

História da Física e Ciências Afins

A evolução da teoria ondulatória da luz e os livros didáticos

(The evolution of the wave theory of light and textbooks)

Fabio W.O. da Silva¹

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil

Recebido em 20/2/2006; Revisado em 13/10/2006; Aceito em 7/12/2006

O tratamento habitualmente dado em livros-texto de física à evolução da teoria ondulatória da luz, a partir do modelo de Christiaan Huygens, pode ser considerado uma reconstrução *a posteriori* (whiggismo), que impõe uma interpretação atual a conceitos enunciados no Século XVII. A leitura do texto original de Huygens, todavia, revela diferenças profundas com as concepções mais recentes da luz e uma afinidade maior com a mecânica do que com a óptica moderna ou o eletromagnetismo. Essa análise sugere a necessidade da utilização de fontes primárias no ensino de ciências, não se restringindo aos livros-texto que, muitas vezes, contêm uma leitura histórica cristalizada.

Palavras-chave: teoria ondulatória, óptica, whiggismo, Huygens.

Textbooks of Physics usually approach the evolution of the wave theory of light, from the model of Christiaan Huygens, as a reconstruction *a posteriori* (whiggism). This happens to impose the current interpretation to concepts already enunciated in the XVII century. However, the original texts of Huygens unveil important differences with the recent conceptions of light and a considerable affinity with Mechanics rather than with Modern Optics or Electromagnetism. Since the textbooks often contain a crystallized historical view, this analysis suggests the use of primary sources in the teaching of sciences.

Keywords: wave theory, optics, whiggism, Huygens.

1. Introdução

A natureza da luz é discutida na maioria dos livros-texto de física. Geralmente, é explicitada a dicotomia onda-partícula, segundo a qual a luz apresenta duplo caráter, de onda e de partícula. Citam-se então o físico holandês Christiaan Huygens (1629-1695), um dos primeiros sistematizadores da teoria ondulatória da luz, e seu contemporâneo inglês Isaac Newton (1642-1727), a quem atribuem a defesa de uma teoria puramente corpuscular.

O resgate histórico costuma opor os defensores das duas teorias, em que o fiel da balança ora pendeu para um lado, ora para o outro, até a aceitação de ambas no Século XX. Assim, nos Séculos XVII e XVIII, em parte graças ao prestígio científico de Newton, prevaleceria a teoria corpuscular. No início do Século XIX, os experimentos de Young e Fresnel, entre outros, estabeleceriam a necessidade de uma teoria ondulatória, complementada com os trabalhos de Hertz, revelando tratar-se a luz de uma onda eletromagnética. No alvorecer do Século XX, entretanto, novos efeitos viriam a ser observados, levando ao estabelecimento de que a luz possui o caráter dual de onda e de partícula. Habitualmente,

não se refere nem mesmo à existência de mais de uma interpretação desse conceito [1].

Nos manuais didáticos, sugere-se que os experimentos realizados nos últimos dois séculos não fizeram mais do que contrapor os cenários apresentados por Newton e Huygens há cerca de trezentos anos. Dessa forma, o leitor é induzido a supor que Huygens tivesse alguma intuição do conceito de ondas eletromagnéticas. Considerando ainda que a maioria dos estudantes e de outros autores não recorrem às fontes primárias, limitando-se à consulta de manuais, de certa forma cristaliza-se essa interpretação e dificulta-se a possibilidade do aparecimento de outras leituras igualmente plausíveis.

Em verdade, o conceito atual sobre o comportamento ondulatório da luz é muito diverso do que foi originalmente proposto. Huygens concebia a luz na forma de uma perturbação mecânica que se propagava através de forças de contato entre corpúsculos. Em sua obra, como não poderia deixar de ser, não aparece qualquer referência à idéia de ação a distância, de campo eletromagnético e outros conceitos mais recentes, desenvolvidos nos séculos que lhe seguiram. Curiosamente, não menciona nem mesmo algumas características mais elementares, como amplitude de vibração, frequência,

¹E-mail: fabiow@des.cefetmg.br.

período ou comprimento de onda. Ignorar esses aspectos pode induzir à atribuição, a um autor do Século XVII, de uma interpretação contemporânea da natureza. Esse risco não é raro. Trata-se de uma tendência a impor, em vez de buscar, uma compreensão do contexto da época, a olhar o passado em função do presente, fenômeno conhecido por whiggismo.

O presente artigo discute essa dificuldade na exposição da teoria ondulatória da luz. Inicialmente, será discutida a proeminência do modelo mecânico durante o Renascimento. Em seguida, será apresentada de forma resumida a teoria da luz tal como se encontra no texto original de Huygens, e depois até mencionar o surgimento da teoria eletromagnética no XIX. Serão então explicitados os pontos de divergência que tornam essas concepções senão incongruentes, pelo menos incomensuráveis, discutindo-se a dificuldade de comparar interpretações tão afastadas no tempo. Em conclusão, sugere-se que sejam utilizados no ensino de ciências, não só os manuais, como também as fontes primárias, permitindo uma percepção dos conceitos mais próxima da forma proposta por seus autores e a discussão de sua evolução até os dias atuais.

Uma vez dito o que se pretende fazer, talvez seja conveniente também afirmar o que não se pretende. Este trabalho discutirá apenas teorias ondulatórias, e não irá contrapor-las à teoria corpuscular da luz. Por isso, não será discutida a teoria de Newton, nem efeitos que demandem uma explicação corpuscular.

2. O mecanicismo

Huygens foi um gênio universal, um inventor habilidoso, e deu contribuições relevantes a diversas áreas do conhecimento. O Tratado da Luz [2], doravante referido apenas como Tratado, foi apresentado por Huygens em 1678 à Academia Real de Ciências da França, em Paris, e publicado em Leyde, em 1690. No prefácio, o autor confessa que escreveu o texto de forma um tanto negligente e esperava traduzí-lo para o latim, quando aproveitaria para conceder-lhe maior atenção. Depois disso, propôs-se publicá-lo juntamente com outro trabalho, no qual explicaria os efeitos dos telescópios e alguns temas dessa ciência. Mas o prazer da novidade passou, entregou-se a outros afazeres e estudos, e jamais realizou seu intento. Considerou então melhor fazê-lo, conhecer tal como se encontrava do que aguardar mais tempo e permitir que se perdesse.

O Tratado é dividido em duas partes: a primeira, em que são explicadas as causas do que ocorre na reflexão, na refração e particularmente na estranha refração do cristal da Islândia (calcita); a segunda, um discurso sobre a causa do peso. A presença dessa última parte, aparentemente desconexa da primeira, não deve causar estranheza, pois é altamente reveladora dos princípios contidos em ambas: um modelo mecânico para explicar os efeitos que descrevem.

A contribuição de Huygens deve ser compreendida no contexto de sua época. O desenvolvimento da teoria física da luz durante o Século XVII está associado à construção de modelos mecânicos. Esses modelos procuram explicar por meio de conceitos puramente mecânicos as propriedades conhecidas da luz, como a propagação retilínea, a reflexão, a refração ou a origem das cores.

Essa obsessão pelo modelo mecânico é facilmente compreensível, pois constituía a melhor ciência de seu tempo. O Século XVII assistiu à ascensão desse modelo com a publicação dos principais trabalhos de Galileu (1564-1642), René Descartes (1596-1650), Pascal (1623-1662), Robert Hooke (1635-1703), Kepler (1571-1630), Robert Boyle (1627-1691) e Isaac Newton (1642-1727), apenas para citar os mais conhecidos.

As ciências naturais estavam se consolidando como um campo independente da Filosofia e da tutela religiosa. Os grandes descobrimentos marítimos desmoralizaram a cosmogonia da terra plana e a crença na interpretação literal do texto bíblico da criação do mundo. A experimentação, o uso do cálculo exprimindo as relações de causa e efeito em forma de equações determinísticas substituiriam a argumentação sob a forma de silogismos como comprovação científica.

A concepção newtoniana de espaço contínuo, homogêneo e infinito, no qual se colocam os corpos, que não podem ocupar simultaneamente o mesmo lugar, ainda não fôra estabelecida. Admitia-se o espaço aristotélico, “cheio e qualitativo”, ou seja, o espaço era o lugar ocupado pelo corpo, em que a natureza tem horror ao vácuo e, ao trasladar-se um corpo, deslocava-se com ele o espaço por ele ocupado.

À noção da composição dos corpos ainda se contrapunham a teoria da matéria-prima e da forma aristotélica, a dos elementos terra, água, fogo e ar e, nos séculos seguintes, haveria ainda debates sobre o éter e o “flogístico”.

Outra dificuldade concernente à realização dos trabalhos científicos advinha da inexistência de padronização das unidades de medida, uma aquisição que somente seria concretizada com o sistema métrico decimal proposto durante a Revolução Francesa de 1789.

Assim, gradativamente, a filosofia mecânica substituiria o aristotelismo escolástico como a nova chave para a compreensão do mundo físico [3], parecendo adequar-se a todas as áreas. Galileu recorre a ela para explicar a percepção de sabores e de calor e, ao descrever o aquecimento por atrito, escreve no §48 de *O Ensaaiador* [4]:

A fricção de dois corpos duros, quer solvendo uma parte em pequenas partes ígneas e voadoras, quer abrindo a saída aos pequenos corpos ígneos contidos, coloca-os finalmente em movimento (...) Depois, chegando à derradeira e importantíssima

solução em átomos realmente indivisíveis, cria-se a luz por meio do movimento ou, queremos dizer, expansão e difusão instantâneas...

Pascal, em 1647, realiza diversas experiências barométricas, as quais explica em termos de forças mecânicas, chegando ao princípio de equilíbrio de corpos líquidos, faz uma estimativa do peso do ar e conclui pela existência do vácuo. Huygens conhecia bem esses trabalhos, pois correspondia-se com Pascal, do qual recebeu, por exemplo, uma carta em 1659, acompanhada de um estudo sobre a Roleta [5].

Descartes publica em 1637 o *Discours de la Méthode*, com três apêndices, *La Dioptrique*, *Les Météores* e *La Géométrie*. Em *La Dioptrique*, apresenta a lei dos senos da refração; em *Les Météores*, discute um modelo da formação de arco-íris e descreve experiências de refração em prismas e globos de vidro com água. Com a publicação de *Le Monde* ou *Traité de la Lumière*, depois em *Les Principes de la Philosophie*, talvez tenha sido o primeiro a elaborar um modelo do tipo mecânico para a luz. Apesar de *Les Principes* terem aparecido em 1644 e *Le Monde* em 1677, portanto uma obra póstuma, esse último estava pronto desde 1634, postergado pelo autor provavelmente em decorrência da segunda condenação de Galileu, em 1633 [6].

Na sua descrição do mundo, Descartes [7] supõe que, no início de tudo, imperava a proporção e a ordem. Considerando que não há proporção e ordem mais simples e fáceis de compreender que a igualdade perfeita, no início as partes (*parties*) de matéria seriam iguais entre si, tanto em tamanho quanto em movimento, e não concebe outra desigualdade no universo além da posição das estrelas fixas. Pouco importa ainda a disposição inicial da matéria, pois essa disposição deve ter mudado logo em seguida, de acordo com as leis da natureza. Considerando que toda a matéria da qual o mundo é composto resulta de uma divisão em partes iguais do todo primitivo, essas partes não poderiam ser arredondadas, pois um conjunto de bolas reunidas não compõe um corpo inteiramente sólido e contínuo, e no universo não poderia haver vácuo. Qualquer que seja porém o formato inicial, essas partes devem ter-se tornado redondas, ao se quebrarem as respectivas arestas (*angles*) pelos sucessivos choques e atritos entre elas, em virtude de diversos movimentos circulares e da grande força que receberam no começo para afastar-se umas das outras.

As partes redondas, entretanto, não podem tocar-se inteiramente, o que deixaria espaços vazios entre elas. Não admitindo o vácuo em nenhum lugar do universo, ele é forçado a supor a existência de partes ainda menores, resultantes da quebra das arestas. Elas deveriam ser extremamente pequenas e mover-se a uma velocidade tão grande, que a impetuosidade de seu mo-

vimento poderia quebrá-las em partes inumeráveis as quais, sem formato nem tamanho determinados, preencheriam facilmente todos os pequenos intervalos nos quais as outras partes não poderiam passar.

Em seguida, ele faz um resumo dessas duas formas (*formes*) de matéria e descreve uma terceira, bem maior que as precedentes. Com essas considerações, ele conclui que a essência do mundo visível seria constituída de três formas principais de matéria. A primeira seria uma espécie de resíduos desprendidos das outras partes da matéria, durante o processo de arredondamento, expelidos com tamanha velocidade que sua agitação seria suficiente, ao tocar outros corpos, para se partir em uma infinidade de fragmentos. Esses fragmentos preencheriam perfeitamente todos os lugares que envolvem os corpos. A segunda forma teria partes arredondadas e muito pequenas em comparação com os corpos encontrados na terra, podendo ainda ser divididas em outras menores. A terceira forma seria encontrada nas partes de matéria que, em virtude de seu tamanho e formato, não seriam emitidas tão facilmente quanto as anteriores.

Na descrição do mundo de Descartes, todos os corpos visíveis seriam compostos pelas formas de matéria acima descritas, bem como de três elementos (*éléments*). O Sol e as estrelas fixas teriam a forma do primeiro elemento (ser luminoso); o céu, do segundo (ser transparente); os planetas e os cometas, do terceiro (ser opaco ou escuro). Esses elementos são então explicados a partir das formas mencionadas. As partes do primeiro elemento (os resíduos), em agitação contínua, tenderiam a escapar dos corpos luminosos e pressionar as partes do segundo elemento (arredondadas), que transmitiriam instantaneamente essa pressão, que não constitui um verdadeiro movimento, até nossos olhos.

Com esse modelo, poder-se-ia explicar a propagação retilínea da luz, a diversidade de cores e a refração. Por exemplo, o espectro de cores, produzido quando a luz atravessa um prisma, seria causado por graus variáveis de tendência ao movimento de rotação do segundo tipo de partes. Algumas seriam mais susceptíveis que outras à rotação que ao movimento em linha reta: a cor vermelha, por se desviar mais em relação à direção original de propagação, seria causada por partes dotadas de uma velocidade maior de rotação do que a cor amarela, e esta, por sua vez, maior do que o azul, cujas partes seriam as de menor rotação. Evidentemente, se essa velocidade de rotação fosse interpretada como análogo ao conceito atual de frequência, a descrição de Descartes estaria invertida, pois a frequência correspondente ao azul é maior que a do amarelo e a deste é maior que a do vermelho. Quanto à refração, o raio luminoso tenderia a mudar de direção em função da diferença de grau de agitação das partes do meio em que se propaga. Nesse ponto, Descartes faz claramente a distinção entre a velocidade de agitação das partes do meio e a de propagação da luz. Essa última, a velocidade de

propagação da luz, ele considera infinita, pois “não se pode duvidar que a ação pela qual as primeiras [partes] são empurradas passa em um instante até as últimas, da mesma forma que, ao se tocar um extremo de um bastão, [a ação] passa ao outro extremo no mesmo instante” [8], um argumento repetido em outros lugares, como no Discurso Primeiro da Dióptrica [9].

Em 1665, Robert Hooke, outro defensor de uma teoria ondulatória mecânica, publica sua *Micrographia*, em que descreve observações ao microscópio das “cores de lâminas delgadas”, explicadas hoje como um fenômeno de interferência, e da difração, também descrito no livro de Francesco-Maria Grimaldi (1618-1663) [10], *Physico-Mathesis de lumine, coloribus et iride*, nesse mesmo ano de 1665. Para Hooke, a luz seria constituída por pulsos de pequena amplitude, propagando-se em um meio contínuo, e possuiria apenas duas cores básicas, o vermelho e o azul. As demais cores seriam geradas a partir dessas duas durante as refrações.

Em 1672, Newton publica seus dois primeiros artigos, coincidentemente sobre óptica. No primeiro, apresenta uma teoria da luz, profundamente inspirada no trabalho do atomista francês Pierre Gassendi (1592-1655); no segundo, descreve o telescópio refletor, uma invenção para evitar a aberração cromática produzida nas lentes dos telescópios refratores da época. O primeiro trabalho de Newton foi severamente criticado por Flamsteed, Huygens e, sobretudo, por Hooke, que acusava Newton de conceber a luz como uma substância material, ou seja, corpuscular. Talvez por isso tenha postergado a publicação de sua *Óptica* até 1704, após a morte de Hooke, ocorrida em 1703.

Em 1687, Newton lança os *Princípios Matemáticos da Filosofia Natural*, sua obra máxima, uma síntese extraordinária da mecânica. Nos *Principia*, como é mais conhecida, estabelece as leis de Newton da mecânica, diversas aplicações de sua teoria, mas trata também da óptica em algumas proposições. O sucesso desse trabalho e sua capacidade descritiva certamente viriam em apoio a uma interpretação mecânica da luz, constituída por corpúsculos. Por exemplo, em um meio homogêneo, na ausência de força externa, de acordo com a lei da inércia, o movimento do corpúsculo deve ser em linha reta. Na reflexão, em virtude da conservação do momento linear em um choque elástico, o ângulo de incidência será igual ao de reflexão, uma descrição satisfatória para uma superfície estacionária.

É nesse contexto de construção da mecânica que deve ser interpretada a obra de Huygens. Desde 1652, ele se questiona sobre os fundamentos das leis cartesianas do choque; em 1656-57, elabora sua própria teoria sobre o choque elástico, enviada sob a forma de relatório em 1669, doze anos após sua conclusão, para participar de um concurso da Real Sociedade de Londres sobre as leis do movimento. Em 1659, Huygens obtém a expressão quantitativa da força centrífuga. Ainda em 1659, obtém o célebre resultado sobre o isocronismo do

relógio. O tratamento galileano do plano inclinado o levou a interessar-se pelo movimento segundo trajetórias curvas, descritas como uma sucessão de pequenos planos inclinados, cada qual com uma inclinação diferente. Esse tipo de análise conduziria a um resultado teórico importante: o tempo de queda de um ponto material ao longo de uma cicloide não depende da amplitude. Uma das aplicações que ele vislumbrava para essa descoberta estava no aperfeiçoamento dos relógios a pêndulo: desde que a trajetória do pêndulo seguisse a forma de uma cicloide, o período permaneceria independente da amplitude. Para forçar o pêndulo a acompanhar essa trajetória, instalou lâminas com essa forma nos dois lados de oscilação.

Os resultados sobre a cicloide e o período de oscilação do pêndulo simples foram publicados em 1673 em seu *Horologium Oscillatorium*. Não satisfeito com o desempenho do relógio, Huygens inventa, em 1675, o relógio a mola espiral. A base de tempo era dada por um oscilador harmônico de rotação, um equivalente ao sistema massa-mola de translação em que a massa é substituída por um disco vazado giratório; e a mola que estica, pela mola em espiral que se enrola em torno de um eixo. Esse mecanismo, usado nos relógios mecânicos até os dias atuais, inclusive de pulso, só viria a ser substituído nos relógios a quartzo, nos quais a base de tempo é dada pelas oscilações de uma lâmina de quartzo (cristal piezoelétrico) submetida a uma diferença de potencial.

Huygens interessou-se ainda por diversos outros temas ligados à mecânica como, por exemplo, entre 1676-1678, o movimento de projéteis em meios resistivos, em que, usando as propriedades da curva logarítmica, resolve os pontos mais importantes nos casos em que a resistência ao movimento seja proporcional à velocidade e ao quadrado da velocidade.

3. O tratado da luz

O Tratado da Luz de Huygens [2] é dividido em 6 capítulos. Para efeito deste artigo, será suficiente ater-se ao primeiro capítulo, denominado *Raios Diretamente Espalhados*, o qual apresenta alguns pressupostos e discute a natureza e as propriedades gerais da luz. Os demais versarão sobre a reflexão, a refração, a refração no ar, a birrefringência da calcita e um método para determinar as figuras produzidas por espelhos e lentes.

O capítulo I inicia-se com uma declaração que vincula o trabalho à tradição geométrica da física desenvolvida no Renascimento [11]:

As demonstrações que se referem à óptica, assim como em todas as ciências nas quais a geometria é aplicada à matéria, são fundadas em verdades extraídas da experiência: tais são que os raios de luz se propagam em linha reta; que os ângulos de reflexão e de

refração são iguais e que nas refrações o raio é quebrado de acordo com a regra dos senos, bem conhecida e não menos correta que as precedentes.

Quanto à natureza da luz, afirma não duvidar que consista no movimento de alguma espécie de matéria, quer se considere sua produção, quer seus efeitos. Na Terra, a principal fonte é o fogo e a chama que o gera, os quais contêm corpos em movimento rápido, pois dissolvem e fundem diversos outros corpos dos mais sólidos. No que se refere aos efeitos, se a luz for concentrada por meio de espelhos côncavos, apresenta justamente essa propriedade de queimar como o fogo, isto é, de separar as partes dos corpos. Isso lhe confere, portanto, a marca de movimento, pelo menos no âmbito do que para ele seria a verdadeira Filosofia, na qual todos os efeitos naturais são concebidos por razões mecânicas. Acrescenta ainda que se deve proceder dessa forma ou renunciar a toda esperança de compreender qualquer coisa em física, ou seja, deve-se adotar o modelo mecânico como a única alternativa possível.

Com respeito ao caráter ondulatório, ele faz uma analogia com as ondas sonoras no ar, que são mecânicas e longitudinais [12]:

Sabemos que por meio do ar, que é um corpo invisível e impalpável, o som se propaga em torno do local em que é produzido, por um movimento que passa sucessivamente de uma parte a outra do ar, e que a extensão desse movimento se faz com igual velocidade por todos os lados, formando-se como ondas esféricas que se alargam permanentemente e vêm tocar nosso ouvido. Ora, não há qualquer dúvida que a luz venha também de corpos luminosos até nós por meio de algum movimento impresso à matéria entre os dois, pois já vimos que isso não pode ocorrer pelo transporte de um corpo que passaria de um a outro.

Nesse curto trecho, foi reafirmada a origem mecânica, a necessidade de um meio material de propagação e afastada a possibilidade de uma natureza corpuscular para a luz.

Ao considerar o som e as ondas produzidas na superfície da água pela queda de uma pedra, acredita, diferentemente de Descartes, que a luz tenha uma velocidade finita. Relata, em seguida, a experiência de Roemer, realizada em 1676, que a avaliou em cerca de 1000 diâmetros da Terra por minuto, ou seja, aproximadamente 214 mil km/h. Nesse aspecto, Descartes, falecido em 1650, estava em desvantagem, pois não dispunha de resultados experimentais confiáveis.

Apesar da analogia, Huygens distingue também algumas diferenças entre a luz e o som, concernente aos

movimentos que os produzem, à matéria na qual se propagam e à forma como se comunicam.

Quanto ao movimento, enquanto as ondas sonoras seriam produzidas pela vibração de um corpo inteiro, ou de uma parte considerável dele, com a agitação de todo o ar à sua volta; a luz, ao contrário, deve nascer do movimento de cada ponto do objeto luminoso, para que se possam perceber todas as diferentes partes desse objeto. Os pontos da superfície do corpo comunicariam essa agitação aos corpúsculos do éter que os envolvem.

Essa matéria, que serve à propagação da luz a partir dos corpos luminosos, ou seja, o éter, não pode ser o ar que sentimos e respiramos, pois, quando o ar é extraído de um local, o éter permanece. Isso pode ser demonstrado encerrando-se um corpo sonoro em um recipiente de vidro e retirando-se o ar por meio da bomba de vácuo inventada por Boyle. Ao retirar o ar, o som deixa de ser ouvido, mas a luz não deixa de atravessar o vidro, tal como antes. Da mesma forma, na experiência de Torricelli, ao inverter o tubo de vidro na cuba com o mercúrio, surge o vácuo na extremidade fechada do tubo, mas a luz continua a atravessar a porção evacuada. Portanto, uma matéria diferente do ar deve atravessar o vidro, sabendo-se que tanto o mercúrio quanto o vidro são impenetráveis ao ar.

No que concerne à forma de propagação dos movimentos do som, o ar, em virtude de sua natureza, pode ser comprimido e, à medida que seu volume é reduzido, faz um esforço para expandir-se. Essa propriedade, associada à penetrabilidade, que permanece apesar da compressão, parece demonstrar que o ar seja constituído de pequenos corpos que nadam e são fortemente agitados na matéria etérea, composta de partes bem menores. Assim, a causa da propagação das ondas sonoras seria o esforço de expansão realizado por esses pequenos corpos que se entrecrocavam, ao serem aproximados uns dos outros nesses círculos de ondas.

A extrema velocidade e outras propriedades da luz, entretanto, não admitem essa propagação de movimento. Ele busca uma explicação na analogia com a transmissão do movimento entre corpos sólidos. Suponha-se um grande número de esferas de mesmo diâmetro e de material muito duro, dispostas em linha reta, coladas umas às outras. Batendo-se com uma esfera semelhante às demais na primeira da fila, o movimento é transmitido rapidamente até a última, que se afasta do grupo sem que se possa perceber qualquer movimento das esferas intermediárias, permanecendo imóvel até aquela que bateu inicialmente. Essa velocidade de transmissão cresce com a dureza do material que constitui as esferas. Além disso, é importante enfatizar que a transmissão do movimento, ou da tendência ao movimento, não é instantânea, mas sucessiva, pois se não o fosse, todas as esferas deveriam avançar ao mesmo tempo, o que não ocorre: apenas a última abandona a fileira com a velocidade da esfera que se chocou contra a fila.

Para relacionar esse tipo de movimento ao que produz a luz, estima-se que esses corpúsculos se aproximem tanto quanto se queira da dureza perfeita e da elasticidade ideal. Isto sugere a idéia de corpúsculos de éter compostos por outros ainda menores, cuja elasticidade seria devida a um movimento muito rápido de uma matéria sutil, que os atravessa de todos os lados, e contrai sua estrutura de forma a dar passagem a essa matéria fluida, o mais fácil e abertamente possível. Um argumento a mais para a elasticidade dos corpúsculos de éter seria a conservação da velocidade da luz. Em sua opinião, a elasticidade lhes daria a propriedade de se restituir à posição de equilíbrio com a mesma velocidade, caso fossem fracamente ou fortemente empurradas. Assim a luz conservaria sua velocidade à medida que se afasta da fonte.

A luz seria propagada por meio de ondas esféricas, pois os corpúsculos de éter não se encontram alinhados um após o outro, mas distribuídos de maneira confusa, de forma que cada um toque diversos vizinhos, o que não impede que transmitam o movimento e o propaguem sempre para frente. Por exemplo, se uma esfera A, em contato com diversas esferas idênticas CCC, for atingida por uma outra esfera B, a esfera A comunicará o movimento às esferas CCC. Em seguida, as esferas A e B permanecerão imóveis (Fig. 1). Não é necessário que os corpúsculos sejam esféricos, como na figura, embora essa característica contribua à propagação do movimento. A igualdade de dimensões, contudo, parece mais necessária, pois, se um corpúsculo de éter se chocasse com outro maior, haveria um pequeno recuo de parte do movimento.

Os corpúsculos do éter são supostos em perpétuo movimento, mas a propagação sucessiva das ondas não é impedida, pois não consiste no transporte dos corpúsculos em si, apenas de uma pequena vibração, que eles não podem deixar de comunicar aos vizinhos, apesar do movimento que os agita e os faz mudar de lugar entre si. Mais uma vez, como se percebe, uma analogia puramente mecânica.

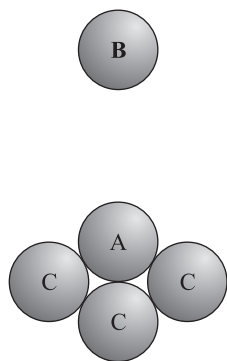


Figura 1 - A esfera A, em contato com diversas esferas idênticas CCC, é atingida por uma outra esfera B. A esfera A comunica o movimento às esferas CCC e, em seguida, as esferas A e B permanecem imóveis.

Em seguida, Huygens passa a discutir a origem das

ondas e o fenômeno hoje chamado de interferência. A origem das ondas é bastante engenhosa. Ele supõe que cada ponto de um corpo luminoso, seja do sol, de uma lamparina, seja de um carvão ardente, crie suas ondas, das quais o ponto é um centro de emissão [13]:

Assim na chama de uma lamparina, distinguindo-se os pontos A, B, C, os círculos concêntricos, descritos em torno de cada um representam as ondas produzidas. É necessário conceber o mesmo para cada ponto da superfície e do interior da chama.

Uma quantidade prodigiosa de ondas se cruzam, sem confusão e sem destruir umas às outras. Um corpúsculo de matéria pode receber diversas ondas, provenientes de várias direções e até de sentidos opostos, não apenas por perturbações sucessivas, mas até simultâneas, e servir à transmissão de todas elas.

Não devemos também nos surpreender, considerando que ondulações produzidas por movimentos e por corpúsculos tão pequenos não desapareçam em distâncias tão grandes, como as existentes entre o sol e as estrelas e nós. A surpresa desaparecerá se considerarmos que, a uma grande distância do corpo luminoso, uma infinidade de ondas, apesar de saídas de pontos diferentes do corpo, unem-se de forma a comportar-se como uma única onda. E cada corpúsculo atingido pela onda comunica o movimento não apenas ao corpúsculo seguinte, em linha reta com o ponto luminoso, mas a todos da vizinhança. Com isso, em volta de cada corpúsculo é criada uma onda da qual esse corpúsculo é um centro. Por exemplo, seja A um ponto luminoso. Cada corpúsculo atingido pela perturbação terá sua onda particular, da qual ele é o centro. Assim, a frente de onda, no ponto mais distante de A, é resultante da contribuição de cada uma dessas ondas e da onda principal proveniente do centro luminoso. Huygens tem plena consciência das implicações desse princípio, “pois, como se verá em seguida, todas as propriedades da luz, e tudo que pertence à reflexão e à refração, explica-se principalmente por esse meio” [13].

4. A teoria ondulatória no Século XIX

O Século XVIII assistiu à ascensão das teorias de Newton, com aplicações a diversas categorias de fenômenos e influência em outras áreas do saber. A Revolução Francesa traria o sistema métrico decimal, que se difundiria através do planeta. Lavoisier estabeleceria, com base em medidas precisas da quantidade de reagentes e de produtos, o conceito de indestrutibilidade da matéria, enunciaria o conceito de substâncias simples e compostas, e levaria à derrocada do flogisto. Assim, após a morte de Huygens e com o sucesso da mecânica de Newton, a teoria ondulatória entrou em declínio. Esse panorama, contudo, começaria a ser alterado no início do Século XIX, como se verá a seguir.

Em 1801, Thomas Young (1773-1829) demonstrou que duas ondas de luz que se superpõem podem interferir uma na outra. O experimento é muito conhecido. Ele fez com que a luz solar incidisse em um orifício em uma chapa opaca. A luz emergente dispersa-se por difração e incide em dois novos orifícios, ocorrendo nova difração. A superposição entre as ondas provenientes desses orifícios gera um padrão de interferência em um anteparo. A análise dos máximos e mínimos, além de estabelecer uma base material convincente para sustentar a teoria ondulatória, permitiu-lhe medir o comprimento de onda da luz solar, estimada em 570 nm (em unidades atuais), bem próximo do valor atual de 555 nm.

Em 1808, em sua casa na rue d'Enfer, em Paris, Étienne Malus (1775-1812) observava, através de um cristal de dupla refração, a imagem do disco solar refletida nas janelas do Palácio de Luxemburgo, durante um pôr-do-sol [14], quando surpreendeu-se ao perceber que, em lugar das duas imagens intensas esperadas, havia apenas uma: a imagem ordinária ou a extraordinária, dependendo da posição que ocupava a lâmina em relação ao seu olho. Ao cair a noite, fez incidir a luz de uma vela em uma superfície d'água, e observou a luz refletida, sob um ângulo de incidência de 36° , mais uma vez através de um cristal de dupla refração e constatou que a luz refletida estava polarizada, como se fosse proveniente de um cristal de calcita. Repetiu o experimento com um espelho e encontrou o mesmo efeito. Malus descobrira que a dupla refração não era o único modo de polarizar a luz. A luz refletida também podia ter "lados".

Essa descoberta de Malus trazia dificuldades aos defensores da teoria ondulatória. Em uma carta de Young [15] a Malus, de 1811, o pesquisador inglês reconhece que esses experimentos demonstram a insuficiência da teoria adotada por ele, apesar de não comprovarem sua falsidade.

Finalmente, em janeiro de 1817, nove anos após a descoberta de Malus [16], Young escreveu a seu amigo Arago, comunicando que encontrara uma explicação, sugerindo que as ondas de luz deveriam conter uma vibração transversal à direção de propagação [17]:

Tenho refletido sobre a possibilidade de dar uma explicação imperfeita do problema da luz que constitui a polarização, sem partir da doutrina genuína de ondulações. Há um princípio nessa teoria segundo o qual todas as ondulações são simplesmente propagadas através de espaços homogêneos em superfícies esféricas concêntricas do tipo das ondas sonoras, consistindo apenas de movimentos diretos e retrógrados das partículas na direção dos raios, com condensações e rarefações concomitantes (isto é, ondas longitudinais). Além disso, é possível expli-

car nessa teoria uma vibração transversal, propagando-se também na direção do raio, com igual velocidade, mas o movimento das partículas ocorrendo em uma certa direção constante em relação ao raio. Isso é uma polarização.

Até então, as explicações correntes supunham a luz como um tipo de onda análogo ao som no ar, em que a vibração ocorre na mesma direção de propagação, ou seja, ondas longitudinais. As ondas na superfície do mar são transversais, mas isso era creditado ao fato de estarem confinadas à superfície, impedindo que fossem tomadas como exemplo. Observe-se que ele expôs a possibilidade das ondas transversais como uma idéia nova e um caso particular. Sabe-se que os sólidos propagam o som com os dois tipos de ondas, longitudinais e transversais. Entretanto, os fluidos, como o ar, não têm essa capacidade, por não serem susceptíveis a forças de cisalhamento. Admitir que o éter, um fluido ainda mais sutil que o ar, possa propagar uma onda transversal é certamente uma hipótese muito ousada. Talvez por isso ele tenha tido tantos cuidados ao expor sua hipótese.

A sugestão de Young foi abraçada pelo engenheiro militar francês Augustin Fresnel (1788-1827), que compreendeu que ela poderia explicar todo o comportamento conhecido da luz, inclusive os efeitos observados dentro dos cristais. Defensor da teoria ondulatória, há muito ele vinha submetendo artigos à Academia de Ciência da França, dominada pela Teoria de Newton. A Academia então lançou um desafio aos defensores da Teoria Ondulatória e promoveu, em 1819, um concurso para uma monografia sobre a difração, vencido por Fresnel. Um dos membros da comissão julgadora do prêmio, Poisson, um ardoroso defensor da teoria corpuscular, mostrou que, se a teoria ondulatória fosse admitida, deveria aparecer um ponto brilhante no centro da sombra de um obstáculo circular opaco, justamente no ponto mais protegido. O comitê organizador do prêmio realizou o teste [18], o que na linguagem de Bacon e Popper seria chamado de um "experimento crucial", e demonstrou a existência do *Ponto brilhante de Fresnel*, como ficou conhecido. Após o relatório da Comissão, Poisson observou a Fresnel que a integral que representa a luz difratada pode ser igualmente obtida a partir da sombra de um obstáculo opaco. Ele fez o cálculo para este último caso e previu um ponto escuro no centro da abertura circular: "foi também o que a experiência confirmou. Colocando-se o foco da lupa do micrômetro na distância calculada, percebeu-se [algo] como uma mancha de tinta no centro da abertura circular" [19].

Em 1850, um novo resultado experimental contrariou a teoria corpuscular, quando Foucault (1819-1868) determinou a velocidade da luz em diferentes meios e demonstrou que ela é menor em um meio mais denso ($v = c/n$).

Paralelamente à óptica, desenvolvia-se o ramo da

Eletricidade. Desde as últimas décadas do Século XVIII, a Eletricidade despertou grande interesse nos pesquisadores. A analogia com a Teoria da Gravitação Universal proposta por Isaac Newton sugeria que a interação elétrica decaísse com o quadrado da distância à fonte. Em 1785, Coulomb publicou dois artigos a esse respeito [20, 21]. No primeiro, demonstrava essa relação para o caso atrativo; no segundo, para o caso repulsivo.

Em 1819, o dinamarquês Christian Oersted observou que uma carga elétrica em movimento gerava campo magnético e, em 1831, o inglês Michel Faraday revelava que um fluxo magnético variável gerava um campo elétrico.

Aos poucos, foram nascendo as equações fundamentais do eletromagnetismo. Na segunda metade do Século XIX, James Clerk Maxwell (1831-1879) fez uma síntese dessas equações e, por simetria, percebeu a ausência de um termo em uma delas. Esse termo permitiu-lhe demonstrar que os campos elétricos e magnéticos satisfazem equações de onda que se propagam com a velocidade da luz. Ele associou então o fato desses campos se propagarem com a velocidade da luz à interpretação de a luz visível ser um caso particular de onda eletromagnética, isto é, as ondas eletromagnéticas na faixa de frequência capaz de ser percebida pelo olho humano constituiriam a luz visível. Era uma hipótese muito ousada, desvinculada tanto da tradição mecânica quanto da tradição da teoria ondulatória clássica. O trabalho de Maxwell chegou a ser ridicularizado na grande imprensa. Entretanto, em 1886, Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) realizou experimentos que confirmaram a previsão de Maxwell.

5. Discussão

Como se pode depreender desse rápido sumário, houve, entre os Séculos XVII e XIX, uma significativa alteração da Teoria Ondulatória da Luz. Para observadores externos, podem parecer etapas normais de um processo de desenvolvimento, mas uma observação atenta revela suas descontinuidades.

Nesta ou em qualquer reconstrução do passado, há uma tendência a um olhar determinado pelo que se julga atualmente importante, o risco de impor em vez de buscar uma compreensão do contexto da época. O fenômeno de olhar o passado em função do presente é tão comum que foi cunhado um termo para exprimi-lo: whiggismo. Apesar desse conceito ter sido proposto por historiadores continuístas, ou seja, que negam a existência da revolução científica, sua contribuição é hoje reconhecida pelas demais correntes. Uma definição do termo seria:

ponto de vista historiográfico, em geral lamentável, que julga a importância de eventos passados à luz dos padrões, preocupações etc. atuais, ou que se ocupa ape-

nas daqueles acontecimentos passados que obviamente parecem ter conduzido ao atual estado de coisas. Uma ameaça sempre presente, capaz de comprometer o trabalho na história da ciência.

As referências à teoria de Huygens, a menos que se faça um esforço deliberado de reflexão, geralmente incorrem no whiggismo e tendem a incorporar a seu modelo componentes ondulatórios que não possuía. Por outro lado, em estudos diacrônicos, algumas vezes são ressaltadas transformações teóricas de relevância maior para outras áreas da ciência do que para a própria óptica, em virtude de seu contexto atual. Um exemplo é a refutação da existência do éter após os experimentos de Michelson-Morley, em 1879. Esse resultado inesperado tem sido amplamente enfatizado na literatura, ao considerar as transformações da física clássica para a física moderna. No que concerne à óptica, entretanto, esse éter, há muito, havia sido destituído de sua natureza física, e as propriedades materiais, a rigor, jamais possuía, pois seus corpúsculos constituintes eram sutis, perfeitamente flexíveis, transparentes, não perturbavam a passagem da luz, não acarretavam perda de energia do fluxo luminoso e assim por diante. Ele permanecia como um suporte necessário à propagação das ondas, através do espaço newtoniano, em virtude da dificuldade conceitual em admitir a ação a distância. Sua existência era, portanto, sustentada mais por argumentos filosóficos do que materiais.

Além disso, a negação do éter trouxe muito mais conseqüências para a mecânica do que para a óptica. Sem desmerecer as conseqüências advindas desse resultado para a imagem da ciência como um todo, é necessário reconhecer que ramos diferentes da física são impactados de forma diferente pelas mesmas causas. Por exemplo, a inexistência do éter e os postulados de Einstein de 1905 permitiram ao eletromagnetismo preservar suas equações, e levaram a mecânica a substituir a transformada de Galileu pela de Lorentz.

A introdução da noção de onda eletromagnética por Maxwell (1831-1879), entretanto, inaugurou uma nova fase da Teoria da Luz. A possibilidade de a luz ser uma onda eletromagnética representou uma mudança radical. Até então, o modelo usado para explicar os fenômenos ópticos fazia referência às ondas mecânicas conhecidas. Em seu Tratado, Huygens estabelece uma analogia explícita entre as ondas sonoras e os efeitos luminosos observados. O poder dessa analogia foi tão intenso que Young levou nove anos para admitir a possibilidade de ondas transversais. Ora, quando Maxwell lança a hipótese de ondas eletromagnéticas, em 1861, elas aparecem em um contexto muito diferente. Desde 1821, com a apresentação da noção de linhas de campo, ou linhas de força, por Faraday (1791-1867), os físicos estavam habituados à descrição dos campos elétrico e magnético usando essa configuração.

O materialismo, tal como era concebido no Século XVIII, proibia à matéria agir onde ela não estivesse. Por isso, estava em voga na época a física dos fluidos [23]. Herdeiro dessa tradição, Faraday atribuía às linhas uma concepção de realidade associada à idéia de fluxo, mais do que uma simples representação. Isso, porém, diferia ainda da concepção de onda caminhante. Apesar de Maxwell não admitir a ação a distância [24], ao propor a luz como onda eletromagnética, estendia a ela a noção de campo, muito distante da velha teoria de choques mecânicos propagando-se de corpúsculo a corpúsculo.

A razão de tais diferenças é que os conceitos de onda foram tomados em contextos muito diversos. Houve uma mudança de paradigma, para usar a linguagem de Kuhn, ou de programas de pesquisa, na concepção de Lakatos. De qualquer forma, entre eles há algo de incomensurável, de incongruente, pois não é possível traduzir a idéia de onda eletromagnética nos termos do Princípio de Huygens, que preside as explicações do Tratado, e, inversamente, não se poderia descrever a propagação das interações mecânicas de Huygens com o formalismo de Maxwell.

Os modelos físicos a respeito da estrutura do universo sofreram profundas modificações nesse ínterim. Quando um conceito enunciado em determinada época é retomado séculos à frente, dificilmente retorna com o significado original. Isso não é privilégio da teoria ondulatória. Ao se referir à Teoria de Newton, Gaston Bachelard [25] afirma:

Falou-se muito apressadamente que a concepção dos fótons restituía a antiga intuição dos corpúsculos de luz imaginados por Newton. Tais restituições são possíveis no começo de uma cultura científica, ante intuições primeiras permutáveis, mas pensamentos retificados nunca voltam a seu ponto de partida. De fato, todas as experiências mecânicas entre *fótons* foram mal sucedidas.

Comentando uma obra em que Heisenberg se refere à teoria ondulatória, Bachelard sintetiza suas conclusões sobre o meio de propagação [26]:

Crê-se então estudar a propagação contínua da luz, mas não se traduz quase nada na intuição a não ser o movimento no mesmo lugar enraizado sobre os corpúsculos separados. A propagação pouco a pouco não aparece senão sob a cobertura de desenvolvimentos matemáticos mais ou menos bem fundados na intuição.

A própria idéia de onda proposta por Huygens é muito diferente da compreensão habitual deste conceito. As ondas geralmente são descritas como um movimento repetitivo, com período, amplitude, fase etc., e

“têm sua origem nas experiências da vida cotidiana, tais como a observação das ondas da água ou das vibrações de um corpo elástico. Elas não parecem, portanto, ligadas a corpúsculos, mas antes a conjuntos complexos e deformáveis” [27]. Ora, nenhuma dessas propriedades usuais de onda aparece descrita no Tratado. Huygens não se refere à frequência ou amplitude de oscilação, parâmetros fundamentais na caracterização de um movimento oscilatório.

A passagem de ondas longitudinais para ondas transversais exemplifica muito essa mudança de explicação. O tipo de ondas mecânicas válidas para os fluidos, ou seja, longitudinal, era incompatível com os fatos observados, supostamente em um fluido, o éter, incapaz de oferecer resistência a forças de cisalhamento. Provavelmente, só não foi descartada por não se vislumbrar a existência de alternativa e, de acordo com Kuhn [28], “rejeitar um paradigma sem simultaneamente substituí-lo por outro é rejeitar a própria ciência”. A existência dessa simples dificuldade é uma evidência de que a noção de onda então vigente e a proposta pela teoria eletromagnética são incomensuráveis e pertencem a paradigmas distintos.

Curiosamente, a passagem para o novo paradigma da óptica não veio de uma revolução da teoria ondulatória, mas por ínvios caminhos, até então insuspeitados. Para Thomas Kuhn, “todas as crises iniciam com o obscurecimento de um paradigma e o conseqüente relaxamento das regras que orientam a pesquisa normal” [29]. Ele aponta três maneiras para o término da crise: 1) Resolver o problema - Não foi o caso, pois seus adeptos não conseguiram eliminar as inconsistências; 2) Emergência de novo paradigma - Não ocorreu, pois a óptica não foi capaz de oferecer novo candidato; 3) Colocar de lado o problema para ser resolvido por uma futura geração - Rigorosamente, também não, pois o problema não chegou a ser rotulado e postergado. Entretanto, de certa forma foi isso o que aconteceu com o aparecimento das ondas eletromagnéticas, mas a solução veio de forma inesperada.

Assim, da mesma forma que não se passa da mecânica newtoniana para o sistema de Einstein acumulando conhecimentos e retificando princípios, não há uma transição possível entre a teoria ondulatória de Huygens e a de Maxwell. Elas partem de concepções de essência muito diversas e nada poderia prever, no Século XVII, esse estranho vínculo entre uma ciência que estudava certos materiais que atraíam limalha de ferro e o comportamento da bússola (magnetismo), uma ciência ligada à propriedade de uma resina de conífera atritada com palha poder atrair pequenas partículas (eletricidade) e a dos fenômenos luminosos (óptica). Para isso foi necessário um esforço de (re)fundação da ciência. Essa mudança talvez seja tão significativa quanto a transição da mecânica de Aristóteles para a de Newton. O emprego do mesmo vocábulo para significar um conceito em sistemas distintos produz enganos, pois sugere

que o conceito tenha uma existência independente do sistema a que pertence, quando um não pode sobreviver sem o outro. Essa alteração de significado é altamente reveladora da mudança de visão de mundo, pois “é no momento em que um conceito muda de sentido que ele tem mais sentido, é então que ele é, em toda verdade, um acontecimento de conceptualização” [30].

Em síntese, talvez aqui se aplique, em outro contexto, mas com muita propriedade, um dos aforismos de Bacon [31]: “As narrações feitas para a cena são mais ordenadas e elegantes e aprazem mais que as verdadeiras narrações tomadas da história.”

6. Conclusão

A rápida retrospectiva sobre a natureza ondulatória da luz a partir do Século XVII revela inicialmente a existência de um modelo mecânico e, posteriormente, de um modelo eletromagnético.

A permanência da denominação de teoria ondulatória referindo-se a ambos induz uma confusão teórica. No modelo inicial, tratava-se de uma explicação puramente mecânica para uma perturbação, ou uma tendência ao movimento, que se transferia por meio de choques de um corpúsculo a outro. No segundo caso, trata-se de uma aplicação do eletromagnetismo para um campo variável que se propaga através do espaço.

A retomada da antiga oposição entre corpúsculo e onda ocorre, então, em um outro paradigma. As partículas de luz já não podem ser interpretadas como os corpúsculos clássicos da Teoria de Newton, nem as ondas de luz como as antigas ondas de pressão da Teoria de Huygens. Afinal os conceitos só adquirem significado dentro da teoria em que foram concebidos. Distinguir, portanto, os contextos em que esses termos são empregados é essencial para apreciar o resultado de três séculos de pesquisa e perceber que não se trata de um retorno ao ponto de partida.

Os professores de física, em congruência com sua atitude científica, devem manter-se críticos em relação aos livros que tendem a manter por muito tempo textos congelados, sem incorporar o resultado de novas pesquisas. Além de ficar atentos ao aparecimento de novos trabalhos sobre a história da ciência, que muitas vezes desfazem versões tradicionalmente aceitas, é importante ler as obras originais dos autores (as fontes primárias), o que se tornou mais fácil atualmente devido à sua disponibilidade na Internet.

Agradecimento

Agradeço ao Prof. Dr. Heitor Garcia de Carvalho, do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, pelas sugestões.

Referências

- [1] J.B. Bastos Filho, Rev. Bras. Ens. Fis. **16**, 33 (1994).
- [2] C. Huygens, *Traité de la Lumière* (Dunod, Paris, 1992).
- [3] J. Henry, *A Revolução Científica e as Origens da Ciência Moderna* (Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 1998), p. 67.
- [4] G. Galilei, *O Ensaaiador (1623)* (Abril Cultural, São Paulo, 1978), Coleção *Os Pensadores*, p. 220.
- [5] B. Pascal, *Oeuvres Complètes* (Seuil, Paris, 1963), p. 281.
- [6] R. Descartes, *Discours de la Méthode* (Garniers Frères, Paris, 1950).
- [7] R. Descartes, *Les Principes de la Philosophie* (F.G. Levrault, Paris, 1824), III Partie, p. 213-218. Disponível em <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k942606>. Acesso em 22/8/2006.
- [8] R. Descartes *Le Monde ou Traité de La Lumière* (F.G. Levrault, Paris, 1824), Oeuvres de Descartes, v. 4, p. 315. Disponível em <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k94261j>. Acesso em 24/8/2006.
- [9] R. Descartes, *La Dioptrique* (F.G. Levrault, Paris, 1824), Oeuvres de Descartes, v. 5, p. 7. Disponível em <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k94262w>. Acesso em 24/8/2006.
- [10] F-M. Grimaldi, *Isis* **60**, 119 (1969).
- [11] C. Huygens, *Traité de la Lumière* (Dunod, Paris, 1992), p. 51.
- [12] Idem, p. 53.
- [13] Idem, p. 65.
- [14] F. Arago, *Oeuvres Complètes de François Arago, Secrétaire Perpétuel de l'Académie des Sciences, Mémoires Scientifiques* (Gide et J. Bodry, Paris, and T.O. Weigel, Leipzig, 1858), tome 3, v. 3, p. 141-142. Disponível em <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k92709b>. Acesso em 22/8/2006.
- [15] F. Arago, *Oeuvres Complètes de François Arago, Secrétaire Perpétuel de l'Académie des Sciences, Mémoires Scientifiques* (Gide et J. Bodry, Paris, and T.O. Weigel, Leipzig, 1858), tome 3, v. 3, p. 146. Disponível em <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k92709b>. Acesso em 22/8/2006.
- [16] H.W. Bragg, *El Universo de Luz* (Emecé, Buenos Aires, 1945), p. 188, tradução para o espanhol de *The Universe of Light*. (The Macmillan Company, Nova Iorque, 1933).
- [17] T. Young, in *Physics for Students of Science and Engineering*, edited by D. Haliday and R. Resnick (John Wiley & Sons, Nova Iorque, 1963), p. 1056.
- [18] F. Arago, *Oeuvres complètes de François Arago, Secrétaire Perpétuel de l'Académie des Sciences, Mémoires Scientifiques*, (Gide et J. Bodry, Paris, and T.O. Weigel, Leipzig, 1858), tome 10, v. 1, p. 386. Disponível em <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k92716m>. Acesso em 22/8/2006.

- [19] F. Arago, *Oeuvres complètes de François Arago, Secrétaire Perpétuel de l'Académie des Sciences, Mémoires Scientifiques*, (Gide et J. Bodry, Paris, and T.O. Weigel, Leipzig, 1858), tome 10, v. 1, p. 400-401. Disponível em <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k92716m>. Acesso em 22/8/2006.
- [20] C. Coulomb, *Premier Mémoire sur l'Électricité et le Magnétisme* (Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, Paris, 1785), p. 559-577. Disponível em <http://ppp.unipv.it/Coulomb/Pages/F3OpaF1.html>. Acesso em 16/8/2006.
- [21] C. Coulomb, *Second Mémoire sur l'Électricité et le Magnétisme* (Mémoires de l'Académie Royale des Sciences, Paris, 1785), p. 578-587. Disponível em <http://ppp.unipv.it/Coulomb/Pages/F3OpaF2.html>. Acesso em 16/8/2006.
- [22] J. Henry, *A Revolução Científica e as Origens da Ciência Moderna* (Jorge Zahar Editor, Rio de Janeiro, 1998).
- [23] G. Bachelard, *O Novo Espírito Científico* (Tempo Brasileiro, Rio de Janeiro, 2000), 3ª ed., p. 59.
- [24] A.C. Tort, A.M. Cunha e A.K.T. Assis, *Rev. Bras. Ens. Fis.* **26**, 273 (2004).
- [25] G. Bachelard, *O Novo Espírito Científico* (Tempo Brasileiro, Rio de Janeiro, 2000), 3ª ed., p. 86.
- [26] G. Bachelard, *O Novo Espírito Científico* (Tempo Brasileiro, Rio de Janeiro, 2000), 3ª ed., p. 83.
- [27] W. Heisenberg, in *O Novo Espírito Científico*, editado por G. Bachelard (Tempo Brasileiro, Rio de Janeiro, 2000), 3ª ed., p. 83-84.
- [28] T. Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas* (Perspectiva, São Paulo, 1978), p. 110.
- [29] T. Kuhn, *A Estrutura das Revoluções Científicas* (Perspectiva, São Paulo, 1978), p. 115-116.
- [30] G. Bachelard, *O Novo Espírito Científico* (Tempo Brasileiro, Rio de Janeiro, 2000), 3ª ed., p. 51.
- [31] F. Bacon, *Novum Organum* Livro I, Af. LXII (Nova Cultural Ltda., São Paulo, 1999), Coleção *Os Pensadores*, p. 49.