
A CRÔNICA DA ÓPTICA CLÁSSICA

José Maria Filardo Bassalo
Departamento de Física – UFPA
Belém – Pa

Nesta Crônica da Óptica Clássica (Parte II: 1665-1803), estudamos os primeiros fenômenos ópticos que levam ao desenvolvimento da Óptica Física ou Ondulatória, como chamam os livros-textos de Física à parte da Óptica que trata desses fenômenos, e para cuja explicação é necessário o conceito de onda luminosa. Assim, iniciamos esta Crônica com a descrição das experiências realizadas por Grimaldi, Hooke, Boyle e Bartholinus relacionadas aos fenômenos de interferência, difração e dupla refração. Em seguida mostramos como os físicos tentaram explicar esses fatos desenvolvendo teorias sobre a natureza da luz. Dentre essas teorias, destacam-se a corpuscular de Newton e a teoria ondulatória de Huygens. Em continuação, descrevemos as primeiras experiências realizadas por Roemer e Bradley, no sentido de determinar a velocidade da luz, uma vez que o conhecimento desta era importante para consolidar as idéias sobre a natureza ondulatória. Concluimos esta parte da Crônica apresentando a experiência de Young, realizada em 1801, na qual se firmou o conceito ondulatório sobre a natureza da luz, já que a figura de interferência obtida com o experimento permitiu precisar o cálculo do seu comprimento de onda.

Com este artigo prosseguiremos a Crônica da Óptica Clássica, iniciada em trabalho anterior⁽¹⁾ e na qual havíamos demonstrado, que o desenvolvimento da óptica Geométrica, isto é, da parte da Óptica que trata, basicamente, dos fenômenos luminosos relacionados à formação de imagens em espelhos e lentes, necessita para sua explicação, apenas, do conceito de raio luminoso. Naquele trabalho, havíamos nos detido no ano de 1665 quando aparecem registros dos primeiros fenômenos ópticos ligados ao caráter ondulatório da luz, como, por exemplo, os de difração e de interferência observados, respectivamente, por Grimaldi, Hooke e Boyle. Neste, trataremos, basicamente, do desenvolvimento da Óptica Ondulatória a par-

tir do estudo desses dois fenômenos ópticos. Assim, iniciaremos com as observações de Grimaldi, Hooke e Boyle, passaremos pela dupla-refração de Bartholinus e pelas teorias de Newton e Huygens sobre a natureza da luz, que foram formuladas com o objetivo de explicar esses fenômenos físicos, e concluiremos com as primeiras determinações da velocidade da luz por Roemer e Bradley.

Iniciemos, portanto, nosso estudo pela difração. O físico italiano Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) em seu livro intitulado Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride⁽²⁾, publicado em 1665, após sua morte, descreveu algumas experiências nas quais mostrou que a propagação da luz pode se realizar de uma quarta maneira (além das três tradicionalmente conhecidas a sua época: reflexão, refração e difusão), denominada por ele de difração. Sua convicção a respeito desse novo fenômeno luminoso foi tão grande que o apresentou como Proposição do seu livro e, a partir disso, passou a relatar alguns experimentos que realizou, explicando-os por intermédio do que acabara de descobrir.

Na descrição de uma dessas experiências, Grimaldi demonstrou 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 a luz se "encurvasse" ao passar pelos orifícios, afirmou Grimaldi⁽³⁾. Observou ainda que nas bordas dessa região iluminada havia uma ligeira coloração avermelhada e azulada. Fenômenos análogos aos descritos, o italiano também observou na iluminação de objetos opacos ou cobertos de fendas finas. (Por esse último tipo de experiência - fendas finas -, Grimaldi é considerado como um dos primeiros a utilizar o que mais tarde viria a ser chamada de rede de difração, importante equipamento óptico que conseguiu consolidar a hipótese ondulatória da luz.) É oportuno salientar que as colorações avermelhada e azulada, percebidas por Grimaldi, indicavam um fenômeno de interferência como, aliás, mais tarde ficou estabelecido, por intermédio de Young, em 1801.

Naquele mesmo ano de 1665, surgiu o livro do físico inglês Robert Hooke (1635-1703) intitulado Micrographia, no qual descreve experiências que mostram a presença de luz na sombra geométrica de um objeto iluminado e, também, de cores produzidas por uma lâmina transparente e fina, de faces paralelas, e iluminada com luz branca. Fala sobre o aparecimento de anéis coloridos quando uma das faces da lâmina é uma superfície esférica. (Por exemplo, tal lâmina pode ser uma camada de ar situada entre uma placa de vidro e a face convexa de uma lente.)⁽⁴⁾ Aliás,

esses anéis coloridos, bem como as cores exibidas por películas finas quando iluminadas com luz branca, também foram observados pelo físico inglês Robert Boyle (1627-1691)⁽⁵⁾, independentemente de Grimaldi e Hooke.

O estudo dos trabalhos de Hooke e de Boyle levou o físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727), em 1666, a estudar as cores exibidas por películas finas, fenômeno até hoje conhecido como “anéis de Newton”. Em suas experiências sobre as cores, Newton descobriu o fenômeno da dispersão da luz⁽⁶⁾, isto é, que a luz branca ao passar por um prisma de vidro era decomposta nas cores do arco-íris. Convencido de que essas cores estavam presentes na própria luz branca e que elas não foram criadas no prisma, realizou um outro tipo de experiência na qual fez passar essas cores do arco-íris por um segundo prisma invertido em relação ao primeiro, reproduzindo, dessa forma, e em uma tela, a luz branca original. Observou ainda Isaac Newton que se apenas uma cor do arco-íris atravessasse um prisma, não haveria mais a decomposição cromática, já que o feixe de luz que emergia do prisma apenas alargava-se ou estreitava-se (dependendo da incidência inicial), permanecendo, assim, da mesma cor. Essa hipótese newtoniana de que a luz branca nada mais era do que uma combinação das cores do arco-íris⁽⁷⁾ foi confirmada por Newton na célebre experiência do disco colorido - o “disco de Newton”, como hoje é conhecido -, que, ao ser girado, aparece branco.

Ainda nessas experiências ópticas, Newton observou que o índice de refração variava com a cor, pois, ao examinar através de um prisma um pedaço de papelão pintado de vermelho e azul, notou que, para uma mesma incidência de raios luminosos, os raios refratados pelo prisma eram diferentes para cada cor, já que as imagens das cores do papelão eram deslocadas, havendo, dessa forma, superposição da parte limítrofe das duas regiões pintadas. Aliás, esse fenômeno da dispersão da luz mostrou ao matemático que os telescópios convencionais até então usados - o de Galileu e o de Kepler⁽⁸⁾ - apresentavam um limite de aplicabilidade, pois a formação de sombras coloridas em torno das imagens dos astros se acentuava na medida em que se tentava obter maiores aumentos com esses telescópios, produzindo, desse modo, imagens turvas. (Esse fenômeno é conhecido, hoje, como aberração cromática.)

Esse fenômeno levou Newton a inventar, em 1668, um telescópio refletor que concentrava a luz vinda do astro por reflexão a partir de um espelho parabólico, em lugar da refração através de uma lente. Essa idéia já havia sido aventada pelo matemático e astrônomo escocês James

Gregory (1638-1675), em 1663, que a ilustrou com um desenho⁽⁹⁾. O telescópio tipo gregoriano inventado por Newton apresentava duas grandes vantagens: a primeira eliminava o fenômeno da absorção luminosa, já que a luz é refletida ao invés de ser refratada; a segunda não há o fenômeno da aberração cromática⁽¹⁰⁾. Por falar nessa, é oportuno lembrar que o óptico inglês John Dollond (1706-1771) construiu o telescópio refrator acromático, em 1733, usando para isso dois tipos diferentes de vidros, cujas refrações das cores se compensavam⁽¹¹⁾ (quase cem anos depois, essa mesma idéia foi utilizada pelo óptico inglês Joseph Jackson Lister (1786-1869) ao construir o microscópio acromático, em 1830⁽¹²⁾).

Na mesma época dos trabalhos de Grimaldi, Hooke, Boyle e Newton, um outro fenômeno luminoso estranho foi descoberto. Com efeito, o médico dinamarquês Erasmus Bartholinus (1625-1698) recebera um cristal transparente de carbonato de cálcio trazido por alguns comerciantes da Islândia (razão pela qual esse cristal passou a ser conhecido como espato-da-Islândia). Durante algum tempo de sua vida, esse médico realizou uma série de experiências ópticas com esse tipo de cristal. Nas primeiras ele percebeu que o cristal duplicava objetos quando estes eram vistos através dele, fenômeno que o médico denominou de dupla refração. No prosseguimento de suas pesquisas, 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, que havia 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. Embora sem explicar essas observações, ele as descreveu em uma pequena memória intitulada Experimentis Crystalli Islandici Disdiaclastici, quibus Mira et Insolita refractio Detegitur, publicada em 1669⁽¹³⁾.

Os fenômenos ópticos descritos evidenciam que a concepção tradicional de “raio luminoso” é insuficiente para tentar explicá-los, uma vez que não há maneira de justificar a presença de luz na sombra de objetos, ou a presença de sombras em regiões iluminadas, ou mesmo a de dois raios refratados (fatos decorrentes dos fenômenos ópticos que descrevemos), por meio da hipótese da trajetória retilínea do “raio luminoso”. Em vista disso, Hooke, em seu já citado Micrographia, tentou pela primeira vez uma nova hipótese sobre a natureza da luz ao propor a idéia de que esta 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 sua propagação em um

meio homogêneo. Neste, acreditava ainda Hooke que cada vibração geraria uma esfera que cresceria constantemente. Por outro lado, ele afirmava também que em um meio transparente opticamente denso, a velocidade da luz aumentava⁽¹⁴⁾.

A hipótese ondulatória da luz, proposta por Hooke, foi reconsiderada pelo físico holandês Christiaan Huygens (1629- 1695) que a melhorou e a ampliou⁽¹⁵⁾. Assim, para tentar explicar os fenômenos da reflexão, refração e difração da luz, formulou a hipótese de que esta era uma onda longitudinal (que ondula, portanto, na direção de seu deslocamento), à semelhança das ondas sonoras. Para chegar aos resultados conhecidos (por exemplo, as leis da reflexão e 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⁽¹⁶⁾ e tomado como o centro de um novo distúrbio que se propagava na forma de ondas esféricas; essas ondas secundárias combinavam-se de tal forma que seu envelope determinava a nova frente de onda em um tempo posterior. Com auxílio desse princípio, ele demonstrou as leis da reflexão e da refração da luz, assim como 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, defensor da teoria corpuscular da luz, afirmava que esta se propagava mais rapidamente na água, em virtude das “partículas luminosas” serem aceleradas pela atração das “partículas” constituintes da água. (Essa polêmica só foi resolvida muito tempo depois, na metade do século XIX, com as medições da velocidade da luz na água, conforme veremos em nosso próximo artigo desta Crônica.)

Após explicar a refração normal de corpos transparentes por intermédio de sua hipótese ondulatória, Huygens passou a fazer experiências com o cristal espato-da-Islândia que Bartholinus havia utilizado quando fez a sua célebre descoberta da dupla refração. Para explicar esse fenômeno, Huygens formulou a hipótese de que nesse tipo de cristal há, em adição à onda esférica primária, uma segunda onda de forma esferoidal (elipse de revolução em torno de seu eixo maior). Para o holandês, a onda esférica primária correspondente ao “raio ordinário” se propaga no cristal com velocidade constante e em todas as direções, através da matéria etérea distribuída pelo corpo do cristal, em maior quantidade do que as partículas que o compõem é responsável pela sua transparência. Por outro lado, a onda esferoidal secundária correspondente ao “raio extraordinário” tem essa forma, concluiu Huygens, porque ela se propaga através da calcita com velocidade variável, já que se “espalha indiferentemente não somente

na matéria etérea distribuída no cristal, bem como pelas partículas que o compõem”.

Por ocasião em que Huygens realizou essas experiências com o cristal de calcita, ele também fez a importante descoberta da polarização da luz. Assim, 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. Porém, em seu livro Traité de la Lumière, publicado em 1690, o descreveu para “dar oportunidade a que outros investiguem-no”⁽¹⁷⁾. E foi Newton quem tentou uma primeira interpretação desse fenômeno.

Embora partidário da teoria corpuscular da luz, Newton admitiu que esta tinha vários “lados”, com propriedades diferentes, apesar de considerar que essa “transversalidade” seria uma objeção insuperável à aceitação da teoria ondulatória de Huygens, já que, àquela época, os cientistas só conheciam as ondas longitudinais decorrentes da propagação do som⁽¹⁸⁾. Aliás, a idéia de que a luz possuía “lados” também foi aproveitada pelo sábio inglês para poder explicar a difração observada por Grimaldi. Desse modo, afirmava Newton, as regiões claras e escuras da figura de difração estariam ligadas ao acesso (“fits”) que os corpúsculos de luz teriam ao passar ou não pela fenda e, uma vez passados por ela, tais corpúsculos poderiam ir ou não para um lado ou para o outro da referida fenda⁽¹⁹⁾. Contudo, a idéia newtoniana sobre a “transversalidade” da luz só foi retomada no começo do século XIX, por meio das experiências de interferência e polarização da luz, realizadas, respectivamente, pelos físicos, o inglês Thomas Young (1773-1829), em 1801, e o francês Étienne-Louis Malus (1775-1812), em 1808, e que serão tratados na parte terceira desta Crônica da Óptica Clássica. É oportuno observar que os trabalhos de Newton sobre Óptica foram inicialmente comunicados a Royal Society, entre 1672 e 1676 e posteriormente completados e apresentados em seu livro Optics, editado em 1704. Porém, é ainda interessante chamar a atenção para o fato de que essa idéia de “lateralidade” do raio luminoso só foi considerada por Newton em 1717, ocasião em que apresentou a segunda edição do Optics⁽²⁰⁾.

Ao concluirmos esta segunda parte da Crônica, vamos descrever as primeiras tentativas dos cientistas de medir a velocidade da luz, uma vez que essa medida era importante para consolidar as idéias sobre a sua natureza ondulatória. Assim, a primeira idéia para medir a velocidade

da luz foi proposta pelo físico italiano Galileu Galilei (1564-1642) e apresentada em seu livro Discurso e Demonstração Matemática em torno de Duas Ciências, publicado em 1638⁽²¹⁾. Sugeria o sábio italiano que se dois homens ficassem em cima de duas colinas separadas por alguns quilômetros e emitissem luz através de lanternas providas de obturadores, a velocidade da luz poderia ser conhecida desde que se medisse o tempo gasto para a luz percorrer a distância entre as duas lanternas. A velocidade seria então a relação entre a distância destas e aquele tempo. Apesar de Galileu e seus assistentes tentarem realizar essa experiência, ela malogrou em virtude de serem pequenas as distâncias consideradas⁽²²⁾. Esse mesmo tipo de experimento proposto por Galileu foi também tentado por cientistas da Academia Del Cimento, porém sem obterem êxito⁽²³⁾.

O primeiro valor medido para a velocidade da luz foi obtido pelo astrônomo dinamarquês Olaus Roemer (1644-1710) , em 1675. No observatório de Paris, ele fazia observações cuidadosas dos eclipses dos satélites de Júpiter⁽²⁴⁾. Verificou que havia um certo atraso dos eclipses que ocorriam quando Júpiter se afastava da Terra, em relação aos que ocorriam quando Júpiter se aproximava da Terra. Em vista disso, concluiu que aquele atraso era devido ao tempo gasto para que a luz, com velocidade finita, atravessasse a órbita terrestre. Desse modo, calculou a velocidade da luz em torno de 220.000 km/s⁽²⁵⁾. Com base nesse resultado, Roemer conseguiu prever alguns eclipses, porém seu trabalho não chegou a impressionar os cientistas que freqüentavam a Academia Francesa de Ciências, quando comunicou nesta o resultado de suas pesquisas. Naquela época, o que prevalecia era a opinião aristotélica de que a luz tinha velocidade infinita, opinião defendida por vários cientistas, dentre eles Descartes e o próprio Cassini. No entanto, outros astrônomos e cientistas apoiaram o trabalho de Roemer como, por exemplo, o francês Jean Picard (1620-1682) (aliás, protetor de Roemer, pois foi ele quem o levou de Copenhague a Paris), além de Huygens e de Newton.

Uma nova experiência para determinar a velocidade da luz só foi feita cerca de 50 anos após a realizada por Roemer, por intermédio do astrônomo inglês James Bradley (1693-1762) que trabalhava na medição da paralaxe das estrelas. Essa medição foi importante para a Astronomia, uma vez que permitiu comprovar o movimento da Terra em torno do Sol, pois parecia inevitável que, em decorrência dessa movimentação, as estrelas deveriam aparecer deslocadas (paralaxadas) no firmamento. (Convém lembrar que, naquela época, ainda existia a polêmica em torno do modelo planetário, se geocêntrico – ptolomaico - ou se heliocêntrico – coper-

nicano - e a medição da paralaxe foi importante argumento para este último modelo.) Em 1725, Bradley e seu amigo, o astrônomo amador e político inglês Samuel Molyneux (1689-1728), fizeram uma série de observações no sentido de determinar a paralaxe da estrela Gamma Draconis⁽²⁶⁾. No entanto, as diversas posições aparentes dessa estrela, por ele, observadas não correspondiam a efeitos de paralaxe. Apesar de constatar esse fato, Bradley não foi capaz de explicar, no momento, essa anomalia.

Segundo nos conta Asimov⁽²⁷⁾, certo dia de 1728, Bradley fazia uma viagem de recreio pelo rio Tamisa. A certa altura notou que a flâmula do topo do mastro do navio em que viajava mudava de posição de acordo com o movimento relativo do navio e do vento, e não apenas com este último. De repente, veio-lhe a intuição de que os desvios que observara nas posições aparentes da estrela Draconis ocorriam em consequência da composição entre a velocidade finita da luz, que leva um certo tempo para caminhar da objetiva até a ocular do telescópio que utilizara em suas medições, e a velocidade da Terra que, nesse mesmo intervalo de tempo, caminha em sua rotação em torno de si própria. Tal composição, concluiu Bradley, faz com que a posição da estrela observada sofra um certo deslocamento. Portanto, acabara de descobrir o que mais tarde se denominou de aberração da luz. Desse modo, e baseado na medida da “aberração da luz” das estrelas, Bradley estimou a velocidade da luz em 304.000 km/s⁽²⁸⁾. É oportuno salientar que essa descoberta consolidou duas hipóteses fundamentais da Física: a finitude da velocidade da luz e a rotação spinorial da Terra. Também convém recordar que a primeira medição da paralaxe de uma estrela a 61 Cygni só foi conseguida com precisão, em 1838, pelo astrônomo alemão Friedrich Wilhelm Bessel (1784-1846), usando para isso o heliômetro - telescópio provido de um micrômetro, que havia sido construído especialmente para esse fim. Além de medir a paralaxe da estrela 61 Cygni, da constelação de Cisne, Bessel estimou sua distância em 10,5 anos-luz.

Ao concluirmos esta segunda parte, queremos destacar que, a autoridade de Newton deixou em estado latente a teoria ondulatória da luz por quase um século, embora esta fosse, no século XVIII, defendida por eminentes cientistas, com o matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783), que sustentava a idéia de que as cores dependiam do comprimento de onda da luz⁽²⁹⁾. No entanto, apesar das evidências experimentais do caráter ondulatório da luz, tais como os fenômenos ópticos que analisamos, era necessária alguma outra experiência que permitisse calcular o comprimento de onda da luz; uma experiência desse tipo foi realizada por Young, em

1801⁽³⁰⁾. Assim, ao fazer passar um feixe luminoso através de dois pequenos orifícios, ele obteve, pela primeira vez, em um anteparo, uma figura de interferência luminosa composta de faixas claras e escuras, alternadamente. A continuação dessas experiências sobre interferência permitiu a Young não só calcular o comprimento de onda da luz visível ($\sim 0,00005$ cm), bem como explicar as cores das películas delgadas (“anéis de Newton”). Essas experiências, assim como outras relacionadas com a polarização da luz, serão tratadas na terceira parte da Crônica da Óptica Clássica.

Notas e Referências Bibliográficas

1. BASSALO, J.M.F. A crônica da óptica clássica – Parte I: (800 a.C. - 1665 d.C.). Cad. Cat. de Ens. de Fis., v.3, n.3, p. 138-59, 1986.
2. Veja alguns excertos desse livro de Grimaldi em MAGIE, W.F. A source book in physics, McGraw-Hill, 1935.
3. ASIMOV, I. Gênios da humanidade. Editora Bloch, 1974.
4. ROSMORDUC, J. De Tales a Einstein. Editorial Caminho, 1983. [Coleção Universitária, 4.]
5. The philosophical works of Robert Boyle. Apud BORN, M.& WOLF, E. Principies of optics. New York: Pergamon Press, 1970.
6. Parece haver sido o estadista e filósofo romano Lucius Annaeus Sêneca (4 a.C. -65 d.C.) o primeiro a observar a decomposição espectral da luz solar ao atravessar esta um pedaço de vidro.
7. Newton, usando o fenômeno da dispersão da luz, mostrou que o arco-íris era devido à dispersão solar nas gotículas de água nas nuvens. E mais ainda, que a existência de um arco-íris duplo era consequência de uma dupla reflexão sofrida pelo raio luminoso no interior das gotículas.
8. Sobre esses dois telescópios, vide referência 1.
9. Gregory fez o estudo sistemático de séries em que, embora constituídas de um número infinito de termos, sua soma, contudo era finita. Acostumado a trabalhar em lentes que convergem em um ponto o feixe luminoso que a atravessa, Gregory, provavelmente, tenha dado o nome de convergentes àquelas séries. (Cf. referência 3.)
10. O telescópio refletor de Newton constitui-se num grande avanço. O primeiro deles que construiu media 15 cm de comprimento e 2,5 cm de diâmetro, com a capacidade de aumentar de 30 a 40 vezes o objeto real. Em 1671, construiu um outro telescópio refletor, com o mesmo diâmetro, porém um pouco maior: 23 cm. Aliás, ao apresentá-lo ao Rei Carlos II e à Royal Society, esta o escolheu como um de seus membros. (Cf. referência 3.)

11. Em 1758, Dollond apresentou seu telescópio acromático à Royal Society, que o distinguiu com a Medalha Copley e o elegeu seu membro em 1761.
12. Em 1834, Lister conseguiu ver, pela primeira vez, a verdadeira forma bicôncava das células vermelhas do sangue (hemácias), em seu microscópio acromático. (Cf. referência 3.)
13. Veja alguns excertos desse trabalho de Bartholinus em Magie, op. cit.
14. Cf. BORN & WOLF, op. cit.; PHILLIPS, M. Eletromagnetic radiation. In: Encyclopaedia Britannica. 6. ed. Macropaedia. The University of Chicago, 1978.
15. Além de Hooke, o jesuíta Pardies também usou a idéia de ondas luminosas para explicar fenômenos ópticos relacionados com reflexão e refração da luz. Em seu famoso Traité de la lumière, publicado em 1690, Huygens refere-se aos trabalhos de Hooke e de Pardies. (Cf. MAGIC, op. cit.; ROSMORDUC, Op. cit.)
16. Por essa época, o éter desempenhava um grande papel na explicação dos fenômenos físicos até então conhecidos: gravitação magnetismo, luz, etc. O próprio Boyle destinou uma parte de suas pesquisas para entender cientificamente o éter. O mesmo fizeram Hooke e Newton. Dentre as teorias do éter, propostas por essa ocasião, destaca-se a apresentada pelo matemático francês René Descartes (1596-1650) em 1644, segundo a qual a gravidade decorria de uma série de vórtices de diversos tamanhos que se situavam no meio etéreo. (Cf. BURTT, E.A. As bases metafísicas da ciência moderna. Editora da Universidade de Brasília, 1983.) Segundo essa teoria, a Terra estava em repouso no centro de um vórtice que, por sua vez, girava em torno do Sol. (Cf. ASIMOV, op. cit.)
17. HUYGENS, C. Treatise on light. Great Books of the Western World, 34. The University of Chicago, 1971.
18. Cf. BORN and WOLF, op. cit.
19. Para o físico inglês Sir Joseph John Thomson (1856-1940; PNF, 1906), Newton pode ser considerado como o precursor do caráter de onda-partícula da luz, graças a essas idéias sobre “lados”. (Cf. ROSMORDUC, op. cit.)
20. NEWTON, I. Optics. Great Books of the Western World, 34. The University of Chicago, 1971; PHILLIPS, op. cit.
21. GALILEI, G. Dois novas ciências. Ched Editorial, Instituto Italiano di Cultura e Nova Stella. s.n.

22. Segundo HALLIDAY, D. e RESNICK, R. (Física, 4. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1980), parece ter sido em torno de 1600 que Galileu fez essas experiências.
23. PLA, C. Galileo Galilei. Argentina, Espasa-Calpe, 1946. ASIMOV, op. cit.
24. Os primeiros satélites de Júpiter foram descobertos por Galileu, em 1610, utilizando para isso o telescópio inventado por ele próprio. Porém, somente em 1668 o astrônomo franco-italiano Giovanni Domenico Cassini (1625-1712) mediu os tempos de revolução desses satélites.
25. ROEMER, O. J. de Sav.: 223. 1676; Mém. de l'Acad. Sci. Paris, 10 (1665-99): 575.
26. Uma primeira medição da paralaxe da estrela Gamma Draconis havia sido realizada por Hooke, em 1669, usando para isso a técnica da determinação da distância zenital de uma estrela, isto é, o ângulo entre o zênite e a estrela.
27. ASIMOV, op. cit.
28. BRADLEY, J. Phil. Trans. London, v.35, p. 637. 1728.
29. EULER, L. L. Eureli Opuscula varii argumenti. 1746. (Veja, também, BORN & WOLF, op. cit., e ASIMOV, op. cit.)
30. YOUNG, T. Phil. Trans. Roy. Soc. London, v. 92, n.12, p. 387, 1802.