
A CRÔNICA DA ÓTICA CLÁSSICA (PARTE III: 1801-1905)

José Maria Filardo Bassalo
Depto. de Física – UFPA
Belém – PA

Com este trabalho concluímos a Crônica da Ótica Clássica, que foi apresentada em três partes. Nesta terceira parte, estudamos inicialmente as experiências de Young (1801) sobre interferência da luz e Malus (1808) sobre a polarização da mesma. Em prosseguimento, estudamos as primeiras teorias desenvolvidas por Arago e Fresnel (entre 1811 e 1822), no sentido de fundamentar o caráter ondulatório da luz, caráter esse decorrente dessas experiências. Logo depois, estudamos os modelos do éter luminífero como meio propagador da onda luminosa. Falamos, ainda, sobre os trabalhos de Maxwell (1865) e os de Einstein (1905) sobre a natureza da luz e concluímos o trabalho descrevendo as experiências de Foucault (1850) e as de Fizeau (1850) sobre a determinação de velocidade da luz no ar e na água, experiências essas que foram fundamentais para decidir, em favor da teoria ondulatória da luz, a polêmica que existia entre esta e a teoria corpuscular de Newton.

Com este artigo encerramos a *Crônica da Ótica Clássica* apresentada em três partes. Na primeira parte⁽¹⁾ havíamos mostrado o desenvolvimento da *Ótica Geométrica*, que é a parte da ótica que estuda os fenômenos luminosos que se relacionam, basicamente, com a formação de imagens em espelhos e lentes. Na segunda parte⁽²⁾, começamos a estudar o desenvolvimento da *Ótica Ondulatória*, que é a parte da ótica que trata dos fenômenos luminosos ligados ao caráter ondulatório da luz. Nessa segunda parte, havíamos estudado os primeiros fenômenos característicos desse ramo da ótica, tais como as experiências sobre interferência, difração e dupla-refração (Boyle, Hooke, Grimaldi e Bartholinus). Destacamos, ainda, nessa segunda parte as primeiras teorias sobre a natureza da luz, desenvolvidas no sentido de explicar esses fenômenos óticos (Newton, Huygens), bem como relacionamos as primeiras experiências sobre a medição da velocidade da luz (Roemer, Bradley). Encerramos essa segunda parte com a célebre experiência

de Young, realizada em 1801, na qual se mediu, com relativa segurança, o comprimento de onda da luz.

No presente artigo, vamos prosseguir examinando, com mais detalhes, essa experiência de Young, assim como outras novas experiências que consolidaram o aspecto ondulatório da luz, tais como as experiências de Malus e Brewster sobre polarização da luz. Em prosseguimento, vamos observar as primeiras teorias desenvolvidas no sentido de fundamentar teoricamente o caráter ondulatório da luz (e, dentre tais teorias, destacam-se as desenvolvidas por Fresnel e Arago). Estudaremos também os modelos construídos no sentido de explicar o meio propagador da luz – o éter. Por outro lado, salientamos ainda os trabalhos de Maxwell (1865) e de Einstein (1905) sobre a natureza da luz. Concluímos este trabalho falando sobre as novas medidas da velocidade de luz, quer no ar, quer em meios refringentes (Foucault, Fizeau).

O físico e médico inglês Thomas Young (1773-1829) estimulado por experiências relacionadas à interferência de ondas de água e de pulsos de som, nas quais percebera que havia regiões de destruição dessas ondas, e regiões em que havia reforço das mesmas, suscitou a hipótese de que o mesmo poderia ocorrer com as ondas luminosas. Assim, em 12 de novembro de 1801, 1 de julho de 1802 e 24 de novembro de 1803, leu alguns trabalhos na *Royal Society*⁽³⁾, trabalhos esses resultantes de suas experiências sobre ótica, e nos quais exaltava a teoria ondulatória e apresentava um novo conceito nessa teoria, o então chamado **princípio da interferência**: – “quando duas ondulações, provenientes de pontos diferentes, coincidem perfeitamente ou quase, em um ponto, o efeito resultante é uma combinação dos movimentos independentes de cada ondulação”⁽⁴⁾. Nessas experiências, ao fazer passar um feixe de luz através de dois pequenos orifícios construídos em um papel grosso, Young obteve pela primeira vez, em um anteparo, uma **figura de interferência luminosa**; composta de faixas claras e escuras, alternadamente.

O resultado dessas experiências permitiu a Young, calcular o comprimento de onda das cores do espectro visível, encontrando um valor médio da ordem de 0.000057, bem como explicar os famosos “anéis de Newton”, usando, para isso, dados do próprio Newton. Para Young, esses “anéis” decorriam da interferência entre ondas, incidentes, refletoras e refratadas na camada de ar variável existente entre a lente e a lâmina que são utilizadas para obter tais “anéis”. O mesmo raciocínio era empregado por Young para explicar a coloração que aparece nas películas delgadas, como, por exemplo, nas bolhas de sabão⁽⁶⁾. De início, esses trabalhos de Young foram bastante criticados na Inglaterra, em uma série de artigos escritos provavelmente por Lord Henry Brougham (inimigo pessoal de Young), no *Edinburgh Review*, que os considerou “destituídos de qualquer mérito”⁽⁷⁾.

Young realizou também trabalhos pioneiros sobre luz e visão. Assim, foi o primeiro a observar que o cristalino altera seu raio para poder dar nitidez às imagens de objetos colocados em posições diferentes, fenômeno esse conhecido como **acomodação**. Descobriu ainda, em 1801, que o **astigmatismo** era consequência da irregularidade da curvatura da córnea. Essas suas pesquisas relacionadas com luz e visão levaram-no a ser, também, o pioneiro na formulação da teoria das cores, teoria apresentada por ele em 1802. Para Young não havia necessidade de um mecanismo fisiológico para se ver cada cor separadamente, e sim bastava ver três cores fundamentais: o vermelho, o verde e o violeta⁽⁸⁾. Uma combinação dessas três cores daria toda a escala cromática. Essa sua teoria das cores foi aperfeiçoada, em 1851, pelo fisiologista e físico alemão Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) – o inventor do oftalmoscópio. Segundo a teoria tricromática de Young-Helmholtz, há três tipos de cones na retina, caracterizados pela presença de três tipos de pigmentos: um absorvendo preferencialmente na parte vermelha do espectro, um outro no verde e um terceiro no azul⁽⁹⁾. Mais tarde, em 1817, Young deu uma outra grande contribuição ao desenvolvimento da teoria ondulatória da luz, ao tentar explicar a dupla-refração que Bartholinus observara em 1669⁽¹⁰⁾. Em carta que escreveu ao físico francês Dominique-François-Jean Arago (1786-1853), Young aventou a hipótese da transversalidade da onda luminosa⁽¹¹⁾, tal como ocorre com as ondas na superfície da água, como a única maneira de explicar a dupla-refração. Mais adiante mostraremos que a idéia da transversalidade da luz foi muito bem desenvolvida pelo próprio Arago e pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel (1788-1827)⁽¹²⁾.

O estudo da dupla-refração levou a uma outra descoberta importante no sentido de consolidar a teoria ondulatória da luz. Com efeito, o físico francês Étienne-Louis Malus (1775-1812), em 1808⁽¹³⁾, estimulado por um prêmio oferecido pela Academia de Ciências de Paris, em janeiro de 1808, prêmio esse oferecido a quem, apresentasse um estudo matemático da dupla-refração e o confirmasse experimentalmente, estudava em casa tal fenômeno com um espato-da-islândia (calcita), com o qual via, através dele, a luz do Sol refletida nas janelas do Palácio de Luxemburgo, que ficava nas proximidades de sua casa localizada à *rue des Enfers*⁽¹⁴⁾. Por essa ocasião, ele fez uma observação curiosa: a de que as duas imagens obtidas por dupla-refração no espato variavam em intensidade, chegando inclusive, a desaparecer uma delas, quando fosse girada a calcita em torno da direção do raio solar refletido. No entanto, esse fenômeno curioso não ocorria quando ele examinava a luz do Sol diretamente através do espato. Desse modo, acabara de descobrir a polarização por reflexão⁽¹⁵⁾.

Em consequência dessa observação, Malus começou a realizar uma série de experiências nas quais estudava a incidência de luz em superfícies transparentes. Observou, então, que quando um feixe de luz incide sobre a superfície da água, uma parte é refletida e a outra é refratada. E mais ainda, quando o ângulo

de incidência for de $52^{\circ}45'$, a parte refletida é polarizada, e tem todas as características do raio refletido pelas vidraças do Palácio de Luxemburgo. Em outras palavras, se ele atravessar uma calcita, cuja secção principal é paralela ao plano de reflexão, ele não será dividido e só emergirá o raio ordinário. Se a secção principal for perpendicular, só emergirá o raio extraordinário⁽¹⁶⁾.

No prosseguimento de suas experiências, Malus obteve, empiricamente, uma lei que permite calcular a intensidade relativa da luz emergente em função do quadrado do co-seno do ângulo (θ) formado entre as direções de polarização dos cristais⁽¹⁷⁾ (os chamados **eixos óticos** que selecionam os planos de polarização). Essa lei é hoje conhecida como **lei de Malus** e sua expressão analítica é dada por $\frac{I}{I_m} = \cos^2 \theta$ ⁽¹⁸⁾. Observou ainda nessas experiências que para o ângulo de

incidência θ_p , para o qual há reflexão polarizada, o raio refratado correspondente também é polarizado, porém em plano perpendicular aquele. Mais tarde, em 1811⁽¹⁹⁾, o físico escocês Sir David Brewster (1781-1868) – o inventor do Caleidoscópio, em 1816 –, observou que esses raios polarizados são ortogonais entre si, e obteve empiricamente uma lei que permite calcular o ângulo θ_p através de sua tangente trigonométrica, em função do índice de refração relativo entre os meios refringentes envolvidos no fenômeno de polarização, isto é: $\operatorname{tg} \theta_p = n_r / n_i$ onde n_i e n_r são, respectivamente, os índices de refração dos meios incidente e refratante.

Partidário incondicional da teoria corpuscular newtoniana da luz (assim como Biot, Arago e Laplace), Malus tentou dar uma explicação corpuscular para esse novo fenômeno que acabara de descobrir, admitindo que um raio de luz é constituído de uma grande quantidade de moléculas luminosas não-esféricas, porém arredondadas com três eixos (a , b , c) ortogonais entre si e desiguais; o maior deles, o a , seria orientado na direção do raio luminoso. Para a luz natural, dizia Malus, os eixos b e c estariam orientados em todos os sentidos. No entanto, quando luz natural incide num meio refringente com ângulo θ_p , as forças repulsivas desse meio refletem uma parte desse raio, de tal forma que as moléculas que constituem esse raio refletido se agrupam, de modo que seus eixos respectivos sejam paralelos entre si. Tal fenômeno, observou Malus, é idêntico ao que se produz quando um ímã orienta, na mesma direção, partículas magnetizadas colocadas em sua proximidade. Daí o nome de moléculas polarizadas que deu para suas moléculas luminosas e, conseqüentemente, o de reflexão por polarização ao fenômeno que acabara de observar.

Explicação semelhante a essa Malus dá ao fenômeno da dupla-refração. Para ele, esse fenômeno é devido às forças repulsivas. Assim, se o eixo b de sua molécula luminosa é perpendicular a essas forças, então refrata-se como raio ordinário: se, contudo, a perpendicularidade ocorrer para o eixo c , então acontece o raio extraordinário⁽²⁰⁾. Convém salientar ainda que, nesse mesmo ano

de 1808⁽²¹⁾, em que fez sua importante descoberta sobre a polarização por reflexão, Malus demonstrou um teorema importante para o desenvolvimento ulterior da Ótica Geométrica, principalmente no que se relaciona a construção de imagens óticas. Esse teorema, hoje conhecido como **teorema de Malus e Dupin**⁽²²⁾, afirma: – “Um grupo de ondas preserva sua congruência normal⁽²³⁾, após qualquer número de reflexões e refrações”. É oportuno salientar que Malus ganhou o prêmio da Academia Francesa de Ciências, em 1810, por seu trabalho sobre a polarização da luz⁽²⁴⁾.

Arago, após ser nomeado, em 1809, professor de Geometria Analítica da Escola Politécnica, em substituição ao astrônomo francês Joseph-Jérôme le Lalande (1732-1807), interessou-se pelo estudo da luz. Primeiramente era partidário da teoria corpuscular, juntamente com Biot e Laplace, conforme vimos; mais tarde, contudo, converteu-se à teoria ondulatória, o que lhe custou a amizade de Biot. Pois bem, em seus estudos sobre a luz, Arago descobriu em 1811 o fenômeno da **polarização rotatória** ou **atividade ótica**, observando que o plano de polarização da luz variava de um certo ângulo quando atravessava o quartzo talhado em lâminas de faces paralelas, perpendicularmente ao seu eixo cristalino.

Logo depois, em 1815, esse físico francês, Jean-Baptiste Biot (1774-1862), descobriu que formas vaporosas e líquidas de várias substâncias, como a turpentina, tinham propriedades análogas, ou seja, podiam também girar o plano da luz polarizada. No entanto, ele descobriu algo mais, pois observou que havia substâncias que giravam o plano de polarização da luz somente no sentido horário, mais tarde conhecidas como **dextrorrotatórias**, e que outras só giravam no sentido anti-horário, as **levorrotatórias**. Mais tarde, em 1822, o astrônomo inglês Sir John Frederick William Herschel (1792-1871) reconheceu duas estruturas cristalográficas do quartzo que produziam a polarização circular da luz observada por Arago e Biot. Com essa descoberta criou-se um novo ramo da Química chamado **polarimetria**, magistralmente utilizado pelo químico francês Louis Pasteur (1822-1895), em sua tese de doutoramento intitulada **Estudo dos Fenômenos relativos à Polarização Rotatória dos Líquidos** (1847), e pelo físico-químico holandês Jacobus Henricus van't Hoff (1852-1911), em 1874⁽²⁵⁾, na determinação da assimetria de cristais orgânicos. É oportuno lembrar que Fresnel, em 1825, propôs uma explicação fenomenológica dessa atividade ótica apresentada por algumas substâncias⁽²⁶⁾.

Feita essa pequena digressão sobre Atividade Ótica, assunto mais ligado à Crônica da Química, voltaremos a nossa da Ótica Clássica. Ainda em 1815, Fresnel⁽²⁷⁾, alertado por Arago sobre as experiências de Young sobre interferência da luz, começou a trabalhar nesse assunto. Não dispunha de qualquer aparelhagem especial, no entanto a sua genialidade o fez tomar apenas dois espelhos e dois prismas, os hoje denominados, respectivamente, **espelho duplo de Fresnel** e **bi-prisma de Fresnel**, e com eles obter belas figuras de interferência⁽²⁸⁾.

Em seguida, passou a estudar o fenômeno da difração da luz que havia sido descoberto pelo físico italiano Francesco Maria Grimaldi (1618-1663), e que, contudo, só foi divulgado após sua morte, no livro *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride*, publicado em 1665. Os primeiros resultados obtidos por Fresnel sobre a difração da luz foram inicialmente publicados na *Annales de Chimie et Physique*⁽²⁹⁾. Tais trabalhos, um pouco mais elaborados, foram então apresentados por seu amigo Arago à Academia Francesa de Ciências, em reunião realizada no dia 15 de julho de 1816⁽³⁰⁾.

Para explicar uma série de experiências realizadas por Fresnel em 1816, sobre difração da luz em obstáculos, extremidades finas e aberturas em anteparos, esse mesmo físico francês combinou o princípio da interferência de Young e o princípio de Huygens para a construção de frentes de ondas⁽³¹⁾, combinação essa que passou a ser conhecida como **princípio de Huygens-Fresnel**. Segundo esse princípio, a amplitude da onda luminosa que passa através de uma abertura ou de um obstáculo em um determinado ponto de um anteparo, no qual essa onda se projeta, é a soma (interferência) de todas as ondas secundárias oriundas da abertura (ou do obstáculo). Para o cálculo dessas ondas secundárias, Fresnel desenvolveu um método engenhoso segundo o qual a área do elemento difrator era dividida em uma série de zonas de igual área – as **zonas de Fresnel**. Esse método era relativamente simples quando aplicado a elementos difratores circulares e para pontos situados sobre o eixo de simetria do sistema fonte-objeto-anteparo. Porém, para outros pontos e outras formas geométricas da abertura (ou do obstáculo) difrator, esse método envolvia certos tipos de integrais de funções trigonométricas, conhecidas desde então como **integrais de Fresnel**:

$$C(\omega) = \int_0^{\omega} \cos(\pi\omega'/2) d\omega' ;$$

$$S(\omega) = \int_0^{\omega} \text{sen}(\pi\omega'/2) d\omega'$$

(É oportuno salientar que a dificuldade do tratamento dessas integrais só foi relativamente contornada, muito mais tarde, pelo físico francês Marie-Alfred Cornu (1841-1902), quando em 1874⁽³⁴⁾, relacionou essas integrais as propriedades geométricas de uma espiral – a famosa **espiral de Cornu** –. Esta nada mais é do que a representação, no plano complexo, de curva $B(\omega) = C(\omega) + iS(\omega)$, com ω tomando todos os valores de 0 até $+\infty$ ⁽³³⁾)

Nessa época em que Fresnel desenvolveu a teoria matemática da difração da luz, baseada na teoria ondulatória de Huygens (1678), havia uma grande polêmica entre essa teoria e a corpuscular de Newton (1704), já que esta contava com muitos adeptos entre os físicos franceses, principalmente Arago, Biot, Pierre

Simon de Laplace (1749-1827) e Siméon Dennis-Poisson (1781-1840). Alguns desses físicos (Laplace e Biot) haviam, inclusive, formulado modelos no sentido de melhorar a teoria corpuscular ou da emissão. Como esses físicos tinham grande influência na Academia Francesa de Ciências fizeram com que esta escolhesse, em março de 1817, como seu tema do prêmio de 1818, a difração da luz. Esses físicos tinham esperança de que a teoria corpuscular sobrepujasse, de uma vez por todas, a teoria ondulatória huygensiana. Pois bem, Fresnel concorreu a esse prêmio com sua teoria matemática da difração. No entanto, em uma das sessões em que Fresnel apresentou sua teoria àquela academia, Poisson, que era um dos membros do comitê de Julgamento⁽³⁴⁾, mostrou, através de cálculo, que, se a teoria fresneliana fosse verdadeira, deveria haver um ponto brilhante no centro da sombra projetada por um pequeno disco circular, o que, no seu entendimento, era um absurdo. Arago, grande amigo de Fresnel, e presente a essa reunião, prometeu que na próxima reunião da Academia confirmaria ou não a objeção de Poisson. Montando sem demora um dispositivo experimental, Arago conseguiu obter o “ponto brilhante” de Poisson. Com esse experimento, Arago rendeu-se ao argumento ondulatório, mas Biot ficou com Newton e brigou com Arago. Não havia mais dúvidas sobre a teoria ondulatória da luz e, conseqüentemente, Fresnel foi o grande ganhador do prêmio de 1818 da Academia Francesa de Ciências com a sua famosa *memoire couronné*.

E interessante observar que outros aspectos da difração da luz foram abordados por outros físicos além de Fresnel. Por exemplo, o físico alemão Joseph von Fraunhofer (1787-1826), depois de haver descoberto as raias espectrais no espectro solar, em 1814⁽³⁶⁾, redescobriu em 1819 o **princípio da grade (rede) de difração** que havia sido descoberto por David Rittenhouse, 1785⁽³⁷⁾, sem, contudo, ter despertado grande interesse. Tal princípio refere-se à difração da luz através de uma série de aberturas, em que a dimensão de cada uma delas (d) é muito menor do que a distância (r) em que se encontra o anteparo no qual se observa a figura de difração, isto é: $d \ll r$. Mais tarde, em 1821⁽³⁸⁾, Fraunhofer utilizou a grade de difração para calcular o comprimento de onda das raias espectrais mais fortes que observara desde 1814, através da relação, hoje, bastante conhecida: $d \sin(\theta) = n\lambda$, onde $n = 0, 1, 2...$ indica a posição dos centros da figura de difração⁽³⁹⁾. Desse modo, a difração para a qual a fonte luminosa está muito distante do objeto difrator ficou conhecida como **difração de Fraunhofer**.

Ainda com relação à difração temos a destacar outros resultados importantes. Assim, em 1835⁽⁴⁰⁾, o astrônomo inglês Sir George Biddell Airy (1801-1892) obteve matematicamente, e pela primeira vez, a difração de Fraunhofer através de aberturas circulares – o hoje famoso **disco de Airy** – e explicando, desse modo e formalmente, as suas regiões claras e escuras. Por outro lado, o físico francês Jacques Babinet (1794-1872), em 1831⁽⁴¹⁾, enunciou um teorema

segundo o qual dois “screens” difratores são ditos **complementares** quando as regiões transparentes sobre um deles correspondem exatamente às regiões opacas do outro e vice-versa. Este teorema ficou conhecido como **princípio de Babinet**. Apesar de alguns resultados teóricos sobre a difração serem conhecidos na década de 1830, o estudo sistemático e formal sobre a difração só foi realizado muito mais tarde pelo físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), em 1882⁽⁴²⁾, que, inclusive, corrigiu dois erros históricos da teoria de Fresnel-Huygens: a **onda-para-trás**, decorrente da construção de Huygens, e a fase $\pi/2$ de Fresnel devido à superposição das fases das ondas secundárias das zonas de Fresnel. No entanto, essa teoria refinada de Kirchhoff apresentava uma grande limitação, pois só se aplicava às ondas longitudinais, isto é, as escalares como as sonoras. Portanto, ela falhava na explicação das ondas luminosas que são transversais⁽⁴³⁾. Por fim, ainda em 1882⁽⁴⁴⁾, um outro importante resultado obtido sobre difração foi a construção de uma **rede de difração**, pelo físico norte-americano Henry August Rowland (1848-1901), com cerca de 14000 linhas por polegada, com um poder de resolução acima de 150000⁽⁴⁵⁾.

Além da difração da luz, Fresnel estudou outros fenômenos luminosos. Com efeito, ainda em 1816 preocupou-se com a dupla-refração que havia sido descoberta por Bartholinus em 1669, conforme já frisamos anteriormente. Pois bem, com a idéia de que só havia interferência de ondas luminosas provenientes de uma mesma fonte, Fresnel e seu amigo Arago tentaram, sem sucesso, interferir os raios ordinário e extraordinário decorrentes da dupla-refração. Em vista desse insucesso, Arago foi conversar com Young, já que esse físico obtivera as primeiras figuras de interferência luminosa em 1801, levando-lhe a informação de que raios ordinário e extraordinário estavam polarizados em planos perpendiculares. Ora, conforme vimos, a polarização já havia sido objeto de estudo por parte de Malus, em 1808. Desse modo, estimulado por essa consulta de Arago e sendo partidário da teoria ondulatória, Young tentou explicar os fenômenos relacionados com a dupla-refração através de uma hipótese audaciosa, qual seja, a de que a luz era uma onda transversal. Tal idéia foi comunicada a Arago em duas cartas: uma no dia 12 de janeiro de 1817 e a outra no dia 29 de abril de 1818⁽⁴⁶⁾.

A idéia da transversalidade da onda luminosa proposta por Young foi a chave para Fresnel explicar a experiência que fizera com Arago em 1816, e referida acima. Assim, para Fresnel, os raios ordinário e extraordinário não interferiam porque vibravam transversalmente e em direções perpendiculares, conforme dissera em trabalho que publicou com Arago, em 1819⁽⁴⁷⁾. Essa hipótese da transversalidade da luz, suscitou uma grande polêmica com relação ao meio transmissor da luz, isto é, o **éter luminífero**, da qual Fresnel participou ativamente, inclusive propondo modelo para o mesmo conforme veremos em seguida.

Desde Huygens (1678), os partidários da teoria ondulatória da luz que o sucederam (exceto Hooke, conforme vimos) acreditavam que as ondas luminosas

eram longitudinais já que, sendo ondas, elas deveriam ser como as sonoras, as únicas até então bem conhecidas, pois ainda não havia sido desenvolvida a teoria da propagação das ondas elásticas nos Sólidos⁽⁴⁸⁾. Porém, sendo a luz uma onda e considerando que o som ondula no ar, Huygens pensou, então, que a luz deveria também “ondular” em um meio. Tal meio, concluiu Huygens, deveria ser o mesmo que enche o Universo todo, já que recebemos luz das estrelas mais distantes. Desse modo, Huygens denominou-o de **éter luminífero** baseado no éter aristotélico-cartesiano⁽⁴⁹⁾. No entanto, devido à alta velocidade da luz já conhecida¹, pois fora calculada pelo astrônomo dinamarquês Olaf Roemer (1644-1710), em 1675, o éter deveria ser uma camada gasosa, extremamente rarefeita, não observável por intermédio dos instrumentos disponíveis à época.

Ora, como os gases não resistem a esforços transversais, Fresnel então formulou um modelo para o éter luminífero. Com efeito, para poder explicar a transmissão das vibrações transversais luminosas através dele, considerou-o então como um sólido. Com essa idéia em mente, a partir de 1821, Fresnel começou a estudar as propriedades dinâmicas do éter luminífero e para isso, examinou a propagação da luz em corpos cristalinos, quer os **uniaxiais** (como a calcita), quer os **biaxiais** (como, por exemplo, a mica). Estes últimos, descobertos por Brewster, em 1815⁽⁵⁰⁾, apresentavam, no entanto, uma dificuldade, qual seja, a de que a dupla-refração nos mesmos não era explicada pela construção de Huygens, isto é, uma onda esférica primária, correspondente ao raio ordinário, se propaga no cristal com velocidade constante e em todas as direções, e uma onda esférica secundária, correspondente ao raio extraordinário, se propaga no cristal com velocidade variável “através não só da matéria distribuída no cristal, bem como pelas partículas que os compõem”⁽⁵¹⁾. Essa construção de Huygens formalizava a doutrina de que nos cristais havia dois meios luminíferos diferentes: um para o raio ordinário e outro para o extraordinário.

Desse modo, como a construção de Huygens não explicava a dupla-refração nos cristais biaxiais recentemente descobertos, Fresnel utilizou-se do conceito de transversalidade da onda luminosa para não só explicar essa situação, como também para explicar a dupla-refração nos cristais uniaxiais. Assim, para esse físico francês, só havia um meio luminífero nos cristais, e as velocidades (v) de propagação dos dois raios na dupla-refração nada mais eram do que as raízes de uma equação quadrática que representava uma superfície de duas-folhas, folhas essas que eram plano-polarizadas e perpendiculares entre si, definidas por:

¹ (cerca de 300.000 Km/s)

$$\frac{l^2}{\left(\frac{1}{\varepsilon_1} - v^2\right)} = \frac{m^2}{\left(\frac{1}{\varepsilon_2} - v^2\right)} = \frac{n^2}{\left(\frac{1}{\varepsilon_3} - v^2\right)},$$

e que ficaram conhecidas por **superfícies-de-onda-de-Fresnel**⁽⁵²⁾, onde (l, m, n) indicam os co-senos diretores da normal ao plano da onda, e $1/\varepsilon_1$, $1/\varepsilon_2$ e $1/\varepsilon_3$ denotam, respectivamente, as forças elásticas de restituição para deslocamentos unitários. Se $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3$ e $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 = \varepsilon_3$ teremos, respectivamente, as ondas esféricas e esferoidais da construção de Huygens para os cristais uniaxiais. Se $\varepsilon_1 \neq \varepsilon_2 \neq \varepsilon_3$, teremos as ondas elipsoidais de Fresnel para os cristais biaxiais. Essa primeira memória de Fresnel sobre a dupla-refração foi apresentada à Academia Francesa de Ciências, no dia 19 de novembro de 1821⁽⁵³⁾. Em 1822, ele apresentou novos trabalhos sobre a dupla-refração, que contudo, somente foram publicados em 1827⁽⁵⁴⁾.

Ainda com relação à dupla-refração, é importante ressaltar que o físico escocês William Nicol (1768-1851), em 1829⁽⁵⁵⁾, usando dois cristais de espato-da-islândia, colados diagonalmente com bálsamo-do-canadá (uma substância transparente com índice de refração 1,55, quase a metade entre n_o e n_e , índice de refração ordinário e extraordinário para o espato), conseguiu eliminar o raio ordinário por reflexão total no bálsamo. Esse dispositivo, que ficou conhecido como **prisma de Nicol**, permitiu o desenvolvimento de técnicas polarimétricas, técnicas essas que foram fundamentais para o estudo posterior da estrutura molecular.

De um modo geral, os materiais cristalinos podem ser usados para estudar a polarização da luz através de um dispositivo chamado **compensador**, cuja função é compensar a diferença de fase entre os raios ordinário e extraordinário. Tal dispositivo, inventado por Babinet em 1849⁽⁵⁶⁾, é constituído de dois cristais de espato-da-islândia, cortados diagonalmente e colados de maneira que seus eixos óticos fiquem ortogonais. Com esse dispositivo, conhecido como **compensador de Babinet**⁽⁵⁷⁾, Babinet conseguiu não só estudar a luz polarizada circularmente, como também a polarizada elipticamente.

Conforme vimos anteriormente, a idéia da transversalidade da onda luminosa de Young e Fresnel levou à hipótese de que o meio onde se propaga essa onda – o éter luminífero – deveria comportar-se como um **sólido elástico**, hipótese essa proposta pelo próprio Fresnel. No entanto, tal hipótese se deparava com uma dificuldade óbvia: como os planetas se movimentavam através dele sem sofrer alterações em suas órbitas? Tentou-se, então, uma teoria mecânica do éter. O primeiro passo dado nesse sentido foi a formulação da teoria da elasticidade dos corpos sólidos e a primeira idéia para a mesma foi apresentada pelo engenheiro francês Claude-Louis-Marie-Henri-Navier (1785-1836) em 1827⁽⁵⁸⁾, ao supor que

a matéria consistia de inúmeras partículas (massas pontuais, átomos) que exercem entre si forças ao longo da reta que as une; com isso, ele deduziu a equação de movimento para o vetor deslocamento e de uma partícula, e na qual introduziu a constante de rigidez n , que é o poder de resistir à distorção apresentada pelo meio.

Por seu lado, Cauchy, examinando a equação de Navier, interessou-se pelo assunto e, em 1828⁽⁵⁹⁾, apresentou uma outra equação diferencial para o vetor \vec{e} , usando outro método, qual seja, o de tratar macroscopicamente as propriedades elásticas da matéria. Em sua equação, Cauchy introduziu, além da constante n uma outra constante k , o módulo de compressão, que representa a relação entre a pressão aplicada em um corpo e a compressão cúbica daí resultante. Completando essa primeira teoria elástica, Poisson ainda em 1828⁽⁶⁰⁾ resolve a equação diferencial para o vetor \vec{e} , partindo da hipótese que tal vetor poderia ser considerado como a soma de dois vetores, isto é, $\vec{e} = \vec{b} + \vec{c}$, em que \vec{b} seria **irrotacional** ($\nabla \times \vec{b} = \vec{0}$) e \vec{c} seria **solenoidal** ($\nabla \cdot \vec{c} = 0$). Com essa hipótese, Poisson demonstrou que em um corpo elástico, as ondas que nele se propagam são de duas espécies: a onda transversal \vec{c} , com velocidade igual a $(n/\rho)^{1/2}$ ($\rho =$ densidade) e a longitudinal \vec{b} , com a velocidade igual a $(k + 4/3n)^{1/2}$ ⁽⁶¹⁾.

Após esses trabalhos, uma teoria elástico-ótica foi paulatinamente sendo construída. O próprio Cauchy, em 1830⁽⁶²⁾, e depois em 1836, fez, a partir deles, um estudo sobre cristais óticos. No trabalho de 1836, estudou a refração, principalmente a causa da existência do índice de refração, isto é, a variação da velocidade da luz de um meio para o outro. Assumindo então, que a densidade ρ do éter é a mesma para todos os meios, porém a rigidez n variando para cada um deles, Cauchy demonstrou as leis da reflexão e da refração de Fresnel. Por essa mesma época, em 1835, e independentemente, o físico escocês James MacCuliagh (1809-1847)⁽⁶⁴⁾ e o físico alemão Franz Ernst Neumann (1798-1895)⁽⁶⁵⁾ estenderam as leis da reflexão da luz aos meios cristalinos. Em 1838⁽⁶⁶⁾, uma teoria elástico-sólida da reflexão da luz foi apresentada pelo matemático inglês George Green (1793-1841). Em todos esses trabalhos, basicamente, as vibrações do éter luminífero elástico eram perpendiculares ao plano de polarização da luz. No entanto, além da dificuldade já apontada anteriormente, qual seja, a de que os planetas não diminuem o ritmo de seus movimentos no éter, havia uma outra dificuldade. Vejamos qual:

Consideremos dois meios contíguos elásticos e admitamos que uma onda transversal se propague dirigindo-se para a fronteira de separação entre eles. De acordo com as leis da Mecânica, no segundo meio, a onda considerada será dividida em uma transversal e em outra longitudinal. Porém, de acordo com os experimentos de Arago e de Fresnel, referidos anteriormente, a onda longitudinal

deveria ser eliminada, violando dessa forma, as leis da Mecânica. Por outro lado, para contornar o problema da rigidez do éter, o físico e matemático inglês Sir George Gabriel Stokes (1819-1903), em 1845⁽⁶⁷⁾, supôs ser o éter como um piche ou cera de sapateiro, que é resistente à uma força súbita e cede a forças lentas e persistentes. Assim, o éter seria rígido para a luz, mas não oferecia resistência aos planetas em seus movimentos. Achava, ainda, Stokes que o éter seria parcialmente arrastado pelos planetas em seus movimentos, sendo o primeiro a considerar um éter móvel⁽⁶⁸⁾. Tal modelo, no entanto, não era satisfatório, muito embora ele se harmonizasse com a hipótese de Fresnel de que a velocidade longitudinal no éter era indefinidamente maior do que a velocidade transversal nesse próprio meio⁽⁶⁹⁾.

Apesar de muitas dificuldades, a teoria do éter elástico persistiu por um longo tempo e alguns cientistas do século XIX contribuíram para ela. Além dos trabalhos já mencionados, temos a destacar os trabalhos de vários físicos, como o do alemão Carl Neumann (1832-1925), em 1869⁽⁷⁰⁾, do inglês John William Strutt (Lord Rayleigh) (1824-1908; PNF, 1904), em 1871⁽⁷¹⁾, do alemão Kirchhoff, em 1876⁽⁷²⁾ e do físico escocês William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907), em 1888⁽⁷³⁾. Em todos esses trabalhos, basicamente, várias hipóteses sobre as condições de fronteira entre os meios refringentes foram formuladas, bem como novas propriedades do éter foram também imaginadas; porém, havia nessas várias conjecturas, e de alguma maneira, conflitos com as leis da Mecânica⁽⁷⁴⁾. É oportuno salientar que, nesse meio tempo, Maxwell, ao demonstrar em 1865⁽⁷⁵⁾ que a luz era uma onda eletromagnética, reforçou ainda mais a idéia do éter luminífero, pois tal meio era considerado como suporte para a propagação dessa onda⁽⁷⁶⁾.

A existência do éter teve sua primeira grande dificuldade com as célebres experiências feitas pelo físico alemão, naturalizado norte-americano, Albert Abraham Michelson (1852-1931; PNF, 1907), experiências essas realizadas, algumas delas, com a colaboração do químico norte-americano Edward William Morley (1838-1923), a partir de 1881⁽⁷⁷⁾. Tais experiências, realizadas com o interferômetro, mostravam ser a presença do éter no Universo incompatível com a ciência física vigente à época, ciência essa calcada na mecânica newtoniana e em seu princípio básico, representado pela lei de composição de velocidades de Galileu – o conhecido **princípio da Relatividade de Galileu**. Por outro lado, o éter não foi considerado pelo físico alemão Albert Einstein (1879-1955; PNF, 1921), em 1905⁽⁷⁸⁾, em seu célebre trabalho sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento, trabalho esse depois conhecido como **Relatividade Restrita**, e nem em seu outro trabalho, também célebre, publicado ainda em 1905⁽⁷⁹⁾, no qual explica o efeito fotoelétrico através da hipótese quântica da luz. Para Einstein, a luz não é uma onda eletromagnética e sim um pacote de energia *lichtquanta* – dotado de características ondulatórias (λ) e corpusculares (ρ), ligadas pela relação: $\rho = h/\lambda$ (h é a constante de Planck). Convém salientar que uma nova idéia de éter vem sendo hoje considerada nas chamadas Teorias da Relatividade Estendia⁽⁸⁰⁾.

Ao encerrarmos a **Crônica da Ótica clássica**, vamos dizer algo sobre as propriedades óticas dos metais e sobre a determinação da velocidade da luz. Após a morte de Fresnel, muita atenção foi dirigida no sentido de explicar as propriedades óticas dos metais, principalmente o seu grande poder de refletir a luz em todos os ângulos (daí seu uso como espelho) e a polarização – primeiramente observada por Malus – dessa mesma luz refletida. No entanto, Brewster, em 1830⁽⁸¹⁾, mostrou que a luz incidente plano-polarizada sobre uma superfície metálica permanece polarizada no mesmo plano e após a reflexão, se sua polarização é paralela ou perpendicular ao plano de reflexão, mas em outros casos a luz refletida é polarizada elípticamente. Após essa descoberta de Brewster, vários cientistas dedicaram-se a formular uma teoria da reflexão metálica. Dentre tais trabalhos, destacam-se os de MacCullagh, Cauchy e Lord Rayleigh. Nesses trabalhos, a idéia central é a de que o índice de refração é uma quantidade complexa⁽⁸²⁾.

As várias determinações da velocidade da luz, realizadas no século XIX, foram importantes na medida em que ajudaram a resolver a controvérsia entre as hipóteses corpuscular e ondulatória da luz. Por exemplo, segundo a teoria corpuscular, a velocidade da luz seria tanto maior quanto mais denso fosse o meio que ela atravessasse. Por outro lado, a teoria ondulatória indicava exatamente o contrário, resultado esse confirmado pelo próprio Fresnel com sua teoria da reflexão e da refração da luz. Pois bem, o físico francês Armand-Hyppolyte-Louis Fizeau (1819-1896), em 1849, determinou a velocidade da luz no ar usando o seguinte dispositivo: no topo de uma colina colocou uma roda dentada com cerca de 720 dentes, tendo um espelho por trás, e um outro espelho foi colocado a uma distância de oito quilômetros. A velocidade da roda dentada poderia ser controlada de modo que a luz passasse entre dois dentes consecutivos na ida e na volta. De posse das dimensões da roda, de sua velocidade angular e da distância entre os espelhos, Fizeau calculou a velocidade da luz como sendo de 315.000 Km/s. (Em 1874, Cornu usaria ainda o método de Fizeau, porém com 200 dentes em sua roda dentada, e obteve o valor de 295.000 Km/s⁽⁸⁵⁾).

Em 1850, o físico francês Jean-Bernard-Léon Foucault (1819-1868), usando uma sugestão de Arago, apresentada em 1842, determinou a velocidade da luz tanto no ar quanto na água. Nesse mesmo ano de 1850⁽⁸⁶⁾, Fizeau e L. Breguet, também seguindo a mesma sugestão de Arago, calcularam a velocidade da luz no ar e na água. Em ambas as experiências, a velocidade da luz na água era menor do que no ar, resultado esse, portanto, favorável à teoria ondulatória⁽⁸⁷⁾. Em 1851, Fizeau determinou a velocidade da luz na água em movimento, comprovando a hipótese feita por Fresnel, por volta de 1821, sobre o arrastamento parcial do éter luminífero pela matéria⁽⁸⁹⁾. Por outro lado, seguindo a sugestão do físico inglês Sir Charles Wheatstone (1802-1875), apresentada em 1834, Foucault, em 1862, substituiu a roda dentada da experiência de Fizeau por um espelho giratório, encontrando então para a velocidade da luz o valor de 298.000 Km/s. O mesmo disposi-

tivo foi utilizado por Michelson, em 1879. Em anos, subseqüentes, Michelson continuou medindo a velocidade da luz e sempre aperfeiçoando os dispositivos que utilizava para tais medidas, inclusive o seu célebre interferômetro, construído em 1881⁽⁹¹⁾.

Notas e Referências Bibliográficas

1. BASSALO, J. M. F. A crônica da ótica clássica (Parte I: 800 a.C.-1665 d.C.). **Cad. Cat. Ens. Fis.**, v. 3, n. 3, p. 138-59, 1986.
2. _____. A crônica da ótica clássica (Parte II: 1665-1801) **Cad. Cat. Ens. Fis.**, v. 4, n. 3, p. 140-50, 1987.
3. Veja excertos dos trabalhos de Young em MAGIE, W. F. **A source book in physics**. McGraw Hill Book Company, 1935.
4. HECHT, E.; ZAJAC, A. **Optics**. Addison-Wesley Publishing Company, 1979.
5. HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Física**. Livros Técnicos e Científicos, 1984. v. 4.
6. O fenômeno da interferência em películas delgadas foi utilizado posteriormente para aumentar o poder de resolução dos microscópios óticos, imergindo sua objetiva em óleo, bem como para construir vidros não refletores. (Cf. HALLIDAY e RESNICK, op. cit.)
7. ASIMOV, I. **Os gênios da humanidade**. Bloch Editores, 1974. HECHT e ZAJAC, op. cit.
8. Young havia considerado o violeta como cor base. No entanto, o físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879), após conhecer Nicol, interessou-se pelo estudo da Ótica, principalmente a teoria das cores de Young-Helmholtz. Assim, ao substituir o violeta pelo azul, Maxwell demonstrou em 1859 que as cores do espectro solar poderiam ser obtidas combinando-se o vermelho, o verde e o azul em várias proporções, trabalho esse que permitiu definitivamente a fotografia a cores. (Cf. GIBERT, A. **As origens históricas da física moderna**. Fundação Calouste Gulbenkian, 1982, ASIMOV, op. cit.)
9. DAVSON, H. Human eye and vision. In: *Macropaedia. Encyclopaedia britannica*. The University of Chicago, 1978. v. 7.

10. Sobre o trabalho de Bartholinus, veja-se MAGIE, op. cit.

11. A idéia de transversalidade da luz já havia sido considerada pelo físico inglês Robert Hooke (1635-1703), em 1672. (Cf. WHITTAKER, E. Sir. **A history of the theories of aether and electricity: the classical theory**. Thomas Nelson and Sons, 1951.)

12. É oportuno salientar que Young trabalhou também em outros ramos da Física. Por exemplo, em 1807, usou pela primeira vez o conceito moderno de energia: a capacidade que tem um corpo de produzir trabalho. Nessa ocasião, mostrou que a energia devia ser calculada como o produto da “massa ou peso de um corpo” pelo quadrado de sua velocidade, em contraposição ao matemático alemão Gottfried Wilhelm Leibnitz (1646-1716), que considerou tal produto como sendo a quantidade de movimento. Trabalhou ainda Young em elasticidade, tendo introduzido o conceito de **módulo de elasticidade**, hoje conhecido como **módulo de Young**. As pesquisas de Young foram reunidas no livro *Lectures on natural philosophy*, editado em 1807. (Cf. ASIMOV, op. cit.; MAGIE, op. cit.)

13. MALUS, E. L. **Nouveau Bull. d. Sci., per la Soc. Philomatique**, v. 1, p. 266, 1809; **Memóires de la société d'Arcueil**, v. 2, p. 143. Convém ressaltar, nesta oportunidade, que o mineralogista e físico austríaco Wilhelm Karl Haidinger (1795-1871) observou que luz polarizada azul era percebida pelo olho, no céu setentrional. (Cf. STRONG, J. **Concepts of classical optics**. W. H. Freeman, 1958.)

14. Esse relato foi feito por Biot, que foi colega de Malus na Escola Politécnica de Paris. (Cf. MAGIE, op. cit.; HECHT & ZAJAC, op. cit.; ASIMOV, op. cit.)

15. GUAYDIER, P. **História da física**. Edições 70, 1984; MAGIE, op. cit.)

16. ROSMORDUC, J. **De Tales a Einstein**. Editorial Caminho, 1983; MAGIE, op. cit.

17. Durante mais de cem anos, apenas a calcita era usada como polarizadora da luz. No entanto, em 1928, o físico norte-americano Edwin Herbert Land (n. 1909), usando uma substância diocróica sintética – a *herapathite* –, inventou o que se chama de polaróide. (Cf. HECHT & ZAJAC, op. cit.)

18. Cf. HECHT & ZAJAC, op. cit.; STRONG, op. cit.

19. MICROPAEDIA. In: **Encyclopaedia britannica**. University of Chicago, 1978. v. 2.

20. Cf. ROSMORDUC, op. cit.; MAGIE, op. Cit.

21. MALUS, E. L. **J. École Polytech.**, v. 7, n.1, p. 84, 1808.

22. Essa demonstração de Malus foi mais tarde generalizada por C. Dupin (1816) (daí o nome do teorema), J. D. Geogonne (1825) e Quetelet (1825). Esse teorema é uma técnica alternativa ao princípio de Huygens, e que permite seguir a trajetória da luz através de vários meios isotrópicos. (Cf. BORN, M. & WOLF, E. *Principles of optics*. Pergamon Press, 1983; HECHT & ZAJAC, op. cit.)

23. Um grupo de raios forma uma congruência normal se cada raio do grupo é cortado ortogonalmente por esferas centradas no ponto de intersecção desses raios. (Cf. BORN & WOLF, op. cit.)

24. Cf. WHITTAKER, op. cit.

25. O químico francês Joseph Aquille Le Bel (1847-1930), dois meses antes de van't Hoff, chegou ao mesmo resultado deste, qual seja, a relação existente entre atividade ótica e estrutura molecular. (Cf. ASIMOV, op. cit.)

26. Cf. ROSMORDUC, op. cit.; GIBERT, op. cit.; ASIMOV, op. cit.; HECHT & ZAJAC, op. cit.

27. Fresnel formou-se em Engenharia de Pontes e Calçadas, por volta de 1806, e passou a trabalhar para o governo francês. No entanto, quando o imperador francês Napoleão Bonaparte (1769-1821) voltou de seu exílio da ilha de Elba, em 1815, Fresnel foi destituído de seu cargo e preso, por não o apoiar. Porém, cem dias depois, Napoleão foi derrotado em Waterloo e, conseqüentemente, Fresnel retomou seu cargo de engenheiro e continuou com suas pesquisas em ótica, para a qual deu grandes contribuições teóricas e práticas a esse ramo da FÍSICA, como, por exemplo, a teoria matemática da onda de luz, e a construção de lentes para faróis. (Cf. BASSALO, J. M. F. *Fresnel: o formulador da teoria matemática da luz*. **Cad. Cat. Ens. Fis.**, v. 5, n. 2, p. 79-87, 1988.)

28. Veja, em HECHT & ZAJAC, op. cit., os esquemas das experiências de Fresnel com o espelho duplo e com o biprisma.

29. FRESNEL, A. **Ann. Ch. et Phys.**, v. 2, n. 2, p. 239, 1816.

30. Cf. WHITTAKER, op. cit.
31. Cf. MAGIE, op. cit.
32. CORNU, M. A. **Journ. of Phys.**, v. 3, n. 5, p. 44, 1874.
33. Para uma tabela de valores de $C(\omega)$ e $S(\omega)$ usando-se a espiral de Cornu, veja-se, por exemplo, HECHT & ZAJAC, op. cit.
34. Os demais membros do Comitê de Julgamento eram Arago, Biot, Laplace e o químico francês Joseph-Louis Gay-Lussac (1778-1850).
35. O “ponto brilhante” calculado por Poisson já havia sido observado pelo astrônomo francês Joseph-Nicholas Delisle (1688-1768) no começo do século XVIII (Cf. WHITTAKER, op. cit.). Ainda no primeiro quartel desse século, em 1723, Maraldi também já o havia observado. (Cf. HECHT & ZAJAC, op. cit.; BORN & WOLF, op. cit.)
36. Essas raias espectrais, cerca de sete, já haviam sido observadas pelo químico e físico inglês William Hyde Wollaston (1766-1828) em 1802 (**Phil. Trans.**, v. 92, p. 365). Entre 1814 e 1815, Fraunhofer apresentou na Academia de Munich um mapa do espectro solar com uma série de linhas escuras, cujas principais ele distinguiu com as letras do alfabeto **B, b, D, F, G, H**, etc... Em 1817, publicou suas pesquisas na **Ann. d. Phys.**, v. 56, p. 264. (Cf. WHITTAKER, op. cit.)
37. RITTENHOUSE, D. **Trans. Amer. Phil. Soc.**, v. 2, p. 201, 1786.
38. Os trabalhos de Fraunhofer sobre grades de difração foram apresentados à Academia de Munich, entre 1821 e 1822 (**Deukschr. Akad. Wiss. München**, v. 8, p. 1) e posteriormente publicados na **Ann. d. Phys.**, v. 74, p. 337, 1823. (Cf. WHITTAKER, op. cit.; BORN & WOLF, op. cit.)
39. HALLIDAY & RESNICK, op. cit.
40. AIRY, G. B. **Trans. Camb. Phil. Soc.**, v. 5, p. 283, 1835. Quase ao mesmo tempo, F. M. Schewerd obteve um resultado análogo ao de Airy substituindo o círculo por um polígono de 180 lados. (Cf. BORN & WOLF, op. cit.)
41. BABINET, J. **Comp. Rend.**, v. 4, p. 638, 1837. É interessante citar que Babinet havia sugerido, em 1829, que o comprimento de onda de uma determinada luz

fosse usado como unidade de comprimento. (Cf. KISTNER, A. **História de la física**. Editorial Labor, 1934.)

42. KIRCHHOFF, G. R. **Berl. Ber.**, p. 641, 1882; **Ann. d. Phys.**, v. 18, n. 2, p. 663, 1883.

43. Cf. STRONG, op. cit.

44. ROWLAND, H. A. **Phil. Mag.**, v. 13, n. 5, p. 469, 1882; **Nature**, v. 26, p. 211, 1882.

45. Aperfeiçoando cada vez mais os espectroscópios, Rowland preparou, no período de 1886 a 1895, um mapa do espectro solar no qual cerca de 14.000 linhas espectrais tinham seus comprimentos de onda exatamente calculados. (Cf. BASSALO, J. M. F. **Crônicas da física**. GEU/UFGA, 1987. Tomo I; BORN & WOLF, op. cit.)

46. Convém observar que a idéia de transversalidade da onda luminosa já havia sido sugerida por Hooke. (Cf. nota 11.)

47. ARAGO, D. F. J. & FRESNEL, A. J. **Ann. de Ch. et Phys.**, v. 10, n. 2, p. 288, 1819. Apesar de neste trabalho Arago haver concordado com o aparecimento de seu nome junto ao de Fresnel, ele não concordava com essa idéia “atrevida” da transversalidade da onda luminosa, conforme declararia posteriormente. (Cf. GIBERT, op. cit.)

48. Leibnitz mostrou, em 1684, que as propriedades acústicas e elásticas dos corpos eram conectadas. Porém, somente em 1734 os matemáticos suíços Daniel Bernouilli (1700-1782) e Leonhard Euler (1707-1783), independentemente, encontraram a equação diferencial parcial que rege as vibrações transversais das barras elásticas, mas que só poderiam ser integradas através de séries. Por fim, o físico e matemático francês Jean le Rond d'Alembert (1717-1783), em 1746, encontrou a solução da equação da corda vibrante em termos de funções arbitrárias. (Cf. TRUESDELL, C. **Essays in the history of mechanics**. Springer-Verlag New York, 1968; KLINE, M. **Mathematical thought from ancient to modern times**. Oxford University Press, 1972.)

49. Para o filósofo grego Aristóteles (384-322), o **éter** era a quinta essência, o componente de que eram formados os corpos celestes além da Terra e da Lua. Em seguida, o éter foi considerado como um fluido que preenchia o espaço todo, e que tinha funções bastante distintas no reino da matéria. Por exemplo, para o filósofo

e matemático francês René Descartes (1596-1650), o éter tinha uma função mecânica que era a de comunicar o movimento entre os astros do Universo. Descartes, em 1644, formulou um modelo segundo o qual o meio etéreo onipresente caía em uma série de vórtices de diversos tamanhos. Segundo esse modelo, os planetas eram capturados e arrastados por um redemoinho de partículas de éter, em cujo centro estava o Sol. (Cf. referência indicada na nota 2.)

50. Os cristais uniaxiais têm um eixo ótico e os biaxiais têm dois. O eixo ótico de um cristal é determinado traçando-se, por um dos dois vértices onde concorrem três ângulos obtusos, uma reta que faça ângulos iguais com as arestas desse vértice. Qualquer reta passando pelo cristal paralelamente a esta será, também, um eixo ótico. (Cf. HALLIDAY & RESNICK, op. cit.)

51. Cf. referência indicada na nota 2.

52. Considerando as superfícies-de-onda de Fresnel, o físico e matemático irlandês Sir William Rowan Hamilton (1805-1865) previu, em 1833, a **refração cônica**, cuja existência foi confirmada experimentalmente pelo físico irlandês Humphrey Lloyd (1800-1881), ainda em 1833. (Cf. BORN & WOLF, op. cit.)

53. Uma semana depois, Fresnel apresentou a essa mesma Academia um suplemento a essa memória, no qual esboçava uma primeira explicação para a **dispersão da luz**, levando em conta a estrutura molecular da matéria. Mais tarde, em 1830, o matemático francês Augustin-Louis Cauchy (1789-1857) apresentou sua famosa teoria da dispersão, tomando como base a idéia molecular de Fresnel. (Cf. WHITTAKER, op. cit.)

54. FRESNEL, A. J. **Mém. de l'Acad.**, v. 7, p. 45, 1827.

55. NICOL, W. **Edinb. New Phil. Journ.**, v. 6, p. 83, 1829.

56. BABINET, J. **Comp. Rend.**, v. 29, p. 514, 1849.

57. H. Soleil modificou o compensador de Babinet introduzindo uma lâmina de faces paralelas ligadas a esse compensador e, de tal modo, que a orientação do eixo ótico da lâmina fosse a mesma da parte de baixo do compensador de Babinet. O compensador de Soleil tem a vantagem de produzir um desvio uniforme sobre toda a sua face e não apenas na do feixe da luz incidente, como ocorre no compensador de Babinet.

58. NAVIER, C. L. M. H. **Mém. de l'Acad.**, v. 7, p. 375, 1827. (Submetida em 1821.)
59. CAUCHY, A. L. **Exercices de Mathématiques**, v. 3, p. 160, 1828.
60. POISSON, S. D. **Mém. de l'Acad.**, v. 8, p. 623, 1828.
61. Cf. WHITTAKER, op. cit.
62. CAUCHY, A. L. **Mém. de l'Acad.**, v. 10, p. 293, 1830.
63. CAUCHY, A. L. **Comp. Rend.**, v. 2, p. 341, 1836.
64. MacCULLAGH, J. **Brit. Assoc. Rep.**, 1835.
65. NEUMANN, F. E. **Abh. Berl. Akad. Math. Klasse.**, v. 1, 1835.
66. GREEN, G. **Trans. Camb. Phil. Soc.**, v. 7, n. 1, p. 113, 1838.
67. STOKES, G. G. **Trans. Camb. Phil. Soc.**, v. 8, p. 247, 1845. É importante observar que, em 1841, o matemático alemão Karl Friedrich Gauss (1777-1855) publicou seu clássico livro sobre Ótica Geométrica, no qual ele expõe o conceito de distância focal e desenvolve fórmulas para o cálculo da posição e do tamanho de imagens formadas por lentes com determinadas distâncias focais. (Cf. KINGSLAKE, R. & THOMPSON, B. J. *principies of optics*. In: *Macropaedia*. Encyclopaedia britannica. University of Chicago, 1978. v. 13.)
68. Cf. BORN & WOLF, op. cit.
69. Cf. WHITTAKER, op. cit.
70. NEUMANN, C. **Math. Ann.**, v. 1, p. 325, 1869.
71. RAYLEIGH, Lord (STRUTT, J. W.). **Phil. Mag.**, v. 41, n. 4, p. 519, 1871.
72. KIRCHHOFF, G. R. **Berl. Abh. Physik. Abteilg.**, v. 2, p. 57, 1876.
73. KELVIN, Lord (THOMSON, W.). **Phil. Mag.**, v. 26, n. 5, p. 414, 1888.
74. Cf. BORN & WOLF, op. cit.

75. MAXWELL, J. C. **Phil. Mag.**, v. 29, p. 512, 1865.

76. O eletromagnetismo de Maxwell e seu desdobramento foi tratado por nós em trabalho específico. (Cf. BASSALO, J. M. F. **Ciên. e Cult.**, v. 36, n. 8, p. 1350-67, 1984.)

77. MICHELSON, A. A. & MORLEY, E. W. **Am. J. Sci.**, v. 34, n. 3, p. 333, 1887. Para um estudo mais detalhado das experiências realizadas por Michelson, veja-se: JAFFE, B. **Michelson e a velocidade da luz**. EDART Livraria e Editora Ltda, 1967.

78. EINSTEIN, A. **Ann. d. Phys.**, v. 17, p. 891, 1905.

79. EINSTEIN, A. **Ann. d. Phys.**, v. 17, p. 145, 1905.

80. A experiência de Michelson-Morley, a Relatividade Restrita e o efeito fotoelétrico já foram tratadas por nós. (Cf. BASSALO, J. M. F. Crônicas da física, op. cit.)

81. BREWSTER, D. **Phil. Trans.**, p. 287, 1830.

82. Para uma descrição e referência desses trabalhos, cf. WHITTAKER, op. cit.

83. FIZEAU, A. H. L. **Comp. Rend.**, v. 29, p. 90, 1849.

84. Cf. WHITTAKER, op. cit.

85. FOUCAULT, J. B. L. **Comp. Rend.**, v. 30, p. 551, 1850.

86. FIZEAU, A. H. L.; BREGUET, L. **Comp. Rend.**, v. 30, p. 562, 771, 1850.

87. Um outro resultado experimental favorável à teoria ondulatória foi o seguinte: segundo a teoria corpuscular, as cores em placas delgadas eram produzidas somente pela luz refletida pela segunda superfície da placa, enquanto que, para a teoria ondulatória, essas cores eram decorrentes da interferência entre a luz refletida pelas primeira e segunda superfícies da placa. Portanto, se, de algum modo, a reflexão da primeira superfície fosse impedida, não haveria formação de cores se a teoria corpuscular fosse correta. Assim, em uma experiência engenhosa realizada em 1833 (**Trans. Camb. Phil. Soc.**, v. 4, p. 279), Airy mostrou que quando se faz incidir luz polarizada, com um determinado ângulo de incidência, em uma lâmina

revestida com uma película metálica espelhante, não há formação dos famosos “anéis de Newton”, confirmando, dessa forma, a hipótese ondulatória da luz. (Cf. WHITTAKER, op. cit.)

88. FIZEAU, A. H. L. **Ann. Chimie**, v. 57, p. 385, 1859.

89. Embora esse resultado experimental tenha sido parcialmente explicado pela teoria de Fresnel, sua explicação completa foi dada pela relatividade restrita einsteniana.

90. FOUCAULT, J. B. L. **Comp. Rend.**, v. 55, p. 501, 792, 1862.

91. Cf. BORN & WOLF, op. cit.; WHITTAKER, op. cit. É oportuno salientar que Michelson continuou medindo a velocidade da luz até sua morte em 1931. (Cf. JAFFE, op. cit.) Michelson, em 1927, mediu a velocidade da luz dentro de um tubo de vácuo com uma pressão de 0,5 mm – Hg e com 1.600 m de comprimento, encontrando então o valor de 299.798 Km/s. Convém, ainda, destacar que Lord Rayleigh, em 1904, ao estudar matematicamente a transmissão de ondas em meios dispersivos, mostrou que as técnicas utilizadas por Roemer, Fizeau e Foucault para determinar a velocidade da luz permitiam apenas calcular a sua **velocidade de grupo** (v_g) e não a sua **velocidade de fase** (v_f) que as mesmas são relacionadas pela equação $v_g = v_f - \lambda(\delta / \delta\lambda)v_f$. No caso de meios dispersivos (índice de refração variando com a frequência (comprimento de onda) da luz), tem-se: $v_f \neq v_g$. Aliás, esse fato já havia sido observado por Michelson em 1884, ao medir a velocidade da luz através do disulfido carbônico (CS_2). No caso de meios não-dispersivos (casos de Roemer, Fizeau e Foucault), tem-se $(\delta / \delta\lambda)v_f = 0$, então $v_g = v_f$. (Cf. d'ABRO, A. **The rise of new physics**. Dover, 1951. v. 1 e 2.)