

## Nascimentos da Física

José Maria Filardo Bassalo

Departamento de Física da UFPA,

66075-900 - Belém, Pará

e-mail://amazon.com.br/bassalo

Trabalho recebido em 16 de novembro de 1995

Com este trabalho, iniciamos uma nova saga. Desta vez, a exemplo do escritor uruguaio Eduardo Hughes Galeano (1940- ) em sua fantástica trilogia **Memória do Fogo (Nascimentos, 1986; As Caras e as Máscaras, 1985; O Século do Vento, 1988** - Editora Nova Fronteira), apresentaremos em forma de verbetes, e na ordem cronológica (seguindo a divisão clássica das idades históricas), os principais fatos (*nascimentos*) referentes aos conceitos físicos, os quais serão apresentados por temas separados. Para isso, basicamente, usaremos os dados que coletamos nos quatro tomos de nossas **Crônicas da Física** (EUFPA: 1987, 1990, 1992, 1994) e nas referências aí indicadas.

With this work, we begin a new saga. This time, as the Uruguayan writer Eduardo Hughes Galeano (1940- ) made in his fantastic trilogy **Memória do Fogo (Nascimentos, 1986; As Caras e as Máscaras, 1985; O Século do vento, 1988** - Editora Nova Fronteira), we present in entries, and in chronological order (following the classical division of historical ages), the main events (*births*) concerned to the physical concepts, which will be presented in separated subjects. For that, basically, we use the data that we gather in our four books **Crônicas da Física** (EUFPA: 1987, 1990, 1992, 1994) and in the references therein.

### Idade Moderna: Óptica

#### Primeira Metade do Século 18 (1701-1750)

Em 1701, o matemático suíço John (Johann, Jean) Bernoulli (1667-1748) fez uma conexão entre a lei da refração da luz com o princípio mecânico da composição de forças, ao perceber que se duas forças (de direções diferentes, sentidos opostos e cuja razão entre suas intensidades vale  $\mu$ ) mantém em equilíbrio uma partícula que só se pode mover livremente em um plano, então, do triângulo de forças formado por essas forças, suas direções obedecem à relação  $\sin i = \mu \sin r$ , onde  $i$  e  $r$  representam os ângulos entre aquelas direções e a normal a um plano perpendicular ao plano de movimento da partícula. Como essa equação é análoga à lei da refração, Bernoulli conjecturou que a teoria da luz pudesse ser baseada nela.

Em 1704, o físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727) publicou a obra *Opticks, or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours*

*of Light* (Óptica, ou um Tratado das Reflexões, Refrações, Inflexões e Cores da Luz) (em três livros), composta de uma parte pelo manuscrito *Lectiones Opticae (Lições de Óptica)*, de 1675, sobre a luz e as cores, e “o resto foi acrescentado cerca de 12 anos depois para completar a teoria, exceto o terceiro livro e as últimas proposições do segundo, reunidos de papéis esparsos”, segundo ele próprio escreveu como “Nota preliminar”. O Livro I expõe, sob forma de teoremas, as experiências sobre a reflexão, refração, dispersão e decomposição da luz no prisma; segue-se a teoria do arco-íris; secções particulares são dedicadas aos telescópios catóptricos, à coloração dos corpos, aos fenômenos das lâminas finas e aos anéis de interferência (**anéis de Newton**). (Observe-se que o físico inglês Robert Hooke (1635-1703), já havia apresentado a hipótese de que esses “anéis”, decorriam da espessura das lâminas.) O Livro II é dedicado aos fenômenos de interferência e periodicidade, à analogia entre a coloração dos corpos e a irisação das lâminas finas e das bolhas de sabão. O

Livro III trata das inflexões sofridas por raios luminosos, quando passam rente aos ângulos, e das franjas de interferência. Ao final desse Livro III, como apêndice, Newton apresenta suas famosas **Queries (Questões)**, num total de 16, redigidas de maneira problemática para “posteriores pesquisas”. É oportuno destacar que Newton, ainda nesse livro, ao estudar a emissão de luz por parte de corpos esquentados acima de uma certa temperatura (fenômeno esse mais tarde conhecido como **radiação térmica**), aventou a possibilidade de que a mesma decorria de movimentos vibratórios das partes constituintes daqueles corpos. Destaque-se ainda que Newton combinou, em sua *Opticks*, concepções corpusculares e ondulatórias para explicar suas investigações ópticas. Por exemplo, Newton afirmou que quando a luz incidia em um meio refrativo, ela produzia “ondas” (da mesma maneira como uma pedra produz ondas quando jogada em um lago) que colocavam em movimento partículas desse meio refrativo. Assim, para Newton, quando um raio incide em um meio refringente, ou ele se move na direção da “onda” produzida, resultando na transposição desse meio, ou ele se dirige contrariamente a mesma “onda” produzida, resultando na sua reflexão. Portanto, conclui Newton, cada raio de luz incidente em um meio transparente tem “acesso à fácil transposição” ou “acesso à fácil reflexão”.

Em 1706, foi publicada a edição latina do livro *Opticks* de Newton (*Optice: sive de Reflexionibus, Refractionibus, Inflexionibus et Coloribus Lucis*), cuja tradução foi feita pelo teólogo e filósofo inglês Samuel Clarke (1675-1729). Para essa edição, Newton preparou mais sete novas questões, numeradas de 17 a 23.

Em 1707, o astrônomo italiano Giacomo Filippo Maraldi (Maraldi I) (1665-1729) publicou o trabalho *Considérations sur la Seconde Inégalité du Mouvement des Satellites de Jupiter et l'Hypothèse du Mouvement Successif de la Lumière (Considerações sobre a Segunda Desigualdade do Movimento dos Satélites de Júpiter e a Hipótese do Movimento Sucessivo da Luz)* no qual ele se opõe à hipótese da finitude da velocidade da luz.

Em 1709, o físico inglês Francis K. Hau(w)ksbee (? -1713) publicou seu livro *Physico-Mechanical Experiments (Experimentos Físico-Mecânicos)* no qual reuniu uma série de experiências por ele realizadas (algumas delas sobre a refração da luz através de prismas), uma vez que era experimentador público da **Royal So-**

**ciety**.

Em 1714-1715, o físico anglo-francês John Théophile Desaguliers (1683-1744), como experimentador público da **Royal Society**, realizou experiências sobre a refração da luz em prismas. Essas experiências tinham o objetivo de reproduzir as experiências realizadas por Newton.

Em 1717, apareceu a segunda edição inglesa do livro *Opticks* de Newton, na qual incluiu mais oito novas Questões, numeradas de 17 a 24, sendo que as Questões de 17 a 23 da edição latina, passaram a receber os números de 24 a 31. Nessas Questões, Newton apresentou sugestões para explicar novos fenômenos luminosos que haviam sido descobertos na segunda metade do século 17, principalmente a **difração da luz** pelo físico italiano Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) e descrita por ele no livro póstumo *Physico-Mathesis de Lumine, Coloribus et Iride*, publicado em 1665, e a **dupla refração da luz** descoberta pelo médico dinamarquês Erasmus Bartholinus (1625-1698), e descrita no livro *Experimentis Crystalli Islandici Disdiacastici, quibus Mira et Insolita Refractio Detegitur*, de 1669. Para explicar esses fenômenos, Newton formulou a hipótese de que cada raio de luz apresentava dois lados, com propriedades diferentes, que lhe permitiam ou não ter “acesso” (**fits**) a uma determinada região, quer por reflexão, quer por refração ou transmissão. Com efeito, para Newton, as regiões claras e escuras (figura de difração) observada por Grimaldi e resultante da passagem de um raio de luz por uma fenda estreita, estariam ligadas à **lateralidade** do raio luminoso, permitindo-lhe passar ou não pela fenda e, uma vez passado pela fenda, esse raio poderia ir ou não para um lado ou para o outro da referida fenda. Também para Newton, esses mesmos “acessos” seriam responsáveis para justificar a pequena parte que é refletida quando um feixe de luz atravessa a superfície separando dois meios refringentes (por exemplo, ar-água e ar-vidro). Por outro lado, para explicar a dupla refração (raios ordinário e extraordinário) observada por Bartholinus e decorrente da passagem de um raio de luz através do cristal espatoda-islândia, Newton supôs que os dois lados do raio luminoso apresentavam propriedades de refração opostas: uma usual (responsável pelo raio ordinário) e a outra não usual (responsável pelo raio extraordinário).

Em 1723, Maraldi I observou pela primeira vez um “ponto brilhante” no centro da sombra projetada por um pequeno disco circular. Aliás, observação análoga a essa foi feita, por volta dessa mesma época, pelo astrônomo francês Joseph Nicolas Delisle (1688-1768).

Em Dezembro de 1725, o astrônomo inglês James Bradley (1693-1762) e seu amigo, o astrônomo amador e político inglês Samuel Molyneux (1689-1728) fizeram uma série de observações telescópicas no sentido de determinar a paralaxe da estrela Gamma Draconis. Inicialmente, o telescópio foi montado na chaminé da casa de Molyneux e, posteriormente, usaram o Observatório de Kew. (**Paralaxe** é o movimento ou deslocamento aparente de objetos próximos vistos contra o pano de fundo de objetos mais distantes; ela é produzida pelo movimento ou deslocamento do observador.)

Em 1728, Bradley fazia uma viagem de recreio pelo rio Tâmis. 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 da estrela Gamma Draconis (por ocasião em que tentava medir sua paralaxe, em 1725) ocorriam em consequência da composição entre a velocidade finita da luz, que levava 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 do Sol. Tal composição, concluiu Bradley, fazia com que a posição da estrela observada sofresse um certo deslocamento. Desse modo, acabara de descobrir o que mais tarde se denominou de **aberração da luz**  $\alpha$ :  $\sin \alpha = \frac{v}{c}$ , onde  $v$  é a velocidade da Terra em torno do Sol e  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. Baseado nas medidas da aberração da luz nas estrelas, Bradley estimou a velocidade da luz em  $295.000 \frac{km}{s}$ , resultado este comunicado à **Royal Society** e publicado no volume 35 das *Philosophical Transactions*, de 1728.

Em 1729, o físico francês Pierre Bouguer (1698-1758) publicou o livro *Essai d'Optique sur la Gradation de la Lumière* (*Tratado de Óptica sobre a Gradação da Luz*) no qual registrou suas experiências sobre a refração e absorção da luz na atmosfera terrestre. Ainda nesse livro, Bouguer apresentou sua lei da atenuação de um feixe luminoso ao atravessar um meio transparente,

pela qual a intensidade da luz varia com o inverso do quadrado da distância.

Em 1731, o físico francês Jean Jacques D'Ortous de Mairan (1678-1771) escreveu o trabalho *Traité de l'Aurore Boréale* (*Tratado da Aurora Boreal*) no qual explicou o fenômeno da aurora boreal como sendo devido à luz zodiacal incidente sobre um grande lente flutuante ao redor do globo terrestre. Esta lente era composta de “matéria fina”, de origem solar, e concentrada ao redor do pólo boreal em razão da força gravitacional.

Em 1733, o óptico inglês John Dollond (1706-1761) construiu o **telescópio refrator acromático**, usando para isso dois tipos diferentes de vidros (**flint** e **crow**), cujas refrações das cores se compensavam.

Em 1740, o astrônomo italiano Giovanni Domenico Maraldi (Maraldi II) (1709-1788) depois de realizar uma série de observações sobre os movimentos dos satélites de Júpiter, aceitou a hipótese da finitude da velocidade da luz, hipótese essa que decorria das observações sobre esses mesmos movimentos, realizadas pelo astrônomo dinamarquês Olaf Roemer (1644-1710), em 1676.

Em 1744, o matemático francês Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759) apresentou à Academia Francesa de Ciências, uma *Mémoire* na qual descreveu, baseado na teoria corpuscular da luz, seu famoso **princípio de mínima ação**: -“O caminho descrito pela luz é aquele para o qual a quantidade de ação é mínima”, traduzido pela expressão:  $\int v ds$ , onde  $v$  é a velocidade com que a luz percorre os espaços  $ds$ . Com esse princípio, Maupertuis demonstrou a lei da refração da luz.

Em 1746, o físico e matemático suíço Leonhard Euler (1707-1783) publicou o trabalho intitulado *Theoria Lucis et Colorum* (*Teoria da Luz e Cor*) no qual demonstrou haver uma semelhança entre luz e som. Nesse trabalho, afirmou que “a luz é no éter a mesma coisa que o som é no ar”.

Em 1747, Bouguer inventou o **heliômetro** para medir o diâmetro dos corpos celestes.

Em 1747, Euler realizou experiências com lentes cheias de água e, em vista disso, concluiu que era possível eliminar a aberração cromática nas lentes.

Em 1748, o astrônomo e matemático croata Rudjer (Roger, Ruggero) Josip (Giuseppe) Bosković (Bos-

covich) (1711-1787) apresentou ao Colégio Romano o trabalho intitulado *Dissertationis de Lumine (Dissertações sobre a Luz)* no qual há uma distinção clara entre **lux** (a luz enquanto fenômeno visual) e **lumen** (a luz enquanto fenômeno físico). É ainda nesse livro que Boscovich apresentou a hipótese de que os raios de luz (lumen) que viajam com velocidade finita pelo espaço cósmico poderiam ser desviados por forças gravitacionais (atrativas ou repulsivas). Para Boscovich, o **lumen** é “effluvium quodam corpusculorum a corpore luminoso emissorum”.

### Segunda Metade do Século 18 (1751-1800)

Em 1752, o matemático suíço John II Bernoulli (1710-1790), filho de John Bernoulli, tentou dar uma explicação física para a teoria mecânico-óptica que seu pai havia formulado em 1701, afirmando que no éter, onde se propaga a luz, há redemoinhos capazes de transmitir vibrações, devido à força centrífuga de cada um deles.

Em 1754, na *Kunliga Svenska vetenskapsakademins Handlinger*, o físico e matemático sueco Samuel Klingenstierna (1698-1765) publicou um trabalho no qual demonstrou matematicamente não ser exata a afirmação feita por Newton, em seu *Opticks* de 1704, de que a refração acromática era impossível, uma vez que a dispersão era proporcional à refração.

Em 1754, Dollond também inventou o **heliômetro** para medir o diâmetro dos corpos celestes.

Em 1758, Dollond apresentou seu telescópio acromático à **Royal Society**, recebendo por isso a Medalha Copley.

Em 1760, Bouguer publicou novos resultados sobre seu trabalho relacionado com a “graduação da luz”, iniciado em 1729, no qual introduziu conceitos como “quantidade de luz” e “força absoluta da luz”, mais tarde identificados, respectivamente, como “fluxo luminoso” e “iluminação”.

Em 1760, na *Kunliga Svenska vetenskapsakademins Handlinger*, Klingenstierna apresentou uma compreensiva teoria sobre as lentes acromáticas e aplanáticas. Estas, reduzem a aberração esférica e o coma. O **coma**, é uma aberração de uma lente ou espelho no qual a imagem de um ponto fora de seu eixo tem a aparência de um cometa, e é provocada pela difração da luz.

Em 1760, o astrônomo, filósofo, físico e matemático suíço-alemão Johann Heinrich Lambert (1728-1777) publicou o livro intitulado *Photometria (Fotometria)* no qual registrou as medições precisas da intensidade da luz das fontes luminosas. Essas medições levaram-no a enunciar a famosa **lei da fotometria**: - “A intensidade da luz varia com o inverso do quadrado da distância”. Observe-se que essa lei já havia sido referida pelo astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630), em 1604 e, também, por Bouguer, em 1739.

Em 1765, o óptico inglês Peter Dollond (1730-1820), filho de John Dollond, inventou uma lente acromática tripla, juntando duas lentes convexas de vidro tipo **crow**n, com uma lente côncava dupla de vidro tipo **flint**.

Em 1785, nas *Transactions of American Philosophy Society 2*, o astrônomo norte-americano David Rittenhouse (1732-1796) apresentou seu estudo sobre a difração da luz através de uma **grade (rede) de difração**: conjunto de riscas igualmente equidistantes gravadas em vidro.

Em 1793, o físico e médico inglês Thomas Young (1773-1829) estudou a acomodação visual do olho humano.

Em 1800, o astrônomo alemão Sir Friedrich Wilhelm (William) Herschel (1738-1822) publicou nas *Philosophical Transactions, 90* o resultado de suas experiências sobre a descoberta dos **raios infravermelhos**. Nessas experiências, ao determinar, com um termômetro enegrecido, as temperaturas das cores do espectro solar, Herschel observou que a temperatura aumentava na medida em que se aproximava da extremidade vermelha do espectro, sendo que a temperatura mais alta se encontrava além do vermelho.

### Primeira Metade do Século 19 (1801-1850)

Em 1801, o físico alemão Johann Wilhelm Ritter (1776-1810) publicou nos *Annalen der Physics 7*, o resultado de suas experiências sobre a descoberta dos **raios ultravioletas**. Nessas experiências, ao observar o espectro solar, percebeu a presença de raios invisíveis além do violeta no espectro solar, uma vez que os mesmos eram capazes de ações químicas, como, por exemplo, enegrecer o Cloreto de Prata.

Em 12 de Novembro de 1801, Young comunicou à **Royal Society of London** o resultado de uma experiência que realizou e na qual fez passar um feixe de luz através de dois pequenos orifícios feitos em um papel grosso. Em um anteparo colocado a uma certa distância desse papel, Young obteve uma figura composta de faixas claras e escuras e situadas alternadamente: a famosa **figura de interferência luminosa**. É oportuno registrar que Young foi estimulado a realizar esse tipo de experiência, ao observar que em experiências relacionadas com a interferência de ondas de água e pulsos de som, havia regiões em que ocorria destruição dessas ondas, e regiões em que havia reforço das mesmas. Ainda em 1801, Young realizou experiências sobre a visão, ocasião em que descobriu que o cristalino altera seu raio de curvatura para poder dar nitidez às imagens de objetos colocados em posições diferentes, fenômeno esse conhecido como **acomodação**. Ainda como resultado dessas experiências, descobriu que o **astigmatismo** era conseqüência da irregularidade da curvatura da córnea.

Em 1 de Julho de 1802, Young apresentou à **Royal Society** novos resultados sobre interferência de raios luminosos. Ainda em 1802, Young formulou pela primeira vez uma teoria das cores, ao afirmar que 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. Uma combinação dessas três cores daria, na opinião de Young, toda a escala cromática.

Em 1802, o político inglês Lord Henry Peter Brougham (1778-1868) fundou o *The Edinburgh Review* no qual apareceram vários artigos (provavelmente escritos por ele próprio) criticando a teoria de Young, considerada como “destituída de qualquer mérito”.

Em 1802, nas *Philosophical Transactions* 92, o químico e físico inglês William Hyde Wollaston (1766-1828) apresentou o resultado de suas observações sobre a presença de sete riscas (raias) no espectro solar.

Em 24 de Novembro de 1803, Young voltou a apresentar na **Royal Society** novos resultados sobre a interferência de raios luminosos e que lhe permitiram enunciar o **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 in-

dependentes de cada ondulação”. Como conseqüência das experiências realizadas com a interferência de raios luminosos, Young calculou o comprimento de onda das cores do espectro visível, encontrando um valor médio da ordem de 0,000057 cm. Além do mais, explicou os famosos **anéis de Newton**, usando, para isso, dados do próprio Newton. Assim, 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 de vidro que são utilizadas para obter tais “anéis”. O mesmo raciocínio foi empregado por Young para explicar a coloração que aparece nas películas delgadas, como por exemplo, nas bolhas de sabão.

Em 1804, nas *Philosophical Transactions* 94, Young explicou pela primeira vez o fenômeno da aberração da luz, por intermédio da teoria ondulatória da luz.

Em 1806, nas *Mémoires de l'Académie des Sciences de l'Institut de France* 7, os físicos franceses Dominique François-Jean Arago (1786-1853) e Jean Baptiste Biot (1774-1862) apresentaram o resultado de suas experiências sobre a determinação dos índices de refração de vários gases e vapores em diferentes pressões.

Em Janeiro de 1808, a Academia Francesa de Ciências propôs o estudo matemático da dupla refração, como tema para o Prêmio de Física de 1810.

Em 1808, o físico e astrônomo francês Pierre Simon, Marquês de Laplace (1749-1827) deu uma explicação dinâmica para o raio extraordinário da dupla refração, ao assumir que o meio cristalino onde ocorre esse fenômeno, atua sobre os corpúsculos de luz desse raio extraordinário, modificando sua velocidade, numa razão que depende de sua inclinação em relação ao eixo do cristal. Assim, para Laplace, a diferença dos quadrados das velocidades dos raios ordinário e extraordinário é proporcional ao quadrado do seno do ângulo que este último faz com aquele eixo.

Em 1808, o físico francês Étienne Louis Malus (1775-1812) começou a estudar, em sua própria casa, o fenômeno da dupla refração. Assim, com um cristal espato-da-islândia (calcita) observou a luz solar refletida nas janelas do Palácio de Luxemburgo, que ficava nas proximidades de sua casa localizada à *Rue des Enfants*, em Paris. Por essa ocasião, ele fez uma observação curiosa, a de que as duas imagens obtidas por dupla re-

fração na calcita variavam em intensidade, chegando, inclusive, uma delas a desaparecer quando esse cristal fosse girado em torno da direção do raio solar refletido. No entanto, esse fenômeno curioso - **polarização por reflexão** - não ocorreu quando ele examinou a luz solar diretamente através da calcita. Em consequência dessa observação, Malus começou a realizar uma série de experiências nas quais estudou a incidência de luz em superfícies transparentes. Com isso, percebeu que quando um feixe de luz incide sobre a superfície da água, uma parte é refletida e a outra é refratada. Ainda dessas experiências, Malus observou que quando o ângulo de incidência era de  $52^{\circ}45'$ , a parte refletida era polarizada, e apresentava todas as características do raio refletido pelas vidraças do Palácio de Luxemburgo. Segundo essas observações de Malus, se um raio luminoso atravessar um cristal de espato-de-islândia, cuja secção principal é paralela ao plano de reflexão, só emergirá o raio ordinário; se essa secção for perpendicular, só emergirá o raio extraordinário. No prosseguimento de suas experiências sobre a polarização da luz, Malus obteve, empiricamente, uma lei que permite calcular a intensidade relativa da luz emergente em função do quadrado do cosseno do ângulo ( $\theta$ ) formado entre as direções de polarização dos cristais (os chamados **eixos ópticos** que selecionam os planos de polarização), lei essa hoje conhecida como **lei de Malus**:  $\frac{I}{I_m} = \cos^2 \theta$ . Ainda como resultado dessas experiências, Malus observou para um determinado ângulo de incidência ( $\theta_p$ ), para o qual há reflexão polarizada, o raio refratado correspondente também é polarizado, porém em plano perpendicular àquele.

Ainda em 1808, no *Journal de l'École Polytechnique*, Malus demonstrou que “se um feixe homocêntrico de raios luminosos retilíneos é refletido ou refratado em uma superfície, o feixe resultante (em geral não mais homocêntrico) preserva sua congruência normal”. (Diz-se que 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.)

Em Dezembro de 1808, Malus comunicou o resultado de suas experiências sobre a **polarização da luz** (nome cunhado por ele) à Academia Francesa de Ciências.

Em Janeiro de 1809, os trabalhos de Malus sobre a

polarização da luz foram publicados nas *Mémoires de la Société d'Arcueil 2* e no *Nouveau Bulletin des Sciences, par la Société Philomatique 1*. (Observe-se que a *Société d'Arcueil* era um Clube que reunia os mais célebres cientistas franceses, nas casas de campo de Laplace e do químico francês Claude Louis, Conde Berthollet (1748-1822), localizadas em Arcueil, uma aldeia próxima de Paris.)

Em 1809, o físico e óptico alemão Joseph von Fraunhofer (1787-1826) (juntamente com o relojoeiro suíço Pierre Louis Guinand) começou a desenvolver uma técnica de obter vidros tipo **flint** (obtido através do acréscimo de óxido de chumbo (PbO) a um cristal de rocha (**flint** escuro), um mineral duro da família do quartzo) e tipo **crown** (vidro com baixo índice de refração, e feitos, basicamente de soda (carbonato de sódio - NaCO<sub>3</sub>) e cal (óxido de cálcio - CaO), com a técnica do sopro) de boa qualidade. (Registre-se que graças a essa nova técnica de fabricar vidros ópticos, Fraunhofer pôde realizar seu trabalho em espectroscopia, a partir de 1814.)

Em 1810, Malus ganhou o Prêmio da Academia Francesa de Ciências como decorrência de seu trabalho sobre a polarização por reflexão e a dupla refração.

Em 1811, Malus apresentou na *Mémoire présenté à l'Institut par divers Savans 2* o resultado de seu trabalho teórico e experimental sobre polarização por reflexão e dupla refração. Partidário da teoria corpuscular newtoniana da luz, Malus tentou dar uma explicação corpuscular para esses dois fenômenos ópticos. Assim, admitindo que um raio de luz é constituído de uma grande quantidade de **moléculas polarizadas luminosas** não-esféricas, porém arredondadas com três eixos ( $\vec{a}$ ,  $\vec{b}$ ,  $\vec{c}$ ) ortogonais entre si e desiguais; o maior deles ( $\vec{a}$ ) seria orientado na direção do raio luminoso. Para a luz natural, na concepção de Malus, os eixos  $\vec{b}$  e  $\vec{c}$  estariam orientados em todos os sentidos. Para explicar a polarização por reflexão, Malus disse o seguinte: quando a luz natural incide num meio refringente com o ângulo  $\theta_p$ , então 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 análogo 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 as moléculas luminosas. Por outro lado, para explicar a dupla refração, Malus considerou que se o eixo  $\vec{b}$  de uma partícula luminosa é perpendicular às forças repulsivas do meio, então refrata-se como um raio ordinário; se, contudo, a perpendicularidade ocorrer para o eixo  $\vec{c}$ , então acontece o raio extraordinário.

Em Agosto de 1811, Arago fez importantes descobertas ao realizar experiências sobre a polarização da luz. Com efeito, em uma delas, descobriu o fenômeno da **polarização rotatória** ou **atividade óptica**, observando que o plano de polarização da luz variava de um certo ângulo quando atravessava o quartzo talhado em lâminas de faces paralelas, perpendiculares ao seu eixo cristalino. Em outra experiência, Arago descobriu que a luz polarizada por reflexão se dividia em dois diferentes feixes coloridos, quando atravessava certos cristais.

Em 1812, Biot observou que a rotação da luz polarizada produzida por uma placa de quartzo decrescia progressivamente quando a cor mudava do violeta ao vermelho. Em Novembro desse mesmo ano, Biot interpretou a polarização da luz como sendo decorrente de uma força repulsiva atuando nas partículas de luz.

Em 1814-1815, Fraunhofer apresentou à Academia de Ciências de Munique um mapa do espectro solar com uma série de linhas escuras, cujas oito principais ele as distinguiu com letras. Dentre as quais, destacam-se: A (vermelho escuro), D (amarelo claro), H (violeta).

Em 1815, o físico irlandês Sir David Brewster (1781-1868) publicou nas *Philosophical Transactions* suas três grandes descobertas. A primeira, refere-se ao fato de que na polarização por reflexão, o raio refletido polarizado é perpendicular ao raio refratado, que também é polarizado. Essa descoberta, conhecida como a **lei de Brewster**, permite determinar o ângulo de incidência  $\theta_p$  para o qual ocorre aquela polarização, por intermédio da expressão  $\text{tg } \theta_p = \frac{n_r}{n_i}$ , onde  $n_r$  e  $n_i$  são, respectivamente, os índices de refração dos meios incidente e refratante. A segunda, relaciona-se com a existência dos cristais **biaxiais**, os que possuem dois eixos ópticos. (O **eixo óptico** 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 cris-

tal paralelamente a esta reta será, também, um eixo óptico.) Nesse tipo de cristal, não há dupla refração ao longo de seus eixos ópticos. Em seu trabalho com os cristais (**uniaxiais**, por exemplo, como a calcita; **biaxiais**, por exemplo, como a mica), Brewster fez sua terceira descoberta ao observar que um material isotrópico transparente sujeito a tensões mecânicas, torna-se opticamente anisotrópico. Esse fenômeno ficou conhecido como **tensão birrefringente** ou **efeito foto-elástico**.

Em 1815, Biot realizou experiências sobre luz polarizada nas quais descobriu que formas vaporosas e líquidas de várias substâncias (tipo a turpentina, por exemplo), apresentavam propriedades análogas àquelas observadas por Arago, em 1811, ou seja, podiam girar o plano de polarização da luz; e mais ainda, que existiam substâncias (o quartzo, por exemplo) que realizavam esse giro, ou somente no sentido horário (mais tarde conhecidas como **dextrógiras**), ou somente no sentido anti-horário (mais tarde conhecidas como **levógiras**). Como conseqüência dessas experiências, Biot observou que se os líquidos (que giram o plano de polarização da luz em sentidos contrários) fossem misturados em proporções determinadas, o efeito (ao qual denominou de **compensé** (compensado)) se cancelaria. Ainda como decorrência de suas pesquisas sobre luz polarizada, Biot encontrou que para uma dada solução líquida, a rotação de seu plano de polarização era proporcional a sua concentração ou, no caso de ser conhecida a concentração, a rotação era proporcional ao comprimento do tubo contendo a solução. Aliás, é oportuno ressaltar que em virtude dessas experiências, Biot introduziu a prática de denotar o efeito da luz polarizada em um líquido ou solução por um valor da rotação produzida em uma coluna de um dado comprimento padrão. Desse modo, Biot foi um dos primeiros a construir um **polariscópio**.

Em 1815, o físico francês Augustin Jean Fresnel (1788-1827) ao ser alertado por Arago a respeito das experiências de Young sobre interferência da luz, construiu dispositivos simples formados por dois espelhos e por dois prismas e, com os mesmos (mais tarde conhecidos como, respectivamente, **espelho duplo de Fresnel** e **bi-prisma de Fresnel**) obteve várias figuras de interferência.

Em 1816, Brewster inventou o **caleidoscópio**, que é um tubo dotado de um jogo de espelhos que produzem

variadas combinações de imagens.

Em 1816, nos *Annales de Chimie et de Physique 1*, Fresnel apresentou os primeiros resultados de suas experiências sobre difração da luz, e que foram comunicados por Arago à Academia Francesa de Ciências, no dia 15 de Julho desse mesmo ano. Nessas experiências, Fresnel estudou a difração da luz em obstáculos, extremidades finas e aberturas em anteparos. Para explicar o que observou nas mesmas, Fresnel combinou o **princípio da interferência de Young** (1801-1803) e o princípio apresentado pelo físico holandês Christiaan Huygens (1629-1695), em 1690 - o **princípio de Huygens** -, para a construção de frentes de ondas, 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, 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 um 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**:

$$C(\omega) = \int_0^\omega \cos\left(\frac{\pi\tau^2}{2}\right) d\tau \text{ e } S(\omega) = \int_0^\omega \sin\left(\frac{\pi\tau^2}{2}\right) d\tau.$$

Em 1816, partindo da idéia de que só havia interferência entre ondas luminosas oriundas de uma mesma fonte, Fresnel e Arago tentaram, sem sucesso, interferir os raios ordinário e extraordinário decorrentes da dupla refração. Nessa experiência, observaram que esses raios estavam polarizados em planos perpendiculares. Imediatamente, Arago comunicou essa observação a Young.

Em 1816, Biot sugeriu que o açúcar de cana e o açúcar de beterraba eram quimicamente idênticos, uma vez que eles produziam o mesmo efeito sobre a luz polarizada.

Em 1816-1817, nos *Annales de Chimie et de Physique 5*, o matemático francês Pierre Charles François Dupin (1784-1873) generalizou o teorema demonstrado

por Malus, em 1808, sobre reflexão e refração de feixes homocêntricos em uma dada superfície, ao demonstrar que o mesmo é verdadeiro para qualquer congruência normal após qualquer número de reflexões.

Em 12 de Janeiro de 1817, Young escreveu uma carta a Arago na qual apresentou a hipótese audaciosa sobre a transversabilidade da onda de luz, para poder explicar a experiência realizada por Arago e Fresnel sobre a não possibilidade da interferência dos raios ordinário e extraordinário observados na dupla refração.

Em Março de 1817, a Academia Francesa de Ciências propôs o estudo matemático da difração da luz como tema para o Prêmio de Física de 1818. A Comissão de Julgamento era composta dos seguintes franceses: os físicos Arago, Biot, Laplace e Siméon Dennis Poisson (1781-1840) e o químico Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850).

Em 1817, nos *Annalen der Physik 56*, Fraunhofer publicou o resultado de suas pesquisas sobre as raiais do espectro solar.

Em 29 de Abril de 1818, Young voltou a escrever para Arago ratificando sua hipótese sobre a transversabilidade da onda luminosa.

Em 22 de Setembro de 1818, Biot anunciou na Academia Francesa de Ciências a “Lei da rotação recíproca aos quadrados dos comprimento dos acessos”, mais tarde conhecida como a **lei da dispersão rotatória de Biot**:  $\alpha = \frac{k}{\lambda^2}$ , onde  $\alpha$  é o ângulo de rotação sofrido pela dispersão de uma onda luminosa de comprimento  $\lambda$ , ao atravessar uma placa cristalina. Ao falar em “acessos”, Biot claramente indicava sua preferência pela teoria corpuscular de Newton, ao invés da teoria ondulatória de Huygens.

Em 1818, Poisson usou a teoria da difração de Fresnel para conjecturar a existência de um “ponto brilhante” no centro da sombra projetada por um pequeno disco circular. Essa conjectura foi imediatamente confirmada experimentalmente por Arago. Em vista disso, a Academia Francesa de Ciências concedeu o prêmio de 1818 a Fresnel, devido a sua famosa *Mémoire Couronné* sobre a Teoria da Difração da Luz.

Em 1818, nos *Annales de Chimie et de Physique 9*, Fresnel publicou um trabalho no qual aventou a possibilidade do movimento da Terra influir na luz.

Em 1819, nas *Annales de Chimie et de Physique, 10* Fresnel e Arago explicaram o resultado da experiência

que haviam realizado em 1816, qual seja, a impossibilidade de interferência entre os raios ordinário e extraordinário decorrentes da dupla refração. Tal impossibilidade era devido à transversibilidade do raio luminoso.

Em 1819, Fraunhofer descobriu o **princípio da grade (rede) de difração** que se refere 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:  $d \ll r$ . Esse princípio é caracterizado pela expressão (na atual notação):  $d \sin \theta = n \lambda$ , onde  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$  indica a posição dos máximos da figura de difração,  $\theta$  é a direção desses máximos, e  $\lambda$  é comprimento de onda da luz que passa pela mesma. Assim, baseado nesse princípio, construiu uma **grade (rede) de difração** com  $d = 3 \mu\text{m}$  ( $1 \mu = 10^{-6}$  metros).

Em 1819, o físico russo-alemão Thomas Johann Seebeck (1770-1831) repetiu a experiência de Herschel sobre radiação solar e observou que a maior temperatura da mesma se encontrava na região infravermelha, quando o espectro solar era produzido com um prisma de **flint-glass**; porém, a maior temperatura se encontrava na região vermelha, quando o espectro solar era produzido por um prisma de **crown-glass**.

Em 1821, o engenheiro francês Claude Louis Marie Henri Navier (1785-1836) submeteu à Academia Francesa de Ciências uma *Mémoire* na qual apresentou um estudo sobre as propriedades elásticas dos corpos sólidos. Nesse estudo, supôs que a matéria sólida consistia de inumeráveis partículas (massas pontuais, átomos) que exercem entre si forças ao longo da reta que as une; com isso, deduziu a equação de movimento para o vetor deslocamento  $\vec{e}$  de uma partícula, e na qual introduziu a **constante de rigidez n**, que representa o poder de resistir à distorção apresentada pelo meio elástico.

No dia 19 de Novembro de 1821, Fresnel apresentou uma *Mémoire* à Academia Francesa de Ciências na qual expôs sua explicação sobre a dupla refração observada nos cristais uniaxiais (Bartholinus, 1669) e nos cristais biaxiais (Brewster, 1815). Assim, para Fresnel, só havia um meio luminífero nesses cristais, e as velocidades de propagação (**v**) dos dois raios na dupla refração nada mais eram do que as raízes de uma equação quadrática que representava uma superfície de duas-folhas (mais

tarde conhecidas como **superfícies de onda de Fresnel**), folhas essas que eram plano-polarizadas e perpendiculares entre si, definidas por:  $\frac{\ell^2}{\epsilon_1 - v^2} = \frac{m^2}{\epsilon_2 - v^2} = \frac{n^2}{\epsilon_3 - v^2}$ , onde  $(\ell, m, n)$  indicam os cossenos diretores da normal ao plano da onda luminosa, e  $\frac{1}{\epsilon_1}, \frac{1}{\epsilon_2}, \frac{1}{\epsilon_3}$  denotam, respectivamente, as forças elásticas de restituição para deslocamentos unitários. Ainda segundo Fresnel, se  $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$  e  $\epsilon_1 \neq \epsilon_2 = \epsilon_3$ , teremos, respectivamente, as ondas esféricas e esferoidais da construção de Huygens para os cristais uniaxiais. Se  $\epsilon_1 \neq \epsilon_2 \neq \epsilon_3$ , teremos as ondas elipsoidais de Fresnel para os cristais biaxiais.

No dia 26 de Novembro de 1821, Fresnel apresentou à Academia Francesa de Ciências um suplemento à sua *Mémoire* do dia 16 de Novembro, no qual esboçou uma primeira explicação para a **dispersão da luz**, levando em conta a estrutura molecular da matéria. Por essa mesma época, Fresnel apresentou a hipótese de que o éter luminífero cartesiano era parcialmente arrastado pela matéria. Em vista disso, calculou a velocidade da luz (**v**) em um meio em movimento, encontrando o seguinte resultado:  $v = c_1 + \frac{\mu^2 - 1}{\mu^2} \omega$ , onde  $c_1$  representa a velocidade da luz no meio em repouso ( $c_1 = \frac{c}{\mu}$ ),  $\mu$  é o índice de refração do meio,  $\omega$  é a velocidade do meio e **c** é a velocidade da luz no vácuo.

Em 1821-1822, Fraunhofer apresentou à Academia de Ciências de Munique o resultado de suas pesquisas sobre a determinação dos comprimentos de onda ( $\lambda$ ) das raiais (linhas) do espectro solar, calculados por intermédio da grade de difração que construía em 1819. Observe-se que esse tipo de difração no qual a fonte luminosa está muito distante do objeto difrator ficou conhecido como **difração de Fraunhofer**.

Em 1822, o astrônomo inglês Sir John Frederick William Herschel (1792-1871), filho de Herschel, fez uma descoberta análoga à de Biot e Arago, isto é, descobriu duas estruturas cristalográficas do quartzo capazes de girar o plano de polarização da luz.

Em 1823, nos *Annalen der Physik* 74, Fraunhofer publicou seus trabalhos sobre a passagem da luz através de uma grade de difração.

Em 1825, o astrônomo belga Lambert Adolphe J. Quételet (1796-1874) e, independentemente, o matemático francês Joseph Diez Gergonne (1771-1859) generalizaram o teorema demonstrado por Malus, em

1808, e Dupin, em 1817, sobre reflexão e refração de feixes homocêntricos em uma dada superfície, ao demonstrarem que o mesmo é verdadeiro para qualquer congruência normal após qualquer número de refrações. Esse teorema, que mais tarde ficou conhecido como **Teorema de Malus-Dupin**: -“Um grupo de ondas preserva sua congruência normal, após qualquer número de reflexões e refrações” -, foi importante para o desenvolvimento ulterior da Óptica Geométrica, pois representou uma técnica alternativa ao princípio formulado pelo físico holandês Christiaan Huygens (1629-1695), em 1690, na construção de imagens ópticas, pois o mesmo permite seguir a trajetória da luz através de vários meios isotrópicos.

Em 1827, nas *Mémoires de l'Académie* 7 foi publicada a *Mémoire* de Navier sobre seu modelo para explicar a elasticidade dos corpos sólidos, proposto em 1821.

Em 1827, nas *Mémoires de l'Académie* 7, Fresnel apresentou novos trabalhos sobre a dupla refração.

Em 1827, o físico inglês Sir Charles Wheatstone (1802-1875) usou um dispositivo que havia inventado - o **caleidofone** -, para estudar as vibrações de um bastão com uma extremidade presa e a outra livre. Tais vibrações se tornavam bastante visuais, quando a extremidade livre recebia um feixe luminoso dirigido ao dispositivo.

Em 1828, o matemático francês Augustin Louis Cauchy (1789-1857) apresentou sua teoria elástica da matéria sólida. Além da **constante de rigidez n** considerada por Navier (1821/1827), ele introduziu uma outra constante, qual seja, o **módulo de compressão k**, que representa a relação entre a pressão aplicada em um corpo e a compressão volumétrica daí resultante. Em vista disso, apresentou uma outra equação diferencial satisfeita pelo vetor deslocamento  $\vec{e}$ .

Em 1828, nas *Mémoires de l'Académie* 8, Poisson resolveu a equação diferencial satisfeita pelo vetor deslocamento  $\vec{e}$  da teoria de Navier-Cauchy, fazendo a seguinte hipótese:  $\vec{e} = \vec{b} + \vec{c}$ , em que o vetor  $\vec{b}$  seria **irrotacional** e o vetor  $\vec{c}$ , **solenoidal**, isto é: (na linguagem atual)  $\nabla \times \vec{b} = 0$  e  $\nabla \cdot \vec{c} = 0$ . Com essa consideração, 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  $\sqrt{\frac{n}{\rho}}$  (sendo  $\rho =$

densidade), e a longitudinal  $\vec{b}$ , com velocidade igual a  $\sqrt{k + \frac{4n}{3}}$ , sendo **k** o módulo de compressão e **n** a constante de rigidez.

Em 1829, o físico escocês William Nicol (1768-1851) usou dois cristais de espato-de-islândia, colados diagonalmente com bálsamo-do-canadá (uma substância transparente com índice de refração  $\mu = 1.55$ ) e, com esse dispositivo, conseguiu eliminar o raio ordinário da dupla refração, 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.

Em 1829, o físico francês Jacques Babinet (1794-1872) sugeriu que o comprimento de onda de uma determinada luz fosse usada como unidade de comprimento.

Em 1830, Cauchy apresentou sua famosa Teoria da Dispersão da Luz, tomando como base a estrutura molecular da matéria proposta por Fresnel. Ainda nesse mesmo ano, Cauchy começou a desenvolver sua teoria elástico-óptica para poder estudar as propriedades ópticas dos cristais.

Em 1830, Brewster observou 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 elipticamente.

Em 1832, o físico e matemático irlandês Sir William Rowan Hamilton (1805-1865) previu a **refração cônica**, ao considerar as superfícies de onda de Fresnel.

Em 1832, Biot observou que uma solução de ácido tartárico tinha a propriedade de girar a luz polarizada.

Em 1833, o físico irlandês Humphrey Lloyd (1800-1801) confirmou experimentalmente a refração cônica prevista teoricamente por Hamilton, em 1832.

Em 1833, nas *Transactions of Cambridge Philosophical Society* 4, o astrônomo inglês Sir George Biddell Airy (1801-1892) demonstrou 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, uma vez que pela hipótese corpuscular, deveria haver formação desses anéis. Com efeito, segundo a hipótese corpuscular, as cores (“anéis

de Newton”) em placas delgadas seriam produzidas somente pela luz refletida pela segunda superfície da placa, enquanto que pela hipótese 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 das cores, segundo a teoria ondulatória.

Em 1834, Wheatstone desenvolveu uma técnica para medir a velocidade da descarga elétrica através de um fio, observando a reflexão da mesma em um espelho girante. Com essa técnica, ele encontrou o valor de  $\sim 400.000 \frac{km}{s}$ , para aquela velocidade.

Em 1835, nas *Transactions of Cambridge Philosophical Society* 5, Airy demonstrou matematicamente, e pela primeira vez, a difração de Fraunhofer através de aberturas e obstáculos circulares - o hoje famoso **disco de Airy** - e explicando, desse modo e formalmente, as suas regiões claras e escuras.

Em 1835, F. M. Schewerd obteve um resultado análogo ao de Airy substituindo um obstáculo circular por um polígono de 180 lados.

Em 1835, o físico escocês James MacCullagh (1809-1847) e, independentemente, o físico alemão Franz Ernst Neumann (1797-1895) estenderam as leis da reflexão da luz aos meios cristalinos, assumindo que as vibrações do éter luminífero elástico cartesiano, eram perpendiculares ao plano de polarização da luz.

Em 1836, nas *Proceedings of Royal Irish Academy* 1, MacCullagh apresentou os primeiros resultados de uma teoria sobre a reflexão metálica, na qual a idéia central é a de que o índice de refração  $\mu$  é uma quantidade complexa:  $\mu = \nu(1 - \kappa\sqrt{-1})$ , onde  $\nu$  e  $\kappa$  são duas constantes características do metal.

Em 1836, nas *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 2, Cauchy publicou um trabalho no qual utilizou sua teoria elástico-óptica para estudar a refração da luz, principalmente a causa da existência do índice de refração. Ainda nesse trabalho, ao assumir que a densidade  $\rho$  do éter luminífero elástico cartesiano é a mesma para todos os meios, Cauchy obteve as leis da reflexão e da refração que haviam sido demonstradas por Fresnel.

Em 1837, nas *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 4 Babinet publicou um trabalho no qual enunciou o seguinte teorema (mais

tarde conhecido como **princípio de Babinet**): - “Dois **screens** difratores são ditos **complementares** quando as regiões transparentes sobre um deles correspondem exatamente às regiões opacas do outro e vice-versa”.

Em 1838, Arago sugeriu que a técnica dos espelhos girantes desenvolvida por Wheatstone, em 1834, poderia ser usada para comparar as velocidades da luz no ar e na água.

Em 1838, nas *Transactions of Cambridge Philosophical Society* 7, o matemático inglês George Green (1793-1841) apresentou sua teoria elástico-sólida para explicar a reflexão da luz.

Em 1838, nas *Mémoires de l'Académie des Sciences de l'Institut de France* 15, Biot publicou um trabalho no qual registrou as experiências que realizou sobre a potência rotatória do ácido tartárico em diferentes condições. Em virtude dessas experiências, Biot acentuou que esse ácido constituía um exceção notável de sua lei do inverso do quadrado dos “acessos”, enunciada em 1818. Desse modo, Biot dividiu as substâncias opticamente ativas em duas classes: uma que obedece sua lei e a outra que não obedece.

Em 1838 e 1839, nas *Comptes rendus* 7; 8, Cauchy desenvolveu uma teoria análoga à de MacCullagh (1836) sobre a reflexão metálica.

Em 1841, o matemático alemão Johann Friedrich Carl Gauss (1777-1855) publicou seu clássico livro sobre Óptica Geométrica, no qual expôs o conceito de distância focal e desenvolveu fórmulas para o cálculo da posição e do tamanho de imagens formadas por lentes com determinadas distâncias focais.

Em 1841, Biot pensou haver descoberto um novo fenômeno de polarização, que dependia da existência das diferentes camadas de um cristal, e ao qual chamou de **polarização lamelar**.

Em 1842, nas *Comptes rendus* 15, Cauchy publicou seu estudo da Teoria da Difração da Luz, no qual apresentou representações em séries divergentes das integrais de Fresnel.

Em 1842, o físico austríaco Christian Johann Doppler (1803-1853) descobriu que o som emitido por uma fonte sonora que se desloca na direção do observador parece mais agudo que o emitido por uma fonte que se desloca com o observador e o som de uma fonte que se afasta do observador, parece mais grave. Em vista dessa

observação, Doppler concluiu que esse mesmo efeito ocorreria com as ondas luminosas. Essa observação foi publicada em *Abh. Kögl. böhm. Gesellsch. 2*.

Em 1843, nas *Proceedings of Royal Irish Academy 2*, MacCullagh completou seu estudo sobre a reflexão metálica, iniciada em 1836.

Em 1844, o óptico francês Jean Baptiste François Soleil (1798-1878) construiu aparelhos baseados na Teoria da Difração de Fresnel. Com eles, produziu anéis de difração coloridos, com centro claro ou escuro.

Em 1844, experiências realizadas pelo químico alemão Eilhardt Mitscherlich (1794-1863) demonstraram que enquanto os cristais de sal de ácido tartárico comercial ( $C_4H_6O_6$  - ácido obtido dos **tártaros** - depósitos que se formam na fermentação da uva) apresentavam atividade óptica, isto é, giravam o plano de polarização da luz que os atravessava, o mesmo não acontecia com os cristais do ácido racêmico (da palavra latina **racemus**, que significa uva), ácido até então desconhecido e que havia sido descoberto, também nos **tártaros** (daí esse ácido ser ainda conhecido como paratartárico) dos processos industriais vinícolas na região de Alsácia.

Em 1845, nas *Comptes rendus 21*, Henri Soleil apresentou seu compensador de Babinet modificado, no qual introduziu uma lâmina de faces paralelas de tal modo que seu eixo óptico fosse o mesmo do da parte de baixo do de Babinet. Esse **compensador de Soleil** apresentava 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.

Em 1845, nas *Transactions of Cambridge Philosophical Society 8*, o físico e matemático inglês Sir George Gabriel Stokes (1819-1903) apresentou seu modelo para o éter luminífero cartesiano, no qual supôs ser o mesmo do tipo piche ou cera de sapateiro, que é resistente a uma força súbita, porém cede a forças lentas e persistentes. Segundo esse modelo, 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, desse modo, o primeiro a considerar um éter móvel.

Em 1845, o meteorologista holandês Christoph Hendrik Diederik Buys Ballot (1817-1890) comprovou o **efeito Doppler** (1842) em uma experiência realizada

na linha férrea Utrecht-Maarsen. Com efeito, o som de um trompete colocado em um vagão-plataforma de um trem em movimento nessa linha, se tornava mais alto para um observador que se encontrava próximo ao trilho, na medida que o trem se aproximava dele, e diminuía na medida que o trem se afastava dele.

Em 1846, na *Philosophical Magazine 28*, Stokes deduziu a fórmula para o cálculo da velocidade da luz em um meio móvel, encontrando o mesmo resultado obtido por Fresnel, em 1821.

Em 1848, o físico francês Armand Hyppolyte Louis Fizeau (1819-1896) explicou a variação do comprimento de onda da luz vinda de uma estrela e mostrou que esse resultado poderia ser usado para medir as velocidades relativas das estrelas que estão na mesma linha do sinal, confirmando, desse modo, a previsão que Doppler fizera em 1842. Em vista disso, esse efeito passou a ser conhecido como **efeito Doppler-Fizeau**.

Entre 1848 e 1850, o químico francês Louis Pasteur (1822-1895) ao estudar, com auxílio de um microscópio, cristais do ácido racêmico, verificou haver dois tipos deles (sendo um a imagem em espelho (especular) do outro), sendo que um deles girava o plano de polarização da luz em sentido horário e o outro em sentido anti-horário. Em vista disso, classificou as moléculas que compunham esses cristais estudados em dois tipos: **mão-direita (levógira)** e **mão-esquerda (dextrógira)**. (É oportuno observar que como o ácido racêmico é constituído de metade de cada tipo desses cristais, ele não apresentava atividade óptica, explicando assim a observação de Mitscherlich, feita em 1844.)

Em 1849, nas *Comptes rendus 29*, Babinet descreveu experiências realizadas com um dispositivo (mais tarde conhecido como **compensador de Babinet**) constituído de dois cristais de espato-de-islândia, cortados diagonalmente e colados com seus eixos ópticos ortogonais. Nessas experiências, Babinet estudou a luz polarizada, quer circularmente, quer elipticamente.

Em 1849, nas *Comptes rendus 29*, Fizeau descreveu uma experiência na qual determinou 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 velo-

cidade da roda dentada era 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  $315.000 \frac{km}{s}$ .

Em 7 de Janeiro de 1849, o físico francês Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) comunicou à *Société Philomathique* o resultado de uma experiência que realizou na qual observou que o par de linhas brilhantes obtidas aquecendo o Sódio, com seu arco elétrico, coincidia com a linha D de Fraunhofer. No entanto, apesar dessa observação, Foucault não atribuiu tal linha aquele metal.

Em 1850, nas *Comptes rendus 30*, Foucault descreveu o resultado de uma experiência que realizou para determinar a velocidade da luz na água, pois acreditava ser ela menor do que no ar. Nessa experiência, ele usou a sugestão feita por Arago, em 1838.

Em 1850, nas *Comptes rendus 30*, Fizeau e o físico francês Louis Breguet (1804-1883) descreveram o resultado de uma experiência na qual observaram ser a velocidade da luz na água menor que no ar. Nessa experiência, eles usaram a sugestão apresentada por Arago, em 1838.

### Segunda Metade do Século 19 (1851-1900)

Em 1851, Fizeau realizou uma experiência na qual determinou a velocidade da luz na água em movimento, confirmando a fórmula teórica de Fresnel (1821)- Stokes (1846). Nessa experiência, Fizeau mediu o deslocamento das franjas de interferência formada pela luz ao passar por uma coluna de água em movimento.

Em 1851, o fisiologista e físico alemão Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) aperfeiçoou a teoria das cores de Young. Substituindo o violeta pelo azul, afirmou que 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.

Em 1852, o matemático e engenheiro francês Gabriel Lamé (1795-1870) afirmou que “a existência do fluido etéreo é incontestavelmente demonstrada pela propagação da luz nos espaços planetários e pela explicação tão simples, tão completa, dos fenômenos de difração da teoria das ondas”.

Em 1852, nos *Annalen der Physik 86*, o físico e mineralogista austríaco Wilhelm Karl Haidinger (1795-1871) observou que na luz linearmente polarizada a direção de vibração no éter deve ser perpendicular à direção de propagação. Ele também observou que a luz polarizada azul era percebida pelo olho humano, no céu setentrional.

Em 1852-1853, Stokes demonstrou que os raios ultravioletas podiam ser refletidos, refratados, interferidos e polarizados, ao interpretar o fenômeno da **fluorescência** (nome cunhado por ele), isto é, a emissão de luz violeta quando a **fluorita** (Fluoreto de Cálcio) é iluminada por luz ultra-violeta.

Em 1857, na *Philosophical Magazine 14*, o físico e químico inglês Michael Faraday (1791-1867) foi o primeiro a demonstrar que a cor vermelha observada no vidro conhecido como “vidro de rubi-ouro”, era devido à presença de pequenas partículas de ouro no mesmo.

Em 1857, o filósofo escocês William Swan (1818-1894) observou que a linha D de Fraunhofer só aparece no espectro da luz de uma lâmpada de álcool, quando na presença do Sódio. Apesar dessa observação, semelhantemente a Foucault, Swan não relacionou aquela linha com esse metal.

Em 1859, nos *Annales de Chimie et de Physique 57*, Fizeau publicou o resultado de sua experiência realizada em 1851, na qual determinou a velocidade da luz na água em movimento.

Em 1859, o físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) demonstrou que as cores do espectro solar poderiam ser obtidas combinando-se o vermelho, o verde e o azul em várias proporções. Esse trabalho permitiu a invenção da fotografia colorida.

Em 1859, Foucault desenvolveu um método simples para testar defeitos nas superfícies dos espelhos dos telescópios.

Em 1862, nas *Comptes rendus 55*, Foucault descreveu o resultado de uma experiência que realizou para determinar a velocidade da luz no ar, na qual substituiu a roda dentada do aparelho usado por Fizeau, por um espelho giratório, encontrando então para aquela velocidade o valor de  $298.000 \frac{km}{s}$ .

Em 1862, nos *Annales de Chimie et Physique 66*, Fizeau descreveu a construção de um aparelho que ser-

viria para calcular o deslocamento das franjas de interferência da luz - o **interferômetro de Fizeau**.

Em 1862, o físico e químico austríaco Johann Joseph Loschmidt (1821-1895) publicou o livro intitulado *Zur Constitution des Aethers (Sobre a Constituição do Éter)*, no qual formulou uma teoria matemática para o éter luminífero, baseada na teoria da elasticidade desenvolvida pelo matemático e engenheiro francês Gabriel Lamé (1795-1870), em 1852. Assim, de acordo com Loschmidt, cada molécula da matéria era envolvida pelo éter, cuja densidade variava inversamente com a distância ao centro da molécula. Ainda para Loschmidt, a matéria e o éter se atraíam, enquanto as partículas de éter se repeliam; o éter era o responsável pela troca de energia no Universo; e as forças de atração e repulsão entre as esferas de éter (forças sumarizadas por Loschmidt com o termo **afinidade**), eram as “almas” dos átomos. Por fim, para Loschmidt, todos os fenômenos naturais eram decorrentes da ação recíproca dos átomos por meio de suas esferas de éter.

Em 1865, na *Philosophical Magazine 29*, Maxwell apresentou seu famoso trabalho no qual demonstrou que **a luz é uma onda eletromagnética**, que tinha como suporte o éter luminífero cartesiano.

Em 1868, o físico alemão Ernst Abbé (1840-1905) inventou um sistema de lentes aplanacromáticas para microscópios, que eliminava, nas lentes até então em uso, a aberração esférica, o **coma** e a distorção da luz colorida. O **coma**, é uma aberração de uma lente ou espelho no qual a imagem de um ponto fora de seu eixo tem a aparência de um cometa, e é provocada pela difração da luz.

Em 1869, o físico alemão Carl Neumann (1832-1925) deduziu novas propriedades para o éter elástico, ao considerar várias hipóteses sobre as condições de fronteira entre os meios refringentes imersos nele.

Em 1870, Abbé introduziu um condensador no microscópio, para aumentar e uniformizar a iluminação.

Em 1870, nos *Annalen der Physik und Chemie 141*, o físico dinamarquês Christian Christiansen (1843-1917) descreveu o resultado de uma experiência que realizou na qual observou a **dispersão anômala** da luz (variação do índice de refração ( $\mu$ ) com a frequência ( $\nu$ ) da luz:  $\mu(\nu)$ ), analisando as raias ou linhas de Fraunhofer em uma solução alcoólica com 18,8 por cento de anilina. Na dispersão anômala (ao contrário da **dis-**

**persão normal**), luz de maior frequência tem velocidade maior do que a de menor frequência. Por exemplo, a luz violeta tem maior velocidade do que a luz vermelha. Assim, quando a luz branca (composição de todas as cores) atravessa um meio no qual  $\mu(\nu)$ , a luz violeta refrata menos do que a vermelha.

Em 1871, nos *Annalen der Physik und Chemie 142*, o físico alemão August Adolph Eduard Eberhard Kundt (1839-1894) confirmou a descoberta da dispersão anômala da luz observada por Christiansen, no ano anterior.

Em 1871, na *Philosophical Magazine 41*, o físico inglês John William Strutt (Lord Rayleigh) (1824-1908; Prêmio Nobel de Física (PNF), 1904) também apresentou contribuições análogas às de Carl Neumann para o entendimento do éter luminífero cartesiano.

Em 1873, nas *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences 76*, o físico francês Jules Antoine Lissajous (1822-1880) descreveu o **fonoptômetro**: um microscópio com um diapasão preso a sua objetiva. Esse aparelho foi inventado por Lissajous para estudar os movimentos periódicos ou contínuos. Assim, as vibrações de um objeto se combinam às da lente da objetiva e podem, portanto, ser analisadas em termos das “figuras de Lissajous” produzidas.

Em 1873, nos *Archiv. f. Mikroskopische Anat. 9*, Abbé apresentou sua teoria da formação de imagens nos microscópios, com iluminação coerente.

Em 1874, os químicos, o holandês Jacobus Henricus van't Hoff (1852-1911; Prêmio Nobel de Química (PNQ), 1901) e, independentemente, o francês Joseph Aquille le Bel (1847-1930) observaram uma relação existente entre a atividade óptica dos cristais orgânicos e sua estrutura molecular.

Em 1874, no *Journal de Physique 3*, o físico francês Marie Alfred Cornu (1841-1902) relacionou as integrais de Fresnel com as propriedades geométricas de uma espiral - a famosa **espiral de Cornu** - que nada mais é do que a representação, no plano complexo, da curva  $B(\omega) = C(\omega) + iS(\omega)$ , com  $\omega$  tomando todos os valores de 0 até  $+\infty$ . Ainda nesse ano de 1874, Cornu usou um dispositivo semelhante ao de Fizeau (porém com 200 dentes) e obteve o valor de  $295.000 \frac{km}{s}$  para a velocidade da luz no ar.

Em 1875, na *Philosophical Magazine* 50, o físico escocês John Kerr (1824-1907) apresentou o resultado de uma experiência na qual observou que o vidro tornava-se birrefringente, sob um intenso campo elétrico.

Em 1876, na Reunião Anual da Sociedade Britânica para o Progresso da Ciência, realizada em Glasgow, Escócia, Kerr apresentou o resultado de uma experiência na qual observou que um feixe de luz plano polarizada era refletido pelo pólo de um eletroímã, ou seja, quando o eletroímã era ativado, o feixe tornou-se elipticamente polarizado, com o eixo maior girando em torno da direção original. Este é o famoso **efeito eletro-óptico** ou **efeito Kerr**.

Em 1878, no *American Journal of Science* 15, o físico germano-norte-americano Albert Abraham Michelson (1852-1931; PNF, 1907) descreveu uma experiência que realizou para determinar a velocidade da luz no ar, usando um dispositivo semelhante ao de Fizeau-Foucault.

Em 1879, Abbé descobriu a célebre **relação de seno de Abbé** que deve ser satisfeita por uma lente para produzir uma imagem nítida, sem a distorção causada pela aberração de esfericidade e pelo **coma** (este, é uma aberração de uma lente ou espelho no qual a imagem de um ponto fora de seu eixo tem a aparência de um cometa, e é provocada pela difração da luz). Essa relação de Abbé é dada por:  $\frac{\text{sen } u}{\text{sen } u'} = M$ , onde  $u$  e  $u'$  são, respectivamente, os ângulos da base de um triângulo formado pelos pontos objeto O e imagem O', e um ponto P qualquer da lente, e  $M = \frac{\ell'}{\ell}$ , com  $\ell = \overline{OP}$  e  $\ell' = \overline{OP'}$ .

Em 1880, nas *Philosophical Transactions of the Royal Society* 171, o físico irlandês George Francis FitzGerald (1851-1901) publicou um trabalho no qual tratou matematicamente o **efeito Kerr**.

Em 1881, no *American Journal of Science* 22, Michelson descreveu o aparelho que havia inventado - o **interferômetro** - com o objetivo de testar a existência do éter luminífero cartesiano. Nesse aparelho, um raio de luz é dividido em dois ( $r_1$ ,  $r_2$ ) quando incide sobre uma lâmina de vidro P, cuja face posterior é coberta por uma camada fina de prata. O raio  $r_1$  é refletido pela superfície de prata e dirige-se para um espelho  $M_1$  colocado a uma distância  $d$  de P; o raio  $r_2$  atravessa P e atinge o espelho  $M_2$  colocado a mesma distância  $d$  de P. Após a reflexão de  $r_1$  em  $M_1$  esse raio per-

corre a mesma distância  $d$  até a placa P; uma parte dele reflete e a outra atravessa P dirigindo-se para um telescópio manipulado por um observador O. Por sua vez, o raio  $r_2$  após refletir-se em  $M_2$  percorre a mesma distância  $d$  até a placa P; uma parte dele reflete e a outra atravessa P dirigindo-se para o telescópio do observador O. Michelson acreditava que quando esses dois raios chegassem nesse telescópio, haveria um deslocamento das franjas de interferência, quando o interferômetro sofresse uma rotação. Contudo, ele observou apenas um minúsculo deslocamento, indicando ser a presença do éter luminífero cartesiano incompatível com a ciência física vigente à época que, de acordo com a mesma, a Terra deveria caminhar através de um éter imóvel. Como conclusão desse trabalho, Michelson escreveu que: - "A hipótese do éter estacionário está errada".

Em 1882, na *Philosophical Magazine* 13, *Nature* 26, o físico norte-americano Henry August Rowland (1848-1901) descreveu a construção de uma rede de difração com cerca de 14.000 linhas por polegada, com um poder de resolução acima de 150.000.

Em 1882, o astrônomo canadense-norte-americano Simon Newcomb (1835-1909) usou um dispositivo semelhante ao de Fizeau-Foucault para determinar a velocidade da luz no ar.

Em 1883, nos *Annalen der Physik* 18, o físico alemão Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887), apresentou o estudo formal da teoria da difração, que havia desenvolvido no ano anterior. Nesse estudo, corrigiu dois erros históricos: a **onda-para-trás**, decorrente da construção de Huygens e a fase  $\frac{\pi}{2}$  de Fresnel devido à superposição das fases das ondas secundárias das zonas de Fresnel. Contudo, essa teoria refinada de Kirchhoff apresentava uma grande limitação, pois só se aplicava às ondas longitudinais, isto é, as escalares como as sonoras. Desse modo, ela falhava na explicação da difração das ondas luminosas, estas já conhecidas como ondas transversais.

Em 1884, no *Report of British Association for the Advancement of Science*, Michelson apresentou o resultado das experiências que realizou para estudar a transmissão da onda luminosa através de meios altamente dispersivos, principalmente o Disulfido Carbônico ( $CS_2$ ). Nessas experiências, mediu tanto a

velocidade de fase ( $v_f$ ) quanto a velocidade de grupo ( $v_g$ ) da luz. Como assumiu que essas velocidades eram iguais, encontrou resultados bastantes inconsistentes. (Somente em 1904, foi possível entender essas experiências de Michelson, quando Lord Rayleigh demonstrou a distinção entre  $v_f$  e  $v_g$ .)

Em 1884, os alemães, o químico Otto Friedrich Schott (1851-1935), o óptico Carl Zeiss (1816-1888) e o físico Ernst Abbé (1840-1905), fundaram a *Glastechnische Versuchsanstalt* (Fábrica de Vidros). Nessa fábrica, foram fabricados vidros resistentes ao calor, bem como cerca de 100 novos tipos de vidros ópticos, para os quais observou ser importante a relação  $\frac{n}{\nu}$ , onde  $n$  é o índice de refração e  $\nu$  é a **dispersão recíproca** definida por:  $\nu = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}$ , sendo  $n_D$ ,  $n_F$  e  $n_C$ , respectivamente, os índices de refração correspondentes às **linhas de Fraunhofer D, F, C**, cujos comprimentos de onda são dados por:  $\lambda_D = 5892 \text{ \AA}$ ,  $\lambda_F = 4861 \text{ \AA}$  e  $\lambda_C = 6563 \text{ \AA}$ .

Em 1885, nos *Annalen der Physik und Chemie* 25, o matemático e físico suíço Johann Jakob Balmer (1825-1898) publicou um trabalho no qual apresentou uma fórmula empírica para determinar as linhas espectrais do hidrogênio:  $\lambda = h \frac{m^2}{m^2 - n^2} = 3645,6 \times 10^{-7} \frac{m^2}{m^2 - n^2}$  mm. Com essa fórmula, Balmer chegou a calcular a posição de dezenove daquelas linhas na região do espectro luminoso visível, constituindo, assim, o que passou a ser conhecido como **série de Balmer**. (É interessante observar que foi um amigo de Balmer, o Professor Eduard Hagenbach, quem lhe indicou os comprimentos de onda de algumas linhas do espectro do hidrogênio para que ele descobrisse uma relação entre os mesmos.)

Em 1886, nas *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften zu Wien* 93, Loschmidt publicou um trabalho no qual tentou mostrar, usando sua teoria do éter desenvolvida em 1862, que as linhas espectrais decorriam das vibrações das esferas de éter que envolvem os átomos.

Entre 1886 e 1895, Rowland aperfeiçoou sua rede de difração e, desse modo, obteve um espectro solar com mais de 20.000 linhas (raias) de Fraunhofer. Com essas linhas, conseguiu identificar a presença de 36 elementos químicos no Sol.

Em 1887, nas *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* 104, o físico francês Henri Deslandres (1853-1948) publicou um trabalho no qual estudou o espectro de bandas das moléculas, cujas

freqüências ( $\nu$ ) das linhas dentro de uma dada banda, são dadas pela expressão:  $\nu = A + 2Bm + Cm^2$ , onde  $m$  é um inteiro (diferente de zero), e  $A$ ,  $B$  e  $C$  são constantes ajustáveis.

Em 1887, nas *American Journal of Science* 34 e *Philosophical Magazine* 24, Michelson e o químico norte-americano Edward William Morley (1838-1923) descreveram a célebre experiência com o interferômetro, na qual confirmaram o resultado obtido por Michelson em, 1881, qual seja, a presença do éter luminífero cartesiano era incompatível com a ciência física vigente à época, ciência essa calcada na mecânica newtoniana e em seu princípio básico - o **princípio da Relatividade de Galileu**. Essa conclusão baseou-se no seguinte. Nessa experiência, esses dois cientistas usaram uma fonte de luz de comprimento de onda  $\lambda = 5.000 \text{ \AA}$  e um percurso dessa luz por um comprimento de 10 metros conseguido por intermédio de reflexões múltiplas nos braços do interferômetro. Assim, considerando que o interferômetro se deslocou com uma velocidade igual a velocidade da Terra através do éter e em torno do Sol, isto é,  $10 \frac{km}{s}$ , e considerando mais ainda o princípio de Galileu para calcular a velocidade dos raios de luz em cada braço do interferômetro, eles esperavam obter um deslocamento na figura de interferência da ordem de 0,4 franjas, quando o interferômetro sofresse uma rotação de  $90^\circ$ . Michelson-Morley observaram que a figura de interferência permaneceu imóvel. Surpresos com esse resultado (que indicava a incompatibilidade do eletromagnetismo com a física newtoniana), várias experiências foram então realizadas, tanto ao meio-dia, quanto às seis da tarde, assim como, com diferença de seis meses, quando, então, a Terra teria posições simétricas em relação ao “mar de éter”, com o mesmo resultado da primeira: imobilidade da figura de interferência.

Em 1888, na *Philosophical Magazine* 26, o físico escocês William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907) também apresentou contribuições análogas às de Carl Neumann e às de Lord Rayleigh para o entendimento do éter luminífero cartesiano.

Em 1890, o físico sueco Johannes Robert Rydberg (1854-1919) expressou a fórmula de Balmer em termos do número de ondas (inverso do comprimento de onda:  $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda}$ ) e observou, ainda, que as posições das raias es-

pectrais de qualquer elemento químico, apresentavam em seus cálculos um fator numérico constante, fator esse que a partir daí tornou-se conhecido como **constante de Rydberg R**. Esse resultado ficou conhecido como a **fórmula de Rydberg**:  $\bar{\nu} = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{b} - \frac{4}{bm^2} = \bar{\nu}_\infty - \frac{R}{m^2}$ .

Em 1891, no *Abhandlungen der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin 21*, os físicos alemães Carl David Tolmé Runge (1856-1927) e Heinrich Johannes Gustav Kayser (1853-1940) publicaram um trabalho no qual registraram suas pesquisas sobre a espectroscopia dos metais alcalinos (lítio, sódio, potássio, rubídio e céσιο). Eles observaram que todas as linhas espectrais poderiam ser arranjasdas em três séries e descritas por equações da mesma estrutura e relacionadas entre si.

Em 16 de Junho de 1892, na *Nature 46*, o físico inglês Sir Oliver Joseph Lodge (1851-1940) mencionou que FitzGerald havia lhe comunicado uma sugestão para explicar o resultado da experiência de Michelson-Morley, de 1887. Para FitzGerald, qualquer comprimento, que se desloca com velocidade de módulo  $\mathbf{v}$ , contrai-se de um fator  $[1 - (\frac{v}{c})^2]^{\frac{1}{2}}$  na direção de seu movimento. Esse fator, introduzido *ad hoc* aos cálculos do deslocamento da franja de interferência na experiência de Michelson-Morley, explicava o resultado da mesma, porém, sem nenhuma razão física.

Em 26 de Novembro de 1892, Lorentz comunicou à Academia de Ciências de Amsterdam um trabalho no qual adotou a hipótese de FitzGerald sobre a contração do comprimento que, a partir daí, passou a ser conhecida como **contração de FitzGerald-Lorentz**. Esse trabalho de Lorentz foi publicado em *Verlag der Kon. Akademie van Wetenschappen I (1892-1893)*.

Em 1896, Rydberg e, independentemente, o físico germano-inglês Sir Arthur Schuster (1851-1934) mostraram a convergência das frequências de diferentes séries espectrais da mesma substância. Esse resultado ficou conhecido como a **lei de Rydberg-Schuster** e, na atual notação, ela apresenta o seguinte aspecto:

$$\frac{1}{\lambda} = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right).$$

Em 1896, no *Astrophysical Journal 4*, o físico e astrônomo norte-americano Edward Charles Pickering (1846-1919) publicou um trabalho no qual descreveu as experiências que realizou sobre o espectro de algumas estrelas, entre elas a  $\zeta$ -Puppis, e que ficaram conhecidas como as **séries de Pickering**. Note-se que essas séries apresentavam um fato curioso: elas praticamente coincidiam com as séries de Balmer, apenas de maneira alternada, isto é, a primeira série de Balmer ( $H_\alpha$ ) praticamente coincidia com a primeira série de Pickering, no entanto, a segunda de Balmer ( $H_\beta$ ) só correspondia à terceira de Pickering, e assim sucessivamente. Em vista disso, as séries de Pickering eram atribuídas ao hidrogênio. (Registre-se que apenas em 1913, o físico dinamarquês Niels Henrik David Bohr (1885-1962; PNF, 1922) demonstrou que as séries de Pickering eram devidas ao hélio.)

Em 1896, nas *Proceedings of the Royal Society 59*, Lord Rayleigh descreveu a construção de um interferômetro, o qual foi usado para medidas de precisão dos índices de refração de gases.

Em 1896, os físicos franceses Charles Fabry (1867-1945) e Alfred Pérot inventaram um interferômetro - o famoso **interferômetro de Fabry-Pérot** - um tipo de aparelho no qual luz monocromática passa através de um par de placas de vidro semi-prateadas produzindo franjas circulares de interferência. Ao aplicar esse aparelho no estudo do espectro luminoso do Sol e das estrelas, Fabry demonstrou que a radiação solar ultravioleta é filtrada por uma camada de ozônio ( $O_3$ ) situada na parte bem alta da atmosfera.

Em 1899, nos *Annales de Chimie et Physique 16*, Fabry e Pérot descreveram a estrutura fina das linhas espectrais.

Em 1900, Kayser iniciou a publicação de seu *Handbuch der Spektroskopie* no qual publicou suas pesquisas no campo da espectroscopia. (Observe-se que essa obra, composta de 8 volumes, só foi concluída em 1932.)