

Autor: Sergio Carlos Zilio

1: Considerações preliminares

A área de óptica é um campo de estudos fascinante. De maneira simplificada, podemos dizer que ela é o ramo da Física que estuda a propagação da luz e sua interação com a matéria. Em muitas áreas da ciência e tecnologia, o entendimento de determinados conceitos pode ser difícil porque seus efeitos não são facilmente visualizados. Na óptica, entretanto, o simples uso de um laser permite a visualização de um dado efeito como função de vários parâmetros, facilitando o aprendizado. Isto se deve principalmente à coerência, monocromaticidade e colimação da luz proveniente deste instrumento, que permitem a observação de fenômenos tais como interferência e difração, nos quais a natureza ondulatória da luz se manifesta claramente. Entretanto, para se chegar ao desenvolvimento deste dispositivo, e de vários outros que são importantes no nosso cotidiano, um longo caminho foi percorrido e este percurso gerou um histórico bastante rico. Alguns aspectos que merecem destaque estão ligados às ideias sobre a natureza da luz e aos caminhos paralelos que a óptica e o eletromagnetismo trilharam durante séculos. Para se entender um pouco estes fatos, faremos, no transcorrer desta seção, uma breve revisão histórica do desenvolvimento dos conceitos principais ligados à óptica.

Outro fato importante para o qual deve-se chamar a atenção refere-se à analogia existente entre a óptica física e a mecânica quântica. No estado estacionário, ambas são descritas pela mesma equação de ondas e assim, vários fenômenos que se observa num laboratório de óptica podem ser usados para um melhor entendimento da mecânica quântica. Apenas como exemplo, o princípio da incerteza de Heisenberg pode ser verificado num experimento de difração de luz por uma fenda, como veremos no Cap. 9. Similarmente, outros fenômenos nos quais a matéria comporta-se de forma ondulatória encontra seu análogo na óptica física. Desta forma, o aprendizado da mecânica quântica torna-se mais simples com o auxílio da óptica.

Autor: Sergio Carlos Zilio

2: Desenvolvimentos iniciais

Antes do século XVII existia pouco embasamento teórico para os fenômenos ópticos observados. Eram conhecidos alguns elementos tais como lentes e espelhos, mas a teoria descrevendo seu princípio de funcionamento não estava sedimentada. A primeira grande evolução da óptica ocorreu durante o século XVII, quando houve um desenvolvimento significativo da sua formulação matemática, o que possibilitou a explicação dos fenômenos observados até então. Nas duas primeiras décadas daquele século foram introduzidos os sistemas ópticos que combinam duas lentes. O primeiro deles, o telescópio refrativo, foi patenteado em 1608 por Hans Lippershey (1587-1619), um holandês fabricante de óculos. Seu dispositivo utilizava uma ocular côncava, conforme esquematizado na Fig. 1.1. Ouvindo falar desta invenção, Galileu Galilei (1564-1642) construiu seu próprio telescópio e em 1610 descobriu as luas de Júpiter, os anéis de Saturno e a rotação do Sol. Estas descobertas popularizaram este instrumento óptico e a configuração que utiliza a ocular côncava leva hoje o nome de telescópio Galileano. O telescópio com ocular convexa, também mostrado na Fig. 1.1, foi introduzido por Johannes Kepler (1571-1630), que o utilizou para fazer importantes observações astronômicas, que se tornaram conhecidas como as leis de Kepler.

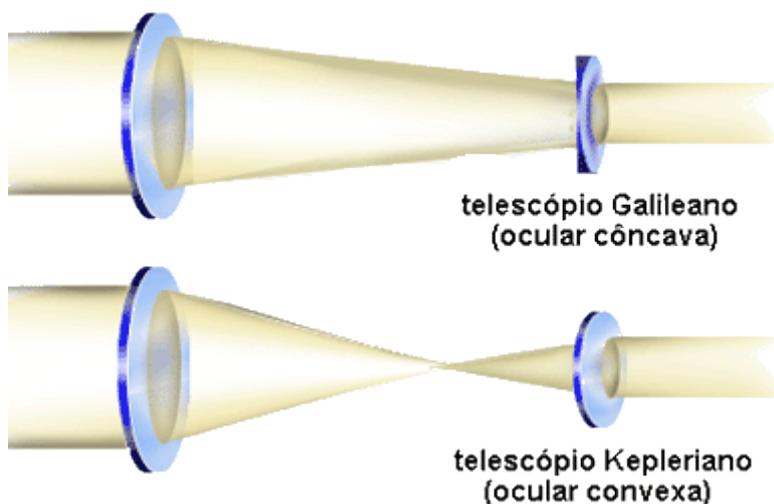


Fig. 1.1 - Tipos de telescópios refrativos

Autor: Sergio Carlos Zilio

O segundo tipo de sistema óptico que combina duas lentes é o microscópio. Ele foi inventado provavelmente pelo holandês Zacharias Janssen (1588-1632) por volta de 1609, na versão possuindo ocular côncava. É interessante notar que a invenção deste instrumento ocorreu praticamente ao mesmo tempo em que a do telescópio. O microscópio com ocular convexa foi introduzido logo a seguir por Francisco Fontana (1580-1656). Além do desenvolvimento tecnológico destes instrumentos refrativos de duas lentes, começou-se neste período a elaboração da formulação matemática que permite o cálculo da propagação dos raios. Em seu livro *Dioptrice*, de 1611, Kepler apresenta a lei de refração para pequenos ângulos, que estabelece que os ângulos de incidência e refração são proporcionais. Isto possibilitou o tratamento matemático de sistemas ópticos simples, compostos de lentes finas. Neste mesmo trabalho, ele introduz de forma pioneira, o conceito de reflexão total interna. Apesar deste sucesso inicial, podemos dizer que a maior contribuição para o desenvolvimento da óptica nesta primeira metade do século XVII deveu-se a Willebrord Snell (1591-1626), que em 1621 introduziu a lei da refração (lei dos senos). O conhecimento desta lei deu origem à óptica aplicada moderna, permitindo o cálculo de sistemas ópticos mais complexos, não tratáveis pela lei de refração para pequenos ângulos, introduzida por Kepler. A lei de Snell foi deduzida pela primeira vez em 1637, por René Descartes (1596-1650), que lançou mão de uma formulação matemática baseada em ondas de pressão num meio elástico. Aparentemente, esta foi a primeira vez em que a luz foi tratada como algum tipo de onda.

Outra dedução interessante da lei de Snell foi realizada por Pierre de Fermat (1601-1665) em 1657, utilizando o princípio do tempo mínimo. Anteriormente a Fermat, Heron, de Alexandria, havia introduzido o princípio da menor distância, que previa que os raios andariam sempre em linha reta, que é a menor distância entre dois pontos. Com o princípio de Fermat, existe a possibilidade do raio executar uma trajetória curva se o meio não for homogêneo. Abordaremos este ponto com maiores detalhes no próximo capítulo, apresentando inclusive outras formulações matemáticas, além do princípio de Fermat.

Autor: Sergio Carlos Zilio

3: Óptica ondulatória versus corpuscular

Na segunda metade do século XVII, descobertas interessantes foram realizadas e novos conceitos foram introduzidos. O fenômeno de difração foi descoberto por Francesco Maria Grimaldi (1618-1663), através da observação de bandas de luz na sombra de um bastão iluminado por uma pequena fonte. Em seguida, Robert Hooke (1635-1703) refez os experimentos de Grimaldi sobre difração e observou padrões coloridos de interferência em filmes finos. Ele concluiu, corretamente, que o fenômeno observado devia-se à interação entre a luz refletida nas duas superfícies do filme, e propôs que a luz originava-se de um movimento ondulatório rápido no meio, propagando-se a uma velocidade muito grande. Surgiam assim, as primeiras ideias da teoria ondulatória, ligadas às observações de difração e interferência, que eram conhecidas no caso das ondas sobre uma superfície de águas calmas. Contribuições relevantes para a óptica foram feitas por Isaac Newton (1642-1727). Ele realizou experimentos de dispersão num prisma em 1665, o que o levou à conclusão sobre a composição espectral da luz branca. Também introduziu a teoria corpuscular que afirmava que "a luz é composta de corpos muito pequenos, emitidos por substâncias brilhantes". Esta sua afirmação foi certamente baseada no fato de que raios de luz se propagam em linhas retas num meio homogêneo e daí a analogia com o movimento retilíneo que uma partícula descreve quando não existe força agindo sobre ela. Esta teoria corpuscular explicava, por exemplo, a formação de sombras, de imagens geradas por uma lente, etc.. Nesta época Newton aceitava as duas teorias, tanto a corpuscular como a ondulatória. A dispersão de luz por um prisma era explicada por ele com sendo devida à excitação de ondas no meio, por corpúsculos de luz; cada cor correspondia a um modo normal de vibração, sendo que a sensação de vermelho correspondia às vibrações mais longas, enquanto que o violeta, às mais curtas. Com o passar do tempo, Newton inclinou-se para a teoria corpuscular, provavelmente devido à dificuldade de se explicar a propagação retilínea da luz através de ondas que se estendiam em todas as direções. Newton também introduziu o telescópio por reflexão em 1668, para contornar os problemas de aberração cromática existentes nos

Autor: Sergio Carlos Zilio

telescópios por refração. Ele acreditava que estas aberrações presentes nas lentes jamais poderiam ser evitadas, o que provou-se não ser verdade com a introdução do dubleto acromático no século XVIII. Christiaan Huygens (1629-1695), que era contemporâneo de Newton, inclinava-se para a interpretação ondulatória da natureza da luz. Esta concepção explicava certos fenômenos, como por exemplo, a interferência e a difração dos raios de luz. Ele estendeu a teoria ondulatória com a introdução do conceito das ondas secundárias (princípio de Huygens), com as quais deduziu as leis da reflexão e refração. Fez ainda várias outras contribuições importantes, como por exemplo, estabelecendo que a velocidade de propagação da luz variava inversamente com uma propriedade do material, denominada índice de refração $\left(v \propto \frac{1}{n} \right)$. A dupla refração da calcita também foi descoberta por ele.

Independente da natureza corpuscular ou ondulatória da luz, um dado importante a ser obtido era sua velocidade de propagação. Muitos acreditavam que ela se propagava instantaneamente, com velocidade infinita. Porém, em 1676, Dane Ole Christensen Römer (1644-1710) sugeriu a medida da velocidade da luz pela verificação do intervalo entre eclipses da lua Io, de Júpiter, que se move praticamente no mesmo plano que este planeta se move em torno do Sol. A realização destas medidas, com base no princípio mostrado na Fig. 1.2, demonstrou que embora muito grande, a velocidade da luz é finita. Observando-se o diâmetro aparente de Júpiter, era possível saber como a distância deste à Terra, $r(t)$, mudava com o tempo. Como o intervalo entre duas eclipses consecutivas variava com o tempo, associou-se esta variação à velocidade de propagação finita da luz, de acordo com $\Delta \tau = \frac{\Delta r}{c}$, de onde

obteve-se $c \approx 2.3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

Ao final do século XVII, ambas as teorias (corpuscular e ondulatória) eram aceitas. Durante o século XVIII acabou prevalecendo a teoria corpuscular, principalmente devido ao grande peso científico de Newton, que havia optado

Autor: Sergio Carlos Zilio

por esta. Não houve grandes avanços da óptica naquele século, exceto pela construção do duplete acromático em 1758, por John Dollond (1706-1761).

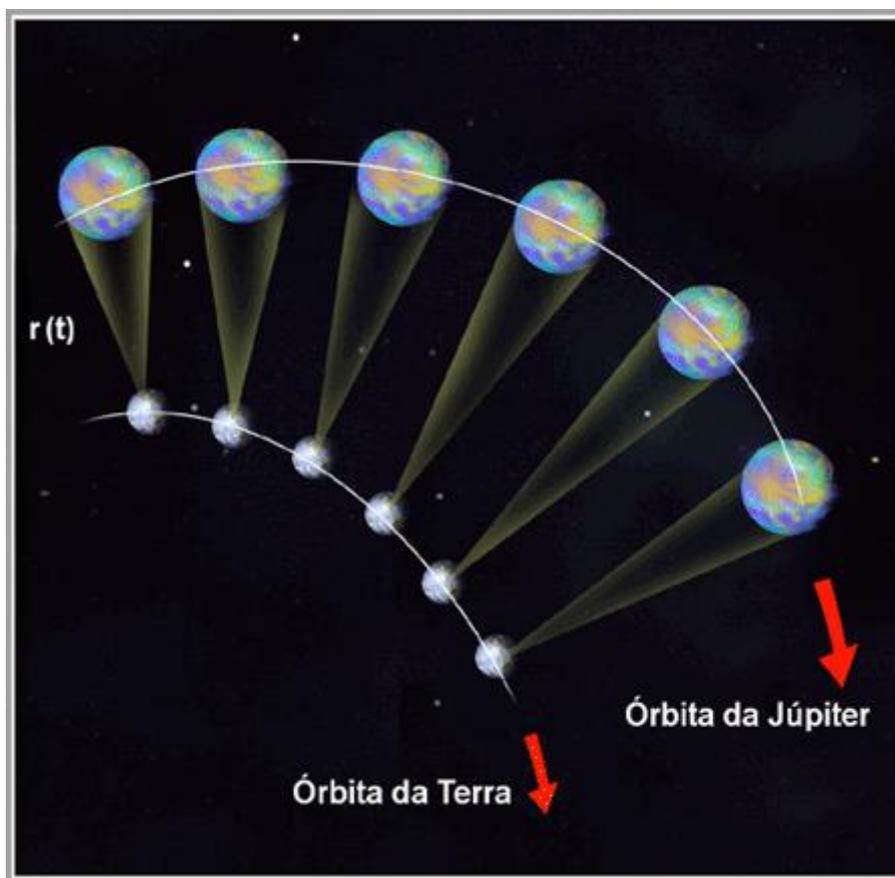


Fig. 1.2 - Medida da velocidade da luz realizada por Rømer. As linhas pontilhadas definem o ângulo de visão de Júpiter por um observador na Terra.

4: [Ressurgimento da teoria ondulatória](#)

O início do século XIX presenciou o ressurgimento da teoria ondulatória. Entre 1801 e 1803, Thomas Young (1773-1829) propôs o princípio da superposição e com ele explicou o fenômeno de interferência em filmes finos. Devido ao peso científico de Newton e suas ideias sobre a teoria corpuscular, Young foi bastante criticado pela comunidade científica inglesa devido a estes trabalhos. Desconhecendo os avanços realizados por Young, já que a difusão de conhecimentos era extremamente lenta naquela época, Augustin Jean Fresnel (1788-1827) propôs, 13 anos mais tarde, uma formulação matemática dos princípios de Huygens e da interferência. Na sua concepção, a propagação de

Autor: Sergio Carlos Zilio

uma onda primária era vista como uma sucessão de ondas esféricas secundárias que interferiam para refazer a onda primária num instante subsequente. Esta proposição, chamada de princípio de Huygens-Fresnel, também recebeu muitas críticas da comunidade científica francesa, principalmente por parte de Laplace e Biot. Entretanto, do ponto de vista matemático, a teoria de Fresnel explicava uma série de fenômenos, tais como os padrões de difração produzidos por vários tipos de obstáculos e a propagação retilínea em meios isotrópicos, que era a principal objeção que Newton fazia à teoria ondulatória na época. Pouco tempo depois, Gustav Robert Kirchhoff (1824-1887) mostrou que o princípio de Huygens-Fresnel era consequência direta da equação de ondas e estabeleceu uma formulação rigorosa para o fenômeno de difração, como veremos no Cap. 9. Ao saber que a ideia original do princípio da superposição devia-se a Young, Fresnel ficou decepcionado, porém os dois acabaram tornando-se amigos e eventuais colaboradores. Fresnel também colaborou com Dominique François Jean Arago (1786-1853), principalmente em assuntos ligados à polarização da luz. Nos primórdios da teoria ondulatória, considerava-se que a luz era uma onda longitudinal, similar à uma onda sonora propagando-se num meio tênue, porém com alta constante elástica, chamado éter. Tal meio precisava ser suficientemente tênue para não perturbar o movimento dos corpos e a constante de mola deveria ser elevada para sustentar as oscilações de alta frequência da luz. Por outro lado, a dupla refração da calcita já havia sido observada por Huygens, que notou que a luz tem "dois lados opostos", atribuídos à presença do meio cristalino. Posteriormente, Étienne Louis Malus (1775-1812) observou que os "dois lados opostos" também se manifestavam na reflexão e que não eram inerentes a um meio cristalino, mas sim, uma propriedade intrínseca da luz. Fresnel e Arago realizaram uma série de experimentos visando observar seu efeito no processo de interferência, mas os resultados não podiam ser explicados com o conceito de onda longitudinal aceito até então. Por vários anos, Fresnel, Arago e Young tentaram explicar os resultados observados, até que finalmente Young propôs que a luz era na verdade composta por ondas transversais (duas polarizações), como as que

Autor: Sergio Carlos Zilio

existem numa corda. A partir daí, Fresnel utilizou um modelo mecanicista de propagação de ondas transversais para deduzir suas famosas equações de reflexão e transmissão numa interface dielétrica, para as duas polarizações. Em 1825 a teoria ondulatória já era bastante aceita enquanto que a teoria corpuscular tinha poucos defensores. Até meados do século, foram realizadas várias medidas terrestres da velocidade da luz. Em 1849, Armand Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) utilizou uma roda dentada rotatória (chopper) para gerar pulsos de luz e um espelho distante que refletia os raios de volta para a roda. Variando a velocidade angular desta, variava-se o período entre duas aberturas consecutivas e era possível fazer com que os pulsos passassem ou fossem bloqueados pela roda. A partir das equações do movimento retilíneo uniforme, Fizeau determinou a velocidade da luz como sendo 315.300 km/s. Outro conjunto de medidas visando a determinação da velocidade da luz foi realizado por Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868), com a utilização de um espelho rotatório desenvolvido em 1834 por Charles Wheatstone (da ponte de Wheatstone) para a medida da duração de uma descarga elétrica. Arago havia proposto o uso deste dispositivo para a determinação da velocidade da luz em meios densos, mas não conseguiu realizar o experimento. Foucault, entretanto logrou êxito nesta tarefa, e em 1850 verificou que a velocidade de propagação da luz na água era menor que no ar. Isto era contrário ao previsto pela teoria corpuscular de Newton e reforçou ainda mais a teoria ondulatória.

5: Ondas eletromagnéticas e éter

Enquanto isso, a eletricidade e o magnetismo desenvolviam-se paralelamente à óptica. Em 1845 foi feita a primeira ligação entre o magnetismo e a luz por Michael Faraday (1791-1867). O efeito Faraday, que veremos com detalhes no Cap. 6, consiste na rotação da polarização da luz quando esta passa por certo material submetido a um campo magnético intenso. Entretanto, o relacionamento completo entre a óptica e o eletromagnetismo foi estabelecido por James Clerk Maxwell (1831-1879). Inicialmente ele propôs a corrente de deslocamento e reescreveu, numa forma diferencial, as equações empíricas existentes na época. As expressões resultantes, hoje conhecidas como

Autor: Sergio Carlos Zilio

equações de Maxwell foram combinadas e geraram uma equação de ondas para o campo eletromagnético, cuja velocidade de propagação dependia das

grandezas μ_0 e ϵ_0 $\left(c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \right)$, que podiam ser determinadas com medidas

de capacitância e indutância. Surpreendentemente, o valor obtido era numericamente igual à velocidade da luz, já bem determinada. Com isto concluiu-se que a luz era uma onda transversal, de natureza eletromagnética.

Esta descoberta foi ratificada pelo trabalho de Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), que em 1888 produziu e detectou ondas longas através de uma antena.

Nós hoje sabemos que a luz visível é uma forma de onda eletromagnética, mas com comprimento de onda restrito ao intervalo que vai de $4 \times 10^5 \text{ cm}$ a $7.2 \times 10^{-5} \text{ cm}$, como mostra a Fig. 1.3.

A intuição na época é que para uma onda se propagar era necessária a existência de algum meio que a suportasse, no caso, o éter. Assim, grande parte dos esforços subsequentes foram na direção de se determinar a natureza física e as propriedades do éter. Uma das questões relevantes na época era se o éter estava ou não em repouso. A origem desta questão estava ligada à observação da aberração estelar, realizada em 1725 por James Bradley (1693-1762). Neste fenômeno, ocorre um desvio da luz das estrelas devido ao movimento de translação da Terra em torno do Sol. Ele podia ser explicado facilmente pela teoria corpuscular; neste caso, seria equivalente à inclinação da trajetória de gotas de chuva que um observador localizado num trem em movimento observa, mesmo que elas estejam caindo na vertical para um observador em repouso. Podia também ser explicado pela teoria ondulatória, desde que se considerasse o éter em repouso e a Terra passando sem perturbações por ele. Com esta motivação, iniciou-se uma série de estudos para a determinação do estado de movimento do éter.

Autor: Sergio Carlos Zilio

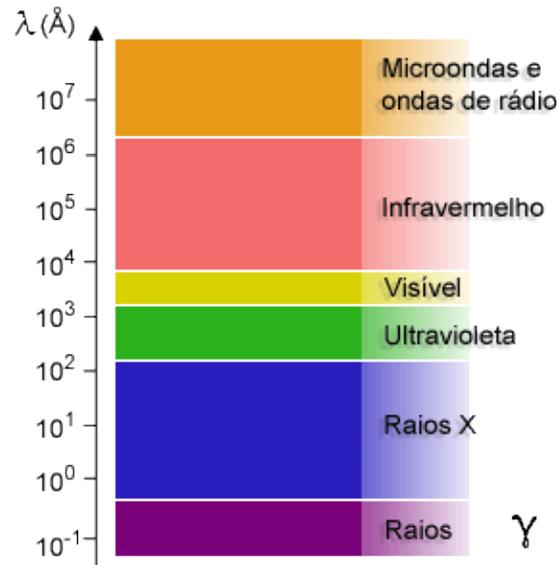


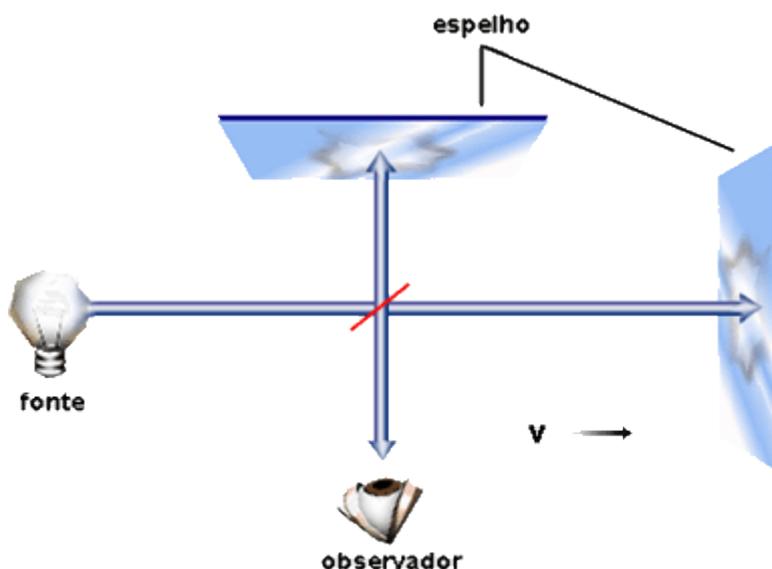
Fig.1.3 - O espectro eletromagnético ($1 \text{ Å} \square 10^{-8} \text{ cm}$).

Arago realizou experimentos mostrando que fontes de luz terrestres e extraterrestres tinham o mesmo comportamento, como se a Terra estivesse em repouso com relação ao éter. Para explicar estes resultados, Fresnel sugeriu que a luz era parcialmente arrastada pelo éter, conforme a Terra passasse por ele. Esta hipótese de arrastamento de Fresnel era aparentemente confirmada por experimentos feitos por Fizeau, com a passagem de luz por colunas cheias de água em movimento e por George Biddell Airy (1801-1892), que em 1871 usou um telescópio cheio de água para observar a aberração estelar. Supondo que o éter estava em repouso absoluto, Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) desenvolveu uma teoria englobando as ideias de Fresnel, e que resultou nas conhecidas fórmulas de Lorentz.

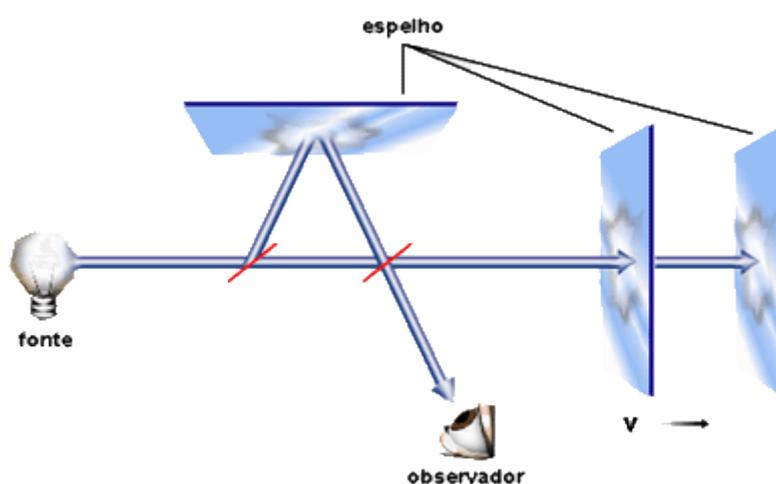
Maxwell sugeriu em 1879, ano de sua morte, um esquema para se determinar a velocidade com que o sistema solar se movia com relação ao éter. O físico americano Albert Abraham Michelson (1852-1931), na época com 26 anos, decidiu realizar o experimento proposto por Maxwell e esquematizado na Fig. 1.4. A montagem experimental faz uso de um interferômetro de dois feixes, hoje conhecido como interferômetro de Michelson, que será discutido no Cap. 7. A luz proveniente de uma fonte é dividida por um espelho semitransparente (divisor de feixes), é refletida por dois espelhos e retorna ao divisor de feixes. Parte da luz chega ao observador e parte retorna à fonte (Fig. 1.4 (a)). Se a

Autor: Sergio Carlos Zilio

Terra estiver andando para a direita com velocidade v e o éter estacionário, os feixes horizontal e vertical levarão tempos diferentes para chegar ao observador. De acordo com a Fig. 1.4 (b), estes tempos são:



(a) interferômetro



(b) caminhos ópticos.

Fig. 1.4 - Diagrama simplificado do experimento de Michelson- Morley

$$t_h = \frac{d}{c-v} + \frac{d}{c+v} = \frac{2cd}{c^2 - v^2} \quad (1.1)$$

onde c é a velocidade da luz e d é a distância do divisor de feixes ao espelho. O primeiro termo representa o tempo que a luz demora para ir do divisor de

Autor: Sergio Carlos Zilio

feixes até o espelho da direita e o segundo é o tempo de volta. Para o feixe vertical temos:

$$t_v = \frac{2}{c} \sqrt{d^2 + \frac{v^2 t^2 v}{4}} \quad (1.2)$$

de onde se obtém $t_v = \frac{2d}{\sqrt{c^2 - v^2}}$, de forma que a diferença de tempos entre os dois caminhos é dada por:

$$\Delta t = t_h - t_v = 2d \left(\frac{c}{c^2 - v^2} - \frac{1}{\sqrt{c^2 - v^2}} \right) \approx \frac{dv^2}{c^3} \quad (1.3)$$

que corresponde a uma diferença de fase:

$$\Delta\phi = \omega\Delta t = \frac{2\pi c}{\lambda} \Delta t \approx \frac{2\pi d}{\lambda} \frac{v^2}{c^2} \quad (1.4)$$

onde λ é o comprimento de onda da luz. Como a velocidade da luz e da Terra eram conhecidas, esperava-se medir uma variação de pelos menos 1/3 de franja de interferência quando o interferômetro fosse rodado 900 com relação à geometria da Fig. 1.4. Entretanto não foi observada nenhuma variação, e em 1881 Michelson publicou os resultados provando que a Terra estava em repouso com relação ao éter. Estes experimentos foram refeitos com maior precisão em 1887, com a participação de Edward Williams Morley (1838-1923), e novamente obteve-se um resultado nulo. Fitzgerald e Lorentz tentaram explicar o resultado nulo do experimento de Michelson e Morley admitindo que um corpo se contrai na direção de seu movimento através do éter, na

razão $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$. Este encurtamento, conhecido como contração de Fitzgerald-

Lorentz, igualaria os dois caminhos ópticos de tal maneira que não haveria qualquer deslocamento de franja. Entretanto, esta explicação ad hoc não era muito satisfatória, pois esta contração não era passível de medição, já que qualquer aparelho se contrairia junto com o objeto a ser medido.

Autor: Sergio Carlos Zilio

6: Relatividade restrita

A observação da aberração estelar não poderia ser explicada pela postulação de um éter em repouso com relação à Terra. Os resultados obtidos por Michelson e Morley eram contrários a esta possibilidade e a explicação de Fitzgerald-Lorentz não era convincente. Poder-se-ia admitir o caráter corpuscular da luz e o efeito da aberração estaria explicado. Entretanto, a teoria ondulatória já estava bem estabelecida e praticamente não foi questionada. Como explicar então o fenômeno da aberração estelar? No início do século XX, em 1900, Jules Henri Poincaré (1854-1912), baseado no experimento de Michelson e Morley questiona a necessidade da existência do éter. Porém, apenas em 1905, quando Albert Einstein (1879-1955) introduziu a teoria da relatividade restrita, foi possível a explicação da aberração estelar sem a necessidade de se postular a existência do éter. Como veremos no Cap. 5, com dois postulados simples, as transformações de Lorentz, e o uso do produto escalar de quadrivetores, é fácil obter-se os efeitos Doppler longitudinal e transversal, bem como explicar os fenômenos de aberração estelar e da velocidade de arraste de Fizeau. Com isto chega-se à conclusão que a onda eletromagnética existe por si só, sem a necessidade de um meio para se propagar.

Em 1905, Einstein também realizou seu famoso trabalho sobre o efeito fotoelétrico, que lhe rendeu o prêmio Nobel de 1921. O desenvolvimento da relatividade restrita havia dispensado a necessidade do éter e favorecia o conceito ondulatório da luz. Paradoxalmente, no efeito fotoelétrico admitia-se a natureza corpuscular da luz, a mesma defendida por Newton. Atualmente, diz-se que a luz tem uma natureza dual porque, devido aos trabalhos de quantização do campo de radiação eletromagnética, mencionados na próxima seção, concluiu-se que as ondas eletromagnéticas são constituídas por partículas relativísticas, chamadas fótons. Portanto, certos fenômenos como interferência, podem ser descritos considerando-se o caráter ondulatório, e outros fenômenos, como o efeito fotoelétrico, considerando-se o caráter de partícula.

Autor: Sergio Carlos Zilio

7: A óptica quântica

Em 1900, Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947) introduz o conceito de quanta para a explicação do espectro da radiação emitida por corpos aquecidos a uma dada temperatura T , como por exemplo, fornos de fundição. Surgiu então o conceito de que a radiação era absorvida pelos átomos da cavidade de forma discreta, o que deu origem à mecânica quântica. Foi introduzida a constante de Planck e a energia absorvida por átomos com frequência de ressonância n como $E_n = h \nu$. Embora Planck tivesse quantizado os átomos da cavidade, foi Einstein, que com a explicação do efeito fotoelétrico, quantizou a onda eletromagnética associando a ela uma partícula, que posteriormente foi denominada fóton.

Com as ideias introduzidas por Niels Bohr e pelos cientistas da escola de Copenhague, a mecânica quântica foi desenvolvida na sua quase totalidade até 1927. O trabalho de Schrödinger, que introduziu a função de onda na descrição de um sistema quântico, está fortemente baseado na analogia que existe entre a óptica geométrica e a mecânica clássica, que será revisada no próximo capítulo. Portanto, como já mencionamos, o entendimento dos fenômenos que ocorrem na óptica ondulatória auxiliam bastante o aprendizado da mecânica quântica.

De acordo com o que foi explanado acima, podemos dividir o estudo da óptica em três partes:

- a) óptica geométrica - trata-se a luz como raios que se propagam em linha reta nos meios homogêneos, de acordo com a descrição de Newton. Nos capítulos 2 e 3 abordaremos alguns de seus aspectos, sem, no entanto exaurir completamente o assunto.
- b) óptica física - leva em conta a natureza ondulatória das ondas eletromagnéticas e como consequência temos a aparição de fenômenos tais como interferência e difração. Esta parte da óptica está relacionada

Autor: Sergio Carlos Zilio

com o entendimento que Huygens tinha a respeito da natureza da luz, e será apresentada nos capítulos de 4 a 9.

c) óptica quântica - nesta parte quantiza-se o campo eletromagnético, aparecendo assim o fóton. Com esta teoria podemos tratar da interação entre fótons e átomos e explicar detalhadamente o funcionamento do laser. Neste curso estaremos interessados principalmente em óptica física, embora façamos uma breve revisão de óptica geométrica. Veremos, no cap. 4, a origem da equação de ondas e sua solução para em seguida abordarmos problemas ligados à polarização das ondas eletromagnéticas, tais como a geração de uma dada polarização e seu uso. Descrevemos vários dispositivos que geram ou alteram uma dada polarização. No capítulo subsequente analisaremos o fenômeno de interferência, discutindo vários tipos de interferômetros e suas aplicações. No Cap. 6, veremos um tópico importante para a obtenção de interferência, que é a coerência da fonte de luz utilizada. Finalmente, estudaremos a difração de luz e suas aplicações práticas, dentre as quais se destaca a rede de difração. Este curso certamente será melhor aproveitado se for acompanhado com demonstrações dos vários tópicos abordados. Levando este fato em conta, incluímos no capítulo final práticas demonstrativas que ilustram e complementam os assuntos apresentados.