

Ótica: O Triunfo da Teoria Corpuscular da Luz

Prof. Dr. Hugo Franco

Apostila de Evolução dos Conceitos da Física
Publicação IFUSP 1336/98 - 2ª edição 2002

1 Prolegômenos

A escola atomista grega, iniciada por Demócrito e Leucipo, e sistematizada por Lucrécio (c. 50 a.C.), concebia a matéria como um conjunto de partículas indivisíveis, separadas por vácuo. Analogamente, atribuía também à luz propriedades de **partícula** indivisível. Tal como a fumaça, composta de finas partículas, que se desprendem da chama da lenha queimando, supunham os atomistas haver **outras emanações** de partículas ainda mais sutis emitidas pela matéria. Essas partículas poderiam desprender-se dos corpos e se introduzir em nosso organismo transmitindo sensações, como o odor, por exemplo.

Para explicar o mecanismo da visão, os atomistas postulavam *partículas de luz*, que se desprenderiam da superfície dos corpos, preservando suas formas, e penetrarim nos olhos reproduzindo os objetos exteriores em proporções reduzidas. Tais emanações, chamadas de *eidola* ou simulacros, se espalhariam em todas as direções.

O atomismo atribuiu uma realidade material, **mecânica**, à luz, que se propagaria por uma trajetória retilínea. O comportamento de espelhos seria explicável em analogia a colisões de corpos macroscópicos: “ao *ricochetear*, ela [a luz] se retorna . . . tendo a natureza determinado **que o ângulo de incidência seja sempre igual ao de reflexão**” (*De Natura Rerum*, de Lucrécio). A existência de um fluxo constante de *partículas de luz* explica a dinâmica das sombras, que parecem nos acompanhar:

“certos pontos do chão se encontram sucessivamente privados da luz do sol pelo nosso caminhar, que a intercepta, e depois a reencontra à medida que nós passamos, o que explica que a

sombra projetada por nosso corpo pareça nos seguir. De fato, os raios luminosos não cessam de se renovar e de desvanecer..."
(Lucrecio, *De Natura Rerum*)

Uma noção inteiramente diferente da natureza da luz foi proposta pelos pitagóricos e, mais tarde, adotada por Euclides. A luz seria algo emanado não dos objetos visíveis, mas pelos olhos. Esta emanação, o *quid*, provinha do *fogo interior* dos seres vivos, e que também se propagaria em **linha reta**. Tal conceito se apoiava em alguns fatos empíricos, por exemplo: se perdemos uma agulha no meio da palha, não a encontramos senão quando nosso olhar incide diretamente sobre ela; de certo modo, podemos "sentir" um olhar etc.

Aristóteles possuía uma concepção ainda diferente, precursora da teoria **ondulatória** da luz. Ele contestava a existência do *quid*, e acreditava que a luz proviesse do movimento, através da uma **perturbação** de um meio intermediário:

"...vamos convir que a sensação nasce do movimento, excitada pelo corpo no meio intermediário ..."

No Império Romano, poucos conceitos novos surgiram no que diz respeito à concepção da luz. O médico alexandrino Galeno dissecou olhos de animais; encontrou o cristalino e o nervo ótico, que ele supunha conduzir um **fluido luminoso** para o cérebro.

Durante a Alta Idade Média, a luz perdeu, no Ocidente, praticamente todo interesse como fenômeno físico, servindo antes como metáfora para designar elevação espiritual.

No **mundo islâmico**, no entanto, a luz foi objeto de estudo de alguns filósofos. Os Árabes assimilaram conhecimentos dos vários povos de seu império: romanos, cartagineses, cristãos. O enfoque do estudo da natureza dos árabes era diferente dos gregos: buscavam conhecimentos que permitissem dominar a natureza, que tivessem uma aplicação prática. Buscavam, por exemplo, o elixir da longa vida, a pedra filosofal, as propriedades mágicas de plantas e minerais. Não possuíam uma demarcação nítida entre ciências da natureza, magia, ocultismo, alquimia, astrologia, astronomia, medicina, matemática...

No campo da ótica, os árabes superaram seus contemporâneos do Ocidente, particularmente nas pessoas de dois filósofos: Al-Kindi e Ibn-al-Haitiam (chamado no Ocidente de *Alhazen*) (965-1039 d.C.). Em sua obra, o *Kitab al-Manazir (Livro da Ótica)*, notou que a resolução da visão depende da intensidade luminosa. Isso não é compatível com a idéia dos *eidola* (simulacros), que deveriam emitir sua própria luz. Notou também que o olho é ofuscado

pelo sol. Isso é incompatível com idéia do *quid*, emitido pelo próprio olho humano, que não geraria uma luz capaz de feri-lo. Conclui, como Aristóteles, que a luz deve ter existência própria, independente do olhar. Eis um trecho de um tratado de Ibn-Al-Haitiam:

“A visão se faz por raios vindos do objeto para o olho. De todo corpo iluminado parte luz em todas as direções . . . Quando o olho é colocado diante de um objeto assim iluminado, a ele chegará luz sobre sua superfície exterior. Ora, já estabelecemos que a luz tem a propriedade de agir sobre o olho. Devemos portanto concluir que o olho pode sentir o objeto visto por intermédio da luz que este lhe envia.”

Esta descrição do fenômeno da visão se assemelha de perto a nossa concepção atual.

Ibn-Al-Haitiam matematizou, em certa medida, o problema da **reflexão** da luz, através de uma analogia mecânica. Dividiu a velocidade com que a luz se propaga em duas **componentes ortogonais**, transversal e perpendicular à superfície incidente, supondo que a **componente paralela** ao plano da reflexão se conservasse. Essa hipótese se aplica igualmente bem à refração, supondo-se que um meio refringente modifique apenas a componente transversal da “velocidade da luz”, mudando sua direção:

“Todo corpo diáfano, quando atravessado pela luz, lhe opõe uma resistência que depende de sua estrutura . . .”

Essa explicação antecipou em séculos uma idéia análoga de Descartes de decomposição em **componentes ortogonais**. Também antecipou a concepção mecânica da luz proposta por Descartes.

Ibn-al-Haitiam também chegou a esboçar o modo de **formação de imagem na retina** por refração, aperfeiçoando os conhecimentos iniciados por Galeno na Antigüidade. Outros filósofos árabes chegaram a ter um rudimentar conhecimento do funcionamento das lentes.

Durante a Baixa Idade Média, o estudo da ótica foi gradualmente retomado de forma empírica no Ocidente, a partir de efeitos notados na arte da vidraria. Era um fato conhecido que “lentilhas de vidro” podiam **aumentar** os objetos, constituindo assim os primeiros óculos. Mais tarde, foram fabricadas lentes convexas.

Um bispo e filósofo inglês desse período, **Grosseteste** (1168-1253), chegou, tendo em vista os efeitos óticos das lentes, a profetizar o advento do **telescópio**:

“...se compreendermos bem esta parte da ótica, poderemos fazer parecer próximas as coisas longínquas... poderemos ler incrivelmente longe letras miúdas...”

Roger Bacon (1214-1294), filósofo inglês e discípulo de Grosseteste, previa possíveis aplicações de tal instrumento para usos militares e astronômicos:

“a uma distância incrível, um exército modesto nos parecerá perto de nós ... poderemos igualmente conseguir que o sol, a lua e as estrelas pareçam aproximar-se e descer em nossa direção ...”

Roger Bacon estudou as propriedades das **lentes** do olho humano, do qual fez um diagrama razoavelmente preciso.

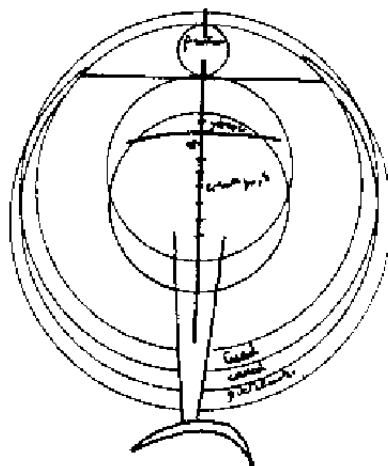


Figura 1: Ilustração de Roger Bacon mostrando o interior do olho humano, com mecanismos semelhantes aos das lentes convergentes.

Bacon também aventou a hipótese de que as cores do arco-íris teriam origem em reflexões e refrações da luz em ângulos precisos.

Também no século XIII foram feitas medidas sistemáticas de **ângulos** de refração da luz no ar, na água e no vidro por Witelo (1230-1300), que afirmava que tais ângulos variam como a densidade dos objetos atravessados. Por exemplo, para um mesmo ângulo de incidência o desvio do raio refratado é maior no vidro que na água. Witelo publicou tabelas de refração, usadas mais tarde para a dedução da lei de Snell-Descartes.

Thierry de Freiberg (c. 1250-1310), inspirado na hipótese de Bacon fez uma “simulação” de arco-íris por meio de balões esféricos de vidro cheios de água. Observou cores diferentes em certos ângulos, que concordavam com

os do arco-íris. Conclusão: as cores correspondem a ângulos de refração diferentes. Um efeito análogo ocorre em arestas de cacos de vidro (que formam prismas). As conclusões filosóficas tiradas desses fenômenos por Freiberg são, no entanto, características da Idade Média: a luz física é análoga à “luz espiritual”; a luz é o **caminho reto**; o desvio da luz leva às trevas!...

Um instrumento que gradualmente emergiu de conhecimentos empíricos de ótica e lentes foi o **telescópio**. Conforme o relato de um autor italiano anônimo do fim do século XVI, descobriu-se que certas combinações de lentes podiam aumentar imagens distantes. Em Paris, no ano 1608, já se vendiam como curiosidade as primeiras lunetas comerciais. Possuíam, no entanto, um aumento pequeno (por volta de três vezes) e uma má qualidade ótica, com imagens extremamente turvas, que valeram pouco sucesso ao instrumento.

Galileu aperfeiçoou o telescópio, acoplando lentes de melhor qualidade a um tubo vazio, anteriormente usado pelos árabes para delimitar uma região de observação do céu. Galileu, realizando concretamente a especulação de Bacon, demonstrou sua revolucionária utilidade para a astronomia, como vimos em capítulo anterior, assim como para uso na navegação.

Kepler observou o fenômeno da *refração do ar* atmosférico da luz proveniente dos astros, através de desvios da posição de estrelas próximas do horizonte, o que publicou na obra *Dioptrice*.

2 René Descartes (1596-1650)

Descartes formulou uma hipótese mecânica para explicar todo o universo, baseada nos vórtices ou turbilhões de um éter, que transmitiria os movimentos, acoplando mecanicamente os corpos celestes, como já vimos. Segundo ele (*Dioptrique*, 1637), a luz seria uma **pressão estática** produzida pelo éter ou ar sutil e transmitida instantaneamente até o observador, entrando via nervo ótico. A pressão do éter estimularia o nervo ótico, que a transmitiria ao cérebro, onde seria interpretada pela alma. A visão seria como um “*tato*” da pressão do ar sutil. De acordo com Descartes, qualquer centro de turbilhão no universo emite luz, haja um astro nele ou não. Isso explicaria a luz proveniente do Sol.

A chama de uma vela produziria também uma pressão no ar sutil. Esta pressão é em certos pontos de sua obra descrita não como uma pressão estática, mas como um “**tremor**” que se propaga. Descartes relança, portanto a idéia Aristotélica da luz como perturbação de um meio.

Segundo Descartes a refração seria explicável através de uma colisão das partículas de luz com uma membrana (representando a interface dos meios), que oferece resistência : “*como uma bala de canhão que bate numa lona*

esticada, sendo parcialmente desviada, mas que consegue atravessar". Este raciocínio é análogo ao do árabe Ibn-al-Haitiam, que o antecipou em séculos. Uma consequência desta imagem da refração é a **Lei de Snell** (Descartes pretendia a sua autoria):

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \frac{n_r}{n_i}$$

em que os subscrito i significa "incidente" e r , "refratado".

O modelo físico proposto por Descartes, que reproduz com sucesso as leis observadas da refração, é o seguinte: a **velocidade** das partículas de luz depende **apenas do meio** em que viajam (ver Whitthaker, p.10-11), que opõe diferentes resistências ao movimento. Assim, se V_i e V_r são as **velocidades das partículas** nos dois meios, teremos a **lei de Snell-Descartes**:

$$V_i \sin \theta_i = V_r \sin \theta_r$$

portanto:

$$\frac{V_i}{V_r} = \frac{n_r}{n_i}$$

Embora o modelo reproduza os resultados experimentais quantitativamente, podemos constatar que ele implica que a velocidade da luz seja **maior** no vidro que no vácuo!

$$V_{ar} < V_{vidro}$$

Descartes tinha consciência do caráter paradoxal desta conclusão, que aceita como uma singular realidade física.

O matemático francês **Pierre Fermat** (1601-1665), contemporâneo de Descartes, obteve o princípio do **mínimo tempo** de trajeto da luz para a reflexão e a refração. O resultado estava em acordo com a lei de Snell-Descartes.

"...o prêmio de meu trabalho foi o mais extraordinário, o mais imprevisto e o mais feliz ... pois eu encontrei a mesma proporção das refrações que Descartes estabeleceu."

Porém, para esta hipótese dar conta dos fatos experimentais, é preciso supor que:

$$V_{ar} > V_{vidro}$$

exatamente o contrário do previsto por Descartes.

Os mecanicistas, como Descartes, não eram de modo algum ateus. Acreditavam que Deus criou o mundo, com suas propriedades físicas, mas depois deixou-o entregue ao curso de seus **mecanismos**. A hipótese de Fermat, por outro lado, implicava certo **finalismo**, ou seja, os fenômenos da natureza teriam uma **intenção**, uma finalidade, que explicaria o curso das coisas. Para os mecanicistas, isso era um aparente regresso a idéias medievais. Um dos argumentos dos cartesianos contra a hipótese de Fermat, de grande sedução lógica, consiste em evidenciar seu caráter finalista. O raio de luz parte do ponto A , atravessa a interface em O e chega ao ponto B , no interior do vidro. Ao chegar no ponto O da interface, há uma infinidade de pontos na circunferência dos lugares geométricos de pontos que levam o mesmo tempo desde A . Para a luz ir precisamente até o ponto B , seria preciso que “... a luz em O se **lembrasse** de que saiu de A com ordem de ir a B , o que não é de modo algum fundamentado em física ...”.

3 Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) e a Difração

Em obra de publicação póstuma, o *Physicomathesis de Lumine, Coloribus et Iride* (Tese Psicossomática da Luz, Cores e Arco-íris, 1665), Grimaldi notou que mesmo no ar a luz não segue em linha reta: há luz mesmo na **sombra geométrica**. O fenômeno **não depende do material** do anteparo. A luz “**difrata**” (“se **fraciona** em duas partes”), segunda a expressão criada por Grimaldi.

Sua concepção da luz era essencialmente **ondulatória**, a de um fluido sutil com **ondulações**. A difração era explicada por analogia com as ondas de superfície da água, como as ondas do mar que são difratadas ao passar por um barco ancorado. A **densidade do fluido sutil** que propaga a luz dependeria do meio material onde a luz se propaga e determinaria sua velocidade no meio.

4 Olaus Romer e a Velocidade da Luz

Olaus Christensen Romer (1644-1710) mediu em 1679 a velocidade da luz observando aparentes variações do período orbital de uma das luas de Júpiter ao longo do ano terrestre. Seu resultado, $v \approx 350.000$ km/s coincide de perto com o valor atualmente aceito. Esta medida fez com que se rejeitasse a idéia bastante aceita da instantaneidade da propagação luz.

5 Isaac Newton

Newton construiu uma teoria simultaneamente **corpúscular** e **mecânica** para a luz. Embora seus primeiros experimentos o levassem para uma teoria corpúscular consistente, como veremos a seguir, seus experimentos de **interferência** obrigam a introduzir também um caráter ondulatório para a luz.

O fenômeno do arco-íris havia sido estudado no século XIV por Thierry de Freiberg. Ele supunha que a luz produzida num prisma era um “efeito de superfície, uma distorção **gerada na interface** ar/vidro, e não uma decomposição da luz.

Newton realizou, durante seu retiro de 1665, experiências com **prismas**. Eis seus principais resultados:

- I. A luz passa pelo prisma e gera um “**espectro**” colorido.
- II. Prismas **perpendiculares** alongam o espectro na largura, mas não modificam os **desvios angulares** das diversas cores.
- III. Com uma fenda separando uma faixa “monocromática” do espectro, passou esta faixa por um segundo prisma e não houve alteração, seu desvio era igual ao do primeiro prisma.
- IV. Colocou prismas com **orientações opostas** no mesmo plano: o segundo prisma recompõe a luz branca! Isto corrobora a hipótese de que a luz branca seja composta de diferentes cores, cada qual com um índice de refração.

Conseqüentemente, uma determinada cor, o vermelho, por exemplo, permanece vermelho também ao passar em um **segundo prisma**, sem que se produzam novas cores. A conclusão de Newton é de que as cores geradas em um prisma em que incide luz branca **não são um efeito das superfícies** e que a luz branca é **composta das várias cores**.

Estes resultados são apresentados na *Royal Society* em 1672, acompanhados (talvez desnecessariamente) de uma hipótese **corpúscular** para a luz. Robert Hooke, então secretário desta prestigiosa sociedade, era partidário da teoria ondulatória da luz. Newton repete as experiências, mas enfrenta violenta oposição. Talvez atingido em sua auto estima, Newton, em carta a um colega afirma que: “...tenho a intenção de não mais me ocupar da filosofia natural...”

Três anos mais tarde, ele faz nova exposição na *Royal Society*, sobre suas experiências sobre cores e lâminas finas, encontrando de novo forte oposição.

Newton não publica mais nada por 10 anos, mas retorna à ciência com uma obra de grande peso, graças ao estímulo de Halley, o *Principia Mathematica* (1686). Além de sua teoria mecânica geral, há o esboço de uma teoria também mecânica da luz. O *Principia* foi acolhido com grande sucesso. Mesmo assim, Newton somente se atreveu a publicar seus trabalhos de ótica muito mais tarde, no livro *Opticks*.

A seguir, um esboço da teoria mecânica da luz de Newton.

5.1 Reflexão

A superfície dos corpos polidos é ainda rugosa na escala da luz. Newton postula uma **Força Refratante**, uniformemente distribuída na superfície (devido ao polimento do material). Newton calcula a trajetória parabólica percorrida pela partícula de luz próxima à superfície e obtém o resultado correto: $\theta_i = \theta_r$ (ângulo de incidência = ângulo de reflexão).

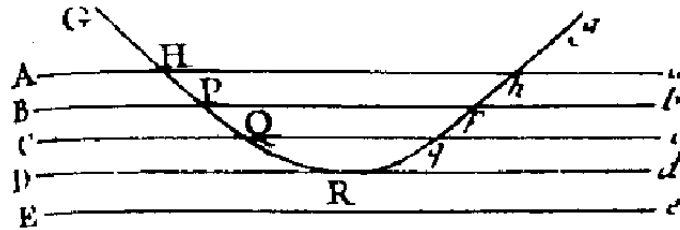


Figura 2: Trajetória parabólica das partículas de luz newtonianas, sujeitas a uma força refratante junto à interface ar/vidro. O ângulo de incidência é igual ao de reflexão.

5.2 Refração

Supondo apenas a existência de uma **força refratante, normal** a superfície, desvia o raio. Obtém-se o resultado previsto na lei de Snell-Descartes:

$$\frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} = \text{constante}$$

Convém notar que, como no caso de Descartes, é preciso supor que a velocidade no vidro seja maior do que no ar, ou seja, que a força refratante seja **atrativa**.

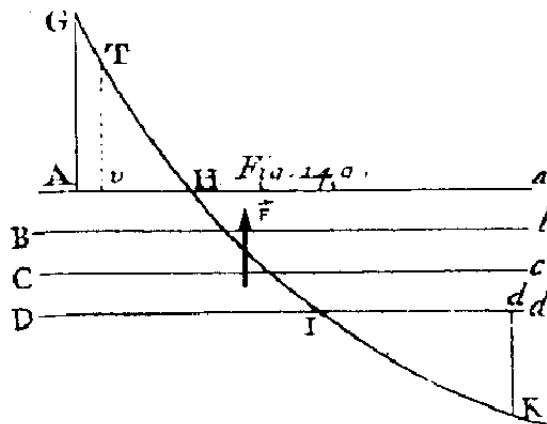


Figura 3: Trajetória das “partículas de luz” de Newton quando sujeitas a uma força refratante repulsiva. Neste caso, o feixe de luz se afasta da normal.

5.3 Refração e formação de cores

Na teoria de Newton, todos os corpúsculos viajam a 300.000 km/s, conforme medido por Romer, mas a luz de cores diferentes é composta de corpúsculos de **massas diferentes**. Os “*fótons newtonianos*” possuem, portanto, diferentes quantidades de movimento.

Newton conclui que, devido a este efeito, a **aberração cromática** seria inevitável nas lentes, o que o leva a inventar o **telescópio refletor**, que usa um espelho côncavo como objetiva.

Segundo Newton, a *força refratante* poderia mesmo ser uma força **gravitacional**, pois cresce com a **densidade** (na ordem crescente de densidade e índice de refração n : vácuo, ar, água, vidro ...), “*exceto para os corpos gordurosos e os sulfurosos*”.

A despeito deste evidente sucesso, a teoria corpuscular da luz contém sérias contradições: a maioria das substâncias que **refratam** a luz também **refletem** ao mesmo tempo. Neste caso, a **direção** da *força refratante* fica indefinida: para fora para explicar a reflexão e para dentro para explicar a refração. No entanto, o grande prestígio de Newton impõe esta teoria, ao menos na Inglaterra, a despeito desses problemas.

6 Mínimo Tempo × Mínima Ação

O modelo corpuscular da luz, conquanto tenha conhecido um período relativamente curto de sucesso, pois foi pouco depois substituído pela teoria ondulatória, deixou uma importante herança para a **mecânica**. Recordemos

que Descartes propusera um modelo corpuscular para a luz, que exigia que $V = \text{constante} \times n$. No entanto, o matemático **Fermat** obtinha resultados equivalentes com o princípio do mínimo tempo, supondo o inverso:

$$V_{\text{luz}} = \frac{\text{constante}}{n}$$

Segundo Fermat, “... a luz, princípio **teológico**, escolhe sempre a via mais rápida ...”. A argumentação de Fermat não conseguiu se impor. Ela implicava na natureza ondulatória da luz, mal aceita em sua época.

No entanto, em 1744 **Maupertuis** procura um princípio de economia da natureza compatível com a teoria **corpuscular** e mecânica de Newton. Introduce, para este fim, uma nova variável: a **ação**, com uma definição ainda ligeiramente diferente da usada na mecânica lagrangiana.

“... ela [a ação] é proporcional à soma dos espaços multiplicada pela velocidade com a qual o corpo os percorreu ... É esta quantidade de ação que representa a verdadeira despesa da Natureza, e que ela economiza ao máximo no movimento da luz”.

Esta nova grandeza integra ao longo do caminho as velocidades, e não seu inverso, corrigindo assim o problema apresentado pela hipótese de Fermat.

Pela hipótese de Maupertuis, a grandeza minimizada pela natureza seria:

$$S = \int V ds$$

supondo

$$\frac{V_r}{V_i} = \frac{n_r}{n_i}$$

Na hipótese de Fermat, o integrando é o **inverso** da velocidade:

$$\Delta T = \int dt = \int \frac{1}{V} ds$$

o que implica que

$$\frac{V_r}{V_i} = \frac{n_i}{n_r}$$

Esta hipótese reproduzia, portanto, os resultados da lei de Snell-Descartes dentro de uma teoria **corpuscular** da luz.

É interessante notar que, embora no século XVIII o mecanicismo estivesse bem estabelecido, a hipótese de Maupertuis, como a de Fermat, aparenta implicar numa doutrina **finalista**:

*“... conheço a repugnância que os matemáticos têm pelas causas finais aplicadas à física e eu os aprovo mesmo até certo ponto ... não se pode, no entanto, duvidar de que todas as coisas sejam regidas por um **ser supremo** que, enquanto ele imprimiu à matéria forças que denotam sua potência, destinou-a a executar efeitos que marquem sua sabedoria ” (!!!)*

Maupertuis estende, em seguida, seu **princípio da mínima ação** para a mecânica dos corpos em geral, aplicando-a, por exemplo, ao problema das colisões. Embora este princípio seja posteriormente abandonado quando do triunfo da teoria ondulatória da luz, serviu de ponto de partida para a construção da mecânica de **Lagrange**, posteriormente consagrada no contexto da **Mecânica**.