



## SEARA DA CIÊNCIA

### CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



#### Lentes Delgadas.

Uma das mais antigas referências ao uso de uma **lente** parece haver ocorrido em 423 a. C., por ocasião da encenação da peça **As Nuvens** (“Nephelai”, em grego) do teatrólogo grego Aristófanes (c.450-c.388). Nela, um velho velhaco de nome Strepsíades, depois de consultar o filósofo grego Sócrates de Atenas (c.427-c.399) usa um vidro polido para focar os raios de Sol sobre um tablete de cera e, com isso, apagou um registro de um débito de jogo.

Ainda na Antiguidade, os estudiosos de Óptica além de se preocuparem com a propagação e natureza da luz, também estudaram as propriedades refratadoras de esferas de cristais e de vidros, bem como as propriedades refletoras das superfícies espelhantes planas e curvas. Seus estudos se dividiam em duas grandes partes: a **Óptica**, que tratava da teoria geométrica da percepção visual do espaço e dos objetos nele situados; e a **Catóptrica**, que estudava principalmente a teoria dos espelhos e alguns fenômenos relacionados com a refração. Assim tivemos, por exemplo, os livros: **Óptica** e **Catóptrica** do matemático grego Euclides de Alexandria (323-285); **Catóptrica** do matemático e inventor grego Arquimedes de Siracusa (c.287-c.212); **Catóptrica** do matemático e inventor grego Heron de Alexandria (c.20 d.C.- ? ); e **Óptica** do astrônomo grego Cláudio Ptolomeu (85-165).

Por volta de 1038, o físico e matemático iraniano Abu-‘Ali Al-Hasan Ibn Al-Haytham (Al-Hazen) (c.965-1038) publicou o livro intitulado **Kitab Al-Manazer** (“Tesouro da Óptica”), no qual mostrou que o poder de ampliação das **lentes** (formadas pelo polimento de vidros que os tornava com a forma esférica) era devido à sua curvatura, e não a uma propriedade intrínseca do vidro, conforme a opinião da época. Ele chegou a essa conclusão ao estudar a estrutura anatômica do **olho**, principalmente o cristalino, que o considerava como sendo o receptor de imagens.

Em 1267, o filósofo e monge franciscano inglês Roger Bacon (c.1220-1292) reuniu seus estudos sobre Óptica em seu livro intitulado **Opus Majis** (“Obra Maior”), no qual apresentou a idéia de usar **lentes** (construídas por ele) em espetáculos teatrais, assim como para tornar o Sol, a Lua e as estrelas mais perto de nós.

O emprego de **lentes** para corrigir defeitos de visão, isto é, seu emprego como **óculos** só ocorreu na Idade Média, entre 1280 e 1289, no vale do Rio Arno, na Itália. No entanto, eles eram muito grosseiros, dando imagens deformadas dos objetos, pois as técnicas de polimento de vidro ainda não eram muito apuradas naquela época. [W. T. Sedgwick, H. W. Tyler e R. P. Bigelow, **História da Ciência: Desde a Remota Antiguidade Até o Alvorecer do Século XX** (Editora Globo, 1950); Jean Rosmorduc, **De Tales a Einstein** (Editorial Caminho, 1983).]

A melhora na técnica de polimento de vidros, ocorrida durante a Renascença, permitiu que se estabelecesse a profissão de fabricante de **óculos**. E foram justamente esses profissionais que inventaram os instrumentos ópticos que estenderam o emprego da visão: **microscópio** e **telescópio**. Em 1590, o óptico holandês Hans Janssen [auxiliado por seu filho Zacharias (1580-

c.1638)], utilizou uma **lente côncava** e uma **lente convexa**, de pequeno poder de aumento, e inventou o **microscópio composto**. Um dispositivo semelhante a esse, ou seja, duas lentes colocadas em linha foi utilizado pelo óptico holandês Hans Lippershey (c.1570-c.1619), em 1608, para observar o catavento de uma torre distante, e com ele percebeu que o catavento lhe parecia ampliado. [Tony Osman, **Eureka!** (Labor do Brasil, 1975).] Registre-se que um instrumento desse tipo, mais tarde denominado de **telescópio** (vide verbete nesta série), já havia sido construído por Zacharias Janssen, em 1604, imitando um dispositivo análogo que fora inventado na Itália, em 1790.

Muito embora o físico, matemático e astrônomo italiano Galileu Galilei (1564-1642) haja utilizado o **telescópio** que construíra [usando duas **lentes de óculos** (uma convergente e a outra divergente)], em 1609, para observar os astros celestes, o estudo matemático das **lentes** foi iniciado pelo astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630), em 1610, quando escreveu seu famoso livro **Dioptrice** (“Dióptrica”), no qual tentou usar funções trigonométricas para estudar a refração da luz (vide verbete nesta série). Em seu estudo sobre a refração da luz, Kepler tentou resolver um problema que era conhecido desde a Antiguidade: as lentes esféricas apresentavam uma dificuldade de focagem. Por exemplo, objetos distantes não produziam imagens pontuais, ou seja, o **foco imagem da lente esférica** não é bem definido. Conhecedor das seções cônicas, que haviam sido descobertas pelo matemático grego Apolônio de Perga (c.261-c.190), Kepler acreditava que qualquer uma daquelas seções (circular, elíptica, parabólica ou hiperbólica) resolveria esse problema. Ainda nesse livro, Kepler apresentou a sua teoria da visão afirmando que os raios luminosos provenientes de objetos visíveis, depois de se refratarem nas **lentes dos olhos** (cristalino), projetam-se em forma invertida na retina. É oportuno registrar que, antes, em 1604, no livro intitulado **Ad Vitellionem Paralipomena** (“Suplemento à Óptica de Vitelo”), Kepler já havia desenvolvido uma teoria da visão e, com ela, explicou o funcionamento de **óculos** para míopes e presbitas. É interessante destacar que, também nesse livro, Kepler explicou o princípio da **câmara escura**, bem como afirmou que a intensidade da luz variava com o inverso do quadrado da distância e, com isso, ele pode ser considerado o precursor da **fotometria**.

Note-se que o estudo mais detalhado da **fotometria** só foi realizado no Século 18. Com efeito, em 1729, o físico francês Pierre Bouguer (1698-1758) publicou o livro **Essai d'Optique sur la Gradation de la Lumière** (“Ensaio de Óptica sobre a Gradação da Luz”) no qual registrou suas experiências sobre a refração e a absorção da luz na atmosfera terrestre. Ainda nesse livro, Bouguer apresentou sua **lei da atenuação da luz** de um feixe luminoso ao atravessar um meio transparente: - *A intensidade da luz varia com o inverso do quadrado da distância*. Essa lei foi confirmada pelo astrônomo, filósofo, físico e matemático suíço-alemão Johann Heinrich Lambert (1728-1777) em seu livro intitulado **Photometria** (“Fotometria”), publicado em 1760, no qual descreveu suas medidas precisas da intensidade da luz das fontes luminosas.

Voltemos às **lentes**. A solução do problema da focagem desses instrumentos ópticos foi encontrada pelo filósofo e matemático francês René du Perron Descartes (1596-1650) ao estudar o problema mais geral, que era o de encontrar qual a superfície que separando dois meios refringentes, faria com que os raios luminosos partindo de um mesmo ponto e após se refratarem nessa superfície, convergiria para um outro ponto bem determinado. Descobriu então Descartes que a curva que gera tal superfície é uma oval, hoje conhecida como **oval de Descartes**, apresentada em seus livros **La Dioptrique** (“A Dióptrica”), e **La Geometrie** (“A Geometria”), suplementos acrescentados ao seu famoso **Discours sur la Methode** (“Discurso sobre o Método”), de 1637. Aliás, nesses suplementos, além de apresentar sua **Lei da Refração**, abordou o problema de projetar **lentes** para telescópios, microscópios, e outros instrumentos ópticos que eram importantes para o desenvolvimento da Física e da Biologia.

Ainda no Século 17, o físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727) deu novas contribuições ao estudo das **lentes**. Por exemplo, em 1666, ao observar a **dispersão da luz** em um prisma, entendeu a razão das imagens turvas dos astros que apareciam quando eram

usados **telescópios** mais potentes. Esse fenômeno era conhecido como **aberração cromática**, decorrente da mistura das cores nas imagens refratadas. Em vista disso, em 1668, inventou o **telescópio refletor**, em que a **lente ocular** era substituída por um **espelho parabólico**. Em 1670, ele usou uma lente de curvatura conhecida sobre um pedaço de vidro plano e descobriu os famosos **anéis de Newton**. É interessante registrar que, em 1678, o matemático, físico e astrônomo holandês Christiaan Huygens (1629-1695) comunicou à *Royal Academy of Sciences* o texto **Treatise of Light** (“Tratado da Luz”), no qual formulou a proposta de que a luz era uma **onda**, em contraposição a Newton que admitia ser a luz uma **partícula**. Nesse texto, publicado como livro em 1690, Huygens demonstrou as leis da reflexão e da refração da luz (sobre essas leis ver verbetes nesta série), assim como estudou a forma de uma **lente** para evitar a **aberração esférica**, segundo a qual os raios luminosos incidentes paralelos ao eixo da **lente**, não convergem em um mesmo ponto depois de refratados. Registre-se que Newton havia definido como **foco** o ponto para o qual convergem ou divergem os raios incidentes depois de refratados.

Em 1704, Newton publicou seu famoso tratado intitulado **Optics, or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light** (“Óptica, ou um Tratado das Reflexões, Refrações, Inflexões e Cores da Luz”) composto de três livros. Nesse tratado, além de reunir os resultados de suas pesquisas em Óptica realizadas na segunda metade do Século 17, ele apresenta a hoje famosa **Equação de Newton das Lentes** (em notação atual):  $x_0 x_i = f^2$ , onde  $x_0$  e  $x_i$  representam, respectivamente, as distâncias do **foco objeto** ao objeto, e do **foco imagem** à imagem, e  $f$  é a **distância focal** da lente.

Mais tarde, em 1738, o matemático inglês Robert Smith (1689-1768) desenvolveu uma regra prática para determinar a imagem de um objeto colocado na frente de uma **lente**. Segundo essa regra, todo raio luminoso emitido pelo objeto e que incide na lente paralelamente ao eixo focal, se refratará passando pelo **foco imagem**; se aquele raio incidir na lente passando pelo **foco objeto**, se refratará paralelamente ao **eixo focal**; por fim, se aquele raio incidir na **lente** passando pelo seu **centro óptico**, ele não sofrerá desvio ao emergir da **lente**. Mais tarde, como veremos mais adiante, foi visto que essa regra é válida apenas para **lentes delgadas** e para raios incidentes próximos (**raios paraxiais**) do **eixo focal** (reta contendo os focos e o centro óptico) para evitar a **aberração da esfericidade** (vide verbete nesta série). Registre-se que, em 1760, o físico e matemático sueco Samuel Klingenstierna (1698-1765) apresentou uma compreensiva teoria sobre as aberrações das **lentes: esférica, cromática** e o **coma**. Esta é uma aberração de uma **lente** ou espelho no qual a imagem de um ponto fora de seu eixo focal tem a aparência de um cometa, e é provocado pela difração da luz.

No Século 19, novos aspectos do estudo das **lentes** foram discutidos. Logo no início desse Século, em 1801, o físico e médico inglês Thomas Young (1773-1796) – o descobridor da **interferência luminosa** – explicou a **acomodação visual** do olho humano, estudo que iniciara em 1793, dizendo que o cristalino altera seu raio de curvatura para poder dar nitidez às imagens de objetos colocados em lugares diferentes. Além do mais, descobriu que o **astigmatismo** – defeito de uma **lente** pelo qual há distorção de um plano colocado em seu foco – do globo ocular decorre da irregularidade da curvatura da córnea.

Em 1841, o físico e matemático alemão John Karl Friedrich Gauss (1777-1855) apresentou seu clássico **Reports on the Teaching of Geometrical Optics** (“Informações sobre o Ensino da Óptica Geométrica”), no qual expôs o conceito de **distância focal** ( $f$ ) e desenvolveu fórmulas para o cálculo da posição e do tamanho de imagens formadas por **lentes delgadas** com determinados  $f$ . Em notação atual, seguem as chamadas **Equações de Gauss**:

$$1/f = 1/p + 1/p' \text{ (Equação dos Focos Conjugados);}$$

$$1/f = (n_2/n_1 - 1) (1/r_2 + 1/r_1) \text{ (**Equação dos Fabricantes de Lentes**)};$$

$$m = I/O = p'/p \text{ (**Equação da Amplificação**)},$$

onde  $p$  e  $p'$  representam, respectivamente, as distâncias do objeto (de altura  $O$ ) e de sua imagem (de altura  $I$ );  $n_2$  e  $n_1$ , significam, por sua vez, os **índices de refração** do material de que é feita a **lente** e do meio refringente onde a mesma se encontra;  $r_2$  e  $r_1$  são os raios de curvatura das superfícies que compõem a **lente**, com sinais convencionados da seguinte maneira: negativo (-) para côncavas e positivo (+) para as convexas. É oportuno destacar que as **Equações de Gauss** só valem para os **raios paraxiais**.

É oportuno salientar que, de um modo geral, as **lentes delgadas** são de dois tipos: **convergentes** ( $f > 0$ ), constituídas de duas superfícies esféricas convexas, formando imagens reais de objetos reais; e as **divergentes** ( $f < 0$ ), constituídas de duas superfícies esféricas côncavas, formando imagens virtuais de objetos reais.

Por fim, sobre o estudo das **lentes** é importante destacar que o físico alemão Ernst Abbe (1840-1905), em 1879, propôs sua célebre expressão que deve ser satisfeita por uma **lente** para produzir uma imagem nítida, sem distorção causada pela **aberração de esfericidade** e o **coma**:  $\sin u / \sin u' = M$ , onde  $u$  e  $u'$  são, respectivamente, os ângulos da base de um triângulo formado pelo ponto objeto ( $O$ ) e pelo ponto imagem ( $O'$ ), e um ponto  $P$  qualquer da **lente**; por sua vez,  $M = \ell' / \ell$ , com  $\ell = OP$  e  $\ell' = O'P$ . Essa expressão é conhecida como **relação de seno de Abbe**.



**ANTERIOR**

**SEGUINTE**