



## SEARA DA CIÊNCIA

### CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



#### Reflexão da Luz e Espelhos.

Parece haver sido o filósofo grego Aristóteles de Estagira (384-322) o primeiro a ter conhecimento da **Lei da Reflexão da Luz** - *O ângulo de incidência (i) é igual ao ângulo de reflexão (r):  $i = r$* . Essa lei também foi objeto de estudo por parte do matemático grego Euclides de Alexandria (c.323-c.285). Com efeito, no tratado denominado **Catóptrica**, ele descreveu o comportamento de raios luminosos refletidos por espelhos planos, côncavos e convexos, usando algumas definições e 31 proposições. Ainda nesse tratado, ao admitir a trajetória retilínea do raio luminoso, e com seus conhecimentos geométricos (que os havia apresentado em seu famoso livro **Elementos de Geometria**), Euclides demonstrou corretamente a **Lei da Reflexão da Luz**, e mostrou que a mesma era válida para espelhos planos e esféricos. Registre-se que no tratado citado acima, Euclides descreveu a possibilidade de tornar visível a um observador, um anel colocado em um vaso transparente, bastando para tal derramar água no mesmo. [Carl B. Boyer, **A History of Mathematics** (John Wiley and Sons, 1968); Morris Kline, **Mathematical Thought from Ancient to Modern Times** (Oxford University Press, 1972); Carlos Tomei, **Euclides: A Conquista do Espaço** Odysseus, 2003].

O matemático e inventor grego Arquimedes de Siracusa (287-212), em seu livro **Catóptrica**, estudou os espelhos que apresentavam a propriedade de concentrar, em determinados pontos, raios luminosos paralelos incidentes, como ocorre com os espelhos esféricos e os parabolóides de revolução, espelhos esses denominados de **incandescentes** ou **ustórios**. É interessante registrar que, segundo conta a lenda, Arquimedes construiu um espelho de cobre (Cu) em forma de parabolóide de revolução e o teria usado para incendiar os navios romanos que invadiram Siracusa, em 214 a. C., invasão essa comandada pelo general e cônsul romano Marcus Claudius Marcellus (c.268-c.208), por ocasião da **Segunda Guerra Púnica** (218-201), entre Roma e Cartago. Segundo o filósofo da ciência francês Pierre Thuillier (1927-1998), no livro **De Arquimedes a Einstein: A face oculta da invenção científica** (Jorge Zahar Editor, 1994), parece que um certo Proclus teria também utilizado espelhos ardentes para destruir a frota do general cita Vitalino, quando este cercou Constantinopla (atual Istanbul, na Turquia) em 514 d.C.

É interessante ressaltar que sobre essa possível façanha “incendiária” de Arquimedes há muita controvérsia. Por exemplo, o filósofo e matemático francês René du Perron Descartes (1596-1650) em sua **Dióptrica**, publicado em 1637, afirma que para atear fogo, a grande distância, por intermédio de um espelho ardente, é necessário que ele tivesse um tamanho desmesurado. No entanto, a possibilidade de usar espelhos com a finalidade de atear fogo, foi confirmada pelo naturalista francês George Louis LeClerc, Conde de Buffon (1707-1788), em 1747, ao construir um espelho formado por 168 vidros de pequeno tamanho e conseguir incendiar umas pranchas de madeira untadas com breu, distanciadas de 50 metros de seu dispositivo [José Babini, **Arquimedes** (Espasa-Calpe Argentina S. A., 1948)]. Em 1973, o engenheiro grego Ioannis Sakkas fez uma réplica da experiência “incendiária” de Arquimedes. Para isso, usou espelhos (de vidro) com superfícies e dimensões comparáveis às dos clássicos escudos dos soldados gregos (cerca

de 1,70 m por 0,70 m) e recobriu-os com uma fina película de bronze não muito polida. Depois de preparar dessa forma 66 “escudos-espelhos”, deu-os a seus ajudantes, que, no Porto de Pireu, na Grécia, concentraram os raios solares sobre um modelo reduzido de galera, de 3,60 m de comprimento, que flutuava cerca de 50 m de distância. Em dois minutos o alvo incendiou-se de forma tão intensa e, também intensamente, continuou a se queimar. Para maiores detalhes sobre essa experiência “incendiária” de Arquimedes, ver: Thuillier, op. cit.

Os **espelhos incandescentes** também foram objeto de estudo por parte do matemático grego Apolônio de Perga (c.261-c.190) e do matemático grego Diocles (f.c. final do Século 2, a.C.), em livros que tinham o mesmo título: **Espelhos Incandescentes**. Apolônio também observou que os espelhos elipsoidais apresentavam a propriedade de que todos os raios luminosos emanados de um de seus focos refletem-se no foco conjugado. Observe-se que Apolônio foi um dos primeiros matemáticos a estudar de maneira sistemática as secções cônicas (elipse, parábola e hipérbole), em seu livro denominado **Cônicas**.

No começo da Era Cristã (d.C.), o matemático e inventor grego Heron de Alexandria (c.20 d.C.- ? ) publicou o livro intitulado **Catóptrica**, no qual explicou a propagação retilínea da luz e formulou, com base na **Lei da Reflexão da Luz**, de Aristóteles e Euclides, o seguinte princípio: - *É mínimo o trajeto descrito por um raio luminoso* [A. d’Abro, **The Rise of New Physics** (Dover, 1952)]. Ainda nesse livro, Heron tratou de **espelhos côncavos** e **convexos**, bem como de sua associação. Parece ser ainda dele a observação de que se podem obter várias imagens de um objeto colocado entre dois **espelhos planos** formando um determinado ângulo. Apesar dessa observação, o **caleidoscópico**, que se baseia nesse princípio (formação de várias imagens), só foi inventado pelo físico irlandês Sir David Brewster (1781-1868), em 1816.

Os espelhos parabólicos e sua propriedade de incandescência foram também estudados pelos matemáticos gregos Pappus de Alexandria (c.260 d.C.- ? ) e Anthemius de Tralles (c.474- c.534). Este, por sinal, como também era arquiteto, ajudou Isidoro de Mileto na construção da igreja de Santa Sophia, em Constantinopla, em 532.

A **Lei da Reflexão da Luz** de Aristóteles e Euclides recebeu uma importante contribuição por parte do físico e matemático iraquiano Abu-’Ali Al-Hasan ibn al-Haytham (al-Hazen) (c.965-1038). Com efeito, em seu livro intitulado **Kitab Al-Manazer** (“Tesouro da Óptica”), publicado por volta de 1038, usando argumentos geométricos, al-Hazen completou aquela Lei, afirmando: - *O raio incidente, o raio refletido e a normal estão em um mesmo plano*. Ele, também, nesse livro, redescobriu a “lei do trajeto mínimo da luz” descoberto por Heron. Ao estudar algumas propriedades dos espelhos esféricos e parabólicos, principalmente a determinação de seus focos, determinação essa conhecida como o **problema de al-Hazen**, descobriu a hoje famosa a **aberração de esfericidade** dos espelhos esféricos, isto é, a indefinição do foco de tais espelhos, quando um feixe de raios luminosos incidentes nos mesmos for de grande abertura angular. Observou ainda al-Hazen que isso não acontece nos espelhos parabólicos, uma vez que os raios luminosos incidentes são refletidos e focalizados em um mesmo ponto, independente da distância daqueles raios ao eixo do espelho. É oportuno registrar que, em virtude dessa propriedade, os espelhos parabólicos foram usados, antigamente, como **incandescentes** e hoje, nos faróis de carro. Registre-se, também, que esse livro de al-Hazen foi usado pelo erudito inglês Robert Grosseteste (c.1175-1253) em suas experiências com a Óptica Geométrica. (Boyer, op. cit.).

Em 1558, o físico e filósofo italiano Giambatista Della Porta (c.1535-1615) publicou o livro intitulado **Magia Naturalis** (“Magia Natural”) (re-editado em 1589), no qual descreveu as experiências que realizou com espelhos esféricos, particularmente os **côncavos**, ocasião em que descobriu que o foco dos mesmos apresentava a propriedade de inverter a imagem, isto é, enquanto objetos colocados entre o foco e o espelho davam imagens virtuais (por trás do espelho) e diretas, as mesmas se tornariam reais (formadas na frente do espelho) e invertidas, quando os objetos fossem colocados além do foco. Isso o levou a denominar o foco de um **espelho côncavo**

de **ponto de inversão**. Essas experiências levaram-no, também, à observação do efeito “incandescente” de raios solares incidindo nesse tipo de espelho. [A. Kistner, **Historia de la Física** (Editorial Labor, 1934).]

Em 1567, o matemático e astrônomo italiano, o Abade Francesco Maurolycus (1494-1575), escreveu o texto **Photismi de Lumine et Umbra ad Perspectivam et Radiorum Incidentiam Facientes**, no qual tratou de suas experiências sobre a Óptica Geométrica (p.e.: projeção de sombras e reflexão da luz). Ao trabalhar com espelhos esféricos, ele descobriu a **cáustica** – *uma superfície (ou envelope) envolvendo raios refletidos*. Note-se que, em 1694, o matemático suíço James (Jakob, Jacques) Bernouilli (1654-1705) demonstrou que a **cáustica** (de reflexão e de refração), tem a forma de uma espiral logarítmica.

No início do Século 18, a **reflexão da luz** foi tratada pelo físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727), em seu 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”), publicado em 1704. Usando a hipótese newtoniana de que a luz era uma partícula, a **Lei da Reflexão da Luz** é facilmente demonstrada usando a teoria de choque de partículas e a Lei de al-Hazen. É oportuno salientar que essa teoria havia sido intuída pelo artista, inventor e cientista italiano Leonardo da Vinci (1452-1519) ao afirmar que: - *Existe uma igualdade entre os ângulos de incidência e de reflexão no choque de um corpo contra uma parede rígida*.

O estudo quantitativo da **reflexão da luz** foi apresentado pelo físico e matemático alemão John Karl Friedrich Gauss (1777-1855), em seu clássico texto **Reports on the Teaching of Geometrical Optics** (“Informações sobre o Ensino da Óptica Geométrica”), publicado em 1841, no qual expôs o conceito de **distância focal** ( $f$ ) e desenvolveu fórmulas para o cálculo da posição e do tamanho de imagens formadas por **espelhos** (e, também, para **lentes delgadas**) com determinados  $f$ . Em notação atual, seguem as chamadas **Equações de Gauss** (válidas apenas para raios paraxiais – próximos do eixo do espelho):  $1/f = 2/r = 1/p + 1/p'$  (**Equação dos Focos Conjugados**); e  $m = I/O = p'/p$  (**Equação da Amplificação**), onde  $p$  e  $p'$  representam, respectivamente, as distâncias do objeto (de altura  $O$ ) e de sua imagem (de altura  $I$ );  $r$  é o raio de curvatura do espelho. Essas grandezas ópticas são convencionadas da seguinte maneira. **Distância focal** ( $f$ ): valor positivo (+) para os **espelhos côncavos** e valor negativo (-) para os **espelhos convexos**; **Distância objeto** ( $p$ ): (+) para os objetos reais (colocados na frente do espelho) e (-) para os objetos virtuais (colocados atrás dos espelhos); **Distância imagem** ( $p'$ ): (+) para as imagens reais (formadas na frente do espelho) e (-) para as imagens virtuais (formadas atrás dos espelhos); a **Imagem** é invertida, quando  $p$  e  $p'$  têm o mesmo sinal, e direta, quando os sinais são contrários. É oportuno destacar que, para o caso os **espelhos planos** ( $r = \infty$ ), as **Equações de Gauss** são escritas na forma:  $p = -p'$  e  $m = -1$ , ou seja, a imagem de um objeto real é sempre virtual e direta. [John Strong, **Concepts of Classical Optics** (W. H. Freeman and Company, 1958)].

É interessante ressaltar que os **espelhos**, principalmente os **planos**, são usados em truques de mágica ilusionista. Um dos mais famosos desses truques foi o usado para fazer desaparecer um elefante dentro de uma jaula. Com finos, longos e verticais espelhos planos colocados atrás das barras e ligados a um mecanismo adredemente preparado, o mágico canadense Doug Henning (Douglas James Henning) (1947-2000), em seu programa de televisão na NBC, o **Doug Henning's World of Magic** (iniciado em dezembro de 1975), fazia um elefante desaparecer e aparecer fora da jaula, ao girar o seu mecanismo de um ângulo de  $45^{\circ}$ . [Michio Kaku, **Physics of the Impossible** (Anchor Books, 2008); [pt.wikipedia.org/wiki/Doug\\_Henning](http://pt.wikipedia.org/wiki/Doug_Henning) (acesso em 13/07/2009)].



ANTERIOR SEGUINTE