



SEARA DA CIÊNCIA

CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



O Arco-Íris.

Parece haver sido o filósofo grego Aristóteles de Estagira (384-322) o primeiro a tentar uma explicação para o **arco-íris**, ao afirmar que o mesmo era devido a gotículas de água contidas na atmosfera, que refletiam a luz do Sol e que causavam a variação da cor. Observou ainda Aristóteles que a reflexão da luz do Sol pelas nuvens ocorria para um ângulo determinado, dando surgimento, portanto, tal reflexão, a um cone circular de "*raios de arco-íris*". Contudo, somente em 1266 é que o filósofo e monge franciscano inglês Roger Bacon (c.1220-1292) mediu pela primeira vez tal ângulo, encontrando o valor aproximado de 42° . Aliás, Bacon achava que o arco-íris era devido a pequenas imagens do Sol desvanecidas em inúmeras gotas d'água, e que suas cinco (5) cores eram devidas a um fenômeno subjetivo produzido pelo olho.

Na segunda metade do Século 13, o físico persa Ibn Marud Al-Schirazi (f.c. metade do Século 13) complementou a explicação de Aristóteles ao afirmar que além da reflexão nas gotículas d'água, haveria também uma dupla refração (de fora para dentro e de dentro para fora das gotículas d'água). Essa idéia foi comprovada pelo monge e erudito alemão Dietrich von Freiberg (Theodorico de Freiberg) (c.1250-c.1310). Com efeito, em 1304, ele escreveu o livro intitulado **De Iride et Radialibus Impressionibus** (*Sobre o Arco-Íris e as Impressões Causadas pelos Raios*), no qual apresentou a hipótese de que o arco-íris era resultado de uma combinação de refração e reflexão da luz solar por gotículas de chuva individuais, e não coletivamente como considerava Aristóteles. A fim de verificar essa hipótese, encheu esferas cristalinas ocas com água e as colocou no trajeto de raios solares. Com essa experiência, Teodorico conseguiu reproduzir tanto o arco-íris primário quanto o secundário. Além do mais, demonstrou que o arco-íris secundário tinha invertida a ordem de suas cores em relação à do primário e que o ângulo entre os raios incidente e emergente dos raios secundários eram maior do que 11° em relação ao primário. Com isso, Theodorico explicou a chamada **região escura de Alexandre**, região situada entre os dois arco-íris (primário e secundário) e que havia sido descrita pela primeira vez pelo filósofo grego Alexandre de Afrodísias (f.c. Século 3 ou Século 2, a. C.), por volta de 200 a. C.. Registre-se que experiências análogas à de Theodorico foram realizadas pelo físico polonês Witelo (c.1225-c.1275) (cerca de 1274), pelo Arcebispo de Spalato, Antonius de Dominis (por volta de 1591), e pelo filósofo e matemático francês René du Perron Descartes (1596-1650), em 1637.

Apesar de todas essas explicações sobre a natureza do arco-íris, três questões ainda esperavam resposta. 1) Porquê o arco-íris só é visto sob um certo ângulo; 2) a razão de suas cores; 3) a presença dos **arcos supranumerários**, constituídos por uma série alternada de bandas fracas, rósea e verde, e localizados logo abaixo do arco-íris primário. A primeira dessas questões foi respondida por Descartes, graças a sua **Lei da Refração da Luz**, obtida em 1637. [Note-se que essa lei havia sido observada experimentalmente pelo astrônomo e matemático holandês Willebrord van Roijen Snell (1591-1626), em 1621, daí ela ser

$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

conhecida como **Lei de Snell-Descartes**, dada por $\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$, onde i , r representam, respectivamente, os ângulos de incidência e de refração, com n_i , n_r seus respectivos índices de refração.] A segunda, ou seja, a razão das cores do arco-íris foi explicada pelo físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727), em 1666, graças ao seu estudo sobre a dispersão da luz do Sol nos prismas. [Note-se que o estadista e filósofo romano Lucius Annaeus Sêneca (4 a. C.-65 d. C.) parece haver sido o primeiro a observar a decomposição espectral da luz (dispersão) nas margens de vidros. Ele também chegou a observar que uma esfera de vidro cheia d'água poderia ser usada como vidro de aumento.] A terceira, isto é, os **arcos supranumerários**, só foram explicados pelo físico e médico inglês Thomas Young (1773-1829) como sendo devidos à

interferência dos raios espalhados pelas gotículas d'água. Observe-se que Young descobriu a interferência luminosa em 1801.

A descoberta da polarização da luz pelo físico francês Étienne-Louis Malus (1775-1812), em 1808, permitiu que se observassem um novo aspecto do arco-íris, ou seja, o de que suas cores são completamente polarizadas. Note-se que tal efeito deve-se ao fato de que o ângulo interno de incidência da luz solar na gotícula d'água ser muito próximo ao **ângulo de Brewster** (θ_B), ângulo sob o qual ocorre a polarização por reflexão. Registre-se que esta foi descoberta pelo físico irlandês Sir David Brewster (1781-1868), em 1815. Como o raio refletido polarizado é perpendicular ao raio

refratado, que é também polarizado, a lei de Snell-Descartes nos mostra que $\operatorname{tg} \theta_B = \frac{n_r}{n_i}$.

Com o advento da Teoria Eletromagnética da Luz, apresentada pelo físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879) em seu famoso livro intitulado **A Treatise on Electricity and Magnetism**, publicado em 1873, começou-se a estudar o espalhamento da luz pela matéria e, conseqüentemente, o problema do arco-íris passou a ser pesquisado sob esse novo ponto de vista. Desse modo, o físico alemão Gustav Mie (1868-1957), em 1908 (*Annales de Physique Leipzig* **25**, p. 377), explicou o espalhamento da luz por uma gotícula d'água na atmosfera. No entanto, logo se descobriu que a solução exata, em forma de série, encontrada por Mie, apresentava uma grande dificuldade, pois a mesma só se aplicava a partículas de dimensões pequenas comparadas com o comprimento de onda da luz. Como a gotícula d'água na atmosfera atinge dimensões milhares de vezes maiores do que o comprimento de onda da luz, era necessário somar milhares de termos da **série de Mie** para se ter um resultado razoável. Esse problema foi então contornado com a aplicação da Teoria do Momento Angular Complexo, desenvolvida no começo do Século 20 pelos matemáticos, o francês Henri Poincaré (1854-1912) e o inglês George Neville Watson (1886-1965) e aplicada ao problema do arco-íris pelos físicos alemães Balthasar van der Pol (1889-1959) e H. Bremmer, em 1937, e pelo físico brasileiro Herch Moisés Nussenzveig (n.1933), em 1969 (*Journal of Mathematical Physical* **10**, p. 125). Graças a esse trabalho, Nussenzveig ganhou o **Prêmio Max Born**, da *Optical Society of America*, em 1986. Para maiores detalhes sobre o arco-íris ver os artigos: KHARE, V. and NUSSENZVEIG, H. M. 1974. *Physical Review Letters* **33**, p. 976; NUSSENZVEIG, H. M. 1977. *Scientific American* **236**, p. 116.

Nota do editor: Um relato de como o arco-íris contribuiu para o abandono da teoria corpuscular da luz, defendida por Isaac Newton, está em [DESCREVENDO O ARCO-ÍRIS](#).