



SEARA DA CIÊNCIA CURIOSIDADES DA FÍSICA

José Maria Bassalo



A Refração da Luz e o Índice de Refração: Positivo e Negativo.

Uma das primeiras observações sobre a refração da luz foi apresentada pelo matemático grego Euclides (323-285), que viveu em Alexandria e Megara, no livro intitulado **Catóptrica**, no qual escreveu que para tornar visível a um observador um anel colocado em um vaso transparente, bastava derramar água no mesmo. Aliás, é ainda nesse livro que Euclides demonstrou, usando os seus conhecimentos de Geometria, a **lei da reflexão da luz: o ângulo de incidência (i) igual ao ângulo de reflexão (r)**. Afirmou também que essa lei era válida quer para espelhos planos, quer para espelhos esféricos. [Morris Kline, **Mathematical Thought from Ancient to Modern Times** (Oxford University Press, 1972).]

Por outro lado, uma primeira tentativa para estudar analiticamente a refração da luz, foi realizada pelo astrônomo grego Cláudio Ptolomeu (85-165). Com efeito, em seu livro **Óptica**, ele apresentou uma tabela na qual registrou os ângulos de incidência (i) e de refração (r) de raios luminosos que atravessavam superfícies de separação entre ar-água, ar-vidro e água-vidro, ângulos esses medidos por um aparelho bem simples inventado pelo próprio Ptolomeu. Ao examinar essa tabela, percebeu que quando esses ângulos eram pequenos a relação entre os mesmos permanecia constante. No entanto, para ângulos maiores, Ptolomeu notou que se i_1 e i_2 são dois ângulos de incidência e se r_1 e r_2 são os ângulos de refração correspondentes, e se $i_2 > i_1$, então: $i_2/i_1 > r_2/r_1$. Além do mais, e ainda para ângulos maiores, ele formulou uma lei do tipo: $r = ai + bi^2$, onde a e b são constantes. Ele também afirmou que a “quantidade” da refração depende da densidade do meio.

Uma outra tentativa para estudar quantitativamente a refração da luz foi apresentada pelo físico e matemático iraquiano Abu-’Ali Al-Hasan ibn al-Haytham (al-Hazen) (c.965-1038) em seu livro intitulado **Kitab Al-Manazer** (“Tesouro da Óptica”), escrito por volta de 1038, no qual apresentou correções às tabelas de Ptolomeu. Note-se que, também nesse livro, al-Hazen completou a lei da reflexão da luz, ao escrever que *o raio incidente, o raio refletido e a normal, estão no mesmo plano*, bem como redescobriu o **princípio do trajeto mínimo da luz**, enunciado pelo matemático e inventor grego Heron de Alexandria (c.20-f.c.62), em seu livro **Catóptrica**. [George F. Kneller, **A Ciência como Atividade Humana** (Zahar/EDUSP, 1980).]

Novos estudos quantitativos da refração da luz foram desenvolvidos pelo erudito inglês Robert Grosseteste (c.1175-1253), ao anunciar que *o ângulo de refração é a metade do ângulo de incidência*, e pelo erudito silesiano Witelo (c.1225-c.1275), no livro que escreveu por volta de 1274, intitulado **Perspectiva** e fundamentado nos trabalhos de Ptolomeu e al-Hazen, no qual descreveu suas experiências relacionadas com a refração da luz nas interfaces ar-água, ar-vidro e água-vidro, e apresentando uma tabela dos diversos ângulos de incidência e de refração ocorridos nessas interfaces. Registre-se que esse livro de Witelo foi usado como obra clássica da Óptica por mais de três séculos, sendo então substituído pelo livro **Dioptrice**, escrito pelo astrônomo alemão Johannes Kepler (1571-1630), em 1610. Nesse livro, ele desenvolveu as seguintes relações matemáticas para a **lei da refração da luz**: $i - r = k \sec i$; $2i - r = k \sen i$; $m \operatorname{tg} i = k \operatorname{tg} r$; $\operatorname{tg} i = \sen(i - r)$; $1 - \operatorname{tg} i \operatorname{cotg}(i - r) = k \operatorname{tg} i$; $1 - \operatorname{tg} i \operatorname{cotg}(i - r) = k \sen i$; $i - r = k_1 + k_2 \sec i$; $1 - \operatorname{tg} i \operatorname{cotg}(i - r) = k_1 + k_2 \sen i$, onde i e r representam, respectivamente, os ângulos de incidência e de refração, e os k e m são constantes. [Alan Chalmers, **A Fabricação da Ciência** (EDUNESP,

1994).]

A lei correta da refração da luz (indicada mais abaixo), relacionada com os senos dos ângulos de incidência e de refração, foi descoberta, independentemente, por três cientistas, segundo Chalmers, op. cit. O primeiro, foi o astrônomo e matemático inglês Thomas Harriot (1560-1621) que, em 1616, encontrou experimentalmente essa lei, porém não a divulgou. O segundo, o matemático holandês Willebrord van Roijen Snell (1591-1626), que a encontrou por volta de 1621, também não a divulgou, embora ele haja falado dessa lei em seus manuscritos. O terceiro, foi o matemático e filósofo francês René du Perron Descartes (1596-1650) ao apresentar um tratamento matemático da refração em **La Dioptrique**, texto escrito em 1637 como suplemento de seu famoso **Discours sur la Methode**. Aliás, segundo Chalmers (op. cit.), Descartes já havia demonstrado essa lei por volta de 1619.

Vejamos como Descartes chegou à expressão da lei do seno. No **La Dioptrique**, ele demonstrou que são as semicordas do dobro dos ângulos de incidência e de refração que permanecem constantes quando a luz atravessa a superfície de separação de dois meios transparentes. Além do mais, considerando a luz como uma partícula, deslocando-se com uma velocidade v_1 em determinado meio (1) transparente, incidindo com um ângulo i na interface de um segundo meio (2), também transparente, se refratando de um ângulo r e se deslocando com uma velocidade v_2 ,

Descartes então assumiu que a razão dessas velocidades depende apenas da natureza dos meios considerados. Desse modo, ao considerar que os componentes das duas velocidades paralelos à interface permanecem constantes, demonstrou que (na linguagem atual): $\sin i / \sin r = n_2 / n_1$, com n_2 e n_1 significando, respectivamente, o **índice de refração** de cada meio. De posse desse resultado, Descartes concluiu que se $i > r$, a velocidade da luz é maior em meios mais densos.

Observe-se que, muito embora a palavra **seno** já fosse conhecida nessa época, pois ela havia sido introduzida pelo matemático inglês Robert of Chester (c.1140- ?), Descartes usou as semicordas do dobro dos ângulos, conforme registramos acima. É oportuno salientar que Descartes também se preocupou com a natureza da luz, pois, ainda no **La Dioptrique**, apresentou a idéia de que a luz era essencialmente uma pressão que se transmitia através de um meio perfeitamente elástico – o **éter luminífero** – que enche todo o espaço. Desse modo, ele atribuía a diversidade das cores a movimentos rotatórios (turbilhões) das “partículas luminosas” com diferentes velocidades através desse “éter”. Aliás, Descartes havia formulado esse conceito de “éter”, em 1644, por ocasião em que concebeu a sua Teoria da Gravitação, porque ele não admitia a idéia de uma força “agir à distância”, e sim, apenas por contacto. Por isso, ele considerava que a força de gravidade decorria de uma série de vórtices de diversos tamanhos que se situavam no meio “etéreo”. [William Francis Magie, **A Source Book in Physics** (McGraw-Hill Book Company, Inc., 1935); Sir Edmund Taylor Whittaker, **A History of the Theories of Aether and Electricity** (Thomas Nelson and Sons Ltd., 1951); Carl B. Boyer, **A History of Mathematics** (John Wiley & Sons, 1968); Descartes, *Great Books of the Western World, Volume 28* (Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, 1993); e André Ambrósio Abramczuk, **O Mito da Ciência Moderna** (Cortez/Autores Associados, 1981).]

A **lei da refração da luz** recebeu uma nova demonstração por intermédio do matemático francês Pierre Fermat (1661-1995). Vejamos como. Em agosto de 1657 (*Epistolae 42*), em carta escrita em Toulouse a Cureau de la Chambre, ele enunciou seu famoso **princípio do tempo mínimo**: *A Natureza sempre escolhe os menores caminhos*. De acordo com esse princípio, observou Fermat, a luz, ao se propagar entre dois pontos (P_1 , P_2) de sua trajetória, escolhe um caminho cujo tempo

de percurso seja mínimo. Na notação atual, esse princípio significa dizer que
$$I = \int_{P_1}^{P_2} dt = \int_{P_1}^{P_2} ds/v$$
, assume um valor **mínimo** quando a luz viaja com a velocidade v , entre aqueles dois pontos.

Muito embora Heron e Al-Hazen hajam usado esse princípio em seus estudos sobre a reflexão da luz, conforme vimos anteriormente, foi Fermat quem o utilizou para demonstrar a **lei da refração da luz**, conforme escreveu em uma carta escrita em 1 de janeiro de 1662 (*Epistolae 43*), ainda em Toulouse. Em sua demonstração, Fermat formulou a hipótese de que as **resistências** (inverso da velocidade da luz) dos meios mais densos eram maiores que as **resistências** dos meios menos densos, em frontal desacordo com a opinião de Descartes que afirmava exatamente o contrário, isto é, que a velocidade da luz é maior nos meios mais densos, segundo vimos acima. [Para um

excelente estudo sobre essa demonstração de Fermat, ver: Wolfgang Yourgrau e Stanley Mandelstam, **Variational Principles in Dynamics and Quantum Theory** (Dover Publications, Inc., 1968).]

Registre-se que a hipótese formulada por Fermat descrita acima foi confirmada pelo físico e astrônomo holandês Christiann Huygens (1629-1695) em seu famoso livro intitulado **Traité de la Lumière** publicado em Paris, em 1678, ao demonstrar, por intermédio de sua Teoria Ondulatória da Luz, que: $\sin i / \sin r = v_i / v_r$. Note-se que, mais ou menos por essa mesma época, o matemático e filósofo alemão Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), encontrou essa mesma relação de Huygens aplicando o Cálculo Diferencial (que ele havia desenvolvido em 1675) à condição de ser mínima a **dificuldade de caminho do raio luminoso**. Essa dificuldade era calculada pelo produto do comprimento do percurso pela resistência do meio. [Max Born e Emil Wolf, **Principles of Optics** (Pergamon Press, 1970); Huygens, *Great Books of the Western World, Volume 32* (Encyclopaedia Britannica, Inc., Chicago, 1993); John Losee, **Introdução Histórica à Filosofia da Ciência** (Itatiaia/EDUSP, 1979); Kline, op. cit.; e Whittaker, op. cit.).]

A **refração da luz** também foi objeto de estudo por parte do físico e matemático inglês Sir Isaac Newton (1642-1727), em suas pesquisas realizadas a partir de 1666, comunicadas à *Royal Society of London*, entre 1672 e 1676, e reunidas em seu famoso tratado intitulado **Opticks, or a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light**, publicado em 1704. Nesse livro, há uma afirmação controversa, qual seja, que a velocidade da luz é maior nos meios mais densos, em desacordo com a afirmação de Huygens, segundo dissemos anteriormente. Conforme vimos em verbetes desta série, essa controvérsia só foi resolvida com a formulação matemática da Teoria Ondulatória da Luz desenvolvida pelo físico francês Augustin-Jean Fresnel (1788-1827), entre as décadas de 1810 e 1820, e as experiências realizadas, em 1850, pelos físicos franceses Jean-Bernard-Léon Foucault (1819-1868) (*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* **30**, p. 551), e Armand Hyppolyte Louis Fizeau (1819-1896) e Louis Breguet (1804-1883) (*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* **30**, p.562; 771), nas quais mostraram que a velocidade da luz na água é menor do que o ar. (Nesta oportunidade, é interessante destacar o estudo sobre a **refração da luz** em um meio com **índice de refração variável**, realizado por Lúcio Fassarella, em 2007 (*Revista Brasileira de Ensino de Física* **29**, p. 215.)

Uma outra questão controversa no estudo da Óptica relaciona-se com o problema da **dispersão da luz** (vide verbete nesta série), registrada pela primeira vez pelo estadista e filósofo romano Lucius Annaeus Sêneca (4 a.C.-65d.C) em virtude da observação que fez sobre a decomposição espectral da luz solar ao atravessar um pedaço de vidro. Um estudo mais detalhado dessa dispersão foi pesquisado por Newton, depois de fazer, em 1666, suas famosas experiências sobre a propagação da luz em meios transparentes. Em uma dessas experiências, observou que o **índice de refração** de uma substância variava com a cor, pois, ao examinar através de um prisma um pedaço de papelão pintado de vermelho e azul, notou que, para uma mesma incidência de raios luminosos, os raios refratados pelo prisma eram diferentes para cada cor, já que as imagens das cores do papelão eram deslocadas, havendo, dessa forma, superposição da parte limítrofe das duas regiões pintadas. A controvérsia desse estudo decorre do fato de saber se as cores decompostas na dispersão, em consequência da refração da luz, tem seu comprimento de onda (λ) [ou a frequência linear / angular (v / ω)] associado(a) com o **índice de refração**, isto é: $n(\lambda)$ ou $n(v / \omega)$.

A solução da controvérsia referida acima começou a ser delineada nos trabalhos sobre as propriedades ópticas dos cristais, realizados pelo matemático francês Augustine Louis Cauchy (1789-1857), em 1828 (*Exercices de Mathematiques* **3**, p. 160; 188), em 1830 (*Bulletin des Sciences Mathematiques* **14**, p. 6) e em 1836 (*Comptes Rendus Hebdomadaires des Séances de l'Académie des Sciences de Paris* **2**, p. 341), e da reflexão e refração metálica, nos trabalhos publicados, independentemente, em 1835, pelos físicos, o escocês James MacCullagh (1809-1847) (*Report of the British Association for the Advancement of Sciences*) e o alemão Franz Ernst Neumann (1798-1895) (*Abhandlung Berliner Akademie der Mathematischen: Klasse 1*); e por MacCullagh, em 1836 (*Proceedings of Royal Irish Academy* **1**). Destaque-se que, nesses

trabalhos, a idéia central é a de que o **índice de refração** é uma quantidade representada por um número complexo.

Uma primeira expressão analítica para o **índice de refração** (n) foi deduzida pelo físico e matemático escocês James Clerk Maxwell (1831-1879), em 1865, quando demonstrou que os distúrbios eletromagnéticos que se propagam em um meio cujo $n = \sqrt{\mu \kappa}$, onde μ e κ são, respectivamente, a **permeabilidade magnética** e a **capacidade indutiva específica** daquele meio transparente, o fazem com a velocidade $v = c/n$ (vide verbete nesta série).

Por sua vez, uma primeira evidência da dependência do **índice de refração** (n) com a frequência (ν), foi obtida por W. Sellmeier, em 1871 (*Poggendorff's Annalen der Physik und Chemie* **143**, p. 2271), ao determinar uma relação entre n de uma substância gasosa e ν da luz que o atravessa. No entanto, a demonstração formal dessa relação foi realizada pelo físico holandês Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928; PNF, 1902), em 1892 (*Archives Néerlandaises des Sciences Exactes et Naturelles* **25**, p. 363), por intermédio de sua Teoria dos Elétrons (vide verbete nesta série). A expressão obtida por ele foi: $n(\omega)^2 = (1 + 4\pi N e^2) / [m(\omega_0^2 - \omega^2)]$, onde m e e representam, respectivamente, a massa e a carga do elétron, N é o número de moléculas por unidade de volume de um meio refringente, $\omega_0 = 2\pi\nu_0$, $\omega = 2\pi\nu$, ν_0 é a frequência linear própria dos elétrons constituintes do meio, em torno de posições fixas, e ν é a frequência linear de uma onda eletromagnética monocromática que atravessa o meio considerado.

A idéia de ser o **índice de refração** representado por um número complexo, conforme mostraram as pesquisas independentes realizadas por MacCullagh e Franz Neumann, em 1835, conforme vimos acima, foi confirmada, também em trabalhos independentes realizados pelos físicos, o alemão Ralph de Laer Krönig (1904-1995), em 1926 (*Journal of the Optical Society of América* **12**, p. 547) e, o holandês Hendrik Anthony Kramers (1894-1952), em 1927 (*Estratto degli Atti del Congresso Internazionale de Fisici, Como*, p. 545), ao estudarem a absorção e a dispersão da luz em meios transparentes levando em conta que os elétrons, no interior desses meios, oscilavam com movimento harmônico amortecido, sob a ação de um campo elétrico externo. Eles encontraram que o **índice de refração** é uma função complexa dada por: $n(\omega) = n_{\text{Re}}(\omega) + i n_{\text{Im}}(\omega)$, com:

$$\text{Re} [n(\omega) - 1] = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\text{Im} [n(\omega') - 1]}{\omega' - \omega} d\omega', \quad \text{Im} [n(\omega) - 1] = -\frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\text{Re} [n(\omega') - 1]}{\omega' - \omega} d\omega',$$

onde P representa o **valor principal de Cauchy**. Essas relações são hoje conhecidas como as famosas **relações de dispersão de Kramers-Krönig**.

Na conclusão deste verbete, é oportuno destacar um novo aspecto do **índice de refração** dos materiais. Segundo vimos acima, Maxwell mostrou que $n = \sqrt{\mu \kappa}$. Embora o valor da raiz quadrada de um número possa ser \pm , o sinal (-) nunca havia sido considerado. Quem primeiro pensou na possibilidade de um **índice de refração negativo** foi o físico russo Victor G. Veselago (n. 1929), em 1964/1968 (*Uspekhi Fizika Nauk* **92**, p. 517; *Soviet Physics Uspekhi* **10**, p. 509), ao aventar a hipótese de que meios dispersivos que apresentassem μ e κ negativos, poderiam ter $n < 0$ sem, contudo, violar a **lei da refração**. Portanto, para esses meios com $\kappa < 0$ ou $\mu < 0$, os elétrons se movem na direção oposta à força aplicada pelos campo elétrico ou magnético, portadores de uma determinada frequência. Além disso, as velocidades de fase e de grupo (vide verbete nesta série) teriam direções opostas.

Essa conjectura de Veselago ficou apenas como uma proposta teórica até 1996 (*Physical Review Letters* **76**, p. 4773), quando o físico inglês John B. Pendry, do *Imperial College*, na Inglaterra, em colaboração com A. Holden, W. Stewart e I. Youngs, da *Marconi Materials Technology*, também na Inglaterra, perceberam que um "material" construído de estruturas microscópicas, como fios e anéis, poderia adquirir "novas" propriedades eletromagnéticas, como, por exemplo, **índice de refração negativo**, conforme o próprio Pendry descreveu em 2001 (*Physical Review Letters* **87**, números 249702 e 249704). Uma das predições de Pendry sobre o uso desses **metamateriais**, como ele os denominou, foi a de que uma lâmina desse "novo" material poderia refocar os raios de luz de uma fonte próxima, com resultado melhor do que as lentes tradicionais da Óptica de $n > 0$.

Ou seja, os **metamateriais** poderiam ser usados para construir **superlentes**.

Essas idéias de Pendry foram consideradas pelo físico norte-americano David R. Smith, da *Universidade da Califórnia*, em San Diego, nos Estados Unidos. Com efeito, Smith e colaboradores (R. A. Shelby, S. C. Nemat-Nasser e S. Shultz), em 2000, usaram uma combinação de fios e anéis de cobre (Cu) depositados sobre um circuito ressonador em anel aberto (RAA), entrelaçados e dispostos em formato de prisma. Como os fios forneciam $\kappa < 0$, e os RAA, $\mu < 0$, os dois juntos deveriam produzir um $n < 0$, conforme a conjectura de Veselago, segundo vimos anteriormente. Para efeito de comparação, eles também fabricaram um prisma de teflon com formato idêntico, com $n = + 1.4$. Desse modo, em 2001 (*Applied Physics Letters* **78**, p. 489), eles direcionaram um feixe de microondas sobre uma das faces dos prismas e mediram a intensidade dessas ondas que emergiram em vários ângulos. Como era esperado, o feixe sofreu refração *positiva* (o raio refratado emergiu do outro lado do raio incidente, em relação à normal) no prisma de teflon, mas *negativa* (o raio refratado emergiu do mesmo lado do raio incidente, em relação à normal) no **metamaterial**. A **refração negativa** observada por Smith e colaboradores foi confirmada, em 2002 (*Optical and Quantum Electronics* **34**, p. 133), pelo físico japonês Masaya Notomi, da *NTT Basic Research Laboratories*, no Japão, usando cristais fotônicos, que são estruturas periódicas construídas na escala de comprimentos de onda ópticos. Contudo, essa confirmação foi contestada, ainda em 2002 (*Physical Review Letters* **88**, número 187401), por Prashant M. Valanju, R. M. Walser e A. P. Valanju, pesquisadores da *Universidade do Texas*, que realizaram uma experiência com duas ondas de diferentes comprimentos de onda, incidindo na fronteira entre materiais com índices de refração, positivo e negativo. Como ondas que se propagam na mesma direção interferem produzem um padrão de pulsação que se move com a velocidade de grupo (ver verbete nesta série), eles usaram esse fato para analisar os raios refratados com ângulos ligeiramente diferentes, que emergiam daquela fronteira. Ao perceberem que a pulsação resultante, em vez de se refratar negativamente, exibia refração positiva, concluíram que, embora possa existir um **metamaterial**, a **refração negativa** era impossível.

No ano seguinte, em 2003 (*Physical Review Letters* **90**, número 029703), Pendry e Smith re-analisaram a experiência de Prashant M. Valanju e colaboradores, referida acima. Após refletirem sobre o resultado dessa experiência, admitiram que era errado considerar a conexão entre a velocidade de grupo e o padrão de interferência decorrente de duas ondas que viajam em diferentes direções. Em vista dessa consideração, afirmaram que a **refração negativa** era possível. Ainda em 2003, novas observações da **refração negativa** foram registradas, com diferentes tipos de experimentos, tais como os realizados por: Claudio G. Parazzoli, R. B. Gregor, Kin Li, B. E. C. Koltenbah e Minas Tanielian, da *Boeing Phantom Works* (*Physical Review Letters* **90**, número 107401); Andrew A. Houck, Jeffrey B. Brock e Isaac L. Chuang, do *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) (*Physical Review Letters* **90**, número 137401); e Christophe Caloz e Tatsuo Itoh, da *Universidade da Califórnia*, em Los Angeles (*Journal of Applied Physics* **92**, p. 5560). Registre-se que Caloz e Itoh usaram circuitos eletrônicos análogos a **metamateriais**. [Smith, physicsworld.com, May 1 (2003); Pendry e Smith, *Scientific American Brasil* **51**, p. 56 (2006).]

É oportuno destacar que o estudo de novos **metamateriais** e a possibilidade da construção de **superlentes** usando a idéia de Veselago sobre a **refração negativa** foram apresentados em vários artigos. Vejamos alguns deles. Anthony Grbic e George V. Eleftheriades, pesquisadores da *Universidade de Toronto*, em 2003 (*IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **51**, pgs. 2297; 2604) e em 2004 (*IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **52**, p. 1580); ainda em 2004 (*Physical Review Letters* **93**, número 137405), Smith, P. M. Rye, Jack J. Mock, D. C. Vier e A. F. Starr; em 2005: S. Johnson, A. Markwitz, M. Rudolphi, H. Baumann, P. Y. Kuo, Richard Blaikie e A. Mucklich (*Journal of Applied Physics* **97**, número 094301); L. Ran, J. Huangfu, H. Chen, Xiang Zang, K. Cheng, T. M. Grzegorzczuk e J. A. Kong (*Progress in Electromagnetics Research-Pier* **51**, p. 249); C. Enkrich, Martin Wegener, S. Linden, S. Burger, L. Zschiedrich, F. Schmidt, J. F. Zhou, Th. Koschny e Costas M. Soukoulis (*Physical Review Letters* **95**, número 203901); e Gregor, Parazzoli, J. A. Nielsen, M. A. Thompson, Tanielian e Smith (*Applied Physics Letters* **87**, número 091114); em 2006: T. Driscoll, D. N. Basov, Starr, Rye, Nemat-

Nasser, D. Schurig e Smith (*Applied Physics Letters* **88**, número 081101); G. Dolling, Enkrich, Weneger, Soukoulis e Linden (*Optics Letters* **31**, p.1800); e Pendry (*Nature Materials* **5**, p. 763); e em 2007: Dolling, Weneger, Soukoulis e Linden (*Optics Letters* **32**, p. 53); K. Busch, G. von Freymann, Linden, S. F. Mingaleev, L. Tkeshelashvili e Wegener (*Physics Reports-Review Section of Physics Letters* **444**, p. 101); Dolling, Wegener, Soukoulis e Linden (*Optics Express* **15**, p. 11536); Ruopeng Liu, Aloyse Degiron, Mock e Smith (*Applied Physics Letters* **90**, número 263504); Veselago, L. Braginsky, V. Shkover e C. Hafner (*Journal of Computational and Theoretical Nanoscience* **3**, 189); e H. Giessen e Pendry (*Physica Status Solidi B-Basic Solid State Physics* **244**, p. 1167).

Outros artigos sobre esse fascinante tema da **refração negativa** (que, provavelmente, será objeto de Prêmio Nobel no futuro), com propriedades ópticas surpreendentes, como, por exemplo, a reversão do **efeito Doppler** (vide verbete nesta série) e aplicações tecnológicas, na Óptica (**superlentes**) e na Engenharia de Materiais (**metamateriais**), poderão ser encontrados no site: apps.isiknowledge.com/WoS/CIW.cgi.



[ANTERIOR](#)

[SEGUINTE](#)