

ÓTICA COM ÍNDICE DE REFRAÇÃO NEGATIVO[†]

Walter S. Santos¹, Antonio Carlos F. Santos², Carlos Eduardo Aguiar²

¹ Colégio Pedro II, Rio de Janeiro

² Instituto de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro

Proposta Pedagógica

A ótica geométrica é parte integrante de quase todos os cursos introdutórios de Física. Há bons motivos para isso. Usando os princípios da ótica podemos compreender uma grande variedade de fenômenos que fazem parte de nosso cotidiano: a formação de sombras, as imagens em um espelho, o arco-íris e até nosso sentido da visão são exemplos disso. Os mesmos princípios permitem entender o funcionamento de inúmeros instrumentos de enorme importância prática, como óculos, microscópios, lunetas e muitos outros. A ótica geométrica é, também, uma das áreas da Física onde os estudantes mais facilmente podem perceber como modelos matemáticos abstratos são aplicados à descrição de sistemas reais. A matemática é relativamente simples (um pouco de geometria), os conceitos e princípios básicos (raios, leis da reflexão e refração) são de fácil compreensão, e as aplicações são incontáveis.

Apesar de sua importância, o ensino da ótica geométrica tem perdido espaço nos currículos escolares. Uma das causas disso é a percepção mantida por muitos (equivocadamente, como veremos) de que esta é uma área de conhecimento “finalizada”, onde nada de novo e interessante acontece há muito tempo. Um ótimo exemplo de que isso não é verdade foi o desenvolvimento de metamateriais com índice de refração negativo. Esses materiais artificiais são objeto de intensa pesquisa atual, com aplicações que podem revolucionar diversas áreas tecnológicas. Apesar de ter aspectos surpreendentes, a ótica dos metamateriais é muito simples (ou, pelo menos, tão simples quanto as dos materiais tradicionais) e pode ser facilmente integrada aos cursos introdutórios de física. O ensino da ótica geométrica tem muito a ganhar com essa integração, que traz um tema novo e interessante para dentro das salas de aula.

Até onde sabemos hoje, não existem na natureza materiais com índice de refração negativo. Isso não impediu que materiais artificiais – *metamateriais* – fossem projetados construídos para ter essa propriedade. Metamateriais, como o nome indica, não são substâncias comuns – são obras de microengenharia, estruturas periódicas formadas pelo arranjo regular de minúsculos circuitos elétricos. Radiação eletromagnética de grande comprimento de onda (muito maior que o tamanho dos circuitos) propaga-se por um metamaterial como se ele fosse um meio homogêneo, dotado de índice de refração. Escolhendo apropriadamente os circuitos elementares é possível obter os mais diferentes índices de refração, inclusive valores negativos.

Metamateriais com índice de refração negativo têm propriedades óticas muito estranhas. Entre elas está a de que, ao entrar em um desses materiais, a luz (usaremos esse termo em vez de radiação eletromagnética, mesmo quando esta não tiver comprimento de onda visível) é refratada para a direção “errada” da linha normal à superfície, como está ilustrado na figura 1. Ao invés de cruzar essa linha, como ocorre quando um raio de luz entra

[†] Versão original de artigo publicado em *Scientific American Brasil – Aula Aberta n. 9 (2011)*, sem as modificações introduzidos pela revista durante o processo editorial.

num material comum, com índice de refração positivo (figura 1.a), no metamaterial de refração negativa o raio permanece sempre do mesmo lado da normal (figura 1.b).

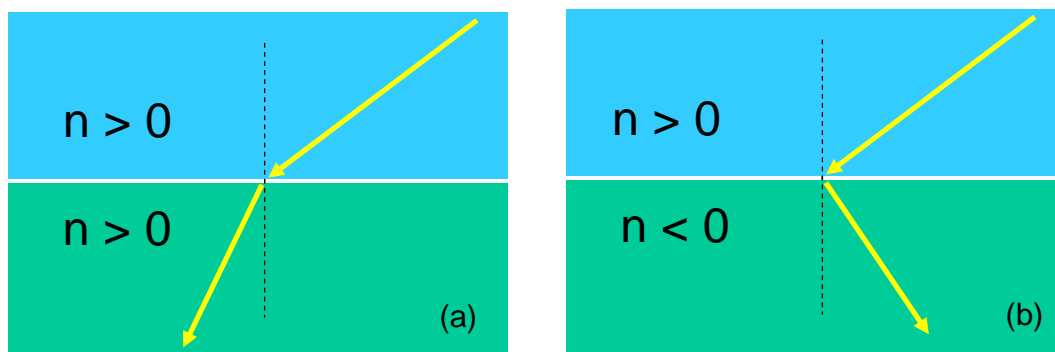


Figura 1. Desvio da luz ao penetrar num meio com índice de refração (a) positivo e (b) negativo.

A refração negativa é descrita pela mesma lei que governa a refração usual, a lei de Snell

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

onde n_1 e n_2 são os índices de refração dos meios percorridos pelo raio luminoso, e θ_1 e θ_2 são os ângulos que o raio faz, em cada meio, com a linha normal à superfície de separação. Se um dos índices de refração for negativo, o ângulo correspondente também o será, e tanto o raio incidente quanto o refratado ficarão do mesmo lado da normal. A aplicação da lei de Snell torna-se particularmente simples para um metamaterial com $n = -1$ em contato com o ar ($n = 1$). Nesse caso a relação entre os ângulos de incidência e refração é simplesmente $\theta_1 = -\theta_2$.

Nas discussões propostas a seguir, exploraremos algumas das curiosas propriedades óticas dos materiais de índice de refração negativo. Estudaremos duas situações simples. A primeira envolve a formação de imagens pela superfície de um meio de índice de refração negativo (uma piscina com “meta-água” de refração negativa, por exemplo). Em seguida investigaremos a superlente de Veselago e discutiremos algumas de suas propriedades surpreendentes.

Temas para discussão

Profundidade ou altura aparente?

Vamos considerar dois meios de índices de refração diferentes separados por uma fronteira plana, e uma fonte luminosa imersa em um deles. A figura 2 mostra os raios de luz que saem da fonte, no caso em que os dois índices de refração são positivos ($n = 1,3$ e $n = 1$). Vemos que os raios refratados na parte superior parecem divergir de uma região situada abaixo da superfície. Para um observador acima da interface a imagem do objeto é formada no meio inferior, embora a uma “profundidade aparente” menor daquela em que o objeto se encontra.

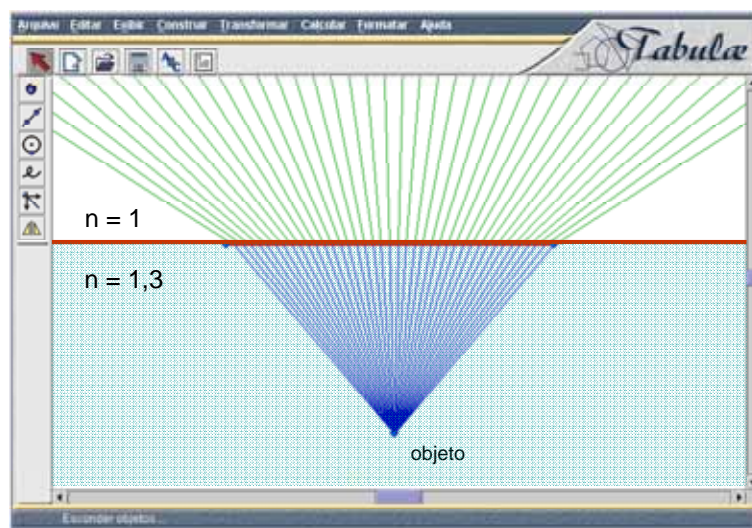


Figura 2. Refração de raios luminosos na interface entre dois meios de índices de refração positivos.

A situação muda drasticamente se um dos meios tiver índice de refração negativo. A figura 3 mostra o que ocorre quando o índice de refração do meio inferior, onde está imerso o objeto, é $n = -1$. O valor negativo de n altera completamente o comportamento dos raios refratados, que agora tendem a convergir no meio superior. Isso significa que a imagem do objeto luminoso é formada acima da superfície, ao contrário do que acontece na refração usual. Em outras palavras, uma moeda no fundo de uma piscina com “água” de índice de refração negativo pareceria estar acima da superfície – a profundidade aparente seria substituída por uma altura aparente.

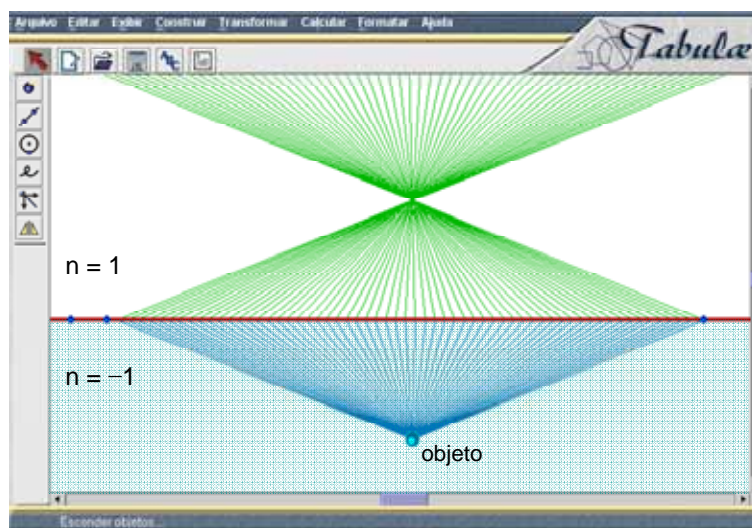


Figura 3. Desvio dos raios de luz quando o meio onde está o objeto tem índice de refração negativo. A imagem é formada acima da superfície.

A lente plana

Se o material com índice de refração negativo tiver a forma de uma placa plana (como um vidro de janela), surgem novos efeitos interessantes. A figura 4 mostra o que

acontece com a luz que passa por uma placa de material tradicional, com índice de refração positivo. Basicamente, uma imagem virtual é formada nas proximidades do objeto.

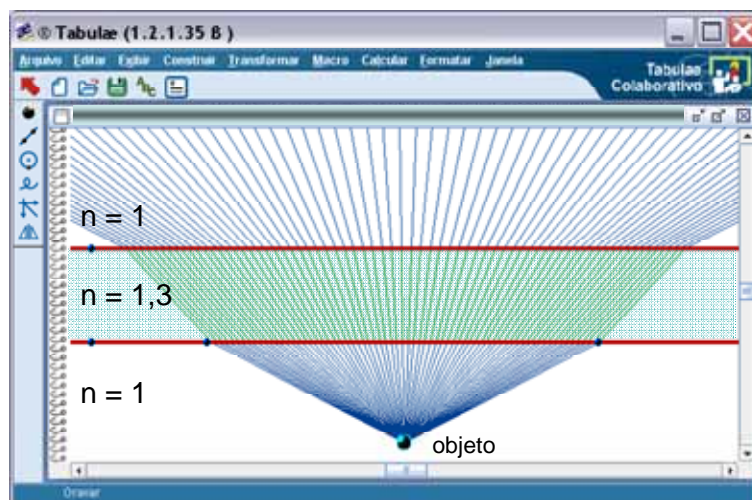


Figura 4. Refração da luz por uma placa com $n = 1,3$.

Algo bem diferente é encontrado se a placa tiver índice de refração negativo. Essa situação está ilustrada na figura 5. Vemos que duas imagens reais são formadas, uma dentro da placa e outra do lado oposto àquele em que se encontra o objeto. Ou seja, se a janela de uma sala tivesse o “vidro” feito com material de índice de refração negativo, objetos do lado de fora da sala pareceriam estar do lado de dentro.

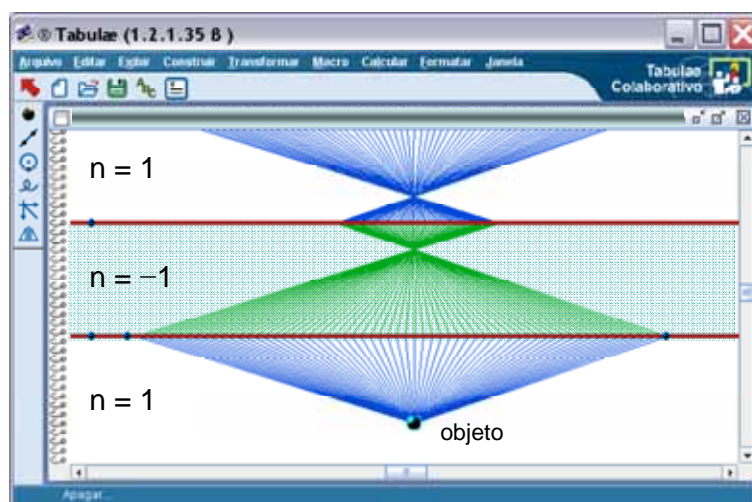


Figura 5. Refração da luz por uma placa com $n = -1$.

As imagens produzidas pela placa com $n = -1$ têm uma característica notável: elas não sofrem o efeito de aberrações e estão perfeitamente em foco. Também pode ser demonstrado que tal placa não reflete a luz incidente. Essas duas propriedades fazem da placa de refração negativa uma lente de excelente qualidade, frequentemente chamada de lente de Veselago. Mais ainda, a resolução das imagens obtidas não é limitada por efeitos difrativos, como ocorre com as lentes normais. Com a lente de Veselago é possível focalizar a luz em

uma área de dimensões bem menores que o comprimento de onda. Por essas razões a lente de Veselago também é chamada de superlente, ou lente perfeita.

Sugestões de leitura

- Walter S. Santos, Antonio C. F. Santos e Carlos E. Aguiar, *Refração Negativa*. Texto com figuras interativas disponível em http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/material_didatico.html
- Felipe A. Pinheiro, *Manto da invisibilidade: mais próximo da realidade*. *Ciência Hoje*, v. 44, n. 260, p. 10-11, 2009.