



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Instituto de Física
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física
Mestrado Profissional em Ensino de Física

Uma aula sobre metamateriais para o ensino médio

Walter S. Santos

Material instrucional associado à dissertação de mestrado de Walter S. Santos, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro
2011

Uma Aula sobre Metamateriais para o Ensino Médio

Walter da Silva Santos (Colégio Pedro II, Rio de Janeiro)

As pesquisas que apresentaremos nesta aula se iniciaram há cerca de 10 anos, apesar de a ideia original ter surgido em 1968. Por ser um assunto muito recente, uma exposição a respeito dessas novas ideias numa linguagem simples e objetiva para os alunos do ensino médio se faz necessária. Desde o ano passado (2010) começou a surgir questões sobre o tema nos concursos de acesso ao terceiro grau (ENEM e UNICAMP), tornando essas novidades do mundo científico ainda mais curiosas para os estudantes de Ótica, assim como, de seu interesse em particular.

Quando em uma ocasião comentei em sala de aula sobre a possibilidade de se criar um material com índice de refração negativo, isto é, uma proposta que sai dos padrões considerados normais da Ótica, surgiram questionamentos com propriedades bem interessantes. A expectativa foi muito grande, já que é enfaticamente pregado por nós professores do ensino médio não existir índice de refração menor do que 1 para um material, nem entre zero e 1 e muito menos negativo. Diante desta postura por parte dos alunos, a recompensa e a realização eram certas, daí a proposta em preparar uma aula qualitativa sobre o tema. No entanto, não se pode falar em um material com índice de refração negativo sem comentar o pré-requisito indispensável para seu entendimento, a refração.

Entende-se por refração a passagem da luz de um meio para outro sofrendo, com exceção da incidência perpendicular à interface de separação dos meios, um desvio na sua direção de propagação. A luz se aproxima da normal quando sua velocidade diminui, e se afasta quando aumenta a sua velocidade, conservando o raio incidente de um lado da normal e o refratado do outro. A figura 1 faz a ilustração clássica de refrações envolvendo índices de refração positivos.

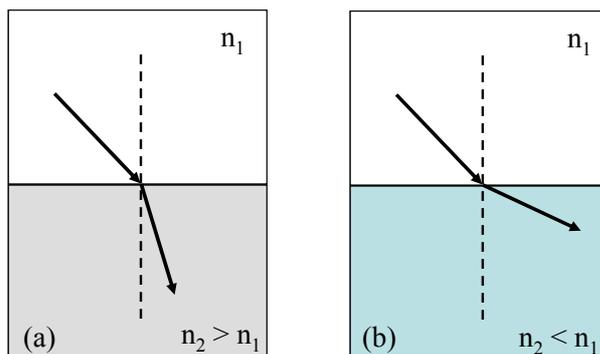


Figura 1: A refração da luz; em (a) a velocidade diminui e em (b) a velocidade aumenta.

Devido a esta diferença entre as velocidades de propagação da luz, criou-se uma relação entre a velocidade da luz no vácuo c e a velocidade da luz no meio em questão v , ou seja, $n = c/v$, denominada índice de refração n . Não se sabe ao certo quando surgiu esta relação, mas desde Newton se tem conhecimento que o índice de refração depende da frequência da radiação incidente na superfície. A mudança da velocidade da luz devido à refração tem como consequência alguns efeitos óticos bem presentes no nosso cotidiano: a piscina parecer mais rasa quando cheia de água, a formação do arco-íris, a impressão do lápis parecer quebrado quando imerso na água, e muitos outros. A figura 2 ilustra os exemplos citados.



Figura 2: Na esquerda o arco íris e na direita o lápis “quebrado”.

A refração não é um atributo só da luz, podendo ocorrer com qualquer onda, eletromagnética ou não. A diferença de uma onda eletromagnética para outra está na sua frequência. A luz em particular, é uma onda eletromagnética que pode ser captada pelos nossos olhos, nos dando a sensação da visão. Para uma familiarização maior com as ondas eletromagnéticas, a figura 3 mostra o espectro eletromagnético nas frequências mais presentes no cotidiano.

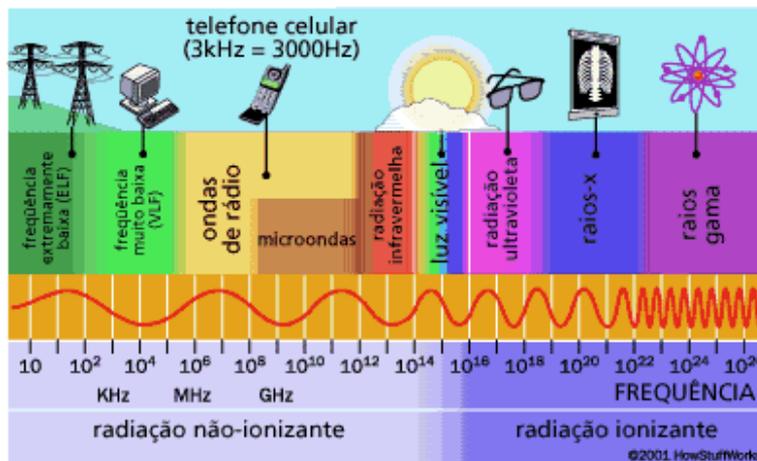


Figura 3: O espectro eletromagnético.

Um grande avanço no estudo da refração teve início em 1967, com o físico russo Victor Veselago, mostrado na figura 4. Ele sugeriu possibilidade de um material com índice de refração negativo, que a princípio nenhuma lei física diz ser impossível. Essa era uma proposta inovadora, uma vez que a comunidade científica nunca tinha examinado de perto o conceito de refração negativa. Se o índice de refração n for negativo, isso acarreta uma velocidade v , para a onda, também negativa, já que $v = c/n$.

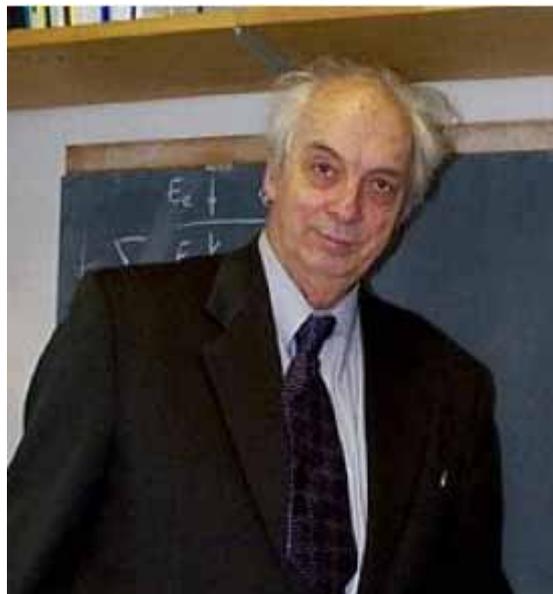


Figura 4: Victor Veselago.

A interpretação estritamente cinemática para que a velocidade da luz no vácuo e a velocidade da luz no meio tenham sinais opostos é que essas duas velocidades possuem sentidos opostos. É difícil entender o que isso significa quando se imagina a luz entrando no meio, vinda do vácuo. A solução para o problema surge quando se toma conhecimento que uma onda possui diversas velocidades, a destacar as velocidades de

fase e de grupo. A velocidade de fase é aquela com que se movem as ondas de frequência e comprimento de onda bem determinados. Essas ondas repetem-se indefinidamente e, portanto, não têm começo nem fim. Uma onda com início e fim – um pulso ou uma sequência finita de ondulações, por exemplo – move-se com velocidade de grupo. No ensino médio, não discutimos a diferença entre essas velocidades, porque consideramos os meios como sendo “não-dispersivos”, o que acarreta uma igualdade entre as velocidades de fase e grupo. No entanto, em meios reais essas velocidades não precisam ser iguais.

Como Veselago notou, em um material com índice de refração negativo as velocidades de fase e de grupo estão em sentidos opostos. Surpreendentemente, enquanto o pulso se propaga para frente, as ondulações individuais que o formam se propagam “para trás”. A energia do feixe de luz viaja para frente, com a velocidade de grupo. Outra questão que desperta interesse é que, se a lei de Snell for válida para a refração negativa, ou seja, $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$, o raio refratado se desvia mantendo o mesmo lado da normal à superfície que o raio incidente. O raio se comportaria como sofresse uma “reflexão na normal”, seguindo trajetórias diferentes daqueles que os livros didáticos retratam e que nós professores expomos aos nossos alunos no caso da refração convencional. A figura 5 ilustra a refração da luz para um meio com índice de refração positivo (a) e para outro com índice de refração negativo (b).

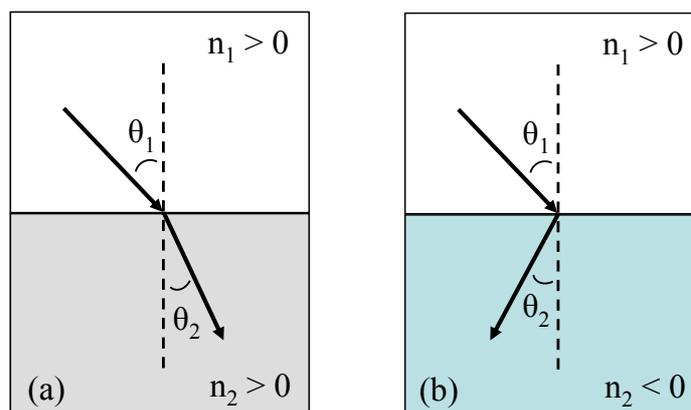


Figura 5: (a) Refração em dois meios com índices de refração positivos. (b) Refração quando um dos meios tem índice de refração positivo e o outro tem índice de refração negativo.

As ideias de Veselago ficaram esquecidas por cerca de três décadas, pois não se conheciam na natureza materiais com índice de refração negativo. Finalmente, em meados dos anos 90 na Inglaterra, John B. Pendry, com a colaboração de cientistas da

empresa britânica *Marconi Materials Technology*, concluiu que seria possível, a partir de uma estrutura metálica, criar um material artificial com índice de refração negativo.



Fig. 6: John Pendry (esquerda) e David Smith (direita)

Por fim, em 2000, David R. Smith e colegas da Universidade da Califórnia em San Diego construíram o material proposto por Pendry. A figura 7 mostra um pedaço das estruturas montadas por Smith e sua equipe.



Figura 7: A estrutura metálica de um material com índice de refração negativo.

As estruturas eram uma combinação de pequenos circuitos metálicos que, num certo sentido, desempenhavam o papel das ‘moléculas’ do material de refração negativa. A estrutura ‘molecular’ desses materiais era periódica, com dimensões menores que o comprimento de onda das ondas eletromagnéticas para as quais se desejava a refração negativa. No caso dos materiais de Smith, essas eram micro-ondas de comprimentos de onda de alguns centímetros. Isso fez com que as ondas “enxergassem” o material como sendo um meio homogêneo, com índice de refração negativo. A figura 8 mostra um material artificial criado para fornecer resposta negativa para o índice de refração numa visão tridimensional.

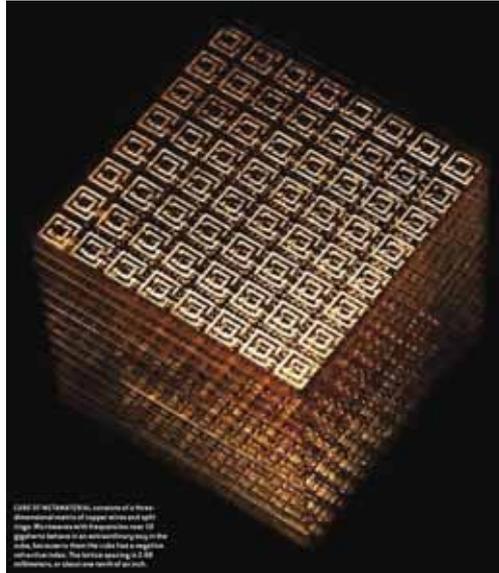


Figura 8: Visão tridimensional de uma estrutura com índice de refração negativo.

Os materiais artificiais de Pendry e Smith foram chamados de *metamateriais*. Smith e sua equipe notaram que o ângulo de refração das micro-ondas em seus metamateriais obedecia à lei de Snell, sendo que o raio refratado permanecia do mesmo lado da normal à superfície de separação dos dois meios que o raio incidente. Pesquisas mais recentes já produziram metamateriais com um índice de refração negativo na faixa do infravermelho, chegando quase ao visível.

Um índice de refração negativo pode criar efeitos surpreendentes. A figura 9 compara um lápis imerso em um líquido de índice de refração positivo com outro imerso em um líquido com índice negativo. Pode-se perceber que o segundo parece “quebrado” para cima do líquido.

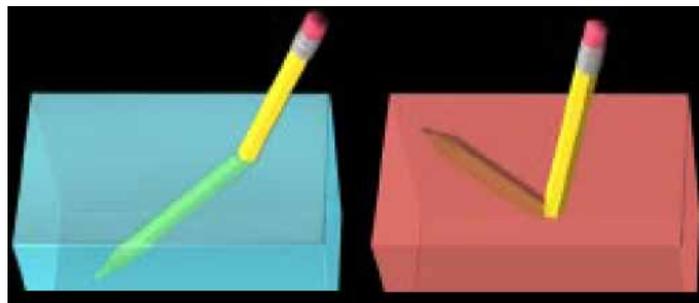


Figura 9: Lápis mergulhado num material com índice de refração positivo (esquerda) e negativo (direita).

A figura 10 mostra uma placa retangular com índice de refração negativo (uma superlente). Do objeto à esquerda, partem raios luminosos que incidem na placa e, ao serem refratados, formam uma imagem invertida no interior da mesma. Ao sofrerem

uma nova refração, voltando ao meio exterior, produzem uma segunda imagem à direita da placa.

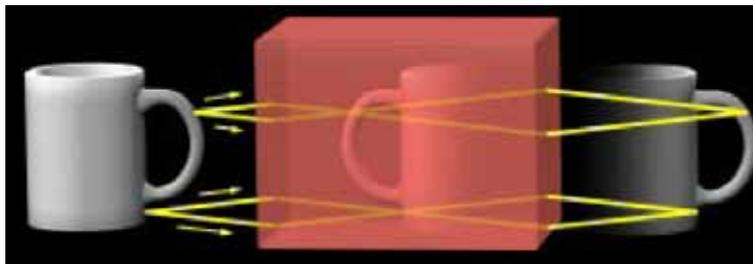


Figura 10: Superlente formada por uma placa com índice de refração negativo.

Outra simulação interessante é vista na figura 11. Pode-se observar uma piscina, com água de índice positivo normal e em seguida, uma piscina cheia com “água” de índice de refração negativo.



Figura 11: (a) Piscina com água normal; (b) com “água” de índice negativo.

Finalmente, na figura 12, uma vareta é colocada dentro de um líquido e parece “quebrada”. Como na figura 12 (c) o líquido possui índice de refração negativo $n = -1,3$, a haste se quebra para o lado “errado”.

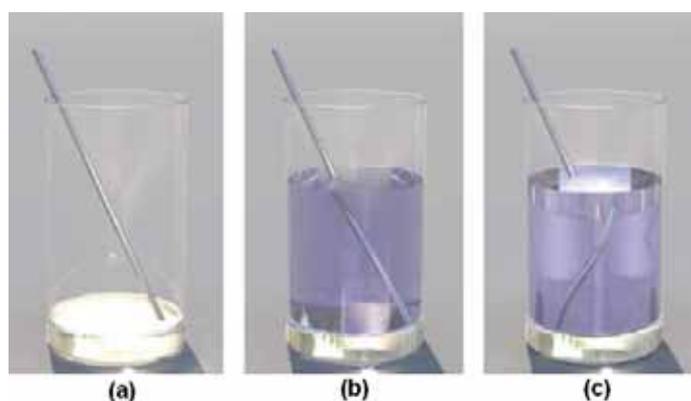


Figura 12: (a) Copo vazio; (b) copo com água de índice $n = 1,3$; (c) copo com “água” de índice $n = -1,3$.

É fato que a luz, em geral, muda a sua direção de propagação à medida que vai encontrando meios com índices de refração diferentes. A variação do índice de refração

pode ter as mais diversas causas e conduz a muitos fenômenos interessantes. Por exemplo, a variação da densidade do ar devido ao seu aquecimento próximo a superfícies quentes, como o asfalto de uma rodovia exposto ao Sol, faz com que os raios sofram um desvio ao passarem da camadas de ar mais frias (maior índice de refração) para as mais quentes (menor índice de refração) próximas à superfície, provocando a reflexão total da luz e fazendo com que o solo funcione como um espelho. Esta variação do índice de refração ocasiona o que chamamos de miragem. A figura 13 à esquerda é uma foto indicando a formação de uma aparente “poça d’água”, apesar do dia seco, que funciona como um espelho onde é possível ver refletida a imagem do automóvel. Na figura 13, à direita, temos uma representação simplificada da formação de miragem.



Figura 13: Esquerda: foto com um automóvel refletido no asfalto.

Direita: ilustração simples da formação de miragem.

Com a tecnologia de metamateriais, o homem está sendo capaz de manipular a refração da radiação eletromagnética de uma maneira completamente nova, controlando os desvios sofridos pela luz através da criação de metamateriais com índice de refração ‘projetados por encomenda’, sejam negativos ou positivos. Por exemplo, a figura 14 mostra as trajetórias que os raios luminosos seguiriam através de um metamaterial especialmente projetado para tornar invisível a região no interior da esfera, criando um “manto da invisibilidade”.

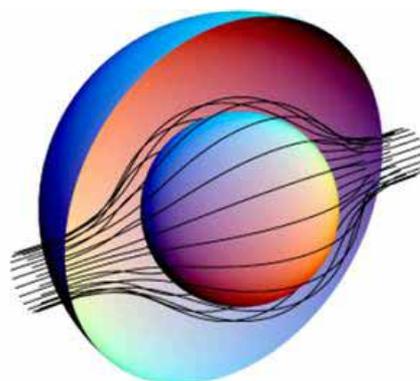


Figura 14: O metamaterial distribui os raios de luz em torno da esfera, formando o “manto de invisibilidade”.

Em princípio, os metamateriais podem ser usados para formar diversas estruturas de “camuflagem”, que conseguem “dobrar” as ondas eletromagnéticas, como a luz, fazendo com que contornem um objeto. A curva dos raios luminosos em torno de um objeto, como a esfera central da figura 14, dão a um observador a impressão de que este é completamente transparente, ou seja, invisível. Dispositivos como o “manto de invisibilidade do Harry Potter” podem se tornar realidade.