



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

Autorizada pelo Decreto Federal nº 77.496 de 27/04/76
Recredenciamento pelo Decreto nº 17.228 de 25/11/2016



PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
COORDENAÇÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

XXIX SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEFS **SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - 2025**

Ótica de Transformação aplicada ao estudo de mantos de invisibilidade do Tipo "Carpet Cloak"

Wanderley Ramos de Jesus Silva¹; Felipe Azevedo Gomes²

1. Wanderley Ramos de Jesus Silva, PROBIC/UEFS, FÍSICA, e-mail: wanderleyr@gmail.com

2. Felipe Azevedo Gomes, DEPARTAMENTO DE FÍSICA, e-mail: fagomes@uefs.br

PALAVRAS-CHAVE: Ótica de Transformação; Mantos de Invisibilidade; Carpet Cloak.

INTRODUÇÃO

Neste trabalho nos propomos a discutir os recentes avanços no estudo de mantos de invisibilidade. Isto é, estudos em materiais que permitam a perfeita camuflagem de um objeto. A ideia de poder construir um manto de invisibilidade sempre alimentou os mais diversos contos de ficção científica. No entanto, tirar essa ideia do papel e trazer para a vida real parecia algo impossível. Até pouco tempo atrás não se conhecia nenhuma técnica ou material que nos permitisse ter tamanho controle sobre a luz. (PENDRY *et al.*, 2006).

Para conseguirmos camuflar perfeitamente um objeto precisamos buscar um material que desvie toda a luz que incide sobre ele, de forma que ela não tenha acesso ao objeto e, portanto, não interaja com o mesmo resultando em fenômenos com a reflexão e refração. Ao mesmo tempo, precisamos fazer com que a onda retorne ao meio seguindo a mesma trajetória original. Desta forma, um observador externo não conseguiria enxergar o objeto e também não conseguiria identificar qualquer alteração na trajetória da luz.

Construir esse tipo de material sempre foi um desafio devido a limitação nas propriedades óticas dos materiais que encontramos na natureza. Durante as últimas décadas vem se desenvolvendo uma nova classe de materiais projetados com o objetivo de transpor essas limitações; tais materiais ficaram conhecidos como metamateriais (CUI *et al.*, 2010). Para obter tais avanços, além das propriedades químicas, a engenharia molecular, é fator essencial para produzir parâmetros efetivos que não são encontrados na natureza e nos permitir ter mais controle sobre as propriedades óticas do material.

Uma técnica muito importante no estudo dos metamateriais é conhecida como ótica de transformação (LEONHARDT e PHILBIN, 2010). Tal técnica se baseia na covariância entre as equações de Maxwell no vácuo com geometria curva e num material dielétrico. Devido a essa propriedade, podemos identificar qual geometria guiaria a luz de uma determinada forma e, a partir dessa geometria, encontramos quais

deveriam ser os parâmetros (mais especificamente, a permissividade elétrica, ϵ , e a permeabilidade magnética, μ) de um material que produziria o mesmo efeito.

Através da ótica de transformação podemos projetar uma geometria que conduza a luz de forma a camuflar perfeitamente um objeto e, ao mesmo tempo, projetar em laboratório um material que reproduza esse comportamento para a luz em um metamaterial (FLEURY & ALU, 2014). Várias construções experimentais do manto de invisibilidade já foram feitas em laboratório para ondas sonoras, eletromagnéticas, entre outras. (SMITH, SCHURIG e PENDRY, 2006).

METODOLOGIA

Neste trabalho de iniciação científica estudamos a técnica de ótica de transformação aplicado a construção de mantos de invisibilidade. Uma vez que as equações de Maxwell são as principais equações que descrevem o eletromagnetismo, e consequentemente a ótica, revisamos os seus fundamentos e mostramos como podemos manipulá-las para construir o que conhecemos como ótica de transformação. As equações, inicialmente, escritas em notação vetorial, serão transformadas para notação tensorial de métrica generalizadas; isso se deve ao fato de que tais leis ainda sejam válidas na sua escrita covariante. Pois, caso houvesse violação, significaria uma não possibilidade de efetuar a camuflagem desejada.

Sendo satisfeita a covariância das equações de Maxwell, em outras palavras, a evidência de igualdade das equações referidas entre um espaço curvo e vazio a um espaço plano e material, é correto afirmar que pode-se simular o comportamento de um material estudando a geometria, uma vez que nota-se a permissividade e permeabilidade estarem relacionadas a métrica de coordenada abordada.

Ao tomar dois pontos num espaço vazio e distorcê-lo virtualmente (na verdade, o espaço se manterá o mesmo), teremos a mesma resposta (resultado) de um espaço material escolhido. Exemplos de mantos de invisibilidade obtidos sob essa perspectiva são os de coordenadas curvilíneas cilíndricas e esféricas, mas também o Carpet Cloak (também referido como tapete de invisibilidade) que é o foco do presente trabalho; então a análise para construção desse manto, torna-se necessária.

Suponhamos um relevo que queremos ocultar (como a sujeira escondida debaixo de um tapete) com um conjunto de coordenadas (x', y', z') . Então, ao calcularmos seus parâmetros que compõem o índice de refração, respeitando a métrica das devidas coordenadas (oriundas da geometria diferencial), obtemos a informação necessária para sintetizar o manto do tipo tapete de invisibilidade.

A partir daí podemos garantir: evitar a interação da luz incidente com a região ocultada e a garantia que a luz siga o caminho normal, aquele sem a presença de manto de invisibilidade, resultados da busca de um índice de refração a partir da geometria.

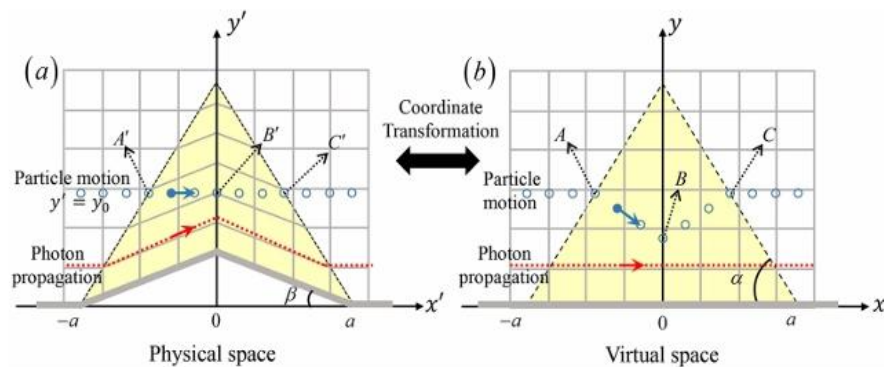
No entanto, e se estivermos numa situação oposta, ou seja, como saber se estamos próximos a uma região de manto de invisibilidade? É necessário também poder detectar uma região de manto, Uma possibilidade poderia ser pensar em algo análogo ao efeito Aharonov-Bohm, uma situação que investigamos a consequência de um campo magnético nulo e potencial magnético constante numa determinada região.

A fim de analisar o efeito AB, tratamos a situação clássica do movimento de uma partícula carregada numa região de campo magnético (de um solenoide muito longo), usando um potencial generalizado na abordagem hamiltoniana. Como o efeito AB é um fenômeno quântico, reescrevemos o hamiltoniano de potencial generalizado clássico no seu equivalente quântico, de forma que a equação de Schrödinger apresenta o potencial magnético 'A' no operador hamiltoniano do estado.

RESULTADOS

Como exposto na seção anterior, após investigar metamateriais e o manto de invisibilidade, a constatação de o manto de invisibilidade ser possível e haver mais de um tipo de fazê-lo ou abordá-lo; pudemos analisar através da ótica de transformação, como a luz se comportaria numa região de manto, a saber as regiões de um Carpet Cloak vistos na Figura 1

Figura 4 - Esquema da transformação de coordenadas para o tapete de invisibilidade no (a) espaço físico e (b) espaço virtual.



Fonte: Shi et al., 2015, pág. 2.

A imagem acima exhibe a trajetória de uma partícula em movimento comparada com a de um fóton que passa através (Figura 4.a) do manto de tapete e (Figura 4.b) de seu espaço virtual correspondente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante o desenvolvimento deste trabalho tivemos a oportunidade de exercitar o conhecimento da notação tensorial e geometria diferencial (para um caso não convencional), das leis do eletromagnetismo, além da oportunidade e incentivo à pesquisa. Existem várias outras propostas para a construção e detecção do manto de invisibilidade. Além disso, construir materiais com os parâmetros calculados já é possível e já foi feito em laboratório. Uma vez que já temos a capacidade de projetar

objetos como mantos de invisibilidade, um problema interessante que surge é como detectá-los.

REFERÊNCIAS

- CAI, Wenshan; SHALAEV, Vladimir. Optical Metamaterials: Fundamentals and Applications. New York: Springer, 2010.
- CUI, Tie Jun; SMITH, David R.; LIU, Ruopeng (Ed.). Metamaterials: theory, design, and applications. New York: Springer, 2010.
- ERGIN, Tolga et al. Three-dimensional invisibility cloak at optical wavelengths. *Science*, v. 328, n. 5976, p. 337-339, 2010.
- FLEURY, Romain; ALU, Andrea. Cloaking and invisibility: A review. *Forum for Electromagnetic Research Methods and Application Technologies (FERMAT)*, v. 1, ed. 9, 2014.
- GHARGHI, Majid et al. A carpet cloak for visible light. *Nanoletters*, v. 11, n. 7, p. 2825-2828, 2011.
- GOMES, Felipe Azevedo. Uso de geometria no estudo de Nanocones duplos de carbono e mantos de invisibilidade. Tese de doutorado, UFPB, 2018.
- LEONHARDT, Ulf; PHILBIN, Thomas. Geometry and Light: the science of invisibility. New York: Dover Publications, 2010.
- LHEURETTE, Eric. Metamaterials and Wave Control. London: John Wiley & Sons, 2013.
- LI, Jensen; PENDRY, John B. Hiding under the carpet: a new strategy for cloaking. *Physical Review Letters*, v. 101, n. 20, p. 203901, 2008.
- PENDRY, John B.; SCHURIG, David; SMITH, David R. Controlling electromagnetic fields. *Science*, v. 312, n. 5781, p. 1780-1782, 2006.
- SHELBY, Richard A.; SMITH, David R.; SCHULTZ, Seldon. Experimental verification of a negative index of refraction. *Science*, v. 292, n. 5514, p. 77-79, 2001.
- SHI, Xihang et al. Electromagnetic detection of a perfect carpet cloak. *Scientific Reports*, v. 5, n. 1, p. 10401, 2015.
- VALENTINE, Jason et al. An optical cloak made of dielectrics. *Nature materials*, v. 8, n. 7, p. 568-571, 2009.
- ZHANG, Baile et al. Macroscopic invisibility cloak for visible light. *Physical Review Letters*, v. 106, n. 3, p. 033901, 2011.