

XXVIII SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UEFS SEMANA NACIONAL DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA - 2024

INVESTIGAÇÃO DA ANALOGIA ENTRE ÓPTICA FÍSICA E MECÂNICA QUÂNTICA ONDULATÓRIA

Nascimento, L. M.¹; A V Andrade-Neto²

1. Bolsista – PROBIC/UEFS, Graduando em Licenciatura em Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: merceslucas1@gmail.com
2. Orientador, Departamento de Física, Universidade Estadual de Feira de Santana, e-mail: aneto@uefs.br

PALAVRAS-CHAVE: Óptica física; Mecânica quântica; Efeito túnel.

INTRODUÇÃO

A investigação das analogias entre diferentes áreas da física tem se mostrado uma abordagem frutífera para a compreensão de fenômenos complexos. Uma dessas analogias notáveis é a que relaciona a óptica física, baseada na teoria eletromagnética de Maxwell, com a mecânica quântica ondulatória, formalizada na equação de Schrödinger (Andrade-Neto, A. V. *et al.*, 2021). Ambas as teorias, embora aplicadas a diferentes domínios da realidade física, compartilham princípios matemáticos e conceituais que permitem uma exploração conjunta de fenômenos.

Historicamente, a teoria eletromagnética de Maxwell, desenvolvida no século XIX, unificou as leis do eletromagnetismo, descrevendo a luz como uma onda eletromagnética (Lima, 2019). Por outro lado, a mecânica quântica, cujos fundamentos foram estabelecidos no início do século XX, especialmente com a introdução da equação de Schrödinger em 1926 (Quaglio, 2021), trouxe uma nova perspectiva sobre a descrição da matéria em escalas microscópicas.

A analogia entre a Mecânica Quântica Ondulatória e a Ótica Física torna-se evidente ao percebermos que certos sistemas quânticos possuem descrições matemáticas formalmente idênticas às da teoria eletromagnética de Maxwell (Andrade-Neto, A. V. *et al.*, 2021). Este trabalho visa investigar essa analogia, não apenas sob o ponto de vista matemático, mas também explorando suas implicações físicas.

A relevância deste estudo se fundamenta na crescente importância de compreender e manipular fenômenos quânticos, que constituem a base das tecnologias

contemporâneas, além de proporcionar um aprofundamento nas conexões fundamentais entre diferentes áreas da física.

MATERIAL E MÉTODOS OU METODOLOGIA (ou equivalente)

Por se tratar de um trabalho de física teórica, a metodologia adotada envolve o uso e domínio das teorias físicas que abordam os fenômenos em questão. Inicialmente, revisamos a teoria maxwelliana da radiação eletromagnética e a mecânica quântica ondulatória, formalizada pela equação de Schrödinger, que oferece uma descrição probabilística para sistemas microscópicos. Essas teorias fornecem a base matemática e conceitual necessárias para a análise comparativa que se segue.

Em seguida, aplicamos a teoria de Maxwell para estudar sistemas com interfaces planas e paralelas, focando no cálculo dos coeficientes de transmissão e reflexão das ondas eletromagnéticas. Esses cálculos são essenciais para compreender os fenômenos ópticos nesses sistemas, e são realizados com base nas condições de contorno das equações de Maxwell (Hecht, 1991). Paralelamente, utilizamos a equação de Schrödinger para determinar as probabilidades de reflexão e transmissão de partículas em barreiras de potencial, explorando a analogia matemática e física entre os fenômenos descritos pelas duas teorias.

A exploração dessa analogia é central à nossa investigação, pois permite uma comparação dos conceitos de transmissão e reflexão nos contextos da óptica física e da mecânica quântica.

RESULTADOS E/OU DISCUSSÃO (ou Análise e discussão dos resultados)

Os resultados deste trabalho incluem a determinação dos coeficientes de reflexão e transmissão para sistemas com duas interfaces paralelas e para uma barreira de potencial quadrada. Além disso, foram calculados os mesmos coeficientes para o potencial degrau e para um sistema óptico com uma única interface plana separando dois meios ópticos. No entanto, optamos por apresentar apenas os resultados do primeiro caso (interface dupla e barreira de potencial), pois acreditamos que ele oferece maior interesse do ponto de vista físico. Também foi estabelecida uma analogia clara entre esses sistemas quânticos e clássicos, mostrando que os coeficientes de reflexão e transmissão são formalmente idênticos, destacando uma correspondência matemática precisa entre as configurações ópticas e quânticas.

Para o caso quântico, os coeficientes de transmissão (T) e reflexão (R) para a barreira de potencial são dados por:

$$T = \frac{1}{1 + F_{quan} \sinh^2(k_2 a)}, \quad (1)$$

$$R = \frac{F_{quan} \sinh^2(k_2 a)}{1 + F_{quan} \sinh^2(k_2 a)}, \quad (2)$$

com

$$F_{quan} = \frac{(k^2_1 + k^2_2)^2}{4k^2_1 k^2_2}, \quad (3)$$

onde F_{quan} é o coeficiente de finesse quântico. As grandezas k^2_1 e k^2_2 são definidas como

$$k^2_1 = \frac{2mE}{\hbar^2} \quad (4)$$

e

$$k^2_2 = \frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}, \quad (5)$$

onde V_0 é a altura da barreira, E e m são a energia e a massa da partícula, respectivamente, a é a largura da barreira e \hbar é a constante de Planck reduzida. Estas equações se referem ao caso onde $E < V_0$.

Para o caso clássico, os coeficientes de transmissão e reflexão são dados por (quando o ângulo de incidência é maior que o ângulo crítico):

$$T = \frac{1}{1 + F_{||} \sinh^2(\frac{\delta}{2})}, \quad (6)$$

$$R = \frac{F_{||} \sinh^2(\frac{\delta}{2})}{1 + F_{||} \sinh^2(\frac{\delta}{2})}, \quad (7)$$

com

$$F_{||} = \frac{4r_{||}^2}{(1 - r_{||}^2)^2}, \quad (8)$$

onde $F_{||}$ é o coeficiente de finesse óptico para onda polarizada paralelamente ao plano de incidência. As equações para polarização perpendicular são análogas. Nas equações (6) e (7), δ é a diferença de fase entre dois raios adjacentes e na equação (8), $r_{||}$ é a amplitude de reflexão dada pelos coeficientes de Fresnel.

A analogia entre os sistemas quânticos e clássicos é evidente ao compararmos as equações dos coeficientes de reflexão e transmissão. Em ambos os casos, as expressões para T e R têm uma estrutura matemática idêntica, sendo moduladas por funções hiperbólicas. No caso quântico, o coeficiente de finesse F_{quan} governa o comportamento

de partículas que atravessam uma barreira de potencial, enquanto no caso clássico, $F_{||}$ desempenha um papel análogo na transmissão de ondas ópticas através de duas interfaces paralelas.

Fisicamente, essa correspondência revela que os fenômenos de interferência e transmissão observados em sistemas ópticos podem ser diretamente comparados aos fenômenos de tunelamento quântico e reflexão por uma barreira. O coeficiente de finesse, tanto quântico quanto óptico, abriga as características intrínsecas dos sistemas, como a relação entre as constantes de onda k_1 e k_2 no caso quântico e os coeficientes de Fresnel no caso óptico. Assim, essa analogia não apenas unifica a compreensão de fenômenos em diferentes domínios da física, mas também sublinha a universalidade das leis que regem a propagação de ondas e partículas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS (ou Conclusão)

A análise dos coeficientes de reflexão e transmissão em sistemas com duas interfaces paralelas e barreira de potencial quadrada revelou uma correspondência matemática significativa entre a óptica física e a mecânica quântica. A determinação dos coeficientes de finesse, tanto óptico quanto quântico, confirmou que o coeficiente de finesse óptico é eficaz na avaliação da interferência, enquanto o coeficiente de finesse quântico reflete a probabilidade de tunelamento.

Esses resultados destacam a relevância das analogias entre as duas teorias e oferecem uma base sólida para compreender fenômenos como interferência e tunelamento em diferentes contextos. Acreditamos, portanto, que as comparações realizadas abrem caminhos para futuras investigações na interseção entre óptica física e mecânica quântica, assim como em outras áreas da física.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE-NETO, A. V. et al. Analogies between optical physics and quantum mechanics. **European Journal of Physics**, v. 42, n. 5, p. 055402, 2021.
- HECHT, Eugene. Óptica, Fundação Calouste Gulbenkian. 1991.
- LIMA, Marcelo Costa de. Sobre o surgimento das equações de Maxwell. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 41, n. 4, p. e20190079, 2019.
- QUAGLIO, João. Deduzindo a Equação de Schrodinger Através da Analogia Óptico-Mecânica de Hamilton. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 43, p. e20210208,