

Feixes de Bessel acústicos: expansões em ondas parciais e cálculo computacional de forças acústicas exercidas sobre micropartículas esférica

Lucas Lima Romero

Felipe de Alcântara Tomé

Leonardo André Ambrosio

Universidade de São Paulo - EESC/ICMC

lucaslromero@usp.br

Objetivos

O escopo principal do projeto foi desenvolver e validar um algoritmo computacional para calcular as componentes da força de radiação acústica exercida por feixes de Bessel sobre uma micropartícula esférica e elástica. Na prática, busca-se uma ferramenta confiável que permite desenhar futuros sistemas de “pinças acústicas” para manipular objetos micrométricos, como células, sem a necessidade de tocá-los. Para isso, foi utilizada a linguagem de programação Julia, para a descrição de um Feixe Cilíndrico de Bessel - um tipo interessante de onda incidente, não difrativa - que foi decomposto em ondas parciais em coordenadas esféricas. A aparente complicação em alterar o sistema de coordenadas é fundamental para aproveitar a simetria esférica da partícula. Além disso, era necessário saber como a partícula reagiria ao ser atingida pela onda acústica, isto é, visualizar as forças de radiação acústicas na partícula, dadas diferentes condições iniciais.

A metodologia do trabalho foi dividida em três etapas sequenciais. A primeira consistiu na fundamentação teórica, na qual foram estudadas a equação de Helmholtz e a teoria de espalhamento acústico. O campo do feixe de Bessel foi descrito matematicamente pelo método da expansão em ondas parciais, e a resposta da partícula foi modelada pela teoria de Faran [2]. A segunda etapa foi a implementação computacional em Julia, onde as rotinas foram estruturadas de forma modular, para calcular os coeficientes de espalhamento da partícula - baseando-se em Hickling [3] - e os Fatores de Forma do Feixe (BSCs). Em seguida, foram calculadas as forças cartesianas resultantes do acoplamento entre esses dois conjuntos de coeficientes. Por fim, a terceira etapa foi a de validação, na qual os resultados do código foram sistematicamente comparados com os gráficos publicados no artigo de referência de Baresch et al. [1], analisando-se as forças axial e radial em diferentes regimes físicos para aferir a precisão do modelo.

Métodos e Procedimentos

Resultados

O algoritmo desenvolvido demonstrou sucesso na validação, à medida em que reproduziu

satisfatoriamente a física do problema. A Figura 1 mostra a expansão em ondas parciais descrevendo de forma excelente Feixes de Bessel, etapa fundamental para a confecção de um dos resultados obtidos na segunda parte, em que foi feito o cálculo das forças.

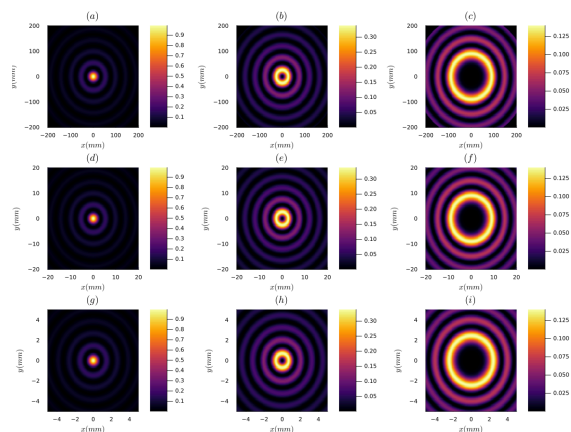


Figura 1: Simulação de Feixes de Bessel via decomposição em ondas parciais

A Figura 2 evidencia um dos resultados obtidos que coincide perfeitamente com a literatura, vide Baresch et al. [1]. O resultado apresentado revela a existência de múltiplos pontos de equilíbrio estável, onde a partícula pode ser aprisionada e a força se torna restauradora. Esses pontos ocorrem nos mínimos de intensidade do feixe marcados com setas vermelhas, supondo que a leitura das curvas se dá em razão do deslocamento da partícula, como feixe fixo no referencial do laboratório. Nestas armadilhas acústicas, a resposta linear da força em torno do ponto de equilíbrio se assemelha à Lei de Hooke, caracterizando um potencial de aprisionamento harmônico. Note que a derivada da força ao redor dos pontos de mínimo de intensidade é negativa, e, em primeira ordem, tem-se uma força linear, da forma $F = -k(\rho/\lambda)$, o que justifica o caráter restaurador supracitado.

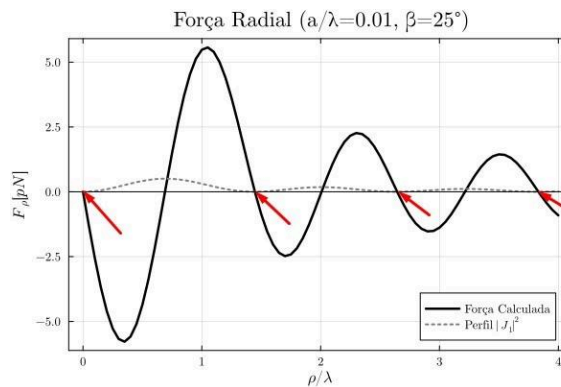


Figura 2: Gráfico da força radial em uma micropartícula esférica

Conclusões

O projeto atingiu com êxito os seus objetivos, de modo que o resultado foi uma ferramenta computacional robusta e validada para a simulação de forças de radiação acústica de feixes de Bessel. A excelente concordância entre os resultados simulados e os dados da literatura confirma a correta implementação tanto do modelo do feixe quanto da física do espalhamento. A superação de desafios de instabilidade numérica através de métodos adequados foi um resultado técnico importante, que garantiu a precisão do modelo em regimes de ressonância. A ferramenta desenvolvida não só representa a conclusão bem-sucedida desta iniciação científica, mas também serve como uma base sólida para futuras pesquisas do Grupo de Eletromagnetismo Aplicado (AEG) em áreas de fronteira, como o projeto de pinças acústicas avançadas e displays volumétricos.

Os autores declaram não haver conflito de interesses. L. L. Romero (Autor) desenvolveu os algoritmos, realizou as simulações, a análise dos dados e participou da redação do manuscrito. L. A. Ambrosio (Orientador) supervisionou todo o trabalho, participou do planejamento, da análise dos resultados e da revisão final do manuscrito. F. A. Tomé auxiliou



no desenvolvimento dos algoritmos, principalmente na questão de eficiência e paralelismo. Todos os autores aprovaram a versão final do resumo.

Referências

- [1] Baresch, D., Thomas, J.-L., & Marchiano, R. (2013). Three-dimensional acoustic radiation force on an arbitrarily located elastic sphere. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 133(1), 25-36.
- [2] Faran, J. J., Jr. (1951). Sound scattering by solid cylinders and spheres. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 23(4), 405-418.
- [3] Hickling, R. (1962). Analysis of echoes from a solid elastic sphere in water. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 34(10), 1582-1592.