DETECÇÃO DE NEUTRINOS DE SUPERNOVAS: UM ESTUDO DE SIMULAÇÃO PARA O EXPERIMENTO DUNE

Emanuele Vieira, Rafael Camargo Rodrigues de Lima

INTRODUÇÃO

Neutrinos são partículas subatômicas que não possuem carga elétrica, consequentemente interagem fracamente com a matéria, atuando apenas por meio da gravidade e da força nuclear fraca, uma das características do neutrino é transportar informações sobre os processos em que são produzidos. Essa propriedade os torna relevantes para o estudo de fenômenos astrofísicos, especialmente de supernovas, eventos associados ao colapso gravitacional de estrelas massivas, nos quais grande parte da energia é liberada na forma de neutrinos.

A observação de neutrinos provenientes da supernova SN 1987A foi um marco para a astronomia de neutrinos, fornecendo informações sobre o colapso estelar e a formação do objeto compacto resultante. Durante sua propagação, foi possível analisar que neutrinos podem sofrer oscilações de sabores, alterando o fluxo observado em relação ao produzido na fonte. O estudo desses efeitos é importante para a interpretação dos sinais de supernovas.

Nesse contexto, os métodos de Monte Carlo constituem uma ferramenta para demonstrar estatisticamente processos de transporte e interação de partículas. Neste trabalho, foi desenvolvida uma simulação Monte Carlo para o transporte de partículas em uma atmosfera bidimensional simplificada, considerando espalhamentos Compton e acompanhando as variações de trajetória, energia e direção. Com a finalidade de analisar os efeitos dos espalhamentos sobre o transporte das partículas, como parte de uma etapa de formação teórico-computacional no desenvolvimento do projeto de Iniciação Científica, contribuindo para estudos posteriores relacionados ao transporte e à detecção de partículas.

DESENVOLVIMENTO

Inicialmente, foi realizada uma revisão dos conceitos relacionados ao transporte de partículas e aos métodos de Monte Carlo, seguida da implementação computacional do modelo em Python. A simulação é desenvolvida pelo método de Monte Carlo (NEWMAN; BARKEMA, 1999), considerando uma atmosfera bidimensional representada por uma camada plana de altura H, limitada pelo solo e pelo topo da atmosfera. A partícula inicia sua trajetória no topo, com direção inicial para baixo, e sua posição é atualizada após cada deslocamento.O deslocamento entre duas interações é determinado pelo caminho livre médio, definido por:

$$\lambda(E) = \frac{1}{n_e\, \sigma(E)} \qquad (1)$$

em que (n_e) representa a densidade eletrônica e o (σ(E)) é a seção de choque da interação. A distância livre (s) é sorteada a partir de uma distribuição exponencial, utilizando um número aleatório uniforme ($\varepsilon\ \epsilon\ (0,1)$):

$$s = \lambda(E)\ ln\ (\varepsilon) \qquad (2)$$

Após cada interação, a direção da partícula é atualizada de acordo com o processo de espalhamento considerado. Nesta etapa do trabalho, foi utilizado o espalhamento Compton, cuja distribuição angular é descrita pela seção de choque diferencial de Klein–Nishina (RYBICKI; LIGHTMAN, 1979). O ângulo de espalhamento é obtido numericamente por amostragem aleatória e, a partir dele, são atualizadas a direção de propagação e a energia da partícula.

O procedimento é repetido para cada partícula simulada, registrando-se sua trajetória, energia, ângulo de espalhamento e número de interações. As partículas que atingem o limite inferior da atmosfera são classificadas como transmitidas, enquanto aquelas que retornam ao limite superior são classificadas como refletidas. Caso o número máximo de interações seja atingido antes da saída da atmosfera, a partícula é classificada como presa, conforme o limite numérico estabelecido no modelo.
A simulação permite, assim, analisar estatisticamente o transporte das partículas e os efeitos sucessivos do espalhamento sobre suas trajetórias e energias. Essa implementação também constitui uma etapa de formação computacional relacionada ao projeto de Iniciação Científica, que prevê o desenvolvimento progressivo de conhecimentos em simulação e análise de processos envolvendo partículas.

RESULTADOS

Podemos observar que as trajetórias simuladas apresentaram diferentes caminhos de propagação, evidenciando a alteração da direção das partículas após as interações. A distribuição angular dos espalhamentos apresentou maior concentração de eventos em torno de pequenos ângulos, embora também tenham sido observados espalhamentos em diferentes direções. A energia final dos fótons apresentou redução com o aumento do número de espalhamentos, indicando a perda de energia associada às sucessivas interações Compton.
Observou-se ainda que, com o aumento da profundidade óptica inicial, a fração de partículas transmitidas diminuiu, enquanto a fração refletida aumentou. Esses resultados permitem caracterizar o efeito da quantidade de matéria atravessada sobre o transporte das partículas no modelo considerado.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em vista dos resultados obtidos, a simulação permitiu analisar as propriedades do transporte de partículas sob condições atmosféricas simplificadas. A ferramenta desenvolvida estabelece uma base para a progressão do código em direção à descrição de processos de espalhamento em altas energias. Assim como o desenvolvimento futuro da simulação poderá contribuir para estudos envolvendo propagação de partículas e, posteriormente, análise de neutrinos associados a explosões de supernovas.

Palavras-chave: Monte Carlo; transporte de partículas; espalhamento Compton; radiação cósmica; atmosfera.

ILUSTRAÇÕES

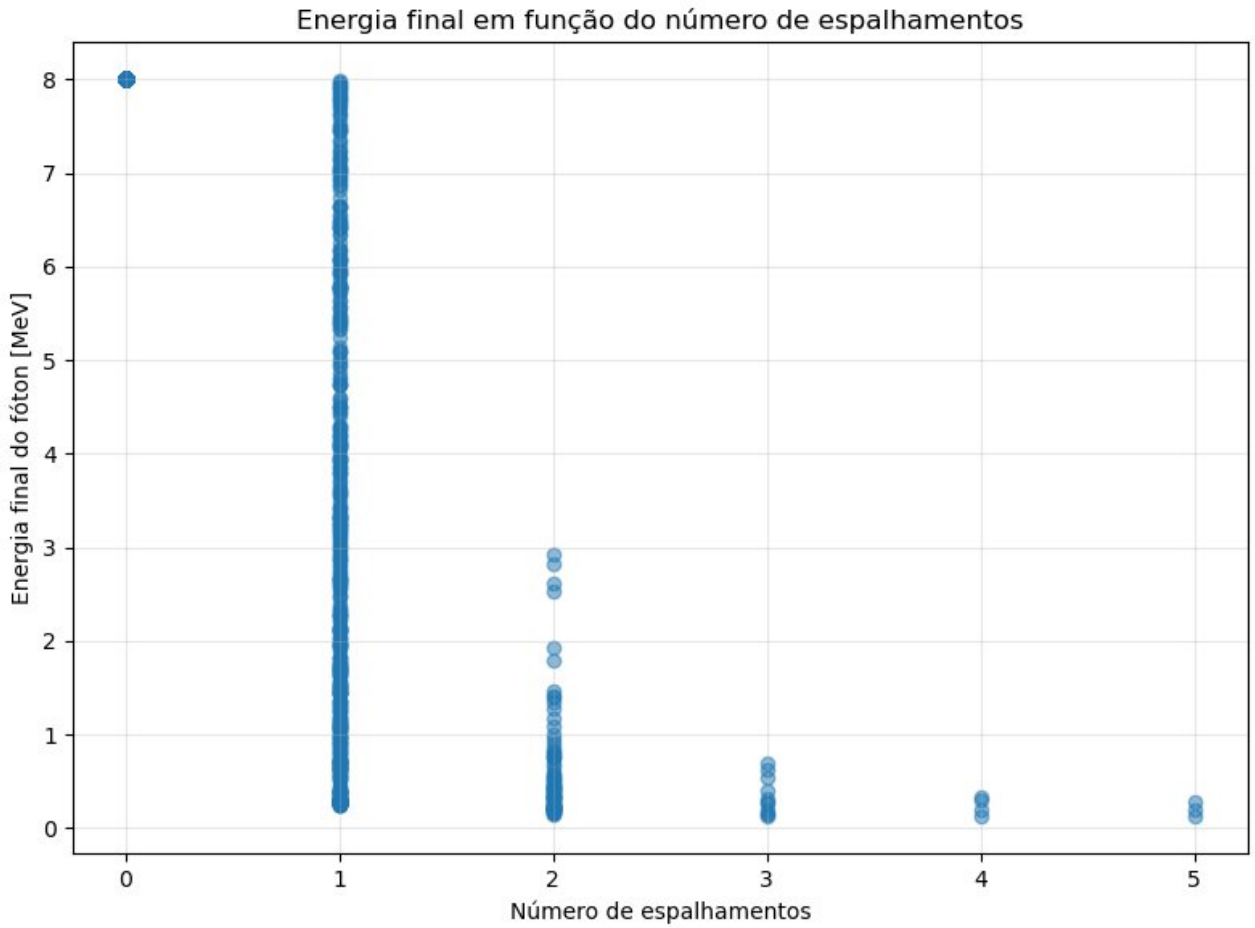


Figura 1. *Energia final em função do número de espalhamentos.*

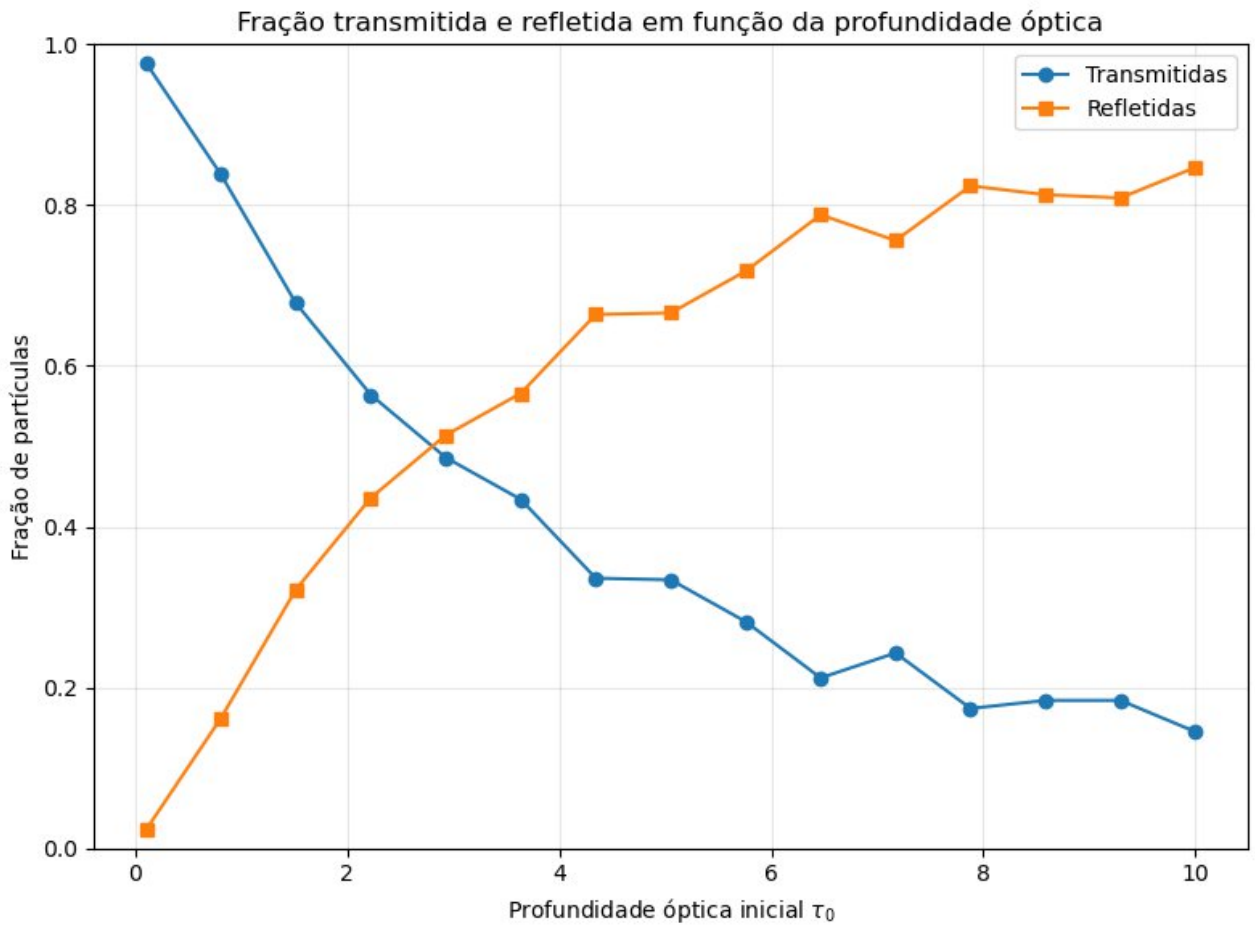


Figura 2. *Fração transmitida e refletida em função da profundidade óptica.*

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CLOSE, Frank. *Neutrino*. Oxford: Oxford University Press, 2010.

RYBICKI, G. B.; LIGHTMAN, A. P. *Radiative Processes in Astrophysics*. New York: John Wiley & Sons, 1979.

NEWMAN, M. E. J.; BARKEMA, G. T. *Monte Carlo Methods in Statistical Physics*. Oxford: Oxford University Press, 1999.