Simulação de Ray-Tracing em Estrelas de Nêutrons e Buracos Negros com Aplicações em Astrofísica Relativística

João Alexandre Costa, Rafael Camargo Rodrigues de Lima

INTRODUÇÃO

Objetos compactos, como estrelas de nêutrons e buracos negros, possuem uma influência gravitacional tão intensa que gera efeitos significantes na trajetória da luz próxima deles. Estudar esses efeitos é uma forma de compreender como a curvatura do espaço-tempo influencia imagens e sinais observados; o que faz as técnicas de *ray-tracing* ferramentas importantíssimas para a astrofísica relativística. Neste trabalho, buscou-se estudar os fundamentos da propagação da luz em espaços-tempos curvos e utilizar métodos computacionais para simular esses efeitos. Como objetivos principais, buscou-se compreender e implementar as geodésicas, utilizar técnicas de *ray-tracing* para simular estrelas de nêutrons e analisar suas imagens e curvas de luz, dando foco para efeitos de lente gravitacional e influência da compactação e de *hotspots*.

DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do trabalho foi progressivo, iniciando com revisão bibliográfica, estudo teórico e computacional. Inicialmente, foram estudados os fundamentos da Relatividade Restrita e posteriormente da Relatividade Geral a partir das obras *A First Course in General Relativity* e *Gravity from the Ground Up*, de Bernard F. Schutz, dando foco na descrição do espaço-tempo, métrica de Schwarzschild e nas equações geodésicas utilizadas para modelar a propagação da luz. Posteriormente, foram realizadas implementações numéricas em Python, para integrar as equações geodésicas e analisar a trajetória dos fótons. Com esse mesmo fim, um código de *ray-tracing* originalmente desenvolvido para simulação de buracos negros foi remodelado para simular estrelas de nêutrons, permitindo estudar numericamente a propagação da luz nas proximidades da superfície estelar. Por fim, utilizando o programa PULSARIS como ferramenta complementar no estudo de estrelas de nêutrons, com foco em gerar e analisar curvas de luz e na organização de sinais periódicos com base na rotação da estrela. Todas as etapas foram realizadas com acompanhamento do orientador, objetivando relacionar procedimentos computacionais aos conceitos físicos estudados na revisão bibliográfica.

RESULTADOS

A implementação numérica em Python permitiu simular a propagação de fótons nas proximidades de uma estrela de nêutrons e obter imagens representando os efeitos da curvatura do espaço-tempo. Como resultado, foi obtida a formação de um anel de Einstein associado à deflexão gravitacional da luz (ANEXO I). O resultado está de acordo com a previsão da Relatividade Geral de que a trajetória da luz é alterada pela curvatura do espaço-tempo.

Os estudos com o programa PULSARIS permitiram explorar configurações de estrelas de nêutrons com *hotspots* e analisar a variação do fluxo observado em função da rotação da estrela. As curvas de luz obtidas permitem relacionar a geometria da região emissora e a orientação do sistema com a modulação do sinal recebido pelo observador. Também foi realizado o procedimento de *folding* dos sinais (ANEXO II), com o objetivo de organizar os dados de acordo com a fase de rotação e facilitar a identificação de padrões periódicos.

Os resultados obtidos demonstram a possibilidade de utilizar métodos computacionais para relacionar a propagação relativística da luz às características envolvidas na observação de estrelas de nêutrons. Como limitação, parte das simulações foi realizada a partir da adaptação de ferramentas já existentes,

sendo necessário aprofundar e sistematizar a análise dos parâmetros físicos para uma caracterização mais completa dos efeitos estudados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As atividades realizadas até o momento permitiram desenvolver uma base teórica e computacional para o estudo da propagação da luz em torno de objetos compactos. O estudo da Relatividade Geral e equações geodésicas foi complementado pela implementação numérica em Python e pela adaptação das técnicas de *ray-tracing* para estrelas de nêutrons.

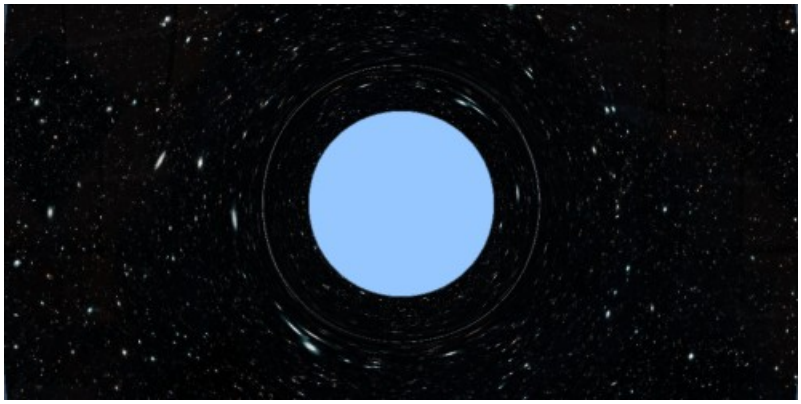
Os resultados permitiram visualizar efeitos da curvatura do espaço-tempo sobre a propagação da luz, além de possibilitar o estudo utilizando curvas de luz e sinais associados à rotação e *hotspots* por meio do PULSARIS.

Portanto, os objetivos propostos para essa etapa foram alcançados, construindo a fundamentação necessária e desenvolvendo as primeiras simulações computacionais. A continuidade do trabalho permitirá aprofundar a análise dos modelos.

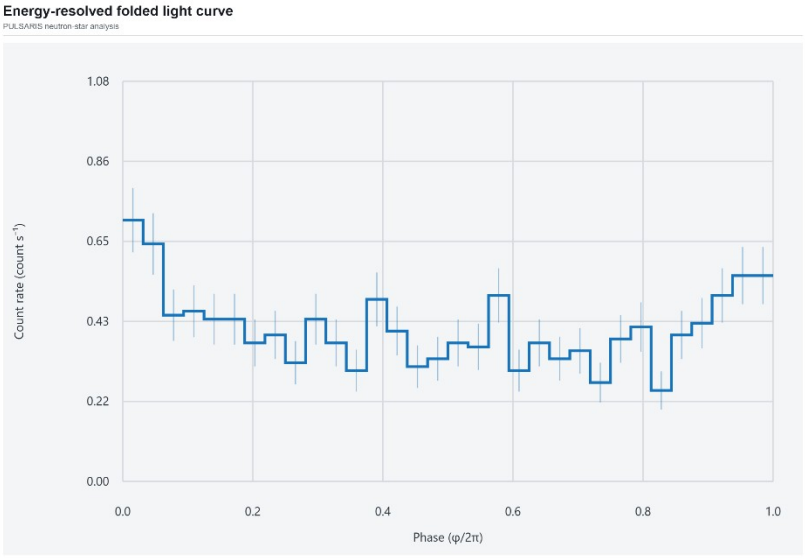
Palavras-chave: relatividade geral; estrelas de nêutrons; *ray-tracing*; lente gravitacional; curvas de luz.

ANEXOS

ANEXO I — Simulação da formação de um anel de Einstein pela deflexão gravitacional da luz nas proximidades de uma estrela de nêutrons.



ANEXO II — Resultado do procedimento de *folding* aplicado ao sinal simulado de uma estrela de nêutrons, organizado em função da fase de rotação.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

SCHUTZ, Bernard F. *A first course in general relativity.* 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2009.

SCHUTZ, Bernard. *Gravity from the ground up: an introductory guide to gravity and general relativity.* Cambridge: Cambridge University Press, 2003.

DE LIMA, Rafael C. R. *PULSARIS*. GitHub, [s.d.]. Disponível em: https://github.com/RafaelCRdeLima/PULSARIS. Acesso em: 16 set. 2026.