



ASTROFÍSICA NUCLEAR: MODELANDO ESTRELAS DE NÊUTRONS

RAMON GOULART DA SILVA¹; RAFAEL CAVAGNOLI²; VICTOR PAULO
BARROS GONÇALVES³

¹*Universidade Federal de Pelotas – goulart94@hotmail.com*

²*Universidade Federal de Pelotas – rafabrasil2@gmail.com*

³*Universidade Federal de Pelotas – victorpbg@gmail.com*

1. INTRODUÇÃO

A Física de partículas sob o regime de altas energias é um assunto com grande potencial para a ciência moderna. Os principais resultados obtidos são encontrados em experimentos como do LHC ou Grande Colisor de Hádrons, que tem por objetivo o descobrimento de uma Física ainda não explorada, capaz de unificar os conhecimentos de mecânica quântica e relatividade em uma única e inédita teoria.

Para a realização deste trabalho forem realizados estudos em Física de partículas aplicados em uma abordagem de natureza Astrofísica, em estrelas compactas. Torna-se presente uma conexão entre hádrons, léptons, bósons e férmons ao evidenciar seus comportamentos e interações na estrutura interna de estrelas.

Estrelas são corpos celestes em equilíbrio hidrostático, isto é, conseguem balancear forças internas (pressão do gás presente em seu interior) com externas (força gravitacional), capazes de transformar hidrogênio em hélio (e assim por diante) por meio da fusão termonuclear, e que podem ser classificadas de acordo com sua massa, brilho, luminosidade e temperatura.

O hélio presente no núcleo da estrela pode então ser convertido em outros elementos químicos, todos mais leves que o ferro. Após esta fase a estrela possui três destinos possíveis, que dependem de sua massa inicial: a formação de uma anã branca, estrela de nêutrons ou buraco negro.

O foco deste trabalho está no estudo das estrelas de nêutrons, que são objetos com um raio muito pequeno (na ordem de 10 km) e com massa muito grande (ordem de 1 massa solar, $1 M_{\odot}$), caracterizando um estado de alta energia, pois a matéria em seu interior encontra-se em condições extremas. Estas estrelas possuem um campo magnético muito intenso que combinado com sua alta rotação produz efeitos que podem ser detectados como um pulsar.

Para a descrição do comportamento de uma estrela de nêutrons se torna necessário o estudo das variações de sua compressibilidade, pressão, densidade de energia, massa e raio. Tais parâmetros definem a estabilidade destes corpos celestes.

A pressão exercida pelo gás interno em um objeto tão compacto é descrita por meio de equações de estado (EoS) dadas em termos de interações envolvendo a força (nuclear) forte. Estas equações são capazes de descrever o comportamento da estrela, modelada pelas equações da relatividade geral e resolvidas em uma determinada métrica. Considerando um objeto estático e composto por um fluido perfeito, tais soluções são conhecidas como equações TOV (Tolman-Oppenheimer-Volkoff).

2. METODOLOGIA



O processo realizado para obter os resultados desejados teve início com o estudo da descrição de uma estrela de nêutrons, onde leituras de artigos e trabalhos acadêmicos foram necessárias para o conhecimento dos parâmetros e grandezas físicas que compõe a estrutura da estrela, bem como as unidades de medidas utilizadas nestes casos.

Com a utilização da linguagem *Fortran* é possível escrever um programa capaz de modelar uma estrela de nêutrons, em seguida com a utilização do software *Gnuplot* as informações obtidas são representadas em gráficos. Estes gráficos relacionam variáveis como: pressão, densidade de energia, densidade bariônica, raio e massa, considerando ainda variações em sua densidade central diante de uma compressibilidade fixa ou vice-versa.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente manteve-se a compressibilidade K da estrela fixa em 170 MeV, e sua densidade central n_c variando a densidade bariônica n_B em termos da densidade de saturação da matéria nuclear n_0 . Foi possível então construir um gráfico da Pressão x Raio (figura 1). Observa-se que a pressão no interior da estrela aumenta conforme o raio diminui, pois quanto mais próximo do centro da estrela, maior a densidade e a pressão. Aumentando a distância ao centro da estrela a pressão diminui, pois a densidade no interior da estrela é menor, chegando ao raio limite da estrela, onde a pressão tende a zero.

Em seguida manteve-se a densidade central fixa, variando a compressibilidade (K) da matéria nuclear que compõe a estrela (figura 2). Também relacionamos a pressão da estrela com sua densidade bariônica n_B em termos da densidade de saturação da matéria nuclear, n_B/n_0 (figura 3).

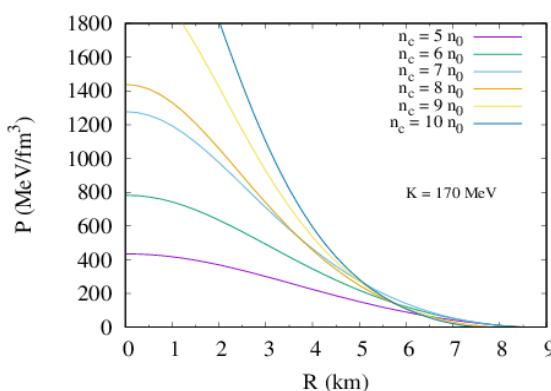
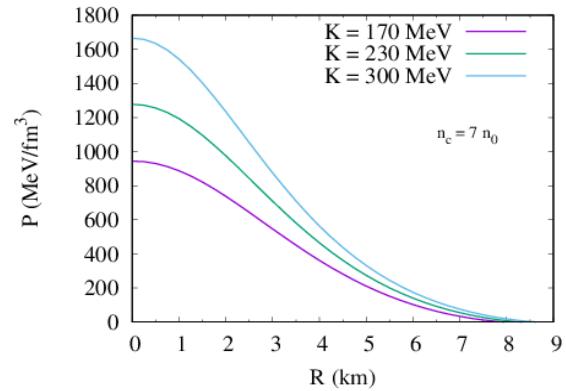


Figura 1: Pressão x Raio



raio (densidade central fixa)

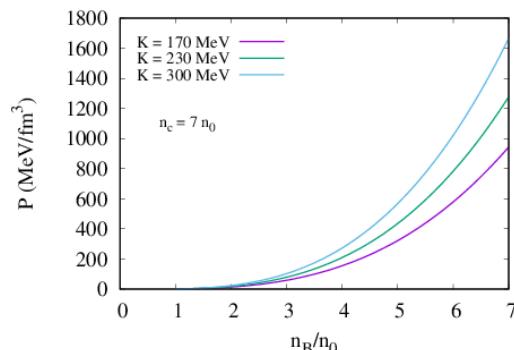


Figura 3: Pressão x densidade bariônica

O próximo passo foi obter perfis massa x raio de estrelas a partir das equações de estado estudadas anteriormente. Para isso foi necessário adicionar às EoS ante-riores, os dados de equações de estado para uma região de baixa densidade (crosta da estrela), obtidos com um modelo mais preciso para tal região, por Baym, Pethick e Sutherland (BPS). Estes dados em baixa densidade não afetam os resultados mostrados anteriormente. As novas EoS são usadas como input nas equações TOV, que fazem a ponte entre a Física Nuclear e a Astrofísica, resultando em perfis de estrelas, massa x raio.

Primeiramente fixou-se a compressibilidade e variou-se a densidade central (figura 4). Nota-se que a massa máxima ocorre em torno de $2 M_{\odot}$ (2 massas solares) com um raio máximo entre 10 km e 11 km. Outros perfis de estrelas podem ser obtidos variando a compressibilidade e mantendo a densidade central fixa (figura 5). Neste caso é possível alcançar massas máximas maiores variando levemente o respectivo raio da estrela, em função da compressibilidade. A compressibilidade diferente implica em diferentes interações na matéria nuclear e que implicam em modificações significativas nas equações de estado (mais “duras” ou mais “moles”, conforme figura 3), levando a um resultado diferente nos perfis de estrelas.

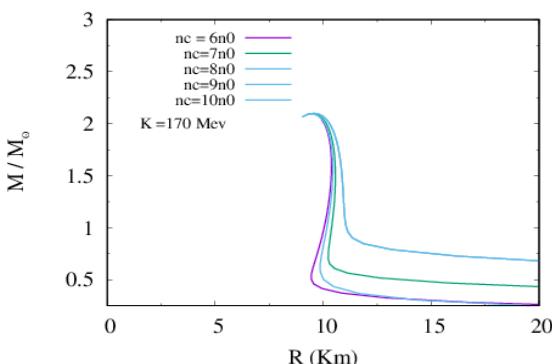


Figura 4: Perfil massa x raio de estrelas (compressibilidade fixa)

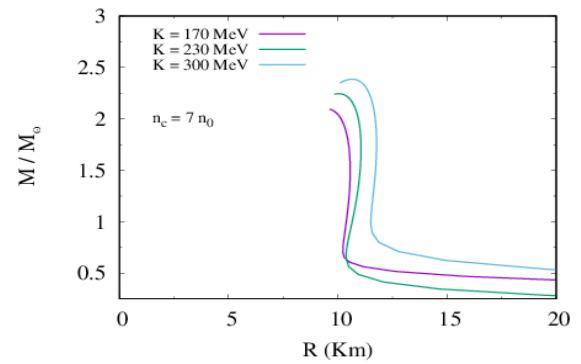


Figura 5: Perfil massa x raio (densidade central fixa)

4. CONCLUSÕES

De maneira geral, podemos dizer que as simulações computacionais realizadas geraram um conjunto de dados satisfatório, dado o nível inicial de abordagem do projeto, em comparação com a bibliografia especializada. Os resultados iniciais foram suficientes para validar o método, e uma quantidade maior de resultados, envolvendo diferentes valores nas variáveis de entrada, bem como modificação de alguns parâmetros, se mostram necessários a fim de obtermos uma melhor comparação com os dados provenientes de observações astrofísicas.

A fim de melhorar o estudo bem como os resultados, fica evidente a necessidade de inclusão de mais parâmetros, dados por diferentes interações entre partículas a serem consideradas na constituição da estrela, inclusive uma possível fase mista na composição da mesma, contendo uma parte hadrônica e outra composta por quarks desconfinados.



5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, Fernanda Machado. **Estrelas de Nêutrons: estrutura e propriedades.** 2010. 51 f. TCC (Graduação) - Curso de Centro de Matemática, Computação e Cognição, Universidade Federal do ABC, Santo André, 2010. Disponível em: http://professor.ufabc.edu.br/~cecilia.chirenti/pt/pesquisa/people/araudo/Relatorio_Final.pdf. Acesso em: 28 set. 2020.
- CHUNG, K. C. **Vamos Falar de Estrelas?** Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2000.
- LAZZARI, Lucas. **Estrutura e estabilidade das estrelas estranhas.** Orientador: Victor Paulo Barros Gonçalves. 2019. 101 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Física) – Instituto de Física e Matemática, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.
- MILONE, André de Castro *et al.* **INTRODUÇÃO À ASTRONOMIA E ASTROFÍSICA.** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2018. Disponível em: http://www.inpe.br/ciaa2018/arquivos/pdfs/apostila_completa_2018.pdf. Acesso em: 28 set. 2020.
- NYÍRI, Ágnes. **Quark-Gluon Plasma in Neutron Stars.** 2001. 113 f. Tese (Doutorado), Department Of Physics, University Of Bergen, Bergen, 2001.
- OLIVEIRA FILHO, Kepler de Souza; SARAIVA, Maria de Fátima Oliveira. **Astronomia e Astrofísica.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2014.
- OSTERMANN, Fernanda. **Partículas Elementares e Interações Fundamentais.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.