

ESTRELA DE NÊUTRONS DE MATÉRIA NUCLEAR

LEONARDO TAYNÔ TOSETTO SOETHE¹; RAFAEL CAVAGNOLI²; VICTOR PAULO BARROS GONÇALVES³

¹ Universidade Federal de Pelotas – tayno_jahva@hotmail.com

² Universidade Federal de Pelotas – rafael.cavagnoli@ufpel.edu.br

³ Universidade Federal de Pelotas – victorpbg@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

De acordo com KEPLER (2014), podemos definir estrelas como esferas autogravitantes de gás ionizado, cuja fonte de energia é a transmutação de elementos através de reações nucleares. O estudo das estrelas se mostra de grande interesse, pois elas podem nos contar a história da matéria que hoje constitui todo o universo, além de explicar a abundância de cada elemento (CHUNG, 2000).

Dependendo do valor de sua massa inicial, uma estrela pode evoluir de formas diferentes, sofrendo interação gravitacional, colapsando ao núcleo, liberando energia, e dando origem a uma determinada quantidade de diferentes elementos. Vamos dirigir nossa atenção para um tipo conhecido como estrela de nêutrons, que é o produto da ejeção de uma grande quantidade de matéria após a explosão de uma supernova, atingindo então uma configuração de equilíbrio.

Por se tratarem de objetos extremamente massivos e densos, faz-se necessário levar em conta a distorção do espaço-tempo. Uma equação de estado deve ser usada afim de relacionar as grandezas termodinâmicas envolvidas, como a temperatura, densidade de energia, densidade nuclear e energia de ligação.

Como principal objetivo, procuramos descrever a estrela da melhor forma possível. Isto é, encontrar relações entre seu raio, densidade de energia, pressão e densidade bariônica. A qualidade dos resultados obtidos se dá através da comparação com os valores observados astronomicamente.

Após a comparação, conclui-se então quais os valores das variáveis de entrada que melhor descrevem uma estrela, permitindo assim a possibilidade de novas inferências a respeito do comportamento da matéria e do próprio objeto celeste.

Embora já exista uma considerável bibliografia sobre como tratar as estrelas do ponto de vista teórico, é reduzido o número de cálculos e resultados gerais feitos a partir dessas diferentes sugestões, se tornando assim um caminho importante a ser verificado.

2. METODOLOGIA

Dentro da astrofísica nuclear, diversas abordagens podem ser feitas para descrever uma estrela de nêutrons. Optamos por um método bastante conhecido, que consiste em solucionar (1), a equação de Tolman-Oppenheimer-Volkoff. Esse cálculo foi feito pela primeira vez em 1939, por J. R. Oppenheimer e G. M. Volkoff.

$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{Ge(r)M(r)}{r^2c^2} \left(1 + \frac{P(r)}{e(r)}\right) \left(1 + \frac{4\pi r^3 P(r)}{M(r)}\right) \left(1 - \frac{2GM(r)}{r}\right)^{-1} \quad (1)$$

A equação (1), que já inclui correções relativísticas, apresenta a pressão P e a densidade de energia e em um determinado ponto da estrela como funções do raio r , ou seja, a distância do centro da estrela ao ponto em questão. Por ser a força

gravitacional uma das principais grandezas envolvidas no processo de formação da estrela, notamos o uso da constante gravitacional $G = 6,672 \times 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{gs}^2$, além da massa envolvida por um raio r , explicitada em (2), já coordenadas esféricas.

$$M(r) = \int_0^r 4\pi r'^2 e(r') dr' \quad (2)$$

Essas equações são suficientes para descrever uma estrela esférica, sem movimento de rotação, e com a pressão interna em equilíbrio com a força gravitacional.

Para a equação de estado, usamos (3), que trata de descrever a estrela como matéria nuclear.

$$e(n) = n[\varepsilon_{comp}(n) + W_0 + W_{sym} + m_n] \quad (3)$$

A equação acima relaciona a densidade de energia e com um termo de compressão ε_{comp} , $m_n = 939 \text{ MeV}$ é a massa de repouso do nucleon, $W_0 = -16 \text{ MeV}$ é a energia de ligação por nucleon à densidade nuclear normal ($n_0 = 0,17 \text{ fm}^{-3}$), e $W_{sym} = 32 \text{ MeV}$ é a energia de simetria. Para o termo de compressão, por sua vez, usa-se (4)

$$\varepsilon_Q(n; K) = \frac{K (n - n_0)^2}{18 n_0^2} \quad (4)$$

conhecida como parametrização quadrática para o termo de compressão, onde K é a constante de compressão.

Como ferramenta de cálculo, usamos a linguagem de programação Fortran, pela sua eficiência e popularidade. No trabalho feito por NYÍRI (2001), temos um modelo de programa para resolver as equações em questão. Basicamente, ao rodar o programa, é pedido o valor de densidade central, que deve ser a variável de entrada. Como resultado é gerada uma tabela que relaciona valores de raio, massa, pressão, densidade de energia e número bariônico total.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como o número de valores gerados a partir do programa é muito grande, a construção de gráficos é muito útil na hora de resumir os resultados, assim como também no momento de interpretá-los.

Além disso, alguns dos parâmetros definidos dentro do programa podem ser mudados, afim de buscar melhores resultados. Os resultados aqui mostrados são referentes a valores de $\Lambda_B = 185 \text{ MeV}$, sendo $B = \Lambda_B^4 / (\hbar c)^3$ a constante de bag; e $K = 170 \text{ MeV}$ para a compressibilidade.

Na Figura 1 abaixo é apresentado um gráfico que mostra a pressão em um determinado ponto da estrela em função do raio desse ponto. Nesse caso, foi escolhido $5 \text{ GeV}/\text{fm}^3$ como densidade central para o parâmetro de entrada.

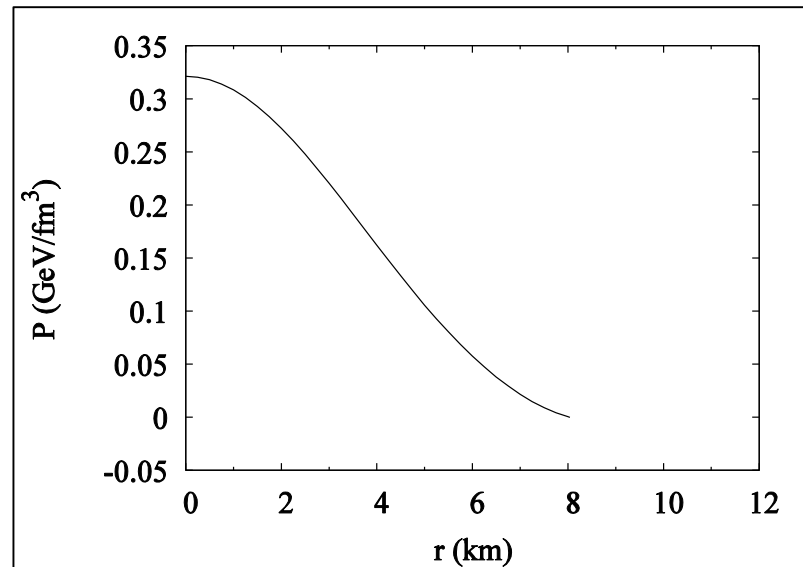


Figura 1: gráfico da pressão em função do raio da estrela.

Pode-se notar que o gráfico apresentado está de acordo com o que prevê a literatura. Gráficos que relacionam diferentes variáveis (densidade de energia, massa, número bariônico) podem ser gerados a partir da modificação do parâmetro de entrada, bem como da constante de bag e da compressibilidade.

4. CONCLUSÕES

As simulações computacionais realizadas geraram um conjunto de dados que estão de acordo com a bibliografia especializada. Comparações iniciais foram suficientes para validar o método, e uma quantidade maior de resultados, envolvendo diferentes valores nas variáveis de entrada, bem como modificação nos parâmetros de compressibilidade e constante de bag, devem ser suficientes para uma melhor comparação com os dados provindos de observações astronômicas.

A fim de refinar o método e melhorar os resultados obtidos, se mostra de grande valia um trabalho futuro, com o objetivo incrementar a descrição da estrela através de modificações na equação de estado, acrescentando diferentes interações entre partículas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

NYÍRI, Á. **Quark-Gluon Plasma in Neutron Stars**. 2001. Thesis (Master of Philosophy degree in Physics) – Department of Physics, University of Bergen.

SAGERT I., HEMPEL M., GREINER C., SCHAFFNER-BIELICH J. Compact Stars for Undergraduates. **Eur.J.Phys**, v.27, p.577-610, 2006.

SILBAR R.R., REDDY S. Neutron Stars for Undergraduates. **Am.J.Phys**, v.72, p.892-905, 2004.

CHUNG, K.C. **Vamos Falar de Estrelas?** Rio de Janeiro: Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2000.

MENEZES, D.P. **Introdução à Física Nuclear e de Partículas Elementares**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2002.



KEPLER, S.O.; SARAIVA, M.F.O. **Astronomia e Astrofísica**. São Paulo: Editora Livraria da Física, 2004.