

ESTRELAS COMPACTAS

Lucas da Silva Lazzari¹; Victor Paulo Gonçalves²

¹Universidade Federal de Pelotas – lucas.lazzari@ufpel.edu.br

²Universidade Federal de Pelotas – barros@ufpel.edu.br

1. INTRODUÇÃO

No presente trabalho iremos estimar a massa, raio e pressão características de estrelas de quarks e anãs brancas, ambas são objetos formados no fim da vida das estrelas. As anãs brancas constituem a maior parte do nosso estudo, sendo utilizadas como base conceitual para uma primeira abordagem no estudo de estrelas de quarks e objetos compactos em geral. Já as estrelas de quarks, apesar de sua observação (ou não) ser ainda tema de intenso debate, podem estar presentes em um segundo estágio das estrelas de nêutrons.

No fim da evolução estelar, para uma estrela como o Sol, esta começará uma expansão e expelirá massa criando uma nebulosa planetária ao redor do seu antigo núcleo. Este núcleo que restou da estrela é chamado de anã branca (JACKSON et al., 2005). Existe uma massa limite de aproximadamente $1,4M_{\odot}$, onde M_{\odot} é a massa do Sol, descoberta por Chandrasekhar (PINOCHET; JAN, 2016) para que estrelas tornem-se anãs brancas. Outro objeto compacto pode ser formado ao fim da vida, para estrelas muito mais massivas que o Sol, são as estrelas de nêutrons, que são formadas após a ocorrência de uma supernova. Também existe uma massa limite para as estrelas originarem estrelas de nêutrons, acima de tal limite, as estrelas continuam o colapso, formando um buraco negro (JACKSON et al., 2005). Modelos teóricos mostram que estrelas de quarks podem ser um segundo estágio das estrelas de nêutrons, e possibilitam também uma configuração chamada estrela híbrida, onde o núcleo seria formado por uma matéria de quarks mas a camada externa formada por nêutrons (NYÍRI, 2001). Acredita-se que diferentemente da matéria ordinária, estas estrelas de quarks possuíam o quark strange, pois esta configuração chamada de Matéria Estranha de Quarks seria energeticamente mais favorável (WEBER, 1996). Através das observações não foi possível determinar se as estrelas de nêutrons observadas não são estrelas de quarks ou híbridas.

As equações de estado que descrevem o comportamento da massa M e da pressão p de uma estrela com a variação do raio r são, de acordo com o modelo newtoniano (SAGERT et al., 2006)

$$\frac{dM}{dr} = \frac{4\pi r^2 \epsilon(r)}{c^2}, \text{ (Equação 1)} \quad \frac{dp}{dr} = -\frac{G\epsilon(r)M(r)}{c^2 r^2}, \text{ (Equação 2)}$$

onde ϵ é a densidade de energia, G a constante gravitacional e c a velocidade da luz no vácuo.

Ao levarmos em consideração as correções da Relatividade Geral ao modelo de 'Newton', obtemos, no lugar da Equação 2, a Equação de Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) (SAGERT et al., 2006)

$$\frac{dp(r)}{dr} = -\frac{G\epsilon(r)M(r)}{c^2 r^2} \left[1 + \frac{p(r)}{\epsilon(r)} \right] \left[1 + \frac{4\pi r^3 p(r)}{M(r)c^2} \right] \left[1 - \frac{2GM(r)}{c^2 r} \right]^{-1},$$

(Equação 3)

resultando em um novo sistema de equações. A fim de resolvermos os sistemas de equações devemos estipular duas condições iniciais, uma pressão central p_0 e uma massa central nula.

A pressão expansiva que sustenta estas estrelas compactas contra a contração gravitacional, é a pressão de degenerescência, consequência do Princípio de Exclusão de Pauli (UFSM). No caso das anãs brancas, a pressão de degenerescência é devida aos elétrons, e nas estrelas de nêutrons, se deve aos nêutrons, lembrando que quarks, prótons, nêutrons e elétrons são férmions. Dito isso, consideraremos as estrelas como compostas por um gás ideal de férmions degenerado. Chamamos de gás ideal pois desconsideraremos qualquer interação entre os férmions. E por degenerado designamos que todos os níveis de energia até um nível de energia chamada energia de Fermi estão ocupados (GLEDENNING, 1996). Esse nível de energia de Fermi corresponde à máxima velocidade possível para os férmions, que de acordo com a Teoria da Relatividade Restrita é próxima da velocidade da luz.

Nas anãs brancas, descrevemos a densidade de energia total como a soma da energia devida ao movimento dos elétrons e pela energia de repouso dos núcleons. Dito isso, levaremos em conta dois modelos para estrelas anã branca. O modelo de 'Newton' e o modelo 'TOV', que leva em consideração as correções da Teoria da Relatividade Geral. Estamos desprezando a massa dos elétrons e por consequência sua energia de repouso.

No caso das estrelas de quarks, não podemos de forma alguma desprezar as correções relativísticas, e nosso modelo consiste em solucionar a apenas equação TOV. Porém, neste caso, existe uma relação direta entre a pressão e a densidade de energia, ao levarmos em conta uma pressão de sacola B (WEBER, 1999). Dito isso, temos (NYÍRI, 2001)

$$p = \frac{1}{3}(\epsilon - 4B). \quad (\text{Equação 4})$$

Neste modelo para a estrela de quarks estamos desconsiderando a massa dos mesmos.

2. METODOLOGIA

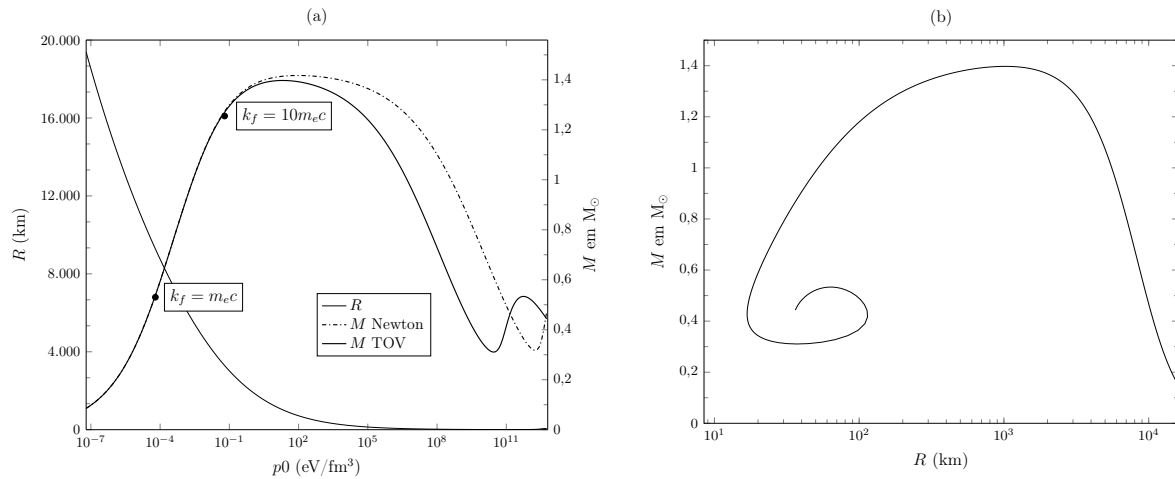
Começamos nossa pesquisa revisando o trabalho de PINOCHET; JAN (2016), que serviu como uma introdução ao estudo de estrelas, permitindo-nos entender sua evolução e os processos característicos. Posteriormente, utilizando os trabalhos de SAGERT et al. (2006) e NYÍRI (2001), fomos capazes de comparar os resultados para dois tipos de estrelas, as anãs brancas e as estrelas de quarks. Ambos autores propunham um modelo teórico, que também foi analisado a partir dos trabalhos de GLEDENNING (1996), WEBER (1999) e JACKSON et al. (2005), revisitando os principais conceitos referentes à estrelas e sua estabilidade. Além disso, também apresentavam modelos numéricos para o cálculo dos parâmetros de interesse, como pressão, massa e raio das estrelas. Para a resolução numérica foram desenvolvidos softwares na linguagem FORTRAN90, e os gráficos foram gerados no PGFPLOTS (extensão do LaTeX).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A fim de compararmos nosso modelo com a teoria vigente, na figura 1(a) apresentamos os dois modelos utilizados para o cálculo dos parâmetros de interesse para estrelas do tipo anã branca. Variando a pressão inicial, obtemos o raio e a massa finais correspondentes. Assim, atingimos com ótima precisão a massa de Chandrasekhar, mostrando que o modelo está de acordo com a teoria. Também temos dois outros pontos de interesse neste gráfico. O primeiro ($k_F = m_e c$) representa o ponto onde os elétrons começam a se comportar

relativisticamente. O segundo demonstra a separação das curvas, que até ali eram indistinguíveis, e representa a maior contribuição dos fatores corretivos da relatividade geral. Também vale notar a diferença entre o decaimento das curvas 'TOV' e 'Newton', pois pelas correções relativísticas a contração gravitacional se torna mais forte e a estrela acaba mais compacta e densa, portanto, com menor massa. Outro fator relevante que ocorre pelo mesmo motivo, é que a massa máxima no modelo 'Newton' ($M = 1,41740M_{\odot}$) é maior do que a do modelo 'TOV' ($M = 1,39696M_{\odot}$). Na figura 1(b) mostramos a relação entre a massa final e o raio final correspondente para uma estrela anã branca, utilizando o modelo 'TOV'. Esta relação nos fornece informações importantes sobre a estabilidade desta estrela. Lembrando que, nesta figura, a pressão central cresce no sentido contrário ao do raio, como pode ser deduzido da figura 1(a). Um aumento na massa da estrela, aumenta mais a força gravitacional do que a pressão interna do gás de elétrons responsável pela pressão. Isto implica que qualquer acréscimo de massa a uma anã branca em equilíbrio fortalece a força gravitacional, comprimindo a estrela, fazendo-a colapsar.

Figura 1: (a) Cálculo da massa e raio para anãs brancas usando diferente equações de estado. (b) A relação entre massa e raio.

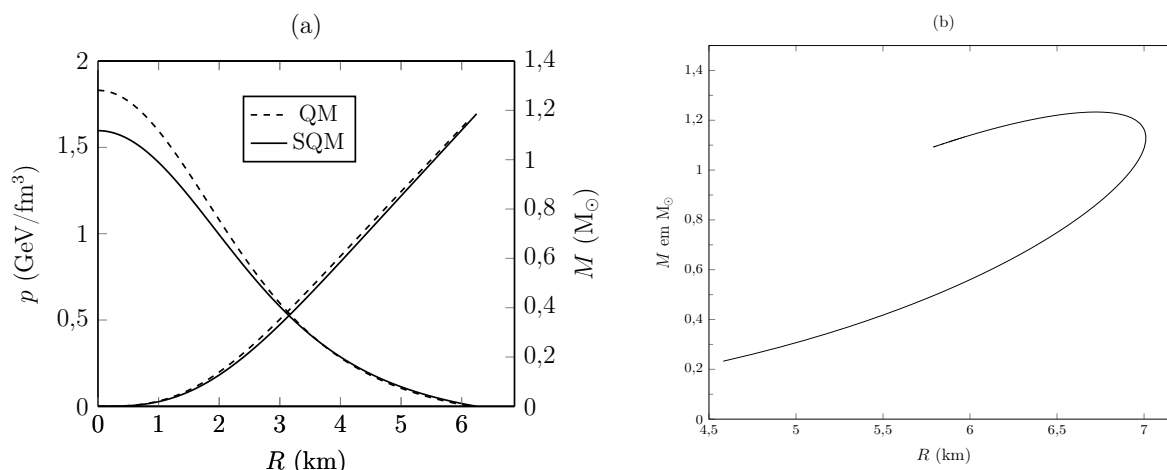


Por outro lado, as estrelas de quarks aparecem no outro extremo dos objetos compactos, onde a relatividade geral não pode ser desprezada. Portanto, estas estrelas teriam massas comparadas à do Sol e raios de aproximadamente 6 km, como mostra a figura 2(a). No regime da matéria de quarks, consideramos uma pressão central muito maior do que para as anãs brancas. Com $p_0 = 1,83007 \text{ GeV fm}^{-3} = 1,83007 \times 10^9 \text{ eV fm}^{-3}$ para uma matéria composta apenas por quarks up e down (QM), e $p_0 = 1,59673 \text{ GeV fm}^{-3}$ para matéria contendo o quark estranho (SQM). Com essa pressão, obtivemos $R = 6,151 \text{ km}$ para dois quarks e $R = 6,247 \text{ km}$ para três quarks, e, respectivamente, $M = 1,16911M_{\odot}$ e $M = 1,18585M_{\odot}$. Para os dois casos consideramos $B = 0,15245 \text{ GeV}$, que é um valor comumente usado na literatura. Os argumentos de estabilidade são análogos àqueles para as anãs brancas, podendo observá-los na figura 2(b), com a diferença singular de que a matéria degenerada é formada por quarks.

4. CONCLUSÕES

Concluimos que os modelos utilizados para o cálculo das propriedades de interesse das estrelas anãs brancas condizem com a teoria vigente e com as observações já realizadas, comprovando a massa limite de Chandrasekhar.

Figura 2: (a) Pressão e massa como funções do raio para estrelas de quarks com dois e três sabores. (b) Relação massa-raio para dois e três sabores (as curvas se sobrepõem).



A possibilidade teórica para uma estrela de quarks, ainda em um estágio inicial, indica que a matéria destas estrelas contenha o quark estranho, diferentemente da matéria usual que conhecemos. Dentro deste modelo, discutimos as possibilidades de explicar o núcleo de uma estrela de nêutrons (que passaria a ser uma estrela híbrida) e a existência de uma estrela composta apenas por quarks como um segundo estágio da estrela de nêutrons. Como futuro da nossa pesquisa, procuraremos implementar modelos que levem em consideração a massa dos quarks e a interação entre eles no interior da estrela.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GLENDENNING, N K. **Compact Stars**. New York: Springer, 1996.

JACKSON, C.B.; et al. Compact objects for everyone: I. White dwarfs stars. **European Journal of Physics**, London, v.26, n.5, p.695-709, 2005.

NYÍRI, Á. **Quark-Gluon Plasma in Neutron Stars**. 2001. Dissertação (Mestrado em Física Computacional) - Pós-graduação em Física Computacional, Universidade de Bergen.

PINOCHET, J.; JAN, M.V.S. Chandrasekhar Limit: an elementary approach based on classical physics and quantum theory. **Physics Education**, London, v.51, n.3, 2016.

SAGERT, I.; et al. Compact stars for undergraduates, **European Journal of Physics**, v.27, n.3, p.577-610, 2006.

UFSM. **Princípio de Exclusão de Pauli**. Universidade Federal de Santa Maria. Acessado em 11 ago. 2018. Online. Disponível em: <http://coral.ufsm.br/gef/p-pauli.html>

WEBER, F. **Pulsars as astrophysical laboratories for nuclear and particle physics**. London: Institute of Physics Publishing Ltd, 1999.