



## ESTRUTURA E ESTABILIDADE DE ESTRELAS ESTRANHAS CARREGADAS

LUCAS LAZZARI<sup>1</sup>; VICTOR P. GONÇALVES<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Pelotas – lucas.lazzari@outlook.com

<sup>2</sup>Universidade Federal de Pelotas – barros@ufpel.edu.br

### 1. INTRODUÇÃO

Estrelas de nêutrons são as estrelas mais densas já observadas no Universo, e servem como um excelente laboratório para o estudo da matéria nuclear e das interações fortes neste regime (SCHAFFNER-BIELICH, 2020). As primeiras tentativas de descrever estes objetos datam da década de 1930, onde diversos avanços teóricos foram desenvolvidos. Em especial, a descrição quantitativa das estrelas de nêutrons foi proposta em 1939, por TOLMAN (1939), OPPENHEIMER E VOLKOFF (1939). Para descrever estas estrelas necessitamos de uma equação de estado (EOS, do inglês *equation of state*), que descreve a matéria no seu interior. Hoje, sabemos que estrelas de nêutrons são o denso núcleo remanescente de estrelas massivas, que são estrelas com massa superior a oito massas solares.

Devido às densidades extremas presentes nas estrelas de nêutrons, sua constituição interna permanece um tema de intenso debate, já que estados exóticos da matéria podem se fazer presentes (SCHAFFNER-BIELICH, 2020). Uma dessas possibilidades são as estrelas de quarks, que são estrelas inteiramente formada por uma matéria de quarks. De acordo com as propostas de BODMER (1971) e WITTEN (1984), a matéria de quarks que contém o quark *strange*, chamada de matéria estranha de quarks (SQM, do inglês *strange quark matter*), é o verdadeiro estado da matéria que interage fortemente, a isto damos o nome de hipótese de Bodmer-Witten. Estrelas inteiramente compostas pela SQM são chamadas de estrelas estranhas.

A SQM presente no interior da estrela ocupa sua parte mais densa e central, porém, nas regiões próximas a superfície a densidade de quarks *strange* decresce e elétrons formam uma eletrosfera ao seu redor (ALCOCK; FARHI; OLINTO, 1986). A eletrosfera está separada da SQM por aproximadamente 100 fm, e não é mantida pela atração gravitacional, e sim pela atração coulombiana. Desta forma, estrelas estranhas devem ser analisadas no contexto de estrelas compactas eletricamente carregadas (NEGREIROS et al., 2009). A presença de carga elétrica na estrela leva ao aumento de seus parâmetros observáveis, isto é, massa e raio. Além disso, a carga elétrica afeta a sua estabilidade (ARBAÑIL; MALHEIRO, 2015). A análise do equilíbrio de estrelas compactas carregadas no contexto da Relatividade Geral, é feito através do seguinte sistema de equações:

$$\frac{dq}{dr} = 4\pi r^2 \rho_e e^\lambda,$$

$$\frac{dp}{dr} = -(\epsilon + p) \left( 4\pi r p + \frac{m}{r^2} - \frac{q^2}{r^3} \right) e^{2\lambda} + \frac{q}{4\pi r^4} \frac{dq}{dr},$$

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon + \frac{q}{r} \frac{dq}{dr},$$

$$\frac{d\nu}{dr} = -\frac{1}{\epsilon + p} \left( \frac{dp}{dr} - \frac{q}{4\pi r^4} \frac{dq}{dr} \right),$$



onde  $\lambda$  e  $\nu$  são as funções métricas. As condições de contorno no centro da estrela ( $r = 0$ ) para este sistema de equações é tal que

$$p(0) = p_0, \quad m(0) = q(0) = 0 \quad \nu(0) = \nu_0$$

além disso, as condições de contorno na superfície da estrela ( $r = R$ ) são

$$p(R) = 0, \quad m(R) = M, \quad q(R) = Q, \quad \nu(R) = -\lambda.$$

De tal forma que a pressão nula na superfície implica no equilíbrio hidroestático da estrela. Além disso,  $M$  e  $Q$  simbolizam sua massa e carga total, respectivamente.

A estabilidade destas estrelas pode ser obtida da forma proposta originalmente por CHANDRASEKHAR (1964), onde impomos uma perturbação no fluido que compõe a estrela. Desta forma, uma equação de pulsação é obtida e é dada por (BRILLANTE; MISHUSTIN, 2014)

$$\frac{d}{dr} \left[ \mathcal{P} \frac{du}{dr} \right] + [\mathcal{Q} + \omega^2 \mathcal{W}] u = 0,$$

onde  $u$  é a função de deslocamento do fluido renormalizada. A condição de contorno no centro da estrela é  $u(0) \approx 0$  e a condição de superfície deve ser tal que  $u'(R) = 0$ , onde  $u' = du/dr$ . Os valores de  $\omega^2$  que satisfazem esta condição de contorno na superfície da estrela são as chamadas autofrequências do sistema. De fato, por se tratar de um problema de Sturm-Liouville onde a função auxiliar  $\mathcal{Q}$  é real, a análise do sinal da autofrequência fundamental  $\omega_0^2$  permite a determinação do comportamento da função  $u$  e, consequentemente, da estabilidade da estrela. Para maiores detalhes veja GONÇALVES; LAZZARI (2020).

Neste trabalho, analisaremos o equilíbrio e a estabilidade de estrelas estranhas eletricamente carregadas, comparando os resultados para duas EOSs: a do modelo de sacola do MIT e uma derivada através da Cromodinâmica Quântica (QCD, do inglês *Quantum Chromodynamics*) perturbativa (pQCD) (FRAGA; KURKELA; VUORINEN, 2014). Os resultados aqui apresentados fazem parte do artigo que publicamos em 2020 (GONÇALVES; LAZZARI, 2020), onde este estudo foi desenvolvido em maiores detalhes. Nesta referência, dois tipos de distribuição de carga elétrica foram utilizados, além de termos considerado diferentes configurações estelares com a mesma carga elétrica total. Aqui, apresentaremos os resultados somente para uma dessas distribuições de carga elétrica, que chamaremos por distribuição- $\beta$ . Esta distribuição segue uma lei de potências do tipo  $q(r) = Q(r/R)^3 \equiv \beta r^3$ .

## 2. METODOLOGIA

Começamos este estudo reproduzindo os resultados obtidos por ARBAÑIL, MALHEIRO (2015) para estrelas estranhas carregadas no contexto do modelo de sacola do MIT (desconsiderando a massa dos quarks). Estes resultados foram reproduzidos a partir de softwares que desenvolvemos na linguagem FORTRAN90, que permitiram a obtenção de novos resultados para o modelo de sacola do MIT (considerando a massa dos quarks) e para a pQCD.

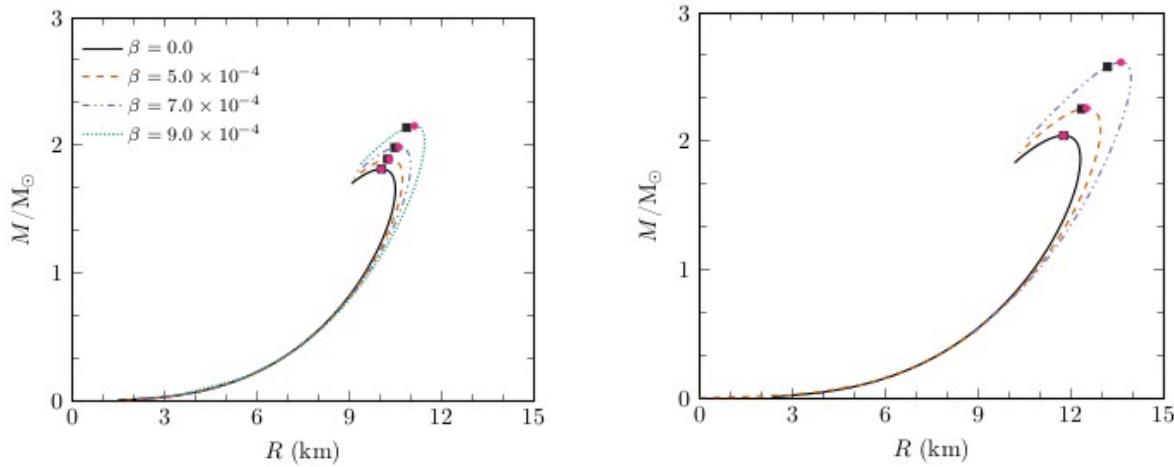
## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Começamos apresentando, na Figura 1, o perfil massa-raio de estrelas estranhas eletricamente carregadas para as EoSs do MIT-BM (painel esquerdo) e da pQCD com  $X = 3$  (painel direito). Nesta distribuição, o caso neutro (curva preta contínua) é representado para  $\beta = 0$ , onde vemos que a configuração de massa



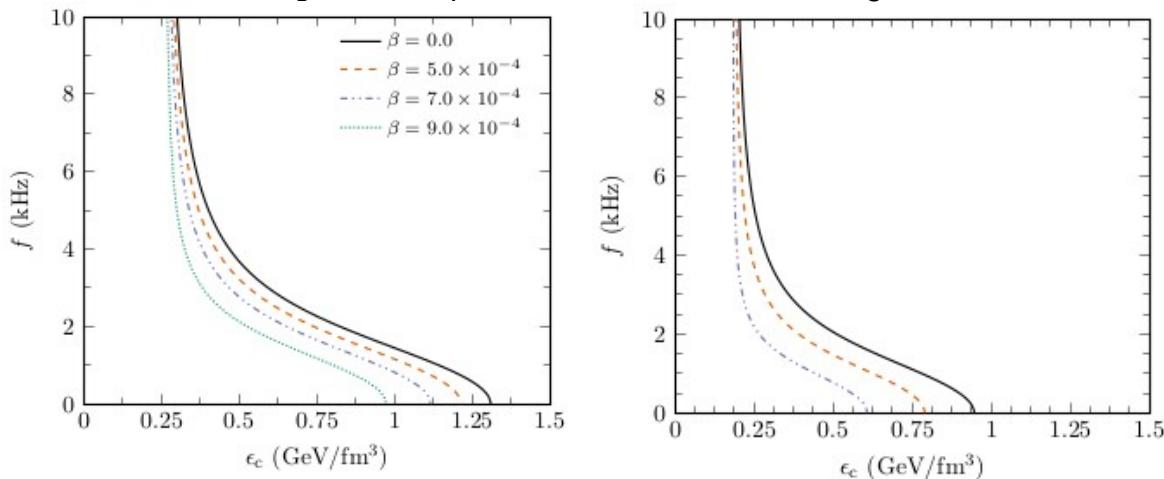
máxima (círculo rosa) e a última configuração estável (quadrado preto) ocorrem no mesmo ponto. A introdução de carga elétrica ( $\beta > 0$ ) leva a configurações estelares mais massivas e com raios maiores, quando comparados ao caso neutro. Além disso, a presença de carga elétrica gera um deslocamento entre as configurações de maior massa e autofrequência fundamental nula, o que não ocorre no caso neutro. A EOS da pQCD leva a configurações estelares mais sensíveis a presença de carga elétrica, e apresenta maiores massas e raios quando comparados aos resultados do modelo de sacola do MIT. De fato, os resultados da pQCD são mais realistas e apontam a instabilidade das configurações estelares para  $\beta = 9 \times 10^{-4} M_{\odot} \text{ km}^{-3}$ , diferentemente do modelo de sacola do MIT.

Figura 1 – Perfil massa-raio de estrelas estranhas carregadas para diferentes valores de  $\beta$ .



Na Figura 2, apresentamos a parte real da frequência linear, em função da densidade de energia central da estrela, isto é, estamos mostrando apenas configurações estáveis perante oscilações radiais nos contextos do modelo de sacola do MIT (painel esquerdo) e pQCD (painel direito). Assim como no caso neutro, os valores da autofrequência fundamental decrescem monotonamente com o aumento da densidade de energia central. Além disso, o aumento da carga elétrica, i.e., o aumento de  $\beta$  diminui a quantidade de valores da densidade de energia central que geram configurações estáveis.

Figura 2 – Parte real da autofrequência fundamental em função da densidade de energia central para estrelas estranhas carregadas.



#### 4. CONCLUSÕES



Neste trabalho, verificamos que estrelas estranhas eletricamente carregadas são estáveis perante oscilações radiais. A fim de compararmos com resultados já apresentados na literatura para o modelo de sacola do MIT, apresentamos os resultados no contexto da pQCD ao lado. Desta forma, verificamos que utilizando a EOS da pQCD, que leva em conta a interação entre os quarks, as configurações estelares são mais sensíveis a presença de carga elétrica, e apresentamos maiores massas e raios do que o caso neutro.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALCOCK, C.; FARHI, E.; OLINTO, A. Strange stars. **The Astrophysical Journal**, v. 310, n. 1, p. 261-272, 1986.
- ARBAÑIL, J. D.; MALHEIRO, M. Equilibrium and stability of charged strange stars. **Physical Review D**, New York, v. 92, n. 8, p. 084009, 2015.
- BODMER, A. Collapsed nuclei. **Physical Review D**, New York, v. 4, n. 6, p. 1601-1606, 1971.
- BRILLANTE, A.; MISHUSTIN, I. N. Radial oscillations of neutral and charged hybrid stars. **Europhysics Letters**, London, v. 105, n. 3, p. 39001, 2014.
- CHANDRASEKHAR, S. Dynamical instability of gaseous masses approaching the Schwarzschild limit in general relativity. **Physical Review Letters**, New York, v. 12, p. 114-116, 1964.
- FRAGA, E.; KURKELA, A.; VUORINEN, A. Interacting quark matter equation of state for compact stars. **The Astrophysical Journal Letters**, London, v. 781, n. 2, p. L25, 2014.
- GONÇALVES, V. P.; LAZZARI, L. Electrically charged strange stars with an interacting quark matter equation of state. **Physical Review D**, New York, v. 102, n. 3, p. 034031, 2020.
- NEGREIROS, R.; et al. Electrically charged strange quark stars. **Physical Review D**, New York, v. 80, n. 8, p. 083006, 2009.
- OPPENHEIMER, J. R.; VOLKOFF, G. M. On massive neutron cores. **Physical Review**, New York, v. 55, n. 4, p. 374-381, 1939.
- SCHAFFNER-BIELICH, J. **Compact stars physics**. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- TOLMAN, R. C. Static solutions of Einstein's field equations for spheres of fluid. **Physical Review**, New York, v. 55, n. 4, p. 364-373, 1939.
- WITTEN, E. Cosmic separation of phases. **Physical Review D**, New York, v. 30, n. 2, p. 272-285, 1984.