

# Estudo das Configurações de Equilíbrio Estático das Estrelas de Nêutrons Hadrônicas

Marco Aurélio Laversveiler Paiva\*

Riccardo Belvedere<sup>†</sup>

Sérgio José Barbosa Duarte<sup>†</sup>

\* Observatório do Valongo – Universidade Federal do Rio de Janeiro

<sup>†</sup> Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas



XXVI Jornada de Iniciação Científica e Tecnológica do CBPF



# Motivações

Objeto	Massa (M)	Raio (R)	Densidade Média (g cm <sup>-3</sup> )	Potencial Superficial (GM/Rc <sup>2</sup> )
Sol	M <sub>☉</sub>	R <sub>☉</sub>	1	10 <sup>-6</sup>
Anã Branca	≲M <sub>☉</sub>	~ 10 <sup>-2</sup> R <sub>☉</sub>	≲10 <sup>7</sup>	~ 10 <sup>-4</sup>
Estrela de Nêutrons	~1-3 M <sub>☉</sub>	~ 10 <sup>-5</sup> R <sub>☉</sub>	≲10 <sup>15</sup>	~ 10 <sup>-1</sup>
Buraco Negro	Arbitrário	2GM/c <sup>2</sup>	~ M/R <sup>3</sup>	~ 1

$$M_{\odot} = 1.989 \times 10^{33} \text{ g}$$

$$R_{\odot} = 6.9599 \times 10^{10} \text{ cm}$$

# Método

- Núcleo:

- Descrição da matéria nuclear através da Hadrodinâmica Quântica (teoria de campo efetiva) e sua densidade Lagrangiana.

-  $\sigma$  = Campo mesônico escalar: força nuclear atrativa de longo alcance.

-  $\omega$  = Campo mesônico vetorial: força nuclear repulsiva de curto alcance.

-  $\rho$  = Campo mesônico isovetorial: efeitos de borda modelando força nuclear repulsiva.

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_B + \mathcal{L}_\sigma + \mathcal{L}_\omega + \mathcal{L}_\rho + \mathcal{L}_l + \mathcal{L}_{int}$$

$$\mathcal{L}_B = \sum_B^N \bar{\psi}_B (i\gamma_\mu \partial^\mu - m_B) \psi_B$$

$$\mathcal{L}_\sigma = \frac{1}{2} (\partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - m_\sigma^2 \sigma^2)$$

$$\mathcal{L}_\omega = \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega_\mu \omega^\mu - \frac{1}{4} \Omega_{\mu\nu} \Omega^{\mu\nu}$$

$$\mathcal{L}_\rho = \frac{1}{2} m_\rho^2 \vec{\rho}_\mu \cdot \vec{\rho}^\mu - \frac{1}{4} R_{\mu\nu} R^{\mu\nu}$$

$$\mathcal{L}_l = \sum_l^n \bar{\psi}_l (\gamma_\mu i \partial^\mu - m_l) \psi_l$$

$$\mathcal{L}_{int} = \sum_B^N \bar{\psi}_B \left[ -g_\sigma \sigma - \gamma_\mu \left( g_\omega \omega^\mu - \frac{1}{2} g_\rho \vec{\tau}_i \cdot \vec{\rho}^\mu \right) \right] \psi_B$$

$$- \frac{1}{3} b m_N (g_\sigma \sigma)^3 - \frac{1}{4} c (g_\sigma \sigma)^4$$

# Método

- Equações de movimento com aproximação da “RMFT”

$$m_\sigma^2 \sigma_0 + b m_N g_\sigma^3 \sigma_0^2 + c g_\sigma^4 \sigma_0^3 = g_\sigma (n_p^s + n_n^s)$$

$$m_\omega^2 \omega_0 = g_\omega (\rho_p + \rho_n)$$

$$m_\rho^2 \rho_0 = \frac{1}{2} g_\rho (\rho_p - \rho_n)$$

- Condições de equilíbrio da estrela de nêutrons

$$\rho_p = \rho_e + \rho_\mu$$

$$\rho_N = \rho_n + \rho_p$$

$$\mu_n = \mu_p + \mu_e$$

$$\mu_\mu = \mu_e$$

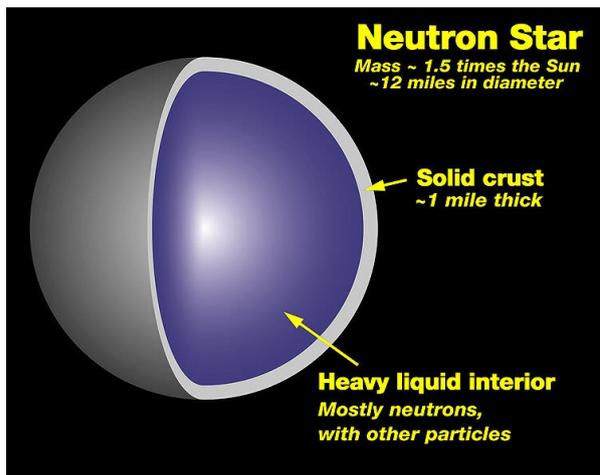
	NL3	NL3*	GM1
$m_N$ [MeV]	939	939	938
$m_\sigma$ [MeV]	508.194	502.5742	550
$m_\omega$ [MeV]	782.501	782.600	783
$m_\rho$ [MeV]	763	763	770
$g_\sigma$	10.217	10.0944	9.5708
$g_\omega$	12.868	12.8065	10.5964
$g_\rho$	4.474	4.5748	4.09785
$b$	0.00205534	0.00290366	0.002947
$c$	- 0.00265081	- 0.00290366	- 0.001070
$n_0$ [fm <sup>-3</sup> ]	0.148	0.150	0.153

# Método

- **Crosta:**

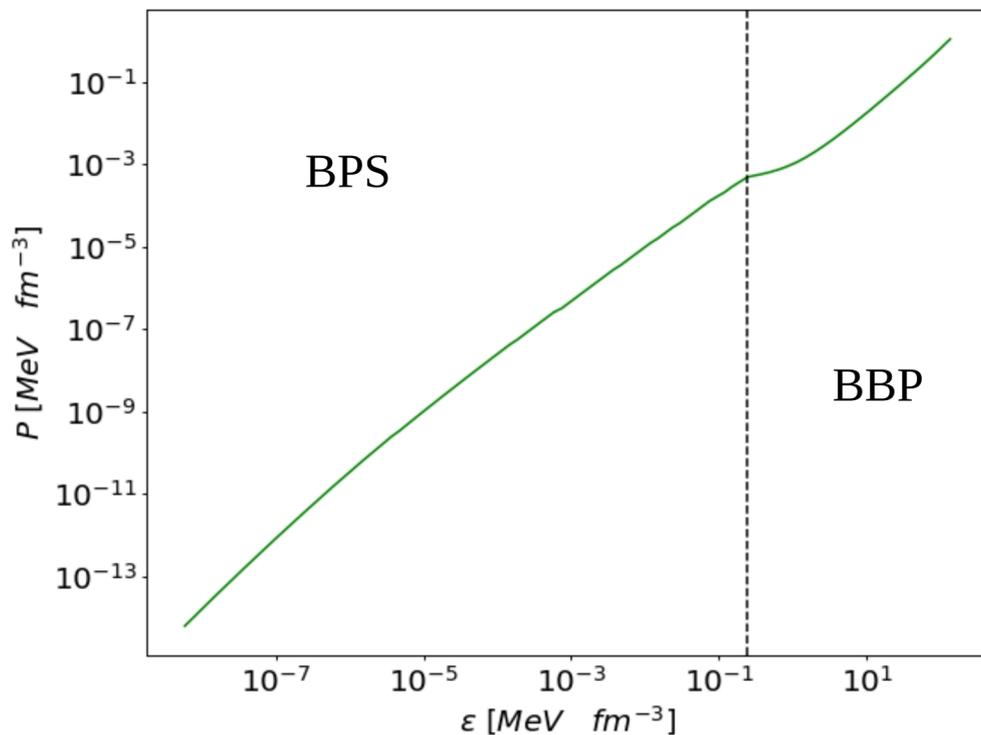
- Baym-Bethe-Pethick (BBP) –  
Descrição da crosta interna

- Baym-Pethick-Sutherland (BPS) –  
Descrição da crosta externa



$$\rho < \rho_{\text{drip}}$$

$$\rho_{\text{drip}} < \rho < \rho_{\text{nuclear}}$$



# Método

- Métrica em simetria esférica, estática:

$$ds^2 = e^{\lambda(r)} dt^2 - e^{\nu(r)} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2(\theta) d\phi^2)$$

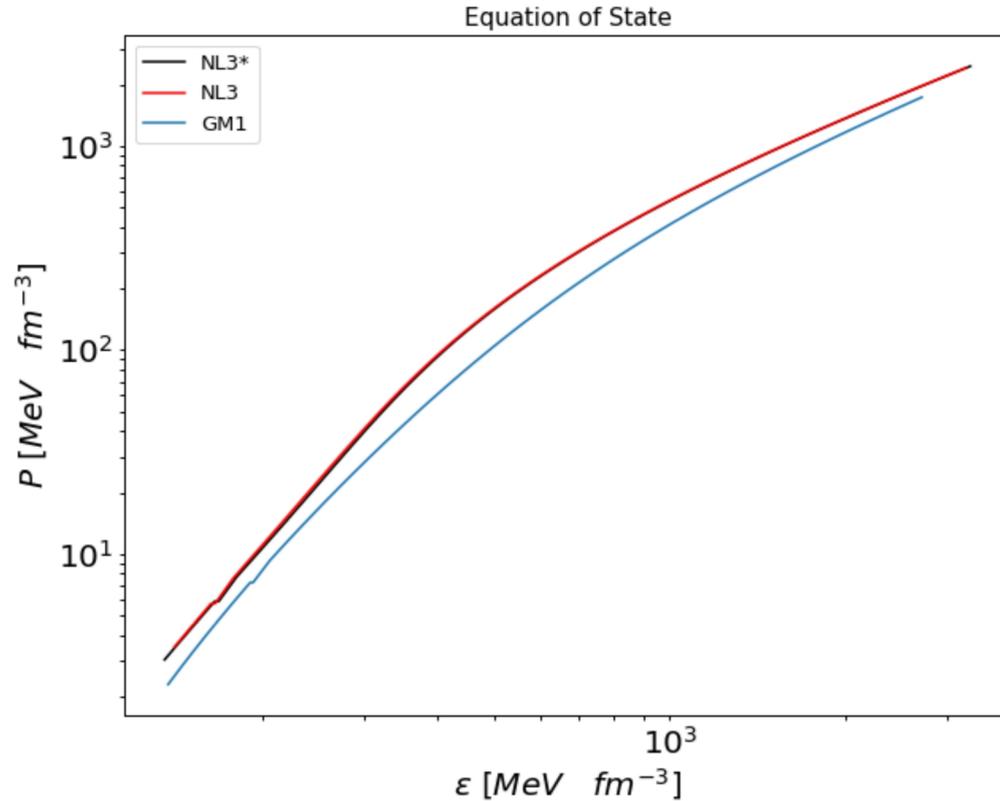
- Equação de Tolman-Oppenheimer-Volkoff:

$$\frac{dP}{dr} = - \frac{G[\varepsilon(r) + P(r)][M(r) + 4\pi r^2 P(r)]}{r(r - 2GM(r))}$$

- Equação para a massa:  $\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \varepsilon(r)$

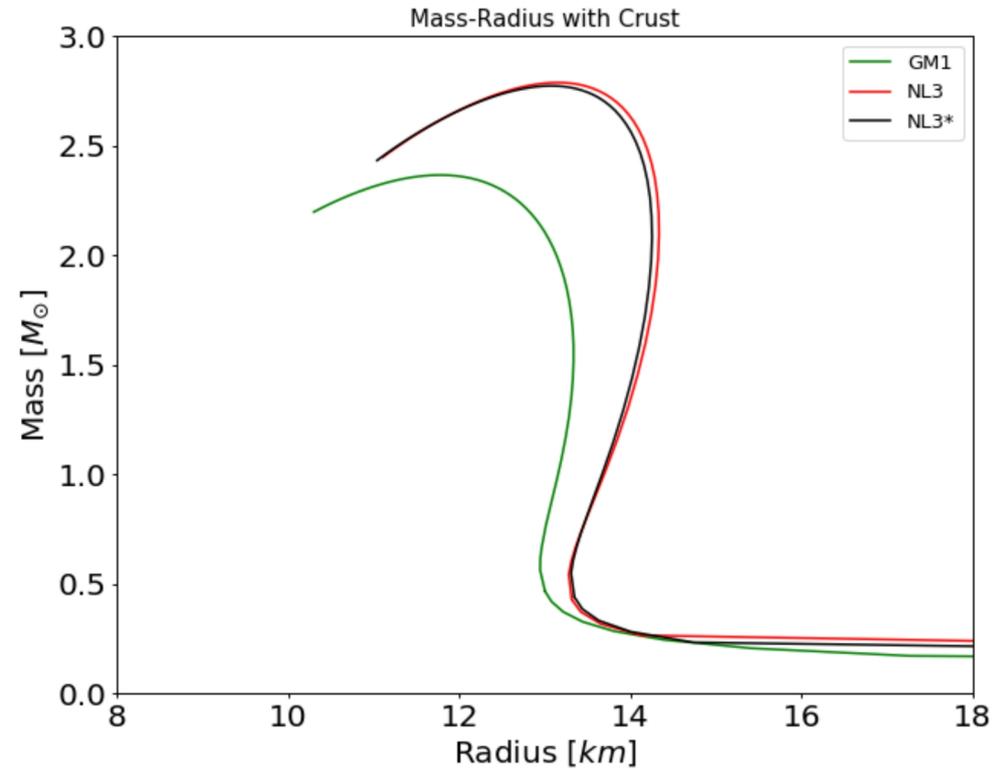
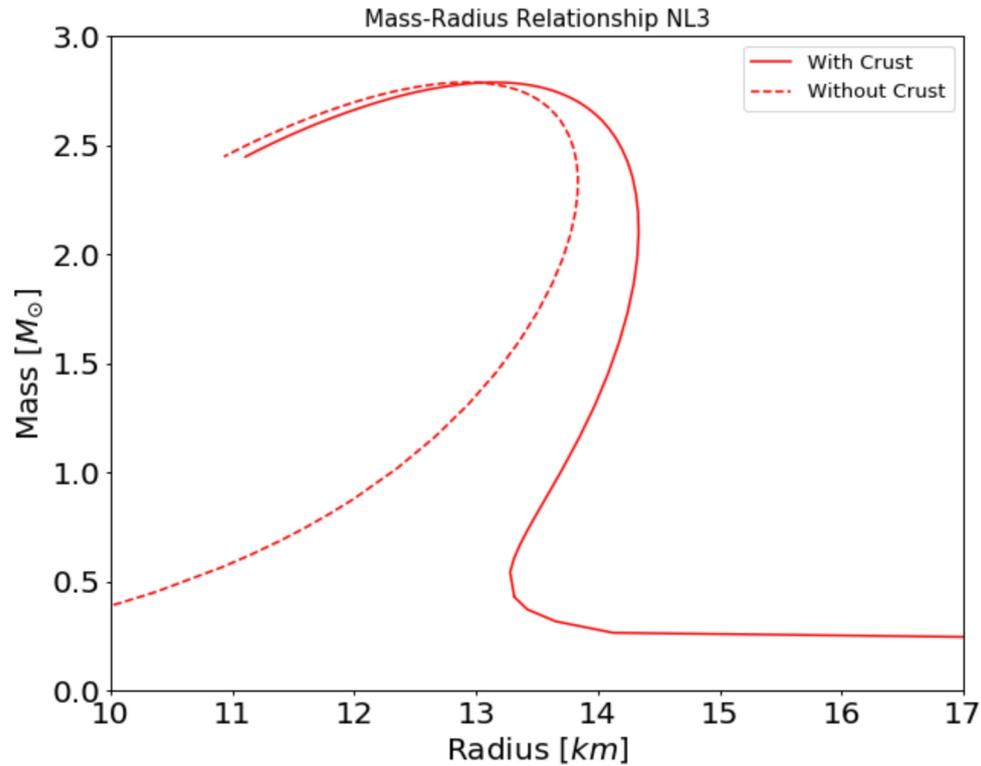
# Resultados

## Equações de Estado

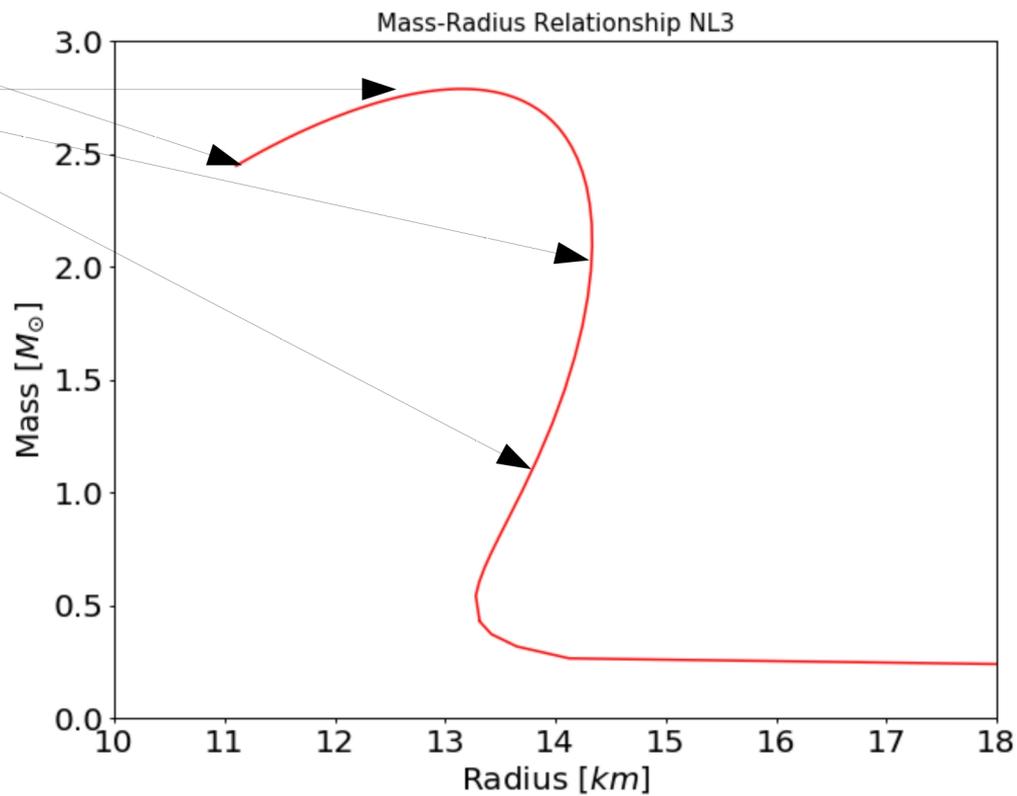
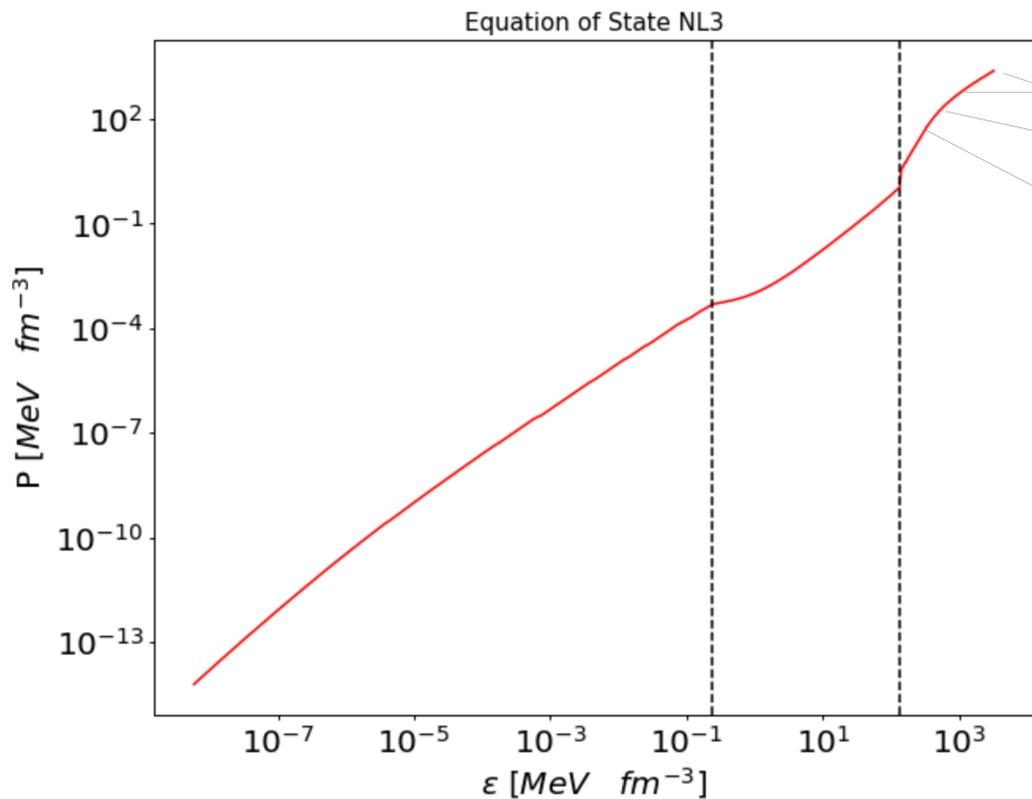


# Resultados

## Relações Massa-Raio



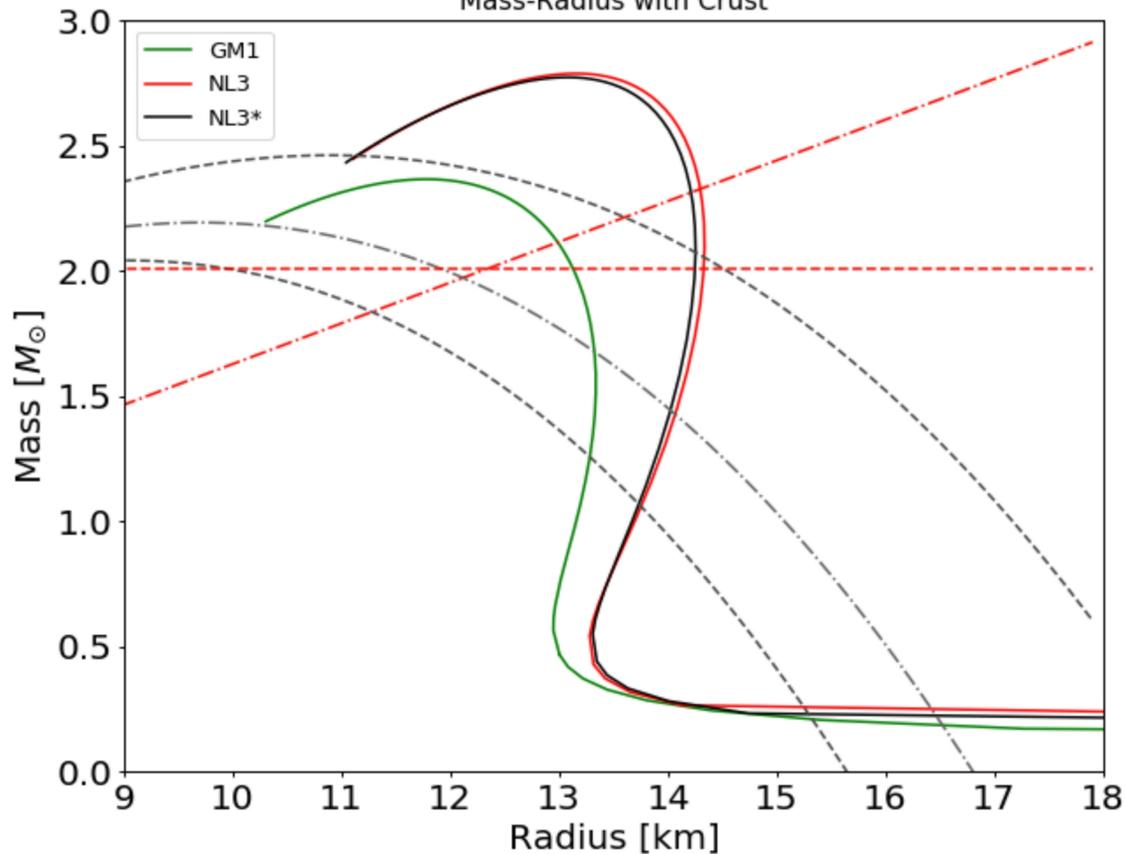
# Resultados



# Resultados

## Vínculos Observacionais

Mass-Radius with Crust



---- Contorno com 90% de confiança de constante  $R_{\infty}$  da estrela de nêutrons no sistema binário de raios-X de baixa massa X7.

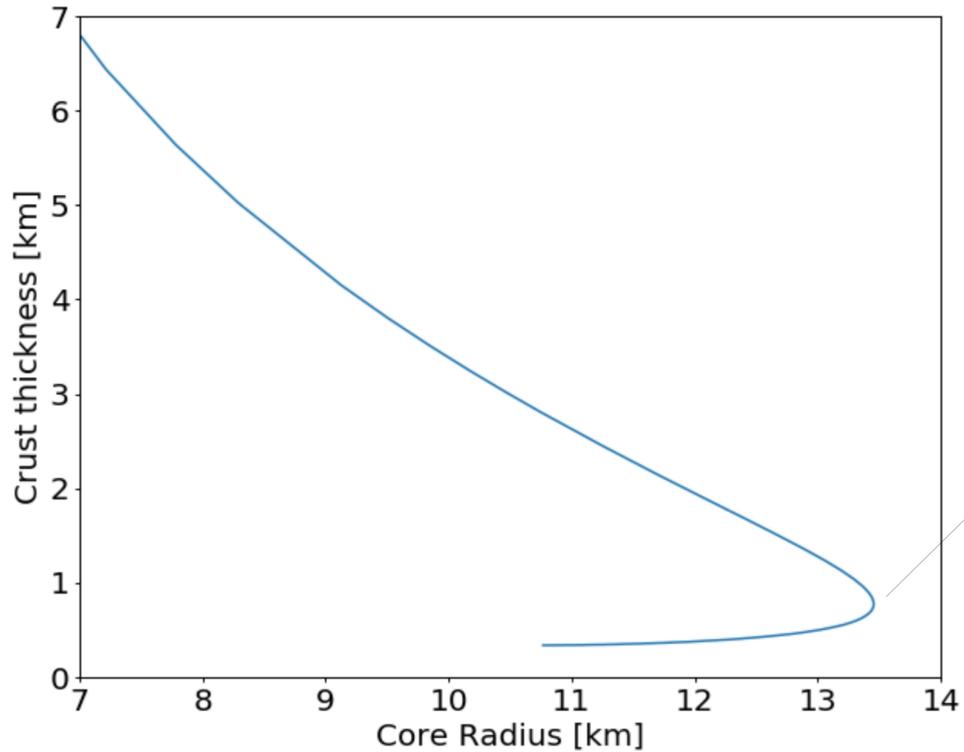
-.-. Limite inferior do raio de RX J1856-3754.

----- Maior massa já encontrada para um pulsar, 2.01 Massas Solares (PSR J0348+0432).

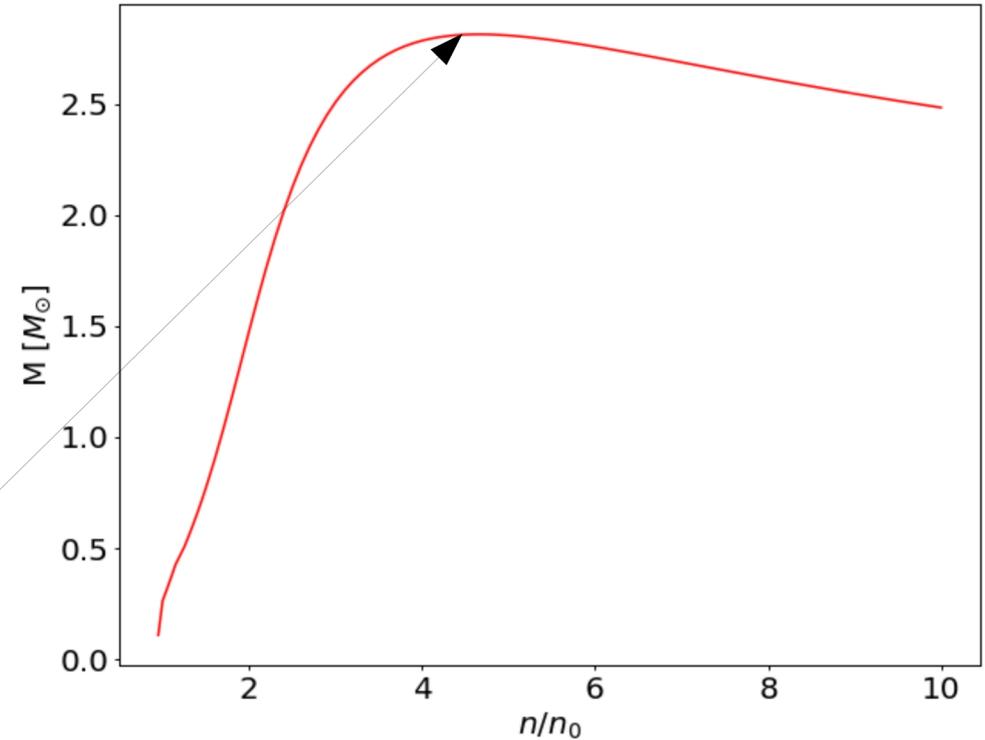
-.-. Limite superior de gravidade de XTE J1814-338

# Resultados

Relação entre raio do núcleo e largura da crosta



Massa da estrela e densidade nuclear numérica



# Perspectivas

- Introdução de mais graus de liberdade bariônicos
- Estrela de Quarks
- Estrela Híbrida
- Rotação:
  - Método de Hartle (equações de Einstein perturbadas até a segunda ordem na velocidade angular).