

# Estrelas de Quarks e de Nêutrons

## Características e Assinaturas

LEONARDO TAYNÔ TOSETTO SOETHE

---

GRUPO DE ALTAS E MÉDIAS ENERGIAS

UFPEL - 26/06/2015

# Sumário

- Introdução
- Metodologia
- Alguns Resultados para Estrelas de Nêutrons
- Alguns Resultados para Estrelas de Quarks
- Condições
- Características e Assinaturas
- Próximos Passos
- Referências

# Introdução

- “Estrelas são esferas autogravitantes de gás ionizado, cuja fonte de energia é a transmutação de elementos através de reações nucleares”.
- Por que estudar estrelas?
- Via Láctea:  $10^{11}$  estrelas,  $\emptyset = 100.000$  anos-luz.
- “Nascem, crescem e morrem”.

# Introdução

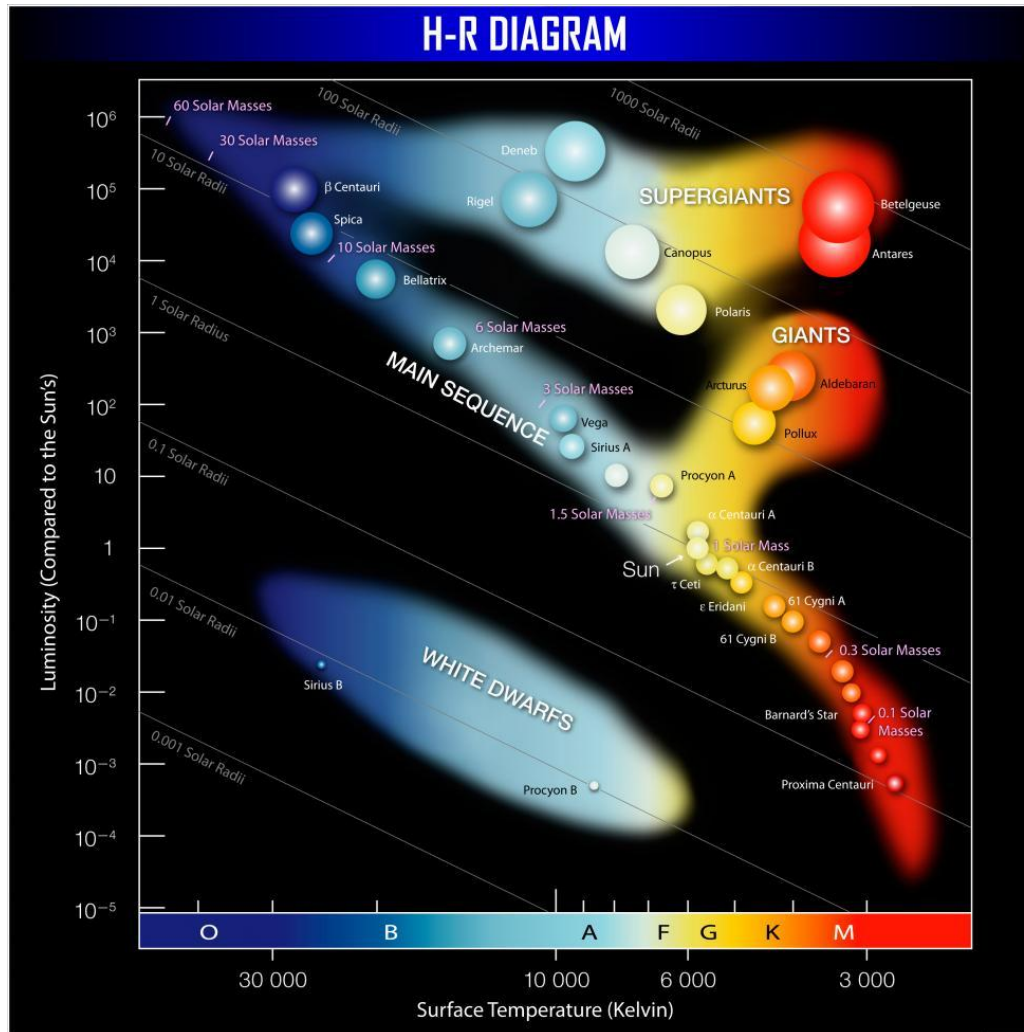


Fig. 1: o diagrama H-R. Relação temperatura-luminosidade.

# Introdução

- Big Bang...
  - $10^{-9}s \rightarrow 10^{23}K$
  - $10^{-6}s \rightarrow$  produção de bárions e mésons
  - $1s \rightarrow 10^{10}K$ , abundância de prótons e nêutrons
  - $15min \rightarrow$  aglomerados de nucleons
  - $\vdots$
  - $10^6anos \rightarrow$  átomos e moléculas
  - $10^9anos \rightarrow$  proto-estrelas

# Introdução

- Instabilidade gravitacional, contração, irradiação de energia.
- Quando  $T \approx 1,6 \times 10^5 K$ , ocorre a ionização do hidrogênio  $\rightarrow$  gás de elétrons livres.
- Cria-se uma pressão de dentro para fora, contrária a pressão gravitacional.

# Introdução

- Quando  $\rho \sim 10 \text{ g/cm}^3$  e  $T \sim 10^6 \text{ K}$ , atinge-se o limiar de fusão dos núcleos de hidrogênio.
- Cadeias ppl, ppII, ppIII, CNO. Reações de fusão explicam a energia irradiada.
- Cada camada representa uma determinada temperatura e densidade.

# Introdução

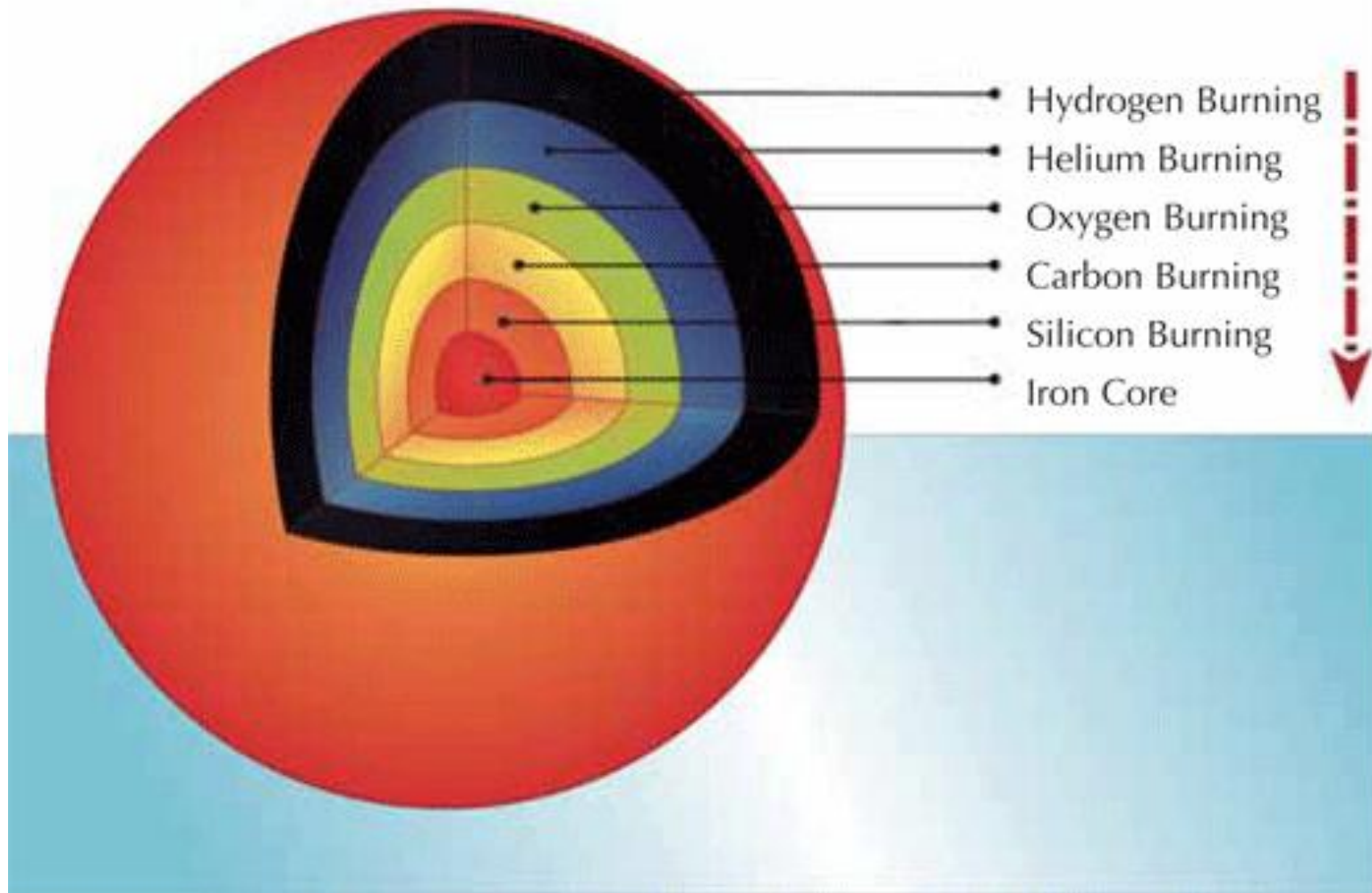


Fig. 2: as camadas de uma estrela.



# Introdução

- $T = 10^9 K, \rho = 10^8 g/cm^3$ 
  - os núcleos passam a capturar elétrons através da reação de interação fraca.
  - supernova: colapso e explosão.
- Estrela de Nêutrons
  - Configuração estacionária, “núcleo supergigante”.
  - Valores típicos:  $r \sim 10 km, \rho = 10^{15} g/cm^3,$   
 $1,4M_{\odot} < M < 3,2M_{\odot}.$

# Introdução

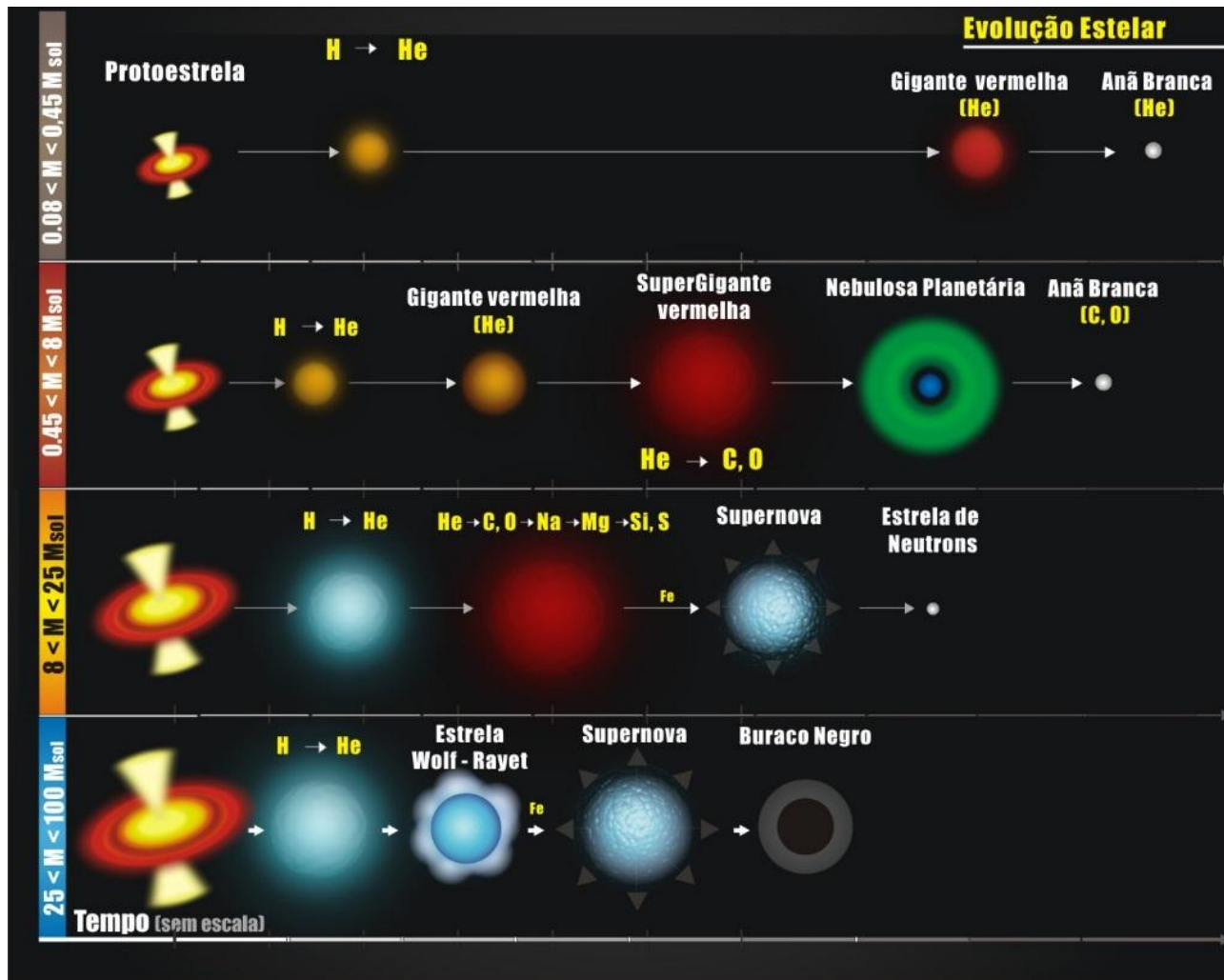


Fig. 3: a evolução estelar de acordo com a massa inicial.

# Metodologia

- Utilização de um modelo analítico através da resolução de Tolman-Oppenheimer-Volkoff, que contém correções relativísticas e considera uma estrela simples, esférica, e sem movimento de rotação.
- Utilização de uma equação de estado, a fim de descrever a constituição da estrela como matéria nuclear.

# Metodologia

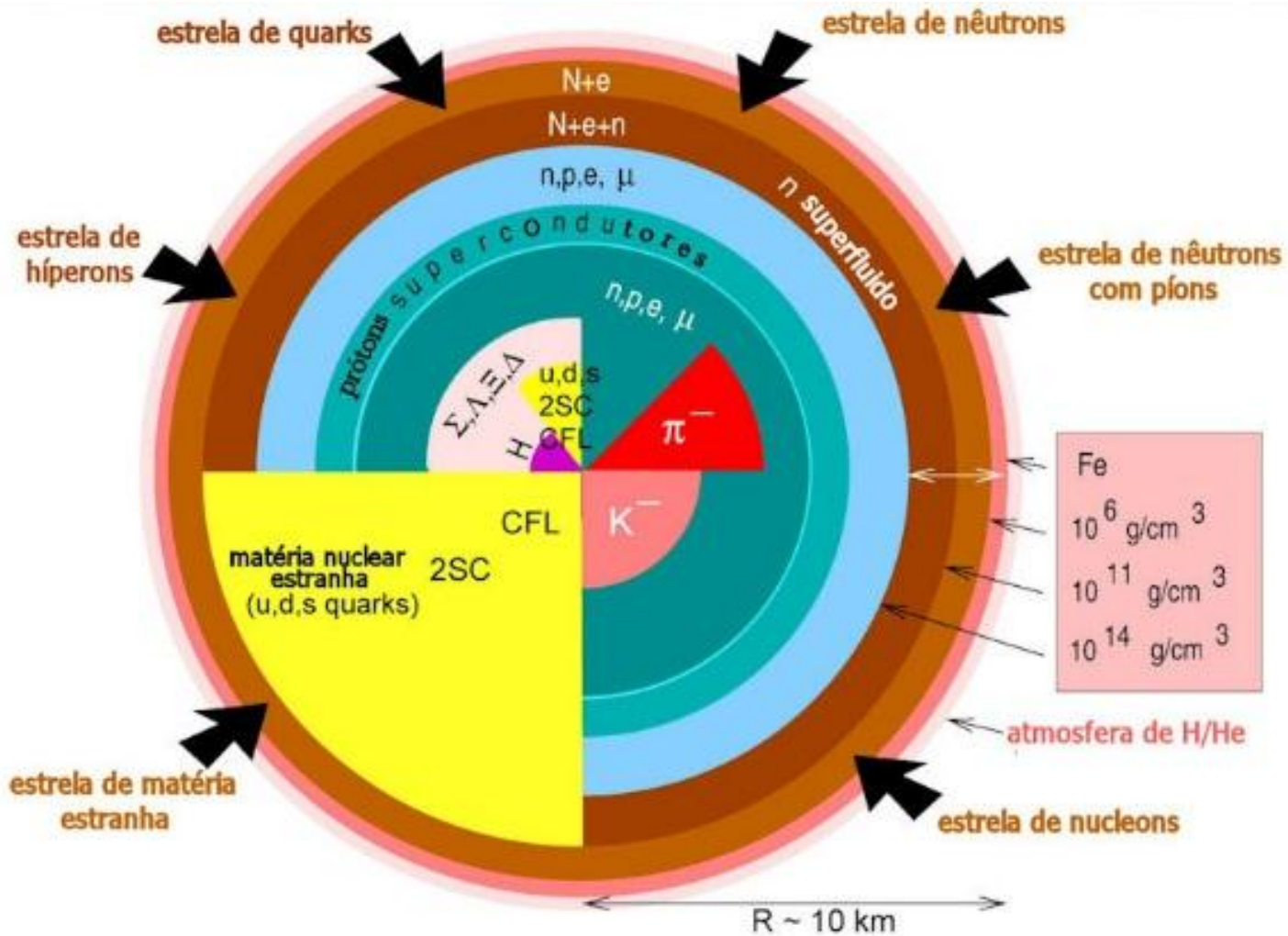


Fig. 4: alguns modelos para estrelas.

# Metodologia

- Equação de TOV (Tolman-Oppenheimer-Volkoff):

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

onde

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

- Equilíbrio entre pressão e gravidade. Definição do raio pela pressão.
- Uso de uma equação de estado.

# Alguns Resultados para Estrelas de Nêutrons

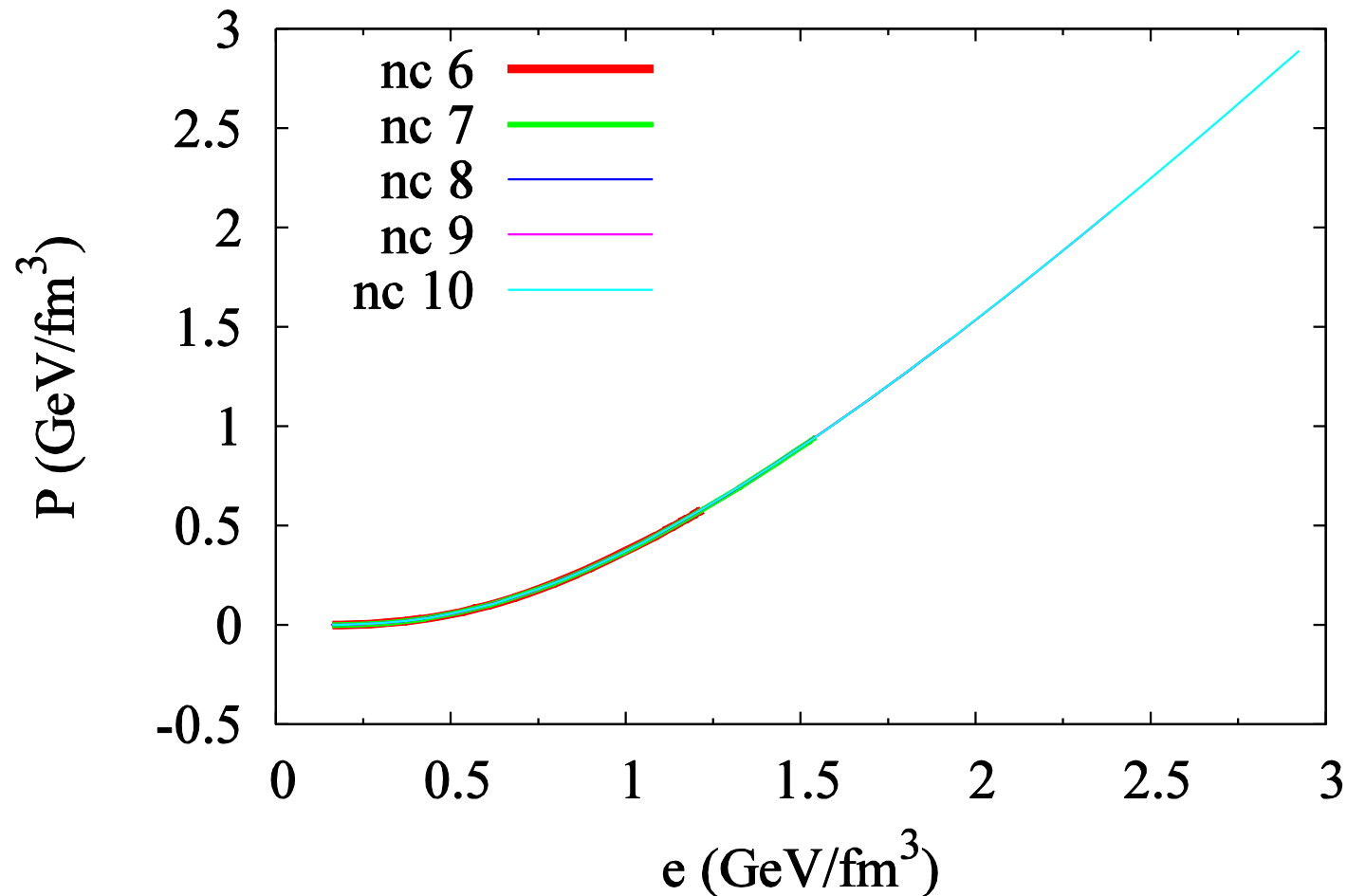


Fig. 5: estrela de nêutrons -  $P \times e$ , para  $K = 170\text{MeV}$ .

# Alguns Resultados para Estrelas de Nêutrons

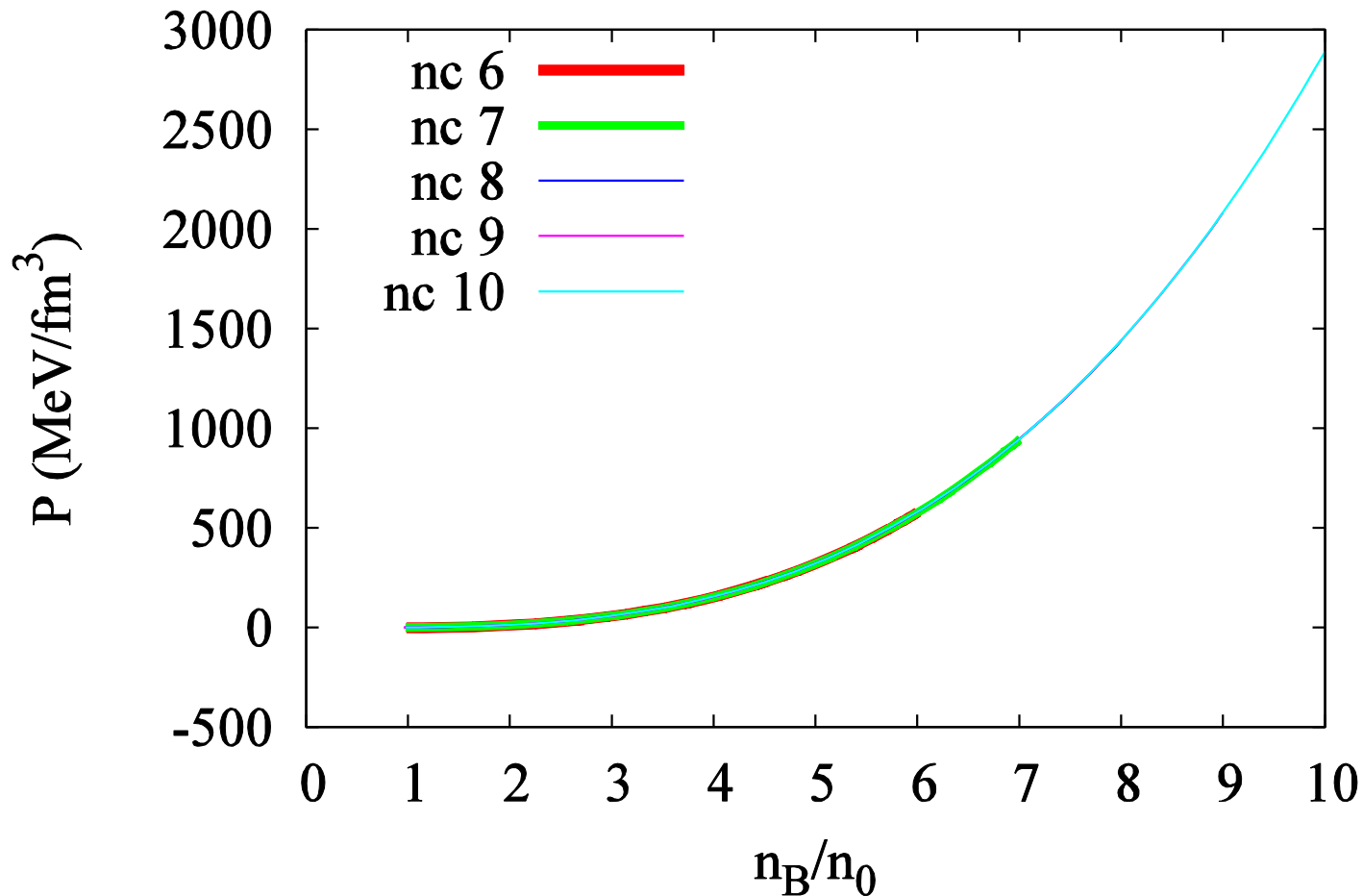


Fig. 6: estrela de nêutrons -  $P \times n_B/n_0$ , para  $K = 170 \text{MeV}$ .

# Alguns Resultados para Estrelas de Nêutrons

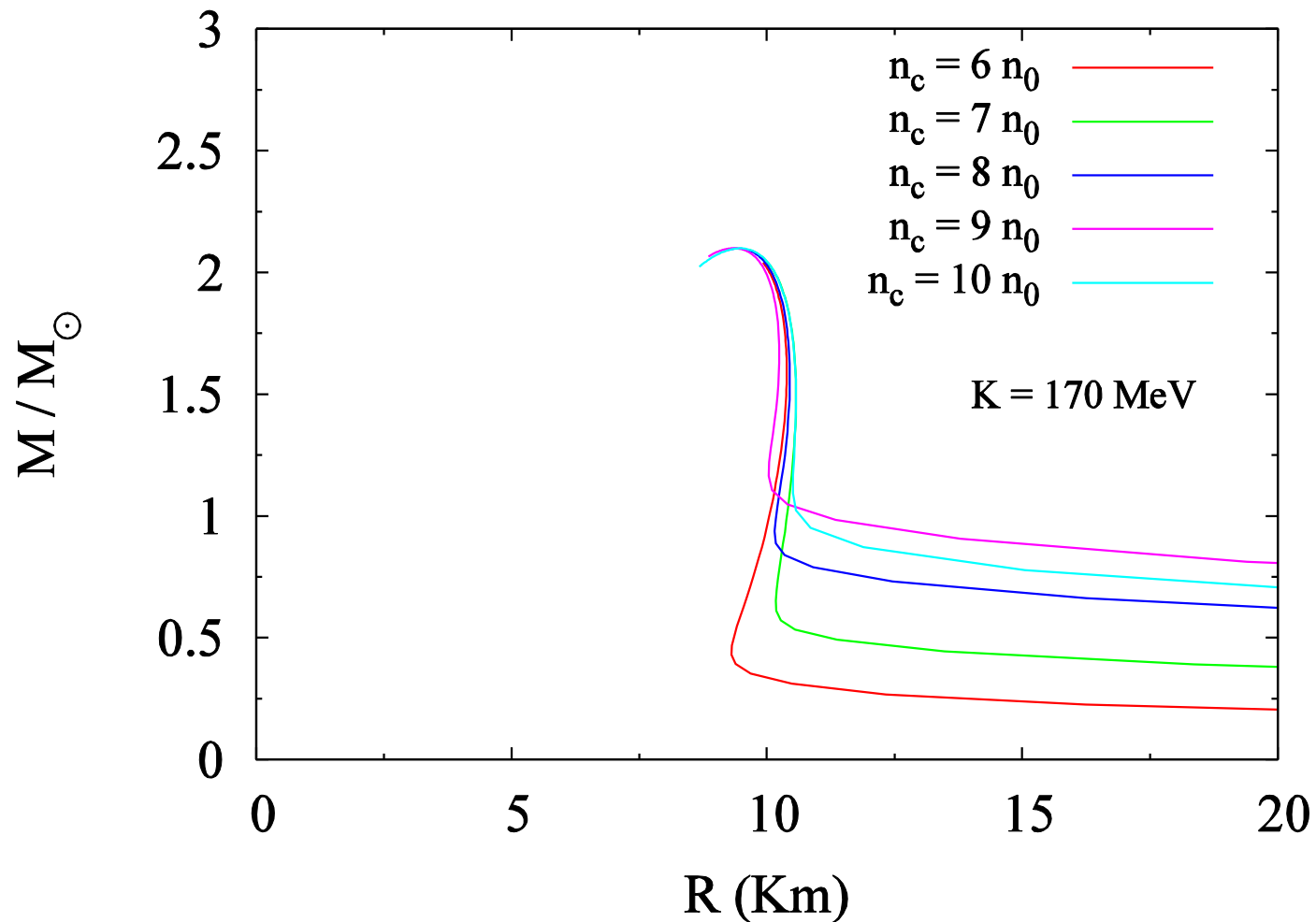


Fig. 7: perfil de uma estrela de nêutron para  $K = 170 \text{ MeV}$ .



# Alguns Resultados para Estrelas de Nêutrons

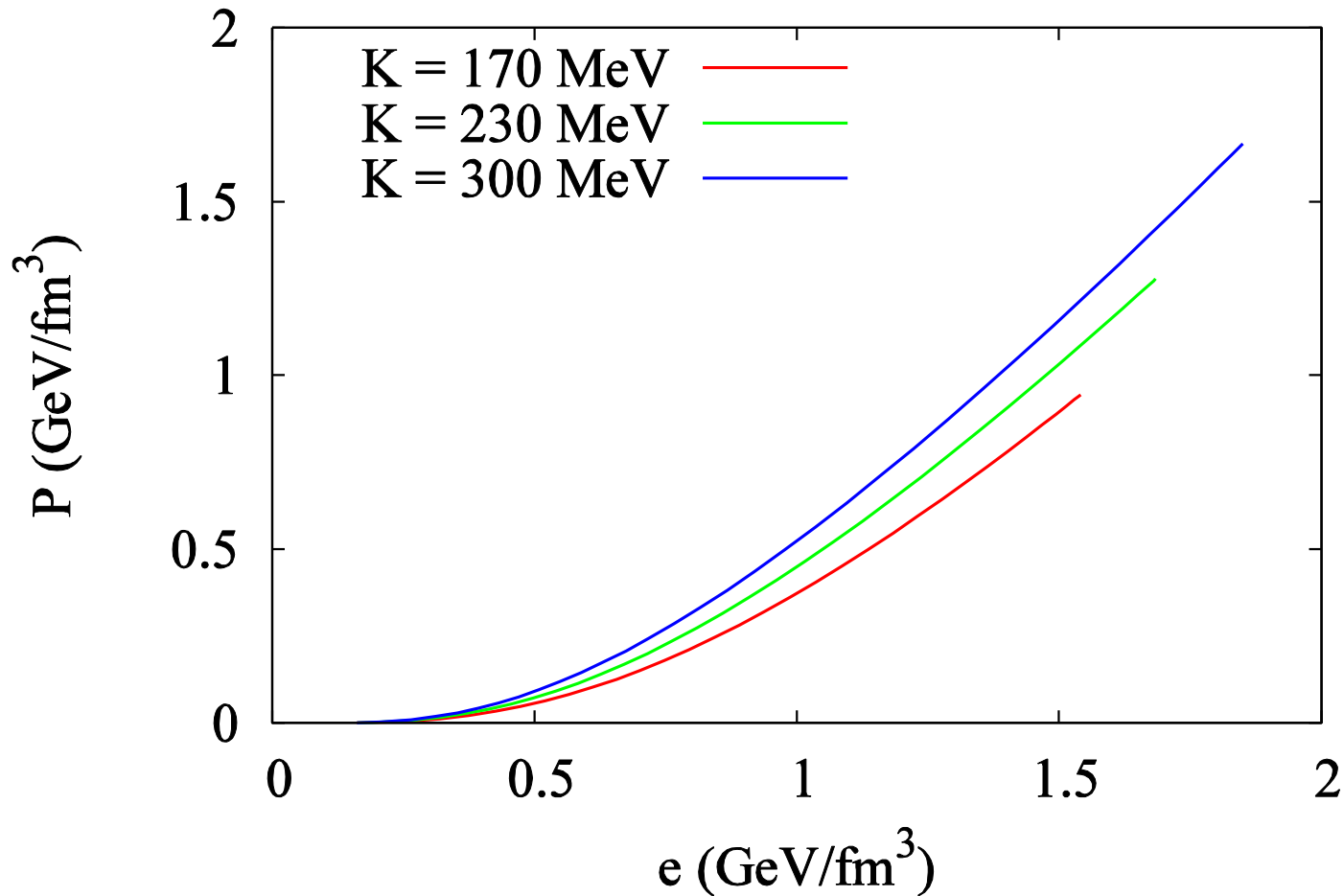


Fig. 8: estrela de nêutrons -  $P \times e$  para  $n_c = 7n_0$ .

# Alguns Resultados para Estrelas de Nêutrons

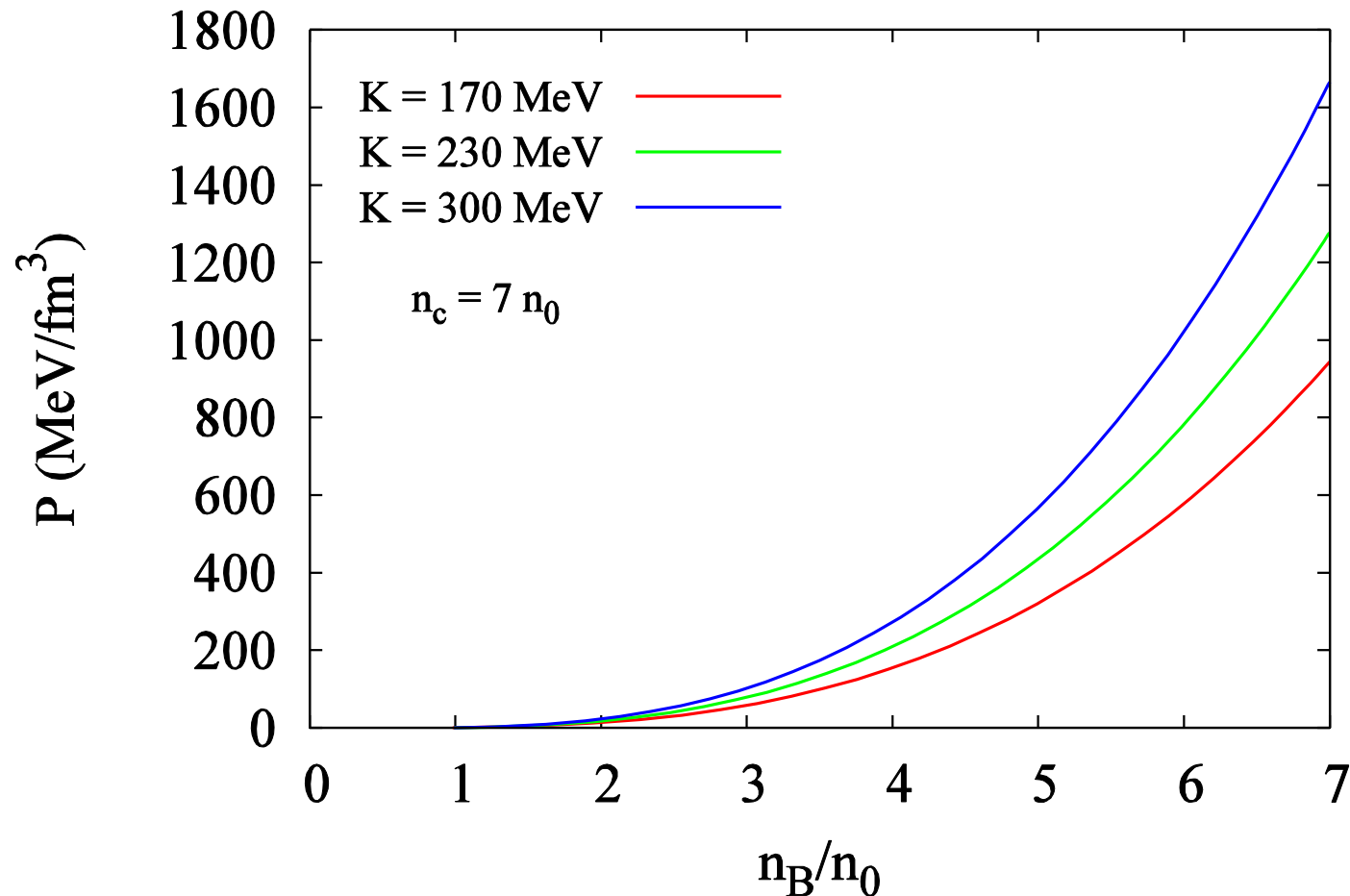


Fig. 9: estrela de nêutrons -  $P \times n_B/n_0$ , para  $n_c = 7n_0$ .

# Alguns Resultados para Estrelas de Nêutrons

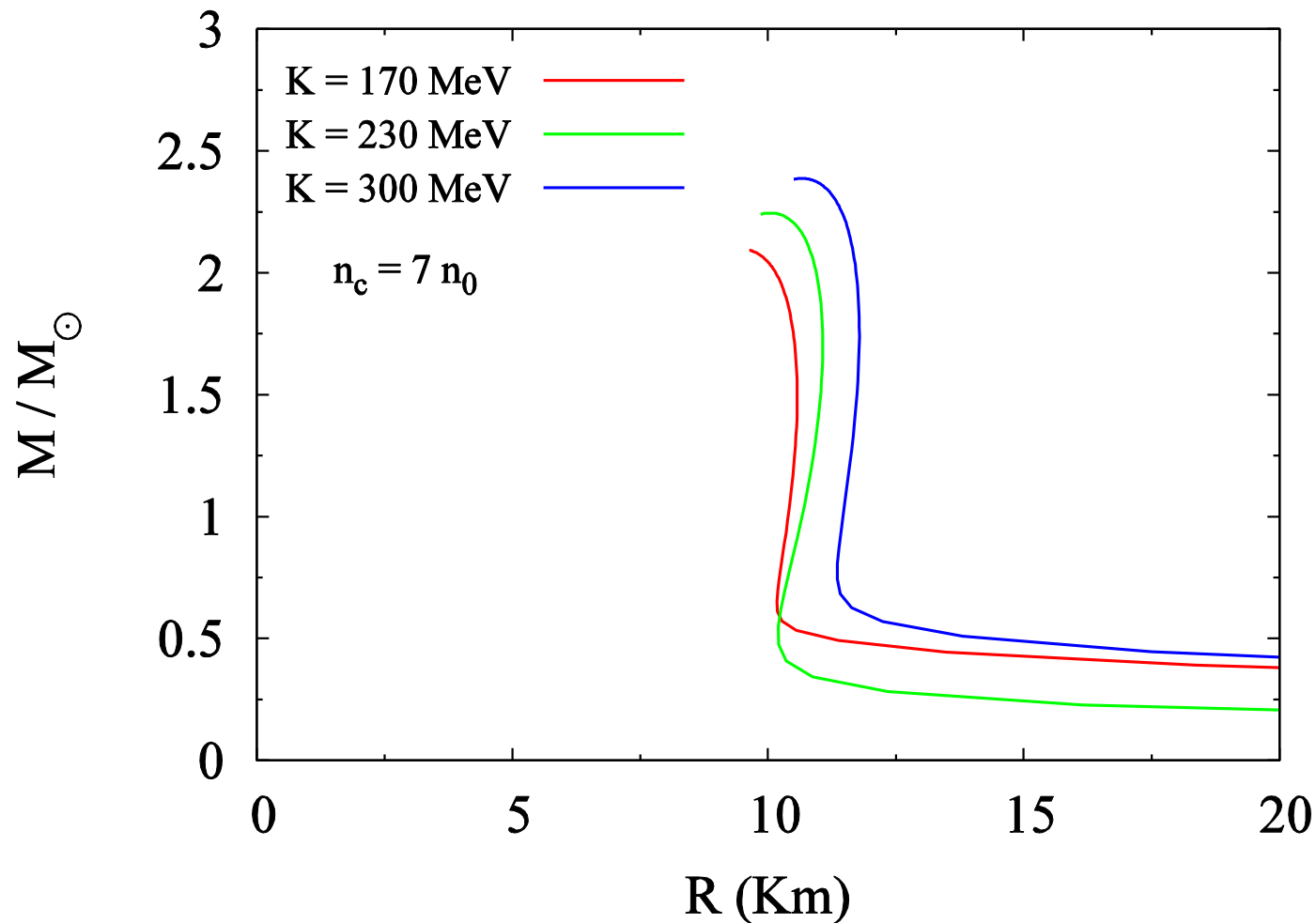


Fig. 10: perfil de uma estrela de nêutron para  $n_c = 7n_0$ .

# Alguns Resultados para Estrelas de Quarks

- Equações de estado para uma estrela de quarks

- pressão

$$p = -B + \sum_f \frac{1}{4\pi^2} \left[ \mu_f k_f \left( \mu_f^2 - \frac{5}{2} m_f^2 \right) + \frac{3}{2} m_f^4 \log \left( \frac{\mu_f + k_f}{m_f} \right) \right]$$

- energia

$$e = B + \sum_f \frac{3}{4\pi^2} \left[ \mu_f k_f \left( \mu_f^2 - \frac{1}{2} m_f^2 \right) - \frac{1}{2} m_f^4 \log \left( \frac{\mu_f + k_f}{m_f} \right) \right]$$

- potencial químico e momento de Fermi

$$\mu_f = \left( m_f^2 + k_f^2 \right)^{1/2}$$

# Alguns Resultados para Estrelas de Quarks

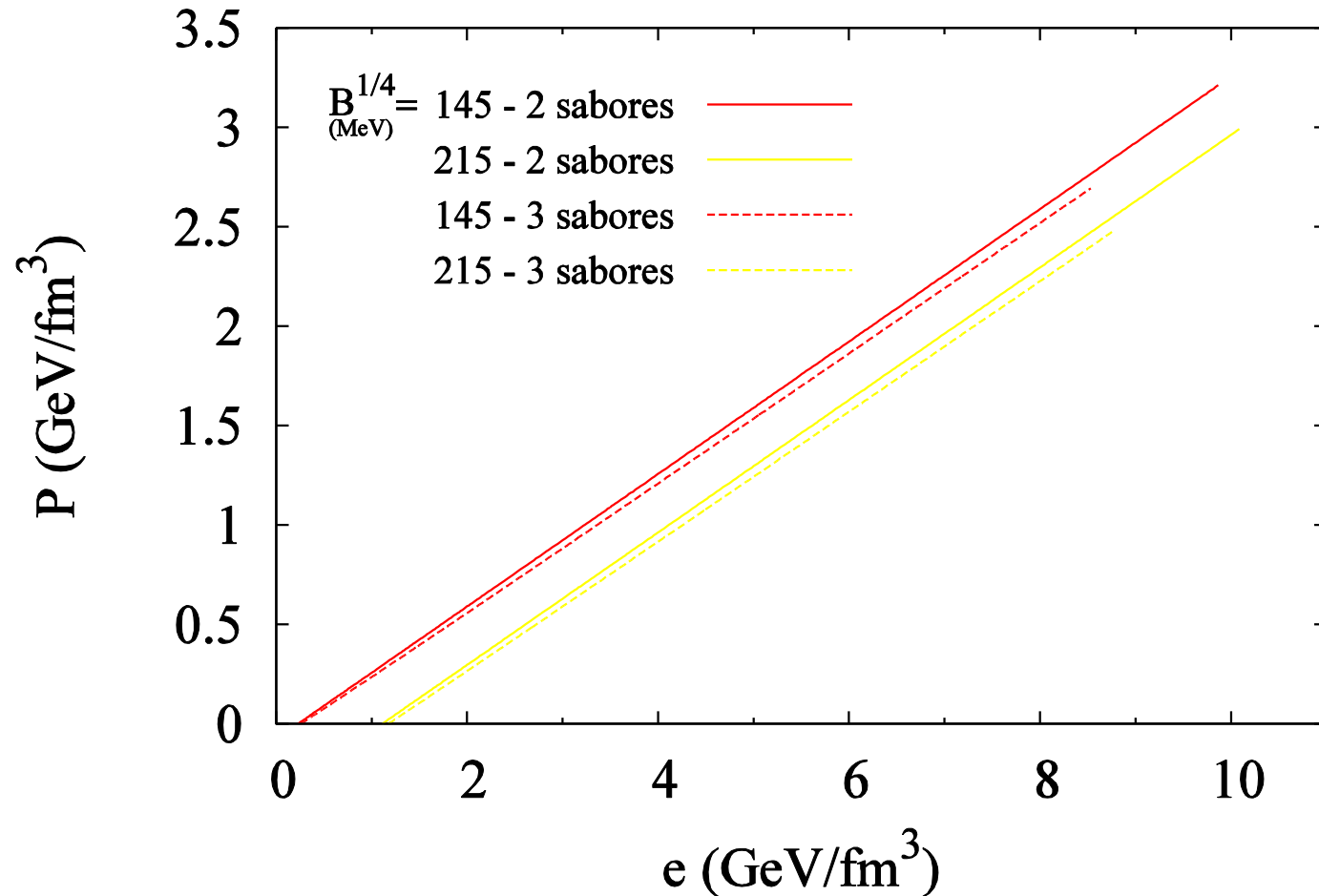


Fig. 11:  $P \times e$  para uma estrela de quarks de 2 e 3 sabores.

# Alguns Resultados para Estrelas de Quarks

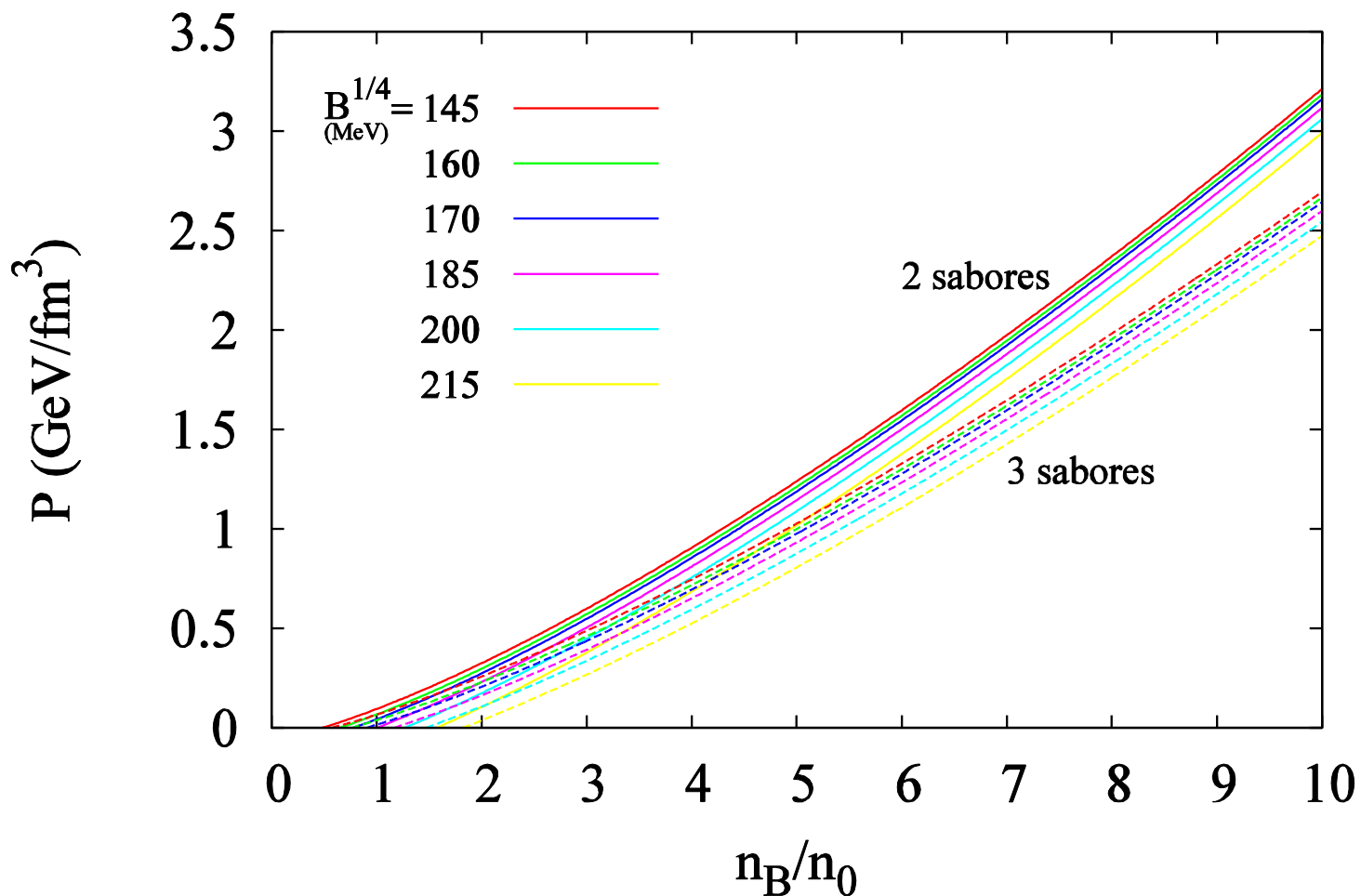


Fig. 12:  $P \times n_B/n_0$  para uma estrela de quarks de 2 e 3 sabores.

# Alguns Resultados para Estrelas de Quarks

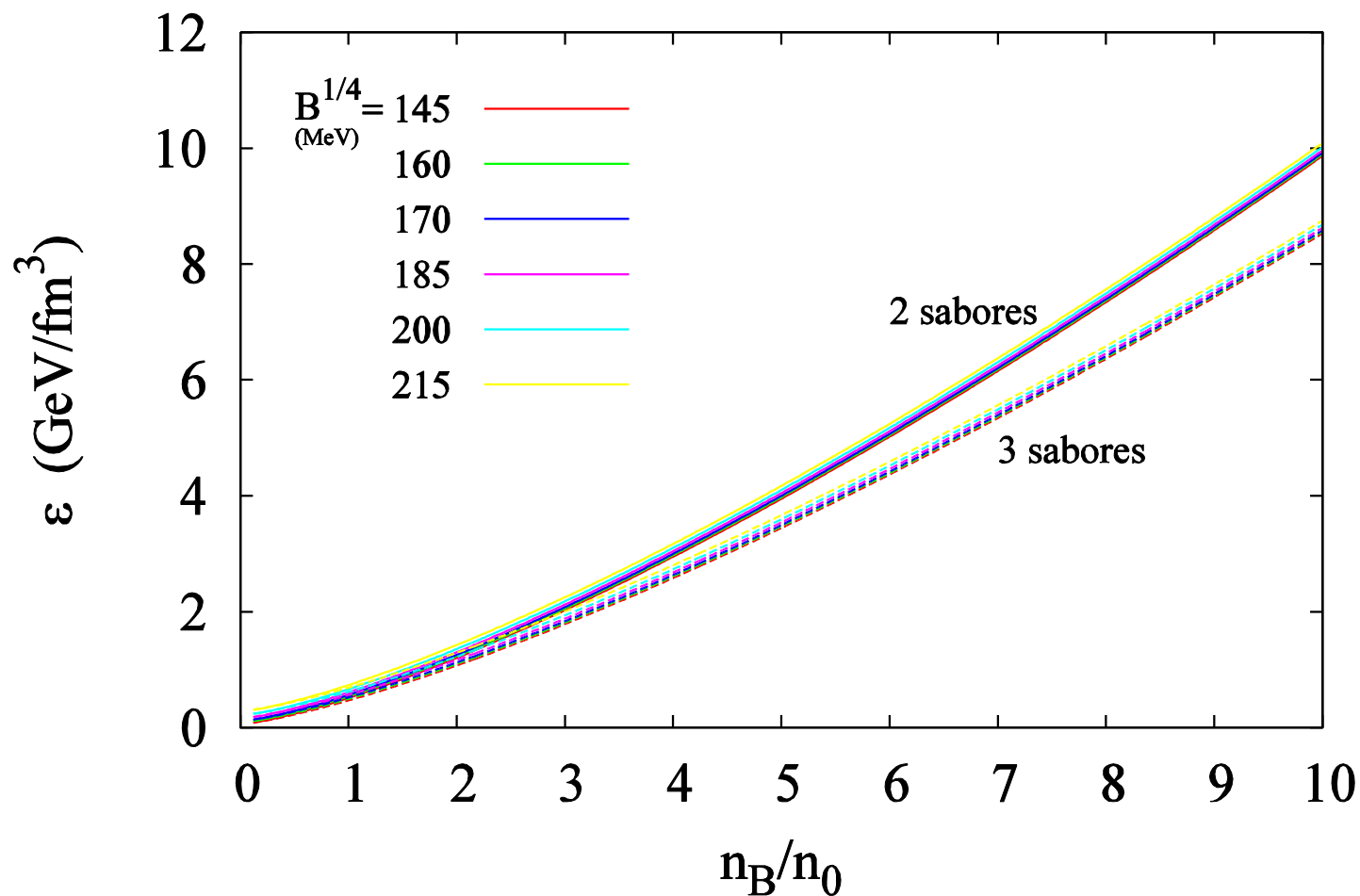


Fig. 13:  $e \times n_B/n_0$  para uma estrela de quarks de 2 e 3 sabores.

# Alguns Resultados para Estrelas de Quarks

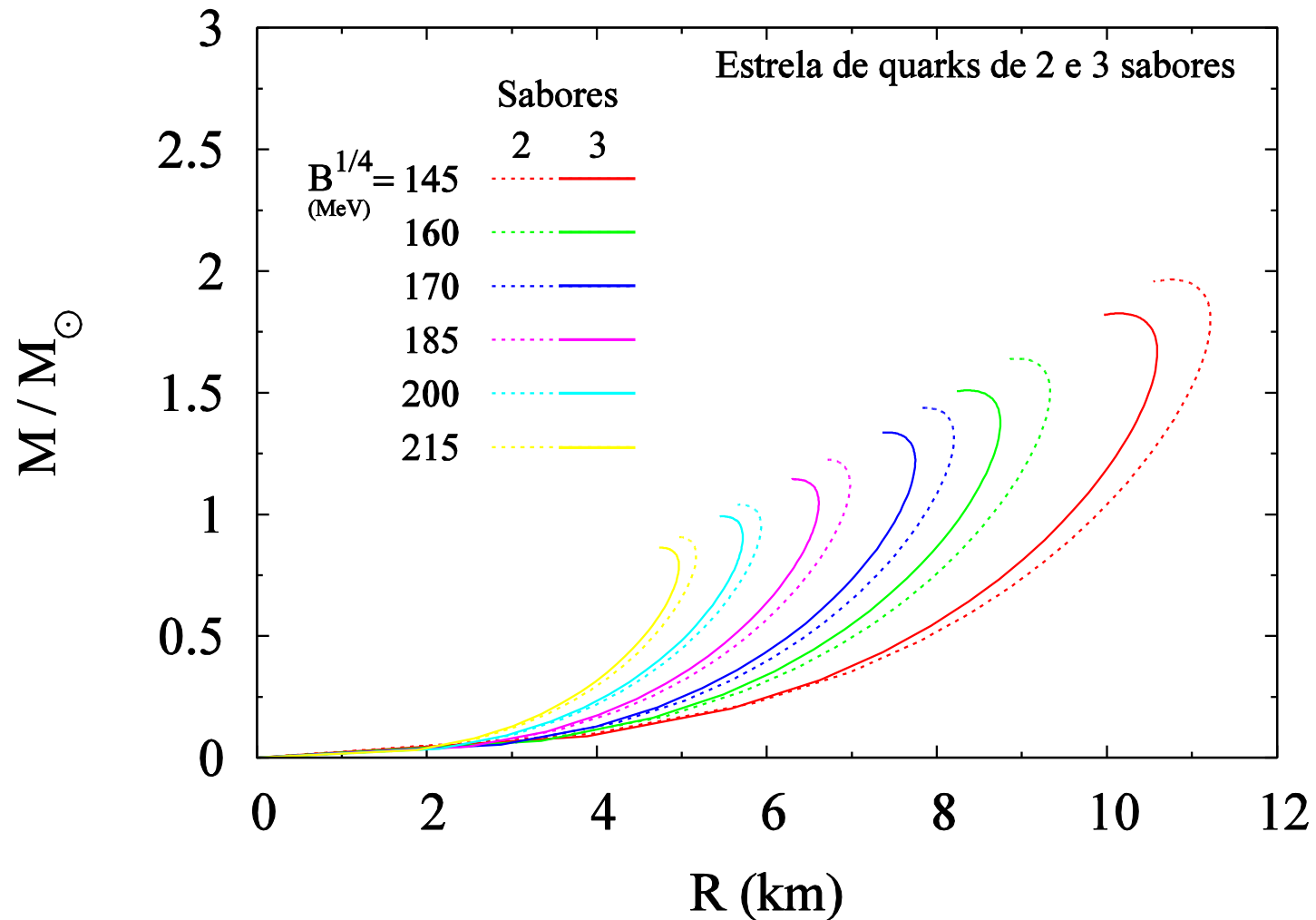


Fig. 14: o perfil de uma estrela de quarks de 2 e 3 sabores.



# Alguns Resultados para Estrelas de Quarks

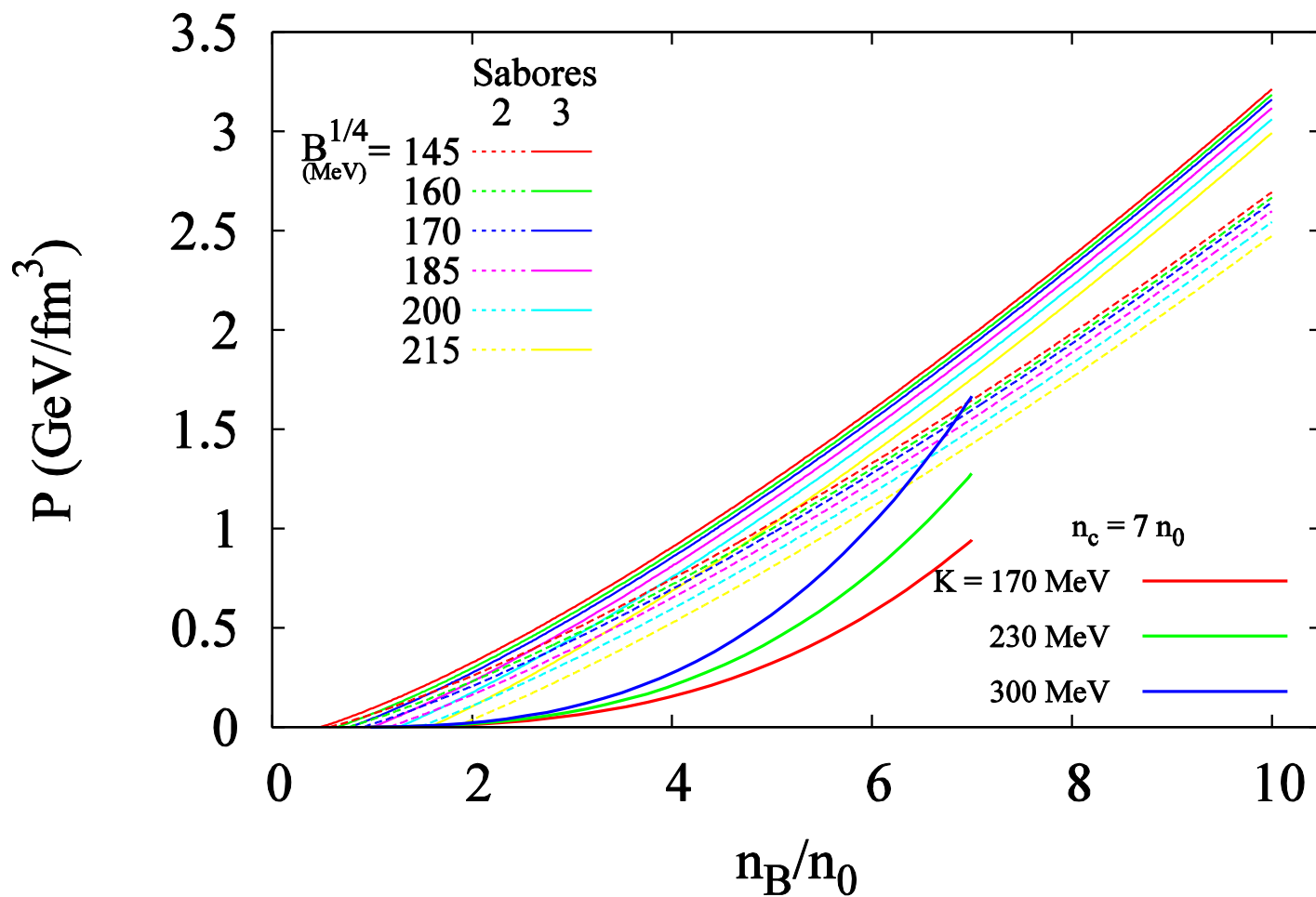


Fig. 15: comparação de  $P \times n_B/n_0$  entre estrela de nêutrons e estrela de quarks de 2 e 3 sabores.

# Alguns Resultados para Estrelas de Quarks

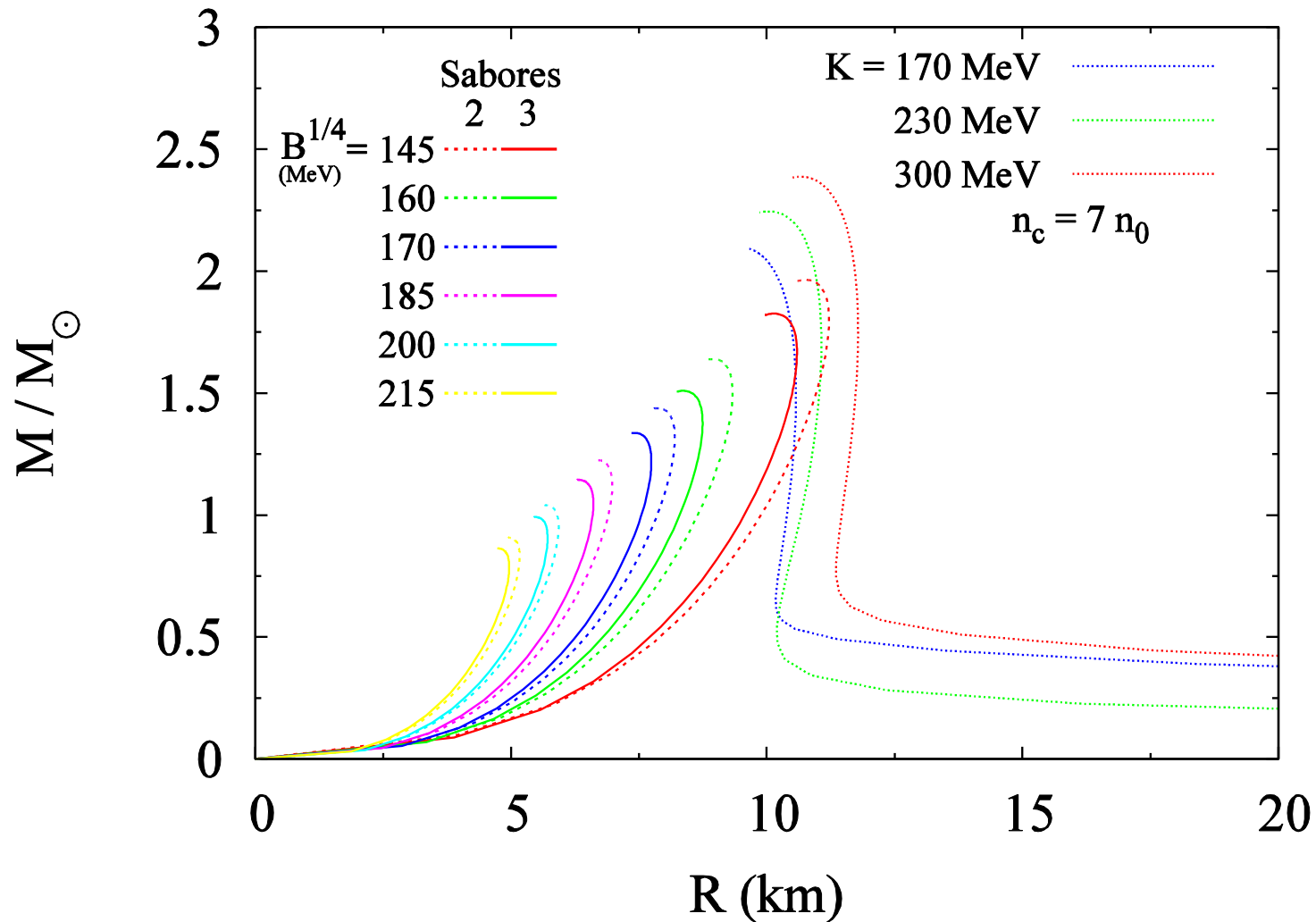


Fig. 16: comparação entre o perfil de uma estrela de nêutrons e o de uma estrela de quarks.

# Condições

- Algumas condições de estabilidade (energia/partícula):

$$\left. \frac{E}{A} \right|_{u,d,s} < \left. \frac{E}{A} \right|_{^{56}\text{Fe}} < \left. \frac{E}{A} \right|_{u,d}$$

onde podemos escrever

$$\frac{E}{A} = \frac{E/V}{A/V} = \frac{\varepsilon}{n}$$

Sendo  $\varepsilon$  a densidade de energia e  $n$  a densidade de partículas

- Para o  $^{56}\text{Fe}$  temos que  $E/A = 930\text{MeV}$

# Condições

- Com as equações de estado (*EoS*) do modelo de sacola do MIT (*MIT bag model*), em sua forma mais simples, obtemos:

- 2 sabores

$$\frac{\varepsilon_2}{n_{B,2}} = (2\pi)^{1/2} (1 + 2^{4/3})^{3/4} B^{1/4}$$

- 3 sabores

$$\frac{\varepsilon_3}{n_{B,3}} = (2\pi)^{1/2} 3^{3/4} B^{1/4}$$

- Para o limite inferior ( $B^{1/4} = 145 \text{ MeV}$ ), temos:

$$\frac{\varepsilon_3}{n_{B,3}} = 829 \text{ MeV} < 930 \text{ MeV} < \frac{\varepsilon_2}{n_{B,2}} = 934 \text{ MeV}$$

# Condições

- Outras condições precisam ser analisadas:
  - inclusão de interações no *MIT* (ex.:  $\alpha_S \neq 0$ )
  - presença de léptons em estrelas de nêutrons e de quarks (u,d)
- Em uma estrela de quarks (u,d) ocorre o aparecimento do quark *s*, via decaimento por força fraça. Nas condições do interior destas estrelas a matéria estranha torna-se mais estável, ao que podemos chamar de ‘estrela estranha’ (EE), composta por quarks *u*, *d*, e *s*.

# Características e Assinaturas

- Raio: estrelas de quarks (EQ) devem ter raios menores do que estrelas de nêutrons (EN)
- Massa: EQ podem ter massa menor do que EN
- Densidade: EQ alcançam densidades maiores do que EN
- Período de rotação: EQ possuem períodos menores do que EN
- Ondas gravitacionais: diferenças na emissão em sistemas binários; diferentes densidades da fonte.

# Características e Assinaturas

- Verificou-se em alguns sistemas binários de pulsares a ocorrência de perda de energia e momento angular, onde a justificativa mais plausível para tal é em função da emissão de ondas gravitacionais.
- Exemplos destes sistemas: PSR 1913+16; PSR B1534+12 e o pulsar duplo PSR 0737-3039A+B; o estudo do PSR 1913+16, descoberto em 1975 rendeu o prêmio Nobel de Física para Taylor e Hulse em 1993.

# Características e Assinaturas

- Podemos ter um sistema EN-EN ou EN-EE.
- A presença de EE neste sistema implicaria em emissão de ondas gravitacionais de maior frequência e amplitude.

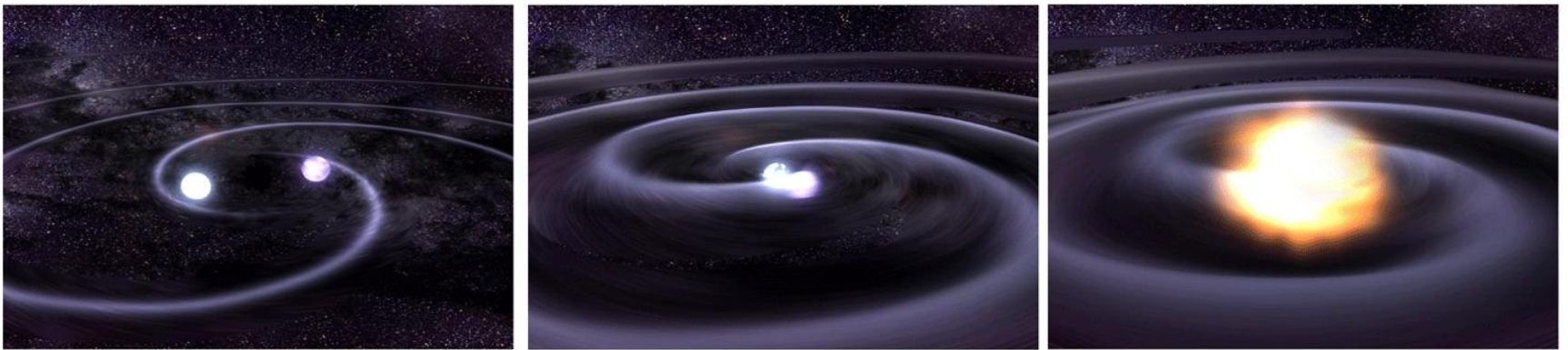


Fig. 17: Sistema binário de estrelas - coalescência/fusão com emissão de ondas gravitacionais e GRB (gamma ray bursts) - explosões de raios gama de curta duração.



# Próximos Passos

- Testar outras equações de estado (outros modelos)
- Incluir interação entre quarks e outras características
- Transições de fases
- Estrelas híbridas
- Campos magnéticos

# 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.

OBRIGADO!