

卒業論文発表会

2016年2月4日 福井大学工学部物理工学科

中性子星の最大質量への ハイペロンの影響

物理工学科 佐々木光明 (12380253)

目次

1. 本研究の目的

2. 本研究の背景

- ・ 中性子星に関する天文学的情報
- ・ ハイペロンとは
- ・ 核物質の状態方程式
- ・ **TOV** 方程式

3. 計算結果

- ・ **4種類**のEOSを使用した結果

4. まとめ

1. 本研究の目的

中性子星の構造を TOV 方程式と核物質の状態方程式を組み合わせて数値的に解き、解の性質を調べる。

- Web サイト **CompOSE**[1] で公開されている状態方程式から 4 種類のデータを取得し、ルンゲクッタ法で TOV 方程式を解く。
- 得られた結果から中性子星のもちうる最大質量に対するハイペロンの影響、中性子星内部の密度分布、中性子星の半径について考察する。

[1]<http://http://compose.obspm.fr/>

2. 本研究の背景

中性子星に関する天文学的情報

- パルサーの発見 1967年
宇宙から来る電波が非常に規則的
その正体は中性子星
- 中性子星とは
 - ・ 半径 10km 程度
 - ・ 質量は $(1 \sim 2)M_{\odot}$ (太陽質量: $M_{\odot} = 1.99 \times 10^{30} [\text{kg}]$)
 - ・ 密度は中心では $10^{15} [\text{g/cm}^3]$ 原子核 ($2.8 \times 10^{14} [\text{g/cm}^3]$) を超える密度
地球は $5 [\text{g/cm}^3]$
- 物理学にとっては超高密度の核物質の性質に関する希少な情報源
- $(1.97 \pm 0.04)M_{\odot}$ の中性子星の発見で核物質の状態方程式のモデルの多くが変更を余儀なくされた (P.B. Demorest et al., Nature, 467, 1081 (2010).)

ハイペロンとは 素粒子

クォーク quark : 強い相互作用をする素粒子。

第二世代 **s (strange)**, **c (charm)**

バリオン baryon: 3個のクォークから構成される粒子。

Qを電荷 (素電荷を単位として数える)。

Sをストレンジネス (sクォークは1単位のストレンジネスを持つ) とする。

ハイペロン hyperon: sクォークを1個以上含むバリオンの総称。

(ラムダ粒子) **S=-1 Q=0**

(シグマ粒子) **S=-1 Q=-1,0,1**

(グザイ粒子) **S=-2 Q=-1,0**

これら6種類のバリオンと陽子、中性子をあわせてバリオン8重項と呼ぶ。

核物質の状態方程式 (Equation Of State :以下 EOS と略す)

- 微視的理論では核子間や、核子・ハイペロン間の衝突実験から決めた相互作用を使って量子力学的に計算を行う。
本研究で使用するのは **APR**、**BHF**(どちらもハイペロンを考慮していない)
 - 現象論的理論では相対論的平均場模型と呼ばれるモデルの相互作用パラメータを有限核などのデータを再現するように決定し、そのモデルに基づいて計算する。
本研究で使用するのは **Y4**、**Y6**(どちらもハイペロンを考慮している)
- 一般には、ハイペロンを考慮すると状態方程式が軟らかくなるため **中性子星の最大質量が増えていかない。**

TOV 方程式

TOV 方程式 : 中性子星の重力平衡を表した微分方程式
(Tolman, Oppenheimer, Volkoff)

- ・ 高密度 重い重力場 一般相対論による取り扱いが必要

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{G[M_r + 4\pi r^3 P/c^2](\varepsilon + P)/c^2}{r[r - 2GM_r/c^2]} \quad (1)$$

r : 動径座標

P : 圧力

G : 重力定数 ($=6.67408 \times 10^{-11} [\text{m}^3 \text{kg}^{-1} \text{s}^{-2}]$)

M_r : 星の半径 r の球殻より内側の部分の質量

c : 光速度 ($=2.99792 \times 10^8 [\text{ms}^{-1}]$)

ε : エネルギー密度 (物質の静止エネルギーを含む)

この式の変数は r 、未知関数は P 、 M_r 、 ε である。

変数が1つなので一階の常微分方程式になっており、未知関数が3つあるのでこのほかに方程式があと2つ必要になる。

TOV 方程式と EOS の組み合わせ方

1 M_r は未知関数 $\varepsilon(r)$ の定積分として定義される。

$$M_r = \frac{4\pi}{c^2} \int_0^r \varepsilon r^2 dr \quad (2)$$

この式の両辺を r で微分すると $M_r(r)$ を微分方程式の未知関数として決めることも可能である。

$$\frac{dM_r}{dr} = \frac{4\pi}{c^2} \varepsilon r^2, \quad M_r(r=0) = 0 \quad (3)$$

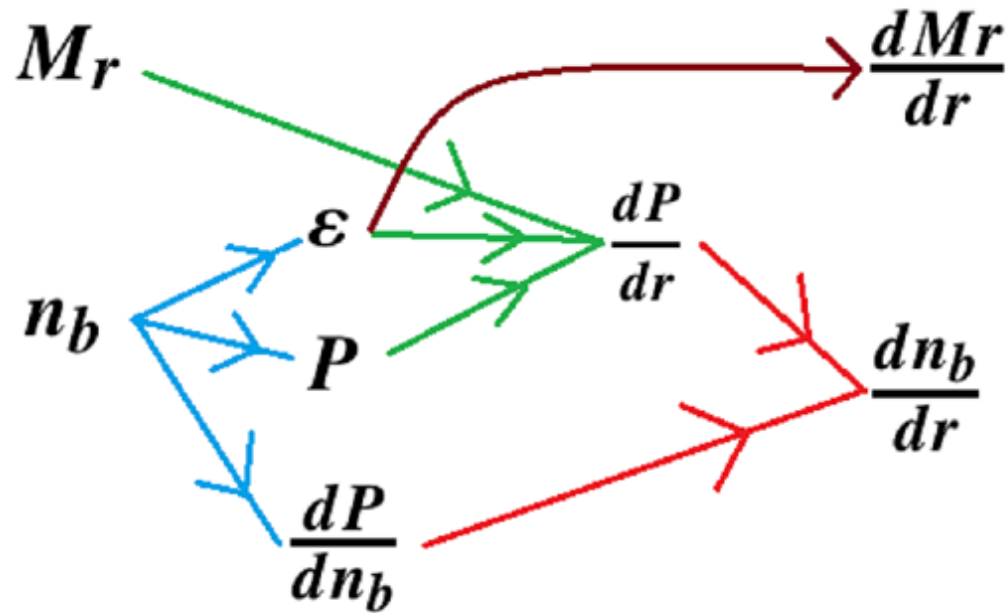
2 連立常微分方程式の一般形

$$\frac{d}{dx} \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_1(x, y_1, y_2) \\ f_2(x, y_1, y_2) \end{pmatrix} \quad (4)$$

に当てはめると対応関係は以下の通りである。

変数 x ————— r

2つの未知関数 y_1, y_2 ——— $P(r), M_r(r)$



青:EOS

$\epsilon_b = \epsilon_b(n_b)$ として与えられる。(n_b はバリオン個数密度)

$$\epsilon = \epsilon_b n_b$$

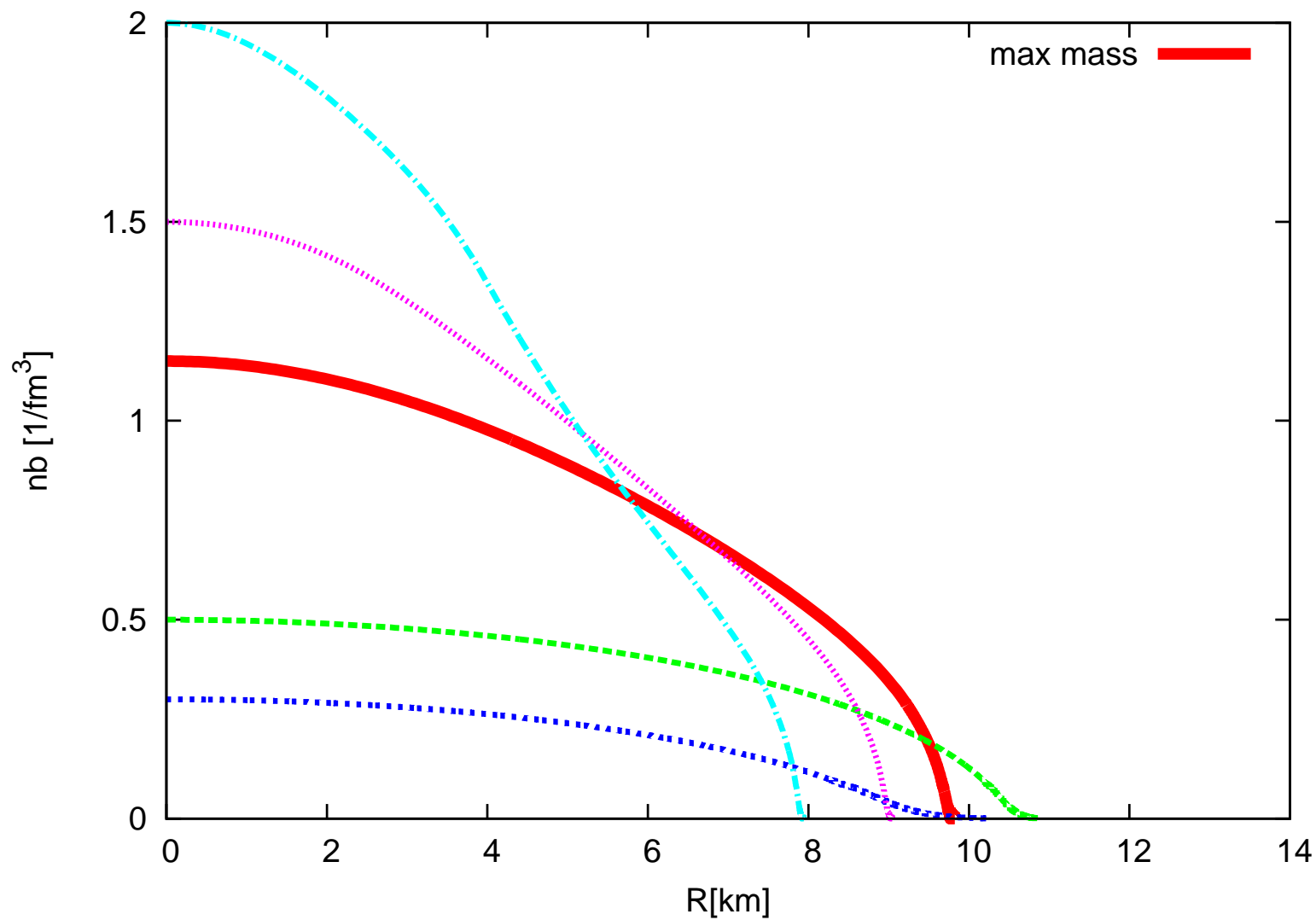
$$P = n_b^2 \frac{d\epsilon}{dn_b}$$

赤:微分の chain rule(合成関数の微分法)

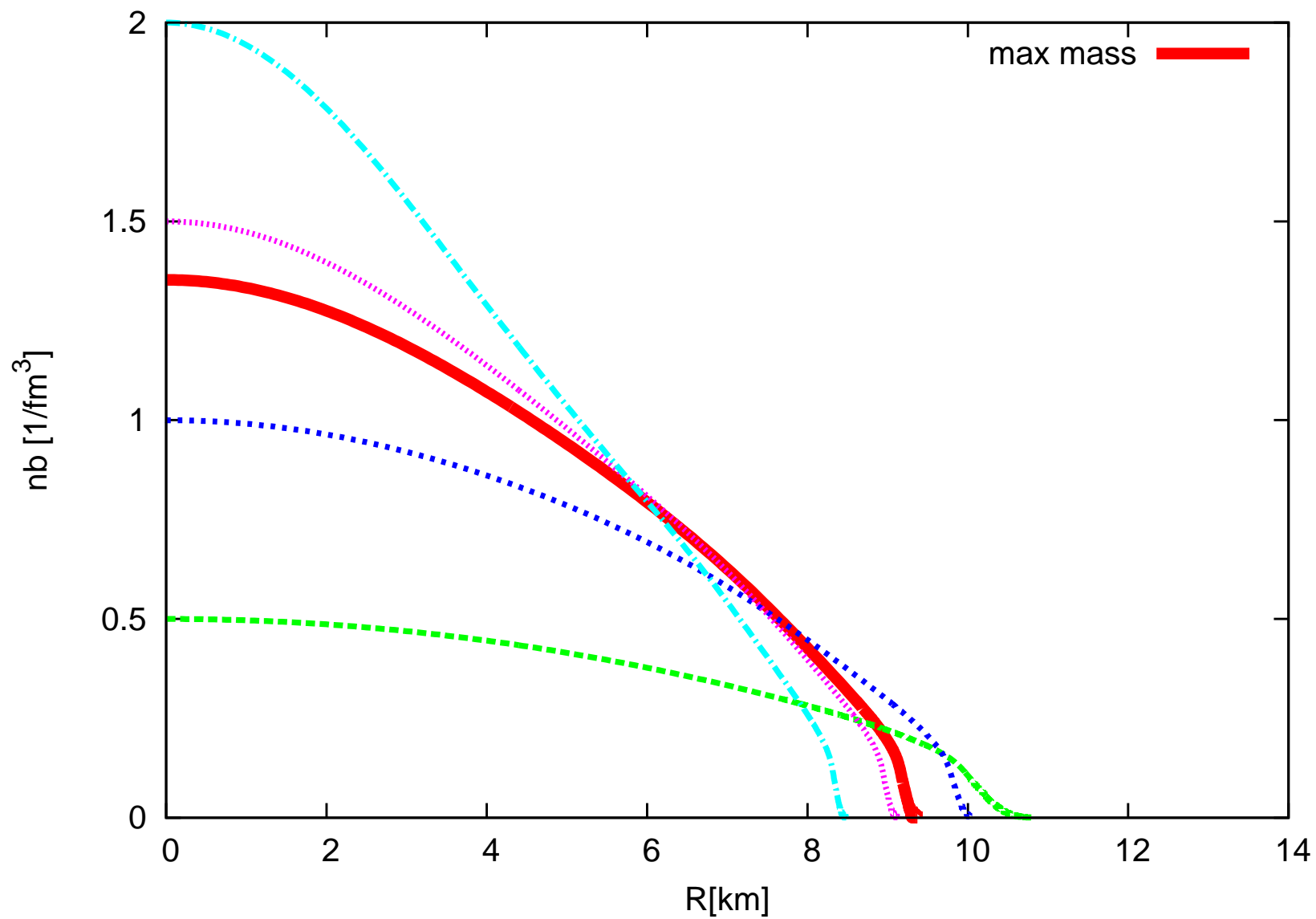
$$\frac{dn_b}{dr} = \frac{\frac{dP}{dr}}{\frac{dP}{dn_b}}$$

3. 計算結果

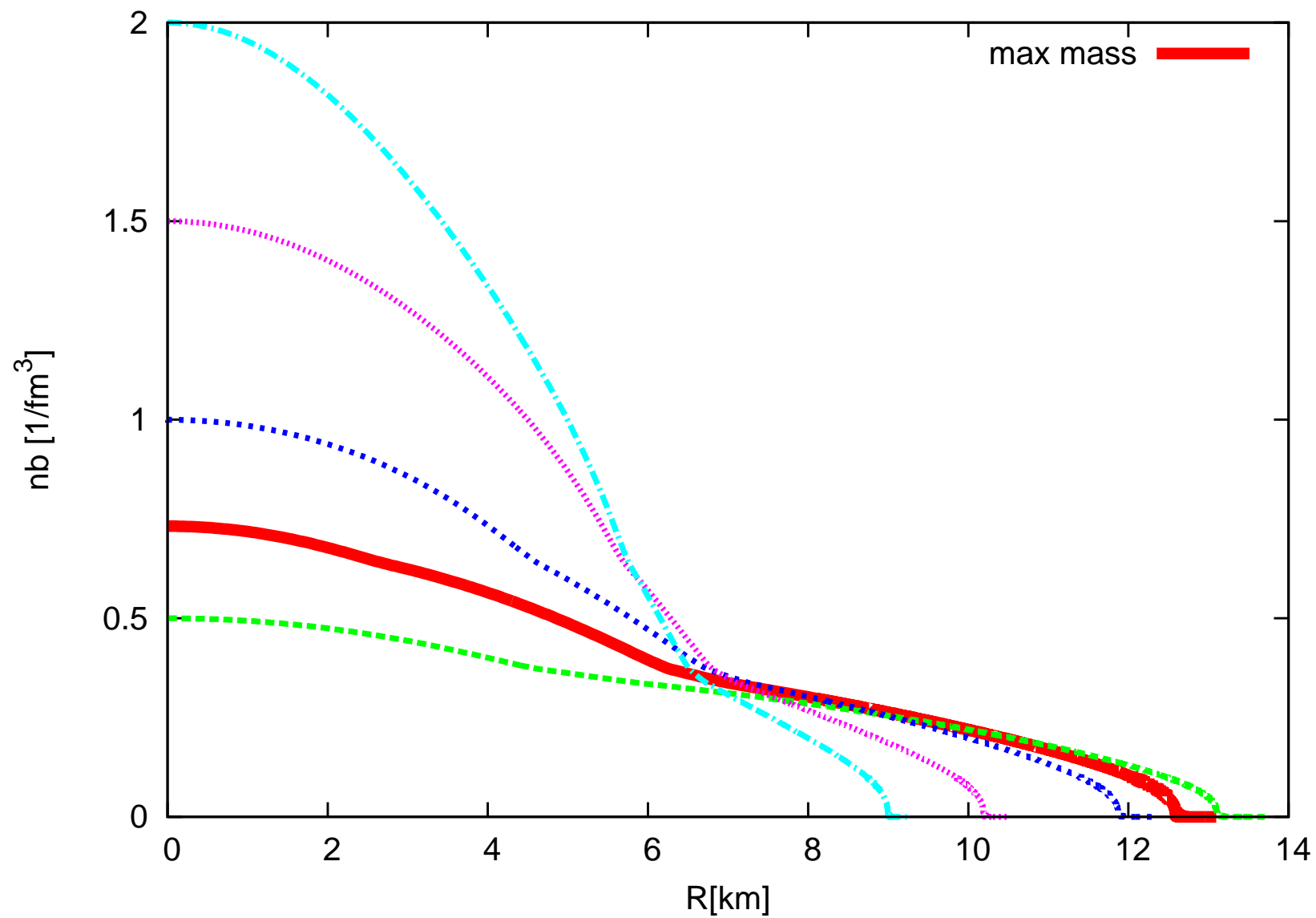
APRでの中心のバリオン個数密度と半径の関係



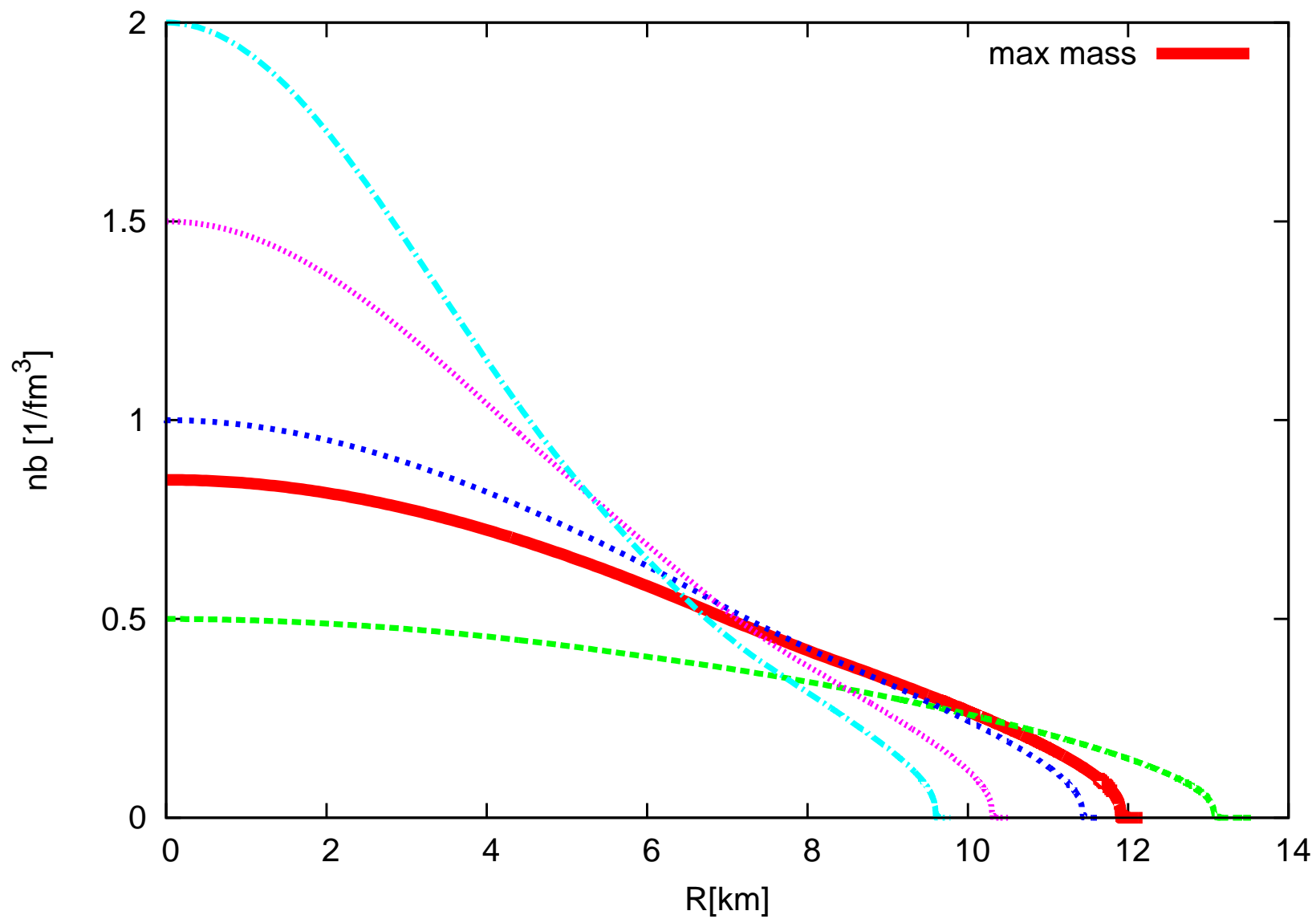
BHFでの中心のバリオン個数密度と半径の関係



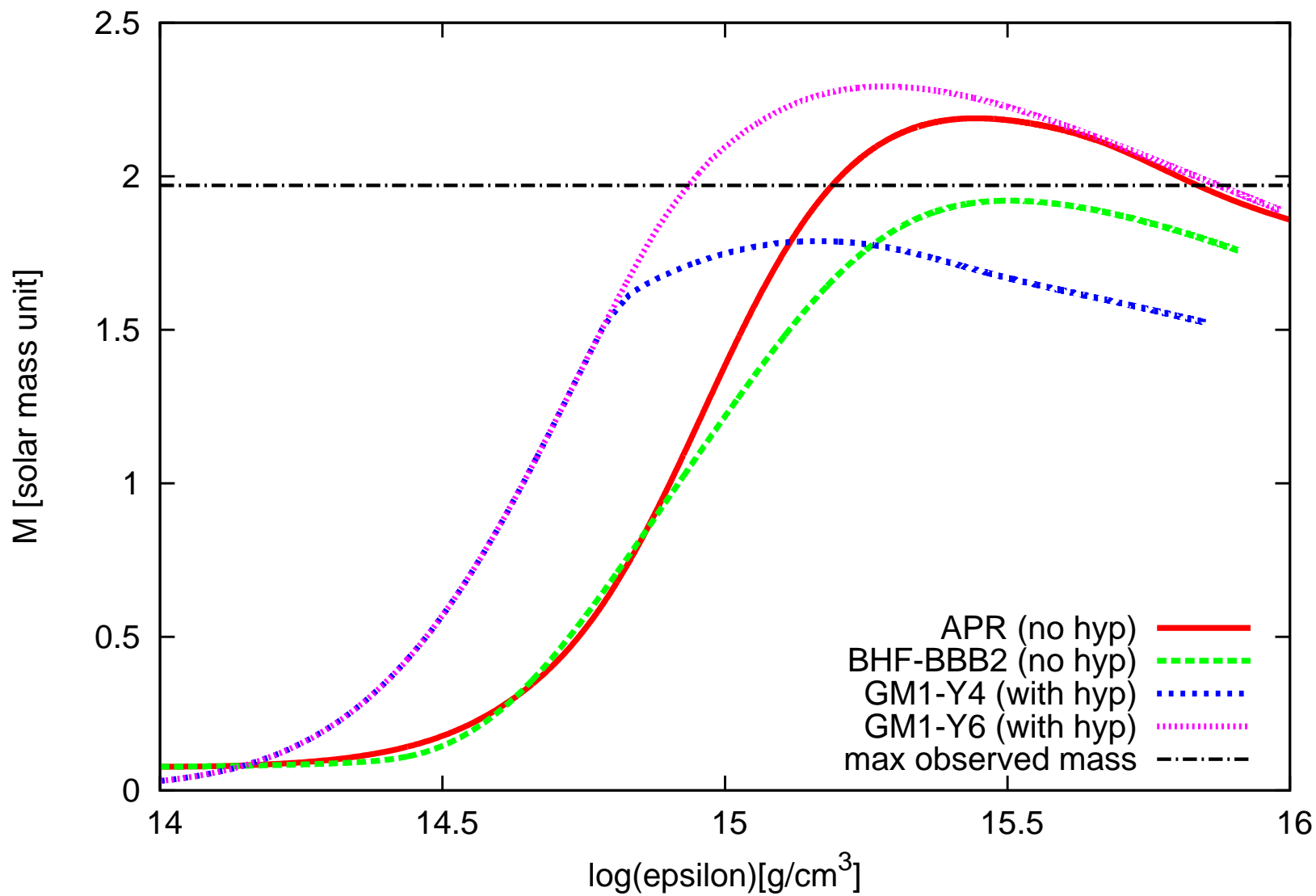
Y4での中心のバリオン個数密度と半径の関係



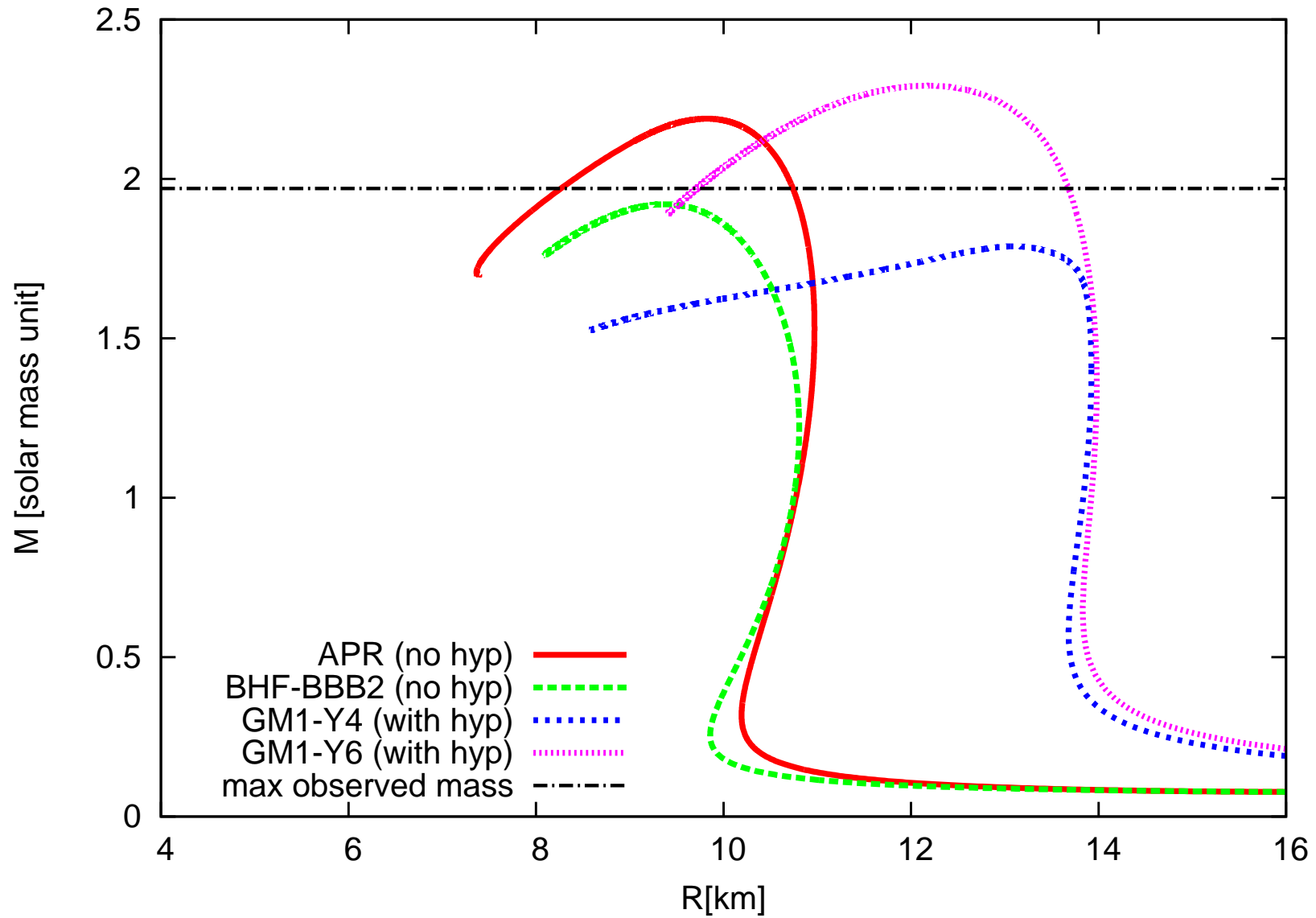
Y6での中心のバリオン個数密度と半径の関係



4種類のEOSでの質量と中心のエネルギー密度の関係



4種類のEOSでの中性子星の質量と半径の関係



4.まとめ

1. TOV 方程式を EOS を利用して数値的に解いた。
2. EOS の違いによる最大質量とそのときの半径、エネルギー密度を求めた。
3. ハイペロンを考慮すると EOS は軟らかくなるが、パラメータを適切に決定すれば観測された約 $2M_{\odot}$ の中性子星の質量を再現することも可能であることがわかった。ただし、半径は大きくなる傾向が見られた。

本研究で使用した4つの状態方程式の詳細
温度はゼロ度、成分比は 平衡での値に固定したもの。

1. APR

A18相互作用等を使った微視的な変分法の結果

考慮した粒子： 中性子、陽子、電子、ミュー粒子

A. Akmal, V.R. Pandharipande and D.G. Ravenhall, Phys. Rev. C, 58, 1804 (1998).

2. BHF-BBB2

核子間相互作用としてParisポテンシャル等を使った微視的なBueckner Hartree-Fock計算結果

考慮した粒子： 中性子、陽子、電子、ミュー粒子

M. Baldo, I. Bombaci and G. F. Burgio, Astron. Astrophys. 328, 274 (1997).

3,4. GM1-Y4, GM1-Y6

相対論的平均場模型という現象論的模型による計算結果

考慮した粒子： 中性子、陽子、電子、ハイペロン

・ N.K. Glendenning and S.A. Moszkowski, Phys. Rev. Lett. 67, 2414 (1991)

・ M. Oertel, C. Providencia, F. Gulminelli, A. Raduta, arxiv.1412.4545. (2014)

(2 solar mass の中性子星の発見後、改訂した)

TOV 方程式についての考察

重力が弱いとして近似するとニュートンの重力理論に基づく重力平衡条件になる。

$$\frac{dP}{dr} = -f \frac{GM_r \left(\frac{\varepsilon}{c^2}\right)}{r^2} \quad (5)$$

$$f = \frac{\left(1 + \frac{4\pi r^3 P}{c^2 M_r}\right) \left(1 + \frac{P}{\varepsilon}\right)}{1 - \frac{2GM_r}{c^2 r}} \quad (6)$$

ここで f を見ると分子は1に正の量を加え、分母は1から正の量を引いているので $f > 1$
一般相対論ではニュートンの重力理論よりも重力が強くなる