

変分法によるハイペロン混合を考慮した 核物質状態方程式

富樫 甫（理化学研究所）

共同研究者：肥山 詠美子（理化学研究所）

鷹野 正利（早稲田大学）

山本 安夫（理化学研究所）

Contents

1: Introduction

2: ハイペロン物質に対するクラスター変分法

3: ハイペロン相互作用と中性子星の構造

4: まとめ

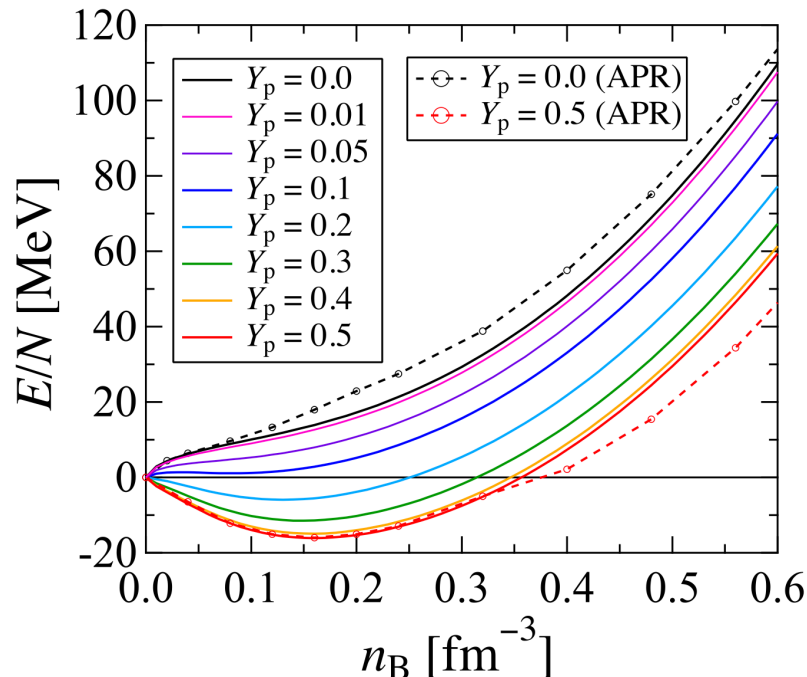
1: Introduction

超新星爆発計算に適用可能な核物質状態方程式 (SN-EOS)

一様核物質EOS: 現象論的模型に基づいて作成

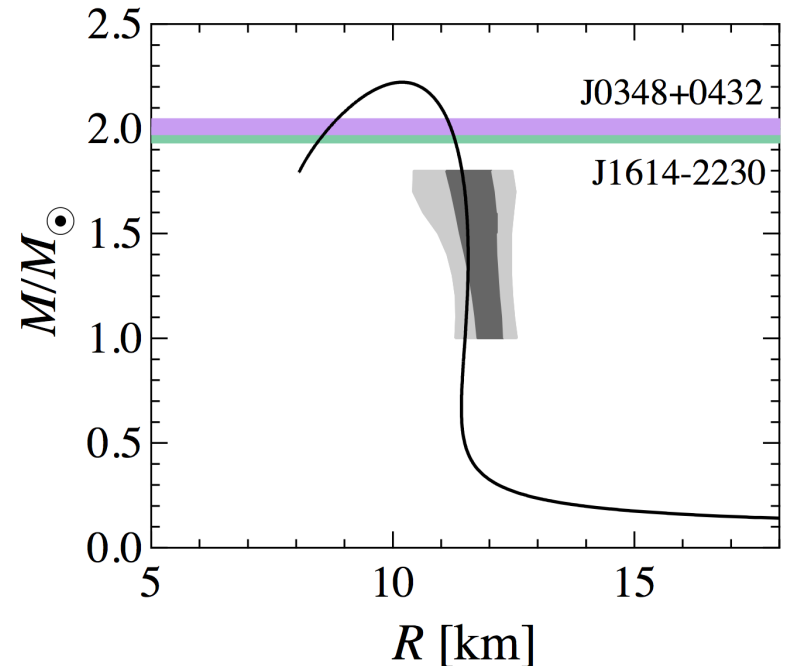
- ・ *LS EOS* (Skyrme型相互作用)
- ・ *Shen EOS* (相対論的平均場理論)

多体変分計算による現実的核力に基づく核物質状態方程式の作成



Our EOS : NPA902(2013)53

APR : PRC58(1998)1804



J0348+0432: Science 340 (2013) 1233232

J1614-2230: Nature 467 (2010) 1081

重力崩壊型超新星爆発計算のためのEOS作成手順

一様核物質 (AV18 + UIX)

クラスター変分法による一様核物質状態方程式

非一様核物質

Thomas-Fermi 計算による非一様核物質状態方程式

鈴木英之氏, 中里健一郎氏, 竹原裕太氏, 山室早智子氏 (東京理科大学)
との共同研究

★ We are here. ★

中里さんの発表

SNシミュレーションのための核物質状態方程式の完成

Density ρ : $10^{5.1} \leq \rho_m \leq 10^{16.0} \text{g/cm}^3$ 110 point

Temperature T : $0 \leq T \leq 400 \text{ MeV}$ 92 point

Proton fraction x : $0 \leq x \leq 0.65$ 66 point

研究目的

クラスター変分法によるバリオン間相互作用に基づいた 一様ハイペロン物質状態方程式の作成

- 2体クラスター近似を用いた従来の研究を拡張することで、ハイペロン物質を扱う場合に生じる粒子混在度の問題点を比較的容易に克服できる。
- 質量の異なる粒子間に働く2体相関をあからさまに取り扱う。

今回の発表

- **核子(N), Λ , Σ^-** で構成されたハイペロン物質に対する
クラスター変分法の定式化
- Λ 粒子の相互作用に着目し、相互作用が中性子星の質量や内部の粒子混在度を与える影響を調べる。

2: ハイペロン物質に対するクラスター変分法

2体ハミルトニアン

$$H_2 = -\sum_i \left[m_i c^2 + \frac{\hbar^2}{2m_i} \nabla_i^2 \right] + \sum_{i<j} V_{ij}$$

2体バリオン間相互作用

$$V_{ij} = \sum_{N,Y} [V_{ij}^{NN} + V_{ij}^{YN} + V_{ij}^{YY}]$$

3体ハミルトニアン

$$H_3 = \sum_{i<j<k} V_{ijk}$$

3核子間(NNN)相互作用: UIX

NN potential: **Argonne V18 (AV18) ポテンシャル** (PRC 51 (1995) 38)

$$V_{ij}^{NN} = \sum_p \sum_{s=0}^1 [V_{Cps}(r_{ij}) + sV_{Tp}(r_{ij})S_{Tij} + sV_{SOp}(r_{ij})(\mathbf{L}_{ij} \cdot \mathbf{s}) \\ + V_{qLps}(r_{ij})|\mathbf{L}_{ij}|^2 + sV_{qSOp}(r_{ij})(\mathbf{L}_{ij} \cdot \mathbf{s})^2] P_{psij}^{NN}$$

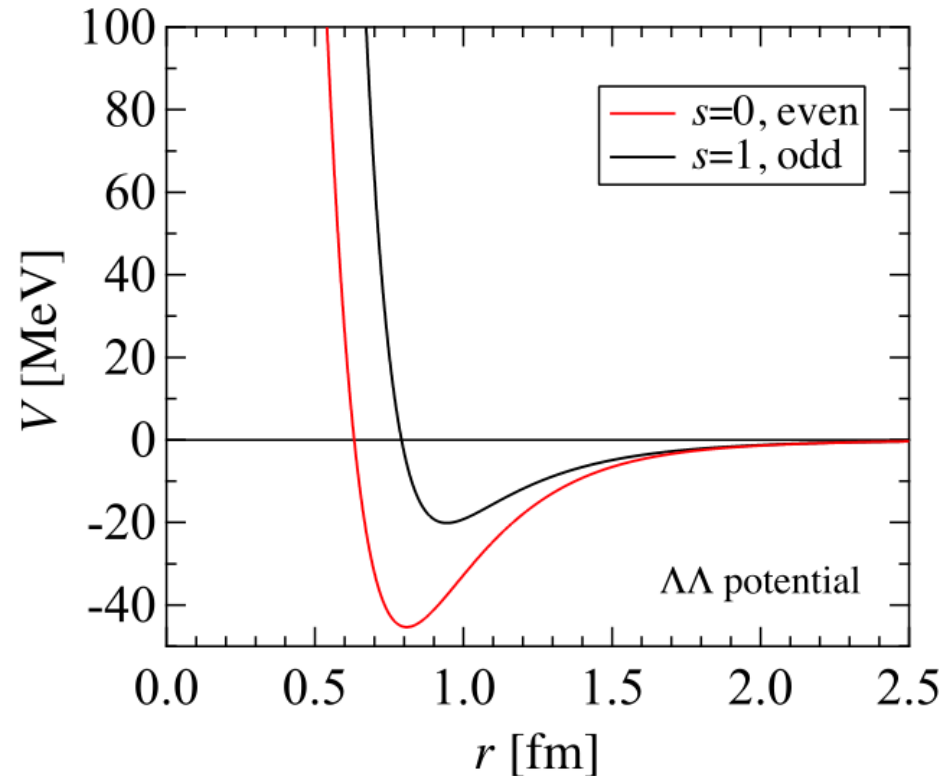
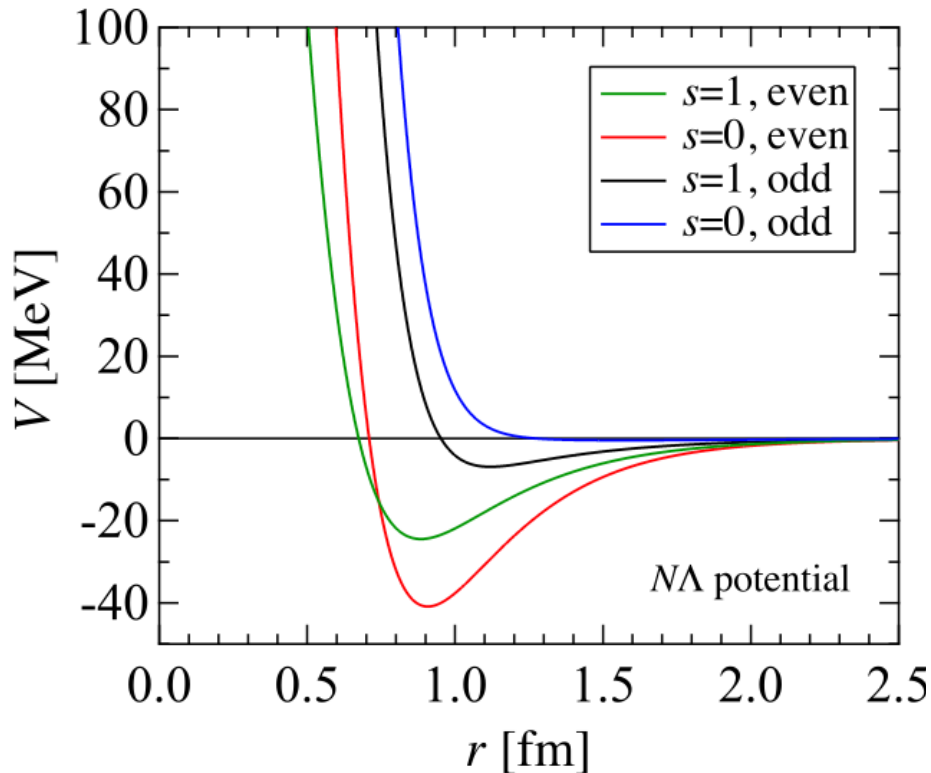
YN・YY potential: **中心力成分のみ**
($\mu = \Lambda p, \Lambda n, \Lambda\Lambda, \Sigma^- p, \Sigma^- n$)

$$V_{ij}^{\mu} = \sum_p \sum_{s=0}^1 V_{Cps}^{\mu}(r_{ij}) P_{psij}^{\mu}$$

$N\Lambda$ 相互作用と $\Lambda\Lambda$ 相互作用

肥山らによる少数多体系の厳密計算によって、
 Λ ハイパー核の実験値を再現するように決定されたポテンシャル

(PRC 66 (2002) 024007)



今回の研究

不定性の大きい $N\Lambda$ 及び $\Lambda\Lambda$ 相互作用の odd state に着目

ハイペロン物質に対するJastrow 波動関数

Jastrow 波動関数

$$\Psi = \text{Sym} \left[\prod_{i < j} f_{ij} \right] \Phi_F$$

Φ_F : フェルミ気体の波動関数

$\text{Sym} []$: 対称化演算子

2体相関関数:

$$f_{ij} = \sum_{N,Y} [f_{ij}^{NN} + f_{ij}^{YN} + f_{ij}^{YY}]$$

NN 相関関数 $f_{ij}^{NN} = \sum_p \sum_{s=0}^1 \left[\underbrace{f_{Cps}^{NN}(r_{ij})}_{\text{Central}} + s \underbrace{f_{Tp}^{NN}(r_{ij})}_{\text{Tensor}} S_{Tij} + s \underbrace{f_{SOp}^{NN}(r_{ij})}_{\text{Spin-orbit}} (L_{ij} \cdot s) \right] P_{psij}^{NN}$

YN, YY 相関関数 $f_{ij}^{\mu} = \sum_p \sum_{s=0}^1 \underbrace{f_{Cps}^{\mu}(r_{ij})}_{\text{Centralのみ}} P_{psij}^{\mu} \quad (\mu = \Lambda p, \Lambda n, \Lambda \Lambda, \Sigma^- p, \Sigma^- n)$

2体クラスター近似による H_2 の期待値を E_2 とする.

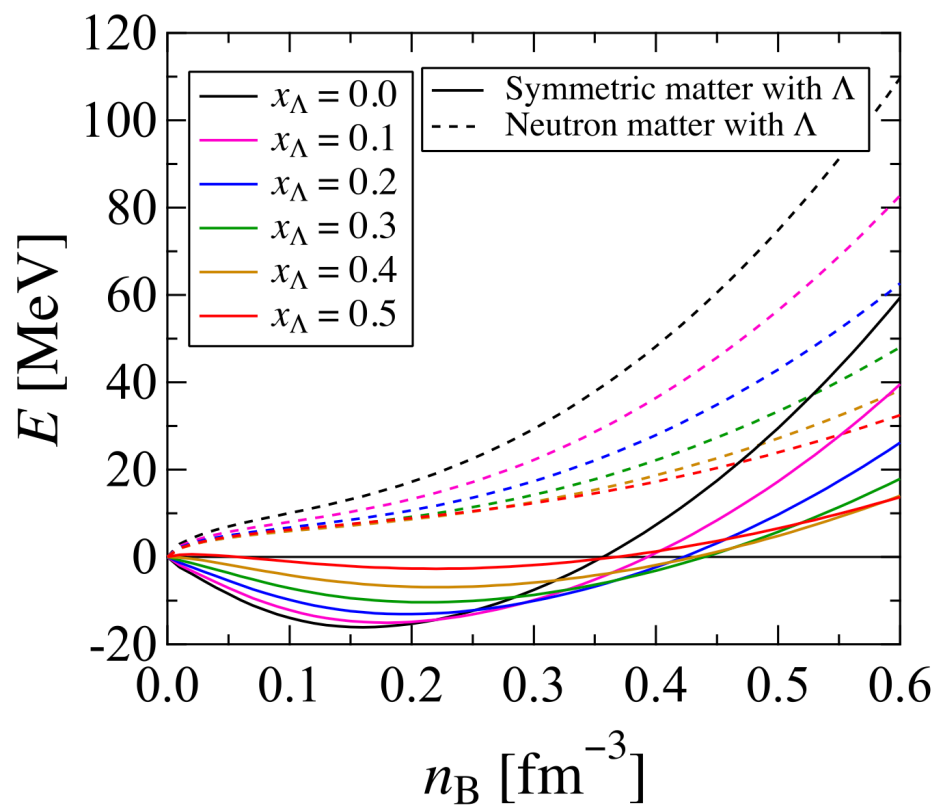
$$E_2(n_p, n_n, n_{\Lambda}, n_{\Sigma^-}) = \frac{\langle H_2 \rangle_2}{A} [f_{Cps}^{\mu}, f_{Tp}^{\mu}, f_{SOp}^{\mu}]$$

適切な条件のもとで Euler-Lagrange 方程式を解き、
 E_2 を相関関数 $f_{Cps}^{\mu}(r)$, $f_{Tp}^{\mu}(r)$, $f_{SOp}^{\mu}(r)$ について最小化

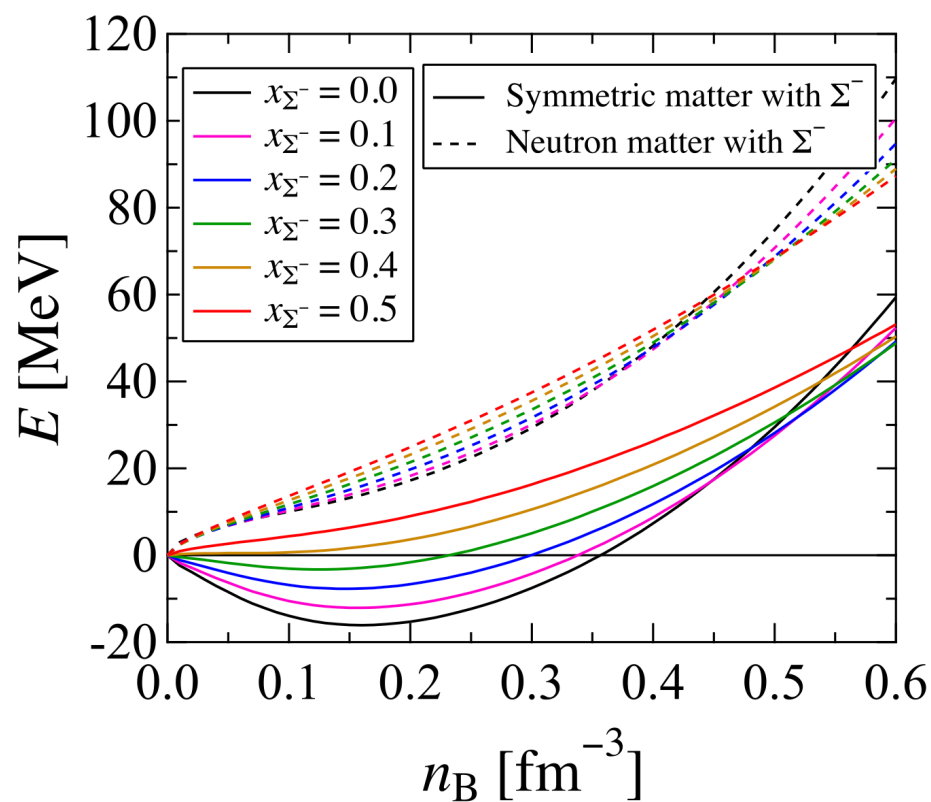
ハイペロン物質における一粒子あたりのエネルギー

$$E(n_p, n_n, n_\Lambda, n_{\Sigma^-}) = E_2(n_p, n_n, n_\Lambda, n_{\Sigma^-}) + E_3(n_p, n_n)$$

絶対零度フェルミ気体波動関数に対する H_3 に基づく期待値

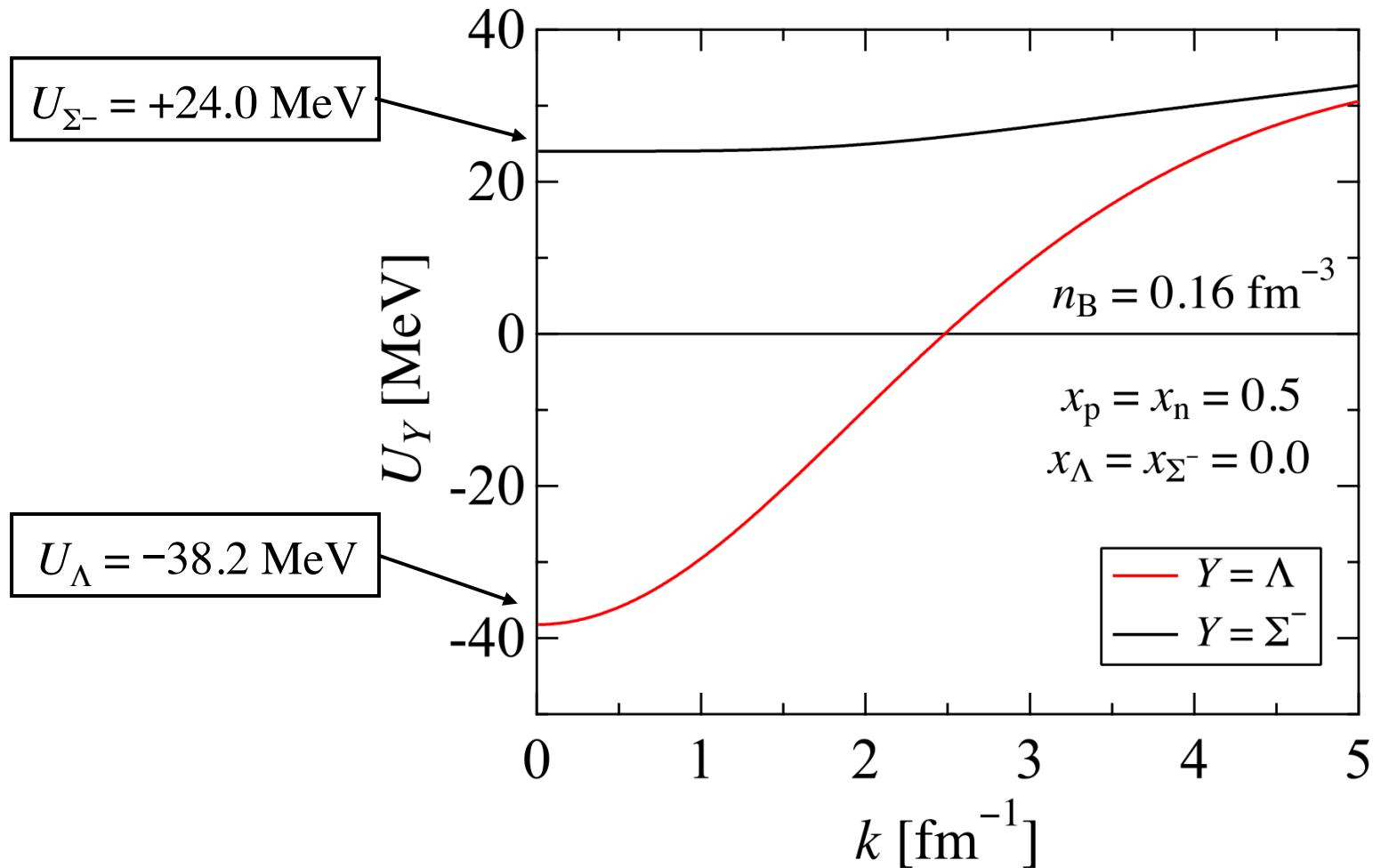


一粒子あたりのエネルギー
(核物質に Λ が混合した場合)



一粒子あたりのエネルギー
(核物質に Σ^- が混合した場合)

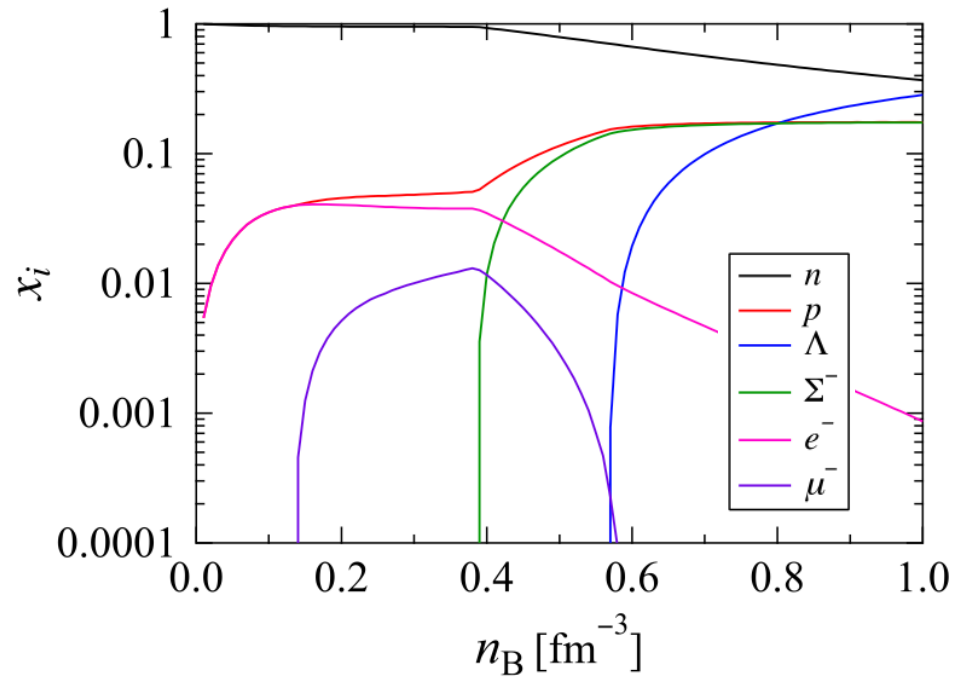
ハイペロンの単一粒子ポテンシャル



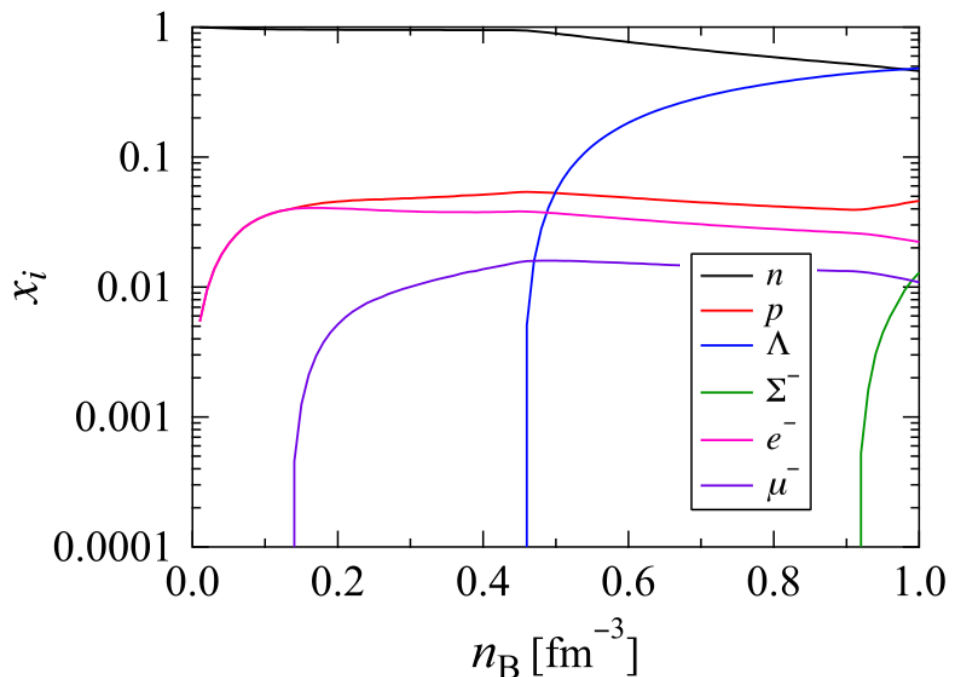
対称核物質 ($x_p = x_n = 0.5$) の飽和密度 $n_B = 0.16 \text{ fm}^{-3}$ における単一粒子ポテンシャル

3: ハイペロン相互作用と中性子星の構造

3-1: ハイペロン相互作用が与える影響



中性子星物質内部の粒子混在度
(ハイペロン相互作用の無い場合)

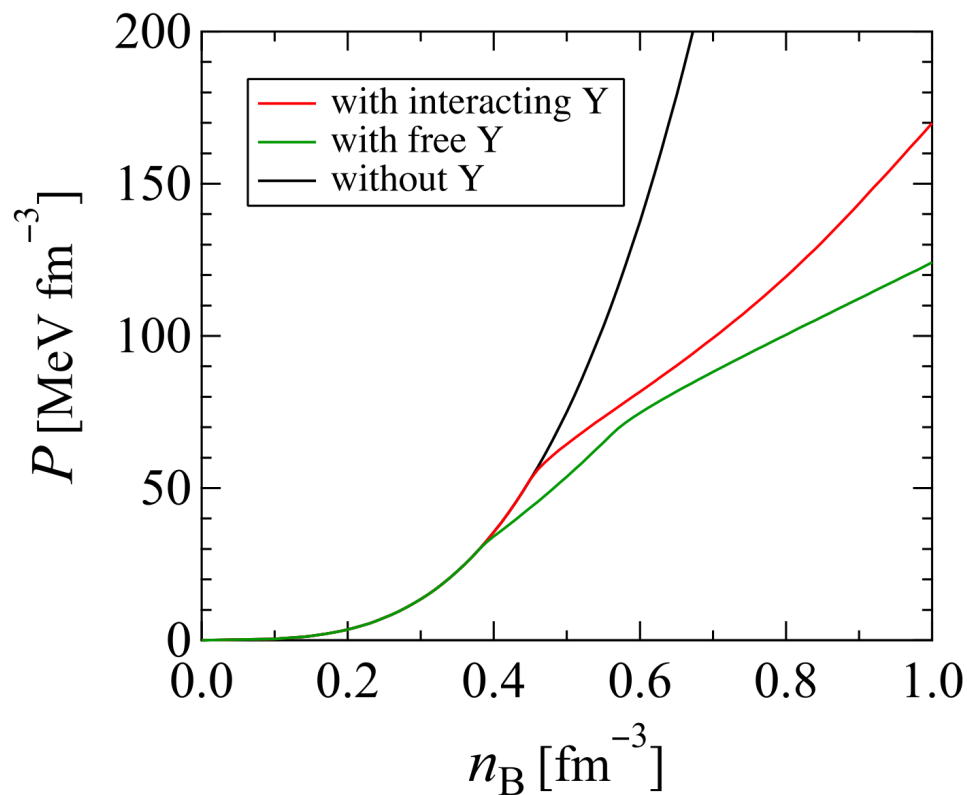


中性子星物質内部での粒子混在度
(ハイペロン相互作用のある場合)

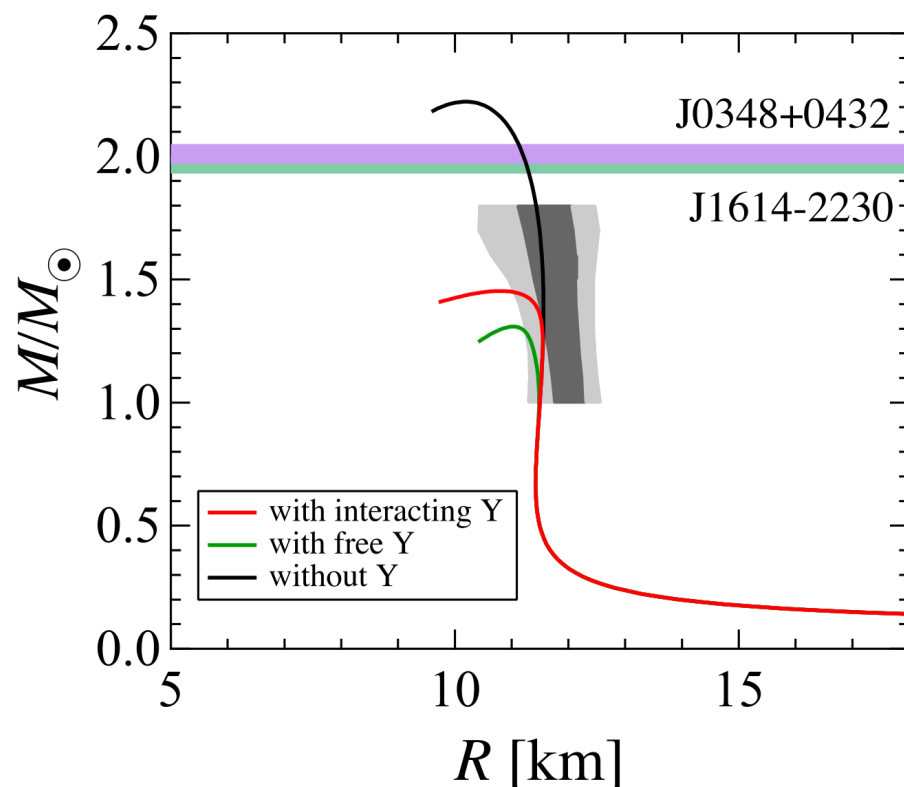
Λ 混合の臨界密度 n_{Λ}^{th} : $0.57 \text{ fm}^{-3} \rightarrow 0.46 \text{ fm}^{-3}$

Σ 混合の臨界密度 n_{Σ}^{th} : $0.39 \text{ fm}^{-3} \rightarrow 0.92 \text{ fm}^{-3}$

中性子星物質EOSと中性子星の質量



中性子星物質の状態方程式



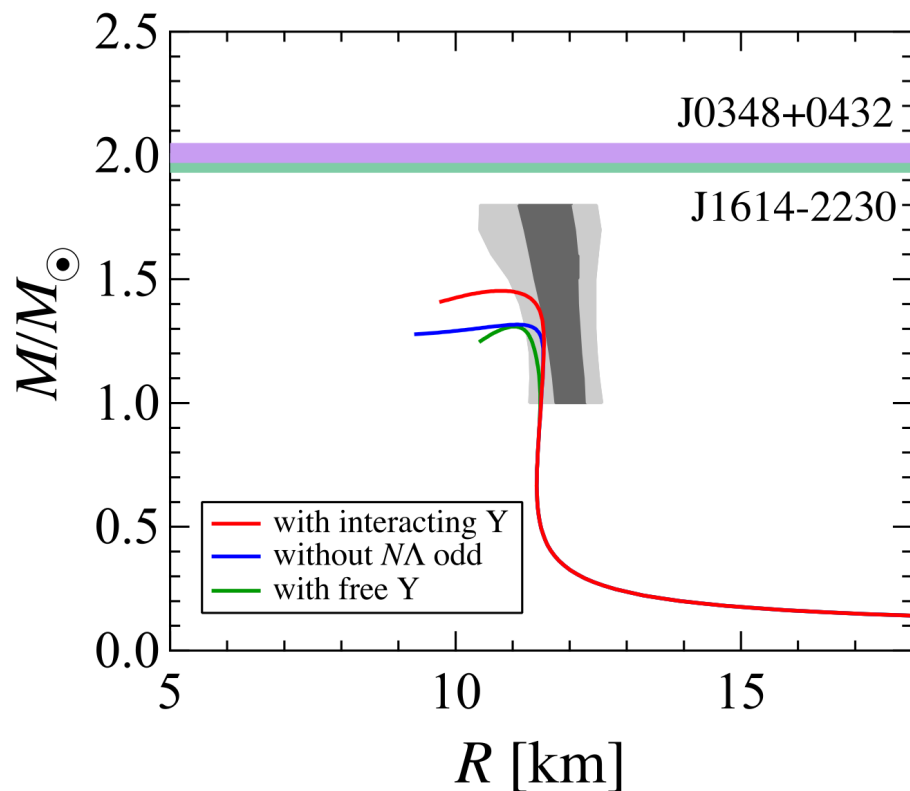
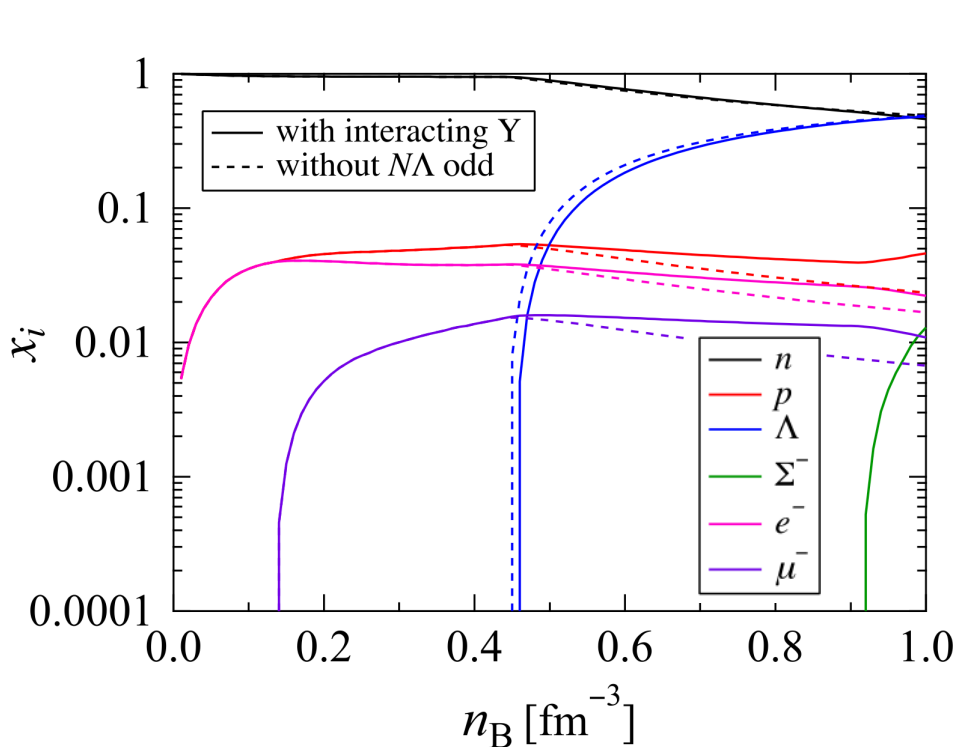
中性子星の質量 M と半径 R の関係

ハイペロン相互作用の無い場合とハイペロン相互作用のある場合を比較すると・・・

中性子星物質のEOSはハイペロン相互作用によって硬くなり、
中性子星の最大質量は増加する。 $(1.31M_\odot \rightarrow 1.45M_\odot)$

3-2: $N\Lambda$ 相互作用 odd state からの寄与

$N\Lambda$ 相互作用の odd state channel のみ switch off



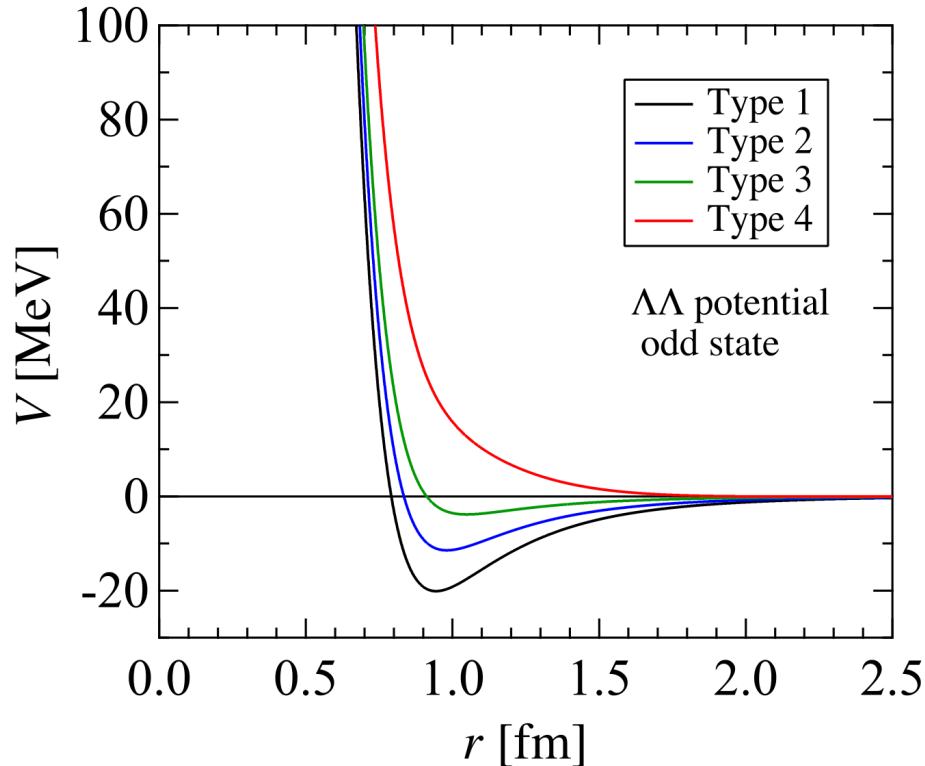
Λ 混合の臨界密度 n_Λ^{th} : $0.46 \text{ fm}^{-3} \rightarrow 0.45 \text{ fm}^{-3}$

中性子星の最大質量: $1.45 M_\odot \rightarrow 1.32 M_\odot$ (10%程度)

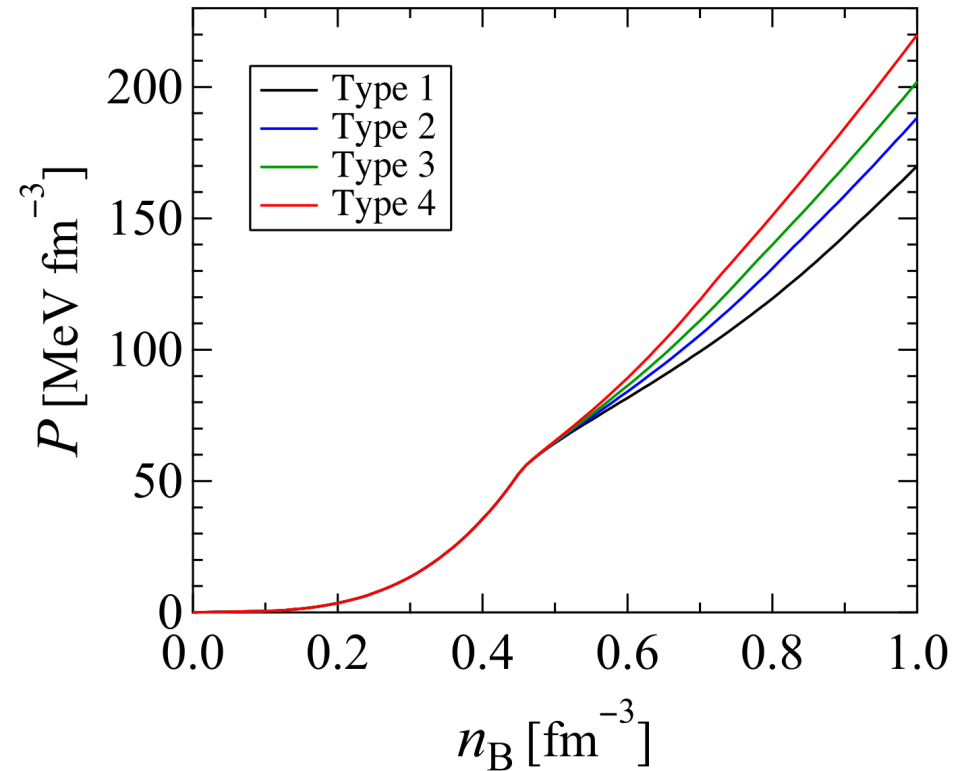
3-3: $\Lambda\Lambda$ 相互作用の odd state が与える影響

Triplet-odd channel に対する4種類の $\Lambda\Lambda$ 相互作用を用意

(斥力芯は変化させず、引力ポケットの深さを調整)

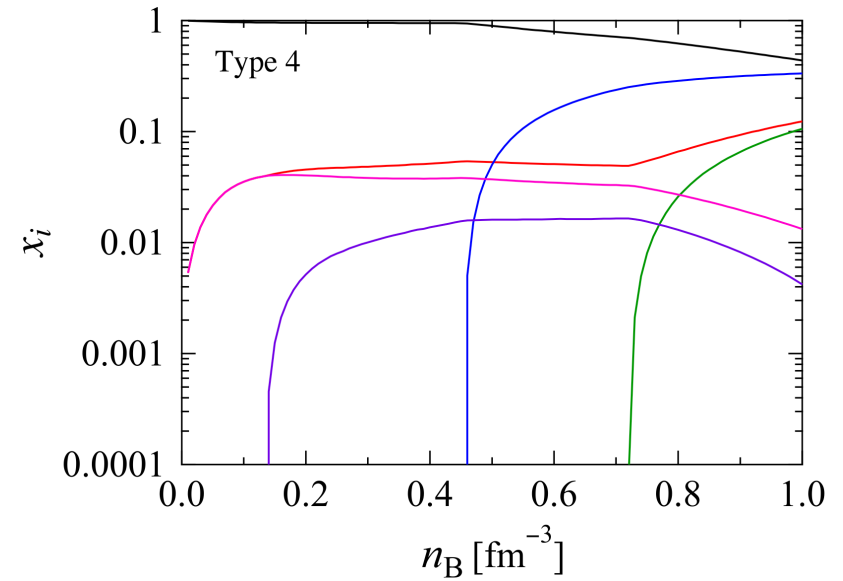
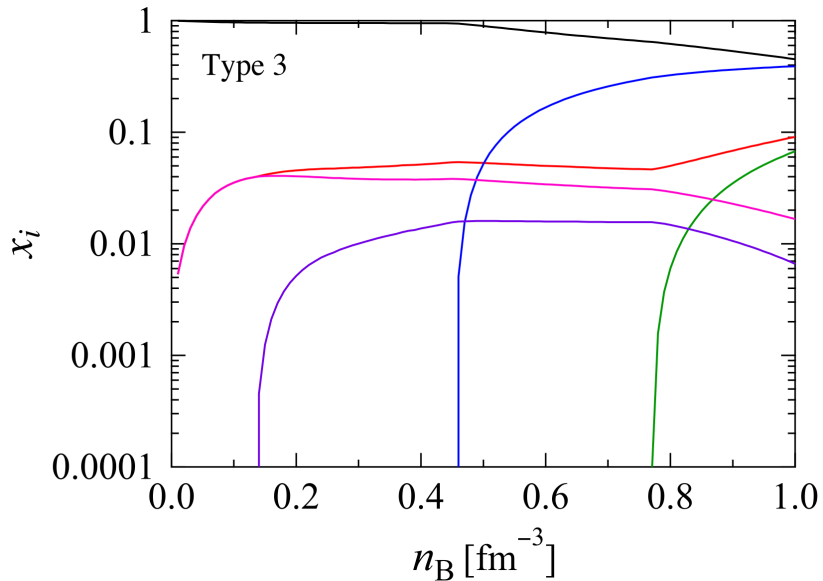
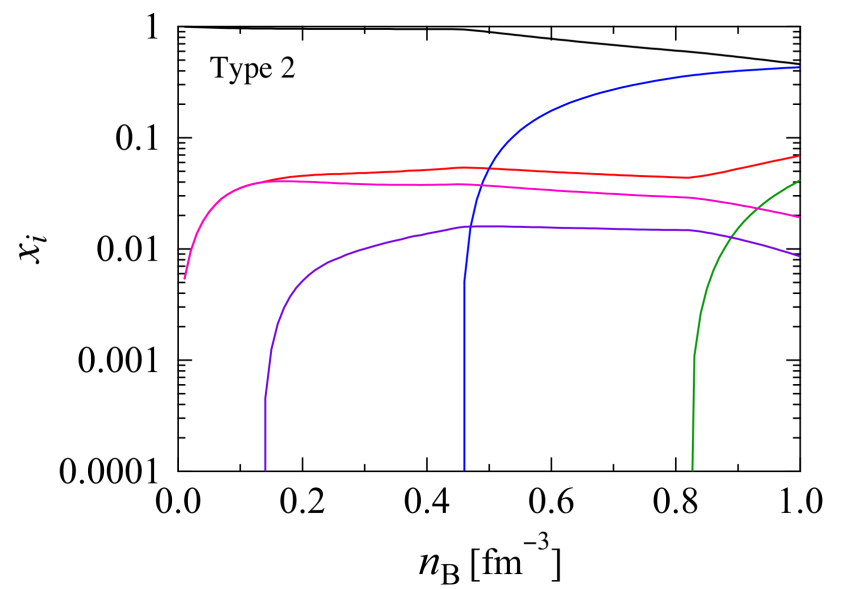
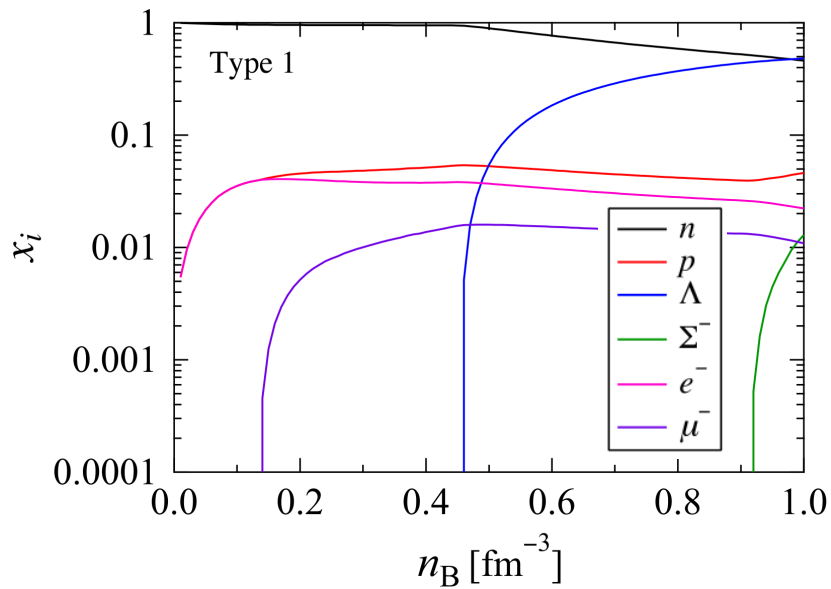


$\Lambda\Lambda$ ポテンシャル (Triplet-odd state)



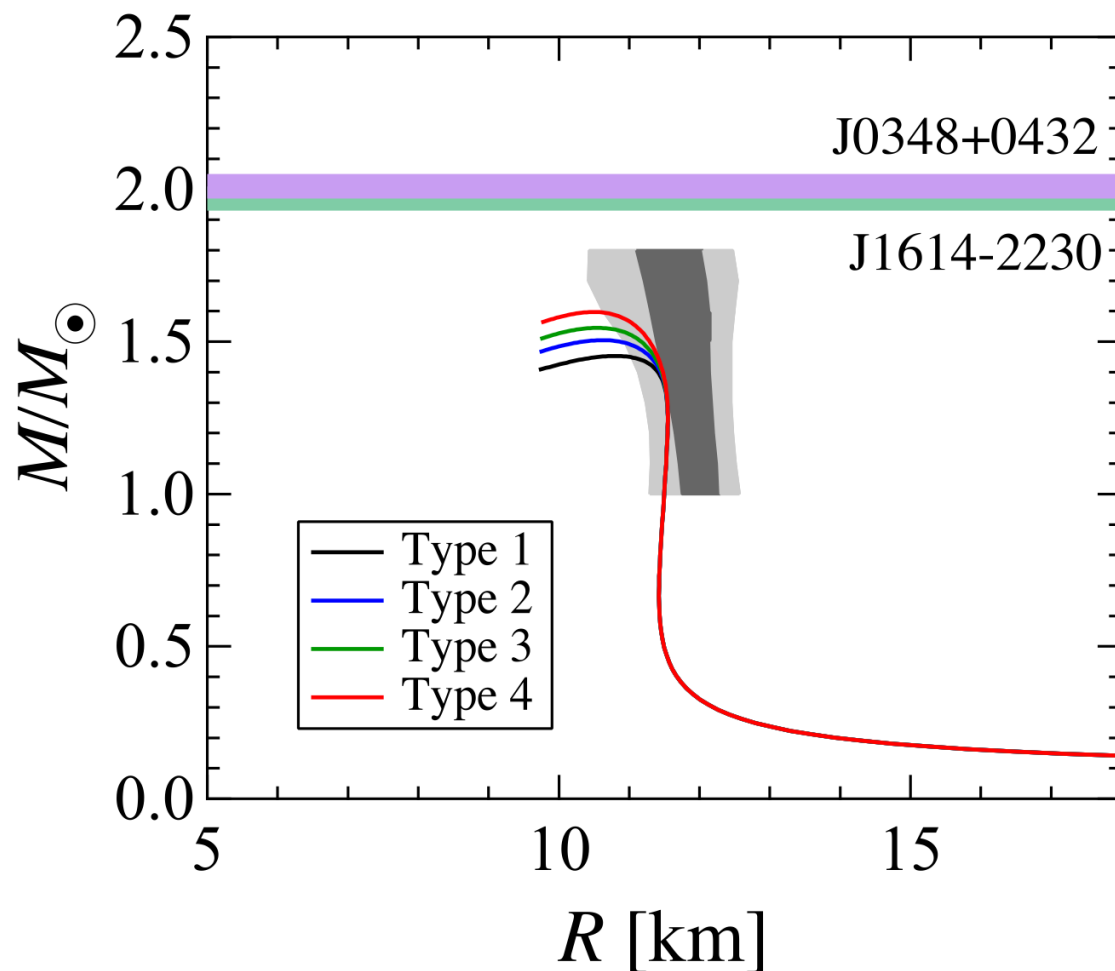
中性子星物質の状態方程式

中性子星内部の粒子混在度の変化



$\Lambda\Lambda$ 相互作用 odd stateの違いは、 Λ 混合の臨界密度には大きく寄与しない。
相互作用の斥力的寄与の増加に伴い、 Σ^- 混合の臨界密度は減少。

中性子星の質量と半径の関係

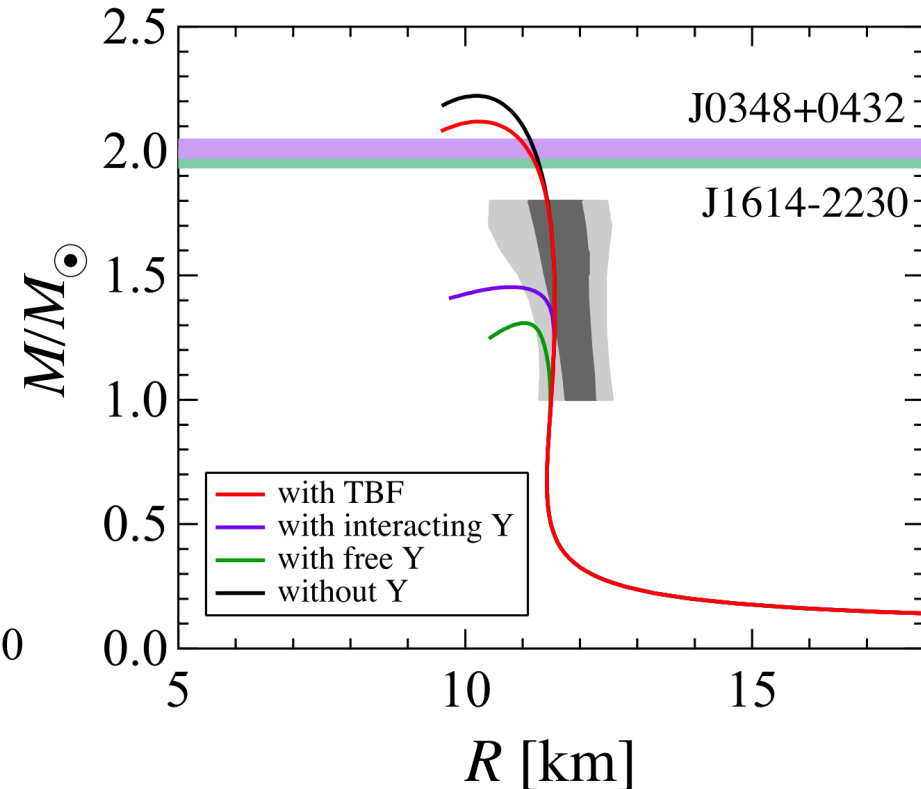
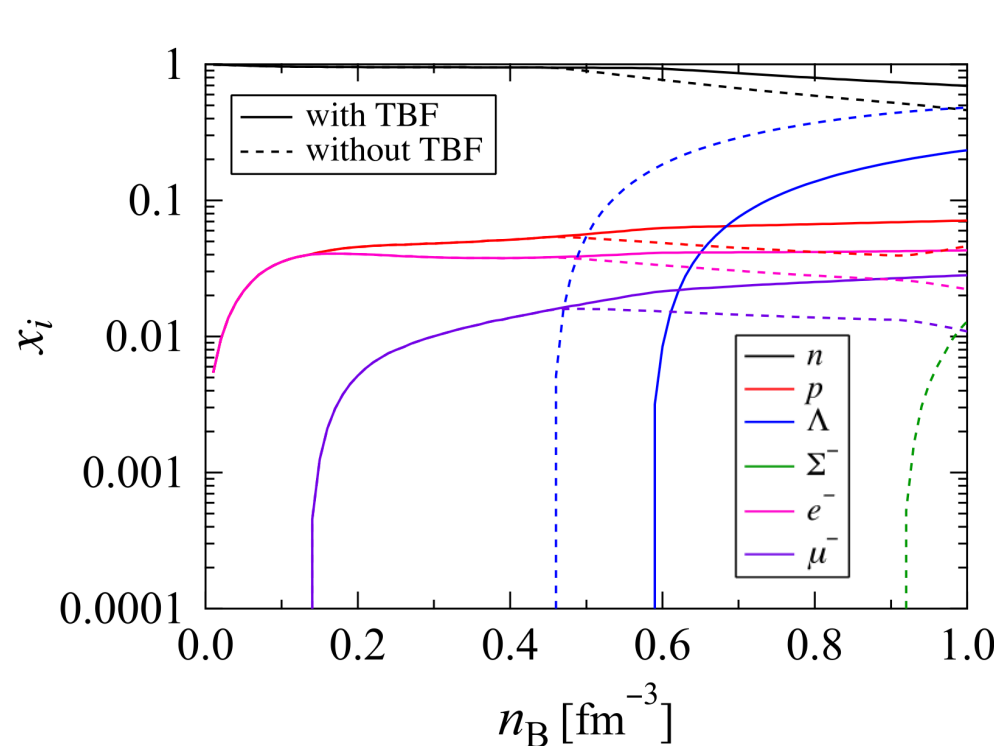


相互作用の斥力的寄与の増加に伴い、中性子星の最大質量も増加
 $1.45M_{\odot} \rightarrow 1.50M_{\odot} \rightarrow 1.55M_{\odot} \rightarrow 1.60M_{\odot}$ (最大で10%程度)

3-4: 3体バリオン間相互作用

今まで考慮してきた2体バリオン間相互作用に加えて、
3体バリオン間に働く斥力 (TBF) をeffectiveな2体力として考慮

Y. Yamamoto et al., PRC 90 (2014) 045805



Λ 混合の臨界密度 n_Λ^{th} : **0.59 fm⁻³**

中性子星の最大質量 : **2.12 $M_\odot$**

4: まとめ

- 一様核物質に対するクラスター変分法を拡張し、ハイペロン(Λ , Σ^-)混合を考慮した中性子星のEOSを作成した。
- Λ 粒子の相互作用に着目し、相互作用が中性子星の構造に与える影響を系統的に調べた。
- $N\Lambda$, $\Lambda\Lambda$ 相互作用の odd state は、中性子星の最大質量の10%程度に影響する。
- $\Lambda\Lambda$ 相互作用は Σ^- 混合の臨界密度に影響する。
- 観測(2倍の太陽質量の中性子星)と矛盾しないためには、2体バリオン間相互作用の斥力だけでは不十分(?)

今後の課題

- より現代的なハイペロン相互作用に基づくEOSの構築
- Λ ハイパー核に対する少数多体計算との系統的な研究
- 他のハイペロン(Σ^0 , Σ^+ , Ξ^- , Ξ^0)の考慮