

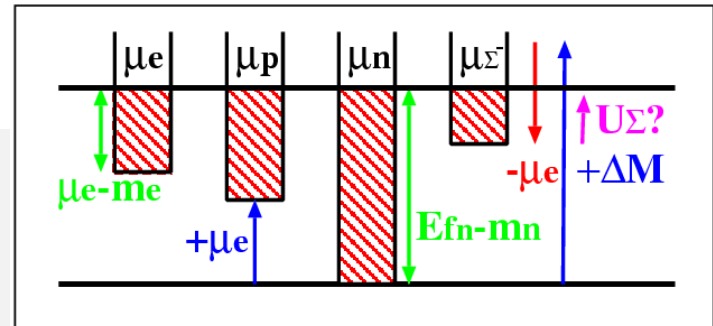
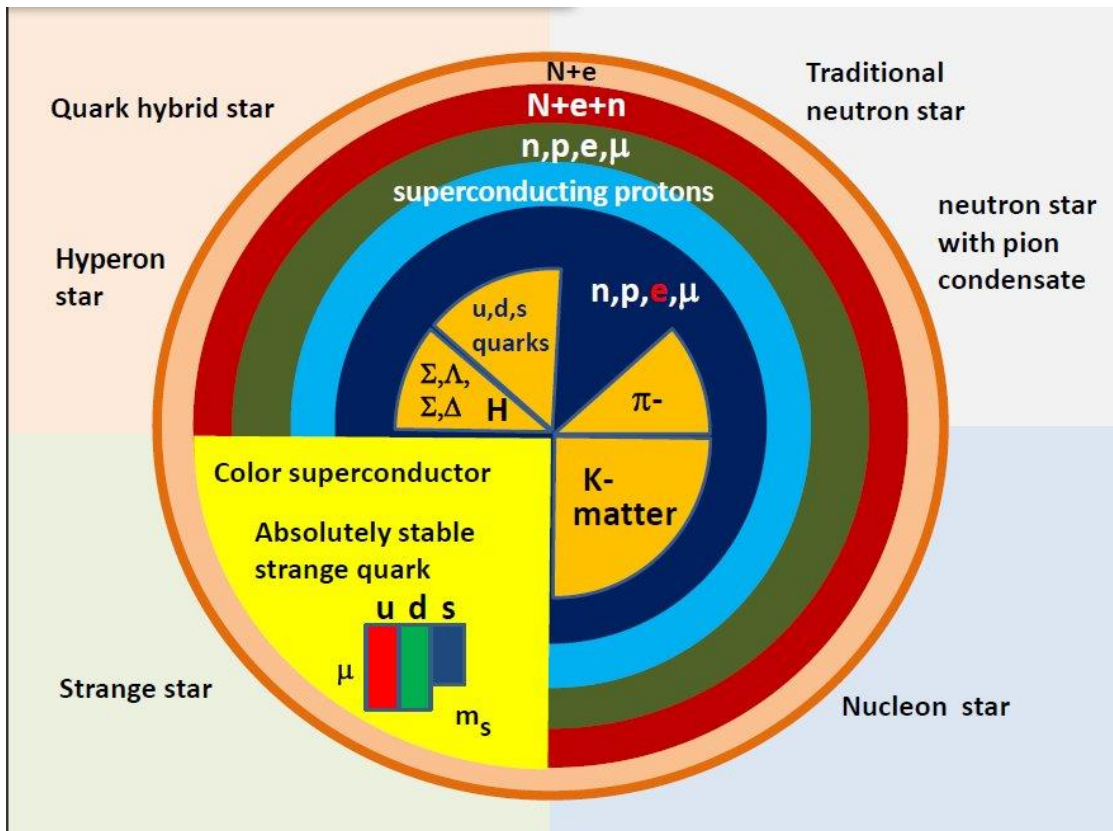
Σ 、三粒子のポテンシャルと 中性子星中での出現比率に ついて

大阪電気通信大学 椿原康介

共同研究者：大西明（京大基研）、原田融（大阪電通大）

Introduction

► Ambiguity in dense inner region of NS



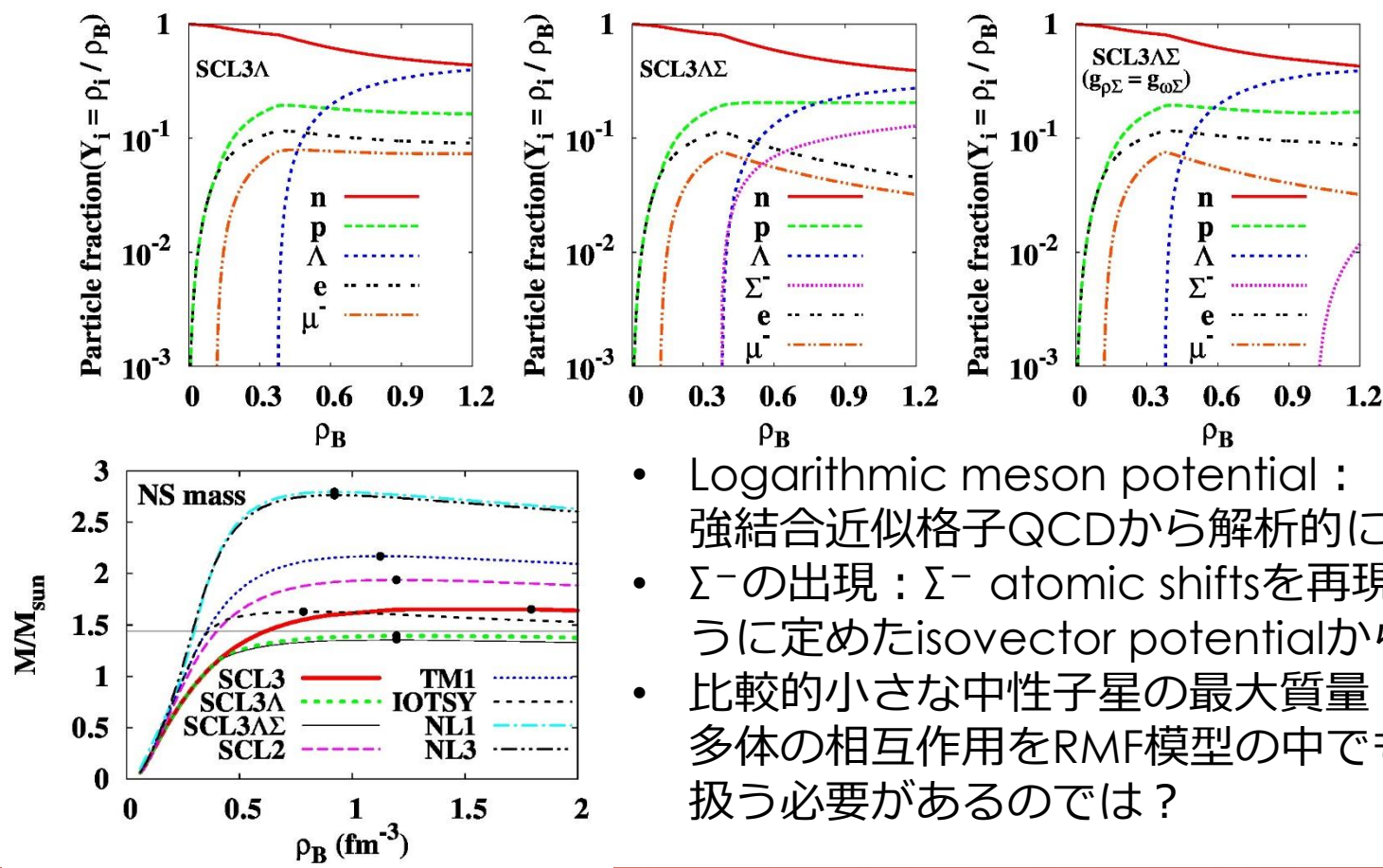
- 地上ではエキゾティクな粒子が安定に存在。
- ハイペロンの出現:
ハイペロンの感じるポテンシャルに依存するが、原子核などにハイペロンが束縛された状態を通す必要がある。
- 核物質・有限核の双方を定性的・定量的に取り扱える理論模型→RMF模型

Personal motivation

Tsubakihara and Ohnishi, PTP 117 (2007) 903.

Tsubakihara et al., PRC 81 (2010) 065206.

► Previous works on SCL3 RMF model



- Logarithmic meson potential :
強結合近似格子QCDから解析的に導出
- Σ^- の出現 : Σ^- atomic shiftsを再現するように定めたisovector potentialから実現
- 比較的小さな中性子星の最大質量 :
多体の相互作用をRMF模型の中でも取り扱う必要があるのでは？

Motivation

- ▶ 中性子星内部で Σ^- の存在が許されるか検証
 - ▶ 先に示したSCL3 RMF模型だけで起きることなのか確かめるため、他のRMF模型を用いてAtomic shiftのデータに基づき考察
- ▶ 引力的なポテンシャルを持つであろう Ξ^- との共存？
 - ▶ よく知られているWoods-Saxon 14MeVという結果を用いて、 Ξ^- まで考えた際に Σ^- の出現が本当に許されるかどうか？

Model description

- ▶ RMF Lagrangian w/ non-linear meson potentials

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_N &= \sum_{i \in N} \bar{\psi}_i (i \not{\partial} - M_i) \psi_i + \mathcal{L}_{\sigma\omega\rho} \\
 &+ \sum_{i \in N} \bar{\psi}_i [g_{\sigma i} \sigma - \gamma_\mu (g_{\omega i} \omega^\mu + g_{\rho i} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{R}^\mu)] \psi_i \\
 \mathcal{L}_{\sigma\omega\rho} &= \frac{1}{2} \partial_\mu \sigma \partial^\mu \sigma - \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 - V_\sigma(\sigma) \\
 &- \frac{1}{4} \omega_{\mu\nu} \omega^{\mu\nu} + \frac{m_\omega^2}{2} \omega_\mu \omega^\mu + V_\omega(\omega) \\
 &- \frac{1}{4} \mathbf{R}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{R}^{\mu\nu} + \frac{m_\rho^2}{2} \mathbf{R}_\mu \cdot \mathbf{R}^\mu,
 \end{aligned}$$

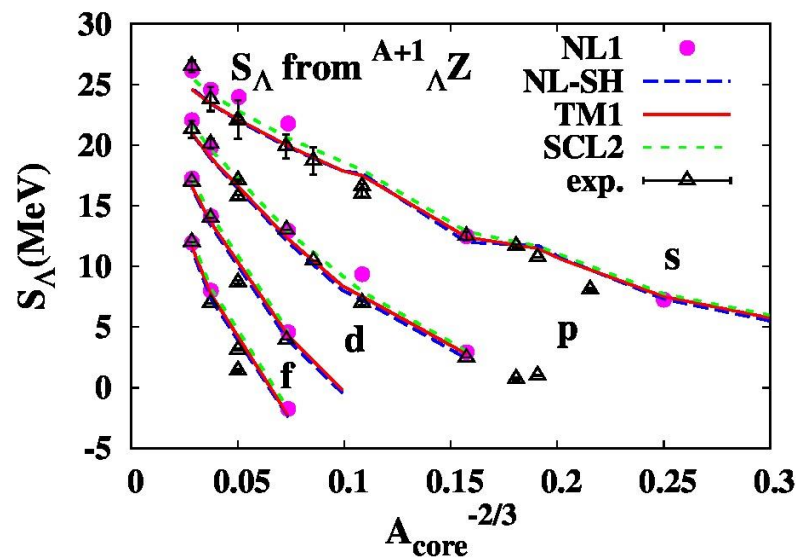
$$\begin{aligned}
 V_\sigma(\sigma) &= \frac{1}{3} c_{\sigma 3} \sigma^3 + \frac{1}{4} c_{\sigma 4} \sigma^4 \\
 V_\omega(\omega) &= \frac{1}{4} c_{\omega 4} (\omega_\nu \omega^\nu)^2
 \end{aligned}$$

$$\mathcal{L}_{\zeta\phi} = \frac{1}{2} \partial_\mu \zeta \partial^\mu \zeta - \frac{1}{2} m_\zeta^2 \zeta^2 - \frac{1}{4} \phi_{\mu\nu} \phi^{\mu\nu} + \frac{m_\phi^2}{2} \phi_\mu \phi^\mu$$

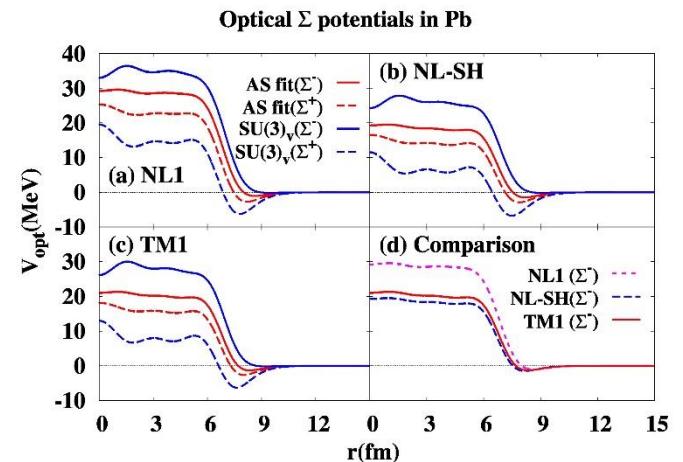
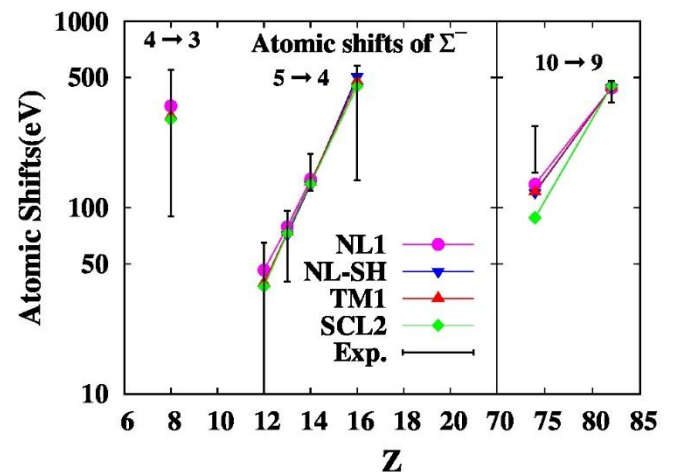
- 非線形な中間子間ポテンシャルを持つRMF模型として、核子部分はNL1、NL-SH、TM1などを用意
- そこは変えずに、中間子-ハイペロン間の結合をハイパー核などのデータを満たすように決定

Parameter Setting

▶ meson-hyperon coupling constants



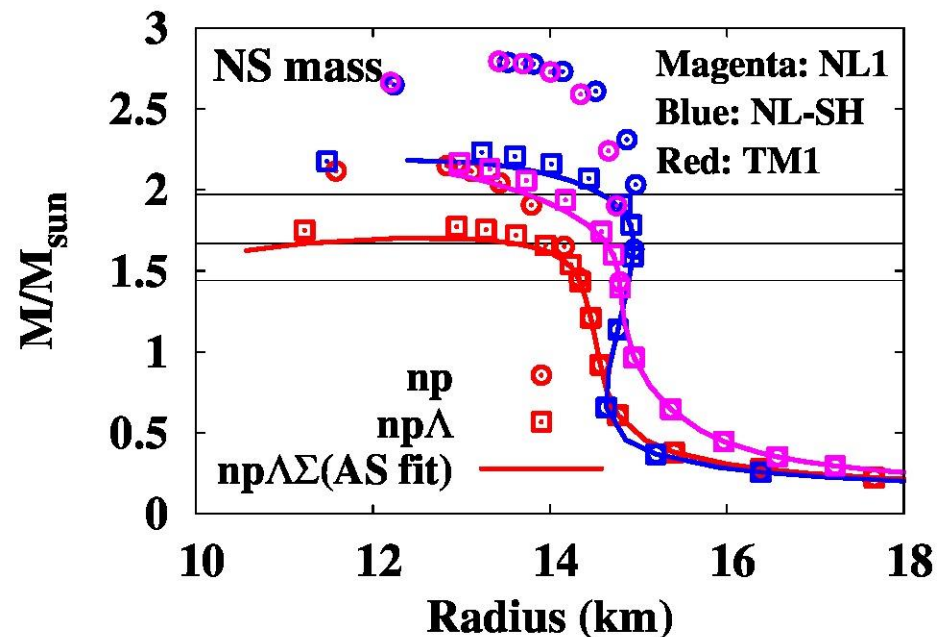
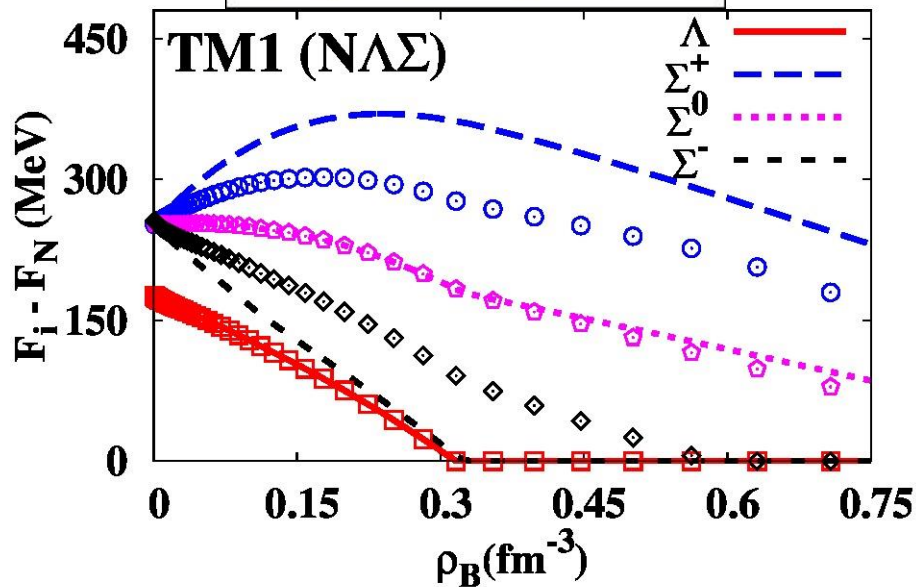
- $SU(3)_f$ 対称性から示唆される $g_{\rho\Sigma}$ よりもかなり小さいものが必要
→ 中性子星物質中で Σ^- が感じる斥力も弱くなる



Calculated NS-EOS

- Fermi energy F_Y measured from F_N and M-R curves

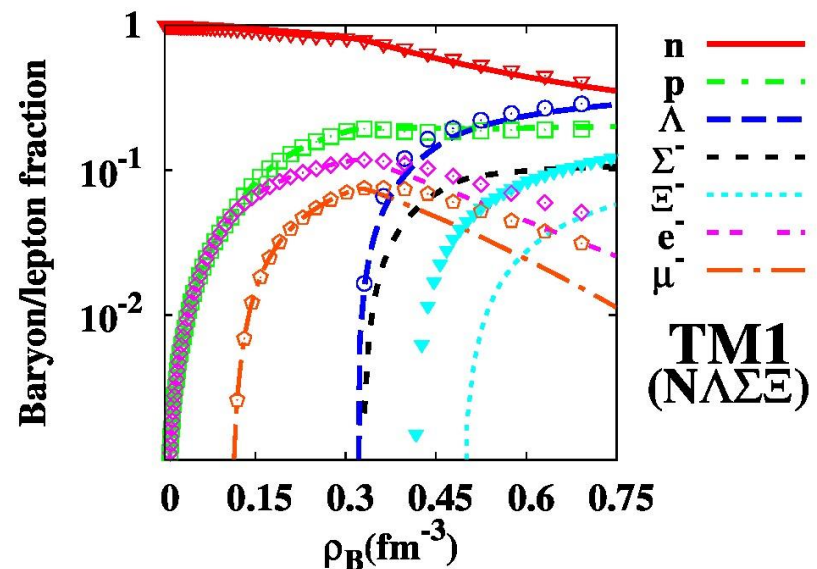
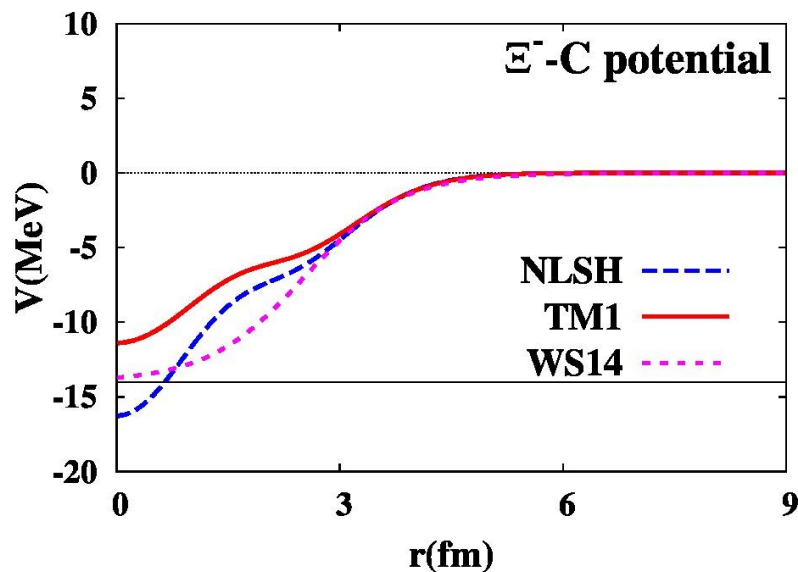
$$F_i \equiv \sqrt{(M_i^*)^2 + k_{F_i}^2} + V_i^0 - \mu_i$$



- Σ^- ハイペロンの F_Y が isovector 型斥力の減少し、より低い密度から Σ^- が発生
- 中性子星の最大質量にも数%程度影響を及ぼす

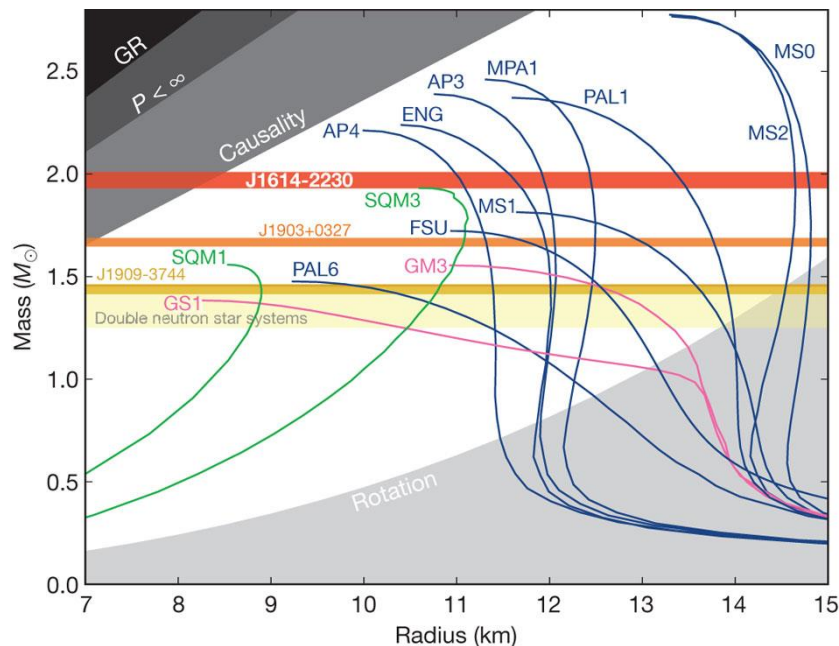
The effect of Ξ^- emergence

► Determined potentials and baryon fractions



- Cを芯核とする Ξ^- ハイパー核の中で、 Ξ^- が感じるポテンシャルとWS14とが表面付近で一致するように決定
- 先の弱い斥力を示す $g_{\rho\Sigma}$ を用いると、 Ξ^- が引力を感じる場合でも中性子星に登場し得る。

How to understand $2M_{\odot}$



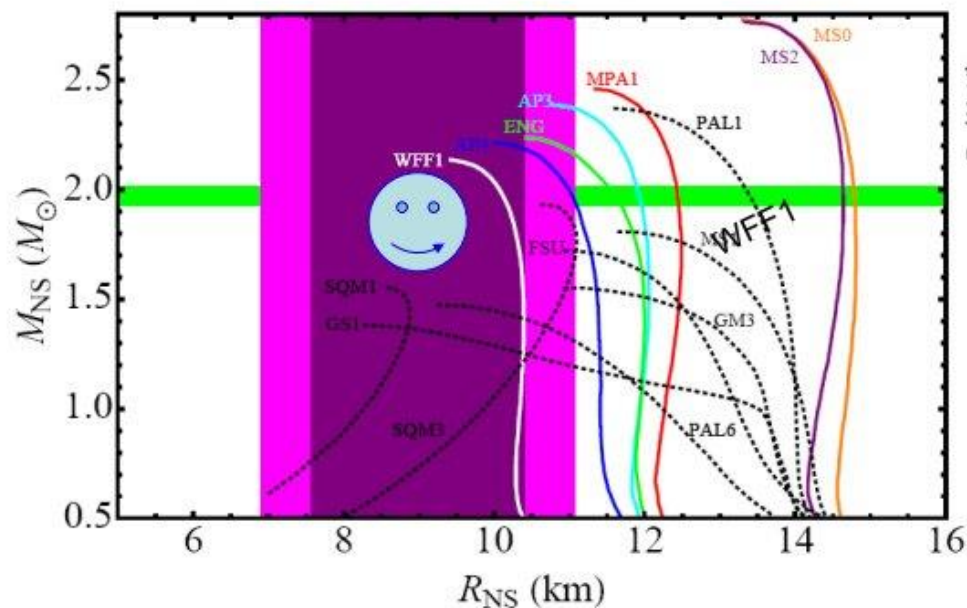
$2M_{\odot}$ という大きな課題：
 $2M_{\odot}$ を支えることが出来ている青線の状態方程式達も、ハイペロンを含むとどうなるかはわからない。
いまだに第一原理的な計算の上で、ハイペロンまでを含んだ計算が難しい。

“Most EOS curves involving exotic matter, such as kaon condensates or hyperons tend to predict maximum masses well below $2.0 M_{\odot}$ and are therefore ruled out”

Introduction

Rutledge+Guillot: $R_{\text{NS}} = 9.1^{+1.3}_{-1.5} \text{ km}$ (90%-confidence)

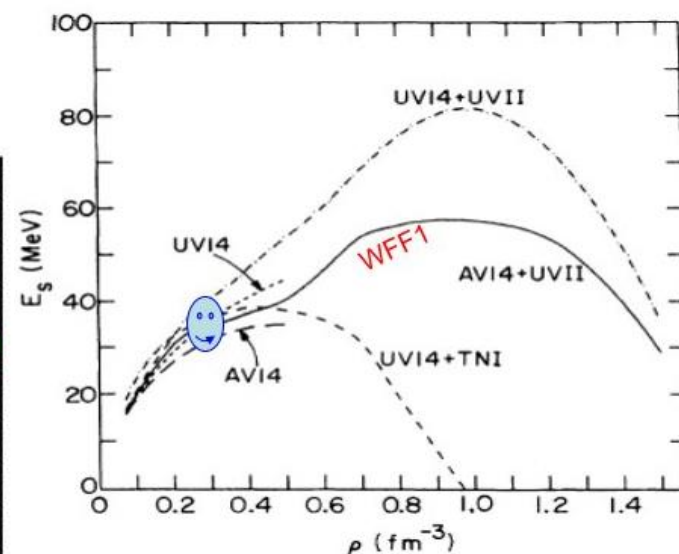
Independent of the masses of neutron stars



WFF1 has a soft EOS: $K_0=209 \text{ MeV}$, $E_{\text{sym}} \approx 26 \text{ MeV}$, $L \approx 60 \text{ MeV}$ (estimates)

WFF: Wiringa, Fiks and Fabrocini (1988), Phys. Rev. C 38, 1010

The L is not so different from those studies giving significantly larger radii, is the high density E_{sym} rather than L more important here?



距離や柱密度、解析手法自体の不定性はあるものの、高密度でこういう振舞いをするというのは単純に面白い

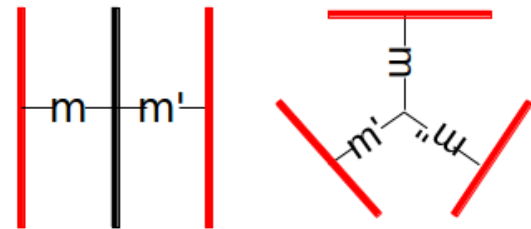
提案

- ▶ 今までのような状態方程式の振る舞いをRMF模型の中で再現することはできないか？
 - ▶ RMF模型では相互作用は与えられるものではなく作るもの
 - ▶ 有限核が計算できる→各ハイペロンを取扱い、定量的に模型中の相互作用を決定することが出来る。
- ▶ そのためにはどのようなRMF模型中の結合がひつようになってくるか？ → Multi-Body Couplings

n=3 coupling in RMF

- ▶ $n=B/2+m+D=3$ となるNLO項

$$\bar{\Psi}_B m m' \Psi_B, \quad m m' m''$$



- ▶ n の数は各項で参加するバリオン数に対応する
→短距離での三体力に対応

- ▶ Isoscalar型

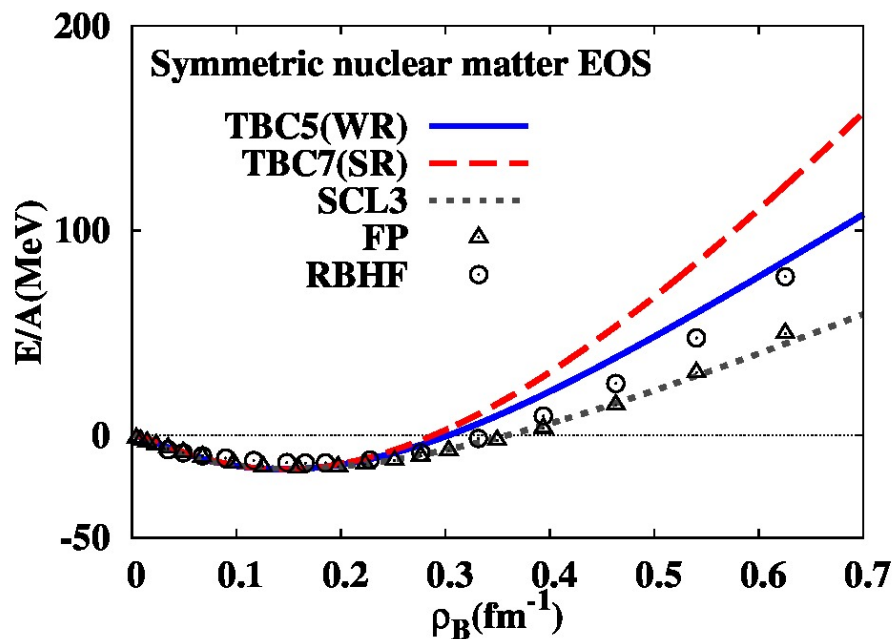
$$\bar{\Psi}_B (g_{\sigma\sigma B} \varphi_\sigma^2 / f_\pi) \Psi_B, \quad \bar{\Psi}_B (g_{\sigma\omega B} \varphi_\sigma \omega / f_\pi) \Psi_B, \quad \bar{\Psi}_B (g_{\omega\omega B} \omega^2 / f_\pi) \Psi_B, \quad \frac{C_{\sigma\omega 2}}{2} f_\pi \varphi_\sigma \omega^2$$

- ▶ Isovector型

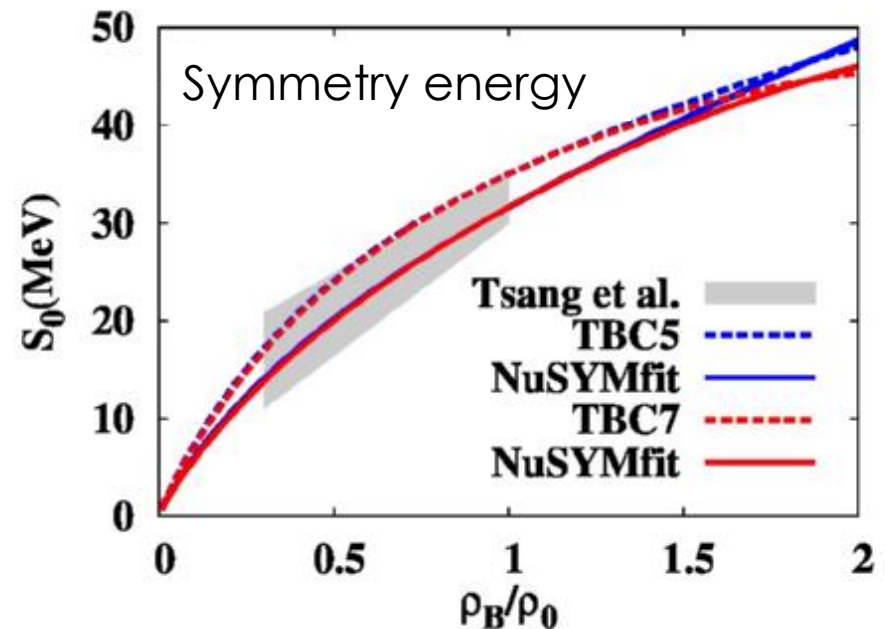
$$\bar{\Psi}_B (g_{\rho\sigma B} \rho \varphi_\sigma / f_\pi) \Psi_B, \quad \bar{\Psi}_B (g_{\omega\rho B} \omega \rho / f_\pi) \Psi_B, \quad \bar{\Psi}_B (g_{\rho\rho B} \rho^2 / f_\pi) \Psi_B, \quad \frac{C_{\sigma\rho 2}}{2} f_\pi \varphi_\sigma \rho^2$$

Symmetric/Pure neutron matter

- ▶ 高密度での振る舞いについて：三体結合では不足？

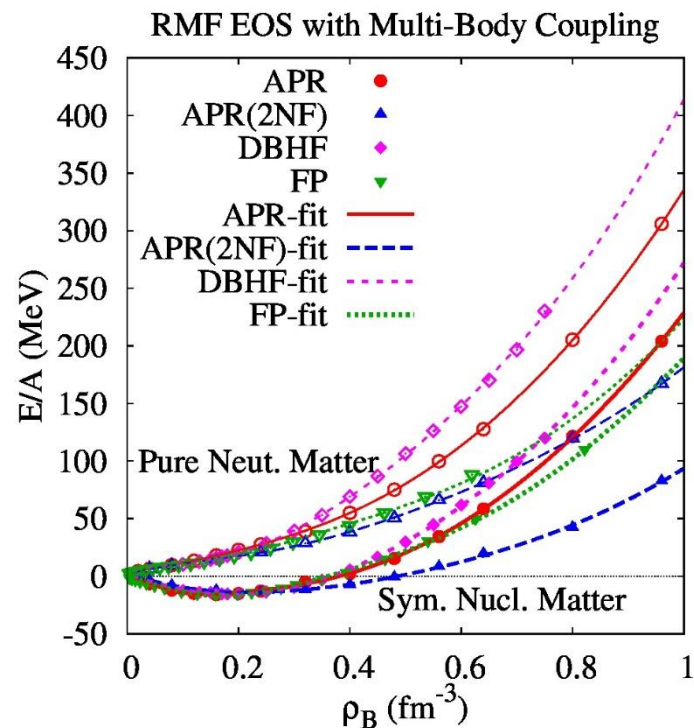
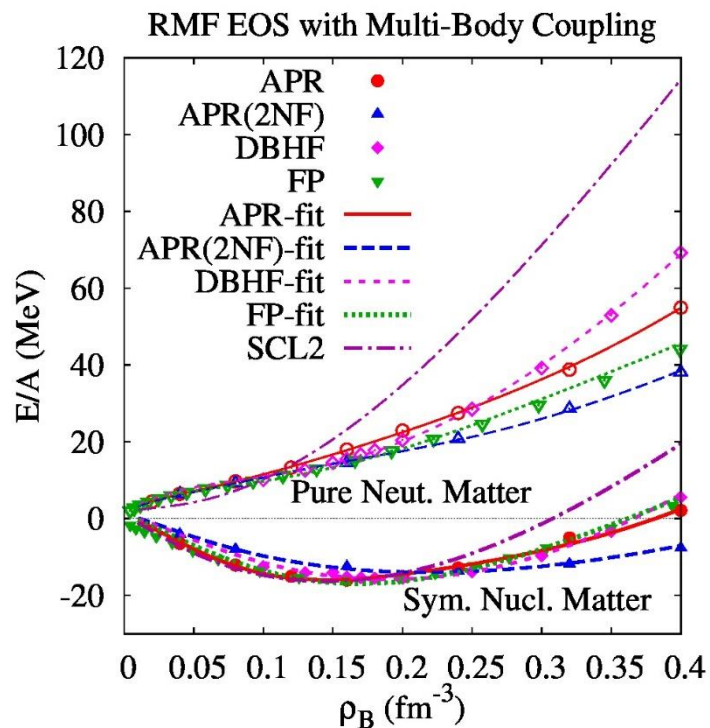


$K \sim 300 \text{ MeV}$ としても、高密度核物質においていまだに線形的上昇



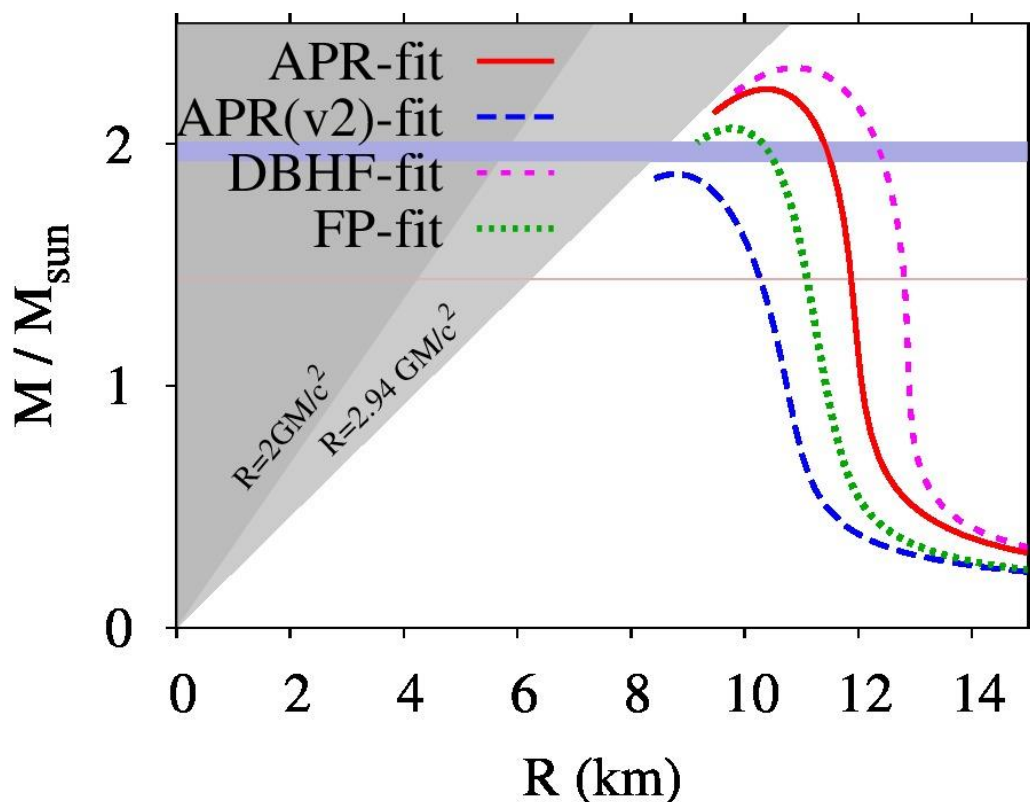
IV $n=3$ coupling: 線形ではなく弧を描くように対称エネルギーが変化
→再上昇するには何が必要か？

Results (Detail: Ohnishi, 3/14, $n_{\max}=4$)



- 高密度状態におけるParabolicな曲線： $n_{\max}=4$ 以上の相関が必要？

Results



- APR等の第一原理的計算で導かれる対称核物質・中性子物質状態方程式から出発して、中性子星の状態方程式を解くことができる。
- Λ (Σ) ハイペロンの導入：
有限核が計算できるので、将来、定量的に盛り込むことができるかと期待。

Summary

- ▶ 中性子星中での各ハイペロンの存在比率→最大質量などに影響
 - ▶ Σ^- atomic shiftを再現するようなRMF模型→調べた限りでは全てのRMF模型において非常に弱いisovector potentialを示し、結果として Σ^- の出現が早まり、中性子星の最大質量にも微妙だが変化をもたらす。
 - ▶ Ξ^- の効果：核中で引力を示す様な場合でも、 Σ^- の方が先に現れる傾向
- ▶ RMF模型による他の状態方程式の再現 → ハイパー核などを通じて各ハイペロンの効果を取り入れられるのでは
 - ▶ 高密度で状態方程式は線形な立ち上がりを見せ、 $n=4$ 以上の高次のMBC項が必要となるが、十分な再現性を見せる (Ohnishi, 3/14)
- ▶ 直近の課題：有限核の計算から、パラメータの微調整、及びハイパー核などの計算をまとめる必要性



Thank you for
listening.

THAT'S ALL