

3体力を含む相対論的平均場理論による 中性子星物質状態方程式

京大基研 大西 明

基研研究会

「ハドロン物質の諸相と状態方程式－中性子星の観測に照らして－」

Aug.30-Sep.1, 2012.

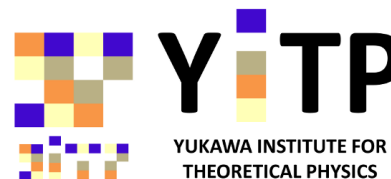
- Introdution

新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」

- ハイペロンを含む状態方程式と重い中性子星

- 3体力を含む相対論的平均場理論 (Progress Report)

- Summary

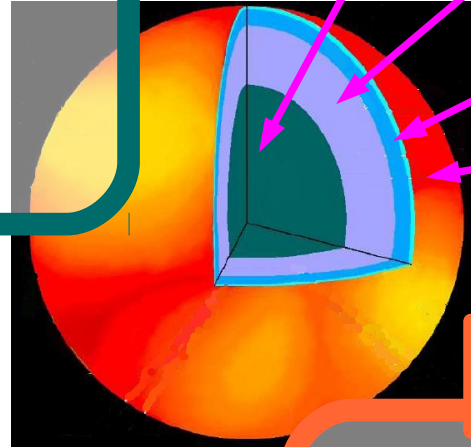


実験と観測で解き明かす中性子星の核物質

高密度領域

ハイパー核、K 中間子核、
YN, YY 相互作用、
有効相互作用、
(重イオン衝突)、

J-PARC



Hyperons, mesons, quarks

Asym. nuclear matter
+elec.+ μ

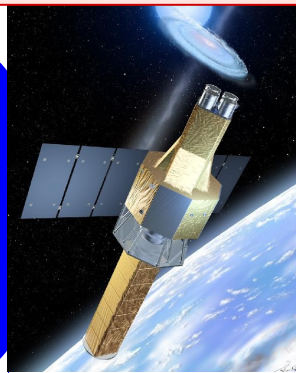
Nuclei+neutron gas+elec.

Nuclei + elec.

低密度領域

対称エネルギー、
対相関ギャップ、
BEC-BEC cross over、
冷却原子系とのつながり、

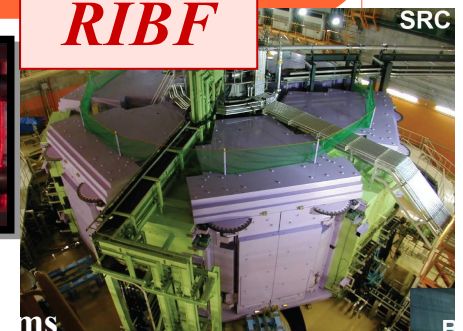
ASTRO-H



天体現象

半径、質量、
温度(時間依存性)、
星震、パスタ、

RIBF

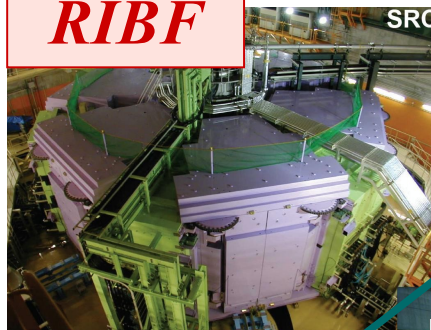


中性子星物質状態方程式

対称エネルギーの
密度依存性

$$L = 3\rho \frac{dS}{d\rho} = \frac{3}{\rho} P(\rho = \rho_0)$$

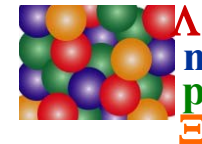
RIBF



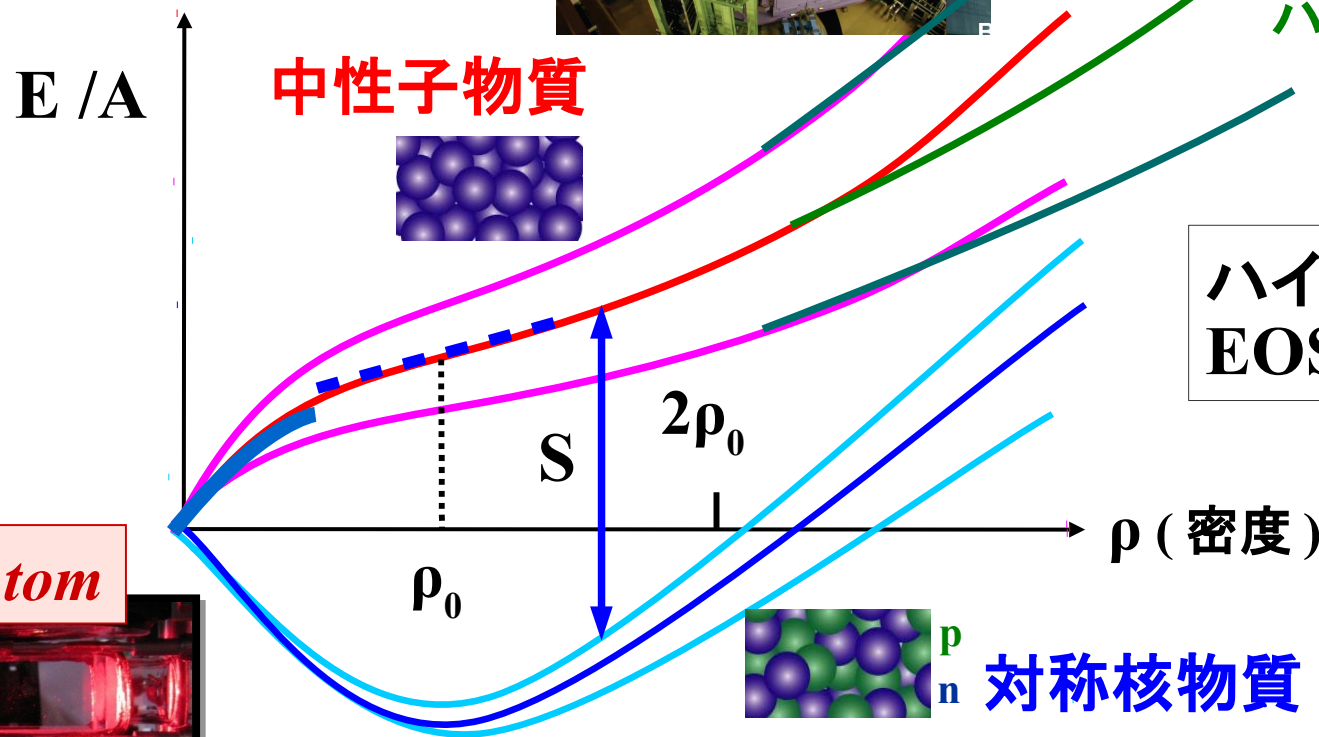
J-PARC



ハイペロン物質



ハイペロンによる
EOS 軟化



Cold Atom

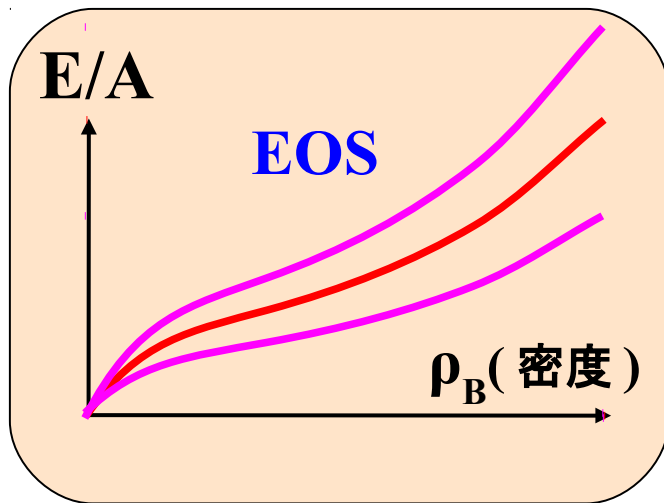


希薄中性子物質
～ユニタリー気体

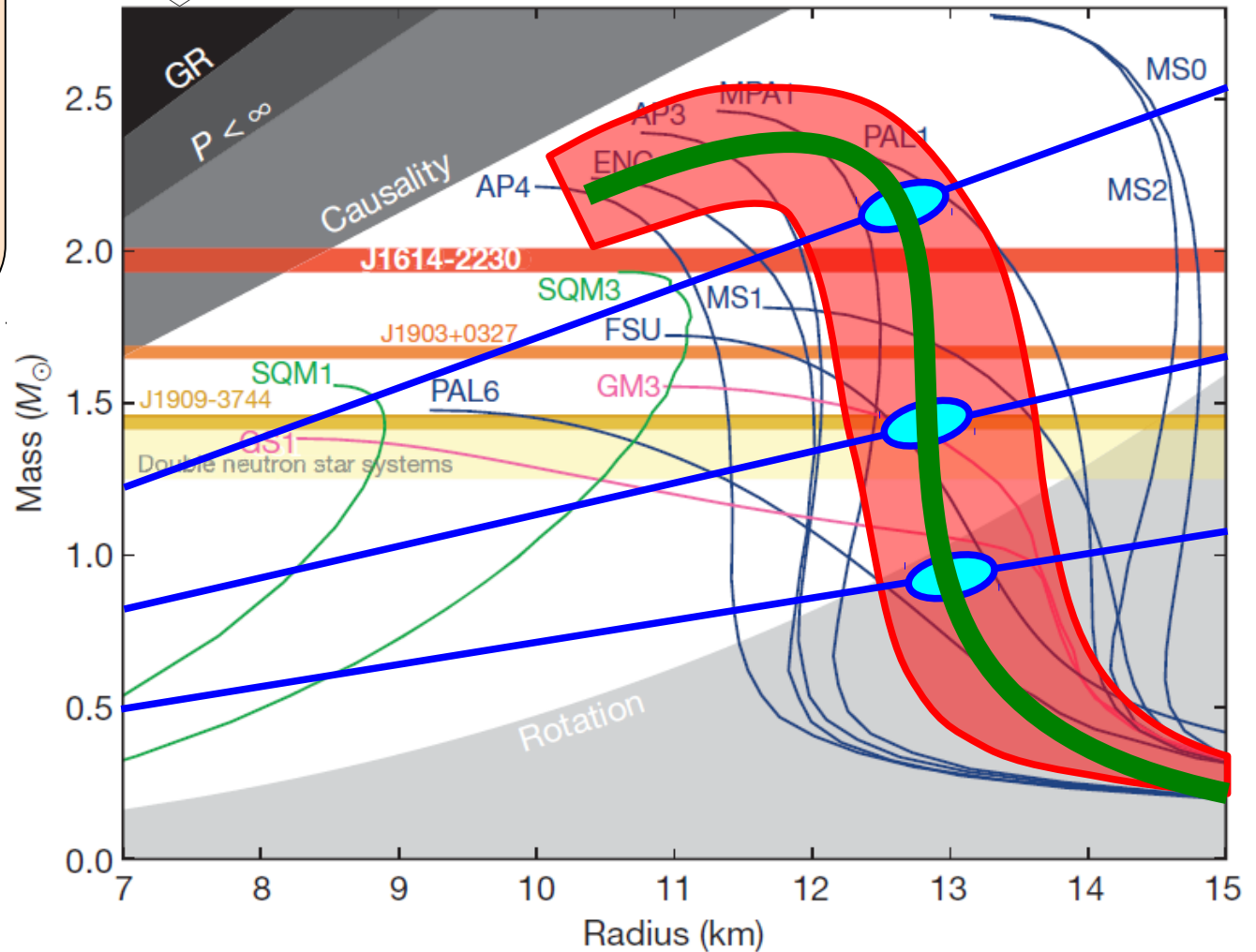
$$E^{Unitary} = \xi E^{Free}$$

$$\xi \simeq 0.4 \text{ (Bertsch parameter)}$$

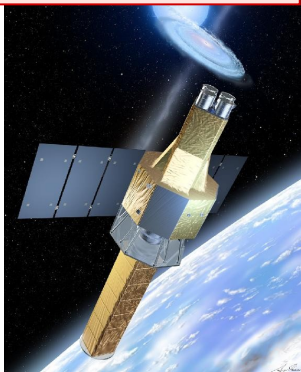
中性子星の質量と半径



静水圧平衡 (TOV 方程式)



ASTRO-H



Red shift (line) から
M/R を決定

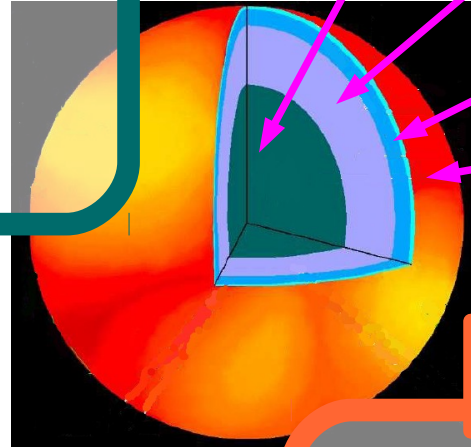
Demorest et al., Nature 467 (2010) 1081 (Oct.28, 2010).

中性子星と核物質の理論研究 (理論計画班)

高密度領域

原田 (Prod.)、
木村 (Structure)、
土手 (Kaon Nucl.)

J-PARC



Hyperons, mesons, quarks

Asym. nuclear matter
+elec.+ μ

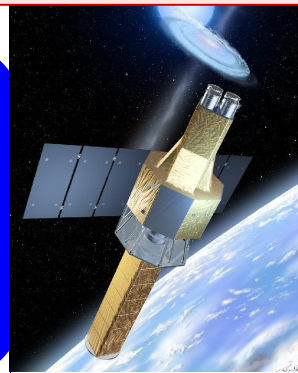
Nuclei+neutron gas+elec.

Nuclei + elec.

低密度領域

中田 (Sym.E)、
松尾 (EOS)、
小野 (HIC)、

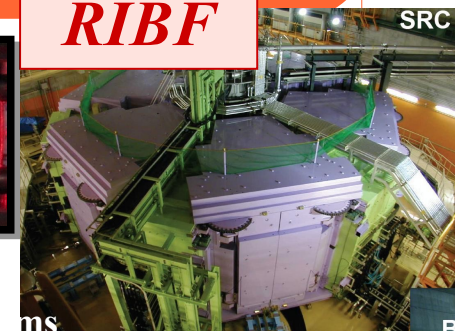
ASTRO-H



天体現象

飯田 (Phen.)、
巽 (Quark)、
中里 (Pasta)

RIBF



連携: 国広、西崎、親松、丸山、阿武木、大橋、柴崎、中務 (C)

高密度物質状態方程式と 中性子星最大質量

$1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$ Neutron Star

■ 重い中性子星 (2 倍の太陽質量) の観測

Demorest et al., Nature 467 (2010) 1081 (Oct.28, 2010).

PSR J1614-2230 (NS-WD binary), $1.97 \pm 0.04 M_{\text{sun}}$

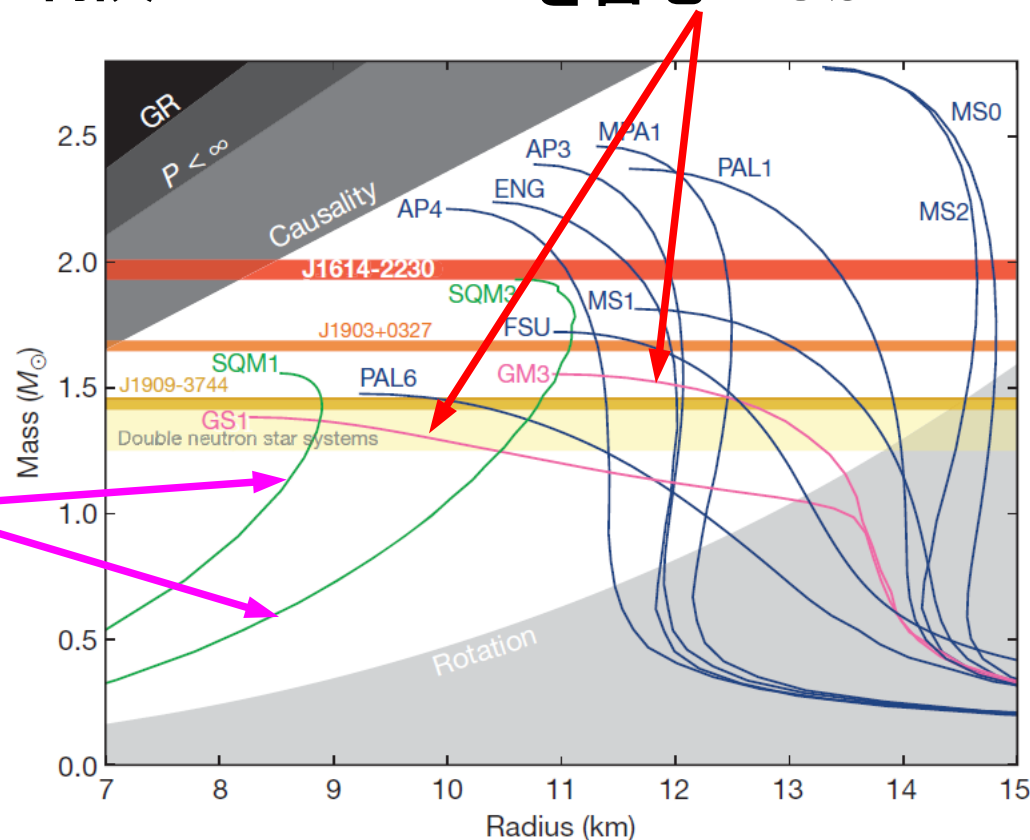
- 一般相対性理論 (Shapiro delay) に基づく質量決定
- 幸運な公転面の向き + 美しい観測結果

■ 高密度状態方程式 (EOS) に強い制限

- Strange Hadron
(ハイペロン・K 中間子)
凝縮を含む EOS は棄却 (?)
- クォーク物質でも
相互作用に制限

Strange Hadron
を含む EOS

クォーク物質
の EOS



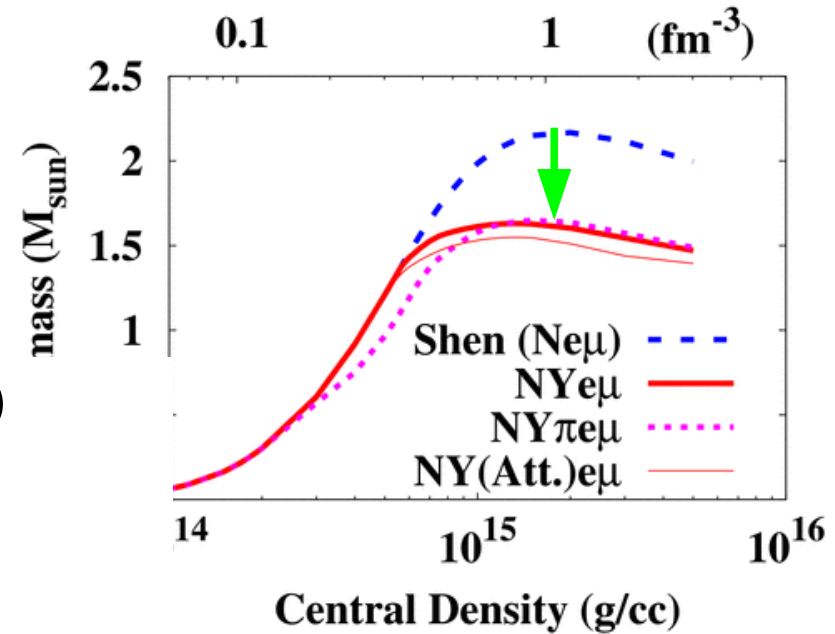
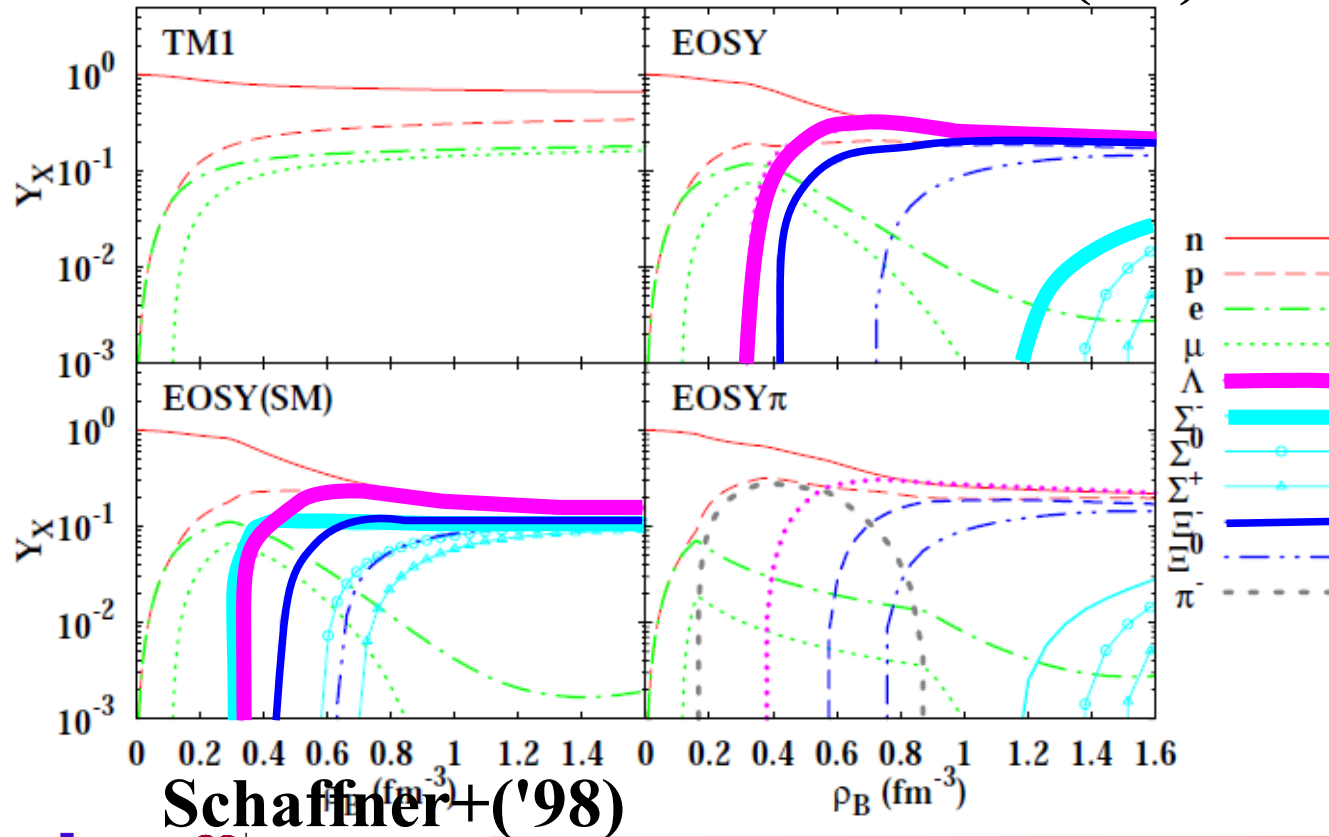
ハイペロンを含むRMF の例(1)

Ishizuka, AO, Tsubakihara, Sumiyoshi, Yamada, J. Phys. G35(08),085201

■ Hyperon Effect is DRASTIC

- $M_{\text{max}} = 2.1 M_{\odot} \rightarrow 1.56 M_{\odot}$
- Composition $Y_{\Lambda} \sim Y_n$
- Large fraction of Ξ

Neutron Star Matter **Ishizuka+('08)**



c.f. H. Shen+('09)
 $\rightarrow n, p, \Lambda$ EOS

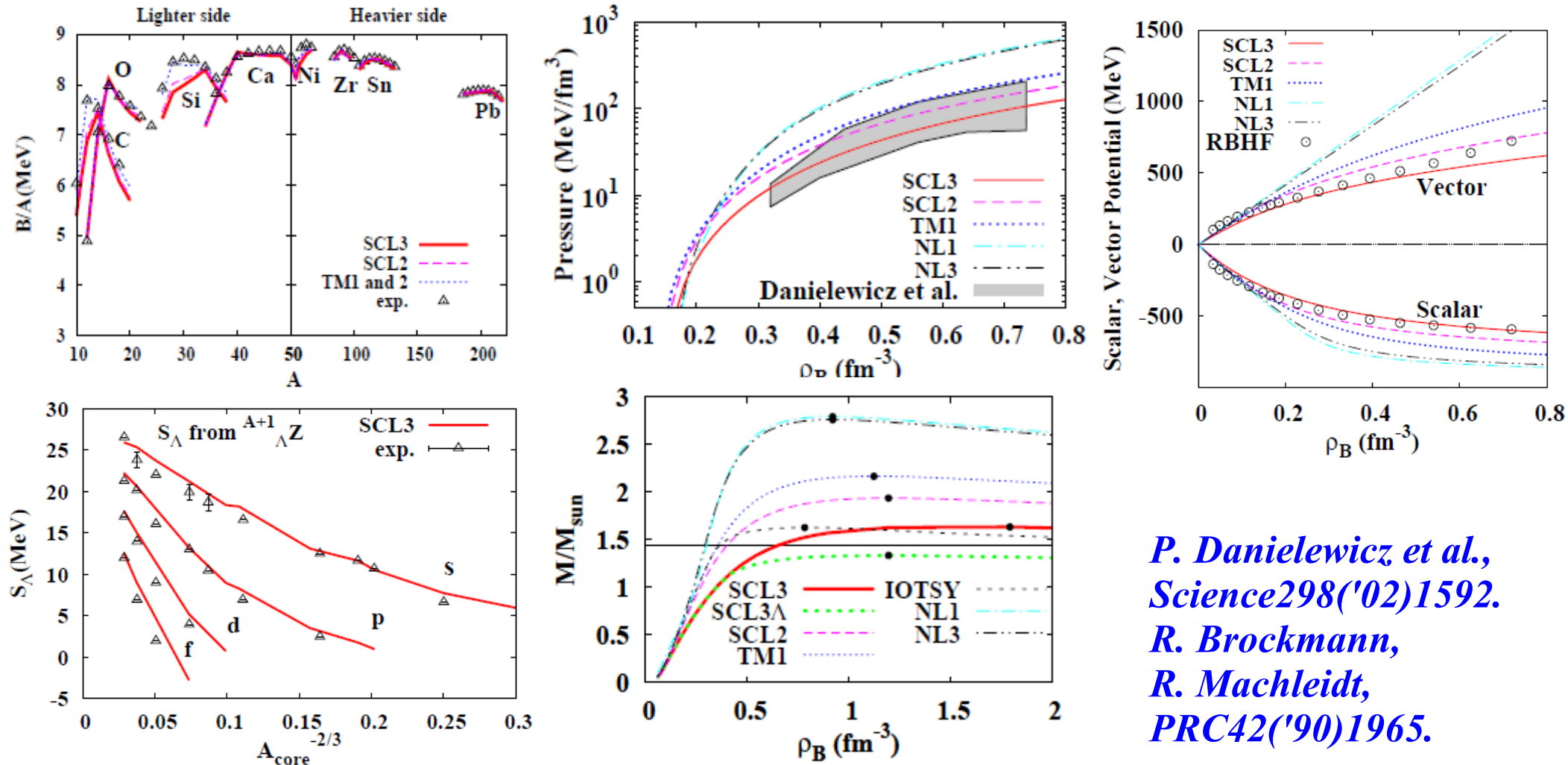
Schaffner+('98)

ハイペロンを含むRMFの例(2)

Fit as many as known observables

K. Tsubakihara, H. Maekawa, H. Matsumiya, AO, PRC81('10)065206.

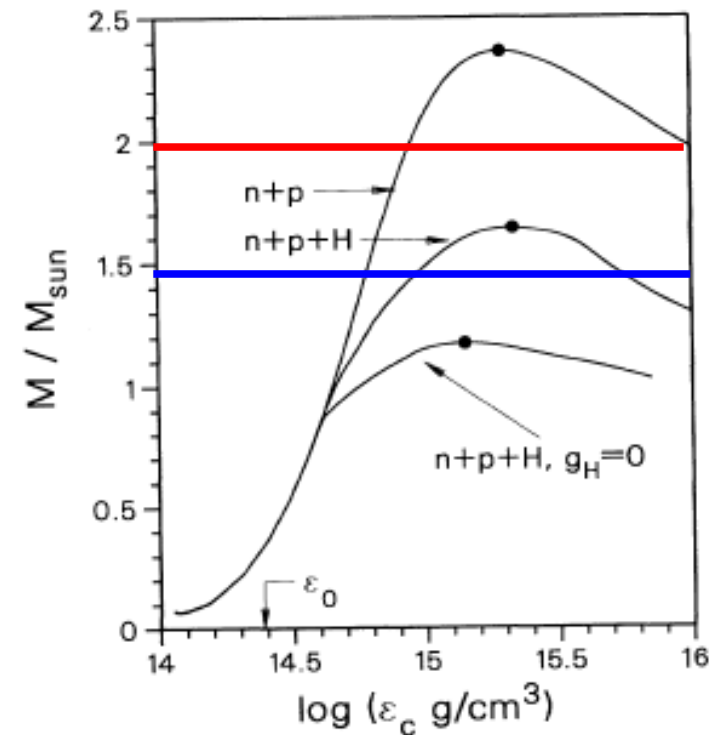
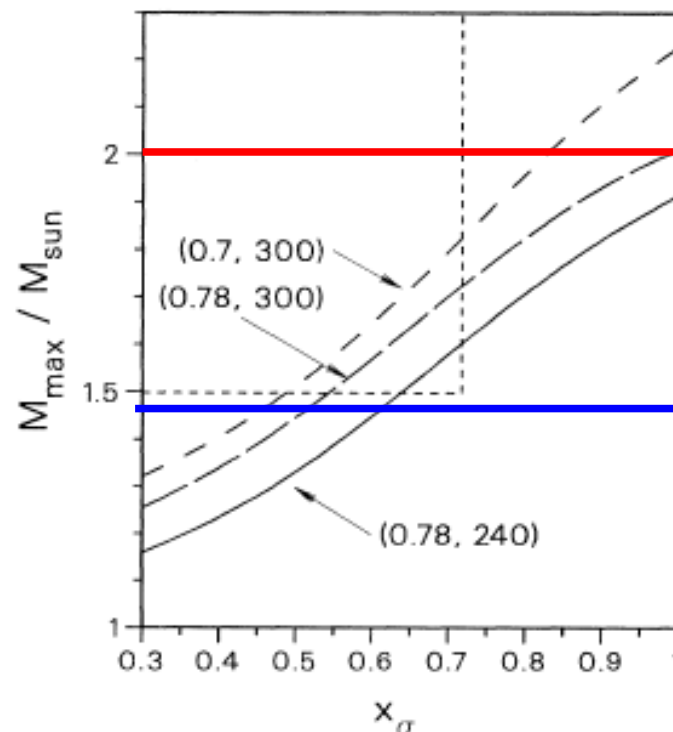
EOS, Nuclear B.E., High density EOS from HIC, Vector potential in DBHF, Hypernuclear Separation Energy, Neutron Star, ...



*P. Danielewicz et al.,
Science 298('02)1592.
R. Brockmann,
R. Machleidt,
PRC 42('90)1965.*

ハイペロンと重い中性子星

- 中性子星における One of the Two Serious Problems (高塚)
- 「柔らかい EOS は否定されたが、exotic な構成粒子が否定されたわけではない。」(Lattimer)
 - 否定されたハイペロン・K 中間子を含む EOS
= 相対論的平均場理論 (RMF) において結合定数をほぼ SU(6) にしたがって選んだもの ($g_{\sigma\Lambda} / g_{\sigma N} \sim 2/3$)

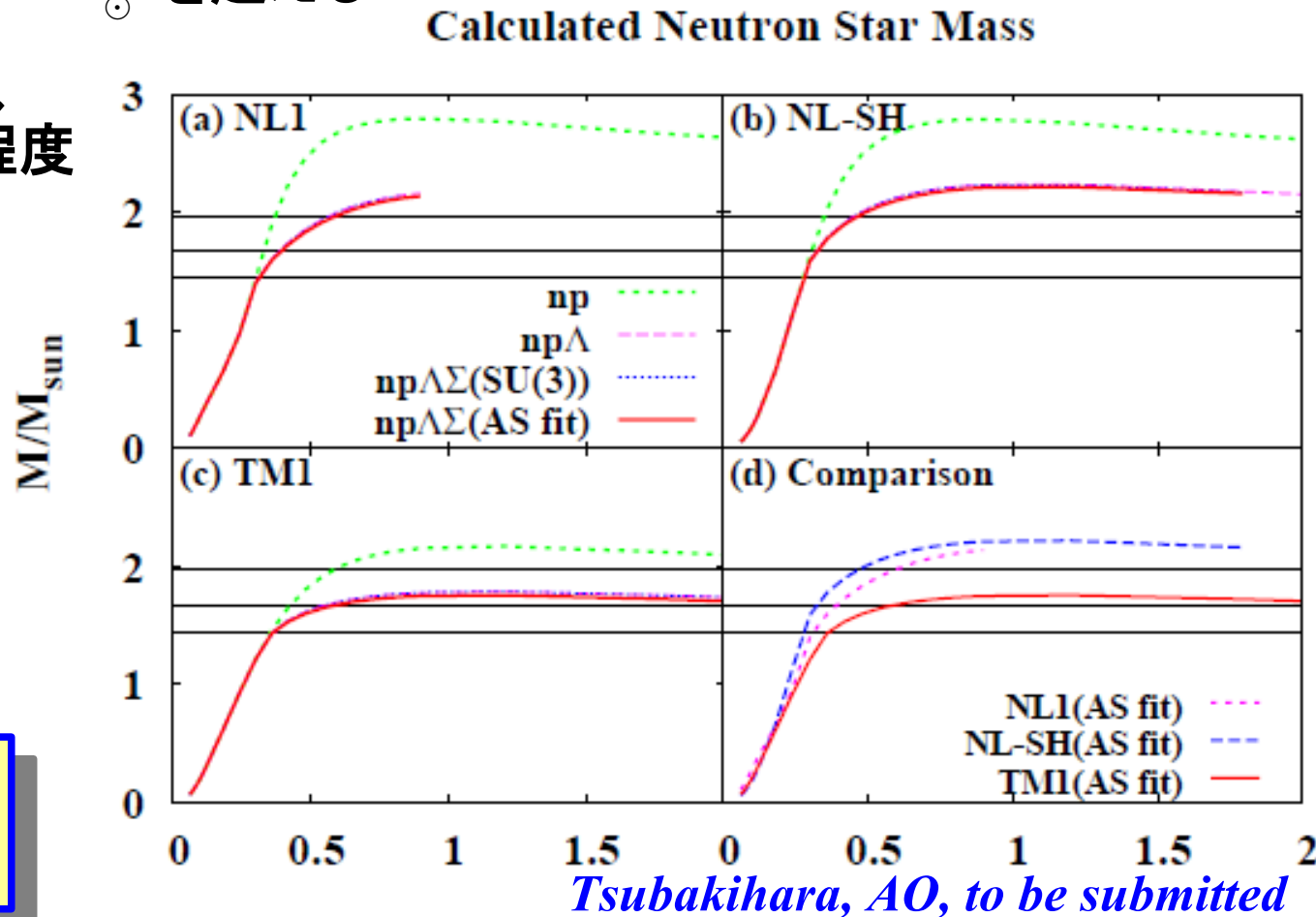


N.K.Glendenning, S.A.Moszkowski, PRL67('91)2414

ハイペロンと重い中性子星

■ ハイペロンを含み、重い中性子星を支える RMF

- ハイパー核情報を尊重: Λ の一粒子エネルギー、ダブルハイパー核の相互作用エネルギー、 Σ -原子の atomic shift
- NL1, NL-SH 等の RMF パラメーターではハイペロンを含んでも中性子星最大質量は $2 M_{\odot}$ を越える！
- TM1 を基にした場合、最大質量は $1.7 M_{\odot}$ 程度



その違いは？

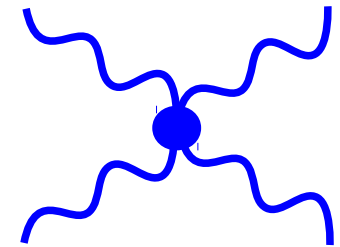
→ *meson self-energy*

Tsubakihara, AO, to be submitted

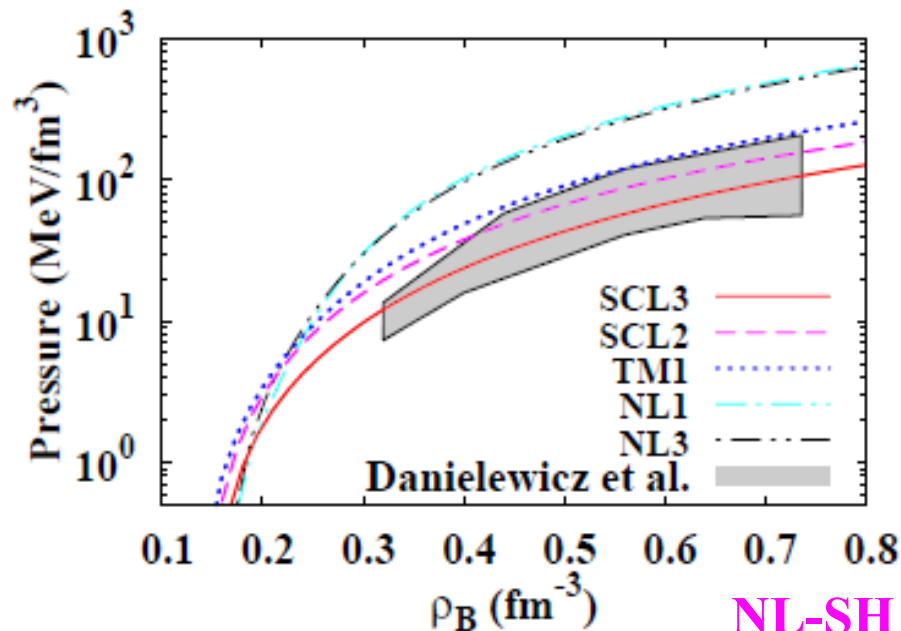
Meson self-energy 効果

■ ベクトル中間子の自己エネルギー項

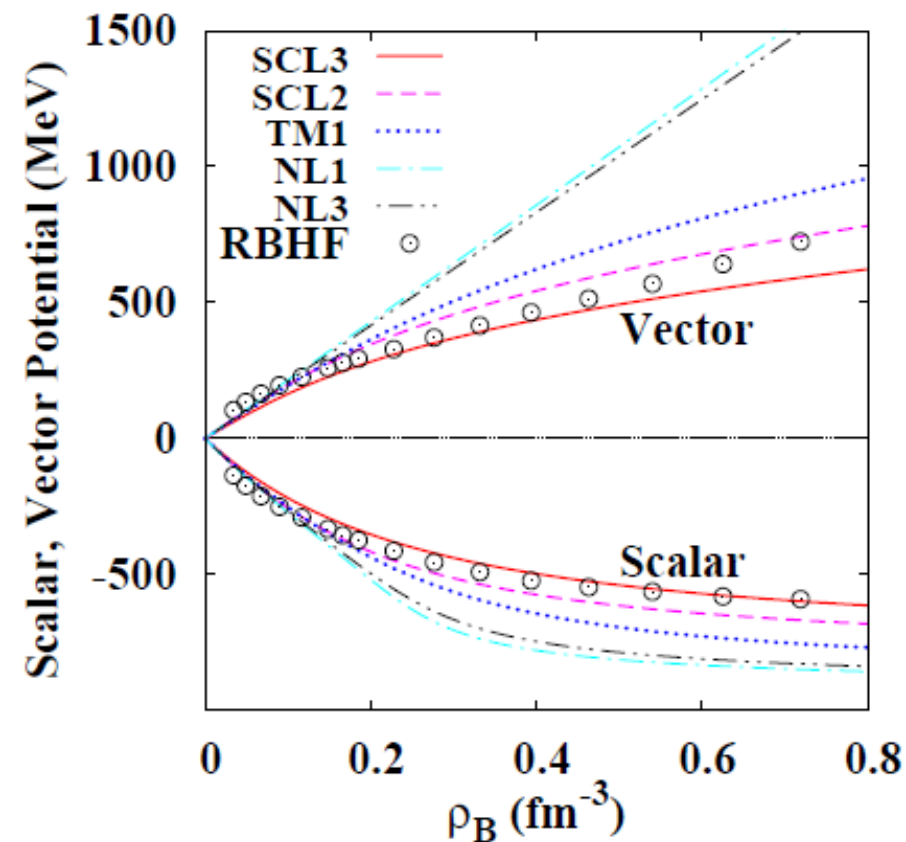
$$L_{\omega} = \frac{1}{4} \omega_{\mu\nu} \omega^{\mu\nu} - \frac{1}{2} m_{\omega}^2 \omega_{\mu} \omega^{\mu} - \frac{1}{4} c_{\omega} (\omega_{\mu} \omega^{\mu})^2$$



- 第一原理計算 (RBHF)、重イオン衝突からの制限のクリアに必要なだが NL1, NL-SH には含まれていない。



P. Danielewicz et al., Science 298('02)1592;
R. Brockmann, R. Machleidt, PRC 42('90)1965.
K. Tsubakihara, H. Maekawa, H. Matsumiya,
AO, PRC 81('10)065206

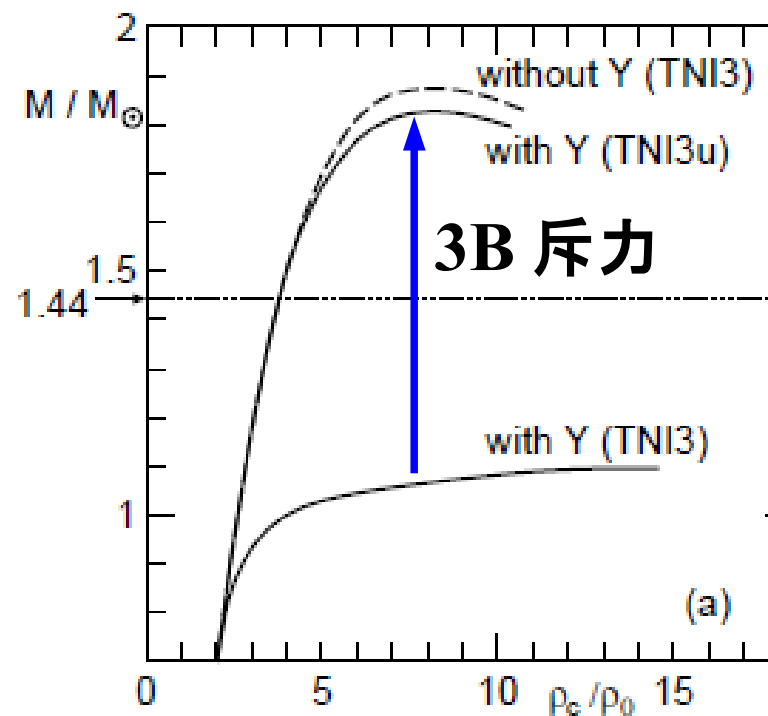


Short Summary

■ 問題点

- Demorest et al. (2010) では核子以外の自由度による EOS の軟化の問題を指摘。
- 非相対論的理論ではハイペロンを含む Universal な斥力が必要。
- 相対論的平均場 (RMF) では相対論効果から現れる Universal な斥力が存在するので問題はややまし。しかし第一原理計算の結果や重イオン衝突からの制限を課すと、 $2 M_{\odot}$ を支えるには同様にハイペロンを含む “Extra Repulsion” が必要。

→ 3体力 (多体力) を含む EOS 理論へ !



*S. Nishizaki, T. Takatsuka,
Y. Yamamoto, PTP108('02)703.*

3体力を含む相対論的平均場理論 (*Progress Report*)

相対論的平均場理論 (*Relativistic Mean Field*)

■ バリオンと中間子の有効ラグランジアン + 平均場近似

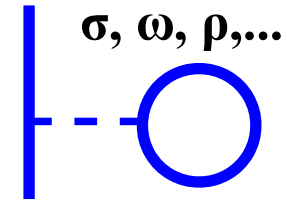
B.D.Serot, J.D.Walecka, Adv.Nucl.Phys.16 ('86), 1

$$L = L_B^{\text{free}} + L_M^{\text{free}} + L_{BM}$$

$$L_B^{\text{free}} = \bar{\psi}_B (i \gamma^\mu \partial_\mu - M_B) \psi_B$$

$$L_M^{\text{free}} = \sum_S \left[\frac{1}{2} \partial^\mu \varphi_S \partial_\mu \varphi_S - \frac{1}{2} m_S^2 \varphi_S^2 \right] + \sum_V \left[-\frac{1}{4} V_{\mu\nu} V^{\mu\nu} + \frac{1}{2} m_V^2 V_\mu V^\mu \right]$$

$$L_{BM} = - \sum_{B,S} g_{BS} \bar{\psi}_B \varphi_S \psi_B - \sum_{B,V} g_{BV} \bar{\psi}_B \gamma^\mu V_\mu \psi_B$$



- バリオン・中間子 : $B=N, \Lambda, \Sigma, \Xi, \dots$, $S=\sigma, \varsigma, \dots$, $V=\omega, \rho, \varphi, \dots$
- スカラー場からの引力 + ベクトル場からの斥力
→ 適度な引力と大きなスピン・軌道力
- 相対論効果
→ 非相対論的にみれば有効 3 体力が現れる、因果律を守る

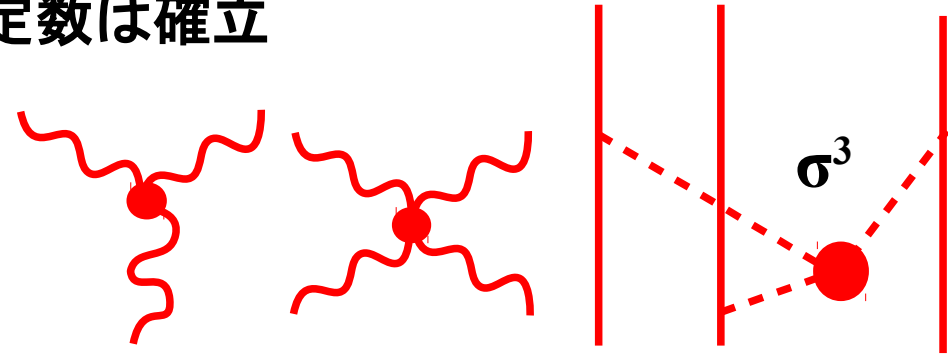
相対論的平均場理論 (Relativistic Mean Field)

■ RMF のパラメータ → MB 結合定数、中間子質量

- 原子核の性質 → $\sigma N, \omega N, \rho N$ 結合定数は確立

■ 多体力の導入

$$L_M^{\text{Int}} = -U_\sigma(\sigma) + \frac{1}{4}c_\omega(\omega_\mu\omega^\mu)^2 + \dots$$

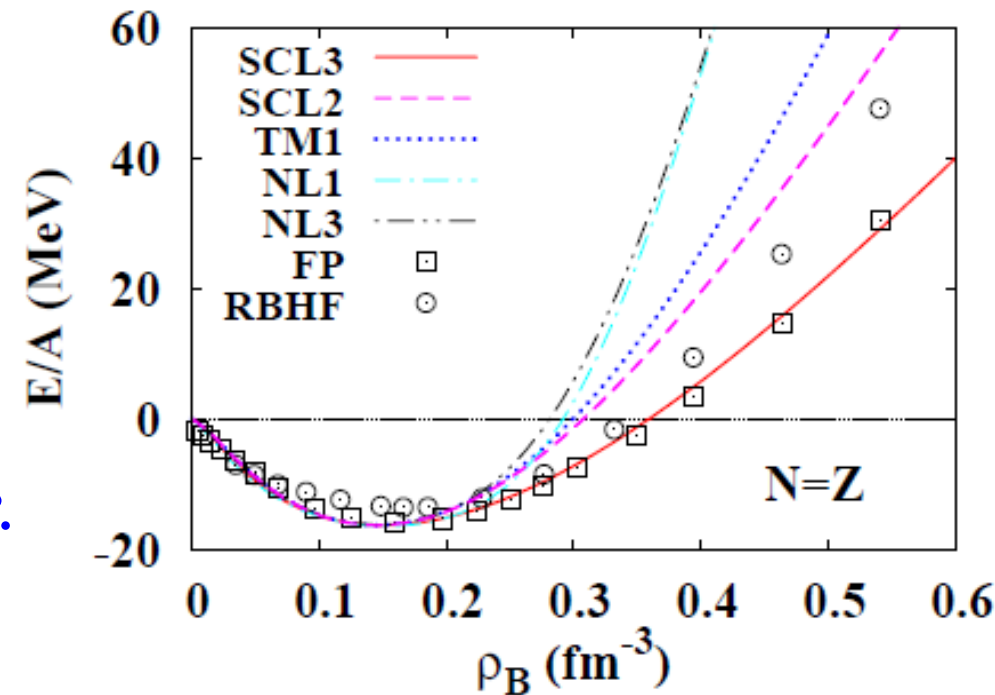


- σ^3 and σ^4 項 → EOS のソフト化

*J. Boguta, A.R. Bodmer NPA292('77)413,
NL1: P.-G. Reinhardt, M. Rufa, J. Maruhn,
W. Greiner, J. Friedrich, ZPA323('86)13.
NL3: G.A. Lalazissis, J. König, P. Ring,
PRC55('97)540.*

- ω^4 項 → DBHF の結果を simulate

*TM: Y. Sugahara, H. Toki,
NPA579('94)557;
R. Brockmann, H. Toki, PRL68('92)3408.*



→ 高密度領域では大きな違い

K. Tsubakihara, H. Maekawa, H. Matsumiya, AO, PRC81('10)065206.

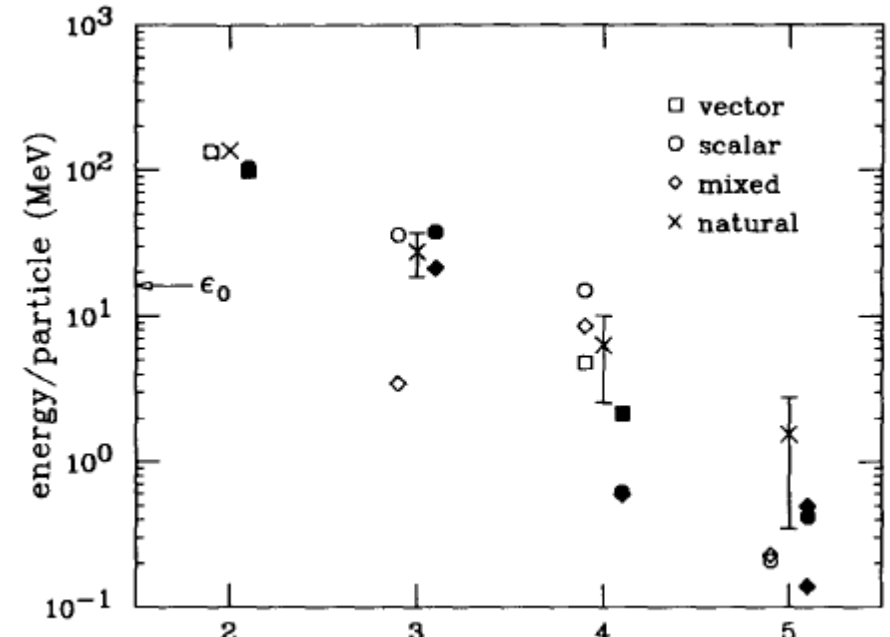
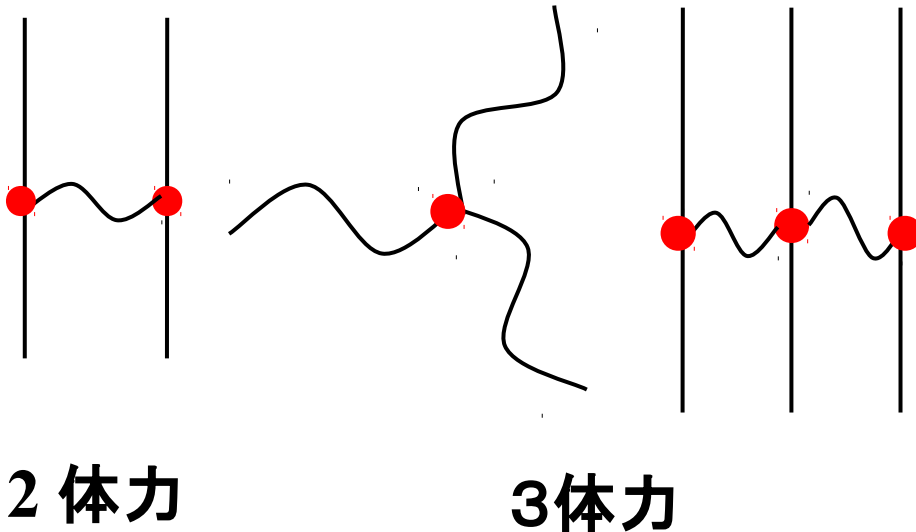
3 体力を含む RMF

■ 3 体力を含む相互作用項

$$\delta L = -\frac{1}{2} c_{\sigma\omega} \sigma \omega_\mu \omega^\mu - \sum_B \bar{\Psi}_B \left[g_{\sigma\sigma B} \sigma^2 + g_{\sigma\omega B} \sigma \omega_\mu \gamma^\mu + g_{\omega\omega B} \omega_\mu \omega^\mu \right] \Psi_B$$

- BBMM 相互作用項は標準的な RMF では無視
(場の再定義により他の項に吸収可能) *Furnstahl, Serot, Tang ('97)*
しかし場の再定義は Naïve dimensional analysis (NDA) の次数を変え、
高密度では n 体力が重要な役割を果たす。

$n = d + B/2 + M$ (d; 微分結合、B: バリオン場、M: non-NG ボソン)



Furnstahl, Serot, Tang ('97)

RMF with 3BF + $SU(3)_f$ “violation”

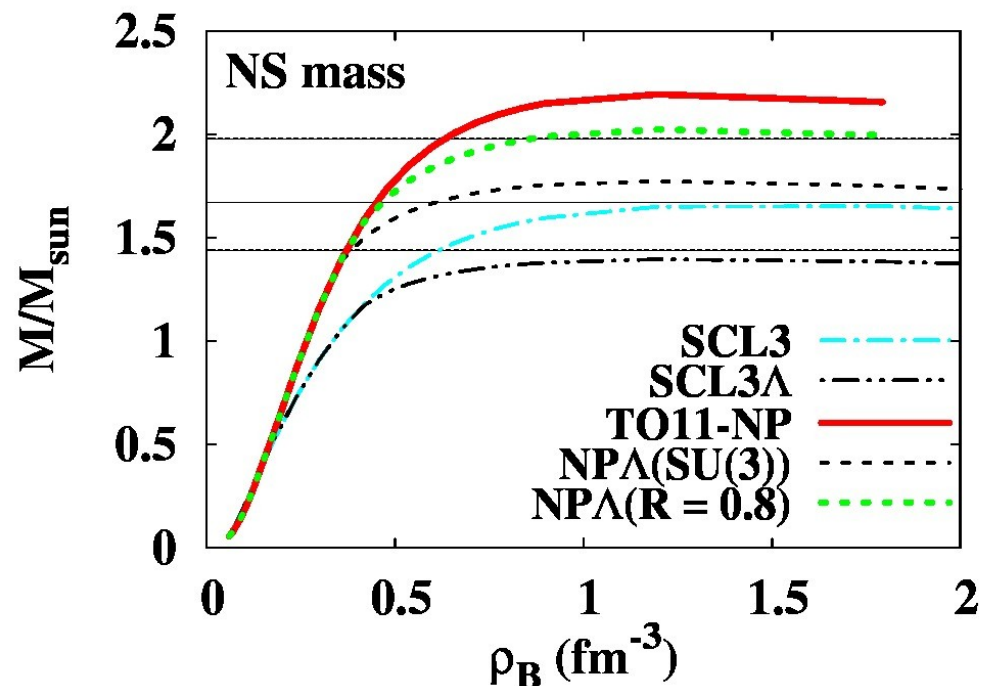
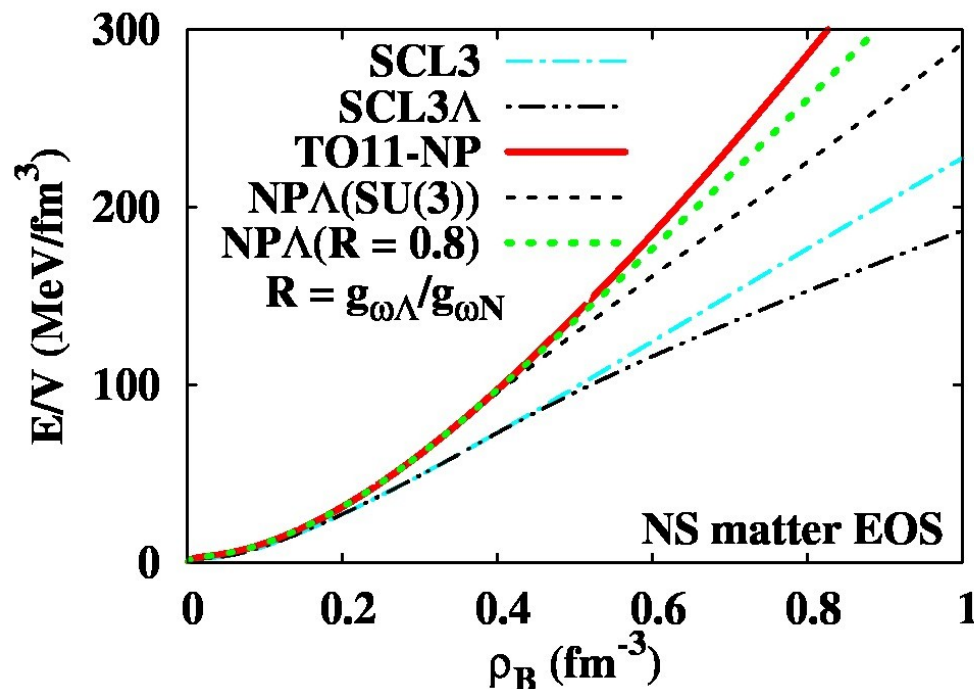
■ Two types of modification

Tsubakihara et al., in prep.

- 3-baryon repulsion $\rightarrow$ EOS becomes stiff gradually at high density.
(Fitting meson mass (E325) and U_v in RBHF)

- $R = g_{\omega\Lambda} / g_{\omega N} \sim 0.8 (> 2/3 \text{ (SU(3))})$

$\rightarrow M_{\max} \sim 2.02 M_{\odot}$ with hyperons ($\sim 1.4 M_{\odot}$ w/o 3BF, violation)

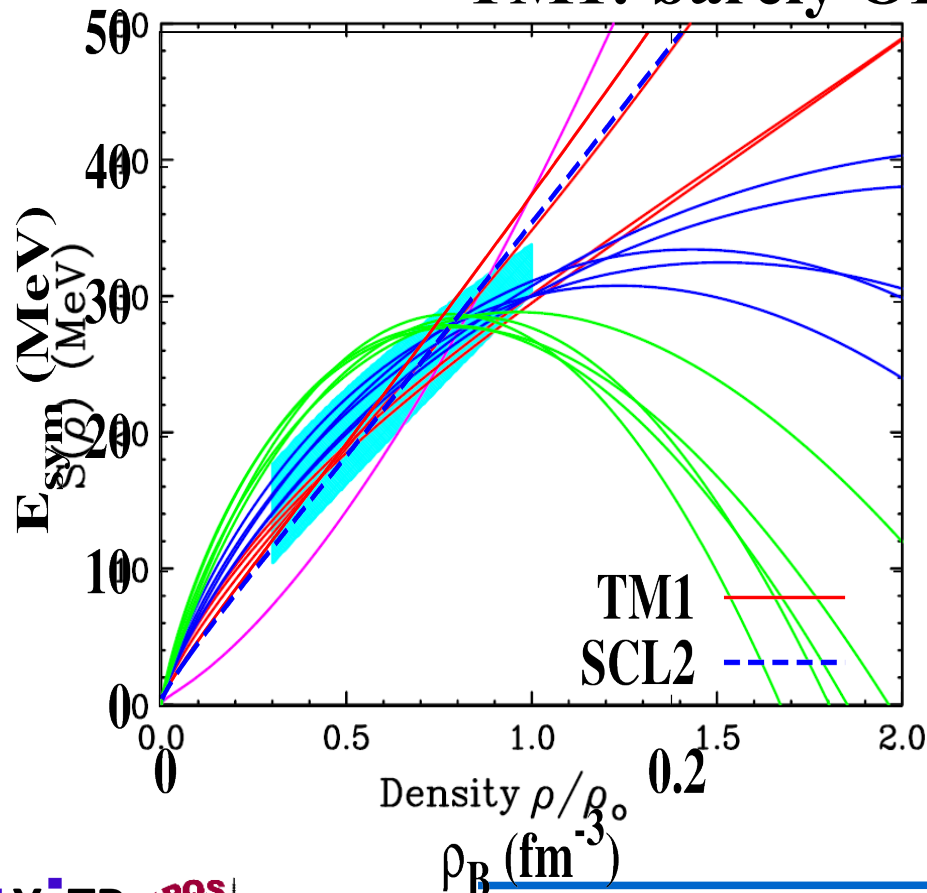


3 体力を含む RMF

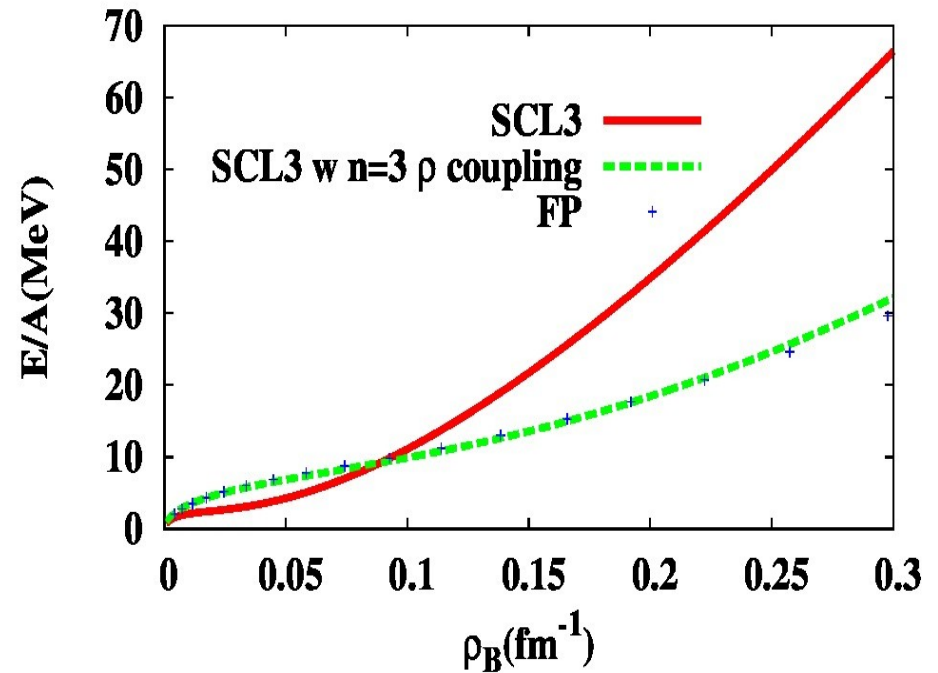
- 2 体力までであれば、対称エネルギーはほぼ密度に比例 (L=3 S)
→ 通常の RMF では高密度で大きな対称エネルギー
- ρ 中間子を含む 3 体力 → 対称エネルギーの密度依存性

$$\delta L = -\frac{1}{2} c_{\sigma\omega} \sigma \rho_\mu^a \rho_a^\mu - \sum_B \bar{\psi}_B \left[g_{\sigma\rho B} \sigma \rho_\mu^a \tau_a \gamma^\mu \right] \psi_B$$

TM1: barely OK



Pure neutron matter EOS



Tsubakihara et al., in prep.

FP: Friedman, Pandharipande ('81)

- 新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」
 - 低密度核物理、高密度核物理、天体物理の協力により中性子星の性質を明らかに！
 - 理論班：実験・観測に対応して EOS 情報を引き出す体制
 - 冷却、磁場、QCD 相転移、格子 QCD 等、多くの課題がカバー出来ていません。→ 公募研究への応募、よろしくお願いします。
- ハイペロンを含む状態方程式と重い中性子星
 - ハイペロンを含み、2 倍の太陽質量を越える中性子星を支えるモデルは存在する。
 - 他の実験データと consistent であるためには、単純な相対論効果を越える何らかの 3 体力 (多体力) 効果が必要。
 - 3 体力を含む相対論的平均場理論では重い中性子星を支えるとともに、対称エネルギーの密度依存性をコントロールできる。
 - 実験・観測・第一原理計算からどのように決められるか？

Thank you for your attention !