

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)

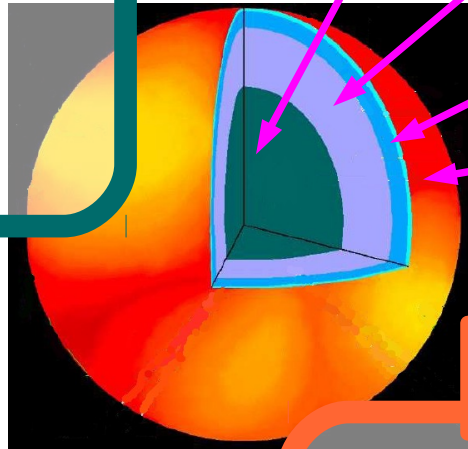
- Summary



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)、



Hyperons, mesons, quarks

Asym. nuclear matter
+elec.+ μ

Nuclei+neutron gas+elec.

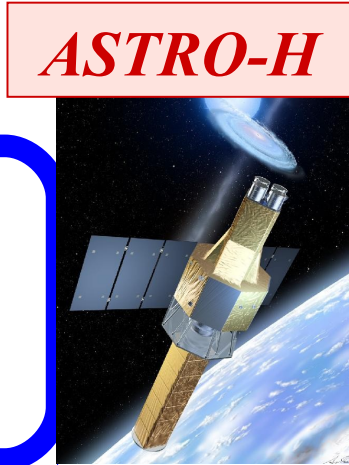
Nuclei + elec.

低密度領域

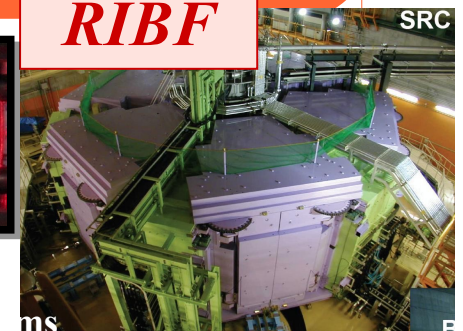
対称エネルギー、
対相関ギャップ、
BEC-BEC cross over、
冷却原子系とのつながり、

天体現象

半径、質量、
温度(時間依存性)、
星震、パスタ、



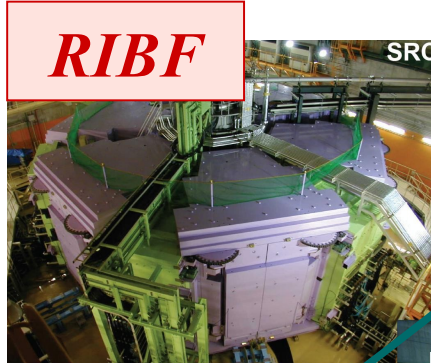
RIBF



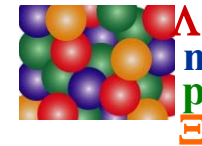
中性子星物質状態方程式

対称エネルギーの
密度依存性

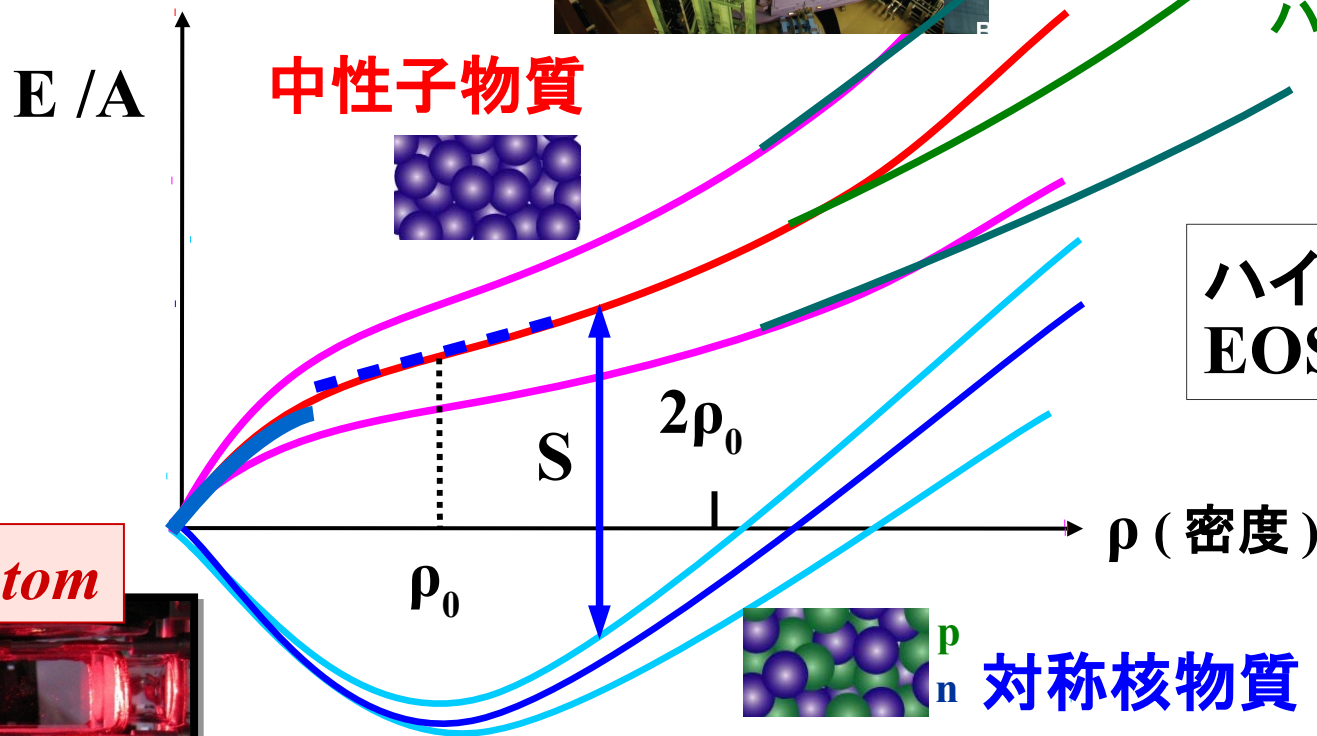
$$L = 3\rho \frac{dS}{d\rho} = \frac{3}{\rho} P(\rho = \rho_0)$$



ハイペロン物質



ハイペロンによる
EOS 軟化



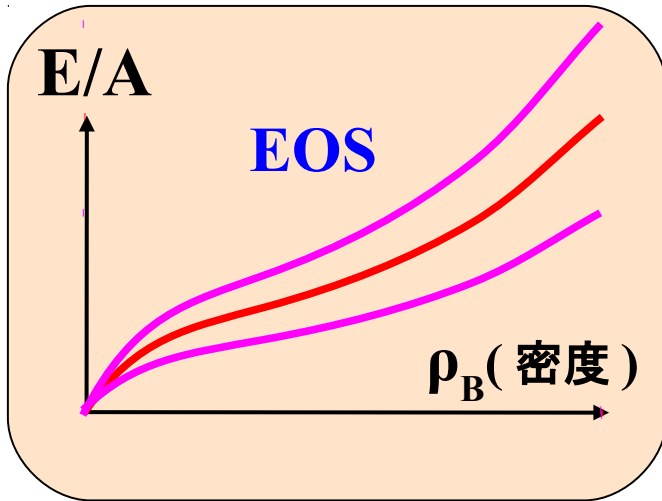
希薄中性子物質
~ ユニタリー気体

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

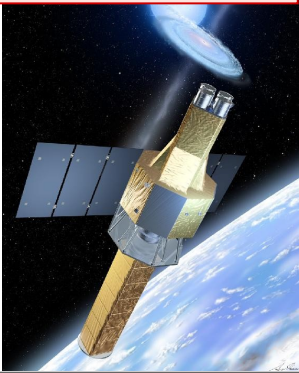
$$\xi \simeq 0.4 \text{ (Bertsch parameter)}$$

中性子星の質量と半径

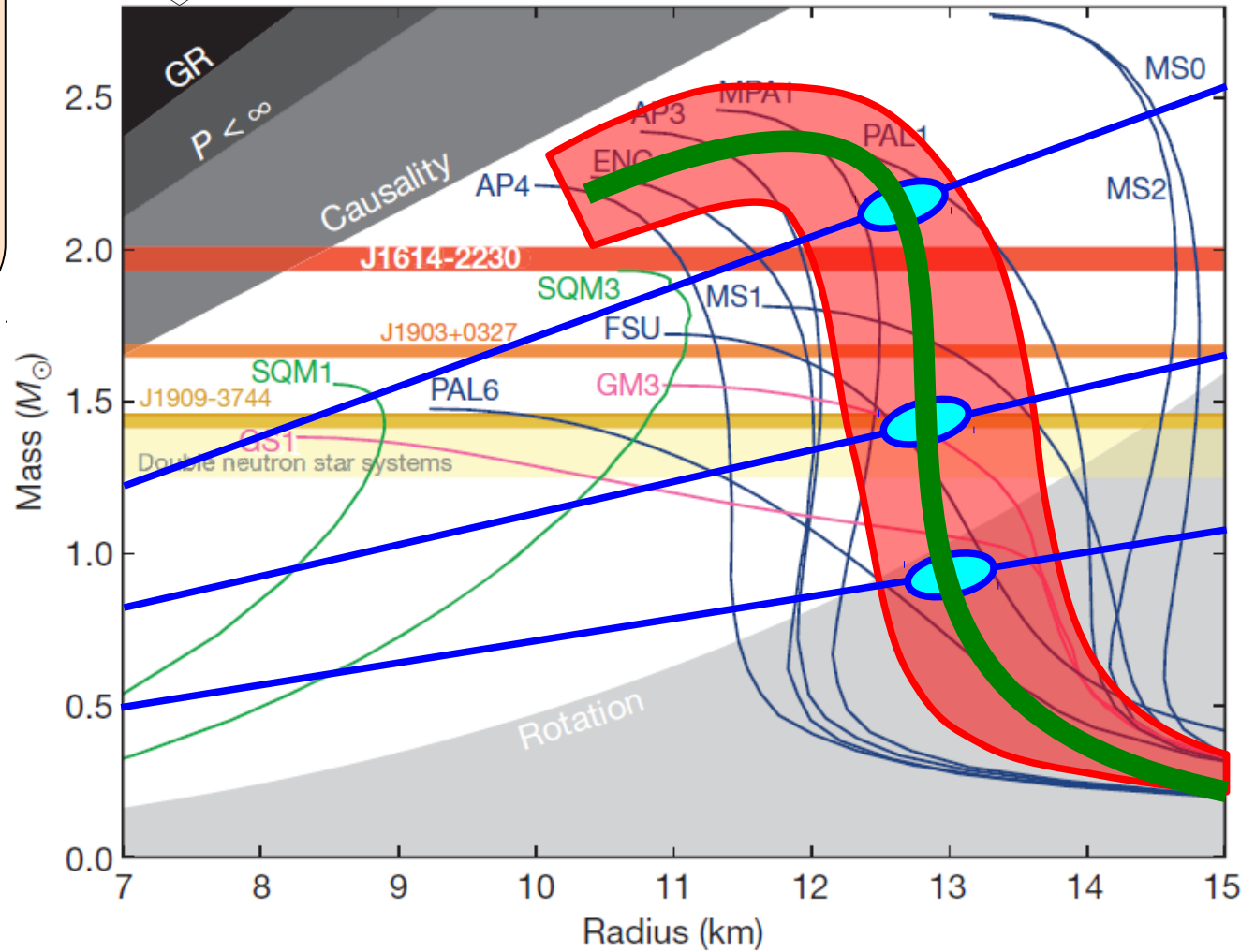
静水圧平衡 (TOV 方程式)



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

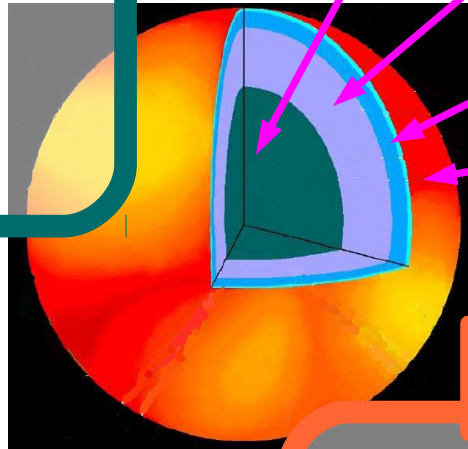
原田 (Prod.)、
木村 (Structure)、
土手 (Kaon Nucl.)

Hyperons, mesons, quarks

Asym. nuclear matter
+elec.+ μ

Nuclei+neutron gas+elec.

Nuclei + elec.



J-PARC



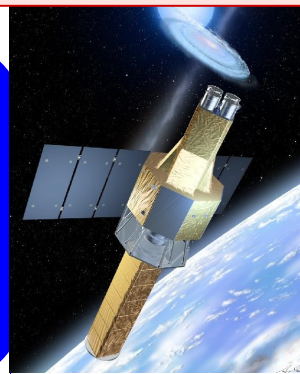
低密度領域

中田 (Sym.E)、
松尾 (EOS)、
小野 (HIC)、

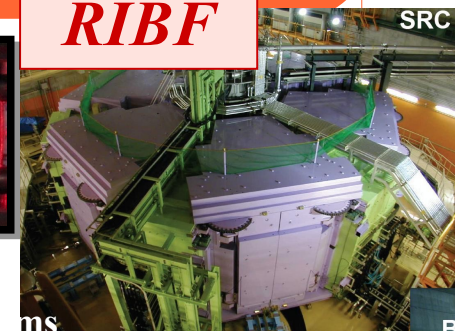
天体現象

飯田 (Phen.)、
巽 (Quark)、
中里 (Pasta)

ASTRO-H



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), $1.97 \pm 0.04 M_{\text{sun}}$

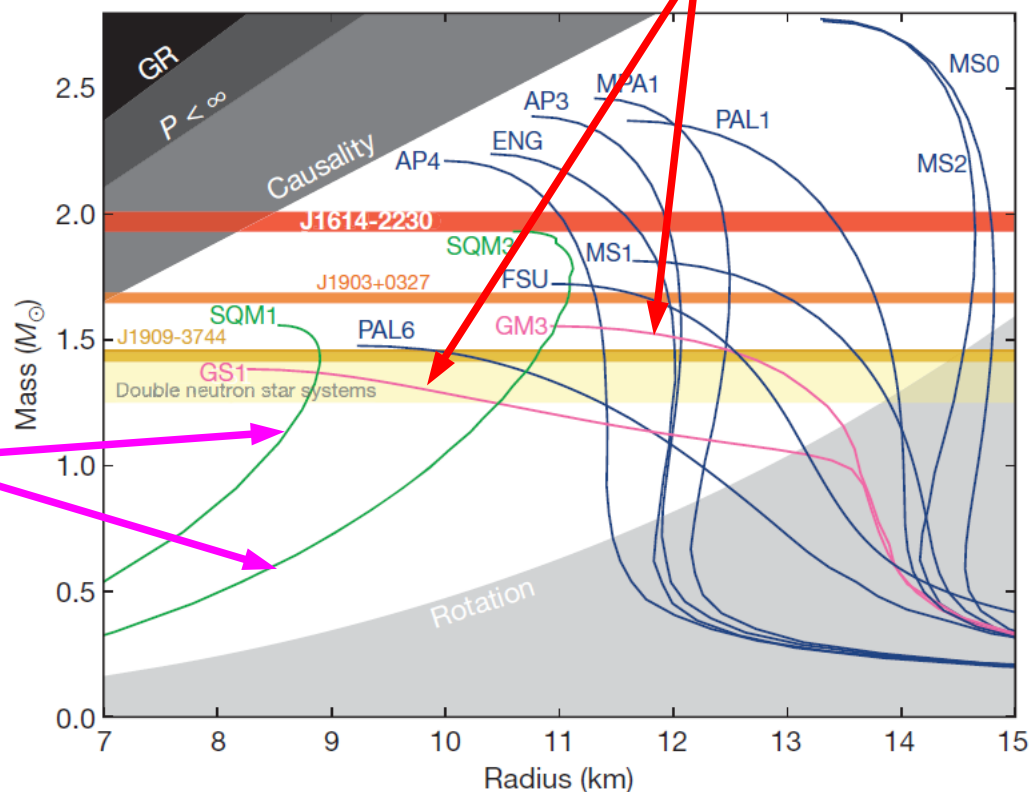
- 一般相対性理論 (Shapiro delay) に基づく質量決定
- 幸運な公転面の向き + 美しい観測結果

■ 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



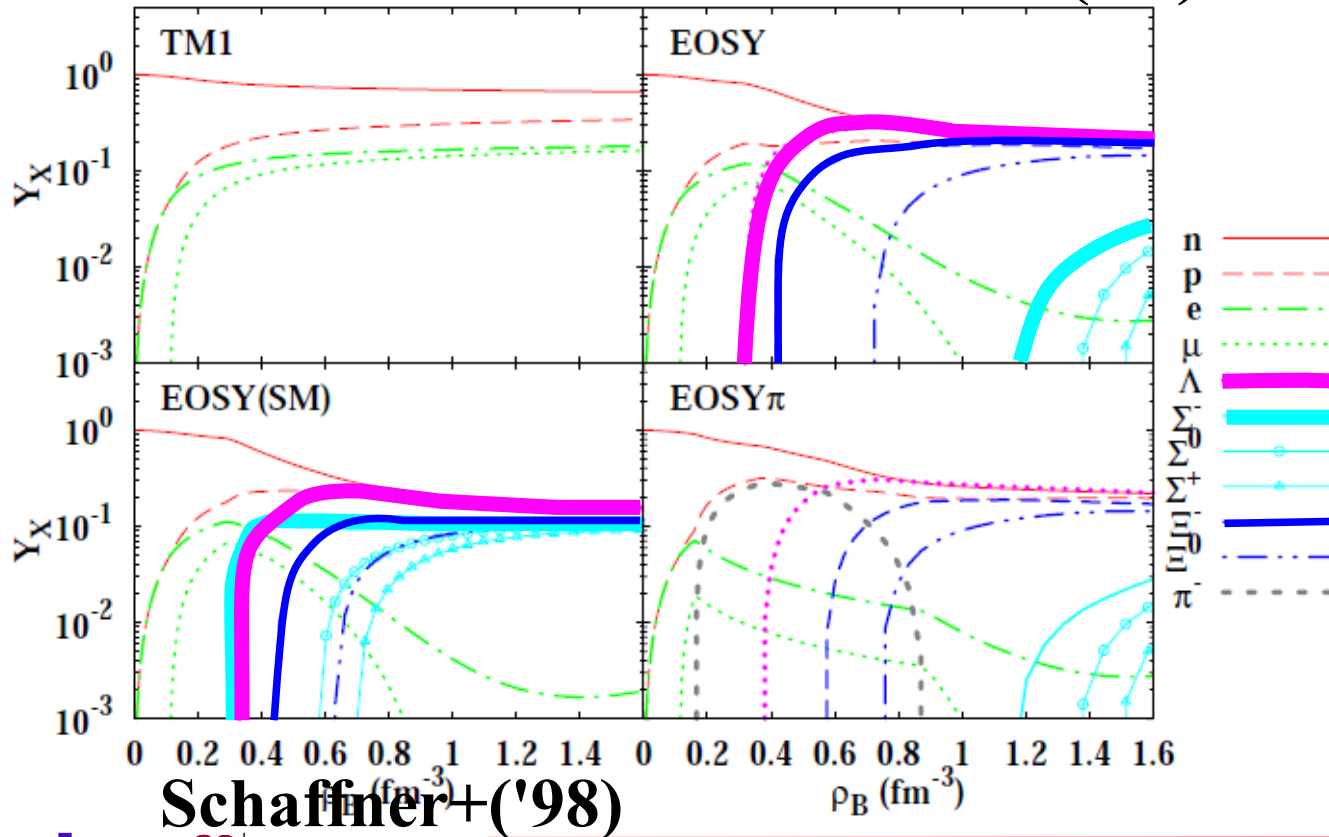
ハイペロンを含むRMFの例(1)

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

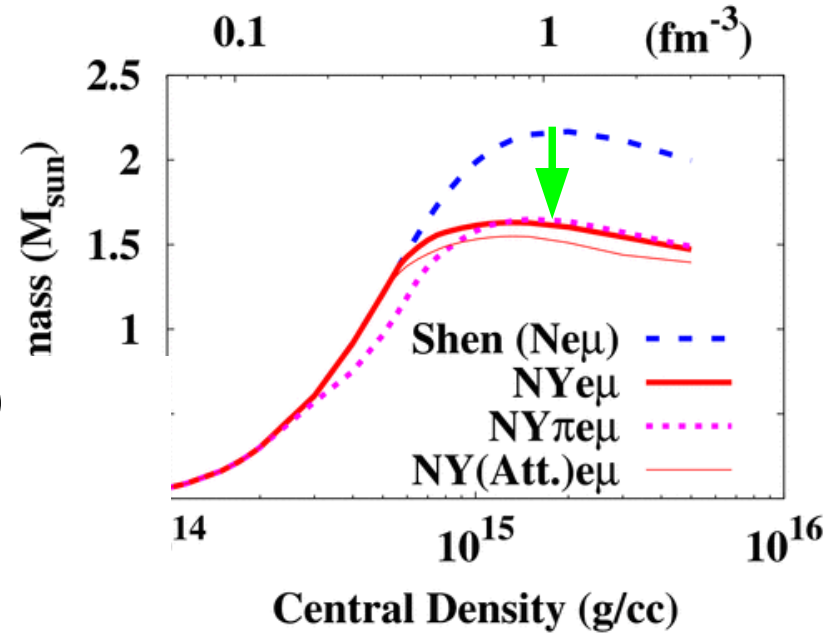
Hyperon Effect is DRASTIC

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

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



Schaffner+('98)



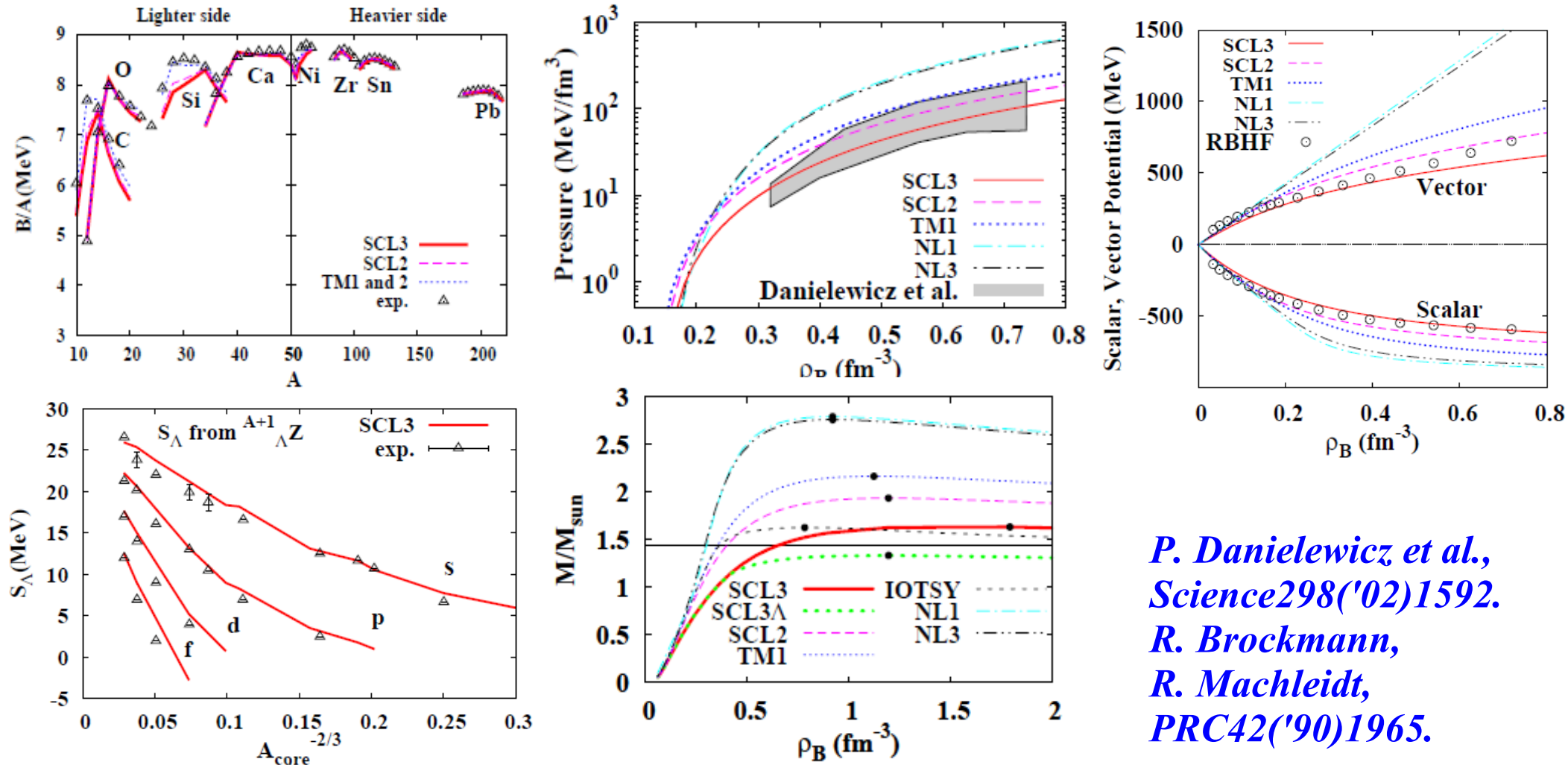
c.f. H. Shen+('09)
 $\rightarrow n, p, \Lambda$ EOS

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.

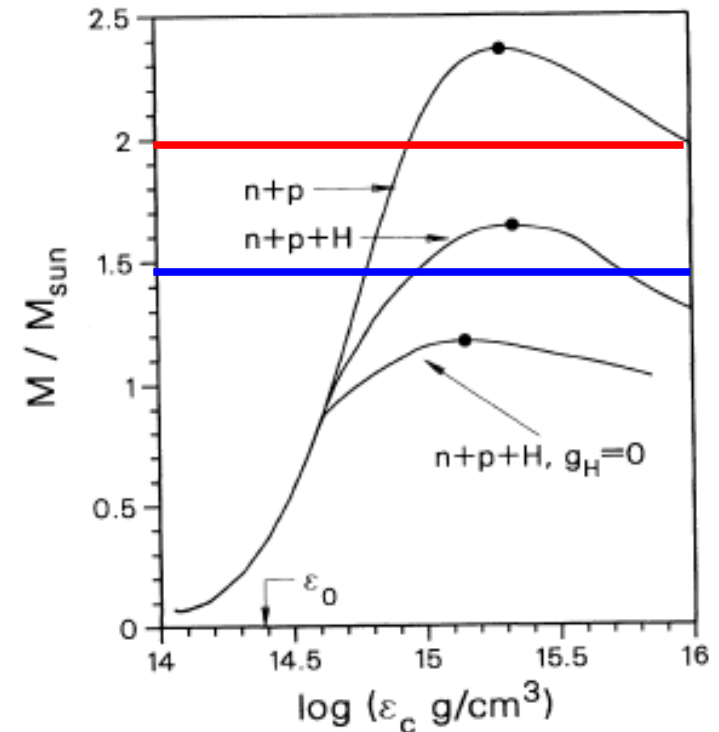
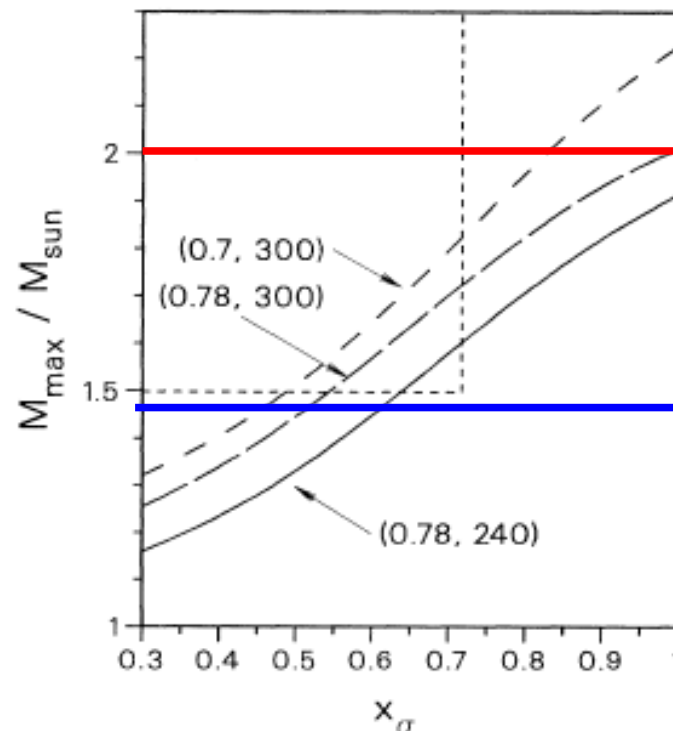
- EOS, Nuclear B.E., High density EOS from HIC, Vector potential in DBHF, Hypernuclear Separation Energy, Neutron Star, ...



*P. Danielewicz et al.,
Science298('02)1592.
R. Brockmann,
R. Machleidt,
PRC42('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 ($g_{\sigma\Lambda} / g_{\sigma N} \sim 2/3$)



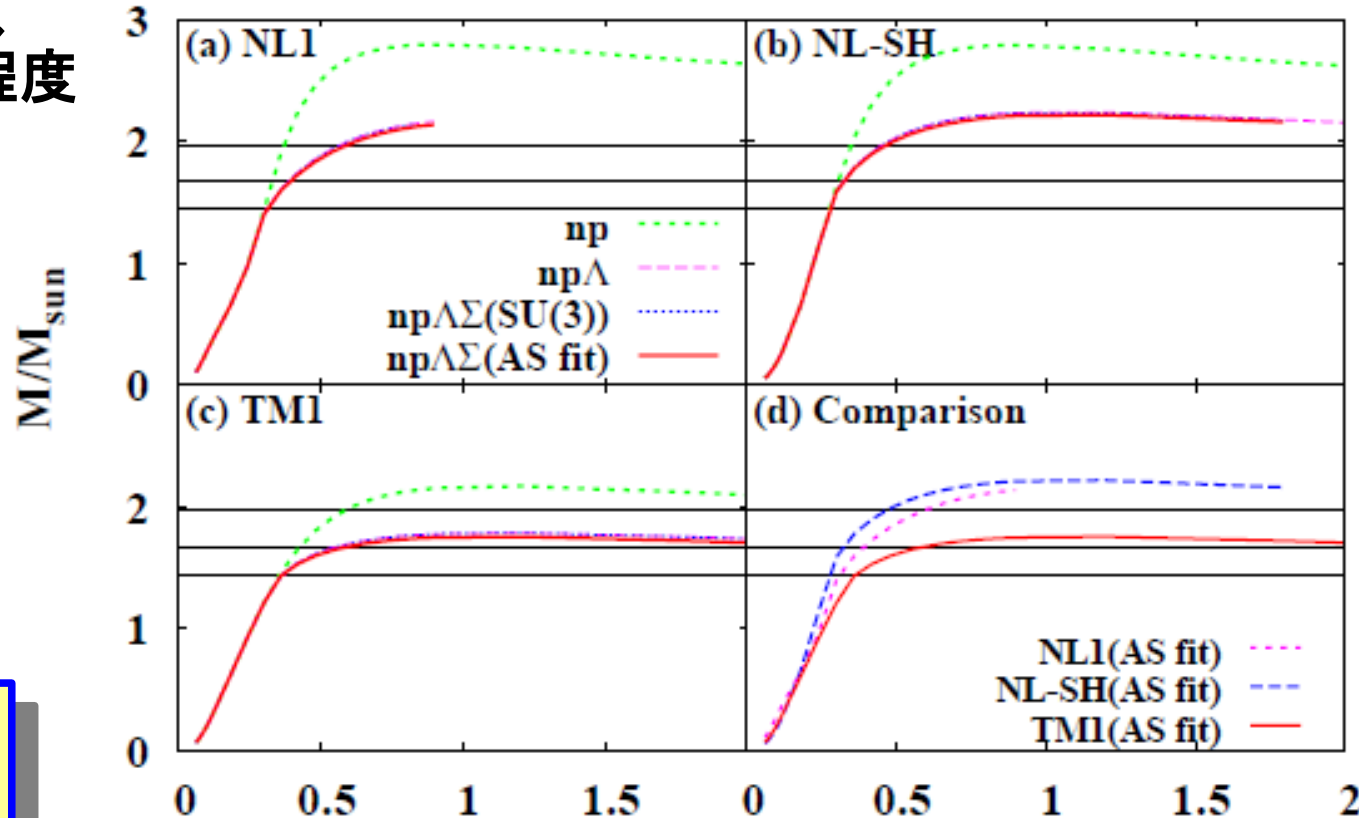
N.K. Glendenning, S.A. Moszkowski, PRL67('91)2414

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

Calculated Neutron Star Mass



Tsubakihara, AO, to be submitted

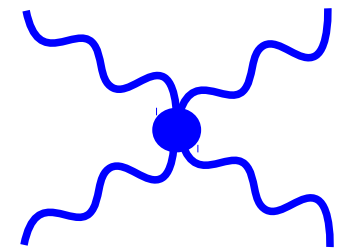
その違いは？

→ meson self-energy

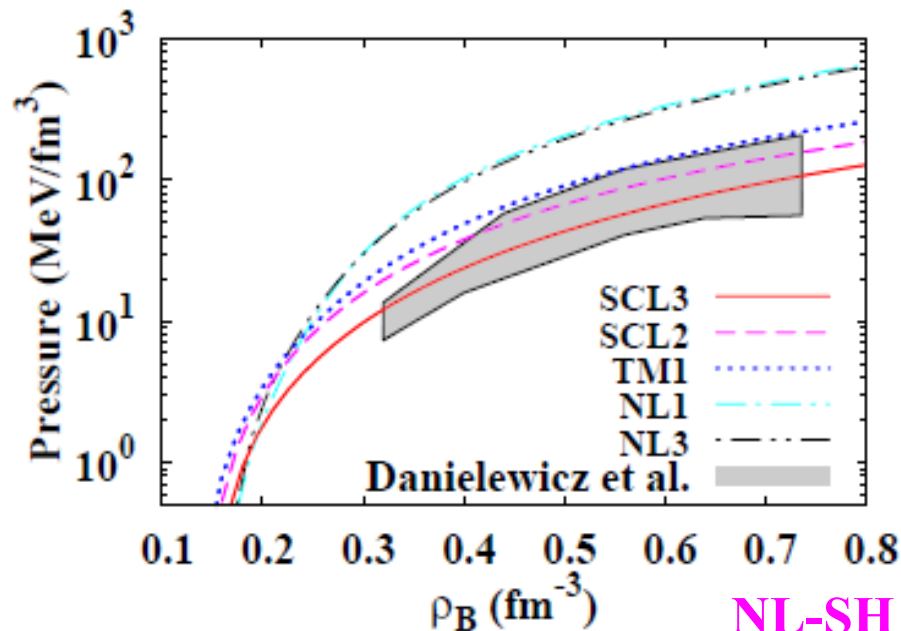
Meson self-energy 効果

■ ベクトル中間子の自己エネルギー項

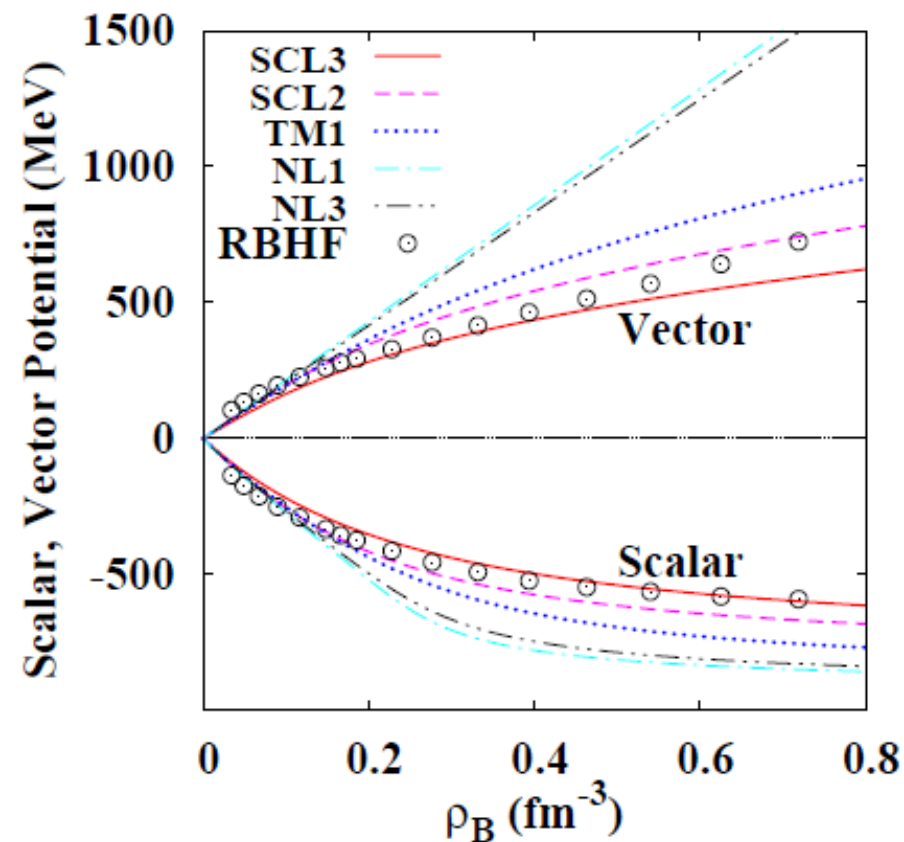
$$L_{\omega} = \frac{1}{4} \omega_{\mu\nu} \omega^{\mu\nu} - \frac{1}{2} m_{\omega}^2 \omega_{\mu} \omega^{\mu} - \frac{1}{4} c_{\omega} (\omega_{\mu} \omega^{\mu})^2$$



- 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

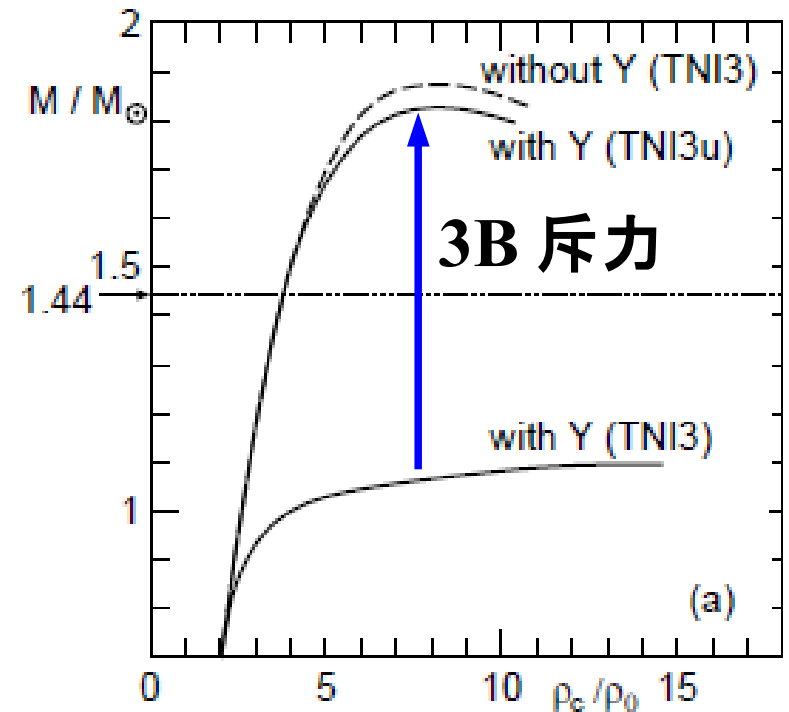


Short Summary

■ 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

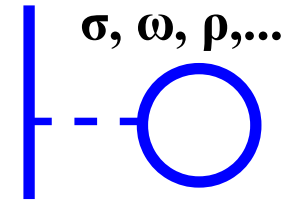
B.D.Serot, J.D.Walecka, Adv.Nucl.Phys.16 ('86), 1

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

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

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

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



- バリオン・中間子 : B=N, Λ, Σ, Ξ, ..., S= σ, ζ, ..., V= ω, ρ, φ, ...
- 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

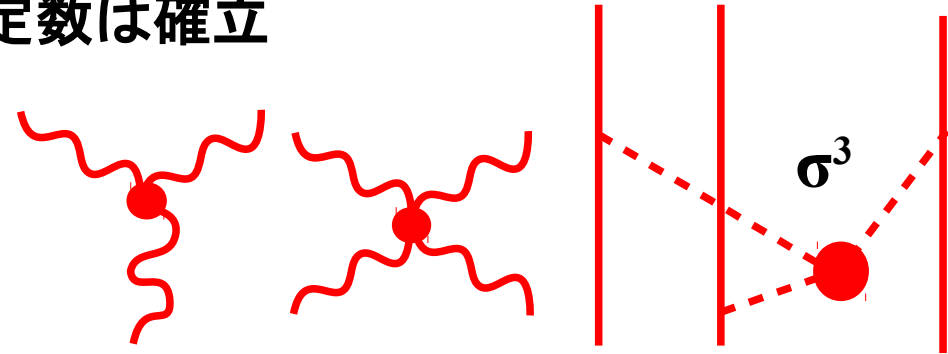
相対論的平均場理論 (Relativistic Mean Field)

■ 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

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

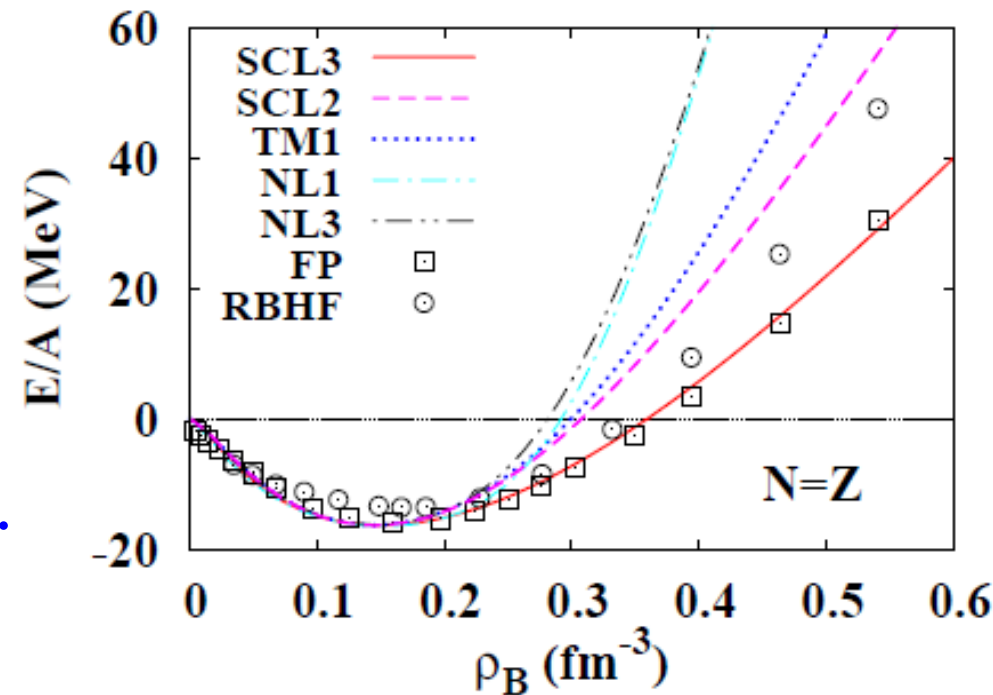


- σ^3 and σ^4 項 → EOS のソフト化

*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.

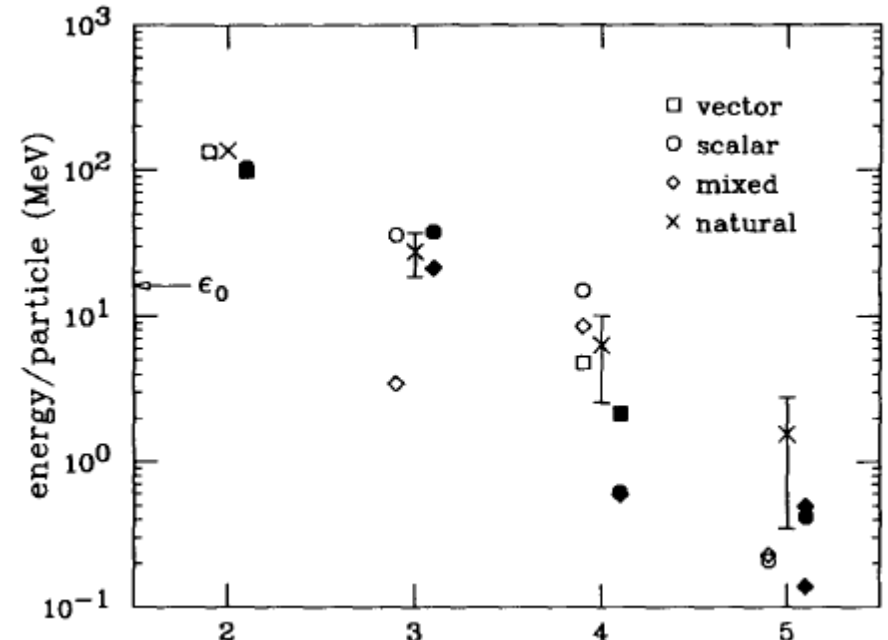
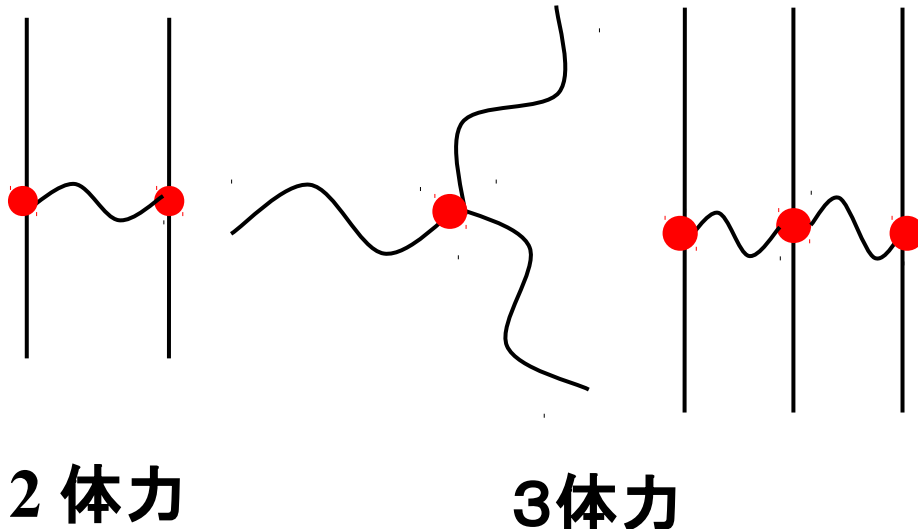
3 体力を含む RMF

■ 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”

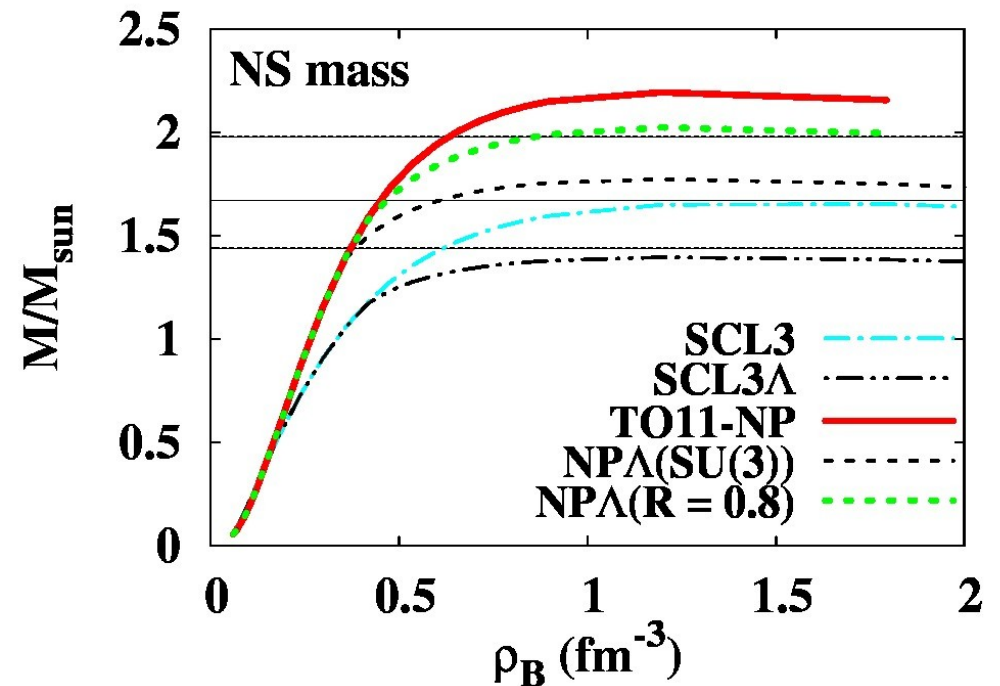
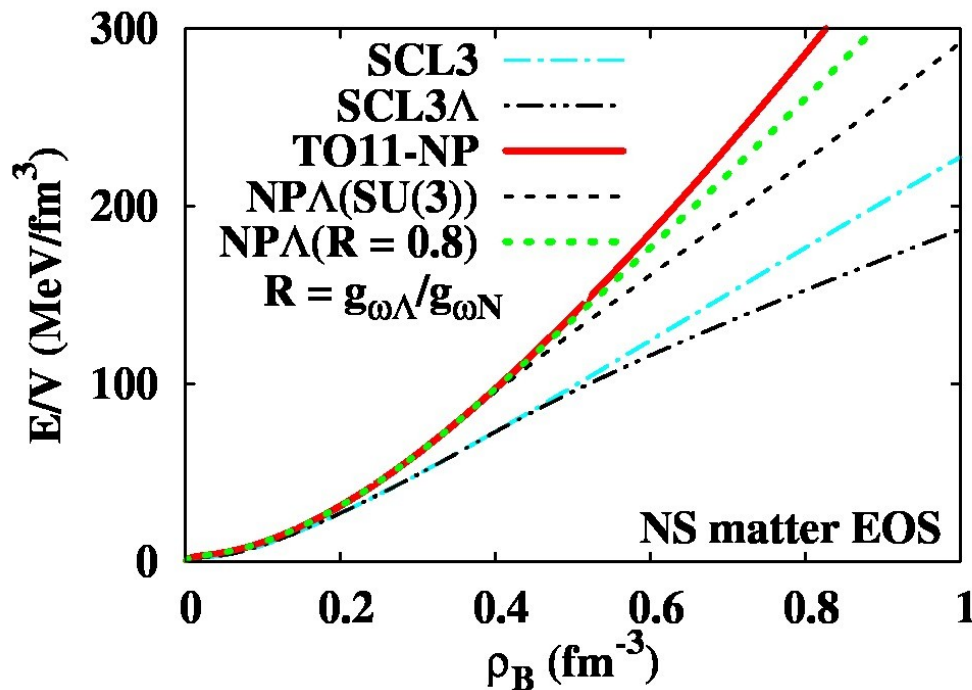
■ Two types of modification

Tsubakihara et al., in prep.

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

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

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

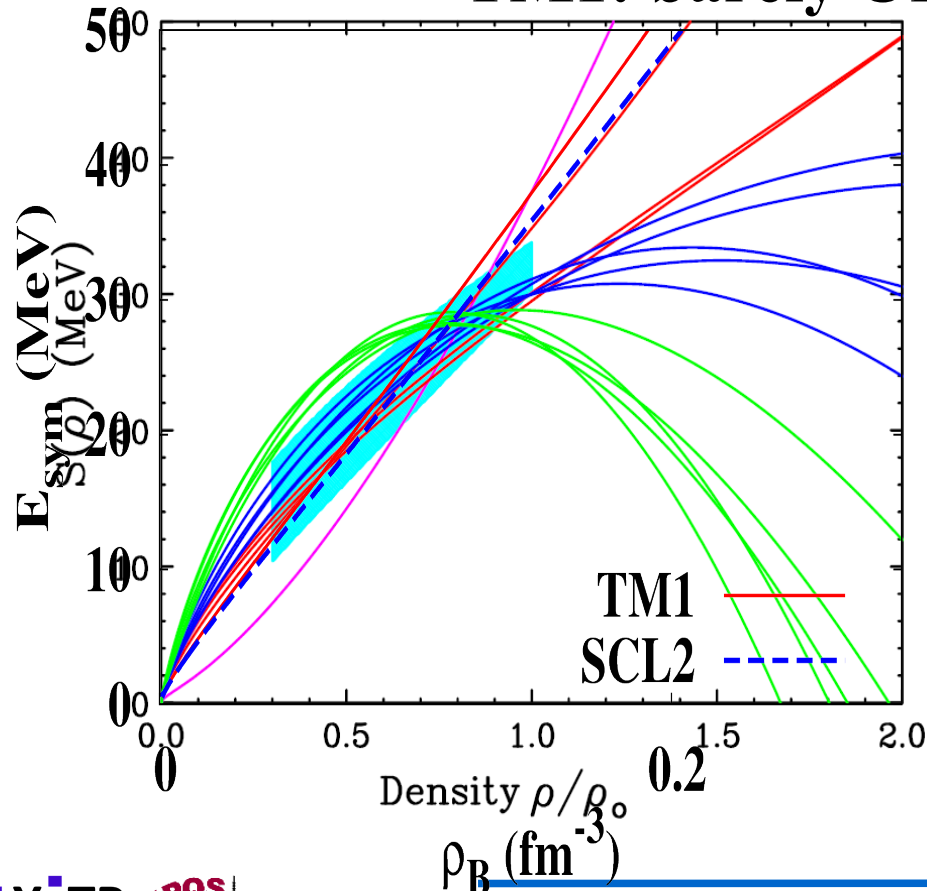


3 体力を含む RMF

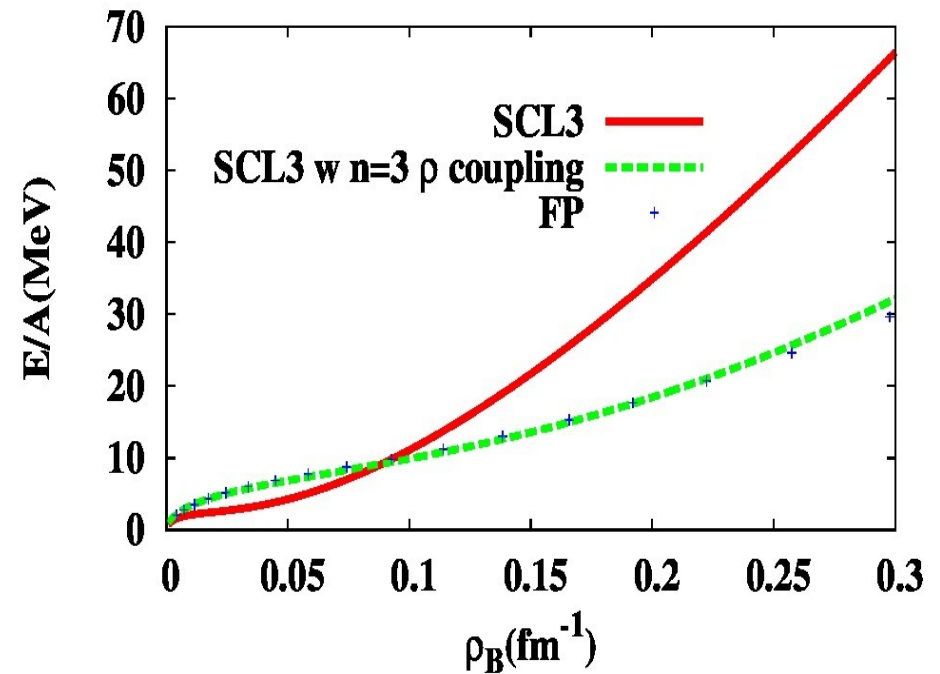
- 2 体力までであれば、対称エネルギーはほぼ密度に比例 (L=3 S)
→ 通常の RMF では高密度で大きな対称エネルギー
- ρ 中間子を含む 3 体力 → 対称エネルギーの密度依存性

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

TM1: barely OK



Pure neutron matter EOS



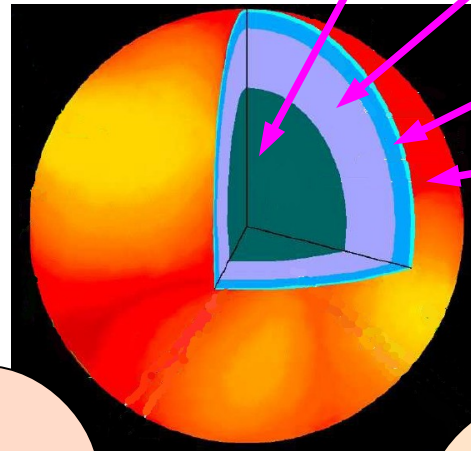
Tsubakihara et al., in prep.

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 !

中性子星の組成・MR 曲線と状態方程式

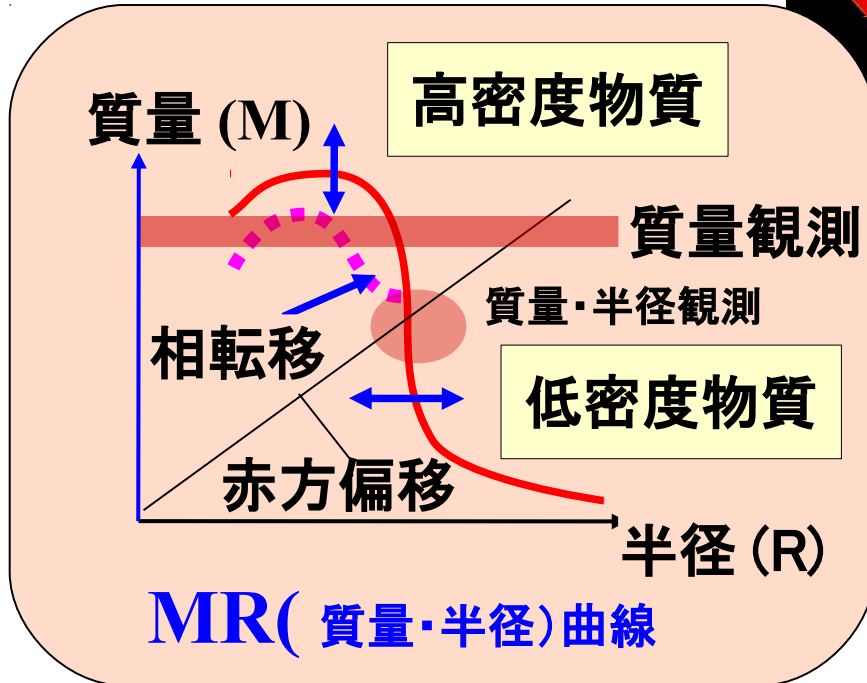


Hyperons, mesons, quarks

Asym. nuclear matter
+elec.+ μ

Nuclei+neutron gas+elec.

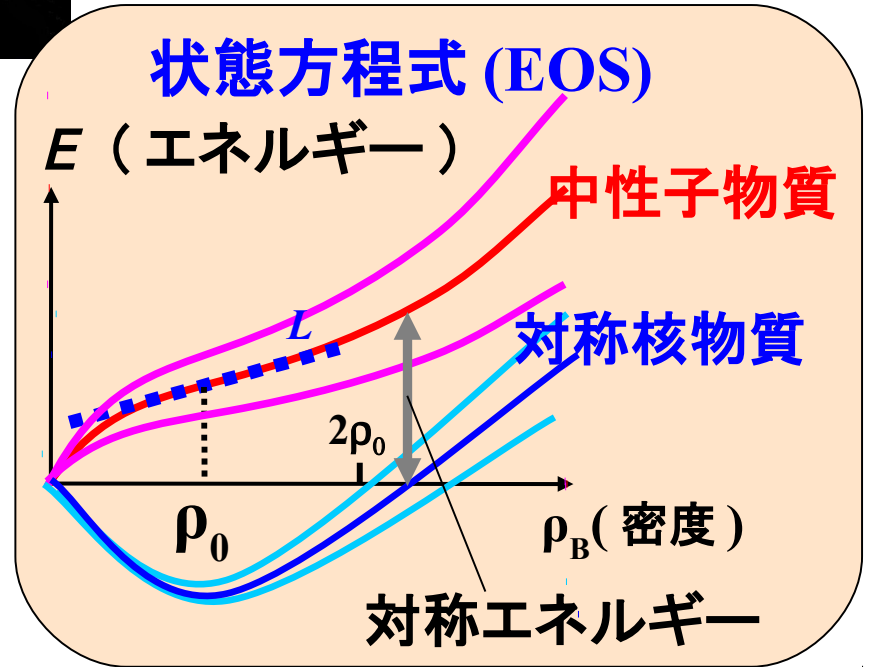
Nuclei + elec.



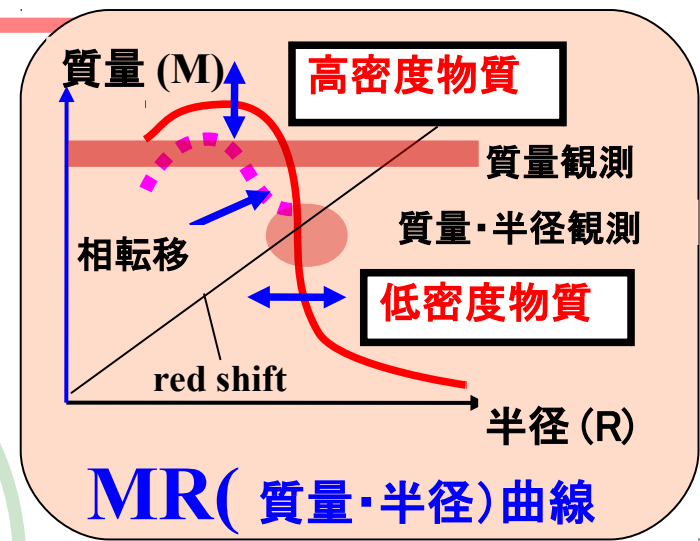
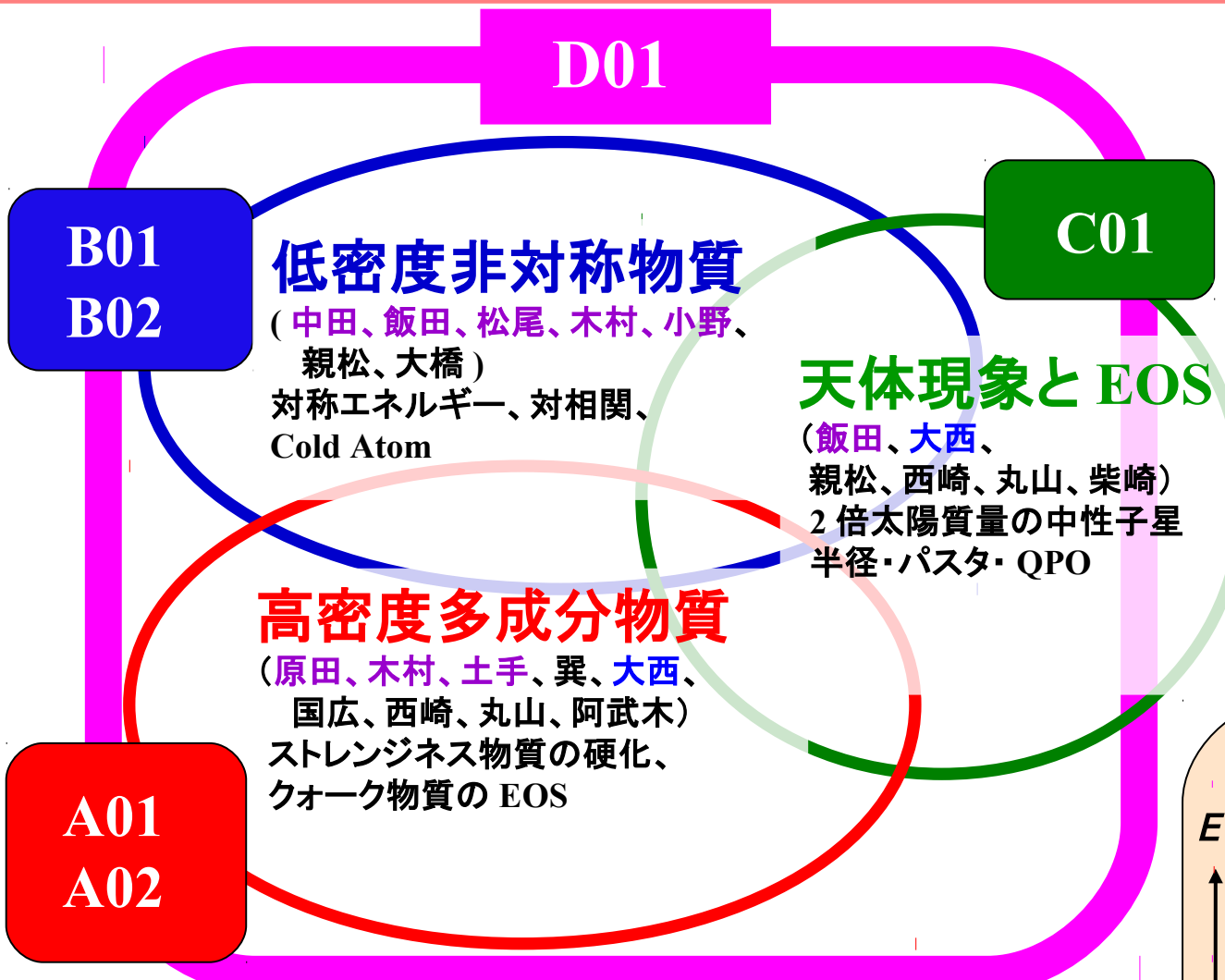
TOV
方程式

⇔

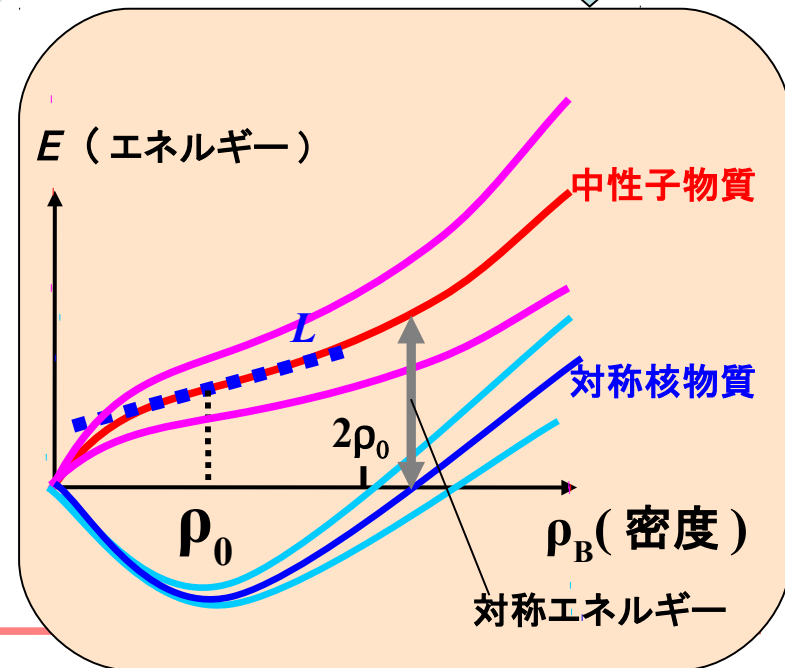
重力と
圧力の
釣り合い



D01: 中性子星と核物質の理論研究

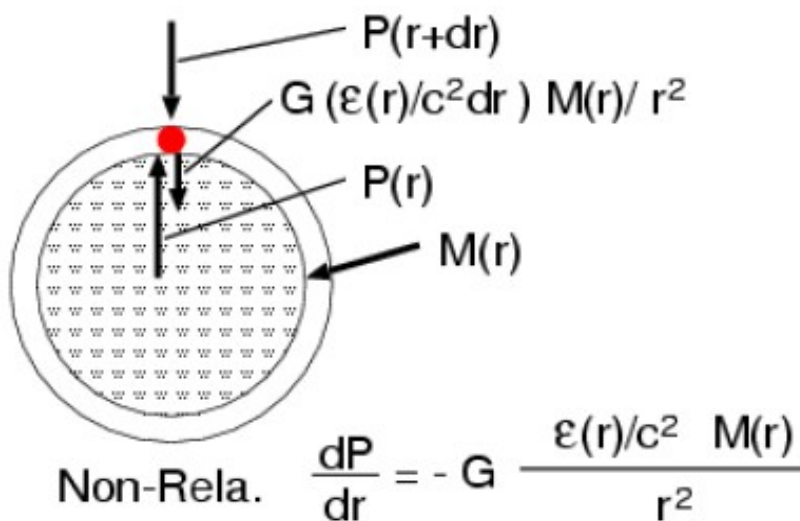


TOV 方程式



理論の立場から、
 ストレンジネス核物理、中性子過剰核物理、
 冷却原子物理、天体物理を結びつけ、
 現象に裏付けられた **"The EOS"** を決定する。

Tolman-Oppenheimer-Volkoff equation



$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{(\epsilon/c^2 + P/c^2)(M + 4\pi r^3 P/c^2)}{r^2(1 - 2GM/rc^2)}$$

$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon/c^2, \quad \frac{dP}{dr} = \frac{dP}{d\epsilon} \frac{d\epsilon}{dr}$$

$$P = P(\epsilon), \quad \frac{dP}{d\epsilon} = \frac{dP}{d\epsilon}(\epsilon) \quad (\text{EOS})$$

When you make a new EOS, please check the NS mass !

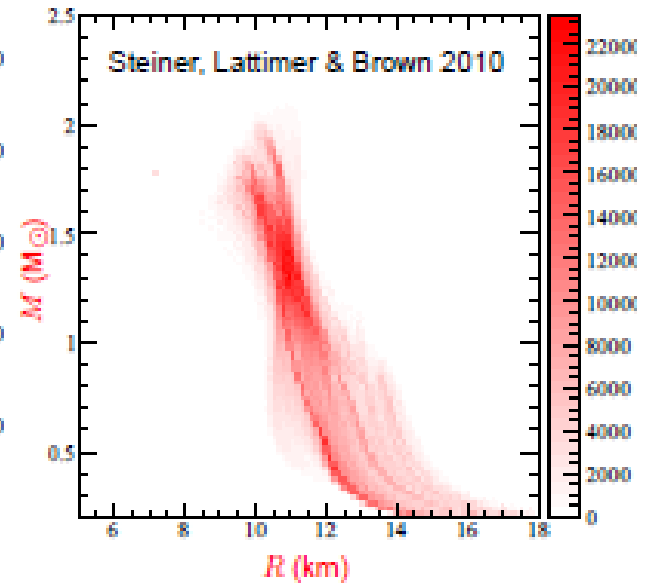
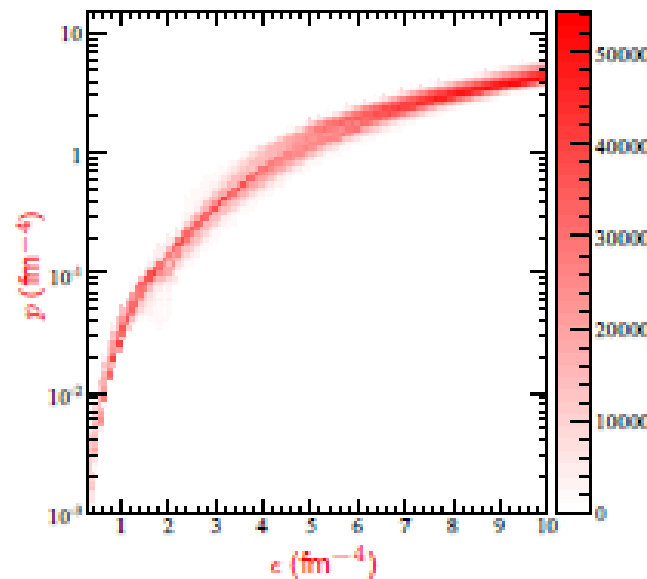
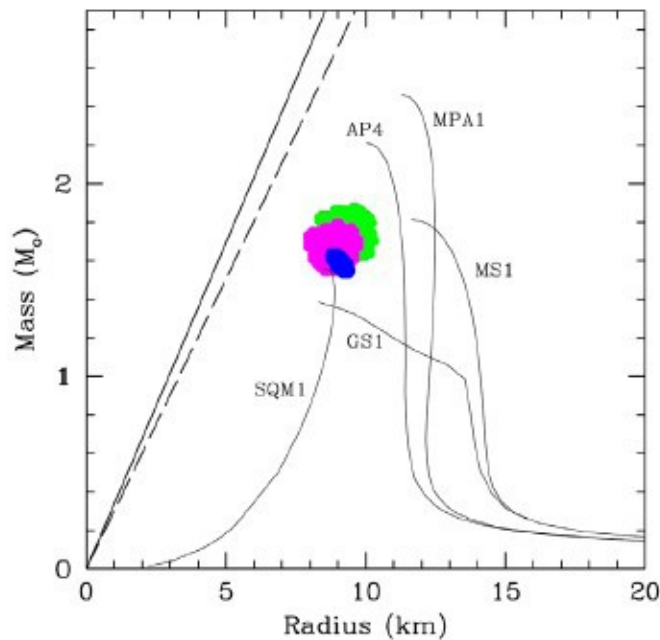
なぜ今、中性子星か？

- 近年の実験の進展が面白い！
 - スtrenジネス核物理の進展 - NY, YY 相互作用 (高橋 (俊))
 - 高エネルギー重イオン衝突による相図探索 (坂口)
 - 中性子過剰核 --- 対称エネルギー・対相関 (中村)
 - 高エネルギー重イオン衝突における $\Lambda\Lambda$ 相関と $\Lambda\Lambda$ 力
- 近年の理論の進展が面白い！
 - 格子 QCD バリオン間力 (根村)
 - 中性子星物質中の対相関・対称エネルギー・パスタ (飯田)
- 最近の天体観測結果が面白い！
 - 1.97 M_{\odot} 中性子星の発見 (Demorest+, 2010)
 - 半径の測定 (高橋 (忠))
 - 速い冷却の発見 (Page+, 2011)
- 分野間のつながりが面白い！
 - 冷却原子系の物理の進展 (堀越)

最近の中性子星観測の話題

■ 中性子星の質量・半径同時測定

- TOV 方程式を使うと M (質量)- R (半径) 関係式と EOS は 1 対 1 対応
- M, R が同時に決まると、EOS に非常に強い制限
[観測された (M, R) の”点”を通る必要がある!]
- X 線バースト観測 → 半径 (+ 質量) の情報



Ozel, Baym & Guver,
PRD82('10)101301 [arXiv: 1002.3153]

Steiner, Lattimer, Brown, ApJ 722 (2010) 33
[arXiv:1005.0811]

核子超伝導状態と冷却曲線

■ 表面温度測定と冷却曲線

- 超伝導状態 → ギャップ → ν 放出の抑制

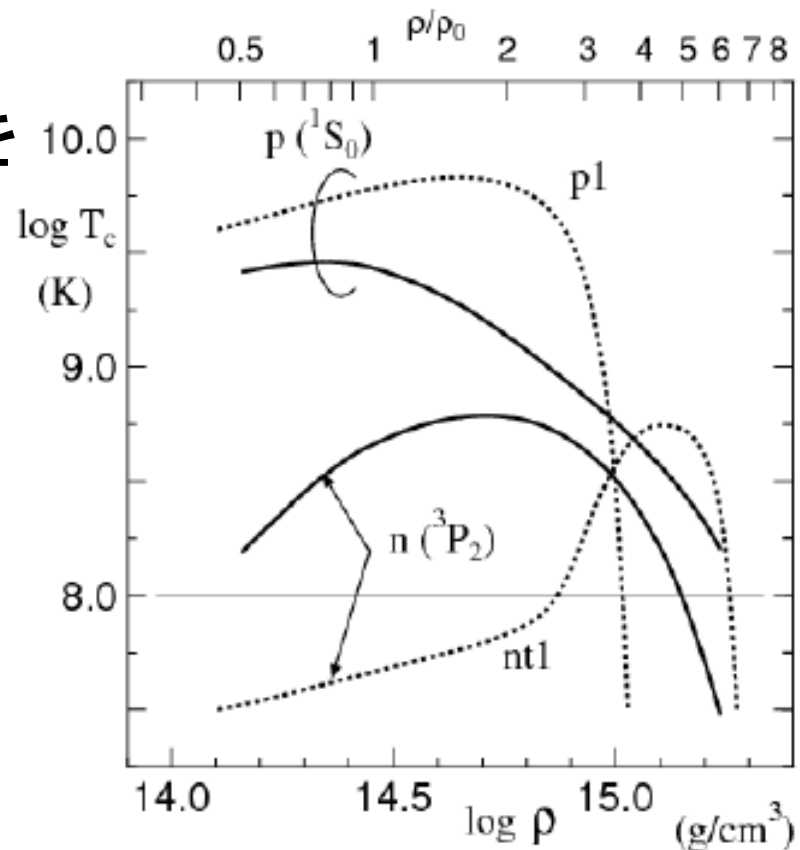
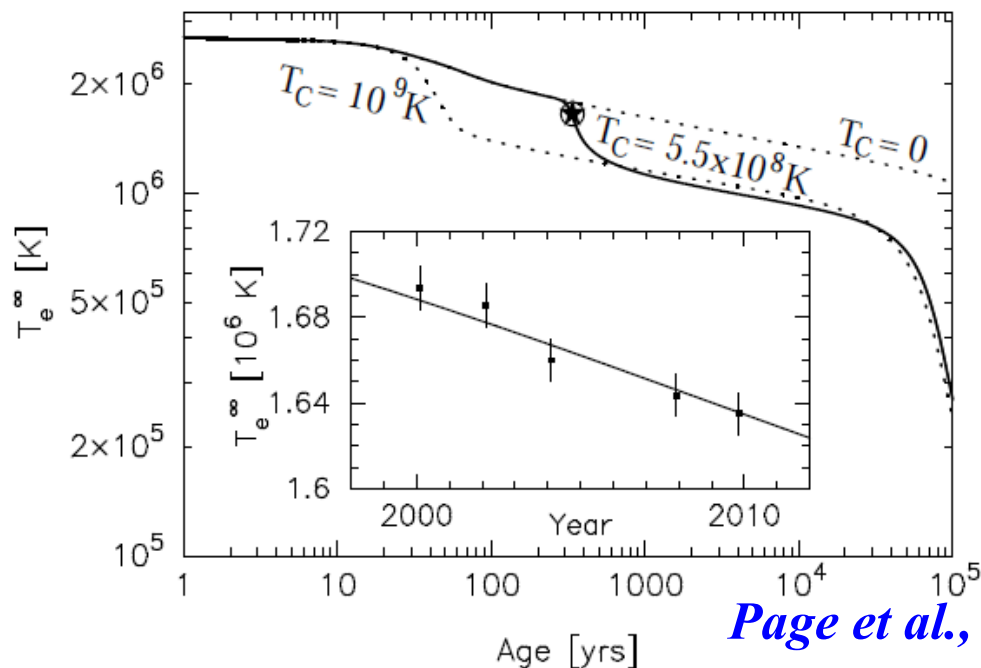
- Cas A の正確な温度測定と冷却率の測定

Heinke, Ho, ApJ 719('10) L167 [arXiv:1007.4719]

Page et al., PRL 106 ('11) 081101 [arXiv:1011.6142]

- neutron pair の breaking & formation

■ 核物理への宿題: $5\rho_0$ 程度までのギャップを正確に測定・計算できるか?



中性子星物質状態方程式と対称エネルギー

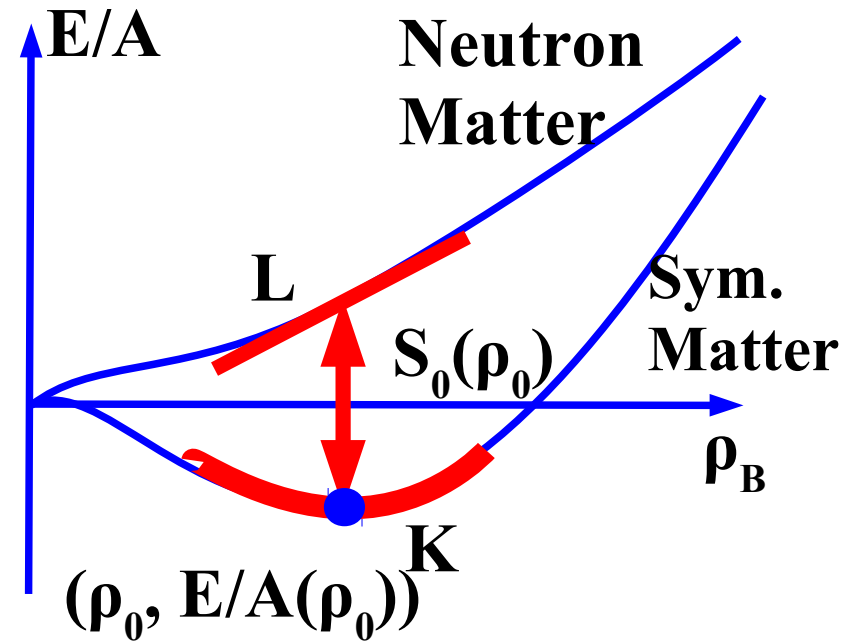
■ 核物質

- 原子核の質量・半径
→ 飽和密度、核子あたりのエネルギー、対称エネルギー
 $(\rho_0, E/A(\rho_0)) = (0.15 \text{ fm}^{-3}, -16 \text{ MeV})$
 $S_0 \sim 30 \text{ MeV}$
- 原子核の密度振動、重イオン衝突、中性子過剰核
→ 非圧縮率 (K)、対称エネルギーの密度依存性 (L)、...

■ 平衡条件 = 電気的中性

+ バリオンあたりのエネルギー最小

- 低密度：原子核 + 電子 + 中性子
- 高密度：核子 + 電子 + ミューオン + ハイペロン + K, π 中間子 + クォーク ...



$$E/A(\rho, \delta) = \varepsilon(\rho) + E_{\text{sym}}(\rho)\delta^2 + O(\delta^4)$$

Symmetric Matter

$$\varepsilon(\rho) = \varepsilon(\rho_0) + \frac{K(\rho - \rho_0)^2}{18\rho_0^2} + O((\rho - \rho_0)^3)$$

Symmetry Energy ($\delta = (N - Z)/A = 1 - 2Y_p$)

$$E_{\text{sym}}(\rho) = S_0 + \frac{L(\rho - \rho_0)}{3\rho_0} + \frac{K_{\text{sym}}(\rho - \rho_0)^2}{18\rho_0^2} + O((\rho - \rho_0)^3)$$

Symmetry Energy(対称エネルギー)

■ Summary of Nuclear Symmetry Energy workshop

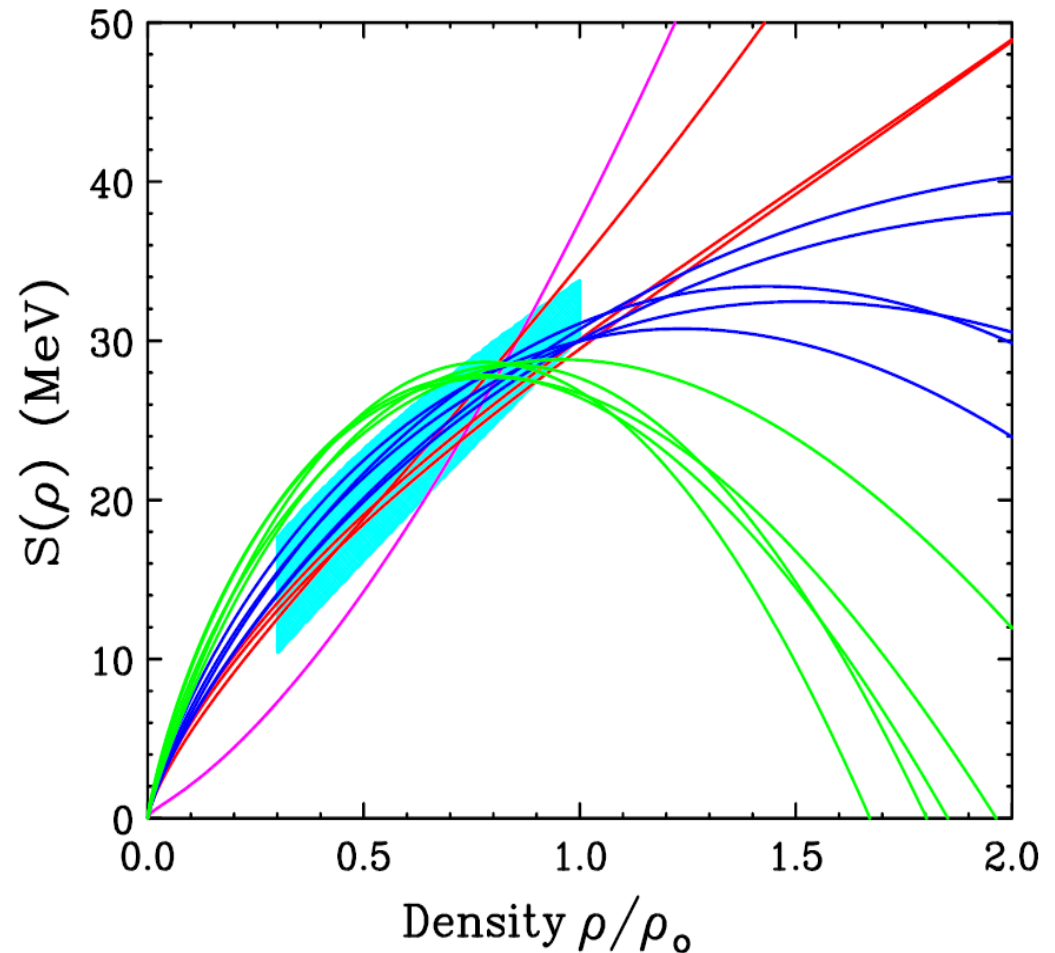
NuSym11 <http://www.smith.edu/nusym11>

$$E_{\text{sym}}(\rho_0) = 31\text{-}34 \text{ MeV}, L = 50\text{-}110 \text{ MeV}$$

extracted from various observations.

- Mass formula Moller ('10)
- Isobaric Analog State
Danielewicz, Lee ('11)
- Pygmy Dipole Resonance
Carbone+ ('10)
- Isospin Diffusion
NSCL/MSU group
- Neutron Skin thickness
J.Zenihiro+ ('10)

- 注意:これらは全て ρ_0 以下の密度での E_{sym} に敏感。
→ 高密度側では?



中性子星核物質状態方程式

■ 第一原理的計算

Akmal, Pandharipande, Ravenhall ('98), Kanzawa, Oyamatsu, Sumiyoshi, Takano ('07)
Brockmann, Machleidt ('90), Schulze, Polls, Ramos, Vidana ('06),
Nishizaki, Takatsuka, Yamamoto ('02), ...

- 現実的な核力から出発して、多体問題を直接解く (GFMC, Variational) あるいは有効相互作用を導出 (DBHF, G-matrix)
- 飽和性の説明には一般に現象論的 3 体力・密度依存斥力などが必要
- ハイペロンを導入するとさらに軟化 → Universal 3B Repulsion (NTY)

■ 非相対論的平均場模型 *E.g. Lattimer, Swesty ('91), Nakada ('08)*

- 密度依存力 (Skyrme 力、M3Y) 平均場 + 圧縮性液滴

■ 相対論的平均場模型

Muller, Serot ('96), Glendenning, Moszkowski ('91), Shen, Toki, Oyamatsu, Sumiyoshi, ('98), Ishizuka, AO, Tsubakihara, Sumiyoshi, Yamada('08)

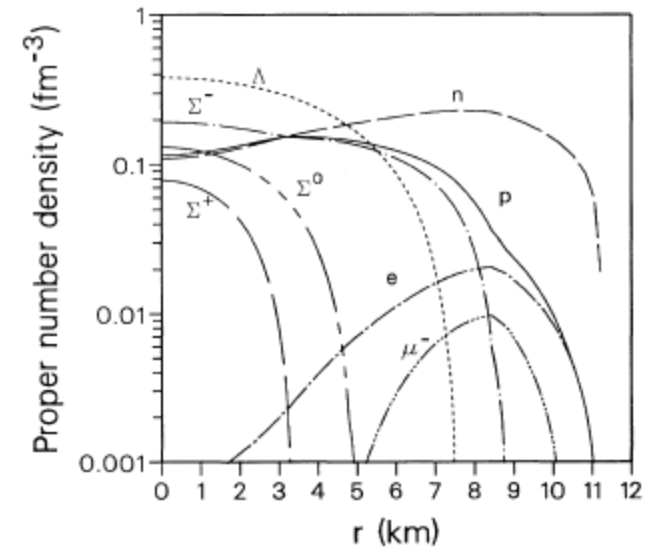
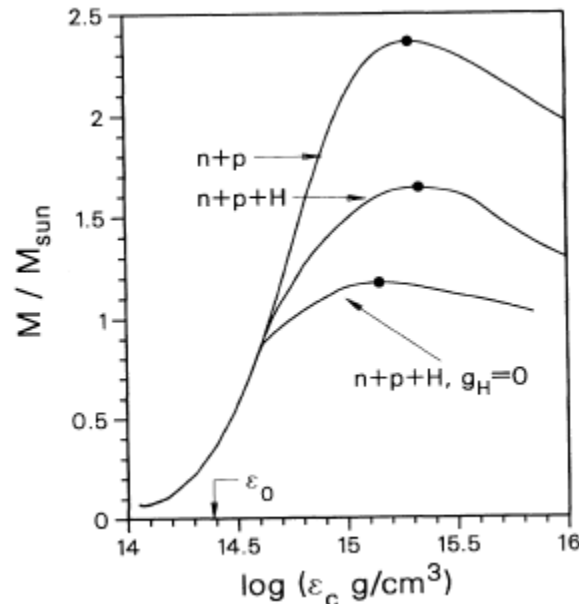
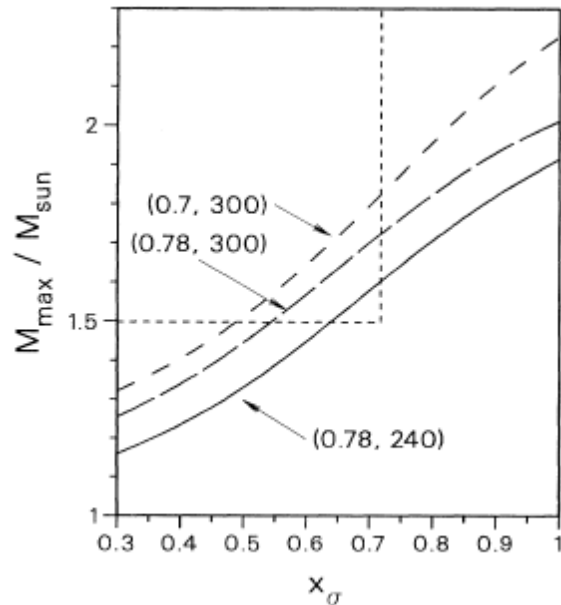
- 相対論的平均場 (RMF) + 非一様性 (Thomas-Fermi 近似)
- 相対論効果による斥力
→ ハイペロンを導入しても $1.5 M_{\odot}$ 程度の中性子星を支える

■ RMF with hyperons

- $n, p, Y, \sigma, \omega, \rho / \sigma^3, \sigma^4$
- Give $x_\sigma = g_{\sigma Y} / g_{\sigma N}$ and fix $x_\omega = g_{\omega Y} / g_{\omega N}$ to fit Λ separation energy.
- $x_\sigma = 0.6 \rightarrow m^*/m=0.7, x_\omega=0.653$
(similar to quark number counting result, $x=2/3$)
 $\rightarrow M_{\max} \sim 1.6 M_\odot$

TABLE I. Values of the hyperon-to-nucleon scalar and vector coupling that are compatible with the binding of -28 MeV for Λ hyperons in nuclear matter for two values of the nucleon (Dirac) effective mass at saturation density.

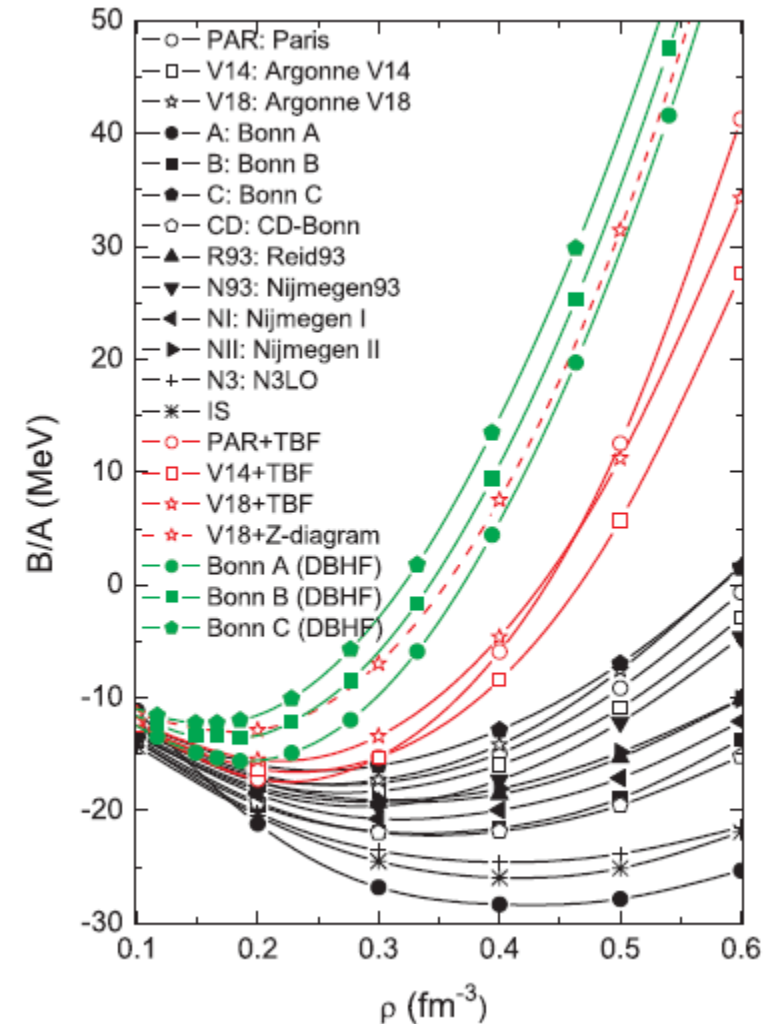
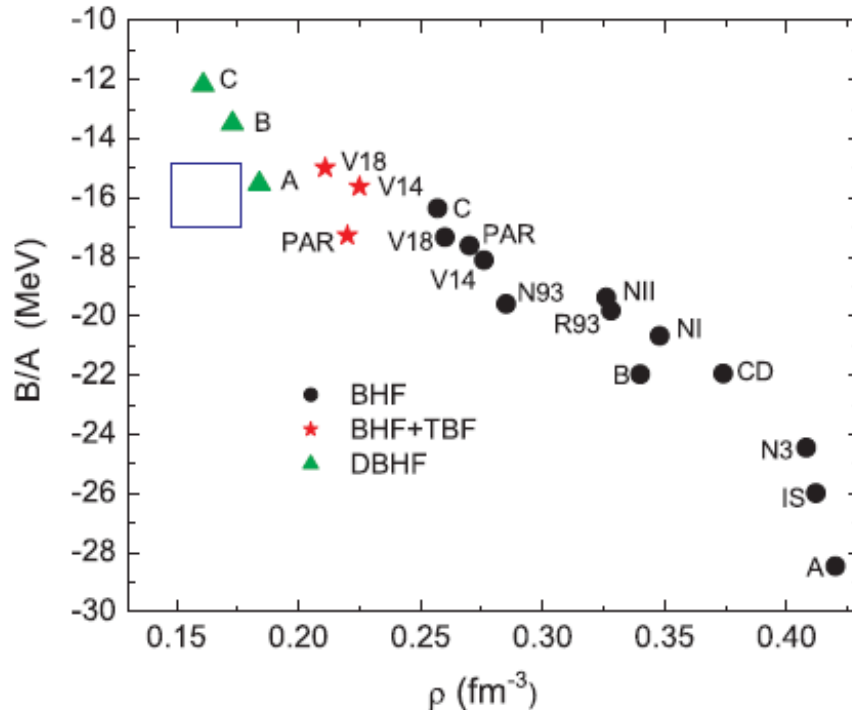
x_σ	x_ω	$m^*/m=0.7$	$m^*/m=0.78$
0.2		0.131	0.091
0.3		0.261	0.233
0.4		0.392	0.375
0.5		0.522	0.517
0.6		0.653	0.568
0.7		0.783	0.800
0.8		0.913	0.942
0.9		1.04	1.08
1		1.17	1.23



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

Bruckner-Hartree-Fock 理論

- 現実的核力からスタートして、有効相互作用 (G-matrix) と一粒子エネルギーを self-consistent に決定。
- 飽和点を再現するには、3 体力が必要。
→ 藤田・宮沢タイプ (バリオン共鳴経由) の 3 体力 (2 π 交換) + 現象論的 3 体力 (or 相対論効果)



Z.H.Li, U. Lombardo, H.-J. Schulze, W. Zuo, L. W. Chen, H. R. Ma, PRC74('06)047304.

BHF with Hyperons

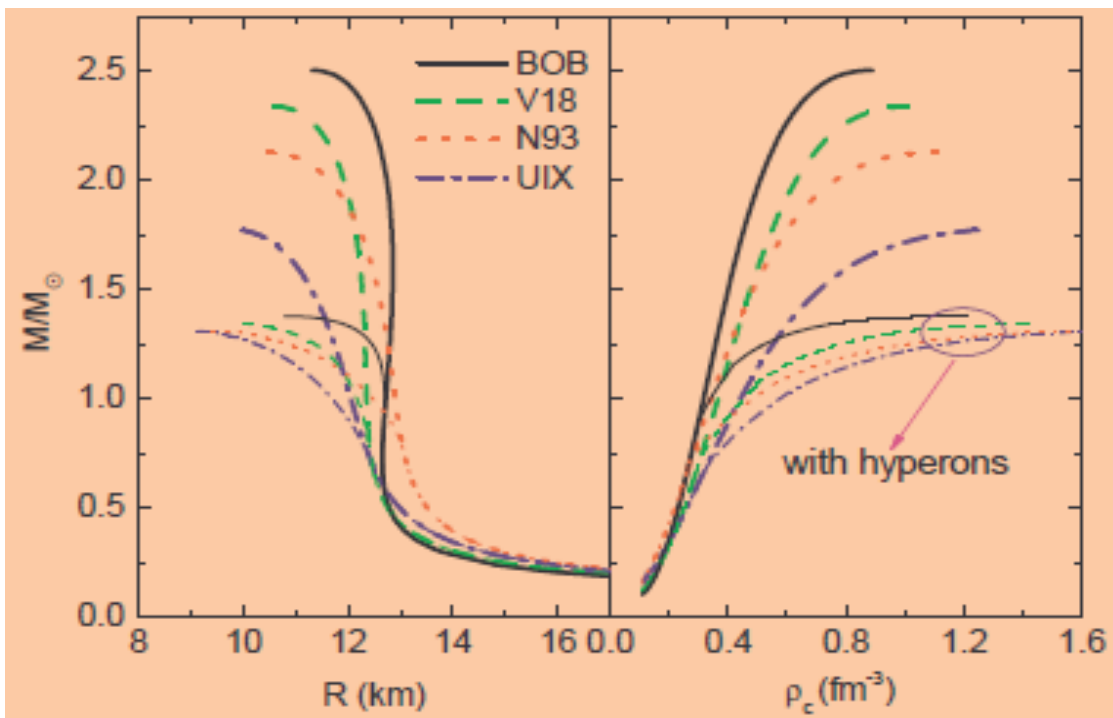
■ 現実的 NN, NY 力から構成した有効相互作用 (微視的有効相互作用)

*3 体力 (現象論を含む)

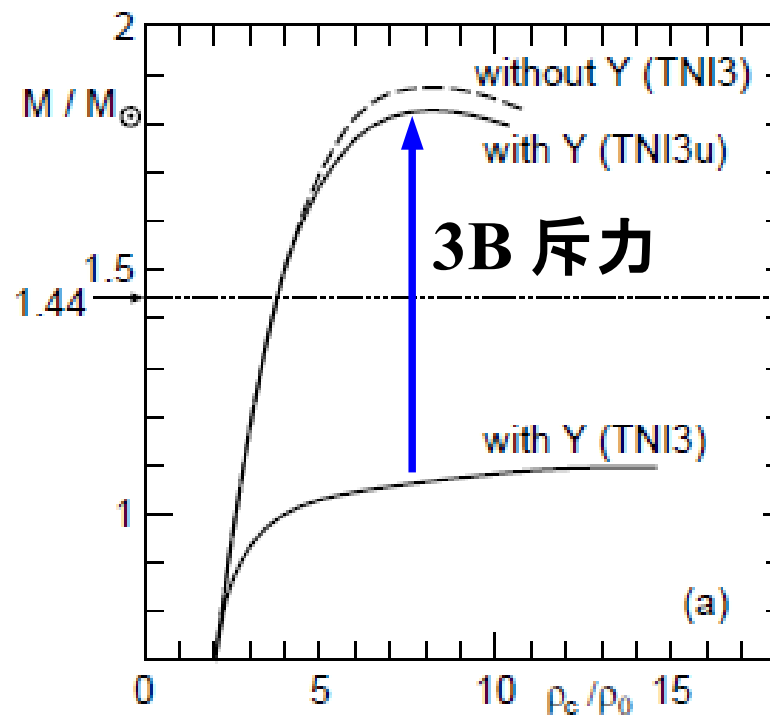
- 相互作用依存性 (V18, N93, ...) 大 → ハイパー核情報が必要。

E.Hiyama, T.Motoba, Y.Yamamoto, M.Kamimura / H.Tamura et al.

- 3B 力を入れないと中性子星はつぶれる。



*H.J.Schulze, A.Polls, A.Ramos, I.Vidana,
PRC73('06),058801.*



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

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

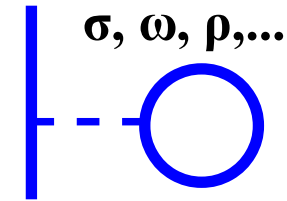
B.D.Serot, J.D.Walecka, Adv.Nucl.Phys.16 ('86), 1

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

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

$$L_{BM} = -\sum_{B,S} g_{BS} \bar{\Psi}_B \Phi_S \Psi_B - \sum_{B,V} g_{BV} \bar{\Psi}_B \gamma^\mu V_\mu \Psi_B$$

$$L_B^{\text{free}} = \bar{\Psi}_B (i \gamma^\mu \partial_\mu - M_B) \Psi_B, \quad L_M^{\text{free}} = \sum_S \left[\frac{1}{2} \partial^\mu \Phi_S \partial_\mu \Phi_S - \frac{1}{2} m_S^2 \Phi_S^2 \right] + \sum_V \left[-\frac{1}{4} V_{\mu\nu} V^{\mu\nu} + \frac{1}{2} V_\mu V^\mu \right]$$



- バリオン・中間子 : B=N, Λ , Σ , Ξ , ..., S= σ , ζ , ..., V= ω , ρ , φ , ...
- 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、非線形結合

● 原子核の性質

→ σN , ωN , ρN 結合定数は確立

● 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.

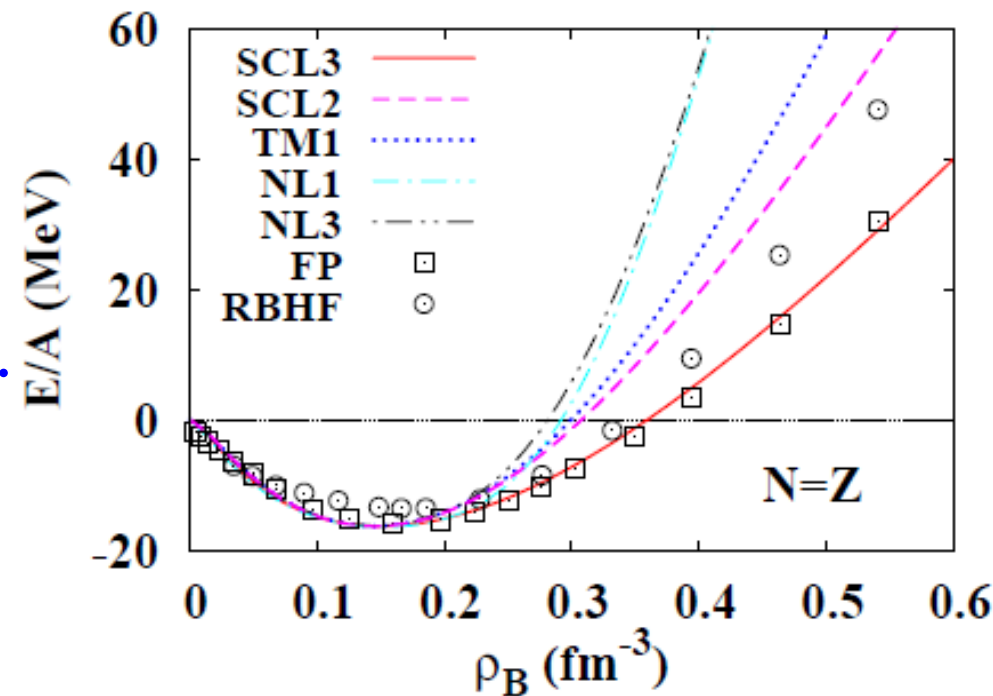
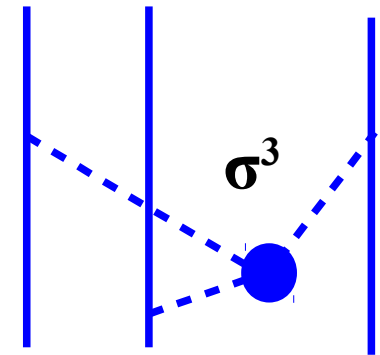
NL3: G.A. Lalazissis, J. König, P. Ring,
PRC55('97)540.

● 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



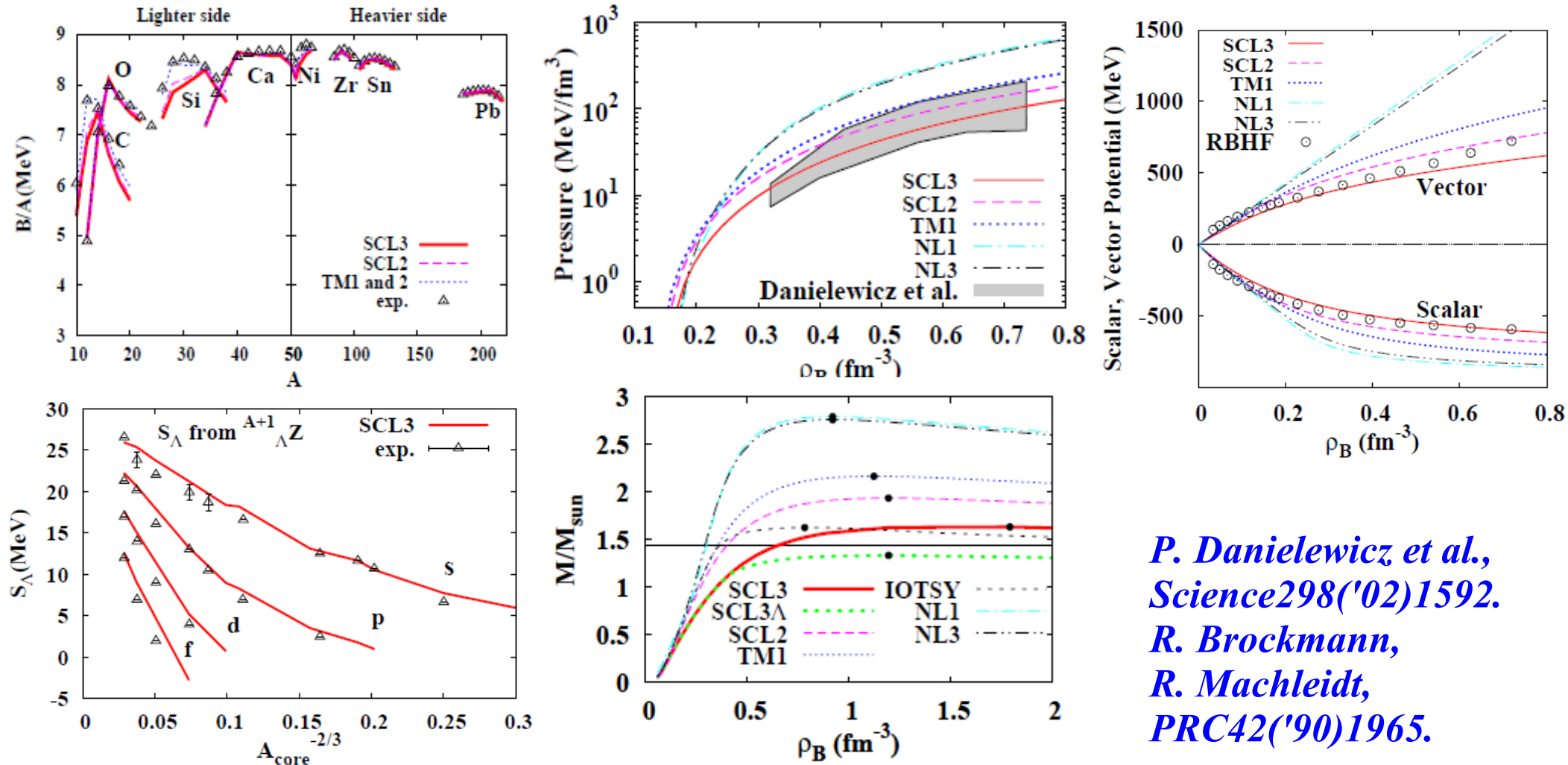
K. Tsubakihara, H. Maekawa, H. Matsumiya, AO, PRC81('10)065206.

現象論としてのRMF

Fit as many as known observables

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

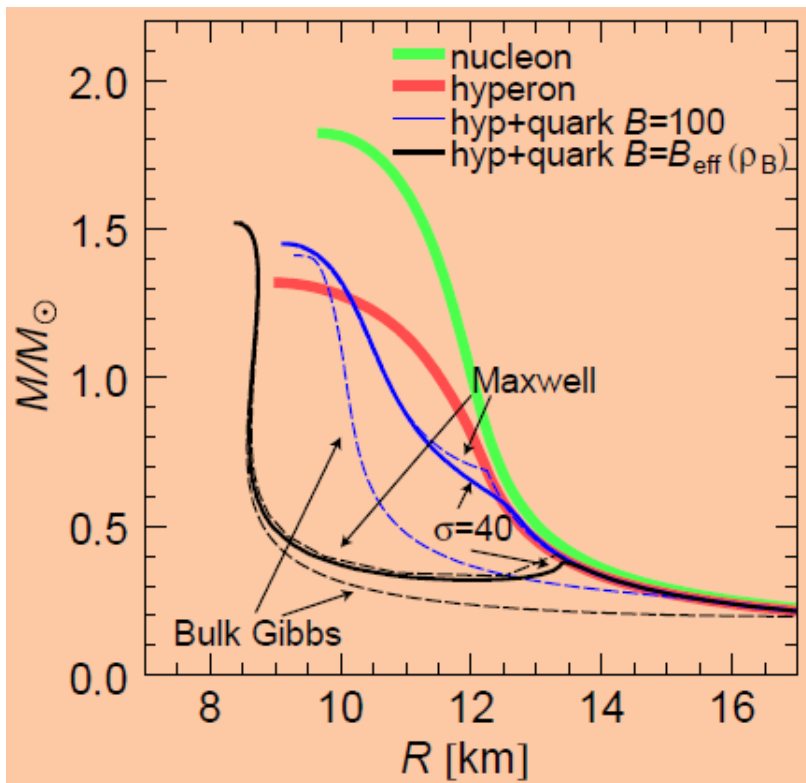
- EOS, Nuclear B.E., High density EOS from HIC, Vector potential in DBHF, Hypernuclear Separation Energy, Neutron Star, ...



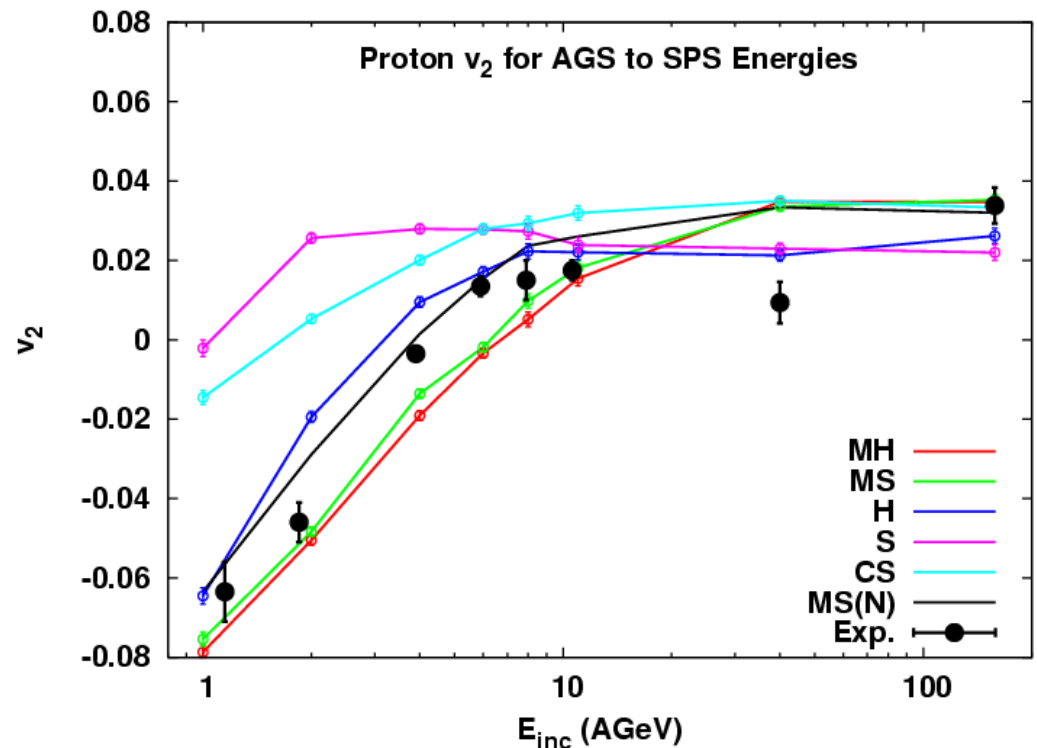
*P. Danielewicz et al.,
Science 298('02)1592.
R. Brockmann,
R. Machleidt,
PRC 42('90)1965.*

How can we solve it ?

- No Hyperons, No Kaons → How can it be consistent with YN int ? (μ_B in NS ~ 1650 MeV in core in TM1)
- Stiff nuclear matter EOS + transition to quark matter at small ρ_B → How can it be consistent with HIC data at AGS-SPS energies ?
- Three-body force for baryons, quarks, ...



H.-J. Schulze, NFQCD10



M. Isse, AO, N. Otuka, P. K. Sahu, Y. Nara, PRC72 ('05)064908

RMF へのハイペロンの導入

■ 中間子・ハイペロン結合

- フレーバー・スピン (SU(6)) 対称性
 ~ クォーク数カウンティング
Glendenning ('81)

$$x_{\sigma\Lambda} \equiv g_{\sigma\Lambda} / g_{\sigma N} = 2/3$$

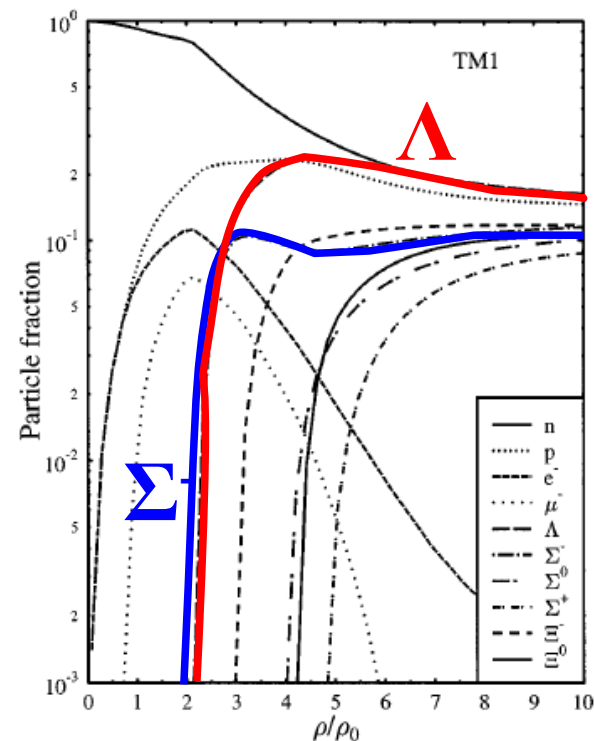
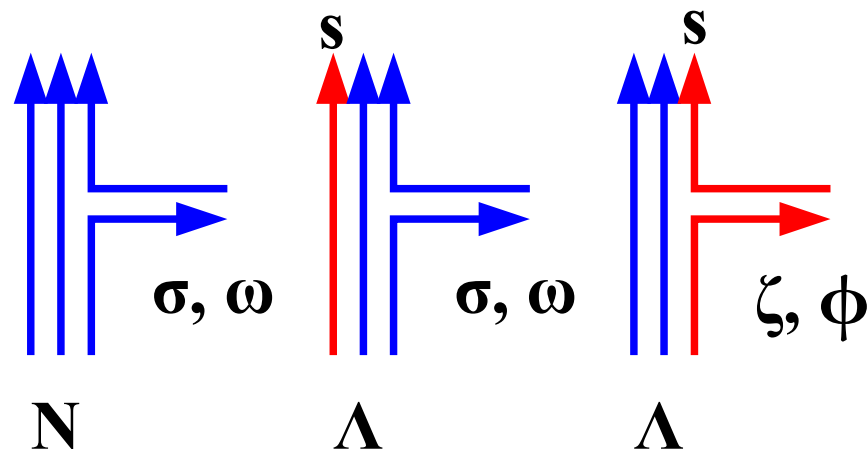
$$x_{\omega\Lambda} \equiv g_{\omega\Lambda} / g_{\omega N} = 2/3$$

→ 核物質中のポテンシャルの比
 ($U_{\Lambda} \sim 2/3 U_N$) と対応。

c.f. π 交換をもとに考えると $x_{\sigma\Lambda} \sim 1/3$
Brockmann, Weise ('77)

- $\bar{s}s$ からなるスカラー、ベクトル中間子
 (ζ, ϕ) との結合を導入

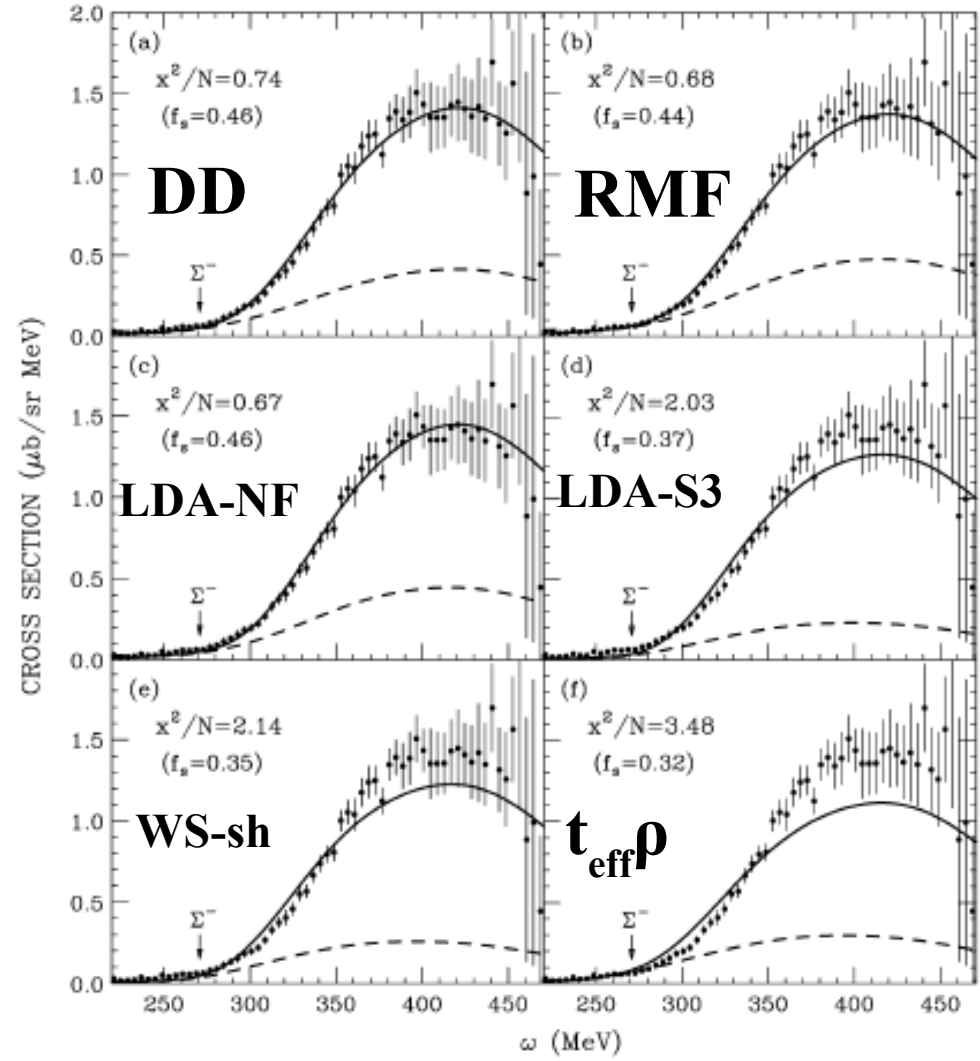
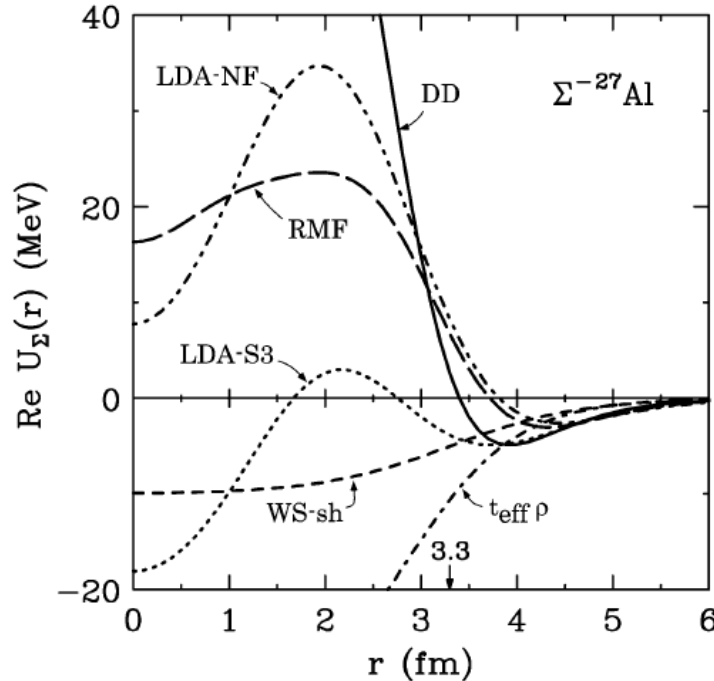
- 高密度物質中の大きなフェルミエネルギー、
 弱い斥力により、(2-4) ρ_0 でハイペロンが出現



*J. Schaffner, I. N. Mishustin,
 PRC 53('96)1416*

RMF へのハイペロンの導入

- クォーク数カウンティングに従うと、
 $U_{\Sigma} \sim U_{\Lambda} \sim 2/3 U_N \sim -30 \text{ MeV}$
 のはず。
- Σ バリオン生成反応データを
 分析すると、 $U_{\Sigma} > 0$ (斥力)



Harada, Hirabayashi ('05)

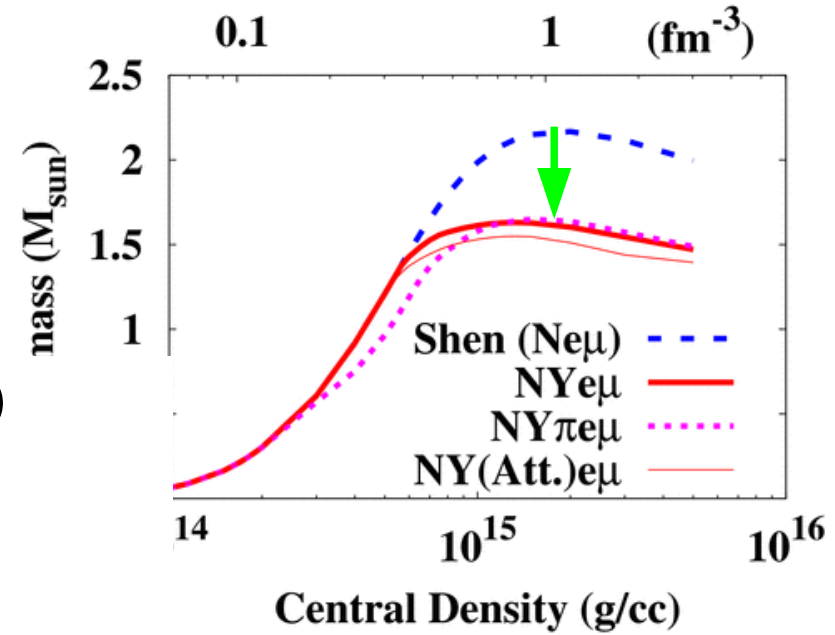
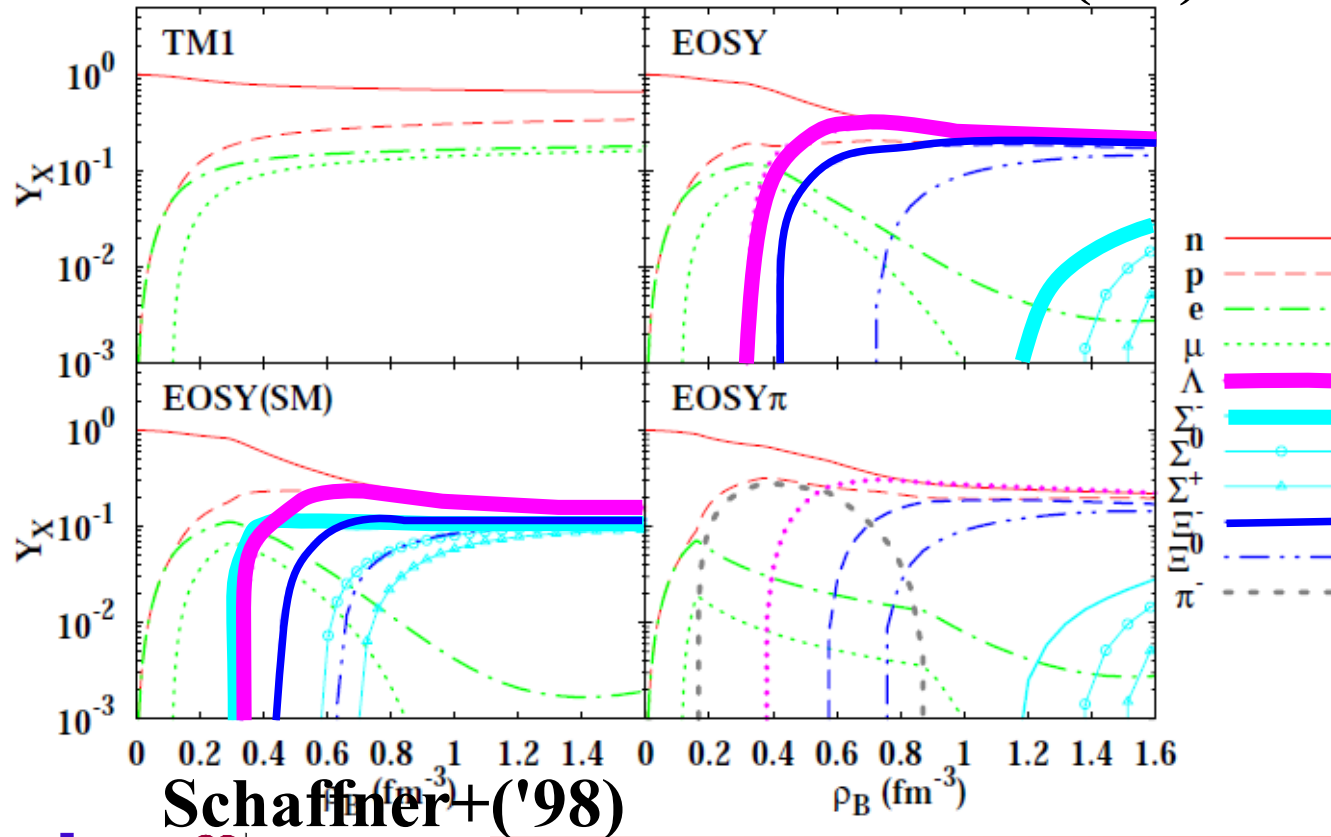
ハイペロンを含むRMFでの中性子星

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

何が中性子星を支えるのか？

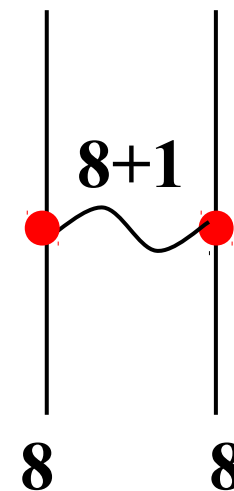
■ 棄却された EOS

= SU(3) (or SU(6)) 対称性に基づく中間子交換起源の 2 体斥力による平均場の状態方程式

Glendenning, Moszkowski ('91)

- 相対論効果を含めても、 $\omega\Lambda$ 結合 $\sim (\omega N \text{ 結合}) \times (2/3)$ とすると、 $1.97 M_{\odot}$ は支えられない。

→ **ベクトル中間子交換以外の起源の斥力がある！**



■ 高密度での斥力の起源は？

- 3 体斥力の導入

Nishizaki, Takatsuka, Yamamoto ('02)

- 高次項の導入 *Bednarek, Haensel et al.('11)*

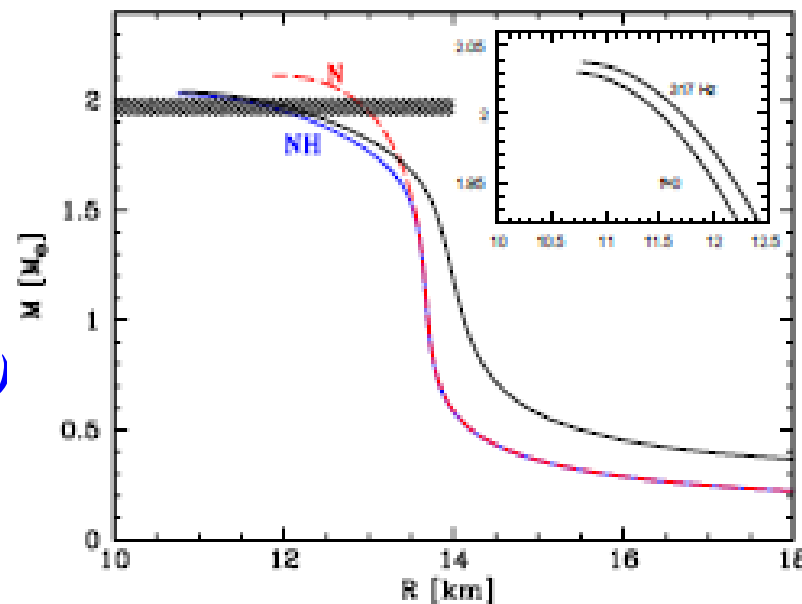
- Vector 結合に SU(6) の破れを導入

Weisenborn, Chatterjee, Schaffner-Bielich ('11)

- クォーク物質への相転移

この学会での講演 5 件！

(高塚、益田、山崎、李、上田)



Bednarek, Haensel et al.('11)

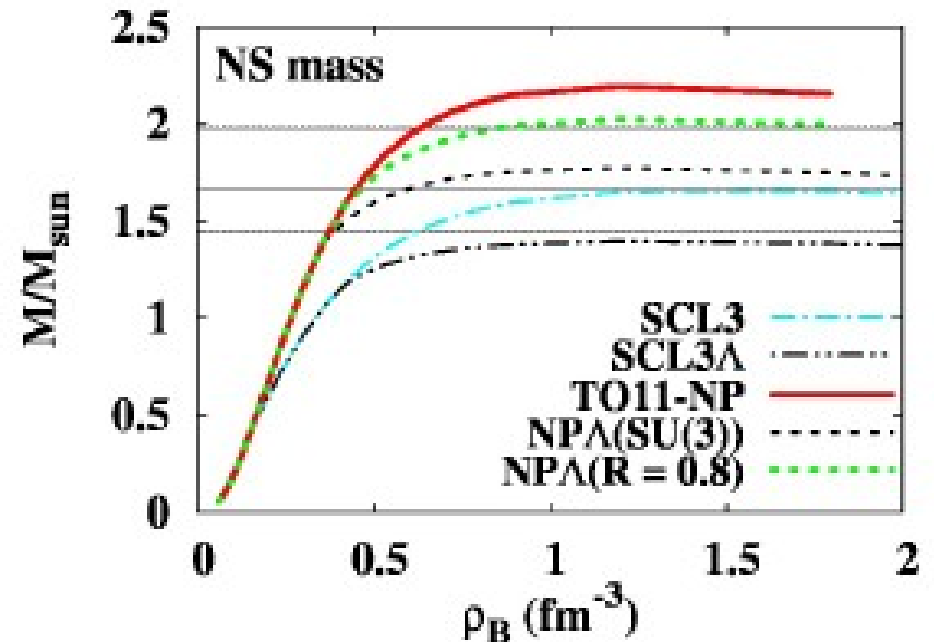
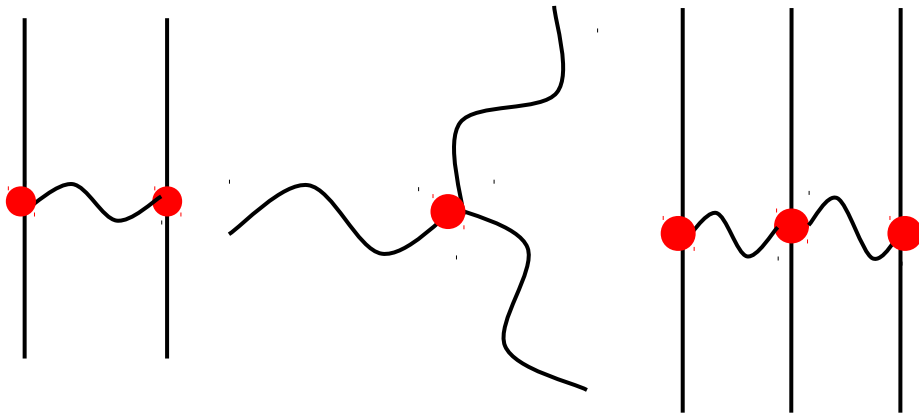
3 体力を含むRMF

■ 3 体力を含む相互作用項

$$\delta L = -U_\sigma(\sigma) - \frac{1}{2} c_{\sigma\omega} \sigma \omega_\mu \omega^\mu - \frac{1}{4} c_{\omega\omega} (\omega_\mu \omega^\mu)^2$$

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

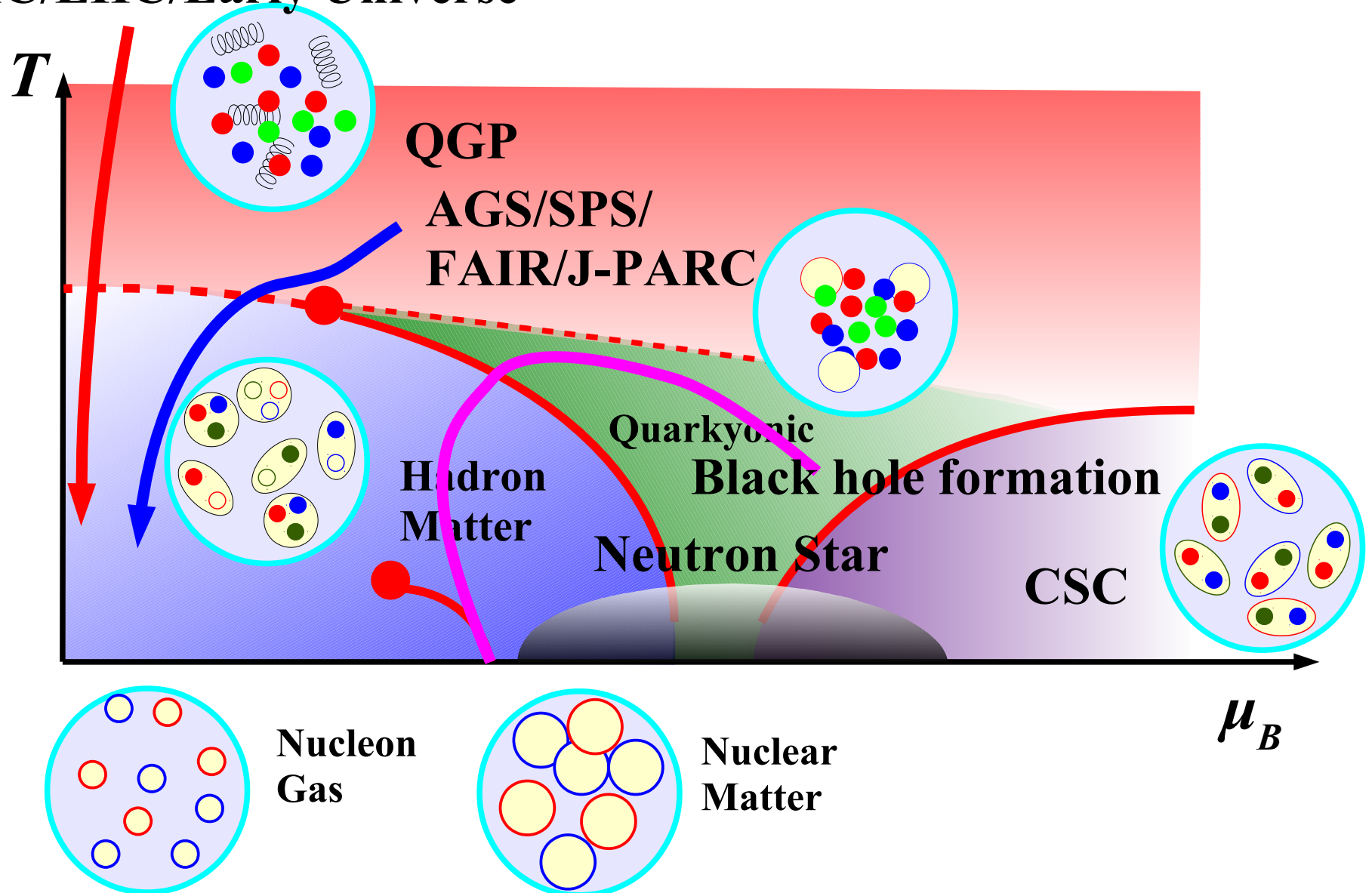
- BBMM 相互作用項は標準的な RMF では無視
(場の再定義により他の項に吸収可能) *Furnstahl, Serot, Tang ('97)*
しかし場の再定義は Naïve dimensional analysis (NDA) の次数を変える
 $n = B/2 + M$



Tsubakihara, AO, in prep.

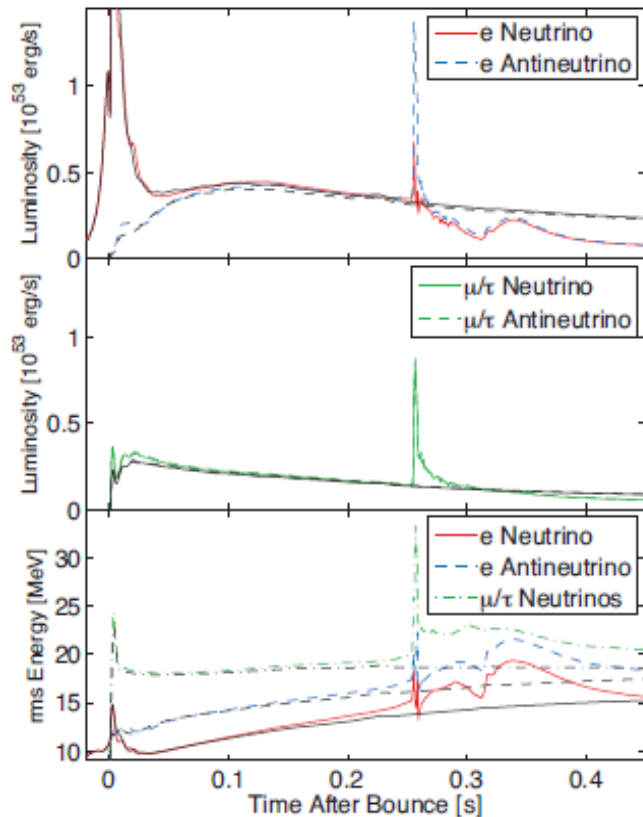
QCD Phase Diagram

RHIC/LHC/Early Universe



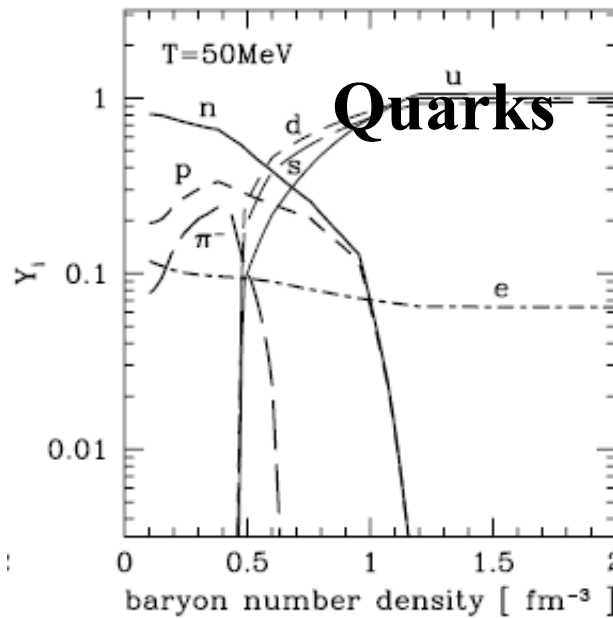
Can we detect Quark Matter ?

- Transition to Strange Quark Star during Supernovae → Second Shock (*Hatsuda, 1987; Sagert et al., 2009*)
- Earlier Collapse to Black Hole with Quark-Hadron Coexistence (*Nakazato, Sumiyoshi, Yamada, 2008*)



Sagert et al., 2009

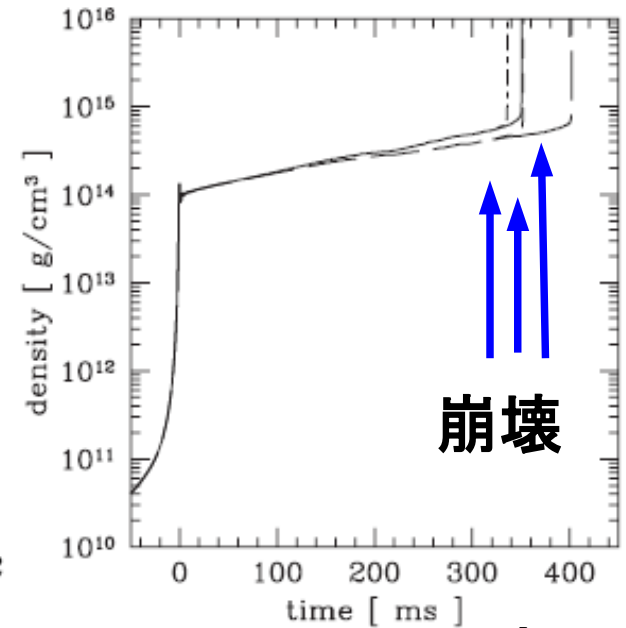
粒子比



密度

Nakazato, Sumiyoshi, Yamada

密度

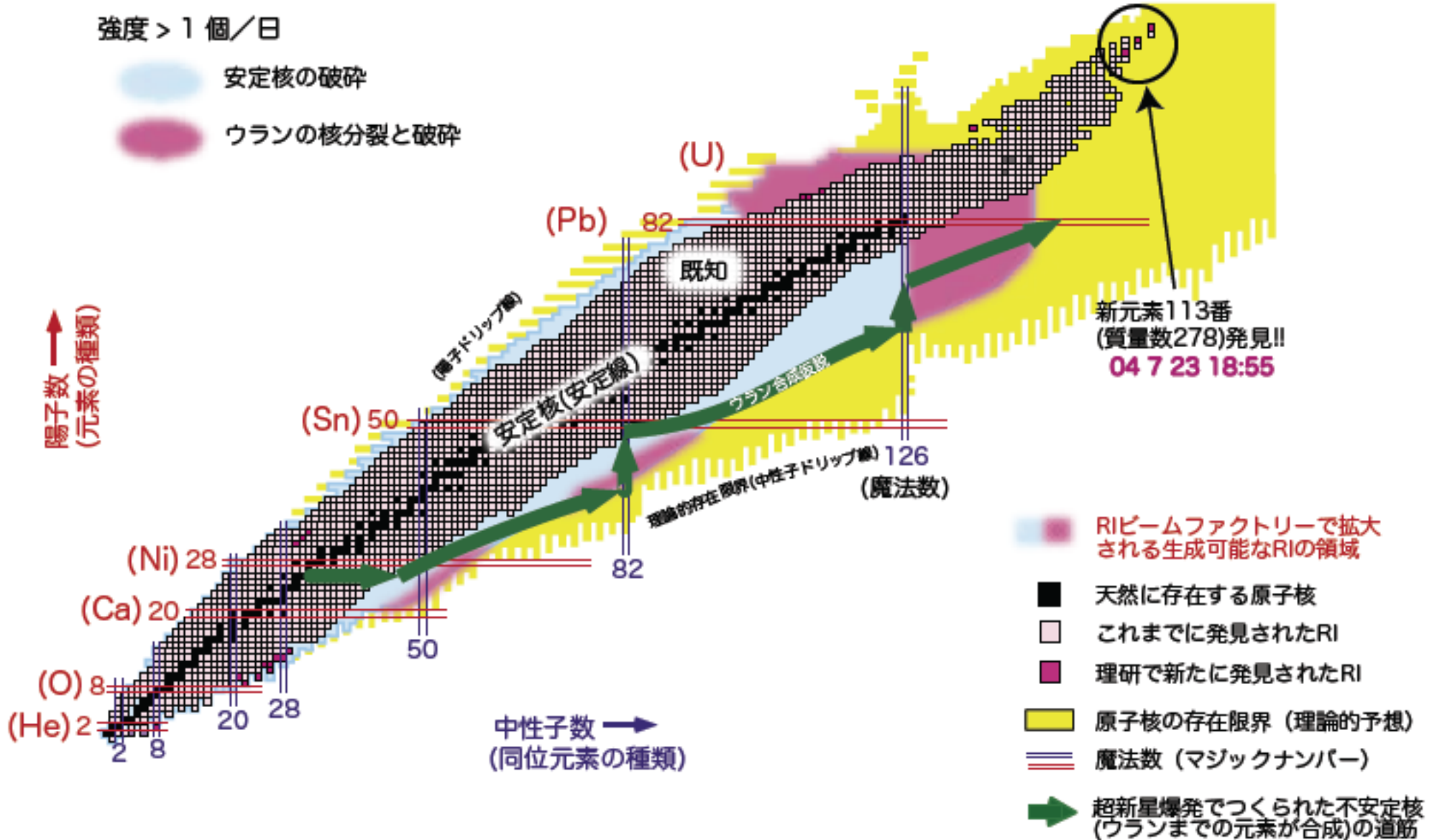


崩壊

時間

原子核の存在領域の拡大

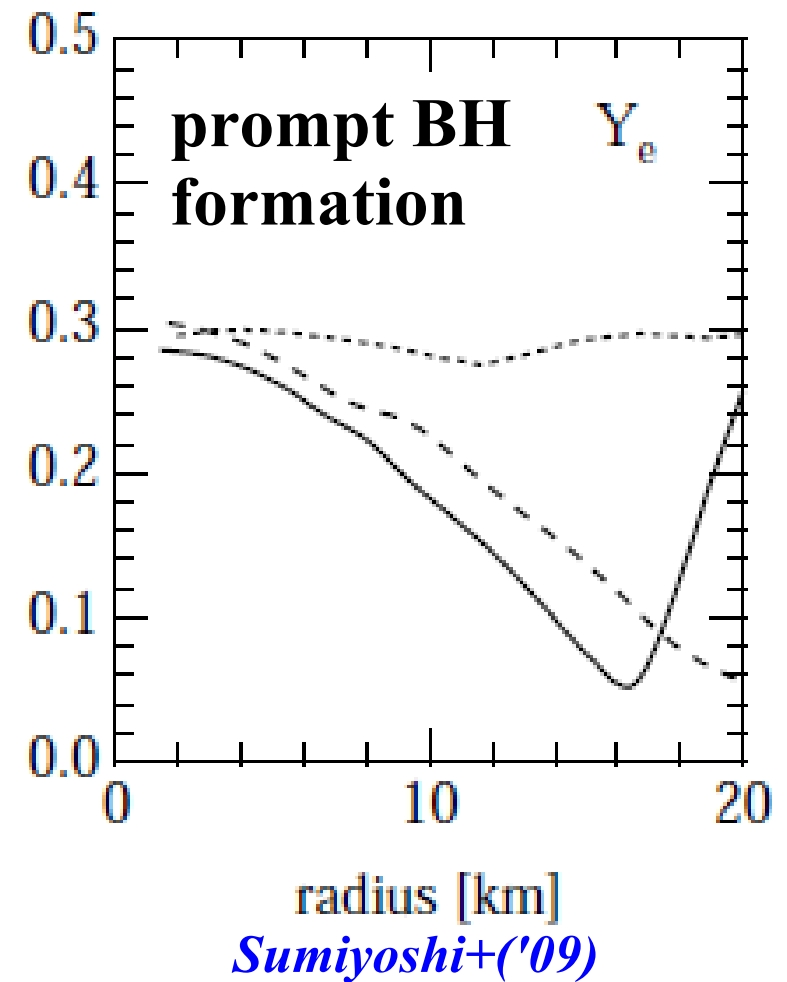
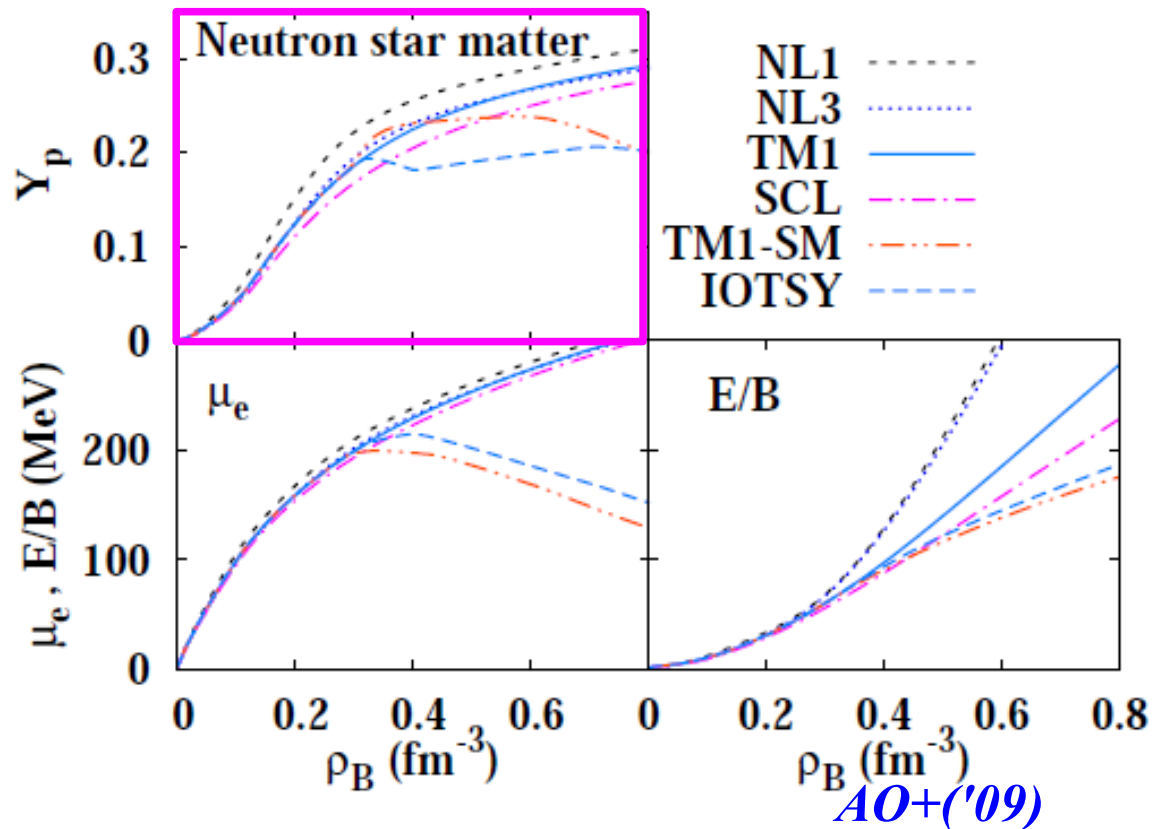
Nishina Center RIBF Pamph.



Compact Star Matter is Neutron Rich

■ Proton fraction in Compact Stars

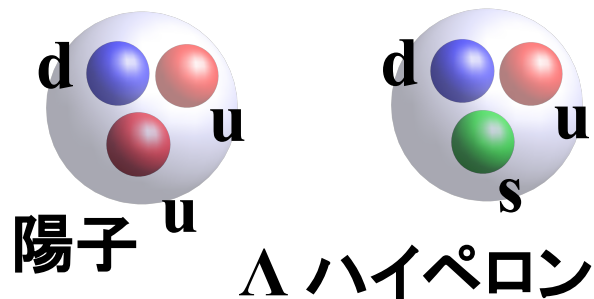
- Neutron star $Y_p \sim 0.1$ ($\rho_B \sim \rho_0$)
- Supernova $Y_p \sim 0.3$ (bounce) (c.f. H. Suzuki's talk)
- Black hole formation $Y_p \sim (0.1-0.3)$



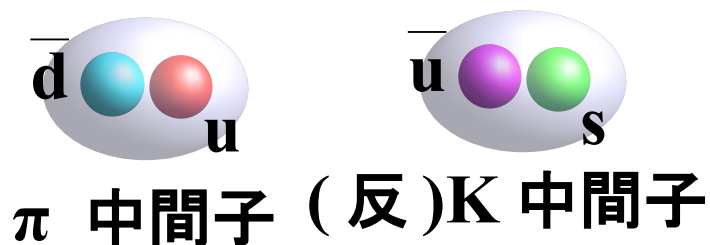
中性子星コアの状態

■ コア領域では様々な可能性

- ストレンジクォークを含むバリオン (ハイペロン) を含む物質

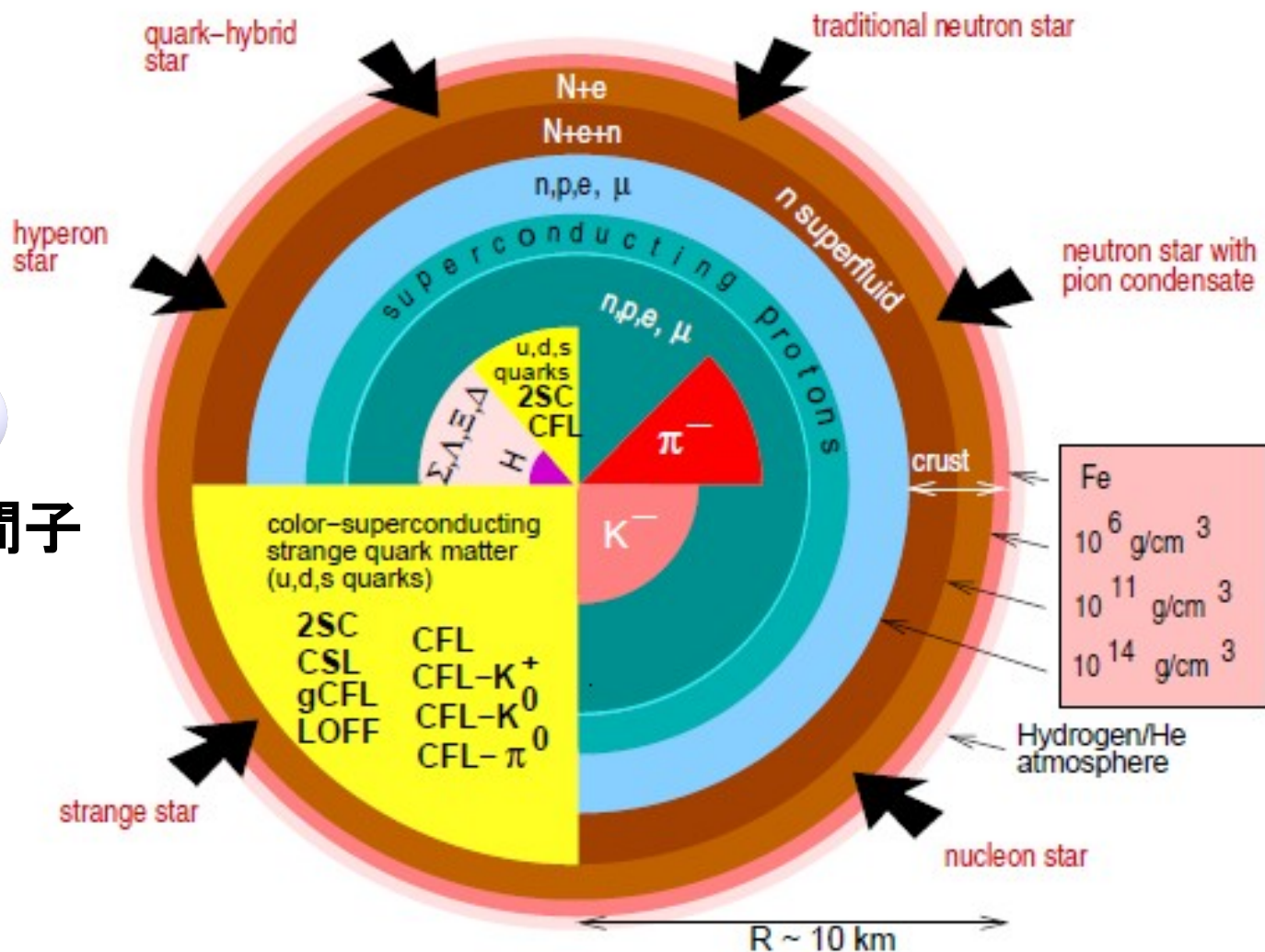
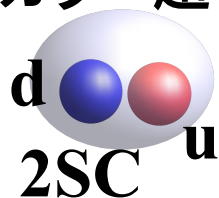


- 中間子凝縮 (K , π)



- クォーク物質

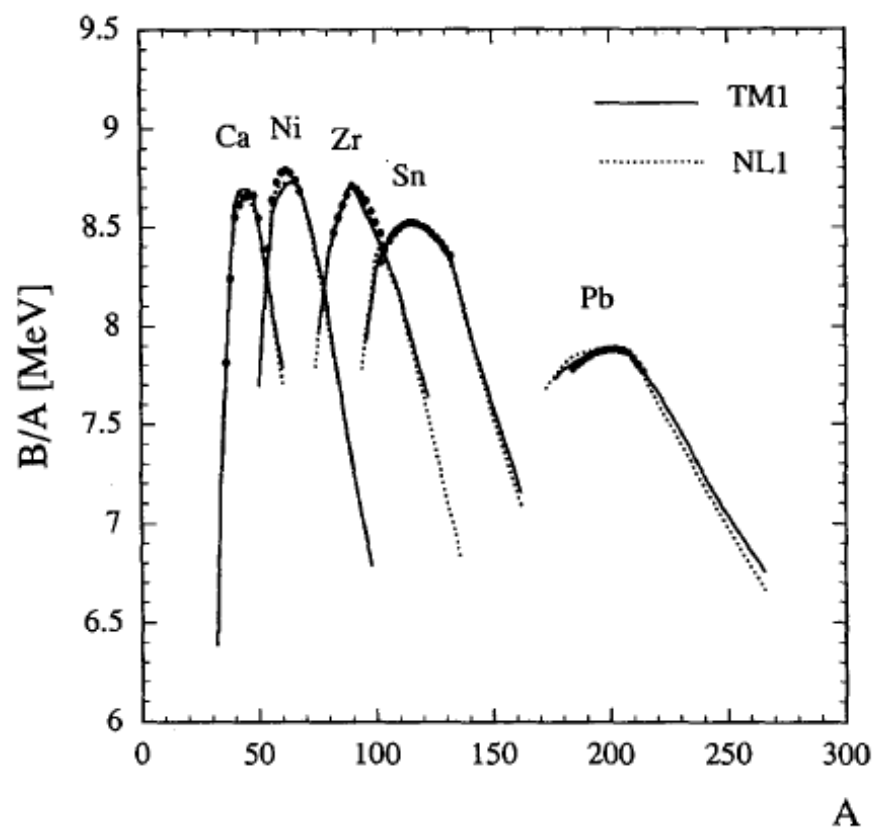
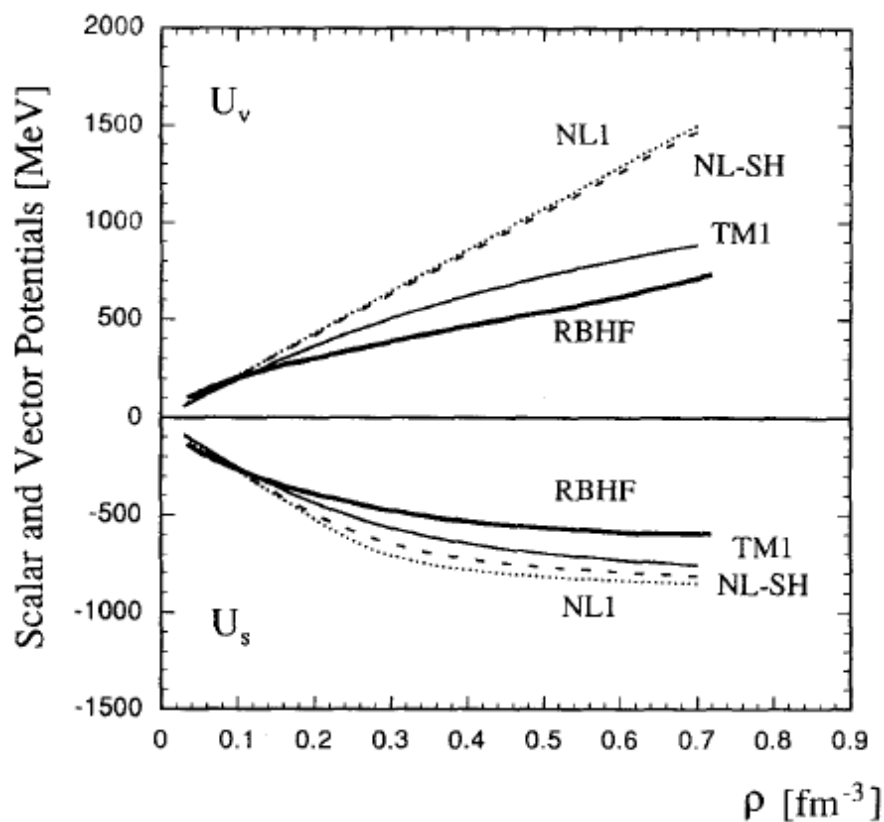
- クォーク対凝縮状態 (カラー超伝導)



F. Weber, Prog. Part. Nucl. Phys. 54 (2005) 193

RMF with meson self-interaction

- 最も単純な RMF ($\sigma\omega$ 模型) では EOS が硬すぎる ($K > 600$ MeV)
- Self-interaction term of mesons
 - ω^4 の導入 \rightarrow 第一原理計算 (DBHF) のベクトル・ポテンシャルを模倣
 - σ^3, σ^4 の導入 \rightarrow 柔らかい状態方程式が可能



TM1: Sugahara, Toki ('94)

High Quality RMF models

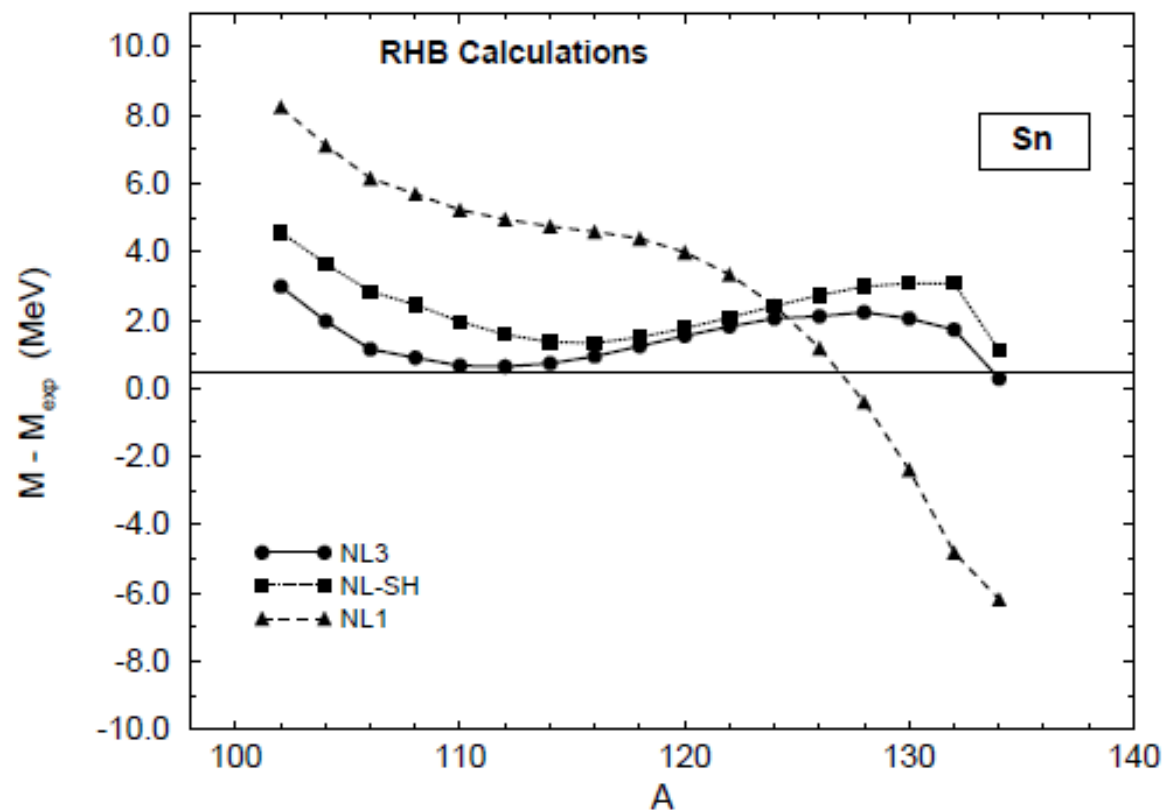
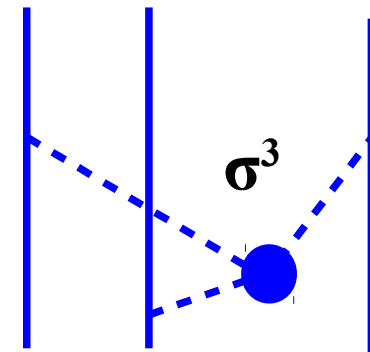
- いくつかの RMF パラメータによる計算は、「質量公式」に迫る精度で原子核質量を記述！

→ High Quality RMF models.
TM, NL1, NL3,

- 全質量で 1, 2 MeV の誤差 (NL3)

- Linear coupling (σN , ωN , ρN), self-energy in σ , ω

- 場合によっては結合定数の密度依存性を導入。



NL3: Lalazissis, Konig, Ring, PRC55 ('97)540

Symmetry Energy

- Summary of Nuclear Symmetry Energy workshop
NuSym11 <http://www.smith.edu/nusym11>

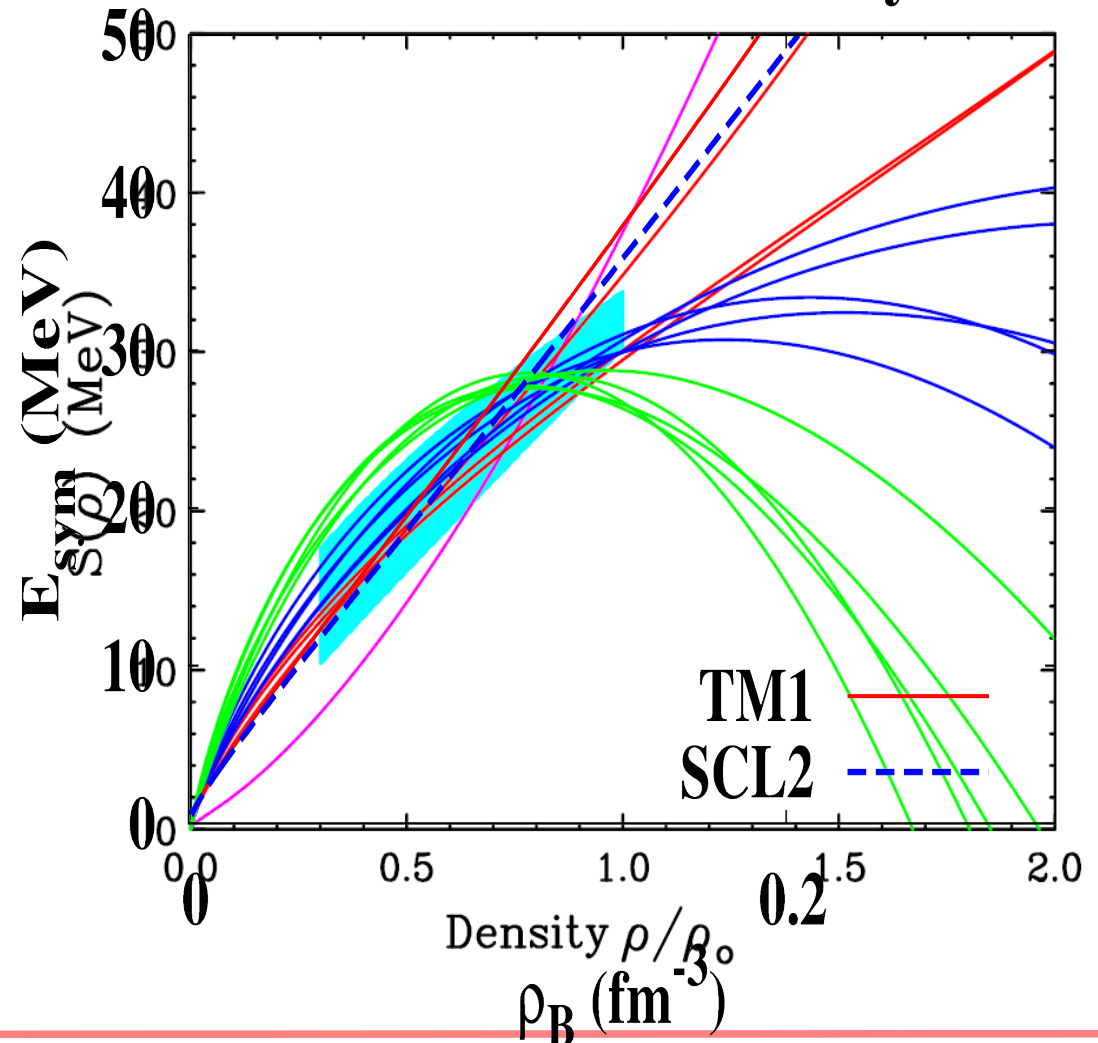
$$E_{\text{sym}}(\rho_0) = 31\text{-}34 \text{ MeV}, L = 50\text{-}110 \text{ MeV}$$

extracted from various observations.

TM1: barely OK

- Mass formula Moller ('10)
- Isobaric Analog State
Danielewicz, Lee ('11)
- Pygmy Dipole Resonance
Carbone+ ('10)
- Isospin Diffusion
NSCL/MSU group
- Neutron Skin thickness
J.Zenihiro+ ('10)

- 注意:これらは全て ρ_0 以下の密度での E_{sym} に敏感。

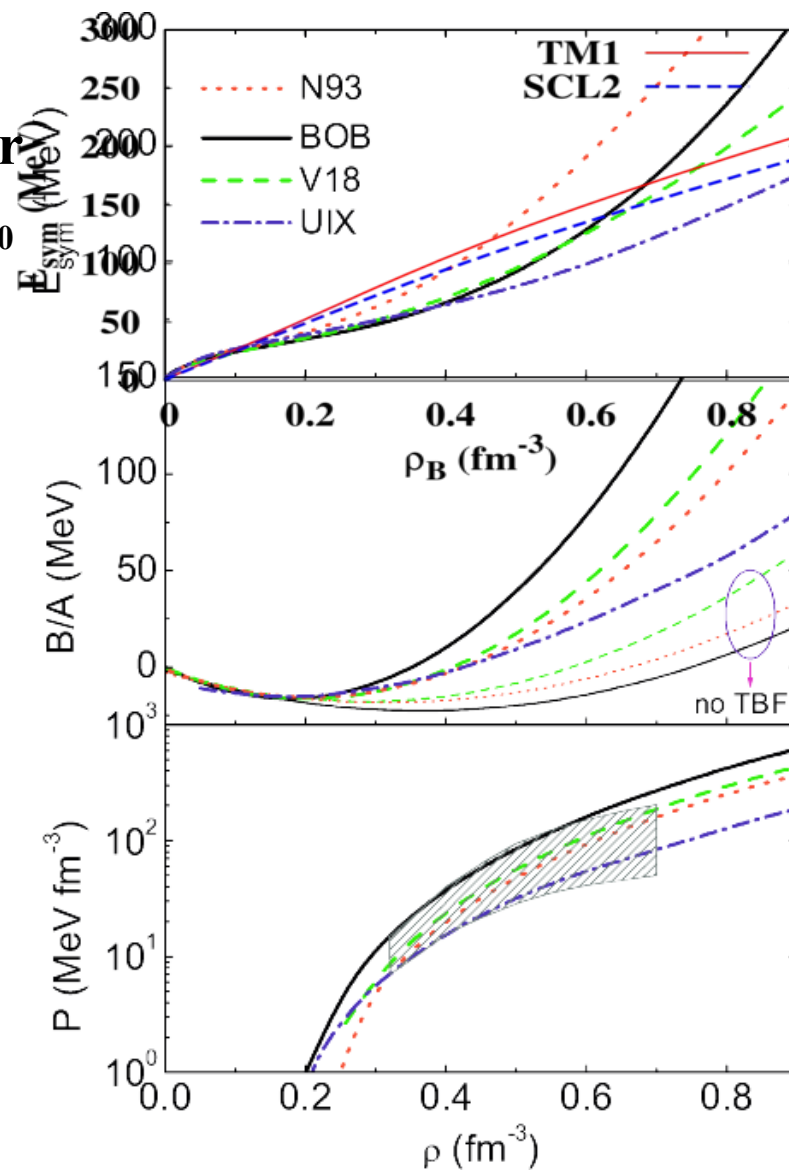
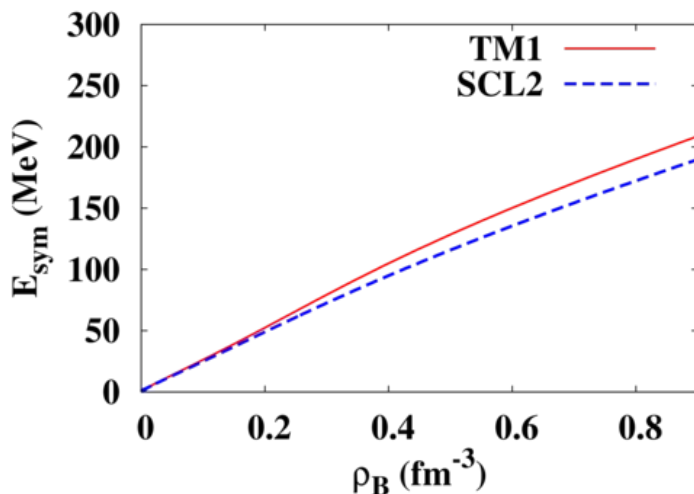


Density dependence of Symmetry Energy

■ RMFs have small ambiguity in E_{sym} .

Is it true ?

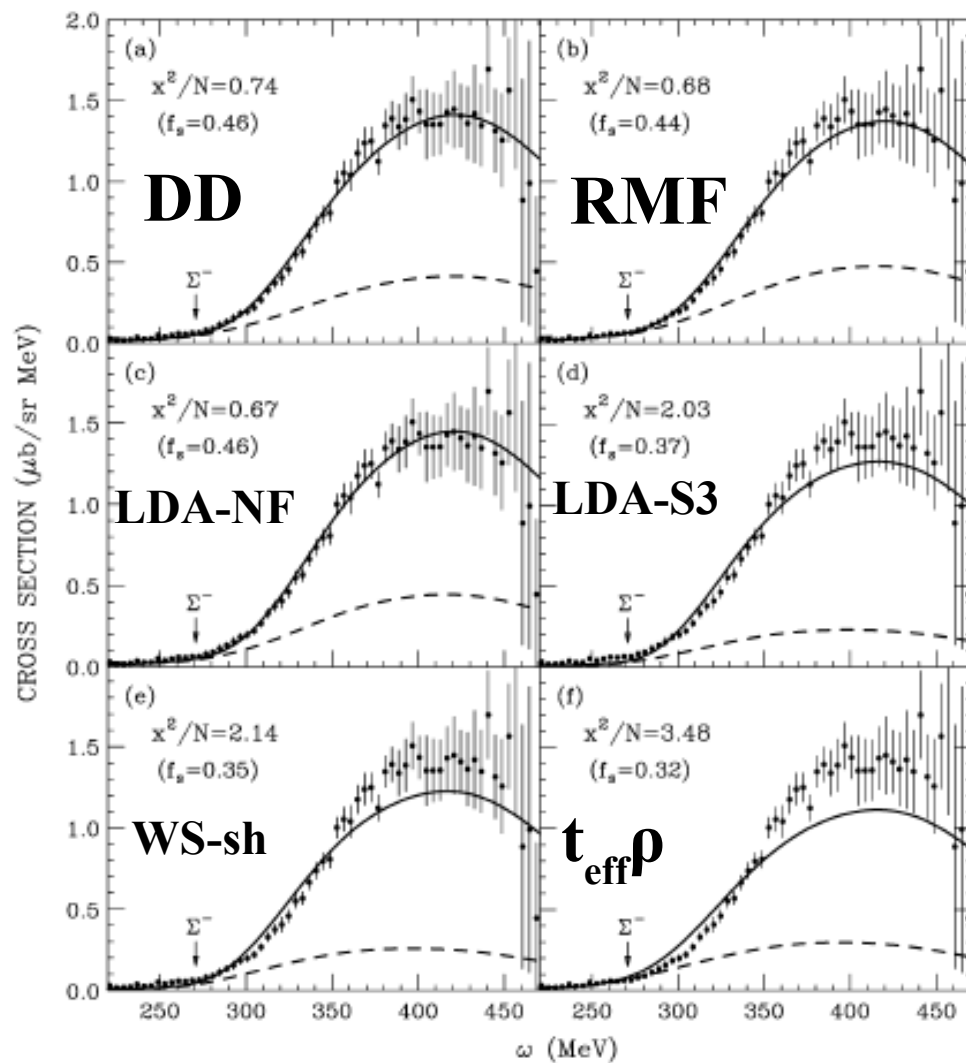
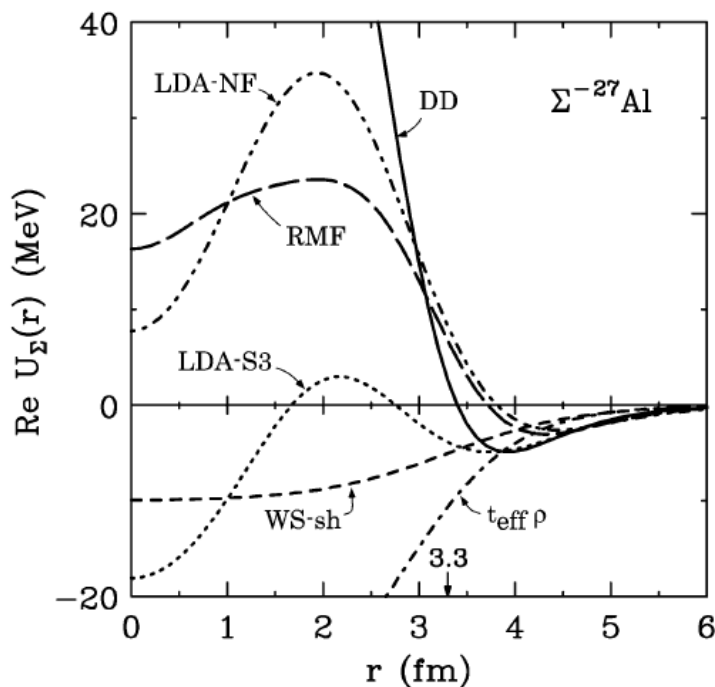
- RMF E_{sym} is determined to fit finite nuclear BE, thus reflects average values in the $\rho_B < \rho_0$ region.
- Nuclear effective potential (g-matrix) suggests S-curve behavior of E_{sym} , while RMF gives E_{sym} almost linear in ρ_B .
→ RMF may overestimate E_{sym} at high density.



Lombardo, DCEN slide

RMF へのハイペロンの導入 (2)

- クォーク数カウンティングに従うと、
 $U_{\Sigma} \sim U_{\Lambda} \sim 2/3 U_N \sim -30 \text{ MeV}$
 のはず。
- Σ バリオン生成反応データを
 分析すると、 $U_{\Sigma} > 0$ (斥力)



Harada, Hirabayashi ('05)

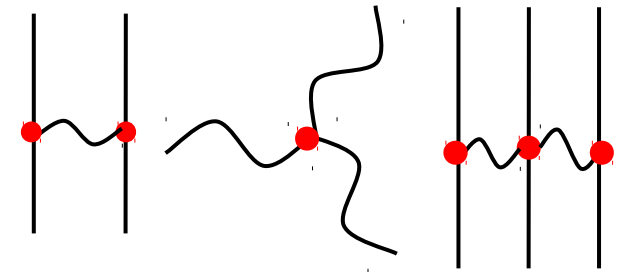
■ Three-baryon coupling term

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

$$\delta L = -U_\sigma(\sigma) - \frac{1}{2} c_{\sigma\omega} \sigma \omega_\mu \omega^\mu - \frac{1}{4} c_{\omega\omega} (\omega_\mu \omega^\mu)^2$$

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

v = 3 terms



- BBMM terms are ignored in standard RMF.

(They can be absorbed in other terms by field re-definitions.)

R.D.Furnstahl, B.D.Serot, H.-B. Tang, NPA615 ('97)441

- But field re-definition modifies the order of NDA.

Naïve dimensional analysis (NDA)

$$v = B/2 + M + d$$

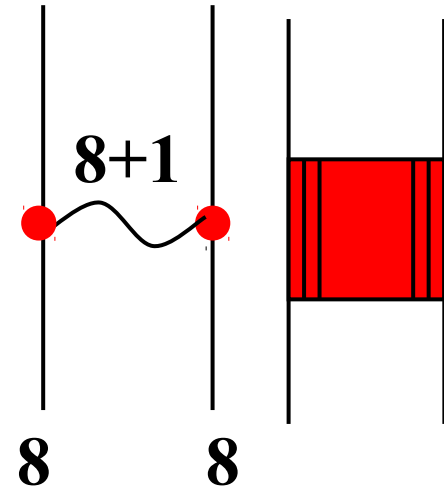
(B, M, d=# of baryon and non-NG boson field, derivatives to NG fields)

- Higher v terms are found to be suppressed at $\rho \sim \rho_0$, but they will contribute more at high densities.

- c.f. σ polarizability in QMC *T.Miyatsu, K.Saito, PTP 122 ('10) 1035*

$SU(3)_f$ “violating” coupling

- Naïve RMF assumption = BM coupling follows $SU(3)_f$.
- Short range BB interaction comes from quark Pauli blocking + one-gluon exch.
Oka, Yazaki; Faessler et al.; Fujiwara et al.; HAL QCD collab.
- Short-range BB repulsion is sensitive to (S,T) in the s-channel. When we include those interactions in the bosonized form, BM coupling violates $SU(3)_f$.

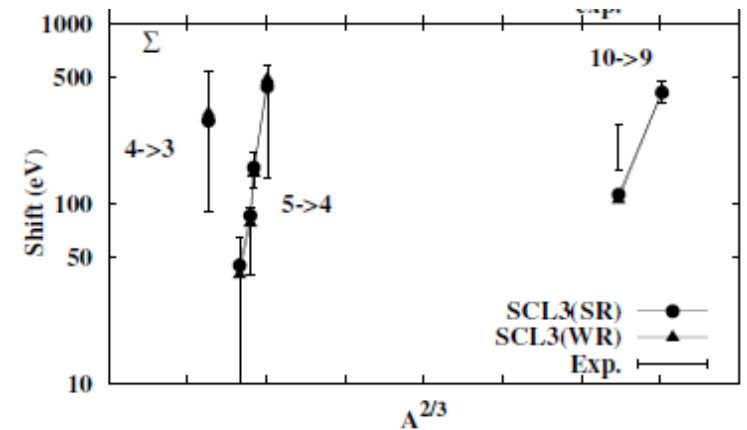


$$V = \sum_{\alpha, \beta} (\bar{\Psi} \bar{\Psi})_{\alpha} \Gamma_{\alpha\beta} (\Psi \Psi)_{\beta} \rightarrow -\frac{1}{2} \sum_{\alpha} m_{\alpha}^2 \omega_{\alpha}^2 + \sum_{\alpha} g_{\alpha} \omega_{\alpha} (\Psi \Gamma \Psi)_{\alpha}$$

E.g., Σ atomic shift

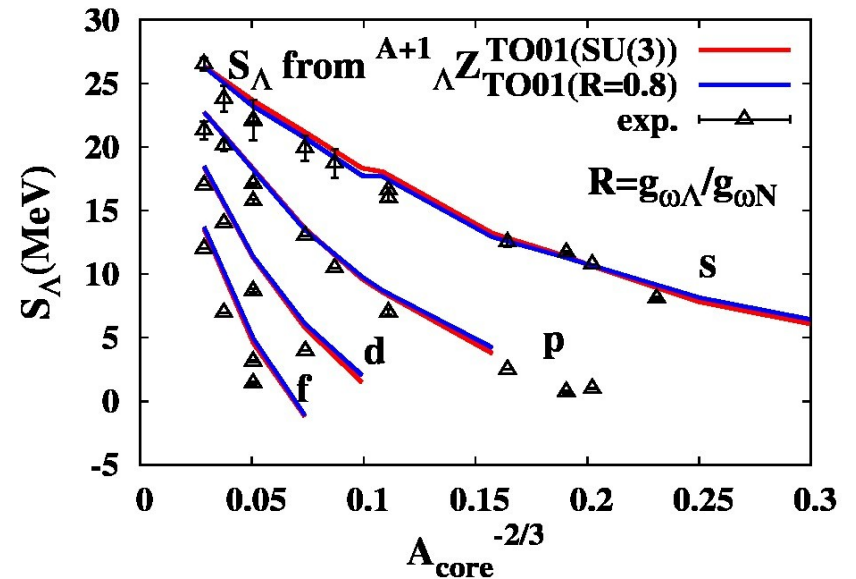
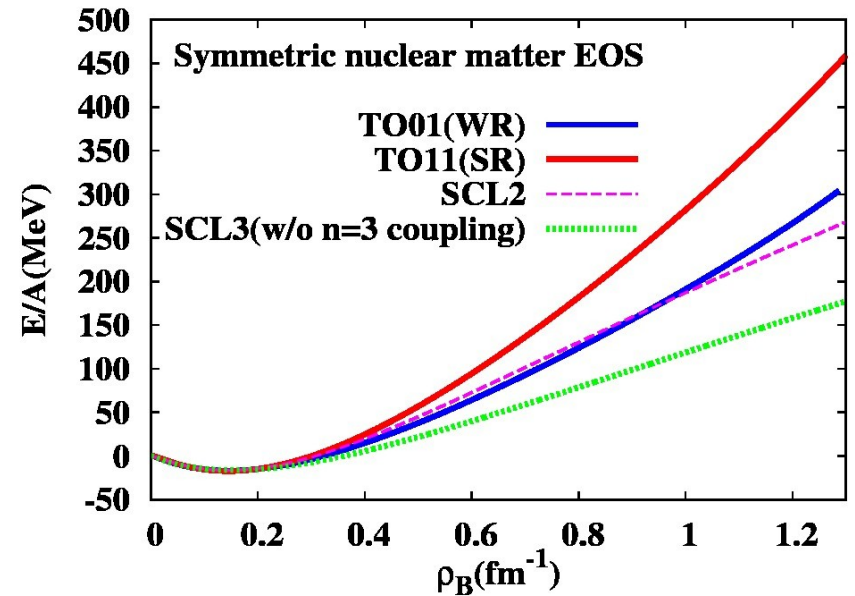
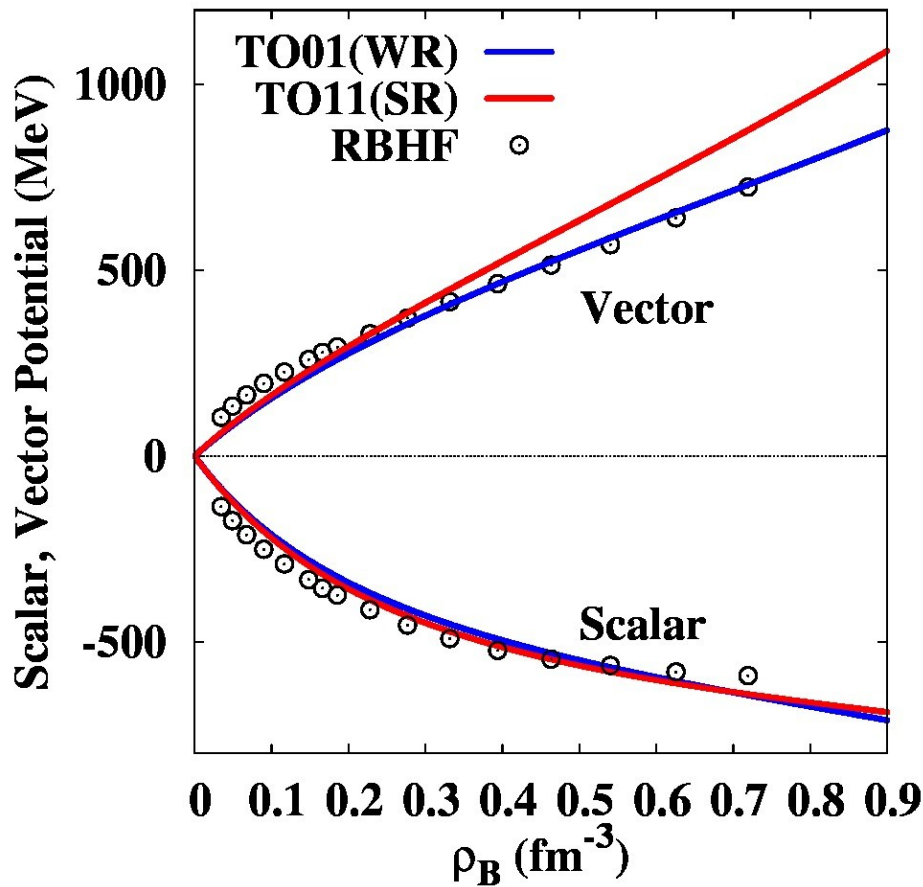
$$\rightarrow g_{\sigma\Sigma} \sim g_{\sigma\Sigma} (SU(3)) \times (0.2-0.3)$$

- Finite size of baryons would lead to excluded volume effects $\rightarrow \mu - \nu P$ (flavor singlet vector-like effects)



Tsubakihara et al., (2010)

- Nucleon vector potential $U_V(\rho)$
in DBHF: Non-linear behavior in ρ_B .
→ EOS becomes gradually stiffer



RMF with 3BF + $SU(3)_f$ “violation”

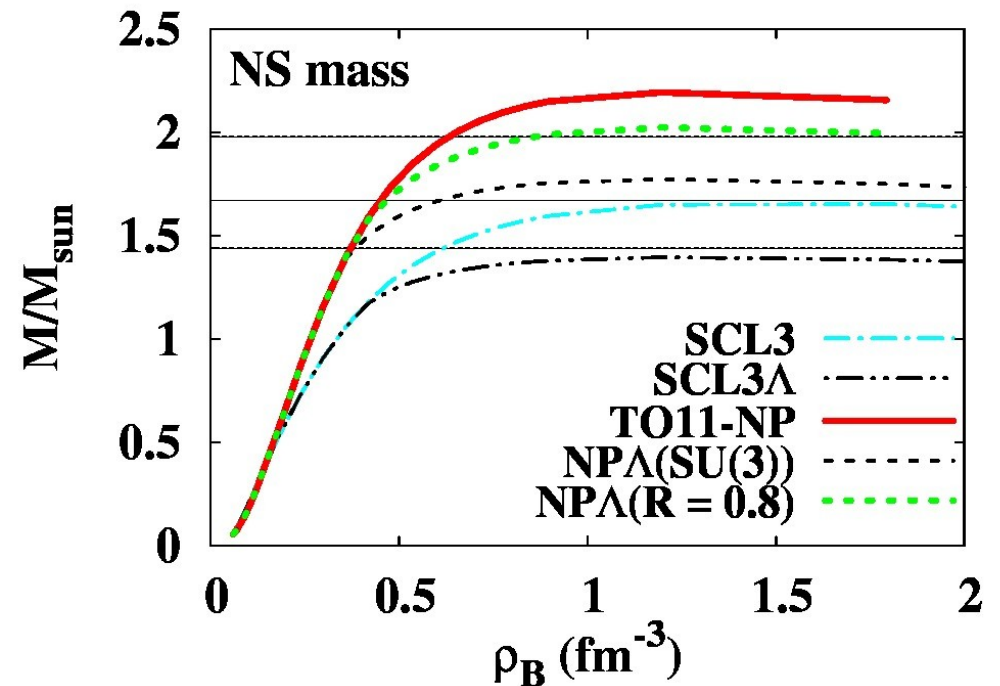
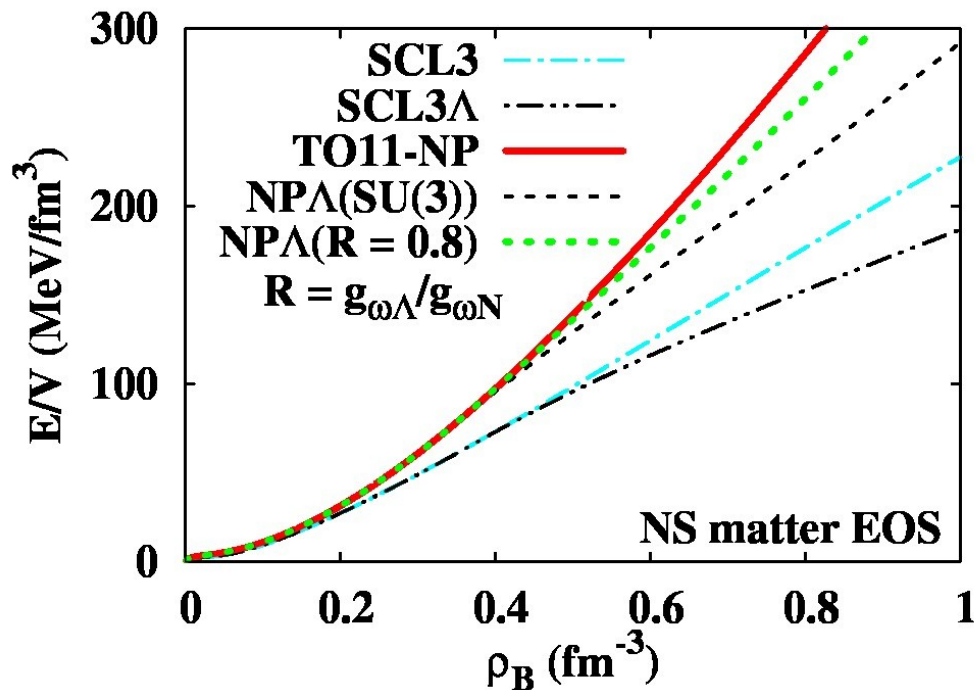
Two types of modification

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)

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

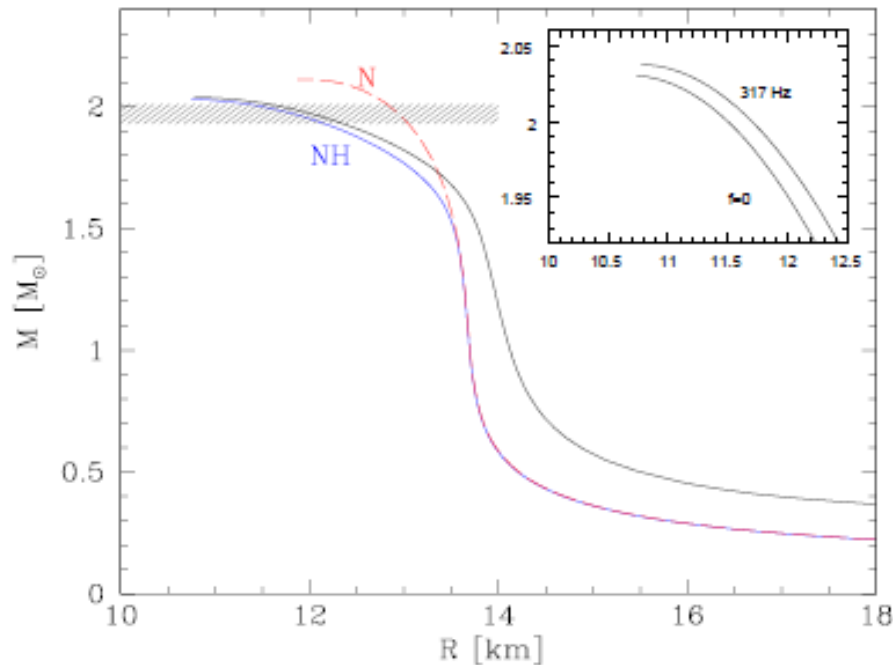
$\rightarrow M_{\max} \sim 2.02 M_{\odot}$ with hyperons ($\sim 1.4 M_{\odot}$ w/o 3BF, violation)



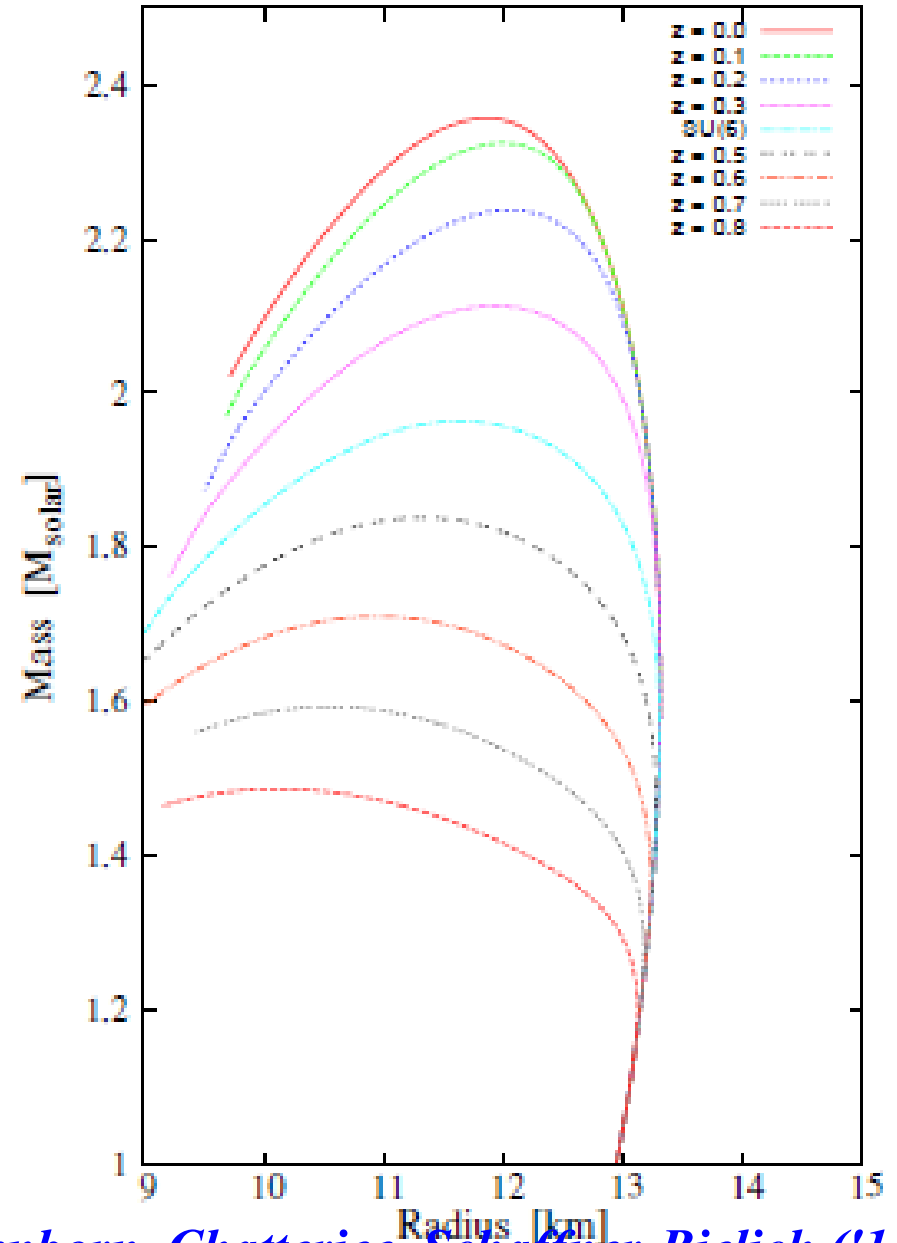
■ Hidden strange meson の4次

- $\zeta^4, \zeta^2(\omega^2 + \rho^2)$ を導入
- Λ 間の引力を小さく見積もる
- SU(6) 関係式は保持

■ Vector 結合に SU(6) の破れを導入



Bednarek, Haensel et al. ('11)



Weisenborn, Chatterjee, Schaffner-Bielich ('11)

Swept Region of Phase Diagram during BH formation

CP location in Symmetric Matter

- Lattice QCD

$$\mu_{CP} = (400-900) \text{ MeV}$$

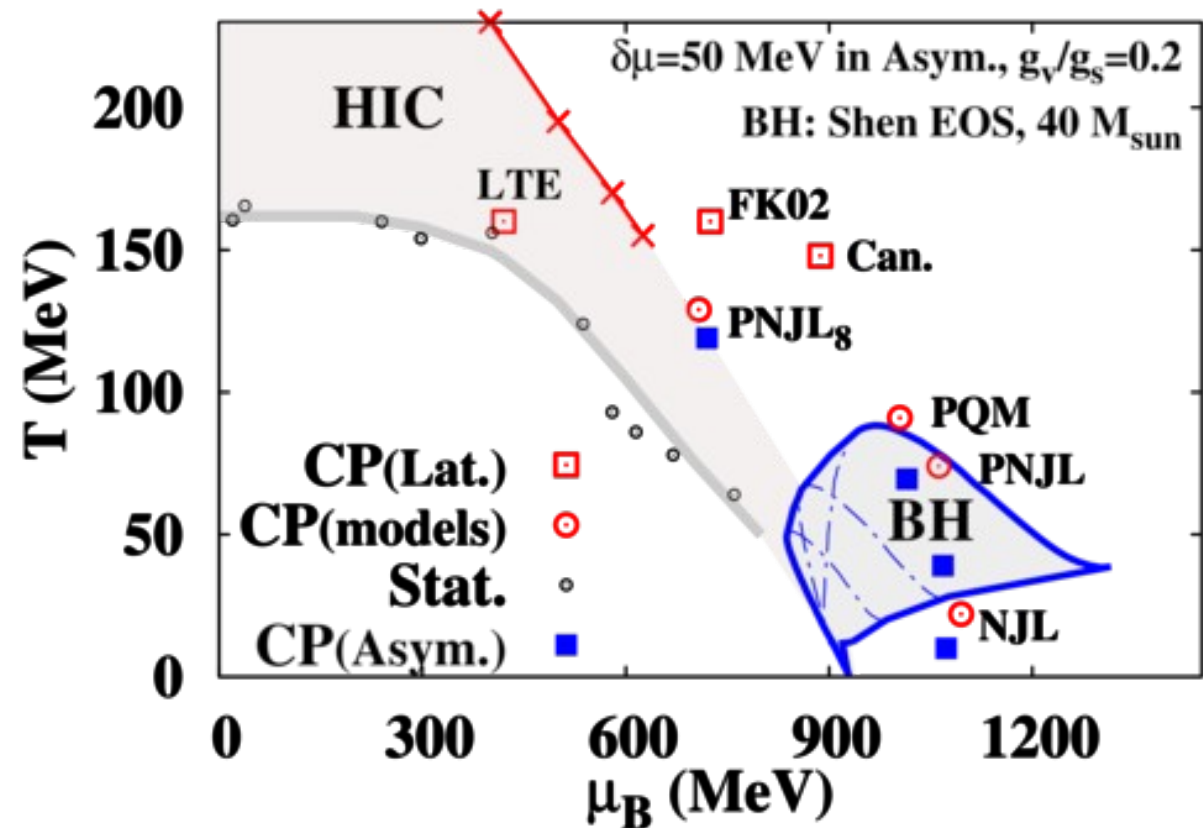
- Effective models

$$\mu_{CP} = (700-1050) \text{ MeV}$$

CP in Asymmetric Matter (E.g. $\delta\mu=50 \text{ MeV}$)

- T_{CP} decreases at finite $\delta\mu$.

→ Accessible (T, μ_B) region during BH formation

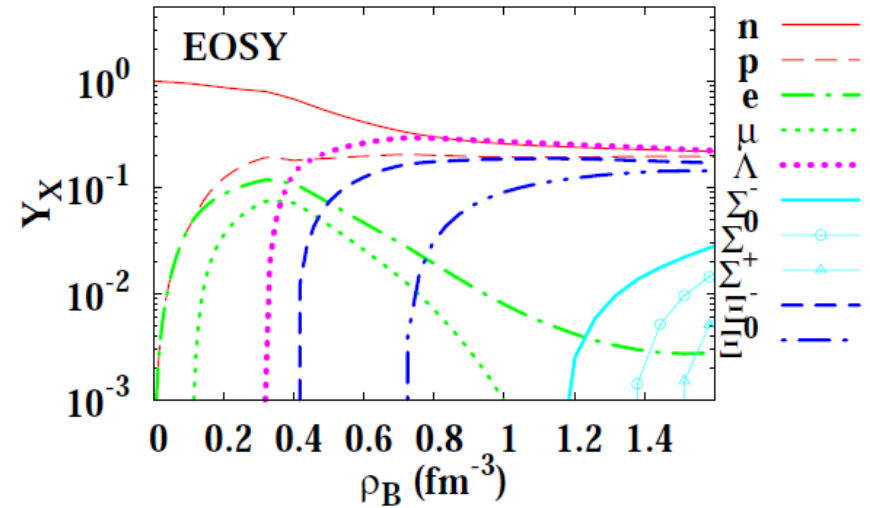


M.A.Stepanov, Prog.Theor.Phys.Suppl.153 ('04)139;
FK02:Z. Fodor, S.D.Katz, JHEP 0203 (2002) 014
LTE:S. Ejiri et al., Prog.Theor.Phys.Suppl. 153 (2004) 118;
Can: S. Ejiri, PRD78 (2008) 074507
Stat.:A. Andronic et al., NPA 772('06)167

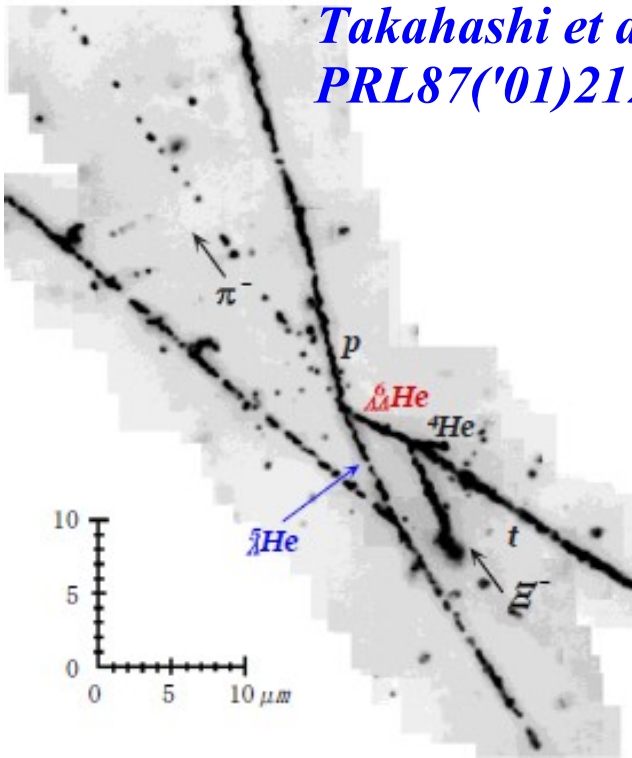
ハイペロン-ハイペロン相互作用

■ 中性子星のハイペロン

- コア領域での化学ポテンシャル
 $\mu_B \sim 1650 \text{ MeV} \gg M_\Lambda$ (Shen EOS)
 \rightarrow ハイペロンが出てくるのが自然
- $\Lambda\Lambda$ 相互作用は?
 \dots ダブル Λ ハイパー核、 $\Lambda\Lambda$ corr.

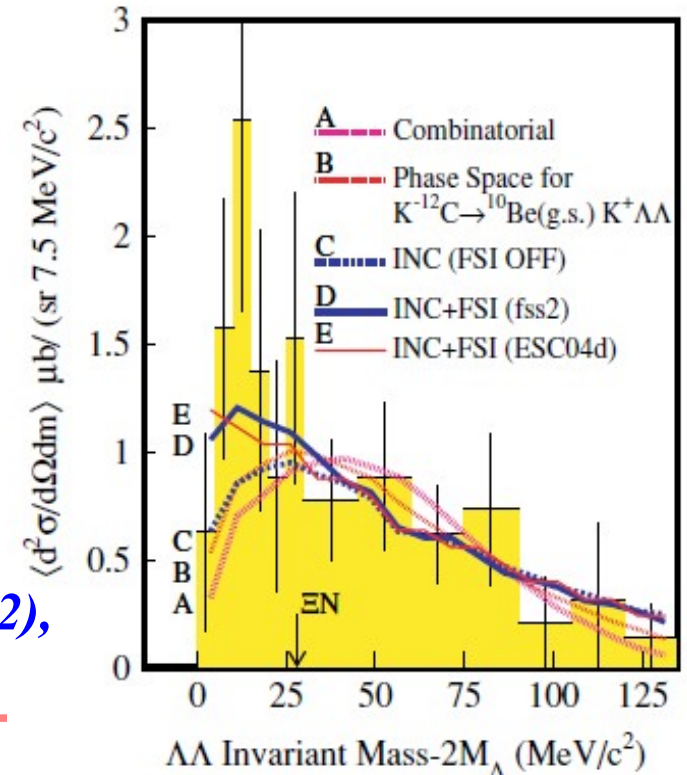


Ishizuka, AO, Tsubakihara, Sumiyoshi, Yamada, JPG35('08)085201



Takahashi et al.(KEK-E373), PRL87('01)212502

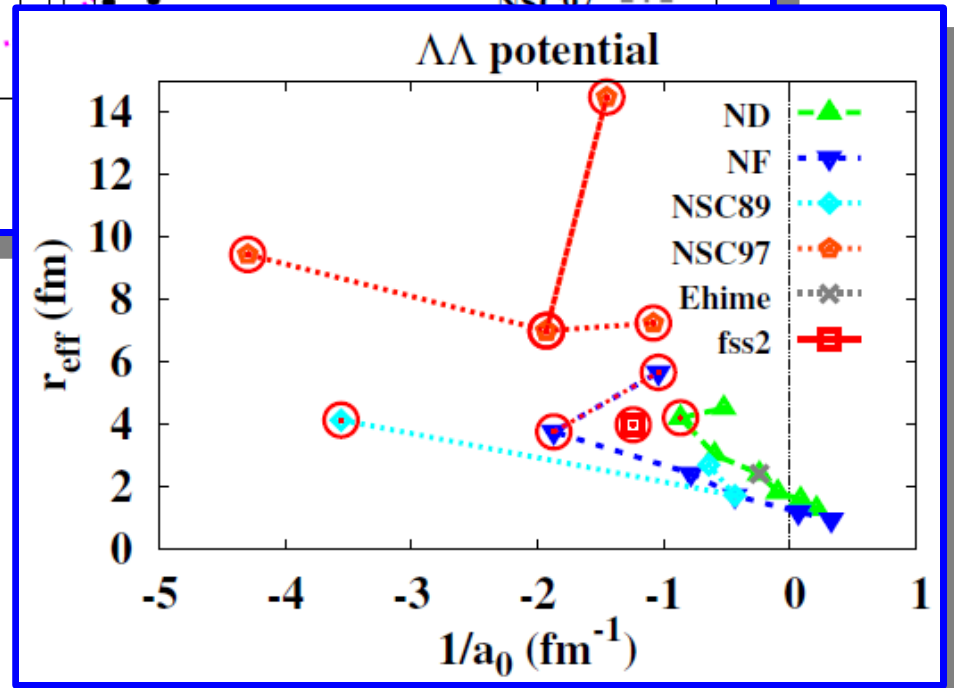
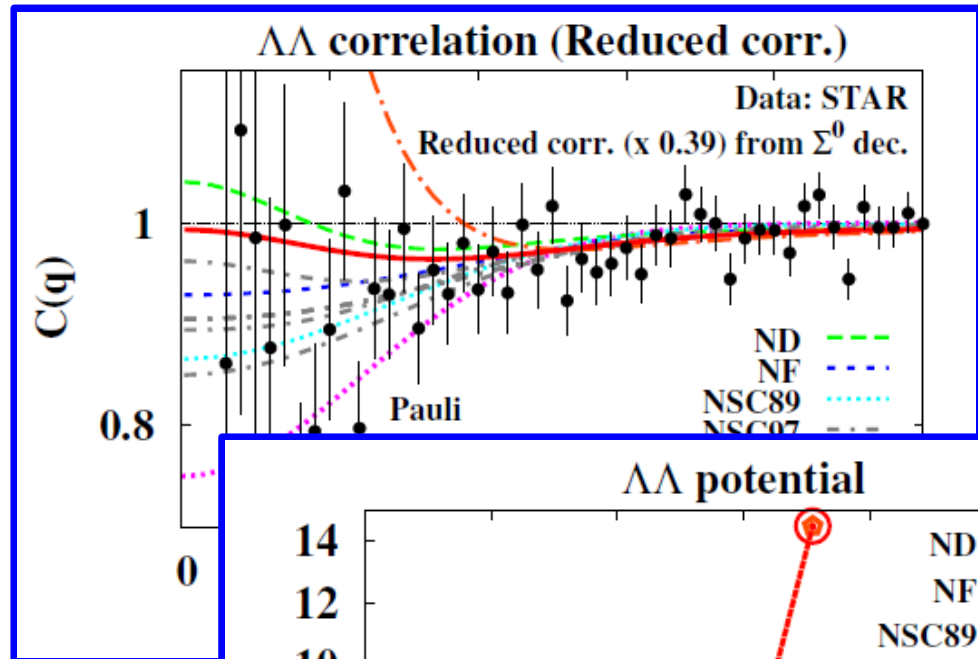
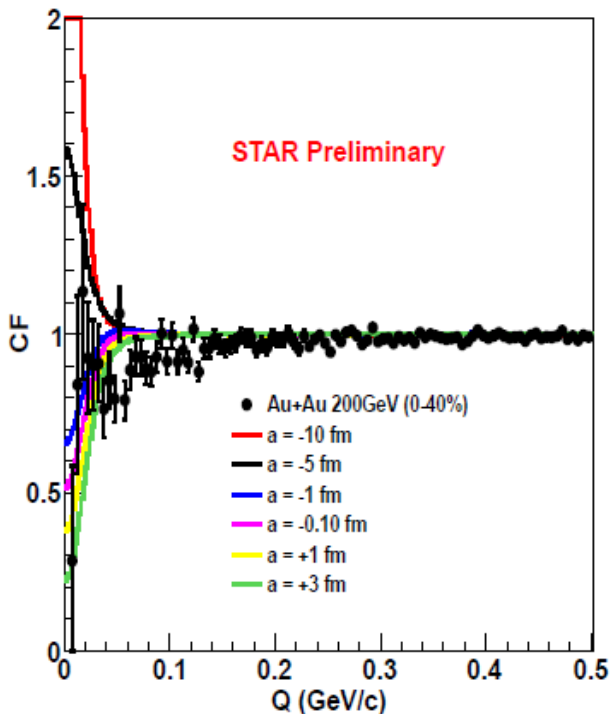
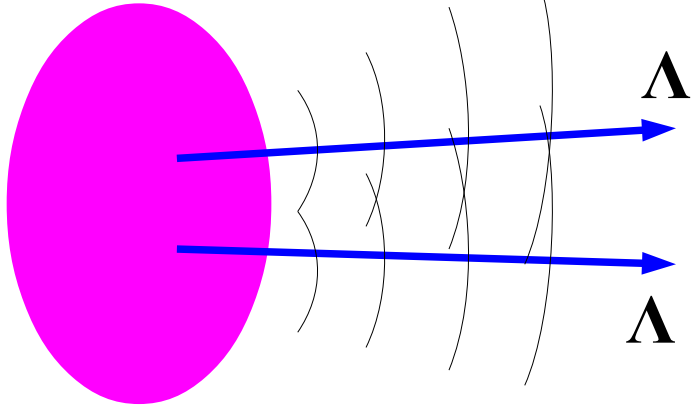
C.J.Yoon et al., (KEK-E522), PRC75 (2007) 022201(R)



$\Lambda\Lambda$ correlation from heavy-ion collisions

■ RHIC-STAR measured $\Lambda\Lambda$ correlation !

$\rightarrow 1/a_0 < -1 \text{ fm}^{-1}, r_{\text{eff}} > 3 \text{ fm}$



Shah et al. (STAR collab.), arXiv:1112.0590

AO, Furumoto, HHI workshop @ BNL