

中性子星と状態方程式

京大基研 大西 明

「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」、
日本物理学会第 67 回年次大会、関西学院大学、2012 年 3 月 26 日

■ Introduction

- なぜ今、中性子星か？
対称エネルギー、YY 力、 $2 M_{\odot}$ 中性子星、冷却曲線

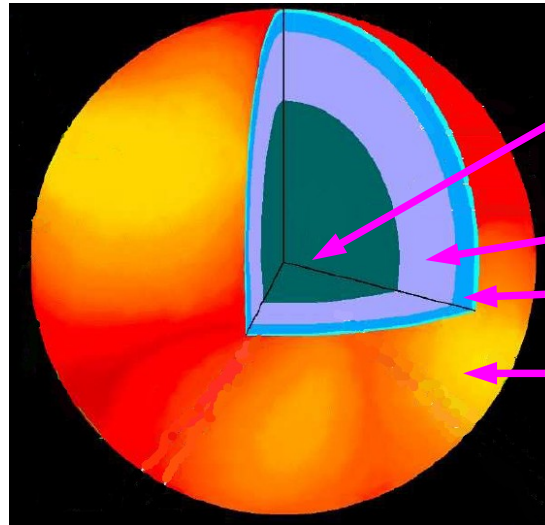
■ 高密度物質状態方程式と中性子星

- 中性子星質量パズル
何が中性子星を支えるか？

■ Summary



中性子星の組成・MR 曲線と状態方程式

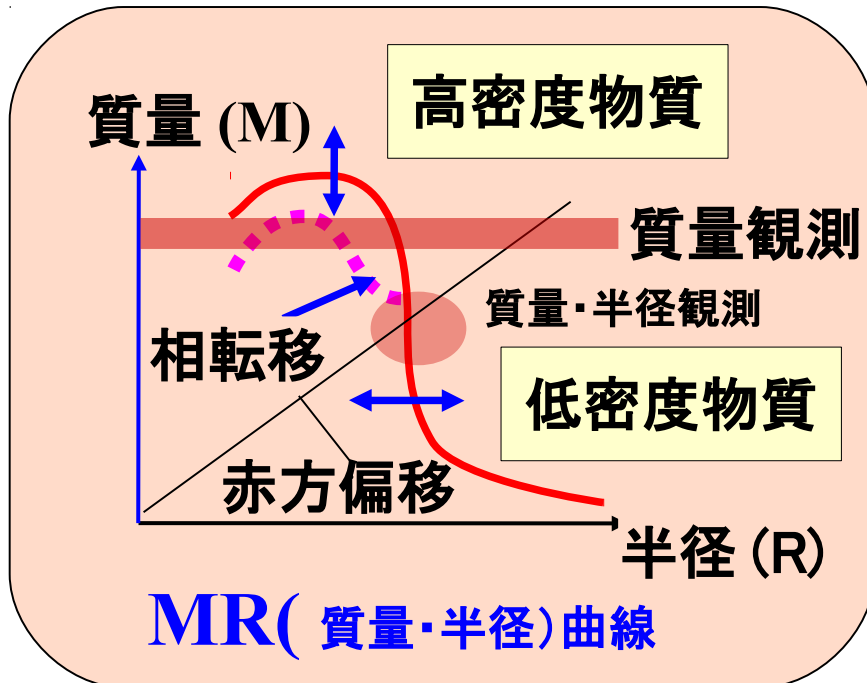


Hyperons, mesons, quarks

Asym. nuclear matter+elec.+ μ

Nuclei+neutron gas+elec.

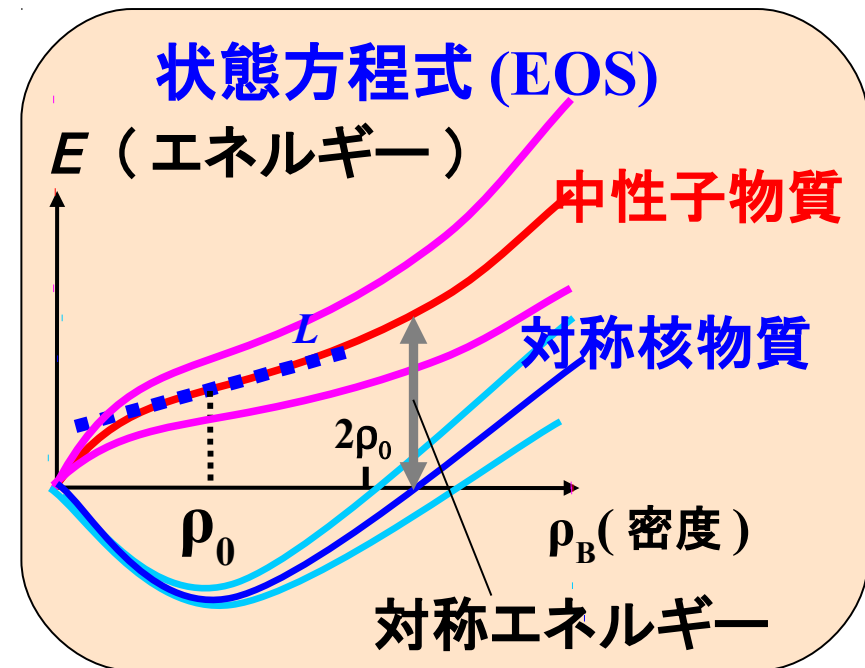
Nuclei + elec.



TOV
方程式

⇔

重力と
圧力の
釣り合い



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)

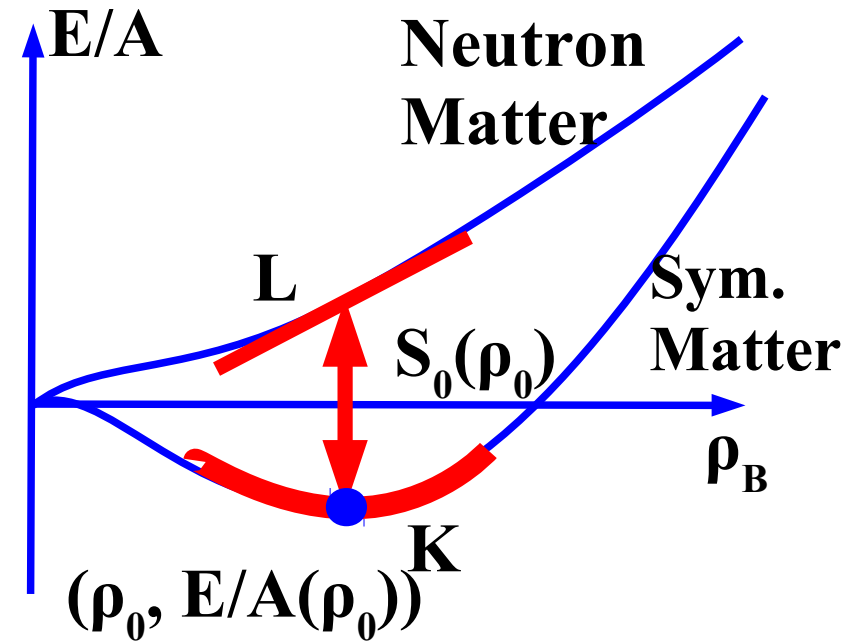
中性子星物質状態方程式と対称エネルギー

■ 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

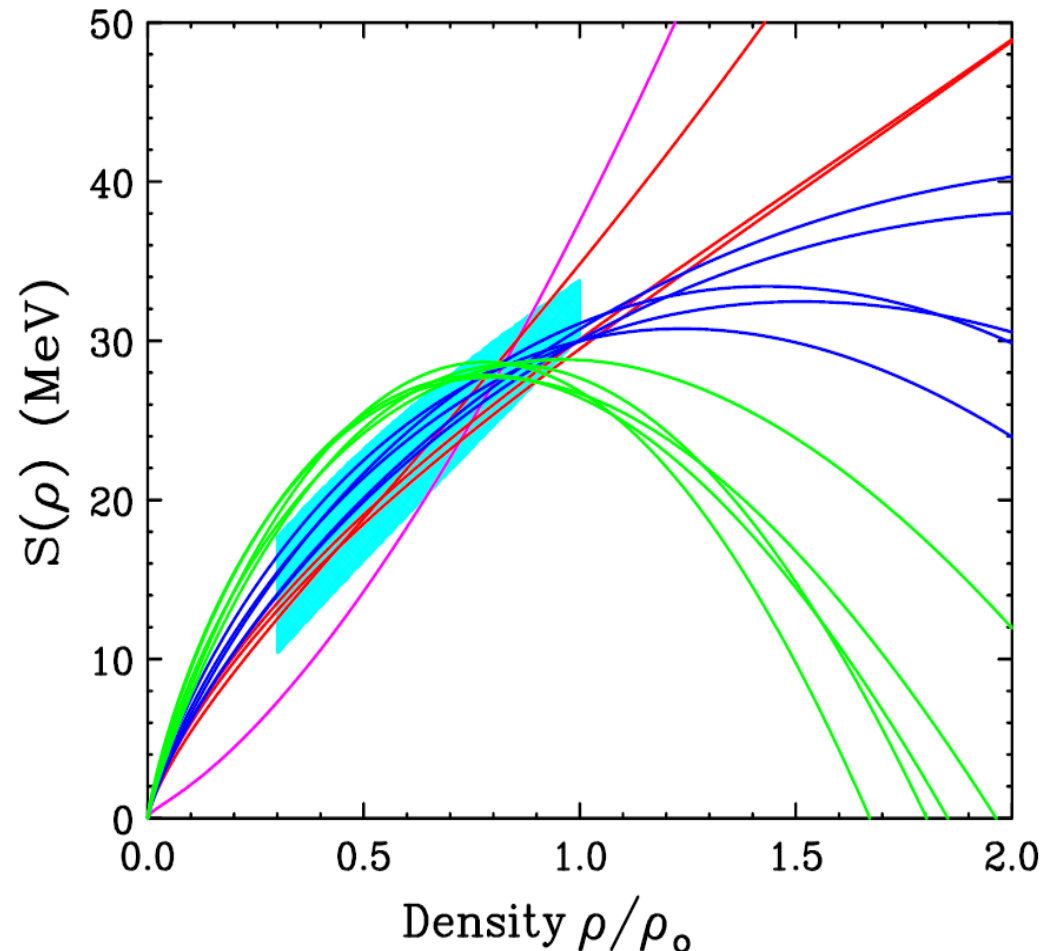
NuSym11 <http://www.smith.edu/nusym11>

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

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)

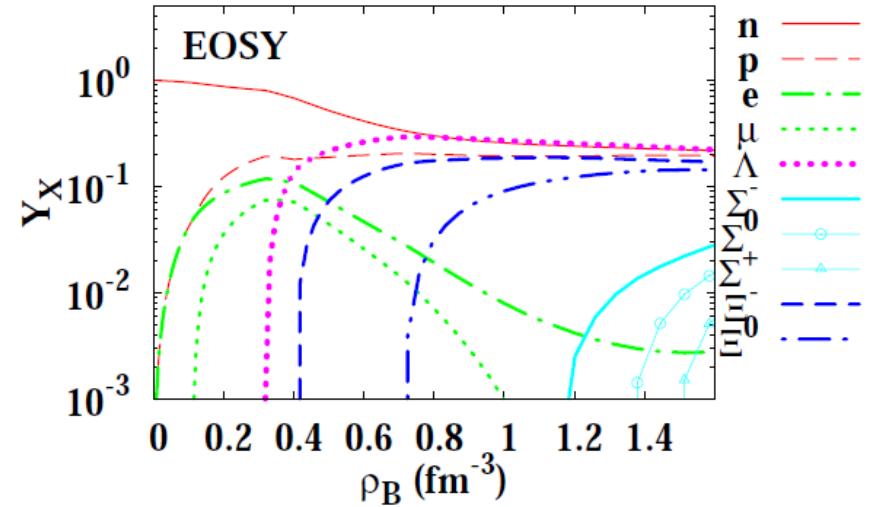
- 注意:これらは全て ρ_0 以下の密度での E_{sym} に敏感。
→ 高密度側では?



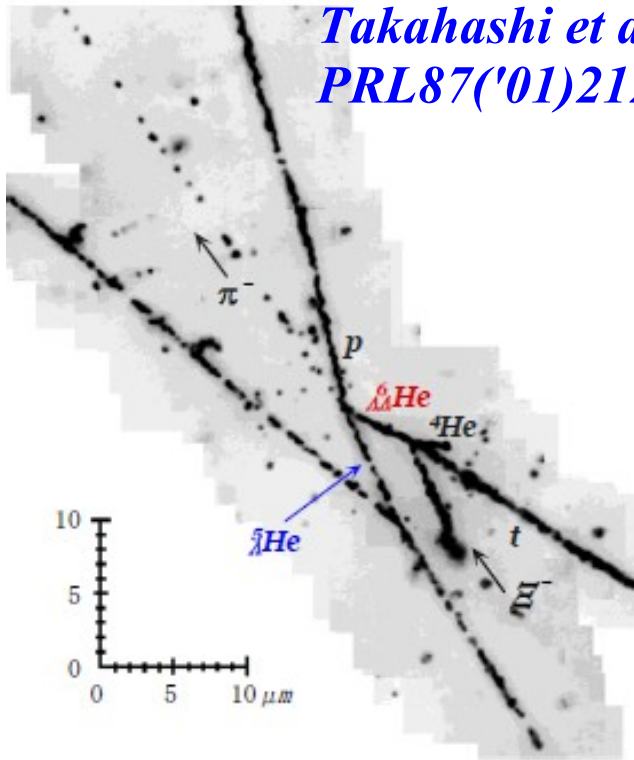
ハイペロン-ハイペロン相互作用

■ 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.

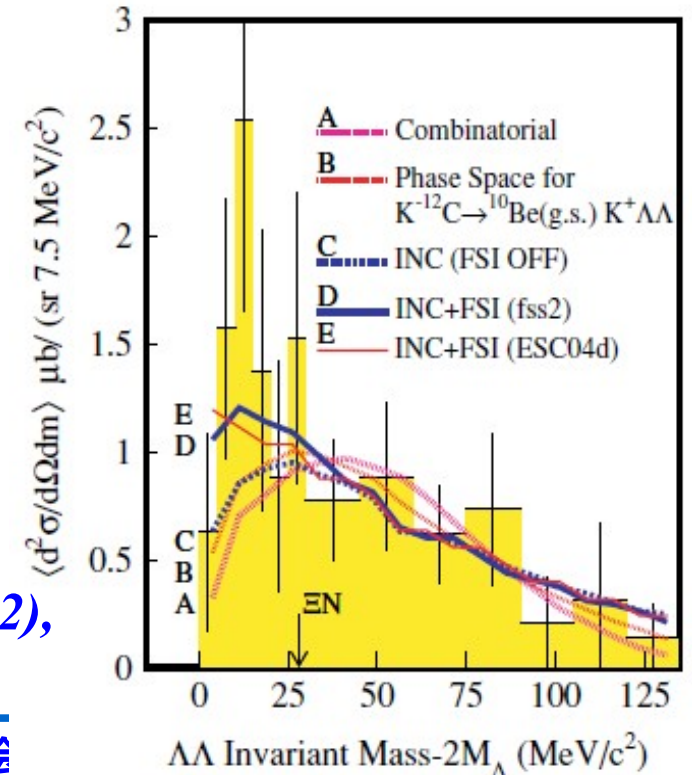


Ishizuka, AO, Tsubakihara, Sumiyoshi, Yamada, JPG35('08)085201



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

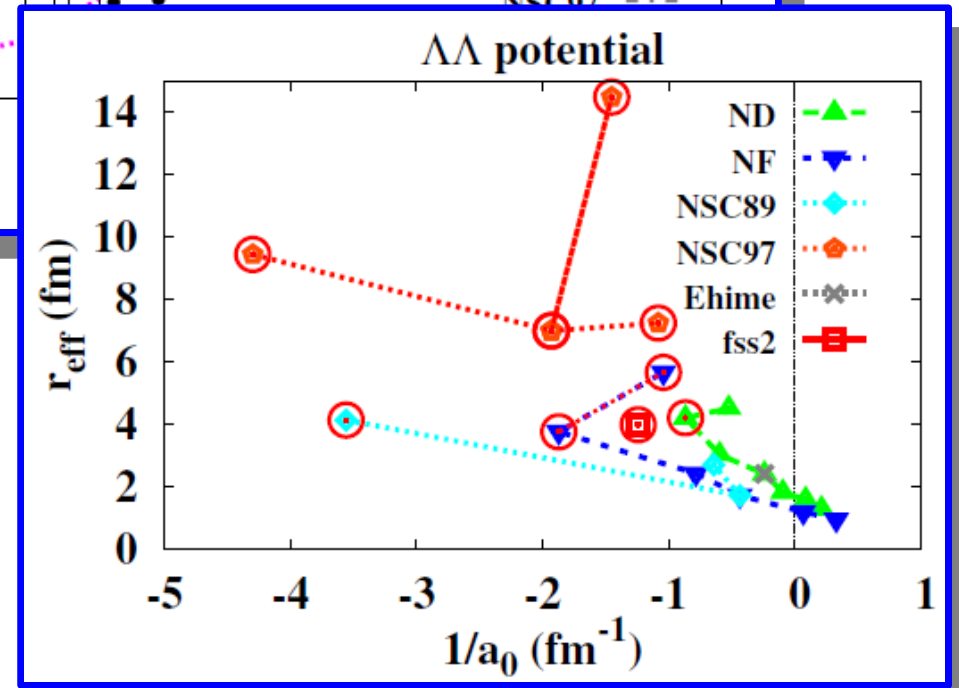
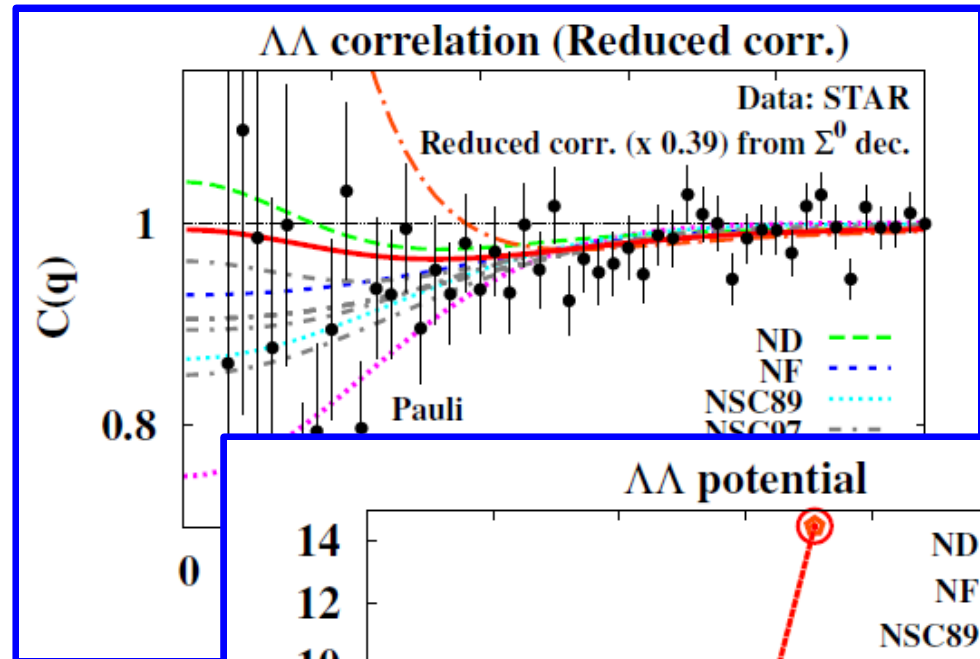
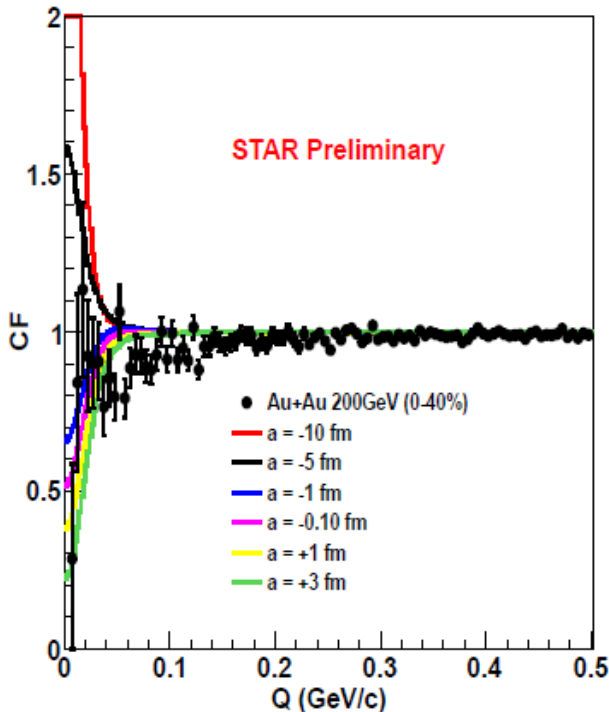
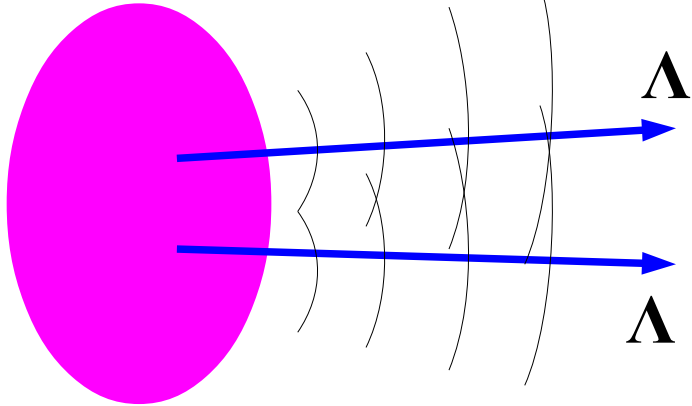
C.J. Yoon et al., (KEK-E522), PRC75 (2007) 022201(R)



$\Lambda\Lambda$ 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

$1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$ 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

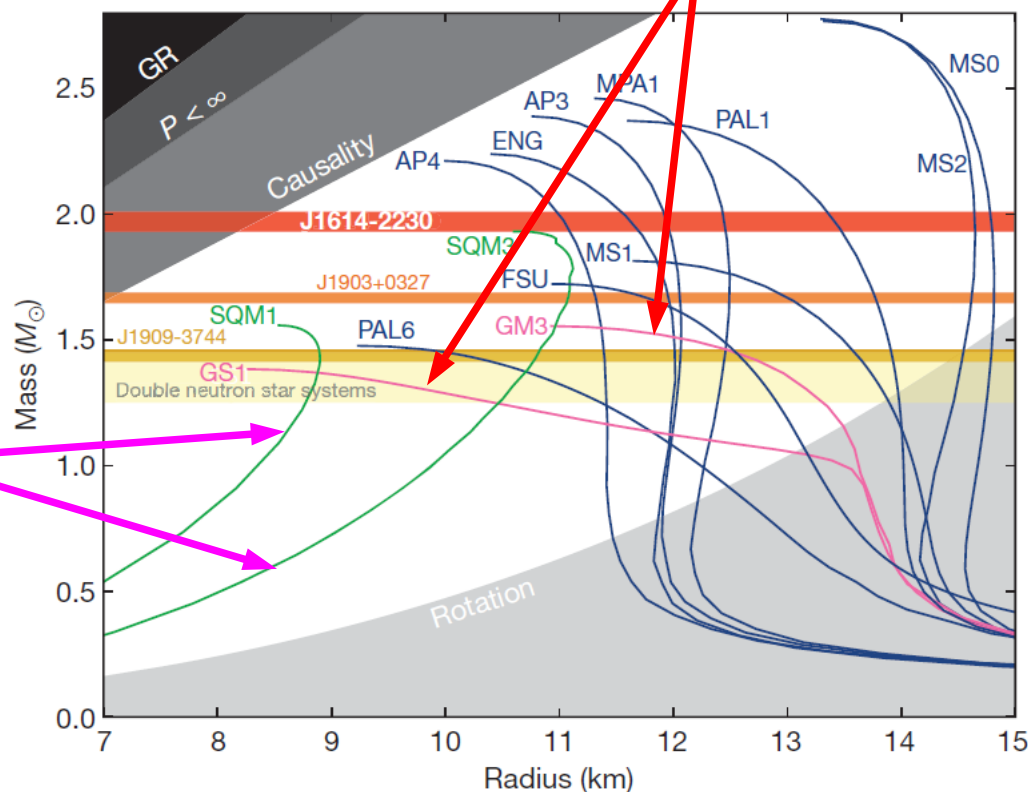
■ 高密度状態方程式 (EOS) に強い制限

- 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

クォーク物質
の EOS

to be discussed later

Strange Hadron
を含む EOS

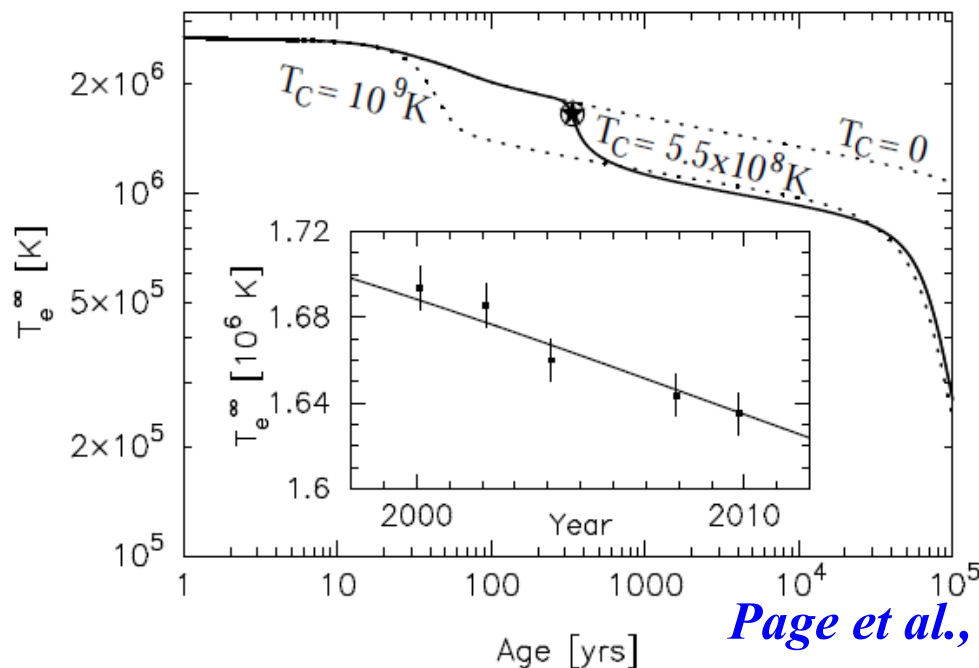


核子超伝導状態と冷却曲線

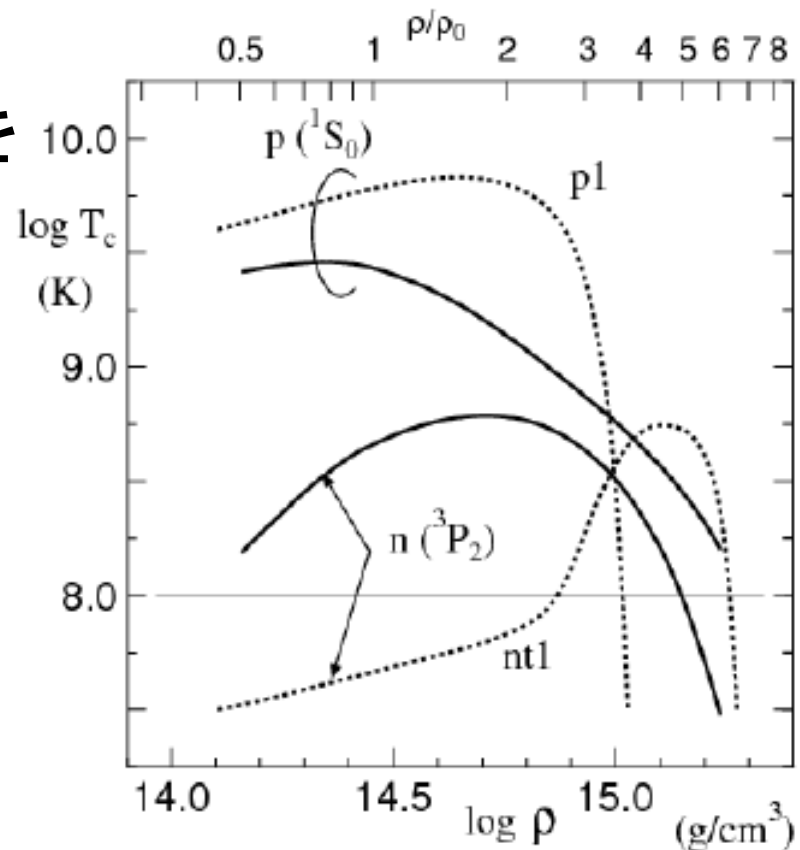
■ 表面温度測定と冷却曲線

- 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?



Page et al., 2011



Takatsuka

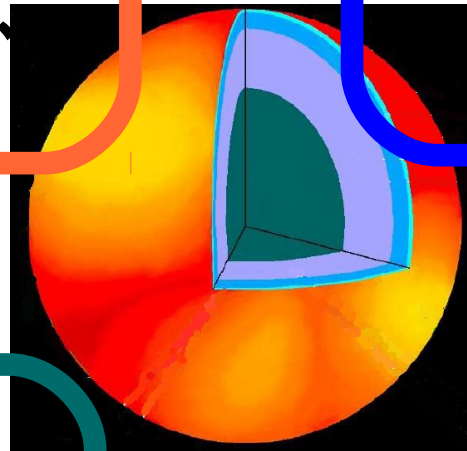
実験と観測で解き明かす中性子星の核物質

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、
RIBF

天体現象

半径、質量、
温度(時間依存性)、
星震、パスタ、
Astro-H



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

分野の協力により
全体像を解き明かせる？

高密度物質状態方程式と 中性子星最大質量

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

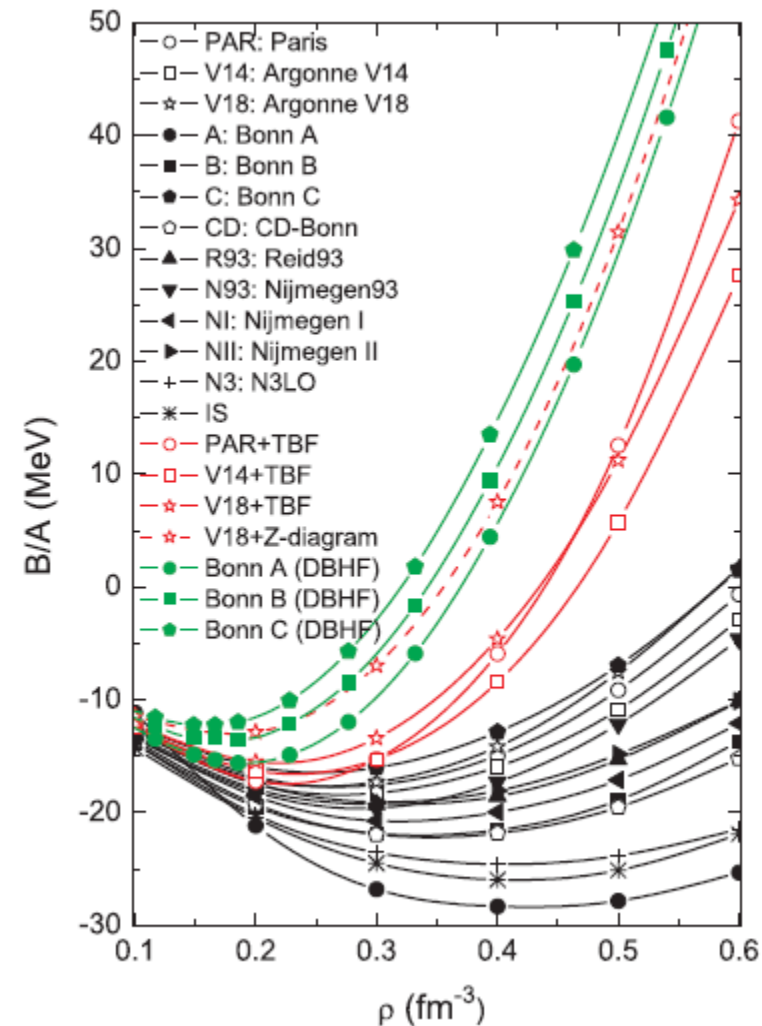
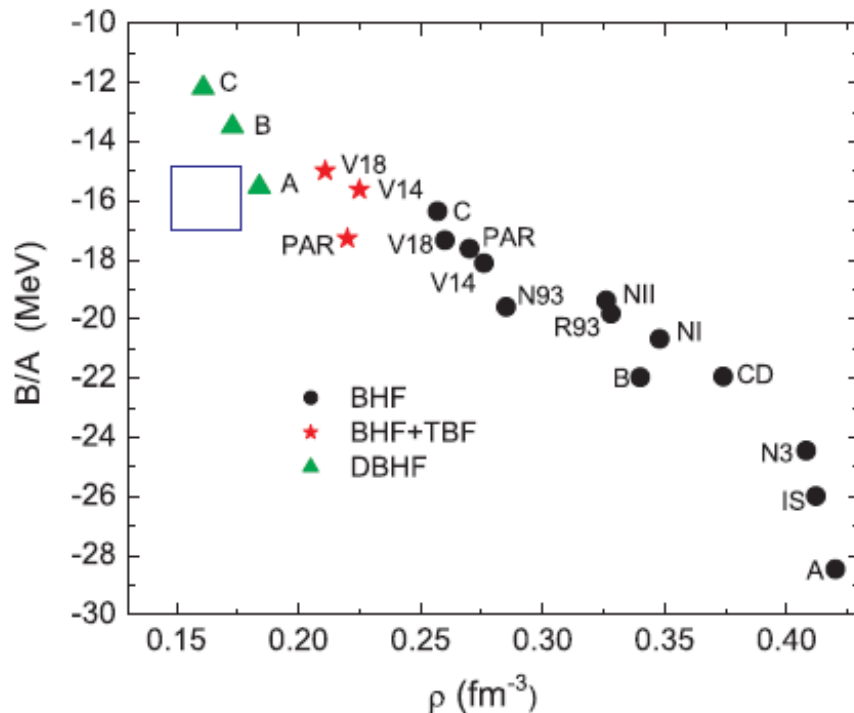
■ 相対論的平均場模型

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

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

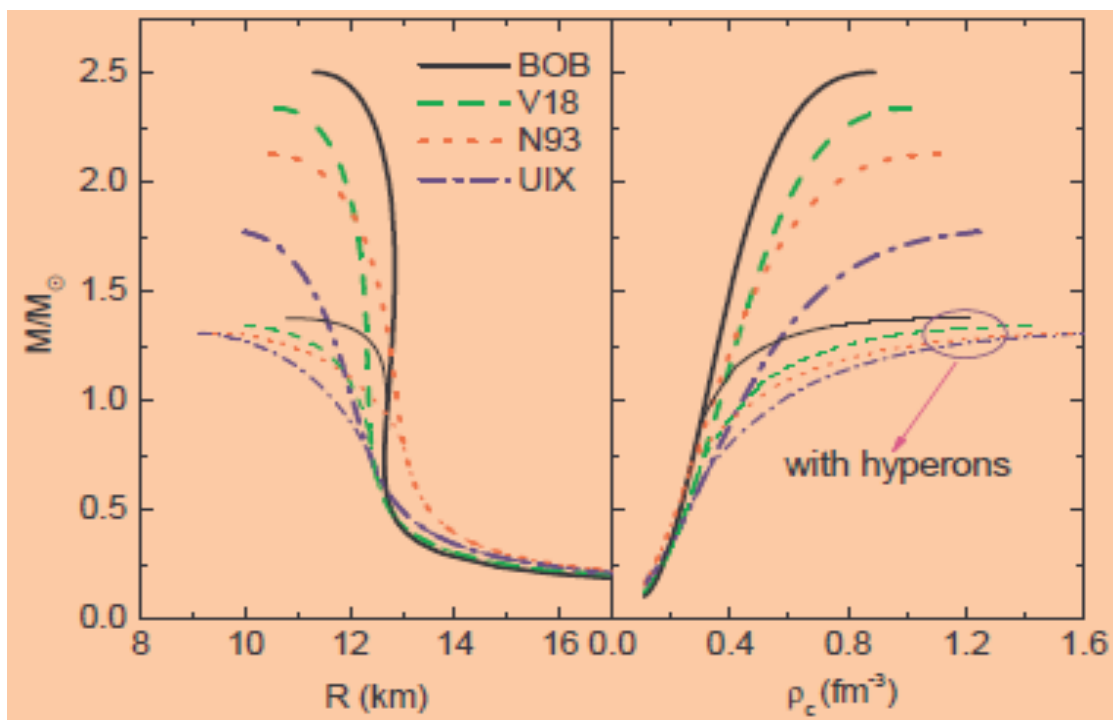
■ 現実的 NN, NY 力から構成した有効相互作用 (微視的有効相互作用)

*3 体力 (現象論を含む)

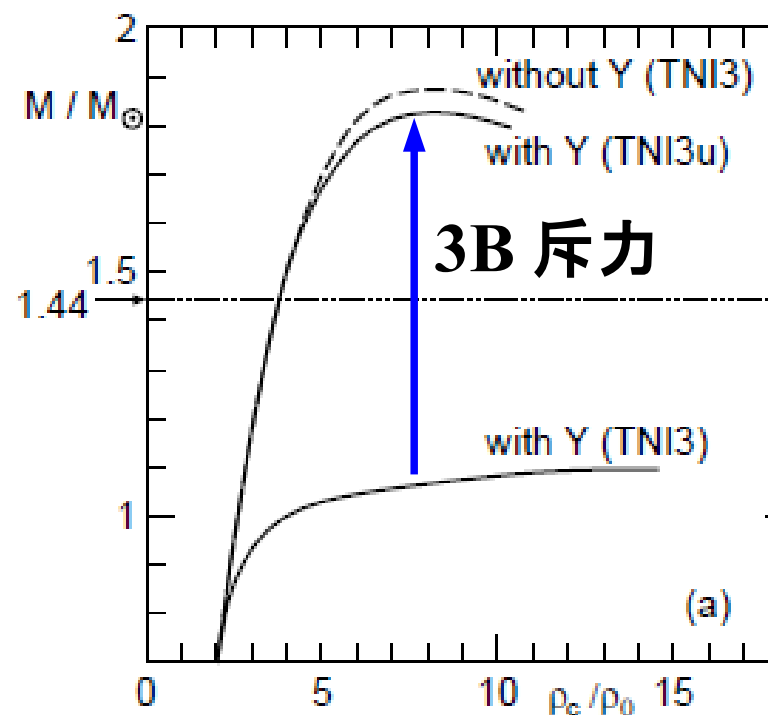
- 相互作用依存性 (V18, N93, ...) 大 → ハイパー核情報が必要。

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

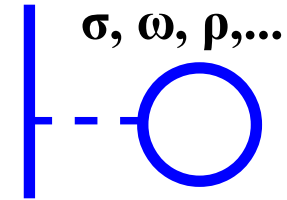
B.D.Serot, J.D.Walecka, Adv.Nucl.Phys.16 ('86), 1

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

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

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

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



- 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

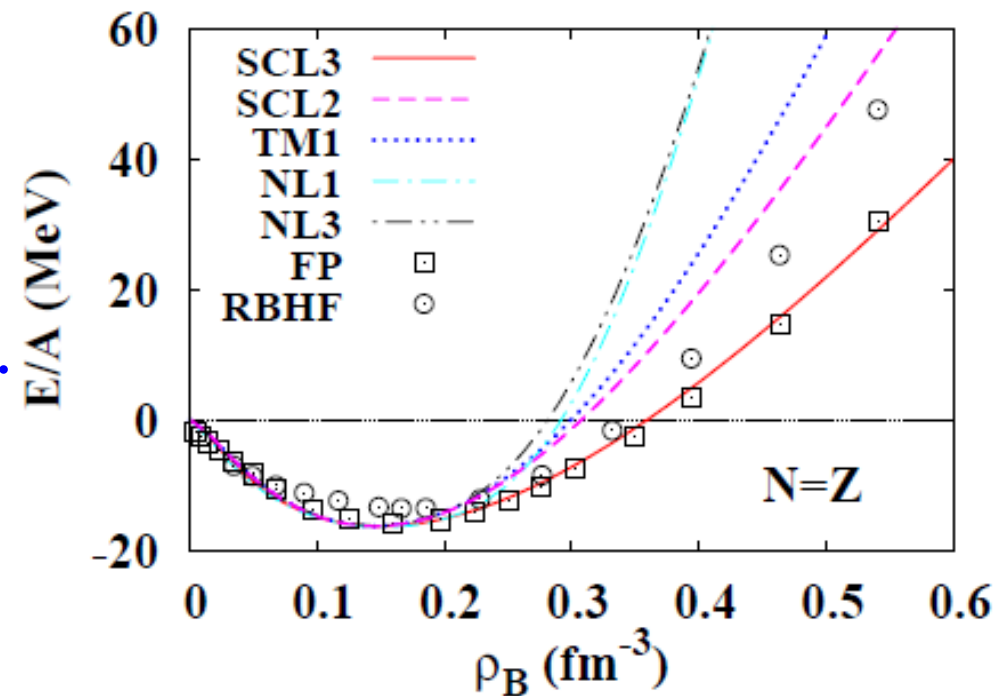
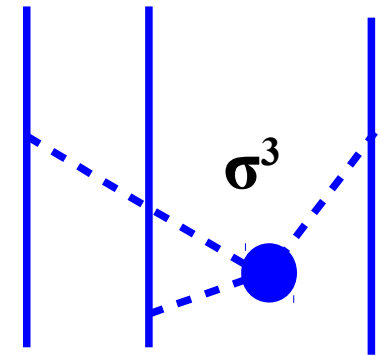
● σ^3 and σ^4 項 → EOS のソフト化

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. Konig, 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.

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)

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

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

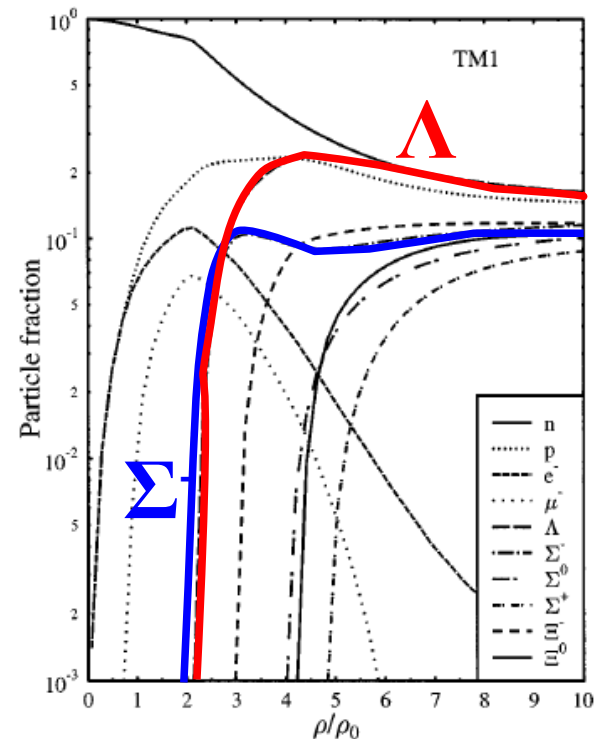
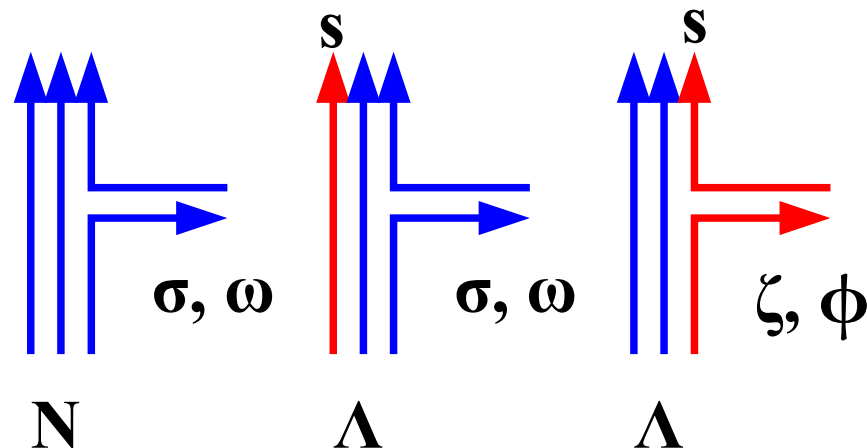
→ 核物質中のポテンシャルの比
($U_{\Lambda} \sim 2/3 U_N$) と対応。

c.f. π 交換をもとに考えると $x_{\sigma\Lambda} \sim 1/3$

Brockmann, Weise ('77)

- $s\bar{s}$ 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*

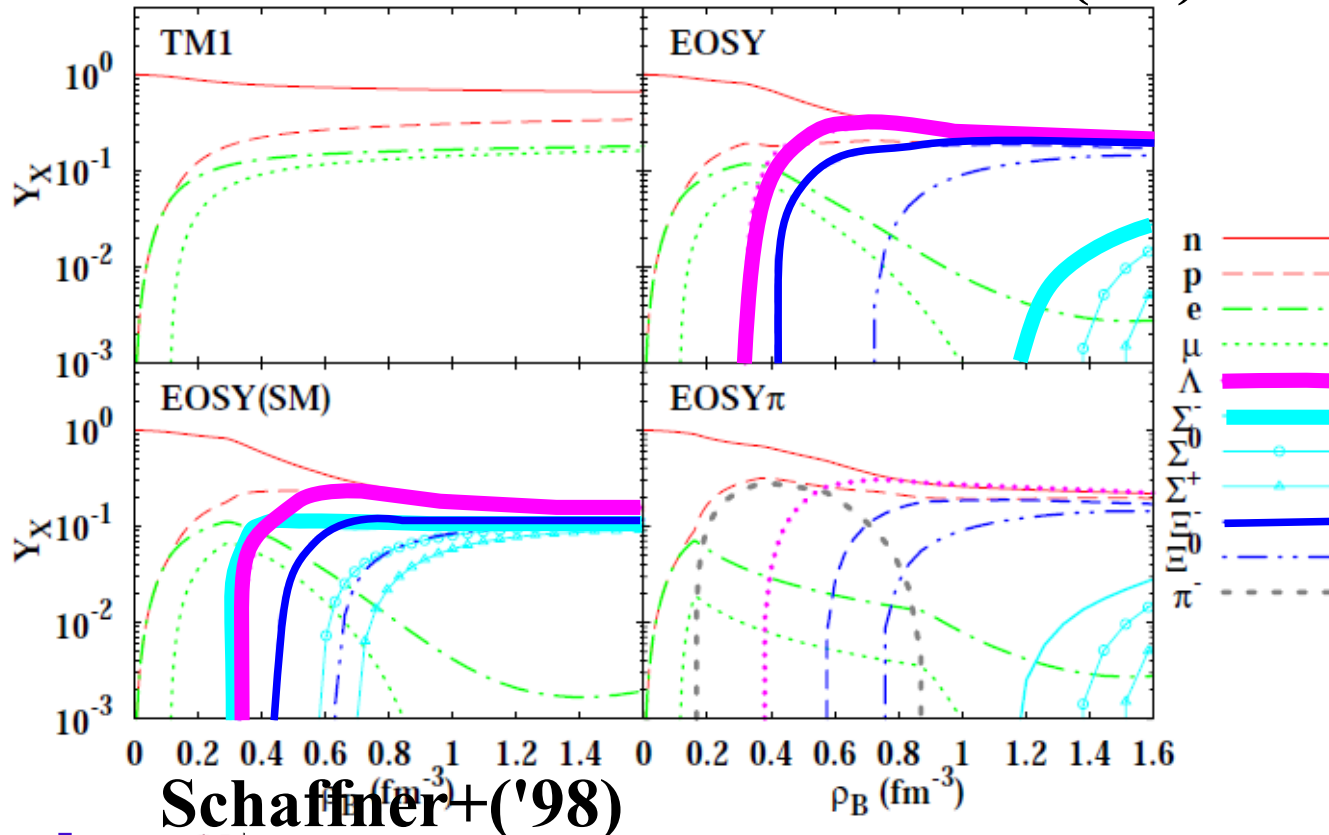
ハイペロンを含むRMF での中性子星

Ishizuka, AO, Tsubakihara, Sumiyoshi, Yamada, *J. Phys. G*35(08),085201

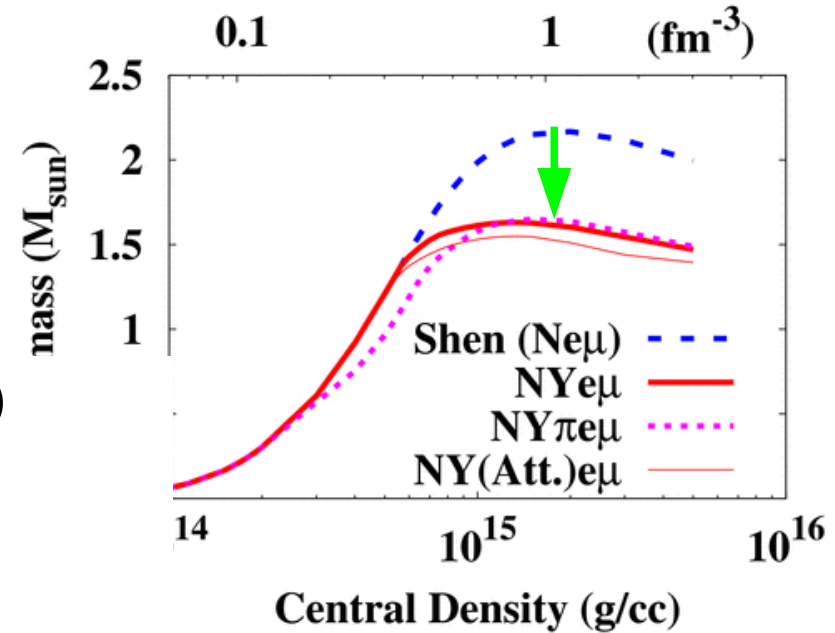
Hyperon Effect is DRASTIC

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

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



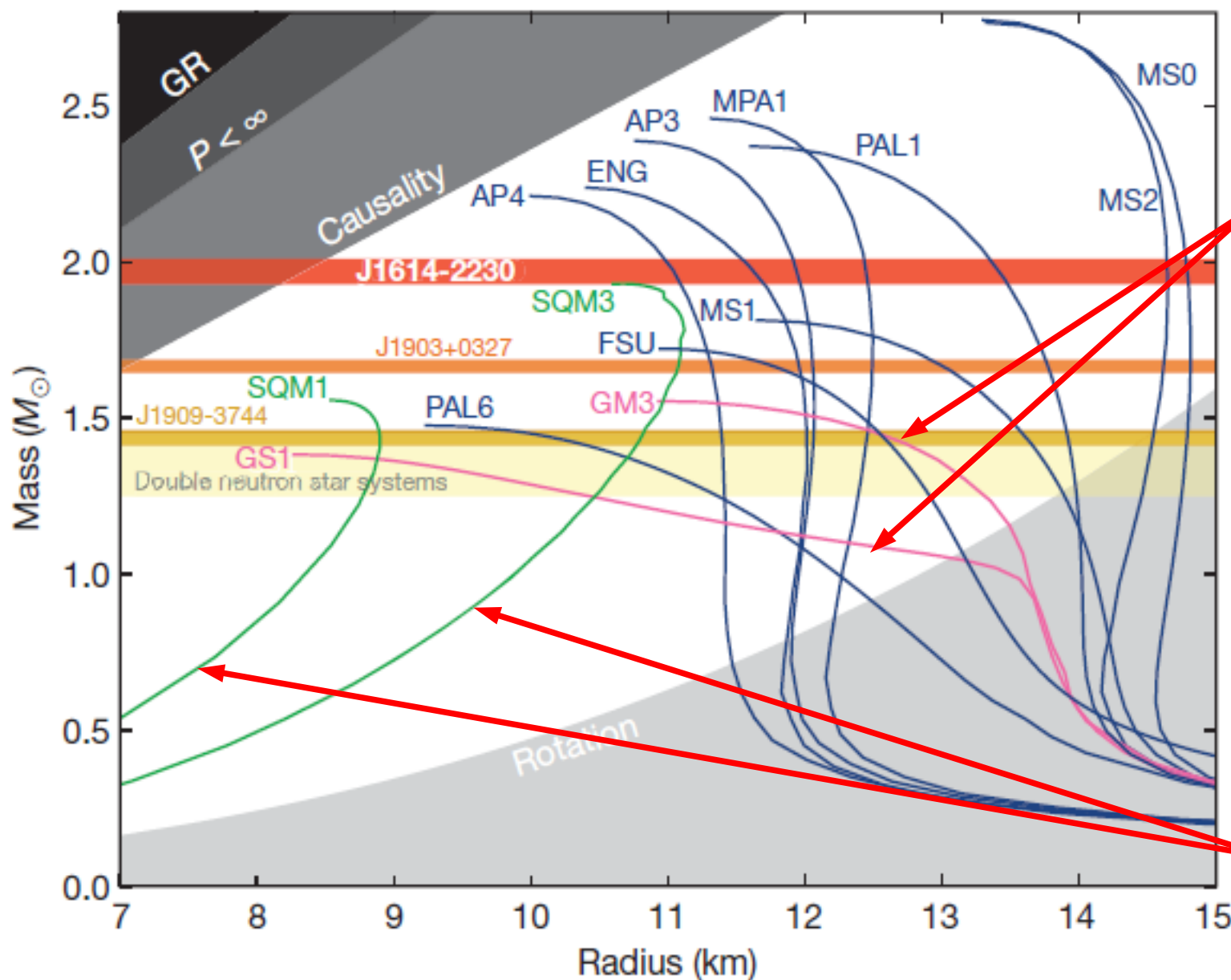
Schaffner+('98)



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

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

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



ハイペロンを
含む EOS

クォーク物質
のみの EOS

何が中性子星を支えるのか？

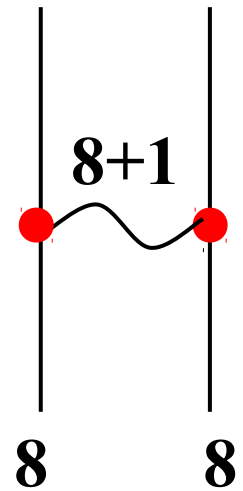
■ 棄却された EOS

= 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)*

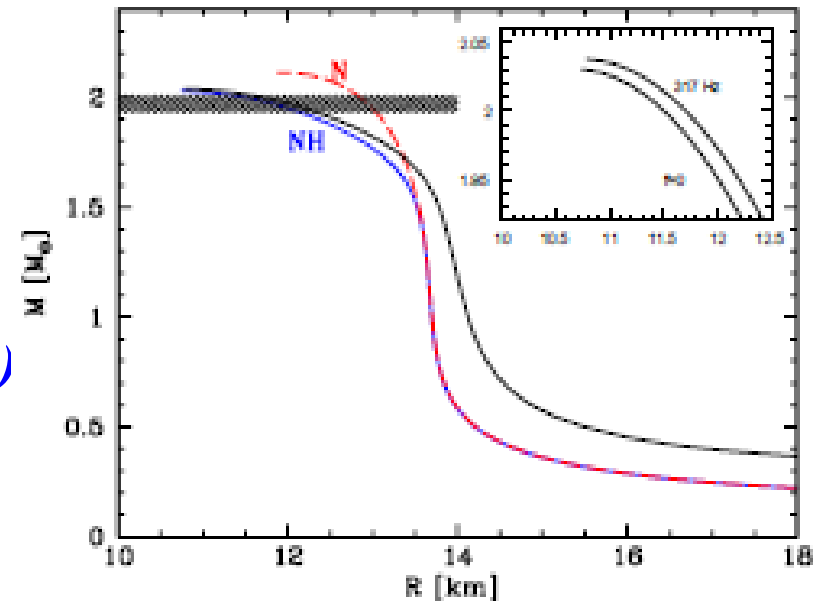
- Vector 結合に SU(6) の破れを導入

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)

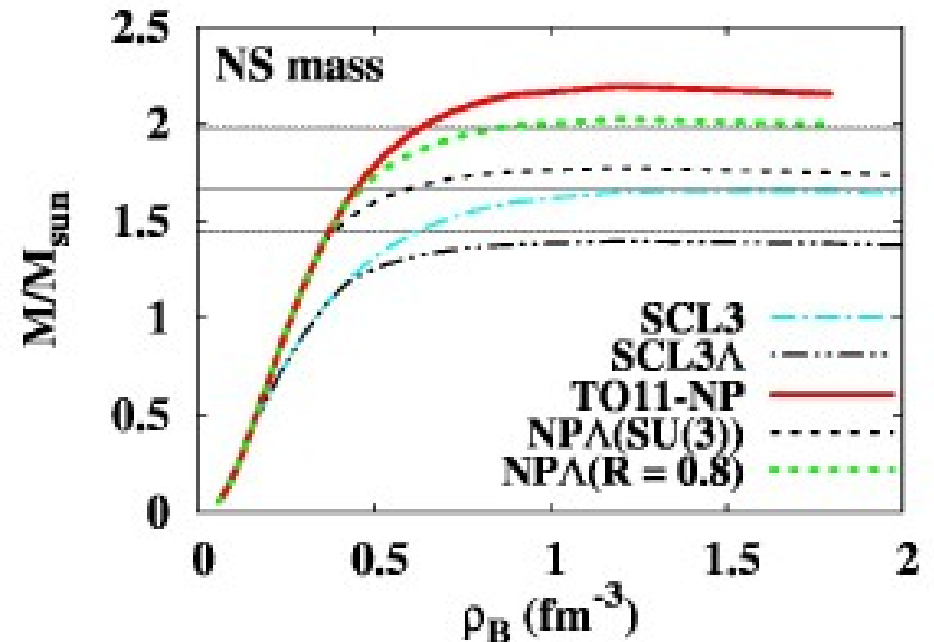
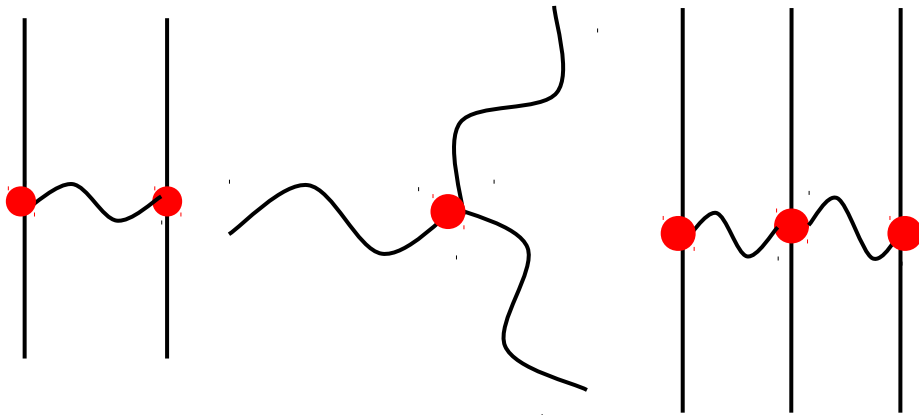
3 体力を含む RMF

■ 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.

- 中性子星は多体問題の宝庫であり、
現在様々な側面から様相を明らかにする道具がそろいつつある。
- なぜ今、中性子星か？
 - 最近の観測・実験・理論の発展
→ 分野間で協力すれば低密度から高密度まで理解できる可能性
 - 最近の観測からの核物理への挑戦：冷却、半径、質量
 - 地上での実験の進展：中性子過剰核、ハイパー核、重イオン
 - 理論の進展：多体論、現象論、格子
- 高密度物質の状態方程式パズル
「ハイペロン・中間子凝縮を含むと、
1.97 Msun の中性子星は支えられない？」
＝高密度での斥力起源の再考を要請
 - 多体力 or 非中間子的 (非 SU(6) 的) 斥力 or クォーク物質
 - 実験・観測によって、どのように区別できるか？
 - ハドロン物質で、どうしても説明できない場合
→ 自然に存在するクォーク物質の発見？

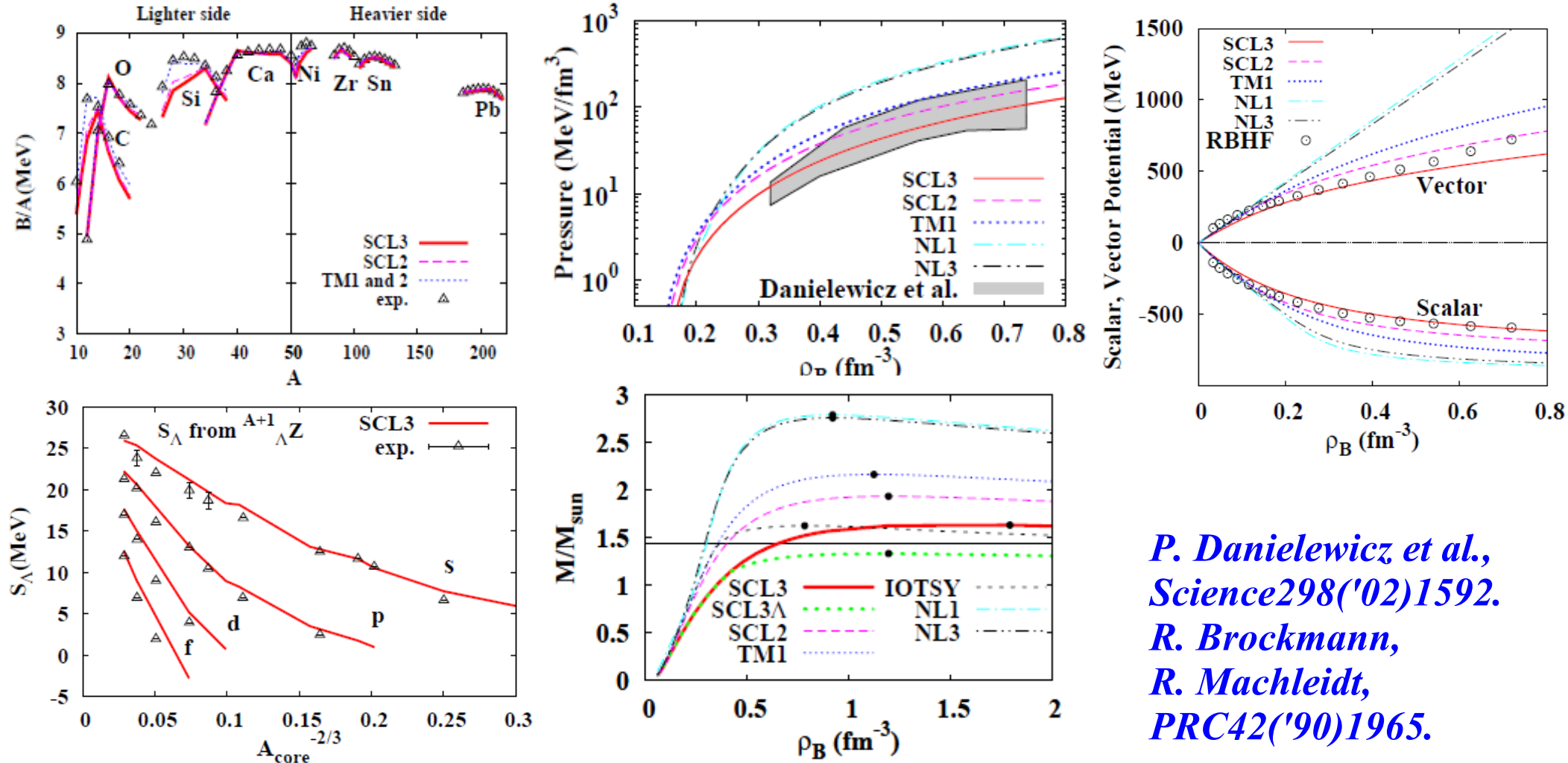
Thank you for your attention !

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, ...



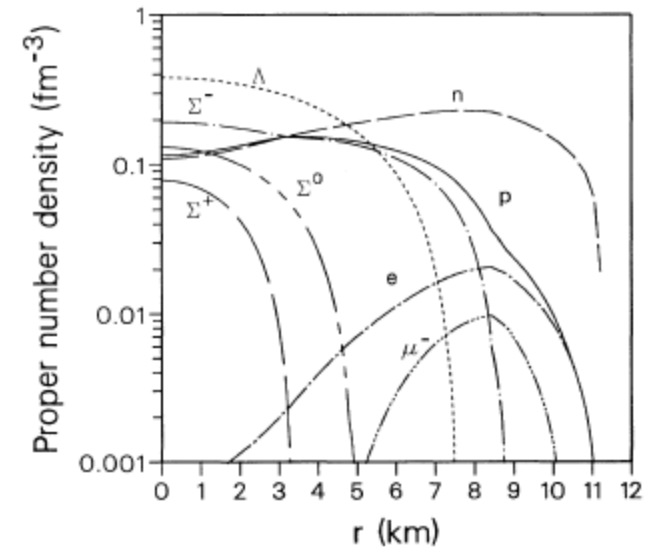
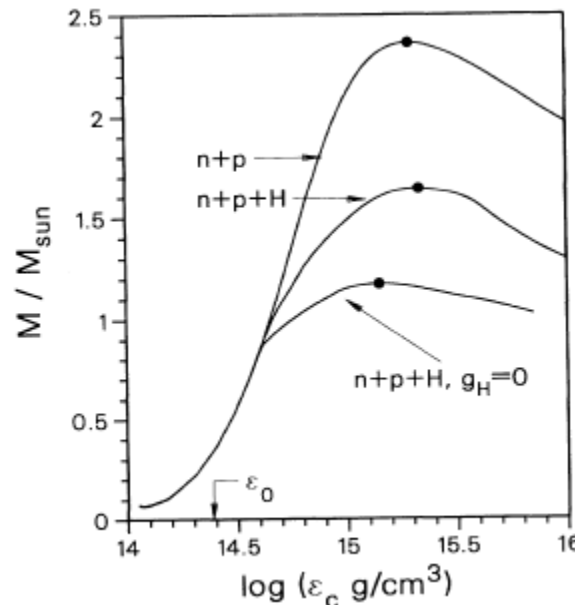
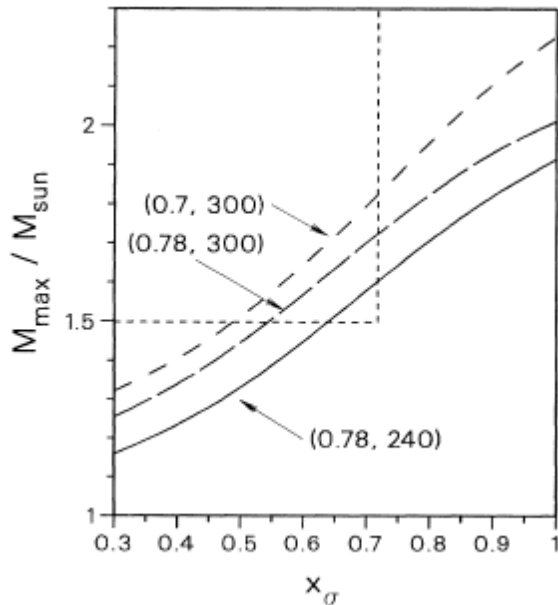
Glendenning & Moszkowski (1991)

■ 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.

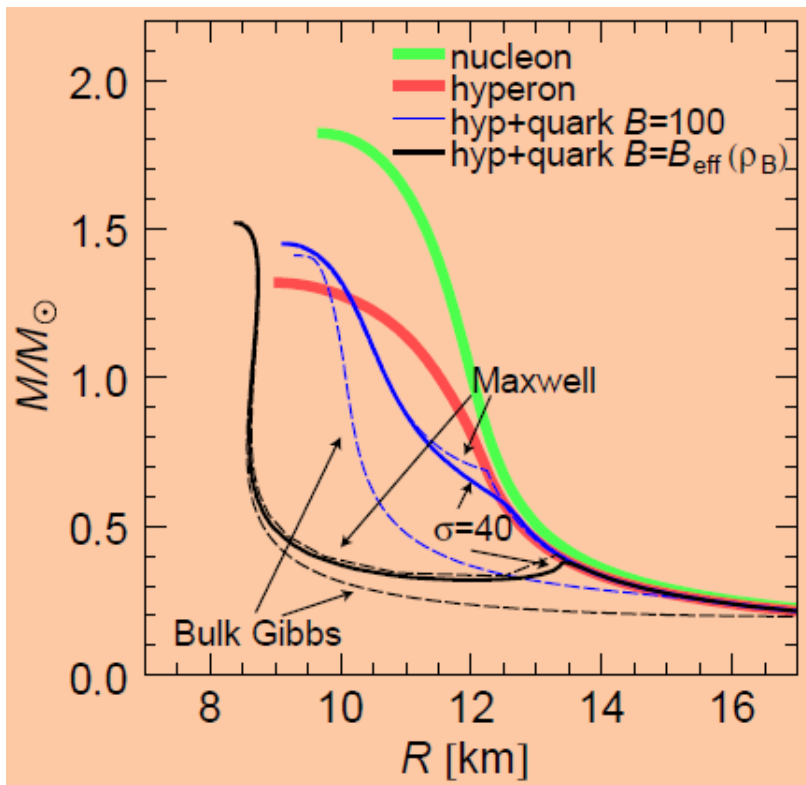
| x_σ | $m^*/m=0.7$ | x_ω | $m^*/m=0.78$ |
|------------|-------------|------------|--------------|
| 0.2 | 0.131 | | 0.091 |
| 0.3 | 0.261 | | 0.233 |
| 0.4 | 0.392 | | 0.375 |
| 0.5 | 0.522 | | 0.517 |
| 0.6 | 0.653 | | 0.568 |
| 0.7 | 0.783 | | 0.800 |
| 0.8 | 0.913 | | 0.942 |
| 0.9 | 1.04 | | 1.08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



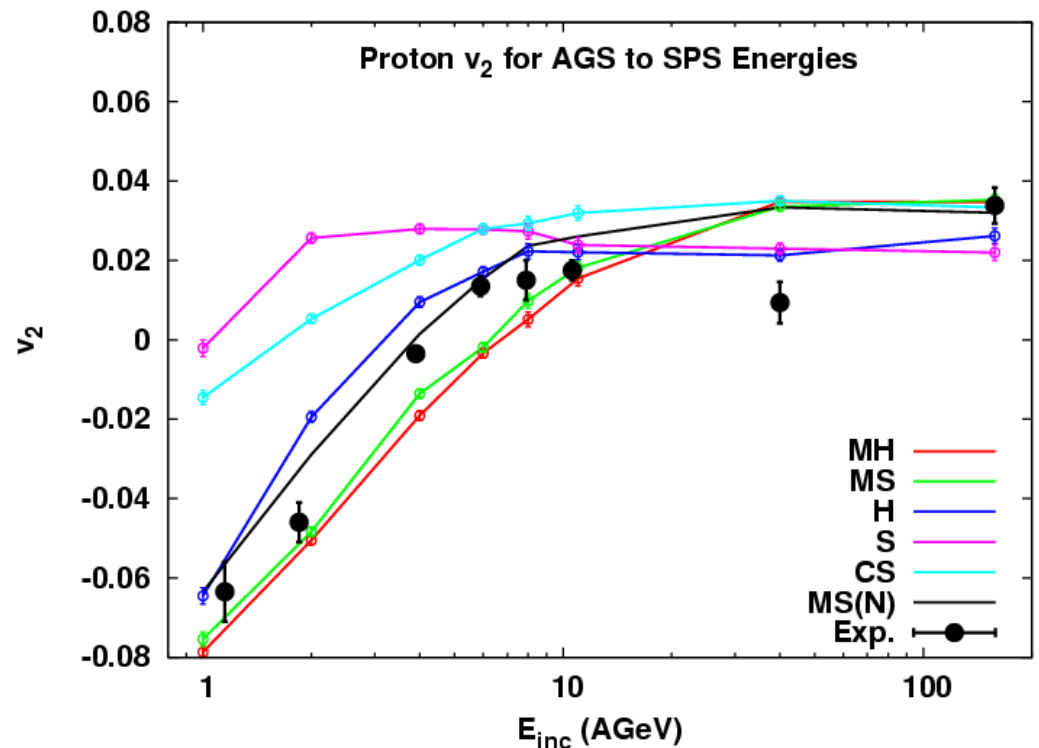
N.K.Glendenning, S.A.Moszkowski, PRL67('91)2414

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, ...



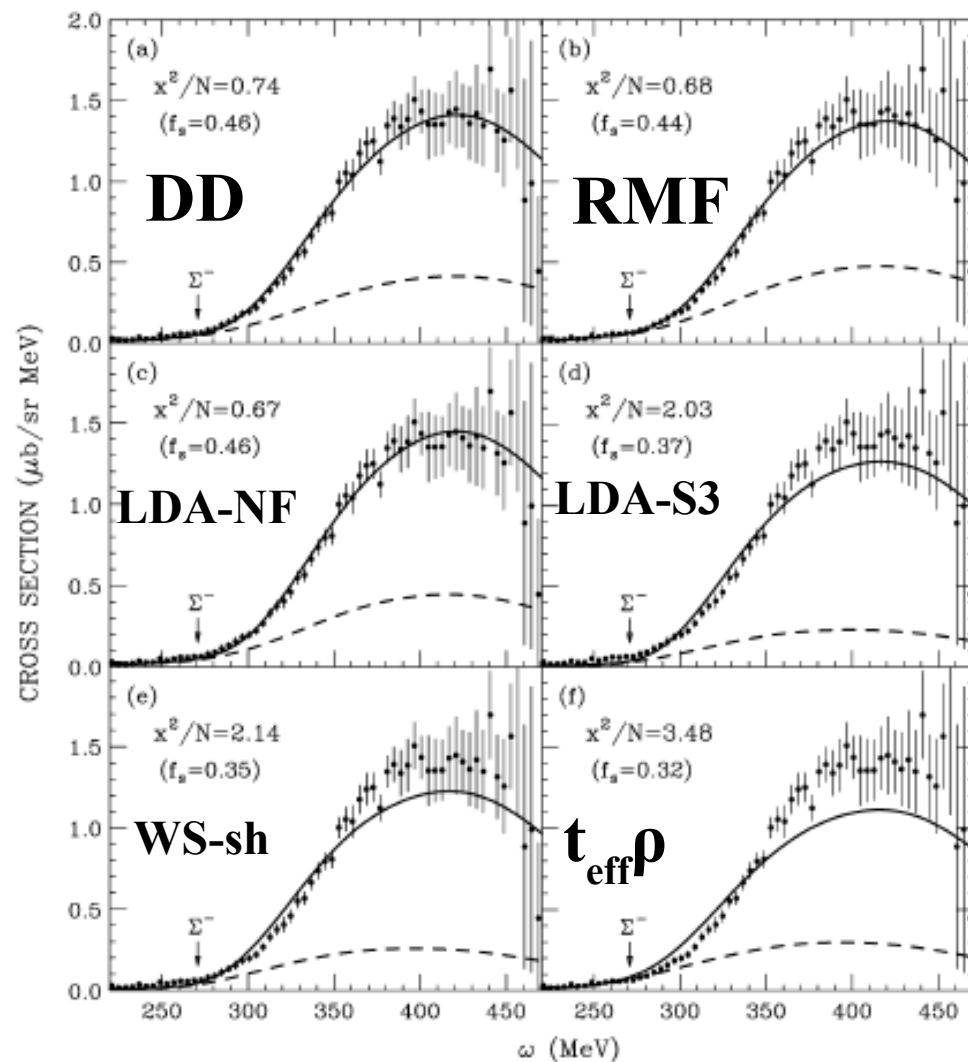
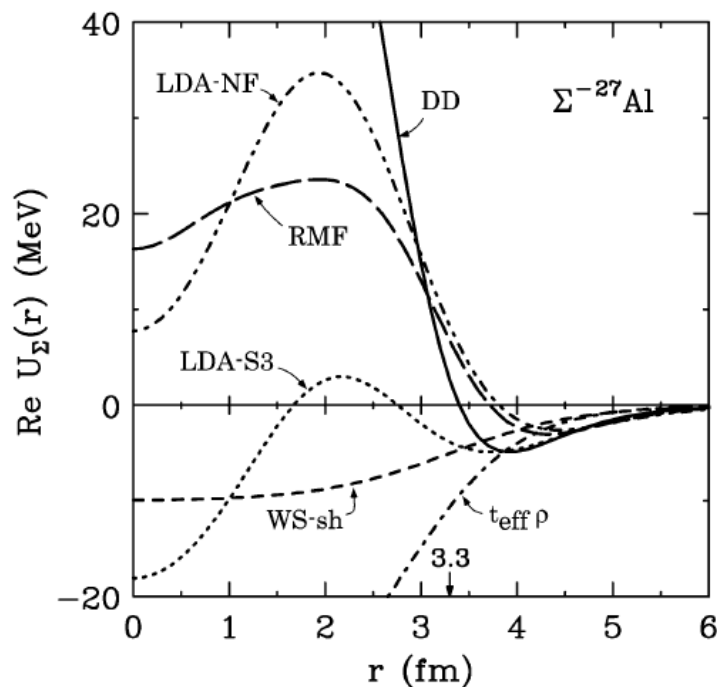
H.-J. Schulze, NFQCD10



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

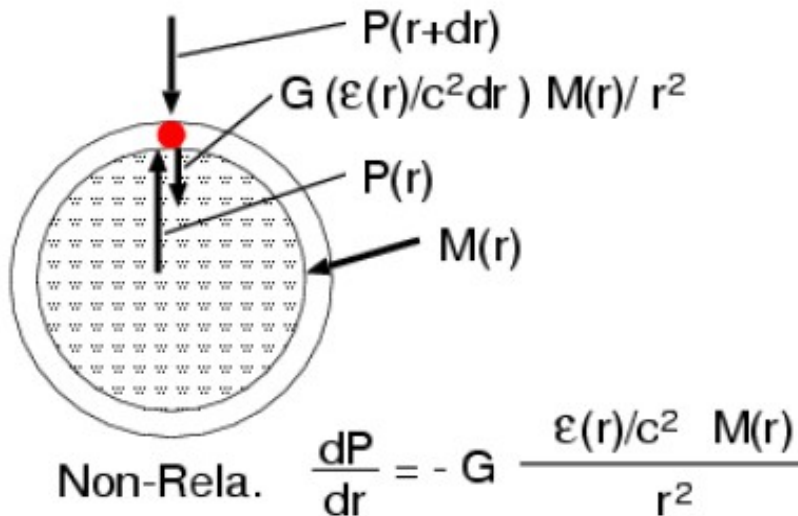
RMF へのハイペロンの導入

- 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)

Tolman-Oppenheimer-Volkoff equation



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

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

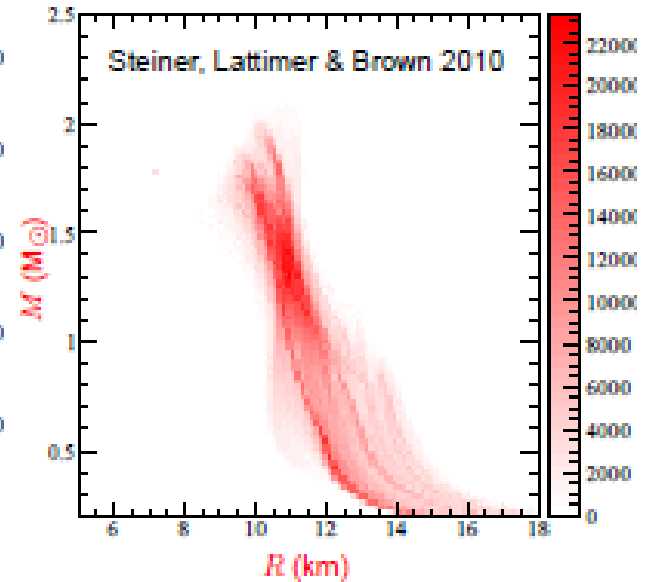
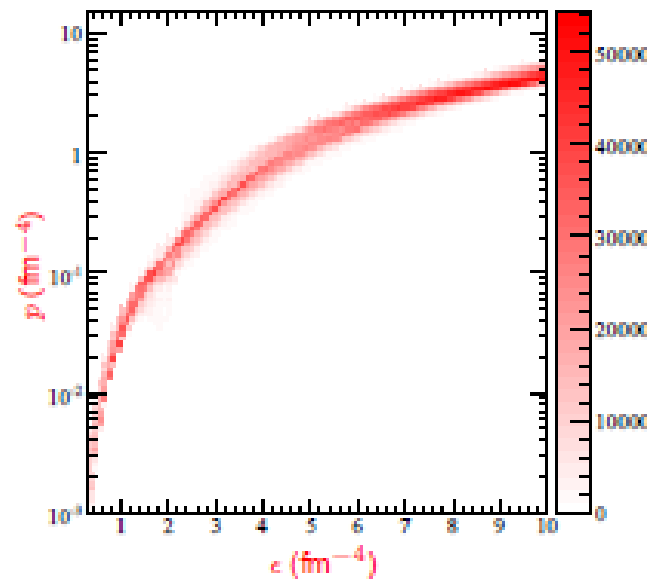
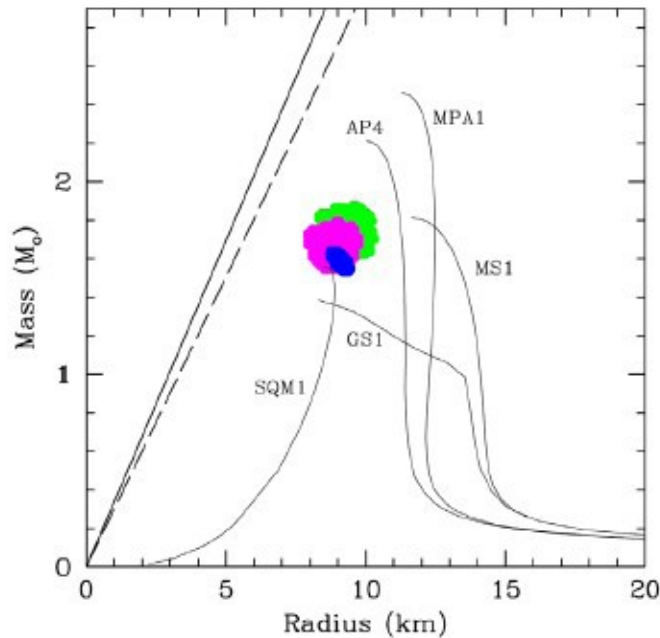
$$P = P(\epsilon), \quad \frac{dP}{d\epsilon} = \frac{dP}{d\epsilon}(\epsilon) \quad (\text{EOS})$$

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

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

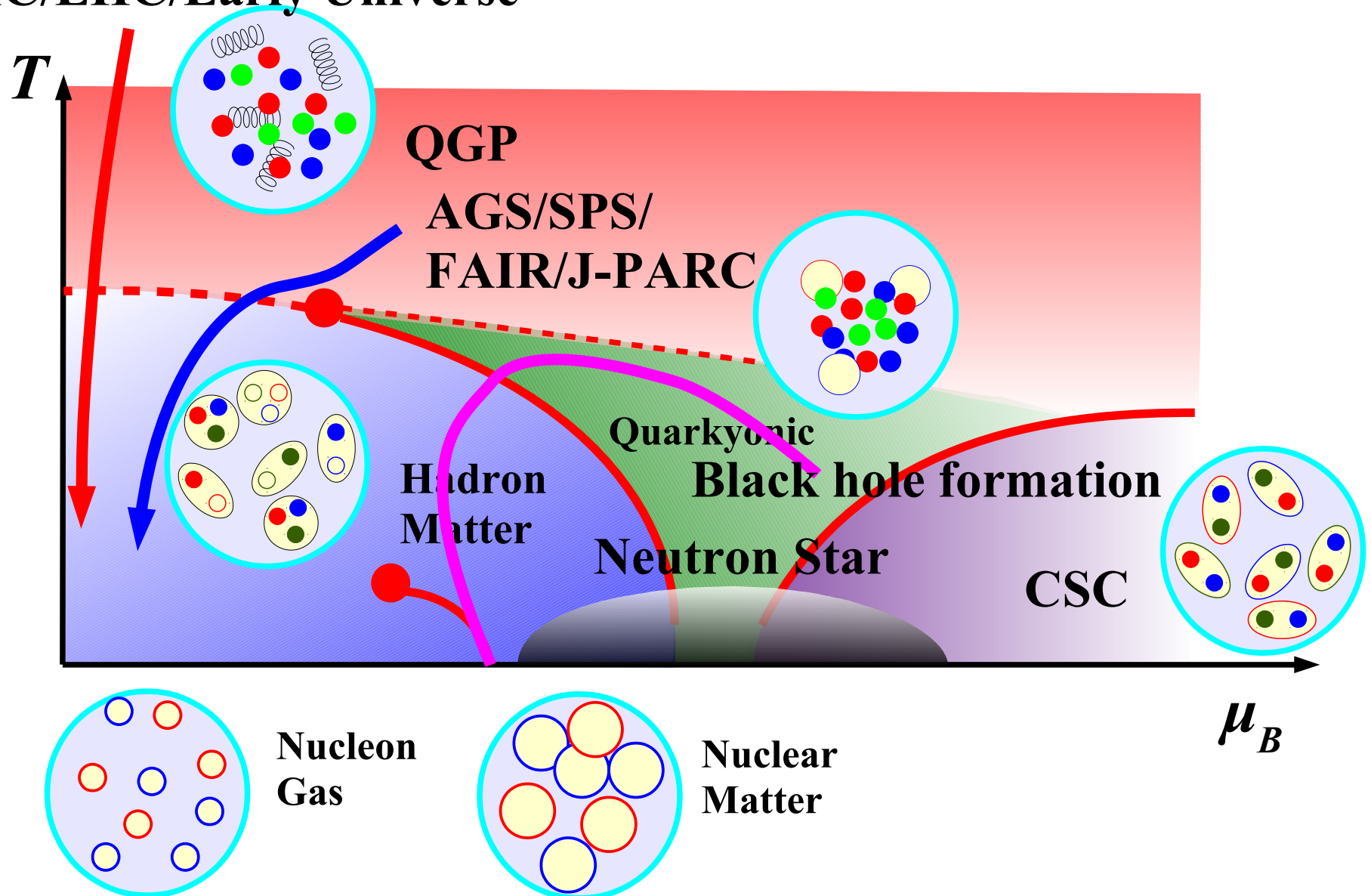


Ozel, Baym & Guver,
PRD82('10)101301 [arXiv: 1002.3153]

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

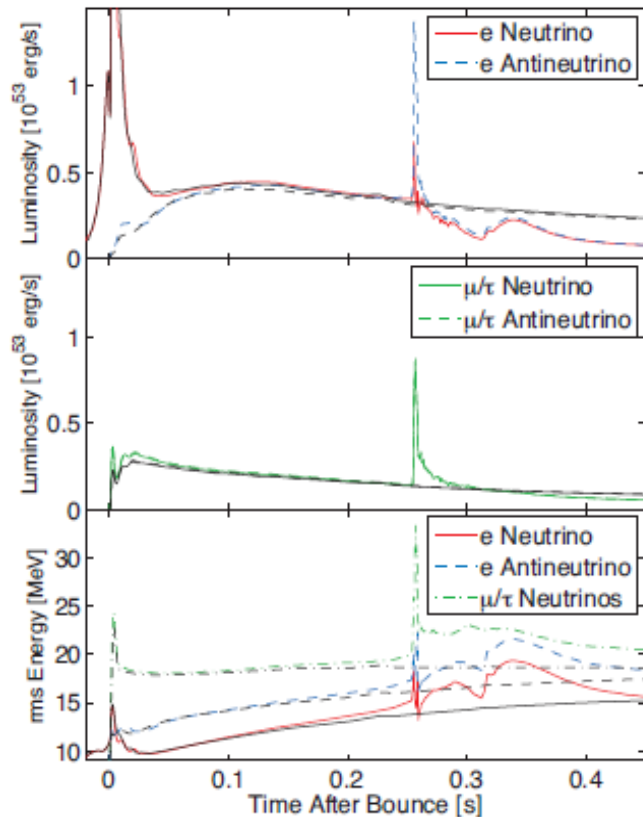
QCD Phase Diagram

RHIC/LHC/Early Universe



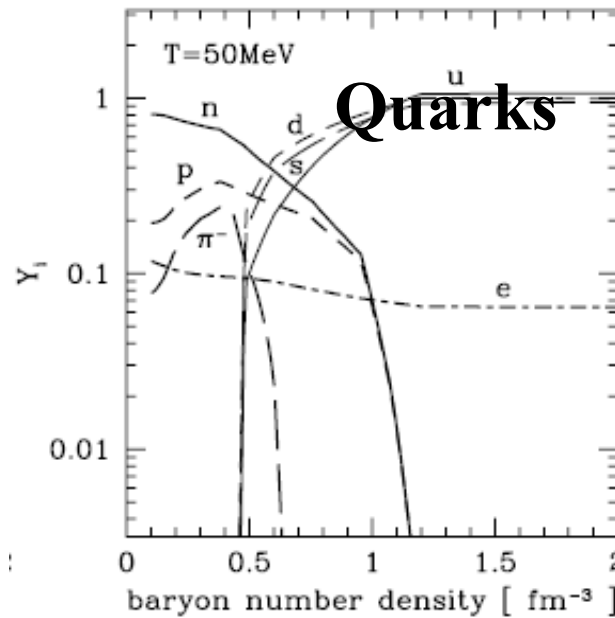
Can we detect Quark Matter ?

- 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

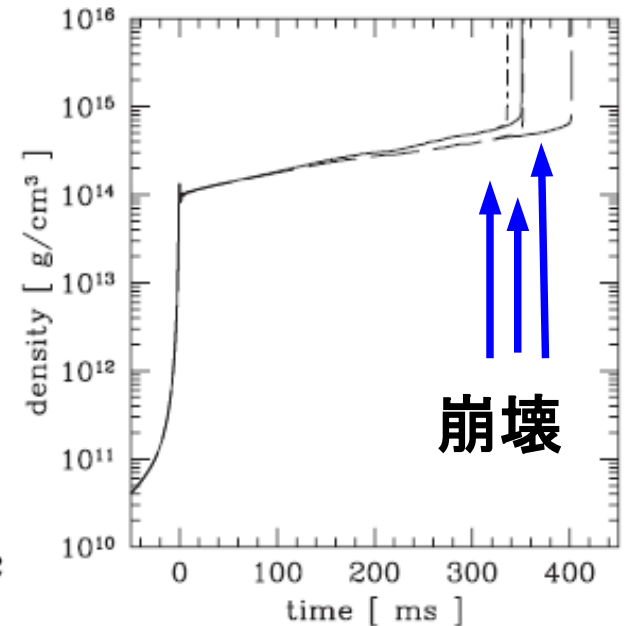
粒子比



密度

Nakazato, Sumiyoshi, Yamada

密度

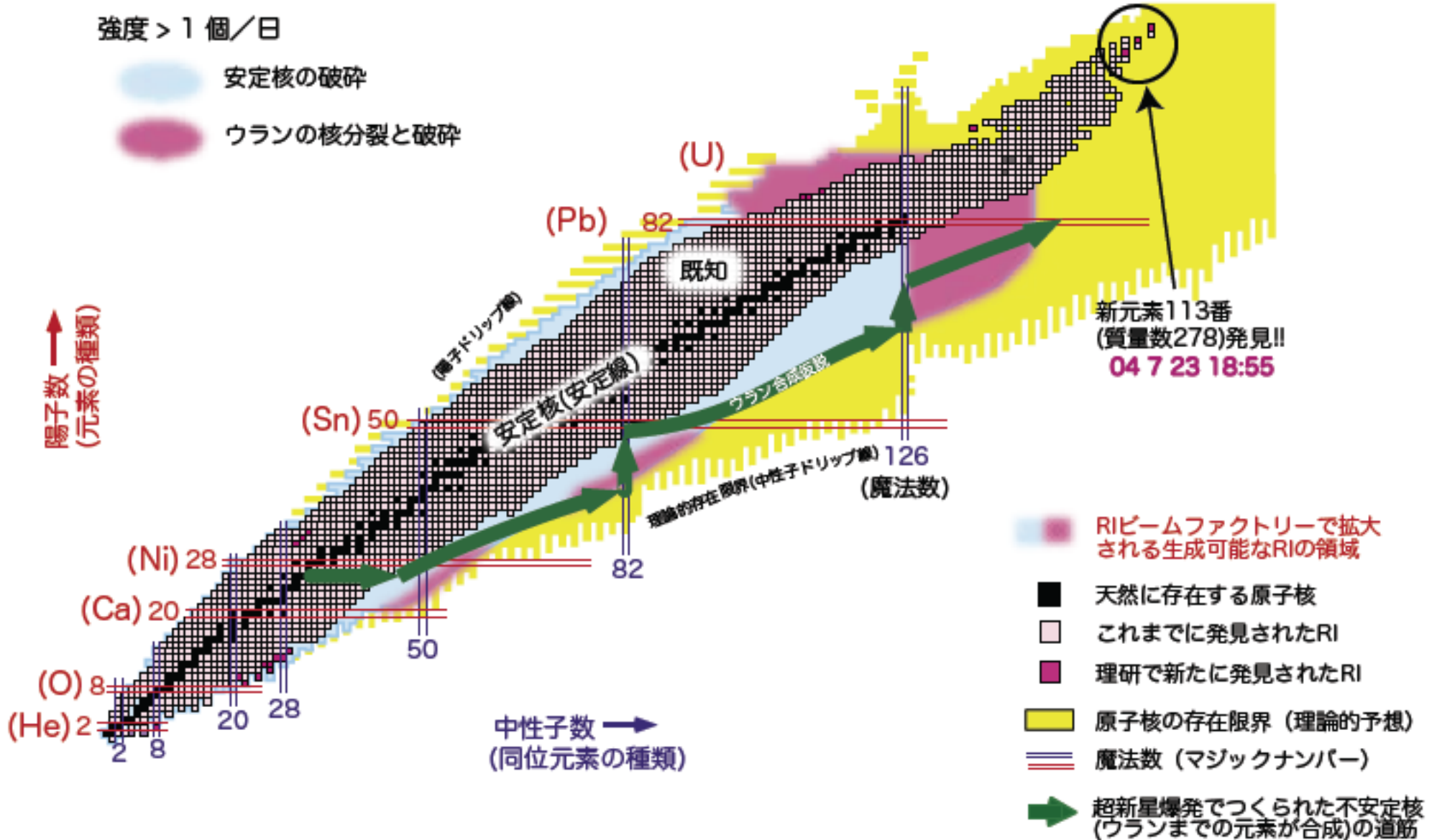


崩壊

時間

原子核の存在領域の拡大

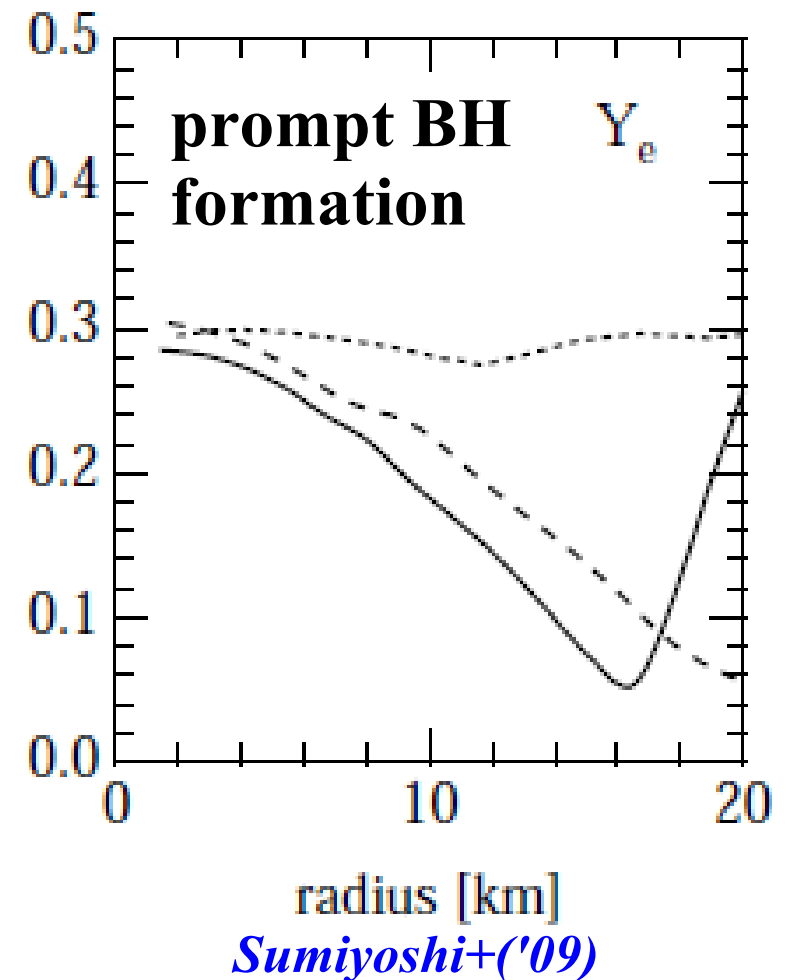
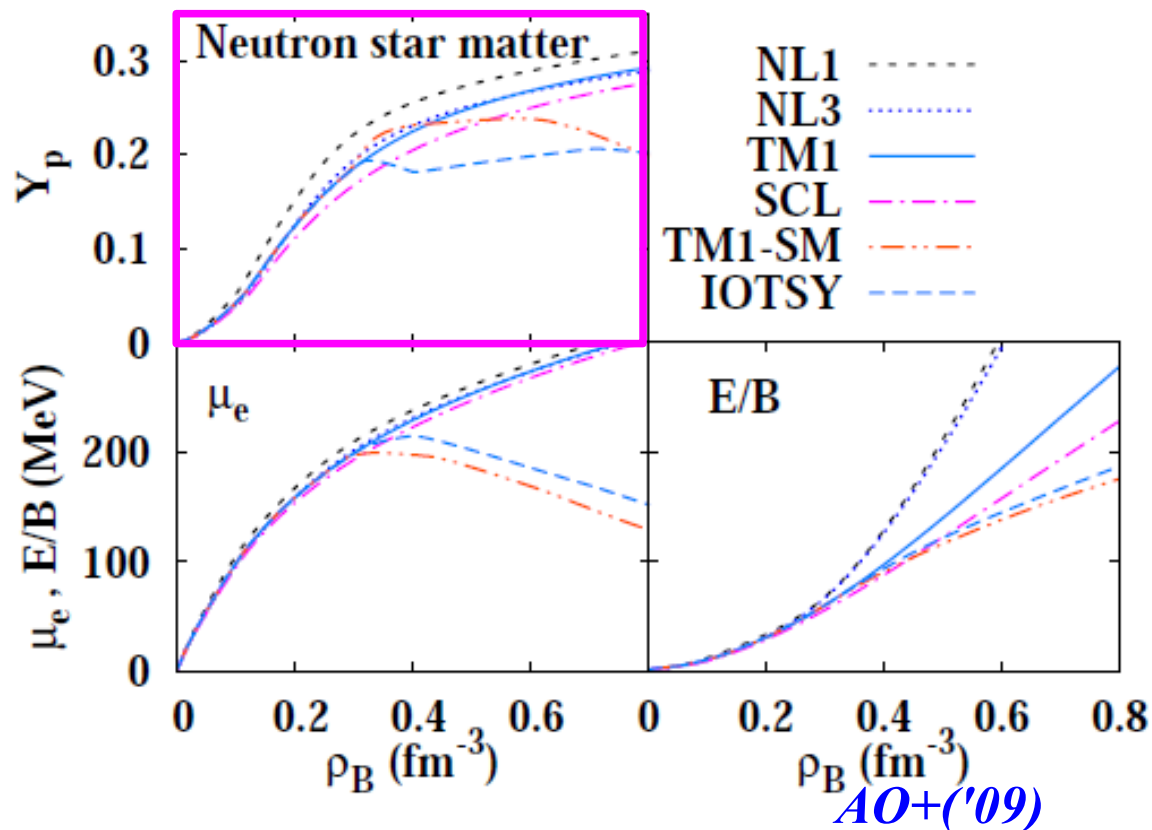
Nishina Center RIBF Pamph.



Compact Star Matter is Neutron Rich

■ Proton fraction in Compact Stars

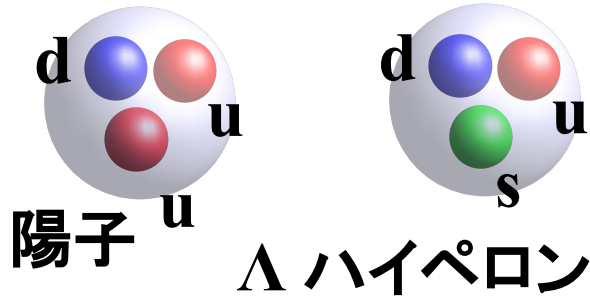
- Neutron star $Y_p \sim 0.1$ ($\rho_B \sim \rho_0$)
- Supernova $Y_p \sim 0.3$ (bounce) (c.f. H. Suzuki's talk)
- Black hole formation $Y_p \sim (0.1-0.3)$



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

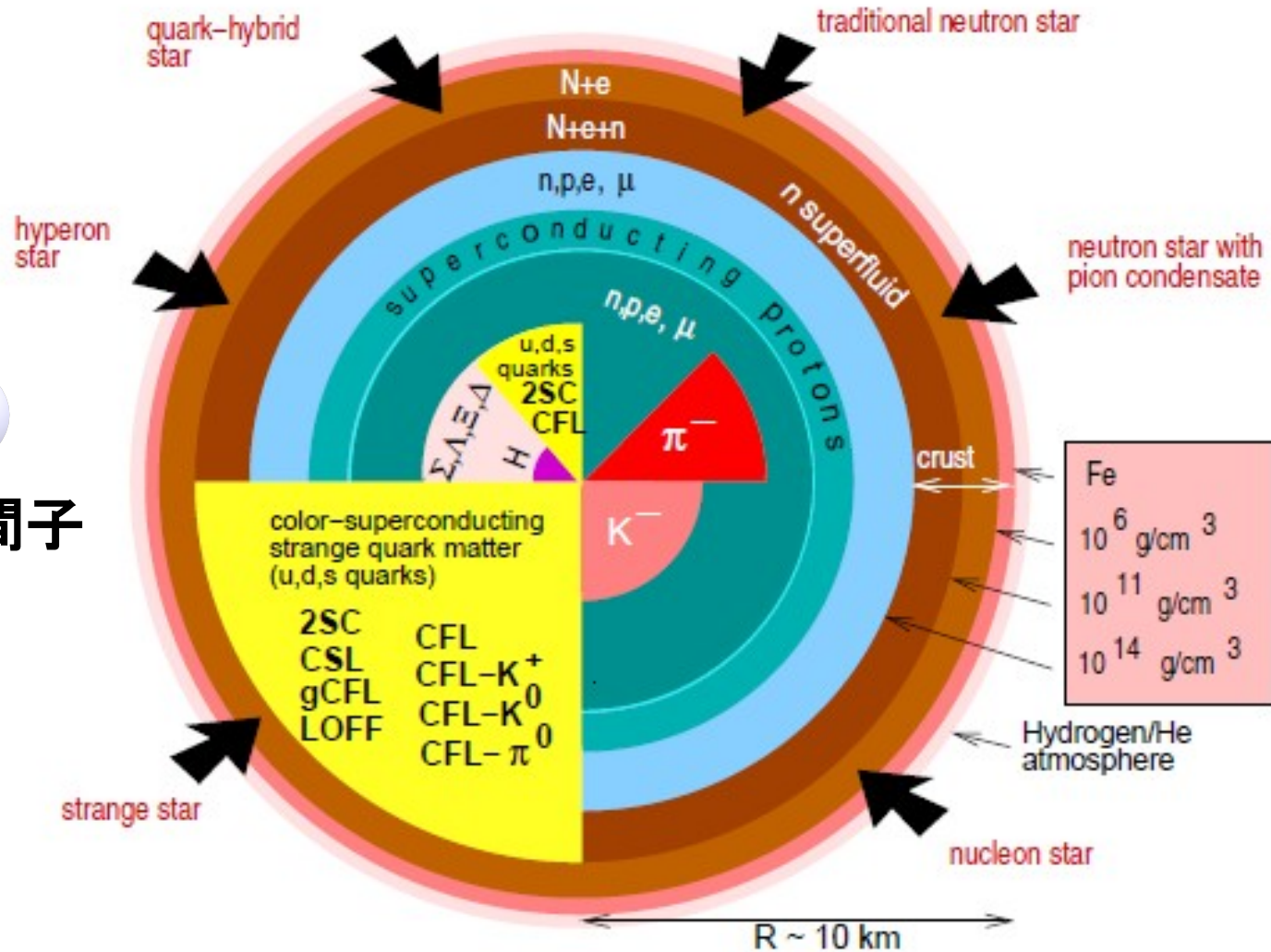


- 中間子凝縮 (K, π)



π 中間子 (反)K 中間子

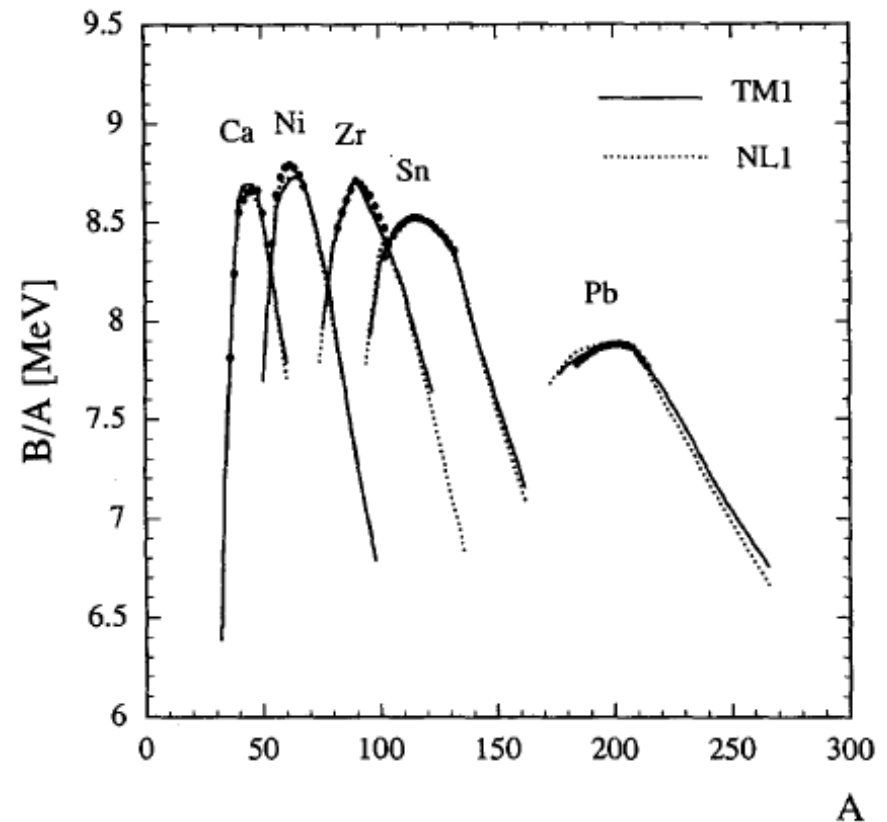
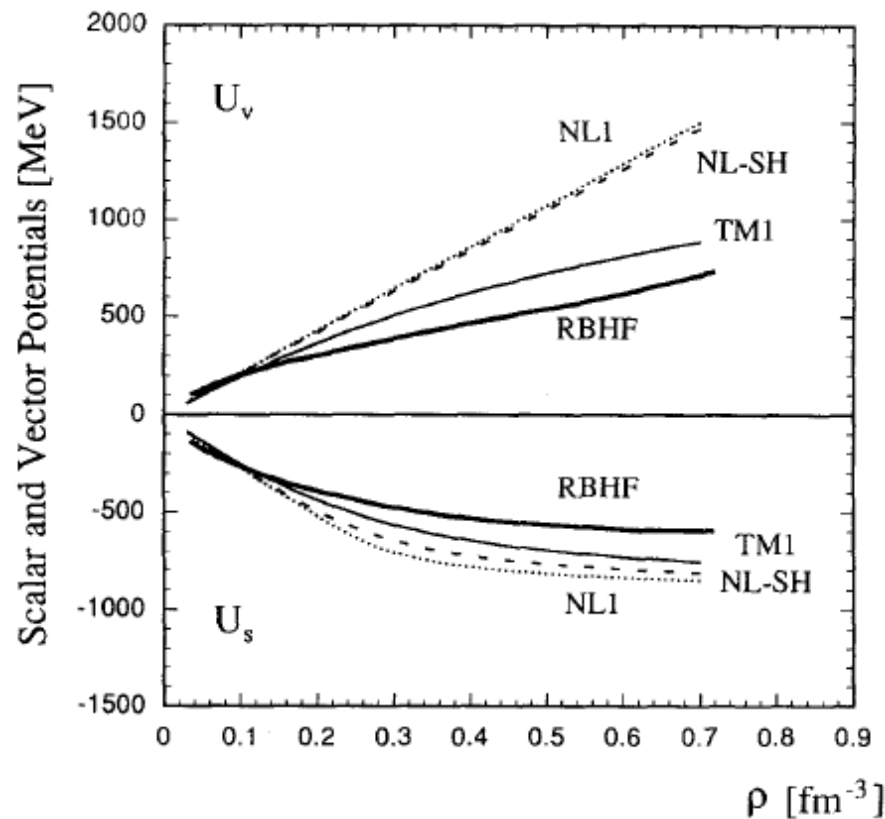
- クォーク物質
- クォーク対凝縮状態 (カラー超伝導)



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

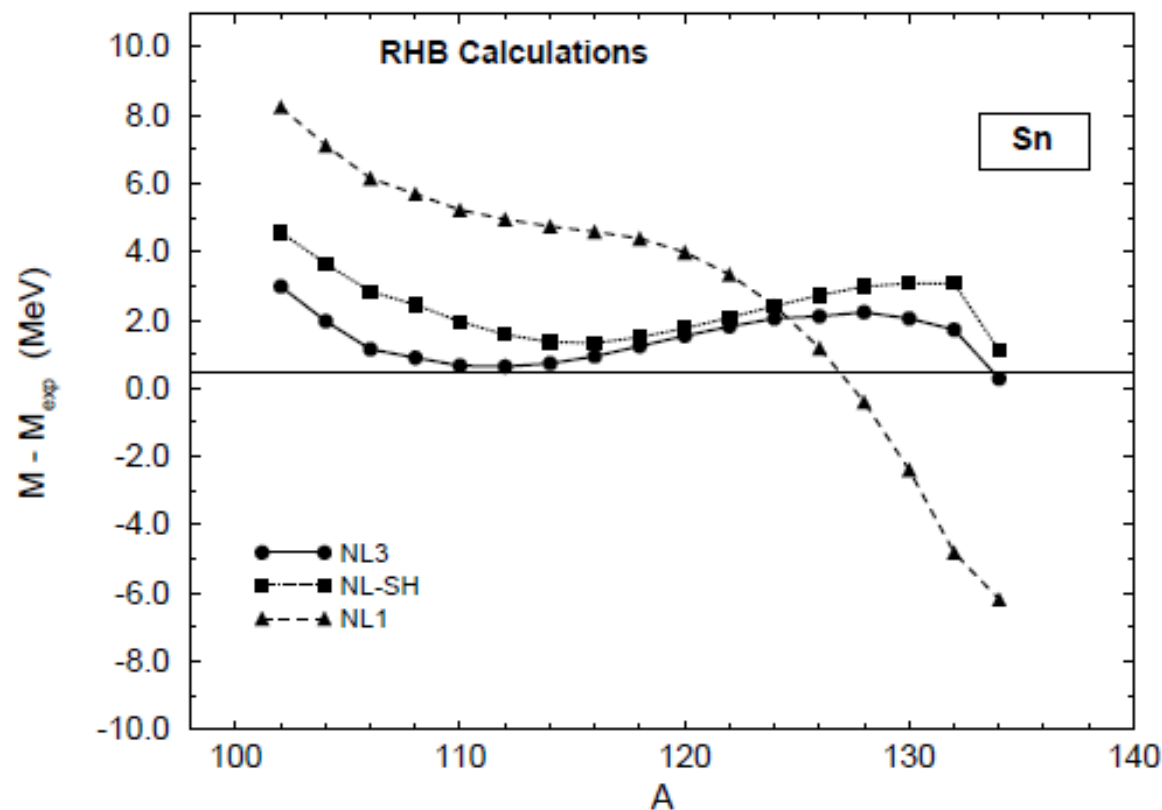
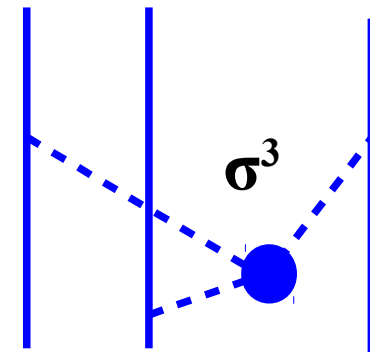
- いくつかの RMF パラメータによる計算は、「質量公式」に迫る精度で原子核質量を記述！

→ 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>

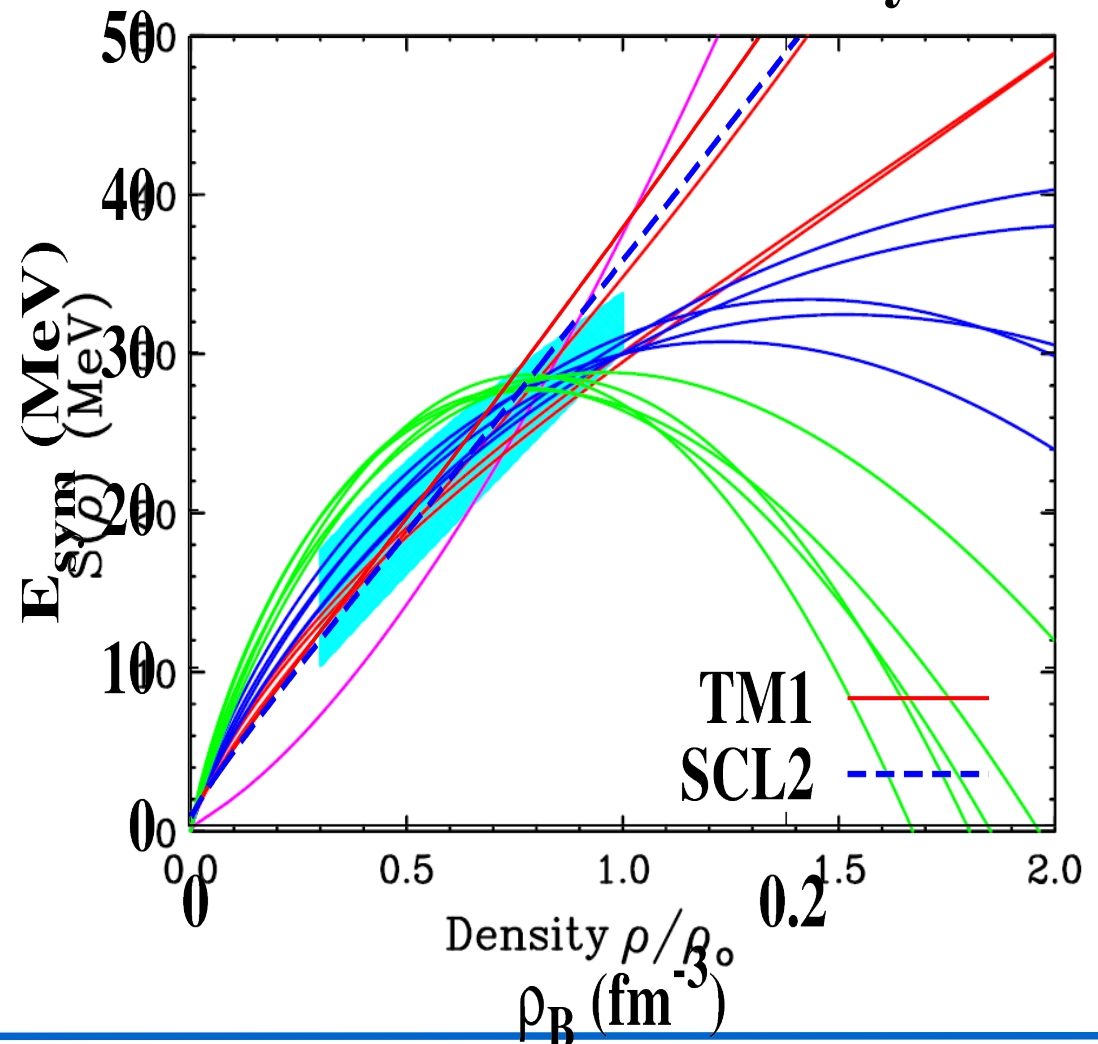
$$E_{\text{sym}}(\rho_0) = 31\text{-}34 \text{ MeV}, L = 50\text{-}110 \text{ MeV}$$

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。

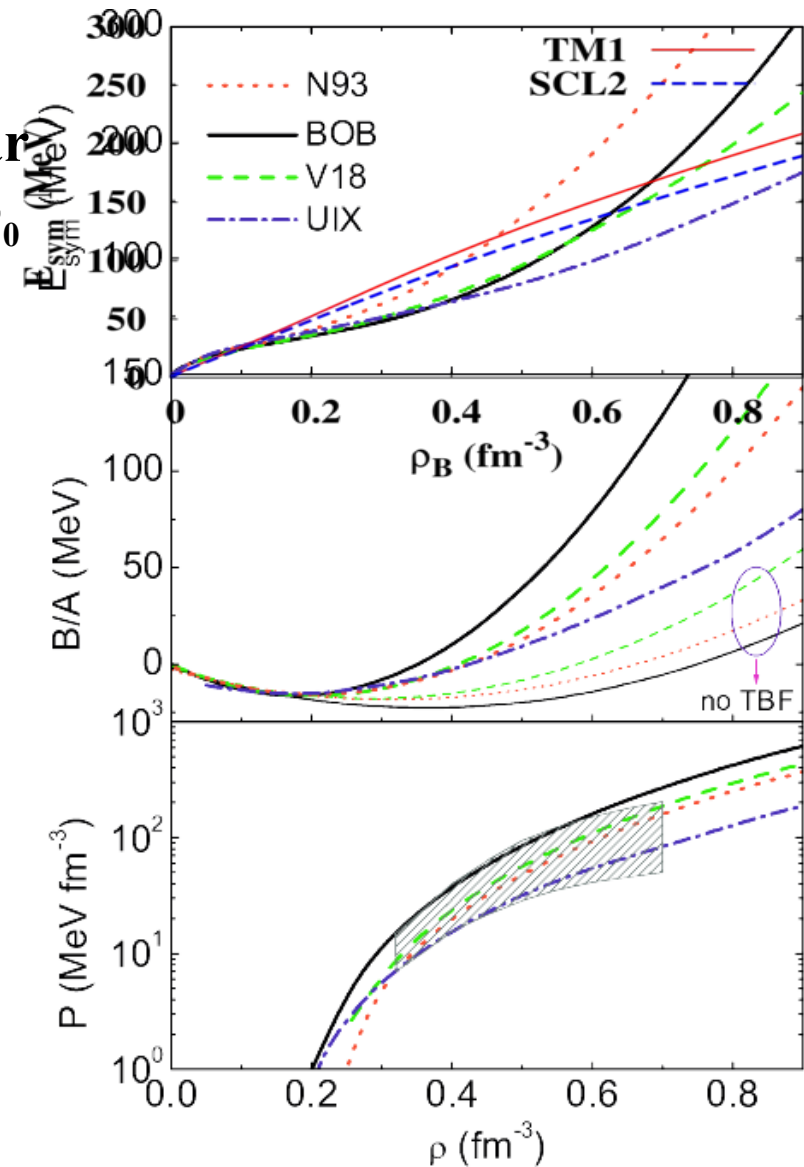
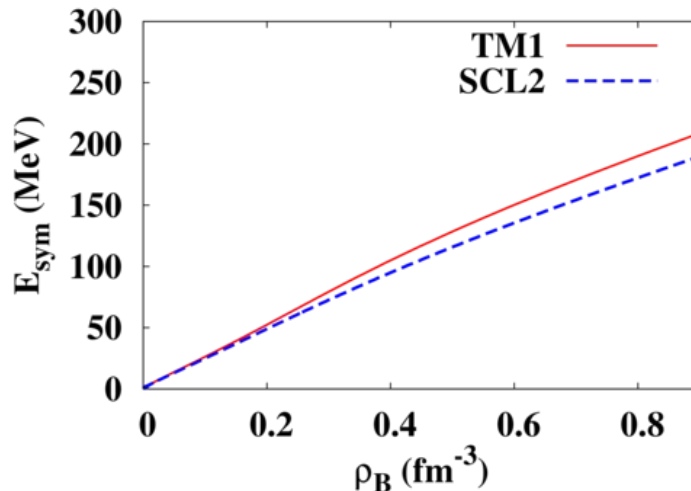


Density dependence of Symmetry Energy

■ RMFs have small ambiguity in E_{sym} .

Is it true ?

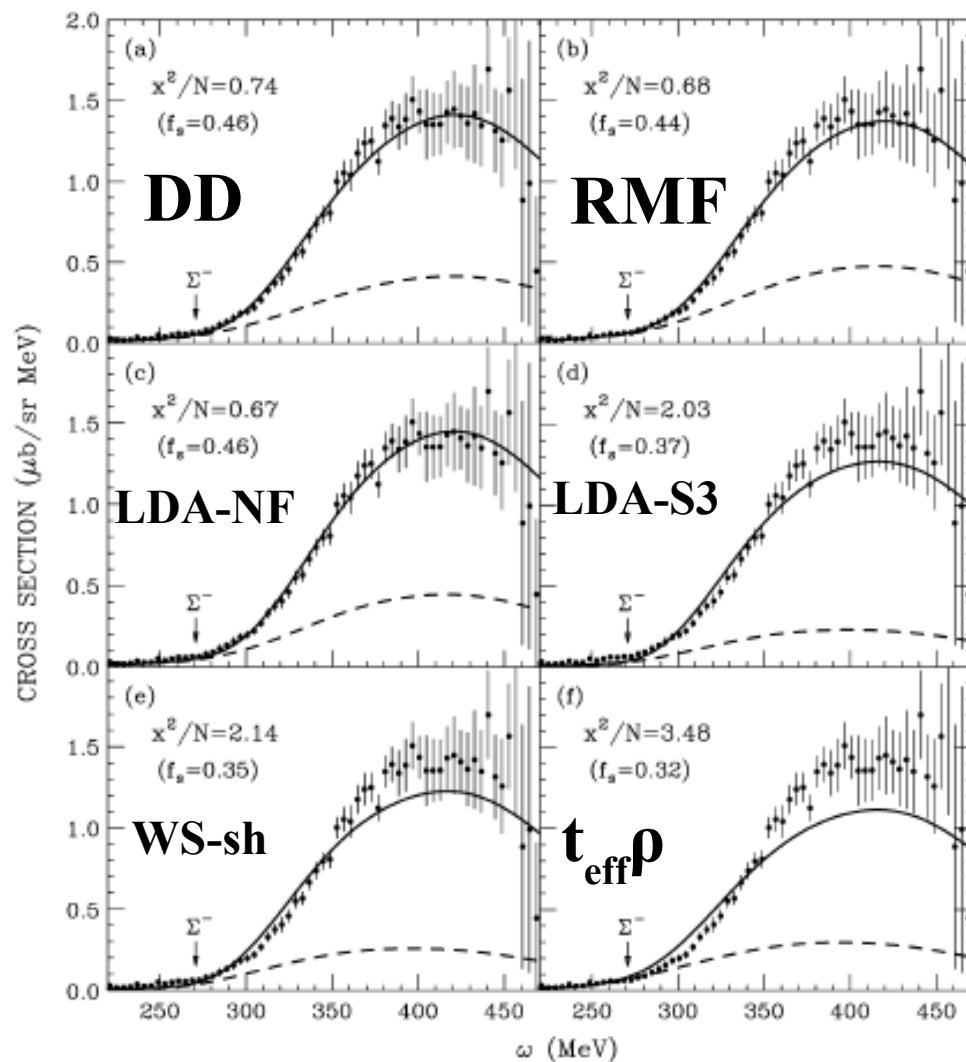
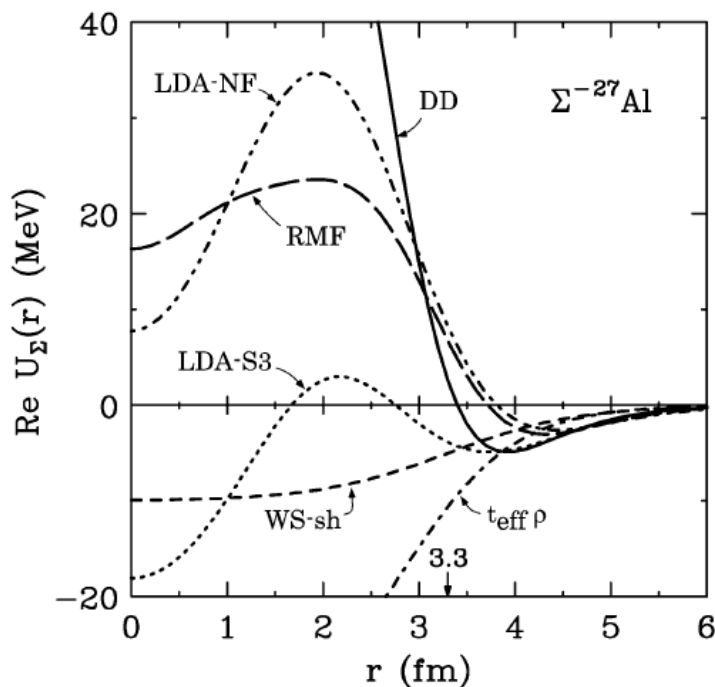
- RMF E_{sym} is determined to fit finite nuclear BE, thus reflects average values in the $\rho_B < \rho_0$ region.
- Nuclear effective potential (g-matrix) suggests S-curve behavior of E_{sym} , while RMF gives E_{sym} almost linear in ρ_B .
 → RMF may overestimate E_{sym} at high density.



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)

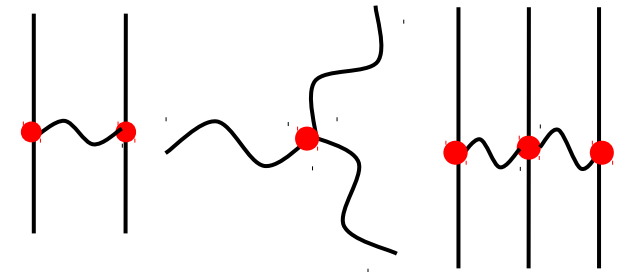
■ Three-baryon coupling term

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

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

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

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)

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

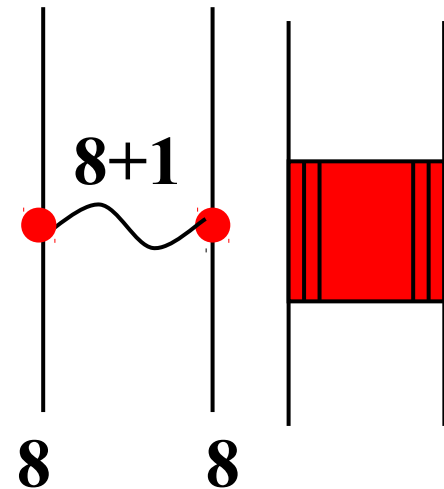
(B, M, d=# of baryon and non-NG boson field, derivatives to NG fields)

- 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 $SU(3)_f$.

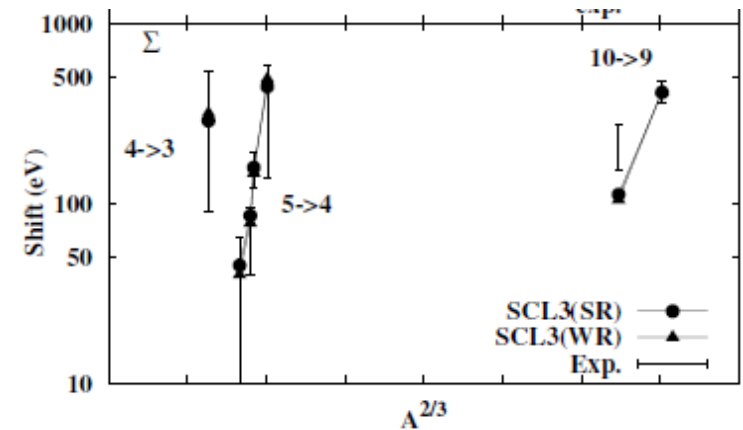


$$V = \sum_{\alpha, \beta} (\bar{\Psi} \bar{\Psi})_{\alpha} \Gamma_{\alpha\beta} (\Psi \Psi)_{\beta} \rightarrow -\frac{1}{2} \sum_{\alpha} m_{\alpha}^2 \omega_{\alpha}^2 + \sum_{\alpha} g_{\alpha} \omega_{\alpha} (\Psi \Gamma \Psi)_{\alpha}$$

E.g., Σ atomic shift

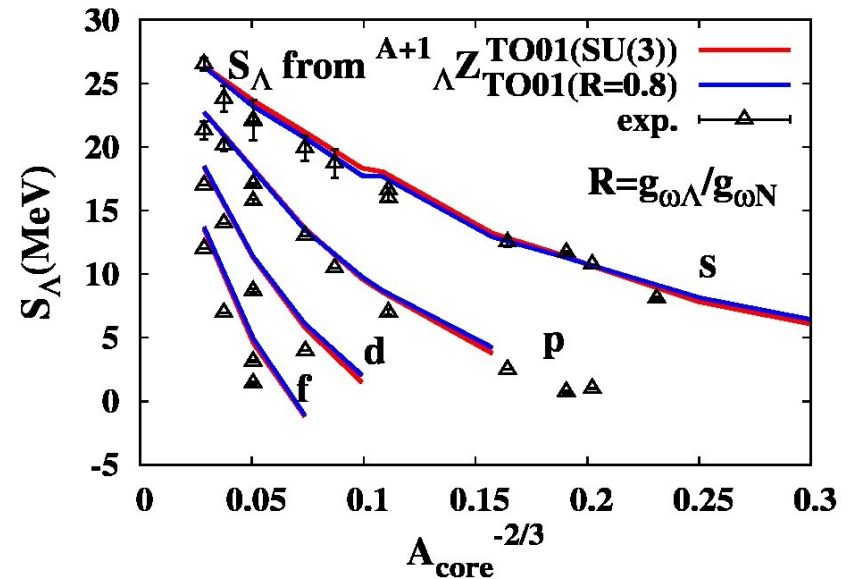
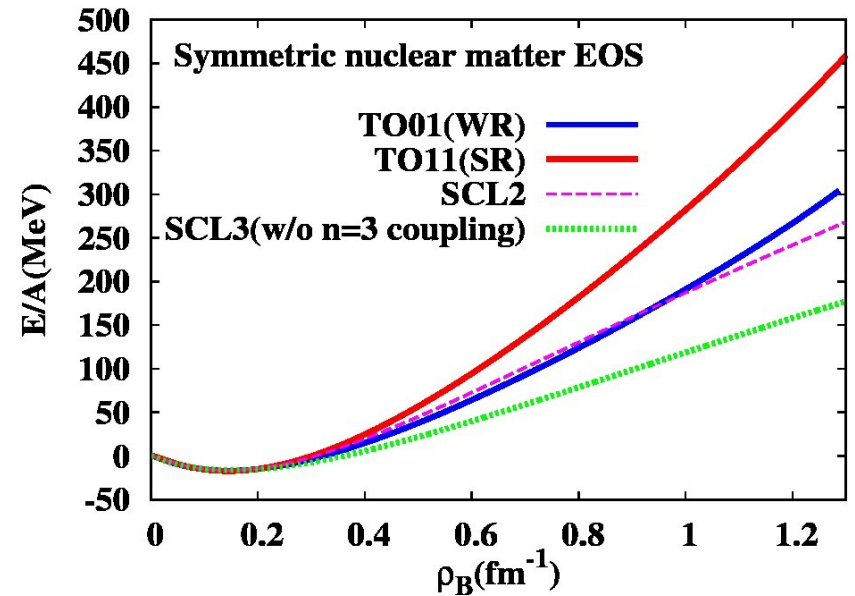
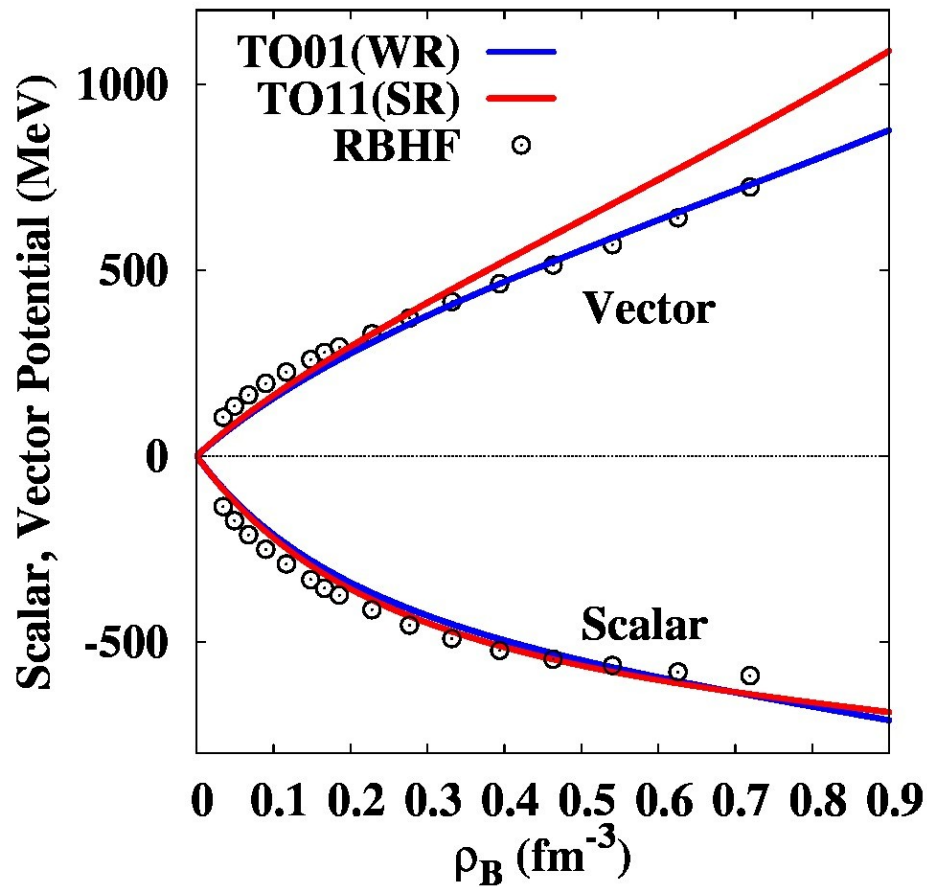
$\rightarrow g_{\sigma\Sigma} \sim g_{\sigma\Sigma} (SU(3)) \times (0.2-0.3)$

- Finite size of baryons would lead to excluded volume effects $\rightarrow \mu - vP$
(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”

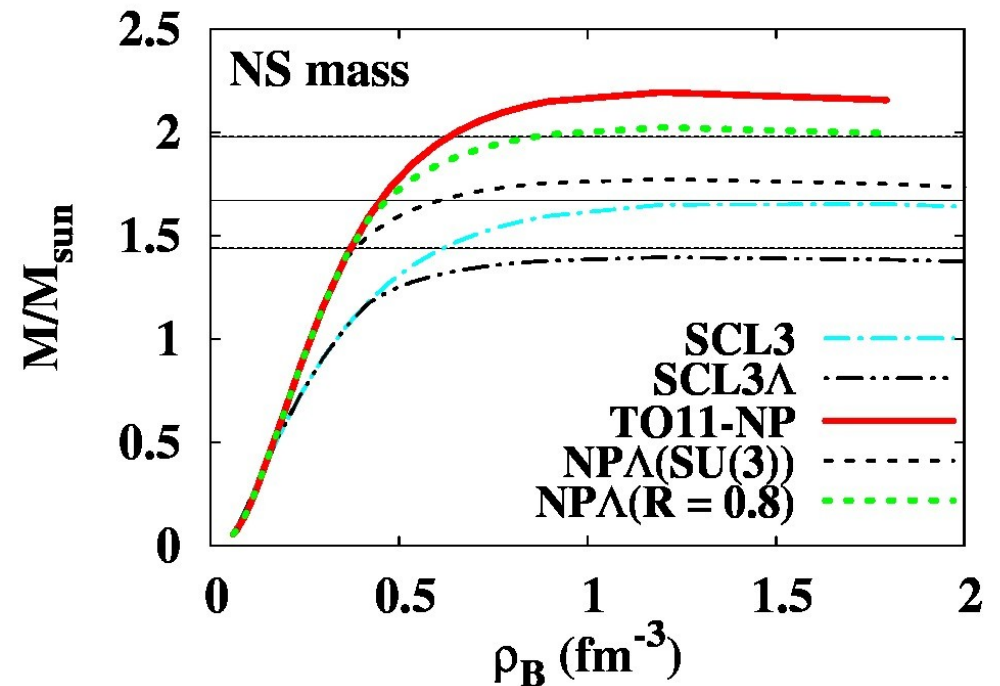
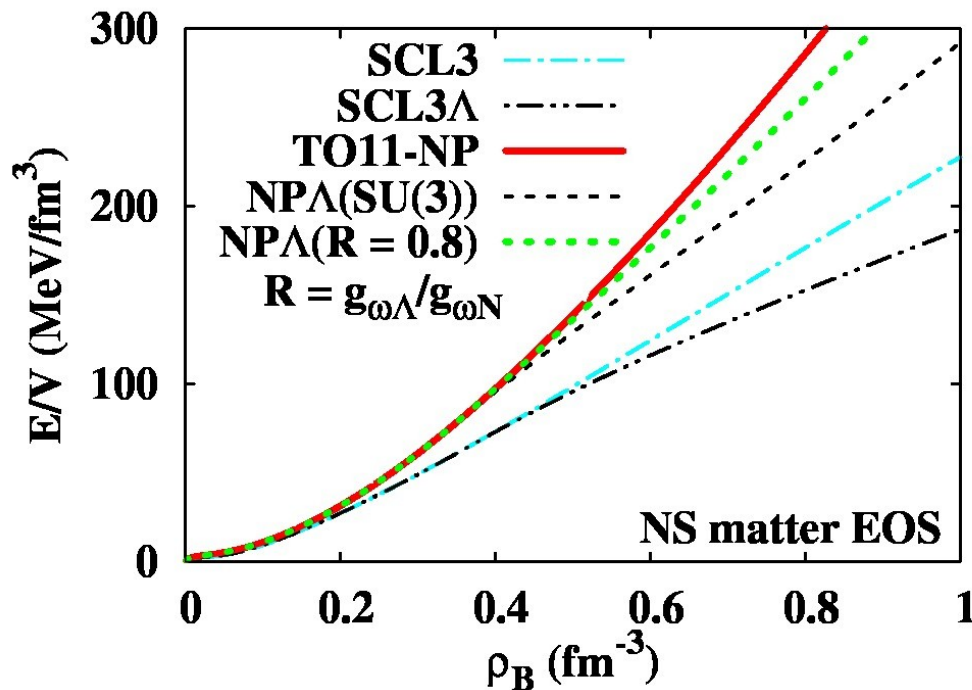
■ Two types of modification

Tsubakihara, AO, in prep.

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

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

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

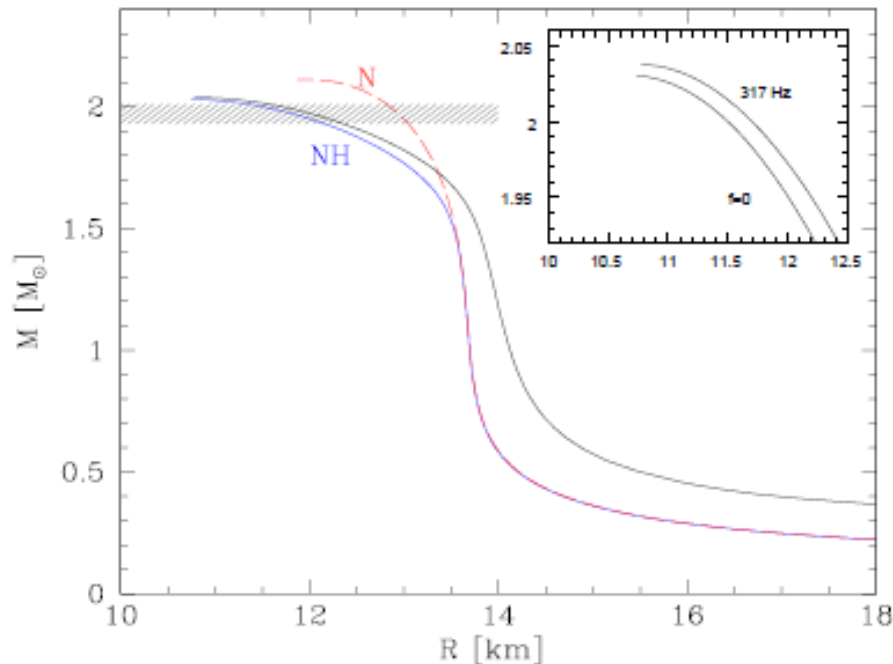


他の解決方法

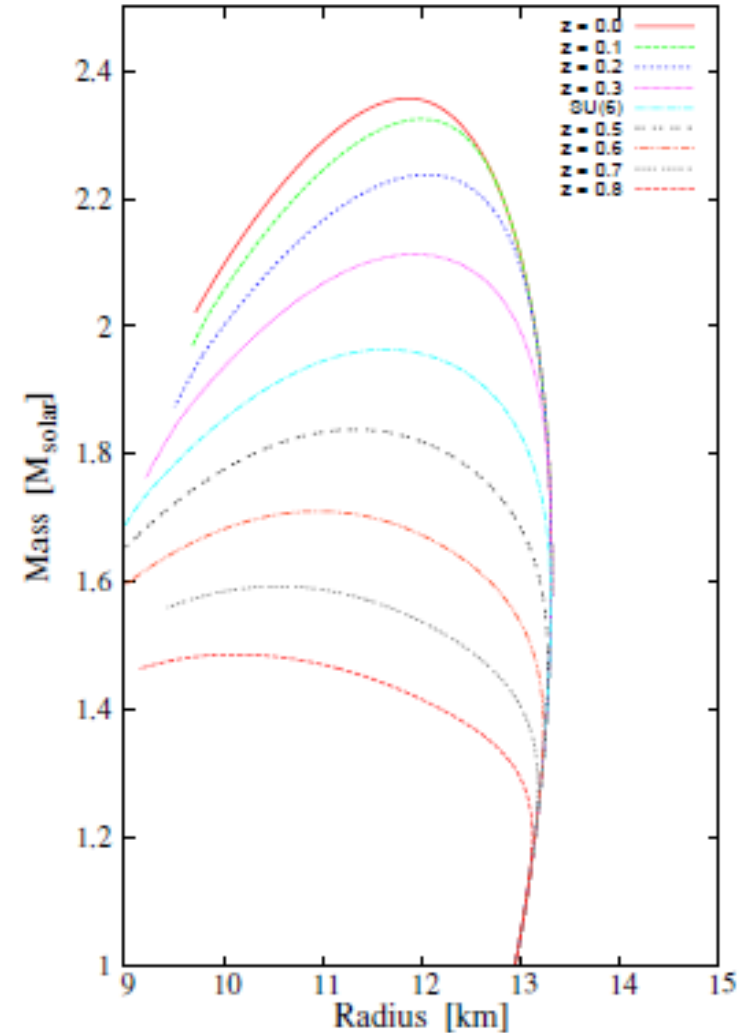
■ Hidden strange meson の4次

- $\zeta^4, \zeta^2(\omega^2 + \rho^2)$ 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

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

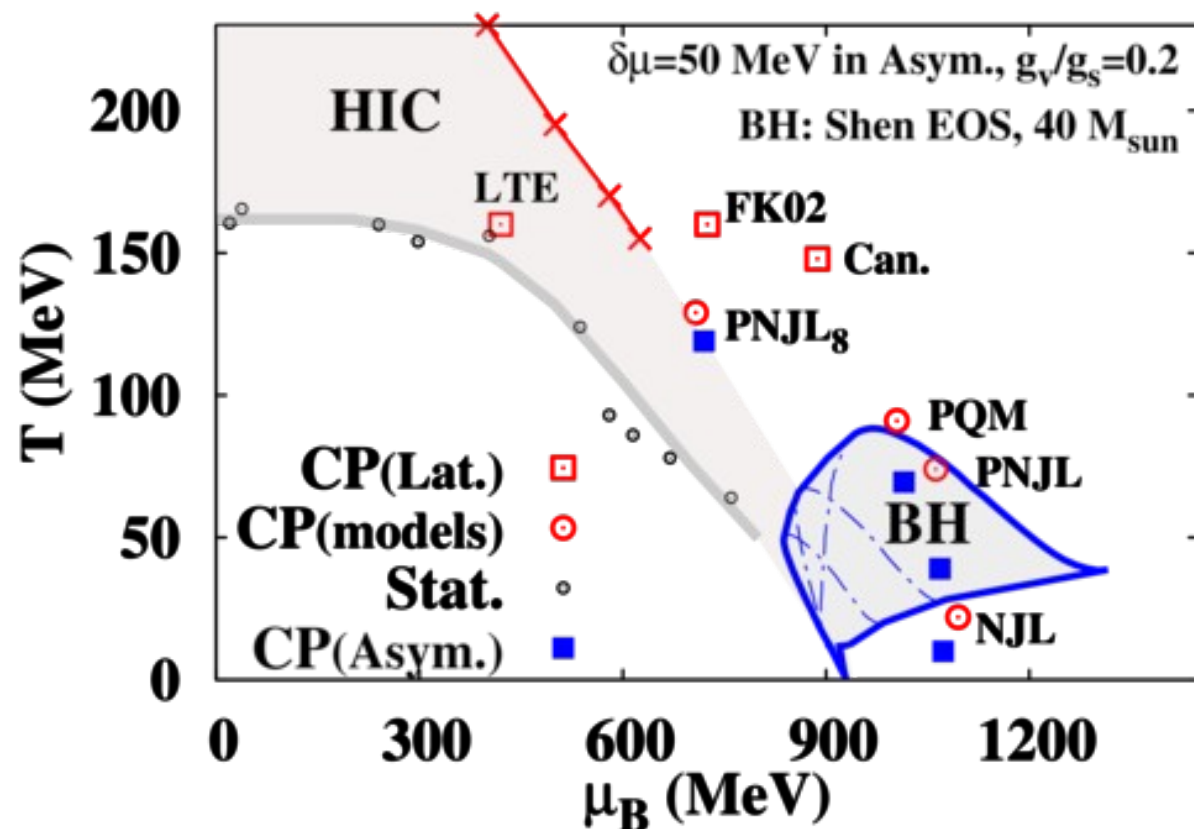
- Effective models

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

■ 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;

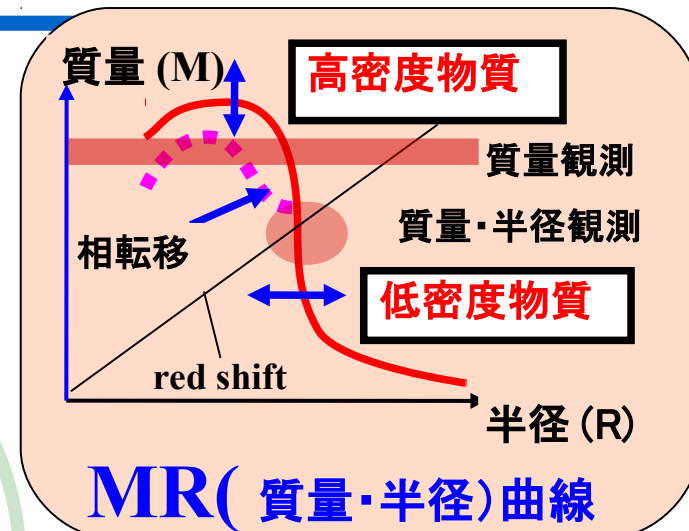
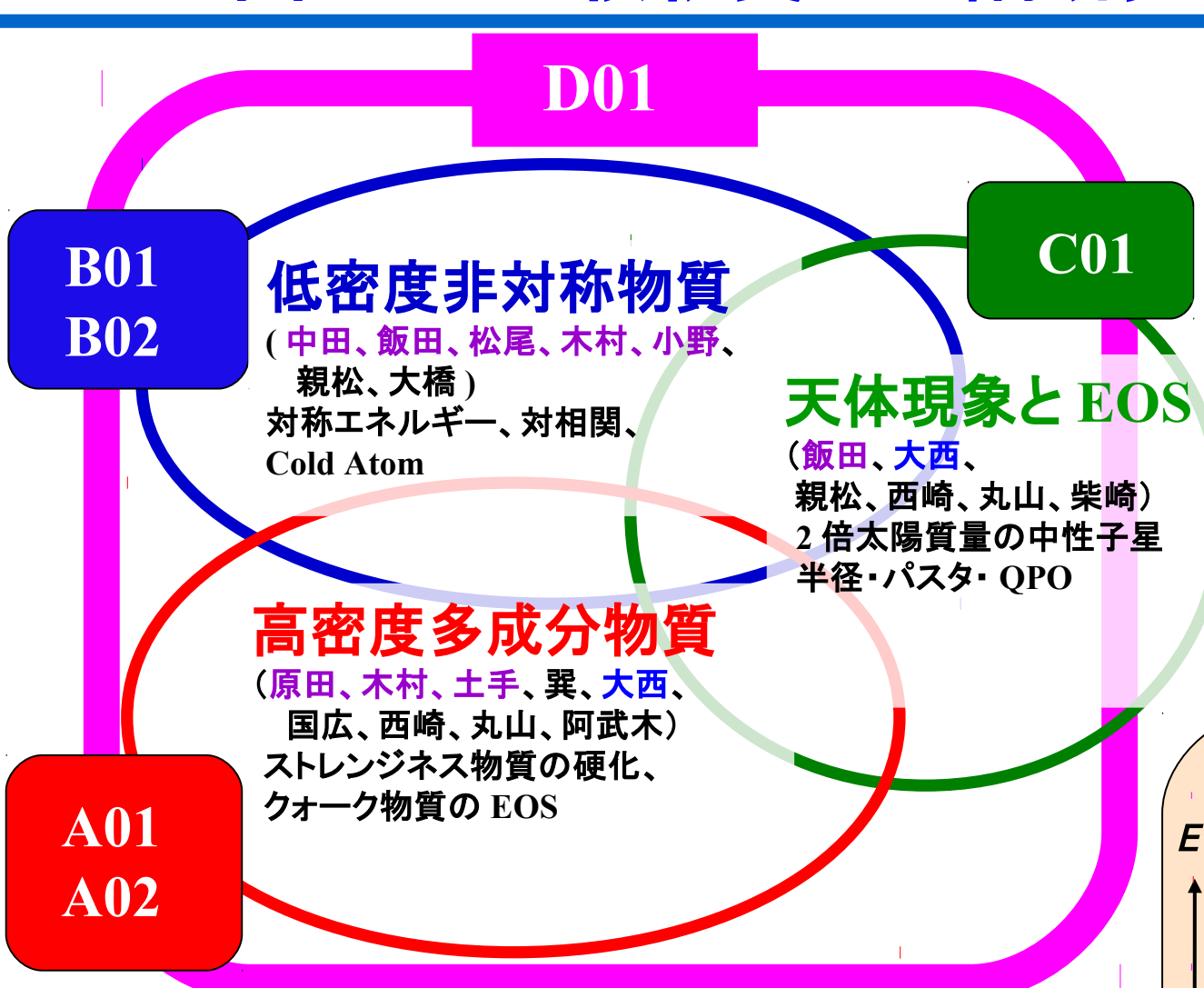
FK02:Z. Fodor, S.D.Katz, JHEP 0203 (2002) 014

LTE:S. Ejiri et al., Prog.Theor.Phys.Suppl. 153 (2004) 118;

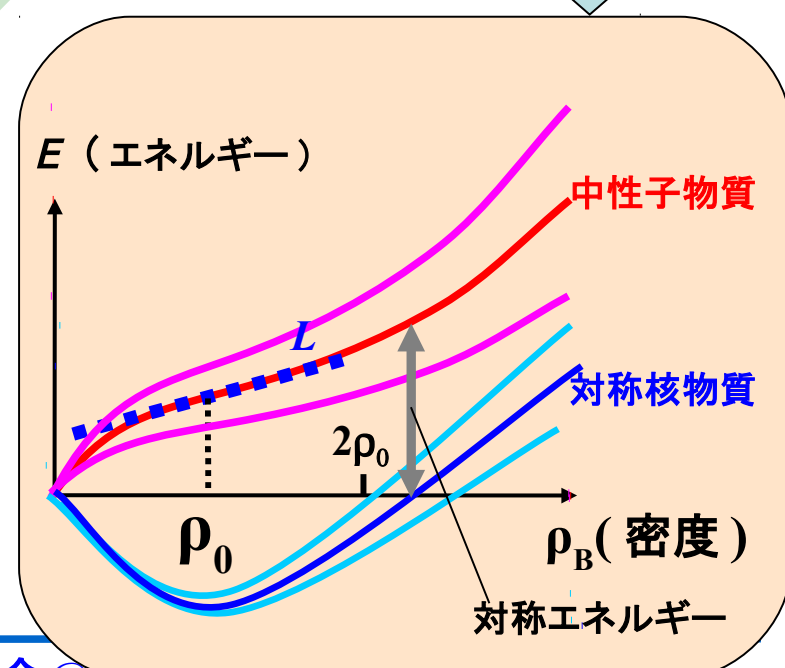
Can: S. Ejiri, PRD78 (2008) 074507

Stat.:A. Andronic et al., NPA 772('06)167

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。