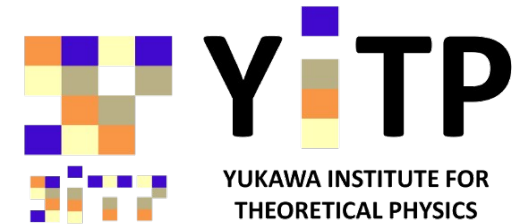


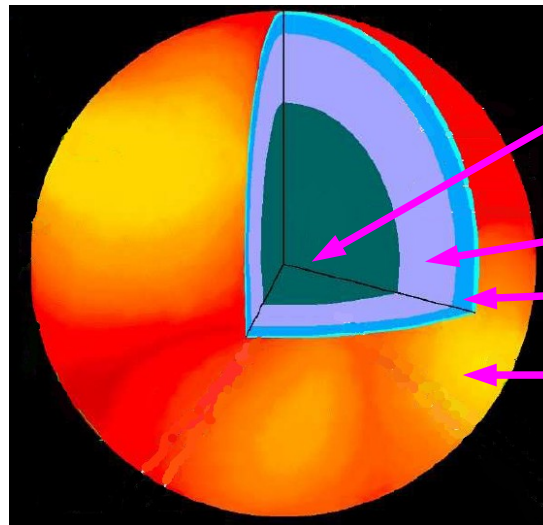
高密度物質 EOS と中性子星

京都大学基礎物理学研究所 大西 明
Akira Ohnishi (YITP, Kyoto Univ.)



- Introduction
- なぜ今、中性子星か？最近の中性子星研究の話題
- 高密度物質 EOS と重い中性子星
- まとめ

中性子星の組成

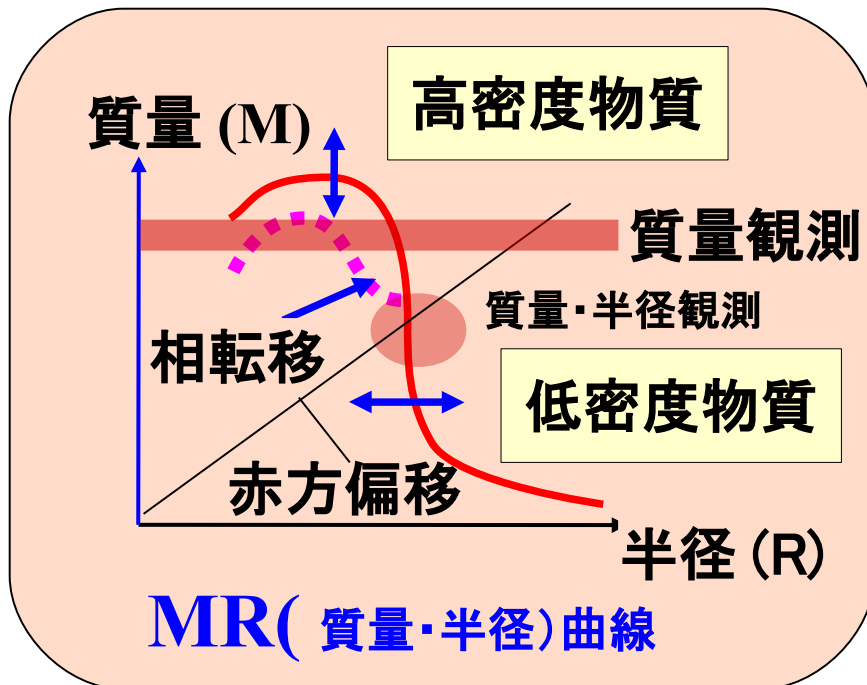


Hyperons, mesons, quarks

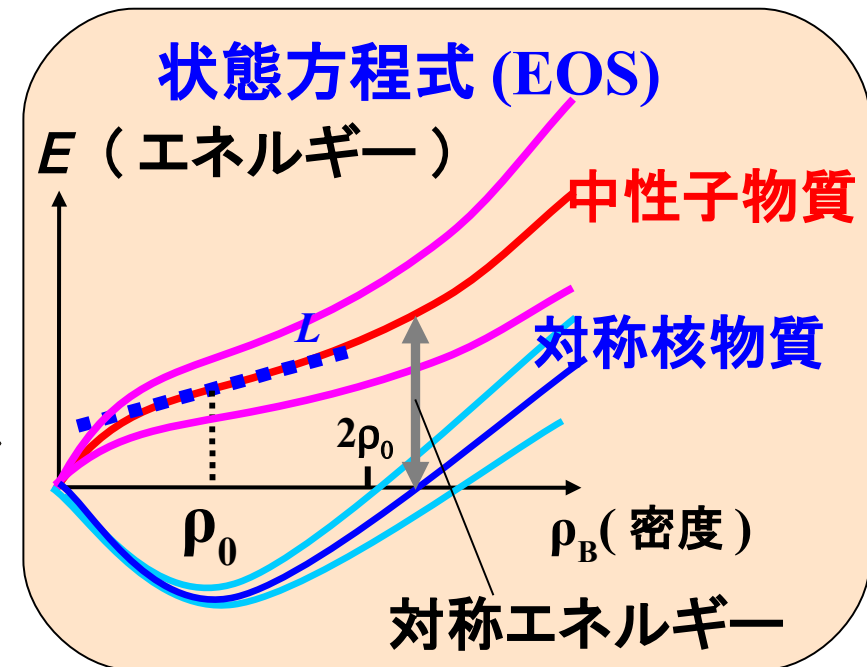
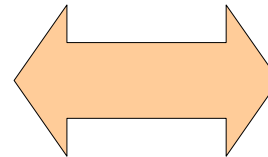
Asym. nuclear matter+elec.+ μ

Nuclei+neutron gas+elec.

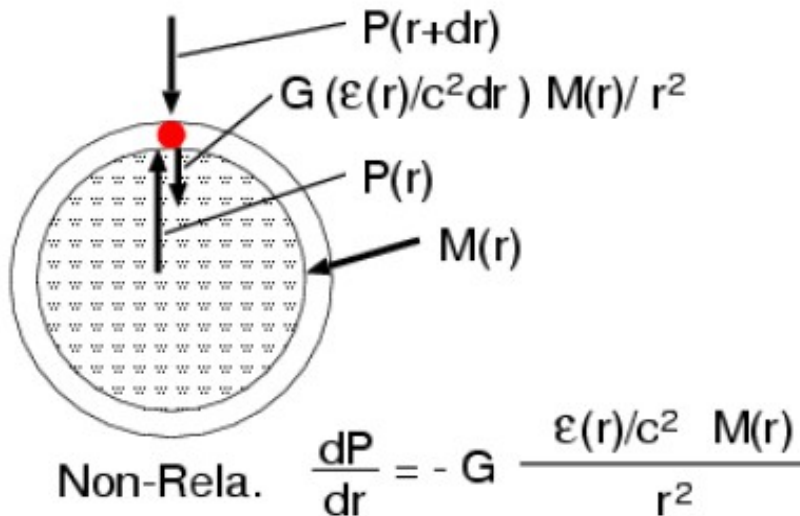
Nuclei + elec.



TOV
方程式



Tolman-Oppenheimer-Volkoff equation



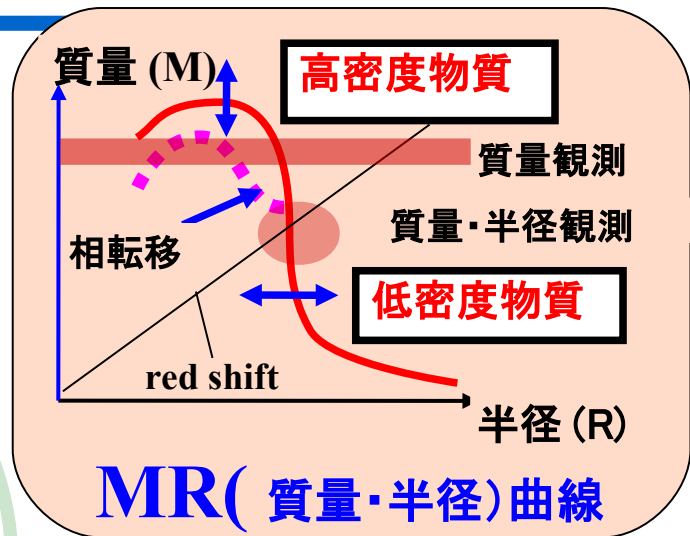
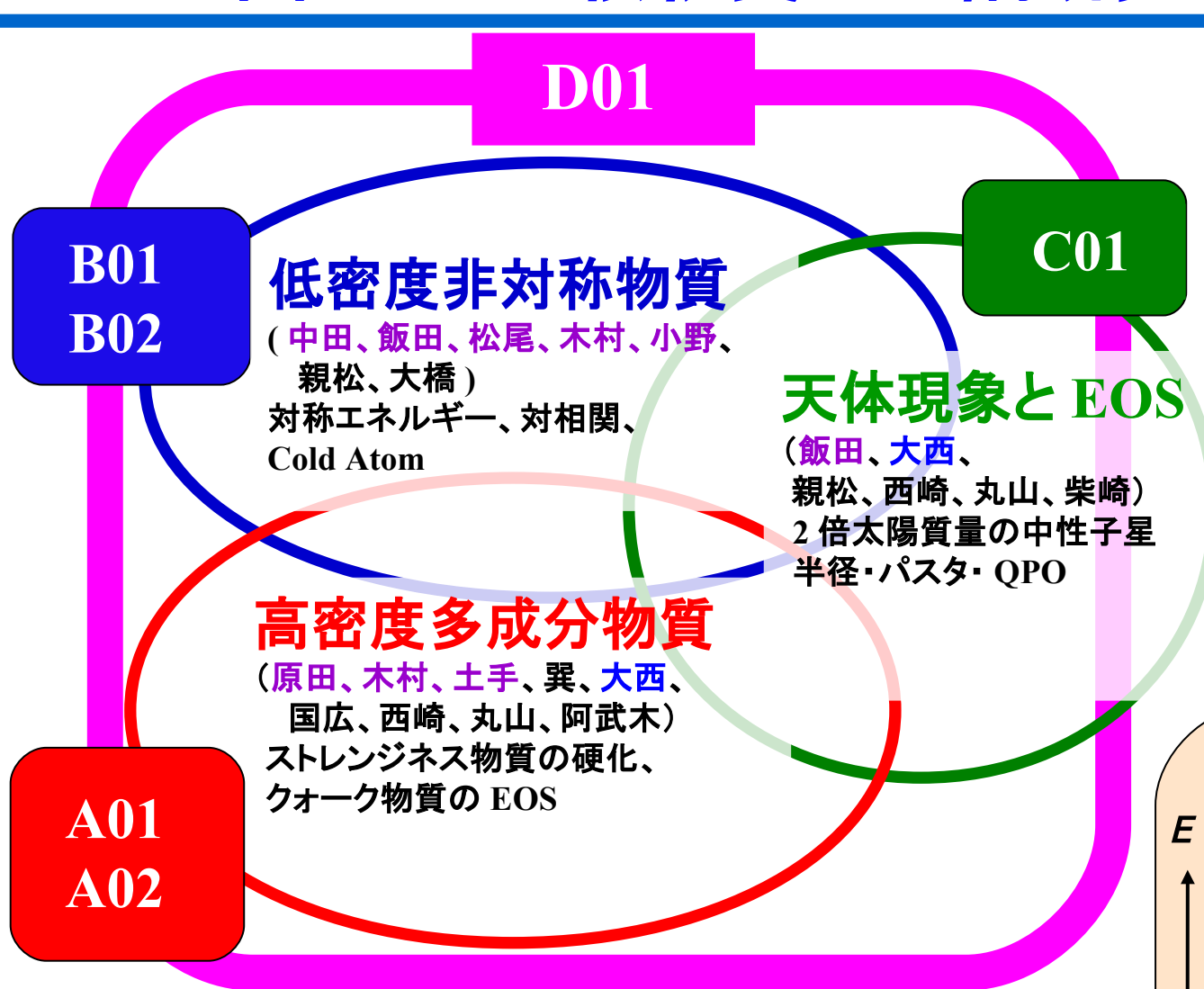
$$\frac{dP}{dr} = -G \frac{(\epsilon/c^2 + P/c^2)(M + 4\pi r^3 P/c^2)}{r^2(1 - 2GM/rc^2)}$$

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

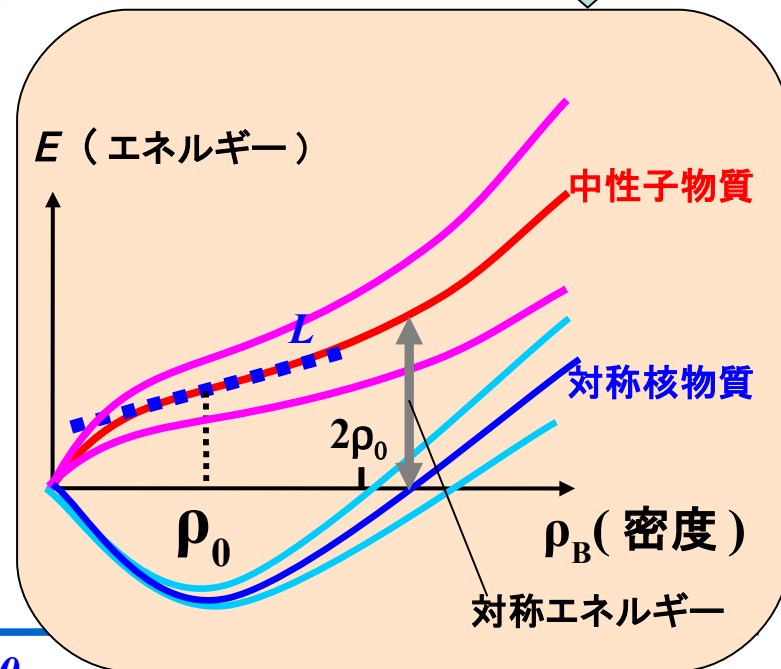
$$P = P(\epsilon), \quad \frac{dP}{d\epsilon} = \frac{dP}{d\epsilon}(\epsilon) \quad (\text{EOS})$$

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

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。

「中性子星の核物質」研究会

- 初田:クォークから中性子星へ
- 高橋(俊): $\Xi N, \Lambda\Lambda$ の核力、仲澤: $\Lambda\Lambda$ 核、田村: n-rich Λ 核, Σ -核ポテンシャル、 \bar{K} 核、三輪: Σ^+p 散乱 (90°)、原田: ハイペロン混合・荷電交換反応
- 村上: π^+/π^- による ρ_0 を超える密度での対称エネルギー、磯部: フロー、小野: AMD、中村: 低励起状態と $\Delta(\rho)$ 、堀越: 多体シミュレータ、高塚: グリッチ・冷却現象、
- 親松: L と半径・パスタ存在領域、飯田: L とクラスト・質量・半径・QPO、堂谷: 半径・温度測定・バースト中の吸収線・エディントン限界・QPO、高橋(忠): 将来の天体衛星
- 住吉:、大西

なぜ今、中性子星か？

- 最近の観測結果が面白い！
 - 1.97 Msun 中性子星の発見
 - 質量・半径の同時測定
 - 速い冷却の発見
- 近年の理論と地上実験の進展が面白い！
 - 格子 QCD (初田)
 - ストレンジネス核物理 (田村、高橋、仲澤、三輪、原田)
 - 中性子過剰核 (村上、磯部、小野、中村)
 - 冷却原子系の物理の進展 (堀越)
 - 対相関・対称エネルギー・パスタ (親松、飯田、堂谷、高橋、)
 - 高密度物質状態方程式 (住吉)
- 分野間の協力がぜひとも必要！

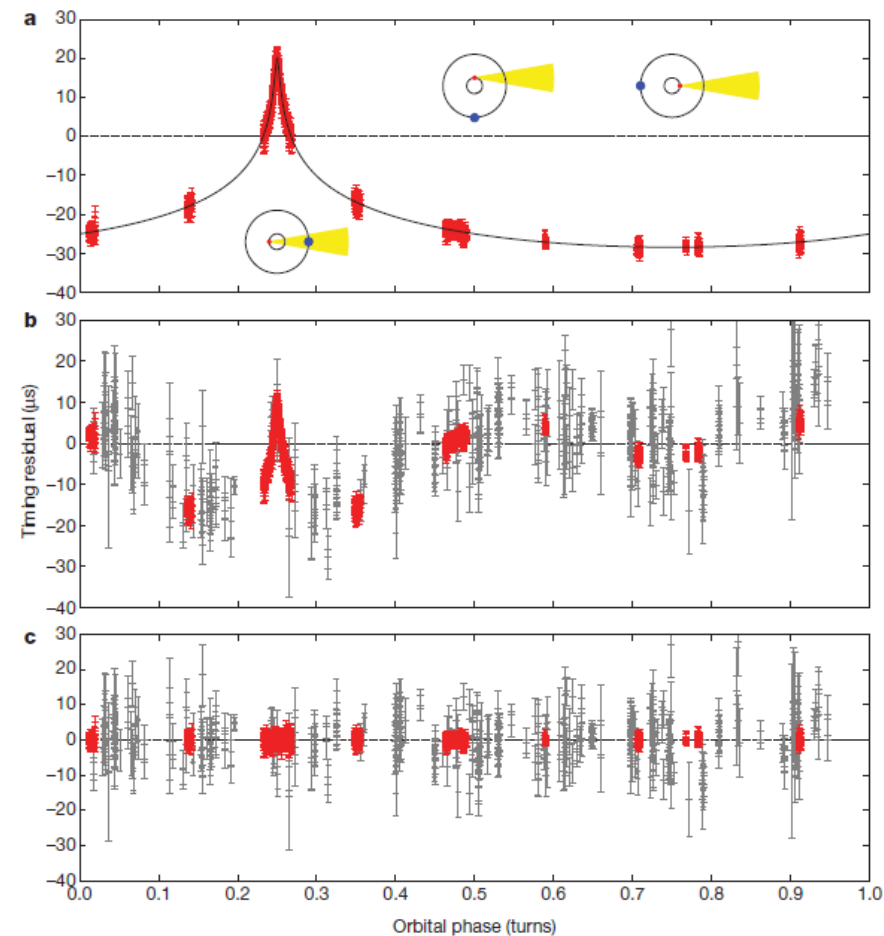
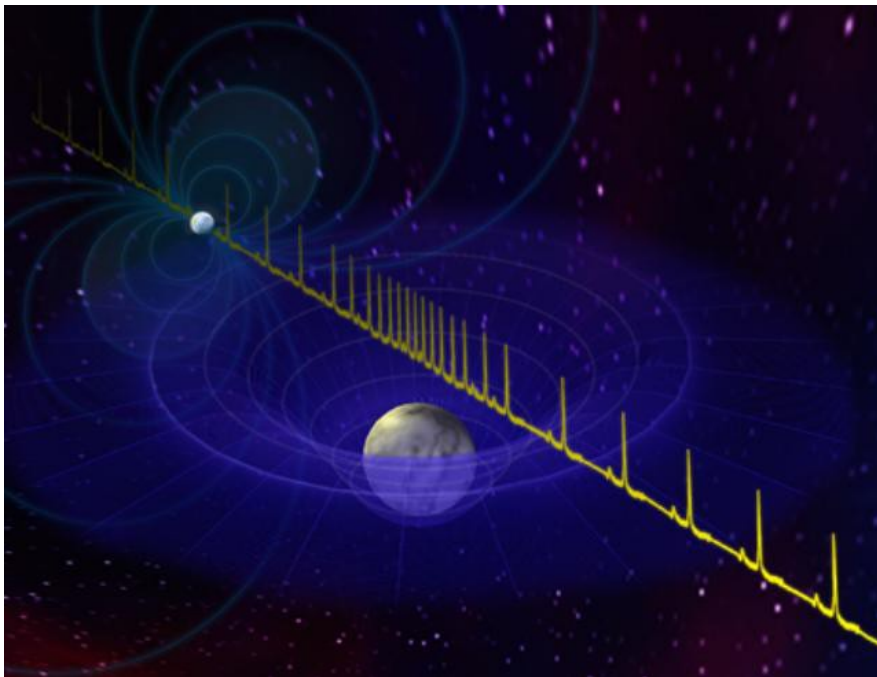
最近の中性子星観測の話題(1)

■ 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), $1.97 \pm 0.04 M_{\text{sun}}$

- 一般相対性理論に基づく時間の遅れ(Shapiro delay)による質量決定(模型によらない)
- 幸運な公転面の向き
- 美しい観測結果

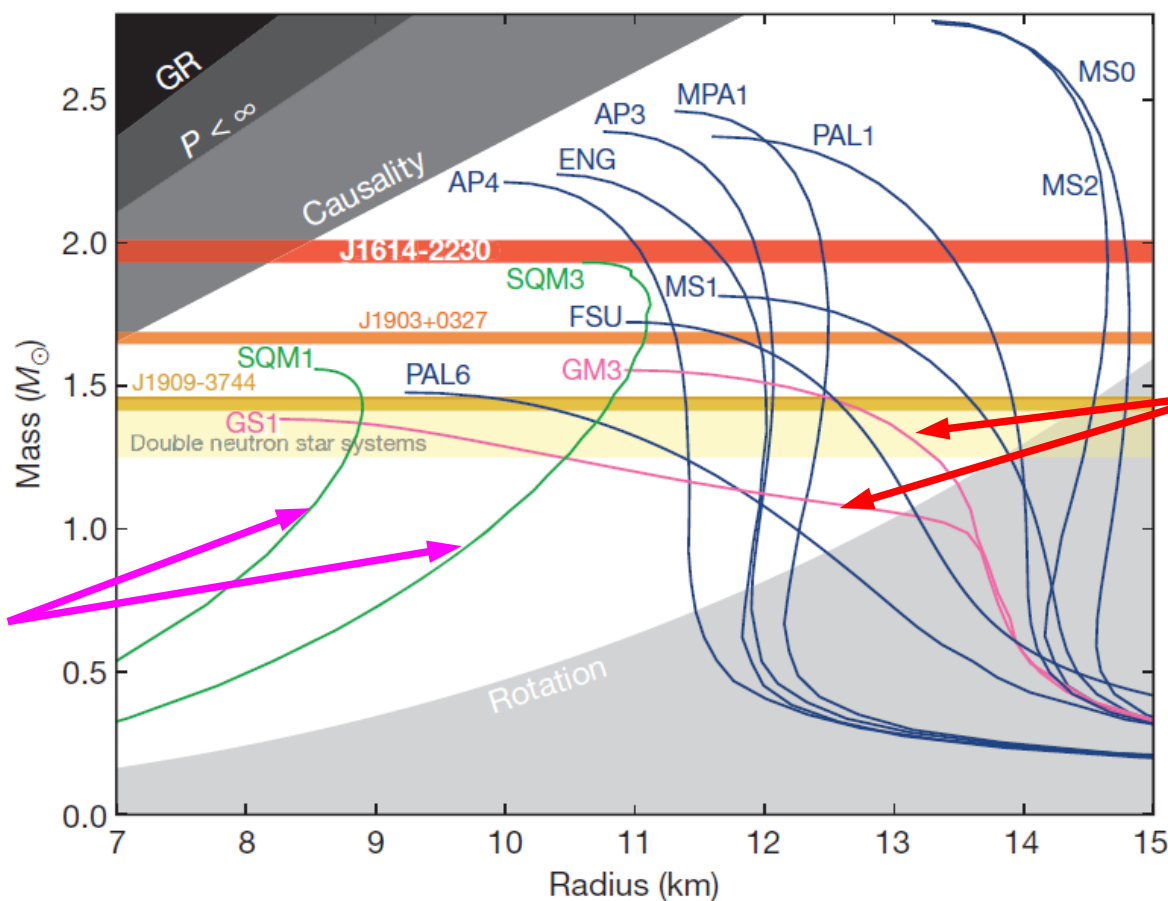


$1.97 \pm 0.04 M_{\odot}$ Neutron Star

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

■ 高密度物質 EOS に強い制限

- ハイペロンを含む状態方程式は棄却される (?)
- クォーク物質でできているとしても強く相互作用していることが必要 (?)



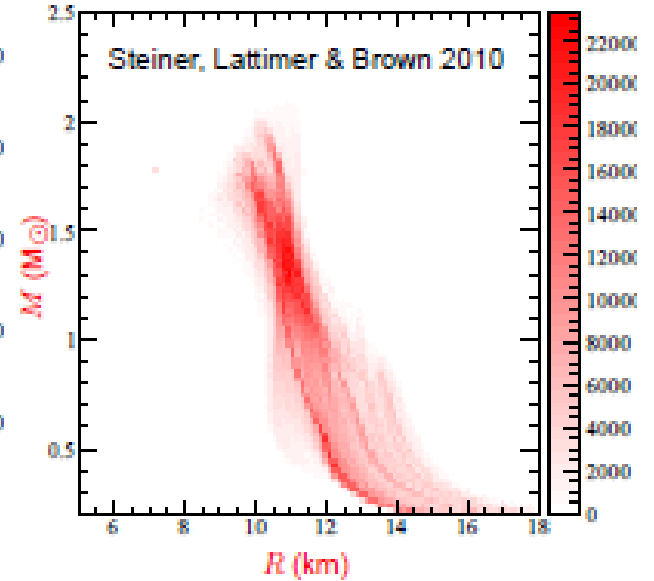
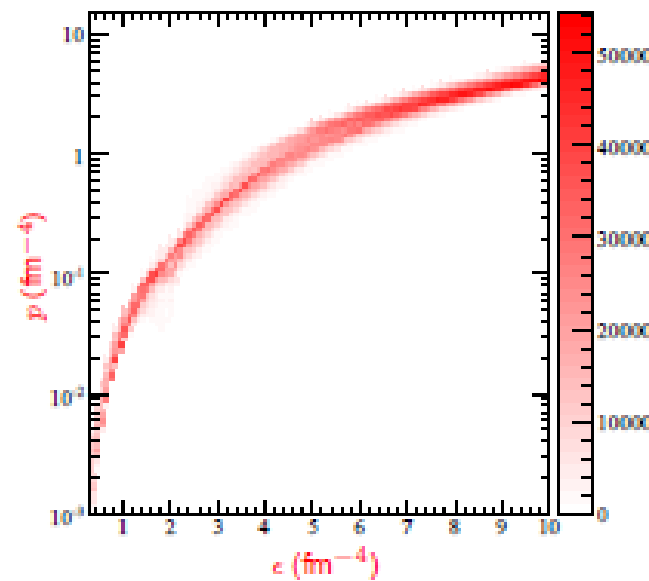
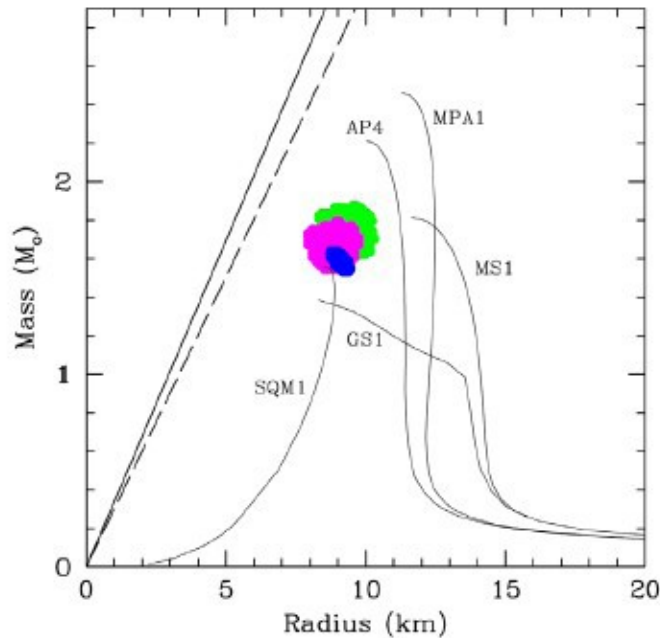
ハイペロンを
含む EOS

クォーク物質
の EOS

最近の中性子星観測の話題(2)

■ 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]

最近の中性子星観測の話題(3)

■ 表面温度測定と冷却曲線

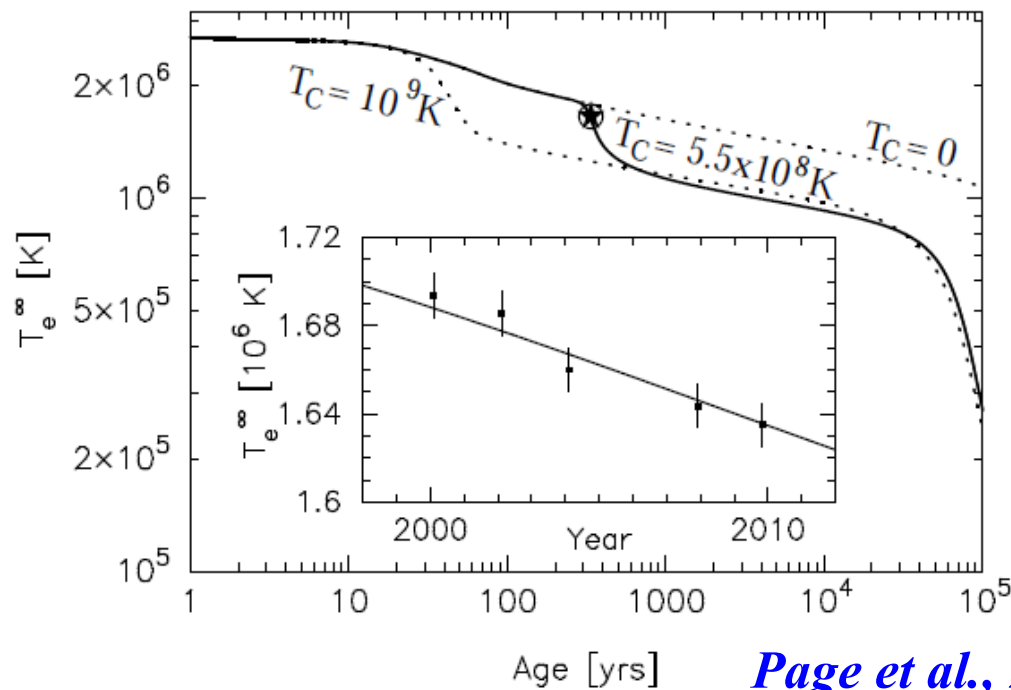
● Cas A の正確な温度測定と冷却率の測定

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

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

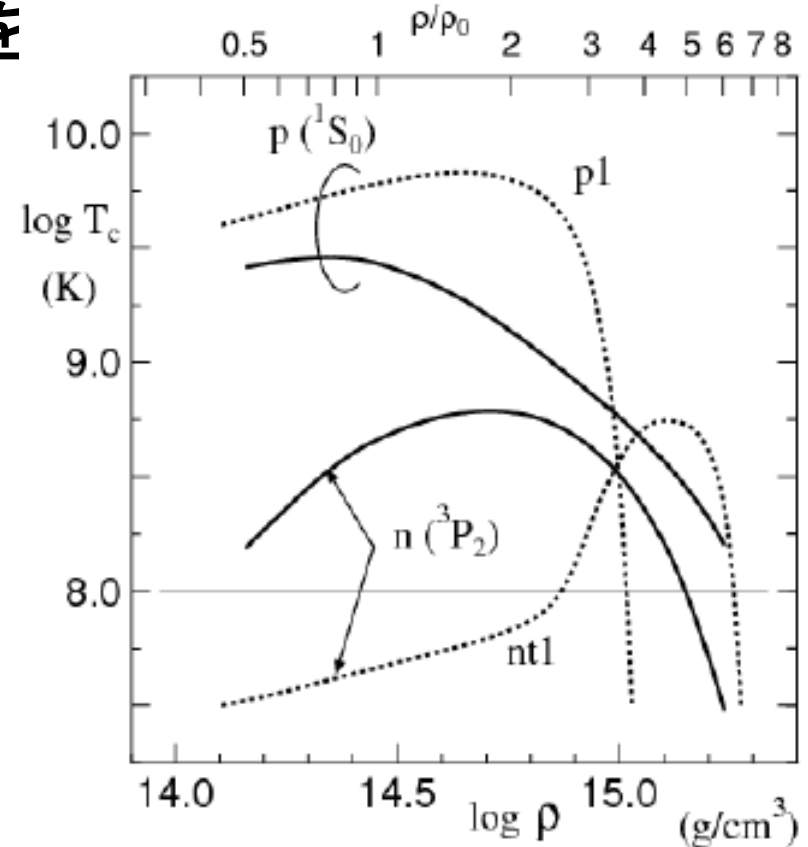
● neutron pair の breaking & formation

■ 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?

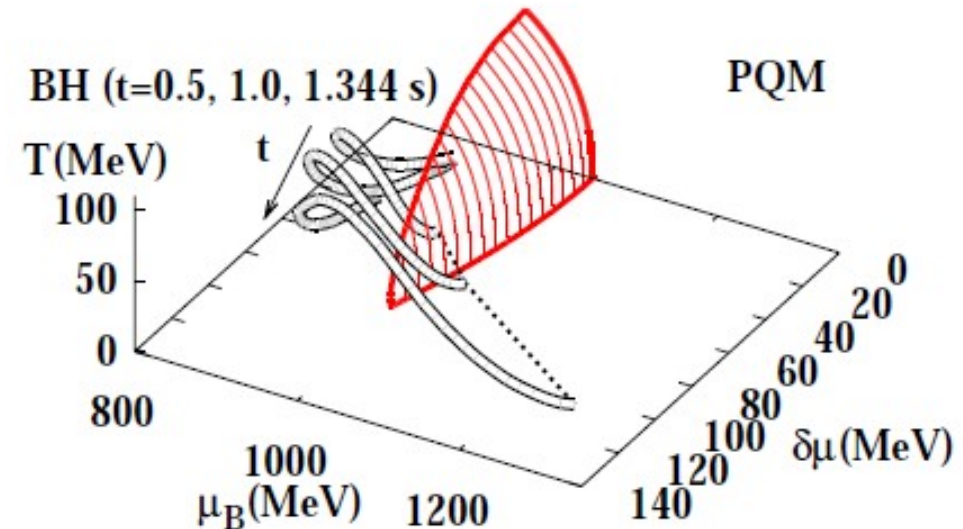
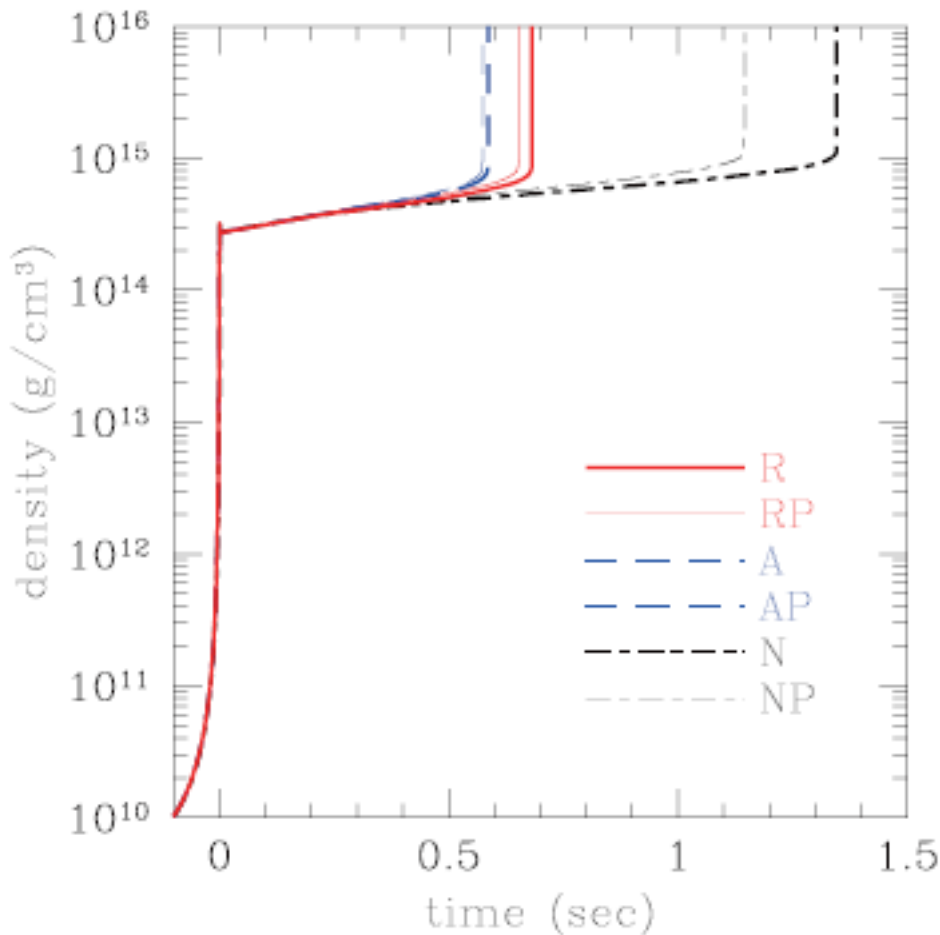


Page et al., 2011

Takatsuka



中性子星・ブラックホール形成過程での高密度物質探索



**AO, Ueda, Nakano, Ruggieri,
Sumiyoshi, PLB, to appear
[arXiv:1102.3753]**

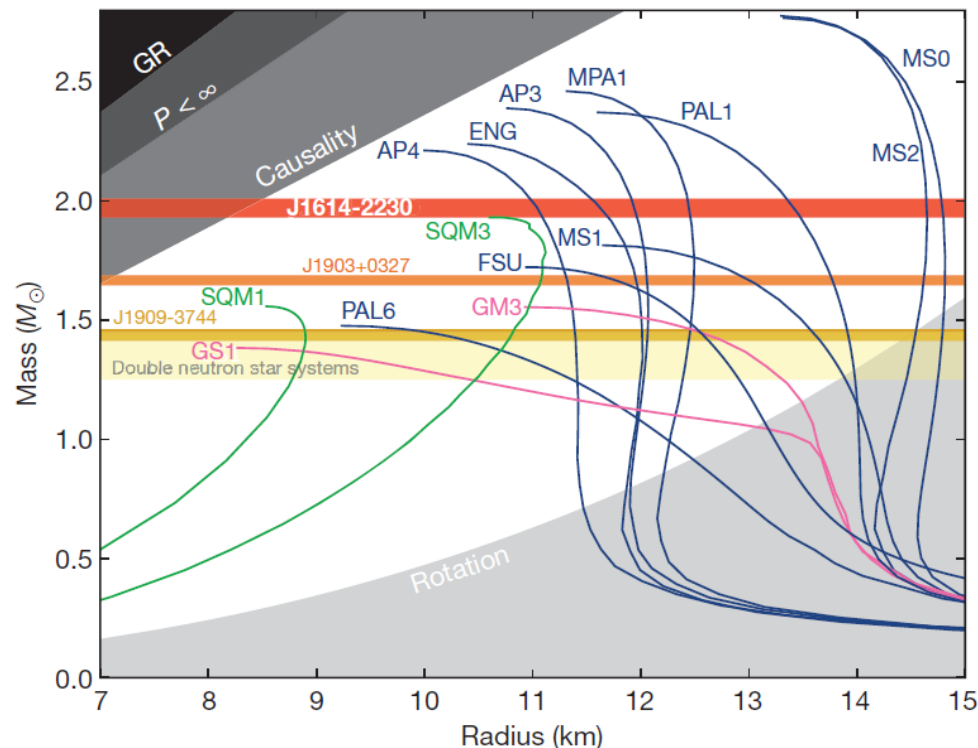
**Nakazato, Furusawa, Sumiyoshi, AO,
Yamada, Suzuki, submitted.**

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

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

- 論文の主張
(1.97 ± 0.04) M_{\odot} の中性子星は、
ハイペロン、中間子凝縮を含む
状態方程式では支えられない。
クォーク物質でも強く相互作用
している必要がある。
→ 本当か？



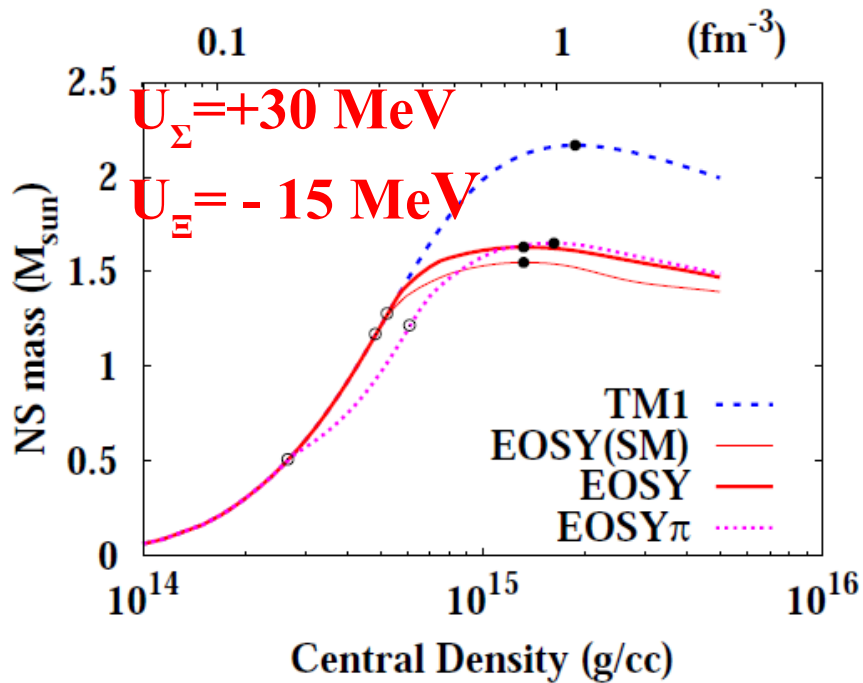
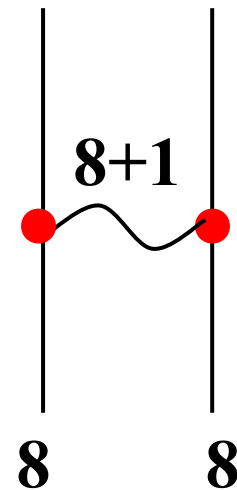
signature. We calculate the pulsar mass to be $(1.97 \pm 0.04)M_{\odot}$, which rules out almost all currently proposed²⁻⁵ hyperon or boson condensate equations of state (M_{\odot} , solar mass). Quark matter can support a star this massive only if the quarks are strongly interacting and are therefore not 'free' quarks¹².

棄却された EOS

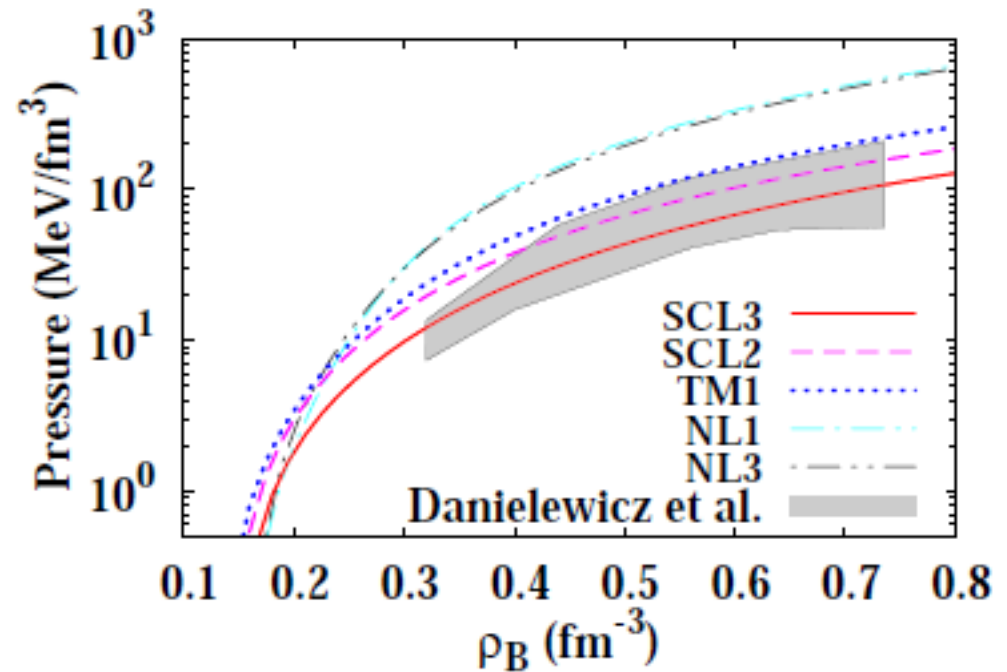
■ 棄却された EOS

= SU(3) 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

- E.g. $\omega\Lambda$ 結合 $\sim (\omega N \text{ 結合}) \times (2/3)$
- 相対論効果を含めても、ハイパー核・重イオンデータを尊重すると 1.97 Msun は支えられない。



Ishizuka et al., (2008)



Tsubakihara et al., (2010)

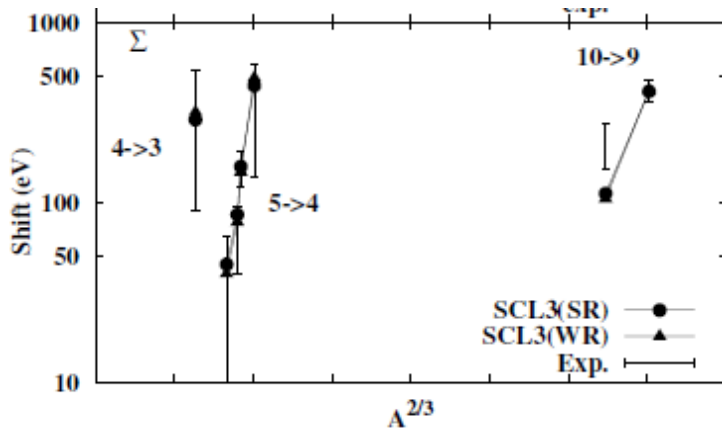
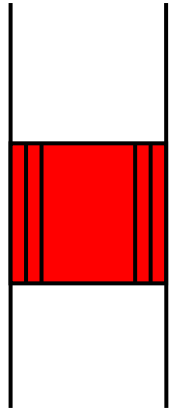
解決方法は？

- (近年の) 高密度での「バリオン間斥力」の理解 (1)
= BB 相互作用ではクォーク起源の斥力が重要
Oka, Yazaki; Fujiwara et al.; HAL QCD collab.

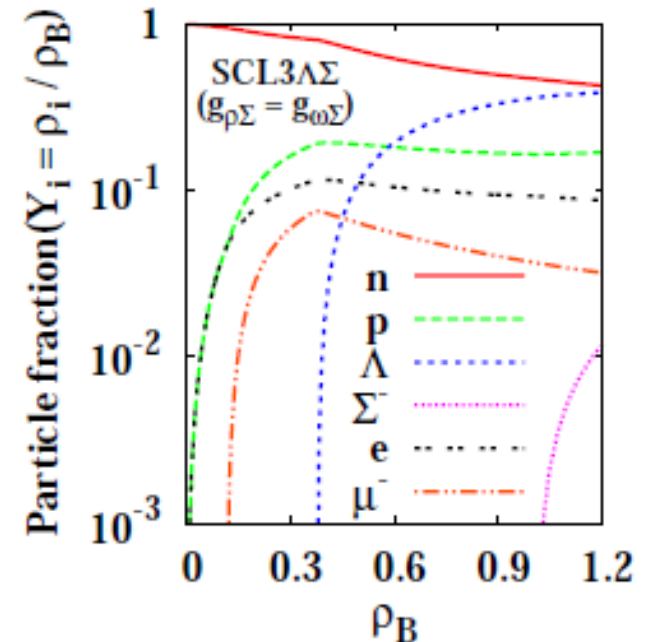
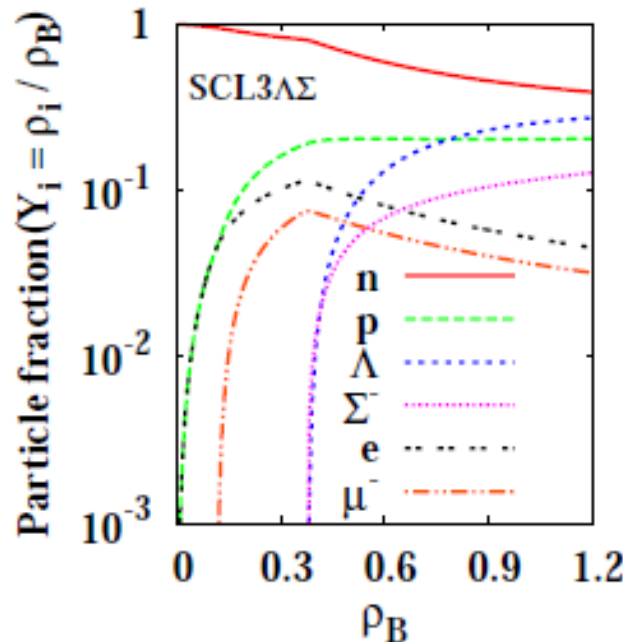
→ s-channel での spin, isospin, flavor に敏感

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

→ HS 変換すると MB 結合で SU(3) が破れているように見える
例: Σ 原子の atomic shift $\rightarrow g_{\sigma\Sigma} \sim g_{\omega\Sigma} (\text{SU}(3)) \times (0.2-0.3)$



Tsubakihara et al., (2010)



3 体力を含むRMF

■ 3 体力を含む相互作用項

$$\delta L = -U_\sigma(\sigma) - \frac{1}{2} c_{\sigma\omega} \sigma \omega_\mu \omega^\mu - \frac{1}{4} c_{\omega\omega} (\omega_\mu \omega^\mu)^2 - \sum_B \bar{\Psi}_B \left[g_{\sigma\sigma B} \sigma^2 + g_{\sigma\omega B} \sigma \omega_\mu \gamma^\mu + g_{\omega\omega B} \omega_\mu \omega^\mu \right] \Psi_B$$

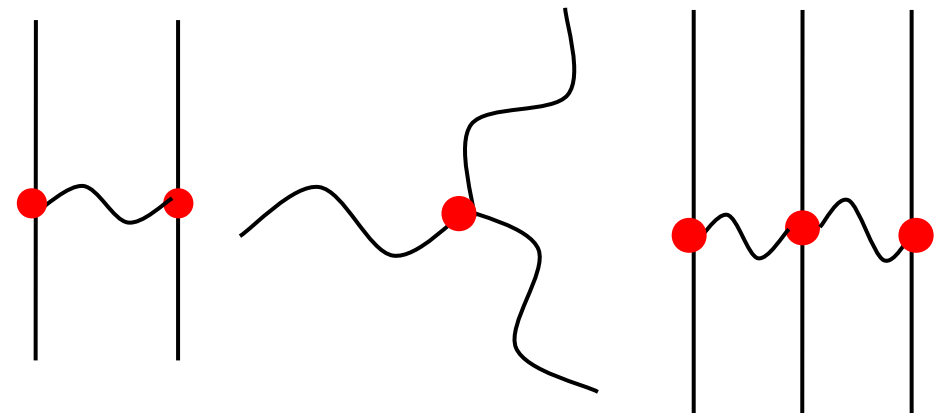
- BBMM 相互作用項は標準的なRMFでは無視 (ボソン化・場の再定義により他の項に吸収可能)

Furnstahl, Serot, Tang (1997)

しかし場の再定義は NDA の次数を変える

Naïve dimensional analysis (NDA)

$$n = B/2 + M$$

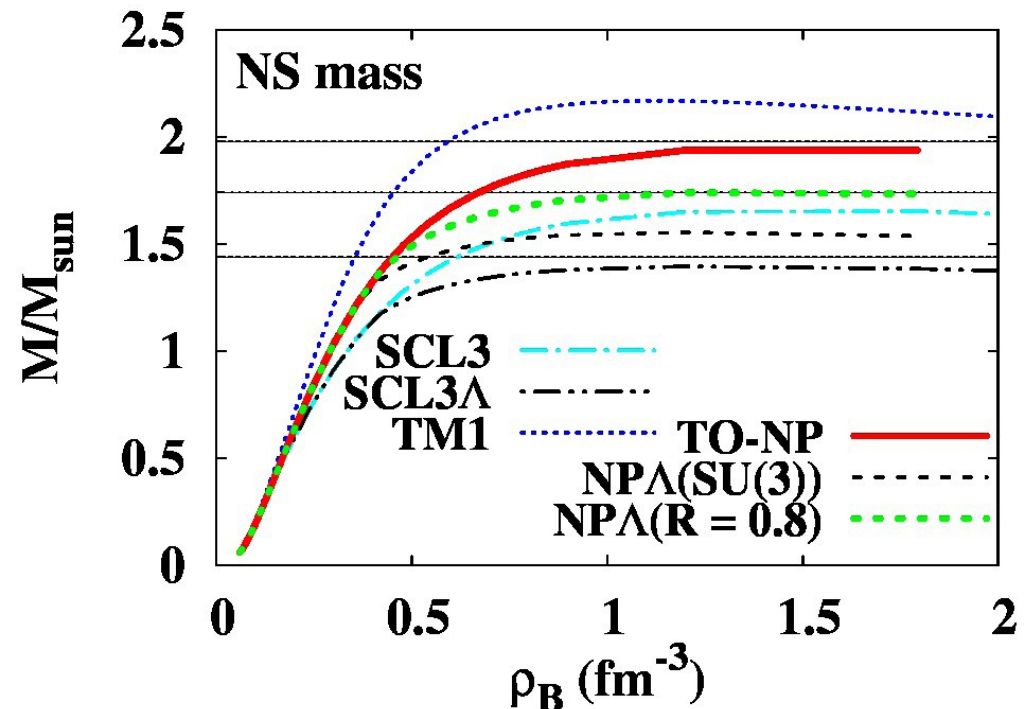
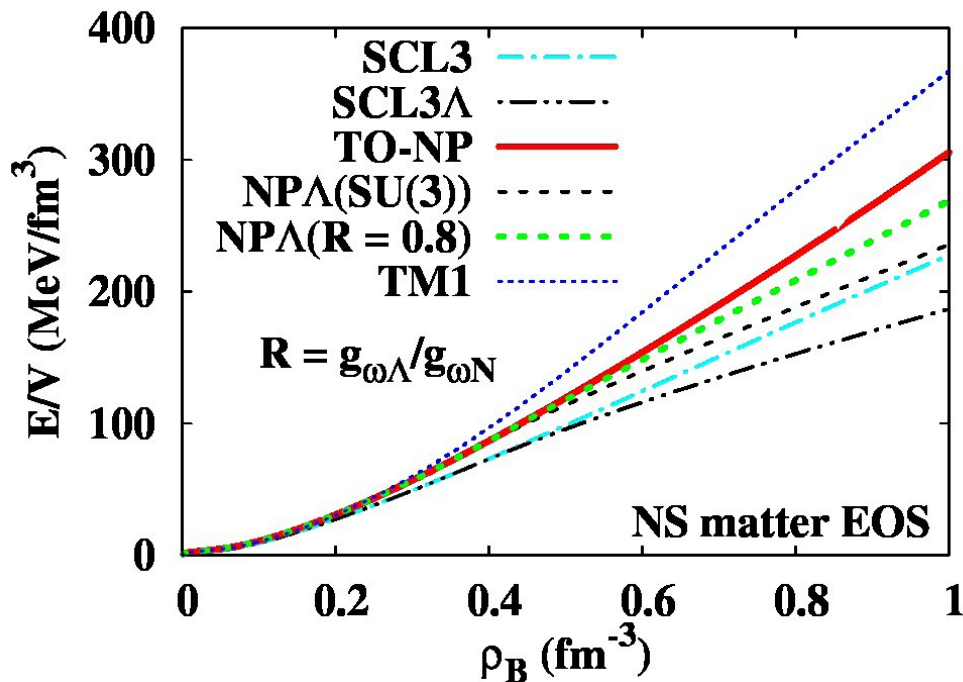


Tsubakihara, AO, in prep.

3 体力を含む RMF

Tsubakihara, AO, in prep.

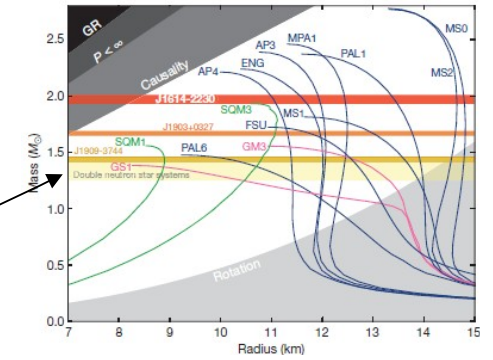
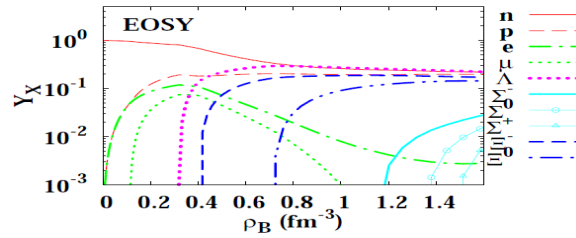
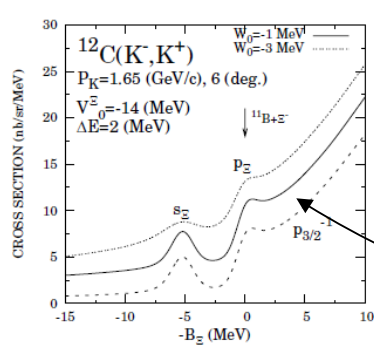
- 3 体斥力効果: 高密度にて徐々に EOS を硬くする (meson mass (E325), RBHF での vector pot. を fit)
- $R = g_{\omega\Lambda} / g_{\omega N} \sim 0.8$ (2/3 (SU(3)) と変更
→ ハイペロン導入による中性子星最大質量減少は小さい。



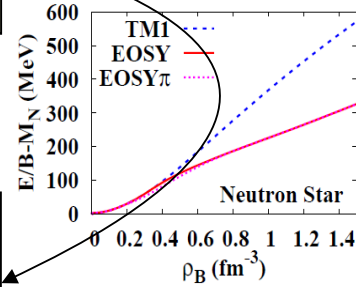
Summary

- D01 (理論)班: 実験、および分野間で協力して低密度から高密度までの状態方程式を確定。
- なぜ今、中性子星か？
 - 最近の観測・理論・実験の発展
 - 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
 - 理論・(地上の)実験の進展
- 高密度物質の状態方程式
 - 多くの有効相互作用 (G 行列)、相対論的平均場理論 (RMF)、....
 - ハイペロン・中間子凝縮を含む場合、 $1.97 M_{\text{sun}}$ の中性子星は支えられない。
 - 中性子は「核子とレプトン」、または「クォーク物質」
 - 3 体力、 $SU(3)$ 結合からのずれを取り入れた RMF
 - パラメータによってはハイペロンを含めて支えられる (?)
 - あらわな 3 体力、チャンネルごとのバリオン間力の情報が必要。

実験と観測 (と理論) で解き明かす中性子星の核物質



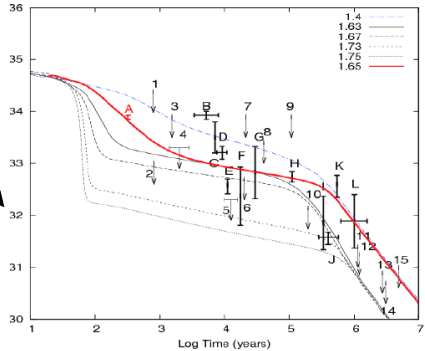
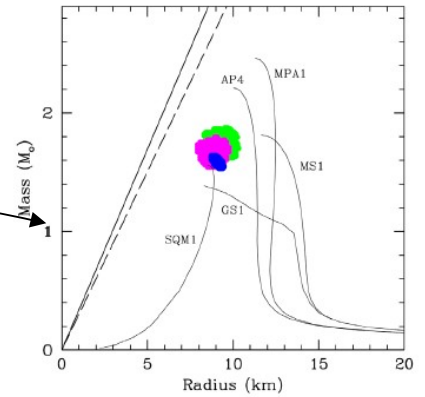
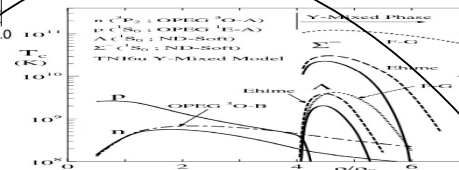
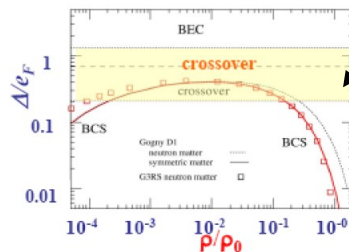
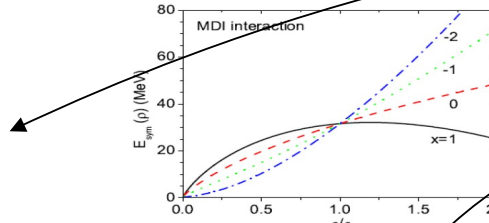
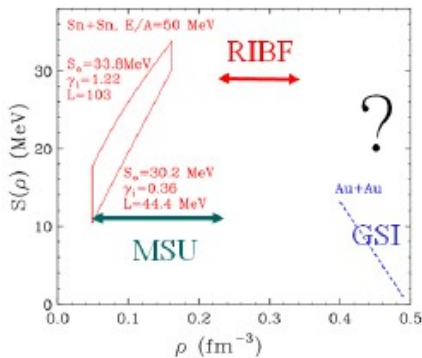
A 班
(ストレンジネス核)



D 班
(理論)

C 班
(中性子星観測)

B 班
(中性子過剰核)



Thank you