

新物理探査に向けた 中性子星状態方程式の現状と課題

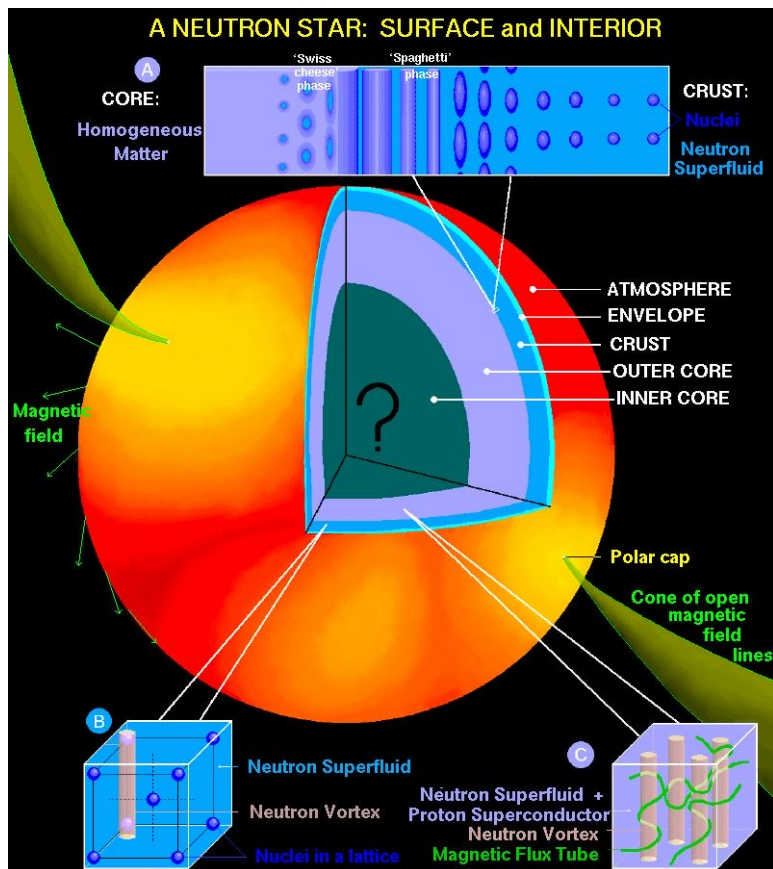
富樫 甫

(東北大学 原子核理論研究室)

Outline

1. 中性子星と状態方程式
2. 核力から出発した核物質状態方程式
3. 中性子星内部におけるエキゾチック相
4. 中性子星を用いた暗黒物質探査の可能性

1. 中性子星と状態方程式

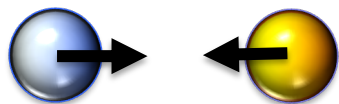


<http://www.astro.umd.edu/~miller/nstar.html>

中性子星の基本的性質

- 質量： $\sim 1-2 \times$ 太陽質量
- 半径： $\sim 10\text{km}$
- 中心密度： $\sim 10^{15}\text{g/cm}^3 \sim 4-5 \times \rho_0$
原子核密度 $\rho_0 \sim 2.8 \times 10^{14}\text{g/cm}^3$
- 温度： $\sim 0\text{ MeV}$
表面温度： $\sim 0.1\text{keV}$
中性子のフェルミ温度： $\sim 10\text{ MeV}$
- 粒子組成： $\text{N}, \text{e}^-, \mu^-, \text{Y}, \text{q} \dots$

自己重力を「核力」が支えている！



通常の原子核

核力によって核子同士が結合している



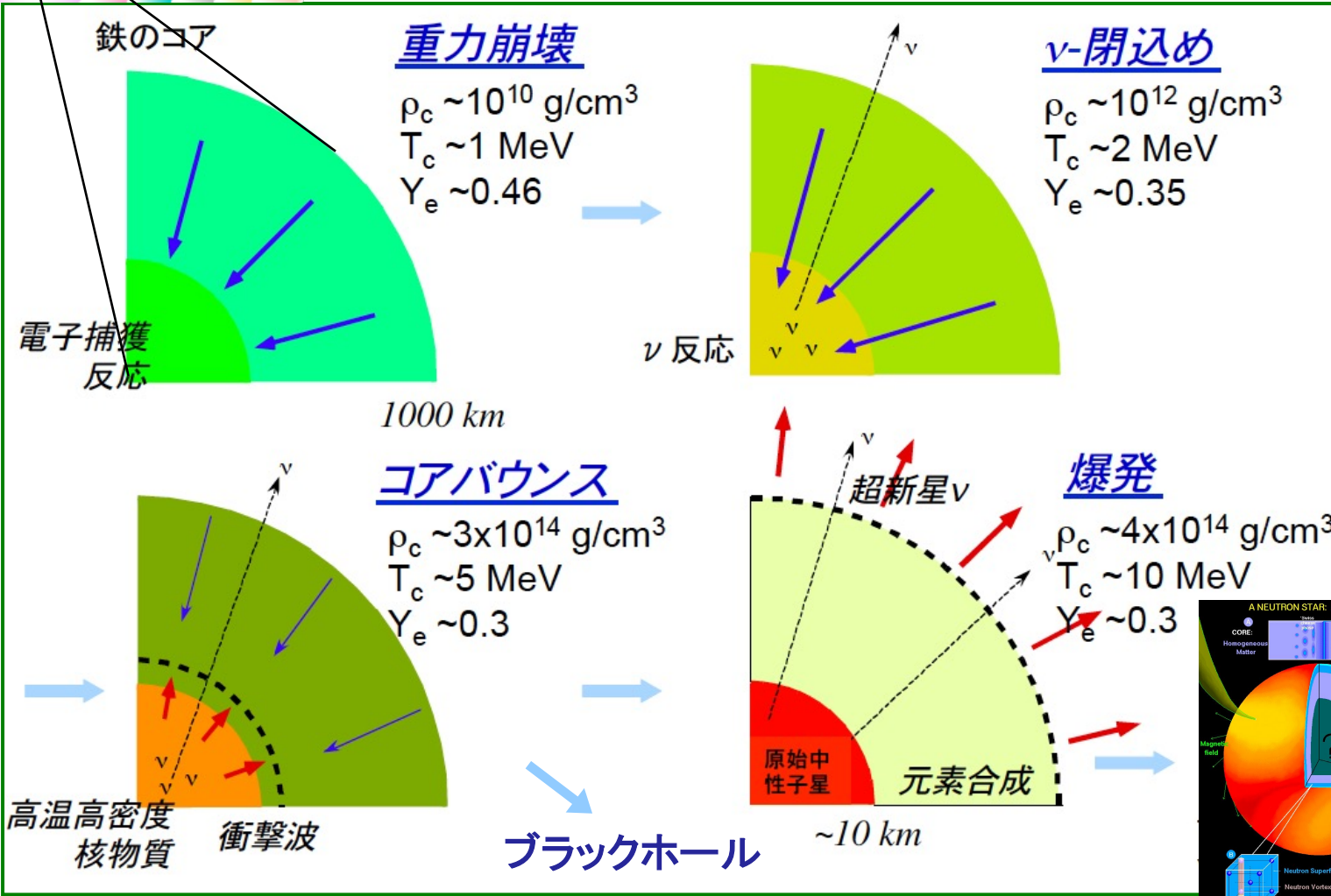
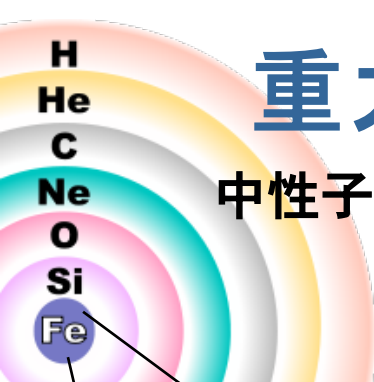
高密度核物質

核力によって核子同士が反発し合う

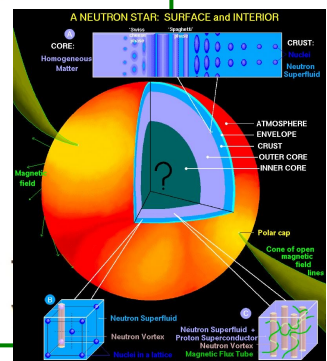
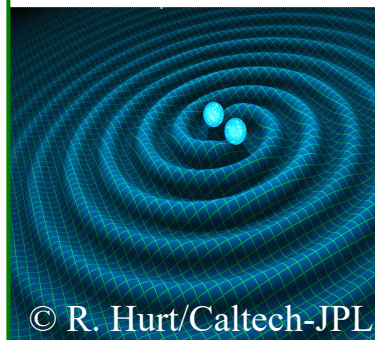
重力崩壊型超新星爆発と中性子星

中性子星は恒星の進化の最終段階で起こる「重力崩壊型超新星爆発」の後に残される高密度天体

K. Sumiyoshi, 基研 Summer School 2010



連星中性子星合体



(冷えた) 中性子星

中性子星の観測データ

重い中性子星の観測

- PSR J1614 – 2230 ($M = 1.928 \pm 0.017 M_{\odot}$)
- PSR J0348 + 0432 ($M = 2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$)
- PSR J0740 + 6620 ($M = 2.14^{+0.10}_{-0.09} M_{\odot}$)

(Nature 467 (2010) 1081, APJ 832 (2016) 167)

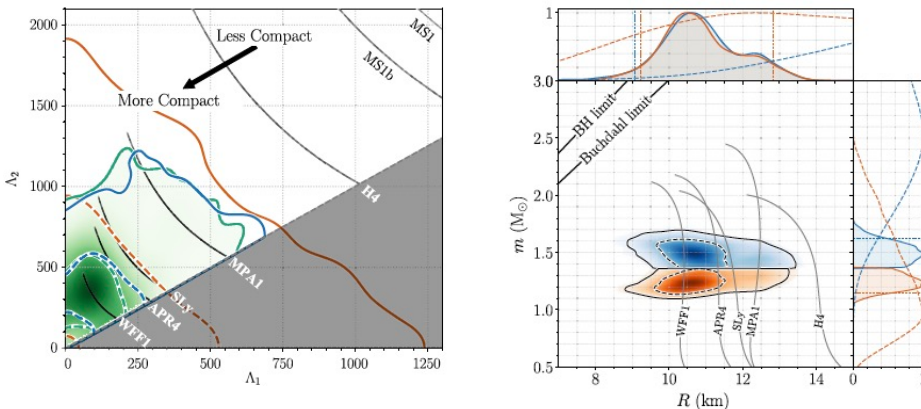
(Science 340 (2013) 1233232)

(Nat. Astron. (2019))

連星中性子星合体からの重力波観測

(PRL 119 (2017) 161101)

(PRL 121 (2018) 161101)



NICER によるミリ秒パルサーの観測

- PSR J0030 + 0451
($M = 1.44^{+0.15}_{-0.14} M_{\odot}$, $R = 13.02^{+1.24}_{-1.06}$ km)
($M = 1.34^{+0.15}_{-0.16} M_{\odot}$, $R = 12.71^{+1.14}_{-1.19}$ km)
- PSR J0740 + 6620
($M = 2.08^{+0.07}_{-0.07} M_{\odot}$, $R = 13.7^{+2.6}_{-1.5}$ km)
($M = 2.072^{+0.067}_{-0.066} M_{\odot}$, $R = 12.39^{+1.30}_{-0.98}$ km)

(Miller et al., APJ 887 (2019) L24)

(Riley et al., APJ 887 (2019) L21)

(Miller et al., APJ 918 (2021) L28)

(Riley et al., APJ 918 (2021) L27)

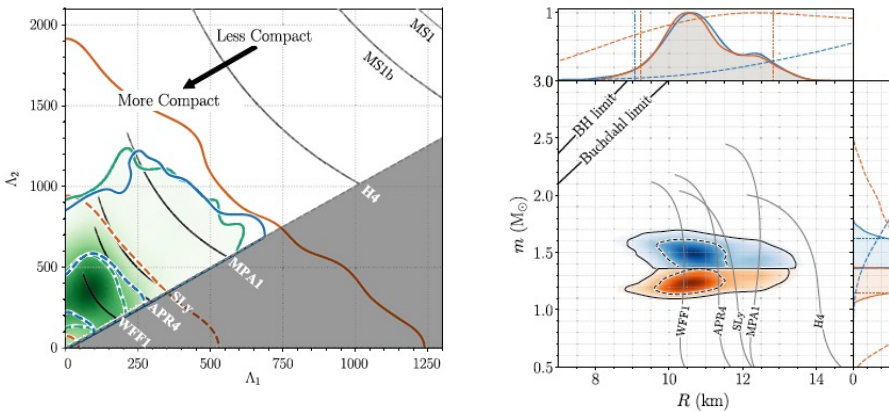
中性子星の観測データ

重い中性子星の観測

- PSR J1614 – 2230 ($M = 1.928 \pm 0.017 M_{\odot}$)
- PSR J0348 + 0432 ($M = 2.01 \pm 0.04 M_{\odot}$)
- PSR J0740 + 6620 ($M = 2.14^{+0.10}_{-0.09} M_{\odot}$)

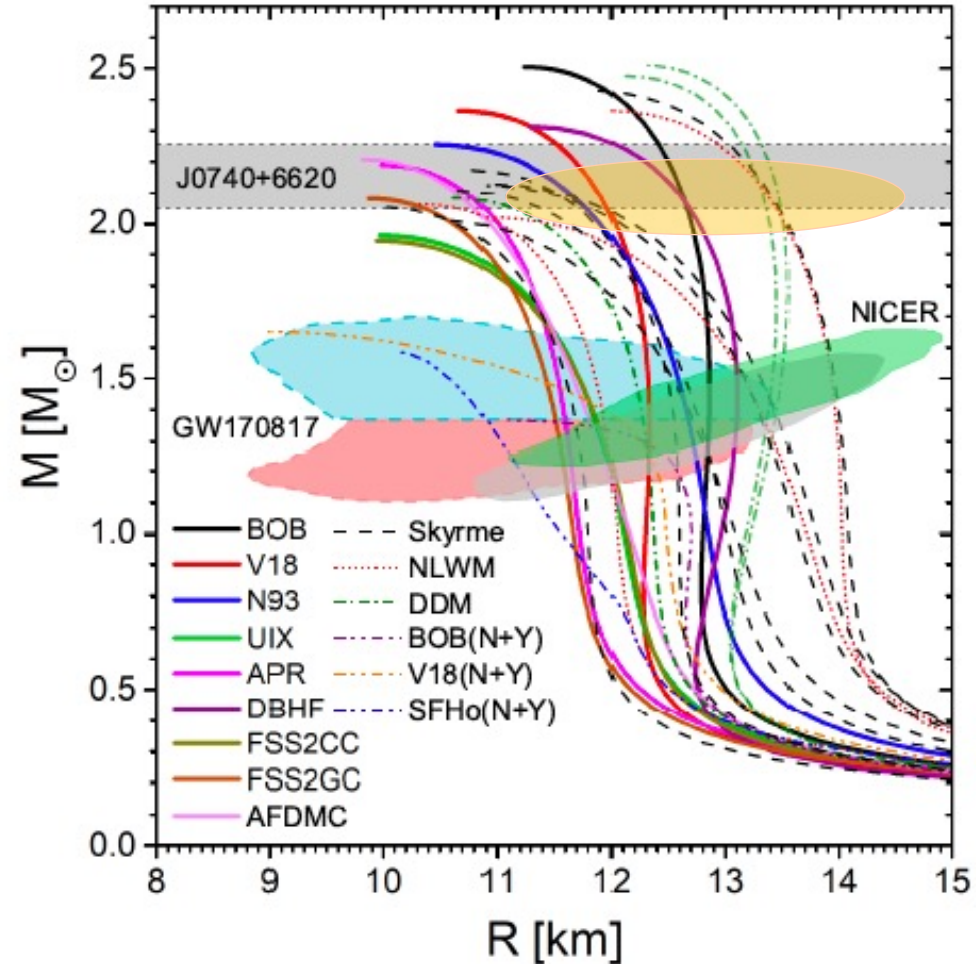
(PPNP 120 (2021) 103879)

連星中性子星合体からの重力波観測



NICER によるミリ秒パルサーの観測

- PSR J0030 + 0451
 $(M = 1.44^{+0.15}_{-0.14} M_{\odot}, R = 13.02^{+1.24}_{-1.06} \text{ km})$
 $(M = 1.34^{+0.15}_{-0.16} M_{\odot}, R = 12.71^{+1.14}_{-1.19} \text{ km})$
- PSR J0740 + 6620
 $(M = 2.08^{+0.07}_{-0.07} M_{\odot}, R = 13.7^{+2.6}_{-1.5} \text{ km})$
 $(M = 2.072^{+0.067}_{-0.066} M_{\odot}, R = 12.39^{+1.30}_{-0.98} \text{ km})$



中性子星の質量と半径の関係

中性子星の質量-半径と状態方程式

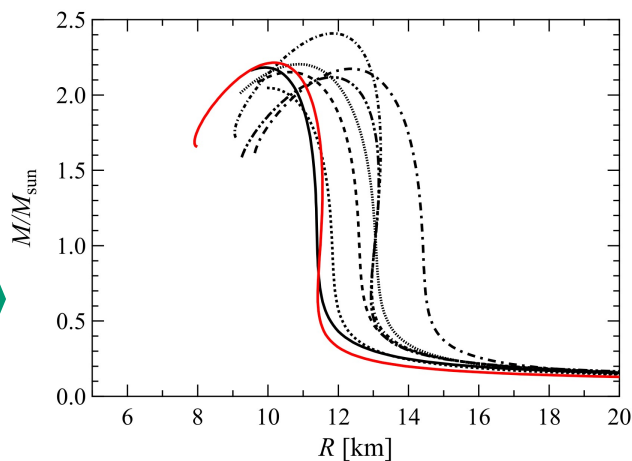
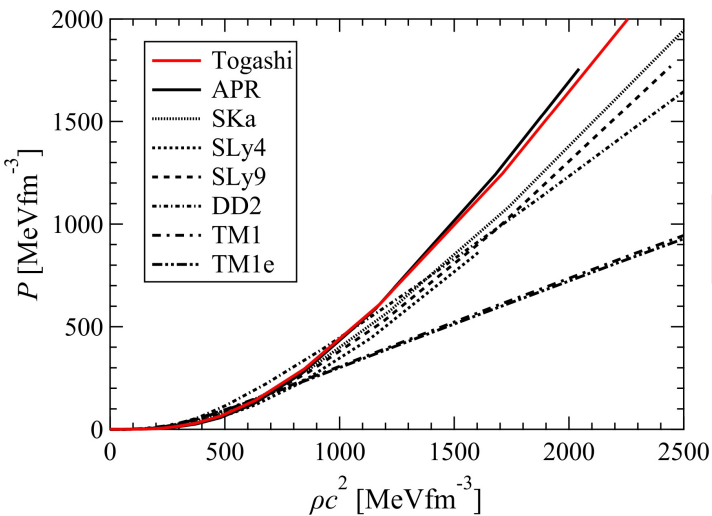
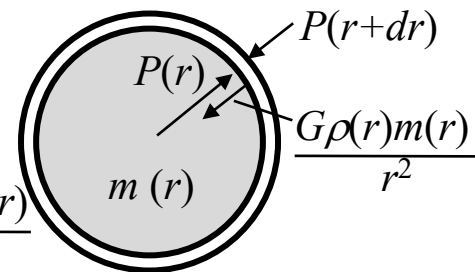
中性子星の質量-半径曲線と中性子星物質の状態方程式は1対1対応

Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) 方程式 (一般相対論的球対称静水平衡の式)

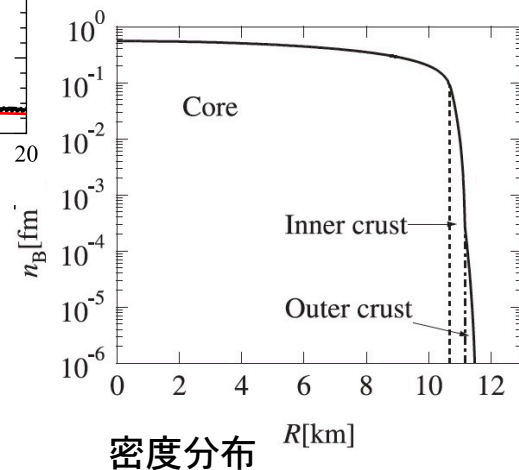
$$\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{G}{r^2} \left[\rho(r) + \frac{P(r)}{c^2} \right] \left[m(r) + 4\pi r^3 \frac{P(r)}{c^2} \right] \left[1 - \frac{2Gm(r)}{c^2 r} \right]^{-1}$$

$$\frac{dm(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r)$$

非相対論 $\frac{dP(r)}{dr} = -\frac{G\rho(r)m(r)}{r^2}$



質量と半径の関係



密度分布

中性子星物質の状態方程式: $P = P(\rho)$

核物質の状態方程式

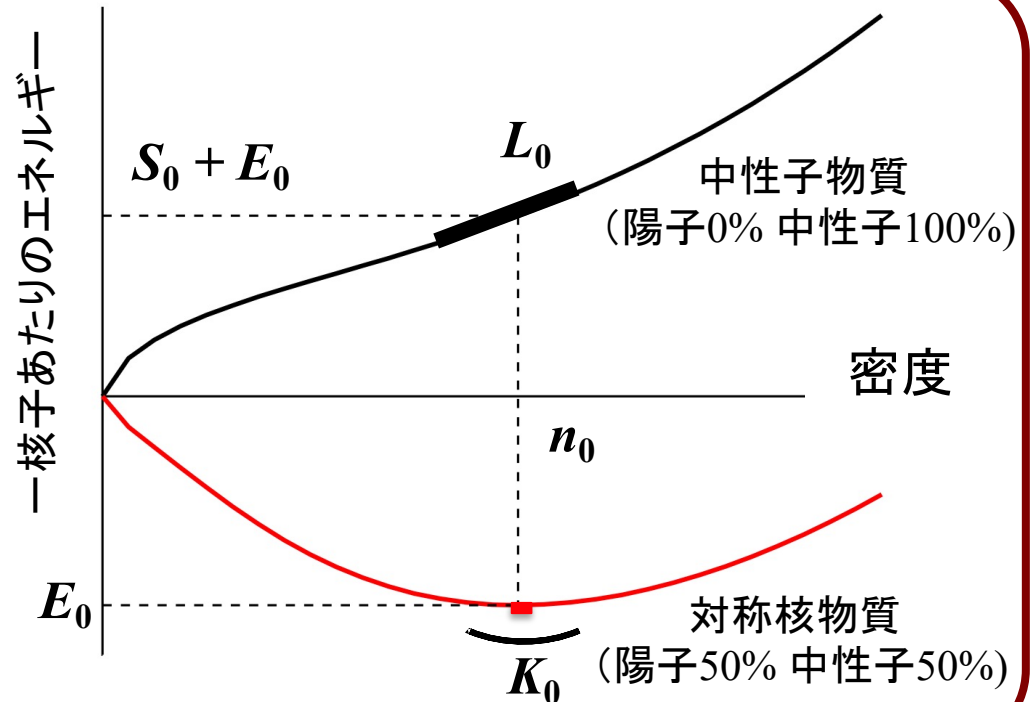
中性子星物質の状態方程式

バリオン数保存: $\rho_B = \rho_p + \rho_n$ 荷電中性: $\rho_p = \rho_e + \rho_\mu$ β 平衡: $\mu_n = \mu_p + \mu_e, \mu_e = \mu_\mu$

$$\epsilon(\rho_n, \rho_p, \rho_e, \rho_\mu) = (\rho_n m_n + \rho_p m_p) + (\rho_n + \rho_p) E(\rho_n, \rho_p) + \epsilon(\rho_e) + \epsilon(\rho_\mu)$$

無限に大きい一様な核物質の状態方程式の予想図

- n_0 : 飽和密度
- E_0 : 飽和エネルギー
- K_0 : 非圧縮率
- S_0 : 対称エネルギー
- L_0 : S_0 の密度勾配



核物質状態方程式の作り方

1. 解析的な関数形を仮定

$$\frac{E}{A}(\rho, \beta) = E_0 + \frac{1}{2}K_0x^2 + \frac{1}{6}Q_0x^3 + \left(S_0 + Lx + \frac{1}{2}K_{\text{sym}}x^2 + \frac{1}{6}Q_{\text{sym}}x^3 \right) \beta^2 + \dots$$
$$x = (\rho - \rho_0)/3\rho_0 \quad \beta = (\rho_n - \rho_p)/(\rho_n + \rho_p)$$

2. 現象論的モデル(有効相互作用・平均場近似)

- Skyrme Hartree-Fock
- Energy density functionals
- Relativistic mean field theory

3. 生の核力に基づく量子多体計算(微視的理論)

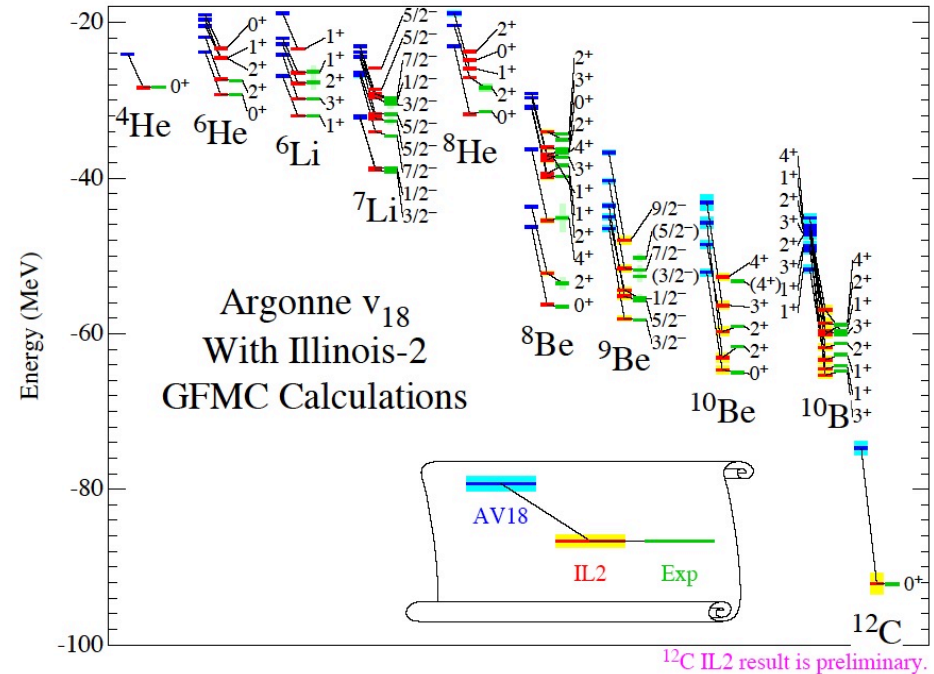
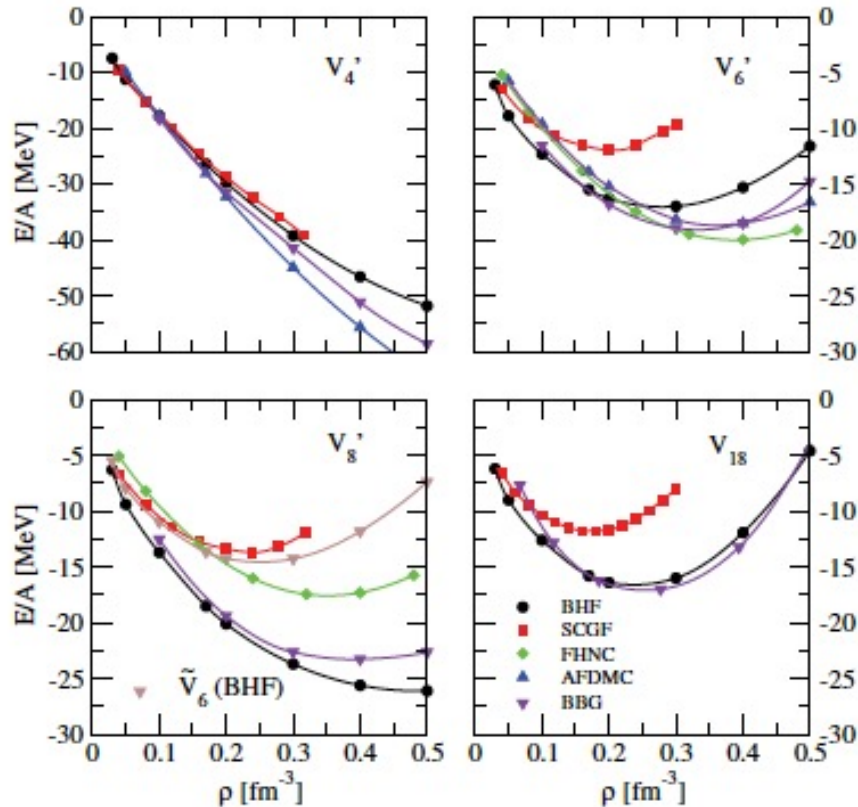
$$V_{ij} = \sum_{t=0}^1 \sum_{s=0}^1 [V_{\text{Cts}}(r_{ij}) + sV_{\text{Tt}}(r_{ij})S_{\text{Tij}} + sV_{\text{SOt}}(r_{ij})(\mathbf{L}_{ij} \cdot \mathbf{s}) + V_{\text{qLts}}(r_{ij})|\mathbf{L}_{ij}|^2 + sV_{\text{qSOt}}(r_{ij})(\mathbf{L}_{ij} \cdot \mathbf{s})^2] P_{tsij}$$

2. 核力から出発した核物質状態方程式

生の核力に基づく高密度物質状態方程式の計算例

- **摂動論** (媒質中の2体散乱問題を解く) 例) Brueckner Hartree Fock theory
- **変分法** (Jastrow型試行関数で最小化) 例) Fermi Hypernetted Chain (FHNC)

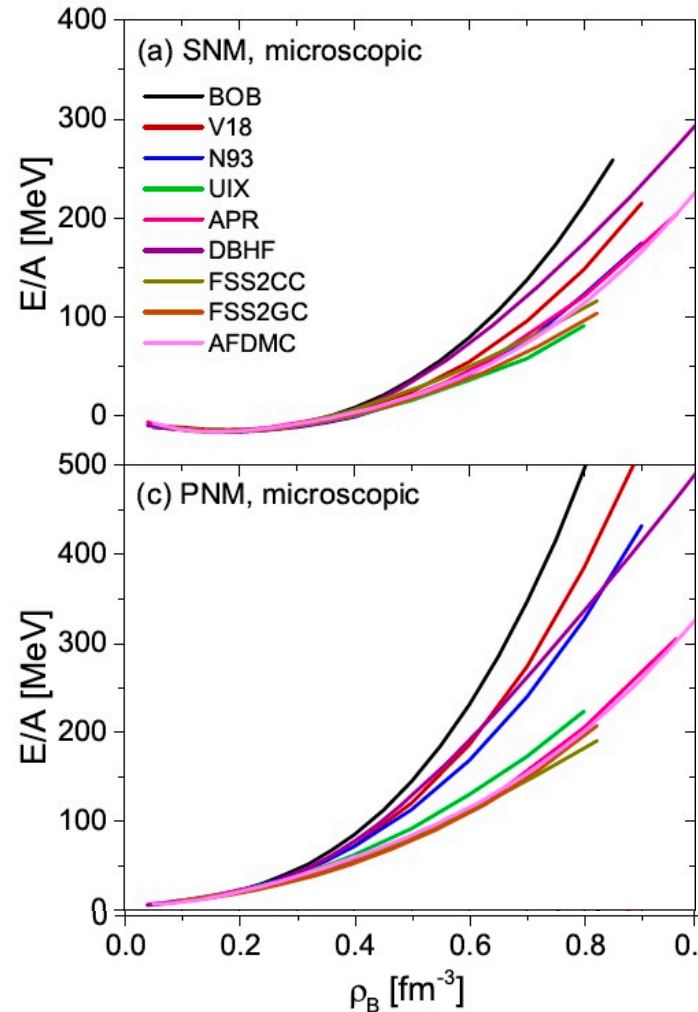
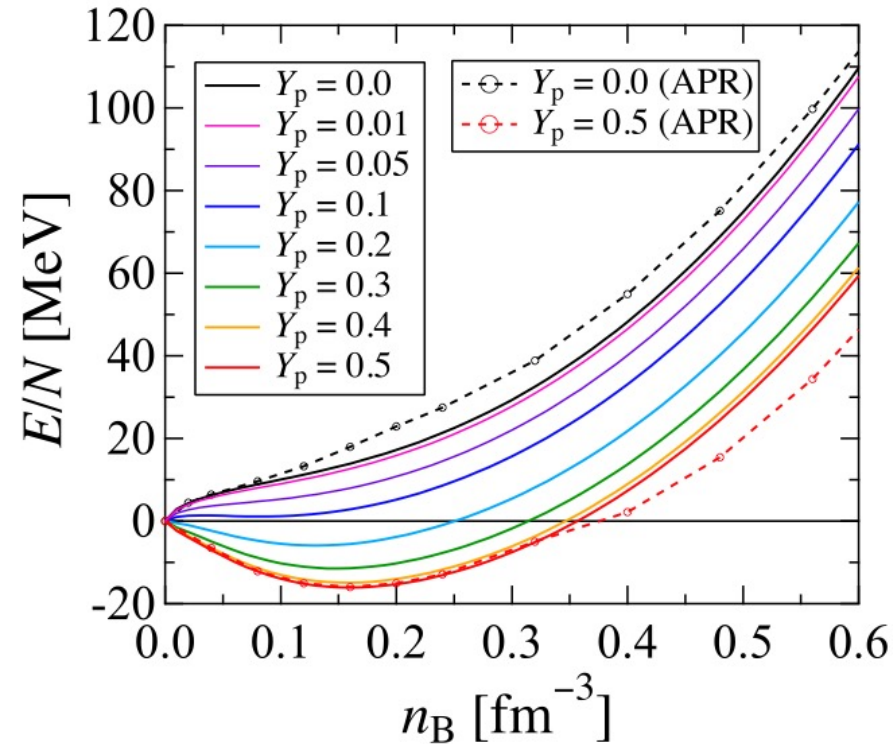
2核子散乱実験を再現する現実的な2体核力を用いると...



一様核物質状態方程式の比較

arXiv: 2105.03747

原子核や核物質の計算には3体核力が必要！

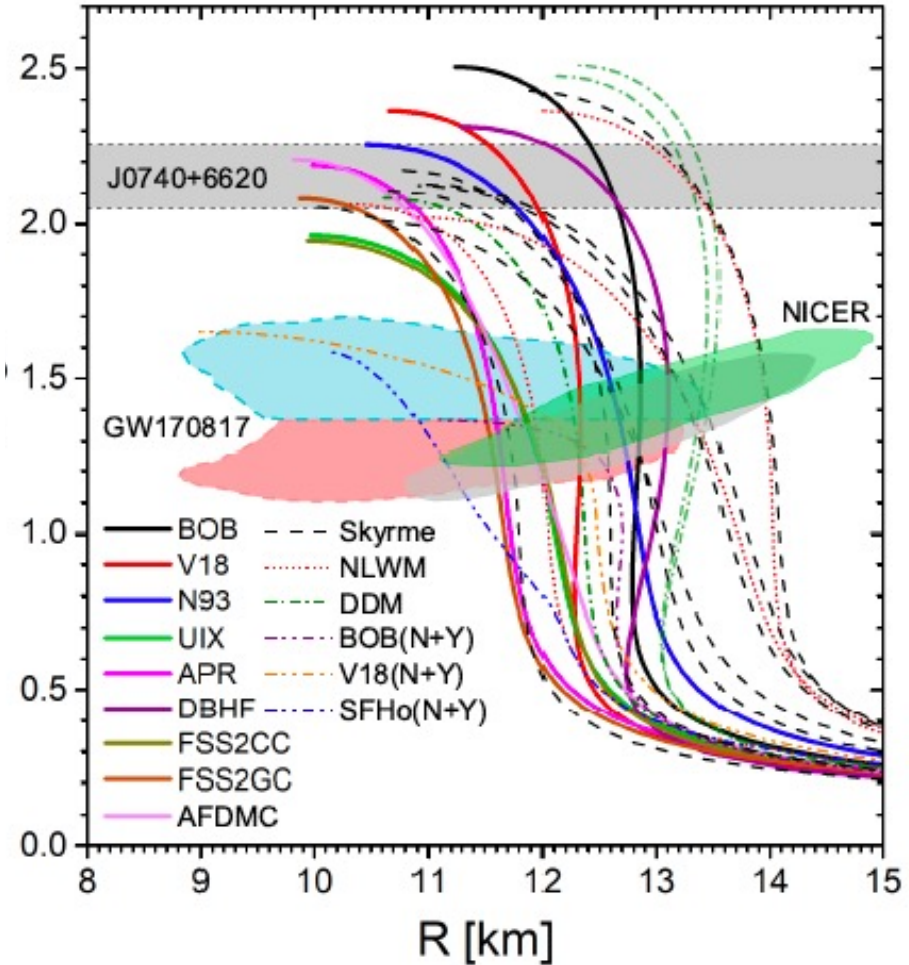
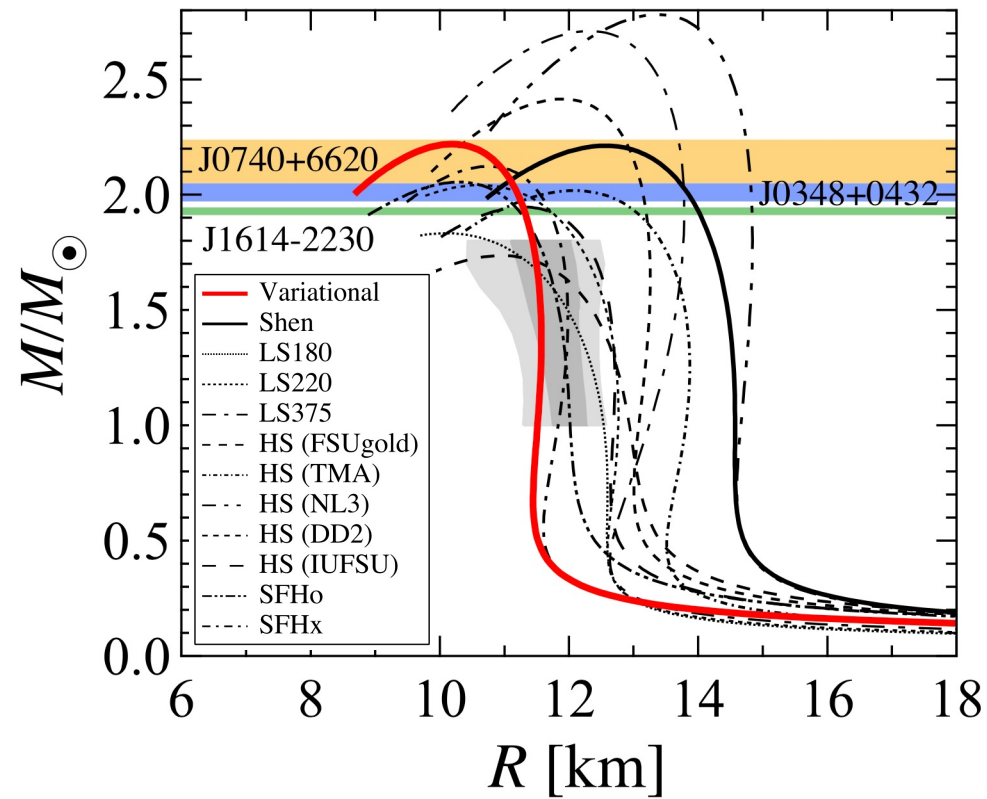


Our EOS : HT and M. Takano, NPA 902 (2013) 53

	n_0 [fm^{-3}]	E_0 [MeV]	K_0 [MeV]	S_0 [MeV]	L_0 [MeV]
Our EOS	0.160	16.1	245	29.1	38.7
Exp.	0.15 – 0.17	15.8 – 16.2	220 – 260	28 – 35	35 – 100

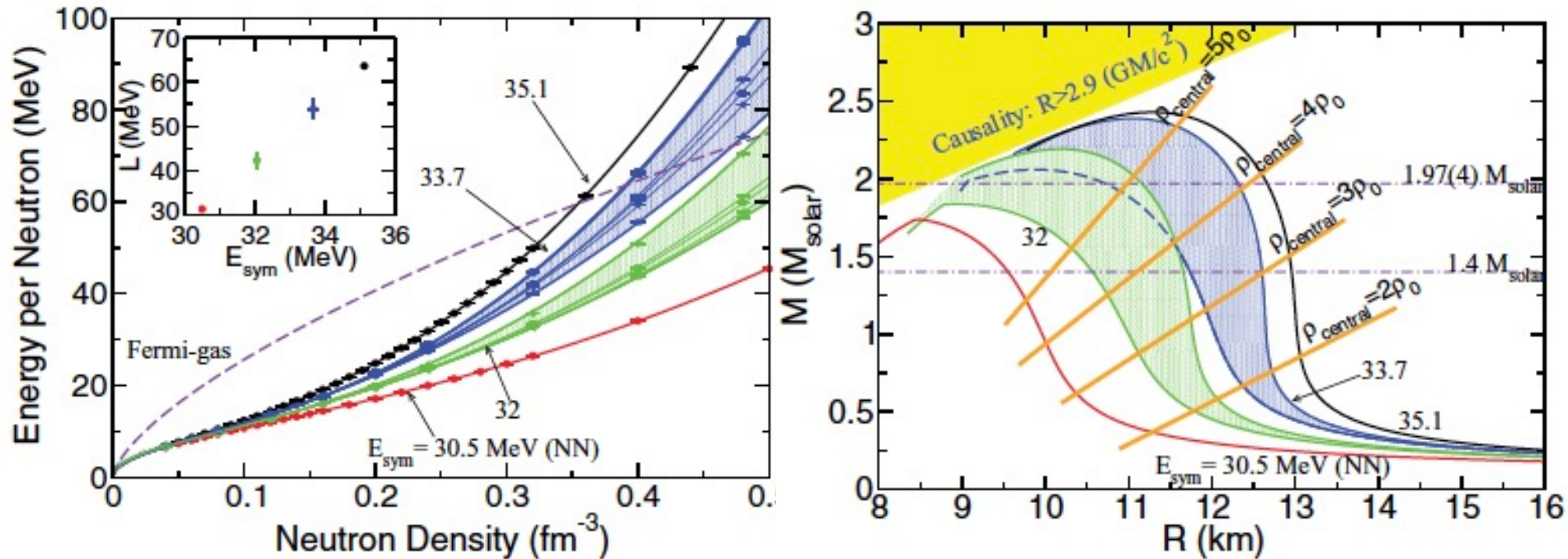
中性子星の質量と半径

(PPNP 120 (2021) 103879)



3体核力の不定性と中性子星構造

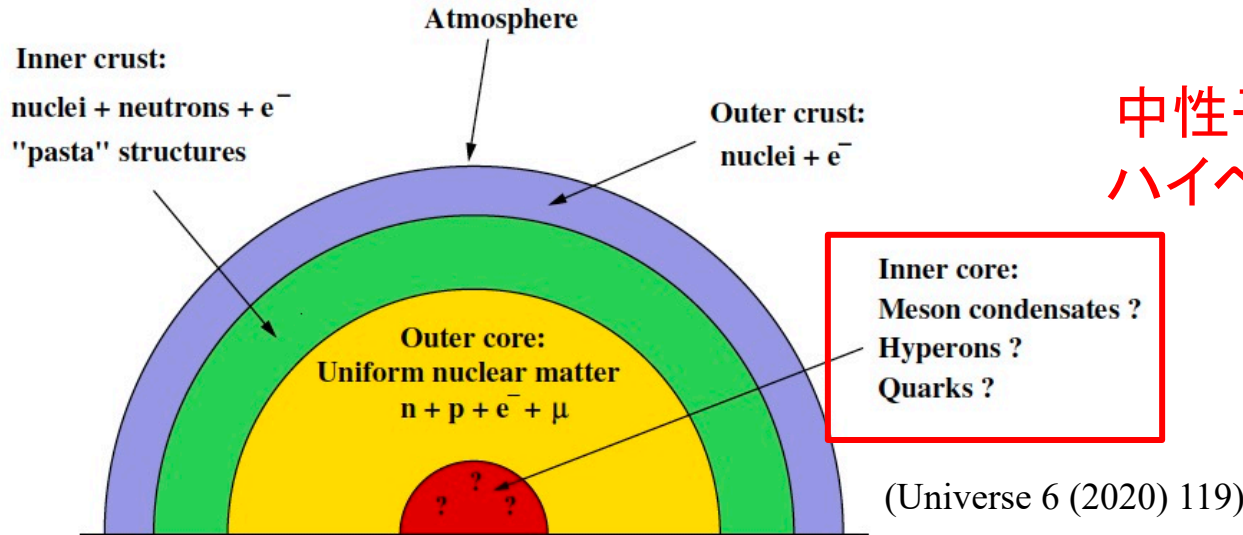
AFDMC計算による3体核力の系統的評価



3体核力 ($T = 3/2$) は対称エネルギー E_{sym} やその勾配 L と強く関連!

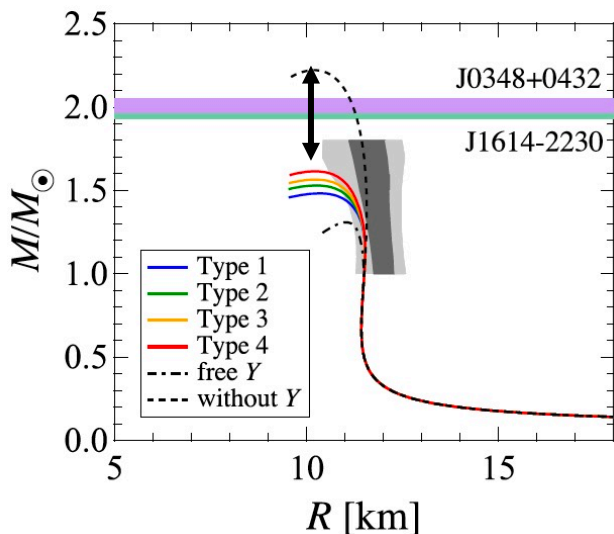
3体核力の決定は原子核分野における重要課題

3. 中性子星内部におけるエキゾチック相

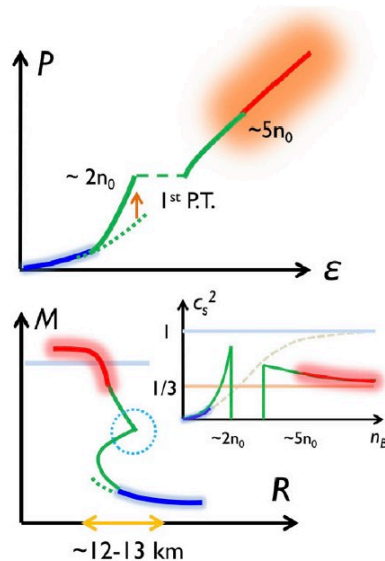


中性子星の内部コアでは
ハイペロンやクォーク相が
出現するはず

重い中性子星問題 (ハイペロンパズル)



(PRC 93 (2016) 035808)



(PRD 104 (2021) 063036)

- ハイペロン混合に伴うEOSの軟化
- $2M_\odot$ の中性子星観測と矛盾

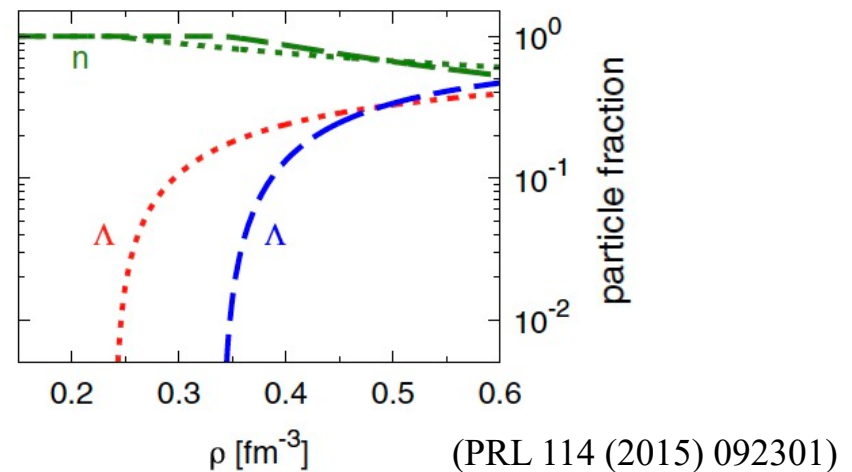
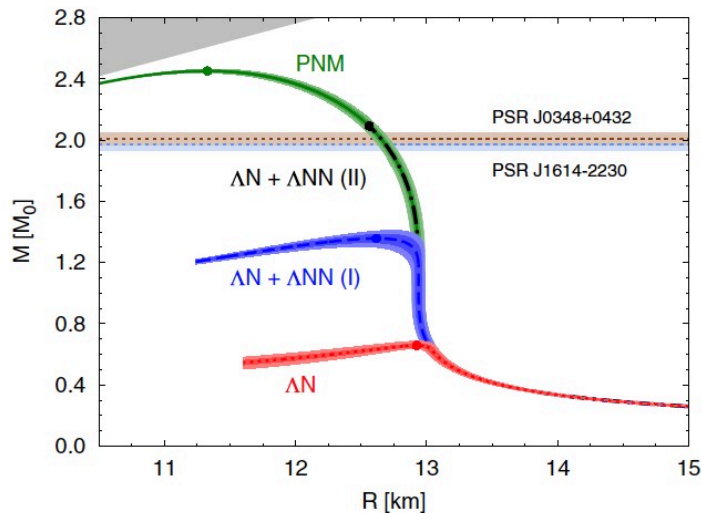
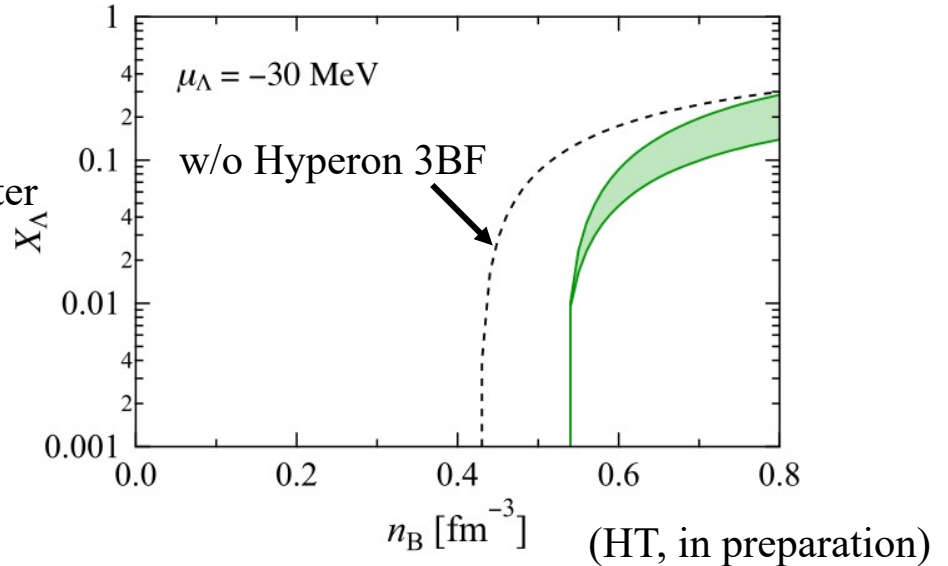
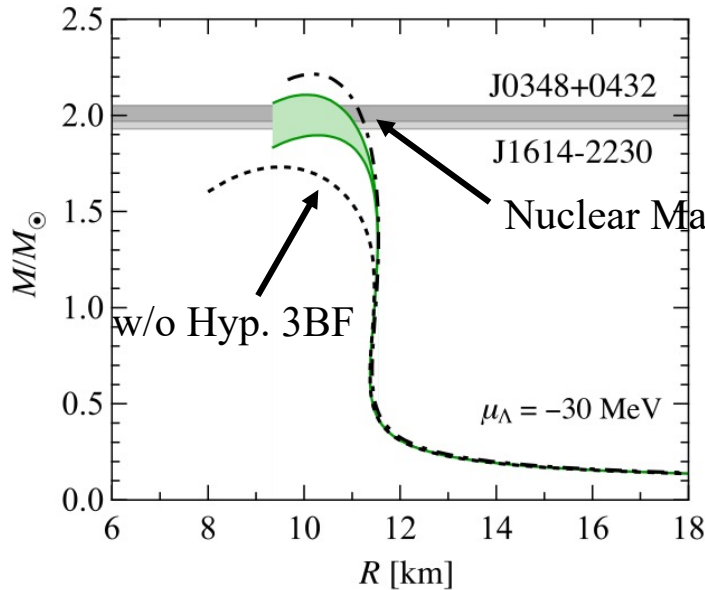
ハイペロン相互作用は2体力すら
ほとんどわかっていない...

原子核からクォークまで扱える
確立した手法はない...

重い中性子星問題への解決策①

ハイペロン相互作用に強い斥力を導入する

→ハイペロン臨界密度が上昇

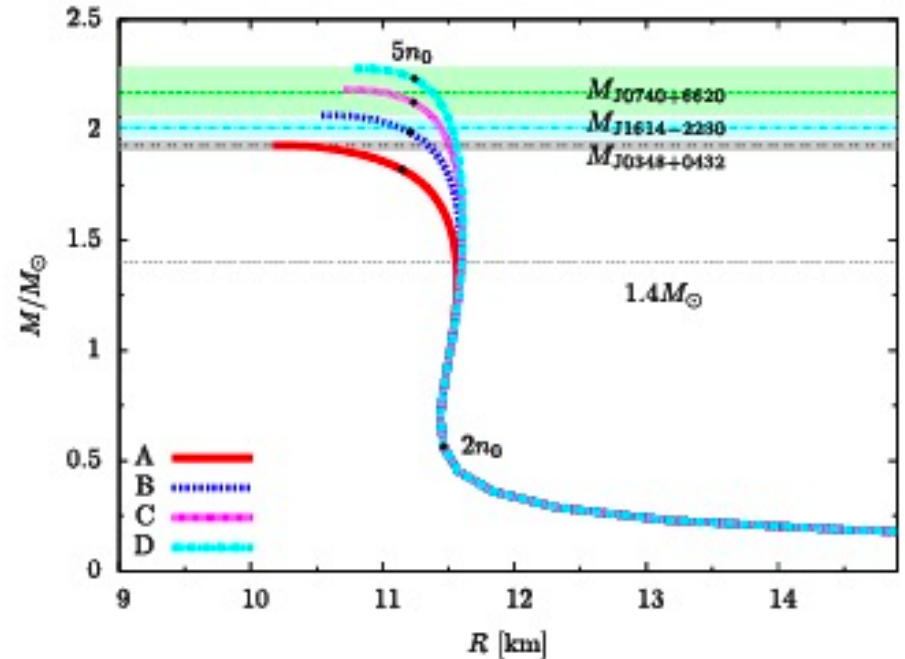
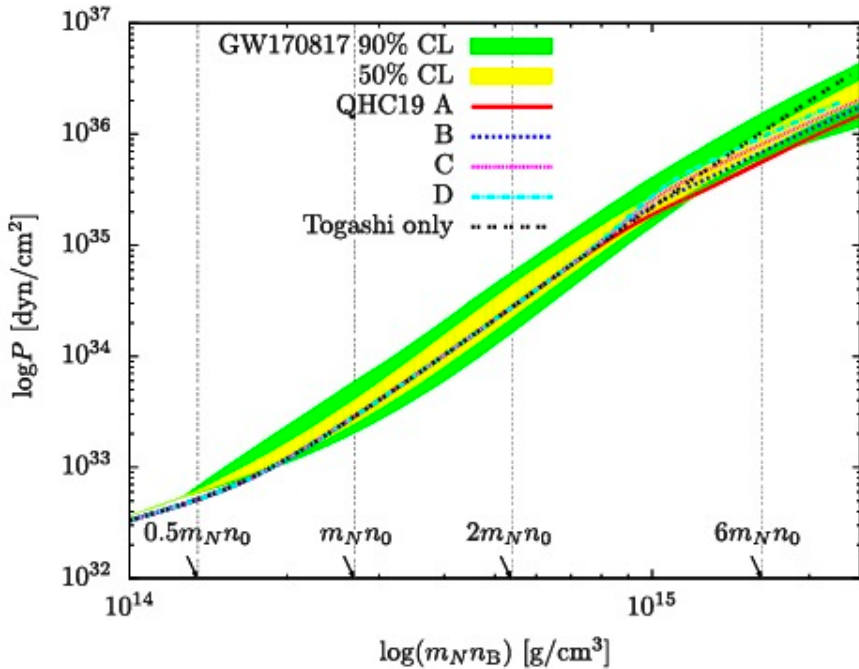
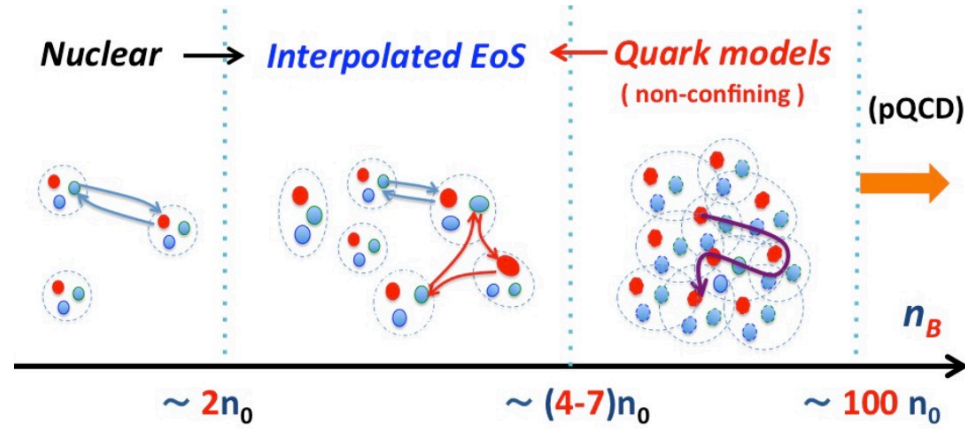


(PRL 114 (2015) 092301)

重い中性子星問題への解決策②

APJ 885 (2019) 42

ハドロン相からクォーク相へのクロスオーバー相転移



ここまでのまとめ

【中性子星物質の状態方程式】

- 質量と半径の観測が状態方程式に強い制限を与える
- 内部組成を決めるには理論計算が不可欠

【核物質状態方程式の不定性】

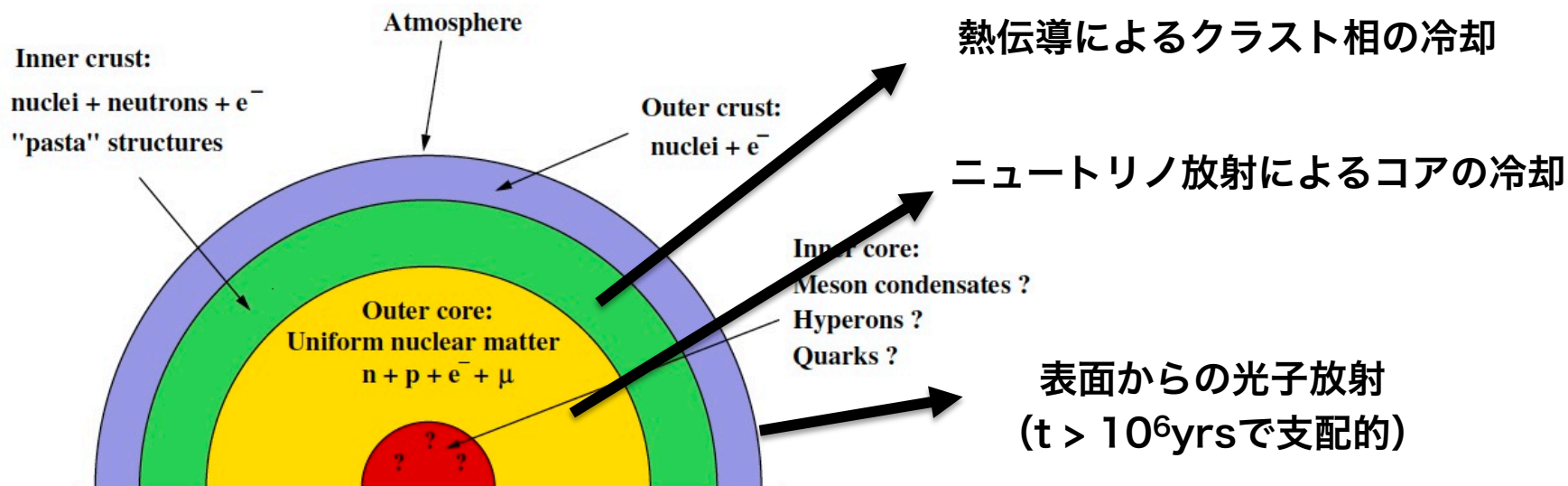
- 核力部分: 3体力 (特に $T = 3/2$) が未解明
 - 3体系の原子核実験や理論計算 (Chiral EFT/ LQCD) による解決に期待

【エキゾチック相の不定性と重い中性子星問題】

- ハイペロン: 斥力効果により星内部に出現しにくくなる
 - 典型的な中性子星 ($\sim 1.4 M_{\text{sun}}$) では、ハイペロン混合は生じていない (かも)
 - ハイペロン相互作用の精密化が重要 (J-PARCにおける散乱実験など)
- クォーク相: クロスオーバー相転移が好ましい
 - 観測データとの整合性を考慮すると一次相転移は考えにくい
 - 状態方程式はハドロン相と大きく違わないため観測からの制限が難しい

4. 中性子星を用いた暗黒物質探査の可能性

中性子星の冷却



Direct URCA 過程

中性子ペアリング

修正 URCA 過程

中性子制動放射

fast: $n \rightarrow e^- + p + \bar{\nu}_e$

medium: $n + n \rightarrow \langle nn \rangle + \nu + \bar{\nu}$

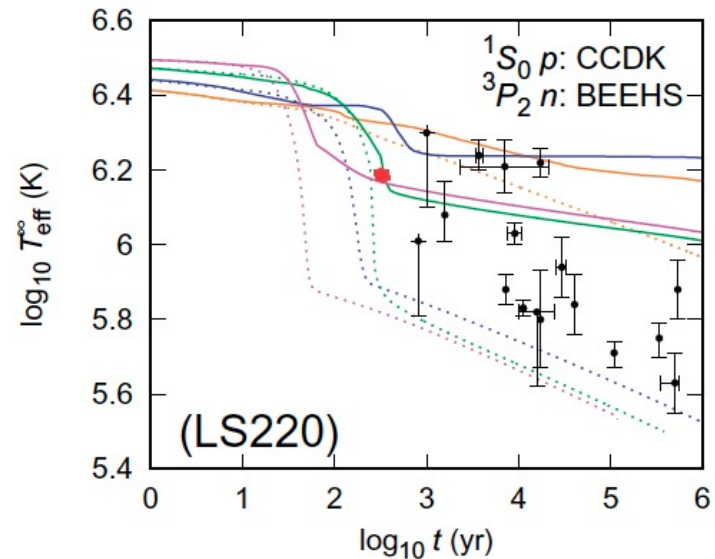
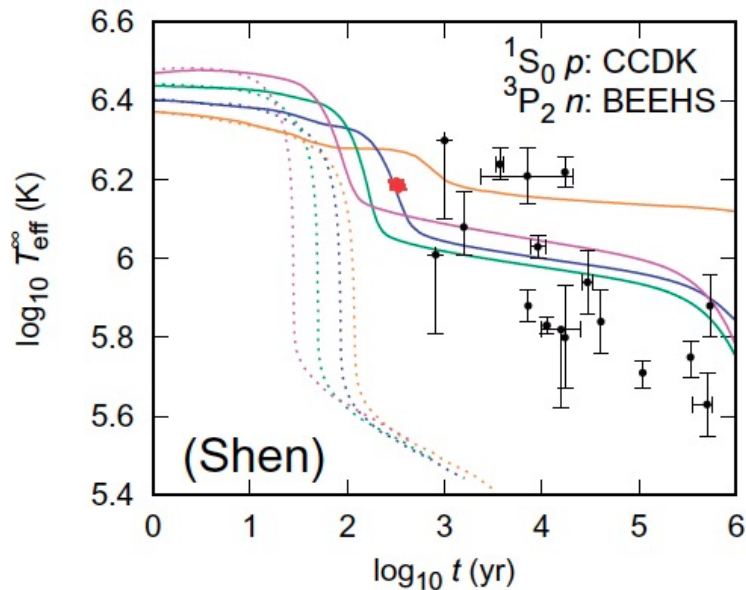
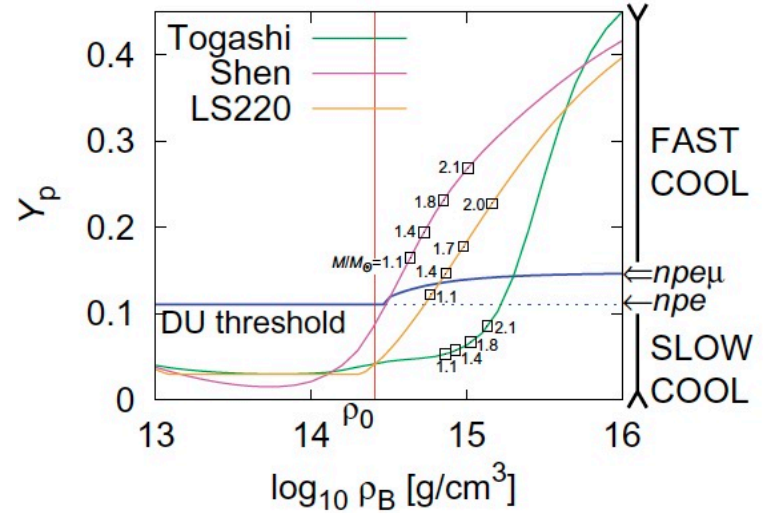
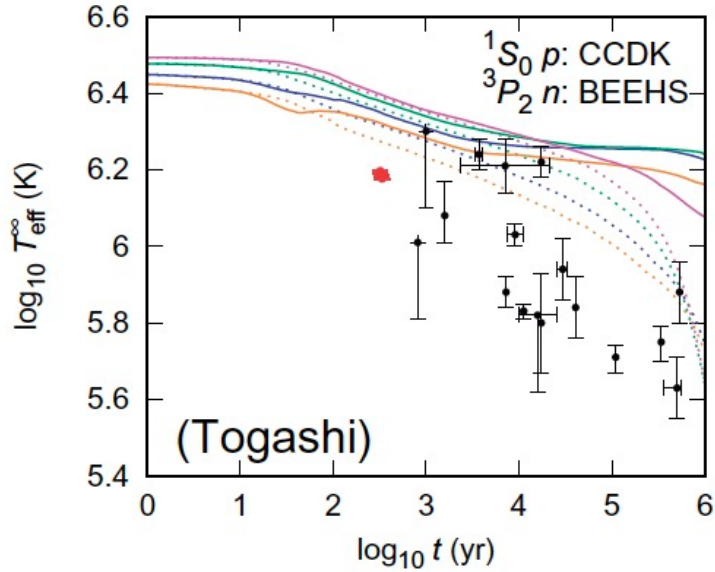
slow: $n + n \rightarrow n + p + e^- + \bar{\nu}_e$

very slow: $n + n \rightarrow n + n + \nu + \bar{\nu}$

Increasing NS mass

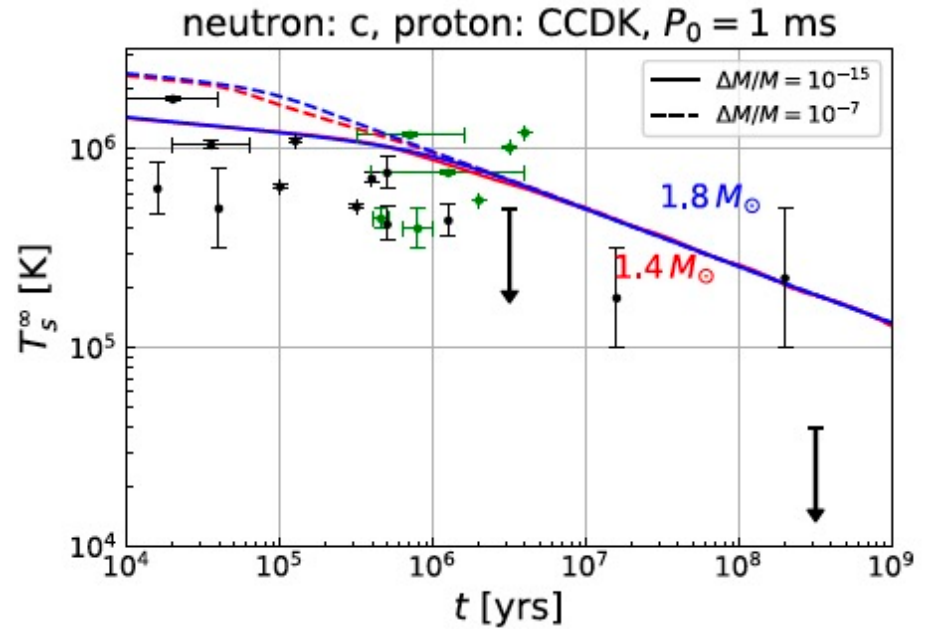
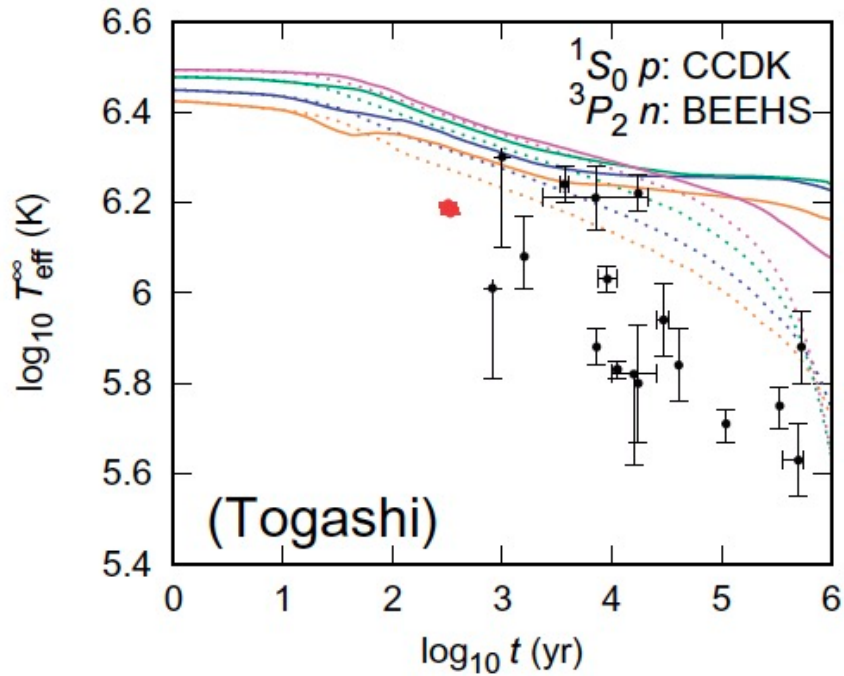
状態方程式を用いた冷却シミュレーション

A. Dohi et al., PTEP 2019 (2019) 113E01



暗黒物質探索の可能性

K. Yanagi et al., MNRAS 492 (2020) 5508



まとめ

【中性子星物質の状態方程式】

- 質量と半径の観測が状態方程式に強い制限を与える
- 内部組成を決めるには理論計算が不可欠

【核物質状態方程式の不定性】

- 核力部分: 3体力 (特に $T = 3/2$) が未解明
 - 3体系の原子核実験や理論計算 (Chiral EFT/ LQCD) による解決に期待

【エキゾチック相の不定性と重い中性子星問題】

- ハイペロン: 斥力効果により星内部に出現しにくくなる
 - 典型的な中性子星 ($\sim 1.4 M_{\text{sun}}$) では、ハイペロン混合は生じていない (かも)
 - ハイペロン相互作用の精密化が重要 (J-PARCにおける散乱実験など)
- クォーク相: クロスオーバー相転移が好ましい
 - 観測データとの整合性を考慮すると一次相転移は考えにくい
 - 状態方程式はハドロン相と大きく違わないため観測からの制限が難しい