

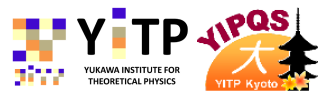
中性子星と核物質の理論研究 (研究計画 D01)

京大基研 大西 明

新学術領域研究
「実験と観測で解き明かす
中性子星の核物質」
キックオフシンポジウム

2012年10月26-27日

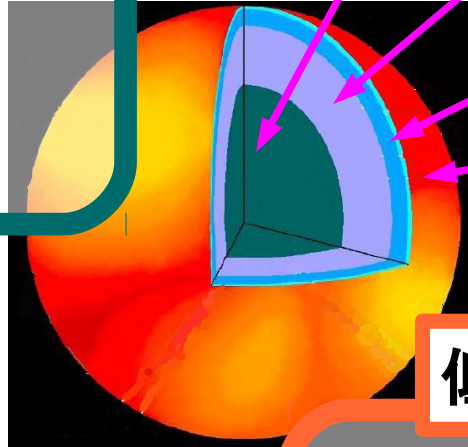
協賛: 理研理事長ファンド準備研究
「理論物理とX線観測の連携に基づく超高密度天体の構造解明」
(初田哲男、橋本幸士、玉川徹)



実験と観測で解き明かす中性子星の核物質

高密度領域 (A 班)

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 (B 班)

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、

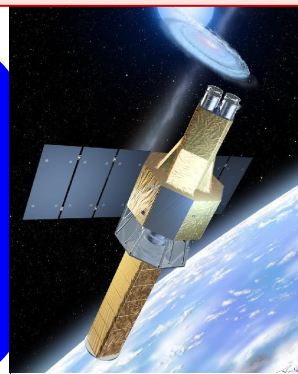
RIBF



天体現象 (C 班)

半径、質量、
温度(時間依存性)、
星震、パスタ、

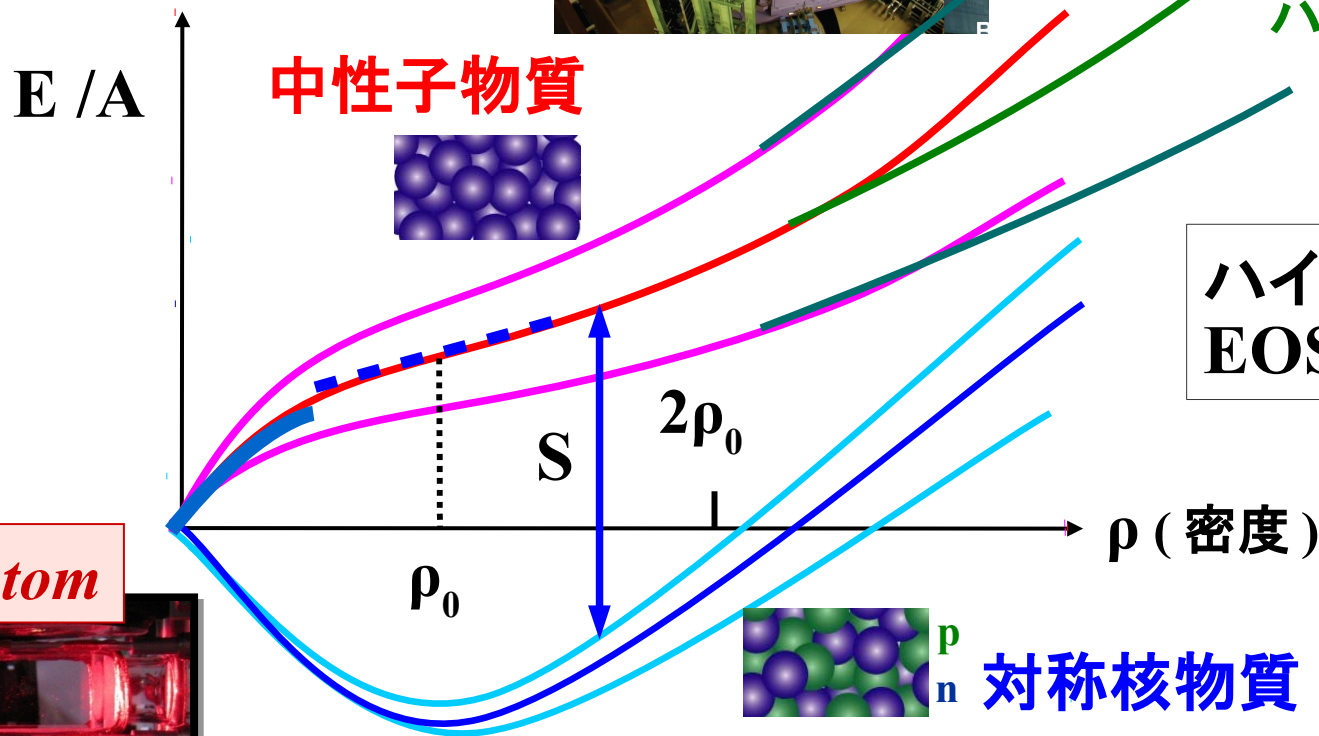
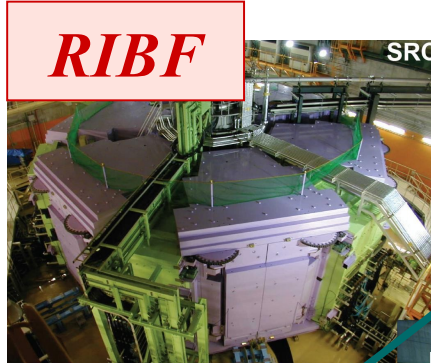
ASTRO-H



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

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

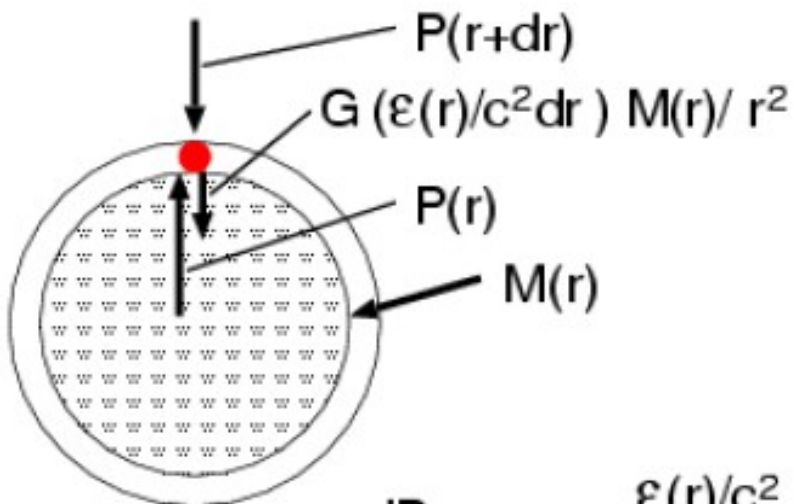
$\xi \simeq 0.4$ (Bertsch parameter)

Tolman-Oppenheimer-Volkoff equation

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

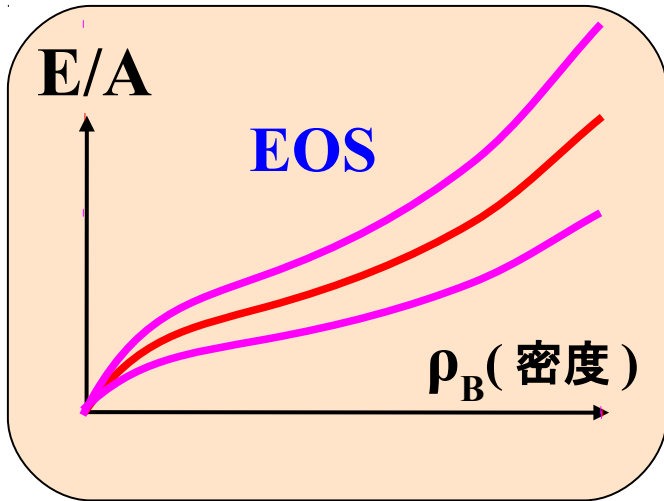
$$\frac{dM}{dr} = 4\pi r^2 \epsilon/c^2, \quad \frac{dP}{dr} = \frac{dP}{d\epsilon} \frac{d\epsilon}{dr}$$

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

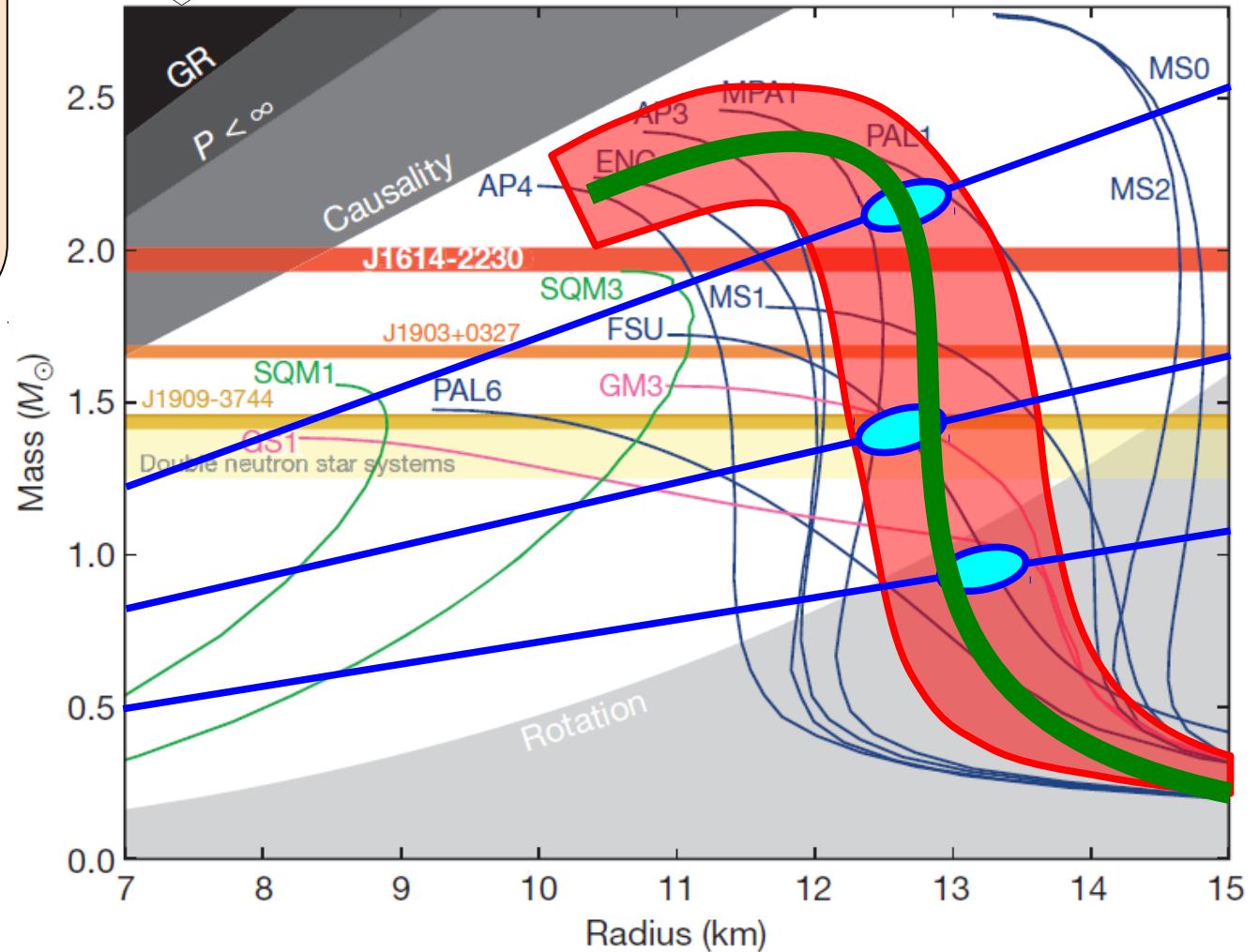


Non-Rela. $\frac{dP}{dr} = -G \frac{\epsilon(r)/c^2 M(r)}{r^2}$

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 (D01: 理論計画班)

高密度領域

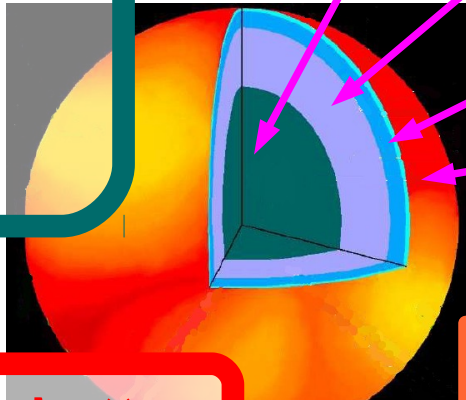
原田 (Prod.)、
木村 (Structure)、
土手 (Kaon Nucl.)、
山縣 - 関原

Hyperons, mesons, quarks

Asym. nuclear matter
+elec.+ μ

Nuclei+neutron gas+elec.

Nuclei + elec.



J-PARC



大西、祖谷

ASTRO-H



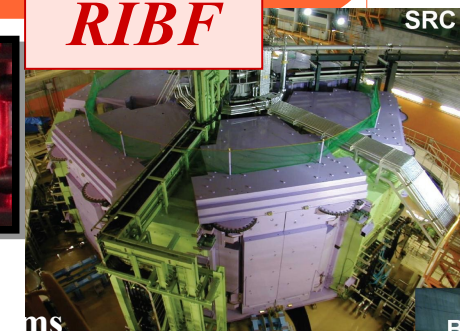
低密度領域

中田 (Sym.E)、
松尾 (EOS)、
小野 (HIC)、
稲倉

天体現象

飯田 (Phen.)、
巽 (Quark)、
中里 (Pasta)、
石塚

RIBF



連携: 国広、西崎、親松、丸山、阿武木、大橋、柴崎、中務 (B)

高密度中性子星物質

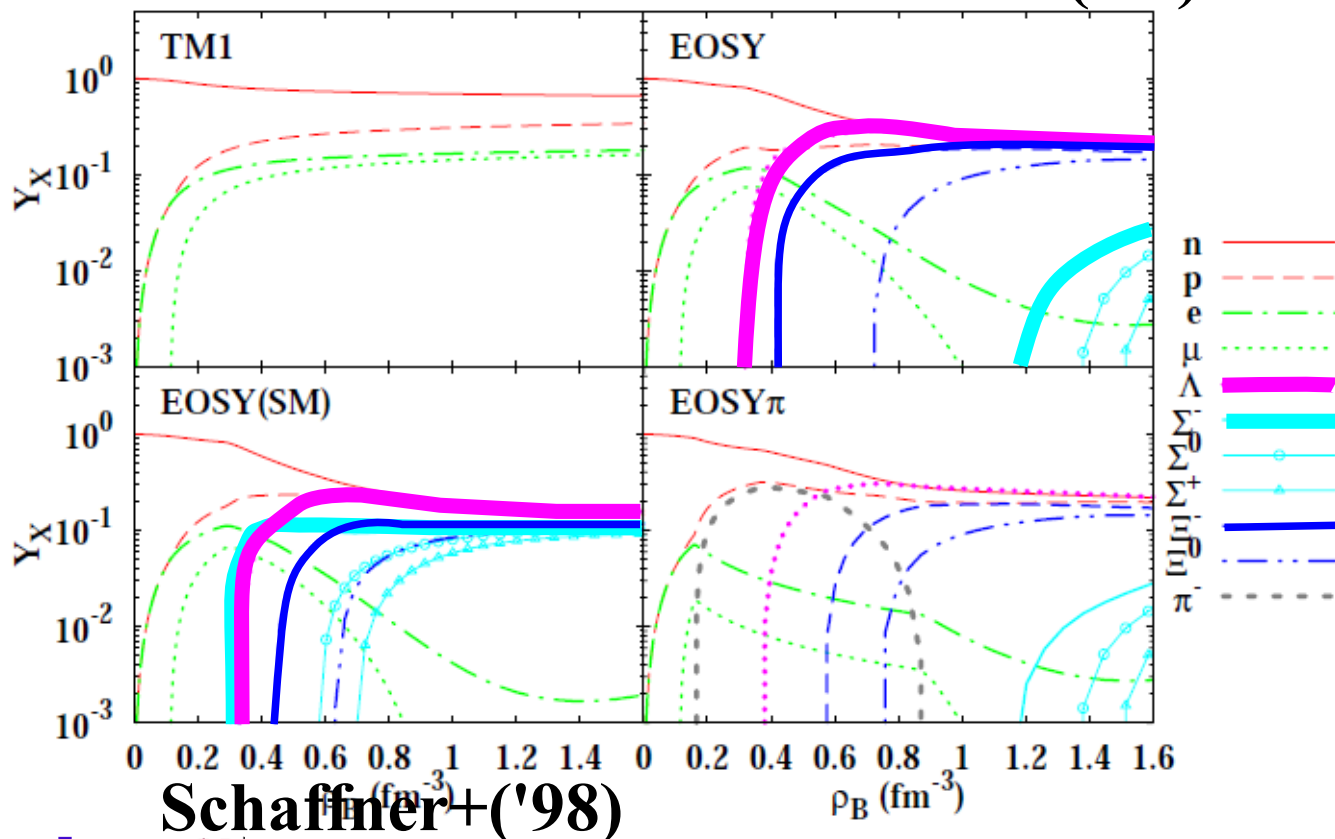
中性子星物質におけるハイペロンの役割

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

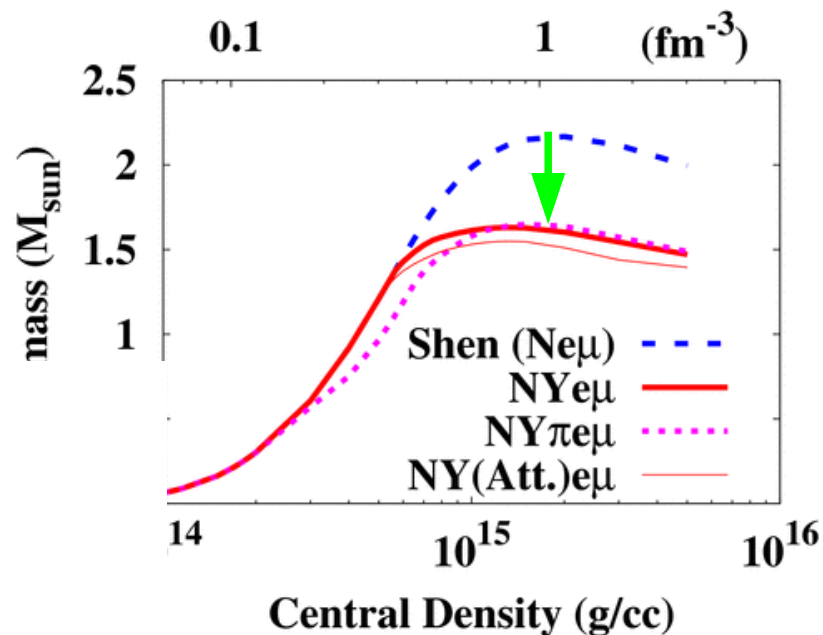
Hyperon Effect is DRASTIC

- $M_{\max} = 2.1 M_{\odot} \rightarrow 1.56 M_{\odot}$
- 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

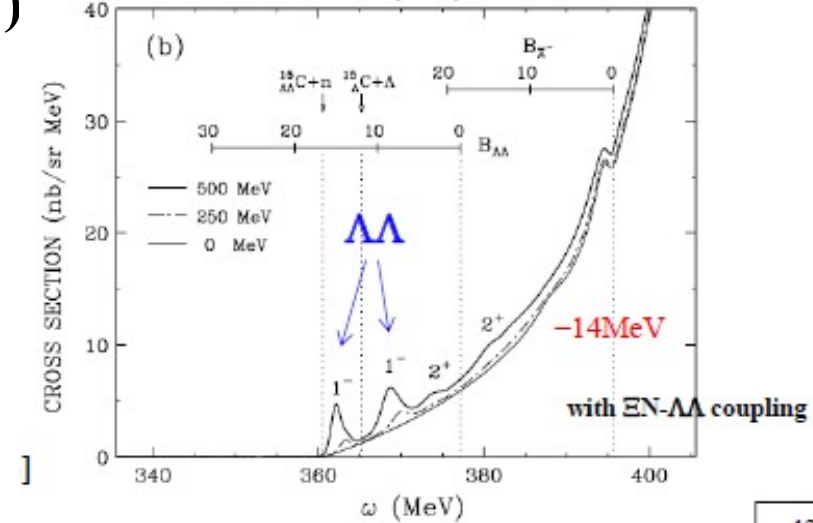
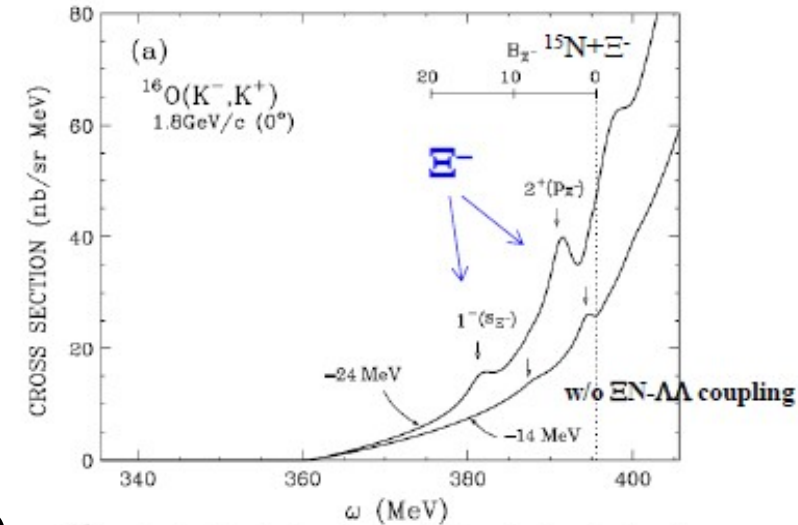
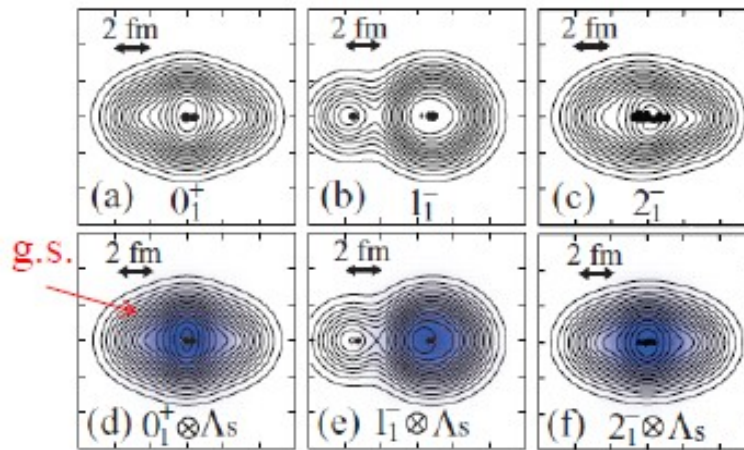
高密度中性子星物質の課題

■ 多重ストレンジネス原子核・物質 ⇔ A01 班

- Ξ -核相互作用、 ΞN - $\Lambda\Lambda$ 結合
⇔ 中性子星組成、ハイペロン結合
(原田、平林、河野、藤原、山本、大西)

■ S=-1 原子核 ⇔ A02 班

- ΣN 相互作用、K-原子核束縛状態
⇔ 中性子星組成 (原田、土手、山縣、武藤、巽)
- (中性子過剰) Λ 核分光
⇔ ハイパー核の形・ハイペロン結合
(木村、肥山)



Harada, Hirabayashi, Umeya ('10)

Isaka, Kimura, Dote, AO ('11)

■ クォーク物質の存在様式(後述)

1.97 ± 0.04 M_⊙ 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 ± 0.04 Msun

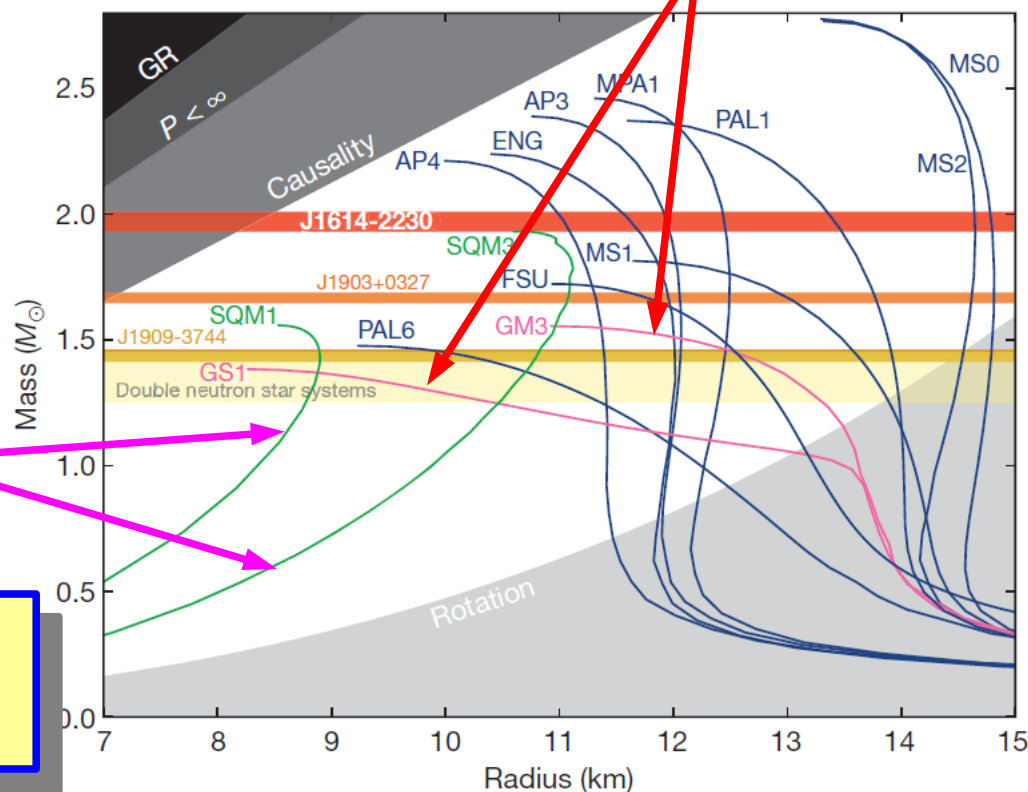
- 一般相対性理論 (Shapiro delay) に基づく質量決定
- 幸運な公転面の向き + 美しい観測結果

■ 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

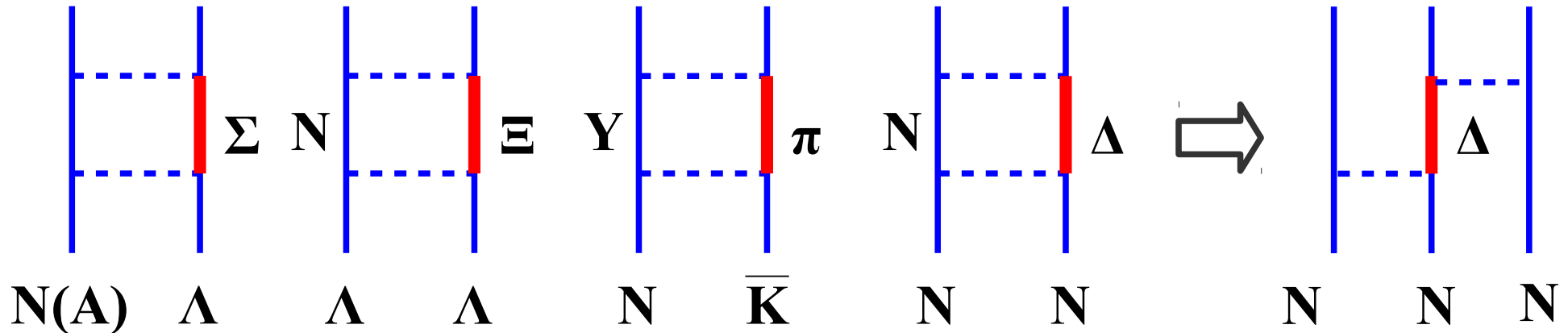
クォーク物質
の EOS



Unversal 3B repulsion ?
Nishizaki, Takatsuka, Yamamoto ('03)

ストレンジネスハドロンは中性子星内で存在するか？

- ストレンジネス核のキーワード
= 相互作用の平均的な強さ (ポテンシャルの深さ) とチャネル結合



「棄却された EOS」(simple な RMF) に含まれていない効果

チャネル結合 \rightarrow 3 体力

\rightarrow 媒質効果による強い斥力 (河野)、Shell evolution (大塚)

全ての 3 バリオンチャネルに働く斥力が現れるか？

Nishizaki, Takatsuka, Yamamoto ('03); Doi et al. (HALQCD)

ストレンジネス核・YN, YY 相互作用の詳細な検討を通じて
ポテンシャル・チャネル結合効果を明らかにし、
(あらわな 3 体力を含む) 多体理論を援用して EOS \rightarrow

低密度中性子星物質

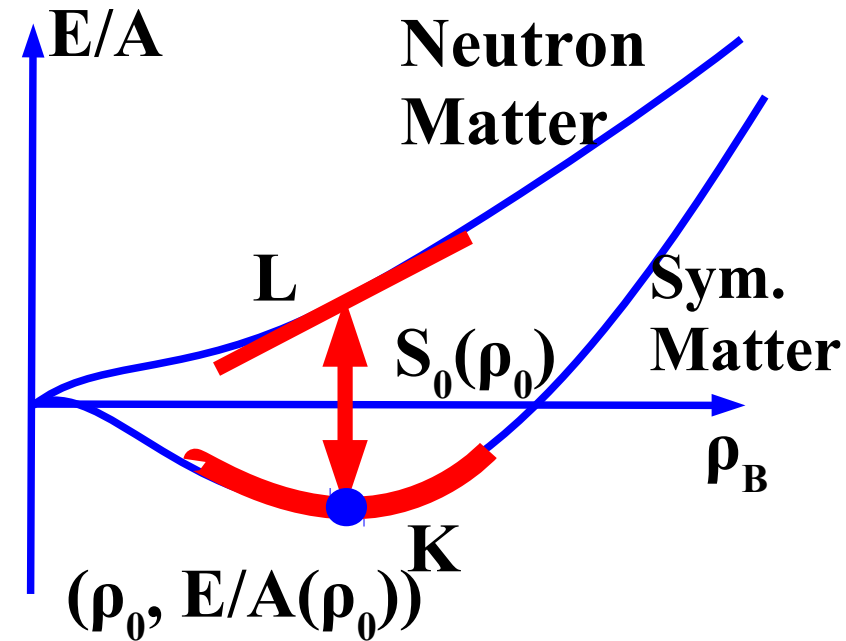
中性子星物質状態方程式と対称エネルギー

■ 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

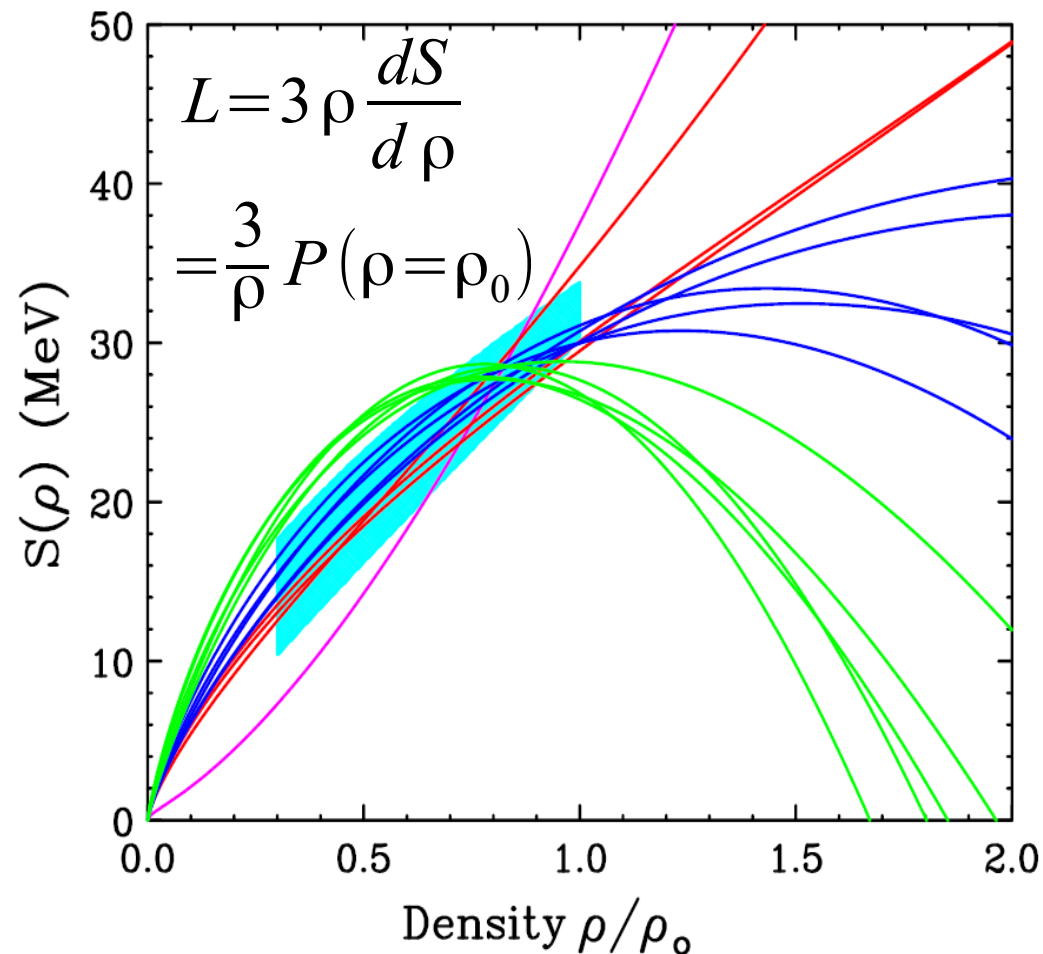
NuSym11 <http://www.smith.edu/nusym11>

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

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 $(0.3\text{-}1)\rho_0$ の密度での E_{sym} に敏感。
→ 超低密度、高密度側では？



Sym. E 2011 summary

低密度中性子星物質の課題

■ ρ_0 より高い密度領域での対称エネルギー ⇔ B01

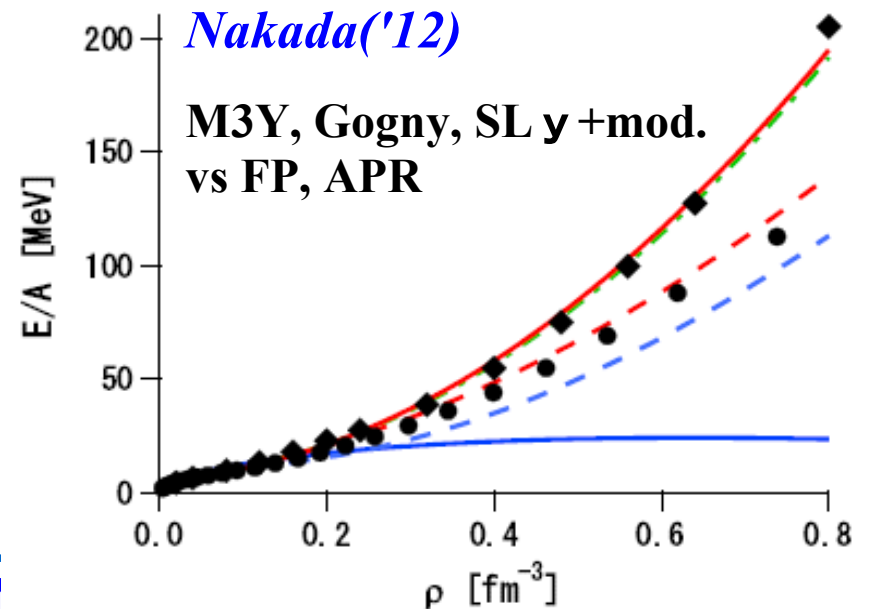
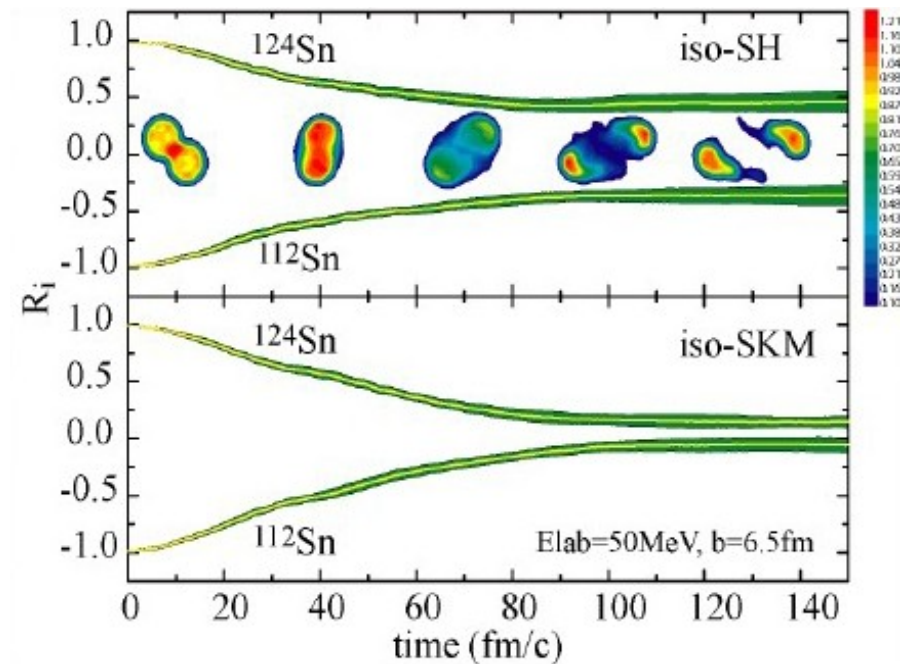
- π^\pm 生成、 t , ^3He のフロー (小野、村上)
⇔ Isospin diffusion (MSU/RIKEN)

■ 低密度中性子過剰物質の物性 ⇔ B02

- 中性子過剰核の pigmy 共鳴 (稲倉)
- 低密度中性子過剰物質での対相関と dineutron 相関 (松尾)
- 準現実的相互作用 (中田)
- ρ_0 以下での対称エネルギーと核構造 (中田、木村、飯田、親末)

■ 低密度中性子物質と冷却原子 ⇔ B02 (渡辺、堀越、大橋、中務)

W. Lynch et al.



現実的な中性子物質 EOS 構築へ向けて

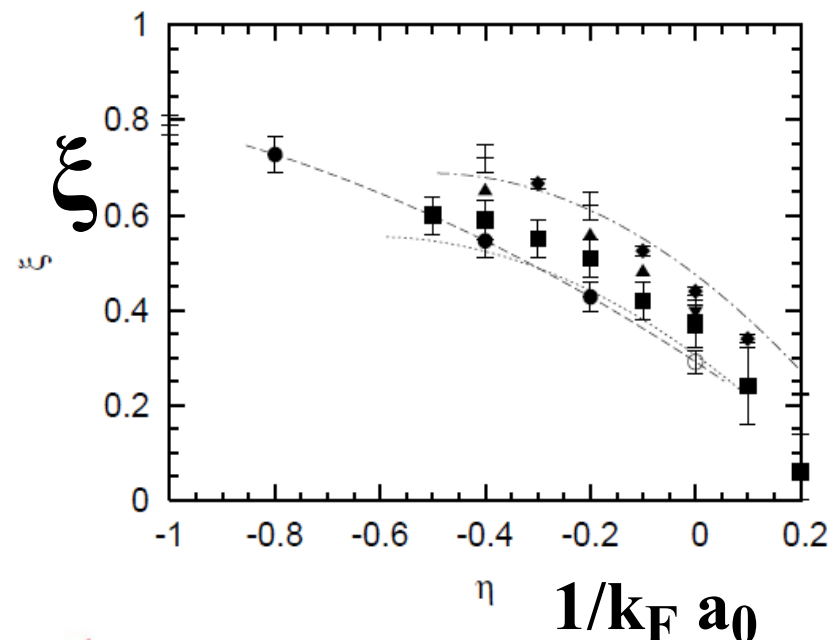
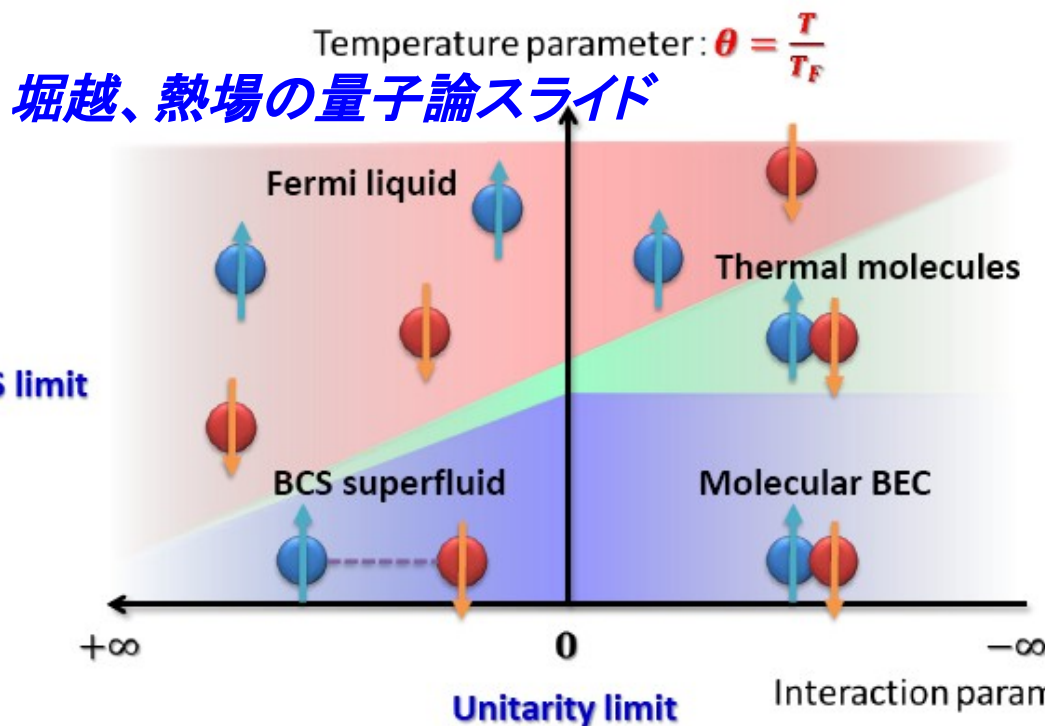
■ 中性子過剰物質物質のキーワード

= 対称エネルギー・微視的相互作用・普遍性

- 低密度純中性子物質: 第一原理計算が可能 (e.g. Abe, Seki ('09); Takano)
- 大きな散乱長 ($a_0 \sim -16$ fm) \rightarrow 中性子物質 \sim ユニタリーガス

$$E^{Unitary} = \xi E^{Free} \quad \xi \simeq 0.4 \text{ (Bertsch parameter)}$$

\rightarrow 理論計算手法のテスト、*finite* a_0 , r_{eff} を含む普遍的関数の探索



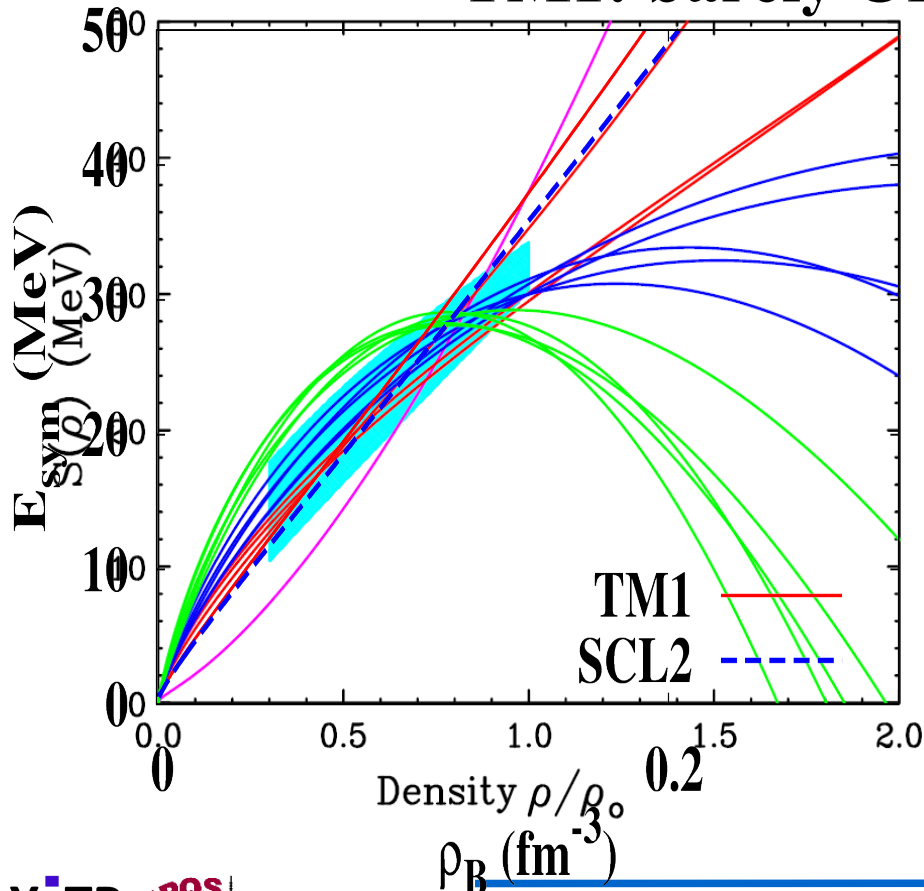
Abe, Seki ('09)

3 体力を含む RMF と対称エネルギー

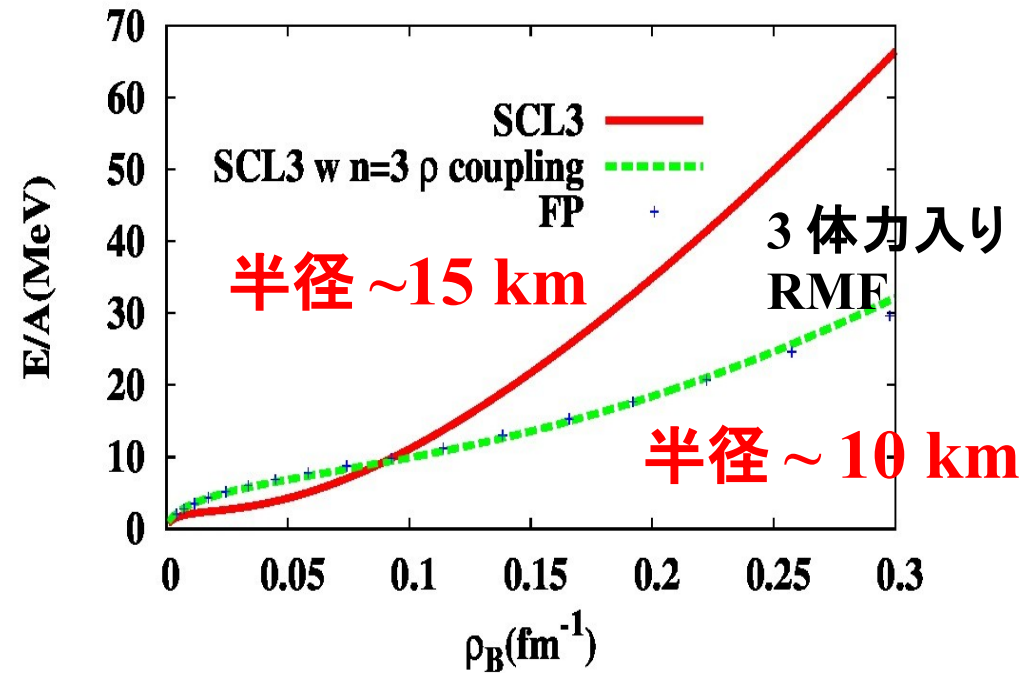
- 2 体力までであれば、対称エネルギーはほぼ密度に比例 (L=3 S)
→ 通常の RMF では高密度で大きな対称エネルギー
- ρ 中間子を含む 3 体力 → 対称エネルギーの密度依存性

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

TM1: barely OK



Pure neutron matter EOS

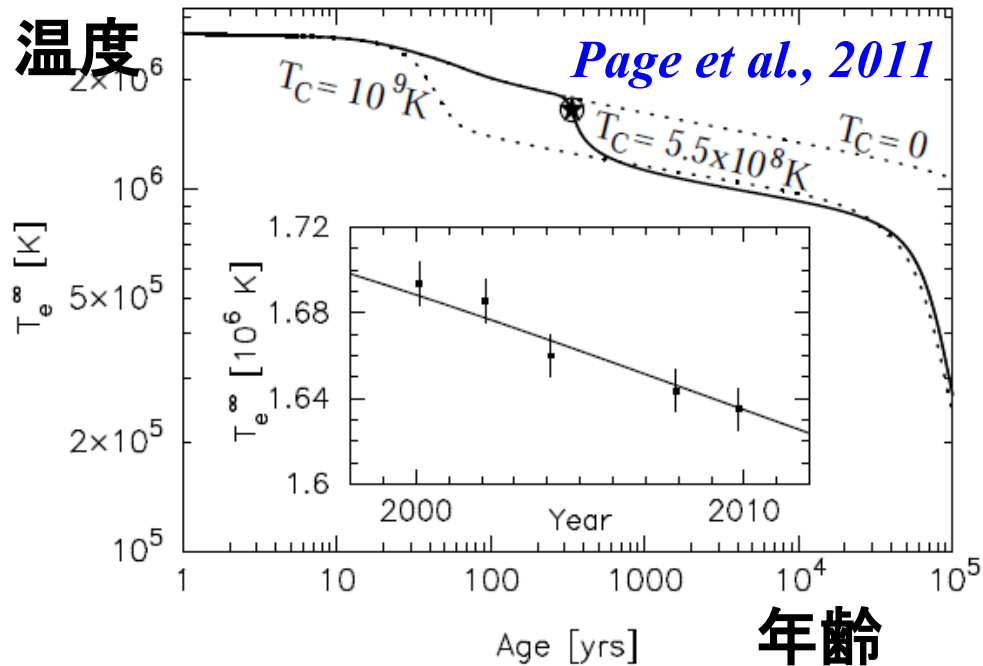
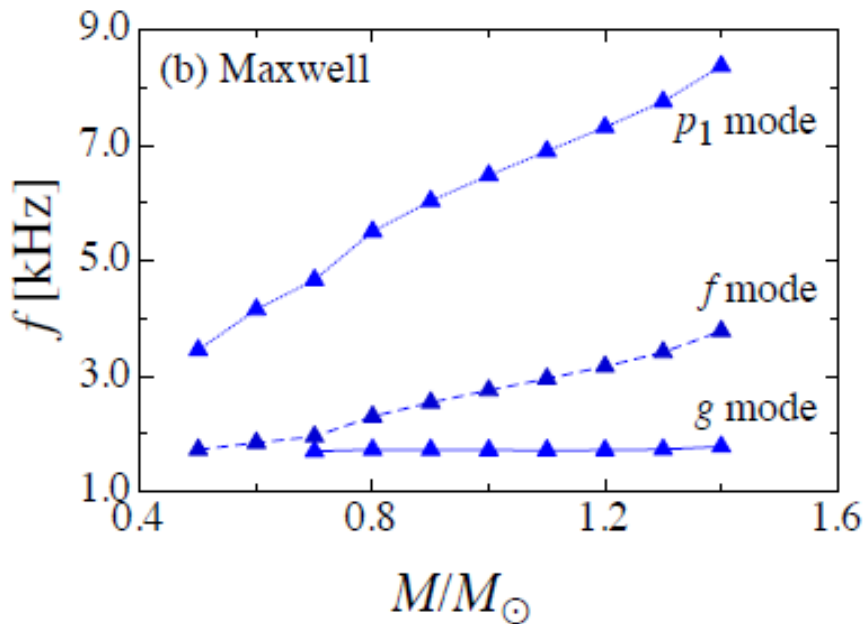
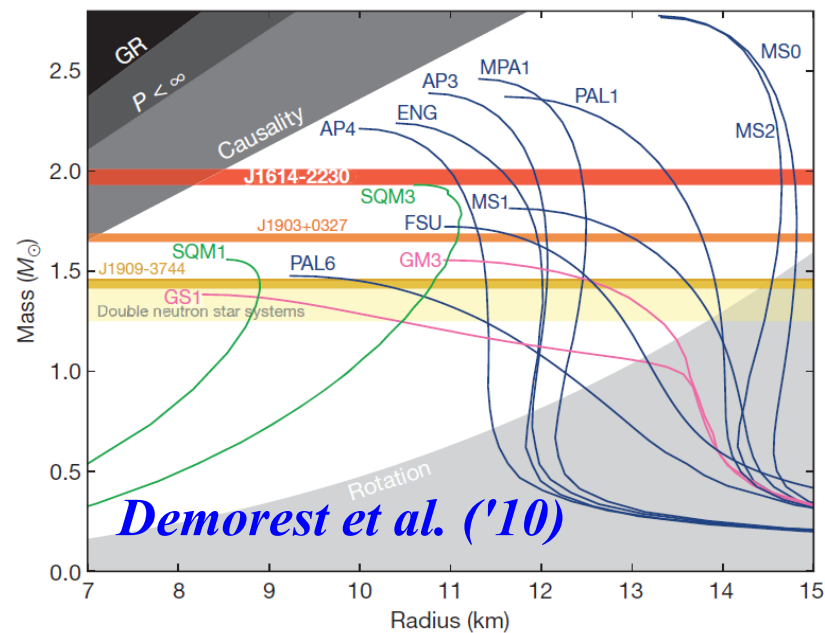


Tsubakihara, Ohnishi, Hyp2012 proc.;
FP: Friedman, Pandharipande ('81)

コンパクト天体現象

中性子星の観測量

- 質量・半径 \Leftrightarrow EOS \Leftrightarrow C01
- 表面温度 \rightarrow 対ギャップ (高塚)
- 中性子星の振動 (重力波, QPO) \rightarrow EOS (Sym. E)、パスタ、クォーク・ハドロン相転移
- 磁場、周期、....



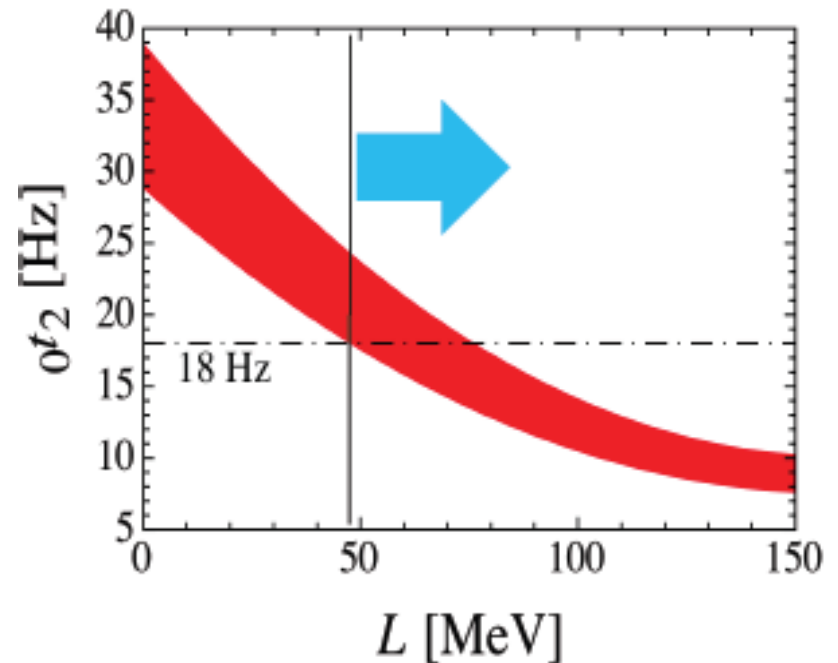
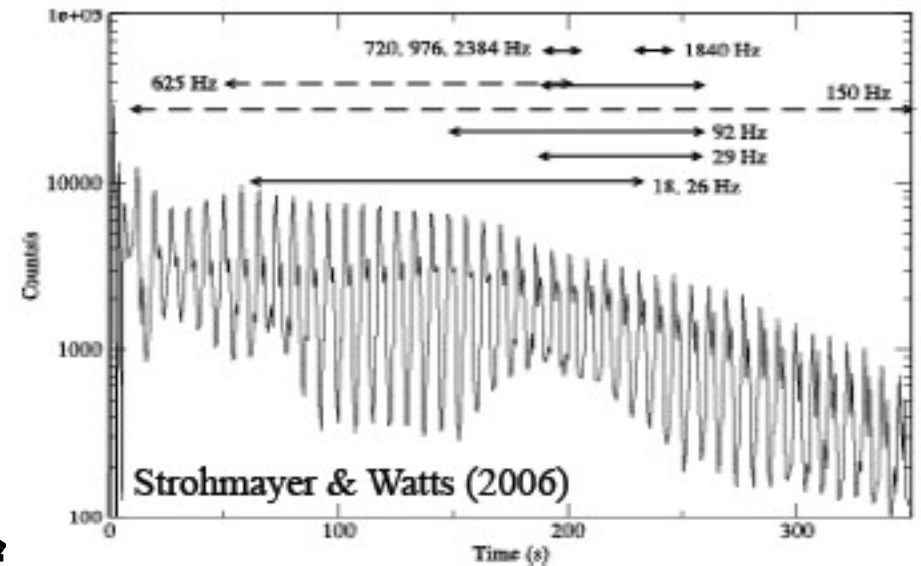
Sotani, Yasutake, Maruyama, Tatsumi ('11)

中性子星の準周期振動

- Soft Gamma-ray Repeater (SGR) の巨大フレア (3 例観測) に見られる準周期振動 (QPO)

→ クラストの torsional oscillation (ねじれ振動)
or Alfvén oscillation (磁場中の振動)

- クラストの torsional oscillation ならば、質量・半径の不定性を考えても対称エネルギーの密度依存性 (L) を制限できる

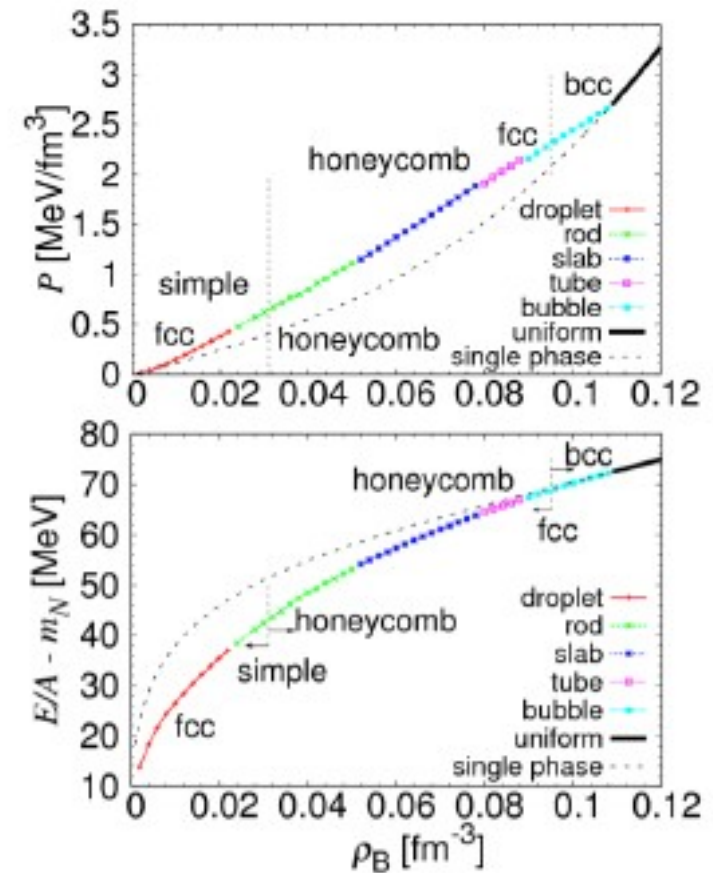


Sotani, Nakazato, Iida, Oyamatsu ('12)

中性子星現象の課題

■ 実験と観測から制限される状態方程式作成

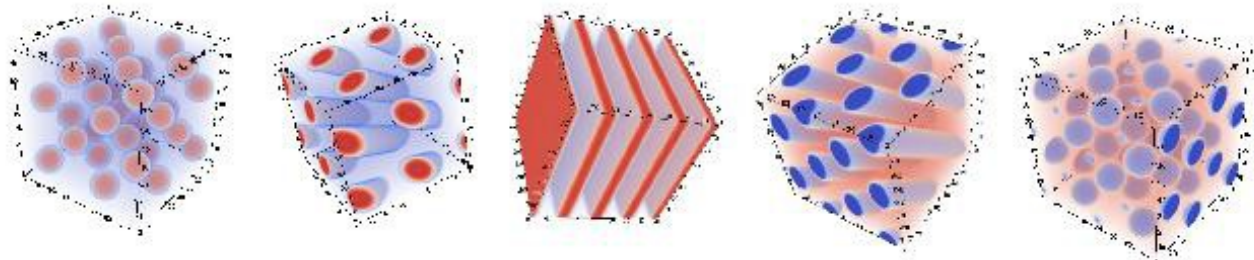
- 低密度・高密度領域の原子核実験と矛盾しない一様物質 EOS
(大西、椿原、住吉；高塚、西崎、山本、玉垣)
→ 中性子星の質量・半径と比較して選別
- 非一様性 (原子核、パスタ) を考慮した EOS
(飯田、中里、親末；巽、丸山、岡本、矢花；鷹野、住吉、...)
- クォーク物質への相転移を取り入れた EOS
(巽、丸山、祖谷、安武；益田、初田、高塚；上田、大西；阿武木、国広)



Okamoto, Maruyama, Yabana, Tatsumi ('12)

■ コンパクト天体現象の理解

- QPO (祖谷、中里、飯田、親末；柴崎、...)
- 中性子星の冷却 (高塚、西崎、山本、玉垣)



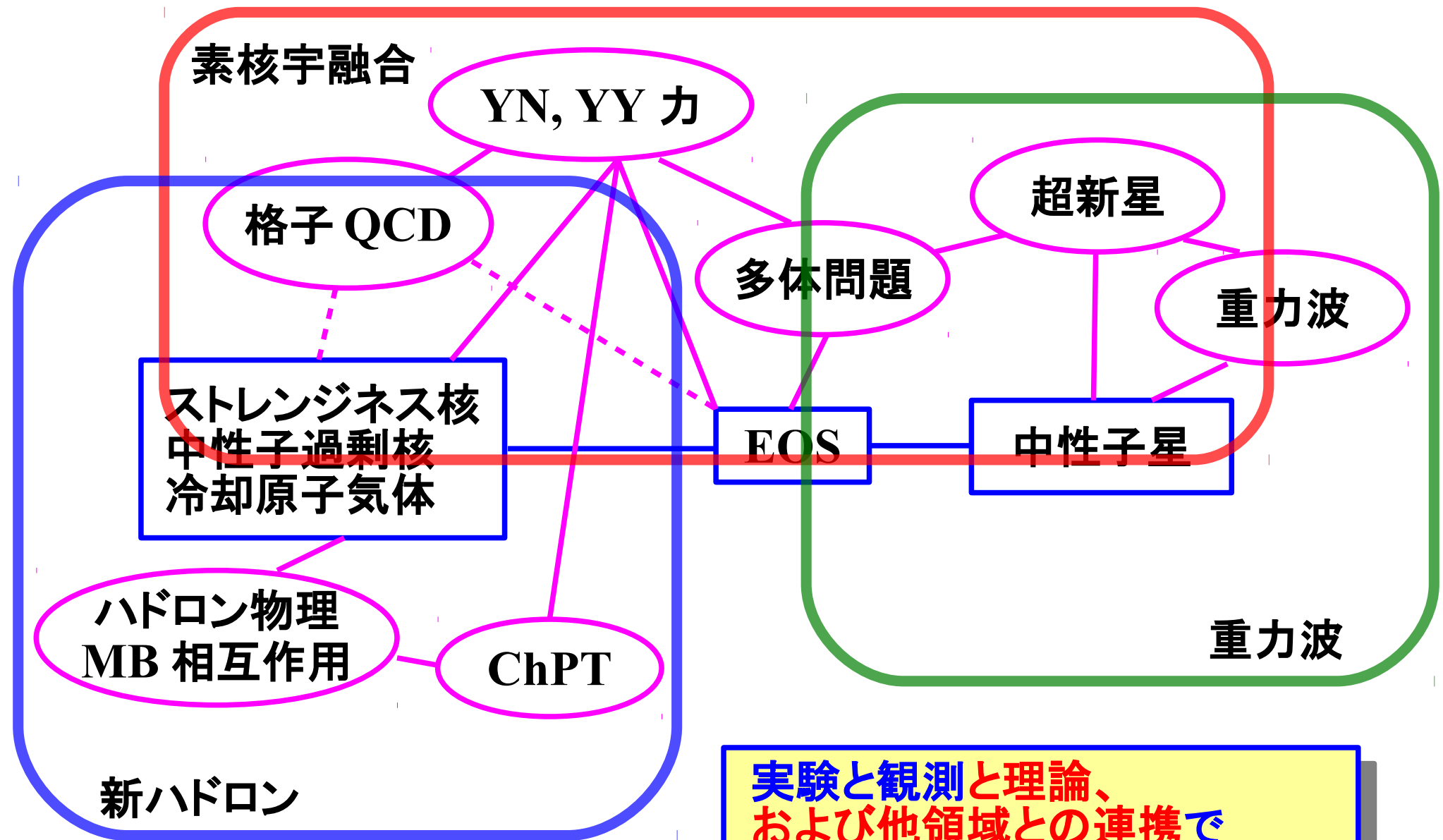
Summary

■ 中性子星物質は多体問題の宝庫

- 広い密度領域、多彩な構成子、多彩な相互作用、...
- 複数の分野で議論されてきた課題が繋がりにある。
チャンネル結合、3体力、BEC-BCS とユニタリーガス、非一様構造、...

■ 理論研究の対象

- カバーする(すべき)範囲:
原子核・冷却原子・格子・核物質・クォーク物質・コンパクト天体現象・....
→ (低温での)量子多体問題全般
- 計画班 (D01) :
ストレンジネス核・中性子過剰核の「実験」から
状態方程式を通じて、天体「観測」をつなぐ。



実験と観測と理論、
 および他領域との連携で
 解き明かす中性子星の核物質

Summary

■ 中性子星物質は多体問題の宝庫

- 広い密度領域、多彩な構成子、多彩な相互作用、...
- 複数の分野で議論されてきた課題が繋がりにある。
チャンネル結合、3体力、BEC-BCS とユニタリーガス、非一様構造、...

■ 理論研究の対象

- カバーする(すべき)範囲:
原子核・冷却原子・格子・核物質・クォーク物質・コンパクト天体現象・...
→ (低温での)量子多体問題全般

- 計画班 (D01) :
ストレンジネス核・中性子過剰核の「実験」から
状態方程式を通じて、天体「観測」をつなぐ。

- 計画班で議論できない多くのテーマがあります！
冷却現象、格子 QCD、(生の)バリオン間力、.....

素核宇連携、新ハドロン、重力波の領域の皆さん、
および関連する研究者の皆さん、
公募研究・研究員応募・研究会・共同研究などを通じて、
ご協力をお願いします！