

# 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」  
公募研究交流会

2013 年 9 月 12-13 日

- Introduction
- 中性子星物理の課題と D01 班の最近の取り組み
- Summary



# 中性子星と核物質の理論研究 (D01: 理論計画班)

## 高密度領域

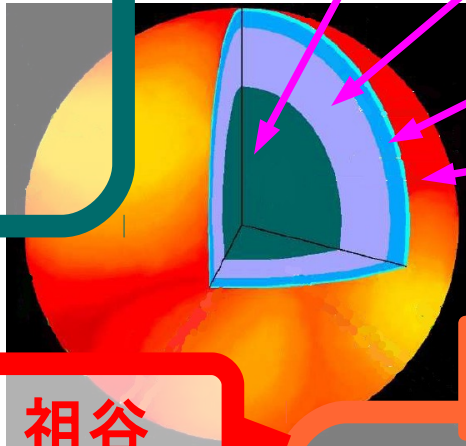
原田 (Prod.)、  
木村 (Structure)、  
土手 (Kaon Nucl.)、  
**山縣 - 関原 → 椿原**

Hyperons, mesons, quarks

Asym. nuclear matter  
+elec.+ $\mu$

Nuclei+neutron gas+elec.

Nuclei + elec.

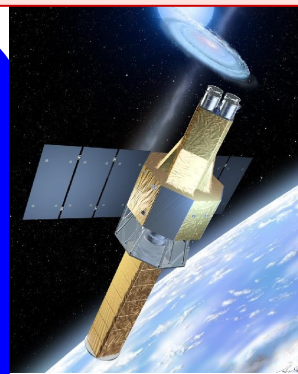


**J-PARC**



**大西、祖谷**

**ASTRO-H**



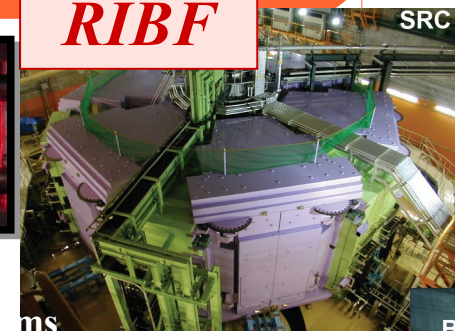
## 天体現象

飯田 (Phen.)、  
巽 (Quark)、  
中里 (Pasta)、  
**石塚**

## 低密度領域

中田 (Sym.E)、  
松尾 (EOS)、  
小野 (HIC)、  
**稲倉**

**RIBF**



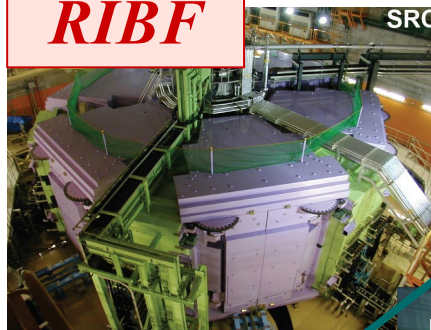
連携: 国広、西崎、親松、丸山、阿武木、大橋、柴崎、中務

# 中性子星物質状態方程式

対称エネルギーの  
密度依存性

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

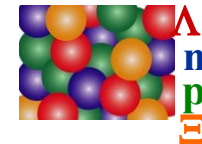
**RIBF**



**J-PARC**

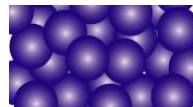


ハイペロン物質



ハイペロンによる  
EOS 軟化

中性子物質



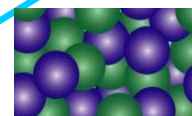
**Cold Atom**



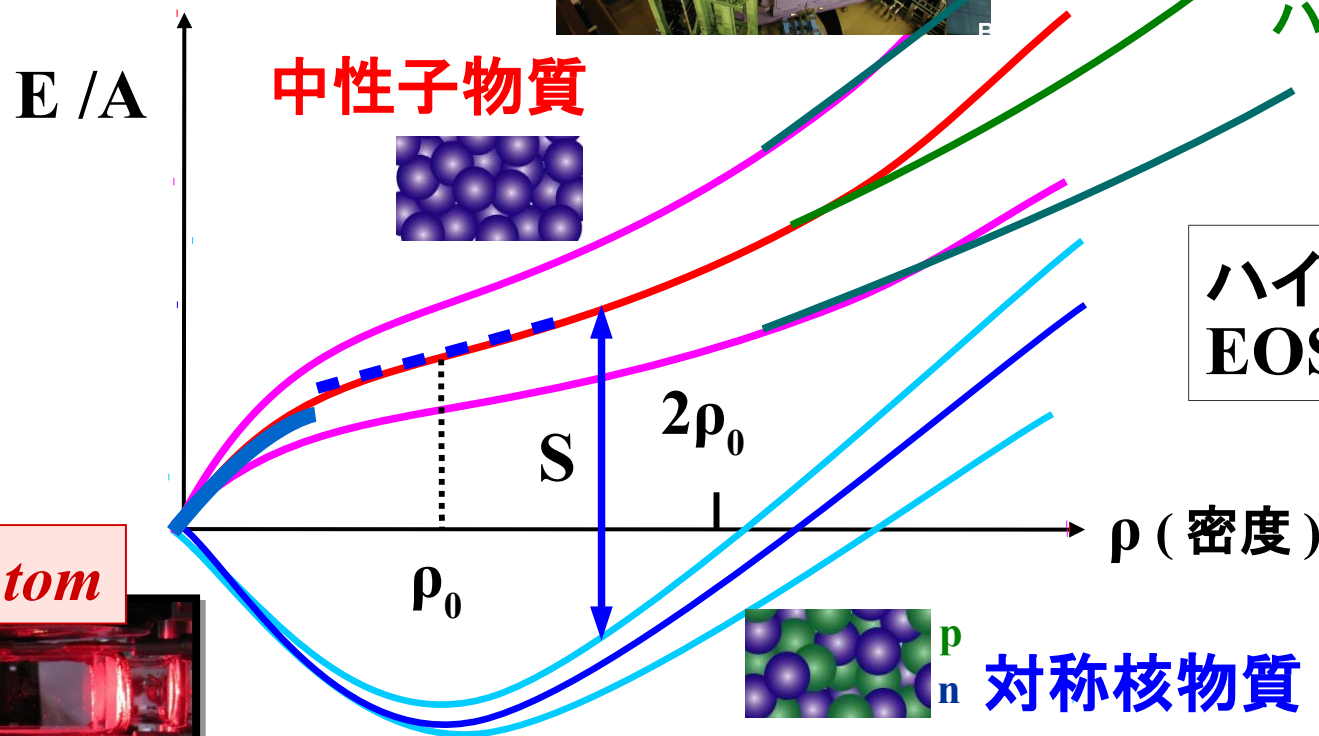
希薄中性子物質  
～ユニタリー気体

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

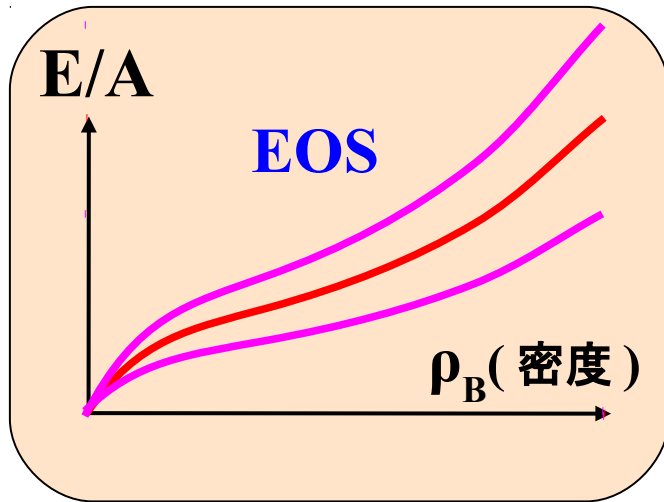
$$\xi \simeq 0.4 \text{ (Bertsch parameter)}$$



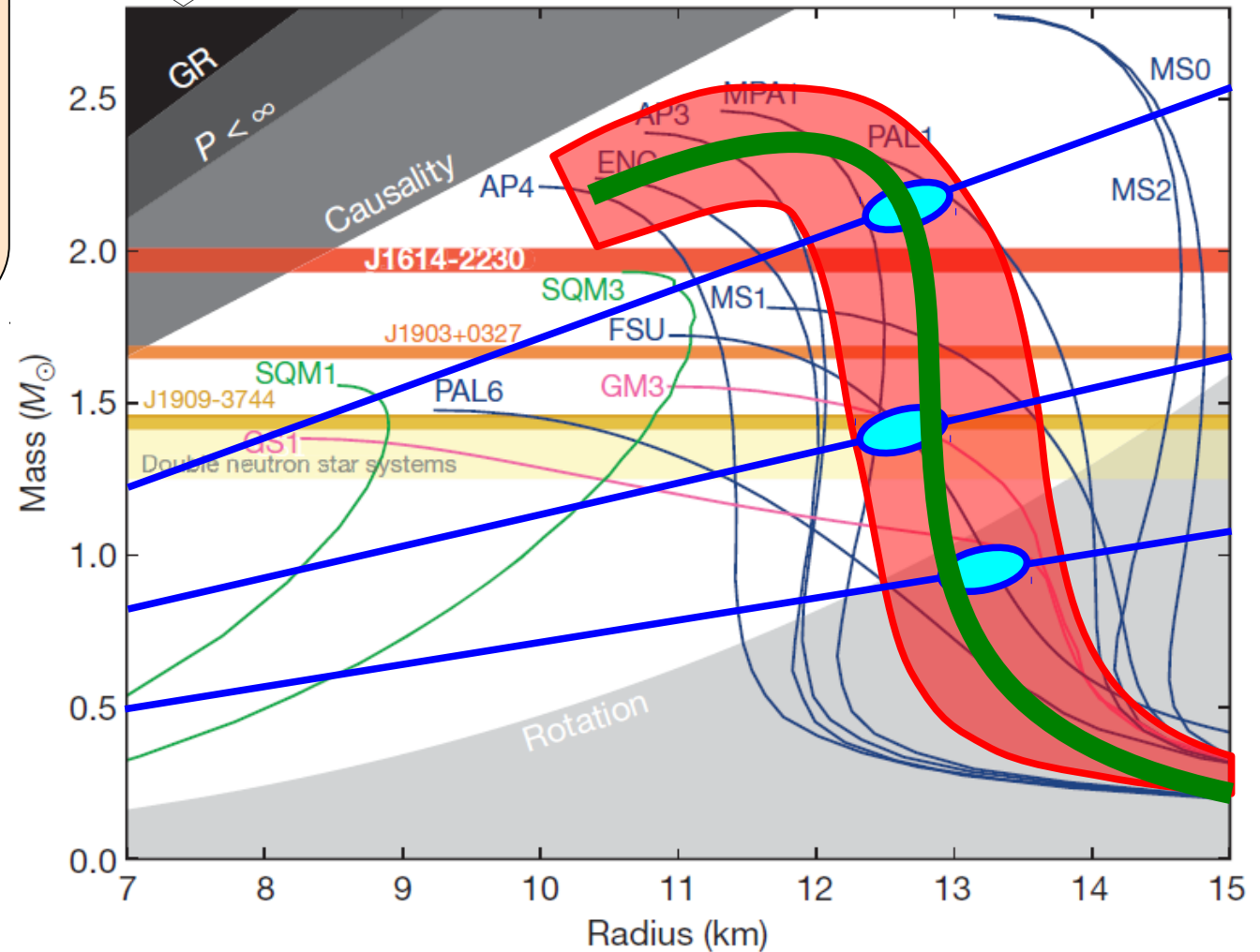
対称核物質



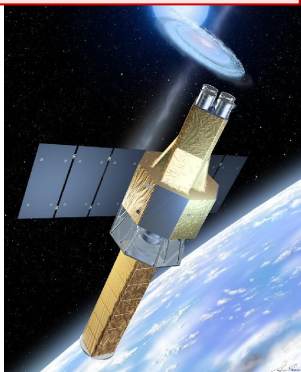
# 中性子星の質量と半径



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 → 椿原**

*J-PARC*

Hyperons, mesons, quarks

Asym. nuclear matter  
+elec.+ $\mu$

Nuclei+neutron gas+elec.

Nuclei + elec.

大西、祖谷

*ASTRO-H*

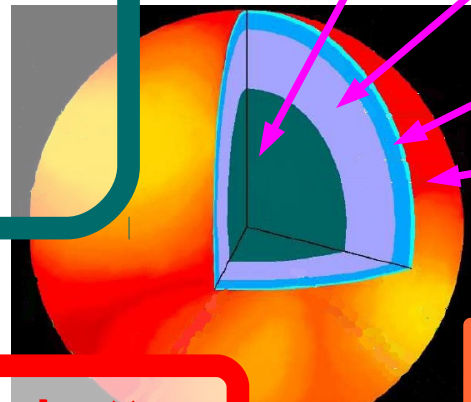
## 天体現象

飯田 (Phen.)、  
巽 (Quark)、  
中里 (Pasta)、  
**石塚**

## 低密度領域

中田 (Sym.E)、  
松尾 (EOS)、  
小野 (HIC)、  
**稲倉**

*RIBF*



連携: 国広、西崎、親松、丸山、阿武木、大橋、柴崎、中務 (B)

## ■ 計画研究

- 代表:大西、特定研究員:祖谷
- 高密度中性子星物質
  - ◆ 分担:原田、木村、土手、研究員:山縣関原 → 椿原
- 低密度中性子星物質
  - ◆ 分担:中田、松尾、小野、研究員:稻倉
- 天体現象
  - ◆ 分担:飯田、巽、中里、研究員:石塚
- 連携研究者
  - ◆ 国広、西崎、親松、丸山、阿武木、大橋、柴崎、中務 (B)
  - ◆ 2013 年度より追加  
山本安夫 (理研)、高塚龍之 (岩手大)、河野通郎 (九州歯科大)、  
宮川貴彦 (愛知教育大)、武藤巧 (千葉工大)、  
住吉光介 (沼津高専)、佐川弘幸 (会津大)

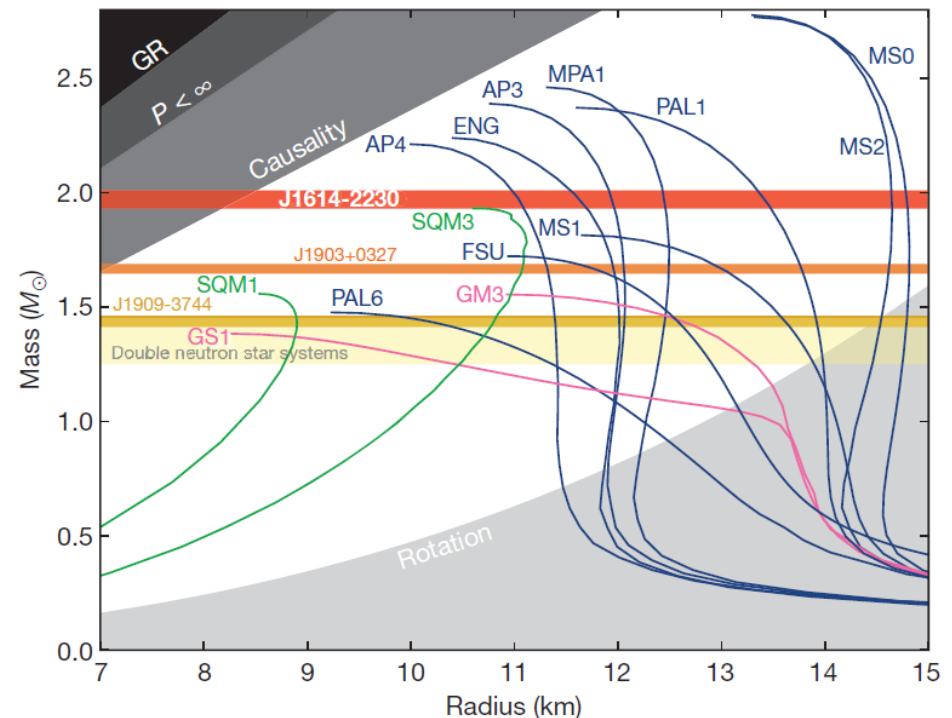
## ■ 公募研究代表者

- 安武、萩野、木内、大橋、根村

# 中性子星物理の課題と *D01* 班の取り組み

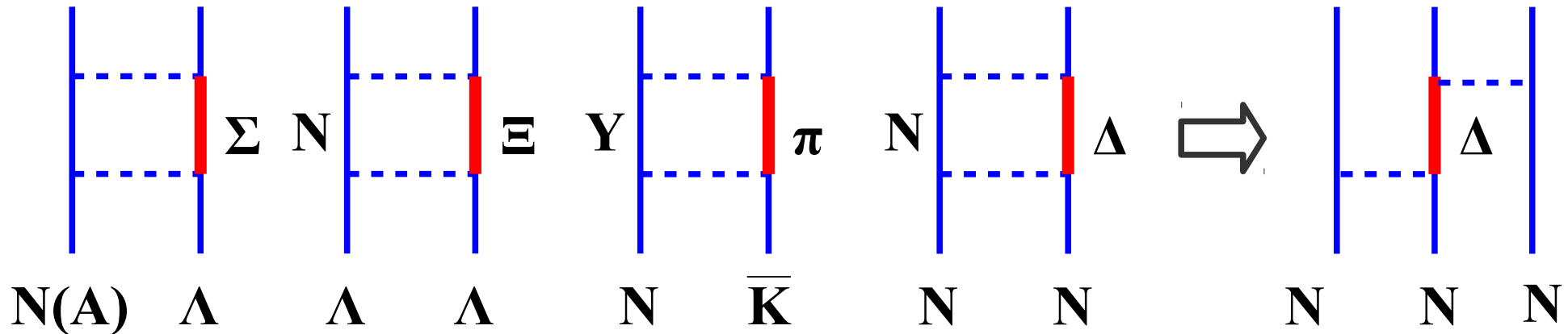
# 高密度領域の課題

- 大きな課題: Massive Neutron Star Puzzle を解決すること
- 矛盾する2つの観測・実験事実をどう解決するか?
  - 重い中性子星の発見 → 核子以外のハドロン自由度の抑制  
*Demorest et al., Nature 467 (2010) 1081 (Oct.28, 2010).*  
PSR J1614-2230 (NS-WD binary),  $1.97 \pm 0.04 \text{ Msun}$
  - ハイパー核物理からの推測 →  $(2-4) \rho_0$  の密度でのハイペロンの発現



# 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 → 3 体力

→ 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 相互作用の研究から、  
(あらわな 3 体力を含む) 多体理論を援用して EOS へ

# 高密度中性子星物質: D01 班の取り組み

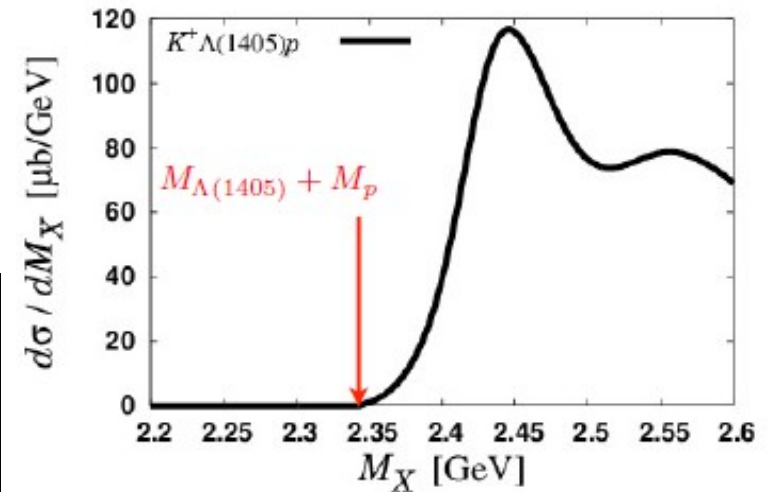
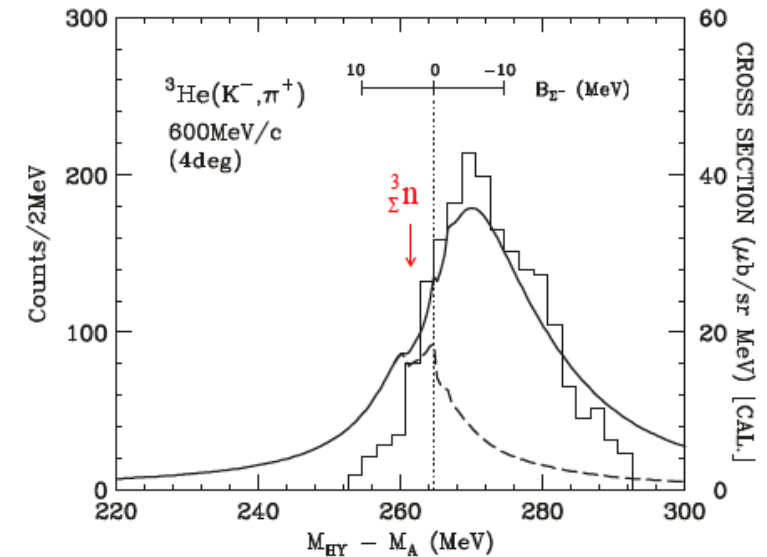
## ■ チャンネル結合・3 体力効果 → まずは少数系から

- ${}^3\text{He}(\text{K}^-, \pi^+) {}^3_{\Sigma}\text{n}$  Harada et al.
- $\text{d}(\pi^+, \text{K}^+) \text{K}^+\text{pp}$   
Yamagata-Sekihara et al.; Dote et al.

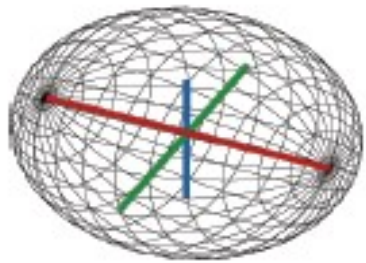
## ■ 原子核の変形をハイペロンで調べる

- Triaxial def. of  ${}^{25}_{\Lambda}\text{Mg}$   
Isaka, Kimura, Dote, AO

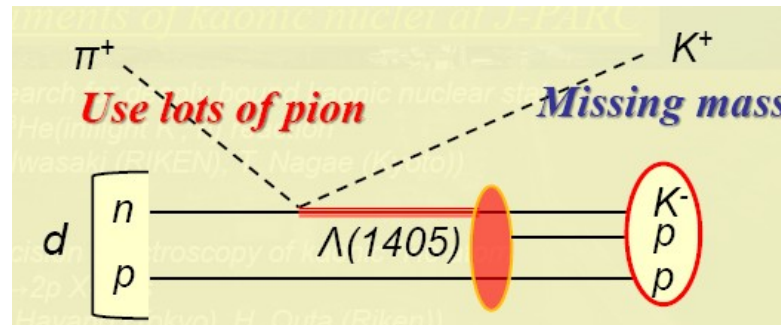
## ■ 陽な3 体力を含む RMF Tsubakihara et al.



$$M_{\Lambda(1405)} = 1405 \text{ MeV}$$



Triaxial deformation



# 低密度領域の課題

- 大きな課題: クラスト領域の状態方程式・組成を定め、  
” Compact NS & Cooling puzzle ” への核物理からの解答を与える！

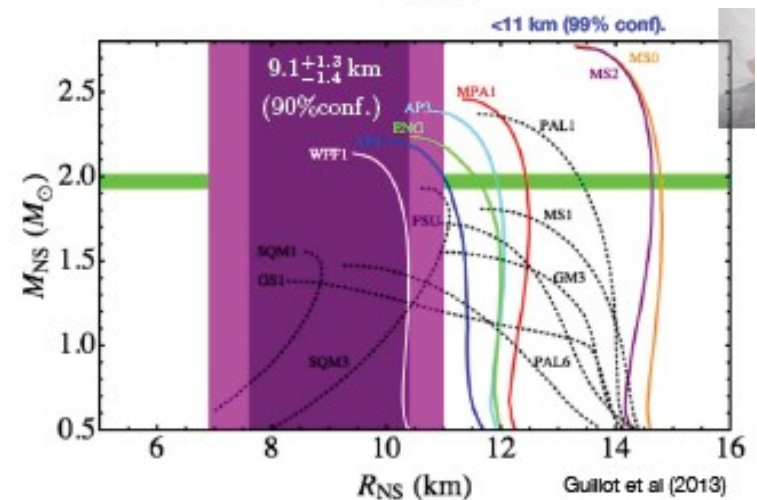
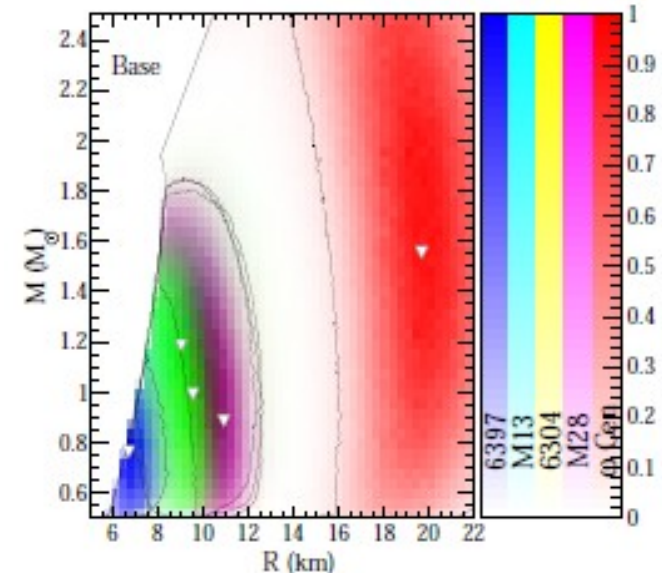
- Compact NS “Puzzle”

*Lattimer, Steiner (2013); Guillot et al. (2013)*

- X-ray bursts の観測結果から半径・質量を推定  
中性子星の半径は 9 km 程度  
→ 現在までに提案されているほとんどの  
EOS を棄却

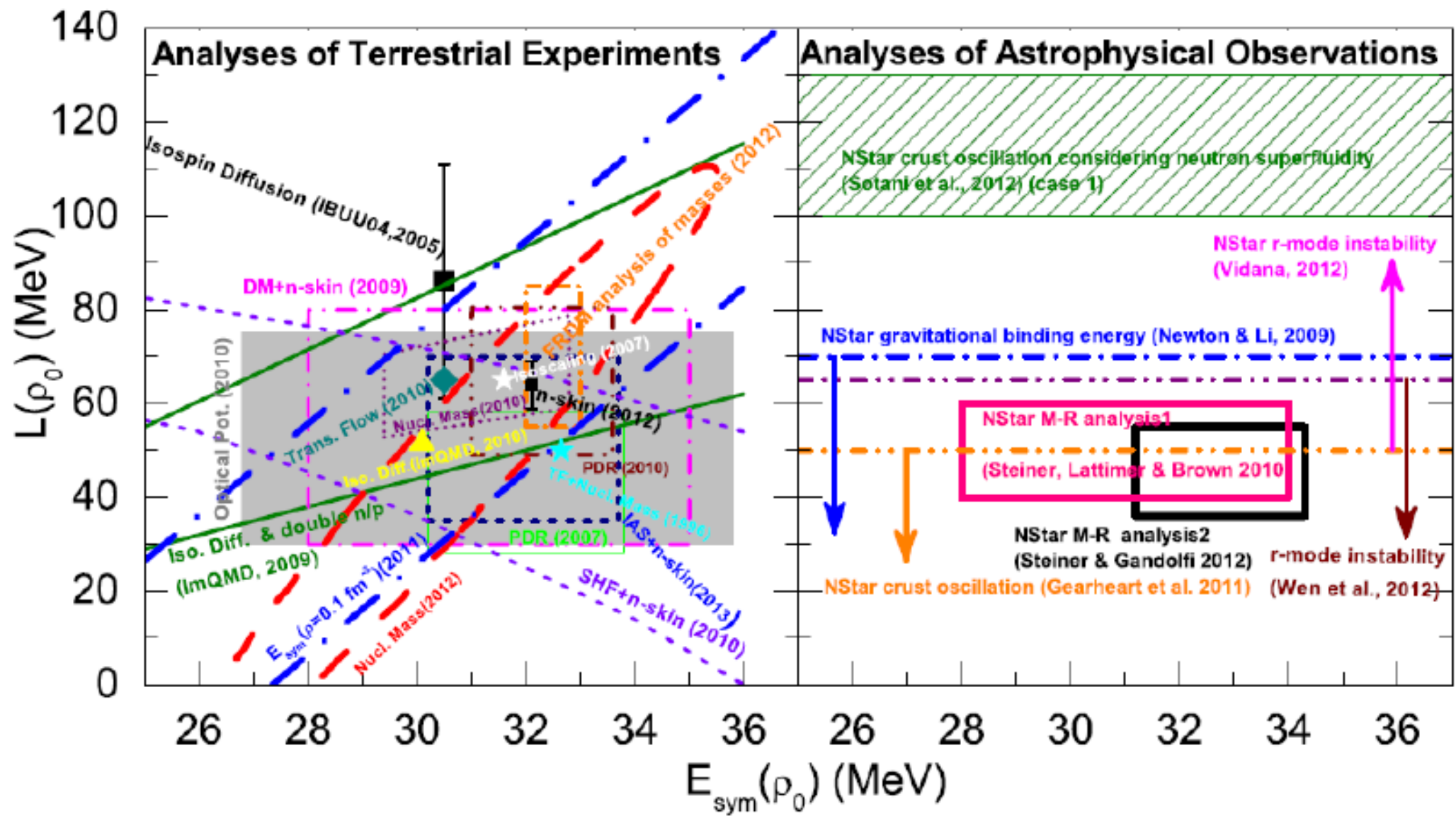
WFF: Wiringa, Fiks, Fabrocini (1988)

- 中性子星の半径は対称エネルギーの  
密度依存性 ( $L$ ) に強く依存  
→ 高密度で対称エネルギーは  
小さいのか？



NS ~ Almost causal limit object ?

Thanks to the hard work of many of you, your postdocs and students as well as supports of your funding agencies



# 低密度中性子星物質: D01 班の取り組み

## ■ 半微視的 EOS

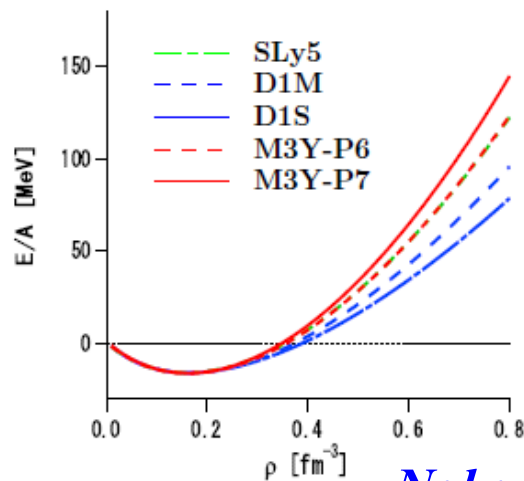
G-matrix based eff. int. + 現象論的調整

*Nakada (2013)*

## ■ 励起スペクトルから対称エネルギーへ

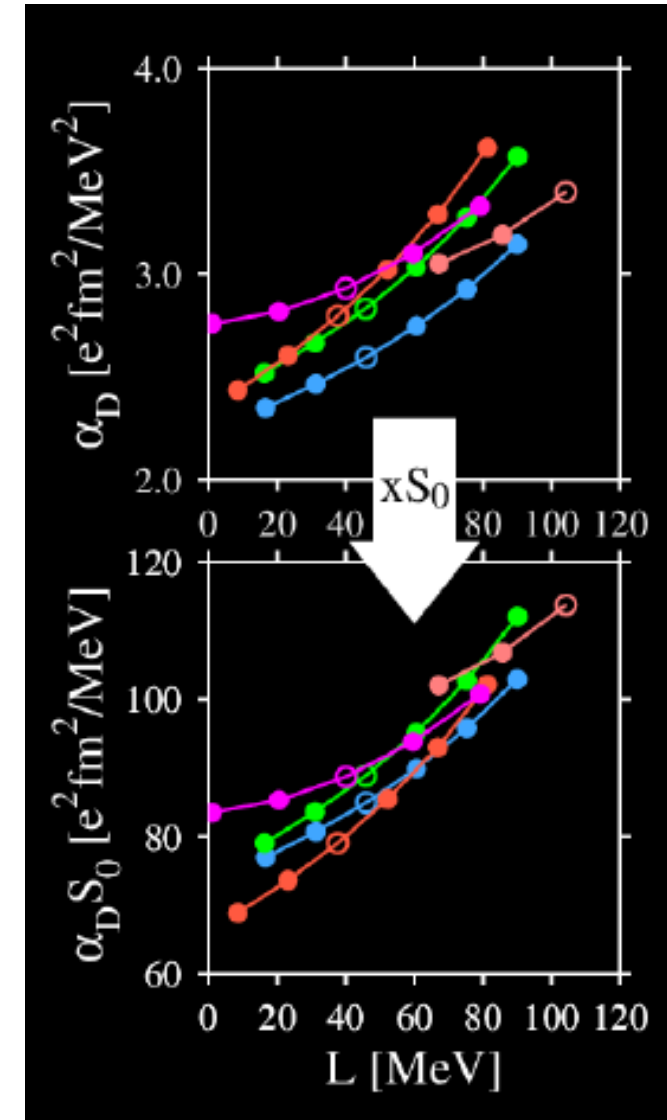
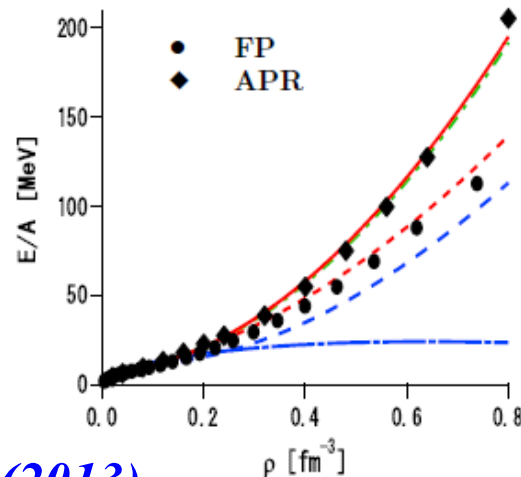
Inakura et al. (2013, in prep.)

symmetric nuclear matter



*Nakada (2013)*

neutron matter

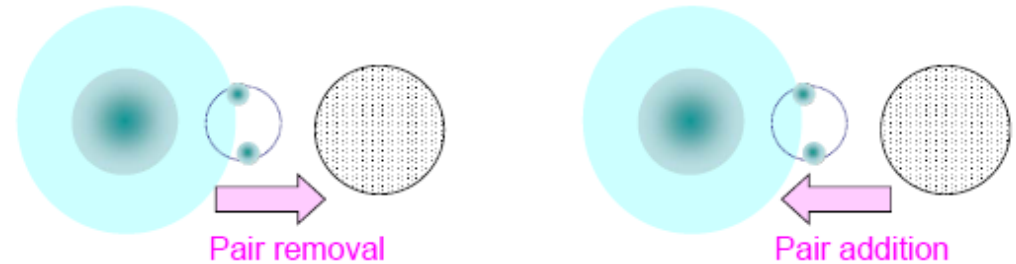


*Inakura et al. (2013)*

# 低密度中性子星物質: D01 班の取り組み

- Pairing functional を用いた対励起・BEC-BCS crossover の研究  
Shimoyama, Matsuo et al.

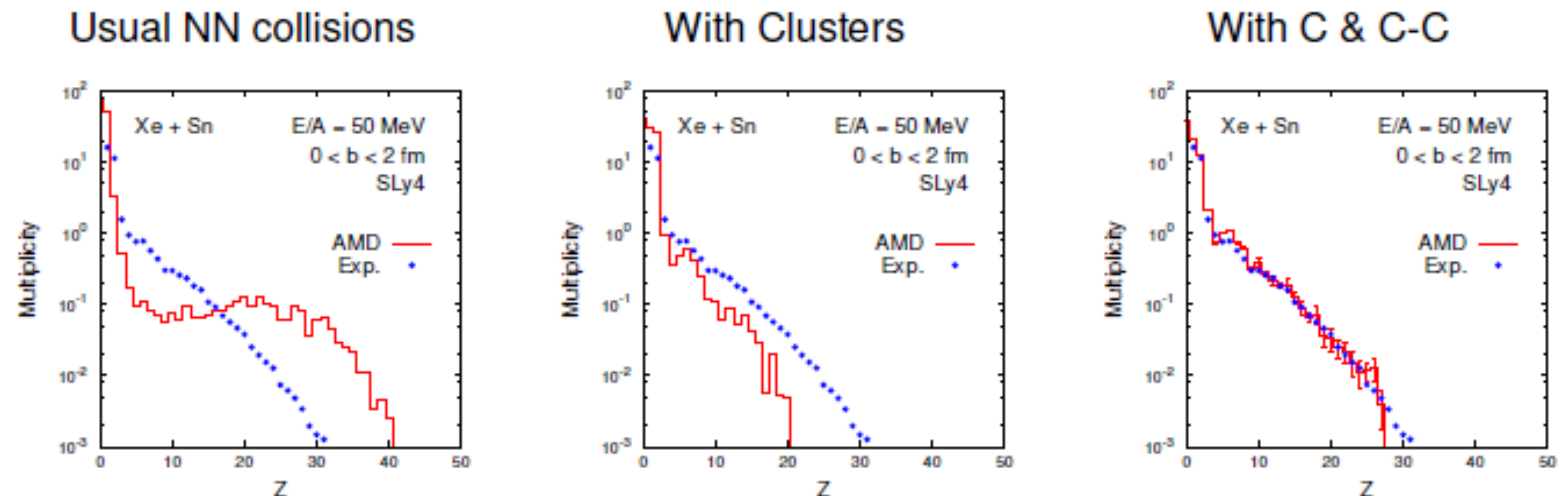
*Pair transfers in neutron-rich nuclei*



Pair transfer process, for Sn isotopes,  $^{132}\text{Sn}$ ~

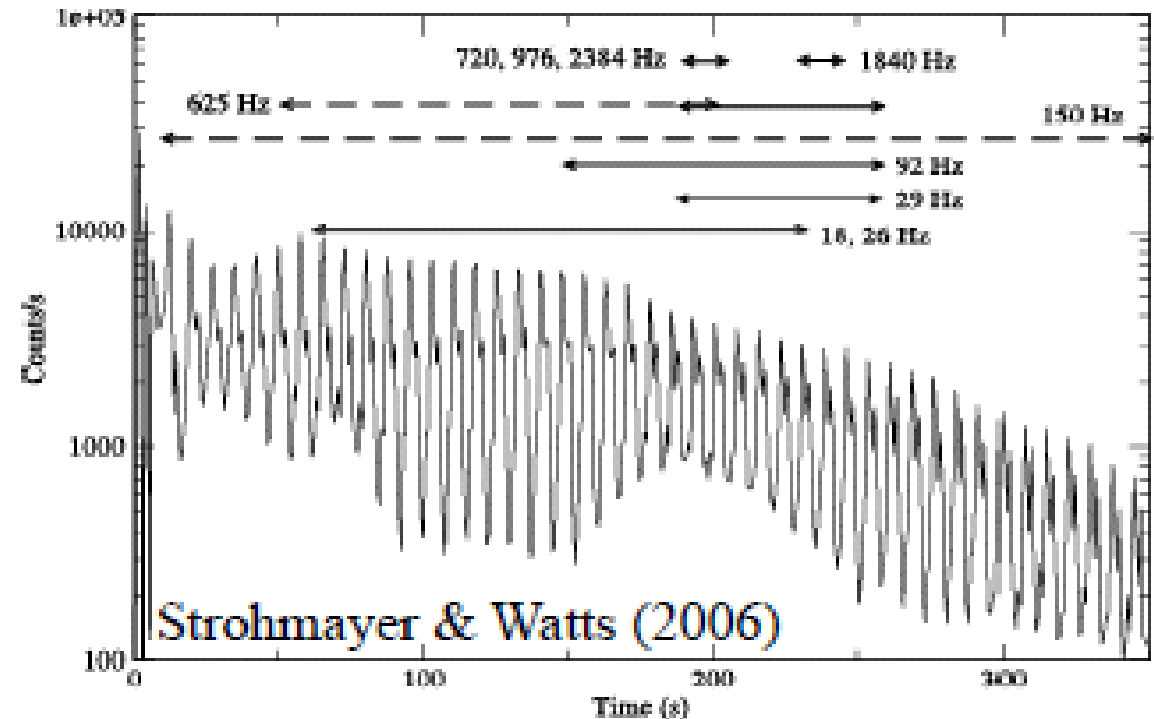
*Anomalous  $0^+$  state, a new kind of pair vibration*

- 重イオン反応からのフラグメント生成と対称エネルギー  
Ono et al.



# 中性子星天体現象の課題

- 大きな課題： 状態方程式に敏感な天体現象を見出し、  
(新たに) 観測データから EOS への制限を提言する！  
& クォーク物質生成の可能性を探る。
- Quasi-periodic oscillations (QPOs) in afterglow of giant flares  
from soft-gamma repeaters (SGRs)  
→ 中性子星の振動



# watermelon

- how to find the best watermelon in supermarket ?
- how to know the best time to eat a watermelon ?
  - inside can not be checked before cutting
- “empirical rule”
  - to check the best time, knock a watermelon
    - high frequency “KIN-KIN” ; too young
    - “BAN-BAN” ; best time !
    - low frequency “BON-BON” ; too old
  - need many years to get this ability
- one could see interior with specific sound from object.
  - asteroseismology !!



# 中性子星天体現象: D01 班の取り組み

## ■ 中性子星の振動

Sotani, Nakazato, Iida, Oyamatsu  
(2012,2013)

$101 \text{ MeV} < L < 131 \text{ MeV}$

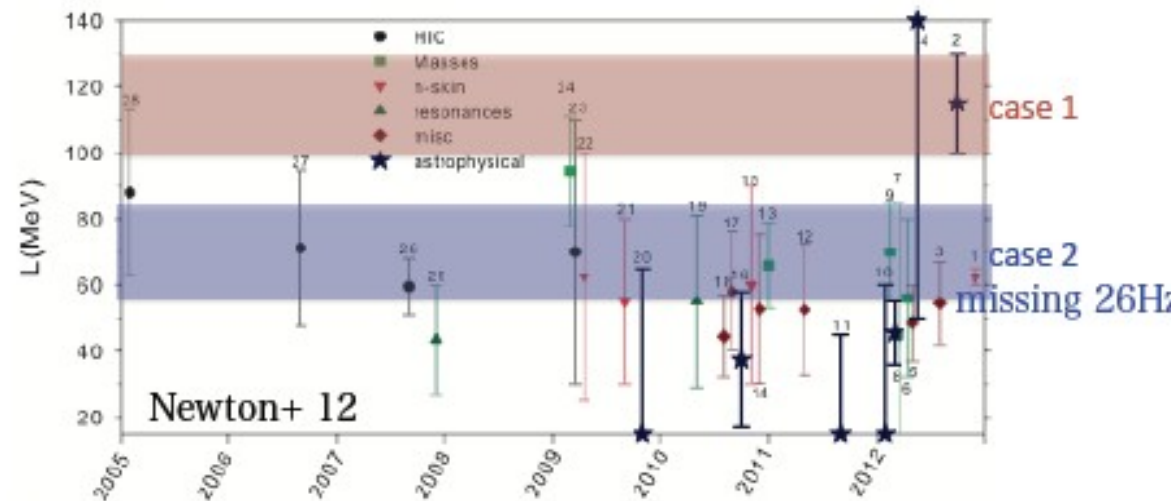
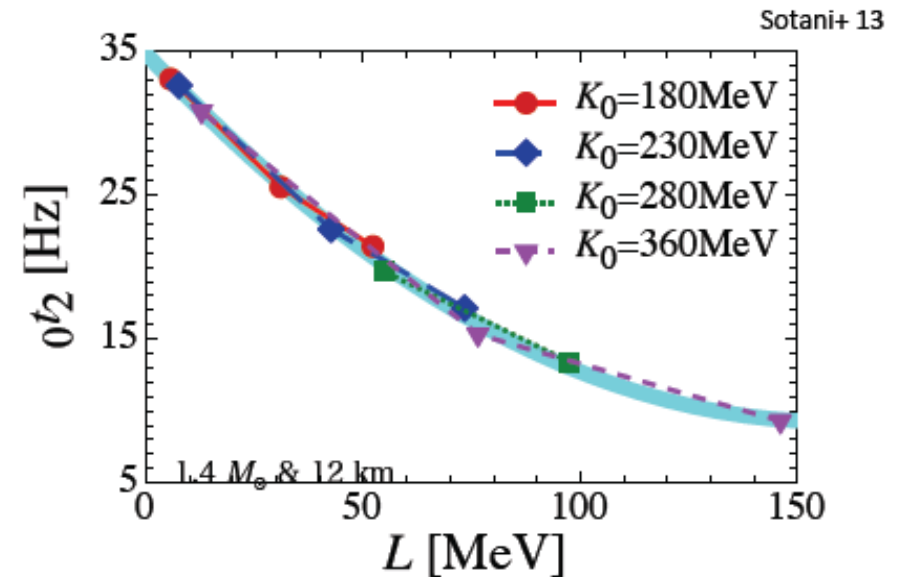
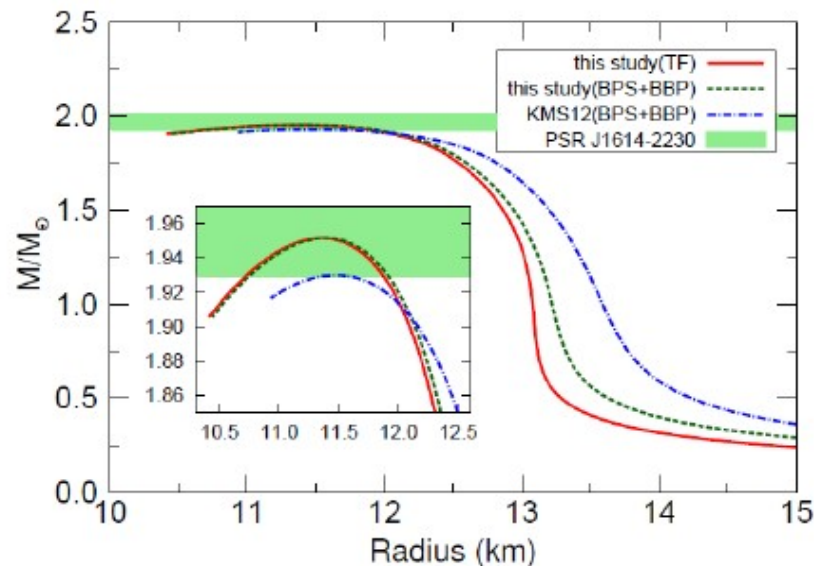
or  $58 \text{ MeV} < L < 85 \text{ MeV}$

## ■ クラスト状態方程式の再考察

Miyatsu, Yamamuro, Nakazato

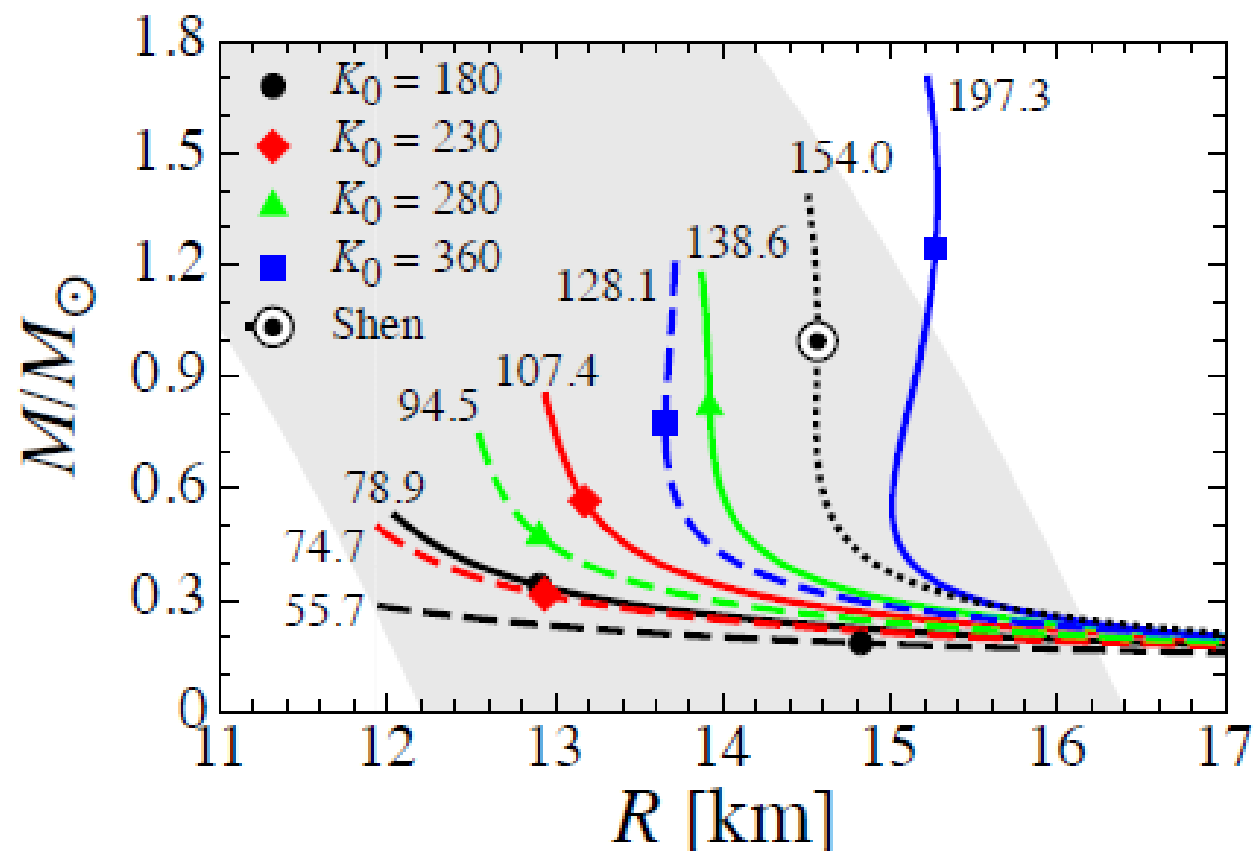
## ■ 非一様凝縮 Tatsumi et al.

## ■ 状態方程式データベース Ishizuka et al.



## Very recent work

- 中性子星の M-R relation に、  
非圧縮率 ( $K$ ) と対称エネルギーの密度微分 ( $L$ )  
のどちらがどの程度大切か？  
→  $\eta = (KL^2)^{1/3}$  で整理可能 (low mass neutron star の場合)  
Sotani, Iida, Oyamatsu, AO (to be submitted)



# Summary

## ■ 理論計画班

→ 実験データと観測データから、中性子星物質状態方程式を制限

- 大目標 = 核物理入力とM-R 曲線から1本のEOSを得る！
- 高密度中性子星物質、低密度中性子星物質、中性子星天体現象の3つの方向からのアプローチ
- それぞれの現象については、理解・予測（データ待ち）が進んでいる。統合的理解、第一原理的理解はまだまだ。

## ■ 公募研究との協力

- 第一原理からの理解、  
フェルミオン多体系状態方程式の普遍的性質、  
M-R relation や QPO 以外の現象、  
中性子星の多次元内部構造と非線形ダイナミクス  
→ 状態方程式のより確かな制限と中性子星物理の広がり

■ Notice: Int. Symp. on “Neutron Star Matter in view of  
nuclear experiments and astronomical observations”,  
YITP, Kyoto, Japan, Oct. 25, 2013.

よろしくお願いします！

**EOS<sub>PNM</sub> provides a theoretical boundary condition to calibrate the EOS of asymmetric matter**

