

#### 京大基研 大西 明 Akira Ohnishi (YITP, Kyoto Univ.)

- 中性子星パズル
- 新学術領域
   「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」

   A)高密度中性子星物質とストレンジネス核物理 (J-PARC)
   B)低密度中性子星物質と中性子過剰核・冷却原子 (RIBF)
   C)新しい天体観測による半径測定 (ASTRO-H)
- まとめ

九州大学談話会 2014/7/9





*Ohnishi* (a) *Kyushu U., 2014* 1

#### Crab Nebula SN1054 (e.g. Meigetsu-ki, Teika Fujiwara) Crab pulsar (PSR J0534+2200), discovered in 1968.

π, ŀ

pasta

**Hubble space telescope** 

## **Basic properties of neutron stars**

- Mass:  $M = (1-2) M_{\odot} (M \sim 1.4 M_{\odot})$
- Radius: 5 km < R < 20 km (R ~ 10 km)</p>
- Supported by Nuclear Pressure c.f. Electron pressure for white dwarfs
- Cold enough (T ~ 10<sup>6</sup> K ~ 100 eV) compared with neutron Fermi energy.
- Various constituents (conjectured) n, p, e, μ, Y, K, π, q, g, qq, ....





Ohnishi @ Kyushu U., 2014 3

# 中性子星の組成・MR 曲線と状態方程式







#### Massive Neutron Star Puzzle

2.5

■ 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<sub> $\odot$ </sub>

- ◎ 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





Ohnishi @ Kyushu U., 2014 5

Strange Hadron を含む EOS

MS0

15

#### **Compact Neutron Star Puzzle**

- X-ray from Quiescent Low-Mass X-ray Binaries
  - 低質量の伴星をもつ中性子星からの X 線データの解析
  - いくつかの仮定(水素大気、低磁場、等方放射)
  - 選んだ中性子星の質量が同じとした fit





How can we solve Neutron Star Puzzles

- 中性子星パズル
  - 重い (~ 2 M<sub>o</sub>) 中性子星パズル
     核子以外のハドロンを考慮すると中性子星が支えられない!
  - コンパクト (~9 km) 中性子星パズル
     既存の状態方程式では 12 km 程度の半径!
- パズルを解くには?
  - 重い中性子星パズル ハイペロンを含む相互作用のより正確な理解
     → J-PARC 実験
  - ■コンパクト中性子星パズル 広い密度領域における対称エネルギーの理解 → RIBF 実験
    - + モデル・仮定によらない中性子星半径測定
    - → ASTRO-H による観測

実験と観測で解き明かす中性子星の核物質











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的状態方程式 Glendenning, Moszkowski ('91)
    - 相対論効果を含めても、ωA 結合 ~(ωN 結合) x (2/3) とすると、1.97 M ⊙ 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 Masuda, Hatsuda, Takatsuka ('13)



8 + 1

8

8



1.5

# Universal Three-Baryon Repulsion

- "Universal" 3-body repulsion is necessary to support NS. Nishizaki, Takatsuka, Yamamoto ('02)
- Mechanism of "Universal" Three-Baryon Repulsion.
  - "σ"-exchange ~ two pion exch. w/ res.
  - Large attraction from two pion exchange is suppressed by the Pauli blocking in the intermediate stage. *M. Kohno ('13)*





"Universal" TBR

- Coupling to Res. (hidden DOF)
- Reduced " $\sigma$ " exch. pot. ?

How about YNN or YYN ?



**Ch-EFT EOS** 

#### Phen. models need inputs from Experimental Data and/or Microscopic (Ab initio) Calc.

#### Recent Ch-EFT EOS is promising ! NN (N3LO)+3NF(N2LO)

WA INSTITUTE FO



M. Kohno, PRC 88 ('13) 064005

**Three-Baryon Repulsion with Hyperons** 

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

# $\begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} & \Delta & N & \Delta & N & \Sigma & N & \Xi & Y & \pi \\ \hline N & N & N & N & N & N(A) & \Lambda & \Lambda & \Lambda & N & \overline{K} \end{array}$

■ チャネル結合+パウリ原理 → 3 体力 「棄却された EOS」(simple な RMF)に含まれていない効果

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 へ





#### By Takahashi (A01)







*Ohnishi* (a) *Kyushu U., 2014* 16

どのようなEOS ならコンパクトな中性子星が作れるか?

- WFF1: Guillot et al.('13) と無矛盾な EOS Wiringa, Fiks and Fabrocini, PRC 38('88)1010
  - 対称エネルギーの特異な密度依存性 高密度でもうー度立ち上がる





# Updated Constraints from NuSYM13



#### By Murakami (B01)

#### Prediction of Bao-An Li NPA 708 (2002) 365



# How to determine the EOS? ---Projects of B02

□S(ρ) : S<sub>0</sub>, L(pressure), K<sub>sym</sub>(Incompressibility)
← Collective Motion of Neutron-rich Nuclei

Pygmy Dipole Resonance (E1)

Breathing Mode (E0)

Y.Togano, M. Shikata, CATANA→ PDR of <sup>52</sup>Ca,

PDR Approved (Grade-A) by PAC in Dec.2013 !

□Superfluidity ←Dineutron correlation in low-dense matter



Core

n-skin

Coulomb Breakup of 2n Halo 22C and 19B

Done at SAMURAI, 2012.

Analysis: R.Minakata,S.Ogoshi,J.Tsubota

#### □S(ρ) ← Nuclear force

(density dependence, isospin dependence, 3N/4N force)

← tetra neutron, exotic nucleonic system 4n 26, 28 S.Shimoura 4n exp at SHARAQ Done, Next-generation N-array Kondo: <sup>26</sup>O, Done at SAMURAI, 2012, <sup>28</sup>O exp Approved by PAC (Grade-S) Sekiguchi 3N/4N force

#### □S(ρ)←Bulk Property

heutron skin thickness(Tamii,Togano),masses (Yamaguchi)

## By Nakamura (B02)

#### フェルミ超流動の実現と状態方程式決定へ向けて



By Horikoshi (B03)

# 本当に中性子星はとてもコンパクトか?

#### ■ QLMXB での半径・質量測定の不定性

解析グループによる半径の大きな違い
 N<sub>H</sub>(宇宙空間における水素の柱密度 Column density),
 Red shift の取り扱い、大気模型の違い、.....



22

#### By Tadayuki Takahashi (C01)

#### 6. ASTRO-H Features --- High Resolution Spectroscopy ---

# GRO J1655-40

The superior resolution of SXS in the Fe K band enables the unambiguous detection of weak and narrow lines from a wind.

Chandra Same Model Parameters with the Chandra result normalized counts/sec/keV Lines are saturated 2 but not black due a to scattering, resolution. Running out of S/N 5 L 5 6 9 10  $\mathbf{5}$ 8 9 10Energy (keV) Energy (keV) ASTRO-H SXS can handle 250 cts/s (Simulation by J. Miller) 2011//06/30 The X-ray Universe 2011, Berlin

方法1:吸収線による重力赤方偏移の測定

中性子星大気で形成される吸収線のエネルギーの観測

└── 〔•ASTRO-Hの超高エネルギー分解能が活かせる。 ↓•クリーンな観測が可能。

細い吸収線が観測される条件

∫ 表面磁場強度 ≤ ~10<sup>9</sup> G スピン周波数 ≤ 数十Hz

低質量X線連星系が候補になり得る

Tarzan 5 X2 が条件を満たす!

By Dotani (C01)

まとめ

- 中性子星の物理が今、面白い。
  - 中性子星パズル
     天体観測から核物理への宿題+観測・解析方法の改善の必要性
  - ストレンジネス原子核物理・中性子過剰核物理の進展 低密度から高密度にわたる EOS への情報が蓄積
  - 理論の進展 QCD 低エネルギー有効理論 (Chiral EFT) から核物質の飽和性へ
- 新学術領域の取り組み
  - ▲ A01, A02: チャネル結合効果を含めて、ハイペロン 核子、ハイペロン
     ハイペロン相互作用決定へ (J-PARC)
  - B01, B02, B03: 2ρ₀ までの様々な密度での対称エネルギー, EOS 決定へ (RIBF)
  - ◎ C01: 不定性のない中性子星半径測定へ (ASTRO-H)
- 今秋、2 回目の公募研究募集



# Thank you !



*Ohnishi* @ *Kyushu U., 2014* 26