

新学術領域 「実験と観測で解き明かす 中性子星の核物質」 の目指すもの

領域代表
東北大学理学研究科
田村 裕和

中性子星核物質の謎

■ 物質の最終形態

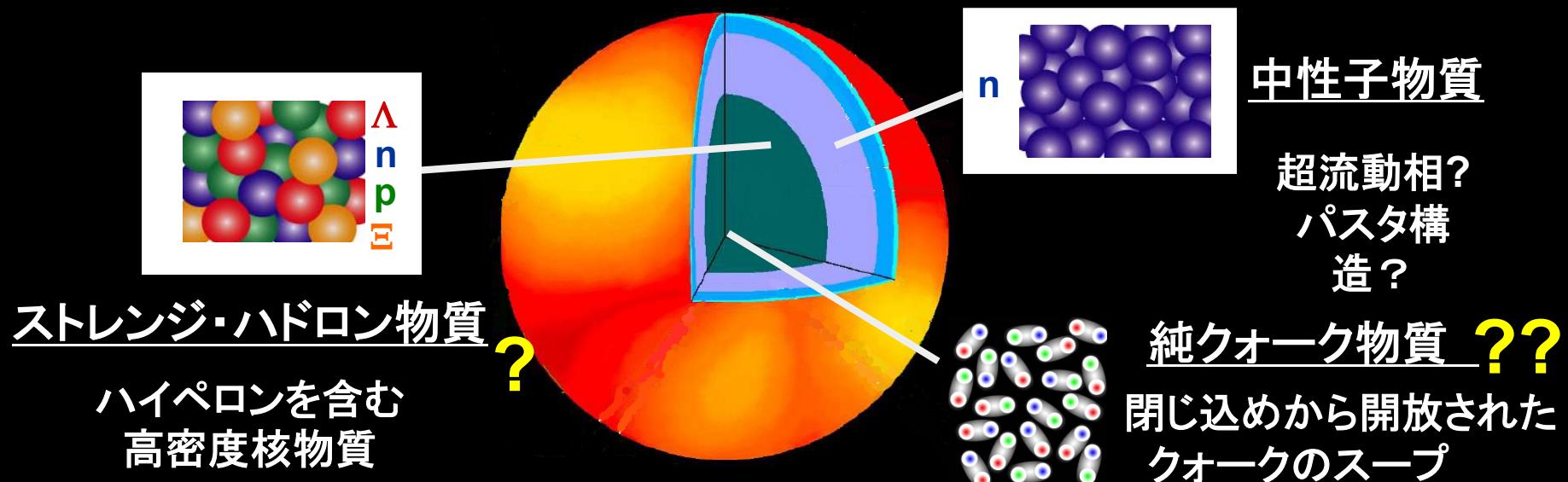
超新星爆発で生成、“X線パルサー”として観測

■ 宇宙の最高密度物質

質量: $1\sim 2 M_{\odot}$ (太陽質量)、半径: 10 km程度?

=> 中心は原子核密度の3~10倍 ($10\sim 30$ 億トン/cm³)
= 宇宙に浮かぶ巨大原子核

■ クオークのみでできた様々な物質形態



“クオークの物質科学”

電子とクオーク(原子核)からなる物質

原子からなる物質

地球上の物質
「原子・分子物理学」「物性物理学」
「化学」

プラズマ

恒星内部の物質
「プラズマ物理学」

電子(+原子核)と電磁気学が主役

クオークのみからなる物質

中性子星内部の物質

「原子核物理学」→ “クオークの物質科学”

クオーク(ハドロン)と強い相互作用が主役

本新学術領域: 実験・観測・理論 連携

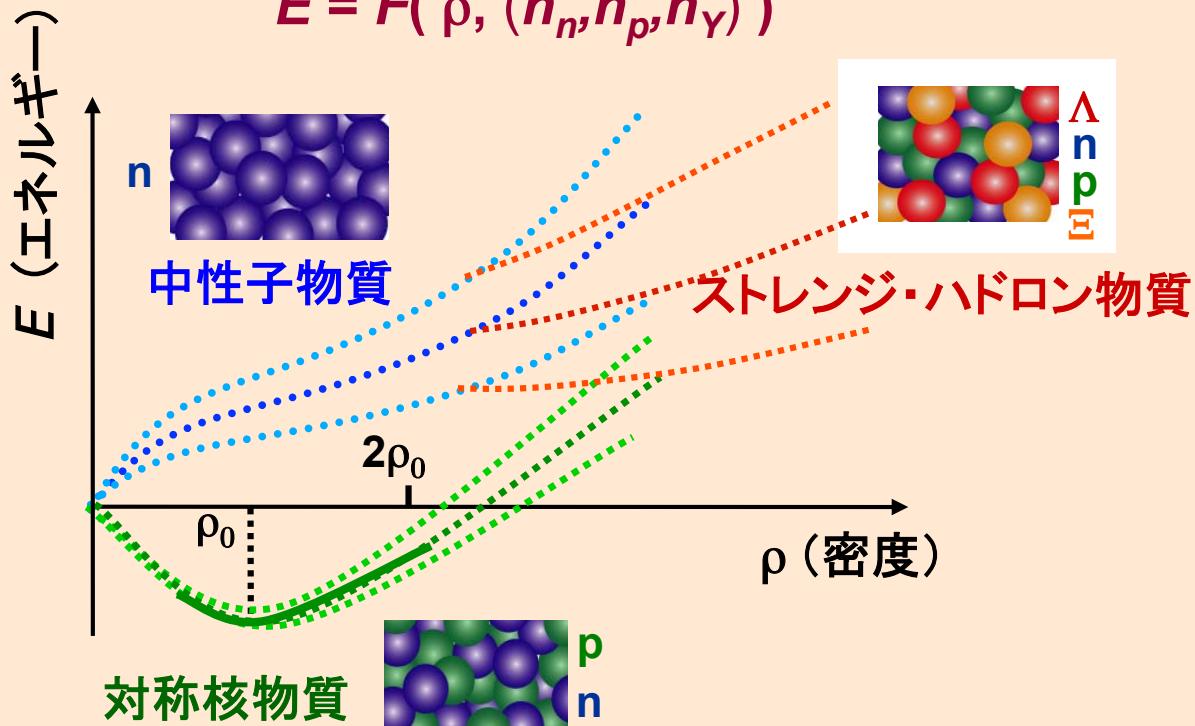


核物質を探る鍵: 状態方程式(EOS)

核物質の状態方程式(EOS)

$$E = F(\rho, (n_n, n_p, n_\gamma))$$

密度 粒子比



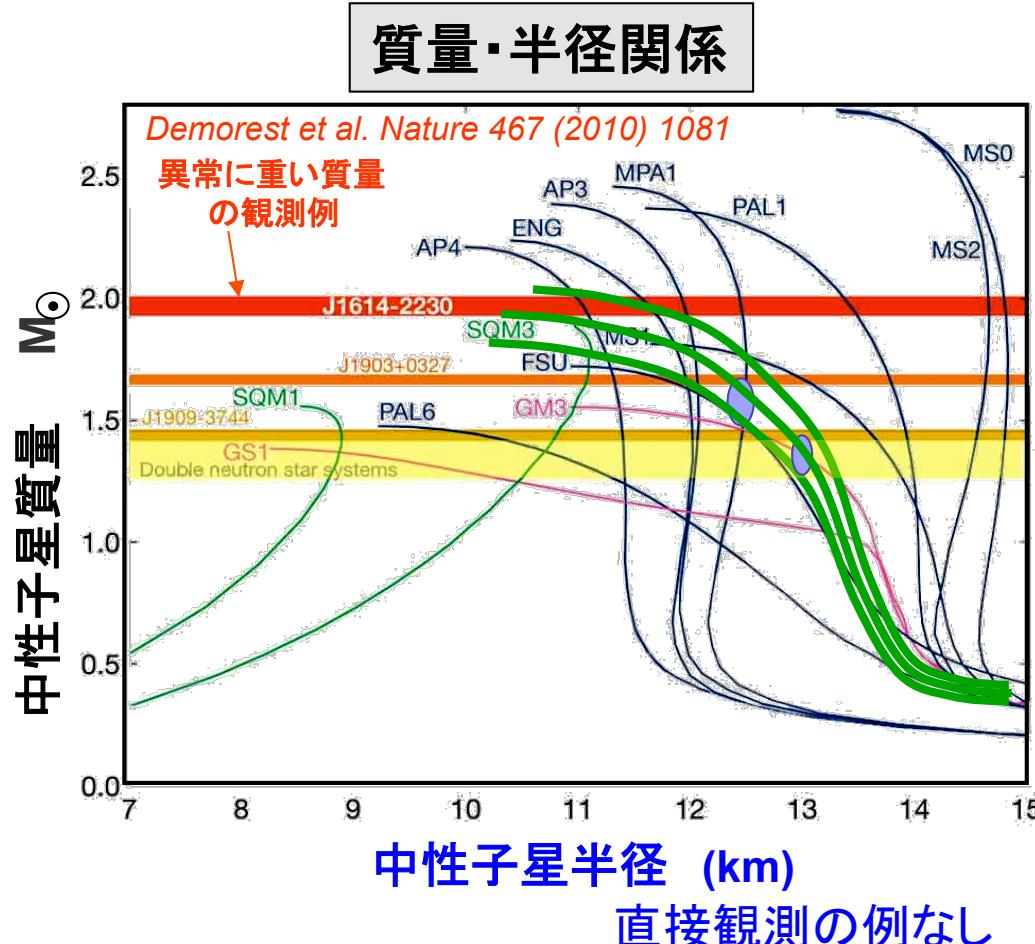
EOS決定 → 内部構造決定

地上実験と天文観測の連携の必要性

核物質の状態方程式(EOS)

$$E = F(\rho, (n_n, n_p, n_\gamma))$$

一意的
(重力・圧力の釣合い)



地上実験による
核物質の情報
+
理論

X線天文衛星
による
半径観測

EOSの
決定

+
EOSの
検証

EOSの確定

理論的枠組みの証明
純クオーク物質の存否

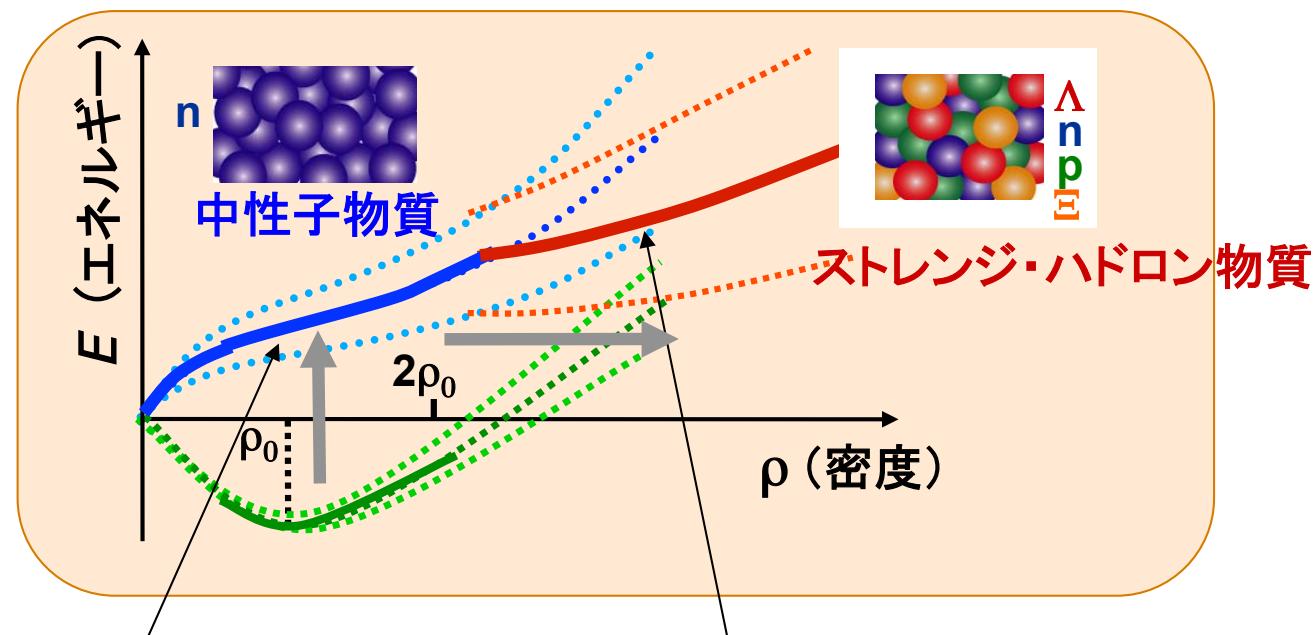
地上実験による核物質EOSの決定

■ コア外縁部、内殻($\rho < 2\rho_0$)

中性子過剰になるとEOSはどう変化するのか？

■ コア中心部 ($\rho > 2\rho_0$)

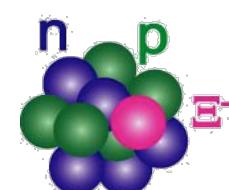
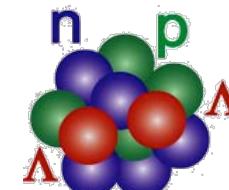
どのハイペロンがどれだけ存在するのか？



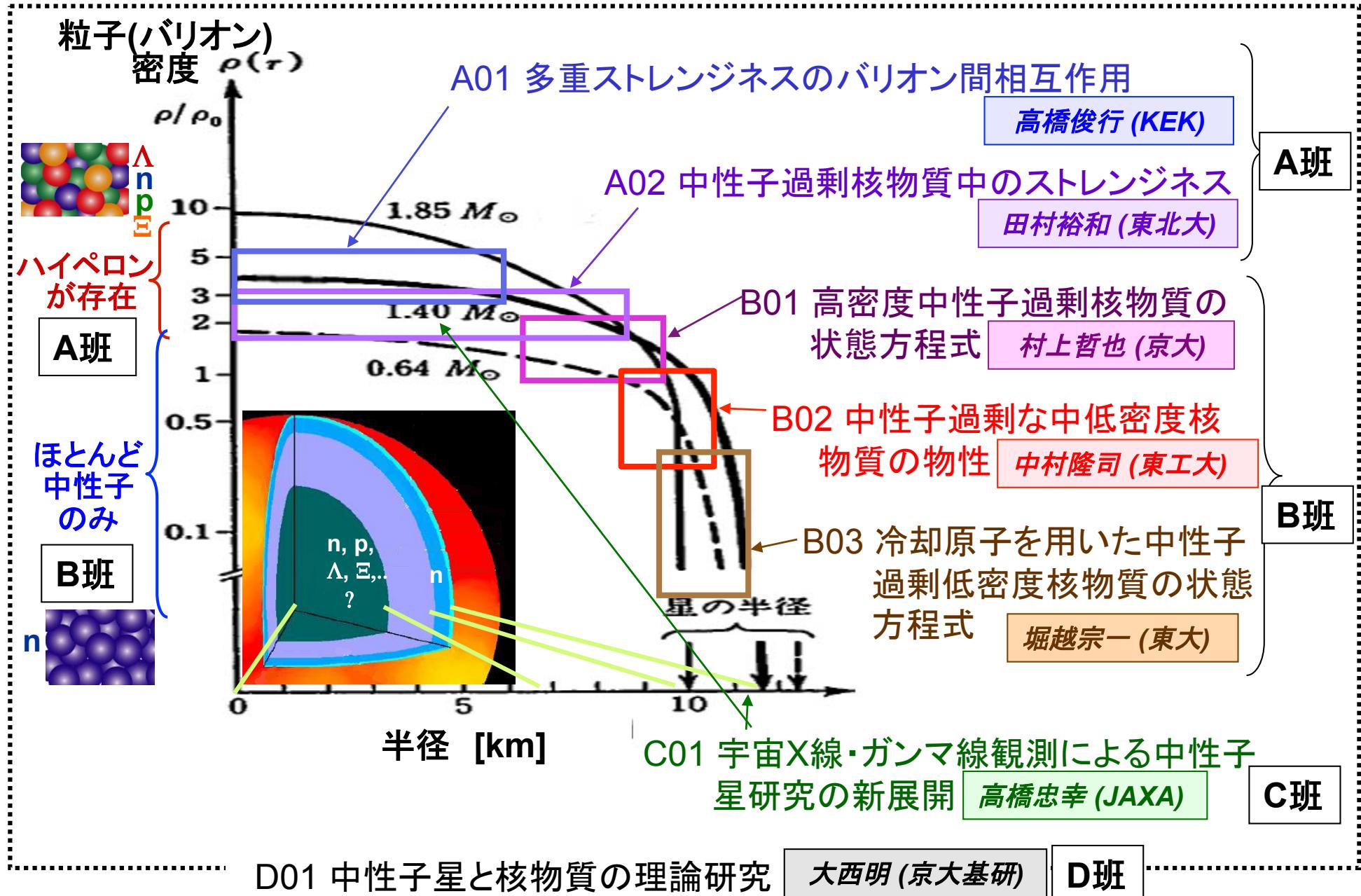
粒子間相互作用を測定、EOSのinputに

ハイパー核で実験的に調べる@J-PARC

A班

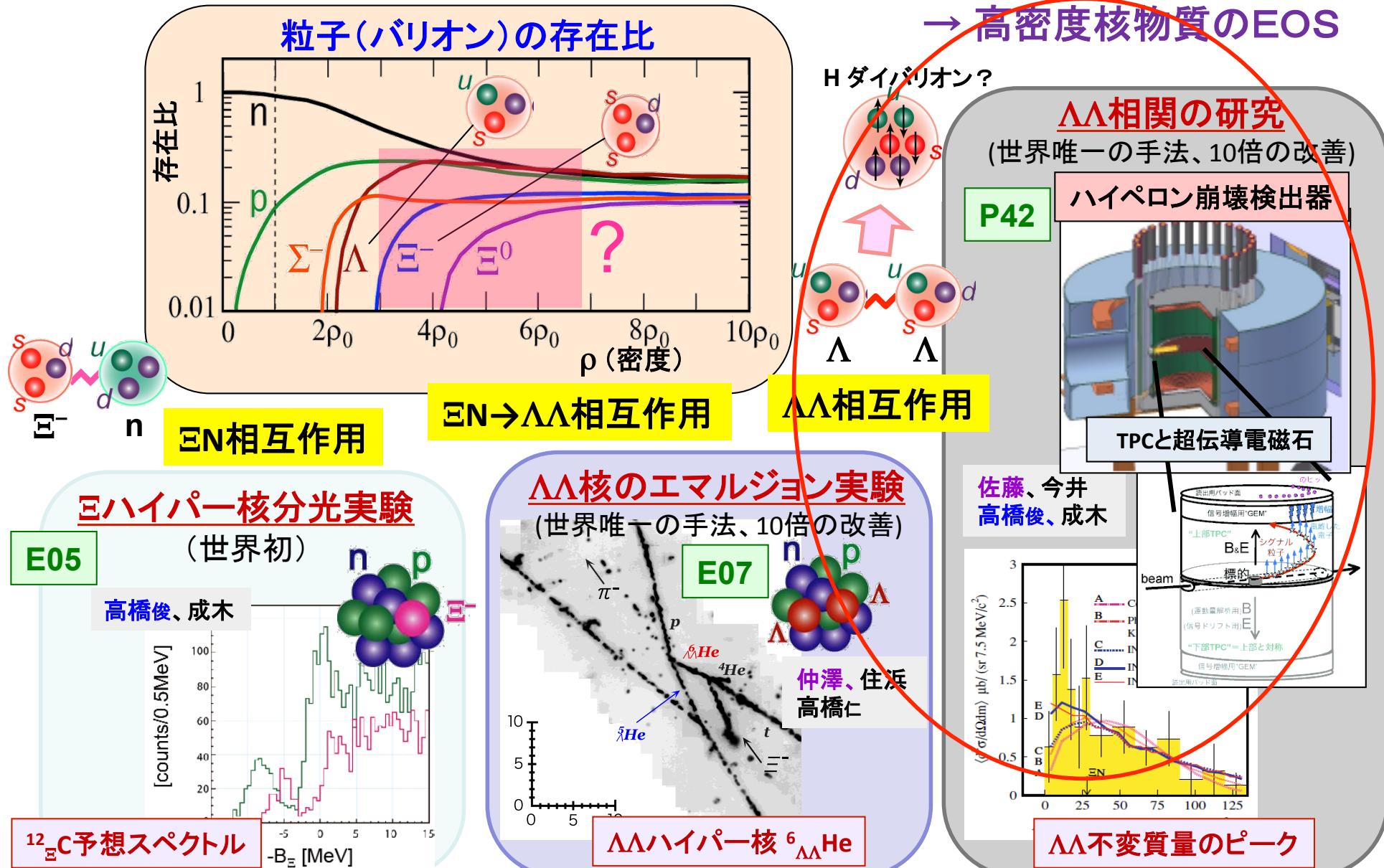


研究領域と計画研究



A01: 多重ストレンジネスのバリオン間相互作用

中心領域($\rho > 3\rho_0$)のハイペロン混合(複数のストレンジネスが関与)を決定する



A02 中性子過剰核物質中のストレンジネス

代表者・分担者

ストレンジネスが現れだす $\rho = 2 \sim 3 \rho_0$ 領域のハイペロン混合を決定する

(1) $\Sigma^+ p$ 散乱実験 (世界初) 三輪、田村

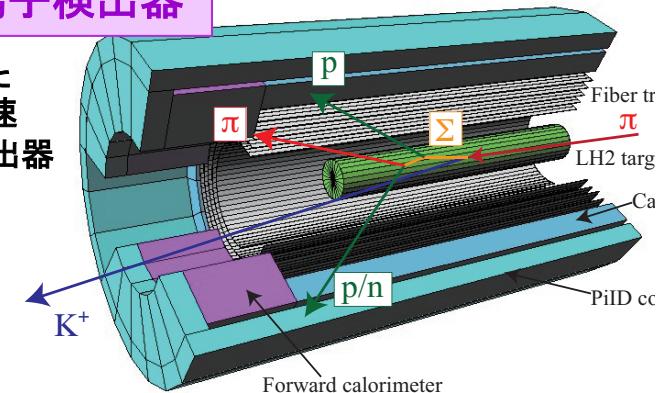
-> $\Sigma^- n$ (= $\Sigma^+ p$) 相互作用

=> Σ^- が中性子星に存在するか確定

E40

散乱陽子検出器

MPPC を用いた
世界初の超高速
(~100倍) 飛跡検出器



(2a) Λ ハイパー核 ガンマ線分光

E13

(世界唯一の手法, Hyperball) 小池、田村

-> ΛN , ΛNN 相互作用の詳細

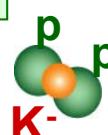
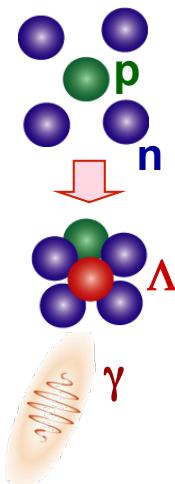
(2b) 中性子過剰 Λ ハイパー核 分光

E10

(世界唯一の手法) 阪口、味村、福田

-> 中性子過剰環境での Λnn 相互作用

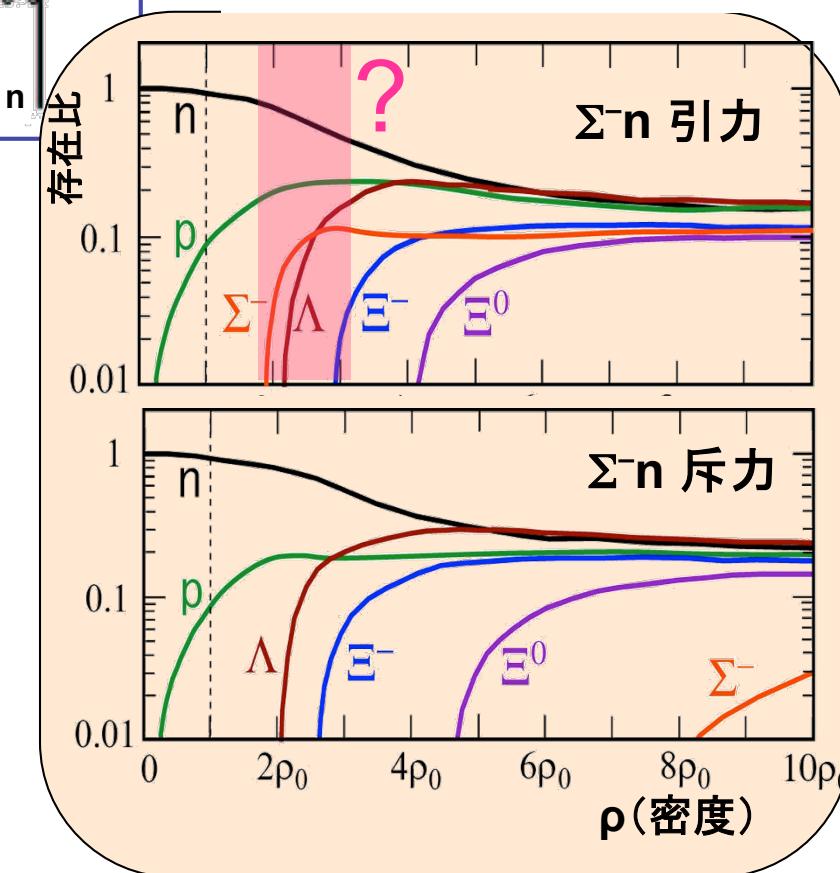
=> 中性子星中の Λ 粒子の組成比を決定



(3) K -原子核束縛状態 應田、鈴木

E15, E27

-> $K^{bar} N$ 相互作用
=> K 中間子が中性子星に存在するかを確定



$\Lambda - \Sigma$ coherent coupling

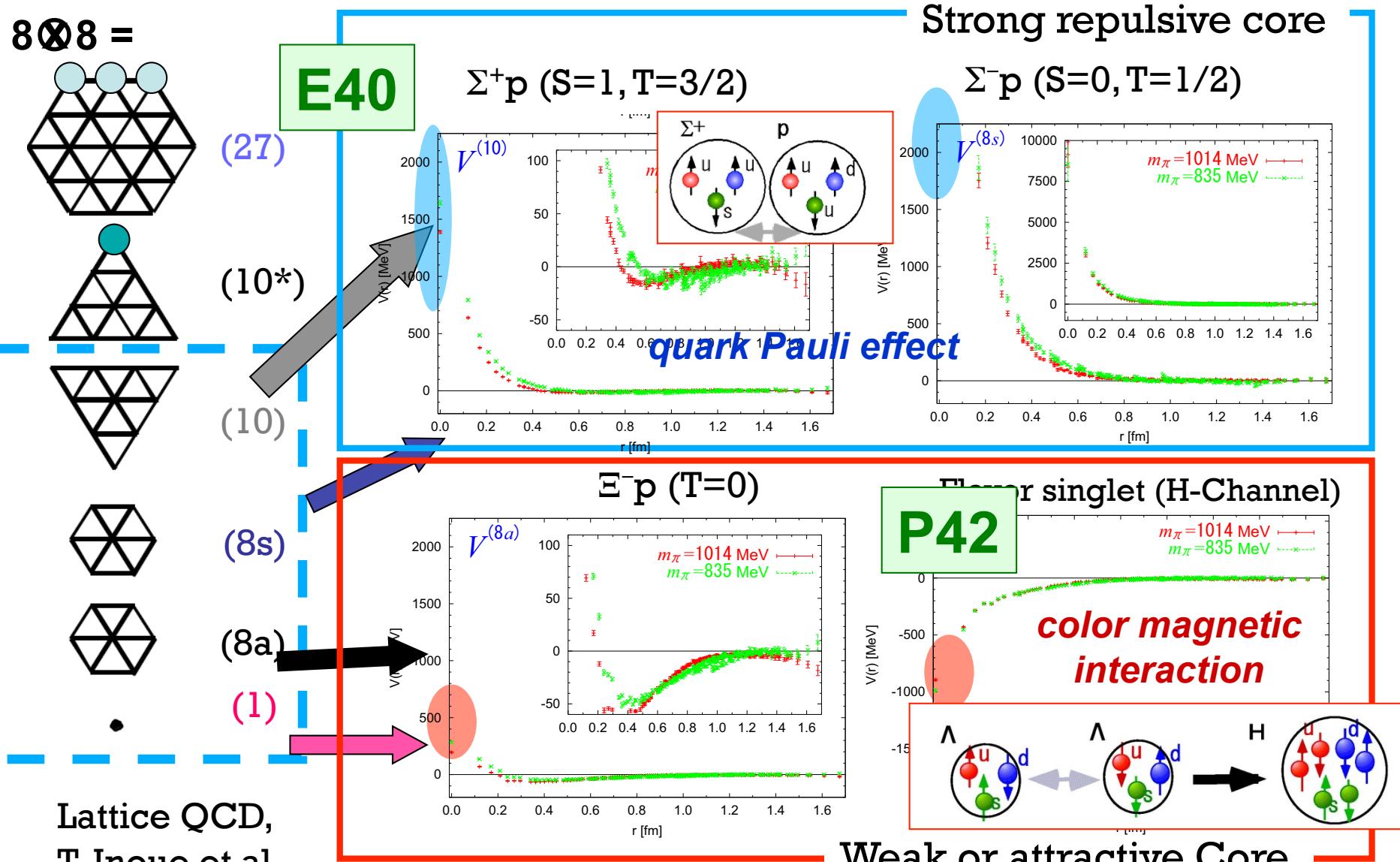
n

n

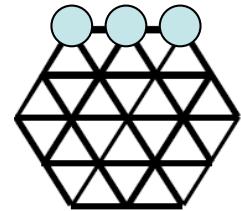
Baryon

• 6

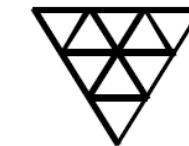
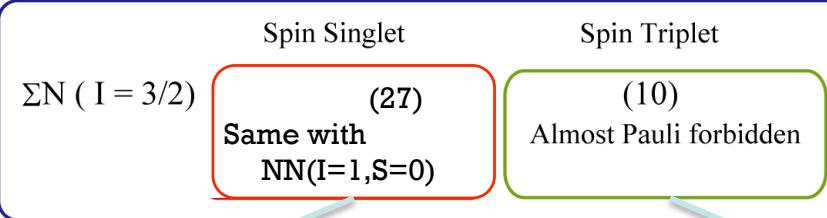
*The same behavior was already predicted
by Oka-Yazaki's Quark Cluster Model*



Repulsive force in $\Sigma^+ p$ ($= \Sigma^- n$) channel

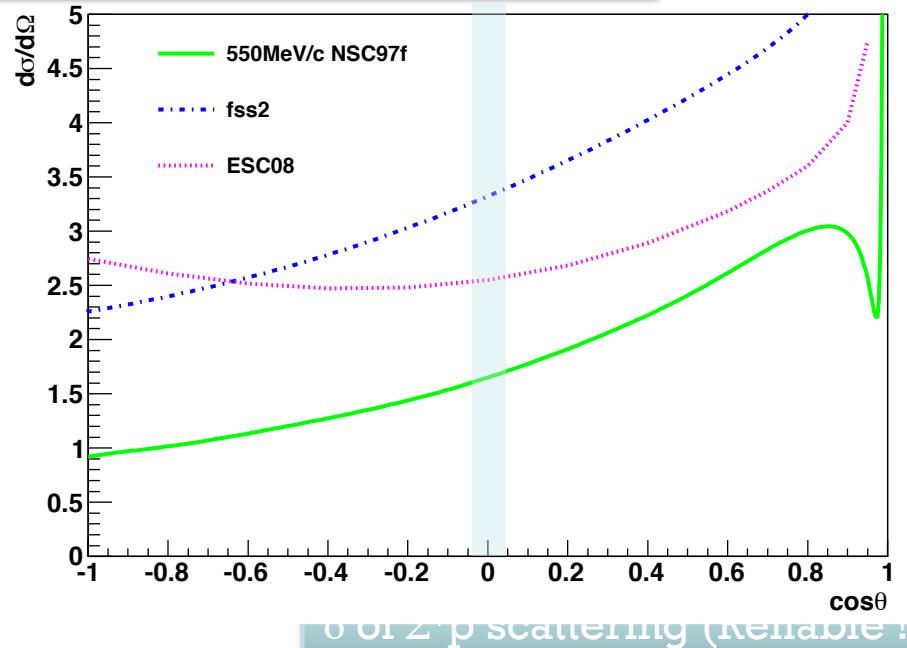
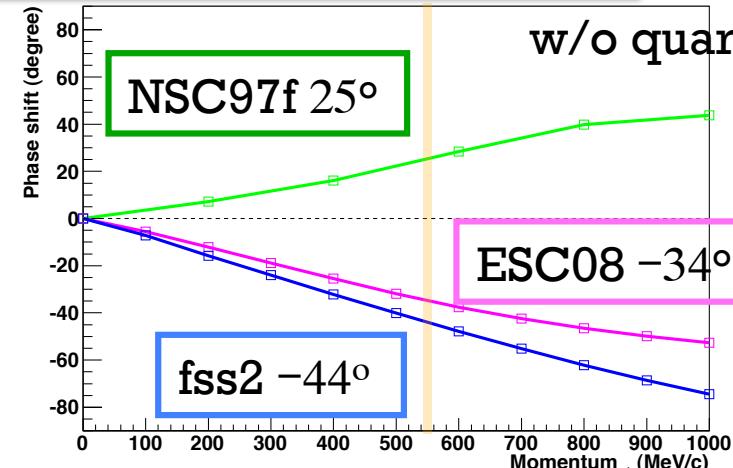


(27)



(10)

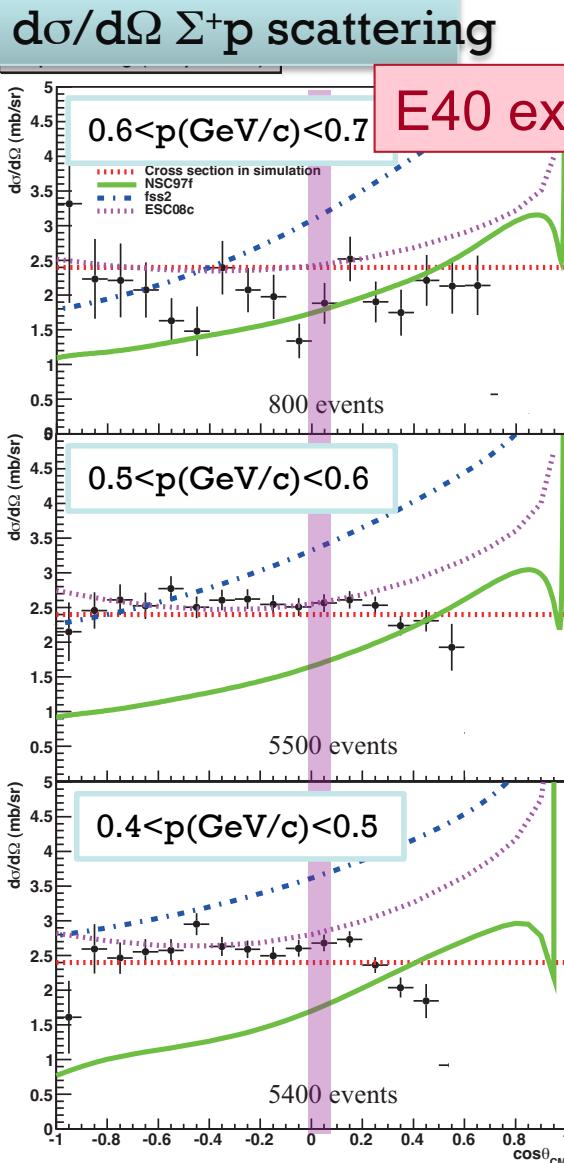
Spin weight: 1/4

 $\Sigma^+ p \frac{d\sigma}{d\Omega}$ ($p = 550$ MeV/c)Phase shift of $\Sigma^+ p$ (3S_1 channel)

w/ quark Pauli

We will determine δ in 3S_1 channel.

Phase shift of 3S_1 channel

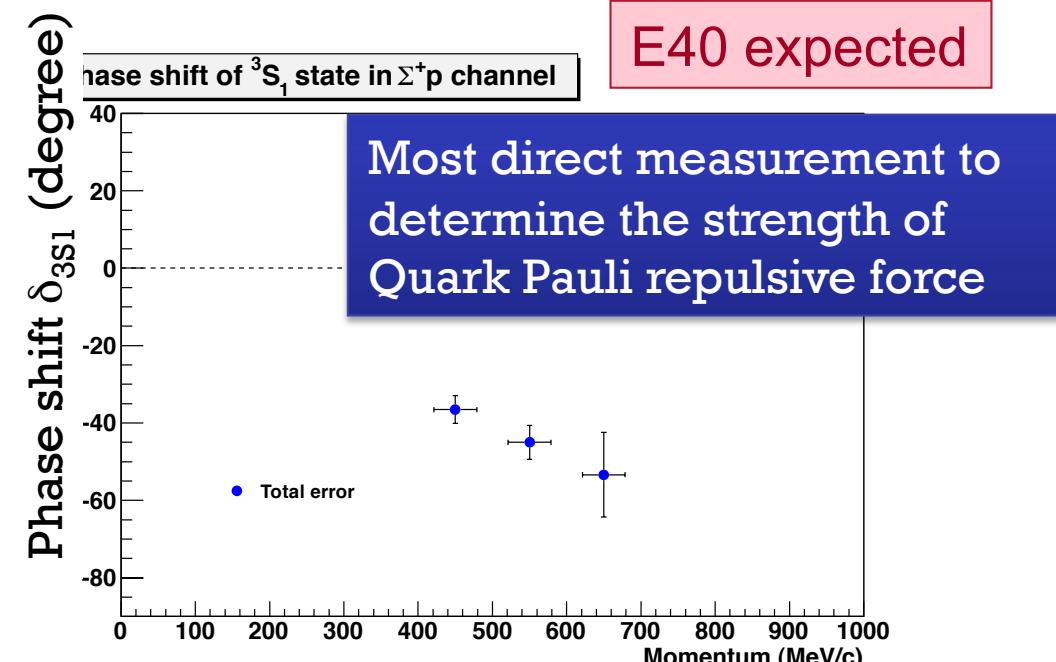


- Energy dependence of $\delta_{^3S_1}$ from $d\sigma/d\Omega(90^\circ)$

Negligibly small

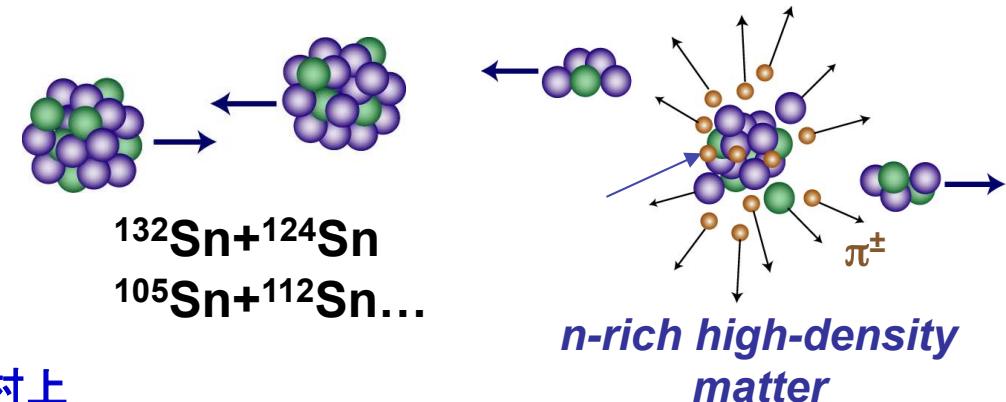
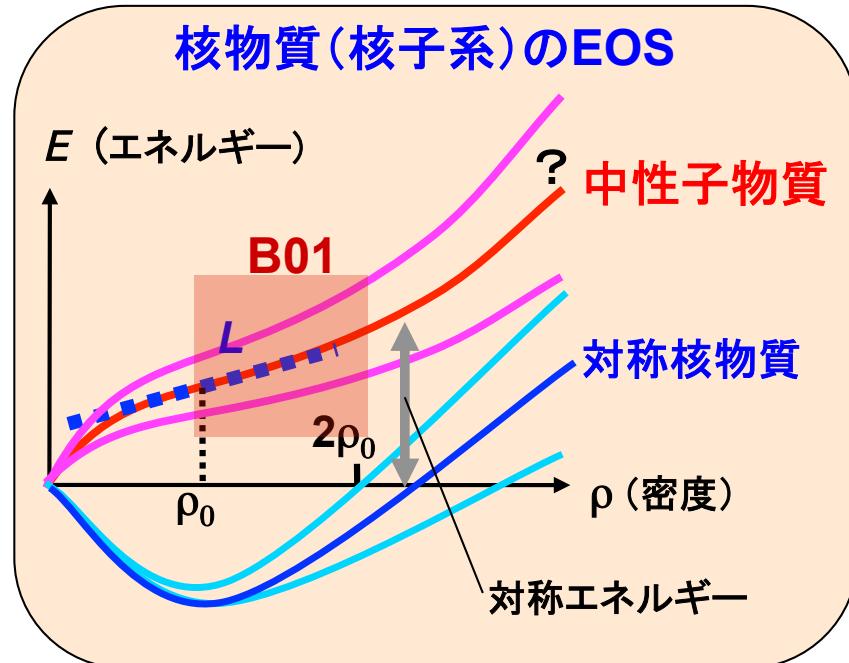
$$\frac{d\sigma}{d\Omega}(90^\circ) = \frac{1}{4} \frac{1}{k^2} \sin^2 \delta_{^1S_0} + \frac{3}{4} \frac{1}{k^2} \sin^2 \delta_{^3S_1} + (\text{higher waves, etc})$$

Almost model-independent



B01:高密度中性子過剰核物質の状態方程式

$\rho \sim 2\rho_0$ 領域で非対称核物質の対称エネルギーの密度依存性を求める



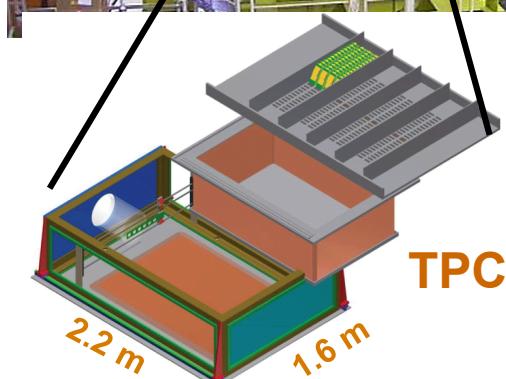
村上
川畑、磯部、家城
竹谷、溝井、栗田、馬場

新型検出器開発

TPC(時間射影型検出器)
読み出し回路
前方角度カロリメーター
シリコン多重度検出器

幅広い陽子数/中性子数比を持つ不安定核ビームを用いて、
中心衝突から発生する π^+ と π^- の収量比を系統的に測定

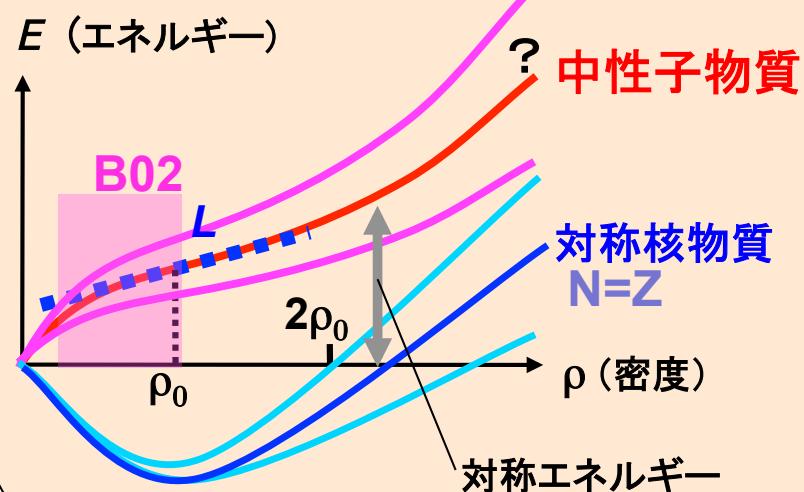
通常核物質の約2倍程度の密度領域で非対称核物質の
対称エネルギーの密度依存性に強い制限



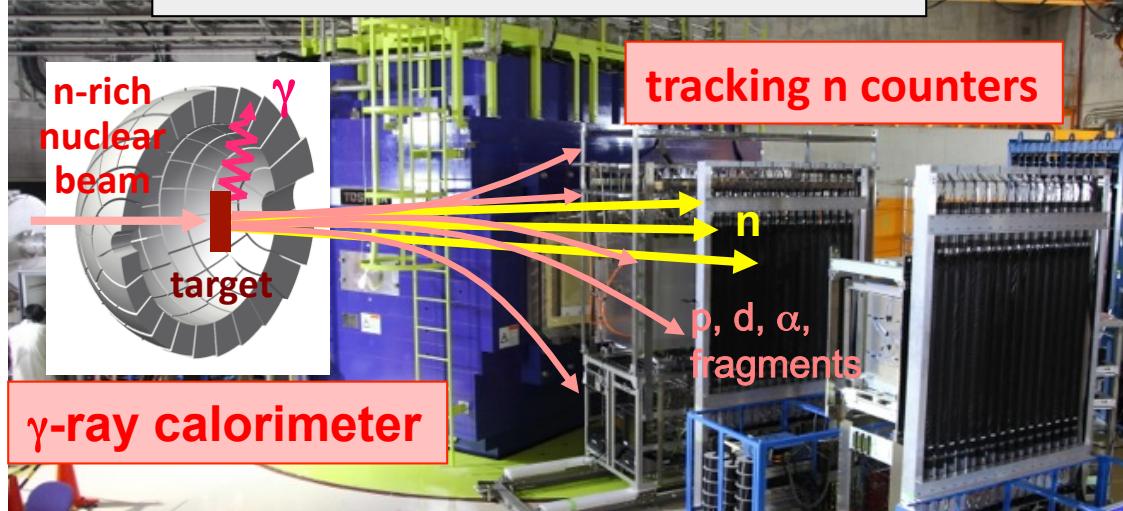
B02: 中性子過剰な中低密度核物質の物性

$\rho \lesssim \rho_0$ 領域で中性子過剰核物質のEOSを決定する

核物質(核子系)のEOS



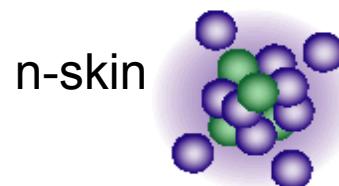
理研RIBF: SAMURAIスペクトロメータ



不安定核ビームを用いた中性子過剰核の反応

中村、下浦、近藤、寺西

① 中性子スキン核の核応答



PDR(ピグミー共鳴)
密度振動(E0mode)

中性子過剰核物質のEOS(圧力, 非圧縮率)
 γ 線力口リメーター

② 希薄物質中のダイニュートロン相関



中性子星内殻の超流動

③ 中性子超過剰な核子多体系



中性子過剰物質中の
核力(アイソスピン依存性)
tracking中性子検出器

非対称核物質のEOS

$$\varepsilon(\rho, \alpha) = \varepsilon(\rho, 0) + E_{sym} \alpha^2 + \dots$$

$$\alpha = \frac{\rho_n - \rho_p}{\rho} = \frac{N - Z}{A}$$

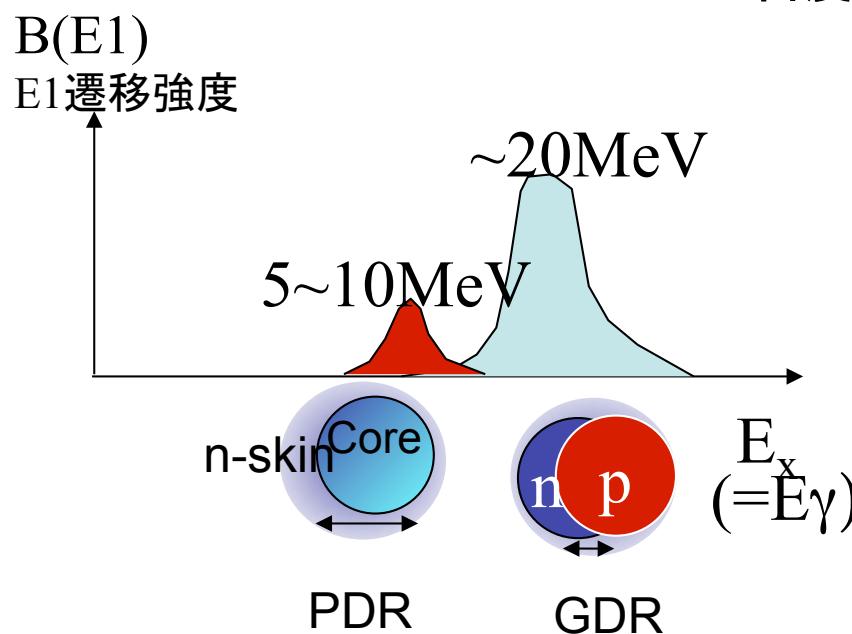
$$E_{sym} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 E}{\partial \alpha^2} \Big|_{\alpha=0}$$

非対称核物質の
圧力

非対称核物質の
非圧縮率

中性子スキン核の
ピグミー共鳴

中性子過剰核の
密度振動モード



中性子過剰核の
原子核衝突実験

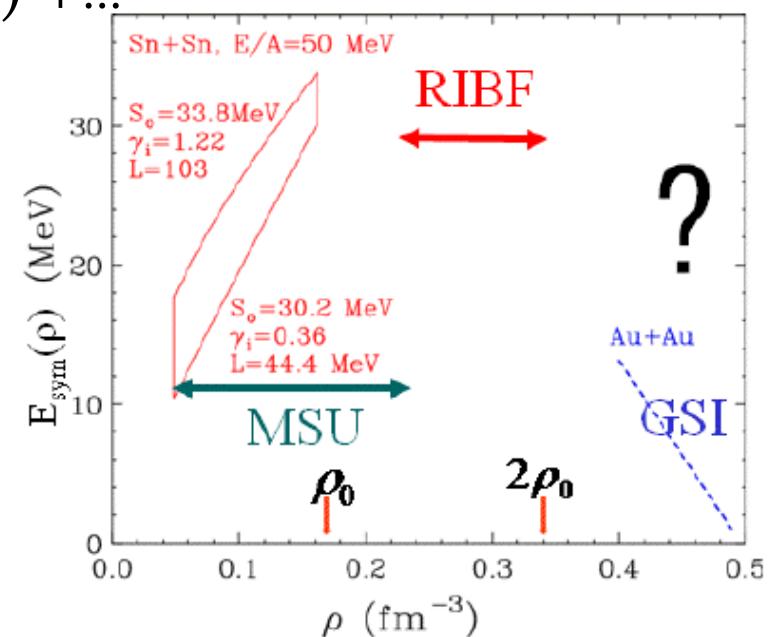


図 1: 実験的に求められた対称エネルギーの密度依存性。RIBF エネルギー領域で不定性が大きい。

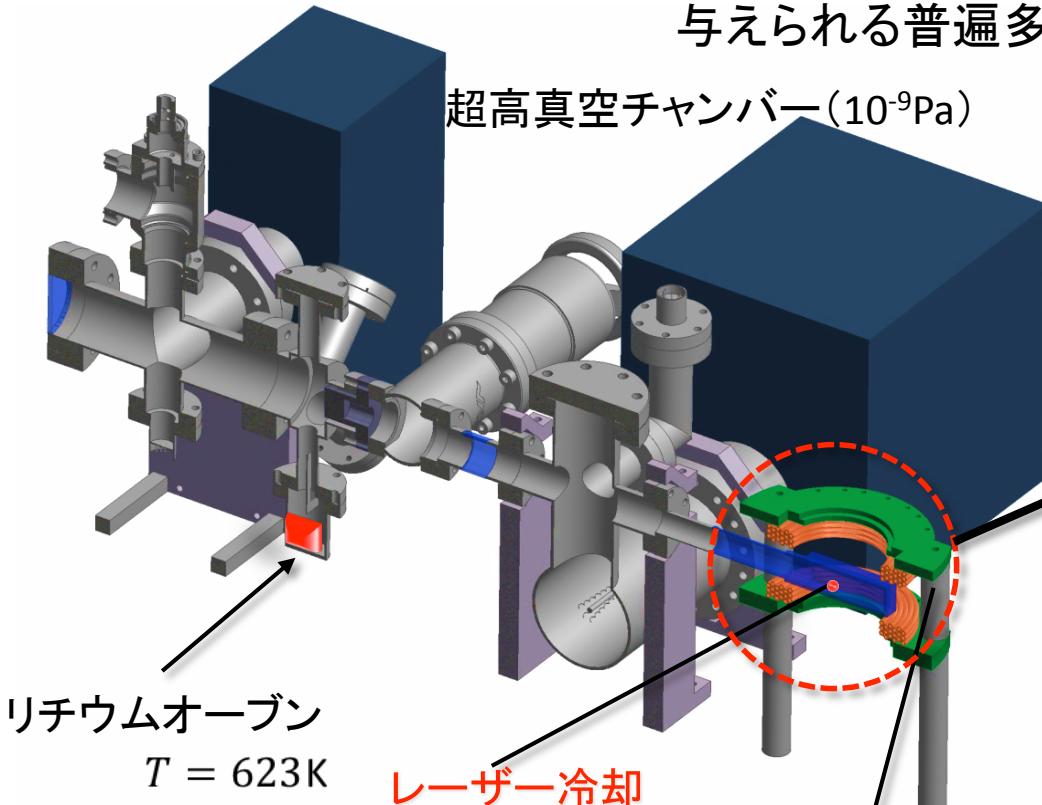
B03: 冷却原子による中性子過剰低密度核物質の状態方程式

温度パラメータ $\tau = T/T_F$ と相互作用パラメータ $\xi = 1/(k_F a)$ で
与えられる普遍多体関数 $h(\tau, \xi)$ を発見

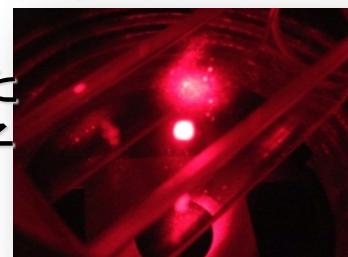
堀越、向山、
水島、中務

inner crust 領域:

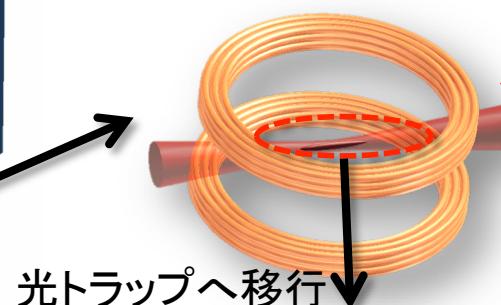
密度 $\sim 0.5\rho_0$, 散乱長 $a = -18.5 \text{ fm}$
 $\Rightarrow \xi = -0.04 \sim -0.280$



レーザー冷却された
極低温フェルミ原子
 ${}^6\text{Li}$



$N = 10^8, T \sim 1\text{mK}$



光トラップへ移行

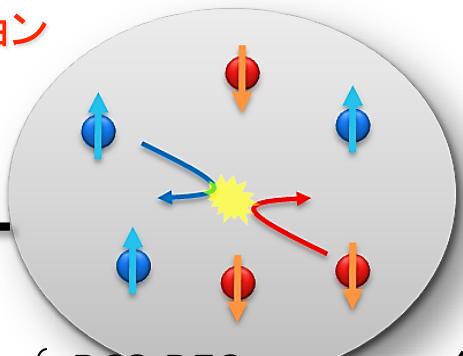
外部磁場による
粒子間相互作用の制御
→ 希薄中性子物質と
同じ状態を作る

短距離で強く相互作用している
希薄フェルミ粒子系の実験的シミュ
レーション

研究目的
EOS
超伝導Gap

粒子間相互作用の制御により

$BCS\text{-}BEC$ crossover 領域
希薄極限でない効果
 p 波相互作用する粒子系



C01: 革新的X線天体観測

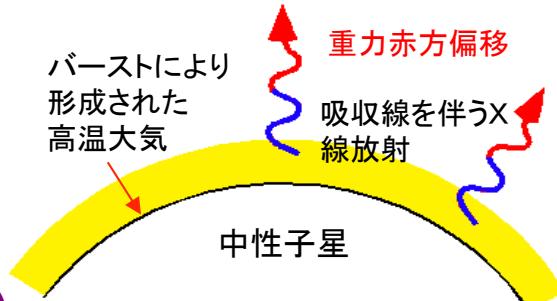
高橋(忠)、玉川、
堂谷、辻本、宮崎

新世代X線望遠鏡による距離によらない中性子星半径の精密決定

(1) X線バースト中の重元素吸収線の赤方偏移

(2) 表面周回ガスからの準周期的X線放射(QPO)

(3) 弱磁場中性子星からの偏光X線パルス

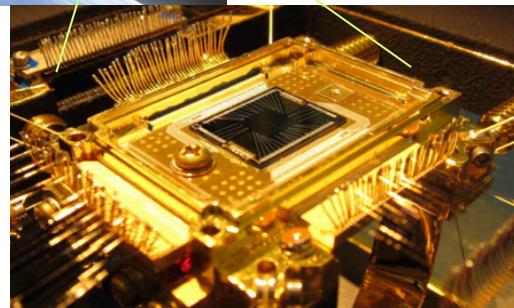


ASTRO-H
(宇宙研/JAXA, 2014~)



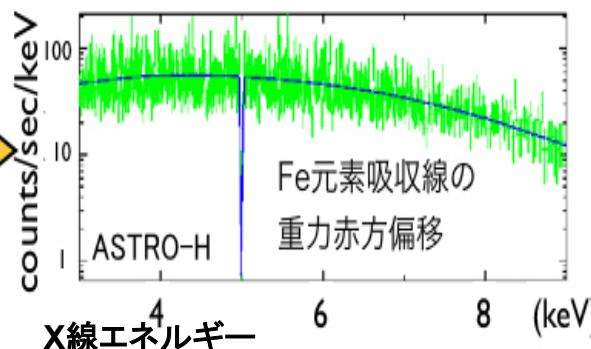
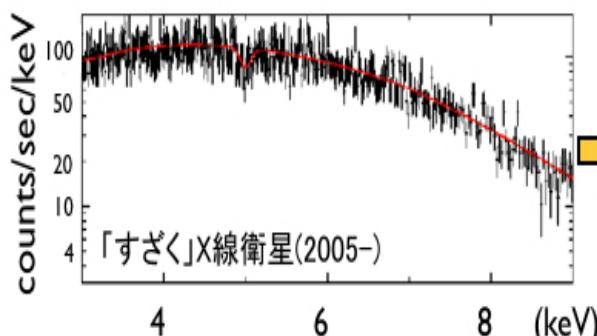
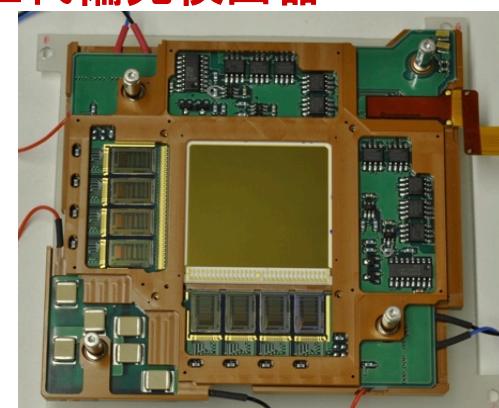
GEMS (NASA, 2014~)
世界初のX線偏光専用機

+
世界初のカロリメータ
当グループが開発、
X線精密測定(2桁向上)
が初めて可能に

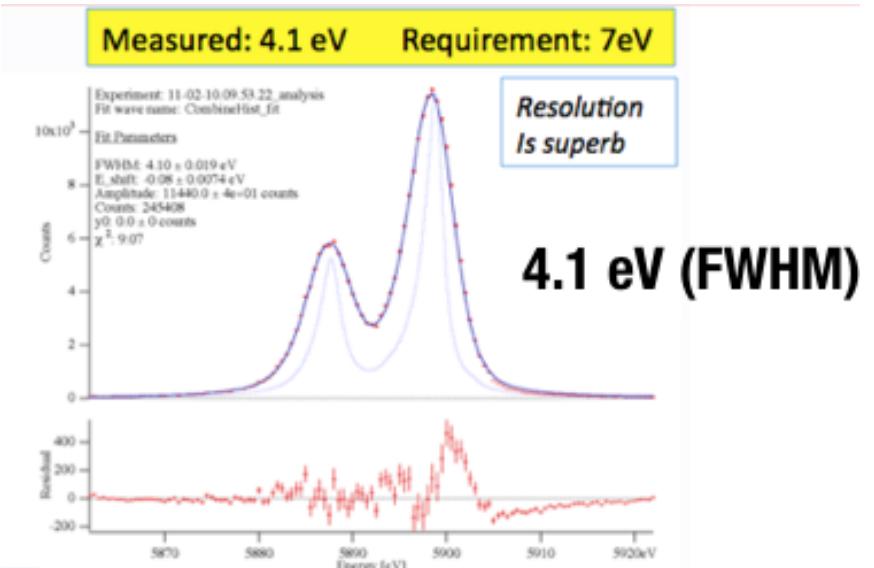
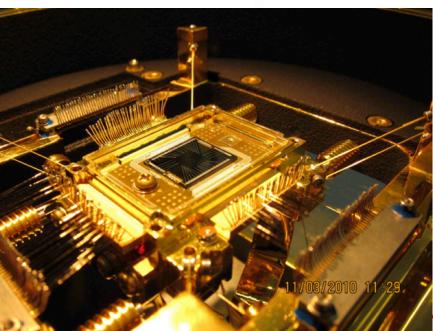
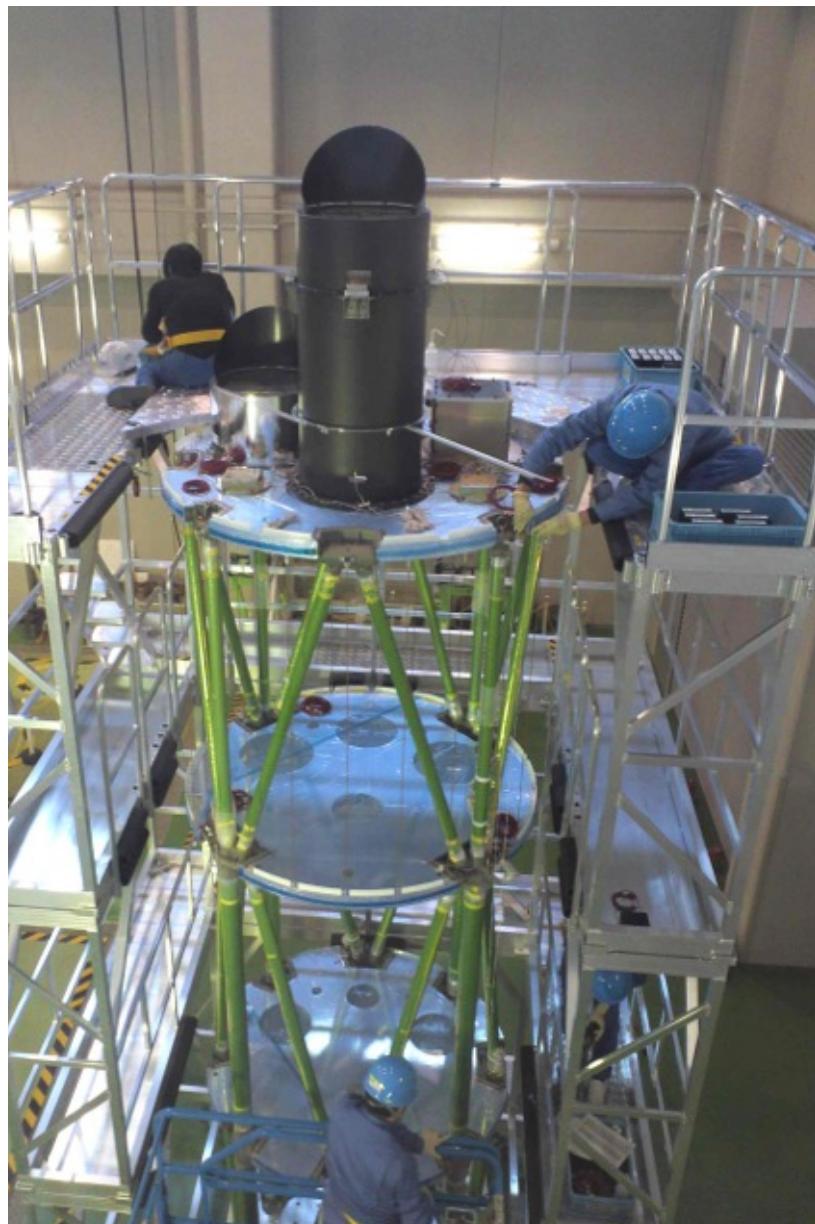


(4) 次世代衛星用X線検出器開発

高計数+高エネルギー分解能+偏光観測
→ バーストの精密測定が初めて可能
=> CMOS X線撮像器
ガンマ線カメラ(CdTe, Ge strip)
次世代偏光検出器



ASTRO-H の準備状況

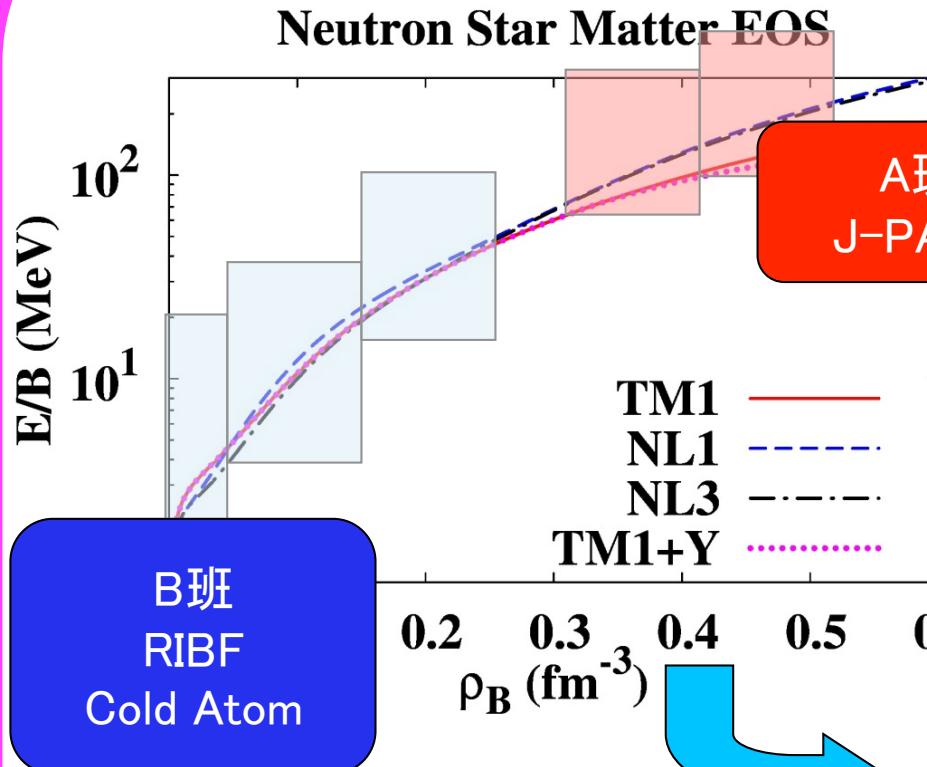


ASTRO-Hに
搭載される
マイクロカロリメーター
(50mKで動作)

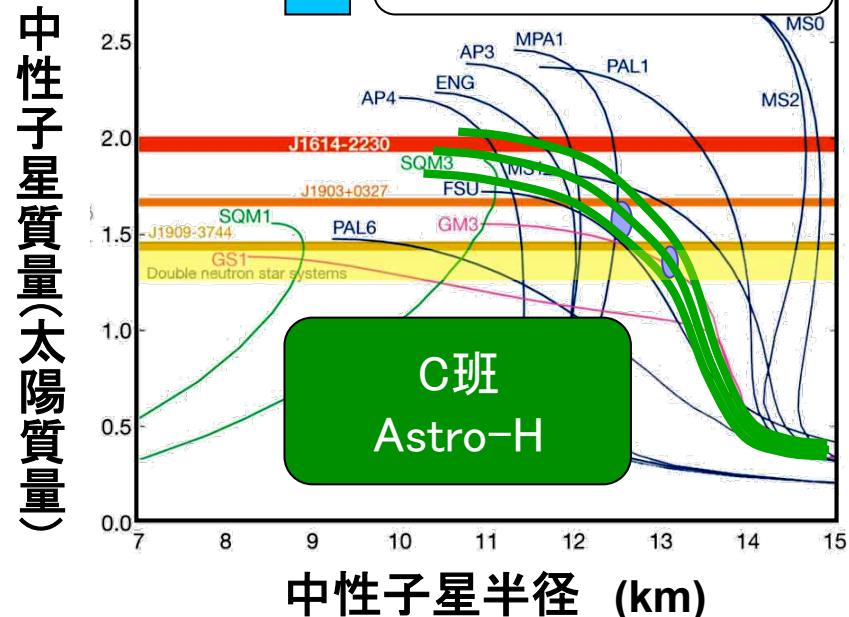
D01: 中性子星と核物質の理論研究

D班
理論

大西、原田、中田、飯田、松尾、翼、小野、土手、木村、中里、
国広、西崎、親松、丸山、阿武木、大橋、柴崎



RHIC・GSIデータ、
格子QCDによるBB力・3体力、
ストレンジ物質の硬化、 京計算機
クオーク物質のEOS



対称エネルギー、対相関、
パスタ相、準ユニタリー気体、
量子モンテカルロ、…

理論によって

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。

想定される公募研究の例

公募研究

A,B班の関連研究

- Ξ 原子X線の精密測定
- Λ ハイパー核弱崩壊、電子線による Λ ハイパー核研究
- ϕ や ω を束縛した原子核
- 高エネルギー原子核衝突実験(でのハイペロン生成)
- 反応断面積による中性子スキン厚の測定
- 3体、多体核力の実験研究
- ニュートリノ

A,B,C班の関連: 250万円/年 × 8件、

D班の関連: 100万円/年 × 4件

A,B,C班共通

積極的なご応募をお待ちしています。

- 新しいタイプの検出器(次期X線衛星搭載用および加速器実験用)の開発
- 共通するASICやFPGAを用いた信号処理系の開発

D班の関連研究

- 極低温原子系の理論研究
- 中性子星の生成・冷却過程、超新星やコンパクト星の天体现象
- (京コンピュータを用いた) 格子QCDによる核力、クォーク物質

これらの分野を横断する研究テーマ

H24年度 若手スクール

日時： 2013年2月25日(月)–2月27日(水) (予定)
(27日はASTRO-H, J-PARCの見学会)

場所： KEK

内容：

初歩からのわかりやすい基本的な講義 90分 × 8コマ
見学会

たくさんの方のご参加をお待ちしています。

H24年度研究会

“キックオフシンポジウム”

日時：2012年10月26日（金）、27日（土）

10月26日は10:00開始、27日は16:00頃終了の予定。

場所：理化学研究所 RIBF棟2F大会議室

たくさんの方のご参加をお待ちしています。

- 新学術領域の紹介
 - 各計画研究の目的と内容
 - A01, A02, B01, B02, B03, C01, D01
 - 関連する分野横断的な話題
 - 新学術領域の進め方についての議論
 - など
- (プログラムの詳細は決まり次第ご連絡します。)

また、参加希望者一部に対して旅費のサポートがあります。

X線天文衛星
ASTRO-H

“クオークの物質科学”創始

中性子星全体の内部構造の解明

学問的価値

日本が誇る
世界最高の2大加速器
と天文衛星

現実に宇宙に存在する未知の物質形態を解明して、
人類の物質観を拡張、「クオークの物質科学」を構築する

X線天文観測

特徴

⇒ 中性子星の半径
異なる分野の連携により初めて解明できるテーマ

いずれも各分野で世界のトップを走るグループが連合物理

大強度陽子加速器

世界最高の3大施設が運用開始となる今こそ日本で進めるべき

⇒ 中性子物質の物性

ストレンジネス核物理

⇒ ハイペロン粒子の間の力