

領域略称名：中性子星核物質
領域番号：2404

平成26年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る中間評価報告書

「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」

(領域設定期間)

平成24年度～平成28年度

平成26年 6 月

領域代表者 東北大学・理学研究科・教授・田村 裕和

目 次

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要	2
2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	5
3. 研究の進展状況	8
4. 若手研究者の育成に関する取組状況	13
5. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	15
6. 総括班評価者による評価	17
7. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	20
8. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開發表等）	24
9. 今後の研究領域の推進方策	31

研究領域全体に係る事項

1. 研究領域の目的及び概要（2 ページ程度）

研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時に記述した内容を簡潔に記述してください。どのような点が「我が国の学術水準の向上・強化につながる研究領域」であるか、研究の学術的背景（応募領域の着想に至った経緯、これまでの研究成果を進展させる場合にはその内容等）を中心に記述してください。

本領域の目的は、宇宙で観測可能な最高密度物質である中性子星内部の物質を解明することである。そのため、下図に示すように、A) 我が国が誇る世界最高性能の陽子加速器施設**J-PARC**を用いたストレンジネス核物理の実験研究、B) 同じく世界最高性能の重イオン加速器施設である理研**RIBF**を用いた中性子過剰核物理の実験研究、およびフェルミ縮退した極低温原子系の実験研究、C) 世界最高性能のX線天文衛星**ASTRO-H**を用いた高精度X線観測、D) これらの実験・観測を統合する理論研究、の4分野の先端的研究を連携して進め、中性子星の中心から表面に至る核物質全体を支配

する状態方程式 (EOS)を決定し、中性子星内部の構造と各密度領域に現れる核物質の正体を解明する。これらの分野は従来交流がなかったが、新施設等で得られる画期的データ(全種類のハイペロン[=ストレンジネスをもつバリオン: Λ, Σ, Ξ]と核子の相互作用、中性子過剰核物質の低密度から高密度までの性質、フェルミ縮退ガスの性質、中性子星半径の観測値)を統合することで、初めて中性子星物質の全体像を解明することができる。中性子星の理解は、現代の原子核物理学の正しさを検証する究極の試金石であり、さらに、電子系の物性物理学と異なり、バリオン(あるいはクォーク)が主役となる“バリオン系物性物理学”という新しい物質科学を拓くことにつながる。3つの新施設が稼動しあるいは稼動間近の今こそ、各分野で世界トップレベルにある日本が中性子星核物質の問題に一致集中して取り組むことで、世界で進められている中性子星研究において日本が世界のトップに躍り出て、世界に先駆けてこの新分野を開拓することができる。



本研究領域の概念図と特徴

中性子星は、恒星が進化の末に起こす超新星爆発の後に残る天体であり、主に中性子から成る巨大原子核のような星である。その中心は、原子核の数倍の密度をもつ、自然界で観測可能な最高密度の物質である。中性子星は、自転に伴い電波やX線を周期的に発するパルサーとして多数観測されている。しかし中性子星内部の様々な核物質が従う状態方程式(EOS)は不明であり、その内部の構造や性質ばかりか、中性子星の半径と質量の関係さえ決定されていない。通常の原子核は、ほぼ一定の密度($\rho_0 \sim 0.16 \text{ fm}^{-3}$)をもち(飽和性)、陽子数・中性子数の比が1:1(対称核物質)に近いため、低密度($\rho < \rho_0$)から高密度($\rho \sim 3\rho_0 - 6\rho_0$)に亘り、かつ、中性子が陽子より圧倒的に多い中性子星内部の核物質については、従来の原子核物理学の知識を動員しても理解することができない。一方、X線観測によって多数の中性子星の質量が精密に測定されているが、半径の信頼できる測定例はほとんどない。特に、同じ中性子星に対して質量と半径を精度よく測定できればEOSに極めて強い制限を与えられるが、模型依存性の大きな半径の導出例がいくつか報告されているのみである。

中性子星の中心部分(inner core)では、現存する実験データを再現するバリオン間相互作用を用いると、中性子のフェルミエネルギーがハイペロンと中性子の質量差を越え、密度 $\rho \sim 2\rho_0 - 3\rho_0$ 程度でハイペロンが現れると予想されている。ところが2010年に一般相対論を利用して測定された $1.97 \pm 0.04 M_\odot$ (M_\odot は太陽質量)の質量をもつ重い中性子星は、ハイペロンや中間子凝縮を含む既存のEOSでは支えられない(すなわち密度が上がりす

ぎてブラックホールになる)。まだ不明な点が多いハイペロンを含むバリオン間力を実験で定め、重い中性子星の質量や冷却速度の観測値に一貫した説明を与えることは、大きな課題である。もし説明できないことが示されれば、中性子星中心部にクォーク物質があることを間接的に示すことになるかも知れない。より外側の密度 $\rho \sim \rho_0 - 2\rho_0$ のouter coreは、大部分が中性子からなる核物質と考えられ、この領域のEOSは星の半径に大きな影響を与える。この領域では、通常核密度 ρ_0 での核力と対称核物質(中性子数 $N \sim$ 陽子数 Z)のデータをもとにEOSを構築しているが、中性子星内の中性子過剰な非対称核物質($N \gg Z$)を記述するEOSの主要成分“対称エネルギー”(中性子物質と対称核物質のエネルギー差)には大きな不定性がある。EOSを与えれば中性子星の半径が計算でき、観測値と比較できるが、観測による半径導出には大気の模型等が仮定されていて信頼性が不十分である。中性子過剰な非対称核物質に対する低密度から高密度($2\rho_0$ 付近)までの密度と圧力の関係(非圧縮率等)を実験で測定できれば、直接EOSを決定できる。さらに低密度($\rho \ll \rho_0$)のcrust(地殻)領域では、純粋な中性子物質と中性子過剰原子核とが共存する「パスタ相」が理論的に予想されており、その観測的検証も興味深い。純粋な中性子物質は、散乱長が発散するユニタリー気体で近似でき、近年進展している冷却原子系の実験によりEOSを確認できる段階になりつつある。ユニタリー極限と、中性子星物質において必要となる様々な補正とを正しく記述する理論的枠組みを開発し、中性子過剰核の性質、特に中性子星の冷却速度に影響を与える超流動ギャップの大きさに関する現象を探求する。これらは、冷却原子系と中性子過剰核というスケールが大きく異なる対象を結びつける魅力的課題である。

本研究では、以下のようにして信頼性の高いEOSを決定し中性子星の物質と構造を解明することを目指す。

A班 (A01, A02) : 我々が世界をリードして進めてきたハイパー核研究を、世界最大強度の陽子加速器J-PARCで一層発展させ、inner coreの高密度($>2\rho_0$)核物質の理解に不可欠なストレンジ粒子の相互作用を実験的に決定する。A01では、ハイペロン崩壊検出器やエマルジョンによる $\Lambda\Lambda$ ハイパー核とダブル・ストレンジネス系($\Lambda\Lambda$ 相関)の研究や、世界初の Ξ -ハイパー核分光により、 $\Lambda\Lambda$ 間、 Ξ 核子間、 $\Xi N - \Lambda\Lambda$ 転換の相互作用を決める。これはinner coreの最も高密度($\rho > 3\rho_0$)の領域で現れるハイペロンの組成を決める。また、A02では、新方式の Σ^+p ($=\Sigma^-n$)散乱実験や、実績ある中性子過剰 Λ ハイパー核分光と Λ ハイパー核 γ 線分光、 K^- 中間子核の研究により、中性子過剰核物質中での Σ^- 、 Λ 、 K^- の相互作用を決める。これらは、inner coreの密度 $\rho \sim 2\rho_0 - 3\rho_0$ の領域でハイペロンがどのように現れ出すか、 K^- 凝縮は起こるのか、を支配する。

B班 (B01, B02, B03) : 世界最高性能を誇る不安定核ビーム施設RIBFで中性子過剰核を大量生成し、中性子過剰核物質の性質を様々な実験で調べる。B01では、中性子過剰核ビームの原子核衝突実験により、outer coreの高密度($\rho \sim \rho_0 - 2\rho_0$)領域に対応する中性子過剰核物質の非圧縮率(EOSの重要部分)を引き出す。B02では、我々が世界で初めて不安定核の研究に導入したクーロン分解法(運動学的完全測定)を用い、中性子過剰核のPygmy共鳴やモノポール($E0$)巨大共鳴等の集団運動を測定して非圧縮率を決定し、outer coreのより低密度領域($\rho \sim 0.5\rho_0 - \rho_0$)でのEOSを決める。低密度中性子物質で重要な役割をもつダイニュートロン相関も実験で解明する。B03では、レーザー冷却した極低温フェルミ縮退原子系の性質を実験的に調べることで、中性子星のcrustで中性子物質が現れ出す領域の希薄中性子物質($\rho \ll \rho_0$)のEOSやその性質(BCS/BEC状態)を調べる。

C班 (C01) : 宇宙X線望遠鏡を用い中性子星半径の精密決定に挑む。運用中のX線衛星による研究に加え、2015年度に打ち上げ予定のX線天文衛星ASTRO-Hにより中性子星を観測し、半径を導出する。X線黒体放射スペクトルからの半径導出の精度向上、質量降着で発生するX線バースト中の吸収線の重力赤方偏移の測定、準周期的放射(QPO)の測定により、信頼性の高い半径導出を行う。さらに将来の大面積X線検出器を搭載した衛星のための新たな検出器開発を実施する。

D班 (D01) : 原子核理論・天体理論・凝縮系理論の研究者が協力し、低密度から高密度の広い密度領域において中性子星物質の多体問題を正確に解く理論的枠組みの開発・整備を行う。A・B班からの実験データに基づき高密度から低密度領域のEOSを精密化する。結合したEOSから得られる結果をC班で得られる半径・質量

のデータと比較してEOSを選別・改良し信頼性の高いEOSを決定して、中性子星の構造や冷却過程を解明する。

従来、上記AとBの分野は研究上の交流が殆どなく、Cの分野やBの極低温原子物理分野と他の間にはまったくなかった。今回初めて中性子星物質の理解という明確な目標のもと、分野を横断する理論研究を通じて連携することとなった。A, B, C班で得られたデータは直ちにD班による理論的検討を通じて領域全体にフィードバックし、各班の次の研究戦略を決める。またA, B, C班は新型検出器の開発・使用でも協力する。領域全体で研究会やスクール等を行い、各分野の若手研究者の視野を広げ、当領域の研究に積極的に加わってもらう。

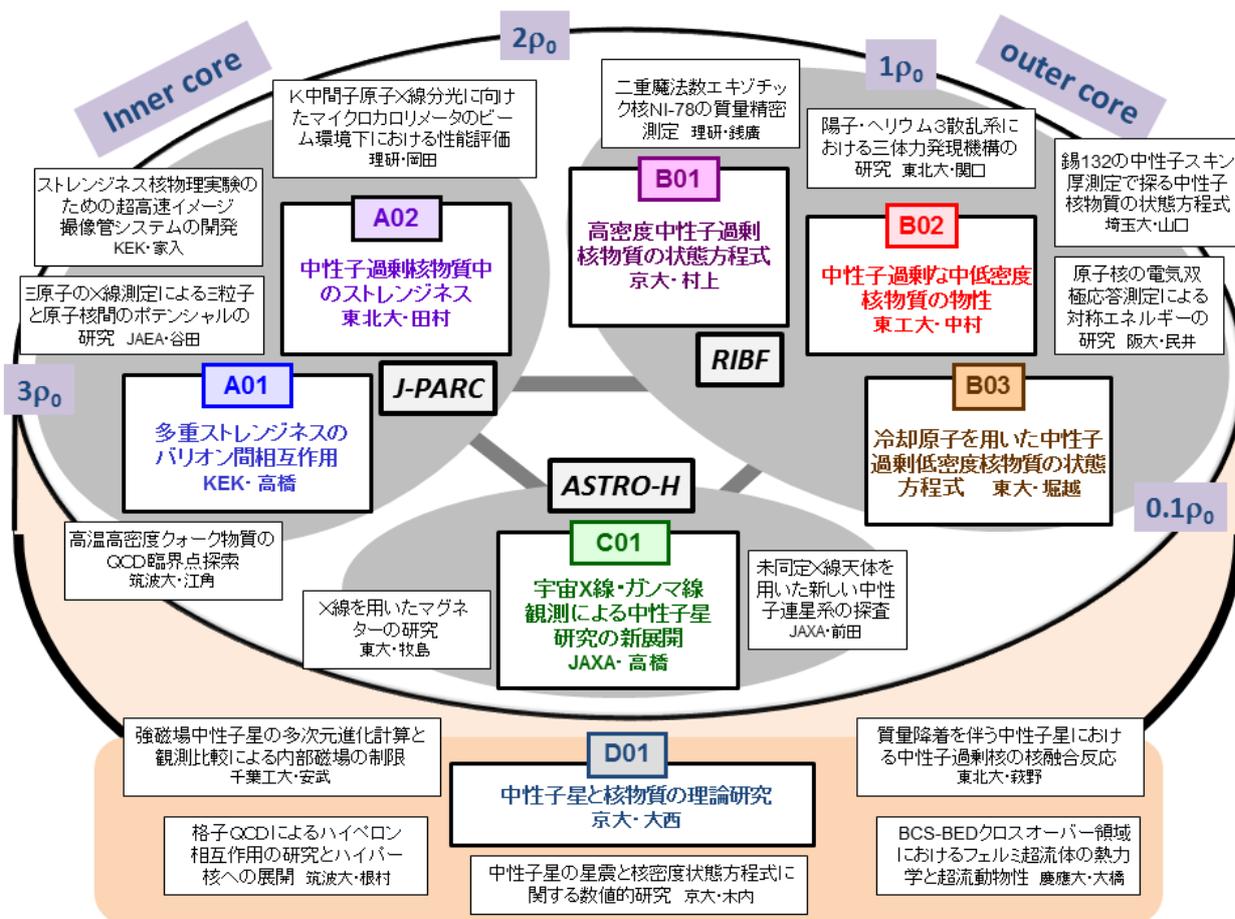
本領域の発展により、“バリオン系物性物理学”というべき新分野が拓かれ、物性物理をはじめ広汎な科学に影響を与える。また、超新星爆発やブラックホール形成の理解を助け、天体物理・宇宙物理を進展させる。さらに、クォーク物質やクォークグルオンプラズマ等のハドロン系を超えた物質科学の進歩をも促す。

2. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況（2 ページ程度）

領域内の計画研究及び公募研究を含んだ研究組織と領域において設定している各研究項目との関係を記述し、研究組織間の連携状況について図表などを用いて具体的かつ明確に記述してください。

研究組織・研究項目の互いの関係を以下に図で示す。計画研究は、A01,A02,B01,B02,B03 の順に（図では時計回りに）、対応する中性子星物質の密度が高密度から低密度へと下がる向きで描かれている。C01 はそのすべてと連携し、さらにその全体が理論班 D01 によって結び付けられ、連携している。15 件の公募研究はもともと連携の強い計画研究の近くに配置した。公募研究は、(a)計画研究と同じ研究課題に異なるアプローチや実験手法で迫ることで相乗効果が期待できるもの、(b)異なる計画研究の間を埋めることで領域全体の「中性子星核物質」研究をより深めるもの、(c)周辺他分野との橋渡しとなってより広い研究領域への発展の契機となるもの、という観点で選ばれた。

すべての公募研究と計画研究が一同に会して連携の方策を議論する「公募研究キックオフ会」や、計画研究間での検出器の共同開発や相互利用を目指した「検出器交流会」を開催した。



計画研究 A01, A02

計画研究 A01, A02, および 3 つの公募研究（谷田、家入、岡田）は、高密度核物質中のストレンジネスを探ると同じ研究目的のもと J-PARC の同じビームライン K1.8/K1.8BR で行う実験およびそのための検出器開発が課題である。公募研究（谷田）のΞ原子の研究は、A01 のΞハイパー核分光実験と相補的なΞN相互作用の情報が得られ相乗効果が大きい。公募研究（岡田）のめざす K-中間子原子実験は A02 の K-pp 束縛状態探索実験と相補的で相乗効果が大きい。公募研究（家入）は A02 で行うΣ陽子散乱実験を別の新手法で行うための装置開発である。一方、公募研究（江角）は A01, A02 が扱う高密度状態を、高エネルギー重イオン衝突実験というまったく別方向から探るもので、周辺他分野と結び付け本領域を広い研究領域へ発展される契機となる。また、これらの研究はいずれも D01 班による理論的分析が不可欠であるため、A01, A02 班と理論班 D01 は日常的にも情報交換や議論を行っており、連携して研究会やセミナーも開催している。

(計画研究 A01) A01班ではビーム飛跡測定と運動量解析のための K1.8 ライン上の位置検出器を、大強度ビームに対応したファイバー検出器に改良した。これを用いて A02班で行った中性子過剰 Λ ハイパー核分光実験では、12-14M/spill という大強度ビームを扱うことに成功した。エマルジョン実験用にギャップを上げた KURAMA スペクトロメータは、公募研究（谷田）の実験でも用いることを考慮して、検出器等の整備を進めている。また、ハイペロン崩壊スペクトロメータの読出し回路として B01班が開発したシステムを採用した。

(研究計画 A02) A02班で行う実験の多くは、現在の弱いビーム強度でも実施可能で、また、現在のセットアップ(K1.8 ライン+SKS スペクトロメータ)で行うため、同じ K1.8 ラインで行う他実験よりも先行して行う。そのため、ビーム調整や K1.8 ライン上の検出器の調整は、A02で行ったものを A01班の実験でも引き継いで行う予定である。また、A02で行うハイパー核ガンマ線分光実験に使用するゲルマニウム検出器 Hyperball-J は、配置をかえて公募研究（谷田）の X 線測定でも使用する。そこで、A02 班では谷田氏も交えて、ゲルマニウム検出器の読出しや校正方法について共同開発を行っている。また、公募研究（岡田）で開発している新型超伝導 X 線検出器は、C01班のもつマイクロカロリメータの技術を生かすことで一層の性能向上を目指している。なお岡田氏の超伝導 X 線検出器を将来は谷田氏の Ξ 原子 X 線測定でも使えないかも検討している。

計画研究 B01

本計画研究 B01 で実験に用いる理化学研究所 RIBF の大型基幹装置 SAMURAI は、当初からいくつかの異なった構成で様々な実験に使えるように設計され、計画研究 B02 の実験にも用いられることになっている。SAMURAI は汎用性を持たせるため、早い段階でこの装置を使うことに興味を持つ者がまとまり国際共同実験グループ SAMURAI Collaboration を組織することになったが、計画研究 B01、B02 はその主要メンバーとして、連携してビームライン検出器、大型中性子検出器群、データ収集システムの開発に携わって来た。

TPC のトリガー検出器の開発に当たって、計画研究 A02 で開発された MPPC 用の読み出し回路を発展させて使うことになり、連携しながら仕事を進めている。TPC の読み出し回路についても B01班がフランス、アメリカのグループと開発を進めてきたものを計画研究 A01 に紹介したこともあり、今後も情報を共有し、リソースの有効利用をすることになっている。

重イオン衝突を使つての高密度領域での中性子過剰な核物質の状態方程式の導出のためには、信頼度の高いシミュレーションプログラムの開発が不可欠になる。そこで、理論の計画研究 D01 と共催で 2013 年 7 月に Nuclear symmetry-energy and nucleus-nucleus collision simulation を開催し、今後より信頼度の高いプログラムを共に開発することを合意した。

計画研究 B02

B02班で進めている(1)中性子過剰核(中性子スキン核)の核応答の研究では、中性子スキン核に出現する「ビッグミー共鳴」を観測するため D01 (理論)、および B02 の公募研究 (民井)との連携を強めている。H25 年度にはミニワークショップ「原子核応答と核物質の状態方程式」を開催し活発な議論を交わした。中性子過剰 Ca 核の電気双極子応答の実験提案は理研 RIBF のプログラム委員会で高い評価を得、採択されたが、これは D01 の特任研究員(稲倉)との連携が大きく寄与した。また、(2)希薄核物質中でのダイニュートロン相関、(3)中性子超過剰な非束縛核子多体系の探索に関しては、D01(松尾、萩野(公募)、稲倉)と連携し、取得した $^{22}\text{C}, ^{19}\text{B}, ^{26}\text{O}$ の実験データの解釈について議論を交わしている。B01、B02 はどちらも理研 RIBF の基幹施設の一つ「多種粒子測定装置(SAMURAI)」を用いるが、両班はともに SAMURAI Collaboration に参加し、建設や運営に参画している。また本領域で開催した NuSYM13 (下記 D 班の項参照)に B02、D01 と共に参加し、講演を行うとともに議論に参加した。検出器交流会では他班と検出器開発のノウハウについて意見交換を行い、今後の検出器の開発にも役立つ情報を多く集めることができた。民井氏以外の B02班の公募研究 (関口、山口)は計画研究と相補的な研究となっている。関口氏の推進する 3 体力の研究は EOS にとって重要であることが指摘されており、計画研究の(3)とも関連している。山口氏の目指す中性子過剰核の質量の直接測定は、

不安定核のバルクな性質からの EOS へのアプローチで、反応を利用した計画研究と相補的である。

計画研究 B03

B03 班は希薄中性子物質 EOS の実験的決定へ向け、粒子密度が十分小さく粒子間相互作用が s 波相互作用で記述できる領域と、密度が大きくなり p 波相互作用が支配的になる領域を、堀越（代表）と向山（分担）がそれぞれ冷却フェルミ原子実験によって進めている。冷却原子系で決定された EOS や物性特性を原子核物理へ応用する為、中務（分担）が両分野を接続する役割を担う。この研究は、低密度の中性子物質の性質を冷却原子ガスというまったく別の手法で調べるものであり、加速器による原子核実験の B01, B02 班とは検出器相互利用などの実験上の連携はないが、原子核理論が専門の中務（分担者）や D01 理論班と 公募研究（大橋）を通して、他のグループとも連携して研究を進めている。

計画研究 C01

C01 班では、ASTRO-H 等での X 線・ガンマ線観測で得られるデータから中性子星核物質について何が引き出せるかをあらかじめ 理論班 D01 と議論し、観測開始後にすぐに有意義なデータが得られるよう準備しておく。本格的な連携はこれからだが、総括班主催の研究会や国際会議を通して議論を進めている。また、検出器については、開発を進めてきたアナログ LSI の技術を 計画研究 A,B 班の今後の実験に生かせるようにしたい。そのため「検出器交流会」を開催して A,B 班との情報交換を進めている。また、筑波の JAXA 宇宙センターにて組み上げ中の ASTRO-H 衛星を領域のメンバーに見てもらおう機会を設けた。

計画研究 D01

D01 の理論研究の課題の多くでは、得られた結果を他の研究計画などから得られる実験データと組み合わせることによって中性子星物質の EOS の決定につなげることができる。また、理論による予言とその精度は、実験の計画を立てる上でも重要である。したがって、計画研究 D01の理論研究では、日常的な研究活動や研究領域の活動において、実験の研究項目と連携している。例えば、B01の重イオン衝突の実験から対称エネルギーを得る研究のためには、十分な精度のシミュレーション計算が必要になる。その問題を議論するために、B01と D01の研究者が中心となって、2013 年 7 月に理研でワークショップ「Nuclear symmetry energy and nucleus-nucleus collision simulation」を開催した。そこでの議論に基づいて、国内のシミュレーションコードにより、対称エネルギーを反映すると期待される π 中間子を含む計算も実現している。現在、B01の既存の実験データとの比較により、理論の精度向上を検討中である。

また、中性子星物質（またはその重要な要素である対称エネルギーの密度依存性）は、理論・実験・観測の様々な手法でアプローチされているが、ひとつの手法のみで EOS が確定するわけではなく、むしろ、様々な手法の成果を組み合わせることによって強固な結論が得られると考えられる。そのような主旨で 2013 年 7-8 月に国際ワークショップ「Symmetry Energy in the Context of New Radioactive Beam Facilities and Astrophysics (ICNT2013)」、及び国際会議「3rd International Symposium on Nuclear Symmetry Energy (NuSYM13)」が開催されたが、D01が中心的な組織委員として運営に関わった。また、他の研究計画やその他の日本の研究者からも重要な研究成果が示されて活発な議論が起これ、現状での対称エネルギーの制限に重要な貢献がなされている。これらの研究のいくつかは公募研究に採択されており、今後のさらなる進展が期待される。

公募研究では、たとえば安武氏は 計画研究 D01の巽（分担者）、丸山（連携者）とクォーク=ハドロン相転移における非一様構造の出現可能性に関する共同研究を進めている [arXiv:1403.7492]。大橋氏は、B03 班の冷却原子気体実験グループと密接に議論を行い、スピン軌道相互作用を用いた p 波超流動の実現方法の理論的提案などを行うとともに、2013 年 3 月の中性子核物質理論班研究会に参加し、フェルミ超流動の強結合物性について、本学術領域主催の研究会を中心に D01 班の研究者と冷却原子物理学と原子核物理学との垣根を越えた議論を行って連携を深めている。

3. 研究の進展状況〔設定目的に照らし、研究項目又は計画研究毎に整理する〕（3ページ程度）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、現在どこまで研究が進展しているのか記述してください。また、応募時に研究領域として設定した研究の対象に照らして、どのように発展したかについて研究項目又は計画研究毎に記述してください。

計画研究 A01

(1) エマルジョンによるダブル Λ 核事象等の研究、(2) 大立体角ハイペロン崩壊スペクトロメータによる H 粒子探索、(3) Ξ ハイパー核分光 の実験を J-PARC ハドロン施設で行い、ストレンジネス-2のバリオン間相互作用を定量的に調べ、高密度領域での EOS の精度を高めることを目的とする。

これらの実験を行う K1.8 ビームライン検出器・データ収集系の高速化・高計数率化対応を行った。本研究課題の実験を行うには、十分な性能の基盤設備が整ったことになる。

(1)の実験実施に向け、実験提案時に計画した量の 80%のエマルジョンを用意できた。不足分を補うため、散乱粒子 K^+ の検出効率向上のため、KURAMA スペクトロメータ磁石のギャップを拡げることにした。そのため下流の検出器の大型化および必要な検出器の製作を行った。エマルジョンの画像解析法としては、スペクトロメータ情報を使う「ハイブリッド法」を用いるが、エマルジョン層間の位置合わせの精度を向上することに成功し、 Ξ 粒子の飛跡やダブル Λ 核からの崩壊粒子の飛跡を、人の目を介することなく自動追跡することが可能となった。一方、スペクトロメータの情報を使わず、ダブル Λ 核の生成・崩壊に特徴的な 3 つの分岐点を持つ事象を高速に検出する「全面全自動スキャン法」の開発にも成功し、これまでの 600 倍の速度で画像が取り込めるようになり、以前にビーム照射したエマルジョンを用いた試験スキャンでは、数個のダブル Λ 核候補が検出された。

(2)については、H24 年 7 月の J-PARC 課題採択委員会で物理的意義を認める Stage-1 採択を得た。ハイペロン崩壊スペクトロメータの設計を進め、その主要飛跡検出器 TPC の仕様を決定し、製作を進めている。TPC 読出し回路系は、B01 班が Saclay 等と共同開発した GET システムを採用し、製作を行っている。

(3)の Ξ ハイパー核分光実験のための高分解能スペクトロメータ S-2S の製作を進めている。

計画研究 A02

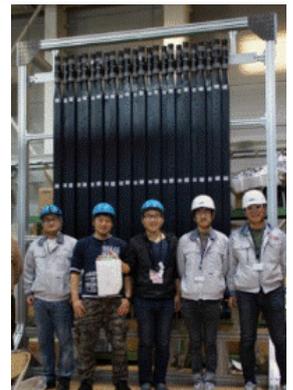
ストレンジネス $S=-1$ 系の実験研究である(1) Σp 散乱実験、(2a) 精密 γ 線分光、(2b) 中性子過剰 Λ ハイパー核分光、(3) K中間子原子核探索実験の 4つを J-PARC ハドロン施設で行い、中性子星内部の密度 $2\rho_0-3\rho_0$ 程度の領域でハイペロンがどう現れるのか、K中間子凝縮は起こるのか、に答える。

(1) Σp 散乱実験 (E40) : 中性子星内部で密度が上がるとともに最初に発生するストレンジ粒子が Λ か Σ かを確定するため、 Σn と同一の相互作用をもつ Σ^+p の散乱実験を従来の百倍の高統計で行い、 Σn 相互作用の符号と大きさを確定する。これまでに MPPC 読出しの多層円筒状ファイバ

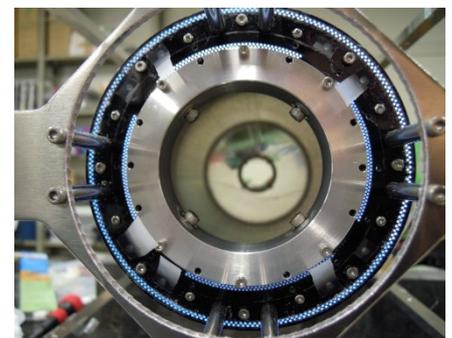
ートラッカー (写真)、BGO カロリメータ、MPPC 読み出し専用回路からなる散乱陽子測定システムの開発に成功し、ビームを用いた性能評価で良好な結果を得た。実機の製作に着手した。

(2a) 精密 γ 線分光 (E13) : ${}^4_\Lambda\text{He}$, ${}^{10}_\Lambda\text{B}$, ${}^{11}_\Lambda\text{B}$ 等の軽いハイパー核の構造を精密 γ 線分光によって決定し、 ΛN 相互作用の詳細、特に $\Lambda N-\Sigma N$ 結合力の効果を定量的に調べる。これまでに Ge 検出器群 Hyperball-J を K1.8 ラインに設置、H25 年 3 月に第一実験 E13-1 を開始、K-ビーム調整と検出器テストを行った。また、強いビームで行う第二実験 E13-2 に備えて Hyperball-J の耐高計数性能を上げるため、digital signal processor を利用した波形データ収集システムの開発と、新開発の機械式冷凍機型 Ge 検出器の冷却性能の改良を進めている。

(2b) 中性子過剰 Λ ハイパー核分光 (E10) : (π^-, K^+) 反応によって ${}^6_\Lambda\text{H}$ および ${}^9_\Lambda\text{He}$ の束縛エネルギーとレベル



大型化した KURAMA スペクトロメータ TOF 検出器



多層円筒状ファイバートラッカー

構造を調べる。これまでに、MPPC読出しのファイバートラッカーによる飛跡検出器の開発に成功し、従来の10倍の $10^7/\text{sec}$ の大強度ビームで実験可能となった。これを用いて第一実験E10-1を行い、 ${}^6\text{LiH}$ のデータを成功裏に収集、解析もほぼ終了した。予測に反して ${}^6\text{LiH}$ は生成されておらず、生成断面積の上限值を得た。D01班の原田らと理論的扱いの再検討を始めた。また、第二実験に向けて飛跡検出器信号処理システムを整備し、GEMの技術を用いた超高計数率対応の飛跡検出器の開発を進めた。

(3) K中間子原子核 (E15) : ${}^3\text{He}(\text{K}^-,n)$ 反応を用いて K^-pp 束縛状態を探索する。これまでに、K1.8BRラインの検出器系を調整し、第一段階実験E15-1の一部のデータを収集、解析した。現状では、 ${}^3\text{He}(\text{K}^-,n)$ 反応のmissing massスペクトルに深く束縛した K^-pp 核は見えておらず、浅くて吸収の強いK中間子核のポテンシャルが示唆される。運転再開後のビーム強度の増大に備え、高計数率対応の飛跡検出器 (MWPC) の製作を進めた。

計画研究 B01

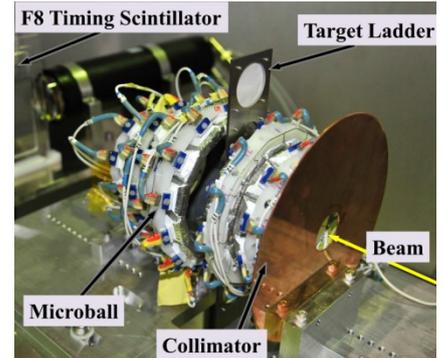
通常核密度の約2倍($\rho \sim 2\rho_0$)の密度領域では対称エネルギーが密度に大きく依存すると予想されている。この中間エネルギー(核子当たり200–300 MeV)領域での不安定核-安定核中心衝突から放出される π^+ と π^- との生成比等を測定し、この領域での状態方程式決定を目指す。そのためまず、重イオン衝突実験のデータから“輸送方程式”を使って信頼できる通常核密度領域での対称エネルギーの情報を導き出せるか検討した。その結果は文献(B01-10)としてまとめられているが、重イオン衝突実験から得た対称エネルギーは、他のより信頼度の高い方法を用いて求めたものとよく一致することが分かり、“輸送方程式”計算を高核密度領域に広げて使うことの妥当性が示された。

平成25年6月に、状態方程式探索重イオン衝突実験の手始めとして、核子当たり70 MeV領域の不安定Sn核ビームを用いて、入射核から標的核に(あるいはその逆方向に)中性子や陽子がどのように拡散移動するかを探る実験を行い(写真)、予定量のデータ収集に成功した。現在、詳細な解析を進めているところである。

平成27年度の早い時期から高密度領域での実験が始められるように、測定に必要な多重飛跡検出器(TPC)の設計、製作はアメリカDOEの予算を使いながら、そしてTPCからの信号を処理する回路(GET)は、フランスのサクレーなどの協力を得て、開発を進めてきた。ミシガン州立大学で進めてきたTPCの開発は、平成24年度初めに基本設計が終了し、その後部品の製作が順次始まった。そして平成25年1月に製作の進捗状況についてDOEからのレビューを受けて、日本側の寄与も含めて「良好」との評価を得た。平成25年夏には、最終テスト用AsAd基板(GETのフロントエンド基板)をミシガン州立大学に持ち込み、ワイヤー面の製作まで終了していたTPCに、放電防止用に開発したZAPボードを介して装着した。そして宇宙線を使ったテストを行い、荷電粒子の飛跡信号を見ることに成功した。このテストの際に見つかった不具合の手直しを施した後、平成26年2月末にTPC本体を理化学研究所に搬入した。

計画研究 B02

B02班「中性子過剰な中低密度核物質の物性」では、不安定核ビームを用いた中性子過剰核の反応実験を遂行し、標準核密度から希薄核密度までの密度領域について中性子過剰核物質の物性を明らかにし、中性子過剰な核物質の状態方程式(EOS)の決定を目指している。そのため(1)中性子過剰核(中性子スキン核)の核応答の研究、(2)希薄核物質中でのダイニュートロン相関の研究、(3)中性子超過剰な非束縛核子多体系の探索、の3つの課題に取り組んでいる。(1)まだ数例しか測定のない中性子スキン核のピグミー共鳴の観測を目指している。D01班とも連携してシミュレーションを重ね、中性子スキンが発達しEOSの主要パラメータに感度をもつと



荷電粒子検出器：マイクロボール

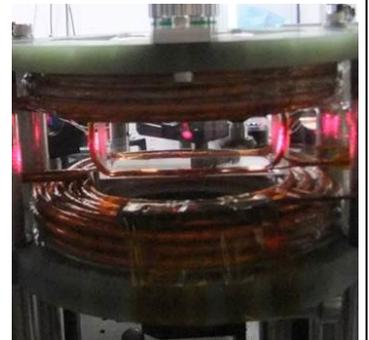


CATANA 検出器 プロトタイプ

期待される中性子過剰な Ca 核を用いた実験計画を立てた。これは理研 RIBF の PAC (プログラム委員会) において高い評価を得、採択された。一方、この実験で用いる γ 線カロリメータ(CATANA)の開発を進めている。シミュレータの開発、CsI(Tl), CsI(Na)結晶を用いたプロトタイプの製作、テスト実験を重ね、仕様の決定がほぼ終わった。今年度から次年度にかけて建設を加速させ、次年度後半には実験を行う予定で進めている。(2) 2 個の中性子をハロー成分にもつ 2 中性子ハロー核 $^{22}\text{C}, ^{19}\text{B}$ のクーロン分解実験を行いダイニュートロン相関の解明を行うことが目標である。この実験は成功し、現在詳細な解析を進めており、プレリミナリーながらもダイニュートロン相関の導出にも重要な電気双極子応答の強度分布の結果を得た。また関連して、中性子過剰核 $^{31}\text{Ne}, ^{37}\text{Mg}$ が中性子ハロー成分をもつ変形核であることをつきとめ論文発表し(B02-1,B02-2)、プレス発表も行った。(3)目標は、4n(テトラニュートロン) および重い酸素同位体 ^{28}O の初観測である。中性子は 2 体ですでに非束縛であるが、4 体でどのように安定性が増すのか(あるいは不安定化)するのかという問いは核力を理解する上でも重要である。 ^{28}O は観測しうる最後の二重閉殻核となる可能性もある核子多体系で、 $^{24}\text{O}+4n$ でできた 5 体の共鳴状態と考えられており、注目されている。 $^{25,26}\text{O}$ の実験は H24 年度に行われ、成功した。現在、その詳細解析を進めている。 ^{26}O については殻構造の変化や 3 体力に感度のある第一励起準位の特定に世界で初めて成功した。 ^{28}O の実験については実験計画が理研 RIBF の PAC において最高評価を得、H27 年度の実施に向けて準備を本格化させている。一方、4 中性子系を効率よく測定するための次世代型中性子検出器についても仕様が固まり、建設を進めている。

計画研究 B03

B03 班「冷却原子を用いた中性子過剰な低密度核物質の状態方程式」では、研究期間内に (1) s 波相互作用しているフェルミ多体系の EOS: $P(T, \mu, \alpha^{-1})$ の決定、(2) 周期ポテンシャルが EOS に与える効果、(3) 回転系 EOS と静止系 EOS との比較、(4) p 波相互作用しているフェルミ多体系の EOS の決定、を目指す。これらはそれぞれ自由な希薄中性子物質、中性子星 inner crust 内の中性子物質、中性子星の自転の効果、密度が飽和核密度程度の中性子物質に対応する。現在までの進展状況は以下である。(1) 冷却フェルミ原子系で中性子物質に相当する EOS



リチウム原子のレーザー冷却

を測定する為には、フェルミ多体系を $T/T_F < 0.1$ の極低温状態で用意する必要がある。これまでリチウム原子のレーザー冷却装置の開発から行い、 10^5 個の ^6Li フェルミ原子を $T/T_F < 0.1$ の極低温状態に至らせ、超流動転移を確認した。さらに安定化された磁場を用いた s 波散乱長の制御や、約 $1 \mu\text{m}$ の高い空間分解能での撮像システムも整った。現在テストとして相互作用をしていない理想フェルミ気体の EOS を実験的に決定し、正しい EOS を構築できるか試している段階である。その後中性子物質の EOS に移る。(2)(3) 周期ポテンシャルや回転ポテンシャル用のレーザー光の準備が整った。(1)の実験を基礎に行うので、新たな装置の開発は必要としない。(4) 峡線幅の p 波フェッシュバツハを用いて p 波相互作用を高精度に制御する為、外部磁場を生成するコイル電流の 6 桁の精度での安定化に成功。この磁場安定化技術を用いて、p 波フェッシュバツハ共鳴のパラメータ決定に世界で初めて成功した。現在 p 波相互作用しているフェルミ粒子系の EOS を決定するため、p 波相互作用エネルギーの測定に挑戦している。

計画研究 C01

本研究は、X線天文衛星による観測から中性子星半径の精密決定に挑む事を目的とする。中性子星半径の決定には様々な不定性が伴うため、それを出来る限り小さくした観測を工夫し、また、適切な観測対象を選ぶ必要がある。本研究においては、2015年度に打ち上げ予定の次期X線衛星ASTRO-Hに搭載される次世代型の観測装置を中性子星観測においても十分な性能が得られるように整備すると共に、ASTRO-Hと相補的な能力を持つ将来ミッションの実現をはかる。

ASTRO-Hの超高分解能分光装置(マイクロカロリメータ)を用いて中性子星表面からのX線バースト中に予

想される吸収線の重力赤方偏移を測ることが出来れば、距離によらない半径（Schwarzschild半径に規格化された）の観測が可能である。また、軟X線(0.3 keV)から軟ガンマ線(600 keV)と3桁にも及ぶ広帯域観測でバースト中のスペクトルを正確に決定することで半径に制限をつけることができる。本研究では、こうした高計数率観測をASTRO-Hを用いて可能とするための改良作業を行うことを研究期間前半の目標とした。特にデジタル波形処理機器は、精密軟X線分光装置において、衛星上で入射光子のエネルギーを精密測定する心臓部の一つであり、その高速化が本研究の鍵をにぎる。耐高計数率化を可能とする回路方式の検討を行い、従来のソフトウェア制御による収集方式に代替可能なハードウェアによる収集方式を検討し、回路として実装し、試験を行い、効率的な大量のデータ送信が可能となった事を確認した。その他、ASTRO-Hに搭載されるX線CCDや硬X線検出器、軟ガンマ線検出器による広帯域同時観測を実現し、特に高計数率の状況でも複数の装置の性能が十分に発揮できるようにFPGAの改良やセンサー全体の試験を行った。特に、硬X線イメージャについては、キャリブレーション用のハードウェアを整備することができた（写真）。



本研究で組み上げた硬 X 線撮像検出器の地上試験モデル

観測計画をたてるため、また実際に解析を行うために、中性子星表面の極限環境や天体の非対称な形状を考慮した、より精密なX線放射のシミュレーションコードの開発を行った。これを用いて初期観測フェーズにおいて観測すべき天体候補の検討を行い、候補天体を識別した。さらに、中性子星の半径に制限を与える目的で提案されているNICER(米国)、LOFT（ヨーロッパ）などの将来衛星計画のメンバーとなり、その実現に向けたセンサー開発や予備実験を実施した。

計画研究D01

D01 班では、原子核理論・天体理論・凝縮系理論の研究者が協力し、(A)高密度側での多成分最高密度低温物質、(B)低密度側での非対称核子物質、(C)コンパクト天体現象の3つの方向から中性子星の物理に迫り、実験・観測に根ざした中性子星核物質状態方程式を構築するとともに、密度変化により起こる相構造・量子相転移の普遍性と多様性を明らかにすることを目指している。

(A)高密度領域では、ハドロンと核子・核物質の相互作用、特にハイペロン・反K中間子(K^{bar})を含む3体力が重要な役割を果たす。核内ハイペロン-核子相互作用の情報を含む $\Lambda\text{NN}-\Sigma\text{NN}$ 3体系とグリーン関数法による ΣNN 、 $K^{\text{bar}}\text{NN}$ 生成スペクトルの研究(D01-3)のほか、反K中間子(K^{bar})-核子(N)相互作用情報を含む $K^{\text{bar}}\text{-pp}$ の生成スペクトルを調べるとともに、複素スケーリング法とカイラル理論に基づく $K^{\text{bar}}\text{N}-\pi\text{Y}$ ポテンシャルと $K^{\text{bar}}\text{NN}$ 3体系構造の研究を進めた(D01-8)。またsd核領域と $A=40$ 領域の Λ ハイパー核の超変形状態など特徴的な構造(D01-7)に関して、さらに陽に3体力を取り入れた相対論的平均場理論(D01-2)による研究も進んでいる。

(B)低密度領域では、対称エネルギーと対相関が大きな課題である。新たに開発した半微視的核子間有効相互作用を用いて対称エネルギーに敏感な低エネルギー双極子励起を分析し、巨大共鳴を含むE1偏極率と対称エネルギーパラメータLの相関を見出したほか、魔法数の現れ方への影響も調べた(D01-4)。また対相関に関しては、中性子過剰Zr同位体の巨大中性子ハローにおける対相関の分析を進め、2中性子しきい値近辺に中性子対が広がった状態が普遍的に現れることを見出した(D01-6)。また、原子核衝突では反対称化分子動力学(AMD)により、破砕片分布、特に ${}^3\text{H}/{}^3\text{He}$ 比に対する α 生成の対称エネルギー依存性について新たな知見を得た(D01-10)。

(C)天体物理では、コンパクト天体現象と状態方程式の関係が課題である。理論班では中性子星の星振(ずりモード振動)からクラストのずり弾性率と対称エネルギーの関連を研究しており、これまでに、中性子超流動の効果の研究(D01-5)、ずり弾性率に影響する原子核の結晶構造・パスタ構造の数値的計算を進めた。また時間

依存ハートリーフォック理論によるパスタ核生成、カイラル QMC 模型に基づく非一様領域を含む中性子星状態方程式の構築(D01-11)、非一様なカイラル凝縮相に関わるニュートリノ過程・クォーク質量効果・多次元非一様構造、状態方程式データベース構築についての研究も進めた。低質量中性子星の質量・半径が核物質の状態方程式パラメータを組み合わせた 1 変数により記述できることの指摘、現実的な状態方程式を用いたクラスト振動の分析による対称エネルギーパラメータ L への制限、高密度領域で現れる非一様カイラル凝縮が引き起こす速い冷却機構の発見(D01-9)等の成果が得られた。

また、連携研究者によるカイラル有効場理論からの 2 体・3 体核力(D01-14)、多ポメロン交換からの 3 体力(D01-12)、ハドロン・クォーク・クロスオーバー等に基づく状態方程式(D01-13)も重要な成果である。

4. 若手研究者の育成に係る取組状況（1 ページ程度）

領域内の若手研究者の育成に係る取組状況について記述してください。

○総括班主催の若手育成イベント

総括班では、若手育成を特に重視し、以下のようなイベントを行ってこれに取り組んでいる。

若手スクール

H24 年度と H25 年度に、総括班が主催して、学生と若手を対象とした 2 日間にわたる「ウインタースクール」を開催している。本新学術領域のメンバーや、関連の深い分野の研究者を講師として、中性子星内部の物質を理解するために必要な地上実験や天体観測、理論的研究について講義を行い、実験施設の見学も行った。学生は修士課程学生を中心に学部 4 年生も参加した。

・2013 年 2 月 25 日～27 日、KEK つくばにて開催。JAXA で ASTRO-H 見学、J-PARC で加速器・実験施設見学。参加者 90 人。 <http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20130410100000/>

・2013 年 12 月 25-26 日、理研仁科センターにて開催。RIBF を見学。参加者 99 人。

<http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/nstar/symposium/2014.html>

全体研究会での若手の発表

2013 年 12 月 27-28 日に理研で行った第二回全体研究会では、ポスターセッションで若手 37 名がショートプレゼンテーションとポスター発表を行った。若手の研究をエンカレッジし、若手同士の交流の場ともなり、大変有効であった。<http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/nstar/symposium/2014.html>

国際スクール

・International School on Neutron Star Matter、2014 年 3 月 4 日～7 日、京都大学基礎物理学研究所にて開催。外国人若手を含む 43 名が参加。著名な外国人研究者 2 名を講師として招聘し、日本人講師 2 名とともに本新学術領域全体にわたる講義を 4 日間かけて行った。若手参加者 6 名の口頭発表の機会も設けた。

<http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/nstar/symposium/InternationalSchool2014.html>

・International school for Strangeness Nuclear Physics (SNP School、東北大学主催、東海および仙台にて) 2013 (2.14-20) および 2014 (2.13-19) を 2 回とも協賛した。

○各計画研究の若手育成

各計画研究は、右表のように H24, H25 年度だけで合計 40 名の修士、14 名の博士を生んだ。博士取得者の大部分は本新学術領域の研究に関係した職に就いている。

また、合計 8 名の若手の特任准教授・助教や研究員を雇用して本研究に専念してもらったが、そのうち 2 名は研究が評価されより条件のよいポストに異動(予定を含む)し、特に特定研究員として D01 班が採用した祖谷氏は研究成果が認められ国立天文台の特任助教として転出した。

それぞれの計画研究でも独自の若手育成の取り組みをしている。たとえば、計画研究 A01, A02 では大学院生の国際会議登壇

を積極的に支援しており、この 2 年間に博士課程学生 10 件、修士課程学生 6 件の口頭発表が行われた(予定を含む)。計画研究 B01 では、大型の多重粒子飛跡検出器 (TPC) の開発を国際共同プロジェクトとして進めているが、海外も含む多数の大学院生、ポスドクが参加しており、本計画研究の重要な部分を積極的に担ってもらっている。また、B03 班は学生に海外での口頭発表を経験させたり、三か月に一回若手研究者と学生中心の研究会を行っている。また B03 班はアジアで初となる冷却原子と原子核の合同国際研究会を若手中心に組織し、成功裏に終わらせた。また D01 理論班も大学院生教育を重視しており、大学院生の発表機会を増やす意味

計画研究名	研究員 特任教員	修士 取得者数	博士 取得者数
A01	1 名	4 名	1 名
A02	1 名	8 名	1 名
B01		4 名	
B02	1 名	4 名	1 名
B03		2 名	
C01	1 名	3 名	2 名
D01	4 名	15 名	9 名

もこめて、研究会において大学院生・ポスドクの講演を奨励している。理論班研究会(H24年度)、および国際スクール(H25年度)では、時間は短くとも若手が口頭発表する時間を取るよう心がけた。

○若手の受賞

本新学術研究を通じて、学生が以下の賞を受賞した。

1. 松本祐樹「J-PARC 大強度ビームトラッキング用ファイバー検出器の開発」2012年度ハドロンホールユーザー会(HUA)修士論文賞 (A02)
2. 赤澤雄也「シグマ陽子散乱実験のため検出器群開発」2013年度測定器開発・優秀修士論文賞 (A02)
3. 小林信之 “Spectroscopy of Neutron-Rich Nuclei via the Inclusive Breakup Reactions” RIBF Thesis Award 2013 (B02)
4. 和田泰敬「陽子- ^3He 散乱測定のための偏極 ^3He 標的の開発」2013年度東北大学物理学専攻賞 (B02 公募・関口)
5. 池町拓也「相互作用する極低温フェルミ多体系の温度評価」日本物理学会 2013年秋季大会領域1 学生プレゼンテーション賞 (B03)
6. 伊藤亜紀「Atomic shot noise 観測による実効的な撮像分解能の評価」日本物理学会 2013年秋季大会領域1 学生プレゼンテーション賞 (B03)

5. 研究費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）（1 ページ程度）

領域研究を行う上で設備等（研究領域内で共有する設備・装置の購入・開発・運用・実験資料・資材の提供など）の活用状況や研究費の効果的使用について総括班研究課題の活動状況と併せて記述してください。

総括班 X00 総括班の研究費は、主には全体研究会と若手スクールの参加者の旅費として使用している。さらに、総括班が主催・共催・協賛する国際スクールや国際会議、セミナー等への招待者の渡航費や参加者の旅費にも用いている。事務補佐員の雇用費にも使用している。

計画研究 A01 エマルジョン実験に向け、エマルジョン乳液（本研究費では予定の 40%）を購入し、乾板を製作した。また、KURAMA スペクトロメータの検出器の製作・整備を行った。KURAMA スペクトロメータは、本計画研究だけでなく、計画研究 A02 の Σp 散乱実験（E40）、および公募研究（代表：谷田聖）の Ξ 原子 X 線測定実験（E03）でも使用する予定である。H 粒子探索実験のためのハイペロン崩壊スペクトロメータの TPC の読出し回路システムとして、計画研究 B01 により開発された GET システムを採用し、製作を進めている。また計画研究の実験を行う J-PARC の K1.8 ビームラインの飛跡検出器を高レートに対応するための改良を本研究費で行った。このビームライン検出器は、A01, A02 班の実験で共通に使用される。

計画研究 A02 Σp 散乱実験用の MPPC 読出しの多層円筒状ファイバートラッカー、BGO カロリメーター、MPPC 読み出し専用回路（EASIROC 基板）の開発と実機製作に本研究費を使用した。開発した EASIROC 基板は B01 班の実験にも使用されることとなった。また、今後のビーム強度の増強に備えて、精密 γ 線分光用 Ge 検出器の波形データ収集システムの開発と機械式冷凍機型 Ge 検出器の冷却性能の改良、中性子過剰ハイパー核分光実験用の GEM による超高計数率飛跡検出器開発、K1.8BR ライン出口への高計数率飛跡検出器の導入にも使用した。

計画研究 B01 本研究費の大半は、TPC からの多量のデータを高速で読み出し処理をする回路 GET の開発と製作（フランスのサクレーなどと共同で進めている）、それに TPC を動作させるのに必要な電源類の調達に当てている。GET については、我々の勧めもあり、計画研究 A01 が製作する別の TPC の読み出し回路としても採用されることになった。そのため GET 回路は製作する台数が全体として増えたためコストを軽減することができた。またそれぞれの計画研究で調達した回路は、何らかの事故で回路が故障した時にバックアップとして使えるため、実験する上で保険の役割を果たしてくれる。また、計画研究 B01 の TPC のデータを読み込むトリガーを作る回路として、計画研究 A02 が開発してきた MPPC 専用の回路 EASIROC を採用することにしたので、開発費を減らすことが出来た。

計画研究 B02 ガンマ線カロリメータ（CATANA）の開発を進め、プロトタイプ製作のため CsI(Tl), CsI(Na), 光電子増倍管、アバランシュフォトダイオードを購入した。また、プロトタイプの試験だけでなく本実験でも用いる VME 規格の信号処理回路（アナログデジタル変換機、マルチヒット時間デジタル変換機）等の購入を行った。一方、理研 RIBF での本実験で用いる多種粒子測定装置用荷電粒子窓を購入したが、これは B01 班の実験でも用い、有効活用する予定である。一方、次世代型中性子検出器の開発では、読み出しに MPPC 用のプログラマブルバイアス電源を整備するとともに、VME 規格のマルチヒット時間デジタル変換器を購入し、これを主体とするデータ収集系の整備を進めている。

計画研究 B03 研究費は原子冷却用のレーザー光源とその周辺光学素子、レーザー周波数安定化用エレクトロニクス、高強度光トラップ用光学素子、フェッシュバッハ共鳴磁場用の電源やコイルの冷却システム、大電流制御用エレクトロニクス、観測系の撮像システム、その他計測機器に用いられている。特に本研究費で開発した PPS 製のステージやマウントは高磁場中に生じる渦電流の効果が無く、また加工可能性、低熱膨張率、高い剛性により冷却原子系において幅広い応用が期待される。また本研究で用いている 200W のハイパワーレーザーは、熱レンズ効果の影響で制御が難しいと言われてきたが、適切な光学素子を選ぶ事により問題が解決できることを見出した。これによりレーザー冷却された原子を直接光トラップへ移行する事が可能になり、冷却

原子実験の困難さを大きく低減し実験サイクルを大幅に減らすことに成功した。

計画研究 C01 ASTRO-H 衛星搭載装置の中性子星観測に対する改良と最適化を行った。ASTRO-H 衛星搭載のマイクロカロリメータのデジタル波形処理機器(PSP)を用いて X 線バースト中の高計数率観測を行うために回路の改良, 実装, 試験を行った。打ち上げ後, ただちに行われる観測に向け, X 線 CCD と組み合わせて広い範囲で正確なスペクトルを保証するために, 硬 X 線望遠鏡の焦点面検出器の地上試験用装置を整備し, それを完成させた。将来の衛星搭載を目指した開発研究として, X 線偏光計の高度化など, 検出器開発にむけた要素研究を実施した。本研究における一連の試験を進める上で, 多くは既存の設備を用いたが, 一部, 計測装置の購入を行った。

計画研究 D01 理論班(D01)では研究費の多くを研究員雇用経費と旅費に使用している。まず理論研究に必要なのはマンパワーであり, 4名の研究員を雇用し, 研究代表者と, 高密度中性子星物質・低密度中性子星物質・天体物理のそれぞれのグループに配置している。本計画開始時に採用した4名の研究員のうち, 2名は他のより条件のよいポストに転出(予定含む)しており, 活発な研究が他からも評価されている。次に重要であるのは議論と研究交流のための旅費である。本領域では, 研究背景の異なる研究者が集まる異分野連携の側面をもっており, 原子核物理学(ストレンジネス核物理・中性子過剰核物理)、コンパクト天体核物理、冷却原子物理の研究者が集まって議論する本領域での研究会は非常に新鮮である。理論班(D01)独自の研究会や、他の計画研究との合同研究会を開催して研究交流を行っている。

6. 総括班評価者による評価（2ページ程度）

総括班評価者による評価体制や研究領域に対する評価コメントを記述してください。

総括班評価者は、分野のバランスを考え、以下の3名をお願いしている。

岡 真（東京工業大学）専門：原子核物理学（理論）

酒井 英行（理研）専門：原子核物理学（実験）

大橋 隆哉（首都大学東京）専門：X線天文学

評価コメントを以下に記す。なお、岡氏には計画研究 A01, A02, D01, 酒井氏には計画研究 B01, B02, B03, 大橋氏には計画研究 C01 についても簡単なコメントをいただいた。

評価者：岡 真（東京工業大学、原子核物理学（理論））

領域全体に関する評価

本研究領域では、中性子星を構成する物質形態の多様性をキーワードに、多角的な原子核・ハドロン物質の構造とダイナミクスを加速器実験と天体観測などを組み合わせることにより解明することを目指している。領域の構成は、ハドロンダイナミクスの加速器研究を行う A 班、中性子過剰物質の状態方程式の解明を重イオン加速器研究と、冷却原子研究を組み合わせる B 班、衛星による X 線観測により中性子星観測データの精密化を図る C 班、これらの実験観測研究の成果を用いて理論的な観点から研究全体の統合を行う D 班からなる。

このような異種多様な分野にわたる研究者の連携が研究活性化に有効に資するためには、総括班が強いリーダーシップを発揮して、相互の興味と情報を共有することが最重要である。総括班が、これまで定期的な打ち合わせ会のほか、3 回の分野統合型研究会を行って、全分野間で研究進捗状況などの情報を共有し、また領域の課題全体をテーマとする若手（国際）スクールを 4 回開催し、若手研究者が全分野を俯瞰することを促す活動を進めていることは高く評価できる。今後も、広い視野を持った若手の育成を含めて、分野間の連携強化に引き続き努力していくことが望ましい。

それぞれの課題研究の進捗評価と今後の課題

A01 J-PARC のハドロン実験においてダブルハイパー核を探索するためにエマルジョンの高精度化、自動スキャン法の高速度を実現し、本実験の準備が十分に進捗している。ストレンジクォークを 2 個以上含むハドロン相互作用は実験的には未踏の領域であるが、中性子星をはじめとする核物質の物理にとって非常に重要な情報の 1 つである。J-PARC の稼働再開によって、今後スケジュール通りに実験と解析を進めて行くことが強く期待される。

A02 中性子過剰ハイパー核の候補である ${}^6_{\Lambda}\text{H}$ の束縛可能性の検証が最大の成果である。理論的な検証も行われており重要な進展と言える。中性子過剰ハイパー核は引き続き重要な課題であり、他のハイパー核のデータとの整合性を含む統一的描像の確立が今後の課題である。K 中間子原子核の探索およびバリオン散乱実験も J-PARC の稼働再開によって、進捗することが十分に期待できる。

D01 理論班は研究全体を統括すべき重要な役割を果たしている。特に高密度物質での 3 体ダイナミクスの解明、低密度領域での対称エネルギーと対相関の解析で進展が見られる。さらに、中性子星に現れる多様な物質形態の理論的解明も着実に進んでいる。中性子星の状態方程式における 3 体力の効果とその起源が理論における最大の課題であり、第一原理である QCD に基づいてその起源を解明する努力が必要である。

評価者：酒井英行（理研、原子核物理学（実験））

本「新学術領域研究」は 4 つの班で構成されている。それぞれの班は独自の研究課題が設定されていて、それぞれ当初の計画に従ってほぼ順調に研究が進展していると評価できる。しかしそれでは本研究は不十分であり、各研究班が有機的に連携し、新たな領域の創生に繋がることを期待されている。その要になるのが総括班

である。従って総括班の役割は極めて重要である。この最終目標に向けて、まずは研究班の相互理解から始めなければならない。そのための情報交換として、定例打ち合わせ、全体研究会、若手向けスクールなどを実施して当初の目標はある程度実現されたと評価する。その一方で、情報交換以上の成果、つまり個々の班の活動を包括(merge)した新たな展開や方向性がまだ十分には見出されていないように見える。これは、まだ研究開始2年という短い期間では当然といえば当然だろう。その意味で、今後残りの3年間で総括班の活動が極めて重要であると考え。その舵取りに大いに期待している。実際、重い中性子星の謎を解くために核子とハイペロンの3体斥力に関する研究をA, B, D班と一緒に検討しようとしているが、これが新たな展開の一つとなる可能性がある。

本研究は大型加速器施設に依存している部分がある。予測できないJ-PARCハドロン施設の事故が起き、当初計画した実験が計画通りに実施できない事態となったが、大筋では当初目標を達成できそうである。(もちろんハドロン施設の利用開始時期に依る。) 直接関係する「ストレンジネス核物理 (A班)」の危機回避努力を評価する。

本研究課題「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」は、中性子星の物性 (EOS) を明らかにするものである。実験に関連する研究班が実験的に決める様々な核密度での EOS パラメータはそれ自身で極めて重要で意義高いものである。その一方で、本研究の最終目標である「中性子星の包括的理解」には理論が最も重要な役割を果たすと思う。個々の実験班の個別の研究課題においては理論班との強い連携が読み取れ、理論班の活動を大いに評価するところではあるが、包括的理解を目指した研究課題を公募研究などで補い力強く展開してほしい。そこでの総括班の役割を期待したい。

個別の研究課題では、

計画研究 B01 班は、中性子星の通常密度の2倍までの領域についての EOS 中の対称エネルギーを実験的に求める研究であり、ある意味で最も重要な研究課題である。海外のグループとの共同研究部分で幾つかの困難があったが計画の遅れを回避し順調に推移しているのを高く評価する。

計画研究 B02 班は、中性子星の外縁部の EOS に関する情報を得るのを目的としている。計画は極めて順調に進展し既に成果が論文となり複数発表されている。評価者個人は次世代中性子検出器の開発に興味を持った。

B01、B02 班とも理論班(D01)との連携も進んでいる。最終目標である総合的な中性子星の EOS 決定に向けより一層の連携を進めてほしい。

計画研究 B03 「冷却原子を用いた中性子過剰低密度核物質の状態方程式」の「 p 波相互作用しているフェルミ粒子系の EOS の決定」に、評価者個人としては、従来から理論的に予測されていた ${}^3\text{P}_2$ 超流動状態との関連で大変興味を感じた。

評価者：大橋隆哉 (首都大学東京、X線天文学)

この新学術領域研究は中性子星の核物質をテーマとして、加速器や冷却原子を用いた地上実験、科学衛星からのX線天体観測、そして理論研究がタイアップすることで超高密度物質の理解を目指すもので、活発な研究活動を進めている。特に原子核レベルのミクロな対象を扱う物理学とマクロな中性子星そのものを見る宇宙X線観測とを有機的に結合させようという試みは興味深く、一定の成果をあげつつあると思われる。総括班が中心となり、120名規模の研究会を2回、若手向けスクールを3回、国際会議を1回開催した他、検出器交流会やその他の研究会も多く開催している。先端的な研究の推進だけでなく、若手研究者の育成と国際化に配慮した運営を行っていることは高く評価される。また公募研究が15件採択されており、計画研究を補間するようなテーマを選定することで、領域全体の研究を活性化させるよう努めている。一方、中性子星というキーワードでつながるとは言え、地上実験の結果がすぐさま宇宙観測にフィードバックを与える、あるいはその逆が起き

るというケースは容易には実現しがたい。その意味で、総括班が中心となって計画研究を横につなぐような具体的な課題を設定できると、領域としての一体性や目的意識がより高まるであろう。また、研究会等は積極的に開催あるいは共催してはいるが、もともと交流が密でない分野の研究者が集まっていることを考慮し、複数の計画研究グループが同じ問題について討論できるように、絞り込んだテーマに関する研究会やセミナーを開催することも今後検討されるとよい。たとえば宇宙物理関連では、中性子星の半径も重要であるが、冷却していく速度や磁場の減衰、グリッチと超流動コアとの関連なども、新しい観点から見直すことで原子核理論や実験とを結ぶテーマになりうるのではないかと期待する。

一方、検出器技術の開発という点では、本領域以外の分野をも巻き込んで、研究開発に拍車をかけることも有効と考えられる。たとえばX線分光検出器マイクロカロリメータはA02の公募研究(岡田氏)と計画研究C01とで開発を進めているほか、他の新学術領域研究でも開発に力を入れている技術であり、やや広い視点から技術交流を支援することは有効であろう。この点からも本領域によって開催された検出器交流会が、今後より広がりを見せることを期待する。また、中性子星の観測から高密度核物質のEOSを決めようというテーマは世界的にも注目されていて、2028年にヨーロッパ主導で計画する大型X線天文衛星Athenaの主要テーマにもなっている。この点からも本領域として開催する国際会議は、宇宙・地上実験・理論を含め、広く高密度核物質に関係する世界の研究者が一同に会するような、有意義な機会となることを期待する。

全体として本領域は、先端的研究の推進、若手研究者の育成、異なる分野間の連携といった面で優れた成果をあげつつあると評価され、引き続き本領域研究を推進されることを強く期待する。

個別の研究課題では、**計画研究C01**は宇宙X線観測により、さまざまな手段で中性子星の半径を決めることを目指しており、2015年打ち上げのASTRO-H衛星によるX線バーストの吸収線の高分解能分光観測、準周期的変動や偏光を用いた中性子星の構造や磁場の制限、これらを目指した検出器開発が柱となっている。GEMSやLOFTなど一部の海外の計画は遅れているが、日本のASTRO-Hは本領域の期間内に上がる見通しである。中性子星天体の高い計数率に対してマイクロカロリメータのデータ処理ができるよう改良した他、衛星全体では広いエネルギー範囲で高い感度が得られる見通しで、研究は着実に進展している。検出器開発に関して交流会を開催するなど、他の計画研究との連携にもよく努めている。ASTRO-Hを控えて理論研究グループとの交流をより深め、中性子星の観測から核物質に迫る戦略をさらに強化していくことを期待する。

7. 主な研究成果（発明及び特許を含む）[研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理する]

（3 ページ程度）

現在実施している新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（発明及び特許を含む）について、現在から順に発表年順をさかのぼり、図表などを用いて研究項目毎に計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。

計画研究 A01

本研究のために整備した K1.8 ビームラインの設計や性能、その検出器・データ収集システムなどを論文にまとめた (A01-1, A01-2)。この論文は、本計画研究メンバーだけでなく、ビームラインを建設し使用する共同研究者チーム (J-PARC 施設のスタッフ、計画研究 A02 の研究者を含む) による成果である。また、エマルジョン実験に関して、本研究に直結する過去の実験研究のまとめの論文を出版した (A01-4)。また、本研究の J-PARC での実験について、エマルジョン画像解析法の向上なども合わせて、様々な国際会議などで、報告・発表を行った (A01-5, A01-10, A01-11, A01-12)。大立体角ハイペロン崩壊スペクトロメータの建設とそこで可能な実験について、国際ワークショップで提案した (A01-9)。

計画研究 A02

(2b) 中性子過剰 Λ ハイパー核分光実験 (E10-1) の結果として、二重荷電交換反応 (π, K^+) による ${}^6_\Lambda\text{H}$ の生成断面積が予想に反して極めて小さい (1 nb/sr 以下) との重要な結果が得られ、論文発表 (A01-7) するとともに多数の国際会議で報告した。(1) Σp 散乱実験 (E40) では、実験のデザイン、散乱陽子検出器システムの開発、多チャンネル MPPC 読み出し回路の開発、ファイバートラッカー飛跡検出器の開発、といった成果があり、それぞれ国際会議や論文で発表した (A02-9)。(2a) Λ ハイパー核精密 γ 線分光実験 (E13) については、実験の目的や準備状況、ビームを用いたテストの結果について発表した (A02-2,3)。(3) K^-pp 束縛状態の探索実験 (E15) では、これまでに収集したデータの解析結果を国際会議で発表した (A02-7)。また、A01, A02 で行う予定のすべての実験を含む J-PARC でのストレンジネス核物理実験について、実験の意義や内容についてまとめた論文を発表した (A02-5)。

公募研究 A02

江角: LHC 実験では、鉛-鉛衝突実験データの解析を進め、長い η 相関の解析からリッジ現象の原因を調査した。RHIC 実験では、金-金や様々な非対称衝突系の物理解析を進めた。重陽子-金衝突系での楕円的膨張の兆候を見つけ (A02 公募江角-3)、前方-後方非対称性を観測、銅-金衝突での指向的方位角異方性を観測、金-金衝突での高次の反応平面に対する 2 粒子ジェット相関と 2 粒子 HBT 相関の依存性を研究した (A02 公募江角-2)。

岡田: H25 年度は NIST (米国標準技術研究所) の TES (超伝導遷移端) X 線マイクロカロリメータ開発チームの協力を得て X 線管を用いた TES 検出器システムの基本性能評価を行い、本実験遂行に十分な性能を確認。一方、ビーム環境下での TES 性能評価実験を PSI 研究所 (スイス) に提案し受理され、H26 年 10 月に実施予定。

計画研究 B01

本計画研究が行われる RIBF の基幹装置である SAMURAI の設計や性能、その常設の検出器などを論文にまとめた (B01-2,5)。この論文は、SAMURAI の建設に従事し、いろいろな形で利用を予定している計画研究 B02 の研究者を含む SAMURAI Collaboration 全体の成果である。

TPC の読み出し回路 GET の開発状況について論文にまとめた (B01-9)。これは GET 開発にいろいろな形で関与した GET Collaboration 全体の国際的な成果である。TPC、GET 関係の日本国内での技術開発については物理学会、国際ワークショップでも報告・発表を行った。

本研究で実験データ解析のときに用いる、輸送方程式を使った原子核反応のシミュレーション計算の是非を確認するため、シミュレーションを使って重イオン反応から求めた通常核密度領域での対称エネルギーと、より精密な理論計算が可能な原子核の構造から求めたものとを比較した結果を論文にまとめた (B01-10)。これは出版からあまり時間がたっていないにもかかわらず、既に 50 回以上引用されている。

計画研究 B02

電気双極子応答(ピグミー共鳴)、4中性子系, ^{28}O の実験のための装置の開発、整備を進めるとともに、すでに行った希薄な核物質「中性子ハロー」をまとう原子核や非束縛準位についての実験成果の論文発表を進めている。前者については B01 班でも用いる汎用的な RIBF の実験施設 SAMURAI についての論文を発表し(B02-4)、4n系についての前駆的実験で使用した SHARQA スペクトロメータの論文発表も行った(B02-10)。中性子ハローについては、本研究でも用いる核力・クーロン分解反応の手法をまとめた Review Article を出版し(B02-9、B02書籍-1)、また炭素のハロー核について分解反応の反応機構を詳細に調べた論文(B02-7)を発表した。さらに中性子ハローを持つ変形核 ^{31}Ne , ^{37}Mg を発見し、この成果を論文発表し(B02-1, -2)、中性子過剰核の新たな特異構造についてのプレスリリースを行った(B02 ホームページ 1)。新たな2重閉殻核 ^{24}O の新準位の発見についても論文発表した(B02-7)。なお、これらの成果や本計画研究の実験計画について、多数の国際会議で講演(大部分は招待講演)を行っている。

公募研究 B02

関口: 陽子・ ^3He 散乱の測定から三体力の発現性、スピン・アイソスピン依存性を調べる。本年度は、 ^3He の偏極分解能測定に必要とされる偏極 ^3He 標的の開発を開始し、偏極生成に成功した。本結果については当グループの大学院生が修士論文としてまとめ、東北大学物理学専攻賞を受賞した。

山口: 重イオン蓄積リングを用いて、従来不可能であった陽子と中性子の数が極端にアンバランスな希少原子核の質量を精密測定し、EOS に強い制限を与える。重イオン蓄積リング(希少 RI リング)を建設し、質量測定を効率よく行う実験装置の開発を行っている。これまでに、蓄積リングの建設を行い、効率的に特定のエキゾチック核を選択する仕組み、チェレンコフ光による速度選択法の導入に成功した(B02-公募山口-1,-2,-3)。

民井: 本研究では、陽子非弾性散乱によって中重安定核の電気双極子応答を精密測定し、核物質の状態方程式の対称エネルギー項に強い制限を与えることを目的としている。すでに ^{208}Pb を標的とするデータの解釈と理論的考察と議論を進め、実験値から対称エネルギーの制限を数値として引き出した(公募民井-1,-2)。また国際会議等において成果を発表した。スズ同位体の加速器課題を申請し採択された。

計画研究 B03

レーザー冷却された ^6Li フェルミ原子を用いて s 波相互作用している中性子物質の EOS を決定するため、実験装置の立ち上げを行った(B03-4)。本装置の特徴的な点は、従来用いるゼーマン減速手法や磁気トラップという手法を用いず、低消費電力で且つ簡便な実験手法を導入した。具体的には永久磁石を用いた二次元レーザー冷却による冷却原子の予備冷却と、高出力レーザーを用いた冷却原子の直接捕獲である。結果として従来の手法と同程度の冷却原子を光トラップ中に捕獲する事に成功し、大幅に実験難易度と消費電力を下げる事に成功した。さらに光トラップ中のフェルミ原子を蒸発冷却によってさらに冷却する事により、フェルミ超流動への転移がフェルミ対の重心運動量を測定する事により確認された(図1)。現在 10^5 個のフェルミ原子が温度として $T/T_F = 0.05$ の極低温状態を実現しており、冷却原子を用いた中性子物質 EOS 決定の準備が整った。

^6Li フェルミ原子を用いて p 波相互作用している中性子物質の EOS を決定するため、p 波フェッシュバツハ共鳴のパラメータ決定を行った(B03-1)。本研究で開発された磁場安定化システムを用い、各磁場で p 波散乱による散乱断面積を測定し、それより p 波フェッシュバツハ共鳴のパラメータを決定した。本研究成果は世界で初めての p 波フェッシュバツハ共鳴パラメータの決定である。決定されたパラメータより、印加磁場によって粒子系

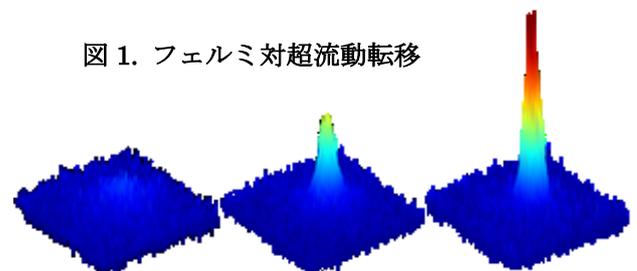


図 1. フェルミ対超流動転移

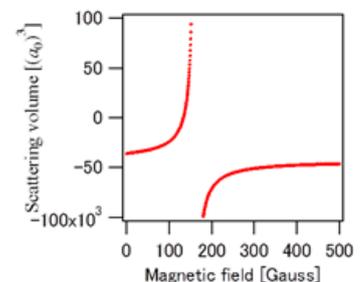


図 2. p 波フェッシュバツハ共鳴

にどのような p 波散乱長を与えているか判るようになった (図 2)。これにより p 波相互作用している粒子系を系統的に研究する準備が整った。

計画研究 C01

ASTRO-H衛星の開発作業を進めた。特に、高い計数率が予想される中性子星の観測を行う事を念頭において必要な改良を行い、搭載品と同時に地上での検証装置を製作し、様々な条件下で試験することによって検証を進めることができた。得られた検出器の性能などについて論文で発表した (C01-9-11)。また、GEMS, NICER, LOFTなどの中性子星の精密観測をめざす将来ミッションに向けたハードウェア開発を行い、発表を行った (C01-2-3)。すざく衛星のデータを用いた中性子星の観測的研究を行ない、論文としてまとめた (C01-1,5-7)。今後の解析に必要な物理プロセスとジオメトリをモンテカルロ計算コードに組み、その成果を論文としてまとめた (C01-4)。初期観測フェーズにおいて、どのような天体が候補になるかについて、ASTRO-Hの国内外のメンバーを集めてタスクフォースを設置し、様々な物理モデルやこれまでの観測結果にもとづいて検討を行い、具体的な候補天体を定める事ができた。ASTRO-Hの開発とそこで可能な観測について、論文として執筆した他 (C01-12)、多くの国際ワークショップで発表した。

公募研究C01

牧島: X線衛星「すざく」で、8.69秒の自転周期をもつマグネター4U 0142+61を観測したところ、自転に伴う硬X線パルスが15時間の周期で位相変調されており、自由歳差運動が起きている兆候をつかんだ。これは慣性モーメントにして 1.6×10^{-4} の異方性に相当し、この中性子星の内部に 1×10^{12} T (1×10^{16} G) に達するトロイダル磁場が潜んでいる可能性を示唆する。これは観測から中性子星の内部磁場に迫る最初の結果である。

前田: 銀河系バルジのX線未同定天体の解析を進め、新たな中性子星連星系を1天体、銀河団を1天体発見した。

計画研究 D01

高密度中性子星物質で重要な役割を果たすハドロンと核子系・核物質の間に働く相互作用を明らかにするため、ハイペロンや K^{bar} を含む原子核の構造・生成反応の研究を進めている。一つの例として我々は $K^{\text{bar}}\text{NN}$ 3 体系および $\Lambda\text{NN}\cdot\text{ENN}$ 3 体系の構造および生成スペクトルを解析・予言した(D01-3)。一方でハドロンは原子核の構造を調べる探針ともなる。我々は Λ ハイパー核 ($^{25}\Lambda\text{Mg}$) の励起スペクトルを解析することで、三軸非対称に変形した核子系との相互作用により、特徴的な励起スペクトルが現われることを予言した(図 3)(D01-7)。

低密度領域で著しく中性子過剰な中性子星核物質を実験的に探る上では不安定核ビームによる中性子過剰核の実験データが鍵を握る。我々は半微視的核子間有効相互作用を用いて核図表全体で理論を判別する一つの試金石である魔法数の現れ方を調べ、有効相互作用の一つ(M3Y-P6)が、現存するデータとはほぼ矛盾しない魔法数を示すことが分かった。さらに、重い不安定核や超重核での魔法数に対する予言を行っている(図 4) (D01-4)。

天体物理からの状態方程式の制限も本計画研究の柱の一つである。γ線やX線を繰り返し放出し強磁場中性子星と考えられている軟γ線リピーターでは、これまでに3例見つかった巨大フレア現象において特徴的な準周期的振動が観測されている。我々はこれらを中性子星の捻れ振動として一般相対論と原子核物理学から得られる状態方程式を組み合わせて調べ、対称エネルギーの密度依存性を特徴づけるパラメータ(L)に制限を与えることに成功した(図 5)(D01-5)。また高密度でのクォーク物質の発現は、強い磁場の起源の有力候補である。我々は非一様凝縮を伴うカイラル相転移について研究を進め、相転移への磁場の効果や非一様凝縮によって現れる新たな冷却機構を議論した(D01-9)。

公募研究 D01

荻野: 連星中性子星からのX線スーパーバーストで重要となる $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 系の核融合反応の研究を行っている。クーロン障壁以上のエネルギーでの $^{12,13}\text{C}+^{12,13}\text{C}$ 系に見られる核融合反応断面積の振動が同種粒子性・核子移行効果により統一的に理解できることを明らかにした(D01-公募-1)。より低いエネルギーでの $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 核融合

反応でも、生成される複合核の準位密度の観点から研究が進んでいる。

根村: 格子QCDを用いて現実的な大きな格子でハイペロン・核子ポテンシャルの導出を行うために必要となる効率的な計算方法の開発を行った。現在の格子サイズでの成果(D01-公募-2)に加えて、ハイペロンを含む52チャンネルのバリオン間波動関数を効率よく計算することのできるアルゴリズムなど、順調に開発が進んでいる。

安武: (1) 強磁場中性子星の構造や磁場分布の進化計算(D01-公募-3)、(2) 重い中性子星内部でのQCD相転移における非一様構造での表面張力やクォーク有効模型におけるベクトル項への制限、(3) 現実的な状態方程式に基づく完全な回転星の進化計算を確立する上で突破口となる手法を提案、の3つの成果を得た。

大橋: 強結合フェルミ原子気体のスピンギャップ温度・領域をBCS-BECクロスオーバー全域で理論的・定量的に決定し、擬ギャップ温度との関連も明らかにした(D01-公募-4)。スピン偏極率が大きな領域で、有効磁場依存性データを調整パラメータなしで理論的に説明し、パズルとなっていた擬ギャップ現象との矛盾を解消した。

木内: 中性子星が元来保持する磁場が連星中性子星合体過程で増幅される可能性は古くより指摘されてきたが、世界最高解像度の磁気流体-数値相対論シミュレーションにより磁場増幅過程を解明した。連星中性子星合体後に形成される大質量星中性子星はマグネタークラスの磁場を保有することが分かった(D01-公募-5)。

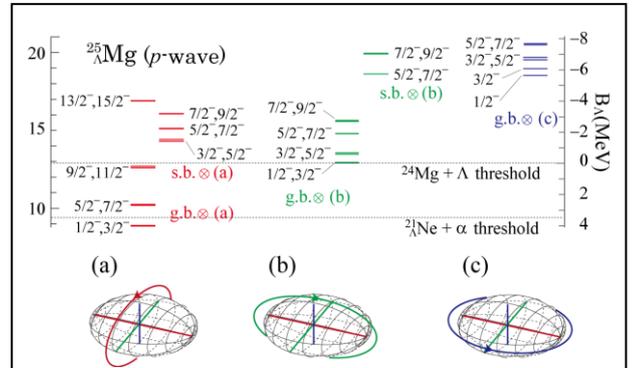


図 3. Λ による原子核の三軸変形の探索

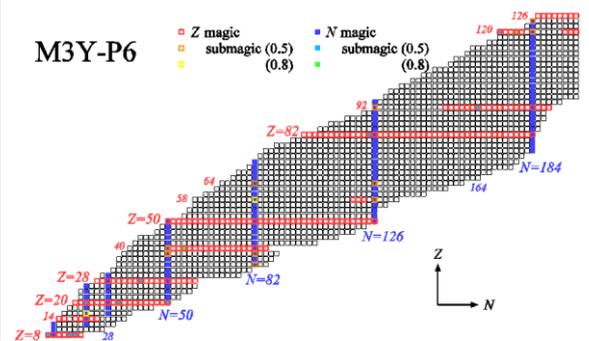


図 4. 魔法数の消滅と発現の予想

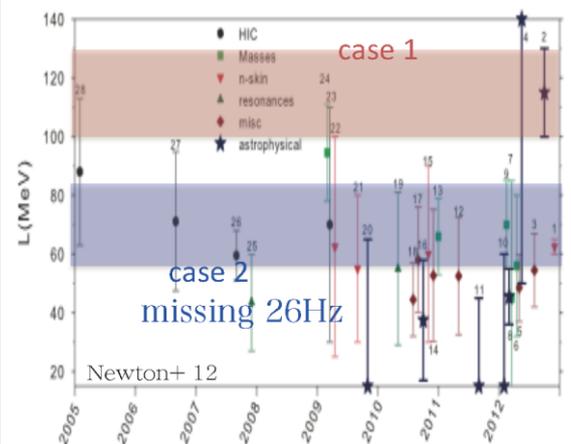


図 5. 対称エネルギーパラメータ L の推定値の年次変化

8. 研究成果の公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）（5 ページ程度）

現在実施している新学術領域研究（公募研究含む）の研究課題を元に発表した研究成果（主な論文、書籍、ホームページ、主催シンポジウム等の状況）について具体的に記述してください。論文の場合、現在から順に発表年順をさかのぼり、計画研究・公募研究毎に順に記載し、研究代表者には二重下線、研究分担者には一重下線、連携研究者には点線の下線を付し、corresponding author には左に*印を付してください。また一般向けのアウトリーチ活動を行った場合はその内容についても記述してください。

計画研究 A01

- A01-1. *T. Takahashi, M. Naruki et al., “Beam and SKS spectrometer at the K1.8 beam line”, Prog. Theor. Exp. Phys., 02B010 (2012).
- A01-2. K. Agari, *M. Ieiri, M. Naruki, H. Takahashi, T. Takahashi. et al. “Secondary charged beam lines at the J-PARC hadron experimental hall”, Prog. Theor. Exp. Phys., 02B009 (2012).
- A01-3. Megumi Naruki, "Hadron physics at J-PARC", Prog. Theor. Exp. Phys., 02B013 (2012).
- A01-4. J.K. Ahn, K. Imai, *N. Nakazawa, H. Takahashi, T. Takahashi, K. Tanida et al., “Double- Λ hypernuclei observed in a hybrid emulsion experiment”, Phys. Rev. C88 014003-1 - 10 (2013).
- A01-5. K. Nakazawa, “Experimental Study of Interaction of Two Lambda Hyperons in Double Hypernuclei”, International Conference on Physics, Feb. 3-6, 2012 Mandalay, Myanmar.
- A01-6. B.H. Kim, K. Tanida et al. (Belle Collaboration, "Search for an H-dibaryon with a Mass near $2m_{\Lambda}$ in Y(1S) and Y(2S) Decays", Phys. Rev. Lett. 110, 222002-1 - 6 (2013).
- A01-7. *H. Sugimura, S. Hasegawa, K. Imai, M. Naruki, H. Sako, S. Sato, T. Takahashi, H. Tamura, K. Tanida et al., “Search for ${}^6_{\Lambda}\text{H}$ hypernucleus by the ${}^6\text{Li}(\pi^-, \text{K}^+)$ reaction at $p_n = 1.2 \text{ GeV}/c$ ", Phys. Lett. B729, 39-44 (2014). 【A02 と共同】
- A01-8. T. Takahashi, “Overview of Hypernuclear Physics Program at K1.8 and K1.1 Beamlines of J-PARC”, Nucl. Phys. A914, 530-537 (2013).
- A01-9. K. Imai, "Possible physics programs with a larger acceptance hyperon spectrometer at J-PARC", Int. Workshop on Strangeness Nuclear Physics 2012 (SNP12), Aug.27-29, 2012, Neyagawa, Japan
- A01-10. K. Nakazawa, "Experimental Study of the Interaction between Two Lambda Hyperons", Few-Body Syst. 54, 1279-1282 (2013).
- A01-11. K. Nakazawa, "Study of double-Lambda hypernuclei at J-PARC", JPS Conf. Proc. 1, 013078 (2014).
- A01-12. *Junya Yoshida, Kazuma Nakazawa, Kaori Umehara, "New Methods and Technologies for Double-Lambda Hypernucleus search in Nuclear Emulsion in J-PARC E07", JPS Conf. Proc. 1, 013070 (2014).

○共催研究会

Workshop on $S = -2$ and the related Nuclear Physics in HIDA-Takayama 2012, 2012年11月25日-27日, 岐阜県高山市

計画研究 A02

- A02-1. *H. Tamura, “Nuclear Matter in Neutron Stars -A Great Challenge in Nuclear Physics-“, JPS Conf. Proc. 1, 011003-1-7 (2014).
- A02-2. *S.B. Yang, T. Koike, K. Miwa, H. Tamura et al., “High Precision γ -ray Spectroscopy of ${}^4_{\Lambda}\text{He}$ and ${}^{19}_{\Lambda}\text{F}$ at J-PARC”, JPS Conf. Proc., 1, 013076-1-5 (2014).
- A02-3. *H. Tamura, K. Hosomi, S. Bufalino, N. Chiga, P. Evtoukhovitch, A. Feliciello, R. Honda, T. Koike, Y. Ma, K. Miwa, A. Ssaki, Y. Sasaki, K. Shirotori, K. Tanida, Z. Tsamalaidze, M. Ukai, T.O. Yamamoto, S.B. Yang, “Gamma-ray spectroscopy of hypernuclei - present and future”, Nucl. Phys. A 914, 99-108 (2013).
- A02-4. *S.N. Nakamura et al., “Observation of the ${}^7_{\Lambda}\text{He}$ Hypernucleus by the $(e, e'\text{K}^+)$ Reaction”, Phys. Rev. Lett. 110, 012502-1-4 (2013).

- A02-5.** *H. Tamura, “Strangeness nuclear physics experiments at J-PARC”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 02B012-1-18 (2012).
- A02-6.** *K. Shirotori, S. Ajimura, K. Miwa, A. Sakaguchi, H. Tamura et al.,” Search for the Θ^+ pentaquark via the $\pi^-p \rightarrow K^- X$ reaction at 1.92 GeV/c”, Phys. Rev. Lett. 109, 132002-1-4 (2012).
- A02-7.** *S. Ajimura, T. Fukuda, H. Ota, T. Suzuki et al.,” A search for deeply-bound kaonic nuclear state at the J-PARC E15 experiment”, Nucl. Phys. A 914, 315-320 (2012).
- A02-8.** *M. Agnello, H. Ota et al., “Search for the neutron-rich hypernucleus $^9_\Lambda\text{He}$ ”, Phys. Rev. C 86, 057301-1-4 (2012).
- A02-9.** *R. Honda, K. Miwa, I. Nakamura, M. Tanaka, K. Yoshimura, T. Uchida, M. Ikeno, “The development of the multi PPD readout electronics with EASIROC and SiTCP”, Proc. of Science, PhotoDet2012, 031-1-6 (2012).
- A02-10.** *H. Tamura, “Experimental Approaches to Exotic Matter in Neutron Stars”, The 12th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG12), 2013年11月18日～2013年11月21日, Tsukuba, Japan.

公募研究 A02 –江角

1. *S. Esumi, "Soft physics results from the PHENIX experiment", accepted in Prog. Theor. Exp. Phys. as a special volume of "PHYSICS AT PHENIX, 15 years of discoveries".
2. A. Adare, S. Esumi, J. Jia, *D. Morrison, et al. "Azimuthal-angle dependence of charged-pion-interferometry measurements with respect to 2nd and 3rd-order event plane in Au+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV", accepted in Phys. Rev. Lett.
3. A. Adare, S. Esumi, J. Jia, *D. Morrison, et al. "Quadrupole anisotropy in dihadron azimuthal correlations in central d+Au collisions at $\sqrt{s_{NN}}=200$ GeV", Phys. Rev. Lett. 111, 212301 (2013)

公募研究 A02 –岡田

1. *S. Okada et al., “High-resolution kaonic-atom x-ray spectroscopy with transition-edge-sensor microcalorimeters”, Journal of Low Temperature Physics, (2014).
2. *E. Friedman, S. Okada, “Feasibility guidelines for kaonic atom experiments with ultra-high-resolution X-ray spectrometry”, Nucl. Phys. A 915 170-178 (2013).

○主催・共催研究会

1. Workshop on “Future prospect on nuclear physics with strangeness at J-PARC”, 2014年5月31日－6月1日, 理研
2. 「 Λ ハイパー核分光の将来」2014年5月20日－22日, 東北大学
3. 「ハイパー核物理の発展と今後の展望」2013年7月7日－8日, 志摩市 和洲閣

計画研究 B01

- B01-1.** *Y. Sato, A. Taketani, et al., “Energy resolution of gas ionization chamber for high-energy heavy ions”, Jpn. J. Appl. Phys. 53 (2014) 016401.
- B01-2.** *T. Kobayashi, T. Isobe, Y. Kondo, T. Nakamura et al., “SAMURAI spectrometer for RI beam experiments”, Nucl. Instrum. Meth. B 317 (2013) 294-304. 【B02 と共通】
- B01-3.** *M. Itoh, T. Murakami et al., "Isoscalar Giant Resonance Strengths in ^{32}S and possible excitations of superdeformed and $^{28}\text{Si}+\alpha$ cluster bandheads", Phys. Rev. C 88 (2013) 064313.
- B01-4.** *D. Patel, T. Murakami et al., "Testing the Mutually Enhanced Magicity Effect in Nuclear Incompressibility via the Giant Monopole Resonance in the $^{204,206,208}\text{Pb}$ Isotopes", Phys. Lett. B 726

(2013) 178-181.

- B01-5.** *H. Sato, T. Isobe, T. Nakamura, Y. Kondo, Y. Togano, T. Murakami et al., "Superconducting Dipole Magnet for SAMURAI Spectrometer", IEEE Trans. on Applied Super. 23 (2013) 4500308. 【B02と共通】
- B01-6.** ASY-EOS Collaboration (*P. Russotto, T. Isobe et al.), "The ASY-EOS experiment at GSI: investigating the symmetry energy at supra-saturation densities" J. Phys. Conf. Ser. 420 (2013) 012092.
- B01-7.** *K. Fujiwara, T. Isobe, T. Kobayashi, and A. Takekani, "Design of low-cross-talk readout pads for time projection chamber", Journal of Instrumentation 7 (2012) C06004.
- B01-8.** *D. Kameda, H. Baba, Y. Mizoi, K. Ieki, Y. Kondo, T. Nakamura et al., "Observation of new microsecond isomers among fission products from in-flight fission of 345 MeV/nucleon ^{238}U ", Phys. Rev. C 86 (2012) 054319. 【B02 と共同】
- B01-9.** *E. Pollacco, H. Baba, T. Murakami, A. Takekani et al., "GET: A Generic Electronic System for TPCs for nuclear physics experiments", Phys. Procedia 37 (2012) 1799-1804.
- B01-10.** *M.B. Tsang, J.R. Stone, F. Camera, P. Danielewicz, S. Gandilfi, K. Hebel, C.J. Horowitz, Jenny Lee, W.G. Lynch, Z. Kohley, R. Lemmon, P. Moller, T. Murakami, S. Riordan, X. Roca-Maza, F. Sammarruca, A.W. Steiner, I. Vidafia, and S.J. Yennello, "Constraints on the symmetry energy and neutron skins from experiments and theory", Phys. Rev. C 86 (2012) 015803.

○主催シンポジウム

1. "Nuclear symmetry-energy and nucleus-nucleus collision simulation" [RIBF ULIC-MiniWS027], RIKEN, Wako, Japan, July 2-4, 2013. 【D01 と共催】

計画研究 B02

- B02-1.** *N. Kobayashi, T. Nakamura, Y. Kondo et al., "Observation of a p-Wave One-Neutron Halo Configuration in ^{37}Mg ", Phys. Rev. Lett., in press.
- B02-2.** *T. Nakamura, N. Kobayashi, Y. Kondo et al., "Deformation-Driven p-Wave Halos at the Drip Line: ^{31}Ne ", Phys. Rev. Lett. 112, 142501-1~5 (2014).
- B02-3.** *Y. Satou, T. Nakamura, Y. Kondo et al., "One-neutron knockout reaction of ^{17}C on a hydrogen target at 70 MeV/nucleon", Phys. Lett. B 728, 462~466 (2014).
- B02-4.** *T. Kobayashi, Y. Kondo, T. Nakamura et al., "SAMURAI spectrometer for RI beam experiments", Nucl. Instr. Meth. B, 317, 294-304 (2013). 【B01 と共通】
- B02-5.** *S. Sakaguchi, Y. Kondo, T. Nakamura et al., "Shallow and diffuse spin-orbit potential for proton elastic scattering from neutron-rich helium isotopes at 71 MeV/nucleon", Phys. Rev. C 87, 021601 (2013)
- B02-6.** *N. Kobayashi, T. Nakamura, Y. Kondo et al., "One- and two-neutron removal reactions from the most neutron-rich carbon isotopes", Phys. Rev. C 86, 054604-1~11 (2012).
- B02-7.** *K. Tshoo, T. Nakamura, Y. Kondo, S. Shimoura et al., "N=16 Spherical Shell Closure in ^{24}O ", Phys. Rev. Lett. 102, 022501-1~5 (2012).
- B02-8.** *S. Takeuchi, Y. Kondo, T. Nakamura, S. Shimoura et al., "Well Developed Deformation in ^{42}Si ", Phys. Rev. Lett. 109, 182501-1~5 (2012).
- B02-9.** *T. Aumann, *T. Nakamura, "The electric dipole response of exotic nuclei", Physica Scripta T152, 014012 1~27 (2013).
- B02-10.** *T. Uesaka, S. Shimoura, H. Sakai, "The SHARAQ spectrometer", Prog. Theor. Exp. Phys. 2012 03C007 (2012).

○書籍

1. *T. Nakamura, Y. Kondo, "Neutron Halo and Breakup Reactions", Clusters in Nuclei, Vol.2, Springer Heidelberg. (共著, Eds Christian Beck)

○主催シンポジウム

1. "SAMURAI International Collaboration Workshop 2013" 2013年9月9-10日 東京工業大学
2. ミニワークショップ "原子核 E1 応答と核物質の状態方程式" 2014年2月24日 東京工業大学

公募研究 B02-山口

1. *T. Yamaguchi, et al., "Cherenkov light detection as a velocity selector for uranium fission products at intermediate energies", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, (2014), in press.
2. *T. Yamaguchi, et al., "Performance of high-resolution position-sensitive detectors developed for storage-ring decay experiments", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B 317 (2013) 697-700.
3. *T. Yamaguchi, Y. Yamaguchi, A. Ozawa, "The challenge of precision mass measurements of short-lived exotic nuclei: Development of a new storage-ring mass spectrometry", Int. J. Mass Spectrom. 349-350 (2013) 240-246.

公募研究 B02-民井

1. A. Tamii, P. von Neumann-Cosel, I. Poltoratska, "Electric dipole response of ^{208}Pb from proton inelastic scattering: Constraints on neutron skin thickness and symmetry energy", Eur. Phys. J. A 50, 28 (2014).
2. 「中性子スキンと原子核物質の状態方程式」民井淳、銭廣十三、日本物理学会誌 Vol.69, No.1,6 (2014).

計画研究 B03

- B03-1.** Takuya Nakasuji, Jun Yoshida, and Takashi Mukaiyama 「Experimental determination of p-wave scattering parameters in ultracold ^6Li atoms」 Phys. Rev. A 88, 012710 (2013).
- B03-2.** Koichi Sato, Jacek Dobaczewski, Takashi Nakatsukasa, and Wojciech Satula "Energy-density-functional calculations including proton-neutron mixing", Phys. Rev. C 88, 061301(R) (2013).
- B03-3.** Tsunenori Inakura, Takashi Nakatsukasa, and Kazuhiro Yabana, "Low-energy E1 strength in select nuclei: Possible constraints on neutron skin and symmetry energy", Phys. Rev. C 88, 051305(R) (2013).

○主催シンポジウム

- B03-4.** 「Workshop on the intersection of cold-atomic and nuclear physics」, APCTP Headquarters, Pohang, Korea, May 12-13, 2014.

計画研究 C01

- C01-1.** Odaka, H., Khangulyan, D., Tanaka, Y.T., Watanabe, S., Takahashi, T., Makishima, K., "Short-term variability of X-rays from accreting neutron star vela X-1. II. Monte Carlo modeling", Astrophysical Journal, vol.780 (1). Art no. 28 (2014).
- C01-2.** Wakabayashi, M.; Komiya, K.; Tamagawa, T.; Takeuchi, Y.; Aoki, K.; Taketani, A.; Hamagaki, H., "Development of a Diehard GEM using PTFE insulator substrate", Journal of Instrumentation 9, C03043 (2014).
- C01-3.** Takeuchi, Y.; Tamagawa, T et al., "Property of LCP-GEM in Pure Dimethyl Ether at Low Pressure", Journal of Instrumentation, 9, C01002 (2014).
- C01-4.** Odaka, H., Khangulyan, D., Tanaka, Y.T., Watanabe, S., Takahashi, T., Makishima, K. "Short-term variability of x-rays from accreting neutron star vela X-1. I. Suzaku observations, Astrophysical Journal,

vol.767(1). Art no. 70 (2013).

- C01-5.** Takei, D., Tsujimoto, M., Drake, J. J., Kitamoto, S., "X-ray Development of the Classical Nova V2672 Ophiuchi with Suzaku", 2013, Publications of the Astronomical Society of Japan 66, No. 2.
- C01-6.** Wada, Q., Tsujimoto, M., Ebisawa, K., Miller, E. D., "Detection of a 522 s Pulsation from the Transient X-ray Source Suzaku J0102.8-7204 (SXP 522) in the Small Magellanic Cloud", Publications of the Astronomical Society of Japan 65, L2, (2013).
- C01-7.** Iwahashi, T.; Enoto, T.; Yamada, S.; Nishioka, H.; Nakazawa, K.; Tamagawa, T.; Makishima, K., "Suzaku Follow-Up Observation of the Activated Magnetar 1E 1547.0-5408", Publications of the Astronomical Society of Japan 65, 12 (2013).
- C01-8.** Takahashi, Tadayuki; Uchiyama, Yasunobu; Stawarz, Łukasz, "Multiwavelength Astronomy and CTA: X-rays", Astroparticle Physics, Vol. 43, pp. 142-154 (2013).
- C01-9.** Yamada, Shin'ya; Uchiyama, Hideki; Dotani, Tadayasu; Tsujimoto, Masahiro; Enoto, Teruaki; et al., "Data-Oriented Diagnostics of Pileup Effects on the Suzaku XIS", Publications of the Astronomical Society of Japan 64, p.53-64 (2012).
- C01-10.** Seta, H.; Tashiro, M. S.; Ishisaki, Y.; Tsujimoto, M.; et al., "Development of the onboard digital processing system for the soft x-ray spectrometer of ASTRO-H: performance in the engineering model tests", Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE, Vol. 8443, article id. 84435D, pp. 5-15 (2012).
- C01-11.** Hagino, Kouichi; Odaka, Hirokazu; Takahashi, Tadayuki; et al. "Imaging and spectral performance of CdTe double-sided strip detectors for the hard x-ray imager onboard ASTRO-H", Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE, Volume 8443, article id. 844355, 11 pp. (2012).
- C01-12.** Takahashi, T., Dotani, T., Enoto, T., Odaka, H., Tamagawa, T., Tsujimoto, M., et al.. "The ASTRO-H X-ray Observatory", Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE, Volume 8443, article id. 84431Z, 22 pp. (2012).

○主催シンポジウム

「9th ASTRO-H Science Meeting --- Precise Measurements of the extreme conditions in the Universe」 Feb. 19-22 (2013), Tsukuba, Japan

公募研究 C01-牧島

1. *Makishima, K., Enoto, T., Hiraga, J.S., Nakano, T., Nakazawa, K., Sakurai, A., Sasano, M., Murakami, H., "Possible Evidence for Free Precession of a Strongly Magnetized Neutron Star in the Magnetar 4U 0142+61", Phys. Rev. Lett., 112, 171102 (2014).
2. *Enoto, T., Sasano, M., Yamada, S., Tamagawa, T., Makishima, K. et al., "Spectral and Timing Nature of the Symbiotic X-ray Binary 4U 1954+319: The Slowest Rotating Neutron Star in an X-ray Binary System", Astrophysical Journal, 786, 127 (2014).
3. *Sasano, M., Makishima, K., Sakurai, S., Zhang, Z. & Enoto, T., "Suzaku View of the Neutron Star in the Dipping Source 4U 1822-37", Publ. Astron. Soc. Japan 66 (2014), in press.

公募研究 C01-前田

1. *Mori, H., Maeda, Y., Furuzawa, A., Haba, Y., and Ueda, 2013, Publications of the Astronomical Society of Japan 65, 102.
2. *Maeda, Y., Mori, H., and Dotani, T. 2013, Advances in Space Research 51, 1278.

計画研究 D01

理論班(D01 班)のメンバー(代表・分担・連携研究者)により H24, H25 の 2 年度で 133 編の論文が出版された。ここではそのうち主要なもののみを記す。

- D01-1. *H. Ueda, T. Z. Nakano, A. Ohnishi, Marco Ruggieri, K. Sumiyoshi, "QCD phase diagram at finite baryon and isospin chemical potentials in Polyakov loop extended quark meson model with vector interaction", Phys. Rev. D 88 (2013), 074006.
- D01-2. *K. Tsubakihara, A. Ohnishi, "Three-body couplings in RMF and its effects on hyperonic star equation of state", Nucl. Phys. A 914 (2013), 438.
- D01-3. *T. Harada, Y. Hirabayashi, "Production Spectra of the ΣNN Quasibound States in ${}^3\text{He}(K, \pi^+)$ Reactions", Few Body Syst. 54 (2013), 1205.
- D01-4. *H. Nakada, K. Sugiura, "Predicting magic numbers of nuclei with semi-realistic nucleon-nucleon interactions", Prog. Theor. Exp. Phys. 2014 (2014), 033D02.
- D01-5. *H. Sotani, K. Nakazato, K. Iida, K. Oyamatsu, "Possible constraints on the density dependence of the nuclear symmetry energy from quasi-periodic oscillations in soft gamma repeaters", Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 434 (2013), 2060.
- D01-6. *H. Shimoyama, M. Matsu, "Di-neutron correlation in monopole two-neutron transfer modes in Sn isotope chain", Phys. Rev. C 88 (2013), 054308.
- D01-7. *Masahiro Isaka, Masaaki Kimura, Akinobu Dote, A. Ohnishi, "Splitting of the p orbit in triaxially deformed ${}^{25}_{\Lambda}\text{Mg}$ ", Phys. Rev. C 87 (2013), 021304(R).
- D01-8. *Akinobu Dote, T. Inoue, T. Myo, "Comprehensive application of a coupled-channel complex scaling method to the $K^{\text{bar}}N-\pi Y$ system", Nucl. Phys. A 912 (2013), 66.
- D01-9. *T. Noda, M. Hashimoto, N. Yasutake, T. Maruyama, T. Tatsumi, M. Fujimoto, "Cooling of compact stars with color superconducting phase in quark-hadron mixed phase", Astrophys. J. 765 (2013), 1.
- D01-10. *Ono, "Nuclear matter properties in fragmentation reactions", Journal of Physics: Conference Series 436 (2013), 12068.
- D01-11. *T. Miyatsu, S. Yamamuro, K. Nakazato, "A new equation of state for neutron star matter with nuclei in the crust and hyperons in the core", Astrophys. J. 777 (2013) 4.
- D01-12. *Y. Yamamoto, T. Furumoto, N. Yasutake, Th. A. Rijken, "Multi-pomeron repulsion and the neutron-star mass", Phys. Rev. C 88 (2013), 022081(R).
- D01-13. *K. Masuda, T. Hatsuda, T. Takatsuka, "Hadron-Quark Crossover and Massive Hybrid Stars with Strangeness", Astrophys. J. 764 (2013), 12.
- D01-14. *M. Kohno, "Nuclear and neutron matter G-matrix calculations with a chiral effective field theory potential including effects of three-nucleon interactions", Phys. Rev. C 88 (2013), 064005.
- D01-15. *Hiroyuki Sagawa, Gianluca Colo, "Tensor interaction in mean-field and density functional theory approaches to nuclear structure", Prog. Part. Nucl. Phys. 76 (2014), 76.

○主催シンポジウム

「中性子星核物質理論班研究会」, 2013年3月5日-8日, 三河西浦温泉・葵。

公募研究 D01 (萩野、根村、安武、大橋、木内)

1. *S. Yusa, K. Hagino and N. Rowley, "Non-collective excitations in low-energy heavy-ion reactions: applicability of the random matrix model", Phys. Rev. C88 (2013), 044620.
2. *T. Inoue, S. Aoki, T. Doi, T. Hatsuda, Y. Ikeda, N. Ishii, K. Murano, H. Nemura, K. Sasaki (HAL

QCD collaboration), “Equation of State for Nucleonic Matter and Its Quark Mass Dependence from the Nuclear Force in Lattice QCD”, Phys. Rev. Lett. 111 (2013), 112503.

3. *N. Yasutake, K. Kotake, M. Kutsuna, T. Shigeyama, “An investigation into surface temperature distributions of high-magnetic-field pulsars”, Publ. Astron. Soc. Jap. 66 (2014), 50.

4. *H. Tajima, T. Kashimura, R. Hanai, R. Watanabe, Y. Ohashi, “Uniform spin susceptibility and spin-gap phenomenon in the BCS-BEC crossover regime of an ultracold Fermi gas,” Phys. Rev. A 89 (2014), 033617.

5. *K. Hotokezaka, K. Kiuchi, K. Kyutoku, T. Muranushi, Y.-I. Sekiguchi, M. Shibata and K. Taniguchi, “Remnant massive neutron stars of binary neutron star mergers: Evolution process and gravitational waveform”, Phys. Rev. D 88 (2013), 044026.

ホームページ

- (X00) 新学術領域「実験と観測で解き明かす中性子星の核物質」ホームページ

<http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/nstar/>

- (B02) “Deformation-Driven p-Wave Halos at the Drip Line: ^{31}Ne ”, T. Nakamura, et al., Phys. Rev. Lett. 112, 142501 (2014) のプレスリリース (東工大) <http://www.titech.ac.jp/news/2014/027409.html>

- (B02 公募・民井) GRFBL(GR 前方モードビームライン) HP

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/np1-a/GRFBL/>

本領域でのアウトリーチ活動

(X00 田村)「宇宙のかなたにある不思議な物質－中性子星の謎－」大阪市立科学館発行 月刊「うちゅう」2013年7月号 p.4-9 (一般向け解説記事)。

(X00 田村)「中性子星の奇妙な物質－加速器実験とX線・重力波で探る－」日本物理学会 科学セミナー「宇宙における物質の起源と進化」、東京大学小柴ホール、2013年8月22-23日。なおこの講演のビデオは物理学会HPで公開され、内容は単行本として出版予定。

(A02 田村)「素粒子から物質がどう作られた?～原子核の放つガンマ線から宇宙の物質の起源を探る～」東北大学サイエンスカフェ(2012.8.31、仙台メディアテーク)

(A02 田村)「ガンマ線で調べる放射能汚染とハイパー原子核－原子核と放射線の基礎から最先端まで－」日本物理学会「公開講座」(2012.11.3、東京大学小柴ホール)

(A02 江角) つくば茗溪高校「スーパー・サイエンス・ハイスクールCERN,ATLAS,ALICE研修、講義」

(A02 江角) 高エネルギー加速器研究機構 サマーチャレンジ「ラドン検出器を用いた実験演習」

(B01 磯部)「元素の世界はどうなっている?」出前授業 新潟県十日町市立十日町中学校、2013年2月14日

(B01 村上)「元素誕生の謎」出前授業@京都府立菟道高等学校(2年生)、2014年1月25日

(D01 萩野)「日本の名前がつくかもしれない!? ～新元素 113 番のはなし～」第 98 回東北大学サイエンスカフェ 平成 25 年 11 月 29 日 仙台メディアテーク

(D01 大橋)「量子の世界と超伝導」出前授業:SFC 科学入門講座, 2014 年 3 月 10 日, 慶應義塾湘南藤沢高等部

9. 今後の研究領域の推進方策（2ページ程度）

今後どのように領域研究を推進していく予定であるか、研究領域の推進方策について記述してください。また、領域研究を推進する上での問題点がある場合は、その問題点と今後の対応策についても記述してください。また、目標達成に向け、不足していると考えているスキルを有する研究者の公募班での重点的な補充や国内外の研究者との連携による組織の強化についても記述してください。

○研究の一層の推進と連携

1~2か月に1回行っている総括班会議では、各計画研究の進捗状況を総括班の中で共有し、互いに助言や議論を行っているが、研究会や若手スクールなどの企画の議論に時間をとられ、こうした研究自体の議論が必ずしも十分ではないように感じている。今後は、全員が出席できなくても総括班会議の回数を増やし、こうした議論を行うこととする。

公募研究については、昨年開催した公募研究と計画研究の代表者が一同に会しておこなう研究会を毎年開催するとともに、公募研究代表者と関連する計画研究代表者が日常的に情報交換や相互協力をするように促す。

各計画研究と公募研究のメンバー全員が交流する場合は、毎年行っている全体研究会である。これは各班の研究の成果や進展を共有して領域全体を意識した議論を行う貴重な場であるが、取り上げる研究内容が幅広いにもかかわらず研究会の時間が限られており、参加者も100人以上いるため、班を越えた具体的な連携について議論をするには不十分であった。そこで、今後は研究会では時間をとってゆったりと議論ができるような時間を増やすとともに、ポスターセッションの時間を長くにとって、個人レベルや若手同士での研究の連携の機会を増やす。さらに、2つか3つの研究班だけ、あるいは1つの計画研究と関連する公募研究だけで集まって、少人数で具体的な連携を深める議論を行うための会合を多数開催するように促すこととする。

こうした情報交換と議論を通して生まれる新しい研究課題や方向性を総括班が拾い上げて、推進したい。例えば、太陽質量の2倍の重い中性子星の存在は、EOSが高密度で急激に硬くなることを示しており、そのためには、核子だけでなくハイペロンも含む3体のバリオン間(NNN, YNN, YYNなど、Yはハイペロン)に強い斥力が必要であることが示唆されている。A班で様々な質量数の Λ ハイパー核束縛エネルギーの精密測定を行い、B班で中間エネルギーでの通常核の原子核・原子核散乱の高精度測定を行い、これらを組み合わせるその解決が図れないかを考えたい。今後、A, B, D班でこの課題に特化した研究会を開いて集中的に検討し、見通しが開ければA, B班合同の実験プランを策定したい。

○若手研究者の育成

この領域は、原子核物理（実験・理論）、原子物理、天文学にまたがるため、自分の専門分野を越えた知識と興味を若手に持たせることが極めて重要である。これまで、領域全体で学生や若手を対象とした「ウインタースクール」を毎年開催し、さらに国際スクールも1回開催、2回協賛している。今後もこうしたスクールを継続して行うとともに、若手を意識した入門的なセミナーを各大学で行ったり、全体研究会での若手の発表の機会を増やすようにしたい。

○国際的な広報と連携

これまで、さまざまな国際会議の場で、本領域の全体像や、各計画研究についての紹介を行ってきた。そのため、世界の不安定核と対称エネルギーの研究者や、ストレンジネス核物理研究者の間でこの新学術領域プロジェクトが認識されている。今後は、世界の関連分野の研究者と連携して、彼らのアクティビティをも本領域研究の進展に役立てるような方策を考えたい。

また、H26年秋の物理学会では、核物理部門が米国物理学会との合同大会を開催するので、そこで「中性子星核物質」ミニシンポジウムを主催することとした。ミニシンポジウムは一般講演を主体とするもので、国内の

新学術関係者はもとより米国の関連する研究者にも講演の応募を促し、この新学術領域の宣伝と米国との連携のきっかけとするつもりである。

○アウトリーチ

領域全体のアウトリーチとして、大阪市立科学館の機関誌への記事掲載と、市民向け講演会（物理学会主催行事の一部、東京）を行った。物理学会主催市民向け講演会については、講演内容をまとめた単行本が H26 年 8 月に出版される予定である。今後は、市民向け講演会は東京だけでなく京都や仙台などでも行いたい。領域全体のアウトリーチ活動とは別に、各計画研究の成果を講演会や新聞・雑誌などで積極的に発表することも心がける。出前授業の実施や科学イベントへの参加も行いたい。また、この分野へ将来加わる若手を増やすために、単なる一般向けでなく、いくつかの大学内で理系の学部生を対象にした講演会を開くことも検討する。

○検出器に関する連携

検出器の開発情報や技術の共有、共同開発、開発した検出器の相互利用を一層進めたい。これまでは、「全体研究会」「公募研究キックオフ会」「検出器交流会」において情報交換し、すでにいくつかの相互利用が始まっているが、こうした活動を増やす。特に C01 班と A, B 班の間の相互利用や共同開発を一層進める。