

領域略称名：中性子星核物質
領域番号：2404

平成29年度科学研究費補助金「新学術領域研究
(研究領域提案型)」に係る事後評価報告書

「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29年6月

領域代表者 東北大学・大学院理学研究科・教授・田村 裕和

目 次

1. 研究領域の目的及び概要	7
2. 研究領域の設定目的の達成度	9
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	12
4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況	13
5. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	15
6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧、ホームページ、公開発表等）	18
7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況	23
8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用、研究費の効果的使用を含む）	25
9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度	29
10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況	30
11. 総括班評価者による評価	31

研究組織 (総括：総括班, 計画：総括班以外の計画研究, 公募：公募研究)

研究項目	課題番号 研究課題名	研究期間	代表者氏名	所属機関 部局 職	構成員数
X00 総括	24105001 実験と観測で解き明かす中性子星の核物質	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	田村 裕和	東北大学・理学研究科・教授	10
A01 計画	24105002 多重ストレンジネスのバリオン間相互作用	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	高橋 俊行	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授	12
A02 計画	24105003 中性子過剰核物質中のストレンジネス	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	田村 裕和	東北大学・理学研究科・教授	9
B01 計画	24105004 高密度中性子過剰核物質の状態方程式	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	村上 哲也	京都大学・理学研究科・講師	8
B02 計画	24105005 中性子過剰な中低密度核物質の物性	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	中村 隆司	東京工業大学・理学院・教授	4
B03 計画	24105006 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	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	堀越 宗一	東京大学・理学系研究科・助教	4
C01 計画	24105007 宇宙 X 線・ガンマ線観測による中性子星研究の新展開	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	高橋 忠幸	宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授	5
D01 計画	24105008 中性子星と核物質の理論研究	平成 24 年度 ～ 平成 28 年度	大西 明	京都大学・基礎物理学研究所・教授	24
統括・支援・計画研究 計 8 件					

A01 公募	25105512 ☒ 原子の X 線測定による ☒ 粒子と原子核間のポテンシャルの研究	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	谷田 聖	日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センター・研究員	1
A01 公募	25105513 ストレンジネス核物理実験のための超高速イメージ撮像管システムの開発	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	家入 正治	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授	1
A02 公募	25105504 高温高密度クォーク物質の QCD 臨界点探索	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	江角 晋一	筑波大学・数理物質科学研究科・准教授	1
A02 公募	25105514 K 中間子原子 X 線分光に向けたマイクロカロリメータのビーム環境下における性能評価	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	岡田 信二	独立行政法人理化学研究所・研究員	1
B01 公募	25105515 錫 132 の中性子スキン厚測定で探る中性子核物質の状態方程式	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	銭廣 十三	独立行政法人理化学研究所・研究員	1
B02 公募	25105502 陽子・ヘリウム 3 散乱系における三体力発現機構の研究	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	関口 仁子	東北大学・理学研究科・准教授	1
B02 公募	25105506 二重魔法数エキゾチック核 Ni-78 の質量精密測定	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	山口 貴之	埼玉大学・理工学研究科・准教授	1
B02 公募	25105509 原子核の電気双極応答測定による対称エネルギーの研究	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	民井 淳	大阪大学・核物理研究センター・准教授	1
C01 公募	25105507 X 線を用いたマグネターの研究	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	牧島 一夫	東京大学・理学系研究科・教授	1

C01 公募	25105518 未同定 X 線天体を用いた新しい中性子連星系の探査	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	前田 良知	宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教	1
D01 公募	25105503 質量降着を伴う中性子星における中性子過剰核の核融合反応	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	萩野 浩一	東北大学・理学研究科・准教授	2
D01 公募	251055005 格子 QCD によるハイペロン相互作用の研究とハイパー核への展開	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	根村 英克	筑波大学・数理物質科学研究科・准教授	1
D01 公募	25105508 中性子星の星震と核密度状態方程式に関する数値的研究	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	木内 建太	京都大学・基礎物理学研究所・研究員	1
D01 公募	25105510 強磁場中性子星の多次元進化計算と観測比較による内部磁場の制限	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	安武 伸俊	千葉工業大学・情報科学部・助教	3
D01 公募	25105511 BCS-BEC クロスオーバー領域におけるフェルミ超流体の熱力学と超流動物性	平成 25 年度 ～ 平成 26 年度	大橋 洋士	慶應義塾大学・理工学部・教授	1

A01 公募	15H00833 多重 K 中間子凝縮核と中性子星	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	山崎 敏光	東京大学・理学系研究科・名誉教授	1
A02 公募	15H00837 カイラル有効理論のハイペロン核子 3 体力が示唆するストレンジネス核物理	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	河野 通郎	大阪大学・核物理研究センター・協同研究員	1

A02 公募	15H00838 J-PARC 二次ビーム 高強度化のための汎 用トリガーモジュー ルの開発	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	本多 良太 郎	大阪大学・理学研究科・研究員	1
A02 公募	15H00839 光生成反応による反 K 中間子原子核探索 のための粒子識別検 出器開発	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	時安 敦史	東北大学・電子光物理学研究センタ ー・助教	1
B01 公募	15H00834 スズ 132 の巨大単極 共鳴測定による中性 子核物質の非圧縮率 の研究	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	大田 晋輔	東京大学・理学系研究科・助教	1
B02 公募	15H00830 新型飛行時間検出器 による Ni 同位体の質 量測定	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	小沢 顕	筑波大学・数理物質科学研究科・ 教授	3
B02 公募	15H00832 きわめて不安定な原 子核の表面にあらわ れる中性子層核物質 の探索による EOS へ の挑戦	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	山口 貴之	埼玉大学・理工学研究科・准教授	1
B02 公募	15H00844 π 中間子原子分光実験 の発展	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	板橋 健太	独立行政法人理化学研究所・研究 員	1
C01 公募	15H00835 X 線で探る中性子星 の表面	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	牧島 一夫	東京大学・理学系研究科・教授	1
C01 公募	15H00845 超高時間分解能・大 統計 X 線ミッション NICER との国際連携 による中性子星観測	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	榎戸 輝揚	独立行政法人理化学研究所・研究 員	3
D01	15H00836 連星中性子星合体に よるマグネター形成 と核物質状態方程式	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	木内 建太	京都大学・基礎物理学研究所・研 究員	1

D01 公募	15H00840 極低温フェルミ原子 気体における状態方 程式の理論的決定と 中性子星低密度領域 への応用	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	大橋 洋士	慶應義塾大学・理工学部・教授	1
D01 公募	15H00841 中性子星において回 転する超流動体の研 究	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	新田 宗土	慶應義塾大学・商学部・准教授	1
D01 公募	15H00842 重イオン弾性散乱に よる高密度領域の核 媒質効果の分析	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	古本 猛憲	一関工業高等専門学校・講師	1
D01 公募	15H00843 中性子星観測から迫 る原子核飽和パラメ ータの制限	平成 27 年度 ～ 平成 28 年度	祖谷 元	国立天文台・助教	1
公募研究 計 30 件					

1. 研究領域の目的及び概要（2ページ以内）

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、応募時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。

概要 中性子星に関連する地上実験・天体観測・理論研究を分野横断的に連携して推進し、宇宙で観測可能な最高密度をもつ中性子星内部の物質を解明するのが本領域の目的である。中性子星はさまざまなバリオンから成る量子多体系であり、中性子星内部の物質は、表面から中心に向かって低密度($\rho \ll \rho_0$)から高密度($\rho \sim 3\rho_0 - 6\rho_0$) ($\rho_0 \sim 0.16 \text{ fm}^{-3}$ は通常の原子核の密度)にわたり、希薄な中性子物質から高密度のハイペロン（ストレンジネスをもつバリオン）の混在するバリオン物質まで、さまざまな形をもつと予想されている。しかし、これらを支配する核物質（バリオン多体系）の状態方程式（EOS）はよくわかっておらず、そのためそれぞれの物質の性質や中性子星の内部構造は謎に包まれている。中性子星の内部を解き明かすには、ストレンジネス核物理、中性子過剰核物理、物性物理、天体物理が一体となって挑む必要がある。そこで本領域研究では、次の4つの研究項目を設定する。

(A) 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) 不安定核ビーム工場(RIBF)を用いた中性子過剰核物理の実験研究、および、冷却原子気体を用いた中性子物質の実験的シミュレーション

(C) X線天文衛星ASTRO-Hを用いた中性子星の高精度X線観測

(D) 実験と観測を統合する理論研究

本領域研究では、図に示すように、それぞれ (A) 高密度核物質のEOS構築に不可欠なストレンジ粒子（ハイペロン Λ, Σ, Ξ

とK中間子）と核子の相互作用を実験的に決定し、(B) 中性子物質や中性子過剰核物質の高密度から低密度までの物性を実験的に調べてEOSの情報を引き出し、(C) EOSの適否を検証するために不可欠な中性子星半径の正確な測定を行う。そして、(D) これらの成果を理論研究によって統合し、中性子星の中心から表面に至る核物質全体を支配する信頼性の高いEOSを決定し、中性子星内部の構造とそこに現れる様々な物質の正体を解明することをめざす。中性子星の理解は、核物理をはじめとする現代物理学にとっての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、バリオンが主役となる“バリオン系物性物理学”というべき新しい物質科学を拓くことにもつながる。

従来、核物理の(A)と(B)の分野間には研究上の交流が殆どなく、さらに原子核分野、(C)の天文分野、(B)の冷却原子分野、の3者の間にはまったく交流がなかったが、本研究では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これらが初めて連携する。また、J-PARC, RIBF, ASTRO-Hは、いずれもそれぞれの分野で世界最高の性能をもつ日本の新しい研究施設であり、今これらの研究が連携する意義は極めて大きい。これらの研究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。

背景 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、主に中性子からなる巨大原子核のような高密度天体であり、その中心は原子核の数倍の密度をもつ。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核物質が従う状態方程式（EOS）は不明であり、そのため中性子星内部の物質の性質や中性子星の内部構造はわかっていない。なぜなら、通常の原子核はいずれもほぼ一定の密度($\rho_0 \sim 0.16 \text{ fm}^{-3}$)をもち陽子数・中性子数の比が1:1（対称核物質）に近いので、こうした原子核のデータをもとに作られた原子核物理学は、中性子星内部の核物質を理解するために必要な、中性子が陽子より圧倒的に多くしかも低密度($\rho \ll \rho_0$)から高密度($\rho \sim 3 - 6 \rho_0$)にわたるような核物質のEOSを予言することができないためである。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、信頼できる半径の測定例はほとんどない。質量と半径の関係は、EOSを決めると一意的に決まるので、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、



本研究領域の概念図と特徴

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る。しかし2010年に観測された質量 $1.97 \pm 0.04 M_\odot$ (M_\odot は太陽質量)という重い中性子星は、ハイペロンやK中間子を含む既存のEOSでは支えられず、つぶれてブラックホールになってしまう(この矛盾をハイペロン・パズルという)。不明な点が多いハイペロンやK中間子と核子との相互作用を実験で定め、中性子星質量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。より外側の密度 $\rho \sim \rho_0 - 2\rho_0$ のouter coreは、ほぼ中性子のみ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=陽子数)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核物質を記述する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。中性子過剰核の様々な実験データを使って低密度から高密度($\sim 2\rho_0$)における対称エネルギーの情報を得ることが期待されている。さらに低密度($\rho \ll \rho_0$)のcrust領域では、純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いる。純中性子物質は、散乱長の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でEOSをシミュレートできる段階になりつつある。ユニタリー極限の実験値に中性子星物質で必要となる補正を正しく加える理論的枠組みを開発し、中性子星物質のEOSを導き、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を探求することも望まれる。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。

研究の目的と方法 中性子星内部の核物質を支配する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して、以下のように研究を進める。実験の研究項目A01, A02, B01, B02, B03は、対象とする核物質密度が高密度(中性子星中心部)から低密度(表面)へと向かう順番に並んでいる。

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し、理論班の構築するEOSに反映させる。A01では、エマルジョンやハイペロン・スペクトロメータによる $\Lambda\Lambda$ ハイパー核とHダイバリオン($\Lambda\Lambda$ 相関)の研究や、世界初の Ξ ハイパー核分光により、 $\Lambda\Lambda$ 間、 ΞN 間(Nは核子を表す)、 $\Xi N - \Lambda\Lambda$ 転換の相互作用を決める。これらは最高密度($\rho > 3\rho_0$)領域でのハイペロンの有無や組成を支配する。A02では、新方式の $\Sigma^+ p$ ($=\Sigma^+ n$)散乱実験や、実績ある中性子過剰 Λ ハイパー核分光、 Λ ハイパー核線分光、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の相互作用を調べる。これらは inner core ($\rho \sim 2\rho_0 - 3\rho_0$)において、ハイペロンがどう現れ出すか、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対称エネルギーの密度依存性を引き出す。B02では、我々が世界に先駆けて不安定核に適用したクーロン分解法(運動学的完全測定)を用い、中性子過剰核に現れる中性子スキンの振動モード(電気双極子応答、特にピグミー共鳴)を測定して、outer coreの低密度領域($\rho \sim 0.5\rho_0 - \rho_0$)でのEOSの対称エネルギー項に強い制限をつける。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。一方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を決定し、その性質(BCS/BEC状態)を調べる。

C 班 (C01) : 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。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、X線黒体放射スペクトルからの半径導出の精度向上により、信頼性の高い半径導出を行う。さらに将来の大面积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を構築・改良する。こうして作成したEOSから得られる中性子星の半径・質量の関係を、C班で得られる半径・質量の観測値と比較してEOSを選別し、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。

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、次の研究戦略を決める。またA, B, C班は検出器の開発・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。

本領域研究は、“バリオン系物性物理学”というべき新しい物質科学の開拓につながり、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。またクォーク物質、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. 研究領域の設定目的の達成度（3 ページ以内）

研究期間内に何をどこまで明らかにしようとし、どの程度達成できたか、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の達成度合いについて、具体的に記述してください。必要に応じ、公募研究を含めた研究項目ごとの状況も記述してください。

1. に記載した A01, A02, B01, B02, B03 の各研究項目の実験研究と, D01 の理論研究を組み合わせることで、データに基づく信頼できる核物質 EOS を構築して、中性子星の半径や内部物質の性質を予測し、これをさらに C01 の半径の観測結果と比較することで EOS を選別・検証して、中性子星内部の物質の理解を大幅に深めることを目指した。

まず、実験研究の成果を低密度側(B03)から高密度側(A01)へ向かう順番で述べる。中性子星表面の低密度領域については、B03 班の冷却原子の実験データによって低密度領域の EOS の決定に成功したことは極めて大きな成果である。測定したユニタリー極限に近いフェルミ粒子系の EOS を実際の低密度中性子星核物質の EOS に変換する理論の完成も重要な成果である。より内部の中密度領域では、B02 班による RIBF 等での 中性子過剰核の構造や中性子スキン等の実験データ が（一部データ解析中であるものの）多数得られたことで、低～中密度領域の EOS を支配する「対称エネルギー」の制限を一層厳しくつけられるようになり、中性子星物質の超流動にかかわるダイニュートロン相関の知見も得られた。高密度領域 EOS については、B01 班が大型検出器(SAMURAI TPC)を完成させ 世界初の中性子過剰核衝突実験を成功裏に実施し、高密度領域の対称エネルギーへの実験による制限が初めてつけられる見通しとなった。

さらに高密度領域については、J-PARC で A02 班により 中性子過剰 Λ ハイパー核と Λ の荷電対称性の破れ のデータが得られ、そこから中性子過剰核物質中のハイペロンの理解に欠かせない ΛN - ΣN 結合の情報が引き出されつつある。K 中間子核(K-pp)の明確なデータ も得られたため、中性子星での K 中間子凝縮の有無も確定する。A01 班は、世界初の Ξ ハイパー核束縛状態の発見 という大きな成果をあげ、中性子星の中で Ξ が比較的 low density で発生しうることを示した。しかしこれは EOS を一層柔らかくするため、ハイペロン・パズルの矛盾が一層深刻になってしまった。なお、J-PARC 事故による 2 年のビーム停止のため A01 班のダブル Λ 核のエマルジョン実験は、実施が遅れたが（2017 年 6 月現在順調に実施中）、1~2 年後には解析結果が出る予定であり、また、A01 の H ダイバリオン探索と A02 の Σp 散乱実験は、本実験が新学術の期間内に実施できなかったもののいずれも装置の開発・製作には成功し、今後のビームタイムで EOS の input 情報となるデータが得られる見通しである。

ハイペロン・パズルの解明に向けては、その鍵となるハイペロンを含むバリオンの 3 体斥力についていくつかの新しい理論計算を行ない、その効果を含めた EOS の提案や、それを検証するための新しい実験を立案するなどの大きな進展があり、パズル解決への方向性が明らかになった。今後、一層の理論研究とともに、こうした新実験の実施や観測との比較を行うつもりである。

こうして、これまでの理論的成果を統合して構築した EOS [D01-1-1, Togashi et al., Nucl. Phys. A (2017)]（および、本学術領域研究で得られるデータが揃ったのちにさらに改良する予定の EOS）は、中性子星の構造や超新星爆発などの計算に広く使われることを想定して公開しており、今後観測と比較される。今回は、ひとみ衛星の運用停止のため当初期待していた半径の精密測定ができなかったが、衛星用 X 線検出器技術が圧倒的に向上したことが軌道上で証明できたことと、本領域研究によるさらなる検出器技術の進展があったことから、今後の観測で EOS の直接検証が可能となり、我々の中性子星核物質の理解を大きく進展させることができるはずである。以上の成果より、本領域の目的は十分達成されたと考えられる。研究項目ごとの達成状況を以下に述べる。

研究項目 A01「多重ストレンジネスのバリオン間相互作用」

(1)エマルジョンによるダブルストレンジネス系の測定、(2)大立体角ハイペロン・スペクトロメータによる H ダイバリオン探索・ $\Lambda\Lambda$ 相関の測定、(3) $^{12}\text{C}(K^-,K^+)$ 反応による Ξ ハイパー核分光のダブルストレンジネス(S=-2)系に関する実験、を J-PARC で行い、これまでほとんどわかっていない $\Lambda\Lambda$ 間、 ΞN 間、および $\Xi N \rightarrow \Lambda\Lambda$ のバリオン間相互作用の大きさを測定し、中性子星中心部の高密度核物質における状態方程式(EOS)の決定に重要な情報を与えることを目標として設定した。さらに公募研究として、 Ξ 原子核からの X 線分光により Ξ 原子核ポテンシャルを調べる(2)と相補的な実験を加えた。

J-PARC ハドロン施設の放射能漏えい事故による 2 年の運転停止により、実験の実施は大幅に遅延した。エマルジョン実験(1)は 2016 年にビーム照射開始となり 2017 年夏にデータ取得完了の予定である。 Ξ ハイパー核分光実験(3)は、計画していた高分解能スペクトロメータではなく既存の SKS スペクトロメータでのパイロット的なデータ取得を行った。一方、(1)のためにエマルジョンの全面スキャン法を開発しこれに成功、この方法で過去にビーム照射したエマルジョンを解析して、世界初となる Ξ ハイパー核束縛状態の明確な証拠(KISO event)を発見した。 Ξ の原子核ポテンシャルとその源である ΞN 相互作用は引力であるということが確定した意義は極めて大きい。また、(3)の $^{12}\text{C}(K^-,K^+)$ 分光パイロット実験でも 6 MeV (FWHM)というこれまでにない高分解能でスペクトルを取得し、KISO event とは別の Ξ ハイパー核の存在を確認するとともに、この新しい分光法の有効性を証明した。H ダイバリオン探索実験(3)については、主

要検出器のハイペロン・スペクトロメータ（超伝導電磁石と TPC 検出器）が完成し、ビームで性能を確認した。本実験のビームタイムも認められた。

研究項目 A02「中性子過剰核物質中のストレンジネス」

J-PARC にて、(1) 中性子星内部での Σ の発生の有無を調べるため、 Σ^+p 散乱実験を行ってこれと等価な Σ^+n 相互作用の符号と大きさを測定すること、(2a) 中性子過剰 Λ ハイパー核の反応分光と、(2b) 軽い Λ ハイパー核の γ 線分光による構造研究を行って、中性子過剰核で重要な役割を果たす ΛN - ΣN 相互作用の性質を調べ、中性子星で Λ が発生しはじめる中性子過剰な核物質中の環境で Λ の相互作用がどう変わるかを調べること、(3) K^- 中間子 (反 K^- 中間子) 原子核を探索して、そのデータから核物質中での K^- の相互作用の情報を引き出し、中性子星内部での K^- 中間子凝縮の可能性を調べることを、を目的とした。

(2a) 中性子過剰ハイパー核 ${}^6_\Lambda\text{H}$ の生成実験を行った。イタリアで発見したという報告に反してこのハイパー核は観測されず、生成断面積の厳しい上限値を得てこの核が束縛しない可能性を示した。(2b) γ 線分光実験により ${}^4_\Lambda\text{He}$ の基底状態二重項間の γ 遷移を観測し、そのエネルギーから極めて大きな荷電対称性の破れ (Δp - Δn 相互作用の違い) を発見した。(3) 明確な K^-pp 束縛状態の存在を示す高統計データを得た。理論的解析は途中だが、核内での反 K^- 中間子の引力の大きさが確定する。これらから、中性子星の中性子過剰核物質中での Λ の相互作用の特徴や、反 K^- 中間子の性質が明らかになってきた。また、(1) Σ^+n 相互作用を決定するための、 Σ^+p 散乱実験を準備し、円筒型シンチレーションファイバー検出器と BGO カロリメータからなる新型の陽子検出器システム CATCH の開発に成功し、実機を完成させビームでの性能テストも行った。しかし J-PARC 事故のため本実験のビームタイムが大幅に遅れた (H29 年度後半の予定) ため、CATCH を用いて陽子・重陽子反応の詳細なデータを東北大サイクロで測定し、ハイペロンを含まない 3 体核力を調べる研究も進めた (B02 公募研究と共同)。一方、ハイペロン・パズル解明に必要な 3 体バリオン力を調べるための Λ ハイパー核精密反応分光実験を立案した。

研究項目 B01「高密度中性子過剰核物質の状態方程式」

B01 計画研究は、中性子過剰核物質の EOS の中でも特に重要な項、“対称エネルギー”が通常核物質の約 2 倍程度の密度領域でどう変化しているのか (EOS が堅いのか柔らかいのか) を世界に先駆けて決定することを目指した。理研 RIBF で生成される幅広い陽子数/中性子数比を持つ不安定核ビームを標的核に衝突させ、中心衝突で通常核物質の約 2 倍の核物質を作り、そこから発生する π^+ と π^- の生成比を系統的に調べ、理論計算と比較して対称エネルギーの密度依存性に強い制限を与えることを計画した。

SAMURAI 電磁石に組み込む汎用性の高い大型の多重飛跡検出器 (TPC) をアメリカミシガン州立大学の共同研究者たちとともに製作し、H25 年度中に完了した。また、この TPC の多量の信号を処理するため仏 Saclay をコアとする国際共同研究グループとともに高速 TPC 読出し回路系 GET (General Electronics for TPC) を共同開発し、動作テストののち量産した。

中心衝突を選び出すため、磁場中でも動作する新型多重度検出器を、A02 班が実験(1)用に創出した技術を用いて開発した。また周辺衝突で放出されるビーム粒子に近い重い粒子を効率的に排除する前方検出器をポーランドの共同研究者と開発した。H27 年秋までにそれぞれ実機の製作を完了した。さらに、収集したい事象が発生した時にだけ TPC が信号を出力するための Gating Grid Driver の開発にも成功した。

これらの検出器のビームコミッションののち、H28 年春、高密度中性子過剰核物質の EOS を探究する総計 13.5 日の実験を実施。核子当り 280 MeV の不安定核ビーム (${}^{108,132}\text{Sn}$) を用いて ${}^{132}\text{Sn}+{}^{124}\text{Sn}$, ${}^{124}\text{Sn}+{}^{112}\text{Sn}$, ${}^{108}\text{Sn}+{}^{112}\text{Sn}$ 等の中心衝突の実験を行い、予定を上回る統計量のデータ収集に成功した。 π^+ と π^- の生成比を正確に決定するデータ解析を継続中で、間もなくこの結果と D01 班の理論計算結果との比較から対称エネルギーの密度依存性に制限がつけられる見通しである。

公募研究では二重閉殻の中性子過剰核 ${}^{132}\text{Sn}$ の巨大単極共鳴測定実験が行われた。解析は現在進行中であるが、中性子過剰物質の非圧縮率が得られることが期待される。

研究項目 B02「中性子過剰な中低密度核物質の物性」

B02 計画研究では、理研 RIBF での中性子過剰核の研究から、標準核密度から希薄核密度までの範囲で中性子過剰核物質の物性を明らかにすることを目指した。特に (1) 中性子スキン核の核応答、特にピグミー共鳴から中性子過剰核物質の EOS の情報を得る、(2) 中性子ハロー核により希薄核物質中でのダイニュートロン相関を調べる、(3) 中性子数が超過剰で非束縛状態の核子多体系の探索、に取り組んだ。

(1) RIBF の多種粒子測定装置 SAMURAI を用い、本計画研究の予算で建設した γ 線カロリメータ (CATANA) を用いて、中性子過剰 Ca 核のピグミー共鳴を観測する実験を行った。CATANA を製作・完成させ不安定核で γ 線の測定に成功、H29 年 4 月に本実験のデータ取得に成功した。(2) 中性子ハロー核 ${}^{22}\text{C}$, ${}^{19}\text{B}$ のクーロン分解反応のデータを取得し、ダイニュートロン相関の兆候を示す強いクーロン励起強度を観測した。また、これに関連して ${}^{22}\text{C}$ の核半径を導出し、 ${}^{31}\text{Ne}$, ${}^{37}\text{Mg}$ には変形駆動型ハローを発見した。(3) 不安定核の荷電交換反応を用いて 4 個の中性子多体系「テトラ中性子」の候補を発見した。また、非束縛同位体 ${}^{25,26}\text{O}$ の合成とその高精度質量測定を行い、 ${}^{26}\text{O}$ では 2 中性子がごく僅かに非束縛の状態であることを見いだした。 ${}^{27}\text{O}$, ${}^{28}\text{O}$ という 3,4 個の非束縛中性子系をもつ核の世界初測定にも成功した。こうした

成果は、3 体力等の核力の現代的理論模型に強い制限を与え、EOS の構築に重要な役割を果たす。

また、公募研究では i) 陽子- ^3He 散乱実験によって中性子過剰物質中で重要となるアイソスピン 3/2 の 3 体核力を調べるため、偏極 ^3He 標的を開発し、偏極分解能の測定を成功させ、また ii) 安定核の電気双極子励起の測定により中性子過剰核物質 EOS の対称エネルギーを制限する研究を一層進めた。

研究項目 B03「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」

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、希薄中性子物質および希薄中性子星核物質の EOS や中性子星内殻構造を明らかにすることを目指した。

冷却原子を用いて s 波、および p 波相互作用しているフェルミ粒子系の物性研究を行い、中性子物質の基本 EOS を得た。D01 班の公募研究（大橋）との共同研究により、有効長の影響を考慮したより現実的な中性子物質の EOS を得た。本成果を中性子星に適応させるため、フェルミ超流動の平均場計算と周期ポテンシャルに対する厳密な境界条件を扱う計算手法を確立した。本新学術領域研究の対象は、「異なる学問分野の連携と当該研究領域の発展を目指すもの」であったが、冷却原子研究と原子核研究の連携はこれに合致し、我が国で立ち遅れていた冷却原子研究と原子核研究との融合が確かに達成された。さらに本研究を有限温度系に拡張する事により、中性子星の形成ダイナミクス、地殻変動、冷却曲線の計算に必要な EOS を与えられることがわかり、天体物理学との連携も生まれた。このような連携は本研究領域として予想以上の成果であるといえる。

研究項目 C01「宇宙 X 線・ガンマ線観測による中性子星研究の新展開」

中性子星の半径を、不定性の大きい天体までの距離に依存せずに、精密に観測することを目指した。運用中の X 線衛星に加え、打ち上げられる ASTRO-H 衛星により中性子星を観測し、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や、準周期的放射(QPO)の測定などから半径を導出するとともに、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行うこととした。

ASTRO-H の準備として、搭載される軟 X 線分光装置(マイクロカロリメータ) の波形処理機器の高速化などの機器の試験・改良を行い、また観測すべき候補天体をシミュレーションと既存衛星データの再解析によって検討し 2 つの中性子星(Terzan 5 X2 と Ser X-1)を選択した。

2016 年 2 月の ASTRO-H 打上げ後、検出器の性能をペルセウス銀河団やカニ星雲の観測で実証した。マイクロカロリメータは、「すざく」の CCD を約 30 倍上回る分解能 (4.9 eV FWHM) を軌道上で達成した。しかし ASTRO-H (ひとみ) は短時間で運用停止となり、実際の中性子星の観測はできなかった。

一方、中性子星の半径を制限するため既存衛星データの解析も実施。GRS1747-312 の「すざく」衛星での X 線バーストの減光時スペクトルに特徴的構造を検出し、中性子星表面の重力赤方偏移を推定する新手法を提示した。また中性子星大気モデルを整備し、SerX-1 の Chandra 衛星データから吸収線の上限值を求めて中性子星表面の温度や伝導度に制限をつけた。フェルミ衛星の γ 線データも解析し、パルサー星雲 N157B にパルサー風の熱的成分による逆コンプトン散乱で生じている可能性のある成分を発見、これから中性子星の慣性モーメントを制限できることを示した。X 線データから中性子星半径を精密決定するために必要な、中性子星での物理現象のシミュレーションコード(MONACO)を整備した。

将来の観測に向けて、X 線偏光観測用 PRAXyS 衛星や、光度曲線の精密観測から中性子星の半径を決められる LOFT 衛星計画などの国際衛星計画提案にも参加した。将来ミッションへの搭載を目的として、CdTe 両面ストリップ検出器の改良やビーム試験、ADC 内蔵のピクセル検出器用低雑音多チャンネル ASIC の開発、電子飛跡追跡を可能とする新型 SI センサーの開発などを行い、期待される性能を得た。

研究項目 D01「中性子星と核物質の理論研究」

理論班(D01)では、原子核理論・天体理論・凝縮系理論の研究者が協力し、実験・観測班(A,B,C 班)と連携して、(A) 多成分からなる最高密度の低温物質、(B) 低密度側での非対称核子物質、(C) 中性子星核物質 EOS とコンパクト天体現象、の 3 方向から中性子星の物理に迫ることを目指してきた。

研究業績の項で示すように、設定目的の (A) ハイパー核・K 中間子核の構造・反応からの相互作用の理解、クォーク物質の性質の議論、(B) 対称エネルギーの大きさと密度依存性の抽出、(C) これらのデータと無矛盾な信頼性の高い原子核・ハドロン物質 EOS の構築・提案と中性子星諸現象の分析、また分野横断的な課題である (D) 冷却原子系に基づく中性子物質の理解、について研究が大きく進展した。重イオン衝突からの 2 粒子相関を用いたハドロン間相互作用の分析など、当初の想定外の研究も進展した。これらの研究を通じて実験・観測班の活動との連携が進んだ。

一方で、目標の一つであった「新たに得られた実験・観測データに基づいて 3 体力効果を引き出すこと」は未完成である。第一原理変分計算に基づく EOS の提案において 3 体力効果を取り入れており、また 3 核子スピン軌道相互作用の効果による Pb 同位核の荷電半径の違いが理解され、ハイパー核・K 中間子核においてバリオン 3 体力の起源の一つであるチャンネル結合効果の分析が進むなど、理解が進んだ。ハイパー核の精密データからバリオン 3 体力の情報を引き出す方法も提案した。3 体力効果を今後データから定めるとともに、基礎理論である量子色力学(QCD)に基づいた 3 体力と比較し、EOS へ反映させることは残された課題である。

3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況（1 ページ以内）

研究推進時に問題が生じた場合には、その問題点とそれを解決するために講じた対応策等について具体的に記述してください。また、組織変更を行った場合は、変更による効果についても記述してください。

期間中に生じた 2 つの大きな問題について、当時講じた対応策 1)~4)と【その後の実際の状況】を示す。

J-PARC ハドロン施設の事故

H25 年 5 月の J-PARC ハドロン施設の放射性物質漏えい事故によって施設の運転が停止した。【実際、H27 年 4 月 24 日の運転再開まで、ほぼ 2 年間実験ができなかった。】

計画研究 A01, A02 はほぼすべて J-PARC ハドロン施設での実験を必要とするため、大幅な遅れが予想された。（実際、2 年間のビーム停止により予定していた実験のほぼ半数が期間内に実施できなかった。）

- 1) 実施が危ぶまれる実験でも、装置の開発や準備は期間内に着実に終了し、科研費の期間を越えてでも確実に実験を実施し本領域の成果とする。【実際、A01 の H ダイバリオン探索実験は、装置(ハイペロン・スペクトロメータ)を完成させビームを用いたテスト実験で性能を確認した。A02 の Σp 散乱実験は、陽子検出器システム(CATCH)の開発・建設とビームによる性能テストまで終了した。J-PARC 実験を待つ間、CATCH を使用して B02 公募研究(関口)と A02 計画班とが 3 体核力の共同実験を行った。】
- 2) ビーム再開後、効率よく次々と実験を実施できるよう、各実験の準備を徹底する。【実際、ハイパー核 γ 線分光実験、エマルジョン実験は十分な準備ののち再開後効率よく行われた。前者では Λ 粒子の荷電対称性の大きな破れを発見した。 Ξ ハイパー核分光は、本来の実験は間に合わないで既存装置で短時間のパイロット実験を行い、下記エマルジョンとは別手法で Ξ ハイパー核束縛状態を発見した。】
- 3) ビーム停止期間中は、実験装置の開発・製作、すでにとったデータの解析に集中し、装置開発や解析結果の国際会議での発表や論文発表を行う。【本科研費で開発したエマルジョンの自動全スキャン装置を使って、過去に KEK でビーム照射したエマルジョンを再解析し、史上初の Ξ ハイパー核事象(KISO event)を発見して、 Ξ 粒子と核の相互作用が引力であることを確定した（日本物理学会論文賞受賞）。】
- 4) J-PARC 以外(独マインツ大と米 JLab)でハイパー核実験を行っている A02 連携者の中村哲との連携を一層進める。【中村氏は、計画班の発見したものは相補的な荷電対称性破れのデータをマインツ大で得ており、さらに JLab で中性子過剰ハイパー核データも得ている。これらは、実施が間に合わなくなった A02 班の(2a), (2b)の第二段階実験を補うことができる。本来予定していた中性子過剰核物質中のハイペロンに関する知見を得るべく D01(理論)班も含めた連携研究を加速させた。】

ASTRO-H (ひとみ) 衛星の運用停止

2016 年 2 月に打ち上げられた ASTRO-H 衛星は約 1 ヶ月の試験観測の後、通信異常により運用停止となった。そのため、最終年度に予定していた ASTRO-H による中性子星の観測は実施できなくなった。

- 1) 軌道上で得られた貴重なデータから検出器の性能を評価する。
【機器立ち上げ時に行ったペルセウス銀河団やかに星雲などの観測データで性能を実証した。マイクロカロリメータでは「すざく」の CCD を約 30 倍上回る画期的なエネルギー分解能 (4.9 eV FWHM) を軌道上で達成した。この成果は、今後の衛星開発にとって大変貴重である。】
- 2) 既存の衛星データを用いて中性子星の半径に制限をつける解析を加速させる。
【既存衛星データの解析を強力に進め、以下の成果を得た。GRS1747-312 の「すざく」衛星の X 線バーストデータから、減光時のエネルギースペクトルに吸収端状の構造を検出した。これまで、X 線バーストでこのような構造が見られたことはなく、中性子星のスピンの鈍った吸収端と解釈できる。これにより、中性子星表面の重力赤方偏移を推定する新たな方法を提示した。また、中性子星大気モデルを整備したうえで、SerX-1 の Chandra 衛星データの詳細な解析を行い、吸収線の上限值を求めることに成功した。平均された表面温度が 10^7K であれば、中性子星大気モデルから、Fe XXV の吸収線の等価幅は 10 eV と予測され、実際に得られた吸収線の上限值から、中性子星表面の温度や伝導度に制限をつけることができた(論文執筆中)。一方で、X 線スペクトルから中性子星半径の精密決定を行うために必要な、中性子星の極限環境の物理現象をモデル化したシミュレーションコード MONACO (磁場やアウトフロー、降着円盤からの放射、さらに、X 線偏光などを取り込んだもの)を ASTRO-H 打ち上げ前から開発してきたが、これを一層推進し、将来の衛星の解析に適用できるようにした。このコードは中性子星以外を含む様々な天体解析に用いられ、その結果が複数の論文として出版された。】
- 3) 他の衛星ミッションに参加して行う研究を加速する。
【X 線偏光観測のための PRAXyS 衛星や、光度曲線の精密観測から中性子星の半径を決めることを目的とした LOFT 衛星計画など、新たな国際衛星計画提案にも参加していたが、そのための検出器の開発を加速させた。CdTe 両面ストリップ検出器の改良や加速器を用いた試験、ADC を内蔵したピクセル検出器用低雑音多チャンネル ASIC の開発、CMOS 読み出しとストリップ電極を組み合わせた電子飛跡追跡を可能とする新しい SI センサーの試験などの先端検出器の開発、さらに大量のデータを高速に処理するための新しいデータ処理装置の開発を行い、期待される性能を得た。】

4. 審査結果の所見及び中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況（2 ページ以内）

審査結果の所見及び中間評価において指摘を受けた事項があった場合には、当該コメント及びそれへの対応策等を記述してください。

<審査結果の所見において指摘を受けた事項への対応状況>

該当なし。

<中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況>

<中間評価で指摘を受けた事項>

研究項目 A の実験は、J-PARC ハドロン施設の放射性物質漏えい事故による運転停止のために約 2 年間実験が行われないことになるため、研究期間内で期待通りの成果が得られるか少し厳しい状況になっている。効率の良い実験計画を練ることで、成果を挙げて頂きたい。

<対応>

「3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況」に記載した通り、できる限りの対応をした。

<中間評価で指摘を受けた事項>

理論的研究としてはハイペロンを含む核子の 3 体力の効果とその起源が最大の課題であるが、QCD 有効模型に基づきその解明を進めていただきたい。

<対応>

QCD に基づいてハイペロンを含む 3 体バリオン力 (YNN 力, Y はハイペロンを表す) を理論的に求める方法として、格子 QCD 核力、カイラル有効場理論核力、クォーク模型核力などのアプローチが考えられる。格子 QCD 核力は大変有望であるが、現時点では計算能力が足りず、YNN 力は残念ながらまだ定量的に求められる段階にない。本領域研究では中間評価での指摘を受けて、A02 公募 (河野) がカイラル有効場理論からの YNN 3 体力を取り入れてハイペロンポテンシャルの密度依存性を求めた。また D01 班ではクォーク模型を用いて 3 クォーク力からの YNN 力を求めた [Ohnishi, Kashiwa, Morita, PTEP]。これらの研究はともに YNN 力が核子 3 体力よりも強い斥力であることを示唆している。これらの効果をハイパー核実験で確認するには、数 100 keV 以下の精度で Λ 粒子の束縛エネルギーを測る必要があり、A02 班では、JLab と J-PARC (拡張ハドロン施設) での実験を提案した。JLab の実験 (実験責任者は連携研究者の中村哲) は $^{40,48}\text{Ca}$ 標的についてビームタイムが認められ、数年後の実施に向けて準備を始めている。

<中間評価で指摘を受けた事項>

今後は、領域内でより一層の連携を図るために、研究項目間を横につなぐような具体的な課題を設定するなどの努力を期待する。特に、計画項目 C01 の X 線観測により得られるデータの種類や精度が研究項目 A, B で得られる実験データとどのように関係し、中性子星の状態方程式の理解にどう役に立つかなど、研究項目 D とのより一層の連携と戦略が必要である。

<対応>

B01, B02 班が実験で求める対称エネルギーと C01 班が観測する中性子星半径との関係は、世界的な関心事となっており、国際的な共同研究の流れができています。本新学術領域はこの国際共同研究に参画し、対称エネルギーの精密決定のための実験・理論研究を進め、その国際共同研究の一翼を担ってきた。この近年、世界で毎年行われている「対称エネルギー国際会議」は本領域が共催・協賛しており、中間まとめの論文 [C. Horowitz et al., J. Phys. G41 (2014) 093001] は既に 62 回引用され高く評価されている。

現時点では、EOS から計算される中性子星半径が対称エネルギーの不定性によってもつ誤差は、半径の観測の誤差 (20~30%) と同程度であり、理論との協力のもと実験と観測が精度を競い合っている。従来の観測方法では、低質量 X 線連星の観測に適した 2 keV 以上においては検出が極めて困難であった。カロリメータによる検出器が実現したことで、有効面積、エネルギー分解能の両面でそれぞれ 10 倍以上改善し、1% の統計精度で吸収線の重力赤方偏移が求まることとなった。質量の誤差がないものとする、半径は 0.3 km (2~3%) の精度で決まる。(もし別の方法で 0.1 太陽質量程度の精度で質量が決定できれば、0.7 km 程度の精度で半径が決定できることになる。) こうして、ひとみ衛星後継機で数% の誤差で半径が観測され、B01, B02 班のデータから決められる高精度の対称エネルギーの値を組み合わせると、飽和密度近

辺での非対称核物質 EOS の検証だけでなく, EOS の高次の係数の情報が得られ, 飽和密度を超える領域での対称エネルギーも決定できることとなる。本領域研究はこうした研究の道筋を生み出す役割を果たしてきた。

一方, A01, A02 班の求める YN, YY 2 体相互作用は EOS 構築に不可欠だが, ハイペロン・パズルが示すように観測される質量・半径には YNN 3 体力も大きく影響する。しかし YNN 力が有限ハイパー核に及ぼす効果は小さく, 本領域研究の期間内での検証は難しいことが判明したため, 本領域研究では, まず未知の YN 力を決定するとともに, NNN 力を正確に評価する方向で研究を進めることとした。そこで A02 計画班と B02 公募(関口)の共同で NNN 力を詳しく調べる研究も開始した。D01 班では, 長年問題だった Pb アイソトープ半径問題に NNN 3 体力が解決を与えることを見出し, また中性子星振動や低質量中性子星の質量・半径と状態方程式の関連についても定量的な理解を進めた。これらは YNN 力決定を目指して研究を進めるという方針の下で行われたものである。

<中間評価で指摘を受けた事項>

今後は, 検出器の開発などは, 領域内での連携に留まらず, より広い分野の研究者との連携が望まれる。

<対応>

毎年行った領域研究会や, 総括班会議を通じて議論をしてきた。

A02 計画研究が Σ_p 散乱実験用に開発した, シンチレーションファイバーと MPPC を用いた検出器の技術と, 多チャンネル MPPC 読出し回路(VME-EASIROC モジュール) は, B01, B02 計画研究でも使用したが, これらは汎用性が高いため, 領域外の研究にも売り込んできた。特に, この VME-EASIROC モジュールは, 誰でも A02 班(東北大)を通して共同購入できるようにする体制を作った。その結果, VME-EASIROC モジュールは, J-PARC ハドロン施設の本領域外の実験, Spring-8/LEPS のハドロン実験, 理研 RIBF での本領域外の実験でも現在使用されている。また, VME-EASIROC モジュールに搭載する ASIC チップの共同購入についても, A02 班が原子核分野への呼びかけを積極的に行って, この回路系の広い分野への普及に務めている。

また, A02 班公募(本多)が J-PARC での A01, A02 計画班の実験用に開発した汎用ロジックモジュールについても, 領域外のグループや大学に売り込んでおり, 購入希望があれば東北大が中心となって共同購入する体制を作った。

それ以外にも, 本領域で開発した技術や成果を今後も領域内だけでなく領域外の研究者にも広めることや, 本領域内で計画している新たな開発を領域外の研究者とも共同で進める仕組みを作ることをめざして, 2017 年 3 月の第二回検出器研究会で検討を行い, 検出器開発に興味のある若手数名でワーキンググループを組織し, 今後活動を進めることとなった。

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

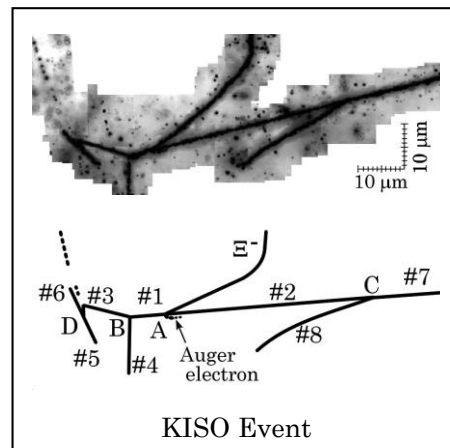
（3 ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・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。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

研究項目 A01 多重ストレンジネスのバリオン間相互作用

A01-1 (計画・高橋, 仲澤, 佐藤)

- (K, K^+) 反応による Ξ ハイパー核分光の成功 (高橋, 永江) 当初予定していた J-PARC での (K, K^+) 反応による Ξ ハイパー核分光実験のパイロット実験として、 $^{12}\text{C}(K, K^+)$ 反応スペクトルを既存の SKS スペクトロメータを用いて 6 MeV (FWHM) という以前より圧倒的に良い分解能で測定し、 Ξ 束縛領域に明確な事象を多数観測して、後述の KISO event とは別種の Ξ ハイパー核の存在を確認した。こうしてこの新分光法の威力が示された。[A01-1-1]。
- Ξ ハイパー核の発見 (高橋, 仲澤) エマルジョンの高速画像解析システムの開発に成功し[A01-1-2,3], これを使った全面スキャン法を用いて、過去に KEK でビーム照射したエマルジョンを再解析したところ、世界初の Ξ ハイパー核事象 (KISO event, 右図) を発見した。この発見により Ξ と原子核の相互作用、さらに ΞN 相互作用が引力であることが確定した。この発見の論文[A01-1-5]は 2017 年第 22 回日本物理学会論文賞を受賞した。
- ハイペロン・スペクトロメータの開発 (高橋, 佐藤) 特異な $S=-2$ 系である H ダイバリオンを探索するための超伝導スペクトロメータと TPC 検出器からなる装置の開発に成功し、性能を確認した[A01-1-8]。



研究項目 A02 中性子過剰核物質中のストレンジネス

A02-1 (計画：田村, 阪口, 応田)

- $\Sigma^+ p$ 散乱用検出器 CATCH の建設と 3 体核力研究 (田村, 三輪) : B02 公募・関口と連携 J-PARC $\Sigma^+ p$ 散乱実験のための円筒型シンチレーションファイバー検出器と BGO カロリメータからなる新型の陽子検出器システム CATCH の開発に成功した[A02-1-3]。まずこの装置を用いて B02 公募研・関口の課題である 3 体核力のデータを取得するため、break-up を含む pd 散乱実験を東北大サイクロで実施した（データ解析中）。
- Λ ハイパー核の荷電対称性の破れの発見 (田村, 阪口) $^4_\Lambda\text{He}$ ハイパー核の $1^+ \rightarrow 0^+$ 遷移 γ 線を観測した。エネルギーは鏡像核 $^4_\Lambda\text{H}$ の同遷移と大きく異なり、 Λ ハイパー核に理論的に説明できない大きな荷電対称性の破れ (CSB) を発見した（東北大・KEK・J-PARC・JAEA の 4 者からプレスリリース）[A02-1-1]。連携者(中村哲)のメインツ大での $^4_\Lambda\text{H}$ 基底状態エネルギーの精密測定結果と合わせて、CSB が核スピンの大きさに依存することが判明した。
- K - pp 束縛状態の存在の確定 (応田) K 原子核の探索実験を行い、 K - pp 束縛状態の存在を示す明確なデータを得た[A02-1-2]。核内での反 K 中間子の引力の大きさを確定させる理論研究が進められている。
- 中性子過剰ハイパー核 $^6_\Lambda\text{H}$ の生成実験 (阪口) イタリアで報告された中性子過剰ハイパー核 $^6_\Lambda\text{H}$ の追試実験を行ったが観測されず、生成断面積の厳しい上限値を得た[A02-1-6]。この核が束縛しない可能性を示唆しており、中性子過剰核中の Λ の相互作用の情報が得られる。

A02-2 (公募：江角, 岡田, 河野, 本多, 時安)

- 超高分解能 K 中間子原子 X 線分光のための検出器開発 (岡田) 準備実験である TES (超伝導遷移端検出器) による超高精度 π 中間子原子 X 線の測定に初めて成功した[A02-2-1]。

研究項目 B01 高密度中性子過剰核物質の状態方程式

B01-1 (計画：村上, 川畑, 家城, 磯部)

- 不安定核衝突実験の実施 高密度中性子過剰核物質の EOS を調べるため、RIBF で不安定核ビーム ($^{108,132}\text{Sn}$) を安定 Sn 核に衝突させ、 $^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$, $^{124}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$, $^{108}\text{Sn}+^{112}\text{Sn}$ 等の中心衝突から発生する π^+ と π^- との比を測定した。これまでの解析で π^+/π^- 生成比の抽出が可能であることを確認。(多数の国際会議で発表)
- 多重度検出器の開発 : A02 計画と連携 上記実験で中心衝突を選び出すため、磁場中で動作するファイバーを用いた新型多重度検出器を開発した。また周辺衝突で放出される重い粒子を排除する前方検出器 KATANA をポーランドの共同研究者とともに開発した[B01-1-1]。
- 不安定核衝突実験用 TPC 検出器と読出し回路の開発・建設 RIBF での中性子過剰核ビームを用いた原子核衝突実験用に汎用性の高い大型の多重飛跡検出器 (TPC) を開発し完成させた[B01-1-4]。また、高速 TPC 読出し回路系 GET (General Electronics for TPC) を仏 Saclay のグループらと共同開発した[B01-1-5]。

これらはビームを用いてテストし性能を確かめた。また、収集したい事象が発生した時にだけ TPC が信号を出力するようにする Gating Grid Driver の開発にも成功した[B01-1-2]。

B01-2 (公募・銭廣, 大田)

- ^{132}Sn ビームによる EOS 探索実験の実施 (銭廣, 大田) 銭廣, 大田は ^{132}Sn ビームによる陽子弾性散乱実験および巨大単極子共鳴の実験を 2016 年にそれぞれ実施, いずれもデータ収集に成功し現在解析中。

研究項目 B02 中性子過剰な中低密度核物質の物性

B02-1 (計画: 中村, 下浦)

- γ 線カロリメータの開発とピグミー共鳴実験 (中村) 中性子過剰核のピグミー共鳴を観測するためのクーロン励起の測定に用いる γ 線カロリメータ CATANA が完成。これを用いて中性子過剰核の脱励起 γ 線の測定に成功した。(その後本実験を H29 年 4 月に実施済み。)
- 中性子ハロー核の研究 (中村) ^{22}C , ^{19}B のクーロン分解反応により, ダイニュートロン相関の兆候を示す強いクーロン励起強度を観測した。また, ^{22}C の核半径の精密測定に成功[B02-2-1], さらに変形誘因型ハロー構造を ^{29}Ne [B02-1-2], ^{37}Mg [B02-1-5], ^{31}Ne [B02-1-6]に発見した (プレスリリース 2 本)。
- 非束縛中性子過剰核の研究 (中村) 高精度の質量測定により, ^{26}O の 2 つの中性子がわずかに非束縛であることを見出し, また第一励起準位の世界初測定にも成功した[B02-1-3] (プレスリリース)。
- テトラ中性子の発見 (下浦) 4 中性子系 “テトラ中性子” の観測に成功[B02-1-4] (プレスリリース)。

B02-2 (公募: 関口, 山口, 板橋, 民井)

- 三体力の研究 (関口) 100 MeV 付近の陽子- ^3He 散乱の ^3He 偏極分解能の測定手法を確立し, 厳密理論計算との比較による三体核力効果の議論が可能な状況となった。[B02-2-3]
- 中性子スキン厚の測定 (山口) Ni同位体の相互作用断面積を測定した。今後中性子スキン厚を導出し EOS の情報を引き出す予定。また中性子過剰核の質量測定用蓄積リングに, 速度選択型トリガー検出器 (チェレンコフ検出器)を建設した[B02-2-5]。
- π 原子の研究 (板橋) π 中間子原子質量スペクトルの分解能としてこれまでで最高の 280 keV を達成し, 1s, 2p 状態それぞれの生成断面積が反応角度により変化することを世界初観測した[B02-2-4]。
- 電気双極子応答 (民井) 原子核の電気双極子応答の測定から飽和密度での対称エネルギーに制限を与え [B02-2-1], EOS の代表的な制限図 (Phys.Rev.C 92, 064304(2015)の図5) にも採用された。

研究項目 B03 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

B03-1 (計画: 堀越, 向山, 中務)

- 非相対論的希薄中性子物質の EOS の決定 (堀越): D01 公募・大橋との連携研究 縮退フェルミ原子気体を用い, s 波相互作用フェルミ粒子系の熱力学量を測定し, 普遍的な EOS を無次元形式で得た。この実験値を D01 公募の大橋等の強結合理論 (拡張 T 行列近似) と比較したところ両者が一致した。この普遍的な EOS に中性子の散乱長と質量を与え, 中性子物質の基本 EOS を得た。中性子の有効長の影響を理論的に補正することで, 非相対論的希薄中性子物質の EOS の決定が達成された[B03-1-1,5,6,7]。
- p 波相互作用するフェルミ粒子系の研究 (向山) p 波相互作用の影響が顕著になる高密度領域に EOS を延長するため, p 波相互作用フェルミ系の物性研究を進めた。 ^6Li 原子の p 波 Feshbach 共鳴のパラメータを決定し, p 波相互作用による近距離粒子相関の測定を行った。これを用いると将来的に高密度領域への EOS の延長が期待される。さらに冷却原子とイオントラップの混合系により中性子星内殻を実験的にシミュレートできる可能性を見出した。[B03-1-8,9,10,11]
- 中性子星の内殻構造と希薄中性子星核物質 EOS の計算手法の確立 (中務) 中性子物質 EOS を中性子星核物質 EOS に変換するため, 中性子星内殻構造の理論研究を行った。周期的に配置された原子核を想定し, フェルミ超流動の平均場計算と周期ポテンシャルに対する厳密な境界条件を扱う計算手法を考案し, 中性子星内殻構造と希薄中性子星核物質 EOS の計算手法を確立した。[B03-1-2,3,4]

研究項目 C01 宇宙 X 線・ガンマ線観測による中性子星研究の新展開

C01-1 (計画: 高橋, 堂谷, 玉川, 辻本)

- 新たな中性子星半径導出法の提案 GRS1747-312 の「すぎく」衛星の X 線バーストデータから, 減光時のエネルギースペクトルに吸収端状の構造を初めて検出した[C01-1-1]。これは中性子星のスピんで鈍った吸収端と解釈でき, 中性子星表面の重力赤方偏移を推定する新たな方法を提示した。
- SerX-1 の Chandra 衛星データを解析し, 吸収線の上限值を求めることに成功した。この上限値と中性子星大気モデルとから, 中性子星表面の温度や伝導度に制限をつけることができた [論文執筆中]。
- パルサー星雲 N157B について, フェルミ衛星の γ 線データを解析し, スペクトル中に他のパルサー星雲と異なる成分を発見, それがパルサー風の熱的成分による逆コンプトン散乱である可能性を指摘した。また, この γ 線観測が中性子星の慣性モーメントを制限する新手法となることを示した[2016 国際会議]。
- X 線検出器の軌道上性能の確認 2016 年 2 月に打ち上げられた ASTRO-H 衛星で, X 線検出器の性能をペルセウス銀河団やかに星雲の観測で実証した。特に, マイクロカロリメータでは「すぎく」の CCD

を約 30 倍上回るエネルギー分解能 (4.9 eV FWHM) を軌道上で達成した[C01-1-2]。

- **観測候補天体の選別** ASTRO-H 衛星での半径測定を想定して、観測候補天体を検討した。検出器の応答関数を加味し、シミュレーションと既存衛星データの再解析も行って、1 Hz と低い回転周期をもつ Terzan 5 X2 と Low Inclination Angle で観測可能な Ser X-1 を候補に選んだ。
- **中性子星の物理現象シミュレーションコードの整備** 中性子星半径の精密決定に必要な、磁場やアウトフロー、降着円盤からの放射、X 線偏光など中性子星の物理現象をとりこんだシミュレーションコード MONACO を整備した。[このコードを様々な天体解析に用いた結果が複数の論文として出版。]
- **将来へむけた検出器開発** 将来ミッションへの搭載を目指し、PRAXyS 衛星用の X 線偏光測定器の開発 [C01-1-3]、CdTe 両面ストリップ検出器の改良や試験、ADC 内蔵のピクセル検出器用低雑音多チャンネル ASIC の開発、CMOS 読出しとストリップ電極を組み合わせた電子飛跡追跡用の新型 SI センサーの試験、新しい大量高速データ処理装置の開発などを行い、期待される性能を得た。

特許：「放射線測定装置及び放射線測定方法」 発明者：松浦大介，高橋忠幸他（全 9 名），

権利者：国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構他，特願 2015-147025，出願年月日 2015 年 07 年 24 日

01-2 (公募：牧島，前田，榎戸)

- **中性子星の歳差運動の初観測 (牧島)** マグネター 4U 0142+61 の X 線パルスの時間スペクトルから、この天体が球形から 0.01% 対称軸に沿って変形し自由歳差運動していることを見出した[C01-2-3]。強磁場が変形の原因と考えられるため、観測で強磁場の存在を初めて示唆したこととなる。

研究項目 D01 中性子星と核物質の理論研究

D01-1 (計画：大西，原田，中田，飯田，松尾，巽，小野，土手，木村，中里)

D01-2 (公募：萩野，根村，木内，安武，新田，古本，祖谷)

- **中性子過剰核衝突実験の分析：B01 との連携研究** 高密度での対称エネルギー決定を目指して B01 班が実施した中性子過剰核衝突実験 ($^{132}\text{Sn}+^{124}\text{Sn}$) を新たに開発した輸送モデルで分析し、高密度での対称エネルギーが π 中間子生成比に反映される機構を明らかにした[D01-1-7]。実験データとの比較を今後行う。輸送モデルを比較する国際共同研究にも参加し、理論の信頼度向上のための研究を進めてきた。
- **中性子過剰核の理論研究：B02 との連携研究** 対称エネルギーパラメータと原子核の低エネルギー励起スペクトル(B02 班実験予定)の相関を明らかにした [D01-1-8]。中性子過剰核で対相関がもたらす励起モード・崩壊過程への効果 [D01-1-5, D01-2-7] も研究が進んだ。
- **ハイパー核・K 中間子核データの理解：A01, A02 との連携研究** A01, A02 班が実験したハイパー核・K 中間子核の構造・生成反応を分析し、軽い Σ 核存在の示唆・ K^-pp 原子核の束縛エネルギーと崩壊幅の相互作用依存性・ Σ -原子核斥力ポテンシャルの強さの決定、 Λ ハイペロンによるコア原子核の変化、などの成果を得た [D01-1-9, D01-1-10, D01-1-15]。また波動関数の情報を含む重イオン衝突での 2 粒子相関が短寿命粒子間の相互作用を調べる上で有用であることを示し、データから $\Lambda\Lambda$ 相互作用の散乱長を制限した研究 [D01-1-11] は、新たな観測量の提案という高い意義をもつ。格子 QCD からのバリオン間相互作用 [D01-2-5]、高密度領域クォーク物質の超強磁場における EOS の硬化とこれに伴う第 3 分岐の可能性 [D01-2-1]、クォーク液滴有限サイズ効果 [D01-2-6]、などの研究も進展した。
- **中性子星核物質 EOS の構築・改良と天体現象** 本計画の主要目標の一つ。核子・クォーク・中間子にわたる様々なモデルを用いて系統的分析を行い、対称エネルギーの密度依存性への制限と核物質の非一様性や低質量中性子星の構造の理解 [D01-1-12, D01-2-12]、クォーク・メソン結合に基づくハイペロンを含む中性子星物質 EOS 構築 [D01-1-14]、第一原理変分計算による中性子星物質 EOS 構築[D01-1-1]等を達成。
- **ハイペロン・パズルの解決への研究** 3 体斥力の導入やクォーク物質へのクロスオーバー相転移などの機構が必要であり、前述の EOS でも現象論的 3 体力や、媒質効果による核力の変化が取り入れられている。また、カイラル有効場理論から得られる 3 体力により核物質の飽和性と高密度での斥力が説明できた [A02-2-2]。一般に 3 体力効果は低密度領域では小さく、その形と大きさを原子核データから決めることは容易ではないが、長年理解されていなかった鉛などの同位体荷電半径の違いが 3 核子スピン軌道相互作用の効果により無理なく再現できた[D01-1-10]。重イオン散乱による 3 体力強度決定 [D01-2-2]、原子核データと第一原理計算結果を尊重して現象論的に導入した 3 体力の形と大きさを定める研究も進行中。

D01-3 (公募：大橋，木内，新田)

- **ユニタリー極限近辺のフェルミ粒子系状態方程式：B03 との連携研究** 物性物理学で用いられる対凝縮の振幅とゆらぎを積分する手法によりユニタリー極限近辺の冷却原子 EOS が表せることを示し [D01-2-3]、冷却原子実験による中性子物質 EOS 研究が大きく進展。物性物理と原子核物理にまたがる成果。
- **中性子星合体・ボルテックス間相互作用** 高分解能計算による中性子星合体過程 [D01-2-4, D01-2-8]、中性子星コアで存在が想定される超流動体中のボルテックス管相互作用 [D01-2-4] を明らかにした。

6. 研究成果の取りまとめ及び公表の状況（主な論文等一覧，ホームページ，公開発表等）（5ページ以内）

本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果の公表の状況（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。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

- 論文の場合、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に記載し、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。
- 別添の「(2) 発表論文」の融合研究論文として整理した論文については、冒頭に◎を付してください。
- 補助条件に定められたとおり、本研究課題に係り交付を受けて行った研究の成果であることを表示したもの（論文等の場合は謝辞に課題番号を含め記載したもの）について記載したものについては、冒頭に▲を付してください（前項と重複する場合は、「◎▲・・・」と記載してください。）。
- 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。

<発表論文>

研究項目 A01 多重ストレンジネスのバリオン間相互作用 計 39 件（うち査読有 38 件）

A01-1（計画・高橋，仲澤，佐藤）

- *T. Nagae, T. Takahashi, H. Tamura et al., “Search for a Ξ bound state in the $^{12}\text{C}(\text{K}, \text{K}^+)\text{X}$ reaction at 1.8 GeV/c”, Proceedings of Science, 掲載決定, 査読有
- ▲*J. Yoshida, K. Nakazawa et al., “A new scanning system for alpha decay events as calibration sources for range energy relation in nuclear emulsion”, Nucl. Instr. Meth. A847 (2017) 86-92. 査読有
- ▲*M.K. Soe, K. Nakazawa et al., “Automatic track following system to study double strangeness nuclei in nuclear emulsion exposed to the observable limit”, Nucl. Instr. Meth. A848 (2017) 66-72. 査読有
- ▲*S.H. Kim, T. Takahashi et al., “Cosmic-ray test of a time-of-flight detector for double- strangeness experiment at J-PARC”, Nucl. Instr. Meth. A795 (2015) 39-44. 査読有
- ▲*K. Nakazawa, H. Takahashi, T. Takahashi et al., “The first evidence of a deeply bound state of $\Xi^{-14}\text{N}$ system”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015 (2015) 033D02-1-11. 査読有
- *J.K. Ahn, K. Imai, K. Nakazawa, H. Takahashi, T. Takahashi, K. Tanida et al “Double- Λ hypernuclei observed in a hybrid emulsion experiment”, Phys. Rev. C88 (2013) 014003-1-10. 査読有
- *T. Takahashi, T. Koike, K. Miwa, M. Naruki, A. Sakaguchi, H. Takahashi, K. Tanida, H. Tamura, M. Ukai et al., “Beam and SKS spectrometers at the K1.8 beam line”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2012 (2012) 02B010-1-16. 査読有
- ▲*H. Sako, S. Hasegawa, K. Imai, S. Sato et al, “Development of a prototype GEM TPC with a gating grid for an H-dibaryon search experiment at J-PARC”, Nucl. Instr. Meth. A763 (2014) 65-81. 査読有
- ▲*R. Kiuchi, S. Hasegawa, K. Imai, K. Nakazawa, H. Sako, S. Sato et al, “Development of a silicon micro-strip detector for tracking high intensity secondary beams”, Nucl. Instr. Meth. A763 (2014) 399-403. 査読有

A01-2（公募：谷田，家入，山崎）

- S. Maeda, Y. Akaishi, *T. Yamazaki, “K $\bar{\text{K}}$ pp - an important gateway toward multi-kaonic nuclei”, JPS Conf. Proc. 17 (2017) 082007-1-4. 査読有
- B.H. Kim, K. Tanida et al., “Search for an H-dibaryon with a Mass near $2m_{\Lambda}$ in Y(1S) and Y(2S) Decays”, Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 222002-1-6. 査読有

研究項目 A02 中性子過剰核物質中のストレンジネス 計 87 件（うち査読有 71 件）

A02-1（計画：田村，阪口，応田）

- ▲*T.O. Yamamoto, T. Koike, K. Miwa, A. Sakaguchi, T. Takahashi, H. Tamura et al., “Observation of Spin Dependent Charge Symmetry Breaking in ΛN Interaction: Gamma-Ray Spectroscopy of $^4_{\Lambda}\text{He}$ ”, Phys. Rev. Lett. 15 (2015) 222501-1-5. 査読有。プレスリリース “J-PARC ハドロン実験施設で “奇妙な粒子” が原子核の荷電対称性を破る現象を発見”（東北大, KEK, JAEA, J-PARC センターの 4 者で発表）
<http://www.sci.tohoku.ac.jp/news/20151125-3744.html>
- *Y. Sada, S. Ajimura, T. Fukuda, H. Ota, T. Suzuki et al., “Structure near $\text{K}^{-}\text{p+p}$ threshold in the in-flight $^3\text{He}(\text{K}^{-}, \Lambda\text{p})\text{n}$ reaction”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2016 (2016) 051D01-1-11. 査読有
- ▲*Y. Akazawa, K. Miwa et al. “Development of a cylindrical tracking detector with multichannel scintillation fibers and pixelated photon detector readout”, Nucl. Instr. Meth. A787 (2015) 193-196. 査読有
- ▲*K. Hosomi, T. Koike, K. Miwa, T. Takahashi, H. Tamura et al., “Precise determination of $^{12}_{\Lambda}\text{C}$ level structure by γ -ray spectroscopy”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015 (2015) 081D01-1-8. 査読有
- *T. Hashimoto, S. Ajimura, T. Fukuda, H. Ota, T. Suzuki et al. “Search for the deeply bound K^{-}pp state from the semi-inclusive forward-neutron spectrum in the in-flight K^{-} reaction on helium-3”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015 (2015) 061D01-1-11. 査読有
- ▲*H. Sugimura, K. Miwa, A. Sakaguchi, T. Takahashi, H. Tamura et al., “Search for $^6_{\Lambda}\text{H}$ hypernucleus by the $^6\text{Li}(\pi, \text{K}^+)$ reaction at $p_{\pi}=1.2$ GeV/c”, Phys. Lett. B 729 (2014) 39-44. 査読有

7. ▲T. Koike, H. Tamura et al., “Development of a low-temperature germanium detector via mechanical cooling with a compact pulsetube refrigerator”, Nucl. Instr. Meth., A 770 (2014) 1-7.
8. ▲*H. Tamura, “Nuclear Matter in Neutron Stars -A Great Challenge in Nuclear Physics-”, JPS Conf. Proc. 1 (2014) 011003-1-7. 査読有

A02-2 (公募：江角, 岡田, 河野, 本多, 時安)

1. ▲*S. Okada, H. Ota et al. “First application of superconducting transition-edge sensor microcalorimeters to hadronic atom X-ray spectroscopy”, Prog Theor Exp Phys 2016 (2016) 091D01-1-9. 査読有
2. ▲*M. Kohno, “Nuclear saturation in lowest-order Brueckner theory with two- and three-nucleon forces in view of chiral effective field theory”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015 (2015) 123D02-1-16. 査読有
3. ▲*R. Honda, K. Miwa et al., “A beam position fiber counter with scintillation fibers and multi-pixel photon counter for high intensity beam operation”, Nucl. Instr. Meth. A787 (2015) 157-160. 査読有
4. ▲*S. Esumi, “Soft physics results from the PHENIX experiment”, Prog. Theor. Exp. Phys. 2015 (2015) 03A104-1-15. 査読有

研究項目 B01 高密度中性子過剰核物質の状態方程式 計 140 件 (うち査読有 139 件)

B01-1 (計画：村上, 川畑, 家城, 磯部)

1. ▲P. Lasko, *P. Pawlowski, T. Isobe, T. Murakami et al., “KATANA -A charge-sensitive triggering system for the $\Sigma\pi$ RIT experiment”, Nucl. Inst. and Meth. A 856 (2017) 92-98. 査読有
2. ▲*M.B. Tsang, T. Isobe, T. Murakami et al., “Pion production in rare-isotope collisions”, Phys. Rev. C 95 (2017) 044614-1-7. 査読有.
3. S. Tangwancharoen, *M.B. Tsang, T. Isobe, T. Murakami et al., “A gating grid driver for time projection chamber”, Nucl. Instr. Meth. A 853 (2017) 44-52. 査読有.
4. ▲*G. Jhang, T. Isobe, T. Murakami, H. Baba et al., “Beam Commissioning of the $\Sigma\pi$ RIT Time Projection Chamber”, J. Korean Phys. Soc. 69 (2016) 144-151 査読有.
5. ▲*R. Shane, T. Isobe, T. Murakami, A. Taketani et al., “ $\Sigma\pi$ RIT: A Time-projection chamber for symmetry-energy studies”, Nucl. Instr. and Meth. A, 784 (2015) 513-517. 査読有
6. *E. Pollacco, H. Baba, T. Murakami, A. Taketani et al., “GET: A Generic Electronic System for TPCs for nuclear physics experiments”, Phys. Procedia 37 (2012) 1799-1804. 査読有
7. *M.B. Tsang, T. Murakami et al., “Constraints on the symmetry energy and neutron skins from experiments and theory”, Phys. Rev. C 86 (2012) 015803-1-28. 査読有

研究項目 B02 中性子過剰な中低密度核物質の物性 計 73 件 (うち査読有 71 件)

B02-1 (計画：中村, 下浦)

1. ▲*Y. Togano, T. Nakamura, Y. Kondo, et al., “Interaction cross section study of the two-neutron halo nucleus ^{22}C ”, Phys. Lett. B 761 (2016) 412-418. 査読有
2. ▲*N. Kobayashi, T. Nakamura, Y. Kondo, Y. Togano, et al., “One-neutron removal from ^{29}Ne : Defining the lower limits of the island of inversion”, Phys. Rev. C 93 (2016) 014613-1-11. 査読有
3. ▲*Y. Kondo, T. Nakamura, et al., “Nucleus ^{26}O : A Barely Unbound System beyond the Drip Line”, Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 102503-1-6. 査読有. プレスリリース “原子核からほんの少しだけあふれた 2 個の中性子” <http://www.titech.ac.jp/news/2016/033690.html>
4. ▲*K. Kisamori, S. Shimoura et al., “Candidate Resonant Tetraneutron state Populated by the $^4\text{He}(^8\text{He}, ^8\text{Be})4n$ Reaction”, Phys. Rev. Lett. 116 (2016) 052501-1-5. 査読有. プレスリリース: 「テトラ中性子核を発見: 中性子物質研究の本道を開拓」 <http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2015/60.html>
5. ▲*N. Kobayashi, T. Nakamura, Y. Kondo, et al., “Observation of a p-Wave One-Neutron Halo Configuration in ^{37}Mg ”, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 242501-1-5. 査読有. プレスリリース “中性子ハローがマグネシウム同位体にも出現” <http://www.titech.ac.jp/news/2014/027999.html>
6. ▲*T. Nakamura, N. Kobayashi, Y. Kondo et al., “Deformation-Driven p-Wave Halos at the Drip Line: ^{31}Ne ”, Phys. Rev. Lett. 112 (2014) 142501-1-5 査読有. プレスリリース “中性子が多い原子核に現れる特異構造を解明”, 科学新聞でも紹介
7. *N. Kobayashi, T. Nakamura et al., “One- and two neutron removal reactions from the most neutron-rich carbon isotopes”, Phys. Rev. C 86 (2012) 054604-1-11. 査読有

B02-2 (公募：民井, 関口, 板橋, 山口)

1. ▲*T. Hashimoto, A. Tamii et al. “Dipole polarizability of Sn-120 and nuclear density functionals”, Phys. Rev. C 92 (2015) 031305-1-5. 査読有
2. ▲*H. Matsubara, A. Tamii, et al., “Nonquenched Isoscalar Spin-M1 Excitations in sd-Shell Nuclei”, Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 102501-1-6. 査読有
3. *Y. Wada, K. Sekiguchi et al., “Study of Three-Nucleon Force Effect via Few-Nucleon Scattering”, Int. J. of Modern Physics: Conf. Ser. 40 (2016) 1660070-1-4. 査読有

4. ▲*K. Itahashi et al., "Precision spectroscopy of pionic atoms and chiral symmetry in nuclei", EPJ Web of Conferences 130 (2016) 1017-1-5. 査読有
5. ▲*T. Yamaguchi et al., "Cherenkov light detection as a velocity selection for uranium fission products at intermediate energies", Nucl. Instr. Meth. A 766 (2014) 123-125. 査読有

研究項目 B03 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 計 30 件 (うち査読有 27 件)

B03-1 (計画：堀越，向山，中務)

1. ▲*H. Tajima, P. van Wyk, R. Hanai, D. Kagamihara, D. Inotani, M. Horikoshi, *Y. Ohashi, "Strong-coupling corrections to ground-state properties of a superfluid Fermi gas.", Phys. Rev. A 95 (2017) 043625-1-5. 査読有
2. Y. Kashiwaba, *T. Nakatsukasa, "Density Functional Calculations for the Neutron Star Matter at Subnormal Density", Proc. 14th Int. Symp. on Nuclei in the Cosmos (NIC2016) (2017) 020801-1-3. 査読有
3. ▲S. Yoon, F. Dalfovo, T. Nakatsukasa, *G. Watanabe, "Multiple period states of the superfluid Fermi gas in an optical lattice", New Journal of Physics 18 (2016) 023011-1-10. 査読有
4. ▲*T. Nakatsukasa, K. Matsuyanagi, M. Matsuo, K. Yabana, "Time-dependent density-functional description of nuclear dynamics", Rev. Mod. Phys. 88 (2016) 045004-1-53. 査読有
5. H. Tajima, P. van Wyk, R. Hanai, D. Kagamihara, D. Inotani, M. Horikoshi, *Y. Ohashi, "Zero-Temperature Properties of a Strongly Interacting Superfluid Fermi Gas in the BCS-BEC Crossover Region.", Journal of Low Temperature Physics (2016) 1-8. 査読有
6. ▲T. Ikemachi, A. Ito, Y. Aratake, Y. Chen, M. Koashi, M. Kuwata-Gonokami, *M. Horikoshi, "All-optical production of dual Bose-Einstein condensates of paired fermions and bosons with ${}^6\text{Li}$ and ${}^7\text{Li}$ ", J. Phys. B: Atomic, Molecular and Optical Physics 50 (2016) 01LT01-1-6. 査読有
7. *堀越宗一, "冷却原子実験から希薄中性子物質へ", 原子核研究 第 61 巻 1 号 (2016) 58-69 査読有
8. ▲R. Saito, S. Haze, M. Sasakawa, R. Nakai, M. Raoult, H. Da Silva Jr, *T. Mukaiyama, "Characterization of charge-exchange collisions between ultracold Li 6 atoms and Ca 40+ ions.", Phys. Rev. A 95, 032709 (2017) 査読有
9. ▲M. Waseem, Z. Zhang, J. Yoshida, K. Hattori, T. Saito, *T. Mukaiyama, "Creation of p-wave Feshbach molecules in selected angular momentum states using an optical lattice.", J. Phys. B: Atomic, Molecular and Optical Physics 49 (2016) 204001-1-6. 査読有
10. S. Haze, R. Saito, M. Fujinaga, *T. Mukaiyama, "Charge-exchange collisions between ultracold fermionic lithium atoms and calcium ions." Phys. Rev. A 91 (2015) 032709-1-5. 査読有
11. ▲T. Nakasuji, J. Yoshida, *T. Mukaiyama, "Experimental determination of p-wave scattering parameters in ultracold ${}^6\text{Li}$ atoms." Phys. Rev. A 88 (2013) 012710-1-5. 査読有

研究項目 C01 宇宙 X 線・ガンマ線観測による中性子星研究の新展開 計 49 件 (うち査読有 41 件)

C01-1 (計画・高橋，堂谷，玉川，辻本)

1. ▲M. Iwai, T. Dotani, M. Ozaki, Y. Maeda, H. Mori, S. Saji, "Observational Constraints on the Surface Gravitational Redshift of a Neutron Star", Pub. Astro. Soc. Jpn (2017) in press. 査読有
2. ▲F. Aharonian, T. Takahashi, T. Tamagawa et al. (Hitomi collaboration), "Hitomi Constraints on the 3.5 keV Line in the Perseus Galaxy Cluster", Astrophys. J. 837 (2017) L15-1-9. 査読有
3. ▲W. Iwakiri, T. Tamagawa et al., "Performance of the PRAXyS X-ray polarimeter", Nucl. Instr. Meth. A 838 (2016) 89-95. 査読有
4. K. Hagino, H. Odaka, C. Done, R. Tomaru, S. Watanabe, T. Takahashi, "A disk wind interpretation of the strong Fe K α features in 1H 0707-495", Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 461 (2016) 3954-3963. 査読有
5. ▲F. Aharonian, T. Dotani, T. Takahashi, T. Tamagawa, M. Tsujimoto, Y. Uchiyama et al. (Hitomi collaboration), "The quiescent intracluster medium in the core of the Perseus cluster", Nature 535 (2016) 117-121. 査読有
6. ▲*T. Takahashi, T. Dotani, T. Tamagawa, M. Tsujimoto, Y. Uchinobu et al., "The ASTRO-H (Hitomi) X-ray astronomy satellite", Proc. of SPIE, 9905 (2016) 27.
7. G. Sato, T. Takahashi et al., "The Si/CdTe semiconductor camera of the ASTRO-H Hard X-ray Imager (HXI)", Nucl. Instr. Meth. A 831 (2016) 235-241. 査読有
8. ▲Y. Ichinohe, T. Takahashi et al., "The first demonstration of the concept of Narrow-FOV Si/CdTe semiconductor Compton camera", Nucl. Instr. Meth. A 806 (2016) 5-13. 査読有
9. ▲*H. Odaka, T. Takahashi et al., "Sensitivity of the Fe K α Compton shoulder to the geometry and variability of the X-ray illumination of cosmic objects", Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 462 (2016) 2366-2381. 査読有
10. ▲*S. Watanabe, T. Takahashi et al., "The Si/CdTe semiconductor Compton camera of the ASTRO-H Soft Gamma-ray Detector (SGD)", Nucl. Instr. Meth. A 765 (2014) 192-201. 査読有
11. *H. Odaka, D. Khangulyan, Y.T. Tanaka, S. Watanabe, T. Takahashi, "Short term variability of X-rays from accreting neutron star Vela X-1: Monte Carlo modeling", Astrophys. J. 780 (2013) 38-1-12. 査読有

C01-2 (公募・牧島，前田，榎木)

1. ▲*T. Sato, Y. Maeda, et al., "Multi-year X-Ray Variations of Iron-K and Continuum Emissions in the Young

- Supernova Remnant Cassiopeia A”, *Astrophys. J.* 836 (2017) 225-1-10. 査読有
2. ▲*S. Shibata, T. Enoto, et al., “X-Ray and Rotational Luminosity Correlation and Magnetic Heating of Radio Pulsars”, *Astrophys. J.* 833 (2016) 59-1-14. 査読有
 3. ▲*K. Makishima et al., “Possible Evidence for Free Precession of a Strongly Magnetized Neutron Star in the Magnetar 4U 0142+61”, *Phys. Rev. Lett.* 112 (2014) 171102-1-5. 査読有

研究項目 D01 中性子星と核物質の理論研究 計 360 件 (うち査読有 328 件)

D01-1 (計画・大西, 原田, 中田, 飯田, 松尾, 巽, 小野, 土手, 木村, 中里)

1. ▲*H. Togashi, K. Nakazato, Y. Takehara, S. Yamamuro, H. Suzuki, M. Takano, “Nuclear equation of state for core-collapse supernova simulations with realistic nuclear forces”, *Nucl. Phys. A* 961 (2017) 78-105. 査読有
2. ▲*H. Sotani, T. Tatsumi, “Quark matter with strong magnetic field and possibility of the third family of compact stars”, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 467 (2017) 1249-1-10. 査読有
3. ▲*R. Yoshiike, T.-G. Lee, T. Tatsumi, “Chiral pair fluctuations for the inhomogeneous chiral transition”, *Phys. Rev. D* 95 (2017) 074010-1-13. 査読有
4. ▲*J. Xu, A. Ono et al., “Understanding transport simulations of heavy-ion collisions at 100A and 400A MeV: Comparison of heavy-ion transport codes under controlled conditions”, *Phys. Rev. C* 93 (2016) 044609-1-20. 査読有
5. ▲*Y. Kobayashi, M. Matsuo, “Effects of pairing correlation on the low-lying quasiparticle resonance in neutron drip-line nuclei”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2016 (2016) 013D01-1-14. 査読有
6. ▲*Y. Nara, H. Niemi, A. Ohnishi, H. Stoecker, “Examination of directed flow as a signature of the softest point of the equation of state in QCD matter”, *Phys. Rev. C* 94 (2016) 034906-1-10. 査読有
7. ▲*N. Ikeno, A. Ono, Y. Nara, A. Ohnishi, “Probing neutron-proton dynamics by pions”, *Phys. Rev. C* 93 (2016) 044612-1-13. 査読有
8. ▲*T. Inakura, H. Nakada, “Constraining the slope parameter of the symmetry energy from nuclear structure”, *Phys. Rev. C* 92 (2015) 064302-1-8. 査読有
9. ▲*T. Harada, Y. Hirabayashi, “P-wave resonant state of the ${}^4_{\Sigma}\text{He}$ hypernucleus in the ${}^4\text{He}(K^-, \pi^-)$ reaction”, *Phys. Lett. B* 740 (2015) 312-316. 査読有
10. ▲*A. Dote, T. Inoue, T. Myo, “Application of a coupled-channel complex scaling method with Feshbach projection to the K-pp system”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2015 (2015) 043D02-1-25. 査読有
11. ▲*K. Morita, T. Furumoto, A. Ohnishi, “ Λ - Λ interaction from relativistic heavy-ion collisions”, *Phys. Rev. C* 91 (2015) 024916-1-16. 査読有
12. ▲*K. Iida and K. Oyamatsu, “Symmetry Energy, Unstable Nuclei and Neutron Star Crusts”, *Euro. Phys. J. A* 50 (2014) 42-1-16. 査読有
13. ▲*H. Nakada, K. Sugiura, “Predicting magic numbers of nuclei with semi-realistic nucleon-nucleon interactions”, *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2014 (2014) 033D02-1-17. 査読有
14. ▲*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) 4-1-10. 査読有
15. ▲*M. Isaka, M. Kimura, A. Dote, A. Ohnishi, “Splitting of the p orbit in triaxially deformed ${}^{25}_{\Lambda}\text{Mg}$ ”, *Phys. Rev. C* 87 (2013) 021304-1-5. 査読有

D01-2 公募(萩野, 根村, 木内, 安武, 大橋, 新田, 古本, 祖谷)

1. ▲*H. Sotani, K. Iida, K. Oyamatsu, “Possible identifications of newly observed magnetar quasi-periodic oscillations as crustal shear modes”, *New Astronomy* 43 (2016) 80-86. 査読有
2. ▲*T. Furumoto, Y. Sakuragi, Y. Yamamoto, “Approach to high-density nuclear matter via nucleus-nucleus elastic scattering”, *Acta Phys. Pol.* B47 (2016) 853-858. 査読有
3. ▲*P. van Wyk, H. Tajima, R. Hanai, Y. Ohashi, “Specific heat and effects of pairing fluctuations in the BCS-BEC-crossover regime of an ultracold Fermi gas”, *Phys. Rev. A* 93 (2016) 013621-1-9. 査読有
4. ▲*K. Kasamatsu, M. Eto, M. Nitta, “Short-range intervortex interaction and interacting dynamics of half-quantized vortices in two-component Bose-Einstein condensates”, *Phys. Rev. A* 93 (2016) 013615-1-16. 査読有
5. ▲*H. Nemura, “Instructive discussion of an effective block algorithm for baryon-baryon correlators”, *Comp. Phys. Comm.* 207 (2016) 91-104. 査読有
6. ▲*N. Yasutake, R. Lastowiecki, S. Benic, D. Blaschke, T. Maruyama, T. Tatsumi, “Finite-size effects at the hadron-quark transition and heavy hybrid stars”, *Phys. Rev. C* 89 (2014) 065803-1-11. 査読有
7. ▲*K. Hagino, H. Sagawa, “Correlated two-neutron emission in the decay of the unbound nucleus ${}^{26}\text{O}$ ”, *Phys. Rev. C* 89 (2014) 014331-1-6. 査読有
8. ▲*K. Kiuchi, K. Kyutoku, Y. Sekiguchi, M. Shibata, T. Wada, “High resolution numerical relativity simulations for the merger of binary magnetized neutron stars”, *Phys. Rev. D* 90 (2014) 041502-1-5. 査読有

<書籍>

- ① *中村隆司 著, 共立出版「不安定核の物理」2016年, 194頁。ISBN: 978-4-320-03528-7
第6章「中性子過剰核で探る中性子星」に本領域研究の内容を解説。

<ホームページ・新聞等>

- 領域ホームページ: <http://lambda.phys.tohoku.ac.jp/nstar/>
- SPiRIT TPC Experiments at RIKEN https://groups.nslc.msu.edu/hira/NP1306_SAMURAI15/index.htm
- 2014年8月18日朝日新聞朝刊 科学の扉“元素の魔法数”(B02 中村隆司が取材受ける)
- 2014年10月26日 日本経済新聞朝刊 “中性子星の一部, なぜ電子のように?” (中村隆司が取材受ける)
- 2015年1月19日 中日新聞朝刊 “中性子星に「グザイ」存在”(A01 仲澤和馬が取材受ける)
- 2015年12月23日 大学ジャーナル“電荷対称性の破れ 原子核の中で新現象発見” <http://univ-journal.jp/3581/>
- 2016年4月19日 科学新聞 “酸素 26 の質量を高精度で決定”

<主催シンポジウム等の状況>

総括班主催の国際会議

- Int. Symp. on Neutron Star Matter, 2013年10月25日, 京都, 約40名参加。
- Int. School on Neutron Star Matter, 2014年3月4~7日, 京都, 43名参加。
- 日米合同原子核物理学会でのミニシンポジウム“Nuclear Matter in Neutron Stars”を主催, 2014年10月7日, ハワイ島。2件の招待講演と33件の応募講演。
- Int. Symp. on Neutron Star Matter—Recent Progress in Observations, Experiments and Theories—(NSMAT2016), 2016年11月21~24日, 仙台, 130名参加(うち外国人28名)。本領域研究のとりまとめ国際会議。口頭発表68(うち招待講演11), ポスター発表12。

計画班主催/総括班共催の国際会議

- YITP workshop on “Nuclear equation of state and hypernuclear physics”, 2013年1月18~19日, 京都大学。
- 3rd Int. Symp. on “Nuclear Symmetry Energy”, 2013年7月22~26日, East Lansing, Michigan, USA. 84名参加。
- Int. Symp. on “Origin of Matter and Evolution of Galaxies”, 2013年11月18~22日, つくば, 117名参加。総括班が中性子星物質の特別セッションを開催。
- Int. Workshop on “Intersection of cold-atomic and nuclear physics”, 2014年5月12~13日, Pohang 韓国。B03班主催, 総括班共催。アジア初の冷却原子と原子核物理の合同研究会。
- Int. Workshop on “Future Prospect on Nuclear Physics with strangeness at J-PARC”, 2014年5月31日~6月1日, 理研。A01, A02班主催, 総括班共催。
- 12th Int. Conf. on Hypernuclear and Strange Particle Physics (HYP2015), 2015年9月7~12日, 仙台, 203名参加。ハイペロン・パズルに関する特別セッション開催。
- Int. Symp. on Physics and Astronomy of Neutron Stars and Supernovae, 2015年6月22~23日, 国立天文台, 35名参加。
- Numazu Workshop 2015: Challenges of modeling supernovae with nuclear data, 2015年9月1~4日, 三島。

主催した国内シンポジウム・研究会

総括班主催で領域研究会 5回 (7.(1)参照)と若手スクール 5回 (7.(2)参照)を開催した。各計画研究班が主催する国内研究会を8回実施した。

<アウトリーチ活動>

一般向け講演会・出前授業

- 田村裕和, “素粒子から物質がどう作られた?”, 東北大学サイエンスカフェ, 2012年8月31日, 仙台, 約100名参加。講演・装置デモ・参加者との議論を行った。
- 田村裕和, “中性子星の奇妙な物質—加速器実験とX線・重力波で探る—”, 日本物理学会主催「科学セミナー」2013年8月22~23日, 東京大学小柴ホール。物理学会HPで動画配信。
- 玉川 徹, “宇宙の進化とブラックホールの謎”, 公開講演会「21世紀の科学技術」~みんなで学ぼう! 宇宙の最前線~, 2015年12月20日, 長崎総合科学大学。

など, 計12件の講演会・出前授業を行った。

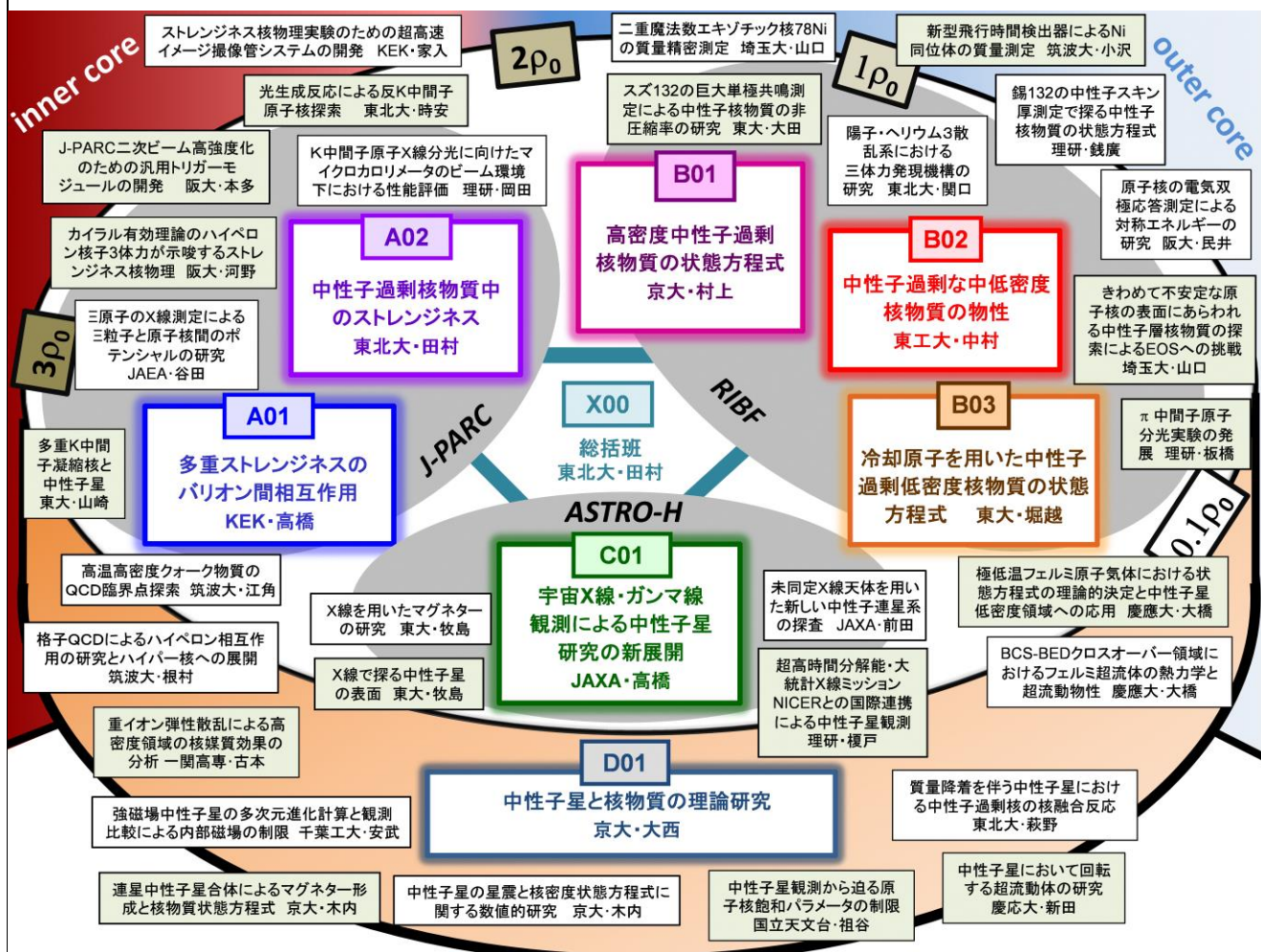
一般向け記事, 入門書

- ① 田村 裕和, “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.
- ② 田村裕和, “中性子星の奇妙な物質”, 日本物理学会編「宇宙の物質はどのようにできたのか—素粒子から生命へ—」日本評論社 (2015) p.148-167.
- ③ 中村隆司, 基本法則から読み解く物理学最前線「不安定核の物理」, 共立出版 (2016)p.1-194. 第6章「中性子過剰核で探る中性子星」に本領域研究の内容を解説。
- ④ 仲澤和馬, 高塚龍之, “超巨大ハイパー核としての中性子星: 混在ハイペロンの謎”, パリティ 32 (2016) p.12-18.

7. 研究組織（公募研究を含む。）と各研究項目の連携状況（2ページ以内）

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、総括班研究課題の活動状況も含め、どのように研究組織間の連携や計画研究と公募研究の調和を図ってきたか、組織図や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下図に示す。計画研究は、A01, A02, B01, B02, B03の順に（図では左から時計回りに）、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る。30件の公募研究はもっとも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。



総括班の活動

総括班には各計画研究班から1名（C01は2名）が分担者として加わり、以下を行った。総括班会議を1〜2か月ごとに実施し、各計画研究の進捗状況のチェックや研究会・スクール等の企画・準備を行なった。

(1) 領域研究会

領域全体にまたがる研究会（2〜3日程度）を以下のように毎年開催した。各計画研究と公募研究の現状や成果の報告と議論を中心に、関連した話題の講演も加え、異なる分野の研究者間の相互理解を深めながら、本領域の研究活動や成果を領域全体で共有し、共同研究につながるような議論を行った。研究会は本領域研究に関わっていない研究者にもオープンにして、研究の裾野の拡大に努めた。学生や若手研究者を主な対象としたポスターセッション（ショートプレゼン付き）も行った。

- ・2012年6月26〜27日（キックオフ研究会）理研, 124名参加。
- ・2013年12月27〜28日（第二回研究会）, 理研, 129名参加。
- ・2014年9月23日〜25日（第三回研究会）, 熱川温泉, 68名参加。
- ・2015年9月17日〜18日（第四回研究会）, 湘南国際村, 56名参加。新公募研究の紹介も行った。
- ・2017年2月16〜18日（第五回研究会）, 福島飯坂温泉, 52名参加。若手のみが運営・参加する「若手セッション」を設け、本領域研究への意見や将来展望を議論した。

また、これらとは別に公募研究の代表らを集めた研究会も以下のように行った。

- ・2013年9月12日～13日（H25～26年度公募研究キックオフ交流会）、東北大、35名参加。
- H27～28年度の公募研究については、同様のものを第四回研究会（湘南国際村）の中で行った。

(2) 若手スクール（10.にも記載）

学生や若手研究者を主な対象としたスクール（2～3日間）を毎年開催した。各研究分野の基本的内容の講義をメインに、若手参加者のポスター発表や研究施設の見学会を加えた。

- ・第1回：2013年2月25～27日、KEK、90名参加、JAXAつくば(C01関連)とJ-PARC(A01,02関連)を見学。
- ・第2回：2013年12月25～26日、理研、99名参加、RIBF(B01,02関連)を見学。
- ・第3回：2015年2月25～27日、阪大RCNP、約55名参加、RCNP(B01,02公募関連)を見学。
- ・第4回：2016年2月24～26日、国立天文台、約50名参加、ドームシアター見学。
- ・第5回：2017年2月16～18日（研究会と合わせて開催）、福島飯坂温泉、52名参加。

(3) 国内研究会、セミナー

上記以外にも総括班が国内研究会・セミナーの主催・共催を計21件行った。これらはA01,A02+D01班の合同開催、B01,B02+D01班の合同開催、B03+D01班の合同開催、A01,A02,B01,B02,B03,C01班の合同開催、というさまざまな組み合わせで行なった。

また、本領域の外に広がった活動として特筆すべきものは、

- ・新学術3領域合同シンポジウム「多面的アプローチで解きあかす宇宙と天体」、2015年7月24～25日、東北大学、約60名参加。同時に走っていた重力波天体・地下素核研究・中性子星核物質の3つの新学術領域の相互理解を目指し、本総括班が他領域に呼び掛けて合同で実施した。

また、検出器や実験・観測技術に関する以下の研究会を開催、研究班をまたがる装置や技術の相互利用や共同開発の検討を行った。

- ・第一回検出器研究会：2013年10月17日、JAXA(見学あり)、35名参加。
- ・第二回検出器研究会：2017年3月4日、東工大、35名参加。

(4) 国際会議等の開催

「中性子星核物質」をテーマとした国際会議を主催するとともに、関連するテーマの国際会議や国際スクールを共催・協賛し、本領域研究の世界への周知と世界の関連する研究情勢の吸収に努めた。

主催した国際会議・国際スクール、共催した国際会議 => 6. に記載した。

協賛した国際会議・国際スクール

8件の国際会議・国際スクールを協賛した。協賛した会議等では総括班メンバーが参加・講演し、また組織委員として領域代表がセッションの組織や講演者選定を行った。

- ・4th および5th Int. School for Strangeness Nuclear Physics (2015年9月3～5日および2016年11月18～20日、いずれも東北大学)では、外国人講師による中性子星核物質の講義を前者は1名、後者は2名入れた。
- ・16th Int. Symp. on Nuclei in the Cosmos, 2016年6月19-24日、新潟、中性子星セッション開催に貢献した。

(5) 広報・アウトリーチ活動 => 6. に記載した

連携の状況

以上の活動が実り、さまざまな連携研究・共同研究がすすめられた。

- ・D01（計画・公募）の理論研究の多くは、実験・観測の各計画・公募研究との連携により進められた。
- ・高密度核物質の理解とハイペロン・パズルの解決に不可欠な3体核力の実験的研究はB02公募（関口）の課題だが、A02計画班と関口氏が共同研究により、A02班が Σp 散乱実験用に開発した多重陽子検出器システム(CATCH)を用いて breakup を含む p+d 散乱の実験を東北大 CYRIC で実施し3体核力のデータを得た。この研究は ^3He 標的の使用やRCNPでのより高いエネルギーへの展開など、今後も発展させることとなった。
- ・B01計画班が開発したTPCの読み出し回路システムを、A01班が自らのTPCの読み出し用に使用した。
- ・A02計画班が開発した Σp 散乱実験用シンチレーションファイバー+MPPCの検出器技術と読み出し回路をB01、B02計画班がSAMURAI内部に設置する多重度検出器に利用した。
- ・C01計画班の開発したASICの技術やCdTeなどの半導体検出器技術は、加速器実験A01/A02/B01/B02班で利用できるものが多く、検出器研究会の議論を経て、今後技術移転や共同研究を進めるための若手からなるチームを結成した。
- ・A02公募（岡田）は、C01班が関係する宇宙観測用のX線分光検出器TESカロリメータを、はじめて加速器ビーム実験に用いてK中間子原子X線分光を行うことで、分解能の画期的向上を目指している。

8. 研究経費の使用状況（設備の有効活用，研究費の効果的使用を含む。）（1 ページ以内）

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記述してください（総括班における設備共用等への取組の状況を含む。）。

【総括班】毎年度開催した領域研究会と若手スクールを開催における参加者の出張旅費や会場費が研究経費の多くを占めた。また、国際会議開催時の招待講演者招へいや参加者旅費，共催・協賛した国際会議等への参加者旅費等としても使用した。事務員（1名，週4日勤務）の雇用も行った。

【A01 計画】H ダイバリオン探索実験(J-PARC E50)の基幹設備であるハイペロン・スペクトロメータの開発・製作費（ヘルムホルツ超伝導電磁石の購入，HypTPC 検出器の読出し回路系の部品・基板等の購入）に研究経費の多くを使用した。また，エマルジョン実験(E07)を実施するための周辺装置や検出器架台，エマルジョン乳剤やその他の消耗品の購入にも使用した。研究員1名(4年)の雇用，電磁石製作や読出し回路系の製作の打合せや国際会議出席のための旅費等にも使用した。

【A02 計画】 Σp 散乱実験(E40)の基幹設備である円筒型陽子検出器群 CATCH の開発・製作（MPPC，シンチレーションファイバー，読出し回路等の材料・部品購入）に研究経費の多くを使用した。ハイパー核 γ 線分光実験(E13)用の Ge 検出器群 Hyperball-J（既存）の冷凍機の一部追加購入，中性子過剰核実分光実験(E10)と K 中間子原子核探索実験(E15)のためのビームライン用検出器の製作，これらの実験（E10,E13,E15）を実施するため必要な周辺装置や消耗品の購入にも使用した。准教授1名（4年）と特任助教1名（2年）の雇用，国際会議出席のための旅費等にも使用。

【B01 計画】多重粒子測定装置 SAMURAI TPC の開発・製作，とくに読出し回路の購入に研究経費の多くを使用した。さらに研究員1名(3年)の雇用，国際共同実験として計画を遂行するため外国人研究者の滞在費の負担，研究打ち合わせ，国際集会出席のための旅費などにも使用した。

【B02 計画】ガンマ線カロリメータ CATANA の開発・製作のための部品・材料（シンチレータ結晶，光電子増倍管，読出し回路）の購入に研究経費の多くを使用した。さらに理研 RIBF で行われた中性子ハロー核や非束縛中性子過剰核の実験のための周辺機器，消耗品の購入にも使用した。また，CATANA の開発とピグミー共鳴実験を主導する特任助教1名（5年）雇用，国際会議出席のための旅費等にも使用した。

【B03 計画】世界をリードする冷却原子実験を展開するため，高分解能観測システム，大電流制御システム，超安定磁場生成システムの構築に研究費を使用し，その結果，局所的な冷却原子の熱力学量の測定と p 波相互作用するフェルミ粒子系の実現に至った。またワークステーションと MATLAB を導入してビッグデータの高速処理が可能になり，希薄中性子物質に相当する EOS を高精度で得ることができた。

【C01 計画】観測による距離によらない中性子星半径の精密決定を目指して，ASTRO-H 衛星に搭載される軟 X 線分光装置(マイクロカロリメータ)の波形処理機器の高速化などの機器の試験・改良，広帯域にわたって精度よく観測を実施するための試験やキャリブレーションと，それに必要な地上試験用センサーなどシステム構築に研究費を使用した。試験やキャリブレーションを実施するにあたって，必要な旅費を使用している。また，将来の大面积 X 線検出器を搭載した衛星のための新たな検出器開発として，新しい CMOS センサー，アナログ LSI(ASIC)，CdTe イメージャの試作，試験のために研究費を使用した。中性子星表面からの X 線放射を研究するため，および ASIC の設計と試験のために，研究員を延べ5名雇用した。

【D01 計画】

研究経費の大部分を，理論研究に不可欠な人件費(ポスドク雇用経費)として使用した。全ての分担研究者（9名）が0.5年～2年のポスドク雇用を行い，代表者は科研費全期間を任期とする特任研究員1名を配置した。さらに，打ち合わせ旅費，理論班研究会開催旅費，国際会議協賛費，国際会議等の成果発表旅費としても使用した。

【効果的使用，設備共用について】

A01, A02, B01, B02 が製作した装置・検出器は，それぞれの計画研究の目的に特化した特殊なものであり，それぞれが時間をかけて開発した技術を使って各実験に最適なものとして設計・製作した。そのため，その他の研究項目とそのままの形で共用したり流用したりすることはできない。ただし，それぞれを製作するうえで開発したり利用したりした技術は，他の研究にも利用できるものがあるため，総括班や，研究班同士の議論を通じて，こうした技術的な共用や共同利用を進めた。

- ・ A02 計画班は上記の円筒型陽子検出器のために開発した技術である，多チャンネルのシンチレーションファイバーと光センサー MPPC，その読出し回路（VME-EASIROC モジュール）については，B01, B02 でも利用した。特に回路系は，A02 の開発した VME-EASIROC モジュールを別途購入した。
- ・ B01 計画班が多重粒子測定装置 SAMURAI TPC 用に開発した読出し回路(GET)は，A01 計画班も別途購入してハイペロン・スペクトロメータ用 TPC の読出し回路として使用した。互いに不測の事態の場合のバックアップシステムを日本国内に持つという役割を果たしている。
- ・ A01, A02 班は J-PARC ハドロン施設のデータ収集系やビームライン検出器を共同で開発・製作した。
- ・ B01 班が理研内に設営したクリーンルームは B02 班の実験準備にも使用している。

・研究費の使用状況

(1) 主要な物品明細(計画研究において購入した主要な物品(設備・備品等。実績報告書の「主要な物品明細書」欄に記載したもの。)について、金額の大きい順に、枠内に収まる範囲で記載してください。)

年度	品名	仕様・性能等	数量	単価(円)	金額(円)	設置(使用)研究機関
24	AGETチップ	仏 CEA Saclay 製 AGET V2.0 160個	1式	12,352,000	12,352,000	京都大学
	MPPC 5000個	浜松ホトニクス S10362-11-050P	1式	10,710,000	10,710,000	東北大学
	パルス管冷凍機 4台	富士電機製 CZX53111-23	1式	9,158,229	9,158,229	東北大学
	光電子増倍管	浜松ホトニクス製 H3178	1式	9,324,000	9,324,000	東京工業大学
25	HypTPC 用信号 増幅変換基板	セイコー・イー ーアンドジー	1	8,615,040	8,615,040	日本原子力開発機構
	AsAd 基板	CENBG-AsAd V2.1	40	269,220	10,768,800	京都大学
26	ヘルムホルツ型 超伝導電磁石 (コイルアセン ブリ,ヨーク)	林栄精器製	1	32,896,800	32,896,800	高エネルギー加速器研 究機構
	γ線検出器用結 晶(第1回目支 払)(合算)★	蘭 Scionix Holland BV社製	1式	20,790,000	20,790,000 (19,982,640)	東京工業大学
	アナログ処理 ASIC	IDEA	1式	3,944,700	3,944,700	宇宙航空研究開発機構
	半導体レーザー 励起個体レーザ ーシステム	Finesse 532-10W-SD	1式	3,240,000	3,240,000	東京大学
27	ヘルムホルツ型 超伝導電磁石 (クライオスタ ット及び組立)	林栄精器製	1式	27,896,400	27,896,400	高エネルギー加速器研 究機構
	γ線検出器用結 晶(第2回目支 払い)	蘭 Scionix Holland BV社製	1式	20,790,000	20,790,000	東京工業大学
	γ線検出器用結 晶(第1回支払 (★との合算))	蘭 Scionix Holland BV社製	1式	20,790,000	20,790,000 (807,360)	東京工業大学
28	高カウントレ ート対応 CdTe 撮 像検出器	両面ストリップ CdTe 半導体	1式	11,934,000	11,934,000	宇宙航空研究開発機構
	Wavelength Meter	WS6-200(オプショ ン MC8MMc 付)	1	3,541,018	3,541,018	電気通信大学

(2) 計画研究における支出のうち、旅費、人件費・謝金、その他の主要なものについて、年度ごと、費目別に、金額の大きい順に使途、金額、研究上必要な理由等を具体的に記述してください。

【平成24年度】

・旅費

【C01】 総額 571 万円。研究協力者の中性子星の理論研究，X線やガンマ線衛星を用いた観測戦略打ち合わせ，データ解析検討のための海外旅費・招聘旅費，中性子星観測に向けた観測装置改良検討打ち合わせのための国内旅費，中性子星研究のための将来ミッションに必要な技術調査のための海外旅費に使用。

【D01】 総額 480 万円。理論研究にとって不可欠な研究立ち上げのための打ち合わせ旅費や，理論班研究会開催経費として主に使用した。

【総括班】 総額 465 万円。その多くを，キックオフ研究会と若手スクールの参加者出張費（国内旅費）として使用した。一部は協賛した国際会議に本領域関係者が出席し発表するための旅費としても使用。

【B01】 総額 256 万円。海外の協力研究者との情報交換，テスト作業のため外国旅費使用。

・人件費・謝金

【D01】 総額 767 万円。ポスドク 4 名を半年雇用した。理論研究にとってもっと重要な使途である。

【B02】 総額 334 万円。特任助教を半年雇用，また事務効率化のため事務補佐員を雇用(H24のみ)。

・その他

【C01】 総額 1696 万円。ASTRO-H を用いた中性子星観測手法等を議論するための国際会議開催，軟 X 線分光装置(マイクロカロリメータ)の波形処理機器の高速化のための設計検討に使用。

【平成25年度】

・旅費

【総括班】 総額 558 万円。その多くを第二回研究会と第二回若手スクールの参加者出張費（国内旅費）として使用した。

【B02】 総額 576 万円。主に国際会議出席（招待講演 5 回を含む計 11 回）および共同研究打ち合わせのための海外旅費，外国人理論家の招聘旅費（共著論文の成果に結びついた）。

【C01】 総額 553 万円。中性子星観測に関する検討のための海外旅費，本研究で改良・開発を行った装置に関する打ち合わせ，およびセンサー等の試験，キャリブレーション実施のための国内旅費に使用。

【B01】 総額 498 万円。TPC 開発のためのミシガン州立大研究者の日本での滞在費，日本人研究者のミシガン渡航費などに使用した。

【D01】 339 万円。代表者・分担者・雇用したポスドクの理論研究のための旅費として使用した。

・人件費・謝金

【D01】 総額 1602 万円，ポスドク 4 名を通年雇用した。

【A02】 総額 793 万円，准教授 1 名を通年雇用した。

【B02】 総額 652 万円，特任助教 1 名を通年雇用した。

【C01】 総額 553 万円，研究員 1 名を通年雇用した。

・その他

【C01】 総額 1766 万円。主に軟 X 線分光装置の波形処理機器の高速化のための設計検討(その 2)，および ASTRO-H 硬 X 線撮像検出器地上試験・較正用モデル組み上げ作業に使用した。

【平成26年度】

・旅費

【C01】 総額 651 万円，ASTRO-H における中性子星等の観測に関する検討，打ち合わせのための海外旅費，中性子星研究のための将来ミッションに必要な技術検討のための海外旅費，および本研究で改良，開発を行った箇所に関する ASTRO-H センサー試験，キャリブレーション実施のための国内旅費に使用。

【総括班】 旅費 598 万円。その多くを第三回研究会と第三回若手スクールの参加者出張費（国内旅費）として使用した。

【A02】 総額 450 万円。主に，国際会議での成果発表旅費，東北大開催の研究会の参加者旅費。

【D01】 総額 330 万円。代表者・分担者・雇用したポスドクの理論研究のための旅費として使用した。

【B02】 総額 295 万円。主に国際会議出席(計 8 回)のための外国旅費，共同研究の打ち合わせのため海外旅費，打ち合わせのための連携研究者の招聘や研究会への参加旅費のための国内旅費として使用した。

【B01】 総額 259 万円。その多くはミシガン州立大研究者の日本での滞在費，日本人研究者の海外協力研究者との打ち合わせのための海外旅費として使用した。

・人件費・謝金

【D01】 1,616 万円，ポスドク 7 名を半年～通年雇用した。

【A02】 10,771,388 万円，准教授 1 名(12 か月)，特任助教 1 名(6 か月)を雇用した。

【C01】 総額 918 万円，研究員 1 名を通年雇用，1 名を 6 ヶ月雇用した。

【B02】 653 万円，特任助教 1 名を通年雇用した。

【B01】 508 万円，ポスドク 1 名を通年雇用した。

【A01】 総額 403 万円，ポスドク 1 名を雇用した。

・その他

【C01】 総額 807 万円 主に ASTRO-H 衛星広帯域スペクトル測定用軟ガンマ線検出器の地上較正試験モデルの検討と試作に使用した。

【平成27年度】

・旅費

【総括班】旅費 445 万円。その多くを第四回研究会と第四回若手スクールの参加者出張費（国内旅費）および会場費として使用した。

【C01】総額 433 万円。海外の研究協力者を中性子星の理論研究のため招聘。国内の研究協力者を共同解析のために招聘、中性子星に関連する国際会議、研究打ち合わせのため海外旅費、センサーの性能評価試験のための実験施設への出張などに使用。本研究で改良、開発を行った箇所に関する ASTRO-H センサー試験、キャリブレーション実施などのための国内旅費に使用した。

【B01】総額 417 万円(秋に TPC のコミッションング実験を行い、それに関連してに来日した外国人の研究員、大学院生の滞在費(総額約 134.9 万円)を負担した。

【B02】総額 287 万円。主に、国際会議出席(計 6 回)や、公募研究(民井)との共同研究のための国内旅費。

【D01】総額 269 万円。代表者・分担者・雇用したポスドクの理論研究のための旅費として使用した。

・人件費・謝金

【D01】総額 1693 万円、ポスドク 4 名を通年雇用した。

【C01】総額 1127 万円、研究員を 1 名 8 ヶ月雇用、特任准教授を 1 名通年雇用した。

【A02】総額 1260 万円、准教授 1 名、特任助教 1 名を通年雇用した。

【B02】総額 654 万円、特任助教 1 名を通年雇用した。

【B01】総額 518 万円、ポスドク 1 名を通年雇用した。

【A01】総額 413 万円、ポスドク 1 名を通年雇用した。

【平成28年度】

・旅費

【B01】総額 503 万円。本実験のため来日した海外の研究員・院生の滞在費、国際集会での成果発表のための外国旅費等として使用した。

【総括班】総額 436 万円。その多くを第五回研究会+若手スクールの参加者出張費（国内旅費）と会場費、および、主催したとりまとめ国際会議での外国人招待講演者の滞在費等に使用した。

【D01】総額 325 万円。代表者・分担者・雇用したポスドクの理論研究のための旅費として使用した。

【C01】総額 320 万円、中性子星表面の放射のシミュレーションコード開発、中性子星に関連する国際会議、研究打ち合わせのため海外旅費、センサーの性能評価試験のための実験施設への出張などに使用。

・人件費・謝金

【C01】総額 1729 万円。研究員 1 名を通年雇用、1 名を 3 ヶ月雇用。特任准教授を 1 名通年雇用した。

【D01】総額 1600 万円、ポスドク 4 名を通年雇用した。

【A02 班】総額 1264 万円、准教授 1 名、特任助教 1 名を通年雇用した。

【B01】総額 519 万円、ポスドク 1 名を通年雇用、京都大学で事務補助のための人件費としても使用。

【B02】総額 659 万円、特任助教 1 名を通年雇用した。

【A01】総額 413 万円、ポスドク 1 名を通年雇用した。

(3) 最終年度(平成28年度)の研究費の繰越しを行った計画研究がある場合は、その内容を記述してください。

A02 班では、平成 29 年度へ 190 万円の繰越しを行った。 Σp 散乱実験(E40)の基幹設備である円筒型陽子検出器群 CATCH は、28 年 10 月に完成して性能試験を行ったが、詳細な較正データを収集しておく必要があることが分かったため、較正に時間をかけることとした。そのため、この装置の性能試験を兼ねて最初に実施する予定だった東北大サイクロトロンでの 3 体核力を調べる実験(B02 公募(関口)と共同)は、予定より遅れて平成 29 年 1 月の実施となり、そのデータ解析と解析結果に基づく検出器最終調整や周辺検出器・制御系の整備に平成 29 年 6 月までかかることとなった。なお、本検出器を用いた J-PARC での Σp 散乱実験は、ハドロン事故によるビームタイムの遅れのため、もともと平成 29 年度後半以降に実施することとなっており、繰り越しによる影響は生じない。

D01 班では平成 29 年度へ 58 万円の繰越しを行った。高密度における対称エネルギー決定において重要な B01 班が行った実験データの公開が 1 年遅れることとなり、D01 班も参加している国際的な理論グループでの議論が継続しているためである。研究打ち合わせ旅費と理論班研究会に使用する予定である。その後、これらの新しい実験データから得られる情報を組み込む形で EOS を改良して提案する。

9. 当該学問分野及び関連学問分野への貢献度（1 ページ以内）

研究領域の研究成果が、当該学問分野や関連分野に与えたインパクトや波及効果などについて記述してください。

中性子星内部の高密度核物質を理解することは、原子核物理学の最大の目標の一つである。これまで原子核物理学では、現象論的ながらよく知られた 2 体核力や原子核のデータをもとに、さまざまな原子核と核物質（核子の有限多体系や無限多体系）をいくつかの理論的枠組みのもとで計算していたが、現実存在する原子核の密度はほぼ一定のため、通常の原子核とは密度が極端に異なる核物質＝中性子星核物質を再現できるとは限らず、これは原子核理論の枠組みが正しいかどうかを試す試金石であった。これまで、さまざまな核理論の枠組みと核力パラメータに対応するさまざまな EOS が提案され、それぞれに対応した中性子星の質量・半径の関係が予言されていた。しかし以前は、主に中性子星半径の高精度測定が難しいためにこれらの EOS を観測で選別することができず、一方で加速器実験による原子核のデータから EOS の信頼性を大きく上げることも難しかった。核物質の EOS がわからず中性子星内部がわからないということは、中性子星自体の質量・半径・冷却・磁場などの性質はもとより、超新星爆発、中性子星合体、ブラックホール形成といった天体現象も正しく理解できていないことを意味していた。

しかし、今から 6~7 年前になって、J-PARC や RIBF 等の最先端加速器施設のおかげで、中性子星核物質 EOS に直結するデータが得られる状況になり、さらに X 線天文学、とくに X 線検出器の進歩により、中性子星の半径を以前より圧倒的な高精度で測定できる状況が生まれてきた。こうした状況をとらえてスタートした本新学術領域は、さまざまな実験データを実際に測定し、それに基づいて、低密度での EOS を直接決定し、中高密度での EOS の対称エネルギーを厳しく制限し、超高密度の EOS のために必要となるハイペロンの相互作用(YN,YY 相互作用)を決定した（一部はデータ解析中）。低密度領域については、冷却原子実験に基づいて決めるという新しい方針をとった。理論的枠組みも改良・開拓し、これらの新しいデータと進んだ理論的扱いのもとで、以前より圧倒的に信頼性の高い EOS を構築することができるようになった（本領域研究で得られる実験データをすべて反映させた最終的な EOS の構築・提案は、実験データが揃い次第速やかに行う予定）。これは、原子核物理と天体物理の双方にとって極めて大きな価値をもつ。

ただし、太陽質量の 2 倍の重い中性子星が観測され、従来の 2 体核力だけで作られた EOS の多くが棄却され、3 体核力（3 体バリオン力）に強い斥力が存在する（あるいは核内核力（バリオン力）の斥力的な密度依存性が存在する）ことが明らかとなっている。さらに自然発生するはずのハイペロンが EOS を一層柔らかくして中性子星最大質量を大きく下げて矛盾を大きくするハイペロン・パズルが深刻な問題となっている。この問題の解決はかなり難しいが、本領域研究を通して、理論・実験・観測が連携してこれを解明するための道筋が明らかになってきた。ハイペロンを含む 3 体バリオン力の情報を実験から引き出すのは将来の課題とはなるが、その方法を提案することができた。また、近年 lattice QCD シミュレーションやカイラル有効理論によるバリオン間力の研究が進み、こうした 3 体力を導き出すことも将来的には可能になるとの期待が生じてきた。さらに、こうした研究は、中性子星内部に相転移したクォーク物質があるかどうか、という現時点では信頼性ある議論ができない問題の解決にもつながる。これは核物理最大の目的であるクォーク多体系の相図（QCD 相図）の解明において、特に手ごわい高密度側の理解に結びつく。

今後さらに改良される EOS による中性子星の質量・半径関係の予言を、数年後のひとみ後継機やその他のミッションによる半径の精密観測データと比較することで、その EOS の適否の判定、さらには原子核理論の枠組みの検証と天体物理への大きな貢献が成し遂げられるだろう。今後は、中性子星合体の重力波の観測データも使って、より高い信頼性で EOS を選別し検証することも可能となってくる。

このような研究の流れと実際のアクティビティを作り上げたことは、本領域研究の極めて大きな成果といえる。さらに、異分野出身の若手を含む研究者からなる新しいコミュニティを日本に作り、今後研究を加速させることを可能にしたのも大きな成果である。

また、本領域研究では、冷却原子の EOS から希薄中性子星物質の EOS を決定し、また中性子物質の超流動や BEC-BCS 相転移の考察も行い、原子核物理学と物性物理学との融合を意識した研究を行った。実際、核物理研究者と物性（原子）物理研究者の間の垣根が取り払われ、緊密な共同研究が行われた。ここで行われた研究は、原子系とか核子系とかに限定されない、より一般的な「フェルミ粒子系の物性物理学」であった。その成果を、通常の電子系の物質ではなく、中性子あるいはバリオン多体系に適用することで中性子星の物性の理解が進んできた。これは、電子ではなく、バリオンが主役となる新しい物性物理学＝“バリオン物性物理学”ととらえることができる。宇宙に、電子がほとんどなくバリオン（あるいはクォーク）だけから構成される巨視的な物質が安定に存在していることを我々が認識して、その物質の物性を探求することは、我々の自然観・物質観を拡張することを意味している。本領域研究を通して、こうした考え方がわれわれ研究者に定着してきたといえるだろう。

中性子星内部の完全な理解に達するには道半ばではあるものの、本領域研究は、そこに向けた研究の流れを作り上げるとともに、実際に相当な進展を果たすことができた。さらに、原子核・素粒子物理、物性物理、天体物理、天文学、検出器技術などの広い分野へ影響を与えることができた。

10. 研究計画に参画した若手研究者の成長の状況（1ページ以内）

研究領域内での若手研究者育成の取組及び参画した若手研究者（※）の研究終了後の動向等を記述してください。

※研究代表者・研究分担者・連携研究者・研究協力者として参画した若手研究者を指します。

(1) 総括班主催の若手育成イベント

本領域研究では、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だ。

- **若手スクールの開催** 7. に記載した通り、毎年2~3日間、参加者50~100人規模のスクールを開催。
- **領域研究会での若手の発表会**

領域全体の研究会（7. 参照）では、若手参加者の積極的な参加を促し若手参加者同士の交流を深めるため、ポスターセッション+ショートプレゼンテーション（一人5分程度）の時間を設けた。

- **最後の領域研究会での若手セッション**

第五回研究会（福島飯坂温泉, 52名参加）では、若手のみが運営・参加する80分間の「若手セッション」を設け、本領域研究への意見や将来展望を若手研究者に議論してもらった。その結果は、若手代表に発表してもらい、領域代表がレポートとして受け取った。若手の自主性を育む効果があったと思われる。若手の代表的な意見：「スクールは若手の育成に有効だった。スライドは残っているが教科書や講義録を残してほしい。」「総括班の運営に若手が参画したかった。若手主催でスクールを開催したかった。」「分野間の交流が進み、自分の知見も広がった。一方、若手同士で共同研究をもっと進めるべきだった。」「実験(B02)と理論(D01)の共同の実験提案や、A, B, C 班の検出器の情報交換や共同開発ができて良かった。」

- **国際スクールの開催**

- ・ 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名を招聘し、日本人講師2名とともに本領域全体にわたる講義を4日間かけて行った。若手参加者の口頭発表も行った。
- ・ International school for Strangeness Nuclear Physics (SNP School) (東北大学主催、東海および仙台) の第2回 2013 (2.14-20), 第3回 2014 (2.13-19), 第4回 2015 (9.3-5), 第5回 2016 (11.18-20)をすべて協賛した。すべて、若手参加者の発表とポスターセッション(毎回20名程度参加)を行った。また、外国人講師による中性子星核物質の講義を第4回では1名、第5回では2名入れた。

- **各計画研究の若手育成**

A 班では、大学院生の国際会議登壇を積極的に支援しており、毎年10件程度の学生が国際会議で発表した。また、上記の International school for Strangeness Nuclear Physics に参加し積極的に発表も行うよう毎年学生を指導してきた。B01 班では、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、ポスドクにプロジェクトの主要部分を積極的に担ってもらっている。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、韓国で開催して成功裏に終わらせた。D01 班も、理論班研究会や国際スクール(H25年度)の際に参加した若手が口頭発表できるように発表時間を設けた。

(2) 若手の受賞

本新学術研究を通じて、学生（研究当時）が以下の31件の賞を受賞した。

原子核談話会新人賞（全国実験核物理分野）2件、測定器開発優秀修士論文賞（全国素核宇宙分野）4件、ハドロンホールユーザー会修士論文賞（J-PARCハドロン施設関連）4件、

RIBF Thesis Award (理研 RIBF 関連) 1件、東京大学理学系研究科奨励賞 1件、

東北大学物理学専攻賞 1件、日本物理学会領域1学生プレゼンテーション賞 7件、

国際会議ポスター賞 3件、国内研究会ポスター賞 4件、慶応大学藤原賞 2件、

東工大基礎物理学専攻優秀修士論文賞 1件、東工大基礎物理学専攻最優秀修士論文賞 1件、

東工大理学系若手研究奨励賞 1件。

(3) 若手研究者の動向

本領域で雇用したポスドク・任期付き教員は21名いるが、うち7名がパーマネントの教育・研究職を得て、11名がポスドク・任期付き教員ポストを継続している。

本領域の計画研究に加わって博士論文の課題として研究を行った大学院生のうち、期間中に24名が博士号を取得し、うち17名が研究職に就職した。また同様に103名が修士号を取得し、うち43名が博士課程（後期課程）に進学した。

11. 総括班評価者による評価（2ページ以内）

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。

評価者：岡 眞（東京工業大学，原子核物理学（理論））

中性子星の組成，内部構造，冷却，生成進化のダイナミクスの解明は QCD を基本理論とするハドロンおよび原子核物理学における重要課題であるが，その極限的な環境と限られた観測データに阻まれて未だ十分な理解には達していない。本新学術研究では，RIBF および J-PARC を用いた中性子物質やストレンジネス物質のダイナミクスの実験的解明，および X 線天文衛星 ASTRO-H を用いた中性子星観測を進めて，理論研究のサポートにより中性子星の状態方程式へ結びつける研究展開を図った。

本研究期間内に，J-PARC の事故によるハドロン実験の遅れや ASTRO-H の障害による観測中止という本計画の進捗を大きく阻害する要因が生じたことは大変残念であった。その中で，核物質の状態方程式の精密化と中性子星内部のハドロン物質相の状態を確定するという最終目標へ向けて，研究は相当程度前進したと言える。本領域の大きな成果として，実験グループからはテトラ中性子状態や Ξ 束縛核の発見を含む複数の非常に重要な発見，理論では対称エネルギーの密度依存性の決定や，三体力を取り入れた有効理論での核物質の飽和性を始めとする多くの重要な進展がもたらされ，目標へ至る道筋が明らかになった。また，中性子星核物質物理の課題を総合的な視点で整理し，RIBF, J-PARC, X 線天文衛星など，主要大型研究施設におけるプロジェクト間の連携を進め，若手研究者の育成に大きく寄与するなど今後の発展への足がかりを築いた点が高く評価できる。

評価者：酒井英行（理研，原子核物理学（実験））

この新学術領域研究は，従来個別のアプローチになりがちであった中性子星の物性研究を，「状態方程式 (EOS) の決定」を共通のキーワードに，関連する分野(ハドロン系，核子系，宇宙・天体系，冷却原子系)の理論・実験研究者が結集して行うものである。広い分野に跨ることからも相互の分野連携は，総括班による強いリーダーシップが欠かせない。

以下の3つの観点から総括班の評価をする。

- (1)緊急事態に対応できたか。
- (2)異なる研究課題の間の連携や共同研究をプロモートしたか。
- (3)新しい研究領域，新しい研究者コミュニティができたのか。

(1)3つの新施設 (①J-PARC, ②ASTRO-H (ひとみ), RIBF) に於いて行われる実験・観測データ取得はこの新学術領域研究の根幹である。しかしながら，①J-PARC に於いてはハドロン実験室での放射能漏えい事故による2年間運転停止，②ひとみ衛星の事故による観測不可能など，それぞれ自分たちの努力では解決できない極めて困難な事態に遭遇した。

①J-PARC ハドロン実験施設の事故により，目玉であったダブルストレンジネスのエマルジョン実験の結果を期限内に出すことができなかった。しかしながら，この実験の準備として進めていた自動解析システムを転用し過去の KEK-PS のエマルジョンを再解析し，明確な Ξ 原子核束縛状態を初めて発見した。報告論文 Nakazawa et al., PTEP は物理学会論文賞になったのは大いに評価できる。2年間の運転停止時間を利用し，実験準備を万端行い，実験再開後の短時間で成果を挙げるよう努力した。その結果，いくつもの成果がでたが，とりわけ ${}^4\Lambda\text{He}$ ハイパー核のガンマ線核分光による，大きな荷電対称性の破れを発見したことと， $K\text{-pp}$ 高統計データによる明確な束縛状態の実験的確立も従来の論争に終止符を打つ重要な結果を得たのは出色といえる。

このように，2年間の運転停止に至った J-PARC 事故という緊急事態に対して，素早い対応で損失を最低限に導いた総括班の活動を高く評価するものである。

②中性子星の状態方程式 (EOS) に強い制限を与える筈であった，ひとみ衛星の X 線観測による中性子星半径の精密決定ができなくなったのは大きな損失であった。この損失に対する総括班の対応は他の評価者がされると思うのでここでは述べない。

(2) 連携については，もともとそれぞれの分野では理論と実験との連携はかなり密接であったと思われるが，分野を超えて実験結果を EOS に反映，あるいは反映させるために必要な研究が十分に進んだと判断する。その例の一つとしては，B03 が冷却原子で EOS を実測し，理論研究によってそれを中性子星物質

EOSに焼き直せるようになったことが挙げられるであろう。

また、評価者は中間評価の際に、「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、これが新たな展開につながる可能性がある」と指摘した。本報告書の13, 14ページの〈中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況〉欄には、この指摘について直接答える様な形で記入されていないが、全体的には指摘した方向で、実験や理論の交流が深まり新しい展開が始まったことが十分に読み取れる。

(3) 新しい研究領域、新しい研究者コミュニティの創生については、数多くの国際会議・国際スクールを意識的に主催・共催し相互の垣根を低くする努力がされた。特に若手の育成に、若手スクールを毎年開催したのは評価に値する。この学術研究は、原子核分野を中心に宇宙・天文分野と冷却原子分野という異分野の融合が鍵であったが、少なくとも「異分野連携研究のネットワーク構築」は進んだと判断する。

以上の事から、総括班は十分にその機能を果たしたと高く評価する。その一方で、最終目標である中性子星の包括的EOSを得るという点については、J-PARC事故やひとみ衛星の喪失などの困難に遭遇したことも影響し、もう一步の所まで到達したが、期間内に結論を得るに至らなかったのは少々残念である。異分野融合を推進力として、早期の最終目標の達成を期待している。

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あり、活発な研究活動を進めてきた。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、J-PARCの放射線事故、「ひとみ」衛星の姿勢異常といった予想外のトラブルに見舞われはしたが、将来につながるような成果を多くあげたと評価される。総括班および計画班が主催した国際会議が12件、発表論文数が800件近くとなっている。また、若手を対象とした国内スクールの開催が5回、その他国際スクールの協賛など若手研究者の育成にも力を入れ、結果として24名が博士号を取得するなど、期間内に目に見えた成果を上げていることも注目される。公募研究は30件採択されており、計画研究を補間しつつ広い分野の研究を活性化することに本領域が寄与できたと考えられる。

本領域研究は中性子星の内部物質を解明するというテーマのもとに、原子核物理学、宇宙物理学、冷却原子気体、そして理論の研究者などが集まって活発に研究を進め、分野を超えた研究交流を活発化する上でも成果を上げたと評価される。宇宙観測を目的として開発されたX線分光検出器TESカロリメータを用いたK中間子原子の特性解明、計画研究A班で開発した陽子検出システムCATCHのB班公募研究における3体核力の実験への応用などが例として上げられる。こうした新たな研究連携を領域終了後もぜひ継続してもらいたいと希望する。中性子星の内部物質の解明という課題は、ブラックホールに至る手前の究極の高密度物質を理解するという物理学の大きな挑戦である。「ひとみ」衛星の代替ミッションが2021年の打ち上げを目指して始まりつつあり、米国のNICERは今年中にもデータを出す見通しである。2028年にヨーロッパが中心となって打ち上げる大型X線天文衛星Athenaに日本も参加するが、このテーマは主要課題の一つである。本領域研究によって芽生えた新たな研究の種を、今後も広い視野を持って推進されることを強く期待する。

計画研究C01は宇宙X線観測を用いて、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進められた。2016年に打ち上げられた「ひとみ」(ASTRO-H)衛星では、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を計画していた。「ひとみ」の姿勢異常によりデータを得ることができなかつたが、約1ヶ月の初期観測を通じて、X線マイクロカロリメータの素晴らしい性能を確認することができ、これを可能にした技術が世界的に傑出したものであることが示された。本領域研究の成果として誇るべきものである。科学面では、「すざく」によるGRS1747-312のX線バーストの吸収端構造、ChandraによるSer X-1の吸収構造などの成果を着実に上げた。PRAXySやLOFTなどの計画は、必ずしも打ち上げの明確な見通しが得られていない状況ではあるが、本研究で開発された検出器技術が、ミッション成立にとって本質的に重要であるとして提案に組み込まれたことは注目に値する。