

領域略称名：ニュートリノ  
領域番号：2504

平成27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

「(研究領域名) ニュートリノフロンティアの融合と進化」

(領域設定期間)

平成25年度～平成29年度

平成27年6月

領域代表者 (京都大学・理学研究科・教授・中家 剛)

# 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	7
2. 研究の進展状況	9
3. 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	12
4. 主な研究成果（発明及び特許を含む）	13
5. 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）	18
6. 研究組織（公募研究を含む）と各研究項目の連携状況	25
7. 若手研究者の育成に関する取組状況	27
8. 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）	29
9. 総括班評価者による評価	30
10. 今後の研究領域の推進方策	32



## 研究組織

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	25105001 ニュートリノフロンティアの融合と進化	平成25年度～ 平成29年度	中家 剛	京都大学・理学研究科・教授	11
A01 計	25105002 加速器ニュートリノビームによるニュートリノフロンティアの展開	平成25年度～ 平成29年度	中家 剛	京都大学・理学研究科・教授	5
A02 計	25105003 原子炉ニュートリノを用いた基礎科学および応用科学	平成25年度～ 平成29年度	久世 正弘	東京工業大学・理工学研究科・准教授	8
A03 計	25105004 大気ニュートリノを用いた質量階層構造の研究と次世代研究フロンティアの発展	平成25年度～ 平成29年度	塩澤 真人	東京大学・宇宙線研究所・教授	13
A04 計	25105005 ニュートリノで探る深宇宙	平成25年度～ 平成29年度	吉田 滋	千葉大学・理学系研究科・教授	4
B01 計	25105006 超高解像度ニュートリノ検出器の開発	平成25年度～ 平成29年度	中村 光廣	名古屋大学・エコトピア科学研究所・グリーンシステム部門 教授	10
B02 計	25105007 宇宙背景ニュートリノの崩壊探索に用いる超伝導赤外線検出器の開発	平成25年度～ 平成29年度	金 信弘	筑波大学・数理物質科学研究科・教授	4
B03 計	25105008 液体アルゴン 3次元飛跡イメージング検出器の開発研究	平成25年度～ 平成29年度	丸山 和純	大学共同利用機関法人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	5
C01 計	25105009 ニュートリノ振動現象論の新展開と新物理の探求	平成25年度～ 平成29年度	安田 修	首都大学東京・理工学研究科・教授	7
C02 計	25105010 ニュートリノで探る原	平成25年度～ 平成29年度	佐藤 透	大阪大学・理学研究科・准教授	5

	子核のクォーク・グルーオン構造と標準反応模型の構築				
C03 計	25105011 ニュートリノで探る素粒子の起源と宇宙の構造	平成25年度～平成29年度	北野 龍一郎	高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授	5
計画研究 計 11 件					
D01 公	26105502 ジルコニウム96を用いた2重ベータ崩壊事象探索実験用液体シンチレータの開発	平成26年度～平成27年度	福田 善之	宮城教育大学・教育学部・教授	1
D01 公	26105504 Research and Development of a Non-destructive Profile Monitor for ~MW Power Proton Beams	平成26年度～平成27年度	Hartz Mark	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任助教	1
D01 公	26105510 高エネルギー大気ν流束推定へ向けた気球高度で生成されるチャーム粒子測定手法の開発	平成26年度～平成27年度	六條 宏紀	名古屋大学・エコトピア科学研究所・研究員	1
D01 公	26105512 48Ca 二重ベータ崩壊精密測定に向けたバックグラウンド事象の新測定技術開発	平成26年度～平成27年度	吉田 斉	大阪大学・理学研究科・准教授	1
D01 公	26105513 CANDLES 実験における中性子線源を用いた検出器較正およびバックグラウンド調査	平成26年度～平成27年度	飯田 崇史	大阪大学・核物理研究センター・特任助教	1
D01 公	26105516 原子核乾板検出器を用いた短基線ニュートリノ振動実験	平成26年度～平成27年度	小川 了	東邦大学・理学部・教授	1

D01 公	26105518 大強度シンクロトロン における加速途中のベ ータ関数測定および光 学補正	平成26年度～ 平成27年度	栗本 佳典	大学共同利用機関法人高エネルギー 加速器研究機構・加速器研究施設・ 助教	1
D01 公	26105519 CMB偏光観測からニュ ートリノ質量階層性 に迫るための偏光角較 正装置の開発	平成26年度～ 平成27年度	田島 治	大学共同利用機関法人高エネルギー 加速器研究機構・素粒子原子核研究 所・准教授	1
D02 公	26105505 大型液体キセノン検出 器XMASSを用いた 超新星ニュートリノの 観測	平成26年度～ 平成27年度	平出 克樹	東京大学・宇宙線研究所・特任助教	1
D02 公	26105506 大気ニュートリノを用 いた地球内部の密度及 び化学組成の研究	平成26年度～ 平成27年度	保科 琴代	東京大学・地震研究所・特任研究員	1
D02 公	26105511 ハフニウム多層障壁層 窒化物超伝導体トンネ ル接合検出器の開発	平成26年度～ 平成27年度	赤池 宏之	名古屋大学・工学系研究科・准教授	1
D02 公	26105515 ニュートリノの質量階 層と超新星ニュートリ ノ観測イベントに関す る系統的研究	平成26年度～ 平成27年度	鈴木 英之	東京理科大学・理工学部・教授	1
D03 公	26105503 ニュートリノ質量模型 とレプトン数・フレーバ ーの破れた過程の関連	平成26年度～ 平成27年度	太田 俊彦	埼玉大学・理工学研究科・研究支援 者	1
D03 公	26105507 アナーキーと陽子崩壊	平成26年度～ 平成27年度	村山 斉	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究 機構・教授	1
D03 公	26105508 軽い右巻きニュートリ ノの宇宙物理と実験検 証	平成26年度～ 平成27年度	浅賀 岳彦	新潟大学・自然科学系・准教授	1
D03 公	26105509 輻射シーソー機構と宇 宙の暗黒セクター	平成26年度～ 平成27年度	青木 真由美	金沢大学・数物科学系・助教	1

D03 公	26105514 ニュートリノ質量起源 としての新型ヒッグス モデルの宇宙論的研究	平成26年度～ 平成27年度	瀬戸 治	北海学園大学・工学部・准教授	1
D03 公	26105517 超新星元素合成とニュ ートリノ振動	平成26年度～ 平成27年度	梶野 敏貴	国立天文台・理論研究部・准教授	1
D03 公	26105520 宇宙論によるニュート リノ質量階層性の決定	平成26年度～ 平成27年度	郡 和範	大学共同利用機関法人高エネルギー 加速器研究機構・素粒子原子核研究 所・准教授	1
D03 公	26105521 見えてきた高エネルギー ニュートリノ起源の 理論的解明	平成26年度～ 平成27年度	長瀧 重博	独立行政法人理化学研究所・長瀧天 体ビックバン研究室・准主任研究員	1

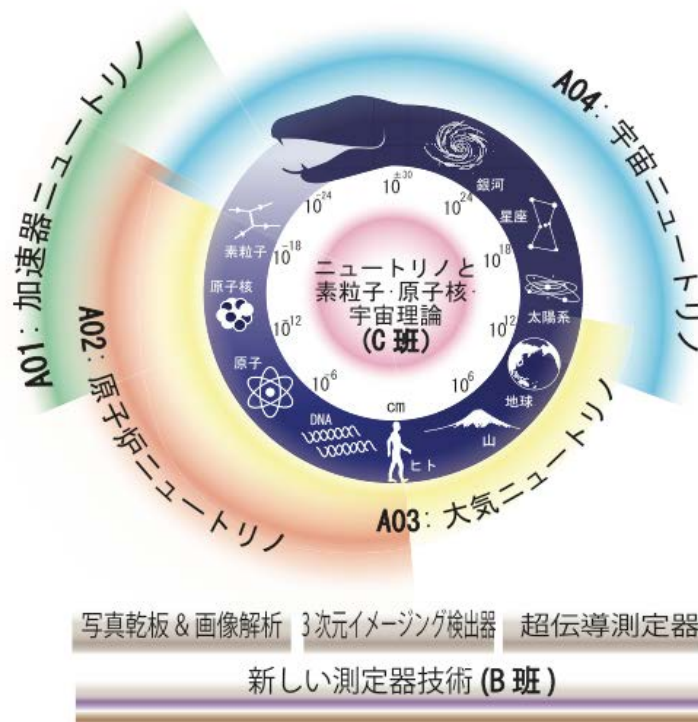
公募研究 計 20 件

# 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、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。

素粒子から宇宙のスケールに渉る自然の各階層で展開する、世界最先端を走る日本のニュートリノ研究を融合し、ニュートリノを使った科学研究フロンティアを進化・発展させる。本領域では、下図に示す研究テーマをカバーする世界の第一線の研究者集団を集め、「ニュートリノの質量と混合の解明に向けた基礎研究」、「ニュートリノによる自然観測」、「ニュートリノ研究をベースとした技術応用」を展開する。



日本における素粒子物理学の研究は、湯川、朝永、小柴、南部、小林、益川のノーベル賞に示されるように、国際的に極めて高い水準にある。特にニュートリノ研究は、小柴のノーベル賞受賞につながった1987年の超新星ニュートリノ観測から25年の間、ノーベル賞級の成果であるニュートリノ質量の発見、太陽ニュートリノ問題の解決、地球反ニュートリノの発見、3世代間ニュートリノ混合の確立、宇宙起源ニュートリノの発見、と世界第一級の成果をあげてきた。ただし、最近では中国、韓国等からも優れた研究結果が発表されるなど、競争が激しくなってきた。よって、日本のニュートリノ研究をより発展させるために、日本の研究者の力を融合し、新しい研究成果、新しいアイデア、新しい実験技術を創出し、「ニュートリノフロンティア」のさらなる進化を目指す。

ニュートリノの質量は他の素粒子よりずっと小さく、ニュートリノが他の素粒子とは大きく異なる性質をもつことを示唆している。その起源として、大統一理論を見据えたシーソー機構、超弦理論や余剰次元、複合粒子仮説等、様々な可能性が考えられる。起源の解明に向け、「加速器ニュートリノを使った素粒子、原子核実験」、「原子炉反ニュートリノを使った素粒子実験」、「大気ニュートリノと太陽ニュートリノの観測」等で、ニュートリノの性質（質量、混合、粒子と反粒子間のCP対称性）が研究されている。同時に、「地球反ニュートリノ、太陽ニュートリノ、宇宙ニュートリノ等の自然ニュートリノ観測」により、自然の様々な理解（地球内部の熱発生源の解明、太陽の核融合燃焼メカニズム確立、宇宙線起源の解明等）も進んでいる。理論研究において、牧・中川・坂田によるニュートリノ振動の提唱、柳田によるニュートリノ質量の理解（シーソー機構）、柳田・福来によるニュートリノ起源による物質優勢宇宙論モデルの提唱（レ



プトジェネシス) 等、ニュートリノが素粒子・宇宙の深部を探るユニークな手段となっている。

ニュートリノの基本性質を究明するために、加速器、原子炉、自然のニュートリノ源を組み合わせるニュートリノ振動の研究を総合的に進展させることはきわめて重要で、それが本領域の主目的である。複数の測定を組み合わせ、「ニュートリノ質量」の起源を探り、小柴により開拓されたニュートリノ天文学を発展させ、小林・益川により示された CP 対称性の破れをニュートリノで探索する、世界第一級の挑戦的な研究を進める。

ニュートリノフロンティアを推進する目的で、次の 3 つの研究項目を設定している。

- **研究項目 A:** 世界の先端を走る、T2K 加速器実験 (A01)、Double Chooz 原子炉実験 (A02)、スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ観測 (A03)、Ice Cube による宇宙ニュートリノ観測 (A04) の研究を進め、「ニュートリノの基本性質 (質量、混合、粒子と反粒子の違い)」を解明する。また、「ニュートリノ天文学」を開拓し、超高エネルギーの宇宙像を描く。ニュートリノを使った応用研究として、小型ニュートリノ原子炉モニターを実現する。A01、A02、A03 ではニュートリノ振動を加速器、原子炉、大気ニュートリノのそれぞれで測定し、相補的にニュートリノ振動パラメータ (質量 2 乗差、質量階層性、混合角  $\theta_{13}$ 、 $\theta_{23}$ ) を数%の精度で決定する。パラメータの高精度測定により、ニュートリノの CP の破れを探求し、さらには「世代間混合の起源」解明を目指す。A03、A04 では大気ニュートリノと宇宙ニュートリノの同時観測を実施し、宇宙ニュートリノ観測の感度を一桁向上させる。
- **研究項目 B:** 将来のニュートリノフロンティア展開の基幹となる最先端実験技術の研究開発を行う。ナノスケールの超高精度で粒子を測定する写真乾板技術 (B01)、マイクロ電子ボルトの超高エネルギー分解能を持つ超伝導トンネル接合素子 (STJ) を使った遠赤外線センサー (B02)、粒子反応の 3 次元イメージングが可能な液体アルゴン検出器 (B03) の研究開発を行う。B01 は、写真乾板の原子核乳剤の独自開発を行い、感度と位置分解能の向上した高精度フィルムの供給を可能とする。このフィルムにより、 $\sim 10\text{nm}$  の反応点分解能をもつニュートリノ測定器が実現できる。B02 は、遠赤外線 (数 10meV) を 2%以下のエネルギー精度で測定できる Nb/Al-STJ を開発し、ロケット観測で宇宙背景ニュートリノ崩壊起源の赤外線を探索する。B03 は、大型液体アルゴン検出器実現の各要素 (高電圧、電子の長距離ドリフト、低温環境での電子回路) 開発をすすめ、荷電粒子やニュートリノ検出性能を確認する実証機を製作し、総合試験を行う。
- **研究項目 C:** ニュートリノに関する理論的研究を広い範囲で進める。素粒子 (C01、C03)、原子核 (C02)、宇宙 (C03) の各分野 (+境界領域) で有機的に研究を発展させる。研究項目 A・B と協力して、ニュートリノで見る新しい自然像を確立する。C01 は研究項目 A と密接な連携を取り、ニュートリノ混合のパラメータ決定のための現象論研究をすすめ、実験計画に指針を与える。C02 はニュートリノ振動実験 (特に A01、A03) の精度向上にむけ、ニュートリノ原子核反応の統一的な標準反応モデルを構築する。C03 はニュートリノを足がかりとして、ニュートリノ質量と混合の起源、素粒子の起源や宇宙の成り立ちに関する未解決問題に取り組み、素粒子と宇宙理論の全体像に迫る。

全計画研究班が有機的に連動することで、ニュートリノフロンティアの融合と進化が実現する。

領域ホームページ : <http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/nufreontier/>

## 2. 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ごとに整理する〕（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、現在までに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ごとに記述してください。

### ・ 計画研究 A01 [加速器ニュートリノ]

加速器で生成するニュートリノビームを利用し、世界最高精度でニュートリノ混合行列を決定する。T2K 実験では、世界で最初にミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動を発見し、未知の混合角  $\theta_{13}$  がゼロでないことを突き止めた。この発見により、ニュートリノでの CP 対称性の測定が現実的となった。本研究で、ニュートリノ振動の精密測定を行い、さらに CP の破れを探索する。H27 年 6 月の時点で、本研究により次の成果が達成できた。[1]電子ニュートリノ出現の発見（信頼度  $7.3\sigma$ ）、[2]ニュートリノ CP 対称性のパラメータ  $\delta_{CP}$  の測定。信頼度 90%で  $0.15\pi < \delta_{CP} < 0.83\pi$  [ $\Delta m_{32}^2 > 0$  の場合]、 $-0.08\pi < \delta_{CP} < 1.09\pi$  [ $\Delta m_{32}^2 < 0$  の場合]の領域を排除。[3]ニュートリノ振動パラメータ  $\theta_{23}$  と  $\Delta m_{32}^2$  の精密測定、[4]ニュートリノ振動パラメータ  $\theta_{23}$ 、 $\Delta m_{32}^2$ 、 $\delta_{CP}$  の同時決定、[5] 反ニュートリノビームを使った反ニュートリノ振動の測定。以上のように、研究は当初計画以上に進んでおり、当初の物理目標であるニュートリノ振動のパラメータの精密測定とニュートリノ CP の決定にあと一步の所に迫っている。

### ・ 計画研究 A02 [原子炉ニュートリノ]

フランス Chooz 原子力発電所における Double Chooz 実験の前置検出器を建設し、精度  $\delta \sin^2 2\theta_{13} \sim 10\%$  でのニュートリノ振動角  $\theta_{13}$  測定を行うことが本計画研究の主要な目的である。前置検出器は H26 年 12 月に完成し、H27 年 6 月現在前置後置両検出器での同時データ取得中である。後置検出器のみのデータから  $\sin^2 2\theta_{13} = 0.09 \pm 0.03$  の測定結果が得られ、H26 年 10 月に論文刊行された。また、我々が得意とする液体シンチレータ検出技術、反電子ニュートリノ検出技術を応用した全く新しい原子炉の遠隔モニター検出器の開発を行っている。これは IAEA でも開発すべき新技術と位置づけられている。東京大学の PANDA、東北大学の KASKA プロトタイプとも検出器の改良試験・設計が終了し最終形の製作段階に入っている。原子炉での実測定は日本の原子力発電所の再稼働の状況を注視している。その他、水をベースとしたシンチレータの開発など将来実験に役立つ技術開発も行った。

### ・ 計画研究 A03 [大気ニュートリノ]

三世代ニュートリノ構造からのずれの検証を行い、第四のニュートリノの混合とローレンツ不変性を破るニュートリノ振動パラメータに対し新たな制限を付け、各々論文として発表した。また、大気ニュートリノによる質量階層構造研究を究極化するため、領域内のニュートリノ相互作用の最新研究結果（A01、C02）や、加速器（A01）・原子炉（A02）・太陽ニュートリノ研究成果を取り入れた総合解析の枠組みを確立し、予備的な研究結果を得た。さらに高性能事象再構成アルゴリズムの開発を進め、研究感度向上の見通しが得られた。

次世代大型ニュートリノ実験ハイパーカミオカンデ計画では、国際研究グループを正式に発足させ、世界 13 カ国の参加者と協力して実験実現を目指す体制を整えた。また包括的な要素開発と実験装置設計作りを推進した。

### ・ 計画研究 A04 [宇宙ニュートリノ]

TeV-PeV 宇宙ニュートリノ同定では、TeV-PeV 領域の宇宙ニュートリノを  $5\sigma$  以上の統計的有意性で同定し、エネルギー分布、流量を測定する。現在までにこの目標はすでに完遂し、大気由来雑音事象に比して  $5.7\sigma$  の優位性で宇宙ニュートリノ信号の卓越を検出するとともに、流量値、スペクトル、到来方向分布の

描画にも成功した。この進展を受けて高エネルギーニュートリノ検出器開発を加速的に進めることとなり、宇宙ニュートリノ同定解析での経験から大気ミュオン・ニュートリノの veto 能力が鍵となることを考慮し、光子入射角に依存しない検出効率を持つ検出器モジュール D-Egg をデザインし、基礎開発と試験を終了した。高エネルギー領域における大気ニュートリノ測定によって宇宙ニュートリノ検出の系統誤差を減らし、素粒子物理へのインプットを提供することも目標である。測定技法開発を全データの10%にあたる sample を試験的に使って遂行した。スケジュールどおりに進展しており、今夏に最初の結果を発表できる見込みである。

#### ・ 計画研究 B01 [原子核乾板技術]

研究項目：①物理的に最適な原子核乳剤を開発・製造し、実験に供する事が出来る環境を整備する。：ほぼ完了。②原子核乳剤の3次元空間解像力の向上ほか高感度化、高性能化を推進する。：これまでに記録飛跡の長期保存特性改善に成功。③高精度に膜厚調整されたフィルムの製造装置を開発し、フィルムの供給を可能とする。：施設を立ち上げ年間 300 m<sup>2</sup>程度の塗布能力を実現。実際のテスト実験、気球実験、応用実験に使用。

#### ・ 計画研究 B02 [超伝導トンネル結合素子技術]

本研究では、宇宙背景放射と同様に宇宙初期に生成され、宇宙空間に一樣に存在すると予言されている「宇宙背景ニュートリノ」の崩壊探索を行うために、ニュートリノ崩壊時に発生する 25meV 域の遠赤外線のエネルギーを一光子ごとに2%以下の精度で測定する超伝導トンネル接合素子(Superconducting Tunnel Junction, STJ) 検出器を開発している。宇宙赤外線観測ロケット実験に用いる Nb と Al を超伝導素材とする Nb/Al-STJ 検出器の開発では S/N 比を改善するために、極低温で動作する SOI プロセスによる MOSFET を用いた前置増幅器の基板上に Nb/Al-STJ をプロセスした SOI-STJ 一体型検出器を設計製作して、性能試験を行い、SOI-MOSFET と STJ が共に 0.4K で正常に動作することを検証した。このように世界で初めての SOI-STJ 一体型検出器の開発を順調に進めている。また人工衛星搭載実験に用いる Hf-STJ 検出器の開発研究でも、世界初の Hf-STJ の光応答信号の検出に成功するなど開発を順調に進めている。

#### ・ 計画研究 B03 [液体アルゴン TPC 技術]

液体アルゴン3次元飛跡イメージング検出器は、素粒子を視覚的にリアルタイムで捉えることのできる現代版電子泡箱と言える夢の検出器で、その検出器性能の高さから将来の様々な実験で有望な検出器である。だが、検出器の大型化には (A) 大型化する技術と安価な検出器を作製する技術を培い、(B) 検出器応答理解のため、運動量・粒子の種類等良く理解された荷電粒子を使うビームテストを行う必要がある。(A) コストを抑えながら大型化する技術の確立のため、(a) 電離電子信号増幅部を特定用途向け集積回路(ASIC)として開発し、(i) コッククロフト型装置を使い測定装置内部で高電圧を生成し、(う) 高純度達成のために、モニター用光検出器の開発を行った。また、(B) 荷電粒子応答をデータによって理解するために、米国フェルミ研究所で行われている LArIAT (LAr TPC In A Test-beam) 実験に参加し、良く理解された 100MeV~数 1000MeV の荷電粒子  $\pi/p/\mu/K/e$  をビームとして使って、試験を行った。この試験で使用する液体アルゴン低温容器の規模は容量 0.7 トンである。

#### ・ 計画研究 C01 [ニュートリノ現象論]

研究目的と研究状況は以下の通りである。(1) 3世代ニュートリノ混合の枠組でのパラメーターの精密決定をするための現象論を研究するという目的に対しては、ニュートリノ振動確率に対する解析的表式の

非断熱的遷移への拡張・非一様な物質密度の場合の物質効果のフーリエ解析を行い、より議論を精密にするための方法を整備した。(2) ニュートリノで探索できる新物理の現象論を研究するという目的に対しては、非標準的相互作用を持つ3世代ニュートリノと非標準的ポテンシャルを持つステライルニュートリノの枠組みに対する大気ニュートリノからの制限を議論し、ニュートリノの質量とレプトンの混合を説明する輻射模型(KNT 模型の拡張)において非標準相互作用やニュートリノを出さない二重ベータ崩壊の大きさがどの程度になるかを議論した。(3) 加速器実験等における荷電レプトンを通して得られる新物理への制約を研究するという目的に対しては、IceCube Gap と  $\mu$  粒子の異常磁気能率を説明する模型を提唱してその現象論を議論し、COMET 実験・LHC 実験でのレプトンフレーバーの破れと T2K での非標準相互作用探索の可能性を議論した。

#### ・ 計画研究 C02 [原子核反応理論]

研究目的は、原子核を標的とするニュートリノ実験の解析に不可欠な、広いエネルギー領域にわたるニュートリノ原子核反応の模型を構築することである。核子共鳴領域では、電子線、光子及びパイ中間子をプローブとする核子における中間子生成反応を包括的に記述する模型からはじめ、ニュートリノ核子反応模型を構築する。次にこれを用い、原子核効果を取り入れたニュートリノ原子核包含反応模型を構築する。深非弾性領域では、最新の JLab と NuTeV のデータを含めた解析を行い、大きい  $x$  領域を含めてパートン分布関数の原子核補正を正確に把握し、ニュートリノ原子核深非弾性散乱断面積の基準模型を構築する。最終的にこれらを統合した反応模型を構築する。これまでに、 $\pi$ ・光子・電子と核子の中間子生成過程を、包括的に記述する反応模型を開発し、これを拡張してニュートリノ反応模型の構築に成功した。また深非弾性散乱領域における、NuTeV のニュートリノ散乱、JLab の電子散乱のデータ解析を進めているなど、研究は当初の計画どおり順調に進んでいる。

#### ・ 計画研究 C03 [素粒子・宇宙理論]

本研究の目的は、ニュートリノ物理を足がかりとして、素粒子の起源や宇宙の成り立ちに関する未解決問題に取り組み、素粒子・宇宙理論の全体像に迫ることである。これまでの研究で、ヒッグス場、宇宙、超弦理論がどのように関連しているのか、ニュートリノを核として多方面からアプローチしている。特に、新しい素粒子模型の構築、暗黒物質シナリオの検証法の考察や、超弦理論の示唆する宇宙紐の考察など、ユニークな研究を多く生み出している。今後、より大きな枠組みの構築へ向けた準備が整備されつつある。また、研究会の開催を通じて、国内外の研究者のネットワークが強固なものとなり、多くの共同研究を生み出すきっかけとなっている。

### 3. 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（2 ページ程度）

審査結果の所見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。

計画研究 A04 の代表者である吉田は、基盤研究(S)も採択されており、研究の重複がないように研究計画を検討するように指摘された。これを受けて双方の研究計画を慎重に再編・最適化した結果、本新学術領域研究では TeV-PeV 領域の宇宙ニュートリノ及び大気ニュートリノ測定を実施するのに対して、基盤研究(S)では、100PeV-100EeV(1EeV=1000 PeV)領域における超高エネルギー宇宙ニュートリノ探索に特化し宇宙のエネルギーフロンティアをニュートリノで探るという目的に絞って研究を遂行することとした。

両者とも実験プロジェクトとしては IceCube 実験が中心となるが、1000 倍もエネルギー範囲が異なることにも起因して、TeV-PeV 領域での解析手法と EeV 領域での解析手法は大幅に異なる。また対象となる物理も異なるため、サイエンスの観点からも実験遂行の観点からも相補的であって重複は存在しない。

IceCube 実験を強化する将来実験として ARA 実験を推進することも本計画研究の当初の柱であった。ARA 実験は電波放射検出という技術を使うため、検出可能なニュートリノのエネルギーは高く、EeV 領域が主である。このため IceCube 実験に隣接して建設される ARA 実験は、IceCube 実験の超高エネルギー領域への拡張として位置づけられてきた。このため ARA 実験は主として基盤研究(S)の研究計画として実施し、本計画研究領域では、ARA 実験のニュートリノ検出エネルギー閾値を PeV 領域に下げたための基礎研究のみを行うことに変更した。電波放射の機構と検出器応答の理解が精緻になれば十分可能な目標であり、実現できれば、本計画研究の主目的の一つである PeV 領域の宇宙ニュートリノ測定に資するものが大きいからである。

この再計画に従って平成 25 年度-26 年度の研究を進めてきたが、途中で情勢の変化が起こった。IceCube 実験による TeV-PeV 領域の宇宙ニュートリノの同定には、3 年程度かかる見込みであったが、解析が非常にうまく進み、1 年目でこの目標をほぼ達成することに成功した。この予想を上回る進展によって IceCube 実験本体の拡張建設をできるだけ早期に開始する機運が高まり、アメリカ・ヨーロッパの IceCube 実験グループは次期実験の検出器開発に着手した。この情勢下では、PeV エネルギー宇宙ニュートリノによる天文学開拓という本計画研究の基幹テーマの推進にとって IceCube 実験本体の拡張実験検出器開発に優先して取り組むほうが、より近道かつ本質的な道筋である。このため、本計画研究における ARA 実験への関与を、既に遂行した研究の取りまとめを除いては中止し、その分のリソースを IceCube 次期拡張実験のための検出器開発に前倒しで振り分けて、日本の国際競争力を維持・発展させることに方針転換した。基礎開発研究を既にスタートさせ、短波長紫外光の透過率を現状の 4 倍に高めた耐圧ガラス球の製作に成功するなどの実績を達成し、海外のライバルグループからも高い評価を得ている。引き続き検出器開発を TeV-PeV 宇宙ニュートリノ同定、高エネルギー領域における大気ニュートリノ測定に並ぶ計画研究 A04 の 3 本柱の一つとして推進する。

#### 4. 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 ページ程度)

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。

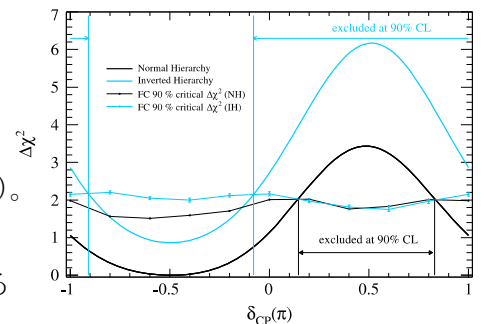
#### ・ 計画研究 A01 [加速器ニュートリノ]

##### 【1】電子ニュートリノ出現の発見（信頼度 $7.3\sigma$ ）

T2K 実験で、ニュートリノビームの大強度化、大量データ収集、物理解析の高度化を行ったことで、ミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの振動の信号を 28 事象観測し、 $7.3\sigma$  の信頼度で電子ニュートリノ出現を発見した（文献[A01-4]）。

##### 【2】ニュートリノ CP 対称性のパラメータ $\delta_{CP}$ の測定（信頼度 90%）

電子ニュートリノへの振動の確率を測定し、原子炉反ニュートリノによる  $\theta_{13}$  の測定結果(2012 年度の測定値平均  $\sin^2\theta_{13}=0.098\pm 0.013$ )  $\Delta\chi^2$  と組み合わせることで、世界で初めて  $\delta_{CP}$  に制限を課した（文献[A01-4]）。 $\delta_{CP} = -0.5\pi$  が測定値であり、 $0.15\pi < \delta_{CP} < 0.83\pi$  [ $\Delta m_{32}^2 > 0$  の場合]、 $-0.08\pi < \delta_{CP} < 1.09\pi$  [ $\Delta m_{32}^2 < 0$  の場合]の領域を 90%の信頼度で排除することに成功した（図）。



##### 【3】ニュートリノ振動パラメータ $\theta_{23}$ と $\Delta m_{32}^2$ の精密測定

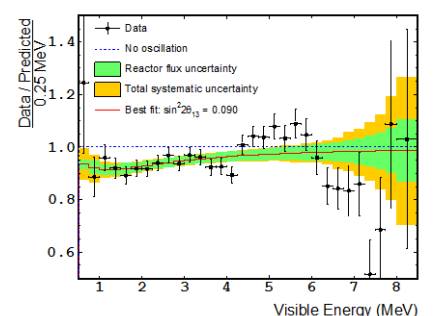
ミューオンニュートリノ消失モードを測定することで、世界最高の精度で  $\sin^2\theta_{23}=0.514^{+0.055}_{-0.056}$  と測定した（文献[A01-9]）。また、 $|\Delta m_{32}^2|=(2.51\pm 0.10)\times 10^{-3}\text{eV}^2$  [ $\Delta m_{32}^2 > 0$  の場合]、 $(2.48\pm 0.10)\times 10^{-3}\text{eV}^2$  [ $\Delta m_{32}^2 < 0$  の場合]も世界記録（誤差 0.09）とほぼ同精度を達成した。また、前ページの研究目的で述べた  $\theta_{23}$  と  $|\Delta m_{32}^2|$  を、それぞれ 10%と 3%の精度まで後一步に迫っている（現状は 11%と 4%）。

##### 【4】反ニュートリノビームを使ったニュートリノ振動の観測

2014 年に反ニュートリノビームの生成に成功し、その後  $4\times 10^{20}$  陽子のデータを蓄積することに成功した。このデータの一部を用いて、2015 年 5 月に反ニュートリノ振動のパラメータ  $\bar{\theta}_{23}$  を  $\sin^2\bar{\theta}_{23}=0.515^{+0.085}_{-0.095}$  と世界最高精度で測定することに成功した。

#### ・ 計画研究 A02 [原子炉ニュートリノ]

後置検出器データのガドリニウム中性子捕獲事象のスペクトル解析から、 $\sin^2\theta_{13}=0.09\pm 0.03$  の測定結果を得た（図）。この原子炉ニュートリノスペクトルに見られる 5MeV での理論予測との食い違いは Double Chooz 実験が平成 26 年に他実験に先駆けて発表し、核分裂生成物の  $\beta$  崩壊スペクトルの理論計算方法に一石を投じることとなった。現在活発に議論が行われている。スペクトルを用いず原子炉出力との相関のみからバックグラウンド



と  $\theta_{13}$  を同時に求める方法（Reactor Rate Modulation）を開発し、上記結果と矛盾しない値を得ている。原子炉モニターは双方のタイプとも性能試験を行い国際会議で発表した。この結果を最終形検出器の設計にフィードバックしている。水を用いたシンチレータの基礎特性測定結果も測定器国際会議で発表した。

#### ・ 計画研究 A03 [大気ニュートリノ]

三代目ニュートリノ構造からのずれの検証を行い、第四のニュートリノの混合に対し  $|U_{\mu 4}|^2 < 0.041$ 、 $|U_{\tau 4}|^2 < 0.18$  と新たに制限をつけ、ローレンツ不変性を破るニュートリノ振動パラメータに対しこれまでより 7 けた強い制限を与える結果を得て、各々論文に発表した。また大気ニュートリノの質量階層構造決定感

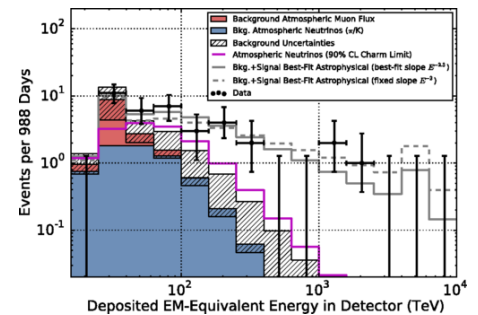
度の改善を行い、予備的な結果として正順階層構造が示唆されたが優位性は $1\sigma$ 程度と低く、さらなる解析の改善や観測データが必要とされることが判明した。

ハイパーカミオカンデでは、世界13カ国が参加する国際研究グループを正式に発足させた。技術開発に於いては、現行実験スーパーカミオカンデの約2倍の高感度の大口径光電子増倍管(図)を実現し、また時間測定精度が現行の2.1nsecから1.1nsecに改善された。長期線ニュートリノ振動研究の感度研究により、ニュートリノのCPの破れパラメータが19度以下の不定性で決定できる見込みであることや、 $3\sigma$ ( $5\sigma$ )以上の有意性でCPの破れが発見できるCPパラメータの割合が76%(58%)である事が示され、論文に発表した。



・ **計画研究 A04 [宇宙ニュートリノ]**

PeVのエネルギーを持つニュートリノ事象を発見した解析の threshold energy を下げることに成功した。この結果、宇宙ニュートリノは少なくとも 60 TeV 以上からほぼエネルギーにべき乗のスペクトルで PeV まで伸びていることが分かった(図)。その最初の成果はサイエンス誌に掲載され、2013年取得の最新データを使って更に高統計で測定した結果を PRL に出版した。信号は $5.7\sigma$ の優位性で雑音事象に卓越し、宇宙ニュートリノの発見を正式にクレームした。また流量もフレーバーあたり  $10^{-8}$  GeV/cm<sup>2</sup> sec sr であるという値が得られた。高エネルギーニュートリノ検出器開発では、波長域350nm以下の紫外線領域でも透過度を保つ耐圧ガラス球の製作に成功し、IceCube実験検出器に比して4倍の感度向上を達成した。



・ **計画研究 B01 [原子核乾板技術]**

以下、本研究で開発した装置・施設で製造した原子核乾板を用いた、あるいは前提にしたものである。

2015年5月：高感度原子核乾板を搭載した $\gamma$ 線観測用気球のフライトの成功 ([http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2015/0512\\_balloon.shtml](http://www.isas.jaxa.jp/j/topics/topics/2015/0512_balloon.shtml))。

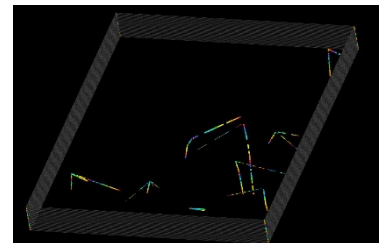
2015年3月：福島第一原子力発電所2号機・5号機の透視結果を発表。

2014年10月：新乳剤製造装置稼働開始。

2014年10月：低エネルギー $\nu$ 反応研究の為のテスト実験 JPARC T60 のビーム照射を A01 と共同で開始 (図は記録されたニュートリノ反応群)。

2014年4月：タウニュートリノ反応研究を含む SHIP 実験の実験・技術提案書を CERN SPSC へ提出。 (<http://ship.web.cern.ch/ship/>)

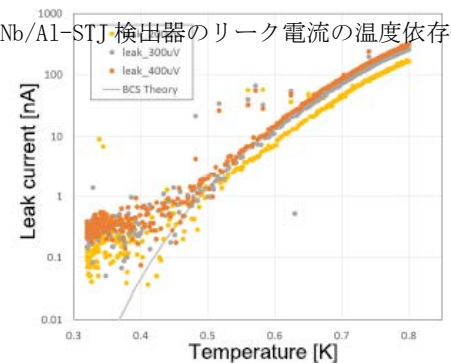
2014年2月：新原子核乾板塗布室稼働開始。



・ **計画研究 B02 [超伝導トンネル結合素子技術]**

本研究では、宇宙赤外線観測ロケット実験に用いる遠赤外線光を検出する超伝導トンネル接合素子 (STJ) 検出器を開発している。Nb と Al を超伝導素材とする Nb/Al-STJ 検出器についてはロケット実験のための実験要求値であるリーク電流 0.1nA を下回る STJ の作成に成功した。これによって、平成 24 年度に比較すると、S/N 比は 100 倍程度改善した。さらに S/N 比を改善するために、極低温で動作する前置増幅器の開発を行っており、SOI (Silicon-On-Insulator) の MOSFET が極低温 0.4K で動作することを検証した。また SOI 前置増幅器基板

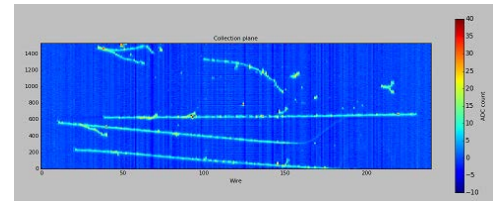
50  $\mu$ m 角の Nb/Al-STJ 検出器のリーク電流の温度依存性。



上に Nb/Al-STJ をプロセスした SOI-STJ 一体型検出器を設計製作して、性能試験を行い、SOI-MOSFET と STJ が共に 0.4K で正常に動作することを検証した。このように世界で初めての SOI-STJ 一体型検出器プロトタイプを作成し、その基本動作が正常であることを確認した。また Hf-STJ 検出器の開発研究で、ハフニウムとしては世界初の STJ として動作し、光応答信号を出すことを確認するという実績をあげた。

#### ・ 計画研究 B03 [液体アルゴン TPC 技術]

(A) (あ) 読出回路ASIC化はまず常温性能確認を行い、測定器容量100pFに対し宇宙線信号読出評価で信号雑音比10以上を達成し (い) 高電圧生成装置は安価化のためコッククロフト型装置を使い、50kV以上の高電圧生成を達成し (う) 高純度達成のためのモニター開発は、波長変換剤TPBを光電子増倍管に真空蒸着し紫外光を検出できることを確認した。(B) 荷電粒子応答確認実験はH26年度までに、実験のデザイン・荷電粒子ビームラインのデータを使った理解を進め、H27年5月1日に、初めてのビームを使った3次元飛跡イメージを捉えた (図)。現在高統計のデータ取得を続けている。



#### ・ 計画研究 C01 [ニュートリノ現象論]

主な研究成果は以下の通りである。(1) 3世代ニュートリノ混合の枠組の研究では、ニュートリノ振動確率に対する非断熱的遷移の寄与の解析的な表式を得る道筋が得られた；非一様な物質密度の場合の物質効果のフーリエ解析の方法に見通しが得られた。(2) ニュートリノでの新物理の研究に対しては、ニュートリノの伝播中の非標準的相互作用に対するハイパーカミオカンデの感度が現状の一桁程度の改善であることがわかった；LSND と MiniBooNE の違いを物質効果で説明する非標準的ステライルニュートリノの仮説は排除された。(3) 荷電レプトンを通して得られる新物理の研究に対しては、COMET・LHC・T2K でのレプトンフレーバーの現状の制約を考慮した結果、前二者についてはレプトンフレーバーの敗れの検出可能性が有り、後者についてはハイパーカミオカンデなどより将来の実験を期待する必要があるという結論を得た； $\mu$ 数と $\tau$ 数の差をゲージ化したモデルで IceCube Gap と  $\mu$ 粒子の異常磁気能率を同時に説明出来る可能性があることを示した。

#### ・ 計画研究 C02 [原子核反応理論]

これまで開発してきたチャンネル結合反応理論を用い、およそ2万点に及ぶ核子標的の中間子生成反応データを解析した。その結果 $\pi$ 、 $2\pi$ 、 $\eta$ 、 $K$ などの中間子生成過程を包括的に記述する反応モデルを構築し、振幅解析から20個の核子共鳴( $N^*$ 、 $\Delta$ )を見だし、質量・分岐比などの情報を抽出した。さらに電子散乱、ニュートリノ反応の解析をすすめ、世界で始めて、深非弾性領域に接続可能な、ニュートリノ反応モデルが構築された。このモデルにより、ニュートリノによる最も重要な $1\pi$ 中間子生成断面積のみならず、 $\eta$ 、 $K$ 中間子生成や $2\pi$ 中間子生成断面積の情報も得られるようになった。また、Ab initio 原子核理論計算が可能な、重陽子や $4\text{He}$ ニュートリノ反応の解析を行った。終状態相互作用を取り入れた重陽子分解ニュートリノ反応の解析から、 $\Delta(1232)$ 領域における従来の解析では、場合により $\pi$ 中間子生成断面積を2倍近く過大評価することが示された。このことは重陽子データから抽出された核子反応断面積を再検討する必要性を示している。

#### ・ 計画研究 C03 [素粒子・宇宙理論]

これまで研究代表者・研究分担者により29本の論文が発表され、学術雑誌に掲載されている。宇宙のインフレーション直後に右巻きニュートリノが生成され、それが暗黒物質として残存するシナリオが、宇宙のバリオン数生成と興味深い整合性をもつことの発見、また、ICECUBE 実験において発見された高エネ

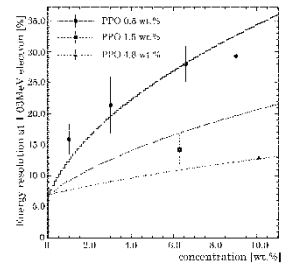


ルギーニュートリノの起源の考察やそのスペクトル構造が示唆する新しい相互作用の指摘、また、超弦理論の示唆する宇宙紐から生成する粒子への宇宙観測からの制限など、様々な興味深い結果が得られている。

- ・ 公募研究より抜粋

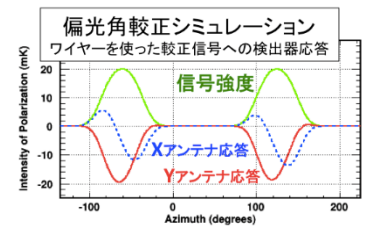
- ・ D01：ジルコニウム96を用いた2重ベータ崩壊事象探索実験用液体シンチレータの開発

ジルコニウム・βケトエステル錯体のアニソールに対する溶解度は30wt.%以上であり、Zrの溶解量が70g/Lに達することがわかった。また、PPOの溶解量を0.5wt.%から4.8wt.%まで増加させた場合、錯体を10wt.%溶解させた液体シンチレータの発光量は標準シンチレータの $48.7 \pm 7.1\%$ 、エネルギー分解能は $13.0 \pm 2.0\%$ @1.03MeVが得られた(図)。これは光電子増倍管の集光率40%のZICOS実験において $4.1 \pm 0.6\%$ @3.35MeVに相当し、本年度の目標を達成できた。



- ・ D01：CMB偏光観測からニュートリノ質量階層性に迫るための偏光角較正装置の開発

宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測からニュートリノ質量和の測定を行うには、高精度の偏光角較正手法の確立が必須である。本研究は、わずか一本の金属ワイヤーで望遠鏡の偏光角を較正する手法を開発した。チリ・アタカマ高地で観測中の望遠鏡にて偏光角の較正試験を行い、数百個ある検出器を同時に較正することに成功した(右図のシミュレーションに相当する信号を確認した)。



- ・ D01：原子核乾板検出器を用いた短基線ニュートリノ振動実験

ニュートリノ振動現象観測のために、エマルジョン積層チェンバー(ECC)で標的を構成することにより、新しい感度でのGeVからsubGeV領域でのニュートリノ反応の測定を目指している。原子核乾板の製作から解析までを研究組織内で行う。使用する新型高銀含有原子核乾板は、名古屋大学において自主製作を行った。製作した原子核乾板の感度評価を行い、従来よりも高い感度を確認した。ECCを構成し、ニュートリノビームの照射実験を行い、ニュートリノ反応の観測に成功した(A01、B01との共同研究)。

- ・ D02：ハフニウム多層障壁層窒化物超伝導トンネル接合検出器の開発

Hf障壁層窒化物トンネル接合検出器を実現すべく、検出器用材料としてNbNより適したNbTiNに着目し、薄膜成膜条件を検討した。その結果、臨界温度14.8Kを達成し、また、応用上重要な抵抗率などの物性パラメータを得た。また、独自障壁層によるトンネル接合を作製、その接合特性評価から、超伝導電極材料として適用できることがわかった。一方、障壁層材料として用いるHfについては、接合応用に適した比較的小さな抵抗率を有する薄膜の成膜条件を見出すとともに加工法を確立した。さらに、HfO<sub>x</sub>障壁層NbTiN接合等を作製し、エネルギーギャップを反映した準粒子トンネル特性を得ることができた。

- ・ D02：ニュートリノの質量階層と超新星ニュートリノ観測イベントに関する系統的研究

中里らとの連携により、超新星ニュートリノデータベースから予測される銀河中心超新星の観測データに対し、統計的な解析を用いた研究を行った。ニュートリノの質量階層については、アクリーション段階でイベント分布に定性的な違いが現れるものの、統計誤差などを考慮すると識別は難しいことがわかった。また、これらの超新星ニュートリノのモデルを計算するために必要となる高密度物質の状態方程式について、石塚らとの共同でデータベースを作成し公開した。

・ D03 : ニュートリノ質量模型とレプトン数・フレーバーの破れた過程の関連

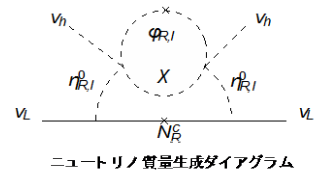
代表的なレプトン数の破れた過程である「無ニュートリノ二重ベータ崩壊過程」に関連する新物理を、有効相互作用として書き下し、それを導出することができる高エネルギー物理模型を網羅的に調べ上げ、それらの模型と輻射ニュートリノ質量模型の間の関係を系統的に議論した。これにより将来実験(無ニュートリノ二重崩壊実験、振動実験、宇宙論的観測量)の結果がニュートリノに新物理を要請した際に、ニュートリノ質量の起源に迫る具体的な道筋を示した。(JHEP 1505 (2015) 092, arXiv.1502.05118)

IceCube 実験で観測された高エネルギーニュートリノのエネルギースペクトルの部分的欠損と、ミューオンの異常磁気能率を同時に説明する理論模型を提案した。(PRD91 (2015) 037301, arXiv.1409.4180) 本研究の完遂にあたり、A04 班 吉田滋教授(千葉大)の協力を仰いだ。

軽い中性超対称ゲージフェルミオン(ニュートラリーノ)が暗黒物質であるシナリオを、LHC でテストする方法を議論した。また現在の実験からの制限を考慮した上で、可能な質量下限値を導出した。(JHEP 1411 (2015) 106, arXiv.1410.5730)

・ D03 : 軽い右巻きニュートリノの宇宙物理と実験検証

本公募研究では、ニュートリノ質量、および宇宙物質の起源を説明する新しい素粒子「軽い右巻きニュートリノ」の実験探索について研究を行った。まず、 $\pi$ 中間子、K 中間子崩壊のレプトンユニバーサルティによる探索可能性を検討し、今後の J-PARC 実験等により検証できる新粒子の質量、混合角がわかった [T. Asaka, et. al. Phys.Lett. B742 (2015) 303-309.]. また、SHiP 実験計画で探れる物理を総括する論文作成に携わり、新粒子が引き起こす素粒子・宇宙現象について、これまで得られた研究成果を発表した [S. Alkhin, W. Altmannshofer, T. Asaka, et al. arXiv:1504.04855.].



・ D03 : 輻射シーソー機構と宇宙の暗黒セクター

輻射シーソー模型は、ニュートリノ質量を輻射補正によって説明する模型である。我々は標準模型を拡張し、図のような2ループダイアグラムによってニュートリノ質量が生成される模型を議論した。この模型は複数の暗黒物質候補を含むが、それぞれが適当な割合を占めることにより、ニュートリノ振動実験や宇宙観測と矛盾しない模型が構築できることがわかった。さらにそうした模型は、将来の暗黒物質の直接探索において検証が可能であることも示された。

・ D03 : 宇宙論によるニュートリノ質量階層性の決定

将来の 21cm 線観測を用いて、ニュートリノのレプトン非対称性を検出する方法を提案する論文を発表した (Kohri, Oyama, Sekiguchi, T. Takahashi, 2014)。レプトン非対称性は宇宙の正味のレプトン数を意味し、宇宙のバリオン数と密接な関係がある。そのため、その検出は基礎物理学において極めて重要な意味がある。近い将来に稼働予定の Square Kilometer Array (SKA) による 21cm 線データを用い、他の方法では実現できない精度(1%以下)で検出できることを示した。

・ D03 : 見えてきた高エネルギーニュートリノ起源の理論的解明

本公募研究では高エネルギーニュートリノ起源天体を理論的に探っている。我々は特に巨大な超新星爆発「極超新星爆発」がこの高エネルギーニュートリノの起源天体であると予想し、その理論計算を行った。これまでの超新星残骸研究で開発してきた非線形粒子加速コードを極超新星残骸に応用し、高エネルギー粒子がどれだけ極超新星残骸で生成されるかを評価した。また得られた宇宙線がガスと相互作用し、どれだけ高エネルギーニュートリノ・ガンマ線を生成するかを評価した。

## 5. 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）

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。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。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。また、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。

### 発表論文（全 159 篇）

#### ・計画研究A01

1. “Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam”, A.K.Ichikawa, A. Minamino, T. Nakadaira, T.Nakaya et al.(T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. 112, 061802 (2014). 査読有 被引用回数155
2. “Precise Measurement of the Neutrino Mixing Parameter  $\theta_{23}$  from Muon Neutrino Disappearance in an Off-axis Beam”, A.K.Ichikawa, A. Minamino, T. Nakadaira, T.Nakaya et al. (T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. 112, 181801 (2014). 査読有 被引用回数74
3. “Evidence of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam”, A.K.Ichikawa, A. Minamino, T. Nakadaira, T.Nakaya et al.(T2K Collaboration), Phys. Rev. D 88, 032002 (2013). 査読有 引用回数107
4. “Measurement of Neutrino Oscillation Parameters from Muon Neutrino Disappearance with an Off-axis Beam”, A.K.Ichikawa, A. Minamino, T. Nakadaira, T.Nakaya et al.(T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. 111, 211803 (2013). 査読有 被引用回数63

#### ・計画研究A02

5. “Improved measurement of the neutrino mixing angle  $\theta_{13}$  with Double Chooz detector”, Y.Abe, T.Hara, M.Ishitsuka, T.Kawasaki, \*M.Kuze, Y.Nagasaka, Y.Sakamoto, F.Suekane, T.Sumiyoshi et al., JHEP 1410, 086(2014). 査読有
6. “Background independent measurement of  $\theta_{13}$  in Double Chooz”, Y.Abe, T.Hara, M.Ishitsuka, T.Kawasaki, M.Kuze, Y.Nagasaka, Y.Sakamoto, F.Suekane, T.Sumiyoshi et al., Phys. Lett. B735, 51-56(2014). 査読有
7. ◎“Reactor antineutrino monitoring with a plastic scintillator array as a new safeguards method”, S.Oguri, Y.Kuroda, Y.Kato, R.Nakata, Y.Inoue, C.Ito, \*M.Minowa, Nucl. Inst. Meth. A757, 33-39(2014). 査読有
8. 「原子炉によるニュートリノ混合角  $\theta_{13}$  の測定」, \*川崎健夫, 石塚正基, 古田久敬, 松原綱之, 日本物理学会誌・解説 2013年7月号 Vol.68, p450~457. 査読無

#### ・計画研究A03

9. “Physics Potential of a Long Baseline Neutrino Oscillation Experiment Using J-PARC Neutrino Beam and Hyper-Kamiokande”, K. Abe, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, \*M. Yokoyama et al. (Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration), Prog. Theor. Exp. Phys. 2015, 053C02(2015). 査読有
10. “Limits on sterile neutrino mixing using atmospheric neutrinos in Super-Kamiokande”, K. Abe, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, M. Yokoyama et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 91, 052019(2015). 査読有

11. “Test of Lorentz Invariance with atmospheric neutrinos”, K. Abe, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, M. Yokoyama et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 91, 052003(2015).  
査読有
12. “Search for Neutrinos from Annihilation of Captured Low-Mass Dark Matter Particles in the Sun by Super-Kamiokande”, K. Choi, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, M. Yokoyama et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. Lett. 114, 141301(2015). 査読有  
  - 計画研究 A04
13. “Atmospheric and Astrophysical Neutrinos above 1 TeV interacting in IceCube”, A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al. (IceCube Collaboration), Phys. Rev. D 91 022001 (2015)
14. “Observation of High-Energy Astrophysical Neutrinos in Three Years of IceCube Data”, A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al. (IceCube Collaboration), Phys. Rev. Lett. 113, 101101 (2014).  
査読有 被引用回数 168
15. “Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector”, A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al. (IceCube Collaboration), Science 342, 1242856 (2013). 査読有 被引用回数 205
16. “First observation of PeV-energy neutrinos with IceCube”, \*A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al. (IceCube Collaboration), Phys. Rev. Lett. 111, 021103(2013). 査読有 被引用回数 207  
  - 計画研究 B01
17. “Development of High Sensitivity Nuclear Emulsion and Fine Grained Emulsion”. H. Kawahara, T. Asada, T. Naka, N. Naganawa, K. Kuwabara, M. Nakamura, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 253-255, 216-217(2014). 査読有
18. “Observation of tau neutrino appearance in the CNGS beam with the OPERA experiment”, N. Agafonova, N. Naganawa, T. Naka, M. Nakamura (OPERA Collaboration), Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 101C01(2014). 査読有
19. “Study of hadron interactions in a lead-emulsion target, Hirokazu Ishida”, M. Nakamura, H. Shibuya et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2014, 093C01(2014). 査読有
20. “Evidence for  $\nu \mu \rightarrow \nu \tau$  appearance in the CNGS neutrino beam with the OPERA experiment”, N. Agafonova, N. Naganawa, T. Naka, M. Nakamura (OPERA Collaboration), Phys. Rev. D89, 051102R(2014). 査読有  
  - 計画研究 B02
21. “Development of Superconducting Tunnel Junction Detectors as a far-infrared single photon detector for neutrino decay search”, \*Y. Takeuchi, S.H. Kim, H. Ikeda, T. Yoshida et al., PoS(TIPP2014)155(2014). 査読有
22. “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detector on SOI Preamplifier Board to Search for Radiative decays of Cosmic Background Neutrino”, \*K. Kasahara, S.H. Kim, Y. Takeuchi, H. Ikeda, T. Yoshida et al., PoS(TIPP2014) 074(2014). 査読有
23. “Search for Cosmic Background Neutrino Decay”, \*S. H. Kim, Y. Takeuchi, H. Ikeda, T. Yoshida et al., JPS Conf. Proc. 1, 013127 (2014). 査読有  
  - 計画研究 B03
24. “2014年度 Open-It 活動報告 (プロジェクト紹介 LArTPC)”, 内田智久, 坂下健, 榎本良治, 高エネルギーニューズ Vol.33, No.4, (2015). 査読無

25. “LBNO-DEMO: Large-scale neutrino detector demonstrators for phased performance assessment in view of a long-baseline oscillation experiment”, L.Agostino, K.Sakashita et al., arXiv:1409.4405 [physics.ins-det] (2014). 査読無

26. “LArIAT: Liquid Argon In A Testbeam”, J.Paley, E.Iwai, T.Maruyama, et al., arXiv:1406.5560 [physics.ins-det] (2014). 査読無

• 計画研究 C01

27. “Cosmic neutrino spectrum and the muon anomalous magnetic moment in the gauged  $L_{\mu}$ - $L_{\tau}$  model”, T. Araki, F. Kaneko, Y. Konishi, T. Ota, J. Sato, T. Shimomura, Phys. Rev. D 91, 037301(2015). 査読有

28. “On nonadiabatic contributions to the neutrino oscillation probability and the formalism by Kimura, Takamura and Yokomakura”, O. Yasuda, Phys. Rev. D 89, 093023(2014). 査読有

29. “A first evidence of the CMSSM is appearing soon”, Y. Konishi, S. Ohta, J. Sato, T. Shimomura, K. Sugai, M. Yamanaka, Phys. Rev. D 89, 075006(2014). 査読有

30. “LHC Tests of Light Neutralino Dark Matter without Light Sfermions”, L. Calibbi, J. M. Lindert, T. Ota, Y. Takani, J. High Energy Phys. 1411, 106 (2014). 査読有

• 計画研究 C02

31. “Nucleon resonances with a dynamical coupled-channels model  $\pi N$  and  $\gamma N$  reactions”, \*H. Kamano, S. X. Nakamura, T. -S. H. Lee and T. Sato, Phys. Rev. C88, 035209(2013). 査読有

32. “Incoherent pion production in neutrino-deuteron interactions”, \*Jia-Jun Wu, T. Sato, T.-S.H. Lee, Phys. Rev. C91, 035203 (2015) 査読有

33. “Toward Construction of the Unified Lepton-Nucleus Interaction Model from a Few Hundred MeV to GeV region”, \*S. X. Nakamura, Y. Hayato, M. Hirai, H. Kamano, S. Kumano, M. Sakuda, K. Saito, T. Sato, AIP Conf. Proc. 1663, 120010(2015). 査読有

34. “Dynamical coupled-channels model of K-p reactions: Determination of partial-wave amplitudes”, \*H. Kamano, S. X. Nakamura, T.-S.H. Lee, T. Sato, Phys. Rev. C90, 065204 (2014). 査読有

• 計画研究 C03

35. “Discrimination of dark matter models in future experiments”, T. Abe, R. Kitano, R. Sato, Phys. Rev. D91, 095004 (2015). 査読有

36. “Lower Bound on the Gravitino Mass  $m_{3/2} > O(100)$ TeV in R-Symmetry Breaking New Inflation”, K. Harigaya, M. Ibe, T. T. Yanagida, Phys. Rev. D89, 055014(2014). 査読有

37. “Neutrino Universe”. T. Higaki, R. Kitano, R. Sato, J. High Energy Phys. 1407, 044 (2014). 査読有

38. “Discrete Gauge Symmetry and Aharonov-Bohm Radiation in String Theory”, Y. Ookouchi, J. High Energy Phys. 1401, 049(2014). 査読有

<公募>

39. “Development of Microwave Kinetic Induction Detectors for Cosmological Observations” K.Karatsu, S. Mima, S.Oguri, O.Tajima et al. IECE Trans. Electron E98-C, No.3, 207-218 (2015). 査読有

40. “Neutrinos in Core-Collapse Supernovae and Nucleosynthesis” T. Kajino, G.J. Mathews and T. Hayakawa, Journal of Physics, G41, 44007 (2014). 査読有

他 90 篇

国際会議講演 (全 172 件)

• 計画研究 A01

1. “Current and future prospects on long-baseline neutrino experiments in Japan”, T. Nakaya, Prospects in Neutrino Physics (NuPhys2013), Dec. 19-20, 2013, London, UK.
2. “Neutrino Program in Japan”, T. Nakaya, ICFA Neutrino Panel: Asian Neutrino Community Meeting, Nov. 13, 2013, Kashiwa, Japan.

• 計画研究 A02

3. “Recent Results from Double Chooz”, M.Kaneda, Lake Louise Winter Institute, Feb. 20, 2015, Lake Louise, Canada.
4. “A Search for Sterile Neutrino at J-PARC Materials and Life Science Experimental Facility”, H. Furuta, The 2nd International Symposium on Science at J-PARC, July 12-15, 2014, Tsukuba, Japan.

• 計画研究 A03

5. “Nucleon Decay Experiments”, M. Shiozawa, International Workshop on Baryon & Lepton Number Violation (BLV2015), Apr. 26-30, 2015. , Amherst, USA. 招待講演
6. “Atmospheric Results from Super-Kamiokande”, R. Wendell, XXVI International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2014), June 2-7, 2014, Boston, USA. 招待講演

• 計画研究 A04

7. “What Neutrinos Tell about the Ultra-high Energy Universe”, S.Yoshida, International Conference on Massive Neutrinos, Feb. 9-13, 2015, Nanyang Technological University, Singapore.
8. “Dual DOM housing up and down PMT pair”, S.Yoshida, HAP workshop, Dec. 8-10, 2014, Aachen, Germany.

• 計画研究 B01

9. “Latest Developments in Nuclear Emulsion Technology”, K. Morishima, 26th International Conference on Nuclear Tracks in Solids (ICNTS26), Sep. 15-19, 2014, Kobe, Japan.
10. “Nuclear Emulsion technology and Directional Dark Matter Study”, T. Naka, KMI International Symposium 2013, Dec. 11-13, 2013, Nagoya, Japan.

• 計画研究 B02

11. “Development of Superconducting Tunnel Junction Photon Detectors for Cosmic Background Neutrino Decay Search”, S.H. Kim, 2nd International Workshop on Superconducting Sensors and Detectors (IWSSD2014), Nov. 5-8, 2014, Shanghai, China. 招待講演
12. “Experimental search for the cosmic background neutrino decay in the cosmic far-infrared background”, Y. Takeuchi, Tsukuba Global Science Week 2014 (TGSW2014), Sep. 28-30, 2014, Tsukuba, Japan.

• 計画研究 B03

13. “Liquid-Argon TPC neutrino detector”, K.Sakashita, 2nd J-PARC symposium, July 12-15, 2014, Ibaraki, Japan.

• 計画研究 C01

14. “A new idea to search for charged lepton flavor violation using a muonic atom”, J. Sato, 3rd Workshop on Muon g-2, EDM and Flavour, Dec. 9-12, 2014, Paris, France.

15. “An analytical treatment of neutrino oscillation probabilities”, O. Yasuda, PASCOS2013, Nov. 20-26, 2013, Taipei, Taiwan. 招待講演  
 ・ 計画研究 C02
16. “Multi-pion resonances and the continuum”, S. X. Nakamura, 9th International Workshop on Neutrino-Nucleus Interactions in the Few-GeV region, May 19-24, 2014 London, UK. 招待講演
17. “Nuclear PDFs (HKN) and exclusive reactions for hadron structure”, S. Kumano, 4th International Workshop on Nucleon Structure at Large Bjorken x (HiX2014), Nov. 17-21, 2014, Frascati, Italy. 招待講演  
 ・ 計画研究 C03
18. “Hidden Local Symmetry as magnetic gauge theory”, R. Kitano, Sakata Memorial KMI Workshop on “Origin of Mass and Strong Coupling Gauge Theories” (SCGT15), Mar. 6, 2015, Nagoya, Japan
19. “Decay of False Vacuum via Fuzzy Monopole in String Theory”, Y. Ookouchi, String 2015, Feb. 5, 2015, Tsukuba, Japan

<公募>

20. “Coleman-Weinberg inflation models” K. Kohri, COSPA 2014, Dec. 10, 2014, Auckland, New Zealand

他 152 件

国内講演、学会発表 (全 281 件)

- ・ 計画研究 A04
- 1. “高エネルギーニュートリノ天文学:南極から見上げる高エネルギー宇宙”, 吉田滋, 第 27 回 理論懇シンポジウム「理論天文学・宇宙物理学と境界領域」, 2014 年 12 月 24-26 日, 国立天文台. 招待講演  
 ・ 計画研究 B03
- 2. “液体アルゴン飛跡検出器荷電粒子応答テスト実験 (LArIAT 実験) の現状”, 丸山和純, 日本物理学会, 2015 年 3 月 22 日, 早稲田大学  
 ・ 計画研究 C01
- 3. “非標準的相互作用のレビュー”, 佐藤丈, 第 28 回宇宙ニュートリノ研究会, 2015 年 2 月 21 日, 東大宇宙線研.

他 278 件

一般・学生向けの講演, 解説

- ・ 計画研究 B01
- 1. “先進科学塾@名大”, 中村光廣, 実験講座, 2015 年 4 月 18・25 日, 1 月 24・25 日, 2014 年 11 月 15・23 日, 9 月 20・23 日, 6 月 7・8 日, 3 月 9・16 日, 2013 年 12 月 7・8 日, 8 月 3・4 日, 名古屋大学  
<http://asw.flab.phys.nagoya-u.ac.jp/>  
 ・ 計画研究 C01
- 2. “ニュートリノ振動—量子力学的干渉効果の一例—”, 安田修, 日本物理学会誌第 70 巻第 4 号 242 (2015).
- 3. “素粒子物理学へのいざない”, 安田修, 東京都立科学技術高等学校短期集中講座, 2014 年 3 月 20 日, 東京都立科学技術高等学校.  
 ・ 計画研究 C03
- 4. “ニュートリノと宇宙の謎”, 北野龍一郎, 2013 年 12 月 21 日, 高エネルギー加速器研究機構

5. “素粒子標準模型とヒッグス粒子”, 伊部昌宏, 2013年12月1日, 東京大学本郷キャンパス
6. “ヒッグス粒子を超えて”, 北野龍一郎, 2013年11月9日, 東京工業大学
7. “ヒッグス粒子を超えて”, 北野龍一郎, 2013年10月27日, 早稲田大学

計画研究班ホームページ・新聞記事等

・計画研究 A01

1. “仁科賞に小林隆氏ら ニュートリノの変化観測”, 日本経済新聞(他 京都新聞, 朝日新聞など), 2014年11月11日
2. “ニュートリノ変化「全容解明」 ミュー型→電子型 宇宙進化の謎迫る”, 読売新聞(他 朝日新聞, 西日本新聞, 毎日新聞, 産経新聞など), 2013年07月20日
3. プレスリリース “T2K 実験、電子型ニュートリノ出現現象の存在を明らかに!”, 2013年7月19日  
<http://www.kek.jp/ja/NewsRoom/Release/20130719210000/>

・計画研究 A02

4. A02 ホームページ <http://dchooz.titech.jp.hep.net/> および  
<http://dchooz.titech.jp.hep.net/A02publications.html>

・計画研究 A03

5. プロジェクトホームページ“ハイパーカミオカンデ ホームページ”, <http://www.hyper-k.org>
6. 神岡宇宙素粒子研究施設ホームページ“神岡宇宙素粒子研究施設”, <http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp>
7. “ハイパーカミオカンデ国際共同研究グループ結成記念シンポジウム及び調印式”, グループ発足記念シンポジウムと研究所の協力協定調印式, 参加者 100名, 2015年1月31日
8. プロジェクトパンフレット 2000部“Hyper-Kamiokande ハイパーカミオカンデ”, ハイパーカミオカンデグループ, 2015年1月
9. “「ハイパーカミオカンデ」目指す”, 朝日新聞, 2015年2月5日.

・計画研究 A04

10. ハドロン宇宙国際研究センター website <http://www.icehap.chiba-u.jp/>
11. ハドロン宇宙国際研究センター facebook <https://www.facebook.com/ICEHAP.Chiba.Univ>
12. “Japanese neutrino physicists think really big”, Science, FEBRUARY 2015・VOL 347 ISSUE 6222.
13. ハドロン宇宙国際研究センターニュース, 吉田滋, 2014年6月  
[http://www.icehap.chiba-u.jp/activity/ICEHAP\\_NEWS/ICEHAP\\_NEWS-No2.pdf](http://www.icehap.chiba-u.jp/activity/ICEHAP_NEWS/ICEHAP_NEWS-No2.pdf)
14. “「宇宙の果て」南極で観測”, 読売新聞, 2014年1月23日
15. 「南極でニュートリノ検出」, 毎日新聞、千葉日報、しんぶん赤旗、四国新聞など, 2013年11月12日

・計画研究 B02

16. “宇宙背景ニュートリノ崩壊探索”, 日経サイエンス 2013年8月号 55ページ
17. B02 ホームページ <http://www.tsukuba.jp.hep.net/twiki/bin2/view/STJ/StjTalksPub>

・計画研究 C01

18. C01 ホームページ <http://musashi.phys.se.tmu.ac.jp/~yasuda/nushin/>

・計画研究 C03

19. BS ジャパン「咲くシズ」に出演, 北野龍一郎, 2014年3月15日放送
20. 日本評論社編集部 編「物理学ガイダンス」に「ヒッグス粒子の先へ」の記事, 北野龍一郎, 2014年2月出版



21. 「物質に質量を与える素粒子、ヒッグス粒子とは？」, 北野龍一郎, 月刊「化学」特別解説, 2013年12月号

#### 受賞

##### ・計画研究 A01

1. 仲村佳悟, 高エネ研(KEK)測定機開発室第5回測定器開発優秀修士論文賞, 論文題目「T2K 実験ニュートリノビーム増強のための J-PARC MR Intra-Bunch Feedback System の開発」, 2015年05月7日
2. 小林隆, 読売テクノ・フォーラム第21回ゴールド・メダル賞, 受賞業績「電子ニュートリノ出現の発見」, 2015年3月21日
3. 中家剛, 小林隆, 塩澤真人, 平成基礎科学財団第6回戸塚洋二賞, 受賞業績「加速器ミューニュートリノビームによる電子ニュートリノ出現現象の発見」, 2015年2月17日
4. 中家剛, 小林隆, 2014年度仁科記念賞, 受賞業績「ミューニュートリノビームからの電子ニュートリノ出現事象の発見」, 2014年11月12日
5. J-PARC ニュートリノビームグループ(代表者 小林隆), 高エネルギー加速器科学研究奨励会諏訪賞, 題目「世界最高強度ニュートリノビーム施設の実現による電子ニュートリノ出現現象発見への貢献」, 2014年2月17日
6. 市川温子, お茶の水女子大学第1回湯浅年子賞, 題目「ニュートリノ振動実験への寄与」, 2013年11月14日

##### ・計画研究 A02

7. T.J.C. Bezerra 氏 高エネルギー物理学奨励賞・日本物理学会若手奨励賞, 論文題目「Improvement of  $\theta_{13}$  Measurement in the Double Chooz Experiment and the First Effective  $\Delta m^2_{31}$  Measurement from Reactor Neutrino Oscillation at Different Baselines」, 2014年10月16日
8. 今野智之, 高エネルギー物理学奨励賞・日本物理学会若手奨励賞, 論文題目「Measurement of reactor anti-neutrino disappearance using the Double Chooz detector」, 2013年11月21日

##### ・計画研究 A03

9. Roger Wendell, 高エネルギー物理学奨励賞・日本物理学会若手奨励賞, 論文題目「Evidence for the Appearance of Atmospheric Tau Neutrinos in Super-Kamiokande」 Phys. Rev. Lett. 110, 181802 (2013), 2014年10月16日

##### ・計画研究 A04

10. 吉田滋, 石原安野, 平成基礎科学財団第5回戸塚洋二賞, 題目「超高エネルギー宇宙ニュートリノ発見への貢献」, 2014年2月12日
11. 石原安野, IUPAP 若手賞, 2013年7月9日

##### ・計画研究 B01

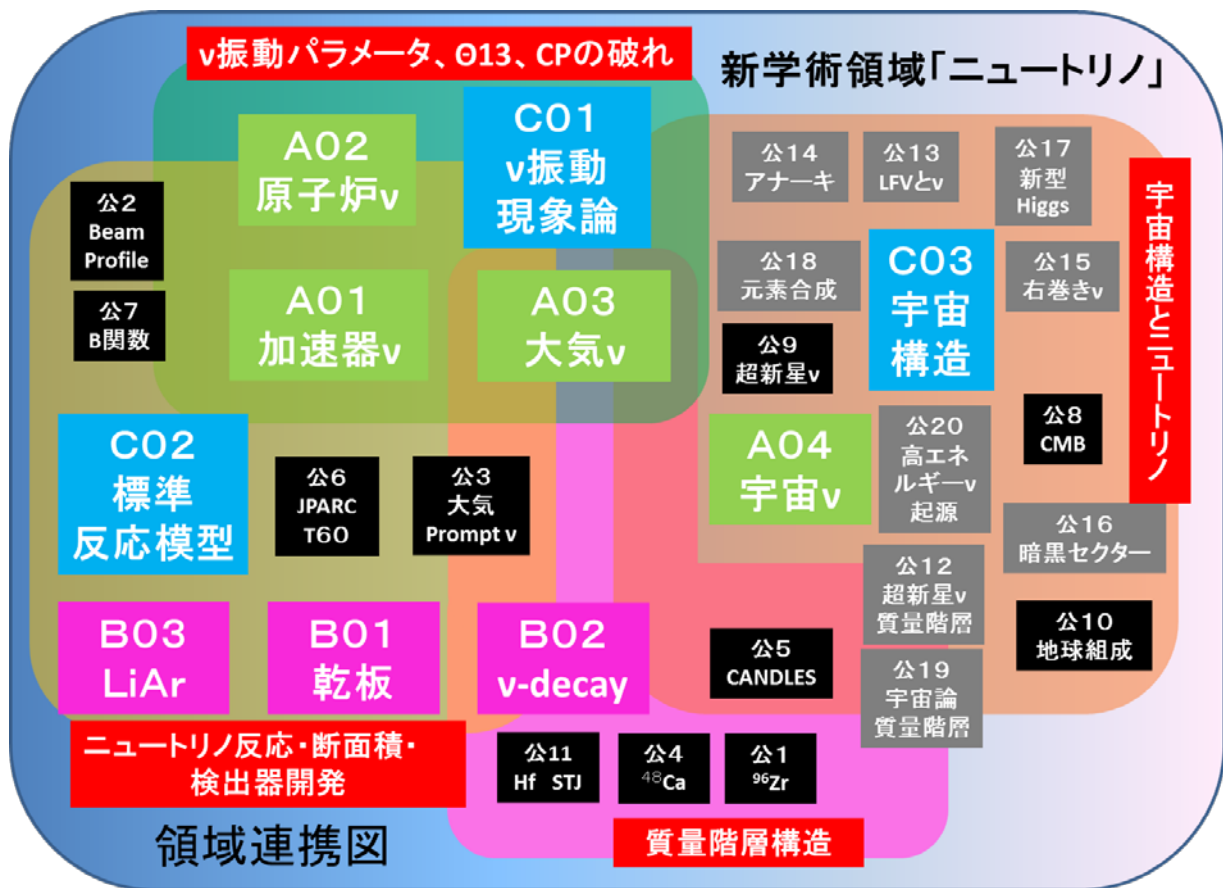
12. 高橋覚, 福田努, 日本写真学会進歩賞, 題目「エマルションガンマ線望遠鏡のための時間分解原子核乾板多段シフターの開発」, 2014年5月26日

##### ・計画研究 C02

13. 佐藤透, 鎌野寛之, 日本物理学会第20回(2015年)論文賞, 論文題目「Energy Dependence of KN Interactions and Resonance Pole of Strange Dibaryons」 Prog. Theor. Phys. 124, 533-539 (2010), 2015年03月25日

## 6. 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。



(1) ニュートリノ振動パラメーター、特に  $\theta_{13}$ 、CP 対称性の破れの研究に関しては A01 班（加速器ニュートリノ実験 T2K）、A02 班（原子炉ニュートリノ実験 Double Chooz）、A03 班（スーパーカミオカンデによる大気ニュートリノ観測）が世界最先端の結果を更新しつつあり、それらを元に C01 班ニュートリノ振動現象論の理論的研究を軸として、公募研究群（公 12～15、17、19）が連携をすすめている。C03 班（宇宙構造）の理論的研究も含めて、ニュートリノ物理と「力の統一・量子重力理論」、「宇宙論」、「素粒子標準理論を超えた物理」の整合性を精査することで素粒子・宇宙・時空の起源という大きなテーマに向かって新たな理論的突破口を見つけ出す。特に、ニュートリノ質量模型の多角的な検証や初期宇宙におけるニュートリノの役割を確立することで、ニュートリノの質量の起源に迫ろうとしている。

(2) ニュートリノ反応、特に低エネルギーニュートリノと原子核の反応断面積の測定に関しては、A01 班、B01 班（原子核乾板）と公募研究 6 の共同による JPARC T60 テスト実験が開始され、今後標的を変えた照射を行うと共に統計を増やし、物理解析につなげようとしている。これらの新たな結果と C02 班（標準反応模型）の理論的連携を軸に標準反応模型を構築してゆく。また B03 班（LiAr）との連携も図ってゆく。また加速器ニュートリノビーム生成に関する公募研究 2、7 を含み加速器実験の強化を図っている。

(3) ニュートリノ質量階層構造に関しては、A01、A03 をはじめとする前述(1)の研究に加えて、B02 班（ニュートリノ崩壊）の実験準備が進展している。これが発見されれば宇宙背景ニュートリノの証拠となる（次項宇宙ニュートリノとの関連）。領域としては含んでいなかったニュートリノのマヨラナ質量に関する二重  $\beta$  崩壊研究を公募研究 1、4、5 で含み、領域としては幅を広げた。理論的には公募研究 12、19 もこれ

に関連する。

(4) A04班（宇宙ニュートリノ望遠鏡IceCube）も観測結果を更新し、太陽系外起源宇宙ニュートリノの観測数を増やし超高エネルギーの宇宙像を描きつつある。この結果に刺激され、C01、C03、公募研究20では超高エネルギーニュートリノの起源の考察や、標準模型を超えたニュートリノ相互作用の影響の理論的研究が進んでいる。また公募研究3はA04の宇宙ニュートリノのバックグラウンドとなりうるチャーム粒子から出るPromptニュートリノ生成に関する研究であり、B01班で開発した原子核乾板を用いて、豪州で行ったフライトが成功した。また公募研究8、9、10、18でニュートリノの関与する幅広い現象について領域に取り込み、互いに刺激し合う環境を構築している。

(5) ニュートリノの質量起源、宇宙のインフレーション、バリオン数非対称性や暗黒物質、それからヒッグス粒子の起源などの素粒子標準模型の謎がどのように結びつき、より基本的な理論に統一されていくのかC01、C03班は超弦理論を含む様々な視点から研究を進めている。これらの研究には、A01、A02、A03班により続々と世界に発信されているニュートリノ質量・混合・CPの破れの最新データ、A04班の宇宙ニュートリノの発見、さらには、B02班の宇宙背景ニュートリノ探索は研究の方向性を大きく左右する。領域研究会やワークショップでの理論・実験相互の情報交換によって、世界にはあまり例を見ないユニークな連携体制ができあがっている。

#### 公募研究リスト

1. ジルコニウム96を用いた2重ベータ崩壊事象探索実験用液体シンチレータの開発（福田善之）
2. Research and Development of a Non-destructive Profile Monitor for ~MW Power Proton Beams (Mark Hartz)
3. 高エネルギー大気 $\nu$ 流束推定へ向けた気球高度で生成されるチャーム粒子測定手法の開発（六條宏紀）
4.  $48\text{Ca}$ 二重ベータ崩壊精密測定に向けたバックグラウンド事象の新測定技術開発（吉田斉）
5. CANDLES実験における中性子線源を用いた検出器較正およびバックグラウンド調査（飯田崇史）
6. 原子核乾板検出器を用いた短基線ニュートリノ振動実験（小川了）
7. 大強度シンクロトロンにおける加速途中のベータ関数測定および光学補正（栗本佳典）
8. CMB偏光観測からニュートリノ質量階層性に迫るための偏光角較正装置の開発（田島治）
9. 大型液体キセノン検出器XMASSを用いた超新星ニュートリノの観測（平出克樹）
10. 大気ニュートリノを用いた地球内部の密度及び化学組成の研究（保科琴代）
11. ハフニウム多層障壁層窒化物超伝導体トンネル接合検出器の開発（赤池宏之）
12. ニュートリノの質量階層と超新星ニュートリノ観測イベントに関する系統的研究（鈴木英之）
13. ニュートリノ質量模型とレプトン数・フレーバーの破れた過程の関連（太田俊彦）
14. アナーキーと陽子崩壊（村山斉）
15. 軽い右巻きニュートリノの宇宙物理と実験検証（浅賀岳彦）
16. 輻射シーソー機構と宇宙の暗黒セクター（青木真由美）
17. ニュートリノ質量起源としての新型ヒッグス模型の宇宙論的研究（瀬戸治）
18. 超新星元素合成とニュートリノ振動（梶野敏貴）
19. 宇宙論によるニュートリノ質量階層性の決定（郡和範）
20. 見えてきた高エネルギーニュートリノ起源の理論的解明（長瀧重博）

## 7. 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。

本領域の研究組織全体 207 名のうち、39 歳以下の若手研究者は 88 名にのぼり、領域自体が若手中心で運営されている。若手研究者育成に係る取組を以下にまとめる。

### ・ 大学院生を含む若手研究者の国内・国際会議での発表支援

若手研究者に発表の機会を多く与えることにより、積極的な若手研究者のプロモートを行っている。以下の表は、平成 25 年度、26 年度における若手研究者（39 歳まで）の国際会議・国内会議での講演実績を研究班ごとにまとめたものである。

計画研究班	国際会議講演数（若手/全体）	国内会議講演数（若手/全体）
A01	21/44	38/54
A02	7/10	16/18
A03	16/19	29/49
A04	3/7	9/11
B01	12/12	50/50
B02	6/13	17/21
B03	1/1	8/11
C01	7/19	5/14
C02	15/39	35/47
C03	7/8	6/6
計	95/172	213/281

A02 班では平成 25 年度、26 年度と連続して、A03 班では平成 26 年度に日本物理学会若手奨励賞受賞者を出している。

### ・ 若手研究者が中心となった研究会の開催

領域では若手研究者が中心となって多様な研究会を主催・共催している（平成 26 年度は国際研究会の開催は 11 件）。領域全体の研究会では、学生セッションを企画し、学生に運営を委ねることで自主性を引き延ばしている。また、学生同士の気安さで、質疑応答が活発におこっており、研究者としての基礎を培っている。全国津々浦々な大学から理論・実験の学生が多く集まることで、異文化交流となっており、自由な発想を基に研究の議論を活性化している。その他にも若手主導の国内研究会を開催している（<http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/nufreanier/workshop.html>）。B02 班が平成 25、26 年度に開催した「宇宙史起源ワークショップ」は、大学院生主導で運営・発表・議論を行い、新しい実験を企画する能力を育成することを目指したものである。平成 25 年度は筑波大学で開催され、小林誠先生の講演の後、学生 25 名が発表を行った。平成 26 年度は名古屋大学で開催され、学生 46 名が発表を行い、活発な議論が展開された。C02 班では、研究会「レプトン原子核反応模型の構築に向けて」、研究会「低エネルギーニュートリノ-原子核反応と天体現象への応用」の支援を行った。また、C03 班は、平成 25、26 年度に若手研究者を中心に理論研究会を開催し、そこでは多くの若手研究者が発表を行った。また、東京近郊で月例開催されているインフォーマルな集い「New Physics Forum」では若手研究者が多く集まり、盛んな議論が行われている。

### ・ 共同研究における積極的な若手研究者の起用

国際共同研究グループ内で、若手がコーディネータなどの重要な部分を担当することを積極的に推奨している。A01 班では、14 名の学生がニュートリノ研究に参加していて、研究所（KEK）の教員と共同研究することで高いレベルの専門技術を取得している。A01 班の主課題である加速器ビームの研究では、学生が KEK の「測定器開発修士論文賞」を受賞した。また、学生達のアイデアをベースに

新型ニュートリノ測定器の開発が進んでおり、若手が主体的に独創的な研究を進める基盤となっている。また、A03 班の大気ニュートリノの研究、高感度大口径光センサーの開発等の中心は大学院生も含む若手研究者である。B01 班の原子核乾板を用いた実験では、実験立案、乳剤開発・製造、乾板製造、検出器組み込み、照射実験、現像、読み取り、解析の全てを自分たちで行えるものであることから、実際に自分の手と頭を動かして、自分の責任でものを作るという原点からの活動を重視している。実験現場への派遣も積極的に行っており、武者修行的実践教育を心がけている。OPERA の現場で根付いているのは、単独海外派遣の原則であり修士といえども一人で日本人のいない現場にのりこみ自分の責任を果たす事を原則としている。理論研究 C01、C02、C03 においても、研究の中心は若手研究者が担っている。

・ **大学院生の教育、研究指導**

大学院生の教育、研究指導を通じて日本の将来を担う若手を育成している。以下の表のように、多くの博士論文、修士論文がこれまでに発表されている。

計画研究班	修士論文数	博士論文数
A01	3	1
A02	8	3
A03	5	2
A04	1	0
B01	7	3
B02	4	0
B03	3	0
C01	2	2
C02	2	1
C03	2	2
計	37	14

また、スクール等における講義もさかんに行われている。領域全体で若手向けのスクールを毎年開催し、そこでは、インターネットベースの TV 会議システムを活用し、遠隔地からの聴講も可能としている。そのうえで、領域の Web ページ上

(<http://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/nufontier/school.html>) に講義ノートを整備し、広く専門教育に活用できるようにしている。他にも、高エネルギー春の学校 (A04)、原子核三者夏の学校 (A04)、天文夏の学校 (A04)、若手研究者育成プログラム NuSTEC2014(Fermilab, USA) (C02)、中部夏の学校(C03)、Tohoku Forum for Creativity 春の学校(C03)などへの講師派遣実績がある。

・ **若手研究者の研究職への就職支援**

若手研究者が本領域における研究での実績を経て、さらなるステップアップをするための支援を行っている。平成 26 年度中には 17 名の若手研究者が研究職（うち 8 名が常勤職）へ就職している。

## 8. 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。

各計画研究班で購入された設備等は全般に有効に活用されている。領域内での設備の一例として、B01班が設置した原子核乳剤製造装置で製造された原子核乾板が、B01班・A01班（加速器ニュートリノ実験）・公募研究（代表 小川了）が共同で進めているJPARC T60実験（低エネルギーニュートリノ反応研究に向けたテスト実験）に供給され、利用されている。また、原子核乾板のより広い応用として、気球による $\gamma$ 線望遠鏡GRAINEや、宇宙線を使って大型構造物（原子炉の内部等）を探索するミュオンラジオグラフィプロジェクトにも原子核乾板が供給されている。さらに、公募研究（代表 六條宏紀）で $\gamma$ 線望遠鏡GRAINEを使って大気プロンプトニュートリノを研究する計画が検討されており、将来のA03班、A04班との共同研究への発展が期待される。A03班（スーパーカミオカンデグループ）が開発しているニュートリノ反応プログラムNEUTは、A01班を始め、公募研究（代表 小川了）やC02班で、そのデータとアルゴリズムが広く利用されている。更に、海外の実験等でも利用されている。他にも、A03班で開発している大型光子検出器は、ニュートリノ実験に有用な装置であり、A01班やA04班でその性能に関する情報を共有している。以上のように、本領域で購入・開発している設備や装置は、領域内で有効に活用できるよう、十分な情報共有を行っている。領域の共有財産は、領域内だけでなく、広く領域外でも利用できるものは外部にも公開している。逆に計算機設備は各計画班それぞれが整備しており、それぞれの計画班内で十分な使用要求があり、セキュリティのことも考慮して、共有はしていない。特にC班（理論班）では、計算機の拡充が研究成果創出に直結している。

研究費に関しても、効果的に使用されている。領域全般に関する総括班の研究費は、総括班事務に使用するPC、事務用消耗品、事務員雇用、ホームページ整備、会議費、若手研究者用の旅費に当初計画通り効果的に使用している。各計画研究班の研究費の使用例として、A01班とA04班では、当初の計画以上に研究が進んでおり、研究成果が前倒しで出た。その結果、A01班では、成果発表のため、旅費の枠を拡充し、成果発表を促し効率的に予算を執行している。また、A03班は、圧力試験装置加圧タンク水用水システムを購入し、水中での光子検出器の耐圧性能試験を行い、耐圧性能の改善が必要である事を突き止めた。A04班は研究計画の発展的再構築を行い、検出器開発に重点的に投資した。更に、海外研究者との議論を進めるための海外旅費も活用している。旅費については、国内外の研究集会での研究発表、国内の研究会への研究者の招聘、海外の第一線で活躍している研究者の招聘、そして若手育成のための発表支援、に用いられ、成果発表・研究者間の交流に役立っている。各計画班で雇用している研究員・特任助教は、研究遂行の実働力としてそれぞれの研究で大いに活躍していることに加え、領域内の各研究をつなぐ緯糸の役目も果たしている。彼らの活躍により、領域全体が活性化され、全体のアクティビティが大きく向上している。

以上、研究費は効率的に使用され、共有できる設備・装置・知的資源は領域内外で有効に活用されている。

## 9. 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。

本研究領域では5名の総括班評価者が置かれている。以下に各評価者による評価を記す。

**評価者：徳宿克夫（高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・所長、専門：素粒子実験）**

この研究は、現在の最先端のニュートリノ研究において、多岐にわたる日本の研究者の知を結集し融合して進める画期的な研究と考える。特に、ニュートリノ混合において長年の最重要探索課題であった  $\theta_{13}$  混合角の測定を、加速器を使ったミューオンニュートリノから電子ニュートリノへの転換を初めて示し（A01 研究）、原子炉電子ニュートリノの減少も初めて示す（A02）など、これまでで既に大きな成果をだしている。さらに、感度はそれらよりは低いが大気ニュートリノを使った実験でもそれをサポートする実験結果を出している（A03）ことからわかるように、この領域研究の研究者たちが結集して領域を構成することにより、相乗効果がでていていると考える。

ニュートリノの反応断面積は非常に小さいこともあり、非常に時間がかかり実験も大規模になっている。それ故に多くの謎も残っており、これまでも、多くの驚きの発見がされてきた。今回の  $\theta_{13}$  が大きいことの発見もこれまでにない重要な発見でありさらに、これはニュートリノで CP 対称性の破れがある場合に検出可能な領域にあることを示して大きなインパクトを与えている。

このような状況では、Exotic な手法も含めて多くの研究方法を進めることが重要であり、高エネルギーの宇宙からのニュートリノ研究（A04）や、将来へ向けての研究開発（B 班）も含め、順調に計画が進んでいると考える。

**評価者：中野 貴志（大阪大学・核物理研究センター・センター長、専門：素粒子・原子核実験）**

A01 班の T2K 実験では、電子ニュートリノの appearance を  $7.3\sigma$  の統計精度で発見し、また、ミューオンニュートリノの disappearance も世界最高精度で確認する等、世界のニュートリノ振動研究をリードしている。特に T2K がニュートリノ CP に対し物理的に意味のある制限をつけ始めたことは高く評価できる。関連する研究としては、A03 班が大気ニュートリノの観測から  $\delta_{CP}$  を測定し、ニュートリノ振動で CP 対称性が最大に破れていることを示唆した。この実験結果は理論研究を刺激し、合同研究会でも C01 班と C03 班を中心に活発な議論が交わされた。A04 班では、高エネルギー宇宙ニュートリノの発見をもたらした IceCube 実験が順調に観測を続け、また B01 班では、様々なニュートリノ・原子核反応断面積やステライルニュートリノ探索の鍵となる低エネルギー電子ニュートリノの反応断面積を目的とするエマルジョンを用いた実験の準備が着々と進んでいる。

以上、予想以上の科学的成果が得られつつあり、また素粒子と原子核、理論と実験の融合も着実に進んでいることから、本領域は当初の予定を超えて進展していると結論付けられる。

**評価者：福島 正己（東京大学・宇宙線研究所・教授、専門：宇宙線実験）**

宇宙ニュートリノに関する研究は、IceCube 実験（A04）による高エネルギー宇宙ニュートリノの発見によって大きく進展している。これまでに確認されている宇宙ニュートリノは、近傍の天体（太陽・超新星爆発）を起源とする 10MeV 程度のエネルギーであったのにくらべて、IceCube の 10TeV-PeV ニュートリノはエネルギーが 6-8 桁たかく、銀河系外の高エネルギー天体现象や深宇宙での生成が考えられる。とくに発生源と発生過程が解明されれば、宇宙空間の希薄標的を通過してくる超長基線ニュートリノビームとして、素粒子物理・宇宙論の研究に大きく貢献すると期待される。このために、分解能・感度・全天性をたかめ、スペクトルや異方性測定の統計精度を格段に（かつ着実に）上げる IceCube 拡張計画は重要で、A04 グループの開発ターゲットが、新しい光検出器 D-Egg に移行したことは、次期計画への積極的貢献と

して高く評価したい。一方、近い将来に EeV の cosmogenic neutrino が観測される可能性に備えて、超高エネルギーでのアクセプタンスを拡張する革新的手法として、アスカリアン電波観測の開発も継続の価値がある。A04 のグループはすでに ARA 開発に大きな人的・資金的資源を投入しており、今後も基盤 S との整合性も踏まえた上で、開発研究を完了してほしい。TeV-PeV 宇宙ニュートリノは新発見の現象として領域内の理論的研究 C01, C02, C03 の活性化に貢献しており、理論と実験の相互作用・共進化が期待される。将来的には、実験に密接にかかわる超高エネルギー粒子からのハドロン・原子核反応によるニュートリノ発生の機構の研究や、超高ニュートリノによる粒子シャワー発生の考察についても進展を期待したい。B02 の超電導赤外線検出器開発は、長年の挑戦的な開発努力が実を結び始めている模様だが、この新学術領域内で実機のローンチにいたらない場合でも、限られた時間と資産でどのあたりまで達成可能か、より具体的な目標設定を確認する必要があると思われる。

**評価者： 野尻 美保子（高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授、専門：素粒子理論）**

ニュートリノの性質は、ヒッグス粒子の性質とともに、基本的相互作用の理解が十分でなく、大きな発見が期待できる分野である。ニュートリノの場合は初期宇宙や天体现象の理解の鍵となる分野であり、本研究計画はこれらの分野を多角的に網羅して総合的な発展をめざすものである。J-PARC のビーム供給が思うように増えない中でも、バックグラウンド事象を制御して着実に測定を進めている実験がある一方で、ハイパーカミオカンデの設計、IceCubeの新測定器の開発、など次世代実験への展開、また、高精度で先進的な測定器の開発研究など、全体的に見れば着実に成果をあげつつ、次のステップのシードを開発するバランスのとれた領域となっている。

エポック的なものとしては、反ニュートリノビームを使った振動の測定、CP の測定精度の向上、IceCube による PeV 領域のニュートリノの初めての観測があり、世界的にも、注目された研究成果である。また、理論研究者の間では、IceCube のスペクトル理解を目指した、新しい物理の提案などが活発であった。

当初計画からの変更としては、計画研究A02におけるCe線源を用いた実験の方針転換、計画研究A04における研究方法の変更（本報告書3章）があるが、先端的な研究計画を組んでいく中で計画の変更はおこりうるものであり、外部状況や、研究上の新しい展開に合わせた研究計画の変更は妥当なものであると認められる。また B班のような先端的な測定器の開発を目指す分野においては、当初計画の達成を目指すと同時に、ニュートリノ実験以外への応用分野にも目配りをすることによって、新学術領域が終了したあとも技術が適切に継承されることに配慮する必要があるだろう。

また、この新学術計画の発展には、研究者自身の努力もさることながら、J-PARC の着実な運転が重要であり、適切な予算処置が行われるように、関係方面に働きかけるとともに、より広い学術研究のコミュニティや社会に対してもニュートリノ物理の多様性、重要性を広報していく努力が必要であると考えられる。

**評価者： 岡 眞（東京工業大学・理工学研究科・教授、専門：原子核理論）**

ニュートリノによる原子核反応の理論的研究では、C02 グループにより、中間エネルギー領域における共鳴状態の寄与を取り入れた世界標準となるチャンネル結合反応モデルの構築が順調に進んできた。とりわけ、2 個のパイオンを放出する反応が重要な寄与を示した研究および、重陽子によるニュートリノ散乱で終状態相互作用の必要性を示した研究は、これまでの解析を書き変える重要な成果である。領域の若手研究者がこの研究において主要な役割を果たし、将来のリーダーを育てる役割も果たしている。今後、ニュートリノ散乱、特に高エネルギー散乱が、原子核の相関や核子構造の密度依存性などを解明する手段として有効であることを明らかにし、長年の原子核物理学の蓄積をもとにニュートリノ原子核反応の全体像を描くことを目標として、研究を進展させることが望ましい。



## 10. 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研究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。

### 【基本的な研究戦略】

本領域では3つの研究項目を設定し、ニュートリノフロンティア全体を推進している。領域創設から2年が経ち、それぞれの計画研究は軌道に乗ってきた。今後は、計画研究と公募研究の連携を強化し、領域全体の研究を活性化していく。

・**研究項目 A:** A01（加速器ニュートリノ）、A02（原子炉ニュートリノ）、A03（大気ニュートリノ）、A04（宇宙ニュートリノ）の研究を推進していく。また、計画研究の枠を超えて、それぞれの結果を組み合わせることで、総合的に「ニュートリノの基本性質（質量、混合、粒子と反粒子の違い）」を解明していく。「ニュートリノ天文学」を開拓し、超高エネルギーの宇宙像を描く。この際、A03 班と A04 班が密接な連携を築き、低エネルギーから高エネルギーまでの広範囲で大気ニュートリノフラックスを精密に測定することでバックグラウンドの評価を信頼できるものとし、宇宙ニュートリノを観測する。ニュートリノを使った応用研究の一つとして、小型ニュートリノ原子炉モニターを開発していく。

・**研究項目 B:** 将来のニュートリノ実験の基幹となる最先端実験技術の開発研究を進める。B01 班で開発しているナノスケールの超高精度で粒子を測定できる写真乾板技術は、A01 班や公募研究を始め、広範囲な応用を進めていく。B02 班で開発している超伝導トンネル接合素子 (STJ) は、マイクロ電子ボルトの超高エネルギー分解能を達成するために極低ノイズの実現が必須で、その実現可能性を探っていく。B03 班で開発している3次元イメージングが可能な液体アルゴン検出器は、大型化の技術の確立とテストビームによる複雑な事象を処理する解析プログラムの構築を進めていく。

・**研究項目 C:** 理論班である C01 班（素粒子）、C02 班（原子核）、C03 班（宇宙と素粒子）はニュートリノに関する理論的研究を包括的に進めていき、境界を超えて有機的に発展を試みる。また、研究項目 A・B との連携を強化し、ニュートリノで見る新しい自然像の確立を目指す。

自然の様々なスケールでの多様なニュートリノ源による多角的な研究が本領域の特徴である。領域全体の目標である「ニュートリノフロンティアの融合と進化」の達成には、3つの研究項目 A、B、C の連携が必須である。領域の創設により、着実な実験結果が見込まれる研究項目 A、将来のニュートリノ研究の可能性を開く先端技術を開発する研究項目 B、それぞれのニュートリノ研究の成果を結合しニュートリノを通した新しい自然観の創生を目指す理論研究 C、の間の連携が飛躍的に強化された。今後も、総括班の活動を通し、この強力な連携を維持していく。発見の可能性のあるブレークスルーの例としては、スーパーカミオカンデ (A03) と IceCube (A04) を合わせて  $10^8\text{eV}$  から  $10^{15}\text{eV}$  の7桁のエネルギー領域で大気ニュートリノを精密に測定することで、これまでアクセスできなかったエネルギー領域でのニュートリノ反応の研究 (C02) が可能となる。また、IceCube (A04) で宇宙ニュートリノ放射源が発見されれば、宇宙スケールでのニュートリノ振動の実験が可能となり、T2K 実験 (A01) や Double Chooz (A02) の結果と組み合わせ、Lorentz 不変性の破れを含む、新物理の探索可能性が一気に広がる。以上のように、9桁にわたるニュートリノエネルギーの領域、10桁以上にわたるニュートリノ伝播距離の領域での観測を組み合わせることで、標準模型の不変性を検証するだけでなく、非標準相互作用、ユニタリー性やローレンツ対称性の破れなど、標準模型とニュートリノ質量の枠組みを越える物理を発見できる可能性を探っていく。さらに、原子核乾板測定器 (B01) や液体アルゴン検出器 (B03) の各方面への利用・応用も、ニュートリノ研究からのスピノフとして、新しい研究領域を創出する可能性があり、今後力を入れていきたい分野である。超低エネルギーの宇宙背景ニュートリノ観測 (B02) と IceCube の超高エネルギー (A04) を組み合わせ

せた新しい宇宙像の創生は、本研究期間内での実現は難しいと考えるが、将来にわたり興味深い課題である。

以上の通り、全計画研究班が有機的に連動し、そこに公募研究の機動性を加え、ニュートリノフロンティアの融合と進化を実現していく。これまでの2年間で出た研究成果を照らし、今後の研究計画は適切なものであると判断している。

#### 【領域研究を推進する上での問題点と対応】

領域全体に関わる大きな問題はない。ただし、計画研究班毎にはいくつか懸念する問題はある。A01 班は加速器のビーム運転時間の確保と加速器本体の電源増強スケジュールの遅延、A02 班は円安により Double Chooz 実験の運転経費の高騰、やはり A02 班の原子炉ニュートリノモニター制作に関して原子力発電所の運転休止のためのモニターの設置・運営の遅延、A04 班は ARA 計画の変更等がある。対応策は、A01 班は物理解析の高度化と加速器フィードバックシステムの高性能化、A02 班は現地作業の効率化による渡航回数削減、原子炉ニュートリノモニターの宇宙線測定による運転、A04 班は実験装置の発展的な再配置で対応している。詳細は、各計画研究の報告書を参照されたし。

#### 【不足していること】

本領域において、当初の目標であった2つの大きな発見があった。ニュートリノCPの信号となる「電子ニュートリノ出現」の発見と「宇宙起源ニュートリノ」の発見である。ニュートリノCPの信号が発見されたことにより、当初計画を超えニュートリノCPの研究を加速させる必要が出てきた。そのために、ニュートリノCP測定の最適化を巡る研究、ニュートリノCPの予言、ニュートリノCPと宇宙の物質反物質非対称性の関係の精査、「電子ニュートリノ出現」の信号を使った標準ニュートリノ振動模型を超える理論の探索等、より広範囲な可能性を探る公募研究の補充が必要であると考え。同様に、宇宙起源ニュートリノを発見したことで、研究計画を発展的に改変し、更なる進展に向けて計画を策定中であり、これまで以上の国際連携が必要となってきた。

領域全体を通し、研究の進展により研究分野がより活性化しており、更なる国内外の研究者との連携強化、海外研究者を含めた新たな共同研究の構築等が期待できる。そのためには、現在確保していた海外旅費では全般的に不足気味で、なんとか海外旅費の補充の術を模索し、国内のニュートリノ研究の基盤をより盤石なものとしたい。

また、不足しているものとして、総括班の研究費、特に会議費と旅費がある。本領域には200名の研究者が関係しており、研究会の参加者も100名規模となっている。領域が活性化しており非常に嬉しい悲鳴であるが、領域の規模と比較して総括班の予算が少なく、計画研究班との連携で何とかやりくりしている。もし、可能であれば、総括班予算の補充があるとありがたい。