

領域略称名：ニュートリノ

領域番号：2504

平成30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

「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

平成30年6月

領域代表者 (京都大学・理学研究科・教授・中家 剛)

# 目 次

1. 研究領域の目的及び概要	8
2. 研究領域の設定目的の達成度	10
3. 研究領域の研究推進時の問題点と当時の対応状況	13
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	14
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：総括班, 支：国際活動支援班, 計：総括班及び国際活動支援班以外の計画研究, 公：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	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
Y00 支	15K21734 国際ニュートリノ研究ネットワーク構築によるニュートリノフロンティアの展開	平成27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	10
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	3
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	6
C02 計	25105010 ニュートリノで探る原子核のクォーク・グルーオン構造と標準反応模型の構築	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
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
統括・支援・計画研究 計 12 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	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

	クグラウンド調査				
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・理工研究域・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
D01 公	16H00859 キセノンを用いた二重 ベータ崩壊実験のため の新型液体シンチレー タ検出器の開発	平成28年度～ 平成29年度	清水 格	東北大学・理学研究科・准教授	1
D01 公	16H00861 ニュートリノ高精度測 定を実現する高性能光 検出器の開発	平成28年度～ 平成29年度	西村 康宏	東京大学・宇宙線研究所・助教	1
D01 公	16H00865 精密飛行時間測定によ るニュートリノレス二 重ベータ崩壊探索の新 手法の開発	平成28年度～ 平成29年度	松岡 広大	名古屋大学・素粒子宇宙起源研究機 構・助教	1
D01 公	16H00870 セルフトリガー可能な 24Na線源開発とCaF2 検出器の低バック グラウンド化	平成28年度～ 平成29年度	飯田 崇史	筑波大・数理解物質科学研究科・助教	1

D01 公	16H00873 原子核乾板ハイブリッド検出器によるニュートリノ反応断面積の精密測定	平成28年度～ 平成29年度	小川 了	東邦大学・理学部・教授	1
D01 公	16H00874 CMB偏光Eモードの再訪で迫るニュートリノ質量和	平成28年度～ 平成29年度	田島 治	京都大学・理学研究科・准教授	1
D01 公	16H00875 Intensified CCD Camera System Development for Beam Profile Monitoring	平成28年度～ 平成29年度	F r i e n d M e g a n	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・助教	1
D01 公	16H00876 ダイヤモンド結晶を用いて実現する大強度加速器時代の新しいビーム性能向上の研究	平成28年度～ 平成29年度	西口 創	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・助教	1
D02 公	16H00866 プラズマ酸化障壁を用いたTHz帯電磁波検出用窒化物超伝導接合の開発	平成28年度～ 平成29年度	赤池 宏之	名古屋大学・工学系研究科・准教授	1
D03 公	16H00862 ニュートリノのCP対称性の破れから探るフレーバーの対称性	平成28年度～ 平成29年度	谷本 盛光	新潟大学・自然科学系・教授	1
D03 公	16H00864 スカラーセクターとフレーバー構造から探るニュートリノ質量起源	平成28年度～ 平成29年度	青木 真由美	金沢大学・理工研究域・准教授	1
D03 公	16H00867 大統一理論の構築とその現象論の研究	平成28年度～ 平成28年度	久野 純治	名古屋大学・理学研究科・教授	1
D03 公	16H00868 ニュートリノ質量起源と新型暗黒物質	平成28年度～ 平成29年度	津村 浩二	京都大学・理学研究科・助教	1
D03 公	16H00869 爆発的天体現象とニュートリノ輸送	平成28年度～ 平成29年度	諏訪 雄大	京都大学・基礎物理学研究所・准教授	1

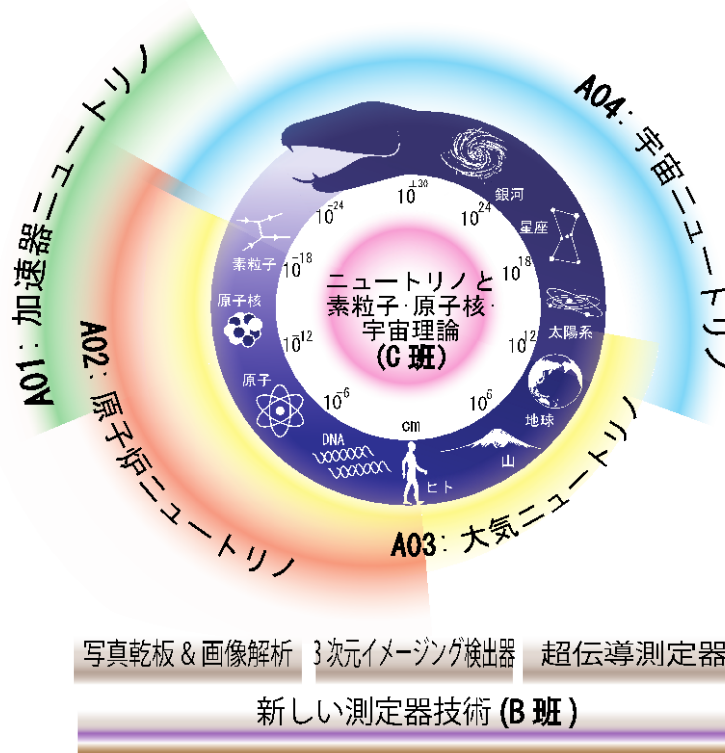
D03 公	16H00871 ニュートリノが切り開くプランクスケールに存在する新しい物理	平成28年度～ 平成29年度	波場 直之	島根大学・総合理工学部・教授	1
D03 公	16H00877 宇宙観測によるニュートリノの絶対質量の決定	平成28年度～ 平成29年度	郡 和範	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授	1
D03 公	16H00878 High energy neutrino emission during flaring activity in non-blazar AGNs	平成28年度～ 平成29年度	BARKOV MAXIM	理化学研究所・研究員	1
公募研究 計 37 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。

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（2015年に梶田がノーベル賞受賞）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模型の提唱（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、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合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/nufrontier/>

## 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。

### ・ 計画研究 A01 [加速器ニュートリノ]

A01 班の研究目的は、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し CP の破れを探索することである。本研究では最終的に、ニュートリノにおける CP の破れの兆候を 95%の有意度で捉えることに成功した。これは、研究計画調書にあげた「CP が最大限に破れている ( $\delta_{CP}=90^\circ$ ) 場合には、CP の破れの発見が 95%以上の信頼度で可能となる。」を達成したことにあたる。具体的に達成した内容は、(1)電子ニュートリノ出現の発見 (有意度  $7.3\sigma$ ) (2)ニュートリノ CP 対称性のパラメータを  $\delta_{CP}=-1.872[\Delta m_{32}^2>0$  の場合]、 $=-1.428[\Delta m_{32}^2<0$  の場合]と決定。特に信頼度 95%で  $-2.99<\delta_{CP}<-0.59[\Delta m_{32}^2>0$  の場合]の領域のみが許容されることを示した。(3)ニュートリノ振動パラメータ  $\sin^2\theta_{23}$  を  $^{+6\%}_{-11\%}$ 、 $\Delta m_{32}^2$  を 3%の高精度 (世界最高精度) で測定することに成功した。以上のように、応募時に設定した目的 (世界最高精度でのニュートリノ混合行列を決定と CP の破れの 95%信頼度での発見) は確実に達成できた。

### ・ 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  $\delta \sin^2\theta_{13}\sim 10\%$  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った。前置検出器は H26 年 12 月に完成し、H27 年 6 月から前置後置両検出器での同時データ取得を開始した。H28 年夏までのデータで  $\sin^2\theta_{13}$  の精度は 13%に達しており、残りのデータの解析および H30 年夏に実施予定の検出器解体時に行う再測量により、10%の精度は達成可能と考える。我々の測定結果を含む  $\theta_{13}$  の値は A01 の T2K 実験の結果と組み合わせ CP 非保存角の測定に用いられた。原子炉の遠隔モニターの開発に関しては、東京大学・北里大学の PANDA、東北大学の KASKA プロトタイプとも検出器としては完成をみた。原子炉での実測定は日本の原子力発電所の再稼働状況のため遅れているが、電力会社との交渉を続けている。我々の液体シンチレータ測定技術を応用して J-PARC におけるステライルニュートリノ探索の測定器の設計を行い、別予算を獲得して実験準備を進めている。総じて、計画研究の目的は十分に達成されたといえる。

### ・ 計画研究 A03 [大気ニュートリノ]

大気ニュートリノによる質量階層構造決定感度を究極化するため、電子ニュートリノと反電子ニュートリノ観測データの統計的分離手法を開発し、さらに領域内のニュートリノ相互作用モデルの最新研究結果 (A01、C02) や、加速器 (A01)・原子炉 (A02)・太陽ニュートリノ振動測定結果を拘束条件として追加した総合解析の枠組みを確立した。大気ニュートリノ観測データを用いた世界最高感度での検証を行い、順階層構造を示唆すること、さらに逆階層構造の棄却優位度は 91.9%から 94.5%の範囲であることがわかり、論文として発表した。さらにタウ型ニュートリノの発現を初めて確認や、三世代ニュートリノ構造からのずれの検証を行い、各々論文として発表した。次世代基幹計画ハイパーカミオカンデ実験では、国際研究グループを立ち上げ、地下大空洞の実現性を示し、高感度光センサーの開発に成功し、実験感度と期待される科学成果を明らかにした。この成果は文科省による大型計画のロードマップ 2017 の掲載に結実し、予算措置がされれば建設をすみやかに開始できる状態に到達した。

### ・ 計画研究 A04 [宇宙ニュートリノ]

IceCube 実験による高エネルギー天文学研究は、PeV 領域のみならず、より低いエネルギー領域である TeV 域においてにおいても宇宙ニュートリノ事象が同定され、10 TeV - 10 PeV ( $=10^5$  TeV) の 3 桁にわたるエネルギー帯域でフラックス測定と到来方向天球分布描画を実現するまでに至った。これは応募時に設定した目標を上回る成果である。しかし、これらの宇宙ニュートリノの放射天体の同定には統計が不足している。このため次世代実験を迅速に進める必要性が高まり、IceCube 実験 Upgrade 用の次期検出器の開発を進めた。卵型の耐圧ガラス球内に 8 インチ PMT 二台を格納する基本デザインを基にプロトタイプ検出器を製作し、現行の IceCube 実験検出器よりも 6 割ほど小型であるにもかかわらず 2 倍のチェレンコフ光検出面積を実現することに成功した。量産に向けた技術的な問題はクリアされ、IceCube 実験のアップグレードを実施する準備が整ったと言える。またこの検出器の技術要素には A03 班で進めているハイパーカミオカンデ検出器と共通するものがあり、A03-A04 班共通でワークショップを開催し、相互交流を進めた。これらの成果は新学術領域としての特性を最大限に活用して実現したものであり、応募時の目標を上回る成果である。IceCube 実験と SuperK 実験による大気ニュートリノ測定はそれぞれの実験データを使った流量解析が行われ、相互に矛盾しない結果を得ている。これは当初予定どおりの達成である。しかし IceCube 実験側の系統誤差がやや大きく、IceCube のデータと SuperK データを統一的に解析して系統誤

差の改善を行うまでには至らず、この点に関しては応募時の目標を上回ったとまでは評価できない。

#### ・ 計画研究 B01 [原子核乾板技術]

研究項目① 物理目的に最適な原子核乳剤を開発・製造し、実験に供給する事が出来る環境を整備する：  
3倍製造装置を設置し自前製造の能力を拡大。また富士フィルムにおける委託製造を可能とし、当面の実験に対応十分な年間700kg程度の乳剤供給体制を整えた。

研究項目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：

記録飛跡の長期保存特性改善に成功。また40nmサイズから1ミクロンのサイズのハロゲン化銀微結晶からなる原子核乾板の製造を可能にし、用途最適なものを適時供給可能とした。

研究項目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㎡程度のフィルム塗布能力を実現。実際のテスト実験、気球実験、ニュートリノ実験ほか応用実験に使用。

#### ・ 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STJ (Superconducting Tunnel Junction) 検出器を開発した。宇宙背景ニュートリノ崩壊探索ロケット実験に用いるNb/Al-STJ検出器の開発では、要求リーク電流値0.1nA以下を満たすSTJの作成に成功した。また電荷積分型の極低温SOI増幅器を試作して、極低温0.4Kの冷凍機内にNb/Al-STJ検出器の直近に設置し性能試験を行った。この試験において設計通りの性能を示すことを確認した。この電荷積分型増幅器と電圧増幅器を組み合わせた最終設計を行い、試作機を作成した。波長40~80μmの遠赤外線ビームを用いて、Nb/Al-STJ検出器プロトタイプの遠赤外線光に対する応答信号を観測した。本研究期間内のロケット実験実施目標を100%まで達成できなかったが、そのための検出器開発において、大きな成果をあげ、80%程度まで準備を進めることができた。また将来の人工衛星搭載実験に向けて、Nb/Al-STJよりエネルギー分解能の高いHf-STJ検出器を開発し、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た。

#### ・ 計画研究 B03 [液体アルゴン TPC 技術]

本研究では、液体アルゴン3次元飛跡検出器を大型化する技術として、(1)低コストで低ノイズ性能をもつ電荷増幅回路とそれを用いた電荷読出しシステムの開発、(2)高純度液体アルゴンの長時間(3ヶ月)維持や粒子が液体アルゴン中を通過した際放出される真空紫外波長の光を捉えた純度モニターの開発、(3)コッククロフトウォルトン回路を用いた30kV以上高電圧生成の達成や有限要素法での計算と宇宙線データの比較から生成電場の理解を進めた。またこれら要素技術について、国際共同研究であるCERN WA105実験70トン検出器で実証試験を進めた。また、日本の知識・技術を盛り込みつつ、良く素性を理解した荷電粒子ビームに対する検出器応答を米国フェルミ国立研究所のLArIAT実験にて測定した。H27~29年度に約180万事例のデータを取得・解析し、将来の大型検出器に対するfeasibilityや起こり得る系統誤差に関する知見を得た。

本研究成果から100トン級の検出器については検出器性能の理解、要素技術の確立ともに達成でき、現在や将来のニュートリノ実験で課題となるニュートリノ相互作用の詳細研究等でこの大きさの液体アルゴンTPC検出器を活用した国内の実験が検討できるようになった。また本研究で開発したASICが他の実験でも活用されたり、LArIAT実験で開発した再構成ツールやシミュレーション、物理結果等が他の液体アルゴン実験で活用されるなど本研究成果の展開も進んでいる。

#### ・ 計画研究 C01 [ニュートリノ現象論]

本研究を開始した時の目的は、(i)3世代標準的混合の枠組みについてはパラメータ縮退の問題を解決して測定精度を議論すること、(ii)標準シナリオを超える枠組みについては、非標準的相互作用・ステライルニュートリノ等に対する将来の実験の感度を議論すること、(iii)荷電レプトンセクターによる探索との比較については大型加速器実験における新物理の兆候を議論することであった。(i)については、将来の長基線実験計画のHKとDUNEの感度を議論してそれらが相補的であること、階層性縮退とoctant縮退が解決できることをそれぞれ示した。(ii)については、非標準相互作用に関して、HK・DUNE・T2HKKの各計画の感度とその感度の系統誤差への依存性・T2HKKのoff-axis角度の最適化について考察することにより将来計画への指針の一助を与え、軽いステライルニュートリノの(3+1)-スキームに関しては新たなCP位相による新しい種類の縮退を発見した。(iii)に関しては、IceCube Gapとμ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、Belle-II実験・COMET実験・LHC実験・ILC実験でどこまで検証できるかを議論した。以上のように三つの課題について、当初の目的をほぼ達成した。

・ 計画研究 C02 [原子核反応理論]

本研究では、核子共鳴領域におけるニュートリノによる中間子生成模型を構築し、深非弾性散乱領域の包括的解析により、原子核パートン分布関数を求めることに成功した。当初の研究目的、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模型の構築は、おおむね達成された。核子共鳴領域の研究では、原子核反応の基礎となるレプトン核子反応模型を構築した。パイ中間子、電子線、光子をプローブとする中間子生成反応の包括的解析により、反応模型の構築、核子共鳴の質量、幅、崩壊分岐比の抽出を行った。その上で深非弾性散乱領域に至るニュートリノ反応模型を構築した。また核子・中間子の終状態相互作用等の原子核効果を含めたニュートリノ原子核反応を調べた。深非弾性散乱領域の研究では、最新のニュートリノ・電子散乱のデータを含む包括的解析により、原子核パートン分布関数を求めた。深非弾性散乱領域から共鳴領域、Regge 領域への統一模型の検討を行い、当初の計画以上の成果も得られた。

・ 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。素粒子論・宇宙論・弦理論の3方向から研究を進め、宇宙の再加熱期のニュートリノ振動によるバリオン数生成機構の研究や、超対称模型の研究、新しい暗黒物質の素粒子模型、宇宙ひもと真空の安定性など、様々な独創的な研究結果が得られた。5年前から、素粒子論は大きく状況が変わった。LHC 実験におけるヒッグス粒子の発見や、その後の新粒子探索実験の結果を受け、素粒子と宇宙の起源となる真実の理論を柔軟に考察し、本計画班から約80編もの論文を発表した。これは、応募時の研究対象をカバーした幅広い研究を達成できたことを表している。国際研究会や定期的な国内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、多くの共同研究が生み出される場を提供することができた。

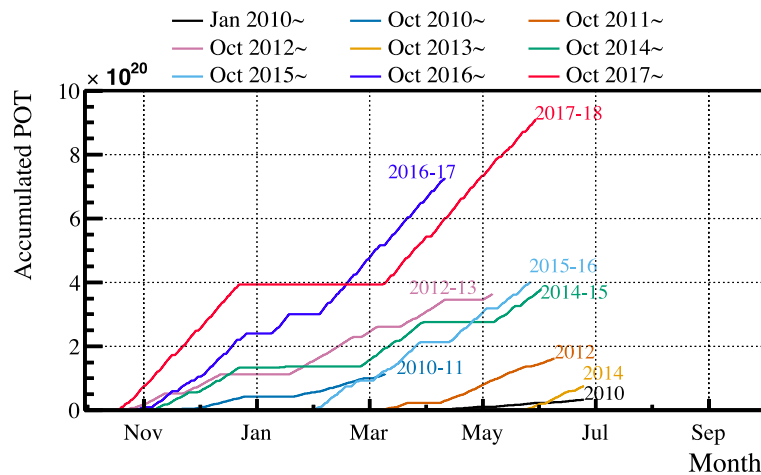
・ 公募研究について

公募研究設定の目的は、戦略的な方針によって進める計画研究ではカバーできていない研究テーマを個々の研究者の自由な発想に基づいて進めることである。この意味で、直接カバーしていなかった「ニュートリノレス2重 $\beta$ 崩壊探索に向けた」萌芽的研究が福田、吉田、飯田(2)、清水、松岡による6件の公募研究でカバーされていた。やはり計画研究にはない「宇宙観測とニュートリノ」も六條、平出、田島(2)と4件で行われた。さらに、新しい測定器技術の開発において、Hartz、栗本、赤池(2)、西村、Friend、西口と7件もの革新的な研究が進められた。理論は個々の研究者による斬新かつ多彩なアイデアの創出が必要不可欠で、本研究期間を通じて17件の公募研究が行われた。以上のように、公募研究があることで本領域の研究の多様性が広がったことにより、公募研究設定の目的は十分達成されたと言える。

### 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。

計画研究 A01 では、長基線ニュートリノ振動実験成功の重要な鍵となる、加速器 J-PARC の運転時間の確保に精力的に取り組んできた。重要な物理成果を遅滞なく発表し、ビームデータ追加により期待される成果向上を適宜 J-PARC Program Advisory Committee (PAC) に訴えることにより、ニュートリノビームの運転時間に対し高い優先度を獲得してきた。さらに確保した J-PARC の運転時間を有効に活用するために、加速器・ビームラインの活動効率を 90% 近くまで向上させた。その結果、2016 年度、2017 年度それぞれ  $7 \times 10^{21}$  と  $9 \times 10^{21}$  Proton-On-Target (POT、ニュートリノビーム生成のために使用した陽子の数) のデータ取得を達成し、ニュートリノビームデータ及び反ニュートリノビームデータそれぞれの量を 2 倍に増やすことに成功した。年度ごとに蓄積したビーム量のグラフを以下に示す。



計画研究 A02 内の原子炉ニュートリノモニター実験に関しては、日本の原子力発電所の休止のため観測実験の実現が遅れているが、測定器は完成させ宇宙線試験等で性能を確かめている。並行して、電力会社との交渉を続けている。一方で、雷雲からのガンマ線測定などの当初予想していなかった科学的応用も見出すことができた。

計画研究 B02 班の「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」では、H30 年 3 月までに COBAND ロケット実験を実施することを計画当初予定していたが、検出器開発の遅れにより、ロケット実験延期を余儀なくされている。特に信号ノイズ比を改善するための極低温 0.4K で動作する増幅器の開発が予定より遅れたが、H26 年に産総研グループ、H27 年に静岡大グループの新しい共同研究者参加もあり、増幅器の専門家を強化することによって、H30 年 4 月現在、設計通りに極低温増幅器プロトタイプが動作しており、最終的な極低温増幅器の設計を完了して、H30 年 6 月にその試作機が完成する予定である。それ以外にも、項目 4 (次ページ) に記述するように、ロケット実験推進のための体制強化を多角的に行ってきた。

#### 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＞

当初計画研究 A04 の代表者である吉田は、基盤研究(S)も採択され、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、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し、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。

##### ＜中間評価の所見等で指摘を受けた事項への対応状況＞

中間評価では A04 に関して、「南極の IceCube 実験において高エネルギー天体ニュートリノの発見が報告されるなど、研究領域発足から早い段階で、期待以上の成果が得られている。IceCube の拡張計画が前倒しになったことで、研究領域発足時の研究計画から変更が必要となっているが、大きな成果に基づいた発展的な計画変更と受け取ることができる。この発展による、今後の研究の進展に期待したい。」と評価され、IceCube 実験の拡張計画にむけた検出器の R&D も進めることになった。D-Egg 検出器と呼ばれる新型検出器は、従来の IceCube 実験チェレンコフ検出器モジュールに比して、60%実面積で小型化され、かつチェレンコフ光検出有効面積は2倍に拡大するという大きな改善を達成した。2度にわたってプロトタイプ検出器製作を行い、実証試験を終了した。この達成を評価され、2018 年から開始される IceCube 実験アップグレードでは、D-Egg 検出器を量産し埋設していく方針が決定された。さらに新型検出器開発に関与した技術チームが、計画研究 A03 でのハイパーカミオカンデ実験検出器システムの開発位研究と連携を開始するなど、計画研究間での相乗効果も生まれている。

B02 に関しては、「ロケット実験についての検討は進んでいるものの、実際の実験に当たっては研究体制の強化を必要に応じて検討されたい。」との指摘を受け、多角的に実施体制強化を行ってきた。COBAND ロケット実験研究は、H26 年 9 月に発足した筑波大学宇宙史国際研究拠点の重要プロジェクトとして強力な支援を受けている。H28 年 4 月に「宇宙史の暗黒を照らす国際研究拠点形成」予算を文科省から獲得し、ソウル大共同研究者のリサーチユニットおよび福井大共同研究者が筑波大併任教授として招致され、実験設計の検討、遠赤外線源開発および超伝導赤外線検出器開発を強い連携のもとに推進している。H29 年 4 月からは新任のテニユアトラック助教が着任し、COBAND 実験の光学系機器（反射鏡、回折格子）の設計開発と超伝導赤外線検出器開発を強力に進めている。また、H29 年 10 月に同拠点は、改組再編により、宇宙史研究センター（朝永センター）となり、新たな予算を得て COBAND 実験を強力に支援する体制を整えた。

B03 に関しては、「研究項目 B03 の本研究領域における位置づけが不明瞭な部分があるため、今後の国際競争における戦略を考慮し、適切な課題設定の下で推進されたい。」と指摘された。我々は、本新学術研究において、日本独自の大型液体アルゴン 3次元飛跡イメージング検出器を用いた物理プログラムを設定するのではなく、開発した内容・ビームテストで得た知見をできるだけ共有することにより、世界のどの実験で液体アルゴン検出器が作製されても、我々が本研究で得た知見を活用できるように努めた。検出器開発やビームテストにおいて国際的（欧州・米国）な共同研究を進めることによって、日本での開発とその知見を国際的にフィードバックできるように、また、日本での開発等も既に国際標準になっているものは積極的に取り入れる体制をしいて、活動を行った。本研究成果から 100 トン級の検出器については検出器性能の理解、要素技術の確立ともに達成でき、現在や将来のニュートリノ実験で課題となるニュートリノ相互作用の詳細研究等でこの大きさの液体アルゴン TPC 検出器を活用した国内の実験が検討できるようになった。また本研究で開発した ASIC が他の実験でも活用されたり、LArIAT 実験で開発した再構成ツールやシミュレーション、物理結果等が他の液体アルゴン実験で活用されるなど本研究成果の展開も進んだ。

## 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）

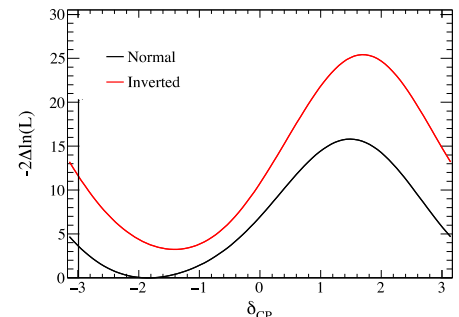
本研究課題（公募研究を含む）により得られた研究成果（発明及び特許を含む）について、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、図表などを用いて研究項目ごとに計画研究・公募研究の順に整理し、具体的に記述してください。なお、領域内の共同研究等による研究成果についてはその旨を記述してください。記述に当たっては、本研究課題により得られたものに厳に限ることとします。

### ・ 計画研究 A01 [加速器ニュートリノ]

【1】T2K 実験でのニュートリノ振動の測定と、原子炉反ニュートリノによる  $\theta_{13}$  の測定結果と組み合わせ、世界で初めてニュートリノで CP 対称性が破れている可能性を 95% の有意度で発見した。 $\delta_{CP} = -1.872$  ラジアンと決定し、95% で許容される領域は右図の範囲である。

【2】電子ニュートリノ出現の発見（信頼度  $7.3\sigma$ ）

【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： $\sin^2 \theta_{23} = 0.526^{+0.032}_{-0.036}$ 、 $|\Delta m_{32}^2| = (2.464 \pm 0.065) \times 10^{-3} \text{eV}^2$  [ $\Delta m_{32}^2 > 0$  の場合]



### ・ 計画研究 A02 [原子炉ニュートリノ]

Double Chooz 実験での原子炉ニュートリノの精密測定からニュートリノ振動角  $\theta_{13}$  を 13% の精度で測定した。上記 T2K での  $\delta_{CP}$  決定には本実験を含む原子炉実験での  $\theta_{13}$  結果が使われている。中性子の水素吸収事象を用いての  $\theta_{13}$  測定法を初めて開発した。また、原子炉運転の出力(2 基, 1 基, 0 基)とニュートリノ観測数の相関から背景事象と  $\theta_{13}$  を同時に求める方法(Reactor Modulation Method)も開発した。

プラスチック・シンチレータおよび液体シンチレータを用いる 2 タイプの原子炉運転遠隔モニターを建設し、調整運転データから雷雲によるガンマ線を観測した。液体シンチレータを用いたステライルニュートリノ探索検出器を設計し、J-PARC での実験実現につなげた。

### ・ 計画研究 A03 [大気ニュートリノ]

大気ニュートリノ観測データに領域内のニュートリノ相互作用モデルの最新研究結果 (A01, C02) や、加速器 (A01)・原子炉 (A02)・太陽ニュートリノ振動測定結果を拘束条件として追加し、世界最高感度での検証により順階層構造を示唆すること、さらに逆階層構造の棄却優位度は 91.9% から 94.5% の範囲であることがわかった。

次世代基幹実験ハイパーカミオカンデ実験では、国際研究グループの下で地下大空洞や高感度光センサーの開発、期待される科学成果を明らかにし、文科省による大型計画のロードマップ 2017 の一プロジェクトとして、予算措置がされれば建設をすみやかに開始できる状態に到達した。

### ・ 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。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。高エネルギーニュートリノ検出器開発では、卵型耐圧ガラス球内に 8 インチ PMT 二台を上下に内蔵する新型検出器 D-Egg の開発とプロトタイプ検出器の製作を完遂した。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及び光学ジェルの製作、低温化で安定的に動作する高電圧回路開発、安価かつ簡易に実装できる地磁気シールドの製作に成功し、その評価を終えた。IceCube 実験検出器に比してチェレンコフ光有感波長領域平均で 2 倍の検出面積を達成した。

### ・ 計画研究 B01 [原子核乾板技術]

2018 年 4 月 GRAINE の第二回オーストラリア気球フライトに成功

2018 年 3 月 J-PARC PAC にてニュートリノ - 水反応断面積の精密測定実験が Stage-1 承認 (E71)

2017 年 11 月 クフ王のピラミッドに大空洞検出を発表

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

2015 年 4 月 ニュートリノ実験用・水標的 ECC を開発

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 低エネルギー  $\nu$  反応研究の為にテスト実験 JPARC T60 のビーム照射を A01 と共同で開始



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  
2014年2月 新原子核乾板塗布室稼働開始 (10月に新乳剤製造装置稼働開始)

#### ・ 計画研究 B02 [超伝導トンネル結合素子技術]

本研究では、宇宙背景ニュートリノ崩壊探索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) 検出器を開発してきた。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。さらに S/N 比を改善するために、極低温 0.4K で動作する前置増幅器の開発を行い、SOI (Silicon-On-Insulator) 技術を用いた前置増幅器を STJ 検出器の直近に設置して、波長 465nm の可視光レーザーパルスを用いて光応答性能試験を行った。この試験において、Nb/Al-STJ の光応答信号を 70 倍に増幅することに成功し、信号ノイズ比を大幅に改善した。さらに電荷積分型の極低温 SOI 増幅器を試作して、極低温 0.4K の冷凍機内に Nb/Al-STJ 検出器の直近に設置し性能試験を行った。この試験において設計通りの性能を示すことを確認した。この電荷積分型増幅器と上記の電圧増幅器を組み合わせた最終設計を行い、試作機を作成した。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、可視光レーザーパルスに対して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]

検出器大型化に必要な電荷読み出しシステム、純化装置、高電圧生成といった要素技術を開発し、CERN WA105 実験の 70 トン検出器で実証試験を進めた。宇宙線信号の観測や、大型検出器を動作させたときに読み出し系にどのくらいの雑音に影響するかなどの試験を進めた。本研究で開発した電荷読み出しシステムで用いる低ノイズな電荷増幅用の CMOS ASIC は、液体アルゴン TPC 以外にも応用が可能なことを活用し、暗黒物質探索などの実験へも技術の発展が見込まれている。また、日本で培った技術・知見も盛り込んだ国際共同実験 (LArIAT) にて、運動量・粒子識別・角度等素性の良く分かった荷電粒子ビームに対する液体アルゴン TPC 検出器の応答を測定した。2015年から2017年の3年間で、約 180 万事象のデータを取得し、パイ中間子-アルゴン原子相互作用の全断面積の解析結果を公表するなどの成果を得、更にデータ解析を進めている。結果や解析ツール・技術は全世界で使用できるものとなっている。

#### ・ 計画研究 C01 [ニュートリノ現象論]

3世代ニュートリノ混合の標準的枠組に関しては、将来の長基線実験計画の HK と DUNE を組み合わせた場合の振動パラメーターの測定精度を議論し、階層性縮退と octant 縮退が解決できることを示した。標準シナリオを超える枠組については、非標準相互作用に関して、HK・DUNE・T2HKK の各計画の感度とその感度の系統誤差への依存性・T2HKK の off-axis 角度の最適化について考察することにより将来計画への指針の一助を与え、軽いステライルニュートリノの (3+1)-スキームに関しては新たな CP 位相による新しい種類の縮退を発見した。荷電レプトンを通して得られる新物理の研究に関しては、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、Belle-II 実験・COMET 実験・LHC 実験・ILC 実験でのレプトンフレーバーの破れの可能性を議論した。

#### ・ 計画研究 C02 [原子核反応理論]

核子共鳴領域 (不変質量 2GeV まで) のニュートリノ反応による中間子生成反応模型を構築した。電子線・パイ中間子反応データの包括的解析のもと、 $2\pi$  中間子発生反応も記述できる模型は他に例を見ない。重陽子反応の解析から終状態相互作用の重要性が示され、ANL/BNL 泡箱実験を再解析する必要性を示した。深非弾性散乱領域の研究では、ニュートリノを含む高エネルギーレプトン・原子核反応の断面積の実験データを解析し、原子核パートン分布関数を求めた。この解析で、荷電レプトン散乱とニュートリノ散乱における原子核補正に違いがあることを示した。深非弾性散乱領域から共鳴領域、また  $Q^2 < 1 \text{ GeV}^2$  の Regge 領域へ繋げる統一模型を検討した。

#### ・ 計画研究 C03 [素粒子・宇宙理論]

これまで本計画研究班から約 80 本の論文が発表され、学術雑誌に掲載されている。A01 班の研究と関連して、CP を破るニュートリノ振動が宇宙のインフレーション直後のプラズマ中において起こり、宇宙のバリオン数を説明する新しい可能性を提唱した。IceCube 実験 (A04) において発見された超高エネルギー宇宙ニュートリノの素粒子論的起源についての世界に先駆けた研究も行い、特に暗黒物質との関連についての研究において成果があがっている。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

からの制限や、宇宙紐による真空崩壊の議論など、様々な興味深い結果が得られた。

## 公募研究より抜粋

### ・ D01: キセノンを用いた二重ベータ崩壊実験のための新型液体シンチレータ検出器の開発

キセノン含有液体シンチレータを用いた高感度な二重ベータ崩壊探索実験を実現するため、本研究では発光時定数による外部バックグラウンド識別を目指す。シンチレーション光に対する吸収・再発光や散乱の効果を正確に評価するため、発光時間波形・波長情報と散乱角度を同時に測定する光学パラメータ測定装置を製作し、再発光確率、及び長波長 (> 400 nm) の散乱確率とその角度依存性を測定した。これらの結果を入力値とした光学シミュレーションを行うことで、発光点識別能の評価が可能となる。

### ・ D01: 原子核乾板ハイブリッド検出器によるニュートリノ反応断面積の精密測定

ニュートリノ反応断面積の精密測定のために、60kg 鉄エマルジョン積層チェンバー (ECC) とエマルジョンマルチステージシフター (シフター) と T2K 実験のニュートリノ検出器 INGRID を用いたハイブリッド検出器によるニュートリノ照射実験を行った。ECC 内の飛跡のみによる解析とハイブリッド解析を並行して行うことにより、バックグラウンドと検出効率の最適化を行っている。前者では、低運動量飛跡によるバックグラウンドが理解できてきており、低多重度の反応断面積の解析に道筋が付けられた。後者は、1/24 の再構成が終わっており、少なくとも 1 本が INGRID と対応が付くことを要求することにより、バイアスの小さい検出が可能となった。高統計化のために、シフターの解析を進めている。

### ・ D01: CMB 偏光観測によるニュートリノ質量和の測定にむけた装置較正と読み出し系開発

宇宙背景放射 (CMB) の偏光観測からニュートリノ質量和の測定を行うためには、高精度の偏光角較正手法と多帯域観測を効率的に行う多重読み出し系の確立が必須である。後者について、従来の CMB 観測の読み出し多重度を 2 倍以上も上回るシステムを開発した。さらに、トリガー機能の付加により、CMB 観測のみならず、放射線計測の用途開拓も可能とした。前者については、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新手法を開発した。実際にチリ・アタカマ高地にて較正試験を行い、その有用性を確認した。

### ・ D03: スカラーセクターとフレーバー構造から探るニュートリノ質量起源

本研究では、ニュートリノの質量生成に寄与する湯川相互作用の構造に注目することで、将来実験において様々なニュートリノ質量生成機構を選別できる可能性があることを示した。スカラーセクターの相互作用の詳細に依らずにニュートリノ質量模型を分類すると、ニュートリノがマヨラナ粒子の場合は 8 つ、ディラック粒子の場合は 18 の機構に分類できる。それらに対して、レプトンフレーバーを破る (LFV) 荷電レプトンの崩壊実験の結果を考慮し、LFV ヒッグス崩壊について議論した。その結果、将来 LFV ヒッグス崩壊が観測された場合には、ニュートリノがディラック粒子であることが示唆されることを示した。

### ・ D03: 爆発的天体現象とニュートリノ輸送

ニュートリノ輻射輸送方程式と流体力学方程式を同時に解くシミュレーションを用いて、ニュートリノによって駆動される突発的爆発天体の研究を進めた。特に、重力波源として極めて注目を集めている連星中性子星を形成する超新星爆発の爆発機構やニュートリノ駆動風の中での元素合成の研究が進み、また高速回転している超新星において回転駆動の非軸対称な不安定モードとニュートリノ加熱が非線形に結合することで現れる新しい爆発機構を発見した。さらに、ニュートリノ輸送方程式の相対論的補正項がニュートリノ加熱率を著しく上げる可能性を示した。

### ・ D03: 宇宙観測によるニュートリノの絶対質量の決定

将来計画されている宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏光観測と宇宙論的な 21cm 線の観測は、ニュートリノの質量の絶対値にたいへん感度がある。このことは、主に既存のニュートリノ振動実験が質量の 2 乗差に感度があることと比較すると、相補的である。CMB の偏光観測、21cm 線観測に加えて、バリオン音響振動 (BAO) の観測を組み合わせることが、我々のアイデアである。我々が発表した文献 (Y. Oyama, K. Kohri and M. Hazumi JCAP 1602 (2016) no. 02, 008) により、次の 3 つの結論が得られた。1) ニュートリノ質量の階層性を決定できる。2) ニュートリノの質量の絶対値を 0.04eV の精度で検出できる。3) ニュートリノ有効世代数を 0.1 世代の精度で検証できる。

## 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（全 483 篇）

- 計画研究A01
  - “Combined Analysis of Neutrino and Antineutrino Oscillations at T2K”, A.K. Ichikawa, A. Minamino, T. Nakadaira, T. Nakaya et al. (T2K Collaboration), Phys. Rev. Lett. 118 no.15, 151801(2017). 査読有 被引用回数 88
  - “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 474
  - “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 252
  - “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 191
- 計画研究A02
  - “Measurement of  $\theta_{13}$  in Double Chooz using neutron captures on hydrogen with novel background rejection techniques”: Double Chooz Collaboration ; JHEP 1601 (2016) 163, arXiv:1510.08937[hep-ex](2015). 査読有
  - “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
  - ◎“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
  - 「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
  - “Atmospheric neutrino oscillation analysis with external constraints in Super-Kamiokande I-IV”, K. Abe, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, \*M. Yokoyama et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 97, 072001 (2018). 査読有
  - “Search for nucleon decay into charged antilepton plus meson in 0.316 megaton · years exposure of the Super-Kamiokande water Cherenkov detector”, K. Abe, Y. Hayato, M. Shiozawa, A. T. Suzuki, \*M. Yokoyama et al. (Super-Kamiokande Collaboration), Phys. Rev. D 96, 012003 (2017). 査読有
  - “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
  - “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
- 計画研究A04
  - “Measurement of the  $\nu_{\mu}$  energy spectrum with IceCube-79”, M. G. Aartsen, A. Ishihara, K. Mase, S.Yoshida et al (IceCube Collaboration) European Physical Journal **C77**, 692 (2017). 査読有
  - “Observation and Characterization of a Cosmic Muon Neutrino Flux from the Northern Hemisphere Using Six Years of IceCube Data”, M. G. Aartsen, A. Ishihara, K. Mase, S.Yoshida et al (IceCube Collaboration) The Astrophysical Journal,**833**:3 (2016).
  - “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

16. “Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector”, M. G. Aartsen, A. Ishihara, K. Mase, S. Yoshida et al. (IceCube Collaboration), Science 342, 1242856 (2013). 査読有  
被引用回数 205
- 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 et al. (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 et al. (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 photon-by-photon spectrometer for neutrino decay search”, Y. Takeuchi, S. H. Kim, H. Ikeda, T. Yoshida et al. , Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), 2015 IEEE International, 551 - 555 (2015), DOI: 10.1109/I2MTC.2015.7151327 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. “Liquid Argon TPC Neutrino Detector”, K. Sakashita, JPS Conf. Proc. 8, 023011 (2015)
25. Optimised sensitivity to leptonic CP violation from spectral information : the LBNO case at 2300km baseline, S.K.Agarwalla, K. Sakashita et. al, arXiv:1412.0593 (2014).
26. “LArIAT: Liquid Argon In A Testbeam”, J.Paley, E.Iwai, T. Maruyama, et al, arXiv:1406.5560 [physics.ins-det] (2014)
- 計画研究 C01
27. “Complementarity Between Hyperkamiokande and DUNE in Determining Neutrino Oscillation Parameters” , S. Fukasawa, M. Ghosh, O. Yasuda, Nucl.Phys. B918 (2017) 337. 査読有
28. “Detecting the  $L \mu$  - $L \tau$  gauge boson at Belle II” , T. Araki, S. Hoshino, T. Ota, J. Sato, T. Shimomura, Phys.Rev. D95 (2017) 055006. 査読有
29. “The possibility to observe the non-standard interaction by the Hyperkamiokande atmospheric neutrino experiment” , S. Fukasawa, O. Yasuda, Nucl.Phys. B914 (2017) 99. 査読有
30. “A way to crosscheck  $\mu$  -e conversion in the case of no signals of  $\mu \rightarrow e \gamma$  and  $\mu \rightarrow 3e$ ” , J. Sato, M. Yamanaka, Phys.Rev. D91 (2015) 055018. 査読有
- 計画研究 C02
31. “Toward a unified model of neutrino-nucleus reactions for neutrino oscillation experiments”, \*S. X. Nakamura, H. Kamano, Y. Hayato, M. Hirai, W. Horiuchi, S. Kumano, T. Murata, K. Saito, M. Sakuda, T. Sato, Y. Suzuki, Rep. Prog. Phys. 80, 056301(2017). 査読有
32. “Dynamical coupled-channels model for neutrino-induced meson productions in resonance region”, \*S. X. Nakamura, H. Kamano, T. Sato, Phys. Rev. D92, 74024 (2015). 査読有
33. “Incoherent pion production in neutrino-deuteron interactions”, \*Jia-Jun Wu, T. Sato, T.-S.H. Lee, Phys. Rev. C91, 035203 (2015) 査読有
34. “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
- 計画研究 C03
35. “Primordial Lepton Oscillations and Baryogenesis,” Y. Hamada, R. Kitano, J. High Energy Phys. 1611, 010 (2016) 査読有
36. “Thermal Effects on Decays of a Metastable Brane Configuration”, Y.Nakai, Y. Ookouchi, Phys. Lett. B762, 321 (2016). 査読有
37. “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
38. “Neutrino-filled Universe”. T. Higaki, R. Kitano, R. Sato, J. High Energy Phys. 1407, 044 (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 443 篇

### 国際会議講演 (全 563 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. “Super-Kamiokande”, M. Shiozawa, XVII International Workshop on Neutrino Telescope, Mar. 13-17, 2017, Venice, Italy. 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. “Superconducting Tunnel Junction Detectors”, Y. Takeuchi, The 18th International Workshop on Next generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN17), Oct. 26-28, 2017, Coventry, UK  
12. “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

#### ・計画研究 B03

13. “Liquid argon TPC for neutrino experiment”, K. Sakashita, Asian Forum for Accelerator and Detector 2018, Jan. 2018.

#### ・計画研究 C01

14. “CLFV theoretical review”, J. Sato, 22nd International Symposium on Particles, Strings and Cosmology (PASCOS 2016), July 10-16, 2016, Quy Nhon, Vietnam. 招待講演  
15. “Synergy of T2HK & DUNE”, O. Yasuda, 3rd International Meeting on Large Neutrino Infrastructures, May 30-31, 2016, KEK, Japan. 招待講演

#### ・計画研究 C02

16. “Analysis of bubble chamber data on neutrino-induced pion production off the deuteron”, S. X. Nakamura, 11th International Workshop on Neutrino-Nucleus Interactions in the Few-GeV region, June 25-30, 2017, Toronto, Canada 招待講演  
17. “Electromagnetic  $N^*$  transition form factors in the ANL-Osaka dynamical coupled-channel approach”, H. Kamano, 11 th international workshop on the physics of excited baryon, Aug. 20-23, 2017, Columbia, SC, USA 招待講演

#### ・計画研究 C03

18. “Strong CP problem on the lattice”, R. Kitano, Johns Hopkins Workshop Series on Current Problems in Particle Theory Summer 2017, “Beyond the Standard Model - Exploring the Frontier”, July. 6, 2017, Budapest, Hungary  
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 552 件

## 国内講演、学会発表 (全 651 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 理論懇話会シンポジウム「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 B02
  2. “超伝導トンネル接合素子 STJ を用いた光・量子計測”, 金信弘, 第 2 回 TIA 光・量子計測シンポジウム, 2016 年 11 月 10 日, つくば国際会議場
  - ・計画研究 B03
  3. “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)RunIII までの現状”, 丸山和純, 日本物理学会, 2017 年 9 月 12 日, 宇都宮大学
  - ・計画研究 C01
  4. “レプトンフレーバーの破れを見る新しい実験の提案”, 佐藤丈, 第一回琉球大学計算科学シンポジウム “素粒子と物性・化学は協力し合える!”, 2017 年 6 月 23 日 琉球大学. 招待講演
- 他 647 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, 11 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. “ニュートリノ物理学へのいざない”, 安田修, 首都大学東京オープンユニバーシティ, 2017 年 5 月 13 日, 5 月 20 日, 6 月 3 日, 首都大学東京.
3. “2015 年ノーベル物理学賞”, 安田修, 数学セミナー, 日本評論社, 2016 年 3 月号, p43.
- ・計画研究 C02
4. “反応理論から探るバリオン励起状態”, 鎌野寛之, 中村聡, 松山晶彦, 佐藤透, 日本物理学会誌第 69 巻第 2 号 74 (2014)
- ・計画研究 C03
5. “宇宙の歴史と物理法則”, 大河内豊, 2015 年 9 月 23 日, 九州大学
6. “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
7. “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
8. “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

## 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 <https://hep-www.px.tsukuba.ac.jp/twiki/bin/view/STJ/StjTalksPub>
18. COBAND 実験ホームページ <http://hep.px.tsukuba.ac.jp/coband/>

・計画研究 C01

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

・計画研究 C02

20. C02 ホームページ <http://nuint.kek.jp/>

・計画研究 C03

21. BS ジャパン「咲くシーズ」に出演, 北野龍一郎, 2014 年 3 月 15 日放送
22. 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
23. 「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
24. C03 ホームページ <http://research.kek.jp/people/kitano/C03/>

## 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現象の発見」, 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 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
9. 末包文彦: Blaise Pascal Chairs 受賞, 2016 年

・計画研究 A03

10. 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

11. 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
12. 石原安野, IUPAP 若手賞, 2013 年 7 月 9 日
13. 石原安野, 第 37 回猿橋賞, 2017 年 5 月 27 日

・計画研究 B01

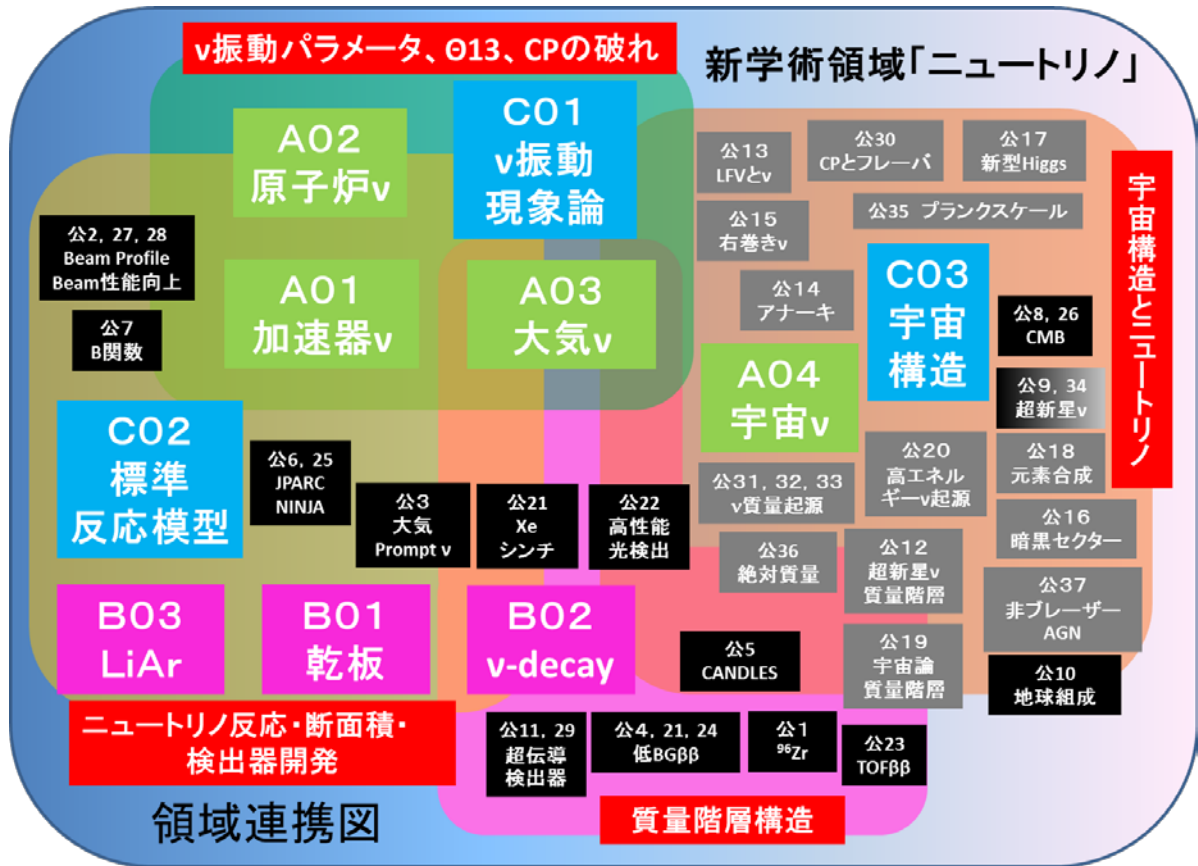
14. 高橋寛, 福田努, 日本写真学会進歩賞, 題目「エマルションガンマ線望遠鏡のための時間分解原子核乾板多段シフターの開発」, 2014 年 5 月 26 日

・計画研究 C02

15. 中村聡, 佐藤透, 平成基礎科学財団第 8 回戸塚洋二賞、題目「精密な  $\nu d$  断面積計算による太陽ニュートリノ問題解決への貢献」, 2017 年 3 月 20 日
16. 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

## 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。



(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、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(上図参照)が連携をすすめた。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だす活動を展開した。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りつつある。

(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, 25 の共同による JPARC T60 テスト実験が組織され、標的を変えた照射を行うと共に、解析のための基礎開発をおこなった。これらをベースに、本格的な物理解析を目指す NINJA 実験を提案し、2018 年 3 月 J-PARC PAC にて Stage-1 承認 (E71) となった。また 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た。B03 班（LiAr）との連携も図り、加速器ニュートリノビーム生成に関する公募研究 2, 7, 27, 28 を含んだ加速器実験の強化を図った。

(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た。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, 21, 23, 24)で含み、領域としての幅を広げた。理論的には公募研究12、19、31、32、33、36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。またIceCube次世代実験にむけた新型光検出器開発では、素子・部品・校正手法に共通項があるハイパーカミオカンデ実験との情報共有を図るため、A03班と合同でワークショップを開催し、開発の現状と問題点について理解を深めた。プロジェクトの垣根を横断した計画研究間の有効な連携をとっている。

(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た。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た。

## 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。）。

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 NINJA実験（原子核乾板を使ったニュートリノ反応測定実験）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、宇宙線ミュオンを使って大型構造物（原子炉の内部等）を探查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進展し、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きた。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、研究成果が前倒して出た。その結果、A01班では、成果発表のため、旅費の枠を拡充し、成果発表を促す予算執行をした。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た。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。特に、平成27年度からは国際活動支援の研究費が採択され、外国での研究発表や海外研究者の招聘に活用し、領域の国際化を促進した。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したと判断した。

・研究費の使用状況（（１），（２），（３）を合わせて３ページ以内）

（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
25	FADC データ収集ボード	CAEN-VX1721	30	666,400	19,992,000	東京工業大学
	プラスチックシンチレータ	10*10*100cm <sup>3</sup>	38	139,650	5,306,700	東京大学
	波長変換ファイバー	Y11(200) 1mmD	1式	4,845,750	4,845,750	京都大学
	原子核乳剤仕込み装置 制御盤	寺製作所製	1式	4,726,911	4,726,911	名古屋大学
	超音波熱圧着ウェッジ ワイヤー凡打一	ウエストボン ド 74760	1式	4,305,000	4,305,000	筑波大学
	VME データ収集システム	VME8100/01 他	1式	3,360,000	3,360,000	東京大学
	ミックスデジタルオシロスコープ	Agilent Technology 社 製 MS09064A	1式	3,051,090	3,051,090	京都大学
デジタルオシロスコープ	ロードシュワ ルツ RT0 1044	1式	2,999,916	2,999,916	千葉大学	
26	GPU 計算機一式	GPU 4 core	1式	2,998,080	2,998,080	千葉大学
	解析計算機システム	Raid 10 64 TByte	1式	2,367,360	2,367,360	千葉大学
	シリコンオイル	KF50-100CS	1式	1,415,232	1,415,232	東京工業大学
	原子核乳剤委託製造	富士フィルム	2台	620,810	1,241,620	名古屋大学
	ファイルサーバー	CSP-32XQSR4	1式	1,129,380	2,258,760	京都大学
27	ビームモニター	(有)清和製作 所製	1台	2,216,160	2,216,160	高エネルギー加 速器研究機構
	68CH ロジックアナライザ	16802A 日本測 器(株)	1式	2,086,128	2,086,128	京都大学
	ファンクションジェネ レーター	東陽テクニカ 1GHz	1式	1,833,062	1,833,062	千葉大学
	ハードディスク	1TB	47	36,756	1,727,650	東京工業大学
	アルミクライオスタット	太陽日酸ガス TCP-312-120	1式	1,598,400	1,598,400	筑波大学
28	ヘリウム減圧極低温冷 却装置(合算)	1.8K、2h 保持、 ジェック東理 社 31-16212	1式	8,991,000	8,991,000	筑波大学
	原子核乳剤委託製造	富士フィルム	3	620,810	1,862,430	名古屋大学
29	原子核乳剤委託製造	富士フィルム	2	620,810	1,241,620	名古屋大学
	デジタルオシロスコープ	岩通製	1台	648,000	648,000	高エネルギー加 速器研究機構

(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。

全年度を通じて、旅費は研究成果発表、共同研究、招聘に使用している。人件費と謝金は研究員の雇用が全ての計画研究班で大部分を占めている。また、Webサイトの制作費の謝金も毎年計上している。その他は、ニュートリノフロンティア研究会の会議費・会場代が主である。以下に主要なもののみを示す。

【平成25年度】

・旅費

[A01班]：研究会派遣2名(家城・鈴木) 725,660円

・人件費・謝金

[A02班]：(研究員1名、他) 4,851,533円、[C01班]：(研究員2名) 2,382,920円、[A01班]：(研究員1名 x5か月) 2,076,850円、[B03班]：(研究員1名) 2,071,500円、[C02班]：(研究員1名) 2,131,589円、[B01班]：(原子核乾板解析技術開発用研究員1名) 1,474,919円、[C03班]：(研究員1名 x3か月) 1,048,980円、[X00班]：(事務員・WEB担当) 983,580円

・その他

ニュートリノフロンティア研究会 会議費 58,950円 X00班

【平成26年度】

・旅費

[A01班]：ニュートリノフロンティア研究会 (14名) 711,660円、J-PARC シンポジウム (9名) 480,748円、加速器ニュートリノワークショップ (6名) 216,480円

[B03班]：WA105 実験国際共同研究者会議 (スイス、CERN、1名) 419,920円、国際共同研究者会議 (米国、1名) 341,600円

[C02班]：NUINT2014 255,170円

・人件費・謝金

[A02班]：研究員3名等 19,095,628円、[C03班]：研究員1名 5,856,240円、[B01班]：(原子核乾板解析技術開発用研究員2名) 5,402,237円、[B03班]：研究員1名 5,372,560円、[A01班]：研究員1名 4,391,000円、[C02班]：研究員1名 4,330,710円、[C01班]：(研究員3名) 4,104,944円、[X00班]：(事務員・WEB担当) 538,600円

[X00班]：ニュートリノフロンティア WEB サイト制作 謝金 300,000円

・その他

ニュートリノフロンティア研究会 会議費 110,160円

【平成27年度】

・旅費

[A01班]：ニュートリノフロンティア研究会 (16名) 709,640円、[国際活動支援班] 招聘旅費 (2名) 866,000円、[B03班]：液体アルゴン TPC 検出器読み出し実験 (スイス、CERN、1名) 487,410円、LA r IAT 荷電粒子ビームテスト (米国、フェルミ国立研究所、1名) 397,830円、[C02班]：NDM15 209,600円

・人件費・謝金

[A02班]：研究員3名等 20,452,881円、[C01班]：(研究員3名) 5,424,737円、[B03班]：研究員1名 5,641,120円、[C03班]：研究員1名 5,371,900円、[C02班]：研究員1名 4,339,106円、[A01班]：研究員1名 4,257,900円、[B02班]：研究員1人 3,850,000円、[B01班]：(原子核乾板解析技術開発用研究員1名) 3,010,893円、

[X00班]：ニュートリノフロンティア WEB サイト制作 謝金 300,000円

・その他

ニュートリノフロンティア研究会 会議費 179,172円

【平成28年度】

・旅費

[国際活動支援班]：Neutrino2016 国際会議 (5名) 1,716,038円、NuFact2016(4名) 868,171円、招聘旅費 (1名) 494,000円、[A01班]：ニュートリノフロンティア研究会 (17名) 591,860円、[B03班]：WA105 実験国際共同研究者会議 (スイス、CERN、1名) 444,530円、LA r IAT 荷電粒子ビームテスト (米国、フェルミ国立研究所、1名) 347,660円、[C02班]：PWA/ATHOS2017 247,780円

・人件費・謝金

[A02班]：研究員3名等 19,053,749円、[C01班]：(研究員5名) 5,592,828円、[C03班]：研究員1名 4,594,160円、[A01班]：研究員1名 4,403,000円、[C02班]：研究員1名 4,398,893円、[C03班]：研究員1名 1,615,806円、[B02班]：研究員1名 x 4か月 1,400,000円

[X00班]：ニュートリノフロンティア WEB サイト制作 謝金 300,000円

・その他

ニュートリノフロンティア研究会 会議費 545,340円

【平成29年度】

・旅費

〔国際活動支援班〕：ニュートリノフロンティア国際研究集会 招へい（5名） 952,120円、外国人研究者招聘（ベトナム1名 スペイン1名） 806,650円、国際会議（インド、3名） 677,250円、ハイパーカミオカンデ研究会議（スペイン、2名） 512,680円、〔A01班〕：ニュートリノフロンティア研究会（13名） 425,590円、エリーチェスクール（イタリア） 409,100円、〔C02班〕：外国人研究者招聘 520,864円（インド） 345,888円（ブラジル）、〔B03班〕：WA105実験国際共同研究者会議（スイス、CERN、1名） 399,110円

・人件費・謝金

〔A02班〕：研究員1.5名等 9,419,939円、〔C01班〕：（研究員3名） 5,652,555円、〔B02班〕：研究員1人 x 10か月 3,500,000円、〔B01班〕：（原子核乾板解析技術開発用研究員1名） 2,989,404円、〔C03班〕：研究員1名 2,557,782円、〔国際活動支援班〕：研究員1名 x 3ヶ月 1,150,150円  
〔X00班〕：WEBサイト制作 謝金 300,000円、パンフ製作費 謝金 270,000円

・その他

〔A01班〕：電磁石検出器組み立て作業 1式 2,600,000円、  
〔X00班〕：ニュートリノフロンティア研究会 会場・会議費 623,240円、ニュートリノフロンティア国際研究集会 会議費 330,000円

(3) 最終年度（平成29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。

計画研究 A02 班では、当初の目的である前置・後置両検出器を用いた高精度の  $\theta_{13}$  振動角測定を成し遂げたが、その過程で、Gd 入り標的領域の外側を覆う補助的な液体シンチレータ領域（ $\gamma$  キャッチャー）もニュートリノ標的として用いる手法を開発した。これにより統計量が当初予定の3倍に増え、当初の目標より精度良い結果を出すことができた。さらに、この領域の水素含有量を正確に測定することにより、系統誤差をさらに軽減した高精度の測定が可能となった。測定精度の向上のため、H30 年度に直接経費を繰越し、シンチレータを抽出して重量および体積の再測定を行うことにした。

計画研究 A04 班では、新型光検出器 D-Egg に搭載予定の超小型高圧電源モジュール由来のノイズを落とし、かつ電力消費を落とすために、設計を一部変更する必要があることが判明した。このため対策を検討し改良案を固めた上で最終型プロトタイプ検出器の製作を行うことに予定を変更し、直接経費を繰り越して H30 年度に製作を実施する。

計画研究 C03 班では、宇宙の暗黒物質がヒッグス場で構成されているスキルミオン暗黒物質の可能性についての研究を進めてきた。宇宙初期のバリオン数生成が起源となり、スキルミオンが現在も残存したとする非対称暗黒物質シナリオについての研究が平成29年度までに論文発表にはいたらないことが判明した。そこで、共同研究者である博士研究員の任期を平成30年度まで延長し、平成29年度に使用予定であった人件費200万円、研究発表用の旅費等に50万円をH30年度に繰越した。

## 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。

本研究領域の目的はニュートリノを使って科学的研究を行うことであるが、いくつかの計画研究の中で特に当該分野に大きいインパクトを与えたのは以下の実験である。[A01 班] T2K 実験は、ミュー型ニュートリノが電子型ニュートリノに変換する現象を最初に発見した点(PRL 112(2014)061802: 被引用数 469)、大気ニュートリノ振動の混合角  $\theta_{23}$  を高い精度で測定している点(PRL 112(2014)181801: 被引用数 251)、原子炉ニュートリノ実験の結果と組み合わせることにより CP 非保存位相の値をある程度推定できる精度の測定をした点(PR D91(2015)072010: 被引用数 263)で、非常に大きなインパクトをニュートリノ振動研究の業界に与えた。[A02 班] Double CHOOZ 実験は、混合角  $\theta_{13}$  を原子炉ニュートリノにより初めて測定した研究成果(PR D86 (2012) 052008: 被引用数 427)が高く評価されている。原子炉ニュートリノ実験は、その消失チャンネルと加速器ニュートリノの出現チャンネルを組み合わせることにより  $\theta_{13}$  と CP 非保存位相の値を決定できるという特徴を持っており、CP 非保存の決定というニュートリノ振動研究の最終目標に向けてインパクトを与え続けている。一方、Double CHOOZ をはじめとする 3 つの原子炉ニュートリノのエネルギースペクトルの観測データは、5MeV 付近の領域で理論値との食い違い（いわゆる 5MeV bump）を示している。この現象が原子核物理による説明を必要としているのかどうかについては現在も論争が続いており、原子炉ニュートリノ観測の結果が原子核物理にまで波及している。[A03 班] スーパーカミオカンデ実験は 1998 年の大気ニュートリノ振動の発見以来、今日に至るまで大気ニュートリノの観測により三世代ニュートリノ混合の振動パラメーターの決定等の成果をあげてきている。本研究領域に属するスーパーカミオカンデのメンバーは、スーパーカミオカンデ実験での経験を十二分に活用して次世代のハイパーカミオカンデ計画のシミュレーションに取り組んできており、三世代ニュートリノ混合シナリオにおける質量パターンの決定についてかなりの信頼度で結論できることなどを示し、当該分野の世界中の研究者から高い評価を得ている(PTEP 2015 (2015) 053C02: 被引用数 148)。[A04 班] IceCUBE 実験は、これまで観測されていなかった高エネルギー宇宙ニュートリノを観測することに初めて成功し、ニュートリノ研究者のみならず宇宙物理の関係者から極めて高い評価を得た(PRL 111 (2013) 021103: 被引用数 537; Science 342 (2013) 1242856: 被引用数 721; PRL 113 (2014) 101101: 被引用数 747)。この発見により、活動銀河核やガンマ線バーストなどの宇宙物理学的物体に関する情報が得られるのみならず、高エネルギーニュートリノを通して宇宙を研究する高エネルギーニュートリノ天文学が開拓されたと言える。

この他、測定器開発の各分野でもインパクトのある研究成果が得られている。B01 班では従来よりも高分解能を持つ原子核乾板の実現に成功してメーカーへの委託製造のルートを確立させる一方、宇宙線ミューオンラジオグラフィという応用研究に乾板を供給し、未解明だったピラミッドの内部構造の探査に貢献した。B02 班では超伝導トンネル接合素子検出器と分光素子を組み合わせた観測装置の開発を進めた。B03 班では液体アルゴン TPC 測定器製作のための基礎技術開発を進める一方、液体アルゴン飛跡検出器荷電粒子ビーム応答テスト実験で液体アルゴン中の  $\pi$  中間子散乱断面積を測定することに成功した。理論研究の分野でもインパクトのある成果が出ている。C01 班では標準模型を超える物理によるさまざまな予言をすることにより、将来の種々の実験計画に示唆を与えた。C02 班では原子核—ニュートリノの散乱断面積を求めるための、共鳴領域と深非弾性散乱領域を統合する模型の構築に向けて研究を進展させた。C03 班では超対称模型の新しい可能性、暗黒物質の新しい可能性、また超弦理論に基づく真空の安定性の研究など、多岐に渡る研究成果をあげることができた。

本研究領域の研究の期間中である 2015 年 12 月には、大気ニュートリノ振動の発見の功績により、梶田隆章氏がノーベル物理学賞を受賞した。各計画研究班のメンバーは、各地でニュートリノに関する一般向けの講演を行ったり、非専門家向けの雑誌に解説記事を書いたりする等のアウトリーチ活動を行い、ニュートリノ研究の成果を広く国民に還元することにも大きく貢献した。

## 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。

本領域の研究組織全体 216 名のうち、39 歳以下の若手研究者は 76 名にのぼり、領域自体が若手中心で運営されてきた。若手研究者育成に係る取組を以下にまとめる。

### ・ 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、若手が中心となって活躍する機会を与えてきた。A01 班では、約 30 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。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行われ、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、実験立案から解析まで、若手研究者が自分の手と頭を動かして成果を出す活動を重視してきた。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きた。

毎年開催した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きた。さらに、大学院生や若手研究者が主導で運営・発表・議論を行う多くの理論的・実験的研究会の開催を支援し、若手のスクールへの講師派遣も積極的に行った。

### ・ 大学院生を含む若手研究者の国内・国際会議での発表と修士・博士論文、受賞

研究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きた。平成 25 から 29 年度における若手研究者（39 歳まで）の実績として、約 250 件の国際会議発表と約 400 件の国内会議発表が行われ、領域全体で 110 件の修士論文と 31 件の博士論文を輩出した。

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。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。A04 班では、平成 25 年度の IUPAP Young Scientist 賞に加えて、平成 29 年度に猿橋賞の受賞者を出した。

### ・ 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きた。平成 25 から 29 年度までで、38 名の若手研究者が研究職（うち 5 名が常勤職）へ就職し、別に若手の常勤のポスト昇進が 10 名あった。

## 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。

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、ニュートリノで CP 対称性の破れの兆候を捉えるなど、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、研究は順調に進展した。それぞれの計画が良く進行したうえに、毎年の研究会等を通してグループ間を融合した議論が進み、領域の研究全体が大きく発展したと言える。

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た。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、IceCube 実験が順調に観測を続け、高エネルギー宇宙ニュートリノの発見をもたらした。さらに 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進み、実施の目処が立った。

以上、予想以上の科学的成果が得られ、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たと結論付けられる。

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た。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が、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現象や深宇宙での生成が考えられる。今後、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高める IceCube 拡張計画は重要で、A04 グループの開発が、新しい光検出器 D-Egg に移行したことは、次期計画への確実な貢献として評価できる。EeV 領域のアクセプタン



スを拡張する手法としては、当初提案のアスカリアン電波観測 ARA も重要である。両者は原型検出器の開発を終え、一部の現地試験も始まった。D-Egg は IceCube Gen-2 の光検出器提案の一つとなり、ARA とともに NSF へ予算化申請が行われた。A04 の開発努力は十分な成果をあげたと言える。

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 にも貢献したと考えられ、今後も理論と実験の相互作用・共進化が続くことを期待したい。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が期待される。

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段階的に成果をあげ始めているが、この新学術領域内では検出器実機の提案には至らなかった。今後も具体的な目標設定を行いつつ、ローンチ提案へむけて着実な開発を続けてほしい。

**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）**

ニュートリノの基本的な相互作用や、宇宙線ニュートリノの起源の解明は初期宇宙における物質生成や天体现象の理解の鍵となる。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推進した。さらに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において着実に成果をあげ次のステップへの基礎をきづいた。エポック的な測定としては、ニュートリノの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等があり、どちらも学術的に注目された研究成果である。これをうけ、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や、物質生成に対する宇宙初期のニュートリノの役割などについての研究が活発であり活発な相互交流があった。またB01班におけるピラミッドや、原子炉内部構造の測定、A02班における雷雲によるガンマ線の発生など素粒子分野の枠にとどまらない研究もさかんであった。総合的には、ニュートリノCPの測定という大目標の着実な進展、PeVニュートリノなどの新しいフロンティアをコアとし、日本の優位性を維持するための測定器の開発、応用的測定など充実した結果を上げた。

**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）**

ニュートリノの謎を解明するチャレンジングな課題に、素粒子・原子核・宇宙の専門家を巻き込んで取り組んだ本領域の研究は、5年間に十分な成果を出したと判断する。ニュートリノ検出反応に重要な役割を果たす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だ。本研究が実験解析に果たした役割は大きいですが、それとともに、高エネルギーニュートリノ散乱が、原子核の相関や核子構造、原子核のパートン分布関数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、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、核物理にも新風を吹き込む重要な成果である。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たことは、この問題の将来への橋渡しとしても重要である。