

領域略称名：ニュートリノ
領域番号：6003

令和5年度科学研究費助成事業
「新学術領域研究（研究領域提案型）」
に係る研究成果報告書（研究領域）兼
事後評価報告書

「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」

領域設定期間

平成30年度～令和4年度

令和5年6月

領域代表者 京都大学・理学部・教授・中家 剛

目 次

研究組織

1	総括班・総括班以外の計画研究	2
2	公募研究	3

研究領域全体に係る事項

3	交付決定額	7
4	研究領域の目的及び概要	8
5	審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	10
6	研究目的の達成度及び主な成果	12
7	研究発表の状況	17
8	研究組織の連携体制	22
9	研究費の使用状況	23
10	当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況	25
11	若手研究者の育成に関する取組実績	26
12	総括班評価者による評価	27

研究組織

(令和5年3月末現在。ただし完了した研究課題は完了時現在、補助事業廃止の研究課題は廃止時現在。)

1 総括班・総括班以外の計画研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
X00 総	18H05535 ニュートリノで拓く素粒子と宇宙	平成30年度 ～ 令和4年度	中家 剛	京都大学・理学研究科・教授	11
A01 計	18H05536 自然ニュートリノ観測と陽子崩壊 探索を通して探る新たな素粒子物 理	平成30年度 ～ 令和4年度	早戸 良成	東京大学・宇宙線研究所・准 教授	7
A02 計	18H05537 加速器ニュートリノビームで探る 素粒子の対称性	平成30年度 ～ 令和4年度	中家 剛	京都大学・理学研究科・教授	6
A03 計	18H05538 宇宙ニュートリノによる標準模型 を超えた物理の探索	平成30年度 ～ 令和4年度	石原 安野	千葉大学・大学院理学研究 院・教授	5
A04 計	18H05539 ニュートリノ質量測定・TeV を 超える物理の探索を実現する次世 代 CMB 観測	平成30年度 ～ 令和4年度	日下 暁人	東京大学・大学院理学系研 究科・准教授	5
B01 計	18H05540 ニュートリノはマヨラナか？希ガ ス検出器による革新的測定法の開 拓	平成30年度 ～ 令和4年度	市川 温子	東北大学・理学研究科・教授	4
B02 計	18H05541 ニュートリノ精密測定にむけた 原子核乾板開発	平成30年度 ～ 令和4年度	佐藤 修	名古屋大学・未来材料・シス テム研究所・特任准教授	4
C01 計	18H05542 ニュートリノで探る対称性と宇宙 像	平成30年度 ～ 令和4年度	伊部 昌宏	東京大学・宇宙線研究所・准 教授	5
C02 計	18H05543 標準理論を超えた新現象とニュー トリノで探る新しい素粒子像	平成30年度 ～ 令和4年度	津村 浩二	九州大学・理学研究院・准教 授	5
総括班・総括班以外の計画研究 計 8 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

2 公募研究

研究項目[1]	課題番号 研究課題名	研究期間	研究代表者 氏名	所属研究機関・部局・職	人数 [2]
D01 公	19H05093 チェレンコフ光による位相幾何学 情報を用いたT1-208背景事 象の除去とその実証	令和元年度 ～ 令和2年度	福田 善之	宮城教育大学・教育学部・教 授	1
D01 公	19H05094 フッ素系界面活性剤による透明な 水シンチレータの実現	令和元年度 ～ 令和2年度	飯田 崇史	筑波大学・数理物質系・助教	1
D01 公	19H05098 ベータ崩壊ニュートリノ・電子角 相関項測定のための、低エネルギ ー粒子検出器の特性	令和元年度 ～ 令和2年度	田中 雅光	名古屋大学・工学研究科・助 教	1
D01 公	19H05099 高時間分解能ガス電子増幅型光検 出器RPC-PMT用光電面の開 発	令和元年度 ～ 令和2年度	松岡 広大	名古屋大学・素粒子宇宙起 源研究所・特任准教授	1
D01 公	19H05102 超新星背景ニュートリノ探索のた めのカムランドでのT2Kビーム 事象観測と基礎研究	令和元年度 ～ 令和2年度	小原 脩平	東北大学・学際科学フロン ティア研究所・助教	1
D01 公	19H05107 ニュートリノ質量分光に向けた多 光子微弱遷移のレート増幅の研究	令和元年度 ～ 令和2年度	平木 貴宏	岡山大学・異分野基礎科学 研究所・特任助教	1
D01 公	19H05108 超伝導技術を利用したニュートリ ノ研究の新展開	令和元年度 ～ 令和2年度	石野 宏和	岡山大学・自然科学研究科・ 教授	1
D01 公	19H05109 LHCにおける長寿命中性レプト ンの探索	令和元年度 ～ 令和2年度	織田 勲	九州大学・理学研究院・助教	1
D01 公	19H05113 大強度陽子シンクロトロンのため の電磁石電流計測による超精密ビ ーム光学の実現	令和元年度 ～ 令和2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・准教授	1
D02 公	19H05096 大型液体キセノン検出器を用いた 低エネルギー太陽ニュートリノの 観測	令和元年度 ～ 令和2年度	平出 克樹	東京大学・宇宙線研究所・特 任助教	1
D02 公	19H05100 多波長データにおける銀河団重力 レンズ効果を用いたニュートリノ 質量和の制限	令和元年度 ～ 令和2年度	宮武 広直	名古屋大学・高等研究院 (理)・YLC 特任助教	1

D02 公	19H05111 ニュートリノ物理と大気ニュートリノスペクトルの精密計算	令和元年度 ～ 令和2年度	緑川 章一	青森大学・ソフトウェア情報学部・教授 (2022.4～名誉教授)	1
D02 公	19H05112 超新星残骸における宇宙線加速限界の直接測定	令和元年度 ～ 令和2年度	浅岡 陽一	早稲田大学・理工学学術総合研究所・准教授	1
D03 公	19H05091 ニュートリノ相互作用を規定する対称性の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	瀬戸 治	北海道大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授	1
D03 公	19H05097 原始重力波を用いたニュートリノ質量獲得機構の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	浅賀 岳彦	新潟大学・自然科学系・教授	1
D03 公	19H05101 荷電レプトンフレーバーの破れを用いたニュートリノ質量生成機構の解明	令和元年度 ～ 令和2年度	大村 雄司	近畿大学・理工学部・講師	1
D03 公	19H05103 鏡像異性体分子中の電子カイラリティと宇宙線衝突によるホモカイラリティの起源	令和元年度 ～ 令和2年度	瀬波 大土	京都大学・工学系研究科・講師	1
D03 公	19H05104 Δ 共鳴から深非弾性散乱に至る核子共鳴領域におけるニュートリノ反応の理論的研究	令和元年度 ～ 令和2年度	佐藤 透	大阪大学・核物理研究センター・教授	1
D03 公	19H05106 ニュートリノで探究する大統一理論の物理	令和元年度 ～ 令和2年度	波場 直之	島根大学・学術研究院理工学系・教授	1
D03 公	19H05110 ハッブル定数、揺らぎの振幅問題から示唆される標準宇宙論の拡張とニュートリノ質量	令和元年度 ～ 令和2年度	高橋 智	佐賀大学・理工学部・准教授	1
D03 公	19H05114 初期宇宙のニュートリノ振動の宇宙論的研究	令和元年度 ～ 令和2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
D01 公	21H00063 異分野連携で挑む革新的水シンチレータ技術の実現	令和3年度 ～ 令和4年度	飯田 崇史	筑波大学・数理物質・助教	1
D01 公	21H00065 極低質量・高計数率飛跡検出器で挑む荷電レプトンフレーバーの破れの探索	令和3年度 ～ 令和4年度	内山 雄祐	東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教	

D01 公	21H00071 電波吸収材で極めるニュートリノ 実験—冷やせる、貼れる、とにかく 黒い！	令和3年度 ～ 令和4年度	安達 俊介	京都大学・白眉センター・特 定助教	1
D01 公	21H00077 超伝導技術と微細構造形成技術の 合体による新しいニュートリノ物 理学の展開	令和3年度 ～ 令和4年度	石野 宏和	岡山大学・自然科学研究科・ 教授	1
D01 公	21H00082 F A S E R 実験における右巻きニ ュートリノ探索のための前段シャ ワー検出器の開発	令和3年度 ～ 令和4年度	田窪 洋介	高エネルギー加速器研究機 構・素粒子原子核研究所・講 師	1
D01 公	21H00083 ニュートリノフラックス精密測定 に向けた二次粒子観測手法の研究	令和3年度 ～ 令和4年度	関口 哲郎	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
D01 公	21H00084 気液2相式液体アルゴンTPC用 c r y o g e n i c e l e c t r o n i c s の 開 発	令和3年度 ～ 令和4年度	岸下 徹一	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	21H00061 反電子ニュートリノ精密観測のた めの $^{13}\text{C}(a, n)^{16}\text{O}$ 反応断 面積測定	令和3年度 ～ 令和4年度	小原 脩平	量子科学技術研究開発機 構・次世代放射光施設整備 開発センター・技術員	1
D02 公	21H00066 すばる望遠鏡高解像度データによ るブレーザー母銀河・中心ブラッ クホール質量の研究	令和3年度 ～ 令和4年度	諸隈 智貴	千葉工業大学・惑星探査研 究センター・主席研究員 (2021-2022)	1
D02 公	21H00070 多波長観測による高赤方偏移の宇 宙大規模構造の測定とニュートリ ノ質量和の制限	令和3年度 ～ 令和4年度	宮武 広直	名古屋大学・素粒子宇宙起 源研究所・准教授	1
D02 公	21H00085 (廃止) GPUを用いた大強度陽子ビーム 損失の高速シミュレータの実現	令和3年度 ～ 令和4年度	栗本 佳典	高エネルギー加速器研究機 構・加速器研究施設・准教授	1
D03 公	21H00060 不活性ニュートリノ暗黒物質の間 接検出可能性	令和3年度 ～ 令和4年度	瀬戸 治	北海道大学・理学研究院・准 教授	1
D03 公	21H00064 陽子寿命の理論予想に関わる行列 要素の格子QCD計算	令和3年度 ～ 令和4年度	新谷 栄悟	筑波大学・計算科学研究セ ンター・研究員	1
D03 公	21H00067 宇宙背景ニュートリノで探る新物 理	令和3年度 ～ 令和4年度	白井 智	東京大学・カブリ数物連携 宇宙研究機構・特任助教	1

D03 公	21H00069 ニュートリノの安定性と崩壊率・ 寿命	令和3年度 ～ 令和4年度	山口 昌英	東京工業大学・理学院・教授	1
D03 公	21H00072 カイラル分子中の電子カイラリテ ィとニュートリノ相互作用による ホモカイラリティ発生	令和3年度 ～ 令和4年度	瀬波 大	京都大学・工学研究科・講師	1
D03 公	21H00074 量子コヒーレンスによる素粒子微 弱過程の増幅に向けた理論研究	令和3年度 ～ 令和4年度	田中 実	大阪大学・理学研究科・助教	1
D03 公	21H00075 量子重力で探るニュートリノ質量 の起源	令和3年度 ～ 令和4年度	野海 俊文	神戸大学・理学研究科・准教 授	1
D03 公	21H00076 ニュートリノと陽子崩壊で探る大 統一理論と世代構造	令和3年度 ～ 令和4年度	波場 直之	大阪公立大学・大学院理学 研究科・教授	1
D03 公	21H00081 ニュートリノトライデント生成過 程の精密測定で検証する新物理	令和3年度 ～ 令和4年度	上坂 優一	九州産業大学・理工学部・特 任講師	1
D03 公	21H00086 ニュートリノとクォークで挑む新 しい力の正体	令和3年度 ～ 令和4年度	遠藤 基	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
公募研究 計 41 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、国：国際活動支援班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

研究領域全体に係る事項

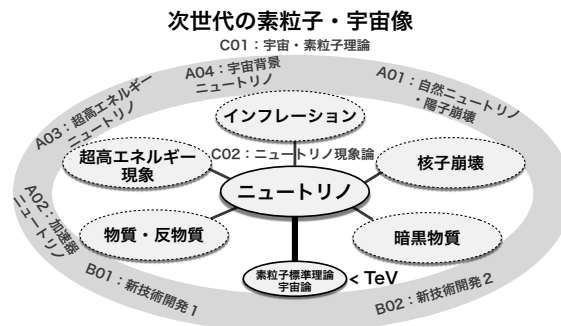
3 交付決定額

年度	合計	直接経費	間接経費
平成 30 年度	292,370,000 円	224,900,000 円	67,470,000 円
令和元年度	297,700,000 円	229,000,000 円	68,700,000 円
令和 2 年度	297,960,000 円	229,200,000 円	68,760,000 円
令和 3 年度	295,620,000 円	227,400,000 円	68,220,000 円
令和 4 年度	285,220,000 円	219,400,000 円	65,820,000 円
合計	1,468,870,000 円	1,129,900,000 円	338,970,000 円

4 研究領域の目的及び概要

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究目的及び全体構想について、応募時の領域計画書を基に、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、どのような点が「革新的・創造的な学術研究の発展が期待される研究領域」であるか、研究の学術的背景や領域設定期間終了後に期待される成果等を明確にすること。

研究の学術的背景、目的、全体構想



素粒子物理学の標準理論は加速器の発展により TeV スケールまでの広い範囲で検証され、その予言値は実験による測定値と良く一致している。標準宇宙論は、宇宙の熱史における元素合成を説明する一方で暗黒物質・暗黒エネルギーの存在を揺るぎないものとした。しかしながら宇宙の物質・反物質非対称性の起源、暗黒物質・暗黒エネルギーの正体、インフレーションの起源、力・物質場の統一など、超初期宇宙から現在までを統一的に理解するには標準理論、標準宇宙論を超える枠組みが必要であることは明白である。究極の素粒子・宇宙像の構築には TeV スケールを大きく超えた物理を探ることが不可避である。

ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノが他のフェルミオンに比べて極端に小さい質量を持ち、クォークと異なり世代間で大きく混合していることを明らかにした。これらの性質は他の素粒子と比べて特異なものであり、ニュートリノが標準模型を超えた枠組みと密接に関わっていることを強く示唆している。実際、ニュートリノ質量起源の最も有力な可能性と考えられているシーソー機構では、ニュートリノの質量の小ささが統一模型の高いエネルギースケールによって説明されるだけでなく、宇宙の物質・反物質非対称性の起源も同時に説明が可能である。このように素粒子と宇宙の未知の領域に踏み込む研究の糸口として、ニュートリノが重要な鍵を握ることが強く期待されている。

本領域では、上図に示す研究分野の世界第一線の研究者集団を組織し、ニュートリノを軸とした“素粒子+宇宙”×“理論+実験”の多角的なアプローチを行うことで TeV スケールを大きく超えた究極の素粒子・宇宙像を探っていく。

本研究領域で期待される革新的・創造的な学術研究

各班において期待される成果を融合させ、ニュートリノの3世代パラダイムの先にある次に進むべき方向性をいち早く見出し、新しい素粒子・宇宙像を構築する革新的・創造的な研究を進展させる。各班において期待される発展および分野の融合による相乗効果は以下の通りである。

・**A01 班**は大統一理論の動かぬ証拠となる陽子崩壊の発見を目指す。また、超新星背景ニュートリノ測定による星形成史の研究、暗黒物質の崩壊や対消滅、ガンマ線バーストなどを起源とする未観測の高エネルギーニュートリノの探索を進展させ、ニュートリノ天文学の研究領域を飛躍的に発展させる。A01 班で研究する大気、太陽ニュートリノ測定精度の向上は、次世代のハイパーカミオカンデ実験の感度向上に必須であり、世界をリードする日本のニュートリノ実験の地位を揺るぎないものとする。

・**A02 班**は、世界最高強度・高品質の J-PARC ニュートリノビームを活用しニュートリノ振動の測定精度を向上させる。また、ニュートリノ・原子核反応の系統誤差を抑える新たな実験を遂行し、T2K 実験と米国の NOvA 実験での θ_{23} 混合角の乖離の問題に決着を付ける。ニュートリノの3世代パラダイムの検証を進め、精密測定データに基づいた新しい素粒子・宇宙像の理論研究を加速させる。

・**A03 班**は IceCube 実験で確立した観測の技術を元に、高エネルギー宇宙ニュートリノをプローブとした新物理探索を進める。A01 班との連携により幅広いエネルギーでのニュートリノ天文学を展開する。また、

最新の一次宇宙線観測データと加速器実験によるハドロン生成測定データを用い、大気ニュートリノの系統誤差を削減する。この研究は A01 班の大気ニュートリノ振動の測定精度の向上にもつながる。

・A04 班は宇宙背景放射の測定を推し進め、振動現象実験では決定が難しいニュートリノ質量および世代数の測定の高精度化を行う。日本グループが最初の受信機を担当する Simons Array と日本独自の GroundBIRD 双方のデータ解析をリードすることで宇宙観測によりニュートリノの性質を決定する。また世界をリードする Simons Array によって B-モードの検出を目指す。ニュートリノ 3 世代パラダイムの検証を進める A01, A02 班と相補的な研究を行い、新しい素粒子・宇宙像の理論研究の促進に繋げる。

・B01 班は革新的な技術である高圧キセノンガス TPC 検出器を用いた次世代二重ベータ崩壊実験の実現を目指す。二重ベータ崩壊実験で検証されるニュートリノ質量のマヨラナ性は宇宙の物質反物質非対称性の起源を探る上で最も重要な情報であり、新しい素粒子・宇宙像の構築に多大な影響を与える。

B02 班は原子核乾板の技術革新を進める。大量塗布技術の確立、長期測定での性能の安定化、可動式の検出器による時間情報を含めた測定の実現を図る。ニュートリノ・原子核反応、および、ハドロン生成反応の精密測定への応用を通し、ニュートリノ振動実験の精度向上に貢献する。

・C01 班は広い理論的研究を総動員し、力・物質の統一理論の枠を超えた暗黒物質、インフレーション模型、さらには時空の量子論までも含む究極の素粒子・宇宙論の構築に向けた飛躍的な発展を狙う。

C02 班では素粒子・原子核・宇宙のあらゆる探査方法を用いて多様なニュートリノ理論の系統分析を進め、真の理論を明らかにする方法を飛躍的に発展させる。

本領域では 5 年の研究期間の間に、以下の研究成果が期待される。

(1) スーパーカミオカンデ実験のデータ解析のさらなる高精度化、有効体積の増加、エネルギー閾値の低減、ラドン除去装置の改良を実現する。これによりニュートリノの質量階層性、ニュートリノ振動物質効果のより深い理解、および陽子崩壊探索を通じた大統一理論の実験的検証が進展する。

(2) ハイパーカミオカンデ実験の検出器要素開発、および解析手法改善による到達物理感度の向上。

(3) T2K 実験で初期の目標である 7.8×10^{21} 陽子のデータを取得し、 θ_{23} を現在の 2 倍以上良い精度である 5% で測定する。ニュートリノ混合行列の精密な決定によってニュートリノの 3 世代パラダイムの検証が進む。またニュートリノにおける CP 対称性の破れを 99% の有意度で検証する。

(4) 新しい原子核乾板と水標的を使ったニュートリノ反応測定実験では、これまでニュートリノ反応では測定されたことのない 2p-2h 反応を同定することでニュートリノ・原子核反応モデルを一新する。

(5) IceCube 実験における宇宙ニュートリノ観測精度の向上とニュートリノ生成モデル系統誤差の低減を図る。これによりニュートリノをプローブに用いた標準模型を超える新物理の探索が進展する。

(6) 次世代実験の超高感度化に重要な大容量冷凍機・高精度光学系・多チャンネル超伝導計測系の開発研究、環境構築が進展する。開発の初期成果を Simons Array および GroundBIRD に適用し、ニュートリノ質量およびインフレーションに対する新たな制限が得られる。

(7) 高圧キセノンガス検出器を素材にさまざまな測定原理を開発することによって、二重ベータ崩壊および暗黒物質探索における現状の限界を超えるための技術を確立する。

(8) 原子核乾板の塗布の自動化、可動式原子核乾板製造装置の開発が進展する。またタウニュートリノの発生源である陽子と原子核の反応で生成される Ds 粒子の生成の詳細測定が進展する。

(9) 広範囲の理論研究を総動員することでこれまでの統一理論の枠を超えた新たな究極理論の構築が進展する。「(1)-(6)の成果」を有機的に取り入れることで究極理論に対する考察の精度が高まる。

(10) 多様なニュートリノ理論の系統分析が進展し、精密測定されたニュートリノ質量と混合角、CP の破れが示唆する新物理が持つ対称性の相関の理解が進む。さらに精密測定データに基づいた新しい素粒子像の構築が進展する。

5 審査結果の所見及び中間評価結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況

研究領域全体を通じ、審査結果の所見及び中間評価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、当該指摘及びその対応状況等について、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

<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>

審査結果の所見では、研究領域全体が目指す課題との結びつきがやや弱い課題を含んでいるように見られることへの対応として、総括班を中心とする**研究領域全体としての進展を推進するようなマネジメント**が必要であるとの指摘を受けた。本研究領域は、異なる生成機構やエネルギーを持つニュートリノを軸とし、素粒子物理学の標準理論と標準宇宙論を超える枠組みへのヒントを分野横断的に探る多角的アプローチをとっている。異なる分野を融合し高い物理目標を目指す点が、まさに本研究領域の強みであり、また指摘の通りその推進が総括班の重要な役割である。そこで本研究領域では、総括班が中心となり、新しい素粒子・宇宙像へと向けた定期的な議論を行うことで有機的な連携の方向性を見出してきた。例えば、本領域における重要研究目標のひとつであるニュートリノ質量行列の理解を例にとると、

- ニュートリノ質量和 (CMB 宇宙観測; A04 班)
- ニュートリノ質量二乗差・CP の破れ (ニュートリノ振動実験; A01, A02 班)
- マヨラナニュートリノ質量測定 (ニュートリノのない二重 β 崩壊探索; B01 班)

のように多面的なアプローチが物理の大きな枠組み理解に向けては重要であり、その達成を本研究領域では目指す。そこで、これらのテーマで理論研究 C01 班、C02 班、及び公募研究を組み込んだ議論を、研究交流等を通して定期的に行うことで研究融合を重視した領域全体の進捗を確認し進めた。

国際動向により計画どおりに進まない場合の対応策(A04 班)としては、次世代 CMB プロジェクトの動向によるリスクを軽減するため、将来計画として、CMB-S4 以外にも Simons Observatory (S0) の次世代アップグレードも視野に入れ開発を進めてきた。CMB-S4 に遅れが出た場合は、S0 アップグレードを推進できるようにすることで本研究課題からの開発成果が生かされるように計画してきたが、実際に S0 アップグレードが日・米・英で予算化され、我々の開発成果が反映されることとなった。また、A04 班では、Simons Array と GroundBIRD という現在進行形の実験からのデータ解析経験や研究成果を着実に積み重ねており、その蓄積が国際動向によらずに成果を出し続けるためのリスクの軽減策といえる。

技術面における困難のために研究目標が達成できない状況に対する対応(B01 班)。B01 班では大型化が可能で、かつ媒質としてさまざまな特色を持つ希ガス検出器である高圧キセノンガス検出器による新しい測定法および技術を確立することで、現行検出器の原理では困難となっている背景事象の大幅な削減を目指してきた。現存技術の限界を打破するような測定原理の開発には思いがけない技術的困難が起こり得るが、新しい測定原理の開発はそれ自体が重要な成果になり得る。本計画においても様々な技術的困難に見舞われはしたものの、領域として定期的にレビューをして解決にむけた計画の見直しを通し研究を着実に進展させるようサポートを行ってきた。様々な分野の研究者が揃う本領域内で議論を進めることで、困難の解決を通じた新しい技術の創生につながられた。

一方、**技術面における困難のために研究目標が達成できない状況に対する対応(B02 班)**では、サブミクロンの位置分解能・高サンプリング検出器としての原子核乾板を用いた実験を推進するために必須となる大規模乳剤製造装置の導入にあたり、予想できる問題点の洗い出しをあらかじめ行うことでリスクに対応した。例えば、原子核乾板の大量生産を実際に連続運転したときに起こりうる問題として、製造装置の軸受けの摩耗破損や洗浄不足等による錆などの発生の影響をうけ、製造される乳剤の性能悪化を想定し、定期的に最小電離粒子に対する感度、ランダムノイズの評価を行い、異常を早期に検出、問題個所の同定を行う体制を作った。また、製造の際に化学薬品や廃液もれが起きて運転を止める状況が起こらないように、安全を重視し定期点検を行った。このように慎重な検討のもと、問題の事前回避に努めてきた。それでも起きる不慮の装置故障等を想定し、生産計画に余裕をもたせて運用することで実験グルー

プへの原子核乾板供給に遅れが生じないように配慮し実行することができた。

B02 班の国内旅費修正が必要との留意事項においては交付申請時に適切に算出し修正を行うことで対応した。

留意事項である**新たな学術領域を担う次世代の若手人材を育てる重要性**については、本研究領域の設立当時から強く認識をしているものである。本領域研究計画班の代表者は若く(A01, A03, A04, B01, C01, C02 班が 40 代)、次世代の研究を担うリーダー的人材であり、本学術領域において重要な役割を果たしてきたことでさらなる研鑽を積み、現在では将来の新たな学術領域の担い手となっている。また、若手研究者が中心となった研究会を開催し、自発的なアイデアの交換や分野を超えたネットワークづくりを推進してきた。長期的な発展を担う次世代研究者の育成に力を入れることで、さらにその先の時代の人材育成を見据えている。若手研究者からは「日本物理学会若手奨励賞」や KEK の「測定器開発修士論文賞」、国際コラボレーション内における若手賞の受賞者を輩出した。また、本計画の実施期間に、参加した若手研究者の助教等のポスト獲得も達成している。

＜中間評価結果の所見等において指摘を受けた事項への対応状況＞

中間評価では所見における指摘はなかったものの、留意事項として「**COVID-19 の影響を受けている海外での実験には懸念があり、状況に応じて計画の見直しが必要である**」ことが指摘された。指摘の通り COVID-19 の影響は、特に海外実験では大きい。

A03 班では 2019 年度末から新型光検出器の製造を日本で行う予定となっており、2020 年 2 月に予定されたデザインレビューを急遽オンラインで行うなどの変更や、リスクを見越しリードタイムが伸びる可能性がある主要部品等をあらかじめ購入するなどの措置を取り、更にそれまで開発で協力をしてきた国内企業との緊密な連携により製造開始の遅れを最小限に留めた。また、衛生面に最大限の注意を払い進めることで、コロナ禍の中で一年半に渡り続けた製造ラインにも大きな遅れが発生しなかった。一方、南極大陸への上陸に制限がかかり、南極点における建設には 3 年の遅れが生じた。このため、埋設した検出器から初期校正データの取得は期間中に達成することが困難となったが、ポストコロナでの建設スケジュールを NSF との協議のもと進め新たな計画を制定した。本計画により製造した光検出器は 2024 年の南極点へ輸送後、2025 年の建設が決定しており、本研究計画からの成果は確実である。

A04 班では、2020 年 3 月から 2020 年 10 月まで観測サイトへのアクセスが出来なくなり、その後もアクセスが制限された状態が 2 年近く続いた。その対応として、当該期間に集中的なデータ解析の準備を行い、観測再開から最短で物理成果の出版が行える準備をすること、現地エンジニアとのビデオ会議等を通してプロジェクトを進めることによって遅れを最小限に留める対応を取った。

A03 班、A04 班共に海外での実験ではあるが、海外共同研究者とはほぼ毎日といえるほどのオンラインミーティングを通し緻密な連携を図り、実験の開発順序や準備を入れ替えることで適切に対応してきた。コロナ禍におけるリスクはゼロではなかったものの、最低限に抑えられたものと認識している。

6 研究目的の達成度及び主な成果

(1) 領域設定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、(2) 本研究領域により得られた成果について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。(1)は研究項目ごと、(2)は研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で記載すること。なお、本研究領域内の共同研究等による成果の場合はその旨を明確にすること。

計画研究

A01[自然ニュートリノ観測と陽子崩壊探索を通して探る新たな素粒子物理]

(1) スーパーカミオカンデ(SK)において20年以上にわたって取得したデータを用い、3種類あるニュートリノの質量の関係(質量階層性)、ニュートリノと反ニュートリノの振動に違いがないか(物質・反物質対称性の破れ)を世界最高の感度で探索、ニュートリノの性質を明らかにするだけでなく、宇宙からなぜ反物質がほぼすべて消え去ったのかという謎の解明につなげることを目指した。さらに同じデータを用い、レプトンとクォークの関係性を明らかにする陽子(核子)の崩壊の発見も目指した。特に領域設定期間に、SKのデータ解析手法を改良することで研究期間以前の統計量から50%増やし、これを用いた質量階層性の判定、CP対称性の破れの有無の検証ならびに陽子(核子)崩壊の発見を目標とした。また、SK水中へのガドリニウム導入を実現、中性子感度を向上させることも目指した。さらに、次世代ハイパーカミオカンデ(HK)検出器感度向上のための検出器構成要素の改良を実現することも目指した。SKのデータ解析改善と感度向上の目標を達成したほか、ガドリニウムの導入も完了、中性子検出の大幅な感度向上も実現した。さらにHKに用いる光電子増倍管(PMT)を含む各種機器の大幅な性能向上も実現、当初の目標を達成した。

(2) SKの有効体積を全実験期間にわたり20%増加させ、新しいデータも追加で用いて統計量を従来の50%増としたほか、系統誤差低減を実現した。このデータならびにT2K実験が出版した結果を併用することで、質量階層性は98%の確率で逆階層を棄却したほか、CP対称性もT2K実験と同様に最大限に破れている($\delta_{CP} = -\pi/2$)ことが好まれるという結果を得た。陽子(核子)崩壊探索については、これまで解析してきた主要崩壊モード($p \rightarrow e^+ \pi^0$ 、 $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$ 、 $p \rightarrow \mu^+ K^0$ 等)以外にも陽子が3つの荷電レプトンに崩壊する場合を網羅的に探索した。崩壊の発見はかなわなかったが、得られた寿命下限値は過去の結果に比べ50%から10倍以上と大幅に長いものとなった。また、SKの水にガドリニウム導入に成功、中性子検出能力を従来の25%から倍以上改善した。さらに、HK用光センサーではガラス中の放射性物質を大幅に減らすことでダークノイズを4kHz程度と半分以下とすることに成功したほか、エレクトロニクスの性能向上も実現、HK検出器性能の向上に必要な開発を完了した。

A02[加速器ニュートリノビームで探る素粒子の対称性]

(1) ニュートリノ混合行列の構造を調べることによって「素粒子の対称性」の研究を進展させる。長基線加速器ニュートリノ実験T2Kでニュートリノ振動のパラメータ、特に θ_{23} を精密に測定し、さらにCP対称性の破れを高感度で探索する。このためT2K実験の性能を向上させるべく、(a)ニュートリノビームの大強度化による大量データの蓄積とニュートリノフラックスの高精度決定、(b)ニュートリノと原子核反応の高精度測定、(c)ニュートリノ振動解析の高度化、を目標とした。ニュートリノビームデータとして 3.8×10^{21} 陽子分をこれまでに収集し、その大部分を使ってニュートリノ振動解析を実行した。そして、 θ_{23} は0.46~0.491、あるいは0.526~0.578とほぼ当初目標であった $\pm 5\%$ の精度で測定することに成功した。CP対称性の破れに関しては、そのパラメータ δ_{CP} を99.7%の有意度で制限した。ニュートリノ振動の研究で、当初の目標を達成した。

(2) (a)について、J-PARC加速器は当初目標の750kWのビーム強度を2023年に達成した。また、新たに「16電極ピックアップ型非破壊ビームモニター」を完成させビーム診断を実施した。(b)ニュートリノ反応の不定性を削減するために、新しい方法でニュートリノ反応断面積を測定した。T2K実験ND280検出器を使って、“Transverse Kinematic Imbalance”という量を π 中間子生成反応で測定し、原子核効果を検証した。また、原子核乾板を使った新しい実験NINJAを立ち上げ、ニュートリノ反応のエネルギー依存性まで含めた測定を実現した。原子核乾板の採用により、これまでの検出器では観測できなかった低エネルギー陽子を高い効率で検出することに成功している。(c)ニュートリノ振動解析においては、A01班との共同研究のもと、有効体積の拡充と多粒子生成事象の活用することで、測定の感度を向上させ

た。ニュートリノ振動解析で、ニュートリノと反ニュートリノのデータを解析し、CP が破れている兆候を発見し Nature 誌に発表した。その結果、CP が破れていない δ_{CP} の値を 2σ (95%) の有意度で排除し、 $\sin^2 \theta_{23}=0.53^{+0.03}_{-0.04}$ と測定した。さらに、データを追加し、2022 年のニュートリノ国際会議で最新結果を更新した。T2K 実験と独立に新たに立ち上げた NINJA 実験では、ニュートリノ反応における生成粒子の多重度を測定することでニュートリノ反応を研究した。その結果は、後方に放出される低エネルギーの π 中間子に理論予想との違いが見えており興味深い結果となっている。ニュートリノと水における荷電カレント反応を検出し、 μ 粒子の運動量再構成法を改良し、より高精度な測定を可能とした。

A03 [宇宙ニュートリノによる標準模型を超えた物理の探索]

(1) 南極点ニュートリノ望遠鏡 IceCube 及び SK 実験による標準理論を超える物理信号探査の感度向上を目指し系統誤差の削減を目標としてきた。南極氷河中光伝搬起因の系統誤差削減に向け、次世代南極点ニュートリノ望遠鏡 IceCube-Gen2 の Phase-1 計画 (*IceCube-Upgrade*) に用いられる新型光検出器 D-Egg100 台の製作、その実験室での較正を進めた。2021 年度に 100 台の製作を終了し南極大陸への輸送前の最終試験進めている。しかし、2022 年末に予定されていた IceCube-Gen2 Phase1 の建設は、コロナの影響で 3 年の遅れが生じた。実データの取得解析を 2025 年度から進める。

標準理論を超える信号解析の系統誤差である大気ニュートリノ流量計算の高度化・精密化として、最新加速器データ及び宇宙線実験データを取入れ、大気ニュートリノ計算コードを拡張、異なるエネルギー領域における統一モデルの確立を進め、系統誤差の削減に成功した。PeV にまで至る高エネルギー領域への展開としては、LHCf 計画からの高統計データ取得を可能とし、高エネルギー領域で最も不定性の大きい中間子の生成に対する理解を進めている。

(2) IceCube-Gen2 実験 Phase-1 計画に向けた新型光検出器 D-Egg の製造においては、プロトタイプ機の開発の進展及びその性能が評価され、2019 年までに世界 12 か国から成る国際共同実験で正式にその採用が決定、最終審査に合格した。そして製造を進め、較正装置を開発し南極氷河中の光伝搬モデルに対する感度を見積もった。IceCube データを用いた解析及びその系統誤差の理解を進め、 $v/c > 0.8$ のモノポールに対する世界最高感度での探査の結果を論文として発表した。また、加速器では難しい標準理論の検証となる 6 PeV のグラシヨウ共鳴事象の観測にも成功した。スーパーカミオカンデ実験での暗黒物質間接探索として、銀河中心方向からの暗黒物質対消滅ニュートリノの探索し、10 GeV/c² 以下の領域では最もよい対消滅断面積への制限を得た。宇宙線ハドロン相互作用とニュートリノフラックスの計算の精密化で異なる加速器実験の生成断面積をパラメータ化し取り入れ、その結果得られた大気ニュートリノモデルと既存のモデルとの比較を宇宙線国際学会 (ICRC2021) において発表した。また、10 GeV を超えるエネルギー領域の不定性要因である K 粒子生成理解に向け、超前方ストレンジネス測定準備を進め、新たなトリガーシステムや DAQ システムを開発し、高統計データの取得に成功した。

A04 [ニュートリノ質量和測定・TeV を超える物理の探索を実現する次世代 CMB 観測]

(1) 初期宇宙観測という他計画研究と大きく異なる切り口で、本領域の目標「ニュートリノを軸とした新しい素粒子・宇宙像の創造」に貢献する。宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) 観測によって、初期宇宙インフレーション探索と、ニュートリノ質量とそれに依存する宇宙大規模構造の測定を目的として、現行実験である Simons Array と GroundBIRD の観測遂行とデータ解析を行った。さらに、CMB-S4 や Simons Observatory アップグレードなどの将来計画に向けた開発研究を推し進めることも目的とした。Simons Array と GroundBIRD については、コロナ禍や装置の不具合による観測中断の影響を受けて必ずしも期待したデータが得られなかったが、Simons Array の前進である POLARBEAR のデータについて、すばる望遠鏡との統合解析による宇宙大規模構造の測定を行い、またデータの再解析による感度向上でチリからの観測としては最高感度でのインフレーション探索を行った。Simons Array と GroundBIRD についても当初の目標達成へむけた観測再開にこぎ着けた。次世代実験に向けた研究開発では、1000 個以上の超伝導検出器を同時に評価する設備を整備し、次世代 CMB およびサブミリ波望遠鏡のための超伝導検出器開発を行ったほか、5G 技術を用いた読出しエレクトロニクス開発や、マイクロ波光学素子のための防反射加工開発に成功した。加えて、新しい前景放射モデルを提案するなど、次世代実験の高精度 CMB 観測のためのデータ解析手法についても研究を進めた。

(2) POLARBEAR 実験から再構成した重力レンズマップとすばる/HSC の銀河サーベイから再構成した重力レンズマップを統合解析することで、 3.5σ の有意性で相関を検出した。この領域では相関の大きさが理

論予測と無矛盾だがやや大きいことが見いだされた。また、POLARBEAR 実験データの再解析により、宇宙初期インフレーションに 95% C.L. で $r < 0.33$ の制限を与えた。これは、チリからの CMB 観測として最も良い制限である。GroundBIRD 実験の感度予測を進め、再電離の光学厚みへの感度計算を出版した。多くの装置開発で成果があり、超伝導センサの外部施設を用いた作製、新しい超伝導転移点センサ評価法の提案と実証、アルミナ・サファイアの防反射加工開発、読出しエレクトロニクスの性能向上を行った。また、前景放射について、これまで無視されてきたダストの影が CMB 観測に与える影響の解析や、Anomalous Microwave Emission (AME) をダスト放射の一部として理解する新しいモデル提案を行った。

B01[ニュートリノはマヨラナか? 希ガス検出器による革新的測定法の開拓]

(1) 未発見の「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊」を、その頻度を定めるニュートリノ有効質量領域 $100 \text{ meV}/c^2$ を超えて探索することができるような希ガス検出器による新しい測定原理・技術を確立することを目指した。本研究により、半値全幅で 0.72% という高いエネルギー分解能を達成し、また飛跡の形状から背景事象を 1/100 に抑えられることを示した。これらにより、目標の性能を達成することに成功したと言える。

(2) 希ガス検出器においてベータ線のエネルギーと飛跡を測定するために我々が独自に開発した Electro Luminescence Collection Cell (ELCC) を、少ない物質量で大面積化するため、フレキシブル基板を用いた ELCC モジュールと、その読み出しのためのディジタイザを開発した。ガス容器内のキセノンを 0.2 ppm 以下に保つことができるキセノンガス循環純化系を確立した。ガス検出器内で電場を発生させる電極について要求される耐電圧性能をもつ電極および導体の接続法を確立した。以上を組み込んだ 180 リットル検出器でガンマ線源を用いた測定を行い、エネルギー較正、光素子の非線形性の補正、光量の時間および位置依存性の補正を開発し適用することで半値全幅 0.72% という高いエネルギー分解能を得ることに成功した。機械学習によるアルゴリズムを用いて飛跡の形状から ν 無二重ベータ崩壊探索における背景事象を 1/100 に抑えられることを示した。なお実際に ν 無二重ベータ崩壊を行うためには、検出器を大型化しなければならない。そのための開発として、1000 リットルガス容器の設計と部分的な製作、ガス容器内で動作するコッククロフト高電圧発生回路、フェイルセーフなガス循環・純化システムの構築、ディジタイザの高実装化を行った。検出器構成要素の放射線の測定では、構成要素のうち、光センサーのセラミックスパッケージおよび PEEK 樹脂が主な背景放射線源であることが確認され、これらを低放射化することで、背景事象はほぼ環境放射線からのものになることが分かった。電離電子とともに生成する陽イオンの信号を検出することに成功した。電離電子の場合に比べて拡散の小さいくっきりとした飛跡情報を得ることにつながる一歩である。その他にも、高電位にある光素子の光ファイバ信号読み出し、暗黒物質探索において、近年利用されているミグダル効果の検証のための研究などを行った。

B02[ニュートリノ精密測定にむけた原子核乾板開発]

(1) 原子核乾板は位置分解能と飛跡分離能力が極めて優れた 3 次元飛跡検出器である。近年の飛跡読み取り装置の飛躍的な高速化により、その他の検出器による大規模実験にもひけを取らない実験的研究が可能となっている。本研究は、特に原子核乾板を用いたニュートリノ関連実験、NINJA、DsTau、FASER 等の実験で必要とされる原子核乾板を供給する体制を整備し、それらの実験のスケジュールに遅滞することなく供給することを狙ったものである。領域設定期間後半、2021 年度より、新規装置群で生産された原子核乾板を DsTau 実験、FASER 実験、GRAINE 実験に供給し、ビーム照射は完了、解析に入っており、プリリミナリーな結果が学会・国際会議で報告されている。また最終年度も、引き続き、DsTau 実験、FASER 実験、NINJA 実験に供給する原子核乾板の作成を続けており、概ね研究目手は達成できている。

(2) 名古屋大学に既存の装置の 10 倍規模の乳剤製造装置群を新規導入し、製造工程の作成し、運転をし

ながら改善を行い、製造装置群の長期稼働体制を構築した。また、製造された原子核乾板を1-2週間ごとにサンプリングし、最小電離粒子(電子)を照射しての検査体制を構築、荷電粒子に対する感度(飛跡を構成する銀粒子数)とランダムに発生するノイズ銀粒子密度を測定し品質を担保する体制を整えた。原子核乾板の長期安定性の改善を行うことで照射期間の長いニュートリノ実験に適した原子核乾板を作成することができた。読み取りの装置のスペックに合わせて、粒子径の大きな硝酸銀での乳剤製造も行い、将来の超高速読み取りにも耐える原子核乾板の作成レシピもできた。これにより、将来の更なる原子核乾板実験の規模拡大に対する準備ができた。

C01 [ニュートリノで探る対称性と宇宙像]

(1) 本研究計画では素粒子現象論、宇宙論、および弦理論を含む基礎理論をニュートリノ物理に現れる様々な対称性を通して結びつけることで既存の分野に囚われない新たな理論仮説を提案するなどの革新的な成果を得ることを目的とし、ニュートリノ物理で探ることの出来る新物理の範囲を広げていくことを目指す。本研究期間内には、物質反物質の非対称性の新たな起源のモデルとニュートリノ実験の関係、大統一モデルにおける陽子崩壊の再検討、新たなインフレーションモデルの考案、新たな暗黒物質モデルの考案、宇宙初期に現れる位相欠陥の新たな側面の研究、超弦理論の真空解の分類など新物理に関わる幅広い研究において成果を得た。

(2) 成果の一つとして、宇宙再加熱期におけるニュートリノ振動による物質反物質非対称性生成機構の提案が挙げられる。特に、インフラトンがヒックス粒子へ崩壊するシナリオにおいて、物質反物質非対称性がニュートリノ振動の PMNS 行列の CP 位相で決定され、低エネルギーニュートリノ実験によって検証可能であることを示した。また、SU(5) 超対称大統一モデルの再評価を行った。その結果、統一理論のヒッグス場との高次数相互作用によって SU(5) 対称性の重いゲージ粒子の質量が減少し、 $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ モードの陽子寿命がハイパーカミオカンデ実験で検証可能になり得ることを示した。さらに、新しいタイプの物質場の統一モデルを考案し、陽子崩壊の崩壊分岐比がこれまでのモデルと大きく異なり得ることを明らかにした。弦理論に関する成果として、4次元時空に $N=2$ 超対称性が残る真空に対する弦理論のモジュラー対称性が与える一般的帰結を考察した。その結果 U(1) 電荷の異なる BPS Hypermultiplet の個数に線形関係式が存在することを示した。これは有効場の理論からは導かれない非自明な関係式であり、弦理論からの有効場の理論への制限の導出につながる成果である。また、「沼地条件」と呼ばれる量子重力と有効場の理論の整合性を図る議論に関しても標準モデルのヒッグス粒子のポテンシャルの性質を精査し、「沼地条件」の不備を指摘した。「沼地条件」はニュートリノの質量のタイプに関するものも存在するため、「沼地条件」の精査は標準モデルを超える物理を目指す上で非常に重要なテーマとなっている。

C02 [標準理論を超えた新現象とニュートリノで探る新しい素粒子像]

(1) 標準理論では説明できない新現象とニュートリノ物理(とその間の関係)を手がかりに、素粒子の標準理論を拡張・修正するボトムアップ型の理論研究を行い、実験からのインプットを積極活用して新しい素粒子像を切り拓くことを目的とする。本研究期間内においてニュートリノ振動実験の測定値の不一致を説明する非標準相互作用の検証を目的として研究を行い、将来の長期線実験においてパラメタ縮退を解くことができることを示した。また、ミュオン原子によるレプトンフレーバーの破れの感度向上を目的として詳細解析を行い、相互作用のカイラリティを区別できることを示した。大統一理論に代わる陽子崩壊の起源を考案することを目指して研究を行い、高エネルギーの対称性で特徴づけられるさまざまな新物理モデルを系統的に構成する方法を発見した。レプトン数およびバリオン数の対称性を破るモデルの新たな展開を目指して研究を行い、それらの対称性を起源とする新しい擬南部ゴールドストーン暗黒物質モデルを構築した。2つ以上の新奇現象を説明する新理論の提案を目指して研究を行い、ハップル定数の不一致問題とミュオン異常磁気能率の理論と実験の乖離を同時説明する新理論を構築した。ニュートリノ質量モデルの系統分析を目指して研究を行い、これまでのモデル構築の研究の中で見逃されてきた新たなモデルを発見し、その現象論的帰結について研究を行った。

(2) 本研究計画の遂行により、ニュートリノ振動実験の詳細解析を行うことで、質量階層性の縮退、 θ_{23} 、CP 位相 δ 、非標準相互作用を決定できることを示した。レプトンフレーバーの破れの探索においては、放出される電子の角度分布を用いると相互作用の形を決められることが分かった。さまざまなレプトン数およびバリオン数を破る過程が、超高エネルギーにおける理論の対称性によっては、他の実験と

矛盾することとなる観測可能なレベルで起こることを示した。これらの研究成果から各種実験のインパクトの最大化し、また探索能力を向上することが出来た。

本計画研究の遂行により、バリオン数やレプトン数の対称性とその破れが新しい形で暗黒物質と結びつき、例えば、暗黒物質と陽子の寿命が関係する可能性が示された。レプトン数の破れに伴う南部ゴールドストーンボソンを活用してハッブル定数の不一致モデルを解くことで、複数の標準モデルを超えた物理を説明するモデルが可能になった。ニュートリノ質量モデルを新粒子の相互作用の観点から分類し系統的に分析することで、これまであまり注目されてこなかったディラックニュートリノに対する新たな質量モデルが発見された。これらの新モデル構築の成果から、新しい視点で新物理モデルを構築することが可能になった。

公募研究

D01: ニュートリノに関する実験研究（実験技術開発研究を含む）（16 件）

[世界の先端を走るニュートリノ実験とその基幹となる実験技術の開発研究(計画研究 A01、A02、B01、B02 に関連)]

D01 成果例：“フッ素系界面活性剤による透明な水シンチレータの実現、異分野連携で挑む革新的水シンチレータ技術の実現” 研究代表：飯田 崇史（筑波大学）

本研究では、水をベースとした液体シンチレータの開発を行うものである。蛍光剤（PPO）は水に難溶であるが、炭化水素系の界面活性剤である非イオン性界面活性剤 Triton-X 100 と陰イオン性界面活性剤のドデシル硫酸ナトリウムを適切な濃度で混ぜ合わせた溶液に PPO とプソイドクメンを導入する手法を開発、発光量 1000 光子/MeV、減衰長 30cm を実現する水シンチレータを実現した。

D02: ニュートリノによる自然（地球・宇宙等）観測の研究（8 件）

[ニュートリノによる自然観測(計画研究 A01、A03、A04 に関連)]

D02 成果例：“多波長観測による高赤方偏移の宇宙大規模構造の測定とニュートリノ質量和の制限” 研究代表：宮武広直（名古屋大学）

本研究では、最新の多波長データを用い、高赤方偏移領域における宇宙の大規模構造からニュートリノ質量和を始めとする宇宙論パラメータに制限を付けることを目的としている。昨年度までに行ったすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) で検出された $z \sim 4$ の大規模超遠方銀河サンプル(ライマンブレイク銀河)の Planck 衛星データを用いた CMB 重力レンズ効果測定及びライマンブレイク銀河の CMB 重力レンズ効果と空間クラスタリングを組み合わせた宇宙論パラメータの制限に関する論文が、Physical Review Letters (PRL) 誌に掲載された。本研究は PRL の Editor's suggestion や Physics Magazine の Viewpoint に選出されるなど非常に高い注目を集めている。

D03: ニュートリノに関する理論研究（18 件）

[ニュートリノに関する理論的研究(計画研究 C01、C02 に関連)]

D03 成果例：“宇宙背景ニュートリノで探る新物理” 研究代表：白井智（東京大学）

本研究では宇宙背景ニュートリノからの制限を用いて、暗黒物質を内包するダークセクターについての制限を行った。特に注目したのはメディエーターと呼ばれる暗黒物質と標準模型粒子を結びつける粒子である。これらのメディエーターについて強い宇宙論的制限を得ることに成功した。この結果によって、他の地上実験からは全く届かないようなパラメータ領域についても制限をかけることが可能になった。なお本研究は C01 班との共同研究である。

7 研究発表の状況

研究項目ごとに計画研究・公募研究の順で、本研究領域により得られた研究成果の発表の状況（主な雑誌論文、学会発表、書籍、産業財産権、ホームページ、主催シンポジウム、一般向けアウトリーチ活動等の状況。令和5年6月末までに掲載等が確定しているものに限る。）について、具体的かつ簡潔に5頁以内で記述すること。なお、雑誌論文の記述に当たっては、新しいものから順に発表年次をさかのぼり、研究代表者（発表当時、以下同様。）には二重下線、研究分担者には一重下線、corresponding author には左に*印を付すこと。

A01 班

<主な雑誌論文>

1. R. Matsumoto*, Y. Hayato, M. Ishitsuka, M. Kuze, Y. Nishimura, A. Suzuki, R. Wendell et al. (Super-Kamiokande collaboration), Search for proton decay via $p \rightarrow \mu + K^0$ in 0.37 megaton-years exposure of Super-Kamiokande, Phys. Rev. D106, 072003 (2022)
2. K. Abe, H. Sekiya**, Y. Hayato, M. Ishitsuka, M. Kuze, Y. Nishimura, A. Suzuki, R. Wendell et al. (Super-Kamiokande collaboration), First Gadolinium Loading to Super-Kamiokande, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A 1027, 166248 (2022)
3. A. Takenaka*, Y. Hayato, M. Ishitsuka, M. Kuze, Y. Nishimura, A. Suzuki, R. Wendell et al. (Super-Kamiokande collaboration), Search for proton decay via $p \rightarrow e + \pi^0$ and $p \rightarrow \mu + \pi^0$ with an enlarged fiducial volume in Super-Kamiokande I-IV, Phys. Rev. D 102, 112011 (2020)
4. M. Tanaka*, Y. Hayato, M. Ishitsuka, M. Kuze, Y. Nishimura, A. Suzuki, R. Wendell et al. (Super-Kamiokande collaboration), Search for proton decay into three charged leptons in 0.37 megaton-years exposure of the Super-Kamiokande, Phys. Rev. D 101, 052011 (2020)
5. M. Jiang*, Y. Hayato, M. Ishitsuka, M. Kuze, Y. Nishimura, A. Suzuki, R. Wendell et al. Atmospheric Neutrino Oscillation Analysis With Improved Event Reconstruction in Super-Kamiokande IV, Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 053F01

<主な学会発表>

1. M. Ishitsuka, Hyper-Kamiokande, The XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, 2020
2. Y. Nakajima, Recent results and future prospects from Super-Kamiokande, The XXIX International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, 2020
3. Y. Hayato, Atmospheric Neutrino Results from Super-Kamiokande, XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2018), 2018

<一般向けアウトリーチ活動>

期間中に一般向け講演会や講義などを70回以上開催した。コロナ禍中にもオンラインによる講演会、見学会、講義などを積極的に実施してきた。特にオンライン見学会は、英語を用い、時間帯もずらした海外向けの会も開催している。2022年度からは対面での開催も再開している。また、スーパーカミオカンデの大気ニュートリノや陽子崩壊のシミュレーションデータならびにサンプロプログラムを自己学習用に公開した。

A02 班

<主な雑誌論文>

1. H. Oshima, T. Nakaya, T. Fukuda, T. Kikawa et al. (NINJA Collaboration), “Measurements of protons and charged pions emitted from numu charged-current interactions on iron at a mean neutrino energy of 1.49 GeV using a nuclear emulsion detector”, Phys. Rev. D 106, 032016, 2022
2. T. Nakaya, T. Nakadaira, Y. Seiya, T. Kikawa et al. (T2K Collaboration), “First T2K measurement of transverse kinematic imbalance in the muon-neutrino charged-current single- π^+ production channel containing at least one proton.”, Phys. Rev. D 103, 112009, 2021
3. T. Nakaya, T. Nakadaira, Y. Seiya, T. Kikawa et al. (T2K Collaboration), “Improved constraints on neutrino mixing from the T2K experiment with 3.13×10^{21} protons on target”, Phys. Rev. D 103, 112008 (2021)

4. T. Nakaya, T. Nakadaira, Y. Seiya, T. Kikawa et al. (T2K Collaboration), “Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations”, Nature 580, 339-344, 2020
5. A. Hiramoto, T. Nakaya, T. Fukuda, T. Kikawa et al. (NINJA Collaboration), “First measurement of ν_{μ} and ν_{μ} charged-current inclusive interactions on water using a nuclear emulsion detector”, Phys. Rev. D 102, 072006, 2020
6. T. Nakaya, T. Nakadaira, Y. Seiya, T. Kikawa et al. (T2K Collaboration), “Search for CP Violation in Neutrino and Antineutrino Oscillations by the T2K Experiment with 2.2×10^{21} Protons on Target”, Phys. Rev. Lett. 121, no.17, 171802, 2018

<主催シンポジウム>

シンポジウムを3回開催した。

<一般向けアウトリーチ活動>

一般向けセミナー、イベントを16回開催した。

A03 班

<主な雑誌論文>

1. “D-Egg: a dual PMT optical module for IceCube”, A. Ishihara, R. Nagai, N. Shimizu, C. Hill, K. Kin, M. Meier, S. Yoshida, A. Pollmann 他 IceCube Collaborations, JINST 18 (2023) P04014.
2. “Search for Quantum Gravity Using Astrophysical Neutrino Flavour with IceCube”, A. Ishihara, K. Farrag, R. Nagai, N. Shimizu, C. Hill, A. Pollmann, M. Meier, S. Yoshida 他 IceCube Collaborations, Nature Physics 18 (2022) 1287-1292.
3. “Search for Relativistic Magnetic Monopoles with Eight Years of IceCube Data”, A. Ishihara, A. Pollmann, R. Nagai, N. Shimizu, C. Hill, K. Farrag, M. Meier, S. Yoshida 他 IceCube Collaborations, Phys Rev Lett (2022), 128:051101.
4. “Detection of a Particle Shower at the Glashow Resonance with IceCube”, A. Ishihara, L. Lu, R. Nagai, N. Shimizu, C. Hill, K. Farrag, A. Pollmann, M. Meier, S. Yoshida 他 IceCube Collaborations, Nature 591 (2021) 220-224.
5. “Measurement of energy flow, cross section and average inelasticity of forward neutrons produced in $\sqrt{s} = 13$ TeV proton-proton collisions with the LHCf Arm2 detector.”, Y. Itow, H. Menjo, K. Sato 他 LHCf Collaboration, JHEP 2020, (2020) 016.
6. “Transverse Single-Spin Asymmetry for Very Forward Neutral Pion Production in Polarized p+p Collisions at $\sqrt{s}=510\text{GeV}$ ”, Y. Itow, H. Menjo, K. Sato 他 RHICf Collaboration, Phys. Rev. Lett. 124, 252501 (2020).

<主な学会発表>

1. A. Ishihara, “A new view of the universe with high-energy astrophysical neutrinos”, Interdisciplinary Science Conference in Okinawa (ISCO 2023), 2023/2/27-3/3, Okinawa, Japan.
2. A. Ishihara, “Review of neutrino oscillation study using high energy atmospheric neutrinos”, Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors (NNN22), 2022/9/28-30, Hidafurukawa, Japan.
3. K. Sato, “Atmospheric Neutrino_Reviews on neutrino fluxes (low E atm nu)”, Neutrino2022, 2022/5/30-6/4, Online
4. H. Menjo, “Very forward particle measurements with LHCf and RHICf”, 21st International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interactions (ISVHECRI 2022), Online, 2022/5/23-28
5. K. Sato, Y. Itow, H. Menjo and M. Honda “Update of the atmospheric neutrino flux simulation ATMNC for next-generation neutrino experiment” 16th TAUP2019, Toyama, Japan (Sept 9-13, 2019)
6. A. Ishihara for the IceCube Collaboration, “The IceCube Upgrade -- Design and Science Goals”, 36th ICRC2019, Madison, USA (July 24-Aug.1, 2019)

<主催シンポジウム>

大気ニュートリノについての国際ワークショップを三回にわたり開催。

<一般向けアウトリーチ活動>

アウトリーチ活動: 5年間にわたり平均年7回以上の啓蒙講演やイベントを多数行ってきた。

A04 班

<主な雑誌論文>

1. Kana Sakaguri, Masaya Hasegawa, Yuki Sakurai, Charles Hill, Akito Kusaka, "Broadband Multi-layer Anti-reflection Coatings with Mullite and Duroid for Half-wave Plates and Alumina Filters for CMB Polarimetry," *Journal of Low Temperature Physics* volume 209, pages 1264-1271 (2022)
2. Tomoki Terasaki, Kenji Kiuchi, Shunsuke Honda, Shugo Oguri, Yume Nishinomiya, Akito Kusaka, "Development of Al-Nb Hybrid Lumped-Element Kinetic Inductance Detectors for Infrared Photon Detection," *Journal of Low Temperature Physics* volume 209, 441-448 (2022)
3. Yume Nishinomiya, Akito Kusaka, Kenji Kiuchi, Tomoki Terasaki, Johannes Hubmayr, Adrian Lee, Heather McCarrick, Aritoki Suzuki, Benjamin Westbrook, "Development of the Characterization Methods Without Electrothermal Feedback for TES Bolometers for CMB Measurements," *Journal of Low Temperature Physics* volume 209, 1079-1087 (2022)
4. The POLARBEAR Collaboration: S. Adachi, M. Hasegawa, A. Kusaka, O. Tajima, et al., "Improved Upper Limit on Degree-scale CMB B-mode Polarization Power from the 670 Square-degree POLARBEAR Survey," *2022 ApJ* 931 101
5. Masashi Nashimoto, Makoto Hattori, Ricardo Génova-Santos, Frédéric Poidevin, "Thermal emission from the amorphous dust: An alternative possibility of the origin of the anomalous microwave emission," *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Volume 72, Issue 1, February 2020, 6
6. K. Kiuchi, S. Oguri, S. Mima, C. Otani, A. Kusaka, "Development of Large Array of Kinetic Inductance Detectors Using Commercial-Class External Foundries," *Journal of Low Temperature Physics* volume 200, pages 353-362 (2020)
7. Satoru Takakura, Masaya Hasegawa, Akito Kusaka, Osamu Tajima, et al, "Measurements of Tropospheric Ice Clouds with a Ground-based CMB Polarization Experiment, POLARBEAR," *2019 ApJ* 870 102
8. Hiroki Kutsuma, Makoto Hattori, Ryo Koyano, Satoru Mima, Shugo Oguri, Chiko Otani, Tohru Taino, Osamu Tajima, "A measurement method for responsivity of microwave kinetic inductance detector by changing power of readout microwaves," *Appl. Phys. Lett.* 115, 032603 (2019)
9. Toshiya Namikawa, Yuji Chinone, Hironao Miyatake, Masamune Oguri, Ryuichi Takahashi, Akito Kusaka, Nobuhiko Katayama, Masaya Hasegawa, Osamu Tajima, et al., "Evidence for the Cross-correlation between Cosmic Microwave Background Polarization Lensing from Polarbear and Cosmic Shear from Subaru Hyper Suprime-Cam," *2019 ApJ* 882 62
10. Hiroki Kutsuma, Makoto Hattori, Kenji Kiuchi, Satoru Mima, Taketo Nagasaki, Shugo Oguri, Junya Suzuki, Osamu Tajima, "Optimization of Geomagnetic Shielding for MKIDs Mounted on a Rotating Cryostat," *J Low Temp Phys* 193, 203-208 (2018)

<主な学会発表>

Akito Kusaka, "Cosmic Microwave Background - challenges and future prospect," *Frontiers in Cosmology*, Bangalore, India (Feb. 2023)

<一般向けアウトリーチ活動>

服部 (分担者) が 2011 年に立ち上げた、高校生に天文学者職業体験の場を提供する 6 泊 7 日の合宿型アウトリーチ活動「もし天」を毎年度開催した。継続的な活動とその成果が評価され、「もし天実行委員会」(代表 服部・板) が 2021 年度東北大学総長教育賞をした。

B01 班

<主な雑誌論文>

“Design and performance of a high-pressure xenon gas TPC as a prototype for a large-scale neutrinoless double-beta decay search.” *S. Ban, M. Hirose, A.K. Ichikawa, T. Kikawa, K.Z. Nakamura, T. Nakaya, S. Tanaka, S. Obara, M. Yoshida, Y. Iwashita, H. Sekiya, Y. Nakajima, K. Ueshima, K. Miuchi, K.D. Nakamura, A. Minamino, T. Nakadaira, K. Sakashita. Progr. of Theor. Exp. Phys. 2020, Issue 3, 033H01 (Mar. 2020)

<主な学会発表>

1. “Front-end-Electronics for the SiPM-readout gaseous TPC for neutrino-less double beta decay search .” 2019 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference K.Z. Nakamura (10/28/2019, Manchester, United Kingdom)
2. “AXEL experiment: High pressure Xe gas TPC for neutrinoless double-beta decay search .” The 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (9/12/2019, Toyama, Japan) S. Ban

<一般向けアウトリーチ活動>

愛知県立一宮高校令和4年度スーパーサイエンスハイスクール文化講演会 2022年6月8日
“探索したいんです。” 市川温子 (2022/06/08, 愛知県一宮市民会館)

B02 班

<主な雑誌論文>

1. T. Ariga, O.Sato et al. (FASER Coll.), First neutrino interaction candidates at the LHC, Phys. Rev. D 104, L091101 (2021)
2. Tani T., Nishio A., Uchida T., Morishima K., Latent image stabilization in nuclear emulsions for cosmic-ray imaging, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, 975(2020)

<主な学会発表>

1. 中野昇 (名大)、原子核乾板における新たなノイズ評価手法の開発、日本物理学会 2019 年秋季大会
2. 眞部祐太、森島邦博 (名大) 他、高精度原子核乾板検出器の開発、日本物理学会 2020 年年会
3. 石塚唯和、佐藤修 (名大) 他、次期原子核乾板実験のための大規模原子核乳剤製造装置の立ち上げ、日本物理学会 2020 年年会
4. 佐藤修 (名大)、有賀智子 (九大) 他、原子核乾板の高位置分解能を利用した DsTau 実験での物理解析、日本写真学会 2021 年度 年次大会
5. 中野昇 (名大)、原子核乾板における現像銀粒子像の詳細測定、日本物理学会 2020 年秋季大会
6. 杉村昂 (名大)、次期原子核乾板実験のための自動フィルム塗布装置の開発、日本物理学会 2020 年秋季大会
7. 六條宏紀 (名大)、次期原子核乾板実験のための自動フィルム塗布装置の開発現状、日本写真学会 2020 年度秋季大会
8. 山本紗矢 (名大) 他、原子核乾板における高コントラスト現像の開発、日本写真学会 2022 年年次大会
9. 臼田育矢 (名大) 他、原子核乾板のリフレッシュによる飛跡の消去速度の研究、日本写真学会 2022 年年次大会

<雑誌等の記事>

1. 有賀昭貴 (千葉大)、有賀智子 (九州大)、原子核乾板で拓くニュートリノ研究のエネルギーフロンティア: CERN-FASER 実験, 日本写真学会誌 84 巻 1 号
2. 福田 努 (名大)・木河達也 (京大) 【話題】 J-PARC で新しく始まったニュートリノ反応測定実験、日本物理学会誌 第 75 巻 第 7 号

C01 班

<主な雑誌論文> (理論論文であり corresponding author は設定されていない)

1. “On odd number of fermion zero modes on solitons in quantum field theory and string/M theory.”, Y. Sato, Y. Tachikawa and T. Watari. JHEP 09 (2022) 043
2. “Proton Decay: Flipped vs Unflipped SU(5)”, J. Ellis, M. A. Garcia, N. Nagata, D. V.

Nanopoulos, K. A. Olive. JHEP 2005 (2020) 021

3. “Probing heavy dark matter decays with multi-messenger astrophysical data”, Koji Ishiwata, Oscar Macias, Shin’ichiro Ando, Makoto Arimoto. JCAP 2001 (2020) no.01, 003
4. “Throwing away antimatter via neutrino oscillations during the reheating era”, Shintaro Eijima, Ryuichiro Kitano, Wen Yin. JCAP 03 (2020) 048
5. “Novel GUT with apparently complete SU(5) multiplets”, Masahiro Ibe, Satoshi Shirai, Motoo Suzuki, Tsutomu T. Yanagida. Phys.Rev. D100 (2019) no.5, 055024
6. “The swampland conjecture and the Higgs expectation value”, Koichi Hamaguchi, Masahiro Ibe, Takeo Moroi. JHEP 1812 (2018) 023

<主な学会発表>

1. 大統一理論におけるヨタスケールの物理, 日本物理学会 2022 年秋季大会 永田夏
2. バリオン暗黒物質偶然一致問題と非対称暗黒物質の可能性, 日本物理学会 2019 年秋季大会 伊部昌宏

<一般向けアウトリーチ活動>

1. 宇宙が教えてくれること. 石渡弘治 (2021/12/09, 鶯谷高校 (岐阜市))
2. 特殊な幾何的対象と「数」概念の拡張から立ち現れる、整数論と超弦理論との関連, Satoshi Kondo and Taizan Watari (March 2, 2020)
3. 宇宙のはじまり, Ryuichiro Kitano (5/11/2019, 朝日カルチャーセンター横浜教室)

C02 班

<主な雑誌論文>

1. “Baryon number non-conservation as Peccei-Quinn mechanism”, T. Ohata, K. Takeuchi, *K. Tsumura, PRD104, 035026 (2021)
2. “Resolving the Hubble tension in a U(1) $L_\mu - L_\tau$ model with Majoron”, T. Araki, K. Asai, K. Honda, *R. Kasuya, J. Sato, T. Shimomura, M. J.S. Yang, PTEP 2021, 103B05
3. “Pseudo-Nambu-Goldstone dark matter from gauged U(1)B-L symmetry”, *Y. Abe, T. Toma, K. Tsumura, JHEP 05 (2020) 057
4. “Testing NSI suggested by the solar neutrino tension in T2HK and DUNE”, *M. Ghosh, O. Yasuda, Mod. Phys. Lett. A 35, 17, 2050142 (2020)
5. “New model for radiatively generated Dirac neutrino masses and lepton flavor violating decays of the Higgs boson”, *K. Enomoto, S. Kanemura, K. Sakurai, H. Sugiyama, PRD100, 015044 (2019)

<主な学会発表>

1. “Determination of coupling patterns by parallel searches for $\mu^- \rightarrow e^+$ and $\mu^- \rightarrow e^-$ in muonic atoms”, Joe Sato, Third International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (3rd J-PARC HEF-ex WS), 14 Mar-16 Mar 2023, J-Parc, Tokai, Japan
2. “The origin of pseudo-Nambu-Goldstone-Boson Dark Matter”, Koji Tsumura, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2022) and International Joint Workshop on the Standard Model and beyond, 29 Nov-2 Dec 2022, KEK, Tsukuba, Japan
3. “Theoretical overview”, Osamu Yasuda, 21st international workshop on Next Generation Nucleon Decay and Neutrino Detectors, 28-30 Sep 2022, Hida City, Gifu, Japan
4. “Review of Dark Photon Phenomenology”, Takashi Shimomura, The 3rd J-PARC Symposium, 23-26 Sep 2019, Tsukuba International Congress Center, Tsukuba, Japan
5. “(招待講演) Introduction to Neutrino Physics”, Hiroaki Sugiyama, Physics at the Cosmic Frontier, 7-9 Mar 2019, University of Toyama, Toyama, Japan

公募研究

1. A “First Identification of a CMB Lensing Signal Produced by 1.5 Million Galaxies at $z \sim 4$: Constraints on Matter Density Fluctuations at High Redshift”, H. Miyatake *et al.*, Phys. Rev. Lett. 129, 061301 (2022)
2. Dark photon from light scalar boson decays at FASER T. Araki, K. Asai, H. Otono, T. Shimomura, Y. Takubo, JHEP 03 (2021) 072

8 研究組織の連携体制

研究領域全体を通じ、本研究領域内の研究項目間、計画研究及び公募研究間の連携体制について、図表などを用いて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

ニュートリノを軸に、素粒子から宇宙、実験から理論まで、幅広く多様な研究者の交流による研究の進展があった。下の表は、本研究領域での研究項目間の連携を、検出器開発における連携(◆)、系統誤差及び背景ノイズ削減に向けた連携(☆)、特定の物理テーマを探究する連携(□)ごとに記したものである。

	A01 班	A02 班	A03 班	A04 班	B01 班	B02 班	C01 班	C02 班
A01 班		☆1, 2□1	◆1☆1, 2 □1, 4, 5				☆2	□1, 2, 3, 4
A02 班			☆1, 2□1	□3	◆2□3	◆4☆2	□1, 3, 4	□1, 3, 4
A03 班						☆2	□1, 4, 5	□1, 4, 5
A04 班							□3, 4, 6	□3, 4, 6
B01 班							□3	□3
B02 班								
C01 班								□1, 4
C02 班								
公募研究 D01-03	☆1, 2	☆2□4 ◆5	☆1, 2	◆3 □3, 6	◆6		□3, 4, 6	□3, 4, 6

様々テーマについての連携により得られた、研究成果の例を以下にあげる。

1. 検出器開発での連携:

◆1) A01-A03 (水・氷)チェレンコフニュートリノ検出器； ◆2) A02-B01 MPPC アンプや読み出し回路； ◆3) A04-D01 超電導検出器； ◆4) A02-B02 原子核乾板の大量生産； ◆5) A02-D01 加速器ビーム強度増強； ◆6) B01-D01 ガス型光検出器

◆1 では、IceCube 実験、HK 実験でのそれぞれの光センサーの開発において、領域をきっかけとして、研究会の場に止まらない恒常的な交流が生まれ、PMT ガラス材質改善や校正 LED 光源開発など、互いの光センサーの性能の向上や校正手法の改善につながるアイデアが得られた。◆4 は、原子核乾板を共同で大量に製造、解析する装置の整備が進み、領域内の様々な研究の同時進行が可能となった。

2. 系統誤差削減に向けた連携

☆1) A01-A02-A03 大気ニュートリノモデルの精度向上

☆2) A01-A02-A03-B02-D03 ニュートリノ相互作用理解

☆1 では、SK 実験で用いられる MeV-GeV 領域大気ニュートリノに関する Honda モデル、Bartol モデルと、IceCube 実験で用いられる TeV-PeV 領域の 1 次元解析モデルとの連携を図る大気ニュートリノ生成研究会(Workshop for Atmospheric Neutrino Production in the MeV to PeV range)を 3 度開催し、モデル間の差異や系統誤差の理解を進めた。☆2 ではニュートリノと水標的反応の精密測定(PhysRevD. 102. 072006)等が行われ、原子核乾板による精密測定結果を T2K ニュートリノ振動解析に適用した連携研究が立ち上がり、解析の初期成果が得られた。

3. 特定の物理テーマを探究する連携: 理論と実験の連携、異なる実験間の連携で、進展を後押しした。

□1) A01-A02-A03 振動パラメータ、CP 対称性、質量階層性； □2) A01-C01-C02 陽子崩壊探索；

□3) A02-A04-B01-D02-C01-C02 ニュートリノ質量理解； □4) A01-A03-A04-C01-C02 標準模型を超える物理； □5) A01-A03-C01-C02 暗黒物質； □6) A04-C01-C02-D02-D03 宇宙論

□1 では、T2K での加速器ニュートリノと、SK での大気ニュートリノの合同振動解析が行われ、統合した解析結果が今夏公開予定である。□6 は D02 公募研究による Subaru/HSC による銀河サーベイと A04 による CMB 観測の統合解析によりニュートリノ質量に依存性を持つ宇宙大規模構造を測定した(T. Namikawa *et al* 2019 *ApJ* 882 62)、などの成果が得られた。

9 研究費の使用状況

研究領域全体を通じ、研究費の使用状況や効果的使用の工夫、設備等（本研究領域内で共用する設備・装置の購入・開発・運用、実験資料・資材の提供など）の活用状況について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。また、領域設定期間最終年度の繰越しが承認された計画研究（総括班・国際活動支援班を含む。）がある場合は、その内容を記述すること。

領域内での研究費活用の例として、A01 班が研究開発を進めるハイパーカミオカンデ用光センサーについては、水(氷)チェレンコフ型ニュートリノ検出器全般に活用が見込まれる研究開発であり、A02 班および A03 班においても開発に関する情報を共有してきた。B01 班が開発を進める光検出器 MPPC 読出し回路は、A02 班で開発してきた新型ニュートリノ検出器にも応用できる技術で汎用性が高い。B02 班が整備を進める原子核乾板の量産体制により作成した原子核乾板は、領域内の A02 班研究の一部である NINJA 実験に供給し利用されており、領域における連携が非常にうまく機能した事例である。また、タウニュートリノ研究を行う DsTau 実験と SHiP 実験、LHC 衝突点からのニュートリノを測定する FASER ν 実験など、数多くの領域外ニュートリノ関連プロジェクトでもこの原子核乾板が活用される。このように、本領域で購入・開発している設備や装置は、領域内で広く活用できるよう、十分な情報共有、資産共有が行われてきた。また、A04 班の開発する希釈冷凍機を用いた超伝導検出器開発・評価用設備など、領域外でも活用・共用が可能なものについては、積極的に共用を進めてきた。そして、暗黒物質探索の新実験 DOSUE-RR が立ち上がり、暗黒光子の新しいパラメータ領域を探索することに成功した。一方、計算機設備とその上で使用するソフトウェアについては、セキュリティやライセンス上の制約から共用はしない。例えば、C01 班は計算機設備を拡充し、新たなタイプの宇宙ひも形成のシミュレーションを行うなどの成果が上がった。以上のように、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た。

領域全体に関する総括班の研究費は、領域研究会開催にかかる経費、研究会への参加旅費、事務員雇用、領域 Web ページ整備やパンフレット作成の広報費など、効果的に使用している。各計画研究班においても効率的な研究費の使用がなされている。例えば、A01 班においては、東京大学 VDEC の共用機材を使用することで研究開発のコストを圧縮した。A02 班においては、ビームタイムの遅れなど当初の計画からは予想できない事情が発生したが、柔軟に資金を繰り越し計画通りの研究内容を実現した。A03 班においては、IceCube-Gen2 の光検出器を製造・作成する鍵となる設備の設置を行い、大きな進展が見られた。A04 班では、シナジーのある JSPS 拠点形成事業の採択により、旅費や研究会運営費の効率的な活用が見込まれる。B01 班では、ほぼ予定通りの執行を行っているほか、光センサー等の共用やキセノンガスを液化回収するなどしてコスト圧縮に努めた。B02 班においても、原子核乾板の量産に不可欠な設備への投資を順調に進め、研究開発が大きく進捗した。旅費については、国内外の研究集会での研究発表、海外の第一線で活躍する研究者の招聘、海外での研究交流や海外観測サイト派遣等、若手研究会の支援などに用いられている。各研究班で雇用している研究員・特任助教は、研究遂行の中心的な推進力として活躍すると共に、領域研究会への活発な参加など、領域全体の活性化に大きく貢献した。研究費に関しても、効率的に使用されていた。

領域設定期間最終年度の繰越しが承認されたのは、総括班、A02 班、A03 班、A04 班、B01、C02 班である。

総括班では、最終年度中頃に予定して国際会議の開催を年度終盤の 2023 年 3 月に開催し、予算を繰り越すことで、その後半年かけて国際動向調査と成果取りまとめを行った。これは、新型コロナウイルスの

感染拡大による影響に伴い研究協力機関における感染症拡大防止の観点に基づく渡航制限により、海外研究協力者の招へいが困難となったことによる計画変更である。

A02 班は、2022 年 7 月にニュートリノビームデータの収集に使用予定の陽子加速器の不測の故障により、実験を実施出来なくなった。陽子加速器の修理・調整を行ったうえで、ニュートリノビームデータの収集を 2023 年春から行う必要が生じた。データ収集後にニュートリノビームデータの物理解析、データ解析の結果発表、論文執筆、成果取りまとめを行うために予算を繰り越した。

A03 班では、新型光検出器の広ダイナミックレンジ化を目指し開発した読み出し基板に当初使用を予定していた部品が、世界的な半導体不足により入手困難となった。入手可能な部品を用いた基板デザイン代案を作成し、半導体部品の入手期間の延長に応じて二つのデザインから選択できるようにすることでリスクの低減を図ることとした。このための当該部品の製造及び試験期間を延長に対応するため予算の繰越を行った。

A04 班では、チリ観測サイトで観測中の望遠鏡に設置した半波長板システムの故障により、想定していたデータ取得ができなかった。このシステムは既に復旧し、現在データ収集を再開している。データ取得を継続し、2023 年度中に宇宙背景放射マップ作成と物理解析に加え、偏光天体観測によるアクシオン探索を行い、論文執筆と発表を行うために、予算を繰り越した。

B01 班では、高圧キセノンガス検出器の大型化のため、高密度化したディジタイザモジュールの開発を進めてきた。モジュールの部品である集積回路素子の入手困難により当初計画より遅れが生じたため、繰越して、そのモジュールを実際に製作する。

C02 班では、雇用していた研究員 2 名が、8 月と 11 月に相次いで転出することとなり、2022 年度内で研究のとりまとめが困難になった。専門知識を持った代替りの研究者を探し、2023 年 7 月より雇用開始する。

以上、コロナ禍におけるリスクはゼロではなかったもののその影響を最低限に抑えて、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た。

10 当該学問分野及び関連学問分野への貢献の状況

研究領域全体を通じ、本研究領域の成果が当該学問分野や関連学問分野に与えたインパクトや波及効果などについて、「革新的・創造的な学術研究の発展」の観点から、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、応募時に「①既存の学問分野の枠に収まらない新興・融合領域の創成を目指すもの」、「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を目指すもの」のどちらを選択したか、また、どの程度達成できたかを明確にすること。

本研究領域は「②当該領域の各分野発展・飛躍的な展開を目指すもの」に該当する。

スーパーカミオカンデの解析手法改善によってニュートリノの性質の謎解明に一步近づくことに成功した。ガドリニウム導入成功による中性子感度の大幅な向上と合わせ、今後5年間のデータ収集、ならびに将来のハイパーカミオカンデによって宇宙の起源や成り立ちの謎に迫ることが可能であることを示す革新的な成果を得た。

スーパーカミオカンデの有効体積を過去20年以上取得した全データについて創造的な手法で20%拡大し、本領域研究開始以前に比して50%以上の統計増加を実現した。これにより、ニュートリノの質量階層性について逆階層を98%で棄却した。CP対称性の破れのパラメータはT2K実験と整合性のある結果となった。また、陽子崩壊の棄却領域も大幅に拡大し、大統一理論の研究の進展に貢献した。

各種の原子核とニュートリノとの反応を精密に測定するNINJA実験では、放出される荷電粒子の角度分布を粒子別に大角度アクセプタンスかつ低運動量(陽子の場合200MeVまで)閾値で測定した。反ニュートリノと鉄標的との反応ではMCに対して、 π 中間子の後方散乱が有意に多いなど注目されている。また、FASER実験でのLHC衝突反応で生じた高エネルギーニュートリノ反応の初検出に原子核乾板を供給することで貢献した。今後、本格的に解析が進み、低エネルギーから高エネルギーまでのニュートリノ反応詳細解析によりこの分野の発展につながることを期待される。

貴ガスを用いた新しい検出器技術を開発し、2MeV程度の電子に対して、半値全幅で0.72%という高エネルギー分解能で測定し、同時に飛跡の形状を再構成することに成功した。これによりニュートリノがマヨラナ粒子かどうかを確認する「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊」探索において、現状の限界を越える可能性が開けた。

一立方キロメートルの容量を持つ南極点ニュートリノ望遠鏡IceCubeによってTeV-PeV領域での標準モデルを超える物理の探査で世界最高感度を更新すると共に、加速器での到達が難しいエネルギー領域での標準理論の検証を高感度で進めた。次世代ニュートリノ望遠鏡IceCube-Gen2での格段の感度向上の礎を築く成果を得た。

POLARBEARデータ解析によって、チリでの観測による高感度インフレーション探索が可能であることを示した。また、次世代高感度実験を実現するためのマイルストーンを達成し、一部の技術は実際にSimons ArrayおよびSimons Observatoryに採用され、2020年代後半に計画されるCMB-S4の候補技術にもなっている。

新たなタイプの統一模型における陽子崩壊分岐比の予言や大統一理論以外の陽子崩壊の起源の理論研究が大きく進展した。これらの成果は将来のハイパーカミオカンデ実験が探ることができる新物理の範囲を広げる重要な成果と言える。また、4次元 $N=2$ 超対称性を持つ超弦理論の真空における非自明な条件や、量子重力の整合性条件である「沼地条件」の不備の指摘など量子重力に関連した研究にも進展を見た。「沼地条件」にはニュートリノ質量への制限なども含まれており、その精査は標準モデルを超える物理を目指す上で非常に重要なテーマとなっている。

11 若手研究者の育成に関する取組実績

研究領域全体を通じ、本研究領域の研究遂行に携わった若手研究者（令和5年3月末現在で39歳以下。研究協力者やポスドク、途中で追加・削除した者を含む。）の育成に係る取組の実績について、具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

本領域は研究組織全体193名のうち若手研究者（39歳以下）が80名を占めており、領域自体が若手中心で構成されている。若手研究者育成に係る取り組みを以下にまとめる。

・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様々な研究会を主催・共催している（15件）。領域全体の研究会では学生が主導するセッションが企画され、学生同士の気安さで活発な議論が展開された。各計画研究においても多くの海外研究者が参加する国際コラボレーション会議、ニュートリノ原子核散乱や機械学習などテーマを絞った若手主導の研究会が実施されている。また将来の領域を牽引できる若手を育成するため、学生やポスドクが企画する若手研究会の開催をサポートした。若手が企画者の立場で研究会のテーマ決めから議事進行までを務めたことで、研究に対する意識が向上し、また運営を通して若手間の連携が進んだ。

・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を担当することを積極的に推奨している。A01班の最新ソフトウェア技術による解析手法改善、検出器の低放射能化、大口径光電子増倍管の開発等は大学院生を含む若手研究者によって進められている。A03班ではIceCube実験にインパクトのある貢献を行った研究者を評価する賞（IceCube Impact Award）を作り、2019年度に千葉大の若手研究者が受賞した。B01、B02班の最先端技術開発では、立案、装置製作、実験、解析までの全てを担えるように若手を研究の中核に起用している。C01、C02班においても、自由な発想と独創性に優れた若手研究者が研究の主力である。

・大学院生を含む若手研究者の国内・国際学会での発表と修士・博士論文、受賞

できるだけ多くの若手研究者に対して発表の機会を与えることで、積極的な若手研究者のプロモートを行っている。2018年度から2022年度において、国内・国際会議での若手研究者の発表は全体の1473件に対し約2/3の割合を占め、修士論文82件、博士論文19件が発表されている。

A02班の加速器ニュートリノ測定、A04班のCMB観測、B01班のガスTPC検出器開発では、学生がKEKの「測定器開発修士論文賞」を受賞した。A02班では2019年度、2020年度、2021年度と連続して「日本物理学会若手奨励賞」の受賞者を出している。A03班では2019年度の「仁科賞」、B01班では2020年度の「猿橋賞」、B02班では2021年度の「若手科学者賞」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、さらにステップアップするための支援を行っている。2018年度から2022年度までで、83名の若手研究者が研究職（うち27名が常勤職）へ就職している。また他分野で経験を積んだ若手をリーダーとして積極的に雇用し、領域が取り組む課題の多様性を高めている。

12 総括班評価者による評価

研究領域全体を通じ、総括班評価者による評価体制（総括班評価者の氏名や所属等）や本研究領域に対する評価コメントについて、具体的かつ簡潔に2頁以内で記述すること。

評価者： 飯島徹(名古屋大学・大学院理学研究科・教授、専門:素粒子実験)

本領域では、世界最先端のニュートリノ実験（スーパーカミオカンデ(SK)、T2K 実験、IceCube 実験）と CMB 観測（Simons Array および GroundBIRD）、大学をベースにした独自かつ挑戦的な技術開発（次世代二重 β 崩壊実験に向けた高圧キセノンガス TPC 検出器の開発、および独自の原子核乾板技術の開発）、最先端の理論計画研究が連携して、着実に成果を得るとともに、次のステップに向けた研究が活発に進んでいることを高く評価したい。

具体的には、スーパーカミオカンデにおける大幅な感度を向上させた陽子崩壊探索結果、T2K 実験におけるニュートリノの CP 対称性の破れのパラメータの制限、IceCube 実験における 6PeV のニュートリノによるグラシヨウ共鳴事象の観測成功、CMB データ解析による宇宙初期インフレーションに対する新たな制限（95% C. L. で $r < 0.33$ の制限）などがあげられる。その一方で、SK へのガドリウム導入、次期計画 Hyper-K 実験や IceCube-Gen2 用の光センサーの開発、二重 β 崩壊実験に向けた高圧キセノンガス TPC 検出器での高エネルギー分解能の達成や、NINJA、DsTau、FASER 等の実験に向けた原子核乾板供給体制の整備も進んだ。理論研究においても、ニュートリノ実験による結果と高いエネルギースケールでの理論を繋ぐ様々な検討がなされ、「沼地条件」と呼ばれる量子重力と有効場理論の統合する足掛かりとなる議論も進んだ。新型コロナ感染症拡大の影響によって、海外の現地で行うべき研究が制限されたものの、オンライン会議の積極的な導入や、実験の開発順序や準備の入れ替えなどで対応し、影響は最低限に抑えられている。

研究組織としても、次世代を担うリーダー格の研究者がビジブルに活躍しており、若手主催の研究会開催など将来の人材育成策にも工夫が見られる。ぜひ、この研究領域を更に発展させて、ニュートリノを核とする様々な実験・観測と理論の活発な連携により、高いエネルギースケールでの物理理論を探る研究に繋げて欲しい。

評価者： 大野木哲也(大阪大学・大学院理学研究科・教授、専門:素粒子論)

本領域は、世界をリードするニュートリノ実験を進めつつ、次世代実験のための技術開発を行い、理論研究と連携しながら現在および将来のニュートリノ研究を強力に推進することを目的とする。

A01 班はスーパーカミオカンデのデータをもとに、大気ニュートリノ振動パラメータと陽子崩壊寿命のアップデートを行い、またハイパーカミオカンデ実験の準備を順調に進めた。A02 班は T2K 実験で θ_{23} の高精度測定、と CP 対称性の破れ δ_{CP} 制限の制限を行った。A03 班では IceCube における新物理探索に向け、大気ニュートリノ計算コードの系統誤差の削減を進めた。B01 班はニュートリノ有効質量領域 $100\text{meV}/c^2$ を超えて探索出来るような希ガス検出器の技術開発において背景事象の抑制に関して目標性能を達成した。B02 班は NINJA、DsTau、FASER 等のニュートリノ実験に必要な原子核乾板の供給体制の整備に成功した。C01 班では宇宙再加熱期におけるニュートリノ振動による物質反物質非対称性の生成機構、SUSY SU(5)GUT における陽子崩壊の再評価などの成果を得た。C02 班でも、例えばニュートリノ質量のモデルを系統的にタイプ別に分類することにより、これまでに無かった新しいタイプのモデルの可能性を発見するなど、様々な優れた研究成果が挙げられた。

このように本領域は期待通りあるいはそれ以上の成果を挙げたと評価できる。

評価者： 荻尾彰一(東京大学・宇宙船研究所・教授、専門:宇宙線実験)

本学術領域研究は、ニュートリノを軸に世界第一線の研究者が結集して究極の素粒子・宇宙像の解明を目指し、理論・実験の両面から多角的に迫ると同時に、次世代の実験的研究において世界をリードするための革新的な技術の開発も進め、着実な成果をあげたことを高く評価する。

本研究分野においては、2020年にHK計画が正式に開始されたという非常に大きな進展があった。A01、A02における光検出器の開発、ニュートリノビームの大強度化といった技術開発、データ解析手法の改良、ニュートリノ反応の高精度測定などHK実験の成功に直結するもので、非常に重要な成果であると評価できる。またこれにとどまらず、多角的な技術開発が本学術領域研究によって進んだことも取り上げたい。B02は原子核乾板の製造検査体制を整備し、その成果は、A02で重要な成果をあげたNINJA実験などニュートリノ関連実験のみならず様々な分野で利用され、数々の成果につながっている。B01では $0\nu\beta\beta$ 崩壊のための希ガス検出器における新しい測定技術を確認し、高エネルギー分解能と優れた背景事象除去率を達成し、着実な成果をあげた。現在稼働中の実験では、A03はNGC1068からのニュートリノ放射の発見など、ニュートリノ天文学における数々の極めて重要な成果をあげ、その活躍は大きく展開している。A01におけるガドリニウム導入の成功、A04におけるSimons ArrayとGroundBIRDの観測再開など、今後の進展に大いに期待したい。

評価者： 高田昌広(東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・教授、専門:宇宙観測・実験)

CMBの観測的研究は、これまで欧米の独断場であったが、近年日本にもCMB研究の研究者グループ、基盤が整備されてきた。本領域のA04班はそのグループの一つであり、既にCMB研究の実績、経験があるだけでなく、米国との強い連携を確認している。コロナ禍の影響はあったものの、CMB地上実験のSimons Array、GroundBIRDの機器開発において、A04班が超伝導検出器関係の基盤設備を開発したことは評価できる。また、A04班の研究者が公募研究の研究者と協力して行った、CMBと銀河サーベイ観測を組み合わせた重力レンズ効果の検出(Phys. Rev. Lett.)および宇宙模型の検証の結果は大きな成果であり、新学術領域により可能になった研究成果と言える。

A03班が参加する大型国際共同研究である高エネルギーニュートリノ実験IceCubeにおいて、A03班の研究グループが新型光検出器D-Egg 100台の製作を行い、大型共同研究に重要な貢献を成し遂げたのは評価できる。また、IceCubeの大気ニュートリノフラックスの計算の精密化のために、加速器実験LHCfあるいは宇宙線実験の大統計データを用い、大気ニュートリノ計算コードの改良を行った共同研究も、新学術領域の融合領域研究の推進によって実現した成果と言える。これらの新しい手法を用い、IceCubeのデータを用い、複数の研究論文は評価に値する。

以上の理由で、領域の宇宙関係の計画研究は顕著な研究成果を挙げたとと言える。

評価者： 幅淳二(高エネルギー加速器研究機構・理事、専門:素粒子実験)

本領域は、日本におけるニュートリノ研究とその関連分野の専門家を結集した日本が誇る世界屈指の研究者集団が進める素粒子物理の学術分野である。我が国の科学研究の国際的地位の低下が危惧される中で、我が国がトップを走り続ける研究分野として貴重な存在といえる。A01班では、SKのデータ解析手法を改良することで研究期間以前の統計量から50%増やし、これを用い質量階層性の判定、CP対称性の破れの有無の検証ならびに陽子(核子)崩壊の発見の感度を高めたことは地道な研究ながら、まさに値千金の成果といえよう。またSK水中へのガドリニウム導入を完了し、中性子検出の大幅な感度向上も実現した。長期にわたり活用されてきたSKによる新たな成果創出を期待出来る大きな一歩といえる。A02班では、J-PARC加速器は、高繰り返し運転のための機器の改造工事を終了して、当初目標の750kW相当のビーム強度を2023年に達成、今後の大強度加速器ニュートリノによる実験への見通しをつけたことは高く評価される。ニュートリノ振動解析で、CPが破れている兆候を世界で最初に見出しNature誌に発表したことは、 2σ の有意度であっても、極めて大きな成果といえる。B02班では、原子核乾板製造装置群の長期稼働体制を構築し、製造された原子核乾板の品質を担保する体制を整えたことは大変に大きな意義があったと考えられる。ミュオントモグラフィをはじめ原子核乾板でなければできないことがどんどん見出されている昨今、こうした量産体制の整備、拡充はたいへんに貴重なものと考えられる。

若手育成に関して、本領域は研究組織全体213名のうち若手研究者(39歳以下)が83名を占めており、領域自体が若手中心で構成されているとのことで、若手研究者の活躍を至る所にみることが出来る。またそのうえの中堅グループが、次世代のリーダーとしての機会と責任を担っていくことが、領域全体において浸透しており、実際ここから学会のリーダーとなる研究者がすでに輩出されていることは、本事業のある意味もっとも大きな成果であるかもしれない。