

領域略称名：ニュートリノ
領域番号：6003

令和2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）」
に係る中間評価報告書

「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2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 研究領域の目的及び概要	5
4 審査結果の所見で指摘を受けた事項への対応状況	7
5 研究の進展状況及び主な成果	9
6 研究発表の状況	14
7 研究組織の連携体制	19
8 若手研究者の育成に関する取組状況	20
9 研究費の使用状況・計画	21
10 今後の研究領域の推進方策	22
11 総括班評価者による評価	24

研究組織

(令和2年6月末現在。ただし終了した研究課題は終了時現在、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	3
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	京都大学・理学研究科・准教授	3
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・助教	5
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、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 一粒子検出器の特性	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 勸	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	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・高等教育推進機構・特任准教授	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
公募研究 計 21 件 (廃止を含む)					

[1] 総：総括班、計：総括班以外の計画研究、公：公募研究

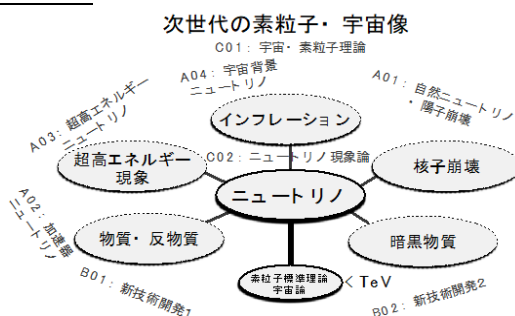
[2] 研究代表者及び研究分担者の人数（辞退又は削除した者を除く。）

研究領域全体に係る事項

3 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和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認する。

(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。

4 審査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。

所見中のコメント：“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受けられ、研究推進のリスクを抱えている。総括班が中心となり、研究領域全体として進展するようなマネジメントが必要である。”

申請時のヒアリングでコメントがあったように、A04 班の CMB 観測を通したニュートリノ研究は、日本の伝統的なニュートリノ研究と異なるアプローチを取るため、一見結びつきが弱いように見えるかも知れない。しかしながら、以下に示すように、近年大きく発展した CMB 観測は、ニュートリノ物理・TeV を超える物理の探索に重要な役割を果たす。

- ニュートリノ質量の絶対値の決定において、CMB 観測に基づく宇宙論的な測定が最も精度が良いと考えられている。
 - ▶ P. A. Zyla et al. (Particle Data Group), “The Review of Particle Physics, Particle Listings, Leptons, Neutrino Properties” to be published in Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 083C01 (2020).
- 宇宙背景ニュートリノの影響が CMB 観測で既に顕著に見えており、宇宙史においてニュートリノが果たした役割を直接的に探ることが出来る。
- 原始重力波の探索は、GUT スケールの実験研究であり、TeV を超える物理を探る有力な手段である。このように、今世紀になり急速に素粒子研究と宇宙論研究の結びつきが強くなった。これは世界的な潮流でもある。実際、米国で高エネルギー実験を組織するエネルギー省 (DOE) は、次世代 CMB 実験“CMB-S4”を強く推進している。

この宇宙観測を通したニュートリノ測定を取り込んだことこそが本領域の強みの一つである。総括班が中心となり、この潮流を領域内のみならず日本国内においても共通認識とする機会を設けている。そして、A04 班が創出する技術、観測データと“ニュートリノ”の連携を促進するような公募研究（実験技術1件、データ解析1件、理論研究2件）も発足した。

本領域における大きな目標の一つとして、ニュートリノ質量行列の理解が挙げられる。これに向けて、以下のような各研究班の測定を統合する必要がある。

- 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)

総括班では、研究会での研究交流等を通して融合的にこれらの研究を推進し、研究領域全体の進捗を図っている。

留意事項 1：“計画研究「A04」は国際動向により、「B01」「B02」は技術面により、研究目標の達成に向けてリスクがあるため、計画どおりに進まない場合の方策を定めるべきである。”

総括班が定期的に研究の進展をモニターし、研究の方向性についてレビューを行っている。A04 班においては、国際動向として CMB-S4 の進捗状況が挙げられる。米国においては、メインの資金配分機関であるエネルギー省 (DOE) が Critical Decision 0 (CD-0) を 2019 年 7 月に承認し、2021 年の DOE CD-1 / NSF PDR に向けてプロジェクトが進捗している。このため、国際動向に関するリスクは減少していると考えられる。さらに、リスク軽減のために、次世代 CMB プロジェクトとして、CMB-S4 だけではなく SO-Enhanced (Simons Observatory の次世代アップグレード) も視野に入れ、CMB-S4 が実現しなかった場合に備えている。A04 班における研究の成果の一つとして、日本学術会議マスタープラン 2020 大型研究計画への掲載が挙げられ、ここでも、CMB-S4 および SO-Enhanced 双方を視野に入れたチリ・アタカマ高原での次世代 CMB 観測への参加が提案されている。一方、直近の深刻なリスク要因として COVID-19 による観測サイトへのアクセスが出来なくなっている事が挙げられる。これに関して

は、この期間にデータ解析の準備に集中して研究を進める事で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現地に行かずにプロジェクトを進めること、によって遅れを最小限にとどめる。

B01 班は、二重ベータ崩壊探索等における現状を打破するために、キセノンガスを用いた新しい検出技術を開発することに挑戦している。そのような技術開発においては、失敗するリスクが高いことはやむを得ない。領域としては、B01 班が挑戦している技術の価値、実現性、研究計画を総合的に判断してレビューを行い、価値のある挑戦を続けるよう研究をサポートしている。B01 班が、本領域期間の後半に挑戦しようとしているバリウムイオンタグは、成功すれば二重ベータ崩壊探索のブレークスルーとなる難しい技術であるが、ここ数年の世界における技術の進展から、B01 班の持つキセノンガス検出器での実現の可能性が大きくなってきている。領域として進展を注視しながらサポートしていく。

B02 班では、大規模乳剤製造装置の導入を行うことで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実験の発展に寄与するものである。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、洗浄不足等による錆などの発生の影響で製造される乳剤の性能悪化の発生がある。これに対しては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、異常を早期に検出し、問題個所の同定を行う。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ざるを得ない状況が起きないように、安全を重視し定期点検を行う。問題発生から解決まで1～2か月かかることを想定し、製造した乳剤の保管スペースを確保し、原子核乳剤の供給体制に穴があかないように計画する。また原子核乳剤の塗布装置の自動化が計画通りに進まない場合には、自動化が可能な機能と作業員の手作業でできる作業を切り分け、塗布作業を半自動で行うことで対応する。

留意事項 2: “前領域と同一の領域代表者が継続しているため、本研究領域によって実現される、新たな学術領域を担う次世代の若手人材を育てることが強く望まれる。”

国内のニュートリノ分野は有望な若手がそろっており、この点について懸念は杞憂である。本領域の研究計画班の代表者の平均年齢は46歳で、半数以上は40代であり(A01, A03, A04, B01, C01, C02 班が40代)、研究分担者も含めると新たな学術領域を担う人材には事欠かない。特に40代前半の計画研究代表が、新たな学術領域を担う若手人材として、領域内外で活躍している。

留意事項 3: “計画研究 B02 の国内旅費は修正が必要であり、交付申請時には適切に算出していただきたい。”

旅費、経費の計上に関して細心の注意をはらって行います。

5 研究の進展状況及び主な成果

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までに何をどこまで明らかにしようとし、中間評価実施時までにどこまで研究が進展しているのか、(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。

(1) 領域設定期間内及び中間評価実施時までの目標と実施状況

研究計画 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]

スーパーカミオカンデ (SK) における大気ニュートリノ・陽子崩壊探索に用いる解析手法を改良、実験開始からの全データについて有効体積を 20% 拡大、粒子識別精度も向上、さらに本研究期間中に新たに取得したデータを加え、解析に用いる統計量を従来発表した結果の 1.5 倍とする。この高精度なデータを用い、ニュートリノ質量階層性を決定するほか、陽子崩壊の主要モードの寿命探索感度を 1.5 倍引き上げる。さらに、太陽ニュートリノのエネルギー閾値をさらに下げ、太陽ニュートリノ振動の太陽内物質効果を確認する。また、次世代のハイパーカミオカンデ実験 (HK) の検出器技術開発を進める。特に HK 用光センサーの性能向上の基礎開発を領域設定期間内で完了し、実験の感度を一層高いものとする。中間評価実施時までに、解析手法の改善による有効体積拡大を実現し、陽子崩壊探索感度を高めた。またニュートリノ質量階層性決定の研究期間完了時の感度評価も完了した。太陽ニュートリノ観測におけるエネルギー閾値の引き下げを妨げているバックグラウンドの理解を進めており、この知見に基づいた新たな事象選別手法を開発するなど、エネルギー閾値低減のための研究開発を進めている。

研究計画 A02 [加速器ニュートリノビーム探る素粒子の対称性]

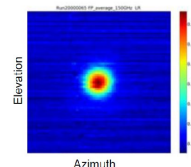
T2K 実験で、ニュートリノ振動のパラメータを精密に測定し (θ_{23} の精度で $\pm 5\%$)、さらに CP 対称性の破れを 99% の有意度で発見できる感度での探索を実行する。そのために、ニュートリノビームの性能向上、系統誤差の主要因であるニュートリノ原子核反応の新たな測定実験の開始、そしてニュートリノ振動解析の高度化を進めていく。中間評価の時点で、J-PARC 加速器用の「16 電極ピックアップ型非破壊ビームモニター」を完成させビーム診断に活用し、水標的と原子核乾板を使った新型ニュートリノ測定器を製作しニュートリノビームデータの取得に成功した。また、これまで取った全データを解析し、ニュートリノ振動パラメータ θ_{23} の精度 +6%-8% を達成した。

研究計画 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]

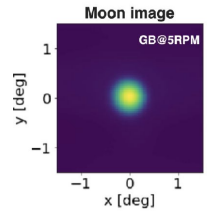
大気ニュートリノ流量計算の高度化・精密化では、最新加速器データ及び宇宙線実験データの取入れを行い、GeV 領域について確立した新大気ニュートリノ計算プログラムの PeV 領域への拡張を進め、広いエネルギー領域における統一モデルの確立を目指す。中間評価実施時までに GeV 領域におけるプログラムの確立を行った。IceCube-Gen2 Phase1 の建設は 2022 年末から 2023 年初頭に予定されている。本研究計画では、較正装置を含んだ新型光検出器 D-Egg100 台の製作とその実験室較正とその埋設を行い、較正データの取得、その理解を目指す。中間評価実施時までに光検出器のデザインを決定し、製造を開始した。広いエネルギー領域での標準模型を超える物理探査にむけては、新しい大気ニュートリノ計算プログラムの検証研究を通し、各実験の系統誤差の相互理解を進め、これらの系統誤差が異なるエネルギー領域での解析においてどのように影響を与えるかを精査する。系統誤差の最も小さくなるエネルギー領域をターゲットとする WIMP や SUSY 粒子といった新物理信号探査を行う。また SK 実験と IceCube 実験の統合解析に向けたフレームワークを確立し、異なるエネルギー領域に感度のある両実験の統合解析を進める。中間評価実施時までは、これらの準備研究を行っている。

研究計画 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]

宇宙論的測定を通し、相補的アプローチでニュートリノ物理を進展させる。分野をリードする Simons Array (SA) 実験と、純国産で国際的にもユニークな GroundBIRD (GB) 実験を推進し、ニュートリノ質量和を 100meV の精度で測定し、次世代実験 CMB-S4 で 30meV の精度とする足がかりとする。さらに、CMB-S4 のための開発研究を進める。SA と GB は観測を



開始するなど目標とする進捗を達成したが(右図：SA 初観測による金星の像、GB 初観測で得られた月の像)、COVID-19 の影響で観測サイトへのアクセスが出来なくなったため対応策を検討中である。CMB-S4 のための開発研究においては、我々の銀河からの放射が観測に与える影響に関する新規研究の論文出版など、予想以上の進捗が見られたほか、開発パイプライン開発、検出器試験、読み出し開発に関しても予定通り順調に進捗している。



研究計画 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]

『ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊』探索における現状の限界の打破を目指し、希ガス検出器による新しい測定原理・技術の開発を行う。領域設定期間内に、

(a)世界記録であるニュートリノ有効質量領域 100meV を超え $0\nu\beta\beta$ を探索できる検出器技術を確立する

(b)ニュートリノ質量の順階層構造に対応する領域(10meV 以下)探索への技術的な道筋をつける

ことを目指している。中間評価実施時まで(a)について基本技術を確認し、(b)について開発の方向性を決定付けることを目指していた。(a)については、二重ベータ崩壊 Q 値 2.5 MeV 付近での実証は間に合わなかったが、 511 keV において基本技術の確立を実証した。(b)については、二重ベータ崩壊核 ^{136}Xe の娘核である ^{136}Ba イオンをタグする方法を開発するという方向性を打ち出し、研究を始めている。

研究計画 B02 [ニュートリノ精密測定にむけた原子核乾板開発]

現在の約 10 倍の年間 3000m^2 の原子核乾板の製造・供給体制の構築が主目的である。中間評価時点では、新規原子核乾板乳剤製造装置を立ち上げ、装置運転のパラメータの調整段階に入る計画ですすめている。2019 年末までに乳剤製造装置の心臓部である粒子形成を担う仕込み装置の立ち上げを行った。実際に臭化銀粒子形成を新規装置で行った。粒子形成後の脱塩水洗処理、後熟処理は、既存の脱塩装置、後熟装置を用いて原子核乾板を作成した。作成された原子核乾板に電子ビームを照射し、最小電離粒子に対し、従来品と同等の感度・ノイズ性能であることを確認した。現在までに脱塩処理、後熟処理装置群の設計・立ち上げを行った。現在はそれぞれの工程間での移液配管、廃液配管を行い、純水による移液・廃液の試験・パラメータの調整を始めるところである。

研究計画 C01 [ニュートリノで探る対称性と宇宙像]

本研究の目的はニュートリノ物理と素粒子論、宇宙論、弦理論を組み合わせることで新たな素粒子・宇宙像に迫ることである。そのために領域設定期間内を通じ素粒子標準模型における未解決問題を解決する新たなアイデアを提案し、領域全体への新たなインプットに繋げていくことを目標としている。宇宙の物質と反物質の非対称性の問題や統一模型の再検討は中間評価実施時まで高い優先度で研究を進めており、ニュートリノ振動パラメータに強い予言を持つ模型の提案など様々な成果が得られている。

研究計画 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]

最新の実験データが示唆する素粒子像を明らかにするために、複数の実験間のニュートリノ振動パラメータの不一致やこれまでに見つかっている標準模型を超えた現象から新物理やニュートリノの 3 世代パラダイムの是非について明らかにする。中間評価実施時まで次世代の長期線実験の重要性についての指摘や複数の新現象を説明する多様な模型を構築した。同時に新物理を探る強力なプローブであるレプトンフレーバーの破れや陽子崩壊の探索にも焦点を当てて、その理論予言の精密化や新現象の新たな起源について研究を行った。さらに数多くの模型を俯瞰的にみることにより見逃されていたディラックニュートリノについての新しいシーソー模型を見出した。中間報告実施時まで各項目の研究を着実に深化させてきており、今後の研究推進においては横連携を高めていく予定である。

(2) 中間評価実施時までの成果

研究計画 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]

2008 年以後(SK4, SK5)のデータに適用可能な新たな事象再構成手法を導入、粒子識別性能を高めつつ有効体積を 30%以上拡大することに成功した (Prog.Theor.Exp.Phys.2019,053F01)。これにより、混合パラメータに大きく依存するが、ニュートリノ質量階層性を $2.5\text{-}3\sigma$ で決定する見通しが立った。陽子崩壊探索については、解析手法改良により SK の全データについて有効体積を 20%拡大すること、ならびに背

景事象除去に用いる中性子探索感度も 25%の向上を実現し、陽電子と中性 π 粒子に崩壊するモードに対して 2.4×10^{34} 年以上という結果を得た。太陽ニュートリノ観測については、背景事象源であるラドンの高精度測定手法を開発した。また、GPUを用いた高速解析ソフトウェアの開発も完了している。これにより、背景事象やデータの理解がさらに進み、今後太陽ニュートリノ観測の閾値低減を実現可能になるメドが立った。HK用光センサーについては、課題となっていた暗電流ノイズの発生源が理解され、ノイズ量を従来の 50—70% に低減する見通しが立った。また、この光センサー性能を活用するエレクトロニクスモジュールの基礎開発もほぼ完了した。

研究計画 A02 [加速器ニュートリノビーム探る素粒子の対称性]

T2K 実験の物理解析で、ニュートリノと反ニュートリノの全データを解析し、Nature 誌に発表した。最新の結果は、 $\sin^2 \theta_{23} = 0.53^{+0.03}_{-0.04}$ と測定し、CP が破れていない δCP の値を 2σ (95%) の有意度で排除した。今後は、目標 (θ_{23} の精度 $\pm 5\%$ 、CP の破れ 99% の有意度) に向けてさらなる精度向上に努めていく。

研究計画 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]

大気ニュートリノ生成モデルのスタンダードとなっている本田モデルコードを今後の拡張を見据えての拡張やその改修を進めた。また、RHIC や LHC からの高エネルギー宇宙線ハドロン相互作用データや気球実験による高空での大気ミューオン測定データについての検討を行った。最新の加速器ハドロン生成データの導入を行うことで、大気ニュートリノモデルの GeV 領域における高精度化へ向けた準備が整った。IceCube-Gen2 Phase1 に向けた新型光検出器の開発ではこれまでに製作されたプロトタイプ機の開発の進展状況やデザインパフォーマンスが評価され、本研究により開発された D-Egg が世界 12 か国から成る国際共同実験で正式に採用が決定し、2022 年末の南極点氷河埋設が決まった。それに伴い南極点での検出器建設を担う米国立科学財団による D-Egg 国際レビューが開始し、中間評価実施時まで計 7 回の審査会議がアメリカおよび日本で行われ、大規模変更はなくデザインが承認された。

研究計画 A04 [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]

SA のデータ解析準備の一環として、前身実験である POLARBEAR 実験のデータ解析を進め、インフレーションモデルへの制限やニュートリノ質量に関連する成果を論文として出版した。特に、すばる望遠鏡の銀河弱レンズ効果と CMB 重力レンズ効果の相関を初めて観測した成果は、ニュートリノ物理にも重要であり SA データ解析において引き続き力を入れる。CMB-S4 のためのデータ解析研究の一環として行った前景放射の新モデル構築に関しては 2 本の論文を出版した。これらは、これまで無視されてきた、将来実験で重要となる効果に着目した新規性のある研究であり、当初の予想以上の成果である。検出器・読出し開発も順調に進捗しており、この成果に基づき、日本の CMB-S4 への参加が日本学術会議マスタープラン 2020 大型研究計画に掲載された。

研究計画 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]

世界記録であるニュートリノ有効質量領域 100meV を超えて $0\nu\beta\beta$ を探索できる検出器技術として、電離電子を検出する ELCC のモジュール化、多チャンネル信号読み出し線と専用回路、高圧キセノンガスの循環・純化システムを確立し、180 リットル検出器に組み込み性能評価を行った。511 keV 電子に対して 1.5%、二重ベータ崩壊 Q 値換算で 0.7%~1.2% の半値全幅エネルギー分解能という世界最高レベルの性能が得られた。また二重ベータ崩壊とガンマ線による背景事象の識別に重要な飛跡のパターンの観測にも成功した。電離電子ではなく電離で生成した陽イオンを検出することができれば、飛跡をさらにクリアーに観測することができる。このため、陽イオン検出の原理開発を行ってきたが、その信号を検出することに成功した。

研究計画 B02 [ニュートリノ精密測定にむけた原子核乾板開発]

新原子核乳剤製造装置を立ち上げ、2019 年末に試作された原子核乾板の性能を評価した。温度調整を担当した修士学生が修士論文にまとめた。新原子核乾板製造装置で供給する原子核乾板のユーザーが進めるニュートリノ実験 (NINJA, DsTau, FASER ν) に進捗があった。A02 班の NINJA 実験は順調に規模を拡大して物理ランを開始した。DsTau 実験および本課題の申請後に計画されてきた LHC 衝突点から

の高エネルギーニュートリノを研究する FASER ν が CERN の実験として正式に承認された。

研究計画 C01 [ニュートリノで探る対称性と宇宙像]

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に着目した研究を行った。その結果、特にインフラトンがヒッグス粒子へ崩壊するシナリオにおいては、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が明らかとなった。また、宇宙の暗黒物質と物質反物質非対称問題が相関する非対称暗黒物質模型の構築および新たな検証法の研究も行った。その結果、非対称暗黒物質模型に特有な、暗黒物質と反暗黒物質の振動現象を sub-GeV 領域の宇宙 γ 線観測でテストすることが可能であることを示した。最小 SU(5) 超対称大統一模型の再評価も行った。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、 $p^+ \rightarrow \pi^0 e^+$ 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。また最小 SU(5) 統一模型と flipped-SU(5) 模型の陽子崩壊予言を比較し、様々な崩壊モードを比較することで統一ゲージ群の識別が可能であることを示した。これらの成果に加え中間評価実施時までに 36 編の査読論文を発表した。

研究計画 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]

ニュートリノ振動パラメータの実験間の不一致やパラメータ縮退を実験で解く方法について研究を行い、低エネルギー実験の有効性と次世代長基線実験の必要性が明らかになってきた。ミュオンが原子中で電子へ変換される過程の詳細な計算を行い、ミュオン偏極に注目して解析することで新物理の相互作用について検証能力が高められることが分かった。さらに深層学習を用いた荷電レプトンフレーバーの破れのデータ解析についても取り組んでいる。大統一理論とは異なる起源を持つ陽子崩壊について研究を行い、強い CP 問題をも解決する新模型を構築した。陽子崩壊の探索モードを組み合わせることで大統一理論と区別出来ることが分かった。標準模型で説明できない複数の現象に注目して、それを説明する模型の提案と検証方法を検討している。複数の標準模型を超えた現象を組み合わせることでより強い模型の予言が得られている。これらの成果に加え中間評価実施時までに 31 編の査読論文を発表した。

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）より抜粋

「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」（代表・田中雅光）

β 崩壊ニュートリノ・電子角相関項測定実験の可能性を明らかにすることを目的に、超伝導検出器を用いて、低エネルギー陽子の計測実験の準備を進めているが、同時に、超伝導検出器に対し、公募研究代表者がこれまでに手がけた超伝導エレクトロニクスを活用することによる新たな応用の可能性を領域内外の研究者と議論した。2019 年度は、領域研究会、A04 班ワークショップで発表を行った。また、海外研究者との連携による検討結果について論文投稿を行った。

「超伝導技術を利用したニュートリノ研究の新展開」（代表・石野 宏和）

太陽からの電子ニュートリノ観測を目的としたインジウム標的表面において、レーザー加工機を用いて微細コーン構造の形成に成功した。また、標的内で生じた非熱的フォノンを検出するために、微細コーンを装着する超伝導検出器をデザイン・作製・評価した。超伝導検出器の歩留まりが 50% 程度であり、それを改善することが課題となっている。日本物理学会で 3 講演、超伝導国際会議でのポスター発表、国内・国外研究会における招待講演で研究紹介した。

「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」（代表・栗本佳典）

本研究では電磁石磁場誤差による加速器パラメータの変動を、電磁石電源電流計測値を使ってリアルタイムで補正することが目的である。2019 年度は重要な加速器パラメータである中心軌道の変動を補正する装置の設計および試作を行った。具体的には偏向電磁石電源の電流から補正電磁石の指令値に変換し補正電磁石電源に入力するためのファームウェアの開発および試作電子回路の作成を行った。テストベンチでの性能確認は終了し、これからビーム試験を行う予定である。

「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」(代表・平木貴宏)

Xe 原子気体を基底状態(5p)から励起状態(6s)に E1×M1(E2)二光子過程による波長 298nm の同色二光子パルスレーザーで励起させた。一方この過程の遷移レートを計算するシミュレーションコードを開発した。実測の励起レートと比較したところ、実験値が計算値より2桁程度低い事が分かった。

公募研究 D02: ニュートリノによる自然(地球・宇宙等)観測の研究より抜粋

「超新星残骸における宇宙線加速限界の直接測定」(代表・浅岡陽一)

CALET による 50GeV から 10TeV までの陽子スペクトルを単一の検出器で初めて測定し公表した。本結果は低エネルギー側で AMS-02 の高精度測定と合致し、高エネルギー側では TeV 領域に至る漸次的なスペクトル硬化を検出した。これは、「宇宙線標準モデル」の予測と食い違う原子核スペクトル「硬化」の起源解明において、伝播効果の役割や近傍加速源の寄与を議論する上で重要な成果である。なおこの成果は ICRC2019 のハイライトトークで取り上げられた。

「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」(代表・宮武広直)

本公募研究では、すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC)による撮像銀河データや CMB データにおける重力レンズ効果を用いて、遠方銀河団の暗黒物質分布を測定し、ニュートリノ質量和に制限を付けることを目指す。初年度は、HSC で発見された $z\sim 1$ の遠方銀河団と $z\sim 4$ の遠方銀河による CMB レンズ効果の測定を行った。次年度はこれらの信号の理論解釈を行い、宇宙論制限を付けることを目指す。関連する研究発表を1件行った。なお本研究は計画研究 A04 との共同研究となっている。

「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」(代表・緑川章一)

大気ニュートリノフラックス計算には、様々な不確定性が存在する。その中で最も大きなものは、一次宇宙線と大気原子とのハドロン衝突の前方散乱断面積である。我々は、観測される大気ミューオンフラックスが大気ニュートリノフラックスの較正に利用できることを明らかにした。すなわち、大気ミューオンフラックスの観測値が一致するようなモデルでは、どのような相互作用モデルを選んでも大気ニュートリノフラックスは一致する。

公募研究 D03: ニュートリノに関する理論研究より抜粋

「ニュートリノで探究する大統一理論の物理」(代表・波場直之)

ミニマルな繰り込み可能 SO(10) GUT において、 $p \rightarrow K^0 \mu^+$ と $p \rightarrow K^+ \nu_\mu$ の partial width の比は 0.05~0.6 になり、ミニマル SU(5) GUT では、0.002 以下になることを示した。両モードの探索から SO(10)と SU(5)の判別が可能になる。また、SUSY dim-6 OP 陽子崩壊に関して、GUT ゲージボソンの質量スペクトルの解析から陽子寿命が SU(5)よりも SO(10)の方が短くなることを示した。

「原始重力波を用いたニュートリノ質量獲得機構の解明」(代表・浅賀岳彦)

ニュートリノ質量や宇宙バリオン数を説明する右巻きニュートリノの原始重力波への影響を検討した。特に、電弱スケールの質量を持つ長寿命右巻きニュートリノが引き起こすエントロピー生成に着目した。この宇宙熱史の変更による原始重力波への痕跡を解析し、特徴的な重力波の周波数帯を見出した。

「初期宇宙のニュートリノ振動の宇宙論的研究」(代表・郡和範)

インフレーション後の宇宙の再加熱温度 T_{RH} が数 MeV であるシナリオの場合に3種類のニュートリノが熱化せず、ビッグバン元素合成に抵触する現象を詳しく調べた。標準理論で記述されるニュートリノ同士の自己相互作用を世界で初めて正しく取り入れた計算を実行した。そして、インフラトン場が電磁的な粒子に壊れる場合、 $T_{RH} > 1.8$ MeV、ハドロンに壊れる場合、 $T_{RH} > 5.0$ MeV という下限を得た。

6 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、一般向けのアウトリーチ活動等の状況。令和2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】

査読論文 12 本, プロシーディングスとレビュー 25 編

国際会議 70 講演, 国内研究会・学会 57 講演, セミナー 12 講演

一般向けセミナー10回、小中高校授業、実験、サイエンスカフェ等 20 回

主な査読論文

- "Atmospheric Neutrino Oscillation Analysis With Improved Event Reconstruction in Super-Kamiokande IV", Y. Hayato, M. Ishitsuka, M. Kuze, Y. Nishimura, W. Roger, A. Suzuki *et al.* (SK Collaboration), Prog. Theor. Exp. Phys.2019, 053F01
- "Search for proton decay into three charged leptons in 0.37 megaton-years exposure of the Super-Kamiokande", Y. Hayato, M. Ishitsuka, M. Kuze, Y. Nishimura, W. Roger, A. Suzuki *et al.* (SK Collaboration), Phys. Rev. D 101, 052011
- "Measurement of neutrino and antineutrino neutral-current quasielasticlike interactions on oxygen by detecting nuclear deexcitation gamma rays ", Y. Hayato, M. Ishitsuka, M. Kuze, Y. Nishimura, W. Roger, A. Suzuki *et al.* (T2K Collaboration), Phys.Rev. D100 (2019) no.11, 112009
- "Measurement of the neutrino-oxygen neutral-current quasielastic cross-section using atmospheric neutrinos at Super-Kamiokande", Y. Hayato, M. Ishitsuka, Y. Itow, M. Kuze, Y. Nishimura, W. Roger, A. Suzuki *et al.* (SK Collaboration), Phys.Rev. D99 (2019) no.3, 032005
- "Search for Neutrinos in Super-Kamiokande Associated with the GW170817 Neutron-star Merger", Y. Hayato, M. Ishitsuka, M. Kuze, Y. Nishimura, W. Roger, A. Suzuki *et al.* (SK Collaboration), Astrophys.J. 857 (2018) no.1, L4
- "Atmospheric neutrino oscillation analysis with external constraints in Super-Kamiokande I-IV", Y. Hayato, M. Ishitsuka, M. Kuze, Y. Nishimura, W. Roger, A. Suzuki *et al.* (SK Collaboration), Phys.Rev. D97 (2018) no.7, 072001
- "Search for Boosted Dark Matter Interacting With Electrons in Super-Kamiokande", Y. Hayato, M. Ishitsuka, M. Kuze, Y. Nishimura, W. Roger, A. Suzuki *et al.* (SK Collaboration), Phys.Rev.Lett. 120 (2018) no.22, 221301
- "Measurement of the tau neutrino cross section in atmospheric neutrino oscillations with Super-Kamiokande", Y. Hayato, M. Ishitsuka, Y. Itow, M. Kuze, Y. Nishimura, W. Roger, A. Suzuki *et al.* (SK Collaboration), Phys.Rev. D98 (2018) no.5, 052006

【A02 班】

査読論文 9 編, プロシーディングス 7 編

国際会議 43 講演, 国内研究会・学会 80 講演, セミナー 8 講演

主宰シンポジウム 1

一般向けセミナー、イベント 4

主な査読論文

- "Search for light sterile neutrinos with the T2K far detector Super-Kamiokande at a baseline of 295km", T. Nakaya, T. Nakadaira, Y. Seiya, T. Kikawa, *et al.* (T2K Collaboration), Phys. Rev. D 99, 071103 (2019)
- "Search for heavy neutrinos with the T2K near detector ND280", T. Nakaya, T. Nakadaira, Y. Seiya, T. Kikawa *et al.* (T2K collaboration), Phys. Rev. D 100, 052006 (2019)
- "Measurement of the $\nu\mu$ charged-current cross sections on water, hydrocarbon, iron, and their

- ratios with the T2K on-axis detectors", T. Nakaya, T. Nakadaira, Y. Seiya, T. Kikawa *et al.* (T2K collaboration), PTEP 2019, 9, 093C02 (2019)
- "Measurement of neutrino and antineutrino neutral-current quasielasticlike interactions on oxygen by detecting nuclear deexcitation γ rays", T. Nakaya, T. Nakadaira, Y. Seiya, T. Kikawa *et al.* (T2K Collaboration), Phys. Rev. D 100, 112009 (2019)
 - "Constraint on the Matter-Antimatter Symmetry-Violating Phase in Neutrino Oscillations", T. Nakaya, T. Nakadaira, Y. Seiya, T. Kikawa *et al.* (T2K Collaboration), Nature 580 (2020) 7803, 339-344
 - "Characterization of nuclear effects in muon-neutrino scattering on hydrocarbon with a measurement of final-state kinematics and correlations in charged-current pionless interactions at T2K", T. Nakaya, T. Nakadaira, Y. Seiya, T. Kikawa *et al.* (T2K Collaboration), Phys.Rev. D98 (2018) no.3, 032003
 - "Search for CP Violation in Neutrino and Antineutrino Oscillations by the T2K Experiment with 2.2×10^{21} Protons on Target", T. Nakaya, T. Nakadaira, Y. Seiya, T. Kikawa *et al.* (T2K Collaboration), Phys.Rev.Lett. 121 (2018) no.17, 171802

【A03 班】

査読論文 31 編, プロシーディングス 13 編
 国際会議 36 講演, 国内研究会・学会 46 講演
 一般向けセミナー、イベント 17
 主な査読論文

- "Development of an Analysis to Probe the Neutrino Mass Ordering with Atmospheric Neutrinos Using Three Years of IceCube DeepCore Data", A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase 他 IceCube Collaboration, European Physical Journal C80 (2020) 009
- "Combined Sensitivity to the Neutrino Mass Ordering with JUNO, the IceCube Upgrade, and PINGU", A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase 他 IceCube-Gen2 Collaboration, Physical Review D101 (2020) 032006
- "Efficient Propagation of Systematic Uncertainties from Calibration to Analysis with the SnowStorm Method in IceCube", A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase 他 IceCube Collaborations, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics 10 (2019) 048
- "Cosmic Ray Spectrum and Composition from PeV to EeV Using 3 Years of Data From IceTop and IceCube", A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase 他 IceCube Collaborations, Phys. Rev. D 100, 082002 (2019)
- "Measurement of Atmospheric Tau Neutrino Appearance with IceCube DeepCore", A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase 他 IceCube Collaborations, Physical Review D99 (2019) 032007
- "Measurements Using the Inelasticity Distribution of Multi-TeV Neutrino Interactions in IceCube", A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase 他 IceCube Collaborations, Physical Review D99 (2019) 032004
- "Search for Neutrinos from Decaying Dark Matter with IceCube", A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase 他 IceCube Collaborations, European Physical Journal C78 (2018) 831
- "Differential Limit on the Extremely-High-Energy Cosmic Neutrino Flux in the Presence of Astrophysical Background from Nine Years of IceCube Data", A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase 他 IceCube Collaborations, Physical Review D98 (2018) 062003
- "Neutrino Interferometry for High-Precision Tests of Lorentz Symmetry with IceCube", A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase 他 IceCube Collaborations, Nature Physics 14 (2018) 961-966
- "Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A", A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase 他 IceCube Collaborations, Science 361, eaat1378 (2018)
- "Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert", A. Ishihara, R. Nagai, K. Mase 他 IceCube Collaborations, Science 361, 147-151 (2018)

- "Search for Boosted Dark Matter Interacting with Electrons in Super-Kamiokande", C. Kachuil, Y. Itow et al. (SK Collaboration), Phys. Rev. Lett. 120 (2018) 221301
- "Measurement of forward photon production cross-section in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$ with the LHCf detector", O. Adriani, Y. Itow et al. (LHCf Collaboration), Physics Letters B 780 (2018) 233-239.

【A04 班】

査読論文 15 編, プロシーディングス 1 編
 国際会議 6 講演, 国内研究会・学会 28 講演
 主な査読論文

- "A Measurement of the Degree Scale CMB B-mode Angular Power Spectrum with POLARBEAR," S. Adachi, A. Kusaka, O. Tajima 他 POLARBEAR Collaboration, arXiv:1910.02608 (2019), accepted for publication in *Astrophys. J.*
- "CMB Shadows: The Effect of Interstellar Extinction on Cosmic Microwave Background Polarization and Temperature Anisotropy," M. Nashimoto, M. Hattori, Y. Chinone, arXiv:2005.06614 (2020), accepted for publication in *Astrophys. J. Lett.*
- "Thermal emission from the amorphous dust: An alternative possibility of the origin of the anomalous microwave emission," M. Nashimoto, M. Hattori, R. Genova-Santos, F. Poidevin, *Publ. Astron. Soc. Jpn.* (2020) **72** (1), 6 (1–21).
- "Development of large array of Kinetic Inductance Detectors Using Commercial-Class External Foundries," K. Kiuchi, S. Oguri, S. Mima, C. Otani, and A. Kusaka, *J. Low Temp. Phys.* (2020); <https://doi.org/10.1007/s10909-020-02453-y>
- "A measurement method for responsivity of microwave kinetic inductance detector by changing power of readout microwaves," H. Kutsuma, M. Hattori, R. Koyano, S. Mima, S. Oguri, C. Otani, T. Taino, and O. Tajima, *Appl. Phys. Lett.* **115**, 032603 (2019)
- "Cross-correlation of CMB Polarization Lensing with High- z Submillimeter Herschel-ATLAS Galaxies," POLARBEAR collaboration: M. Aguilar Faúndez, A. Kusaka, O. Tajima 他 POLARBEAR Collaboration, *Astrophys. J.* **886** 38 (2019).
- "Evidence for the Cross-correlation between Cosmic Microwave Background Polarization Lensing from Polarbear and Cosmic Shear from Subaru Hyper Suprime-Cam," A. Kusaka, O. Tajima 他 POLARBEAR および Subaru/HSC Collaborations, *Astrophys. J.* **882** 62 (2019).
- "Measurements of Tropospheric Ice Clouds with a Ground-based CMB Polarization Experiment, POLARBEAR," S. Takakura, A. Kusaka, O. Tajima 他 POLARBEAR Collaboration, *Astrophys. J.* **870** 102 (2019).

【B01 班】

査読論文 5 編, プロシーディングス 1 編
 国際会議 12 講演, 国内研究会・学会 34 講演
 主な査読論文

- "Design and performance of a high-pressure xenon gas TPC as a prototype for a large-scale neutrinoless double-beta decay search", A.K. Ichikawa, Y. Nakajima, K. Sakashita et al., Progr. of Theor. Exp. Phys. 2020, Issue 3, 033H01
- "AXEL: High-pressure Xe gas TPC for BG-free $0\nu 2\beta$ decay search", A.K. Ichikawa, Y. Nakajima, K. Sakashita et al., Nucl.Instrum.Meth. A958 (2020) 162803
- "Drift field generation with Cockcroft-Walton voltage multiplier in xenon gas for AXEL $0\nu 2\beta$ search detector", A.K. Ichikawa, Y. Nakajima, K. Sakashita et al., J.Phys.Conf.Ser. 1468 (2020) 1, 012151
- "Angular dependence of columnar recombination in high pressure xenon gas using time profiles of scintillation emission", A.K. Ichikawa et al., JINST 13 (2018) no.07, P07015

【B02 班】

査読論文 12 編, プロシーディングス 11 編

国際会議 19 講演, 国内研究会・学会 71 講演

主な査読論文

- "Development of a balloon-style pressure vessel gondola for balloon-borne emulsion gamma-ray telescopes", S. Aoki *et al.*, JINST 14 (2019) 09, P09009
- "DsTau: Study of tau neutrino production with 400 GeV protons from the CERN-SPS", S. Aoki, A. Ariga, T. Ariga, M. Komatsu, Osamu Sato *et al.*, Journal of High Energy Physics
- "Detecting and Studying High-Energy Collider Neutrinos with FASER at the LHC", A. Ariga, T. Ariga, J. Boyd, J. L. Feng, Osamu Sato *et al.*, European Physical Journal C
- "Sensitivity of the SHiP experiment to Heavy Neutral Leptons", Osamu Sato *et al.* (SHiP Collaboration), Journal of High Energy Physics 04 (2019) 077
- "Final results of the OPERA experiment on $\nu\tau$ appearance in the CNGS beam", Osamu Sato *et al.* (OPERA Collaboration), Phys. Rev. Lett. 120 (2018) no.21, 211801
- "A Cold/Ultracold Neutron Detector using Fine-grained Nuclear Emulsion with Spatial Resolution less than 100 nm", N. Naganawa, T. Ariga *et al.*, Eur. Phys. J. C 78 (2018) no.11, 959
- "First demonstration of gamma-ray imaging using a balloon-borne emulsion telescope", H. Rokujo, S. Aoki *et al.* (GRAINE Collaboration), PTEP, 2018 · 6, 063H01
- "GRAINE project, prospects for scientific balloon-borne experiments", S.Takahashi, S. Aoki *et al.* (GRAINE Collaboration), Adv.Space Res. 62, 2945-2953

【C01 班】

査読論文 36 編

国際会議 21 講演, 国内研究会・学会 12 講演, セミナー 18 講演

一般向けセミナー、イベント 5

主な査読論文

- "Cosmological Constraint on Dark Photon from Neff", M. Ibe *et al.*, JHEP 2004 (2020) 009.
- "Oscillating Composite Asymmetric Dark Matter", M. Ibe *et al.*, JHEP 2001 (2020) 027.
- "Throwing away antimatter via neutrino oscillations during the reheating era", R. Kitano *et al.*, JCAP 2003 (2020) 048.
- "Novel GUT with apparently complete SU(5) multiplets.", M. Ibe *et al.*, Phys.Rev. D100 (2019) no.5, 055024.
- "Proton Decay: Flipped vs Unflipped SU(5)", N. Nagata, *et al.*, JHEP 2005 (2020) 021.
- "Supersymmetric Proton Decay Revisited", N. Nagata *et al.*, Eur.Phys.J. C80 (2020) 4, 332.
- "Superstring-Inspired Particle Cosmology: Inflation, Neutrino Masses, Leptogenesis, Dark Matter & the SUSY Scale", N. Nagata *et al.*, JCAP 2001 (2020) 035.
- "Sampling the μ SSM for displaced decays of the tau left sneutrino LSP at the LHC", N. Nagata *et al.*, Eur. Phys. J. C79 (2019) 934.
- "Cooling Theory Faced with Old Warm Neutron Stars: Role of Non-Equilibrium Processes with Proton and Neutron Gaps", N. Nagata *et al.*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 492 (2020) 5508.
- "Leptogenesis after superconformal subcritical hybrid inflation", K. Ishiwata *et al.*, JHEP 1909, (2019) 065.
- "Probing heavy dark matter decays with multi-messenger astrophysical data", K. Ishiwata *et al.*, JCAP 2001 (2020) no.01, 003.
- "A Minimal SU(5) SuperGUT in Pure Gravity Mediation.", N. Nagata, Eur.Phys.J. C79 (2019) 6, 490
- "Decay of I-ball/Oscillon in Classical Field Theory", M. Ibe *et al.*, JHEP04(2019)030.
- "Symmetry Breaking and Reheating after Inflation in No-Scale Flipped SU(5).", N. Nagata *et al.*, JCAP 1904 (2019) no.04, 009.

- "Minimal Gauged $U(1)_{L_\alpha-L_\beta}$ Models Driven into a Corner.", N. Nagata et al., Phys.Rev. D99 (2019) no.5, 055029.
- "The swampland conjecture and the Higgs expectation value.", M. Ibe et al., JHEP 1812 (2018) 023.
- "Non-Universal Gaugino Masses in the NMSSM", N. Nagata et al., JHEP 1810 (2018) 120.
- "Unitarity constraint on the Kähler curvature.", R. Kitano et al., JHEP 1809 (2018) 075.
- "Leptogenesis via Neutrino Oscillation Magic.", R. Kitano et al, JHEP 1810 (2018) 178.

【C02 班】

査読論文 31 編

国際会議 55 講演, 国内研究会・学会 58 講演

著書 1, 一般向けセミナー、イベント 5

主な査読論文

- "Scalegenesis and fermionic dark matters in the flatland scenario", K. Tsumura et al., EPJC80, 368 (2020)
- "Pseudo-Nambu-Goldstone dark matter from gauged $U(1)_{B-L}$ symmetry", K. Tsumura et. al., JHEP 05 (2020) 057
- "Neutrino Oscillations at low energy long baseline experiments in the presence of nonstandard interactions and parameter degeneracy", O. Yasuda, Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 063B03
- "Testing NSI suggested by solar neutrino tension in T2HK and DUNE", O. Yasuda et. al., Mod. Phys. A. 35, No. 17, 2050142 (2020)
- "QED background against atomic neutrino process with initial spatial phase", K. Tsumura et. al., Eur. Phys. J. Plus 135, 283 (2020)
- "Low scale seesaw models for low scale $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ symmetry", J. Sato, T. Shimomura, et. al., Phys. Rev. D100, 095012 (2019)
- "Momentum distribution of electron pair from the charged lepton flavor violating process $\mu-e \rightarrow e^-e^-$ in muonic atoms with polarized muon", J. Sato et. al., Phys. Rev. D 100, 075012 (2019)
- "New model for radiatively generated Dirac neutrino masses and lepton flavor violating decays of the Higgs boson", H. Sugiyama et. al., Phys. Rev. D100, 015044 (2019)
- "Searching for scalar boson decaying into light Z' boson at collider experiments in $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ model", T. Shimomura et. al, Eur. Phys. J. C (2019) 594
- "Syndetic Extension of Baryon and Lepton Numbers: Proton Decay and Long-Lived Dark Matter", K. Tsumura et. al, Phys. Rev. D98, 035037 (2018)

【公募研究】

査読論文 42 編、査読なし論文 14 編

国際会議 46 講演, 国内研究会・学会 47 講演

一般向けセミナー、イベント 7

主な査読論文

- "CALET Collaboration, Direct Measurement of the Cosmic-Ray Proton Spectrum from 50 GeV to 10 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station", Y. Asakoka et al., Physical Review Letters,122,2019,181102
- "Gravitational waves from the minimal gauged $U(1)_{B-L}$ model", O. Seto et al., Phys. Rev. D 99, 095039 (2019)
- "Testing the Seesaw Mechanism and Leptogenesis with Gravitational Waves", K. Kohri et al., Phys. Rev. Lett. 124 (2020) 4, 041804

7 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、素粒子から宇宙まで幅広い分野における基礎研究を発展させる本研究領域では、共通の目的に向かって様々な切り口から分野を進展させる広義の連携が、研究の進展を支えている。また、公募研究においては、各研究者の自由な発想で研究項目の進展を間接的に支える多くの連携が行われている。ここではこれら以外の、より具体的な研究項目間の連携体制について説明する。

下の表は、本研究領域における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	□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

具体的には、以下に示す様々テーマについて連携することで多角的な研究を進めている。

- 検出器開発での連携:** 開発された技術は各実験の進展に留まらず広く分野の発展を助ける。鍵となる技術の共通点は多い。ミニワークショップや研究会での意見交換による連携が図られている。
 - ◆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
- 系統誤差削減に向けた連携:** 異なるニュートリノ観測であっても鍵となる系統誤差は共通している。ここでは、背景事象の共通理解やモデル製作が重要であり積極的な意見交換が進められている。
 - ☆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
- 特定の物理テーマを探究する連携:** 異なる実験観測結果に横軸を通すのが理論である。また、理論と実験の緊密な連携、フィードバックの掛け合いが進展の後押しをする。
 - 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-D03 宇宙論

理論と実験の連携は分野横断をする領域ならではの貴重な機会であり、幅広くニュートリノを通して新物理の示唆を探る本領域の重要なメリットである。理論モデルの実験的な検証、実験からの理論モデル構築のためのインプットと、効果的な循環的連携を可能としている点が特徴であり、効率的な研究の進展を後押ししている。

8 若手研究者の育成に係る取組状況

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2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。）の育成に係る取組状況について、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。若手研究者育成に係る取り組みを以下にまとめる。

・若手研究者の国内・国際会議での発表支援

できるだけ多くの若手研究者に発表の機会を多く与えることにより、積極的な若手研究者のプロモートを行っている。2018、2019年度における国内・国際会議での若手研究者の発表は全体の648件に対し約2/3の割合を占める。A02班では2019年度に「日本物理学会若手奨励賞」の受賞者を出している。

・若手研究者が中心となった研究会の開催

領域では若手研究者が中心となって様々な研究会を主催・共催している（7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（<http://www.kam2.icrr.u-tokyo.ac.jp/indico/event/4/>）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。さらに新型コロナウイルス感染症に関連して多くの研究会が中止になる中、若手研究者を中心としたオンライン接続での研究会や将来計画に向けた勉強会などを実施し、オンラインでありながら活発な質疑が行われた。

・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。B01班のガスTPC検出器開発では、KEKの「測定器開発修士論文賞」を受賞した。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。

・大学院生の教育、研究指導

大学院生に対する研究指導によって将来の研究を担う若手を育成している。2018年度、2019年度には修士論文37件、博士論文11件が発表されている。

・若手研究者の研究職への就職支援

若手研究者が本領域における研究での実績を経て、さらにステップアップするための支援を行っている。2018年度、2019年度には35名の若手研究者が研究職（うち13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。

9 研究費の使用状況・計画

研究領域全体を通じ、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、研究費の使用状況や今後の使用計画、研究費の効果的使用の工夫について、総括班研究課題の活動状況と併せて具体的かつ簡潔に1頁以内で記述すること。

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する。B01 班が開発を進める光検出器 MPPC 読出し回路は、A02 班においても活用が見込まれる。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る予定である。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、資産共有を行っている。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る。一方、計算機設備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げている。

研究費に関しても、効率的に使用されている。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ている。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使用が見込まれる。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も大きく貢献する。

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

10 今後の研究領域の推進方策

研究領域全体を通じ、今後の本研究領域の推進方策について、「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2頁以内で記述すること。なお、記述に当たっては、今後公募する公募研究の役割を明確にすること。また、研究推進上の問題点がある場合や、国際的なネットワークの構築等の取組を行う場合は、その対応策や計画についても記述すること。

本領域では、ニュートリノ研究を飛躍的に発展させ、物理学に革新をもたらす「新しい素粒子・宇宙像」の創成に向けて、多様な研究を進めていく。その途上において、2019年にスーパーカミオカンデ (SK) の後継となる「**ハイパーカミオカンデ (HK) 計画**」が正式に認められ、スタートしたことは朗報である。A01班で進めている水チェレンコフ検出器の究極の性能向上とHK実験のための光センサーとエレクトロニクスの開発は、絶対に成功させるべき研究課題となり、領域の総力を結集して推進していく。以上に加えて、SKへのガドリニウム導入による反ニュートリノ検出器としての革新(2020年度)、J-PARC加速器のアップグレード(2021年度)、IceCube-Gen2 Phase1の建設開始(2022年度)、CMB望遠鏡SAとGBの本格観測の開始(2020年)等、実験装置や設備のアップグレードが進展しており、それらに向けた膨大な量の実験的な研究課題(装置の開発・較正・運転、解析プログラムの開発、シミュレーションの開発、等)が明確になってきている。今後は、各計画研究の間でのより密な連携をとり、共同研究とレビューを絡め、領域全体の研究を推進していく。また、公募研究には、計画研究ではカバーできない多様なテーマが含まれており、計画研究間の隙間を埋め、領域のまとまりをより確固なものとする。

実験研究において、A01班ではSKの統計量を1.5倍(500kton・year)とすることで、大気ニュートリノの観測を通してニュートリノの質量階層性を決定、A02班(T2K実験)との統合解析を実現しCP対称性の発見、太陽ニュートリノ観測における太陽内物質による振動確率の確認、陽子崩壊の探索、を推進していく。また、HK実験の物理感度を最適化するための研究開発を推進する。A02班ではニュートリノ振動測定の精密化のために、ニュートリノビームの強度向上、ニュートリノ・原子核反応の精密測定、ニュートリノ振動解析の高度化、を推進する。ニュートリノビーム強度は700kW超えを(現在は515kW)、ニュートリノ・原子核反応測定は、反断面積のエネルギー依存性を調べ、CCQE反応やその他の反応形式(CC- 1π 、2p2h)の断面積における不定性を10%以下に抑えることを目指す。そして、CP対称性の破れを99%の有意度で確証することを目指す。A03班では、IceCube-Gen2 Phase1のための南極氷河較正、宇宙線ハドロン相互作用と大気ニュートリノ流量計算の高度化・精密化、広いエネルギー領域での標準模型を超える物理探査、を推進する。IceCube-Gen2 Phase1では、新型光検出器D-Eggの製作及びその較正を行い、2021年と2022年に南極点へ輸送する。大気ニュートリノ流量計算においては、最新宇宙線実験データの取入れたうえで、MeV、GeV領域から、TeV、PeV領域への拡張を進め、異なるエネルギー領域における統一モデルの確立を目指し、SK実験とIceCube実験のより直接的な感度比較、系統誤差の相互理解へとつなげる。そして、SKデータとIceCubeデータを用い、銀河中心や太陽にキャプチャーされたダークマターの探査を広い質量領域で行う。A04班では、稼働中のCMB望遠鏡SAとGBのデータ解析、次世代CMB望遠鏡CMB-S4のためのデータ解析・高スループット検出器評価・検出器読みだし技術と較正装置の開発を推進する。SAとGBでは物理成果の基礎となるデータ選別・CMBマップ作成部分のパイプラインを完成させ、そこからデータ解析を進める事で、ニュートリノ質量和の100meVの精度での決定を目指す。また、インフレーション起源の原始重力波を探索し、大統一理論(GUT)のエネルギースケールの実験研究を推進する。更なる感度向上のためには、CMB-S4へ向けたデータ解析手法研究に加えて、理論研究と共同で宇宙観測をベースとしたニュートリノ物理の方向性を探る。検出器開発については、超伝導検出器を用いる公募研究との連携を深め、超高感度・超低エネルギーセンシング分野での相互乗り入れと広い応用を検討する。B01班では、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索における限界を打破することを目指すし、『希ガス検出器特有の性質を用いた野心的革新的な測定原理の開発』と『新素材による周辺物質からの放射線背景の低減』を推進する。希ガス検出器の測定原理の開発では、高圧キセノンガスによるタイムプロジェクションチェンバー(TPC)を開発し、世界記録感度を超える2.5 MeV電子に対して半値全幅0.5%のエネルギー分解能と、電子の飛跡パターンの識別を目指す。さらに、陽イオン検出による飛跡の空間分解能の向上と二重ベータ崩壊核 ^{136}Xe の娘核 ^{136}Ba イオンをタグする方法の開発を進める。新素材による放射線背景の低減では、放射線に感度のあるガス容器の開発と

低放射線 ASIC とそれを用いた回路ボードの開発を進める。B02 班では、原子核乾板検出器の生産技術を開発し、応用研究を含め多数の実験 (A02, A03 等) への供給を進めていく。現状は、原子核乾板に塗布する乳剤の製造装置を開発し、装置の心臓部である粒子形成をおこなう仕込み装置、仕込み以降の工程である脱塩、水洗、感度調整のための装置を立ち上げた。今後は、装置群全体を稼働できるように、開発研究を推進する。稼働後は、各工程間の移液のプロセスをテストし、配管切り替えのタイミング移液作業工程の策定と効率化を進める。また、製造の時間短縮のために、各プロセスの並列処理を進める。

理論研究においては引き続き TeV のエネルギースケールを大きく超える新物理を探り、素粒子・宇宙の究極の統一像の構築に向けた研究を進める。C01 班は広範にわたる理論的研究を総動員し、力・物質の統一理論の枠、暗黒物質、インフレーション模型に対する新たな提案を行い、時空の量子論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、ニュートリノの 3 世代パラダイムの是非を明らかにし、真の理論を明らかにする方法を飛躍的に発展させていく。今後、C01 班 C02 班間の連携、公募研究との共同研究の連携の強化が重要となるいくつかのテーマが浮かび上がってきている。一例として、C01 の成果の一つである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が挙げられる。この機構には低エネルギーニュートリノ実験によって検証可能なシナリオも存在する点が特徴的である。このような検証可能性は標準的な物質反物質非対称性生成機構では期待されない性質であり、C02 と連携し A01, A02 の推進するニュートリノ振動パラメータ測定実験に還元していく。

また、近年の恒星運動の分光観測の目覚ましい進展から銀河や随伴銀河などにおける暗黒物質質量密度分布の構造が明らかになってきている。それらの結果から暗黒物質の候補としてこれまで想定されてきた自己相互作用を持たない重い粒子よりも自己相互作用をもつ GeV 質量程度よりも軽い粒子の方がより整合する可能性も示唆されてきている。このことから現在 sub-GeV 質量の暗黒物質を含むいわゆる暗黒セクター模型が注目を集めている。尤もらしい暗黒物質セクター模型の実現においては様々な対称性に対する考察が必要である一方で、新たな sub-GeV セクターの存在の実験的検証方法の考察も求められており、C01、C02 が連携して取り組む課題である。核子崩壊予言も C01、C02 が連携すべきテーマとなっている。核子崩壊は大統一模型の最も重要な予言であるが、これまでの理論研究では主に $p \rightarrow \pi^0 + e^+$ モードについて議論がなされてきた。一方で中間評価までの C01 の成果において様々な崩壊モードを見ることで大統一模型の対称性を峻別可能性が示されている。また C02 による大統一模型とは異なる起源を持つ核子崩壊の可能性も示されている。そのため C01、C02、さらに「ニュートリノで探究する大統一理論の物理」(代表・波場直之) が連携し、核子崩壊を通した統一模型の検証可能性を進めていく。

以上の理論研究発展の現状をふまえ、C01、C02 が引き続き新物理の提案をトップダウン、ボトムアップで行うと同時に、領域全体の連携を強化して研究を推進していく。領域の計画は戦略的な方針を持って推進されるが、研究には個々の研究者による自由な発想が必要不可欠である。ニュートリノ研究の領域は、素粒子、原子核、原子物理、技術応用、宇宙線、宇宙の分野と非常に広範囲にまたがり、本領域提案でカバーできていない研究テーマが多数存在する。公募研究では、ニュートリノ研究全般が新しい方向と大きな広がりをもって展開するための種となり、次世代を担う若手研究者の活躍を推奨する。一例として、C01、C02 がカバーしきれていない対称性の破れの相転移における重力波信号の研究に関する課題(公募研究「原始重力波を用いたニュートリノ質量獲得機構の解明」(代表・浅賀岳彦) 等)を充実させ、素粒子・宇宙の究極の統一像の構築に向けた研究を充実させていく。

研究遂行上の大きな問題点と考えるのは、2020 年の新型コロナウイルスの世界的な感染拡大の影響である。各計画研究の報告書で詳しく記述しているが、国際共同研究の遂行に大きな問題が生じている。今後のコロナウイルス感染の状況によるが、感染予防に充分注意して、新しいタイプの国際共同の形式を模索していく。

11 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)

世界をリードする最先端の実験プロジェクトに関する計画研究 A01-A04 と、大学をベースにした独自かつ挑戦的な技術開発に関する B01-B02、最先端の理論計画研究 C01-C02 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。

特に、計画研究 A02 が進める T2K 実験の物理解析で得られた CP 対称性の破れの兆候は確立すればノーベル賞級の成果となることから、今後の精度改善が大いに期待される。計画研究 A01 で開発を進めていた次期計画ハイパーカミオカデ実験の建設が承認されたことも大きな進展である。計画研究 A03 で開発を進める光センサーD-Egg は、IceCube 実験に対する日本の貢献の要になるものであり、そのデザインが承認されたことも大きな前進である。計画研究 A04 においても、POLARBEAR 実験でのデータ解析による成果を得ながら、次期計画 CMB-S4 に向けた開発研究が着実に進んでいる。A01-A04 の基幹研究で着実に成果を得る一方、計画研究 B01, B02 では独自性の高い挑戦的な研究を進めている。特に B01 は、ニュートリノのマヨラナ性の検証を世界に先駆けて進めるための開発研究であり、多少野心的であっても、是非進めるべきである。研究組織としても、ベテランから若手まで重層的であり、次世代のリーダー格の研究者が計画研究代表を務め研究を主導しているほか、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、この研究領域を発展させて将来の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)

C01 班では、宇宙観測を念頭を中心に据え、ニュートリノに関連する新物理の模型の研究を行い、他班での実験に対して具体的な新しい示唆を得た。理論研究を通して実験観測を巻き込んだ新しい研究領域の開拓に貢献している点が特筆すべきである。例えば、北野氏らによりインフレーション終了後の再加熱期におけるニュートリノ振動による物質反物質生成機構が提案され、低エネルギーニュートリノ実験(A02 班)で検証可能であることが示された。また伊部氏らは、sub-GeV 質量の暗黒光子を持つ非対称暗黒物質模型を構成し暗黒物質-反暗黒物質間振動を通じた対消滅が sub-GeV 領域の宇宙 γ 線観測でテスト出来ることを示した。永田氏らは高次数相互作用によって SU(5)GUT での $p \rightarrow \pi^0 e^+$ モードの陽子寿命がハイパーカミオカデ実験(A01 班)で探索が可能であることを示した。C02 班では、地上での加速器実験からのアウトプットを用いて、標準模型を超える新しい物理に迫るボトムアップ的アプローチを中心とする。この意味で、他班との連携が良く、特に新しいアイデアに基づく成果が目覚ましい。

例えば、安田氏らは非標準相互作用によるパラメタ縮退の問題の解決とパラメータ決定が低エネルギーニュートリノを利用する A02 班の実験によって可能であることを示した。佐藤氏らは μ -e 転換過程の詳細な計算により相互作用のカイラリティ構造の情報が引き出せることを示した。また深層学習を取り入れた荷電レプトンフレーバーの破れのデータ解析の COMET 実験への適用も行なっている。津村氏らは、ニュートリノ質量と Strong CP 問題を同時に解決する陽子崩壊を予言する新模型を構築、A01 班の実験での複数の陽子崩壊モードを組み合わせることで大統一理論と区別出来ることを示した。また、山津直樹氏(C02 班協力研究員)が"Special Grand Unification"の論文で 2018 年度(第 13 回)中村誠太郎賞を受賞した。C02 班における新しい大統一理論の研究活動が高く評価されている証左である。

評価者: 荻尾彰一(大阪市立大学・大学院理学研究科・教授、専門:宇宙線実験)

本研究領域は、総括班を中心とする密接な連携のもと活発な活動が続けられている。領域発足後に、吉田滋さん・石原安野さんの仁科賞、市川温子さんの猿橋賞など、領域に関わるのべ 6 名の研究者が 5 件の権威ある賞を受けたことも、高いアクティビティのあらわれである。計画研究 A01 はニュートリノの観測による質量階層性・CP 対称性の解明と陽子崩壊の探索を目標としている。これまでに解析手法の改良によって大気ニュートリノ、陽子崩壊に対する有効体積の拡張に成功している。太陽ニュートリノに関する背景事象削減、解析性能向上の取り組みの進展に期待したい。計画研究 A03 では、開発された光検出器が IceCube-Gen2-Phase1 に正式採択され、量産が始まった。また、感度研究による高精度化も進められており、アップグレード計画は順調に進んでいる。IceCube 実験は宇宙線エネルギースペクトル・化学組成についても精力的研究を進めているので、今後はもう一方の目標である大気ニュートリノ流量

計算の高度化の一層の進展を望みたい。計画研究 B02 グループにより製造されている原子核乾板は、本領域発足以来、物理データの取得を開始した計画研究 A02 の NINJA 実験に利用され、また GRAINE 実験の気球に搭載されて高エネルギーガンマ線による Vela パルサーの撮像に成功するなど、優れた成果をあげている。B02 グループは生産能力の向上を目標に掲げ、これまでに乳剤製造の核である粒子形成装置を完成させた。今後の作業工程の確立と環境整備への取り組みは詳細に検討する一方で、乾板塗布装置については時間的余裕もあることから洗い出しが不十分な印象である。本研究の成果の幅広い利用と高い数々の成果が期待されることから、順調な本研究計画の進展に期待する。最後に、ハイパーカミオカンデ (HK) 実験に本格的な予算措置が行われたことは本領域にとっても極めて大きな追い風であると同時に、本領域研究者の密接な連携・協力は HK 実験の力強い推進力になるはずである。そのためにも、現在非常に良くマネジメントされ、高いモチベーションを維持して活発に運営されている本領域のさらなる進展と拡大に大いに期待する。

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)

本新学術領域は、地上実験、宇宙観測・実験、理論、また将来を見据えた技術開発に基づき、包括的なニュートリノ研究を推し進めることを目的とし、その重要性は自明である。宇宙背景放射(CMB)は、1978、2006、2019年のノーベル物理学賞にも示されるように、現代宇宙論の基盤の構築に貢献した最も重要な研究分野である。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のは大きな進展である。特に、A04班の研究グループは、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立しており、地上実験 Simons Array、Simons Observatory、CMB-S4に正式に参加することを成し遂げ、超伝導検出器の開発などの主要な貢献が見られる。また、日本主導の GroundBIRDの独自性も高く、その実証評価が待たれる。ただし、コロナウィルスの影響で実験の遅れが既に出ており、その遅延への対処、必要があれば計画の見直しに細心の方策が望まれる。例えば、研究期間中にニュートリノ質量の100meVの精度での制限を目指しているが、実現が難しいのであれば、見直しが必要であろう。また、物理解析の手法・パイプラインの開発、CMBの超精密測定に対して最重要課題になっている前景放射の除去の理論模型、除去手法が開発されているようであるが、本研究で開発した手法をCMB Planck衛星データ、あるいは他の宇宙データに適用し、実データに基づく手法の有効性の実証、また改良が望まれる。IceCube実験でも、領域の研究グループは既に主要な役割を果たしているが、そのアップグレード版であるIceCube-Gen2において、同研究グループが開発した新型光検出器D-Eggが国際共同研究で採択されたのは大きな成果だろう。IceCubeにより、TeV、PeVの高エネルギースケールのニュートリノの探索が可能になり、重力波天文学、マルチメッセンジャー天文学などの新しい研究の展開も期待できる。ただ、本領域の目的と照らし合わせ、敢えて望むとすれば、理論研究班とのより有機的な連携により、TeV、PeVスケールで探査が可能になる素粒子の新物理、重いダークマター探査などのターゲットになる物理模型が同定できれば、より一層の研究の連携、協奏が生まれると思われる。

評価者: 幅淳二(高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・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、長年にわたり大きな成果を輩出しているSKのデータ解析において、新たな手法を開発することで陽子崩壊探索における感度をさらに高めた結果を出してきたことは高く評価される。(A02)班では、世界をリードする加速器長基線ニュートリノ実験において、ビーム強度をさらに高め500kW超での運転を確立したことは特筆に値する。A03班ではSKとIceCube実験の連携が眼目であるが、今後一層の連携研究による成果の創出が期待される。B01班では、日本における新たな実験研究の創出を目指して技術開発が精力的になされている。代表者である市川温子氏は本領域が関わるニュートリノ研究などでの功績が高く評価され、2020年の猿橋賞を受賞した。B02班は原子核乾板の技術を現代に活かす重要な開発研究で、本領域においても極めてユニークな研究班であり、その成果はニュートリノ研究にとどまらず考古学における遺跡のイメージングから社会インフラの健全性の確認まで多彩な分野で期待されている。応用における科学成果だけでなく、本筋である原子核乾板の技術開発においても、その技術成果の適切な発表がなされていくことを期待する。以上、本新学術領域が期待以上の成果を上げながら推進されつつあるものと評価する。