

## 【令和5年度実績】

### 1. 極稀現象研究の推進

「研究」

No.18 (1)-1 自由な発想に基づく基礎研究の推進および新興・分野融合研究の開拓, No.28 (2)-1 国際共同利用・共同研究拠点及び共同利用・共同研究拠点の機能強化, No.29 (2)-2 大型研究施設等を積極的に活用した戦略的研究連携の推進

実績報告

地下での宇宙素粒子研究が極低放射能技術を発展させることで、自然界に存在する極稀現象を浮き彫りにし、宇宙・素粒子・原子核の最重要課題を研究する極稀現象研究フロンティアを形成してきた。その中核となるニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索は、「宇宙になぜ物質が存在するのか？」など根源的な謎を究明する鍵と考えられている。カムランド禅実験は、巨大・極低放射能のニュートリノ観測装置カムランドに二重ベータ崩壊核を大量に導入することで、世界をリードする探索を行ってきた。この探索は宇宙・素粒子・原子核分野での最重要課題のひとつに挙げられており、老朽化対策に合わせたカムランドの大幅な高性能化計画を提案してきた。この提案は日本学術会議の未来の学術構想(2023)に No.178「カムランド高性能化による極低放射能環境でのニュートリノ研究」として掲載された。また、文部科学省の学術研究の大型プロジェクトの推進に関する基本構想(ロードマップ 2023)にも 12 件のひとつとして「極低放射能環境でのニュートリノ研究」として掲載された。これらの評価を受け、カムランド高性能化の準備として現行装置の排液等が予算化され、2024 年 1 月 12 日をもって二重ベータ崩壊を研究するカムランド禅実験は停止し、二重ベータ崩壊核の取り出しを実施している。停止までの期間でデータの蓄積を増やし、世界で初めてニュートリノ質量の逆階層領域に到達した Physical Review Letters 130, 051801 (2023)と比べて、半減期への制限をさらに 65%向上し、ライバルからのリードを大きく広げた。この解析に関連して博士を1名輩出したほか、機械学習を取り入れた解析の構築によって物理学専攻賞(修士)を受賞するなど、優秀な人材育成に貢献している。

さらに、極稀現象フロンティアを切り拓く拠点として大阪大学核物理研究センターと連携して「大学間連携による神岡極稀現象研究拠点の形成」を組織整備事業として開始するほか、拠点の活動場所を神岡地下のカムランドエリア内に整備し、類を見ない地下のクラス1スーパークリーンルームを備えた施設整備の予算も認められ、分野の中核として長期にわたってコミュニティを支える体制づくりを開始した。極稀現象フロンティアの開拓においては、スペインのカンフラン地下研究所との連携を開始し、国際的なビジビリティも確立している。さらに、極低放射能研究で必須の低バックグラウンドゲルマニウム検出器の開発においては、拠点に設置する検出器のプロトタイプを東京大学施設内に構築し、世界トップ3の高感度を実現することに成功した(PTEP2023 123H01)。さらにニュートリノ科学研究センターは地下の極低バックグラウンドコミュニティの中核として、これまで、新学術領域「地下素核」(2014-2018)、新学術領域「地下宇宙」(2019-2023)の2領域を連続して牽引してきたが、さらに学術変革領域「地下稀事象」(2024-2028)が採択され、ニュートリノ科学研究センターのコミュニティでの地位は盤石となった。

### 2. 素粒子研究と地球科学研究の融合

「研究」

No.18 (1)-1 自由な発想に基づく基礎研究の推進および新興・分野融合研究の開拓

実績報告

カムランドは不可能と言われていた地球内部の放射性物質が放出するニュートリノ(地球ニュートリノ)の観測に世界で初めて成功し、ニュートリノ地球科学を創出した。地球ニュートリノは原子炉由来のニュートリノと同種であるが、観測期間の増加によって、地球内部の放射性熱生成が地表での熱放出の半分程度しかないことを検証することに成功していた。

さらに、東日本大震災後は国内原子炉の多くが停止したことで地球ニュートリノ観測の質が高まり、Geophysical Research Letters 49,16 (2022), e2022GL099566 では、地球モデルの選別が始まり、高めの地熱量を予測するモデルを含めた複数のモデルを排除することに成功した。これにより、地球内部のダイナミクスやそれに関係する地球内部組成に対して新たな知見を与えており、地球内部を大局的に観測する新たなツールとしての質的な変革をもたらした。この論文が、2024年3月にWiley Top downloaded article に選ばれた。素粒子研究と地球科学研究の融合であるニュートリノ地球科学は、東北大学発であるとともに、東北大学が世界をリードし続けている。この論文の成果を受けて、第18回日本物理学会若手奨励賞(宇宙線・宇宙物理領域)、第25回高エネルギー物理学奨励賞、ディスティンディングイッシュトリサーチャー、科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞の受賞があった。また、地球ニュートリノ研究をさらに発展させるニュートリノ科学研究センター発進のプロジェクトが、日本学術会議未来の学術構想(2023)にNo.106「地球ニュートリノ観測が切り拓く新しい地球未来像」として掲載された。先述のNo.178「カムランド高性能化による極低放射能環境でのニュートリノ研究」と合わせて2件のプロジェクトが掲載されており、ニュートリノ科学研究センターの高いビジビリティを実現している。

### 3. ニュートリノ研究の多様化

「研究」

No.18 (1)-1 自由な発想に基づく基礎研究の推進および新興・分野融合研究の開拓  
実績報告

中性子の検出効率の高いカムランドは、中性カレントニュートリノ反応で荷電レプトンを生じない場合でも、脱励起ガンマ線や中性子の測定でニュートリノ反応を捉えることができる。この特徴を活かすことで、ニュートリノ反応のユニークな研究が実施できる。ニュートリノ反応においては核子の形状因子の理解が重要であるが、海クォークとして寄与するストレンジクォークの軸性電荷は、未決定の軸性質量依存性が大きく、反応断面積の不確定性を縮小する妨げとなっていた。カムランドではニュートリノ反応で発生する中性子多重度に注目することで、軸性電荷依存性を抑えたストレンジネス軸性電荷測定が可能であることを見出した。実際にこの手法を大気ニュートリノに適用することで、ストレンジネス軸性電荷の測定に成功した(Phys.Rev.D107, 072006, 2023)。これは中性子検出効率が高いカムランドならではのユニークな研究である。

暗黒物質探索は、二重ベータ崩壊研究とならび宇宙・素粒子・原子核研究の最重要課題のひとつである。カムランドは暗黒物質探索に最適化された検出機ではないが、大量のキセノンを極低放射能環境で保持していることを活かし、キセノンとの反応を使ったユニークな探索で論文を発表(Phys.Lett.B855(2024)138846)した。また、ニュートリノ科学研究センターが運営する地下施設では、その極低放射能環境を活用した多様な研究が可能である。ニュートリノ科学研究センターでは、超伝導センサー技術を用いた低質量暗黒物質探索や、アクシオン探索にも注力しており、それらは極稀現象フロンティアの重要な構成要素である。超伝導センサーを用いた低質量暗黒物質探索においては、希釈冷凍機を用いた10mKでの探索を立案しており、2023年10月には「国立大学法人東北大学ニュートリノ科学研究センターと大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構量子場計測システム国際拠点との新量子場探索のための低バックグラウンド実験の推進に関する連携協力協定書」を交わし、地下のカムランドエリアに希釈冷凍機を設置するため

の整備を開始した。2024年にはCryoLabとして稼働を始める予定である。また、アクシオン探索においても地上の装置で未探索のパラメータ領域である種の理論モデルを検証する探索を実施した。今後安定した地下環境に探索場所を移し、パラメータ領域を大幅に拡大していく予定である。一方、ニュートリノ科学研究センターが有する極低放射能技術は、量子コンピュータなどの基盤技術である量子センサーの今後の懸案事項として挙げられている放射線耐性の検証に適している。半導体量子ドットで使われる量子ポイントコンタクトに対して放射線の影響を調べたところ、高い放射線耐性を示す結果が得られた。これは放射線検出器には適さないということも示唆している。

---

## 4. ニュートリノ天文学の推進

「研究」

No.18 (1)-1 自由な発想に基づく基礎研究の推進および新興・分野融合研究の開拓

### 実績報告

ニュートリノ天文学は光学的観測・重力波観測と合わせてマルチメッセンジャー天文学の一角をなす。天体ニュートリノのエネルギー範囲は広く、光学観測での多波長観測と同様に数 GeV 以上の高エネルギー、数十 MeV 以上の中間エネルギー、数 MeV 程度の低エネルギーでそれぞれ観測手法が異なる。高エネルギーは南極の氷を立法キロメートルオーダーで使う IceCube、中間エネルギーは 5 万トンの水を使うスーパーカミオカンデ、低エネルギーでは最も光収量の多い液体シンチレータを 1000 トン使ったカムランドが担っている。

カムランドは低エネルギーの観測に優れるため、ベテルギウスなどの近傍天体が超新星爆発する際には、爆発の数日前からその前兆となるニュートリノを捉えることができ、特に起動に時間の係る重力波望遠鏡に対して重要なアラームを提供してきた。一方、スーパーカミオカンデがガドリニウムを添加したことで、爆発の数時間前からの感度を高めており、これを受けて、より信頼性の高いアラームを生成できるように、スーパーカミオカンデとの合同観測体制を構築した。一方が停止していても最低限のアラームを発出できるため、カムランドの高性能化作業期間や、ハイパーカミオカンデ開始に伴うスーパーカミオカンデの停止後も継続して監視が可能となり、重大事象である近傍超新星爆発をマルチメッセンジャーで観測する体制をより盤石なものとした。

---

## 5. 地域活動への貢献

「社会との共創」

No.06 (2)-4 「社会とともにある大学」としての社会連携の強化、No.07 (2)-5 戦略的ファンドレイジングの展開と支援者とのネットワーク強化

### 実績報告

岐阜県飛騨市と当センターとの間で令和 3 年 3 月に交わした、学術研究、人材の育成及び地域社会の発展に寄与することを目的とした協定書に基づいて、ふるさと納税の一部を東北大学での宇宙素粒子研究の発展のために寄付する項目を「飛騨市ふるさと応援メニュー」の中に位置付けて頂いている。この枠組みで令和5年度は 720 万円の寄付を頂くことになった。地方自治体からの基礎研究を目的とした寄付金はほとんど例のないものであり、地方創生に強く貢献していることの証左である。この寄付金は、学生や若手研究者の研究力向上を目的とした支援に活用し、我々が推進している基礎物理学研究の発展の成果に繋げることとしており、令和5年度には、国内外の学会において研究成果発表を行う際の参加旅費や宿泊費等への支援、神岡実験施設「KamLAND」での各種実験・作業等の遂行のための交通費や宿泊費等への支援、研究会・セミ

ナー開催に関わる国内外研究者の招聘への支援に活用した。これを一例として、ニュートリノ科学研究センターと飛騨市は、相互に緊密な連携協力を行っており、市民大学の講座を担当するほか、ひだ宇宙科学館カミオカラボなどの種々の地方活性化の企画に関わっており、自治体の特色を生かした町おこしに貢献している。また仙台市においても、日本物理学会第78回年次大会の企画に合わせて、市民科学講演会「地下から挑戦する宇宙の謎」(2023/9/18)を実施したほか、仙台市天文台での展示やブレインサポーターとしての貢献などを通して、地域での科学啓蒙に貢献した。

## 6. 教員の研究時間確保に係る取り組み

「教員の研究時間確保」

No.45 (1)-1 情報セキュリティの確保および事務システムの効率化, No.46 (1)-2 全学 DX によるデジタル・キャンパスの推進

### 実績報告

仙台市のニュートリノ科学研究センターと飛騨市神岡町の地上・地下実験室との内線電話・ネットワークの一体化による高品質な通話・ビデオ通話・データ解析環境を提供することで、旅行頻度を低減するとともに業務・研究の切り替えを容易にしている。また、Slac/Discord を組織として導入し、遠隔地を含めた日常のコミュニケーションを容易にすることで、情報交換のオーバーヘッドを低減し研究時間の確保につなげている。

24 時間監視が必要な実験室環境及び実験装置の稼働状況の監視業務の大部分を自動化し、異常時の電話・電子メールでの自動通報を備えることで、監視業務を大幅に簡略化している。さらに、昼夜間の監視をタイムゾーンの異なる日米で分業することで、生活リズムに無理のないシフト体制を構築し、研究時間の確保及び質向上をおこなっている。また、これまで装置の場所以外向き手動での再起動が必要であったハードウェア障害に対しても、カメラと遠隔操作を組み合わせた装置を教育の一環として開発し導入することで、米国や地上からでもある程度地下のハードウェア障害への対応が可能となり、現地研究者が夜間に装置にまで出向く頻度を低減し、研究時間の確保及び質向上をおこなっている。

助教が担当する学生実験において複数人が協力することで、授業期間においても週単位の出張を可能とし、研究と教育を両立しやすくしている。

セミナー・談話会などをビデオ配信するとともに、実験サイトでは東京大学宇宙線研究所神岡宇宙素粒子研究施設とも情報共有することで、最先端の研究交流の機会を場所によらずに得られるように工夫している。

また、研究の発展やコミュニティへの貢献の増大によって、教員の所掌となる業務はますます拡大している。ニュートリノ科学研究センターの活性化の進展に合わせて組織整備を実施することで、適切な人員増と部門の整理によって、効率的な運用を目指した。令和6年度からは組織整備「大学間連携による神岡極稀現象研究拠点の形成」によって教授・准教授・助教の各1名が増員され、さらに URA、リサーチエンジニアの充当で研究に集中できる環境を構築する。また、ニュートリノ科学研究センター内に、既存のニュートリノ物理研究部、極低放射能科学研究部に加えて、極稀現象研究技術開発部を新設し、コミュニティの技術継承にも対応しつつ研究環境を最適化する整備を実施した。