

## 【令和3年度実績】

### 1. 極低放射能環境での宇宙素粒子研究の推進

No.19 ①-1 長期的視野に立脚した基礎研究の充実

No.20 ①-2 世界トップレベル研究の推進

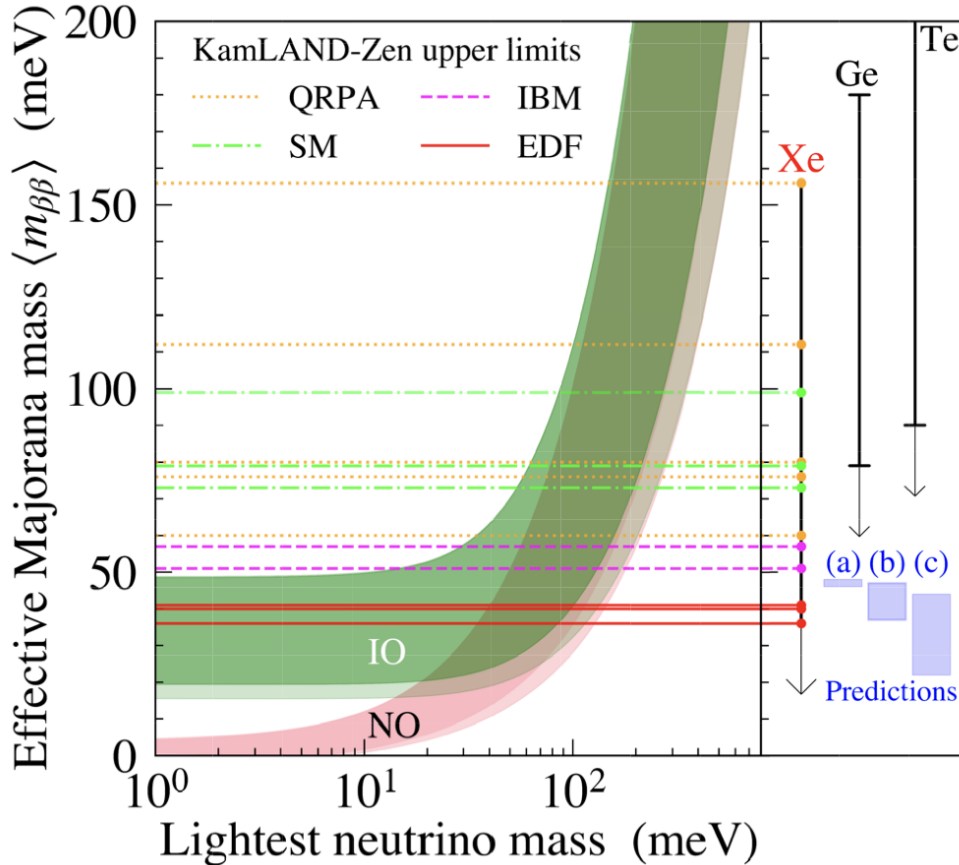
No.21 ①-3 国際的ネットワークの構築による国際共同研究等の推進

No.25 ③-1 新たな研究フロンティアの開拓

No.33 ②-4 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

#### 実績報告

長期運転で故障が目立ってきた光センサーに対して、ゲインの低下を補償する電子回路による増幅で延命し、エネルギー分解能の悪化を最小限にとどめ、刻々と変化する光センサーの性能変化に精緻に対応した観測を行い、世界最高感度でのニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ( $0\nu 2\beta$ ) の探索を実施した。 $0\nu 2\beta$  は未発見であるが、類を見ない極低放射能の実現とともに、機械学習によるガンマ線を伴うバックグラウンドの半減、原子核破碎事象による長寿命核バックグラウンドの詳細な理解、それに対する中性子多重度を使った効率的な識別手法の開発による半減などの高度な解析技術の導入によって、マヨラナ有効質量に対して  $36\sim 156\text{meV}$  以下という非常に厳しい制限を与えることに成功した。排除領域は、ニュートリノ質量の逆階層領域 (IO) に世界で始めて到達するとともに複数の理論予想にもかかっている。PRL に投稿するとともに、arXiv:2203.02139 に掲載し、即座に大きな反響を得ている。この結果は博士論文にもまとめられ、総長賞及び GPPU 優秀学生賞(実験)を受賞している。



また、同じデータを使いレプトン数に破れに伴う南部・ゴールドストーンボゾンであるマヨロンの探索を行い、質量がない場合の実験的探索で世界最高感度を更新するとともに、暗黒物質に関係する有質量の場合には世界で初めて実験的な排除領域を得た。この結果も博士論文にまとめられた。

さらに長期的な取り組みとして、カムランドの性能を大幅に向上する要素技術としての、高量子効率 PMT、集光ミラー、新型液体シンチレータ、新型電子回路を組合せてテストするための 50m<sup>3</sup> の試験装置を建造した。この装置は将来小規模な極低放射能実験向けに共同利用に供する予定であり、地下での宇宙素粒子研究コミュニティの中核として活動している。また、地下スーパークリーン施設を整備するための空洞を整備しており、こちらも共同利用に供しつつ、カムランドの高性能化といった旗艦プロジェクトの実現にも活用する。新型液体シンチレータの開発では、地下宇宙領域若手研究会で修士学生が優秀発表賞を受賞している。

解析の取り組みでは、上述の機械学習によるガンマ線バックグラウンドの低減以外にも、信号事象の位置・エネルギー再構成でも高い性能を実現し始めており、実績のある技術と比較しながら信頼性の高い技術展開を行っている。また、 $0\nu 2\beta$  探索での主要なバックグラウンドが宇宙線によるキセノンの原子核破碎であることがわかっているが、複数の宇宙線が同時入射する割合が 4%程度あり、これまでの単独宇宙線向けのプログラムでは不十分なことはわかっていた。検出器の詳細な応答を取り込み、画像処理技術を適用することで、複数宇宙線を同時に再構成することに成功し、単独宇宙線に対しても性能向上が実現した。今後のバックグラウンド低減に貢献すると期待されている。この成果は修士論文にまとめられ物理学専攻賞を受賞した。世界最高性能の実験装置は、優秀な人材を育成する良い教育環境になっている。

次々世代への取り組みにも着手しており、順階層バンド領域 (NO) をカバーできる感度達成に必要な 100 トンクラスのキセノン <sup>136</sup> 同位体の入手源として使用済み核燃料に着目し、再処理過程でのオフガス取り出し、さらに廃炉とも関連づけた有用元素の抽出について企業と協議して開発計画をまとめている。

 [カムランド禅最新結果.png](#)

## 2. 地球ニュートリノ研究ネットワークの展開

No.19 ①-1 長期的視野に立脚した基礎研究の充実

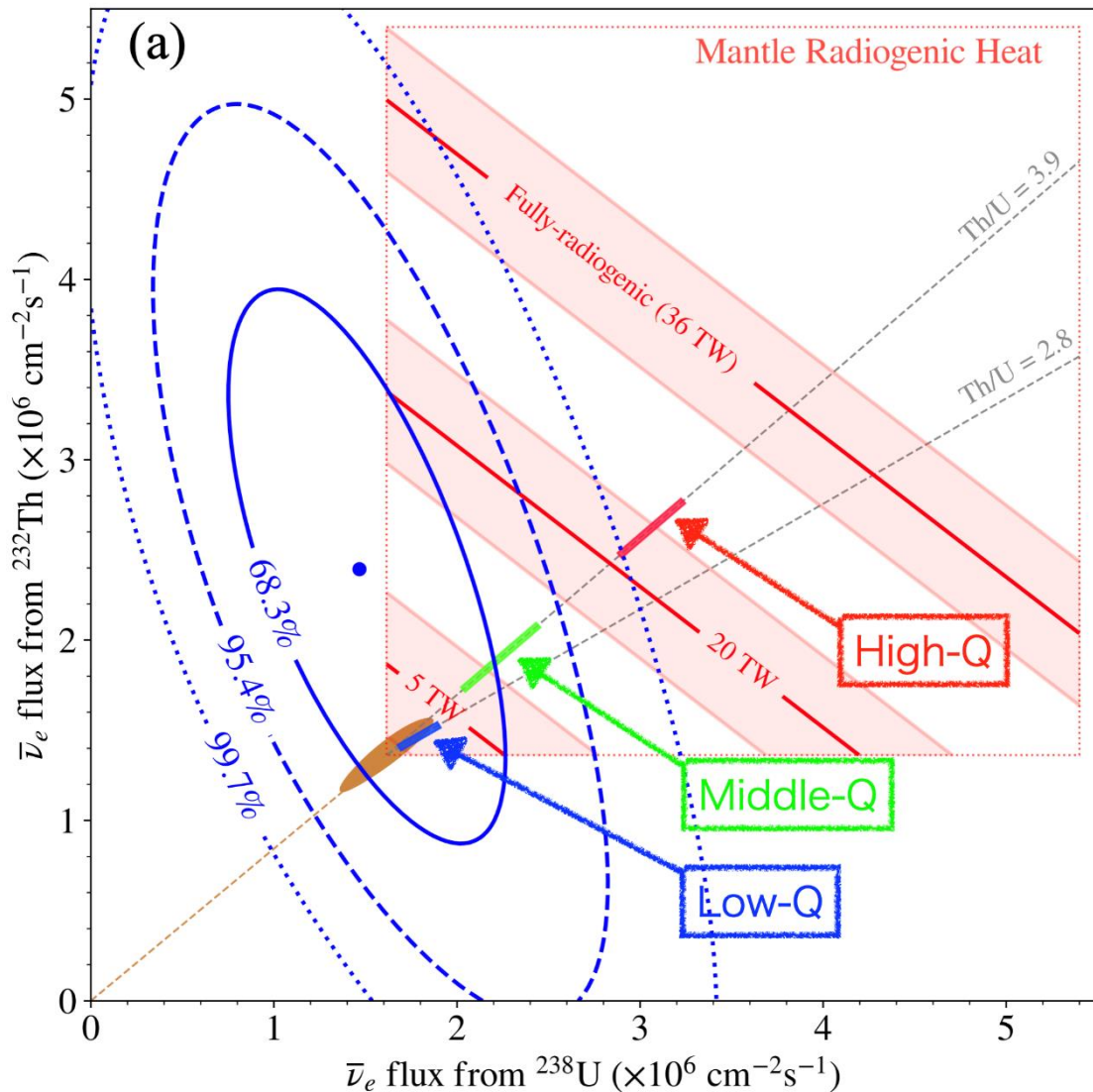
No.20 ①-2 世界トップレベル研究の推進

No.21 ①-3 国際的ネットワークの構築による国際共同研究等の推進

### 実績報告

原子炉停止期間のデータの蓄積により、地球ニュートリノの観測精度は 14.7%に達し、モデル精度を凌駕することに成功した。全地球熱が放射性崩壊によるとする仮説を  $5.2\sigma$  という高い信頼度で明確に排除するとともに、長年の議論である放射性熱量を多く必要とする地球物理学モデル (High-Q) と地球化学モデル (Middle-Q, Low-Q) の弁別において、High-Q モデルを 99.76% の精度で排除することに成功した (arXiv:2205.14934)。これはニュートリノ地球科学の大きなマイルストーンである。これらのモデルはマントル対流様式が異なることから、地球ニュートリノ観測を通してマントル対流に対する知見を得たことに相当する。さらに、Middle-Q, Low-Q の弁別が可能になると地球始原隕石の特定など地球形成史に関わる情報を得ることができる。また、地球内原子炉仮説に対しても世界で最も厳しい制限を与え、地球内での特殊な熱生成モデルや過剰なウラン濃縮仮説を排除している。これらの進展には、地球ニュートリノ観測の最大バックグラウンドである原子炉ニュートリノの評価において、MOX 燃料の影響を解析に反映させるとともに、国外原

子炉の稼働状況の時間変化を詳細に見積もりバックグラウンド評価の更なる低減を行ったことも寄与している。2011 年以降の国内原子炉停止期間では中国の原子炉新設によって原子炉ニュートリノのフラックスが 9% 程度上昇していることがわかった。また渡辺寛子助教が「地球ニュートリノ観測による地球内熱生成量の解明」の業績によって第 24 回(2021 年度)守田科学研究奨励賞を受賞した。



地球ニュートリノ観測は多地点でのネットワーク観測も有効であり、その事例として、KamLAND の他に唯一地球ニュートリノ観測実績のある Borexino 実験と協働し、両実験の地球ニュートリノ観測結果の統合解析を行い出版した(<https://doi.org/10.1007/s40766-021-00026-7>)。

また、マントルの情報をより詳細に得るための有力なプロジェクトとして海洋底地球ニュートリノ観測計画(OBD)を推進しており、海洋工学・科学掘削・海洋生物学といった新たな分野にも連携も拡大している。JAMSTEC とは具体的な検出器開発を進めており、光電子増倍管の耐圧シールド開発では、海底での使用実績があるガラス素材を地球ニュートリノ観測に適合させるための低放射能化に成功し、既存ガラスの 1/10-1/100 の放射性不純物量を実現した。液体シンチレータの

海洋底温度での性能評価や、詳細な検出器シミュレーションによる観測感度の見積もりを行い、海洋底掘削船「ちきゅう」で曳航できるサイズでハワイ沖での観測によって、地球モデルの弁別ができることを初めて示した。アイデアが提唱されて以来約 15 年に及ぶ空白期間を経て、初めての具体的成果を挙げ始めている。この開発に関連し修士学生が物理学専攻賞を受賞した。2022 年度は科研費基盤 B の最終年度となり、JAMSTEC の初島観測所に小型液体シンチレーター観測機を設置し、海底での世界初稼働を目指している。



### 3. 先進の低温検出器の開発

No.19 ①-1 長期的視野に立脚した基礎研究の充実

No.25 ③-1 新たな研究フロンティアの開拓

#### 実績報告

素粒子研究とデバイス・物性研究を結びつける AIMR、電気通信研究所と連携した FRiD プログラムをもとに、月例での研究会が実施され、理研や神戸大学、大阪大学なども参加する活発な連携が進んでいる。量子ドットデバイスに対する放射線影響調査を目的として、量子ポイントコンタクト(QPC)基板を放射化して放射能の影響を調べるなど実際に実験に進んだ事例もある。

また、新学術領域「地下宇宙」での低温技術研究会と低温技術チュートリアル講演会は合わせて 9 回を数え、学際分野でのコミュニティ形成が進んでおり、中核として活動している。理化学研究所、埼玉大学、産業技術総合研究所や情報通信研究機構の量子デバイス研究者との連携も進んでおり、素粒子研究者と量子デバイス研究者で構成するコミュニティ形成の核として貢献している。当センターに設置された 10mK に到達できる希釈冷凍機では、軽い暗黒物質探索を目的として超電導センサーでの放射線検出に成功しており、将来の物理測定を目指した希釈冷凍機の低放射能化も実現した。新規に東北大学の極低放射能技術とローレンス・バークレー国立研究所の量子センサー技術の融合による神岡地下での軽い暗黒物質実験を提案している。地下、極低放射能、量子センサーを組み合わせた新たな研究フロンティアの開拓を進めている。

アクシオン探索に用いる共振空洞の開発・研究では、従来の 26 倍の体積を持つ空洞 (5.7 GHz) を、4K のクライオスタットで 9 テスラを発生する超電導磁石内に導入しており、空洞の Q 値向上のための素材開発を進めている。アクシオン探索に用いる共振空洞は強磁場下において  $Q \sim 2.0E5$  程度が必要とされるが、高純度の誘電体(アルミナなど)でマイクロ波損失が極めて小さいことを利用し、共振周波数 7.1GHz の空洞において、4.2K で  $Q=1.2E5$  を達成した。これらを組み合わせることで、高周波帯の未踏領域での高感度のアクシオン探索を実現できる。また、13 テスラ大空間超伝導磁石を保有する核融合科学研究所との連携が進み、大型マグネットのメリットを生かした類例のない周波数帯( $\sim 0.34\text{GHz}$ )での KSVZ アクシオンモデルを検証する実験計画を進めている。

### 4. ニュートリノ研究の多様化

No.19 ①-1 長期的視野に立脚した基礎研究の充実

No.20 ①-2 世界トップレベル研究の推進

#### 実績報告

超新星爆発ニュートリノ早期警報システム(SNEWS)の中核観測装置として貢献(New Journal of Physics 23 (2021) 31-201)するとともに、現状世界で唯一超新星爆発前兆ニュートリノ観測による



爆発アラームを発信できる装置としてカムランドの高い稼働率を維持しており、重力波観測装置などに爆発前兆アラームを発信している。この取り組みに、感度向上を図っているスーパーカミオカンデを組み入れる共同アラーム構築の MoU を締結した。低エネルギーニュートリノ天文学の中核として、8.3~15.3MeV の超新星ニュートリノ、太陽反電子ニュートリノ、15MeV 以下の暗黒物質に対する対消滅断面積、太陽フレア起源ニュートリノに関して世界で最も厳しい制限を与え、論文発表(ApJ 925: 14, 2022, ApJ 924: 103, 2022)した。カムランドでのニュートリノ天文学関連では、地球宇宙領域研究会での優秀ポスター賞、理学・生命科学研究会合同シンポジウムでの優秀口頭発表賞を受賞している。

国内の原子炉ニュートリノの観測では平均 180km の距離での観測であったが、国内原子炉の大部分が停止していることから、およそ 700km の超長基線での韓国の原子炉からのニュートリノを捉えることに成功し、さらに、超長基線でのニュートリノ欠損の検証にも成功した。

また J-PARC ニュートリノビームをカムランドで観測する T2KL 実験では、中性子数を計測できるというカムランドの強みを活かして、不定性の大きいニュートリノ原子核散乱断面積の重要パラメータであるストレンジネス軸性ベクトル電荷の測定精度向上が進行している。

JSNS2 では J-PARC MLF で1機目の装置で順調にデータ収集を続けており、バックグラウンド削減のためのデータ解析が東北大学を中心に行われている。ニュートリノ検出感度を改善するための2機目の装置も建設が始まった。また、基板研究 A で進めている、J-PARC MLF の静止崩壊ニュートリノを利用する低エネルギー電子ニュートリノ検出実験(DaRveX)では、MLF でのバックグラウンド測定実験を行った。この知見を元に新しいニュートリノ検出器の基本設計を行っている。フランスで実施した Double Chooz 原子炉ニュートリノ振動実験はデータ収集を終了し、検出器解体を進めている。

本予算が認められたハイパーカミオカンデに対し、低エネルギー物理研究への貢献を続けているほか、J-PARC からのニュートリノビームをカムランドで検出する T2KL 実験では、将来の大型実験で必要となるニュートリノの中性カレント反応に関して新たな知見を得始めており、幅広い手法でのニュートリノ研究を展開している。

---

## 5. 地域活動への貢献


No.81 ①-1 地域住民等との協働の緊密化

### 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た。この枠組みで令和4年2月14日には1190万円の寄付を頂き、飛騨市長と目録と感謝状の交換を行った。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(<https://www.city.hida.gifu.jp/site/kamiokalab/>)などの種々の地方活性化の企画に関わっている。

## 飛騨市がんばれふるさと応援寄付金(ふるさと納税)について

 [印刷用ページを表示する](#) 掲載日：2021年12月10日更新

ふるさと飛騨市を応援したい、貢献したい・・・  
そんなあなたのあたたかいご支援をお待ちしています

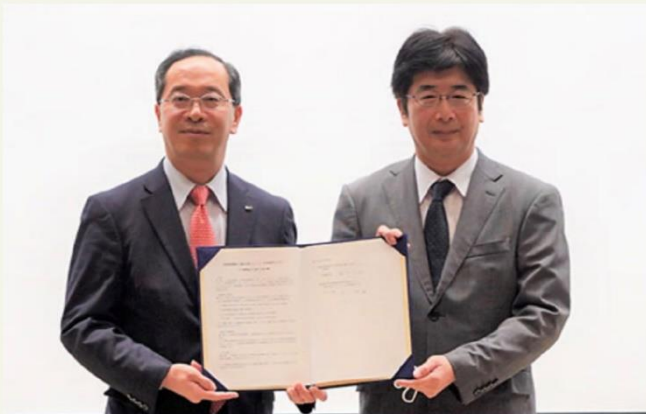
### ふるさと納税とは・・・

自分が生まれ育った「ふるさと（都道府県や市区町村）」や何らかのかかわりのある地域に貢献したい、あるいは応援したい・・・といったあたたかい想いをお持ちの方が、ふるさとに対して寄付を行った場合に、2,000円を超える部分について、所得税・個人住民税から控除する仕組みです。なお、寄付をする先は、出身地や居住地等に限定されず、都道府県や市区町村であればどこでも構いません。この制度を利用して、ぜひ「ふるさと飛騨市」を応援してください！

### 飛騨市ふるさと応援メニュー

飛騨市では、次のメニューの中からお選びいただけます。寄付金はその応援メニューに関連した事業に大切に活用させていただきます。

#### 6. 東北大学宇宙素粒子研究連携事業



飛騨市には東北大学ニュートリノ科学研究センターのKamLANDという最先端宇宙研究施設があります。

飛騨市では、この施設および研究をわかりやすく紹介する「ひだ宇宙科学館カミオカラボ」を東北大学ニュートリノ科学研究センターの協力のもと整備しました。

皆様のご支援で施設の維持管理と研究支援を行うとともに、いただいた寄付金から経費等を除いた額の3割を東北大学に寄付し、基礎物理学研究発展に役立てていただきます。

 ふるさと納税.jpg

## 6. 教員の研究時間確保に係る取組

No.63 ①-1 教育研究組織の点検・見直し

No.64 ①-1 効率的かつ効果的な事務等の構築・機能強化

### 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に出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上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。