

極低放射能環境でのニュートリノ研究

① 計画の概要

ニュートリノ質量の発見により、ニュートリノのマヨラナ性の検証が重要課題となっている。現在唯一現実的な検証方法がニュートリノを伴わない二重β崩壊 ($0\nu 2\beta$) の探索であり、 $0\nu 2\beta$ の発見は「宇宙物質優勢の謎」、「軽いニュートリノ質量の謎」を解明すると期待されている。多数の $0\nu 2\beta$ 探索実験の中、極低放射能を実現したニュートリノ観測装置カムランドを活用したカムランド禅実験は、短期間かつ低コストで世界を大きくリードし、 $0\nu 2\beta$ の発見がいつあっても不思議ではないレベルにまで探索の質を向上させた。本計画は、ニュートリノ質量の縮退構造を排除した感度をさらに高め、逆階層構造をカバーする 20meV まで高感度化する。そのために、エネルギー分解能を大幅に向上し、濃縮キセノン量を 1 トンに増量して $0\nu 2\beta$ 探索を行う。さらに、原子炉ニュートリノが少ない特別な状況や大陸プレートの端に位置するという地理的特徴を生かし、世界をリードしている地球ニュートリノ観測を継続発展させることで、地球の形成・ダイナミクスの理解を深めるニュートリノ地球科学も並行して推進する。また、エネルギー分解能の向上と同時に実施する導入口の拡大により、コミュニティと連携して幅広い極低放射能宇宙素粒子研究を推進する。

② 学術的な意義

$0\nu 2\beta$ 発見はニュートリノのマヨラナ性の証明であり未測定の新ニュートリノ質量絶対値の測定となる。これらは CP 位相の測定と併せてニュートリノ研究の最重要課題である。マヨラナ性の証明はシーソー機構やレプトジェネシス理論を通して上記の謎の究明につながる。逆階層構造をカバーすることで、 $0\nu 2\beta$ 未発見の場合でも他の観測と合わせてディラック粒子であることの証明や、標準階層構造特定につながるも期待される。また、大多数の原子炉が停止している状況で、大陸プレート端での地球ニュートリノ長期観測により、日本発のニュートリノ地球科学で世界のネットワーク観測の中心となり、地球始原隕石の特定や ILLSP の解明、地球内部ダイナミクスの解明など、地球科学の重要課題における新たな展開を生み出す。カムランド 2 は近傍超新星爆発の前兆ニュートリノ観測装置としても優れており、貴重な近傍超新星爆発で万全のマルチメッセンジャー観測を実現する一助となる。

また、極低放射能実現のための設備・環境を地下の宇宙素粒子研究を推進する神岡地下の実験群で共用することで、 $0\nu 2\beta$ 探索・暗黒物質探索・超新星ニュートリノ観測などの幅広い宇宙素粒子研究を相乗的に発展させ、世界屈指の拠点として分野をリードする。

③ 国内外の動向と当該研究計画の位置づけ

$0\nu 2\beta$ 探索は素粒子・宇宙線・原子核分野で重要課題に位置付けられ、熾烈な競争状態にある。高感度化競争で淘汰集約が進む中、いち早く世界をリードした「カムランド禅」研究を大幅に強化する本計画への期待は高く、参加機関も増えてきている。また、カムランド禅を前例にカムランドの極低放射能環境を活用した実験提案も複数なされている。地球ニュートリノ観測は、地球を透視する新手法として地球科学分野でも注目されており、カナダ、中国で建設中の同タイプの検出器と合わせてステレオ観測も実現しつつある。研究開発はほぼ完了しており、海外での予算申請も進んでいる。地下での極低放射能宇宙素粒子研究をコミュニティとして相乗的に発展させる上でも、新学術領域での活動を通して神岡地下での連携を大幅に高める

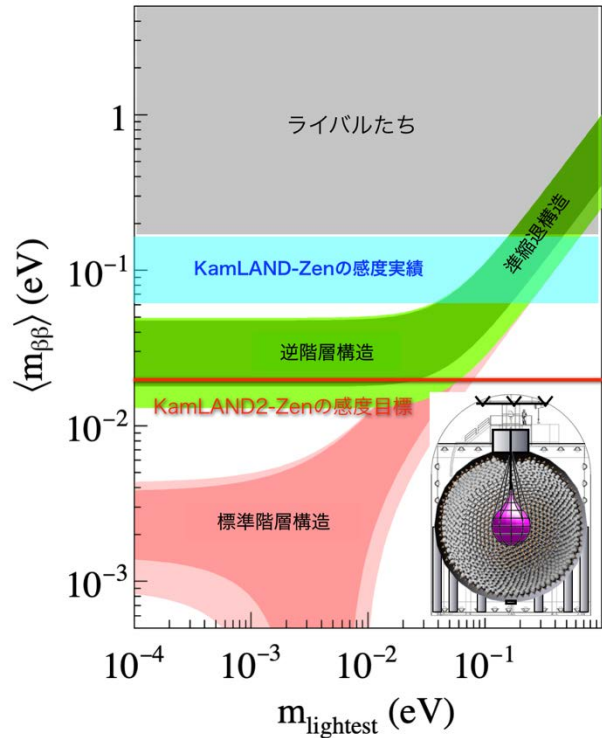


図1 逆階層構造をカバーする目標感度



図2 幅広い研究対象

ことに貢献してきており、本計画はその旗艦計画である。特にハイパーカミオカンデが観測開始した後はスーパーカミオカンデが役目を終えると想定され、本計画は低エネルギーでの研究に優れた茂住坑での中心的な研究として分野を支えることができる。

④ 実施機関と実施体制

カムランドおよびカムランド禅国際共同研究として現行の検出器を用いた観測を実施しており、研究グループとして交わした同意書で、各機関の分担・責任が定義され、研究の進展に合わせて発展させてきている。東北大学ニュートリノ科学研究センターが全体計画の主要部分の予算申請を担当しており、新学術領域などの科研費も活用しつつ開発研究を実施し全体計画を練ってきた。国外はマサチューセッツ工科大学を中心に予算申請を行っており、主に電子回路に貢献するほか、その他の拠点もこれまでのカムランド・カムランド禅での貢献を継続して、インカインドでの物的貢献や人件費・旅費などへの貢献、中性子放射化測定や解析へのニューラルネットワークの導入、地球モデルの構築などの個々の役割を継続する。実験代表を東北大学、副代表をマサチューセッツ工科大学が擁立することで、米国からのマッチングファンドの確実性を高めている。

参加機関は、東北大学（プロジェクトの統括）の他に、マサチューセッツ工科大学（新型電子回路、トリガーロジック）、カリフォルニア大学バークレー校（装置の較正）、ワシントン大学（地球モデル、DAQ ソフトウェア）、ボストン大学（中性子放射化測定、人工知能）、ノースカロライナ大学、ノースカロライナ中央大学、デューク大学、テネシー大学、ハワイ大学、バージニア工科大学、アムステルダム大学、東京大学（ガス分析）、大阪大学（低温検出器）、徳島大学（ヨウ化ナトリウム結晶の高純度化）、京都大学（シンチレーションフィルム）があり、現在も成長している。全機関が現地での運転シフトを担当するとともに、国外機関は夜間のリモート監視を担当する。

⑤ 所要経費

○準備期間(2020-23年)25億円（濃縮キセノン 200kg 4億円、光量子効率PMT 7億円、高性能電子回路 3億円、クリーンルーム整備 3億円、純空気製造装置 1億円、純化装置高度化 5億円、集光ミラー 1億円、バルーン 1億円）

○建設期間(2024-25年)11億円（工事 1億円、高光収率液体シンチレータ 10億円）

○観測期間(2026-2029)人件費、運転経費等

●建設費合計 36億円(内国外4億円)、人件費年間 0.8億円(内国外0.3億円)×10年

⑥ 年次計画

カムランドは2002年以降観測を継続しており、良質の地球ニュートリノデータの蓄積や多様な極低放射能を活用した観測を行っている。0ν2β探索を行うカムランド禅は2011年に開始し、同位体濃縮キセノン 380kgの段階で世界を大きくリードし縮退構造をほぼ排除する成果を得ている。同位体濃縮キセノンを745kgに増量することにも成功し、ミニバルーンは約10倍の低放射化が実現している。有効体積の3～4倍の拡大が見込まれ、逆階層構造に切り込み複数の理論モデルを検証する。データ取得と周辺整備を同時進行することで、観測停止期間を最小限にして最大限の物理成果を得る。基本となる開発研究は完了しており、さらなる高性能化のための開発も継続する。

2020-2023:高性能電子回路の導入、クリーンルームの整備、超純空気製造装置の導入、純化装置改良、キセノンの追加調達、高量子効率PMTの調達、集光ミラー・バルーンの製作など。

2024-2025:開口部拡張、カムランド改修、液体シンチレータ調達・導入

2026-:カムランド2での地球ニュートリノ等観測、ミニバルーン導入、カムランド2禅での0ν2β探索。

人材育成:期間中毎年6人程度の修士、1～2名の博士の輩出を見込む。

雇用:研究員、特任助教を中心に国内7人、国外3人の雇用を継続的に予定する。世界をリードする研究を展開するとともに、地下での極低放射能研究分野での連携をさらに高めて、人材の高い流動性とコミュニティ全体の相乗的な発展を実現する。

⑦ 社会的価値

宇宙の始まりや地球の成り立ちの謎への挑戦は、国民の知的好奇心をかき立て、理科離れが進む現状に歯止めをかける一助になると期待する。また、ニュートリノ研究で世界をリードする日本の活躍を堅持することは、最先端で活躍できる環境として教育・人材育成への高い効果が期待できる。また、本計画でも推進する反ニュートリノ測定は核不拡散のための非破壊検査へ応用が見込まれているほか、先進の極低放射能研究は、稀な現象の研究に留まらず、高感度ホールボディーカウンティングへの利用や除染への応用なども考えられる。

⑧ 本計画に関する連絡先

井上 邦雄（国立大学法人東北大学・ニュートリノ科学研究センター）