

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

① ビジョンの概要

宇宙の始まりから現在までの系統的理解、それに基づく未来の理解を目的とし、素粒子・原子核・天文学・地球科学研究を幅広く連携させる。特に、極低放射能環境でのニュートリノの性質解明やニュートリノをプローブとした観測を展開するとともに、そこで開発する極低放射能技術を広く波及させる。

② ビジョンの内容

「無から生じた宇宙でいかに物質は生成されたのか。」、「宇宙の構造形成・物質の化学進化はどのように進み」、「地球はいかに形成され活動しているのか。」、宇宙の歴史には未解明の重要課題があり、これらの解明には、素粒子・原子核から天文学・地球科学にわたる幅広い連携が不可欠である。「ニュートリノ」の研究は広くこれらの課題に関連づける。

ニュートリノには粒子・反粒子の区別がない可能性があり、その性質はマヨラナ性と呼ばれる。ニュートリノがマヨラナ性を持つ場合、未発見の重い右巻きニュートリノが自然に導入される。この右巻きニュートリノは宇宙の物質生成を説明するレプトジェネシス理論やニュートリノが突出して軽いことを説明するシーソー機構の根幹をなす

ばかりか、暗黒物質の生成や素粒子大統一理論の構築にも重要な役割を果たす。ニュートリノのマヨラナ性の検証は宇宙素粒子の大問題解明の要であるにも関わらず、現在唯一実現可能な検証手法は「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ($0\nu 2\beta$)」の発見しかない。そのため、 $0\nu 2\beta$ 探索が世界中で精力的に行われている。ニュートリノを伴う二重ベータ崩壊 ($2\nu 2\beta$) は稀な現象であり、 $0\nu 2\beta$ はさらに極稀な現象である。そのため大量の二重ベータ崩壊核を用いた極低放射能環境での研究が不可欠となる。この探索では神岡地下で実施されているカムランド禅実験が世界を大きくリードしてきており、理論予想をもカバーし始め、大発見が期待されている。この分野で引き続き世界をリードし $0\nu 2\beta$ 発見を目指すとともに、背景となる物理を解明していく。

一方、ニュートリノは新たな観測プローブでもあり、その透過性の高さを活かして地球・太陽などの天体内部を観察することができる。宇宙の進化や天体現象の解明には多くの情報が必要であり、光・ニュートリノ・重力波によるマルチメッセンジャー観測が重要である。中でも低エネルギーニュートリノ天文学は極低放射能環境を必要とし、ニュートリノの性質解明で必要となる装置との親和性が高い。また、地球内部の組成やエネルギー生成に関する直接的な情報が乏しかった地球科学において、カムランドによって創出されたニュートリノ地球科学は新たな情報をもたらすことができる。カムランドが世界で初めて実現した地球ニュートリノ観測はデータの蓄積とともに測定精度が向上し、現在はニュートリノによる地球モデルの選別が始まり、ニュートリノ観測ならではの新たな知見がもたらされ始めている。この観測をさらに継続発展させ地球科学にフィードバックすることで、地球内部の組成・エネルギー収支・活動形態をも統合する地球ダイナミクスモデルの構築を目指せる段階にある。

極低放射能技術を活用した幅広い研究を行う新たなコミュニティが国内に形成され、 $0\nu 2\beta$ 探索、ニュートリノ観測、暗黒物質探索を初め、量子センサーの開発や超高集積回路の放射線耐性といった応用研究も展開している。極低放射能環境のノウハウを集約し、汎用的な極低放射能研究施設を構築し技術革新をもたらすことは、分野の発展と競争力維持のために不可欠である。世界をリードする実験の推進と並行して、世界に冠たる極低放射能施設を構築し長期的な視野での研究開発を推進し、コミュニティの発展を牽引する。

③ 学術研究構想の名称

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

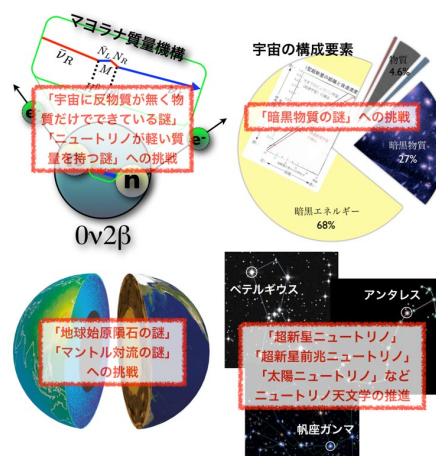


図1 極低放射能環境での幅広い研究

④ 学術研究構想の概要

カムランド禅実験は、 $0\nu2\beta$ 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、その感度はニュートリノ質量の逆階層領域に初めて切り込み、複数の理論モデルにもかかり始めた。本計画は、逆階層構造をカバーする 20meV まで探索を進め、大発見の確率を大幅に向上する。そのために、エネルギー分解能を中心としたカムランドの大幅な高性能化を行う。さらに、地球ニュートリノ観測を継続発展させ、ニュートリノ地球科学を並行して推進する。また、マルチメッセンジャー天文学の一角をなすニュートリノ天文学の低エネルギー領域を担当し、個性的な研究を展開する。さらに、スーパークリーンルームを核に極低放射能研究環境を整備し、コミュニティ全体の長期的発展を促進する。

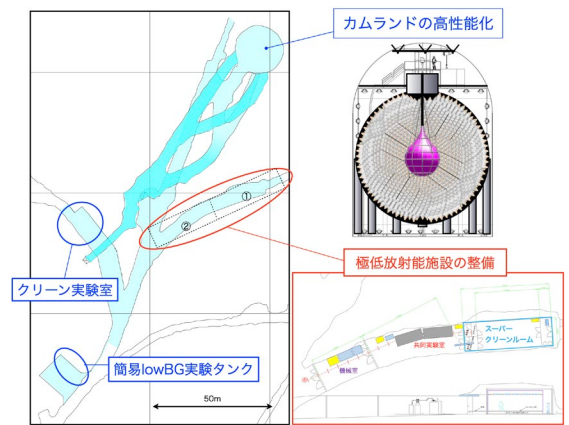


図2 カムランド高性能化と極低放射能環境整備

⑤ 学術的な意義

$0\nu2\beta$ 発見は重い右巻きニュートリノの導入を自然に要請し、シーソー機構やレプトジェネシス理論を通して「軽いニュートリノ質量の謎」や「宇宙物質優勢の謎」の究明につながる。右巻きニュートリノは、大統一理論構築のミッシングピースであり、さらに暗黒物質との関係も議論されている。ニュートリノのマヨラナ性証明の重要性は計り知れない。 $0\nu2\beta$ 探索において、逆階層構造をカバーすることは、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、順階層構造特定につながると期待されるため重要なマイルストーンである。また、地球ニュートリノ長期観測により、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 LLSVP 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。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。

地下宇宙素粒子研究分野の長期的な発展には、将来のための技術開発が不可欠である。極低放射能環境を整備し、コミュニティのノウハウを結集して共同利用とすることで相乗効果を生み出す。

⑥ 国内外の研究動向と当該構想の位置付け

$0\nu2\beta$ 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、欧米では最重要課題として次世代プロジェクトの実現が進められている。国内では、宇宙線研究者会議が本計画を「最重要課題として速やかな実現を望む新規計画」としている他、未来の学術振興構想 2023・文科省の大型プロジェクトに関するロードマップ 2023 にも掲載された。

高感度化競争で淘汰集約が進む中、本計画への期待は高く、参加機関も増えている。地球ニュートリノ観測は、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が実現しつつある。カムランドは、地下宇宙素粒子研究コミュニティ形成にも中核として貢献してきており、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ていく。

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、知的好奇心をかき立て、理科離れ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し、最先端で活躍できる環境として教育・人材育成に大きく貢献する。さらに、極低放射能研究の産業への応用も考えられる。

⑧ 実施計画等について

R8-R9：建設期間（観測停止）、R10-：観測開始

実施機関：東北大学 RCNS を核とした国際共同研究で実施する。付随する極低放射能施設は、東北大学 RCNS と大阪大学 RCNP が連携して整備し、参加機関を拡充しつつ、コンソーシアム形式での運営に移行する。

総経費 163 億円：建設期間(R8-9)79 億円（うち国外 11 億円、措置済 19 億円）、観測期間(R10-19)8.4 億円/年（うち国外 1.2 億円）（人件費、運転経費等）

⑨ 連絡先

井上 邦雄（東北大学ニュートリノ科学研究センター）