

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成28年度研究進捗評価用〕

平成25年度採択分
平成28年3月14日現在

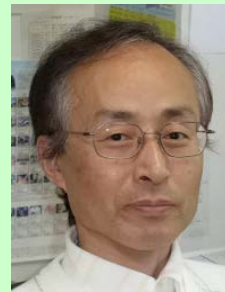
カムランド禅での世界最高感度のニュートリノレス2重
ベータ崩壊の探索研究

Search for neutrinoless double beta decays with the
highest sensitivities with KamLAND-Zen

課題番号：25220704

白井 淳平（SHIRAI JUNPEI）

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・教授



研究の概要：

電荷のないニュートリノはそれ自身が反粒子（マヨラナ粒子）の可能性があり、もしそうならばその異常に軽い質量や、物質優勢の宇宙の謎の解明につながる可能性がある。ニュートリノがマヨラナ粒子であればニュートリノレス2重ベータ崩壊が起こる。本研究は独創的な手法で探索を行う「カムランド禅」実験の感度を飛躍的に高め発見一番乗りを目指すものである。

研究分野：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子（実験）、ニュートリノ、2重ベータ崩壊

1. 研究開始当初の背景

物質の基本粒子である素粒子の中で、ニュートリノは唯一電荷を持たないため、それ自身が反粒子である（マヨラナ粒子である）可能性がある。これは自明ではなく極めて重要な問題である。もしニュートリノがマヨラナ粒子ならばニュートリノの小さな質量を説明すると同時に極めて重い質量のニュートリノを示唆するシナリオ（シーソー機構）を考えることができ、それは標準理論を大きく超える超高エネルギーの物理を示唆する。ニュートリノの出ない2重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$ 崩壊)はニュートリノのマヨラナ性を実験的に確認する唯一可能な方法であるが未発見である。実験の鍵は数100kgに及ぶ大量の2重ベータ崩壊核と検出装置を含む極低放射能環境の実現であり、世界の主立った研究機関で発見一番乗りを目指して熾烈な競争が行われている。

2. 研究の目的

本研究は岐阜県神岡鉱山の地下実験室に位置する高感度ニュートリノ検出器「カムランド」を利用して遂行中の $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験「カムランド禅」の装置を改良し、感度を飛躍的に高めた探索を行うものである。本実験は300kgの ^{136}Xe 核を用いて2011年秋からデータ採取を行っており、本研究では ^{136}Xe 核の量を倍増し、検出器最外層部の改善による背景事象の除去性能の向上と合わせて大幅な感度の向上を目指す。実現すればニュー

トリノ質量の絶対値や階層構造、レプトンセクターでのCPの破れについて貴重な知見が得られるとともに宇宙開闢時の超高エネルギーの物理過程の解明に向けた多大な貢献が期待される。

3. 研究の方法

カムランド禅実験の検出器は、岐阜県神岡鉱山の地下1,000mに位置し、世界最大の1,000トン液体シンチレータを擁するニュートリノ検出器カムランドの中心に300kgの ^{136}Xe 核を含む液体シンチレータ(Xe-LS)を収納する薄く透明な袋(ミニバルーン)を設置したものである(図1)。

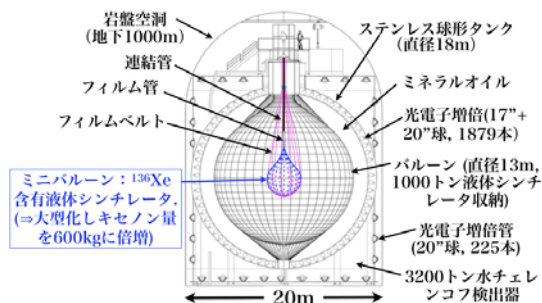


図1. カムランド禅検出器。

$0\nu\beta\beta$ 崩壊によるシンチレーション光は周囲の光電子増倍管で検出する。地上のわずか10万分の1の宇宙線量と超高純度かつ大容量の液体シンチレータは本研究に絶好

の極低放射能環境を提供する。2011年9月に開始した実験は最も厳しい ^{136}Xe 半減期の制限を与えたが、本研究ではさらに感度を上げるためキセノン及び液体シンチレータの蒸留純化による残留放射性不純物の除去を行った後、ミニバルーンをよりクリーンかつ大型化し ^{136}Xe 量を倍増するとともに、宇宙線ミュオン粒子識別用の外水槽光検出器の補強を行い、宇宙線由来の邪魔物反応の除去効率の大幅な向上により飛躍的な感度の向上を目指す。

4. これまでの成果

(背景事象の解析)蓄積されたデータを解析した結果、(1) ^{110m}Ag (福島原発事故由来の降灰の可能性)、(2) ^{214}Bi (ミニバルーン表面の埃)、(3) ^{10}C (宇宙線ミュオン粒子による核反応)、(4) $2\nu\beta\beta$ が主な背景事象と判明した。(1)は最大の背景事象であったがXeとLSの蒸留純化により1/10に削減された。(2)は $\text{Bi}\rightarrow\text{Po}\rightarrow\text{Pb}$ の崩壊連鎖の検出が困難で主要な背景事象となった。(3)は発生時に中性子を伴うためミュオン粒子-中性子捕獲ガンマ線 ^{10}C 崩壊の3重同時計測をとることで除去でき、新たに開発された高速電子回路の導入により除去可能となった。(4)は寄与は小さくエネルギー分解能の向上による除去率のアップを目指し開発研究を続けている。

(ミニバルーン製作)以上から ^{214}Bi を除去するためにはクリーンなミニバルーンへの交換以外に、製作環境(スーパークリーンルーム)の清浄度保持の重要性が改めて認識された。容積を現実的に可能な2倍として製作の全工程での検討を行った。特に作業者の動きにより放出される埃の動きを可視化装置により撮像し検討を行った。そしてクリーンルーム内に更衣室を新たに設置しゴーグルやブーツを含む作業衣を2段階で準備し、毎回の作業で交換と洗濯を行った。また大型のフィルム溶着機を導入し、溶着部の清浄度と一様性の格段の向上を図った。さらにフィルムは表と裏に同じフィルムによる保護膜を重ね製作の最終段階まで直接空気に暴露しないようにした。製作は室内空気の乾燥によるトラブルを避けるため2015年の5月から10月にかけて行った。現在保護袋に入れ窒素ガスで封入しクリーンルーム内で保管中である(図2)。なお2015年12月にカムランド検出器中のミニバルーンを撤去した。

(外水槽再建)初年度は検出器の仕様策定を行い、シミュレーションをもとに光電子増倍管の数と配列を決定した。球形タン



図2. 保護袋に入れ窒素ガス密封する直前の00ミニバルーン。

ク赤道部は岩盤に近く検出効率が他と比べかなり低いことがわかり、PMTの光電面を赤道部に向けること、さらに赤道部の光反射膜として新たな部材の測定を行い選定した。さらに高量子効率のPMTの導入を決定した。これらにより検出効率が1桁近く向上することが期待される。また地磁気とその補償コイルによる外水槽内の磁場について評価を行い、光電子増倍管のミュオン金属製のメッシュとコーンの遮蔽効果を測定し引き続き利用することを決定した。外水槽改修作業は2016年1月から開始し3月上旬に無事完了した(図3)。なお水槽の水漏れ対策として補修工事を施した。現在注水を開始しており、新年度から新たなデータ採取の準備がほぼ整った。



図3. 再建作業終了後の外水槽内部。

5. 今後の計画

新年度はミニバルーンの据付けを行う。時期的には夏～秋を目処とし準備を進める。据付け後Xe-LSの液入れを行いシステムが安定するのを待って本格的なデータ採取を開始する。直ちに解析を行い背景事象の理解を進め、目標感度の達成と新たな知見の獲得を目指す。結果は国際会議等で発表する。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

[1] J. Shirai, “KamLAND-Zen”, presented at the 17th Lomonosov Conference on Elementary Particle Physics, Moscow State University, Aug.21,2015.

[2] J. Shirai, “The status of KamLAND-Zen for neutrinoless double beta decay of ^{136}Xe ”, proceedings of the 16th Lomonosov conference on elementary particle physics, 305-308,2015, World Scientific Publishing Co.

ホームページ等

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamlan>