

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19H00670

研究課題名（和文）高性能液体シンチレータ検出器を用いたニュートリノのマヨラナ性の研究

研究課題名（英文）Research on the Majorana nature of neutrinos with a high-performance liquid scintillator detector

研究代表者

清水 格 (Shimizu, Itaru)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授

研究者番号：10400227

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 35,100,000円

研究成果の概要（和文）：ニュートリノのマヨラナ性を検証する二重ベータ崩壊実験を高感度化するため、高性能小型プロトタイプ検出器を用いた実証試験を行った。新液体シンチレータ・集光ミラー・改良型光センサーなどの個別の開発を組み合わせ、大光量測定を可能にするプロトタイプ検出器の製作を実現した。本研究によって目標としていた液体シンチレータ検出器の高性能化が達成できることが分かり、二重ベータ崩壊実験によるマヨラナ質量の観測が実現する可能性が高まった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

軽いニュートリノ質量や宇宙物質優勢といった素粒子・宇宙の大問題は、ニュートリノのマヨラナ性が解決の鍵となると考えられている。ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索が最も有望であるが、現状の探索感度を大きく改善するためには大型液体シンチレータ検出器を高性能化する必要がある。本研究では高性能化を実証するプロトタイプ検出器の開発を行った。

研究成果の概要（英文）：A verification test to enhance the detector performance for the neutrino-less double beta-decay search, hunting for Majorana neutrinos, was performed by using a prototype detector. We realized a high-light-yield prototype detector by combining all improvements, such as new liquid scintillator, light-collecting mirror, and high efficiency light sensor. The present study shows that the expected improvements of the liquid scintillator detector performance are feasible, and increases the chance of observing the Majorana neutrino mass in the double beta-decay experiments.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ニュートリノ 素粒子実験 実験核物理

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動の観測によってニュートリノが質量を持つことが明らかになったが、その質量の起源は未だ明らかになっていない。ニュートリノが粒子と反粒子を区別しないマヨラナ性を持つことを前提としたシーソー機構やレプトジェネシス理論は、「軽いニュートリノ質量の謎」や「宇宙物質優勢の謎」といった宇宙・素粒子の大問題を解き明かす鍵となると考えられており、マヨラナ性の検証の重要性が高まっている。ニュートリノの放出を伴わない 0ν 二重ベータ崩壊の研究は、ニュートリノのマヨラナ性を証明する唯一現実的な方法であり、さらに崩壊率からニュートリノ質量の絶対値が測定される。このため、 0ν 二重ベータ崩壊の探索は非常に重要視されており、世界中で次世代大型実験が計画され激しい競争状態にある。現在進行中の実験では、同位体濃縮キセノン(^{136}Xe)を用いることで100 kg超の規模に逸早く辿り着いたEXO-200とKamLAND-Zen、また高性能な同位体濃縮ゲルマニウム検出器を用いたGERDAが世界最高感度を競い合っている。

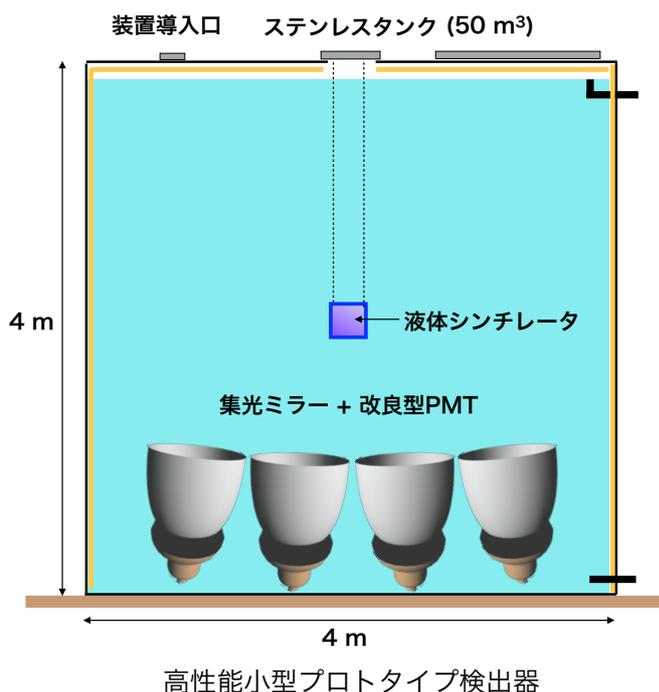
2. 研究の目的

ニュートリノがマヨラナ質量を持つ場合、 0ν 二重ベータ崩壊を起こし、崩壊率は質量の二乗に比例する。検出器の極低放射線環境と拡張性において非常に優れた性能を発揮し、世界の実験を大きくリードするKamLAND-Zen実験では、約750 kgの同位体濃縮キセノン(^{136}Xe :91%)を液体シンチレータに溶かし込み、40 meV程度までのニュートリノ有効質量を検証する。本研究では、高性能液体シンチレータ検出器を実現することによってエネルギー分解能を限界まで高め、逆階層型の有効質量(> 20 meV)を検証し、ニュートリノの質量階層構造を決定する。目標の検出感度を確実に達成するため、高性能小型プロトタイプ検出器によって高性能化の実証試験を行い、同時に低バックグラウンド観測に不可欠となる検出器素材の極低放射能分析を行う。

3. 研究の方法

KamLAND-Zenでは世界最高の低放射線環境を実現したことで、有効体積内のバックグラウンドレートは年間17事象以下というレベルに到達した。しかし、現行の検出器のエネルギー分解能では、 0ν 二重ベータ崩壊の検出感度は最大のバックグラウンド源となる 2ν 二重ベータ崩壊によって制限されてしまう。そこで、検出器のエネルギー分解能の向上により、 2ν 二重ベータ崩壊によるバックグラウンド量を20分の1以下に削減する。KamLANDにおけるエネルギー分解能と光子数統計の関係は線源校正のデータから良く理解されており、現在の5倍の光量によって目標の削減率を達成する。

プロトタイプ検出器は低放射線環境を実現するため、神岡坑内のKamLANDエリア内に50 m³の円筒型ステンレスタンクを建設し、新液体シンチレータ・アクリル容器・純水・集光ミラー・改良型光電子増倍管(PMT)を導入する。全立体角に占める受光面積の割合(占有率)は5%程度しかないが、集光ミラーと改良型PMTを用いることで1,300 p.e./MeV以上の十分な光量が得られる。純水遮蔽によって液体シンチレータでの環境ガンマ線レートは1 Hz程度に抑えられるため、トリウム崩壊系列の娘核種である ^{212}Bi - ^{212}Po 連続崩壊($\tau=431$ ns)による遅延同時事象を利用することで高感度なトリウム濃度測定が可能となる。

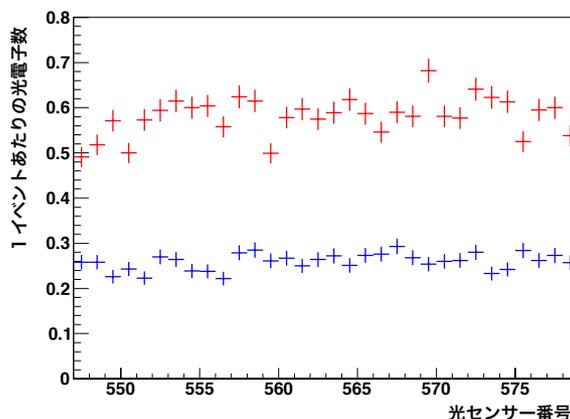


4. 研究成果

目標の高性能化と低バックグラウンド測定を達成するため、高発光シンチレーション観測装置の開発を行った。

最初に高集光量かつ低バックグラウンドを同時に実現するため、高発光シンチレーション観測装置の設計を行った。集光ミラーには受光面積を最大するため、入口の多角形から出口の円形

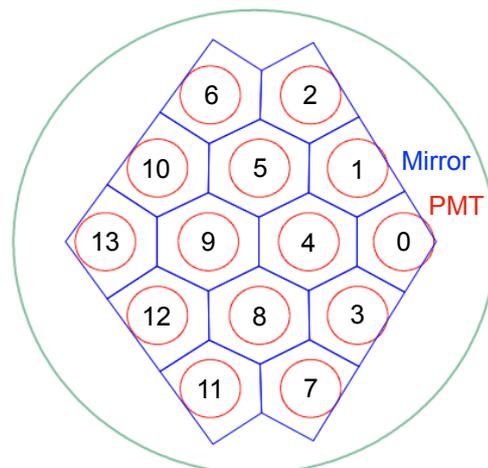
になめらかに変化する筒状の多角形ミラーを使用する。多角形ミラーを現在の KamLAND 検出器に取り付けた場合、シミュレーションによって2倍以上の集光率が得られることが確認できる。集光ミラーは液体中で使用するため、反射面を保護するコーティングが必要となる。まず、真空成形によって多角形ミラー形状のアクリル基板を作製した。このアクリル基板に対して、アルミニウムの真空蒸着と樹脂製の保護コーティングを行い、鏡面を実現した。製作したミラーサンプルでは紫外～可視波長領域における反射率測定によって85%以上の反射率が得られた。また加速劣化試験を行い、長期間安定性も確認した。さらに、製作した多角形ミラーの集光性能をシンチレーション光とPMTを用いた光子計数によって実測し、2倍程度の集光率が得られることを確認した。



シミュレーションによる光量予測

新液体シンチレータはリニアアルキルベンゼン (LAB) に発光剤を溶かし込んで作成することを検討してきたが、さらなる透過率向上のため波長変換剤の添加を検討した。発光量・発光波長スペクトル・発光時定数などの評価によって、最適な波長変換剤 (Bis-MSB) と濃度 (5 mg/L) を選定した。また、発光量増加のためリニアアルキルベンゼンとプロソイドクメン (PC) の混合溶液を溶媒として使用することにした。発光量と透過率の改善を考慮すると、新液体シンチレータはこれまでのものと比較して約1.3倍の光量となると予測される。また、ICP-MSで測定した波長変換剤の放射性不純物量は要求値よりも1桁多いことが判明したが、液液抽出などの純化手法により低減が可能であると考えられる。

光センサーには耐液性のある20インチ高量子効率PMTを使用するため、PMT部材の耐油・耐水試験によって使用可能な素材を選定し、PMTの試作品を用いて光子計数による長期安定性試験を行った。PMTは浮力対策をした小型のステンレス容器に固定し、上部配管ラインを通して窒素パージ・紫外線殺菌ができるようにした。純水の場合は長時間の測定によって光透過率が減少することが確認されたため、本実験では紫外線照射量を増加するなどの対策が必要となるが、波形・ゲイン・暗電流の測定など基本的な動作には問題がないことが確認された。プロトタイプ検出器用のPMTはHV・信号ケーブルを延長し、計14個製作した。



光センサー配置

神岡坑内に新規に建設したステンレスタンクは洗浄作業後に内部に必要な装置を導入し、プロトタイプ検出器の動作確認を行った。ステンレスタンクの底面には本実験と同じ改良型PMTの配置を再現するため、PMTスタンドを固定するステンレスプレートを設置し、球形タンクと同じ曲率になるように高さや傾きを調整した。タンク内面にはタイベック反射シートを取り付け、シンチレーション光に対する反射性能を高めた。PMTは検出器の上部から小型クレーンによって導入し、HV・信号ケーブルを上部フィードスルーを通して計測室まで配線した。データ取得には本実験と同仕様の新型フロントエンド回路を使用し、高速データ収集を実証する。動作確認には市販の電子回路を用いPMTの信号波形・ゲイン・暗電流を測定して、期待通りの性能が得られることを確認した。また、較正用にLED光源とシンチレータ球を組み合わせた光源 (写真の中央) を作成し、発光位置を変えて光量測定を行った。さらに、シンチレーション光によって得られる各PMTの光量・発光時間分布を実測し、予測通りの分布が得られていることが確認できた。今後は液体シンチレータからのシンチレーション光の長期観測を



LED光源による光センサー較正

行い、高感度なトリウム濃度測定を目指す。

現在、KamLAND-Zen 実験では約 750 kg の同位体濃縮キセノンを使用し、ニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊探索を行っている。将来逆階層型 (> 20 meV) まで探索感度を延ばすためには、キセノン量を約 1,000 kg に増量し、さらに検出器の高性能化によってエネルギー分解能を高める必要がある。本研究では KamLAND 実験で使用しているシミュレーションと実測を組み合わせて、液体シンチレータの高性能化を実証した。今後もさらなる検出器改良を進め、マヨラナニュートリノの発見可能性を高める。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 清水格	4. 巻 1
2. 論文標題 Precision Analysis of the ^{136}Xe Two-Neutrino Spectrum in KamLAND-Zen and Its Impact on the Quenching of Nuclear Matrix Elements	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 192501
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.122.192501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 1件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 竹内敦人
2. 発表標題 KamLAND-Zen：ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索の解析の状況
3. 学会等名 日本物理学会2021秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀井雄斗
2. 発表標題 KamLAND-Zen：二重ベータ崩壊の観測
3. 学会等名 日本物理学会2021秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤杏奈
2. 発表標題 KamLAND2-Zen：大光量液体シンチレータ開発
3. 学会等名 日本物理学会2021秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀井雄斗
2. 発表標題 KamLAND-Zen: 背景事象の評価
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅春彦
2. 発表標題 KamLAND-Zen: 機械学習を用いた粒子識別の研究
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾崎秀義
2. 発表標題 KamLAND-Zen: ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索の最新結果
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤杏奈
2. 発表標題 KamLAND2-Zen: 波長変換剤を導入した液体シンチレータ開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内敦人
2. 発表標題 Latest Result from KamLAND-Zen 800
3. 学会等名 La Thuile 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹内敦人
2. 発表標題 Background Rejection with Neural Network for KamLAND-Zen
3. 学会等名 Neutrino 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 亀井雄斗
2. 発表標題 How to reject spallation backgrounds by cosmic-ray muons with KamLAND
3. 学会等名 Neutrino 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾崎秀義
2. 発表標題 KamLAND-Zen : KamLAND-Zen 800でのニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索の解析結果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 亀井雄斗
2. 発表標題 KamLAND-Zen 800: 宇宙線ミュオンによる核破碎反応での不安定核種生成量の評価
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 家城斉
2. 発表標題 KamLAND-Zen: 宇宙線ミュオンによる核破碎と崩壊系列のシミュレーション
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三宅春彦
2. 発表標題 KamLAND-Zen: エネルギー分解能改善に向けた研究開発(3)
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤杏奈
2. 発表標題 KamLAND2-Zen: 大光量液体シンチレータ開発のための第2発光溶質の性能評価
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉田雄貴
2. 発表標題 KamLAND2-Zenプロトタイプ検出器における集光率向上のための反射材の選定
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾崎秀義
2. 発表標題 KamLAND-Zen 800
3. 学会等名 XIX International Workshop on Neutrino Telescopes (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 尾崎秀義
2. 発表標題 KamLAND-Zen : 全体像と系統誤差
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀井雄斗
2. 発表標題 KamLAND-Zen : バックグラウンドの評価
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内敦人
2. 発表標題 KamLAND-Zen：ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索の解析の現状
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅春彦
2. 発表標題 KamLAND-Zen：さらなる探索感度向上のための研究開発の現状
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中村陸生
2. 発表標題 KamLAND2-Zen：発光性ミニバルーンでの背景事象除去に向けた研究開発
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水格
2. 発表標題 メタルスカベンジャーを用いた液体シンチレータの低放射能化
3. 学会等名 第11回アルファ放射体実験室利用研究会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

カムランド
<http://www.awa.tohoku.ac.jp/kamland/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	岸本 康宏 (Kishimoto Yasuhiro)		
研究協力者	古賀 真之 (Koga Masayuki)		
研究協力者	池田 晴雄 (Ikeda Haruo)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------