

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23684012

研究課題名(和文)高集光液体シンチレータ検出器による二重ベータ崩壊の研究

研究課題名(英文)Study of Double Beta Decay with High Light-Concentrating 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・助教

研究者番号：10400227

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,300,000円

研究成果の概要(和文)：同位体濃縮キセノンを用いた 0ν 二重ベータ崩壊の高感度観測のための装置開発を行った。成型したPETフィルムにアルミ蒸着することで大型液体シンチレータ検出器(KamLAND)に特化した形状の集光ミラーを製作し、遠距離から飛来するシンチレーション光に対する集光率の増加を実測によって確認した。同時に、リニアアルキルベンゼンを溶媒とした液体シンチレータの光学性能を高めるため蒸留法と吸着法を組み合わせた不純物除去を行い、現行の液体シンチレータ以上の性能が得られることを確認した。本研究によって、逆階層型までのニュートリノ質量の検証を実現する 0ν 二重ベータ崩壊探索実験の具体的な検討が可能となった。

研究成果の概要(英文)：The development of devices highly sensitive to neutrino-less double-beta decays using isotopically enriched xenon was performed. The specially-shaped light-concentrating mirrors for the large volume liquid scintillator detector (KamLAND) were produced from aluminum metalizing PET film, and the increase of light collection efficiencies for scintillation light coming from distant points was confirmed. In addition, the purification by distillation and adsorption to enhance the optical performance of linear-alkylbenzene-based liquid scintillator was performed, resulting in better performance than the original liquid scintillator in use. The present study allows us to suggest a specific plan to test the inverted hierarchy neutrino masses by the neutrino-less double-beta decay experiment.

研究分野：数物系科学

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

近年の大気・太陽・加速器・原子炉ニュートリノ振動の観測によって、ニュートリノが非常に小さな質量を持ち、三世代間で混合することが実証された。しかし、質量の絶対値は未だ決定されておらず、ニュートリノの3つの質量固有状態に対し、正常階層型、逆階層型に加え、全ての質量が近接した縮退型の可能性が考えられる。ニュートリノの極端に小さい質量を説明するシーソー模型や宇宙物質優勢を説明するレプトジェネシス理論などは、ニュートリノが粒子と反粒子の区別がないマヨラナ粒子であることを前提としている。ニュートリノの放出を伴わない0二重ベータ崩壊は、ニュートリノのマヨラナ性を証明する唯一の手段であり、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、0二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押し進められている。これまでの実験では、⁷⁶Geを用いたハイデルベルグ・モスクワ(HM)実験が400 meV程度の質量値を得たという報告(KKDCの主張)をしているが、バックグラウンドの評価によっては食い違う結果も得られており、一般には彼らの主張は受け入れられていない。このような経緯から、多くの実験が100 meV程度の検出感度を目標としているが、縮退型・逆階層型の予言する質量を全て検証できる20 meVまでの探索については、未だに実現の目処は立っていない。

2. 研究の目的

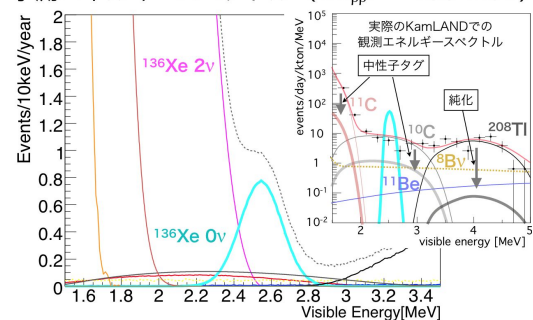
本研究課題は、逆階層型までのニュートリノ質量(> 20 meV)を検証するための実験手法を確立することである。ニュートリノ質量に対する感度をさらに高めるためには二重ベータ崩壊の原子核を大量に用意し、かつ放射線によるバックグラウンドの寄与を減少させるための工夫が重要である。そこで、すでに稼働中で極低放射線環境を実現している1,000 ton液体シンチレータを用いたニュートリノ検出器KamLANDを利用し、高感度な実験計画を比較的安価に実現する。KamLAND実験では、同位体濃縮キセノン(¹³⁶Xe:90%)を用いた0二重ベータ崩壊の高感度観測(KamLAND-Zen実験)を行う。しかし、現状のKamLAND検出器を用いた場合、標準理論の枠内で起こる2二重ベータ崩壊によるバックグラウンドが支配的であるため、数年以内の計測で検出感度の改善が制限されてしまうことが分かっている。そこで、検出器を改良することによってエネルギー分解能の向上を図り、2二重ベータ崩壊によるバックグラウンド量を20分の1程度に削減する。2のバックグラウンドの混入率はエネルギー分解能の5.8乗に比例して大きくなるため、エネルギー分解能の向上は2のバックグラウンドの削減に非常に効果的である。これまでの二重ベータ崩壊の実験は、環境放射線の削減が最大の課題であったが、

KamLAND検出器では高純度の液体シンチレータが放射線をシールドする役割を果たすため、環境放射線レベルが桁違いに小さい。今後数年以内に始まる最も感度の良い実験でも、 10^{-13} g/g以下のウラン・トリウム濃度を狙っているのに対し、KamLAND検出器ではウラン 3.5×10^{-18} g/g、トリウム 5.2×10^{-17} g/gを既に達成しているため、世界の実験を大きくリードする潜在能力を持つ。KamLAND実験では、二重ベータ崩壊の原子核として¹³⁶Xeを用いる。キセノンを用いる利点としては、同位体濃縮・純化が容易であること、液体シンチレータ中にガスの状態で3.0wt%溶かし込むことができること、ニュートリノを放出する2二重ベータ崩壊のレートが他の原子核に比べて低いことなどが挙げられる。将来計画では、現行のKamLAND検出器のエネルギー分解能における弱点を克服し、2二重ベータ崩壊によるバックグラウンドをさらに削減する。この改善により検出感度が向上すると、20 meV程度までのニュートリノ質量の探索が可能となる。

3. 研究の方法

KamLAND検出器は、極低放射線環境を実現しているためバックグラウンドレートは、現状でも既に年間7事象以下というレベルに到達している。しかし、現行の検出器のエネルギー分解能では、下図に示すように0二重ベータ崩壊の検出感度は最大のバックグラウンド源である2二重ベータ崩壊によって制限されてしまう。そこで、検出器に改良を加え発光量を1.5倍、集光効率を2倍に高めることによって、エネルギー分解能が向上し0のピークが鋭くなることでバックグラウンド混入量の大幅な削減が達成される。

予測エネルギースペクトル (<m_{ββ}> = 150 meV)



検出器中心部のミニバルーン内に封入されたキセノン溶解液体シンチレータの発光は、距離8.5 mの位置に均一に配置された計1,879本の17インチ、20インチ光電子増倍管によって捕らえられるが、全立体角に占める受光面積の割合(占有率)は34%程度しかない。そこで、円環型集光ミラーを各光電子増倍管の前面に取り付けることで72%まで占有率を拡大し、全体で2倍の集光効率を目指す。一般に非結像光学系の集光器の形状としては、Winstone-Coneと呼ばれる放物線型回転体が有力であり、他の液体シンチレータ検

出器 Borexino において実際に使用された実績もある。Borexino 実験では光電子増倍管のサイズは 8 インチと小さく、占有率も元々低いこともあり 2.7 倍の占有率の増加に成功している。そこで、同様の集光器の設計手法を KamLAND 検出器に適応して最適化したところ、2.1 倍の占有率の増加が得られることを確認した。

液体シンチレータの発光量は、発光剤の濃度や使用する有機溶媒の種類によってある程度の発光量調整が可能である。実際、最近カナダの SNO+ 実験では安価で高い透過率を持つリニアアルキルベンゼンを溶媒とした液体シンチレータを用いることで、KamLAND の液体シンチレータの 1.5 倍程度の発光量を得られることを示している。

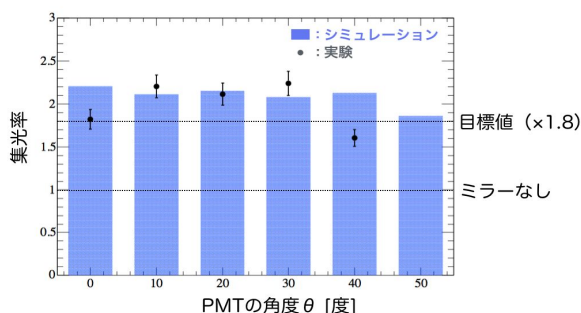
4. 研究成果

検出器のエネルギー分解能改善を実現するため、集光ミラー及び液体シンチレータの開発を行った。

集光ミラーの開発においては、(1)高反射率、(2)化学的な長期安定性、(3)低放射能、(4)低価格で柔軟な素材という 4 つの条件を考慮して材料選定・製作を行った。光電子増倍管はオイル中で用いるため、液中での反射率測定によるミラーの選定を行った。その結果、PET フィルムをベースにアルミ蒸着（厚み 40nm）した反射材において 85% 程度目標値に近い反射率が得られることが分かった。そこで、PET フィルムを真空成型によって Winstone-Cone 型の基盤を作り、アルミの真空蒸着によって集光ミラーの試作品を製作した（下写真）。



20 インチ光電子増倍管用の 16 個の試作品の集光性能を評価するため、検出器サイズの距離から飛来するシンチレーション光に対する集光量を測定した。光源には、窒素レーザーを液体シンチレータに照射した際に得られる蛍光を用いた。その結果、集光率が 1.7~1.9 倍程度まで増加することを空气中において実測した。実際の検出器では 0 度~40 度までの範囲の集光が必要であるが、光の入射角度による集光率の低下はほとんど無いことが確認できた。この結果は、空气中における反射率測定データと Winstone-Cone 型のミラー形状を入力とした光学シミュレーションによって良く再現された（下図）。



次に、集光ミラーを変形させた場合の影響を調べるため、先端部を六角形に変形して再測定したが、全ての角度から入射するシンチレーション光に対する集光量の増加率は 1.7~1.9 倍程度を維持しており、変形の影響は小さいことを実測によって確認した。さらに、液体シンチレータ検出器の内部において長期使用が可能であることを示すために、耐液試験による長期安定性、ミラー表面における化学発光及び乱反射の影響などの評価を行い、いずれも使用上問題とならないことを確認した。

液体シンチレータの開発においては、リニアアルキルベンゼンを溶媒とした液体シンチレータの性能測定及び光学性能を高めるため不純物除去（光学純化）を行った。発光材として PPO 2 g/L を溶かし込んだ液体シンチレータの発光量測定を行ったところ、使用するリニアアルキルベンゼンの種類によって異なるものの、KamLAND の現行液体シンチレータに対して最大でも 1.2 倍程度の増加しか確認できなかった。一方、光透過率の測定では、蒸留法と吸着法を組み合わせた不純物除去を行った場合、現行の液体シンチレータ以上の透過率が達成できることを確認した。両者とも大容量の溶媒を精製するのに工業的に実用化されている技術であり、現在の小型装置のスケールアップが比較的容易であると考えられる。また、波形弁別による粒子識別性能の評価を行い、バックグラウンドの削減に貢献することを確認した。

現在、KamLAND-Zen 実験では 380 kg の同位体濃縮キセノン液体シンチレータ中に溶かし込んで観測を行っているが、未だ有意な 0 二重ベータ崩壊の信号は得られておらず、今後さらなる実験感度の改善が望まれる。来年度以降はキセノン量を約 700 kg に増量し、検出器の放射性不純物を削減した次期フェーズ実験をスタートさせ、縮退型までの検証を行う予定である。さらに、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、高性能化した検出器を用いる KamLAND2-Zen 実験が必要である。本研究によって、逆階層型までのニュートリノ質量の検証に向けた検出器改良の基礎研究が完

了した。KamLAND2-Zen 実験では、約 5 年で 20 meV 程度の感度が見込まれ、比較的短期間の観測で逆階層型の検証が実現する。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3 件)

1. A. Gando, ..., I. Shimizu, 他カムランド共同研究者(40 名中 18 番目) Limit on Neutrinoless Decay of ^{136}Xe from the First Phase of KamLAND-Zen and Comparison with the Positive Claim in ^{76}Ge , Physical Review Letters, 査読有、110 巻、2013 年、062502、doi:10.1103/PhysRevLett.110.062502

2. A. Gando, ..., I. Shimizu, 他カムランド共同研究者(40 名中 15 番目) Limits on Majoron-emitting double- decays of ^{136}Xe in the KamLAND-Zen experiment, Physical Review C, 査読有、86 巻、2012 年、021601、doi:10.1103/PhysRevC.86.021601

3. A. Gando, ..., I. Shimizu, 他カムランド共同研究者(40 名中 15 番目) Measurement of the double- decay half-life of ^{136}Xe with the KamLAND-Zen experiment, Physical Review C, 査読有、85 巻、2012 年、045504、doi:10.1103/PhysRevC.85.045504

[学会発表](計 9 件)

1. 清水格、マヨラナニュートリノ -ダブル崩壊探索-、シンポジウム「ニュートリノ研究の新たなる展開」、日本物理学会第 70 回年次大会、2015 年 3 月 23 日、早稲田大学(東京都)

2. 清水格、KamLAND、Neutrino Telescope 2015、2015 年 3 月 5 日、Venice (イタリア)

3. 清水格、KamLAND2-Zen、CRC タウンミーティング 2014 (第 1 回)、2014 年 7 月 12 日、名古屋大学(愛知県名古屋市)

4. 清水格、Results from KamLAND-Zen、XXVI Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2014)、2014 年 6 月 6 日、Boston (米国)

5. 清水格、Liquid Scintillator for Neutrinoless Double Beta Decay Search、Japan-Korea Joint Symposium: New Detector Technologies、日本物理学会第 70 回年次大会、2014 年 3 月 27 日、東海大学(神奈川県平塚市)

6. 清水格、KamLAND2-Zen 実験用大光量液体シンチレータ開発の現状、日本物理学会

2013 年秋季大会、2013 年 9 月 20 日、広島大学(広島県東広島市)

7. 清水格、KamLAND2-Zen、日本学術会議日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会シンポジウム 公開シンポジウム「天文学・宇宙物理学中規模計画の展望」、2013 年 5 月 28 日、日本学術会議講堂(東京都)

8. 清水格、2 重ベータ崩壊実験、ニュートリノフロンティアの融合と進化、2013 年 4 月 21 日、東京大学(東京都)

9. 清水格、二重ベータ崩壊探索によるニュートリノ研究の展望、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 26 日、関西学院大学(兵庫県西宮市)

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 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・助教

研究者番号：10400227