

平成 30 年 5 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03649

研究課題名(和文) 高発光液体シンチレータ検出器によるマヨラナニュートリノ質量の研究

研究課題名(英文) Study of Majorana Neutrino Mass with High Luminance 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) 12,700,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノが持つマヨラナ質量を高感度測定するための液体シンチレータ検出器開発を行った。その結果、液体シンチレータ原料に含まれる吸光不純物に対して、モレキュラーシーブや活性炭による吸着純化が有効であり、シンチレータとしての性能が大きく向上することが判明した。純化によって発光量と光透過率が増加したことで、目標としていた検出器の高性能化を達成した。本研究によって大型検出器製作にかかるコストが大幅に抑えられたことから、液体シンチレータ検出器によってマヨラナ質量の観測が実現する可能性が高まった。

研究成果の概要(英文)：The development of a liquid scintillator detector to search for the Majorana neutrino mass was performed. We found that molecular sieve and activated charcoal are effective to remove light absorbing materials in the liquid scintillator, resulting in improved performance. The increase of the light output and transparency of the scintillator will enhance the detector performance. The present study enables us to reduce the cost of constructing a large detector and increases the chance of observing the Majorana neutrino mass with a liquid scintillator detector.

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

近年のニュートリノ研究の進展によりニュートリノが非常に小さな質量を持ち3世代間で混合することが明らかにされたが、未だに質量の絶対値の決定には至っていない。ニュートリノの極端に軽い質量は、右巻きの重いニュートリノを予言するシーソー模型による説明が有力である。また、シーソー模型に登場する右巻きニュートリノの崩壊によって宇宙初期の物質・反物質の非対称が作り出されたとするレプトジェネシスが注目を集めており、宇宙物質優勢の謎を解き明かす重要な鍵はニュートリノの性質にあると考えられている。これらの理論は、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 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 二重ベータ崩壊の高感度な探索が重要視され、世界の地下施設において多くの次世代大型実験が計画されている。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 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、ニュートリノ放出を伴わない二重ベータ崩壊を起こし、崩壊率はニュートリノ有効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 Xe (^{136}Xe :91%) を液体シンチレータに溶かし込み、縮退型から逆階層型付近のマヨラナ質量までを検証する。本研究では、現在よりも高発光量の液体シンチレータ検出器を実現することによりエネルギー分解能を限界まで高め、逆階層型のマヨラナ質量 (20 meV 以上) の検証を目標とする。目標を達成するため、本研究では KamLAND 検出器におけるエネルギー分解能の改善に向けた検出器改良を行う。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イトは年間 7 事象以下というレベルに到達しているが、現行の検出器のエネルギー分解能では 2ν 二重ベータ崩壊によるバックグラウンドによって 0ν 二重ベータ崩壊の探索感度は制限されてしまう。そこで、高発光液体シンチレータの開発によってエネルギー分解能を改善し、バックグラウンド混入量をさらに減少させる必要がある。

3. 研究の方法

KamLAND-Zen において目標のバックグラウンドレイトを達成するには、現行の液体シンチレータの光量を 3 倍に増加させる必要が

ある。これまでの研究において 20 インチ光電子増倍管用の Winstone-Cone 型の集光ミラーの開発・製作によって集光効率を 2 倍に高めることに成功しているが、目標である 3 倍の光量を達成するには、さらに液体シンチレータの改良によって光量を 1.5 倍に増加する必要がある。

大型検出器に利用できる液体シンチレータとしてはリニアアルキルベンゼン (LAB) が発光量・透過率において最も高い性能を持っており、現在の KamLAND の液体シンチレータを LAB に入れ替えた場合、発光量 (1.2 倍) と光透過率 (1.3 倍) の増加で集光ミラー (2 倍) と合わせて 3 倍の光量を達成できる。また、LAB は洗剤の原料であるため生産量が多く最も低コストで、国内の生産工場のみで 1,000 トンの調達が可能である。ただし、LAB には蛍光波長領域で吸光するニトロベンゼン誘導体などの微量な不純物が含まれるため、液体シンチレータとして使用するには透過率改善のための光学的純化を行う必要がある。光学的純化の有力な手法として、吸着法が挙げられる。吸着剤としては、物理吸着による高速な純化が期待できる多孔質素材のモレキュラーシーブや活性炭 (下図) が候補となる。



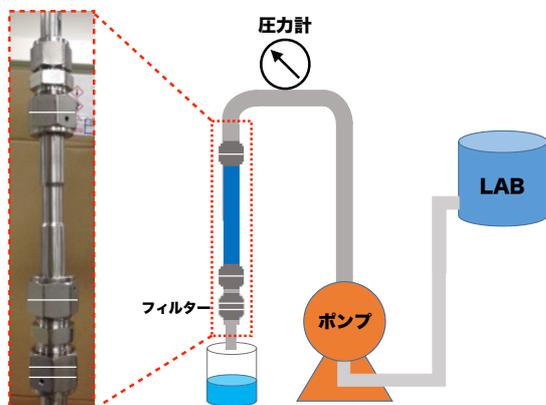
KamLAND では大量の液体シンチレータを作成するため最終的には毎時 1 m^3 以上の純化速度が目標となるが、吸着は工場排水の污水処理などでも使用実績のある確立された技術であるため、十分な純化速度を持ち、かつ安価でランニングコストの低い吸着装置の設計が可能であると考えられる。

4. 研究成果

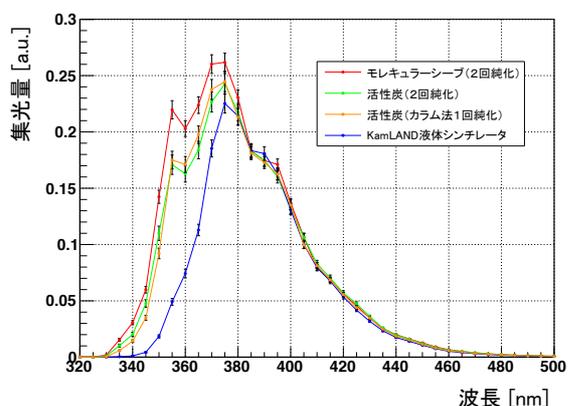
KamLAND 検出器において目標の集光量を達成するため、液体シンチレータの光学純化装置の開発を行った。

最初に吸着剤による純化性能を確認するため、吸着剤と LAB を十分に混合し濾過によって分離し、LAB の発光量・光透過率を測定した。ガラス窓の付いた長さ 2 m のステンレスパイプに LAB を封入することで、波長ごとに高精度な光透過率の測定を実現している。モレキュラーシーブは合成ゼオライトの一種で極めて均一な細孔を持つため、工業的には選択的な不純物除去に利用されている。細孔径が 1.0 nm のモレキュラーシーブを用いた吸着純化を行ったところ、吸光不純物の除去に成功し、目標である約 1.5 倍の光量が達成できることが分かった。しかし、装置を大型化するには LAB の収率や純化に要する吸着

剤の量において難点があった。そこで、モレキュラーシーブよりも安価で吸着面積が大きい活性炭に注目し吸着試験を行ったところ、吸着速度・効率において非常に優れていることが分かった。さらに純化効率を高めるため、下図のようにカラムに液を連続的に流し続けるカラム法による吸着試験も行った。



高い除去効率を得られるよう活性炭量・流速などのパラメータについて最適化を行い、純化条件を決定した。その結果、吸光不純物を1/50程度まで除去することに成功し、光量を約1.35倍まで改善することができた。下図に波長ごとの集光率の比較を示す。純化したいずれのLABも、現在使用している液体シンチレータよりも光透過率において優れていることを示している。



さらに、大型カラムを使用した300LのLAB純化試験を行い、吸光不純物を同程度まで除去できることを確認した。大型カラムの純化パラメータは、小型カラムにおける試験結果を参考に決定した。活性炭による純化ではモレキュラーシーブと比較すると使用する吸着剤の量を1/20、LABの量を1/4程度まで削減できることが分かった。このため、KamLAND検出器の改良に必要な1,000トン液体シンチレータの導入に要するコストは、大幅に低減できると見込まれる。

現在、KamLAND-Zen実験では約750kgの同位体濃縮Xeを導入し、縮退型から逆階層型

付近のマヨラナ質量までを検証を目指す次期フェーズ実験の準備を行っている。逆階層型 (> 20 meV) まで探索感度を延ばすためには、Xe量を約1,000kgに増量し、さらに検出器を改良し高性能化する必要がある。本研究によって検出器改良にかかるコストは大幅に減少し、将来KamLANDによってマヨラナ質量の高感度探索が実現する可能性がより高まった。

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, H. Ikeda, M. Koga, I. Shimizu, 他カムランド共同研究者、Search for Majorana Neutrinos near the Inverted Mass Hierarchy Region with KamLAND-Zen、Physical Review Letters、査読有、117巻、2016年、082503、doi: 10.1103/PhysRevLett.117.082503

② K. Asakura, A. Gando, H. Ikeda, M. Koga, I. Shimizu, 他カムランド共同研究者、Results from KamLAND-Zen、AIP Conference Proceedings、査読有、1666巻、2015年、170003、doi:10.1063/1.4915593

③ A. Gando, H. Ikeda, M. Koga, I. Shimizu, 他カムランド共同研究者、Limit on Search for double-beta decay of ^{136}Xe to excited states of ^{136}Ba with the KamLAND-Zen experiment、Nuclear Physics A、査読有、946巻、2015年、171、doi:10.1016/j.nuclphysa.2015.11.011

[学会発表] (計5件)

① 清水格、Broad Overview of Neutrino Physics、International Workshop: Neutrino Research and Thermal Evolution of the Earth、2016年10月20日、東北大学(宮城県仙台市)

② 清水格、Double Beta Decay、PhyStat- ν Workshop on Statistical Issues in Experimental Neutrino Physics、2016年5月31日、Kavli IPMU(千葉県柏市)

③ 清水格、KamLAND and KamLAND-Zen、Frontiers of Liquid Scintillator Technology (FroST16)、2016年3月18日、シカゴ(米国)

④ 清水格、物質粒子生成とマヨラナニュートリノ、新学術3領域(重力波天体・地下素核研究・中性子星核物質)合同シンポジウム、2015年7月24日、東北大学(宮城県仙台市)

⑤ 清水格、Neutrino Mass Measurements Asia、

Second International Meeting for Large
Neutrino Infrastructures、2015年4月21
日、シカゴ(米国)

[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・准教授

研究者番号：10400227

(3) 連携研究者

古賀 真之 (KOGA, MASAYUKI)

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：90343029

池田 晴雄 (IKEDA, HARUO)

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：90400233

丸藤 亜寿紗 (GANDO, AZUSA)

東北大学・ニュートリノ科学研究センタ
ー・教育研究支援者

研究者番号：20704399