

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 4 月 20 日現在

機関番号：11301
研究種目：挑戦的萌芽研究
研究期間：2015～2016
課題番号：15K13472
研究課題名(和文) ニュートリノ研究のための発光波長の異なる2層型液体シンチレータ検出器の開発

研究課題名(英文) Development of Double-Layer Liquid Scintillator Detector with Different Wavelengths for Neutrino Research

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) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：発光波長に感度を持つ光センサーを用いた2層型液体シンチレータ検出器の発光点識別によるバックグラウンド削減を実現するため、小型プロトタイプ検出器の製作と性能評価を行った。波長変換プレートと光電子増倍管を組み合わせた光センサーを用いて発光波長の異なる液体シンチレータの光子計数を行い、シミュレーションで予測した識別能が得られることを確認した。この結果、大型検出器において発光点識別を実現するための装置設計が詳細に検討できるようになった。

研究成果の概要(英文)：We aim to achieve the discrimination of light output points to reduce backgrounds in a double-layer liquid scintillator detector, based on a light sensor sensitive to the wavelengths of the light source. Using a small prototype, we performed photon counting of the liquid scintillator with different wavelengths in scintillation using a combined system which consists of a wavelength shifting plate and a photomultiplier tube, and confirmed a discrimination ability as expected from a simulation. As a consequence, the study has reached the stage to start to discuss a detailed plan for a future large detector to discriminate light output points.

研究分野：素粒子実験

キーワード：シンチレーション検出器開発

1. 研究開始当初の背景

現在の宇宙に大量に漂うニュートリノは、元素合成以前から宇宙の進化に重大な影響を与えてきたと考えられており、ニュートリノの性質の理解が宇宙の歴史を解き明かす鍵となっている。大気・太陽・原子炉・加速器からのニュートリノ振動研究によってニュートリノ混合行列の詳細が明らかになってきたが、一方でニュートリノの「マヨラナ性」、「質量階層構造」、「CP 非対称」、「世代数」など多くの究明すべき未解決問題がある。これらの研究に共通する課題は、非常に小さな効果を測定するための検出器の大型化や高性能化である。大容量・高純度が特徴である液体シンチレータ検出器は、これまで原子炉ニュートリノ振動の研究で重要な貢献を果たしてきたが、今後はさらに太陽・地球ニュートリノの精密測定、陽子崩壊や二重ベータ崩壊探索などの希な現象の研究における貢献にも期待が高まっている。このため、世界中で液体シンチレータを用いた次世代実験に向けた様々な計画が提案され、性能を最大限に引き出すための開発が急速に進展し、激しい競争状態にある。

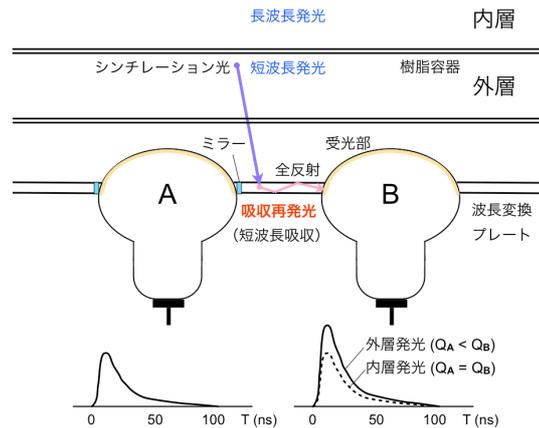
2. 研究の目的

本研究課題は、これまでの液体シンチレータ検出器では前例のない内層と外層の発光波長の違いを利用した発光点の区別を行い、外層や樹脂容器に含まれる放射性不純物に起因するバックグラウンドの大幅な削減を目標とする。この手法は光検出方法のみの改良であるため、液体シンチレータ検出器の特徴である極低放射線環境を損なうこと無く、大型実験に対しても低コストで適用できる点で拡張性に優れている。この開発に成功した場合、検出器の拡張性が要求される二重ベータ崩壊や暗黒物質などの希少事象探索に大きく貢献すると期待される。

3. 研究の方法

これまでの2層型液体シンチレータ検出器は、光到達時間から再構成した位置情報のみを基にして発光点がどちらの層にあるかを区別してきたが、本研究ではこれに発光波長の情報を加えた検出器を開発する。新しい2層型液体シンチレータ検出器の概念を下図(検出器の一部のみ)に示す。適当な発光剤を選択することで、内層に長波長発光、外層に短波長発光の液体シンチレータを導入する。この場合、外層での発光のみが短波長に感度を持つ波長変換プレートにおいて吸収され、再発光を全反射によって光センサーBに導くことができる。一方、光センサーAに対しては再発光の寄与をミラーで遮断する。よって、内層での発光は両センサーの光量が等しく($Q_A = Q_B$)、外層での発光は光センサーBの光量が大きい($Q_A < Q_B$)ため、光量比の情報を基にして発光点を区別できる。

2層の発光点を明確に区別するためには、



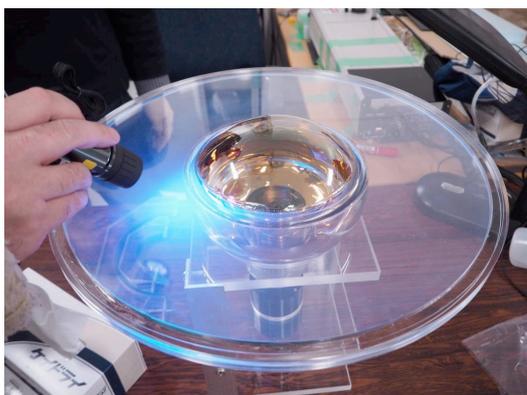
波長感度の異なる2種類の光センサーを均等に配置し、両者の光子カウンティングにおいて統計的に有意な光量差を得る必要がある。本研究では、短波長光に感度を持つ波長変換プレートを用いた集光による光量増加を利用して、発光点の区別に必要な光量差を実現する。この原理を用いた測定の分解能を評価するため、小型プロトタイプ検出器を製作する。内層の液体シンチレータの発光に短波長成分が多く含まれると波長変換プレートによって集光され、外層との光量差は小さくなってしまふ。そこで、短波長成分を吸収する適当な波長変換材(第2溶質)を選択し、内層の液体シンチレータに溶かし込む。その際、発光波長は波長変換プレートの吸収波長よりも大きく、かつ長波長発光の効率が高い第2溶質を選択する必要がある。実際に、プロトタイプ検出器を用いた測定を行い、長波長発光では波長変換プレートの有無による光量の変化が小さいことを確認する。

4. 研究成果

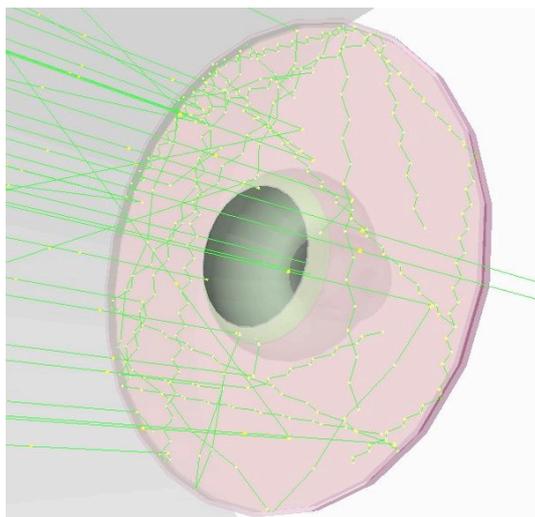
本研究では、短波長発光に感度を持つ波長変換プレートを用いた集光による光量増加を利用して、発光点の区別に必要な光量差を実現する。この手法の原理検証及び測定の分解能を評価するため、小型プロトタイプ検出器の設計を行った。集光性能を評価するため、8インチ光電子増倍管と波長変換プレートを組み合わせた光センサーによってシンチレーション光を測定する。シンチレーション光は、波長変換プレートにおいて吸収・再発光され、液体シンチレータとの間に空気層を設けることで効率よく全反射光が受光部まで導かれる。

波長変換プレートの製作は、波長領域を選択できる市販のプラスチックシンチレータを購入して加工することも可能であるが、波長選択できるものは特殊タイプであるため、いずれのメーカーにおいても製作に時間がかかり効率的では無いことが分かった。そこで、通常タイプのプラスチックシンチレータに第2溶質のPOPOPを混合させる簡易な手法によって波長変換プレートを製作すること

にした。プレートの周囲を紫外線透過タイプのアクリルで囲うことで、全反射に必要な空気層を実現した。また、プレート側面にアルミ蒸着を施し、ミラーによる反射によって光電子増倍管への集光率を高めた。この設計を基に波長ごとの吸収長を考慮した光学シミュレーションを行い、最適な波長変換プレートの直径 (470 mm) と厚み (10 mm) を決定した。集光による光量増加は 1.52 倍となり、発光点の区別に十分な光量差が期待される。決定した形状で波長変換プレートを製作し、下図のようにアクリル・8 インチ光電子増倍管との連結を行い、製作上の問題が無いことを確認した。



液体シンチレータはリニアアルキルベンゼン (LAB) に波長変換材を溶かし込んで作製した。短波長発光には LAB + PPO (2 g/L)、長波長発光には LAB + PPO (2 g/L) + bis-MSB (15 mg/L) を成分とした液体シンチレータを使用した。光センサーに対する入射光を均一な分布にするため、約 6.5 m 離れた位置に液体シンチレータを設置し、窒素レーザーからのパルス状の紫外光を液体シンチレータに照射し十分な光量のシンチレーション光を発生させた。光子計数を行った結果、短波長発光の液体シンチレータでは波長変換プレートによる光量の増加が 1.58 ± 0.06 倍となり、シミュレーションで予測した 1.52 倍と誤差の範囲内で一致した。下図にシミュレーションにおいて波長変換プレートに吸収された光子が光電子増倍管に収集されている様子を示す。一方、短波長発光の液体シンチレータを用いた場合には 1.33 ± 0.05 倍と期待通りに光量の変化が小さいこと確認した。この結果から、波長変換プレートを利用した発光点の区別が可能であることが実証された。この光量差を基に、大型検出器において発光点の区別を実現するために必要な波長感度の異なる 2 種類の光センサーの数量を見積もることが可能となり、将来の液体シンチレータを用いた実験計画をより詳細に検討できるようになった。



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 2 件)

- ① A. Gando, ..., I. Shimizu, 他カムランド共同研究者 (41 名中 17 番目)、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, ..., I. Shimizu, 他カムランド共同研究者 (48 名中 21 番目)、, Results from KamLAND-Zen、AIP Conference Proceedings、査読無、1666 巻、2015 年、170003、doi:10.1063/1.4915593

[学会発表] (計 6 件)

- ① 清水 格、Broad Overview of Neutrino Physics、International Workshop: Neutrino Research and Thermal Evolution of the Earth、2016 年 10 月 25 日、東北大学 (宮城県・仙台市)
- ② 林 歩美、発光波長の異なる 2 層型液体シンチレータ検出器のための波長変換プレートの開発、日本物理学会第 72 回春季大会、2016 年 9 月 22 日、宮崎大学 (宮城県・宮崎市)
- ③ 清水 格、Double Beta Decay、PhyStat-ν Workshop、2016 年 5 月 31 日、IPMU (千葉県・柏市)
- ④ 清水 格、KamLAND and KamLAND-Zen、Frontiers of liquid Scintillator Technology (FroST16)、2016 年 3 月 18 日、シカゴ (米国)

- ⑤ 清水 格、Matter Dominated Universe and Majorana Neutrino、Joint symposium by three innovative areas : Gravitational Wave Source / Underground Particle Nuclear Research / Neutron Star Matter "Universe and Astronomical Objects Uncovered by Multi-Fold Approach"、2015年7月24日、東北大学(宮城県・仙台市)
- ⑥ 清水 格、Neutrino Mass Measurement in 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

研究者番号：

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

林 歩美 (HAYASHI, Ayumi)