

令和 5 年 4 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K13931

研究課題名（和文）液体シンチレータを用いたニュートリノ研究のための背景事象の除去

研究課題名（英文）Background rejection for neutrino searches with a liquid scintillator detector

研究代表者

家城 斉 (Ieki, Sei)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・特任助教（研究）

研究者番号：70826940

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：物理探索において、検出器の感度を定量的に評価するためには検出効率の不定性を見積もることが不可欠である。本研究は液体シンチレータ検出器で電子と陽電子を弁別するとき、検出効率の不定性の要因となるオルソポジトロニウムの寿命と形成率を測定することに注力した。本研究で陽電子の識別が可能になるのは、陽電子が物質中の電子と反応してオルソポジトロニウムを形成した場合に限られており、オルソポジトロニウムの寿命と形成率は周辺物質に依存する。測定環境の構築と実測を行い、寿命については文献値とおよそ矛盾しない結果が得られ、測定方法の大筋が確認できた。形成率を測るためには装置に改善の余地がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

カムランド禅実験は世界最高感度でニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索を行っている。探索感度の向上を妨げている最たる原因は背景事象の多さであり、電子と陽電子の弁別が可能になると探索感度の向上に貢献できる。感度を正しく評価するためには、背景事象の弁別効率の不定性を見積もることが不可欠であり、陽電子の弁別効率を導出するにはポジトロニウムの寿命と形成率が必要である。カムランド禅実験で使用しているキセノン入り液体シンチレータで測定の前例はないので実測が必須である。

研究成果の概要（英文）：In physical research, we must estimate uncertainties of detection efficiency.

Particle identification (PID) is one of the possible approaches to reduce backgrounds in a liquid scintillator (LS) detector. In this study, we measured the sources of uncertainties for PID, that is the lifetime of ortho-positronium and its formation ratio in LS. These values depend on the surrounding material.

We developed a data acquisition system for the measurement of the ortho-positronium lifetime and its formation ratio. A known sample was measured to confirm the method. The measured lifetime agree with the value in a literature. While it was difficult to estimate the formation ratio, since the time resolution was lower than expected and we have room to improve the event selection.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：ポジトロニウム 粒子識別 液体シンチレータ

1. 研究開始当初の背景

KamLAND-Zen 実験は世界最高感度でニュートリノを伴わない二重ベータ ($0\nu\beta\beta$) 崩壊の探索を行っている[1]。現状、探索の感度を制限している最たる要因は背景事象の多さであり、将来的に高感度化を目指すためには背景事象の低減が必須である。信号事象が電子のみを放出するのに対して、影響の大きい背景事象が陽電子を伴うことが多いことに着目し、陽電子を弁別することが背景事象を低減するための有力な手段となると考えた[2]。

また、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の主要な背景事象としてニュートリノを伴う二重ベータ ($2\nu\beta\beta$) 崩壊があり、この量を精度よく測定することも重要である。陽電子が弁別できると、 $2\nu\beta\beta$ 崩壊の主要な背景事象である ^{11}C の陽電子崩壊の検出効率を向上できるので、 $2\nu\beta\beta$ 崩壊の測定精度を改善することにもつながる。

2. 研究の目的

本研究の目的は KamLAND-Zen 実験の事象選別の効率を改善することによってそれに直結する検出器の感度を向上させることである。そのために、陽電子の弁別手法を開発することと、弁別効率の不定性を評価することを目指した。

物質中の陽電子は周辺の電子と反応してポジトロニウムを形成する。このポジトロニウムには寿命の異なるオルソとパラの 2 種類がある。本研究で陽電子を弁別する原理は、陽電子崩壊と、オルソポジトロニウムの崩壊の時間差を検出することである。この方法では寿命の長いオルソポジトロニウムが形成された場合のみ陽電子の弁別が可能になるため、陽電子の弁別効率はオルソポジトロニウムの形成率とその寿命に依存する。これらの値は陽電子の周辺物質によって異なることが知られている。本研究は、KamLAND-Zen 実験で独自に調査された液体シンチレーター (LS) 中でのオルソポジトロニウムの形成率と寿命を実測して、陽電子の弁別効率の不定性を見積もる。

3. 研究の方法

陽電子線源である ^{22}Na を用いて LS 中にポジトロニウムを形成し、 ^{22}Na の陽電子崩壊とポジトロニウムの崩壊の時間差を測定する。この時間差に対して指数関数でフィットをすることによってオルソポジトロニウムとパラポジトロニウムの寿命と割合を導出する。

陽電子崩壊とポジトロニウムが崩壊した時刻は、LS の発光を光検出器で検出し、デジタイザに記録した出力波形を解析することで測定する。

測定装置を構築するにあたり、線源を保護する観点から陽電子線源を LS 中に直接沈めることはできないため、線源をカプトンフィルムで覆う。カプトンフィルムにおいてポジトロニウムが形成されると、LS 中の形成率と寿命の測定値に不定性を与えてしまう懸念があるので、厚さの異なるカプトンフィルムを用いて測定を行うことでこの影響を評価する。また、KamLAND-Zen 実験で使用されている LS にはキセノンが溶解されている。陽電子の弁別効率の不定性を評価するためには、キセノンの溶解量に対するオルソポジトロニウムの形成率の関係を測定しておくことは重要である。このため、キセノンの濃度を変えて測定を繰り返すことを想定し、サンプルの変更と測定を容易に行うことが可能な装置を構築する。

4. 研究成果

(1) 本測定を行うための前提として、使用するカプトンフィルムが LS に対する耐性を持つことは必須である。これを確認するため、LS とカプトンフィルムを入れた容器と、LS のみを入れた容器を用意した。これらを恒温槽で数日保存し、その後 2 つの LS の透過率に有意な違いがないことからカプトンの成分が LS 中に溶解していないことを確かめた。また、図 1, 2 のようにオルソポジトロニウムの寿命と形成率を測定するためのデータ取得装置を構築した。

(2) 構築した測定装置を用いて ^{22}Na の陽電子崩壊とポジトロニウムの崩壊の時間差を測定した (図 3)。測定方法を確立するため、オルソポジトロニウムの寿命と形成率が文献で報告されているサンプルと同様の組成の LS を用意して測定を行った。現状は時間分解能が検出器の性能から想定される値よりも良くないため、寿命の短いパラポジトロニウムの検出と寿命の測定が困難になっており、オルソポジトロニウムの形成率を見積もるには至っていない。一方でオルソポジトロニウムの寿命は文献値と矛盾しない結果が得られたので、測定方法の大筋を確認することができた。



図 1. LS と光検出器。

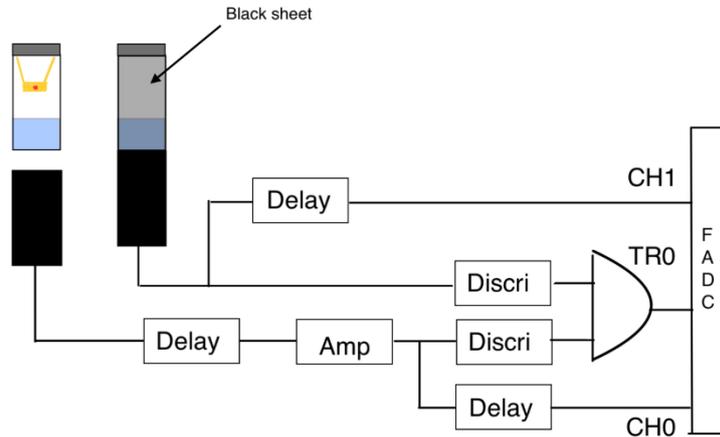


図 2. 測定装置の概要図。

今後、形成率を測定していくためにはパラポジトロニウムの寿命を測定できるようにする必要があり、時間分解能を悪化させている原因を究明するとともに、背景事象を低減することが重要な課題であると考えている。

(3) ポジトロニウムの崩壊に対する背景事象を低減するために光検出器の配置や数などを変更することを検討しており、検出器の構成を最適化していくためにシミュレーションを開発した。以下のようにして背景事象を低減していくことを検討している。

第一に、光検出器を1つ追加し、2本の光検出器を一直線上に配置する。これによってポジトロニウムが崩壊する際に逆方向に放出される2本のガンマ線を同定する。

第二に、光検出器を線源から遠ざけることで ^{22}Na の陽電子崩壊と同時に放出されるガンマ線を低減する。このガンマ線は飛跡次第で寿命の短いパラポジトロニウムとの弁別が困難になると考えられる。立体角による信号数の減少率と背景事象の低減率をシミュレーションで考慮する。

第三に、ガンマ線のエネルギーを測定することが背景事象の低減に有効であるかどうかをシミュレーションを用いて検証する。

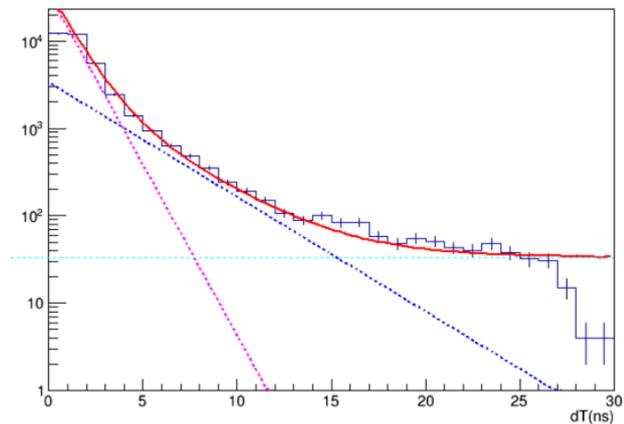


図 3. ^{22}Na の陽電子崩壊とポジトロニウムの崩壊の時間差。青いヒストグラムは測定結果である。マゼンタと青の点線はそれぞれパラポジトロニウムとオルソポジトロニウムの崩壊のフィット結果、水色の点線は時間に依らない背景事象で、3つの点線の合計が赤線である。

<引用文献>

[1] S. Abe et al. (KamLAND-Zen Collaboration) Phys. Rev. Lett. 130, 051801 (2023)
 [2] S. Abe et al. (KamLAND-Zen Collaboration) arXiv:2301.9307

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------