

令和 6 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03586

研究課題名（和文）極低バックグラウンド宇宙素粒子実験のための表面アルファ検出器の高感度化

研究課題名（英文）Supersensitizing the surface alpha counter for ultra-low background astroparticle experiments

研究代表者

平出 克樹（Hiraide, Katsuki）

東京大学・宇宙線研究所・特任准教授

研究者番号：10584261

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）：本研究では、アルゴンガスを用いたイオンチェンバー型の表面アルファ検出器の高感度化を行った。本研究により、表面アルファ検出器のバックグラウンド源を理解するために必要な長期測定が可能になり、サンプルトレイの改善により一部のバックグラウンドを低減することができた。また、帯電しやすい絶縁体サンプルの除電方法についても一定の知見が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

暗黒物質の直接探索実験や、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索実験など、ごく稀な現象を探索する宇宙素粒子実験においては、検出器部材の表面に付着しているラドンの娘核による表面バックグラウンド事象の低減が共通の課題である。本研究の成果は、これらの次世代の検出器を開発するにあたり、必要とされる極低バックグラウンド表面アルファ検出器の性能を実現するために不可欠なものである。

研究成果の概要（英文）：In this research, we increased the sensitivity of an ion chamber type surface alpha detector using argon gas. This study enabled the long-term measurements necessary to understand the background source of the surface alpha detector, and we were able to reduce some of the background by improving the sample tray. We also gained some knowledge about how to eliminate static electricity from insulating samples, which are easily charged.

研究分野：素粒子実験、宇宙線実験

キーワード：表面アルファ検出器 宇宙素粒子実験 極低バックグラウンド

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

宇宙に大量に存在する暗黒物質の正体を解明することは、物理学の重要な課題の一つである。暗黒物質の有力な候補である Weakly Interacting Massive Particles (WIMPs)は、通常の物質中でごく稀に原子核を反跳すると考えられており、このような反応を直接検出しようとする直接探索が世界中で行われている。しかしながら、有意な信号は観測されておらず、有効質量 1.3 トンの液体キセノンを標的に用いた XENON1T 実験によって WIMPs-核子の反応断面積に関して、 $4.1 \times 10^{-47} \text{ cm}^2$ (90%信頼度、30 GeV/c² WIMPs)という厳しい制限がつけられている。さらに高感度で探索を行うためには、Exposure (=標的質量 × 観測時間)を増大させるだけでなく、背景事象の低減が課題となっている。主な背景事象としては、液体キセノン中に混入するラドンの娘核による電子事象、検出器部材から発生する中性子による原子核反跳事象、および検出器部材の表面に付着しているラドンの娘核による表面バックグラウンド事象が挙げられる。

このような表面バックグラウンドの低減は、暗黒物質直接探索実験や、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索実験など、ごく稀な現象を探索する宇宙素粒子実験において共通の課題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、次世代の極低バックグラウンド検出器開発を見据えて、我々が地下実験施設に導入している XIA 社の低バックグラウンド表面アルファ検出器 UltraLo-1800 のバックグラウンドをさらに低減し、検出器部材の表面バックグラウンド量に対する感度を高めるとともに、表面アルファ検出性能を詳細に検証し、測定方法の改善を行うことである。

3. 研究の方法

本研究で使用した表面アルファ検出器は、アルゴンガスを用いたイオンチェンバーで、底面の導電性のサンプルトレイ上に置いたサンプル表面から発生したアルファ線によって電離した電子・イオンを電場でドリフトさせて電極に誘起される電荷を観測する。サンプルトレイには、最大で 40cmx40cmx 厚さ 6mm の板状サンプルを置くことができる。アノード電極で観測された波形の波高と立ち上がり時間の情報から、事象のエネルギーおよびドリフト方向の位置が分かる。

我々は、²¹⁰Po からの 5.3 MeV アルファ線領域に対するバックグラウンドレートを、およそ $1 \times 10^{-4} \text{ /cm}^2\text{/hr}$ まで低減することに成功していた。これは、部材表面の ²¹⁰Po 量に対する感度に換算すると、約 1 mBq/m² に相当する。しかしながら、大型液体キセノン検出器 XMASS-I 実験は、既にこの表面アルファ検出器の検出限界と同程度まで表面バックグラウンド事象の削減に成功していた。

したがって、次世代の極低バックグラウンド検出器を開発するためには、表面アルファ検出器のさらなる感度向上が必要である。また、この表面アルファ検出器では、イオンチェンバー中に直接サンプルを挿入するため、絶縁体サンプルの場合、帯電などによってイオンチェンバー中の電場を変化させてしまい、観測されるアルファ線のエネルギースペクトルに歪みが生じて正確な測定が行えないため、測定が難しかった。

そこで、本研究では、ハードウェアの改善、ソフトウェアによる背景事象の識別・除去、および絶縁体サンプルの測定方法の改善、の3つの観点から研究を行った。

(1) ハードウェアの改善

これまでは約3週間に一度の頻度で液化アルゴンボトルを交換する際に2日間測定を中断する必要があった。そこで、本研究では、まず液化アルゴンボトルを2本並列につなげるようにガス配管を増設し、一方の液化アルゴンボトルの交換作業中でも測定を継続できるようにした。

表面アルファ検出器に何もサンプルを入れずに長期測定したバックグラウンド事象のエネルギースペクトルを見ると、サンプルトレイの表面に付着したラドン娘核 ²¹⁰Po のアルファ線と思われる 5.3 MeV 付近のピークと、5.8 MeV 以上の高エネルギー側の事象が観測された。

そのため、表面アルファ検出器の背景事象をハードウェアの改善によって低減することを目指した。ステンレスや無酸素銅などの金属表面に付着したラドン娘核を削減する研究は既に行われており、電解研磨により金属表面を O(10) μm 削り落とすことが有効な方法であることが分かっていた。そこで、サンプルトレイやガス配管などに電解研磨を施して、これらの部材起因の背景事象を低減することを目指した。

(2) ソフトウェアによる背景事象の識別・除去

この表面アルファ検出器は電極が 2 次元的に細かくセグメント化されていないために、事象のサンプルトレイ表面上での 2 次元位置の情報はハードウェア的には得られない。しかし、最近表面アルファ検出器の応答が、サンプルトレイ上の位置によって違うことが分かってきた。そこで、本研究では波形情報に立ち戻って事象のサンプルトレイ上の 2 次元位置再構成を試みた。

(3) 絶縁体サンプルの測定方法の改善

暗黒物質の直接探索を行う二相式液体キセノン検出器では、検出器の内壁に PTFE でできた反射板を用いるが、PTFE は絶縁体で非常に帯電しやすいため、この表面アルファ検出器での測定が非常に難しかった。これまでも、絶縁体サンプルの測定方法は研究されてきたが完結していなかった。本研究では、測定前の絶縁体サンプルの除電方法に焦点を当てて、サンプルを汚染せず、かつ効果的な除電方法の検討および調査を行った。

イオン噴射による除電方法など複数の方法について、空気イオンカウンターを用いたイオン噴射量の測定、表面電位計を用いて除電前後の絶縁体サンプルの表面電位の測定を行って除電能力の測定を行った。

4 . 研究成果

まず、アルゴンガス配管の改造によって、バックグラウンド源を理解するために必要な長期測定が可能となった。サンプルトレイの表面を電解研磨することにより、5.3 MeV アルファ線領域に対するバックグラウンドを低減することができた。その他のバックグラウンド源を理解するために、サンプル等を設置しない状態での長期測定を行ってバックグラウンドレートやエネルギースペクトルの安定性等の調査を実施したが特定には至らなかった。バックグラウンドレートは時期によってばらつきがあり、アルゴンガス中に混入するラドンなどからの寄与が疑われるため、この点については今後の課題である。

絶縁体サンプルの測定方法については、イオン噴射による除電方法など複数の方法について検討および調査を行った結果、それぞれの除電方法についてイオン量や除電能力など一定の知見が得られた。PTFE は非常に帯電しやすく、サンプルの前処理時の取り扱いによって表面電位が大きく影響を受けるため、注意を払う必要があった。今後も研究を継続して、絶縁体サンプルの測定方法を確立する予定である。

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