

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01104

研究課題名（和文）背景事象識別能力を有する高感度シンチレーターによる宇宙暗黒物質探索

研究課題名（英文）Dark matter search with high purity detector

研究代表者

池田 晴雄（Haruo, Ikeda）

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

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,900,000円

研究成果の概要（和文）：宇宙暗黒物質は存在が示唆されていながら現在検出されておらず、その実現には環境放射線が極めて少ない環境下で不純物を極限まで排除した検出器を用いて観測を行う必要がある。本研究では宇宙暗黒物質との反応を検出するための超純度NaI(Tl)結晶と環境や検出器構造物からくる環境放射線を区別するためのシンチレーションフィルムを組み合わせたハイブリッド検出器の新規開発を行い、その原理検証を行った。そのためにシンチレーションフィルムの放射線含有量を高感度で観測するための手法を開発した。フィルム厚さの異なるハイブリッド検出器を2種類作成し、その性能を神岡地下実験施設内の鉛シールド内で観測しその性能評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙暗黒物質観測のための高純度NaI(Tl)結晶とシンチレーションフィルムを組み合わせたハイブリッド検出器の新規開発の結果、炭化水素フィルムに含まれる放射性不純物量のICP-MSを用いて高感度で測定する技術開発に成功した。検出器の性能評価をするのにノイズの影響が大きくその除去が重要であり、検出器を構成する部材の不純物含有量に加えて考慮すべき点があることが判明した。宇宙暗黒物質観測に欠かせない検出器の長期安定性の確認がなされた。

研究成果の概要（英文）：Dark matter has been suggested to exist in the universe but is currently undetected, and its observation requires using detectors with minimal radioactive impurities in an environment with extremely low environmental radiation. In this study, we developed a new hybrid detector that combines ultra-pure NaI(Tl) crystals to detect reactions with dark matter and scintillating films to distinguish environmental radiation and detector structures. For this purpose, a new method was developed to observe the radiative contamination in the scintillating film with high sensitivity. Two types of hybrid detectors with different scintillating film thicknesses were fabricated, and their performance was observed in the lead shield at the Kamioka Underground Experimental Facility to evaluate their performance.

研究分野：素粒子実験

キーワード：宇宙暗黒物質 極低放射能環境 地下実験

1. 研究開始当初の背景

宇宙暗黒物質は、宇宙の幅広い観測からその存在が示唆されてきた。1937年頃の観測で存在が示唆された後、世界中の多くの研究者が宇宙暗黒物質の直接検出に挑んできたにもかかわらず、80年以上経過した現在でも発見に到っていない宇宙物理学および素粒子物理学の最大の難問である。

宇宙暗黒物質の最有力候補の一つは、質量が水素原子核(質量 $0.938 \text{ GeV}/c^2$) と同等程度からその数千倍の間と予測されている、物質と弱い相互作用をする素粒子で WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles) と呼ばれる未知の素粒子である。WIMPs は素粒子論のモデルでも幅広い研究が進められ、宇宙暗黒物質として宇宙空間に普遍的に存在することが期待されている。

WIMPs と原子核との相互作用は弾性散乱が主たる過程となっており、原子核に与えられる反跳エネルギーは 100 keV 以下という極めて低いエネルギーである。WIMPs と原子核の散乱頻度はその名前の通り極めて稀で、散乱断面積は 10^{-40} cm^2 以下と予想されている。したがって、極めて低い背景事象数の放射線検出器を開発することが求められる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、新たに開発するハイブリッド NaI(Tl) 検出器を用いて、WIMPs に起因すると考えられる低エネルギー領域の計数率の変化を観測して素粒子としての宇宙暗黒物質を発見することである。独自に開発した純化方法によって超高純度 NaI(Tl) 結晶を開発することに成功し、超高純度かつ大容量の NaI(Tl) 検出器による 2 ~ 3 年間の連続測定によって、モデルに依存しない季節変化の事象を探索して宇宙暗黒物質に起因する未知の現象を探索することが可能になった。その開発過程で NaI(Tl) 結晶そのものではなく、結晶容器やそれに内包されている反射材に含まれる、あるいはそれらの表面に付着している放射性物質の崩壊によって生じる事象が背景事象の主たる原因となりうることが判明した。

その背景事象を検出器自身自身で判別することで観測感度を保証するアイデアがシンチレーションフィルムと NaI(Tl) 結晶を組み合わせたハイブリッド検出器で、本研究はこれの開発を目的とする。図 1 にこの検出器の概略図と検出原理の概要を示す。

3. 研究の方法

本研究協力者である伏見賢一氏を代表とする PICOLON グループによる先行研究で開発された純化手法によって、現在世界で最も放射性不純物の少ない NaI(Tl) 結晶の開発に成功しており、この純度を再現した円柱型 3 インチ NaI(Tl) 結晶を作成する。この側面に、シンチレーションフィルムを $200\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ そして比較対象としてまかないのもの 3 種類を 2021 年度と 2022 年度に用意し、それらを極低放射能対策のなされた無酸素銅で作成した両面呼出し型のハウジングに環境放射線混入を極限まで抑えた環境下で収めた。

シンチレーション光を読みだすため、ハイブリッド検出器の両読み出し面に極低放射能化対策を行った 3 インチ光電子増倍管を取り付け、波形取得可能な FADC で信号を記録するシステムを構築した。

このような測定を行うにあたり、地上では宇宙線 μ 粒子による放射化の影響があるので、神岡地下実験出内に用意した鉛シールド内での観測を行なう。放射線源によるエネルギー校正や長期にわたる内部放射線計測を行って性能を評価する。

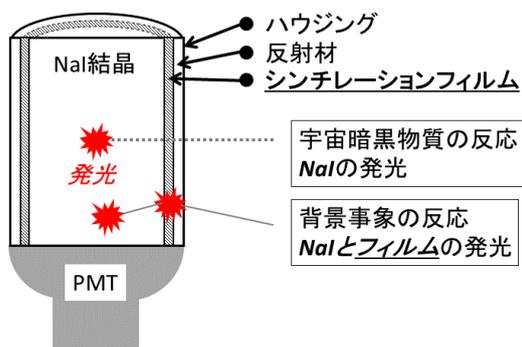


図 1 本研究で開発する検出器の概略図



図 2 作成した検出器の写真

4. 研究成果

作成したハイブリッド検出器を図 2 に示す。シンチレーション光の発光を効率的に観測できるとの予測のもと 3 インチの円柱の両底面に窓を取り付ける設計にする。

極低放射能環境を実現するために、シンチレーションフィルムに含まれる放射性不純物量を事前に測定することが重要である。その観測方法として ICP-MS を利用することになったが、従来の前処理方法では十分な観測感度は得られないため、高感度で観測するための分析手法の開発を行った。シンチレーションフィルムの主成分は炭化水素で、大量のフィルムを一度に灰化することで含まれている不純物を濃縮し再現性のよい計測を行うための手法を新たに確立させ、有機物から高感度で不純物量を計測することを可能にした。[1] これは本研究から派生した副次的かつ画期的な研究成果であり、極低放射能環境可下でしか観測できないような実験の観測感度向上に大いに貢献すると期待される。

データ取得は検出器の両窓面に極低放射能化対策がなされた 3 インチ光電子増倍管を取り付け、シンチレーション光の波形信号を FADC で記録するシステムを構築した。当初は波形取得に時間分解能が 0.5 [nsec] の Capacitor Array を用いる計画であったが、多チャンネルデータ取得を行ったときにデータ取得に失敗する事象が頻発したため、時間分解能が 4 [nsec] と劣るが安定して動作する実績のあった FADC を用いてデータ取得を行った。放射線源による発光観測を行った結果、作成した結晶の両底面から観測される光量を比較したところ、明らかな差がみられるという結果が得られた。原因は今のところ不明であるが、結晶をハウジング内に配置する過程において結晶の中心とハウジングの中心がずれており、窓と結晶底面までの距離が上下で差が生まれたことが考えられる。観測される光量の差は宇宙暗黒物質を観測するにあたりエネルギー校正から生じる系統誤差の原因となりうるので、今後はハウジングの精度を向上させる対策が必要である。両面読み出しによる発光量観測の効果は大きくエネルギー分解能の向上が観測された。図 3 に一例として ^{137}Cs 密封線源を用いたエネルギー校正の結果を示す。線源からの 662 [keV] ガンマ線全吸収に対応するピークで、片面だけを用いたエネルギー分解能は標準偏差で 5.3% (Window0, 青線) 5.7% (Window1, 赤線) だったのが、両方合計した解析によって 4.7% (Combine, 黒線) に向上した。エネルギー分解能は宇宙暗黒物質探索感度に直接影響を与えるのでシンチレーション光を多く取得できる形状の検出器にすることで期待される通りの結果が得られた。

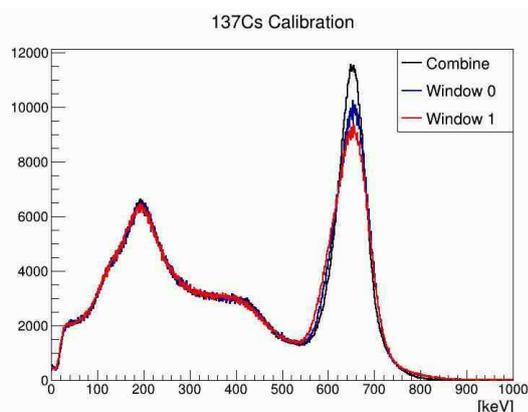


図 3 放射線源によるエネルギー校正 (^{137}Cs)

発光時間の早いシンチレーションフィルムと発光時間の遅い NaI(Tl)結晶が同一検出器内で観測可能か確かめることを目標として波形記録を取得したが、使用した FADC の時間分解能 4 [nsec]であったため、発光時定数が数 10 [nsec] 程度のシンチレーションフィルムからのシンチレーション信号は結果として数点しか保存されず、波形識別を行うためのデータ数として不十分であった。さらに原因は不明であるが、観測に使用した鉛シールドを組み立てた場所を水平にするために床に設置したステンレス板にかかる荷重が変化するとともに大きなグラウンドノイズが発生するという事象が観測された。それはグラウンドレベルを変動させデータ取得のトリガーレートが爆発的に増加するところがたびたび発生した。そのような理由により、グラウンドノイズの変動と、ハイブリッド検出器から得られた信号からシンチレーションフィルム発光成分の明確な区別をすることができなかった。ただし、NaI(Tl)結晶の発光に加えてシンチレーションフィルム発光が含まれているのではないかと考えられる信号も記録されていたので、これらについての対策を行えばシンチレーション光を分離する観測が可能になるのではないかと考えられる。

本研究ではシンチレーションフィルムと NaI(Tl)結晶を組み合わせたハイブリッド検出器による宇宙暗黒物質探索の可能性についての原理検証を行った。このような組み合わせの検出器が宇宙暗黒物質の観測を妨げるような放射性不純物を含まないよう構築可能であることや、長期観測を行うにあたり検出器の安定性が担保されることは確認された。検出器由来や外部由来の背景事象選別のためには、測定環境やデータ取得精度の向上が必須であることが判明した。

参考文献

[1] K. Ichimura et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2024 (ptae071),

DOI: 10.1093/ptep/ptae071

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ichimura K, Chiba K, Gando Y, Ikeda H, Kishimoto Y, Kurasawa M, Nemoto K, Sakaguchi A, Takaku Y, Sakakieda Y	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a method to measure trace level of uranium and thorium in scintillation films	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptae071	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔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
---------	---------