

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：32702

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K13949

研究課題名(和文)原子核乾板中のナノ半導体の発光を用いた暗黒物質反跳原子核の飛跡探索法開発

研究課題名(英文)Development of sub-micron track search method for dark matter recoil nuclei with luminescence of nano-semiconductors in nuclear emulsion

研究代表者

白石 卓也 (Shiraishi, Takuya)

神奈川大学・理学部・助教

研究者番号：00866121

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)：銀河系内の暗黒物質によって期待される数十keV程度の反跳原子核の方向を検出するために、我々は超高分解能の原子核乾板飛跡検出器NITを用いた実験を推進している。NIT中に高密度で分散されたAgBr:I半導体ナノ結晶は、一粒一粒が荷電粒子の飛跡を記録するセンサーであると同時に、高効率な発光も起こる。本研究の最終目標は、反跳原子核の飛跡を発光から位置特定することで、光学顕微鏡のみでの飛跡探索の解析速度限界を超えた探索方法を確立することである。それに先立ち、本課題ではNITの発光情報を引き出すための検出技術の開発に加え、エネルギー損失量の異なる様々な荷電粒子を照射した際の発光応答の基礎研究を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙全体のエネルギーの約1/4を占める暗黒物質は、宇宙の進化において欠かすことのできない未知の重力源であり、直接探索によるその粒子的性質の解明が自然科学における最重要課題の一つとなっている。本研究は、天文学的運動方向の決定が可能な暗黒物質探索を目指すものであり、これまでとは全く異なる証拠を示すことができる。さらに、本手法はAgBr:Iナノ結晶の発光情報の付与という従来の原子核乾板解析技術の延長ではない全く新しい方法であり、100 nmスケールの飛跡の大規模解析という困難さを補うために、観測可能なあらゆる荷電粒子応答を活用しようというアプローチである。

研究成果の概要(英文)：In order to detect the direction of recoil nuclei in the tens of keV scale expected by dark matter (DM) in the Milky Way galaxy, we are promoting a DM search experiment using an ultra-high resolution nuclear emulsion plate (NIT). The NIT comprises AgBr:I crystals with a high density, each crystal acts as a sensor to visualize the trajectory of charged particles with a spatial resolution of 100 nm, and also occur the luminescence in the same crystal. The final goal of this study is to establish a new search method for locating the track of recoil nuclei from their luminescence, thereby exceeding the analysis speed limit by using only an optical microscope. Prior to that, this project aims to develop the detection techniques for extracting NIT luminescence information, and study on basic characteristics for the luminescence when charged particles with different energy losses was exposed.

研究分野：素粒子実験

キーワード：暗黒物質直接探索 原子核乾板 ナノ粒子発光 粒子識別

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

暗黒物質は、宇宙背景放射の温度揺らぎ、宇宙大規模構造、重力レンズ、銀河の回転速度などの様々な宇宙スケールにおける観測からその存在が絶対的なものとなっている。これらの観測結果をうまく説明するモデルとして非相対論的な運動をする冷たい暗黒物質 (Cold Dark Matter, CDM) が有力である。しかし、その粒子的な性質は未知であり、直接探索による性質解明が現在の自然科学において最重要課題の一つとなっている。

我々は、原子核を反跳する暗黒物質候補 WIMP に対し、その到来方向が固体検出器として唯一決定可能な超微粒子原子核乾板 NIT を用いて、WIMP の天文学的運動方向の決定というこれまでとは全く異なる証拠を示すことのできる探索を目指している。しかし、その解析は光学飛跡読取装置の速度制限や、光学像のぼやけによる識別能の低下を受け、非常にチャレンジングな状況である。本研究では、NIT 中の AgBr:I 半導体ナノ結晶の発光現象に着目し、従来の飛跡情報に加えて新たな発光情報を併用することで、NIT の持つ約 100 nm の空間分解能を維持したまま大質量かつ低バックグラウンドで原子核飛跡探索を行う手法を開発している。

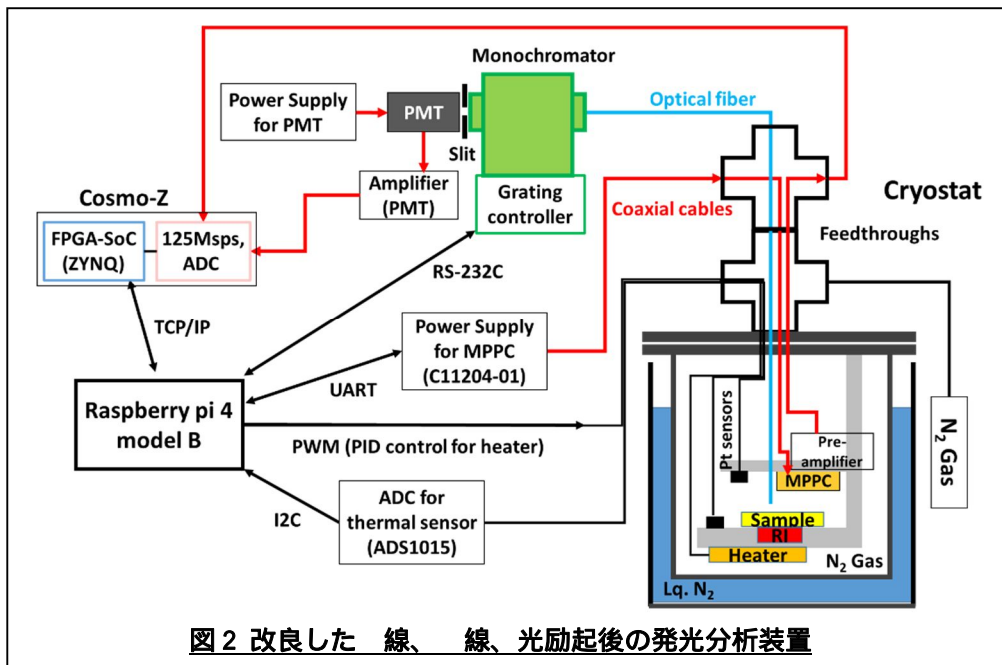
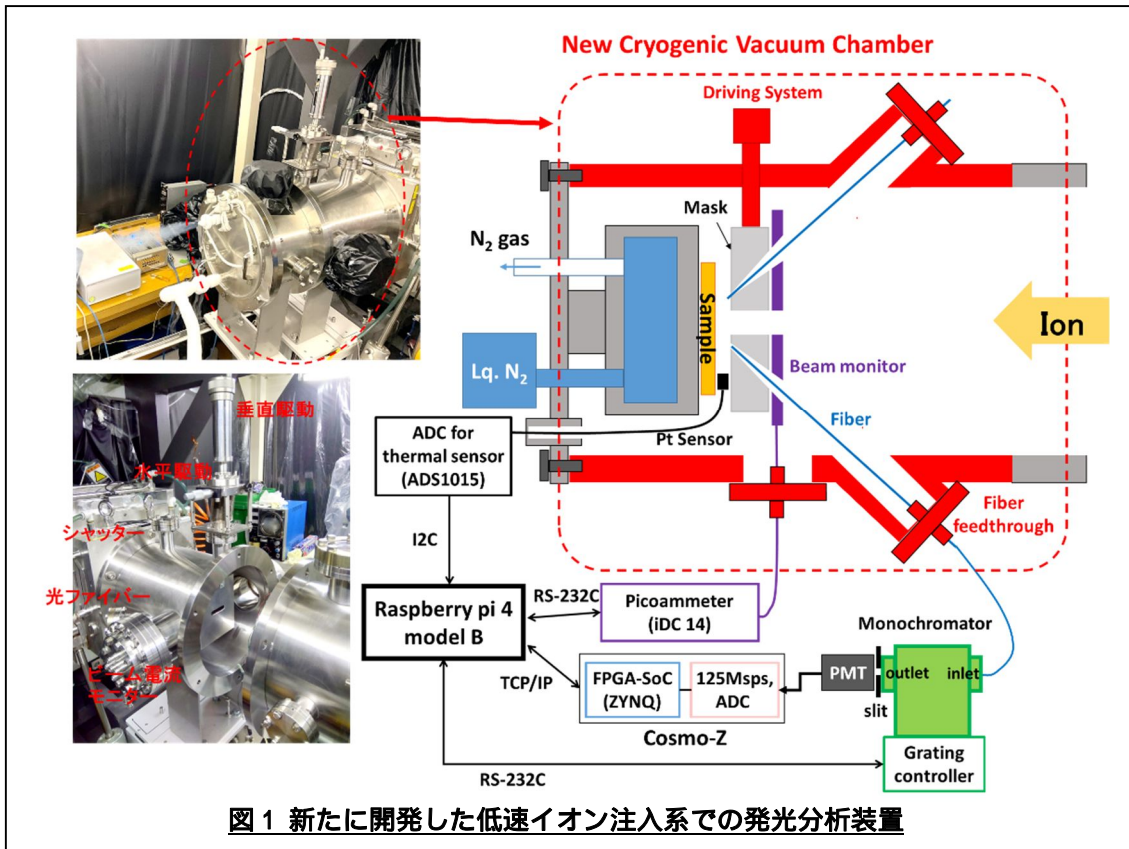
### 2. 研究の目的

NIT 中に高密度に分散された AgBr:I 結晶は、一粒一粒が飛跡を構成するナノ半導体の荷電粒子センサーである。AgBr:I 結晶内の励起電子は飛跡形成に寄与するだけでなく、液体窒素温度では NaI:Tl シンチレータに匹敵する高効率な発光にも寄与する [1]。本研究課題はこの発光の基礎研究を行うものであり、将来的に反跳原子核飛跡の記録された位置を発光から絞り込み、その周辺を自動飛跡読取装置で重点的に解析することで、方向感度を持った WIMP 探索に必要な 100nm の空間分解能を保持しつつ、飛跡読取装置の解析速度制限を超えた規模拡大を目指す。また、従来持ちえなかった時間分解能の付与や、発光特性 (発光スペクトルや時定数) から粒子識別能向上も期待できる。

### 3. 研究の方法

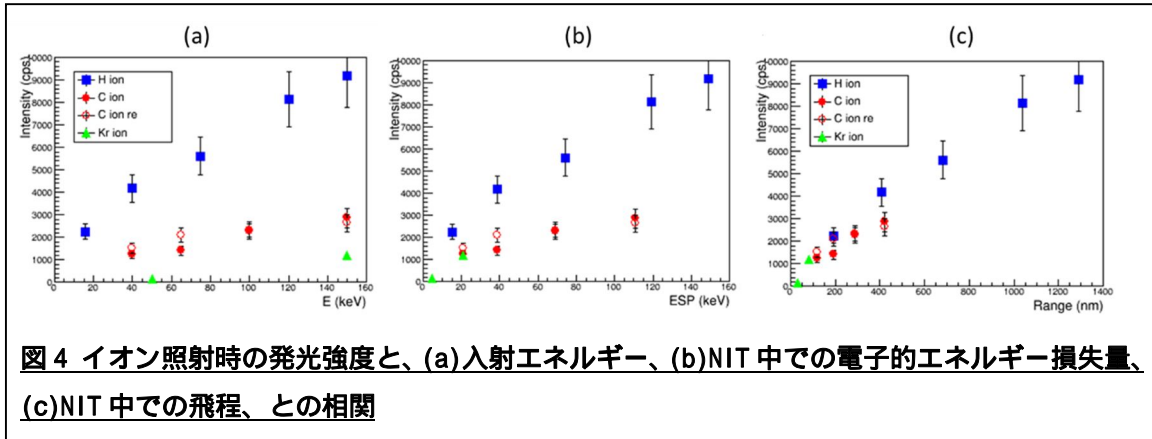
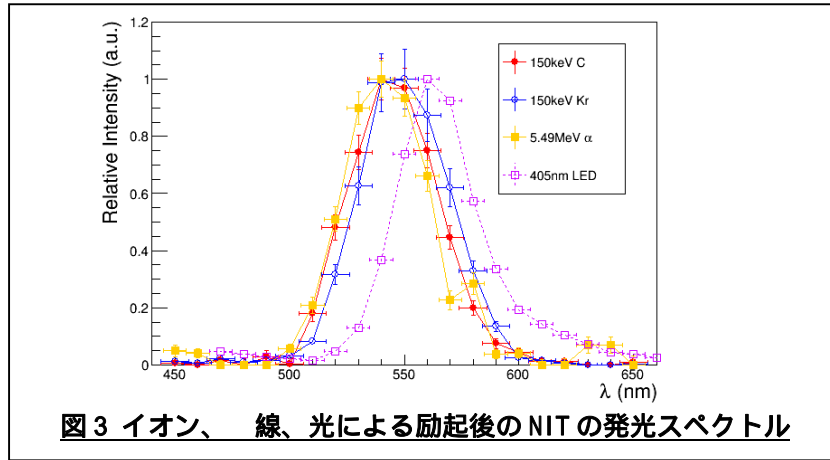
AgBr:I 結晶の発光応答として、当初は線とフォトルミネッセンスでのみしか確認できていなかったため、反跳原子核により近い信号として低速イオンを用いた発光分析を行った。図 1 に示すように、液体窒素温度で照射可能な神奈川大学のイオン注入装置に、新たに独自設計した発光分析用拡張チャンバーを導入し、イオン照射に同期した発光分析が行える装置を開発した。また、ビーム電流の不定性を補うためのビームモニターや、発光スペクトル自動測定のための分光器への波長駆動モーター、サンプル照射位置を変えるための 2 軸駆動、などを導入し、測定系全体を通信制御することで解析の精密化および効率化を行った。

次に、バックグラウンドとして考えられているゼラチン中の C14 由来の線に対して、発光特性からの粒子識別の検証を行った。文献 [1] で開発した装置を改良し、図 2 のような分析装置を構築した。液体窒素温度で冷却したチャンバー内で動作可能な MPPC 用高速トランスインピーダンスアンプを新たに開発し、回路ノイズを大幅に抑制することで 1 p.e. レベルの発光を検出可能にすると同時に、高速な発光応答の測定も可能にした。また、図 1 と同様に波長スペクトルスキャンの自動化を行い、さらにヒーターを PID 制御することでサンプルの温度コントロールの効率化を行った。Am241 からの 5.48 MeV の線と、K40 からの 1.31 MeV (Q 値) の線を用い、エネルギー損失量 (dE/dx) の違いによる発光特性の違いを調べた。



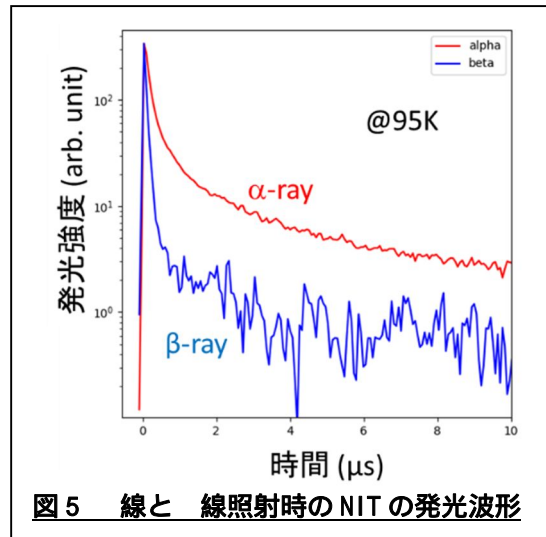
#### 4. 研究成果

図 1 の装置を用いて、反跳原子核疑似信号として 10 - 200 keV の H, C, Kr イオン照射時の NIT の発光応答を分析した。図 3 に示すように、これらの発光は 線照射時と同様であり、フォトルミネッセンス (405 nm の LED 励起) では観測されなかった 540 nm の発光が主成分であることが分かった。発光強度については、イオンのエネルギー損失量よりも、NIT 中での飛行に大きな相関があることが分かった。イオンのようにエネルギー損失量が多い場合は、AgBr:I ナノ結晶当たりの発光量が飽和しており、結晶を何個貫通したかに依存するものと考えられる。



次に、図2の装置を用いて測定した線と線の発光時定数を図5に示す。NITの発光は速い発光と遅い発光の2成分があり、それらの発光強度比が線と線では異なることが明らかとなった。これはエネルギー損失量の違いに起因したものと考えられ、波形弁別による粒子識別への応用が期待できる。

以上のように、NIT中のAgBr:Iナノ結晶の荷電粒子応答として、発光という新たな情報を引き出すための装置開発を行い、その基礎特性を調べるといふ当初の目的を達成した。今後については、図1, 2の装置を用いて線より重いイオンと線の発光特性をより詳細に調べ、どの程度の粒子識別が可能かを明らかにすると同時に、MPPCの多チャンネル化や、NIT内のC14の低減など、より実用的な実験運用を目指す。



<参考文献>

[1] T. Shiraishi, H. Ichiki, and T. Naka, "Study on luminescence of fine-grained nuclear emulsion by charged particles", Nucl. Inst. Meth. A 927, 202 (2019)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 白石卓也, 星野靖, 関祐平, 問仁田省吾
2. 発表標題 原子核乾板中のAgBr: I微結晶の発光の研究
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 T. Shiraishi
2. 発表標題 Environmental neutron measurement at the Gran Sasso laboratory in the NEWSdm experiment
3. 学会等名 8th CYGNUS Workshop on Directional Recoil Detection ( (国際学会) )
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 白石卓也
2. 発表標題 サブミクロンの空間分解能を持つ飛跡検出器を用いたkeVからGeVエネルギースケールのイオンビームと中性子の研究
3. 学会等名 第33回日本MRS年次大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 白石卓也, 赤松咲耶, 中竜大, 浅田貴志, V. Tioukov, G. De Lellis, G. Rosa, 小林龍太, 佐伯加奈, 陳夏姫, ガウディ由莉香, N. D'Ambrosio, A. Alexandrov, 佐藤修, 他NEWSdmコラボレーション
2. 発表標題 グランサッソ研究所での超微粒子原子核乾板を用いた環境中性子スペクトル測定
3. 学会等名 日本物理学会 2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 白石卓也、赤松咲耶、中竜大、浅田貴志、V. Tioukov、G. Rosa、小林龍太、G. De Lellis、佐藤修、久下謙一、他NEWSdmコラボレーション
2. 発表標題 超微粒子原子核乾板を用いたグランサッソでの環境中性子測定
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白石卓也、赤松咲耶、中竜大、浅田貴志、小林龍太、佐伯加奈、森崎紘明、佐藤修、久下謙一
2. 発表標題 超微粒子原子核乾板を用いた環境中性子測定(2)～グランサッソランの物理解析～
3. 学会等名 日本物理学会 第77回年次大会(2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 白石卓也
2. 発表標題 低速イオン照射による数十nmのAgBr: I結晶中での飛跡形成及び発光の研究
3. 学会等名 第22回「イオンビームによる表面・界面の解析と改質」特別研究会
4. 発表年 2021年

〔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
---------	---------