

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13567

研究課題名（和文）高圧キセノンを用いた方向感度と大質量を両立する究極の暗黒物質探索実験の原理検証

研究課題名（英文）High pressure xenon gas detector development for direction-sensitive dark matter search with large mass

研究代表者

中村 輝石（Nakamura, Kiseki）

東北大学・理学研究科・助教

研究者番号：80750463

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：暗黒物質検出において、大質量と方向感度を両立できる手法として、高圧キセノンガスTPCで柱状再結合現象を応用する、というものがある。本研究では、5MeVの線で柱状再結合が起きることを確認した結果について論文にまとめた。また、低エネルギーの原子核反跳での柱状再結合の測定を視野に入れ、中性子ビーム試験を実施した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

柱状再結合現象が荷電粒子の角度に応じた変化があるかどうかは、検出器の新しい使い方をする上で興味深い測定と考えている。今回、5MeVの線での観測に成功しており、本研究期間中に系統的な誤差について評価を行い査読付き論文としての出版ができた点が1つ目の成果となる。また、実際の暗黒物質探索への応用を見据え、中性子ビーム試験の実施準備を完遂させた。コロナの影響で試験自体が本研究期間を少し過ぎてしまったが、試験によるデータ取得も問題なく実施することができた。

研究成果の概要（英文）：In dark matter search, there is a technique that can achieve both large target mass and directional sensitivity by applying columnar recombination phenomena in high-pressure xenon gas TPC. In this study, we report the results of confirming the occurrence of columnar recombination at 5 MeV alpha-rays. Neutron beam experiments were also conducted with a view to measuring columnar recombination at low energy nuclear recoil.

研究分野：希少事象探索

キーワード：ダークマター キセノンガス TPC 柱状再結合

### 1. 研究開始当初の背景

暗黒物質探索において、確度の高い手法として太陽系が銀河の中を移動していることに起因する暗黒物質の到来方向の偏りを検出するというものがある。暗黒物質による低エネルギーの原子核反跳の方向を取得するために、通常低圧ガス検出器での探索が行われるが、低圧であるため標的質量をたくさん用意するのが難しかった。高圧キセノンガス検出器における柱状再結合現象が角度依存性を持てば、この検出器を使って方向に感度を持つ暗黒物質探索がかのうとなり、高圧ガスであるため大質量化も可能である。この応用の提案は D. Nygren によってなされており、彼らのグループでは混合ガスを用いて電離信号の角度依存性の観測に成功している。しかしながら、発行信号がほとんど観測されなかったため、エネルギーと角度を両方の情報を取りだすことができず、このままでは暗黒物質探索への応用は厳しいという結論であった。再結合光は電子のドリフト時に発生するため、励起キセノンからの脱励起によるシンチレーション光よりも数  $\mu$  秒遅れて検出されると考えられる。そこで、PMT で得られる波形を速い成分と遅い成分に分け、遅い成分に着目した。5MeV の線については、飛跡の角度に応じて再結合光と電荷量が逆向きに变化する兆候を簡単な解析から得ることができている。

### 2. 研究の目的

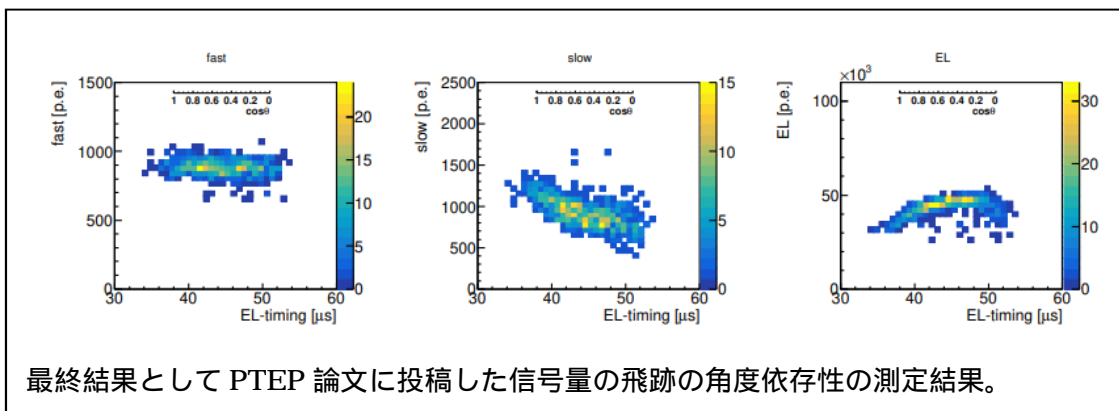
申請者は 5MeV の線について、飛跡の角度に応じて再結合光と電荷信号がそれぞれ逆向きに变化する様子を測定しているが、実験セットアップに起因する影響がいくつか未考慮であった。そのため、それらの影響をきちんと評価し、5MeV の線では柱状再結合現象が起きること、またその条件と程度を明確化することである。次に、低エネルギーの原子核反跳において柱状再結合現象が起きるかどうか確認するために、エネルギーが既知な中性子ビーム試験を実施する。このとき、高圧キセノンガス検出器を可搬なものとして新たに製作する必要がある。

### 3. 研究の方法

中性子の原子核反跳による柱状再結合を検証可能な高圧キセノンガス TPC (Time Projection Chamber) を開発する。中性子による原子核反跳を測定するときは、シンチレーション光のアクセプタンスがイベントごとに必要であり、原子核反跳がガス中のどこで起きたかを知る必要がある。そのため、電子の検出面はピクセル読み出しになっている。各ピクセルではエネルギー分解能のよい増幅過程である比例蛍光 (EL) を起こさせ、発生した光を MPPC 光検出器で検出する。再結合光を含むシンチレーション光は反対側に設置した VUV に感度のある PMT で直接検出する。数 keV の原子核反跳事象で発生するシンチレーション光の光子数は約 100 個程度と少ないため、検出効率を上げるために複数の PMT を配置し、ドリフト領域の壁面には VUV 光を反射する PTFE を用いる。ドリフト方向の位置決定はシンチレーション光と EL 光の時間差から求めることができる。高速中性子を照射し、電離電子と再結合光を測定する。

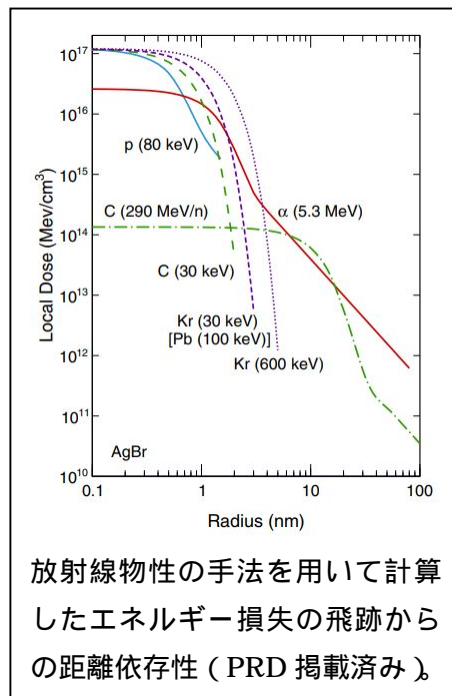
### 4. 研究成果

高圧キセノンガス検出器中での柱状再結合について、5MeV の線では飛跡の角度に応じて電離信号と再結合光が変化する測定の系統誤差として、線源の取り付け部であるドリフトプレーンへの電離電子の衝突による消失の影響を見積もる必要があった。そこで、電場が十分高い時の測定、すなわち再結合がほとんど起きない電場の状況での見かけの角度依存性を測定し、飛跡と電離電子の幾何学的な広がりには低電場でも同様になるとして補正を行った。シミュレーションでも同様の効果を確認できている。このとき、再結合光の電場依存性を測定しており、再結合光が電場依存がなくなった電場を用いて十分高いときの測定とした。これらの補正と誤差の見積りから、最終的な結果をまとめ、査読付き論文として出版した。



柱状再結合の理解のため、放射線物性の専門家と議論をすすめ、低エネルギーの原子核反跳モデルについての計算を実施した。メディアは当時の専門家も興味があったエマルジョンではあるが、最終的に投稿論文としてまとめた。放射線物性サイドからのアプローチとしては、現在では希ガスについての議論に発展した。

実際の暗黒物質探索への応用を見据え、中性子ビーム試験について説明する。エネルギーと方向とフラックスが既知な光速中性子源として、AIST(産総研)の中性子標準グループの中性子ビームラインを用いることを考えた。このビームラインは、床面がグレーチングになっており、ガンマ線バックグラウンド事象も少なく抑えることができる。ビーム試験を遂行するため、可搬な高圧キセノンガス検出器を開発した。压力容器とTPC ケージは別実験で使用していたものを使い、残り(PMT、MPPC、電離電子読み出し検出器面(ELCC)、回路、HV電源等)を調達・組立を行った。キセノンガスを導入しての試験において、全システムが問題なく組みあがり、実際にデータ取得を行うことができた。最終年度にビーム試験を実施予定であったが、コロナの影響でビーム試験自体は本研究期間を少し過ぎてしまったが、試験によるデータ取得も問題なく実施することができた。データについては現在精査中であり、近いうちに結果を公表予定である。



放射線物性の手法を用いて計算したエネルギー損失の飛跡からの距離依存性 (PRD 掲載済み)

左図：AIST でのビーム試験の様子。高圧キセノンガス検出器の全システムを準備し、問題なく稼働させることができた。

右図：検出器面の MPPC のゲインを求めるためのダークカウントの測定の様子。ゲイン測定は高圧キセノンガス検出器のデータの中でも最も基礎的なものである。中性子ビーム照射の環境下においても、問題なくデータを取得することができた。以降の解析については、実験グループ内で結果を評価してから公表予定である。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Nakamura Kiseki D, Miuchi Kentaro, Kazama Shingo, Shoji Yutaro, Ibe Masahiro, Nakano Wakutaka	4. 巻 2021
2. 論文標題 Detection capability of the Migdal effect for argon and xenon nuclei with position-sensitive gaseous detectors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 013C01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa162	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 該当する

1. 著者名 Ban S, Hirose M, Ichikawa A K, Iwashita Y, Kikawa T, Minamino A, Miuchi K, Nakadaira T, Nakajima Y, Nakamura K D, Nakamura K Z, Nakaya T, Obara S, Sakashita K, Sekiya H, Sugashima B, Tanaka S, Ueshima K, Yoshida M	4. 巻 2020
2. 論文標題 Design and performance of a high-pressure xenon gas TPC as a prototype for a large-scale neutrinoless double-beta decay search	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 033H01
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/ptep/ptaa030	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 -

1. 著者名 K.D. Nakamura, S. Ban, M. Hirose, A.K. Ichikawa, Y. Ishiyama, A. Minamino, K. Miuchi, T. Nakaya, H. Sekiya, S. Tanaka and K. Ueshima	4. 巻 13
2. 論文標題 Angular dependence of columnar recombination in high pressure xenon gas using time profiles of scintillation emission	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P0715
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/13/07/P07015	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 -

1. 著者名 Hitachi Akira, Mozumder A., Nakamura Kiseki D.	4. 巻 105
2. 論文標題 Energy deposition on nuclear emulsion by slow recoil ions for directional dark matter searches	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review D	6. 最初と最後の頁 063014-1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevD.105.063014	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 該当する

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 中村輝石、市川温子、中家剛、小原脩平、潘晟、吉田将、中村和広、菅島文悟
2. 発表標題 高压キセノンガス検出器による原子核反跳の測定
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村輝石、身内賢太郎、伊部昌宏、風間慎吾
2. 発表標題 ガス検出器を用いたミグダル事象の観測可能性について
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kiseki Nakamura, A.K. Ichikawa, T.Nakaya, T.Kikawa, S.Obara, Y. Ishiyama, S.Ban, S.Tanaka, K.Z.Nakamura, M.Yoshida, M.Hirose, Y.Iwashita, A.Minamino, H.Sekiya, Y.Nakajima, K.Ueshima, K.Miuchi, K.Sakashita, T.Nakadaira
2. 発表標題 Columnar recombination study in high pressure xenon gas for direction-sensitive dark matter search
3. 学会等名 DBD18 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kiseki Nakamura for the AXEL collaboration
2. 発表標題 Angular dependence of columnar recombination in high pressure xenon gas using time profile of scintillation emission
3. 学会等名 XeSAT2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

ミグダル観測検討会2020  
<https://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~newage/migdal2020/index.html>  
<https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/Neutrino/AXEL/index.html>

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