

平成 31 年 4 月 26 日現在

機関番号：14501

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2014～2018

課題番号：26104005

研究課題名(和文)低バックグラウンド技術を応用した方向感度をもつ暗黒物質探索の基礎研究

研究課題名(英文)Direction-sensitive dark matter detector R&amp;D with low-background technologies

研究代表者

身内 賢太郎(Miuchi, Kentaro)

神戸大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80362440

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 51,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、新学術研究領域「地下素核研究」の計画研究の1つとして遂行、領域の技術的な基盤である「低バックグラウンド技術」を方向に感度を持つ暗黒物質探索へと応用するための基礎研究を目的とした。当初の予定通り、低バックグラウンド検出器(ガス検出器・原子核乾板)の開発に成功、地下実験室にて方向に感度を暗黒物質探索実験を行い、これまでよりも約1桁強い制限を与えた。また、バックグラウンド研究の一環として行った地下環境での中性子測定は、領域内の連携を得て新たな研究へと発展した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙を構成する物質のうちで、我々の知っている物質の5倍以上存在すると言われながらもその正体が不明の「暗黒物質」。その正体解明は、宇宙の大きな謎として宇宙物理・素粒子物理に課せられた大きな課題であり、「宇宙は何からできているのか」という根源的な問いに対する挑戦である。本研究は、「暗黒物質」正体解明に重要である方向に感度を持つ手法について、新学術領域の基盤技術「低放射能技術」を取り入れることで、約10倍の感度で探索するという成果を得た。

研究成果の概要(英文)：This research program aimed to apply low background technologies for direction-sensitive dark matter search experiments. The low background technologies are the backbone technologies in the innovative area grant-in-aid "revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research", where this project was one of the planned research programs. Low background detectors (gas detectors and nuclear emulsion detectors) were developed as planned. A direction-sensitive dark matter search experiment in Kamioka underground laboratory provided dark matter limits about one order of magnitude more stringent than previous direction-sensitive limits. Ambient neutron flux in Kamioka underground laboratory was measured as one of the background studies and this activity attracted the researchers working on other experiments in Kamioka.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：暗黒物質 地下実験 低放射能技術 粒子検出器 宇宙線実験 素粒子実験

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

2002年以降、宇宙の組成の約1/4は暗黒物質であることが様々な宇宙観測などによってはっきりとした。その後、宇宙からの電子、陽電子、ガンマ線の観測、CERNのLHC実験によっても、暗黒物質の正体解明に向けての研究の進展が期待された。これらは暗黒物質の対消滅や崩壊観測を手段としており、「間接探索実験」や「加速器実験」と呼ばれる。一方、暗黒物質との弾性散乱で原子核に与えられたエネルギーを測定する「直接」探索実験も大きく進展していた。DAMAグループは2013年に、暗黒物質起源と考えられる計数率の7周期の季節変動（検出器改良前を合わせると14周期）を捉えたことを報告した。CDMSグループなどの発見可能性を示唆や、XENONグループのSUSY領域への感度到達など、直接探索実験による発見可能性は現実的なものになってきていた。このような状況の下で、大質量検出器実験による示唆を決定的な証拠へと繋げることを目して、方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験のための検出器開発が世界各地で進められていた。

方向に感度を持つ暗黒物質探索実験は、その有用性は認識されながらも、技術的困難さから実現されてこなかった。NEWAGEは日本独自の技術、マイクロピクセルチェンバーを初めて暗黒物質探索実験に応用することで、世界に先駆けて当該分野を切り拓き、唯一の制限を与えていた。最先端の技術を用いて開始した研究であるため、これまで原理実証を最優先し、低バックグラウンド化の重要性は認識しながらも十分な対策はとっていないという状況であった。2007年より地下実験を開始、研究開始当初は「低BG実験」への発展段階であった。

### 2. 研究の目的

本研究では、方向に感度を持つ暗黒物質研究の為の低バックグラウンド(BG)化による基礎研究を行う。低BGのガス検出器( $\mu$ -PIC)製作を軸として、大質量化が可能な原子核乾板の開発を合わせて行い、将来の為の基礎研究もカバーする。製作した低BGの $\mu$ -PICを用いて、神岡地下実験室での観測を行い、既存の方向に感度を持つ暗黒物質探索の制限を一桁上回った感度で探索することを目的とした。また、同じくガスを用いた手法ながら、ガス種類を変えたスピんに依存しない暗黒物質の探索の検討および大質量化を可能とする原子核乾板の開発も合わせて行う。

### 3. 研究の方法

本研究は、低BGガス検出器の $\mu$ -PIC製作(1)を軸として、スピんに依存しない暗黒物質探索の検討(2)と大質量化を可能とする原子核乾板の開発(3)を合わせて行う。いずれも、方向に感度を持った暗黒物質探索を将来目標として持つ。

- (1) ガス検出器を用いた研究では、過去の研究によって装置内部のバックグラウンドが暗黒物質に対する感度を制限していることが判明している。まず、既存装置のバックグラウンド源の同定及び定量化を行い、低バックグラウンド材料の選択を行う。選択された材料を用いて試作機を製作、試作機の動作試験・性能評価からのフィードバックをかけて実機の製作を行う。最終的に、実機を用いた神岡地下実験室での暗黒物質探索実験という順で研究を進める。
- (2) (1)の手法では検出器に使用するガスの性質上、これまでに実績のあるスピんに依存した暗黒物質探索を進めるが、一方でスピんに依存しない暗黒物質探索も重要である。このために、大型化の観点からこれまで積極的に使用してこなかったアルゴンガスやキセノンガス等を用いた研究を行い、将来のための基礎研究とする。
- (3) (1)の手法は、3次元飛跡が取得可能という特徴を得るために、暗黒物質への標的としてガスを用いる。このため、標的物質の質量が稼げないという問題がある。この問題を克服する手法の一つとして、固体検出器（密度：3.3g/cm<sup>3</sup>）かつ数10nmの超微粒子ハロゲン化銀結晶で構成される原子核乾板による手法がある。原子核乾板の開発に関しては、暗黒物質検出器として重要となる原子核反跳の検出が実証された段階である。その性能評価及びバックグラウンドの見積もりを行い、低バックグラウンド化の研究へと進めてゆく。

### 4. 研究成果

(概要) 本研究は、新学術研究領域「地下素核研究」の計画研究の1つとして遂行、領域の技術的な基盤である「低バックグラウンド技術」を方向に感度を持つ暗黒物質探索へと応用するための基礎研究を目的とした。当初の予定通り、低バックグラウンド検出器（ガス検出器・原子核乾板）の開発に成功、地下実験室にて方向に感度を持つ暗黒物質探索実験を行い、これまでも約1桁強い制限を与えた。また、バックグラウンド研究の一環として行った地下環境での中性子測定は、領域内の連携を得て新たな研究へと発展した。

- (1) ガス検出器を用いた方向に感度を持つ暗黒物質探索実験（論文①、⑥、⑧、⑨、⑩、⑫ 発表①）

既存の装置を用いた方向感度を持つ暗黒物質探索実験の結果を解析、それまでの方向感度を持つ制限を更新するとともに、バックグラウンド源の特定を行った[論文⑩、⑫]。この結果、飛跡読み出しに用いている2次元画像装置「 $\mu$ -PIC」中に含まれる放射性同位体の崩壊で放出される $\alpha$ 線が大きなバックグラウンドとなっていることが判明した。中でも材料中のポリイミド樹脂を強化するために用いられているガラス中にこうした放射性同位体が含まれていた。

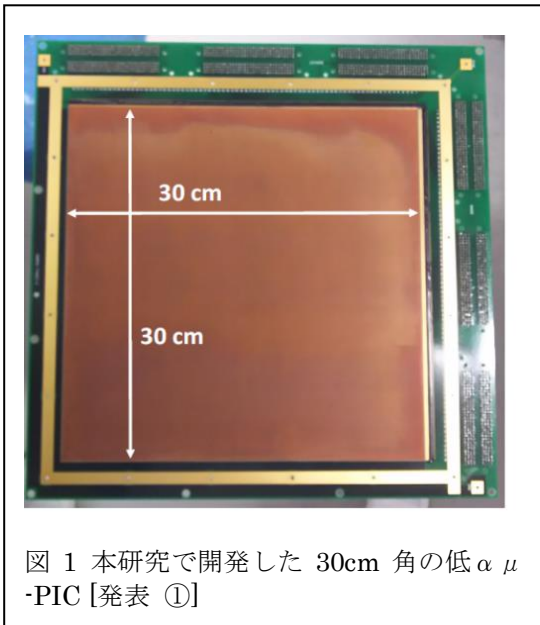


図 1 本研究で開発した 30cm 角の低  $\alpha$   $\mu$ -PIC [発表 ①]

強化のためのガラスを含まないポリイミド樹脂を選択、高純度ゲルマニウム検出器などによって放射性不純物の含有量が少ないことを確認した。この材料を用いた  $\mu$ -PIC ( $\alpha$ 線の放出量が少ないため、「低  $\alpha$   $\mu$ -PIC」と命名)の試作機(10 cm角)を試作、製作上の問題がないこと及び検出器としての性能に問題がないことを確認した。

同じ材料を用いて実機(30cm角)の低  $\alpha$   $\mu$ -PICを製作(図1)、性能評価を行った[論文⑥]。その後神岡地下実験室の装置に組み込んで暗黒物質探索実験を行った。約100日の観測を行い、方向に感度を持つ暗黒物質に対する制限を約1桁更新した(図2)[発表①]。検出器の低バックグラウンド化および感度の1桁更新という当初の目標を達成した。

(2) ガス検出器を用いた方向に感度を持つ暗黒物質探索実験のスピンに依存しない暗黒物質への展開(論文①、④ 発表②、④)

(1)で得られる制限は、暗黒物質と核子とのスピンに依存した散乱断面積である。同じ実験からスピンに依存しない制限も得られるが、さらに感度を高めるために、アルゴンガスやキセノンガスの使用を検討した。いずれも柱状再結合という現象を用いた圧力の高いガス中での粒子の方向感度に関する基礎実験を行い、一定の成果を得た(論文④、発表④)。また、アルゴンガスの使用にあたっては電子拡散が常に問題になるため、電子拡散の測定を行い、1電子については理論通りの値が得られ、複数電子が寄与する場合には統計的位置分解能が改善するということを確認した(論文①)。スピンに依存しない反応に有利なガスの検討を行うという当初目標を達成した。

(3) 方向に感度を持つ暗黒物質探索実験のための低バックグラウンド原子核乾板開発(論文②、⑤、⑦、⑨、⑪ 発表②)

原子核乾板の開発としては、この手法の原理的なバックグラウンドの理解を第一に行った[論文⑪]。この結果、検出器に内在する放射性不純物に由来する中性子事象は十分に低いことが判明した。さらに電子事象を低減するための指針を得た。

暗黒物質探索に重要である低エネルギー原子核反跳事象をとらえるために、粒径の細かい乳

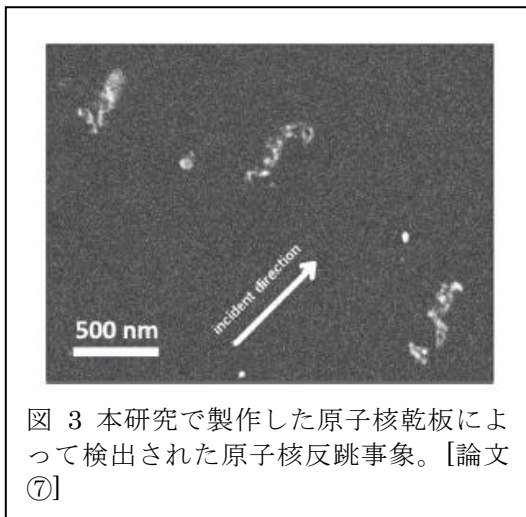


図 3 本研究で製作した原子核乾板によって検出された原子核反跳事象。[論文 ⑦]

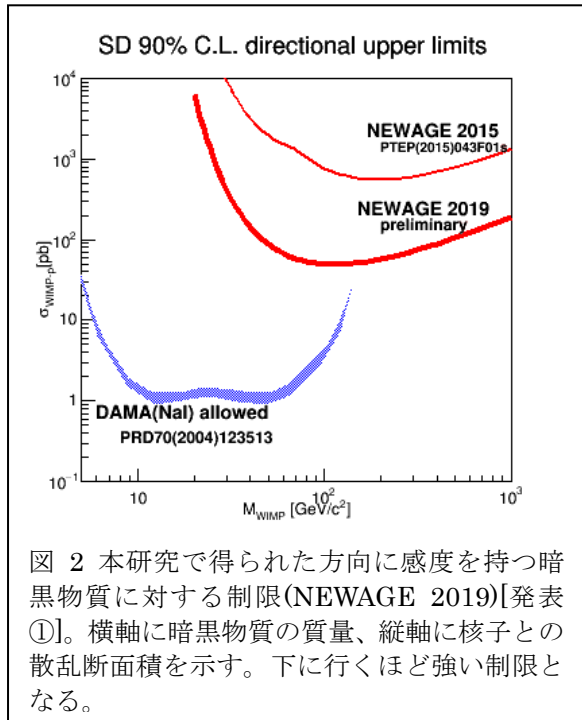


図 2 本研究で得られた方向に感度を持つ暗黒物質に対する制限(NEWAGE 2019)[発表 ①]。横軸に暗黒物質の質量、縦軸に核子との散乱断面積を示す。下に行くほど強い制限となる。

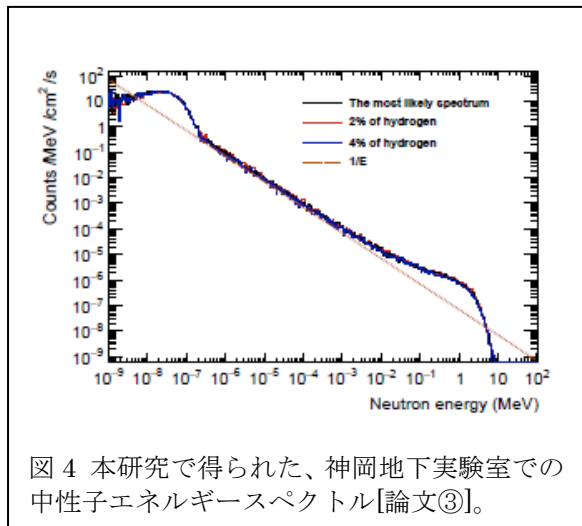


図 4 本研究で得られた、神岡地下実験室での中性子エネルギースペクトル[論文③]。

剤の開発を行い、性能評価を行った[論文⑦]。この結果図3に示す通り、 $1\mu\text{m}$ 以下の原子核飛跡まで検出可能であることが確認された。こうした原子核乾板の性能を踏まえて、暗黒物質発見の可能性を論じた[論文⑤]。また、さらなる感度向上のために新たな手法「プラズモン」を用いた読み出し方法を考案、原理実証を行い将来への重要な技術発展を得た[論文②]。これらにより、原子核乾板を用いた手法に関しても当初の予定通りの成果を得ることができたと言える。上記の原理実証を元に、イタリア・グランサッソ研究所でのデバイス製造含めた実験環境の構築とパイロット実験を行うフェーズへ移行した。

#### (4) 地下実験室における中性子束測定 (論文③ 発表③)

暗黒物質直接探索実験において、環境中性子はその反応が暗黒物質事象と区別がつかないため深刻なBG源となる。本研究では(論文③)。本研究では(1)の測定を行う神岡地下実験室における環境中性子を測定した。本研究では岩盤中の放射性不純物及び水分量に着目、測定結果とシミュレーションを合わせて、これまでに得られていなかった中性子のエネルギースペクトルを得ることに成功した(図4)。このエネルギースペクトルから計算される中性子束は過去の測定と矛盾ない結果であった。本研究は当初の予定にはなかったが、新学術領域研究の領域内連携から生まれた研究であり、予定以上の成果である。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計11件 (全27件中))

- ① Kentaro Miuchi, … (全16名), “Development of a time projection chamber with a sheet-resistor field cage”  
Progress of Theoretical and Experimental Physics accepted,  
<https://arxiv.org/abs/1903.01663> (査読有)
- ② Atsuhiko Umemoto, Tatsuhiko Naka, Andrey Alexandrov and Masahiro Yoshimoto, “Super resolution plasmonic imaging microscopy for submicron tracking emulsion detector”  
Progress of Theoretical and Experimental Physics 2019, 013D02 (2019),  
<https://arxiv.org/abs/1812.09528> (査読有)
- ③ Keita Mizukoshi, Ryosuke Taishaku, Keishi Hosokawa, Kazuyoshi Kobayashi, Kentaro Miuchi, Tatsuhiko Naka, Atsushi Takeda, Masashi Tanaka, … (全11名) “Measurement of ambient neutrons in an underground laboratory at Kamioka Observatory”  
Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2018, Issue 12, 1 December 2018, 123C01, doi:10.1093/ptep/pty133, (査読有)
- ④ K. D. Nakamura, S. Ban, M. Hirose, A. K. Ichikawa, Y. Ishiyama, A. Minamino, K. Miuchi, (全11名), “Angular dependence of columnar recombination in high pressure xenon gas using time profiles of scintillation emission”, 2018 J. Inst. 13 P07015, doi: 10.1088/1748-0221/13/07/P07015 (査読有)
- ⑤ NEWSdm collaboration (N. Agafonova et al., T. Naka 33番目) “Discovery potential for directional Dark Matter detection with nuclear emulsions”, Eur. Phys. J. C 78 (2018) 578, DOI: 10.1140/epjc/s10052-018-6060-1 (査読有)
- ⑥ Takashi Hashimoto, Kentaro Miuchi, (全10名), “Development of a low-alpha-emitting  $\mu$ -PIC for NEWAGE direction-sensitive dark-matter search”, AIP Conference Proceedings 1921, 070001 (2018) (査読無)
- ⑦ Takashi Asada, Tatsuhiko Naka, Ken-ichi Kuwabara and Masahiro Yoshimoto, “The development of super fine-grained nuclear emulsion”, Progress of Theoretical and Experimental Physics (2017)063H01, DOI: 10.1093/ptep/ptx076, (査読有)
- ⑧ Kentaro Miuchi “Radiation Detectors for Direct Dark Matter Search”, JPS Conf. Proc. 11, (2016) 040001, doi 10.7566/JPSCP.11.040001 (査読有)
- ⑨ J. B. R. Battat, I. G. Irastorza, … K. Miuchi (57番目), … T. Naka (63番目), … (全93名), “Readout technologies for directional WIMP Dark Matter detection” Physics Reports Volume 662, 29 November 2016, doi 10.1016/j.physrep.2016.10.001, (査読有)
- ⑩ 中村輝石、身内賢太郎、 「NEWAGE: 方向に感度を持つダークマター直接探索実験」、日本物理学会誌 第71巻 (2016年) 第7号 469頁 最近の研究から  
<http://www.jps.or.jp/books/gakkaishi/2016/07/71-07researches2.pdf>
- ⑪ Alexandrov, …, T. Naka (20番目) … (全27人), “Intrinsic neutron background of nuclear emulsions for directional Dark Matter searches”, Astropart. Phys. 80 (2016) 16–21, doi:10.1016/j.astropartphys.2016.03.003
- ⑫ Kiseki Nakamura, Kentaro Miuchi, … (全16名), “Direction-sensitive dark matter search with gaseous tracking detector NEWAGE-0.3b”, Progress of Theoretical and Experimental Physics (2015) 043F01s

[学会発表] (計3件 (全300件(国際会議49件、国内会議251件)))

- ① Kentaro Miuchi, “NEWAGE”, “Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2019”, 2019年
- ② Tatsuhiko Naka, “NEWSdm experiment ~Directional Dark Matter Search with Super-high

resolution Nuclear Emulsion〜”, “Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2019”, 2019年

③ 田中雅士、「中性子測定コンソーシアム」、「第五回極低放射能技術」研究会、2019年

④ 鈴木優飛、「アルゴンを用いた検出器の方向感度化に関する基礎研究」日本物理学会、第70回年次大会、2015年03月24日、早稲田大学

〔図書〕(計 1 件)

(近日刊) 朝倉書店「宇宙物理学ハンドブック」共著 「暗黒物質直接探査」の節を担当。

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

低バックグラウンド技術を応用した方向感度をもつ暗黒物質探索の基礎研究

[http://www.lowbg.org/ugnd/?page\\_id=49](http://www.lowbg.org/ugnd/?page_id=49)

NEWAGE

NEWAGE [http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~newage/newage\\_j.html](http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~newage/newage_j.html)

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：中 竜大

ローマ字氏名：(NAKA, Tatsuhiko)

所属研究機関名：名古屋大学

部局名：現象解析研究センター

職名：特任助教

研究者番号 (8桁)：00608888

研究分担者氏名：田中 雅士

ローマ字氏名：(TANAKA, Masashi)

所属研究機関名：早稲田大学

部局名：理工学術院

職名：准教授

研究者番号 (8桁)：30545497

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：中村輝石

ローマ字氏名：NAKAMURA Kiseki

※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、研究者個人に帰属されます。