

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：13901

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05446

研究課題名(和文)超高分解能原子核乾板による暗黒物質方向探索実験プロジェクトの推進

研究課題名(英文)Project for Directional Dark Matter Search with Super-high Resolution Nuclear Emulsion

研究代表者

中 竜大(Naka, Tatsuhiro)

名古屋大学・現象解析研究センター・特任助教

研究者番号：00608888

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、直接検出実験による暗黒物質を目的として、特に、超微粒子原子核乾板による方向感度を持った暗黒物質探索を可能にする技術開発と実験の推進を行うものである。

本課題において、それまでに構築した実験基盤をもとに、デバイスの実用化とその理解を進め、低ノイズのデバイス開発とその実用化、さらに、内部に含まれる放射性同位体量の定量的理解とその除去手法に関する研究を行った。また、実際の事象解析のためのシステム開発を行い、サブミクロン事象選別可能な自動解析システム、および、局在表面プラズモン共鳴現象を用いた新たな超解像システムの開発・実装を行い、これらを用いたテスト実験をグランサッソ研究所にて遂行した。

研究成果の概要(英文)：The motivation of this research is challenge to understand the dark matter which is one of the most important subject in nature science. Specially, we are studying and promoting the technology development and the experiment for the direction sensitive dark matter search which is interesting as next generation dark matter search methodology.

In this study, practical application and understanding of the device have been progress, and lower background device was developed. And, intrinsic radioactivity have been also measured, and we could understand the background level quantitatively. Also, new readout systems for automatic selection with more than 150 nm track and super-resolution analysis using the localized surface plasmon resonance have been developed and demonstrated. Finally we started the test experiment in the Gran Sasso underground laboratory, Italy using such technologies.

研究分野：素粒子実験

キーワード：暗黒物質 超微粒子原子核乾板 方向感度検出

1. 研究開始当初の背景

暗黒物質は、宇宙背景放射の精密観測、銀河および銀河団の回転速度の観測、重力レンズの観測等さまざまな独立した宇宙観測およびそれに伴う宇宙論の観点から、宇宙全体の約 25%、これは通常の物質の 5 倍以上を占める全く未知の重力源であり、宇宙起源および宇宙の構造形成の理解において極めて重要なものであると同時に、素粒子標準模型に有力候補がないという観点から、素粒子物理学においても重要な問題である。その存在は確固たるものとなってきたが、その正体・性質はわかっていない。その理解のための唯一の方法は、暗黒物質を直接検出することであり、そのための多角的な方法論の探求は、その性質解明にとって極めて重要である。その中で 9 という極めて高い精度で暗黒物質の信号を季節変動という形で観測したと主張する DAMA/LIBRA 実験[1]があり、その信号の正体の解明は重要な課題であった。そのための新たな情報を加えた探索実験、すなわち“方向感度”を持った暗黒物質探索実験は最も注目される方法の一つであるが、そのための検出器の開発は、世界中でも実用化が難しい状況が続いていた。特に、大質量化を目指した固体もしくは液体による方向感度を持った検出器の開発は、世界でも成し遂げられたことはない非常に高いチャレンジ性を有していた。

本研究は、それを実用化し、新たな暗黒物質探索を目指した研究を進めるものである。

2. 研究の目的

本研究は、宇宙の暗黒物質の直接検出を目的にしたものであり、特に、固体検出器による、つまりは、大質量化可能な検出器による方向感度を持った暗黒物質探索実験を推進するものであり、世界で初めての暗黒物質の方向情報を取得するための技術開発を進めることを目的とする。さらに、地下実験に向

けた環境整備、および、そのための手法開発も含め、原理実証段階から実用化に向けた要素技術の開発と実装を目的とした研究開発を進める。

これらの研究は、独自に開発した超高分解能粒子飛跡検出デバイスである超微粒子原子核乾板 (Nano Imaging Tracker : NIT) を用いたものであり、デバイス自身の開発とそこに記録されたナノメートルスケールの粒子飛跡を検出するためのシステム開発も重要なテーマの一つである。

3. 研究の方法

本研究は、下記の主要開発と方法を用いて行った。

3.1 デバイス開発

デバイスは、本研究のために開発した装置を用いて独自開発を行った超微粒子原子核乾板と呼ばれるデバイスであり、AgBr 結晶に 10%程度の I をドーピングした結晶がセンサーとしての役割を果たすものであり、結晶成長に関する手法は確立し、結晶感度等の最適化は一つの重要なテーマである。特に、暗黒物質事象の較正は、イオン注入装置を用いて行い、その単色性と方向の一様性を用いることで検出性能を評価することができる。

また、放射性線源による感度評価、特に、
・電子線バックグラウンドの除去 (特に、デバイスの不感化) の研究は、将来的な大規模実験に向けた重要な研究であり、その新たな方法として、デバイスの低感度化に対する除去効率の評価を行った。

内部放射線バックグラウンドは、ICP-MS 並びに Ge 検出器、炭素 14 量は AMS を用いて評価を行い、現行のデバイスにおける主要な放射性同位体由来のバックグラウンド推定を行った。

さらに、地下実験に向けたデバイスの長期安定性評価は重要な開発要素であり、どの程度の性能安定性が得られかの実験体制の構

築と放射線を用いた感度および潜像退行性能評価を行った。

3.2 ナノトラッキングシステムの開発とその評価

ナノトラッキングシステム開発は、光学顕微鏡における形状情報による粒子飛跡候補事象選別アルゴリズム開発からスタートし、PTS と呼ばれる実用化を目指したトラッキングシステムの開発・運用を進めてきた。事象選別のルーチン化とパラメータ決定等の性能評価を進めた。

さらに、選別した候補事象のより精密な情報を取得するための新たな解析技術として、局在表面プラズモン共鳴現象を用いた超解像解析法を提案し、実用化に向けたシステム開発をナポリ大学と共同で進めた。

3.3 地下実験環境の構築とテスト実験の推進

イタリア・グランサッソ研究所において、低バックグラウンド地下環境での実験展開に向けた環境整備とテスト実験を行った。実験環境は、Hall B の実験領域がアサインされ、

線および中性子を遮蔽するための遮蔽体の構築、およびデバイスの長期安定性の向上を目的としたクーリングシステムを構築し、小スケール(ターゲットマス 10g 程度 1 カ月のラン)のバックグラウンドランを遂行した。

上記実験環境を想定した場合のシミュレーション評価も行い、これまでの微量放射性同位体測定ならびに環境放射線・中性子等による影響を評価し、バックラウンド事象推定の定量化研究を進めた。

4 . 研究成果

デバイスの性能評価に関しては、1 次候補選別法である楕円解析をベースに評価を行った。イオン注入において、疑似的暗黒物質事象として炭素イオンを用い、エネルギーを

変えることでその検出性能を評価した。また、独自のシミュレーション、特に、ナノスケールの構造(つまりは、ハロゲン化銀結晶による量子化効果)を考慮したシミュレーション法を構築し、実際の検出性能の理解を行った。結果として、60keV の炭素事象に対して約 10% の方向感度検出効率であることを評価し、光学輝度が主な検出効率低下の原因になっていることを理解した。これは、光学系の改良によって向上できるものであり、実際に記録している事象は 40-50% であることから、光学系のアップグレードは重要であることを理解した。シミュレーションとの比較により、検出性能としては、30keV の炭素反跳に対しても、10% 程度の検出感度を出すことは十分可能であることを理解し、そのための性能向上に向けた研究の重要性を定量的に理解することができた。

現行のデバイスにおける内部放射性同位体量に関しても実測が行われ、Th・U 系列では約 10-20 mBq/kg, K-40 に関しては 35mBq/kg, Ag-110m が約 400 mBq/kg, C-14 に関して 24000 mBq/kg であることが理解され、現行の主要な内部放射性バックラウンドは C-14 からの線が支配的であることがわかり、バックグラウンド除去効率の定量的目標設定を行うことができた。K-40 に関しては、特に、使用しているゼラチンを高脱イオン化したものを用いることで、1/2000 に低減することに成功した。

デバイスの長期安定性に関しては、少なくとも常温状態においては、いわゆる潜像退行効果によって 1-2 カ月スケールでの検出能の低下が見られるため、デバイスの低温環境での設置が必要となる。-20 環境においては、少なくとも 2 カ月のランにおいて検出能の低下が見られなかったことから、低温環境での実験環境構築が必要であることを理解した。そのための、クーリングシステムを搭載した検出器マウントは、グランサッソ研究

所と共同で開発を進め、実用化を行った。

さらに、電子事象の除去に関しては、デバイス温度を下げるのが有効な手法であることを明らかにし、-100 で約 1E-6 以上の除去効率が出せることの実証研究を行った。

事象解析システムは、名古屋大学において PTS-2 と呼ばれる(図.1 参照)テスト実験用光学解析システムの運用が開始され、約 0.5 g/month のスピードであるが、候補事象の自動選別を行える体制を構築した。高速化を目指した PTS-3 の開発も開始し、約 2 倍の速度向上は達成し、さらなる高速化に向けた開発研究を開始した。



図.1 ナノスケール飛跡読み取り用光学顕微鏡システム (PTS-2)

また、局在表面プラズモン共鳴現象に着目した新たな光学解析法の提案と実証を行い、約 10nm の空間分解能を達成し、超解像解析の新たな技術の開発に成功した。これを用いたシステムをナポリ大学と共同で開発し、10nm 以下の分解能を達成できることを実証し(図.2 参照)、液晶偏光ローテーターを用いた自動超解像解析を行うシステムの開発を行い、運用を開始した。このシステムでの解析は現在も進行中である。

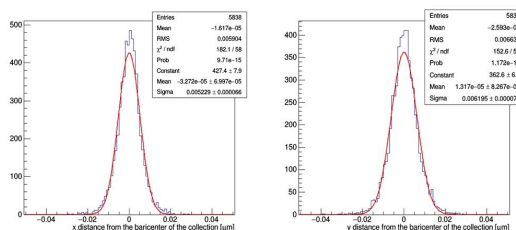


図.2 局在表面プラズモン共鳴解析用光学顕微鏡システムによる分解能評価結果

グランサツソ研究所において、新たな実験サイトとして Hall.B のスペースをアサインされ、テスト実験環境を構築した(図.3 参照)。遮蔽剤として鉛ブロックとポリエチレンブロックで構成された検出器マウントを作成し、10g・1カ月のテストランを行った。



図.3 グランサツソ研究所に構築したテスト実験環境

この環境において期待される外部バックグラウンドのシミュレーションによる推定も行い、ガンマ線は遮蔽によって 2 桁の除去が期待され約 1E3/kg/d の発生数、中性子事象は < 0.1/kg/d, 宇宙線由来の中性子事象は 1 E-3/kg/d のレートであることを確認した。

また、次の実験フェーズに向けた実験環境の構築がスタートし、グランサツソ研究所 Hall.F にクリーンルームを完備した実験室の建設に着手した。これは、2018 年の夏ごろに完成予定である。

実験としての discovery potential に関する研究も行い、Likelihood-ratio analysis

を用いた場合、白鳥座の方向にピークを持つ signal と flat distribution を持つ background 事象との識別能を評価し、共に同等の事象数が観測された場合、暗黒物質質量にも依存するが、約数 10 イベントにおいて、3 以上での discovery potential を持ち、これは質量が軽くなれば、実験閾値との兼ね合いによって、方向ピークが鋭くなる効果から、その significance は向上することを明らかにした[2]。

写真化学的な知見を導入し、暗黒物質検出に向けたデバイス性能の考察も進めている。実際、暗黒物質探索における検出対象は、高い dE/dx を持つことから、ハロゲン化銀結晶内部に非常に密に電子-正孔対が生じる。この状態は、従来の写真感光理論では扱ったことの無い、超高照度状態であり、そのときの潜像形成機構や効率についての現象論的理解は必要である。本課題内で、写真化学を専門とする研究者との研究連携も進み、検出器内部で起こる検出機構の理解に向けた現象論的研究を進め、より最適な性能を発揮するデバイス開発に活かすことを目指している。

参考文献

- [1] R. Bernabei; et al., European Physical Journal C. 73: 2648 (2013)
[2] N. Agafonova et al., arXiv:1705.00613 [astro-ph.CO] (2018)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 10 件)

谷忠昭、中竜大、「検出量子効率に基づく暗黒物質検出用原子核乳剤の設計指針の提案と検討」, 日本写真学会誌 2018 年 81 巻 1 号:53-64 [査読あり]

Takashi Asada, Tatsuhiko Naka, Ken-ichi Kuwabara and Masahiro Yoshimoto, "The development of super fine-grained nuclear emulsion", PTEP(2017)063H01, DOI: 10.1093/ptep/ptx076
K.Katsuragawa,
A.Umemoto, M.Yoshimoto, T. Naka and T.Asada,

"New readout system for submicron tracks with nuclear emulsion", JINST,12(2017)T04002, doi:10.1088/1748-0221/12/04/T04002 [査読あり]

Battat, I.G. Irastorza, ...T. Naka (全 93 名中 63 番目), "Readout technologies for directional WIMP Dark Matter detection" Physics Reports Volume 662, 29 November 2016, Pages 1-46 J.B.R. doi 10.1016/j.physrep.2016.10.001 [査読あり]

T. Tani and T. Naka, "Nuclear Emulsions for Dark Matter Detection", Rad. Meas.,95(2016)31-36,doi:10.1016/j.radmeas.2016.10.004 [査読あり]

A. Alexandrov, T. Asada, A. Buonauro, L. Consiglio, N. D' Ambrosio, G. De Lellis, A. Di Crescenzo, N. Di Marco, M.L. Di Vacri, S. Furuya, G. Galati, V. Gentile, T. Katsuragawa, M. Laubenstein, A. Lauria, P.F. Loverre, S. Machii, P. Monacelli, M.C. Montesi, T. Naka(全 27 人中 20 番目), F. Pupilli, G. Rosa, O. Sato, P. Strolin, V. Tioukov, A. Umemoto, M. Yoshimoto "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 [査読あり]

谷忠昭、中竜大、「原子核乳剤による暗黒物質の検出 写真科学の知見と手法の適用」日本写真学会誌 2016 年 79 巻 2 号 2-10
吉本雅浩、中竜大、浅田貴志、待井翔吾、「暗黒物質探索実験のための地下環境の中性子測定」応用物理学会放射線分科会学会誌:放射線 Vol.40, No.4 (2015)231-235 [査読あり]

梅本篤宏、中竜大、浅田貴志、桂川貴義、「暗黒物質方向探索における局在表面プラズモン共鳴現象を用いた飛跡解析手法の開発」応用物理学会放射線分科会学会誌:放射線 Vol.40, No.4 (2015)225-230 [査読あり]

T.Naka, T.Asada, M.Yoshimoto, T.Katsuragawa, Y.Suzuki, Y. Terada, A.Takeuchi, K.Uesugi, Y.Tawara, A.Umemoto and M.Kimura, "Analysis system of submicron particle tracks in the fine-grained nuclear emulsion by a combination of hard x-ray and optical microscopy" Review of Scientific Instruments 86,0730701(2015), DOI:10.1063/1.4926350 [査読あり]

〔学会発表〕(計 13 件)

中竜大(名古屋)「超微粒子原子核乾板における局在表面プラズモン共鳴を応用した超解像飛跡解析技術」(招待講演), 第 14 回日本写真学会光機能性材料セミナー, 2017 年 8 月 30 日, 東京ミッドタウンカンファレンスルーム-9

Tatsuhiro Naka “NEWSdm experiment - Direction Sensitive Dark Matter Search with Super-high Resolution Nuclear Emulsions”, Exploring the Dark Universe, Quy Nhon, Vietnam, July 23-29, 2017

中竜大(名古屋)「エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWSdm(2)~全体報告~」, 日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 12-15 日、宇都宮大学峰キャンパス
中竜大(名古屋)「NEWSdm」, CRC タウンミーティング, 2017 年 6 月 24-25 日、東京大学柏キャンパス

中竜大(名古屋)「方向感度をもつ暗黒物質探索の基礎研究」, 「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」2017 年領域研究会, 2017 年 5 月 21-23 日 岡山大学

中竜大(名古屋)「NEWSdm」2017 年 1 月 27,28 日、ダークマター懇談会、神戸大学梅田インテリジェントラボラトリ

中竜大(名古屋)「エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWS(2)~地下実験に向けた活動報告と課題~」2017年3月17-20日 日本物理学会年次大会、大阪大学豊中キャンパス

Tatsuhiro Naka “Direction Sensitive Direct Dark Matter Search with Super-High Resolution Nuclear Emulsions”, The 3rd International Symposium on “Quest for the Origin of Particles and the Universe” (KMI2017), 5-7 January 2017, Nagoya University, Japan

中 竜大「エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWS(3)~全体報告~」 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 24 日、宮崎大学

中竜大 “宇宙におけるダークマタ 問題とその直接探索” (基調講演) 2016 年度日本写真学会年次大会 2016 年 6 月 8 日、東京工業大学すずかけ台キャンパス
中 竜大 「エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWS(3)~全体報告と今後の展望~」 日本物理学会年次大会 2016 年 3 月 19-22 日、東北学院大学、仙台

Tatsuhiro Naka, “NEWS project ~Detector Technologies~” (招待講演), 16 June 2015, University of Rome, Italy

中 竜大 “方向感度をもつ暗黒物質探索の基礎研究” 2015 年領域研究会, 2015 年 5 月 16 日 神戸大学

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:

発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中 竜大 (NAKA, Tatsuhiro)
名古屋大学・現象解析研究センター・特任
助教
研究者番号: 00608888

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()