

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23403003

研究課題名(和文)原子核乾板による暗黒物質の検出ーグランサッソー地下の中性子BGの測定ー

研究課題名(英文) Directional Dark Matter Detection by Nuclear Emulsion - Neutron Flux measurement at LNGS-

研究代表者

中村 光廣 (NAKAMURA, MITSUHIRO)

名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授

研究者番号：90183889

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,200,000円、(間接経費) 2,460,000円

研究成果の概要(和文)：超微粒子の原子核乾板を用いる暗黒物質の方向性検出実験実現のための技術開発ならびにイタリアグランサッソー研究所(LNGS)地下での実験の準備・中性子検出のテスト実験を遂行した。20nmサイズのAgBr結晶からなる超微粒子原子核乾板の安定製造方法を確立した。その現像手法として金沈着現像を開発し、形状認識に適した現像粒子とすることができた。また楕円形状認識による200nm長の反跳飛跡の光学読み出しを実現し、専用読み取り装置PTSの立ち上げを行い、系統的な解析を可能とした。BGとなる中性子の測定に関しては、LNGSでOPERA検出器と微粒子乾板を用いた中性子の流量測定を行った。

研究成果の概要(英文)：In order to realize directional dark matter experiment using fine-grain nuclear emulsion, technical R&D studies and neutron flux measurement at Gran Sasso underground laboratory in Italy have been carried out. We succeeded to establish a stable production method of 20nm size nuclear emulsion. Gold deposition development method was developed to generate a round shape grains which is suited for optical read-out. Using high resolution optical microscope with developed ellipsoidal shape fitting method, tracks with 200nm length can be recognized with high efficiency. We developed a dedicated automated read-out system PTS and made systematic studies possible. Also neutron flux measurement using OPERA detector and fine grain nuclear emulsion were carried out in LNGS.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学(素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理)

キーワード：暗黒物質 原子核乾板 イタリア・グランサッソー研究所

1. 研究開始当初の背景

宇宙の暗黒物質の存在は、銀河の回転速度や背景放射の精密測定(WMAPなど)によって確実なものとなってきており、その正体の解明は今世紀最大の課題の一つとなっている。現在計画されている暗黒物質検出実験は、暗黒物質が物質中で極希に起こす衝突現象を検出し、(1)地球の年周運動によって現れる衝突頻度の季節変動の観測、あるいは(2)反跳原子の方向が暗黒物質の入射方向を反映することを利用して、その反跳方向の偏り(太陽の固有運動方向に対する)を検出することによって暗黒物質によるものであると断定する。

実験としては(1)の方法が先行しており、XENON、XMASS等はこの方法を採用している。これら実験のうちDAMA実験はもっとも質量×照射時間が大きな実験であるが、信号の季節変動を8で検出したとクレームしている。しかしながらDAMAと矛盾する結果を出す実験も多く、DAMAの信号に関してなぞは深まるばかりである。DAMAの信号に関して最も疑われているものは、地下の中性子の季節変動である。問題となるエネルギー帯($> 1\text{ MeV}$)の中性子の源として(n)反応と宇宙線 μ 粒子の核破砕反応とがあげられるが、発生後の中性子が水の影響を受けやすいことからLNGS地下ホール近傍の地下水状況の季節変動による中性子変動ではないかと指摘されている。また信号の季節変動の位相が、地下で観測される宇宙線 μ 粒子のフラックスの季節変動と近いことも指摘されており、いずれにせよグランサッソー地下の中性子の季節変動に関する測定が必要とされている。

一方で暗黒物質検出に反跳原子の方向を利用する(2)の方法に関しては、(1)と相補的な役割を果たすものであり、将来必ず必要となる。ガスを用いたもの(Drift、Newage)が先行しており、標的重量百g以下での検証実験が行われている。しかし密度の小さなガスが検出物質であり、将来必要とされる1トン規模の実験の実現は容易ではない。

原子核乾板は、サブミクロンの位置分解能で素粒子が残す飛跡を3次的に捕える事が出来る。我々はタウニュートリノ反応の検出など、短い飛跡を捕えなくてはならない研究に用いて大きな成果を挙げてきた。使用した原子核乾板は10トンのオーダーであり、すでに大重量を実現する技術は存在するが、サブミクロンの飛跡を検出する技術にはまだ開発要素が山積みである。

この研究開始前までに、反跳原子が残す長さ数10から数100nmの非常に短い飛跡をとらえるための超高位置分解能の原子核乾板の開発に成功した。通常用いられているAgBr微結晶のサイズは200nm程度と飛跡長と同程度であったが、開発したものは40nmのものとなっている。

またこの超微粒子の原子核乾板に、反跳原子と同じ低速のイオンを照射して、確かに反跳原子の飛跡をとらえることが出来ることを確認した。飛跡をとらえるのに使用したのは電子顕微鏡であるが、大体積の読み出しには速度が遅すぎる。光学的な読み出しは十分な速さを持つが、数百nmの飛跡長は光学限界以下である。乾板の膨潤による飛跡伸張の最適化や、効率的な読み出し方法の確立が課題として残っていた。

また2010年度に入ってから14.8MeVの単色中性子(D+T反応)やカリフォルニウムからの中性子の照射を行い、反跳飛跡を測定、シュミレーションから予想される描像とよい一致を見て、原子核乾板の中性子に対する反応がよく理解され、中性子検出に関しては地下で原子核乾板の照射を出来る段階にきているが、暗黒物質検出に関しては中性子の反跳などの物理的な背景事象ではない、乾板固有の雑音の原因の究明や低減が不可欠である。

2. 研究の目的

今世紀の重要な研究課題の一つである宇宙の暗黒物質の検出実験を、日本の独自技術である原子核乾板技術を用いて実現する。これまで様々な開発を行ない、準備を重ねてきたが、本研究では原子核乾板本体、読み出し装置の開発を推し進めるとともに、並行して暗黒物質研究のメッカであるイタリアグランサッソー地下研究所で原子核乾板を用いた中性子BGの測定やテスト実験を行う。

グランサッソー研究所(LNGS)では、我々が推進中のニュートリノ振動実験OPERAのために、原子核乾板を取り扱う施設が充実しており、OPERAが走っている間は地下で原子核乾板を容易に塗布現像できる。この絶好の機会を活かし、名古屋大学で開発した原子核乳剤を持ち込み、暗黒物質検出の際にBGとなる中性子のフラックスの測定を行う。

3. 研究の方法

1) 乾板の開発

超微粒子乾板の最適化を推進する。ドーブする不純物を制御して感度の最適化を行う。(反跳原子に対して感度を持ち、線などの背景事象に対しては感度を抑える。)また物理事象と関係のない乾板特有の雑音(Fogという)の原因の理解と低減。また読み出しに適した現像方法の開発を行う。

2) 読み出しの開発

読み出しに関しては、系統的に解析をすることのできるシステムを1台立ち上げて、数cc程度に記録されているすべてのグレインの情報解析を可能にする。またその詳細解析のためにX線顕微鏡あるいは電子顕微鏡とのマッチング解析を可能にする。さらに高速の解析に向けた光学的読み出し手法を模索する。

3) 中性子測定

名古屋大学で開発する暗黒物質検出ならびに中性子検出のための原子核乾板を、グランサッソー研究所地下の OPERA の原子核乾板取り扱い施設で塗布し、フレッシュなフィルムを作り、それらを多数枚重ねてスタックとしたもの(ECC)を一定期間地下で照射する。照射は、地下にある OPERA のフィルム保管用の放射線遮蔽庫内ならびに地上のファシリティで行なう。照射終了後、地下の現像ファシリティで現像を行い、低バックグラウンドの環境下ですべてのプロセスを終了し、現像されたフィルムを日本へ持ち帰って、読み出し解析を行い、地下での中性子の信号を同定する。また OPERA 検出器を構成している ECC を用いて、20MeV 以上のエネルギーを持つ中性子の測定を行う。

研究の遂行にあたっては、中村が研究を総括、中野がフィルムの読み出し、佐藤が解析を担当する。また中嶋大が現場でのフィルム塗布を大学院生と共に担当する。またイタリアグランサッソー研究所所長をはじめ OPERA 実験の現地原子核乾板施設の責任者 Nicola D'Ambrosio 氏、Chiara Signiano 研究員、Giovanni de Lellis 准教授、Bern 大学の有賀昭貴研究員の全面的な協力を得る。

4. 研究成果

1. 乾板の開発

- 1) 特殊なポリマーを用いた乳剤製法により 20nm サイズの微粒子乳剤の安定な製造を可能にした。このことにより、検出できる反跳原子のエネルギー閾値を 30keV 程度にまで下げることができた。
- 2) 電子トラップである物質を結晶にドーブして、検出できるエネルギー閾値の制御ができることを確認した。感度も劣化させるため、今後最適化が必要である。
- 3) 金沈着現像の採用により、反跳炭素原子のエネルギー損出相当の dE/dX をもつ線に対して約 2.2 個/ μm と最高感度を保証しつつ、Fog の低減 < 1 個/ $1000\mu\text{m}^3$ に成功。また現像銀の形状をより球に近くすることができ、読み出しの際の形状認識による識別により適したものとすることができた。副産物として金の採用により X 線顕微鏡で見た時のコントラストが向上し、より小さな 80nm サイズのグレインの検出効率を上げることができた。
- 4) 中性子により反跳された陽子の飛跡検出用に感度を調整した結晶サイズ 200nm の原子核乾板を開発した。

2. 読み出しの開発

- 1) 専用の読み出し装置 PTS (Post Track Selector) を立ちあげた。100 倍の対物レンズ、落射照明、1M ピクセルカメラの採用により、銀粒子の映像を 300nm 程度の高分解能でとらえ、被写界深度方向の合ピント像を自動認識し楕円形状認識を行うアルゴリズムを開発した。これにより 1g 程度

の乳剤中に記録された一億個程度の全銀粒子の読み出しが 10 日間程度で可能となった。

- 2) Spring8 の X 線顕微鏡との融合解析
Spring8 の X 線顕微鏡開発グループとの共同研究で、PTS で光学的にとらえた銀粒子を X 線顕微鏡で 1 対 1 に対応させることができるシステムを開発した。このことにより 50nm の高分解能で、光学顕微鏡でとらえた映像が複数の粒子からなる飛跡なのか単純な Fog なのかを系統的に対比比較できるようになった。

3. 中性子測定

- 1) OPERA のグランサッソー地下施設の暗黒物質実験用途への改造。

日本から塗布台・温調機他を空輸し、OPERA 実験立ちあげ時に使用した地下プレハブ二階を整理・改造し、原子核乳剤の塗布施設を設置した。また OPERA 実験で現役の地下現像施設を時間外に活用することにより、地下で製造したバックグラウンドの低い乾板を地下で現像するということが可能とした。

- 2) D-T 反応により生じる中性子(産総研)を用いて、AgBr 反跳原子の検出を試験。200nm の飛跡の検出効率として 70%を得た。また東海村の FNS 施設の D-D 反応から発生した中性子を用いて、CNO 反跳原子の飛跡を検出。エネルギー閾値で 37KeV まで検出可能であることを確認した。

また結晶サイズ 200nm の原子核乾板に D-D 反応で発生した中性子を照射する較正実験を行い反跳陽子を解析。飛程-散乱角が理論的に予想されるものと一致することを確認した。

- 3) 地下で組み立てられ最長 6 年が経過する OPERA 検出器の ECC を用いて、20MeV 以上の反跳陽子の検出を行い、反跳陽子反応の生成率として、グランサッソー地下で OPERA ECC 1 ccあたり毎秒 6×10^{-10} 個以下、地上で毎秒 2×10^{-6} 個を得た。これと較正実験の結果をもとに検出効率の補正を行い、中性子フラックスへ換算してゆく。
- 4) 上記の地下施設を活用して、微粒子乾板の地下での塗布。地上・地下で約 6 か月の照射を行った。解析は肉眼観察で行い、地上照射のもので反跳飛跡を検出。地下照射のものでは反跳飛跡は検出できなかった。今後規模拡大を行う。

また本研究の遂行に当たって、ナポリ大学、グランサッソー研究所、パドバ大学、ベルン大学の研究者と議論を重ね、国際共同研究のグループを組織した。現在年 2 回程度の共同研究者会議を開催し、規模を拡大した実験の準備につなげた。

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 7 件)

- 1) Status of directional dark matter search with nuclear emulsion, T. Naka, M. Nakamura, T. Nakano, O. Sato, M. Kimura, Y. Tawara, Y. Suzuki., PoS IDM2010 (2011) 040.
- 2) R&D Status of Nuclear Emulsion For Directional Dark Matter Search, T. Naka, M. Kimura, M. Nakamura, O. Sato, T. Nakano, T. Asada, Y. Tawara, Y. Suzuki, EAS Publ.Ser. 53 (2012) 51-58.
- 3) Isospin Violating Dark Matter Search by Nuclear Emulsion Detector, Keiko I. Nagao, Tatsuhiko Naka., PTEP 2013 (2013) 043B02
- 4) Directional Search for Isospin -Violating Dark Matter with Nuclear Emulsion, Keiko I. Nagao, Tatsuhiko Naka., AIP Conf.Proc. 1467 (2012) 274-277.
- 5) Submicron track readout in fine-grained nuclear emulsions using optical microscopy, M. Kimura, T. Naka., Nucl. Instrum. Meth. A680 (2012) 12-17.
- 6) Fine grained nuclear emulsion for higher resolution tracking detector, T. Naka, T. Asada, T. Katsuragawa, K. Hakamata, M. Yoshimoto, K. Kuwabara, M. Nakamura, O. Sato, T. Nakano, Y. Tawara et al., Nucl. Instrum. Meth. A718 (2013) 519-521.
- 7) Status and analysis system of directional dark matter search with nuclear emulsion, T. Katsuragawa, T. Naka, T. Asada, M. Yoshimoto, K. Hakamata, M. Ishikawa., J.Phys. Conf.Ser. 469 (2013) 012004.

[学会発表](計 48 件)

[国内学会]

日本写真学会秋季研究発表会, 2011年12月5日, 京都教育文化センター

- 1) 光学顕微鏡による nm Range スケール Track の選別: 桂川貴義
- 2) 暗黒物質探索に向けた新型超微粒子乳剤開発: 浅田貴志
- 3) 暗黒物質探索に対する現像技術の開発: 袴田香奈子
- 4) 暗黒物質探索のための自動飛跡読み取り装置の開発: 吉本雅浩
- 5) X線顕微鏡を用いたサブミクロン飛跡の詳細解析システムの開発: 中 竜大
日本物理学会 2012年春季大会, 2012年3月24日-27日, 関西学院大学
- 6) 高分解能原子核乾板による暗黒物質探索実験(1) ~ 検出器開発及びバックグラウン

ド研究 ~ : 浅田貴志

- 7) 高分解能原子核乾板による暗黒物質探索実験(2) ~ 光学顕微鏡による反跳原子核飛跡候補の識別 ~ : 桂川貴義
日本写真学会年次大会, 2012年5月29日-30日, 千葉大学
- 8) 暗黒物質探索のための新型原子核乾板: 浅田貴志
- 9) 低速重イオンの形成する現像銀に対する定着の溶解効果と感度低下: 袴田香奈子
日本物理学会 2012年秋季大会, 2012年9月11日-14日, 京都産業大学
- 10) 原子核乾板による地下環境中性子フラックス測定技術の開発: 森島邦博
- 11) 高分解能原子核乾板による暗黒物質探索実験(1) ~ 検出器の感度評価と性能向上 ~ : 浅田貴志
- 12) 高分解能原子核乾板による暗黒物質探索実験(2) ~ 反跳原子核飛跡候補の読み出しシステムの検証 ~ : 桂川貴義
日本写真学会 秋季研究発表会, 2012年11月30日, 京都工芸繊維大学
- 13) 暗黒物質探索実験実施にむけた微粒子原子核乾板の開発: 浅田貴志
- 14) 低温条件下における潜像形成機構の差異に対する現像効率の研究: 袴田香奈子
- 15) 暗黒物質の直接探索のための自動飛跡読み取りシステムの開発: 桂川貴義
- 16) 超微粒子原子核乾板における粒子のエネルギー損失メカニズムに対する潜像形成メカニズムの研究: 中 竜大
- 17) 原子核乾板による高速中性子イメージング技術の開発: 森島邦博
日本物理学会 2013年第春季大会, 2013年3月26日-29日, 広島大学
- 18) エマルジョン暗黒物質方向性探索実験における開発状況(2) ~ 全体報告 ~ : 中竜大
日本写真学会年次大会, 2013年5月27日-28日, 千葉大学
- 19) プラズモン共鳴現象を利用したバックグラウンド除去: 石川めぐみ
- 20) 黒物質探索実験におけるバックグラウンド除去の現像手法の開発: 袴田香奈子
- 21) 新型超微粒子原子核乾板の性能評価と改善: 浅田貴志
- 22) 高速自動解析に適した中性子検出用原子核乾板の開発: 森島邦博
日本物理学会 2013年秋季大会, 2013年9月20日-23日, 高知大学
- 23) エマルジョン暗黒物質探索実験における開発状況(1) ~ テスト実験に向けた検出器開発とバックグラウンド測定状況 ~ : 中竜大
- 24) エマルジョン暗黒物質探索実験における開発状況(2) ~ イオン注入装置と線源を用いた解析 ~ : 桂川貴義
日本写真学会 秋季研究発表会, 2013年11月28日, 京都工芸繊維大学
- 25) 中性子とガンマ線の識別能力向上を目指した原子核乳剤の開発: 待井翔吾

- 26) 新型高感度乳剤の塗布特性の研究：河原宏晃
- 27) 暗黒物質探索に向けた超硬調な微粒子乳剤の開発：古屋駿二
- 28) PVA を利用した超微粒子臭化銀結晶の安定化処方：浅田貴志
- 29) 原子核乾板中の飛跡解析のための銀ナノ粒子の光学応答と形状評価：梅本篤宏
- 30) 金沈着現象の暗黒物質探索実験への利用：袴田香奈子
- 31) 現象金に対するプラズモン共鳴現象を利用したバックグラウンド除去：石川めぐみ
日本物理学会 2014 年春季大会、2014 年 3 月 27 日 - 30 日、東海大学
- 32) 暗黒物質の方向検出に向けた原子核乾板デバイス開発：古屋駿二
- 33) 原子核乾板を用いた暗黒物質の方向探索実験の状況報告(1)～全体報告～：浅田貴志
- 34) 原子核乾板を用いた暗黒物質の方向探索実験の状況報告(2)～サブミクロン飛跡検出のための線源を用いた感度測定の現状～：桂川貴義
- 35) 高速中性子トラッキング検出器の開発(1) 原子核乾板：待井翔吾
- 36) 高速中性子トラッキング検出器の開発(2) 読み取りシステム：吉本雅浩
- [国際会議ほか]
Neutrino 2012, June 3-9 2012, Kyoto, Japan
- 37) Directional Dark Matter Search with Nuclear Emulsion: Tatsuhiro Naka
IDM2012, Identification of Dark Matter, 2012, July 23-27, Chicago, USA
- 38) Directional Dark Matter Search with Nuclear Emulsion: Tatsuhiro Naka
TAU 2012, The 12th International Workshop on Tau Lepton Physics, 17-21 September, 2012, Nagoya, Japan
- 39) Direct detection of dark matter by solid-state detector: KATSURAGAWA, Takayoshi and KAWAHARA, Hiroaki
Workshop on Nuclear Track Emulsion and its Future, Predeal, Romania 14-18 October 2013.
- 40) Development of fast neutron and proton detector and its applications: Morishima Kunihiro
- 41) Development of muon radiography system with nuclear emulsion: Morishima Kunihiro.
- 42) Directional Dark Matter Search With Ultra Fine Grain Nuclear Emulsion: Asada Takashi
The 12th Symposium on X-ray Imaging Optics, Osaka, Japan 18-20 November 2013.
- 43) Combined analysis between the hard X-ray microscope and optical microscope for the directional dark matter search with high resolution nuclear emulsion:

- Naka Tatsuhiro
KMI International Symposium 2013, Nagoya University, December 11-13, 2013.
- 44) Nuclear Emulsion technology and Directional Dark Matter Study: T. Naka
- 45) Directional Dark Matter Search with the Fine Grained Nuclear Emulsion: T. Asada
ISETS 2013, International Symposium on EcoTopia Science, December 13-15, 2013 Nagoya, Japan
- 46) PTS and New system for analyzing very short tracks: T. Katsuragawa
- 47) Background removal with using the plasmon resonance phenomenon: M. Ishikawa, A. Umemoto
- 48) Development Treatment of Directional Dark Matter Search: K. Hakamata

[図書](計 0 件)

[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

6. 研究組織

- (1) 研究代表者
中村 光廣 (NAKAMURA, Mistuhiro)
名古屋大学・エコトピア科学研究所・教授
研究者番号：90183889
- (2) 研究分担者
中野 敏行 (NAKANO, Toshiyuki)
名古屋大学・大学院理学研究科・講師
研究者番号：50345849
- (3) 研究分担者
佐藤 修 (SATO, Osamu)
名古屋大学・エコトピア科学研究所・助教
研究者番号：20377964
- (4) 研究分担者
中 竜大 (NAKA, Tatsuhiro)
名古屋大学・高等研究院・助教
研究者番号：00608888