

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月 5日現在

機関番号：13901

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23840018

研究課題名（和文）

高分解能原子核乾板による暗黒物質探索実験プロジェクトの推進

研究課題名（英文）

Promotion of the project for directional dark matter search with high resolution nuclear emulsion

研究代表者

中 竜大 (NAKA TATSUHIRO)

名古屋大学・高等研究院（現）・特任助教

研究者番号：00608888

研究成果の概要（和文）：

大質量の方向感度を持った暗黒物質探索実験を可能とする検出器として、これまでにない高分解能化された原子核乾板を用いることを提案し、研究開発を行った。

本課題において、代表者が中心となって、プロジェクトチームを編成し、種々の技術開発と実用化を推進した。特に、原子核乾板を構成するハロゲン化銀サイズを20nm程度まで微粒化することに成功し、同時にさまざまな条件下でも安定した独自製造を可能とした。また、暗黒物質のシグナルとして期待されるサブミクロンの飛跡を自動解析するための光学顕微鏡ベースのシステムを実用化させ、中性子を用いたシグナル解析の自動化の実証を行うことができた。並行して、SPRING8にて、X線顕微鏡の開発も行い、高分解能の詳細解析システムを実用化させた。

これらの開発により、これまで困難であった検出器の独自製造から解析までの一連のシステムを実用化させ、テスト実験が可能なフェーズへ進ませることができた。

研究成果の概要（英文）：

This research is for directional dark matter search with the detector which can work as large mass detector. To do that, we proposed the very high resolution nuclear emulsion, and started R&D of the technology.

In this subject, representative of this research promoted the project by being central figure and advanced the practical application. In terms of development of detector itself, we succeeded the micronization to 20 nm sizes for silver halide crystals constituting the nuclear emulsion, and its technology enabled more stable production under various conditions in production processes. Also, automatic read-out system based on optical microscope was constructed, and the submicron tracks expected as dark matter signal could be read out automatically. This system demonstrated by neutron recoil signal. Simultaneously, we developed the X-ray microscope system for final confirmation of candidate signals in SPRING-8, and this system was turned into the practical use.

By these R&D, we constructed the procession of system from detector production to data analysis, and we can go to the phase of test run.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2012年度	1,400,000	420,000	1,820,000
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：素粒子物理、宇宙線  
科研費の分科・細目：  
キーワード：暗黒物質、高分解能原子核乾板

### 1. 研究開始当初の背景

素粒子宇宙物理学における最大の問題の一つである暗黒物質問題が、さまざまアプローチによって解明が急がれている。特に、暗黒物質の直接探索実験は、世界でさまざまな検出器を用いて行われており、近年、その中で、いくつかのグループによって、同じような断面積領域にポジティブなクレームがなされている。その中でもイタリアの DAMA 実験は、極めて高い信頼性を持った結果を主張している。ただし、これらの結果を否定している実験もいくつか存在し、従来の手法だけでは、最終的な発見を出張するには不十分である。そこで、ことなるシステムティクスを持つ実験を独立に行うことが重要であり、その有力な手法が、方向感度を持った暗黒物質探索実験である。

### 2. 研究の目的

本研究は、方向感度を持った暗黒物質探索実験において、よりモデル依存性のない探索を目指すための大質量実験を想定した手法として、原子核乾板を用いた実験を提案し、その検出器と、解析システムを含めたシステムの実用化が本課題の目的である。また、その中で、プロジェクトとして、種々の技術開発を並行して行うための組織体制を構築することをを行う。

### 3. 研究の方法

本研究開発において、大きな技術開発要素として、検出器である原子核乾板の独自製造、シグナルであるサブミクロの飛跡の解析システム、最終的な詳細解析システムである X 線顕微鏡システム、および地下でのテスト実験環境の構築である。

検出器の開発においては、元企業の技術者で、現在客員研究員である研究者と、大学院生が担当し、本課題代表者が中心で進めた原子核乾板の独自製造システムにおいて行った。

解析システムは、光学顕微鏡のシステムを、既存の土台をベースとしつつも、新たな部分は独自に工作することで立ち上げ、駆動システムや解析アルゴリズムなどは独自開発し、より今後のフレキシブルな解析の R&D が可能なシステムの開発を行った。これには、大学院生 2 名と共にを行った。

X 線顕微鏡システムは、SPring8 の BL47 および 37XU のビーム環境を使って、SPring8 の研究者の全面的な協力を受けて行われた。

### 4. 研究成果

#### (1) プロジェクト編成

本研究において、最初の課題は、それまで研究代表者が開発し、実証試験を行ってきた技術を、より実用化させ発展させるためのプロジェクトを編成することであった。これに関して、最終的に、5 名の大学院生、および、イタリアのナポリ大学の研究者 (3 名) と LNGS (グランサッソ国立研究所) の研究者 2 名、おとびパドバ大学の研究者 1 名と共同研究ができる体制となった。また、より専門的な技術における協力体制として、千葉大学、Fuji Film の研究者らと協力関係を持ち、定期的な研究会を開き、より高いレベルの技術を共有できる体制が整えられた。SPring8 において、X 線顕微鏡開発において、SPring8 の研究者の全面的な技術協力が得られる体制が整えられた。

#### (2) 検出器開発

検出器である原子核乾板の開発は、2010 年より代表者が中心となって立ち上げた製造ファシリティ (図 1) によって、独自開発を続けてきた。

検出器開発において、最も重要な要求は、原子核乾板を構成するハロゲン化銀を 20nm 程度まで小さく、かつ安定に製造することであった。この課題において、ポリビニルアルコールを用いることが本質的なブレークスルーとなり、図 2 の測定結果にあるように、20nm の原子核乳剤の製造を安定して行うことが可能にした。また、20nm 以外にもさまざまなサイズに自由にコントロールすることが可能になり、バックグラウンド除去のための結晶感度コントロールなどあらゆる感度コントロールの技術開発を行えるようになった。これに関しては、現在、継続して開発が続けられている。



図 1. 原子核乾板の独自製造装置

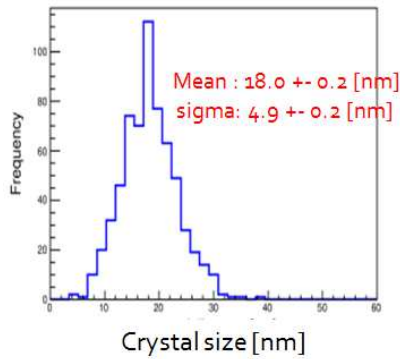


図 2. 電子顕微鏡で測定されたハロゲン化銀結晶サイズ分布

### (3) 光学飛跡自動読み取り装置開発

読み出しシステムにおいては、落射顕微鏡をベースとしたステージを、これまで使われなくなったステージを改造することで、低コストに構築した (図 3)。まず、X, Y, Z 軸をステッピングモーターによって駆動させ、光源を Hg-Xe スポットライト光源を採用し、より高強度で短波長の光まで入射できるようにした。レンズは、既存のレンズを用いているため、現状では NA1.25 のものである。カメラは、1M で Frame rate 120 fps の CMOS カメラを用いていたが、現在、さらに高分解能、高視野のカメラによる試験も行っている。上記のハードを立ち上げ、これを用いて、シグナルを選別し解析するためのソフトウェアの開発を行った。このシステムは、それぞれのシグナルを event by event で画像取得し、それぞれのベストフォーカスにおいて、3次元の位置情報、輝度、形状などを自動でアウトプットすることができるようになっている。光学系は、フレキシブルに変更することが可能であり、カメラの高解像度化、解析波長の選別、その他プラズモン共鳴情報解析が可能なシステムとなるように構築した。

これを用いて、14MeV の中性子によって反跳された原子核の解析を行うことで、図 4 のように中性子方向にピークを持った、まさに暗黒物質探索実験のデモンストレーションを行うことができた。



図 3. 光学自動読み取り装置

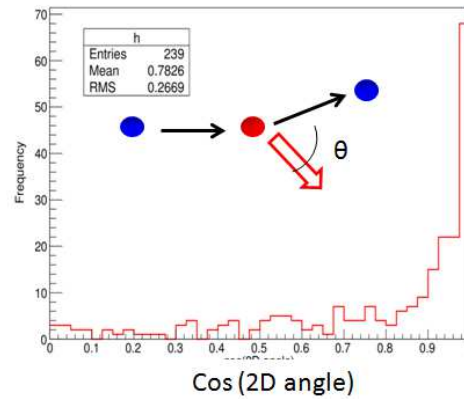


図 4. 光学読み取り装置で測定された中性子反跳原子核の角度分布。(cos(2D angle)=1 が中性子入射方向)

### (4) X線顕微鏡開発

X線顕微鏡は、SPring8 の BL47XU において、テスト観察を行ってきた。ここでの目的は、光学顕微鏡で選別された候補事象を、X線顕微鏡における非破壊性と高分解能を生かして、最終確認するためのツールである。このためには、候補事象が存在する座標に直接移動し、X線で撮像するという機構が必要であった。これは、ある規則的に並んだマスクパターンによって座標構築し、光学読み取りシステム上の座標と X線顕微鏡システム座標をアフィン変換によって共有することで、光学システムにおける候補事象の座標リストを作成することによって、X線顕微鏡でそれらの座標に即座に移動し、観察することが可能となった (図 5)。この位置の対応精度は少なくとも 10  $\mu\text{m}$  以下であり、対応付けの成功率は 99%以上である。

2012 年からは、BL37 のビームラインを用いることで、拡大 X線光学系が実現し、空間分解能が、ほぼ理想的な光学系の分解能 (<70nm) まで達成することができた。このシステムにおいても、光学顕微鏡で選別された候補事象を X線顕微鏡でピンポイント観察ができるような体系を構築し、その位置精度を 5 $\mu\text{m}$  程度、位置決定効率 >99% を実現し、半自動的に撮像できる、より本研究に特化したシステムとなっている。

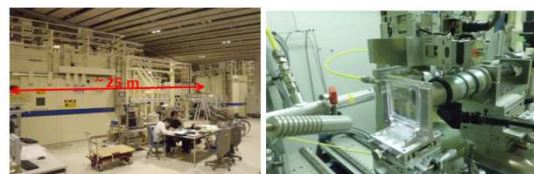


図 5. SPring8 における X線顕微鏡システム

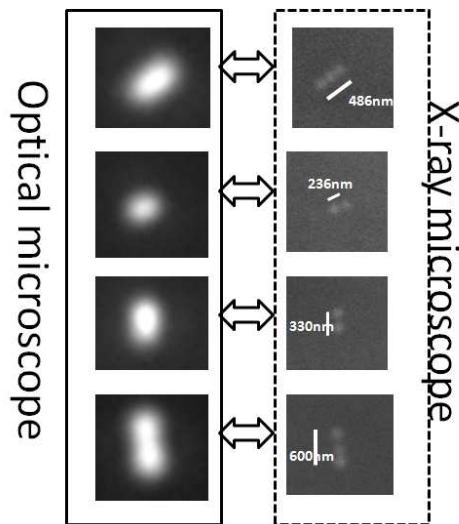


図 6. 光学顕微鏡と X 線顕微鏡における中性子反跳原子核飛跡のマッチング

(5) 国際共同研究への発展

これらの開発と並行して、イタリアグランサツソにおいて、R&D用テストファシリティの構築をイタリア人研究者とともに進め、すでに実験が可能なファシリティの準備を行っている。現状で、図 7 のようなプレハブ内にスペースを確保して、最低限のテストサンプルが作成可能な状況になっている。ただし、さまざまな環境コントロールシステムの導入など、詳細な部分は今後の課題となっている。これと並行して、現在、シミュレーション、および読み取りシステムにおいて、相互開発を行い、クロスチェック体制を構築している。2013 年より、R&D プロジェクトとして、グランサツソ研究所に申請を行う予定である。



図 7. イタリアグランサツソ研究所におけるテストファシリティ

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 5 件)

① T. Naka, M. Kimura, M. Nakamura, O. Sato, T. Nakano, T. Asada, Y. Tawara and Y. Suzuki, “R&D Status of Nuclear Emulsion for Directional Dark Matter Search”, EAS Publication Series, Vol. 53 (2012) pp. 51 – 58 (査読なし)

② K. Kimura and T. Naka “Submicron track readout in fine-grained nuclear emulsions under optical microscopy.”, NIM A 680 (2012) 12-17 (査読あり)

③ T. Naka, T. Asada, T. Katsuragawa, K. Hakamata, M. Yoshimoto, K. Kuwabara, M. Nakamura, O. Sato, T. Nakano, Y. Tawara, G. De Lellis, C. Sirignano, N. D’Ambrosio, “Fine Grained Nuclear Emulsion for Higher Resolution Tracking Detector”, NIMA 55089, DOI:10.1016/j.nima.2012.11.106 (査読あり)

④ K. Ishihara, K. Takagi, H. Minato, J. Kawarabayashi, H. Tomita, S. Maeda, T. Naka, K. Morishima, T. Nakano, M. Nakamura, T. Iguchi “Fast neutron detection under intense gamma-ray fields with novel nuclear emulsion technique” Rad. Meas. RM4855\_proof, 15 November 2012, 1-4 (査読あり)

⑤ K. Nagao and T. Naka, “Isospin Violating Dark Matter Search by Nuclear Emulsion Detector”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 1211-022 (2012) (査読あり)

[学会発表] (計 7 件)

① T. Naka, M. Kimura, T. Asada, M. Nakamura, T. Nakano, O. Sato, Y. Tawara, Y. Suzuki, “R&D Status of Nuclear Emulsion for Directional Dark Matter Search”, CYGNUS2011 conference, 8-11, June, 2011, Aussois, France (査読なし)

② Tatsuhiko Naka “Directional Dark Matter Search with Nuclear emulsion”, Invitation Seminar at Padova University, Italy. 15<sup>th</sup> Dec. 2011 (Invited seminar)

③ T. Naka, “Directional Dark Matter Search with Nuclear emulsion”, IDPASC dark matter work shop, 17-18 Dec. 2011, Evora, Portugal (査読なし)

④ Tatsuhiko Naka “ Directional Dark Matter Search with Nuclear Emulsion”, IDM2012 conference 2012, July 24, Chicago, USA (査読あり)

⑤ Tatsuhiko Naka “Directional Dark Matter Search Project with Very High Resolution Nuclear Emulsion”, 2013, Jan. 16<sup>th</sup>, University of Bern, Switzerland (Invited seminar)

⑥ Tatsuhiko Naka “Directional Dark Matter with Nuclear Emulsion”, 2013 March 7, SLAC, USA (査読あり)

⑦ 中 竜大 他、「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～」日本物理学会年次大会 2013年3月26-29日 広島大(発表27日)  
(査読なし)

〔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  
なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中 竜大 (NAKA TATSUHIRO)  
名古屋大学・高等研究院・特任助教  
研究者番号：00608888

(2) 研究分担者

なし ( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

なし ( )

研究者番号：