

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 2 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B) (海外学術調査)

研究期間：2014～2016

課題番号：26302003

研究課題名(和文)原子核乾板による暗黒物質の検出 -グランサッソー研究所におけるテスト実験-

研究課題名(英文) Directional Dark Matter detection by Nuclear Emulsion

研究代表者

中村 光廣 (NAKAMURA, Mitsuhiro)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

研究者番号：90183889

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：暗黒物質の衝突で生じる反跳原子の飛跡を超微粒子原子核乾板(NIT)で捕らえ、その反跳方向に太陽系の固有運動起因の偏りがある事をもって暗黒物質の信号とする方向探索実験を推進した。低BGのNITの開発、100nm長の飛跡を讀取る讀取装置の開発、反跳原子検出効率の反跳エネルギー依存性の評価を行い、10kg級の実験でイタリアグランサッソー研究所で実験を行うDAMA/LIBRA実験が主張する暗黒物質のパラメータ領域をカバーできることを確認した。同研究所に実験趣意書(LOI)を提出し、準備実験NEWSdmとして認められ、地下に割り当てられた実験エリアで、パイロットラン、中性子測定ほか実験の準備を開始した。

研究成果の概要(英文)： We have been promoting a directional dark matter detection experiment using super fine grain nuclear emulsion (NIT). Development of low BG NIT, of high resolution read-out system to detect ~100nm long recoil tracks, evaluation of the dependence of the detection efficiency on the recoil energy have been performed. It is concluded that the sensitivity of 10kg NIT will cover the parameter region claimed by the DAMA/LIBRA experiment. Letter of Intent has been submitted to LNGS Science Committee, and accepted as a test experiment named NEWSdm. Experimental area at the underground laboratory has been specified, and Pilot run and BG measurement run has been performing in the specified zone.

研究分野：素粒子宇宙物理学

キーワード：暗黒物質 原子核乾板

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙の暗黒物質の有力候補として超対称性理論などが予言する弱い相互作用しかし重い素粒子 (WIMPS) が有力候補としてあげられており、様々な実験がその検出を目指して検出器の開発・観測を行っている。

WIMPS の検出はその衝突により生じた反跳原子の信号を捕らえることで行うが、暗黒物質の信号である事の積極的な特徴として、1)地球の公転運動に付随する反跳事象数の季節変動、2) 反跳原子の方向が太陽系の銀河内公転運動から期待される方向と一致することを利用する。これまでに前者の手法で、グランサッソー地下研究所で観測を行っている DAMA 実験が季節変動するシグナルを  $9\sigma$  の有意性で検出したとする一方、同じく同手法で、同研究所で観測を行う XENON 実験が、DAMA の信号領域を排除するなど、同じ季節変動を捕らえる方法を採用しているが互いに矛盾した結果を示している。このためこれと相補的な反跳方向を用いる手法でのクロスチェックが求められている状況にある。

反跳方向検出を用いる実験手法としては、ガスを用いる手法があるが、標的が気体であり質量が稼げないこと、また短い飛跡の反跳方向検出は信号の拡散によって容易でないことにより、大型化には限界が見えてきている。我々は検出器として結晶サイズ数十 nm の超微粒子の原子核乾板を用いる手法を提案し、20nm 級の超微粒子原子核乾板の実現、100nm 程度の長さしかない極短飛跡の超高解像度光学顕微鏡による検出手法を開発してきた。

### 2. 研究の目的

超高解像度の原子核乾板を用いて、宇宙の暗黒物質の衝突によって生じる  $\sim 100\text{nm}$  長の反跳原子の飛跡をとらえ、暗黒物質の存在を直接検証する実験を推進する。

乳剤開発、読み出し装置の開発を推進するとともにイタリア・グランサッソー地下研究所にあるニュートリノ振動実験 OPERA の原子核乾板施設を活用し、地下で原子核乾板の塗布・現像ができる設備を準備、物理的なバックグラウンド事象を引き起こす中性子の流量を超高速の原子核乾板読取装置 HTS を用いることによって測定し、グランサッソー地下での中性子の流量測定を行う。並行して超微粒子乳剤を用いて g 級の暗黒物質検出のテスト実験を行い大規模化への課題を洗い出し、大規模実験への道を開く。

### 3. 研究の方法

- 1) 超微粒子原子核乾板の特性のさらなる理解とその改良。
- 2) 読取装置の開発を推進しその検出限界を見極める。
- 3) 原子核乾板を用いた中性子測定技術の開発を行い LNGS での中性子流量の測定を行う。

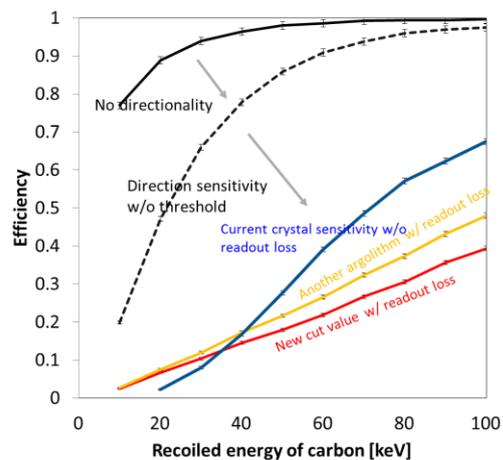
- 4) LNGS での地下実験環境を整備し、超微粒子原子核乾板を用いて g 級実験を実施。

これらをベースに、LNGS へ実験提案書を提出し、実験を成立させる。

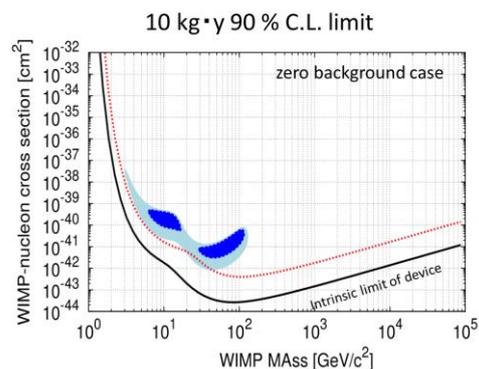
### 4. 研究成果

#### A) 検出効率の反跳エネルギー依存性

開発した超微粒子原子核乾板を暗黒物質検出実験に用いた場合に到達できる感度を定量的に示すために、超微粒子原子核乾板のモデル化と反跳原子飛跡検出のシミュレーション手法を開発した。そのモデル構築のために、イオン注入装置をもちいて原子核乾板に低エネルギーイオンを打ち込み反跳原子を疑似した飛跡を作成し、電子顕微鏡で測定した飛跡と実際に使用する高解像度光学顕微鏡システムで測定した飛跡とを一对で比較検討する手法を確立し、光学顕微鏡システムの検出効率の反跳エネルギー依存性を明らかにした (下図: 30KeV 以下での実証はまだ不十分。 )。



このシミュレーション手法を用いて、超微粒子原子核乾板を用いた暗黒物質検出実験の感度の定量化を行い、暗黒物質検出を信号の年周変動の検出で主張している DAMA/LIBRA 実験の結果の正否を、10 kg 級の超微粒子原子核乾板を用いた反跳方向検出実験によって検証できることを示した (下図: 赤線が上図の NewCut (赤線) の場合)。



また 60~100keV の炭素イオンを NIT に照射し、暗黒物質探索実験における角度分解能

を実測し、その角度分解能が約 350mrad であり、その主要要因が反跳原子が物質中で受ける多重散乱によることを確認し、方向検出法実現に十分な分解能を持つことを確認した。

B) 超微粒子乳剤に含まれる背景事象となる要素の究明

|                                  | U-238 | Th-232 | K-40  | Ag-110m | C-14  |
|----------------------------------|-------|--------|-------|---------|-------|
| 1 <sup>st</sup> prototype device | 27    | 6      | 69020 | (~400)  | 24000 |
| Current device                   | ~27   | ~6     | 35    | (~400)  | 24000 |
| Ultra-low BG device              | 1-10  | ~1     | < 35  | (~400)  | < 100 |

[ mBq/kg ]

ゲルマニウム検出器や質量分析器を使用して、原子核乾板本体に含まれる放射性物質の定量化を行った。結果を上表に示す。現状の乳剤ではカリウムの使用をやめることにより <sup>40</sup>K 起因のバックグラウンドの大幅削減に成功している。

乾板中のウラン・トリウム系列の崩壊で出る  $\alpha$  線が引き起こす ( $\alpha$ , n) 反応により生じる中性子が最後まで残るバックグラウンドとなり得るが、それにより生じる BG は現状で  $1.2 \pm 0.4$  反応/k g/年と推定される。一方で、100nm 以上の飛跡を持つ信号は ~0.05 反応/k g/年であることから、さらなる削減が必要である。今後現生生物由来のゼラチンを石油系のバインダーに置き換えることにより <sup>14</sup>C ほかウラン・トリウム系列の放射性物質含有量の削減を狙っている。

材料に混入するゴミの存在も明らかになってきており、材料のフィルタリングによる除去の可能性の検討なども行った。薬剤のフィルタリングによりゴミが新たに発生する可能性もあり、原因究明のためのスクリーニングが今後必要である。また現像に起因する BG 発生も確認しており、光学顕微鏡でのコントラスト増強に使用している物理現像のプロセスを排除することによりその増加を抑制できることも確認した。

C) X 線顕微鏡に代わるプラズモンを用いた超高分解像度解析手法の開発

これまで候補事象の詳細観察 (セカンドスキャン) には X 線顕微鏡を用いる方向で検討してきたが、X 線顕微鏡は解析速度の面で問題があり、これに代わる物として金属ナノ粒子の局在プラズモン共鳴を用いる光学解析の手法の有効性を検証中である。

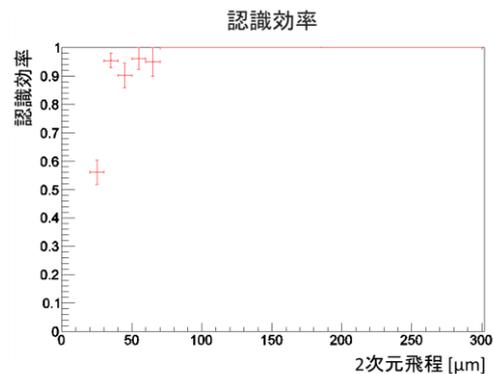
粒子の形状・材質などにより、偏光方向、波長に対する反射率が異なり、これらを解析する事により、対象の材質、形状に対する波長以下のサイズの分解能での情報を得ることが可能である。原理的な確認を行ったところであり、今後詳細な応答性について研究を進め、ゴミ・背景事象の削減における有効性を確認する。

D) 背景中性子測定

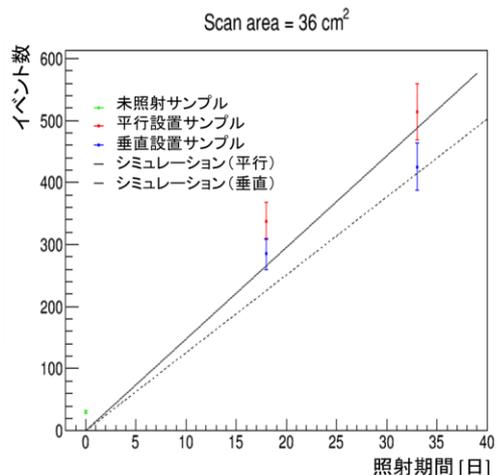
中性子はその衝突によって、暗黒物質の衝突が作り出すのと同じ反跳原子を生成する。暗黒物質の実験の推進において、中性子の信頼性のある測定は重要であり、その手法開発と、実測を行った。

中性子計測には飛程が長くなる反跳陽子を用いる。原子核乾板には重量%で 0.8% の水素が含まれているが、これをゼラチンの比率を高めることによって 2.2% にまで増やし中性子の反応率を高めた。読取装置として、最終的には 1 kg 級の標的を読み取る必要があるため、高速の読取装置 (HTS) を用いる必要があり、このために結晶サイズ 200nm の原子核乳剤を用いる事とした。また反跳陽子に感度を合わせ、背景となるコンプトン電子やフォグの増加を抑制するために、最少電離粒子検出を目的とする金硫黄増感をやめて、ハロゲンアクセプター増感を施した。

読取装置 HTS に反跳飛跡認識アルゴリズムを実装し、<sup>252</sup>Cf からの中性を照射したサンプルに対して GEANT4 によるシミュレーションとの比較を行い、良い一致を得た。このアルゴリズムの反跳陽子検出効率を下図に示す。反跳に次元飛程 40  $\mu$ m 以上ではほぼ 95% 以上の検出効率となっている。



調整された原子核乾板を、地上に設置し検出された反跳陽子と期待値の比較をしたものを下図に示す。



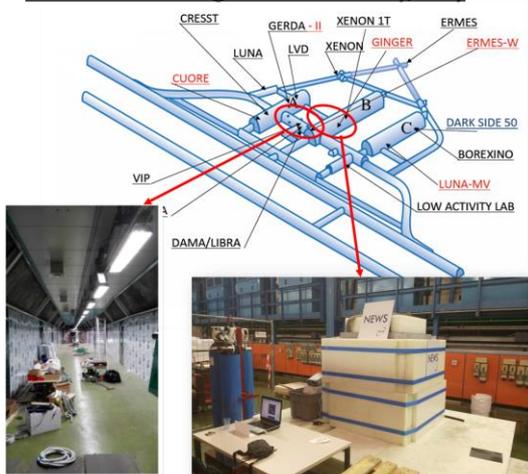
測定値と期待値 (シミュレーション結果) は、乾板準備中の初期蓄積成分をのぞけば良く一致しており、信頼性の高い中性子検出器となっている。

この検出器をグランサッソー地下研究所の  
に設置し、10g・月相当の照射を行った。現在  
読み出し解析中である。

#### E) LNGS での実験提案・環境整備

グランサッソー研究所のサイエンスコミ  
ッティ (LNGSSC) に Letter of Intent (LOI)  
を提出し、準備実験 NEWSdm として実験エリ  
アが割り当てられ、地下での原子核乳剤製造、  
塗布、現像をするための施設の建設と、パイ  
ロット RUN を開始した。

#### Gran Sasso underground laboratory, Italy



OPERA 実験で使用した鉛と、ポリエチレン  
のブロックでシールドを構築し、内部に  
-20°Cまで冷却できる冷却装置を設置、100g  
程度の照射まで出来る状態にした。

今後この環境を利用して 2017 年度は基礎  
性能評価 (長期安定性等)、小スケール (1-10  
g) バックグラウンドランを行い、これらの  
結果をまとめて Technical Design Report  
(TDR) を LNGSSC に提出。2018 年に原子核乳  
剤製造システムを地下へ設置し、乳剤輸送時  
に被るバックグラウンドを削減、-100g 級  
の実験へ拡張する。また赤道儀に搭載し本  
格的な方向探索試験を行う予定である。その  
後 2019 年以降に、10 kg スケールを想定  
した検出器マウントの建設、検出器作成環  
境の構築を行い、DAMA/LIBRA 領域をカ  
バーする方向感探索を展開して行く予定  
である。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

- 1) WIMP tracking with cryogenic nuclear emulsion, M. Kimura (KMI, Nagoya) et al., Nucl. Instrum. Meth. A845 (2017) 373-377 DOI: 10.1016/j.nima.2016.06.052
- 2) Nuclear emulsions for dark matter detection, Tadaaki Tani (Fuji Photo Film), Tatsuhiro Naka (KMI, Nagoya). Radiat. Meas. 95 (2016) 31-36 DOI: 10.1016/j.radmeas.2016.10.004
- 3) Readout technologies for directional WIMP Dark Matter detection, J.B.R. Battat (Wellesley Coll.) et al., Phys. Rept. 662 (2016)

- 1-46, DOI: 10.1016/j.physrep.2016.10.001
- 4) Development of a super-resolution optical microscope for directional dark matter search experiment, A. Alexandrov (INFN, Naples & Lebedev Inst.) et al., Nucl. Instrum. Meth. A824 (2016) 600-602, DOI: 10.1016/j.nima.2015.09.044
- 5) Intrinsic neutron background of nuclear emulsions for directional Dark Matter searches, A. Alexandrov (INFN, Naples) et al., Astropart. Phys. 80 (2016) 16-21 DOI: 10.1016/j.astropartphys.2016.03.003
- 6) Directional Dark Matter Search with the Fine Grained Nuclear Emulsion, Takashi Asada (Nagoya U.) et al., 2014. PoS KMI2013 (2014) 030
- 7) Nuclear Emulsion Technology and Directional Dark Matter Study, Tatsuhiro Naka, Asadam Takashi, Takayoshi Katsuragawa, Masahiro Yoshimoto, Atsuhiko Umemoto, Shunji Furuya, Shogo Machii, Mitsuhiko Nakamura, Toshiyuki Nakano, Osamu Sato (Nagoya U.). 2014. 9 pp. Published in PoS KMI2013 (2014) 017
- 8) Development of High Sensitivity Nuclear Emulsion and Fine Grained Emulsion, H. Kawahara, T. Asada, T. Naka, N. Naganawa, K. Kuwabara, M. Nakamura (Nagoya U.), Nucl. Phys. Proc. Suppl. 253-255 (2014) 216-217 DOI: 10.1016/j.nuclphysbps.2014.09.056
- 9) News: Nuclear Emulsion WIMP Search A. Alexandrov (INFN, Naples) et al., Nuovo Cim. C38 (2015) no. 1, 34 DOI: 10.1393/ncc/i2015-15034-1
- 10) A novel approach to dark matter search based on nanometric emulsions, A. Alexandrov (INFN, Naples) et al., JINST 9 (2014) no. 12, C12053 DOI: 10.1088/1748-0221/9/12/C12053
- 11) Nuclear emulsions as a very high resolution detector for directional dark matter search, Nicola D' Ambrosio (Gran Sasso) et al., JINST 9 (2014) no. 01, C01043 DOI: 10.1088/1748-0221/9/01/C01043

[学会発表] (計 60 件)

国際会議 (16 件)

- 1) International Workshop on Double Beta Decay and Underground Science (DBD16), November 8th - 10th, 2016 Osaka, Japan  
“NEWS : Nuclear Emulsions for WIMP Search”, Atsuhiko Umemoto
- 2) Blois 2016: 28th Rencontres de Blois on Particle Physics and Cosmology, May 29 - June 03, 2016, BLOIS France  
“NEWS: Nuclear Emulsions for WIMP Search”, Masahiro Yoshimoto
- 3) Identification of Dark Matter (IDM2016) 2016 18-22 July 2016, the Cutlers' Hall, Sheffield, UK,  
“The Technical Improvements for NEWS Experiment”, Takashi Asada
- 4) 14th VIENNA CONFERENCE ON INSTRUMENTATION,

2016 Feb. 15-19, Vienna University of Technology, Vienna, Austria  
“WIMP tracking with cryogenic nuclear emulsion”, Mitsuhiro Kimura  
5) ISETS' 15, 2015年11月27-29日, 名古屋大学  
5-1) Development of nuclear emulsion for fast neutron measurement, S. Machii  
5-2) Dark Matter Search with Cryogenic Nuclear Emulsion, M. Kimura  
6) CYGNUS2015, Fifth workshop on directional detection of dark matter  
Occidental College, L.A., CA 2-4 June 2015  
6-1) The performance and status of directional dark matter search with the nuclear emulsion, 浅田貴志  
6-2) Detection efficiency and angular resolution of directional dark matter search with the nuclear emulsion, 桂川貴義  
6-3) Invention of super-resolution readout system using plasmon of directional dark matter search with emulsion, 梅本篤宏  
7) The 1st International Conference on Advanced Imaging (ICAI), 一橋メモリアルホール, 会期6月17日~19日  
7-1) The Simulation about Effects of Micro Construction in the Nuclear Emulsion, 浅田貴志  
7-2) Image Analysis to Detect Submicron Tracks for Directional Dark Matter Search, 桂川貴義  
7-3) The Study of Low Background Fine-grained Emulsion for Dark Matter Search, 古屋駿二  
8) DBD2014, 2014 Oct. 5-7<sup>th</sup>, Hawaii Island, United States,  
“Directional Dark Matter Search Project with Super-High Resolution Nuclear Emulsions”, Tatsuhiro Naka (中 竜大)  
9) 26th International Conference on Nuclear Tracks in Solids (ICNTS26), 15th-19th September 2014, Kobe, Japan  
9-1) Fine grained nuclear emulsion and new readout system for dark matter search, Takashi Asada  
9-2) Development of nuclear emulsion for fast neutron measurement, Shogo Machii  
9-3) Development of Fast Neutron Detection for Dark Matter Search using Nuclear Emulsion, Masahiro Yoshimoto

国内会議・学会 (44件)

1) 日本物理学会 2017年 年次大会, 2017年3月17日(金)~20日(月), 大阪大学豊中キャンパス  
1-1) エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWS(1)~解析速度と S/N 向上のための光学システムの開発~, 梅本篤宏  
1-2) 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~, 中竜大  
2) 画像関連学会連合会秋季大会, 2016年11月17日(木)~18日(金), 京都工芸繊維大学  
2-1) 微粒子原子核乾板の原理的検出能力の直接

測定, 浅田貴志  
2-2) 超微粒子原子核乾板における潜像退行等の特性評価, 岡田晟那  
2-3) 超微粒子乳剤における潜像核の酸化還元電位測定, 多田智美  
2-4) 超微粒子原子核乾板におけるプラズモン共鳴を用いた不純物識別, 梅本篤宏  
2-5) 超微粒子原子核乾板の荷電粒子に対する蛍光発光応答の評価, 市来浩勝  
3) 日本物理学会 2016年 年秋季大会, 2016年9月21日(水)~24日(土), 宮崎大学 木花キャンパス  
3-1) ダークマターアクシオン探索に向けた超伝導 SNS 接合の開発, 白石卓也  
3-2) 超微粒子原子核乾板の荷電粒子に対する蛍光発光の評価, 市来浩勝  
3-3) エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWS(2)~検出器応答を含む方向感度シミュレーション~, 浅田貴志  
3-4) エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWS(2)~解析段階における背景事象の理解~, 桂川貴義  
3-5) エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWS(3)~全体報告~, 中竜大  
4) 日本写真学会年次大会, 2016年6月8日~9日, 東京工業大学すずかけ台キャンパス  
4-1) 基調講演:宇宙におけるダークマター問題とその直接探索, 中竜大  
4-2) 暗黒物質探索のための超微粒子乳剤の低温特性の研究, 木村充宏  
4-3) 超微粒子原子核乾板の荷電粒子に対する蛍光発光応答の評価, 市来浩勝  
4-4) エマルジョン中のダスト除去, 梅本篤宏  
4-5) 原子核乾板の検出能力限界の測定と評価, 浅田貴志  
5) 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  
5-1) 原子核乾板を用いた環境高速中性子フラックス及び方向分布の測定, 待井翔吾  
5-2) エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWS(1) プラズモニクスを用いた飛跡検出性能の評価, 梅本篤宏  
5-3) エマルジョン暗黒物質探索実験 NEWS(2) 超微粒子乳剤の低バックグラウンド化に向けた研究, 木村充宏  
5-4) 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, 中竜大  
6) 極低放射能技術研究会, 2016年3月13-15日, 徳島大学  
NEWAGE の報告・原子核乾板の報告, 中竜大  
7) 第 30 回固体飛跡検出器研究会, 2016年3月14-15日、福井大学(敦賀キャンパス)  
原子核乾板による環境高速中性子計測, 吉本雅浩  
8) 第 13 回プラズモニクスシンポジウム, 2016年1月22日、愛媛大学  
局在表面プラズモン共鳴を応用した原子核乾板における超解像飛跡解析, 梅本篤宏  
9) 画像関連学会連合会 第二回秋季大会, 2015年11月19日、20日、京都工芸繊維大学  
9-1) 超微粒子原子核乾板デバイスにおける内部放射線同位体量の測定, 中竜大  
9-2) 原子核乾板の本質的な分解能の限界の測定

と解析への影響の評価, 浅田貴志  
9-3) 極低バックグラウンド超微粒子原子核乾板の開発～核阻止能によるフォノン励起を利用したアプローチ～, 古屋駿二  
10) 日本物理学会 2015 年秋季大会, 大阪市立大学, 2015 年 9 月 25 日～28 日  
10-1) エマルジョン暗黒物質探索実験(1)現状と展望, 浅田貴志  
10-2) エマルジョン暗黒物質探索実験(2)電子バックグラウンド除去効率と飛跡検出効率の測定, 桂川貴義  
10-3) エマルジョン暗黒物質探索実験(3)超微粒子乳剤の低温化による電子バックグラウンド除去の研究, 木村充宏  
11) 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学早稲田キャンパス, 2015 年 3 月 21 日～24 日  
11-1) エマルジョン暗黒物質探索実験(2)～全体報告～, 浅田貴志  
11-2) エマルジョン暗黒物質探索実験(2)～解析装置の性能向上～, 桂川貴義  
11-3) エマルジョン暗黒物質探索実験(3)～超解像技術を用いた飛跡解析法の研究開発～, 梅本篤宏  
12) 画像関連学会連合会第一回秋季合同大会(1st Meeting of Federation of Imaging Societies 2014), 2014 年 11 月 20 日～ 11 月 21 日, 京都工芸繊維大学  
12-1) 超微粒子乳剤における潜像形成メカニズムの考察, 古屋駿二  
12-2) 極短粒子線飛跡に対する原子核乾板の分解能評価とシミュレーション予測, 浅田貴志  
12-3) 原子核乾板における局在表面プラズモン共鳴現象を用いた超解像飛跡解析, 梅本篤宏  
12-4) 高速中性子検出用原子核乾板の開発, 待井翔吾  
13) 日本物理学会 2014 年秋季大会, 2014 年 9 月 18～21 日, 佐賀大学 本庄キャンパス  
13-1) エマルジョン暗黒物質探索実験に向けた開発状況 1～デバイス開発状況～, 中竜大  
13-2) エマルジョン暗黒物質探索実験に向けた開発状況 2～検出効率に関する研究～, 桂川貴義  
13-3) 暗黒物質方向探索実験における表面プラズモン共鳴を利用した飛跡解析, 梅本篤宏  
13-3) 超微粒子原子核乾板における低バックグラウンド化に向けた研究開発, 古屋駿二  
14) 日本写真学会年次大会, 2014 年 5 月 26 日～ 5 月 27 日, 千葉大学けやき会館  
14-1) 高速中性子検出用原子核乾板の開発, 待井翔吾  
14-2) 超微粒子乳剤原子核乾板における金沈着現象の特性評価, 中竜大  
14-3) 原子核乾板中の銀ナノ粒子の局在プラズモン共鳴を用いた飛跡解析, 梅本篤宏  
14-4) 超微粒子原子核乾板における感度研究, 浅田貴志

〔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

名古屋大学 F 研究室ホームページ

<http://flab.phys.nagoya-u.ac.jp/2011/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

中村光廣 (Mitsuhiro NAKAMURA)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・教授

研究者番号: 90183889

### (2) 研究分担者

中野敏行 (Toshiyuki NAKANO)

名古屋大学・大学院理学研究科・講師

研究者番号: 50345849

佐藤 修 (Osamu SATO)

名古屋大学・未来材料・システム研究所・助教

研究者番号: 20388964

中 竜大 (Tatsuhiko NAKA)

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究機構  
特任助教

研究者番号: 00608888

### (3) 連携研究者

長縄直崇 (Naotaka NAGANAWA)

名古屋大学・未来材料・システム研究所  
研究員

研究者番号: 60402434

森島邦博 (Kunihiro MORISHIMA)

名古屋大学・高等研究院・特任助教

研究者番号: 30377915