

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 4 月 21 日現在

機関番号：14501

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2011～2014

課題番号：23684014

研究課題名(和文)低バックグラウンド・大容積微細飛跡検出器による方向に感度を持った暗黒物質探索実験

研究課題名(英文) Direction-sensitive dark matter direct search experiment with a low-background large-volume gaseous time projection chamber

研究代表者

身内 賢太郎 (Miuchi, Kentaro)

神戸大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：80362440

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 21,700,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の組成の約1/4をしめる未発見素粒子「暗黒物質」の正体解明のために、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」探索実験が世界中で進められている。本研究では低バックグラウンド大容積の微細飛跡検出器を製作、神岡地下実験室で長期間の観測により方向に感度を持つ暗黒物質直接探索実験を世界最高感度で行うことを目的とした。実際に最初の2年間で低バックグラウンド材料を用いた検出器を製作、新規に冷却活性炭を用いたガス循環システムを導入し、詳しく性能評価を行った。その後神岡地下実験室で観測を行い、方向に感度を持つ手法としての暗黒物質に対する最高感度を更新、PTEP誌に掲載された。

研究成果の概要(英文)：Dark matter, an undiscovered but known to occupy 1/4 of the energy density in the universe, attracts a great interest in astrophysics and particle physics. Many experiments are ongoing to detect this dark matter in a direct way, in which we measure the energy deposition to the recoil nuclei by dark matters. This research program aimed to develop a large-volume low-background detector and measure in an underground laboratory. We developed a detector with low background materials and a gas circulation system with cooled charcoal in the first two years. We then installed the detector system in Kamioka underground laboratory and performed dark matter search measurements. We obtained the best direction-sensitive limits as the results.

研究分野：宇宙線実験

キーワード：暗黒物質 宇宙線 素粒子実験 地下実験 放射線検出器 ガス検出器 TPC 低放射能技術

1. 研究開始当初の背景

(1)暗黒物質

2002年以降、宇宙の組成の約1/4は暗黒物質であることがWMAP衛星などの観測結果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、2010年に開始した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ている。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」と呼ばれる。

(2)直接探索

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」探索実験もここ2,3年で大きな動きを見せている。DAMAグループは2008年に、暗黒物質起源と考えられる計数率の季節変動を再度捉えたことを報告した。検出器を一新、質量を増加して行った4年間の再観測の結果であるが、信頼度は高い。2009年にはCDMSグループが発見の可能性を示唆するなど、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る。このような状況下、世界の暗黒物質探索実験は大分して

a) 大質量化によるさらなる感度向上 (固有信号は計数率の数%の季節変動) : 日本ではXMASS実験

b) 方向有感型検出器による確度の高い検出 (方向の前後の非対称性は図1に示す通り最大で10倍程度) : NEWAGE (本申請課題) が日本・世界をリード

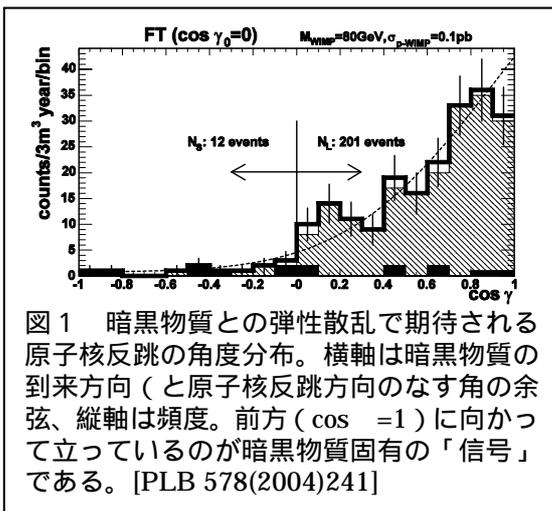


図1 暗黒物質との弾性散乱で期待される原子核反跳の角度分布。横軸は暗黒物質の到来方向(と原子核反跳方向のなす角の余弦、縦軸は頻度。前方(cos γ = 1)に向かって立っているのが暗黒物質固有の「信号」である。[PLB 578(2004)241]

の2つのトレンドで動いている。b)としては、英国DRIFTグループが1990年代よりR&Dを進めており、2004年に我々NEWAGEグループが研究を開始、DRIFTグループを抜いて世界最高感度を有するに至った。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、ここ2,3年では米国、仏国のグループも開発に着手、各グループが特色を活かした研究によって凌ぎを削っている。本

研究は、1,2年のうちに得られるであろうXMASS実験の結果を「発見」へとつなぎ、日本が暗黒物質探索実験をリードする為の重要な時期での申請である。

我々はこれまでに、実験提唱、プロトタイプ機の製作・世界初の方に感度を持つ探索実験、地下実験による性能評価とバックグラウンド研究を行ってきた。これらの結果、検出器の低バックグラウンド化と大型化によってDAMA領域に感度を到達させることが可能であることが判明、これを第一のマイルストーンと設定した。長期的には、大型科研費によるさらなる改善によって、暗黒物質の決定的な発見から銀河内での運動研究へと発展させる。

2. 研究の目的

本研究の目標は、大型・低バックグラウンドの三次元微細飛跡検出器を製作、方向に感度を持つ暗黒物質探索実験を世界最高感度で行うことである。

方向に感度をもつ暗黒物質探索実験分野この分野では本プロジェクトは世界最高感度を有している。実際、

独自のマイクロパターン検出器による、微細な三次元飛跡検出(システムとして実績)

地下実験による方向に感度をもった暗黒物質探索実験(検出器開発に終わらない)

の2点を行ってきたことは我々の特色として世界的に評価されている。上記( )内は、戦略としては基本的な物であるが、研究代表者としてこれらを実際にバランスよく行ってきたことがこれまでの準備研究の特色である。これを基本姿勢として、読み出し回路、ガス循環等にアイデアを加えて発展させながら着実に踏襲させて行く。

3. 研究の方法

これまでの準備研究によって、本研究で製作する検出器には

低バックグラウンド(BG)化: 検出器内部のBGをプロトタイプの1/10以下に低減

検出器の大型化: プロトタイプの30cm角検出器を大型化

の性能が必要であることが分かった。平成23年度及び平成24年度に検出器各部の製作及び地下実験室への設置を行う。この際、予備試験不要な物を平成23年に、予備試験の必要な物を平成24年に製作する。平成25年には地下測定を開始、必要に応じて検出器の改良を加えながら、平成26年度まで観測を行うという計画を立案した。

4. 研究成果

(1) 本研究で製作した検出器、

「NEWAGE-0.3b」の模式図を図2に示す。

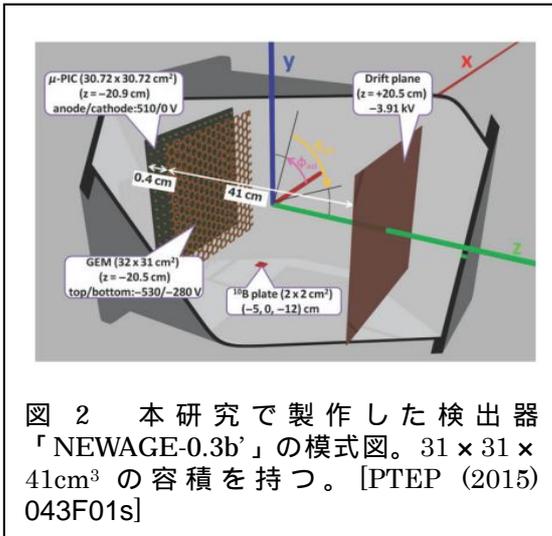


図2 本研究で製作した検出器「NEWAGE-0.3b」の模式図。31×31×41cm<sup>3</sup>の容積を持つ。[PTEP (2015) 043F01s]

本検出器は31×31×41cm<sup>3</sup>の容積をもち、検出器空間を0.1気圧のCF<sub>4</sub>ガスで満たして用いた。本研究では検出器の内部構造として用いる物質を低バックグラウンド化の観点から選択し、従来用いていたガラス繊維強化型のフッ素樹脂からPEEKと呼ばれるプラスチック材料に変更して製作した。大型化としては、従来30cmであったドリフト長を41cmとした。また、従来は0.2気圧のガスを用いていたが、検出器のエネルギー閾値を低減するために、0.1気圧のCF<sub>4</sub>ガスを用いることとした。通常ガス圧を下げると放電などが起こり不安定になるが、本研究では製作精度の向上したMPGD(微細加工技術を用いたガス検出器)を用い、慎重にパラメータ調整を行なうことで低圧力での検出器動作を実現した。また、通常ガス圧での検出器材料中のウラン、トリウムなど放射性不純物の系列崩壊でラドンが希ガスとして放出され、バックグラウンドとなる。本研究ではこうしたバックグラウンドを低減、更にガス検出器としての長期安定動作を達成するために冷却活性炭

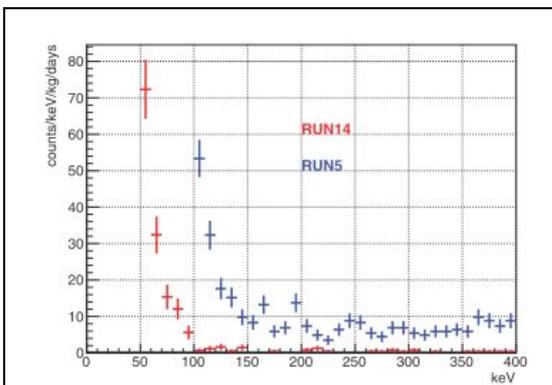


図3 本研究で得られたエネルギースペクトル。横軸はエネルギーで縦軸は計数率。RUN5が以前の結果でRUN14が本研究の成果。閾値が100keVから50keVになったとともに100keVでの計数率(バックグラウンド)が1/10程度に低減した。[PTEP (2015) 043F01s]

を用いたガス循環システムを構築、システムとし動作させた。こうして製作した検出器の性能評価を行い、従来100keVであったエネルギー閾値を50keVとしたことを確認した後、平成24年度に神岡地下実験室に設置した。

(2) 地下実験室への設置の後、現地での各種調整を経て、2013年の7月から11月にかけて神岡地下実験室で暗黒物質探索実験を行った。図3に本研究で得られたエネルギースペクトルを示す。主にバックグラウンド事象として理解されるこれらのスペクトルにおいて、RUN5として表示されているのが以前の結果、RUN14が本研究の結果である。方向に感度を持つエネルギー閾値が100keVから50keVに低減され、100keVでの計数率に注目すると、以前の結果の1/10程度になっているのが分かる。暗黒物質に対する感度は、エネルギー閾値(低いほど感度が向上する)とバックグラウンド計数率(低いほど感度が向上する)によって決定されるため、本研究で製作した検出器によって、以前の結果を上回る感度を得ていることが示されている。

図4には、我々の検出器の特徴的な結果である、原子核反跳事象を用いた天球図を示す。赤色のマーカーでRUN14の測定で得られた50keVから400keVのエネルギーを持つ原子核反跳の方向を天球に投影したものを示す。青色のマーカーでは各時刻における暗黒物質の到来方向を示している。対応する点同士の角度が図1に示すような暗黒物質の到来方向と反跳原子核の方向の角度となり、これを用いて暗黒物質と通常原子核(陽子)の反応率(散乱断面積)に対する上限値を計算したのが図5である。これまでの結果(NEWAGE RUN5として示す)を約一桁上回る制限を与える

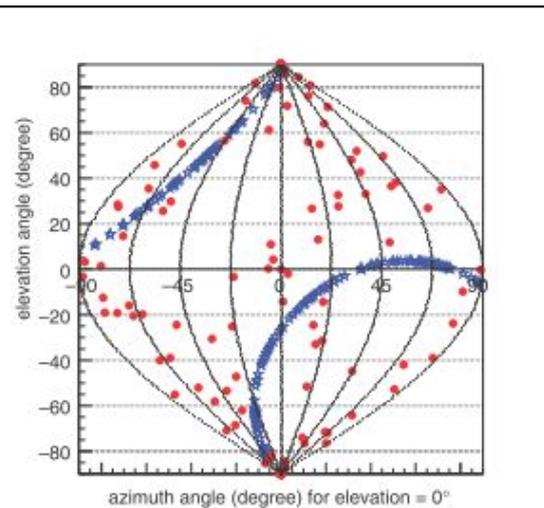


図4 本研究の特徴的な成果である、反跳原子核の方向を用いて描いた天球図。横軸は方位角、縦軸は仰角。赤色の点が得られた事象を表し、青印で期待される暗黒物質の到来方向を示す。[PTEP (2015) 043F01s]

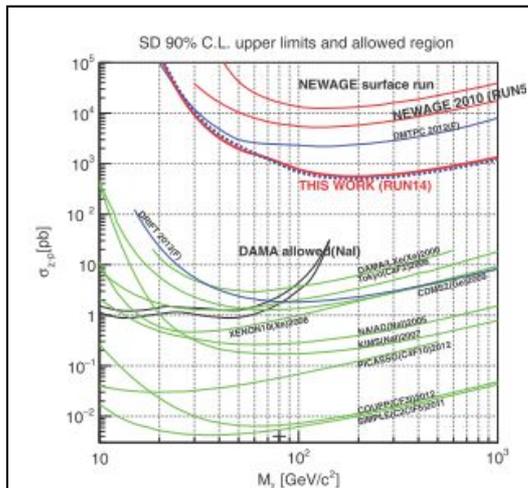


図 5 本研究で得られた暗黒物質と通常の原子核との反応に対する制限。横軸が暗黒物質の質量、縦軸に暗黒物質と通常原子核との散乱断面積を示す。それぞれの曲線の上は排除された領域。THIS WORK で本研究の成果を示す。方向に感度を持つ手法としては、DMTPC の結果を上回り、最高感度を達成した。[PTEP (2015) 043F01s]

ともに、DMTPC2012 として示されている、方向に感度を持つ他の実験を上回る結果を得た。一方で方向に感度を持たない多くの実験はさらに良い制限を与えており、今後さらなるバックグラウンドの研究と低減を進めることで感度を向上させることが重要であることも判明した。

## 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 8 件)

[1] "Direction-sensitive dark matter search with gaseous tracking detector NEWAGE-0.3b" (査読有)

Kiseki Nakamura, Kentaro Miuchi, Toru Tanimori, Hidetoshi Kubo, Atsushi Takada, Joseph D. Parker, Tetsuya Mizumoto, Yoshitaka Mizumura, Hironobu Nishimura, Hiroiyuki Sekiya, Atsushi Takeda, Tatsuya Sawano, Yoshihiro Matsuoka, Shotaro Komura, Yushiro Yamaguchi, and Takashi Hashimoto

Progress of Theoretical and Experimental Physics

(2015) 043F01s

doi: 10.1093/ptep/ptv041

[2] "Simulation of Gas Avalanche in a Micro Pixel Chamber using Garfield++" (査読有)

A. Takada, T. Tanimori, H. Kubo, J. D. Parker, T. Mizumoto, Y. Mizumura, S. Iwaki, T. Sawano, K. Nakamura, K. Taniue, N. Higashi, Y. Matsuoka, S. Komura, Y. Sato,

S. Nama-mura, M. Oda, S. Sonoda, D. Tomono, K. Miuchi, S. Kabuki, Y. Kishimoto, S. Kurosawa

JINST8 (2013) C10023

doi:10.1088/1748-0221/8/10/C10023

[3] "Spatial resolution of a uPIC-based neutron imaging detector" (査読有)

J.D. Parker, M. Harada, K. Hattori, S. Iwaki, S. Kabuki, Y. Kishimoto, H. Kubo, S. Kurosawa, Y. Matsuoka, K. Miuchi, T. Mizumoto, H. Nishimura, T. Oku, T. Sawano, T. Shinohara, J. Suzuki, A. Takada, T. Tanimori, K. Ueno

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 726 2013 Pages 155-161  
doi:10.1016/j.nima.2013.06.001

[4] "NEWAGE" (査読無し)

K. Nakamura, K. Miuchi, T. Tanimori, H. Kubo, T. Mizumoto, J. D. Parker, A. Takada, H. Nishimura, H. Sekiya, A. Takeda, T. Sawano, Y. Matsuoka, S. Komura, Y. Yamaguchi and S. Nakaura

Proceedings of "CYGNUS 2013 : 4th Workshop on directional detection of Dark Matter" Toyama, Japan, June 10-12, 2011

Journal of Physics: Conference Series Volume 469 012003

DOI:10.1088/1742-6596/469/1/012003

[5] "方向に感度を持つ暗黒物質探索実験 NEWAGE" (査読無し、解説記事)

中村輝石、身内 賢太郎(高エネルギーニュース 第31巻 2013年 4-6月 287-295 ページ)

DOI:10.1088/1742-6596/469/1/012003

[6] "Neutron imaging detector based on the  $\mu$ PIC micro-pixel chamber" (査読有)

J.D. Parker, K. Hattori, H. Fujioka, M. Harada, S. Iwaki, S. Kabuki, Y. Kishimoto, H. Kubo, S. Kurosawa, K. Miuchi, T. Nagae, H. Nishimura, T. Oku, T. Sawano, T. Shinohara, J. Suzuki, A. Takada, T. Tanimori, K. Ueno Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 697 2012 Pages 23-31

DOI:10.1016/j.nima.2012.08.036

[7] "Low pressure gas study for a direction-sensitive dark matter search experiment with MPGD" (査読有)

K Nakamura, K Miuchi, S Iwaki, H Kubo, T Mizumoto, H Nishimura, J D Parker, T Sawano, A Takada, T Tanimori, H Sekiya and A Takeda 2012 JINST 7 C02023

[8] "NEWAGE" (査読無し)  
K. Miuchi, K. Nakamura, A. Takada, S. Iwaki, H. Kubo, T. Mizumoto, H. Nishimura, J. Parker, T. Sawano, T. Tanimori, H. Sekiya, A. Takeda, T. Fusayasu, A. Sugiyama and M. Tanaka  
Proceedings of "CYGNUS 2011 : 3rd Workshop on directional detection of Dark Matter"  
Aussois, France, June 8-10, 2011  
EAS publication Series 53 (2012) pp. 33-41, 1109. DOI:10.1051/eas/0936034

[学会発表](計 30件)

[1] Kentaro Miuchi  
"NEWAGE"  
7th international symposium on "large TPCs for low-energy rare event detection"  
15-17 Decembert 2014 Paris, France

[2] Kentaro Miuchi  
"Dark Matter"  
Poster presentarion at 11th Japanese-German Frontiers of Science Symposium(JGFoS)  
October 31 - November 2, 2014 ,Hotel INNSIDE by Melia BREMEN (Bremen, Germany)

[3] Keishi Hosokawa and Kentaro Miuchi  
"DM direct searches in JAPAN"  
KUBEC International Workshop on Dark Matter Searches  
27-29 August 2014 Brussels, Beigium

[4] 身内賢太郎  
NEWAGEにおけるラドンバックグラウンド  
「極低放射能技術」研究会  
2014年 3月 10日 兵庫県立 淡路夢舞台国際会議場

[5] 身内賢太郎  
方向感度検出器の課題  
「極低放射能技術」研究会  
2014年 3月 10日 兵庫県立 淡路夢舞台国際会議場

[6] 身内賢太郎  
ガス飛跡検出器による暗黒物質探索実験  
平成 26 年度宇宙線研究所共同利用研究成果発表研究会(東京大学宇宙線研究所) 2014年 12月 13日

[7] 身内賢太郎  
低バックグラウンド技術を応用した 方向感度を持つ暗黒物質探索の基礎研究  
2014年 8月 23日 大阪大学 豊中キャンパス シグマホール 「地下素核研究」第一回研究会

[8] 身内賢太郎(招待講演)  
暗黒物質直接探索  
2014年 7月 29日 京都大学 基礎物理学研究所 基研研究会 素粒子物理学の進展 2 0 1 4

[9] NEWAGE 実験 33: 高感度化のための研究  
橋本隆 (身内賢太郎)  
日本物理学会 第 71 回年次大会, 2015 年 03 月 24 日, 早稲田大学 早稲田キャンパス

[10] NEWAGE 実験 32: 地下実験経過報告  
稲田知大 (身内賢太郎)  
日本物理学会 第 71 回年次大会, 2015 年 03 月 24 日, 早稲田大学 早稲田キャンパス

[11] NEWAGE 実験 31: 暗黒物質探索実験における反跳原子核の前後判定  
山口祐史郎 (身内賢太郎)  
日本物理学会 第 70 回年次大会, 2014 年 09 月 18 日, 佐賀大学 本庄キャンパス

[12] NEWAGE 実験 30: 高感度化のための研究  
橋本隆 (身内賢太郎)  
日本物理学会 第 70 回年次大会, 2014 年 09 月 18 日, 佐賀大学 本庄キャンパス

[13] NEWAGE 実験 29: 暗黒物質探索実験における反跳原子核の前後判定  
山口祐史郎 (身内賢太郎)  
日本物理学会 第 69 回年次大会, 2014 年 03 月 29 日, 東海大学 湘南キャンパス

[14] NEWAGE 実験 28: 低圧ガスを用いた新検出器による地下実験報告 2  
中村輝石 (身内賢太郎)  
日本物理学会 第 69 回年次大会, 2014 年 03 月 29 日, 東海大学 湘南キャンパス

[15] "暗黒物質研究の現状"  
身内賢太郎  
日本物理学会北陸支部講演会  
2013 年 12 月 20 日

[16] 直接探索の将来計画(招待講演)  
身内賢太郎  
日本物理学会 2013 年秋季大会 高知大学(シンポジウム「暗黒物質探索の現状と将来」)  
2013 年 9 月 21 日

[17] NEWAGE 実験 27: 低圧ガスを用いた新検出器による地下実験報告  
中村輝石 (身内賢太郎)  
日本物理学会 2013 年秋季大会, 2013 年 09 月 20 日, 高知大学 朝倉キャンパス

[18] NEWAGE 実験 26: 2012 年地下測定結果  
日本物理学会 2013 年秋季大会 高知大学  
身内賢太郎

2013年9月20日

[19] NEWAGE 身内賢太郎  
CRC タウンミーティング(東京大学柏キャンパスメディアホール) 2014年3月14日  
2013

[20] ガス飛跡検出器による暗黒物質探索実験 身内賢太郎  
平成 25 年度宇宙線研究所共同利用研究成果発表研究会(東京大学宇宙線研究所) 2013年12月21日

[21] "NEWAGE" Kentaro Miuchi  
Identification of Dark Matter(IDM12)  
23-27 July 2012. Chicago, USA

[22] "NEWAGE" Kentaro Miuchi  
Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics(NDM12)  
11-15 June 2012. Nara, Japan

[23] 地下実験 身内賢太郎  
高エネルギー 春の学校(ラフォーレ琵琶湖)  
2012年5月18日

[24] NEWAGE 実験 25 : 次期地下実験用検出器の製作  
中村輝石 (身内賢太郎)  
日本物理学会 第 68 回年次大会, 2013 年 03 月 27 日, 広島大学 東広島キャンパス

[25] NEWAGE 実験 24 : 次期地下実験用検出器の製作  
中村輝石 (身内賢太郎)  
日本物理学会 2012 年秋季大会, 2012 年 09 月 14 日, 京都産業大学 神山キャンパス

[26] NEWAGE 実験 23 : 2012 年地下測定経過報告  
日本物理学会 2012 年秋の分科会 京都産業大学  
身内賢太郎  
2012 年 9 月 14 日

[27] "NEWAGE" Kentaro Miuchi  
CYGNUS 2011 : 3rd Workshop on directional detection of Dark Matter  
7-10 June 2011

[28] " NEWAGE 実験 22 : 低圧ガスにおける検出器の挙動"  
中村輝石 (身内賢太郎)  
日本物理学会 第 67 回年次大会, 2012 年 03 月 27 日, 関西学院大学 西宮上ヶ原キャンパス

[29] NEWAGE 実験 21 : 原子核反跳の前後判定

日本物理学会秋季大会 弘前大学  
身内賢太郎

[30] 2011 年 9 月 16 日  
"NEWAGE 実験 20: 低圧ガスにおけるダークマター探索実験"  
日本物理学会 2011 年秋季大会 (弘前大学文京町キャンパス) 中村輝石 (身内賢太郎)  
2011 年 9 月 16 日

[その他]  
ホームページ等  
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)

身内賢太郎  
<http://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/~miuchi/work/work.htm>

6 . 研究組織  
(1)研究代表者  
身内賢太郎 (MIUCHI Kentaro)  
神戸大学・大学院理学研究科・准教授  
研究者番号 : 80362440

(2)研究分担者  
( )

研究者番号 :

(3)連携研究者 関谷洋之 (SEKIYA Hiroyuki)  
東京大学・宇宙線研究所・助教  
研究者番号 : 90402768

(4)研究協力者 中村輝石 (NAKAMURA Kiseki)  
京都大学・大学院理学研究科・研究員