

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24244025

研究課題名(和文)ダークマターの探索

研究課題名(英文)A Search for Dark Matter

研究代表者

鈴木 洋一郎(Suzuki, Yoichiro)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授

研究者番号：70144425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 36,900,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙には、通常の物質である原子分子の他に、ダークマターと呼ばれる未知の物質が5～6倍存在している。未発見のダークマターの候補は多様で、検出器物質を蹴りだすもの、ガンマ線を発するものなどがある。本実験装置が、これら多様なダークマター候補に感度があるという特徴を活かし、これまで、存否が確定していなかった低質量のダークマター探索、新しい種類のダークマターの探索などを、これまでにない高い感度でおこなった。本測定器がもつ感度の範囲では、発見にはいたらなかったが、多様なダークマターモデルへの有用な制限を与えた。この方法で、大きな測定器により、さらに感度の良い探索が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：We know that there exists unknown matter in the universe called dark matter that amounts 5 to 6 times more than the ordinary matter. However, we do not know what they are. There are varieties of candidates for dark matter. Some interact with the ordinary matter and kick out the nucleus and some emit gamma rays when they hit the target material of the detector. Our detector, using 835 kg of liquid xenon as a target material has a characteristics of having very low energy threshold and the ability to detect e/gamma events as well as nuclear recoils. Therefore we are able to make high sensitive searches for low mass dark matter and a new type of dark matter that emits gamma rays. After the observation lasted more than one year, we could not find dark matter, but set very stringent limits for those candidates. We have also demonstrated that we are able to make the detector bigger and be able to achieve much higher sensitive searches in future.

研究分野：観測的素粒子物理学、ニュートリノ天文学。ダークマターや陽子崩壊の探索。

キーワード：ダークマター キセノン検出器 低バックグラウンド実験 原子核反跳 温かいダークマター 2重電子捕獲

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 宇宙には、我々の知っている原子分子など通常の物質の他に、ダークマターと呼ばれ、光や電磁波などでは観測にかからない物質が5～6倍存在する。ダークマターの存在は、銀河や銀河団の運動の研究により疑いの余地がない。しかもダークマターがなければ、宇宙初期から現在にいたる過程で、星や銀河が、現在我々が見ているような構造には作られなかったとされている。この目には見えないダークマターは、新しい素粒子ではないかともいわれており、直接的な観測により、その正体の解明が待たれている。もし、直接観測がなされれば、宇宙の大きな謎を一つ解き明かすだけでなく、新しい素粒子の発見に結びつくことにもなる。

(2) 現在まで、世界中でダークマターの直接観測を目指した実験が行われているが、これまでに、確実な証拠は得られていない。ダークマターの候補は、実は一種類ではなく多様である。それら異なるダークマターは、地上に置かれた検出器の中で様々な反応をする。多くのは、検出器物質（我々の場合は、キセノン原子）を蹴り飛ばす。これは、「原子核反跳」といわれるものであるが、蹴り飛ばされることによりエネルギーを得たキセノンが、液体キセノン中でエネルギーを失いながら停止する。ダークマターの候補の中には、検出器物質と反応をして、電子やガンマ線を放出するものもある。このように、ダークマターの直接観測には、原子核や、電子、ガンマ線など、反応による多様な生成物を幅広く捉えられる測定器が理想的である。

## 2. 研究の目的

ダークマターの多様な候補に感度を持つ検出器を使用して、ダークマターの直接観測を目指す。

当初のデータ収集により、光センサーに使われているアルミニウムに放射線バックグラウンドが多く含まれているのがわかったので、そこからのバックグラウンドを低減する工夫をおこなう。

そして、バックグラウンドを低減した測定器を用いて、最も有力な候補とされている「弱い相互作用をする重い粒子 (WIMPs)」の探索を行う。特に、我々の検出器の得意とする低閾値、大質量を利用すると、低質量領域でのWIMPsに関して、これまでにない感度を得ることができる。とくに季節変動に関して、これまで、議論されている領域を完全にカバーできる感度による探索を行う。

さらに、我々の検出器の最大の特徴である  $e/\gamma$  に対する高い感度を利用して、非弾性散乱や、axion, warm ダークマターなどの探索をおこなう。

## 3. 研究の方法

我々の使用する検出器は、直径約 80cm の内壁に直径約 5 cm の六角形の光センサー642本を配置し、その内部に 835kg の液体キセノンを詰めたものである。ダークマターが検出器の物質と反応した時に発生する光を光センサーで捉え、その光量(エネルギーに対応)と反応場所を再構成する。

1 keV のエネルギー放出に対して、約 14 個の光電子を検出することができる。この大光量が、低いエネルギー数値を実現している。また、センサー内部の全体積の 835 kg は世界最大であり、通常何年にも渡る長期間のデータを必要とする季節変動の研究を短期間で実現できる。

当初に見つかった、放射線を多く含むアルミニウム自身は取り除くことができないので、銅製のカバーをアルミニウムにかぶせ、バックグラウンドを低減する

また、本実験の残留バックグラウンドの削減は、自己遮蔽によるものであり、検出器外部から侵入してくる中性子やガンマ線を測定器周縁部で効率良く遮蔽できる。したがって、検出器内部の有効質量 100kg においては、 $e/\gamma$  に対しても、非常にバックグラウンドの低い環境が作られ、これにより、好感度な  $e/\gamma$  信号の探索が行える。

検出器は、光のみの検出であり、 $e/\gamma$  と原子核反跳の区別は、信号の時間発展の仕方の違いによる弁別であり、効率は他の2層式といわれるものよりは悪い、しかしながら2層式では、 $e/\gamma$  を落とすことになり、 $e/\gamma$  にたいして良い感度を持つ本実験の有利なところである。

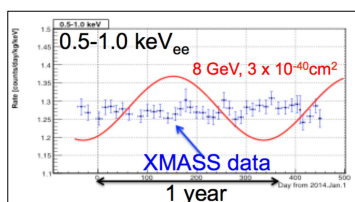
## 4. 研究成果

(1) 銅製カバーを一個ずつ光検出器に付け、バックグラウンドを低減するという測定器の改造を行なった。この結果、標準的なダークマターを探索するエネルギー領域において、バックグラウンドを一桁以上落とすことに成功し、通常のダークマター探索の感度が数倍改善した。また、このバックグラウンド削減の作業を遂行したときに、バックグラウンド事象の様々な様態についての理解がさらに深まった。そのため、本測定器の将来の展開・改善が、現実に則して評価することが可能となった。将来の感度向上に向けて、大きな展望が開けた。

(2) ダークマターの最も有力な候補である「弱い相互作用をする重い粒子 (WIMPs)」のなかでも、通常考えられている質量(数 10 GeV から 1000 GeV 程度 (1 GeV は陽子の質量にほぼ等しい)) よりも質量が小さい (10 GeV 程度かそれ以下の) ものに、世界の関心が集まっている。何故ならこの領域を探索したこれまでの実験結果に、ダークマターの存在に肯

定的なもの、否定的なものとの混在しているからである。このため、この領域に感度を持つ実験で、多面的な観測をして存否に決着をつける必要がある。我々の検出器は、これまでの大型検出器にはない、低い敷居値(0.3 keV)を実現している。暗黒物質の検出はエネルギー閾値が低くなればなるほど、感度が高くなるので、我々の測定器は、この領域のダークマターの検出に最適であり、しかも、これまでの実験よりも測定時間がはるかに少なく済む。2013年に出版した論文では、わずか6日間のデータを用いて、この領域でダークマター存在の証拠を出している DAMA グループが示す質量、反応の強さのパラメータ領域のかなりの部分を排除する結果を示した。この論文での我々の方法は、最終的に残った事象のエネルギーのスペクトルを測ることで、ダークマターの質量、反応の強さに制限を与えたものである。

(3) DAMA グループが主張している肯定的なデータは、実は、反応の量ではなく反応の季節変動を観測したものである。太陽系は銀河(ダークマター)の中を秒速約 230 km で進んでいる。ダークマター観測値の季節変動は、地球の太陽周りの公転運動により、地球とダークマターの相対速度に季節変化を生じ、それがダークマターの反応の割合に季節変化を生じるものである。我々は、今回連続的に一年以上のデータを収集した。これは、実質的に DAMA グループが 14 年かけて、収集したデータ量の 60% 以上であり、しかも、エネルギー閾値が低い為、季節変化に対して、DAMA グループよりも良い結果が期待される。実際、現時点で最終的な結果を発表していないが、季節変動に対する XMASS 実験の感度で DAMA の主張する領域を十分にカバーできるという事をすでに示している。それを下図に示す。



赤い線は、DAMA グループの主張する季節変動に対応するもので、青いデータ点は XMASS 実験の結果である。区別は明らかである。今年の夏に最終結果を発表する予定である。

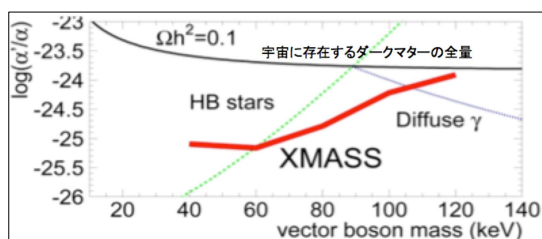
通常のダークマター探索実験の多くは、原子核反跳の測定に限られる。これ以降に述べる XMASS の研究成果は、XMASS が原子核反跳以外にも、電子やガンマ線( $e/\gamma$ ) に高い感度をもつことによる。現在、ダークマターとして当初予想されていた最も有力な候補が、いまだに見つかっておらず、有力な候補だけに限らず、より広い範囲での探索が求められている。XMASS が多様な探索ができることは、非常に良い特徴である。

(4) 太陽アクシオンの探索の成果：アクシオンは、もう一つのダークマターの候補である。素粒子理論の未解決な重大な問題を解決するために仮想的に導入されたものだが、ダークマターの重要な候補でもある。そのアクシオンは太陽の中心でも発生している可能性があり、そのような太陽アクシオンがあれば、地上に設置した検出器で検出することが可能である。アクシオンが液体キセノンと反応すると電子を発生し XMASS 検出器で観測できる。XMASS が 0.3keV という低い閾値を持つこと 835kg の大質量を持つことにより、10-40keV の質量を持つアクシオンに関して、これまでの地上の観測実験のどれよりも良い制限を与えることができた。

(5) 非弾性反応を用いた WIMPs の探索：通常の WIMPs ダークマターの探索では、WIMPs が標的と反応して蹴り出した原子核が持つ微弱なエネルギーを測定することで観測する。観測可能なエネルギーは低く、観測にはバックグラウンドを極限まで落とす必要がある。一方、例えば、129 キセノンと WIMPs が衝突すると、129 キセノンが励起状態になり、そこから、57.6 KeV のガンマ線が放出される。このガンマ線を観測することでも、WIMPs ダークマターの観測が可能だ。エネルギーが高いため、原子核反跳を捉えるよりも簡単ではあるが、反応の割合が小さくなるので、その分大きな測定器が必要である。XMASS は、世界最大のダークマター観測装置であるから、この非弾性散乱の高感度な観測ができる。実際、57.6keV のガンマ線の探索をおこない、これまでに行われた実験よりもより強い制限を得ることができたが、残念ながら発見には至っていない。

(6) ボゾンのスーパーWIMPs 探索：数 10keV のボゾンのダークマターが注目を集めている。数 10keV であるため、宇宙初期に作られるときに、弱い相互作用を持った粒子だとすると、作られすぎてしまうので、相互作用がもっと小さな、「スーパー弱い相互作用」を持つ粒子と考えられている。「見えない」ボゾン粒子が光子と非常に弱く結びついていると考えることもでき、それらは、「隠れた光子」と呼ばれ関心が集まっている。また、質量が通常の冷たいダークマターよりも小さいため、冷たいダークマターではなく、温かいダークマターとして、宇宙の銀河の形成や大規模構造の形成に対して違った振る舞いをすると言われていた。冷たいダークマターのシミュレーションで見られる銀河サイズよりも小さいスケールで見られるクランプなど、実際の観測では見られないものも、このボゾンのスーパーWIMPs がダークマターであれば、解決すると言われ、近年大きな期待がもたれていた。しかしながら、本 XMASS 実験において 40 ~ 120 keV のボゾンのスーパーWIMPs はダークマターではないというこ

とを示した。下図の黒い実線は、スーパーWIMPs がすべてのダークマターであるときのラインであり、XMASS 実験は、その量が赤線



以下であることを示している。

(7) 2重電子捕獲の研究:この成果は、XMASSを用いて多様な研究が可能であることを示す良い例である。2重電子捕獲の研究は、ダークマターではなく、ニュートリノの研究である。2重ベータ崩壊の逆反応である2重電子捕獲は、原子核の遷移行列やニュートリノ質量に関して、2重ベータ崩壊と同様の意義がある。124キセノン(Xe)は2重電子捕獲を行う原子核である。自然存在の割合は、約0.1%であるので、XMASSの総重量835kgに対し、1kg弱の124Xeがあることになる。2ν2重電子捕獲の場合、2つのK殻からの電子捕獲であるとする、信号は、124Xeが2重ベータ崩壊してできる124Te原子の脱励起による総エネルギー64keVの2本のX線等によるものである。結果として半減期の下限として4.9x10<sup>21</sup>年が得られた。これは、これまでの探索の4.7x10<sup>20</sup>年を1桁以上超えたものである。130Baと78Krで2ν2重電子捕獲が観測されており、その値は10<sup>-21</sup>から10<sup>-22</sup>年なので、124Xeの2重電子捕獲も発見の可能性が近いと思われる。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計5件)

K. Abe 他 48 名(鈴木洋一郎、森山茂栄) Light WIMP search in XMASS、Physics Letters B、査読有、719 巻、2013、78-82、DOI: 10.1016/j.physletb.2013.01.001

K. Abe 他 48 名(鈴木洋一郎、森山茂栄) XMASS detector、Nuclear Instrument and Methods in Physical Research A、査読有、716 巻、2013、78-85、DOI: 10.1016/j.nima.2013.03.059

K. Abe 他 47 名(鈴木洋一郎、森山茂栄) Search for solar axions in XMASS, a large liquid-xenon detector、Physics Letters B、査読有、724 巻、2013 年、46-50 DOI: 10.1016/j.physletb.2013.05.060

H. Uchida 他 46 名(鈴木洋一郎、森山茂栄) Search for Inelastic WIMP nucleon scattering on 129Xe in data from the XMASS-I detector、Prog. Theor. Exp. Phys.、査読有、2014 巻、2014、063C01 (11 ページ) DOI: 10.1093/ptep/ptu064

K. Abe 他 45 名(鈴木洋一郎、森山茂栄) Search for Bosonic Super-WIMPs with the XMASS-I detector、Phys. Rev. Lett.、査読有、113 巻、2014、121301 (5 ページ) DOI:10.1103/PhysRevLett.113.121301

〔学会発表〕(計9件)

森山茂栄

Direct Dark Matter Experiment and XMASS、The 4<sup>th</sup> International Symposium on Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics (NDM2012)、12-June-2012、Nara 鈴木洋一郎

XMASS experiment、9<sup>th</sup> International Conference: Identification of Dark Matter (IDM2012)、25-July-2012、Chicago、USA、森山茂栄

XMASS 実験の現状、日本物理学会、2012 年 9 月 14 日、京都産業大学 森山茂栄

太陽アキシオンおよび Bosonic Super-WIMPs 探索、日本物理学会、2013 年 3 月 27 日、広島大学 鈴木洋一郎

改修 XMASS 実験装置と暗黒物質探索、日本物理学会、2014 年 3 月 30 日、東海大学湘南校舎

森山茂栄

XMASS 実験次世代 XMASS1.5、日本物理学会、2014 年 3 月 30 日、東海大学湘南宿舎 森山茂栄

XMASS, present and future development、DM2014、2014 年 2 月 28 日、Los Angeles、USA

森山茂栄

暗黒物質の直接観測の現状、日本物理学会シンポジウム、2013 年 9 月 21 日、高知大学 森山茂栄

XMASS、TAUP2013、2013 年 9 月 10 日、California、USA

〔図書〕(計1件)

鈴木洋一郎、冬幻舎、暗黒物質とはなにか、2013、201 ページ

〔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：  
出願年月日：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等  
<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

鈴木 洋一郎 (SUZUKI, Yoichiro)  
東京大学・国際高等研究所・カブリ数物連  
携宇宙研究機構・特任教授  
研究者番号：70144425

### (2) 研究分担者

森山 茂栄 (MORIYAMA, Shigetaka)  
東京大学・宇宙線研究所・准教授  
研究者番号：50313044

### (3) 連携研究者

中畑 雅行 (NAKAHATA Masayuki)  
東京大学・宇宙線研究所・教授  
研究者番号：70192672

岸本 康宏 (KISHIMOTO Yasuhiro)  
東京大学・宇宙線研究所・准教授  
研究者番号：30374911

山下 雅樹 (YAMASHITA Masaki)  
東京大学・宇宙線研究所・特任准教授  
研究者番号：10504574

マルテンス カイ (Martens Kai)  
東京大学・国際高等研究所・カブリ数物連  
携宇宙研究機構・特任准教授  
研究者番号：20535025

竹田 敦 (TAKEDA Atsushi)  
東京大学・宇宙線研究所・助教  
研究者番号：40401286

安部 航 (ABE Kou)  
東京大学・宇宙線研究所・助教  
研究者番号：30401285

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

小川 洋 (OGAWA Hiroshi)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教  
研究者番号：20374910

小林 兼好 (KOBAYASHI Kazuyoshi)  
東京大学・宇宙線研究所・特任助教  
研究者番号：70466861

平出 克樹 (HIRAIDE Katsuki)  
東京大学・宇宙線研究所・助教  
研究者番号：10584261

リユー ジン (LIU Jing)  
東京大学・国際高等研究所・カブリ数物連  
携宇宙研究機構・特任研究員  
研究者番号：10573024

ヤン ビョンス (YANG Byeongsu)  
東京大学・宇宙線研究所・特任研究員  
研究者番号：10626055

中村 正吾 (NAKAMURA Shogo)  
横浜国立大学・工学研究科・准教授  
研究者番号：50212098

西嶋 恭司 (NISHIJIMA Kyoji)  
東海大学・理学部・教授  
研究者番号：40202238

伊藤 好孝 (ITOW Yoshitaka)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・教授  
研究者番号：50272521

増田 公明 (MASUDA Kimiaki)  
名古屋大学・太陽地球環境研究所・准教授  
研究者番号：40173744

竹内 康雄 (TAKEUCHI Yasuo)  
神戸大学・理学研究科・教授  
研究者番号：60272522

身内 賢太郎 (MIUCHI Kentaro)  
神戸大学・理学研究科・准教授  
研究者番号：80362440

福田 善之 (FUKUDA Yoshiyuki)  
宮城教育大学・教育学部・教授  
研究者番号：40272520

田坂 茂樹 (TASAKA Shigeki)  
岐阜大学・教授  
研究者番号：60155059