

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 24 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：学術創成研究費

研究期間：2007～2011

課題番号：19GS0204

研究課題名（和文） 宇宙暗黒物質の研究

研究課題名（英文） Study of Dark Matter

研究代表者

鈴木 洋一郎 (SUZUKI YOICHIRO)

東京大学・宇宙線研究所・教授

研究者番号：70144425

研究成果の概要（和文）：

宇宙の暗黒物質が実験室の標的に衝突する事象を高感度で検出するための世界最大の液体キセノン検出器(800kg)の建設に成功した。検出器の性能を確認するための微小較正源による較正データは検出器が大きい発光量を持つこと、すなわち、暗黒物質への高い感度を証明した。また、最大のバックグラウンド源である Kr の低減は成功し、世界最高の 2.7ppt 以下を実現した。観測されたバックグラウンド源もほぼ同定し、暗黒物質探索の準備ができた。

研究成果の概要（英文）：

We have succeeded to construct the world largest liquid Xenon detector in order to make an observation of Dark Matter in the laboratory experiment. By the calibration data to understand the detector revealed that we have large light yields which shows the high sensitivity for the dark matter search. We have also succeeded to reduce the most serious background of Kr to the level of 2.7 ppt which is the world lowest background level achieved. The most of the source of backgrounds are identified and we are ready to make an observation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	97,600,000	29,280,000	126,880,000
2008年度	87,000,000	26,100,000	113,100,000
2009年度	97,900,000	29,370,000	127,270,000
2010年度	99,700,000	29,910,000	129,610,000
2011年度	72,100,000	21,630,000	93,730,000
総計	454,300,000	136,290,000	590,590,000

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・液体キセノン・宇宙線・宇宙物理・素粒子実験

1. 研究開始当初の背景

宇宙のエネルギーや質量の割合として光で見える通常の物質は4%でしかなく、その5倍から6倍もの暗黒物質と呼ばれる正体不明な物質が存在すると考えられている。その正体は新しい素粒子である可能性が有力であり、その発見を通じて新たな素粒子物理

学の展開及び新たな天文学の創成が期待される重要な研究分野である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、直接的な観測がまだなされていない暗黒物質が実験室に用意した標的に衝突する事象を捉える直接的方法によ

り暗黒物質を検出することにある。特に世界最大である 800kg の液体キセノンを用いたシンチレーション検出器を用いて低バックグラウンドを達成し、暗黒物質探索に対し従来の約 100 倍の感度を実現することを目標とする。

3. 研究の方法

暗黒物質の探索においては、検出器の建設、検出器の性能評価のための較正作業、液体キセノン等に含まれる放射性不純物の同定及び低減を行い、暗黒物質が原子核反跳した信号を取り出す。

(1) 検出器の建設

本研究計画では、800kg の液体キセノンを用いることにより、事象の発生数を従来の実験より高めることで高感度化を目指す。同時に低バックグラウンド化も必要であり、双方を満たす検出器の建設を行う。テスト実験により実証されている事象再構成の方法をシミュレーションで評価することにより検出器の最適化を行う。放射線シールドのための水槽も用意する。データ収集のための電子回路群及び計算機、DAQソフトを準備する。

(2) 性能評価のための較正作業

小型の較正源を検出器内部に挿入することにより、検出器の基本性能である発光効率、検出効率、事象再構成の性能等を評価する。外部から γ 線を入射させることによって、検出器の動作を確認することも行う。

(3) 液体キセノンに含まれる放射性不純物の同定及び低減

液体キセノンには、微量にクリプトンが含まれるが、その中でクリプトン85は放射性であり、暗黒物質探索のバックグラウンドとなる。その低減のために蒸留装置を建設し、それによりクリプトンをキセノンモル比 2ppt 以下を達成する。また、液体キセノン中のラドンもバックグラウンドになるため、その量を評価し、必要に応じて低減を行う。

(4) 暗黒物質からの信号を取り出す作業

暗黒物質の信号は、低エネルギー部分に指数関数の形で観測されると期待される。これらを正しく予想するためには、例えば中性子を照射した際に得られるデータをシミュレーションがうまく再現できる必要がある。また、観測されたバックグラウンドをよく理解することも重要である。これらの技術を用いて暗黒物質の信号を取り出す。

4. 研究成果

(1) 世界最大の暗黒物質探索用 800kg 液体

キセノン検出器の建設

平成19年度から21年度においては、液体キセノン検出器の建設を行った。本検出器は、800kg の液体キセノンを用いるとともに、低バックグラウンドの光電子増倍管を642本使用し、光電面被覆率を最大限に得ることにより従来の実験の感度を約100倍向上させることにある。検出器の構造は、ほぼ球形であり、内面には光電子増倍管の光電面で埋め尽くされている。図1は、検出器の本体部分を示す。実験の際にはこれらは図2のように断熱真空容器に納められ、自然放射線の遮蔽のために直径10メートル、高さ11メートルの水タンクに納められる。検出器に用いられている大部分は、放射性不純物の少ない無酸素銅製である。これら検出器中心部に加えて、周辺機器、例えばキセノンを液化する冷却装置、液体キセノンを回収しておくためのリザーバー、液体状態で不純物を除去するためのサーキュレーター、非常事態の際にキセノンガスを回収するための容器等の用意も完了した。

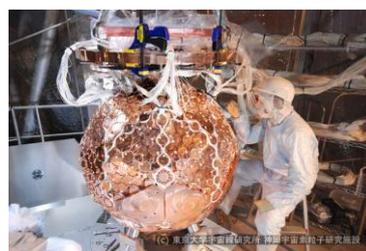


図1 800kg 液体キセノン検出器本体

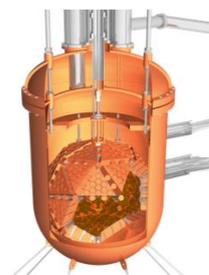


図2 放射線遮蔽体内に設置された検出器

(2) 検出器性能確認のための微小較正源の製作とデータの理解

暗黒物質が液体キセノンに衝突すると、ある点から四方八方に一樣な光を出すと期待されている。この現象を模擬するように、細い容器から放出される放射線を利用し、検出器の性能を評価するとともに、検出器の振る舞いが良く理解できていることを検証してきた。図3は、検出器中心部に置いたコバルト57線源からの放射線を検出したデータとシミュレーションとの比較である。まず、図中 122keV の実データのピーク位置から、

発光量は 14.7 光電子/keV (電子相当) と決定され、期待値であった 5 光電子/keV より大幅に大きな値が得られた。これは主として検出器建設時にクリーン度に気を遣い、かつ複数回にわたる純化作業を行ったおかげであった。また、実データを再現するようにシミュレーションの光量を調整したところ、スペクトル全体が良く再現できるようになった。これは、検出器の応答をシミュレーションでよく再現できていることを示しており、暗黒物質の信号の予想に対しても正当性を示すことにつながる。

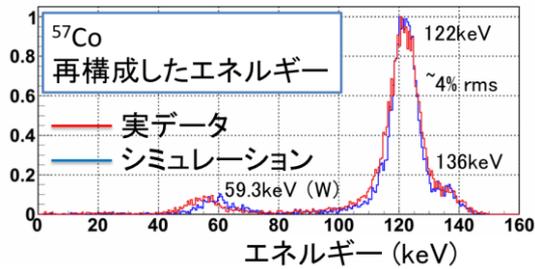


図3 較正源による光電子数分布とシミュレーションとの比較。シミュレーションによりよく再現できていることが分かる。

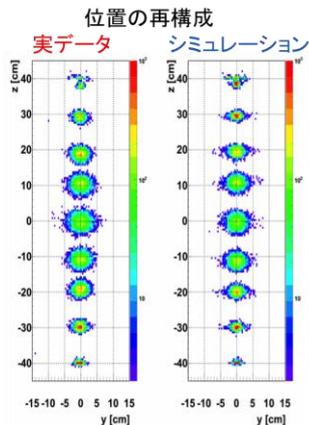


図4 較正源データに対する事象再構成プログラムの出力。球形の検出器内部軸上の各点 (+/-40cm, +/-30cm, +/-20cm, +/-10cm, 0cm) でのデータに対する位置再構成プログラムの出力。シミュレーションは分布を再現できている。

図4は、本検出器の重要な特性を表わすデータを表している。本検出器においては、外部由来のバックグラウンドは検出器周辺部で吸収され、相互作用の弱い暗黒物質等の粒子は検出器内に一様に反応することを利用する。つまり、検出器内部で反応した事象を選べば、バックグラウンドの少ない環境で暗黒物質探索が可能になる。このためには、発

光のパターンから、発光点を導き出すプログラム (事象再構成プログラム) が正しく動作していることを示す必要がある。図4は、小型の較正源からの放射線の発光位置を、実データ、シミュレーションデータの双方に対して正しく再構成できることを示しており、本検出器の重要な特性を証明するデータとなっている。なお、プロトタイプ実験装置による事象再構成の手法については、論文として出版された。

(3) キセノン中のクリプトンの低減装置の建設と運用、ラドン濃度の測定及び低減方法の開発

大気から産出されるキセノン中には、クリプトンが僅かに混入している。クリプトンには、人工の放射性不純物であるクリプトン85が含まれている。この放射性不純物があると、暗黒物質探索のバックグラウンドになるため、キセノン中のクリプトンを低減する必要がある。目標としては、キセノン中クリプトン比を 2ppt 以下とすれば十分に影響がないレベルにできることが分かっていた。

我々は、以前より蒸留法によるクリプトンの低減方法を確立しており、今回は毎時 6kg 程度のキセノン を 1ppt 以下に低減できる装置をくみ上げ、約 1 トンのキセノン を処理することに成功した。1ppt レベル (10^{-12}) の測定も困難であるが、現時点では 2.7ppt 以下との測定結果を得ている。この純度を達成できたのは大きな成果である。

また、ラドン 222 等は、検出器部材から放出され液体キセノン中に溶け出すものである。そのベータ線なども暗黒物質探索のバックグラウンドになる。実際、実データからラドン 222 は約 8mBq、ラドン 220 は約 0.3mBq 以下と評価されている。これらは目標よりも少し高いレベルであるが、現時点では問題にならない程度であり、満足できる量となっている。

並行して、将来的にラドン 222 を低減する必要があった場合に備えて、活性炭によるフィルターの開発を行ってきた。これは、活性炭をラドンのディレイラインのように用いることによって活性炭の中で崩壊させ、十分なレベルにまでラドンを低減する方法である。この技術は論文として出版された。

(4) バックグラウンド源の同定

検出器の運転を開始し、データ解析を開始したところ、予想よりもバックグラウンドが多いことが分かってきた。この原因を追及したところ、光のセンサーである光電子増倍管の窓材をシールしているアルミニウム材及び、ゴアテックス等の材料に起因することがほぼわかってきた。シミュレーションを用い

て評価したところ、予想を超える成分の大部分はそれらが原因であることがはっきりしてきた。今後それらに物理的対策を施すことにより、目標感度を実現することを予定している。なお、これまで取得してきたデータについても、解析上の工夫でバックグラウンドを低減し、暗黒物質探索をこれまでにない感度で遂行する予定である。

(5) 暗黒物質による信号の期待値の評価とその正当性の確認

暗黒物質の信号は、液体キセノン中を反跳された原子核がエネルギーを失うことによって発生する。この信号を模擬するために、中性子源を用いて原子核反跳のデータを取得する。その結果をシミュレーションと比較することにより、検出器が原子核反跳に対して期待通りに応答していることを確認できる。これらは暗黒物質の信号の期待値を正しく評価する上で重要な校正データとなる。

以上の成果に基づいて、計画した感度での暗黒物質探索を遂行する。

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 6 件)

- ① A. Minamino, K. Abe, Y. Ashie, J. Hosaka, K. Ishihara, K. Kobayashi, Y. Koshio, C. Mitsuda, S. Moriyama, M. Nakahata, Y. Nakajima, T. Namba, H. Ogawa, H. Sekiya, M. Shiozawa, Y. Suzuki, A. Takeda, Y. Takeuchi, K. Taki, K. Ueshima, Y. Ebizuka, A. Ota, S. Suzuki, H. Hagiwara, Y. Hashimoto, S. Kamada, M. Kikuchi, N. Kobayashi, T. Nagase, S. Nakamura, K. Tomita, Y. Uchida, Y. Fukuda, T. Sato, K. Nishijima, T. Maruyama, D. Motoki, Y. Itow, Y. D. Kim, J. I. Lee, S. H. Moon, K. E. Lim, J. P. Cravens, M. B. Smy
Self-shielding effect of a single phase liquid xenon detector for direct dark matter search
Astroparticle physics, 査読有, 35 (2012), 609-614
DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.astrupartphys.2012.01.005>
- ② K. Abe, K. Hieda, K. Hiraide, S. Hirano, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, H. Sekiya, A. Shinozaki, Y. Suzuki, O. Takachio, A. Takeda, K. Ueshima, D. Umemoto, M. Yamashita, K. Hosokawa, A. Murata, K. Otsuka, Y. Takeuchi, F. Kusaba, D. Motoki, K. Nishijima, S.

Tasaka, K. Fujii, I. Murayama, S. Nakamura, Y. Fukuda, Y. Itow, K. Masuda, Y. Nishitani, H. Takiya, H. Uchida, Y. D. Kim, Y. H. Kim, K. B. Lee, M. K. Lee, J. S. Lee

Radon Removal from Gaseous Xenon with activated Charcoal

Nuclear Instruments and Methods in Phys. Res. A, 査読有, 661 (2012), 50-57

DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2011.09.051>

- ③ K. Ueshima, K. Abe, K. Hiraide, S. Hirano, Y. Kishimoto, K. Kobayashi, Y. Koshio, J. Liu, K. Martens, S. Moriyama, M. Nakahata, H. Nishiie, H. Ogawa, H. Sekiya, A. Shinozaki, Y. Suzuki, A. Takeda, M. Yamashita, K. Fujii, I. Murayama, S. Nakamura, K. Otsuka, Y. Takeuchi, Y. Fukuda, K. Nishijima, D. Motoki, Y. Itow, K. Masuda, Y. Nishitani, H. Uchida, S. Tasaka, H. Ohsumi, Y. D. Kim, Y. H. Kim, K. B. Lee, M. K. Lee, J. S. Lee
Scintillation-only based pulse shape discrimination for nuclear and electron recoils in liquid xenon
Nuclear Instruments and Methods in Phys. Res. A, 査読有, 659 (2011) 161-168
DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2011.09.011>
- ④ Y. Suzuki, Review of instrumentation for observational particle physics,
Nuclear Instruments and Methods in Phys. Res. A, 査読有, 623 (2010), 57-62
DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2010.02.150>
- ⑤ K. Abe, J. Hosaka, T. Iida, M. Ikeda, K. Kobayashi, Y. Koshio, A. Minamino, M. Miura, S. Moriyama, M. Nakahata, Y. Nakajima, T. Namba, H. Ogawa, H. Sekiya, M. Shiozawa, Y. Suzuki, A. Takeda, Y. Takeuchi, K. Ueshima, M. Yamashita, K. Kaneyuki, Y. Ebizuka, J. Kikuchi, A. Ota, S. Suzuki, T. Takahashi, H. Hagiwara, T. Kamei, K. Miyamoto, T. Nagase, S. Nakamura, Y. Ozaki, T. Sato, Y. Fukuda, T. Sato, K. Nishijima, M. Sakurai, T. Maruyama, D. Motoki, Y. Itow, H. Ohsumi, S. Tasaka, S. B. Kim, Y. D. Kim, J. I. Lee, S. H. Moon, Y. Urakawa, M. Uchino, Y. Kamioka

Distillation of Liquid Xenon to Remove Krypton

Astroparticle Physics, 査読有, 31 (2009), 290-296

DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.astronpartphys.2009.02.006>

- ⑥ K. Ueshima, K. Abe, T. Iida, M. Ikeda, K. Kobayashi, Y. Koshio, A. Minamino, M. Miura, S. Moriyama, M. Nakahata, Y. Nakajima, H. Ogawa, H. Sekiya, M. Shiozawa, Y. Suzuki, A. Takeda, Y. Takeuchi, M. Yamashita, K. Kaneyuki, T. Doke, Y. Ebizuka, J. Kikuchi, A. Ota, S. Suzuki, T. Takahashi, H. Hagiwara, T. Kamei, K. Miyamoto, Y. Nagase, S. Nakamura, Y. Ozaki, T. Sato, Y. Fukuda, T. Sato, K. Nishijima, M. Sakurai, T. Maruyama, D. Motoki, Y. Itow, H. Ohsumi, S. Tasaka, S. B. Kim, Y. D. Kim, J. I. Lee, S. H. Moon
Scintillation yield of liquid xenon temperature at room temperature
Nuclear Instruments and Methods in Phys. Res. A, 査読有, 594 (2008) 148-154
DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2008.06.017>

[学会発表] (計 多数 件)

日本物理学会 : 多数

- ① 山下雅樹 : XMASS experiment, “International Workshop on Particle Cosmology” 2011年12月16日、Nagoya, Japan
- ② 森山茂栄 : XMASS, “Subaru International Conference” 2011年11月1日、Shuzenji, Japan
- ③ 鈴木洋一郎 : Direct Dark Matter Experiments, “European Physics Society”, 2011年7月21日、Grenoble, France
- ④ 岸本康宏 : Status of XMASS, “Patras Workshop on Axions, WIMPs”, 2011年6月27日、Mykonos, Greece
- ⑤ 竹田 敦 : XMASS, “GLA2011”, 2011年6月5日、Jyvaaskylaa, Finland
- ⑥ 森山茂栄 : XMASS, “Shanghai Particle Physics and Cosmology”, 2011年6月1日、Shanghai, China

⑦ 安部 航 : Status of XMASS, “DUSEL workshop”, 2010年10月1日、Homestake, USA

⑧ 小川 洋 : XMASS, “COSMO/CosPA2010” 2010年9月27日、Tokyo, Japan

⑨ 竹田 敦 : XMASS, “LRT2010”, 2010年8月28日、Sadbury, Canada

⑩ 森山茂栄 : XMASS, “IDM2010” 2010年7月26日、Montpellier, France

⑪ 小林兼好 : XMASS Experiment, “TeV Particle Astrophysics 2010”, 2010年7月19日、Paris, France

⑫ 山下雅樹 : XMASS experiment, “Patras WS on Axions WIMPs”, 2010年7月5日、Zurich, Switzerland

⑬ 関谷洋之 : XMASS, “GLA2010”, 2010年3月29日、Tsukuba, Japan

⑭ 山下雅樹 : XMASS experiment, “WONDER2010”, 2010年3月22日、Gran Sasso, Italy

⑮ 小林兼好 : Status of XMASS experiment, “IWDD09”, 2009年6月15日、Shanghai, China

⑯ 安部 航 : The XMASS Experiment, “CIPANP2009”, 2009年5月26日、San Diego, USA

⑰ 鈴木洋一郎 : XMASS, “IDM2009”, 2008年8月19日、Stockholm, Sweden

⑱ 中畑雅行 : Status XMASS Experiment, “Dark07”, 2007年9月28日、Sydney, Australia

⑲ 安部 航 : The XMASS Experiment, “TAUP2007”, 2007年9月12日、Sendai, Japan

⑳ 森山茂栄 : Dark Matter Searches, “NuFact07” 2007年8月8日、Okayama, Japan 21

安部 航 : XMASS Status, “Hunt for Dark Matter”, 2007年5月10日、Fermi Lab, USA

[その他]

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 洋一郎 (SUZUKI YOICHIRO)
東京大学・宇宙線研究所・教授
研究者番号：7 0 1 4 4 4 2 5

(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：5 0 3 1 3 0 4 4

中畑 雅行 (NAKAHATA MASAYUKI)
東京大学・宇宙線研究所・教授
研究者番号：7 0 1 9 2 6 7 2

(H20～H23：連携研究者)

小汐 由介 (KOSHIO YUUSUKE)
東京大学・宇宙線研究所・助教
研究者番号：8 0 2 9 2 9 6 0

(H20～H23：連携研究者)

中村 正吾 (NAKAMURA SYOGO)
横浜国立大学・工学研究科・准教授
研究者番号：5 0 2 1 2 0 9 8

(H20～H23：連携研究者)

竹内 康雄 (TAKEUCHI YASUO)
神戸大学・理学部・教授
研究者番号：6 0 2 7 2 5 2 2

(H20～H23：連携研究者)

(3) 連携研究者

岸本 康宏 (KISIMOTO YASUHIRO)
東京大学・宇宙線研究所・准教授
研究者番号：3 0 3 7 4 9 1 1

竹田 敦 (TAKEDA ATSUSHI)
東京大学・宇宙線研究所・助教
研究者番号：4 0 4 0 1 2 8 6

安部 航 (ABE KOU)
東京大学・宇宙線研究所・助教
研究者番号：3 0 4 0 1 2 8 5

関谷 洋之 (SEKIYA HIROYUKI)
東京大学・宇宙線研究所・助教
研究者番号：9 0 4 0 2 7 6 8

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：1 0 5 0 4 5 7 4

小川 洋 (OGAWA HIROSHI)
東京大学・宇宙線研究所・特任助教
研究者番号：2 0 3 7 4 9 1 0

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：7 0 4 6 6 8 6 1

平出 克樹 (HIRAIDE KATSUKI)
東京大学・宇宙線研究所・特任助教
研究者番号：1 0 5 8 4 2 6 1