

令和 5 年 6 月 5 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H01931

研究課題名（和文）宇宙暗黒物質検出器高感度化のための極低放射能技術の開発

研究課題名（英文）Development of ultra-low background technology for future direct dark matter detection experiments

研究代表者

風間 慎吾（Kazama, Shingo）

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・准教授

研究者番号：40736592

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：TeVスケールの質量を持ち、かつ $1e-48\text{cm}^2$ の非常に小さな散乱断面積を持つ暗黒物質の発見のためには、中性子や放射性ラドンなどの背景事象を一切排除した極低放射能環境を実現することが不可欠であり、本研究では、中性子BGを低減するため光電子増倍管(PMT)とシリコン半導体光検出器(MPPC)をハイブリッドに用いた新たな光検出器の開発を行い、また高純度な石英ガラスを用いた密閉型液体キセノン検出器の開発を行い、中性子・放射性ラドンを排除するための検討を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、既存の光電子増倍管(PMT)やシリコン半導体光検出器に取って代わる新たな光センサーの提案とその開発を行なった。この光センサーはPMTと比べて必要となる部品が少ないため、原理的に低放射能化が可能であり、かつ、価格コストも抑えることができ産業面において魅力的な光センサーとなることが予想される。本研究では、その実現に向けて不可欠となる発光部材の選定を行なった。

研究成果の概要（英文）：For the discovery of dark matter with TeV-scale mass and very small interaction cross-section of  $1e-48\text{cm}^2$ , it is essential to realize an extremely low radioactivity environment that eliminates all background events such as neutrons and radioactive radon. In this study, we developed a new photodetector utilizing both a photomultiplier tube (PMT) and a silicon semiconductor photodetector (MPPC) to reduce neutron BG. We also developed a sealed liquid xenon detector using high-purity quartz glass, and investigated the possibility of eliminating radioactive radon.

研究分野：素粒子実験

キーワード：暗黒物質 極低放射能技術 キセノン 光センサー ラドン 半導体光検出器

### 1. 研究開始当初の背景

質量の起源を担うヒッグス粒子の発見により素粒子物理学の標準理論は完成をし、その質量は  $125\text{GeV}/c^2$  と見積もられたが、標準理論の枠組みではヒッグス質量は輻射補正を受け 2 次発散をするため、この発見自体がヒッグス質量を安定化する新しい物理の存在を強く示唆している。しかし現在までに新物理発見の兆候はなく、その探索の方向性は修正を迫られている。私はこの状況下において次の時代を切り開く鍵となるのは暗黒物質であると考えた。これは暗黒物質の存在は、重力相互作用に基づく様々な天体観測から疑いがなく、標準理論を超える多くの物理においてその存在(超対称性粒子など)が自然に予言されているからである。

ヒッグス粒子発見後の素粒子物理学において、暗黒物質の候補として注目されているのが、弱い相互作用の中性ゲージボソンの超対称パートナー、中性ウィーノであり、熱的生成シナリオの下では質量は約  $3\text{TeV}/c^2$ 、キセノン(Xe)原子核との散乱断面積は  $2.2 \times 10^{-47}\text{cm}^2$  と予言されている(図 1 赤線)。現在稼働中の液体 Xe を 8.5 トン用いた暗黒物質直接探索実験 XENONnT では、偽の暗黒物質信号を形成する中性子カウンターの開発や蒸留塔を用いた放射性ラドンの排除により前身の XENON1T 実験と比べて約 10 倍以上の感度向上が可能となったが、5 年間の運転で偽の暗黒物質信号(BG)が約 5 事象期待され、中性ウィーノの探索感度は約  $1\text{TeV}/c^2$  までで制限される。そのため、TeV スケールの質量を持ち、かつ  $10^{-48}\text{cm}^2$  程度の散乱断面積を持つ暗黒物質の確実な発見のためには、より大きな検出器(O(10)トンの液体 Xe)を実現し、中性子や放射性ラドンなどの BG を一切排除した BG フリー(BG 事象数が 1 事象以下)検出器を実現することが不可欠となっている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、超大型(約 50 トンの液体 Xe)で、放射性ラドンや中性子など放射性不純物由来の BG を極限まで減らした実験(DARWIN)を実現し、大気/超新星残骸ニュートリノにより感度が制限される領域まで暗黒物質の発見感度を向上することにある(図 1)。DARWIN 実験は、2020 年代後半に実験を開始予定であり、本研究では、この実験の実現に向けて鍵を握る BG フリー環境(放射性ラドン/中性子 BG の排除)の実現に向けた以下の 2 つの研究を行った。

1. 密閉型石英容器を用いた放射性ラドン BG の排除
2. 中性子 BG の排除に向けた新たな光検出器の開発

それぞれの具体的な研究内容・成果を 3.と 4.にそれぞれ記す。

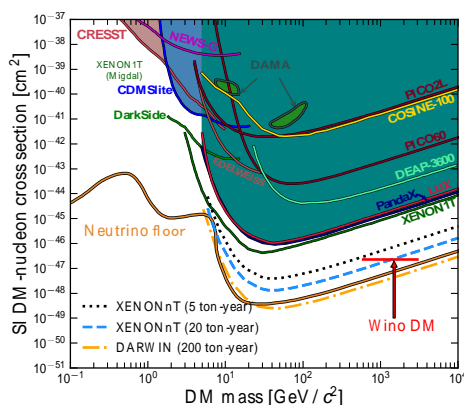


図 1: XENONnT/DARWIN実験の暗黒物質の探索感度(破線)。縦軸は核子と暗黒物質の散乱断面積に対する制限値、横軸は暗黒物質の質量を示す。Wino DMの予言値も示す。

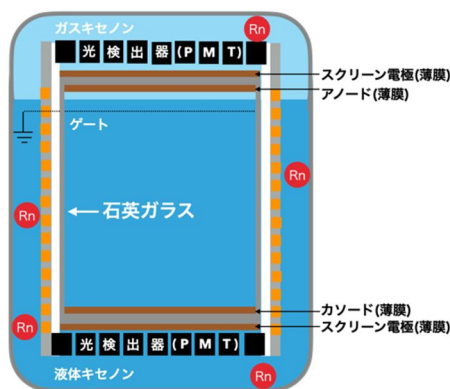


図 2: 本研究で開発する密閉型石英容器。石英ガラスの密閉性により部材から湧き出してきた放射性ラドンの検出器中心部への混入を防ぐことが可能である

### 3. 研究の方法

#### a) 密閉型石英容器を用いた放射性ラドン BG の排除:

XENONnT 実験で問題となるラドンは、光電子増倍管 (PMT)、光の反射に用いる反射材(テフロン)、さらにはクライオスタットなど、検出器部材からの湧き出しが原因である。私たちの研究グループでは、高純度な石英容器で検出器中心部を密閉することで、部材からのラドンの混入を防ぐ仕組み(図 2)の提案を行った。

特に石英加工の専門家である SCREEN 社と共同で加工法(熱膨張/圧力耐性/Xe ガス導入法等を考慮)の検討を行い、石英製の真空容器の試作器を開発した。その後、この試作器とラドン線源を用いて大気中でのラドン透過率の性能評価を行い、石英密閉容器の実現に最適なガスカートや締付圧、締付法の決定を行った。その後、確立した手法を用いて、密閉型 Xe 検出器のプロト

タイプ(0.1L サイズ)の製作も行なった(図 3)。

密閉型 Xe 検出器のアイデアでは、石英容器の内側と外側に存在する Xe は完全に切り分けられるため、それぞれ独立に純化・循環する必要がある。しかし、暗黒物質の検出器として使用するためには、内外の圧力差や液面差を精密に制御する必要がある。そのため、本研究では密閉型 Xe 検出器に特化した新たな循環方法の検討も行なった。また、開発した密閉型 Xe 検出器と循環方法を用いてラドン排除性能の実証実験も行なった。その方法は、石英容器外側に既知量のラドンを注入し、石英容器内部へどれだけラドンが透過するか定量を行う、というものである。この測定では、始めに取り扱いが比較的容易なガス Xe を用いて評価を行い、その後液体 Xe を用いて評価を行った。

#### b) 中性子 BG の排除に向けた新たな光検出器の開発:

XENONnT 実験での中性子 BG は、ステンレス製真空容器、テフロン、PMT に含まれる放射性不純物(ウラン/トリウム)に由来する。特に PMT 由来の中性子 BG は、電子増幅部(ダイノード)や陽極(ガラスシステム)に含まれる放射性不純物に起因しており、開発元である浜松ホトニクスによると、これ以上の削減は非常に難しく、中性子 BG の排除のためには PMT に代わる新たな光検出器の開発が不可欠である。本研究では、この実現に向けて PMT で培われた光電管の技術とシリコン半導体光検出器(MPPC)による電子増幅の技術をハイブリッドに用いた光検出器(SiPMT)を提案し、その開発を行った(図 4)。SiPMT は、光を光電子に変換する光電面、光電子を集束し MPPC へと入射させる集束電極、光電子を検出するための MPPC で構成され、中性子 BG 源であるダイノードやガラスシステムを含まず、僅かな部品で実現が可能である。本研究では新しく開発したこの SiPMT プロトタイプの光センサーとしての性能評価(ゲイン、アフターパルス、検出効率など)を行い、暗黒物質探索に使用可能か検討を行なった。



図 3: 本研究で開発した密閉型石英容器。

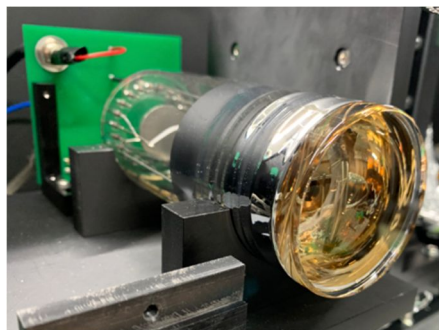


図 4: 本研究で開発したSiPMTの試作器。

## 4. 研究成果

#### a) 密閉型石英容器を用いた放射性ラドン BG の排除:

気体のガスキセノン、テフロン製のガスケット、さらには石英製の真空容器を用いてラドンガスに対する排除性能の評価を行った。その結果、有限のガスリークがあることが判明し、これはテフロンのガスケットに起因していることを突き止めた。現在、これに対処するためカーボン等を添加した新たなガスケットを選定し、再びラドンガスに対する排除性能の評価を行っている。

#### b) 中性子 BG の排除に向けた新たな光検出器の開発

プロトタイプの性能評価を行なったところ、検出効率の非一様性が見られ、かつ紫外光に対する検出効率も約 8%と非常に制限されていることが判明した。非一様性の原因は集束効率が最適化されていないためであり、検出効率が低い原因は、低エネルギー電子(1-2keV)に対する MPPC の検出効率が低いためであることを突き止めた。そのため本研究では、光電効果により生成・加速された光電子を MPPC で捉えるのではなく、蛍光体を用いてこれを紫外光に変換させ、この紫外光を MPPC で検出させるという新たなアイデアの提案を行った。特に重要となるのが、keV エネルギー程度の光電子に対して発光効率の高い蛍光部材の選定であり、これを測定するための検出器の開発を行い、100  $\mu\text{m}$  程度の薄いプラスチックシンチレータなどの発光効率の測定を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Antochi V.C., Baudis L., Bollig J., Brown A., Budnik R., Cichon D., Conrad J., Ferella A.D., Galloway M., Hoetsch L., Kazama S., Koltman G., Landsman H., Lindner M., Mahlstedt J., Marrod'n Undagoitia T., Pelssers B., Volta G., Wack O., Wulf J.	4. 巻 16
2. 論文標題 Improved quality tests of R11410-21 photomultiplier tubes for the XENONnT experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P08033 - P08033
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/16/08/P08033	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ozaki K., Kazama S., Yamashita M., Itow Y., Moriyama S.	4. 巻 16
2. 論文標題 Characterization of new silicon photomultipliers with low dark noise at low temperature	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P03014-P03014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1748-0221/16/03/P03014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ozaki K., Kazama S., Yamashita M., Itow Y., Moriyama S.	4. 巻 1468
2. 論文標題 Characterization of new photo-detectors for the future dark matter experiments with liquid xenon	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012238	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 3件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 山下雅樹
2. 発表標題 DARWIN
3. 学会等名 日本学術会議 大型中型計画シンポジウム
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 山下雅樹
2. 発表標題 DARWIN
3. 学会等名 2021年度第一回CRCタウンミーティング
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 風間慎吾
2. 発表標題 DARWIN実験：液体キセノン50トンを用いた将来暗黒物質探索実験の現状報告
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 青山直樹
2. 発表標題 液体キセノン検出器の高感度化に向けた低量子効率電極の開発
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 原田莉奈
2. 発表標題 将来暗黒物質直接探索実験DARWINのための密閉型液体キセノンTPCの開発
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 風間慎吾
2. 発表標題 液体キセノン検出器高感度化に向けたR&Dの紹介
3. 学会等名 測定器開発プラットフォーム&テストビームライン研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 風間慎吾
2. 発表標題 DARWIN実験に向けた低BG光センサーの開発
3. 学会等名 測定器開発プラットフォーム研究会
4. 発表年 2021年～2022年

1. 発表者名 風間慎吾
2. 発表標題 第3世代の暗黒物質直接探索実験
3. 学会等名 東京大学宇宙線研究所 共同利用研究成果発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 風間慎吾
2. 発表標題 DARWIN実験のための密閉型液体キセノンTPCの開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会(2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 青山直樹
2. 発表標題 DARWIN実験のための低量子効率電極の開発
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会(2022年)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Kazama
2. 発表標題 LXe_dark matter search activities in Japan and its future
3. 学会等名 International Symposium of JSPS Core-to-Core program “DMNet” (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 M. Yamashita
2. 発表標題 Xe_DM Search activity at Nagoya
3. 学会等名 IBS and KMI Joint Workshop (招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 風間慎吾
2. 発表標題 将来暗黒物質探索実験DARWINのためのハイブリッド光検出器の開発
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田莉奈
2. 発表標題 将来暗黒物質探索実験DARWINのための密閉型液体キセノンTPCの開発
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎里奈
2. 発表標題 高抵抗薄膜を用いた暗黒物質直接探索における新たな液体キセノン検出器の開発と電子ドリフト実証
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎里奈
2. 発表標題 高抵抗薄膜を用いた新たな液体キセノンTPCの開発
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾崎公祐
2. 発表標題 次世代暗黒物質探索実験のためのハイブリット光検出器の開発
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 尾崎公祐
2. 発表標題 暗黒物質探索実験のための低ダークカウントSiPMの開発
3. 学会等名 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」2020年度オンライン領域研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山崎里奈
2. 発表標題 高抵抗薄膜を用いた新たな液体キセノンTPCの開発
3. 学会等名 新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」2020年度オンライン領域研究会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

DARWIN <a href="https://darwin.physik.uzh.ch">https://darwin.physik.uzh.ch</a> 名古屋大学 宇宙地球環境研究所 宇宙線研究部(CR研究室)暗黒物質直接探索 <a href="https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/CR/research/direct_dm/">https://www.isee.nagoya-u.ac.jp/CR/research/direct_dm/</a>
---

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	山下 雅樹  (Yamashita Masaki)  (10504574)	東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任准教授    (12601)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	伊藤 好孝  (Itow Yoshitaka)  (50272521)	名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授     (13901)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関