

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 12 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2015

課題番号：25610054

研究課題名(和文) 光読み出し型球形一相式液体キセノドリフトカロリメーターの開発

研究課題名(英文) Development of a spherical-shaped single phase liquid xenon drift calorimeter with proportional scintillation readout

研究代表者

伊藤 好孝 (Ito, Yoshitaka)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：50272521

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：液体キセノン液相中での比例蛍光増幅を用いた光読み出しにより、直接シンチレーション光(S1)とドリフト電荷による比例蛍光(S2)の時間差を用いた位置再構成能力を持つ液相一相式の液体キセノン暗黒物質検出装置の検討を行った。実際の検出器における電場設計を行うと共に、想定電場でのS1、S2発光の測定を行うために、直径、高さ10cm程度の小型キセノン容器を作成し、ワイヤー電極とガスエレクトロンマルチプライヤー(GEM)電極をそれぞれ用いた2種のテストベンチを設置した。後者ではキセノン液中でのGEM電極を用いたS2信号検出の検証を行ったが、36kV/cmのGEM電場ではS2発光は再現はできなかった。

研究成果の概要(英文)：We have developed a single phase liquid xenon dark matter detector in which direct scintillation light (S1) and proportional scintillation light (S2) utilized for precise position reconstruction. We have designed electrodes and electric fields designed for a future detector. We have also developed two types of test bench having an anode electrode either with a gold-coated 10 micron tungsten-wire or with a electron-gas-multiplier (GEM) in order to measure S1 and S2 in the given range of planned electric fields. In the GEM setup, we tested previous report for observation of S2 signal with GEM in liquid xenon with a few kV for GEM voltage. But no S2 signal was observed with 36kV/cm in GEM.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：宇宙線 素粒子実験 実験核物理 放射線 低温物性 宇宙物理 暗黒物質 液体キセノン

1. 研究開始当初の背景

(1) 暗黒物質の解明は、現代素粒子物理学、宇宙物理学の最大の問題のひとつとして、素粒子実験、天文観測、宇宙線観測等、様々な手法を用いた研究が行われている。その中でも、素粒子的な暗黒物質の候補として有力視される Weakly Interacting Massive Particle (WIMP) の探索手法として、WIMP が原子核と衝突した際に生ずる反跳原子核を検出する直接探索実験が、世界各地で活発に行われている。この中で光読み出しによる液体キセノン検出器は、大きな質量数のため WIMP 衝突断面積が大きい、原子番号が大きく外からのガンマ線を遮蔽可能、液化により大質量検出器を容易に建設可能、放射線の電離に対してシンチレーション発光と電離電子の両方の検出が可能、などの長所により、最も有力な暗黒物質直接探索実験の手法として確立している。

(2) 光読み出しによる液体キセノンを用いた暗黒物質直接探索実験では、一次シンチレーション光(S1)のみを検出する液体1相式検出器と、これに加えて電離電子も気相中に引き出し高電圧で雪崩増幅した際の発光(S2)を観測する気液2相式検出器に大別される。前者は XMASS 実験(日本)、後者は LUX(アメリカ)、XENON(欧州)などの実験が稼働中である。液相1相式は電極構造や高電圧印加が不要で球形形状の検出器が可能な反面、シンチレーション光の光量重心による反跳位置再構成能力に限界があり、検出器内壁の放射性物質由来の背景事象が有効体積内に再構成されてしまうという問題点がある。気液2相式検出器は、S1とS2との時間差を用いて位置再構成を行うタイムプロジェクトンチェンバー(TPC)でよい位置再構成能力を持ち、S1/S2比による電子反跳と原子核反跳の識別能力から、暗黒物質直接探索実験の主流となっている。気液2相式は液面管理の問題や検出器形状(電荷ドリフト方向)の自由度などの短所がある。

(3) 一方で、S2発光について液中での比例蛍光増幅を用いる液相一相式 TPC は、1970年代に早稲田大などで開発が進められたが、比例蛍光の増幅度の問題などからやがて気液2相式の研究に移行した。しかし当時くらべ、現在はキセノン純化システムや光検出器の性能が大幅に向上しており、液相1相式でも十分な S1、S2 光量を与える可能性が期待できる。液相1相式は検出器形状に自由度があり、現在の XMASS 検出器のような球形暗黒物質検出器が可能となる(図1右)。また、モジュール構造によって大型化も容易になり、将来の10tスケールの超大型暗黒物質検出器の基盤技術となる可能性がある(図1左)。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、大面積の光読み出しによる液相1相式液体キセノン TPC を開発し、暗黒物質検出器として必要な諸性能、特に引火電圧とエネルギー閾値、位置分解能の関係性を明らかにする。

(2) 検出器形状と電荷ドリフト方向を自由に選べる液相一相式の利点を生かし、球形または円筒形検出器の外側か中心へドリフトする方式を実際に設計し、このパラメーターで動作が可能かどうかを検証する。

(3) 得られた知見を元に、現行の XMASS 検出器の液相1相式 TPC への改造や、将来の大型液体キセノン暗黒物質検出器の検討を行う。

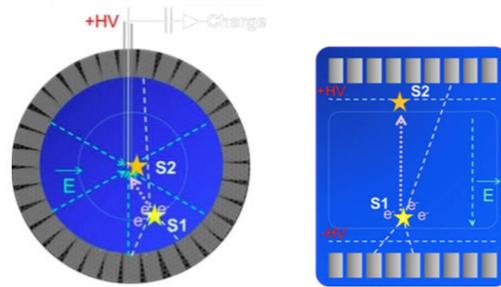


図1 球形液相1相式液体キセノン検出器。増幅用電極を中心に配置。(左)円筒型平行電場方式、電極グリッドを光電子増倍管面上に配置した場合(右)

3. 研究の方法

(1) 将来の液相一相式液体キセノン暗黒物質検出器の概念設計を行う。キセノン容器の設計方針としては、暗黒物質による反跳原子核のエネルギーを測定するカロリメーターとしてエネルギー測定性能に重点を置くため、検出器内壁は光電子増倍管の被覆率をできるだけ大きくできるデザインを設定する。ドリフト電場としては、検出器内壁から中央部方向、増幅電極は光検出器の影にならないような、球形検出器中央に設置する小型球、または円筒検出器中心軸に設置するワイヤー電極を検討する。同時に円筒型検出器については、ドリフト方向を従来通りの円筒軸方向の並行電場とし、増幅電極として Gas Electron Multiplier (GEM)を用いたデザインも検討する。これらの各デザインに対して、有限要素解析ソフト(ムラタソフトウェア FEMTET)を用いて電場解析を行い、実現可能なドリフト電場や増幅電場を検討する。

(2) 液体窒素または冷凍機を用いた小型の1相式液体キセノン検出器(容積100cc程度)

を設置し、上記の電場設計で想定される電場勾配での液体キセノン発光の振る舞いを検証し、S1、S2 発光を実測する。

希ガス中での電極への高電圧印加など液体

実際に測定を行うテストベンチとして、名古屋大学には、直径 136mm、高さ 120mm、容積 0.44 リットルのキセノン容器を、直径 280mm、高さ 321mm、容積 12.8 リットルの断熱真空容器内（両容器とも SUS304 製）に設置した（図 3 上中）。両容器に設置したフッ化マグネシウム窓を通して断熱容器外側に設置した光電子増倍管で読み出す方式とした。キセノン容器には、1970 年台に増田らが行ったワイヤー電極型の比例蛍光シ

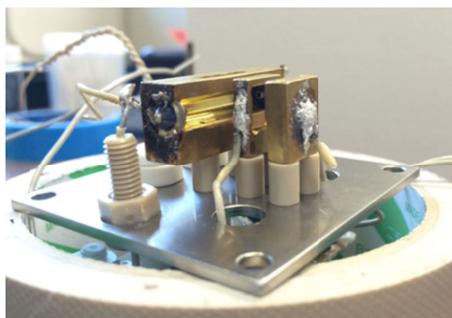
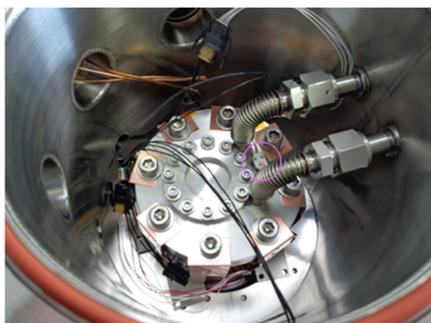
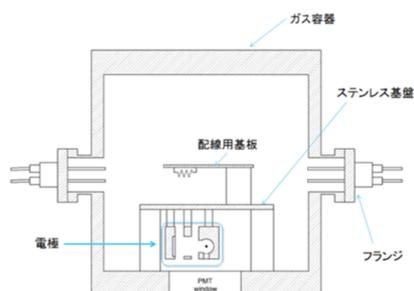


図 3：名古屋大学で組み立てた実験セットアップ。(上)キセノン用容器と電極配置概念図。(中)外真空容器中にセットされたキセノン容器。(下)真鍮性の電極と 10 μ タングステンワイヤー電極。

ンチレーション読み出し実験 (M.Miyazaki et al., Nucl. Instr. Meth. 160, 1979, 239-246) の再現を行うために、当時と同様の電極を真鍮で作成し（図 3 下）、増幅ワイヤー電極として 10 μ タングステン線（金メッキ）を無鉛半田で装着した。本セットアップでは、キセノン容器下部を液体窒素リザーバ

ーから伸ばした銅網線ヒートリンクで冷却する方式を試みた。これらのセットアップを用いて、冷却液化過程のコントロールや液体キセノン検出器の基本技術の習得を行った。

(3) 東京大学宇宙線研究所神岡施設には、より本格的な冷凍機を用いたテストベンチを新たに設計して設置した。キセノン液化テストベンチは東京大学の協力を得て、本研究では、直径 95.6mm、高さ 230mm のキセノン容器に設置する電極構造体の設計と製作を行った。電極はワイヤー電極のほか、GEM 型電極を導入した。光読み出しは液体キセノン中に浸した光電子増倍管を電極上下から読み出す設計とした。キセノン容器内には線源も取り付け、エネルギーや電場ドリフトのシステムティックな測定を行えるようにした（図 4）。

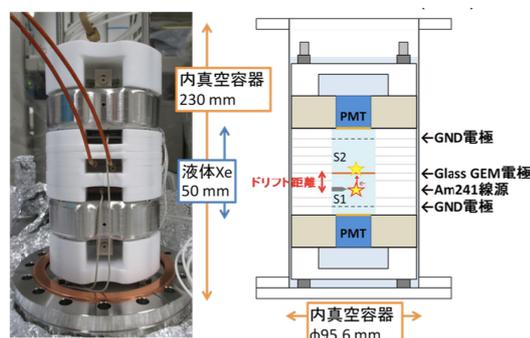


図 4：東京大学宇宙線研究所に設置されたセットアップ概念図。(左)キセノン容器の中に入る電極構造体。(右)電極と PMT 配置図。

4. 研究成果

(1) 名古屋大に設置したセットアップにおいては、液体窒素を用いたキセノン液化温度（約マイナス 100 度）への冷却試験を行った。キセノン容器下面につないだヒートリンクを液体窒素で冷却し、キセノン容器自体を冷却する方式とした。キセノン容器には熱電対温度計を配置し、フィードバック回路を用いて、液体キセノン液化温度（約 -100 度）での安定化に成功した。ただし、冷却に時間がかかり液体窒素の交換が頻繁に必要であること、容器材質のステンレスの熱伝導度が小さく、容器全体を均等な目標温度にコントロールすることは難しいことが分かった。有限要素解析に温度分布の解析を行い、ほぼ実測通りの温度分布を得ることができた（図 5）。容器内に導入したキセノンガス自身の熱伝導により容器温度の均一化は期待されるが、熱効率の問題からキセノン容器上面に銅製コールドフィンガーを設置する方式に設計を変更することになった。

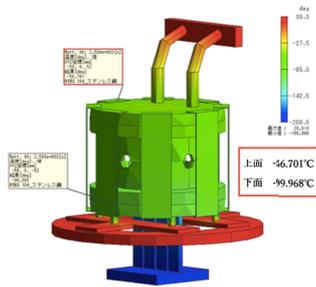


図2 容器の上面と下面の温度差

図5：有限要素解析によるキセノン容器冷却時の温度分布

(2) 上記セットアップのキセノン容器のみを用いて、常温の環境下で宇宙線による希ガスからのシンチレーション発光の S1 光と電極増幅による S2 光の観測を行った。アルゴンガスからの紫外シンチレーション光と電極増幅による遅延 S2 光を、サリチル酸ナトリウムを塗布した波長変換板(図6)を用いて可視波長に変換して、石英窓光電子増倍管を用いて S1 光の観測を行った。また、電極構造に高電圧印加した場合の電場構造について有限要素ソフトを用いて解析を行い、期待される電場構造が実現していることを確認した(図7)。実際にワイヤー電極での比例増幅を確認するために、比例計数管に用いられる P-10 ガスを導入して比例計数管としての動作を行い、ワイヤーに誘起される比例増幅信号の検出を行った。

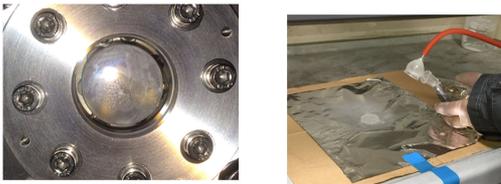


図6：波長変換版として作成したサリチル酸ナトリウムを塗布した石英板(左)と塗布作業(右)

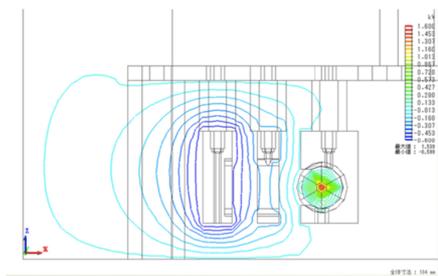


図7：有限要素ソフトによるワイヤー電極での電場構造シミュレーションの結果

(3) 東大宇宙線研に設置したセットアップでは、ガラス製 GEM 電極を増幅電極として用いた S2 発光の検証を行った。ガラス GEM 電極は多孔ガラス板の両端に高電圧をかけ、孔内部に形成された高電場で電子を加速するが、液体キセノン中 S2 発光に必要とされる

～400kV/cm の高電場を形成することができないと考えられる。しかし、液中 GEM 電極での S2 発光観測に成功したという先行研究の報告(L.Arazi et al., 2014, 7th Symposium on Large TPCs for Low-Energy Rare-Event detection)があり、これを本セットアップで検証することになった。冷凍機を用いた冷却により液体キセノンを導入し、まず電場なしの状態での S1 発光量を Am 線源により較正を行った。次に光電子増倍管直上に配置したグリッド電極と GEM 電極面との間にドリフト電

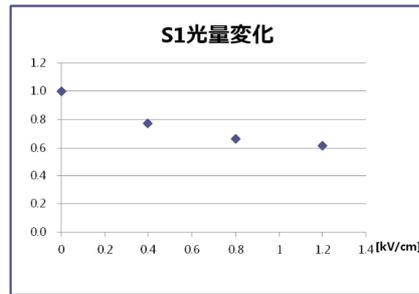


図8：ドリフト電場と S1 光量との関係

場をかけながら S1 光量の変化を測定した。ドリフト電場の増加とともに GEM 電極へ誘引される電離電子量が増加し、結果として S1 シンチレーション光量の減少が観測された(図8)。さらに GEM 両面に電位差 2.5kV の高電圧を印加し 36kV/cm の増幅電場を与えて S2 光の観測を行ったが、有意な発光は認められなかった。このことから液中 GEM 電極での比例増幅を報告した先行研究を再現しない結果となった。先行研究では、比例増幅の発生メカニズムとして、多孔中でキセノンガスがとりのこされ、ガス中でのなだれ増幅が発生したため、と検討している。本セットアップでは、孔径が比較的大きいためガスが残らず先行研究のような増幅が発生しなかったと考えられる。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 3 件)

「比例蛍光読み出しによる XMASS 実験感度向上のためのテストベンチの開発2」毛笠莉沙子、伊藤好孝、増田公明、関谷洋之、日本物理学会秋季大会、2015年9月25日～9月28日、大阪市立大学

「比例蛍光読み出しによる XMASS 実験感度向上のためのテストベンチの開発～GEM による液相増幅」毛笠莉沙子、伊藤好孝、菅澤佳世、増田公明、関谷洋之、第 71 回日本物理学会年次大会、2016年3月19日～3月22日、東北学院大学

比例蛍光読み出しによる XMASS 実験テスト
ベンチの開発～電極の開発」菅澤佳世、伊藤
好孝、毛笠莉沙子、増田公明、関谷洋之、第
71 回日本物理学会年次大会、2016 年 3 月 19
日～3 月 22 日、東北学院大学

〔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〕

ホームページ等：特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 好孝 (ITOW, Yoshitaka)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・教授

研究者番号：5 0 2 7 2 5 2 1

(2) 研究分担者

増田 公明 (MASUDA, Kimiaki)

名古屋大学・宇宙地球環境研究所・准教授

研究者番号：4 0 1 7 3 7 4 4

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

関谷 洋之 (SEKIYA, Hiroyuki)

東京大学・宇宙線研究所・准教授

毛笠莉沙子 (KEGASA, Risako)

名古屋大学・理学研究科・大学院生

菅澤佳世 (KANZAWA, Kayo)

名古屋大学・理学研究科・大学院生