

令和 5 年 6 月 9 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20919

研究課題名（和文）偏極暗黒物質直接探索へ向けた固相キセノンー相式TPC検出器の実証

研究課題名（英文）Development of solid xenon TPC for a polarized direct dark matter search

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：50272521

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：偏極キセノンを用いた固体キセノンタイムプロジェクションチャンバー（TPC）を構想し、方向感度のある暗黒物質直接探索や、アクシオンなどの新物理探索を検討した。この実現に向けて、石英ガラス容器中で液体キセノンを凍らせる固体キセノンTPCのデザインを行い、実際に高さ62mm、内径50mmの石英ガラスフランジ容器を製作し、これを内包する0.1L TPCの試作を行い、電場デザインを行った。また、偏極キセノンを使う冷中性子実験の専門家と検討会を行い、偏極キセノンを用いた暗黒物質探索や新物理探索の検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

偏極という新しい物理量を用いた方向感度を持つ暗黒物質直接探索の検討を行ったが、感度が不足している事を改めて確認した一方、偏極キセノン実験の専門家とのつながりを得て、アクシオン探索など新たな研究の目を得る事ができた。固体キセノンTPC開発としては、石英容器を用いたプロトタイプTPCの設計・試作と、テストベンチの整備ができた。実際のキセノン固化まで進めなかったが、これらの経験と準備は次世代の超低放射性バックグラウンドを実現する密閉型液体キセノンTPC開発への先鞭ともなった。

研究成果の概要（英文）：We looked into a new idea of direct dark matter searches and new physics searches such as axion with use of polarized solid xenon time projection chamber (TPC). To realize this idea, we developed a TPC having a quartz flange vessel with with a 62mm height and a 50mm inner diameter and designed electric fields.

We also had a brain-storm meetings with experts of cold neutron experiments for hyper-polarized Xe129 to discuss such ideas.

研究分野：宇宙線物理学

キーワード：暗黒物質 液体キセノン 固体キセノン 低温検出器 核偏極実験 アクシオン 検出器開発 非加速器素粒子物理

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

現在、気体・液体キセノン二相式 Time Projection Chamber (TPC) 検出器による暗黒物質直接探索が世界中で行われている。二相式 TPC では、暗黒物質と液体キセノン原子と散乱による反跳粒子の信号を、液相キセノン中での即発シンチレーション光(S1)と、ドリフト電場により気相キセノン中へ電離電子を引き出して発生させる比例蛍光(S2)の2種類の情報を組み合わせ、反跳粒子のエネルギーや、散乱の3次元位置、また反跳粒子の種類(原子核反跳か電子反跳か)を識別することができる。この優れた性能により、気相液相二相式 TPC は、世界最高感度の手法として暗黒物質直接探索を牽引している。

キセノン原子核はさまざまな天然安定同位体を含み、Xe129(同位体比 26.4%)は安定なスピン 1/2 を持つ同位体として偏極が可能である。特に、レーザーポンピングにより偏極させたルビジウムガスを Xe129 ガスと混合し、高い偏極のキセノン原子核を得る手法は、hyperpolarized Xe129 として確立している。この偏極の自由度を暗黒物質探索に持ち込む発想はこれまでほとんどなかった。偏極により暗黒物質の散乱断面積に方向依存性が現れれば、全く新しい方向感度を持つ暗黒物質直接探索となりえる。従来方向感度を持つ暗黒物質探索では、反跳原子核の飛跡をガス検出器や原子核乾板で直接捕らえる手法が検討されている。しかし前者については、ガス検出器のため検出器質量をかせぐのが難しく、後者については、μm 以下の軌跡を大量に測定する手法は未確立である。大質量化が可能な手法で偏極した固体キセノンの生成が可能となれば、ユニークな探索手法となりえる。これまで、理論的な検討として、偏極検出器による暗黒物質探索の際の方向検出感度の検討がされているがあまり大きな効果でないとの予測がされている[1]。

一方、固体キセノン TPC による暗黒物質直接探索は以前より検討され、開発が行われてきた。2010 年代に、Fermi 研究所で一連の開発[2]が行われ、1kg サイズの透明な気泡を含まない固体キセノンの生成手法が見出され、固体キセノン TPC としての性能評価も行われている。それによれば、固体キセノン S1 光量は液体キセノンに比べ 1.5 倍多く、電子移動度も 2 倍高いということが分かっている。将来の 50 トン級キセノンを用いた暗黒物質直接探索実験 DARWIN 計画において、一旦キセノンを凍らせた後はラドンなどの放射性不純物の侵入は低いとして、固体キセノン TPC の検討がされている。

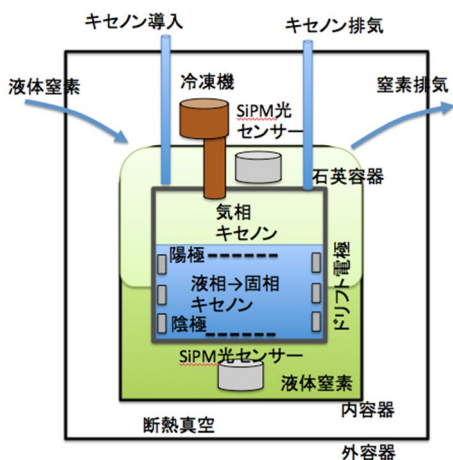
[1] J.Yoo, F.Jaskierny, arXiv:1508.05903

[2] CT.Chiang, M.Kaminkowski, G Z Krnjaic, Dark Univ. 1 (2012) 109

2. 研究の目的

本研究では、hyperpolarized Xe129 の手法により生成した偏極キセノンを用いて、固体キセノン TPC の開発を検討し、これを用いた方向感度を持つ暗黒物質直接探索や、アクシオンなど新物理探索の検討を行う。具体的に以下の3項目を検討していく：1) 固体キセノン TPC を実現するプロトタイプ開発、特に石英ガラス容器を内包する TPC のデザインと、石英ガラス容器の要素開発、2) 既存液体キセノンセットアップを用いた固体キセノンの試作、3) 偏極キセノンを用いた暗黒物質探索や新物理探索の検討、の3項目を目的とする。

3. 研究の方法



図：石英容器を用いた固体キセノン TPC の概念図

1) 下図のような、石英ガラス容器を内包し、二重構造を持つ固体キセノン TPC をデザインし、プロトタイプを試作する。断熱真空容器の中に固体キセノンを保持する石英ガラス容器を納め、その上下端面に光センサーを配置し、固体キセノンからの S1 光、S2 光を検出する。真空紫外光である S1、S2 光を透過させるため、固体キセノン容器は石英ガラスである必要がある。石英ガラス容器内部の底面部および上面部には導電性薄膜電極を短冊上にコーティングし、陰極、陽極として設置する。固相・気相 2 相式 TPC として運用する場合には、容器の上部を気相とし、固相-気相境界面直下に、電離電子を引き抜くためのゲート電極を設置する。石英容器側面にはリング電極を数層積層しドリフト電場を形成する。冷凍器に接続したコールドフィンガーにより、まず気体キセノンを液化し石英容器中に溜める。その後石英容器外側に液体窒素を寒剤として導入し、下部から液相キセノンを冷やして固体キセノンを得る。この時、下部から徐々に時間をかけて凍結させることにより、気泡のない透明な固体キセノンを得られることが先行研究から知ら

れている。石英容器外側には数層のヒーター線を巻き、独立に電流をコントロールし、温度勾配を形成して下面から徐々に凍結するようにする。
 本研究経費では予算が限られていることから、特に石英容器の開発と運用セットアップの整備に注力し、断熱真空容器や冷凍器等の高額な物品の整備は、既存設備や他経費で整備予定の機器を活用する。

2) 既存液体キセノンセットアップを利用したキセノン固化の検討

東大宇宙線研の持つ既存の液体キセノンセットアップを用いて、コールドフィンガー設定温度を十分下げることにより、固体キセノンを得られるか検討する。

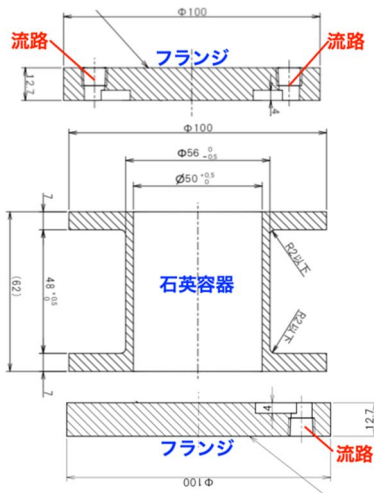
3) 偏極キセノンを用いた暗黒物質直接探索と新物理探索の検討

偏極キセノンを用いた暗黒物質直接探索として、特に原子核反跳の方向に感度を持つ観測やアクシオンなど新物理探索の可能性を検討する。偏極キセノン生成について学ぶため、Hyperpolarized Xe129 などを用いて偏極キセノン標的の開発をおこなっている名古屋大学冷中性子実験グループと連携し検討会を開催する。

4. 研究成果

1) キセノン保持用石英ガラス密封容器の開発

キセノンからの真空紫外シンチレーション光(175nm)を透過する石英ガラスを用いて、キセノンを保持する密封容器の製作を行った。下図のように円筒肉厚 3mm、内径 50mm、高さ 62mm、フランジ径 100mm、フランジ厚 7mm のフランジ容器、板厚 12.7mm のフランジ板を作成した。この石英フランジ容器は外部からのラドンガス遮蔽を目指す密封型 TPC にも共用できるデザインとし、そのガスケット材の選定や、フランジ締め付け圧力と密閉性との関係について検討を行った。上面フランジ板に 2 個、底面フランジ板に 1 個のキセノン導入用・排出用の穴を開け、PTFE テーパーネジによりガラス配管を接続する。ガスケット材としては、通常の



図：石英フランジ容器の寸法図(上)と、その写真(下図3枚)

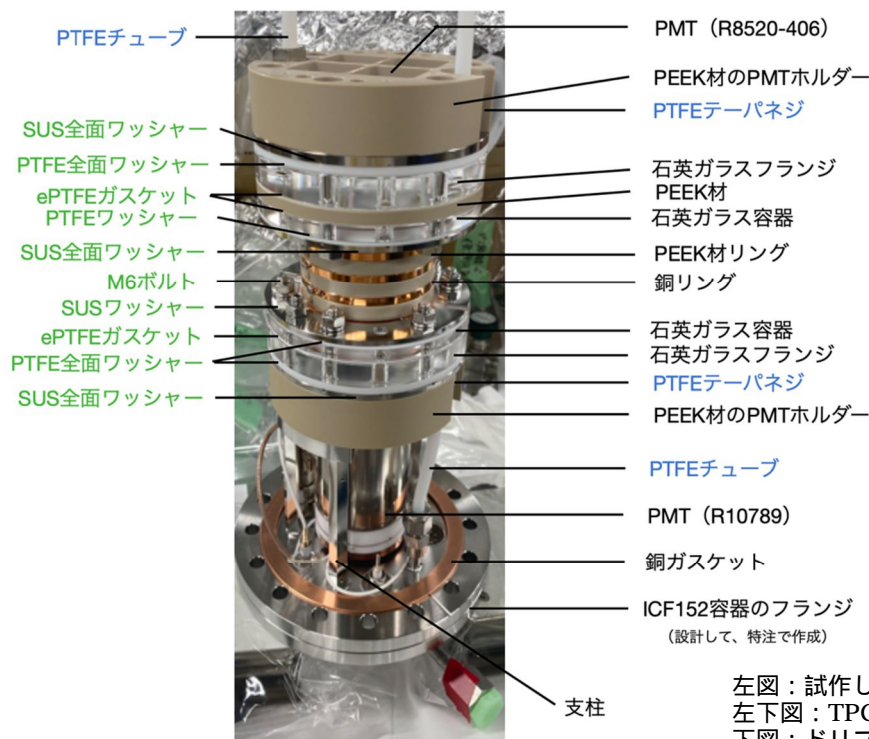
金属ガスケットは石英ガラスと熱膨張率に差があり、ガラス面を傷つける恐れもあるため、柔軟でガス放出の少ない Expanded PTFE を選択した。ガラスフランジ面に歪みを与えることなく、均等な圧力でガスケットを潰すための PEEK 製全面ワッシャーの考案など、さまざまな工夫を行った。今回の運用の中で、フランジ締め付け時に、同時にすべてのナットの締め付ける(緩める)ことができないため、フランジ面に歪みが起こってしまうこと、またステンレスボルト・ナットは、ネジ山変形が起こりやすることなどから、フランジ取り外し時に容器の破損が多発した。フランジ厚を厚くすることで、今のところ問題を解決している。本研究により、石英フランジ容器の製作や取り扱いに大きな知見を得ることができ、固体キセノン TPC のみならず、検出器部材から放出されるラドンガスを遮蔽する石英容器密封型 TPC の開発にも先鞭をつけることができた。



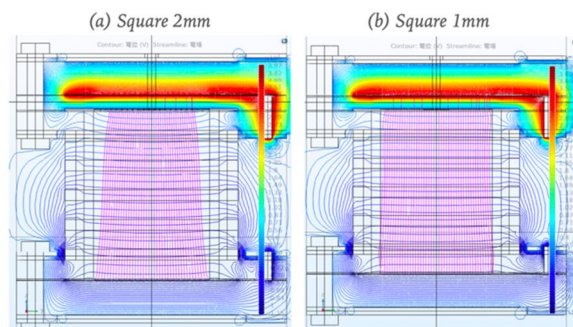
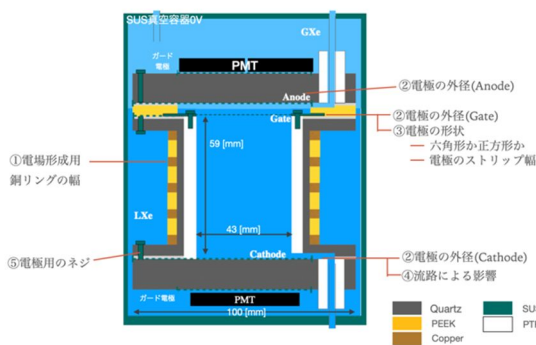
2) 石英容器内包型 TPC のデザインと試作

上記の石英ガラス容器を内包し、容器の内外を切り分けて循環可能な TPC のデザインと試作を行った。試作した TPC 検出器全体像と電極構造の模式図を次ページに示す。下部フランジ板面には XMASS 実験に用いられた光電子増倍管 (HPK R10789) 1 本で S1 光量を効率よく

読み出し、上部フランジ板面には4本の30mm角光電子増倍管(HPK 8520-406)でS2光を読み出すことで、光量重心から電離電子の平面位置情報を得られるようにした。上記石英フランジ容器の円筒部側面外側にはドリフト電場形成用の銅リング電極5層が配置した。底部フランジ板と上部フランジ板の内側には、それぞれ陰極電極と陽極電極を導電性薄膜コーティングにより形成する。2相式TPCの場合には、電離電子を液相から気相へ引き抜くために、100 μm 径ワイヤを1mmピッチ正方形に編んだメッシュ型のゲート電極を配置する(ただし、次ページ写真にはまだこれら電極は組み込まれていない)。これら電極の最適化と印加電圧の決定を、COMSOLパッケージによる電場シミュレーションにより行った。これらは気相液相2相式TPCを念頭においた計算であるが、固体TPCでも電離電子の振る舞いはほぼ同様であり、適用可能である。これらのスタディにより、石英容器内包型のTPCの基本設計は整った。

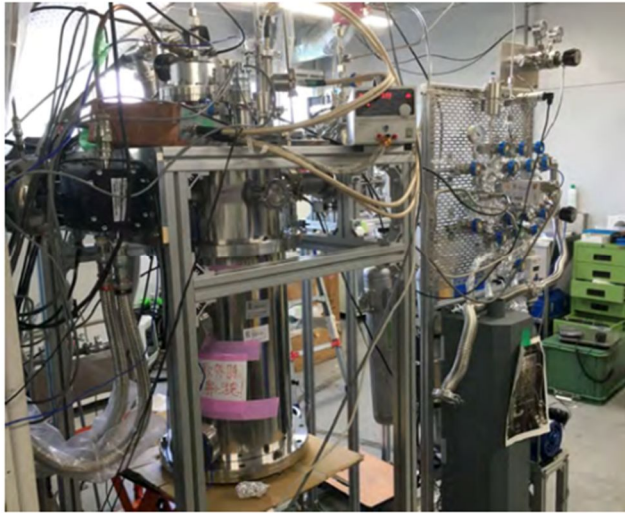


左図：試作した石英容器内包型 TPC
 左下図：TPC の電極配置図
 下図：ドリフト電場シミュレーション結果



3) 既存液体キセノンセットアップによる固体キセノン生成の検討

液体キセノンの純度モニタープロトタイプを転用したキセノン固化試験を行った。純度モニターは二極管構造をした液体キセノンチェンバーであり、紫外光照射した陰極から放出される光電子を外部電場でドリフトし、陽極電流値を測定するものである。液化ポイントである1気圧-100度でまず液化を行い、さらにそれを超えて-110度~-130度まで冷却を行ったが、液相の固化は確認できず、陽極電流が不安になったため固体化を断念した。従来の液体キセノンチェンバーのように、上部コールドフィンガーのみで冷却を行っているため、コールドフィンガー周辺が先に凍結し、液相の冷却に至らなかったためと考えられる。先行研究のように、液相をためた石英容器自身の下部を液体窒素等で冷却し、温度勾配を作りながら下からゆっくりと固化させる手法が必要であると再確認した。



左図：液体キセノン純度モニターでのキセノン固化試験 右図：液体キセノン純度モニター

4) 液体キセノン導入のためのテストベンチの整備

石英容器および TPC 検出器の試作と並行して、これを運用するためのキセノンテストベンチの整備を行った。本予算だけでは、本格的な冷凍器等の高額物品の調達は不可能で、整備は限定的であるが、液体キセノンの運用に不可欠な回収容器や各種真空部品の調達を行い、キセノンガスラインの構築を行った。

5) 偏極キセノンを用いた暗黒物質直接探索・新物理探索の横断的研究会の開催

偏極キセノンを用いた暗黒物質探索や新物理探索を検討するため、偏極キセノンを用いて偏極中性子実験を行っている名大冷中性子実験グループと、素粒子宇宙起源研究所の「分野横断セミナー」の枠組みを活用して定期ブレインストーミングの機会を立ち上げ、2021 年度に 2 回のインフォーマルな研究会(2022 年 1 月 5 日、3 月 22 日)を行った。互いの研究紹介や、偏極キセノンを用いた非常に軽いアクシオン探索 (NASDUCK 実験)の紹介・検討などを行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 Kazufumi Sato, Masaki Yamashita, Koichi Ichimura, Yoshitaka Itow, Shingo Kazama, Shigetaka Moriyama, Kosuke Ozaki, Takumi Suzuki, Rina Yamazaki	4. 巻 11
2. 論文標題 Development of a dual-phase xenon TPC with a quartz chamber for direct dark matter searches	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Progress of Theoretical and Experimental Physics	6. 最初と最後の頁 113H02
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/ptep/ptaa141	査読の有無 有
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5件（うち招待講演 0件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山崎里奈, 風間慎吾, 山下雅樹, 伊藤好孝, 井手隆心, 原田莉奈
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（2021年）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 原田莉奈, 風間慎吾, 山下雅樹, 伊藤好孝, 山崎里奈, 青山直樹
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（2021年）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤好孝
2. 発表標題 Solid Xe TPC
3. 学会等名 G3C meeting
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤好孝
2. 発表標題 偏極キセノンによる暗黒物質・新物理探索
3. 学会等名 KMI分野横断セミナー「偏極キセノンによる暗黒物質・新物理探索」第1回
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤好孝
2. 発表標題 KMI分野横断セミナー#2に向けて
3. 学会等名 KMI分野横断セミナー「偏極キセノンによる暗黒物質・新物理探索」第2回
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------