

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：10105

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H01918

研究課題名（和文）ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索のためのキセノン泡箱の開発

研究課題名（英文）Research and development of xenon bubble chamber for neutrinoless double beta decay search

研究代表者

丸藤 祐仁（Gando, Yoshihito）

帯広畜産大学・畜産学部・准教授

研究者番号：60396421

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）：ニュートリノのマヨラナ性を検証するため数トンクラスの次世代ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索実験を目指し、液体キセノンを用いた発光による事象検出および飛跡確認による粒子識別ができるキセノン泡箱検出器の開発を進めた。赤外線照明および赤外線に感度のあるカメラの導入、液体キセノンを保持する容器や周辺機器の開発、マイナス40度-80度、2-7気圧下における圧力変動確認、その他各種周辺機器の開発、装置の組み込みをおこなった上で、放射線に対して泡生成が可能かテストをおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊が観測されれば、ニュートリノは粒子と反粒子が同一であるマヨラナ粒子であるということが実証され、根本的な粒子の性質が一つ明らかになるとともに、我々の宇宙の天体などの構成物質が“反物質”ではなくほぼ“物質”のみで構築されているという謎を解明する鍵になると考えられる。これは我々がどのようにできているのかという根源的理由の説明につながるという意味で社会的意義がある。

研究成果の概要（英文）：In order to verify the Majorana nature of neutrinos, we aim to develop a next-generation neutrinoless double beta decay search experiment of several tons class, and develop a xenon bubble chamber detector that can detect events by light emission using liquid xenon and identify particles by track confirmation. We introduced infrared illumination and cameras sensitive to infrared rays, developed containers and peripheral devices to hold liquid xenon, confirmed pressure fluctuations at minus 40 to 80 degrees Celsius and 2 to 7 atmospheres, and developed other peripheral devices and equipment. In addition, we tested whether it is possible to generate bubbles against radiation.

研究分野：数物系科学

キーワード：ニュートリノ キセノン 泡箱

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノと反ニュートリノが同一であるというマヨラナ性は、素粒子論、宇宙論、ニュートリノ観測実験の進展により、“軽いニュートリノ”および“宇宙の物質・反物質非対称性”という素粒子・宇宙の研究分野の謎を解く鍵になっているものの、これまで確実な証拠は得られていない。このような状況の中で、ニュートリノのマヨラナ性を検証する唯一現実的な方法は、二重崩壊を起こす特殊な原子核を用いた、ニュートリノを伴わない二重崩壊事象の検出である。二重崩壊反応がおきる場合、原子核内という小さな空間に2つのニュートリノを生み出す事ができ、マヨラナ性があれば対消滅することが可能になる。

ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊事象探索は、これまで大容量、低バックグラウンド化による感度向上を伴いながら進められてきた。その一方で、二重ベータ崩壊核を保持する容器自体や表面に付着している放射性不純物からの放射線事象が感度を制限し、数トン程度の崩壊核を用いた将来計画を考えた場合、大幅な感度向上が見込めなくなっている。

2. 研究の目的

将来の大型を見据えた場合、検出器内に混入するノイズ事象の増加、体積に比例するノイズ事象などによる感度低下が予想されるため、高い粒子識別能力によるノイズ事象の除去および“ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊事象”の同定が必要になってくる。

泡箱検出器は、高い飛跡検出能力を持つことから1960~1970年代に加速器実験で用いられてきたものの、高頻度の事象に対応できないことから現在では使用されていない。その一方、低頻度での使用を前提としている本研究ではこの短所は問題にならず、二重ベータ崩壊核の一つであるキセノンを用いることで、飛跡検出と発光の複合測定を行うことが可能になる。そのため、液体キセノンを用いた泡箱検出器の開発を行う。

3. 研究の方法

液体キセノンは放射線に対して発光し、近年では加速器を用いた希少崩壊探索実験や暗黒物質直接探索実験などの地下実験で用いられている。その発光波長は175nmであり、この波長に感度がある専用のPMTが使用されている。その一方、本研究では放射線の発光の検出と同時に、飛跡に沿って生成される泡の撮影を目指すため、PMTに感度の無い赤外線照明および赤外線に感度のあるカメラを導入し、赤外線を用いた撮像方法を開発する。

液体キセノンを用いた泡箱自体は1956年にテストをしたという記述があるものの、その後使われた痕跡はなく、最近テストを開始したグループがある程度となっている。また、現在泡箱自体の技術も継承されているとは言い難いため、冷却した液体キセノンを用いた小型の泡箱用の容器を用いて基本的な運転のテストを行う。この開発を進めるため、装置を内包できる真空断熱容器、圧力変動をコントロールする金属製ベローズの開発を行い、これらを使用してマイナス40度~100度、2~10気圧下における安定稼働のチェック、加熱液体状態の保持可能時間の確認、および適切な加圧、減圧のタイミングの測定を行う。

4. 研究成果

最初に、外部と熱を遮断するための真空断熱容器の製作、スターリング冷凍機を用いた冷却機構の製作、液体キセノンを保持する石英容器の製作、液体キセノンの加圧減圧を行うための金属製ベローズの製作を行い、これらの組み立ておよび各種センサーの組み込みをおこなった(図1)。

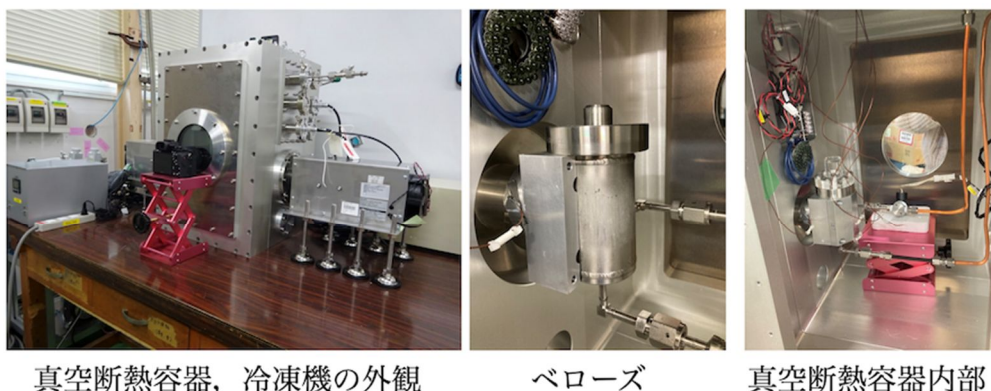
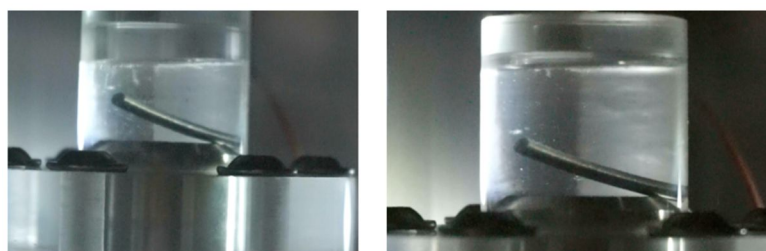


図1 キセノン泡箱装置

各種装置のリークチェックによるリークの発見と再製作、強度不足による破損と再製作、冷却テスト時の熱流入の確認と接続変更などを経た上でマイナス100度までの装置を冷却することができることを確認した。また、ベローズへの高圧窒素ラインおよび真空ラインの接続・切り替

えにより、キセノン側の体積の増減コントロールが可能であることを確認した。液体キセノンを用いた実証実験を行うために装置を設定していたところ、石英容器が破損し、この修理・再制作に時間がかかることから以下の実験はガラス製キセノン容器を用いた実験となっている。

液体キセノンを用いた泡箱は、純粋なキセノンを用いた場合ガンマ線やベータ線に感度が無く、泡ができないとされている。その一方でプロパンを用いた泡箱では、圧力が上昇するにつれ、アルファ線(約 1.5 気圧)、陽子(中性子線、約 3 気圧)、ベータ線(約 8 気圧)に感度を持つことが知られている。そのため、純粋な液体キセノンを用いてベータ線の泡生成感度を確認するため、ガンマ線源を用いて測定を行なった(図2)。確認を行なった圧力は、それぞれ約 2 気圧、4 気圧、6 気圧、7 気圧で、それぞれベローズにかかる圧力から推定した。いずれも泡の生成は見られなかった。次に、過去の報告でキセノン以外のガスを混ぜるとガンマ線に感度を持つという報告があるため、メタンガスを少量混ぜ上記と同様の測定を行なったが、同様に泡生成は確認されなかった。これまでの測定では、液体キセノンを用いた泡箱検出器においてガンマ線(ベータ線)に対する泡生成は確認されていないが、これまで用意した装置を用いることで、メタン比率を増加させた測定、エチレンを混ぜたキセノンを用いた測定、圧力を 10 気圧まで向上させた測定を計画している。また、ベローズを動かしているときに一部細かい固体キセノンが浮かんでいるのが確認されているため、温度勾配のコントロールを見直していくことを予定している。

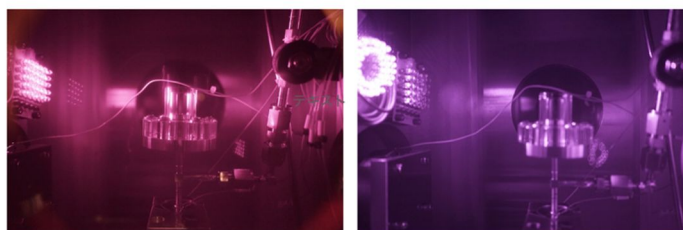


キセノン液化時

減圧テスト

図2 キセノン導入・減圧テスト

キセノン発光による検出と飛跡の撮像の同時測定実現のため、発光 1050 nm および 940 nm の LED 照明、および赤外線に感度のあるカメラを製作し、これらを用いた撮影が可能か確認した。図 3 のとおり、石英容器および周辺機器の撮影が可能であることがわかる。今後、この装置を用いて照明の位置、カメラの焦点の調整を行いながら最適な撮影条件の設定を進める。



1050 nm のLED

940 nm のLED

図3 赤外線LEDによる発光および赤外線に感度のあるカメラを用いた撮影

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Y. Gando et al., KamLAND-Zen Collaboration	4. 巻 16
2. 論文標題 The nylon balloon for xenon loaded liquid scintillator in KamLAND-Zen 800 neutrinoless double-beta decay search experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 P08023 ~ P08023
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/P08023	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 該当する

1. 著者名 S. Abe et al., KamLAND-Zen Collaboration	4. 巻 130
2. 論文標題 Search for the Majorana Nature of Neutrinos in the Inverted Mass Ordering Region with KamLAND-Zen	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 051801-1 - 7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevLett.130.051801	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 該当する

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 丸藤祐仁, 丸藤亜寿紗
2. 発表標題 素粒子・原子核実験のためのキセノン泡箱検出器の開発
3. 学会等名 SMART2022
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
研究分担者	丸藤 亜寿紗 (Gando Azusa) (20704399)	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・特任助教(研究) (11301)	

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