

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04834

研究課題名（和文）方向の情報を付加した新型検出器による超高感度ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索

研究課題名（英文）Ultrahigh sensitivity neutrino-less double beta decay search with a new type of detector with direction information added

研究代表者

上島 考太 (Ueshima, Kota)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教

研究者番号：80605379

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,300,000円

研究成果の概要（和文）：ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊探索のための新しい液体キセノン検出器の研究開発を行なった。検出器は新型プラスチックシンチレータ容器に液体キセノンを導入したものである。液体キセノンのシンチレーション光を新たに開発したブラシン容器の内面で175nm(VUV)から可視光に変換し検出した。また波長変換された液体キセノンの発光波形とブラシン容器の発光波形の違いを利用して大きくBGを低減できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新しい液体キセノン検出器を開発した。液体キセノンのシンチレーション光をブラシン容器内面で波長変換することで、液体キセノンの発光波形は、波形の立ち上がり成分が緩やかになり、立ち上がりの早いチェレンコフ光と区別して検出しやすくなる。液体キセノンの発光波形に埋もれた、チェレンコフ光成分を抽出することにより、液体キセノン検出器に方向の情報を付加でき、将来究極のBGとなる8B太陽ニュートリノ低減に向けた研究開発を行なった。

研究成果の概要（英文）：The R&D for a new type of liquid xenon (LXe) detector is ongoing to search for the neutrinoless double-beta decay ($0\nu\beta\beta$). The detector concept is LXe stored in a new type of plastic scintillator vessel. The wavelength of LXe scintillation light was shifted to visible light from 175nm (VUV) on the inner surface of the vessel. It was found that the pulse shape difference between LXe and plastic scintillator was useful for BG reduction.

研究分野：宇宙素粒子物理学

キーワード：波長変換剤 二重ベータ崩壊 液体キセノン 方向検出

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノがマヨラナ粒子(粒子と反粒子の区別がない粒子)であるかは未だに分かっていない。これはニュートリノの質量の起源に関わる非常に重要な問題である。ニュートリノを放出しない二重ベータ崩壊($0\ 2$)探索は、ニュートリノの質量の階層性、ニュートリノ有効質量の解明、マヨラナ粒子の存在の証拠、レプトン数非保存を示す非常に重要な実験である。さらに現在の宇宙は物質で構成されており、宇宙創成時に存在していた反物質消失の謎に迫る研究である。その物理的意義の大きさから、世界各地で様々な低バックグラウンド化手法を用いて $0\ 2$ 探索実験が開始、計画されている。

KamLAND-Zen 実験では、二重ベータ崩壊核であるキセノン 136 を液体シンチレータに溶かしこみ世界最高の極低放射能環境である KamLAND 検出器の中心を利用して世界最高感度の $0\ 2$ 探索を行なっている。

2. 研究の目的

極低放射能な環境を生かした、液体キセノンを用いた $0\ 2$ 発見に向けた研究開発を行う。エネルギー付加による不感領域を無くすため、プラスチックシンチレータ容器内に液体キセノンを導入し、 $0\ 2$ 探索の大幅な感度向上を目指した研究である。

世界最高感度で実験を行なっている KamLAND-Zen 実験で将来主要なバックグラウンドとして問題になるのは、 214Bi 、 10C 、通常のニュートリノを放出する二重ベータ崩壊($2\ 2$)である。通常 214Bi は Bi-Po の連続崩壊を利用してタグし、除去できるが、 Po の崩壊による線がミニバルーンフィルム内で止まってしまうと発光しないためタグできず、 214Bi がバックグラウンドとなる。また有機液体シンチレータには多量の炭素が存在し、宇宙線ミュオンにより 10C が生成されバックグラウンドとなる。さらに KamLAND 検出器の弱点であるエネルギー分解能が良くないため、 $2\ 2$ の染み込みが問題となる。

本研究は 214Bi や 10C のバックグラウンドを大幅に低減し、さらに $2\ 2$ を低減させるためにエネルギー分解能を向上させる研究である。またシンチレーション光に加えてチェレンコフ光を検出し、シンチレーション光検出器に方向の情報を付加する研究である。

液体キセノン中に炭素が存在しないため、 10C のバックグラウンドを大幅に低減できる。またプラスチックシンチレータ容器内に液体キセノンを導入することで、放射線がエネルギーを落とした時の不感領域がなくなり、 214Po の崩壊をタグして 214Bi を低減できる。また液体キセノンとプラスチックシンチレータの発光波形が異なるため、波形弁別を利用してバックグラウンドを低減できる。

さらに液体キセノンは、発光量約 46000photons/MeV と非常に大発光量のシンチレータで、KamLAND の液体シンチレータと比べて約 6 倍の発光量をゆうする。このため液体キセノンを用いれば収集光量が向上し、エネルギー分解能が向上することにより、 $2\ 2$ のバックグラウンドを低減でき、 $0\ 2$ 探索の探索感度をさらに向上する事ができる。また液体シンチレータに 750kg のキセノンを溶かす場合、探索領域は直径 4m であるが、液体キセノンの密度が 2.9g/cc と大きいため、探索領域をわずか直径 1m に限定でき、大幅にコンパクトな探索有効体積を実現できる。

またチェレンコフ光と液体キセノンのシンチレーション光を区別して検出する事により、方向に感度を持ったシンチレーション光検出器を開発し、将来究極のバックグラウンドとなる 8B 太陽ニュートリノを方向の情報をういて除去でき、 $0\ 2$ の探査感度をニュートリノの質量標準階層領域まで向上させる研究開発である。

3. 研究の方法

これまでの研究では、試作した直径 4cm のポリスチレンベースのプラスチックシンチレータ容器に液体キセノンを導入し、液体キセノンのシンチレーション光を可視光に変換し、プラスチックシンチレータのシンチレーション光との違いを観測した。液体キセノンをプラスチックシンチレータ容器に導入する原理検証は行ったが、本研究ではさらに研究を発展させた。

液体キセノンのシンチレーション光はプラスチックシンチレータ容器内面で吸収され、可視光に波長変換されて等方的に再放出される。一方、液体キセノン中で発生するチェレンコフ光はプラスチックシンチレータ容器を素通りする。このため、図 1 に示すように波長変換された液体キセノンのシンチレーション光波形は、立ち上がりが緩やかになり、効率よくチェレンコフ光成分を抽出できる。

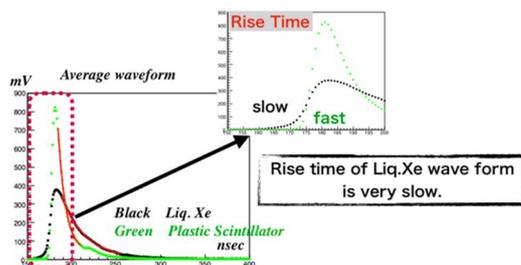
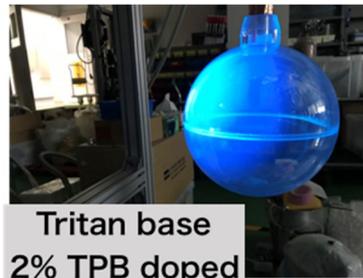


図 1、波長変換された液体キセノンのシンチレーション光波形とプラスチックシンチレータの発光波形

またキセノンを純化するための純化システム、10kgの液体キセノンを導入できるクライオスタットの開発を行なった。

直径20cmの大型プラスチックシンチレータ容器の開発、開発したプラスチックシンチレータ容器に液体キセノンを導入し、プラスチックシンチレータの発光波形と波長変換した液体キセノンの波形弁別の研究を行なった。

チェレンコフ光と波長変換した液体キセノンのシンチレーション波形を区別して検出するためのデータ収集系の整備、時間特性の良い光センサーの多チャンネル化を行なった。



Tritan base
2% TPB doped

図2, 開発した直径20cmの新型プラスチックシンチレータ容器

4. 研究成果

通常のプラスチックシンチレータの母材であるポリスチレンは有機溶剤耐性がなく、有機液体シンチレータの原料である有機溶剤に溶けてしまう。本研究では新たに有機溶剤耐性、低温特性に優れ、ベンゼン環を有する樹脂に着目し、新型のプラスチックシンチレータ容器の開発に成功した。液体キセノンのシンチレーション光を可視光に波長変換するための、波長変換剤テトラフェニルブタジエン (TPB) をトライタン樹脂やポリエチレンナフタレート (PEN) に溶かした容器を開発した。PENにTPBを溶かしこむ際に当初2%を予定していたが、TPBが析出し溶かし込めなかったため、0.2%のTPBを溶かした容器を開発した。トライタンの場合は、2%のTPBを溶かした容器を開発した(図2)。

10kgの液体キセノンを導入できるクライオスタットを開発し(図3)、チェレンコフ光を効率よく取得するため、30chの光電子増倍管(PMT)を配置したシステムをクライオスタット内部に導入した(図4)。

液体キセノンをトライタン樹脂製のプラスチックシンチレータ容器に導入し、安定にキセノンガスを液化できるように、ヒーターの電力、圧力、温度のパラメーター調整を行い、1kgの液体キセノンの導入に成功した。

液体キセノンのシンチレーション光をトータル32chのPMTで読み出すことに成功し、液体キセノンの有無で発光波形が大きく異なることを示した(図5)。この結果、波長変換した液体キセノンのシンチレーション光とプラスチックシンチレータの発光波形を区別することにより、大きくバックグラウンドを低減できることを示した。

また32chのPMTの波形情報を0.2nsecごとに収集できるシステムの構築に成功し、収集した波形情報を用いて、波形の立ち上がり成分に着目し、チェレンコフ光検出のための研究を行っていく。

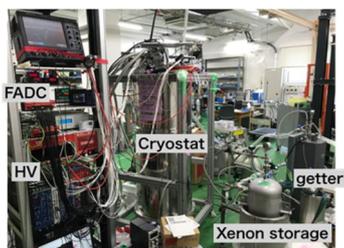


図3, 10kgの液体キセノンを導入できるクライオスタット、ガスラインおよび純化装置

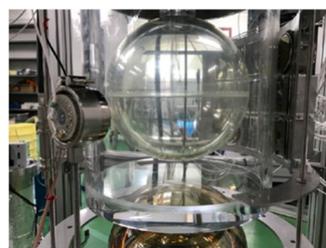


図4, チェレンコフ光検出のためのPMTアレイ

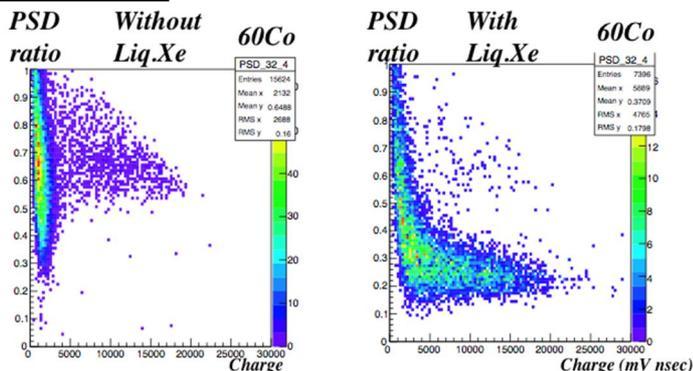


図5, 液体キセノン有無での収集した波形の違い。波長変換した液体キセノンの発光波形とプラスチックシンチレータの波形の違い

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 Kota Ueshima	4. 巻 1468
2. 論文標題 Liquid Xenon detector R&D for 0 2 search (KamXP)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12138
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1468/1/012138	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9件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Kota Ueshima
2. 発表標題 Experimental status of neutrinoless double beta decay searches
3. 学会等名 3 neutrinos and beyond（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kota Ueshima
2. 発表標題 Liquid Xenon detector R&D for 0v2b search (KamXP)
3. 学会等名 Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2019)（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上島考太
2. 発表標題 0v2b探索に向けた液体キセノン検出器の研究開発
3. 学会等名 日本物理学会 2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kota Ueshima
2. 発表標題 Neutrinoless Double Beta Decay Status and Prospects
3. 学会等名 3rd World Summit on Exploring the Dark Side of Universe (remote talk) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kota Ueshima
2. 発表標題 Liquid Xenon detector R&D for 0v2b search (poster)
3. 学会等名 Revealing the history of the universe with underground particle and nuclear research 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 上島考太
2. 発表標題 0v2b探索に向けた液体キセノン検出器開発 (poster)
3. 学会等名 第5回極低放射能技術研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kota Ueshima
2. 発表標題 KamLAND-Zen Results and purification methods
3. 学会等名 XeSAT2017 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 上島 考太
2. 発表標題 高压液体キセノンをを用いた0 2 探索の基礎研究
3. 学会等名 新学術地下素核研究 2017領域研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 上島 考太
2. 発表標題 高压キセノンシンチレータ
3. 学会等名 2017年度CRC将来計画タウンミーティング (招待講演)
4. 発表年 2017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
---------------------------	-----------------------	----