

令和 3 年 4 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03669

研究課題名（和文）液体キセノンを用いたニュートリノの出来ない4重ベータ崩壊、4重電子捕獲事象の探索

研究課題名（英文）Search for neutrino-less quadruple beta decay and electron capture with liquid xenon detector

研究代表者

市村 晃一（Ichimura, Koichi）

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：80600064

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）：本研究ではニュートリノが2重ベータ崩壊反応を起こし得るマヨラナ粒子ではなくディラック粒子の場合でも起こり得ると示唆されるニュートリノを放出しない4重ベータ崩壊事象の探索を、その反応を起こす候補核であるキセノン136を含有する液体キセノンを用いたXMASS実験のデータを用いて行なった。有意な信号は見つからなかったものの初の実験的制限を得ることができ、物理学会で報告した。現在論文投稿にむけた準備を行なっている他、4重ベータ崩壊反応と同様にキセノン124のニュートリノを放出しない4重電子捕獲事象探索のための信号スペクトルのシミュレーションと雑音事象のシミュレーションデータ作成も行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

キセノンを用いた実験では世界中で暗黒物質探索やニュートリノを放出しない2重ベータ崩壊事象探索などが行われているが、本研究では液体キセノンの大発光量と自己遮蔽能による低放射能環境を活かし、新たにニュートリノを放出しない4重ベータ崩壊事象探索という新しい物理探索が可能であることを示すことが出来た。本研究で生成したXMASS検出器と周りの環境中の放射性物質に由来する雑音事象のシミュレーションデータは本研究以外にも応用可能であり、暗黒物質事象探索などに既に利用されている他、将来の探索感度向上のためにはどの放射性物質起源のバックグラウンドを低減しないといけないう、といった計画検討にも活用可能である。

研究成果の概要（英文）：I have searched for the neutrino-less quadruple beta decay of ^{136}Xe in XMASS.

The neutrino-less quadruple decay violates the lepton number, and the process can undergo even in the case that neutrino is a Dirac particle. XMASS is an 832 kg liquid xenon detector. Thanks to its low background event rate, and its capability of beta/gamma events separation, this neutrino-less quadruple beta decay search was conducted with high sensitivity.

No significant excess from the known background was observed and the first experimental constraint of the half-life of this decay mode was set. I reported this result at the JPS conference. The paper related to this research is under preparation. XMASS also has ^{124}Xe isotopes that can undergo neutrino-less quadruple electron capture. To search for this process, I generated signal and background simulation data. This background simulation data can be used for other physics targets, such as dark matter searches using the whole XMASS data set.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ニュートリノ 素粒子実験 キセノン 4重ベータ崩壊 4重電子捕獲

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

素粒子の1種であるニュートリノは Super-Kamiokande 実験や SNO 実験、KamLAND 実験等によるニュートリノ振動現象の発見から、ニュートリノには質量があること、3種類のニュートリノの質量がそれぞれ違うことが分かっている。しかし現在分かっているのは質量の2乗差であり、それぞれの質量の値やレプトンセクターでの CP 対称性の破れ具合、ニュートリノが粒子と反粒子が同じというマヨラナ性を有しているか、といったパラメータや性質についてはまだ明らかにされていない。

ニュートリノの性質に関して世界中の実験で探索が行われている中でも、ニュートリノを放出しない2重ベータ(以下 $0\nu\beta\beta$ と略す)崩壊は、ニュートリノがマヨラナ粒子の場合のみに観測され、レプトン数保存則を破り、その崩壊率はニュートリノの質量の絶対値を与え、また現在の宇宙が粒子によって構成される物質優勢宇宙の説明をできるレプトジェネシスと呼ばれるメカニズムの強力な間接証拠となる。こうした背景から日本の KamLAND-Zen 実験やイタリアの GERDA 実験、CUORE 実験等で $0\nu\beta\beta$ 崩壊事象探索が行われているが未だ発見には至っていない。

上記の $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の状況の中、ニュートリノが反ニュートリノと異なる、いわゆるディラック粒子の場合でも、ニュートリノの質量の極端な軽さや、CP 対称性の敗れ、物質優勢宇宙の説明、未だ正体が分かっていない暗黒物質の候補となり得る事などを説明出来るとする論文が発表されている。特にニュートリノがディラック粒子だった場合、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊は起こさないがニュートリノを放出しない4重ベータ(以下 $04\beta\beta$ と略す)崩壊は起こすと主張する論文も発表されている (J.Heeck and W. Rodejohann, EPL 103, 32001 (2013))。

2. 研究の目的

本研究の目的は、液体キセノン1相型の XMASS 実験のデータを用い、キセノン136の $04\beta\beta$ 事象およびキセノン124のニュートリノを放出しない4重電子捕獲事象(以下 $04EC$ と略す)を世界最高感度で探索することを目的とする。これらの崩壊事象では原子核がそれぞれ(質量数 A, 原子番号 Z) $(A, Z+4)+4e^-$ 、 (A, Z) $(A, Z-4)$ と壊変する。反応を起こしうる原子核は限られており、 $04\beta\beta$ ではジルコニウム96(Q値629 keV)、ネオジウム150(Q値2079 keV)、そしてキセノン136(Q値79 keV)の3核種である。 $04EC$ を起こしうるのはバリウム130(Q値90 keV)、ガドリニウム148(Q値1138 keV)、ジスプロシウム154(Q値2063 keV)とキセノン124(Q値573 keV)の4核種である。

$04\beta\beta$ 崩壊反応ではニュートリノが放出されないため、 $0\nu\beta\beta$ 反応と同様に Q 値にピークを持つ信号が期待され、キセノン136での $04\beta\beta$ 反応で期待される個々の電子のエネルギースペクトルと総和のエネルギースペクトルとともに図1に示す。

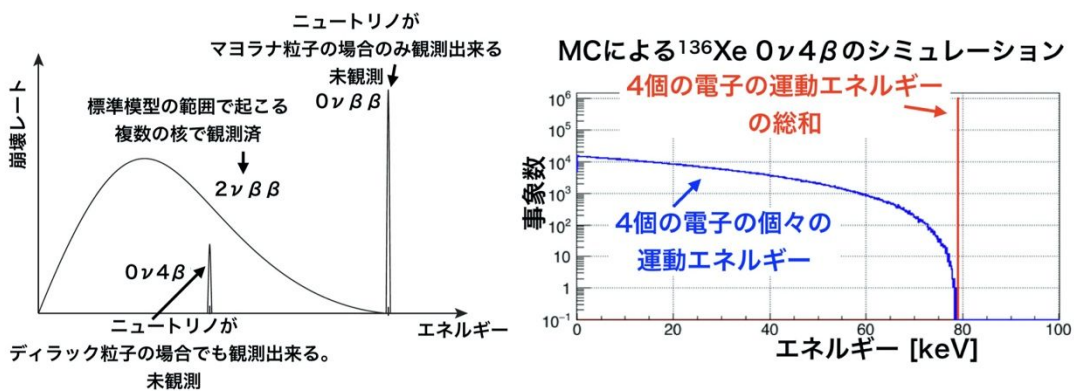


図1 (左) $04\beta\beta$ 信号の概念図 (右)キセノン136の $04\beta\beta$ 信号で発生する4個の電子の個々のエネルギーとその総和。シミュレーション

実験的な探索としてはフラッシュコッド DECAVO を使用した。

フランスの NEMO3 実験によって

ネオジウム150を用いた $04\beta\beta$ 事象探索結果が報告されている (R. Arnold, et al., Phys. Rev. Lett. 119, 041801)。

研究開始当初の時点で800日を超える XMASS 実験データと、液体キセノンの特徴である原子番号が54と大きいことを活用した自己遮蔽効果による外部環境起源のバックグラウンド事象の低減効果を活かした探索を遂行する。

3. 研究の方法

$04\beta\beta$ 、 $04EC$ 事象の探索方法として、得られた実験データのエネルギースペクトルをシミュレーション

レーションで生成した信号および検出器部材や液体キセノンに含まれる既知の放射性不純物による雑音事象のエネルギースペクトルを用いたフィッティングを行う方法を用いる。以下にそれぞれの探索方法を述べる。

0 4 探索について

キセノン 136 の Q 値付近における XMASS 実験での主なバックアップはアルゴン 39 や、ラドン 222 の娘核である鉛 214 などの線である。この領域での雑音事象の除去手法として、同じエネルギーの発光でも、単一の電子に起因する事象と、ガンマ線の光電効果などによって低エネルギー電子複数個から発光する場合で発光時定数が異なることを活かした波形弁別法がある。図 2 に液体キセノン中の粒子別の発光時定数を示す (<http://nest.physics.ucdavis.edu> より)。この発光時定数を用いた波形弁別法は XMASS 実験でこれまでに報告した暗黒物質とキセノン 129 との非弾性散乱事象探索 (T. Suzuki et al., *Astropart. Phys.* 110 (2019) 1-7) や、キセノン 124, 126 のニュートリノを放出する 2 重電子捕獲探索 (K. Abe et al., *PTEP* 2018 053D03) でも用いられている。本研究で探索する 0 4 崩壊事象も 4 電子による信号であるため発光時定数が同エネルギーの単一電子(ベータ線)よりも短くなる。この情報を活かし、XMASS の観測データの中からガンマ線の発光時間分布に近い事象を選別することで高感度な探索を行う。

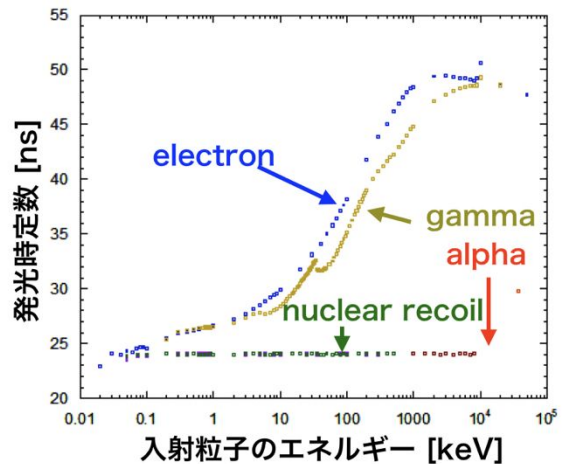


図 2 液体キセノン中での粒子別の発光時定数。ガンマ線による事象ではベータ線よりも発光時定数は短い。

0 4EC 探索について

キセノン 124 の 0 4EC 崩壊事象では 4 本の X 線とガンマ線で Q 値にピークが作られると期待される。本研究課題開始以前は、放射性不純物による雑音事象のシミュレーションデータは、液体キセノンでの発光量がエネルギー換算で 300 keV 以下の事象に対してのみ、約 800 日分のデータが生成されていた。従って物理探索を行うために、液体キセノンでの発光量に制限をかけない新たなシミュレーションデータを生成する必要がある。XMASS の全実験データに対応する 1600 日分の、既知の全ての放射性不純物起源雑音事象のシミュレーション生成には膨大な CPU 資源を必要とする。そのため東京大学の Oakforest、Oakbridge スーパーコンピューターを活用することで高統計なシミュレーションデータを生成する。

4 . 研究成果

0 4 探索について、

論文と同じ約 800 日分のデータを用い、検出器の状態に応じて 4 つの期間にデータを分け、発光時定数を用いた波形弁別法を用いることで、0 4 崩壊事象を多く含むと期待されるガンマ線の発光分布に近い事象を集めたサンプル、アルゴン 39 のようなベータ線を多く含むサンプル、鉛 214 の量を定量するのに用いる、同じくラドン 222 の娘核であるビスマス 214 事象を集めたサンプルの 3 つのサンプルを使い、エネルギースペクトルを雑音事象と 0 4 信号のエネルギースペクトルで同時にフィッティングする手法で信号の探索を行なった。結果有意な信号は見つからなかったもののキセノン 136 の 0 4 崩壊半減期について初の実験的制限を得ることができ、本研究結果や、解析の基となる発光時定数の評価方法について報告を行なった。エネルギースケールの評価に用いているガンマ線と 4 電子が同一原子核から発生する

0 4 信号での検出器の応答の違いの有無や、4 電子が近接して発光することによる増光・減光作用の評価など本研究の論文化に向けたシミュレーションの正当性評価のための研究を行なっている。

0 4EC 探索について

スーパーコンピューターのリソースを活用することによって、全エネルギー範囲で考えられる全放射性不純物起源の雑音事象のシミュレーションデータを、XMASS の観測データと同統計の 1,600 日分に対応する量を生成出来た。液体キセノンに含まれるアルゴン 39 や鉛 214 等の放射性不純物については自己遮蔽が効かないため、より詳細な評価をする必要がある。そのため液体キセノンに一樣に含まれる放射性不純物に関してはフィッティングで信号探索をするにあたり十分な精度を得るに足る統計量のシミュレーションデータを生成出来た。この生成したシミュレーションデータと観測データを比較することにより、0 4EC 事象だけでなく XMASS 実験でこれまで探索されていなかった 300 keV 以上のエネルギー領域のデータ解析が可能となり、また XMASS の全観測データを用いた暗黒物質探索など他の物理探索にも応用が期待される。

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 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ichimura Koichi	4. 巻 2319
2. 論文標題 Latest results from the XMASS experiment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings 2319, 040011 (2021)	6. 最初と最後の頁 040011-1, 4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0037305	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 -

1. 著者名 Ichimura Koichi	4. 巻 1468
2. 論文標題 A measurement of the scintillation decay time constant in liquid xenon with the XMASS-I detector	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 12235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1468/1/012235	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4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Koichi Ichimura
2. 発表標題 A measurement of the scintillation decay time constant in liquid xenon with the XMASS-I detector
3. 学会等名 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, TAUP 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Koichi Ichimura
2. 発表標題 Recent results from the XMASS experiment
3. 学会等名 The 4th International Conference on Science, Application and Technology of Xenon Radiation Detector (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koichi Ichimura
2. 発表標題 Latest results from the XMASS experiment
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Physics Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 市村晃一 他 XMASS collaboration
2. 発表標題 XMASS実験：ニュートリノの出ない4重ベータ崩壊の探索
3. 学会等名 日本物理学会 第74回年次大会
4. 発表年 2019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
---------	---------