

令和元年5月23日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H06004

研究課題名(和文) 多角的アプローチによるキセノン二重ベータ崩壊の探索

研究課題名(英文) Search for double beta decay of xenon by polyhedral approach

研究代表者

平出 克樹 (HIRAIDE, Katsuki)

東京大学・宇宙線研究所・特任助教

研究者番号：10584261

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ニュートリノのマヨラナ性の神髄に迫るべく、多角的なアプローチによるキセノン二重ベータ崩壊の探索を行ってきた。まずは、素粒子標準理論において予言されているがまだ実験的に観測されていない $^{124}\text{Xe}$ のニュートリノを伴う二重電子捕獲の探索を行った。岐阜県飛騨市の神岡鉱山の地下1000mに設置した大型液体キセノン検出器XMASS-Iを用いて取得した800日の観測データを用いて探索を行ったが有意な信号は観測されず、この反応の半減期に対して $2.1E22$ 年以上という世界で最も厳しい制限を与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では $^{124}\text{Xe}$ のニュートリノを伴う二重電子捕獲の探索を行ったが、残念ながら有意な信号を捉えることはできなかった。その結果、この反応の半減期に対して世界でもっとも厳しい制限を与えることになったが、この結果は原子核反応を計算するための様々な理論モデルを改善するための新しいインプットになった。これは、今後ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の半減期の予言精度を向上させることにつながると期待される。

研究成果の概要(英文)：In this research, searches for double beta decays of xenon have been conducted in order to approach the nature of Majorana neutrinos. At first, a search for two-neutrino double electron capture on  $^{124}\text{Xe}$ , which is predicted within the Standard Model of particle physics but has not been experimentally observed, was performed. We searched for this process using 800 days of data taken with a large liquid xenon detector XMASS-I which is located 1000 m underground at the Kamioka Observatory. No significant signal was observed, and hence we set the most stringent lower limit on the half-life of the process to be  $>2.1E22$  years.

研究分野：素粒子実験、宇宙線実験

キーワード：素粒子実験 ニュートリノ 二重ベータ崩壊 二重電子捕獲 キセノン

# 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

## 1. 研究開始当初の背景

二重ベータ崩壊 ( $\beta\beta$ ) は、原子核内の中性子 2 個が同時に陽子 2 個に変わる壊変で、ニュートリノを伴う崩壊 ( $2\nu\beta\beta$ ) と伴わない崩壊 ( $0\nu\beta\beta$ ) が考えられる。 $2\nu\beta\beta$  は素粒子標準理論で許される反応で、既にいくつかの原子核で観測されている。一方、 $0\nu$  モードは素粒子標準理論ではレプトン数非保存のため禁止されており、いまだ観測もされていない。同様に、原子核内の陽子 2 個が同時に中性子 2 個に変わる壊変には、二重電子捕獲 (ECEC)、 $\beta^+EC$ 、 $\beta^+\beta^+$  があるが、 $2\nu$  モードでは ECEC が、 $0\nu$  モードでは  $\beta^+EC$  が支配的だと考えられている。これらも合わせて広義の「二重ベータ崩壊」と呼ばれる。もし  $0\nu$  「二重ベータ崩壊」が発見されれば、素粒子標準理論を超えた現象であり、ニュートリノがマヨラナ粒子であることが分かる。そのため様々な原子核 ( $^{136}\text{Xe}$ ,  $^{76}\text{Ge}$ ,  $^{48}\text{Ca}$  など) を用いた探索実験が世界中で行われている。

ところで、 $0\nu$  「二重ベータ崩壊」のメカニズムとしては、ニュートリノ質量によるもののほかに右巻きカレントの存在によっても起こり得る。面白いことに、 $0\nu\beta\beta$  の観測だけではその 2 つを区別することが難しい。しかし、 $0\nu\beta^+EC$  の崩壊率は右巻きカレントの寄与によって大きく変化するため、 $0\nu\beta\beta$  と  $0\nu\beta^+EC$  の観測を組み合わせることにより、ニュートリノ質量および右巻きカレントそれぞれの寄与を明らかにできる。

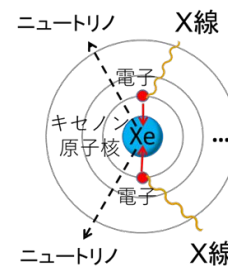
これまで実験的には、 $^{136}\text{Xe}$  の  $0\nu\beta\beta$  については KamLAND-Zen 実験が  $T_{1/2} > 1.06 \times 10^{26}$  年 (90%信頼度) という最も厳しい制限をつけている。一方、 $^{124}\text{Xe}$  の  $0\nu\beta^+EC$  については、Barabash らにより  $T_{1/2} > 1.2 \times 10^{18}$  年 (68%信頼度) という非常に弱い制限しかつけられていない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、岐阜県飛騨市にある神岡鉱山の地下 1,000 メートルに設置した大型液体キセノンシンチレーション検出器 XMASS-I を用いて、 $^{136}\text{Xe}$  のニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊だけでなく、 $^{124}\text{Xe}$  のニュートリノを伴わない二重電子捕獲等の探索も同時に高感度で行うことで、ニュートリノ質量および右巻きカレントの寄与を識別してニュートリノのマヨラナ粒子性の真髄に迫ることである。

## 3. 研究の方法

本研究では、まず素粒子標準理論で存在が予言されているが、まだ実験的に観測されていない  $^{124}\text{Xe}$  の  $2\nu ECEC$  を探索することから始めた。この反応は  $^{124}\text{Xe} + 2e^- \rightarrow ^{124}\text{Te} + 2\nu_e$  という反応で、右図のように 2 つの軌道電子を同時に捕獲したあと、主に 2 つの特性 X 線を放出する。XMASS-I 検出器では 2 つの特性 X 線のエネルギーの和である 64 keV に生じるエネルギーピークを探索することになる。

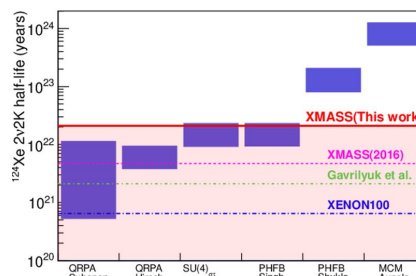


次に、 $0\nu$  モードの探索であるが、 $^{136}\text{Xe}$  の  $0\nu\beta\beta$  は、 $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba} + 2e^-$  という反応で、2 つの電子の運動エネルギーの和 2.46 MeV にピークが立つ。一方、 $^{124}\text{Xe}$  の  $0\nu\beta^+EC$  は  $^{124}\text{Xe} + e^- \rightarrow ^{124}\text{Te} + e^+$  という反応で、X線、陽電子、および対消滅の 2 つのガンマ線のエネルギー和 2.86 MeV にピークが立つ。そこで、それぞれの Q 値に生じるエネルギーピークを探索することになる。

## 4. 研究成果

まず、 $^{124}\text{Xe}$  の  $2\nu ECEC$  の探索では、検出器改修後の 2013 年 11 月から 2016 年 7 月までに取得した 800 日分のデータを用いることで、前回の解析に比べデータ量を 6 倍、有効体積を 8 倍に拡張した。また、液体キセノンのシンチレーション発光時間プロファイルの違いを利用した信号と線バックグラウンドの識別アルゴリズムを開発し、探索の高感度化を実現した。探索の結果、有意な信号は観測されなかったため、半減期に対して  $T_{1/2} > 2.1 \times 10^{22}$  年 (90%信頼度) というさらに厳しい制限をつけた。また、 $^{126}\text{Xe}$  に関しても同様にして  $T_{1/2} > 1.9 \times 10^{22}$  年 (90%信頼度) という制限をつけた。

右図に、 $^{124}\text{Xe}$  の半減期の理論予想とこれまでの実験的制限の比較を示した。青い四角で示された領域が様々な理論で予想されている半減期の範囲を示していて、水平に書かれた線より下側がそれぞれの実験で排除されている。今回この論文の結果により、赤く塗りつぶされた領域が排除されたことになる。



一方、0νモードの探索に関しては、2-3 MeV エネルギー領域でのエネルギー応答などの検出器較正を行い、モンテカルロシミュレーションのチューニングができた。現在、バックグラウンドの評価を行っており、それが完了次第これらのモードの探索が実現できるところまで到達した。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計 3件)

- K. Abe, K. Hiraide et al. (XMASS Collaboration),  
“Improved search for two-neutrino double electron capture on  $^{124}\text{Xe}$  and  $^{126}\text{Xe}$  using particle identification in XMASS-I,” PTEP 2018 (2018) 053D03,  
DOI:10.1093/ptep/pty053, 査読有.
- H. Takiya, K. Abe, K. Hiraide et al. (XMASS Collaboration),  
“A measurement of the time profile of scintillation induced by low energy gamma-rays in liquid xenon with the XMASS-I detector,” Nucl. Instrum. Meth. A834 (2016) 192-196,  
DOI:10.1016/j.nima.2016.08.014, 査読有.
- K. Abe, K. Hiraide et al. (XMASS Collaboration),  
“Search for two-neutrino double electron capture on  $^{124}\text{Xe}$  with the XMASS-I detector,” Phys. Lett. B759 (2016) 64-68,  
DOI:10.1016/j.physletb.2016.05.039, 査読有.

### 〔学会発表〕(計 12件)

- K. Hiraide, “Latest results from XMASS,”  
International Workshop on “Double Beta Decay and Underground Science” (DBD18),  
October 21-23, 2018, Hawaii, USA.
- K. Hiraide, “Latest results from the XMASS experiment,”  
6th Symposium on Neutrinos and Dark Matter in Nuclear Physics (NDM2018),  
June 29-July 4, 2018, Daejeon, Korea.
- K. Hiraide, “Neutrino physics with the XMASS liquid xenon detector,”  
XXVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino2018),  
June 4-9, 2018, Heidelberg, Germany.
- 平出克樹, “XMASS 実験: 粒子識別を用いた  $^{124}\text{Xe}$  二重電子捕獲の高感度探索,”  
日本物理学会 2017 年秋季大会, 2017 年 9 月 12-15 日, 宇都宮大学峰キャンパス.
- K. Hiraide, “Sensitive search for double electron capture on  $^{124}\text{Xe}$  in XMASS,”  
XV International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics (TAUP2017), July 24-28, 2017, Sudbury, Canada.
- K. Hiraide, “Recent results from XMASS,”  
The 26th International Workshop on Weak Interactions and Neutrinos (WIN2017),  
June 19-24, 2017, Irvine, USA.
- 平出克樹, “XMASS 実験:  $^{124}\text{Xe}$  二重電子捕獲の高感度探索 2,”  
日本物理学会 第 72 回年次大会, 2017 年 3 月 17-20 日, 大阪大学豊中キャンパス.
- K. Hiraide, “Search for double electron capture in XMASS,”  
International Workshop on “Double Beta Decay and Underground Science” (DBD16),  
November 8-10, 2016, Osaka, Japan.
- K. Hiraide, “XMASS: a large single-phase liquid-xenon detector,”  
14th Topical Seminar on Innovative Particle and Radiation Detectors (IPRD16),  
October 3-6, 2016, Siena, Italy.
- 平出克樹, “XMASS 実験:  $^{124}\text{Xe}$  二重電子捕獲の高感度探索,”  
日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 21-24 日, 宮崎大学木花キャンパス.
- 平出克樹, “XMASS 実験: 低エネルギー電子事象に対する液体キセノンシンチレーション  
発光時間プロファイルの測定,” 日本物理学会 2016 年秋季大会, 2016 年 9 月 21-24 日, 宮  
崎大学木花キャンパス.
- K. Hiraide, “Recent results of direct dark matter search with XMASS,”  
38th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2016),  
August 3-10, 2016, Chicago, USA.

### 〔図書〕(計 0件)

### 〔産業財産権〕

出願状況 (計 0件)

名称:

発明者:

権利者:

種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況（計 0 件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

【論文紹介】二重電子捕獲の探索（XMASS 実験）

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/xmass/news/article/20190307.html>

## 6 . 研究組織

### (1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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、研究者個人に帰属されます。