

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14726

研究課題名（和文）カムランド禅800による高感度マヨラナニュートリノ探索のための研究開発

研究課題名（英文）R&D of high sensitivity search for neutrinoless double beta decay with KamLAND-Zen 800

研究代表者

丸藤 亜寿紗（GANDO, Azusa）

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・特任助教（研究）

研究者番号：20704399

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）：ニュートリノの性質（マヨラナ性、質量階層構造、絶対質量）を調べる方法として、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索がある。2019年1月に観測を開始したカムランド禅800は、約750kgのキセノン（90%濃縮）を用いて実験を行なっている。過去の実験カムランド禅400での最大の背景事象は、ミュオンによる炭素原子核破砕事象の一つ、C-10であった。これは新しく開発された除去手法により99.3%以上の除去率を達成した。これによって新しい背景事象、ミュオンによるキセノン原子核破砕事象が明らかになった。解析方法を工夫し、世界最高感度での半減期およびニュートリノの有効質量への制限を与えた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

新たな背景事象除去方法の導入により、カムランド禅800の最初の結果が2022年3月に発表された。ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の有意な信号は検出されなかった。カムランド禅400の再解析も行い統合した結果、Xe-136の半減期の下限値は 2.3×10^8 年（90%信頼度）となった。2016年に発表されたカムランド禅400の最後の結果の約2倍の制限である。ニュートリノの有効質量では36-156 meVと世界最高感度を更新し、世界で初めて逆階層構造への探索に踏み出した。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is high sensitivity search for neutrinoless double beta decay of Xe-136 with xenon loaded liquid scintillator (KamLAND-Zen 800). An observation of the decay establish the Majorana nature of neutrino and prove the lepton number violation. KamLAND-Zen 800 started DAQ in 2019 with 750 kg of 90% enriched xenon. One of the main background was spallation product, C-10. We developed a new rejection method and its rejection efficiency reached to more than 99.3%. New spallation products from Xe become new major background in KamLAND-Zen 800. We also developed a likelihood method and rejected data is fitted with single data simultaneously. From these, we obtained most stringent lower half-life limit for Xe-136 and effective neutrino mass.

研究分野：素粒子実験

キーワード：二重ベータ崩壊 液体シンチレータ キセノン

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年のニュートリノ振動実験の進展から、ニュートリノには小さくも有限な質量があることが明らかになり、それぞれの世代間の質量の二乗の差(の絶対値)が精密に測定されるようになってきている。この有限な質量がニュートリノに関する新たな二つの疑問を呈する。一つが、ニュートリノの絶対質量と質量の順序(階層構造)、そしてもう一つが、ニュートリノのマヨラナ性である。全てのクォーク、レプトンの中で唯一、電荷を持たないニュートリノにのみ、粒子と反粒子の区別がないマヨラナ粒子の可能性が残されているが、未だ検証されていない。もしニュートリノがマヨラナ粒子であれば、ニュートリノが他の素粒子に比べて非常に軽い事を説明するシーソー機構を強く示唆し、また、レプトン数の破れから、現在の宇宙が反物質ではなく、物質でできている事を解明できるのではないかと期待されている。

ニュートリノのマヨラナ性を調べる現実的な方法として、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索がある。この崩壊は理論的に予測されているものの、未だ観測されておらず、半減期で 10^{25-26} 年の下限値が与えられているのみである。半減期はニュートリノの有効質量の二乗に反比例するので、ここから質量へのアプローチが出来る。実験の重要性から、長年に渡って世界中で様々な測定が行われているが、崩壊核(例: ^{100}Mo 、 ^{130}Te 、 ^{136}Xe ...)、実験技術(例: シンチレータ、ポロメータ、半導体 検出器...)とも一長一短があり、理想的な実験の組合せは存在しない。

研究開始当初の有効質量に対する最も強い制限は、約 350kg の ^{136}Xe を用いたカムランド禅 400(申請者所属)による 2016 年発表のもので、世界で初めて 100meV をきる (m) < 61-165 meV (90%信頼度)[1] が得られている。ここで有効質量の幅は核行列要素の不定性によるものであり、崩壊核によって異なる。

この二重ベータ崩壊探索実験が、現実的な観測時間(数年)で次の段階である逆階層構造の探索に踏み出すには数百キロから数トンの崩壊核が必要となる。また、検出器は極低バックグラウンド環境でなければ更なる感度向上は見込めない。そのため、背景事象の正確な見積もりと、より効率的な除去が必須となる。

2. 研究の目的

本研究では申請者が所属するカムランド禅実験において、より高感度なニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索を行うことを目的としている。2019 年 1 月に観測を開始したカムランド禅 800 は、1 キロトンの液体シンチレータを使用した大型ニュートリノ検出器カムランドを母体とし、約 750kg のキセノン(90%濃縮)を溶かした液体シンチレータを半径 1.9m のナイロン製バルーン(インナーバルーン)に入れ、二重ベータ崩壊を観測する。世界で初めて逆階層構造に切り込んでいく実験である。2015 年にデータ取得を終了したカムランド禅 400 実験の経験のもと、背景事象の効率的な除去方法と、位置・エネルギー較正装置の開発を目指した。

3. 研究の方法

・位置・エネルギー較正装置について

キセノン含有液体シンチレータを保持するインナーバルーンは、カムランド禅 400、800 とともに厚さ 25 μm のナイロンフィルムでできており、さらに、直管と呼ばれている部分は直径 10cm 程度しかないので、万が一の損傷を恐れ、線源による定期的な位置・エネルギー較正はなされていない。カムランド禅 400 での線源の使用は最少限に抑えられており、データ収集前半期間にインナーバルーンの外側から一回、データ取得終了直後に内部から一回のみであった。カムランド禅 800 でもできるだけ内部へのアクセスを減らしたい。一方、カムランド検出器で用いられている約 1800 本の光電子増倍管は、一部に増幅率が低下しているものがあり、その数は近年徐々に増えていっている。そのため、線源を用いた定期的なエネルギー較正を行いたい。カムランドでは ^7Be 太陽ニュートリノの観測を行う際に、放射性不純物の量を極力下げた線源懸架装置が開発されており[2]、ワイヤーの先に取り付けられた線源がモーターで位置精度よく移動し、複数箇所でのエネルギー較正を可能にしていた。本実験ではワイヤーでバルーンをこするのを防ぐため、ベクトランというスーパー繊維でできた紐を用い、手回しの滑車で目標箇所に降ろす装置を制作したい。また、外側からも線源の投入を可能にするための装置を開発、設置したい。

・背景事象の見積もりと除去方法について

カムランド禅 400 における 0 $\nu\nu$ 領域(崩壊の Q 値 2.458MeV 付近)のバックグラウンドは、(1) インナーバルーンからくる ^{214}Bi 、(2) 宇宙線ミュオンの原子核破砕で生成される ^{10}C 、(3) ^8B 太陽ニュートリノであった。この中で、インナーバルーンからくる ^{214}Bi は、カムランド禅 400 後半のデータに比べて 1/10 程度(親核 ^{238}U 換算)まで減らすことに成功している[3]。製作過程で放射線不純物をつけないよう作業工程を見直し、様々な改善を行った結果であり、洗浄後のフィルムと比較しても遜色ない綺麗さとなった。これ以上の改善はフィルムの製造工程から見直す(全てをクリーンルーム化等)レベルのものとなり、予算的にも現実的ではない。そこで

本研究では残りの二つをいかに除去、評価するかに注力する。

4. 研究成果

・位置・エネルギー較正装置について

最初の作業として、カムランド禅 400 同様、インナーバルーンの外側から線源を入れることを目指した。まず外側用グローブボックスの設置を行い、そこから検出器内に内視鏡カメラを降ろして実際に中の様子を確認した。残念なことにインナーバルーンの吊り紐がカメラと干渉する位置にあることがわかった。インナーバルーンへの余計な負荷や事故を避けようと思うと、装置のかなり上部までしか線源を投入できず、この位置からの較正はあまり効果的ではないことがわかった。グローブボックスの位置を変えるのは検出器の構造上難しいため、外側からの線源投入は諦めざるを得なかった。内側への線源導入については、デザイン等はほぼ決まっているので、大型水タンクでテストを行い、実際の運用は今後の課題としたい。

・背景事象の見積もりと除去方法について

宇宙線ミュオンが液体シンチレータの主要成分である炭素原子核を破砕して生成される背景事象 (^{10}C , ^6He 等) は、ミュオン、中性子、生成された原子核の三重同時計測によって除去される。これはカムランド禅 400 でも使われていた手法である。これに加え、中性子を見逃した場合を考慮し、ミュオンのエネルギー損失から新たな尤度関数を開発した。これらの手法により、 ^{10}C を含む炭素原子核破砕物の除去効率は向上し、 ^{10}C で 99% 以上、 ^6He で約 98% に達した。また ^{136}Xe の中性子捕獲によって生成される ^{137}Xe も同様の方法で 74% の除去率を達成した。

炭素原子核破砕物の効率的な除去方法が確立したことにより新たな背景事象が明らかとなった。キセノン原子核の破砕物である。個々の寄与は小さいものの、非常にたくさんの原子核が生成されるため、トータルとして ROI の探索に効いてくる。また半減期が数時間から数日と長いので、単純なミュオンとの時間相関カットを用いるとライブタイムを大きく減らしてしまう。そこで、ミュオンとの時間相関、生成された原子核と中性子との距離相関、有効中性子数をパラメータとした尤度関数を開発し、この事象に適用した。除去効率は 42% である。この除去したデータも有効に使うため、結果を求める際には同時フィットを行っている。

これらを経て、カムランド禅 800 の最初の結果が 2022 年 3 月に発表された。ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の有意な信号は検出されなかった。カムランド禅 400 の再解析も行い、 ^{136}Xe 半減期の下限值は 2.3×10^{26} 年 (90% 信頼度) となった。2016 年に発表されたカムランド禅 400 のほぼ 2 倍である。有効質量では 36-156 meV と世界最高感度を更新し、世界で初めて逆階層構造への探索に踏み出した。

引用文献

1. A. Gando et al. (KamLAND-Zen Collaboration), Phys. Rev. Lett. 117, 082503 (2016).
2. T.I. Banks et al. (KamLAND collaboration), Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 769, 2015, pp. 88-96.
3. Y. Gando et al. (KamLAND-Zen Collaboration), JINST 16 P08023 (2021).
4. S. Abe et al. (KamLAND-Zen Collaboration), arXiv:2203.02139v1 [hep-ex].

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 0件）

1. 著者名 Yoshihito Gando on behalf of the KamLAND-Zen collaboration	4. 巻 1468
2. 論文標題 First results of KamLAND-Zen 800	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series (JPCS)	6. 最初と最後の頁 1-4
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1742-6596/1468/1/012142	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 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 尾崎秀義, 他KamLAND-Zen Collaboration
2. 発表標題 KamLAND-Zen : KamLAND-Zen 800でのニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索の解析結果
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 亀井雄斗, 他KamLAND-Zen Collaboration
2. 発表標題 KamLAND-Zen 800: 宇宙線ミュオンによる核破砕反応での不安定核種生成量の評価
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 尾崎秀義, 他KamLAND-Zen Collaboration
2. 発表標題 KamLAND-Zen : 全体像と系統誤差
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 亀井雄斗, 他KamLAND-Zen Collaboration
2. 発表標題 KamLAND-Zen: バックグラウンドの評価
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内敦人, 他KamLAND-Zen Collaboration
2. 発表標題 KamLAND-Zen: ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索の解析の現状
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 三宅春彦, 他KamLAND-Zen Collaboration
2. 発表標題 KamLAND-Zen: さらなる探索感度向上のための研究開発の現状
3. 学会等名 第76回日本物理学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹内敦人, 他KamLAND-Zen Collaboration
2. 発表標題 KamLAND-Zen 800: 内部背景事象の評価
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 蜂谷尊彦, 他KamLAND-Zen Collaboration
2. 発表標題 KamLAND-Zen 800 : 宇宙線ミュオン起源の背景事象の評価
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 尾崎秀義, 他KamLAND-Zen Collaboration
2. 発表標題 KamLAND-Zen 800 : 二重ベータ崩壊解析の最新結果
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 三宅春彦, 他KamLAND-Zen Collaboration
2. 発表標題 KamLAND-Zen 800 : エネルギー分解能改善に向けた研究開発
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 亀井雄斗, 他KamLAND-Zen Collaboration
2. 発表標題 KamLAND-Zen 800 : 宇宙線ミュオン起源の背景事象評価
3. 学会等名 第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹内敦人, 他KamLAND-Zen Collaboration
2. 発表標題 KamLAND-Zen 800 : ニュートリノレス2重ベータ崩壊探索の解析状況
3. 学会等名 第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三宅春彦, 他KamLAND-Zen Collaboration
2. 発表標題 KamLAND-Zen 800 : エネルギー分解能改善に向けた研究開発(2)
3. 学会等名 第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 家城育, 他KamLAND-Zen Collaboration
2. 発表標題 KamLAND-Zen800 : 宇宙線ミュオンによる核破砕と崩壊系列についての研究
3. 学会等名 第75回年次大会(2020年)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshihito GANDO
2. 発表標題 First results of KamLAND-Zen 800
3. 学会等名 TAUP2019 (国際学会)
4. 発表年 2020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
---------	---------