

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 16日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究（A）

研究期間：2009～2011

課題番号：21684008

研究課題名（和文）カムランドにおける ^{136}Xe の $\nu\beta\beta$ 崩壊探索に向けた基礎研究研究課題名（英文）Basic research for search for neutrino-less double beta decay of ^{136}Xe in KamLAND

研究代表者

丸藤 祐仁（GANDO YOSHIHITO）

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：60396421

研究成果の概要（和文）：

本研究はカムランドを用いた世界最高感度での二重ベータ崩壊探索実験を実現するための開発研究を目的とし、内部に設置するミニバルーンの開発と設置方法、およびキセノン溶解液体シンチレーターの送液方法の確立を行った。また、この結果を反映した検出器の製作、および建設作業を終え、二重ベータ崩壊探索実験、カムランド禅が開始した。

カムランド禅実験は78日の観測結果を元に最初の結果を公表し、キセノン ^{136}Xe のニュートリノを伴う二重ベータ崩壊については $2.38 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.14(\text{syst}) \times 10^{21}\text{yr}$ という測定値、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊については $>5.7 \times 10^{24}\text{yr}$ (90%CL.)をいう下限値を与えた。

研究成果の概要（英文）：

We performed research and developments to realize double beta decay search in KamLAND with world highest sensitivity. First half of this research, we developed mini-balloon which is used in KamLAND, method of installation of mini-balloon, method of filling of xenon loaded liquid scintillator. After the establishment of techniques, we made mini-balloon, installed mini-balloon, and filled xenon loaded liquid scintillator. Then, we started KamLAND-Zen experiment.

KamLAND-Zen collaboration reported first results with 78 days of observation data. The two-neutrino double beta decay half-life of ^{136}Xe is $2.38 \pm 0.02(\text{stat.}) \pm 0.14(\text{syst.}) \times 10^{21}$ year. The lower limit of neutrino-less double beta decay half-life of ^{136}Xe is $> 5.7 \times 10^{24}$ year.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2010年度	8,800,000	2,640,000	11,440,000
2011年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	20,500,000	6,150,000	26,650,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：素粒子（実験）

1. 研究開始当初の背景

大気ニュートリノ、太陽ニュートリノ、加速器ニュートリノ、原子炉ニュートリノを用いたニュートリノ振動の研究によりニュートリノが質量を持つ事が明らかになり、現在ではニュートリノ振動パラメーターの精密測定へと進展している。しかしこれら振動実験により測定可能なのは質量の二乗差 Δm^2 であり、ニュートリノ質量を明らかにする事は出来ない。また、ニュートリノは未だ未知の部分が多く、ディラック粒子かマヨラナ粒子かという大きな謎が立ちはだかっている。もしニュートリノがマヨラナ粒子であれば、シーソー機構を強く示唆し、さらに我々の宇宙が反物質ではなく物質で出来ている理由が説明できるのではないかと期待されている。これらの謎を解決するのがニュートリノを伴わない2重 β 崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊)の研究であり、これまで世界中で $0\nu\beta\beta$ 崩壊事象の探索が行われてきた。しかし現在まで有意な結果は確認されていなく、 ^{76}Ge を用いたHeidelberg-Moscow実験の一部のグループがこの発見を主張しているが(KKDC claim)、この結果の可否について議論が沸き起こっており、さらなる確認が必要とされている。この検証、及びより高感度測定を元にした発見を目指し、世界中で様々な実験が測定中、または計画されている。

2. 研究の目的

これまでカムランド実験では、極低バックグラウンドかつ大容量の液体シンチレーターを用いて、原子炉ニュートリノを用いたニュートリノ振動の精密研究、地球ニュートリノの初観測など特徴ある成果を上げてきた。また、バックグラウンドとなる ^{13}C の(α, n)反応の研究、低エネルギー太陽ニュートリノの観測を目指した純化、そして宇宙線ミュオンによる原子核破砕反応によって生成される放射性元素の除去を目的とした計測機器の開発などによりさらなる低バックグラウンド環境の構築に成功し、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊事象の探索を行う事が可能な環境が整っている。カムランドではすでに極低バックグラウンド($^{238}\text{U} \sim 3 \times 10^{-18}$, $^{232}\text{Th} \sim 6 \times 10^{-17}$, $^{40}\text{K} \sim 3 \times 10^{-16}$ g/g)の1000トンの液体シンチレーターを有するため、これに二重ベータ崩壊核を溶解させる事で、最も $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索に適切な検出器の1つとなる。本研究では、この環境を有効活用したKKDC claimの検証、世界最高感度での $0\nu\beta\beta$ 崩壊事象の探索を実現するための研究開発を目的とする。

3. 研究の方法

(1) ミニバルーンの開発

カムランドで二重ベータ崩壊探索実験を行うためには、低ノイズ環境を維持したままで大量の二重ベータ崩壊核を保持する必要がある。これまでの研究により、カムランドで最適な崩壊核はキセノン136であり、液体シンチレーターに溶解させる事で最適な実験環境となると見積もられている。しかし体積増加に伴う宇宙線ミュオン起源のノイズ事象を減らし、ノイズ事象の原因となる放射性不純物を抑える必要があるため、直径約3メートルの極低放射能に抑えたミニバルーンの開発が必要であった。

ミニバルーンの材料となるフィルムは、市販のものは低放射能環境を達成出来ない事が判明したため、極低放射能の原料入手から製作行程で混入される充填材の改良まで行い、ウランの含有量が 2×10^{-12} g/gという低放射能のクリーンナイロンの開発を行った。また、フィルムから球形を作成するにはフィルム同士の接着を必要とするが、放射能の観点から接着剤は使用出来ない。そのため熱溶着が候補として挙げられたが、通常ナイロンフィルム同士の溶着は行っていないため、手法が確立していなかった。この溶着技術を、ナイロン溶着が可能な温度設定が可能な装置の導入と、溶着温度・加熱温度・冷却温度の精密な調整を行う事により確立した。ミニバルーン制作手法の確立後、環境放射能の混入を避けるため、クラス1のスーパークリーンルームでミニバルーン製作を行い、クリーンルーム仕様で搬送等も行った。



図1 スーパークリーンルームでのミニバルーンフィルムの溶着作業

(2) ミニバルーン導入手法の確立

すでにカムランド検出器には液体シンチレーターが満たされており、バルーン投入口についても空間的に大きな制限があるため、空のバルーンを挿入した上で送液・ミニバルーンの拡張を行う必要がある。このミニバルーン導入手法の確立のため、2010年6月の2週間および2010年12からの1ヶ月間、半径6.5mの扇形・深さ8mの水槽を使用したバルーン投入試験を行い、バルーン投入・投入後の拡

張・送液・液交換を目的とした密度調整による層作りのテスト、および周辺の固定器具の開発・補助器具の確認・釣り紐にかかる重量変化のデータ収集など、必要不可欠なデータ取得を行った。また、実際のミニバルーン投入で主要メンバーとなるエキスパートグループの養成を主導した。

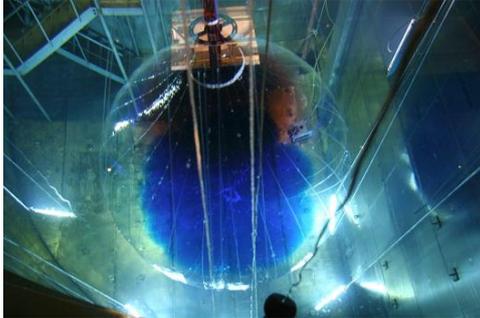


図2 着色および密度差を付けた水による相作成および液体分離テストの様子

(3) モニターカメラの開発

カムランド内部は光学的に外部および開口部から切り離されており、ミニバルーン導入の際、直接目で確認する事は出来ない。しかし目標の位置に安全にミニバルーンを設置するためにはモニターカメラが必要となる。一方で、液体シンチレーターに耐性のある物質で作成された市販のカメラは無く、開発が必要があった。解像度の観点からは通常のwebカメラで十分であったためこれらを使用し、液体シンチレーターに耐性のあるアルミ、紫外線吸収剤未充填の亚克力を使用した容器を作成し、開口部までのケーブルの引き回しはテフロンチューブと真空対応のコネクターで本体およびカムランドのフランジに固定という方法でモニターカメラの開発及び設置を行った。



図3 開発したモニターカメラ。正面と下面にwebカメラ、正面上にLED照明を設置している。

(4) カムランドへのミニバルーンの設定 バルーン投入試験の結果を元に確立した

ミニバルーンの折り畳み方および投入方法を用いてミニバルーン投入し、投入時のダメージの確認のため、キセノン136を溶解していない液体シンチレーター(dummy-LS)を送液した。リーク等が無い事を確認した後、0.015%の密度差をつけたキセノン溶解液体シンチレーター(Xe-LS)を送液し、dummy-LSとXe-LSそれぞれの層を保ったまま液交換を行い、330kgのキセノンガスを溶解したキセノン溶解液体シンチレーター17m³のミニバルーンへの送液が完了し、二重ベータ崩壊探索実験カムランド禅が開始した。



図4 ミニバルーンのカムランド検出器への設置作業の様子

4. 研究成果

実験開始後、カムランド禅実験は順調にデータ収集を行い、78日分のデータを用いたニュートリノを伴う二重ベータ崩壊($2\nu\beta\beta$)の寿命測定およびニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊事象($0\nu\beta\beta$)の探索の最初の結果を発表した。

$2\nu\beta\beta$ については $2.38 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.14(\text{syst}) \times 10^{21}\text{yr}$ という測定値であった。これまで DAMA 実験と EXO 実験それぞれの実験結果で不一致があったが、EXO 実験の結果を追認し、キセノン136の $2\nu\beta\beta$ の寿命を確定した。

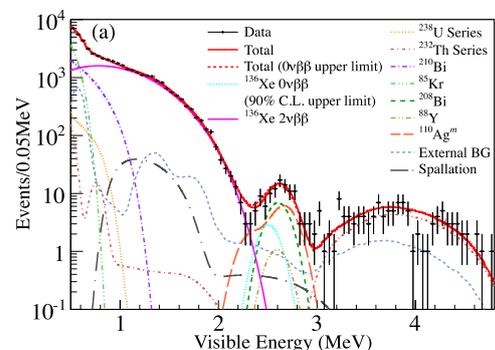


図5 78日のデータ収集から得られたエネルギースペクトルの結果

$0\nu\beta\beta$ については $>5.7\times 10^{24}\text{yr}$ (90%CL.) というキセノン 136 に対する下限値を設定する事に成功した。今後の測定時間の増加および液体シンチレーターの純化に寄るノイズ事象の除去による感度向上により、さらなる高感度の測定を行う可能性を秘めている結果となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

① A. Gando, Y. Gando, et. al.,
Measurement of the double- β decay half-life of ^{136}Xe with the KamLAND-Zen experiment,
Physical Review C 85, 045504 (2012), 査読有り

② A. Gando, Y. Gando, et. al.,
SEARCH FOR EXTRATERRESTRIAL ANTINEUTRINO SOURCES WITH THE KamLAND DETECTOR,
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 745, 193-1~193-8, (2011), 査読有

③ S. Abe, K. Furuno, A. Gando, Y. Gando, et. al.,
Measurement of the ^8B Solar Neutrino Flux with KamLAND liquid scintillator detector,
Physical Review C, 84, 035804-1~035804-6, (2011), 査読有

④ A. Gando, Y. Gando, et. al.,
Partial radiogenic heat model for Earth revealed by geoneutrino measurements,
Nature geoscience, 4, 646-651, (2011), 査読有り

⑤ A. Gando, Y. Gando, et. al.,
Constraints on θ_{13} from a three-flavor oscillation analysis of reactor antineutrinos at KamLAND,
Physical Review D 83, 052002 (2011), 査読有り

⑥ S. Abe, S. Enomoto, K. Furuno, Y. Gando, et. al.,
Production of radioactive isotopes through cosmic muon spallation in KamLAND,
Physical Review C 81, 025807 (2010), 査読有り

[学会発表] (計 19 件)

①加藤領
ニュートリノレス 2 重ベータ崩壊観測のための液体シンチレーター開発

日本物理学会第 67 回年次大会, 2012/03/24, 関西学院大学

②丸藤(寺島)亜寿紗
KamLAND-Zen における ^{136}Xe 二重ベータ崩壊の寿命測定
日本物理学会第 67 回年次大会, 2012/03/24, 関西学院大学

③Yoshihito Gando,
Present Status of KamLAND-Zen,
International Workshop on Double Beta Decay and Neutrinos, 2011/11/15, Osaka, Japan

④Yoshihito Gando,
KamLAND,
6th International Workshop on Low energy neutrino physics, 2011/11/09, seoul, Korea

⑤松田さゆり
KamLAND-Zen のバックグラウンド評価
日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011/09/19, 弘前大学

⑥丸藤亜寿紗
KamLAND-Zen の現状
日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011/09/19, 弘前大学

⑦中田貴広
KamLAND を用いた二重ベータ崩壊実験 16 -高性能バルーンの開発と製作-
日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011/09/19, 弘前大学

⑧丸藤亜寿紗
KamLAND を用いた二重ベータ崩壊実験 14 -現状報告-
日本物理学会第 66 回年次大会, 2011/03/25, 新潟大学

⑨丸藤亜寿紗
KamLAND を用いた二重ベータ崩壊実験 13 -現状報告-
日本物理学会第 66 回年次大会, 2011/03/25, 新潟大学

⑩Yoshihito Gando,
KamLAND : A Neutrino Experiment in Underground,
The 11th Asia Pacific Physics Conference. 2010/10/7, Shanghai, China

⑪高橋永
KamLAND を用いた二重ベータ崩壊実験 12 -実物大バルーンテストとモニターシス

テム-

日本物理学会 2010 秋季大会, 2010/09/14, 九州工業大学

⑫ 藪本洋

KamLAND を用いた二重ベータ崩壊実験 1
1 -Xe 溶解液体シンチレーターの密度測定-
日本物理学会 2010 秋季大会, 2010/09/14, 九州工業大学

⑬ 加藤領

KamLAND を用いた二重ベータ崩壊実験 1
0 -液体シンチレーターへの Xe 溶解度-
日本物理学会 2010 秋季大会, 2010/09/14, 九州工業大学

⑭ 中田貴広

KamLAND を用いた二重ベータ崩壊実験 9
-高性能バルーンの製作-
日本物理学会 2010 秋季大会, 2010/09/14, 九州工業大学

⑮ 渡辺寛子

KamLAND を用いた二重ベータ崩壊実験 8
-シミュレーションによるバックグラウンド
と検出感度の評価-
日本物理学会 2010 秋季大会, 2010/09/14, 九州工業大学

⑯ 藪本洋

KamLAND を用いた二重ベータ崩壊実験 7
-液シンへの Xe 溶解度測定-
日本物理学会第 65 回年次大会, 2010/03/23,
岡山大学

⑰ 成田和弥

KamLAND を用いた二重ベータ崩壊実験 6
-バルーンの長期安定性と試作バルーンのテ
スト-
日本物理学会第 65 回年次大会, 2010/03/23,
岡山大学

⑱ Yoshihito Gando,

KamLAND,
Neutrino Champagne LowNu 2009 5th
International Workshop on Low energy
neutrino physics, 2009/10/19, Reims,
France

⑲ Azusa Terashima,

Status of double beta decay experiment
with KamLAND,
XXIX PHYSICS IN COLLISION
The 1st GCOE International Symposium,
2009/08/31, Kobe, Japan

[その他]

ホームページ等

<http://www.awa.tohoku.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

丸藤 祐仁 (GANDO YOSHIHITO)

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 : 60396421