

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400291

研究課題名(和文)ニュートリノレス二重ベータ崩壊感度向上のための精密モニター付きエネルギー較正

研究課題名(英文)Precise energy calibration with position monitoring for neutrinoless double beta decay search

研究代表者

三井 唯夫 (Mitsui, Tadao)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授

研究者番号：20283864

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：キセノン136を用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)探索実験「カムランド禅」において、位置モニター付きの精密エネルギー較正を行い、 $0\nu\beta\beta$ 探索感度の向上を実現した。位置モニターを行うため、有機溶媒中で使用可能なモニターカメラを選定、開発した。これを用いて精密に線源の位置を確認しながらガンマ線源によるエネルギー較正を行った。光電子増倍感が検出する総光量とエネルギーの関係(比例係数)は、線源の位置によって変わるため、位置モニターをすることにより、エネルギー較正の精度は高まる。この効果により、エネルギースケールの不定性が減少したため、より高感度の二重ベータ崩壊探索が可能となった。

研究成果の概要(英文)：In "KamLAND-Zen" experiment, searching for neutrinoless double beta decay ($0\nu\beta\beta$) using Xe-136, we performed precise energy calibration with monitoring the position of the radioactive sources. The relation between light yield and energy depends on the position of the vertexes, so the uncertainty of the position of the radioactive sources contributes to the uncertainty of the energy scale. By monitoring the source position precisely then, systematic uncertainty of the energy scale has been reduced. We developed monitoring camera which can work in the oil-based liquid scintillator, to accomplish this precise position monitoring. With using the results of this precise energy calibration, we achieved the improvement in the sensitivity of search for $0\nu\beta\beta$.

研究分野：素粒子実験

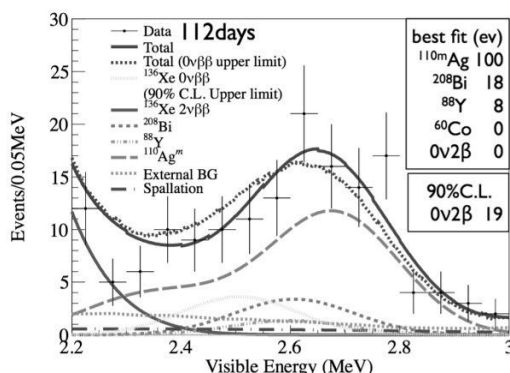
キーワード：ニュートリノ 二重ベータ崩壊

1. 研究開始当初の背景

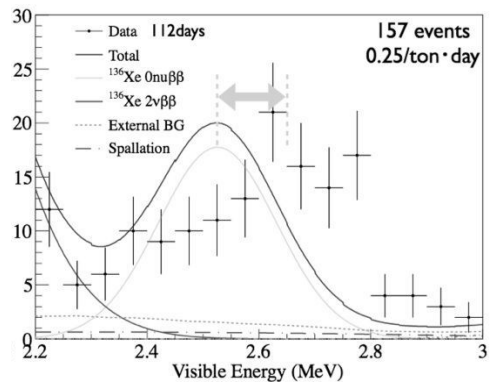
(1) ニュートリノが飛行中に別の「フレーバー」に変化するニュートリノ振動が 1980 年代に発見され、これによって、素粒子物理学の標準理論において質量がゼロと考えられていたニュートリノに、有限の質量があることが明らかとなった。ニュートリノ質量は、標準理論における他の粒子と同じように、ヒッグス場から生成されるディラックタイプの質量のほか、まったく異なる未知の起源により粒子と反粒子で質量項を組むマヨラナタイプの質量が考えられる。マヨラナ質量は、ニュートリノが中性であることから、可能性が考えられる。さらに、マヨラナニュートリノが存在すると、ニュートリノの軽い質量を説明できる、初期宇宙でのバリオン数生成（現在の宇宙に物質が存在する起源）を説明できる、などのメリットがあり、標準理論を超える物理の突破口として期待されている。

(2) マヨラナニュートリノが存在すると、二重ベータ崩壊をする原子核において、ニュートリノが放出されない「ニュートリノレス二重ベータ崩壊」(0νββ) が起こり得る。これを観測することによって、ニュートリノの質量タイプの決定(マヨラナタイプの時のみ 0νββ 崩壊が起こることから)、ニュートリノ振動では分からなかった質量絶対値に関する情報を得ることを目指す「ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索実験」が、世界各国で行われていた。

(3) 400 kg のキセノン 136 (二重ベータ崩壊核のひとつ) を用いた「カムランド禅」実験は、0νββ 崩壊探索実験として、世界最高感度を達成し、さらなる高感度探索に向けて装置、データ解析の改善が鋭意行われていた。そのなかでも、エネルギースケール不定性の改善が大きな課題であった。当時もっとも深刻なバックグラウンドであった銀 110m (^{110m}Ag、原発事故起源と考えられる) は、0νββ シグナルと同じくエネルギースペクトルにピークをつくり、ピークエネルギーも 0νββ シグナルに近い。それでも、エネルギースペクトルだけを頼りに信号と区別していた(下図および右欄の図)。



0νββ シグナル領域のエネルギースペクトル。^{110m}Ag で良くフィットされる。



シグナル領域に観測されたピークを 0 でフィットしようとする、有為エネルギースペクトルのピーク位置が異なる。

2. 研究の目的

(1) カムランド禅での探索感度は、^{110m}Ag、銀 110m、ビスマス 214、炭素 10 などのバックグラウンドによって制限されていた。これらのバックグラウンドと、期待される 0νββ シグナルを区別するためには、エネルギースペクトルの精密解析が必要である。そこで重要なのが、エネルギー分解能とエネルギースケールの決定精度である。このうちエネルギースケールは線源を用いたエネルギー較正によって改善することが出来る。本研究では、線源位置を精密にモニターすることによって、エネルギー再構成におけるパーテックス位置依存性の不定性を減少させ、エネルギースケールの高精度化、結果的にマヨラナニュートリノ探索感度の向上を目的とした。

(2) 線源位置のモニターは、線源懸架システムにおけるワイヤーの長さの測定だけでなく、モニターカメラを用いることによって、その精度を高める。

3. 研究の方法

(1) 線源の懸架システムは、カムランド実験で、2009 年に行った線源エネルギー較正に用いたものを改造して用いる。このシステム(文献 T.I. Banks et al. 参照)は、放射性不純物の混入を極限まで押さえたもので、当時の太陽ニュートリノ観測の厳しい要求に答えたものである。今回、キセノン入り液体シンチレータ保持用の「ミニバルーン」を傷つけないため、ワイヤーを紐に替えるなどの改造を行った。

(2) 位置モニターの精度をさらに高めるため、油中で使える遠隔操作カメラを導入した。工業用内視鏡、1 光子観測用凹面鏡カメラの開発、選定を行い、もっとも高精度でパーテックス位置を決定できる方法を開発した。

4. 研究成果

(1) エネルギー較正のための準備を平成 25, 26 年に行い、カムランド検出器に実際に線源を挿入して行うエネルギー較正を、平成 27 年 10 月に行った。そのデータ解析を行い、エネルギー較正曲線の精度を高め、これを二重ベータ崩壊探索のデータ解析に実際に適応し、探索感度の向上に貢献した。

(2) エネルギー較正の準備は、まず、線源懸架システムを整えた。線源懸架システムは、カムランド・太陽ニュートリノ観測のために開発されたシステムを再利用する。このシステムの概略図を下に示す。

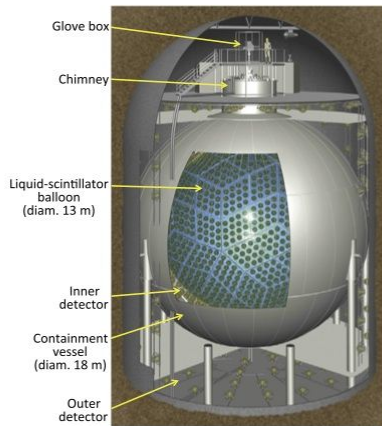
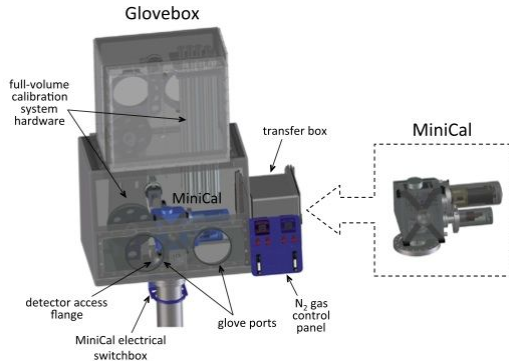


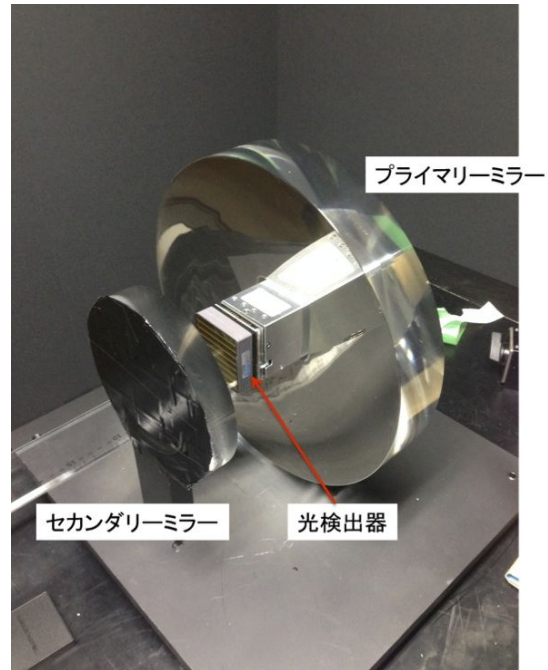
Fig. 1. The KamLAND detector.



カムランド検出器上部の「チムニー」に取り付けたグローブボックスの中に、線源懸架とワイヤー長さ測定装置が設置されていて、放射性不純物の濃度を限界まで下げたシステムとなっている。ただし、カムランド禅ではキセノン入り液体シンチレータ保持のための「ミニバルーン」(直径 3.2 m) が取り付けられたため、エネルギー較正用線源がミニバルーンに接触する危険性が高まった。このため、懸架用に用いていたステンレスワイヤーを、ベクトランの紐に変更し、線源、懸架用プーリーをこれに適合させる改造を行った。また、精密位置モニターカメラ用に、光学系の開発を行った。バルーンフィルムからのバックグラウンドを観測することによって、バルーン的位置をモニターできることが、モン

テカルロシミュレーションによって確認されたので、1 光子を観測するモニターカメラの設計を行った。これにより、受講面積の大きな反射鏡による光学系が必要になったが、光学設計ソフト「ゼマックス」を用いて開発に成功した。ゼマックスの講習会にも参加し経費が生じたが、カメラ開発費の範囲内に収まった。光検出器としては、16×16 チャンネル・マルチアノード光電子増倍管を選択し、これを 2 モジュール購入した。シグナルのパルス高、その印加電圧依存性、ノイズレートなど基本的な性能をチェックし、読み出し回路の設計、製作を行った。反射鏡とマルチアノード光電子増倍管を支える治具の設計し、光学系アラインメントのノウハウも確率した。

(2) 平成 26 年度は、前年に光学シミュレータ「ゼマックス」を用いて設計した、エネルギー較正モニター用カメラを実際に作製し、基本性能のテストを行った。



上図のように 2 枚の凹面鏡を用いた結像系と、マルチアノード光電子増倍からなるカメラで、アクリル板へのアルミ蒸着ミラーなどを用いて、ほぼ設計どおりに作製した。また、発光ダイオードを一定間隔で並べた「ダイオードアレイ」を作製し、その像をモニターカメラで取得した。そのデータから、画像処理を含むオフライン解析を行い、アレイの像を再構成することによってカメラの撮像性能を評価した。その結果、1 光子検出に対して 10 センチメートルの位置分解能が得られることが分かった。1 事象辺りの光子数とエネルギー較正時の事象数を考慮すれば、線源位置に関して 1 センチメートル以下の位置分解能が得られると期待され、エネルギー較正モ

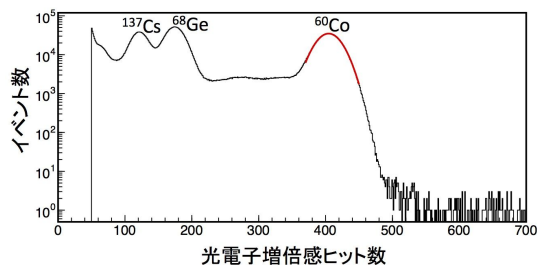
モニター用に十分な性能であることが分かった。いくつかのパラメータに、シミュレーションとの不一致が見られたので、それらはシミュレーションへとフィードバックする貴重なデータとして、今後活用していく。エネルギー較正用線源の懸架、挿入システムは昨年度開発がほぼ終わっているため、微調整とメンテナンスを行い、エネルギー較正に備えた。平成 26 年度中は、二重ベータ崩壊実験カムランド禅では、シンチレータ純化後の良質なデータを取得中であった。また反ニュートリノ観測実験カムランド(キセノン入りでないシンチレータの部分を用いて同時並行に観測を行っている)では、国内の原子炉が停止中であることから、地球ニュートリノの低バックグラウンドデータを取得していた。このような貴重なデータ収集期間であるため、平成 26 年度中は、検出器内への機器の挿入テストは行われなかったが、性能評価はすべて終わり、エネルギー較正の準備は整った。

(3) 平成 27 年度は、ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索実験カムランド禅で、位置モニターをとともう、精密エネルギー較正を行った。セシウム 137 (^{137}Cs)、ゲルマニウム 68 (^{68}Ge)、コバルト 60 (^{60}Co) からなる線源モジュールを、前年までに準備した懸架システムを用いて、キセノン入り液体シンチレータ保持用ミニバルーン内に沈めて、データを取得した。線源位置は、懸架用ベクトラン(強化繊維紐)の長さ測定に加え、平成 26 年度までに用意した 1 光子用カメラと、工業用内視鏡を準備した。



今回は上図に示す工業用内視鏡のみのモニターで十分な精度が得られたため、1 光子用カメラの挿入は行わなかった。しかし、このカメラは、検出器内の精密位置モニター用として今後活用していく。本研究終了後も、この 1 光子観測用凹面鏡カメラの開発、試験は続いている。いっぽうエネルギー較正では、工業用内視鏡による位置モニターにより、目標通り線源位置の系統誤差 1 cm 以内でモニターすることに成功し、エネルギースケールの不定性減少に大きく貢献した。

(4) エネルギー較正データを使って、エネルギースケールの決定を行った。下図に示すように、 ^{137}Cs , ^{68}Ge , ^{60}Co 線源からのガンマ線がくっきりと観測されている。



このデータを用いてエネルギースケールを決定する際、モニターカメラの画像から決定した線源位置を用いることで、位置によるエネルギー/発光量の比例係数の違いの誤差を大きく低減することが出来た。これによりエネルギースケールの誤差低減に貢献した。現在、このエネルギー較正の結果を含んだ二重ベータ崩壊探索データの解析を進めている。エネルギー精度の向上によって、ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索の感度向上が期待されている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

K. Asakura et al. (KamLAND-Zen collaboration), Search for double-beta decay of ^{136}Xe to excited states of ^{136}Ba with the KamLAND-Zen experiment, Nuclear Physics A, Refereed, vol. 946, 2016, pp. 171-181 DOI: 10.1016/j.nuclphysa2015.11.011

K. Asakura et al. (KamLAND-Zen collaboration), Results from KamLAND-Zen, AIP Conference Proceedings 1666, 2015, 170003 DOI: 10.1063/1.4915593

T.I. Banks et al. (KamLAND-Zen collaboration), A compact ultra-clean system for deploying radioactive sources inside the KamLAND detector, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Refereed, vol 769, 2015, pp. 88-96 DOI: 10.1016/j.nima.2014.09.068

[学会発表](計 6 件)

竹本康浩、他 KamLAND-Zen コラボレーション、KamLAND-Zen 実験における線源を用いた位置とエネルギーの較正、日本物理学会第 71 回年次大会、2016 年 3 月 22 日、宮城県仙台市、東北学院

大学

三井唯夫、 Imaging Detector for Particle Identification with Large Liquid Scintillator Detector (ポスター)、米国電気電子学会シンポジウム (IEEE2014)、2014年11月9日-11月15日、米国ワシントン州シアトル、Washington State Convention Center

三井唯夫、 Imaging Detector (ポスター)、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014年4月28日-5月2日、神奈川県横浜市、パシフィコ横浜

白旗豊、 Li loaded liquid scintillator for directional measurement (ポスター)、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014年4月28日-5月2日、神奈川県横浜市、パシフィコ横浜

白旗豊、 KamLAND における位置識別性能向上に向けた開発研究、日本物理学会第 69 回年次大会、2014年3月30日、神奈川県相模原市、東海大学

三井唯夫、 KamLAND: geo-neutrino, Workshop on Particle Geophysics, 2013年10月30日、宮城県仙台市、東北大学

6 . 研究組織

(1)研究代表者

三井 唯夫 (TADAO MITSUI)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・
准教授

研究者番号：20283864