

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 10 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：25400292

研究課題名(和文) 超短基線反ニュートリノ欠損解明の為の基礎研究

研究課題名(英文) A Study for the 4th Neutrino Search with KamLAND

研究代表者

中村 健悟 (NAKAMURA, KENGO)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・講師

研究者番号：10400219

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：過去に行われた原子炉反電子ニュートリノ実験データの見直しにより、第4世代のニュートリノの存在が示唆されるようになってきた。本研究は、既にニュートリノ研究で実績のあるカムランドを用いて第4世代のニュートリノ探索を行う為の基礎研究の位置付けで、反電子ニュートリノ線源をカムランドの近傍に設置して行う実験の技術的な設計を行い、実際にカムランドで第4世代ニュートリノの探索が可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：Re-analysis of past reactor neutrino experiments is suggesting the existence of the 4th neutrinos. KamLAND experiment that has achieved important measurements of the neutrino oscillation parameters has a potential to explore the 4th neutrinos. Technical design of implementing an anti-neutrino generator into the KamLAND has been developed in this study. It has been shown that it is feasible to perform an experiment to explore the 4th neutrinos with KamLAND.

研究分野：素粒子実験

キーワード：4th ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノという素粒子の性質がニュートリノ振動や2重ベータ崩壊の実験を通して明らかになってきた。特にニュートリノ振動の発見以降、ニュートリノ振動の研究はニュートリノ振動を記述する物理パラメータを精密に測定する時代に突入した。その結果、それまでは見えていなかったニュートリノの性質が見え隠れし始めた。精密測定されたニュートリノの性質を考慮に入れて過去の実験データを再解析することも行われ、一度は否定されかけた第4世代のニュートリノの存在を示唆する新たな解析結果が複数出ており、改めて第4世代のニュートリノの探索を行う実験が必要とされていた。そこでカムランドというニュートリノ観測に既に実績のあるニュートリノ観測装置を用いて、第4世代のニュートリノの探索を比較的早期に実現できないかどうかの検討を始めた。

2. 研究の目的

ニュートリノ振動の物理パラメータを精密測定するにあたり、ニュートリノ源とニュートリノ観測装置を設置する場所との距離の最適化が行われると同時に、ニュートリノ源近傍でのニュートリノのエネルギー分布の精密測定が非常に重要な役割をはたすようになってきた。過去のニュートリノ振動実験ではニュートリノ源の近傍で行われた実験も多く、これらのデータを再検討したり、ニュートリノ源でのニュートリノのエネルギー分布の計算の再検討も行われるようになってきた。その結果、ニュートリノ源からの距離が15メートルから100メートルで観測されたニュートリノの観測数が、予想される観測数よりも約5パーセント少ないことが分かってきた(短期線ニュートリノ欠損)。これは何か見えていない系統誤差が隠れているのか、或いは新しい物理を示唆しているのだろうか?何か新しい物理が潜んでいるとした場合、この短期線ニュートリノ欠損は、第4世代のニュートリノの存在を含めたニュートリノ振動で、混合角 $\sin^2 2\theta_{14} \cong 0.1$ 、質量2乗差 $\Delta m_{24}^2 \cong 1 \text{ eV}^2$ というパラメータを採用すると説明することができる。この場合、ニュートリノ欠損の効果を顕著に観測できるのが、ニュートリノ源と観測装置との距離が10メートル程度である。つまりニュートリノ源から10メートルの場所にニュートリノ観測装置を設置してニュートリノを観測すれば、この仮説の検証ができるのである。

しかしこの目的のためにニュートリノ源とニュートリノ測定器の両方をゼロから作り始めるには金銭的にも時間的にも余裕がない。そこで、カムランドという既にニュートリノ観測で実績のあるニュートリノ観測装置をそのまま用いて、この近傍にニュートリノ源を設置できないかどうかを検討する

こととした。

カムランドは半径6.5メートルの透明な風船を液体シンチレーター放射線検出機で満たし、周りに取り付けられた約1800本の光電子増倍管で液体シンチレーターの発光を観測する汎用の放射線検出器である。元々は平均約180キロメートル離れた場所にある日本国内の原子力発電所からの反電子ニュートリノを観測してニュートリノ振動を解明する目的で建設された装置で、カムランド内部で観測された反電子ニュートリノの反応位置を約5センチ、反電子ニュートリノのエネルギーを約7パーセント(@1 MeV)の精度で測定することができる。反電子ニュートリノ源として ^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニュートリノ線源(半減期400日)の導入を検討する。

カムランドに反ニュートリノ線源を設置すると一言で言っても、技術的に解決しなければならない課題は多い。約1年の観測でニュートリノ欠損を確認しようとするには、半減期が短いため、2から3PBqの強度の線源を用いる必要がある。この線源を用いた場合、反ニュートリノ以外にもエネルギーが2.2 MeV付近のガンマ線を 10^{13} Bq 放出する為、反ニュートリノ検出のバックグラウンドとなってしまう、このガンマ線の量を 10^{12} 分の1まで減らす必要がある。それには重量約5トン(厚さ40センチ)のタングステンシールドが必要となり、このような大きな重量物をカムランドに設置するのは容易ではない。また、タングステンシールドに含まれる天然放射能も、バックグラウンドとなってしまう。

本研究では、カムランドでの第4世代ニュートリノの探索を目指して ^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニュートリノ線源をカムランドに導入するにあたり、そのタングステン素材の選定、カムランドへの導入方法の開発を主な目的とする。

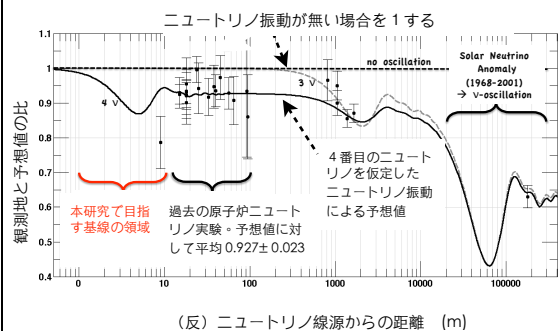


図1: 短期線ニュートリノ欠損。過去のデータと本研究で目指す領域。

3. 研究の方法

(1) カムランド本体に出来るだけ近い場所に ^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニュートリノ線源を設置するため、カムランド外水槽部への導入を検討する。

カムランドに一番近い ^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニ

ニュートリノ線源導入位置はカムランド本体内部であるが、開口部の大きさが小さい上、カムランド本体を破損してしまう恐れがあるため、今の所現実的ではない。次に近い場所は、カムランド本体を覆っている外水槽内である。幸い、ここには ^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニュートリノ線源を導入するのに十分な大きさの開口部は存在する。しかし、5トンもの重量物を支えるだけの強度があるのか？あったとしても、どのような方法で吊り下げるのか？等の課題は多く残っている。そこで、カムランドの設計建設時の資料を洗い出し、再度強度設計を行った上で、 ^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニュートリノ線源の導入方法を設計する。

(2) 外水槽への導入が困難である場合に備えて、別の可能性を探る。

(1) の方法が困難である場合に備えて、カムランドからの距離は少し遠くはなってしまうが、カムランドに接して位置する実験室への導入方法を検討する。この実験室にはカムランドでの2重B崩壊測定実験用の設備が既に存在し、これらの設備を取り扱うことこそできないが、 ^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニュートリノ線源を設置するだけのスペースは存在する。既存設備を破壊することなく ^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニュートリノ線源を安全に導入する方法を開発する。

(3) タングステン素材サンプルをいくつか集めて、最適な素材を選定する。

将来的に ^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニュートリノ線源をカムランド本体内部に導入する場合に備えて、線源のシールドに用いるタングステン素材の表面に付着している放射線量を測定し、使用可能なタングステン素材を選定する。タングステン表面の放射線量の測定には既存のゲルマニウムガンマ線検出器を用いる。

(4) 実際の設置の予行演習を行う。

^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニュートリノ線源の半減期は約400日と長くはない。線源を製作した後、日本に輸入してカムランドに設置するのにモタモタしている時間はないので、本番になってから不具合が見つかるのは問題である。その為、(1)または(2)で開発した方法の予行演習を行い、問題点を洗い出しておくことが重要である。

4. 研究成果

(1) 重量が5トンの ^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニュートリノ線源をカムランドの外水槽に導入する為に、カムランドの構造体の強度計算を行った。その結果このままの構造では強度が足りない事が分かった。そこで強度を補強するための設計を行い、補強を施せば5トンの重量に耐えうることを示した。

また5トンの重量物を吊り下げるクレーンの設置方法を設計し、上記の補強と合わせ

ると、 ^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニュートリノ線源を支える天板に掛かる最大応力は 120 N/mm^2 となり、許容値 205 N/mm^2 以内であることから、 ^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニュートリノ線源をカムランド外水槽内に導入することが可能である事がしめせた。

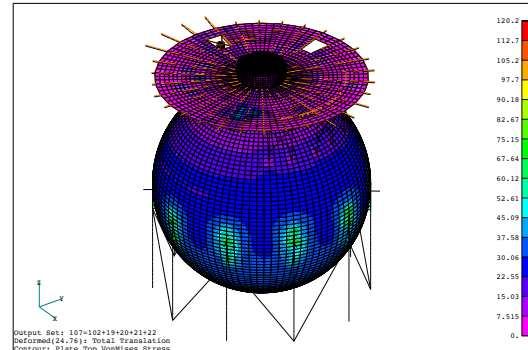


図2：線源を設置した時のカムランド構造体の強度計算。縦軸は応力 (N/mm^2)

(3) ^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニュートリノ線源のガンマ線シールドに用いるタングステンの素材を選定するにあたり、幾つかのサンプルを入手し表面放射線量の測定を行った。シミュレーションによると表面放射能からのカムランドへの影響を抑えるには、U-238, Th-232, Co-60, K-40 による放射線量はそれぞれ 32 Bq/kg , 3.0 Bq/kg , 200 Bq/kg , 1200 Bq/kg 以下である必要がある。Plansee社のタングステンサンプルを測定したところ、それぞれ 0.50 Bq/kg , 0.23 Bq/kg , 0.0015 Bq/kg , 0.080 Bq/kg であることがわかり、このタングステンを使用できることがわかった。

(4) ^{144}Ce - ^{144}Pr 反ニュートリノ線源をカムランドの外水槽に導入する予行演習として、外水槽を開けて、その上にクレーンを設置して予行演習を行った。クレーンを用いて実際に外水槽内部まで物品を搬入し、外水槽内部にボートを浮かべて内部での作業が可能であることを示した。

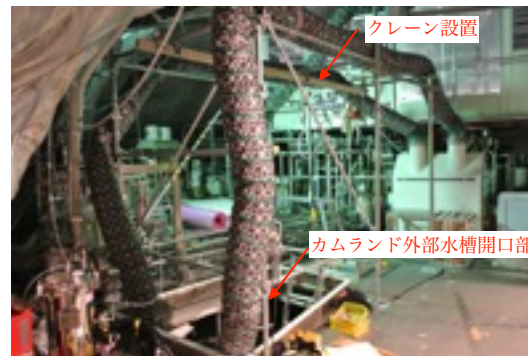


図3：予行演習写真

第4世代のニュートリノの存在を確かめるために 144Ce-144Pr 反ニュートリノ線源をカムランドの近傍に設置し、ニュートリノ振動混合角 $\sin^2 2\theta_{41} \doteq 0.1$ 、質量2乗差 $\Delta m_{41}^2 \doteq 1 \text{ eV}^2$ というパラメータ領域をカバーする実験が可能であることがわかった。

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 1 件)

K. Nakamura A. Gando Y. Gando et al.
“CeLAND: Search for the 4th light neutrino state with a 3 PBq 144Ce-144Pr anti νe generator in KamLAND” (査読なし) e-Print arXiv:1312.0996, 2013 December, <http://arxiv.org/pdf/1312.0896.pdf>

[学会発表] (計 6 件)

① 尾崎秀義 「KamLAND 外部検出機の改修報告」日本物理学会第 71 回年次大会 2016 年 3 月 22 日 東北学院大学泉キャンパス (仙台市)

② 中村健悟 「KamLAND: 日本のお家芸」日本物理学会北陸支部特別講演会 2014 年 11 月 21 日 福井大学文京キャンパス (福井市)

③ 清水格 「CeLAND 実験 ステライルニュートリノの探索における系統誤差の評価」日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27 日 東海大学湘南キャンパス (平塚市)

④ 松田さゆり 「CeLAND 実験 シミュレーションによるバックグラウンド事象の評価」日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27 日 東海大学湘南キャンパス (平塚市)

⑤ 中村健悟 「CeLAND 実験 KamLAND 検出器への Ce 反ニュートリノ線源の導入」日本物理学会第 69 回年次大会 2014 年 3 月 27 日 東海大学湘南キャンパス (平塚市)

⑥ 松田さゆり 「KamLAND でのステライルニュートリノ探索に向けた研究」日本物理学会 2013 年秋季大会 2013 年 9 月 20 日 高知大学朝倉キャンパス (高知市)

[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：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中村 健悟 (NAKAMURA, Kengo)
東北大学・ニュートリノ科学研究センター・講師
研究者番号：10400219

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

清水 格 (SHIMIZU, Itaru)
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：10400227

(4) 研究協力者

松田 さゆり (MATSUDA, Sayuri)
東北大学大学院理学研究科博士 3 年