

令和 4 年 6 月 24 日現在

機関番号：34450
研究種目：基盤研究(C) (一般)
研究期間：2019～2021
課題番号：19K03880
研究課題名(和文) 超短基線ニュートリノ振動でステライルニュートリノを探索する基礎研究

研究課題名(英文) A Development for Sterile Neutrino Search in Short Base Line Neutrino Oscillations

研究代表者
中村 健悟 (Nakamura, Kengo)

大阪物療大学・保健医療学部・教授

研究者番号：10400219

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ステライルニュートリノの探索を目指す実験の可能性について検討した。ステライルニュートリノはニュートリノの精密実験が進むにつれ明らかになってきたアノマリーを解決するために導入された未発見のニュートリノである。既存のニュートリノ観測装置の横に新たなニュートリノ源を設置してステライルニュートリノの探索を行う実験が提唱されているが、その新たなニュートリノ源の設置には様々な制約がある。本研究ではその制約を乗り越えられるかどうかの検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義
ステライルニュートリノとは物質との相互作用をほとんど起こさないニュートリノで、それ故、現在のところ未発見である。またステライルニュートリノは「質量」を持つため宇宙の大部分を占める暗黒物質の候補の1つにもなっている。本研究では、未発見の物を探索するための実験に向けた基礎研究を行った。探索実験そのものをスタートさせた訳ではないが、ニュートリノ物理学の新たな可能性を切り拓く寸の最初の一步は踏み出せたのではなかろうか。

研究成果の概要(英文)：Anomalies became clear as neutrino oscillations have been measured deeply. Sterile neutrino was introduced to solve the anomalies and some experiments were proposed to look for the sterile neutrinos. One of the strategies to solve the anomaly is to measure ultra-short base line neutrino oscillations; a neutrino source is installed right next to a neutrino detector. KamLAND is a low background neutrino detector that has an excellent achievement to measure the reactor neutrino oscillations and that solved the solar neutrino puzzle. A possibility to install the neutrino source in the KamLAND site was discussed and developed in this research.

研究分野：ニュートリノ物理学

キーワード：ステライルニュートリノ サイクロトロン

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

昨今、ニュートリノ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混合角度は、20 年以上前の予想に反しクォークの混合角度とは全く異なる大きさであったり、ニュートリノのマヨラナ性の可能性が出て来たりと、ニュートリノの特異性が明らかになってきている。

ニュートリノ振動の精密測定ができるようになった今、ニュートリノのエネルギー分布の計算が再検討された。それを元に過去の幾つかの原子炉ニュートリノ実験を再検証したところ、原子炉からの距離が 15 m~100 m での実験で、反電子ニュートリノの観測数が平均すると予想値の 0.943 ± 0.023 (@98.6% C.L.) であることがわかってきた（原子炉ニュートリノアノマリー：①）。また加速器を用いたニュートリノ振動実験（ミューニュートリノ→電子ニュートリノ）と原子炉ニュートリノ振動実験（反電子ニュートリノ→反電子ニュートリノ）では、同じ振動パラメーターを測っていた（と思っていた）にもかかわらず、辻褄の合わない結果が得られている（②）。これらの食い違いを説明する 1 つの候補が第 4 世代ニュートリノ（ステライルニュートリノ）である。ステライルニュートリノは上記のアノマリーを説明するために導入された弱い相互作用を起こさないニュートリノで、現在のところ発見されていない。

ニュートリノ振動を利用するステライルニュートリノの探索実験がいくつか提唱されているが、既にニュートリノ振動パターンを観測の実績を持つカムランドがこの探索に適していないか検討を進めることとした。カムランドは原子炉反電子ニュートリノを用いてニュートリノ振動の観測を行い太陽ニュートリノ問題を解決した実験で、ニュートリノ振動の検出技法が既に確立されている。またニュートリノの正確なエネルギー情報を得るためには都合のよい原子核（サイクロトロンで生成）のベータ崩壊を利用する実験の検討を進めることにした。我々日本グループは既にカムランドというニュートリノ検出装置の実績を持つこと、イタリア・アメリカ等のグループがサイクロトロンの専門家であることもあり、お互いに研究協力をするのは自然な流れであった。

<引用文献>

- ① Phys.Rev.D 83, 073006 (2011)
- ② Phys.Rev.D 64, 112007 (2001), Phys. Rev. Lett. 110, 161801 (2013) 等

2. 研究の目的

ステライルニュートリノが弱い相互作用を起こす他のニュートリノとの間でニュートリノ振動を起こせば先述のアノマリーを上手く説明できるかもしれない。それにはステライルニュートリノのニュートリノ振動を記述する 2 つのパラメーターが「ちょうど良い値」である必要がある。またステライルニュートリノは弱い相互作用を起こさないが重力による相互作用は起こすため宇宙を構成する暗黒物質の候補としても着目されており、ステライルニュートリノの探索は暗黒物質の探索の観点からも重要である。そしてステライルニュートリノの探索だけではなくその存在が示唆された場合にはステライルニュートリノの世代数に関する情報が得られるまで踏み込みたい。

国内外にはステライルニュートリノの探索を目的とする実験計画は存在するが、それらは原子炉ニュートリノのニュートリノ振動を利用するタイプ（反電子ニュートリノ→反電子ニュートリノ）と加速器ニュートリノのニュートリノ振動を用いるタイプ（ミューニュートリノ→電子ニュートリノ）であり、共にニュートリノのエネルギー分布の不定性の議論の余地が残っている。

先述の「ちょうど良い」ニュートリノ振動パラメータを探るためには「ちょうど良い」ニュートリノ源と実験場所の選定が必要である。図 1 に「ちょうど良い」振動パラメーター領域（ $\sin^2 2\theta \sim 0.1$ と $\delta m^2 \sim 1 \text{ eV}^2$ の関係）とカムランドとの位置関係を示す。

ニュートリノのエネルギー分布を正確に計算できるベータ崩壊による反電子ニュートリノを用いることで、エネルギー分布の不定性をなくすることが可能である。ベータ崩壊原子核にはリチウム 8 を用いるのだが、半減期が 840 ms と極端に短い時間使いたい時に使いたい場所で製造する必要がある。リチウム 8 のベータ崩壊を利用するのは、反電子ニュートリノのエネルギー（平均値 6.4 MeV）が先述の「ちょうど良い」振動パラメータを探るのに「ちょうど良い」からであり、それをカムランド施設近傍（1 ~ 2 m）に設置するのが「ちょうど良い」のである。

リチウム 8 を製造するには、陽子を加速するサイクロトロン、その陽子を照射するベリリウム製ターゲット、ターゲットで発生した中性子を吸着してリチウム 8 を発生させるためのリチウム 7 製のスリーブから構成される実験装置の建設が必要になり、これをカムランドの真横に設置しなければならない。また 5 年間の観測で十分なデータ量を確保するには十分な数のベータ崩壊が必要で、そのためには 60 MeV、10 mA の陽子サイクロトロンが必要であり、その結果サイクロトロン・ターゲットを設置するエリアが放射化される。本研究は、現場にサイクロトロン・ターゲットシステムをインストールする方法と日本の放射線管理に合った遮蔽の設計を行うことを目的とした。

またカムランドは、稀な事象であるニュートリノ反応の検出を目的に建設された極低放射能バックグラウンド環境下に建設された汎用放射線検出器である。宇宙線の影響を抑える為に 2700 mwe の鉱山の中という特殊な場所に設置されている。中性子やその遮蔽で発生するガンマ線はカムランド本来の研究テーマである長基線ニュートリノ振動の観測やニュートリノの放出を伴

わない二重ベータ崩壊の探索に支障をきたすので、サイクロトロン運転に起因する中性子などの遮蔽は極めて重要である。鉱山内という限られた空間に設置できるのか否か、或いは空間の拡張が必要な場合はどの程度必要なのかといったサイトの選定も本研究の目的の一つである。

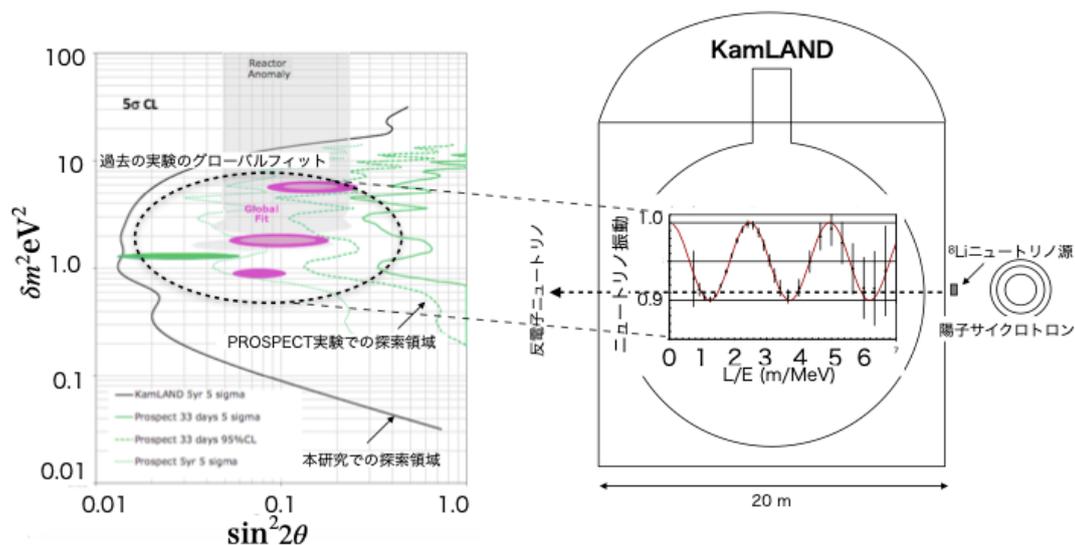


図1：振動パラメーターとカムランドとの関係

3. 研究の方法

遮蔽を設計するにあたり、何がどの程度生成（放射化）され、管理区域にするには法律ではどこまで許されているのかを擦り合わせる必要がある。主にはビームラインの放射化、ターゲットで発生する中性子による遮蔽物の放射化、また遮蔽物を透過した中性子が環境を放射化することが挙げられる。サイクロトロン本体、ビームライン、遮蔽材の放射化は過去の経験により類推可能であるが、環境（鉱石でできた実験室の壁、湿気など）の放射化は新たに見積もる必要がある。次のステップで遮蔽構造に要求される条件を見積もった。

(1) 中性子の発生数をシミュレーションで見積もる。(2) 中性子に対してどのような遮蔽材がどの程度の厚さ必要なのかをシミュレーションで見積もる。(3) 透過した中性子が実験サイトをどの程度放射化するを見積もる。(4) 実験サイトの放射化を要求以下に抑えることができる遮蔽構造を最適化する。

実験サイトの放射化は、既に採取され分析が行われている鉱石の成分データを元に鉱石の放射化が見積もられており、遮蔽物の表面まで透過してくる中性子のフラックスを 10^{-13} 中性子/陽子/mm² 以下に抑える必要があることが分かっている。

またカムランドが設置されているエリアの測量を行って、サイクロトロン・ターゲット設備のインストール方法の検討を行った。

4. 研究成果

(1) 遮蔽物の材料と厚さ

限られた空間内に収める必要があるので遮蔽物は可能な限り薄くする必要がある。そこでコンクリートのみの遮蔽ではなく、他の材料、特に中性子をよく吸着するホウ素を添加したコンクリートと組み合わせる方法をシミュレーションした。この場合、ホウ素による中性子の吸着により発生するガンマ線が外に出てこないようにする必要がある為、併せて鉄板も用いることとし、全体としては、中性子を減速させるプラスチックを添加したコンクリート板、鉄板、中性子を吸着させるホウ素を添加したコンクリート板を組み合わせれば遮蔽物の厚さを 120 cm（総重量 170 トン）に抑えられ、外表面で 10^{-13} 中性子/陽子/mm² 以下に抑えられることがわかった（図2）。これを元に必要なサイトの体積を見積もったところ約 8000 m³ であることが判明した。

(2) サイトの選択

カムランドの近傍2ヶ所を設置エリアの候補として検討した（サイト1とサイト2）。サイト1は既存スペースを利用、サイト2は新たに拡張工事を行う。前者は土木工事は少なく済むが（低コスト）取り回しやインストール方法に対する制約が強い。後者は大掛かりな土木工事が必要になるが（高コスト）、必要な大きさ（8000 m³ の空間以上）を得ることができインストール方法が簡素化出来ることに加え、付帯設備設置工事費用も抑えることができる。サイト2を基本にエンジニアリング会社との打ち合わせを行うこととした。

(3) インストール方法

現場の3次元測量を行った結果、サイクロトロン電磁石コイル（直径5メートル）の搬入が困難であることが分かった。分割して搬入することは可能ではあるが、サイクロトロンの設計の

根幹に関わる問題である。今後サイクロトロン設計グループとの打ち合わせを続けて設計の変更を委ねることとした。これ以外の重量物に関しては、カムランドの建設時に用いたような特殊台車を設計して使用すれば搬入可能であることが分かった。設置サイトに重量物の運搬機構を設置する必要があるが、これはサイト2を選択することにより簡単に設置できることが分かった。

以上を踏まえた上で、鉾山内でのカムランド建設の実績を持つエンジニアリング会社と工事の現実可能性について検討を行い、一般工事部分（建屋、電気、一般設備など）の概算見積を得ることができた。

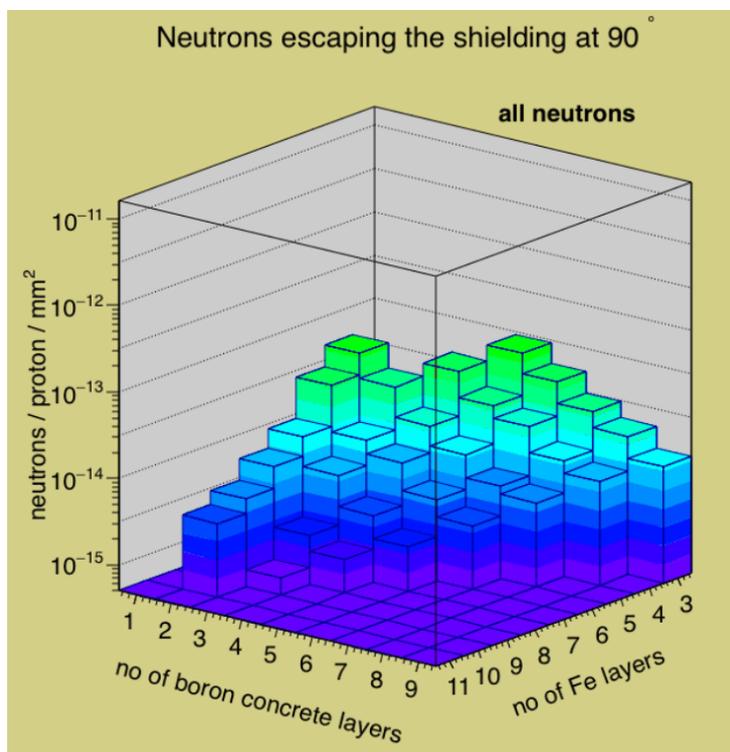


図2：2種類の遮蔽材の組み合わせと遮蔽効果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0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 Adriana Bungau et.al.	4. 巻 15
2. 論文標題 The shielding design concept for the ISODAR neutrino target	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Instrumentation	6. 最初と最後の頁 T07002 T07002
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Joseph Smolisky
2. 発表標題 IsoDAR@KamLAND: Sterile Neutrinos and Beyond
3. 学会等名 APS April Meeting 2021（国際学会）
4. 発表年 2021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
研究 分 担 者	中野 佑樹 (Nakano Yuuki) (70781889)	神戸大学・理学研究科・特命助教 (14501)	
研究 分 担 者	市村 晃一 (Ichimura Koichi) (80600064)	東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教 (11301)	

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
---------	---------