

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2015～2016

課題番号：15K17656

研究課題名(和文) Double Chooz検出器を用いた未解決領域でのステライルニュートリノ探索

研究課題名(英文) Sterile neutrino search in unsolved parameter region with Double Chooz detectors

研究代表者

松原 綱之 (Matsubara, Tsunayuki)

首都大学東京・理工学研究科・特任准教授

研究者番号：30724992

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、原子炉コアから約400 mと約1 km離れた2基のDouble Chooz検出器を用い、飛来する反電子ニュートリノのエネルギーを精密測定することでステライルニュートリノ探索を行うことを目的とする。平成27年から前置検出器の測定を開始し、当初の予定通りに約15ヶ月分の解析可能なデータの取得した。計算機とストレージの増強によるデータ処理、検出器性能やバックグラウンドの理解が完了し、期待される探索感度を見積もった。平成28年8月のICHEP国際会議等でこれら成果の発表を行った。残るは実データ解析のみであり、本研究により、探索結果をまとめて学術論文に投稿するための道筋をつけることに成功した。

研究成果の概要(英文)：Aim of this study is to search for sterile neutrino in unsolved parameter region with Double Chooz detectors, measuring energy spectrum of anti-neutrino with 400 m and 1 km baseline from Chooz reactor core in France. Data taking of the near detector has been started since 2015. We succeeded to take about 15 months of data for analysis as scheduled. Thanks to enhancement of computing and storage resources, we completed data processing, evaluation of detector performances and understandings of background events. Then we obtained realistic expectation of sensitivity to search for the sterile neutrino with statistics and systematics we have. This achievement was presented in some international conferences like ICHEP hold in August 2016. Submission to journal is expected soon after completion of real data analysis.

研究分野：ニュートリノ物理

キーワード：ニュートリノ振動 ステライルニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

2012年、これまで未測定であったニュートリノ混合角  $\theta_{13}$  が発見された。この発見により、LEP 実験が示した3世代のニュートリノに作用する全ての混合角の有限値が測定され、ニュートリノの性質の全容解明にまた一歩近づいた。一方、LSND 実験・Gallium 実験・MiniBooNE 実験・原子炉ニュートリノ異常などで提起された、3世代のニュートリノでは説明のつかない実験結果が複数存在している。LEP 実験の結果はニュートリノの質量が Z ボソンの半分以下であり、弱い相互作用をするニュートリノの世代数が3であることを示したものである。すなわち、弱い相互作用をしないニュートリノであれば世代数が4以上であっても矛盾しない。

こうして理論上導入された新粒子はステライルニュートリノと呼ばれ、国内外でその振動パラメータ(混合角、質量二乗差)の測定を介した探索計画が進行中・または提起されている。過去の実験により存在可能性なパラメータ領域が絞られているが、一部実験においては許容領域の妥当性に疑問が呈されるなどの混迷も続いている。そのため早急に新たな実験結果を得ることが望まれている。

2. 研究の目的

本研究は、未知のニュートリノ振動であるステライルニュートリノへの遷移に伴う、原子炉ニュートリノの観測予測値からの欠損量と振動パターンを観測することでステライルニュートリノ探索を行うことである。反電子ニュートリノの検出には、現在稼働を始めた Double Chooz 前置検出器を用いる。一部の振動パラメータ領域について既存の制限の上回る感度で探索を行うとともに、複数の実験で存在可能性が示唆されている未解決領域についても検証を行う。もし弱い相互作用をしないステライルニュートリノのモデルが正しいと実験的に示されれば、それは未知の相互作用が存在する可能性を示唆するものである。これはニュートリノ世代数のみならず、これまでの理論に修正を迫るブレイクスルーに繋がる可能性がある。

3. 研究の方法

ステライルニュートリノ探索には Chooz 原子炉と Double Chooz 検出器を用いる。原子炉は高い強度を持つ人工のニュートリノ源であり、ノーコストで利用できるメリットがある。モニターされた原子炉の熱出力から生成される反電子ニュートリノの数が約2%の不定性で計算される。前置検出器は約400m、後置検出器は約1kmの位置に設置されている。反電子ニュートリノの検出にはガドリニウム入り液体シンチレータを用いる。原子炉からの反電子ニュートリノはシンチレータ内の水素原子核と逆β崩壊反応を起こす。この反応から反電子ニュートリノの数とエネルギースペクトルを精密に測定する。ス

テライルニュートリノによるニュートリノ振動が存在した場合には振動パラメータに応じてエネルギースペクトルに歪みが生じ、歪みの振幅の大きさから混合角を、振動パターンから質量二乗差を得られる。図1と図2に、振動確率のニュートリノエネルギー依存性(上図)、Double Chooz 前置検出器のエネルギー分解能を加味した観測エネルギー依存性(下図)を示す。振動パラメータは、 $\sin^2\theta_{14} = 0.1$ 、 $\Delta m^2_{41} = 0.1 \text{ eV}^2$  (図1)と  $\Delta m^2_{41} = 1.0 \text{ eV}^2$  (図2)を想定した。

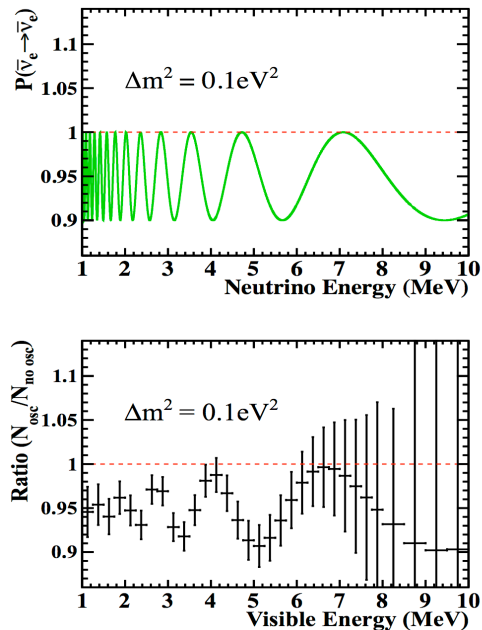


図1：振動確率のエネルギー依存性。  
 $\sin^2\theta_{14} = 0.1$ 、 $\Delta m^2_{41} = 0.1 \text{ eV}^2$ を想定。

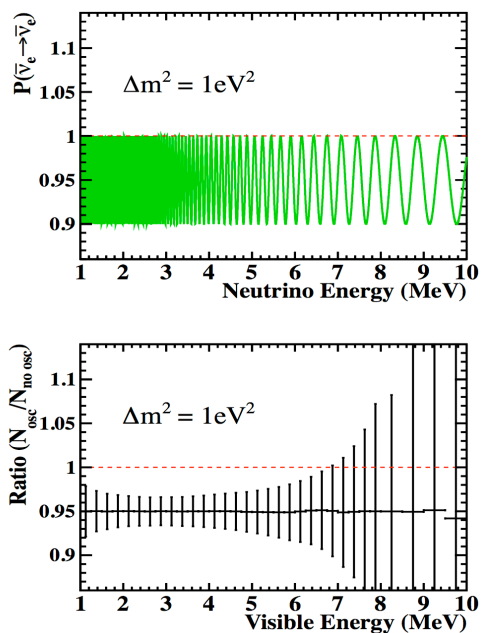


図2：振動確率のエネルギー依存性。  
 $\sin^2\theta_{14} = 0.1$ 、 $\Delta m^2_{41} = 1.0 \text{ eV}^2$ を想定。

#### 4. 研究成果

本研究では、(1) 2015年から始まった前置検出器のデータ取得、(2) オフラインツールを用いたデータ処理、(3) 検出器応答とバックグラウンドの理解、(4) MCシミュレーションを用いた反電子ニュートリノの予測値の算出、(5) 振動解析のための統計処理、を行った。また、これら研究の基盤のために計算機・ストレージの増強を行った。本研究で得られた成果は、国際会議で公表された。

(1) 2015年から前置検出器のデータ取得が開始された。データ処理上の課題であった、刷新されたエレクトロニクスと新たに設置された検出器のためのシミュレーションと解析ツール群のアップグレードを共同研究者らと行った。

(2) アップグレードされたオフラインツールを用いて、解析のためのデータ処理を行った。計算機とストレージの増強を行うとともにデータ処理の一部自動化を実装し、その効率化を図った。これまでに当初の予定通りに約15ヶ月分の解析可能なデータを得ることができた。

(3) 得られたデータを解析して検出器応答とバックグラウンドの評価を共同研究者らと行った。特に、検出器2基のエネルギー応答位置一様性について研究を行い、応答の違いが液体シンチレータの減衰長の違いに由来することを理解し、MCシミュレーションの調整を行った。

(4) MCシミュレーションを用いた反電子ニュートリノの予測値の算出を行った。原子炉の熱出力・燃料構成比・燃料ごとのエネルギースペクトル・反応断面積から検出器で観測されると期待される反電子ニュートリノの量とエネルギースペクトルを計算し、検出器・エレクトロニクスシミュレーションを行なうことで、ステライルニュートリノ探索に必要な予測値を得た。図3に15ヶ月の測定で得られた前置検出器データとその予測値(信号+バックグラウンド)を示す。

(5) 見積もられた予測値と統計・系統誤差をもとに、ステライルニュートリノ探索のための統計処理手法を開発した。原子炉ニュートリノスペクトルの歪み(予測と観測のずれ)が探索に影響を与えるとの懸念が新たな課題となったが、2基の検出器で得られたエネルギースペクトルを比較する方法をとる手法を採用することで解決した。擬似データを用いて期待される探索感度を見積もり、その研究成果を公表した。

これまでにステライルニュートリノ探索に必要なデータが得られ、解析・統計処理手法の堅牢性も確立された。これまでに確立された探索手法から期待される感度を図4に示す。残る課題は実データ解析のみであり、本研究により、探索結果をまとめて学術論文に投稿するための道筋をつけることに成功した。

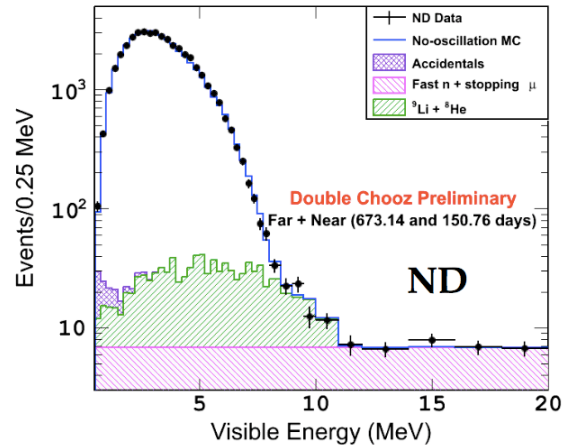


図3：15ヶ月の測定で得られた前置検出器データとその予測値(信号+バックグラウンド)

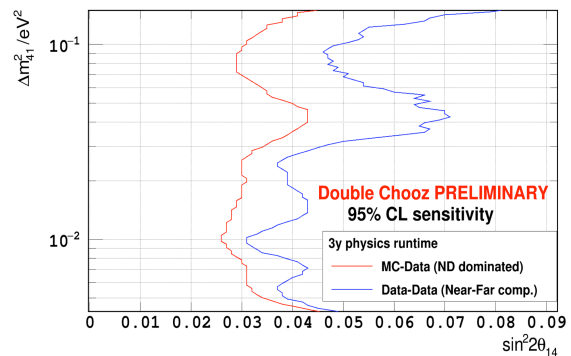


図4：これまでに確立された手法により期待されるステライルニュートリノの探索感度

#### 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3件)

- ① T. Matsubara, “First double detector results from Double Chooz experiment, PoS (ICHEP2016) 469, 査読無
- ② G. Yang, T. Matsubara et al., “Theta-13 oscillation analysis in Double Chooz with two detectors”, PoS (ICHEP2016) 927, 査読無
- ③ T. Matsubara and D. Hellwig, “Sterile neutrino search in Double Chooz experiment”, PoS (ICHEP2016) 927, 査読無

[学会発表] (計4件)

- ① D. Hellwig and T. Matsubara, “Sterile Neutrino Search with the Double Chooz Experiment”, The XXVII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, 2016年6月, ロンドン (英国)

- ② T. Matsubara, “First double detector results from Double Chooz experiment, The 38<sup>th</sup> International Conference on High Energy Physics, 2016年8月, シカゴ (米国)
- ③ G. Yang, T. Matsubara et al., “Theta-13 oscillation analysis in Double Chooz with two detectors”, The 38<sup>th</sup> International Conference on High Energy Physics, 2016年8月, シカゴ (米国)
- ④ T. Matsubara and D Hellwig, “Sterile neutrino search in Double Chooz experiment”, The 38<sup>th</sup> International Conference on High Energy Physics, 2016年8月, シカゴ (米国)

[その他]

ホームページ等

Double Chooz 実験 HP

<http://doublechooz.in2p3.fr/>

Double Chooz 日本グループ HP

<http://dchooz.titech.jp.hep.net/>

首都大学高エネルギー実験研究室 HP

<https://heall.phys.se.tmu.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

松原 綱之 (MATSUBARA, Tsunayuki)

首都大学東京・理工学研究科・特任准教授

研究者番号：30724992