

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 31 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2015

課題番号：23224007

研究課題名(和文) 中性K中間子の稀崩壊で探る標準理論を超える新しい物理

研究課題名(英文) Search for New Physics Beyond the Standard Model with Rare Neutral Kaon Decays

研究代表者

山中 卓(YAMANAKA, TAKU)

大阪大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20243157

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 171,500,000円

研究成果の概要(和文)：粒子と反粒子の対称性を破る、標準理論を超える新しい物理を探るために、J-PARC大強度陽子加速器を用いて中性K中間子がパイ0中間子とニュートリノ対に壊れる稀な崩壊を探索する。各種の新たな検出器を製作して実験を建設し、データ収集を開始した。以前の実験より約2桁高い感度を持つことを示し、新たな背景事象を発見してその対策を取った。今後さらに高いビーム強度でデータ収集を続け、目的の感度に達する予定である。

研究成果の概要(英文)：To search for new physics beyond the standard model, that breaks the CP symmetry, we will search for a rare KL decay mode using the J-PARC high intensity proton accelerator. We developed various new detectors for the new experiment, and started taking data. We showed that the new experiment has 2 orders of magnitude higher sensitivity than the previous experiment. We also found a new type of background events, and developed various techniques to suppress it. We plan to reach the original goal by collecting data with an increasing beam power, despite a 3 years of delay caused by the earthquake and a radiation accident.

研究分野：素粒子実験

キーワード：素粒子実験 K中間子 CP対称性の破れ 標準理論を超える物理

1. 研究開始当初の背景

我々の体、地球、太陽、銀河など、宇宙にある物は全て、突き詰めると、クォークや電子などの「粒子」で作られている。これに対し、電子に対する陽電子、クォークに対する反クォークなど、電荷が反転した「反粒子」もわずかに存在する。ビッグバン直後の、温度が高かった宇宙の初期には粒子と反粒子は同数あったはずだが、膨張して冷えた現在の宇宙に、反粒子はほとんど残っていない。これは、宇宙が冷える過程で、粒子の数が反粒子の数よりもかすかに多くなるという「えこひいき」が起きたからである。こうした粒子と反粒子の間の「えこひいき」を CP 対称性の破れと呼ぶ。小林・益川が提唱した理論は、K 中間子や B 中間子において観測された CP 対称性の破れを説明し、素粒子の標準理論の中に取り込まれたが、宇宙に粒子を残した CP 対称性の破れは説明できない。従って、CP 対称性を破る、標準理論を超える新しい素粒子物理があるはずである。

新しい素粒子物理による CP 対称性の破れを探るために、我々は中性の K 中間子が中性のパイ中間子とニュートリノ対に壊れる崩壊 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を探し、崩壊分岐比を測る実験を計画した。この崩壊は、次の特徴を持つ。まず、CP の状態が - の状態から + の状態に変わるため、崩壊自身が CP 対称性を破っている。次に、標準理論による崩壊分岐比は 3×10^{-11} と非常に小さい上に、理論的誤差が約 2% と小さい。そのため、新しい物理がこの崩壊に寄与することによる、崩壊分岐比の標準理論の予測からズレを検知しやすい。すなわち、CP 対称性を破る新しい物理に対する感度が高い。

この $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊は山中らが米国 Fermilab の KTeV 実験で探索し、その崩壊分岐比に対して $BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 5.9 \times 10^{-7}$ (90% 信頼度) の上限値を与えた。その後我々は KEK の 12GeV 陽子加速器を用いてこの崩壊に特化した E391a 実験を行い、上限値を $BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 2.6 \times 10^{-8}$ (90% 信頼度) まで下げた。また、米国 BNL 研究所の E787/E949 実験が、荷電 K 中間子の $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊を 7 事象観測し、測定した崩壊分岐比を用いて、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊に対して $BR(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) < 1.46 \times 10^{-9}$ (1σ) の間接的な上限値を与えた。

これらの上限値と標準理論の予測の間には 2 桁以上の隔たりがあり、超対称性理論などの

様々な理論が、標準理論の予測とのズレを提示していた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、中性 K 中間子の $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊を探索し、CP 対称性を破る、標準理論を超える新しい物理を探すことである。

3. 研究の方法

茨城県東海村にある J-PARC 大強度陽子加速器で陽子を 30GeV まで加速した後取り出し、ハドロンホールと呼ばれる建物内の金の標的に当て、2 次粒子を生成する。陽子のビームから横に 16 度方向に、ガンマ線を削減する鉛、ビームの形を決めるコリメータを 2 台、荷電粒子を排除する電磁石を設置し、中性の K_L と中性子だけのビームを作る。

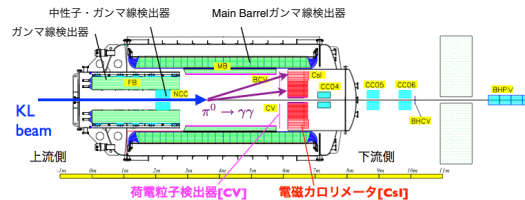


図 1: J-PARC KOTO 実験装置

J-PARC E14 KOTO 実験の検出器の概略を図 1 に示す。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の信号は、 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊の 2 個のガンマ線のみが見え、元の π^0 が大きな横方向の運動量を持つこと(残りの $\nu \bar{\nu}$ が運動量を持ち去るため)である。これらの 2 個のガンマ線のエネルギーと位置を、下流に置いた電磁カロリメータで測定する。電磁カロリメータは、長さ 50cm の CsI の結晶を 2716 本、直径 2m の円筒内に積み上げたものである。また、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 崩壊でできる 4 個のガンマ線のうち、2 個を見失うとこれは背景事象となるため、崩壊を観測する領域の全方向をガンマ線検出器で覆う。荷電粒子も排除するために、カロリメータとガンマ線検出器の表面を荷電粒子検出器で覆う。またほとんどの検出器を真空中に置き、ガンマ線を見失う原因となるビームパイプなどの物質を排除した。また高いレートでも信号を識別できるよう、全ての検出器からの信号は 8ns おきに波高を測定し、デジタル化して記録する。目的の事象の候補を選ぶトリガーは、このデジタル化した情報を用いて作る。

4. 研究成果

- (1) 測定器の建設: 2011年4月に研究が開始された時点では、電磁カロリメータのCsIの結晶を積み上げた直後であり、その他の実験装置はまだほとんど設置されていない状態であった。また2011年3月に東日本大震災が起きた直後で、J-PARC加速器施設も被害を受けた所であったが、我々は次のことを行った。

電磁カロリメータのCsI結晶は地震により破損はしていなかったが、全体が約5mm前にせり出していた。そのため、将来の大地震に備えて結晶が動いたり割れたりしないような改良を行った。また、カロリメータ全体を真空に引いて稼働試験を行った。さらに、カロリメータ上流に電磁石と飛跡検出器を設置し、 K_L の崩壊でできる電子を用いて電磁カロリメータのエネルギー分解能、位置分解能などの測定を行った。また、本番の実験と同様に $K_L \rightarrow 3\pi^0$ 崩壊を用いて電磁カロリメータのエネルギー較正を行い、その結果が電子を用いて行ったエネルギー較正の結果と1.6%の精度で一致していることを確認した。これにより、本番実験中のエネルギー較正法を確立した。

電磁カロリメータの前面に置く荷電粒子の検出器を製作し、設置した。これは、中性子が反応する確率を減らすために厚さわずか3mmのシンチレータに波長変換ファイバーを埋めて光を収集し、MPPCという半導体検出器を用いて読み出す。これにより、薄いにも関わらず、荷電粒子に対して非常に高い検出効率を持つ検出器が完成した。MPPCと一体化したペルチェ素子により冷却し、温度の制御が難しい真空中でも安定に動作した。

電磁カロリメータの中央には、ビームが通り抜ける穴が空いている。この穴を通して下流に抜けるガンマ線を検出するため、ガンマ線を e^+e^- に変換する鉛板、生成された電子をチェレンコフ光で識別するエアロジェルからなる検出器を12台設置した(後に4台追加)。これにより、高い中性子のレートの下でも1GeV以上のガンマ線に対して0.8%の不感率を得た。

ガンマ線と中性子を識別できる検出器を建設し、崩壊領域の上流端に設置した。これはCsI結晶を長さ方向に3分割したものを積み上げ、それぞれの結晶のシンチレーション光を波長変換ファイバーを用いて読み出すという、新しい手法を用いた検出器である。反応の起きる深さがガンマ線と中性子で異なることを利用し、余分なガンマ線を出した事象を排除すると同時に、ビームの外側に広がる中性子の量を測定することもできる。

その他、崩壊領域の横側を覆う円筒形のガンマ線検出器を設置し、カロリメータの下流にも、ビームから外に出て来るガンマ線を検出するための検出器を3ヶ所に設置した。

シカゴ大の開発した信号の波形を記録する装置とミシガン大で開発したデータ収集システムを現場で統合し、試験と調整を行った。また、カロリメータ以外の測定器もトリガーの生成に使えるようにした。

- (2) 初めてのデータ収集とデータ解析: 2013年に測定器全体が完成し、5月に、物理解析用のデータの収集を開始した。しかし、100時間のデータ収集を行った時点で、短いパルスの陽子ビームが取り出され、金の標的の一部を蒸発させて放射性物質が施設外に漏れる事故が発生した。このため、ハドロン実験施設は、改修工事のため約2年間実験を停止した。

しかし、我々は収集した100時間分のデータを解析し、2014年9月にその結果をウィーンで開かれたCKM2014で発表した。わずか4日間のデータであったが、6ヶ月間データを収集したKEK E391a実験とほぼ同じ感度を得た。これは、J-PARC KOTO実験の感度がいかに高いかを示す。

ただし、図2に示すように、シグナル領域内に1事象観測した。モンテカルロシミュレーションを行った結果、ビームの外側に漏れ出た中性子がカロリメータに当たってエネルギーを落とし、中性子がそこからまた飛んで別の箇所にエネルギーを落とした事象であると考えている。

従って、後で述べるように、この背景事象を落とす手法が必要である。

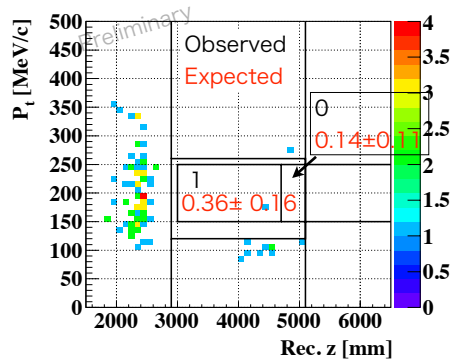


図 2: π^0 の横方向の運動量 (縦軸) と崩壊位置 (横軸) の分布。中央の長方形が、シグナル領域。黒字が観測事象数、赤字がシミュレーションの予測を表す。

- (3) ハドロンホール復旧後のデータ収集: 約 2 年間の改修工事の後、2015 年 4 月にハドロンホールでの実験が開始された。それに向けて、ガンマ線検出器などを追加し、データ収集システムを改良し、より安定してデータを収集できるようにした。また、陽子のビーム強度は初めの 24 kW から 12 月には 42 kW に上がったが、途中からシグナルの波形を記録する装置内でデータを圧縮するように変更し、より高い効率でデータを収集できるようにした。2015 年のデータ収集では、2013 年の約 20 倍のデータを収集した。現在、その解析を進めている。
- (4) 大型円筒形ガンマ線検出器: 崩壊領域の横方向を覆う既存の円筒形ガンマ線検出器では厚みが足りず、ガンマ線が反応せずに突き抜けてしまう問題があるため、その内側に新たな円筒形のガンマ線検出器を追加した。鉛とシンチレータを積層し、シンチレーション光を減衰時間の短い波長変換ファイバーで読み出し、時間分解能も改善した。また、小さな物質質量で 6 トンの重量を支えつつ変形を抑えるために、8 個のジュラルミンの輪の内側に 32 個のモジュールを取り付ける構造とした。測定器は 2016 年 3 月に KOTO の実験装置内に組込まれた。

- (5) 中性子の背景事象の排除: 2011 年のデータ解析で明らかとなった新たな中性子起源の背景事象を抑えるために、次の方策を取った。電磁カロリメータに落とすエネルギーの横方向の形をガンマ線と比較する新たな解析方法を開発し、これにより中性子の事象を約 1/3 に落とした。さらに、CsI の発光する波形がガンマ線と中性子でわずかに異なることを発見し、中性子起源の背景事象をさらに約 1/10 に落とせることを示した。また現在、カロリメータの上流側にも光検出器を取り付け、下流側にある光電子増倍管との時間差を測定することによって入射粒子の反応位置の深さを測定し、反応位置の深い中性子を排除することを計画している。2016 年 2 月には、実際に CsI の結晶の上流側に MPPC 半導体光検出器を取り付けたものに電子ビームを当てて試験し、中性子起源の背景事象をこの方法で約 1/10 に落とせる見通しを得た。

これらの方法を組み合わせると、標準理論の予測する分岐比以下に、中性子起源の背景事象数を抑えられる。

東日本大震災と、ハドロンホールの事故により、データ収集は 3 年間遅れたが、計画していた測定器は全て製作し、KOTO 実験の感度の高さを確認し、中性子起源の背景事象を発見してそれに対する対応策も打ち出した。今後、ビーム強度は 100 kW まで上がる予定であり、高い強度でデータ収集を続けることによって、当初の目標に到達できる見通しが立った。

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 11 件)

特に記さない限り、すべて査読有り。著者のリストは原則、そのテーマで学位を取った人以外はアルファベット順であるため、順番は省略。

- [1] D. Naito, ..., H. Nanjo, T. Nomura, Y. Tajima, 他 7 名, "Development of a low-mass and high-efficiency charged particle detector", PTEP **2016**, 023C01 (2016), 査読有, <http://dx.doi.org/>

doi:10.1093/pte/ptv191.

- [2] T. Masuda, ..., T. K. Komatsubara, G.Y. Lim, T. Matsumura, H. Nanjo, T. Nomura, S. Suzuki, Y. Tajima, T. Yamanaka, 他 47 名, “Long-lived neutral-kaon flux measurement for the KOTO experiment”, PTEP **2016**, 013C03 (2016), 査読有, <http://dx.doi.org/doi:10.1093/ptep/ptv171>.
- [3] T. Matsumura, ..., T. K. Komatsubara, G.Y. Lim, H. Nanjo, T. Nomura, T. Yamanaka, 他 14 名, “Photon-veto counters at the outer edge of the end-cap calorimeter for the KOTO experiment”, Nucl. Instrum. Methods A **795**, 19 (2015), 査読有, <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.nima.2015.05.036>.
- [4] Y. Maeda, ..., H. Nanjo, T. Nomura, Y. Tajima, 他 9 名, “An aerogel Cherenkov detector for multi-GeV photon detection with low sensitivity to neutrons”, Prog. Theo. Exp. Phys. **2015**, 063H01 (2015), 査読有, <http://dx.doi.org/doi:10.1093/ptep/ptv074>.
- [5] Y. Sugiyama, ..., Y. Tajima, T. Yamanaka, 他 11 名, “The Data Acquisition System for the KOTO Experiment”, IEEE Trans. Nucl. Sci. **62**, 1115-1121 (2015), 査読有, <http://dx.doi.org/doi:10.1109/TNS.2015.2417312>.
- [6] E. Iwai, ..., Y. Tajima, T. Yamanka, 他 11 名, “Performance study of a prototype pure CsI calorimeter for the KOTO experiment”, Nucl. Instrum. Meth. A **786**, 135 (2015), 査読有, <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.nima.2015.02.046>.
- [7] T. Masuda, ..., T. K. Komatsubara, G.Y. Lim, H. Nanjo, T. Nomura, T. Yamanaka, 他 14 名, “A vacuum tolerant high voltage system with a low noise and low power Cockcroft-Walton photomultiplier base”, Nucl. Instrum. Methods A **746**, 11: (2014), 査読有, <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.nima.2014.02.007>.
- [8] K. Shiomi, ..., T. K. Komatsubara, G.Y. Lim, Y. Tajima, T. Yamanaka, 他 22 名, “Measurement of K_L^0 flux at the J-PARC Neutral-Kaon Beam Line”, Nucl. Instrum. Methods A **664**, 264-271 (2012), 査読有, <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.nima.2011.11.010>.
- [9] G. Takahashi, ..., T. K. Komatsubara, G.Y. Lim, H. Nanjo, T. Nomura, Y. Tajima, T. Yamanaka, 他 11 名, “Development of a Neutral Beam Profile Monitor”, Jpn. J. Appl. Phys. **50**, 036701 (2011), 査読有, <http://dx.doi.org/doi:10.1143/JJAP.50.036701>.
- [10] T. Yamanaka, “The J-PARC KOTO Experiment”, Prog. Theo. Exp. Phys. **2012**, 02B006 (2012), 査読有, <http://dx.doi.org/doi:10.1093/ptep/pts057>.
- [11] T. K. Komatsubara, “Experiments with K-meson Decays”, Prog. Part. Nucl. Phys. **67**, 995 (2012), 査読有, <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.pnpnp.2012.04.001>.

〔学会発表〕（計 159 件）

- [1] T. Nomura, “Rare Kaon decay experiments and future plans”, FPCP2015 - Flavor Physics & CP Violation 2015, May 25-29, 2015, Nagoya Univ. (愛知県・名古屋市).
- [2] T. Yamanaka, “Current and Future Kaon Experiments”, CKM2014 - 8th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle, Sep 08-12, 2014, Vienna (Austria).
- [3] Koji Shiomi, “ $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ at KOTO”, CKM2014 - 8th International Workshop on the CKM Unitarity Triangle, Sep 08-12, 2014, Vienna (Austria).
- [4] H. Nanjo, “Results of the KOTO Experiment at J-PARC”, Xth Recontres du

- Vietnam, Flavour Physics Conference, Jul 27-Aug 02, 2014, Quy Nhon (Vietnam).
- [5] Manabu Togawa, “Recent Results from KOTO”, BEACH 2014 - XI International Conference on Hyperons, Charm, and Beauty Hadrons, Jul 21-26, 2014, Birmingham (UK).
- [6] T. Yamanaka, “CP Violation in Kaon Decays (II)”, 50 Years of CP Violation, Jul 10-11, 2014, London (UK).
- [7] T. Nomura, “Status of the $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ Experiment at J-PARC”, ICHEP 2014 - 37th International Conference on High Energy Physics, Jul 02-09, 2014, Valencia (Spain).
- [8] T. Nomura, “Kaon Physics”, PIC 2013 - XXXII International Symposium on Physics in Collision, Sep 03-07, 2013, Beijing (China).
- [9] T. Yamanaka, “Future of Flavor Physics”, Lepton Photon 2013 - XXVI International Symposium on Lepton Photon Interactions at High Energies, Jun 24-29, 2013, San Francisco (USA).
- [10] Takahiko Masuda, “KOTO Detector Status”, KAON13, Apr 29-May 01, 2013, Ann Arbor (Michigan, USA).
- [11] Manabu Togawa, “Status and Future Prospects for the KOTO Experiment”, KAON13, Apr 29-May 01, 2013, Ann Arbor (Michigan, USA).
- [12] Naoki Kawasaki, “Gamma and Neutron Counter with WLS Fiber Readout of Undoped CsI Crystals for KOTO Experiment”, KAON13, Apr 29-May 01, 2013, Ann Arbor (Michigan, USA).
- [13] H. Nanjo, “KOTO (J-PARC E14) $\bar{K}_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ ”, CKM2012, Sep 28-Oct 02, 2012, Cincinnati (Ohio, USA).
- [14] G.Y. Lim, “Kaon and Muon Experiments at J-PARC and Fermilab”, FPCP 2012 - Flavor Physics and CP Violation 2012, May 21-25, 2012, Hefei (AnHui, China).
- [15] T. Nomura, “J-PARC Flavor Program”, Flavor Physics and CP Violation 2011, May 23-27, 2011, Kibbutz Maale Hachamisha (Israel).

〔その他〕

ホームページ等：<http://koto.kek.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山中 卓 (Yamanaka, Taku)
大阪大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：20243157

(2) 研究分担者

小松原 健 (KOMATSUBARA, Takeshi)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授
研究者番号：30242168

南篠 創 (NANJO, Hajime)
京都大学・理学研究科・助教
研究者番号：40419445

田島 靖久 (TAJIMA, Yasuhisa)
山形大学・学内共同利用施設等・准教授
研究者番号：50311577

松村 徹 (MATSUMURA, Toru)
防衛大学校・応用科学群・講師
研究者番号：00545957

鈴木 史郎 (SUZUKI, Shiro)
佐賀大学・工学研究科・その他
研究者番号：50089851

(3) 連携研究者

林 ゲヨブ (LIM, GeiYoub)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
研究者番号：90332113

野村 正 (NOMURA, Tadashi)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授
研究者番号：10283582