

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料 〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間：2021～2025
課題番号：21H04995
研究課題名：世界最高感度の中性K中間子実験で拓く素粒子新物理
研究代表者氏名（ローマ字）：南條 創（NANJO Hajime）
所属研究機関・部局・職：大阪大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：40419445

研究の概要：

本研究の目的は“なぜ宇宙が物質ばかりで反物質がほとんどないのか”という謎を解明する、素粒子の新しい物理を探ることにある。中性K中間子 K_L の粒子と反粒子の対称性(CP対称性)を破る崩壊、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を探索する。我々は、茨城県東海村にあるJ-PARC加速器を用いて、KOTO実験の実験装置を強化し、世界最高感度で $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を探索することで、新物理を探る。

研究分野：素粒子、原子核、宇宙線および宇宙物理に関連する実験

キーワード：物質宇宙の起源、CPの破れ、フレーバ物理、稀崩壊

1. 研究開始当初の背景

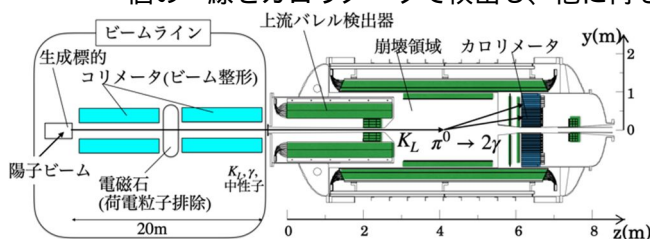
素粒子は粒子と反粒子が対になって存在するが、この宇宙は物質ばかりで、反物質がほとんどない。素粒子の標準理論でも相互作用が粒子と反粒子の間で僅かに異なるが、物質優勢宇宙を説明するには10桁その効果が足りず、新物理が必須である。本研究で用いる中性K中間子の稀な崩壊 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ は、標準理論のみでは分岐比が 3×10^{-11} と強く抑制され、その理論計算による予測精度も2%と精密である。新物理を担う重い新粒子による僅かな寄与も、分岐比の変化として検出できるため、質量500 TeV程度までの粒子に感度をもつ。世界最大のビーム強度を誇る大強度陽子加速器施設J-PARCにおいて、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の発見を目指して我々はKOTO実験を推進している。KOTO実験の2016-18年に取得したデータの解析では、分岐比探索感度 7.2×10^{-10} に対し、3事象を観測した。背景事象の予測が1.2事象に対して超過がみられ、統計的なゆらぎの範囲にあるが、新物理の寄与の可能性があり、更なる探索が重要である。この背景事象は、これまで考えていなかった新たな機構によるものと判明したので、本研究で削減し、高感度実験を行う。

2. 研究の目的

本研究計画では、新たに見出した背景事象を削減することで、新物理の有無を明確に決定し、従来よりさらに1桁高い感度で新物理を探索する。この目的で、新たな低物質質量荷電粒子検出器や永久磁石を追加し、中性子を遮蔽する。また、J-PARC加速器の強化が進行中であり、2023年度から強度が2倍強く、取り出し時の強度ゆらぎの少ない高品質ビームが供給される予定である。このため、データ収集システムも増強する。この理想的なビームを使い、本計画での増強を合わせて、KOTO実験の目標感度に迫る重要かつ総仕上げの研究を実施する。本研究期間で $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ の分岐比探索感度 8×10^{-11} に到達し、 10^{-10} 以上の分岐比であれば3の有意度で新物理の存在を示唆することができる。その結果、 3×10^{-9} の分岐比を与えるようなエキゾチックな新物理を発見するか、その可能性を排除したり、 10^{-10} の分岐比を与える新物理の兆候を捉えたりでき、物質優勢宇宙の起源に迫る。

3. 研究の方法

KOTO実験は図のようなビームラインと検出器からなる。陽子ビームを生成標的にあて、K中間子を生成する。このK中間子の一部がコリメータを通り、検出器に入射する。 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の検出には、2個の線をカロリメータで検出し、他に何も検出していないことを要求(Veto)する。2016-18年に



取得したデータの解析では以下の背景事象が新たに見つかり、主要な背景事象となった。ビームラインの電磁石の下流で、中性K中間子がコリメータの内壁と反応し、荷電K中間子が作られる。これが検出器に入射し、 $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ と崩壊して、 e^+ を検出し損なう場合、背景事象となる。

新たに超低物質質量の荷電粒子検出器を検出器の入り口に設置し、荷電K中間子を検出し、その事象を排除する。

荷電粒子を99%以上検出できる必要がある。しかも、中性K中間子や中性子を含むビーム中に設置するため、これらの粒子が散乱されて背景事象とならないように、検出器を薄くする必要がある。この目的で200 μm 厚のプラスチックシンチレータを用いる。薄いためシンチレータの内部を伝播する光は減衰してしまうので、シンチレータの外に漏れる光をアルミ蒸着フィルムで反射集光して、光電子増倍管により検出する。また、ビームライン出口を改造し、永久磁石を設置し、荷電粒子も排除するなど、背景事象を削減する。さらに、データ収集システムを、新たに高速光ファイバー通信を行うモジュールを導入し刷新する。これまでに取得したデータを解析しつつ、以上の増強を段階的に行い、さ

らにデータを収集し、解析を進めることで、従来よりも 10 倍の高感度を達成する計画である。

4. これまでの成果

厚さ200 μm のプラスチックシンチレータによる超低物質量の荷電粒子検出器を開発した。電子ビーム試験により20光電子に相当する最小電離ピークを得て、99.9%以上の確率で荷電粒子を検出できることを実証した。中性子や中性K中間子の散乱による背景事象数の増加を抑制しつつ、荷電K中間子がKOTO検出器に侵入することを99.9%以上の効率で検出し、背景事象を1/1000以下に削減することができる。真空中で稼働するため、放電耐久性や放熱性能を付与した光電子増倍管を開発し、入射光子レートが4.6 MHzでも安定に動作することを保証し、KOTO実験環境でも問題なく動作することを保証した。2023年4月にKOTO実験に導入し、J-PARCビーム供給に合わせて性能を評価する予定である。ビームライン出口に設置する永久磁石も製作し、0.9 Tの磁束密度を実現した。2023年度秋にKOTO実験に導入し、荷電K中間子による背景事象をさらに削減する予定である。検出器の開発でも、クラレ社の開発した新しい波長変換ファイバの性能を調査した。結果、従来のY-11に比べて蛍光寿命が短く、高速であることがわかった。データ収集システムの刷新では、10Gbit/sのデータレートの光ファイバ4本分のデータを受け、GPUによる高速演算を用いてデータのオンライン解析と圧縮をする、データ収集用のコンピュータを構築した。2023年度4月にKOTO実験の新しいデータ収集システムとして、統合試験を行い、実際にデータ収集に用いる。

また、2019年から2021年に取得したデータのうち、2021年に取得したデータに集中して、ブラインド解析を進めた。単一事象感度 7.9×10^{-10} に対し、背景事象数の期待値は0.33のpreliminary状況である。このうち0.14事象が $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 崩壊による。これはシミュレーションによる見積もりで、過去のデータ解析より2倍以上多かった。原因は、Geant4シミュレーションコードの光核反応のモデルが変更され、パレル検出器の線不感率が増えたこととわかった。Geant4の開発者によると、コードの管理上の問題から変更したとのことで、実データによる光核反応の評価が鍵となる。我々は $K_L \rightarrow 3\pi^0$ 崩壊について、5個の線をカロリメータで検出した事象を用い、6個目の線によりパレル検出器の不感率を評価した。現状ではデータの統計が不足しており、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 崩壊による背景事象数には100%の系統誤差を計上した。次のデータ取得の際は、アップグレードされたDAQを用いて、より多くのコントロールサンプルを取得し、精度の高い結果を得る予定である。

大阪大学でのKAON2022国際会議を開催した(2022年9月13-16)。ハイブリッド開催で、53名が現地参加で、53名がオンライン参加であった。現地参加のうち29名は国外の13カ国からの参加であった。47件の口頭発表と、19件のポスタ発表があった。この成果をまとめたプロシーディングスを出版した。

5. 今後の計画

2023年度4月に超低物質量荷電粒子検出器を導入し、データ収集システムの統合試験を行う。5月にJ-PARCのビーム供給を見込み、ビームを用いたこれらの性能試験を行う。その上で、超低物質量荷電粒子検出器については、物理データ取得において背景事象削減に利用する。

解析の進展により、 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 崩壊による背景事象数に、光核反応からの不定性があることがわかってきている。これを実データで評価する。また、別途パレル検出器モジュールを用い、電子ビームの制動放射からの線を利用するビーム試験を追加で計画している。

ビーム下流の永久磁石については、秋にインストールを行う予定である。ここまでで、荷電K中間子背景事象は完全に無視できるようになる予定であり、秋以降のビーム供給があれば、データを取得し、高感度解析を進める。

引き続き、高速波長変換ファイバの評価、熱中性子に不感となるアイデアを検討し、上流パレル部の検出器改良の準備も進める。これらの設計コンセプトを実証する試験も計画する。

2024年度、2025年度には上流パレル検出器の向上を図りつつ、データ収集と解析を進め、 3×10^{-10} を下回る分岐比の制限をかけるか、事象の超過を検出することで、新物理の探索を進め、物質優勢宇宙の解明を目指す。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

"Search for the Pair Production of Dark Particles X with $K_L^0 \rightarrow XX, X \rightarrow \gamma\gamma$ ", C.Lin, T.Matsumura, H.Nanjo, T.Nomura, Y.Tajima, 他 42 名, Phys.Rev.Lett. 130 (2023) 11, 111801

"New Physics Searches at Kaon and Hyperon Factories", E.Goudzovski, D.Redigolo, K.Tobioka, J.Zupan, H.Nanjo, 他 64 名, Rept.Prog.Phys. 86 (2023) 1, 016201

"Search for the $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ decay at the J-PARC KOTO experiment", K.Shiomi for the KOTO collaboration, J. Phys.: Conf. Ser. 2446 012003

小野啓太 薄膜プラスチックシンチレータを用いた KOTO 実験用荷電粒子検出器の開発(2023年3月 修士論文) ハドロンホール修士論文賞

小野啓太 薄型プラスチックシンチレータを新手法で読み出す KOTO 実験用荷電粒子検出器の性能評価 「2022年秋季大会 日本物理学会学生優秀発表賞」受賞

7. ホームページ等

<https://koto.kek.jp>