

科学研究費助成事業（基盤研究（S））公表用資料
〔平成31年度（2019年度）研究進捗評価用〕

平成28年度採択分
平成31年3月20日現在

K 中間子崩壊に潜む新物理の探索

Search for New Physics in Rare Kaon Decays

課題番号：16H06343

山中 卓 (YAMANAKA, TAKU)

大阪大学・大学院理学研究科・教授



研究の概要（4行以内）

素粒子の標準理論を越える新しい物理を、K 中間子の稀な崩壊 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ を用いて探る。2015年に収集したデータを解析し、今までの崩壊分岐比の上限値の世界記録を10倍更新する結果を得た。また、中性子による背景事象を抑制するために、電磁カロリメータの改造をおこない、目標以上の性能を得た。今後はさらに感度を上げて探索を進める。

研究分野：素粒子実験

キーワード：K 中間子、標準理論を越える物理、CP 対称性、稀崩壊

1. 研究開始当初の背景

宇宙に物質はあるが、反物質はほとんどない。このことは、物質の源である粒子と反物質の源である反粒子の間で、対称性が破れていることを示す。粒子と反粒子の間の対称性の破れ（正しくはCP対称性の破れ）は、1964年にK中間子で発見され、後にB中間子でも確認された。このような実験室で観測されたCP対称性の破れは小林・益川の提唱したモデルにより説明され、そのモデルは素粒子の標準理論に組み込まれた。しかし、標準理論では依然、宇宙の物質・反物質の対称性の破れを説明することはできない。このことは、CP対称性の破れを生む、標準理論を越えた新しい(未発見の)素粒子物理が存在することを意味する。

新しい素粒子物理を実験的に探す方法には大きく分けて2つの方法がある。一つは、エネルギーと質量の等価原理 $E=mc^2$ を用いて高いエネルギーの粒子を衝突させ、新しい素粒子を直接生成する方法である。もう一つは、不確定性原理 $\Delta E \Delta t \sim \hbar$ によって一瞬だけ重

たい新粒子が介在する、現象を探す方法である。後者の場合は、衝突させる粒子のエネルギー（つまり加速器のビームのエネルギー）による制限を受けずに、衝突粒子のエネルギーよりはるかに高い質量の粒子を探すことができる。

CP対称性を破る、標準理論を越えた新しい素粒子物理を探るには、後者の方法で現象として中性のK中間子(K_L)が中性の π 中間子(π^0)とニュートリノと反ニュートリノの対($\nu \nu$ と記す)に壊れる現象、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ 崩壊を用いる方法がある。まず、この崩壊はCP対称性が[-]の状態の K_L がCP対称性が[+]の状態の $\pi^0 \nu \nu$ に壊れるため、CP対称性を破っている。さらに、標準理論によって K_L がこの崩壊を起こす確率は 3×10^{-11} と非常に小さい。そのため、この崩壊を発見し、その崩壊の確率が標準理論の予測よりもはるかに大きければ、これは標準理論を越える新しい物理の発見となる。

我々は米国Fermilab、日本のKEKでの実験を通して、この崩壊を探し求めてきてお

り、J-PARC 大強度陽子加速器の建設に合わせて、より高感度の KOTO 実験を建設した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊を用いて、CP 対称性を破る、標準理論を越えた新しい素粒子物理学を、世界最高感度で探ることである。

3. 研究の方法

J-PARC 大強度陽子加速器で 30GeV まで加速された陽子を標的に当て、カリメータと電磁石を用いて中性 K_L のビームを作る。ビームの下流に電磁カリメータを置き、崩壊でできた π^0 から壊れた 2 個のガンマ線のエネルギーと位置を測る。 $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 崩壊でできる 4 個のガンマ線のうち 2 個しかカリメータに当たらない場合、これは $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ のように見え、偽の信号(背景事象)となってしまう。そうした背景事象を抑制するために、 K_L の崩壊を捉える領域の全方向をガンマ線の検出器で覆い、カリメータに当たった粒子以外にガンマ線などが無いことを要求する。

4. これまでの成果

2013 年に約 100 時間データを収集し、過去に KEK で行なった実験と同等の感度を得た。さらに、2015 年に 2013 年の約 20 倍のデータを収集し、解析を行った。種々の可能性のある背景事象についてそれらを抑制する手法を開発し、抑制の精度を確認したのち、隠していた信号領域を開いたところ、信号領域内に事象はなかった。これをもとに崩壊分岐比として 3.0×10^{-9} 以下(90%信頼度)を与えた。これは世界記録を 10 倍更新するものである。結果は、Physical Review Letters に発表した。

また、2013 年の実験で明らかになった背景

事象として、ビームの外を飛んでくる中性子が直接カリメータに当たり、そこで反応してできた中性子がカリメータ内の別の場所で再び反応し、あたかも 2 つのガンマ線が当たったかのように見える現象がある。これらはデータ解析でかなり抑制できるが、さらに 10 倍抑制するために、電磁カリメータの改造を行った。電磁カリメータは長さ 50 cm の CsI の結晶を約 2700 本を直径 2m の円柱状に積み上げ、各結晶の下流に光電子増倍管を取り付けたものである。ガンマ線はほとんど上流面近くで反応するのに対し、中性子の反応点は奥まで広く分布する。そこでこの各結晶の上流面に薄い半導体の光検出器を新たに接着し、結晶の上流と下流に届く光の時間差から、結晶内での反応の深さを測定できるようにした。2018 年の夏から 7 ヶ月かけて約 4 千個の半導体検出器を接着する改造を行った。その後 2019 年 2 月に収集を始めたデータを解析し、中性子の背景事象を 1/35 に抑制することを示した。

5. 今後の計画

今後は、崩壊を捉える確率を上げるための改良を行い、ビーム強度を上げ、長期間データを収集して感度をさらに上げていく。

6. これまでの発表論文等(受賞等も含む)

- "Search for $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ and $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$ Decays at the J-PARC KOTO Experiment"
J. K. Ahn *et al.* (KOTO Collaboration),
Phys. Rev. Lett., 122, 021802 1-6 (2019).
- "A new search for the $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ and $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$ "
J. K. Ahn *et al.* (KOTO Collaboration),
PTEP, 2017, 021C01 (2017).

7. ホームページ等

<http://koto.kek.jp/>