

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05479

研究課題名(和文) K中間子崩壊による中性で軽い新粒子の探索

研究課題名(英文) Search for neutral and light new-particles through Kaon decays

研究代表者

小松原 健 (Komatsubara, Takeshi)

大学共同利用機関法人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

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)： 中性K中間子の二体崩壊  $KL \rightarrow 0X0$  で現れる中性で軽い新粒子X0を、大強度陽子加速器施設J-PARCのハドロン実験施設で行なっているKOTO実験で探索しました。平成27年のデータの解析をもとに  $KL \rightarrow 0X0$  の探索の新しい結果を出版しました。平成28-30年のデータでは、信号領域の中に候補となる事象が四つあり、現在、この四つの候補事象の詳細を確認するとともにその起源を慎重に精査しています。

研究成果の学術的意義や社会的意義

平成27年のデータをもとに得られた  $KL \rightarrow 0X0$  崩壊の分岐比に対する上限値、X0の質量が135MeVの場合に90%の信頼水準で4.2億回に一度、はこの崩壊に対する世界で最も低く厳しい値です。平成28-30年のデータで観測された四つの候補事象は、現在の分岐比の感度では  $KL \rightarrow 0$  崩壊ではなく  $KL \rightarrow 0X0$  崩壊と解釈するのが自然です。いずれも、学術的意義が高く、自然法則の深い理解へさらに歩を進める結果です。

研究成果の概要(英文)： We search for neutral and light new-particles X0 that appear through a two-body decay of long-lived neutral K meson,  $KL \rightarrow 0X0$ , in the KOTO experiment at the Hadron Experimental Facility of Japan Proton Accelerator Research Complex, J-PARC. Based on the analysis of the data taken in 2015, new results on the  $KL \rightarrow 0X0$  decay were obtained and published. From the analysis of the data taken in 2016-2018, we observed four candidate events in the signal region. Currently we are doing further checks on the four events and careful examinations on their origin.

研究分野：実験素粒子物理学

キーワード：K中間子 崩壊 稀崩壊 新粒子探索 フレーバー物理 ダーク

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

エネルギーフロンティアの直接探索で重い新粒子が見つかっておらず、標準模型の予想値からのずれがミュオン  $g-2$  の測定にしか見られません。この状況で新しい物理を見出すには、大強度フロンティアでの精密測定や稀崩壊探索を行うとともに、理論のシナリオをあらゆる観点で検討して検知可能なシグナルを広い範囲に探索する必要があります。

中性で軽いボーズ粒子、なかでも、通常物質と相互作用をせず寿命も長いために測定器で検出されずに通り抜ける新粒子 ( $X^0$  と総称します) の探索はこれまでも様々な実験手段で行われてきました。例えば、素粒子の世代数 (family number) は自発的対称性の破れで生じるとするシナリオに登場する新粒子 (familon) は、クォークのフレーバーを変える中性カレントに結合し、K 中間子の  $\pi$  中間子と  $X^0$  への二体崩壊で現れます。質量がゼロあるいはゼロに近い  $X^0$  について、本研究代表者は荷電 K 中間子の  $K^+ \rightarrow \pi^+ X^0$  崩壊 (静止した  $K^+$  からの mono-chromatic な  $\pi^+$ ) を探索し、分岐比に対する  $10^{-10}$  台の上限値を 2009 年に得ました [1]。しかしこの探索では、中性  $\pi$  中間子  $\pi^0$  に近い質量 ( $116 \sim 152 \text{ MeV}/c^2$ ) の  $X^0$  に対する制限は全くかけられていません。 $K^+$  崩壊の実験では、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$  崩壊で  $\pi^0$  からの二つのガンマ線が測定器の不感率により検出されないバックグラウンドがあるため、 $\pi^0$  に近い質量の  $X^0$  に対応する運動量の  $\pi^+$  を探索の領域から外していたためです。この不備 (loophole) が 2015 年に理論家により指摘され、さらに、もしも  $\pi^0$  に近い質量の新しいゲージボゾンが存在すればミュオン  $g-2$  の測定のずれが説明でき、vectorlike U quark という新粒子を媒介して起こる中性 K 中間子  $K_L$  の  $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$  崩壊により検知可能であるとも指摘されました [2, 3]。このような指摘に実験側から応えようと考えました。

本研究代表者は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロン実験施設で、中性 K 中性子の CP 対称性を破る稀な崩壊  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  の探索 (KOTO 実験) を行っています。 $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$  崩壊は  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  崩壊と同じ終状態 ( $\pi^0$  と missing energy) なので、KOTO 実験で併行して探索することができます。2013 年に取得した最初の物理データを用いて、 $K_L$  の実験では  $200 \text{ MeV}/c^2$  以下の質量の  $X^0$  を loophole 無しに探索できることを示し、分岐比に対する世界で初めての上限値  $3.7 \times 10^{-8}$  を得て、原著論文を 2017 年 2 月に出版しました [4]。

- [1] <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.79.092004>
- [2] <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.114.171802>
- [3] <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.93.054021>
- [4] <https://doi.org/10.1093/ptep/ptx001>

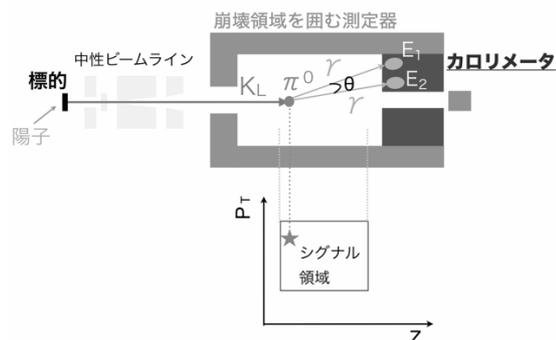
### 2. 研究の目的

本研究では、中性 K 中性子の二体崩壊  $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$  で現れる、中性で軽い新粒子  $X^0$  を探索します。上記 [4] の成果を出発点として、通常物質と相互作用をせず寿命も長いために測定器で検出されずに通り抜ける質量  $200 \text{ MeV}/c^2$  以下の  $X^0$  を、J-PARC の KOTO 実験で引き続き探索します。分岐比の感度を一桁以上向上させるのが目的です。

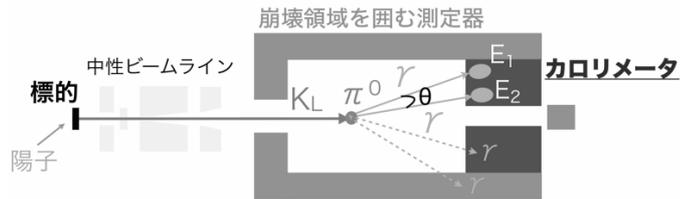
$K_L \rightarrow \pi^0 X^0$  崩壊の探索は、世界中の素粒子実験の中で KOTO 実験そして本研究でのみ行うことができます。クォークのフレーバー物理としても、B 中間子や D 中間子の崩壊による探索より到達感度が優れています。“dark photons” “dark sectors” やダークマターの物理に対して、これまでの研究にはなかった観点で貢献します。

### 3. 研究の方法

$K_L \rightarrow \pi^0 X^0$  崩壊のシグナルは、中性 K 中性子の in-flight 崩壊で  $\pi^0$  一つのみが生じ、この  $\pi^0$  が missing energy に相当する横方向の運動量  $P_T$  を持つ事象です。KOTO 実験では、 $\pi^0$  が直ちに崩壊して生じる二つのガンマ線を前方の電磁カロリメータで測定し、電磁シャワーの位置とエネルギー  $E_1$ 、 $E_2$  から、 $\pi^0$  が生じた崩壊点 Z と  $P_T$  を再構成します。



バックグラウンドとなる  $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$  崩壊は、 $K_L$  崩壊でもう一つ生じる  $\pi^0$  からの extra なガンマ線のエネルギーが実験室系で boost されているので、崩壊領域を囲む測定器で検出しやすくなります。そのため、 $\pi^0$  に近い質量を持つ  $X^0$  に対しても感度を持つことができ、静止  $K^+$  崩壊の実験による  $K^+ \rightarrow \pi^+ X^0$  崩壊の探索よりも有利です。

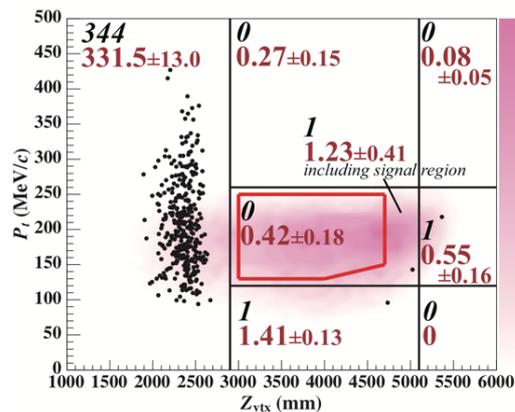


本研究は研究代表者が、KOTO 実験に参加している国内外のコラボレータと密接に連携をとり、協力をしながら進めました。具体的には、国内の大学の研究者を連携研究者、大学院生を研究協力者、海外の大学・研究機関の研究者と大学院生を研究協力者として、研究を実施しました。

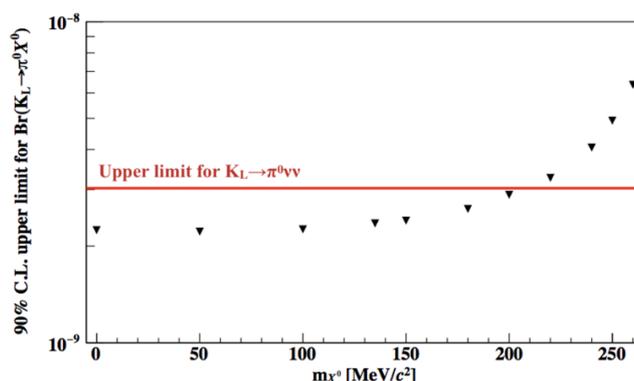
#### 4. 研究成果

KOTO 実験は本研究を開始する前の 2015 年と 2016 年に物理データを取得し、本研究期間の 2017 年、2018 年、2019 年も J-PARC ハドロン実験施設のビームタイムでデータ収集を行いました。また、2018 年のデータ収集後、電磁カロリメータの高度化の作業を行いました。(本研究とは別の科研費で準備・実施しました。) 2019 年のデータからは、カロリメータ内でのシャワーの広がりを三次元的に再構成して電磁シャワー (ガンマ線に起因) とハドロンシャワー (中性子に起因) を分離できるようになりました。

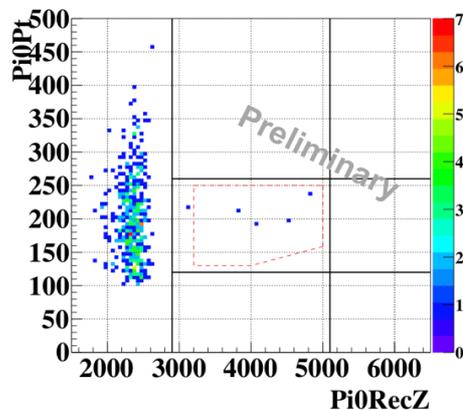
2015 年に取得したデータの解析をもとにした  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  崩壊と  $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$  崩壊の探索の新しい結果を得て、原著論文を 2019 年 2 月に Physical Review Letters 誌に出版しました [5]。終状態の  $\pi^0$  の横方向運動量  $P_T$  を縦軸に、 $\pi^0$  が生じた崩壊点  $Z$  を横軸にとった二次元プロットにおいて、赤い線で囲まれる信号領域の中に予想されるバックグラウンド事象の数 (赤字) は  $0.42 \pm 0.18$  で、シグナルの候補となる事象はありませんでした。



モンテカルロシミュレーションにより  $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$  崩壊の分岐比への感度を  $X^0$  の質量  $m_{X^0}$  の関数として求め、分岐比に対する上限値 (90%信頼水準) として下の図の結果を得ました。 $m_{X^0} = 135 \text{ MeV}/c^2$  での上限値は  $2.4 \times 10^{-9}$  で、2013 年のデータでの上限値  $3.7 \times 10^{-8}$  を十倍更新しました。



2016年から2018年まで取得したデータの解析も進め、2019年9月にイタリアのPerugia大学で開催された「International Conference on Kaon Physics 2019 (KAON2019)」国際会議で発表しました。分岐比感度が  $7 \times 10^{-10}$  に相当するデータで、信号領域の中にシグナルの候補となる事象が四つありました。この四つの事象をもし  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  崩壊とみなすと、荷電K中間子ですでに測定されている  $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \nu$  崩壊の分岐比から得られる間接的な上限値 (Grossman-Nirboound[6]) の  $1.46 \times 10^{-9}$  と矛盾するので、現在の分岐比の感度では、 $K_L \rightarrow \pi^0 X^0$  崩壊と解釈するのが自然です。そのため、この四つの候補事象の詳細を確認するとともにその起源を慎重に精査しています。2020年の夏には結論を得て、解析の結果を公表する予定です。



[5] <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.021802>

[6] [https://doi.org/10.1016/s0370-2693\(97\)00210-4](https://doi.org/10.1016/s0370-2693(97)00210-4)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 J. K. Ahn, T.K.Komatsubara [20番目], 他58名 (KOTO Collaboration)	4. 巻 122
2. 論文標題 Search for KL 0 -bar and KL 0X0 Decays at the J-PARC KOTO Experiment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 021802, 6 pages
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.021802	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 4件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 篠原智史 (京都大学理学研究科-KOTO実験グループを代表しての発表)
2. 発表標題 Search for the rare decay KL 0 at J-PARC KOTO experiment
3. 学会等名 「International Conference on Kaon Physics 2019 (Kaon2019)」国際会議 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yu-Chen Tung (シカゴ大学-KOTO実験グループを代表しての発表)
2. 発表標題 Recent Results from KOTO Experiment
3. 学会等名 「XXXIX International Symposium on Physics in Collision (PIC 2019)」国際会議 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Chieh Lin (国立台湾大-KOTO実験グループを代表しての発表)
2. 発表標題 Recent Result on the Measurement of KL 0 at the J-PARC KOTO Experiment
3. 学会等名 「J-PARC Symposium 2019」国際会議 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 南條創 (大阪大学理学研究科-KOTO実験グループを代表しての発表)
2. 発表標題 Recent news from KL 0 and Perspectives KOTO
3. 学会等名 「Rencontres de Moriond Electroweak Interactions and Unified Theories (EW) 2019」国際会議 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 篠原智史 (京都大学理学研究科-KOTO実験グループを代表しての発表)
2. 発表標題 J-PARC KOTO実験 2016, 2017, 2018年物理ランにおける背景事象見積もりの研究
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小松原健
2. 発表標題 K中間子の稀な崩壊による中性で軽い新粒子の探索
3. 学会等名 日本物理学会2017年秋季大会 (宇都宮大学峰キャンパス(栃木県宇都宮市))
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>素粒子原子核研究所「2020年2月の活動報告 : KOTO実験グループ」  <a href="https://www2.kek.jp/ipns/ja/report/2020/02-2/">https://www2.kek.jp/ipns/ja/report/2020/02-2/</a>          素粒子原子核研究所「2019年5月の活動報告 : KOTO実験グループ」  <a href="https://www2.kek.jp/ipns/ja/report/2019/05-1/">https://www2.kek.jp/ipns/ja/report/2019/05-1/</a>          J-PARC News 第167号より「J-PARCハドロン実験施設の...」  <a href="http://j-parc.jp/ja/news/2019/news-j1903.html">http://j-parc.jp/ja/news/2019/news-j1903.html</a>          プレスリリース「J-PARCハドロン実験施設のKOTO実験が中性K中間子の稀な崩壊で...」  <a href="https://www2.kek.jp/ipns/ja/release/20190304/">https://www2.kek.jp/ipns/ja/release/20190304/</a>          [PRESS RELEASE] KOTO Experiment at ...  <a href="https://www2.kek.jp/ipns/en/release/20190304/">https://www2.kek.jp/ipns/en/release/20190304/</a>          素粒子原子核研究所「2018年9月の活動報告 : KOTO実験グループ」  <a href="https://www2.kek.jp/ipns/ja/report/2018/09-1/">https://www2.kek.jp/ipns/ja/report/2018/09-1/</a>          素粒子原子核研究所「中性K中間子の稀な崩壊で世界最高感度を10倍更新」  <a href="https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2018/07/koto/">https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2018/07/koto/</a>          素粒子原子核研究所「1月の活動報告 : KOTO実験グループ」  <a href="https://www2.kek.jp/ipns/ja/report/2018/01-1/">https://www2.kek.jp/ipns/ja/report/2018/01-1/</a>          素粒子原子核研究所「【特集】K中間子の稀な崩壊を探し、標準理論の限界に挑む」  <a href="https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2017/10/koto-intro/">https://www2.kek.jp/ipns/ja/post/2017/10/koto-intro/</a>          素粒子原子核研究所「4月の活動報告 : KOTO / Belle」  <a href="https://www2.kek.jp/ipns/ja/report/2017/04/">https://www2.kek.jp/ipns/ja/report/2017/04/</a>          J-PARCセンター「J-PARC紹介映像 (APS-TV)」  <a href="https://www.youtube.com/watch?v=6kXgS7ryqc&amp;index=26&amp;list=PLGv6BxyFHNURBIE9fPuE8VSBG9IIce-&amp;t=0s">https://www.youtube.com/watch?v=6kXgS7ryqc&amp;index=26&amp;list=PLGv6BxyFHNURBIE9fPuE8VSBG9IIce-&amp;t=0s</a></p>
---

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