

( 続紙 1 )

京都大学	博士 ( 理学 )	氏名	中桐 洸太
論文題目	Search for the Decay $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ at the J-PARC KOTO Experiment		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、大強度陽子加速器施設 (J-PARC) で行われているKOTO実験に於ける、長寿命中性K中間子 (<math>K_L</math>) の稀な崩壊、<math>K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}</math>崩壊の探索結果について報告している。</p> <p><math>K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}</math>崩壊は素粒子標準理論においてその崩壊分岐比が<math>3 \times 10^{-11}</math>と強く抑制されており、かつ精度よく計算されている。標準理論を超えた未知の物理現象が寄与するとその崩壊分岐比に相対的に大きな変化が生じ得て、未知の物理現象に対して感度の高い崩壊として知られている。この崩壊は現在未発見の崩壊であり、崩壊分岐比には上限値<math>2.6 \times 10^{-8}</math> (90%信頼度) の制限がつけられていた。</p> <p>KOTO実験ではJ-PARC加速器から供給される30 GeVの陽子ビームを金標的に当てて生じる<math>K_L</math>を用いる。標的に生じた<math>K_L</math>は20mの長さのビームラインで細いビームに成形され、KOTO検出器エリアまで導かれる。電磁石により荷電粒子は排除されるため、ビームは<math>K_L</math>、中性子、光子で構成される。<math>K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}</math>崩壊の同定には、<math>\pi^0</math>が崩壊して生じる2光子をカロリメータで検出し、さらに他に検出可能な粒子がないことを要求する。</p> <p>2013年に初めて物理解析用データを取得し、解析の結果、先行実験と同等の探索感度を達成し、また背景事象についての課題が明らかになった。最大の背景事象源は、ビーム外縁部の中性子がカロリメータに直接当たって、立て続けに2つのハドロンシャワーをカロリメータ内で起こし擬似信号を作る、“ハドロンクラスター背景事象”であった。</p> <p>2015年に再びデータを取得した。本論文での<math>K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}</math>崩壊探索はこのデータに基づいている。通常データに加え、ビーム中に中性子散乱源を挿入してハドロンクラスター背景事象を効率的に生成・収集したコントロールサンプルも取得した。このコントロールサンプルを用いて開発されたハドロンクラスター背景事象削減のための解析手法のパフォーマンスを評価した。</p> <p>解析を進めるうちに、カロリメータ付近の検出器に中性子が当たって<math>\eta</math>中間子を生成、<math>\eta \rightarrow 2\gamma</math>崩壊により生じる2光子がカロリメータに当たるような事象が背景事象として大きな寄与をもつことが判った。この背景事象に対し、独自の解析手法を開発して背景事象を削減することに成功した。</p> <p>定量的な評価のため、<math>K_L \rightarrow 2\pi^0</math>崩壊を用いて収集<math>K_L</math>数を測定し、またシミュレーションを用いての<math>K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}</math>シグナルアクセプタンスを見積もった。</p> <p>これらの解析を経て、<math>(1.30 \pm 0.01_{\text{stat}} \pm 0.14_{\text{sys}}) \times 10^{-9}</math>の実験感度を達成し、結果として<math>K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}</math>崩壊の崩壊分岐比に<math>3.0 \times 10^{-9}</math> (90%信頼度) の上限値を与えた。この結果は今までの上限値を約一桁更新したものである。</p> <p>最後に、KOTO実験での今後の探索に向けた、背景事象削減、探索感度向上のための方策についても論じている。</p>			

(続紙 2 )

(論文審査の結果の要旨)

物質を構成する素粒子とその間に働く相互作用は、標準模型と呼ばれる一群の法則に従うことがわかっている。しかし、標準模型にはパラメータが多数あるなど基礎法則として不完全な部分があり、また標準模型では説明のつかない現象も存在することがわかっている。例えば、我々の宇宙に物質が存在するためには、宇宙初期に粒子と反粒子の間の対称性(Charge-Parity, CP対称性)が破れていたことを意味するが、標準模型におけるCP対称性の破れでは不十分であることがわかっている。

本学位申請論文は、長寿命中性K中間子 ( $K_L$ ) の未発見の崩壊  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊を測定することで、標準理論を超えたCP対称性の破れを伴う未知の物理法則を探索することを目的としている。この崩壊は、標準理論の寄与が小さいため、未知の物理法則を探索する上では理想的な現象であるが、実験としては、中性の  $K_L$  粒子が崩壊後、すべて中性の粒子として放出、とくに検出不可能なニュートリノを伴うため、その同定は困難を極める。申請者が共同研究者として参加するKOTO実験では、 $\pi^0$  が崩壊して放出されるガンマ線 2 個のみをカロリメータで検出するのであるが、2013年に初データを取得して以降、さまざまな背景事象の混入に悩まされてきた。KOTO実験では背景事象を取り除くため、 $K_L$  が崩壊する領域の周囲を荷電粒子検出器で覆い、一つでも荷電粒子が検出されれば、その事象は背景事象として判断する。ビーム軸上には、大量の中性子、ガンマ線が飛んでいるため、偶発的に信号を落としてしまうことを避けるためには、中性粒子には不感な荷電粒子が必要となる。申請者は、MWPC(Multi Wire Proportional Chamber)による検出器を開発しビーム軸上に設置し、中性粒子には不感で、荷電粒子に対して高い検出効率を持たせることに成功した。これにより、KOTO実験は、信号取得効率を高めることに大幅に成功した。

2013年のデータでは  $K_L$  ビーム中に混入している中性子が、カロリメータで反応して  $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  と同じような信号を残すというものが最大の背景事象源であった。そのため、カロリメータの詳細な情報を用いたさまざま信号識別法が開発されてきたが、その定量的評価が難しく、長らく実験結果を確立するに至っていなかった。申請者は、それらの識別法の性能を、コントロールサンプルを用いることで定量的に評価することに成功した。さらに、コントロールサンプルで見られた起源が不明の背景事象が、カロリメータ付近の検出器に中性子が当たって  $\eta$  中間子を生成、 $\eta \rightarrow 2\gamma$  崩壊により生じる2光子がカロリメータに当たるような事象であることを突き止め、独自の解析手法を開発して背景事象を削減することに成功した。KOTO実験は、2018年に、2015年に取得したデータの結果を公表するに至ったが、上記のように申請者の果たした役割は本質的、中心的であると言える。結果は、約10年間破られなかった、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$  崩壊の上限値を約一桁更新するものであり、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$  崩壊索の一つマイルストーンを達成したものとして高く評価されるべきものである。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成31年1月18日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降