

(論文内容の要旨)

長寿命中性 K 中間子 (K_L) が中性 π^0 中間子とニュートリノ対 ($\nu\nu$) に崩壊する過程 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\nu$ は、ストレンジクォークからダウングォークへのフレーバーの変化を伴う中性カレント反応であり、この事象が発見されれば直接的 CP の破れの新たな証拠となる。またこの崩壊の振幅は、CP の破れの大きさを決める小林益川行列の複素パラメータに比例しており、崩壊の分岐比を測定する事によってこの複素パラメータを決定することができる。他の実験から定められたパラメータを使うと、分岐比の標準理論による予言値は、 $(2.49 \pm 0.39) \times 10^{-11}$ であるが、このうち理論から来る不定性は僅か 1 から 2 % 程度であり、分岐比を正確に測定することで、標準理論を精密に検証することができる。またこの崩壊は中間状態にループを含むため、標準理論を超えた新しい物理を発見する上で強力な手段と成り得る。

一方、実験の観点では観測できる粒子が π^0 より崩壊してできる二つの光子のみであり、また $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\nu$ 崩壊の分岐比が非常に小さいため、背景事象を排除するのが困難である。

申請者を含む実験グループ (E391a グループ) は、この崩壊を測定するために新たな実験手法を考案し、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) において、世界初の $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\nu$ 測定専用の実験となる E391a 実験を遂行した。このため、KEK の 12GeV 陽子加速器を用いて K_L を生成し、コリメータを用いて円錐角で 2 mrad という細いビームを実現した。これによって、二つの光子から再構成される π^0 に対し強い運動学的な制限をかけることが可能になった。また、ビーム領域を含む崩壊領域の周囲を完全に veto 検出器で覆う事で、 K_L 崩壊における主な背景事象源である $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 崩壊を、余分の光子を検出する事により排除することができた。この上で、実際に主な背景事象源となったのは、ビーム中や周辺に存在する多量の中性子が検出器を構成する物質と相互作用し、 π^0 や η 中間子を生成する事象であった。E391a 実験における 1 度目のデータ収集 (Run-I) では、崩壊領域の最下流に余分な物質が存在し、ここでビーム中心の中性子が反応して大量の背景事象が発生してしまった。その結果、信号アクセプタンスの大幅に減少に繋がった。E391a グループは、この問題を解決した上で、2 度目のデータ収集 (Run-II) を 2005 年の 2 月から 4 月まで行った。Run-II で得られたデータの解析において、中性子が崩壊領域上流の検出器と反応して π^0 を生成する事象や、崩壊領域下流の検出器で η を生成する事象について、その背景事象数を定量的に評価する手法を構築し、さらに背景事象を排除する新たな運動学的カットを開発した。これらの事により、信号アクセプタンスを保ったまま Run-I に比較して約 10 倍の S/N 比を達成した。また、これらの解析をブラインドアナリシスと呼ばれる手法で行い、実データに対して信号領域の事象を隠したまま全ての背景事象の予想値を計算した。最終的に、1 事象感度 $= (2.91 \pm 0.31) \times 10^{-8}$ 、背景事象 (BG) の予想値 $N(BG) = 0.42 \pm 0.14$ に対して、信号領域で事象は発見されず、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\nu$ の分岐比 (Br) に対する上限値は、90%信頼度において $Br < 6.7 \times 10^{-8}$ と求まった。これは E391a 実験に先行する実験結果からは 8.8 倍の改善となる。この結果は、稀崩壊モード $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\nu$ に対する新しい知見を与えると共に、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\nu$ 崩壊測定における新たな背景事象源を突き止め、本実験の方法論の本質を初めて詳細に検証し、信号事象発見への道筋を示したと言える。

(論文審査の結果の要旨)

申請者は、高エネルギー加速器研究機構(KEK)の13GeV陽子シンクロトロンを利用し、長寿命中性K中間子(K_L)が中性 π^0 中間子とニュートリノ対($\nu\nu$)に崩壊する過程 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\nu$ の分岐比を測定した。この過程を測定する意義は以下の通りである。まずこの過程は、ストレンジクォークからダウングォークへのフレーバーの変化を伴う中性カレント反応であり、この事象が発見されれば直接的CPの破れの新たな証拠となる。またこの崩壊の振幅は、CPの破れの大きさを決める小林益川行列の複素パラメータに比例しており、崩壊の分岐比を測定する事によってこの複素パラメータを決定することができる。他の実験から定められたパラメータを使うと、分岐比の標準理論による予言値は、 $(2.49 \pm 0.39) \times 10^{-11}$ であるが、このうち理論から来る不定性は僅か1から2%程度であり、分岐比を正確に測定することで、標準理論を精密に検証することができる。またこの崩壊は中間状態にループを含むため、標準理論を超えた新しい物理を発見する上で強力な手段と成り得る。

この過程は理論的には非常に魅力に富んだ過程であるが、その一方、実験の観点では観測できる粒子が π^0 より崩壊してできる二つの光子のみであり、また $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\nu$ 崩壊の分岐比が非常に小さいため、背景事象を排除するのが困難であることが予想される。

申請者らの実験グループは、この崩壊を測定するために新たな実験手法を考案し、世界初の $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\nu$ 測定専用の実験となるE391a実験を遂行した。E391a実験の特色は、 K_L 生成において2 mradという細いビームを実現したこと、これによって、二つの光子から再構成される π^0 に対し強い運動学的な制限をかけることが可能になったこと、ビーム領域を含む崩壊領域の周囲を完全にveto検出器で覆う事で、 K_L 崩壊における主な背景事象源である $K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$ 崩壊を、余分の光子を検出する事により排除することを可能にしたことなどにある。実際に主な背景事象源となったのは、ビーム中や周辺に存在する多量の中性子が検出器を構成する物質と相互作用し、 π^0 や η 中間子を生成する事象であった。申請者は中性子が崩壊領域上流の検出器と反応して π^0 を生成する事象や、崩壊領域下流の検出器で η を生成する事象について、その背景事象数を定量的に評価する手法を構築し、さらに背景事象を排除する新たな運動学的カットを開発した。また申請者は、これらの解析をブラインドアナリシスと呼ばれる手法で行い、実データに対して信号領域の事象を隠したまま全ての背景事象の予想値を計算した。最終的に、1事象感度 $= (2.91 \pm 0.31) \times 10^{-8}$ 、背景事象(BG)の予想値 $N(BG) = 0.42 \pm 0.14$ に対して、信号領域で事象は発見されず、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\nu$ の分岐比(Br)に対する上限値は、90%信頼度において $Br < 6.7 \times 10^{-8}$ と定めた。この結果は、申請者らの実験に先行する実験結果に比較し8.8倍の改善であり、世界で最も良い感度を達成することに成功している。この結果は、稀崩壊モード $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\nu$ に対する新しい知見を与えると共に、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu\nu$ 崩壊測定における新たな背景事象源を突き止め、本実験の方法論の本質を初めて詳細に検証し、信号事象発見への道筋を示したと言える。

以上により、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た。