

論文の内容の要旨

論文題目 An Experimental Study of the Rare Decay

$$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$$

($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊現象の実験的研究)

氏名 村松 憲仁

K^+ 中間子の稀崩壊現象 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ は、ストレンジクォーク (s) からダウングォーク (d) へフレーバーが変わる中性カレント反応であり、標準模型においては1次の電弱相互作用による崩壊が禁止される。2次の相互作用をもとに理論計算される崩壊幅は、トップクォーク (t) とダウングォーク (d) の混合を示すカビボ・小林・益川 (CKM) 行列要素 V_{td} に強く依存する。この崩壊の分岐比を実験的に測定することにより、いまだ精度良く測られていない V_{td} の大きさを求めることができる。特に $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊は、分岐比に対するチャームクォークの寄与が小さいだけでなく、始状態 (K^+ 中間子) における強い相互作用の寄与を $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ 崩壊の分岐比から得ることができ、精度の良い理論計算がなされている。標準理論による分岐比の範囲は、これまでの CKM 行列要素の測定結果を考慮することによって、 $(0.82 \pm 0.32) \times 10^{-10}$ と計算されており、実験値との比較で標準模型を越える理論を探索することができる。

ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の E787 実験は、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊現象を探索することを目的としている。Alternating Gradient Synchrotron (AGS) 加速器で 24GeV に加速した陽子をプラチナ標的に当てて K^+ 中間子ビームを作り、670-790MeV/c の K^+ 中間子を E787 スペクトロメータに導く。これらの K^+ 中間子は、ビームライン上の検出器で識別されたあと、スペクトロメータの中心にあるアクティブ・ターゲットで止まる。アクティブ・ターゲットは、シンチレーション・ファイバーの束で出来ており、 K^+ 中間子とその崩壊生成物の軌跡を測ることができる。 K^+ 崩壊によって生成された荷電粒子は、アクティブ・ターゲットの周りを覆うドリフト・チェンバーで運動量が測られ、さらにその周りを覆うプラスチック・シ

ンチレータの層(レンジ・スタック)で止まり、レンジと運動エネルギーが測定される。レンジ・スタックの信号は、500MHzのトランジエント・ディジタイザー(TD)で数 μsec のあいだ波形が記録され、 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ の崩壊連鎖を起こす荷電粒子を同定することによって、 π^+ の識別が行なわれる。全立体角は電磁カロリメータで覆われ、 K^+ 崩壊に伴う光子が検出される。

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊現象は、E787実験のPhase-I(1989-1991)で収集されたデータを解析した時点で見つかっていなかった。本論文では、E787実験で1995年から1997年までに収集されたデータ(3.2×10^{12} K^+ トリガー)を解析した。

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 稀崩壊現象の探索は、 K^+ 崩壊で生成された荷電粒子の運動量が、2体崩壊である $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ ($K_{\pi 2}$)と $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ ($K_{\mu 2}$)の運動量ピーク(それぞれ、205MeV/cと236MeV/c)の間となる領域で行なった。バックグラウンドとなるプロセスは、これら[1] $K_{\pi 2}$ 崩壊、[2] $K_{\mu 2}$ 崩壊($K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ を含む)と、ビーム中に π^+ が混入することに起因するプロセス(ビーム・バックグラウンド)である。ビーム・バックグラウンドには、[3]ビーム中の π^+ がアクティブ・ターゲットで反跳して、シグナル事象による π^+ に見えるシングルビーム・バックグラウンド、[4] K^+ がターゲットまで至って止まっている間、後から来た π^+ がターゲットで反跳してシグナル事象に見えるダブルビーム・バックグラウンド、[5]ターゲットにおいて K^+ が荷電交換反応を起こして K_L^0 が生成され、これがセミレプトニックに崩壊($K_{e 3}^0$, $K_{\mu 3}^0$)して生じた π^+ がシグナル事象の崩壊生成物に見える荷電交換バックグラウンドが含まれる。収集されたデータの中に標準模型で予想されるシグナル事象は1事象程度であるので、検出されたシグナル事象の信頼度を高めるためには、これらの5つのバックグラウンドをコントロールして、シグナル事象の数より十分低く抑えることが重要である。

バックグラウンドに対するオフライン・カットを決定し、それらのカットをデータにかけた時に残るバックグラウンドのレベルを評価するために、「バイフルケーション法」(二股分割法)を用いた。バイフルケーション法は、考えているバックグラウンド・プロセスに対して大きな除去率を持つ2つの独立したカットを用意し、それぞれのカットの除去率を別々に求めて、最後に掛け合わせるという方法である。それぞれのカットの除去率を求めるには、残ったもう一方のカットで「除くことができる」事象をサンプルとして集めた。この方法の利点は、サンプルを集める時点でシグナル事象が混ざることがなく、統計量の多いバックグラウンド事象を多く集められることである。

シングルビーム・バックグラウンドに対しては、ターゲットにおける

K^+ 信号と π^+ 信号の時間差が少なくとも 2nsec 以上であることを要求するカットと、ターゲットの直前にあるホドスコープに残されるエネルギー損失により π^+ が侵入してきた事象を除くカットを、バイフルケーション法の2つのカットとして選んだ。これにより評価されたシングルビーム・バックグラウンドの数は、1995-1997年のデータセットに対して0.005事象となった。また、ダブルビーム・バックグラウンドに対しては、ビームライン上流と下流において2粒子が検出された事象をそれぞれ除くカットが選択され、バックグラウンド・レベルは0.016事象と評価された。 $K_{\mu 2}$ バックグラウンドでは、荷電粒子の運動量、レンジ、運動エネルギーが $K_{\mu 2}$ または $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ に相当する事象を除くカットと、 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ 崩壊連鎖が見つからなかった事象を除くカットを用いて、バックグラウンド・レベルが0.028事象と評価された。 $K_{\pi 2}$ バックグラウンドにおいては、荷電粒子の運動量等が $K_{\pi 2}$ に相当する事象を除くカットと、荷電粒子の検出された時間に π^0 の崩壊生成物である光子が検出された事象を除くカットが用いられ、0.024事象のバックグラウンド・レベルが評価された。各バックグラウンドの評価は、シグナル領域に近いバックグラウンド事象の数と、その領域におけるバイフルケーション法による評価を比べることにより、点検された。最後に、荷電交換バックグラウンドは、モンテカルロ法で生成されたサンプルに、用意された全てのカットをかけることにより、バックグラウンド・レベルが0.010事象と評価された。以上により、用意された全てのカットを用いたときの全バックグラウンド・レベルは (0.083 ± 0.019) 事象と計算され、十分にバックグラウンドがコントロールされていることが確認された。

1995年から1997年に収集された全データに、用意された全てのカットをかけた結果、1事象が残った。この事象は、用意されたカットに対して相対アクセプタンスが33%、バックグラウンド・レベルが0.0065事象と評価される「黄金領域」に存在し、シグナル事象としての信頼度が高い。全てのトリガー条件、オフライン・カットのアクセプタンスは、モニター・トリガー・データから評価され、収集された K^+ トリガーの全数とかけ合わせることで、本解析での信号の感度が計算された。これを、シグナル事象が1事象観測された事実と合わせた結果、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比は、

$$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) = (1.52_{-1.26}^{+3.48}) \times 10^{-10}$$

と求められた(信頼率68%の信頼区間)。この分岐比は、誤差の範囲内で標準模型と一致した。分岐比より導かれる V_{td} の範囲は、

$$0.0024 < |V_{td}| < 0.038$$

であった。