

論文内容の要旨

論文題目 : Experimental Study of the Decay $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$

($K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ 崩壊の実験的研究)

氏名 : 吉岡 瑞樹

K^+ 中間子の稀崩壊現象である $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ の分岐比測定は低エネルギー QCD の有効場理論であるカイラル摂動理論を検証する上で重要である。 $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ 崩壊から来る π^+ の運動量分布は高次の補正の有無によりその終点 (227 MeV/c) 付近の分布を大きく変える。本研究は $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ 崩壊を終点付近で検出することを目的とし、カイラル摂動理論の高次効果の有無を明らかにしようとするものである。

$K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0; \pi^0 \rightarrow \gamma \gamma (K_{\pi 2})$ 崩壊は終状態が $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ 崩壊と同一であり、かつその分岐比は 21% と大きく、この崩壊に対して主要なバックグラウンドとなる。 $K_{\pi 2}$ の π^+ は単色運動量 (205 MeV/c) を持つため、これまでの先行実験は $K_{\pi 2}$ の運動量ピークにより探索領域を 2 つに分割した。ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の E787 実験は $K_{\pi 2}$ の運動量ピークより下の領域で $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ 崩壊を 31 事象観測した。 $K_{\pi 2}$ の運動量ピークより上の領域では未だ観測例がなく上限値のみが与えられている。これらの結果はカイラル摂動理論の高次の補正がない場合と矛盾しないものである。E787 実験の増強実験である E949 実験は $K_{\pi 2}$ の運動量ピークより上の領域で $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ 崩壊を観測することを目的とするトリガーを設置し、2002 年に 1.2×10^{12} K^+ トリガーのデータを収集した。このデータから、カイラル摂動理論の高次の補正が存在すれば事象観測が期待される。本論文ではこのデータの解析結果について報告する。

E949 実験は K^+ 中間子の崩壊を静止系で観測する。Alternating Gradient Synchrotron (AGS) 加速器で 22 GeV まで加速した陽子ビームを白金標的に当て、生成した 2 次粒子より高純度かつ 710 MeV/c の単色 K^+ ビームを選択し、E949 検出器まで導く。 K^+ ビームはビームライン上にある減速材を通った後、検出器の中心にあるターゲットで静止する。ターゲットは、プラスチック・

ファイバーの束で構成されており、時間・エネルギー情報より入射 K^+ 中間子とその崩壊生成物の識別を行い、 K^+ 中間子がターゲット中で静止したことを保証する。E949 検出器は荷電粒子の運動学的変数 (運動量・飛程・エネルギー) を冗長性に富んで測定することができ、バックグラウンドに対して高い棄却能力を持っている。 K^+ 中間子の崩壊によって生じた荷電粒子は、ターゲットを樽状に覆うドリフト・チェンバーにより運動量が測られ、その周りを覆う積層プラスチック・シンチレータ (レンジ・スタック) 中で静止し、飛程とエネルギーが測られる。レンジ・スタックでの波形は 500MHz トランジエント・ディジタイザーで記録され、 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ 崩壊連鎖を検出することにより、荷電粒子が π^+ であることを同定する。E949 検出器の全立体角は光子検出器で覆われている。レンジ・スタックを覆うパレル領域にあるサンプリング・カロリメーター (パレル・ベトー・ライナー、パレル・ベトー) で光子の再構成を行う。 $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ 崩壊の終点付近では運動学により 2 つの光子のなす角度が小さく、検出器の位置分解能により 1 つのクラスターとして再構成される (モンテカルロ・シミュレーションによるとこの割合はおよそ 50%)。本研究では再構成された光子が 1 つである事象も信号として同定し、アクセプタンスの向上を図った。その他の光子検出器は、他の K^+ 崩壊に伴う光子や偶発的なヒットが同時計測された事象を排除するために用いられる。

今回収集されたデータから期待される信号事象は少数統計であるため、バックグラウンドのメカニズムを理解し、バックグラウンド・レベルを信号事象の感度より十分低く抑えることが重要となる。本研究ではバックグラウンドをそのメカニズムにより分類し、「二股分割法 (Bifurcation Method)」によりバックグラウンド・レベルを評価した。この方法では、評価しようとしているバックグラウンドに対して高い排除効率を持つ独立した 2 つの選択条件を用意する。一方の選択条件により「排除されない」事象を集めることにより、高統計のバックグラウンド・サンプルを実データを用いて作ることができ、他方の排除効率を精度良く求めらることができる。探索領域におけるバックグラウンド・レベルは選択条件の独立性を仮定して、その掛け合わせにより推測することができる。この方法の利点は、実データを用いてバックグラウンド予測ができることにあり、これによりモンテカルロ・シミュレーション中では考慮されていない稀なバックグラウンド事象やデータ収集中のハードウェアの問題に起因するバックグラウンド事象を正しく見積もることができる。二股分割法において重要な点は、2 つの選択条件が独立であるという前提である。探索領域の外側でのバックグラウンドの分布は、二股分割法で用いた選択条件を緩めていくことにより特徴付けられる (バックグラウンド関数)。バックグラウンド関数の予測と探索領域の外側で実際に観測された事象数を比較することにより選択条件の独立性が確認される。

$K_{\pi 2}$ バックグラウンドを例にとると、 $K_{\pi 2}$ 崩壊の運動量・飛程・エネルギーは単色の値をとるため信号と区別する良い変数である。また、運動学により 2 つの光子のなす角度は $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ 崩壊と $K_{\pi 2}$ 崩壊では異なる。これらの選択条件を用い、二股分割法によりバックグラウンド・レベルは 0.017 ± 0.006 事象と算出された。荷電粒子の運動学的変数と光子に関する変数の各々についてバックグラウンド関数を作り、その独立性が確認された。

この他に、 $K_{\pi 2}$ 崩壊中の π^0 から来る低エネルギー光子が荷電粒子にオーバーラップする事象 (オーバーラッピング・フォトン・バックグラウンド)、光子を伴った μ^+ への崩壊事象 (ミュオン・バックグラウンド: $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$, $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu$) がバックグラウンドとなり得る。オーバーラッピング・フォトン・バックグラウンドに対しては、荷電粒子の運動学的変数とレンジ・スタック中での dE/dx が選択条件として用いられ、バックグラウンド・レベルは 0.065 ± 0.065 事象と算出された。ミュオン・バックグラウンドにおいては、荷電粒子の運動学的変数と、トランジエント・ディジタイザーの波形解析による変数が用いられ、バックグラウンド・レベルは 0.090 ± 0.020 事象

と算出された。 K^+ 中間子の崩壊によるバックグラウンドの他に、入射ビームに起因したバックグラウンドが考えられる; K^+ 中間子がターゲット中で静止する前に崩壊する事象(シングル・ビーム・バックグラウンド)や検出器中での K^+ 中間子の計測時間と崩壊生成物の計測時間が2つの入射粒子により別々に作られる事象(ダブル・ビーム・バックグラウンド)などが挙げられる。これらのバックグラウンドに対しては、ターゲットやビームライン中での計測時間情報が用いられ、シングル・ビーム・バックグラウンドに対しては 0.025 ± 0.014 事象、ダブル・ビーム・バックグラウンドに対しては上限値 $0.006(90\% \text{C.L.})$ 事象のバックグラウンド・レベルを得た。以上、5つのバックグラウンドに対して探索領域における全バックグラウンドの合計は 0.197 ± 0.070 事象と見積もられた。

全バックグラウンドが十分低く抑えられたことが確認された後、信号の探索が行われた。全選択条件をデータに課した後、探索領域に残った事象を信号と同定する。今回収集したより、探索領域に事象は観測されなかった(図1参照)。各選択条件のアクセプタンスはバックグラウンド予測と同様に実データを用いて求められ、モンテカルロ・シミュレーションはトリガーアクセプタンスなど他に手段が無いもののみ用いた。全選択条件のアクセプタンスは $1.550 \pm 0.034 \times 10^{-4}$ と算出された。 K^+ 中間子のターゲット中での静止効率は $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ トリガー中の $K_{\pi 2}$ 事象を用いて測定され、 0.7541 ± 0.0242 と算出された。以上の計算結果と探索領域の0事象の代わりに2.44事象を用いて、 π^+ の運動量領域 $213 \text{ MeV}/c$ 以上での $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ 崩壊分岐比に対する上限値

$$Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma, P_{\pi^+} > 213 \text{ MeV}/c) < 9.08 \times 10^{-9} (90\% \text{C.L.})$$

を得た。これはカイラル摂動理論の高次補正の予言値 6.10×10^{-9} と矛盾しない結果となった。

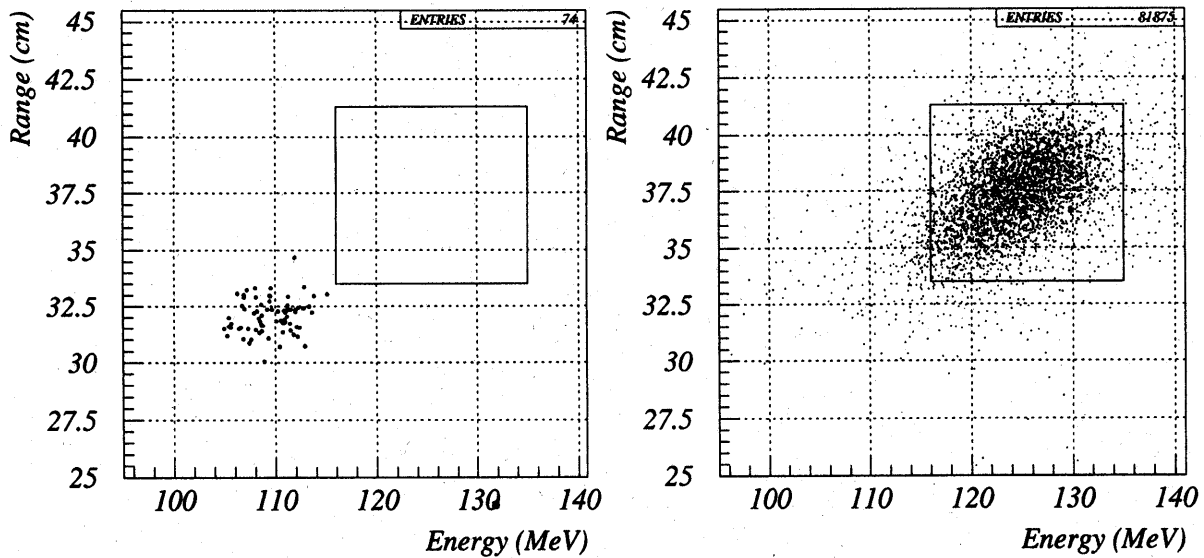


図1: (左) 全選択条件を課した後の荷電粒子の飛程・エネルギー分布。探索領域は図中の箱で示されている。エネルギー 110 MeV に固まっている事象は排除されずに生き残った $K_{\pi 2}$ 事象。(右) モンテカルロ・シミュレーションによる $K^+ \rightarrow \pi^+ \gamma \gamma$ 事象。