

論文内容の要旨

Measurement of the $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ Branching Ratio

($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊分岐比の測定)

関口 哲郎

稀崩壊 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ は、フレーバーを変える中性カレント反応によって起こり、中間状態にトップクォークが介在する 1 ループのファインマン図で表される。この崩壊は、トップクォークからダウンクォークへの遷移を含み、崩壊分岐比は Cabibbo-小林-益川 (CKM) 行列要素の $|V_{td}|$ によって表される。この崩壊では、長距離相互作用の寄与が小さい。ハドロンの遷移行列における不定性は、 $K^+ \rightarrow \pi^0 e^+ \nu$ 崩壊分岐比との比をとることにより相殺される。また、崩壊分岐比における理論的不定性は 7% と小さい。したがって、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊分岐比を精密に測定することは、 $|V_{td}|$ を精度良く測定する方法の一つである。標準理論では、 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊分岐比は $(0.78 \pm 0.12) \times 10^{-10}$ と予想される。実験的には、ブルックヘブン国立研究所 (BNL) にて行われた BNL-E787 実験において 2 事象の $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊が観測され、 $(1.57^{+1.75}_{-0.82}) \times 10^{-10}$ の崩壊分岐比が得られた。この結果は誤差の範囲で標準理論の予想値と一致している。BNL-E949 実験は、実験感度を高めて $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊分岐比を精密に測定することにより、標準理論の検証、さらには新しい物理の探索を行うことを目的としている。

E949 実験では、前実験である E787 実験の測定器および K^+ ビーム強度を増強し、より精度の良い測定を行うことを図った。E949 実験では、静止した K 中間子の崩壊を測定する。 $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊の測定は、静止した K^+ 崩壊から運動量 $211 < P < 229$ MeV/c を持つ π^+ を検出し、崩壊に同期したその他の粒子が検出されないことを要求する。 π^+ の識別は、運動量、運動エネルギー、飛程の測定と、 $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \rightarrow e^+$ の連続崩壊を観測することで行う。標準理論で予想される崩壊分岐比は 10^{-10} と小さいため、他の全ての K^+ 崩壊が雑音となりうる。その中でも $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$ ($K_{\pi 2}$) 崩壊、 $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ ($K_{\mu 2}$) 崩壊、 $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu \gamma$ ($K_{\mu \nu \gamma}$) 崩壊が主な雑音事象となる。また、ビームに混入した π^+ が散乱されて測定器で検出される事象も雑音事象となる。

大強度 K^+ ビームは、BNL の Alternating Gradient Synchrotron (AGS) 加速器により生成される。AGS

加速器で 5.4 秒間隔の加速周期あたり 65 兆個の陽子が 21.5 GeV/c の運動量に加速され、1 次ビームラインに取り出される。1 加速周期あたり 2.2 秒間陽子を取り出し、白金標的に照射する。白金標的に生成した 2 次粒子から 710 MeV/c の運動量を持つ K^+ を選別し、E949 測定器に入射する。E949 測定器では、ビームライン上に配置されたチェレンコフ検出器、ビームワイヤーチェンバー、dE/dx 測定器で K^+ の識別が行なわれる。BeO 等の減速剤中でエネルギーを失った K^+ は、E949 測定器中心部に位置するシンチレーションファイバーターゲットで静止崩壊する。1 加速周期あたり 3.9×10^6 の K^+ がターゲット中で崩壊する。崩壊から生じた π^+ は、1 T の磁場中で測定される。ターゲットを取り囲んで配置されたドリフトチェンバーで運動量が測定され、その外側に位置するプラスチックシンチレータの飛程測定器 (Range Stack, RS) 中で π^+ の運動エネルギーと飛程が測定される。Range Stack の外側に位置する鉛/プラスチックシンチレータのサンプリングカロリメータとエンドキャップ部に位置する CsI カロリメータが崩壊点を 4π の立体角で覆い、崩壊から生じる γ 線を検出する。

E949 実験は、2002 年に最初の物理測定を行ない、 1.8×10^{12} の K^+ 崩壊に相当するデータを収集した。収集したデータは、Blind Analysis により解析された。つまり、信号選別基準の決定および雑音事象数の評価が終わるまで信号領域を調べることなくデータ解析を行なった。各々の種類の雑音事象 ($K_{\pi 2}$ 、 $K_{\mu 2}$ 、etc) は、互いに相関のない二つの選別基準によって除去される。ある雑音事象を、二つの選別基準の一方を反転することにより選別し、もう一方の選別基準のその雑音事象に対する除去能力 (rejection) を測定する。信号領域に予想される雑音事象数の評価は、独立に測定された二つの rejection の積によって測定される。雑音事象数の評価をできるだけバイアスがなくなうために、選別基準の決定と雑音事象数の評価は、各々独立のデータサンプルを用いて行なった。選別基準を決定する際には、全データの 1/3 を周期的に抽出したサンプル (1/3 サンプル) を用いて行い、残りの 2/3 のサンプル (2/3 サンプル) を用いて雑音事象の評価を行なった。信号選別効率 (acceptance) と雑音事象数を選別基準の厳しさの関数 (function) で表すことにより、信号領域の中と外での予想される信号事象と雑音事象の分布を評価した。この function により、信号および雑音事象の分布を把握し、かつ選別基準の厳しさと雑音事象数の関係を理解できるので、信号領域を拡げることにより、E949 実験では、E787 実験より 30% acceptance が増加した。

$K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊分岐比の測定は、Likelihood Analysis により行なった。信号領域を小さな領域 (セル) に分割し、各セルごとに予想される信号事象数および雑音事象数を評価した。予想される信号事象数は、($K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊分岐比) \times (K^+ 崩壊の数) \times (セルごとの acceptance) で表される。各セルにおける acceptance および雑音事象数は、あらかじめ測定された function により評価した。信号領域を調べ、事象が観測されれば、各セルに観測される事象数が決まる。崩壊分岐比をパラメータとして扱い、観測された事象の信号領域内での配置に基づいて、Likelihood を最大とする値が崩壊分岐比の中心値として決定される。

1/3 サンプルを用いて信号選別基準を決定し、その選別基準を用いて 2/3 サンプルで雑音事象数を評価した結果、信号領域に混入する雑音事象数は 0.297 ± 0.024 事象 ($K_{\pi 2}$: 0.216 事象、 $K_{\mu 2}$ および $K_{\mu\nu\gamma}$: 0.068 事象、ビームに起因する雑音: 0.013 事象) と評価された。

収集した全データに全ての信号選別基準を課した結果、信号領域に 1 事象が観測された。この事象において、 π^+ は運動量 227.3 MeV/c、運動エネルギー 128.9 MeV、飛程 39.2 cm を持つ。この事象を基に崩壊分岐比の測定を行なった。全ての信号選別基準の acceptance は $0.22 \pm 0.01_{stat} \pm 0.02_{sys}$ % と評価され、E949 実験の感度として $(2.6 \pm 0.1_{stat} \pm 0.2_{sys}) \times 10^{-10}$ が得られた。観測された 1 事象に基づき、Likelihood Analysis により崩壊分岐比を計算すると、上限値として 8.76×10^{-10} (90% 信頼度 (CL)) が得られた。E949 実験の結果と E787 実験で得られた結果を合わせると、 $(1.47^{+1.60}_{-0.93}) \times 10^{-10}$ (68% CL) の崩壊分岐比が得られた。この崩壊分岐比の中心値は標準理論の予想値の 2 倍となっているが、誤差の範囲内で一致している。E949 実験で観測された 1 事象の信号対雑音比は、0.9 であった。

E949 実験で得られた $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊分岐比から CKM 行列要素 $|V_{td}|$ に制約を与えると、 $0.002 < |V_{td}| < 0.032$ (90% CL) となり、他の実験結果を統合して得られた範囲 $0.005 < |V_{td}| < 0.014$ (90% CL) と一致する結果が得られた。