

【論文博士用】

学 位 審 査 報 告 書

(ふりがな) 氏 名	ふじわら つねひろ 藤原 庸博
学位（専攻分野）	博 士 （ 理 学 ）
学 位 記 番 号	論 理 博 第 号
学位授与の日付	平成 年 月 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項 該 当
(学位論文題目) Experimental Study of the $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ Decay (荷電 K 中間子の放射 $K_\mu 3$ 崩壊の実験的研究)	
論 文 調 査 委 員	(主査) 中家 剛 教授 谷森 達 教授 永江 知文 教授

理 学 研 究 科

京都大学	博士（理学）	氏名	藤原 庸博
論文題目	Experimental Study of the $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ Decay		
(論文内容の要旨)			
本論文は、電荷を持つ K 中間子 (K^+) の中性パイ中間子 (π^0)、ミュー粒子 (μ^+)、ミューニュートリノ (ν_μ) ガンマ線 (γ) への四体崩壊という素粒子反応過程を、米国ブルックヘブン国立研究所 (BNL) の E787 実験の測定装置を用いて実験的に研究したものである。 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ 崩壊は“ガンマ線放出をともなうセミレプトニック崩壊”と呼ばれる過程の一種である。素粒子標準模型で強い相互作用を記述する量子色力学では、K 中間子からパイ中間子への遷移をともなう低エネルギー反応を直接計算することができない。近年“カイラル摂動理論”と呼ばれる有効場理論が開発されたことで、理論的な予言が可能になった。本論文では、崩壊分岐比を測定することでこの理論の検証を行うことを目指した。 BNL の E787 実験は、K^+ が電荷を持つパイ中間子 (π^+) と二つのニュートリノへ崩壊する稀な過程の検出を目的とするものである。大強度の K^+ ビームを生成し、K^+ を測定器の中心で静止させ、崩壊で生じた π^+ や μ^+ の運動量、運動エネルギー、レンジを磁気スペクトロメータと積層プラスチックシンチレータで測定し、崩壊で生じた γ のエネルギーをその外側に位置し全立体角を覆うガンマ線検出器で測定することができる。$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ 崩壊では、低い運動量をもつ μ^+ と、$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊にともなう計三つの γ が終状態として測定され、ニュートリノは検出されずにエネルギー欠損として測定される。本研究では、μ^+ 測定には内側の六層のプラスチックシンチレータを、γ 測定には測定器のバレル部分のガンマ線検出器を用いることとし、$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ 崩壊のための特別なトリガーを E787 測定装置に設置して 1998 年にデータの収集を行った。 オフライン解析では、測定器で記録された荷電粒子のトラックと電磁シャワーを再構成して μ^+ と γ の運動学的情報を求めた。次に、Kinematic fit と呼ばれる手法を用い、これらの粒子は K^+ が運動量・エネルギー保存則を満たして四体崩壊することにより生じ、かつ二つの γ については $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊から生じているということを要求して、測定の分解能を向上させた。Kinematic fit を行うための測定器キャリブレーションを詳細に行うとともに、モンテカルロシミュレーションで測定器の性能が再現できるようにした。更に、荷電粒子のトラックと電磁シャワーがトリガー段階での条件を満たして正しく再構成された事、それらが μ^+ と γ であると同定できること、運動力学的要請をかけたフィットの結果は $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ 崩壊という仮定と矛盾しないこと、などを要求するイベントの識別条件を課した。 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ 崩壊の候補として信号領域に 40 イベントが得られ、バックグラウンドよりも有意に多く、運動学的変数の分布も一致することから、この崩壊を観測することができたと結論した。系統誤差の検討の後、測定された崩壊分岐比は $(1.58 \pm 0.46(\text{stat.}) \pm 0.08(\text{syst.})) \times 10^{-5}$ (γ のエネルギーが 30MeV 以上、μ^+ と γ の間の角度が 20 度以上の範囲) であった。この結果は、カイラル摂動理論の予想値 2.0×10^{-5} と統計誤差の範囲で一致し、$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ 崩壊に関する過去の実験（ロシアで行われた ISTR+実験、日本の E470 実験）の結果とも矛盾していない。 なお、本研究の内容は、E787 実験コラボレーションによる次の原著論文として平成 22 年 5 月に出版されている：S.Adler et al. (E787 Collaboration), Measurement of the $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ branching ratio, Physical Review D81, 092001(2010) [10 pages]。			

(論文審査の結果の要旨)

本論文の研究は、 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ 崩壊の分岐比を、過去の実験よりも優れた精度と信号-バックグラウンド比によって測定したものである。E787 測定器が静止 K^+ 崩壊の検出に対して比類無い性能を持つこと、特に密閉型の測定器で崩壊点を覆う事で荷電粒子のトラックと電磁シャワーを大立体角で検出できることに着目して、 K^+ の多体崩壊の実験的研究を実施し、崩壊事象を高い信頼度で測定することができた。本研究によりこの崩壊が、標準模型の予想する分岐比と同程度で起きていることが実験的に確立された。

$K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ 崩壊によるカイラル摂動理論の検証という観点では、崩壊分岐比に対して 8%程度の寄与があるとされる”ガンマ線の Structure Dependent 放出”の大きさを測定し、カイラル摂動理論の高次効果の有無を確かめることが期待される。また、終状態の π^0 、 μ^+ 、 γ の運動量ベクトルの三重積の非対称性を測定することで時間対称性の破れを検証し、標準模型を超える新しい物理を探索することが提案されている。本論文の研究や過去の実験で得られた $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ 崩壊の統計量は十分ではない。将来の $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ 崩壊実験では、統計精度を向上させてこれらの研究に発展することが望まれる。

本論文は、静止 K^+ 崩壊を用いて E787 実験と同じ手法で測定を行うためには今後どのような改善が必要かも議論している。1998 年のデータ収集の後に解析を進める中で明らかになったこととして、低い運動量の μ^+ に対するトリガー条件として積層プラスチックシンチレータ中のレンジを用いているが、高い運動量を持った π^+ がシンチレータ中で反応を起こしてあたかもそこで止まったかに見える事象が多く残る事、 γ に対するトリガー条件としてバレル部分のガンマ線検出器のみで三つの電磁シャワーを要求しているが、それでは信号のアクセプタンスが限られる事、などがある。また、E787 測定器のガンマ線検出器は γ のエネルギーや位置の測定 (calorimetry) よりも γ を終状態に持つ事象の除去 (veto) に重点を置いて設計されているが、エネルギー分解能が向上すれば $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ 崩壊の解析が容易になること、崩壊のアクセプタンスをより良い精度で測定しモニターするには、 $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ 崩壊のためのトリガーだけでなくアクセプタンスのスタディのためのトリガーで同時にデータ収集を行う必要があることも論文中で指摘している。

特に藤原氏は、この研究のためのトリガーの設計、測定器キャリブレーション、解析手法の確立、バックグラウンドの評価と、共同実験ながら $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ 崩壊の研究は藤原氏自身の主要な業績である。また、信号中に混入するバックグラウンドの評価は、同じトリガーで収集したデータを用いてバックグラウンドレベルを推定する “bufircation” と呼ばれる解析手法 (2つの解析パスから独立に確認する手法) やモンテカルロシミュレーションにより詳細な分析を行っており、藤原氏のこの研究の特筆すべき成果である。また、博士論文は、K 中間子の稀崩壊の物理、BNL E787 実験の詳細な説明、モンテカルロシミュレーション、トリガーの設計、測定装置の較正、イベントの識別、バックグラウンドの評価、そして物理解析と将来への展望が詳細に説明されており、本人の理解の深さが読み取れる。本論文は $K^+ \rightarrow \pi^0 \mu^+ \nu_\mu \gamma$ 崩壊の実験的研究について、世界最高の精度で測定され、更に測定結果について十分な考察がなされていると判断できる。

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 23 年 1 月 19 日論文内容とそれに関連した口頭試問を行った。その結果合格と認めた。

要旨公開可能日： 年 月 日以降

【論文博士用】

学識確認のための試問の結果

氏 名 藤原 庸博			
(試問の科目・方法・判定)			
(科 目)	(方 法)	(判 定)	(備 考)
<u>専 攻 学 術</u>			
素粒子物理学	口頭	合格	
(試問の結果の要旨)			
上記のとおり、専攻学術に関する試問の結果、本学大学院博士後期課程を修了した者と同等以上の学力を有することを確認した。			
試問担当者氏名			
氏 名 中家 剛		氏 名 谷森 達	
氏 名 永江 知文		氏 名 畑 浩之	
氏 名 市川 温子			