

論文審査の結果の要旨

氏名 モラ グリマルド ジョニー アレハンドロ

本論文は7章からなる。研究目的は高エネルギー加速器研究機構において稼働中の SuperKEKB 加速器及び Belle II 検出器で取得された電子・陽電子衝突実験データ(積分輝度 11.5 fb^{-1})を用い、B 中間子系でのクォークフレーバー変換を伴う中性カレント崩壊現象 $B \rightarrow K l^+ l^-$ を4つのモードで測定することである。第1章、第2章で、本研究の独自性の簡潔なまとめ、素粒子標準模型についての概略、理論計算の概略、解析戦略が示される。B 中間子データを用い $B \rightarrow K e^+ e^-$ と $B \rightarrow K \mu^+ \mu^-$ の崩壊分岐比を測定し、その比を取ることで系統誤差を相殺し、高精度で標準模型予言値との比較が可能になる。特に Lepton Flavor Universality (LFU) を破る性質を持つ新物理の探索において有効で、かつ過去の実験結果では 2.5 標準偏差で標準模型予想値からの逸脱が示唆されており、高統計データを用いたさらなる追試が重要である。これらの事実に基づき Belle II 実験における高精度での崩壊分岐比測定的重要性を指摘し、本研究の動機が明確に示されている。

第3章では、本研究で用いた実験データを取得した加速器、検出器、DAQ・トリガー及びデータ解析ソフトウェアが解説される。第4章では、終状態粒子の再構成・粒子識別方法と、信号の事象選別手法の研究が述べられる。特に本研究では、電子の再構成において、制動放射に伴う光子が持ち去る運動量を回復させるための新しい補正手法を開発した。ビームパイプや検出器センサー層での制動放射に対し、電磁カロリメータ上での光子検出点と飛跡の位置関係をシミュレーションにより明らかにし、制動放射に由来する光子の発見効率を従来の手法よりも大幅に改善し補正の精度を高めた。これは本研究においてダイレプトン共鳴を伴う背景事象を効率よく排除するために重要な研究成果である。また、背景事象削減のための事象選別の最適化研究として多変量解析手法を開発した。事象選別では機械学習の一種である BDT を用い、高い信号効率を維持しつつ、特に $ee \rightarrow qq$ 背景事象を 1/50 まで削減することを達成した。また機械学習手法の最適化により最終分離変数である Beam Constrained Mass (m_{bc}) に対するバイアスを最小限に抑えた。

第5章では、終状態粒子再構成効率、粒子識別効率、多変量解析による効率について実験データを用いた性能測定を行い、Belle II 検出器実機の性能測定に基づく $B \rightarrow K e^+ e^-$ と $B \rightarrow K \mu^+ \mu^-$ 信号検出効率を算出した。Belle II の最初期の物理データ解析であり、実機の性能評価を再構成効率、粒子識別効率の詳細な研究は学術的価値が高い。

第6章では、積分輝度 11.5 fb^{-1} の電子陽電子衝突実験データを用いた統計解析による信号抽出と崩壊分岐比測定について、手法と結果の考察を議論する。最終分離変数である m_{bc} スペクトラムの統計解析により信号数と背景事象数を決定する。フィットに用いるテンプレートは実験データやシミュレーションを用いて決定した。有意な信号事象数の検出には至らず崩壊分岐比の上限値を算出し、4つの崩壊モードに対して、90%信頼度で 1-4

$\times 10^{-6}$ の上限を得た(モードにより異なる)。これらは、過去の実験による測定値及び標準模型に基づく崩壊分岐比期待値に一致する結果であった。

第7章では、本研究によって最適化された手法に基づき、将来の測定感度の推定を積分輝度の関数として行った。統計誤差、系統誤差を考慮し、また将来の高輝度実験環境に対する信号検出効率依存性や、バックグラウンドレートの変動可能性についても考察を示した上で、将来の測定感度を推定した。過去の実験が示す標準模型予想値からの逸脱が真だった場合、 35 ab^{-1} の統計量により LFU の破れの現象を 5 標準偏差の有意度で発見可能であることを示した。更に将来のデータ解析において改善が必要な点を指摘した。

本研究によって、Belle II 実験における $B \rightarrow K l^+ l^-$ 崩壊分岐比測定手法が詳細に渡り研究された。信号選別効率、背景事象除レートの実機性能に基づく理解、解析の最適化が達成された。特に制動放射に対する電子のエネルギー補正や手法や機械学習を用いた背景事象削減は論文提出者による独創的な成果である。 11.5 fb^{-1} の衝突実験データを用いて崩壊分岐比の上限値を算出し、従来の測定結果及び標準模型に基づく期待値と無矛盾の結果であることを示した。また本研究に基づき、詳細な感度外挿の研究により LFU の破れの発見が期待される積分輝度が推定された。素粒子物理学における最も重要な測定の一つであり学術的な価値は高い。

なお本論文の研究は Belle II 実験で取得したデータを用い、Belle II 実験コラボレーション内での共同研究であるが、本論文のデータ解析は論文提出者が主体となって行い結果を示したものであり、寄与は十分であると判断される。

以上のことから、論文提出者は博士(理学)の学位を与えるにふさわしい学識を持つものと認められ、審査委員全員で合格と判定した。