

新しいレプトン対称性の破れの探求

Search for new symmetry violation in leptons

課題番号：18H05226

飯嶋 徹 (IIJIMA, TORU)

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究所・教授



研究の概要（4行以内）

スーパーBファクトリー実験とミュオン異常磁気能率測定実験における、3種類の荷電レプトン（電子、ミュオン、タウ）が関与する素粒子現象の精密・高感度測定により、新しい対称性の破れの探索を進め、標準理論を超える新しい物理の発見を目指す。そのために独自の最先端実験技術確立と将来に向けた改良、大量のデータ解析技術や新しい解析手法の開発に取り組む。

研究分野：素粒子物理学（実験）

キーワード：素粒子実験、レプトン、加速器、粒子測定技術

1. 研究開始当初の背景

Bファクトリー実験における小林-益川理論の検証やLHC実験でのヒッグス粒子の発見がなされてなお、力の統一や、宇宙の物質優勢、暗黒物質の正体などの謎が残されており、その解明に向けて、標準理論を超える新しい物理の発見が重要となっている。その探求には、粒子の世代（フレーバー）に着目した対称性や保存則の破れが重要な役割を担うと考えられ、これまでにクォークやニュートリノにおけるフレーバー保存則の破れの研究が進んできた。一方、申請者たちは、第3世代の荷電レプトンであるタウレプトンに注目した独自の研究を進め、B中間子の弱崩壊ではタウレプトンへの崩壊 ($B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$) が電子やミュオンへの崩壊 ($B \rightarrow D^{(*)} e \nu$, $D^{(*)} \mu \nu$) よりも起きやすい“レプトン普遍性の破れ”の兆候を捉えている。また、B中間子の稀な崩壊 ($B \rightarrow K^{(*)} e^+ e^-$, $K^{(*)} \mu^+ \mu^-$) や、ミュオンの異常磁気能率の測定結果においても標準理論からの乖離が報告されている。

2. 研究の目的

この状況をふまえ、本研究では、国内で進む実験プロジェクト（SuperKEKB/Belle II実験とJ-PARC E34実験）において、3種類の荷電レプトン（電子、ミュオン、タウ）が関与する素粒子現象の精密・高感度測定により、新しい対称性の破れの探索を進め、標準理論を超える新しい物理の発見を目指している。これまでの研究で申請者が独自に進めて

きた実績ある研究を、Belle II実験で発展・展開し、B中間子のタウオンニック崩壊におけるレプトン普遍性の破れ、稀崩壊 ($B \rightarrow K^{(*)} 1^+ 1^-$ 崩壊等) におけるレプトン普遍性の破れ、タウレプトン崩壊におけるレプトン対称性の破れを探索し、そのために必要となる検出器の性能改良、ビッグデータ解析技術の開発を進める。さらに、標準理論からのずれが報告されているミュオン異常磁気能率 ($g-2$) に関して、Belle II実験における電子-陽電子衝突断面積の精密測定からハドロン量子ループの寄与を測定することや、Belle IIに向けて開発してきた実験技術の応用によって $g-2$ 実験の性能向上を図るなど、実験プロジェクトを横断した、より包括的な研究展開を進める。新物理が発見された場合には、荷電レプトンに関する新しい研究領域が拓かれると期待される。

3. 研究の方法

Belle II実験では、2018年度末から物理データ取得を開始、研究期間前半では、申請者達が独自に開発し製作を行ってきた新型粒子識別装置（「TOPカウンター」と「エアロジェルRICH検出器」）の較正、性能検証を進めるとともに、ビーム由来のバックグラウンドの理解等を進める。また、GRID計算機網を利用したデータ解析技術、機械学習を使った新しいデータ解析手法の開発等を進める。加速器の衝突性能をあげながら、研究期間終了までに 10ab^{-1} 以上のデータ蓄積を進め、上記

の物理データ解析結果の獲得を目指す。また、これと並行して、粒子識別装置の改良に関する開発研究も進める。

J-PARC E34 実験については、g-2 の精密測定に重要となる超冷ミューオンビームの生成に関して、Belle II 実験で培った実験技術を活用し、高時間分解能ミューオンビームモニターやシリカエアロジェルを使ったミューオニウム生成標的の開発を進め、期間終了後の E34 実験実現につなげる計画である。

4. これまでの成果

Belle II 実験については、予定通りに、2018 年に予備衝突実験を行い、電子・陽電子ビームの初衝突観測に成功、2019 年からは全種類の検出器を装備して本格的な衝突データ収集を開始し、2019 年末までに 10 fb^{-1} のデータを収集した。この間に、TOP カウンターとエアロジェル RICH 検出器の運転、校正を進め、衝突データを用いて検出器性能の確認を行うとともに、今後のデータ解析で重要となる粒子識別性能や光子エネルギー分解能などの実験の基礎性能評価を進めた。また、B 中間子崩壊やタウ崩壊のデータ解析に向けて、シミュレーションによる解析条件の最適化とともに、初期衝突データを用いてビームバックグラウンドの影響などの理解を深めている。また、電子-陽電子衝突断面積の精密測定についても始状態輻射を伴う $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ 、 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\gamma$ 過程について、初期データの解析が進んだ。データ解析技術の開発については、GRID データ解析のジョブ監視システムの開発とともに、機械学習を使った粒子識別アルゴリズムの開発を行い、従来の手法よりもよい識別性能を得ている。また、新潟大学にデータ解析計算機を増強し、物理データ解析に向けたシミュレーションデータ生成を行える環境を構築した。

一方、J-PARC E34 実験にむけては、レーザー加工したシリカエアロジェルを用いたミューオニウム生成の定量的理解が進み、MCP を使った高時間分解能ミューオンビームモニターを開発して、RF 加速したミューオンビームバンチの測定に成功した。

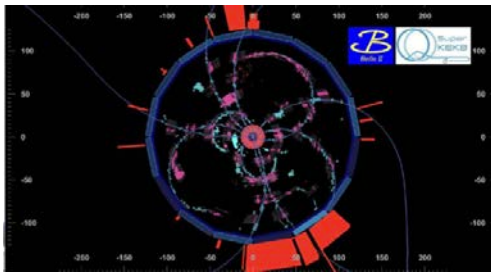


図 1 : 2019 年 3 月に本格的データ収集を開始した Belle II 実験で観測した B 中間子生成事象

5. 今後の計画

SuperKEKB/Belle II 実験においては、可能な限りデータ蓄積を行い物理成果の獲得を進める。B 中間子崩壊におけるレプトン普遍性の破れの研究においては、2022 年には $B \rightarrow D^* \tau \nu$ 崩壊の角度分布や q^2 分布を測定し、レプトン普遍性の破れを引き起こす新物理によって崩壊分岐比やそれらの分布の形が標準理論の予想からずれるかどうかを検証する。タウ崩壊データ解析においては、レプトンフレーバーを破るタウ崩壊や CP 対称性の破れの探索を世界最高感度で行う。電子-陽電子衝突断面積の精密測定については、2021 年までに $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\gamma$ 過程、その後さらに系統誤差の最小化を図り、 $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$ 過程の結果導出を進める。

一方、J-PARC ミューオン g-2/EDM 実験の技術開発では、現在準備中の RFQ と IH-DTL 試作機でミューオンを 0.34 MeV から 1 MeV まで段階的に加速する試験を行い、低エミッタンスミューオンビームを生成する技術基盤を確立し、g-2/EDM の精密測定に備える。

国内外の研究者を招聘して研究会を開催し、実験データの理論的解釈等についての議論を深めてゆく。

6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

1. “Development of a bunch-width monitor for low-intensity muon beam below a few MeV”, Y. Sue, M. Yotsuzuka, T. Iijima, T. Mibe, M. Otani et al., Phys. Rev. AB, 23, 022804, pp.1-7 (2020).
2. “Operational status of the Belle II Time-Of-Propagation counter readout and data acquisition system”, Y. Maeda, T. Iijima et al., Nucl. Instr. and Meth. A952 (2020) 162049
3. “Performance and commissioning of HAPDs in the Aerogel RICH counter”, Masanobu Yonenaga, Toru Iijima, Hidekazu Kakuno et al., Nucl. Instr. and Meth. A952 (2020) 162264,
4. “A new approach for measuring the muon anomalous magnetic moment and electric dipole moment”, M. Abe, K. Hayasaka, T. Iijima, T. Mibe et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2019, 053C02.
5. 「SuperKEKB/Belle II 実験の物理」、飯嶋徹、日本加速器学会誌、15 巻、ページ 221-228、2018 年。

7. ホームページ等

<http://wru.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/>