

1 Belle II の運転状況

Belle II 実験は、電子陽電子衝突型の SuperKEKB 加速器で作り出す大統計の B 中間子、 D 中間子、 τ レプトンなどの崩壊を精密に測定し、素粒子標準理論を超える新しい物理法則を発見することを目指している。SuperKEKB 加速器のルミノシティ増強が本実験成功の鍵であり、2020年6月に世界最高のピークルミノシティを達成して以降、設計ルミノシティの実現に向けた未到の領域での挑戦を、加速器と Belle II 測定器の双方で続けている。ルミノシティ増強のためには、加速器の性能をよく理解し、ルミノシティを制限する要因を一つずつ解決すること、また、安定な運転を維持しながらビーム電流を上げていくことが重要である。Belle II 測定器においては、ビーム電流に伴って増加するビーム由来のバックグラウンドに対処し、高い効率で安定にデータを収集することが重要である。

2021年後半の SuperKEKB 加速器の運転は、10月19日から12月23日まで行われた。ビーム電流を安全に上げるためのプロトコルを設定し、それに基づいて徐々に電流を上げ、12月末までに陽電子ビームの電流 1 A 以上を目指すこととした。しかしながら、陽電子ビームの入射キッカー電磁石が頻繁に誤発動し、最初の約3週間はビーム電流を上げることができなかった。また、誤発動により蓄積ビームの軌道がそれてビームコリメータを損傷し、ビーム由来のバックグラウンドが増加してしまった。11月10日からの19日間、ボトムフォークを含む新複合粒子の研究のため 10.657, 10.706, 10.751, 10.810 GeV の衝突エネルギーで合計 19.3 fb^{-1} のデータを取得した。その後は、Belle II 測定器や他のコリメータを損傷することなく、順調にビーム電流を上げ、12月18日に陽電子ビーム 1020 mA、電子ビーム 800 mA に到達し、12月23日に、ピークルミノシティ $3.81 \times 10^{34} / \text{cm}^2/\text{s}$ を達成した。なお、2021年夏のシャットダウン期間中に、蓄積ビーム由来のバックグラウンドを削減するために陽電子リングのコリメータの1つを約3 m 上流へ移動したが、SVD より外側の検出器については期待通り削減できていることが確認できた。

2020年6月ごろから約1年半の間、衝突エネルギーが $\Upsilon(4S)$ の生成断面積が最大となるエネルギーから約4 MeV ずれていたことがわかった。このため、 B 中間子対の生成数が6%程度下がってしまっていた。従来のハドロンと Bhabha 散乱の事象数比のモニターに加え、ミュオン対を用いた衝突エネルギーのモニターを整備して、今後エネルギーがずれたときは直ちに修正できるようにした。

2022年の SuperKEKB 加速器の運転は、2月21日から始まった。陽電子ビーム入射キッカー電磁石誤発動の再発、原因不明の大きなビームロスによるコリメータの損傷、不安定な入射ビーム等の問題が起こったものの、5月17日に陽電子ビーム 1150 mA、電子ビーム 920 mA、**ピークルミノシティ $4.14 \times 10^{34} / \text{cm}^2/\text{s}$ を更新し**

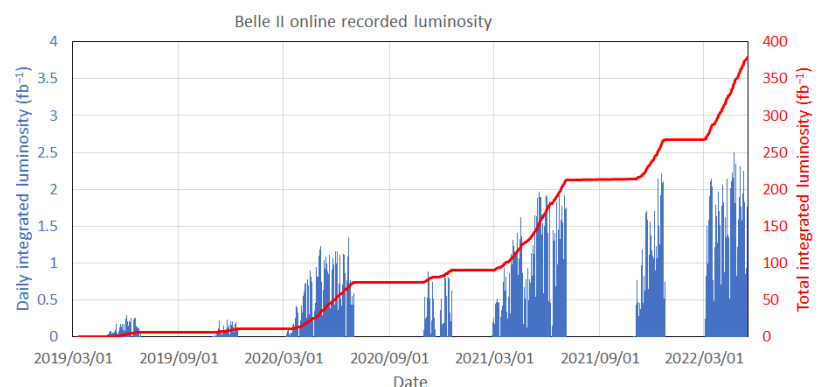


図 1: Belle II 実験で蓄積した1日毎の積分ルミノシティ(青棒グラフ)と総積分ルミノシティ(赤線)。

た。2022年5月17日時点での総積分ルミノシティは 380 fb^{-1} になった。図1に Belle II 実験で蓄積した積分ルミノシティの推移を示す。

将来の高いルミノシティとビーム由来のバックグラウンドによる高レートでのデータ処理を見据えて、後段読み出しエレクトロニクスを、旧式化してきた COPPER を用いたものから、新しく PCIe40 を用いたものに順次入れ替え、データ収集性能を改善する計画を進めている。2021年夏のシャットダウン期間中に7つのサブ検出器のうち TOP と KLM の2つに関して COPPER を PCIe40 に更新した。初期トラブルにより一時期 TOP の PCIe40 を COPPER に戻したが、その後問題を解決して再び PCIe40 でデータ収集を続けた。2022年冬のシャットダウン期間中に ARICH も PCIe40 に更新し、このときは TOP と KLM の経験を活かし、問題なく移行することができた。

ルミノシティとともに増大する中性子バックグラウンドによって、検出器前段回路内の FPGA でソフトエラーが起り、頻繁にデータ収集が中断させられるものの、エラーの診断や復帰の自動化等をさらに進めたことで、データ収集効率を目標の90%近くまで改善できた。長引くコロナ禍でも、リモート参加の運転体制と現場で運転に携わる人々の多大な努力により、なんとか滞りなく実験を遂行することができた。

2 Belle II データ解析の状況

Belle II 実験では、データ蓄積が進むにつれ、これまでの Belle 実験の結果の追認だけでなく、総データ量ではまだまだ Belle 実験での結果にかなわないものの、新しくなった Belle II 検出器の特長や新規開発の手法を活かしたさまざまな物理解析を進めている。また、Belle のデータと組み合わせることにより統計的に Belle での結果を改善することができるだけのデータ量が蓄積されはじめてきた。

今回初めて、Belle の 711 fb^{-1} のデータに Belle II で収集された 128 fb^{-1} のデータを加えた統合的解析を行った。対象はユニタリティ角 ϕ_3 を測定するもので、荷電 B 中間子が中性 D 中間子と荷電 K 中間子に崩壊し、さらに D 中間子が K_S^0 、 π^+ 、 π^- の3つの中間子に崩壊(3体崩壊)する事象を使用する。ユニタリティ角は、小林益川理論におけるクォーク間遷移を表すユニタリティ行列(小林益川行列)を三角形として視覚化したもので、三角形の大きさが物質・反物質対称性(CP対称性)の破れを表わし、 ϕ_3 はその三角形の角度のひとつである。この崩壊過程はCP対称性を破る崩壊であり、 B^+ 中間子とその反粒子である B^- 中間子との間のダリツ分布と呼ばれる3体崩壊の分布の違いから図2のように角度 ϕ_3 を求めることができる。

Belle 実験の 711 fb^{-1} の最終データを用いた同じ手法での解析では、 ϕ_3 の角度は $77.3 \pm 16.1^\circ$ と求まっていた。今回の統合解析では、データ量としての追加分はわずか18%であったが、解析ソフトウェアの大幅な改良により、誤差としては約3割の削減に成功し、 $78.4 \pm 11.5^\circ$ という結果を得ることができた(資料1)。Belle II 実験では、最終的には他の崩壊過程での解析結果も合わせて 1.6° の精度で ϕ_3 の測定を行うことを目指している。三角形の3辺の長さとおの3つの角度を精密に測定することにより、 B 中間子崩壊で小林益川理論の整合性を破るような標準理論を越える現象に対して、例えば、Belle II 実験の最終的な結果から10TeVのエネルギースケールの超対称性理論への感度があるとされており、新物理の探索を行う有力な手段として期待されている。

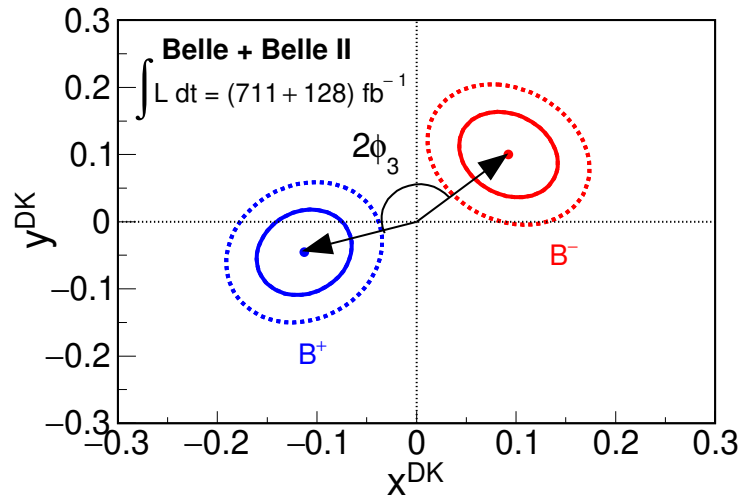


図 2: B^+ と B^- での CP 非対称性を表わすパラメータ (x, y) の測定結果とその誤差 (1σ および 2σ)。二次元平面上の角度からユニタリティ角 ϕ_3 が求まる。

3 Belle データ解析の状況

Belle 実験のデータを使った解析も引き続き行われている。 B 中間子の崩壊過程は、分類方法にもよるが、分岐比が測定されているものだけでも何百種類も存在している。分岐比は特定の崩壊の起きる確率を表しており、 B 中間子の場合には崩壊過程の種類が多い分、それぞれの分岐比は小さく、これまで測定された分岐比がごく小さい崩壊過程(総称して稀崩壊と呼ばれる)では約 10^{-7} (1 千万分の 1) のものもある。分岐比の測定は、目に見えない素粒子の素過程で何が起きているのかを引き出す重要な情報で、標準理論で知られている素過程、新物理で生じるかもしれない素過程などが合わさって分岐比となって現れる。 B 中間子が D 中間子と π 中間子に崩壊する事象の分岐比は比較的大きく、 10^{-3} (千分の 1) 以上である。測定できる事象数が多いため統計誤差は小さくなるが、その分系統誤差に細心の注意を払う必要があるため、測定がなかなか行われてこなかった。今回、Belle 実験の全データを用いて精度のよい報告することができた(資料 2.3)。素過程の精密な理解につながるため、理論コミュニティの関心を引いている。

その他にも、ここ半年の間に、新たな B 中間子稀崩壊過程の探索、新たな新複合粒子の探索、新しい崩壊過程でのレプトン普遍性の検証およびレプトンフレーバーの破れの探索、チャームバリオンの新しい崩壊過程の測定などの成果を得ており、論文として報告している。

4 参考資料

- (1) Belle and Belle II Collaboration, JHEP 2022, 063 (2022).
- (2) Belle Collaboration, Phys. Rev. D 105, 012003 (2022).
- (3) Belle Collaboration, Phys. Rev. D 105, 072007 (2022).