

1 Belle II の運転状況

SuperKEKB 加速器を用いた Belle II 実験は全検出器による物理データ収集のための運転 (Phase 3 運転) を 2019 年 3 月に開始している。2020 年には 2 月 25 日から 7 月 1 日までと夏季停止期間後の 10 月 19 日から 12 月 18 日まで運転を行い、図 1 に示すように Phase 3 運転開始からの積分ルミノシティ約 90 fb^{-1} のデータを収集した。これまでの運転で、当初の予想の数十倍もの加速器からのビームバックグラウンドやビームロスによる検出器損傷などの課題が明らかになった。特に、粒子識別装置 (TOP) で使用しているマイクロチャンネルプレート型光電子増倍管の光電面劣化が懸念されており、これを抑えるためにビームバックグラウンドの量に上限を設けているが、近い将来それがルミノシティを制限する最大の要因になることが予想される。今後、目標の 50 ab^{-1} (前身の Belle 実験で蓄積した $1 \text{ ab}^{-1} = 1000 \text{ fb}^{-1}$ の 50 倍) に向けて、ビームバックグラウンド低減とルミノシティ向上を両立させ、さらに安定なビーム制御を実現していかなければならない。

COVID-19 の世界的流行により、海外のみならず国内からも人の往来がほぼ途絶えてしまったが、Belle II 実験ではリモートシフトを活用した運転体制に改め、三密の回避や感染症対策を徹底しつつ運転を続けた。その間、Belle II データ収集効率の目標値を 90% に定め、効率改善に取り組んだ。まず、各種監視機構を整備して収集効率とエラーの状況を正確に把握した。そして、エラーの原因を修正するとともにエラーからの復帰時間を短縮することに努めた。特に、30 分以上の停止時間があった場合は、復帰対応方法を集中的に見直した。その結果、2019 年の運転では 50% 程度しかなかったデータ収集効率は、2-7 月の運転で 84%、10-12 月の運転で 88% に改善した。中でも、データ収集を妨げる主要因であった K_L -ミューオン検出器 (KLM) の読み出し回路の不調を夏季停止期間に改修し、10-12 月の運転では安定に動作させることができた。

SuperKEKB 加速器では、3-4 月にビーム衝突の安定性を高めるクラブウェストという新しい衝突方式を導入した。その後さまざまな調整を続け、6 月 21 日に世界最高のルミノシティ $2.40 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成した。この時のビーム電流は、電子ビームが 607 mA、陽電子ビームが 712 mA で、KEKB 加速器の記録 $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ の時の約半分のビーム電流で更新することができた。また、陽電子ビームコリメータの追加やビームパイプの真空度の経時的改善により、ビームバックグラウンドをほぼ一定に保ったままルミノシティを向上させることに成功した。一方、10-12 月の運転では、衝突点のビームの絞りを表すパラメータ β_y^* を 1.0 mm から 0.6 mm まで小さくする計画だったが、入射器の不安定性やビーム輸送路の設定ミス、ビームコリメータの損傷と修理等により、 β_y^* を絞る以前に 6 月のルミノシティ性能を再現するこ

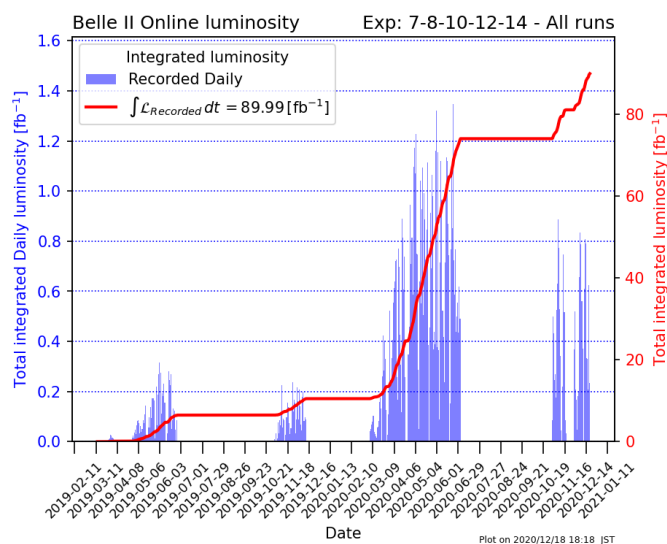


図 1: Belle II 実験で取得した 1 日ごとの積分ルミノシティ (青) と総積分ルミノシティ (赤)。

とができなかった。夏季停止期間に、陽電子ビームコリメータ1台のヘッドをタンタル製のものから損傷しにくいカーボン製のものに取り替えたが、当初の見積り以上にそのインピーダンスが大きいことが判明し、そのこともルミノシティ性能を再現できない要因の1つであったと考えられる。冬季停止期間に当該ヘッドをタンタル製の短いものに戻すことにした。短いヘッドは損傷時の悪影響が少ないと考えられるが、引き続き長期的方針の検討が必要である。

2 Belle II データ解析の状況

Phase 3 運転で収集されたデータから、 B 中間子崩壊の基本的な測定が進められた。用いたデータ量は 35 fb^{-1} でまだ Belle の B 中間子崩壊データの 20 分の 1 ではあるが、 $B \rightarrow J/\psi K_S^0$ 崩壊を用いた CP 非対称性の測定、小林益川行列要素の絶対値 $|V_{cb}|$ および $|V_{ub}|$ のための B 中間子のセミレプトニック崩壊の測定、 B 中間子のチャームレス崩壊の測定、 D^0 中間子の寿命測定、タウレプトンの質量測定などの結果を夏の ICHEP2020 国際会議 [1] で報告した。図 2 に示すように、CP 対称性が破れていることを Belle II 実験で再確認することができた。統計量ではまだ Belle には追いついてはいないが、例えば CP 非対称性の測定に用いるフレーバータグ効率は検出器の高度化および解析手法の改善により 10% 以上向上しており、今後に期待が持てる。

Phase 2 運転で収集されたデータの解析も行われた。物理解析に使用しているデータは 0.5 fb^{-1} ほどだが、それでも Belle 実験の時になかった荷電粒子飛跡数の少ない事象を収集するための新しいトリガ条件の追加により新たな新物理の探索手段を開拓している。標準理論を超える新物理で予言されるアクシオンおよび類似の新粒子 (axion-like-particle, ALP) は暗黒物質解明につながる未知粒子の候補のひとつである。Belle II では ALP が光子対に崩壊する事象を効率的に探索することが可能になった。この解析を行い、ALP 事象の候補は見つからなかったものの、図 3 のように ALP と光子の結合の排除領域を広げることができた。この結果は Belle II の 2 つ目の物理結果の論文として Physical Review Letters 誌に出版された [2]。

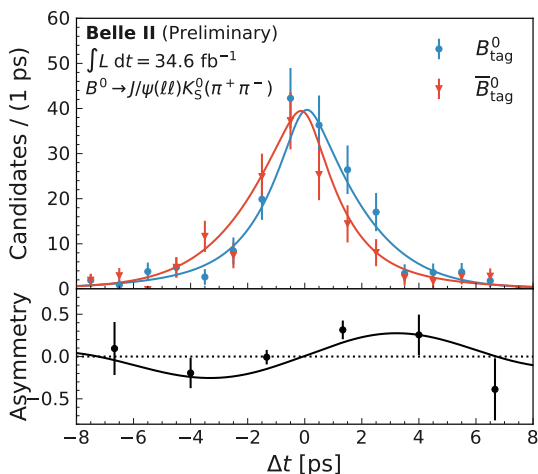


図 2: B 中間子の CP 対称性の破れの測定。フレーバータグを行う B 中間子が B^0 (青) と反 B^0 (\bar{B}^0) (赤) の時で崩壊時間差 (Δt) の分布が異なることを示している。

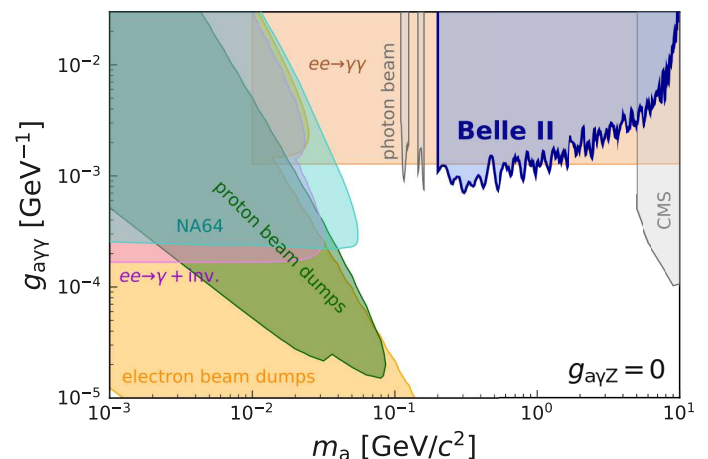


図 3: Belle II および他の実験による ALP の質量 (m_a) と ALP と光子の結合 $g_{a\gamma\gamma}$ の平面での排除領域 (色の領域)。白い領域はまだ実験的に排除されず ALP が存在する可能性が残されている。

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。Belle 実験で 2003 年発見された質量 3.872 GeV の $X(3872)$ 粒子は通常の間接子ではなくなんらかの 4 クォーク状態をもつエキゾチック複合粒子だと考えられており、スピン・パリティ・荷電パリティ (J^{PC}) が 1^{++} であると同定されている。 $X(3872)$ はさまざまな反応での生成例が報告されているが、この J^{PC} を持つ $X(3872)$ は通常の質量を持たない光子の衝突 (二光子反応) から作り出すことはできない。ただし、光子のひとつが仮想的に負の二乗質量 (Q^2) を持つとその条件を緩和することができる。Belle 実験の全データを用いた二光子反応のデータから $X(3872)$ の $J/\psi\pi^+\pi^-$ 終状態への崩壊事象の候補が図 4 のように不変質量 3.872 GeV 付近に 3 事象見つか、背景事象もほぼないため $X(3872)$ を二光子反応からも生成できる証拠を得た [3]。これは $X(3872)$ の正体を解明するための新しい手掛りとなる。

その他にも Belle 実験の全データを用いたチャームバリオンの新しい測定、 B 中間子崩壊における CP 非対称性の測定およびレプトン普遍性の破れの探索、新たなエキゾチック複合粒子の探索などの成果を得ている。

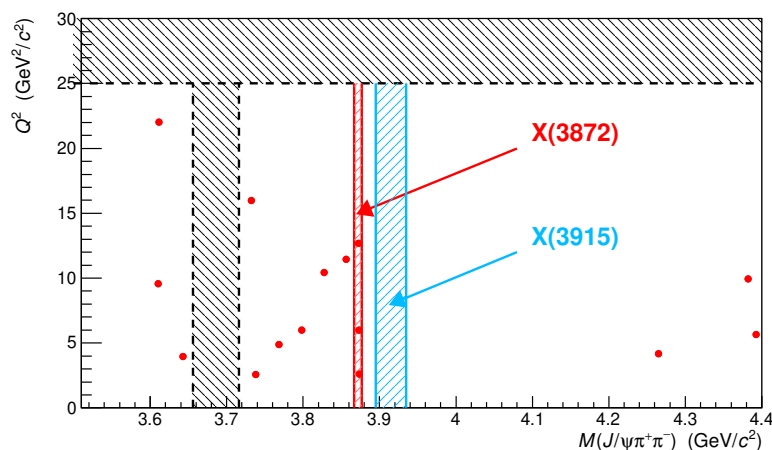


図 4: $J/\psi\pi^+\pi^-$ の不変質量と光子の負の二乗質量 Q^2 の二次元分布。

4 参考資料

[1] 40th International Conference on High Energy Physics, <https://ic hep2020.org>

[2] Belle II Collaboration, Phys. Rev. Lett. 125, 161806 (2020).

[3] Belle Collaboration, arXiv:2007.05696.