

1 Belle II ラン2 開始!

2022 年 6 月のビーム運転終了から始まった SuperKEKB/Belle II の 1 年半にわたる長期運転停止期間 (LS1) が完了し、1 月 29 日から SuperKEKB のビーム運転を開始した。LS1 前までの期間をラン 1 (ラン・ワン)、LS1 後の期間をラン 2 (ラン・ツー) と呼んで区別している。前回の報告にあるような LS1 でのさらなるルミノシティ増強に向けての加速器と測定器の改良・改修作業の成果が試される時が来た。

ビーム運転開始後は、真空焼き出しやさまざまな調整を行い、2 月 20 日から Run 2 でのビーム衝突運転および物理データ収集を開始した (図 1 はその時の様子)。ビーム軌道の詳細な調整やビーム口径の測定などの加速器スタディを進め、加速器のさまざまな機器の老朽化による問題に対処しつつ、衝突点におけるビームの収束を表すパラメータである β_y^* を LS1 前と同じ 1mm まで絞り、ビーム電流を少しずつ増やし、ルミノシティ増強を進め、3 月 15 日に $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティに達した。



図 1: Belle II 実験のコントロールルームにおいて、データ収集再開を記念した集合写真。

Belle II 測定器では、新しく入れ替えた崩壊点ピクセル検出器をはじめ、改良を加えたさまざまな検出器で大きな問題を起こすことなくデータ収集を開始することができた。全周で 2 層目の実装が完了したピクセル型シリコン崩壊点検出器 (PXD) では、摺動機構の不具合のため大事をとって 20 あるラダーのうち外周の 2 つのラダーは当面使用せず、また他の理由で外周の別のラダー半分も使用しない構成で運転を開始した。

データ収集系では LS1 期間中に COPPER と呼ばれる旧式のデータ読み出しシステムを PCIe40 と呼ばれる新型のデータ読み出しシステムへと移行する作業が完了した。どちらも検出器ごとに光ケーブルで送られてくる事象データを受信・成形し、ネットワーク経由で後段の処理へ送り出すシステムである。COPPER は約 20 年前に設計された電子回路モジュールで今後の保守が難しい状況になっていた。PCIe40 への置き換えにより高性能化と同時に高集積化と低消費電力化が進み、13 台のラックおよび 43 台の PC サーバを使用したシステムから、2 台のラックに収まる 21 台の PC サーバを使用し、消費電力も 1/3 になるシステムとなった。PCIe40 システムはこれまで順調に稼働している。

SuperKEKB 加速器では β_y^* を 1mm のまま電流の増強を続けたが、さまざまな障害に立ち向かうことになった。ラン 1 で未解決だった瞬時にビームを失う現象 (sudden beam loss,

SBL) は LS1 中には発生のメカニズムが不明のままであったため本質的な対策を取ることができなかった。それでも LS1 中に SBL の原因を探るための準備や、SBL が起きた時に測定器などに生じる損傷を低減する対策は行い、さまざまな改修が間接的な問題解決につながっていないか期待を持ちながら運転を進めていたが、電流増強に伴い SBL が起こりはじめ、また、準備していた仕掛けでも問題解決の糸口がつかめなかったため、いくつかの仮説は排除できたものの、原因究明を一からやり直すことになった。

SBL は大きな放射線を瞬時に発生させるため、加速器や測定器へのダメージが心配されていたが、4月22日にその懸念が実際になり、測定器への大きな放射線により PXD の一部に損傷が生じた。その後も本質的な対策方法がわからないまま運転を続けたところ、5月6日に、2度目の SBL により PXD にさらに大きな損傷を生じさせてしまった。

PXD には放射線耐性の高い半導体製造プロセスが用いられており、通常の運転であれば Belle II 測定器の衝突点近傍の高い放射線下でも問題なく動作する。その中で、ピクセルからデータを集めてくるスイッチャーと呼ばれる ASIC の素子(図 2) が最も放射線に弱いことがわかっている。この時点で、全体の約 2% でピクセルがゲート(一列)単位で読めなくなる損傷が生じ、また外周の 2 ラダーについて、スイッチャーの消費電流が増加し温度が上昇してしまうため、電源を落とす必要が生じた。この状態でも PXD は物理解析に必要な信号を生成することができるが、さらなる SBL により壊滅的な損傷を受けるリスクを回避するため、5月7日以降は PXD の電源を落として運転することにした。PXD に電源が入っていないければ、放射線損傷を受けないことはわかっている。これにより PXD のデータが得られず、崩壊点の測定精度が 2 倍程度悪くなり、崩壊点測定を必要とする物理解析に影響が出るが、その他の物理解析にはほとんど影響が出ない予定である。



図 2: PXD のラダー上に配置されたスイッチャーの ASIC。この一部が SBL による損傷を受けた。

SBL の問題を解決するため SuperKEKB 加速器および Belle II 測定器の研究者が共同でビームモニターなどを用いた SBL 事象の解析を進めた。並行して、加速器のさまざまな監視装置から得られる膨大な情報について統計的に処理した結果、特に陽電子リングの全周の約 5% の区間で使用されている特殊なビームパイプ付近を起源としている可能性が示された。その特殊なビームパイプ上部には、ビーム不安定性を生じさせる電子雲を低減するための電極が取り付けられている。ノッカーと呼ばれる装置でそのビームパイプを遠隔操作で物理的に叩くと、SBL と同等の現象を再現させることができた。また、ビームのない時に叩いておくと、その後の SBL の頻度を減らせることもわかった。このことから、電極の素材が放射線または熱応力により劣化して時々落下し、ビームを攪乱することにより SBL が生じるというメカニズムが

考えられる。現在までのところ、この仮説に対する反証は見つかっておらず、SBL のメカニズムの最有力候補である。

SuperKEKB 加速器では、SBL の他にも、ビーム電流増加を阻むさまざまな困難があった。ラン2の最初の運転は7月1日まで続けられ、 β_y^* は 0.9 mm まで絞り、ルミノシティは最大 $4.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ と、ラン1での記録に肉薄はしたものの、更新することはできなかった。運転時間の半分以上を加速器でのさまざまな困難の調査やルミノシティ向上のための加速器の調整に使い、速報値での積分ルミノシティはラン2で 103 fb^{-1} 、トータルで 531 fb^{-1} となった(図 3)。

7月1日以降の夏季のシャットダウン期間には、SBL メカニズムの仮説を元に、電極のついたビームパイプのうち約 1/3 を上下反転するなどの作業を行い、また電流増強の障害を調査するための仕組みの増強などを行い、秋からの運転再開に備える。

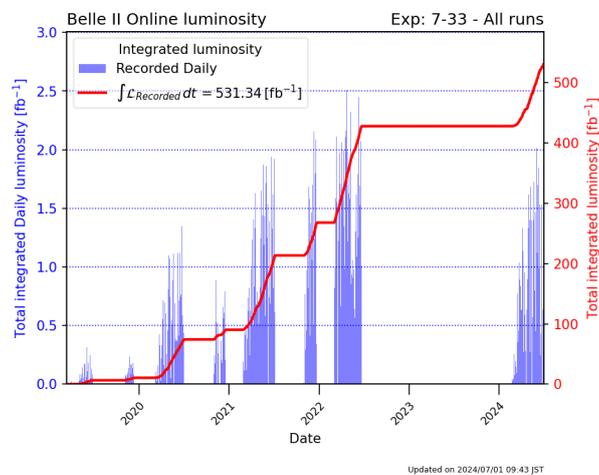


図 3: 2024 年 7 月 1 日時点における、これまでの日毎の積分ルミノシティと総積分ルミノシティの変遷。

2 Belle と Belle II データ解析の状況

Belle II 実験が LS1 までに収集した総積分ルミノシティ 424 fb^{-1} の全データ(そのうち 362 fb^{-1} が 387×10^6 の B 中間子崩壊を含むデータ)の解析が進められており、また Belle 実験のデータを使った解析も引き続き数多く行われている。Belle 実験のデータも Belle II 実験の枠組の中で取り扱ってゆくことになったこともあり、Belle 実験と Belle II 実験のデータを統合した解析も進められてきた。

ここ半年間で、Belle II 実験としては 16 の新しい結果(参照 (1))を、また Belle 実験としては 7 つの新しい結果(参照 (2))を論文として投稿した。以下にその一部を紹介する。

- B 中間子の J/ψ および K_S^0 への崩壊は CP 対称性を破る崩壊過程で、Belle 実験による小林益川理論の検証に使われたものである。この崩壊で測定される CP 対称性の破れは、ユニタリティー三角形の角度 ϕ_1 で表わすことができ、 ϕ_1 をはじめとするユニタリティー三角形の三辺の大きさと三つの角度を精度よく測定することは、小林益川理論のさらなる検証および標準理論を超える物理の探索につながる。この測定では、反対側の B 中間

子が B^0 か反 B^0 かを効率よく見分けることが重要になる。今回、機械学習を用いてこの効率を 37% へと大幅に向上させることに成功し、少ないデータ量でこれまでの測定と遜色ない精度の結果を得ることができた (文献 (3)、図 4)。

- 米国ブルックヘブン研究所およびフェルミ研究所で測定されたミュオン粒子の異常磁気能率 $g-2$ の標準理論からのずれは、新物理の寄与の可能性を示唆する有力な測定結果であり、実験・理論の双方で検証が進められている。理論値の計算で最も誤差の大きなハドロン真空偏極の寄与の計算には、低エネルギーでの電子・陽電子衝突でのハドロン生成断面積が使用されており、この断面積測定の精度向上が求められている。Belle II 実験では、断面積への寄与のうち 2 番目に誤差の大きな $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ の生成断面積の測定を行い、理論計算の精度向上へ貢献した。もっとも誤差の大きな $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$ の生成断面積のためのデータ解析も現在進められている (文献 (4))。
- ミュオン粒子の異常磁気能率 $g-2$ を新物理で説明しようとする試みも数多く行われている。ミュオン粒子にのみ結合するスカラー粒子や、 $L_\mu-L_\tau$ 模型のベクトルボソンを想定すると $g-2$ の標準理論からのずれを説明することができるが、そのような粒子は電子・陽電子衝突反応でも生成されるはずである。Belle II での新しい測定により、ギガ電子ボルト (GeV) の質量領域の一部において、これらの仮説を排除することができた (文献 (5)、図 5)。
- クォークおよびニュートリノは異なる世代間の遷移をすることが可能であるが、標準理論の枠組内では電荷を持ったレプトンは異なる世代間の遷移ができない。標準理論を超える新物理においてはこの制約は必ずしも不要で、例えばタウ粒子がニュートリノを放出せずに異なるレプトンへ遷移する事象は新物理の直接的な証拠となる。このような現象を、レプトンフレーバーの破れと呼ぶ。Belle II 実験ではタウ粒子が 3 つのミュオン粒子へと崩壊する事象の探索を行い、これまでの Belle 実験や LHCb 実験の結果を抑えて最も低い上限値を得ることができた (文献 (6)、図 6)。
- 標準理論ではレプトンはその種類によらず、質量の違いを除けばどのような反応においてもまったく同一のふるまいをする。これをレプトン普遍性と呼ぶ。これまで、 B 中間子崩壊において、タウ粒子を含む崩壊過程の分岐比がミュオン粒子および電子の場合と異なる可能性を示唆する結果が得られており、さまざまな崩壊過程においてレプトン普遍性の検証が進められている。Belle II 実験では、タウ粒子がミュオン粒子と 2 つのニュートリノに崩壊する事象と電子と 2 つのニュートリノに崩壊する事象とを比較し、これまでで最も良い精度で両者の分岐比がミュオン粒子と電子の質量差の分を除いて一致することを確かめた (文献 (7)、図 7)。
- B 中間子が 2 つの光子に崩壊する事象は、標準理論においては高次効果による B 中間子内のクォーク間の対消滅により引き起こされるため、予言されている分岐比がおおよそ 1 億分の 1 と小さく、新物理にも感度がある。Belle および Belle II の全データを用いた探索を行い、予言値に近いところまで探索範囲を押し下げることができた。今後の Belle II データ蓄積により、まもなく発見されるであろう崩壊事象のひとつであることを再確認することができた (文献 (8))。

これらの他にも多数の B 中間子崩壊、ハドロンの研究、未知の新粒子探索などに関する論文を投稿している。ラン2のデータの解析の準備を進めているが、ラン1のデータの解析もまだまだ引き続き行われており、国際会議での報告、論文の投稿の準備が進められている。

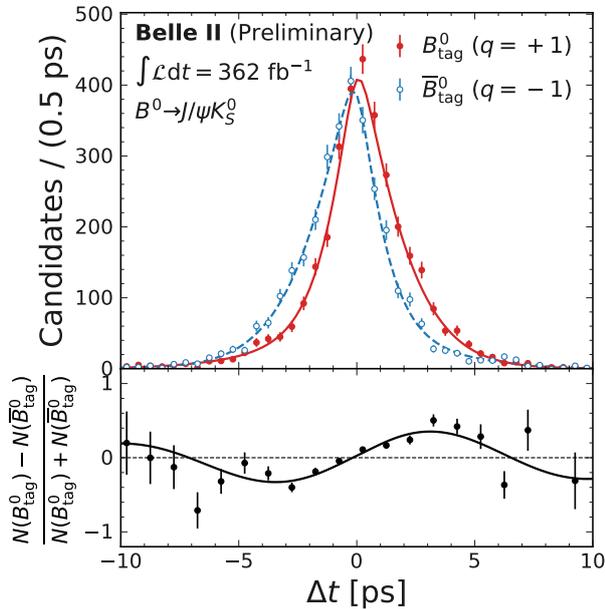


図4: Belle II での $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ 崩壊時間分布。反対側の B 中間子が B^0 の場合 (赤) と \bar{B}^0 の場合 (青) とで分布が異なる (CP 非対称性がある)。

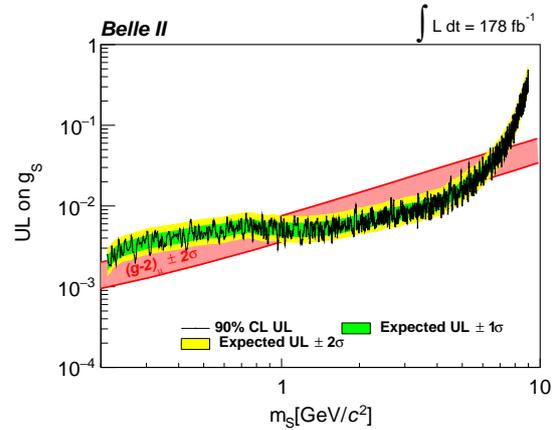


図5: Belle II で探索したミュオンとのみ結合する未知のスカラー粒子の結合定数 g_S の上限と、 $g-2$ から予想される値との比較。スカラー粒子の質量 2.9 GeV から 3.5 GeV の領域を排除した。

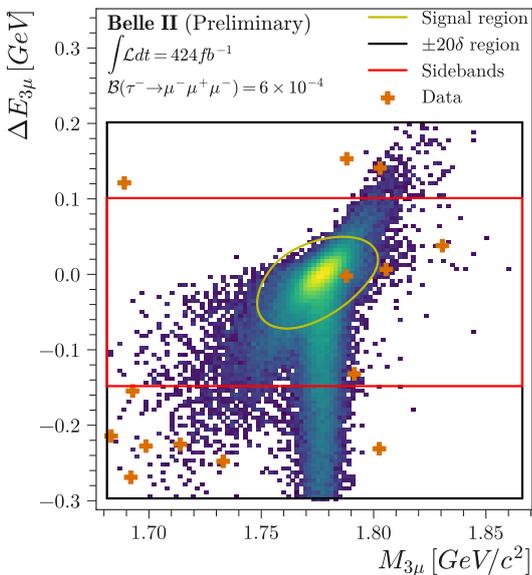


図6: Belle II で探索した $\tau \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^-$ の信号候補。1事象が信号領域である黄色い楕円の中に見つかったが、背景事象と矛盾しない結果である。

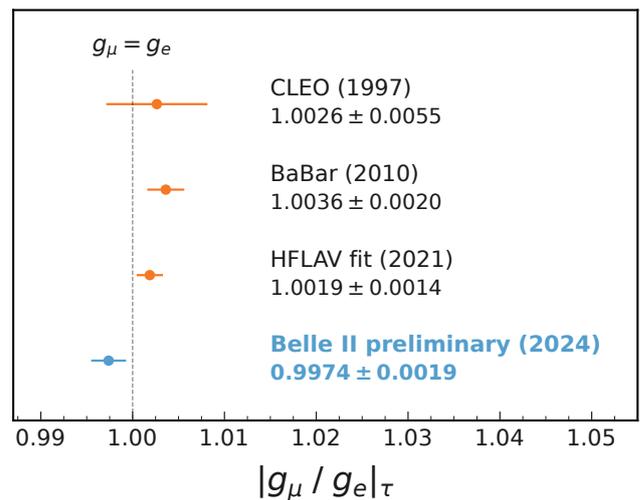


図7: Belle II で測定した $\tau \rightarrow \mu\nu\bar{\nu}$ と $\tau \rightarrow e\nu\bar{\nu}$ での結合定数の比。レプトン普遍性が成り立つときにこの比が1となる。

3 参考資料

- (1) Belle II 投稿論文一覧: <https://www.belle2.org/research/physics/publications>
- (2) Belle 投稿論文一覧: https://belle.kek.jp/bdocs/b_journal.html
- (3) Belle II Collaboration, arxiv:2402.17260 (Phys. Rev. D に掲載予定)
- (4) Belle II Collaboration, arxiv:2404.04915 (Phys. Rev. D に投稿中)
- (5) Belle II Collaboration, Phys. Rev. D 109, 112015 (2024)
- (6) Belle II Collaboration, arxiv:2405.07386 (JHEP に投稿中)
- (7) Belle II Collaboration, arxiv:2405.14625 (JHEP に投稿中)
- (8) Belle II Collaboration, arxiv:2405.19734 (Phys. Rev. D に投稿中)