

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。2022 年の SuperKEKB 加速器の運転は 2 月 21 日から 6 月 22 日まで行われた。バンチあたりの電流を上げると原因不明の急激なビームロスが起こるため、バンチ電流を 0.7 mA 以下に保ったままバンチ数を増やすことでビーム電流を上げてゆき、2022 年 6 月 8 日に陽電子ビーム 1320 mA、電子ビーム 1100 mA において、ピークルミノシティ $4.65 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を更新した。また、特別なデータ解析のために重心エネルギーを変更したデータを収集した。運転終了時点での総積分ルミノシティは 424fb^{-1} になった。

2 長期運転停止期間中の作業状況と計画

2022 年 6 月 22 日のビーム運転終了後、SuperKEKB/Belle II は長期運転停止期間 (LS1) に突入した。LS1 では、これまでの加速器運転で明らかになった問題に対処し、LS1 後のさらなるルミノシティ増強で予想されるビーム由来ノイズの増大、検出器の劣化、トリガーレートの増大に備えるため、加速器と検出器の様々な改良作業を行っている。以下では、これらの作業の主なものについて説明する。

ピクセル型シリコン検出器 (PXD) を全センサー実装のものへ交換し、同時に PXD へ到達する放射光を抑制するためにデザインを修正した新型の衝突点ビームパイプを導入する。新たな PXD の製作・組立がドイツで進められてきたが、検出器の熱変形を吸収するメカ機能がうまく働かないことが判明したため、改良および検証を進めている。衝突点ビームパイプは約 2 年の製作期間を経て 2022 年 11 月に完成した。並行して、新たなビームパイプと PXD、および組立のために現行の Belle II 測定器から一時的に取り出すストリップ型シリコン検出器 (SVD) を再び組み上げてから再インストールするための準備を進めている。早ければ来春から交換作業を始め、およそ 6 ヶ月をかけて作業を完了させる見込みである。

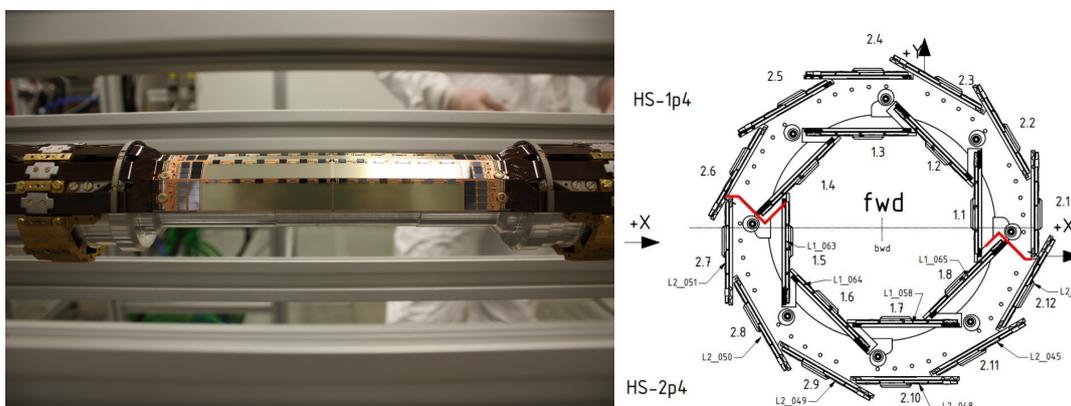


図 1: ドイツで組立中の PXD (左) と断面の構造 (右)。

バレル部の粒子識別装置 (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 (MCP-PMT) の量子効率が著しく低下している懸念があり、量子効率の低下が確認できた MCP-PMT を LS1 の間に交換する予定である。11 月に検出器全体の 16 分の 1 に相当する MCP-PMT32 台を取り出し、名古屋大学での精密な量子効率測定と宇宙線データの解析による量子効率測定の結果とを併せて、交換する MCP-PMT を決定する。MCP-PMT の交換作業は 2023 年 2 月から開始し、2~3ヶ月程度の期間で完了する予定である。

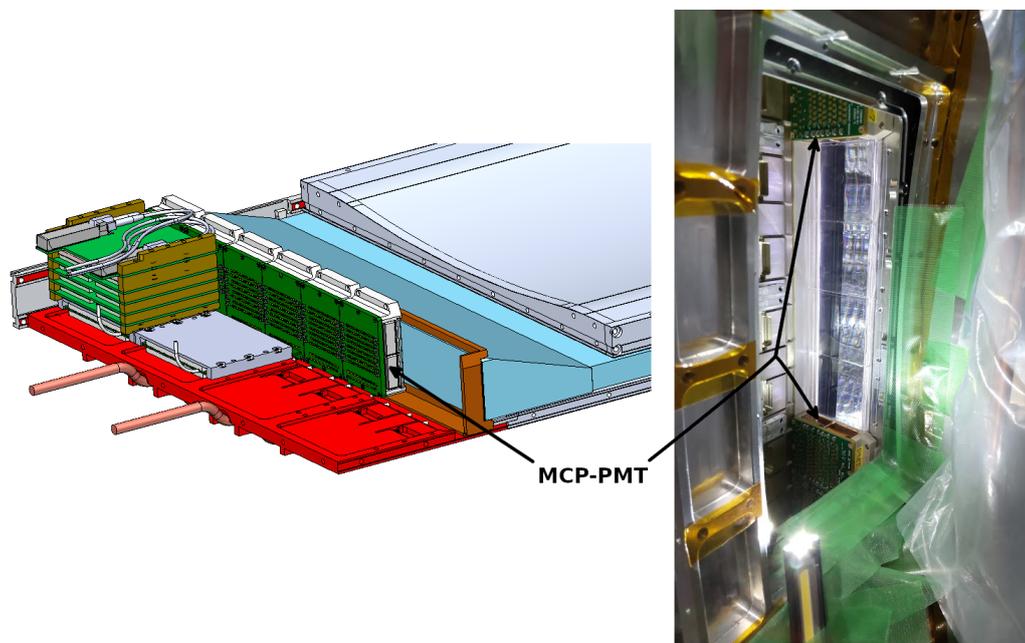


図 2: TOP の MCP-PMT まわりの構造 (左) と MCP-PMT を 16 個 (2×2 のモジュールを 4 個) 取り外したところ (右)。

中央ドリフトチェンバー (CDC) で実験中に確認された信号ゲインの低下を抑制するために、高電圧印加回路にあるローパスフィルタの抵抗の交換、検出器内の水分量モニターの校正、およびガス流量の増強を計画している。電磁カロリメータ (ECL) では、ビーム入射ノイズの影響を緩和するため、信号波高再構成のアルゴリズムの改良を検討している。初段トリガーシステム (TRG) では高性能な回路への入れ替え作業を進めている。さらに実験中に観測されている中性子による様々な影響 (読み出し回路の誤動作や K_L / ミュオン検出器 (KLM) でのヒットレート増大など) を緩和するために、中性子遮蔽体を加速器トンネル内部、KLM エンドキャップ外壁、および最終収束超伝導電磁石 (QCS) 表面に追加することを計画している。また、CDC や TOP へのビーム由来のノイズを低減するために、PXD および SVD と QCS の間のペローズ管周辺への遮蔽体追加と、QCS 先端部フランジの素材をタングステンからステンレスへ変更する作業も予定している。

DAQ グループは、旧型の COPPER システムから新型の PCIe40 システムへ移行する作業を進めている。Belle II 実験開始時には PXD を除く全検出器で COPPER を用いていたが、2022 年 2 月までに TOP・KLM・エンドキャップ部粒子識別装置 (ARICH) で移行作業を完了させており、LS1 中に残りの SVD・CDC・ECL・TRG で移行を完了させる。他の検出器への導入経験から移行作業は順調に進んでおり、すでに全ての検出器で PCIe40 を導入してデータ読み出しに成功している。現在は長期安定性の確認試験を進めている。また高次トリガ (HLT)

を、これまでの CPU 総計約 4000 コアを有する HLT10 台のシステムから CPU 総計約 6400 コアを有する 13 台のシステムに増強する予定で、LS1 後のトリガーレートの増大に備える。

SuperKEKB 加速器では、非線形コリメータ導入の準備が進められている。非線形コリメータにより従来のコリメータよりも大きな物理口径で効果的なビームコリメーションが可能になる。急激なビームロスが発生した際に Belle II 検出器が損傷するのを避けるため、速いビームロス検出が可能な検出器 (CLAWS) とより短いアポート信号経路を組み合わせるだけで早くビームを捨てることのできる新たなビームアポートシステムを導入する計画である。

3 Belle II データ解析の状況

Belle II 実験でのデータ蓄積が進み、新しくなった Belle II 検出器の特長や新規開発の手法を組み合わせることにより、Belle 実験では難しかった解析や Belle 実験での精度に匹敵する結果を出せる解析テーマが増えてきた。ここ半年間で、昨年度の夏までに収集された 207 fb^{-1} のデータなどを用いて新たに 5 つの新しい結果を論文として投稿した。

- 小林益川理論のパラメータの一つである $|V_{cb}|$ は弱い相互作用である b クォークのセミレプトニック崩壊 ($b \rightarrow c l \nu$) 過程の崩壊分岐比を測定し、理論と比較する事により得られる。理論計算では、強い相互作用による高次補正のうち理論からだけでは求めることができない部分をモデル化し、崩壊分岐比以外の実験データを用いてモデルパラメータの決定および検証を行う。本解析ではその一つであるレプトン対 ($l\nu$) の質量二乗モーメント分布を測定した。ニュートリノを直接測定できないなどの理由により全分布を測定することはできないが、可能な領域の 77% をカバーすることに成功し、過去の実験より改善する事に成功した (文献 (1))。
- Belle II 検出器の優れた崩壊点検出器の機能を最大限に生かし、チャームクォークを含むバリオン粒子 Λ_c^+ 粒子の寿命を世界最高精度で測定した (図 3、文献 (2))。
- 同様に Ω_c 粒子の寿命を高精度で測定した。 Ω_c 粒子は 1 つのチャームクォークと 2 つのストレンジクォークで構成され、チャームクォークを 1 つ含むバリオンの基底状態の中では最も寿命が短いとされてきたが、最近 LHCb 実験がこれを否定する結果を報告した。本解析は、この LHCb の結果を追認した (文献 (3))。
- 暗黒物質に関連する新粒子である暗黒光子 A' と暗黒ヒッグス粒子 h' の生成を、暗黒ヒッグス粒子輻射と呼ばれる過程 $e^+e^- \rightarrow A'h', A' \rightarrow \mu^+\mu^-$ を用いて探索した。ここで暗黒ヒッグス粒子が暗黒光子より軽い領域は、暗黒ヒッグス粒子が長寿命で見えない粒子となり、消失エネルギー事象として観測される。過去には KLOE 実験が暗黒ヒッグス粒子質量約 0.5 GeV までの領域で探索を行ったが、本解析ではほぼ 10 倍にあたる約 5 GeV までの重い領域での世界初の探索を行った。その結果暗黒ヒッグス粒子の生成に強い制限をかけた (文献 (4))。
- 特別な加速器の運転モードとして、通常の重心系エネルギー 10.58 GeV より高い 10.701 GeV 、 10.745 GeV 、および 10.805 GeV でデータを収集し、既知の共鳴状態に分類できていない $Y(10753)$ 粒子の新たな崩壊過程を探索した。本解析では $e^+e^- \rightarrow \omega\chi_{b1}(1P)$

および $e^+e^- \rightarrow \omega\chi_{b2}(1P)$ 反応において、この質量領域での生成信号を世界で初めて観測した。さらに Belle 実験で取得した 10.867 GeV のデータを併せて生成断面積のエネルギー依存性を調べたところ、 $Y(10753)$ 粒子の生成に一致した (図 4)。これは、今後 $Y(10753)$ の正体を決定するための有用な情報のひとつとなる (文献 (5))。

LS1 までに収集されたデータの解析結果が得られるのはまだこれからであるが、これまで Belle 実験で行われてきたほとんどの測定を少なくとも同程度の精度で行うことが可能となるため、精力的に準備が進められている。

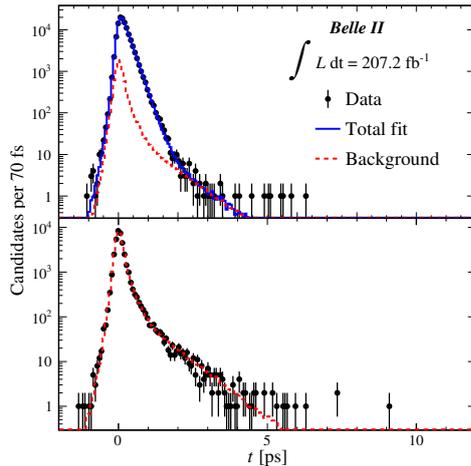


図 3: (上) Λ_c バリオンの崩壊時間分布および (下) バックグラウンドのみの分布。分布の左側の負の崩壊時間へのしみ出しは測定分解能によるもので、分布の右側の傾きが寿命に相当する。

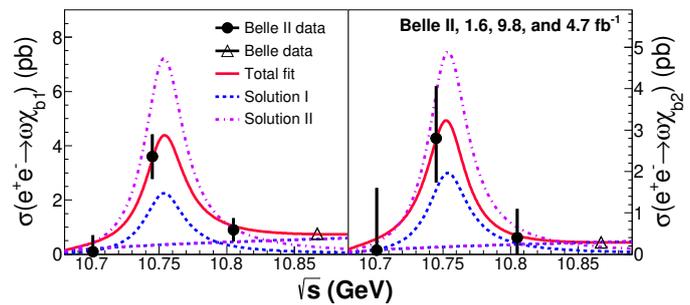


図 4: (左) $e^+e^- \rightarrow \omega\chi_{b1}(1P)$ および (右) $e^+e^- \rightarrow \omega\chi_{b2}(1P)$ の生成断面積の重心系エネルギー (\sqrt{s}) 分布。

4 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数多く行われている。ここ半年の間に、新たな B 中間子崩壊過程の測定および探索、新たな D 中間子崩壊過程の測定および探索、チャームバリオンの新しい崩壊過程の測定、電子陽電子衝突による軽いハドロン生成の研究などの成果を得ており、論文として投稿している (参照 (6))。

5 参考資料

- (1) Belle II Collaboration, arxiv:2205.06372 (Phys. Rev. D に掲載予定)
- (2) Belle II Collaboration, arxiv:2206.15227 (Phys. Rev. Lett. に掲載予定)
- (3) Belle II Collaboration, arxiv:2208.08573 (Phys. Rev. D に掲載予定)
- (4) Belle II Collaboration, arxiv:2207.00509 (Phys. Rev. Lett. に掲載予定)
- (5) Belle II Collaboration, arxiv:2208.13189 (Phys. Rev. Lett. に投稿中)
- (6) Belle 投稿論文一覧: https://belle.kek.jp/bdocs/b_journal.html