

1 Belle II の運転状況

Belle II 実験は、SuperKEKB 加速器で作り出す大統計の電子陽電子衝突データによって、 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。まずは先行の Belle 実験を超える積分ルミノシティ ($>1 \text{ ab}^{-1}$) を蓄積し、他実験を上回る精度の物理測定結果を多数創出して、再び素粒子研究の最前線に立つことが急務である。そのためには、SuperKEKB 加速器のルミノシティ増強が最優先課題であり、また高いルミノシティに伴う Belle II 測定器運転の諸課題をクリアし、高い効率で安定にデータを収集することが重要である。

高いルミノシティでの運転に向けて、2020年12月から2021年2月の加速器シャットダウン中に、高次トリガ(HLT)に用いる計算機CPUコアを20%増強し、初段トリガーレートの上限を約13 kHzに引き上げた。また、世界各地の計算機で構築される計算機グリッド上にRucioデータ管理システムを導入し、分散するデータの自動管理による効率化を図った。ルミノシティ向上とともに、加速器ビーム由来のバックグラウンド(ビームバックグラウンド)も増加する。ビームバックグラウンドは、検出器の劣化と性能悪化を引き起こすため、ある上限値以下に抑えなければならない。上限値が最も厳しいのはTOP検出器で用いるマイクロチャンネルプレート型光電子増倍管(PMT)である。2022年に予定しているPMTの交換以降はPMTを実験最後まで使用できるように、ビームバックグラウンドによるヒットレートの上限を2020年までは1.2 MHz/PMTとしていた。しかし、2026年頃に2回目のPMT交換を行うことを決め、最初のPMT交換までは3.0 MHz/PMT、それ以降は5.0 MHz/PMTと上限を引き上げ、ビームバックグラウンドによる制限を緩和した。

2021年前半のSuperKEKB加速器の運転は、2月16日から7月5日まで行われた。2022年に予定されている長期シャットダウン前にできるだけ多くのデータを収集するため、2021年のこれまでの運転では、衝突点のビームの絞りを表すパラメータ β_y^* は1.0 mmのまま、ビーム電流を上げることでルミノシティを増強し、できるだけ多くの運転時間をデータ蓄積に充てる方針で進めた。そのため、ビームバックグラウンドの低減よりもルミノシティの向上を優先した。

ビーム電流増加とともにビームバックグラウンドが増加し、TOP検出器のPMTのビームバックグラウンドによるヒットレートは最大2.8 MHz/PMTになった。記録する膨大な量のデータ中のバックグラウンド事象をできるだけ削減するために、ニューラルネットワークを利用した

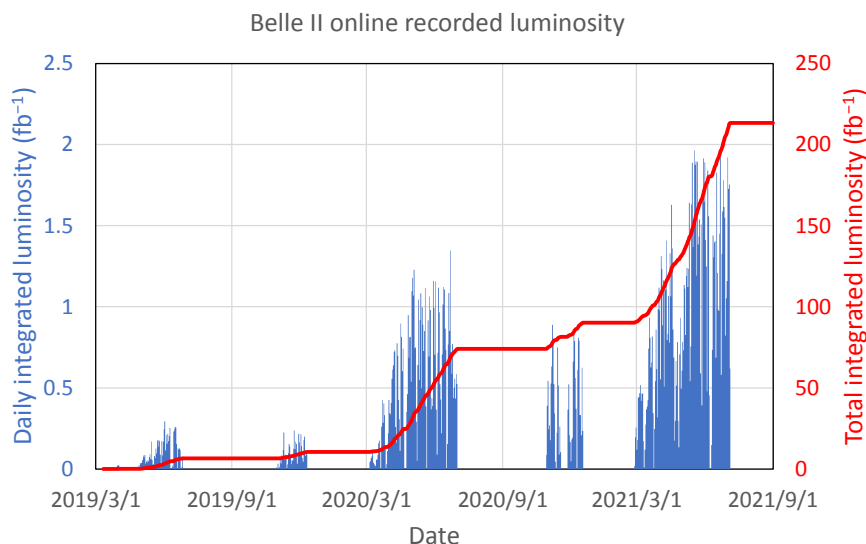


図 1: Belle II 実験で蓄積した 1 日毎の積分ルミノシティ(青棒グラフ)と全積分ルミノシティ(赤線)。

トラックトリガーを導入することで初段トリガーレートをこれまでの半分近くに低減し、ルミノシティ増加分を含めても 8 kHz 以下で運転することができた。HLT においてもイベント選別を導入して、保存するデータ量を約 1 桁減らすことに成功した。加速器運転において、ルミノシティ向上のためにビーム電流を上げると、原因不明の甚大なビームロスが頻発した。主にそれが原因で、4 月下旬以降、陽電子ビームは 840 mA 以下で運転することとなった。電子ビームは、入射器のパワー不足により、680 mA 以上に上げることが難しかった。しかしながら、電子ビームのフィードバックゲインを下げることで、制御系のノイズの問題を回避し安定性を増し、ルミノシティを約 30% 増加させることに成功した。このノイズの問題も後日解決した。6 月 22 日には、これまでの記録を塗り替えるピークルミノシティ $3.12 \times 10^{34} / \text{cm}^2/\text{s}$ を達成した。これらの努力の積み重ねで実験開始からの全積分ルミノシティは倍増し、 213 fb^{-1} となった。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。

このコロナ禍において、実験サイトである KEK に滞在できる人数は限られたが、リモート主体の運転体制で、感染防止にできる限りの対策を講じながら、運転を続けることができた。ビーム電流とともに中性子バックグラウンドが増加し、検出器前段回路内の FPGA のソフトウェアでデータ収集が止まる頻度が昨年と比べ倍増したものの、自動化等による復帰時間の短縮により、データ収集効率の目標である 90% をほぼ達成することができた。

2 Belle II データ解析の状況

Belle II 実験における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物理解析の結果が生まれ始めている。

今回、Belle II の 63 fb^{-1} のデータに対して新手法を用いた $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊の探索を行った。この崩壊のニュートリノを荷電レプトンに置き換え、 K^+ 中間子を K^* 中間子に置き換えた $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$ 崩壊における角度分布変数 P_5^* について LHCb 実験で標準理論では説明できず新物理の影響を示唆する結果が報告され世界的に話題になっている。同様の新物理の影響が $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊に見られる可能性があり、理論計算の誤差がより小さくなるため、信頼性の高い結果が期待できる。二つのニュートリノが検出できないためこの崩壊事象を同定することは非常に難しいが、Belle II 実験で B 中間子が対生成されることを利用し、反対側の B 中間子を完全に検出した上で、崩壊からくる K^+ 中間子とニュートリノにより失われた運動量を持つ事象を探索する。Belle 実験でも同様の探索は行われたが、Belle II では Belle の時と比べ、包括的な手法を用いて反対側の B 中間子を完全に検出する効率をさらに高めた手法を開発した。標準理論での崩壊分岐比が $(4.6 \pm 0.5) \times 10^{-6}$ と予言されているのに対し、Belle 実験による探索での崩壊分岐比の上限は 90% の信頼度で 16×10^{-6} とあと数倍のところまで来ている。今回の探索ではブースト決定木手法により $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ 崩壊の信号らしさを数値化した値 (BDT) と、 K^+ 中間子の横方向運動量 (p_T) ごとに 12 の領域に分けて、それぞれで信号らしき事象の成分を求めた (図 2)。残念ながら有意な信号は見られず、崩壊分岐比の上限値として 41×10^{-6} を得た。上限値の期待値は 23×10^{-6} であり、一桁少ないデータ量ながらも先行研究と比肩する結果である。結果は Belle II 実験最初の B 中間子崩壊の物理の論文として Physical Review Letter 誌に掲載予定である (資料 1)。この新規手法は、解析が同様に難しい他の B 中間子崩壊過程にも応用可能である。

また、今回、Belle II 実験で D 中間子寿命の精密測定を行った。中性 D^0 中間子の混合や CP 対称性の破れの大きさが共に小さいであろうとの予想に反して、比較的大きな中間子混合と CP 対称性の破れが見つかったことで、 D 中間子が新物理探索のプローブとして注目を集めており、寿命という基本的な物理量の精密測定の重要さが増している。 D 中間子の寿命の測定には精度の高い崩壊点検出が必要であり、2002 年の FOCUS 実験の結果以来更新されてこなかった。Belle II では崩壊点検出器による崩壊点決定精度が Belle よりも 2 倍良く、崩壊点検出器の設置位置からのわずかなずれと変形をビームデータを用いて精度良く決定することにより、 D 中間子寿命の精密測定が可能となった。寿命の測定にはバックグラウンド事象が少なく崩壊分岐比の大きい $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ 崩壊と $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$ 崩壊を用いた。図 3 の D^0 と D^+ の崩壊時間分布から $\tau(D^0) = 410.5 \pm 1.1 \pm 0.8$ fs, $\tau(D^+) = 1030.4 \pm 4.7 \pm 3.1$ fs を得た (資料 2)。これらは現在の世界平均より良い精度の結果であり、また過去の結果とも一致する。世界最高精度の寿命測定を行える能力は、今後の Belle II 実験での D^0 の中間子混合や時間に依存する CP 対称性の破れの精密測定につながってゆくことになる。

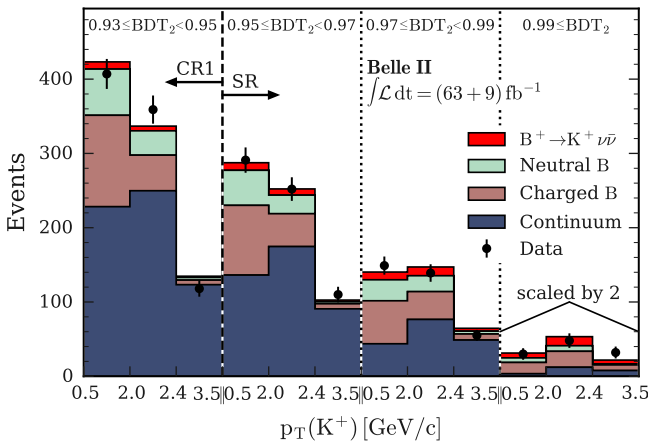


図 2: ブースト決定木手法の値 BDT と横方向運動量 p_T の領域ごとの事象数。 $B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}$ の事象があれば、図の右側ほど赤色で示す成分の割合が高くなるはずだが、有意な成分は見られない。

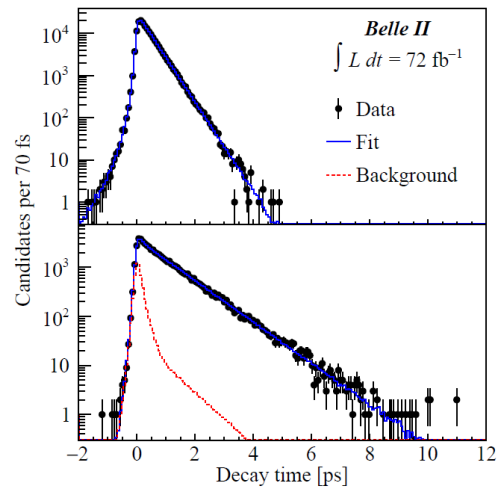


図 3: (上) D^0 と (下) D^+ の崩壊時間分布。分布の左側の負の崩壊時間へのしきり出しは測定分解能によるもので、分布の右側の傾きがほぼ寿命を表わす。

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 中間子崩壊の CP 対称性の破れの起源である小林益川行列の行列要素のうち、 b クォークから c クォークへの遷移確率を表わす V_{cb} と b クォークから u クォークへの遷移確率を表わす V_{ub} は標準理論の重要な物理量である。 V_{cb} と V_{ub} の絶対値および CP 対称性を破るユニタリ角 ϕ_3 の 3 つの測定値は標準理論を越える新しい物理現象による相互作用の影響をほぼ受けず、他の CP 対称性の破れの測定を通しての新物理の探索の際の基準となる。従って V_{cb} と V_{ub} の精度良い測定は新物理探索に欠かすことができない。

V_{cb} と V_{ub} の測定手法には、特定の崩壊過程を使用するエクスクルーシブ法と崩壊過程を包括的に扱うインクルーシブ法があり、両者が一致することが測定精度の信頼性を担保することになるが、現在、両手法間の結果に差があり大きな問題となっている。 V_{cb} についてはそれぞれの手法で2%の精度で結果が得られているが、差が6%あり、 V_{ub} についてもそれぞれ4%の精度に対して差が16%ある。そこで、最近進展のあった新しい理論的手法を用い、また Belle II のために開発された新しいデータ解析の手法を使用して、より解析方法の難しいインクルーシブ法での解析を行った(資料3、4)。特に、図4に示すように V_{ub} についてより広い運動学領域をカバーすることにより信頼性と精度が向上し、単一の測定として7%の精度となり、エクスクルーシブ法との差が11%とやや近づいた結果となった。

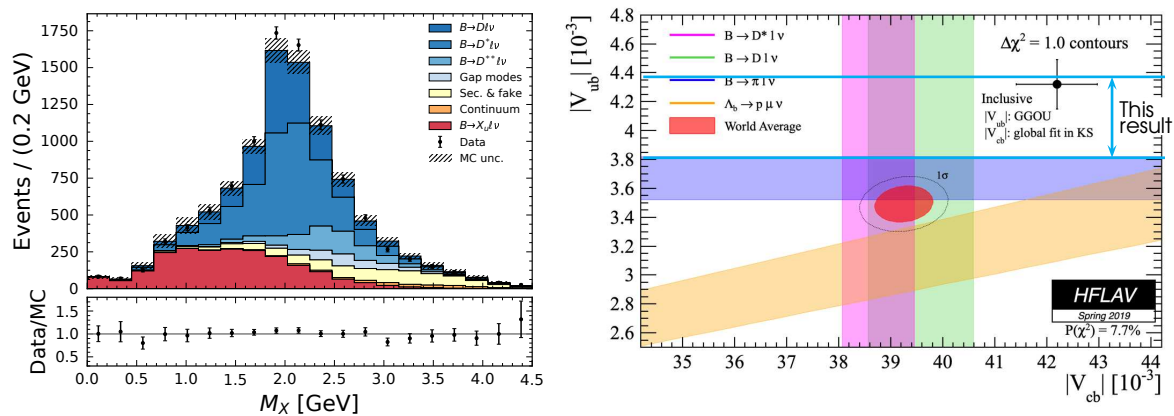


図4: (左) V_{ub} 測定におけるハドロン質量分布。信号(赤)はバックグラウンド(赤以外)より低い質量に分布する。(右) これまでのエクスクルーシブ法(赤い楕円)とインクルーシブ法(黒い十字)による V_{cb} と V_{ub} と今回の V_{ub} の結果(水色の線)の比較。

その他にも、今年になってからだけでも 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稀崩壊の探索、暗黒粒子候補の探索、タウレプトンの電気双極子モーメントの探索などの成果を得ている。

4 参考資料

- (1) Belle II Collaboration, arXiv:2104.12624, Phys. Rev. Lett. 誌に掲載予定.
- (2) Belle II Collaboration, arXiv:2108.03216, Phys. Rev. Lett. 誌に投稿中.
- (3) Belle Collaboration, arXiv:2109.01685, Phys. Rev. D 誌に投稿中.
- (4) Belle Collaboration, Phys. Rev. D 104, 012008 (2021).