

Belle II 実験における $B \rightarrow K\pi\pi\gamma$ 崩壊を用いた 直接的CP非対称性の測定手法の開発

黒川 俊輔, 角野 秀一, 石川 明正^{A,B}, 他 Belle II Collaboration
東京都立大学, KEK^A, 総研大^B

Flavor Frontier 2026, 2026-09-03

$B \rightarrow K\pi\pi\gamma$ 崩壊

■ $b \rightarrow s\gamma$ 崩壊

- 標準模型で抑制され、新物理に高感度なFlavor Changing Neutral Current過程
- ループに $H^\pm$ や W_R が寄与する可能性：右巻き相互作用の探索に有用

■ 本研究： $B^+ \rightarrow K^+\pi^-\pi^+\gamma$ と $B^0 \rightarrow K^+\pi^-\pi^0\gamma$ における直接的CP非対称性 A_{CP} の測定

- Dalitz変数を用いて $M(K\pi\pi)$ の領域毎に A_{CP} を測定

$$A_{CP} = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow f) - \mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow \bar{f})}{\mathcal{B}(B \rightarrow f) + \mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow \bar{f})}$$

■ 先行研究

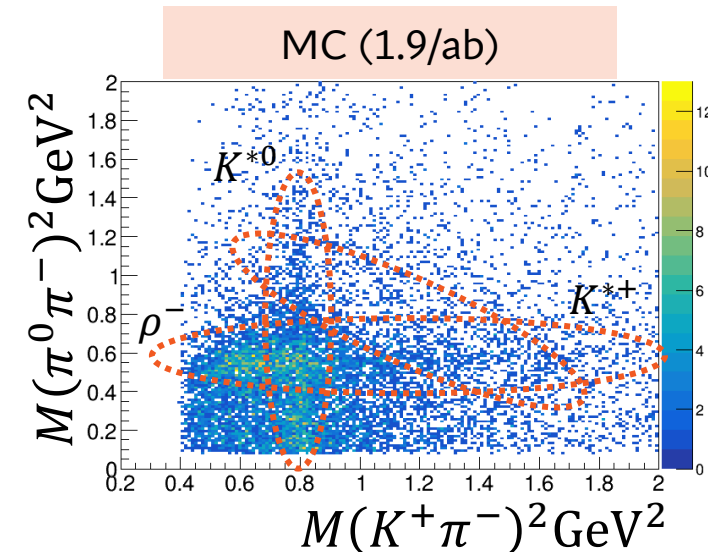
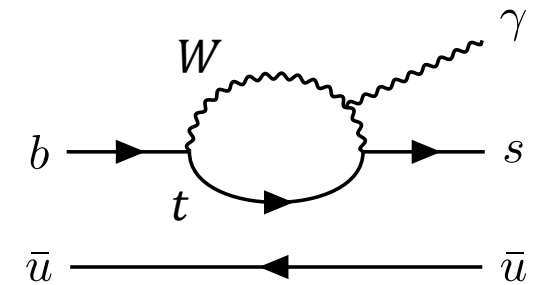
● $B^\pm \rightarrow K^\pm\pi^\mp\pi^\pm\gamma$ 崩壊

- LHCb により A_{CP} が測定された[[paper](#)]が、Belle (II) では未測定

- zero consistent: $A_{CP} = -0.007 \pm 0.015$ (stat) ± 0.008 (syst)

● $B^0 \rightarrow K^+\pi^-\pi^0\gamma$ 崩壊は未測定

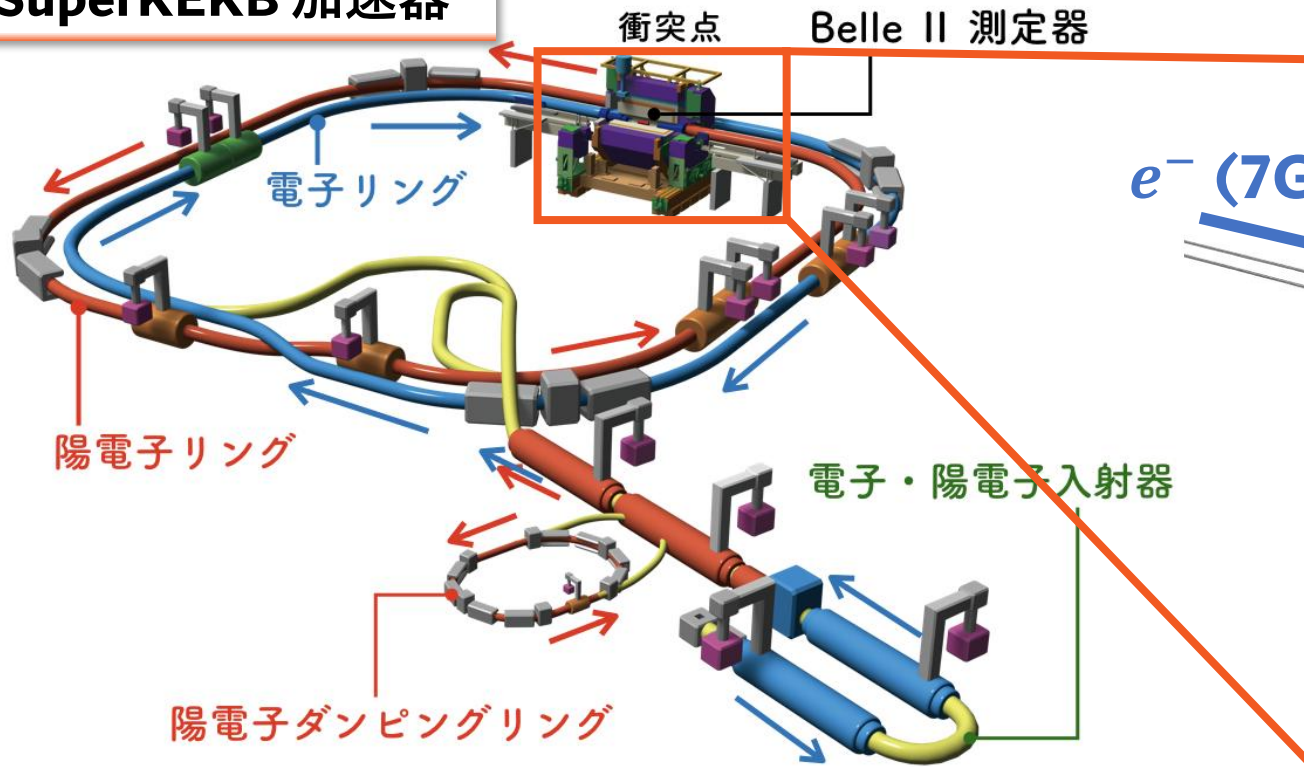
- π^0 を含む崩壊は、Belle II 測定器の方が有利
- $K\pi\pi$ 系で複数次 (K^{*0}, K^{*+}, ρ^-) の共鳴状態が寄与することにより、 $B \rightarrow K\pi\gamma$ よりも直接的CP非対称性が大きく出る



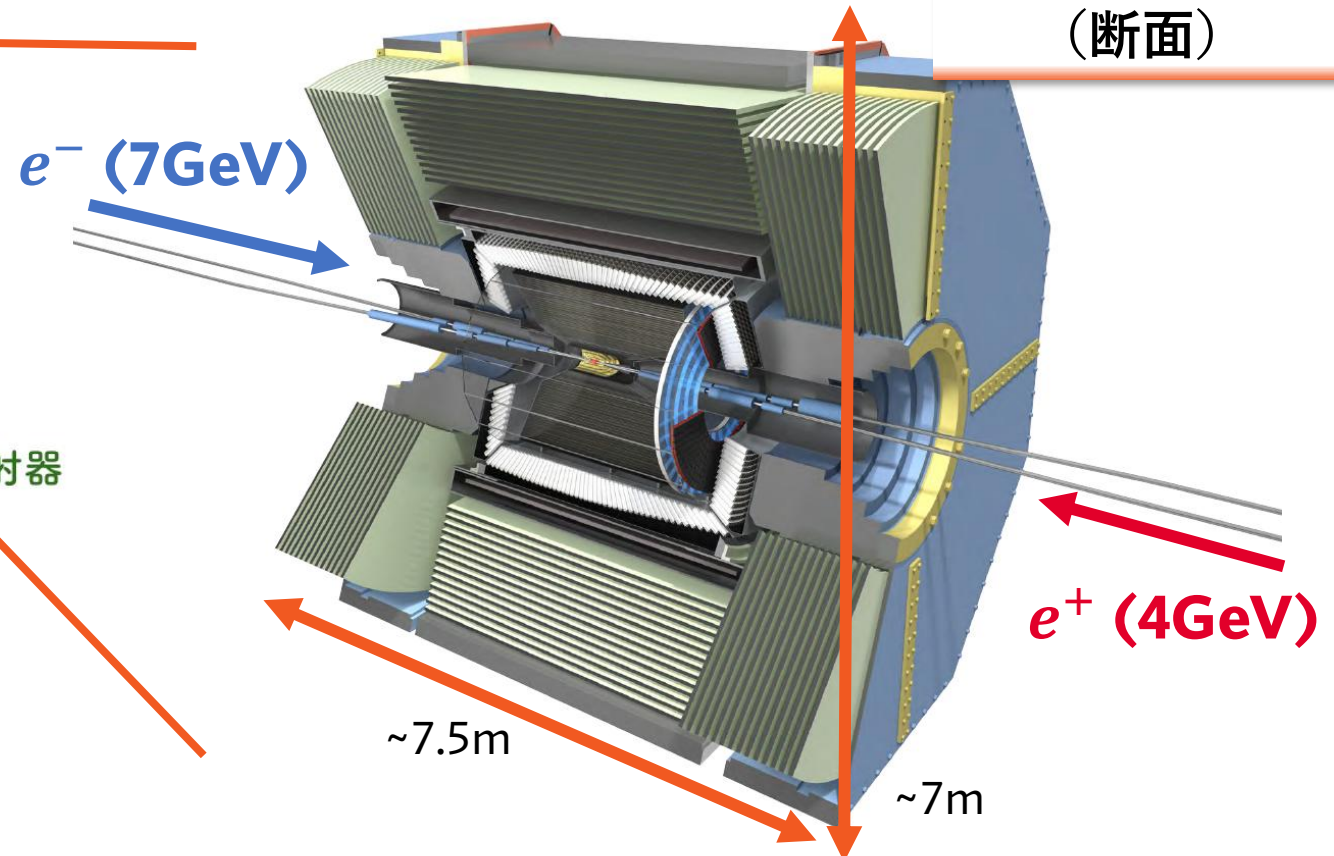
SuperKEKB/Belle II 実験

- 電子・陽電子衝突型加速器によるBファクトリー実験 (2019年~) @KEKつくば
 - $\Upsilon(4S)$ 共鳴状態から生成した B 中間子対の崩壊過程を精密観測
 - 2026年6月までに 0.914/ab のデータを収集、 $\Upsilon(4S)$ データは世界最大 (0.808/ab)

SuperKEKB 加速器



Belle II 測定器
(断面)



直接的CP非対称性の測定手法

■ Monte Carloデータセット (1.946/ab) を利用

■ 解析手法

● $B^+ \rightarrow X_S (\rightarrow K^+ \pi^+ \pi^-) \gamma$ 、 $B^0 \rightarrow X_S (\rightarrow K^+ \pi^- \pi^0) \gamma$ 崩壊事象を再構成

➤ $\pi^0, \eta \rightarrow \gamma\gamma$ をMVAでveto

➤ $M(K\pi\pi) < 2.4 \text{ GeV}/c^2$ に限定

➤ 正しく再構成されたB中間子イベント候補を要求

➤ B中間子の運動量情報

• Beam constrained mass $M_{bc} = \sqrt{(E_{\text{beam}}/c^2)^2 - (p_B/c)^2} > 5.2 \text{ GeV}/c^2$

➤ B中間子の質量情報

• $\Delta E = E_B - E_{\text{beam}} (-0.15 \text{ GeV} < \Delta E < 0.1 \text{ GeV})$

B中間子候補のエネルギー

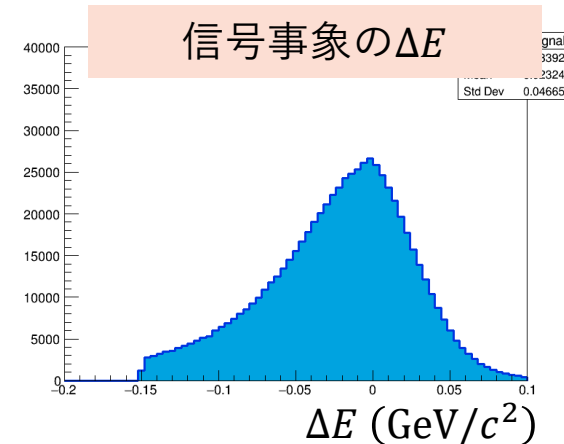
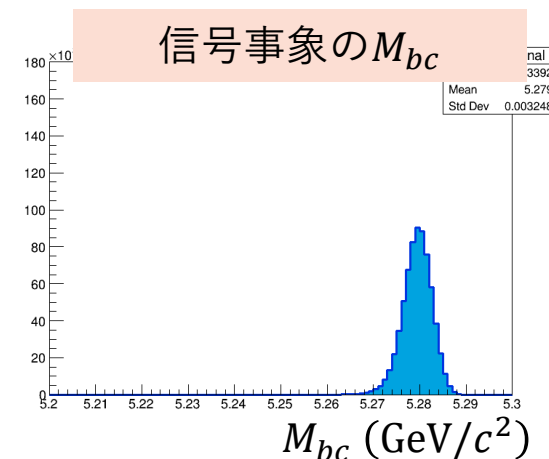
重心系ビームエネルギー

B中間子候補の運動量

● 複数の候補がある場合、 ΔE の絶対値が最小の候補を残す

● 背景事象を抑制 (後述)

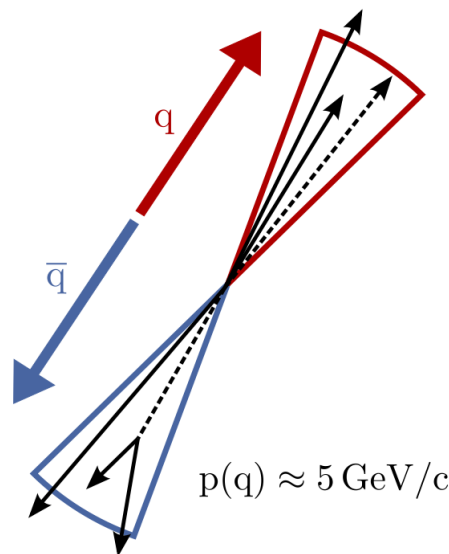
● M_{bc} をフィットし (後述)、事象抽出・カウント



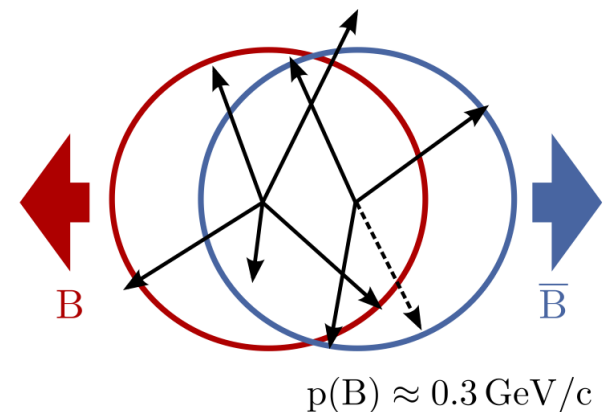
背景事象の抑制

■ Continuum事象

- 本解析における主要なバックグラウンド
- 電子陽電子衝突で $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ ($q = u, d, s, c$)
- 重心系でのイベント形状の違いで抑制できる
 - $q\bar{q}$ はジェット状に崩壊
 - $B\bar{B}$ はほぼ静止して崩壊



$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \quad (q \in \{u, d, s, c\})$$



$$e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$$

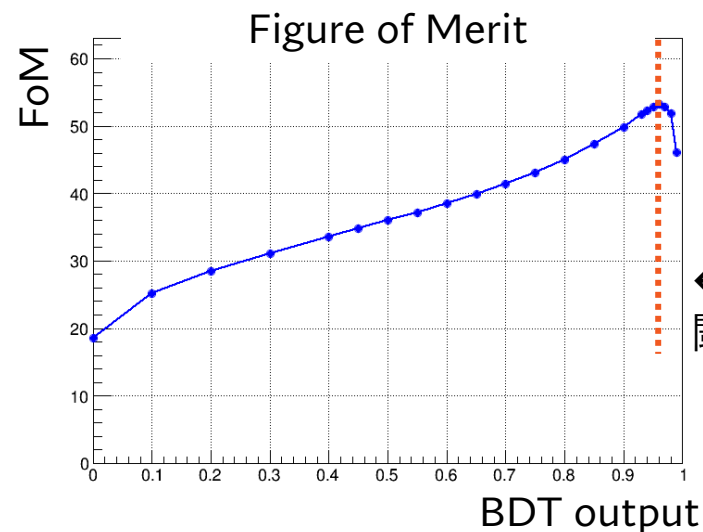
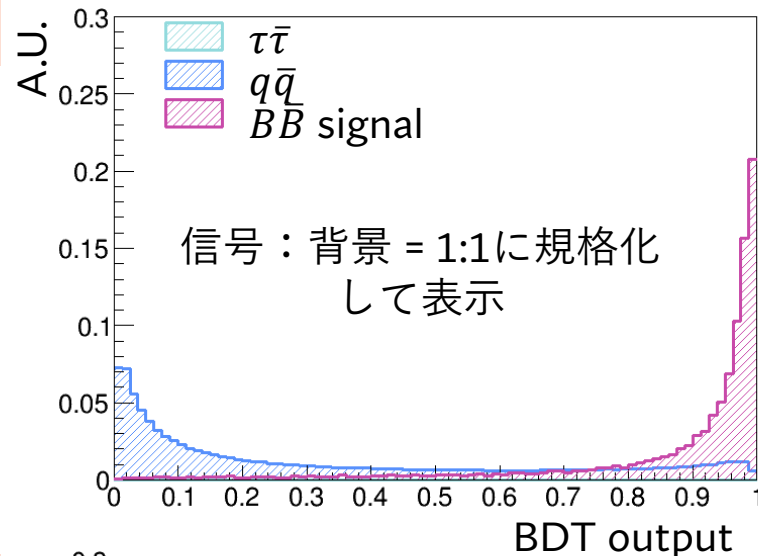
■ Boosted Decision Treeを用いて、信号事象とContinuum事象を分離

- XGBoostを利用

BDTによるContinuum事象分離

Figure of Meritが最大になるように分離閾値を決定

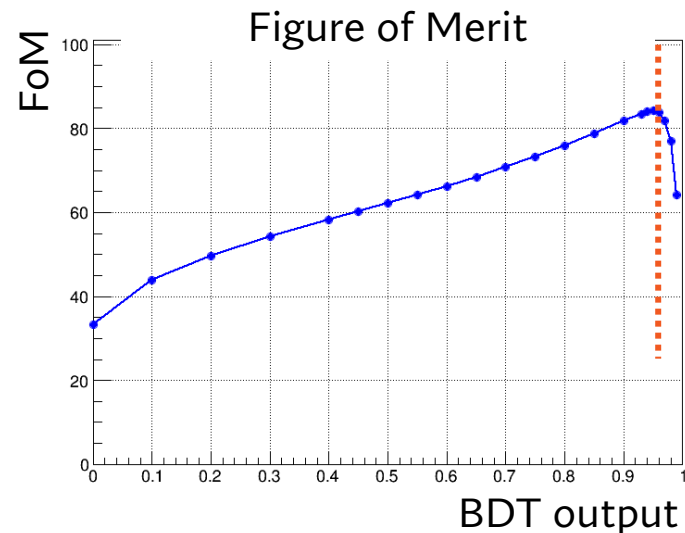
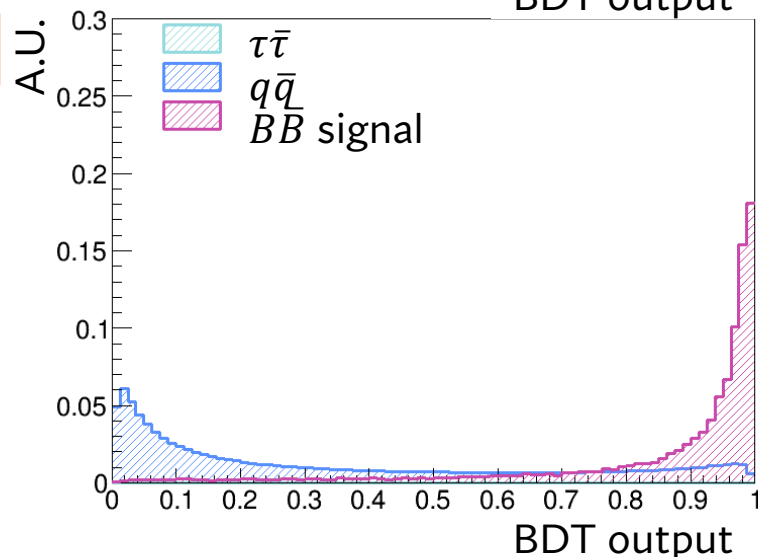
B^0



$$\text{FoM} = \frac{\text{信号事象数}}{\sqrt{\text{信号事象数} + \text{背景事象数}}}$$

← 信号確率=0.96に
閾値を決定

B^+



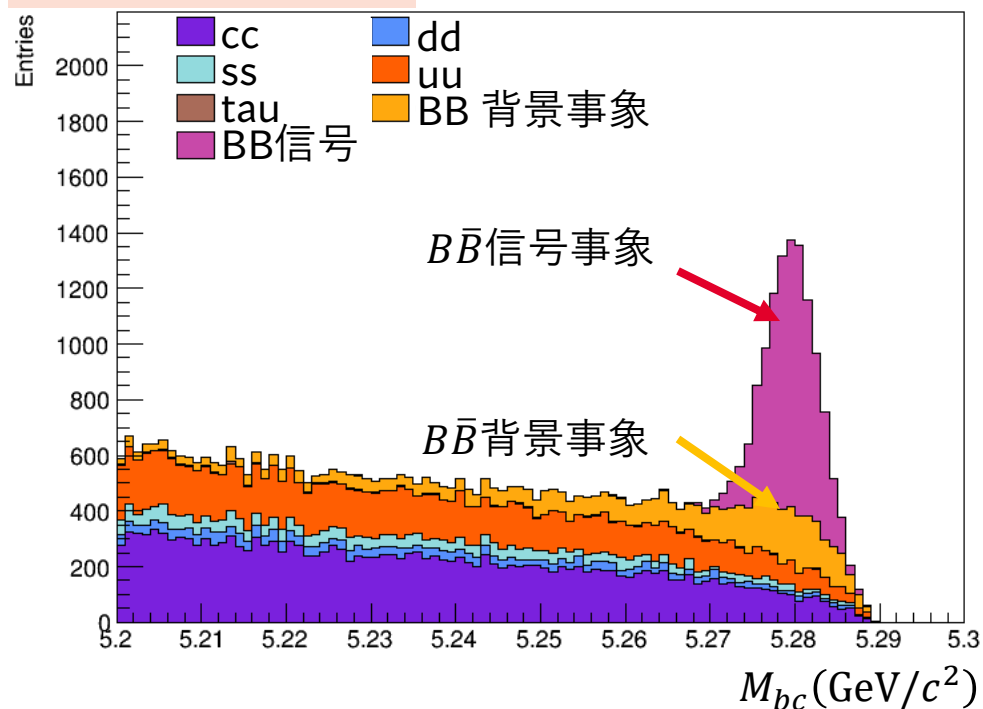
Continuum事象抑制後の M_{bc}

■ M_{bc} 分布

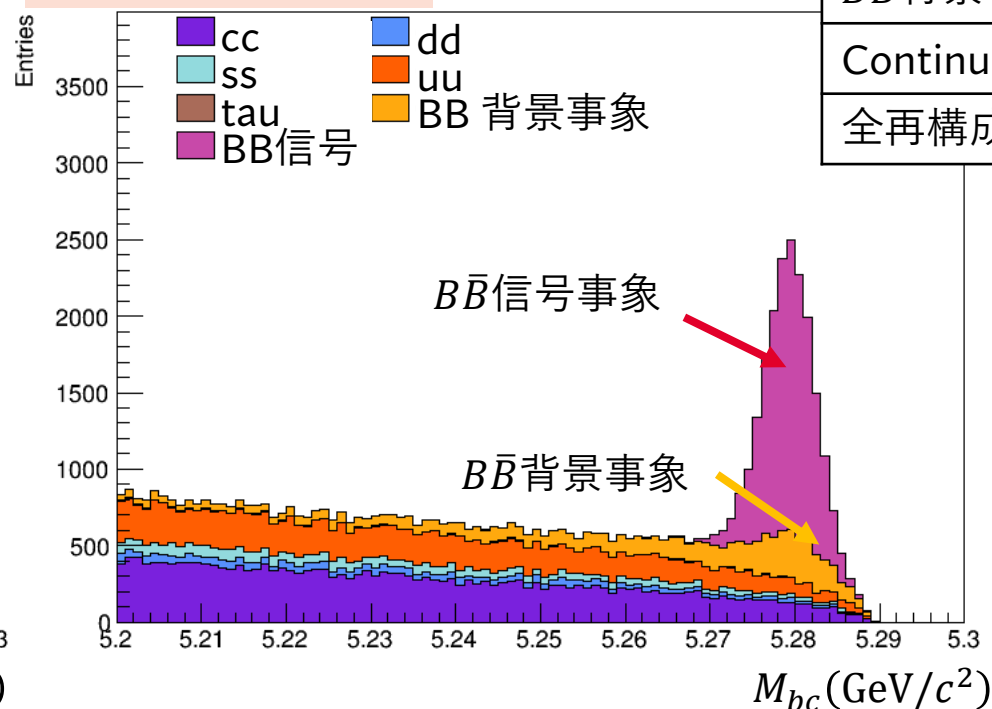
- (Continuum 事象抑制の) BDT output > 0.96を要求
- Continuum事象抑制後、 $B\bar{B}$ イベントのうち、 M_{bc} にピークを作る背景事象が見られる

➤ 主に $b \rightarrow s\gamma$ 背景事象、 $\pi^0, \eta \rightarrow \gamma\gamma$ で説明される

B^0 (MC 1.9/ab)



B^+ (MC 1.9/ab)

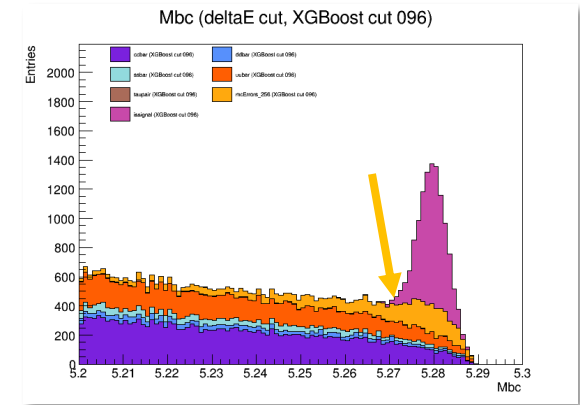
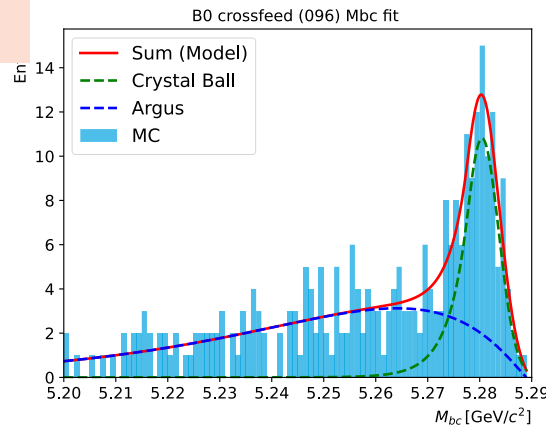


	B^0	B^+
信号事象	7398	14078
$B\bar{B}$ 背景事象	2963	4230
Continuum事象	4730	6148
全再構成イベント数	15091	24456

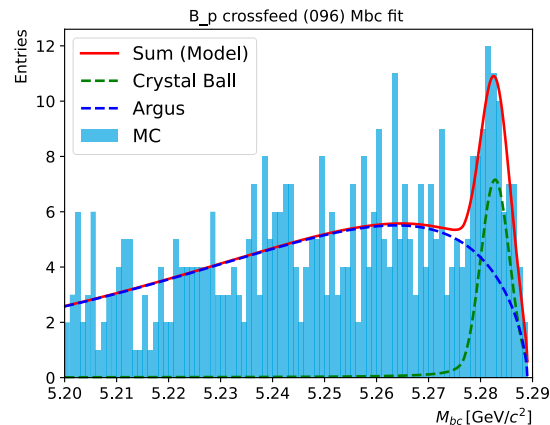
$b \rightarrow s\gamma$ の背景事象で、 M_{bc} ピークを作るイベント

- ピークとその他のcombinatorial成分について、ARGUS関数 + Crystal Ball関数
- MC情報にしたがって、個別にフィッティング

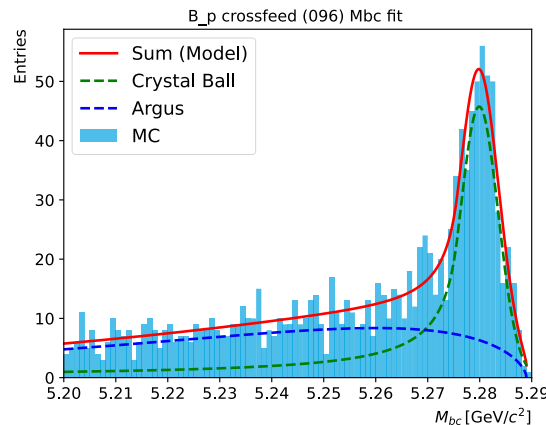
$$B^0 \rightarrow K^0 \pi^0 \gamma$$



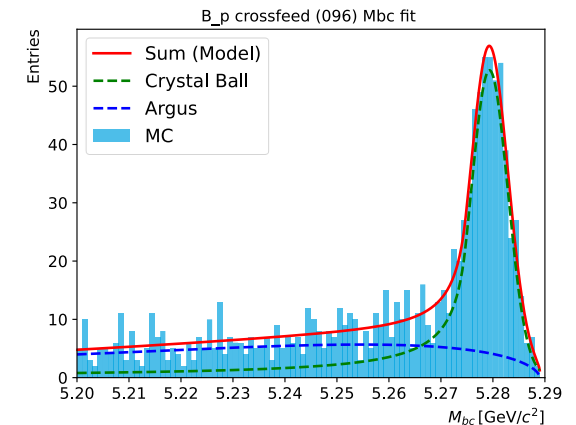
$$B^+ \rightarrow K^0 \pi^0 \pi^+ \gamma$$



$$B^+ \rightarrow K^0 \pi^+ \gamma$$



$$B^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^+ \pi^- \gamma$$

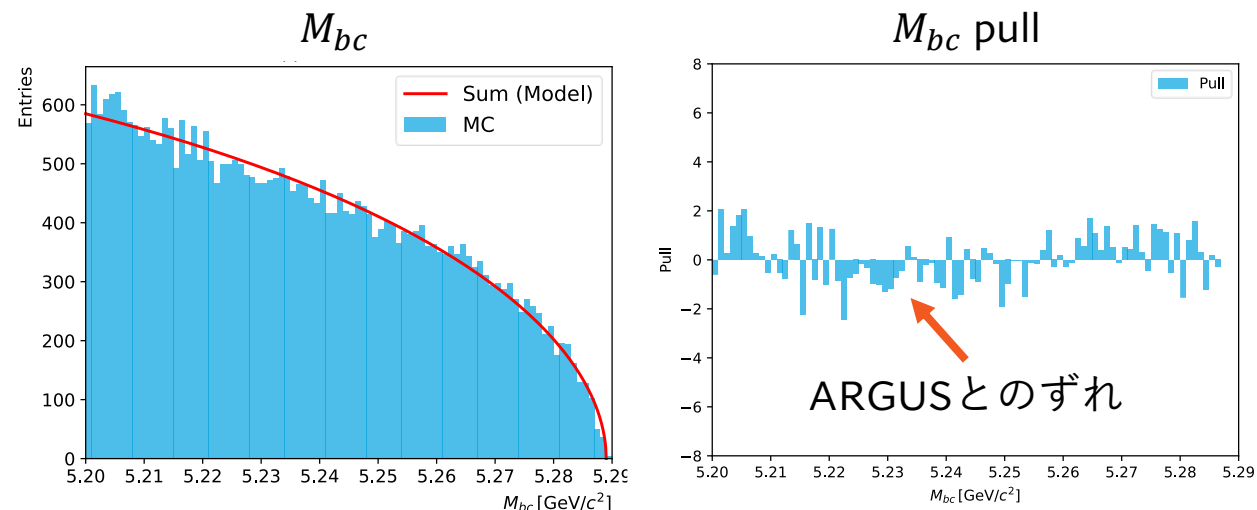


Continuum事象のフィッティング

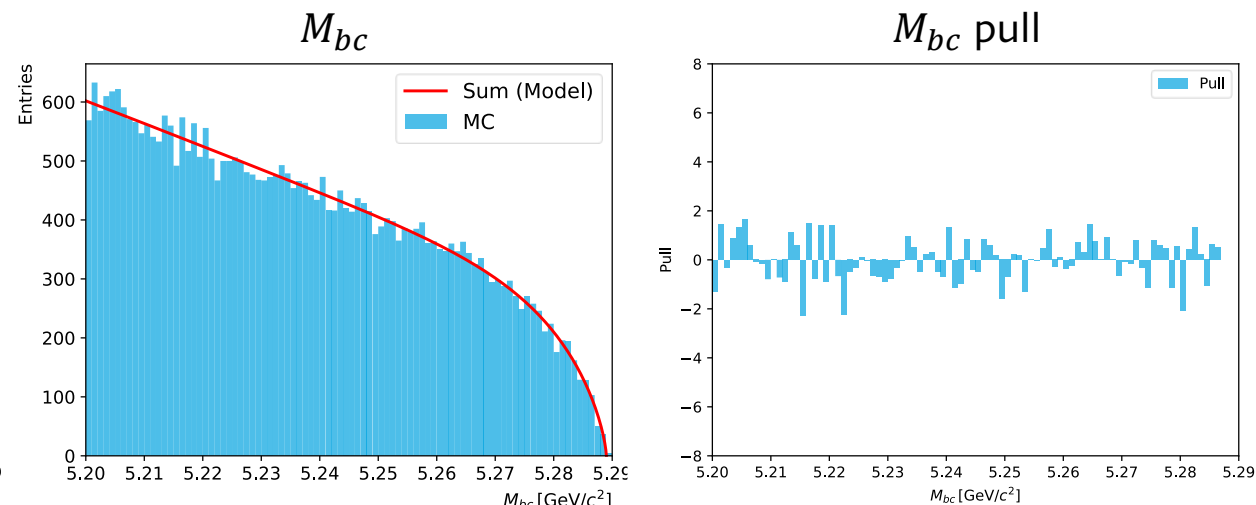
- Continuum事象： M_{bc} 分布が、通常のARGUS関数と一部フィットしない
 - ISR/FSRを含むイベントと、その他のイベントのARGUS関数の形状が異なる
- 方針：2つのARGUS関数の和でフィット

$$f(x) = x \left\{ 1 - \left(\frac{x}{E_{\text{beam}}} \right)^2 \right\}^p \cdot \left\{ \exp \left[c \left\{ 1 - \left(\frac{x}{E_{\text{beam}}} \right)^2 \right\} \right] + \exp \left[c_2 \left\{ 1 - \left(\frac{x}{E_{\text{beam}}} \right)^2 \right\} \right] \right\}$$

B^0 再構成時のcontinuum (1つのARGUS関数)



B^0 再構成時のcontinuum (2つのARGUS関数の和)



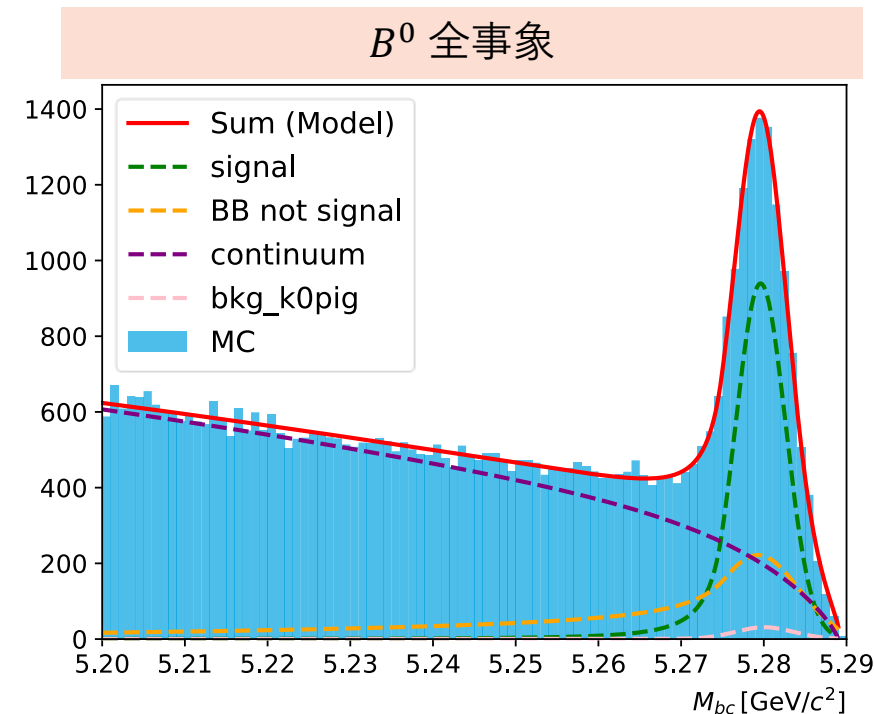
イベント数をカウント

■フィッティング後、信号領域 ($5.267 \text{ GeV}/c^2 < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}/c^2$) のイベント数

●MC 1.946 /abを利用

●実験データ (0.808/ab) にスケール

	B^0	B^+
信号事象	3072	5841
$b \rightarrow s\gamma$ 背景事象	59	554
残りの $B\bar{B}$ 背景事象	954	1139
Continuum事象	1961	2558
背景事象合計	2974	4251
合計	6045	10092



●Continuum事象抑制、フィッティング手法を確立

まとめ

■ $B \rightarrow K\pi\pi\gamma$ の解析

- 標準模型で抑制されており、新物理が存在する場合に寄与が表れやすい
- Belle II における測定が（特に B^0 崩壊について）重要
- 直接的CP非対称度から新物理を探索可能
- 信号シミュレーション、背景事象を含めたシミュレーションデータセットにより解析手法を開発
- Unbinned fitによりPDFモデルを評価し、Continuum事象のPDFの候補を確立した

■ 今後

- 系統誤差の見積もり
- Dalitz変数を用いた、直接的CP非対称度の測定感度の見積もり

