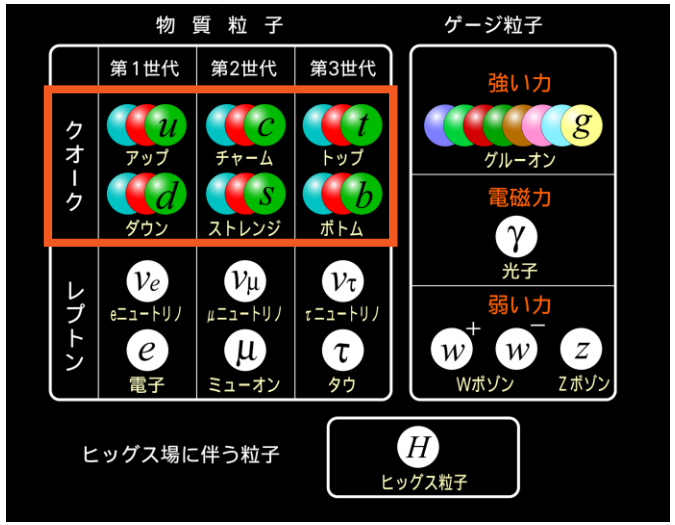
Belle II 実験における$B \to K\pi\pi\gamma$崩壊を用いた直接的CP非対称性の測定手法の開発

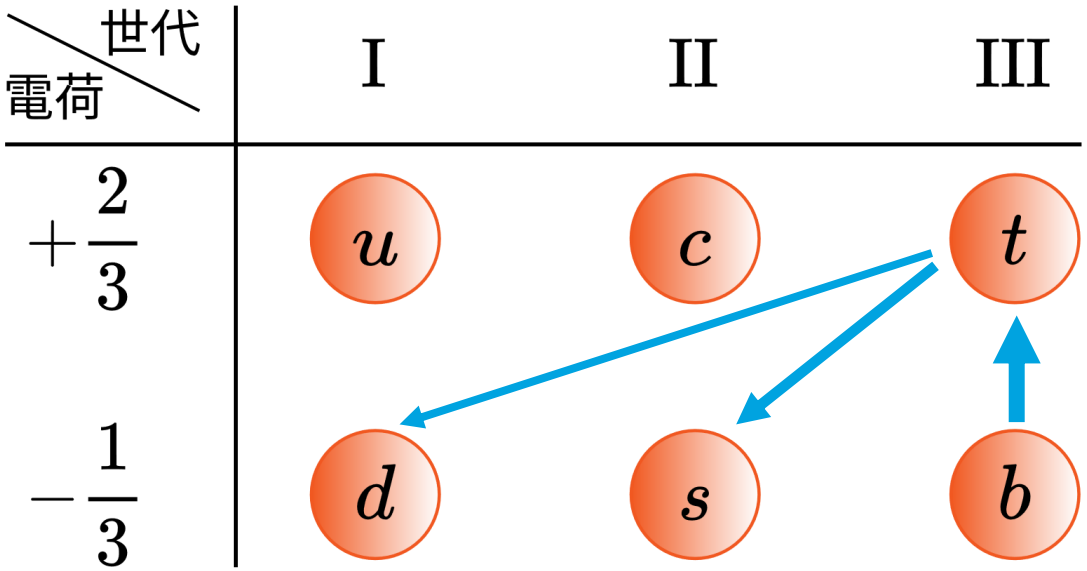
黒川 俊輔, 角野 秀一, 石川 明正[A, B], 他 Belle II Collaboration
東京都立大学, KEK[A], 総研大[B]

Flavor Physics Workshop, 2026-11-18

Flavor Changing Neutral Current

- “フレーバーを変える中性カレント過程”
  - $b \to s, d$のような遷移
  - (d, s, b)は基底をなすので、d, s, b間でフレーバーを変えるには(u, c, t)を介す必要がある（=高次の過程）
  - 抑制されていることから、稀崩壊と呼ばれる





$|V_{tb}^* V_{td}| \sim 10^{-4}$　$|V_{tb}^* V_{ts}| \sim 10^{-3}$

$V_{tb} \sim 1$なので、高次過程でも
崩壊分岐比は比較的大きい

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

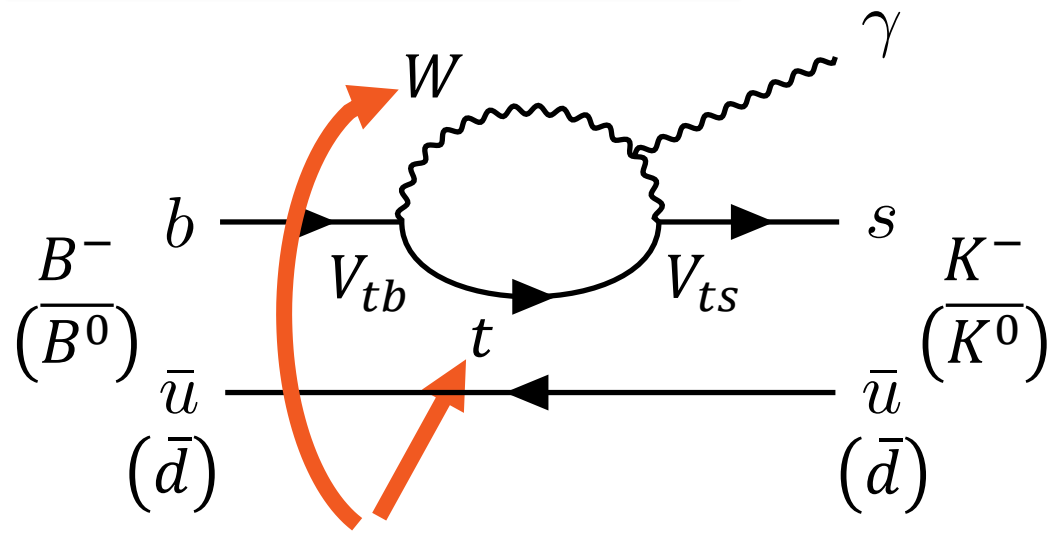
Flavor Changing Neutral Current

■“フレーバーを変える中性カレント過程”

- （ツリーダイアグラムは禁止され、）ループダイアグラムで表される
- 標準模型過程が抑制されているため、もし**新物理の寄与が存在すれば、比較的観測しやすい**

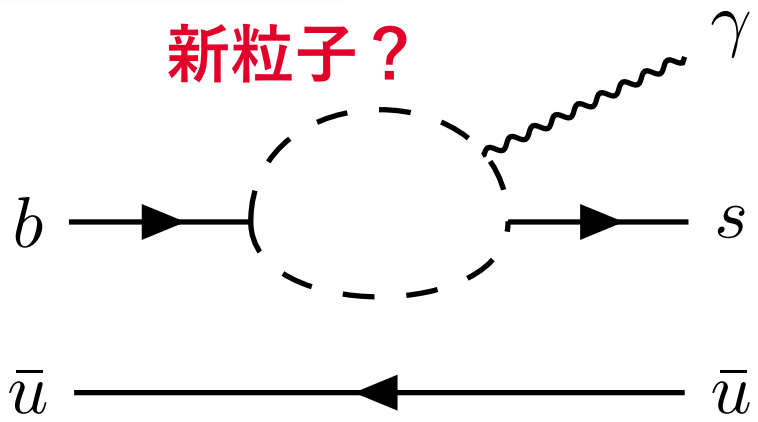
ペンギン崩壊とも呼ばれる

標準模型で許される$b \to s\gamma$



質量合計~260 GeV
B中間子 (5.28 GeV) の50倍

新物理の例

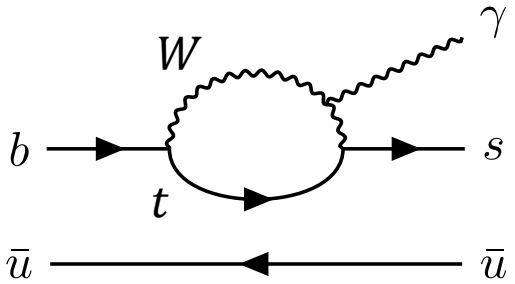


荷電ヒッグス？
超対称性粒子？

$B \to K\pi\pi\gamma$ 崩壊

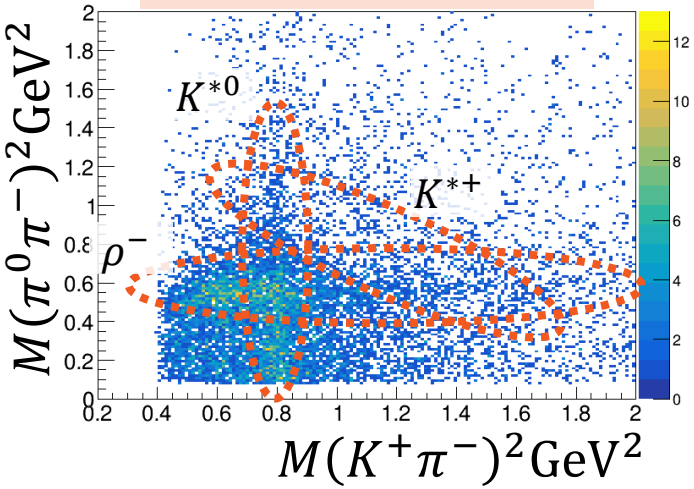
- $b \to s\gamma$崩壊
  - 標準模型で抑制され、新物理に高感度なFlavor Changing Neutral Current過程
  - ループに$H^{\pm}$やW_Rが寄与する可能性[1]：右巻き相互作用の探索に有用
- 本研究：$B^+ \to K^+\pi^-\pi^+\gamma$ と $B^0 \to K^+\pi^-\pi^0\gamma$における直接的CP非対称性$A_{CP}$の測定
  - Dalitz変数を用いて$M(K\pi\pi)$の領域毎にA_{CP}を測定

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



- 先行研究
  - $B^{\pm} \to K^{\pm}\pi^{\mp}\pi^{\pm}\gamma$ 崩壊
    - LHCb によりA_{CP}が測定された[2]が、Belle (II) では未測定
      - zero consistent: $A_{CP} = -0.007 \pm 0.015\ (\text{stat}) \pm 0.008\ (\text{syst})$
  - $B^0 \to K^+\pi^-\pi^0\gamma$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 (K^{*0}, K^{*+}, ρ^-) の共鳴状態が寄与することにより、$B \to K\pi\gamma$よりも直接的CP非対称性が大きく出る

MC (1.946/ab)

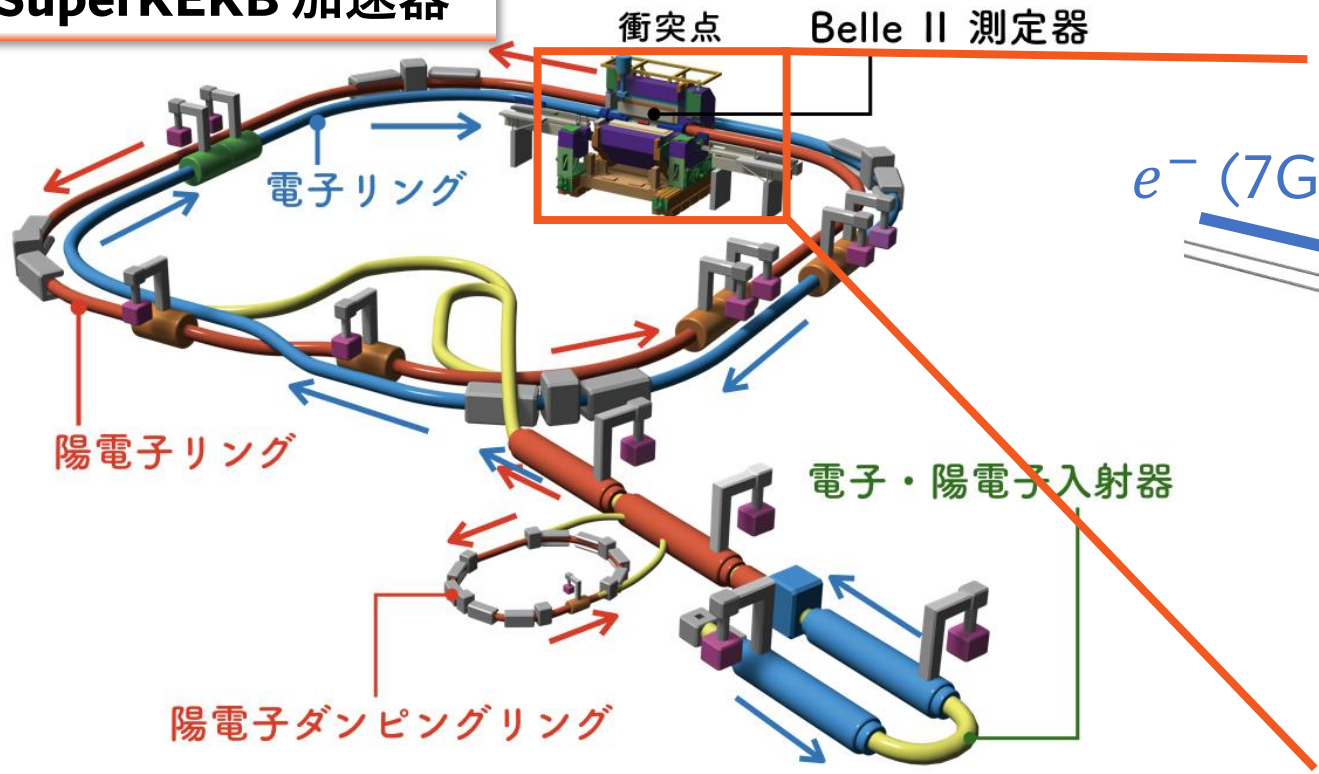


[1] arXiv:1111.5014 [hep-ph]
[2] LHCb-CONF-2013-009

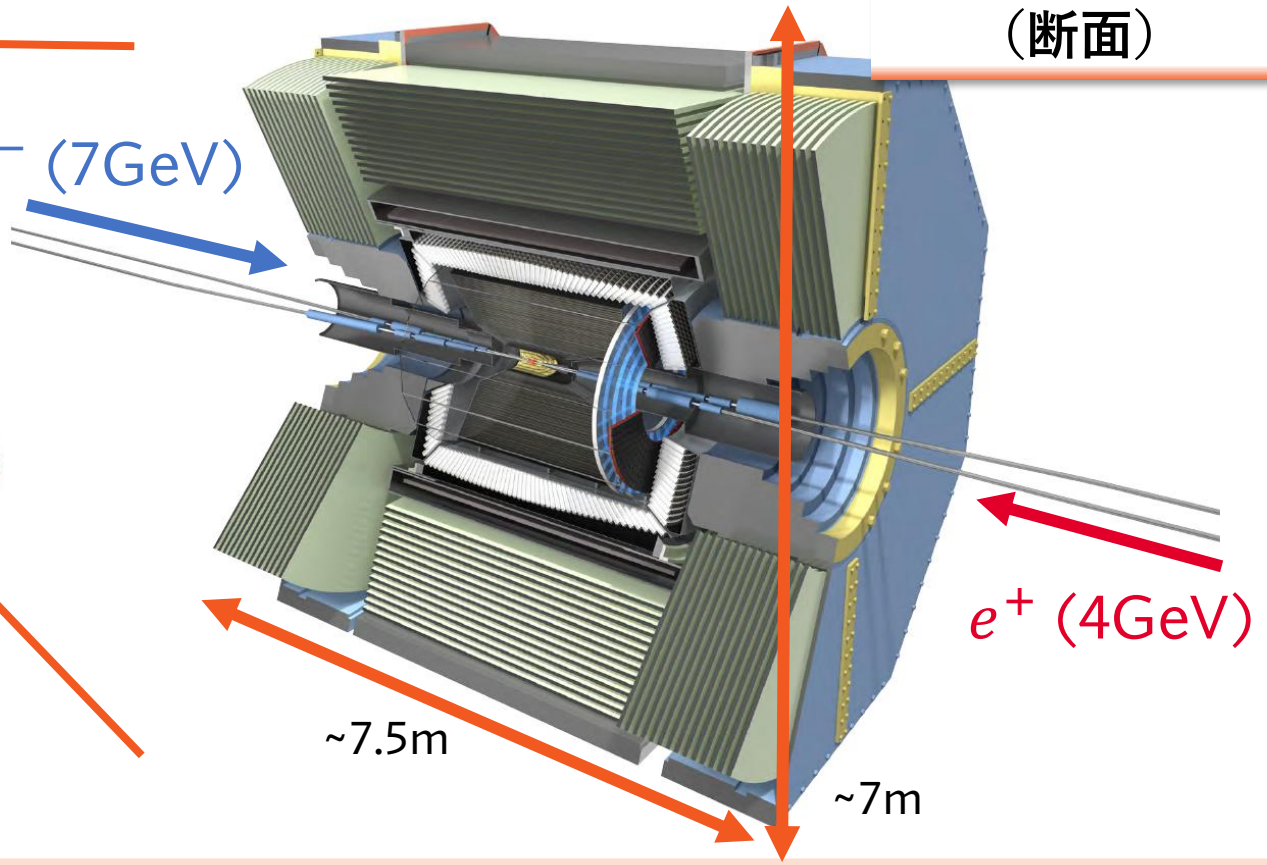
SuperKEKB/Belle II 実験

- 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）



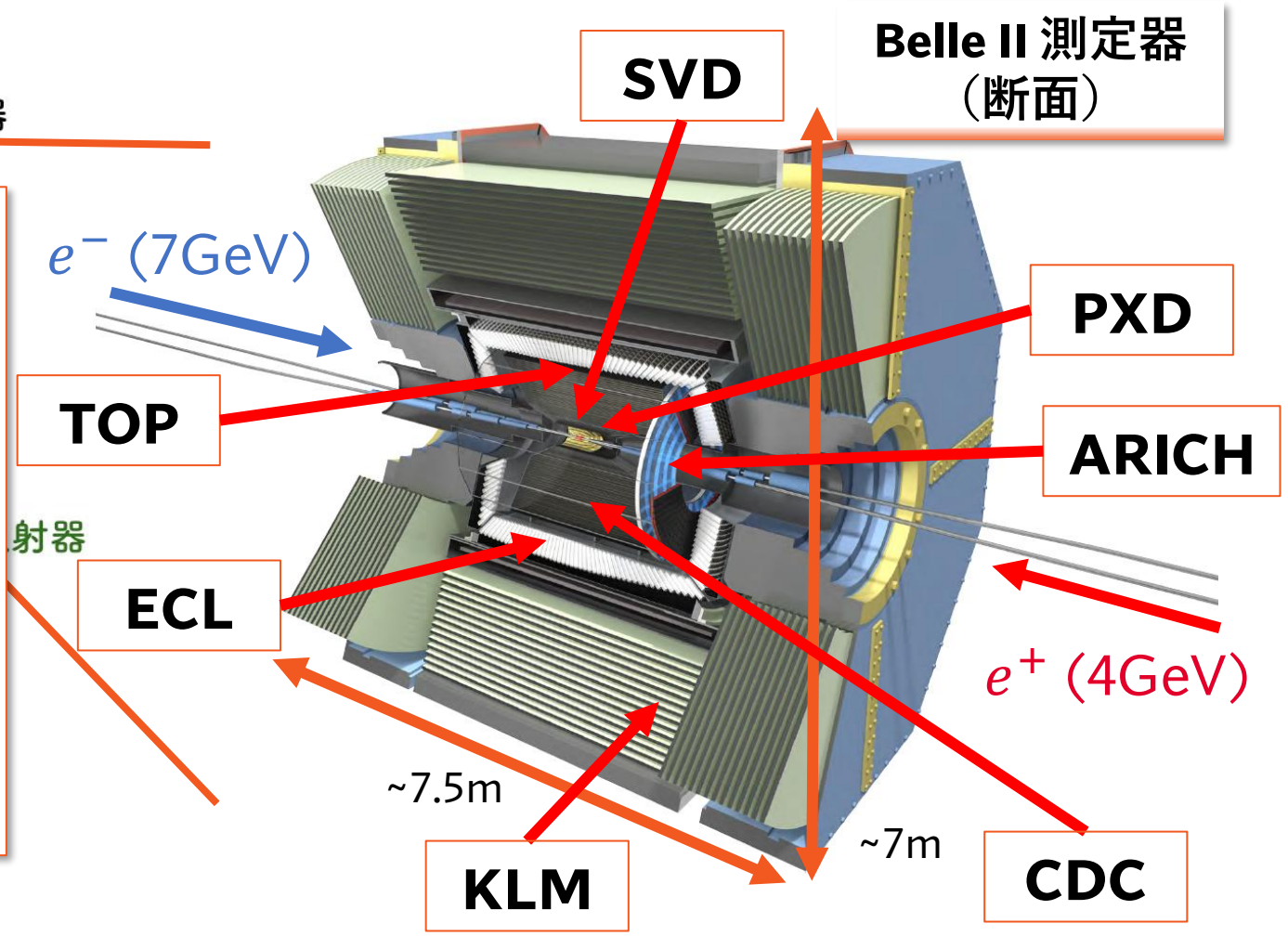
Belle II 測定器

- 衝突点に設置
- 各検出器で役割を分担



- Belle II を構成する検出器
  - PXD（ピクセル検出器）
  - SVD（シリコンバーテックス検出器）
  - CDC（中央飛跡検出器）
  - TOPカウンター
  - ARICH（エアロゲルRICHカウンター）
  - KLM（KL0/ミューオン検出器）
  - ECL（電磁カロリメーター）

この他にトリガーシステムやDAQシステム等



解析の流れ

- モンテカルロシミュレーション (MC)
  - 各検出器の測定量から、抽象的な物理量を計算したデータセットを利用
  - 今回は1.946 /ab
- B中間子候補事象の再構成
  - 緩い選別条件を設定
- 再構成後の候補事象をさらに選別
  - 条件を吟味して、よりB中間子らしい事象に絞り込む
  - MC情報と比較
  - 背景事象の選別
- …
- 実験データについて、同様に解析
  - A_{CP}の導出

信号事象をできるだけ残しつつ、
背景事象は削減したい

直接的CP非対称性の測定手法

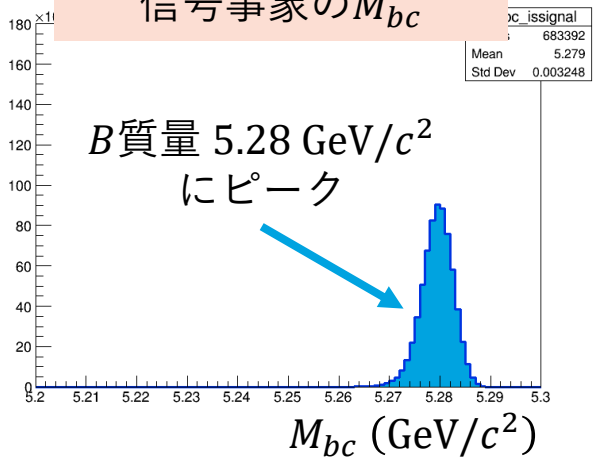
■解析手法

- $B^+ \to X_s\,(\to K^+\pi^+\pi^-)\,\gamma$、$B^0 \to X_s\,(\to K^+\pi^-\pi^0)\,\gamma$崩壊事象を再構成
  - 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})
    - $M_{bc} = \sqrt{(E_{\mathrm{beam}}/c^2)^2 - (p_B/c)^2} > 5.2\ \mathrm{GeV}/c^2$

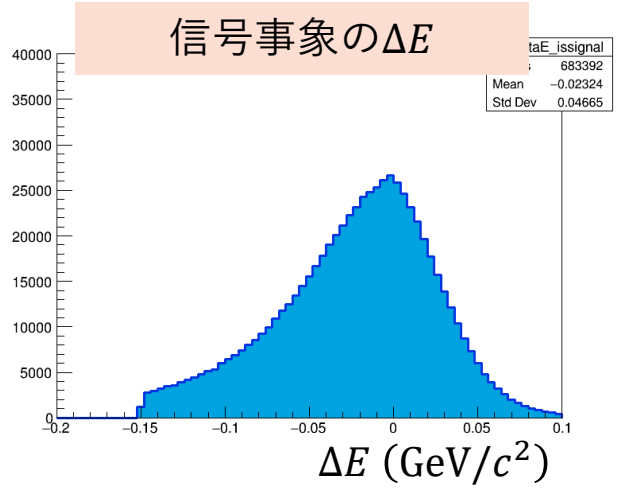
      重心系ビームエネルギー　　B中間子候補の運動量
  - B中間子の質量情報 : ΔE
    - $\Delta E = E_B - E_{\mathrm{beam}}\ (-0.15\ \mathrm{GeV} < \Delta E < 0.1\ \mathrm{GeV})$

      B中間子候補のエネルギー
  - $M(K\pi\pi) < 2.4\ \mathrm{GeV}/c^2$に限定
  - $\pi^0, \eta \to \gamma\gamma$を多変量解析で抑制
- 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

信号事象のM_{bc}



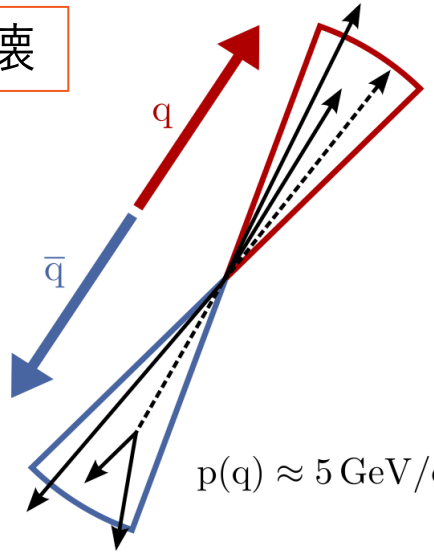
信号事象のΔE



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 $e^+e^- \to q\bar{q}\ (q = u, d, s, c)$
  - 重心系でのイベント形状の違いで抑制できる

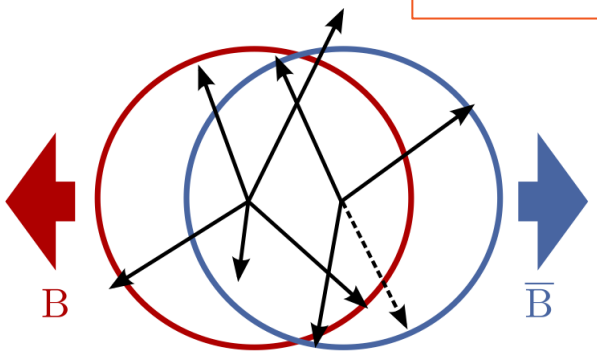
$q\bar{q}$はジェット状に崩壊



$\mathrm{p(q) \approx 5\,GeV/c}$

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

$B\bar{B}$はほぼ静止して崩壊



$\mathrm{p(B) \approx 0.3\,GeV/c}$

$\mathrm{e^+e^- \to \Upsilon(4S) \to B\overline{B}}$

- 信号事象との分離にはFox-Wolfram momentなどの変数が用いられる
  - 球面調和関数を用いて粒子の空間分布を表現

機械学習によるContinuum事象抑制

- 機械学習で信号とcontinuum事象を選別
  - Continuum事象の抑制に利用する変数が22個
  - 機械学習を用いて、これらの変数が、信号事象であるかに相関をしているか調べる（信号らしさにfitするモデルを探す）

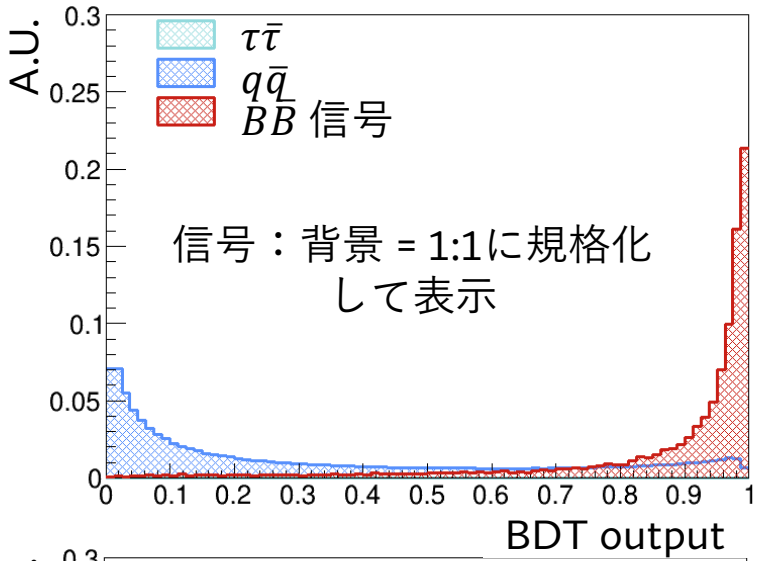
- 手法 : 勾配ブースティング決定木 (Gradient **B**oosted **D**ecision **T**ree)
  - 教師あり学習を行う
  - モデルと正解の差を表現する目的関数（損失関数）について偏微分（勾配）を求め、勾配が小さくなるように、繰り返しモデルを調整する (boosting)
  - モデルには決定木 (decision tree) を用いる

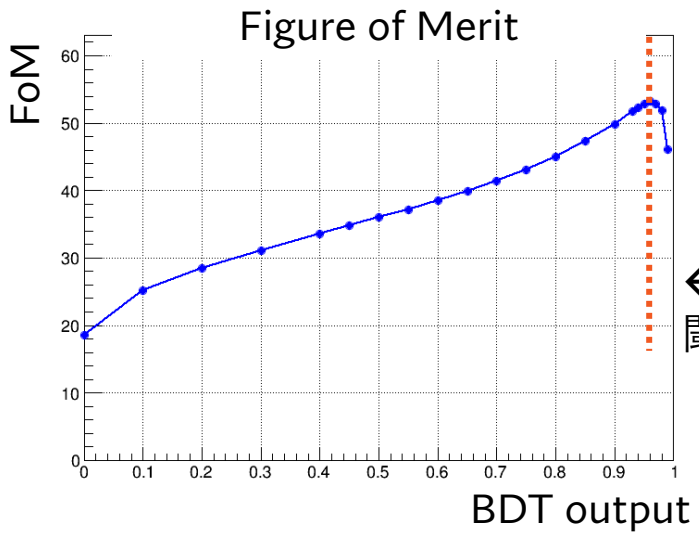
  - →XGBoostを用いて学習

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

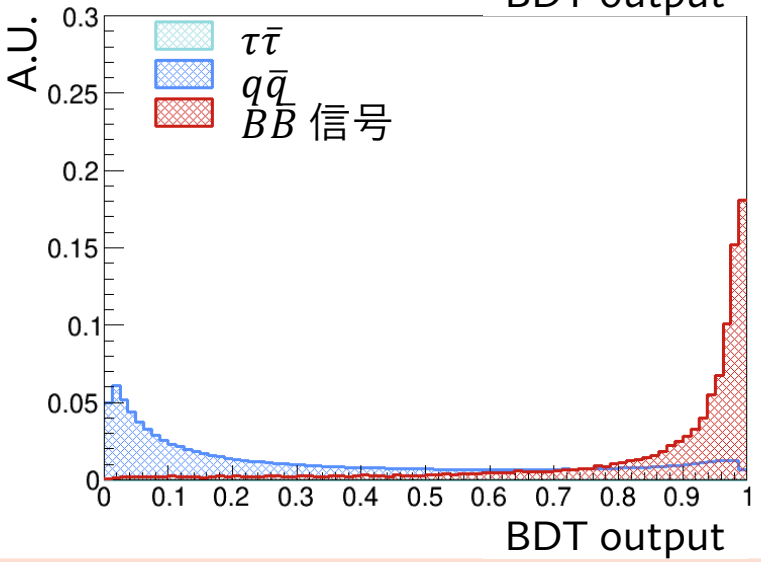


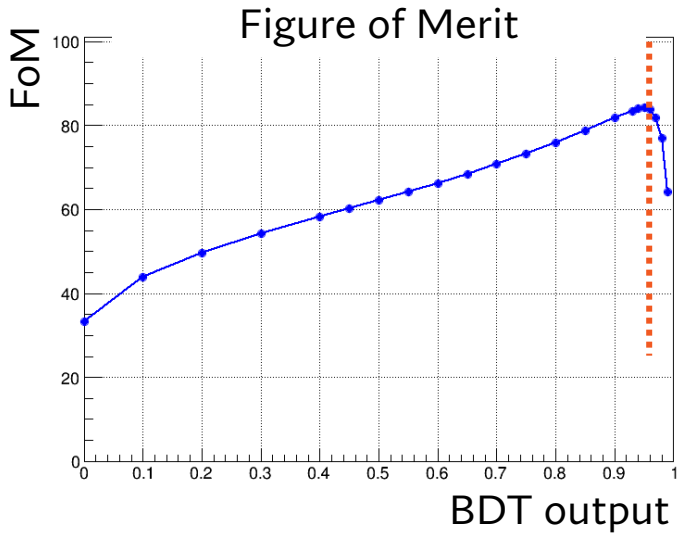


$$\mathrm{FoM} = \frac{\text{信号事象数}}{\sqrt{\text{信号事象数} + \text{背景事象数}}}$$

← 信号確率=0.96に閾値を決定

B^+



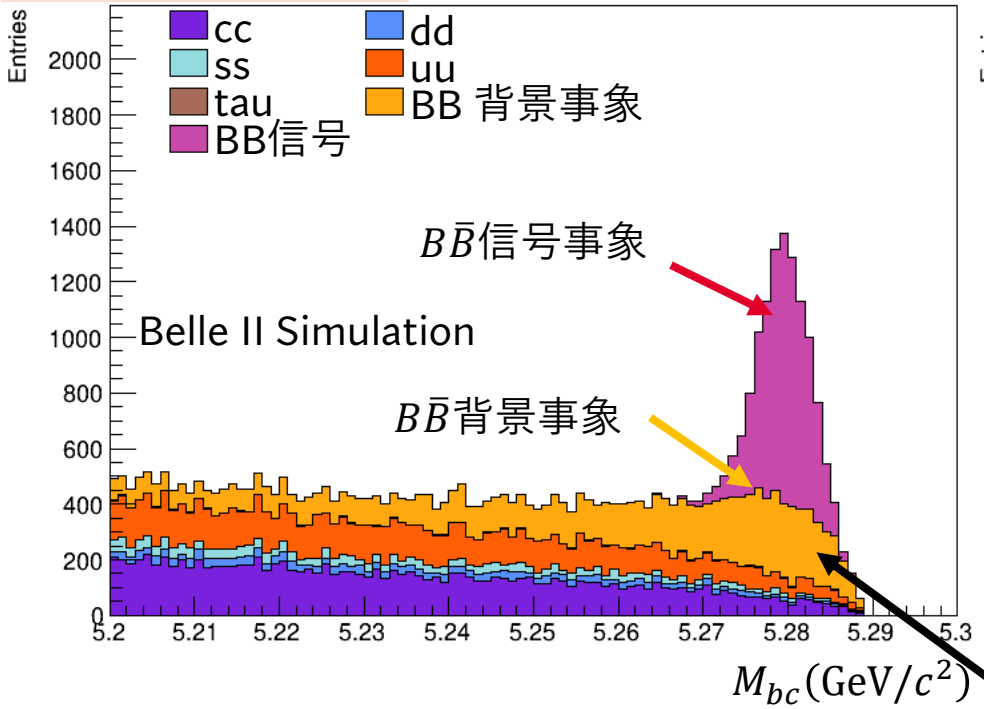


Continuum事象抑制後のM_{bc}

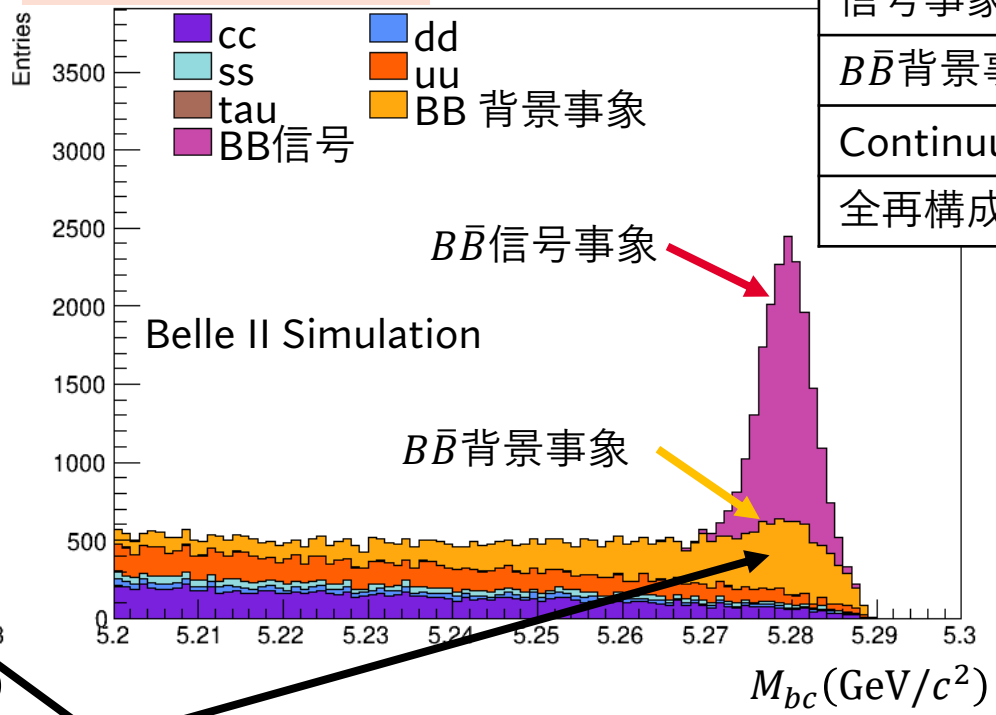
■M_{bc}分布

- （Continuum 事象抑制の）BDT output > 0.96を要求

B^0 (MC 1.946/ab)



B^+ (MC 1.946/ab)



	B^0	B^+
信号事象	7114	13051
$B\bar{B}$背景事象	3298	3906
Continuum事象	3139	3510
全再構成イベント数	13551	20467

- $B\bar{B}$背景事象のうち、M_{bc}にピークを作るものが見られる
  - 主に$b \to s\gamma$背景事象、$\pi^0, \eta \to \gamma\gamma$で説明される

M_{bc}のフィッティング

- フィット手法: Unbinned Negative Log Likelihood
- 事象別にモデルを設定
  - 信号事象： Crystal Ball関数
  - $B\bar{B}$背景事象 : ARGUS関数 + Crystal Ball関数
    - $b \to s\gamma$の背景事象で、ピークを作るものは別にfit
  - Continuum事象 : ARGUS関数

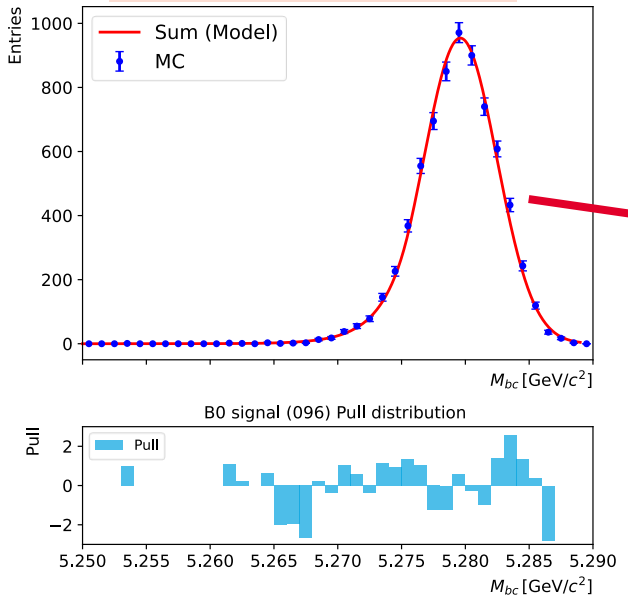
Crystal Ball

$$f(x;\mu,\sigma,\alpha,n) = \begin{cases} \exp(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}), & \text{for } \frac{x-\mu}{\sigma} \geqslant -\alpha \\ A\cdot(B-\frac{x-\mu}{\sigma})^{-n}, & \text{for } \frac{x-\mu}{\sigma} < -\alpha \end{cases}$$

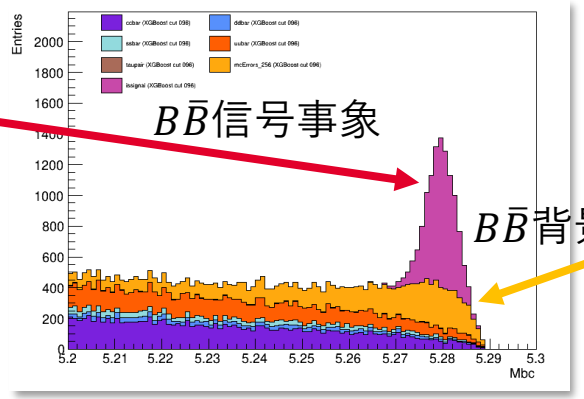
ARGUS

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

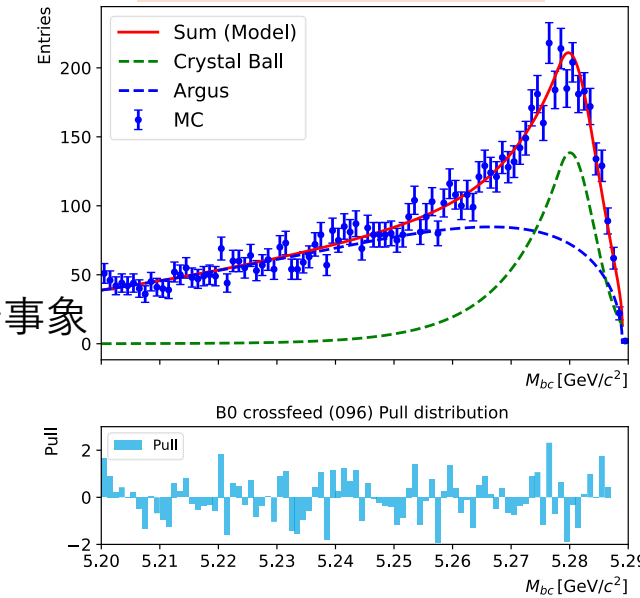
B^0信号事象



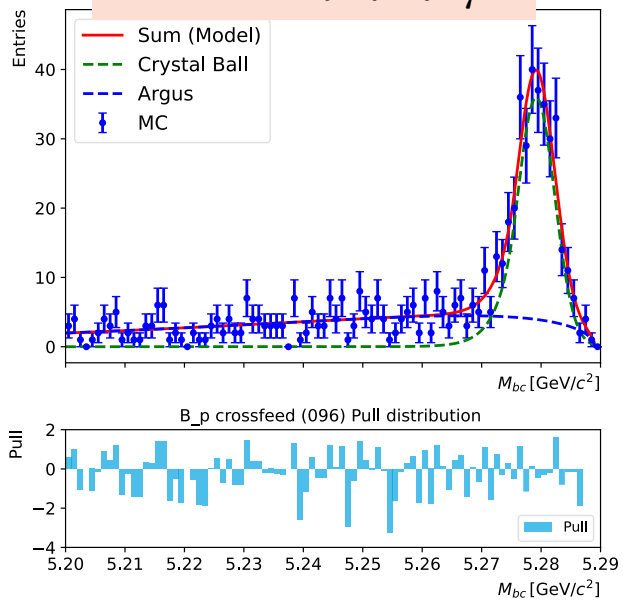
B^0 M_{bc}分布



B^0背景事象



$b \to s\gamma$の背景事象
$B^+ \to K^+\pi^0\pi^+\pi^-\gamma$



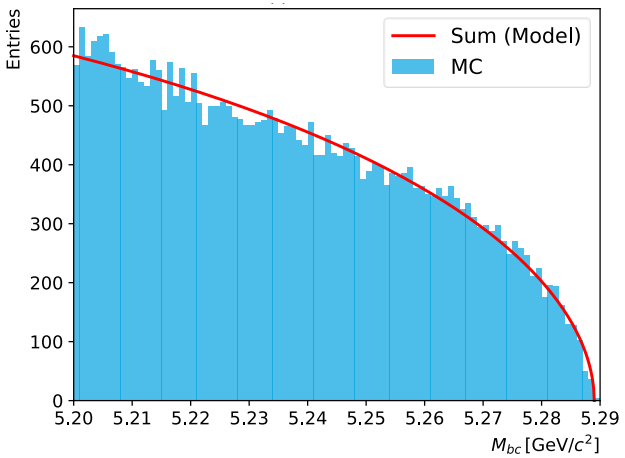
Continuum事象のフィッティング

- $b \to s\gamma$ではないγを含むイベントと、その他のイベントで、M_{bc}分布のARGUS関数の形状が異なる
  - →**<u>2つのARGUS関数の和</u>**でフィット

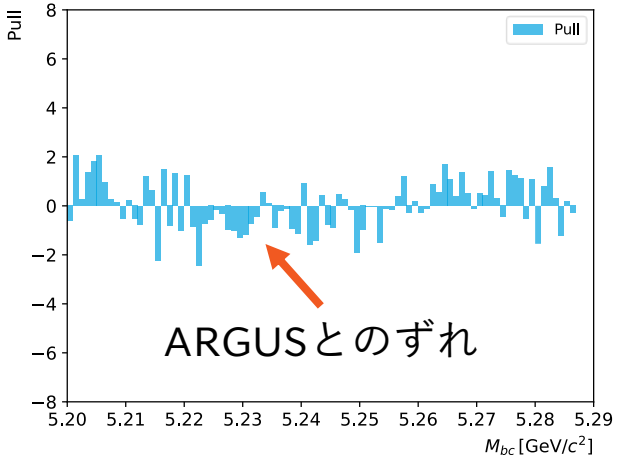
$$f(x) = x\left\{1 - \left(\frac{x}{E_{\mathrm{beam}}}\right)^2\right\}^p \cdot \left\{\exp\left[c\left\{1 - \left(\frac{x}{E_{\mathrm{beam}}}\right)^2\right\}\right] + \exp\left[c_2\left\{1 - \left(\frac{x}{E_{\mathrm{beam}}}\right)^2\right\}\right]\right\}$$

B^0再構成時のcontinuum （1つのARGUS関数）

M_{bc}

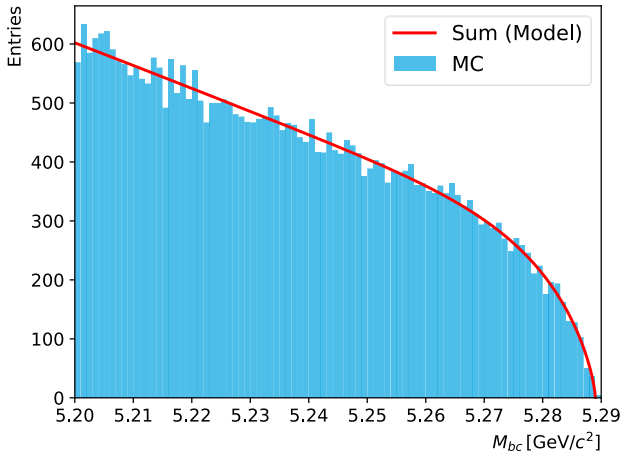


M_{bc} pull

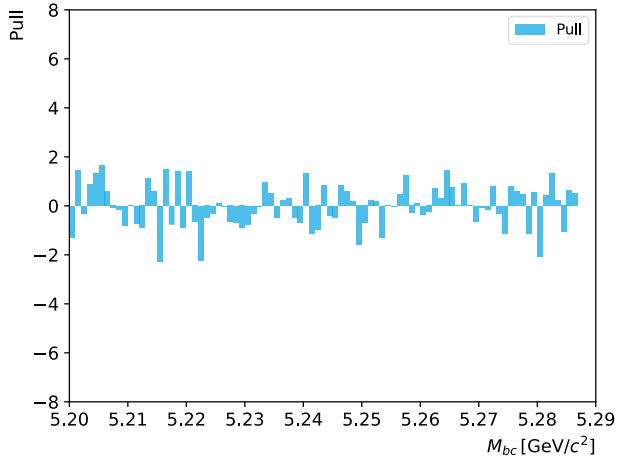


B^0再構成時のcontinuum （2つのARGUS関数の和）

M_{bc}



M_{bc} pull



まとめ

- $B \to K\pi\pi\gamma$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 においての測定が（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によりフィッティングモデルを評価し、安定性を確認
  - $A_{CP} = 0$を仮定した統計誤差の見積もりを得た

- 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