

# Measurement of Branching Fractions of $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$ Decays at the Belle II experiment

Belle II 実験における  $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$  過程の崩壊分岐比の測定

素粒子実験研究室

佐藤 瑤



# 物理的背景

$b \rightarrow s\ell^+\ell^-$  について

解析の枠組み

本研究の目標

LHC 13 TeV における直接探索で標準模型を超える物理の兆候が得られていない

→ 新物理はより高いエネルギー領域に存在？ 間接探索が重要に！

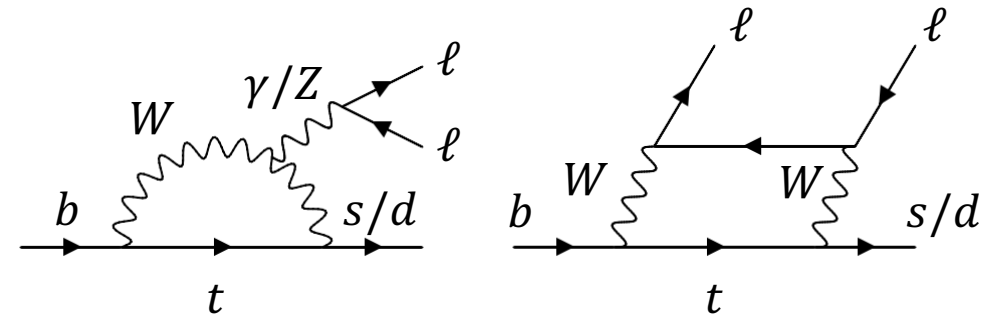
## $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ 過程

### □ Flavor Changing Neutral Current (FCNC)過程

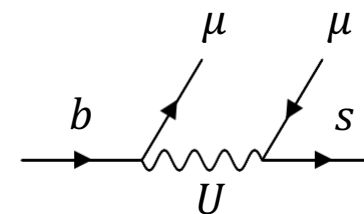
- 標準模型ではループを介するダイアグラムで生成
- ループに現れる新粒子やFCNCをツリーレベルで生じさせる新物理の探索に有効

- $q^2(= M_{\ell^+\ell^-}^2)$  とレプトンの角度分布を使うことで、新物理探索に重要な観測量が豊富に得られる

### 標準模型における $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ のダイアグラム



### 新物理における $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ のダイアグラムの例



$U$  : ベクター型の  
Leptoquark

- 理論的解析フレームワーク
- 重い粒子( $t$ -クォーク, $W,Z$ など)の寄与を積分して、 $b \rightarrow s$  過程のHamiltonianを計算

$$\mathcal{H}_{\text{eff}}^{\text{SM}} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} \left[ V_{tb}V_{ts}^* \sum_{i=1}^{10} C_i \mathcal{O}_i + V_{ub}V_{us}^* \sum_{i=1}^2 C_i (\mathcal{O}_i - \mathcal{O}_i^u) \right]$$

- 重い粒子はWilson係数  $C_i$  に、軽い粒子は $\mathcal{O}$  に含まれる

$$\mathcal{O}_7 = \frac{e}{16\pi^2} m_b (\bar{s}_L \sigma^{\mu\nu} b_R) F_{\mu\nu},$$

- 標準模型では、 $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$  は $\mathcal{O}_{7,9,10}$  のオペレータで記述

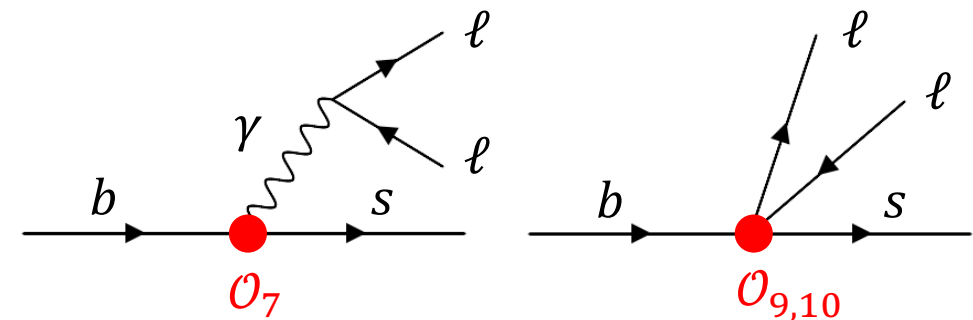
$$\mathcal{O}_9 = \frac{e}{16\pi^2} m_b (\bar{s}_L \gamma_\mu b_L) \sum_{\ell} (\bar{\ell} \gamma^\mu \ell),$$

- 標準模型： $C_7 \sim -0.33, C_9 \sim 4.1, C_{10} \sim -4.2$

$$\mathcal{O}_{10} = \frac{e}{16\pi^2} m_b (\bar{s}_L \gamma_\mu b_L) \sum_{\ell} (\bar{\ell} \gamma^\mu \gamma_5 \ell).$$

- 新物理が存在すると、Wilson係数のズレや、異なるオペレータの寄与として現れる

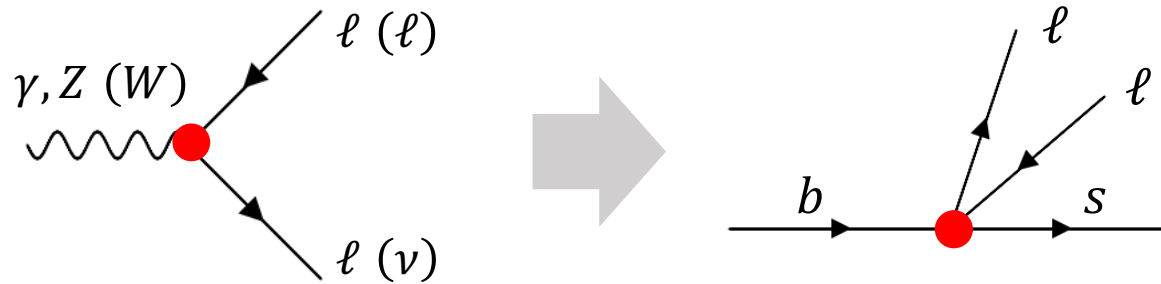
- モデル非依存な探索が可能



|       | Exclusive decay : $B \rightarrow K^{(*)}\ell^+\ell^-$                              | Inclusive decay : $B \rightarrow X_s\ell^+\ell^-$                                     |
|-------|--|---|
| 手法    | 特定のハドロン終状態 : $K^{(*)}$   | s-クォークを含む全ハドロン終状態 : $X_s$   |
| 実験的特徴 | 実験的に測定が比較的容易   | <b>背景事象が非常に多い</b><br>(LHCb での研究は困難)   |
| 理論的特徴 | ハドロン不定性が大きい<br><ul style="list-style-type: none"> <li>崩壊分岐比の比を取る等の工夫が必要</li> </ul> | <b>ハドロン不定性が小さい</b><br><ul style="list-style-type: none"> <li>崩壊分岐比自体の測定も重要</li> </ul> |
| 研究状況  | <b>LHCbで標準模型からの乖離が見られている</b><br>(次ページで詳細)  | BaBar, Belle の結果は <b>統計誤差</b> が大きく、<br>有意な乖離は発見されていない                                 |

**$B \rightarrow X_s\ell^+\ell^-$  の研究で  $B \rightarrow K^{(*)}\ell^+\ell^-$  の結果を検証することが重要**  
**→ Belle II 実験は高統計量で  $B \rightarrow X_s\ell^+\ell^-$  の研究ができる唯一の実験**

- 標準模型のゲージ結合は、レプトンの種類に依らず普遍的

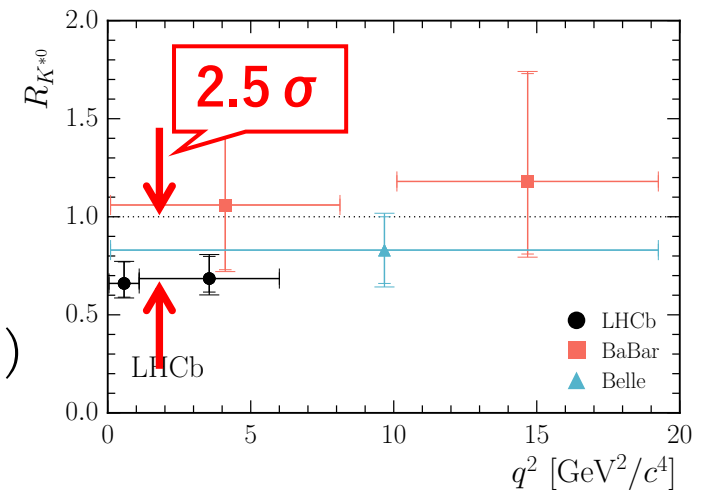
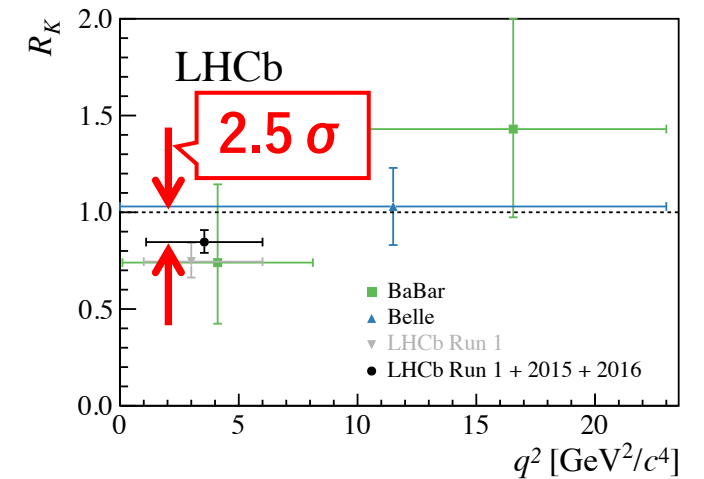


崩壊分岐比の電子とミュオンとの比,  $R_{K^{(*)}}$  :

$$R_{K^{(*)}} [q_0^2, q_1^2] = \frac{\int_{q_0^2}^{q_1^2} dq^2 \frac{d\Gamma(B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-)}{dq^2}}{\int_{q_0^2}^{q_1^2} dq^2 \frac{d\Gamma(B \rightarrow K^{(*)} e^+ e^-)}{dq^2}}$$

- $\ell = e, \mu$  で崩壊分岐比は同じ  $\rightarrow R_{K^{(*)}} = 1.00$  ( $q^2 (= M_{\ell\ell}^2) > 1.0 \text{ GeV}^2$ )
- $R_K, R_{K^*}$  のいずれも 1 より小さい方向にずれている ( $1 \leq q^2 \leq 6 \text{ GeV}^2$ )  
= レプトン普遍性の破れ? 新物理?

LHCb の  $B \rightarrow K^{(*)} \ell^+ \ell^-$  における  $R_K$  (上) と  $R_{K^*}$  (下) の測定結果



目標： Belle II 実験で初めて  $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$  についての測定を行う

Belle II 実験の **Golden mode** の一つ. 将来の研究に向けて解析手法を確立する

## □ 崩壊分岐比

- 新物理探索に重要な観測量

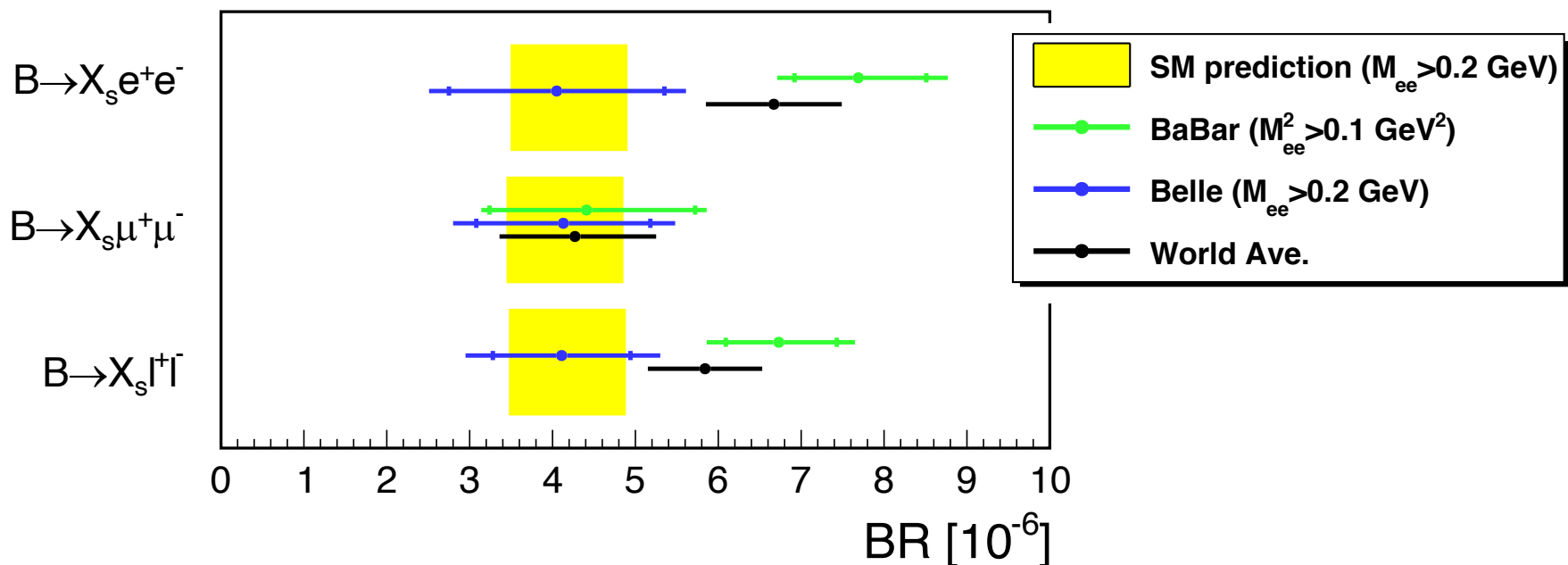
$$\mathcal{B}(B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-) = \frac{\Gamma(B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-)}{\Gamma_{\text{total}}}$$

## □ $R_{X_s}$ : 崩壊分岐比の電子とミューオンの比

- 比を取ることで系統誤差をキャンセル出来るため、実験初期で特に重要
- LHCb 実験の  $R_{K^{(*)}}$  のアノマリーの検証

$$R_{X_s}[q_0^2, q_1^2] = \frac{\int_{q_0^2}^{q_1^2} dq^2 \frac{d\Gamma(B \rightarrow X_s \mu^+ \mu^-)}{dq^2}}{\int_{q_0^2}^{q_1^2} dq^2 \frac{d\Gamma(B \rightarrow X_s e^+ e^-)}{dq^2}}$$

## 崩壊分岐比の予言値と測定結果



|              | $B \rightarrow X_s e^+ e^- [10^{-6}]$ | $B \rightarrow X_s \mu^+ \mu^- [10^{-6}]$ | $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^- [10^{-6}]$ |
|--------------|---------------------------------------|---|---|
| <b>Belle</b> | $4.05 \pm 1.30^{+0.87}_{-0.83}$       | $4.13 \pm 1.05^{+0.85}_{-0.81}$           | $4.11 \pm 0.83^{+0.85}_{-0.81}$             |
| <b>BaBar</b> | $7.69^{+0.82+0.71}_{-0.77-0.60}$      | $4.41^{+1.31+0.63}_{-1.17-0.50}$          | $6.73^{+0.70+0.60}_{-0.64-0.56}$            |
| <b>世界平均</b>  | $6.67 \pm 0.82$                       | $4.27^{+0.98}_{-0.91}$                    | $5.84 \pm 0.69$                             |
| <b>標準模型</b>  | $4.3 \pm 0.7$                         | $4.15 \pm 0.70$                           | $4.18 \pm 0.70$                             |

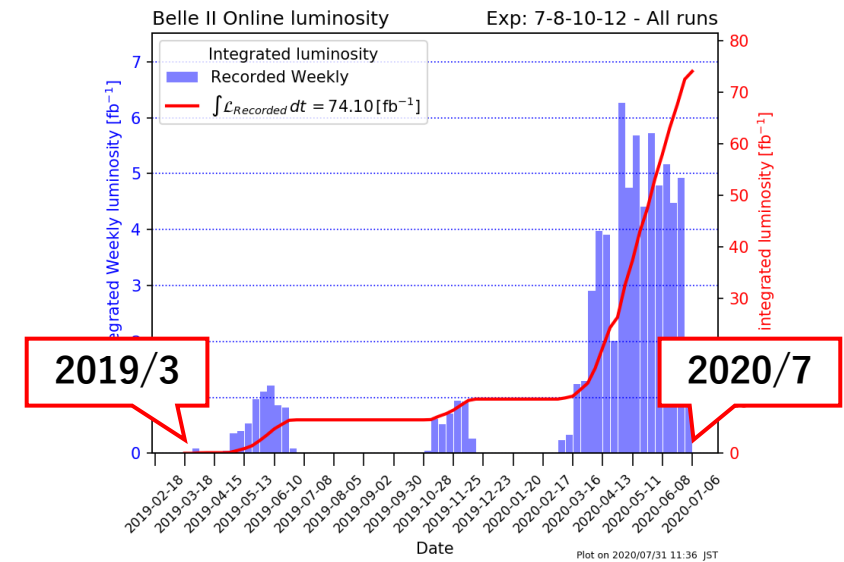
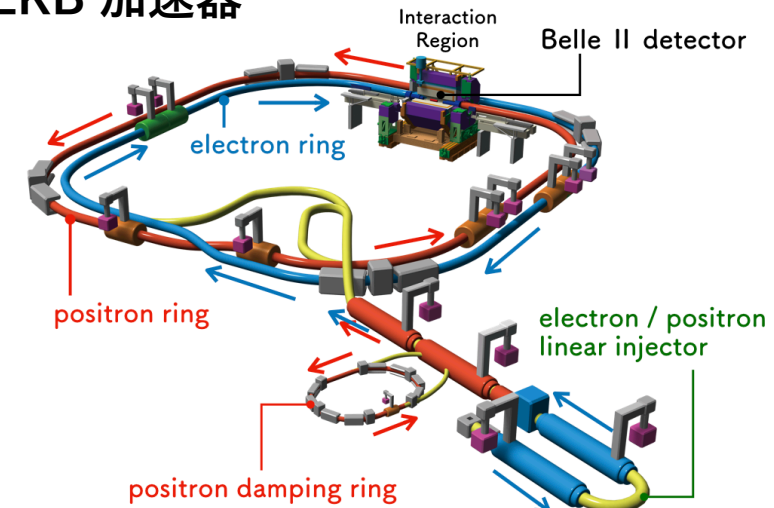


# Belle II 実験

Belle II 実験と Belle II 検出器について

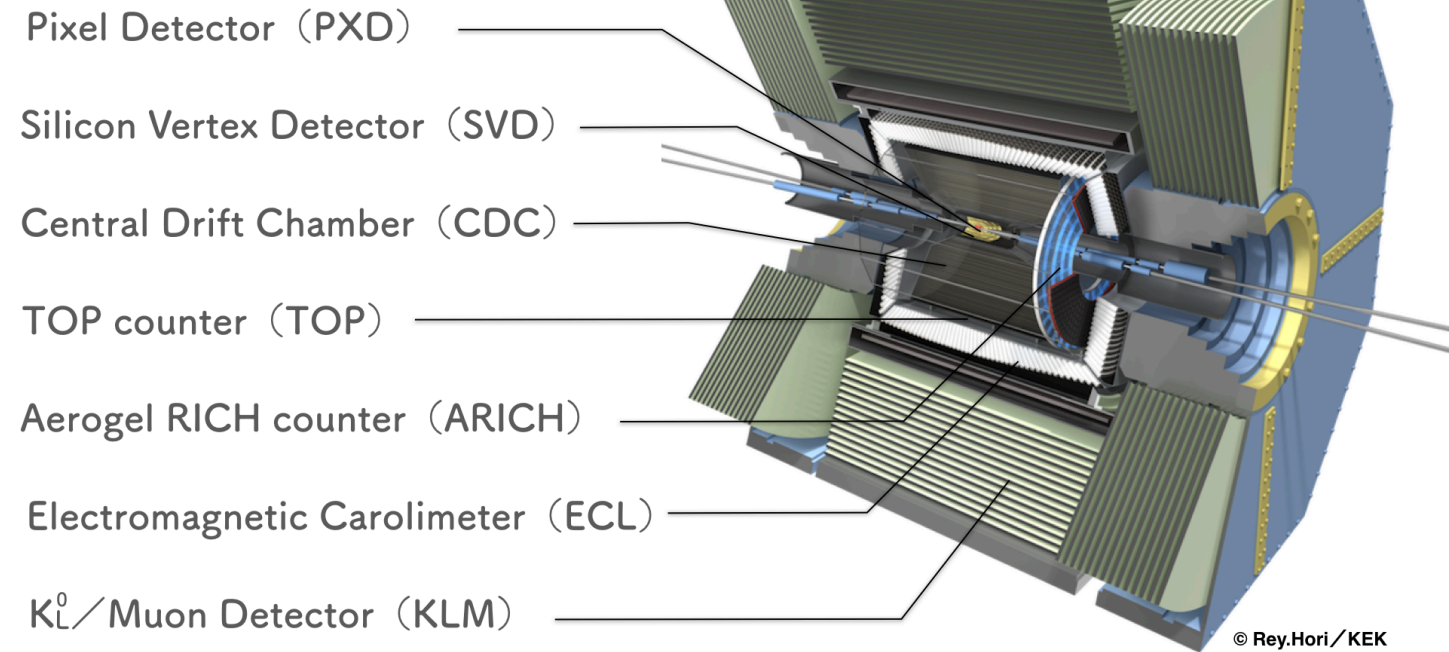
- B中間子対を大量に生成・崩壊過程を精密測定
  - CP対称性の破れ、FCNC過程における新物理探索
- SuperKEKB 加速器で電子陽電子を衝突
  - 電子: 7 GeV, 陽電子: 4 GeV →  $\Upsilon(4S)$  共鳴状態 →  $B\bar{B}$  事象
- 前身のBelle 実験から加速器・検出器をアップグレード
  - 目標：ルミノシティを40倍、データ量を50倍 (50  $\text{ab}^{-1}$ )
  - 測定器性能の高度化、高イベントレート下でのデータ取得
- 2018/4/26：初めて衝突事象を観測
- 今回使用するデータ(2019/3-2020/7)：
  - 積分ルミノシティ  $34.6 \text{ fb}^{-1} = 37.7 \text{ M } B\bar{B}$ 対

## SuperKEKB 加速器



- **VXD** 崩壊点検出器
  - PXD + SVD
  - B中間子の崩壊位置の測定
- **CDC** 飛跡検出器
  - 荷電粒子の運動量測定
  - $dE/dx$  による粒子識別
- **TOP/ARICH** 粒子識別装置
  - チェレンコフ光を利用した $K/\pi$  識別
- **ECL** 電磁カロリメータ
  - 光子のエネルギー測定
  - 電子の識別
- **KLM**  $K_L/\mu$  検出器
  - ミューオンの識別

## Belle II 検出器



# 解析の概要

ブラインド解析

Monte-Carlo サンプル

Sum-of-Exclusive Method

□ **ブラインド解析**：Monte-Carlo (MC)シミュレーションで解析手順を最適化した後、実データを用いて測定を行う

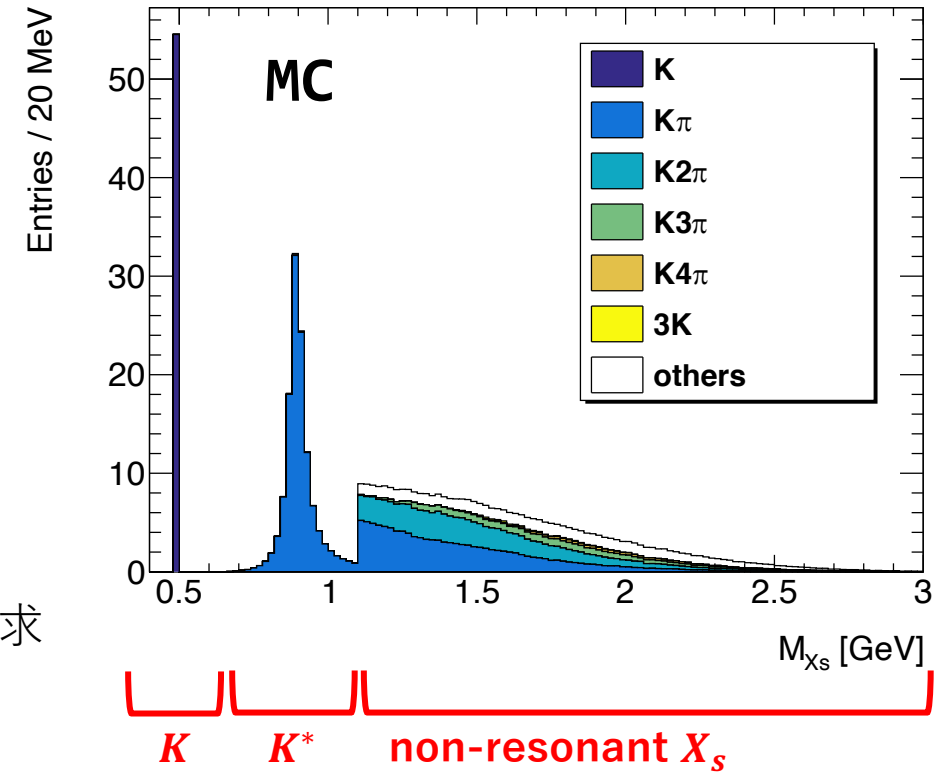
□ **信号事象のMCサンプル**：

標準模型の予言値を元に、3種類のサンプルを組み合わせる

- $K\ell^+\ell^-$  : 8.4% ( $Br = 0.35 \times 10^{-6}$ )
- $K^*\ell^+\ell^-$  : 28.7% ( $Br = 1.19 \times 10^{-6}$ )
- non-resonant  $X_s\ell^+\ell^-$  : 62.9% ( $Br = 2.61 \times 10^{-6}$ )  
 →  $B \rightarrow X_s\gamma$  で観測された  $M_{X_s}$  を再現するよう  $M_{X_s} > 1.1$  GeV を要求

□ **Sum-of-Exclusive Method**：多くの終状態から  $X_s$  を再構成

- $Kn\pi$  ( $0 \leq n \leq 4$ ) :  $\pi^0$  は最大1つ
- $3K$  :  $K_S^0$  は最大1つ
- (2つ以上  $\pi^0$  や、5つ以上  $\pi$  を持つモードは効率が低く、背景事象が多い)  
 → 全終状態の63%をカバー、 $K_L^0$ を含めれば83.1%



•  $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$  のMatrix elementを元に計算  
 •  $B$ 中間子内での $b$ -quarkの運動をFermi motion modelで考えて  $M_{X_s}$  を計算

# $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$ の再構成

粒子選別

$X_s$  の再構成

$B$  中間子の再構成

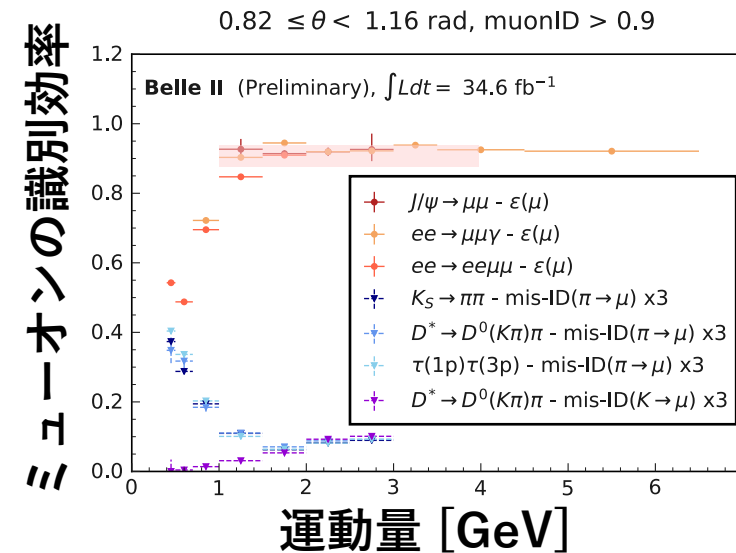
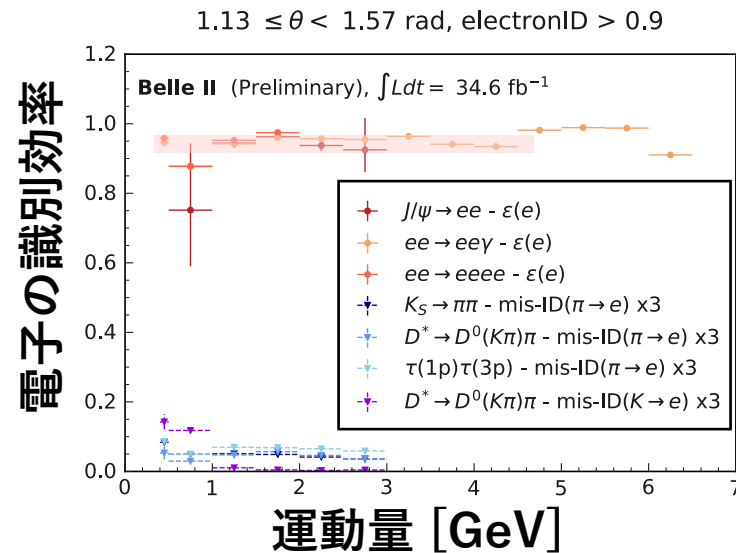
$M_{bc}$  と  $\Delta E$  について

# 粒子選別

## □ 荷電粒子： $e, \mu, \pi, K$

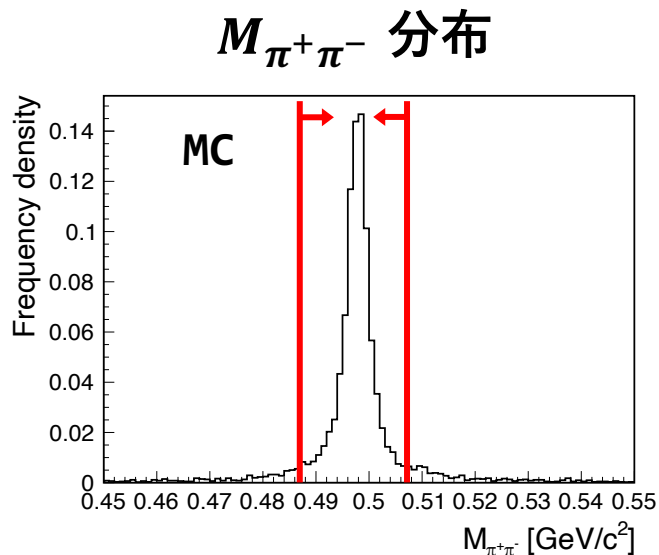
- VXD+CDC から飛跡を再構成・運動量を測定
- 検出器情報から粒子の種類を識別
  - 各検出器で各粒子のLikelihoodを計算し、Likelihood ratio を識別の指標に用いる
- 識別効率・誤識別率は、Belle II 実験の性能として評価されている
  - 本研究で重要なレプトン識別性能を、二光子過程( $ee \rightarrow eell$ )によって評価した

## 電子(左)とミュオン(右)の識別効率の測定結果



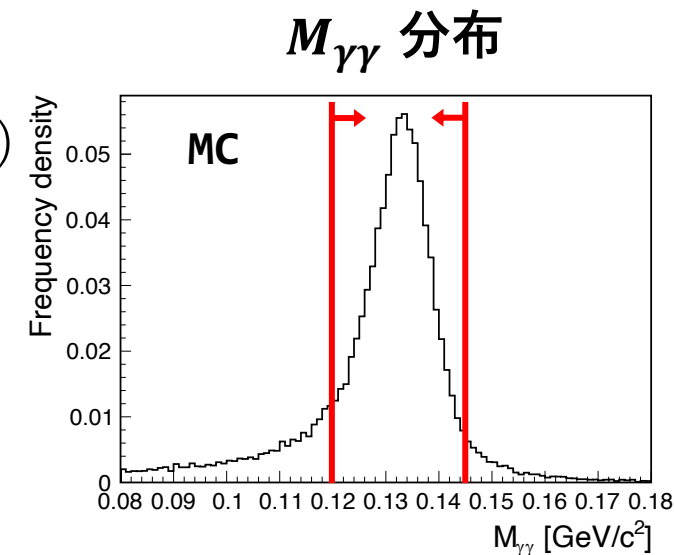
## □ $K_S : \pi^+\pi^-$ から再構成

- 不変質量( $\sim 4\sigma$ )
- 崩壊点位置情報から選別



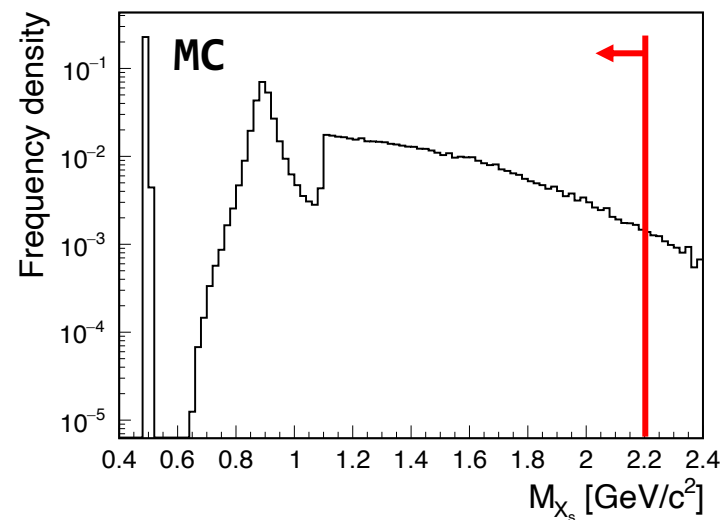
## □ $\pi^0 : \gamma\gamma$ から再構成

- 不変質量( $\sim 1.5\sigma$ )
- 角度情報
- 運動量条件から選別



## □ $X_S$

- $Kn\pi (0 \leq n \leq 4), 3K$  の終状態から再構成
- $M_{X_S} < 2.2$  GeV を要求 (後で2.0 GeVを要求)



$M_{X_S}$  分布



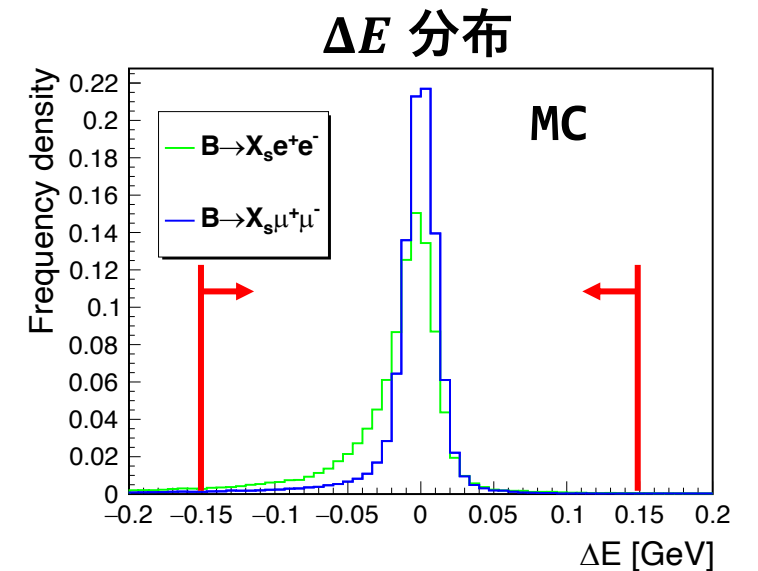
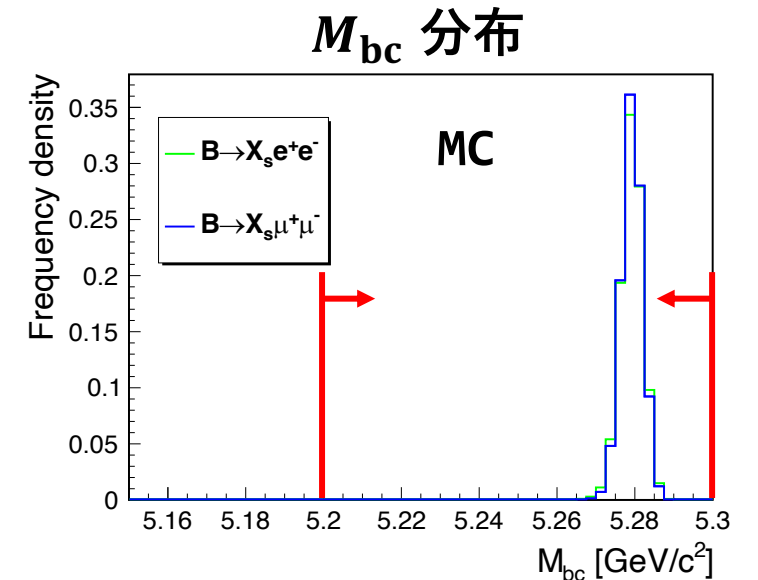
□  $X_s$  と  $e^+e^-$ ,  $\mu^+\mu^-$  から再構成

□  $M_{bc} \equiv \sqrt{(E_{\text{beam}}^*)^2 - |\vec{p}_B^*|^2}$  : B中間子の質量にピーク

- $5.2 < M_{bc} < 5.3$  GeV
- $M_{bc}$  分布をフィットして信号事象数を測定する
  - 背景事象の分布を正しく測定するために、ピーク以下の部分も残しておく

□  $\Delta E \equiv E_{\text{beam}}^* - E_B^* : 0$  にピーク

- $-0.15 < \Delta E < 0.15$  GeV
- 背景事象選別に用いる



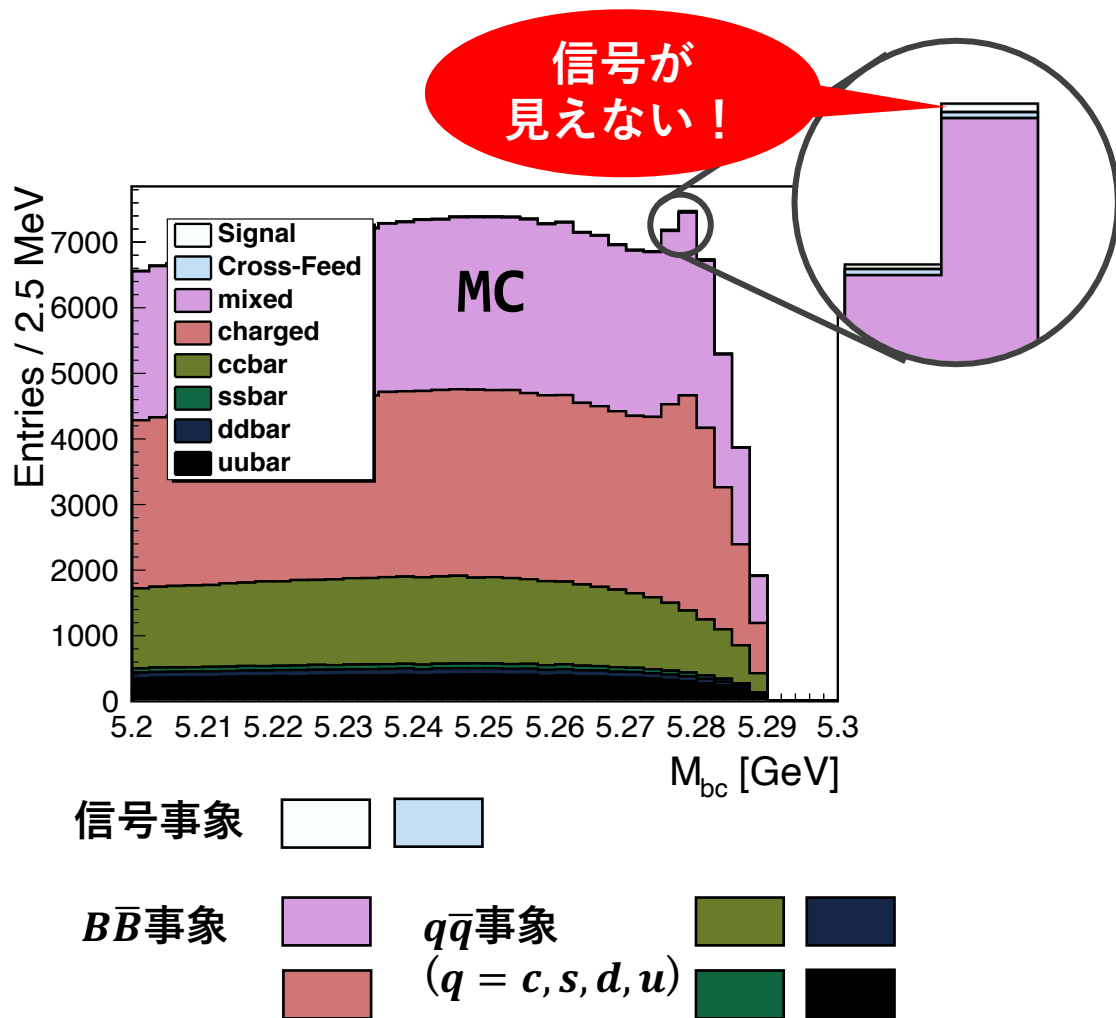
# 背景事象について

背景事象の取り扱い方針

背景事象選別

ピークを作る背景事象の見積もり

## 事象選別前の $M_{bc}$ 分布



$M_{bc}$  分布のフィットから信号事象数を測定したい  
... が、背景事象をどうにかしないと不可能!

### □ ピークを作る背景事象

- $B \rightarrow X_s J/\psi (\rightarrow \ell^+ \ell^-)$
- 粒子の誤識別(例:  $B \rightarrow K\pi\pi$ を $K\ell\ell$ と間違える)

信号事象の  
100倍以上

信号事象数を正しく測定するために確実に除去 &  
どのくらい混入するかデータで正しく見積もる

### □ ピークを作らない背景事象

- $B\bar{B}$  事象のSemi-leptonic Decay  
(例:  $B \rightarrow D (\rightarrow X \ell^- \bar{\nu}) \ell^+ \nu$ )
- $c\bar{c}$  事象のSemi-leptonic Decay

信号事象の  
1000倍以上

機械学習で信号事象を保持しつつ効率良く削減

## □ 測定範囲の設定

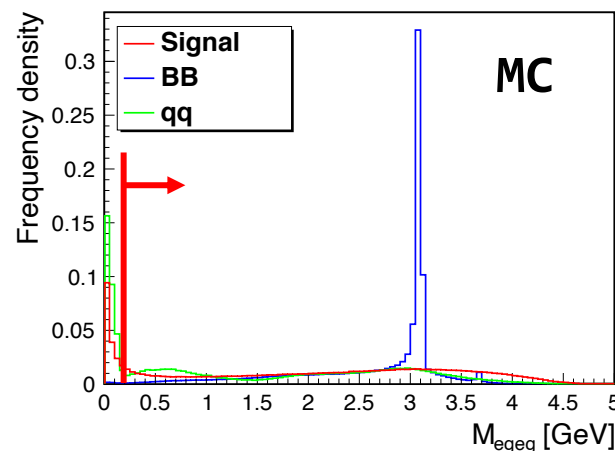
- $M_{ee} > 0.2 \text{ GeV}$  :  $\gamma \rightarrow e^+e^-$ ,  $\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$  の抑制
  - $M_{X_S} < 2.0 \text{ GeV}$  : 組み合わせ間違いの抑制
- 先行研究・理論予測との比較に適した値を利用

## □ 確実に落とせる背景事象を除去(機械学習の効率化)

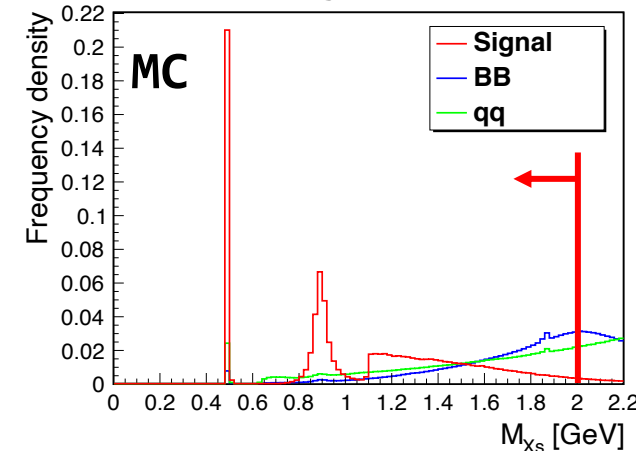
- $-0.10 < \Delta E < 0.05 \text{ GeV}$  (電子)
- $-0.05 < \Delta E < 0.05 \text{ GeV}$  (ミュオン)
- 崩壊点位置が大きく異なる事象の除去  
( $B \rightarrow D(\rightarrow X\ell^-\bar{\nu})\ell^+\nu$  では、 $D$ の崩壊点が異なる)

→ 7割以上の背景事象を除去！

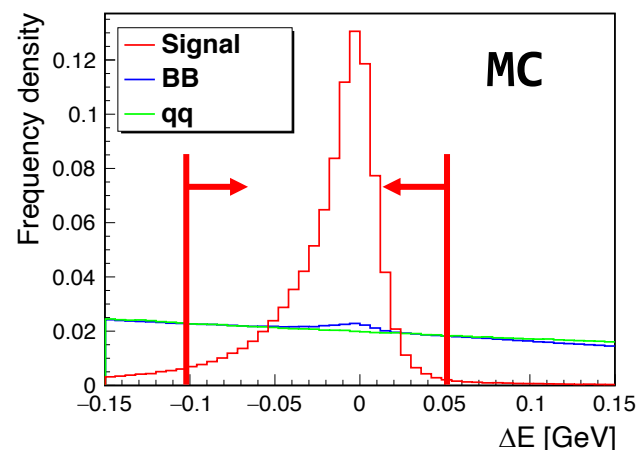
### $M_{ee}$ 分布



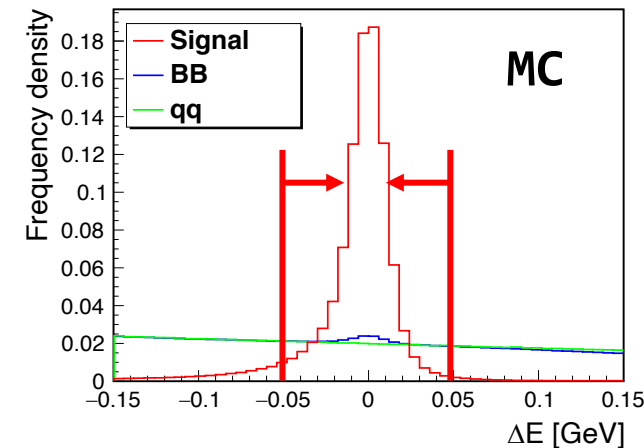
### $M_{X_S}$ 分布



### $\Delta E$ 分布(電子)



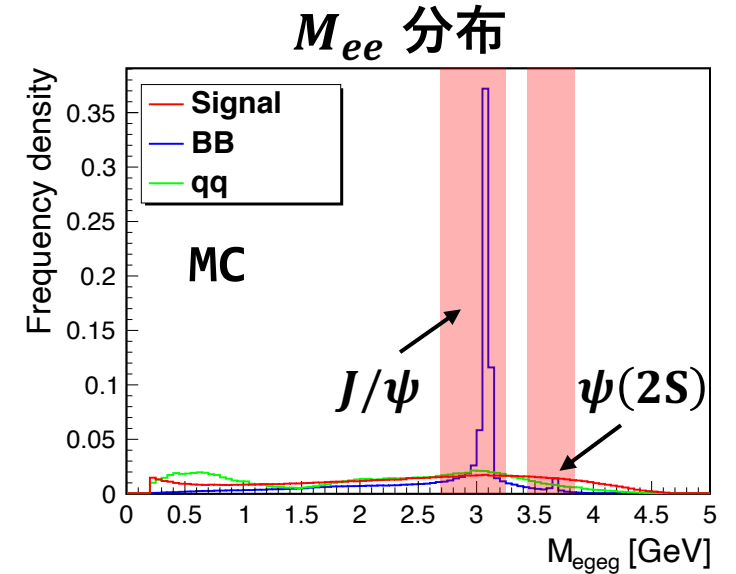
### $\Delta E$ 分布(ミュオン)



# ピークを作る背景事象の除去

## □ チャーモニウム事象の除去(例: $B \rightarrow X_s J/\psi(\rightarrow \ell^+ \ell^-)$ )

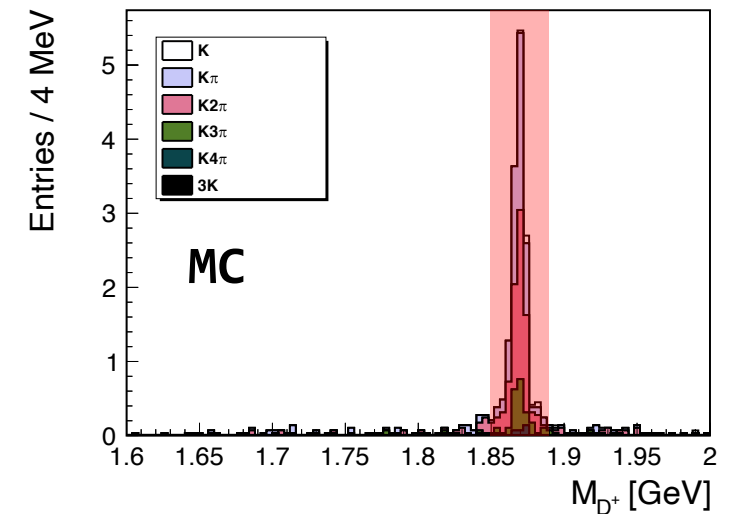
- 信号事象と同じ終状態  
→ 混入の見積もりが困難なので確実な除去が必要
- $M_{\ell^+ \ell^-}$  が  $M_{J/\psi}, M_{\psi(2S)}$  に近い事象を除去
  - 除去した事象はデータとMCの違いの補正に利用

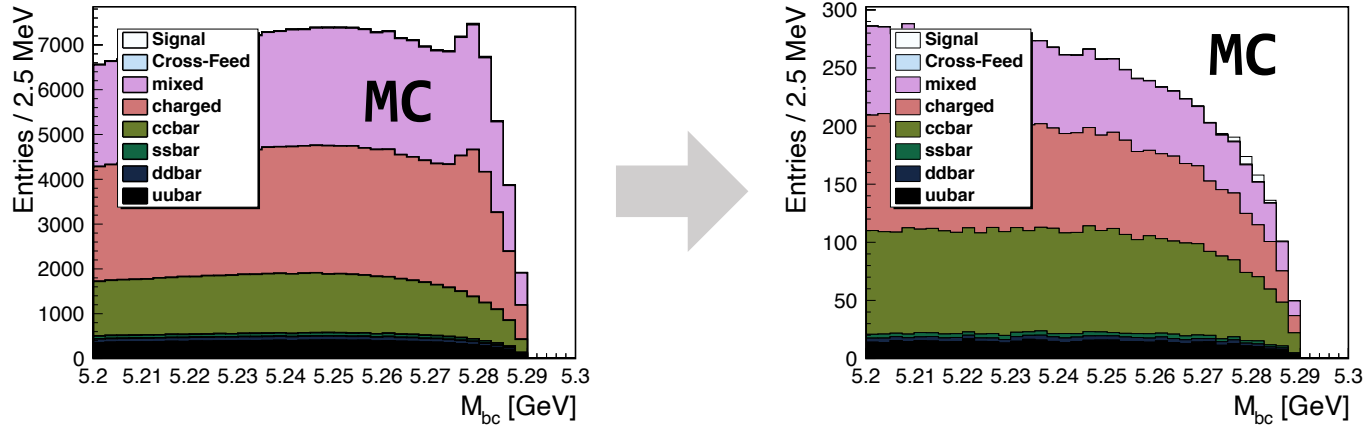


## □ D中間子由来の事象の除去(例: $B \rightarrow D\pi \rightarrow K\pi\pi$ )

- 粒子の種類を誤識別すると誤って混入  
→ 誤識別率を使うことで見積もり可能(後述)  
**系統誤差削減のため可能な限り除去したい**
- B中間子の娘粒子を組み合わせて、D中間子の質量に近い組み合わせがあれば除去

## $M_{\text{mostD-like}}$ 分布(ミュオン、 $D^+$ )



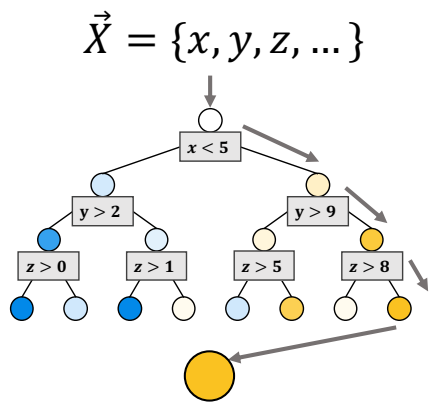


(左)事象選別前, (右)ピーク除去後の $M_{bc}$ 分布  
 ピークを作る事象を取り除いた!  
 ... が、まだ背景事象は信号事象の600倍程度

□ 機械学習の一つである**FastBDT**を利用して、効率良く事象選別を行う

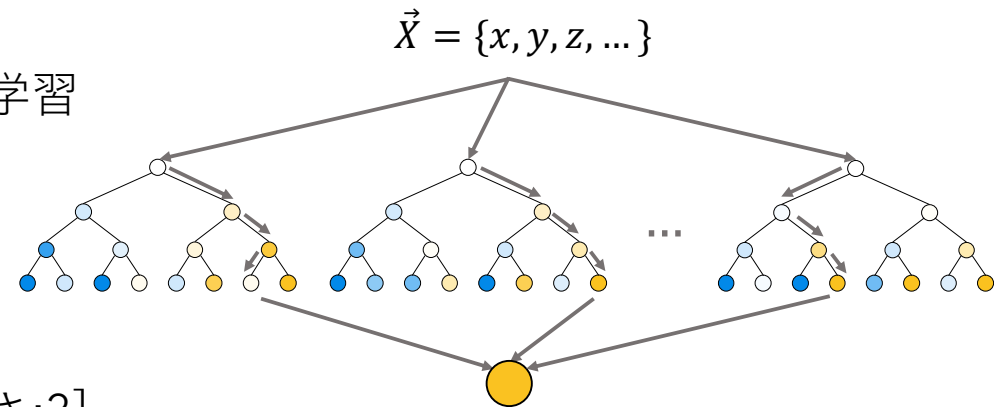
## Decision Tree (DT)

- ノード毎に変数と閾値をTraining
- 深いTreeほど、正確だが過学習しやすい

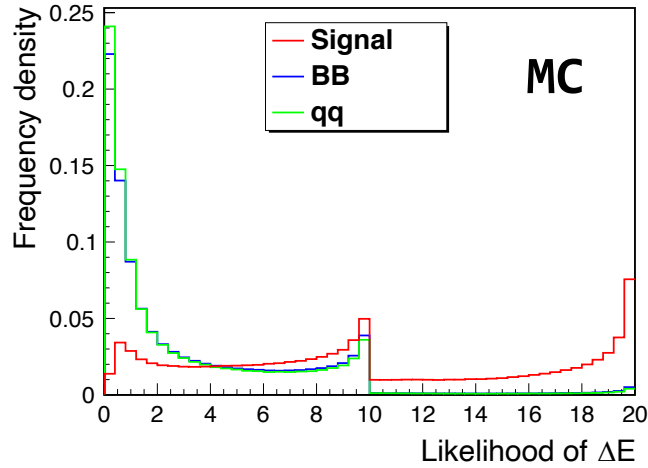


## FastBDT

- 浅いDTを連続して学習
  - 過学習を避けつつ高速で正確に選別
  - 各DTの結果を元に最終結果を出力
- [DTの数:200, DTの深さ:3]

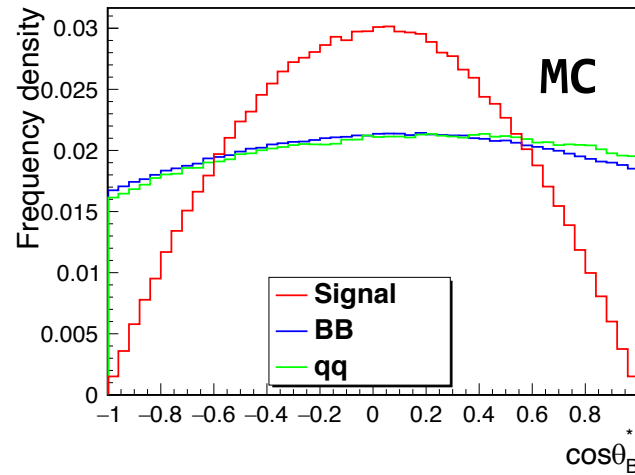


## $\Delta E$ Likelihood



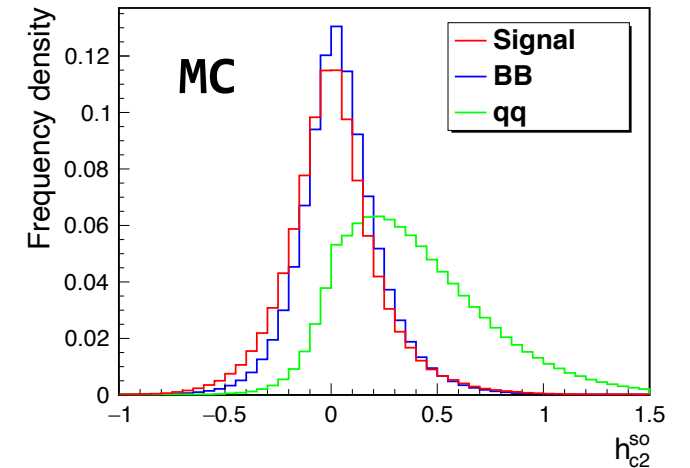
- $\Delta E$  分布を $\pi^0$ の有無で分けて尤度関数を定義
- $B\bar{B}$  事象、 $q\bar{q}$  事象の分離に有効

## $\cos \theta_B^*$



- $e^+e^-$ の重心系での $B$ 中間子の極角分布
- $\Upsilon(4S)$ (スピン1)が $B$ (スピン0)対に崩壊  $\rightarrow 1 - \cos^2 \theta_B^*$

## KSFW moment $h_{c2}^{SO}$



- 運動量の位相空間分布を、ルジャンドル多項式で展開
- $B\bar{B}$  事象(等方的)と $q\bar{q}$  事象(ジェット形状)の区別にも有効

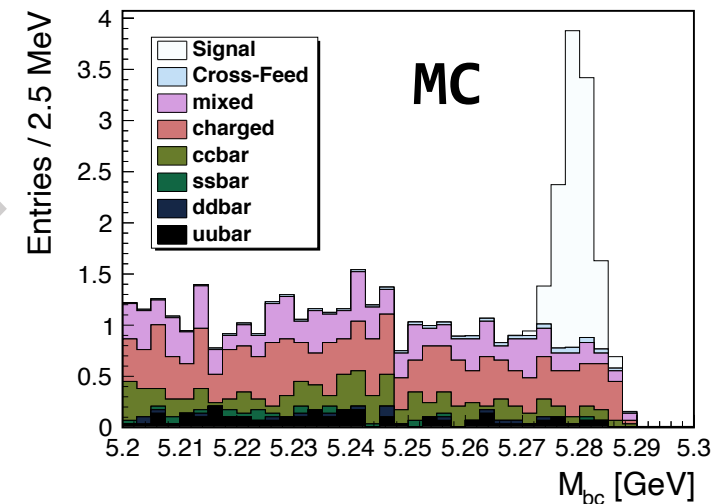
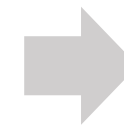
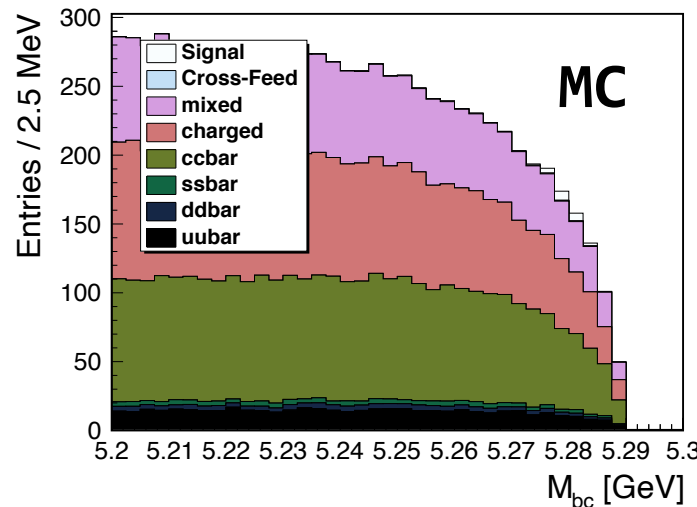
- 効率良く選別するため、特徴の違いに合わせて別々にTraining
  - Training sample として、それぞれ 80000 events 以上使用
- $M_{bc} \in [5.27, 5.29]$  の範囲でFOMを最大化するよう閾値を決定：

$$FOM = \frac{N_{signal}}{\sqrt{N_{signal} + N_{background}}}$$

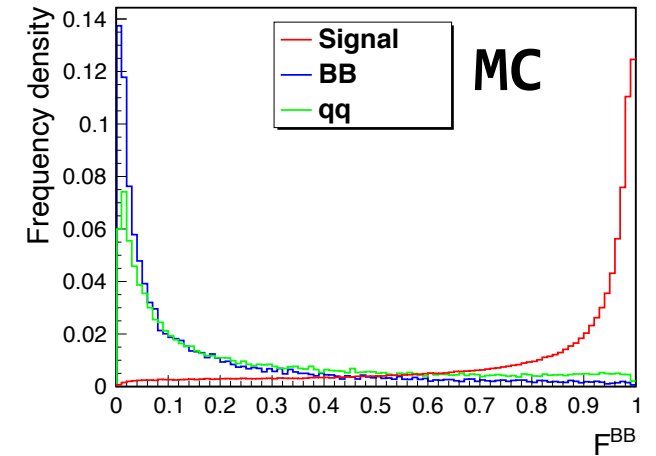
- 候補が複数ある場合はFastBDTの出力結果が良い方を選択

**信号事象の46.6% を保持しつつ、  
背景事象を99.5% 削減！**

信号事象のピークが明らか  
 $M_{bc}$  分布のフィットが可能に！



**FastBDT の出力結果**  
( $e^+e^-, M_{X_s} < 1.1 \text{ GeV}, B\bar{B}$ )





ピークを作る背景事象の大部分は除去した。

だが、正しく信号事象数を測定するには、

**データからピークを作る背景事象数を見積もることが重要**

## □ チャーモニウム由来の事象

(例)  $B \rightarrow X_s J/\psi (\rightarrow \ell^+ \ell^-)$

## □ Double misID background

- 2回ハドロンをレプトンに誤識別

(例)  $B \rightarrow K\pi^+\pi^-$  を  $B \rightarrow K\mu^+\mu^-$  と間違える

## □ Swapped misID background

- ハドロンをレプトン、レプトンをハドロンの誤識別

(例)  $B \rightarrow K\pi^+\mu^+\mu^-$  を  $B \rightarrow K\mu^+\pi^+\mu^-$  と間違える

MCを使って見積もる  
(系統誤差をConservativeに)

データを使って見積もる  
(次ページで詳細)

方針：背景事象を**粒子識別無し**で再構成して、**誤識別率( $f$ )**で重み付けする

$M_{bc}$ 分布の形と事象数を実データから見積もって、 $M_{bc}$ 分布のFitに使用する

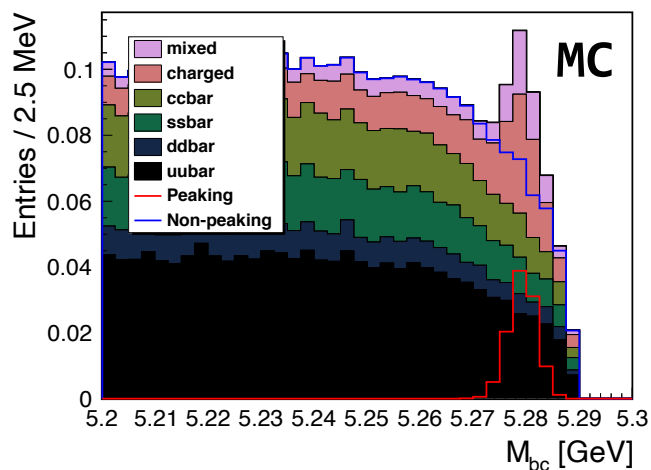
## □ Double misID

$B \rightarrow X_s h^+ h^-$  ( $h$ : ハドロン)として再構成し、  
誤識別率( $f_\ell$ : ハドロン→レプトン)で重み付け

$B \rightarrow X_s h^+ h^-$   
の事象数

$f_{\ell^+} \cdot f_{\ell^-}$

$B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$   
と誤認識される事象数



MCで見積もった  
Double misIDの  
 $M_{bc}$ 分布

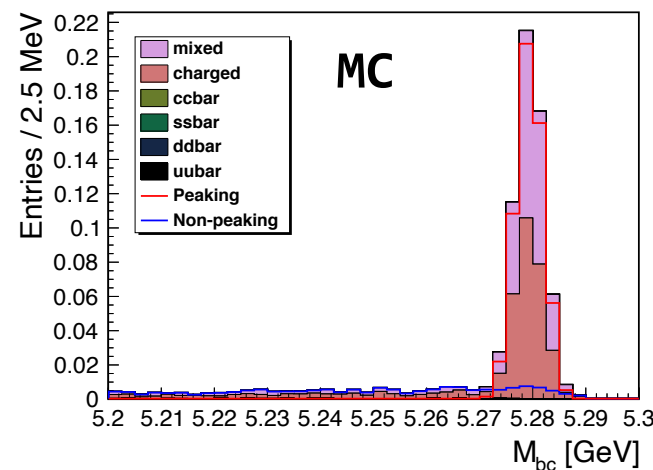
## □ Swapped misID

$B \rightarrow X_s J/\psi(\psi(2S))$ として再構成して、  
誤識別率( $f_\ell, f_h$ : レプトン→ハドロン)で重み付け

$B \rightarrow K \pi \ell \ell$   
の事象数

$\frac{f_\ell}{\epsilon_h} \cdot \frac{f_h}{\epsilon_\ell}$

$B \rightarrow K \ell \pi \ell$   
と誤認識される事象数



MCで見積もった  
Swapped misIDの  
 $M_{bc}$ 分布

# 崩壊分岐比の測定

$M_{bc}$ 分布のフィットによる信号抽出

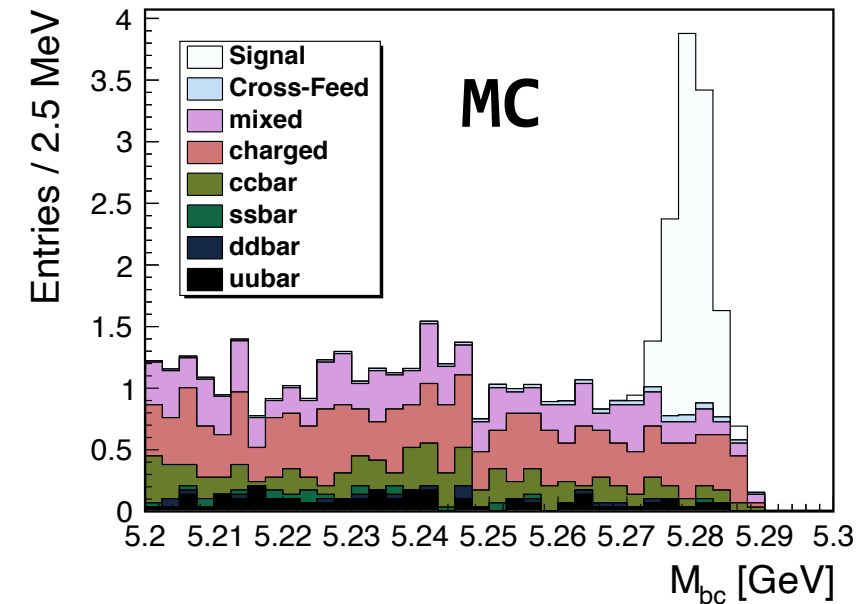
確率密度関数

ToyMC によるFitter の動作確認

**方法:**  $M_{bc}$  分布をフィットして信号事象数,  $N_{\text{signal}}$ , を測定し、次の式から崩壊分岐比を計算

$$\mathcal{B}(B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-) = \frac{N_{\text{signal}}}{2N_{B\bar{B}} \times \epsilon}$$

- $N_{B\bar{B}}$ ,  $B\bar{B}$ 事象数: 全ハドロン事象から、 $q\bar{q}$ 事象を差し引く
- $\epsilon$ , 再構成効率: MCで見積もり、データとの違いから補正



- (1)  $\mathcal{B}(B \rightarrow X_s e^+ e^-)$ と $\mathcal{B}(B \rightarrow X_s \mu^+ \mu^-)$ をパラメータとして、それぞれの $M_{bc}$ 分布をフィット
- (2)  $\mathcal{B}(B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-)$ をパラメータとして、 $e$ と $\mu$ の $M_{bc}$ 分布を同時にフィット

$M_{bc}$  分布の形状に合わせて確率密度関数を用意して Likelihood 関数を定義

□ 信号事象 : **Gaussian**

- Mean と Sigma は  $B \rightarrow X_s J/\psi$  のデータを使って固定

□ Self Cross-feed (信号の一部) : **Histogram**

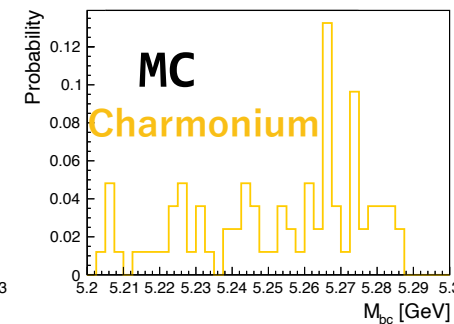
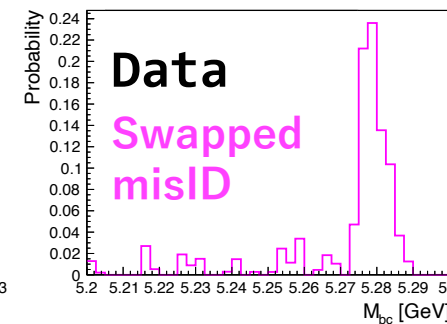
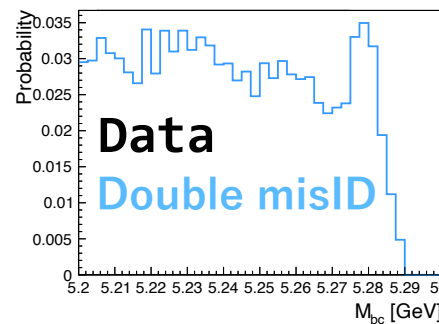
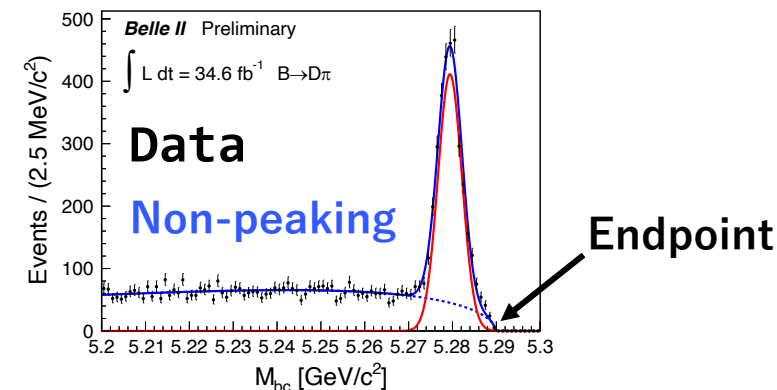
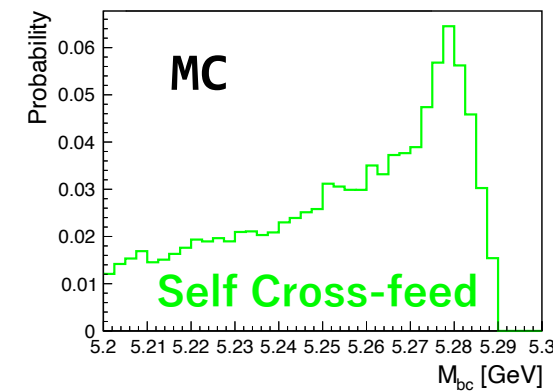
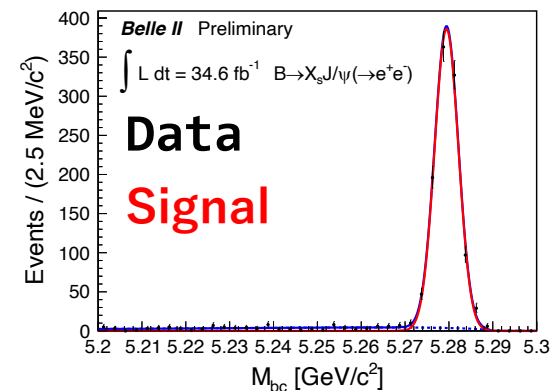
- MC でHistogramを定義
- Gaussianと比例して事象数を動かす

□ ピークを作らない背景事象 : **Argus function**

- Endpoint は  $B \rightarrow D\pi$  のデータを使って固定

□ ピークを作る背景事象 : **Histogram**  
(**Double misID**, **Swapped misID**, **Charmonium**)

- 前述の手法でHistogram の形と事象数を定義



**ToyMC** : PDFを使って疑似実験を生成し  $M_{bc}$  分布をフィットする  
 → 正しく信号事象数が測定できるかを確認

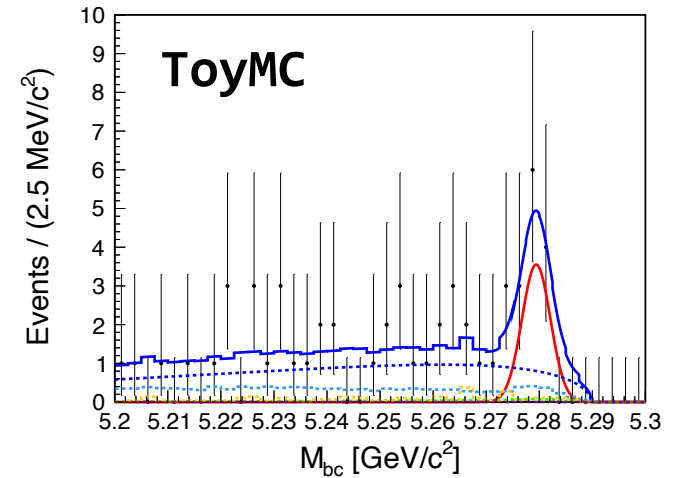
## Pull 分布

$$\text{pull} = \frac{N_{\text{input}} - N_{\text{observed}}}{\delta N_{\text{observed}}}$$

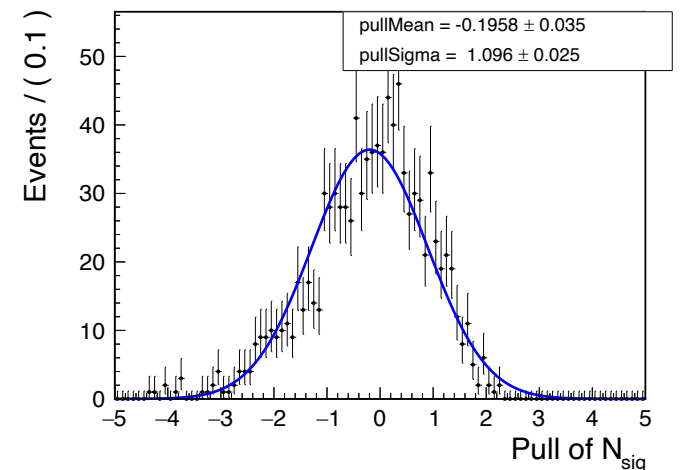
Meanが0、Sigmaが1であればFitter が正しく測定出来ている

- Mean が 0 からずれる = 測定のBiasを示唆
  - Sigma が 1 より大きい = 誤差の過小評価を示唆
- 統計誤差に比例する形で系統誤差の要因に含める

## ToyMC で生成した疑似実験の $M_{bc}$ 分布とフィット結果



## $B \rightarrow X_s e^+ e^-$ についてのPull 分布



# 系統誤差

系統誤差の種類

Signal modeling 由来の系統誤差

崩壊分岐比測定に用いた式：

$$\mathcal{B}(B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-) = \frac{N_{\text{signal}}}{2N_{B\bar{B}} \times \epsilon}$$

□  $N_{\text{signal}}$  : 信号事象数

- Fitter によるバイアスや統計誤差の過小評価 (Pull分布から評価)
- Fitter で固定したパラメータを動かす

□  $N_{B\bar{B}}$  :  $B\bar{B}$  事象の数 =  $(37.7 \pm 0.7) \times 10^6$

- Belle II 実験の測定結果の誤差分動かす

□  $\epsilon$  : 再構成効率

- 測定器性能に由来する検出効率を補正。補正項の誤差分動かす
- $B \rightarrow X_s J/\psi$  を用いてFastBDTの効率を校正。補正項の誤差分動かす
- **Signal modeling** :  $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$  のMC サンプルを作る際の不定性 (次ページ)



$B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$  のMC サンプルは、  
 $K \ell^+ \ell^-$ ,  $K^* \ell^+ \ell^-$ , non-resonant  $X_s \ell^+ \ell^-$  をMixさせて生成

□ 配分の誤差 (配分は標準模型の予言値で決定)

①  $K \ell^+ \ell^-$ ,  $K^* \ell^+ \ell^-$  の崩壊分岐比の誤差分動かす

□ non-resonant  $X_s$  について

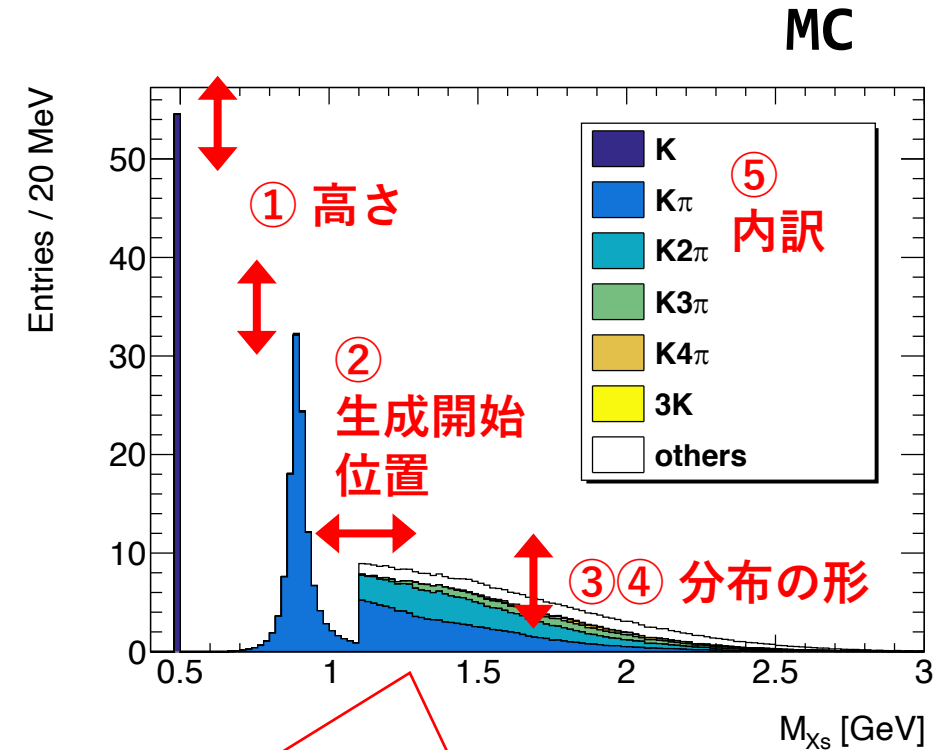
② 生成開始位置 :  $M_{X_s} \in [1.0, 1.2]$  GeV で動かす

③  $b$ -quarkの質量 :  $m_b \in [4.65, 4.95]$  GeV で動かす

④ Fermi 運動量 :  $p_F \in [0.422, 0.498]$  GeV で動かす

⑤  $X_s$  の崩壊パターン (PYTHIAで決定) :

Belle 実験の測定結果からMC の崩壊パターンを修正  
 測定結果の誤差分動かす



- $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$  のMatrix elementを元に計算
- $B$ 中間子内での $b$ -quarkの運動をFermi motion modelで考えて $M_{X_s}$ を計算

# $B \rightarrow X_s J/\psi$ による解析手法の検証

$B \rightarrow X_s J/\psi$  の崩壊分岐比測定

先行研究との比較

$B \rightarrow X_s J/\psi$  を使って、解析手法の検証を行う

□  $B \rightarrow (K^+, K^0, K^{*0}(K^+\pi^-), K^+\pi^-\pi^+) J/\psi (\rightarrow e^+e^-, \mu^+\mu^-)$  の崩壊分岐比を測定し、先行研究と比較する

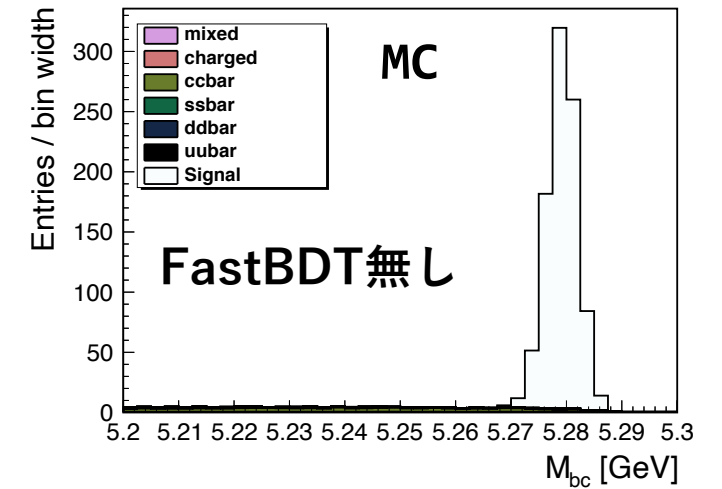
- チャーモニウム事象として除去した事象を使う

□ 解析手法は  $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$  とほぼ同様

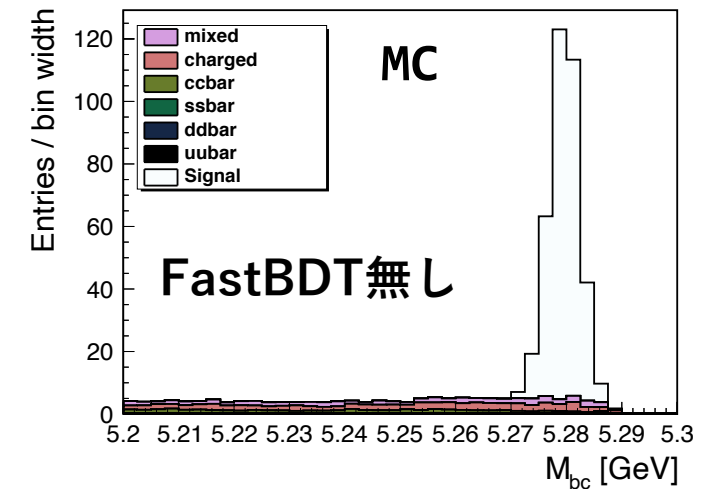
- 相違点：FastBDTを使用しないこと  
→ FastBDTの効率はこのモードで校正されている

→ 先行研究との比較によって、解析手法を検証する

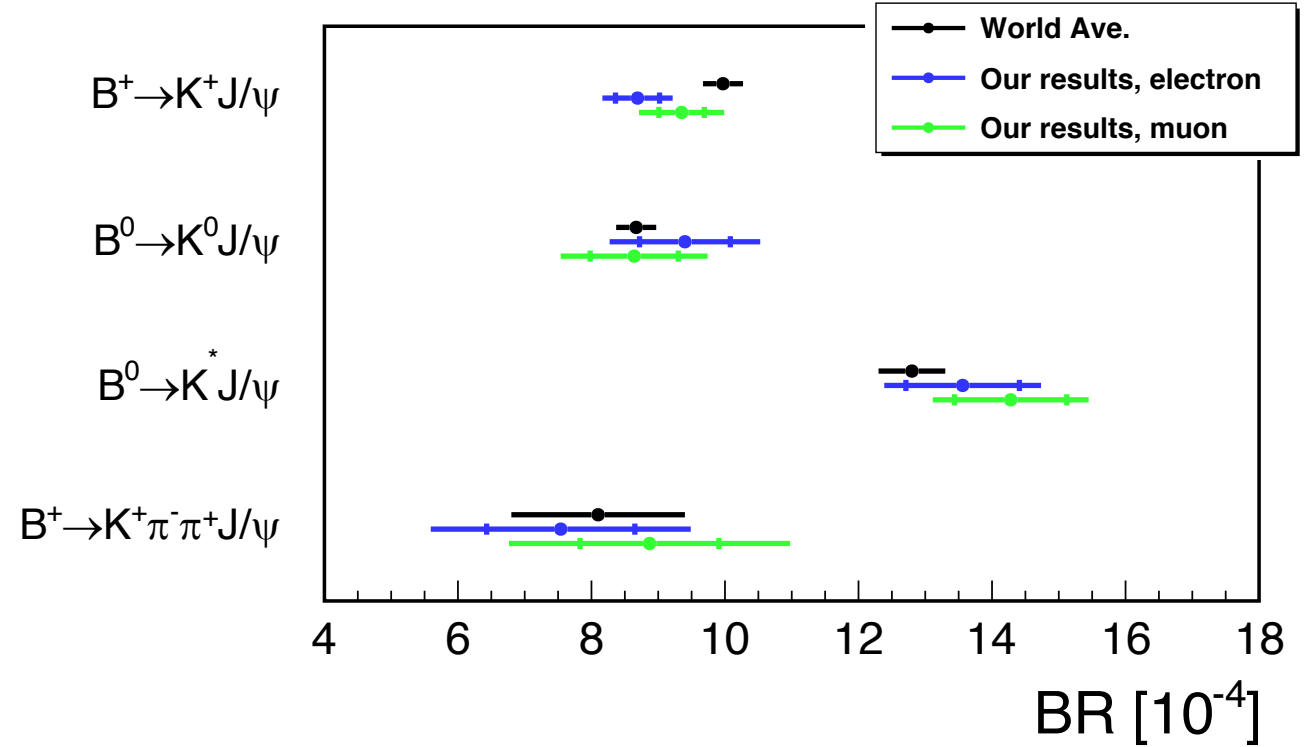
$M_{bc}$  分布 ( $B^+ \rightarrow K^+ J/\psi(e^+e^-)$ )



$M_{bc}$  分布 ( $B^0 \rightarrow K^{*0}(K^+\pi^-) J/\psi(e^+e^-)$ )



- ほぼ全モード、世界平均と $1\sigma$ 以内で一致
    - $B^+ \rightarrow K^+ J/\psi (\rightarrow e^+ e^-)$ :  $2.1\sigma$  が最大
  - 全モードについて、電子・ミューオンの結果が $1\sigma$ 以内で一致
- 解析手法は正しいことを確認



$B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$  の崩壊分岐比を測定する準備が出来た

| モード                      | 電子 [10 <sup>-4</sup> ] | ミューオン [10 <sup>-4</sup> ] | 世界平均 [10 <sup>-4</sup> ] |
|--------------------------|------------------------|---------------------------|--------------------------|
| $K^+ J/\psi$             | 8.69 ± 0.33 ± 0.41     | 9.35 ± 0.34 ± 0.54        | 9.97 ± 0.30              |
| $K^0 J/\psi$             | 9.40 ± 0.68 ± 0.90     | 8.64 ± 0.66 ± 0.88        | 8.67 ± 0.30              |
| $K^{*0} J/\psi$          | 13.56 ± 0.85 ± 0.81    | 14.28 ± 0.84 ± 1.04       | 12.8 ± 0.5               |
| $K^+ \pi^- \pi^+ J/\psi$ | 7.54 ± 1.11 ± 1.60     | 8.87 ± 1.04 ± 1.83        | 8.1 ± 1.3                |

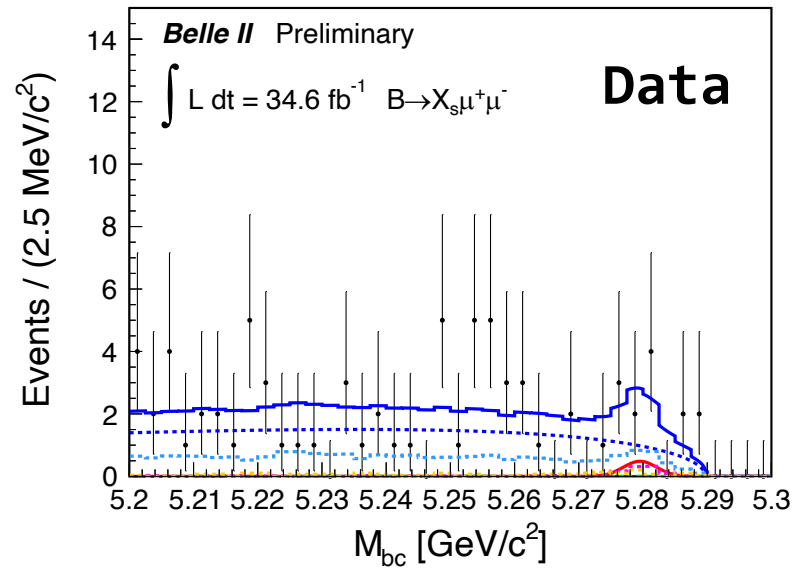
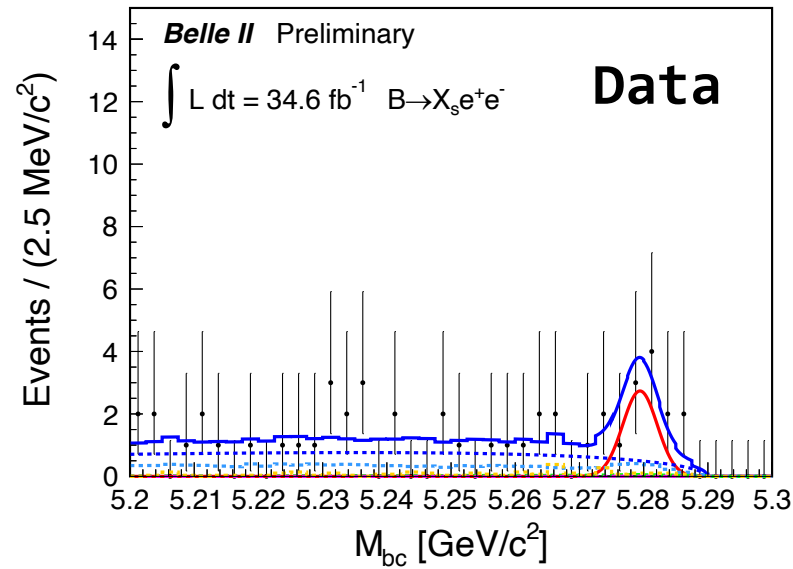
# 崩壊分岐比測定の結果

(1)  $B \rightarrow X_s e^+ e^-$  と  $B \rightarrow X_s \mu^+ \mu^-$  の崩壊分岐比測定

(2)  $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$  の崩壊分岐比測定

崩壊分岐比の系統誤差

# (1) $\mathcal{B}(B \rightarrow X_s e^+ e^-)$ と $\mathcal{B}(B \rightarrow X_s \mu^+ \mu^-)$ の測定



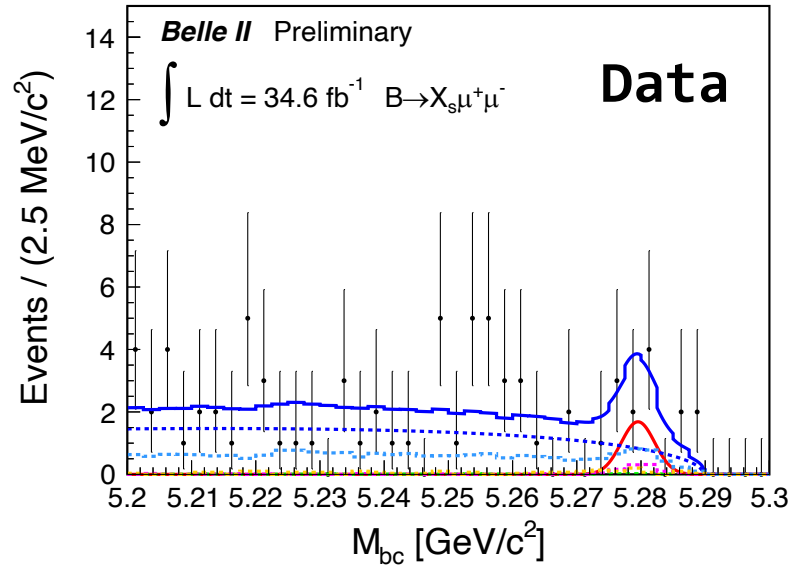
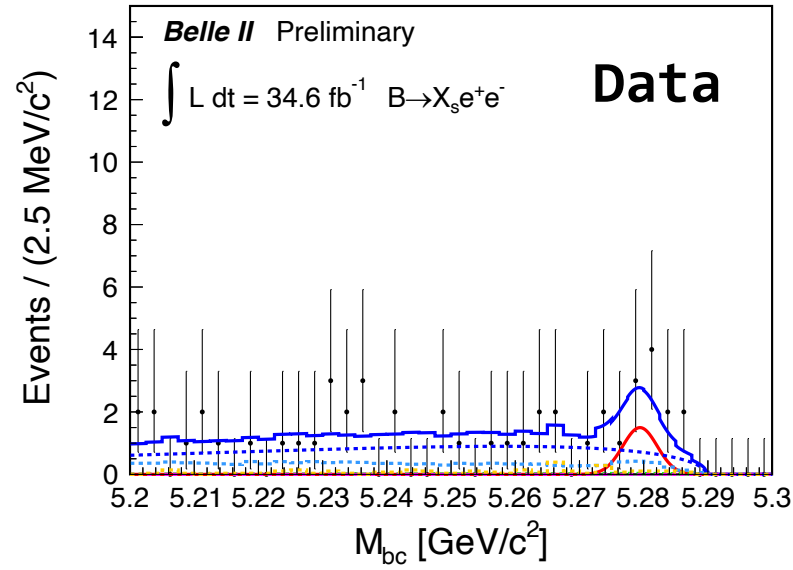
$M_{bc}$  分布とフィット結果

- : 全PDFの和
- : 信号事象
- - - : Self Cross-feed
- - - : ピークを作らない背景事象
- - - : Double misID
- - - : Swapped misID
- - - : Charmonium

## 測定結果の中心値

|                                 | 崩壊分岐比 [ $10^{-6}$ ]  | 信号事象数  |
|---------------------------------|--|--|
| $B \rightarrow X_s e^+ e^-$     | $4.86^{+2.75}_{-2.42}(\text{stat})^{+1.02}_{-0.92}(\text{syst})$ | $8.25^{+4.69}_{-4.09}(\text{stat})^{+1.33}_{-1.25}(\text{syst})$ |
| $B \rightarrow X_s \mu^+ \mu^-$ | $0.78^{+2.21}_{-1.85}(\text{stat})^{+0.43}_{-0.38}(\text{syst})$ | $1.37^{+3.87}_{-3.24}(\text{stat})^{+0.74}_{-0.65}(\text{syst})$ |

# (2) $\mathcal{B}(B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-)$ の測定



$M_{bc}$  分布とフィット結果

- : 全PDFの和
- : 信号事象
- - - : Self Cross-feed
- - - : ピークを作らない背景事象
- - - : Double misID
- - - : Swapped misID
- - - : Charmonium

## 測定結果の中心値

| 崩壊分岐比 [ $10^{-6}$ ]               |  |
|-----------------------------------|--|
| $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$ | $2.78^{+1.82}_{-1.65}(\text{stat})^{+0.66}_{-0.61}(\text{syst})$ |

|                               |                    | $X_S e^+ e^-$        | $X_S \mu^+ \mu^-$ | $X_S \ell^+ \ell^-$ |
|-------------------------------|--------------------|----------------------|-------------------|---------------------|
| $N_{B\bar{B}}$                |                    | $\pm 0.08$           | $\pm 0.01$        | $\pm 0.04$          |
| 再構成効率<br>の補正                  | Tracking           | +0.19<br>-0.18       | $\pm 0.02$        | +0.11<br>-0.10      |
|                               | Electron ID        | +0.13<br>-0.10       |                   | +0.006<br>-0.012    |
|                               | Muon ID            |                      | +0.02<br>-0.03    | +0.07<br>-0.13      |
|                               | Kaon ID            | $\pm 0.06$           | $\pm 0.007$       | $\pm 0.03$          |
|                               | Pion ID            | +0.02<br>-0.04       | $\pm 0.004$       | +0.01<br>-0.02      |
|                               | $K_S^0$            | +0.03<br>-0.04       | +0.005<br>-0.006  | $\pm 0.02$          |
|                               | $\pi^0$            | +0.007<br>-0.010     | $\pm 0.001$       | +0.001<br>-0.005    |
|                               | FastBDT            | +0.21<br>-0.19       | $\pm 0.02$        | +0.10<br>-0.09      |
|                               | Signal<br>modeling | $K^*-X_S$ transition | +0.02<br>-0.13    | +0.01<br>-0.02      |
| $m_b$                         |                    | $\pm 0.03$           | $\pm 0.003$       | $\pm 0.01$          |
| $p_F$                         |                    | +0.07<br>-0.06       | +0.005<br>-0.011  | $\pm 0.04$          |
| $X_S$ fragmentation           |                    | +0.15<br>-0.14       | $\pm 0.02$        | +0.09<br>-0.08      |
| Fraction of $K\ell^+\ell^-$   |                    | +0.53<br>-0.41       | +0.09<br>-0.07    | +0.32<br>-0.25      |
| Fraction of $K^*\ell^+\ell^-$ |                    | +0.12<br>-0.10       | +0.010<br>-0.004  | +0.04<br>-0.03      |

|  |                    | $X_S e^+ e^-$  | $X_S \mu^+ \mu^-$ | $X_S \ell^+ \ell^-$ |
|--|--------------------|----------------|-------------------|---------------------|
| Fitter 由<br>来の系統<br>誤差                 | バイアス               | +0.54<br>-0.48 | +0.35<br>-0.29    | +0.46<br>-0.41      |
|  | 統計誤差の過小評価          | +0.26<br>-0.23 | +0.10<br>-0.09    | +0.19<br>-0.18      |
| Fitter の<br>固定パラ<br>メータ由<br>来の系統<br>誤差 | Signalのmean        | $\pm 0.08$     | +0.02<br>-0.03    | $\pm 0.05$          |
|  | Signalのwidth       | $\pm 0.16$     | +0.008<br>-0.004  | $\pm 0.06$          |
|  | Self cross-feedの割合 | +0.46<br>-0.47 | $\pm 0.05$        | +0.15<br>-0.17      |
|  | Double misIDの数     | $\pm 0.10$     | +0.16<br>-0.15    | $\pm 0.12$          |
|  | Swapped misIDの数    | $\pm 0.002$    | $\pm 0.09$        | +0.03<br>-0.04      |
|  | Charmoniumの数       | $\pm 0.04$     | $\pm 0.10$        | +0.07<br>-0.09      |

崩壊分岐比についての系統誤差. 単位は $[10^{-6}]$ .  
**赤字** : 主要な系統誤差の要因(後で議論)

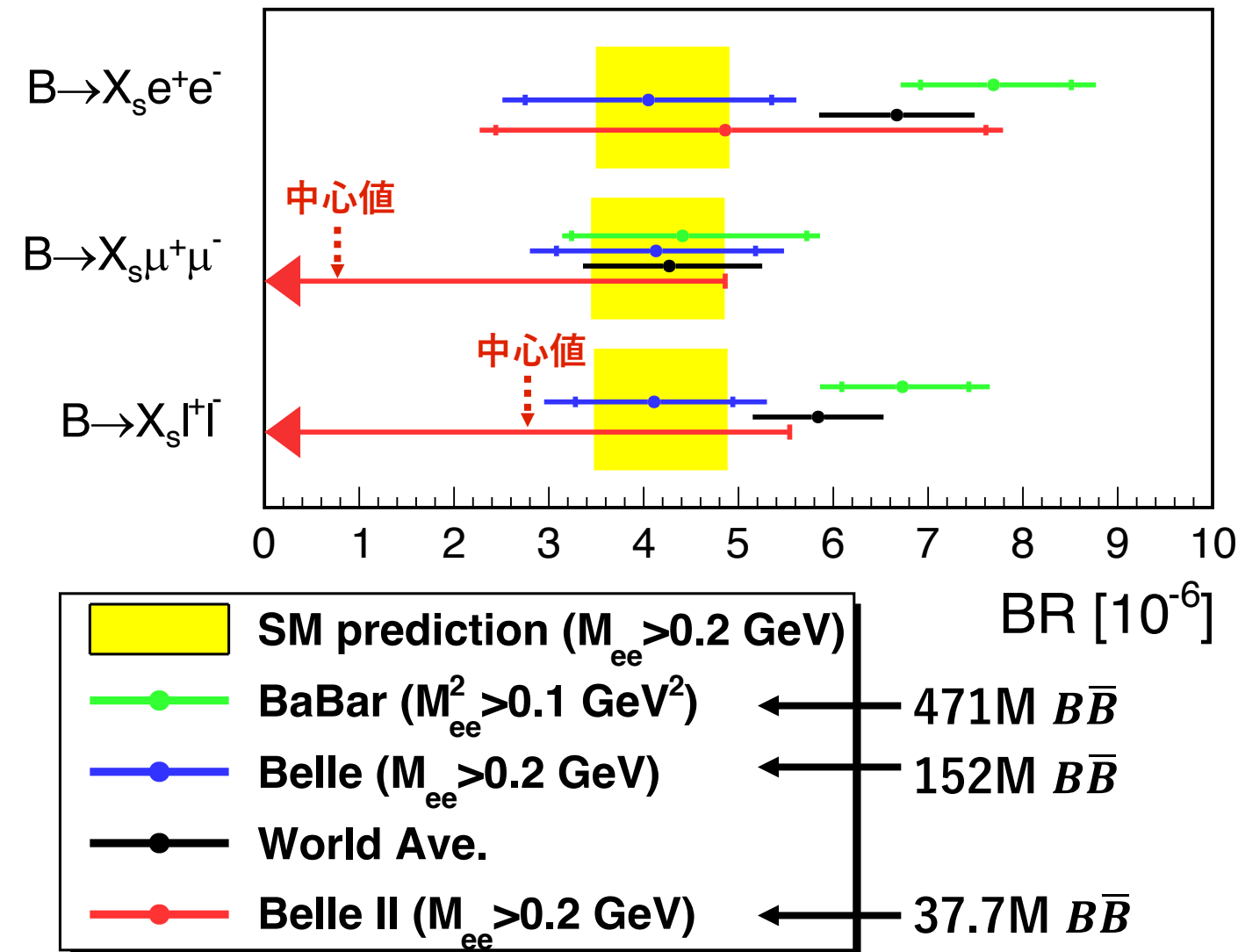


# 議論と今後の展望

先行研究・標準模型との比較

今後の測定に向けた展望

Belle II実験における最終目標



| 崩壊分岐比 [10 <sup>-6</sup> ]         |  |
|-----------------------------------|--|
| $B \rightarrow X_s e^+ e^-$       | $4.86^{+2.75}_{-2.42}(\text{stat})^{+1.02}_{-0.92}(\text{syst})$ |
| $B \rightarrow X_s \mu^+ \mu^-$   | $< 4.67(5.61)$ at 90%(95%) CL                                    |
| $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$ | $< 5.54(6.30)$ at 90%(95%) CL                                    |

- 有意度が $2\sigma$ に満たなかった $X_s \mu^+ \mu^-$ と $X_s \ell^+ \ell^-$ は上限値を計算
- $B \rightarrow X_s e^+ e^-$ ,  $X_s \mu^+ \mu^-$ については、先行研究・標準模型と $1\sigma$ 以内で一致
- $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$ については、世界平均、Belle実験と標準模型とは $1\sigma$ 以内で一致
  - Babar実験とは $1.4\sigma$ だけ離れている

## □ 統計誤差の削減について

- 2022年夏までに積分ルミノシティ **1.1 ab<sup>-1</sup>** を蓄積する計画  
→ 統計的な精度を、今回の5.6倍、BaBar の1.6倍まで改善
- $R_{X_s}$  (崩壊分岐比の電子とミューオンの比)も測定可能：

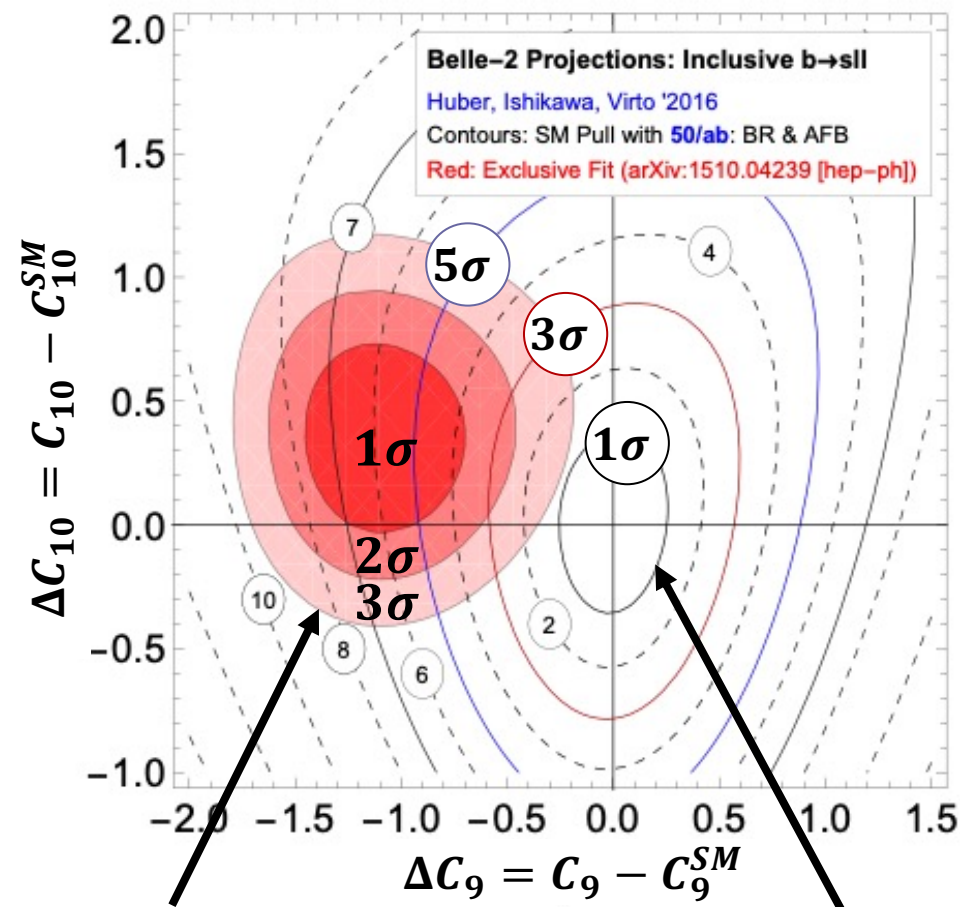
$$R_{X_s}[q_0^2, q_1^2] = \frac{\int_{q_0^2}^{q_1^2} dq^2 \frac{d\Gamma(B \rightarrow X_s \mu^+ \mu^-)}{dq^2}}{\int_{q_0^2}^{q_1^2} dq^2 \frac{d\Gamma(B \rightarrow X_s e^+ e^-)}{dq^2}}$$

## □ 系統誤差の削減について

- Pull分布で見積もったFitter 由来の系統誤差：  
統計誤差に比例するため、統計誤差の削減に伴って減少
- $K\ell^+\ell^-$  の割合の不定性：  
Belle II 実験で精度良く測定し、測定結果に合わせて割合を正確に決定していく
- Self Cross-feed の割合 ( $\pm 100\%$ 動かしている)：  
主な理由は粒子識別の間違い。 Belle II 測定器の性能向上に伴って割合自体が減少

- 2031年までに積分ルミノシティ  $50 \text{ ab}^{-1}$  を取得予定
- $q^2 (= M_{\ell\ell}^2)$  毎の崩壊分岐比  $d\Gamma/dq^2$  と、前後非対称度  $A_{FB}$  による Wilson 係数への Sensitivity
  - $C_9$  と  $C_{10}$  だけがずれると仮定:  
 $\Delta C = C - C^{SM}$ ,  $C^{SM}$ : 標準模型の予言値
  - 先行研究の測定結果は  $\Delta C_9 \sim -1$  を示唆
    - 主に LHCb が強い制限を与えている

→ 先行研究の中心値が正しければ、Belle II 実験における  $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$  の解析によって、 $5\sigma$  以上で標準模型を排除

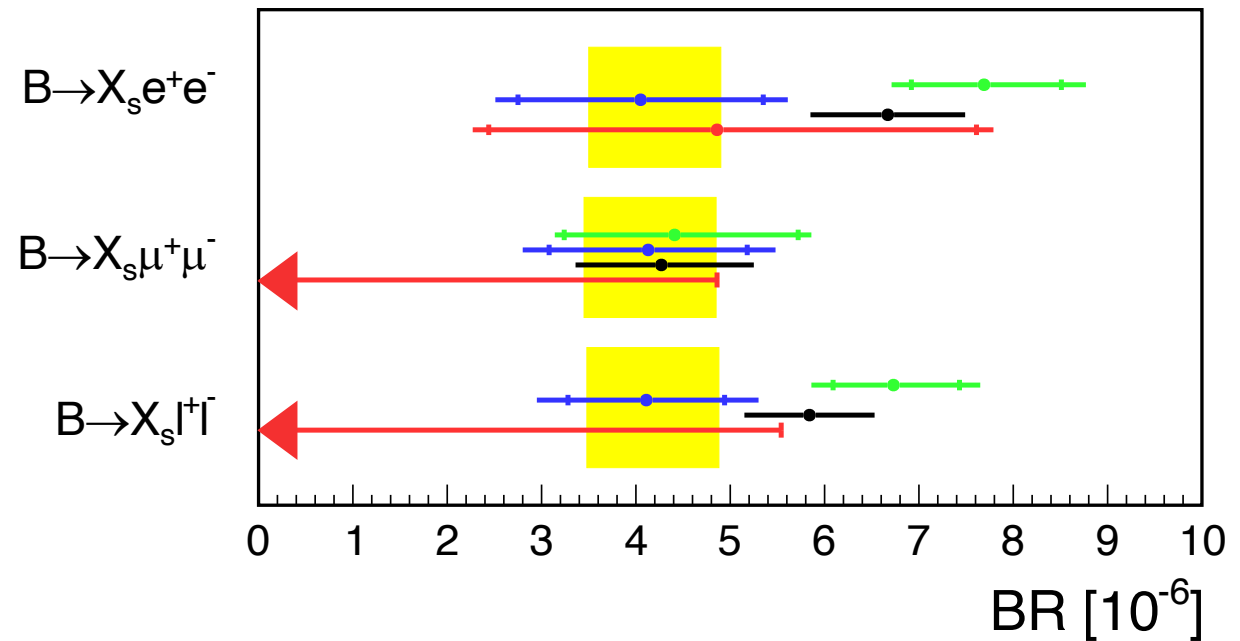
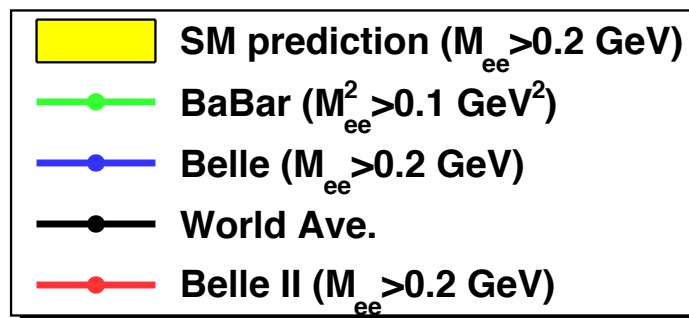


先行研究  
による制限

Belle II における  
 $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$  の  
Sensitivity

□ Belle II 実験の初期データ ( $37.7 \times 10^6$   $B\bar{B}$ 対)を用いて、Belle II 実験において初めて  $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$  の崩壊分岐比を測定した

- $B \rightarrow X_s e^+ e^-$ ,  $B \rightarrow X_s \mu^+ \mu^-$  については先行研究と標準模型の予言値と一致
- $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$  は世界平均、Belle実験、標準模型と一致。BaBar実験とは  $1.4\sigma$  のずれ



□ 将来の高精度な測定に向けて、Belle II 実験における  $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$  の解析手法を確立した

予備スライド

# ご清聴ありがとうございました

## 業績まとめ

### 論文

- Belle-II Collaboration, F. Abudinen, Y. Sato et al. Measurement of the integrated luminosity of the Phase 2 data of the Belle II experiment. Chin.Phys.C 44 (2020) 021001
- Belle-II Collaboration, I. Adachi, Y. Sato et al. Search for an Invisibly Decaying  $Z'$  Boson at Belle II in  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- (e^\pm\mu^\mp)$  Plus Missing Energy Final States. Phys.Rev.Lett. 124
- Belle-II Collaboration, F. Abudinen, Y. Sato et al. Search for Axion-Like Particles produced in  $e^+e^-$  collisions at Belle II. Phys.Rev.Lett. 125 (2020) 16, 161806
- Yo Sato, Top electroweak couplings study at the ILC. Heavy Quarks and Leptons 2018, PoS HQL2018 (2018) 025
- Yo Sato, Results and Prospects of Radiative and Electroweak Penguin Decays at Belle II. ICHEP 2020 (投稿中) arXiv:2012.15394 [hep-ex]

### 国際会議における発表

- ◦ Yo Sato, Akimasa Ishikawa, Emi Kou, Francois Le Diberder, Hitoshi Yamamoto, Junping Tian, Keisuke Fujii, Ryo Yonamine. Top electroweak couplings study at the ILC. Heavy Quarks and Leptons 2018, 山形, 2018年5月
- Yo Sato on behalf of the Belle II collaboration. Results and Prospects of Radiative and Electroweak Penguin Decays at Belle II. 40th International Conference on High Energy Physics (ICHEP2020), プラハ(チェコ)リモート開催, 2020年7月

### 国内会議における発表

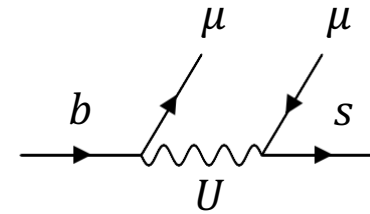
- ◦ 佐藤 瑤、山本均、石川明正  
Belle II実験における $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$ によるレプトン普遍性の検証と新物理探索  
日本物理学会第75回年次大会、名古屋大学(現地開催は中止)、2020年3月
- ◦ 佐藤 瑤、石川明正  
Belle II実験における二光子課程を用いたレプトン識別性能評価  
日本物理学会2020年秋季大会、オンライン開催、2020年9月

### 受賞歴

- Flavor Physics Workshop 2019 ベストトーク賞受賞 2019年11月

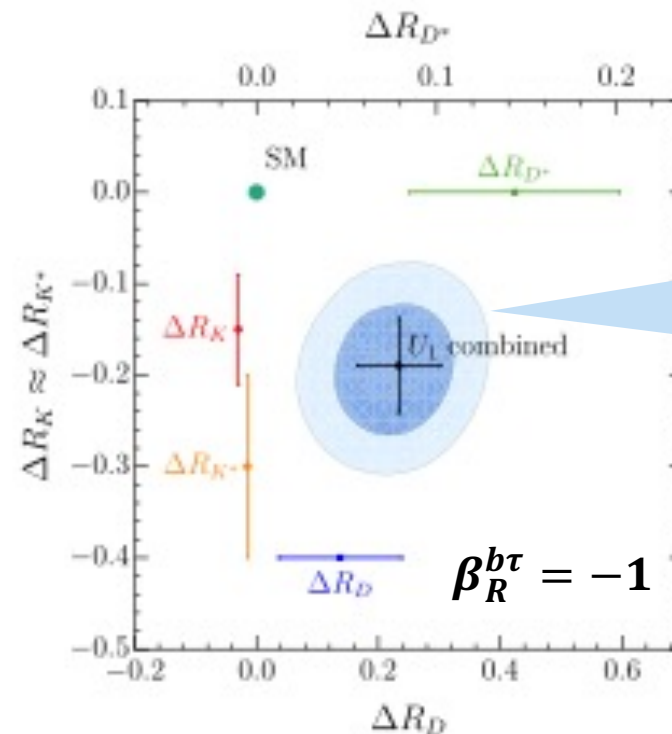
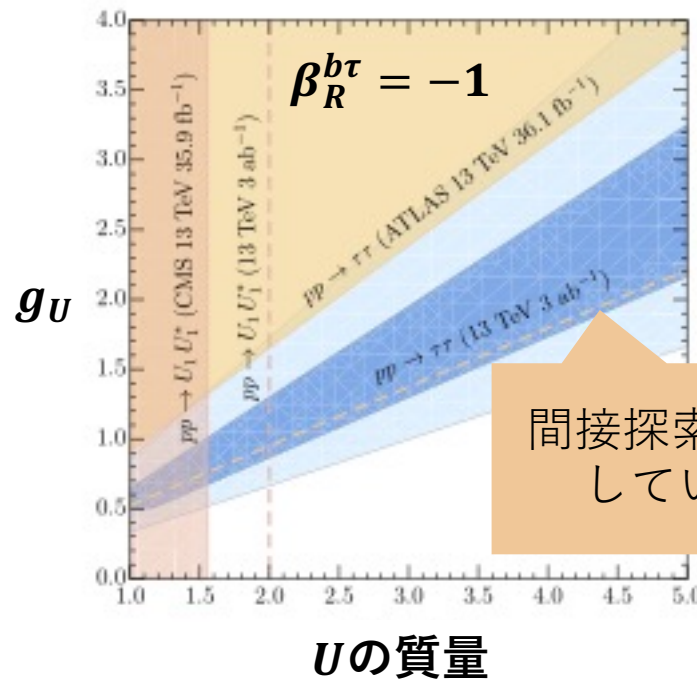
Vector型のLeptoquark  $U$  :  $L_{NP} \subset \frac{g_U}{\sqrt{2}} U^\mu [\beta_L^{i\alpha} (q_L^i \gamma_\mu \ell_L^\alpha) + \beta_R^{i\alpha} (d_R^i \gamma_\mu e_R^\alpha)]$

- レプトン普遍性の破れを引き起こす
- $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$  におけるレプトン普遍性の破れも説明
- 直接探索では制限されていない部分も多い



$$\beta_L = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \beta_L^{d\tau} \\ 0 & \beta_L^{s\mu} & \beta_L^{s\tau} \\ 0 & \beta_L^{b\mu} & 1 \end{pmatrix}, \beta_R = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta_R^{b\tau} \end{pmatrix}$$

JHEP 07 (2019) 168



Wilson 係数( $C_9, C_{10}$ ),  $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$  などの間接探索による制限( $1\sigma, 2\sigma$ )

$R_{K^{(*)}}$  と  $R_{D^{(*)}}$  等の測定結果を同時に説明可能

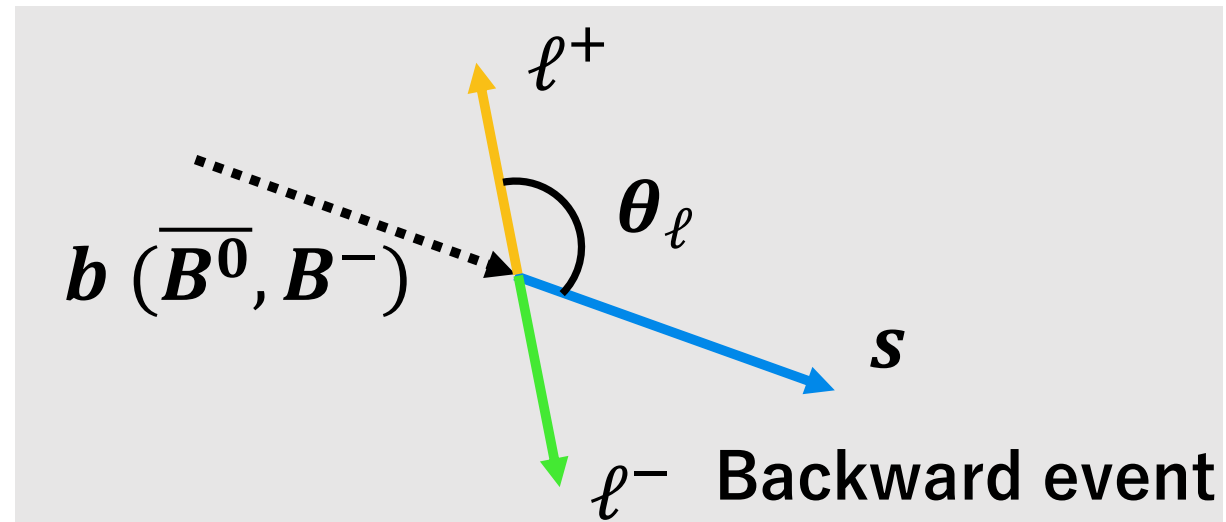
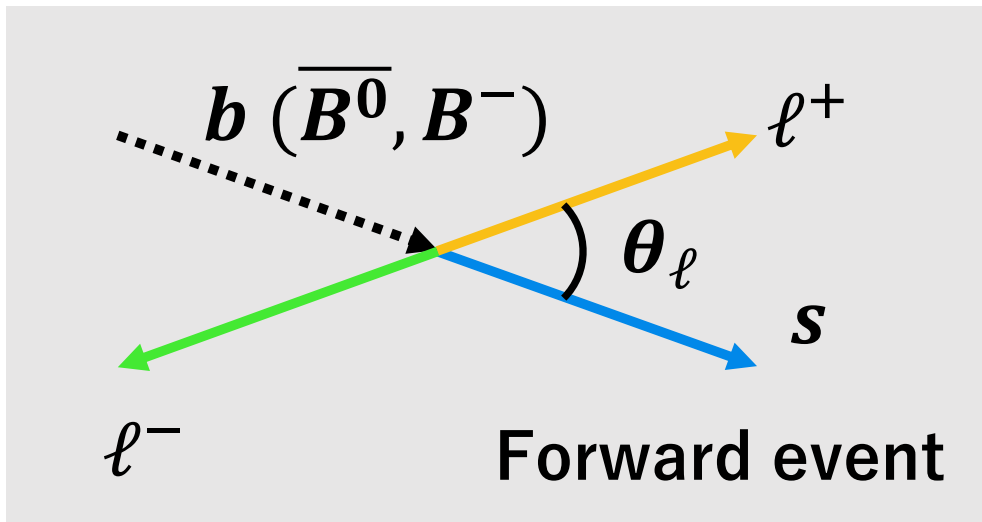


$$\frac{d\Gamma}{dq^2} = \Gamma_0 m_b^3 (1-s)^2 \left[ (|C_9|^2 + |C_{10}|^2)(1+2s) + \frac{4}{s} |C_7|^2 (2+s) + 12 \operatorname{Re}(C_7^* C_9) \right],$$

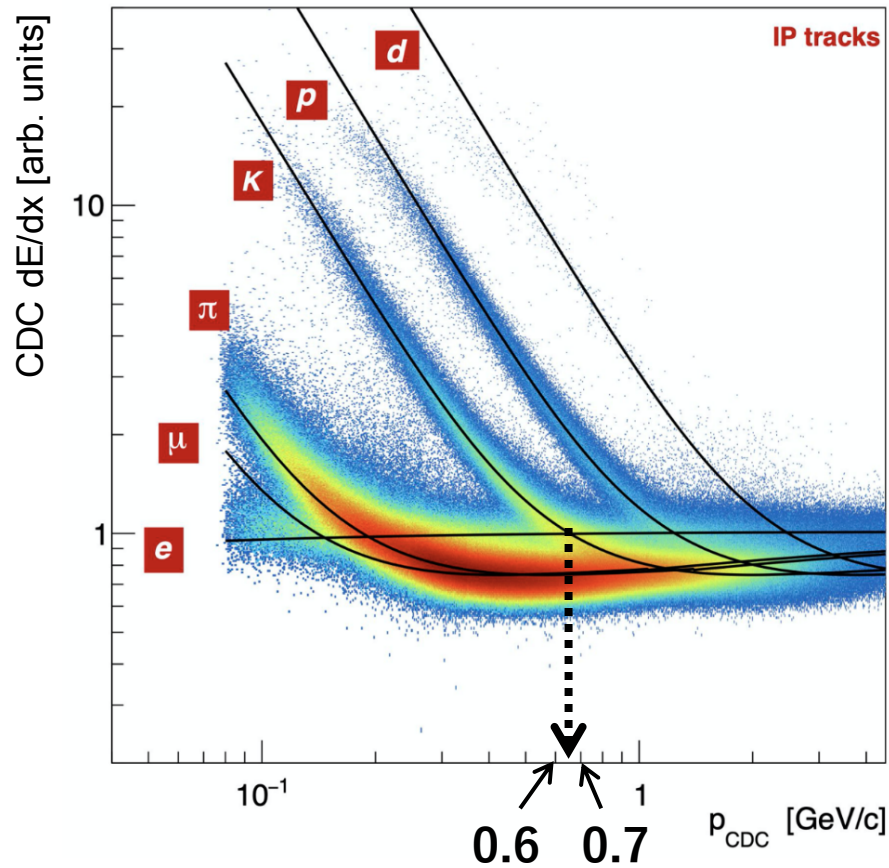
$$\frac{dA_{FB}}{dq^2} = \int_{-1}^1 dz \frac{d^2\Gamma}{dq^2 dz} \operatorname{sign}(z) = -3\Gamma_0 m_b^3 (1-s)^2 s \operatorname{Re} \left( C_{10} \left( C_9 + \frac{2}{s} C_7 \right) \right).$$

where  $s = q^2/m_b^2$ ,  $z = \cos \theta_\ell$  and

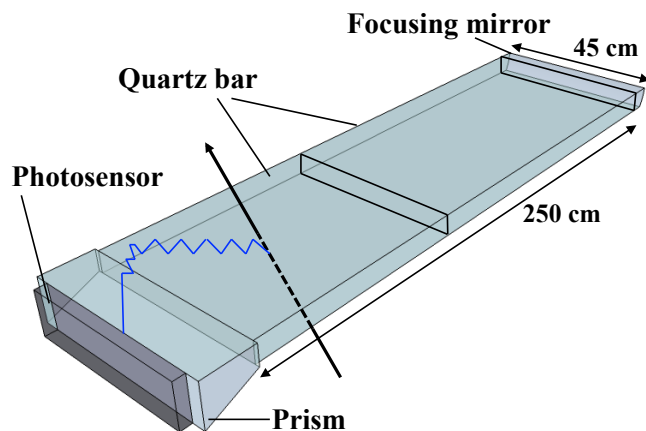
$$\Gamma_0 = \frac{G_F^2}{48\pi^3} \frac{\alpha_{\text{em}}^2}{16\pi^2} |V_{tb} V_{ts}^*|^2.$$



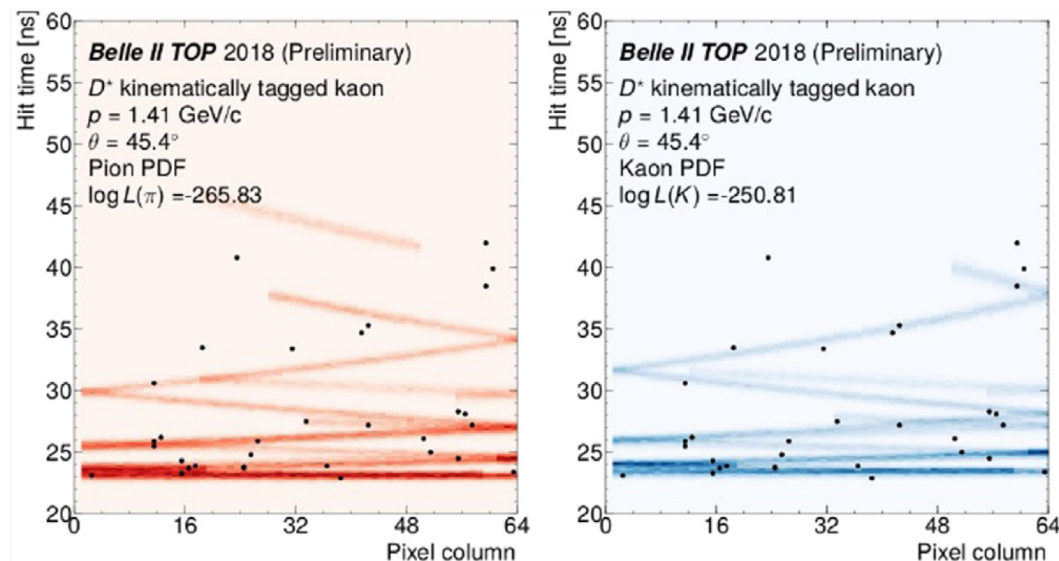
CDC-dE/dx distribution and predictions

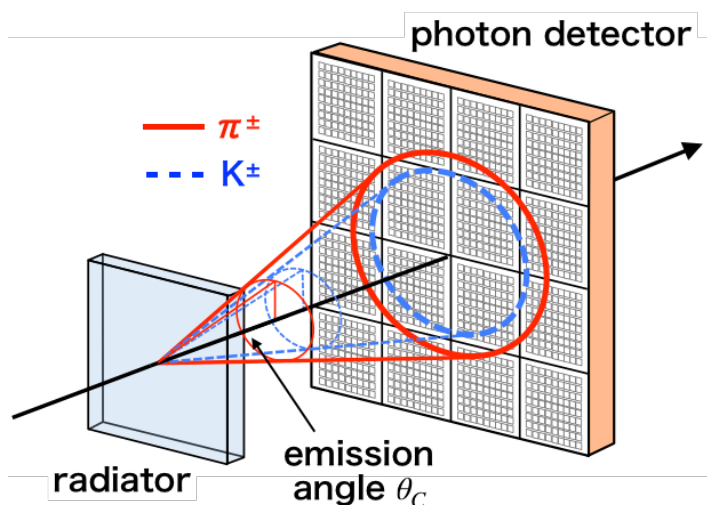


- $dE/dx$  の測定
- 低運動量の粒子の種類を識別するのに有効
  - TOPに到達するには  $P_T \sim 0.5$  GeV 程度
- 電子の識別効率が、 $P \sim 0.7$  GeV 付近で下がるのは、電子とK中間子のバンドが交差しているため
- より低運動量の粒子識別のために、SVDによる  $dE/dx$  の測定も進行中

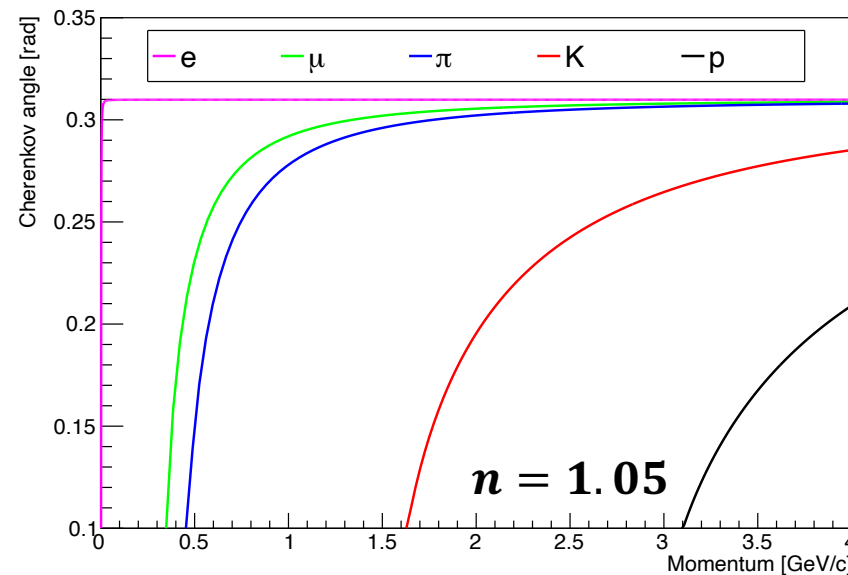
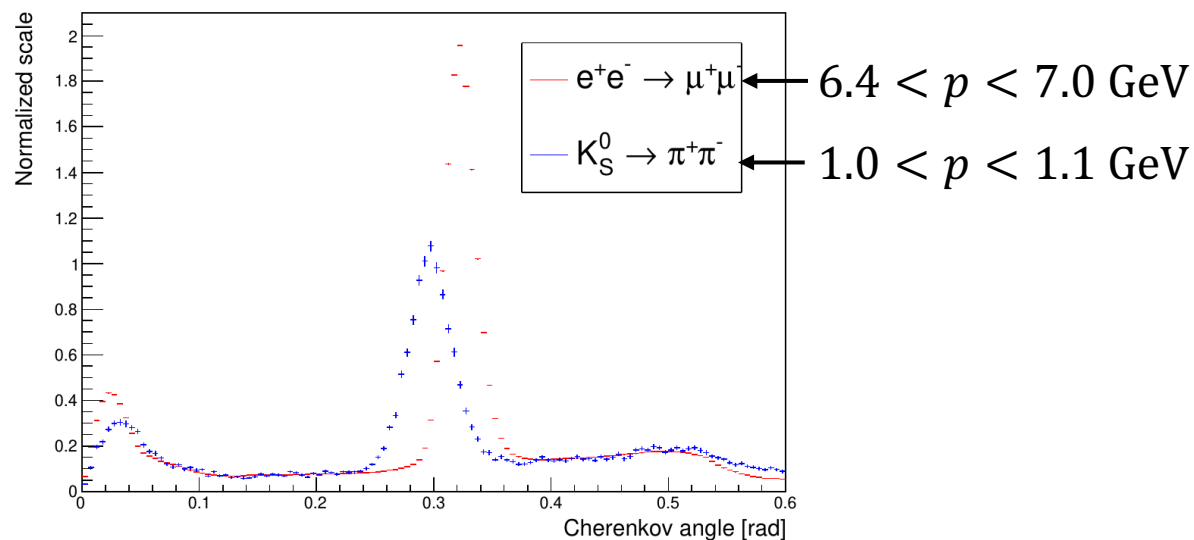


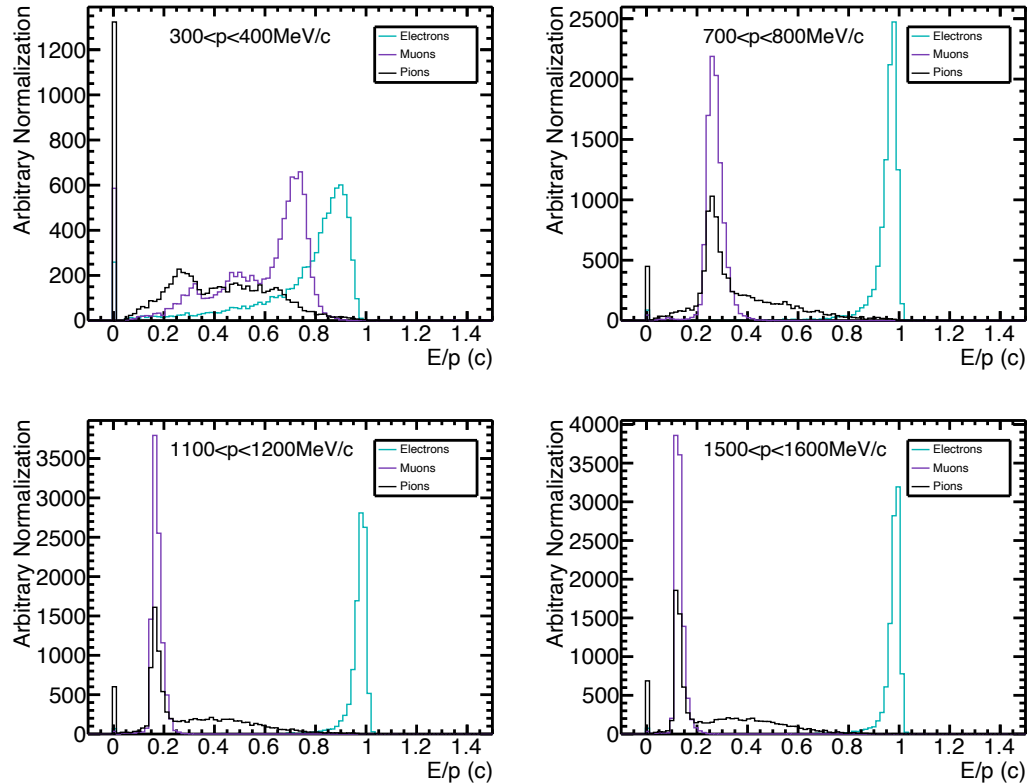
- ❑ クォーツ内で発生したチェレンコフ光を、全反射させて、終端の光検出器(MCP-PMT)で検出
- ❑ 検出位置・時間が粒子の種類によって異なる



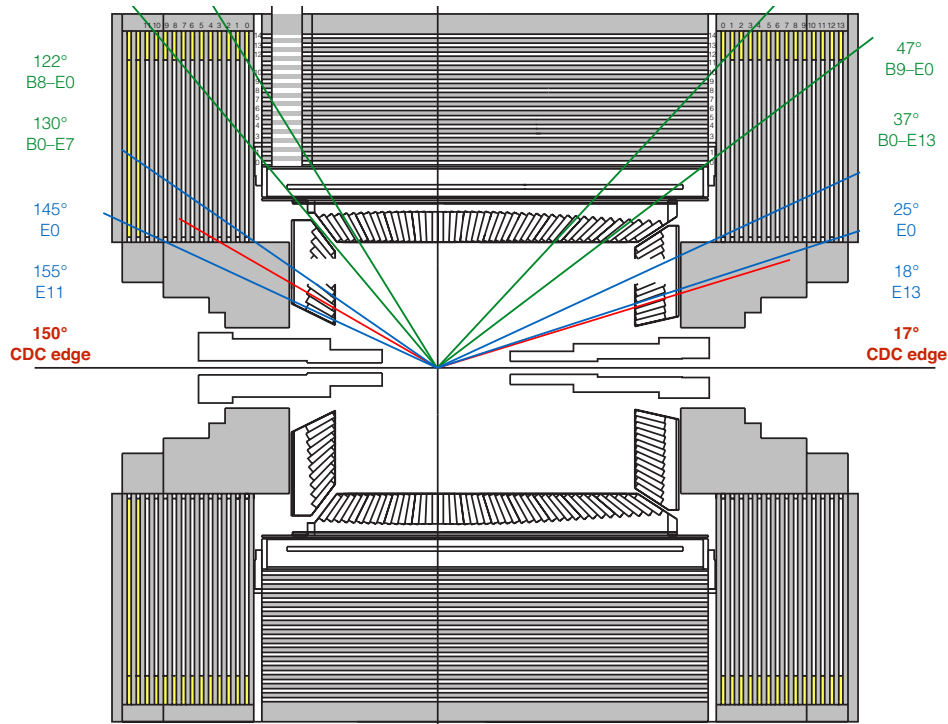


- エアロジェルで発生したチェレンコフ光を、後段の光検出器(HAPD)で検出
- チェレンコフ光によるリングイメージから、チェレンコフ角を測定。粒子の運動量と合わせて粒子の種類を識別する



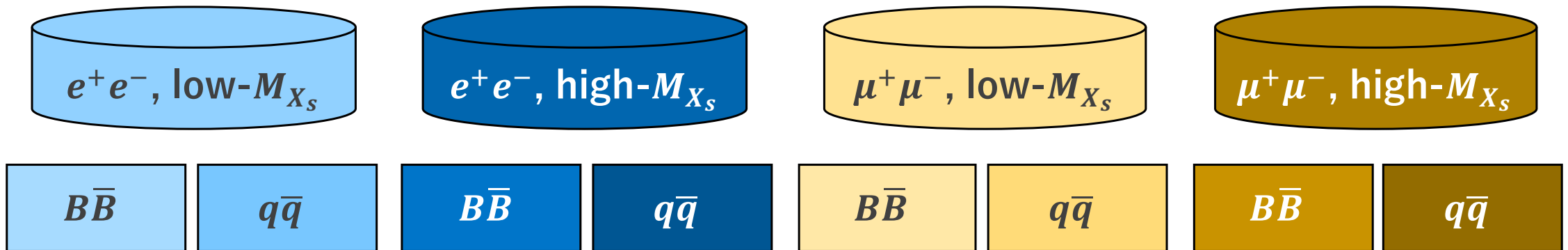


- $E_{ECL}/P$  分布の形を使って識別
  - 電子はほとんどのエネルギーを失うので、1 にピークを持つ
- 特に高い運動量での選別が得意
  - 低運動量側はCDCが使える

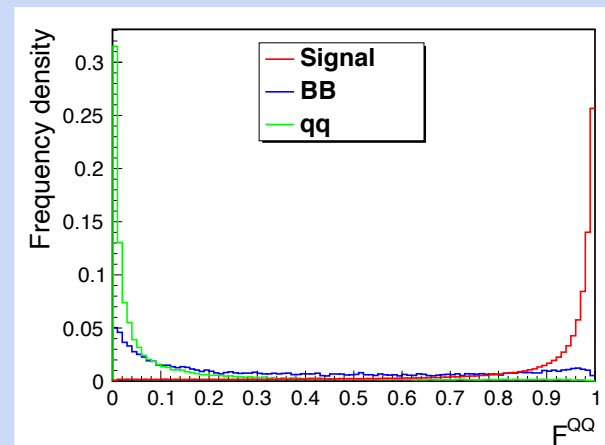
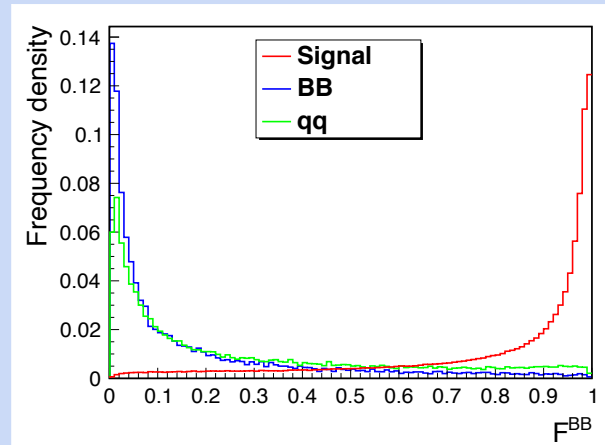
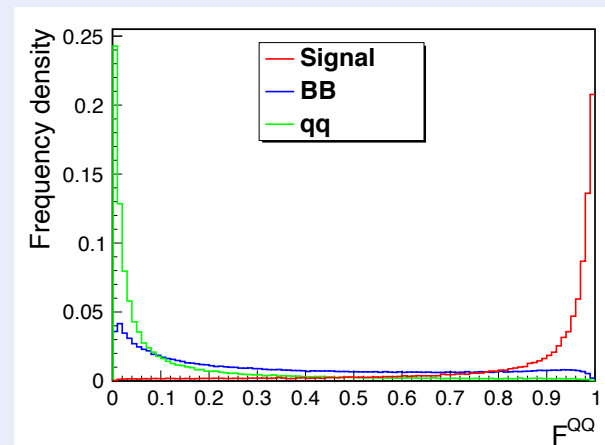
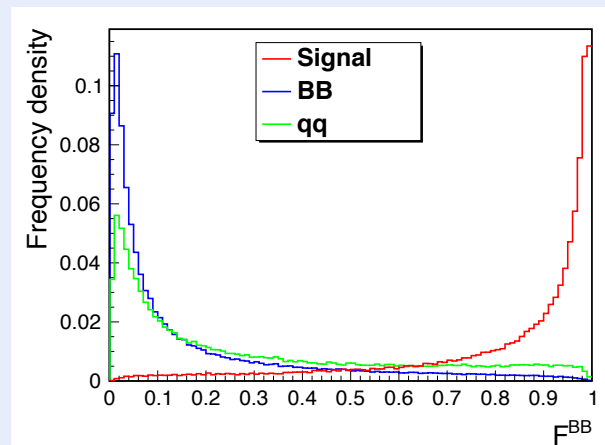


- ❑ 鉄のプレートと検出器のサンドイッチ構造
- ❑ 透過力の高いミュオンを識別
- ❑ Interaction length : 3.9 ( $e^{-3.9} \sim 0.020$ )  
→  $\pi$ 中間子の誤識別は ~2% 程度生じうる

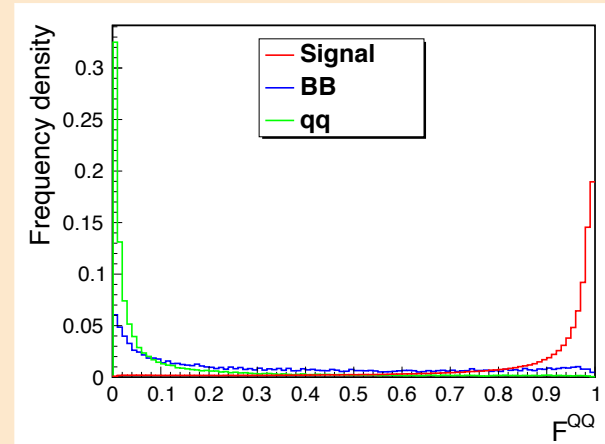
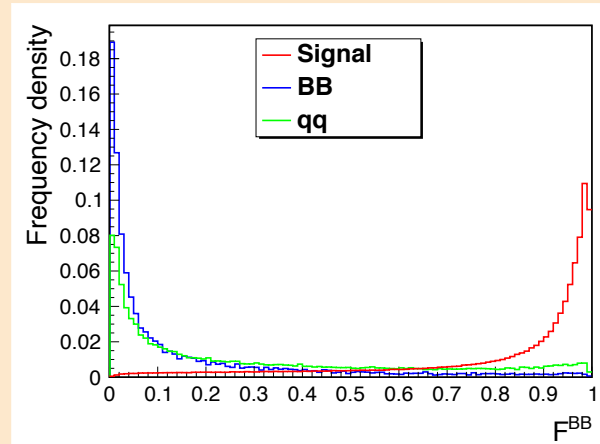
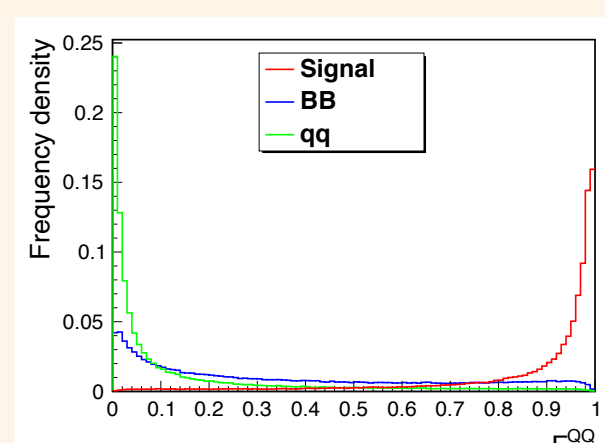
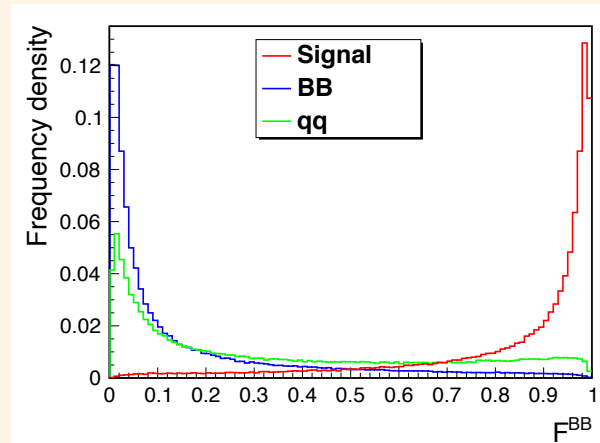
- 効率良く選別するため、特徴の違いに合わせてTraining
  - $[e^+e^- \text{ or } \mu^+\mu^-] \times [M_{X_s} < 1.1 \text{ GeV or } M_{X_s} > 1.1 \text{ GeV}]$  の4つに分ける
  - $B\bar{B}$  事象と  $q\bar{q}$  事象、それぞれを削減するためのFastBDTをTraining



- 候補が複数ある場合は  $B\bar{B}$  の出力結果が良い方を選択

$B\bar{B}$  事象用のFastBDT 出力 $q\bar{q}$  事象用のFastBDT 出力 $e^+e^-$ ,  
 $M_{Xs} < 1.1 \text{ GeV}$  $e^+e^-$ ,  
 $M_{Xs} > 1.1 \text{ GeV}$ 



$B\bar{B}$  事象用のFastBDT 出力 $q\bar{q}$  事象用のFastBDT 出力 $\mu^+\mu^-$ ,  
 $M_{Xs} < 1.1 \text{ GeV}$  $\mu^+\mu^-$ ,  
 $M_{Xs} > 1.1 \text{ GeV}$ 

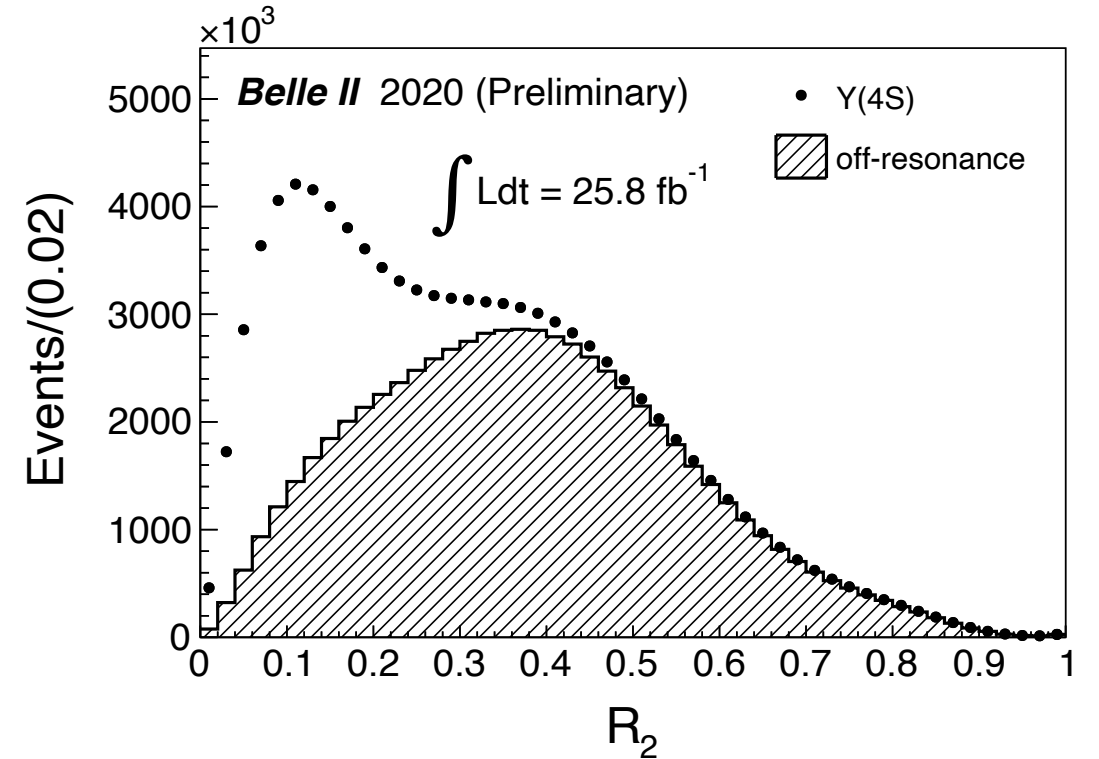
|                          | $B \rightarrow X_s e^+ e^-$ |                    |                    | $B \rightarrow X_s \mu^+ \mu^-$ |                    |                    |
|--------------------------|-----------------------------|--------------------|--------------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|
|                          | 信号事象                        | $B\bar{B}$ 事象      | $q\bar{q}$ 事象      | 信号事象                            | $B\bar{B}$ 事象      | $q\bar{q}$ 事象      |
| Generated                | 318.7 (100.0%)              | $3.63 \times 10^7$ | $1.29 \times 10^8$ | 316.1 (100.0%)                  | $3.63 \times 10^7$ | $1.29 \times 10^8$ |
| Reconstructed            | 40.00 (12.55%)              | $9.89 \times 10^4$ | $3.84 \times 10^4$ | 32.31 (10.22%)                  | $1.13 \times 10^5$ | $4.68 \times 10^4$ |
| Pre-selection            | 29.22 (9.167%)              | $3.16 \times 10^4$ | $7.68 \times 10^3$ | 28.41 (8.987%)                  | $2.45 \times 10^4$ | $9.14 \times 10^3$ |
| Charmonium veto          | 19.54 (6.131%)              | $8.67 \times 10^3$ | $5.46 \times 10^3$ | 21.19 (6.703%)                  | $8.02 \times 10^3$ | $7.39 \times 10^3$ |
| D veto                   | 18.16 (5.697%)              | $6.45 \times 10^3$ | $4.58 \times 10^3$ | 19.75 (6.249%)                  | $5.94 \times 10^3$ | $6.17 \times 10^3$ |
| FastBDT                  | 7.836 (2.458%)              | 23.5               | 11.1               | 9.821 (3.107%)                  | 38.1               | 37.4               |
| Best Candidate selection | <b>7.705 (2.418%)</b>       | 21.5               | 10.0               | <b>9.731 (3.078%)</b>           | 36.0               | 35.6               |

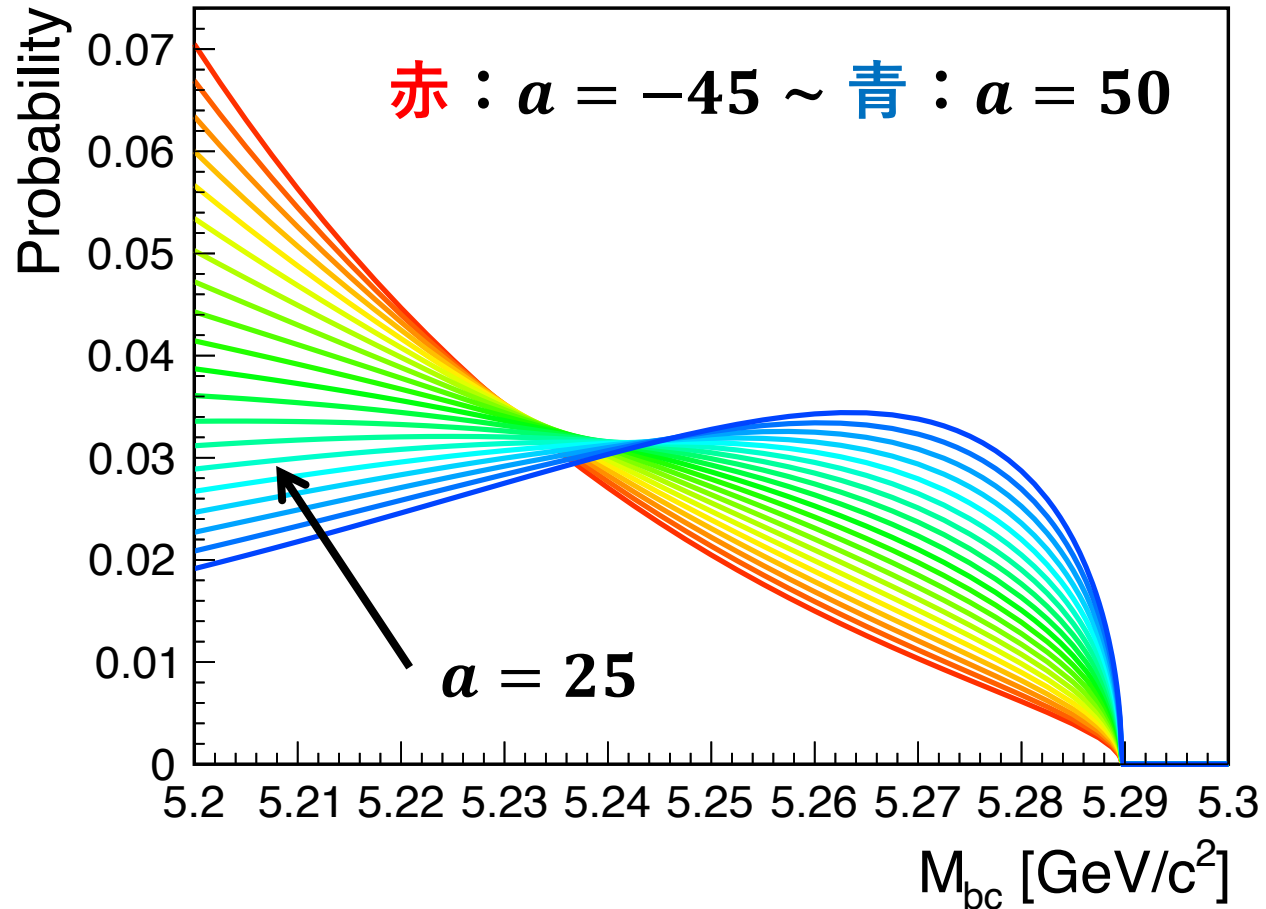
MC によって見積もった期待される信号事象数 : 7.7 ( $X_s e^+ e^-$ ), 9.7 ( $X_s \mu^+ \mu^-$ )

$$N_{B\bar{B}} = \frac{N_{\text{had}}^{\text{on-res}} - R_{\text{lumi}} \cdot N_{\text{had}}^{\text{off-res}} \cdot k}{\epsilon_{B\bar{B}}}$$

- $N_{\text{had}}^{\text{on-res}}$  :  $\Upsilon(4S)$  resonance 上での運転におけるハドロン事象数
  - $N_{\text{had}}^{\text{off-res}}$  :  $\Upsilon(4S)$  resonance より小さいエネルギーの運転におけるハドロン事象数
  - $\epsilon_{B\bar{B}}$  : 選別効率
  - $R_{\text{lumi}}$  : それぞれの積分ルミノシティの比
  - $k$  : エネルギーの違いによる補正
- $B\bar{B}$  事象は  $\Upsilon(4S)$  で急に断面積が大きくなるが、 $q\bar{q}$  事象の断面積はあまり変化がないことを利用

Fox-Wolfram moment の0次と2次の比 :  $R_2$

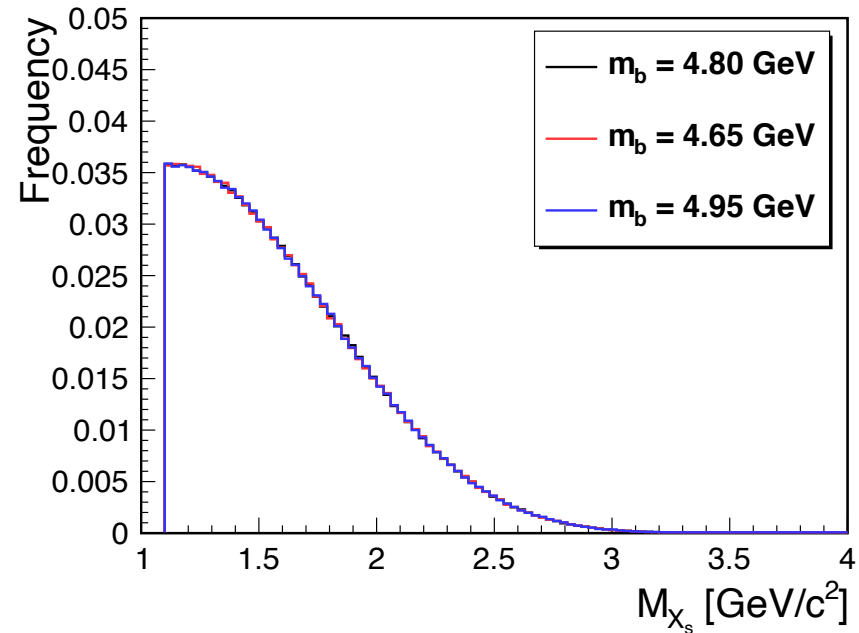




$$f_{ARGUS} = N \cdot M_{bc} \cdot \sqrt{t} \cdot \exp(-at),$$

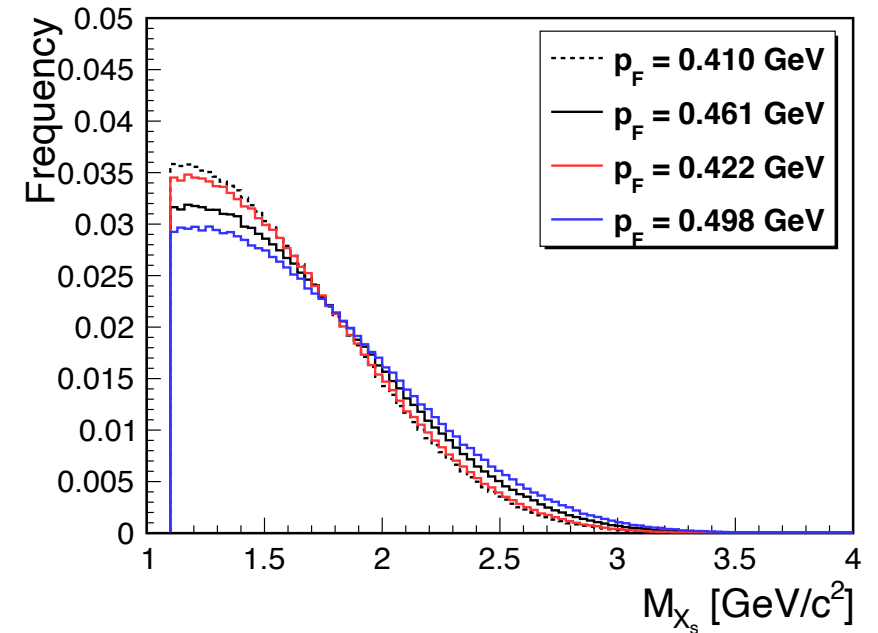
$$t = 1 - \left( \frac{M_{bc}}{\text{Endpoint}} \right)^2.$$

- $q\bar{q}$ 事象やピークを作らない $B\bar{B}$ 事象の分布のモデリングに使用
- Endpoint はビームエネルギーに対応
- 本研究のFit結果は  $a \sim 25$  ( — )



## $b$ -quark の質量を動かした際の $M_{X_s}$ 分布

- 150 MeV と広めに動かしても、分布の形がほとんど変化しない

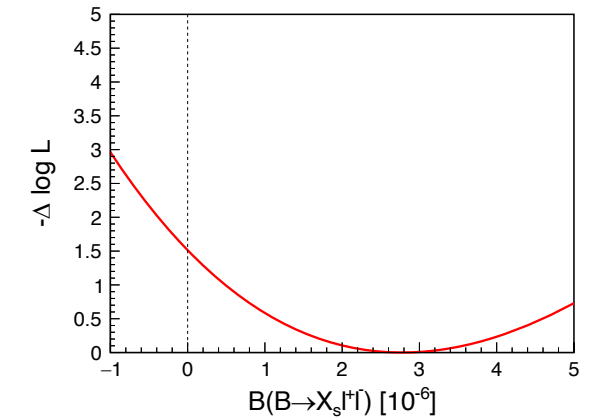
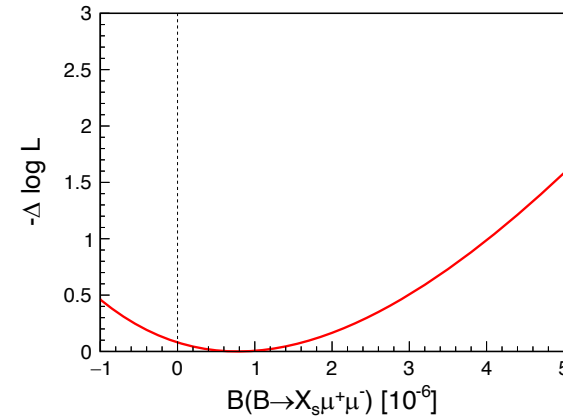
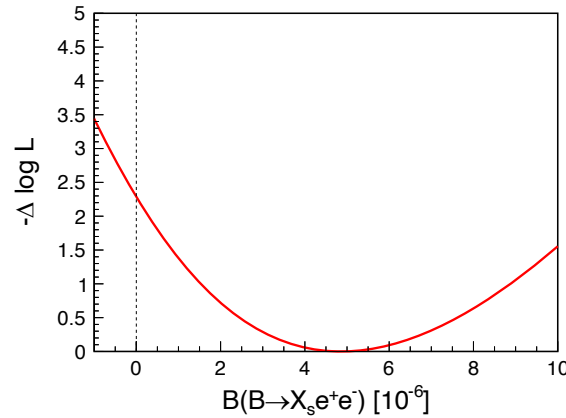


## Fermi 運動量を動かした際の $M_{X_s}$ 分布

- 分布の変化幅が比較的大きい
- 元々のMCサンプルの値を、最近の結果を元に更新した

$\sqrt{-2 \log(L_0/L_{max})}$  :  $L_{max}, L_0$  は通常フィットと信号事象数を0に固定した時のLikelihoodの値

$-\log(L/L_{max})$  分布  
(統計誤差のみ)



系統誤差をWidthとするGaussianでLikelihoodをたたみ込んで、Total Significanceを計算

| $B \rightarrow X_s e^+ e^-$ | $B \rightarrow X_s \mu^+ \mu^-$ | $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$ |
|-----------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|
| $2.0\sigma$                 | $0.40\sigma$                    | $1.7\sigma$                       |

$2.0\sigma$ に満たない $B \rightarrow X_s \mu^+ \mu^-$  と $B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$  は崩壊分岐比の上限を付けた

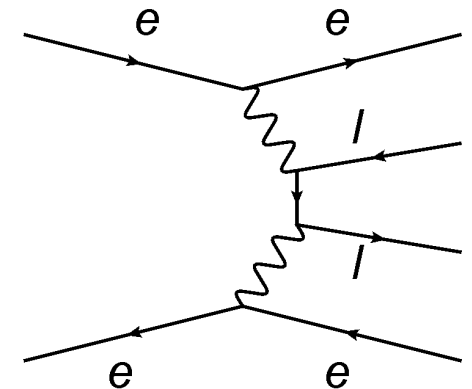
- 物理的に意味のある範囲(=崩壊分岐比が0以上)のLikelihoodについて、全体の90%(95%)になる位置をConfidence Level 90%(95%)の上限として計算

## レプトン識別性能の評価

- レプトン識別効率、実データとMCとの比を測定・評価
  - レプトン普遍性の研究のためには誤差を $O(0.1)\%$ に抑えたい
- 識別効率を測定するためには、予め粒子の種類を特定しておく必要がある

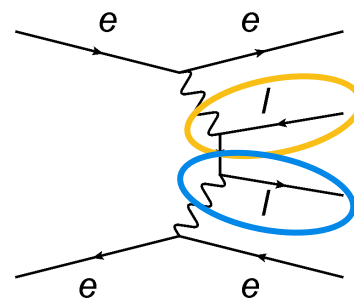
## 二光子過程 $e^+e^- \rightarrow e^+e^-l^+l^-$ : レプトン識別性能評価に最適

- 断面積が大きくイベント数が多い、特に低運動量( $p < 3.0 \text{ GeV}$ )
  - 統計誤差を抑えることが可能
  - B中間子( $m_B = 5.28 \text{ GeV}$ )の崩壊粒子と同程度の運動量
- 終状態のうち、検出器領域には $l^+l^-$ のみ
  - レプトンの種類が同じ。Tag and Probe 方(次頁)が使用できる
  - $l^+l^-$ の横運動量  $p_T$  がバランスしており、事象選別が容易



## Tag and Probe 方

- 一方のレプトンを識別する(**Tag**)ことで、他方のレプトンを**Probe**として用いる



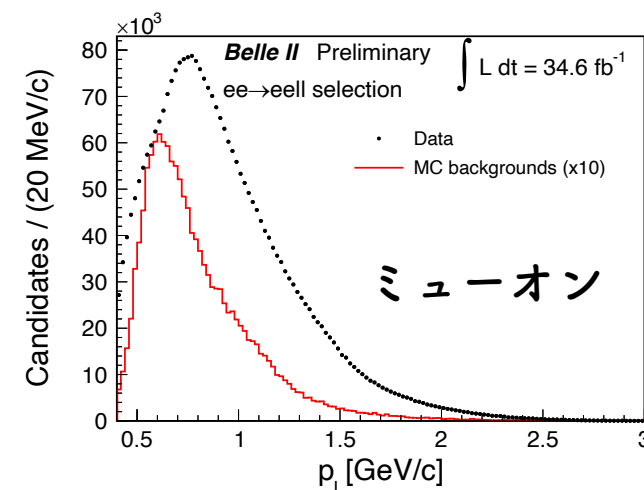
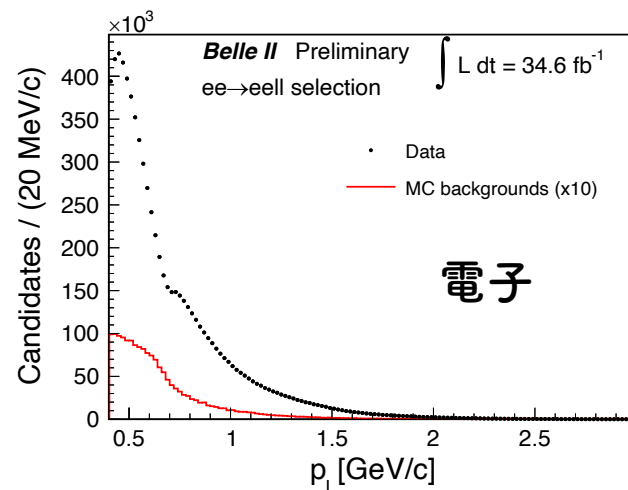
Tag して  
Probe として用いる

## 識別効率の定義:

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{probe}}^{\text{signal}}}{N_{\text{tag}}^{\text{signal}}}$$

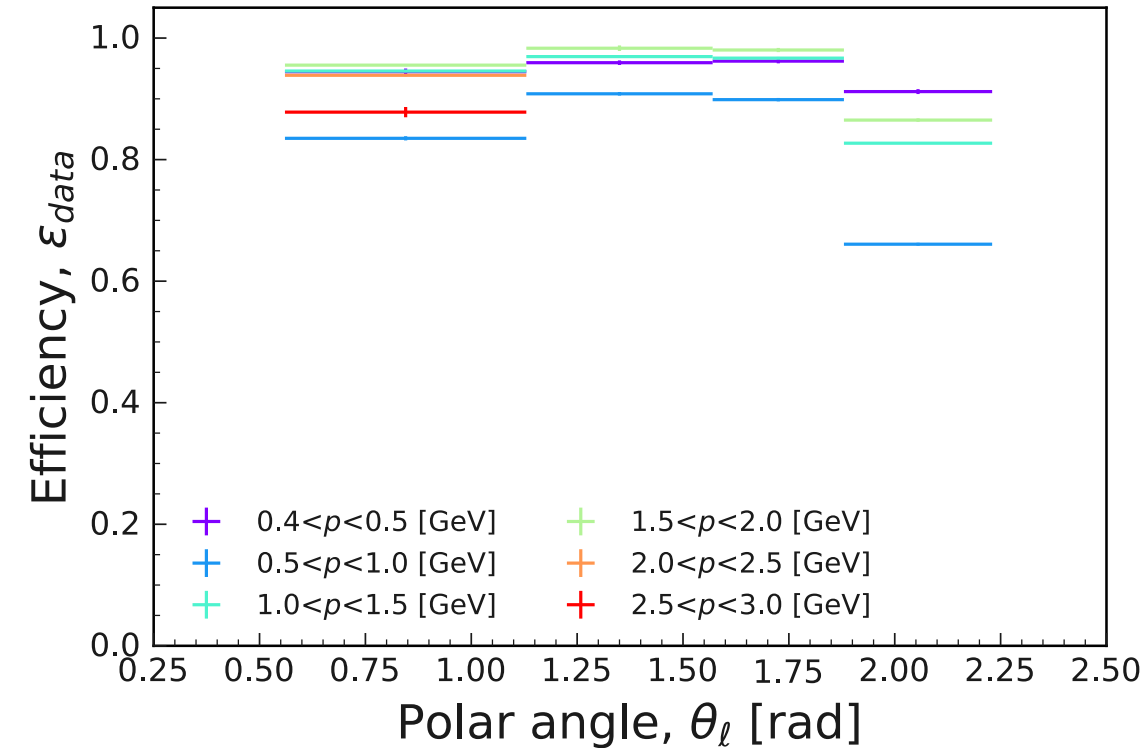
(= Probe に条件を課した後に残るイベント数)  
(= Tag されたイベント数)

- 背景事象はMCを使って差し引く
  - MCで背景事象を見積もり、データとMCの比をかける
  - MCシミュレーションの誤差、補正項の誤差は系統誤差



Tag 後のレプトンの運動量分布。黒点は実データ、赤線がMCの背景事象(可視化のため事象数を10倍)  
(左)電子のTag 条件後、(右)ミューオンのTag 条件後



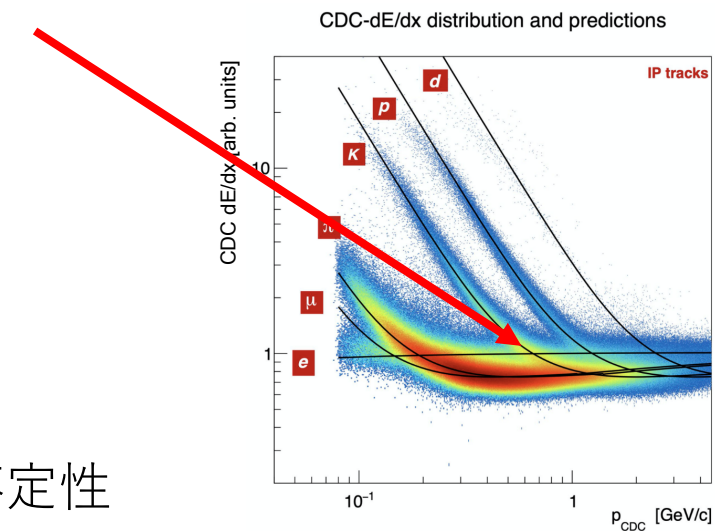


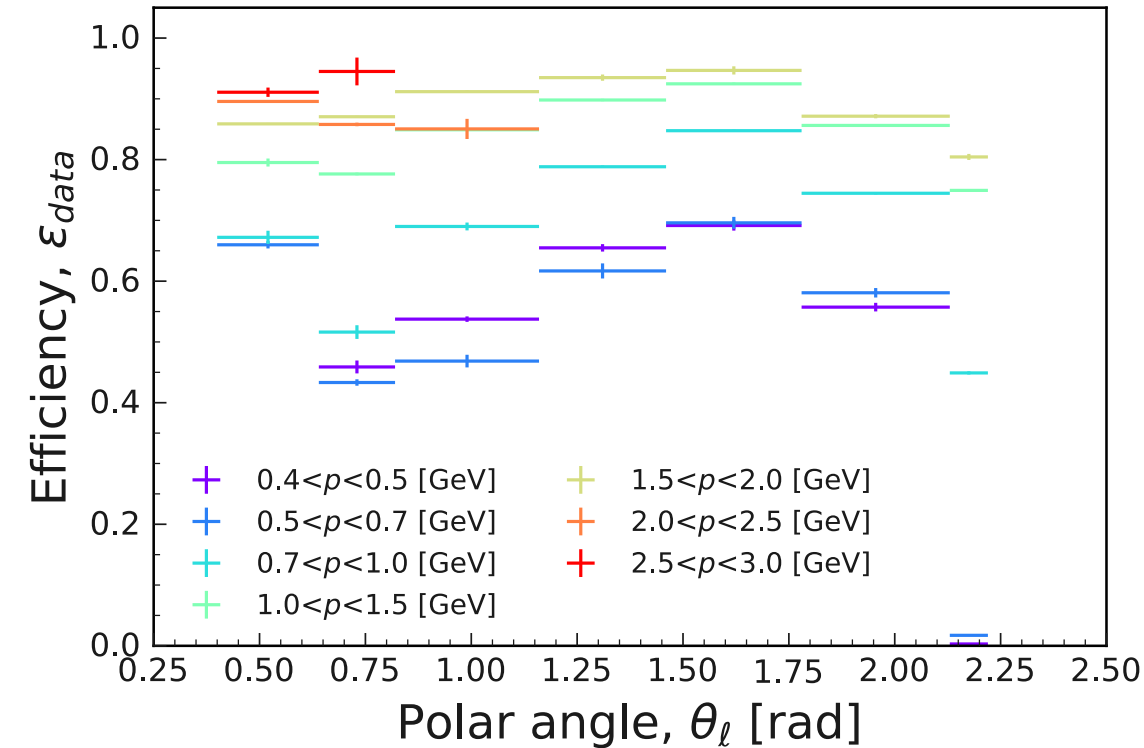
極角  $\theta$  と運動量  $p$  の関数として測定

- 検出器の中心部の効率が低い ( $\epsilon \sim 95\%$ )
  - ECLのクラスター形状を用いた手法を開発中
- $0.5 < p < 1.0$  GeV の効率が低い
  - CDCの $e$ と $K$ の  $dE/dx$  のバンドが交差

- 誤差は $O(0.1)\%$ 、  
系統誤差が支配的

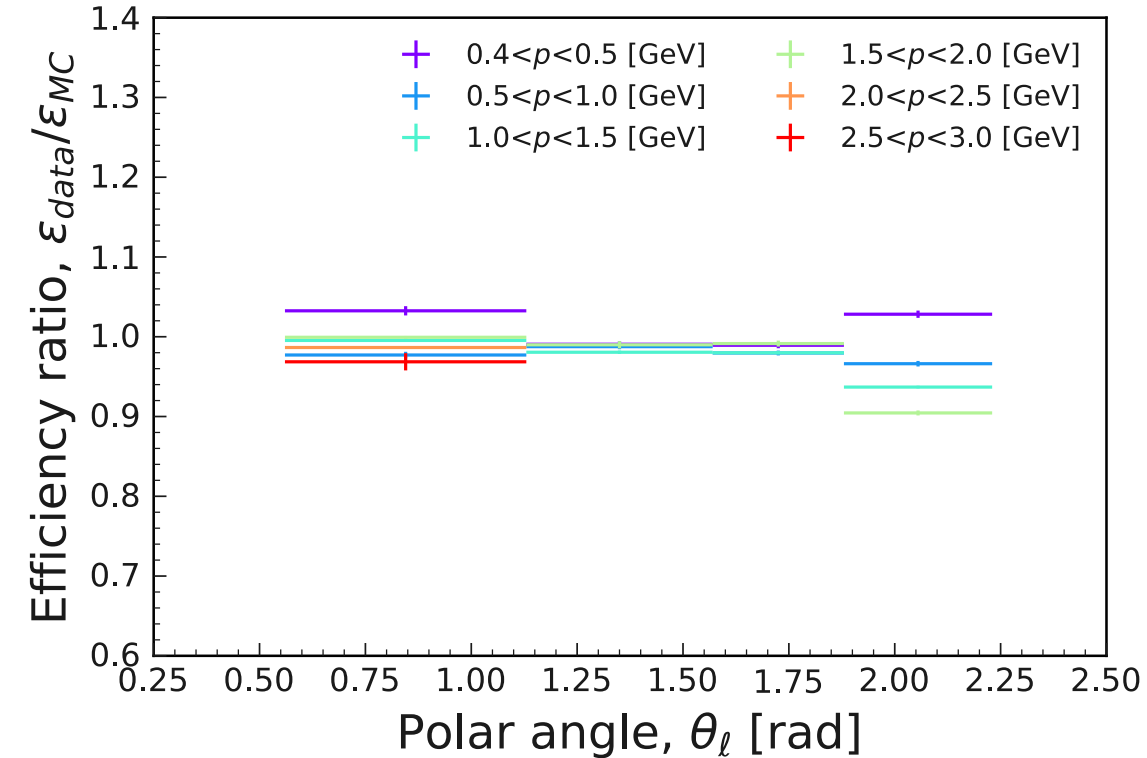
- 背景事象のMC不定性
- 補正に用いる識別効率の比の誤差





極角  $\theta$  と運動量  $p$  の関数として測定

- $p_T < 0.7$  GeV は効率が低い
  - KLMまで届かない、 $\pi$ との識別が困難
- 検出器の中心部、高運動量は  $\varepsilon \sim 90\%$ 
  - ECL のクラスター形状を用いた手法を開発中
  - KLM のミューオン識別アルゴリズムを改善
- 誤差は  $O(0.1)\%$ 、系統誤差が支配的
  - 背景事象のMCシミュレーション
  - 補正に用いる識別効率の比の誤差
  - 低運動量は統計誤差  $O(1)\%$



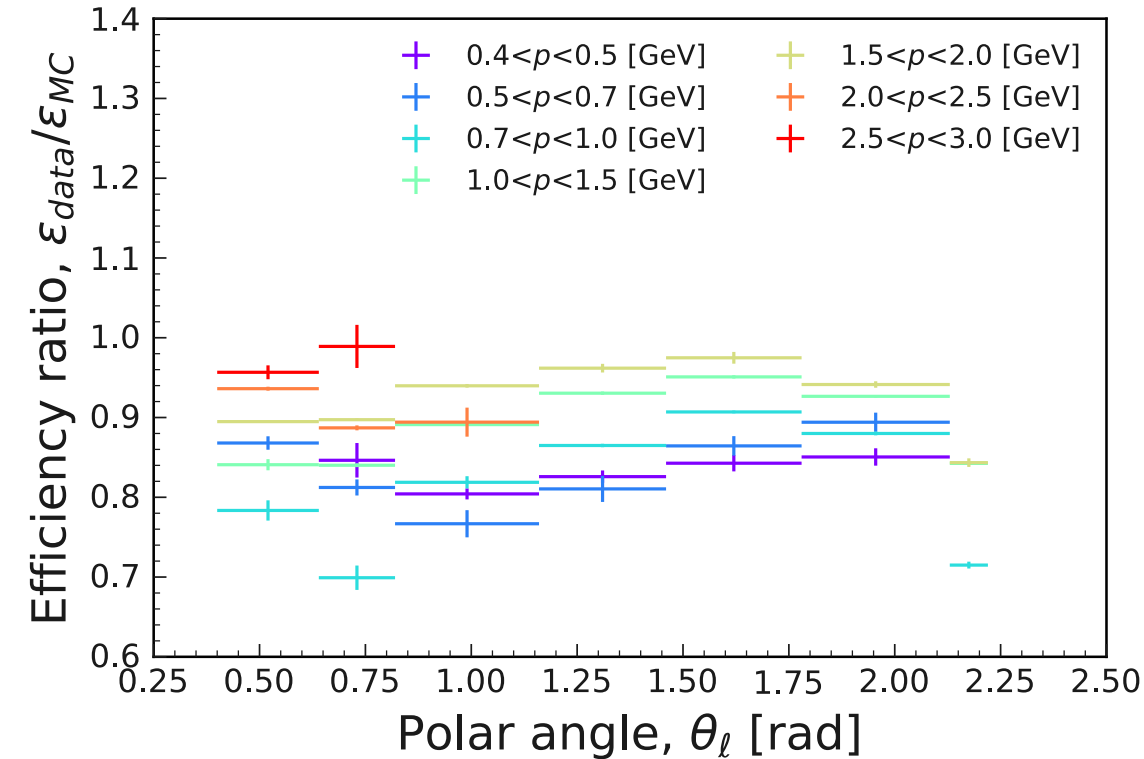
極角  $\theta$  と運動量  $p$  の関数として測定

➤ 数%のレベルでデータとMCが一致

- CDC における  $dE/dx$  の校正が進行中

➤ 誤差は0(0.1)%、系統誤差が支配的

- 背景事象のMCシミュレーション
- 補正に用いる識別効率の比の誤差



極角  $\theta$  と運動量  $p$  の関数として測定

- 高運動量では10%以内で一致
- 低運動量ではO(10)%のずれがある
  - KLM のアルゴリズムの改善、データで思った通りの効率が出ていない可能性
  - CDC における  $dE/dx$  の校正が進行中
- 誤差はO(0.1)%、系統誤差が支配的
  - 背景事象のMCシミュレーション
  - 補正に用いる識別効率の比の誤差