

Belle II 実験の
2019年春期運転データにおける
 $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の再構成と
崩壊点位置分解能の評価

高エネルギー物理学研究室

藤井 美保

目次

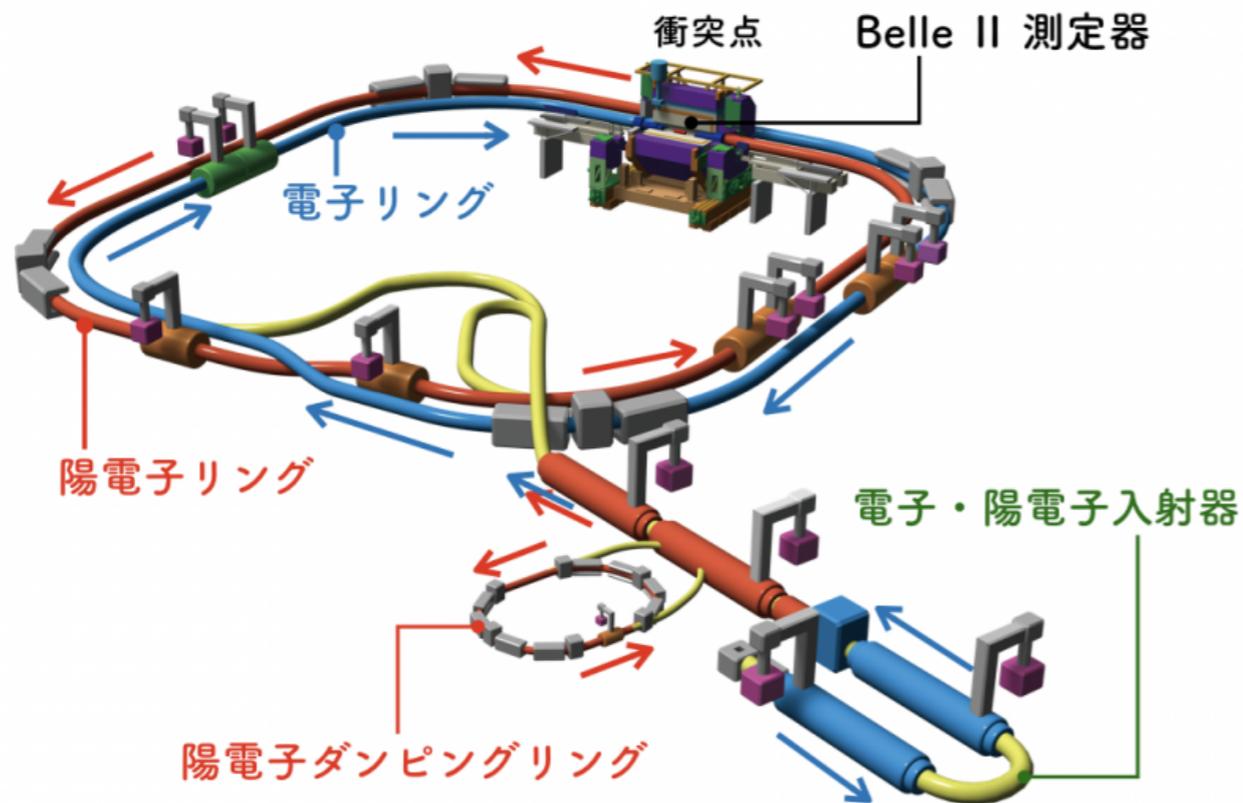
- イントロダクション
 - Belle II 実験
 - 時間依存CP非保存を測定するには
 - 研究動機
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の再構成
(モンテカルロシミュレーション)
- 崩壊点位置分解能の見積もり
(モンテカルロシミュレーション)
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の再構成
(2.62 fb⁻¹の実データ)
- まとめ

目次

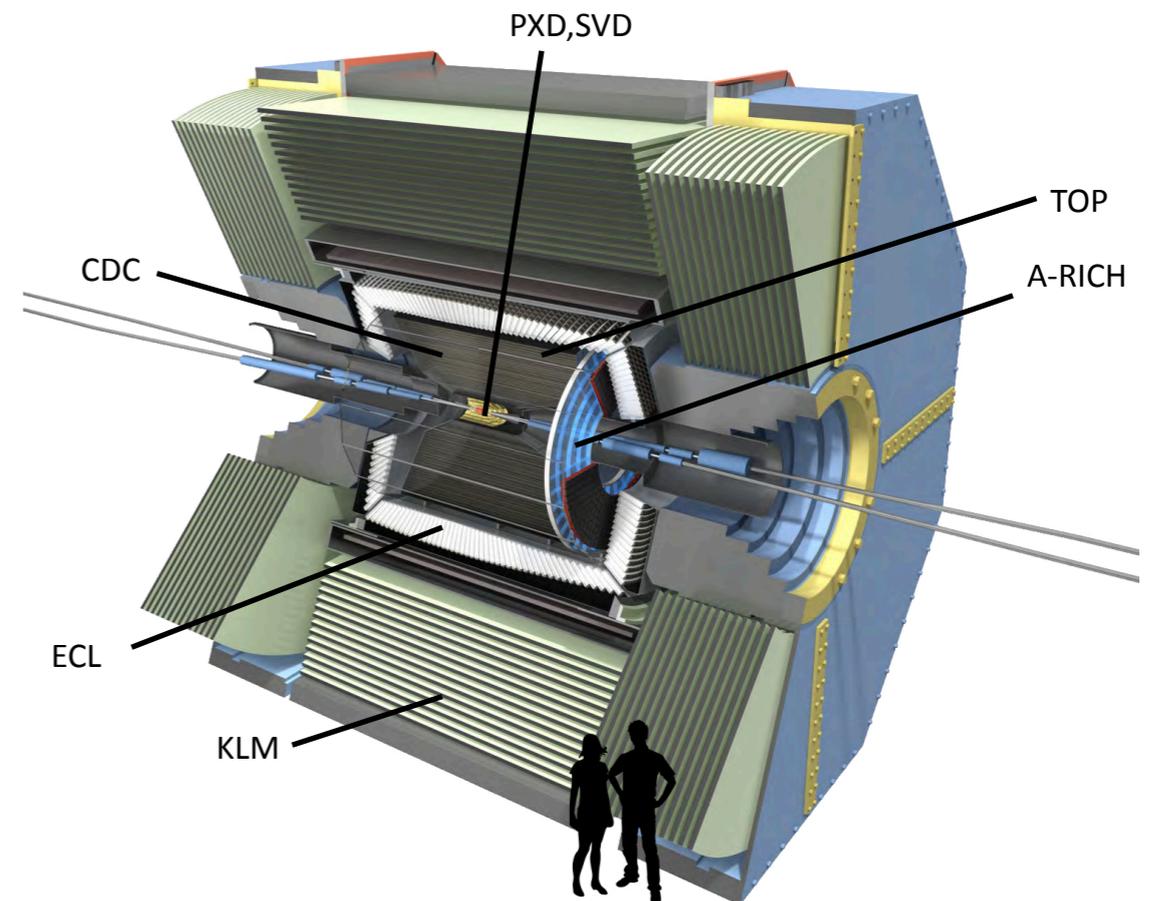
- インTRODクシヨン
 - Belle II 実験
 - 時間依存CP非保存を測定するには
 - 研究動機
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の再構成
(モンテカルロシミュレーション)
- 崩壊点位置分解能の見積もり
(モンテカルロシミュレーション)
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の再構成
(2.62 fb⁻¹の実データ)
- まとめ

Belle II 実験

SuperKEKB加速器



Belle II 測定器



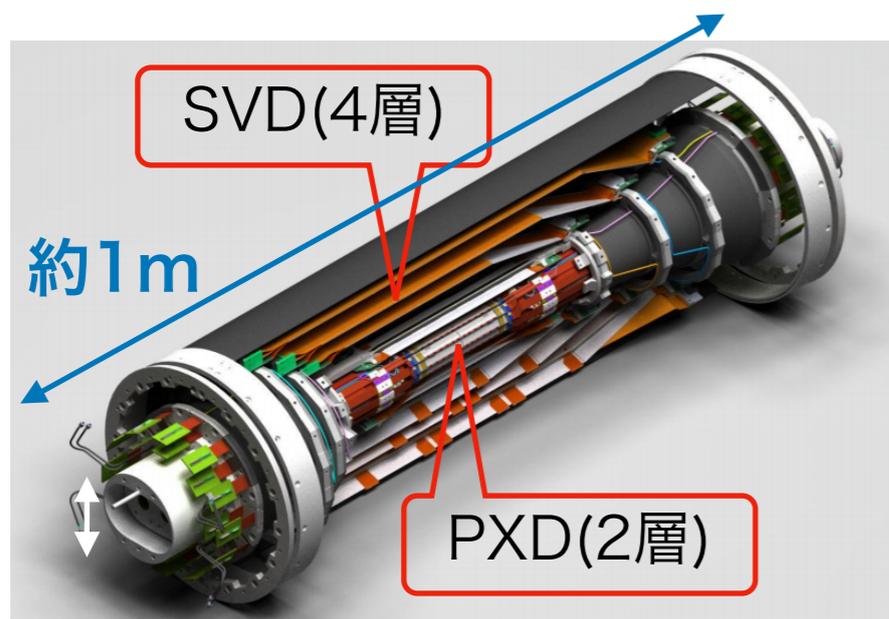
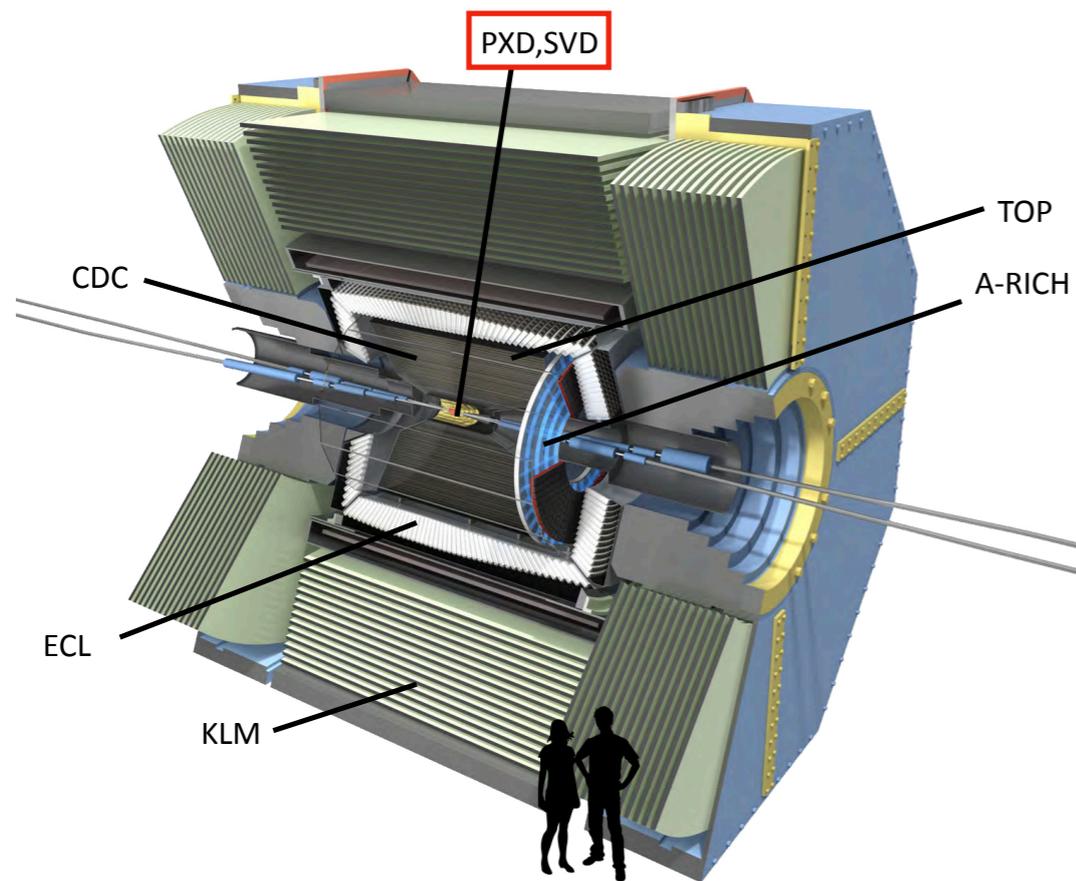
Belle II で目指す物理

- ▶ B中間子崩壊の精密測定による新物理探索
- ▶ タウのLFV事象探索
- ▶ ハドロンの物理 . . .



実験の初期段階なので
検出器の理解を進める研究が
重要。

Belle II 測定器



崩壊点検出器 PXD(Pixel Detector)・SVD(Silicon Vertex Detector)

…崩壊点の測定

中央飛跡検出器(CDC)

…荷電粒子の飛跡・運動量測定

粒子識別検出器(TOP・ARICH)

… K/π 識別

電磁カロリメーター(ECL)

…電子・光子のエネルギー測定

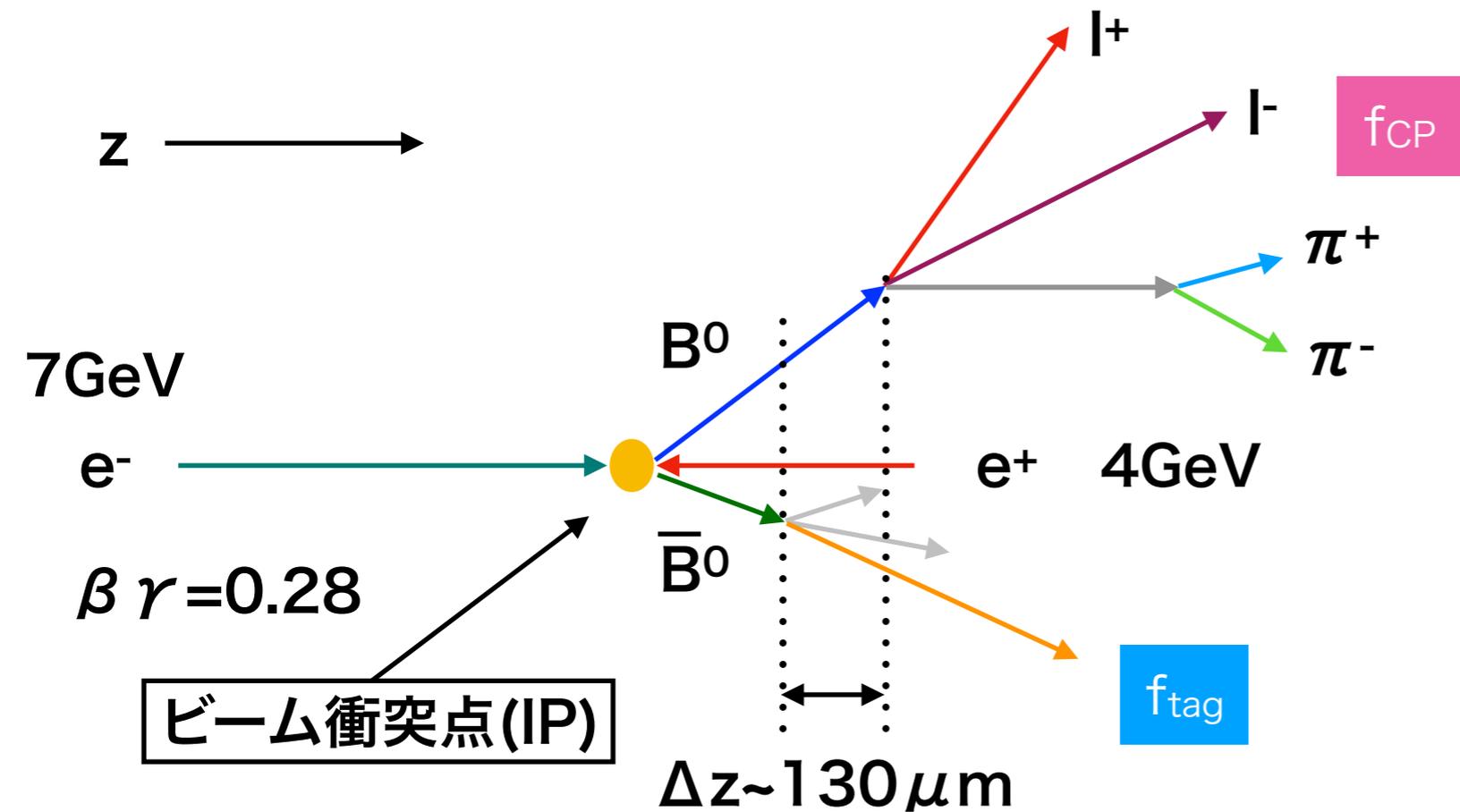
μ 粒子・ K_L^0 粒子検出器(KLM)

… μ 粒子・ K_L^0 中間子の測定

→B中間子崩壊の精密測定(時間依存CP非保存の測定)にはB中間子の崩壊点を測定するPX D・SVDの較正が重要

ビームパイプの半径：10mm

時間依存CP非保存を測定するには



解析手順

- ① CP固有状態(B⁰からも \bar{B}^0 からも崩壊可能)への崩壊を再構成
- ② ①の娘粒子を除いた残りがタグ側B中間子
- ③ ①②の崩壊点を再構成→ Δz を得て、 $\Delta t = \Delta z / c\beta\gamma$
- ④ ②の娘粒子でB⁰か \bar{B}^0 かフレーバー識別

$$A_{CP}(t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP})} = S_{f_{CP}} \sin(\Delta m \Delta t) + A_{f_{CP}} \cos(\Delta m \Delta t)$$

Δm : 2つの中性B中間子の質量固有状態の質量差
=0.5065/ps

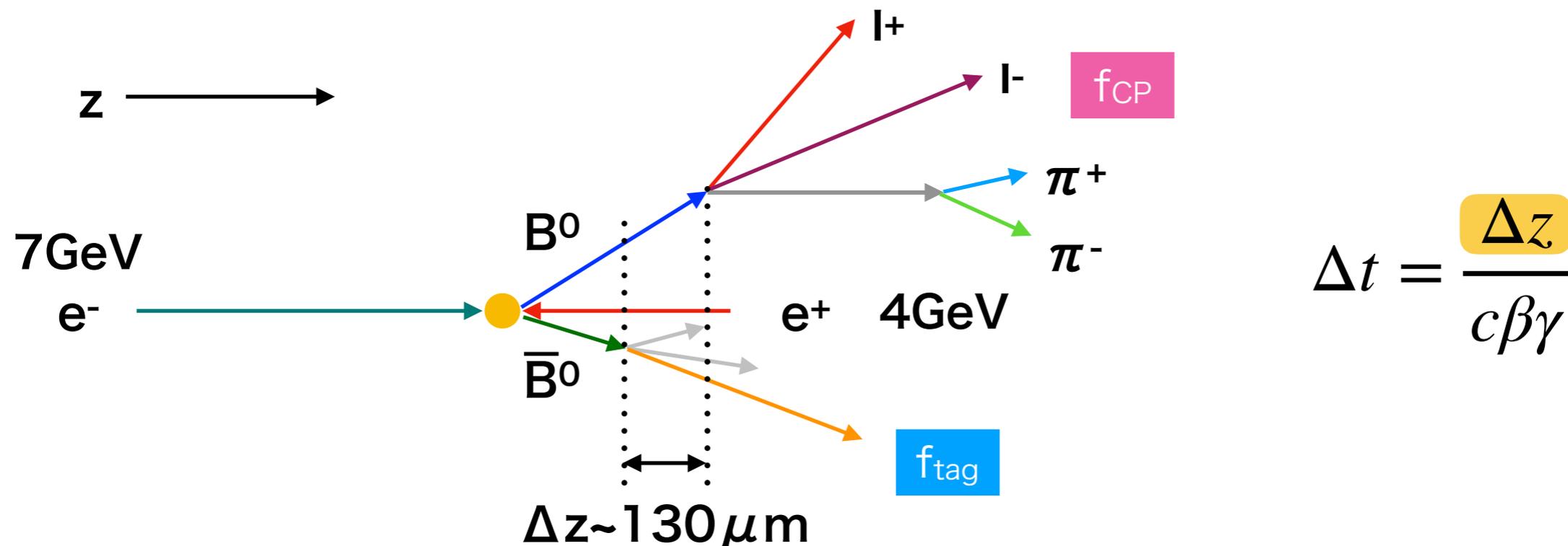
時間依存CP非保存を表す
パラメーター

直接的CP非保存を表す
パラメーター

研究動機①

時間依存CP非保存を測るには

- ① f_{CP} への崩壊時刻を t_{CP} 、 f_{tag} (反対側のB、フレーバーを識別する)への崩壊時刻を t_{tag} として $\Delta t (= t_{CP} - t_{tag})$ を得る。

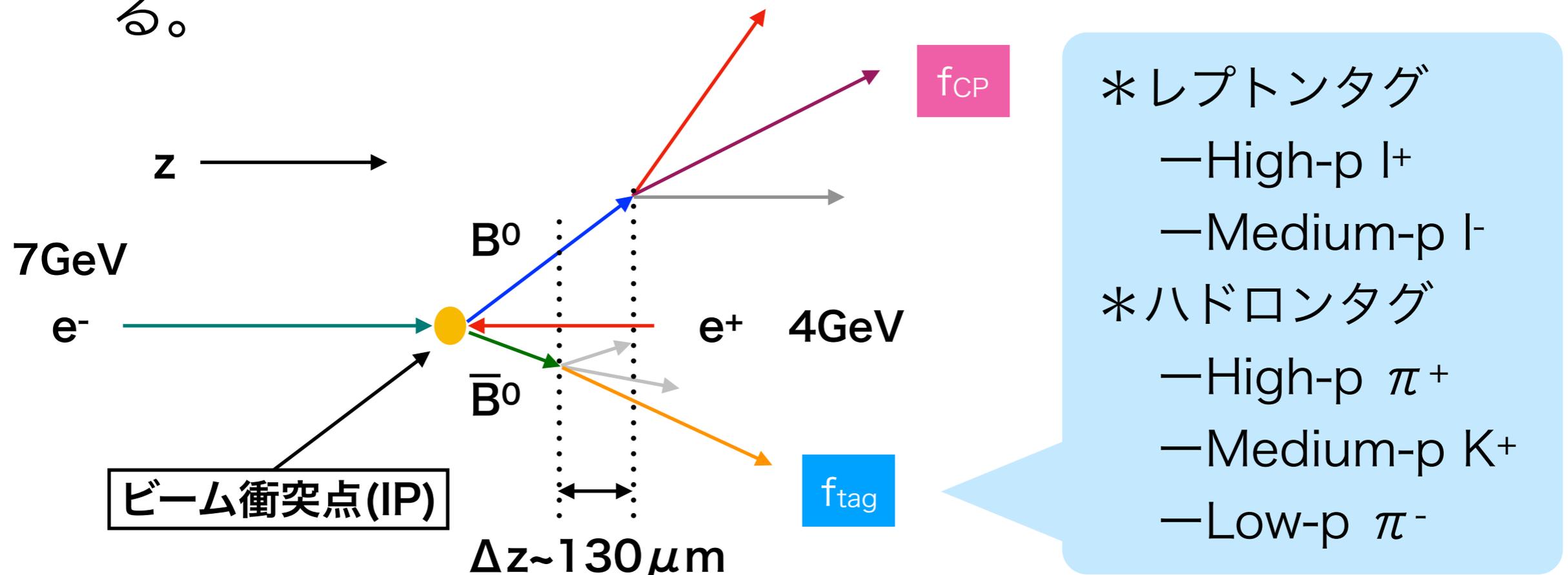


→2つのB中間子崩壊点間のz方向の距離(Δz)から Δt を得る。
崩壊点を再構成した際の位置分解能の見積もりが重要。

研究動機②

時間依存CP非保存を測るには

② 他方のB中間子(f_{tag})の娘粒子からフレーバーを識別する。



→ フレーバータグの性能評価を行いたい

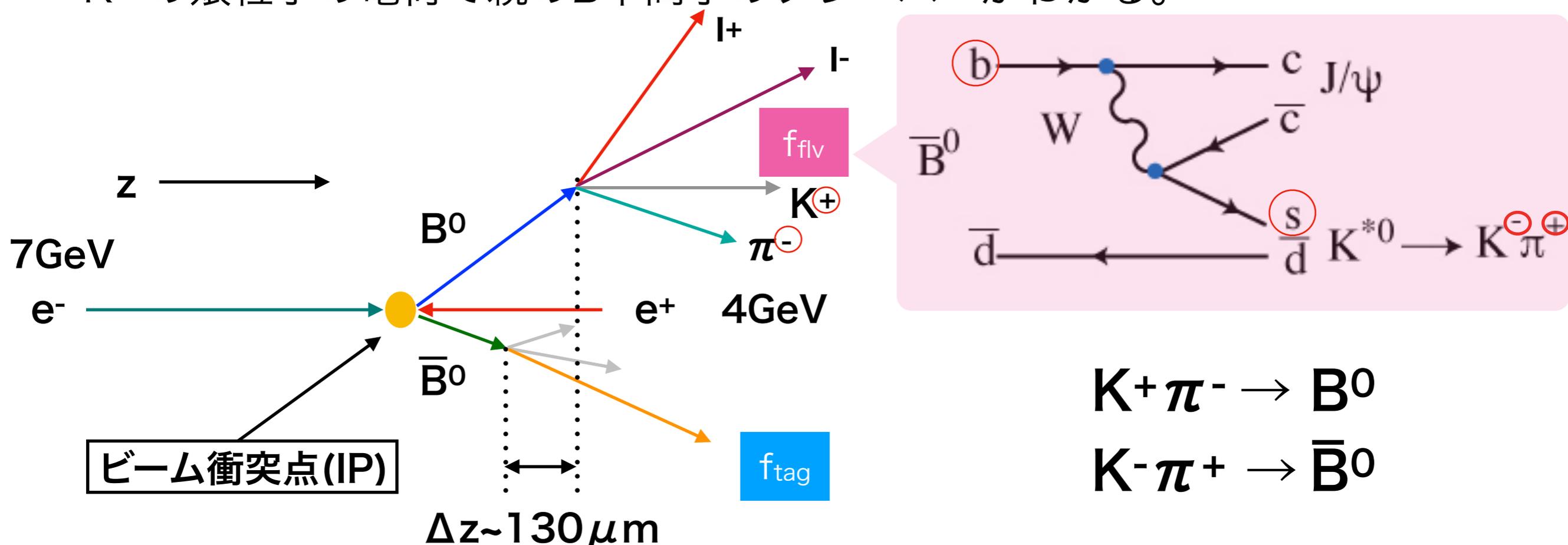
(フレーバー誤認率 wrong-tag fraction の測定)。

$B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ による較正

CP固有状態でなくても、高統計の崩壊モードなら Δt 分布から崩壊点分解能を評価できる。

$\text{Br}(B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}) = 1.27 \times 10^{-3}$: J/ψ を含む崩壊モード中最大。

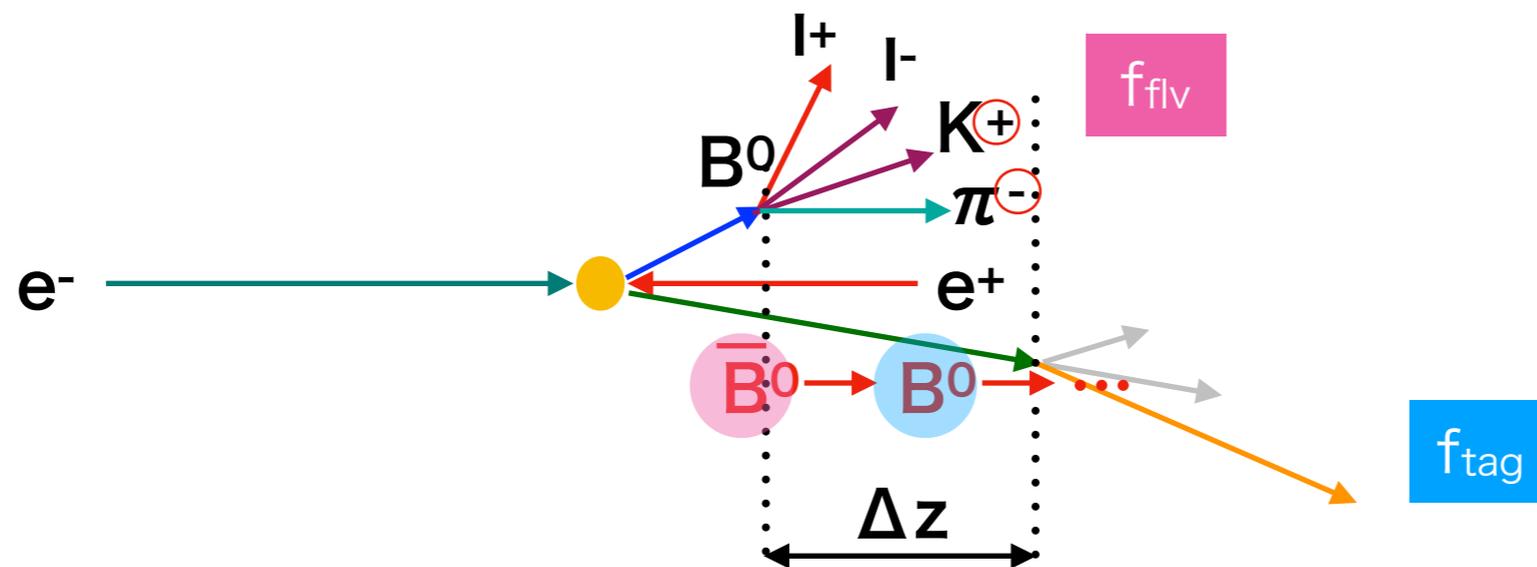
K^{*0} の娘粒子の電荷で親のB中間子のフレーバーがわかる。



$B^0 \rightarrow f_{flv}$ (フレーバーが明らかな状態) なので、フレーバータグの較正もできる。

フレーバー誤認率の測定

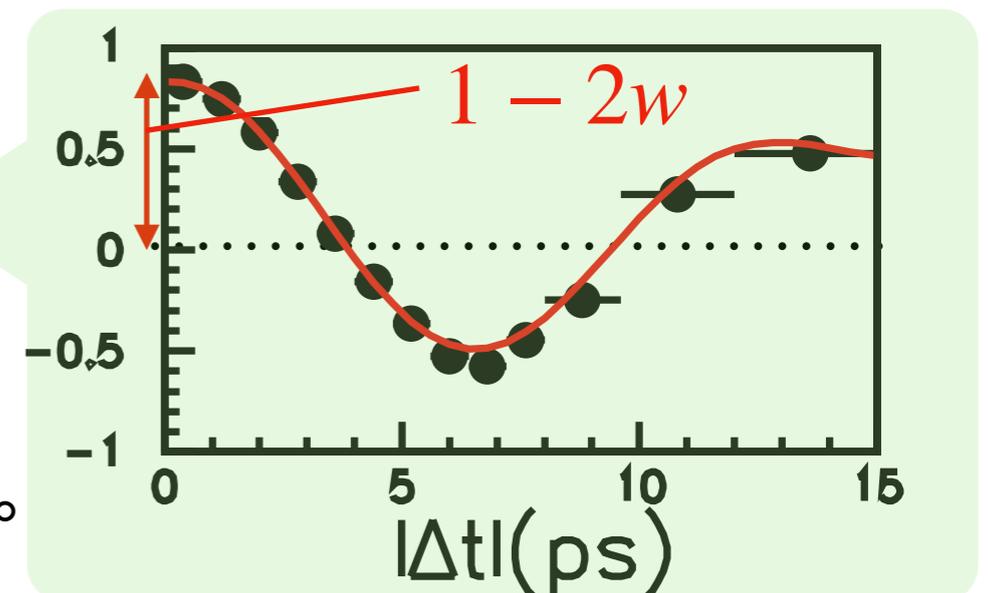
フレーバーの同定を間違ってしまう割合、フレーバー誤認率を (wrong-tag fraction = w)を実データから測定するには、 $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ のように、 B^0 と \bar{B}^0 が明らかに区別できるモードを用いる。



→ N_{OF} (Opposite Flavor)、 N_{SF} (Same Flavor) の時間発展

$$\frac{N_{OF}(\Delta t) - N_{SF}(\Delta t)}{N_{OF}(\Delta t) + N_{SF}(\Delta t)} = (1 - 2w)\cos(\Delta m\Delta t)$$

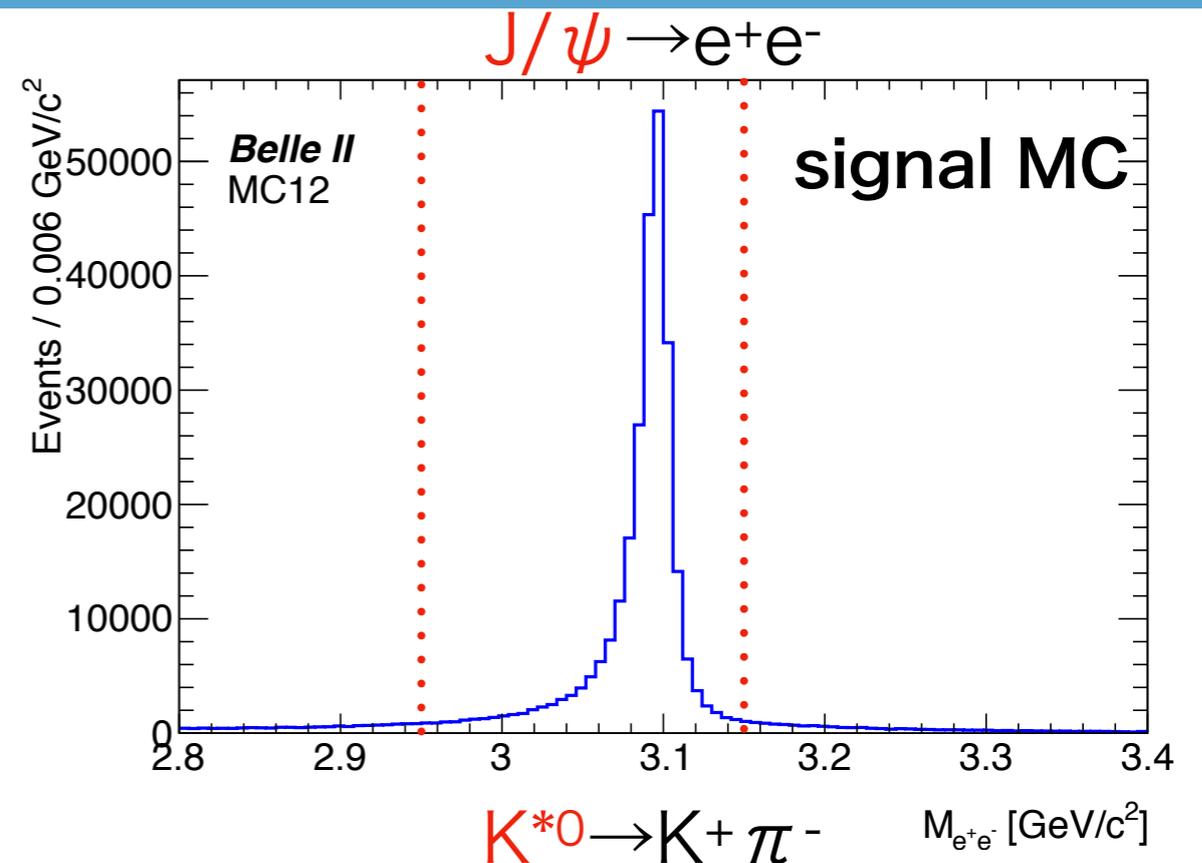
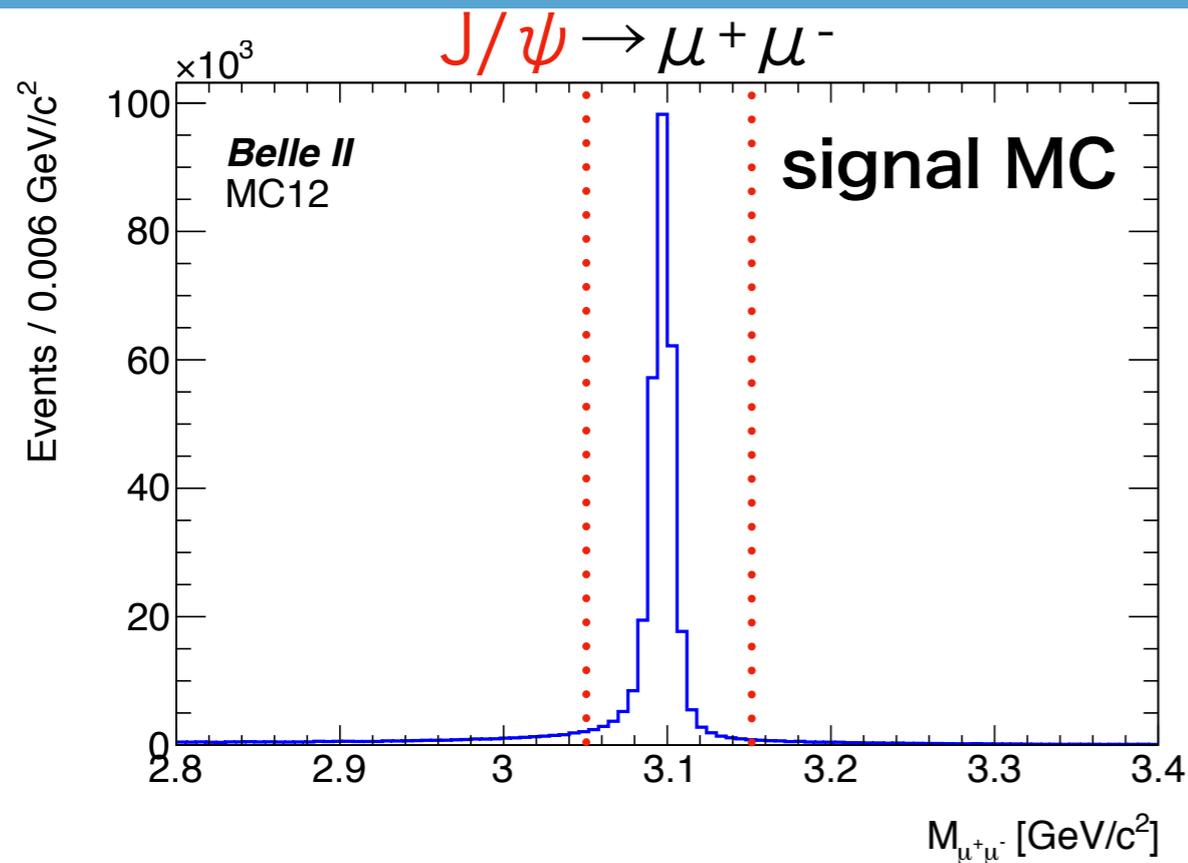
により w を求めるのに $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ 崩壊は役に立つ。



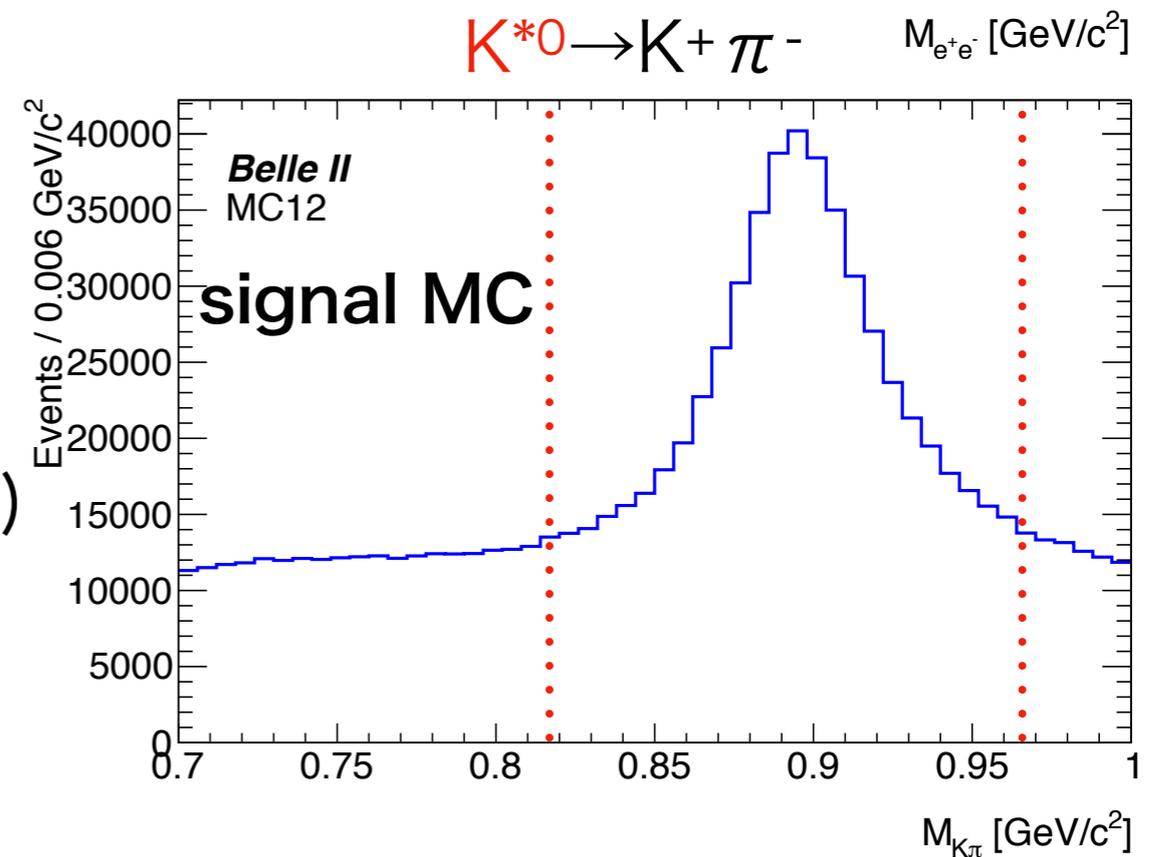
目次

- インTRODクシヨン
 - Belle II 実験
 - 時間依存CP非保存を測定するには
 - 研究動機
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の再構成
(モンテカルロシミュレーション)
- 崩壊点位置分解能の見積もり
(モンテカルロシミュレーション)
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の再構成
(2.62 fb⁻¹の実データ)
- まとめ

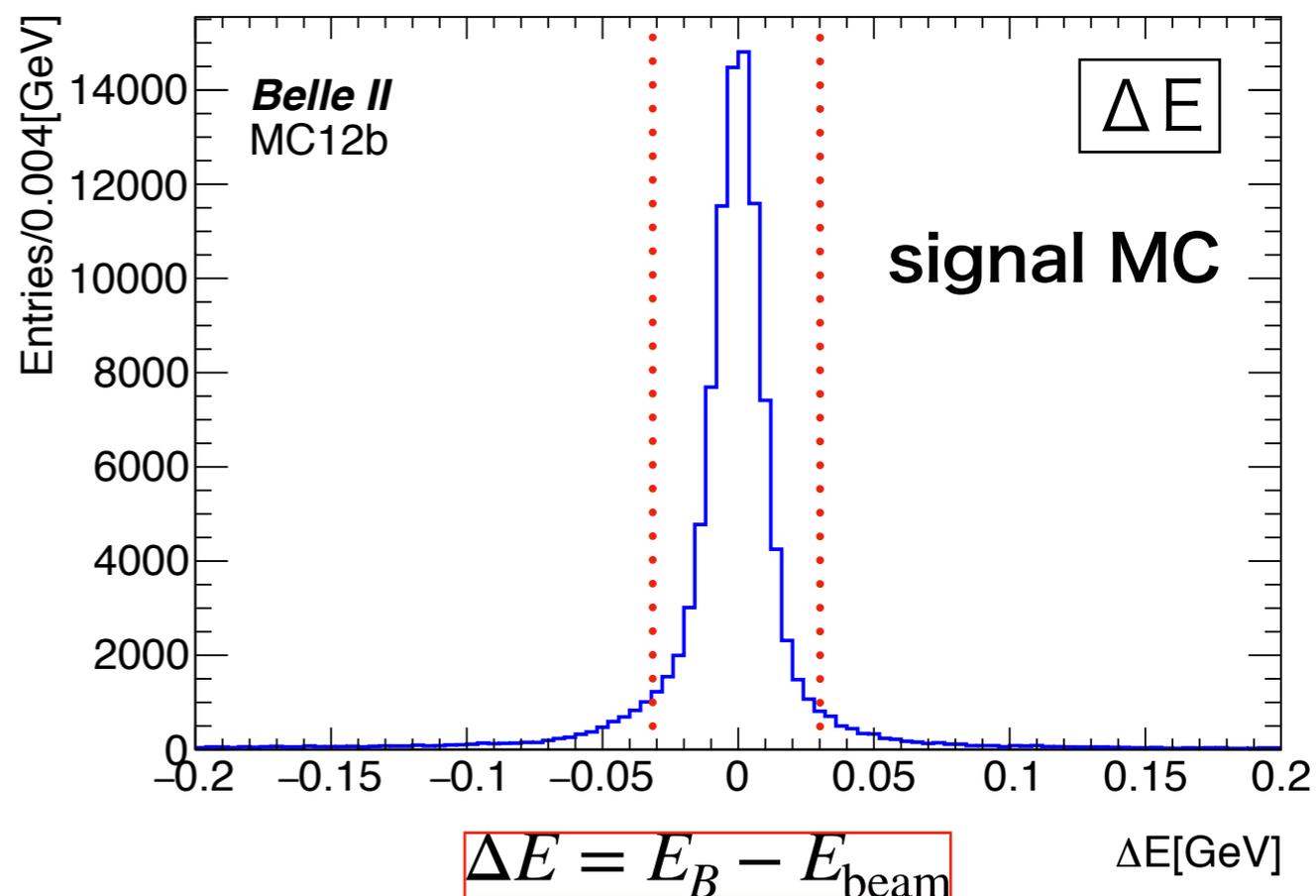
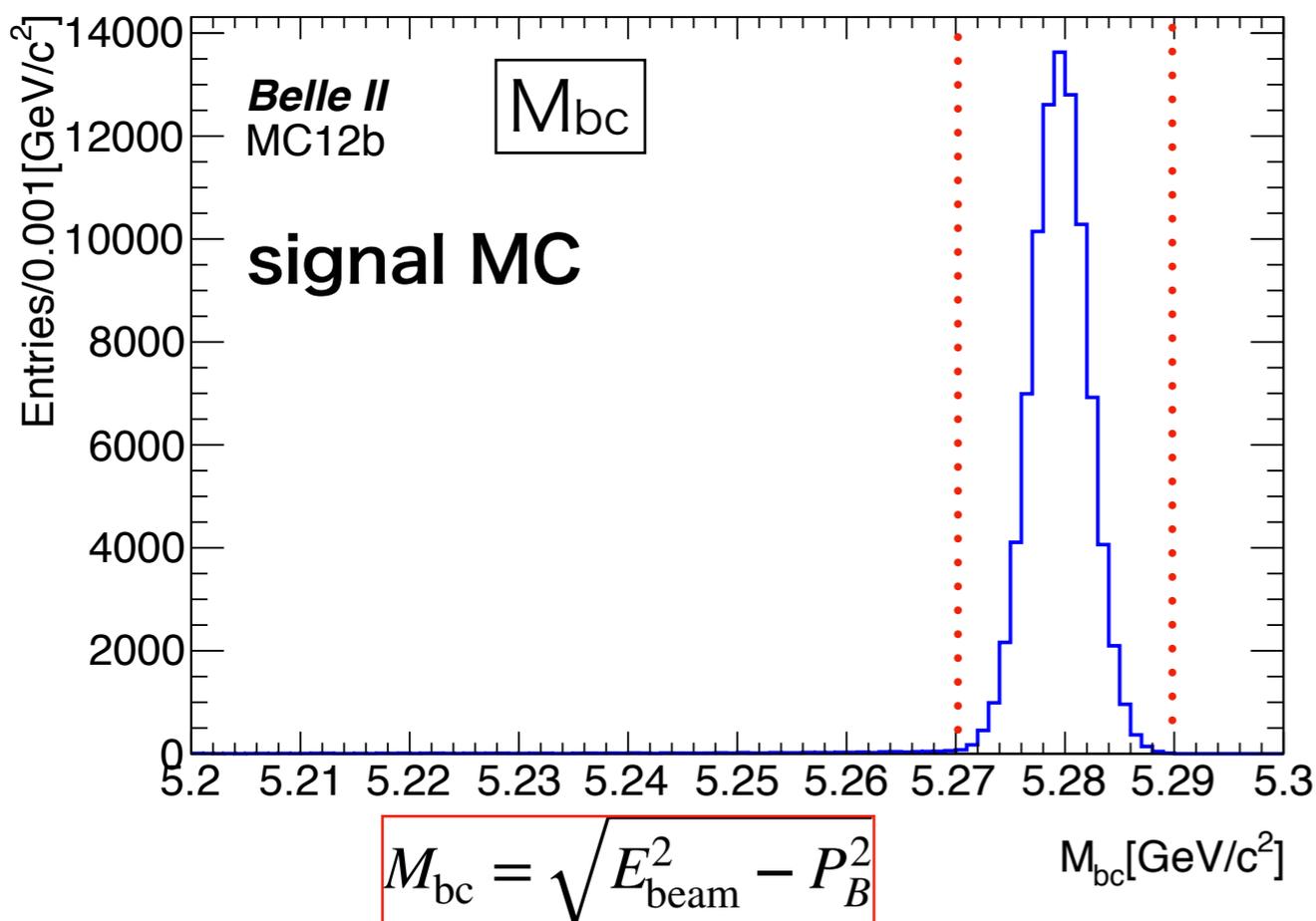
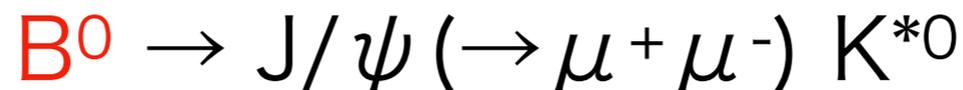
J/ψ, K*⁰候補の選別条件



- 縦赤点線の範囲
 $(3.05 \text{ GeV}/c^2 < M(\mu \mu) < 3.15 \text{ GeV}/c^2$ 、
 $2.95 \text{ GeV}/c^2 < M(ee) < 3.15 \text{ GeV}/c^2$ 、
 $0.817 \text{ GeV}/c^2 < M(K \pi) < 0.967 \text{ GeV}/c^2$)
 を、J/ψとK*⁰候補の選別条件とした。



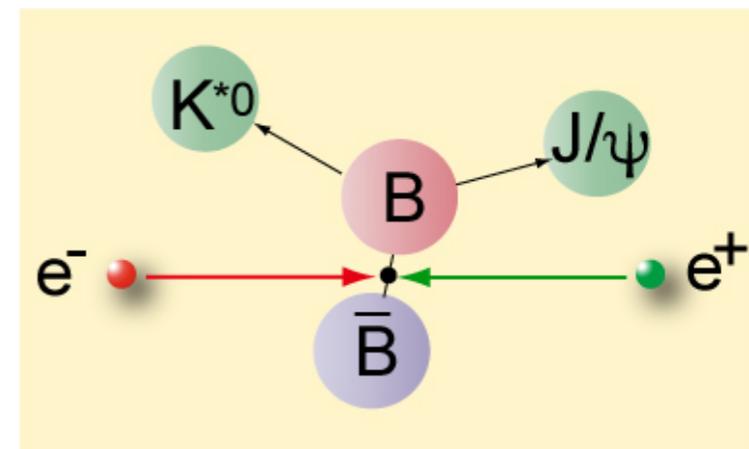
B中間子候補再構成



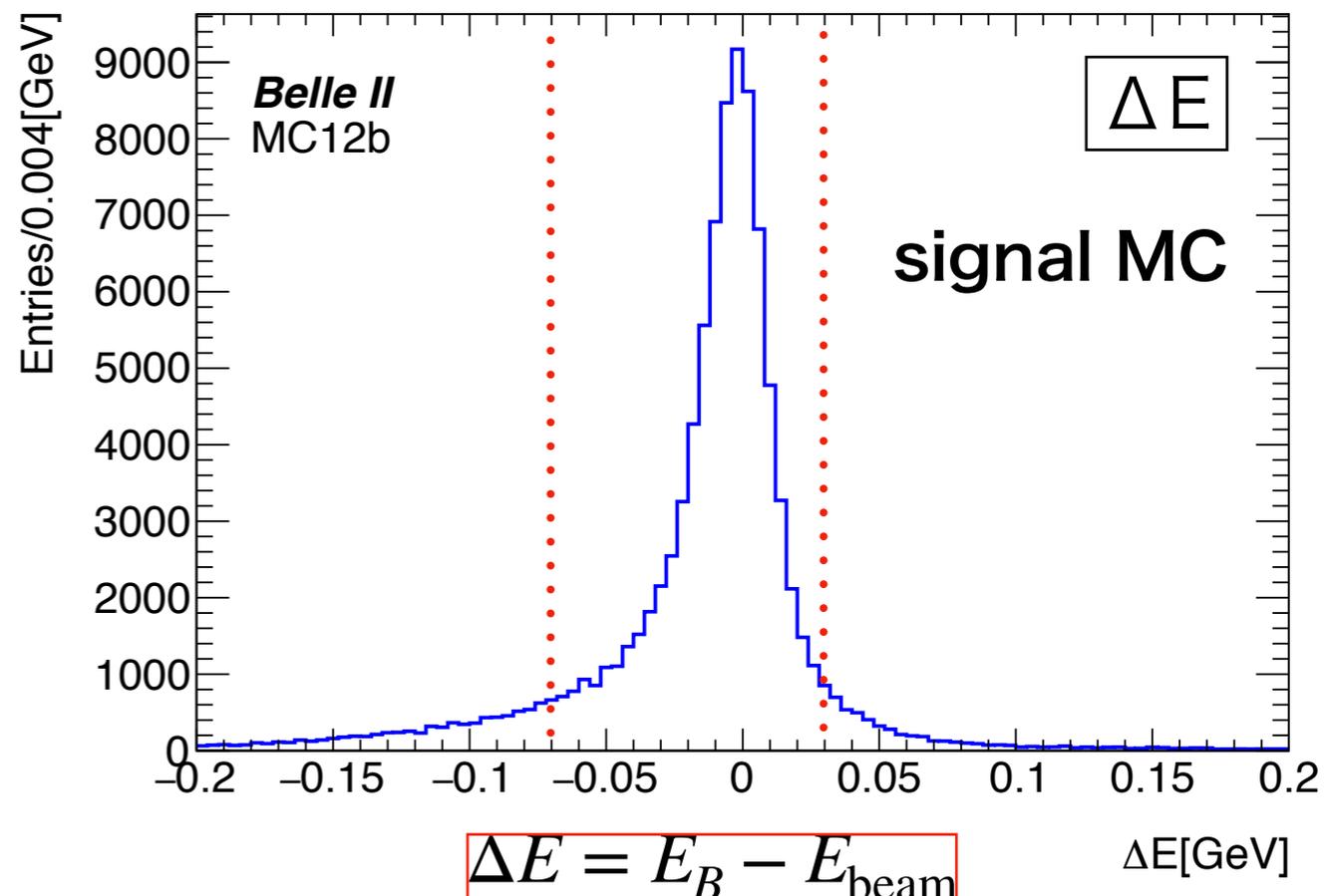
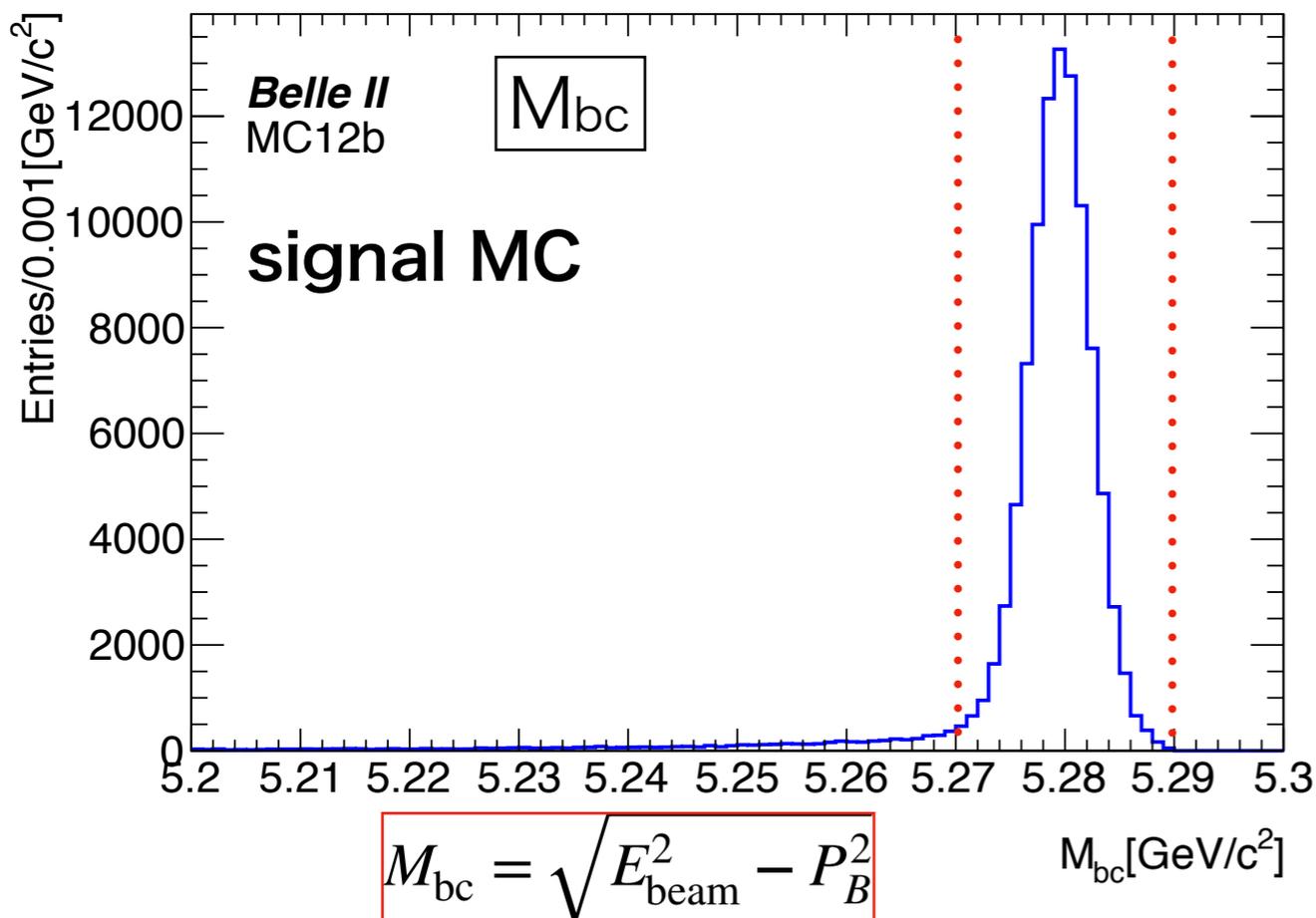
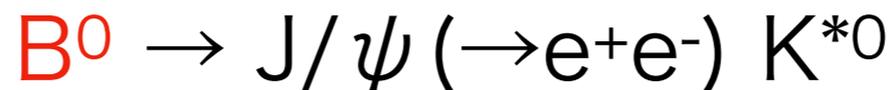
- 重心系では対でできる2つのB中間子がエネルギーを等分している ($E_{\text{beam}} = \text{重心系エネルギーの半分}$)。

信号事象は $M_{bc} : 5.28 \text{ GeV}/c^2$ 、 $\Delta E : 0 \text{ GeV}$ にピーク

- 図示した信号領域に見出された事象数から、
 $B^0 \rightarrow J/\psi (\rightarrow \mu^+ \mu^-) K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ モードでは再構成効率22.3%



B中間子候補再構成



- $B^0 \rightarrow J/\psi (\rightarrow e^+e^-) K^{*0}$ モードでは、電子または陽電子が制動放射した光子を検出できない場合があり、 ΔE 分布の低い方にTailが出る。そこで、 ΔE の下限を-0.03 GeV($\mu^+\mu^-$)から-0.07 GeVに変更した。
- 図示した信号領域に見出された事象数から、 $B^0 \rightarrow J/\psi (\rightarrow e^+e^-) K^{*0} (\rightarrow K^+\pi^-)$ モードでは再構成効率20.4%

目次

- インTRODクシヨン
 - Belle II 実験
 - 時間依存CP非保存を測定するには
 - 研究動機
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の再構成
(モンテカルロシミュレーション)
- 崩壊点位置分解能の見積もり
(モンテカルロシミュレーション)
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の再構成
(2.62 fb⁻¹の実データ)
- まとめ

目次

- インTRODクシヨン
 - Belle II 実験
 - 時間依存CP非保存を測定するには

時間依存CP非保存を測定するためには
2つのB中間子の崩壊点の差が必要

(モンテカルロシミュレーション)

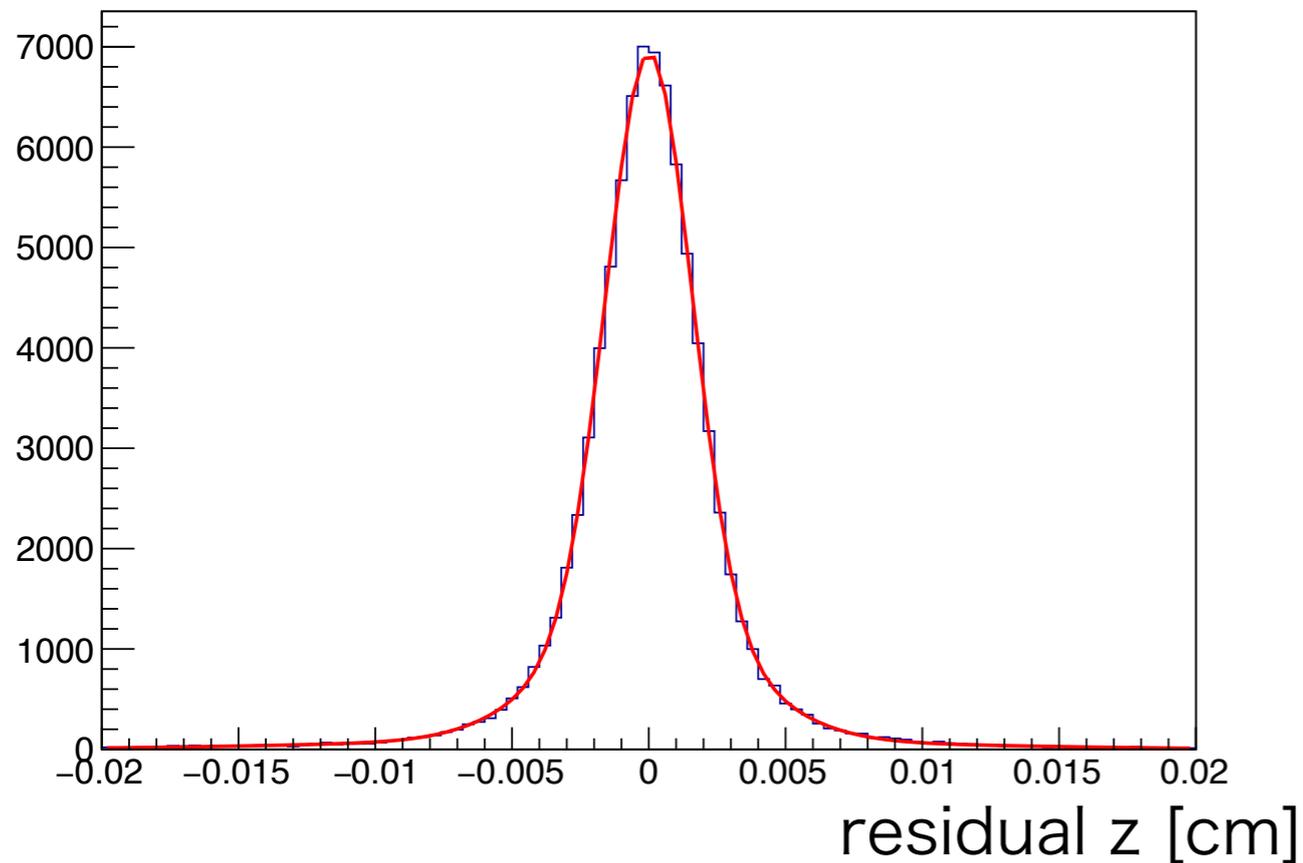


- 崩壊点位置分解能の見積もり
(モンテカルロシミュレーション(MC))
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の再構成
(2.62 fb⁻¹の実データ)
- まとめ

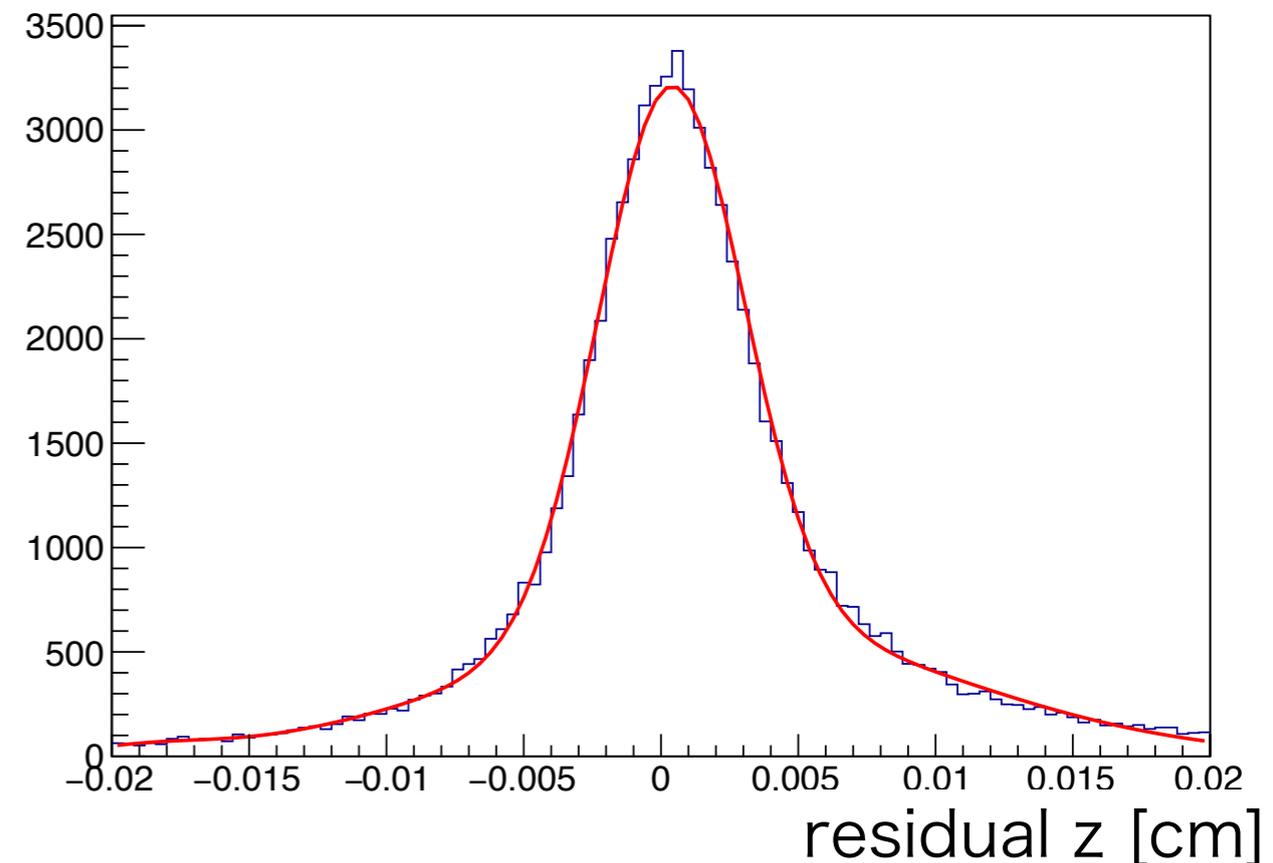
1. $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ の真の崩壊点(MC)と再構成された崩壊点の位置の違いで見積もる。
2. 同一事象でJ/ψとK*⁰でそれぞれ崩壊点を再構成し、その位置の差により見積もる。
3. ビームバックグラウンドの増加に対してPXD 1層と2層の場合で崩壊点位置分解能の変化を見積もる。

1.崩壊点位置分解能 (MC)

$\mu^+\mu^-$ で再構成した B^0 の崩壊点z座標の残差の分布
(MC: 再構成されたz - 真のz)

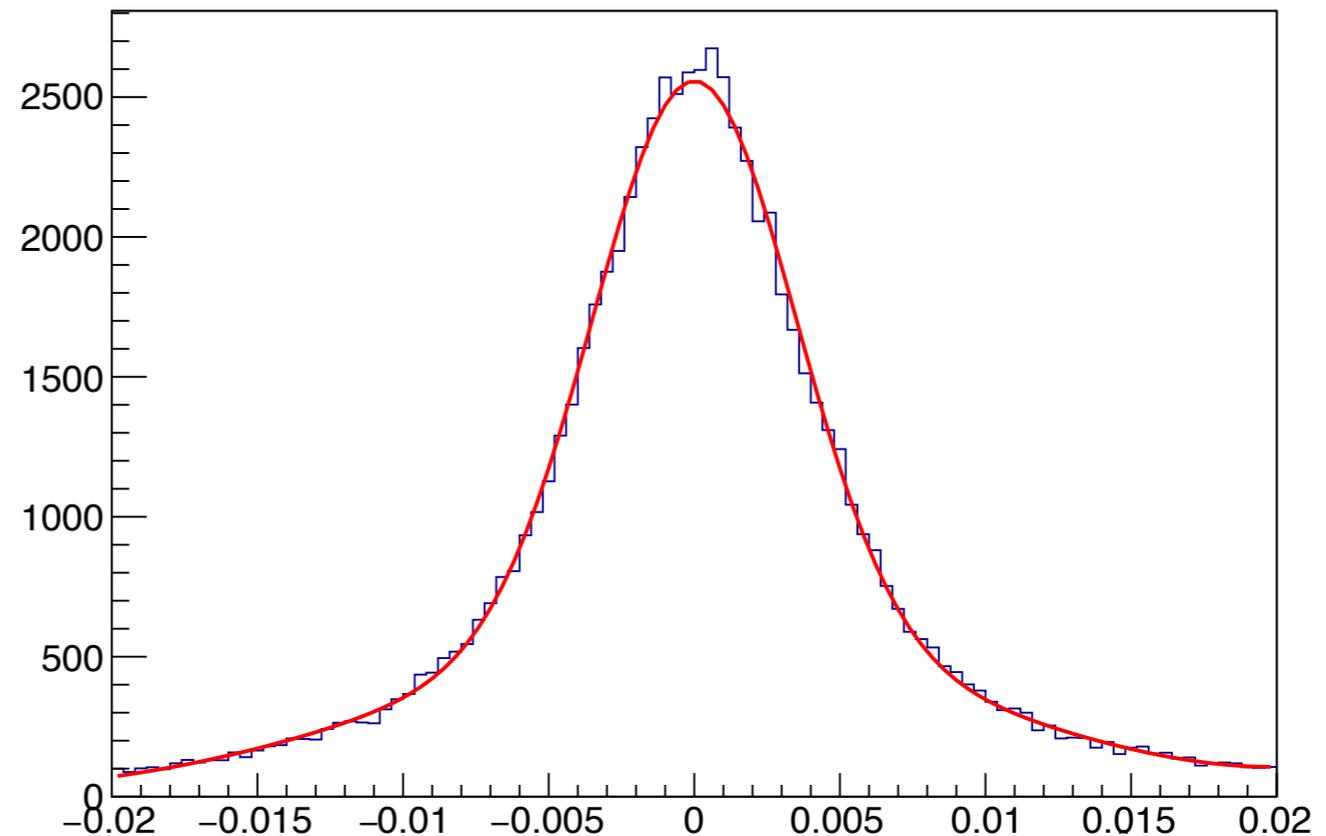
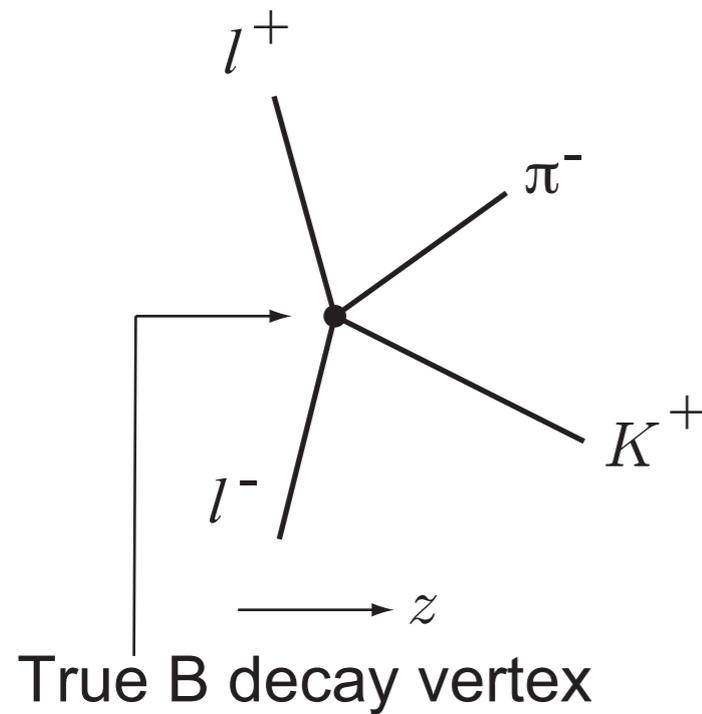


タグ側の B^0 の崩壊点z座標の残差の分布
(MC: 再構成されたz - 真のz)

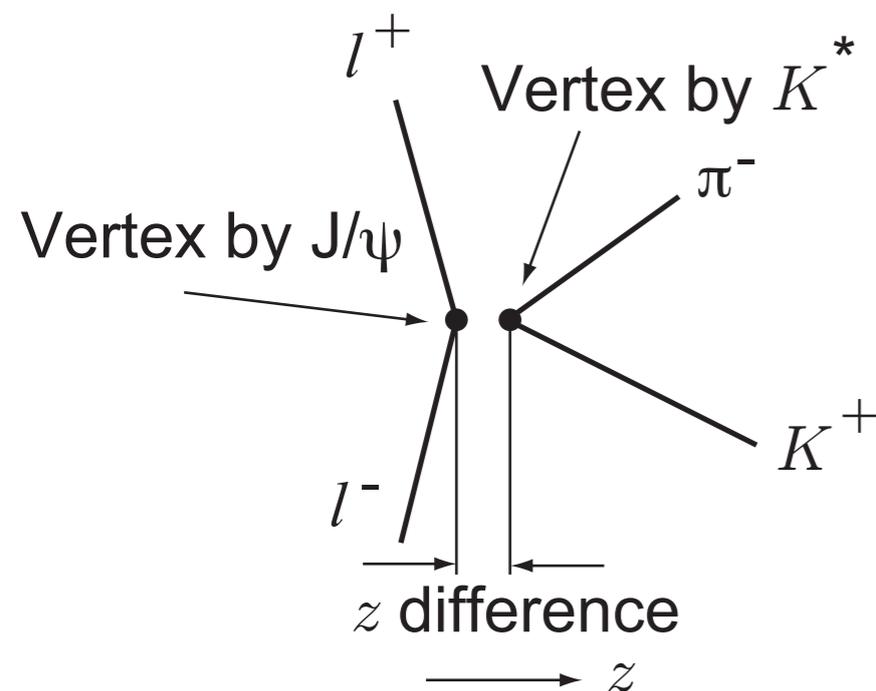


- $\mu^+\mu^-$ で B^0 の崩壊点を再構成すると位置分解能は 33.7 ± 1.1 um。
- タグ側の B^0 の位置分解能は、 95.2 ± 2.3 um。
- Δz 分解能はタグ側の寄与が支配的であることがわかる。

2. J/ψ vertexと K^{*0} vertex ①



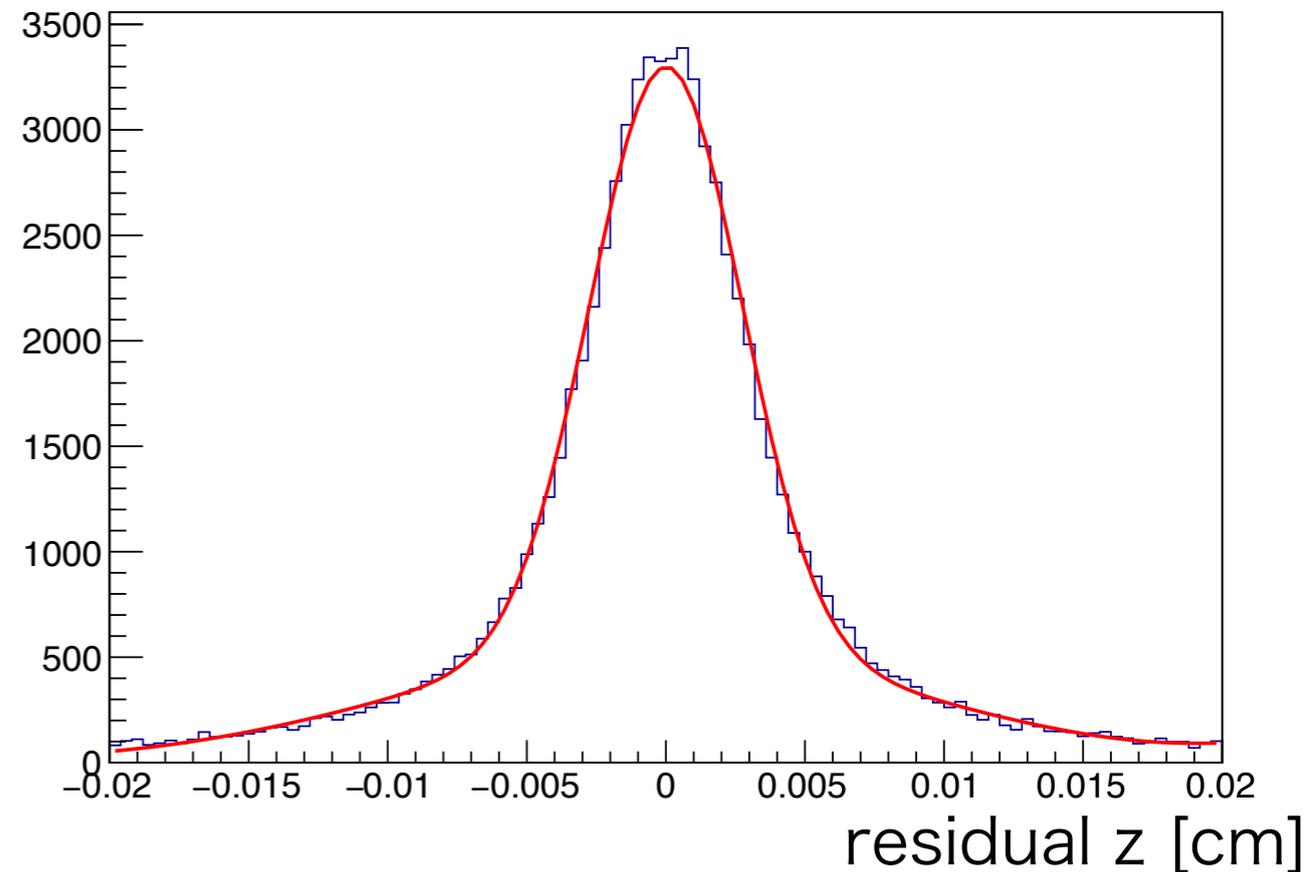
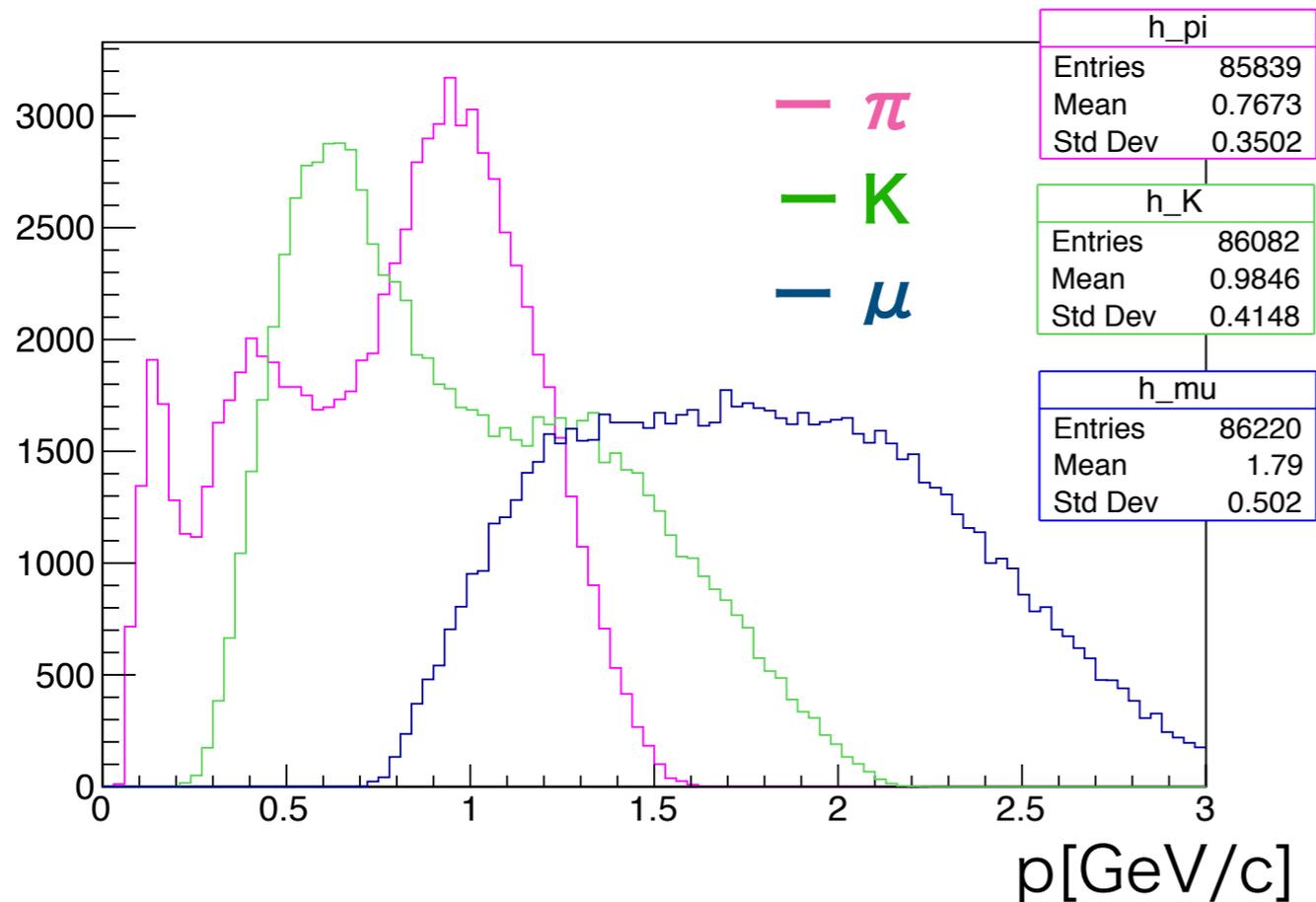
$z(K^{*0}) - z(J/\psi) = z \text{ difference [cm]}$



- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ 崩壊では、同一事象で J/ψ と K^{*0} の崩壊点をそれぞれ再構成すると、位置の違いは検出器の崩壊点分解能を表す。
- K^{*0} と J/ψ の崩壊点の z 座標の差の分布の標準偏差は、 $109.1 \pm 4.0 \text{ um}$ であった。

2. J/ ψ vertex と K^{*0} vertex ②

$K^+\pi^-$ で再構成した B^0 の崩壊点z座標の残差の分布
(MC: 再構成されたz - 真のz)



- z difference分解能は K^{*0} の寄与が支配的: 93.7 ± 2.4 um
(K^+ や π^- の方が運動量が低い)
- J/ ψ と K^{*0} の崩壊点のz座標の差の分布はデータのみで求めることができるので、その分布をMCの結果と比較することにより、MCシミュレーションで得られる崩壊点分解能(p.17)の信頼性をデータで確認することができる。

3. ビームバックグラウンド増加時(PXD1層orPXD2層)

PXDが1層のみインストールされている現在のジオメトリと、近い将来実現するPXDが2層の場合で、MC事象中に埋め込むシミュレーションしたビームバックグラウンドの量を変化させて影響を調べた。

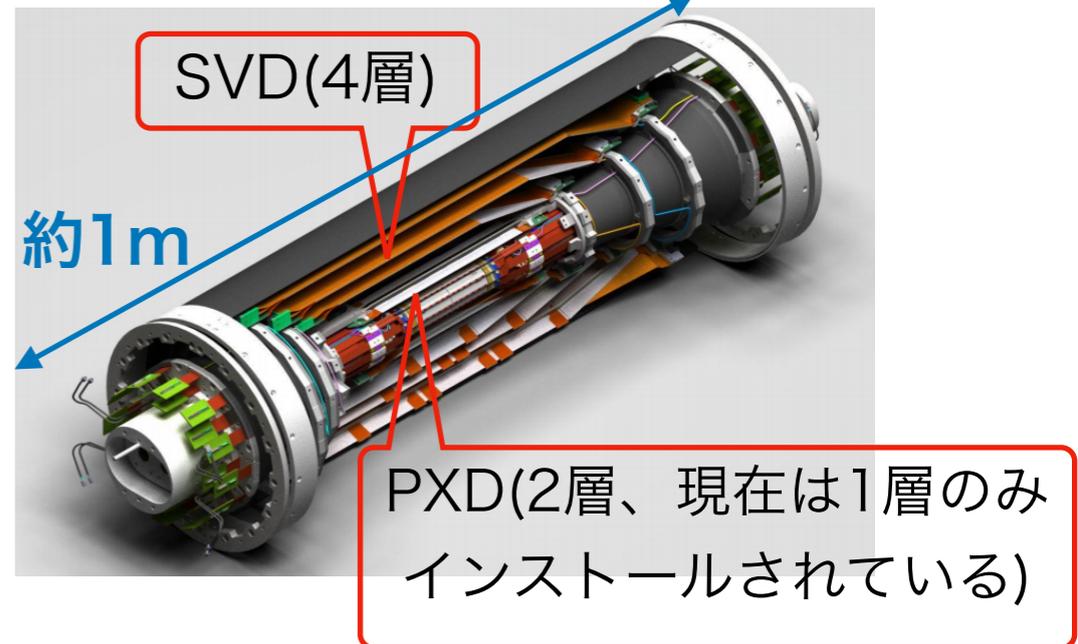
◆PX Dが1層：現状

- ビームバックグラウンドなし(x0)
- ビームバックグラウンドあり ($L=1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- 2倍のビームバックグラウンド(x2)
- 5倍のビームバックグラウンド(x5)

◆PX Dが2層：1～2年以内に実現

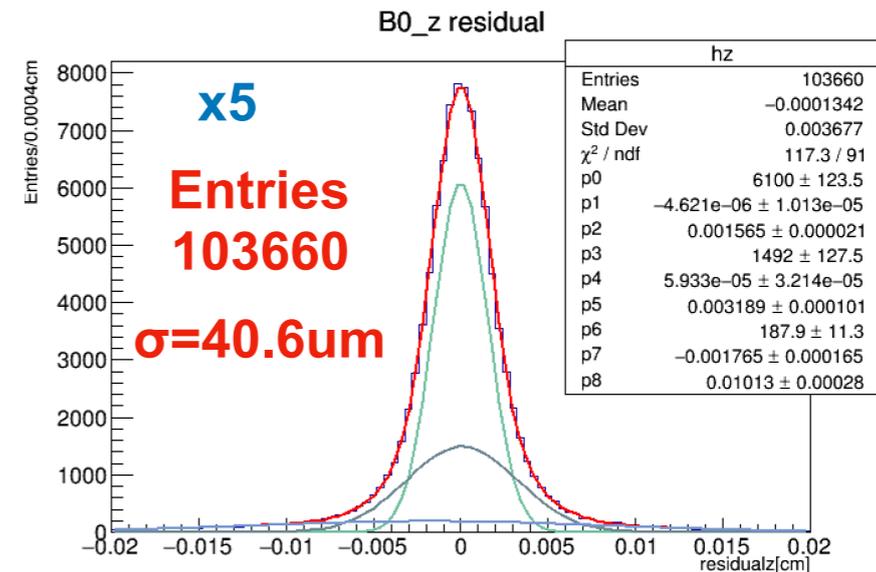
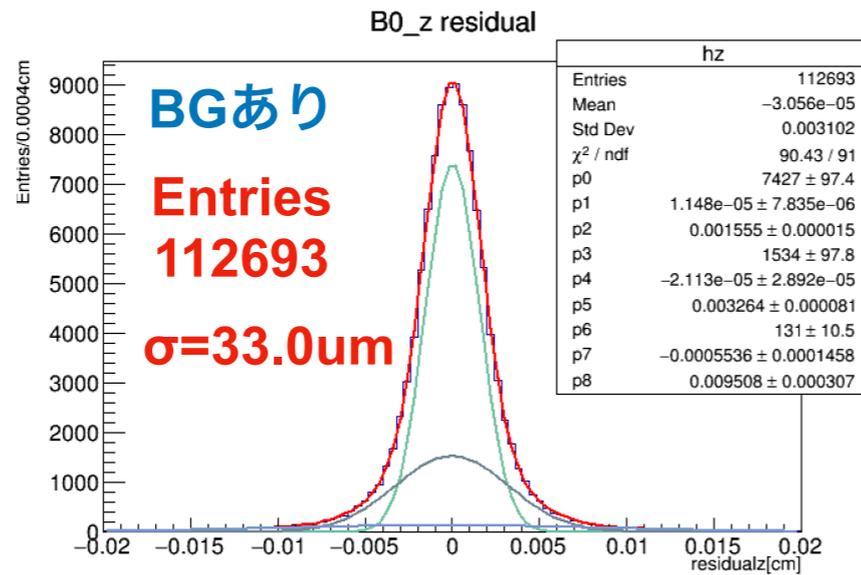
- ビームバックグラウンドなし(x0)
- ビームバックグラウンドあり ($L=8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- 2倍のビームバックグラウンド(x2)
- 5倍のビームバックグラウンド(x5)

崩壊点位置検出器(Vertex Detector)

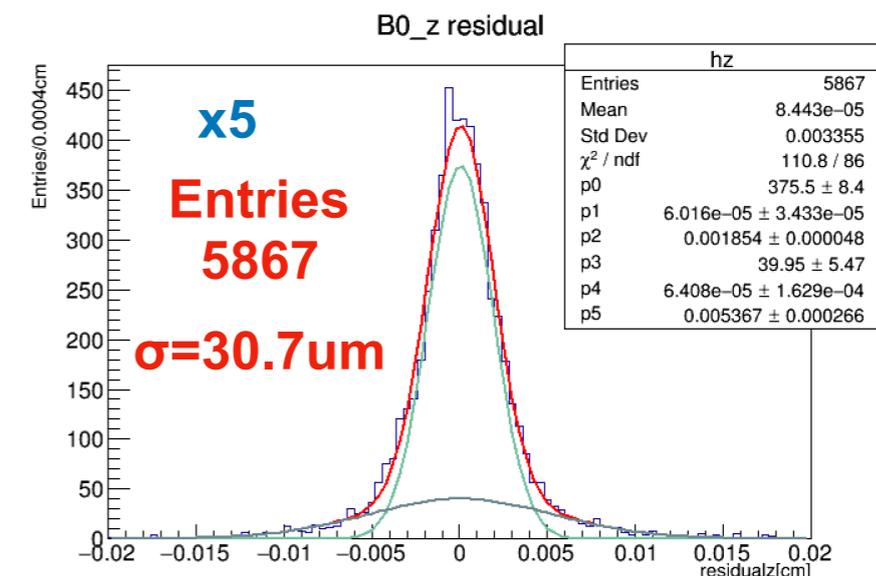
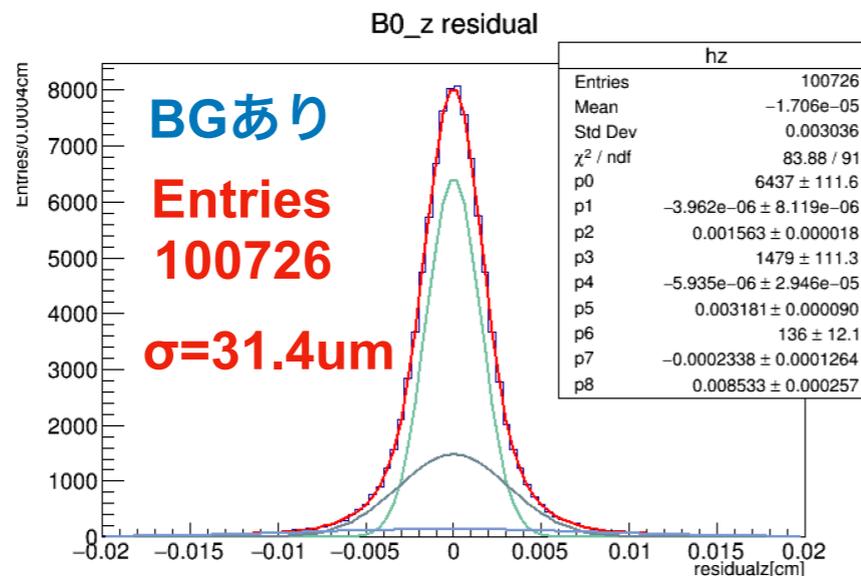


崩壊点位置分解能 (MC, $\mu\mu$)

PXD : 1 layer
 $L=1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



PXD : 2 layers
 $L=8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

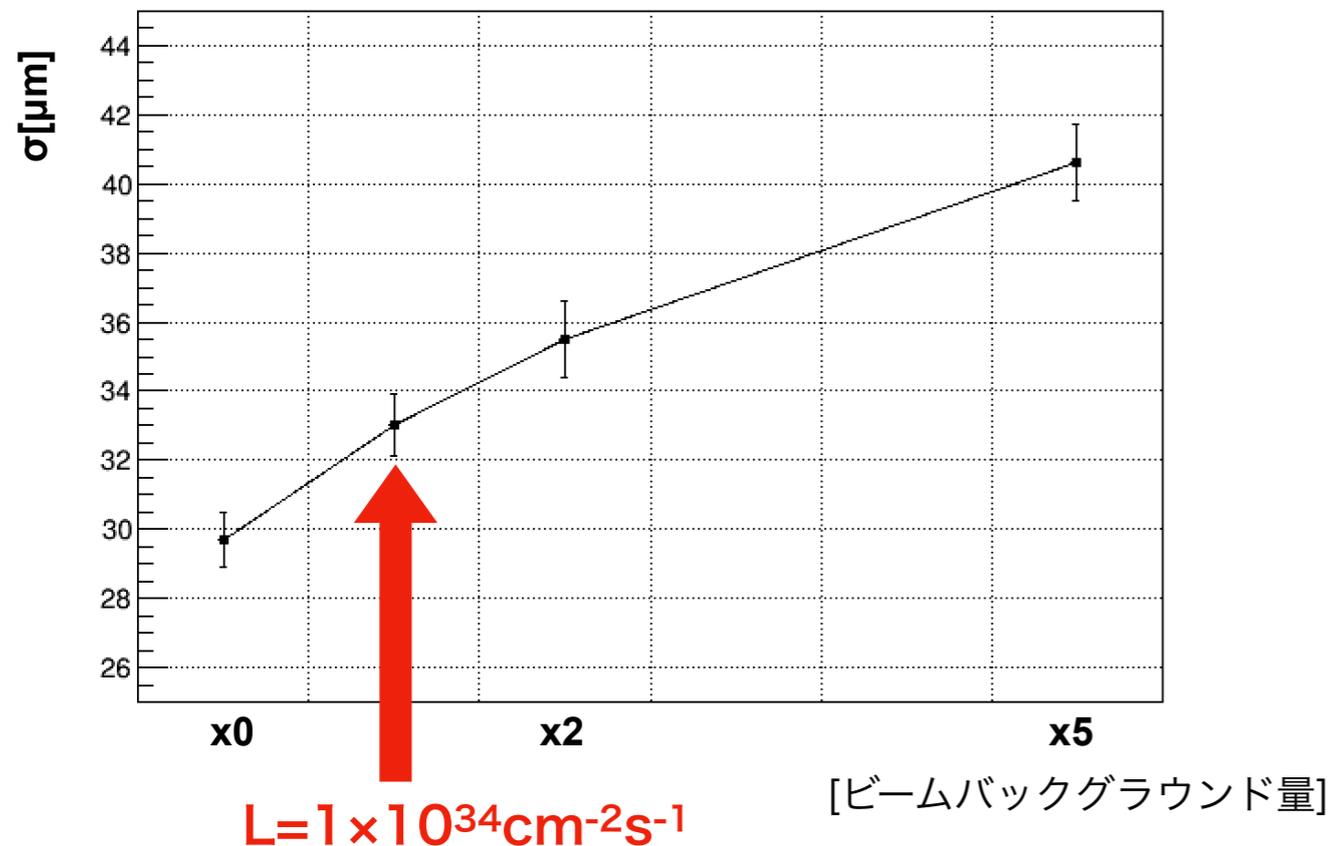


- PXDが1層では、現状よりもビームバックグラウンドが増えると崩壊点位置分解能が悪化する。
- PXDが2層では、ビームバックグラウンドが設計値ルミノシティで想定される量を上回ると飛跡の再構成効率の低下が顕著である。再構成された崩壊点の位置分解能は変わらない。

崩壊点位置分解能まとめ

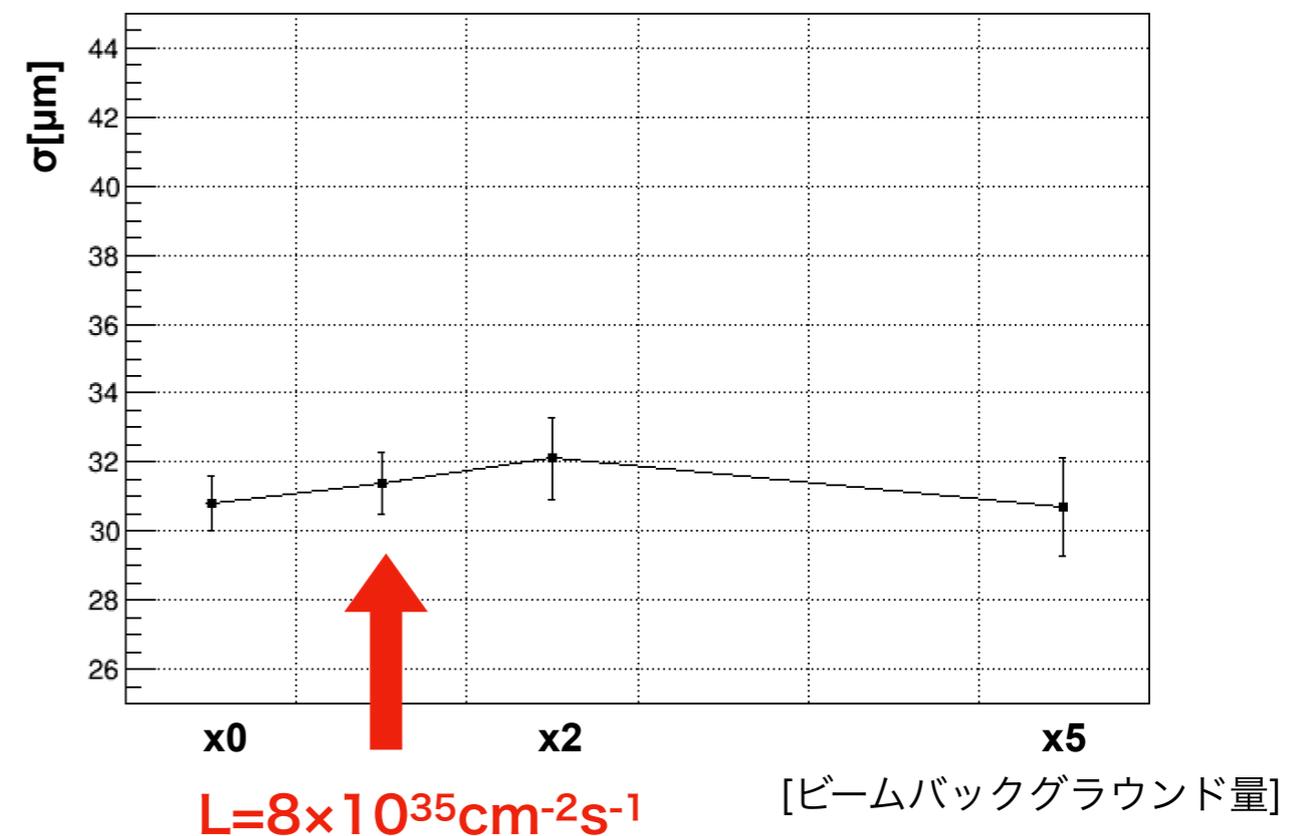
PXD : 1 layer

BG:lum. $=1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$



PXD : 2 layers

BG:lum. $=8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

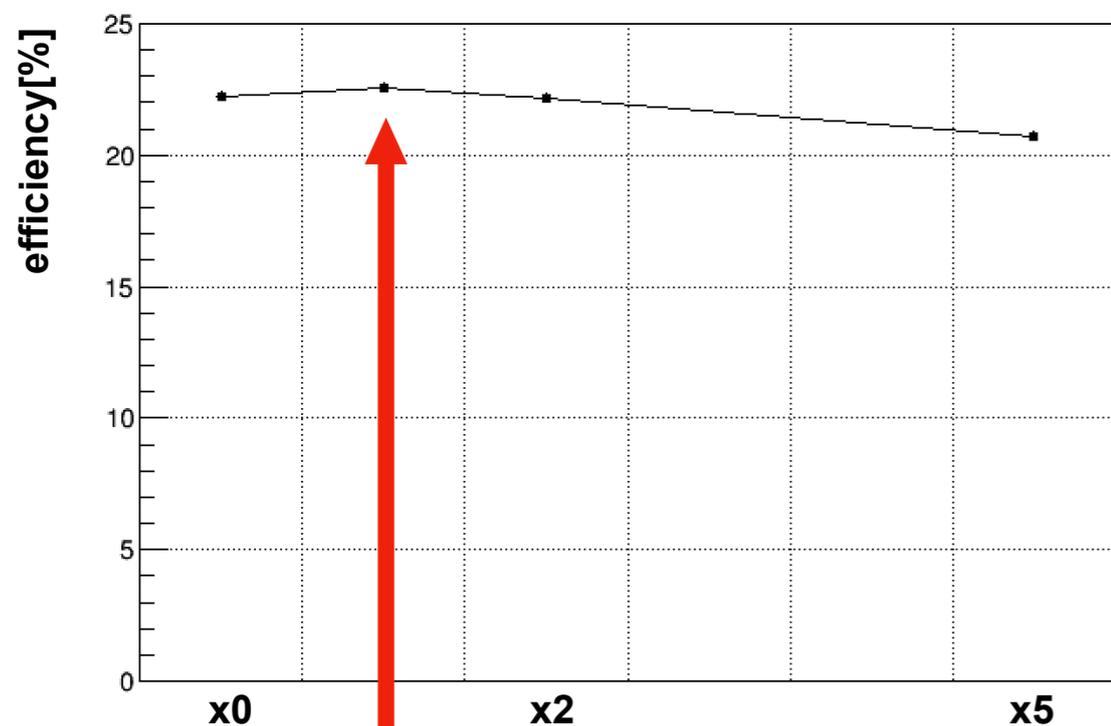


- PXD1層では、現状の数倍のビームバックグラウンド量になると崩壊点位置分解能の悪化がある。PXD2層なら、そのどちらかに飛跡とマッチするヒット点が見つければよいので、設計ルミノシティでも崩壊点位置分解能は悪化しない。

再構成効率 まとめ

PXD : 1 layer

BG:lum. $=1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

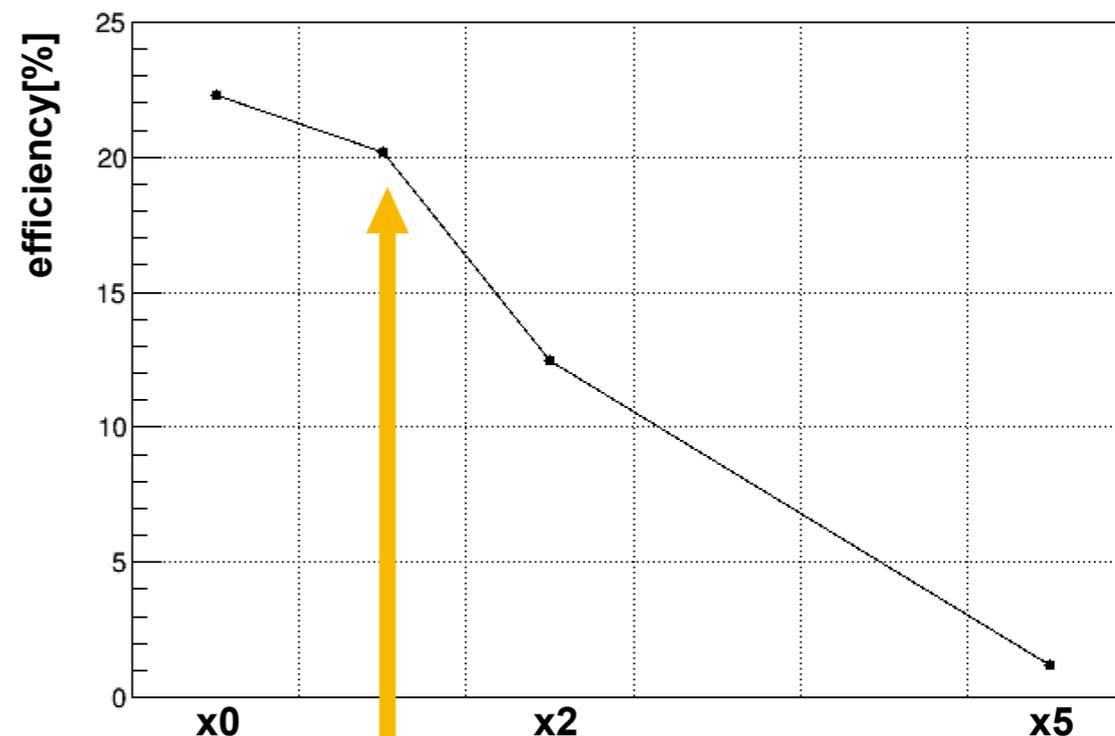


$L = 1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

[ビームバックグラウンド量]

PXD : 2 layers

BG:lum. $=8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$



$L = 8 \times 10^{35} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

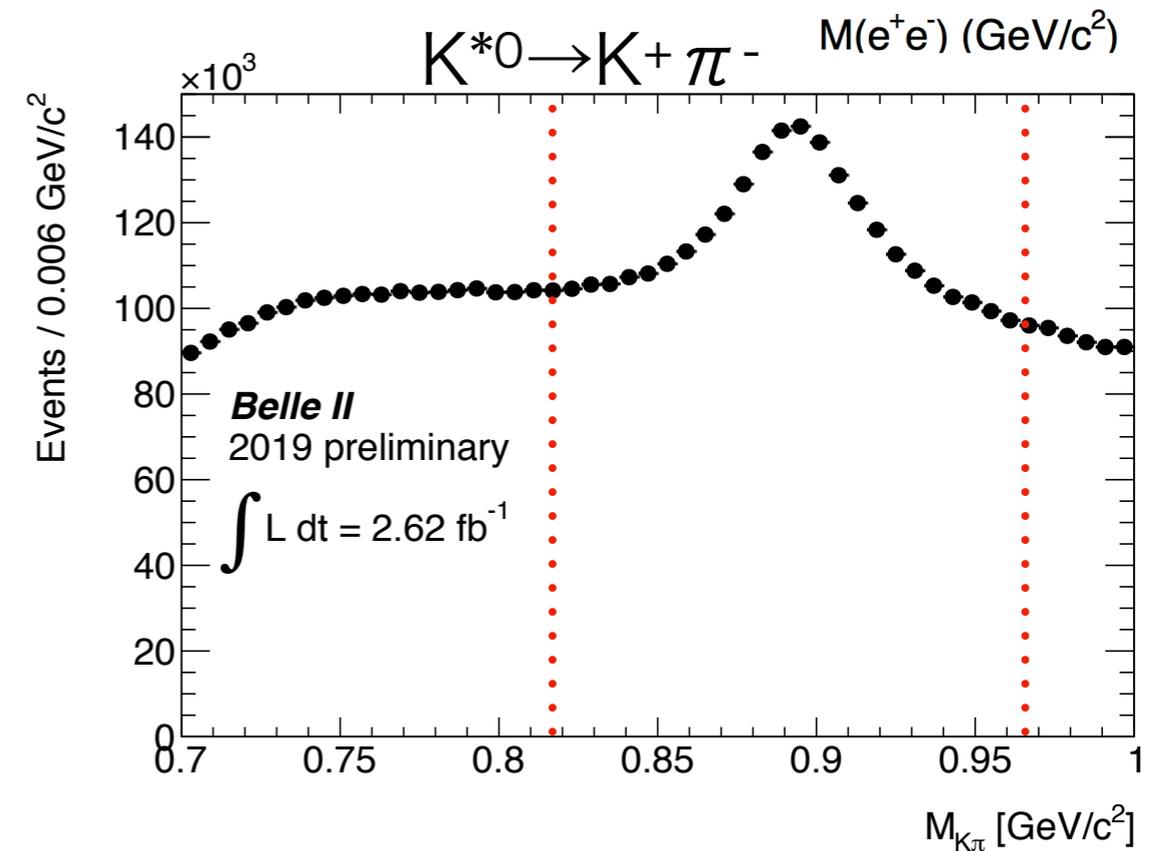
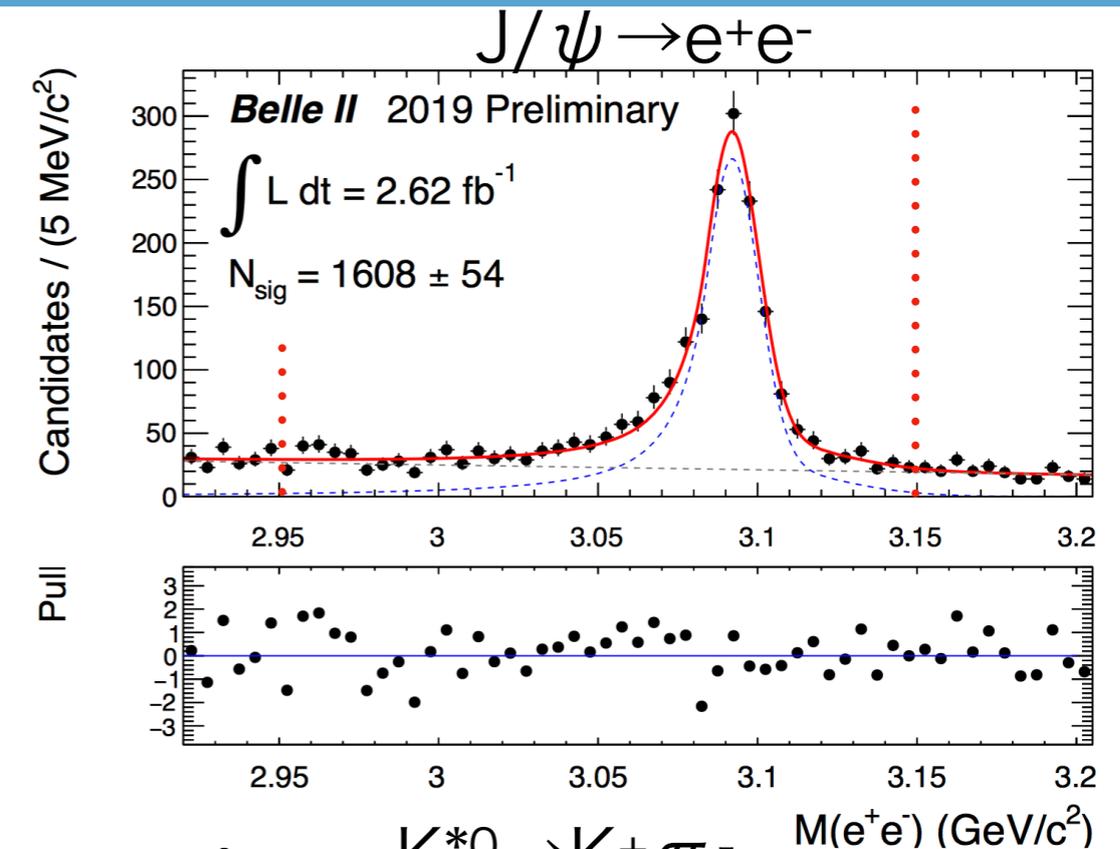
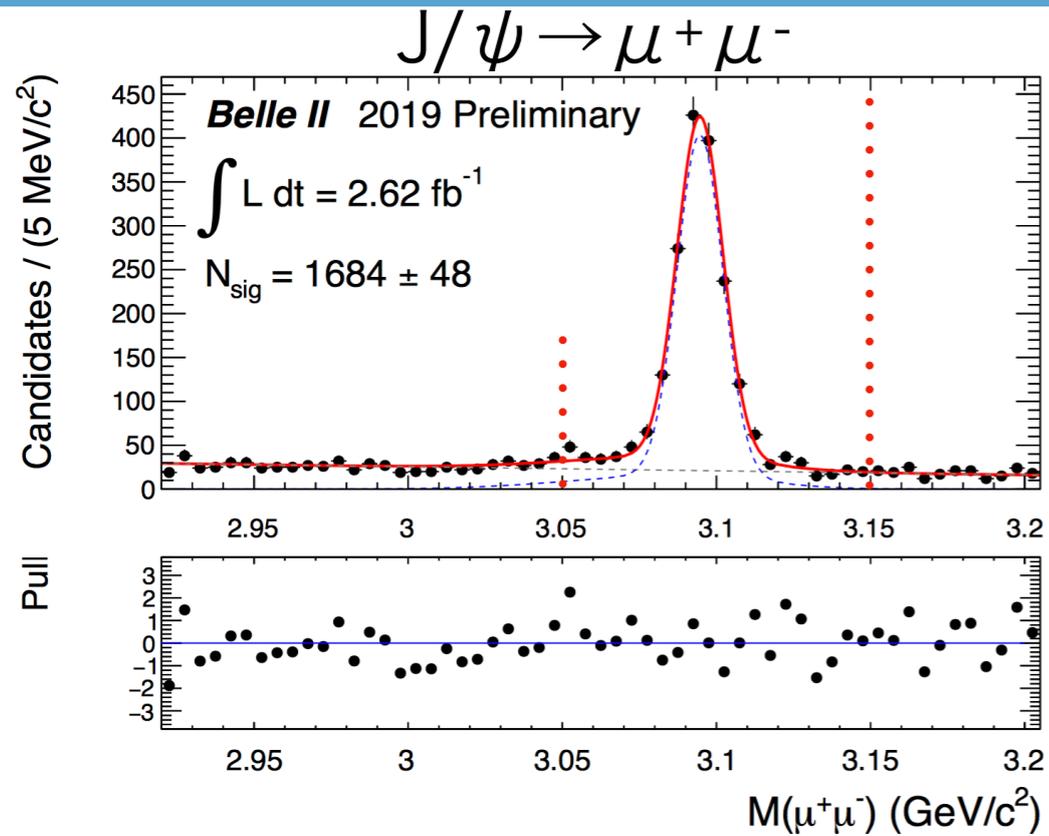
[ビームバックグラウンド量]

- 設計されたルミノシティまでは再構成効率の低下は見られない。
- しかし設計されたルミノシティを超えると再構成効率の低下が深刻になる。

目次

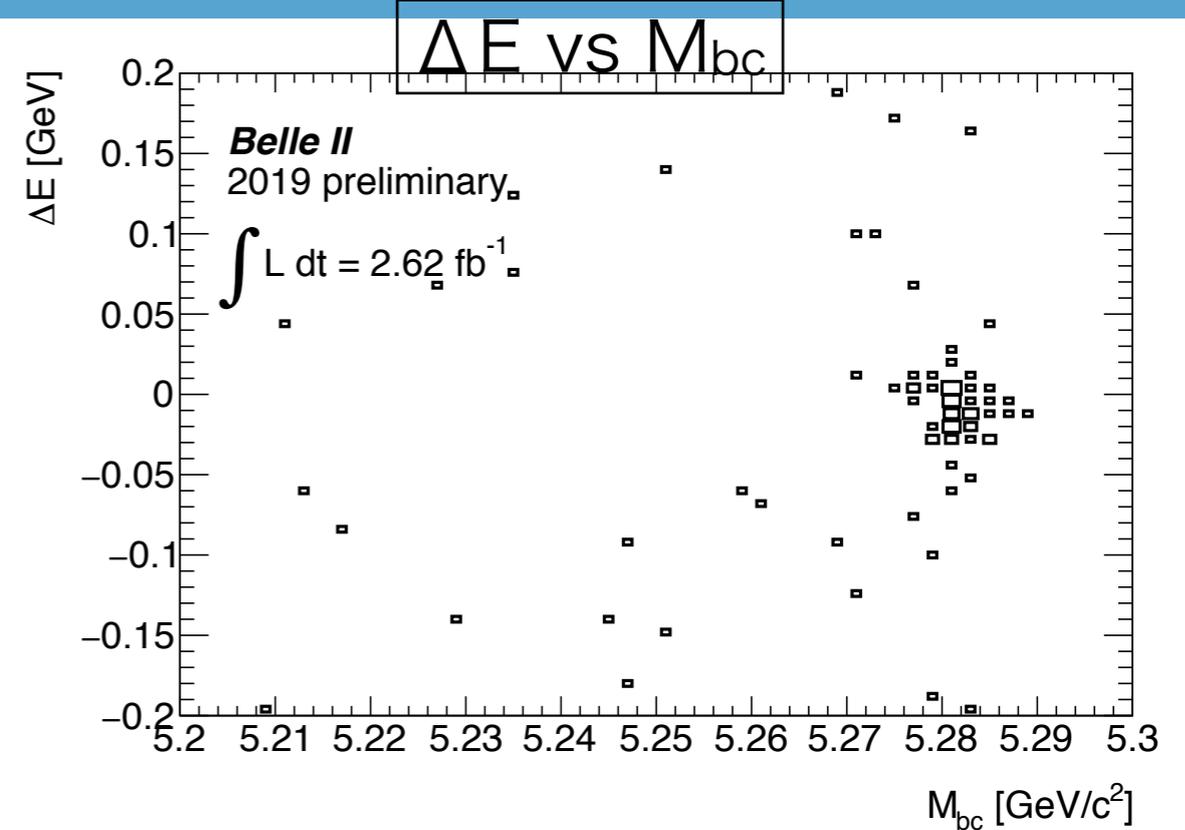
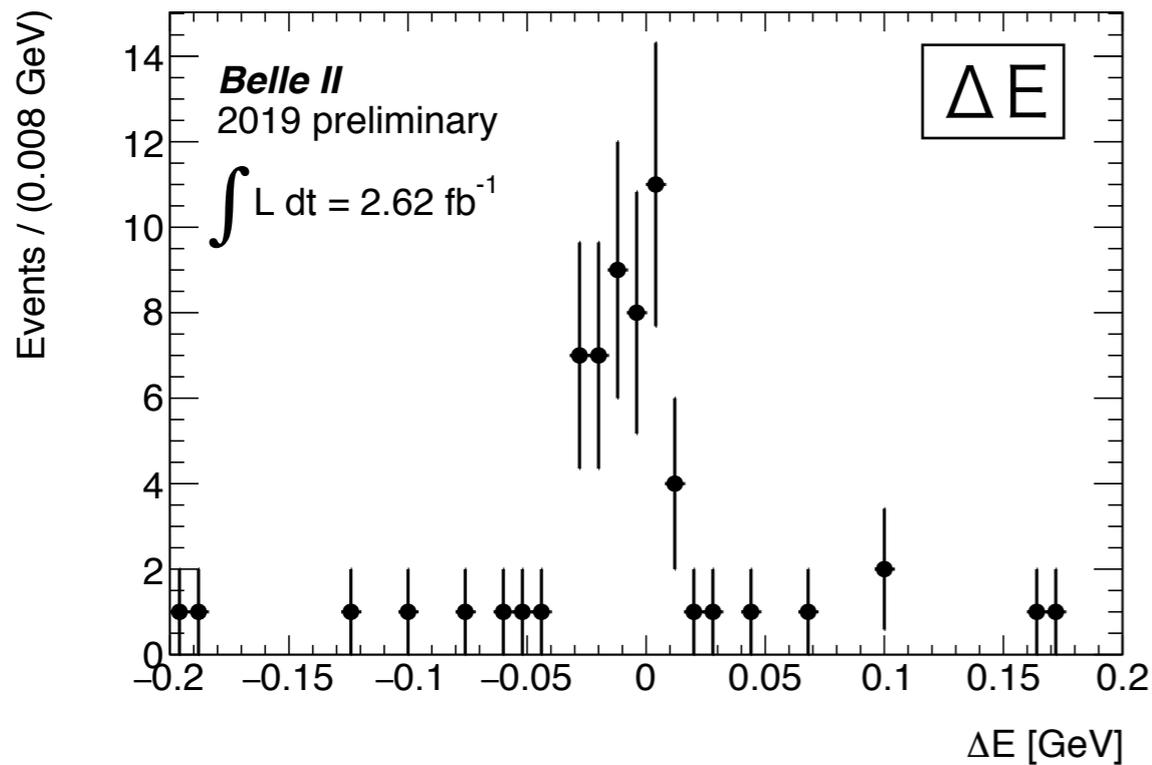
- インTRODクシヨン
 - Belle II 実験
 - 時間依存CP非保存を測定するには
 - 研究動機
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の再構成
(モンテカルロシミュレーション)
- 崩壊点位置分解能の見積もり
(モンテカルロシミュレーション)
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の再構成
(2.62 fb⁻¹の実データ)
- まとめ

実データでの $\mu^+\mu^-$, e^+e^- , $K\pi$ の不変質量分布

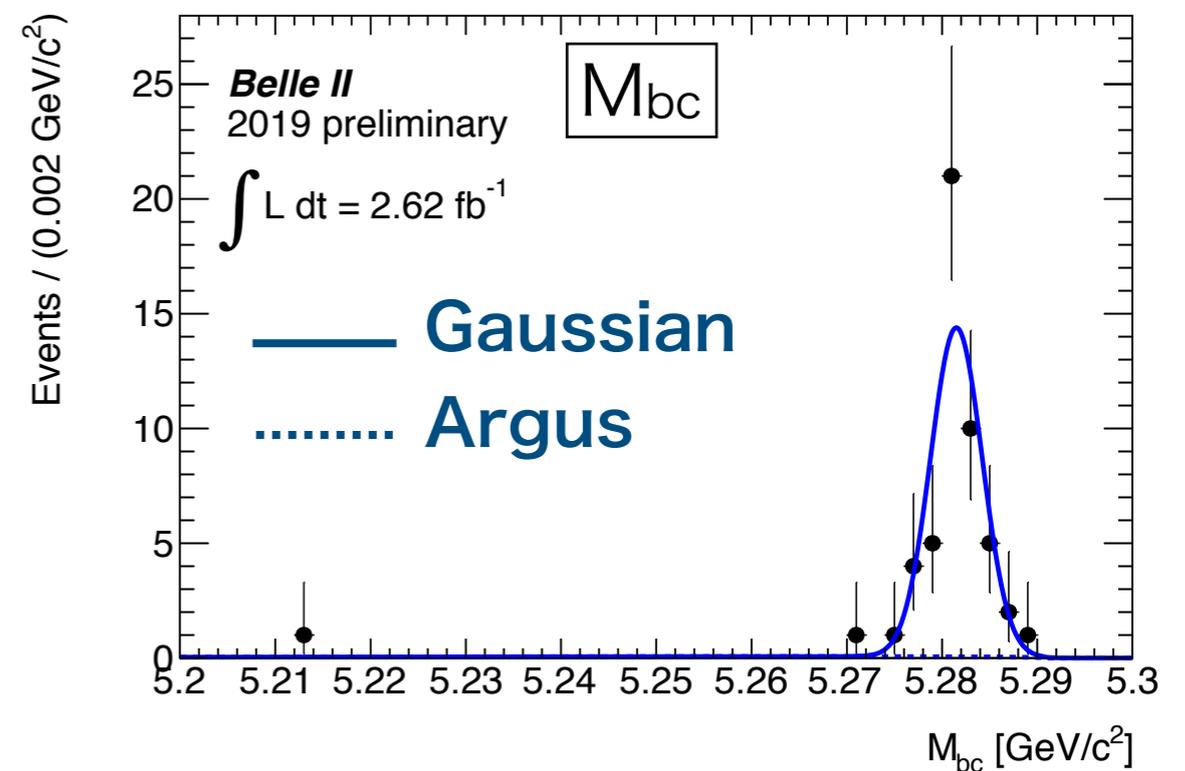


- 設定した不変質量の領域（縦赤点線）に J/ψ と K^{*0} のピークが見えている。

実データでの $B^0 \rightarrow J/\psi (\rightarrow l^+l^-) K^{*0}$ 事象



- $B^0 \rightarrow J/\psi (\rightarrow \mu^+\mu^-) K^{*0}$ と
 $B^0 \rightarrow J/\psi (\rightarrow e^+e^-) K^{*0}$ モードを合わせて、
 M_{bc} 分布のフィット (信号=Gaussian、バック
 グラウンド=Argus : 位相空間に従うバックグ
 ラウンド分布) により、
 信号 = 48.6 ± 7.0 事象 ($\mu^+\mu^-$: 25.1 ± 5.2 事
 象、 e^+e^- : 23.7 ± 4.9 事象)を得た。
 (バックグラウンド = 2.4 ± 1.7 事象)



目次

- インTRODクシヨン
 - Belle II 実験
 - 時間依存CP非保存を測定するには
 - 研究動機
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の再構成
(モンテカルロシミュレーション)
- 崩壊点位置分解能の見積もり
(モンテカルロシミュレーション)
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の再構成
(2.62 fb⁻¹の実データ)
- まとめ

まとめ ($B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ の再構成)

- 2.62 fb⁻¹ の実データを解析した結果
 - $B^0 \rightarrow J/\psi (\rightarrow l^+ l^-) K^{*0}$ では
信号 = 48.6 ± 7.0 事象が得られ、
信号事象の期待値 61 事象と無矛盾であった。
- 背景事象が極めて少ないことが確認できた (Belle 実験や BaBar 実験における先行研究に基づいた期待と無矛盾)。
- 崩壊点位置分解能やフレーバータグ誤認率の較正にはさらに高統計データ蓄積が必要。

まとめ (MC:崩壊点位置分解能)

	位置分解能[um]
$\mu^+\mu^-$ で B^0 の崩壊点を再構成	33.7 ± 1.1
$K^+\pi^-$ で B^0 の崩壊点を再構成	93.7 ± 2.4
タグ側の B^0 の崩壊点	95.2 ± 2.3
J/ ψ 崩壊点と K^{*0} 崩壊点のz座標の差	109.1 ± 4.0

- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+\pi^-)$ モードでの崩壊点位置分解能を確認した。
- K^{*0} とJ/ ψ で再構成した崩壊点のz座標の差は、MCによる真の崩壊点の情報が不要なので、MCと実データの間で直接比較でき、崩壊点の位置分解能の較正に有効。
- PXDが2層になるとビームバックグラウンドが増えた場合でも良い崩壊点位置分解能を保持できる。
- データ蓄積量の増加とともに、この崩壊モードの事象をB中間子崩壊点の位置分解能及びフレーバータグ誤認率の較正に活用。