

$B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊を用いた $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 外挿による B 中間子崩壊点再構成の研究

奈良女子大学大学院 人間文化総合科学研究科 物理科学専攻

高エネルギー物理学研究室 修士2年

黒田奈津貴

2022年度修士論文発表会

2023年2月16日

1. イントロダクション
2. B 中間子崩壊点再構成
3. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (シミュレーション)
4. B 中間子崩壊点分解能の評価 (シミュレーション)
5. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (実験データ)
6. B 中間子崩壊点分解能の評価 (実験データ)
7. まとめ

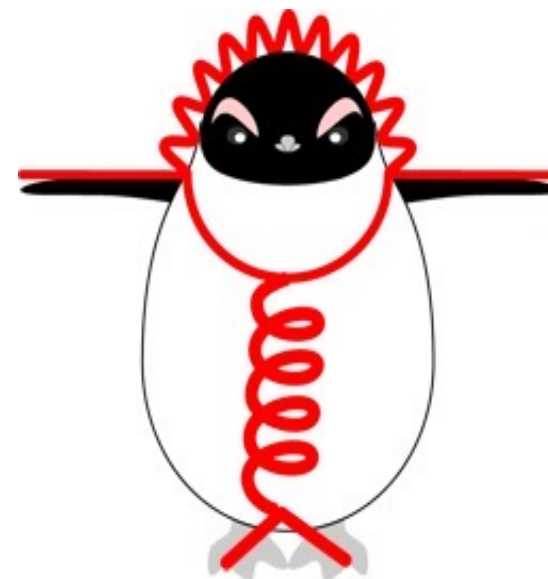
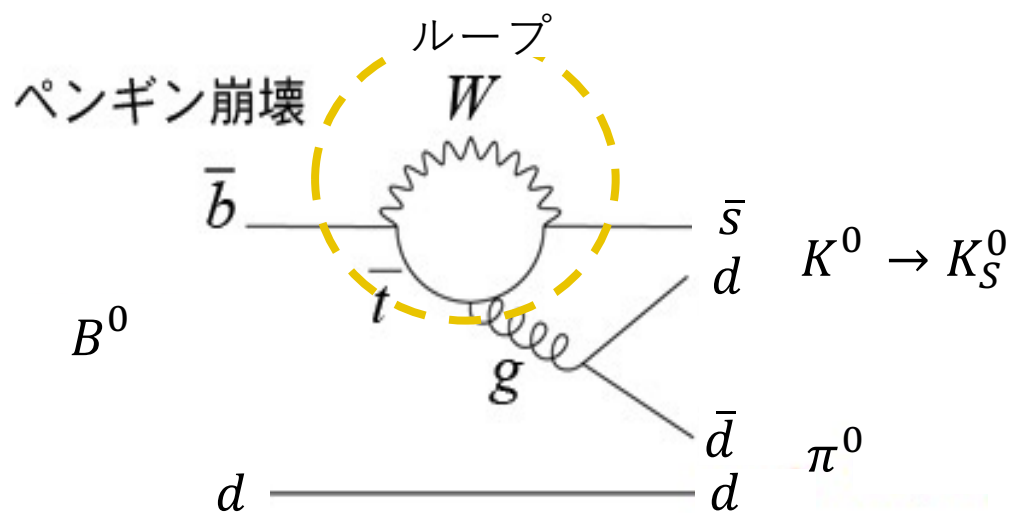
1. イントロダクション

- B中間子の崩壊稀崩壊過程の測定
- Belle II 実験

2. B 中間子崩壊点再構成
3. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (シミュレーション)
4. B 中間子崩壊点分解能の評価 (シミュレーション)
5. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (実験データ)
6. B 中間子崩壊点分解能の評価 (実験データ)
7. まとめ

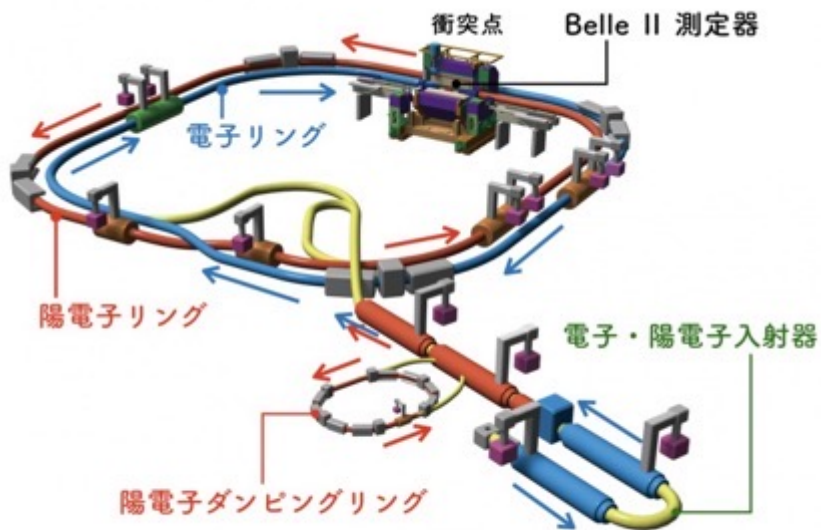
B 中間子の稀崩壊過程の測定

- B 中間子の稀崩壊過程の測定：新物理に感度高い
 - ループを含んだペンギンダイアグラム
 - 不確定性原理のため**新物理の寄与**（未知の粒子など）があり得る
 - 新物理の兆候は、標準模型の**期待値と測定値の差**として現れる
 - この観点で**CP対称性の破れ**を測定することは重要課題である

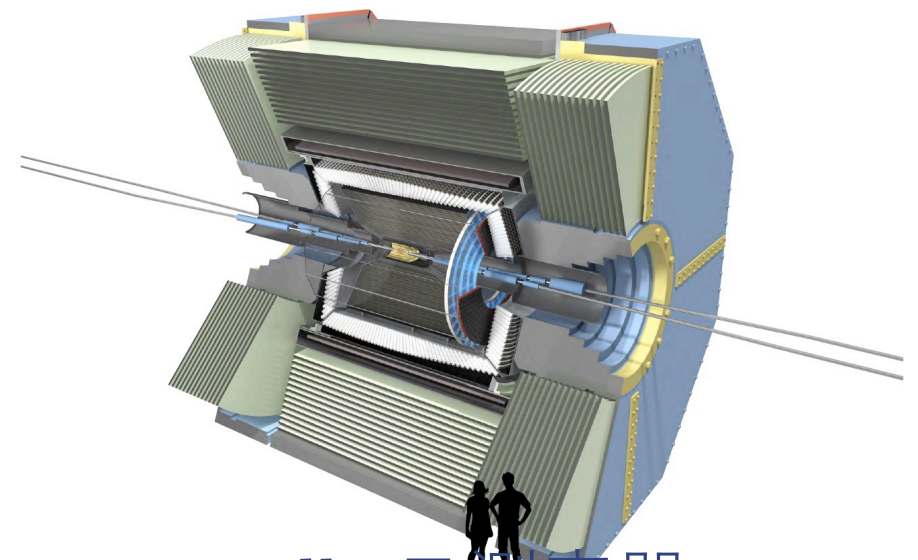


Belle II 実験

- Belle II 実験：SuperKEKB 加速器と Belle II 測定器 を用いて B 中間子を大量に生成する
高エネルギー加速器実験
 - SuperKEKB 加速器：7 GeV 電子と 4 GeV の陽子を衝突させる
非対称エネルギー電子・陽電子衝突型加速器
 - 重心系では生じてほとんど静止している B 中間子対がビーム軸(z)方向に走る。
 - 二つの B 中間子崩壊点の z 座標の差から崩壊した時間差 Δt を測定可能。
 - Belle II 測定器：B 中間子の崩壊を高精度で観測する素粒子検出器



SuperKEKB 加速器



Belle II 測定器

1. イントロダクション

2. 時間依存CP非保存

- B中間子から直接出る飛跡があるモードとないモード
- 崩壊モード： $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}, K^{*+} \rightarrow K_S^0 \pi^+$
- B中間子崩壊点を求める2通りの手法と $\Delta z'$ について

3. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (シミュレーション)

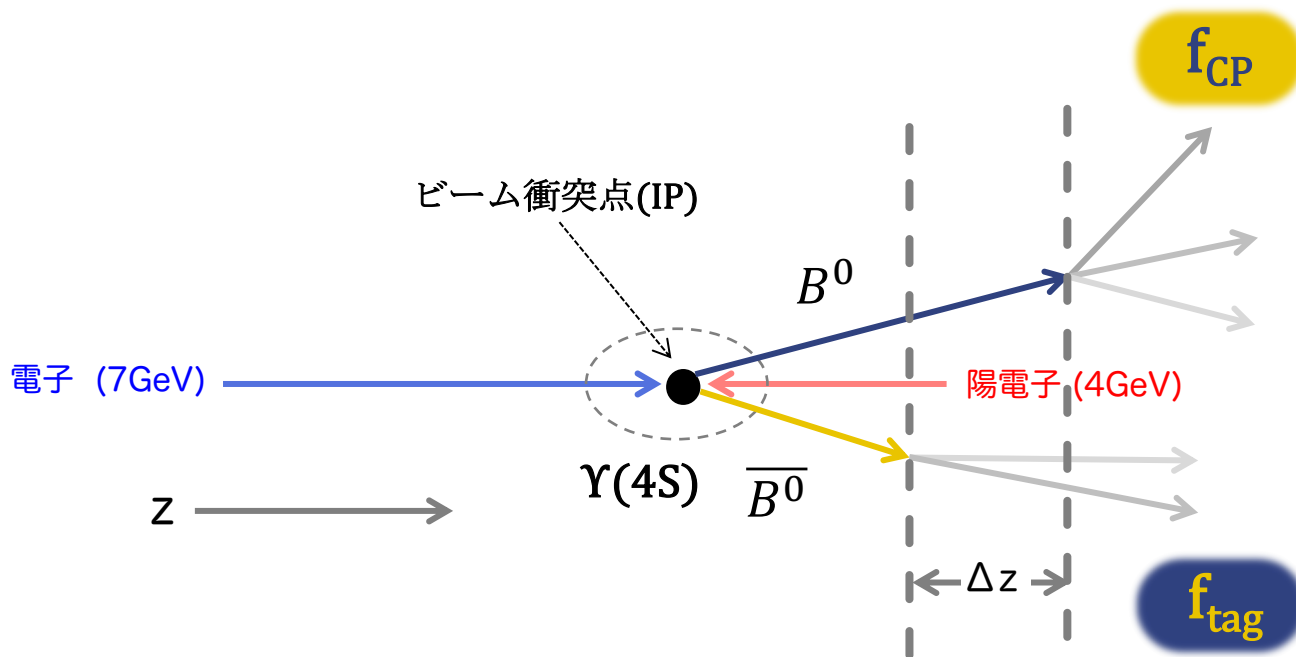
4. B中間子崩壊点分解能の評価 (シミュレーション)

5. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (実験データ)

6. B中間子崩壊点分解能の評価 (実験データ)

7. まとめ

時間依存CP非保存測定方法



1. CP固有状態(f_{CP})の再構成
2. 1の娘粒子以外の娘粒子=タグ側(f_{tag})
3. タグ側B中間子の娘粒子から B^0 か \bar{B}^0 か判別 (フレーバータグ)
4. 1と2の崩壊点位置のz方向の差 Δz より

$$\Delta t \cong \frac{\Delta z}{c\beta\gamma}$$
を得る

5. フレーバータグと Δt 分解能を考慮した確率密度関数 (PDF) で最尤度法フィットし、CP非保存パラメーター (S と A)を抽出

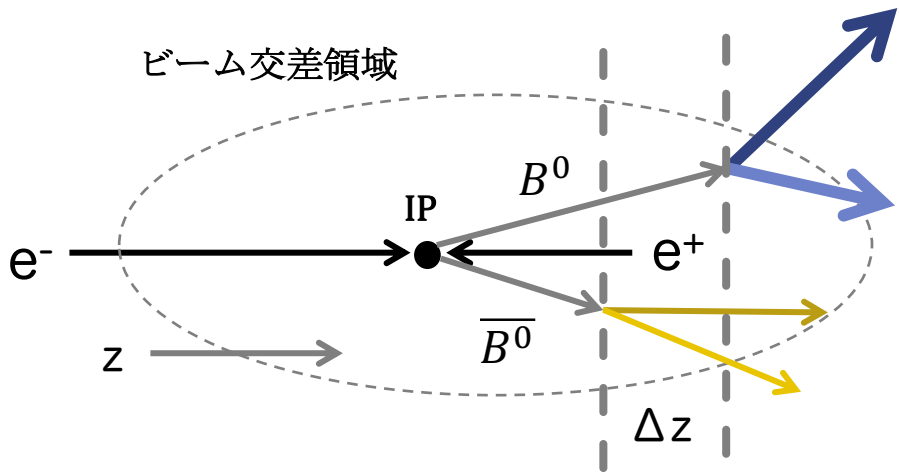
$$A(\Delta t) \equiv \frac{\Gamma[\bar{B}(\Delta t) \rightarrow f_{CP}] - \Gamma[B(\Delta t) \rightarrow f_{CP}]}{\Gamma[\bar{B}(\Delta t) \rightarrow f_{CP}] + \Gamma[B(\Delta t) \rightarrow f_{CP}]}$$

$$= S \sin(\Delta m \Delta t) + A \cos(\Delta m \Delta t)$$

間接的 CP 非保存パラメーター 直接的 CP 非保存パラメーター

B中間子から直接出る飛跡があるモードとないモード

直接出る飛跡があるモード

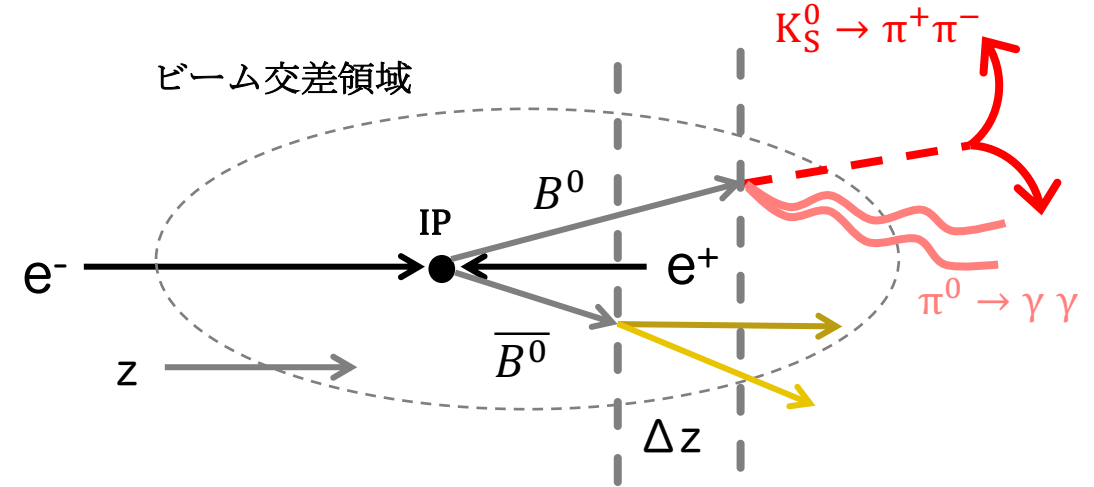


$B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0, B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ など
B中間子崩壊点から直接出る飛跡がある



崩壊点再構成は容易
位置の精度も良い

直接出る飛跡がないモード



$B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0, B^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0, B^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \gamma$ など
B中間子崩壊点から直接出る飛跡がない



$K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ から数cm IPに向けて逆向きに外挿により
B中間子崩壊点を得る

外挿が必要
位置の精度も落ちる

B中間子から直接出る飛跡があるモードとないモード

直接出る飛跡があるモード

直接出る飛跡がないモード

位置分解能の較正方法を考える必要あり

$B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0, B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ など
B中間子崩壊点から直接出る飛跡がある



崩壊点再構成は容易
位置の精度も良い

$B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0 K_S^0, B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0, B^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0, B^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0 \gamma$ など
B中間子崩壊点から直接出る飛跡がない



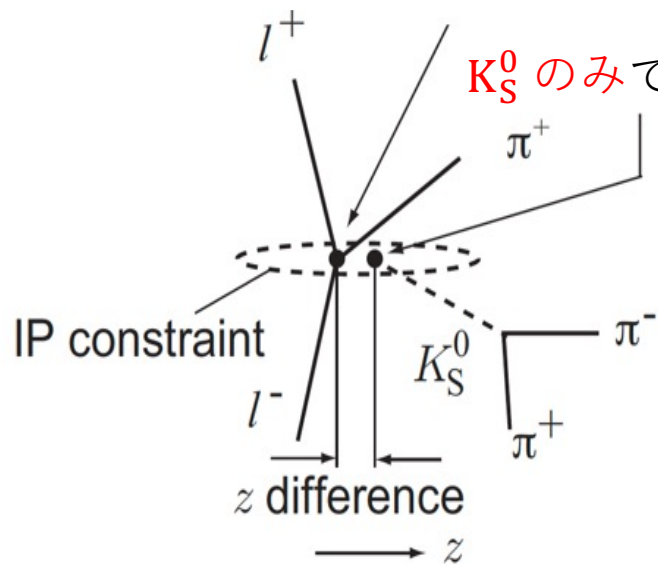
$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ から数cm IPに向けて逆向きに外挿により
B中間子崩壊点を得る

外挿が必要
位置の精度も落ちる

崩壊モード： $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}, K^{*+} \rightarrow K_S^0 \pi^+$

崩壊モード $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}, K^{*+} \rightarrow K_S^0 \pi^+$ を選んだ理由
直接出る飛跡 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ と数cm飛ぶ $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ が
同一B中間子崩壊のうちに存在

$J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ で求めたB中間子崩壊点

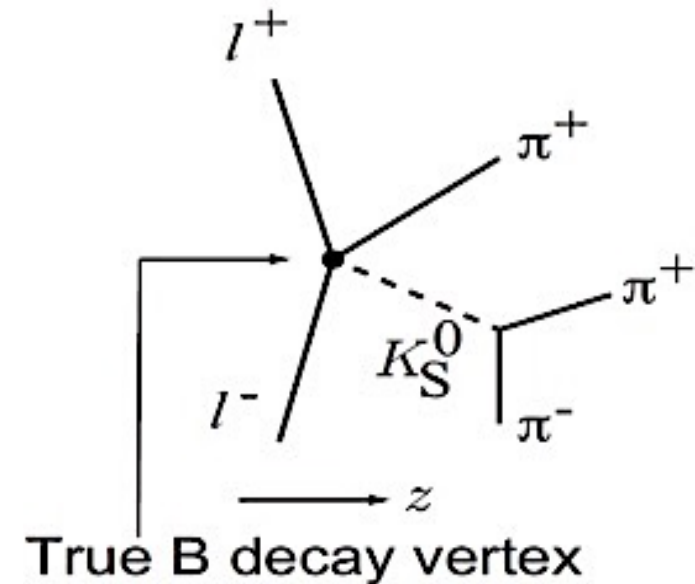


K_S^0 のみで求めたB中間子崩壊点

同一点/同一事象に対して

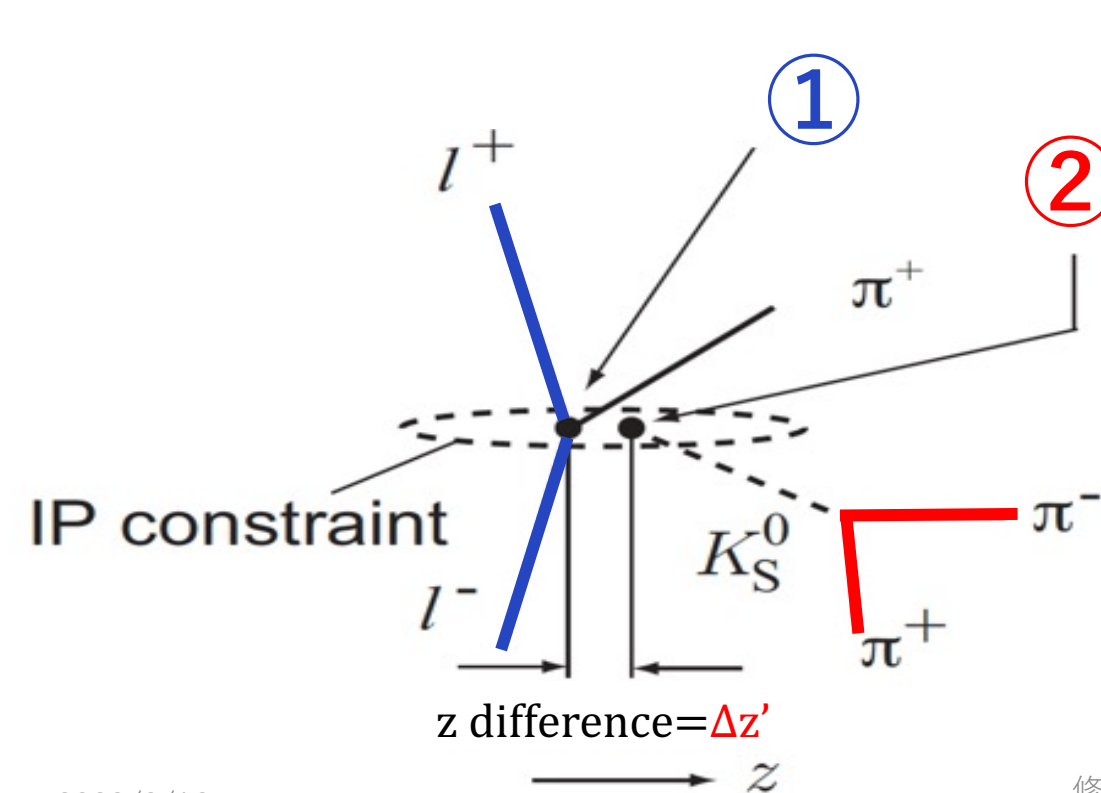
- $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ で求めたB中間子崩壊点
 - K_S^0 のみで求めたB中間子崩壊点
- の二つが得られる。

二つの差は検出器の分解能のためである。



B中間子崩壊点を求める2通りの手法

- ① 直接出る飛跡から求めるB中間子崩壊点：高い運動量を持つJ/ψの娘粒子(J/ψ → μ⁺ μ⁻)で決定
主に崩壊点検出器にヒットした
- ② 外挿によって求めるB中間子崩壊点：K_S⁰ → π⁺ π⁻からビーム衝突点(IP)に向け逆向きに外挿して決定

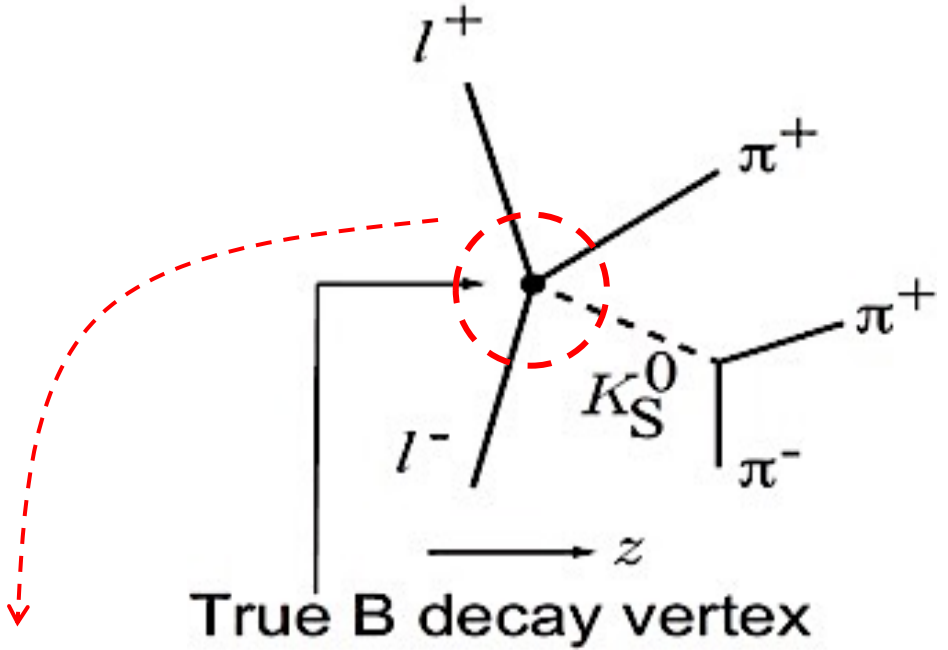
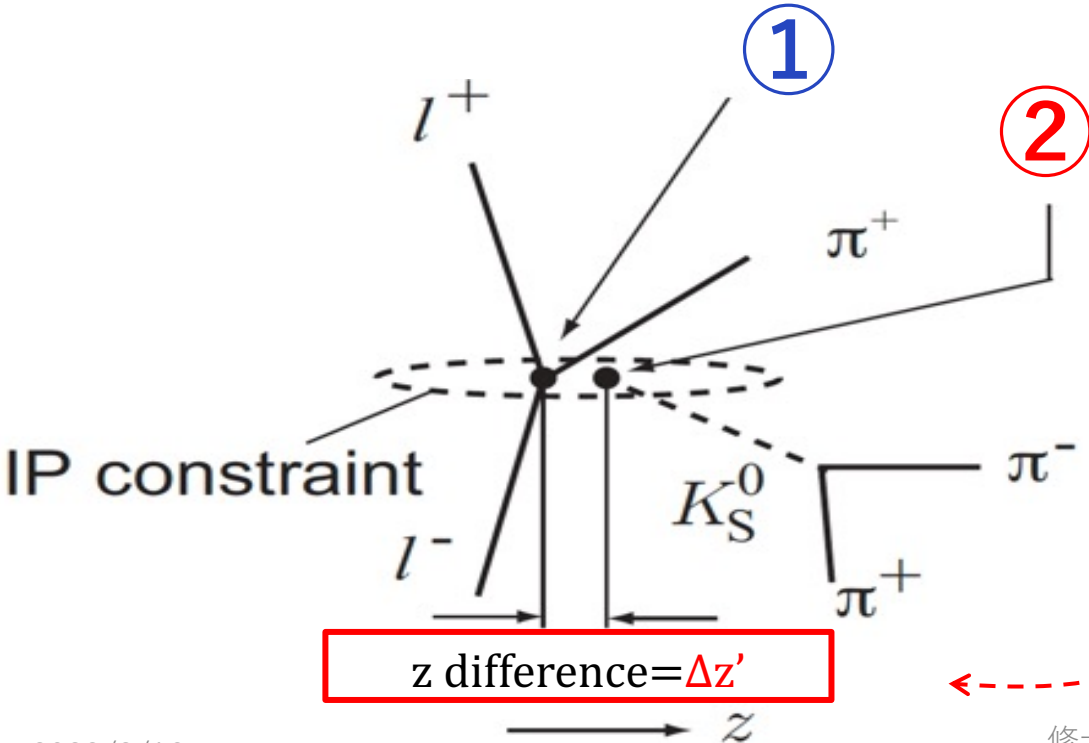


以降は

- ① 直接出る飛跡から求めるB中間子崩壊点は「J/ψ → μ⁺ μ⁻による崩壊点」
- ② 外挿によって求めるB中間子崩壊点は「K_S⁰ → π⁺ π⁻から衝突点(IP)に向け逆向きに外挿して得た崩壊点」と呼ぶ。

$\Delta z'$ の定義

- ① $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ による崩壊点
- ② $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ から衝突点(IP)に外挿して得た崩壊点



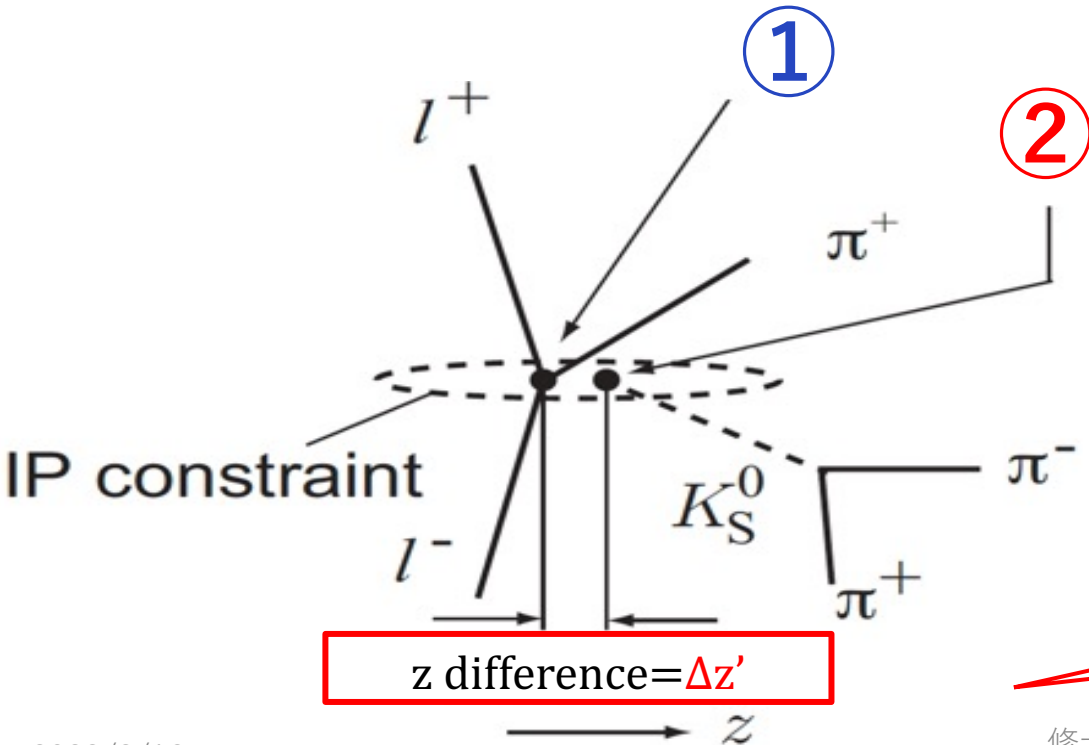
同一のB中間子の崩壊点を二通りの手法(①と②)で求める

①と②で求めたz成分には差がある
= $\Delta z'$ とする

$\Delta z'$ の意味すること

① $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ による崩壊点

② $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ から衝突点(IP)に外挿して得た崩壊点



①の分解能 = 良い = 基準とする
②の分解能 = ①より悪い
⇒ ①と②のz成分の差 $\Delta z'$ ~ ②の分解能

Belle II 測定器

幅8m × 高さ8mの巨大な測定器
粒子識別、エネルギー、運動量等の量を高精度で決定
CDCで娘粒子の飛跡を測定しVXDで崩壊点を再構成

中央飛跡検出器 (CDC)
→荷電粒子の飛跡や運動量、 dE/dx の測定

粒子識別検出器
TOPカウンター (TOP)
エアロゲルRICHカウンター (ARICH)
→ π/K 中間子の識別

崩壊点検出器
VXD (Vertex Detector) :
PXD+SVD



電子 (7GeV)

陽電子 (4GeV)

μ 粒子・ K_L^0 粒子検出器 (KLM)
→ K_L^0 中間子や μ 粒子の測定

電磁カロリメーター (ECL)
→電子や光子のエネルギーの測定

8m

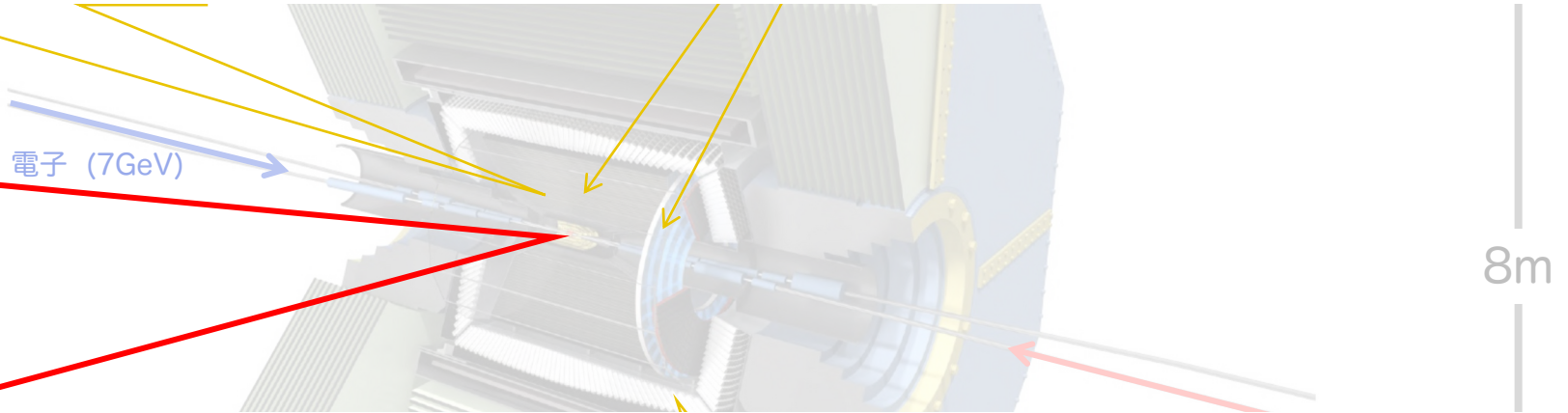
8m

14

崩壊点検出器では粒子の崩壊点を高精度に測定

崩壊点検出器

VXD (Vertex Detector) :
PXD+SVD



崩壊点検出器は

- 内側 2 層のシリコンピクセルセンサー (**PXD**)
 - 4 層のシリコンストリップセンサー (**SVD**)
- ビーム軸から 14 cm の範囲までをカバーする。

電磁カロリメーター (ECL)
→ 電子や光子のエネルギーの測定

1. Belle II 実験

2. 時間依存 CP 非保存と B 中間子崩壊点再構成

3. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (シミュレーション)

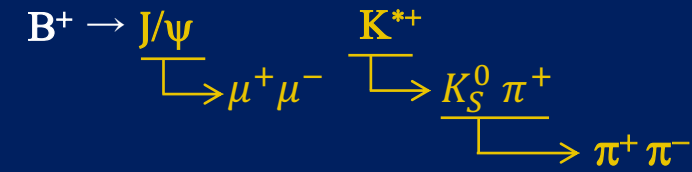
4. B 中間子崩壊点分解能の評価 (シミュレーション)

5. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (実験データ)

6. B 中間子崩壊点分解能の評価 (実験データ)

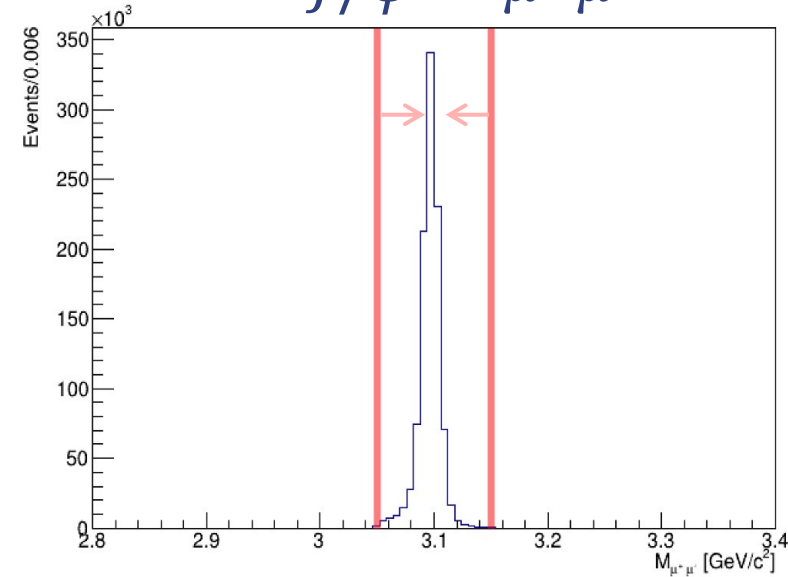
7. まとめ

$B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 事象選別

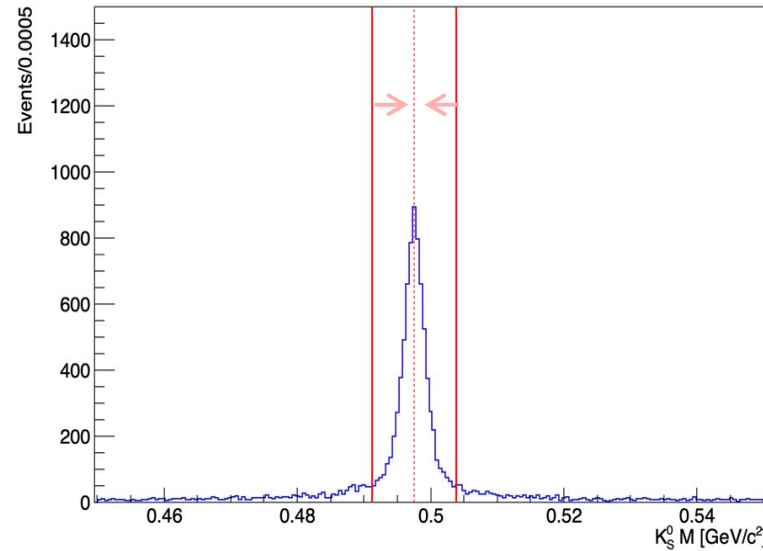


J/ψ , K_S , K^{*+} はいずれも不安定粒子なので、不変質量分布のピークとして現れる。
片方のB中間子が該当するモードに崩壊したシミュレーション事象サンプル

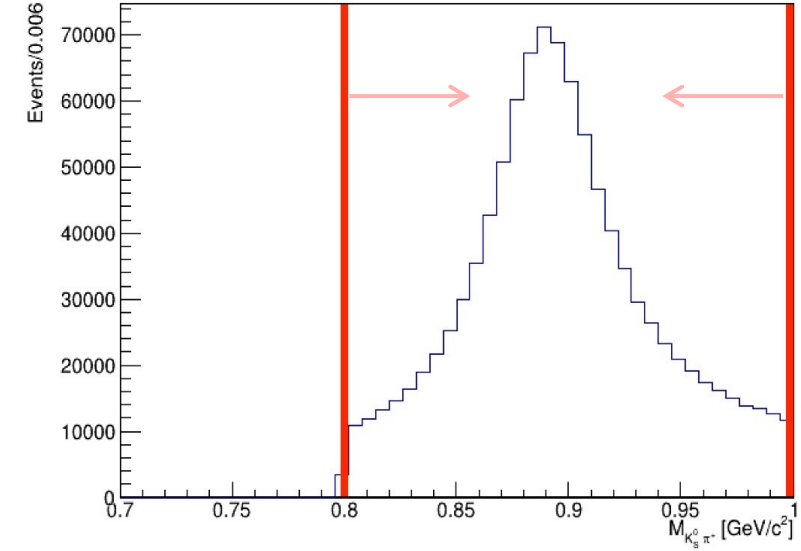
$J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$



$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$



$K^{*+} \rightarrow K_S^0 \pi^+$



J/ψ 候補の選別条件

$$3.05 \text{ GeV}/c^2 < M_{\mu^+ \mu^-} < 3.15 \text{ GeV}/c^2$$

$M_{\mu^+ \mu^-}$ は $3.1 \text{ GeV}/c^2$ 付近にピークを作っている

K_S^0 候補の選別条件

$$0.491 \text{ GeV}/c^2 < M_{\pi^+ \pi^-} < 0.504 \text{ GeV}/c^2$$

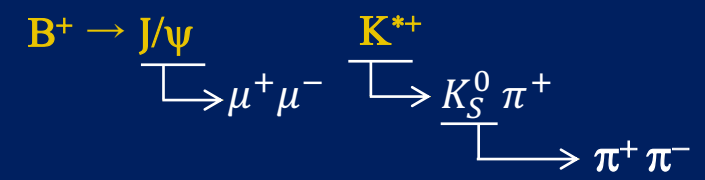
$M_{\pi^+ \pi^-}$ は $0.498 \text{ GeV}/c^2$ 付近にピークを作っている

K^{*+} 候補の選別条件

$$0.8 \text{ GeV}/c^2 < M_{K_S^0 \pi^+} < 1.0 \text{ GeV}/c^2$$

$M_{K_S^0 \pi^+}$ は $0.892 \text{ GeV}/c^2$ 付近にピークを作っている

$B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 事象再構成 (シミュレーション・信号事象のみ)

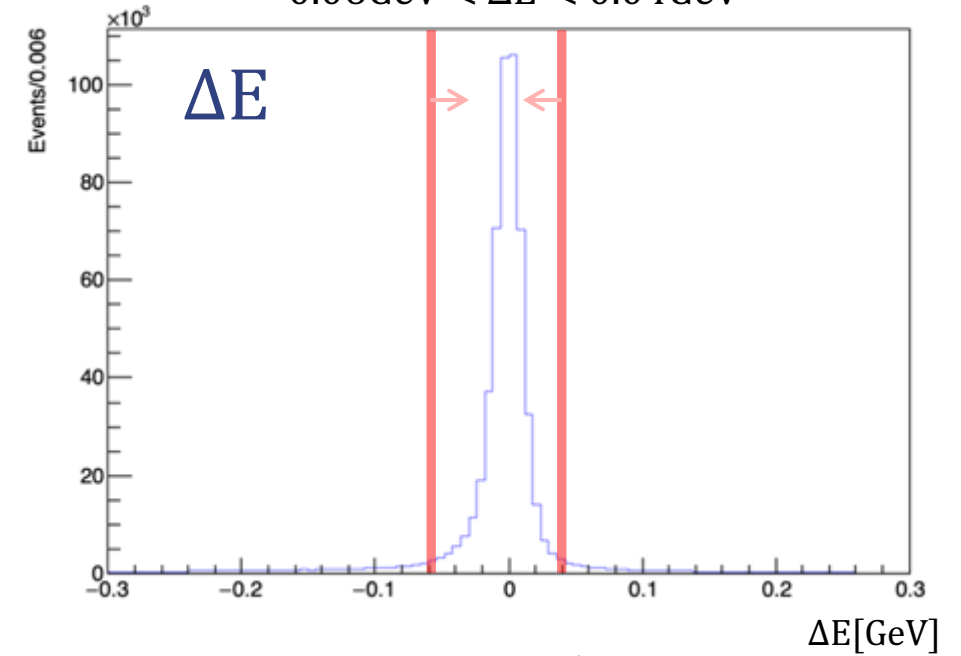
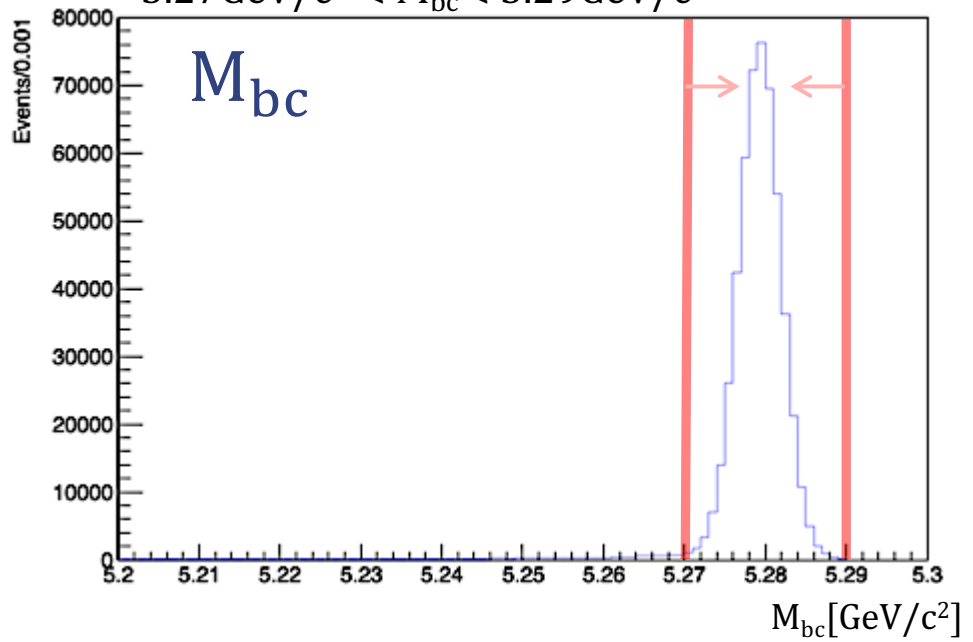


実験室系から重心系 (Y(4S)静止系) に移ってみると、B中間子と反B中間子は等しいエネルギーを持ち、互いに反対むきに運動量の大きさ約330MeV/cで運動している。B中間子のエネルギー(E_B)と運動量(p_B)は、それぞれ娘粒子のエネルギーの和と運動量の和で得る。 E_{beam} は重心系エネルギーの1/2=5.29GeV。

選別条件は信号事象を十分に含む
赤線範囲とした
 $5.27\text{GeV}/c^2 < M_{bc} < 5.29\text{GeV}/c^2$

$B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ の M_{bc} と ΔE

選別条件は信号事象を十分に含む
赤線範囲とした
 $-0.06\text{GeV} < \Delta E < 0.04\text{GeV}$



Beam Constraint Mass : M_{bc}

$$M_{bc} \equiv \sqrt{E_{beam}^2 - p_B^2}$$

E_B と E_{beam} のエネルギー差 ΔE

$$\Delta E \equiv E_B - E_{beam}$$

1. Belle II 実験
2. 時間依存 CP 非保存と B 中間子崩壊点再構成
3. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (シミュレーション)

4. B 中間子崩壊点分解能の評価 (シミュレーション)

- B中間子崩壊点を求める 2 通りの手法と $\Delta z'$ について
- 2 通りの手法の崩壊点分解能
- $\Delta z'$ 分布から求める崩壊点分解能

5. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (実験データ)
6. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の B 中間子崩壊点分解能の評価 (実験データ)
7. まとめ

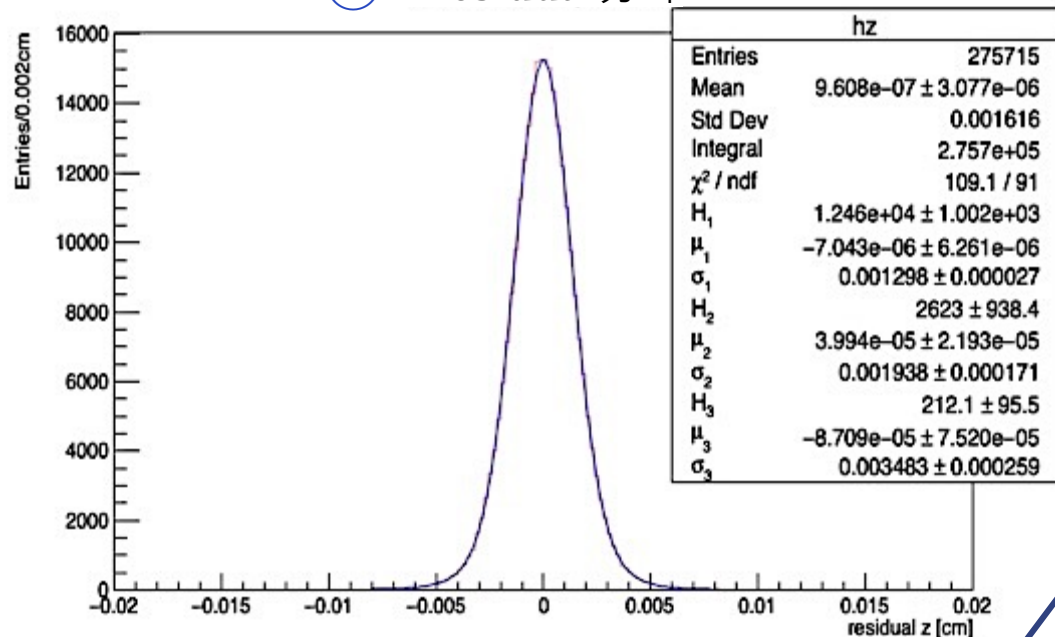
J/ψ → μ⁺μ⁻による崩壊点の位置分解能

(シミュレーション・信号事象のみ)

z-residual : 崩壊点の再構成によって得た崩壊点と事象生成時の真の崩壊点の差
z-residual分布の標準偏差 = 崩壊点分解能

① J/ψ → μ⁺μ⁻による崩壊点

①のresidual分布



①の分解能は **15.9 ± 0.5 μm**

- 分解能計算方法
 - Triple Gaussianでフィット
 - 3つのGaussianの標準偏差σを加重平均

$$f_1 = \frac{N_1}{N_1 + N_2 + N_3}$$

$$f_2 = \frac{N_2}{N_1 + N_2 + N_3}$$

$$f_3 = \frac{N_3}{N_1 + N_2 + N_3} \text{ とすると}$$

N₁, N₂, N₃ は
3つのGaussianの各事象数

$$\text{分解能} = \sqrt{f_1 \times \sigma_1^2 + f_2 \times \sigma_2^2 + f_3 \times \sigma_3^2}$$

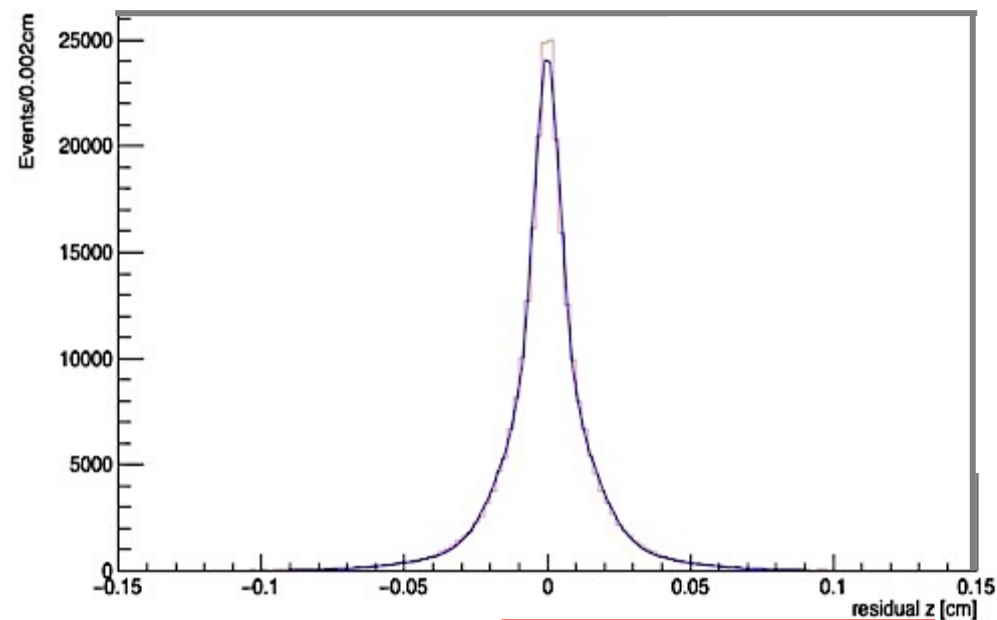
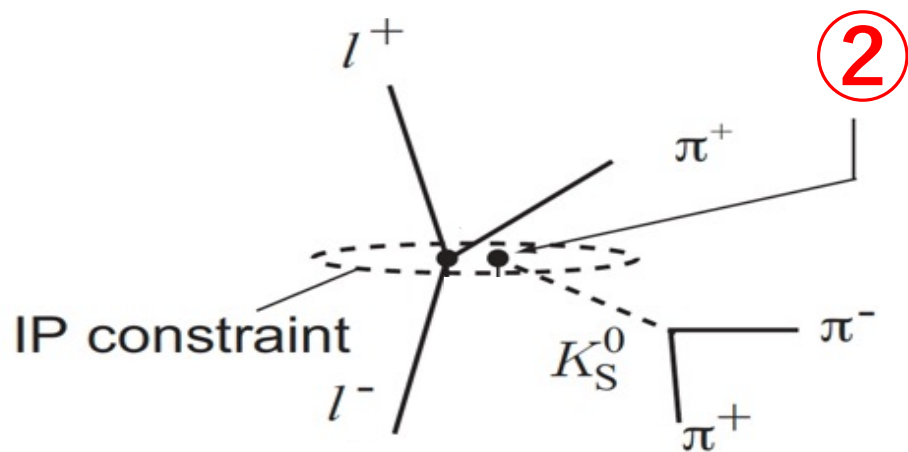
--- Triple Gaussian

$$\mathcal{P}(x) = N_1 \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + N_2 \frac{1}{\sigma_2 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) + N_3 \frac{1}{\sigma_3 \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x - \mu_3)^2}{2\sigma_3^2}\right)$$

$K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ から衝突点(IP)に外挿して得た崩壊点位置分解能 (シミュレーション・信号事象のみ)

② $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ から衝突点(IP)に外挿して得た崩壊点

②のresidual分布



①の分解能は $15.9 \pm 0.5 \mu\text{m}$

②の分解能は $171.5 \pm 1.0 \mu\text{m}$

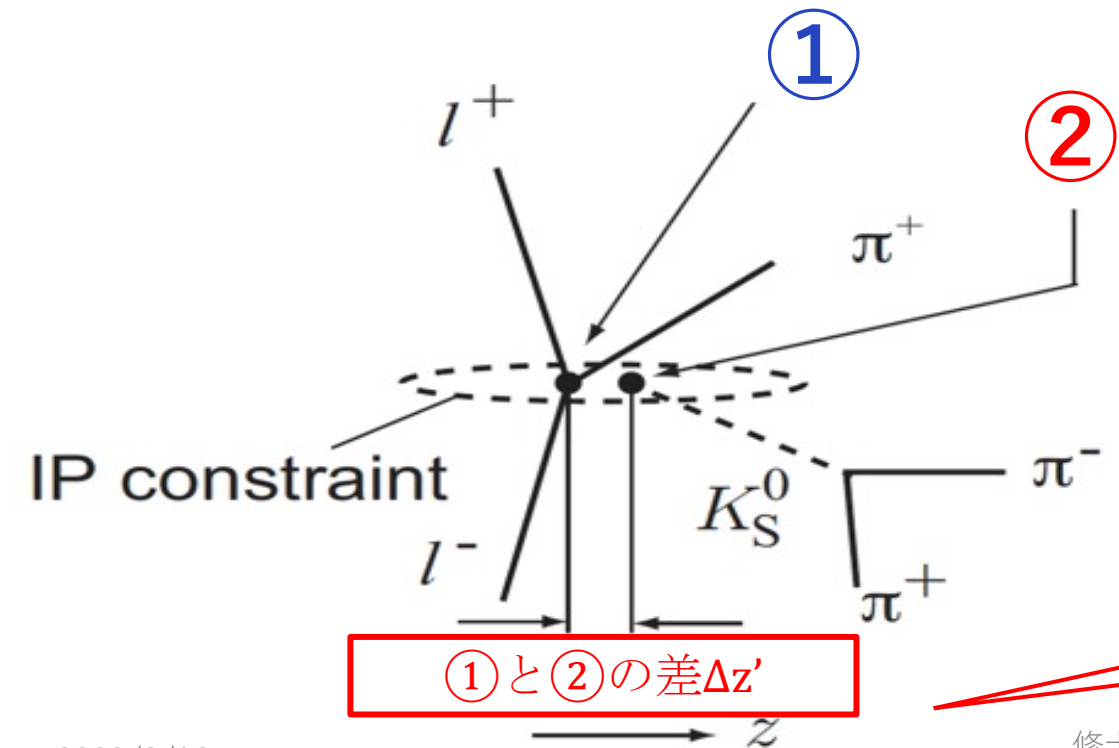
②: K_S^0 崩壊点からの外挿+ K_S^0 から生じる π 中間子の運動量が低いため、 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ で求める崩壊点 (分解能 $15.9 \pm 0.5 \mu\text{m}$) よりも分解能が悪い。検出器通過中の多重散乱の影響が大きい

B中間子崩壊点を求める2通りの手法と $\Delta z'$ について

① $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ による崩壊点：位置分解能 $16\mu\text{m}$

② $K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ から衝突点(IP)に外挿して得た崩壊点：位置分解能 171mm

$\Delta z'$ ：①と②のz成分の差



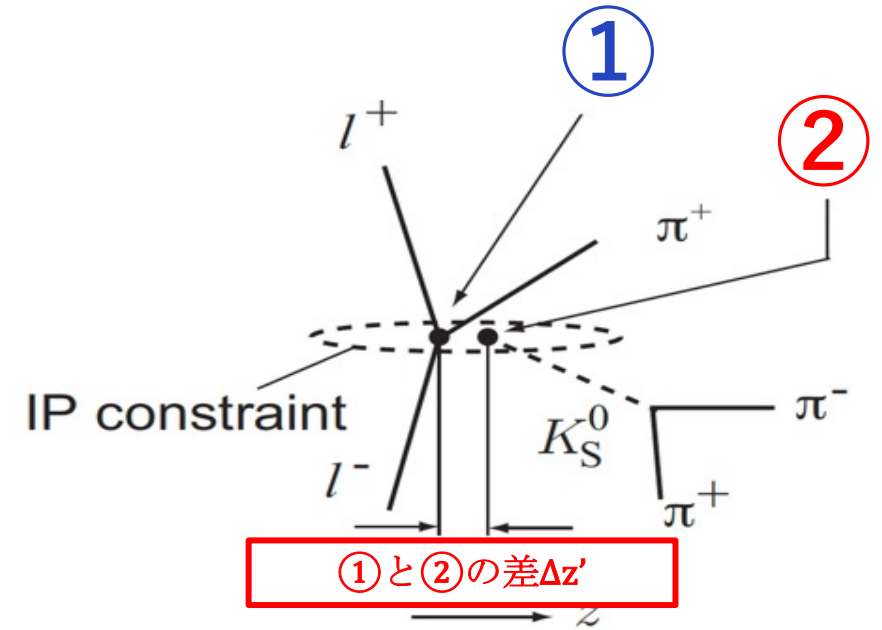
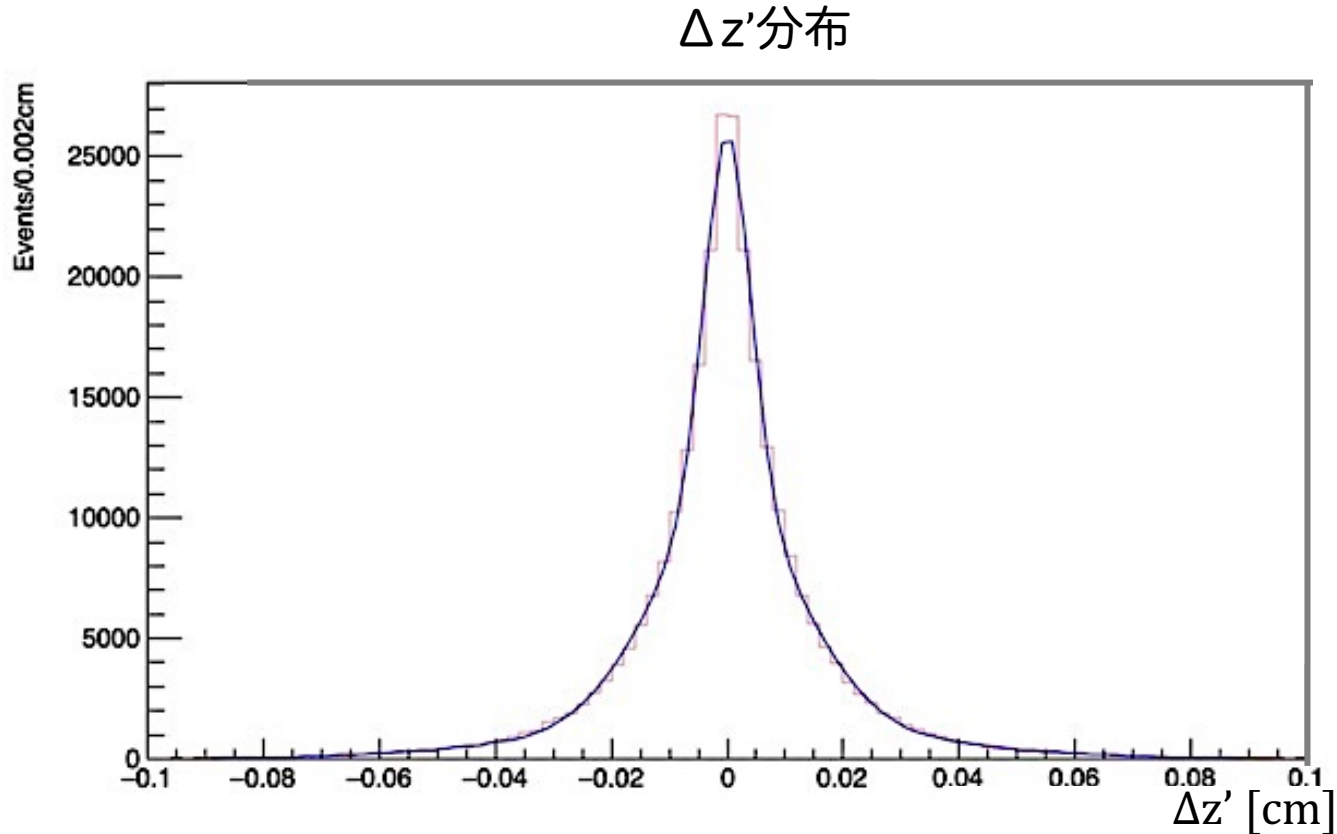
①の分解能 = 良い = 基準とする

②の分解能 = ①より悪い

⇒ ①と②のz成分の差 $\Delta z' \sim$ ②の分解能

シミュレーションでの $\Delta z'$ 分布

(信号事象のみ)



$\Delta z'$ 分布から求めたBの分解能は **$150.9 \pm 1.3 \mu\text{m}$**

①と②のz成分の差 $\Delta z'$ ~②の分解能 を概ね再現することが確かめられた

1. Belle II 実験
2. 時間依存 CP 非保存と B 中間子崩壊点再構成
3. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (シミュレーション)
4. B 中間子崩壊点分解能の評価 (シミュレーション)

5. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (実験データ)

- 使用した実験データ
- $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 事象再構成

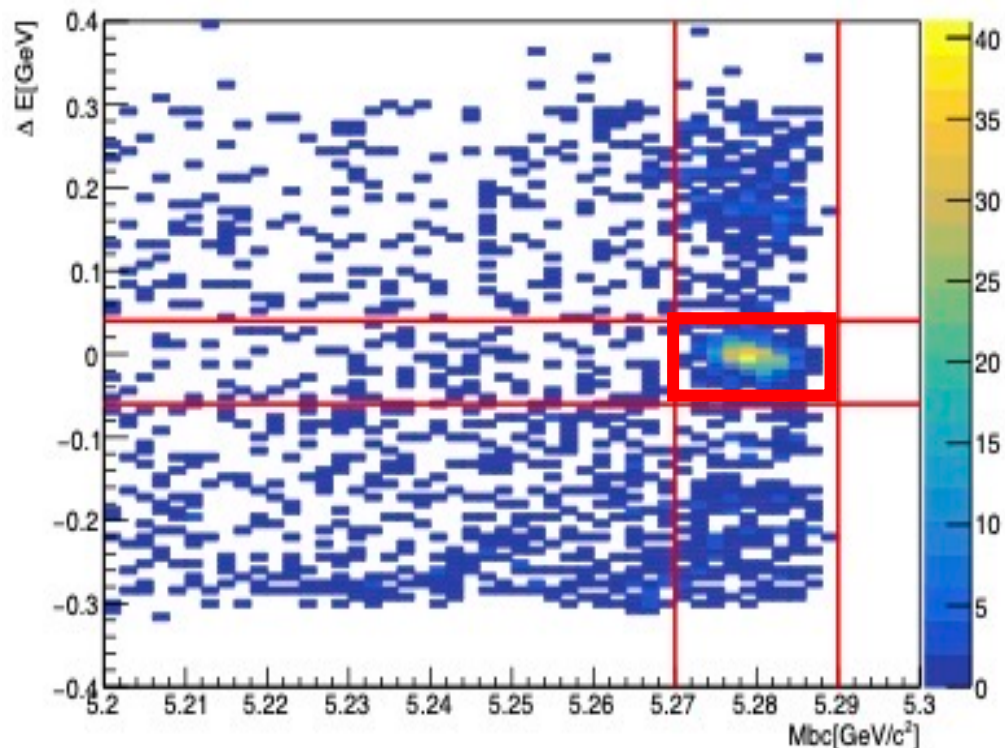
6. B 中間子崩壊点分解能の評価 (実験データ)
7. まとめ

Belle II実験で収集した実験データのうち
積分ルミノシティ 138fb⁻¹を使用

実験データでの $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 事象再構成

M_{bc} と ΔE : B中間子再構成を確認する指標となる物理量

ΔE vs. M_{bc}



選別条件

$$5.27 \text{ GeV}/c^2 < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}/c^2$$

$$-0.06 \text{ GeV} < \Delta E < 0.04 \text{ GeV}$$

ΔE と M_{bc} の二次元分布より

信号事象領域として選んだ領域

では

- $\Delta E = 0$ にピークが見られる
- $M_{bc} = 5.28 \text{ GeV}/c^2$ にピークが見られる

✓ 信号事象を確認

1. Belle II 実験
2. 時間依存 CP 非保存と B 中間子崩壊点再構成
3. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (シミュレーション)
4. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の B 中間子崩壊点分解能の評価 (シミュレーション)
5. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (実験データ)

6. B 中間子崩壊点分解能の評価 (実験データ)

- $\Delta z'$ 分布をフィットする
- 信号事象数と背景事象数
- バックグラウンド事象の分解能の見積もり
- $\Delta z'$ 分布の広がりから求める崩壊点分解能

7. まとめ

実験データでの信号事象数 N_{signal} とバックグラウンド事象数 $N_{\text{background}}$

M_{bc} 分布のフィット

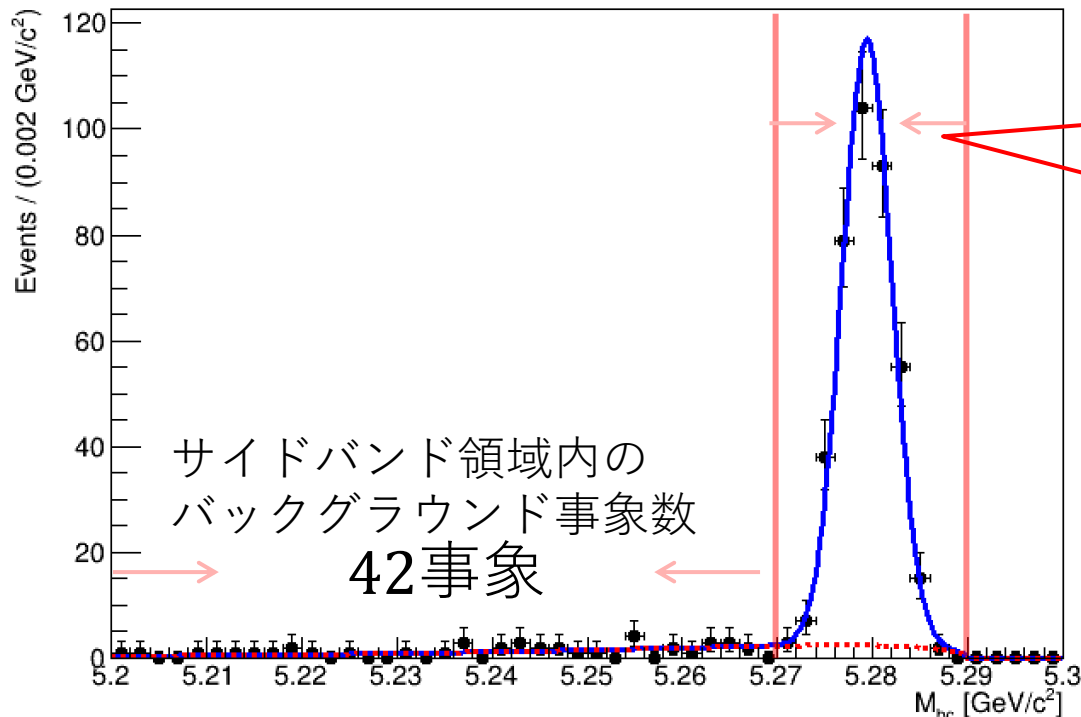
信号事象：Gaussian

バックグラウンド事象：ARGUS 関数 (赤色点線)

信号事象とバックグラウンド事象を合わせた関数を青い実線で描いている

$$f_{\text{Gaussian}}(M_{bc}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{\sqrt{(M_{bc} - \mu)^2}}{2\sigma^2}\right)$$

$$f_{\text{Argus}}(M_{bc}) = M_{bc} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{M_{bc}}{E_{\text{beam}}}\right)^2} \cdot \exp\left[c \cdot \left(1 - \left(\frac{M_{bc}}{E_{\text{beam}}}\right)^2\right)\right]$$



信号領域内の
信号事象数： 376 ± 20 事象
バックグラウンド事象数： 20 ± 9 事象

$B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ モードは非常にバックグラウンドが少ない

実験データの $\Delta z'$ 分布をフィットする

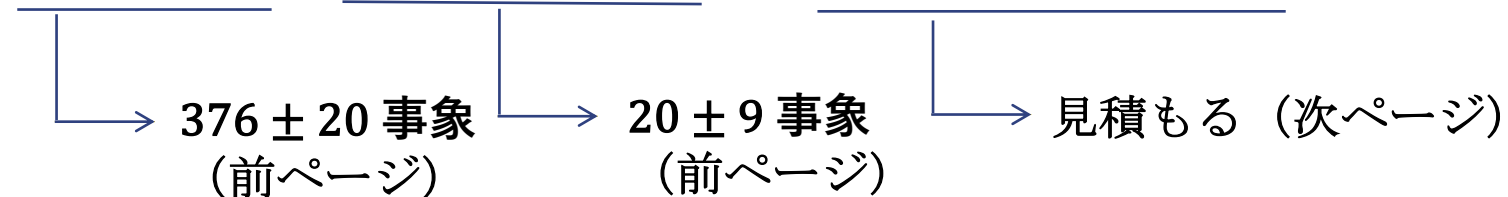
$\Delta z'$ 分布のフィットには

$$\mathcal{P}(\Delta z') = \frac{N_{\text{signal}}}{N_{\text{total}}} \mathcal{P}_{\text{signal}}(\Delta z') + \frac{N_{\text{background}}}{N_{\text{total}}} \mathcal{P}_{\text{background}}(\Delta z') \quad \text{という}$$

確率密度関数(Probability Density Function : PDF)を使用する。

求めたい信号事象の $\Delta z'$ 分布 $\mathcal{P}_{\text{signal}}(\Delta z')$ はDouble Gaussianで表現

フィットに必要な他の変数： N_{signal} や $N_{\text{background}}$ 、 $\mathcal{P}_{\text{background}}(\Delta z')$



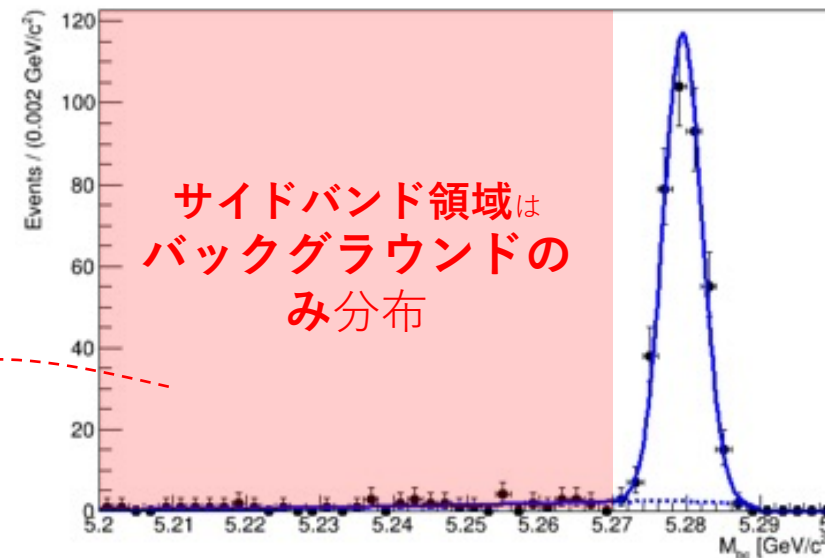
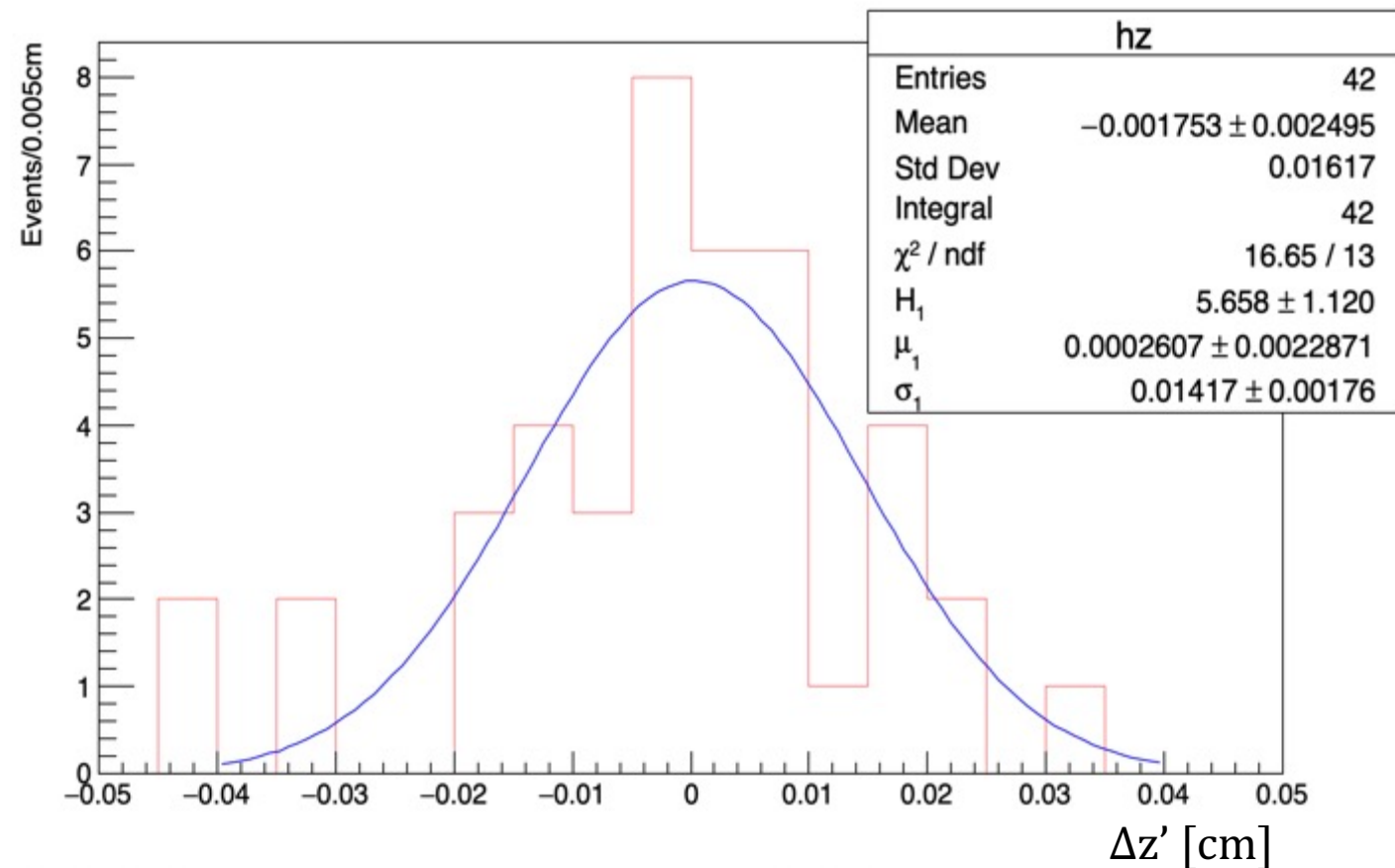
実験データでのバックグラウンド事象の分解能の見積もり

$$\mathcal{P}(\Delta z') = \frac{N_{\text{signal}}}{N_{\text{total}}} \mathcal{P}_{\text{signal}}(\Delta z') + \frac{N_{\text{background}}}{N_{\text{total}}} \mathcal{P}_{\text{background}}(\Delta z')$$

$\mathcal{P}_{\text{background}}(\Delta z')$ は M_{bc} 分布のサイドバンド領域の事象で決定

M_{bc} 分布

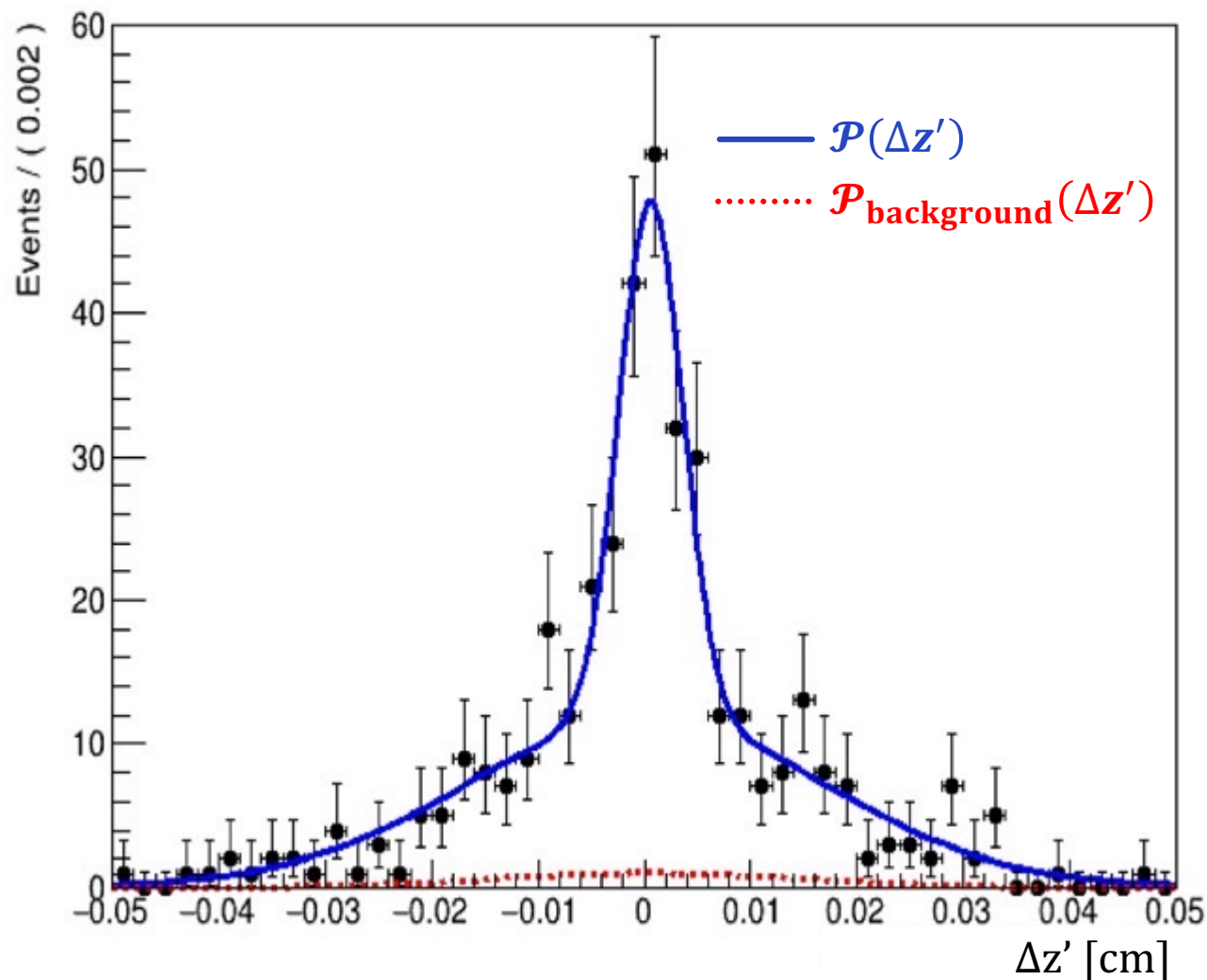
サイドバンド領域での $\Delta z'$ 分布



Gaussianでフィットした結果
 $\mathcal{P}_{\text{background}}(\Delta z')$ のパラメーター：
 $\mu(\text{mean}) : 2.6 \pm 22 \mu\text{m}$
 $\sigma : 142 \pm 18 \mu\text{m}$

実験データの $\Delta z'$ 分布から求める崩壊点分解能

$\Delta z'$ 分布



$$\text{フィット関数 } \mathcal{P}(\Delta z') = \frac{N_{\text{signal}}}{N_{\text{total}}} \mathcal{P}_{\text{signal}}(\Delta z') + \frac{N_{\text{background}}}{N_{\text{total}}} \mathcal{P}_{\text{background}}(\Delta z')$$

系統誤差はバックグラウンドの量と分布関数の不定性を考慮した。

B中間子崩壊点分解能は
 $138 \pm 9(\text{stat}) \pm 1(\text{syst}) \mu\text{m}$ と得た

シミュレーションでの
 $\Delta z'$ 分布から求めた分解能($150.9 \pm 1.3 \mu\text{m}$)と
誤差の範囲で一致。

1. Belle II 実験
2. 時間依存 CP 非保存と B 中間子崩壊点再構成
3. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (シミュレーション)
4. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の B 中間子崩壊点分解能の評価 (シミュレーション)
5. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の事象再構成 (実験データ)
6. $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊の B 中間子崩壊点分解能の評価 (実験データ)

7. まとめ

まとめ

● $B^+ \rightarrow J/\psi K^{*+}$ 崩壊を用いた **B 中間子崩壊点の分解能を評価した**

✓ $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ からビーム衝突点に向け逆向きに外挿する手法での B 中間子崩壊点

● シミュレーション

① $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ による崩壊点 : $15.9 \pm 0.5 \mu\text{m}$

② $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ から衝突点(IP)に外挿して得た崩壊点 : $171.5 \pm 1.0 \mu\text{m}$

• $\Delta z'$ 分布の広がりから求めた分解能 : $150.9 \pm 1.3 \mu\text{m}$ ~ ②の分解能

● 実験データ

• $\Delta z'$ 分布から求めた分解能 ~ ②の分解能 : $138 \pm 9(\text{stat}) \pm 1(\text{syst}) \mu\text{m}$

● $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ から逆向き外装による B 中間子崩壊点の位置分解能は

シミュレーションが実験データの状況をよく再現していることがわかった

