

$B^{\pm} \rightarrow \psi' \pi^0 K^{\pm}$ 崩壊の研究

奈良女子大学大学院 人間文化研究科
物理学専攻 高エネルギー物理学研究室
石塚 規友紀

2012.2.16(Thu.)

目次

- ▶ 研究の背景
- ▶ 目的
- ▶ 実験装置(KEKB加速器、Belle検出器)
- ▶ 解析手順
- ▶ $B^{\pm} \rightarrow \psi' \pi^0 K^{\pm}$ 再構成
 - $\psi' \pi^0$ 不変質量の精度
 - 予想される ΔE 分布
 - 実験データ中の $B^{\pm} \rightarrow \psi' \pi^0 K^{\pm}$ 候補事象
 - $B^{\pm} \rightarrow \psi' \pi^0 K^{\pm}$ 信号事象の抽出
 - $B^{\pm} \rightarrow \psi' \pi^0 K^{\pm}$ 事象中の $M(K^{\pm} \pi^0)$ 分布
 - 崩壊分岐比の算出と評価
- ▶ まとめ

標準模型のクォークとハドロン

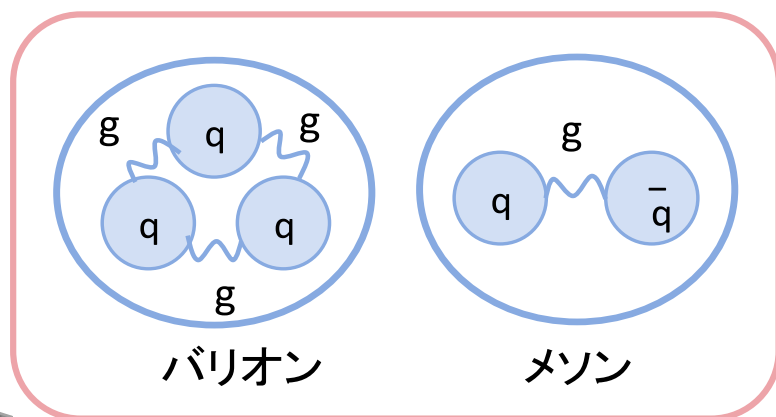
- ▶ 物質の基本となる構成要素
 - 6種類のクォーク
 - 6種類のレプトン
- ▶ その違いの一つは、強い相互作用に関わるかどうか
- ▶ 強い相互作用をするクォークは単体で存在できず、ハドロンと総称される粒子を形成

クォーク

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$$

レプトン

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$



q:クォーク

g:グルーオン

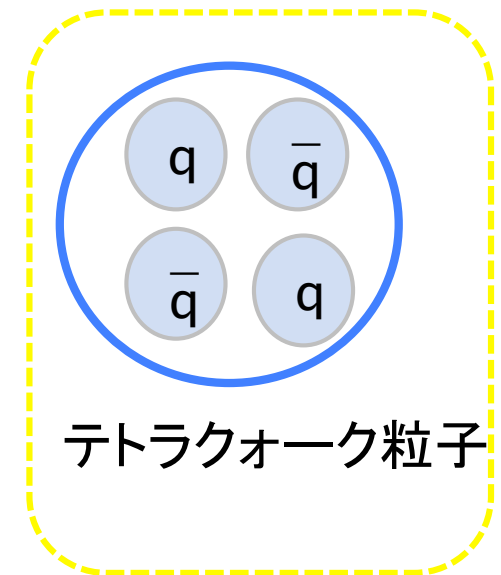
ハドロン

バリオン:クォーク3つ(qqq)から構成される

メソン:クォーク・反クォーク(q \bar{q})から構成される

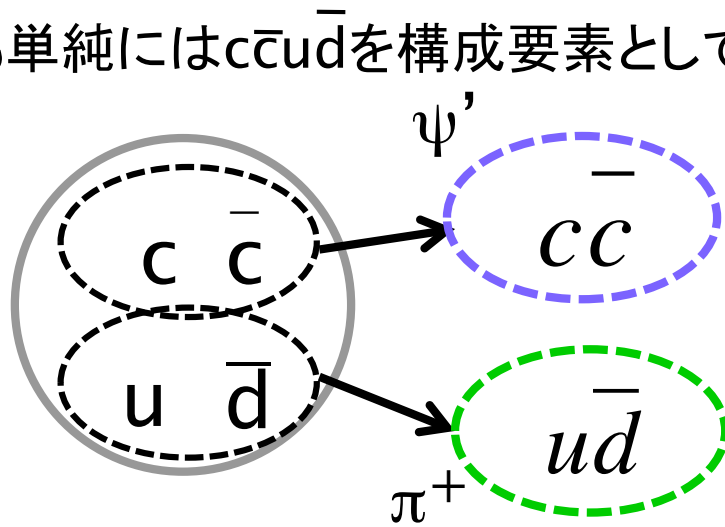
QCDとハドロン

- ▶ 1990年代までに発見されたハドロンは、バリオンもしくはメソン
→しかし、QCD(量子色力学)では、 $q\bar{q}q\bar{q}$ のような組み合わせも禁止されていない
- ▶ これらの新しい種類のハドロンをエキゾチックハドロンと呼ぶ
- ▶ 2000年代になり、加速器の高度化によってエキゾチックハドロンが発見されはじめた
- ▶ 例: $X(3872), Z(4430)^\pm$
 - 中でも $Z(4430)^\pm$ を取り上げる

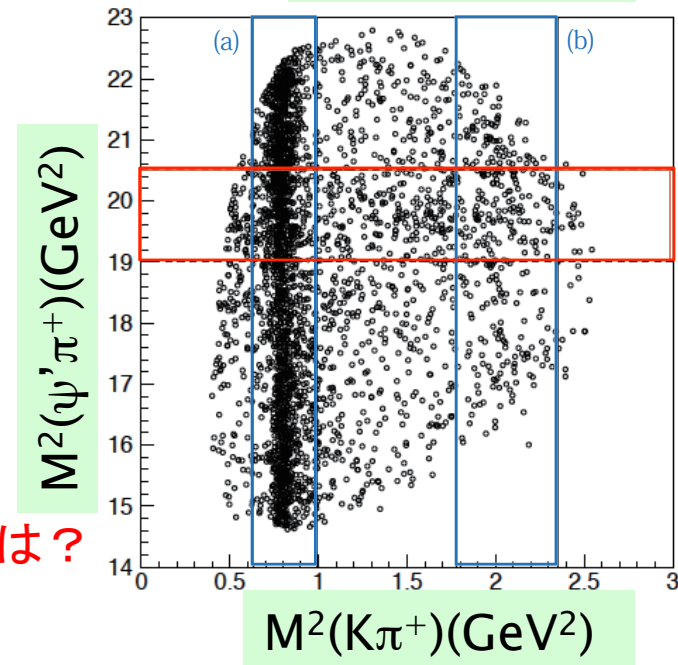
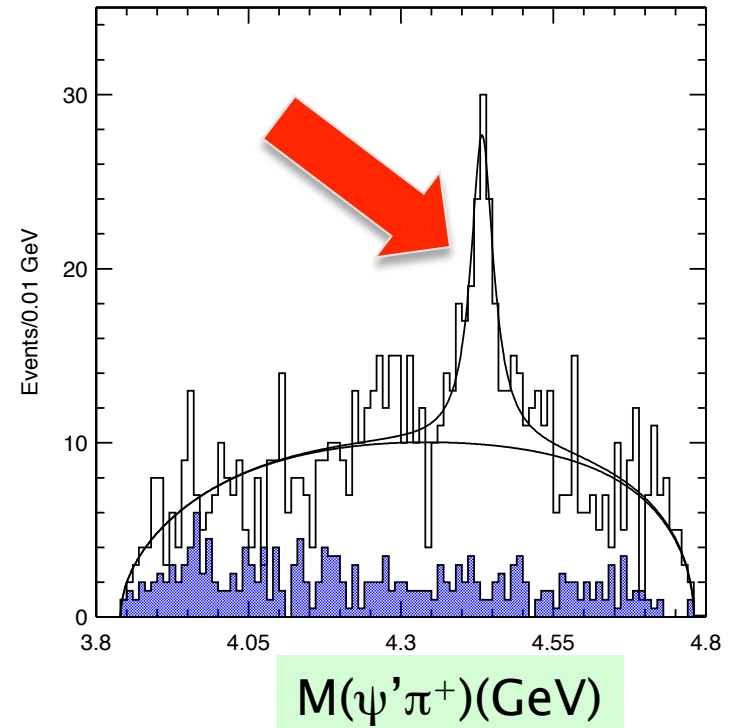


Z(4430)⁺の発見

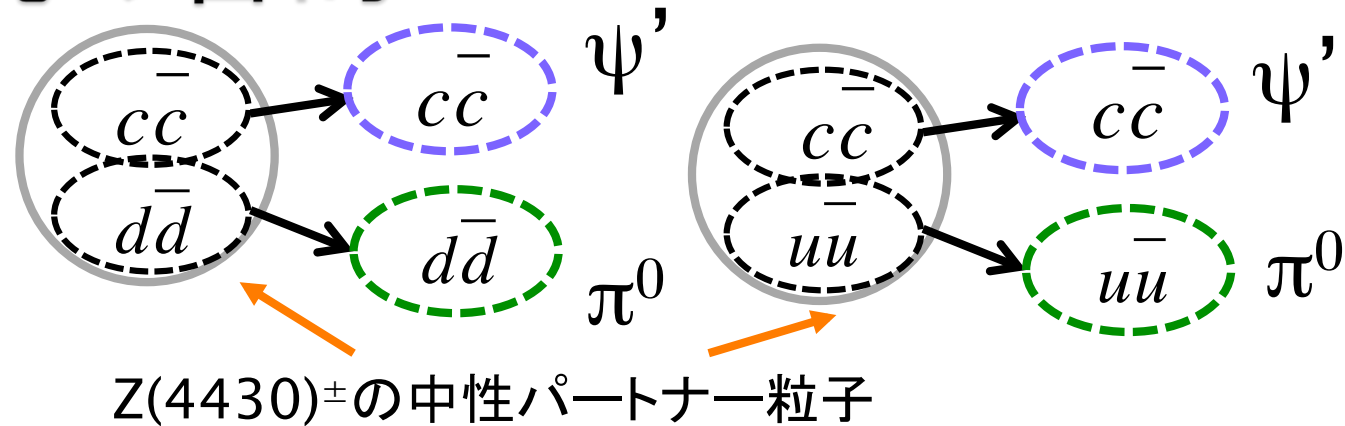
- ▶ B⁰ → ψ' π⁺ K⁻ 過程において発見 (2007, Belle)
- ▶ ψ' π⁺ 不変質量分布で 4430 MeV/c² にピーク
- ▶ 電荷をもち、c \bar{c} を含む
- ▶ 未知のチャームoniumではないことは明らか
- ▶ 最も単純には c \bar{c} u \bar{d} を構成要素としてもつ



➡ 中性 Z(4430) も存在するのでは？



本研究の目的

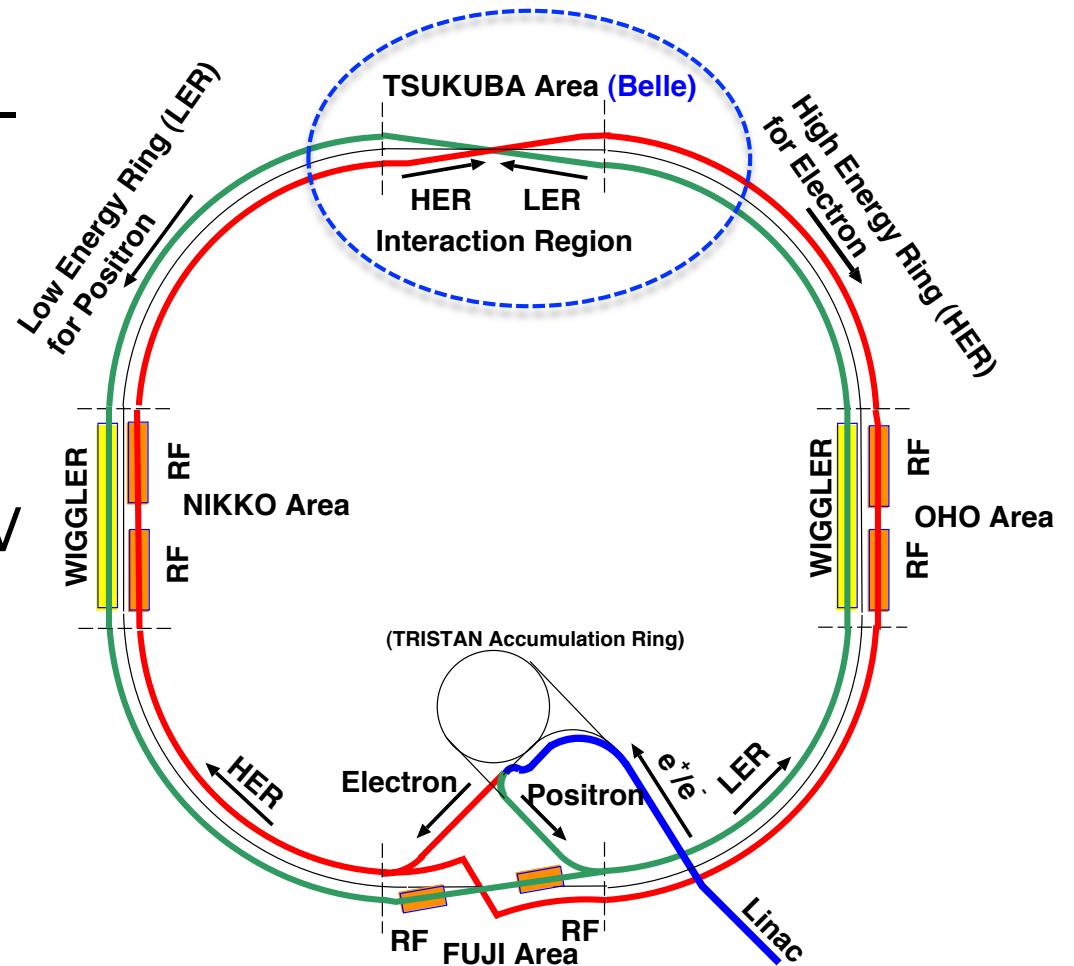


- ▶ $B^\pm \rightarrow \psi' \pi^0 K^\pm$ 崩壊過程を用い、 $\psi' \pi^0$ へ崩壊する共鳴の有無を調べる準備研究として、シミュレーションデータを用いて $\psi' \pi^0$ 不変質量が実験的に十分な精度で再構成可能か調べた。
- ▶ Belle 実験が蓄積した 2.77×10^8 B 中間子対生成事象のデータ (全体の $1/3$) を使用し、 $B^\pm \rightarrow \psi' \pi^0 K^\pm$ 過程の信号抽出を行った。
- ▶ 既知の B 中間子崩壊過程である $B^\pm \rightarrow \psi' K^*(892)^\pm$ が占める寄与について調べた。

実験装置

KEKB加速器 非対称エネルギー電子・陽電子衝突型の加速器

- ◆ 茨城県つくば市(高エネルギー加速器研究機構)に建設
- ◆ 周長3km
- ◆ e^+ : 8.0 GeV
- ◆ e^- : 3.5 GeV
- ◆ 重心系エネルギー: 10.58 GeV
 $\Upsilon(4S)$ ($b\bar{b}$ 共鳴状態)
→ 大量のBB対生成
- ◆ 高いルミノシティを有する
 $2.11 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

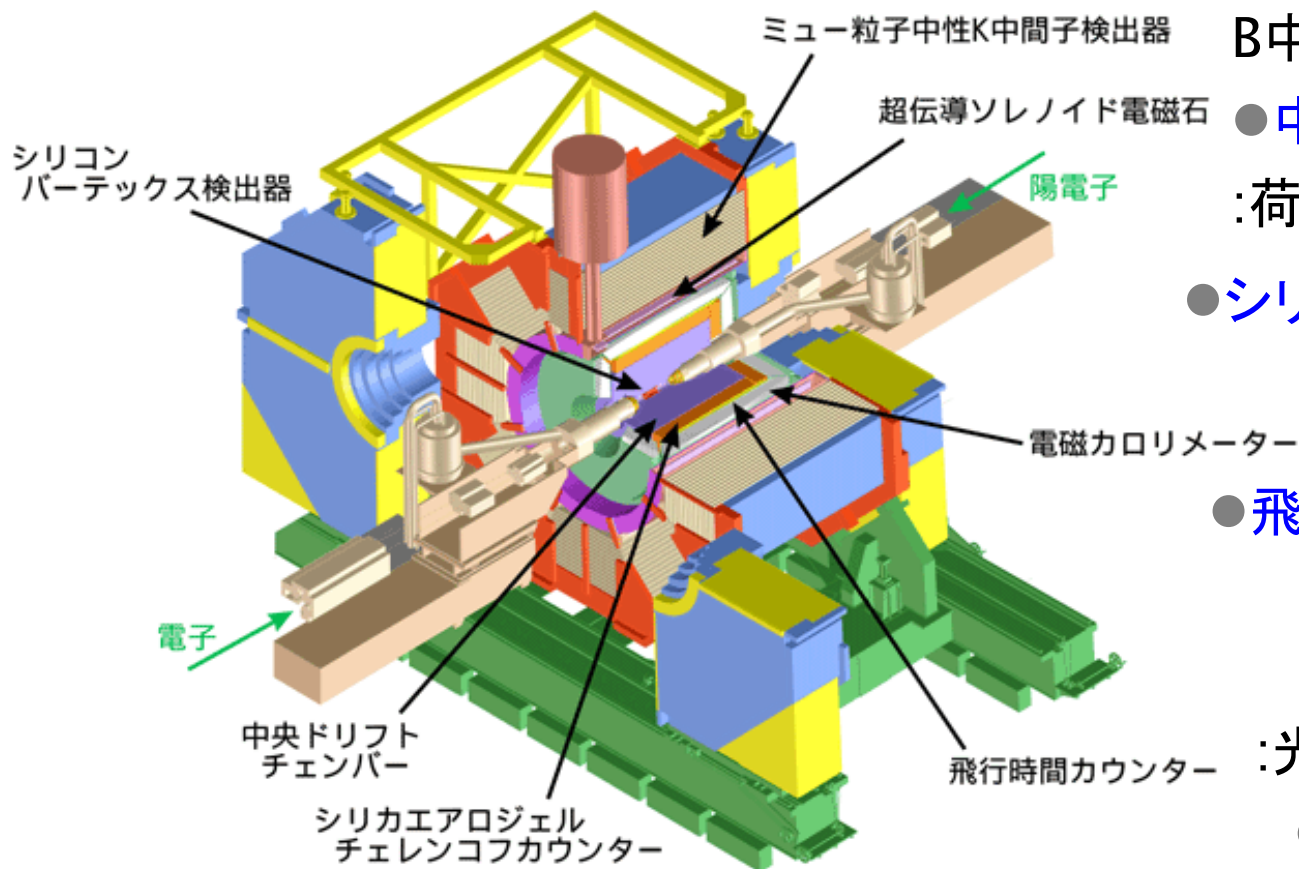


ルミノシティ: ビーム強度を表す。反応断面積と掛けてイベント数となる。

実験装置(続き)

Belle検出器

複数の検出器を組み合わせ、生成された粒子を検出する



●シリコンバーテックス検出器:

B中間子の崩壊点検出

●中央ドリフトチェンバー

:荷電粒子の飛跡、運動量測定

●シリカエアロジェルチェレンコフ
カウンター:K/ π 識別

●飛行時間カウンター:荷電粒子
の飛行距離測定(K/ π 識別)

●電磁カロリメーター

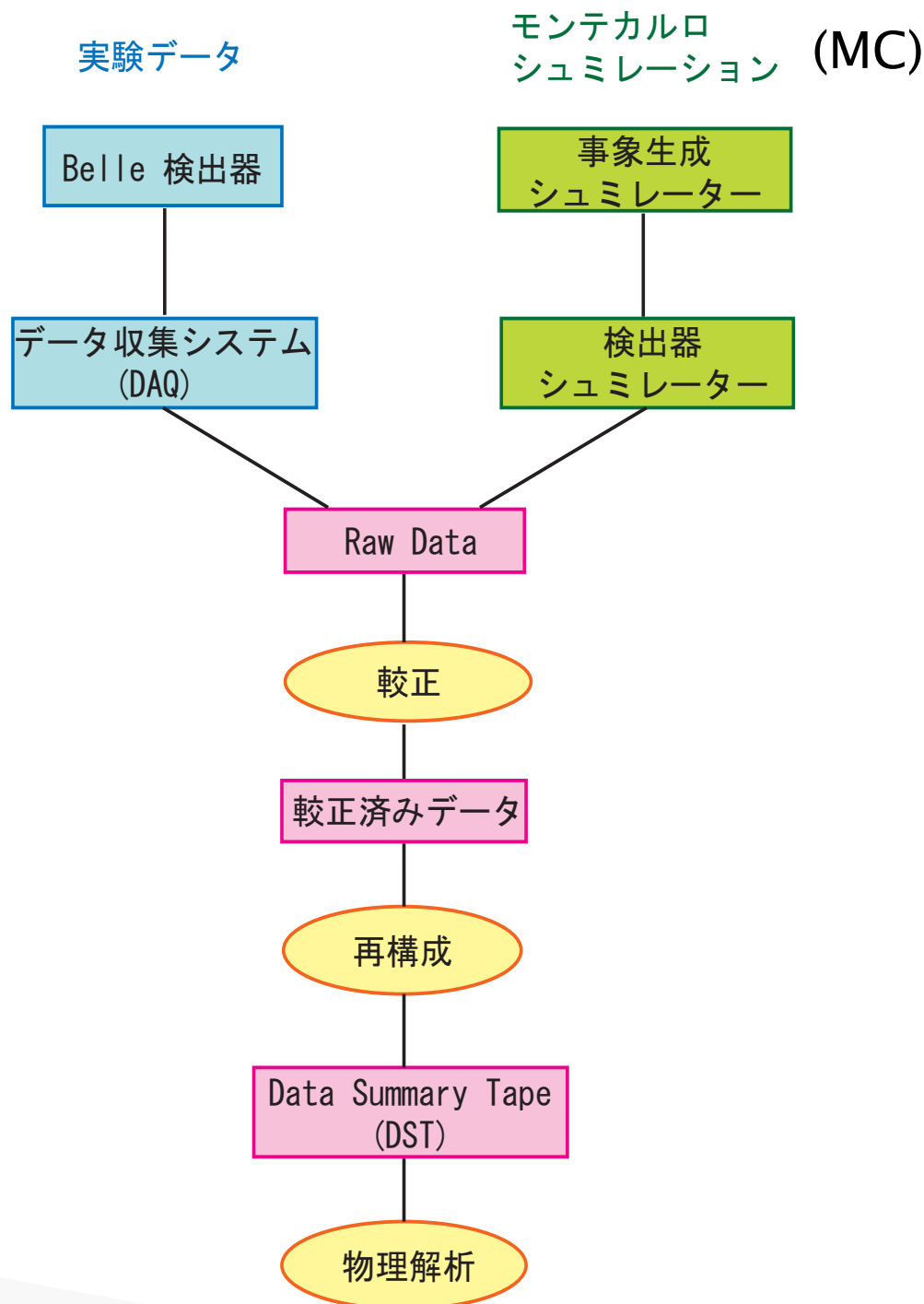
:光子、電子のエネルギー測定

● μ 粒子中性K中間子検出器

: K_L 、 μ 粒子検出

解析手順

- MC:電子・陽電子衝突で発生する粒子の四元運動量を理論の予言や既知の確率分布にしたがって疑似乱数を用いて生成。生成された粒子が検出器内でどのような信号を形成するのかシミュレーションする。
- 測定器の電気信号を数値化したもの(raw data)をもとに、粒子の再構成を行う。
- 実験データとシミュレーションは同じ書式になっており、データ処理と解析処理は同じプログラムを使用できる。
- 両者の結果を比較する。



解析に使用したデータ

▶ 実験データ

- 2000年から2004年にBelleで収集した 2.77×10^8 B中間子対生成事象(全体の1/3)

▶ Signal MC

- $B^\pm \rightarrow \psi' \pi^0 K^\pm$ 三体崩壊
 - 終状態の3つのハドロンが位相空間中に均等に分布
- $B^\pm \rightarrow Z(4430)^0 K^\pm$
 - $Z(4430)^0 \rightarrow \psi' \pi^0$
 - 質量と幅は $Z(4430)^\pm$ と同じと仮定

▶ 各100,000事象

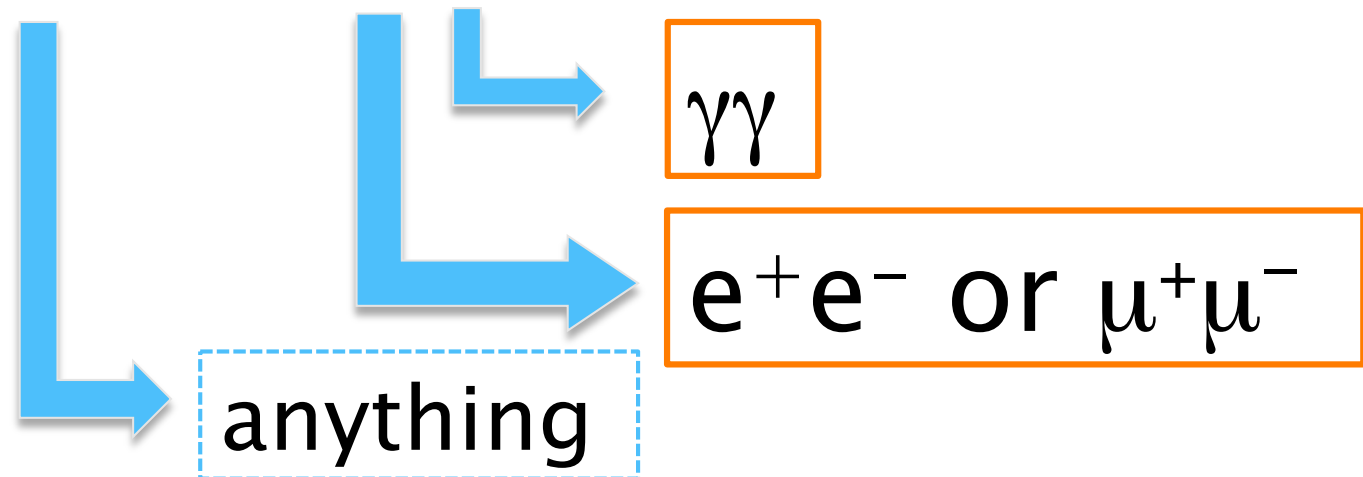
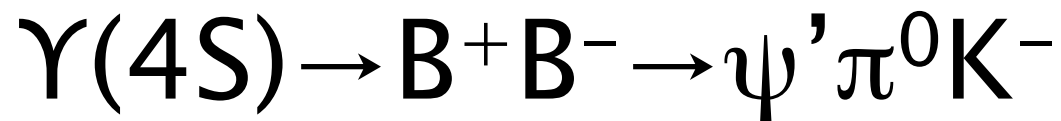
▶ $B \rightarrow \psi' X$ 事象MC(Inclusive ψ' MC)

- 実験データの100倍に対応する事象数

$\psi' \pi^0$ 不変質量の再構成が正しくできるか、分解能のチェック

既知の過程の分布を確かめる

B再構成の手順



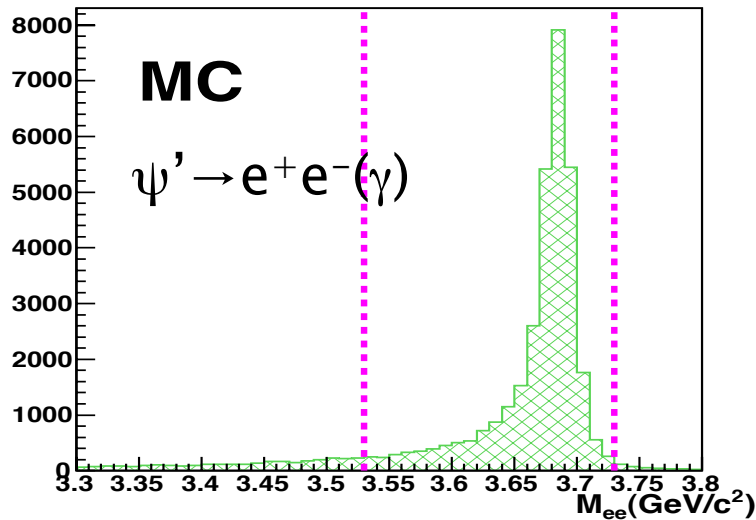
以降、

- ψ' 再構成
- π^0 再構成
- K選別

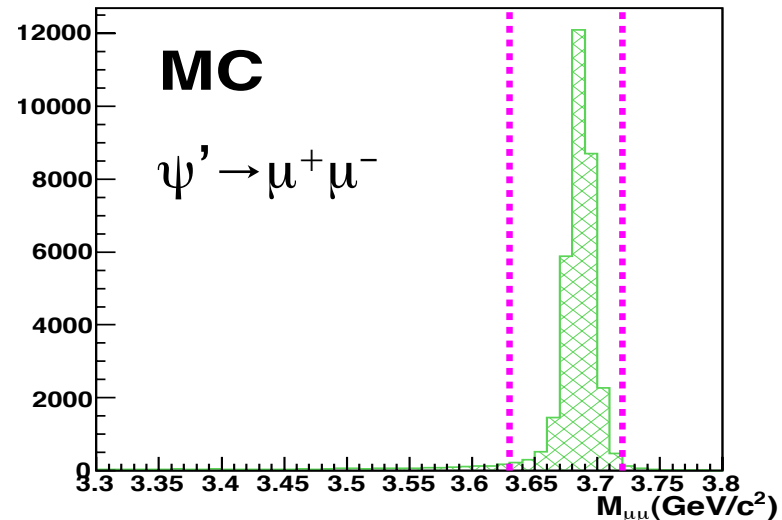
の順に事象選別について説明する。

事象選別 (ψ' 再構成:MC,data)

di-electron mass



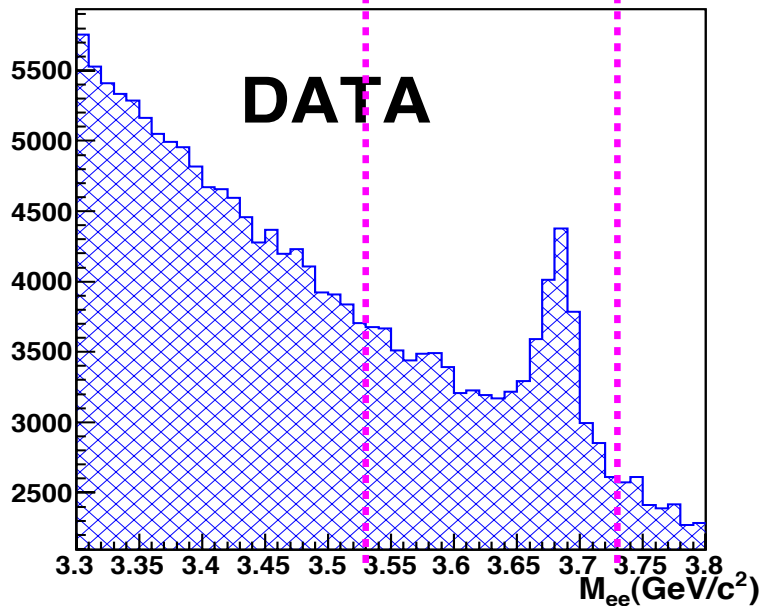
di-muon mass



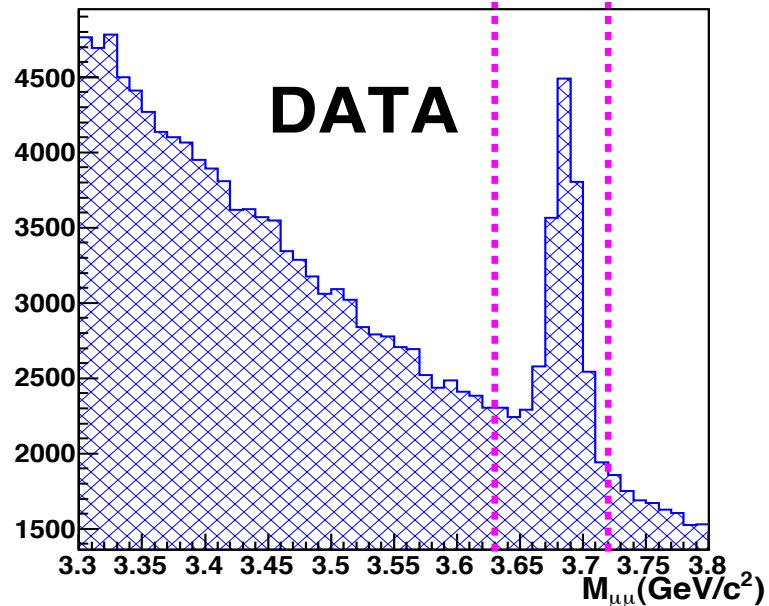
点線の領域内を ψ' として選んだ

$\psi' \rightarrow e^+e^-$
 (γ) :制動放射を考慮して、 e^+e^- の運動量ベクトルから0.05rad以内の γ の運動量を加える

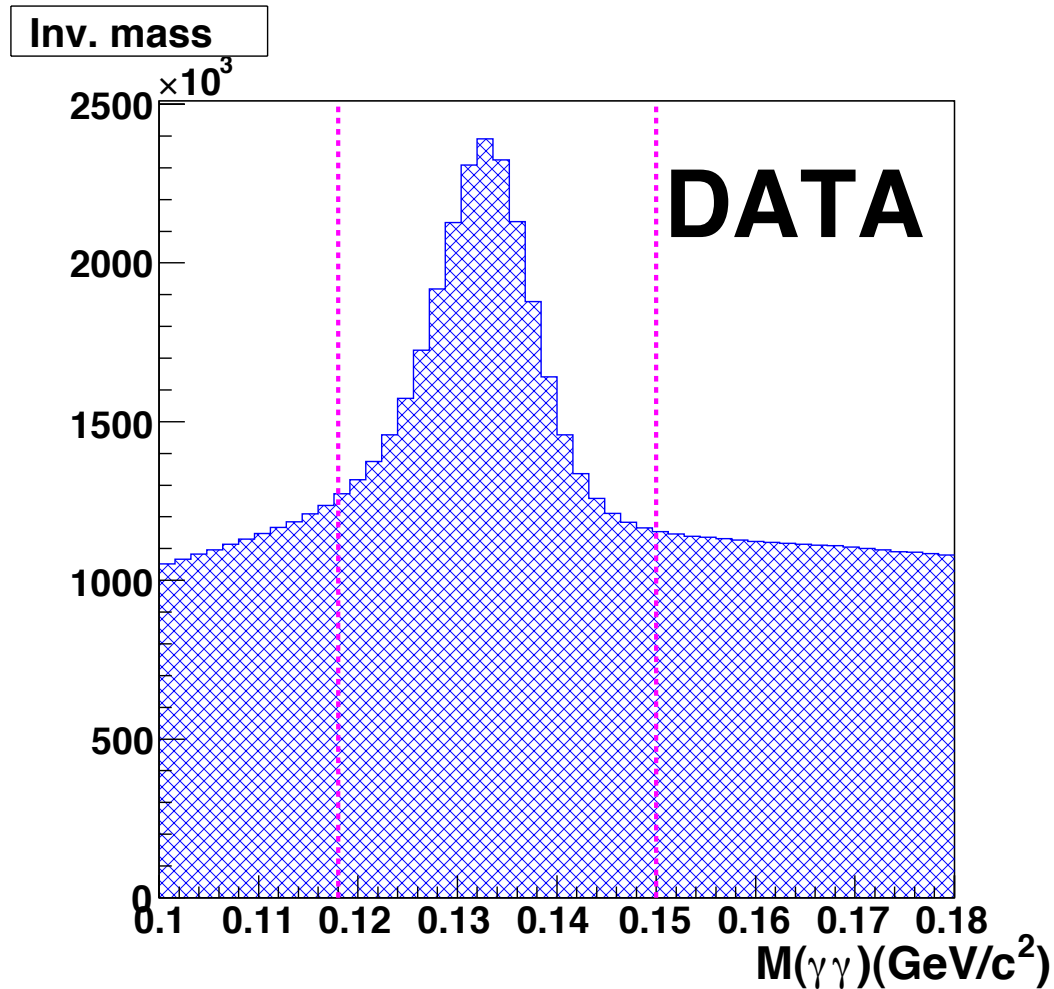
di-electron mass



di-muon mass



π^0 再構成(data)



- ▶ $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- ▶ 実験室系での γ 対の運動量 $> 0.1 \text{ GeV}/c$
- ▶ γ のエネルギー E_γ に条件を課す
 - $E_\gamma > 50 \text{ MeV}$ (Barrel)
 - $E_\gamma > 100 \text{ MeV}$ (Endcaps)
- ▶ $0.118 < M_{\gamma\gamma} < 0.150 \text{ GeV}/c^2$

事象選別(運動量分解能の改善)

- ▶ ψ' : Vertex fit, Mass constraint fit
- ▶ π^0 : Mass constraint fit

Vertex fit:

荷電粒子の飛跡が同じ崩壊点から発生する束縛条件をつけて最小二乗法を適用し、最も確からしい終状態粒子の崩壊点と運動量を求める

Mass constraint fit:

不変質量が既知の質量と一致する束縛条件をつけて最小二乗法を適用し、最も確からしい終状態粒子の運動量を求める

K選別

- シリカエアロジェルチェレンコフカウンター (ACC): 光電子数,
 - 飛行時間カウンター (TOF): 飛行時間,
 - 中央ドリフトチェンバー (CDC): エネルギー損失
- 各情報を組み合わせて粒子を識別

Likelihood

$$L = L^{\text{ACC}} \times L^{\text{TOF}} \times L^{\text{CDC}}$$

→ K, π それぞれの likelihood (L_K, L_π) が与えられる

Likelihood Ratio

$$LR(K : \pi) = \frac{L_K}{L_K + L_\pi} > 0.4$$

B再構成に用いる運動学的変数

- ▶ B中間子の再構成が正しくされているかを確認する
 - $\Upsilon(4S)$ 静止系

$$M_{bc} = \sqrt{E_{beam}^2 - \left| \vec{p}_{\psi'}^* + \vec{p}_{\pi^0}^* + \vec{p}_K^* \right|^2}$$

$$\Delta E = (E_{\psi'}^* + E_{\pi^0}^* + E_K^*) - E_{beam}$$

E_{beam} : ビームエネルギー

$\vec{p}_{\psi'}^*, E_{\psi'}^*$: ψ' の運動量とエネルギー

$\vec{p}_{\pi^0}^*, E_{\pi^0}^*$: π^0 の運動量とエネルギー

\vec{p}_K^*, E_K^* : K の運動量とエネルギー

正しい組み合わせなら
B中間子のmass
(5.28GeV/c²)に一致

正しい組み合わせなら
0に一致

➔ $M_{bc} > 5.2\text{GeV}, |\Delta E| < 0.2\text{GeV}$ を選ぶ

最良B候補選別

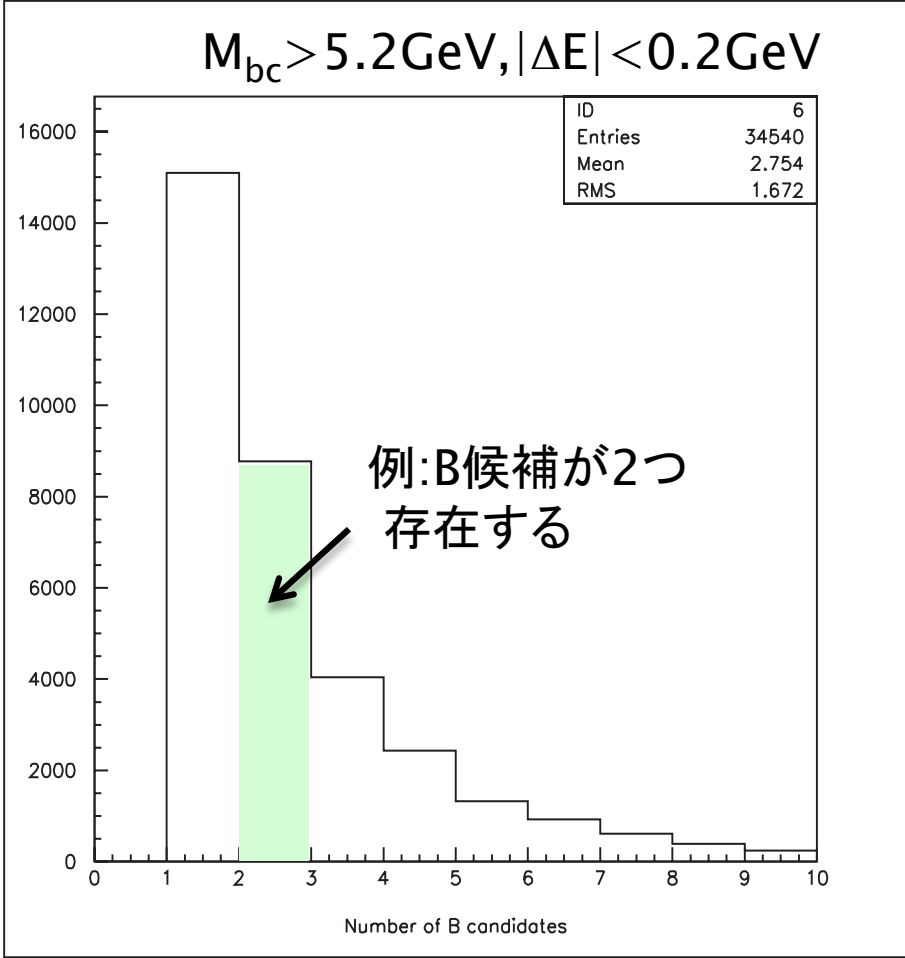
- ▶ 他方のB崩壊から生じた粒子(特に γ)も検出されているので、再構成したB候補が1事象中に複数存在する場合があります
- 最良と思われるものを一つ選ぶ。

Best candidate selection

: χ^2 が最小のものを選ぶ

$$\chi^2 = \left(\frac{M_{l+l-} - M_{\psi'}}{\sigma_{l+l-}} \right)^2 + \left(\frac{M_{\gamma\gamma} - M_{\pi^0}}{\sigma_{\gamma\gamma}} \right)^2$$

- M_{ll} : レプトン対の不変質量
- $M_{\psi'}$: ψ' の質量
- $\sigma_{\psi'}$: ψ' の質量分解能
- $M_{\gamma\gamma}$: 光子対の不変質量
- M_{π^0} : π^0 の質量
- σ_{π^0} : π^0 の質量分解能

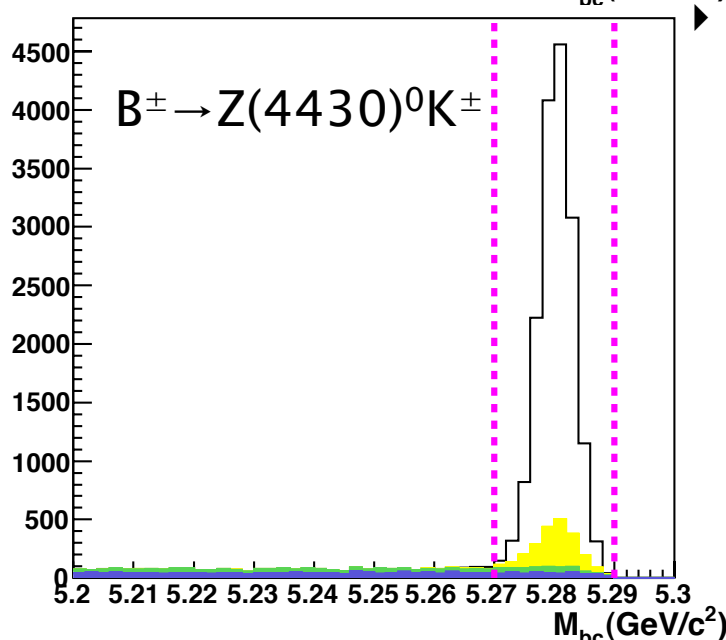
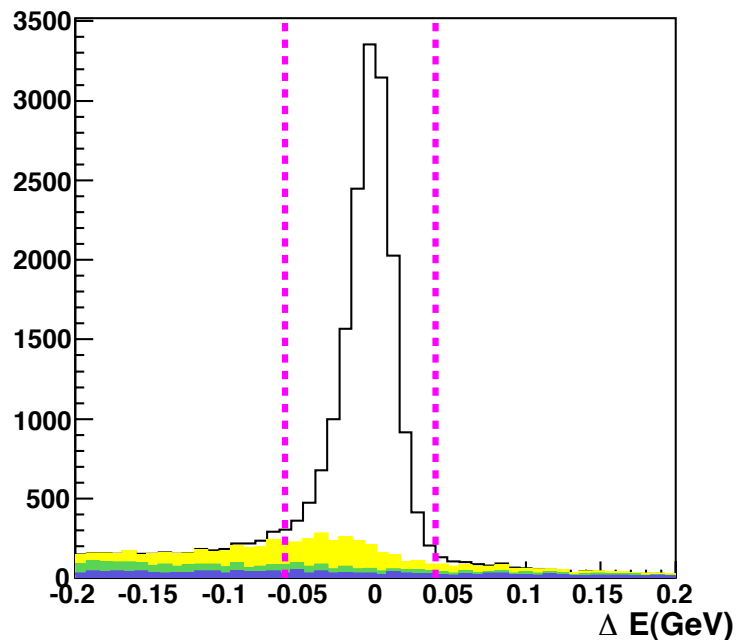
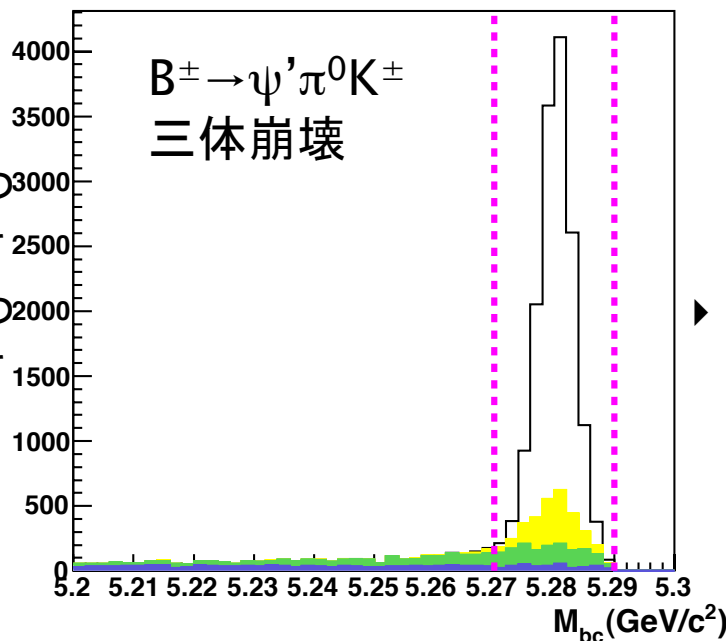
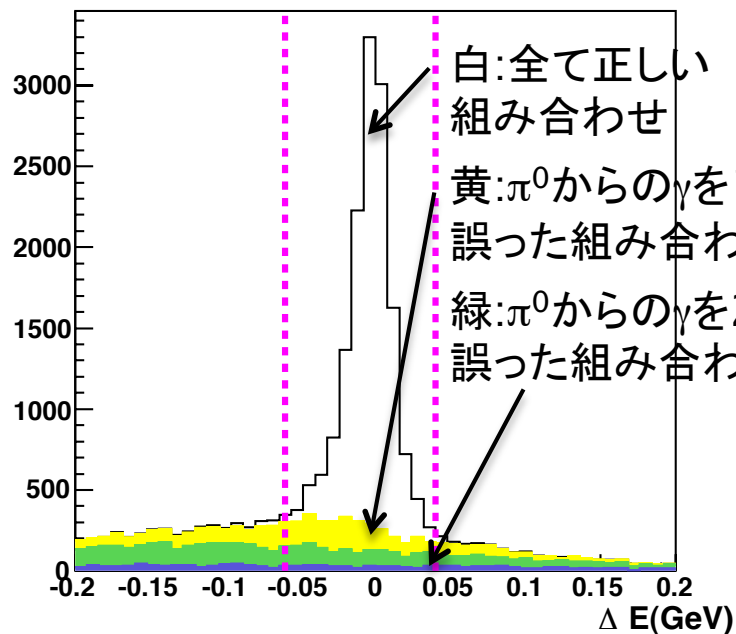


崩壊モード	分解能 σ (MeV)
$\psi' \rightarrow e^+e^-$	16.0
$\psi' \rightarrow \mu^+\mu^-$	10.6
$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$	5.3

$B^\pm \rightarrow \psi' \pi^0 K^\pm$ 再構成(MC)

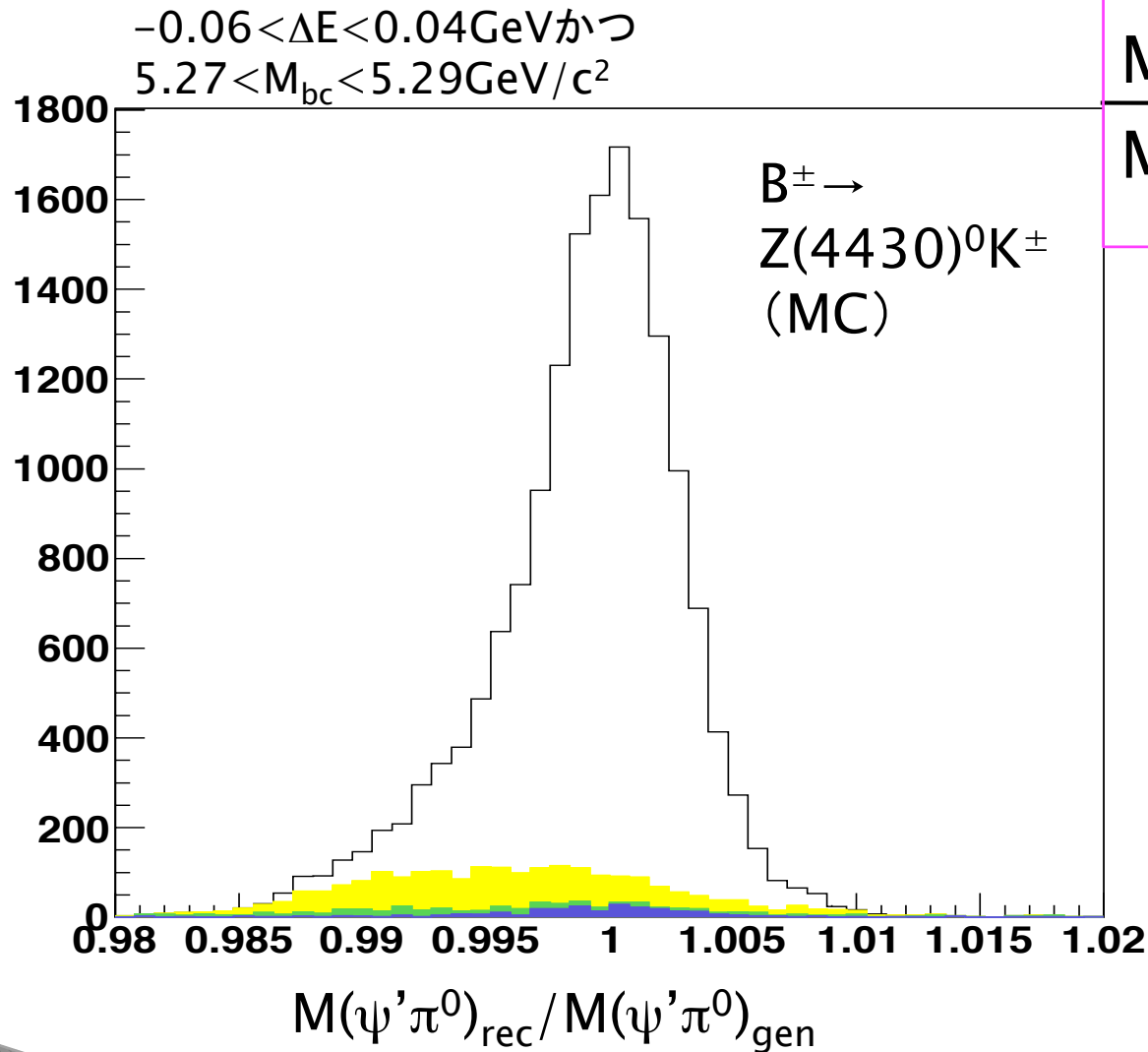
$$M_{bc}: -0.06 < \Delta E < 0.04 \text{ GeV}$$

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



- ▶ 誤った組み合わせで再構成されている事象(特に黄や緑)が存在する。
- ▶ 誤ったγを組み合わせたことによる $M(\psi' \pi^0)$ への影響を確認する。

$\psi'\pi^0$ 不変質量の精度



$M(\psi'\pi^0)$ (B再構成の段階)

$M(\psi'\pi^0)$ (事象生成の段階)

$M(\psi'\pi^0)$ を分解能
 0.34%で再構成可能
 である

→ 誤った γ を組み合わ
 せたことによる $M(\psi'\pi^0)$
 への影響は小さい

$M(\psi'\pi^0)_{\text{rec}}$: B再構成の段階,
 $M(\psi'\pi^0)_{\text{gen}}$: 事象生成の段階

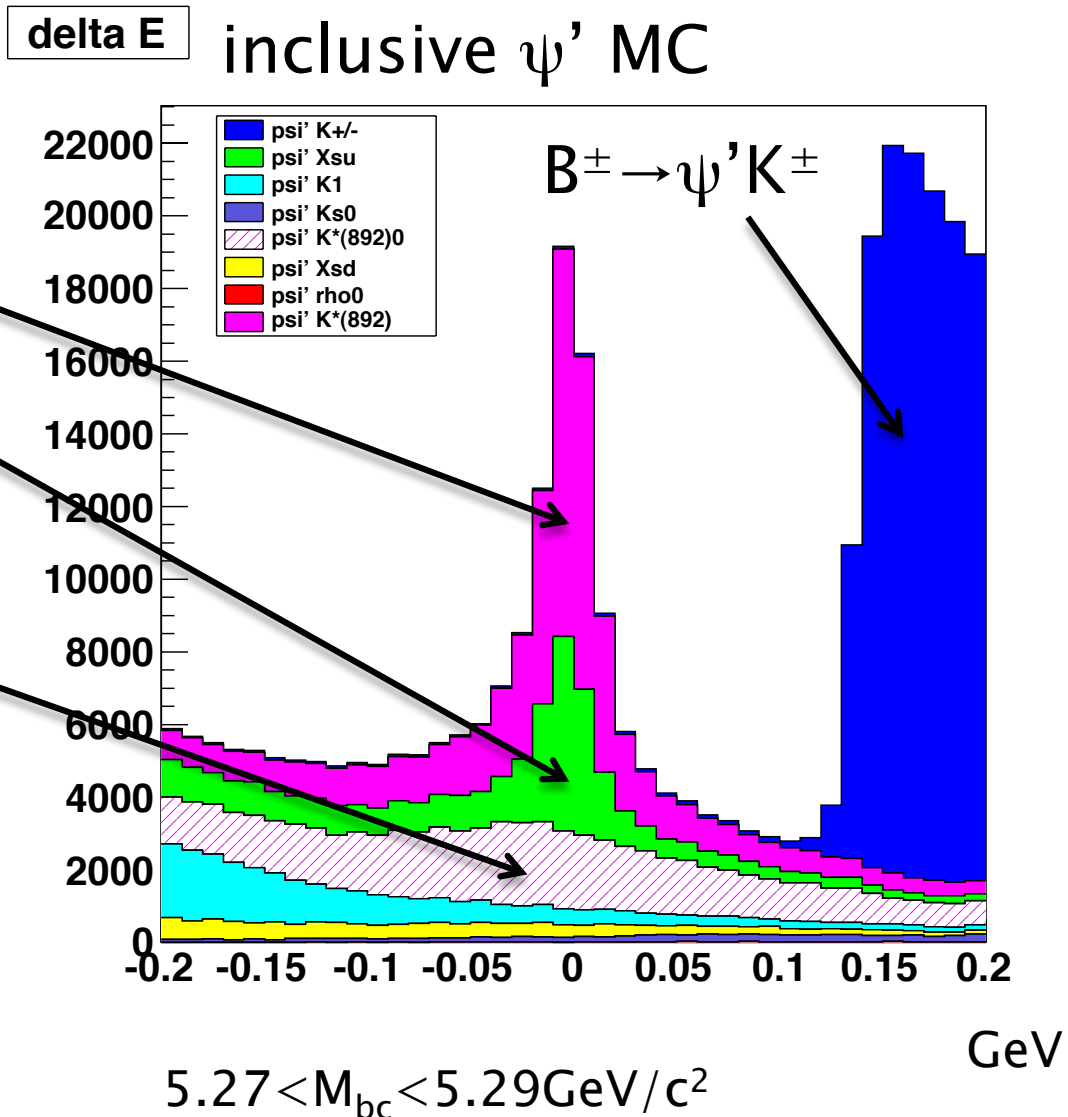
予想される ΔE 分布

※ $B^\pm \rightarrow Z(4430)^0 K^\pm$ は含まない

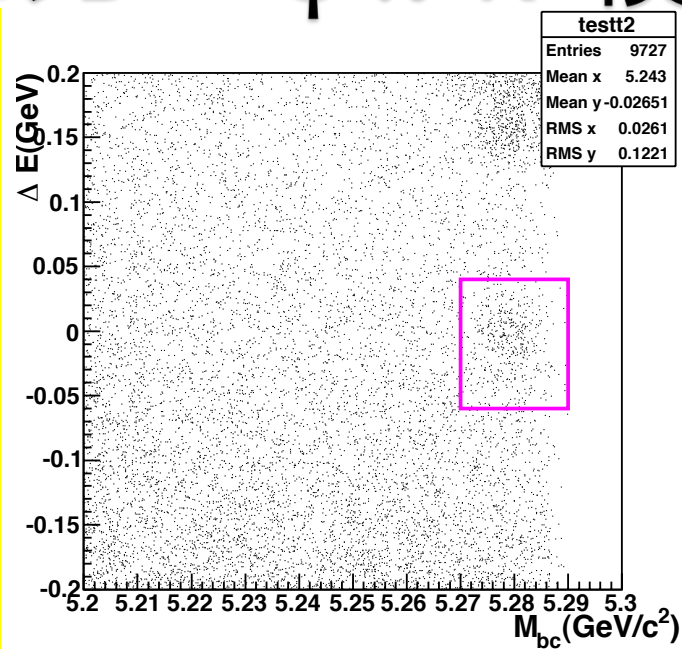
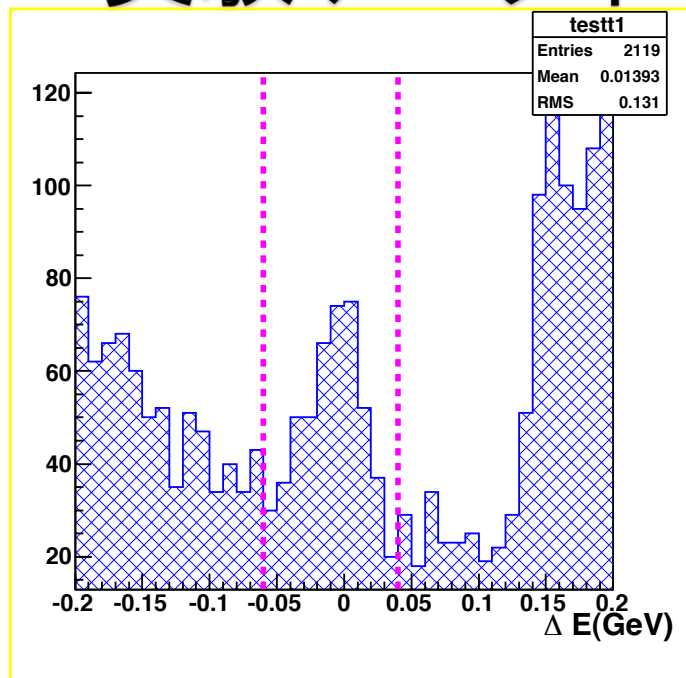
- ▶ $\Delta E=0$ 付近にピークがある崩壊モード
 - $B^\pm \rightarrow \psi' K^*(892)^\pm$
 - $B \rightarrow \psi' X_{su}$
 - ・ いずれも終状態は $\psi' \pi^0 K^\pm$ になる
- ▶ $B^0 \rightarrow \psi' K^*(892)^0$
- ▶ (主なバックグラウンド)



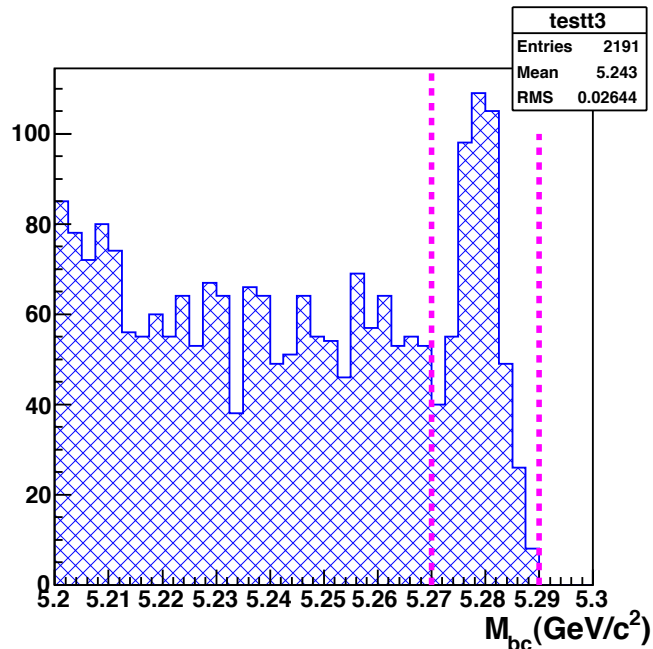
実験データへのフィットを行った



実験データ中の $B^\pm \rightarrow \psi' \pi^0 K^\pm$ 候補事象



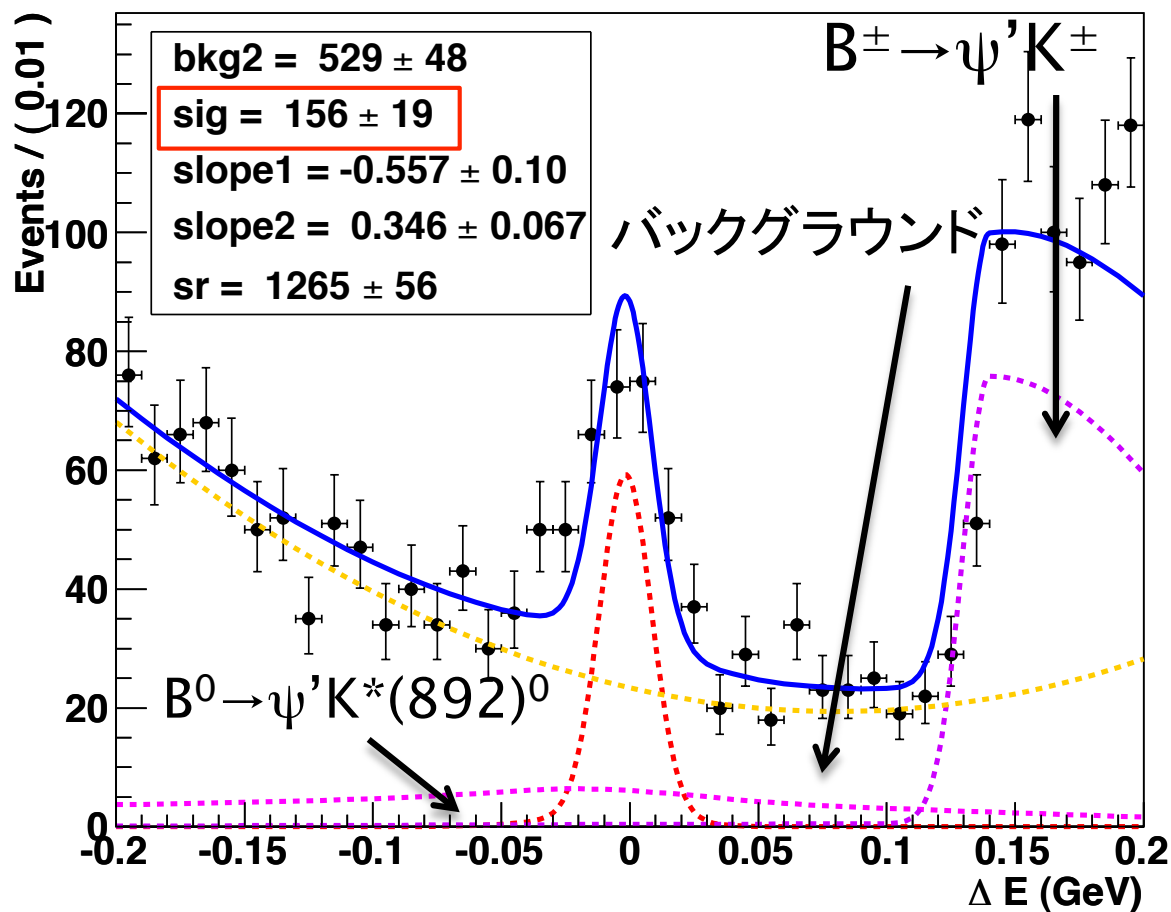
$M_{bc}: -0.06 < \Delta E < 0.04 \text{ GeV}$
 $\Delta E: 5.27 < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}/c^2$



▶ 信号が現れるべき領域に明瞭なピークがある。

$B^\pm \rightarrow \psi' \pi^0 K^\pm$ 信号事象の抽出

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



- ▶ シグナル部分は Logarithmic gaussian と Gaussian を足し合わせた関数でフィットした
- ▶ バックグラウンドの関数は MC を用いて決めた

シグナル事象数
 $N_{sig} = 156 \pm 19$

$B^\pm \rightarrow \psi' \pi^0 K^\pm$ 信号事象の内訳

シグナル事象数

$$N_{\text{sig}} = 156 \pm 19$$

シグナル事象の内訳は

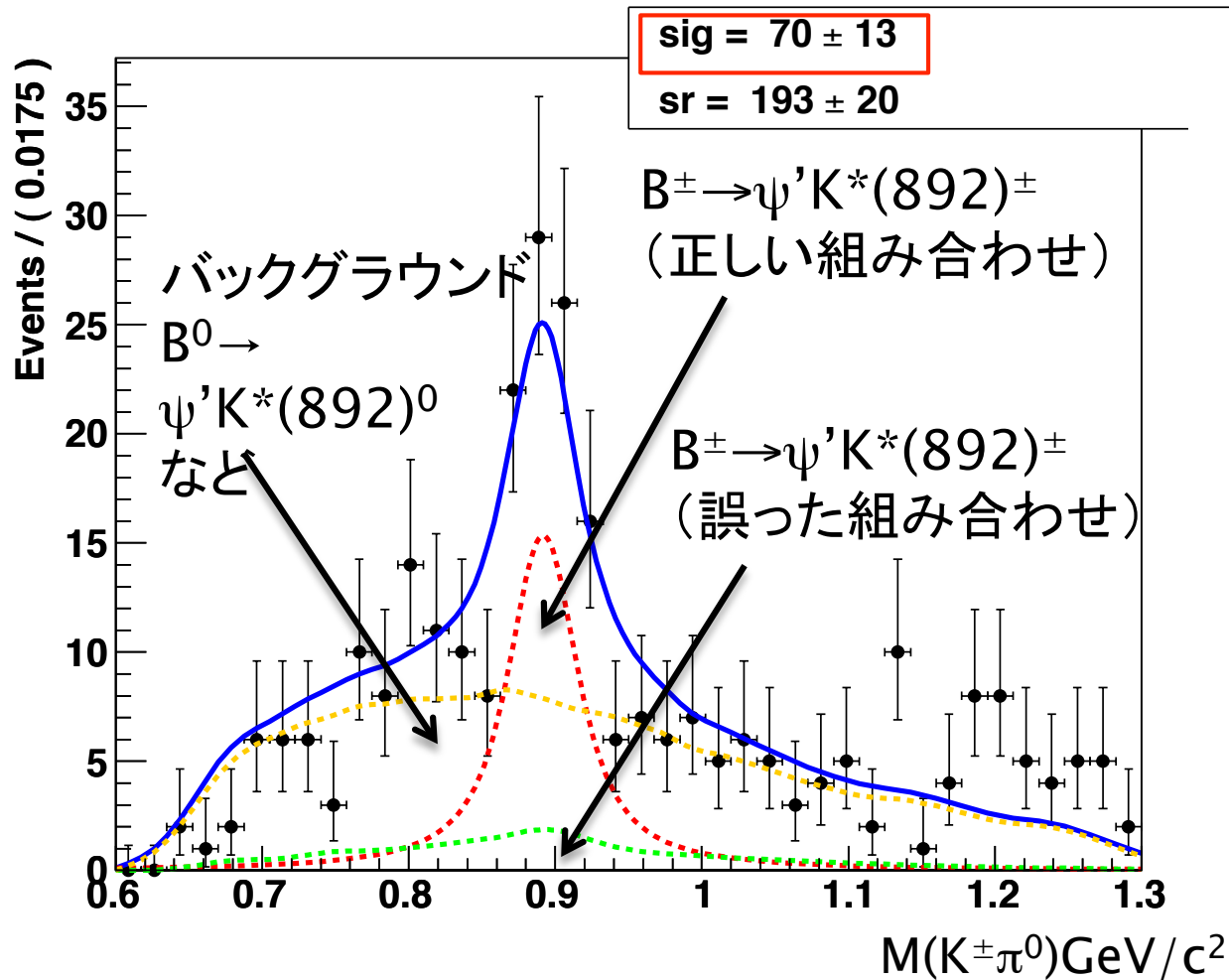
- $B^\pm \rightarrow \psi' K^*(892)^\pm$,
- $B^\pm \rightarrow \psi' K^*(1430)^\pm$,
- $B^\pm \rightarrow \psi' \pi^0 K^\pm$ (共鳴状態でない三体崩壊),
- $B^\pm \rightarrow Z(4430)^0 K^\pm$ (存在するならば)

の総和



$B^\pm \rightarrow \psi' K^*(892)^\pm$ 過程に着目して、 $M(K^\pm \pi^0)$ 分布で信号抽出し崩壊分岐比を算出することで解析手順の正当性を確認する

$B^\pm \rightarrow \psi' \pi^0 K^\pm$ 事象中の $M(K^\pm \pi^0)$ 分布



- ▶ 実験データへのフィット
- ▶ シグナル部分はBreit-Wigner式にGaussianを畳み込み積分した関数でフィット



$B^\pm \rightarrow \psi' K^*(892)^\pm$
信号事象数
 $N = 70 \pm 13$

$-0.03 < \Delta E < 0.03 \text{ GeV}$
 $5.27 < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}/c^2$

崩壊分岐比の算出と評価

$$Br(B^\pm \rightarrow \psi' K^*(892)^\pm) = \frac{N_{sig}}{N_{B^\pm} \cdot \epsilon \cdot Br(\psi' \rightarrow l^+ l^-) \cdot Br(K^*(892)^\pm \rightarrow K^\pm \pi^0)}$$

$B^\pm \rightarrow \psi' K^*(892)^\pm$ ($K^*(892)^\pm \rightarrow K^\pm \pi^0$)事象数	Nsig	70 ± 13
検出効率	ϵ	$9.98 \pm 0.06\%$
B^\pm の数	N_{B^\pm}	$(2.77 \pm 0.03) \times 10^8$
$\psi' \rightarrow l^+ l^-$ 崩壊分岐比	$Br(\psi' \rightarrow l^+ l^-)$	$1.543 \pm 0.097\%$
$K^*(892)^\pm \rightarrow K^\pm \pi^0$ 崩壊分岐比	$Br(K^*(892)^\pm \rightarrow K^\pm \pi^0)$	33.3%

$$= (4.93 \pm 0.92) \times 10^{-4} \quad \text{※} 2.77 \times 10^8 B \text{中間子対}$$

$\psi' \rightarrow e^+ e^- \text{ or } \mu^+ \mu^-$

PDG2011はBabar(2005),CLEO(2001)の平均:

$$Br(B^\pm \rightarrow \psi' K^*(892)^\pm) = (6.1 \pm 1.2) \times 10^{-4}$$

$\psi' \rightarrow e^+ e^- \text{ or } \mu^+ \mu^- \text{ or } J/\psi \pi^+ \pi^-$
 $K^*(892)^\pm \rightarrow K^\pm \pi^0, K^0 \pi^\pm$

▶ 誤差の範囲で一致

まとめ

- ▶ $B^{\pm} \rightarrow \psi' \pi^0 K^{\pm}$ 崩壊過程の再構成プログラムを作成した。
- ▶ シミュレーションデータを用いて $M(\psi' \pi^0)$ を分解能0.34%で再構成できることがわかった。
- ▶ 2000年から2004年までに収集した 2.77×10^8 B中間子対生成事象データ(全体の1/3)を用いて、 $B^{\pm} \rightarrow \psi' \pi^0 K^{\pm}$ 崩壊事象を再構成し、シグナル数を $N_{\text{sig}} = 156 \pm 19$ と得た。
- ▶ このうち、崩壊分岐比が既知である $B^{\pm} \rightarrow \psi' K^*(892)^{\pm}$ 崩壊過程の寄与を抽出し、崩壊分岐比を $(4.93 \pm 0.92) \times 10^{-4}$ と得た。これはPDGの値と誤差の範囲で一致している。
- ▶ よって、本研究で確立した $B^{\pm} \rightarrow \psi' \pi^0 K^{\pm}$ 崩壊過程の再構成手順が正当であると確認できた。
- ▶ 今後、 $B^{\pm} \rightarrow \psi' \pi^0 K^{\pm}$ 崩壊における $\psi' \pi^0$ へ崩壊する未知の共鳴状態の探索へと研究を展開する可能性を明らかにした。

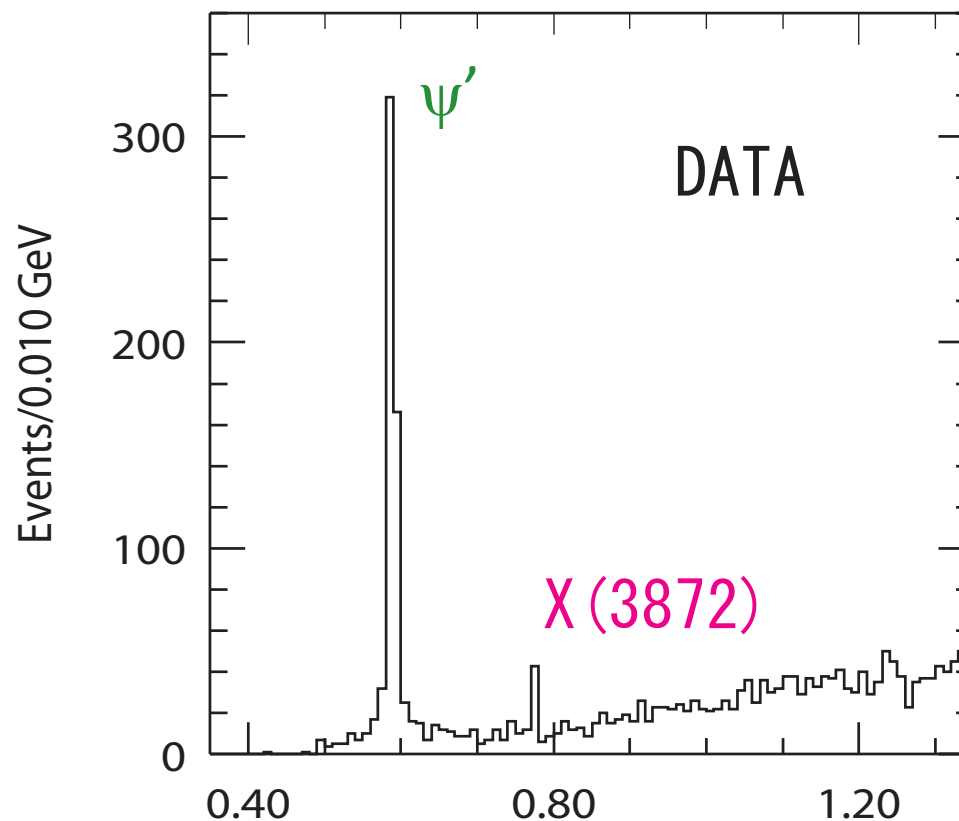
Backup

- ▶ BarBarでのZ(4430)-解析結果
- ▶ $B^{-,0} \rightarrow J/\psi \pi^- K^{0,+}$, $B^{-,0} \rightarrow \psi' \pi^- K^{0,+}$ 崩壊過程
 - 統計的有意性 1.9σ
 - $\text{Br}(B^- \rightarrow Z^- \bar{K}^0, Z^- \rightarrow J/\psi \pi^-) < 1.5 \times 10^{-5}$
 - $\text{Br}(B^0 \rightarrow Z^- K^+, Z^- \rightarrow J/\psi \pi^-) < 0.4 \times 10^{-5}$
 - $\text{Br}(B^- \rightarrow Z^- K^0, Z^- \rightarrow \psi' \pi^-) < 4.7 \times 10^{-5}$
 - $\text{Br}(B^0 \rightarrow Z^- K^+, Z^- \rightarrow \psi' \pi^-) < 3.1 \times 10^{-5}$
 - 95% confidence level
 - データ量が少ない
 - Belle: 660M BB, Babar: 455M BB
 - しかし、Belleの結果と矛盾しないと結論づけられている

X(3872)

ex1.X3872

- $B^\pm \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^- K^\pm$ (2003. Belle)
- BaBar, CDF, D0でも存在が確認された。
- 内部構造については議論されている
 - 未発見のチャームonium
 - 中間子分子

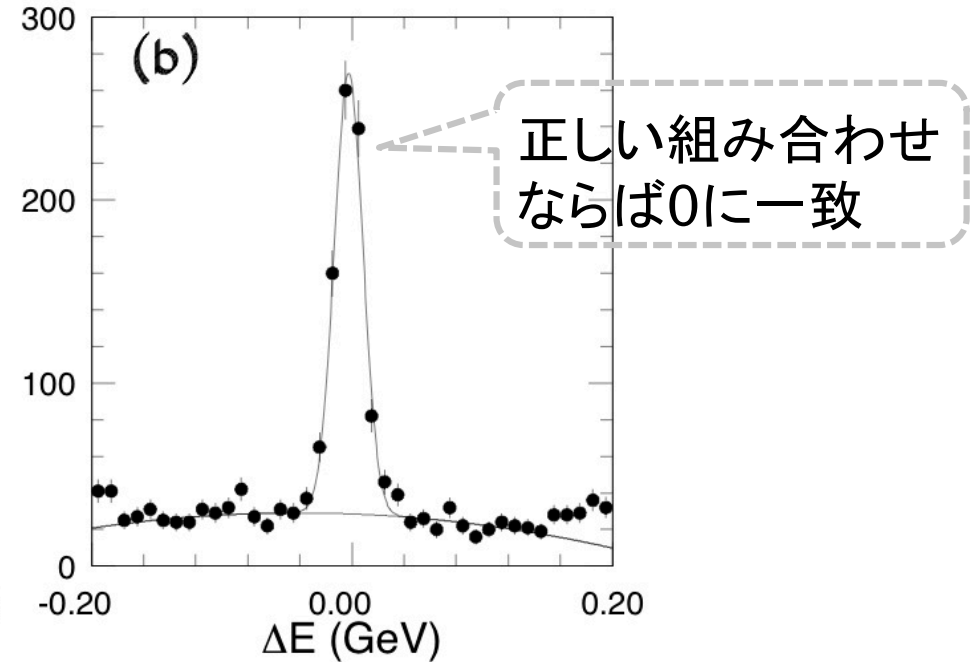
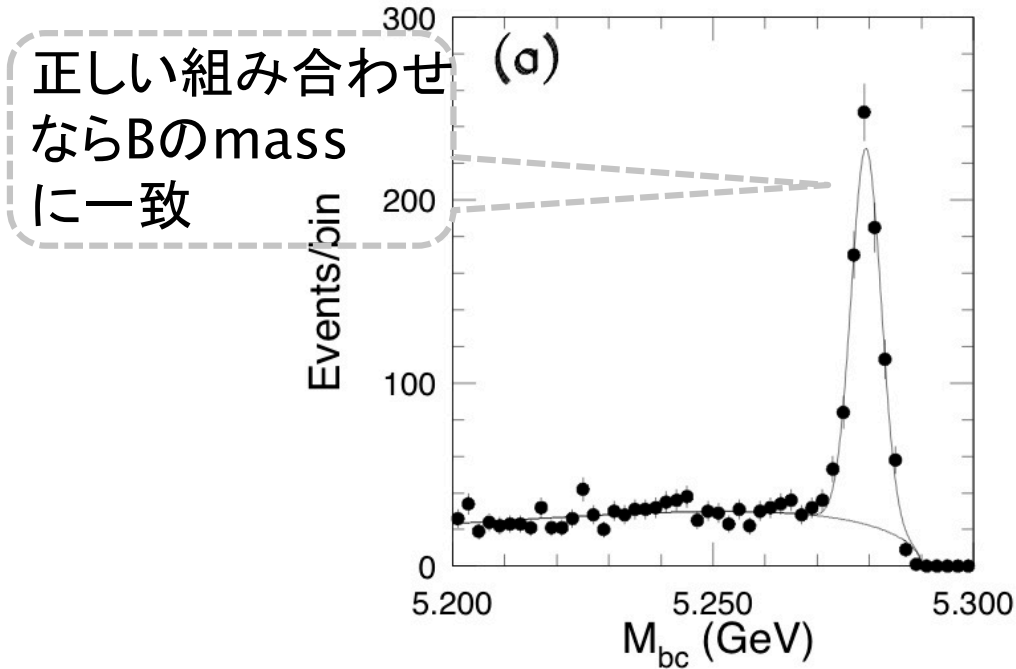


$M(\pi^+ \pi^- l^+ l^-) - M(l^+ l^-)$ (GeV)

$l^+ l^- \pi^+ \pi^-$ 不変質量と $\pi^+ \pi^-$ 不変質量の差の分布

$B^0 \rightarrow \psi' \pi^+ K^-$ 崩壊

PRL100,142001(2008)



$$\sqrt{(E_{beam})^2 - \left(\sum_i \vec{P}_i\right)^2} \equiv M_{bc}$$

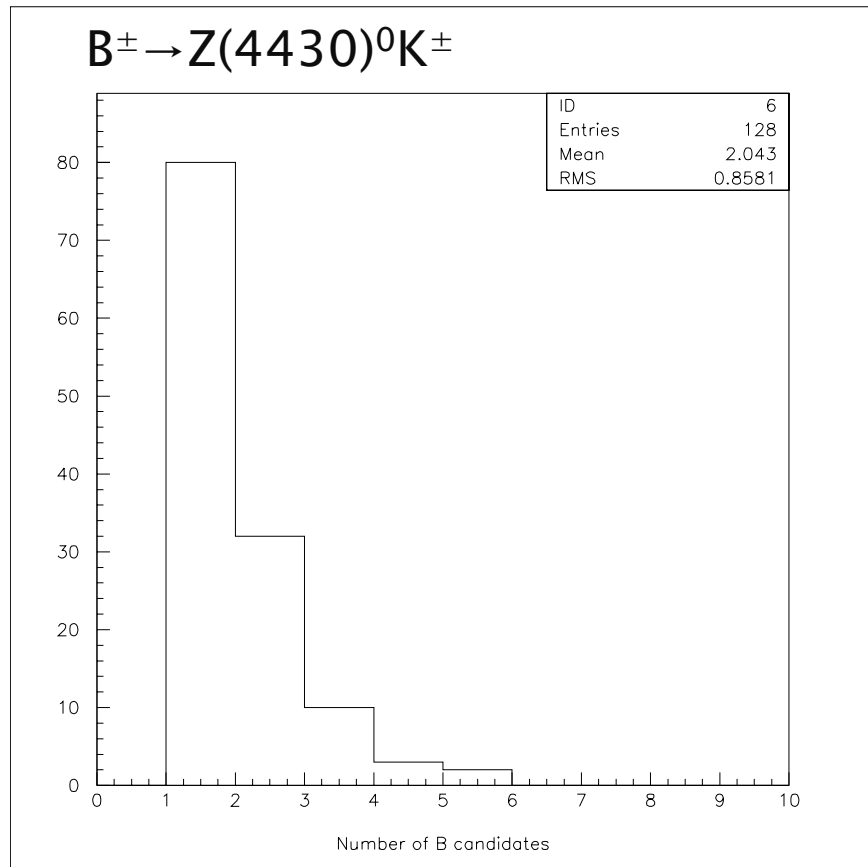
$$\sum_i E_i - E_{beam} \equiv \Delta E$$

$$E_{beam} = 5.28 \text{ GeV}$$

P_i : 崩壊後の粒子の運動量

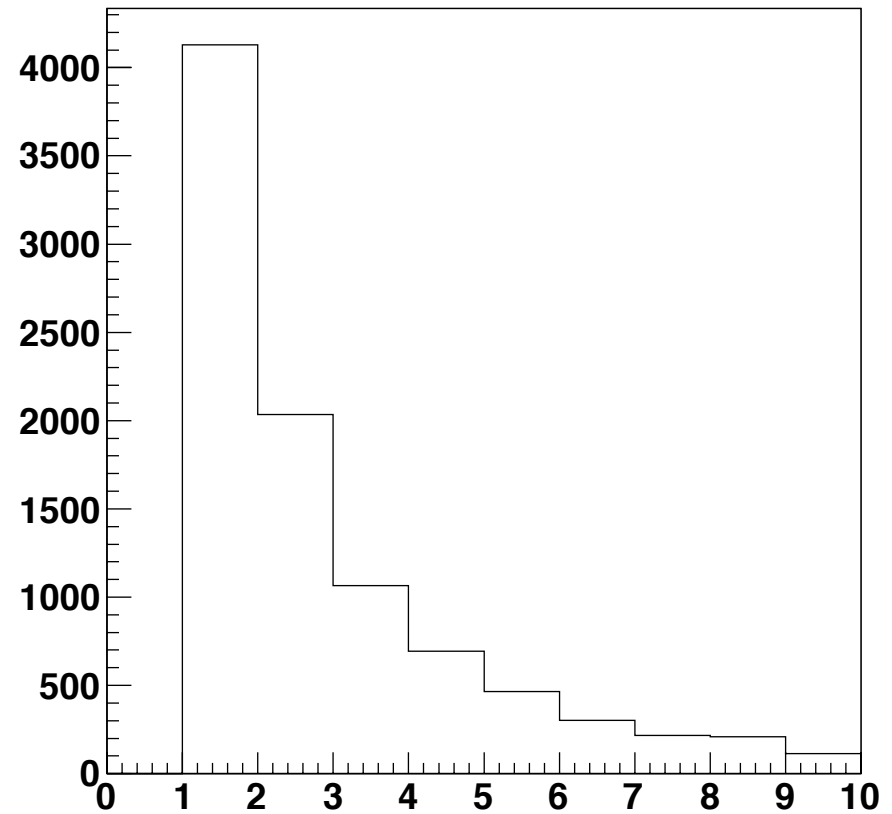
E_i : 崩壊後の粒子のエネルギー

Number of B candidates



Number of B candidates

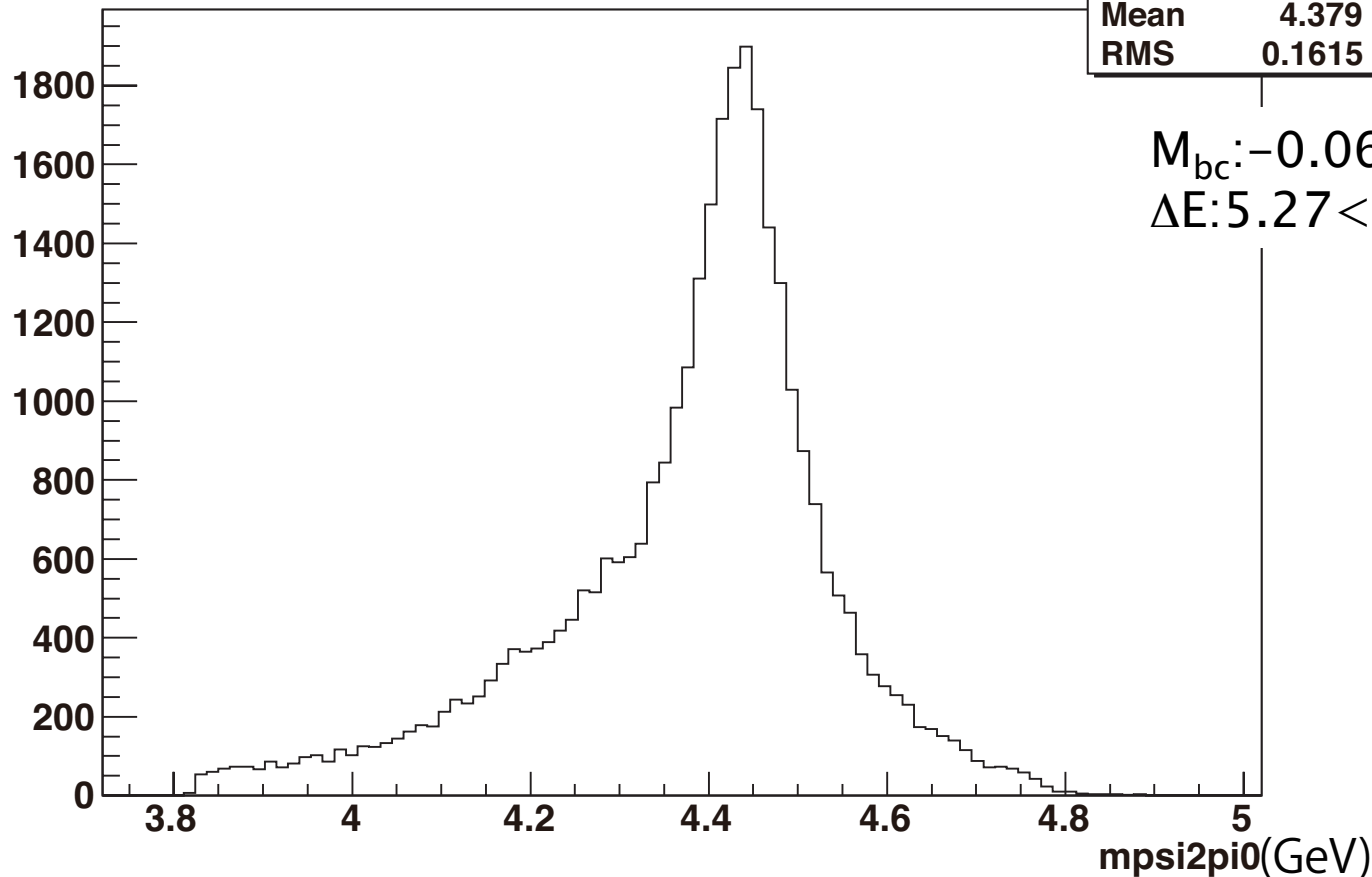
data



$B^\pm \rightarrow Z(4430)^0 K^\pm$ 崩壊の $\psi' \pi^0$ 不変質量分布

mpsi2pi0 {best==1}

htemp	
Entries	32874
Mean	4.379
RMS	0.1615



→4.43GeVにしかるべきピークあり。

終状態の粒子の組み合わせ間違いの割合

- ▶ 共に誤った γ を組み合わせってしまう割合が最も大きい
- ▶ しかし、その割合も多くはない。

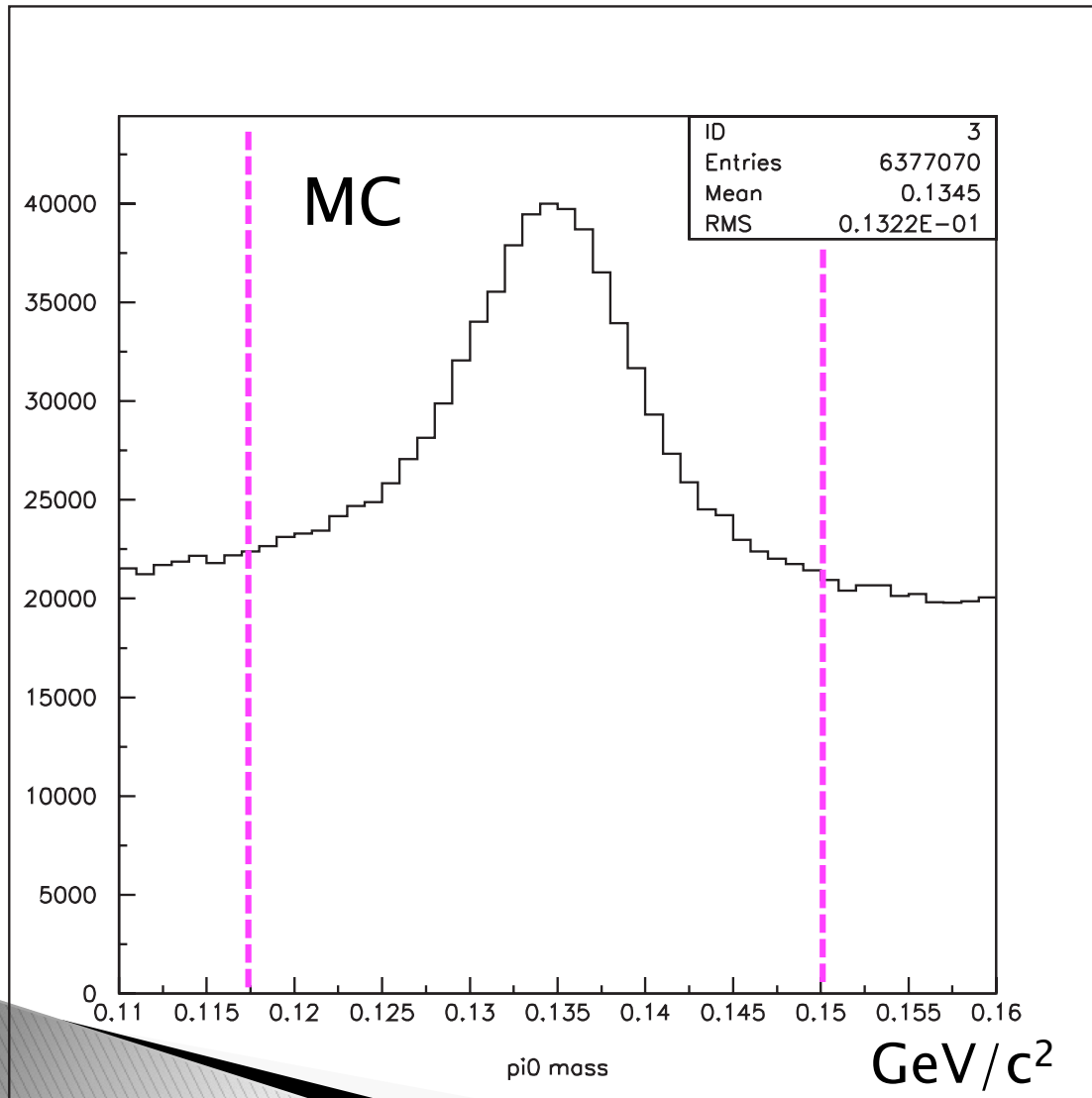
組み合わせの誤りの原因	割合(%)
全て正しい	78.1
γ を1つ誤っている	11.6
γ を2つ誤っている	8.0

Phase space decay MC

組み合わせの誤りの原因	割合(%)
全て正しい	85.8
γ を1つ誤っている	12.0
γ を2つ誤っている	2.2

$B \rightarrow Z(4430)^0 K$ decay MC

π^0 再構成(Phase space decay MC)



▶ γ のエネルギー E_γ に条件を課す

- $E_\gamma > 50 \text{ MeV}$ (Barrel)
- $E_\gamma > 100 \text{ MeV}$ (Endcaps)

▶ $0.118 < M_{\gamma\gamma} < 0.150$
 GeV/c^2