

$B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊によるBメソン 崩壊点位置分解能の研究

奈良女子大学大学院 人間文化総合科学研究科

数物科学専攻物理学コース

高エネルギー物理学研究室 修士2年

今井彩加

2023年度修士論文発表会

2024/2/16

目次

1. イントロダクション
2. 時間依存CP非保存
3. 解析方法
4. モンテカルロシミュレーションデータでの信号事象の解析
5. バックグラウンドの解析
6. 実験データでの解析
7. まとめ

目次

1. イントロダクション

- 標準理論における CP 対称性の破れ
- **Belle II実験**

2. 時間依存 CP 非保存

3. 解析方法

4. モンテカルロシミュレーションデータでの解析

5. バックグラウンドの解析

6. 実験データでの解析

7. まとめ

標準理論におけるCP対称性の破れ

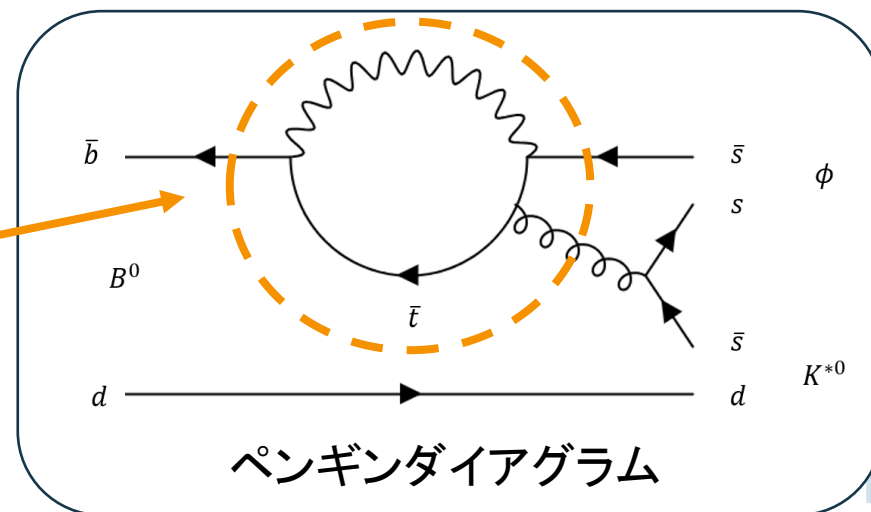
ビッグバン時に物質と反物質は同数生成されたと考えられているが、現在の宇宙では物質のみが存在している。この宇宙の状態に至るために必要である条件が**CP対称性の破れ**である。

(C:荷電共役変換、P:パリティ変換)

小林・益川理論では宇宙の物質優勢を説明できないことから、小林・益川理論以外でCP対称性の破れを生じる新原理・新粒子の兆候を探索することが重要

Belle II実験ではペンギンダイアグラムから生じるB中間子の稀崩壊過程における時間依存CP対称性の破れを測定し、標準理論とのずれを探ることを重要課題としている。

不確定性原理から新粒子が寄与することができるループをもつ

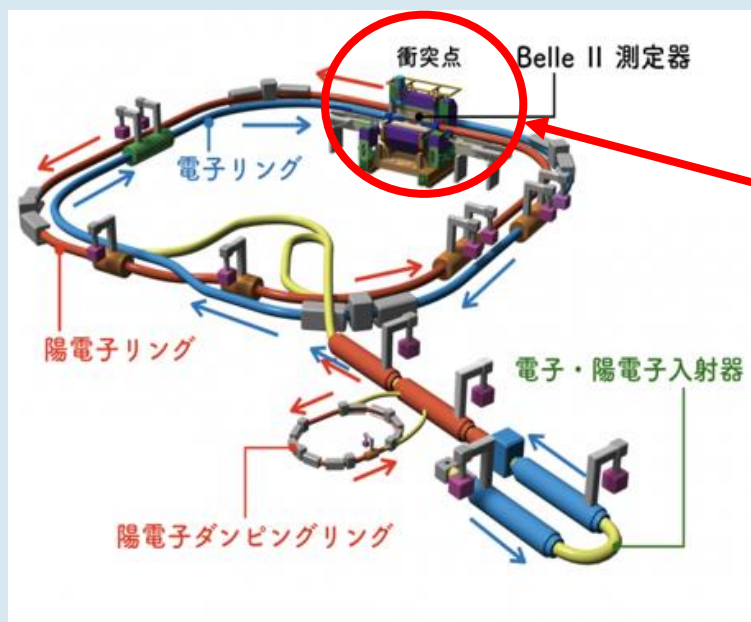


Belle II 実験

SuperKEKB加速器とBelle II測定器を用いて行われる電子・陽電子衝突実験

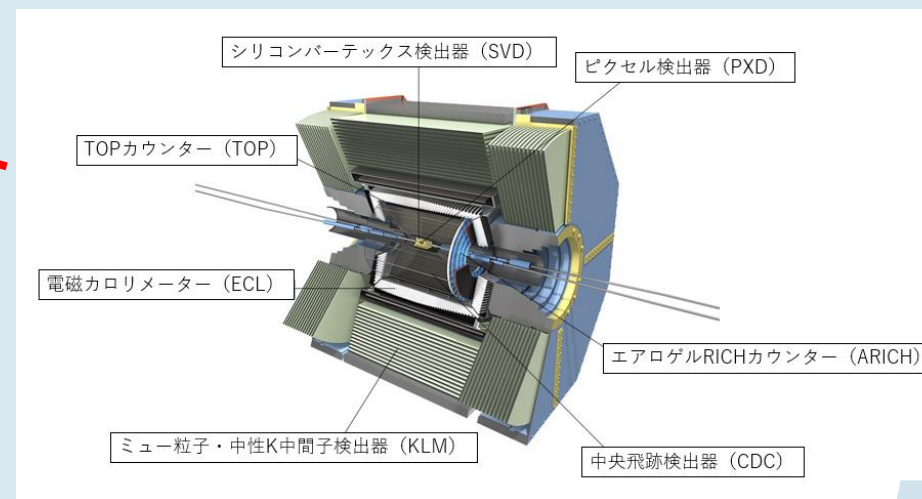
SuperKEKB加速器

...7GeVの電子と4GeVの陽電子を衝突させる
電子・陽電子衝突型加速器



Belle II測定器

...幅、高さが約8m、重さ4トンの素粒子検出器
内部に衝突点を覆うように以下の7種類の検出器
が設置されている



目次

1. イントロダクション

2. 時間依存CP非保存

- 時間依存CP非保存測定方法
- なぜ $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊をしらべるのか

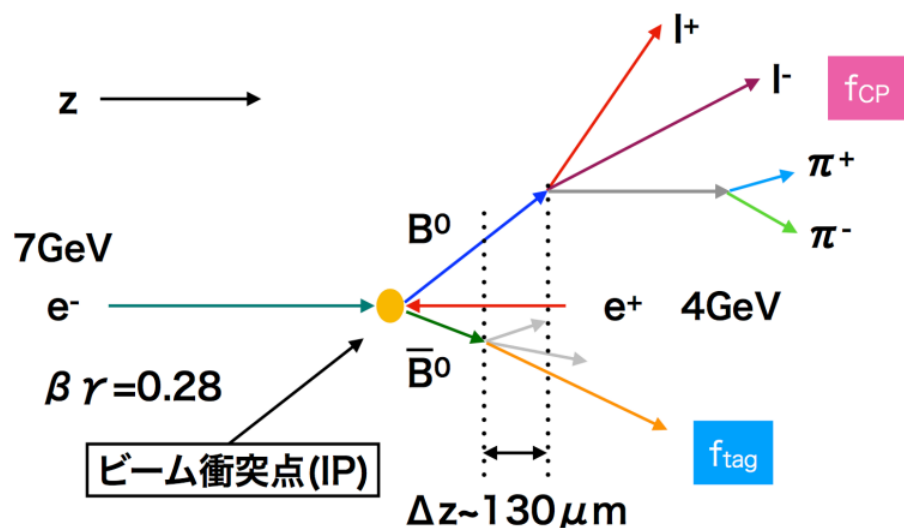
3. モンテカルロシミュレーションデータでの $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊の信号事象再構成と崩壊点位置分解能の評価

4. バックグラウンド

5. 実験データでの $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊の事象再構成と崩壊点位置分解能の評価

6. まとめ

時間依存CP非保存測定方法



時間依存CP非保存測定の手順

1. CP固有状態への崩壊($B \rightarrow f_{CP}$)を再構成する
2. 1以外の娘粒子以外に再構成した粒子を集め、それらをタグ側のB中間子($B \rightarrow f_{tag}$)とする
3. CP側とタグ側双方のB中間子の崩壊点を再構成して Δz を得る。
4. $\Delta t = \Delta z / c\beta\gamma$ より Δt を得る。
5. タグ側の娘粒子の情報からフレーバー識別の符号 q とフレーバータグの質を表す指標である r を得る。
6. 事象ごとに Δt を決定し、 Δt と q から S と C を決定する。

CP非保存の時間発展の式

$$A(\Delta t) \equiv \frac{\Gamma[\bar{B}(\Delta t) \rightarrow f_{CP}] - \Gamma[B(\Delta t) \rightarrow f_{CP}]}{\Gamma[\bar{B}(\Delta t) \rightarrow f_{CP}] + \Gamma[B(\Delta t) \rightarrow f_{CP}]} = S \sin(\Delta m \Delta t) - C \cos(\Delta m \Delta t)$$

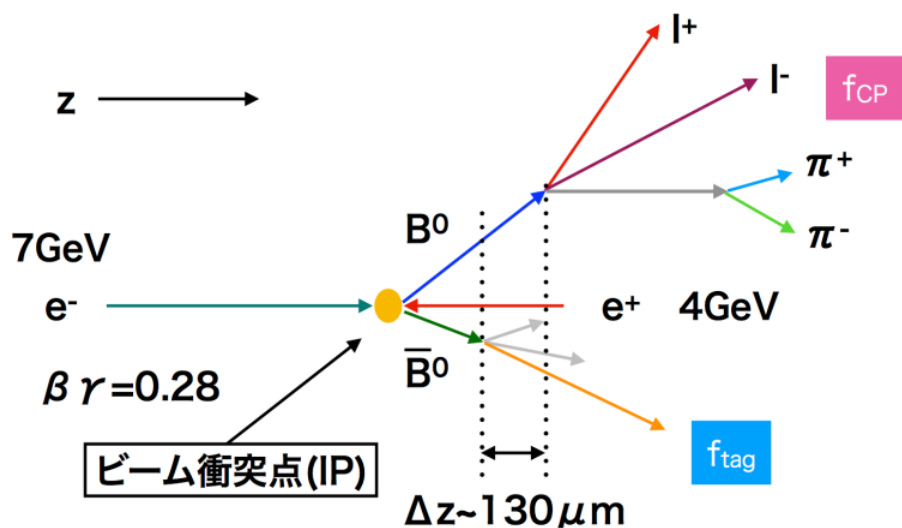
Γ : 事象数

Δm : 中性B中間子の2つの質量固有状態の質量差

S → 間接的CP非保存パラメーター

C → 直接的CP非保存パラメーター

時間依存CP非保存測定方法



時間依存CP非保存測定の手順

1. CP固有状態への崩壊($B \rightarrow f_{CP}$)を再構成する
2. 1以外の娘粒子以外に再構成した粒子を集め、それらをタグ側のB中間子($B \rightarrow f_{tag}$)とする
3. CP側とタグ側双方のB中間子の崩壊点を再構成して Δz を得る。
4. $\Delta t = \Delta z / c\beta\gamma$ より Δt を得る。
5. タグ側の娘粒子の情報からフレーバー識別の符号 q とフレーバータグの質を表す指標である r を得る。
6. 事象ごとに Δt を決定し、 Δt と q から S と C を決定する。

CP非保存の時間発展の式

$$A(\Delta t) \equiv \frac{\Gamma[\bar{B}(\Delta t) \rightarrow f_{CP}] - \Gamma[B(\Delta t) \rightarrow f_{CP}]}{\Gamma[\bar{B}(\Delta t) \rightarrow f_{CP}] + \Gamma[B(\Delta t) \rightarrow f_{CP}]} = S \sin(\Delta m \Delta t) - C \cos(\Delta m \Delta t)$$

Γ : 事象数

Δm : 中性B中間子の2つの質量固有状態の質量差

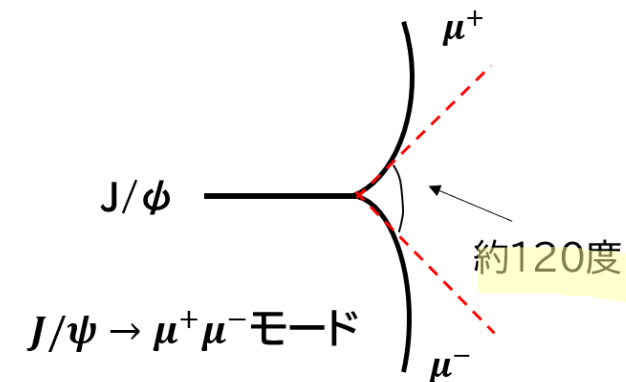
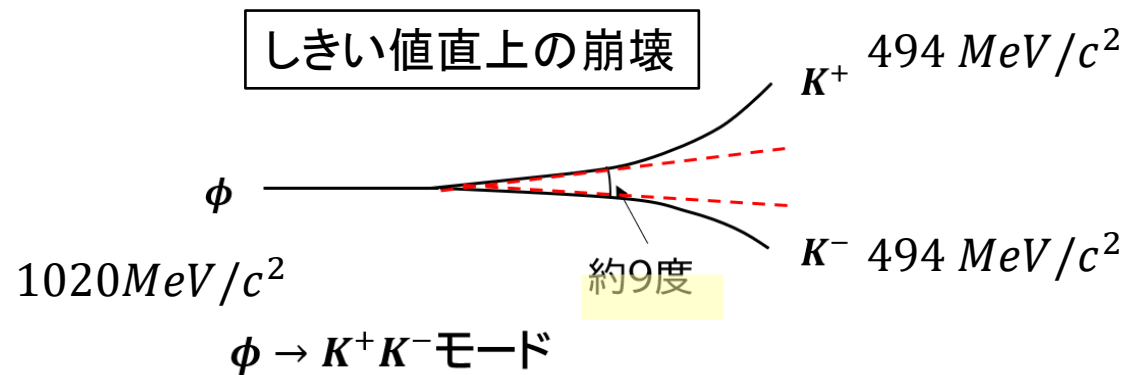
S → 間接的CP非保存パラメーター

C → 直接的CP非保存パラメーター

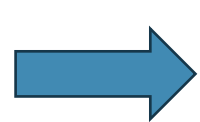
時間依存CP非保存測定には崩壊点位置分解能を評価することが必要不可欠

なぜ $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊を調べるのか

ペンギンダイアグラムから生じるもののうち $B^0 \rightarrow K^+K^-K_S^0$ は重要なモードの一つである。この中には $B^0 \rightarrow \phi K_S^0, B^0 \rightarrow f_0 K_S^0$ といった二体崩壊が生じて、 K^+K^- 対が $\phi \rightarrow K^+K^-, f_0 \rightarrow K^+K^-$ から生じる寄与が約半分またはそれ以上を占めている。



このopening angleが小さいとき、再構成した崩壊点の位置分解能に与える影響について調べたい



$B^0 \rightarrow \phi K^{*0}, \phi \rightarrow K^+K^-, K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-$ に着目し、B中間子の崩壊点位置分解能を評価した

目次

1. イントロダクション
2. 時間依存CP非保存

3. 解析方法

- 解析手順と着目すべき量
 - 崩壊点位置分解能の求め方
4. モンテカルロシミュレーションデータでの信号事象の解析
 5. バックグラウンドの解析
 6. 実験データでの解析
 7. まとめ

解析手順と着目すべき量

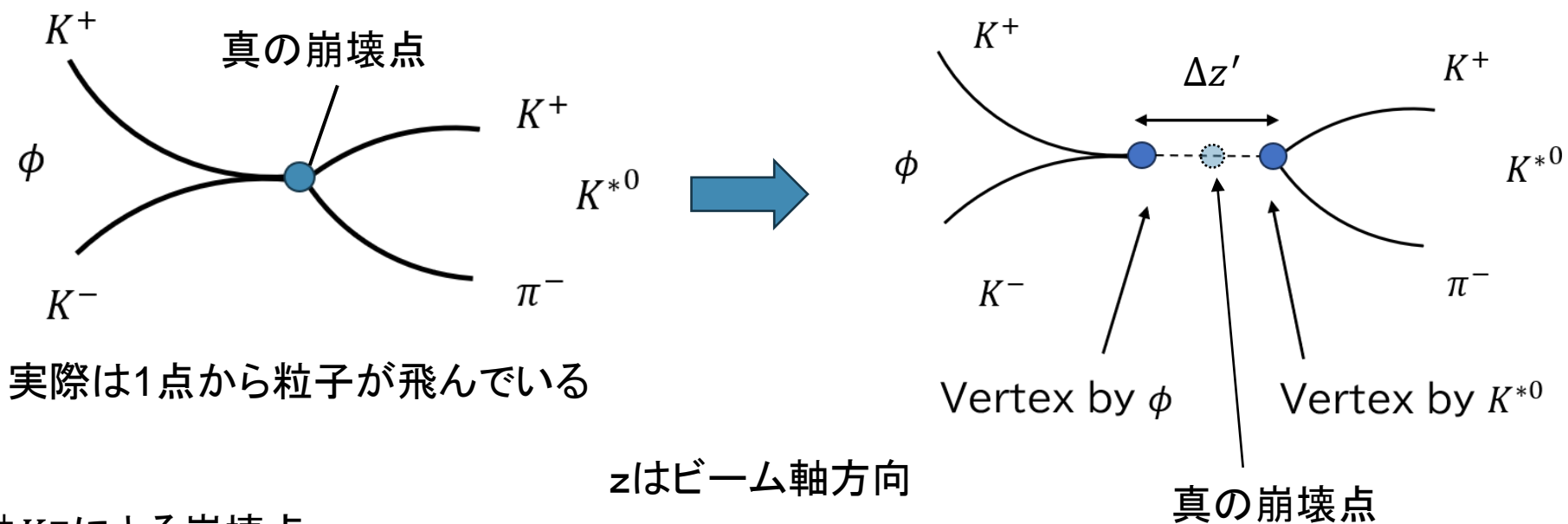
- ①信号のモンテカルロシミュレーションデータを用いて、事象再構成・崩壊点位置分解能を評価する。
- ②バックグラウンドのモンテカルロシミュレーションデータを用いて、バックグラウンドの見積もりを行う。
- ③実験データを用いて、事象再構成・崩壊点位置分解能を評価する。

なぜこの流れで解析をするのか

崩壊点位置分解能はモンテカルロシミュレーションを用いてモデル化する取り組みが行われている。モンテカルロシミュレーションと実験データで直接に比較できる量の分布を観測することにより、シミュレーションが実験の状況を適切に再現していることを確かめることが必要。

→その目的に合致する量として、 $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊事象において、再構成した $\phi \rightarrow K^+ K^-$ 崩壊点と $K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$ 崩壊点の位置の違いが有効であると考えた。

崩壊点位置分解能の求め方



- ・ $\phi \rightarrow K^+K^-$ による崩壊点 z
- ・ $K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-$ による崩壊点 z の差 = $\Delta z'$

$\Delta z'$ 分布をDouble Gaussian(2つのガウシアンを重ね合わせ)でフィットし、求めた2つのsigmaの加重平均を分解能の値として示す。

$\Delta z'$ 分布はMCの情報が必要としないので、実験データの $\Delta z'$ 分布で分解能を求めることができる

目次

1. イントロダクション
2. 時間依存CP非保存
3. 解析方法

4. モンテカルロシミュレーションデータでの信号事象の解析

- $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊事象選別
- $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊事象再構成
- $\Delta z'$ 分布

5. バックグラウンドの解析
6. 実験データでの解析
7. まとめ

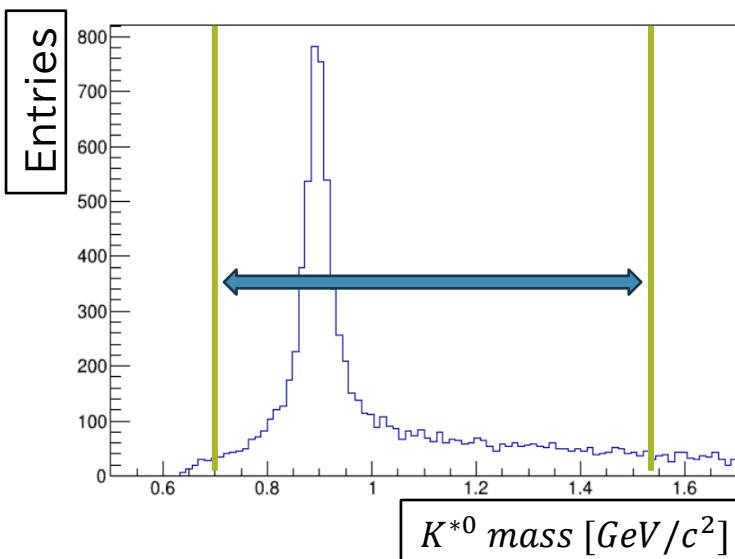
$B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊の事象選別(信号MC)

B^0 、 ϕ 、 K^{*0} 、 K 、 π にそれぞれ右の表にある値でカットをかけて、 ϕK^{*0} 事象の再構成を行う

粒子	選別条件
K	K のLikelihood Ratio > 0.1 $ dr < 1 \text{ cm}$ $ dz < 5 \text{ cm}$
π	π のLikelihood Ratio > 0.1 $ dr < 1 \text{ cm}$ $ dz < 5 \text{ cm}$
ϕ	$M_{KK} < 1.05 \text{ GeV}/c^2$
K^{*0}	$0.70 \text{ GeV}/c^2 < M_{K\pi} < 1.55 \text{ GeV}/c^2$
B^0	$-0.15 \text{ GeV} < \Delta E < 0.15 \text{ GeV}$ $5.24 \text{ GeV}/c^2 < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}/c^2$

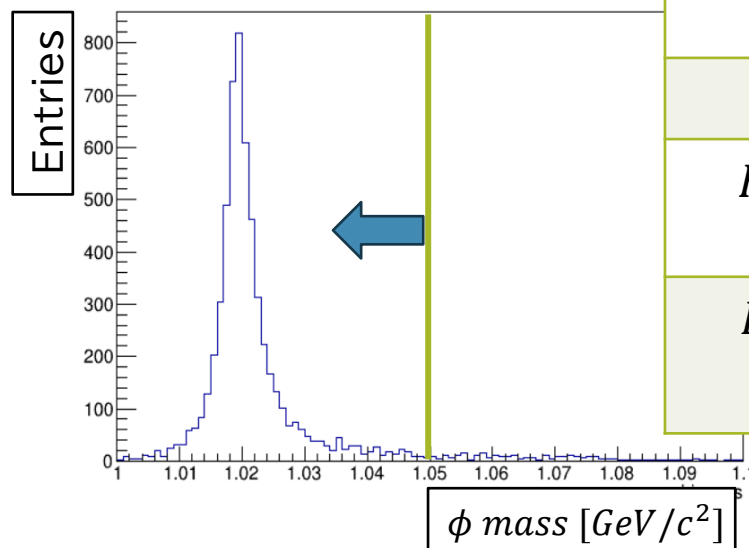
K*0質量分布

K*0 mass



phi質量分布

phi mass



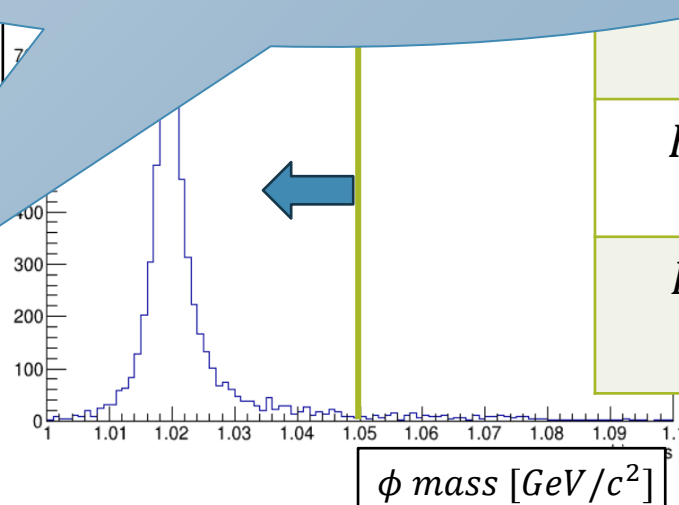
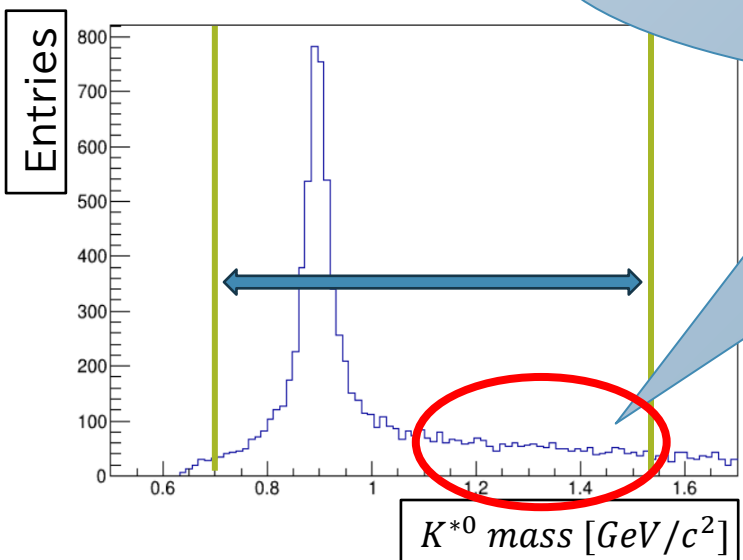
$B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊の事象選別(信号MC)

B^0 、 ϕ 、 K^{*0} 、 K 、 π にそれぞれ右の表にある値でカットをかけて、 ϕK^{*0} 事象の再構成を行う

粒子	選別条件
K	K のLikelihood Ratio > 0.1
	$ dr < 1 \text{ cm}$ $ dz < 5 \text{ cm}$
π	π のLikelihood Ratio > 0.1
	$ dr < 1 \text{ cm}$ $ dz < 5 \text{ cm}$
ϕ	$M_{KK} < 1.05 \text{ GeV}/c^2$
K^{*0}	$0.70 \text{ GeV}/c^2 < M_{K\pi} < 1.55 \text{ GeV}/c^2$
B^0	$-0.15 \text{ GeV} < \Delta E < 0.15 \text{ GeV}$ $5.24 \text{ GeV}/c^2 < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}/c^2$

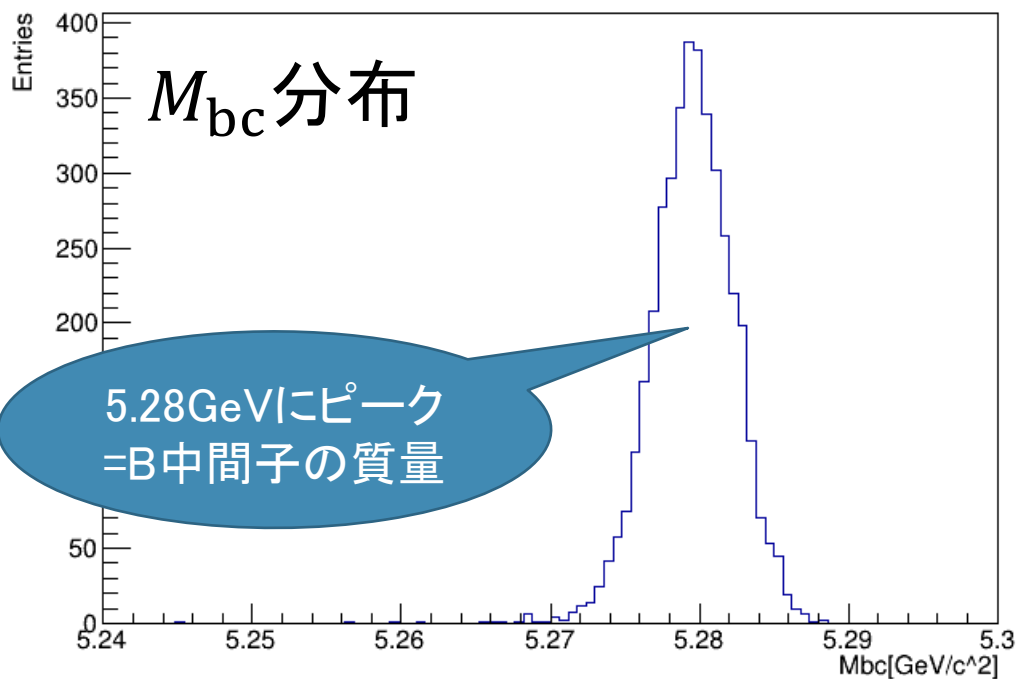
$K^{*0}(892)$ 以外に同じ終状態 $K\pi$ に崩壊する励起状態の崩壊も K^{*0} と同様に扱える

K^{*0} 質量分布
K*0 mass



$B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊の事象再構成(信号MC)

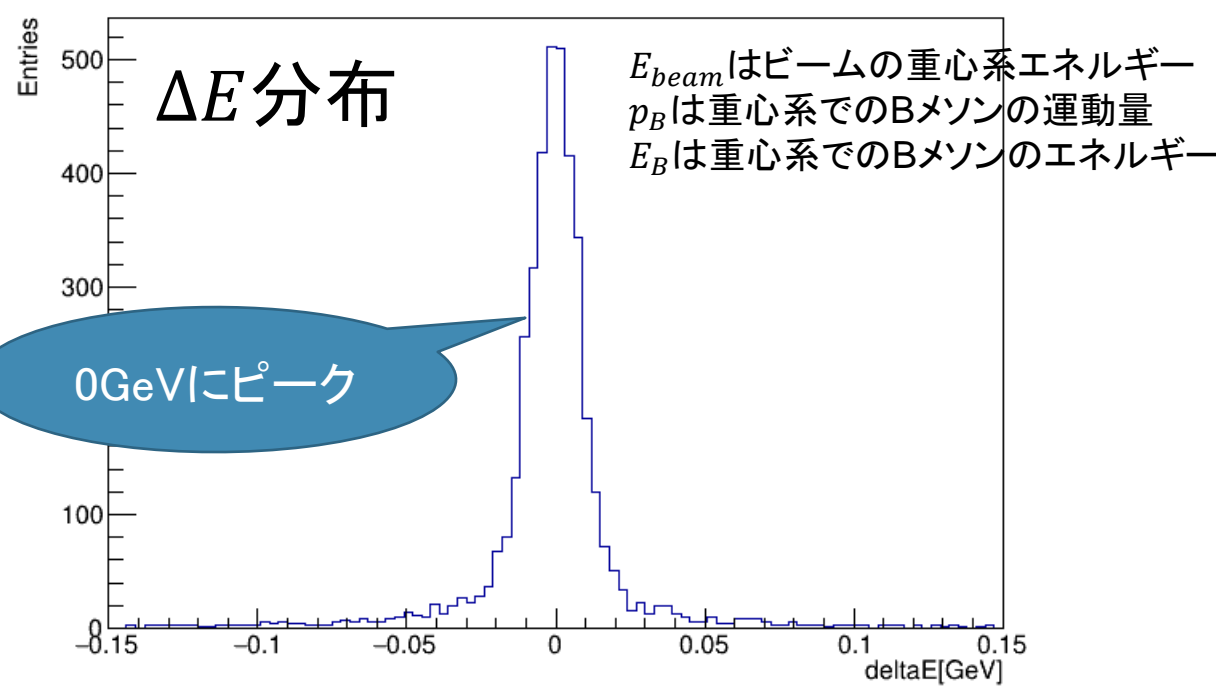
signalMC Mbc



Beam Constraint Mass: M_{bc}

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

signalMC deltaE



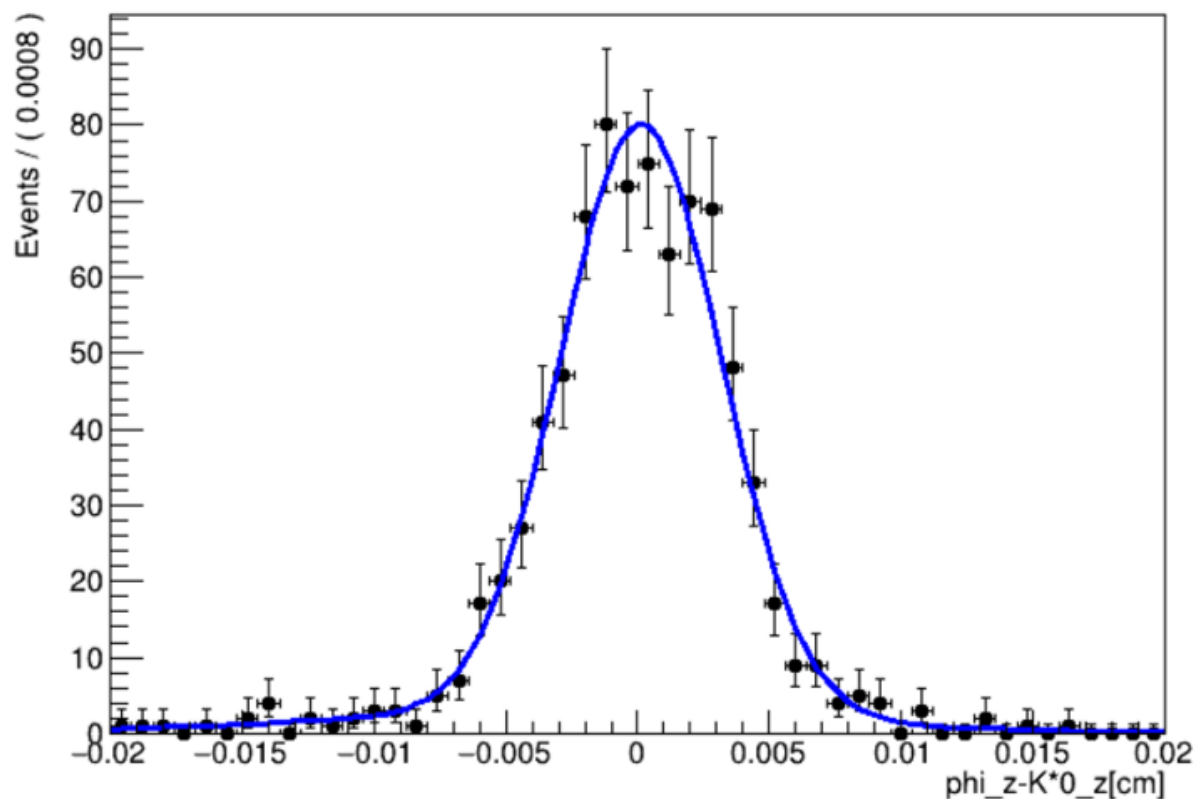
E_B と E_{beam} のエネルギーの差 ΔE

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

$\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ 崩壊は二体崩壊
B中間子のエネルギーが2等分される

シミュレーションでの $\Delta z'$ 分布(信号MC)

信号事象のみの $\Delta z'$ 分布



フィットに使用した確率密度関数

$$\mathcal{P}(\Delta z') = f_1 \mathcal{P}_1(\Delta z') + (1 - f_1) \mathcal{P}_2(\Delta z')$$

$$f_1 = \frac{N_1}{N_1 + N_2} \quad (N_1, N_2 \text{ は事象数})$$

Double Gaussianでフィット

分解能:**40.2±5.2[μm]**

目次

1. イントロダクション
2. 時間依存CP非保存
3. 解析方法
4. モンテカルロシミュレーションデータでの信号事象の解析

5. バックグラウンドの解析

- バックグラウンドの見積もり
- コンティニウムバックグラウンドの低減
- $B\bar{B}$ バックグラウンドの見積もり

6. 実験データでの $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊の事象再構成と崩壊点位置分解能の評価
7. まとめ

バックグラウンド

実験データにはバックグラウンドが混入してくるため
シミュレーションでのバックグラウンドの見積もりが欠かせない

バックグラウンド源は

$B^0 \overline{B^0}$

$B^+ B^-$

コンティニウム

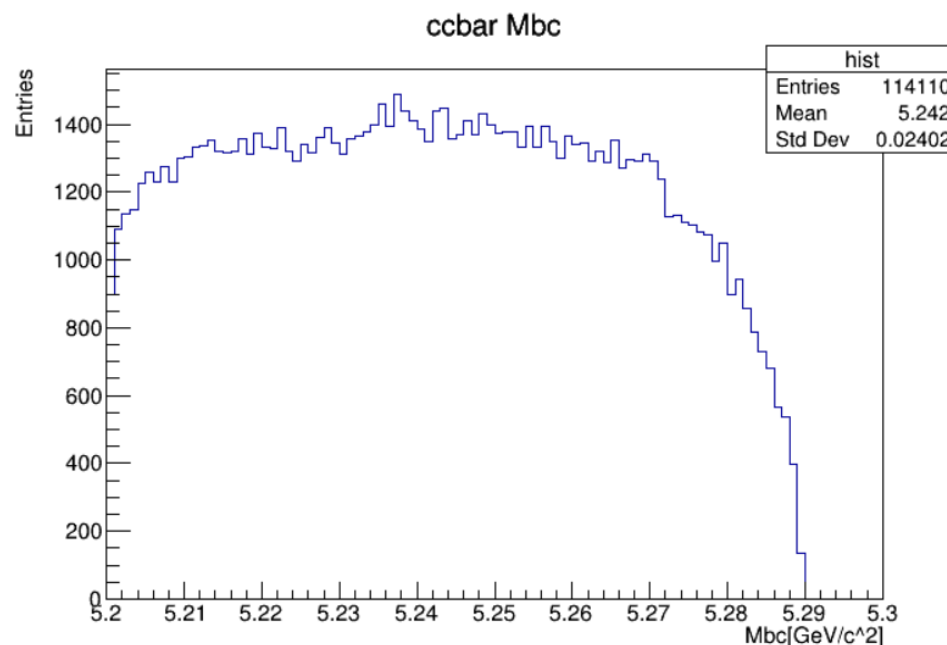
があり、 $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊ではコンティニウムが支配的である

コンティニウムとは
 $e^+ e^- \rightarrow$
 $c\bar{c}, u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s} (= q\bar{q})$
クォーク対生成事象の
総称

バックグラウンドの見積もり

200fb⁻¹相当の各Event TypeのMCシミュレーションデータを使用して、バックグラウンドの事象数や分布を確認した。

バックグラウンドの種類	事象数
$c\bar{c}$	114110
$u\bar{u}$	24388
$d\bar{d}$	5314
$s\bar{s}$	43953
コンティニウム 合計	187765
$B^0\bar{B}^0$	922
B^+B^-	1080
$B\bar{B}$ 合計	2002
バックグラウンド 合計	189767



信号: 308事象
コンティニウム: 約19万事象
 $B\bar{B}$: 約2000事象



コンティニウムが支配的
このままだと信号が埋もれてしまう

コンティニウムバックグラウンドの低減

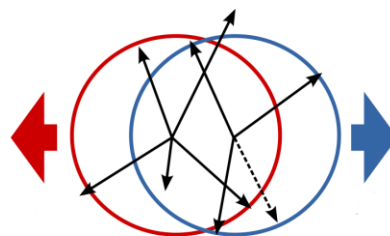
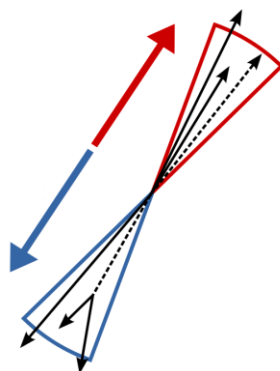
コンティニウムからくるバックグラウンドを減らしたい！



信号とバックグラウンドを分ける指標となる出力値を得たい。

多変量解析アルゴリズムの一つであるBoosted Decision Tree(BDT)をつかい、事象形状を表す変数を入力し、信号とコンティニウムバックグラウンドのMCデータを用いて学習させた。

$q\bar{q}$ はジェット状になっている
(初期のクォークの運動量が高い)

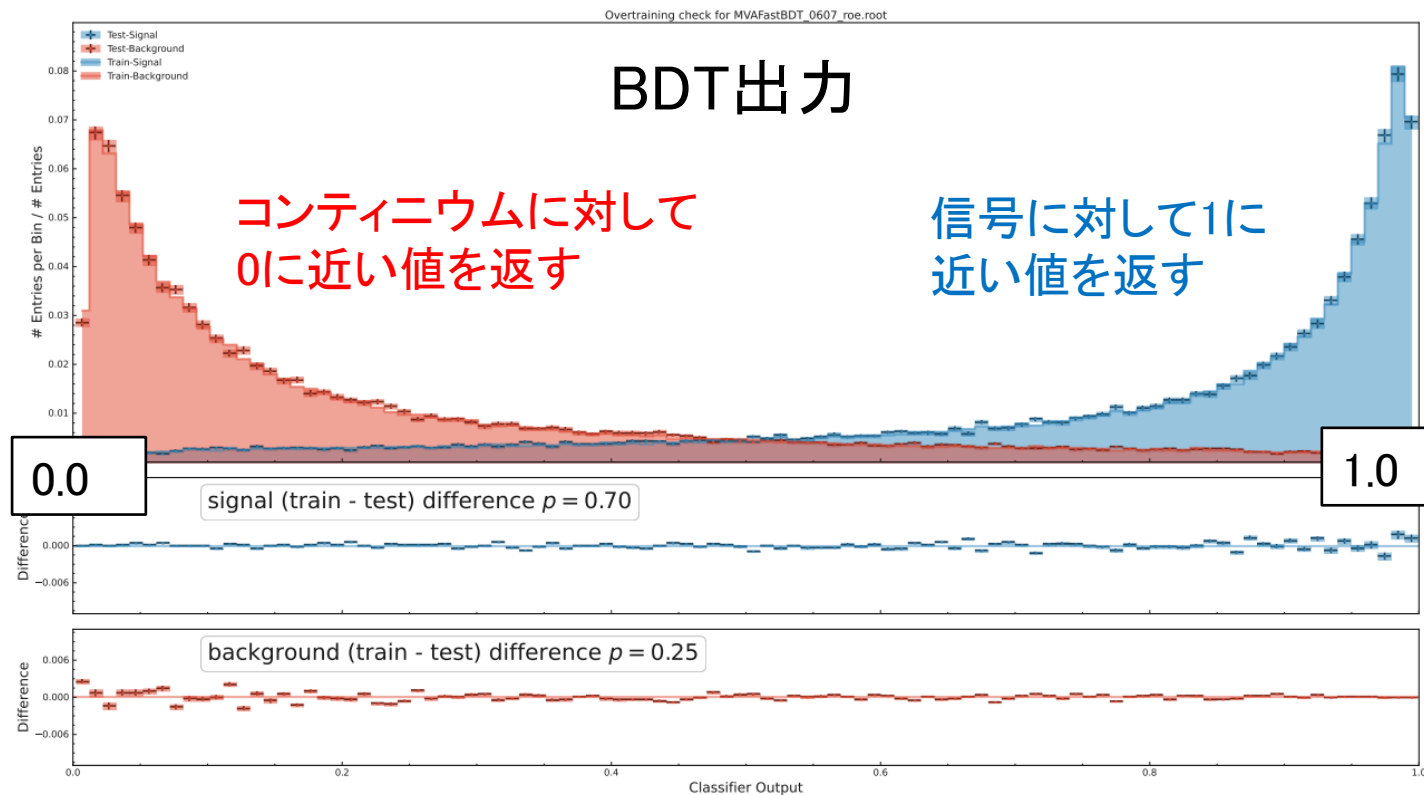


$B\bar{B}$ は球状になっている
(初期の $B\bar{B}$ の運動量が低い)

使用した変数群とBDT出力

- ・R2
- ・スラスト関係の変数(4種類)
- ・CLEO実験でコンティニウム抑制に使用されていた変数(9種類)
- ・Belle標準の事象形状の変数(16種類)

の全30種類の変数を使用



信号とバックグラウンドを分ける指標になる出力値を得ることができた

コンティニウムバックグラウンドの低減

信号が最も明瞭に見えるようにFigure of Meritが最大になるような、FastBDT出力の条件を決めた。

$$FoM = \frac{N_{sig}}{\sqrt{N_{sig} + N_{bg}}}$$

$$\begin{aligned} Br(\Upsilon(4S) \rightarrow B^0\bar{B}^0): & 0.486 \\ Br(B^0 \rightarrow \phi K^{*0}): & 1.0 \times 10^{-5} \\ Br(\phi \rightarrow K^+K^-): & 0.491 \\ Br(K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-): & 0.667 \\ \text{Reconstruction efficiency}: & 0.44 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{sig} &= 1ab^{-1} (\text{使用したMCデータ量}) \times \text{生成断面積}\sigma \\ &\times Br(\Upsilon(4S) \rightarrow B^0\bar{B}^0) \times 2 \times Br(B^0 \rightarrow \phi K^{*0}) \\ &\times Br(\phi \rightarrow K^+K^-) \times Br(K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-) \times \text{efficiency} \end{aligned}$$

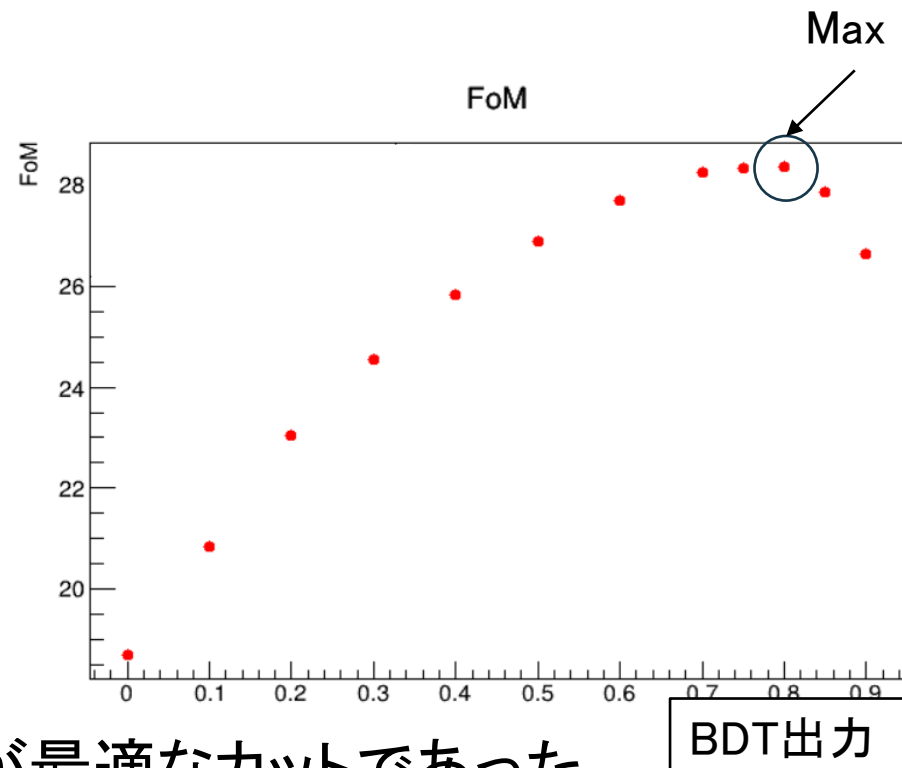
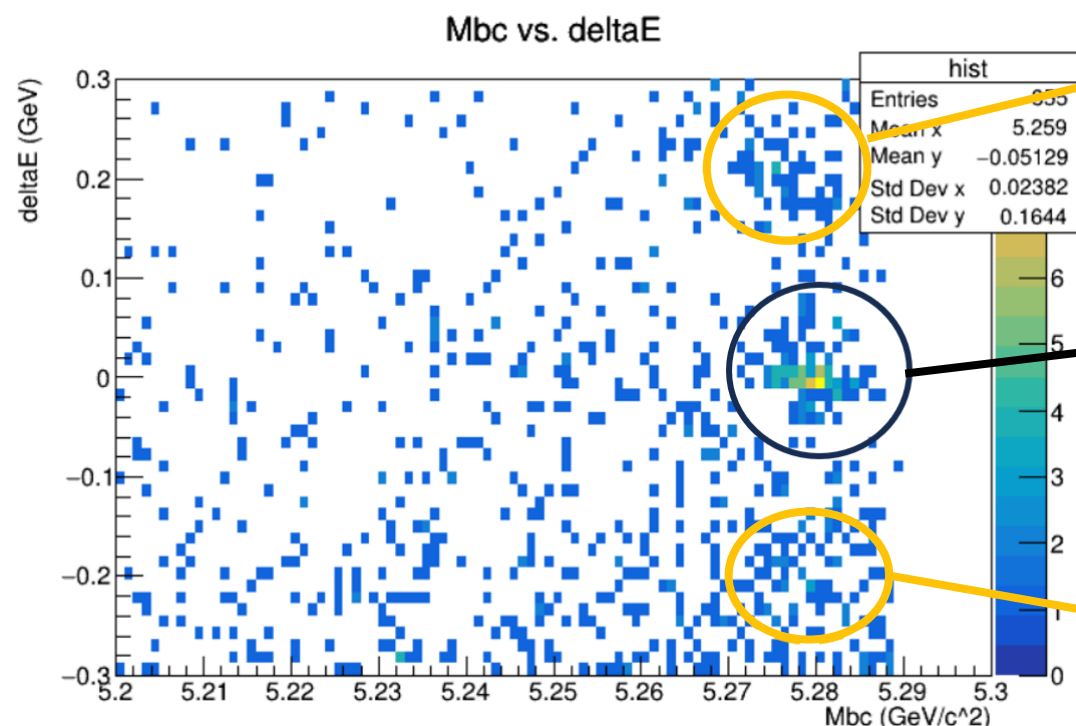


Figure of Meritの値が最大になるFastBDT > 0.8が最適なカットであった。
以後の解析ではFastBDT > 0.8の条件を課す。

$B\bar{B}$ バックグラウンドの見積もり

$B\bar{B}$ バックグラウンドには、 $M_{bc} = 5.28GeV/c^2$ 付近に以下のようなピークが見える。



$B \rightarrow \phi K$ に余分な π をくっつけたもの

$B^0 \rightarrow \phi K^+ \pi^-$ (K^{*0} 以外で終状態が $K^+ \pi^-$ のもの)
 $B^0 \rightarrow \phi K_0^{*0}$ (K^{*0} の励起状態のもの)
等が含まれている

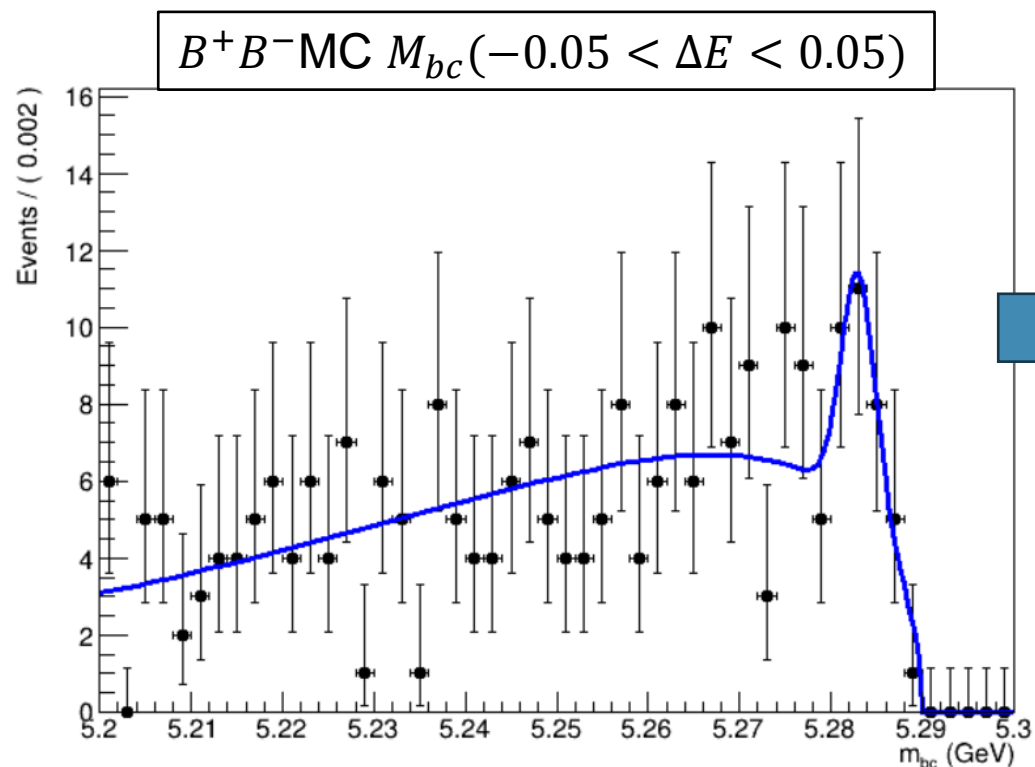
$B \rightarrow \phi K \pi \pi$ 崩壊の π を1つ無視しているもの



黒丸部分に含まれている崩壊は K^{*0} と一緒にの点からトラックが出てくる
= すべて信号とみなすことにした。
黄丸部分は $B^+ B^-$ バックグラウンド

$B\bar{B}$ バックグラウンドの見積もり

黄丸部分を避けるように $1/ab$ 相当の B^+B^- MCデータを使用して $-0.05 < \Delta E < 0.05$ のときの M_{bc} 分布を確認した。



信号領域付近にもまだpeaking backgroundが残っているが、信号事象数に対して数%しかない

Peaking backgroundは
系統誤差として見積もることにした

バックグラウンドの見積もりが完了した(バックグラウンドの $\Delta z'$ 分布についてはのちに述べる)
→実験データの解析に進む

目次

1. イントロダクション
2. 時間依存CP非保存
3. 解析方法
4. モンテカルロシミュレーションデータでの信号事象の解析
5. バックグラウンドの解析

6. 実験データでの解析

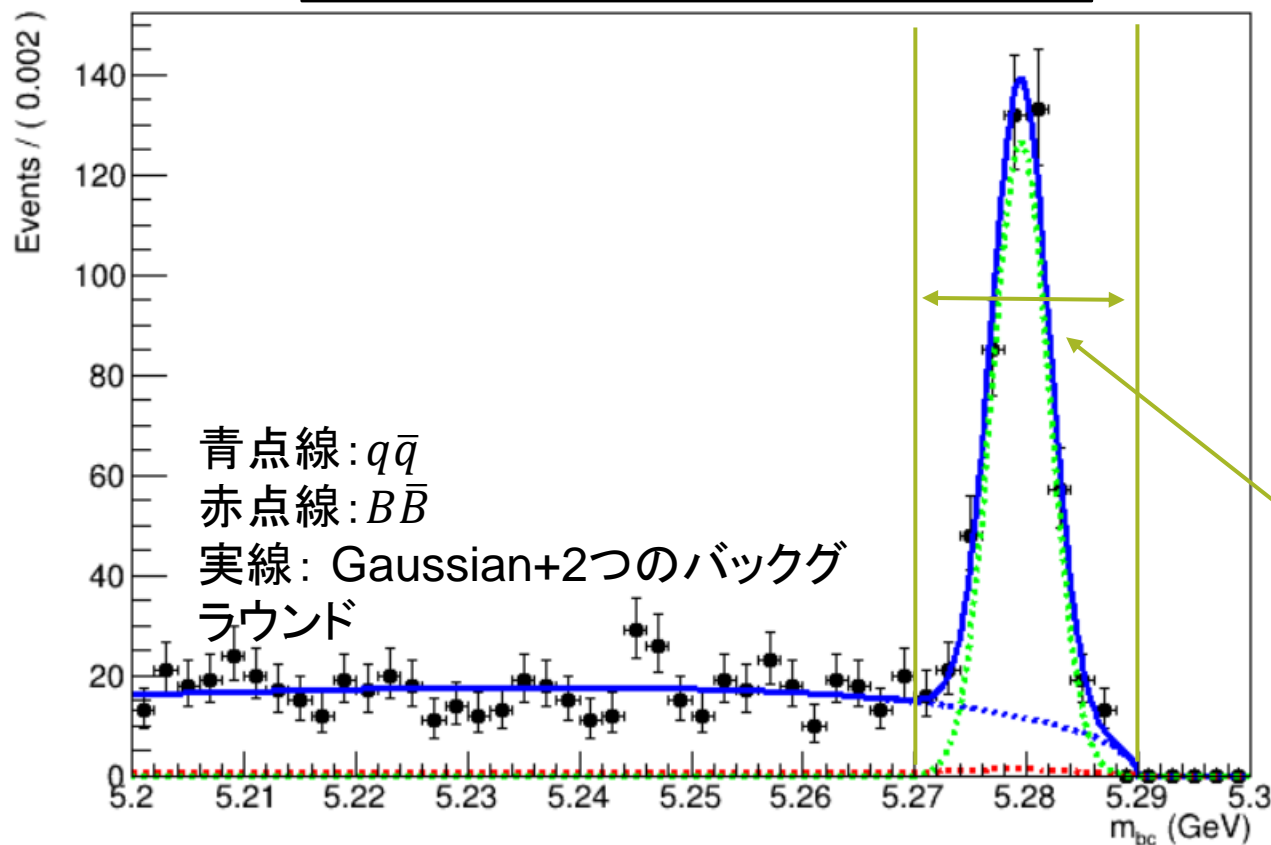
- 実験データでの各事象数
 - 実験データとモンテカルロシミュレーションデータでの質量分布比較
 - $\Delta z'$ 分布のフィット方法
 - 実験データの $\Delta z'$ 分布
7. まとめ

実験データでの $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊の各事象数

使用した実験データ: $N_{B\bar{B}} = (387 \pm 6) \times 10^6$ 事象

信号領域... $-0.03 \text{ GeV}/c < \Delta E < 0.03 \text{ GeV}/c$,
 $5.27 \text{ GeV}/c^2 < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}/c^2$

-0.03 < ΔE < 0.03 のときの M_{bc} 分布



青点線: $q\bar{q}$
赤点線: $B\bar{B}$
実線: Gaussian+2つのバックグラウンド

フィット関数
Signal → ガウス関数
 $q\bar{q}$ → ARGUS関数
 $B\bar{B}$ → ガウス関数 + ARGUS関数

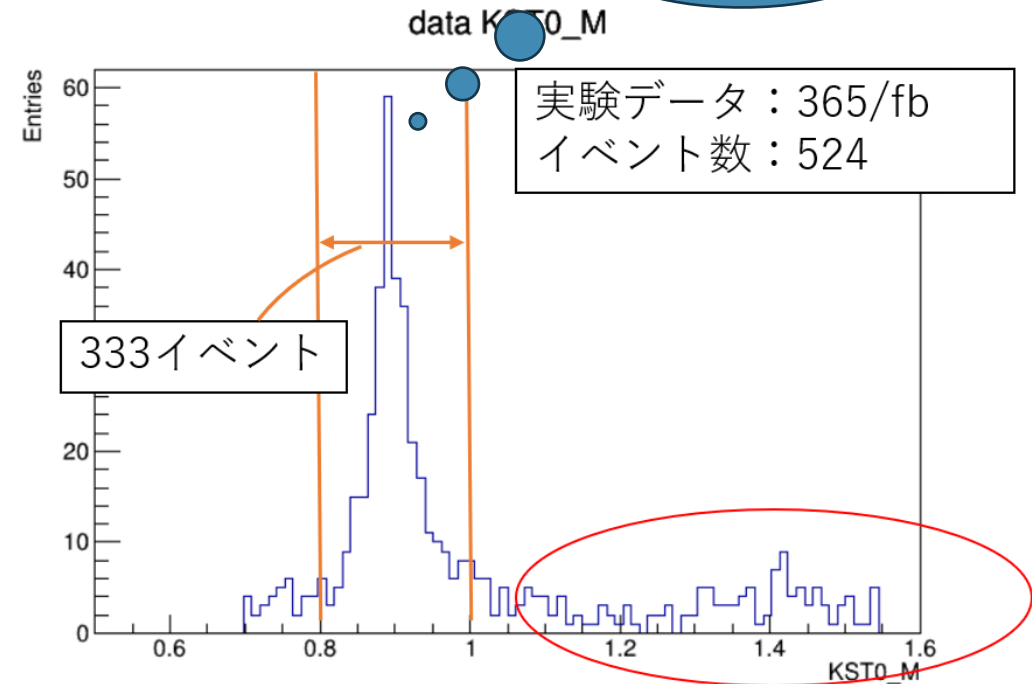
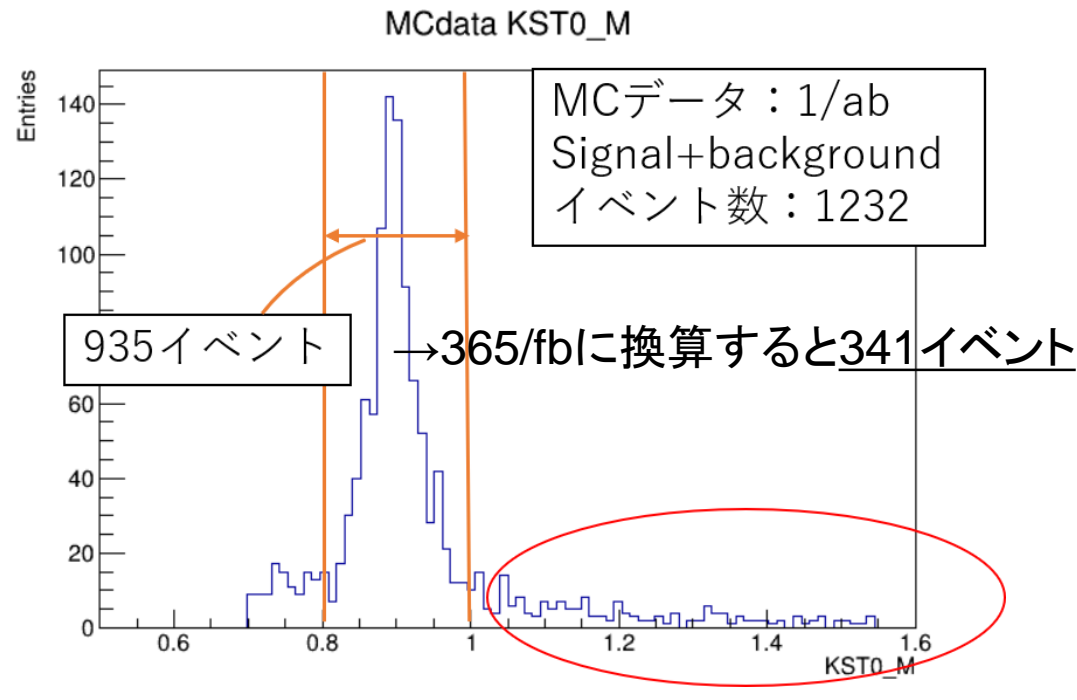
モンテカルロシミュレーションデータでは
signal = 311 ± 14
 $q\bar{q}$ = 124 ± 3
 $B\bar{B}$ = 12 ± 2

実験データの信号領域の事象数は
signal = 412 ± 24
 $q\bar{q}$ = 102 ± 4
 $B\bar{B}$ = 12 ± 2

実験データとモンテカルロシミュレーション データとの質量分布比較

事象数の違いの原因を探るために K^*0 (892)の質量分布を調べた

K^*0 が含まれていると考えられている
 $0.8\text{GeV}/c^2 < M_{kpi} < 1.0\text{GeV}/c^2$
の事象数を比較

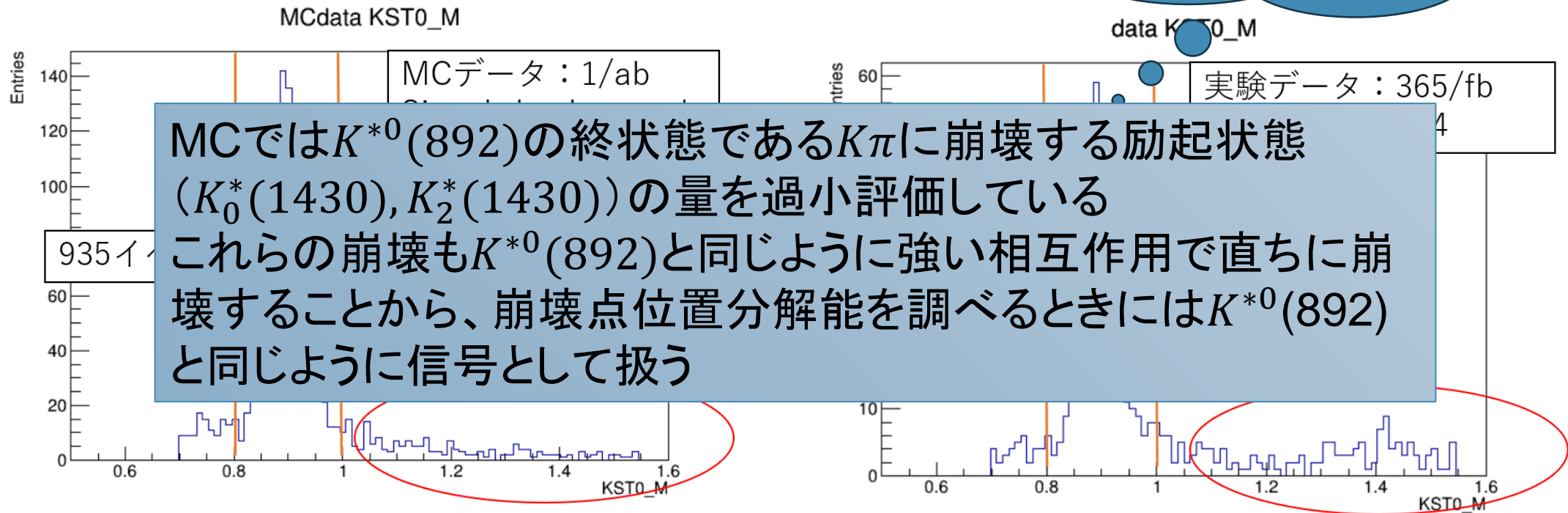


モンテカルロシミュレーションデータの $0.8\text{GeV}/c^2 < M_{kpi} < 1.0\text{GeV}/c^2$ の事象数は
実験データの事象数とほぼ一致

実験データとモンテカルロシミュレーション データとの質量分布比較

事象数の違いの原因を探るために $K^{*0}(892)$ の質量分布を調べた

K^{*0} が含まれていると考えられている
 $0.8\text{GeV}/c^2 < M_{k\pi} < 1.0\text{GeV}/c^2$
の事象数を比較



モンテカルロシミュレーションデータの $0.8\text{GeV}/c^2 < M_{k\pi} < 1.0\text{GeV}/c^2$ の事象数は
実験データの事象数とほぼ一致

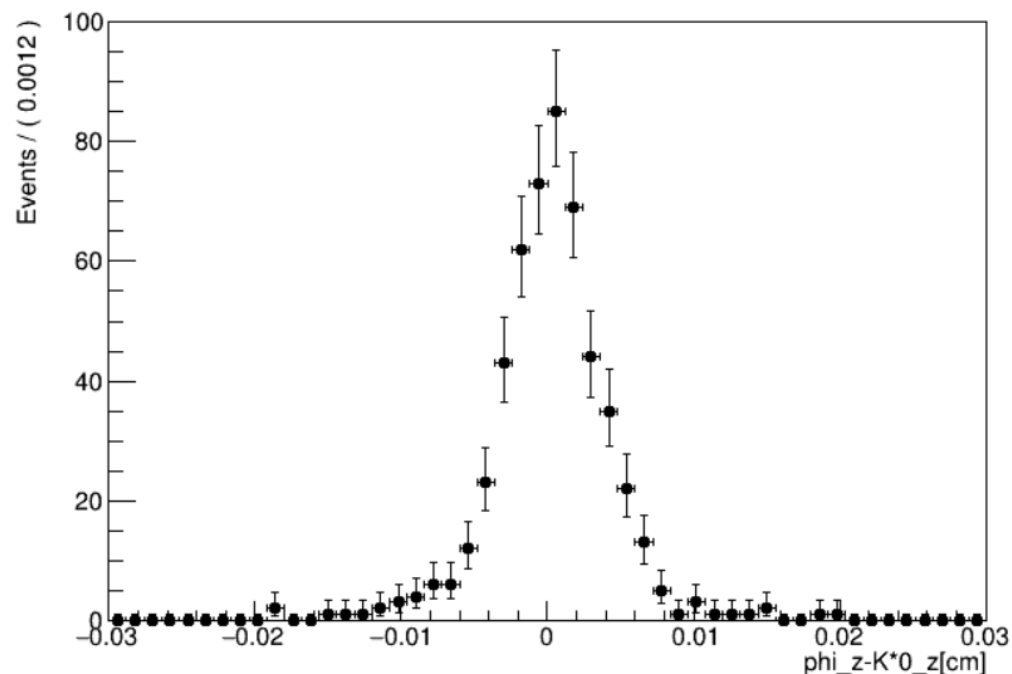
実験データの $\Delta z'$ 分布のフィット方法

フィットに使用する確率密度関数は

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

である。

$\mathcal{P}(\Delta z')$ 分布



この実験データにはバックグラウンドが含まれている
このプロットに上の確率密度関数をフィットしていく

実験データの $\Delta z'$ 分布のフィット方法

フィットに使用する確率密度関数は

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

である。

$N_{\text{signal}} : 404 \pm 24$

$N_{q\bar{q}} : 102 \pm 4$

$N_{B\bar{B}} : 15 \pm 2$

$\mathcal{P}_{q\bar{q}}(\Delta z')$: 次のページで見積もる

$\mathcal{P}_{B\bar{B}}(\Delta z')$: モンテカルロシミュレーションのときに見積もったフィット関数 ($B\bar{B}$ イベントが少ないため)

} 実験データの M_{bc} 分布から見積もった値



信号の $\Delta z'$ 分布 $\mathcal{P}_{\text{signal}}(\Delta z')$ を求めるために、上記の5つを $\mathcal{P}(\Delta z')$ の式に入れてフィットする。

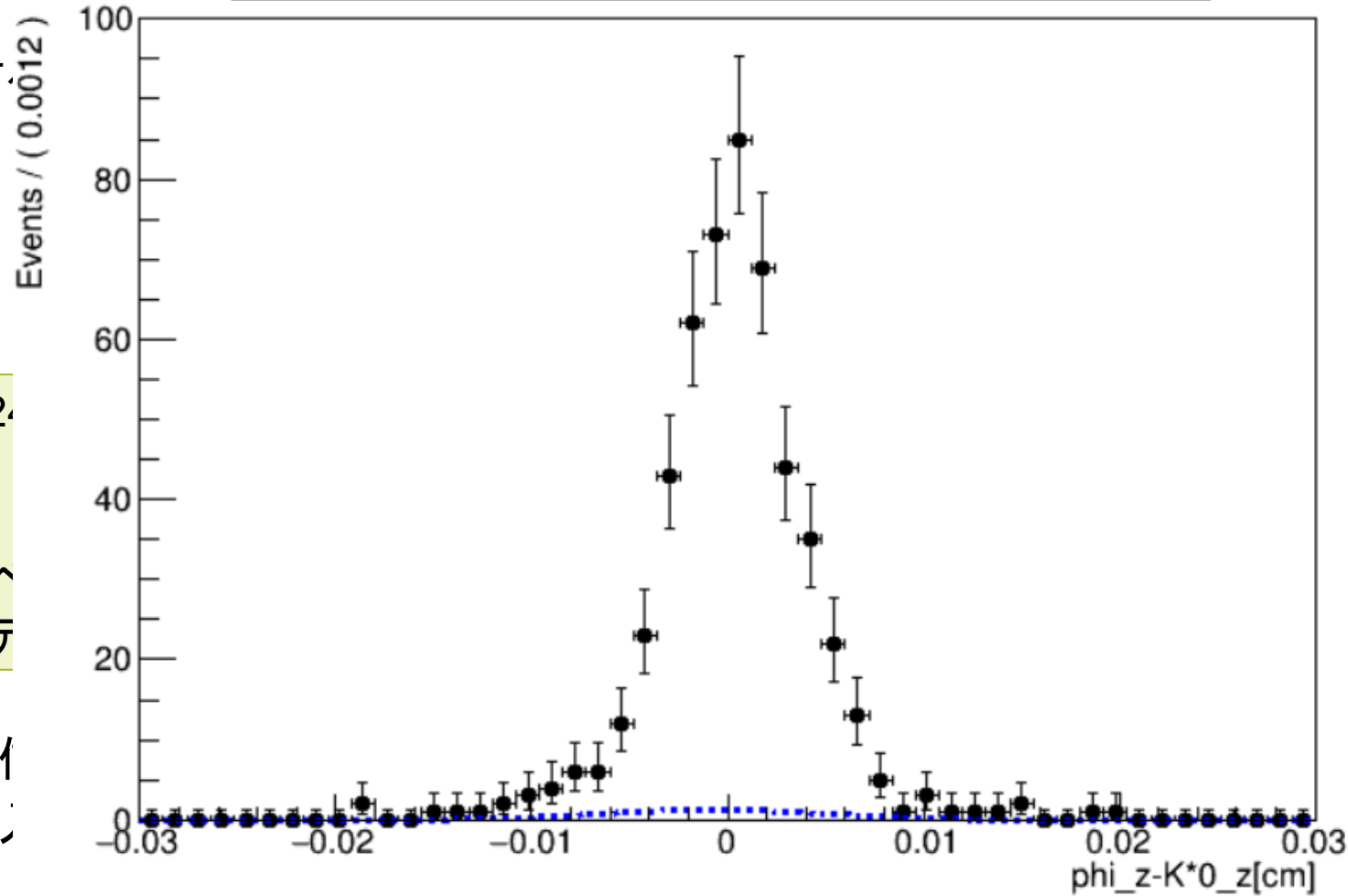
実験データの $\Delta z'$ の分布のフィット方法

$\mathcal{P}_{B\bar{B}}(\Delta z')$ の分布を書き込んだ $\mathcal{P}(\Delta z')$ 分布

フィットに使用する

である。

$N_{\text{signal}} : 404 \pm 2$
 $N_{q\bar{q}} : 102 \pm 4$
 $N_{B\bar{B}} : 15 \pm 2$
 $\mathcal{P}_{q\bar{q}}(\Delta z')$: 次のへ
 $\mathcal{P}_{B\bar{B}}(\Delta z')$: モンテ



よいため)

り式に

実験データの $q\bar{q}$ の $\Delta z'$ 分布

フィット関数

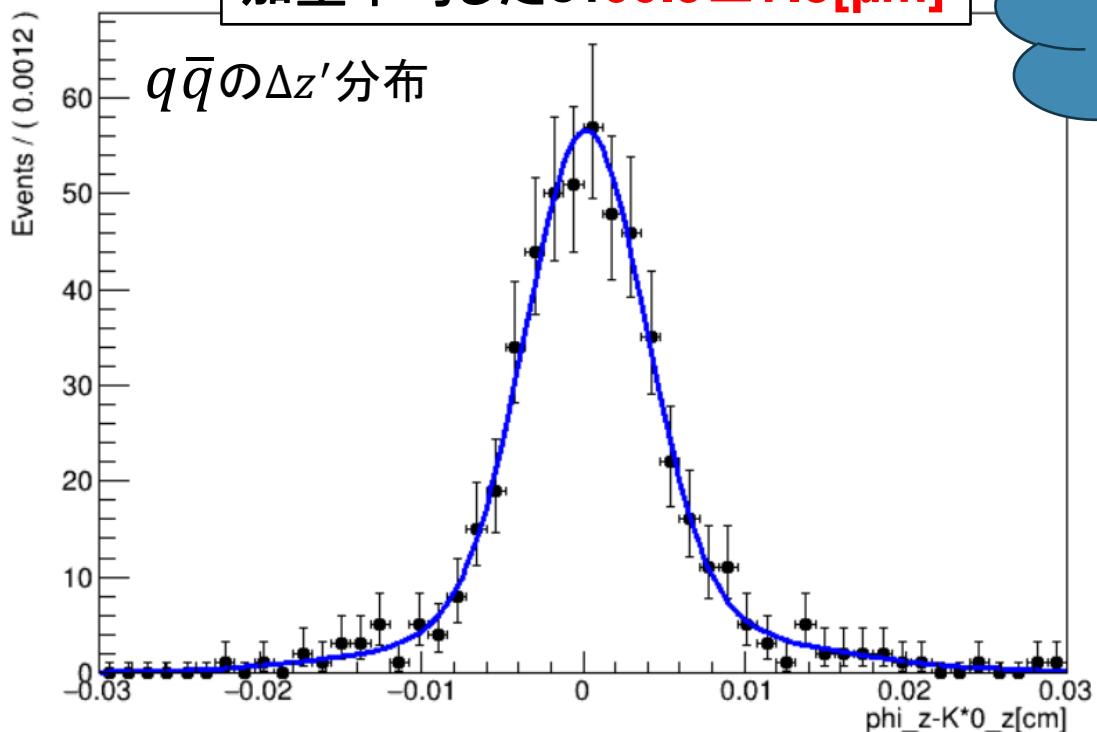
$$\mathcal{P}(\Delta z') = f_1 \mathcal{P}_1(\Delta z') + (1 - f_1) \mathcal{P}_2(\Delta z')$$

$$f_1 = \frac{N_1}{N_1 + N_2} \quad (N_1, N_2 \text{ は事象数})$$

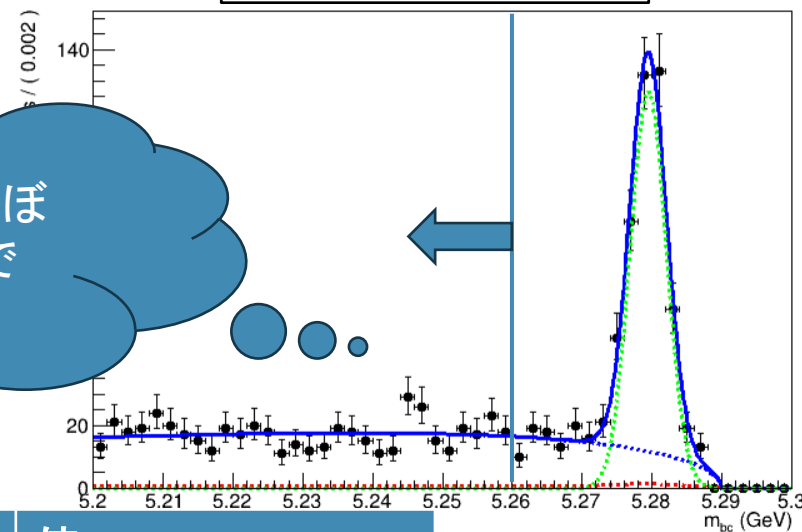
前述の M_{bc} 分布

サイドバンド領域 ($M_{bc} < 5.26$) で $\mathcal{P}_{q\bar{q}}(\Delta z')$ を決定する

Double Gaussianでフィット
加重平均した $\sigma: 60.9 \pm 7.5 [\mu m]$



サイドバンド領域はほぼ
 $q\bar{q}$ バックグラウンドで
構成されている



フィットパラメーター	値
μ_1	$1.7 \pm 2.3 \mu m$
μ_2	$14.5 \pm 11.0 \mu m$
σ_1	$37.2 \pm 2.5 \mu m$
σ_2	$105.7 \pm 12.6 \mu m$
f_1	0.763 ± 0.057

2024/3/1

修士論文発表会 今井彩加

33

実験データの $q\bar{q}$ の $\Delta z'$ 分布

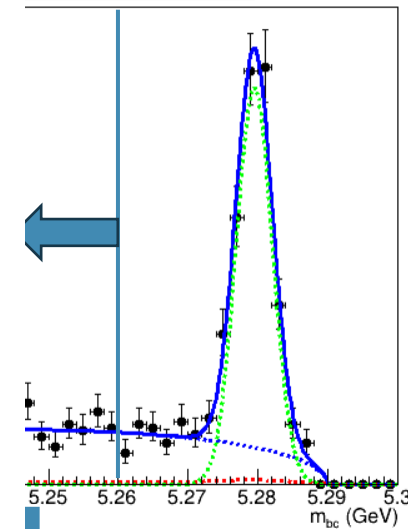
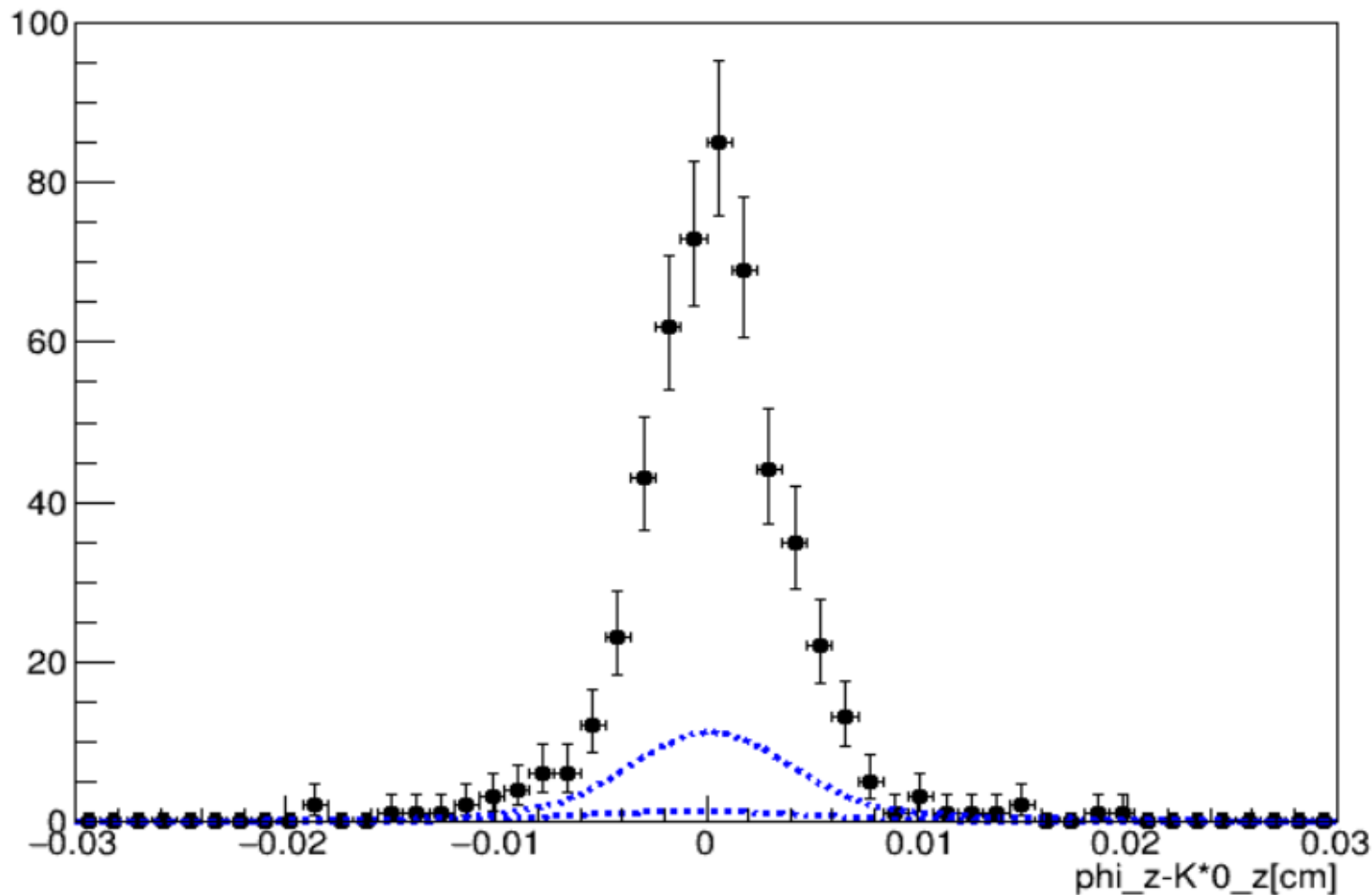
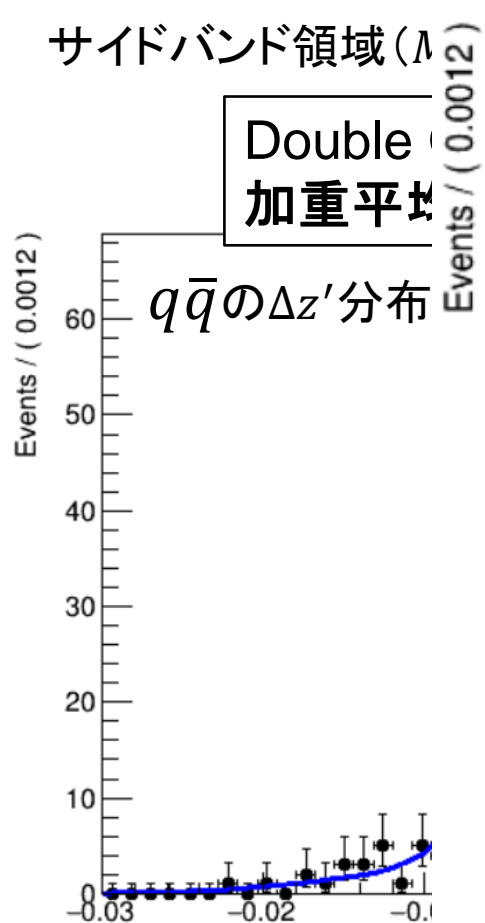
フィット関数

$$\mathcal{P}(\Delta z') = f_1 \mathcal{P}_1(\Delta z') + (1 - f_1) \mathcal{P}_2(\Delta z')$$

$$f_1 = \frac{N_1}{N_1 + N_2} \quad (N_1, N_2 \text{ は事象数})$$

$\mathcal{P}_{B\bar{B}}(\Delta z')$ と $\mathcal{P}_{q\bar{q}}(\Delta z')$ の分布を書き込んだ $\mathcal{P}(\Delta z')$ 分布

m_{bc} 分布



2024/3/1

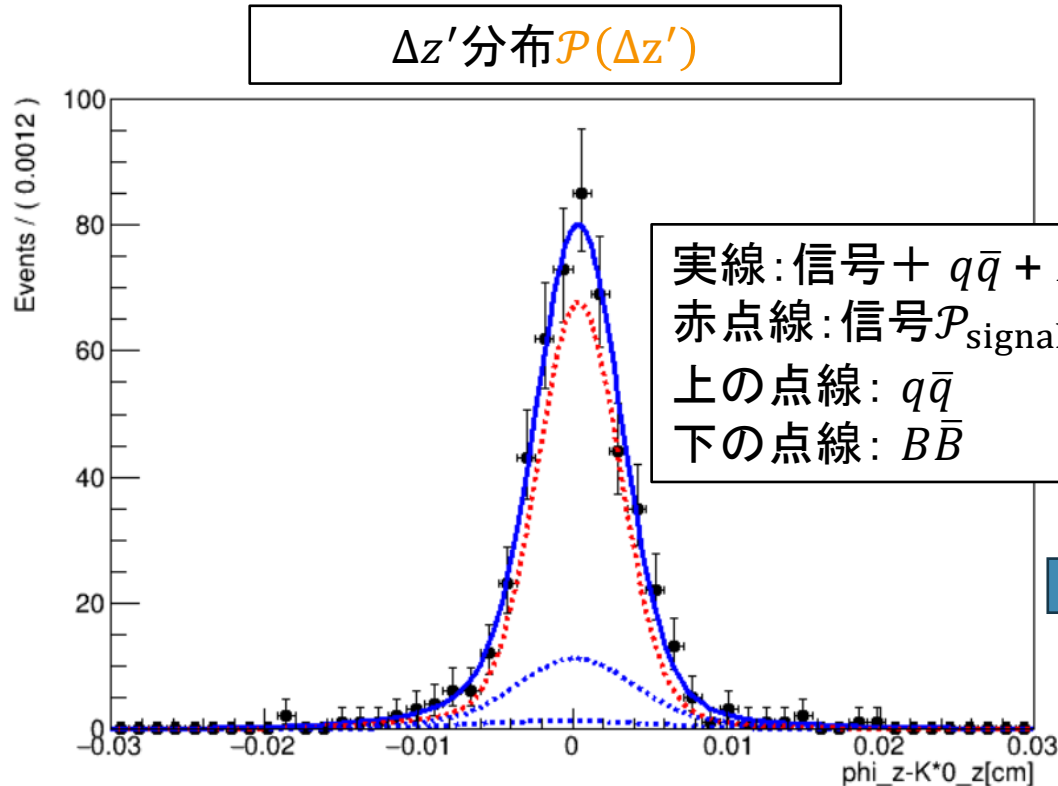
修士論文発表会 今井彩加

実験データの $\Delta z'$ 分布

確率密度関数

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

に求めた値を入れて、信号の $\Delta z'$ 分布を求めた。



$\mathcal{P}_{\text{signal}}(\Delta z')$ にDouble Gaussianを使用した

分解能: $34.9 \pm 6.7(\text{stat}) \pm 2.3(\text{syst}) [\mu\text{m}]$

MCのとき: $36.6 \pm 7.6 [\mu\text{m}]$

系統誤差は N_{signal} 、 $N_{q\bar{q}}$ 、 $N_{B\bar{B}}$ の事象数と、 $\mathcal{P}_{B\bar{B}}(\Delta z')$ の分布関数の不定性を考慮した。

誤差範囲内で一致している

目次

1. イントロダクション
2. 時間依存CP非保存
3. 解析方法
4. モンテカルロシミュレーションデータでの信号事象の解析
5. バックグラウンドの解析
6. 実験データでの解析

7.まとめ

まとめ

モンテカルロシミュレーションデータと365/fbのBelle II実験データを使用し、 $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊の崩壊点位置分解能を調べた。

- **モンテカルロシミュレーションデータ**

信号事象のみの $\Delta z'$ 分布の標準偏差から求めた分解能: $40.2 \pm 5.2 \mu\text{m}$

バックグラウンドも考慮し求めた $\Delta z'$ 分布の標準偏差から求めた信号の分解能: $36.6 \pm 7.6 \mu\text{m}$

- **実験データ**

$\Delta z'$ 分布の標準偏差から求めた分解能: $34.9 \pm 6.7(\text{stat}) \pm 2.3(\text{syst}) \mu\text{m}$

→誤差範囲内で一致しており、顕著な差は見出されなかった。

backup

シグナル事象生成

Belle II実験のソフトウェア環境であるbasf2(Belle Analysis Software frameworkのBelle II用)上でモンテカルロシミュレーション事象データを調べた。

decay tableの一部

Decay Table(研究対象の崩壊モードを事象生成する設定ファイル)を作る



事象生成・検出器シミュレーションを経て再構成した粒子のfour momentumを書きこんだmdstを生成

```
Decay Upsilon(4S)
1.000 B0 anti-B0 MyB0 Myanti-B0 VSS_BMIX dm;
Enddecay
```

$\Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B}$ の崩壊

```
Decay MyB0
1.000 Myphi MyK*0 SVV_HELAMP 0.7069
2.4772 0.7050 0.0 0.0525 1.7413;
```

$B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ の崩壊

```
Enddecay
CDecay Myanti-B0
```

2つのベクトルメソンへの崩壊なのでSVV_HELAMPなるevtgenプログラムが装備するモデルを使用した

3つの振幅の大きさと位相

最新のPDG平均は

$|A_{\parallel}|^2 = 0.279, |A_{\perp}|^2 = 0.224, |A_0|^2 = 0.497$ と $\phi_{\parallel} = 2.43, \phi_{\perp} = 2.53, \phi_0 = 0$ であり、これを使って $A_{\parallel}, A_{\perp}, A_0$ は複素数で表されるので $A_{\parallel} = |A_{\parallel}| \cos(\phi_{\parallel}) + i |A_{\parallel}| \sin(\phi_{\parallel})$ など A_{\perp}, A_0 も計算した。

$$A_{\parallel} = (H_+ + H_-) / \sqrt{2}$$

$$A_{\perp} = (H_+ - H_-) / \sqrt{2}$$

$$A_0 = H_0$$

によりSVV_HELAMPモデルに適合する

$|H_+|, |H_0|, |H_-|$ とそのフェーズを得た。

その結果、 $|H_+|=0.7069, H_+$ のフェーズ= 2.4772

$|H_0|=0.7050, H_0$ のフェーズ= 0.0

$|H_-|=0.0525, H_-$ のフェーズ= 1.7413 と求めた。

Decay tableに使われている記号の意味

VSS:ベクターメソンの親粒子から2つのスカラーメソンの娘粒子に崩壊

BMIX: $B^0 \bar{B}^0$ 混合状態を作る

SVV_HELAMP:スカラーメソンの親粒子から2つのベクトルメソンの娘粒子に崩壊。3つの振幅の重ね合わせになる。これらの大きさと位相を表す6つの実数を入力する必要がある。

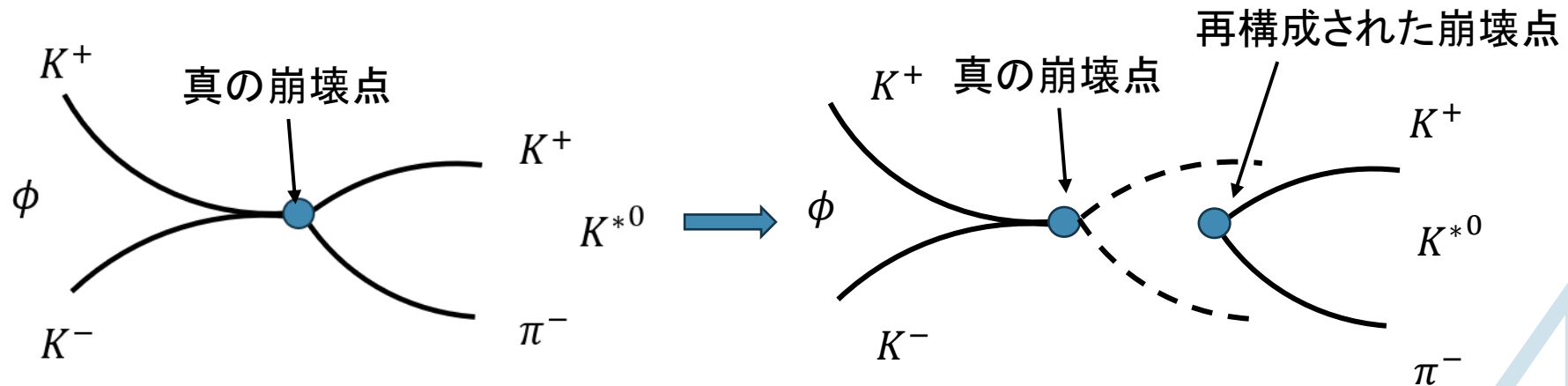
崩壊点位置分解能の求め方(信号MC)

- $\phi \rightarrow K^+K^-$ のみで崩壊点を再構成
- $K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-$ のみで崩壊点を再構成
- それぞれの場合の z-residual 分布を求める

z-residual 分布とは
再構成された B 中間子の崩壊点の z 座標と
事象生成時の真の B 中間子の崩壊点の z 座標
の差の分布



z-residual 分布を Double Gaussian (2つのガウシアンを重ね合わせ) でフィットし、求めた2つの sigma の加重平均を分解能の値として示す。



z-residual分布(信号MC)

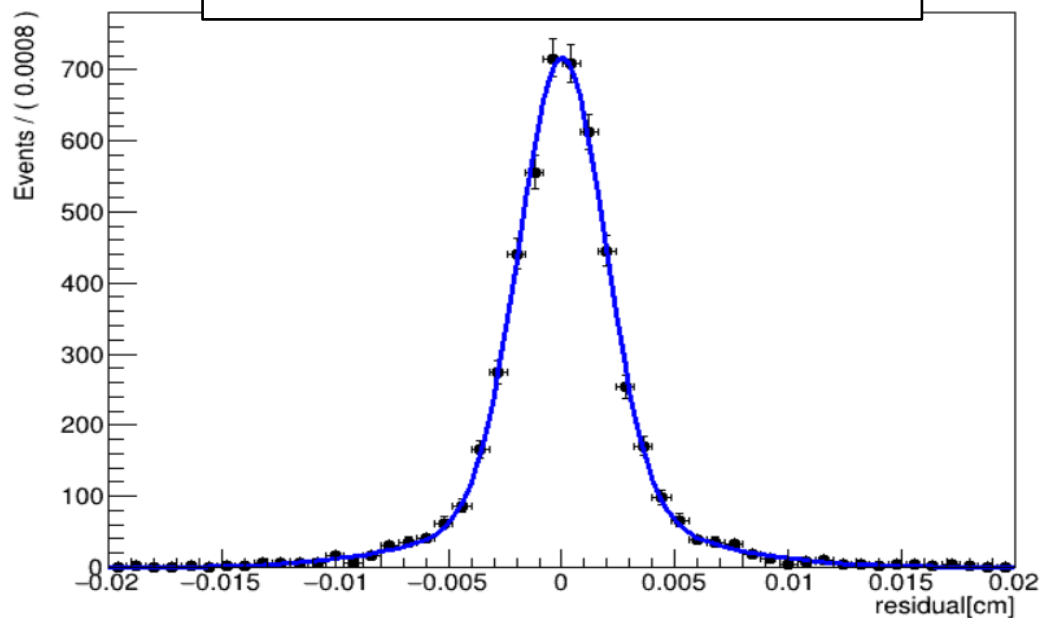
フィット関数

Double Gaussianでフィット

$$\mathcal{P}(\Delta z') = f_1 \mathcal{P}_1(\Delta z') + (1 - f_1) \mathcal{P}_2(\Delta z')$$

$$f_1 = \frac{N_1}{N_1 + N_2} \quad (N_1, N_2 \text{ は事象数})$$

$\phi \rightarrow K^+ K^-$ only

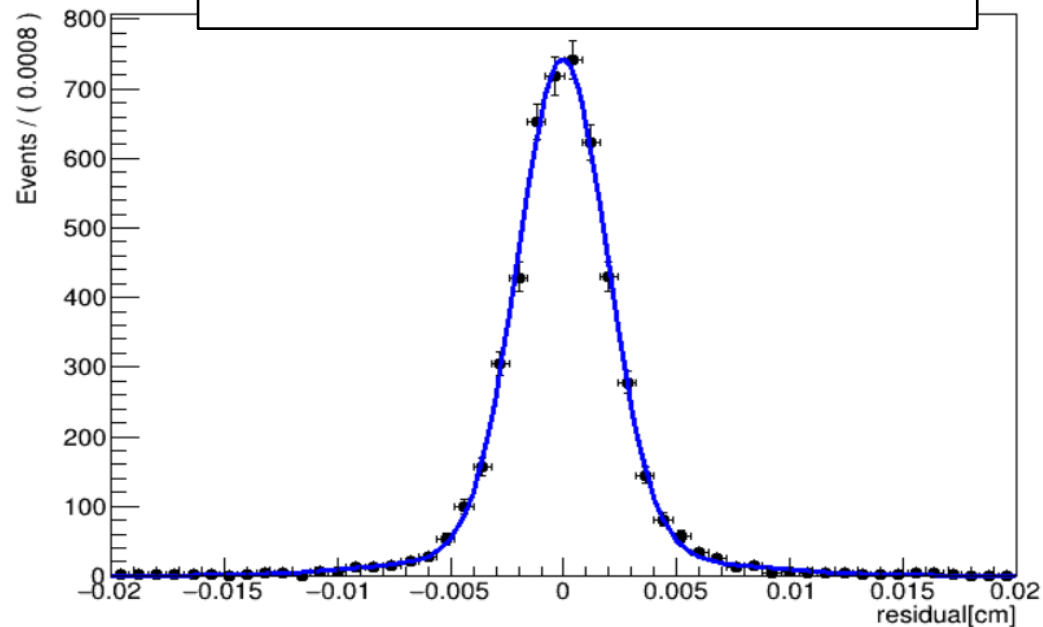


分解能 $\sigma_{kk}^2 : 30.8 \pm 1.1 [\mu\text{m}]$

σ_{kk}^2 と $\sigma_{k\pi}^2$ が独立に寄与するとみなし二乗和を取ると

$$\text{分解能} = \sqrt{\sigma_{kk}^2 + \sigma_{k\pi}^2} = 41.8 \pm 1.1 [\mu\text{m}]$$

$K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$ only



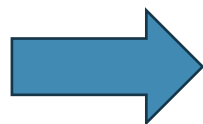
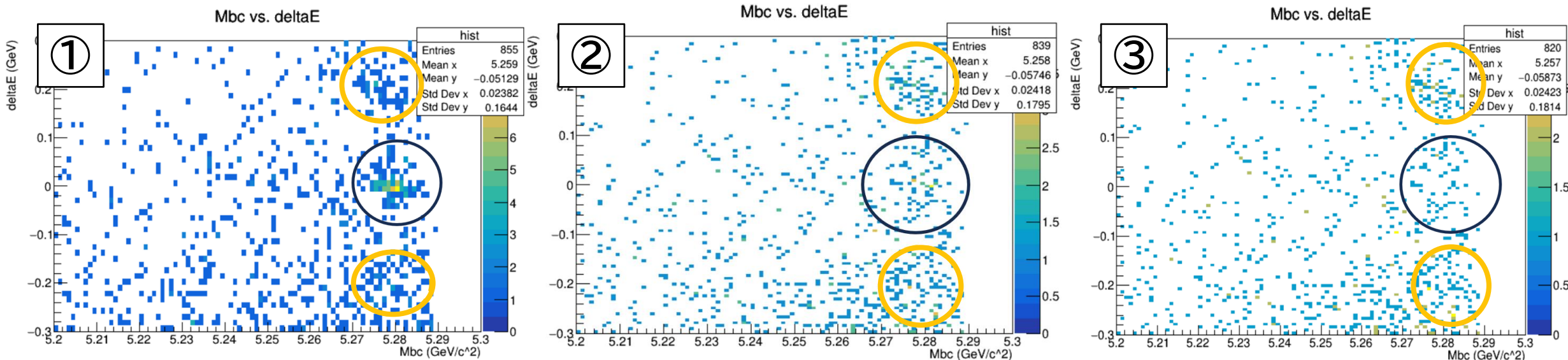
分解能 $\sigma_{k\pi}^2 : 28.2 \pm 1.0 [\mu\text{m}]$

Figure of Merit ($1ab^{-1}$)

	Cutなし	FastBD T>0.1	FastBD T>0.2	FastBD T>0.3	FastBD T>0.4	FastBD T>0.5	FastBD T>0.6	FastBD T>0.7	FastBD T>0.75	FastBD T>0.8	FastBDT >0.85	FastBD T>0.9
qqbar MC	5095	3704	2613	1989	1515	1150	861	603	486	367	262	164
BBbar MC	1198	1189	1167	1140	1106	1064	1026	967	923	850	774	664
N_{sig} (全データ (100万events))	318784	316576	311116	304609	296786	287578	275923	259896	249114	235059	215780	186487
$N_{sig}(1ab^{-1}分)$	1540	1529	1503	1472	1434	1389	1333	1256	1203	1136	1042	901
N_{bg} $= q\bar{q} + B\bar{B}$ $* 144/1198$	5239	3847	2753	2126	1648	1278	984	719	597	469	355	244
$\frac{N_{sig}}{\sqrt{N_{sig} + N_{bg}}}$	18.70	20.85	23.04	24.54	25.83	26.90	27.69	28.26	28.35	28.36	27.88	26.63

$B\bar{B}$ バックグラウンドの見積もり

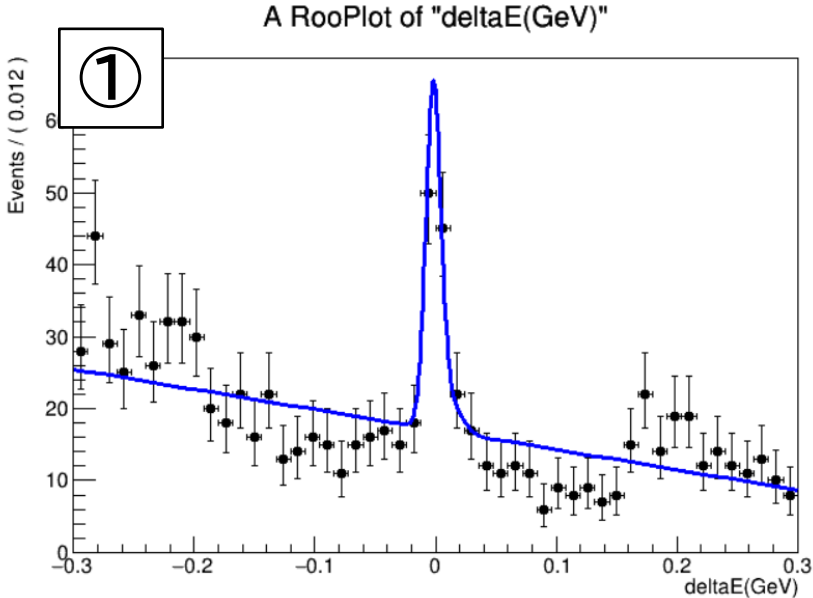
- ① ϕK^{*0} のみを信号としたとき
- ② K^{*0} 以外の $K\pi$ が終状態のものも信号としたとき
- ③ ϕ 以外の KK が終状態のもの、 K^{*0} 以外の $K\pi$ が終状態のものも信号としたときの3パターンで事象数の違いを調べた。



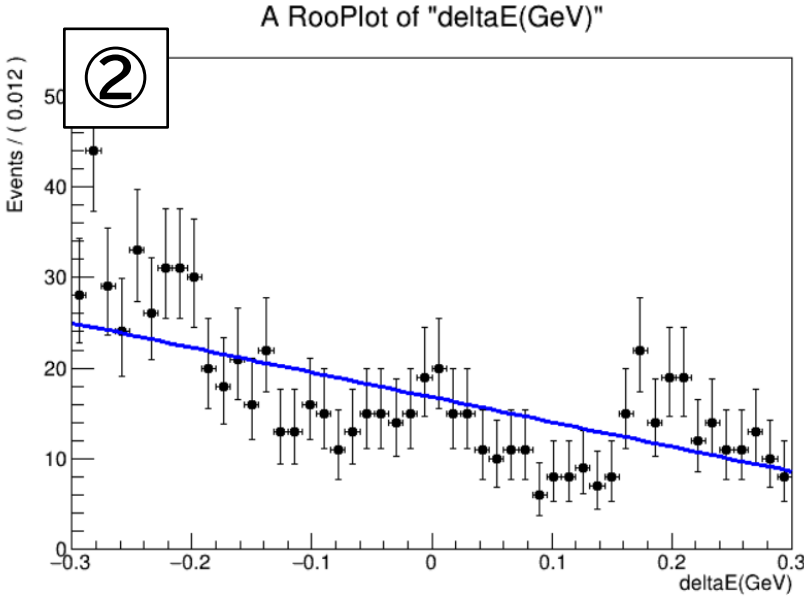
信号領域(黒丸)の事象数を減らすことができた
黄色の部分はまだ残っている

B \bar{B} バックグラウンドの見積もり

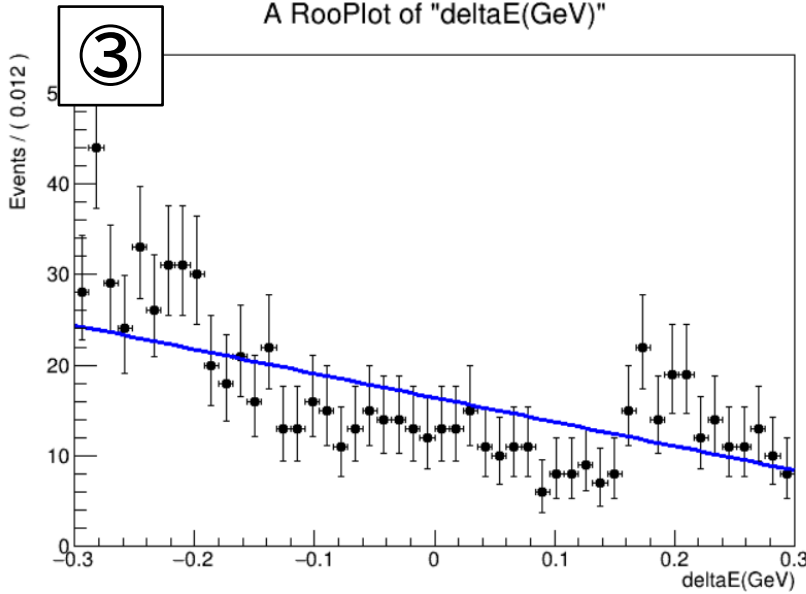
φ K*0のみをsignalとしたとき



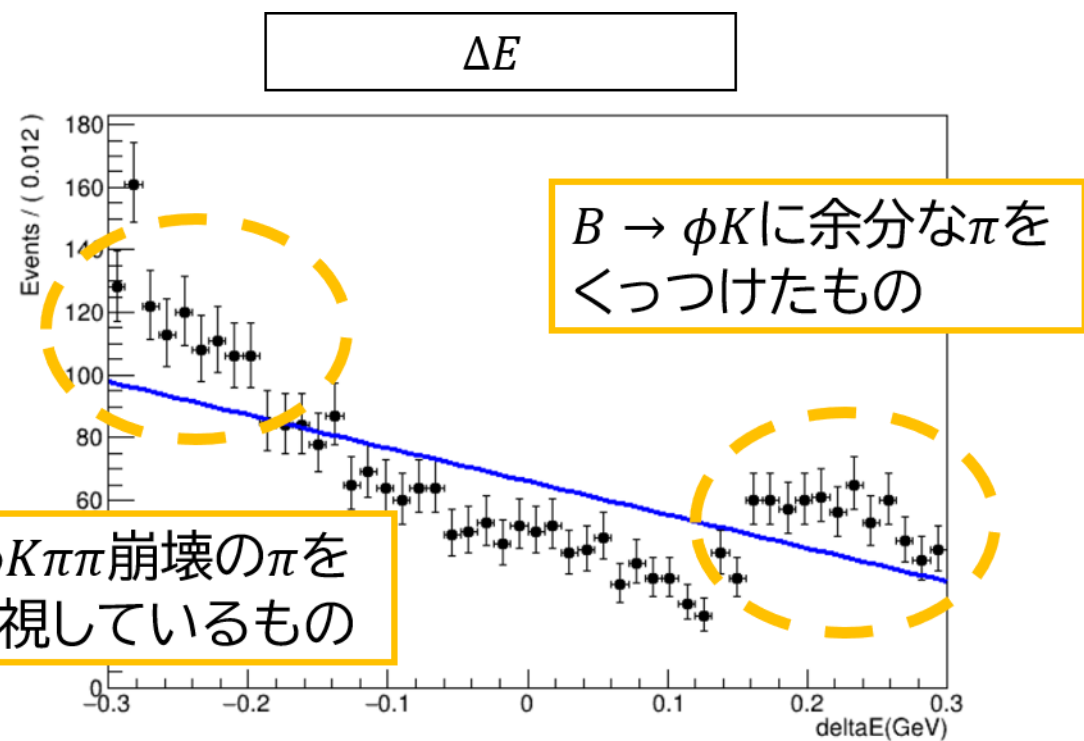
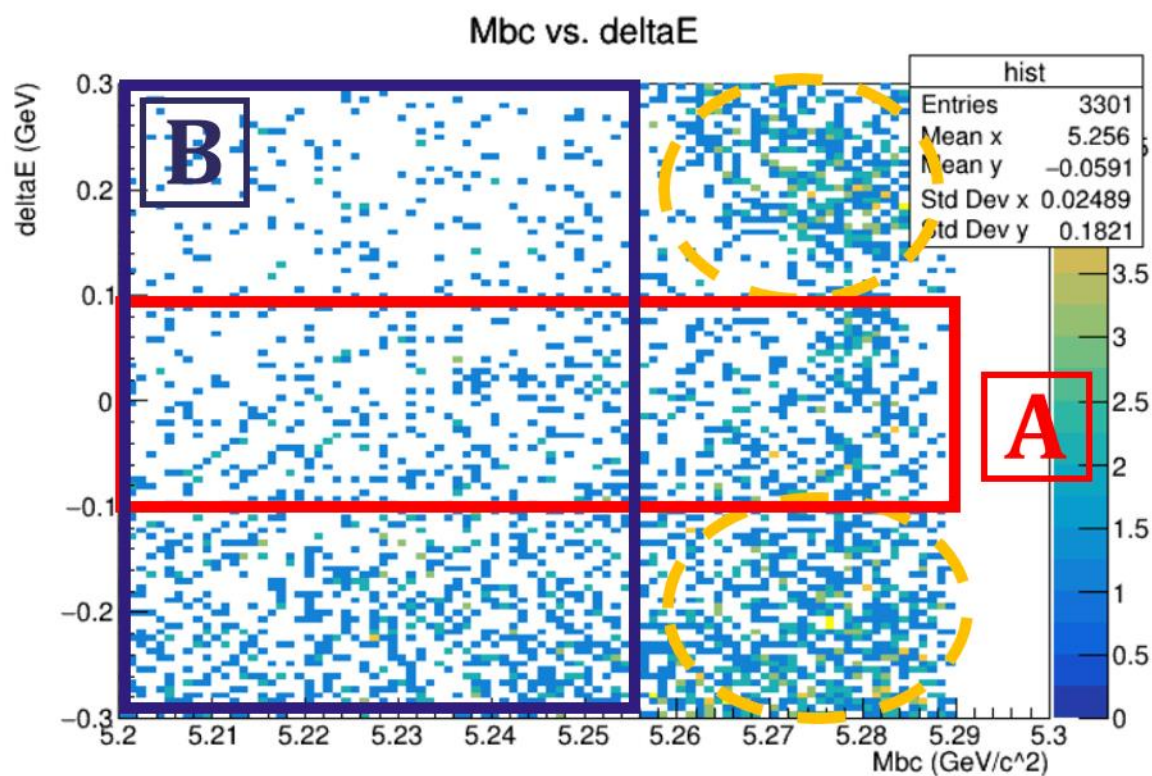
K*0以外もsignalとしたとき



φ、K*0以外もsignalとしたとき



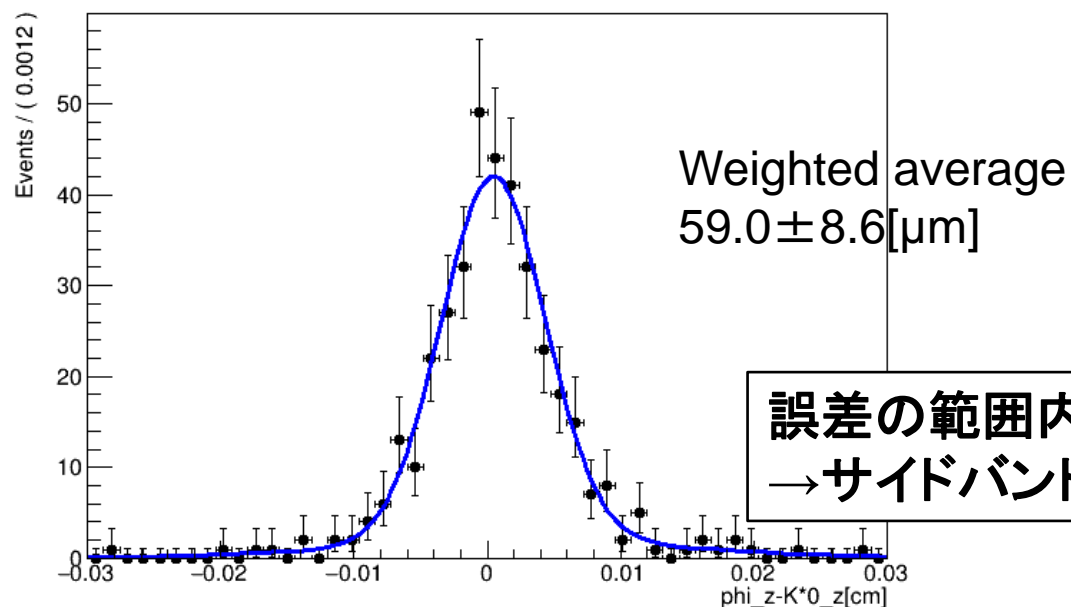
$B\bar{B}$ Mbc- ΔE 分布



$q\bar{q} \Delta z'$ 分布 (MC)

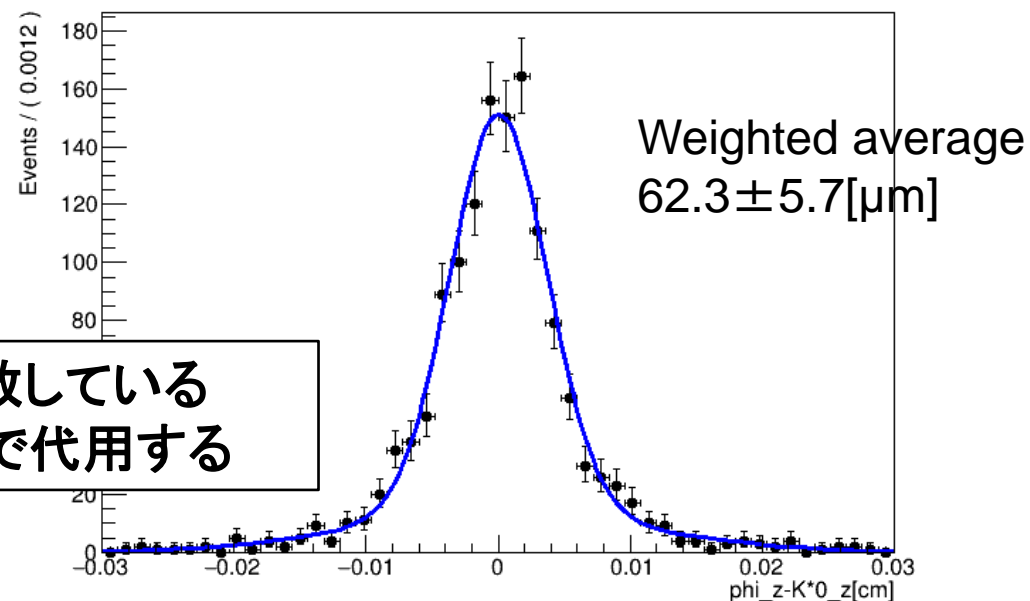
シグナル領域

A RooPlot of "phi_z-K*0_z[cm]"



サイドバンド領域

A RooPlot of "phi_z-K*0_z[cm]"



誤差の範囲内で一致している
→ サイドバンド領域で代用する

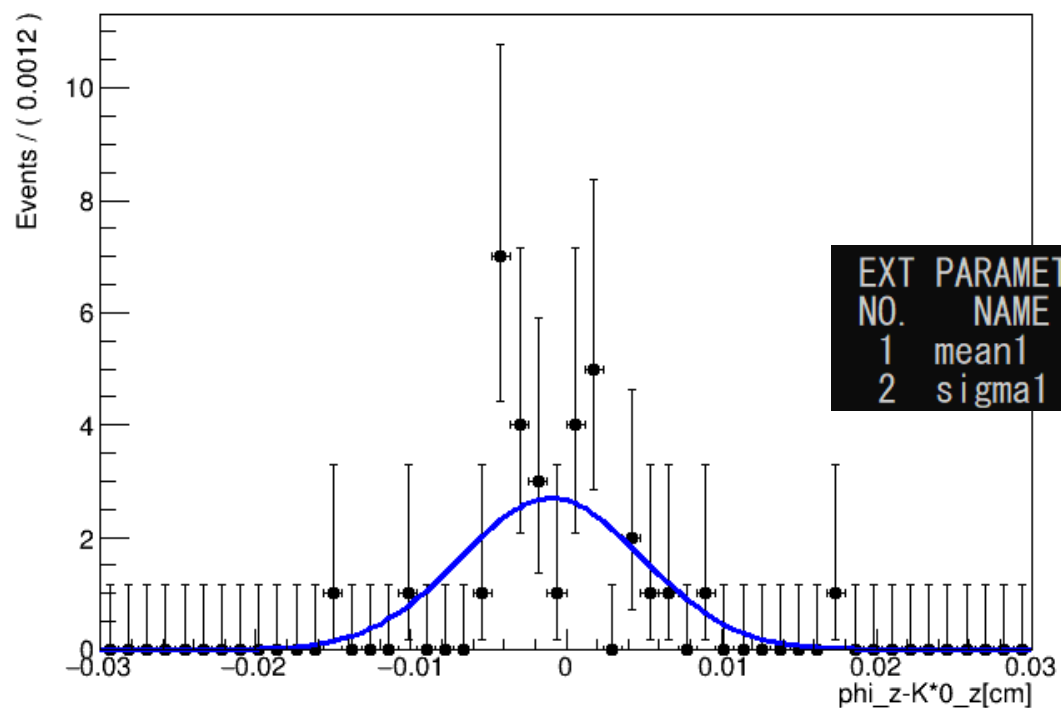
EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	PARABOLIC ERROR	MINOS ERRORS	
				NEGATIVE	POSITIVE
1	f1	8.68049e-01	5.04440e-02	-5.89764e-02	4.32777e-02
2	mean1	4.59175e-04	2.46649e-04	-2.47486e-04	2.46793e-04
3	mean2	2.38923e-03	2.28611e-03	-2.13645e-03	3.01832e-03
4	sigma1	3.91406e-03	2.51104e-04	-2.58525e-04	2.47310e-04
5	sigma2	1.27788e-02	2.96960e-03	-2.27046e-03	4.52772e-03

EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	PARABOLIC ERROR	MINOS ERRORS	
				NEGATIVE	POSITIVE
1	f1	7.73278e-01	3.98961e-02	-4.16183e-02	3.82203e-02
2	mean1	5.13648e-05	1.40533e-04	-1.40001e-04	1.41280e-04
3	mean2	2.10570e-04	7.23523e-04	-7.35644e-04	7.34320e-04
4	sigma1	3.67396e-03	1.88394e-04	-1.88904e-04	1.88022e-04
5	sigma2	1.11891e-02	9.68162e-04	-8.61523e-04	1.11429e-03

$B\bar{B}$ $\Delta z'$ 差分布(MC)

BBbarのイベントが少ないので、ほかのMCデータはDouble GaussianでフィットしているところをSingle gaussianでフィットした

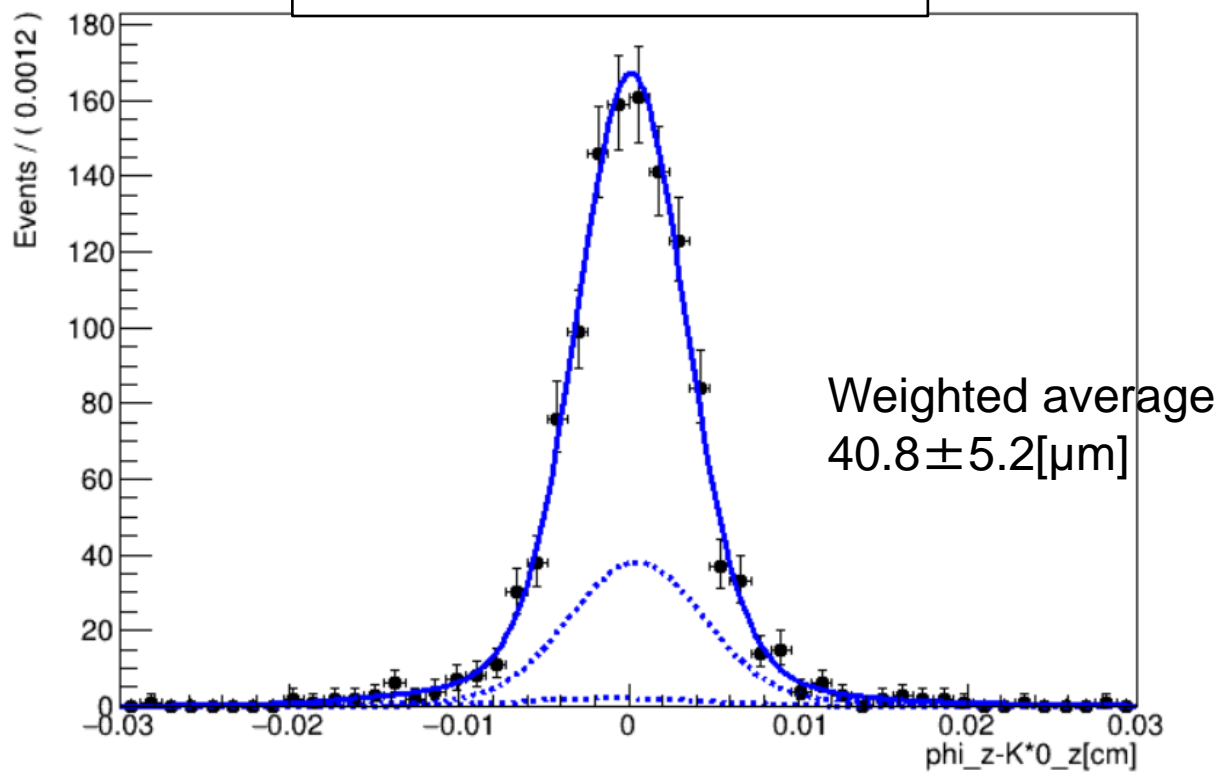
A RooPlot of "phi_z-K*0_z[cm]"



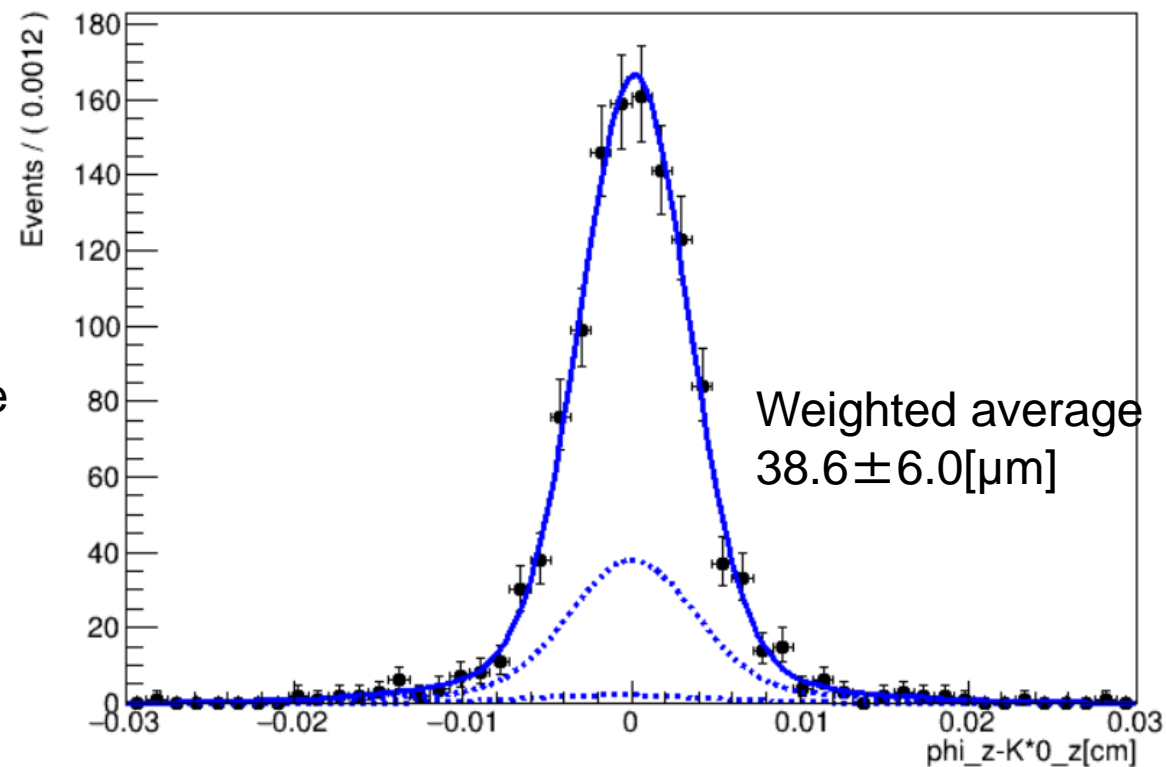
EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	PARABOLIC ERROR	MINOS ERRORS	
				NEGATIVE	POSITIVE
1	mean1	-6.56959e-04	9.71363e-04	-9.84581e-04	9.73808e-04
2	sigma1	5.58170e-03	6.86842e-04	-6.21746e-04	7.65468e-04

$\Delta z'$ 分布 (MC)

シグナル領域



qqbarのみサイドバンド領域



実験データでの $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊の事象再構成

積分ルミノシティ365/fbの実験データを使用
(MCは1/ab)

信号領域

$-0.03 < \Delta E < 0.03, 5.27 < M_{bc} < 5.29$
では、 $\Delta E = 0, M_{bc} = 5.28 \text{ GeV}/c^2$ に
ピークが見えた。

