

Belle II実験における
 $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊によるBメソン
崩壊点位置分解能の研究

Flavor Physics Workshop 2023

奈良女子大学 修士2年 今井彩加

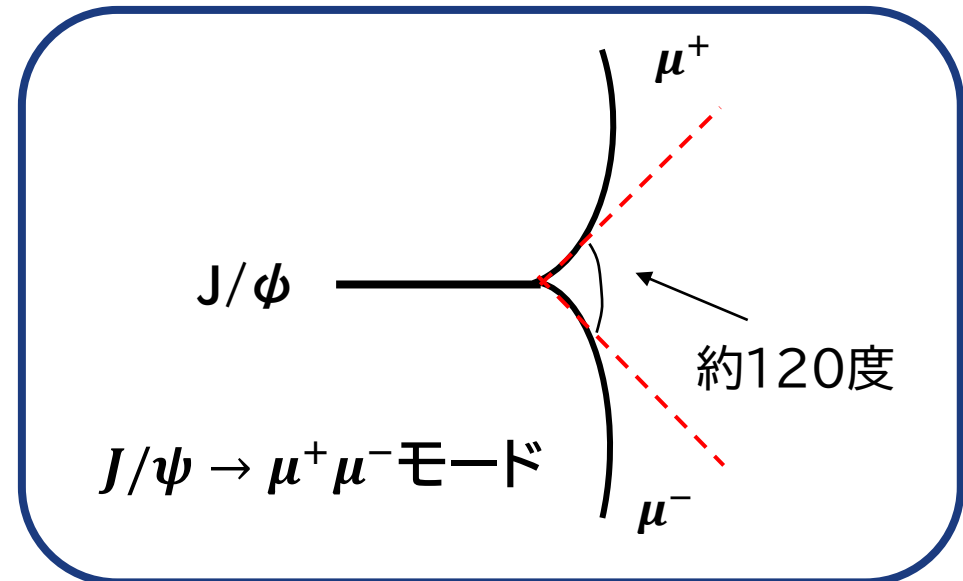
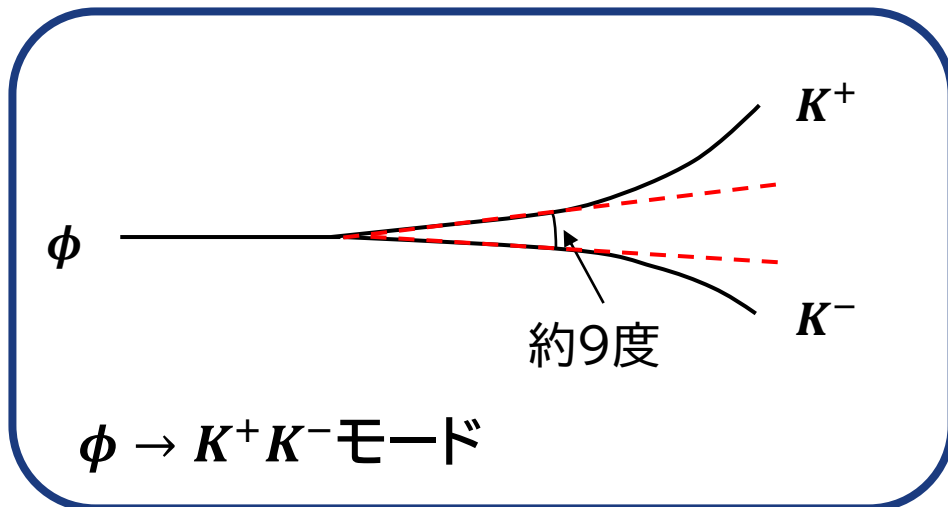
目次

- 研究目的
- シグナル事象再構成
- 崩壊点位置分解能
- バックグラウンド・Continuum Suppression
- まとめと今後の展望

研究目的

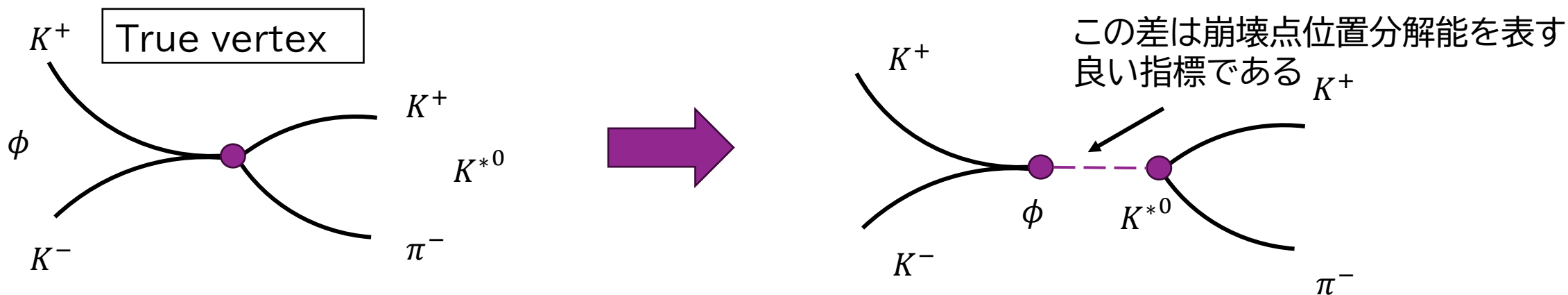
ペンギンダイアグラムで生じるBメソンの崩壊モードにおけるCP非保存測定では、Bメソン崩壊点の再構成とその位置分解能の理解が重要になる。

特に $\phi(1020) \rightarrow K^+K^-$ 崩壊(Kメソン:約500MeV)はしきい値直上の崩壊であり、出てくる K^+ トラックと K^- トラックのopening angleがほかの崩壊よりも小さい。



研究目的

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



$B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 、 $\phi \rightarrow K^+ K^-$ 、 $K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$ モードは、同一事象について

- $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ のすべてのトラックを使用する
- $\phi \rightarrow K^+ K^-$ のみのトラックを使用する
- $K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$ のみのトラックを使用する

の3つの手法で B^0 の崩壊点を再構成して比較することが可能なので、崩壊点の位置の分解能を詳しく調査する目的に向いている。

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

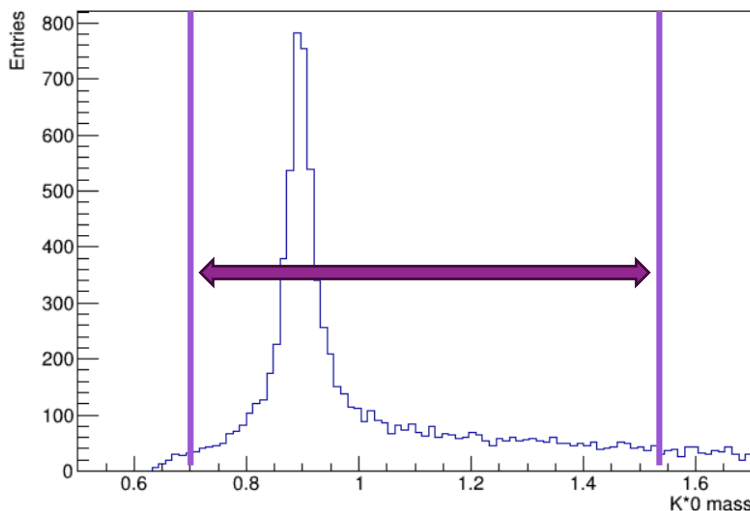
シグナル事象再構成

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$ cm $ dz < 5$ cm
π	π のLikelihood Ratio > 0.1 $ dr < 1$ cm $ dz < 5$ 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	$-0.15 \text{ GeV} < \Delta E < 0.15 \text{ GeV}$ $5.24 \text{ GeV}/c^2 < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}/c^2$

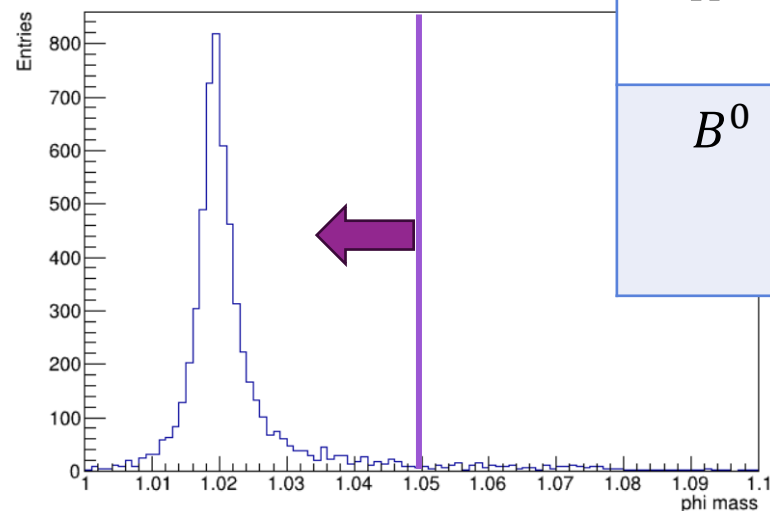
K*0質量分布

K*0 mass

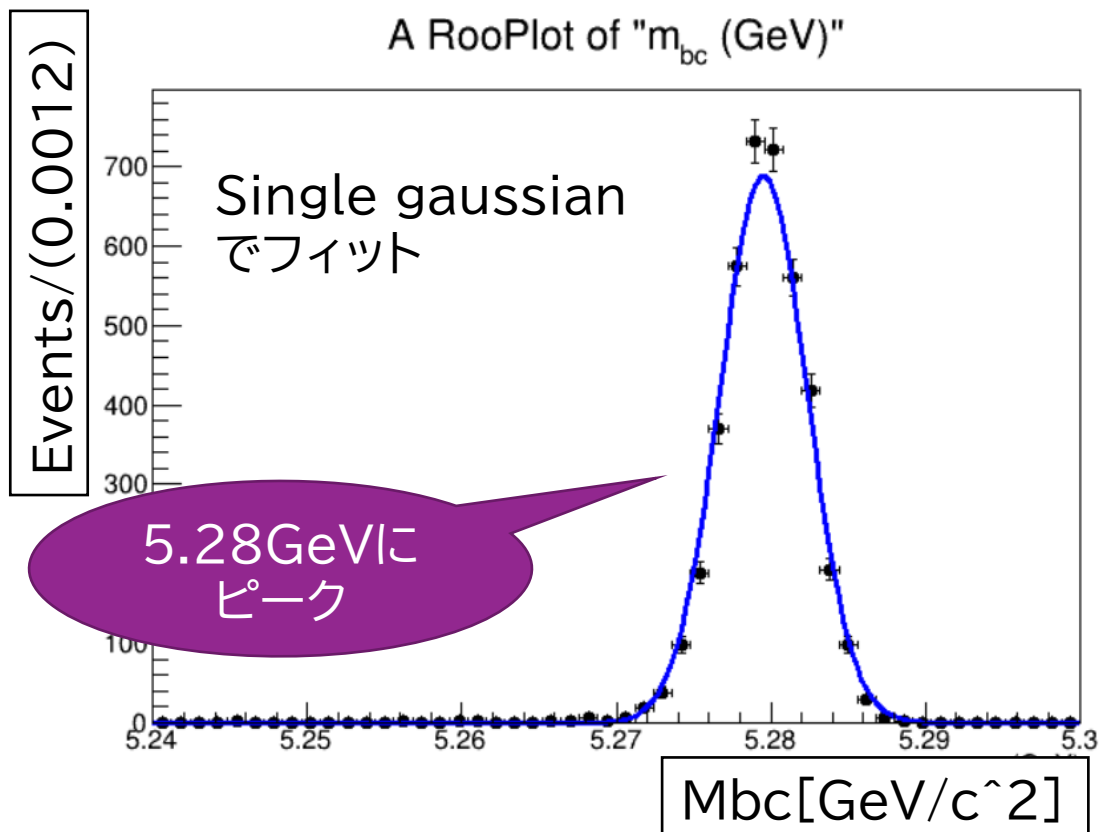


phi質量分布

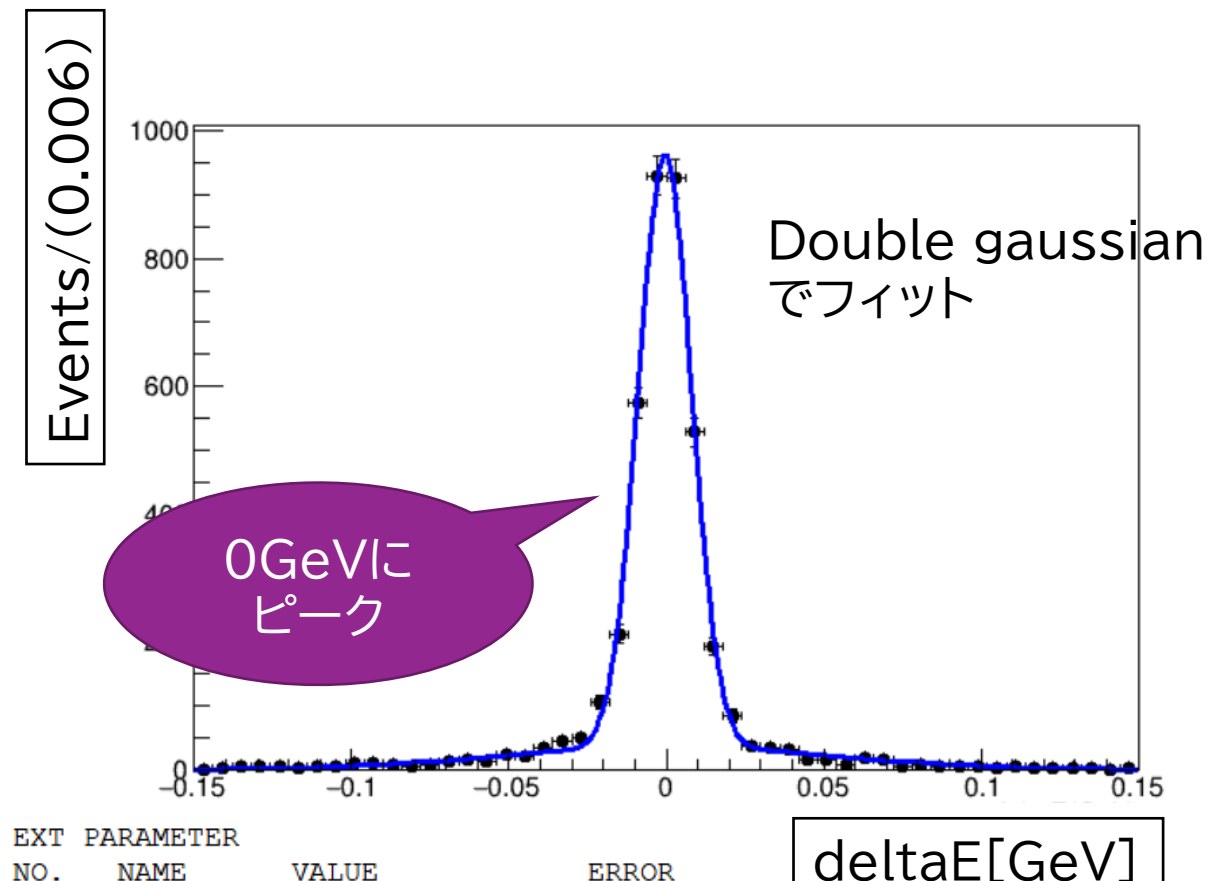
phi mass



SignalMC Mbc,deltaE分布



EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	ERROR
1	sigmean	5.27953e+00	4.43844e-05
2	sigwidth	2.83053e-03	3.13140e-05



EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	ERROR
1	mean	-9.98870e-06	6.88581e-04
2	mean2	-3.71270e-04	1.65153e-04
3	nSig1	7.66539e+02	3.94248e+01
4	nSig2	3.28934e+03	6.38328e+01
5	sigma	5.31683e-02	1.83515e-03
6	sigma2	8.50667e-03	1.54851e-04

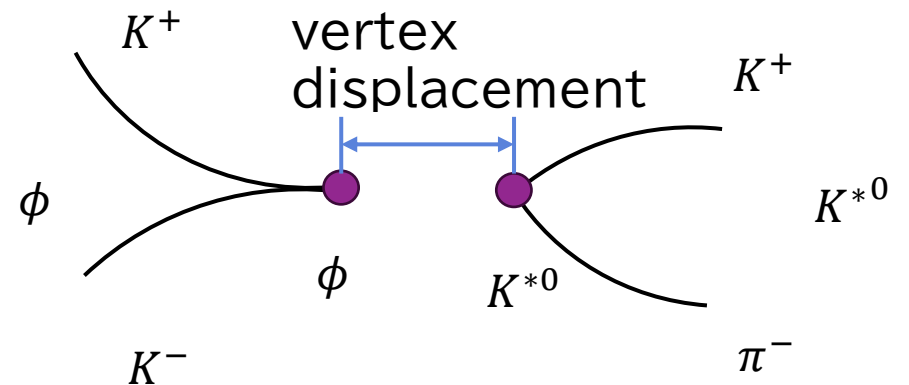
崩壊点位置分解能

TreeFit(Belle II コンストレイントフィットするソフトウェアパッケージ)の仕様(Decay tree全体を指定して入力する)に合わせ、 $\phi \rightarrow K^+K^-$ のみで再構成した崩壊点を得るには、 $K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-$ のtrackの位置のエラーを1000倍大きくして、崩壊点の決定に寄与しないようにする。

$K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-$ のみで崩壊点を再構成するには逆に同様のことをする。

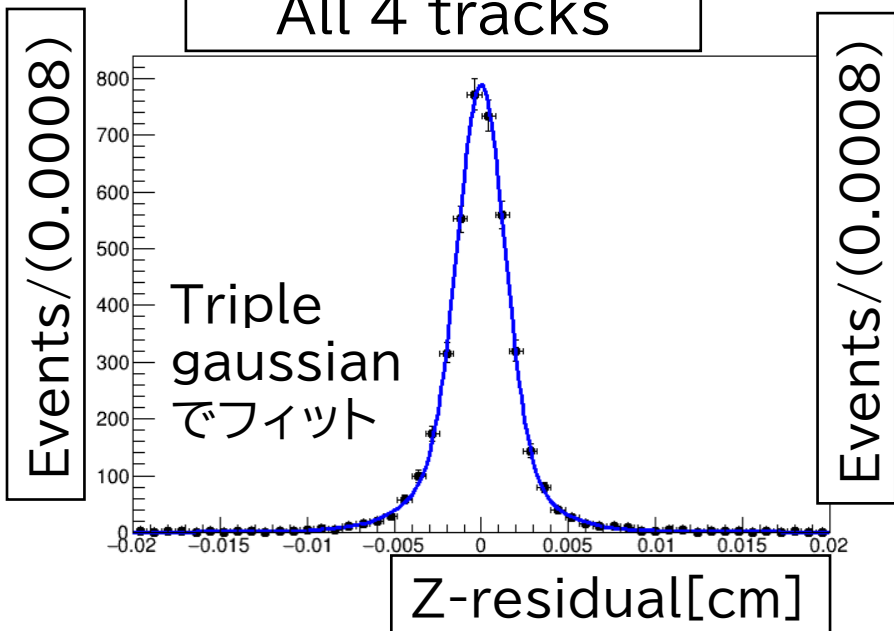
z-residual分布をTriple Gaussian(3つのガウシアンを重ね合わせ)でフィットし、求めた3つのsigmaの加重平均をresolutionの値として示す。

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



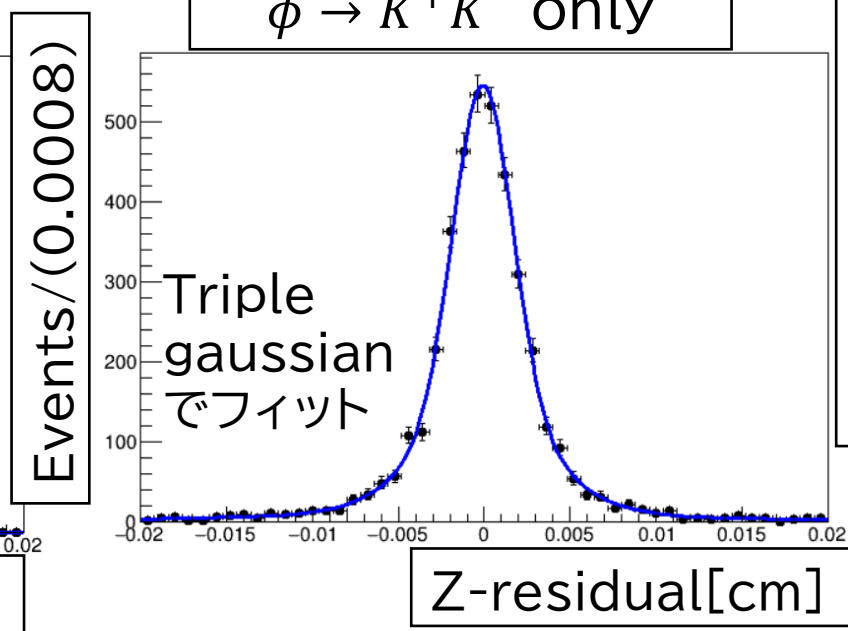
z-residual 分布

All 4 tracks



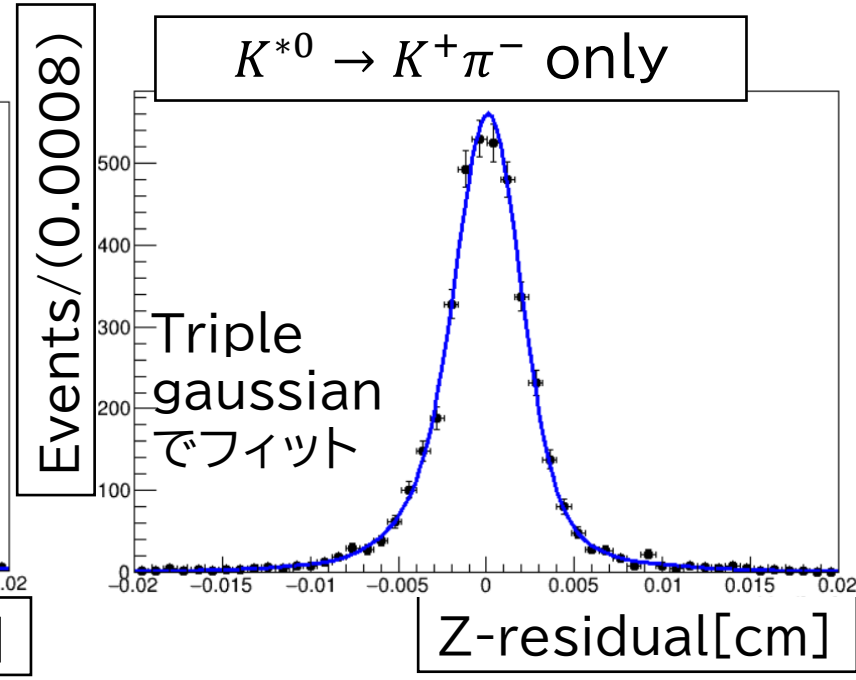
加重平均した σ
 $\sigma_4 = 25.2 \text{ } [\mu\text{m}]$

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



加重平均した σ
 $\sigma_{kk} = 44.6 \text{ } [\mu\text{m}]$

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

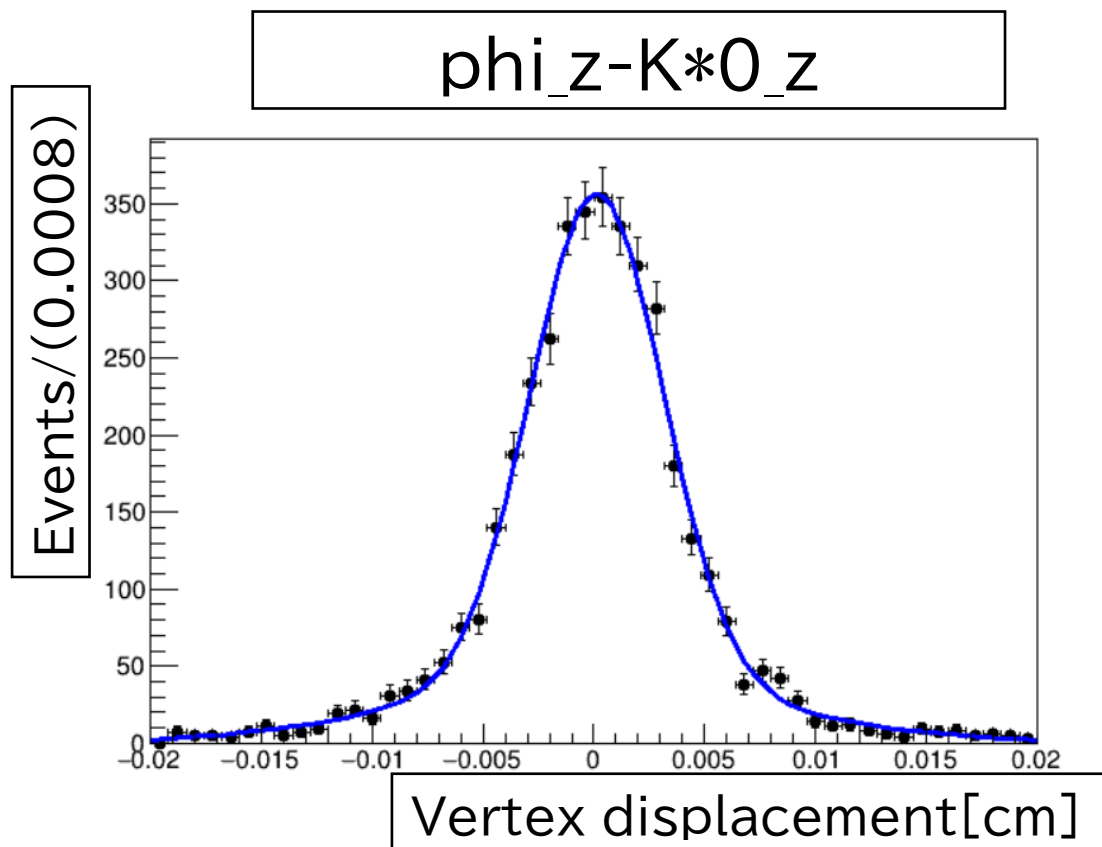


加重平均した σ
 $\sigma_{k\pi} = 34.6 \text{ } [\mu\text{m}]$

$$\sqrt{\left(\frac{1}{\sigma_{kk}^2} + \frac{1}{\sigma_{k\pi}^2}\right)^{-1}} = 27.3 [\mu\text{m}] \cong \sigma_4 (= 25.2 [\mu\text{m}])$$

$\phi \rightarrow K^+K^-$ と $K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-$ は互いに独立に 4tracks で得る崩壊点に寄与。

Vertex displacement



Triple gaussianでフィットしてみると3番目のgaussianの寄与が顕著でなかったためDouble gaussianでフィット

加重平均した σ
 $\sigma = 49.1$ [μm]

Vertex displacementの値はMCの情報は必要ないので、vertex resolutionをデータとMCで直接比較できる。

バックグラウンド

実験データの解析に進むには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

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

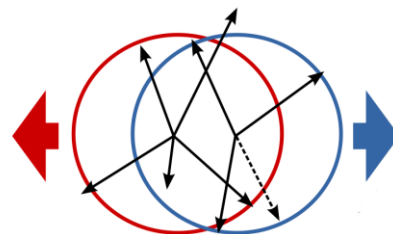
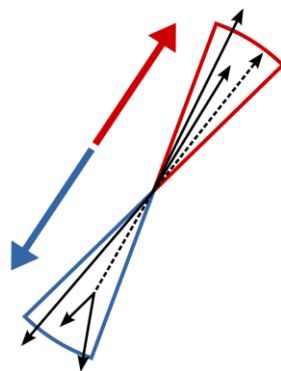
$B^+ B^-$

continuum

があり、 $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊では continuum が 支配的 である

continuum とは
 $e^+ e^- \rightarrow c\bar{c}, u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$
クォーク対生成事象
の総称で $c\bar{c}, u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}$
の合計数

$q\bar{q}$ はジェット状
になっている



$B^0 \overline{B}^0$ は球状に
になっている

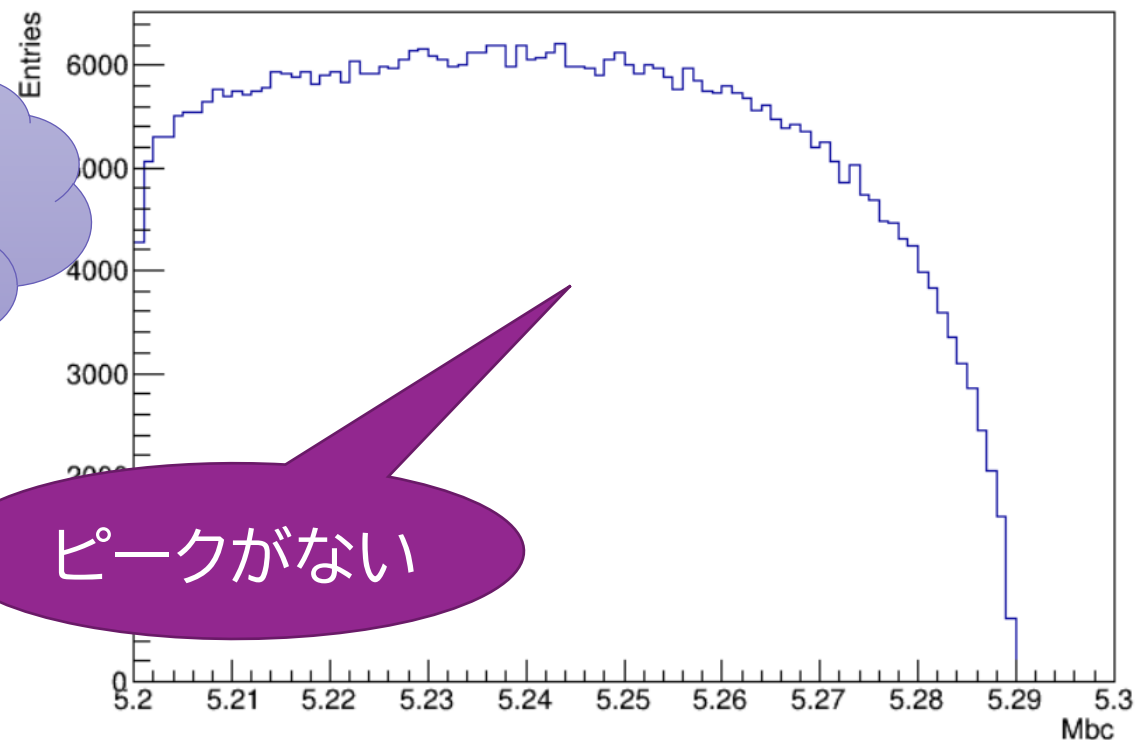
バックグラウンド量の見積もり

$1ab^{-1}$ 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イベント数や分布を確認した。

$c\bar{c}$ のMbc分布

background	entries
ccbar	487453
uubar	100245
ddbar	21832
ssbar	183134
Continuum 合計	792664
mixed	2609
charged	5237
Background 合計	800510

Continuum
が支配的



バックグラウンドの低減

continuumからくるバックグラウンドを減らしたい！



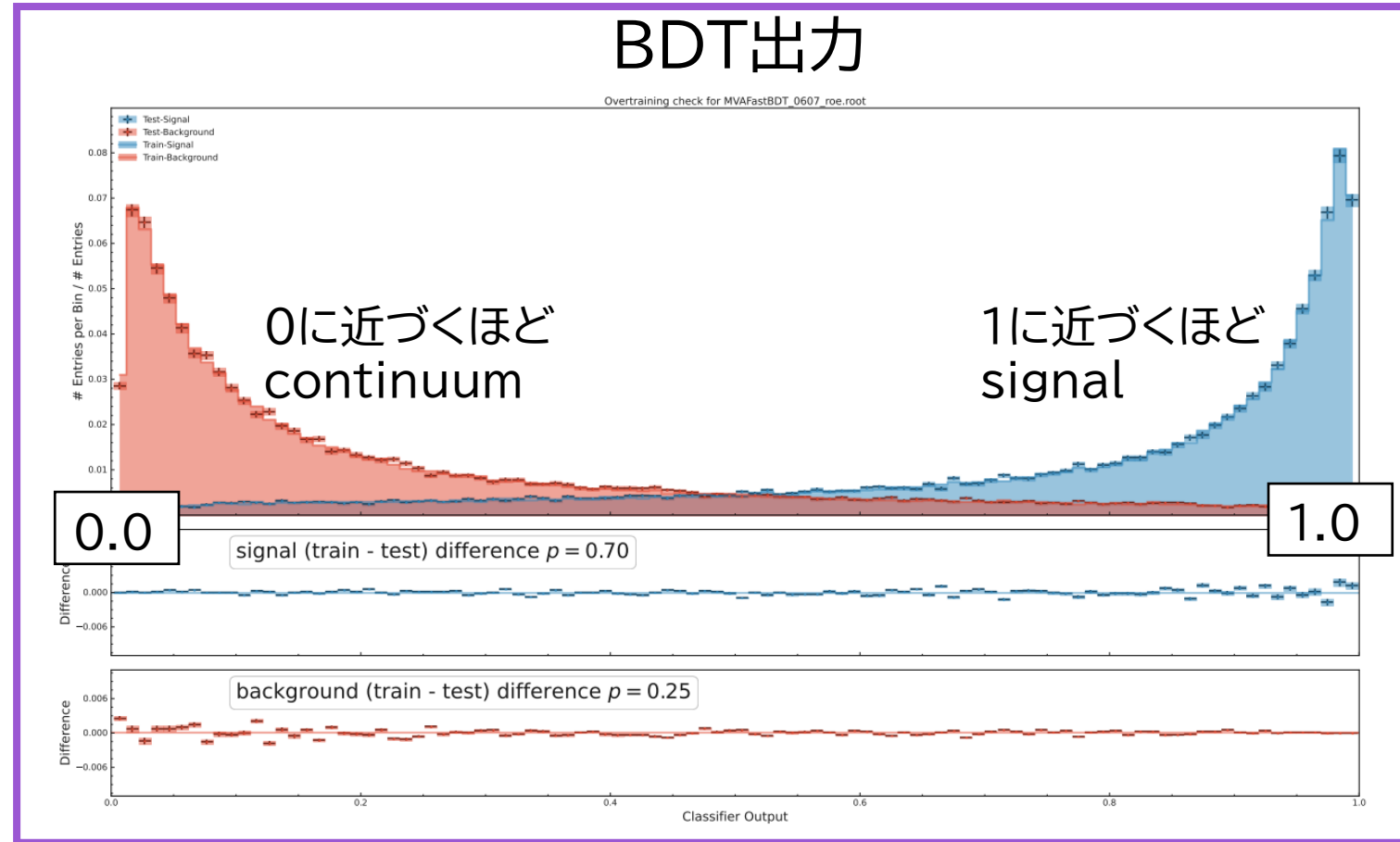
信号とバックグラウンドを分ける指標となる出力値を得たい。

→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、分離に役立つ変数を入力し、信号とcontinuumバックグラウンドのMCデータを用いて学習させる。学習用のトレーニングデータと種類は同じで独立な事象のデータサンプルを用いて、学習の結果を確認する。

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continuum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

Continuum Suppression

シグナル期待値の割合 (Figure of Merit) が最大になるように、FastBDT 出力の横軸のカット値を決めた。

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

$$\begin{aligned} Br(\Upsilon(4S) \rightarrow B^0 \bar{B}^0) &: 0.486 \\ Br(B^0 \rightarrow \phi K^{*0}) &: 1.0 \times 10^{-5} \\ Br(\phi \rightarrow K^+ K^-) &: 0.491 \\ Br(K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-) &: 0.667 \\ \text{Reconstruction efficiency} &: 0.45 \end{aligned}$$

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

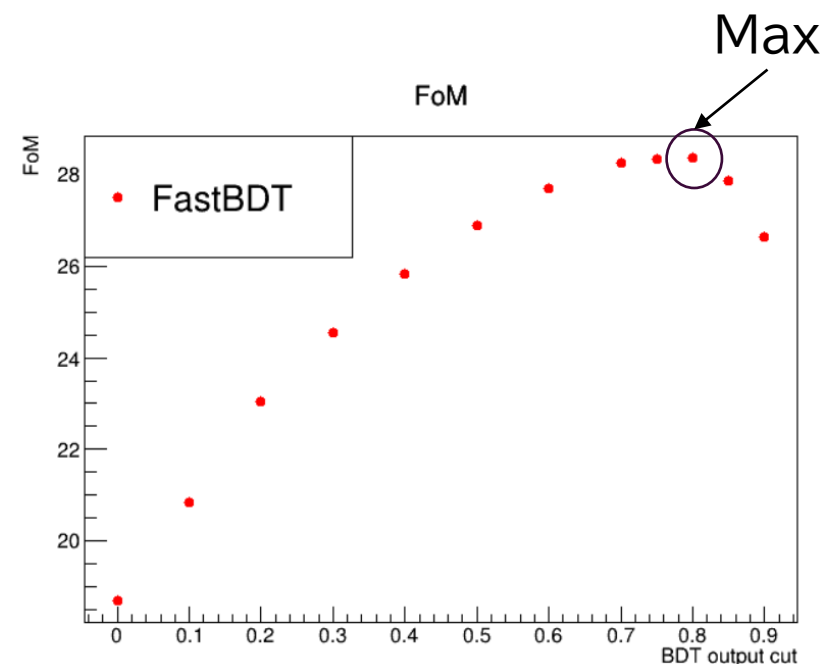
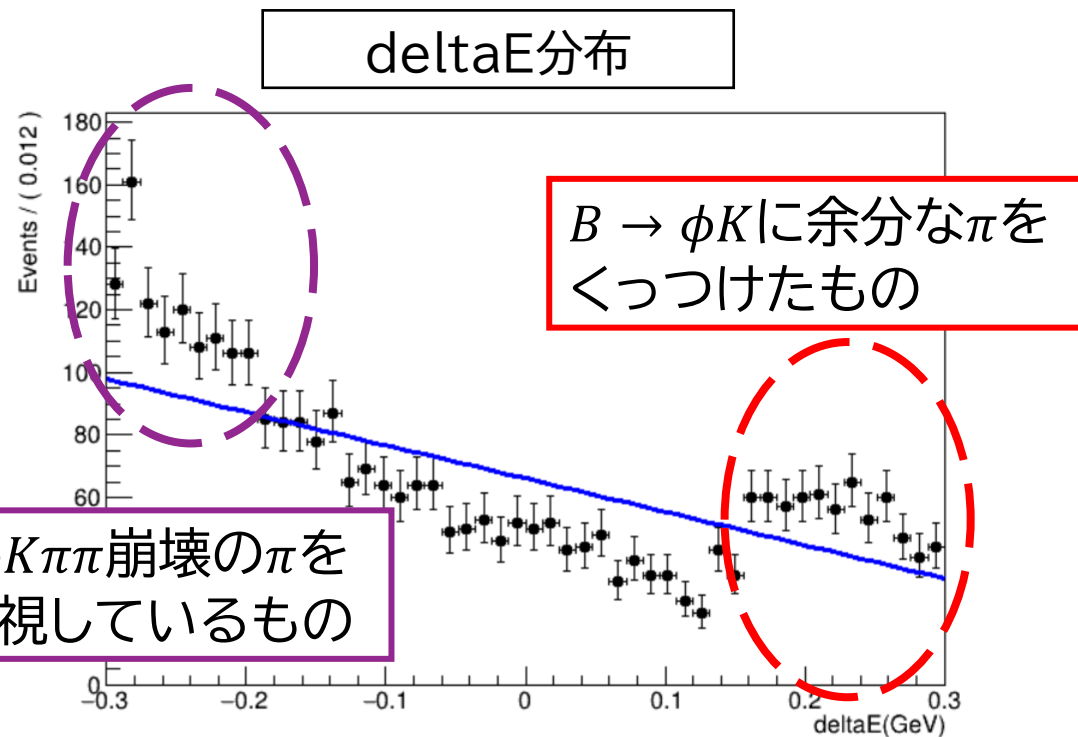
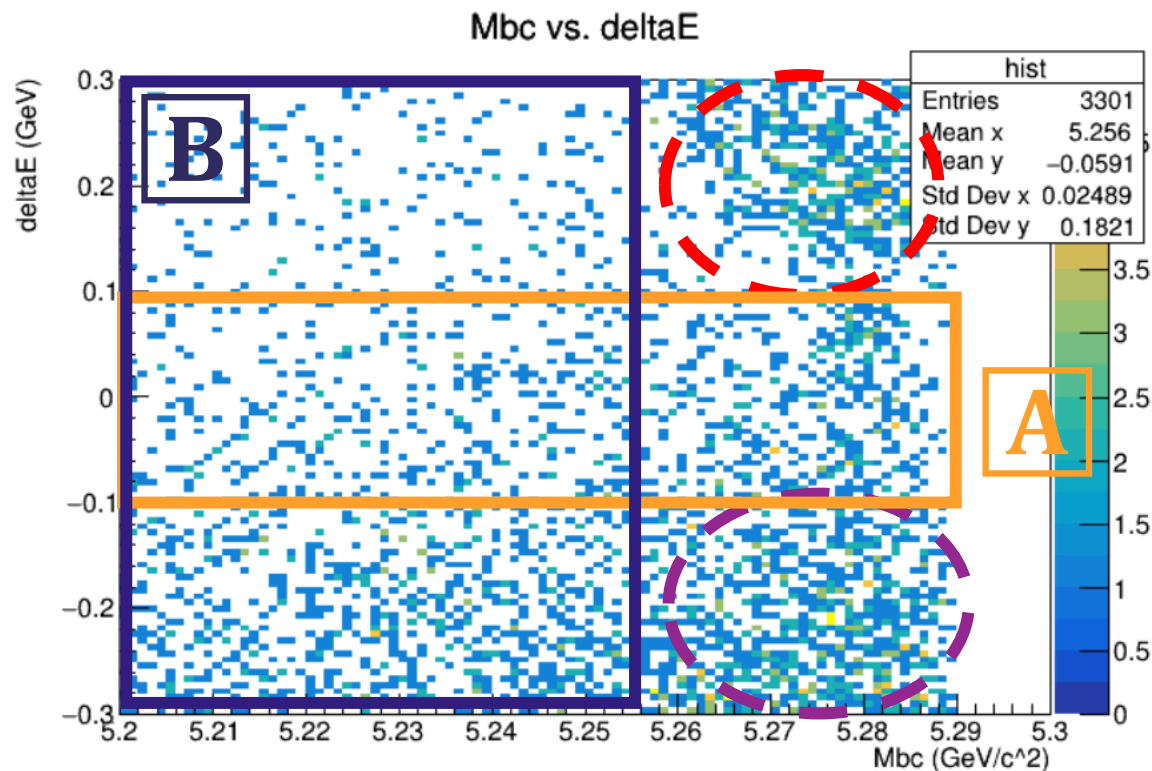


Figure of Meritの値が最大になるところ、FastBDT=0.8が最適値である。以後の解析ではFastBDT>0.8の条件を課す。

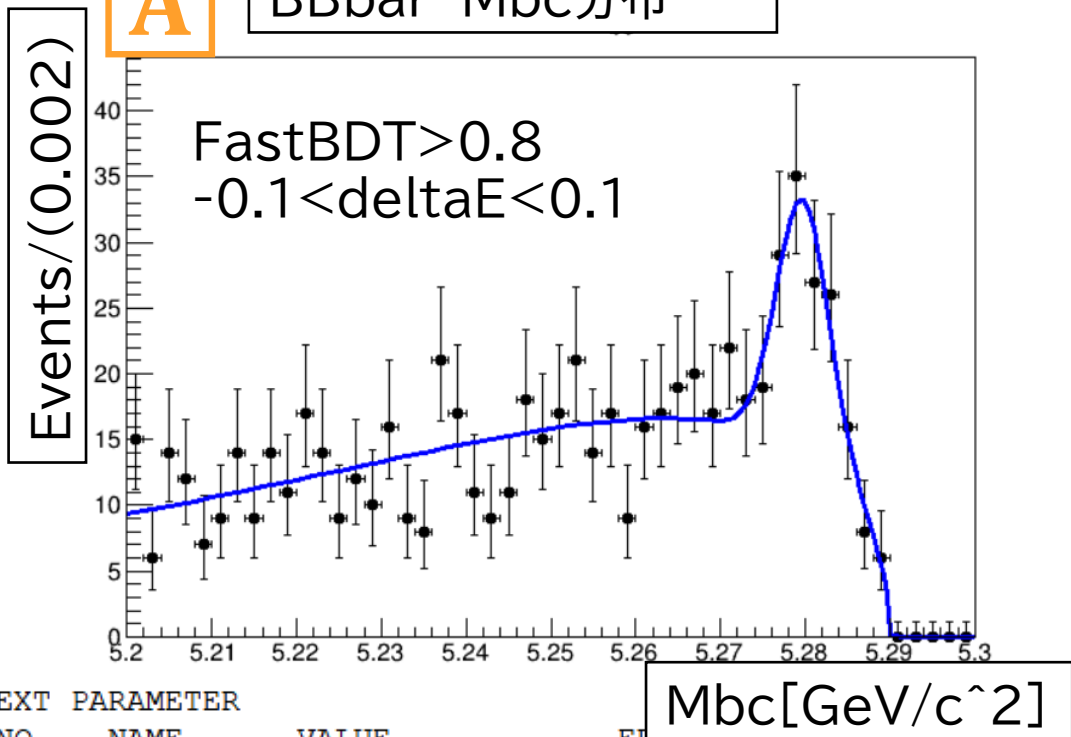
BBbarMC Mbc-deltaE 分布



$B \rightarrow \phi K, B \rightarrow \phi K \pi \pi$ バックグラウンドが多いところを避けた **A**部Mbc分布と **B**部deltaE分布をチェックした。

BBbarMC Mbc,deltaE分布

A BBbar Mbc分布

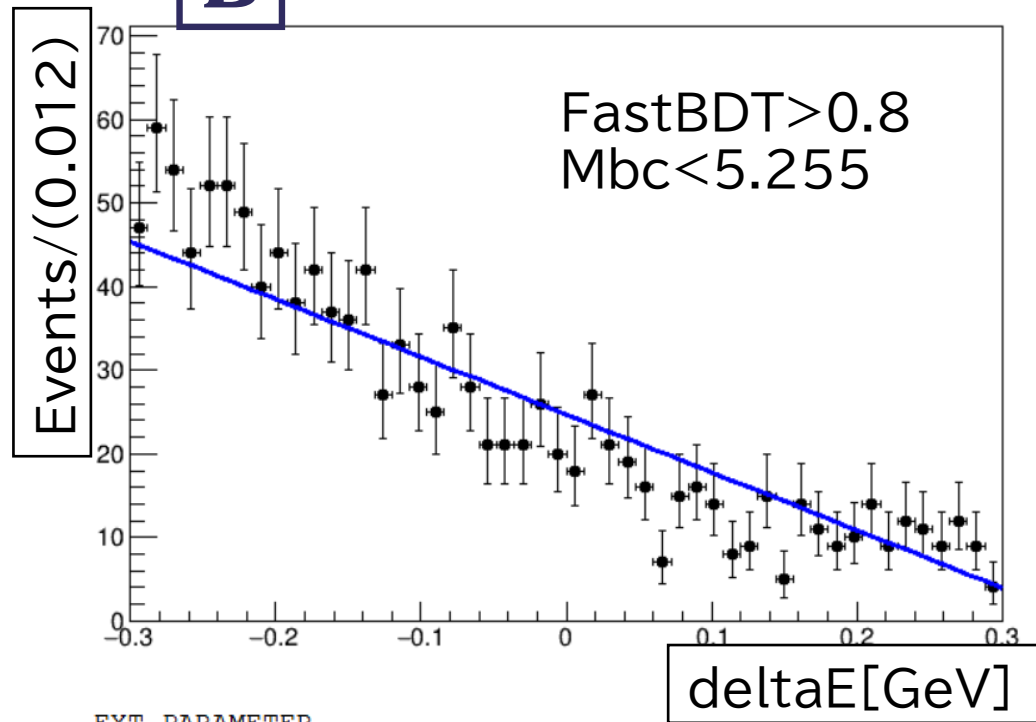


EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	ERROR
1	argus	-4.94144e+01	5.84835e+00
2	mean	5.27974e+00	6.78673e-04
3	nBkg	6.06666e+02	2.89665e+01
4	nSig1	7.43246e+01	1.75142e+01
5	sigma	3.09940e-03	6.70884e-04

ERR DEF= 0.5

ARGUS関数+
single gaussian
でフィット

B BBbar deltaE分布



EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	ERROR
1	a	-2.79558e+00	1.05726e-01

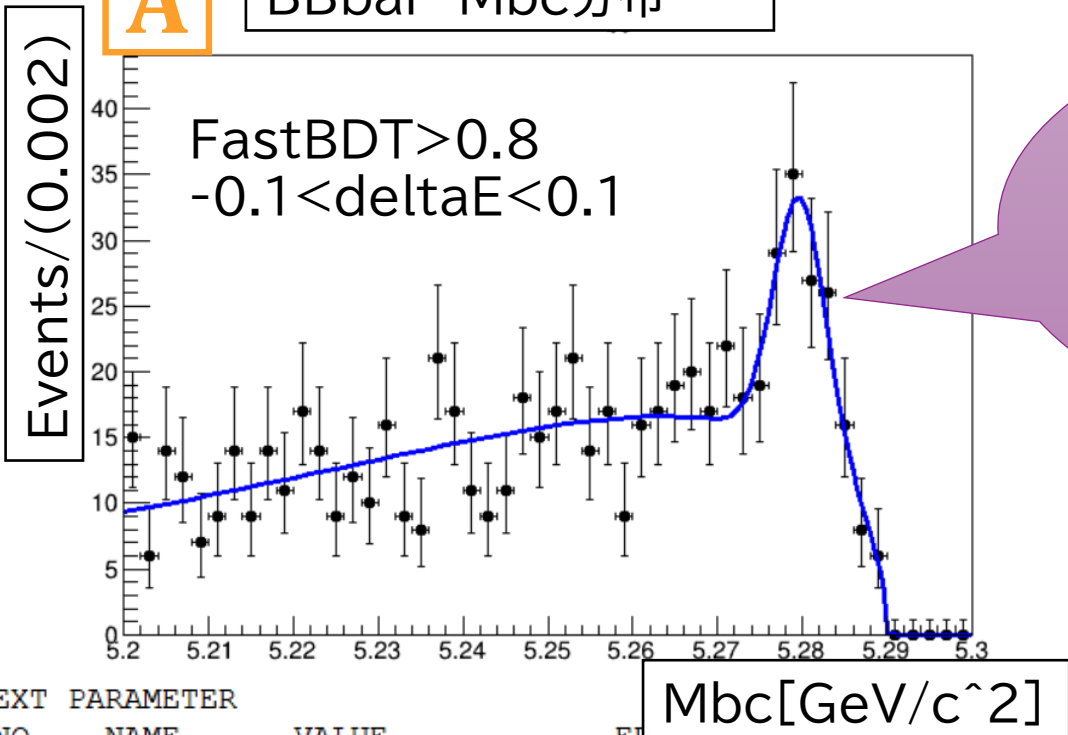
ERR DEF= 0.5

1次関数で
フィット

BBbarMC Mbc,deltaE分布

A

BBbar Mbc分布



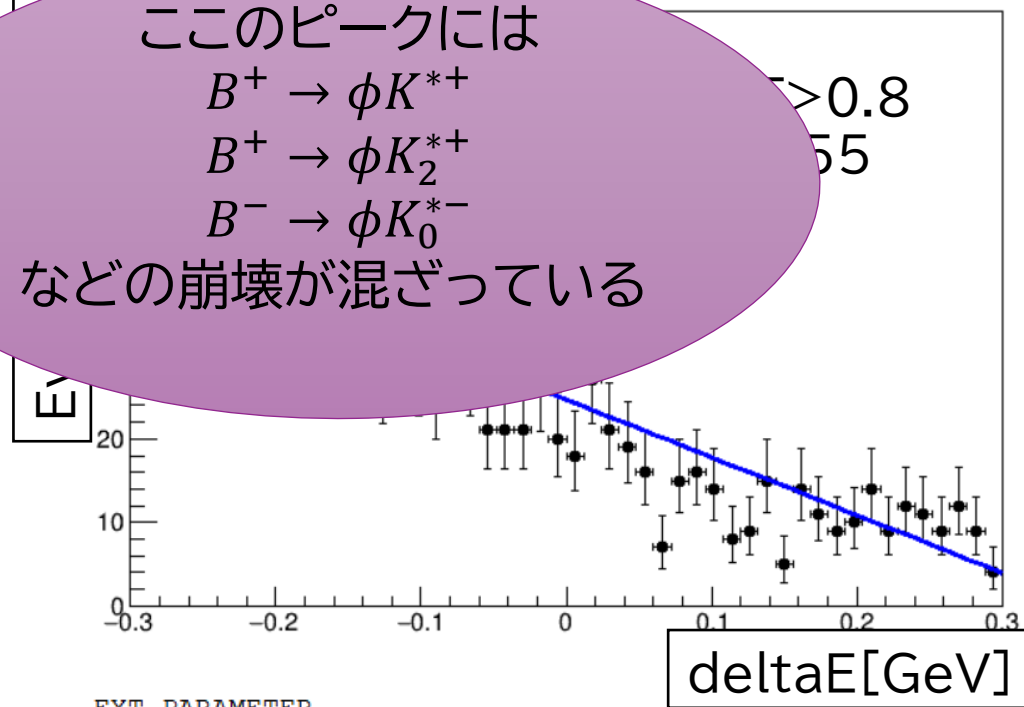
EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	ERROR
1	argus	-4.94144e+01	5.84835e+00
2	mean	5.27974e+00	6.78673e-04
3	nBkg	6.06666e+02	2.89665e+01
4	nSig1	7.43246e+01	1.75142e+01
5	sigma	3.09940e-03	6.70884e-04

ERR DEF= 0.5

ARGUS関数+
single gaussian
でフィット

B

BBbar deltaE分布



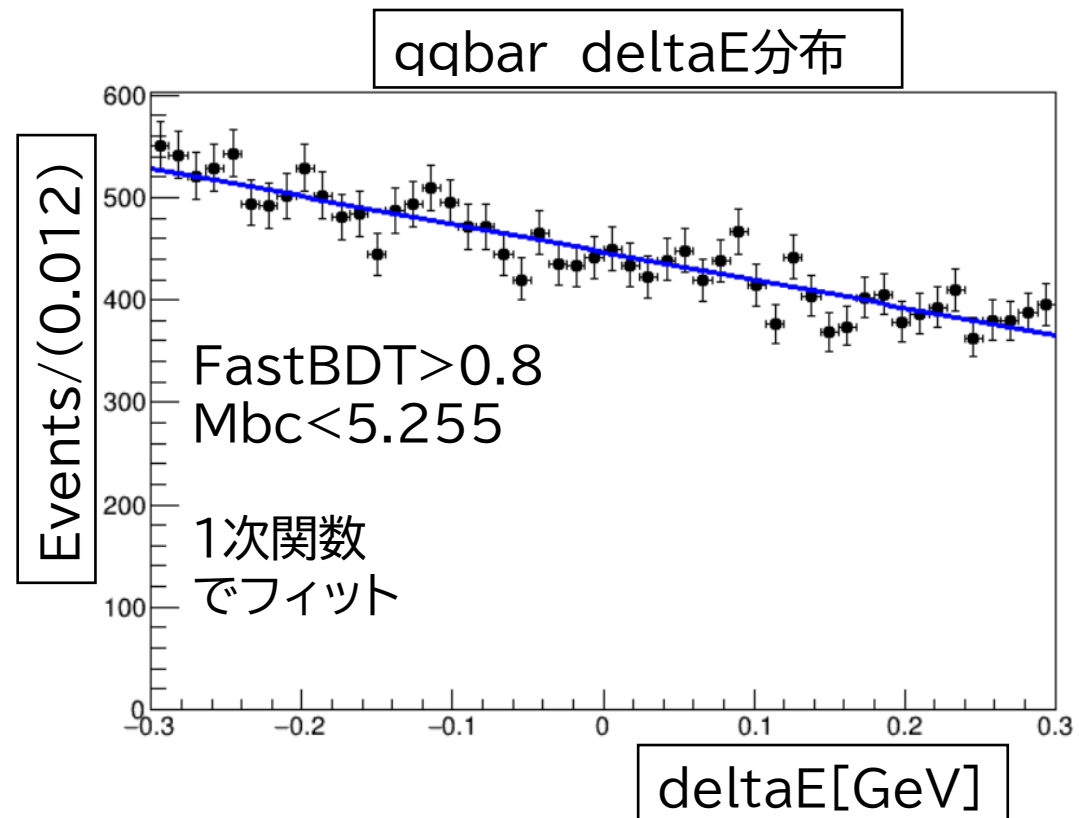
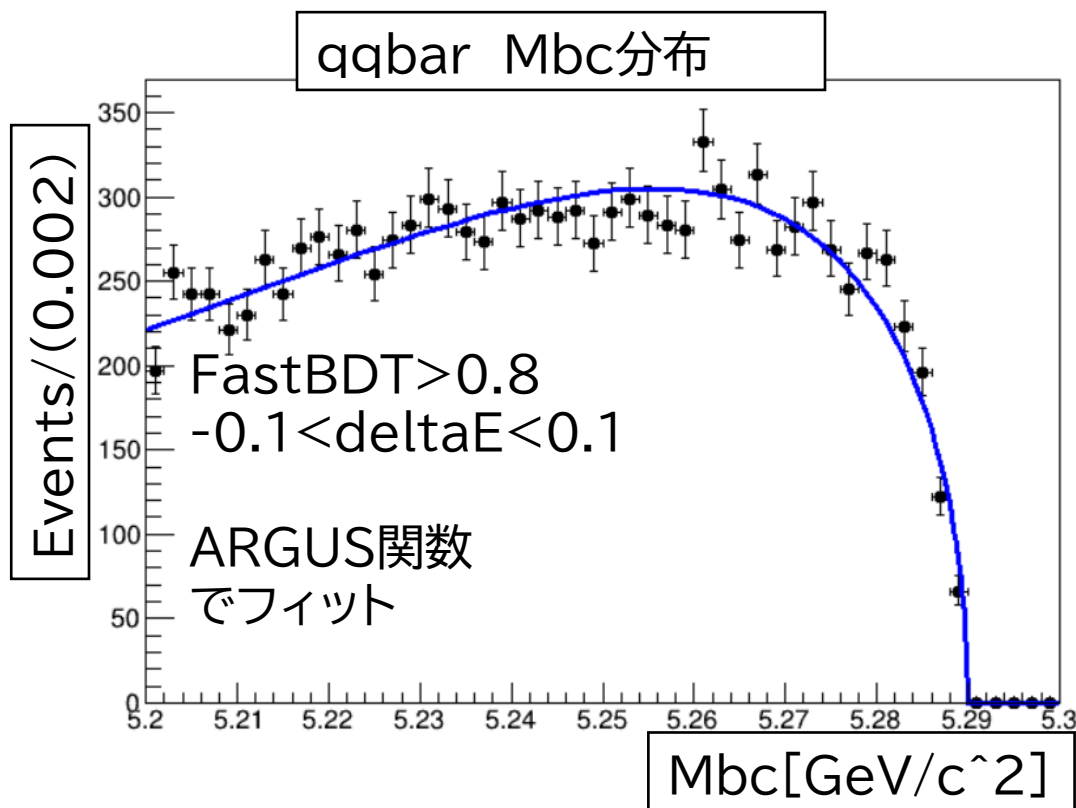
EXT NO.	PARAMETER NAME	VALUE	ERROR
1	a	-2.79558e+00	1.05726e-01

ERR DEF= 0.5

1次関数で
フィット

このピークには
 $B^+ \rightarrow \phi K^{*+}$
 $B^+ \rightarrow \phi K_2^{*+}$
 $B^- \rightarrow \phi K_0^{*-}$
 などの崩壊が混ざっている

qqbarMC Mbc,deltaE分布



EXT PARAMETER

NO.	NAME	VALUE	ERROR
1	argus	-3.80657e+01	1.01437e+00

EXT PARAMETER

NO.	NAME	VALUE	ERROR
1	a	-6.08748e-01	3.80113e-02

ERR DEF= 0.5

まとめと今後の展望

$B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 事象のreconstructionプログラムを作成し、再構成をした。

SignalMCを用いて、崩壊点位置分解能を求めた。

$\Rightarrow \phi \rightarrow K^+ K^-$ only...44.6 [μm]

$K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$ only...34.6 [μm]

All 4 tracks...25.2 [μm] という結果を得た。

continuumバックグラウンドを減らすために、signalとcontinuumを分ける変数群を用いて、分離の指標となるBDT出力を得た。

\Rightarrow 学習した結果から、Figure of Meritが最大になるFastBDT >0.8 の条件を課すことにより、continuumバックグラウンドの低減を行った。

崩壊点分解能がシミュレーションデータと実験データで異なっていたとき、その差に対して $\phi \rightarrow K^+ K^-$ による崩壊点と $K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$ による崩壊点の位置の違いの分布は敏感だと考えられるので、その分布を確認するために実験データを解析する工程に進む

backup

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

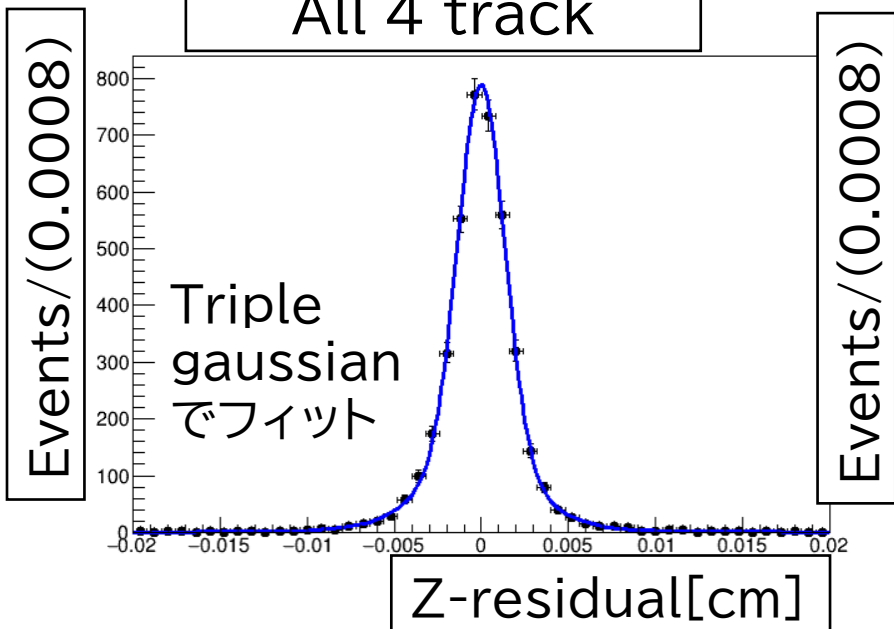
VSS:ベクターメソンの親粒子から2つのスカラーメソンの娘粒子に崩壊

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。

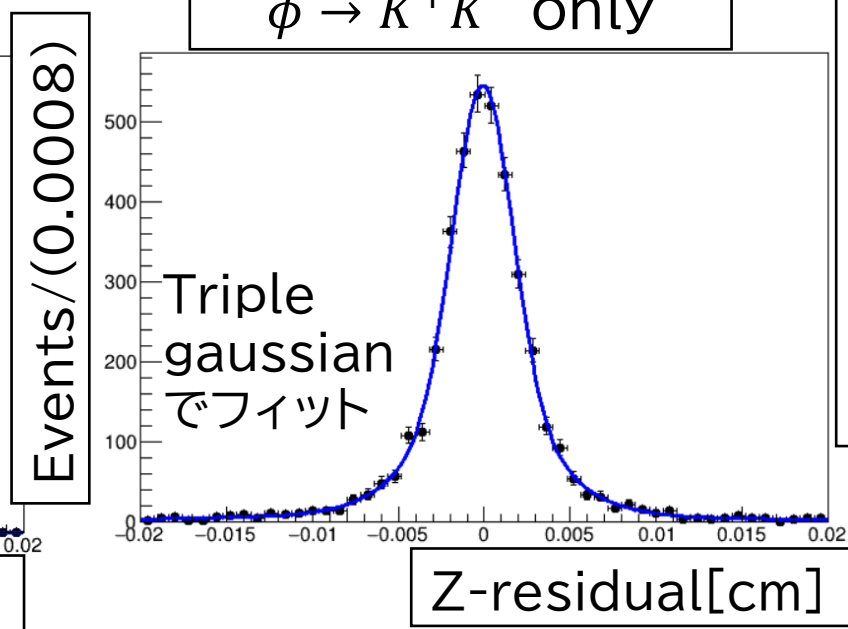
z-residual分布のエラー

All 4 track



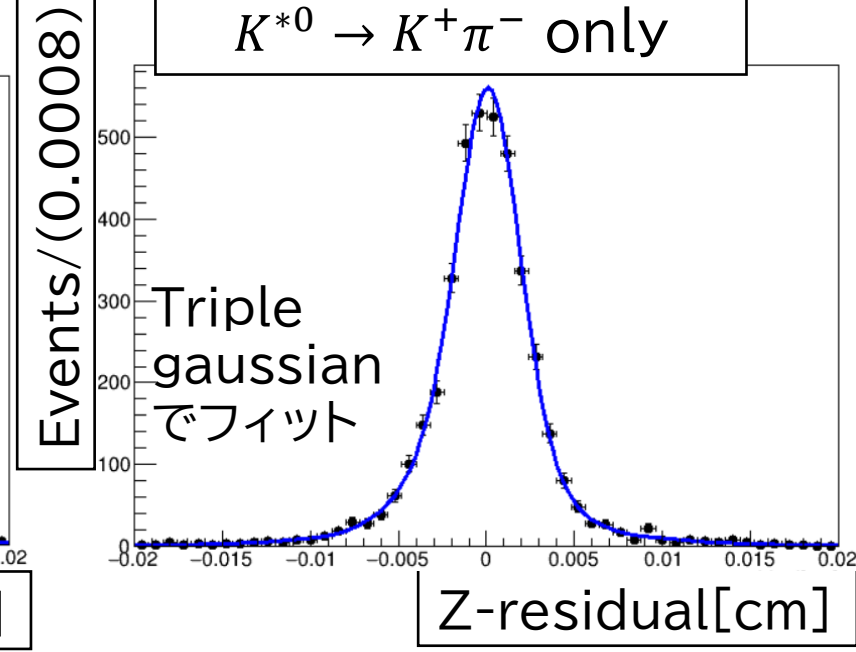
加重平均した σ
 $\sigma_4 = 25.2 \pm 0.2$ [μm]

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



加重平均した σ
 $\sigma_{kk} = 44.6 \pm 0.6$ [μm]

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



加重平均した σ
 $\sigma_{k\pi} = 34.6 \pm 0.2$ [μm]

BBbarのバックグラウンド数、 シグナルのイベント数の計算

200fb⁻¹のときと同じように、BBbarの中身を調べて、シグナルとバックグラウンドの割合を見てみた。

isSignal==1は1038イベント

isSignal==0は154イベント

isSignal==0の中で、シグナルである $B^0 \rightarrow \phi K^{*0}$ 崩壊は16個あった。

よって $B\bar{B}$ はシグナルを1054個含んでいる。なのでバックグラウンドの割合は144/1198(=0.12)で計算していくことにする。

(200fb⁻¹の時はバックグラウンドの割合が38/238(=0.16)で大体同じくらいになった。)

1 ab⁻¹の時のシグナルのイベント数は

$$\begin{aligned} N_{sig} &= 1ab^{-1} \times \text{生成断面積}\sigma \times Br(\Upsilon(4S) \rightarrow B^0\bar{B}^0) \times 2 \times Br(B^0 \rightarrow \phi K^{*0}) \times Br(\phi \rightarrow K^+K^-) \\ &\quad \times Br(K^{*0} \rightarrow K^+\pi^-) \times \text{efficiency} = 1540 \end{aligned}$$

になるのでこの値を使うことにする。

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

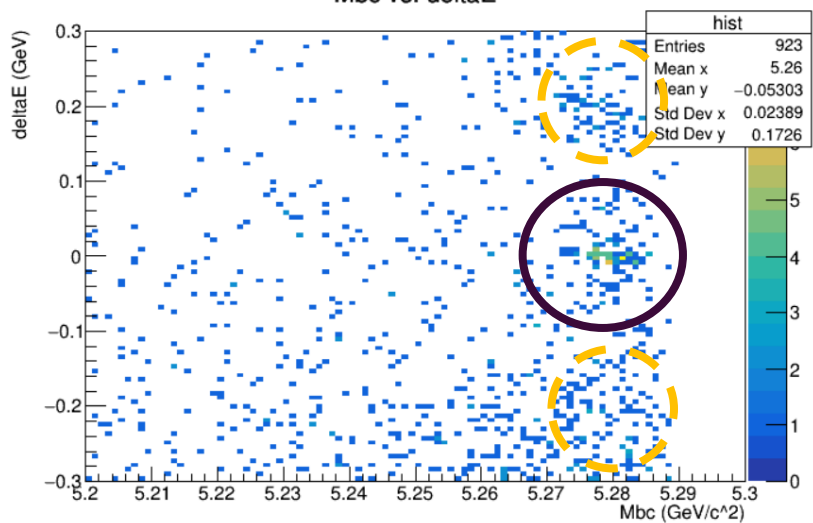
	Cutなし	FastBD T>0.1	FastBD T>0.2	FastBD T>0.3	FastBD T>0.4	FastBD T>0.5	FastBD T>0.6	FastBD T>0.7	FastBD T>0.75	FastBD T>0.8	FastBDT >0.85	FastBD T>0.9
qqbar MC	5095	3704	2613	1989	1515	1150	861	603	486	367	262	164
BBbar MC	1198	1189	1167	1140	1106	1064	1026	967	923	850	774	664
N_{sig} (全データ (100万 events))	31878 4	31657 6	31116	30460 9	29678 6	28757 8	27592 3	25989 6	249114	23505 9	215780	18648 7
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

BBbar: Mbc-deltaEの2次元プロット

BBbarMC: $200fb^{-1}$

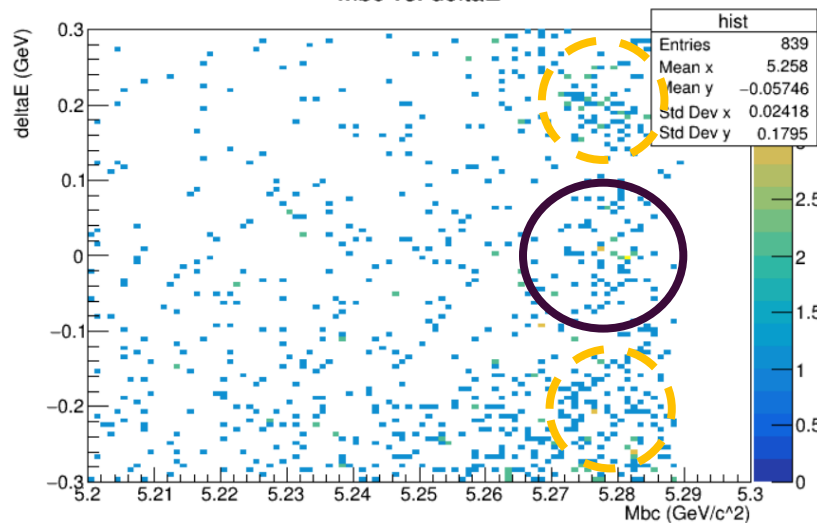
ϕ K*0のみをsignalとしたとき

Mbc vs. deltaE



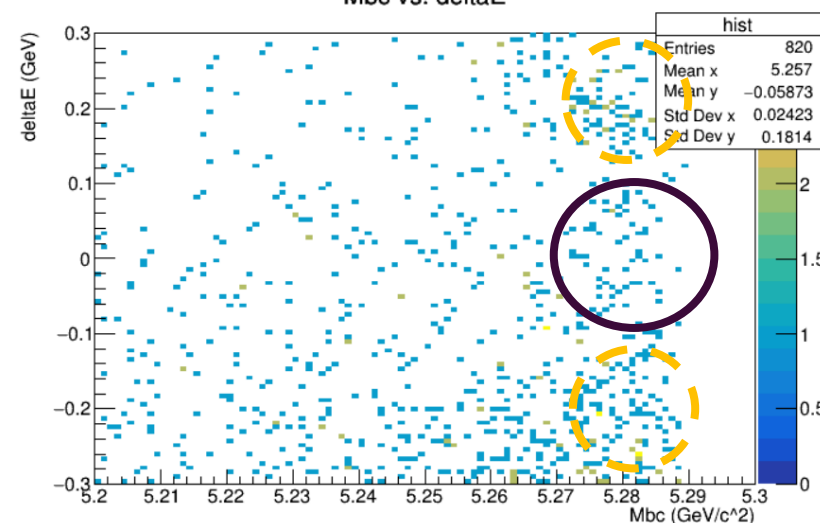
K*0以外もsignalとしたとき

Mbc vs. deltaE



ϕ 、K*0以外もsignalとしたとき

Mbc vs. deltaE

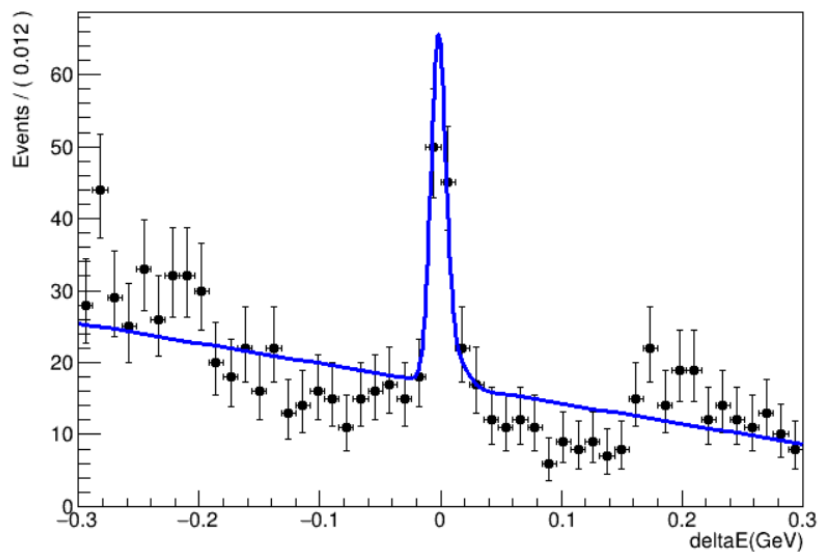


BBbar:deltaE分布

BBbarMC:200fb⁻¹

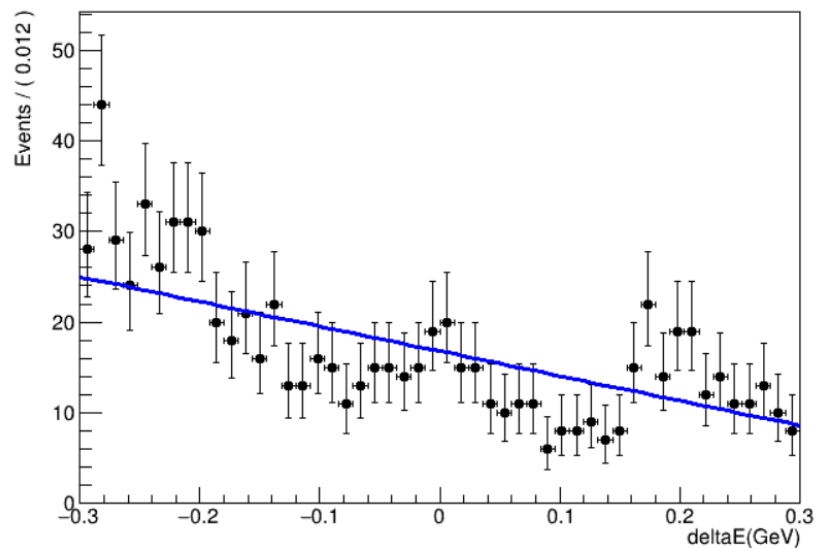
φK*0のみをsignalとしたとき

A RooPlot of "deltaE(GeV)"



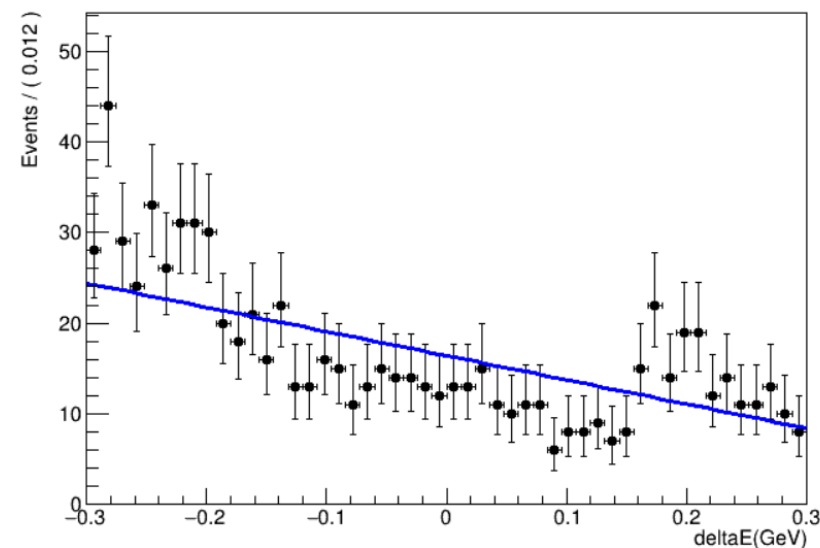
K*0以外にもsignalとしたとき

A RooPlot of "deltaE(GeV)"



φ、K*0以外にもsignalとしたとき

A RooPlot of "deltaE(GeV)"

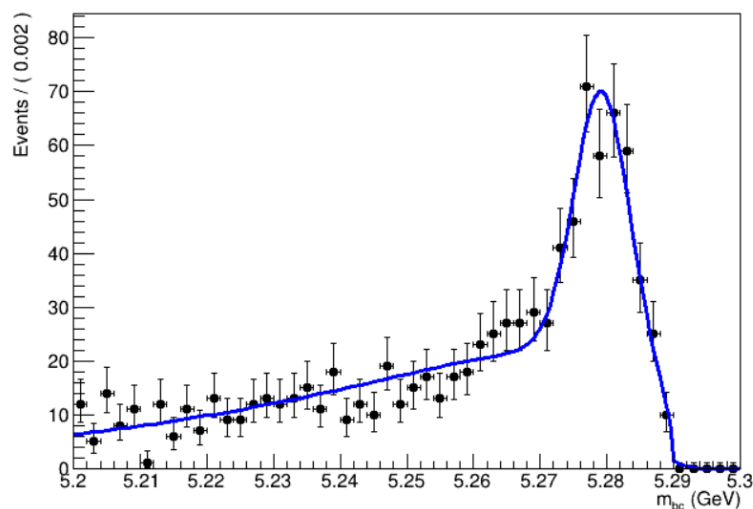


BBbar: Mbc分布

BBbarMC: $200 fb^{-1}$

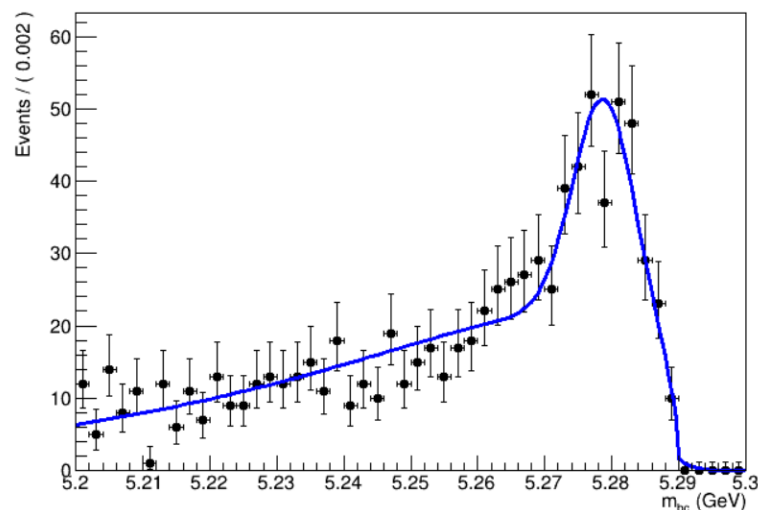
ϕK^*0 のみをsignalとしたとき

A RooPlot of "m_{bc} (GeV)"



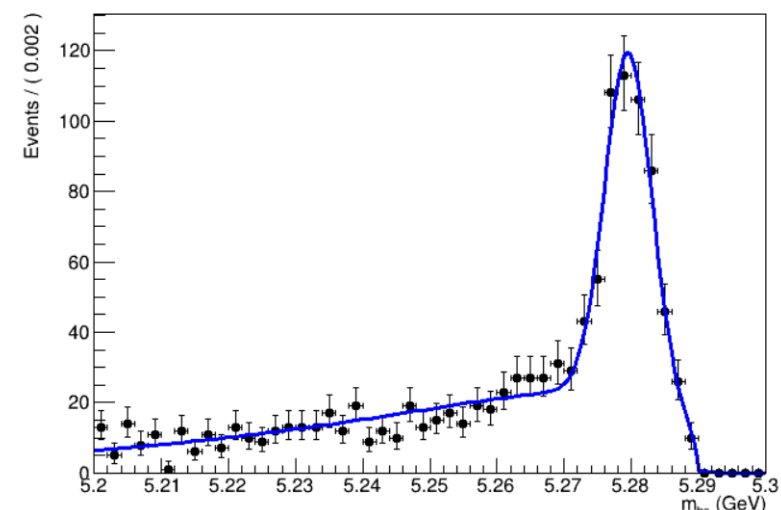
K*0以外にもsignalとしたとき

A RooPlot of "m_{bc} (GeV)"



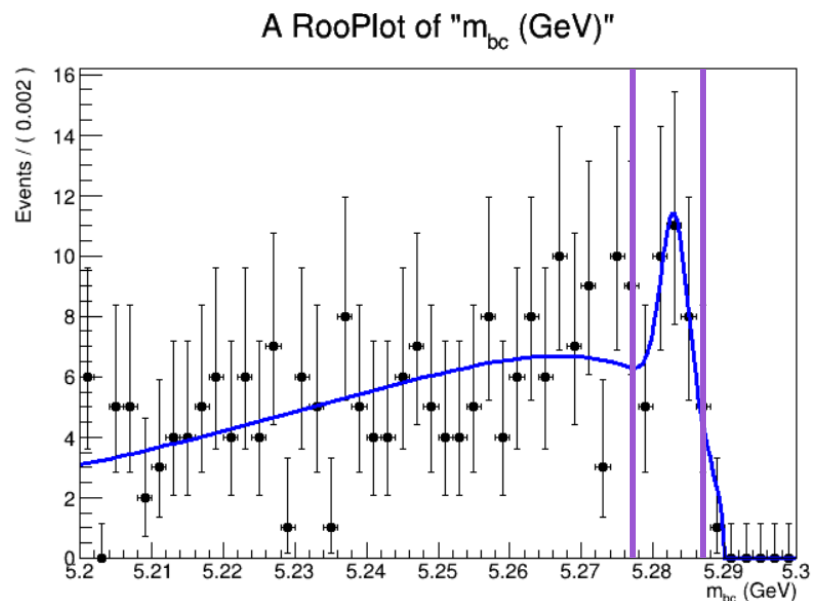
ϕ 、K*0以外にもsignalとしたとき

A RooPlot of "m_{bc} (GeV)"



B^\pm 崩壊のピークに含まれている崩壊モードのチェック

-0.05 < ΔE < 0.05 でカットした M_{bc} 分布



5.277 < M_{bc} < 5.287 の範囲で見てみた。

```

└─ Upsilon(4S) (300553)
  └─ B+ (521)
    └─ phi (333)
      └─ K+ (321)
        ├── pi0 (111)
        ├── gamma (22)
        └─ gamma (22)
      └─ pi0 (111)
        ├── gamma (22)
        └─ gamma (22)
      └─ n0 (2112)
    └─ K- (-321)
      ├── pi0 (111)
      ├── gamma (22)
      └─ gamma (22)
      └─ gamma (22)
      └─ n0 (2112)
    └─ K*+ (323)
      └─ K+ (321)
        ├── e- (11)
        ├── mu+ (-13)
        ├── anti-rho_mu (-14)
        ├── rho_e (12)
        └─ e+ (-11)
        ├── rho_mu (14)
        ├── pi- (-211)
        ├── n0 (2112)
        └─ n0 (2112)
    └─ pi0 (111)
      ├── gamma (22)
      └─ gamma (22)
  
```

$B^+ \rightarrow \phi K^{*+}$: 9個 ($B^- \rightarrow \phi K^{*-}$: 7個)

$B^+ \rightarrow \phi K_2^{*+}$: 3個

$B^- \rightarrow \phi K_0^{*-}$: 2個

$B^+ \rightarrow \phi K^+ \pi^0$: 2個

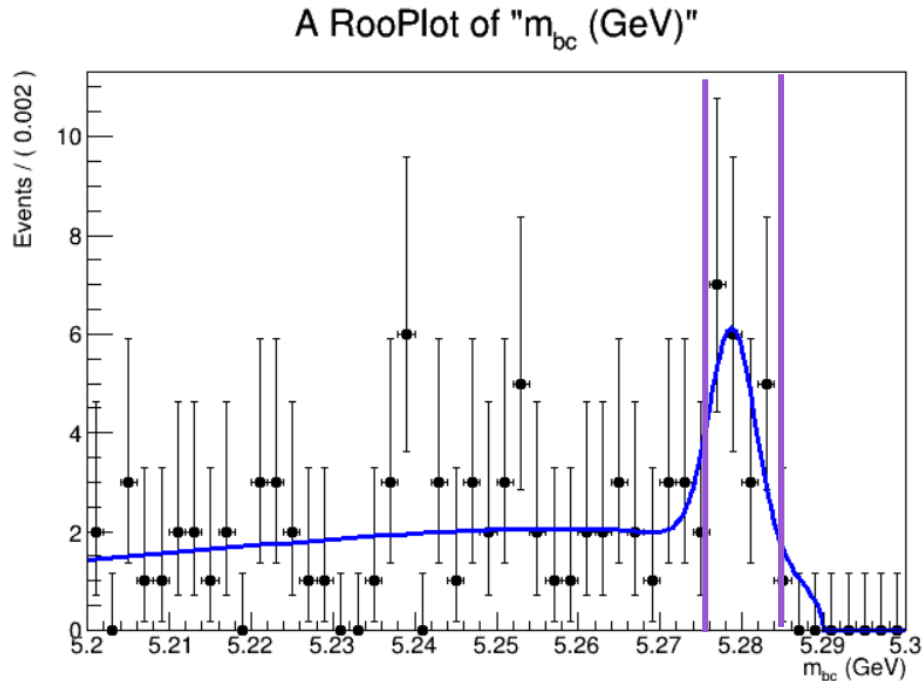
それ以外はほぼDが入っているもので
その中で多かったものは

$B \rightarrow D^0 \pi$: 7個

$B \rightarrow D^0 \rho$: 5個

B^0 崩壊のピークに含まれている崩壊モードのチェック

-0.05 < ΔE < 0.05 でカットした M_{bc} 分布



```
B0 (511)
├── D- (-411)
│   ├── K+ (321)
│   │   ├── e- (11)
│   │   ├── nu_mu (14)
│   │   └── mu+ (-13)
│   │       ├── anti-nu_mu (-14)
│   │       ├── nu_e (12)
│   │       └── e+ (-11)
│   ├── K- (-321)
│   │   ├── n0 (2112)
│   │   ├── gamma (22)
│   │   ├── gamma (22)
│   │   ├── n0 (2112)
│   │   ├── pi- (-211)
│   │   ├── p+ (2212)
│   │   └── pi- (-211)
│   └── pi+ (211)
│       ├── e- (11)
│       └── n0 (2112)
├── pi+ (211)
│   ├── pi+ (211)
│   ├── e- (11)
│   ├── nu_mu (14)
│   └── mu+ (-13)
│       ├── anti-nu_mu (-14)
│       ├── nu_e (12)
│       └── e+ (-11)
```

$B^0 \rightarrow D^- \pi^+$: 10個

$\overline{B^0} \rightarrow D^+ \pi^-$: 7個

$B^0 \rightarrow D^+ K^-$: 2個

$B^0 \rightarrow f_2 \phi$: 2個

と $B^0 \rightarrow D\pi$ の崩壊がほとんどであることが分かった

⇒ Dはvetoする予定