

Belle II実験における  
 $B^0 \rightarrow \eta_c \gamma K^\pm \pi^\mp$  崩壊の探査感度

日本物理学会 第76回年次大会

2021/3/15

奈良女子大学 西川 愛, 宮林 謙吉, 他 Belle II collaboration

# 目次

- イントロダクション
  - 研究動機
  - 研究する崩壊モード
  - Belle II 実験
- $B^0 \rightarrow (\eta_c \gamma) K^\pm \pi^\mp$  の再構成
  - Bの再構成
  - バックグラウンドの見積もり
- continuumバックグラウンドの抑制
  - FastBDT
  - バックグラウンドの抑制結果
- 期待される感度
  
- まとめ

# 目次

- インTRODクシヨン
  - 研究動機
  - 研究する崩壊モード
  - Belle II 実験
- $B^0 \rightarrow (\eta_c \gamma) K^\pm \pi^\mp$  の再構成
  - Bの再構成
  - バックグラウンドの見積もり
- continuumバックグラウンドの抑制
  - FastBDT
  - バックグラウンドの抑制結果
- 期待される感度
- まとめ

# $B^0 \rightarrow (\eta_c \gamma) K^\pm \pi^\mp$ の研究

研究動機：  $(\eta_c \gamma)$  に崩壊する新ハドロンの探索

(X(3872)のC-oddパートナー または  $h_c(2P)$  の探索)

・ X(3872)とは…

$h_c(2P)$  の予測値(質量:3920-3930MeV/c<sup>2</sup>, 幅:  $\psi(3770)$  と同程度)

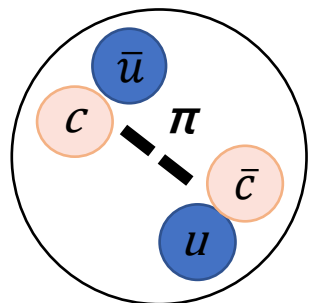
Belle実験で見つかった質量3872MeVの幅が狭い共鳴。

$J^{PC} = 1^{++}$  のメソン分子とチャームoniumの混合状態とする説が有力。

(Jはスピン、Pはパリティ、Cは荷電共役を表す。)

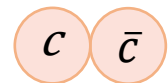
$J^{PC} = 1^{+-}$  のパートナー状態(C-oddパートナー)も存在するかも知れない。 ←本研究の出発点

$$|D^0 \bar{D}^{*0}\rangle + |\bar{D}^0 D^{*0}\rangle$$



混合状態  
↔

$\chi_{c1}(2P)$



考えられるX(3872)の概要図

チャームonium

	$\eta_c$	$J/\psi$	$h_c$	$\chi_{c0}$	$\chi_{c1}$	$\chi_{c2}$
$J^{PC}$	$0^{-+}$	$1^{--}$	$1^{+-}$	$0^{++}$	$1^{++}$	$2^{++}$
質量 [MeV/c <sup>2</sup> ]	2984	3097	3525	3415	3511	3556
$2s+1L_J$	$1S_0$	$3S_1$	$1P_1$	$3P_0$	$3P_1$	$3P_2$

# X(3872) と C-odd パートナー

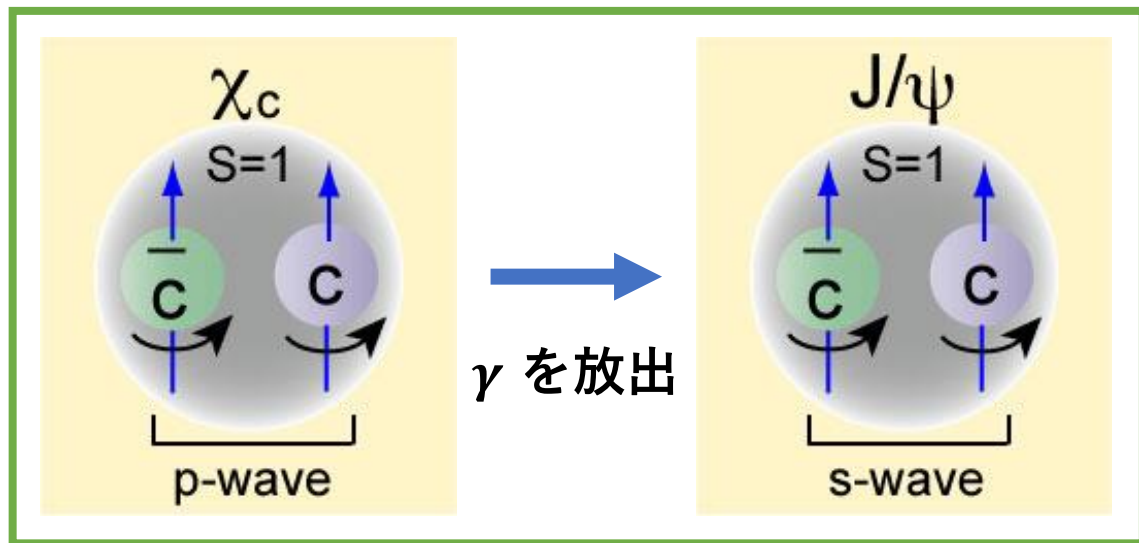
X(3872) : メソン分子  $|D^0\bar{D}^{*0}\rangle + |\bar{D}^0D^{*0}\rangle$  と  $\chi_{c1}(2P)$  の混合状態

→  $J/\psi\gamma$  モードは主としてチャームONIウム成分である  $\chi_{c1}(2P)$  の輻射崩壊による。

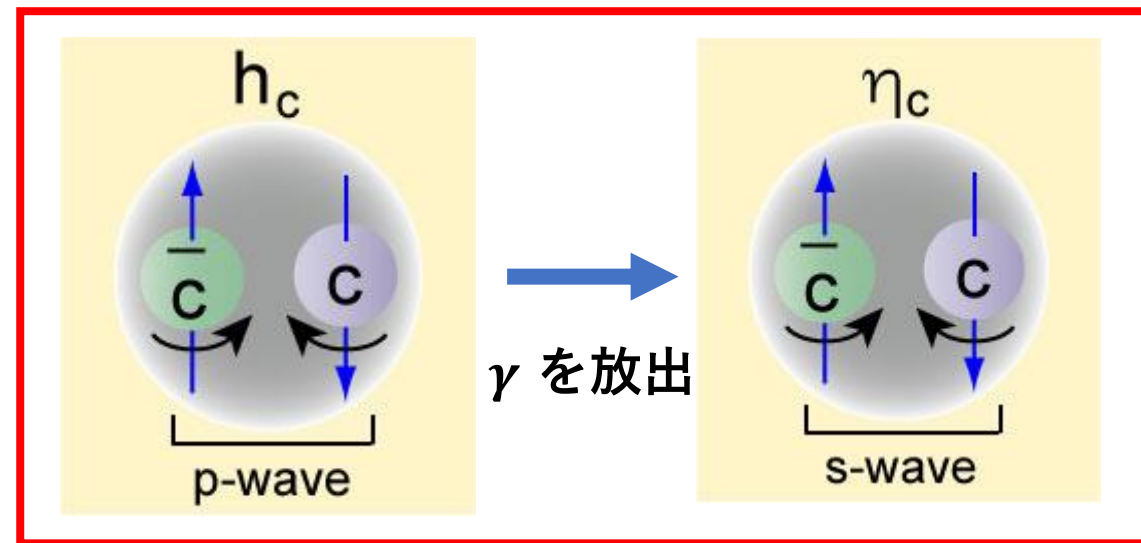
C-odd パートナー : メソン分子  $|D^0\bar{D}^{*0}\rangle - |\bar{D}^0D^{*0}\rangle$  と  $h_c(2P)$  の混合状態,  $J^{PC} = 1^{+-}$

→ 輻射崩壊するのに量子数の矛盾がないのは  $(\eta_c\gamma)$  である。

X(3872)での輻射崩壊



C-odd パートナーでの輻射崩壊



$$\text{Br}(h_c(1P) \rightarrow \eta_c(1S)\gamma) = 51\%$$

# Bメソン崩壊における $J^{PC} = 1^{+-}$ 状態生成

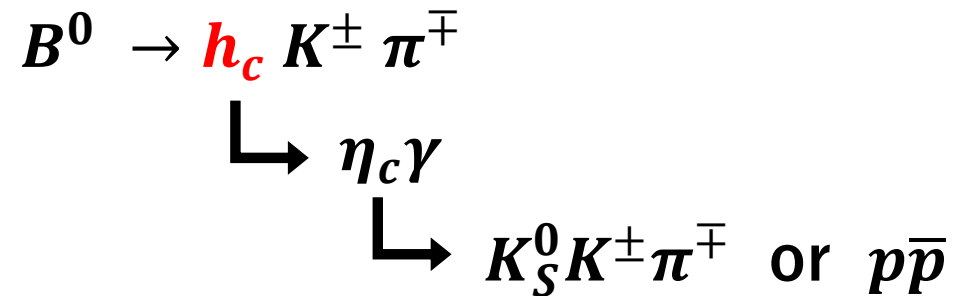
$J^{PC} = 1^{+-}$  状態の生成はBメソンは二体崩壊では抑制→三体崩壊に着目

新粒子：X(3872)のC-oddパートナー、既知の粒子： $h_c(1P)$

研究する崩壊モード： $B^0 \rightarrow (\eta_c \gamma) K^\pm \pi^\mp$

実験の感度を見積もるため、 $(\eta_c \gamma)$ に崩壊する状態が既知の $h_c(1P)$ (質量:3525MeV/c<sup>2</sup>, 幅:0.7MeV/c<sup>2</sup>)であった場合を調べる。

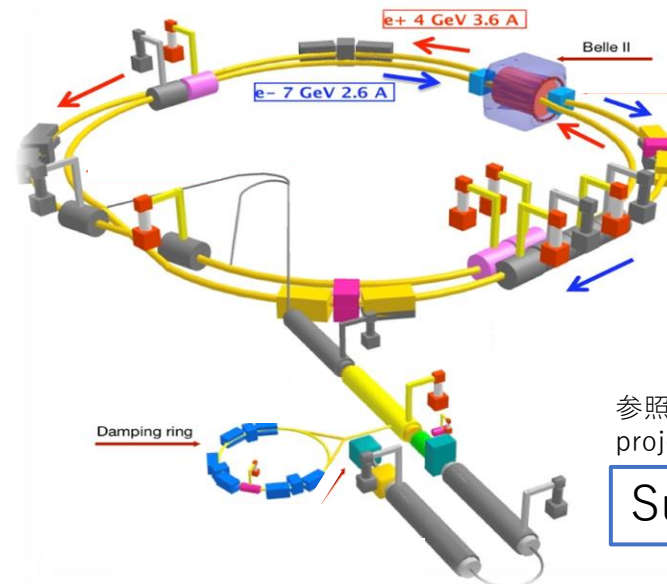
MCシミュレーションデータ(Signal MC)を作成し解析を行った。



$\eta_c$ のそれぞれの崩壊モードについて10万事象を生成した。

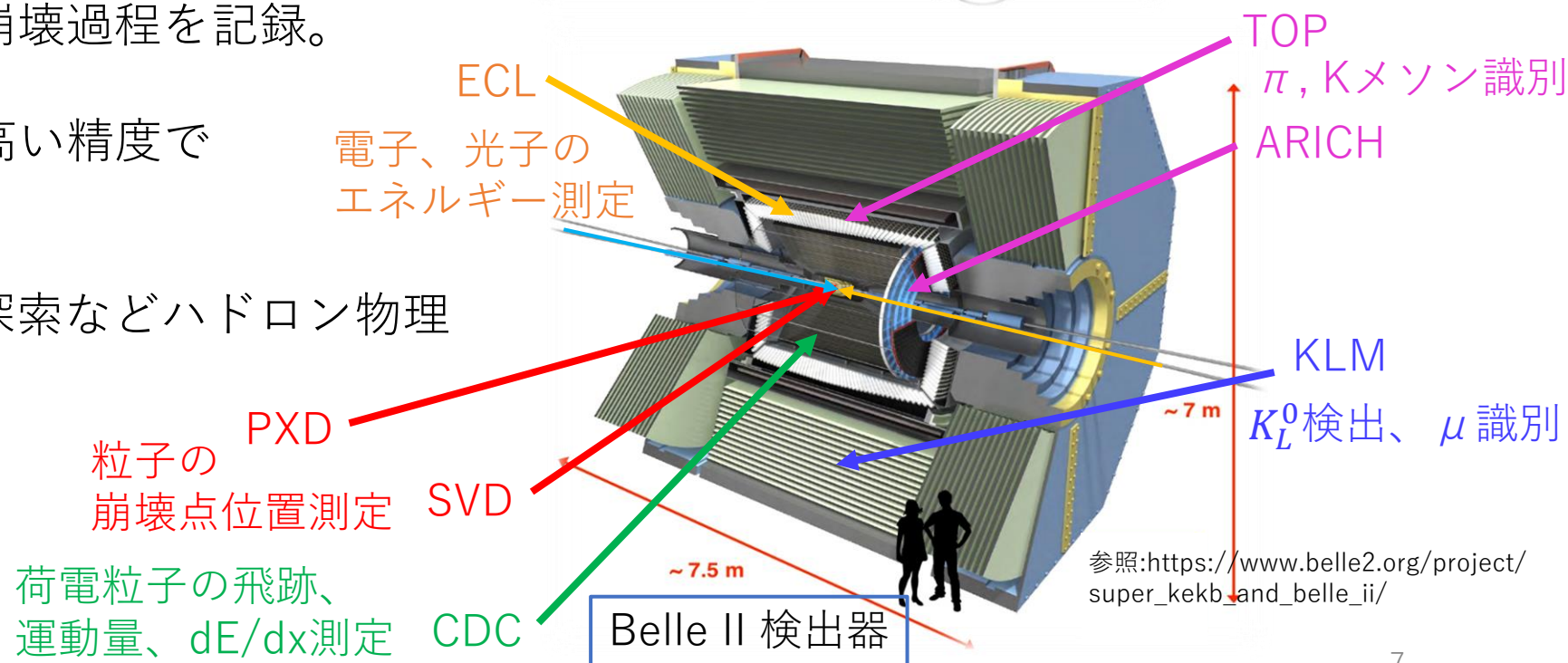
# Belle II 実験

- 電子7GeV・陽電子4GeVの非対称エネルギー衝突型加速器。
- 2019年3月より本格的に物理データの取得開始、10年間で $50 \text{ ab}^{-1}$ のデータを収集予定。
- Bメソンを大量に生成して崩壊過程を記録。
- 荷電Kメソンや $\pi$ メソンを高い精度で識別、検出する。
- X(3872)のパートナー粒子探索などハドロン物理の新展開も期待できる。



参照:[https://www.belle2.org/project/super\\_kekb\\_and\\_belle\\_ii/](https://www.belle2.org/project/super_kekb_and_belle_ii/)

SuperKEKB加速器

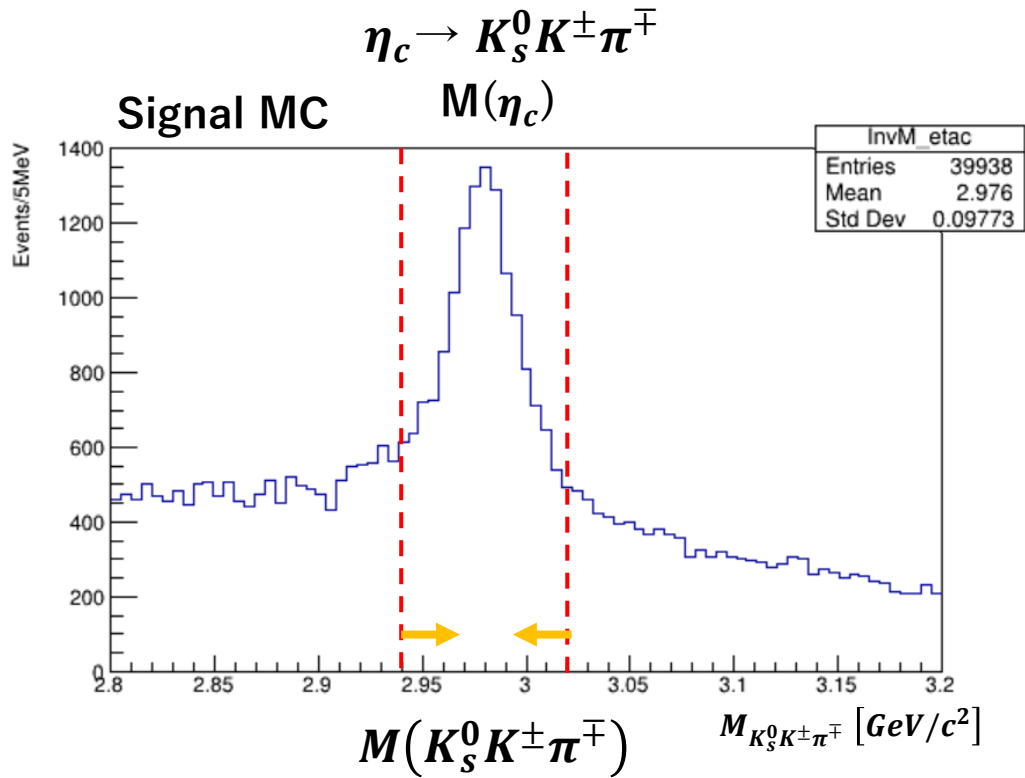
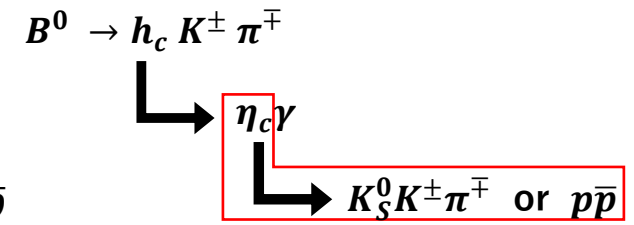


# 目次

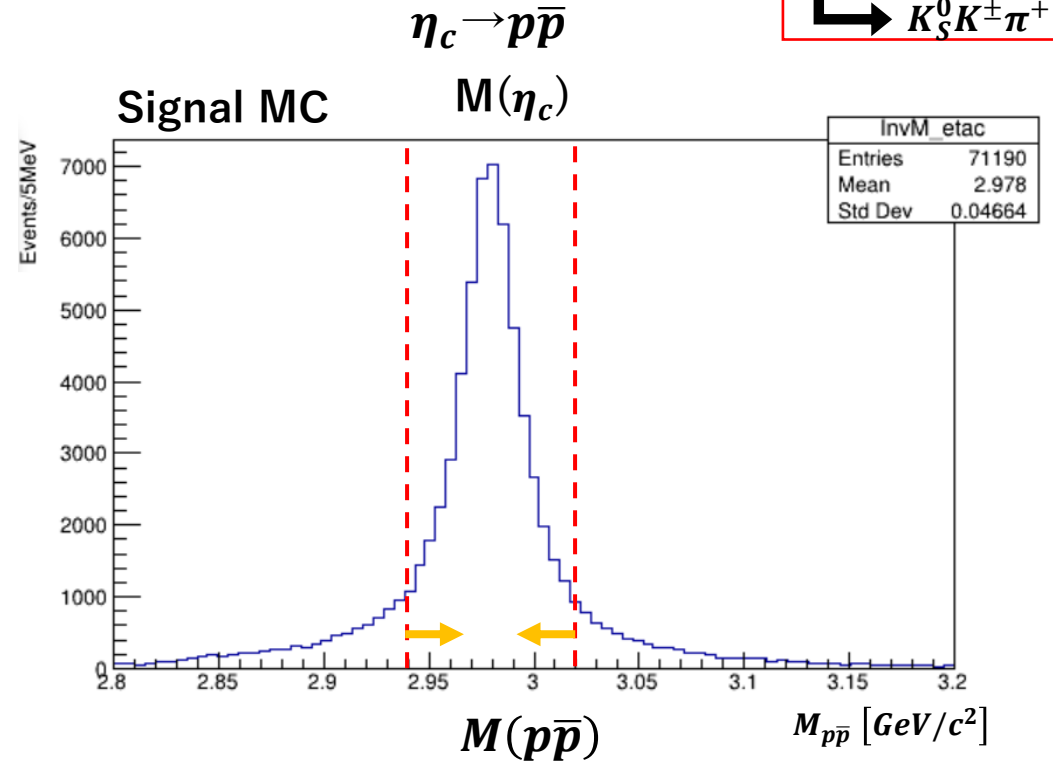
- ・ イントロダクション
  - 研究動機
  - 研究する崩壊モード
  - Belle II 実験
- ・  $B^0 \rightarrow (\eta_c \gamma) K^\pm \pi^\mp$  の再構成
  - Bの再構成
  - バックグラウンドの見積もり
- ・ continuumバックグラウンドの抑制
  - FastBDT
  - バックグラウンドの抑制結果
- ・ 期待される感度
- ・ まとめ



# $\eta_c$ 候補の不変質量分布



$$\text{Br}(\eta_c(1S) \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp) = 2.4\%$$

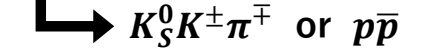
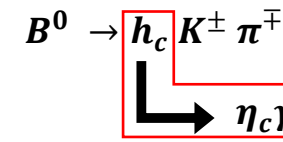


$$\text{Br}(\eta_c(1S) \rightarrow p\bar{p}) = 0.15\%$$

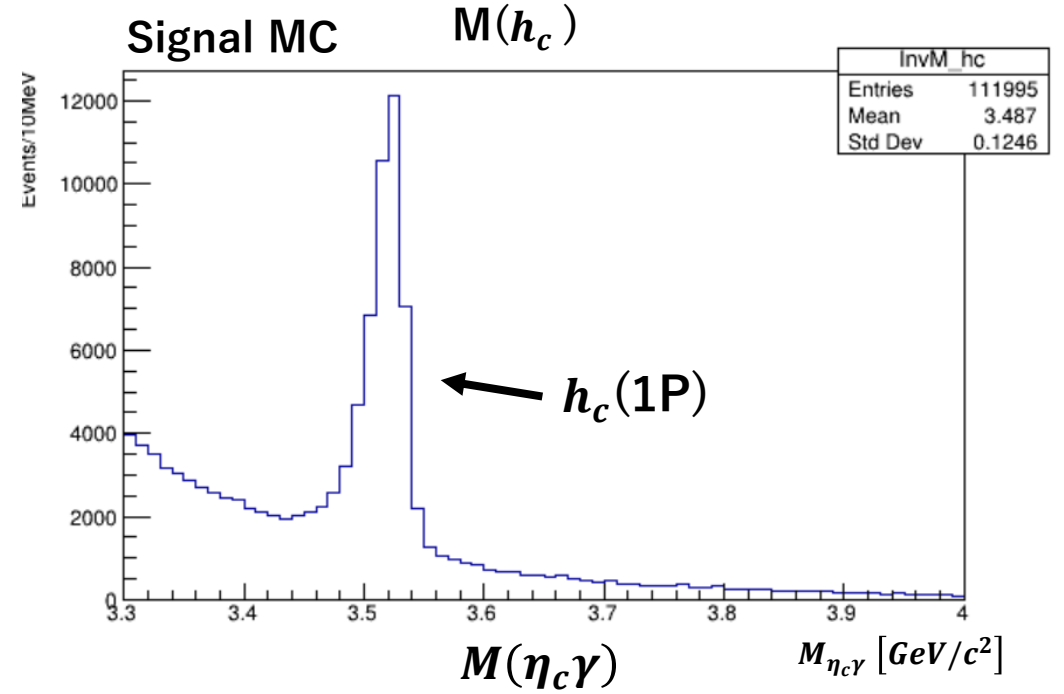
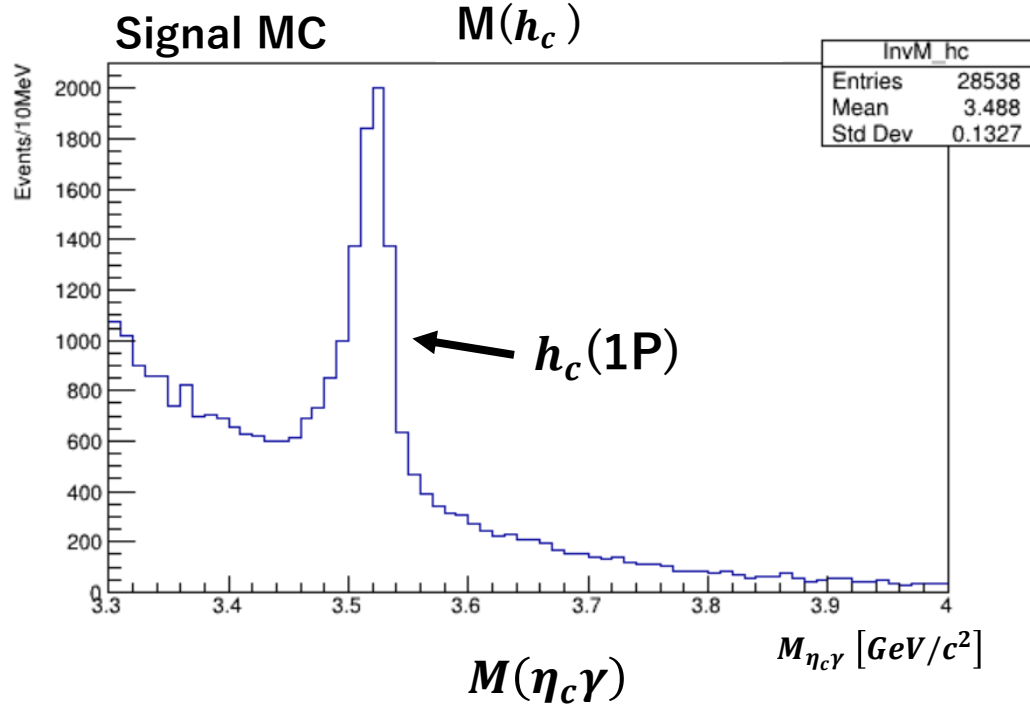
赤点線の範囲 ( $2.94 \text{ GeV}/c^2 < M(K_S^0 K^\pm \pi^\mp)$  or  $M(p\bar{p}) < 3.02 \text{ GeV}/c^2$ ) に入るものを  $\eta_c$  候補とした。

# $(\eta_c\gamma)$ の不変質量ウィンドウ

$$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$$



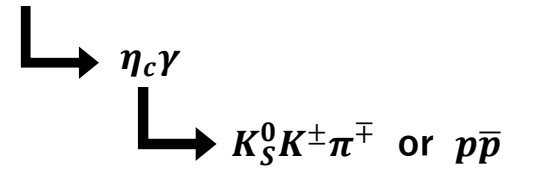
$$\eta_c \rightarrow p\bar{p}$$



$h_c(2P)$ 及び $X(3872)$ のC-oddパートナーの想定される質量を考慮して( $3.3 \text{ GeV}/c^2 < M(\eta_c\gamma) < 4.0 \text{ GeV}/c^2$ )を対象とする。

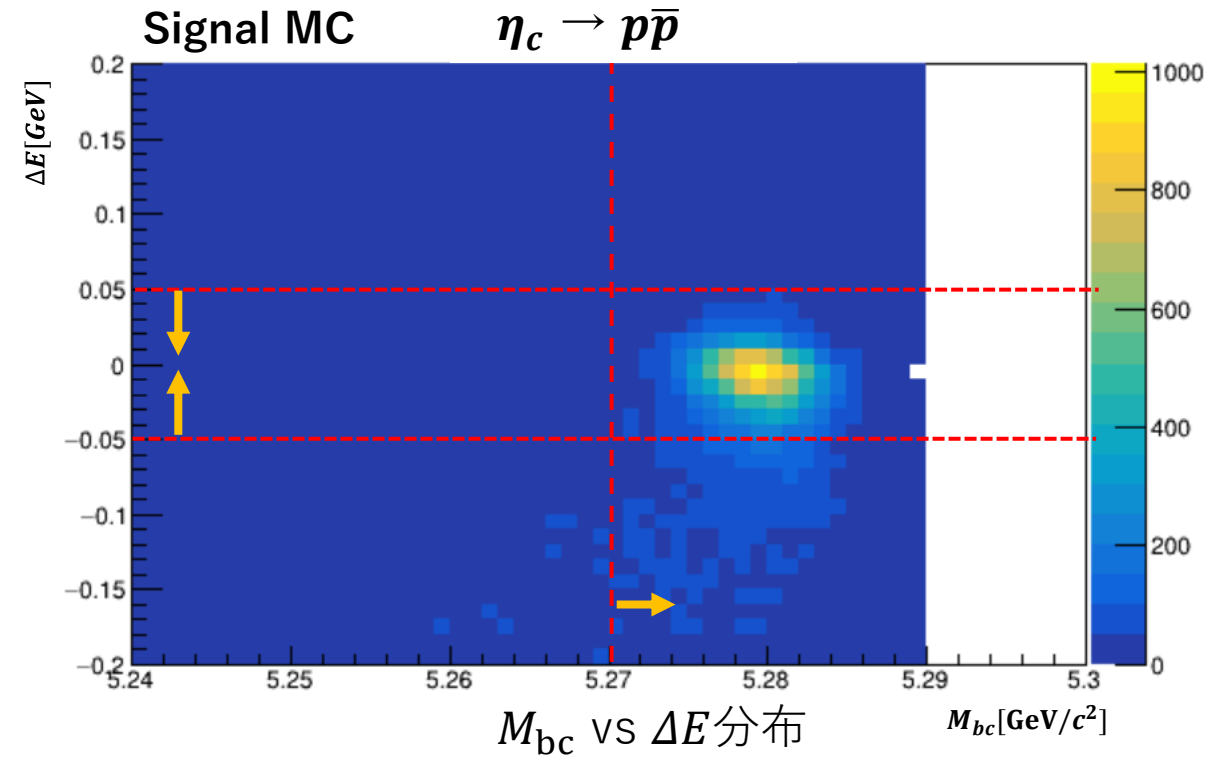
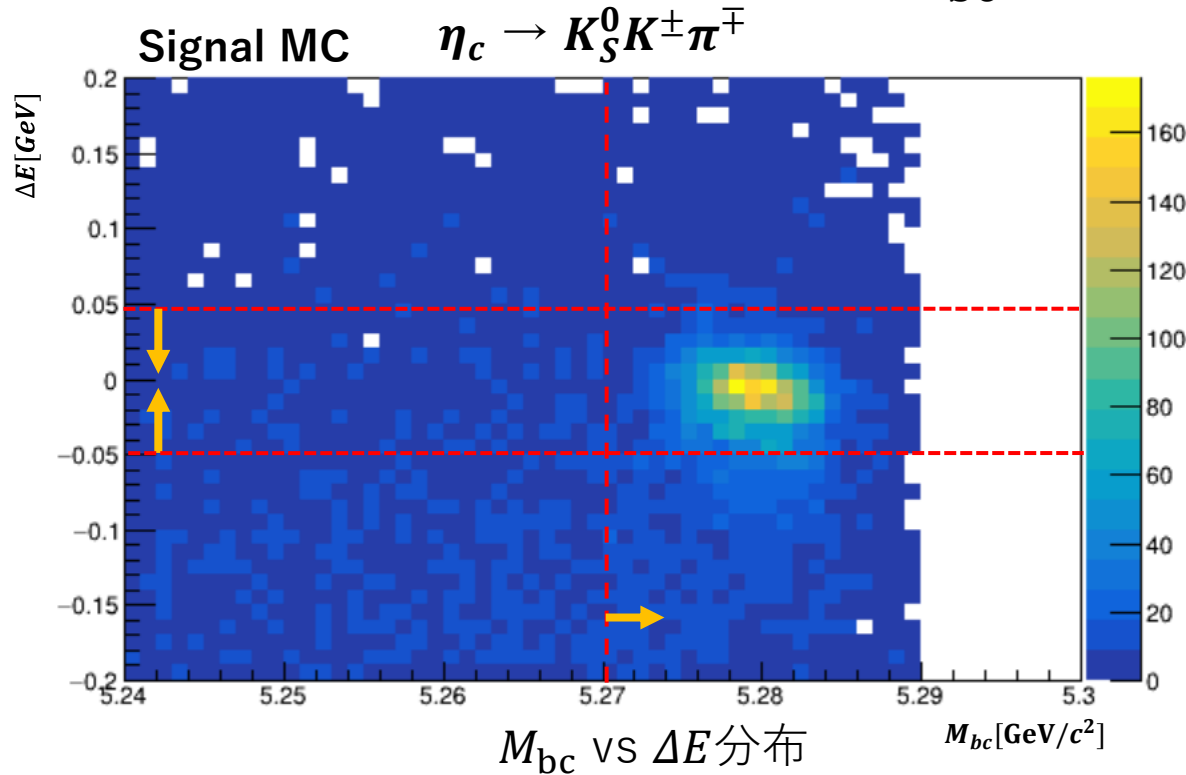
# $B^0 \rightarrow (\eta_c \gamma) K^+ \pi^-$ の再構成

$$B^0 \rightarrow h_c K^\pm \pi^\mp$$



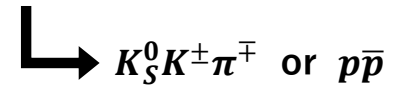
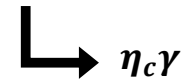
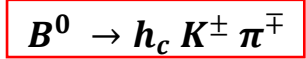
重心系での変数  $M_{bc} = \sqrt{(E_{\text{beam}}^*)^2 - |\vec{p}_B^*|^2}$  と  $\Delta E = E_B^* - E_{\text{beam}}^*$  の二次元分布。

Bメソン崩壊信号では  $\Delta E = 0$ ,  $M_{bc} = 5.28 \text{ GeV}/c^2$  にピークが立つ。

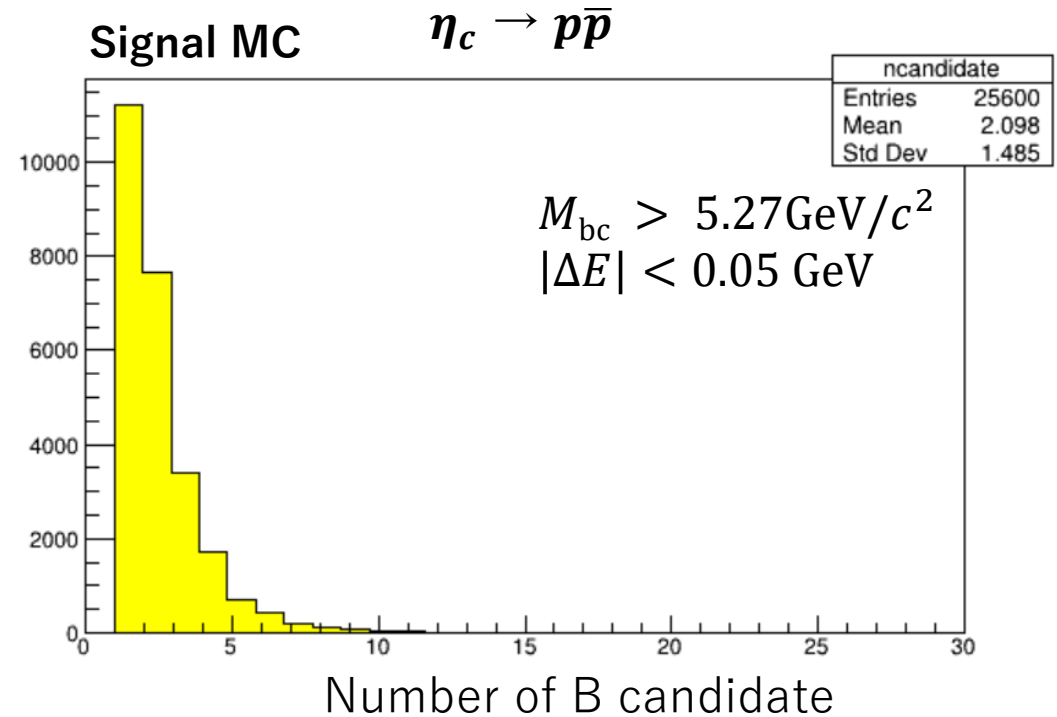
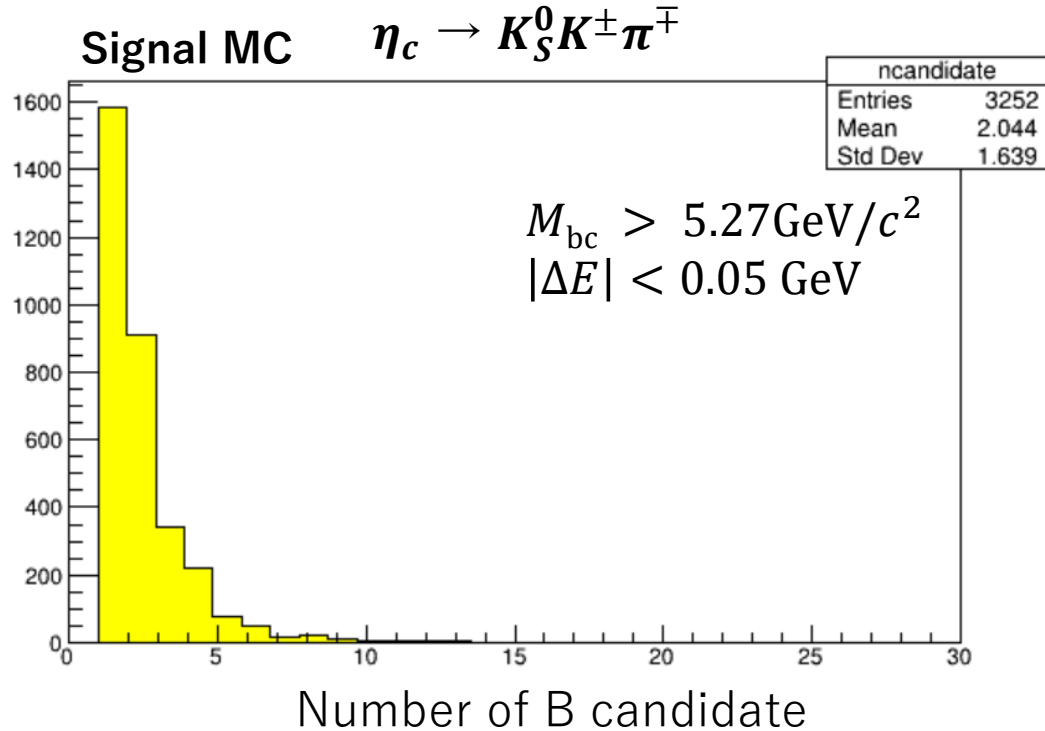


赤点線の範囲  $|\Delta E| < 0.05 \text{ GeV}$ ,  $M_{bc} > 5.27 \text{ GeV}/c^2$  にピークが立っている。  
→この範囲を Signal region とした。

# 1事象当たりのBメソン候補の数



Signal region内で1事象ごとに見出されるBメソン候補の数。



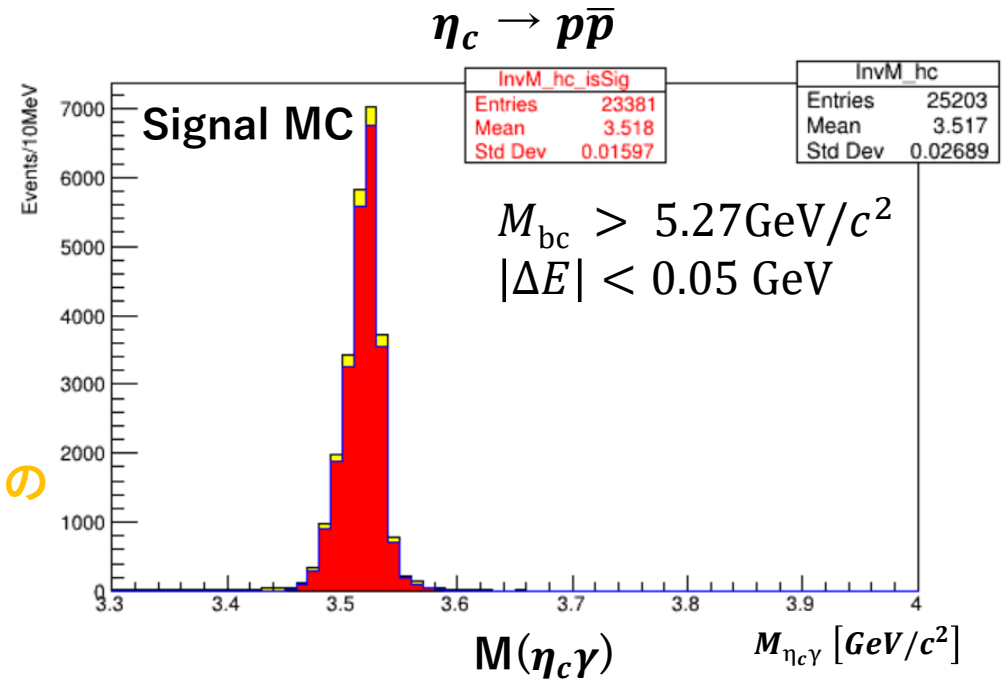
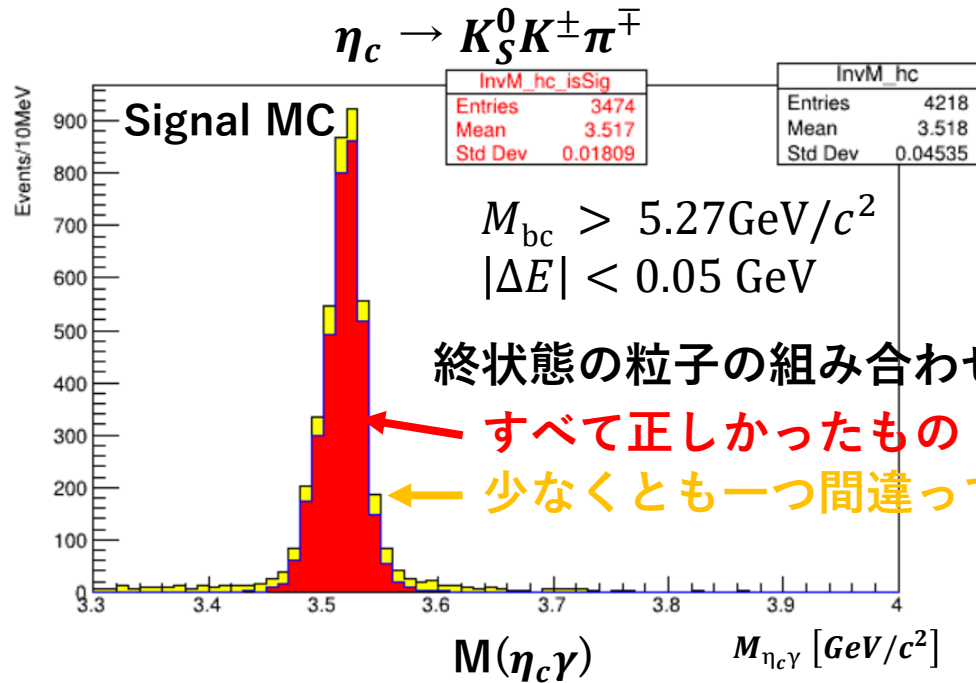
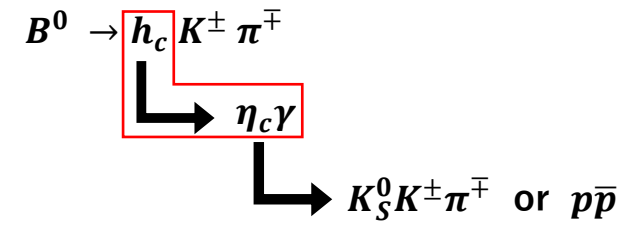
$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ ,  $\eta_c \rightarrow p\bar{p}$  のどちらも半数近くは複数の候補が来ている。  
 →その中で最良のものを選別する必要がある。

本研究では、最良候補選別として  $M_{bc}$  が  $5.28 \text{ GeV}/c^2$  に一番近いものを選ぶ。

最良候補選別の効率  $\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$  : 85%,  $\eta_c \rightarrow p\bar{p}$  : 91%

# 信号検出効率

最良候補選別後のSignal region内に見出された $M_{\eta_c\gamma}$ 分布。



信号検出効率は  $\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ :12.2% ,  $\eta_c \rightarrow p \bar{p}$ :25.2%、  
 終状態粒子の正しい組み合わせを選ぶ確率は、  
 $\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ :82.4% ,  $\eta_c \rightarrow p \bar{p}$ :92.8%。

# バックグラウンドの見積もり

バックグラウンドはcontinuumと $B\bar{B}$ から来る。

100 fb<sup>-1</sup>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見積もりを行った。

残存バックグラウンドの事象数

Event Type	$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$	$\eta_c \rightarrow p\bar{p}$
$u\bar{u}$	4125	1360
$d\bar{d}$	996	212
$s\bar{s}$	2926	295
$c\bar{c}$	15217	1445
continuum	23264	3312
$B^0\bar{B}^0$	3677	247
$B^+B^-$	3730	375
$B\bar{B}$	7407	622
sum	30671	3934

左の表はSignal region内に入ってくる事象数の結果。

continuumは $B\bar{B}$ 以外のハドロン生成事象、 $e^+e^- \rightarrow u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}, c\bar{c}$

どちらの崩壊モードでもcontinuumが占めるバックグラウンドの方が支配的である。

# 目次

- ・ イントロダクション
  - 研究動機
  - 研究する崩壊モード
  - Belle II 実験
- ・  $B^0 \rightarrow (\eta_c \gamma) K^\pm \pi^\mp$  の再構成
  - Bの再構成
  - バックグラウンドの見積もり
- ・ continuumバックグラウンドの抑制
  - FastBDT
  - バックグラウンドの抑制結果
- ・ 期待される感度
- ・ まとめ

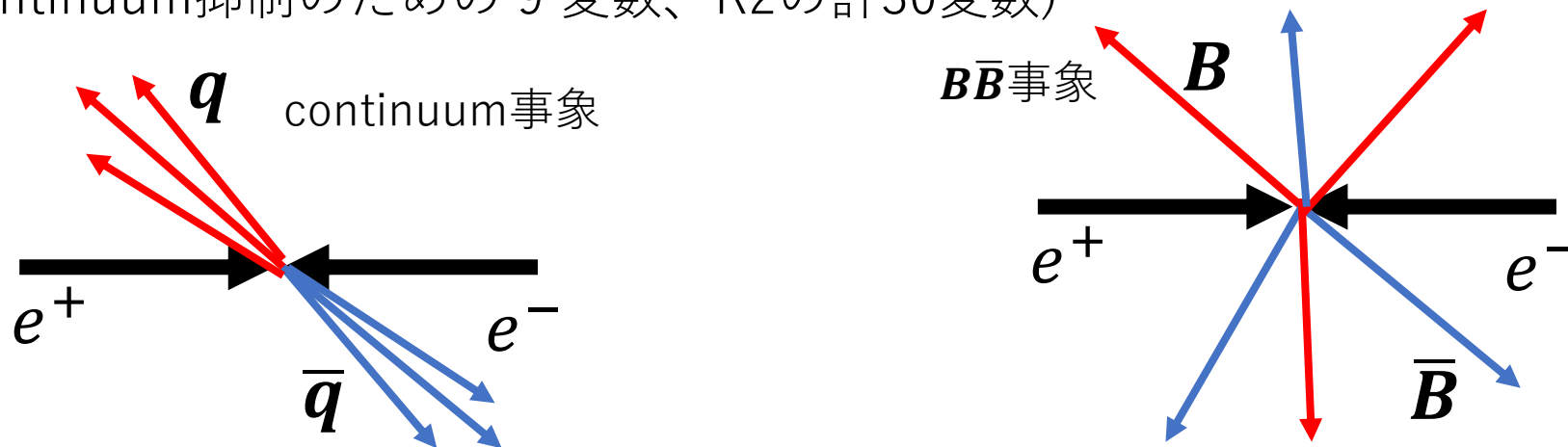
# continuumバックグラウンドの抑制

本研究ではFastBDT(BDT:Boosted Decision Tree)なる多変量解析アルゴリズムを用いて、continuum由来のバックグラウンド事象数の削減を図る。

u, d, s, cクォークの質量は軽いので、continuum事象では対生成したクォークが高い運動量を持ち、ハドロンジェットが形成される。逆にBメソンは $\Upsilon(4S)$ 静止系でほぼ静止して生成するので、娘粒子が等方的な分布となる。

→事象形状を表す変数群を多変量解析に使用した。

(Belle 実験で用いられたcontinuum抑制のための16変数、Thrust関係の4変数、CLEO 実験で用いられたcontinuum抑制のための9変数、R2の計30変数)

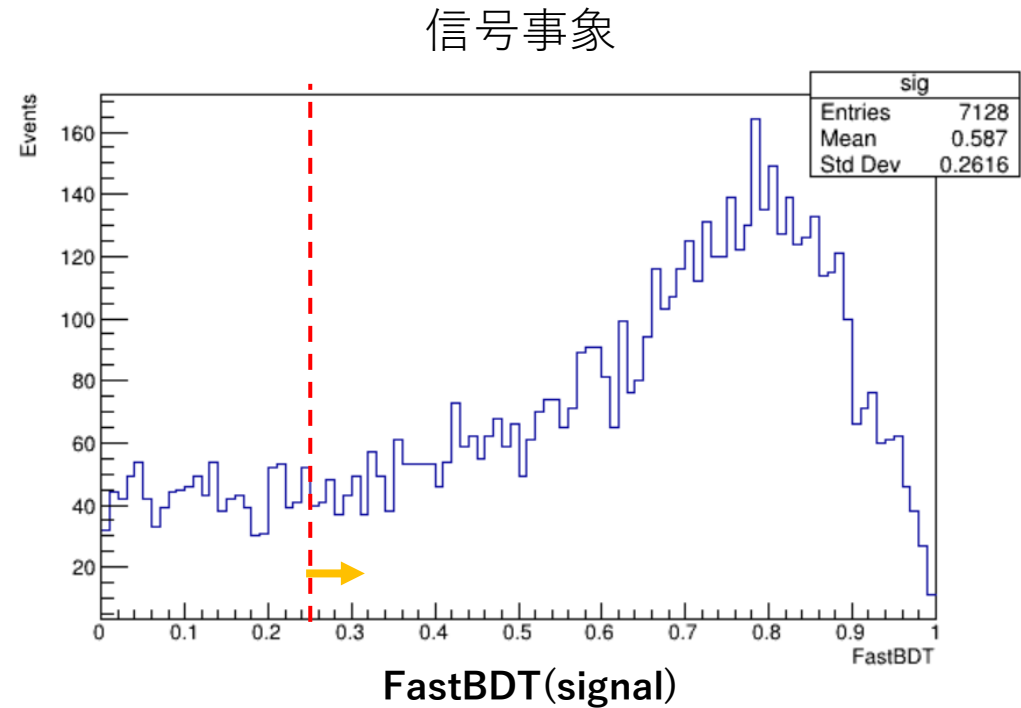
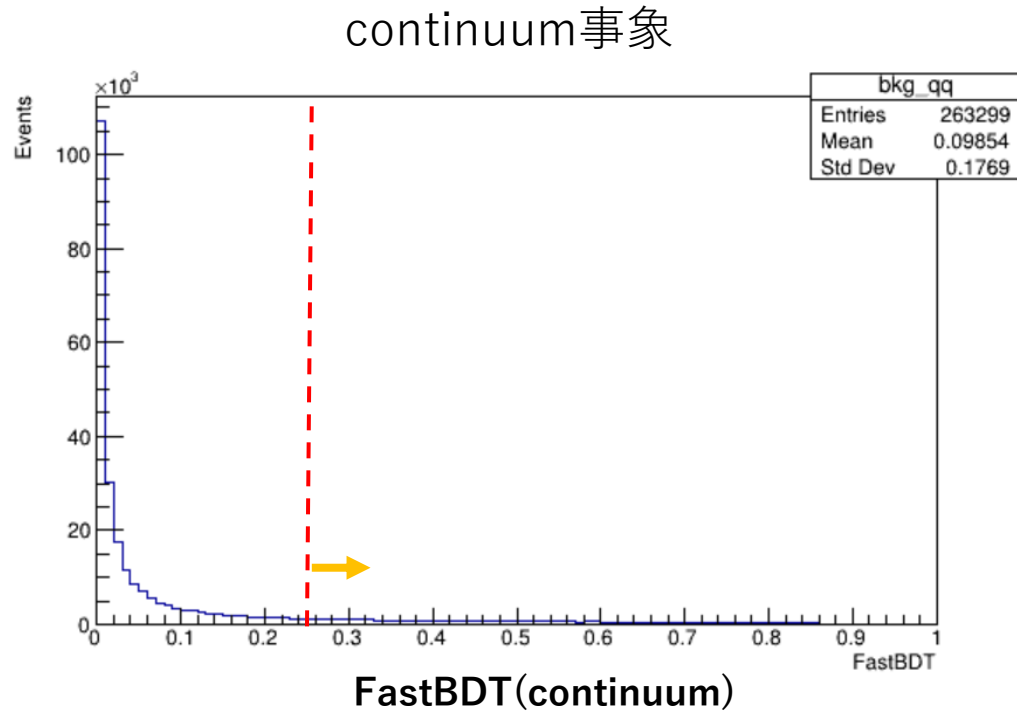




# FastBDT出力値( $\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ )

以下は学習の結果として得られたFastBDT出力値の分布である。

0に近いほどcontinuum事象、1に近いほど信号事象らしい事象であることを表す。

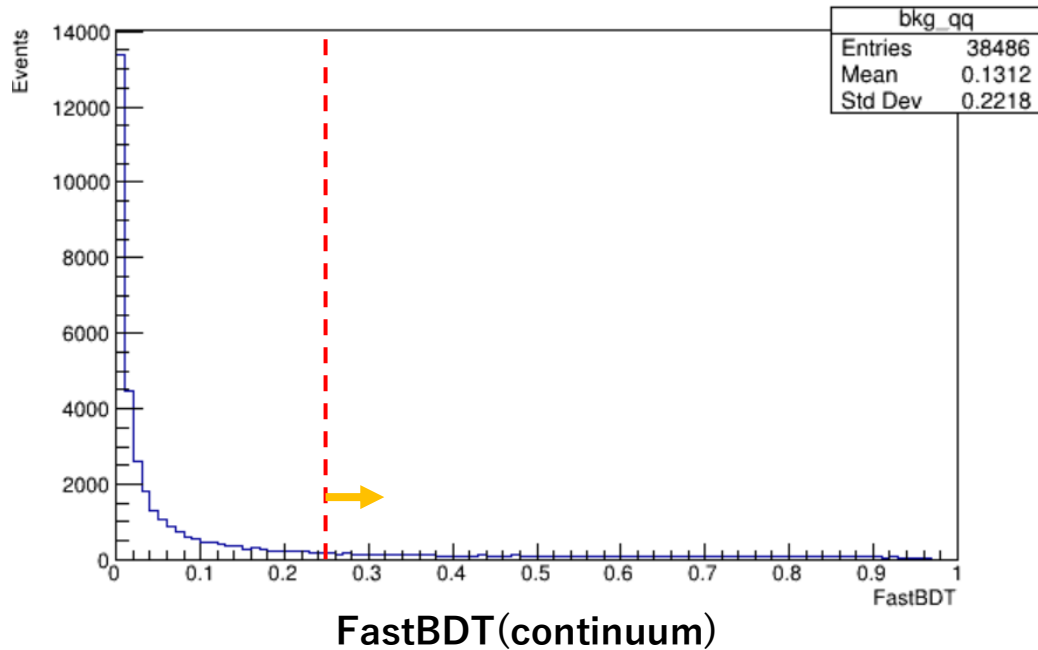


FastBDT > 0.25 を課すことで continuum事象を88%低減しつつ、信号事象を86%保持することが分かった。

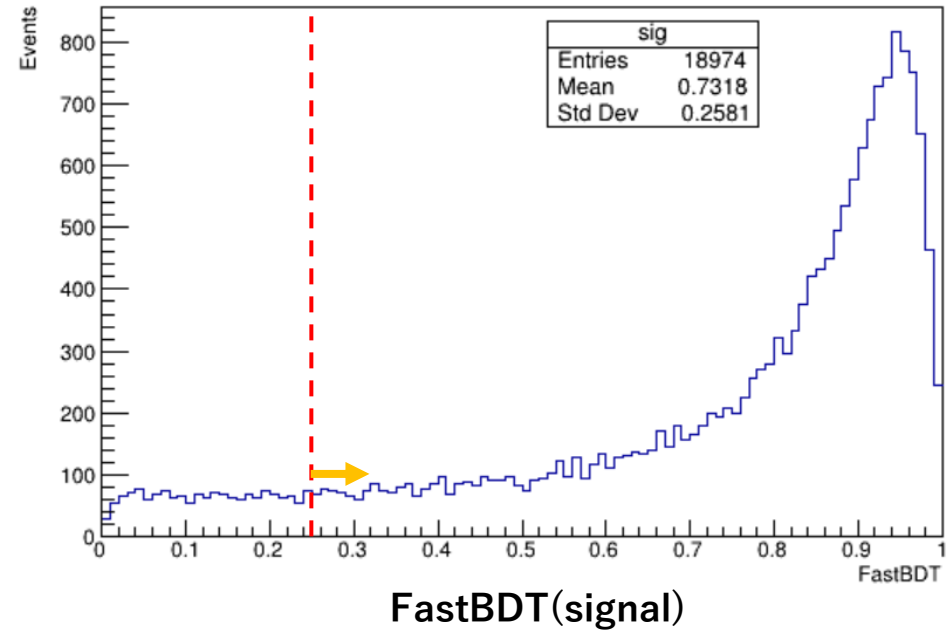
# FastBDT出力値( $\eta_c \rightarrow p\bar{p}$ )

$\eta_c \rightarrow p\bar{p}$ モードでのFastBDT出力値の分布。

continuum事象



信号事象



FastBDT > 0.25 を課すことで continuum事象を83%低減しつつ、信号事象を92%保持することが分かった。

# 目次

- インTRODクシヨソ  
— 研究動機  
— 研究する崩壊モード  
— Belle II 実験
- $B^0 \rightarrow (\eta_c \gamma) K^\pm \pi^\mp$  の再構成  
— Bの再構成  
— バックグラウンドの見積もり
- continuumバックグラウンドの抑制  
— FastBDT  
— バックグラウンドの抑制結果
- 期待される感度
- まとめ

# 50 ab<sup>-1</sup>で期待される事象数

FastBDT出力値の条件を課した後の50 ab<sup>-1</sup>で期待される事象数を調べた。

以下の表はSignal region内に入ってくる事象数を表しており、  
信号事象数の期待値の導出では $Br(B^0 \rightarrow h_c K^+ \pi^-) = 10^{-4}$ を仮定した。

continuum抑制後の50 ab<sup>-1</sup>で期待される事象数の数

	continuum事象	$B\bar{B}$ 事象	信号事象
$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$	1460500	2647500	4949
$\eta_c \rightarrow p\bar{p}$	277500	243500	968

# $M_{\eta_c \gamma}$ 分布のPDF

$M_{bc} - \Delta E$  Signal region内の事象が示す  $M_{\eta_c \gamma}$  分布。

信号事象はNovosibirsk function、バックグラウンド事象は指数関数を使用してフィットし、PDF(Probability Density Function)を決定した。

Novosibirsk function

$$F_{Novosibirsk} = A_S \exp\left(-\frac{0.5 \ln^2[1 + \Lambda a(x - m_0)]}{a^2} + a^2\right)$$

ここで  $\Lambda = \sinh(a\sqrt{\ln 4}) / (\sigma a\sqrt{\ln 4})$

$A_S$  : Normalization

$m_0$  :  $x$ の分布がピークになる値

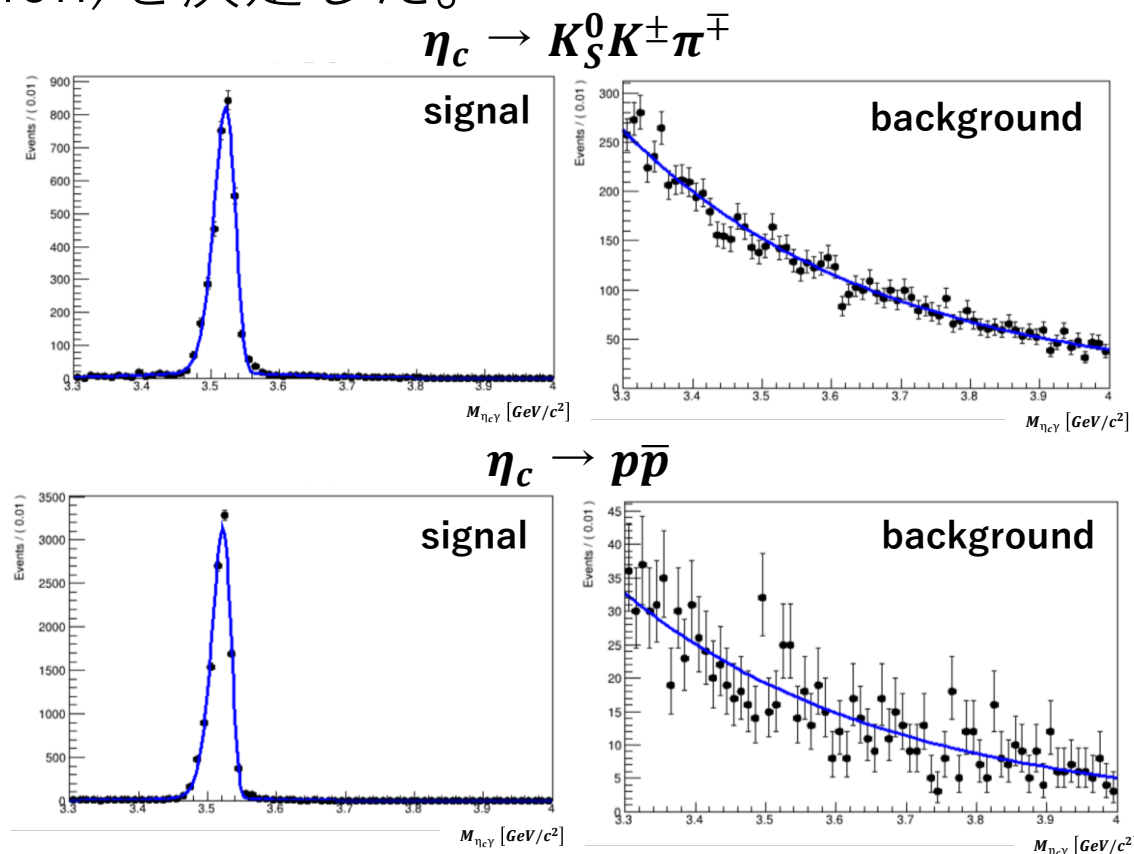
$\sigma$  : 標準偏差

$a$  : 非対称度

指数関数

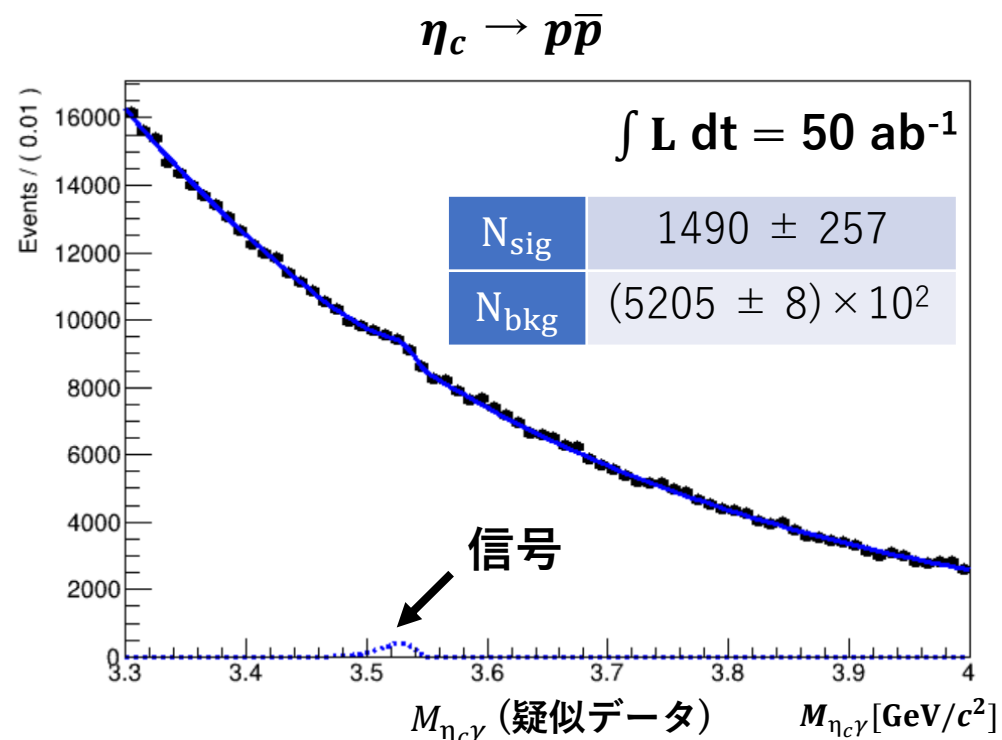
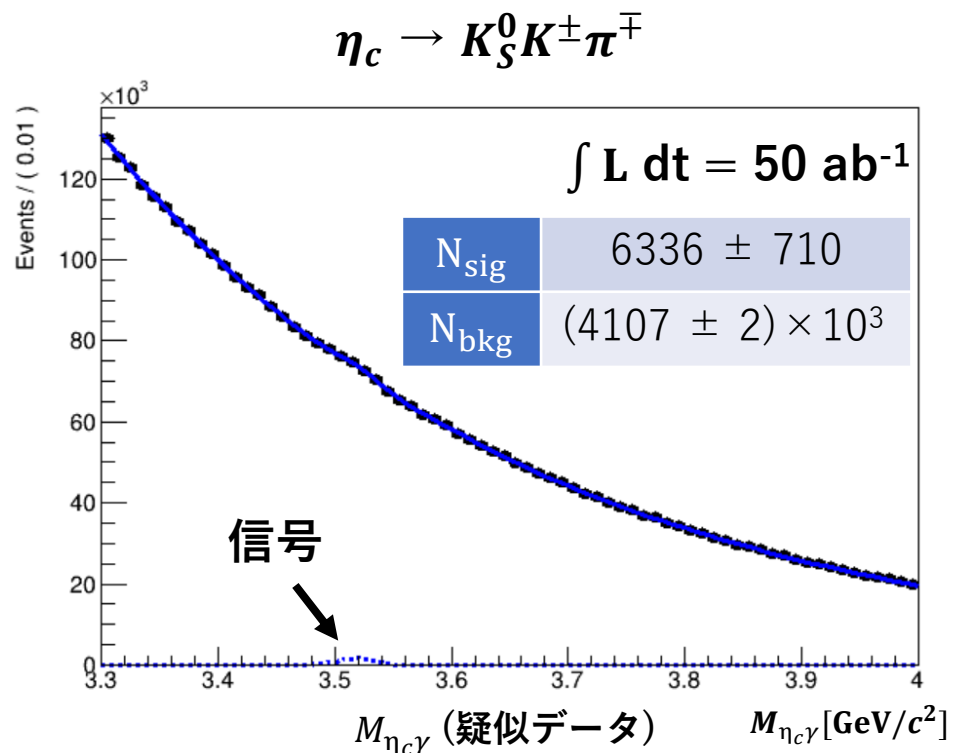
$$F_{exp} = N \cdot \exp(c \cdot x)$$

これらの結果を用いて疑似データを作成した。



# 期待される感度(at 50 ab<sup>-1</sup>)

以下の図は50 ab<sup>-1</sup>に対応する疑似データの $M_{\eta_c\gamma}$ 分布である。



既知の $h_c(1P)$ の生成は測定可能な見込み。

X(3872)のC-oddパートナーなどの新粒子は質量や幅が未知

→それらの探索にはさらにバックグラウンドを減らす工夫が望まれる。

# まとめ

- Bメソン三体崩壊で生成する  $J^{PC} = 1^{+-}$  の状態探査感度を見積もるため、 $B^0 \rightarrow h_c(1P) K^\pm \pi^\mp$ ,  $h_c(1P) \rightarrow \eta_c \gamma$  の事象再構成を行った。
- $\eta_c$  の2つのモードを調べ、 $\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$  モードの検出効率は12.2%、 $\eta_c \rightarrow p\bar{p}$  モードの検出効率は25.2%。
- バックグラウンドの低減を行うために、FastBDTを用いたcontinuum事象低減により、S/N比が1/2000~1/3000程度であったものが一桁ほど改善する。
- 積分ルミノシティ50 ab<sup>-1</sup>におけるB候補事象の  $M_{\eta_c \gamma}$  分布から信号抽出する感度を調べ、既知の  $h_c(1P)$  の生成は測定可能な見込みであることが分かった。
- X(3872)のC-oddパートナーなど質量や幅が未知の新粒子を探索するには、さらにバックグラウンドを減らす工夫が望まれる。崩壊点再構成による  $\Delta t$  分布の活用などが挙げられる。

Back up



# 選別条件

- Track selection
  - $dr < 2\text{cm}$  ,  $dz < 5\text{cm}$  (except for  $K_S^0$  daughter)
  - $K/\pi$  id  $> 0.6$  for K, otherwise  $\pi$
  - Proton-id LR  $> 0.2$
- $K_S^0$  selection
  - $|M(\pi\pi) - M_{K_S^0}| < 20\text{MeV}$
- $\gamma$  selection
  - $E_\gamma > 100\text{MeV}$
  - $clusterE9/E21 > 0.9$
- $\eta_c$  candidates
  - $|M(K_S^0 K^\pm \pi^\mp) - M_{\eta_c}| < 40\text{MeV}$  for  $\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$
  - $|M(p\bar{p}) - M_{\eta_c}| < 40\text{MeV}$  for  $\eta_c \rightarrow p\bar{p}$

# Bから発生する崩壊

本研究ではチャーモニウムライクの源としてBメソンを選んでいる。

Bメソンは質量が $5.28 \text{ GeV}/c^2$  と大きい。

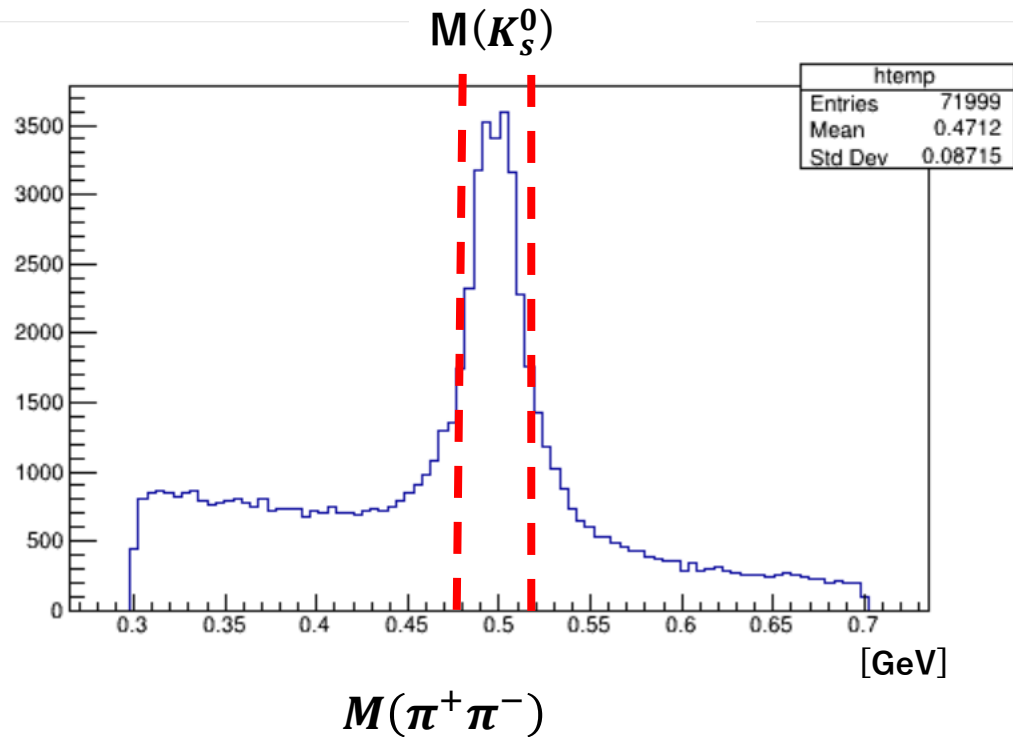
→二体崩壊の場合、崩壊後の娘粒子は互いに反対方向に高い運動量を持って離れる。  
そのため、終状態相互作用が小さいので、崩壊振幅を、この二つの娘粒子に至る  
2つのカレントの積で表したものが良い近似になる。(ファクトリゼーション)

→ファクトリゼーションでは

$J^{PC} = 0^{-+}, 1^{--}, 1^{++}$  のチャーモニウムは生成しやすいが、  
 $J^{PC} = 0^{++}, 1^{+-}, 2^{++}$  は生成しにくい。

よって本研究ではファクトリゼーションの制約がなくなるBメソンの三体崩壊に着目している。

# $K_S^0$ 候補の不変質量分布 (Signal MC)

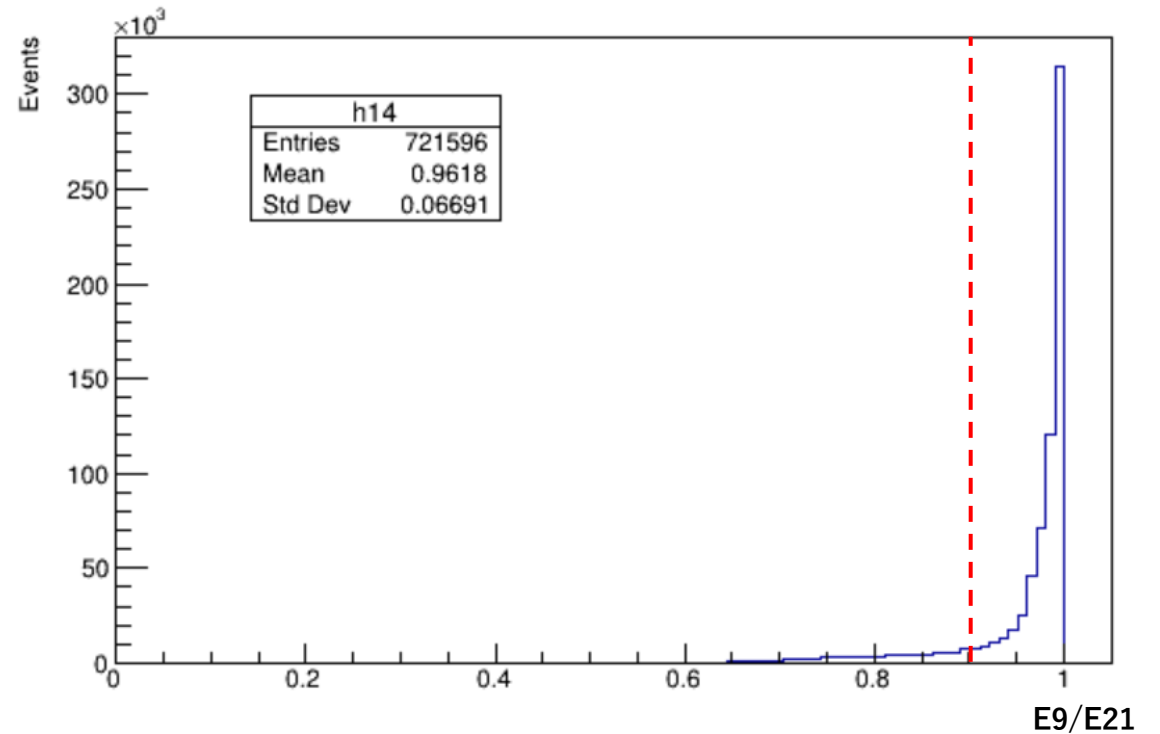
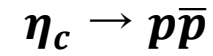
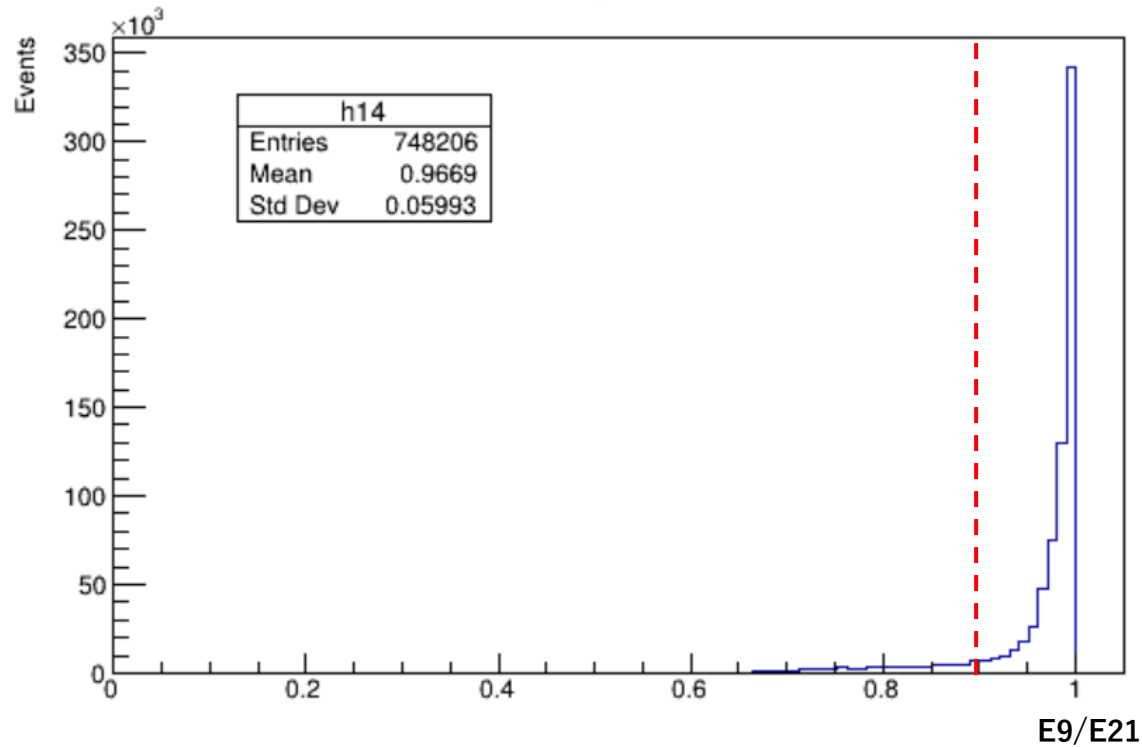


$K_S^0$  の質量  $497.6 \text{ MeV}/c^2$  付近にピークが立っていることが確認できた。

赤点線の範囲 ( $477.6 \text{ MeV}/c^2 < M(\pi^+ \pi^-) < 517.6 \text{ MeV}/c^2$ ) に入るものを  $K_S^0$  候補とした。

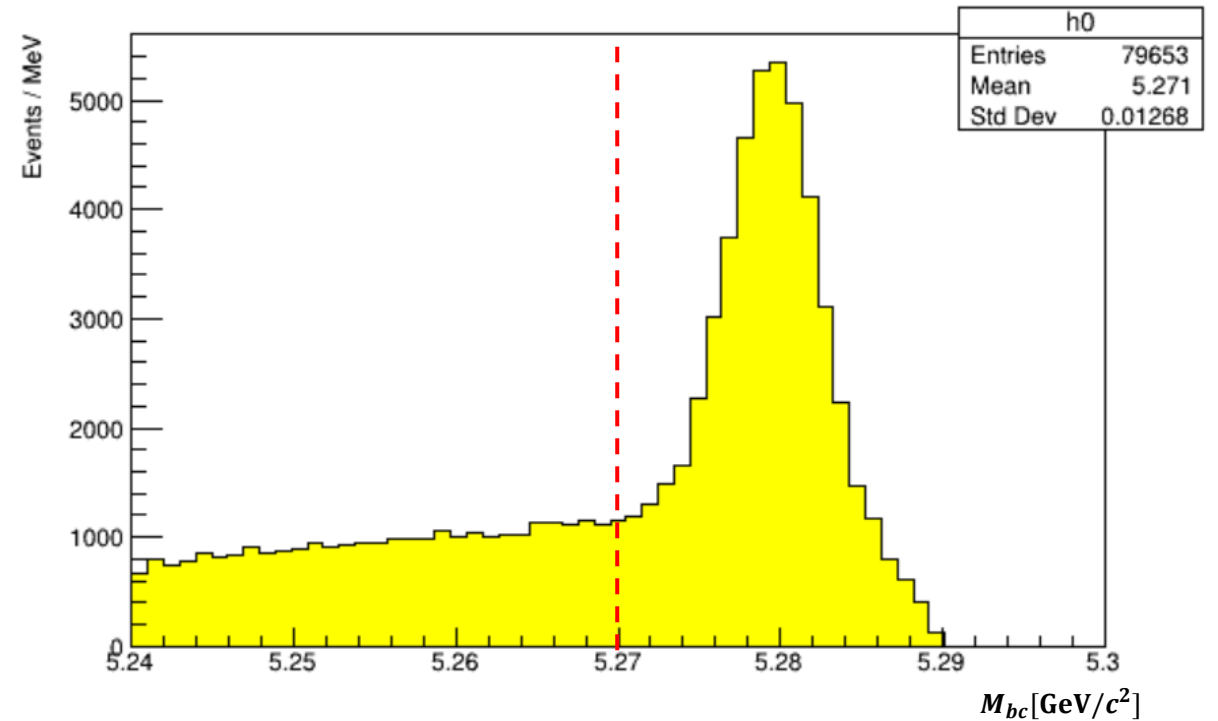
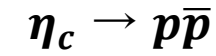
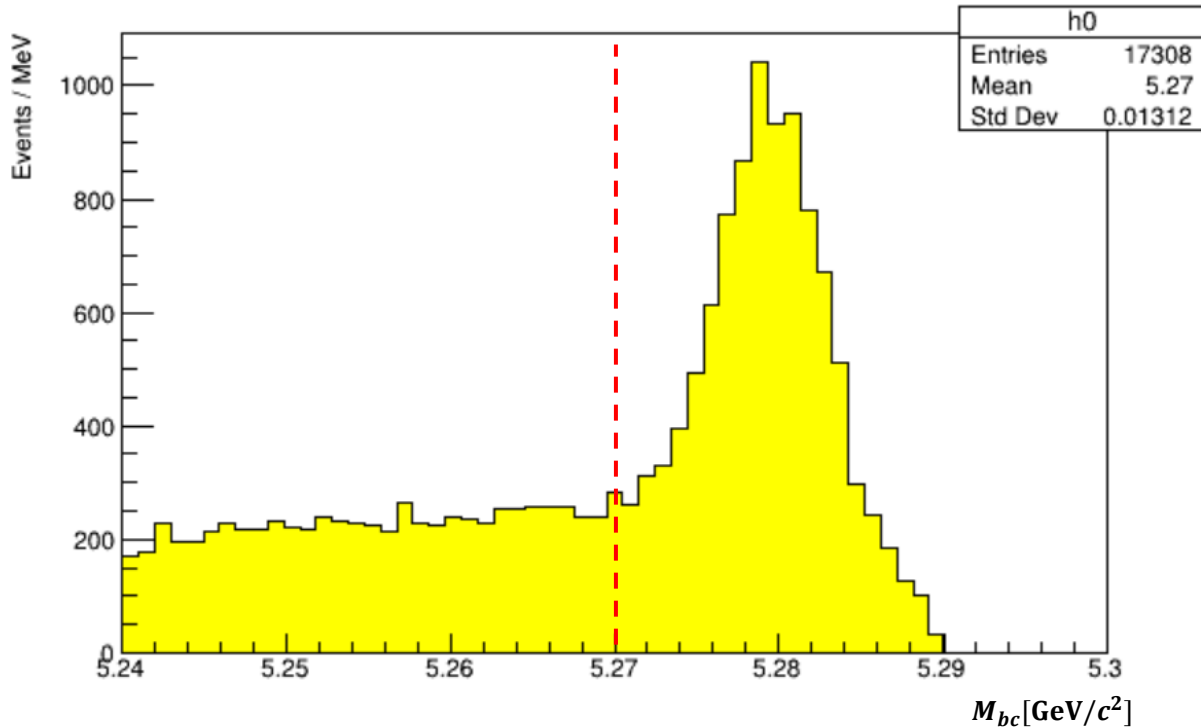
# GammaのE9/E21分布

cutはE > 0.1とgammaの推奨cut。



# $M_{bc}$ 分布

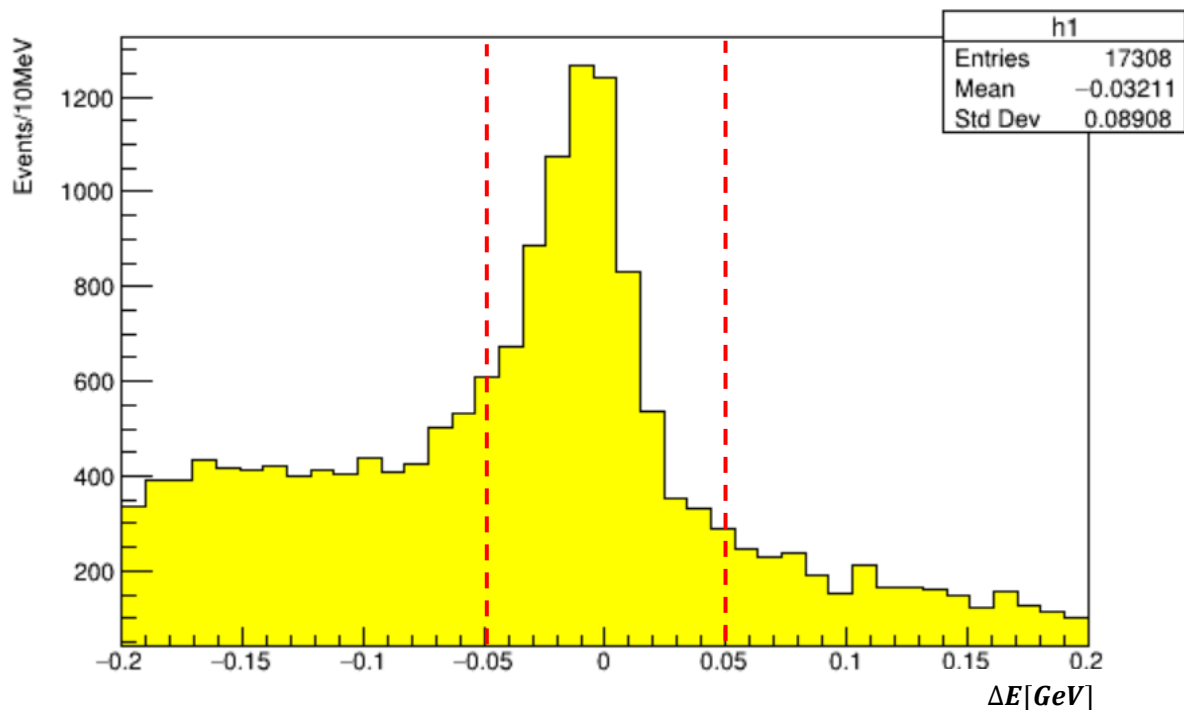
ここで  $M_{bc} = \sqrt{(E_{CM}/2)^2 - P^2}$ ,  $\Delta E = E - (E_{CM}/2)$ 。  
B崩壊信号では  $M_{bc} = 5.28 \text{ GeV}/c^2$ ,  $\Delta E = 0$  にピークが立つ。



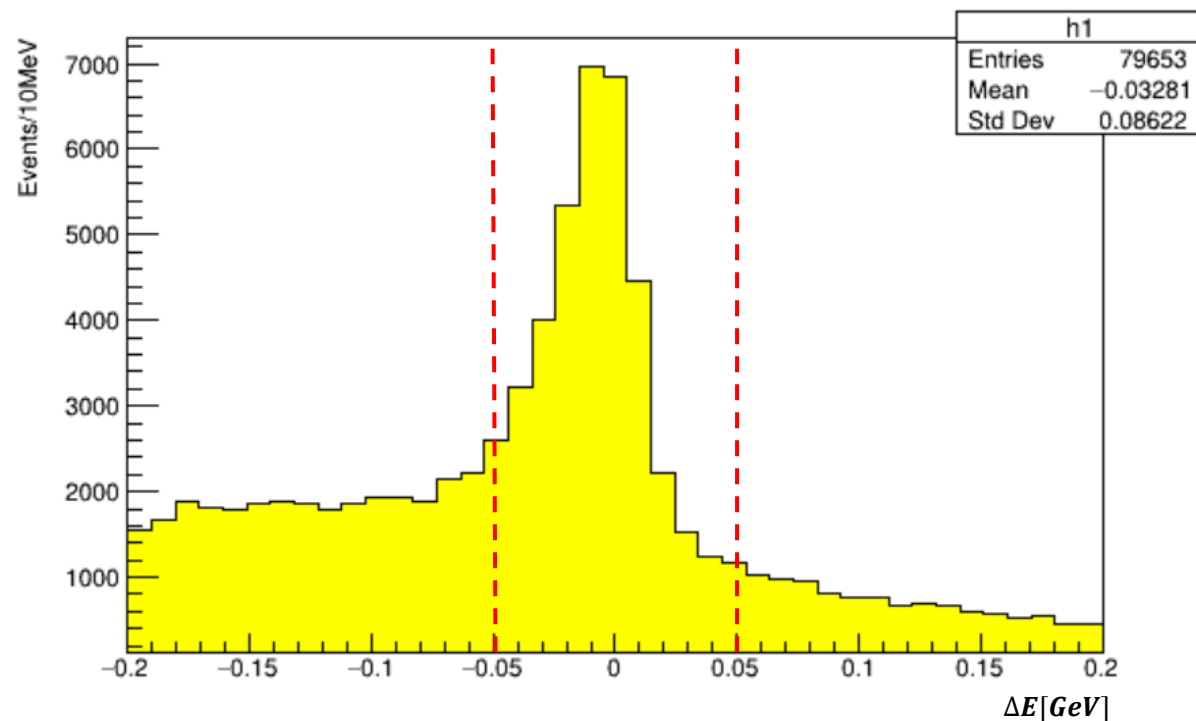
# $\Delta E$ 分布

ここで  $M_{bc} = \sqrt{(E_{CM}/2)^2 - P^2}$ ,  $\Delta E = E - (E_{CM}/2)$ 。  
B崩壊信号では  $M_{bc} = 5.28 \text{ GeV}/c^2$ ,  $\Delta E = 0$  にピークが立つ。

$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$



$\eta_c \rightarrow p\bar{p}$



# 信号事象数の期待値

信号事象数の期待値 $N_{sig}$ は

$N_{sig} = (\text{中性}B\text{メソン数}) \times (\text{各崩壊分岐比}) \times (\text{検出効率}\epsilon)$ で求められる。

100 fb<sup>-1</sup>あたりの中性Bメソン: $1.1 \times 10^8$  個

$Br(B^0 \rightarrow h_c K^+ \pi^-): 10^{-4}$  を仮定。

$$\begin{aligned} \eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp : N_{sig} &= (\text{中性}B\text{メソン数}) \times Br(B^0 \rightarrow h_c K^+ \pi^-) \times Br(h_c \rightarrow \eta_c \gamma) \times \\ &\quad Br(\eta_c \rightarrow K_S^0 K^+ \pi^-) \times Br(K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-) \times (\text{検出効率}\epsilon) \\ &= 1.1 \times 10^8 \times 10^{-4} \times 0.51 \times \left(0.073 \times \frac{2}{3} \times \frac{1}{2}\right) \times 0.69 \times 0.122 \\ &\simeq 11.5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_c \rightarrow p\bar{p} : N_{sig} &= (\text{中性}B\text{メソン数}) \times Br(B^0 \rightarrow h_c K^+ \pi^-) \times Br(h_c \rightarrow \eta_c \gamma) \times \\ &\quad Br(\eta_c \rightarrow p\bar{p}) \times (\text{検出効率}\epsilon) \\ &= 1.1 \times 10^8 \times 10^{-4} \times 0.51 \times 0.0015 \times 0.252 \\ &\simeq 2.1 \end{aligned}$$

この値はBelle全データでは数十事象、 Belle IIでは数百～数千事象にあたる。

# バックグラウンドの見積もり

Belle II共用モンテカルロシミュレーションデータを用いた。

$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ ,  $\eta_c \rightarrow p\bar{p}$  に崩壊するモードの二種類の解析を行った。  
対応する積分ルミノシティは100 fb<sup>-1</sup>。

	対応するEvent数
$u\bar{u}$	161M
$d\bar{d}$	40M
$s\bar{s}$	38M
$c\bar{c}$	133M
$B^0\bar{B}^0$	54M
$B^+B^-$	51M
$\tau^+\tau^-$	92M



# 最良候補選別方法の検討

$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$   $N_{gen} = 34600$

	sig	isSig	efficiency	purity
without BCS	5882	4090	17.0%	69.5%
$\eta_c, B \chi^2$ prob	2127	1830	6.1%	86.0%
deltaE	4325	3439	12.5%	79.5%
Mbc	4218	3474	12.2%	82.4%

$\eta_c \rightarrow p\bar{p}$   $N_{gen} = 100000$

	sig	isSig	efficiency	purity
without BCS	30740	25821	30.7%	84.0%
$\eta_c, B \chi^2$ prob	19892	18347	19.9%	92.2%
deltaE	25987	23677	26.0%	91.1%
Mbc	25203	23381	25.2%	92.8%

左の表はsignal region内に入ってきた事象数をまとめたもの。

( $|\Delta E| < 0.05 \text{ GeV}, M_{bc} > 5.27 \text{ GeV}/c^2$ )

$\eta_c, B \chi^2$  probは $\eta_c$ の崩壊点で $\chi^2$  probabilityが一番大きいものを選び、それでも複数候補が出てくる場合、Bの崩壊点で $\chi^2$  probabilityが一番大きいものを選ぶ。

deltaEは $\Delta E$ が0に一番近いものを選ぶ。

Mbcは $M_{bc}$ が $5.28 \text{ GeV}/c^2$ に一番近いものを選ぶ。

purityは正しく再構成されたものの割合。

deltaEが一番検出効率が良い。

# バックグラウンドの見積もり (BCS:dE)

バックグラウンドにはcontinuumと $B\bar{B}$ の二つのものがあり、100 fb<sup>-1</sup>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見積もりを行った。以下の表はSignal region内に入ってくる事象数の結果。

残存バックグラウンドの事象数

Event Type	$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$	$\eta_c \rightarrow p\bar{p}$
$u\bar{u}$	4580	1496
$d\bar{d}$	1109	241
$s\bar{s}$	3253	344
$c\bar{c}$	17200	1642
continuum	26142	3723
$B^0\bar{B}^0$	4026	269
$B^+B^-$	4148	418
$B\bar{B}$	8174	687
全Type合計	34316	4410

continuumは $B\bar{B}$ 以外のハドロン生成事象、 $e^+e^- \rightarrow u\bar{u}, d\bar{d}, s\bar{s}, c\bar{c}$

$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ よりも $\eta_c \rightarrow p\bar{p}$ の方が予想されるバックグラウンドの事象数は少なく、どちらの崩壊モードでもcontinuumが占めるバックグラウンドの方が支配的であることが分かった。

Mbcの最良候補選別よりも1割ほどバックグラウンドが多い。

# continuum suppressionに使用した変数

KSFW moments(14種類) +  $p_t^{sum} + M_{miss}^2$  : Belle標準のイベント形状の変数  
運動量方向などからイベントの形状を数値化。

cleoConeThrust (9種類) : CLEO実験で $q\bar{q}$ 抑制に使用されていた変数  
スラスト軸とROEの運動量方向の間の角の大きさを場合分けして、  
それぞれの場合のROEの運動量の合計を表す。

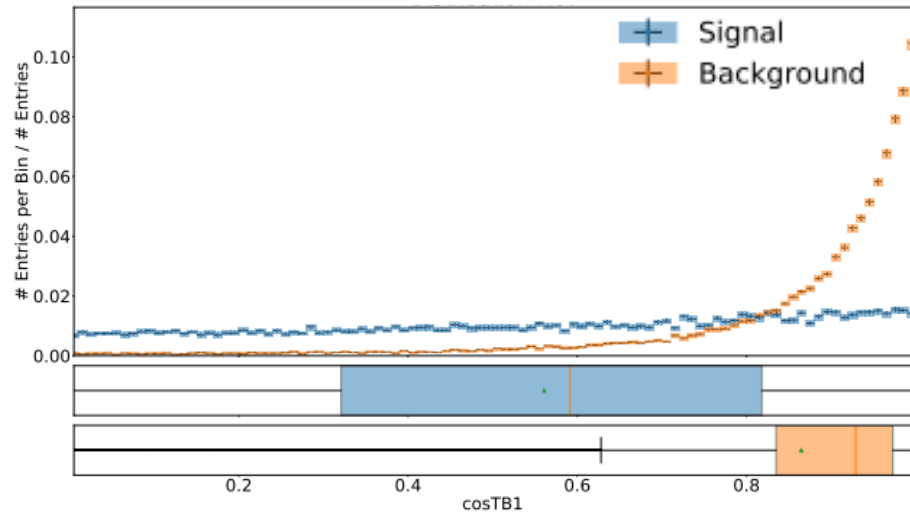
thrustBm, thrustOm, cosTBTO, cosTBz : スラスト関係の変数  $T = \max_{|n|=1} \frac{\sum_i |\vec{n} \cdot p_i|}{\sum_i |p_i|}$   
BメソンやROEのスラスト軸の大きさや、  
BメソンとROEのスラスト軸の間の角、Bメソンのスラスト軸とz軸の間の角を表す。

R2 : Reduced Fox-Wolfram moment  
0~1の値を取り、0に近いほど等方的、1に近いほどジェット形状。

# continuumバックグラウンドの抑制に使用した変数

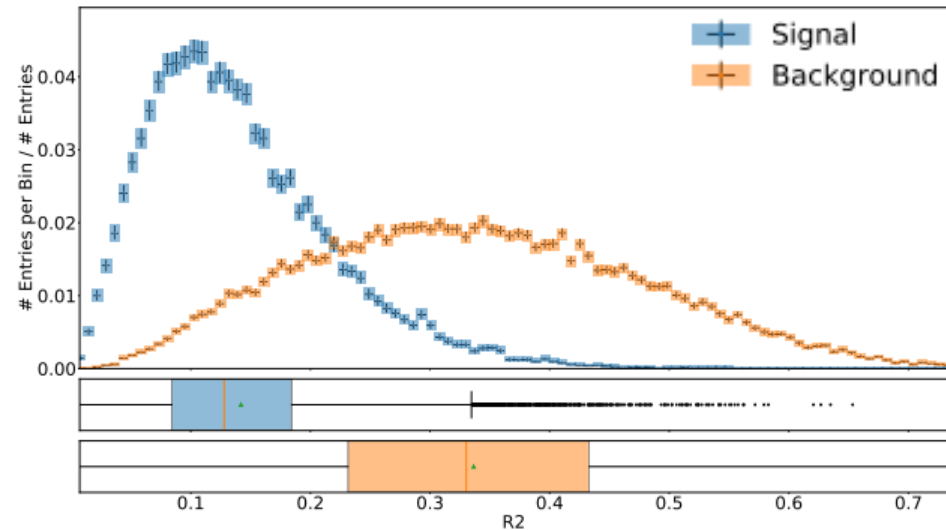
Belle標準の事象形状の変数(16種類)、CLEO実験でcontinuum抑制に使用されていた変数(9種類)、スラスト関係の変数(4種類)、R2の計30変数を使用。

cosTBTO



事象形状がジェットライクだと  
1にピークが表れる。

R2

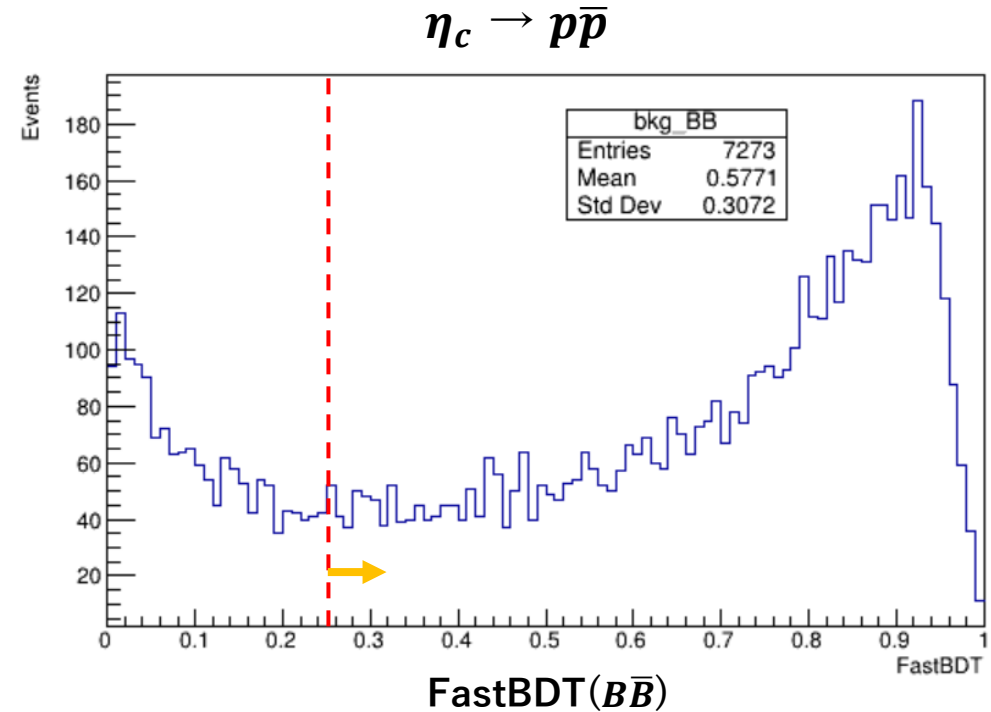
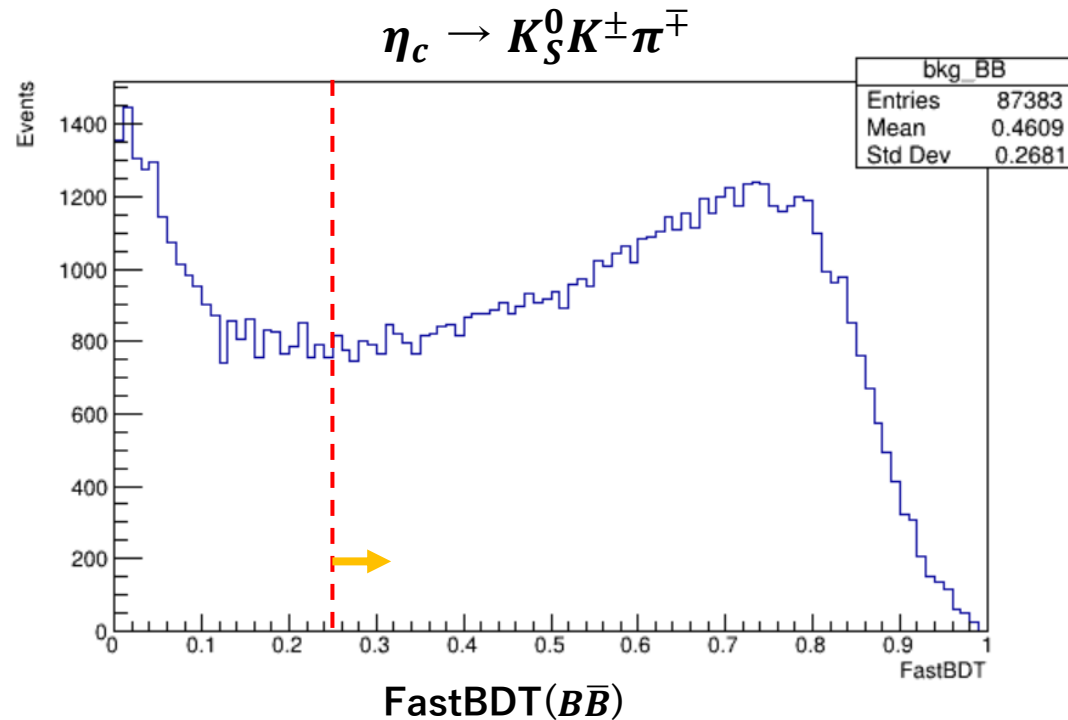


等方的な事象は0に、  
ジェットライクな事象は1に分布する。

FastBDTはこれら複数の変数の相関を考慮して分離を最大化するソフトウェア  
→continuumに対して0を、信号に対して1を返す確率分布を出力する。

# FastBDT出力値( $B\bar{B}$ 事象)

どちらのモードも0付近と1よりの部分にピークがあり、continuum事象と信号事象の中間的な分布となる。



FastBDT > 0.25 を課すことで

$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ モードでは29%,  $\eta_c \rightarrow p\bar{p}$ モードでは23%の $B\bar{B}$ 事象を削減できることが分かった。

# FastBDT学習結果

学習結果であるFastBDT出力値の条件を課すことでSignal region内に入ってくる事象数の変化を調べた。

FastBDT出力値の条件を課す前後の事象数の比較

	continuum事象	$B\bar{B}$ 事象	信号事象
$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ Cut条件なし	23264	7407	4240 (11.5)
$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ FastBDT > 0.25	2921	5295	3649 (9.9)
$\eta_c \rightarrow p\bar{p}$ Cut条件なし	3312	622	12609 (2.1)
$\eta_c \rightarrow p\bar{p}$ FastBDT > 0.25	555	487	11623 (1.9)

※( )内の数字は100 fb<sup>-1</sup>あたりの信号事象数の期待値

FastBDT > 0.25の条件を課すことで  
 $\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ モードでは  
continuum事象を88%低減しつつ、  
信号事象を86%保持でき、  
 $\eta_c \rightarrow p\bar{p}$ モードでは  
continuum事象を83%低減しつつ、  
信号事象を92%保持できることが分  
かった。  
 $B\bar{B}$ 事象は $\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ モードで  
29%、 $\eta_c \rightarrow p\bar{p}$ モードで23%低減され  
ることが確認された。

# $\eta_c \gamma$ 不変質量分布のPDF

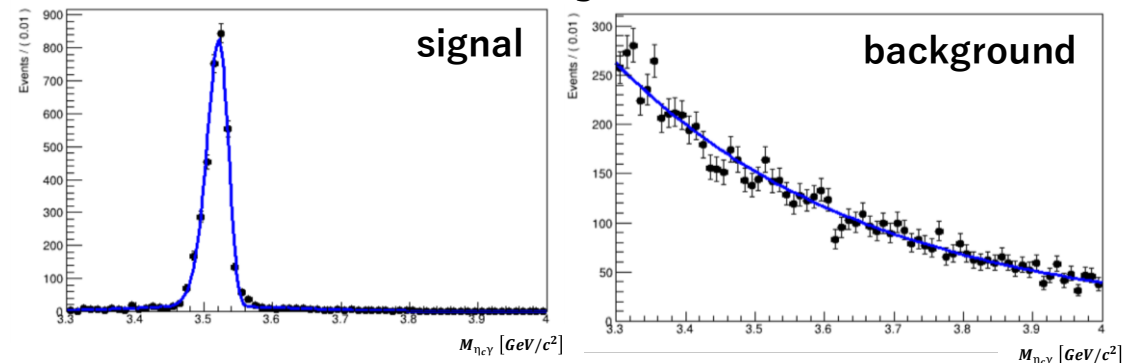
信号事象は非対称Gaussianでフィットを行い、わずかに再構成に失敗して広く分布する成分にはGaussianを使用した。

バックグラウンド事象は指数関数を使用してフィットを行った。

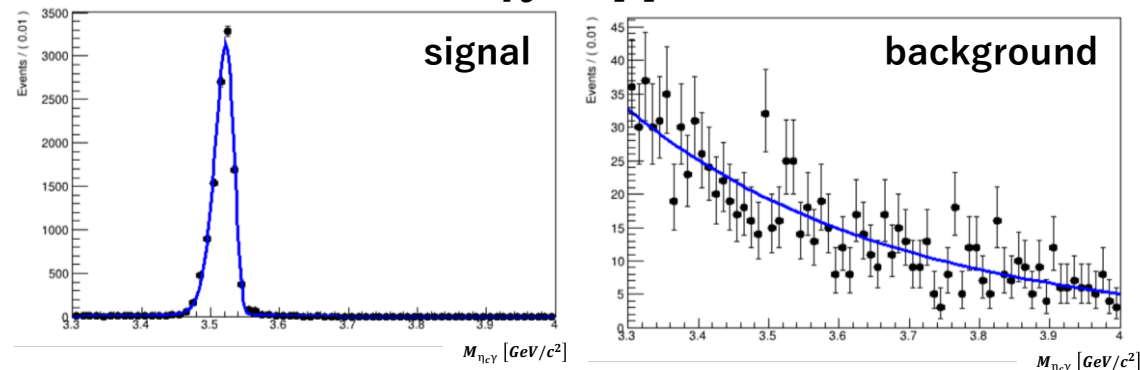
Fit result

	$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$	$\eta_c \rightarrow p\bar{p}$
mean [GeV/c <sup>2</sup> ]	$3.5214 \pm 0.0005$	$3.5219 \pm 0.0002$
$\sigma$ [GeV/c <sup>2</sup> ]	$0.0157 \pm 0.0003$	$0.01397 \pm 0.00012$
Tail	$0.18 \pm 0.02$	$0.226 \pm 0.010$
Background event Lambda	$-2.71 \pm 0.06$	$-2.64 \pm 0.17$

$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$



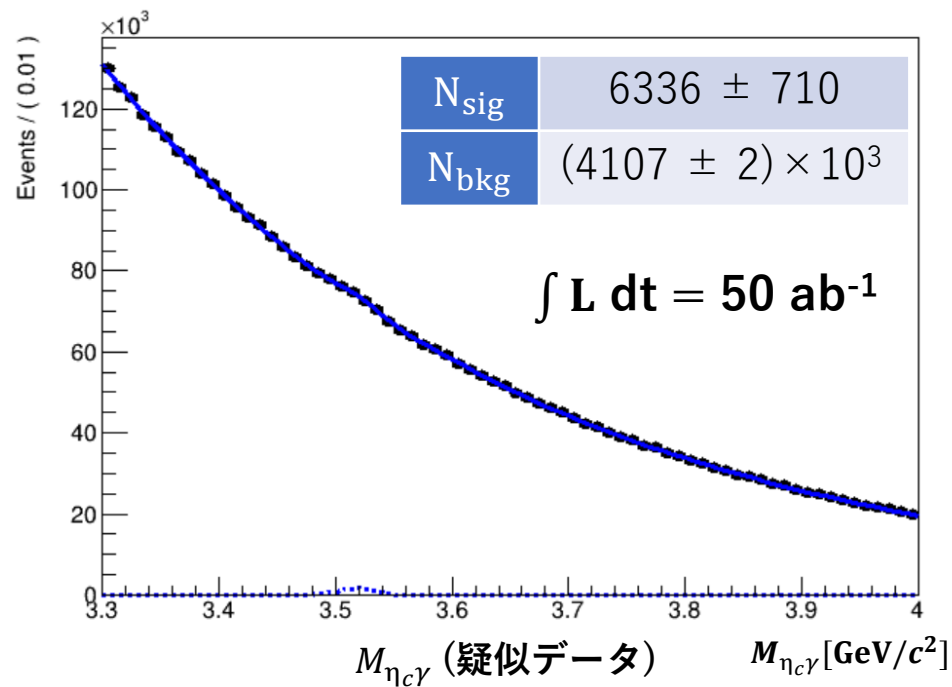
$\eta_c \rightarrow p\bar{p}$



# 期待される感度 ( $\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ )

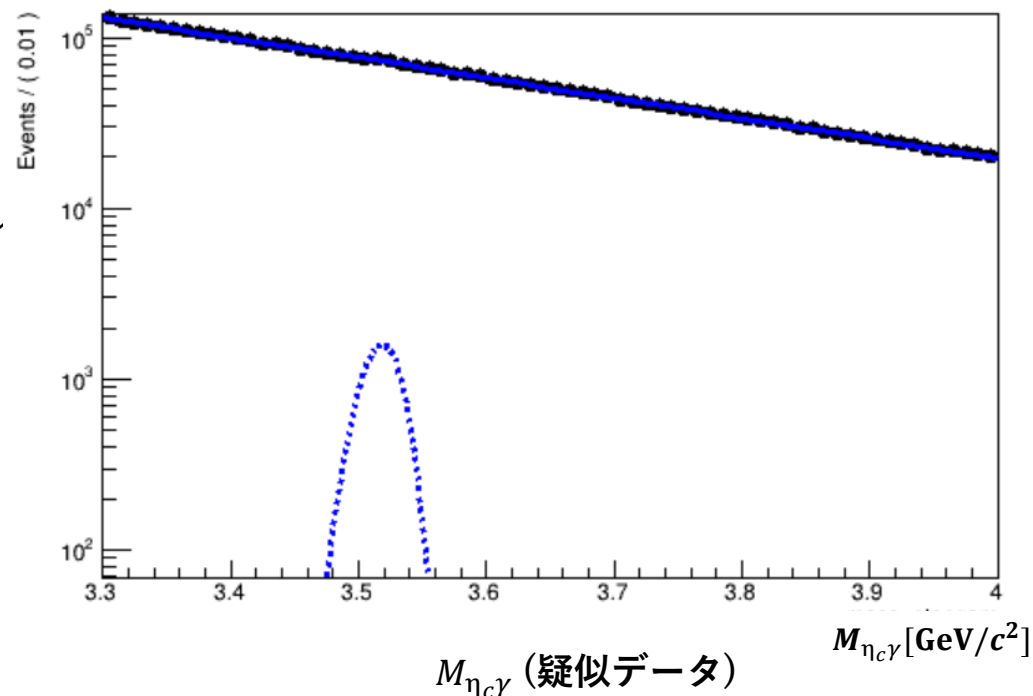
以下の図は50  $\text{ab}^{-1}$ に対応する疑似データ分布である。

線形スケール



→  
対数スケール  
で表示

対数スケール

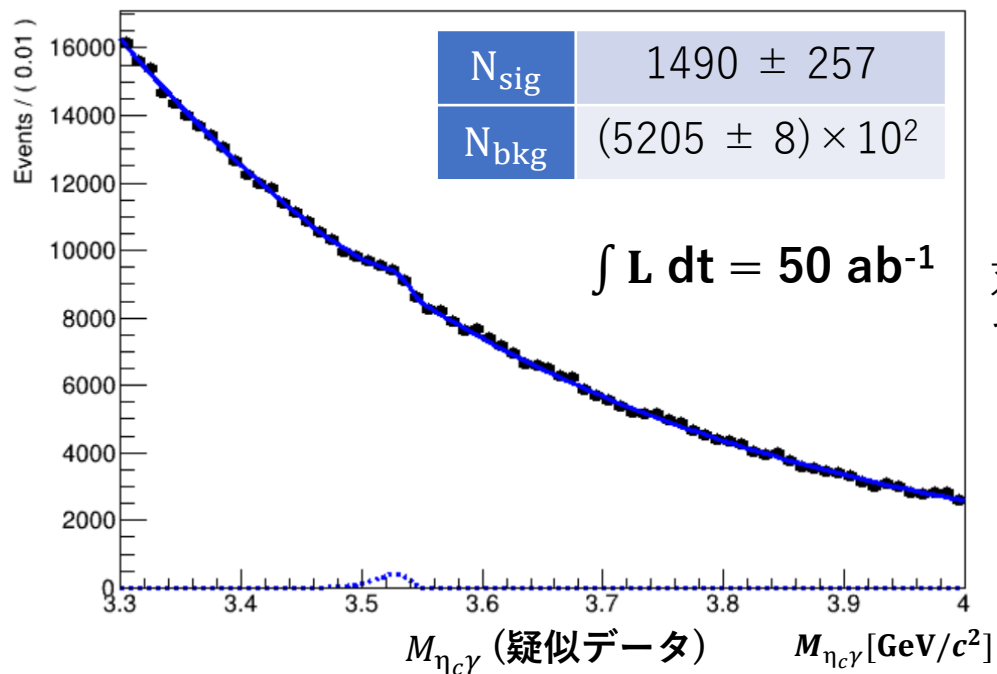




# 期待される感度 ( $\eta_c \rightarrow p\bar{p}$ )

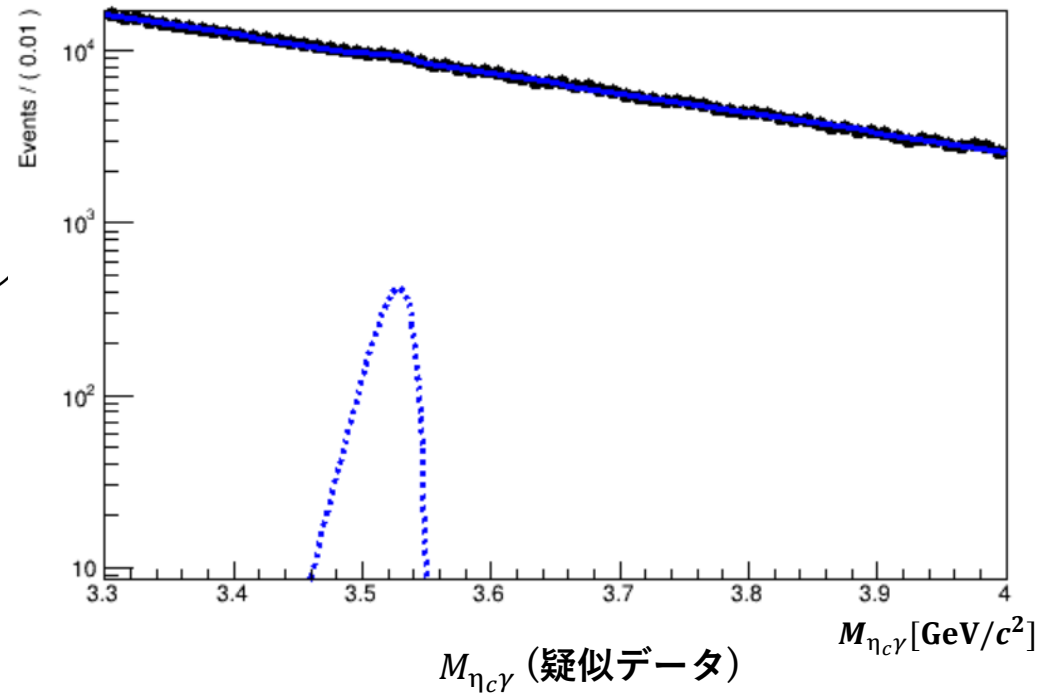
以下の図は50  $\text{ab}^{-1}$ に対応する疑似データ分布である。

線形スケール



対数スケール  
で表示

対数スケール

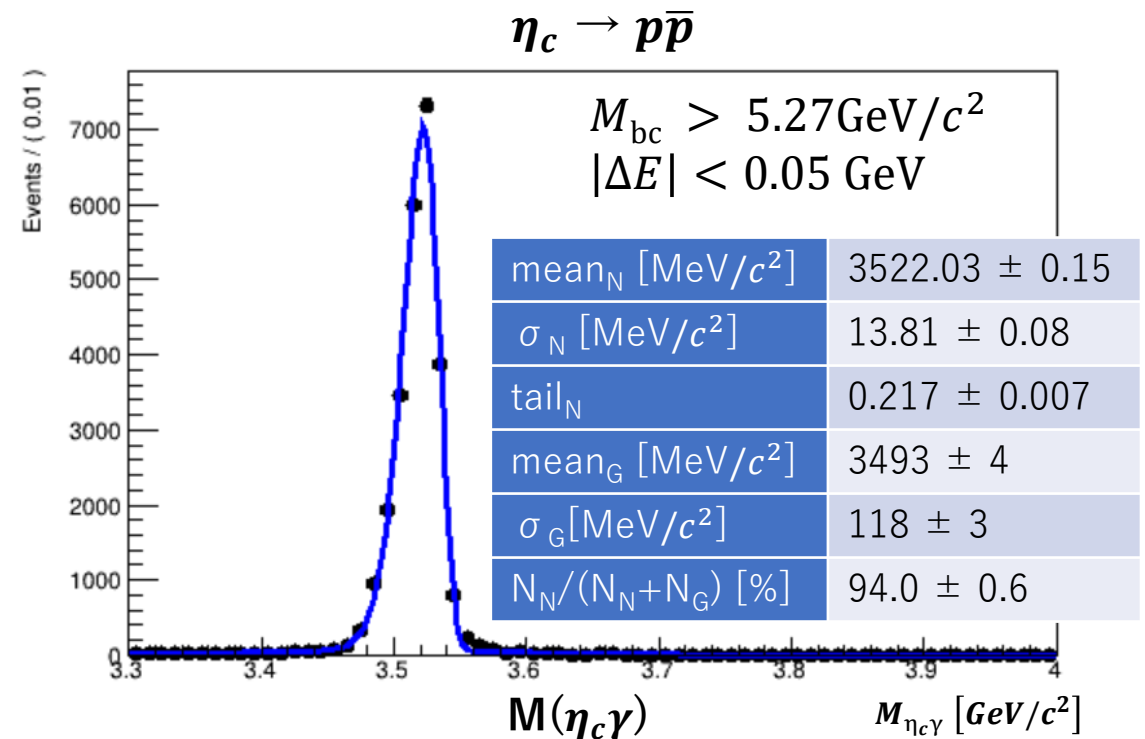
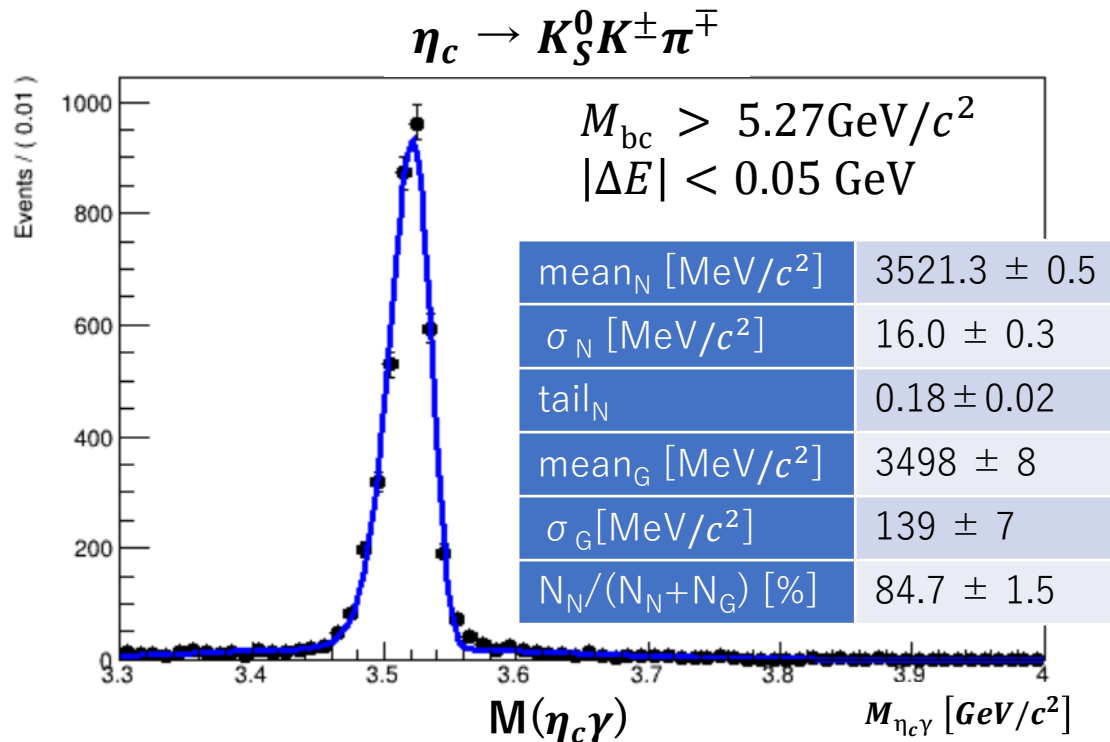
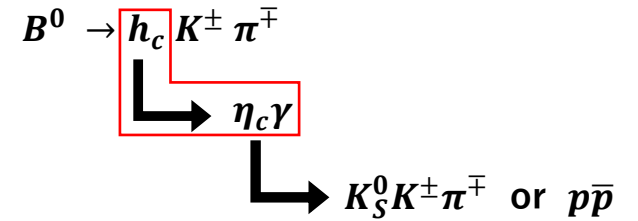


# $\eta_c \gamma$ 不変質量分布

BメソンSignal region内の事象の $\eta_c \gamma$ 不変質量分布。

非対称な分布：非対称Gaussian(添え字:N)

(+分布の裾は幅広Gaussian、割合は小さく、添え字:G)でフィット。

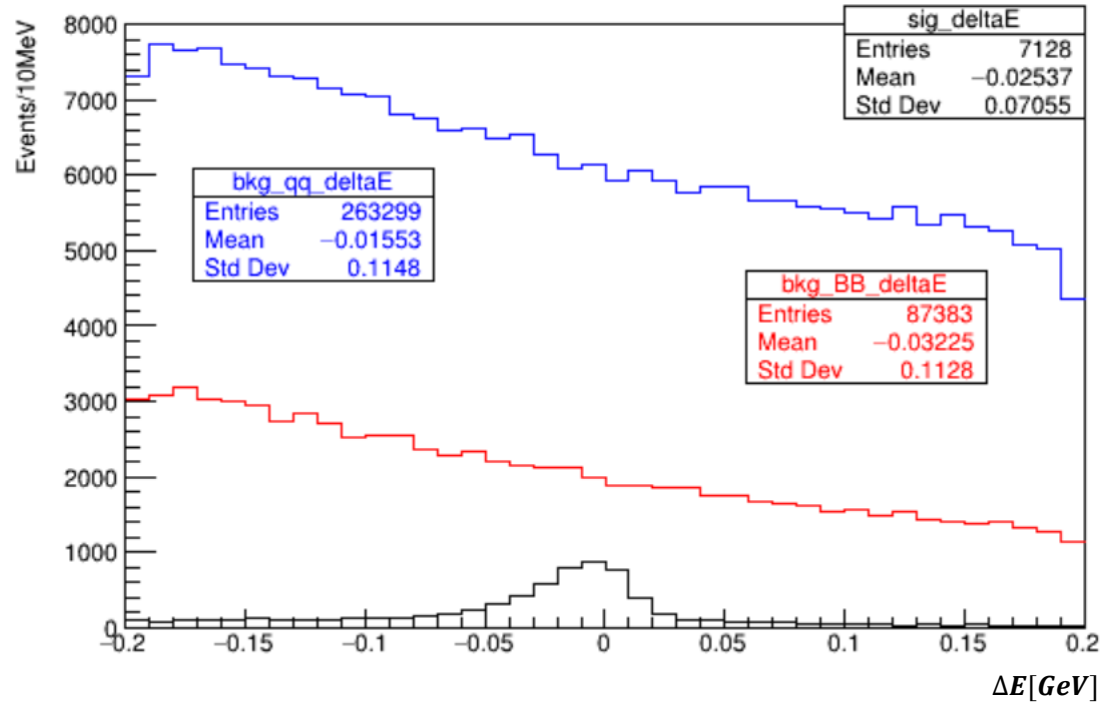


どちらのモードも $h_c$ の質量( $3525 \text{ MeV}/c^2$ )付近にピークが立っている。

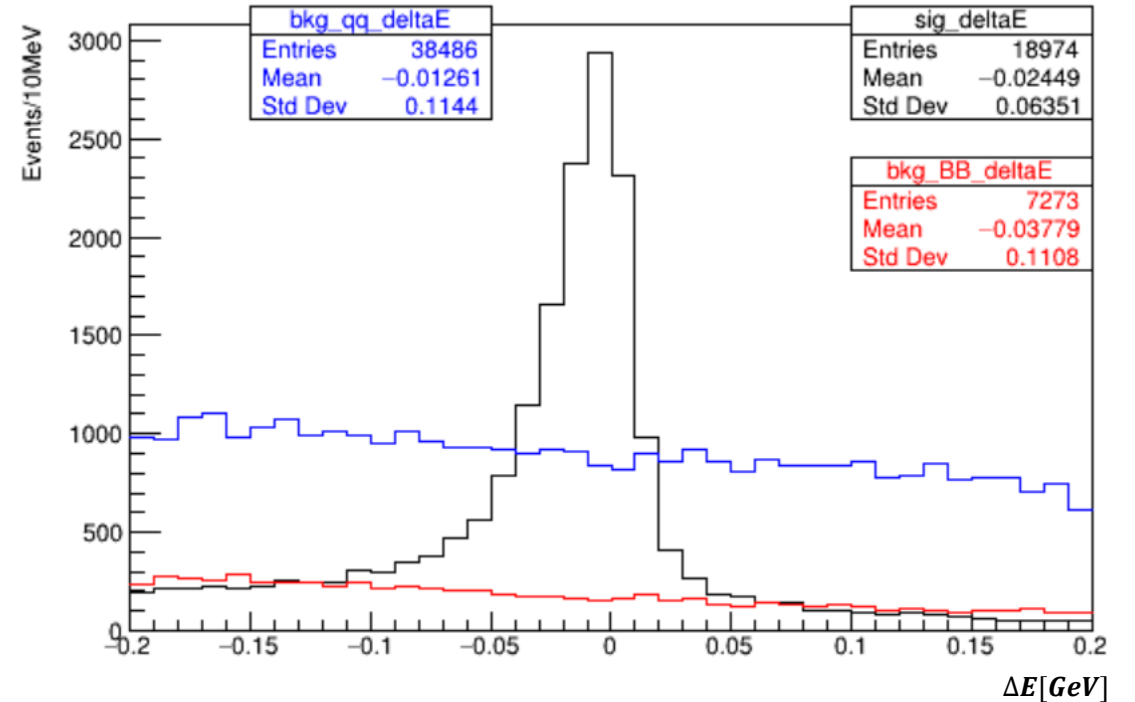
分解能は $\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$ :  $16 \text{ MeV}/c^2$ 、 $\eta_c \rightarrow p \bar{p}$ :  $14 \text{ MeV}/c^2$ が期待できる。

# 最良候補選別後の $\Delta E$ 分布

$$\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$$



$$\eta_c \rightarrow p\bar{p}$$



黒色が信号事象、青色がcontinuum事象、赤色が **$B\bar{B}$** 事象の分布を表す。

# 参考文献

粒子の質量など

PDG,2020, 「The Review of Particle Physics (2020)」

$h_c(2P)$

N. Brambilla et al, Physics Reports 873(2020)1-154

[Elsevier Enhanced Reader](#)

D. Ebert, R.N. Faustov and V. O. Galkin, Physics of Atomic Nuclei, 76 (2013) 1554( $h_c(2P)$  3.926 GeV)

フィット関係

[RooFit Users Manual 300-33](#)

[Microsoft Word - RooFit Users Manual 300-33 \(cern.ch\)](#)

Novosibirsk

H. Ikeda et al. NIM A441 (2000), p. 401 (Belle Collaboration)

[\[1310.6099v1\] Search for  \$\eta\_c\(2S\)\$  and  \$h\_c\$  decays into  \$p\bar{p}\$  \(arxiv.org\)](#)

R2

G. C. Fox, S. Wolfram, Phys. Rev. Lett. 41, 1581,(1978)

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.41.1581>