

# 時間依存CP非保存測定のための $B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$ 崩壊の事象選別条件 の最適化

奈良女子大学  
高エネルギー物理学研究室  
楠戸愛美

# Belle II 実験

SuperKEKB加速器とBelle II測定器による、  
高輝度のBファクトリー実験。

SuperKEKB 加速器:

2リングにて加速される7 GeVの電子ビームと4 GeVの陽電子ビームを衝突させ、10.58GeVの衝突エネルギーからB中間子を生成させるための衝突型加速器。

Belle II 測定器:

衝突点を覆うように以下の検出器が設置されている。

-崩壊点検出器(VXD)

- ピクセル検出器(PXD)

- シリコンバーテックス検出器(SVD)

-中央飛跡検出器(CDC)

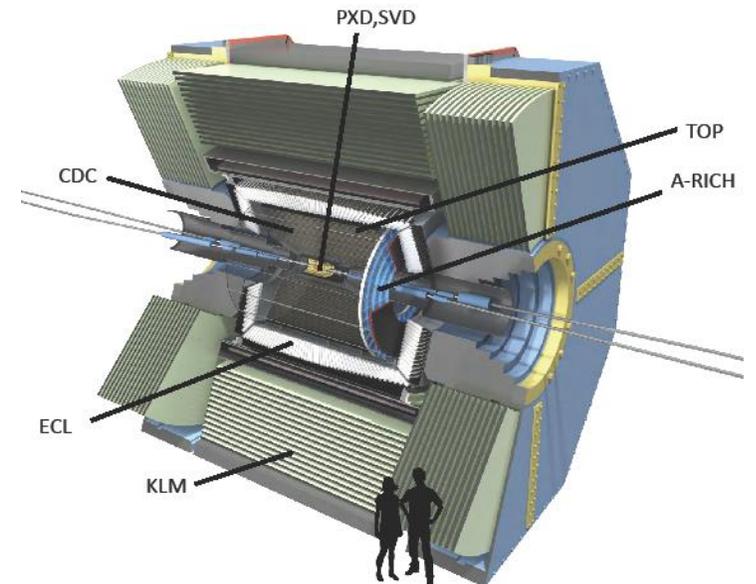
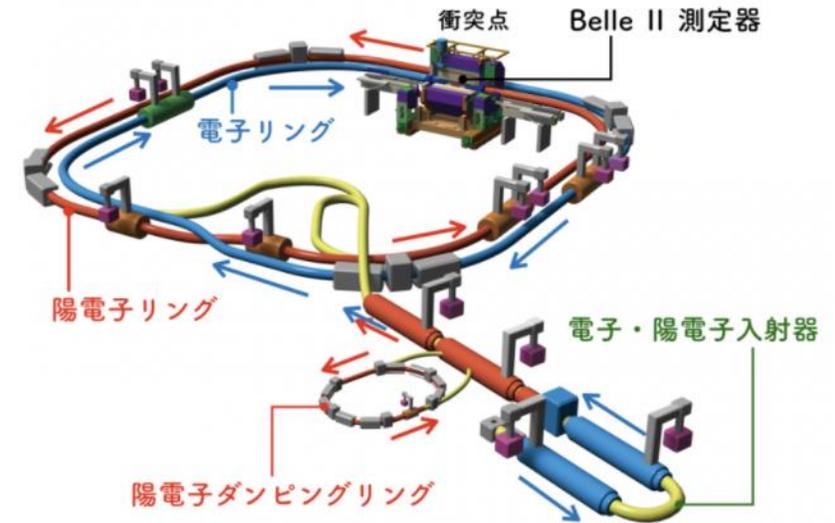
- 粒子識別検出器

- TOPカウンター(TOP)

- エアロゲルRICH検出器(ARICH)

- 電磁カロリメータ(ECL)

-  $K_L$ 、 $\mu$  粒子検出器(KLM)

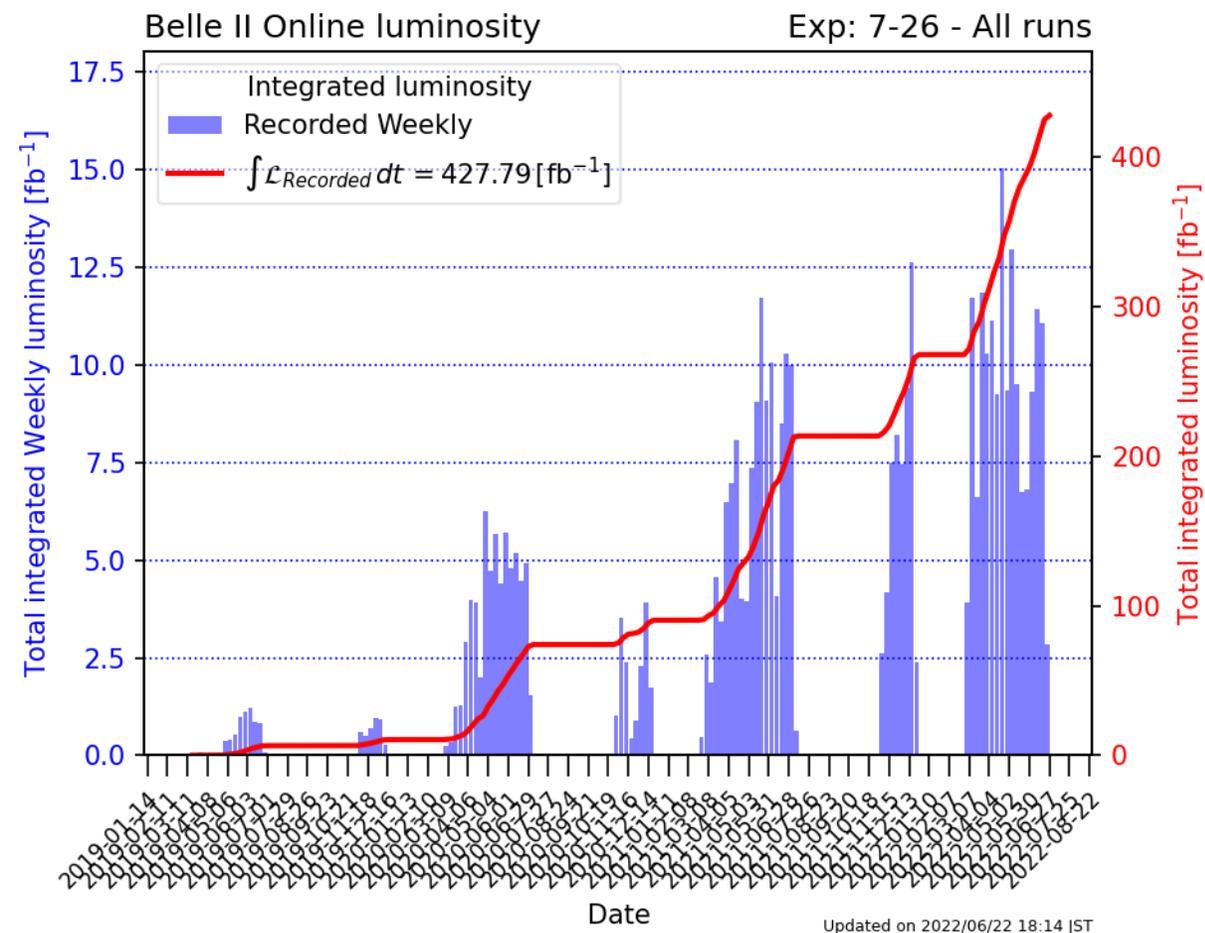


# Belle II実験

2019年より本格的にデータ収集を開始。

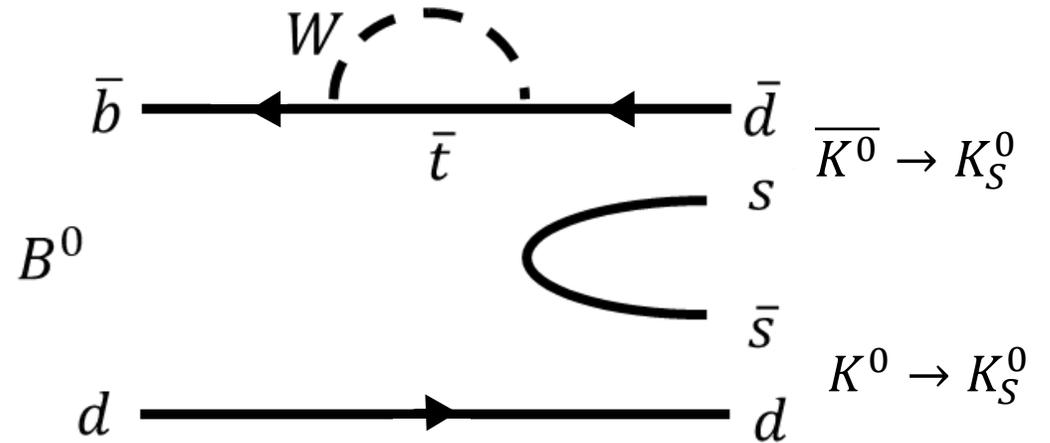
最終的にはBelle実験の50倍のデータ  
( $50\text{ab}^{-1}$ )を収集を目指している。

これまでで収集したデータの積分ルミノシティは $428\text{fb}^{-1}$ 。



# $B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$ 崩壊

- $b \rightarrow d$  遷移で起こる崩壊モード
- 終状態がハドロニック崩壊
- 時間依存のCP非保存を測れる



$B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$ は、今のところこれら3つの特徴を持つ唯一の崩壊モード。

標準理論では顕著なCP非保存は現れないと考えられている。

→ そのため、CP非保存が発見されれば新物理による効果の可能性が大きい。

# 先行研究( $B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$ 崩壊)

- Babar、PRL 97 (2006) 171805

積分ルミノシティ	信号収量	混合誘起CP非保存 S	直接的CP非保存 C
316fb <sup>-1</sup>	32 ± 8 ± 3 ( $K^0 \overline{K^0}$ )	-1.28 <sup>+0.80+0.11</sup> <sub>-0.73-0.16</sub>	-0.40 ± 0.41 ± 0.06

- Belle、PRL 100 (2008) 121601

積分ルミノシティ	信号収量	混合誘起CP非保存 S	直接的CP非保存 A
597fb <sup>-1</sup>	51 ± 11	-0.38 <sup>+0.69</sup> <sub>-0.77</sub> ± 0.09	-0.38 ± 0.38 ± 0.05

- Belle II実験で収集したデータの積分ルミノシティは428fb<sup>-1</sup>。
- Belle IIは崩壊点検出器の体積がBelleのそれよりも大きいので、崩壊点検出器の中で $K_S^0$ が崩壊する確率が高い=Bの崩壊点を得る効率が高い。
- これが時間依存CP非保存を測定するにはやや少ない積分ルミノシティを補って、Belleと同等（以上）の精度で測定を行える見込み。

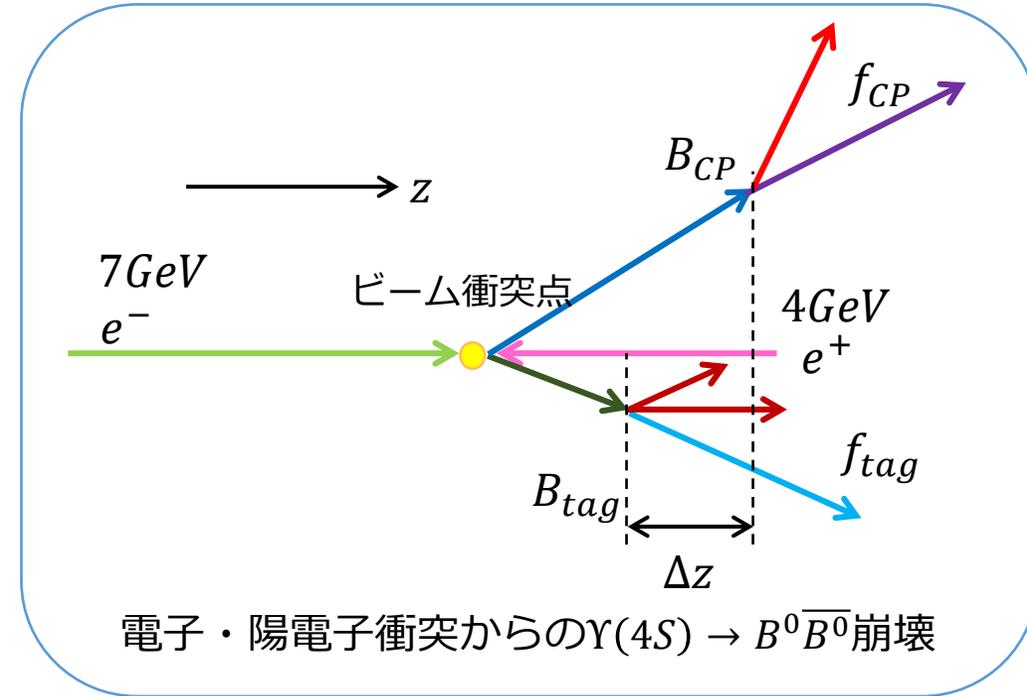
# 時間依存CP非保存の測定方法

## 解析手順

1. CP固有状態 $f_{CP}$ からB中間子 $B_{CP}$ を再構成する。残りの粒子はtag側のB中間子 $B_{tag}$ から崩壊したものとする。
2.  $B_{tag}$ の娘粒子で $B^0$ か $\bar{B}^0$ かのフレーバータグを行う。
3.  $B_{CP}$ 、 $B_{tag}$ の崩壊点を再構成すると、それぞれのz座標 $z_{CP}, z_{tag}$ から $\Delta t$ が得られる。

$$z_{CP} - z_{tag} = \Delta z, \quad \Delta t (= t_{CP} - t_{tag}) = \frac{\Delta z}{c\beta\gamma}$$

$\beta\gamma$  : 非対称衝突による $\Upsilon(4S)$ の実験室系におけるローレンツブースト  
 $c$  : 光速



CP非保存の時間発展  $A_{CP}(\Delta t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP})} = S_{f_{CP}} \sin(\Delta m \Delta t) + A_{f_{CP}} \cos(\Delta m \Delta t)$

混合誘起CP非保存を表すパラメータ      直接的CP非保存を表すパラメータ

$f_{CP}$ に崩壊した $\bar{B}^0$ と $B^0$ の $\Delta t$ 分布が違えばCP非保存がある

$\Gamma$  : 事象数  
 $\Delta m$  : 中性B 中間子の2つの質量固有状態の質量差

# BDTによる $K_S^0$ 候補選別

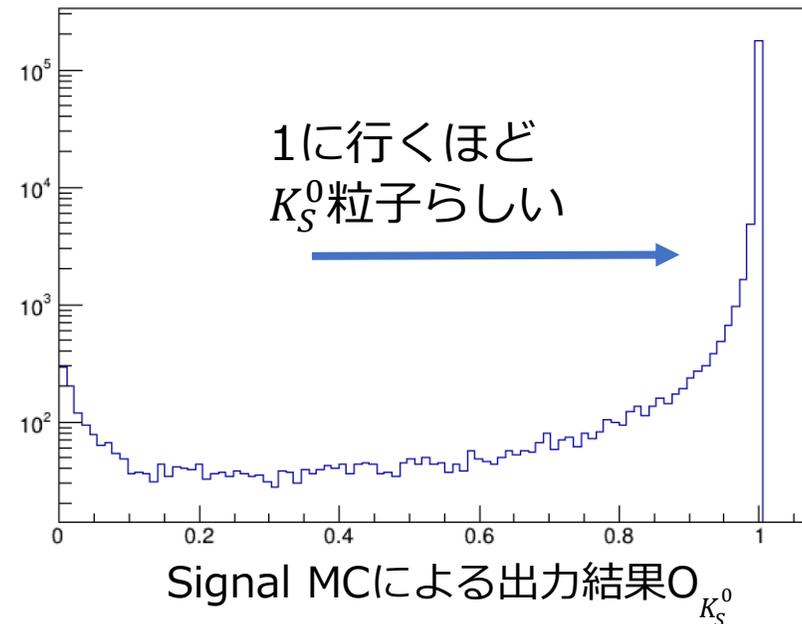
$K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ を再構成する際に、22個の入力変数を使用してトレーニングしたBoosted Decision Tree (BDT) アルゴリズムの出力値を用いて検出効率の確保とバックグラウンドの抑制を図る。

## 入力変数

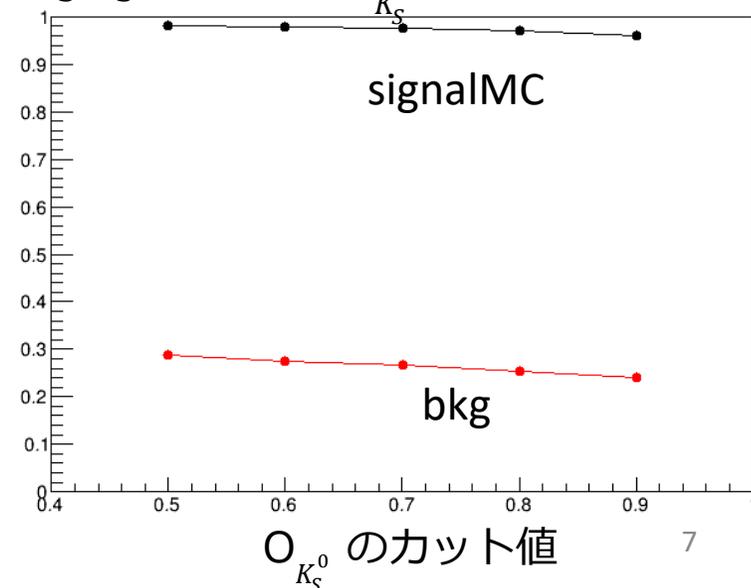
- 娘粒子のパイオンの運動量
- PID、VXDのヒット数
- $K_S^0$ の運動量と崩壊点の方向
- $K_S^0$ の崩壊点の変位 など22変数

$K_S^0$ 粒子らしさの出力結果 $O_{K_S^0}$ が0.5から0.9以上のときの $K_S^0$ 事象数の変化はほぼ横ばいになっていた。

したがって、信号事象を保持するためにもカット範囲を $O_{K_S^0} > 0.6$ で適用する。



$B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$ 事象数の $O_{K_S^0}$ による変化 (相対値)



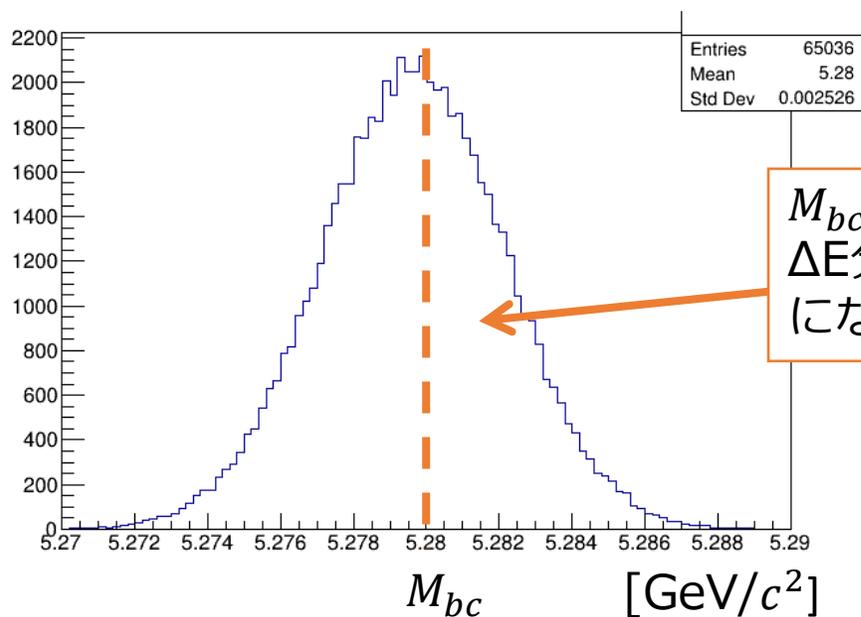
# $B^0$ 候補の再構成

$B^0$ 候補の再構成は以下の選別条件で行う。

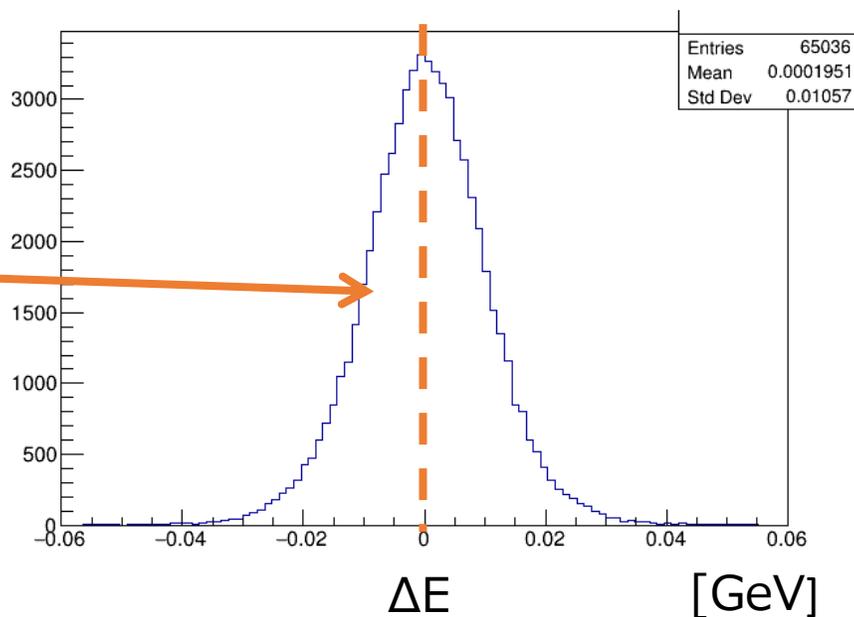
$$B^0 : 5.27 < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}/c^2, |\Delta E| < 0.03 \text{ GeV}$$

ビームコンストレイント質量  $M_{bc} = \sqrt{E_{beam}^2 - p_B^2}$   
エネルギー差  $\Delta E = E_B - E_{beam}$

$E_{beam}$  : ビームエネルギー  
 $E_B$  : Y(4S)静止系でのB候補のエネルギー  
 $p_B$  : Y(4S)静止系でのB候補の運動量の大きさ



$M_{bc}$  分布は5.28 GeV/ $c^2$ 、 $\Delta E$ 分布は0 GeVでピークになる。



# コンティニウム背景事象の弁別

主な背景事象であるコンティニウム事象 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$  ( $q = u, d, c, s$ )の抑制のために、事象形状の情報を使用してトレーニングしたBDTの出力値 $o_{CS}$ を用いる。

$B\bar{B}$ 事象：球状で等方的

$q\bar{q}$ 事象：ジェット形状

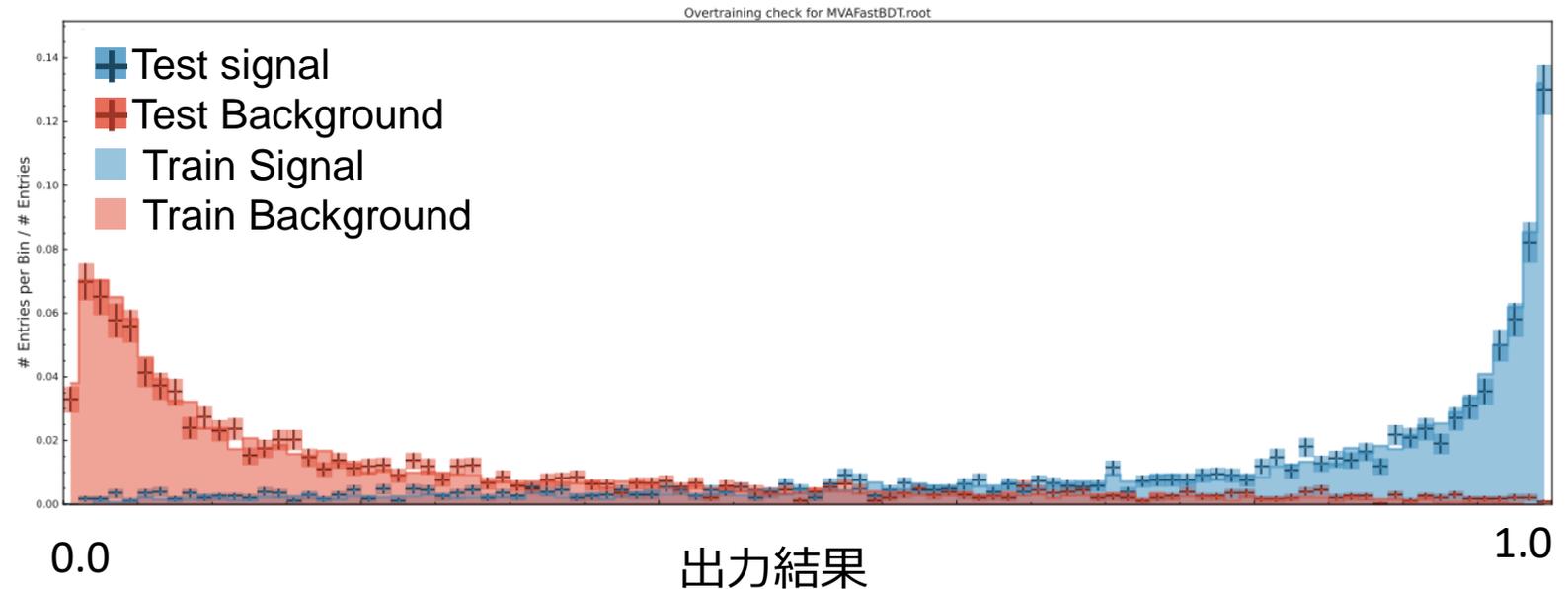
入力変数

- R2
- 14種類のKSFWと呼ばれるFox-Wolfram運動量
- スラスト角

など30個

トレーニング用の $B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$ 候補の選別条件

$$B^0 : M_{bc} > 5.2 \text{ GeV}/c^2, \\ |\Delta E| < 0.1 \text{ GeV}$$



# 質量 $M(\pi^+\pi^-)$ による $K_S^0$ 候補選別

$K_S^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ を再構成したときの質量 $M(\pi^+\pi^-)$ のカットの条件も決定する。

選別条件

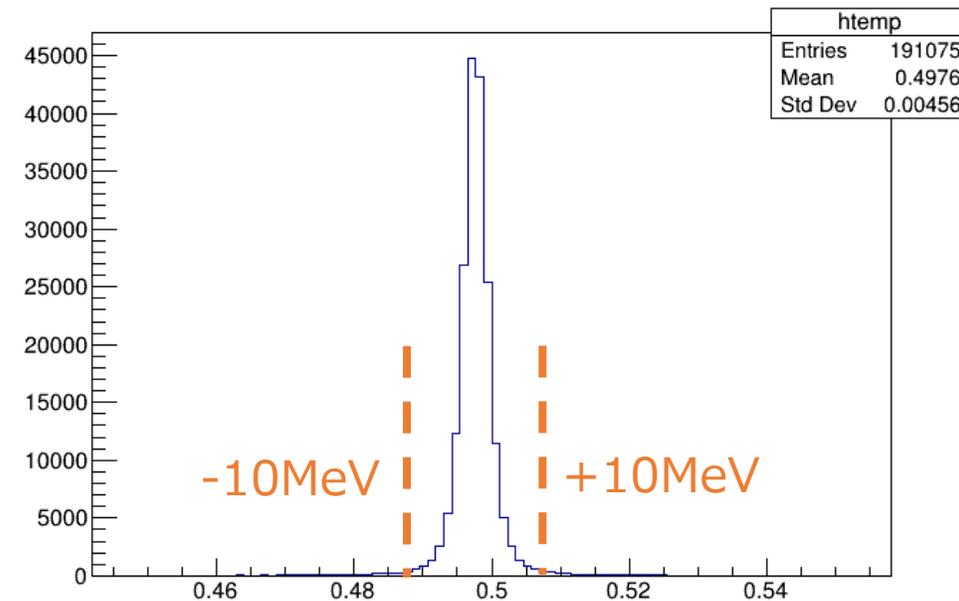
$$K_S^0 : O_{K_S^0} > 0.6$$

$$B^0 : 5.27 < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}/c^2, |\Delta E| < 0.03 \text{ GeV}, O_{CS} > 0.5$$

$K_S^0$ の質量の±何MeVまで受け入れられるか、 $B^0$ 候補の数からFigure of Meritを求めた。

その結果、±10MeVを適用することにした。

$$\text{FoM} = \frac{N_{\text{sig}}}{\sqrt{N_{\text{sig}} + N_{\text{qq}}}}$$



質量 $M(\pi^+\pi^-)$  [GeV/ $c^2$ ]

$K_S^0$ の質量 $M$ の範囲(MeV)	No cut	± 30	± 25	± 20	± 15	± 10	± 5
signal MC(1ab-1換算)	158	157	157	156	155	153	139
qqbar(1ab-1)	525	417	397	377	343	322	272
FoM	6.05	6.55	6.67	6.76	6.95	7.02	6.86

# CP非保存測定に向けて

事象選別条件の最適化は完了した。

- $M_{bc}$ ,  $\Delta E$ ,  $O_{CS}$ の3次元フィットで得た結果から事象ごとに信号事象割合/背景事象割合を与える。
- CP非保存パラメーターを抽出する $\Delta t$ 分布をフィットするプログラムに $\Delta t$  resolution functionとwrong tag fractionを実装する。
- 背景事象 $\Delta t$  PDFの作成

# まとめ

Belle II実験において、 $b \rightarrow d$ ペンギンダイアグラムで生じる中性B中間子のハドロニック崩壊である $B^0 \rightarrow K_S^0 K_S^0$ モードにおける時間依存CP非保存測定のための事象選別条件を最適化した。

- $K_S^0$ 粒子の選別は22個の入力変数を使用するBDT出力値 $>0.6$ を要求する。
- コンティニウム背景事象の弁別は30個の事象形状変数を使用するBDT出力値分布を信号事象割合/背景事象割合を与えるフィットに入れる。
- $\pi^+ \pi^-$  質量の範囲は $K_S^0$ 質量 $\pm 10$ MeVが最適だとわかった。

今後、引き続きCP非保存測定に必要なプログラムのdevelopmentを進める。