



# $B$ - $\pi$ タギング法を用いた $Y(5S)$ 共鳴からの $CP$ 非保存角 $\phi_1$ の測定

佐藤 優太郎、山本均 and the Belle collaboration  
東北大理

2011/09/16 JPS @ 弘前大学

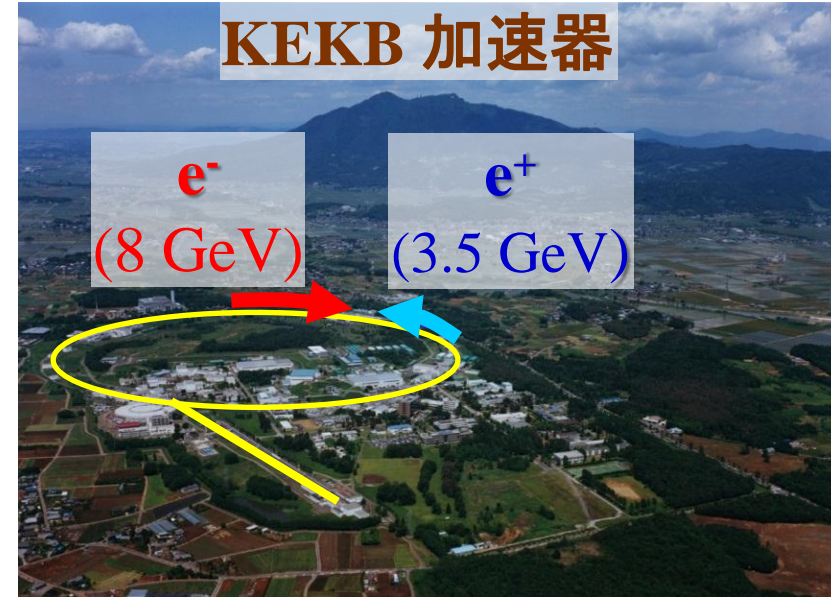
16pSD-5

- イン트로
  - KEKB / Belle
  - $Y(5S)$  共鳴
  - $B$ - $\pi$  タギング法
- 解析
  - 手順
  - モード
  - イベント選択
  - 背景事象
  - フィット関数
- 結果
- まとめ

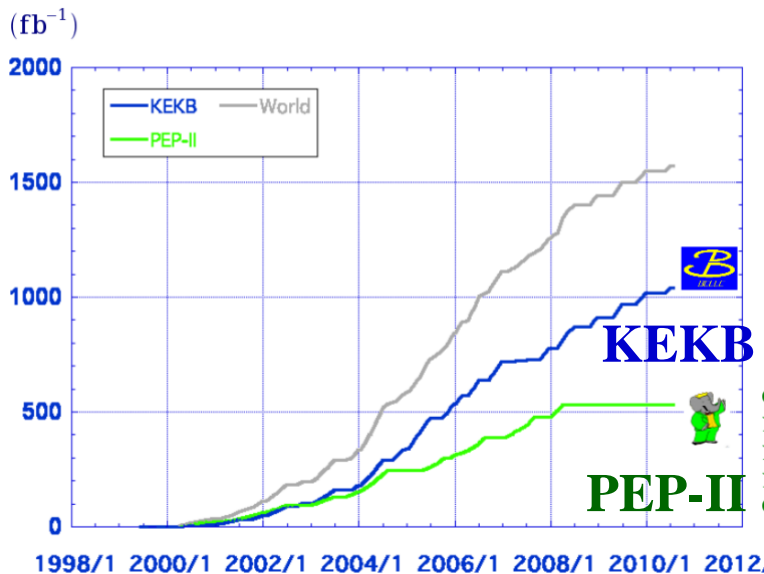
# KEKB / Belle

## KEKB 加速器 (1999-2010)

- 非対称エネルギー ( $\beta\gamma = 0.425$ )
- 重心系エネルギー
  - 主に  $Y(4S)$  共鳴
- 世界最高のルミノシティ
  - (積分) :  $> 1000 \text{ fb}^{-1}$
  - (ピーク) :  $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



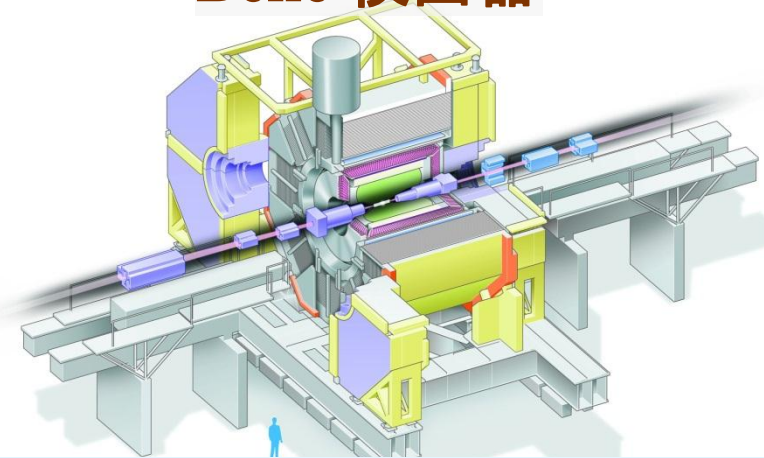
## Luminosity at B factories



**$> 1 \text{ ab}^{-1}$**   
**On resonance:**  
 $Y(5S): 121 \text{ fb}^{-1}$   
 $Y(4S): 711 \text{ fb}^{-1}$   
 $Y(3S): 3 \text{ fb}^{-1}$   
 $Y(2S): 24 \text{ fb}^{-1}$   
 $Y(1S): 6 \text{ fb}^{-1}$   
**Off reson./scan:**  
 $\sim 100 \text{ fb}^{-1}$

**$\sim 550 \text{ fb}^{-1}$**   
**On resonance:**  
 $Y(4S): 433 \text{ fb}^{-1}$   
 $Y(3S): 30 \text{ fb}^{-1}$   
 $Y(2S): 14 \text{ fb}^{-1}$   
**Off resonance:**  
 $\sim 54 \text{ fb}^{-1}$

## Belle 検出器

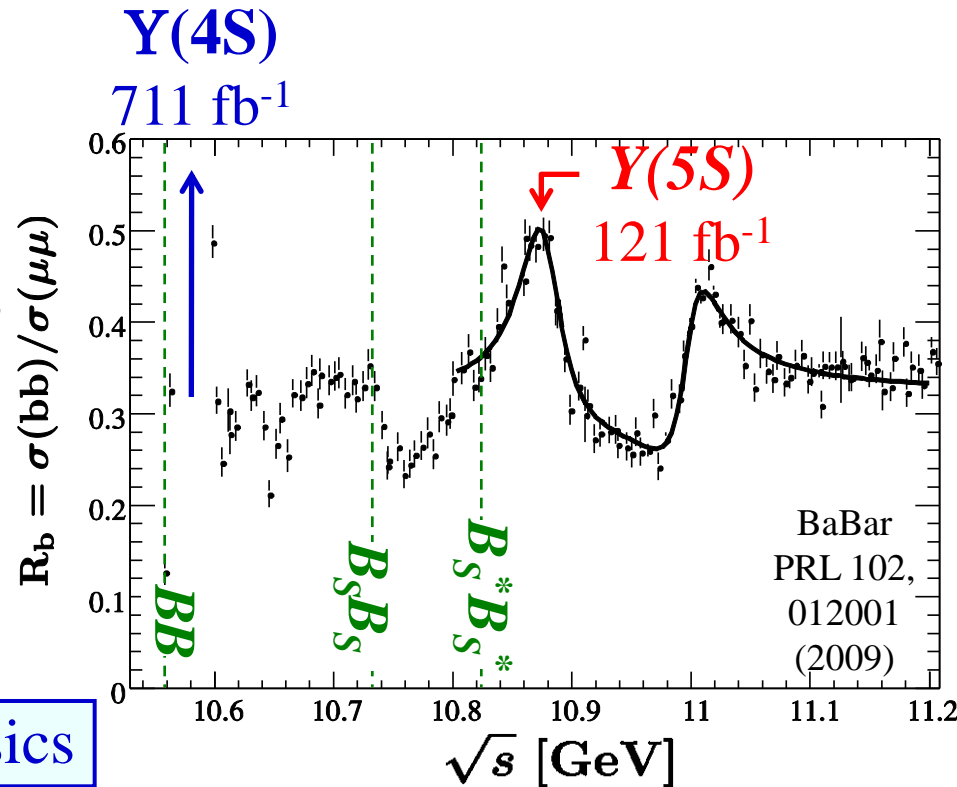


本解析では、Belle で取得した  
**全  $Y(5S)$  データ  $121 \text{ fb}^{-1}$  を使用**

# Y(5S) 共鳴

## Y(5S) の質量

- $M_{Y(5S)} = 10.865 \pm 0.008$  [GeV]
  - $B_S B_S$  threshold を越えている。
  - Y(4S) より、約  $2 M_\pi$  だけ重い。



## 主な崩壊モード

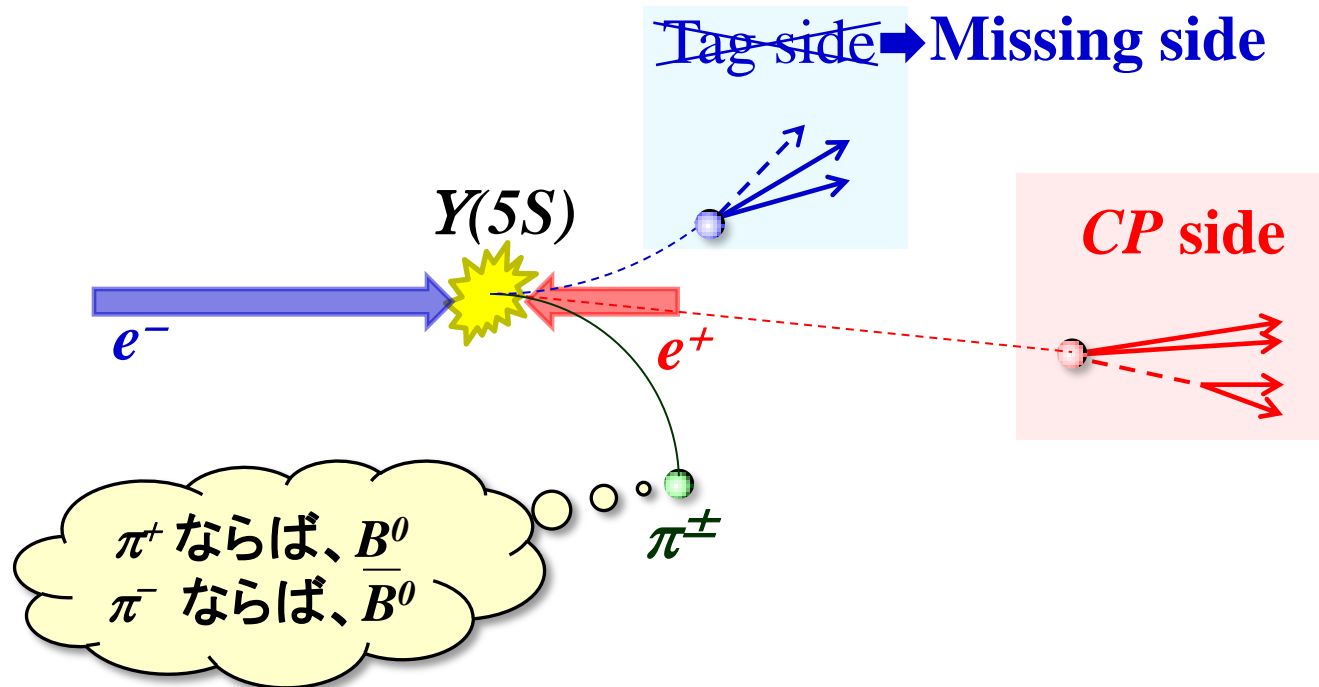
- $Y(5S) \rightarrow B_S^{(*)} B_S^{(*)}$   $\rightarrow$   $B_S$  physics
- $\rightarrow Y(nS) + X$   $\rightarrow$  Bottom spectroscopy
- $\rightarrow B^{(*)} B^{(*)} (\pi)(\pi)$
- $(B^* \rightarrow B \gamma, B_S^* \rightarrow B_S \gamma)$

Y(5S) の崩壊モードから、従来のフレーバータギングと異なる方法を用いてCP対称性の破れの角  $\phi_1$  の測定を目指す

# B- $\pi$ タギング法(1/2)

## アイデア

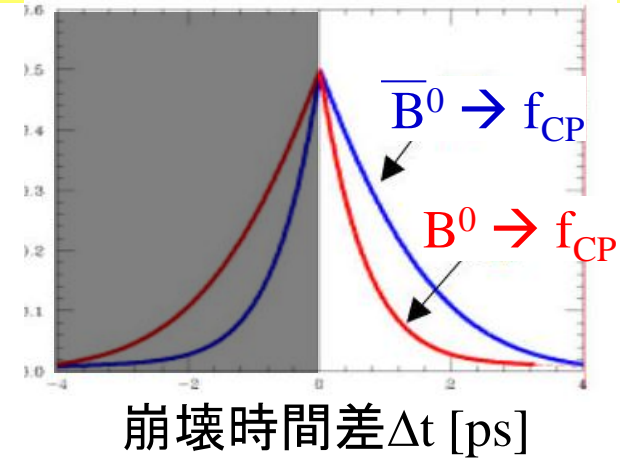
- 中性  $B$  中間子と荷電  $B$  中間子がペアで生成されるモードでは、 $\pi^\pm$  の電荷の符号からフレーバータグをすることができる。
  - $Y(5S) \rightarrow B^{(*)} B^{(*)} \pi^\pm (+\pi^0)$
- 一方の  $B$  は明示的には再構成しない。



# B- $\pi$ タギング法(2/2)

## 特徴

- 崩壊点間距離( $\Delta z$ )を測定する必要がない。
  - イベント数だけで、CPの破れが見える。



$$A_{BB\pi} \equiv \frac{\overset{\text{Mixing-induced}}{\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP}} N_{BB\pi^-} - \overset{\text{Direct}}{B^0 \rightarrow f_{CP}} N_{BB\pi^+}}{\overset{\text{CPV}}{N_{BB\pi^-}} + \overset{\text{CPV}}{N_{BB\pi^+}}} = \frac{\mathbf{S} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{A}}{1 + \mathbf{x}^2}$$

Mixing parameter  $x \equiv \frac{\Delta m_{B^0}}{\Gamma_{B^0}}$

- Vertex が測定できないモードにも(原理的には) 応用可能

(例)  $B \rightarrow \pi^0 \pi^0$

- $Y(4S)$  の解析 : A に制限
  - $Y(5S)$  の解析 : S と A に制限
- 相補的

- $Y(4S)$  の解析とは異なる系統誤差を持つ。

**B- $\pi$  タギングを用いた解析は  $Y(4S)$  の解析と独立な解析であり、将来、 $Y(4S)$  の測定と異なる測定に応用できる可能性あり。**

# 解析手順

1. 片方の  $B_{\text{rec}}$  を再構成する。
2. 再構成した  $B_{\text{rec}}$  と  $\pi^\pm$  から反跳質量を求める。

$$M_{B_{\text{miss}}} = |P_{B_{\text{miss}}}| = |P_{\text{total}} - (P_{B_{\text{rec}}} + P_{\pi})|$$

–  $B^*$  もシグナルとなる。(以後  $B^*$  のモードも含める)

- 反跳質量のピークは  $E_\gamma$  だけずれる。

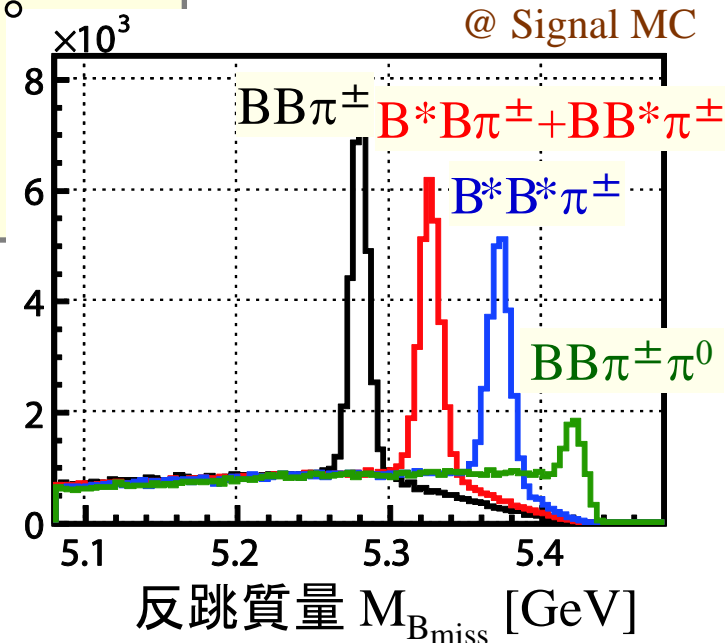
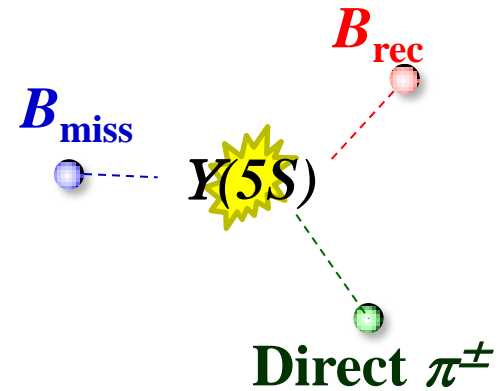
3. 反跳質量分布から、

イベント数の**非対称度**  $A_{BB\pi}$  を求める。

$$A_{BB\pi} \equiv \frac{N_{BB\pi^-} - N_{BB\pi^+}}{N_{BB\pi^-} + N_{BB\pi^+}}$$

- $b \rightarrow ccs$  遷移から  $B$  を再構成する場合  
 $\mathcal{A} = 0, \mathcal{S} = -\eta_{CP} \cdot \sin 2\phi_1$

$$\sin 2\phi_1 = -\eta_{CP} \cdot \frac{1 + x^2}{x} \cdot A_{BB\pi}$$



# 解析モード

## 1. $\chi_d$ (時間積分した混合確率) 測定

- $B$ - $\pi$  タギングが正しくタギングできていることを確認。
- Flavor-specific mode :  $D^{*-} \pi^+$ ,  $J/\psi K^{*0}$ 
  - sub-decay :  $D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0 \pi^-$ ,  $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ ,  
 $: K^{*0} \rightarrow K^+ \pi^-$

$$Y(5S) \rightarrow B^0 B^- \pi^+$$

$$Y(5S) \rightarrow \bar{B}^0 B^+ \pi^-$$

### 再構成した $B$ と $\pi^\pm$ の組み合わせ

$$B^0 - \pi^+ \text{ (unmixed)} \rightarrow N_{BB\pi^+} \cdot (1 - \chi_d)$$

$$B^0 - \pi^- \text{ (mixed)} \rightarrow N_{BB\pi^+} \cdot \chi_d$$

$$\bar{B}^0 - \pi^- \text{ (unmixed)} \rightarrow N_{BB\pi^-} \cdot (1 - \chi_d)$$

$$\bar{B}^0 - \pi^+ \text{ (mixed)} \rightarrow N_{BB\pi^-} \cdot \chi_d$$

(※ フィットでは  $N_{BB\pi^+} = N_{BB\pi^-}$  を仮定)

## 2. Direct CPV 測定

- $B$ - $\pi$  タギングによる非対称がないことを確認。
- Charged mode :  $J/\psi K^+$ 
  - sub-decay :  $J/\psi \rightarrow e^+ e^-$  or  $\mu^+ \mu^-$

## 3. $\sin 2\phi_1$ 測定

- $CP$ -eigenstate mode :  $J/\psi K_S$ 
  - sub-decay :  $J/\psi \rightarrow e^+ e^-$  or  $\mu^+ \mu^-$ ,  $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$



# イベント選択

## 荷電トラック

- 衝突点付近から出ていること。  
( $K_S$  からの  $\pi^\pm$  は除く)
- 粒子識別の情報で  $K^\pm$ ,  $\pi^\pm$ ,  $e^\pm$ ,  $\mu^\pm$  を識別。
- Direct  $\pi$  :
  - $B_{\text{rec}}$  の vertex に近いこと。
  - $K_S$  からの  $\pi^\pm$  を除去。

## 質量

- $J/\psi$  :  $|M(\ell\ell) - M_{J/\psi}| < 30 \text{ MeV}$   
(-100 MeV for  $e^+e^-$ ,  
including  $\gamma$  within 0.05 rad)
- $K_S$  :  $|M(\pi^+\pi^-) - M_{K^0}| < 30 \text{ MeV}$   
 $K_S$  の vertex と運動量の方角、 $\pi^\pm$  の impact parameter を用いて選択。

- $K^{*0}$  :  $|M(K^+\pi^-) - M_{K^{*0}}| < 50 \text{ MeV}$
- $\bar{D}^0$  :  $|M(K^+\pi^-) - M_{D^0}| < 10 \text{ MeV}$
- $D^{*-}$  :  $|\Delta M - (M_{D^{*-}} - M_{D^0})| < 2 \text{ MeV}$
- $B$  :  $|M_{B_{\text{rec}}} - M_B| < 20 \text{ MeV}$
- それぞれの粒子に対して、キネマティックフィット(崩壊点、質量を固定)を適用。  
 $K^{*0}$  は崩壊点のみ固定。

## ビームコンストレイント質量

- 低運動量の  $B$  を選択
  - $M_{bc}$  : 5.348 ~ 5.440 GeV

## continuum 抑制

- イベントの形状を利用
  - $R2 < 0.5$  for  $J/\psi$
  - $R2 < 0.4$  for  $D^{*-}$
  - $|\cos\theta_{\text{thrust}}^*| < 0.75$  for  $D^{*-}$

# 背景事象

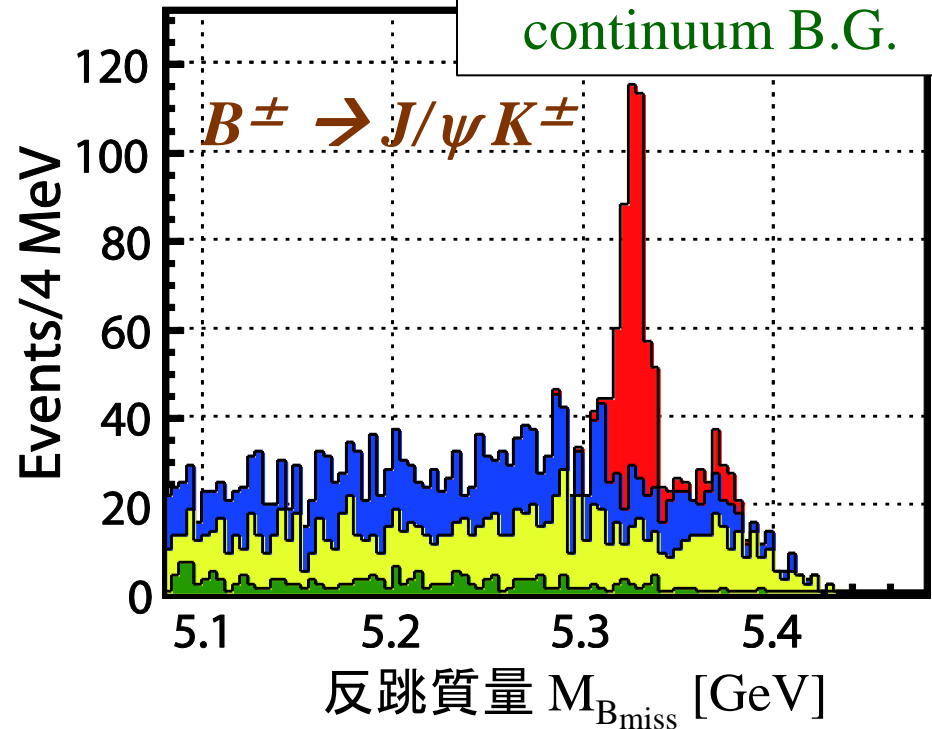
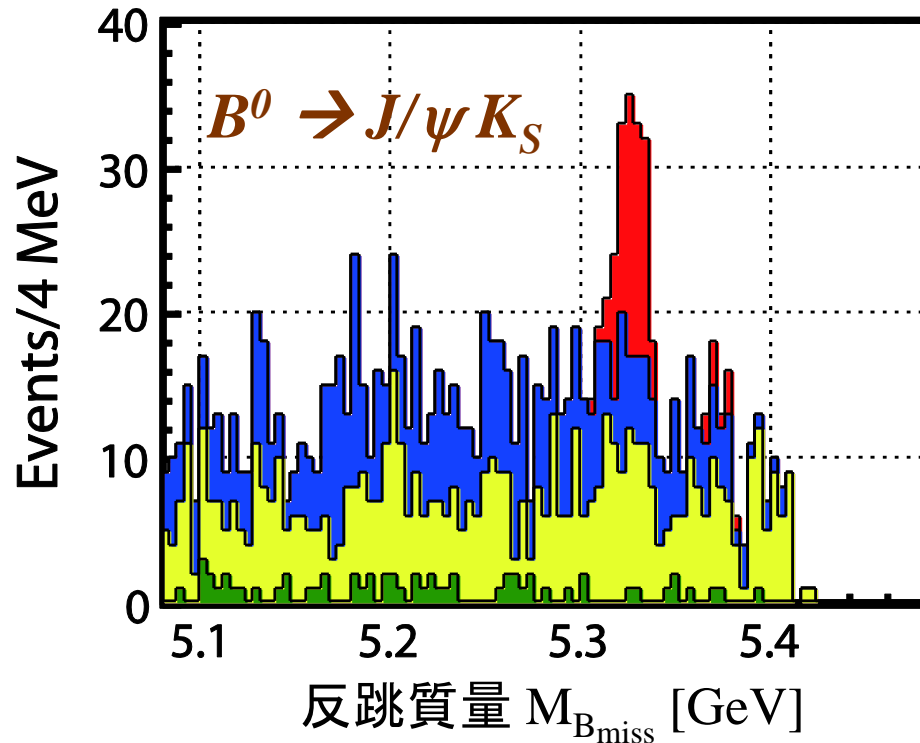
MC を用いて背景事象を確認した。

## 1. Combinatorial B.G.

- 主に、正しく再構成された  $B$  と  $Y(5S)$  以外からの  $\pi^\pm$  との組み合わせ

## 2. Initial-state-radiation (ISR) B.G.

- $ee \rightarrow Y(4S) + \gamma \rightarrow BB\gamma$



Signal  
Combinatorial B.G.  
ISR B.G.  
continuum B.G.

@ MC (=データの6倍)

# フィット関数

## フィット関数

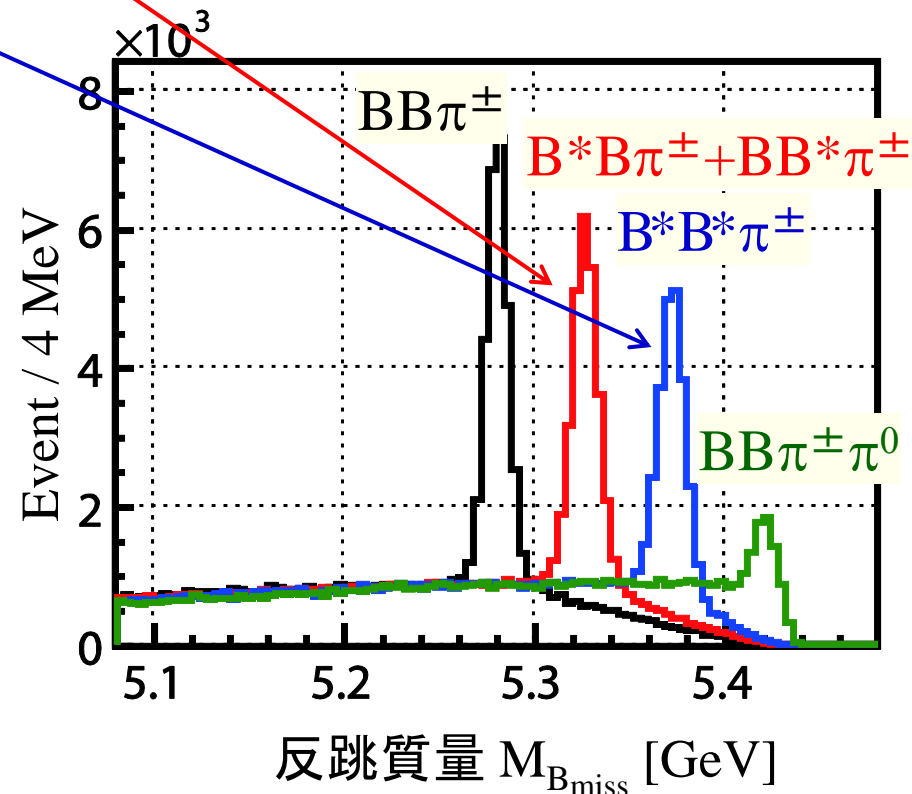
- シグナル : ガウシアン ( $B^*B\pi + BB^*\pi$ )  
 ガウシアン ( $B^*B^*\pi$ )
  - 他のピークは系統誤差に含める。
- バックグラウンド : ARGUS function

## MC で固定したパラメータ

- 2つのガウシアンのmean, width
- ARGUS のendpoint

## フリーパラメータ

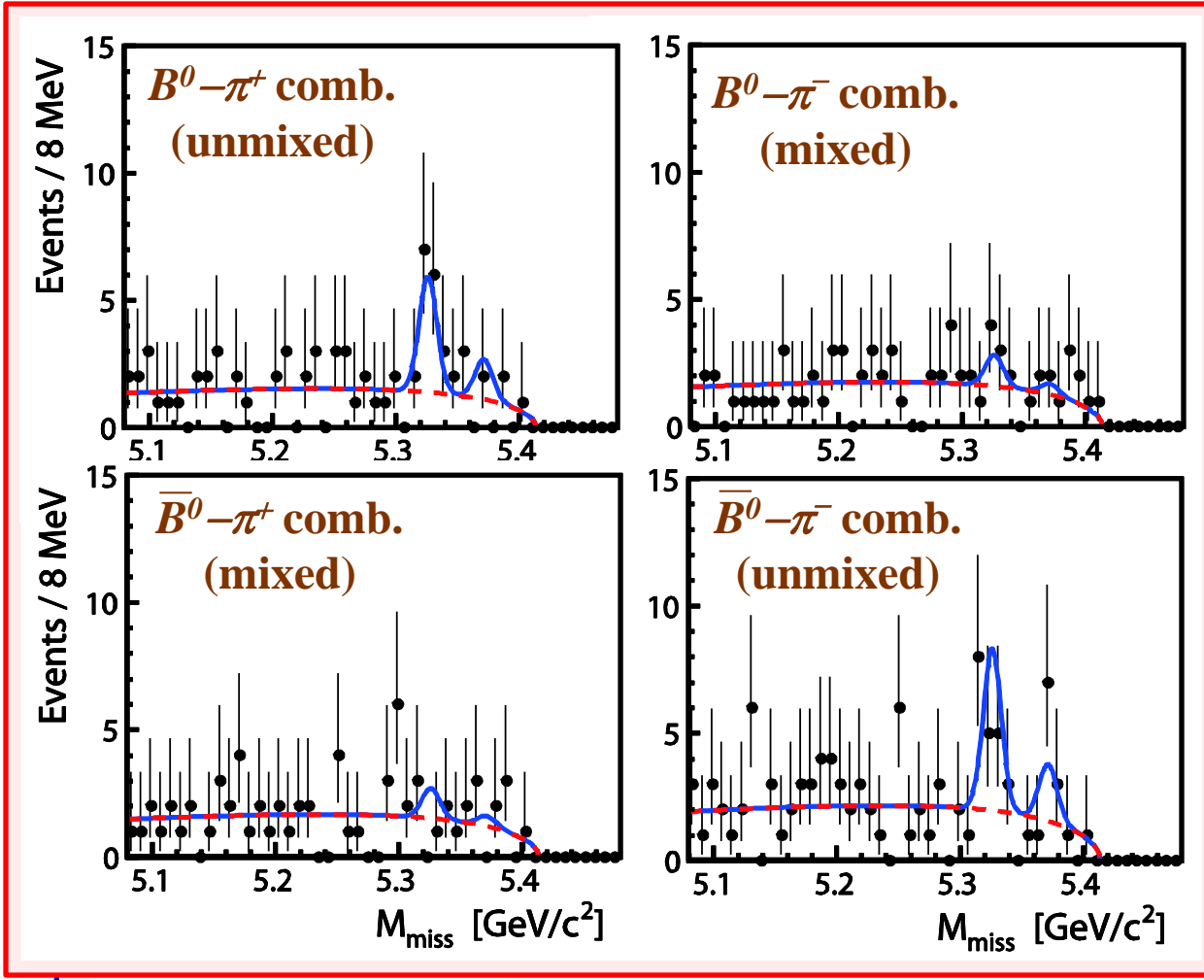
- ARGUS のshape parameter



→ Extended unbinned maximum likelihood fit を行う。

# $\chi_d$ 測定

Flavor-specific mode の8 つ(= 2modes  $\times$  4comb.) のプロットを同時フィット。



$B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$

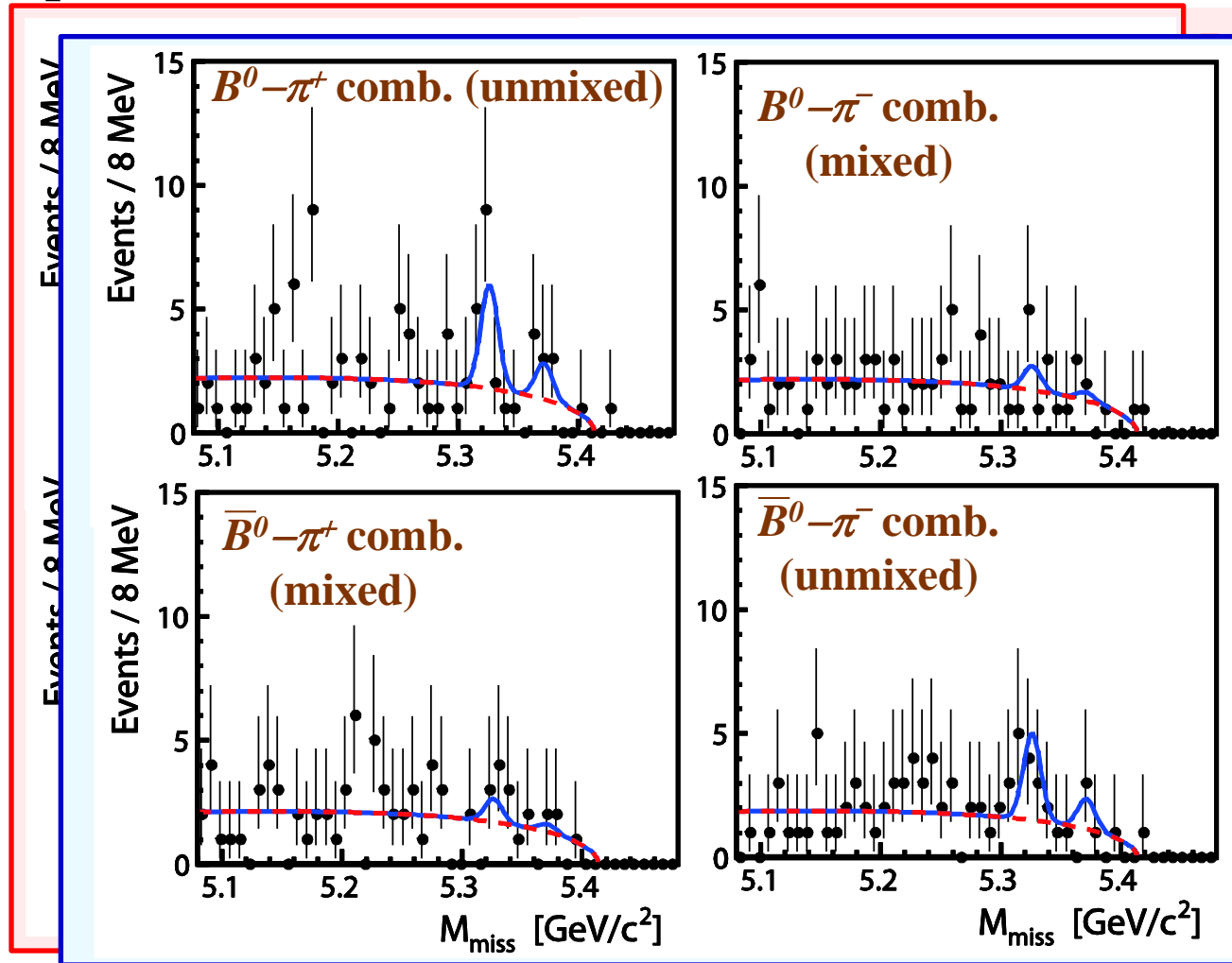
$B^0 \rightarrow D^{*-} \pi^+$

•  $\chi_d = 0.19 \pm 0.09(\text{stat})$  (PDG2010 value :  $\chi_d = 0.1872 \pm 0.0024$ )

→ 統計の範囲内で、正しくタギングできていることを確認。

# $\chi_d$ 測定

Flavor-specific mode の8 つ(= 2modes  $\times$  4comb.) のプロットを同時フィット。



$\rightarrow J/\psi K^{*0}$

$B^0 \rightarrow D^{*-} \pi^+$

- $\chi_d = 0.19 \pm 0.09(\text{stat})$  (PDG2010 value :  $\chi_d = 0.1872 \pm 0.0024$ )

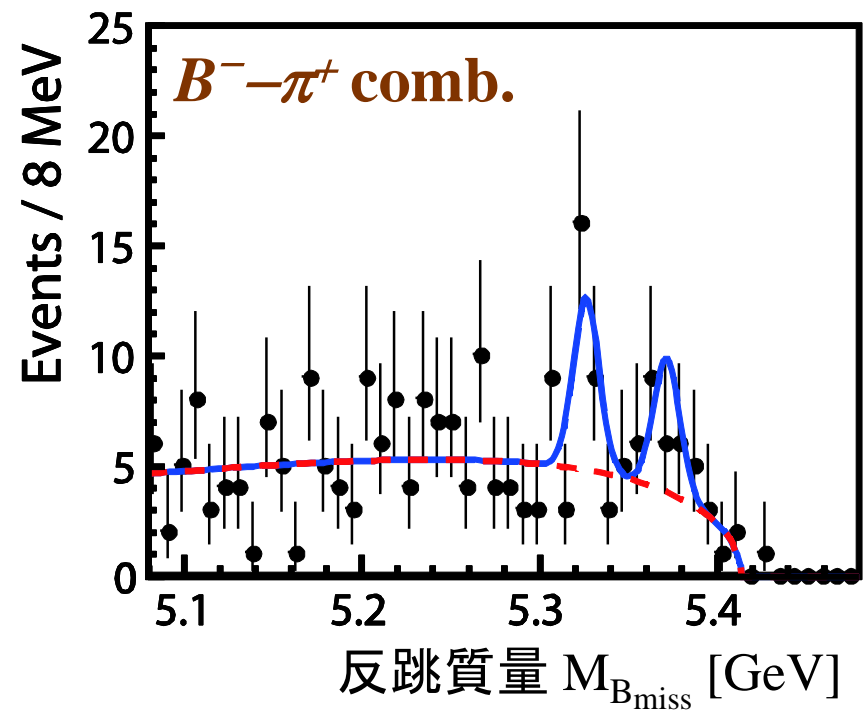
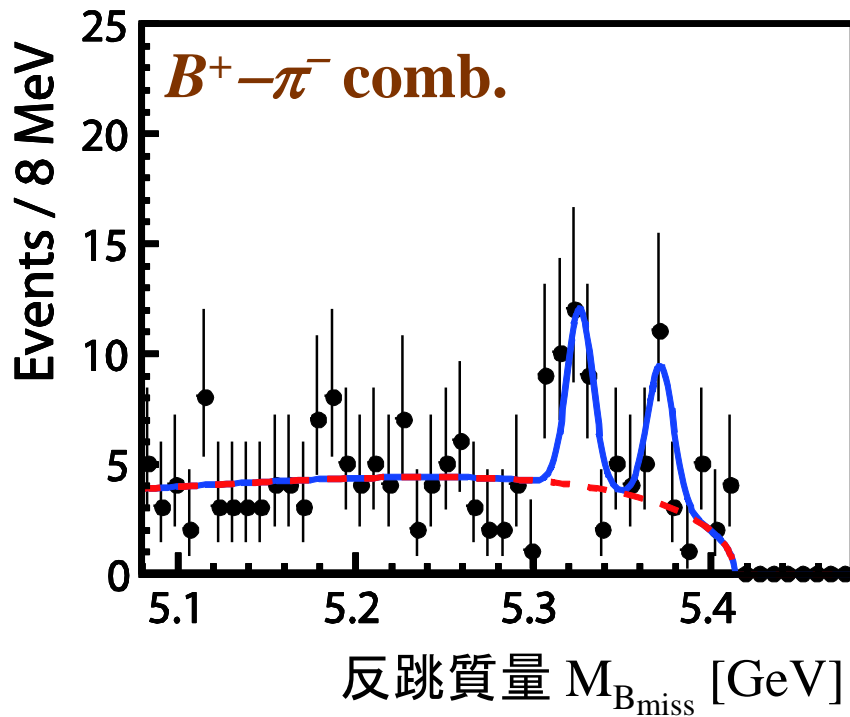
$\rightarrow$  統計の範囲内で、正しくタギングできていることを確認。

# Direct CPV 測定

- $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$  モードをフィットして、非対称度  $A_{BB\pi}$  を得る。

Mixing-induced CPV

$$A_{BB\pi} = \frac{\overset{0}{\parallel} \mathcal{S} \cdot x + \overset{0}{\} \mathcal{A}}{1 + x^2} \quad \text{Direct CPV}$$

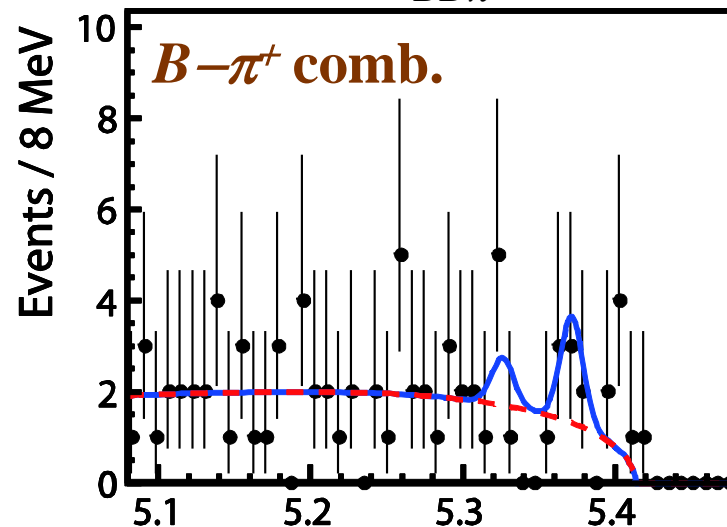
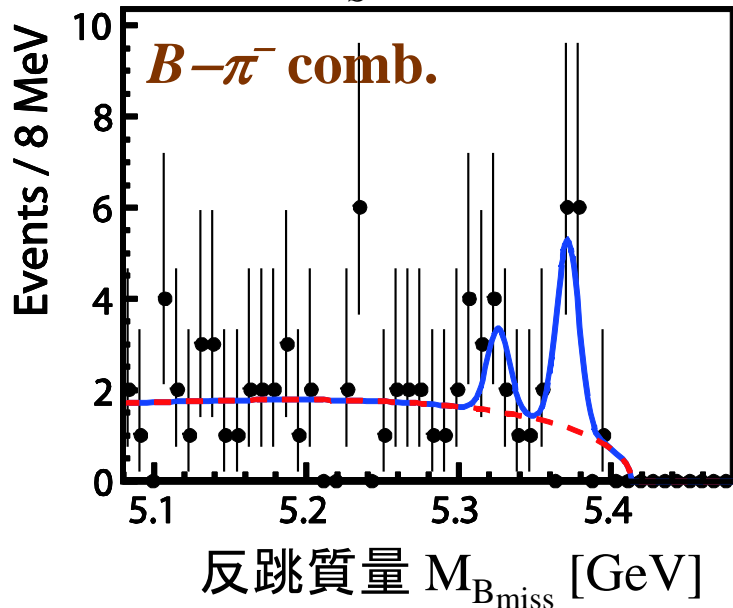


- $A_{BB\pi} = 0.02 \pm 0.17(\text{stat})$

→ 統計の範囲内で、 $B$ - $\pi$  タギングによる非対称がないことを確認。

# $\sin 2\phi_1$ 測定

- $B^0 \rightarrow J/\psi K_S$  モードをフィットして非対称度  $A_{BB\pi}$  を得る。

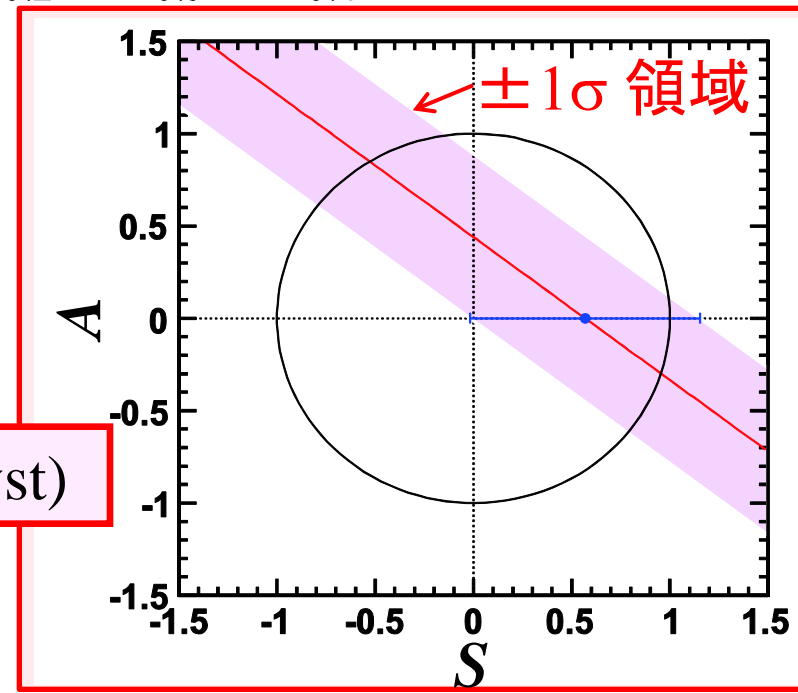


$\rightarrow A_{BB\pi} = 0.28 \pm 0.28(\text{stat})$   
 (Signal yield =  $21.5 \pm 6.8(\text{stat})$ )

- 混合パラメータ  $x$  ( $=0.771$ ) を引用して、

$\rightarrow \sin 2\phi_1 = 0.57 \pm 0.58(\text{stat}) \pm 0.06(\text{syst})$

(PDG2010 value :  $\sin 2\phi_1 = 0.673 \pm 0.023$ )



# $\sin 2\phi_1$ の系統誤差

- 考慮した  $\sin 2\phi_1$  に対する系統誤差

Source	$\sigma_{\sin 2\phi_1}$
Fit parameterization	0.055
Pion detection asymmetry	0.007
Mixing parameter $x$	0.001
Mixing parameter $y$	0.012
$BB\pi$ and $BB\pi\pi$	0.005
Total	0.057

- 主な系統誤差はMCによって固定したフィットパラメータによるもの。
  - Data-driven で行う場合、これは、 $1/\sqrt{(\text{Luminosity})}$  で減る。



# まとめ

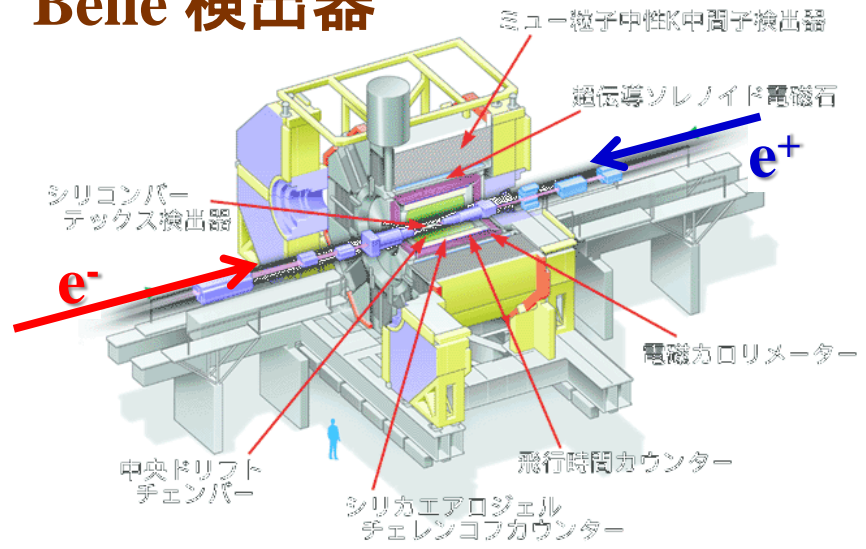
$B$ - $\pi$  タギングを用いて、 $Y(5S)$  共鳴から  $CP$  対称性の破れの角  $\phi_1$  を測定した。

- $B$ - $\pi$  タギングは  $\pi^\pm$  の電荷の符号からフレーバータギングをする。
  - イベント数の非対称度から  $CP$  の破れが見える。
  - $Y(4S)$  の解析とは異なる系統誤差を持つ。
  - Vertex の測定ができないモードにも応用可能。
- 本解析では、Belle で取得した  $Y(5S)$  データ  $121 \text{ fb}^{-1}$  を用いて、
$$\sin 2\phi_1 = 0.57 \pm 0.58(\text{stat}) \pm 0.06(\text{syst})$$
と、測定された。

**Back up**

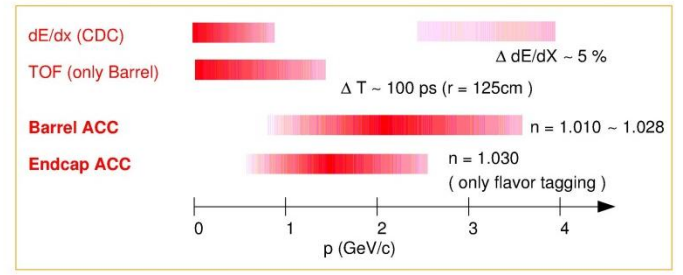
# 粒子識別

## Belle 検出器

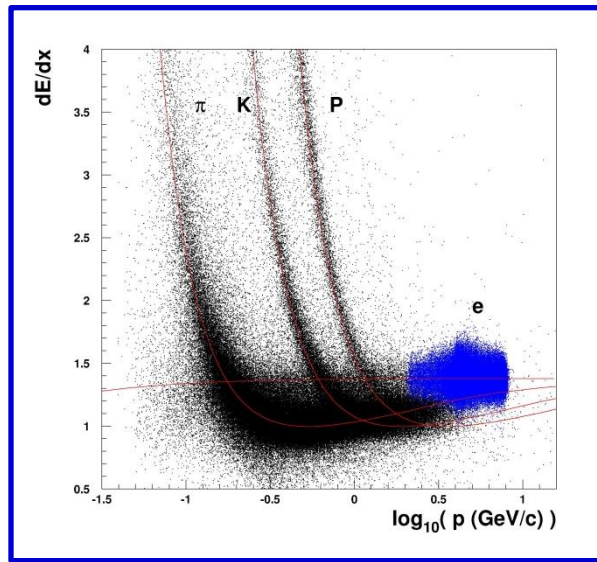


$$\text{Prob}(i : j) = \frac{L(i)}{L(i) + L(j)}$$

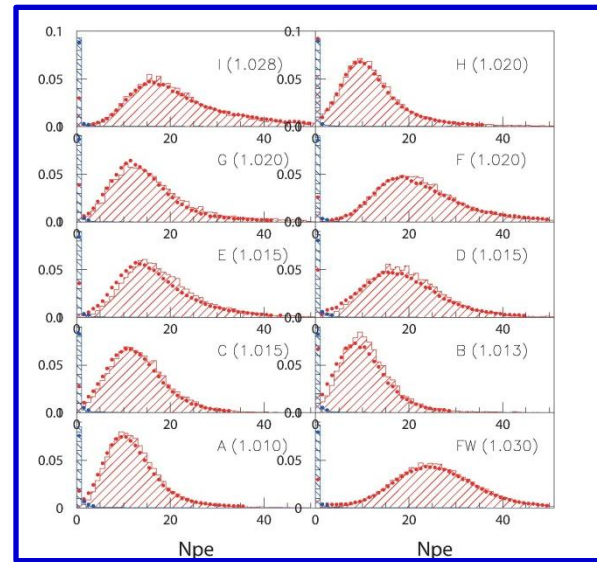
$$L = L^{\text{ACC}} \times L^{\text{TOF}} \times L^{\text{CDC}}$$



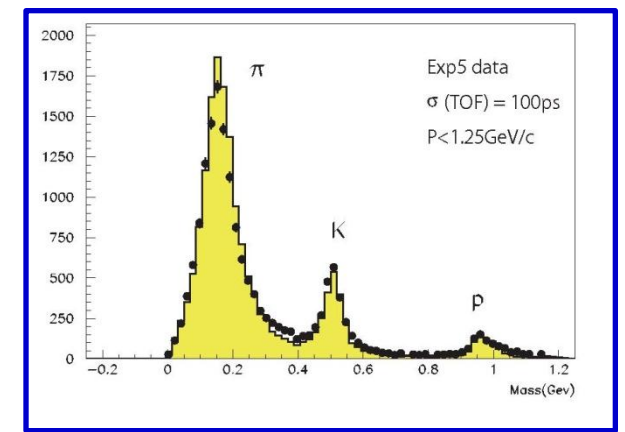
## CDC



## ACC

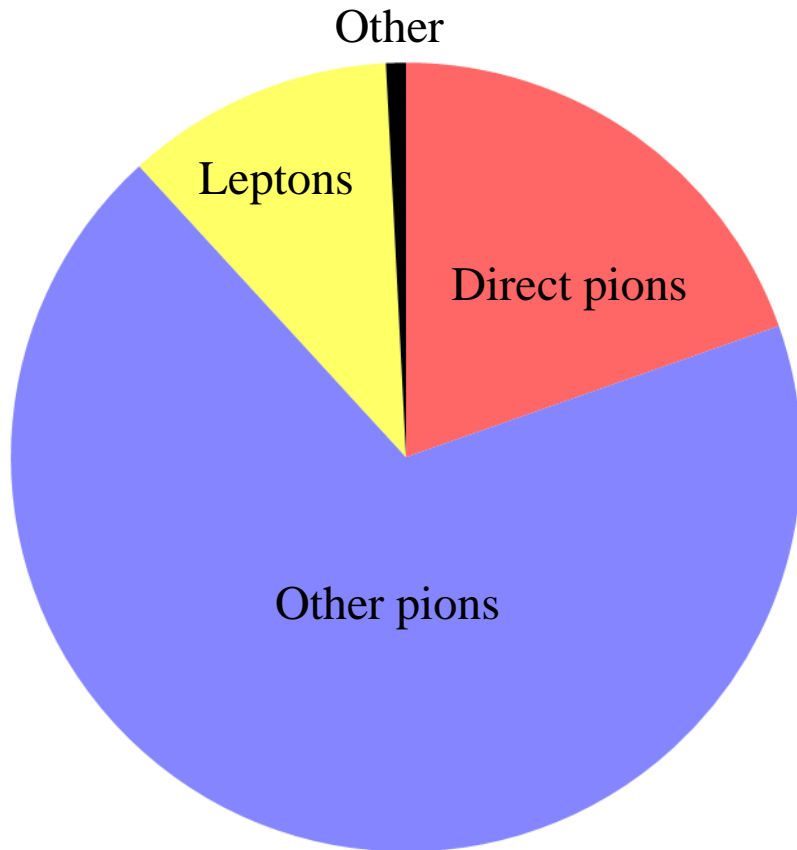


## TOF

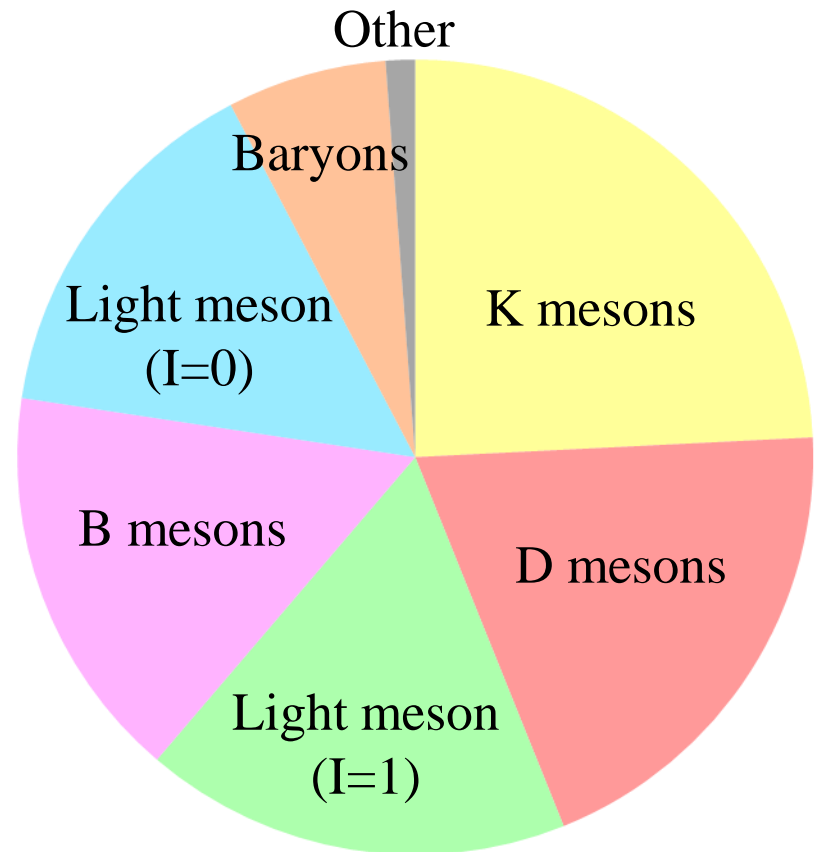


# Direct pion candidates

Direct pion candidates



Mother particles of other pions

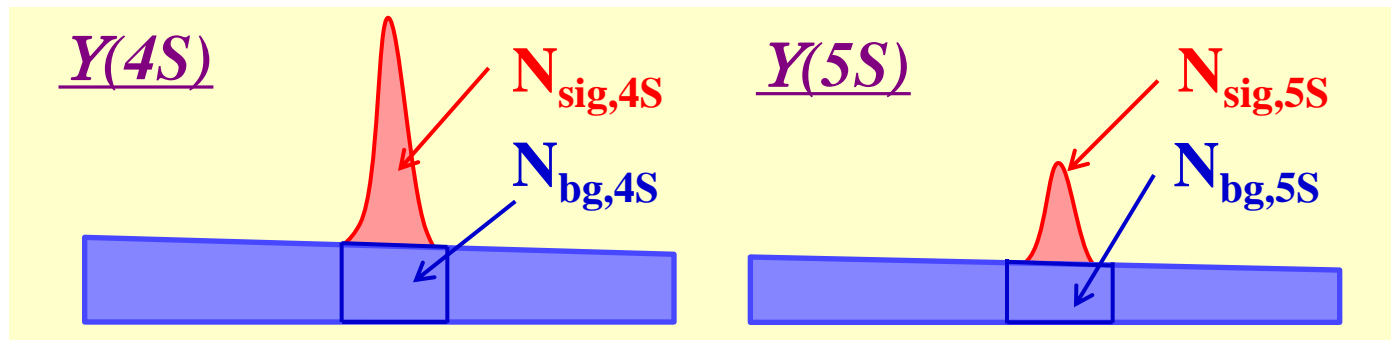


# カットの最適化

## $B_{rec}$ に対する選択条件の最適化

- $J/\psi$  mass window, lepton-ID, K-ID, continuum suppression
  - $Y(4S)$  データ( $\sim 107 \text{ fb}^{-1}$ ) を使用。
  - $Y(5S)$  と  $Y(4S)$  の S/N の違いを補正するため、重み付きの Significance を定義。

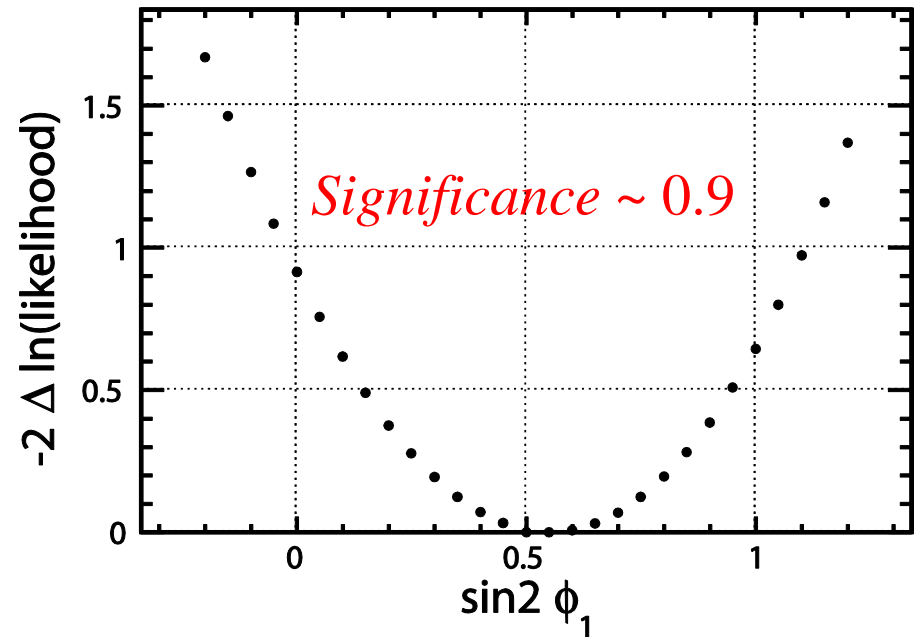
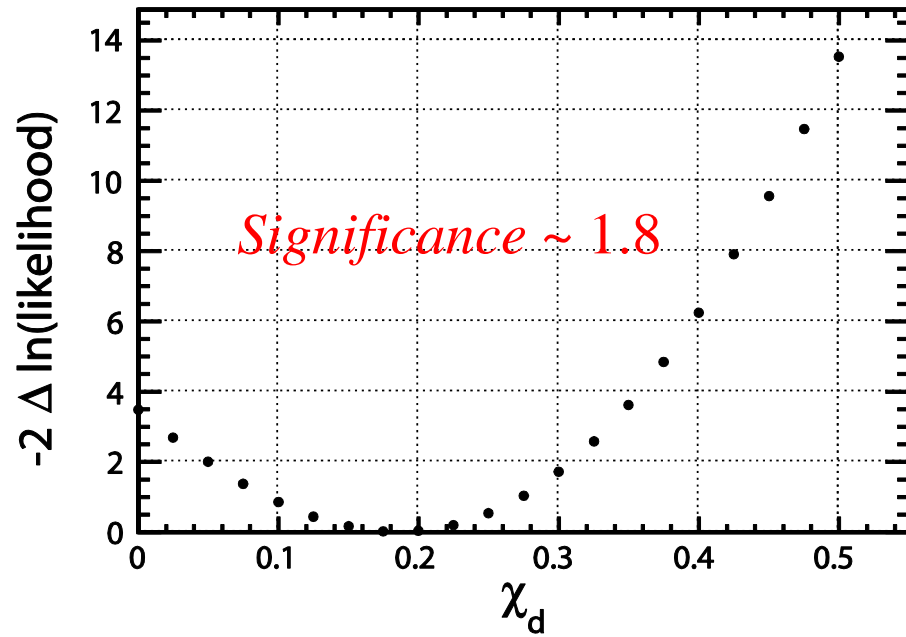
$$\text{Significance} \equiv \frac{N_{sig}}{\sqrt{N_{sig} + w N_{bg}}} \quad w \equiv \frac{N_{sig,4S}/N_{bg,4S}}{N_{sig,5S}/N_{bg,5S}}$$



## $B_{miss}$ に対する選択条件の最適化

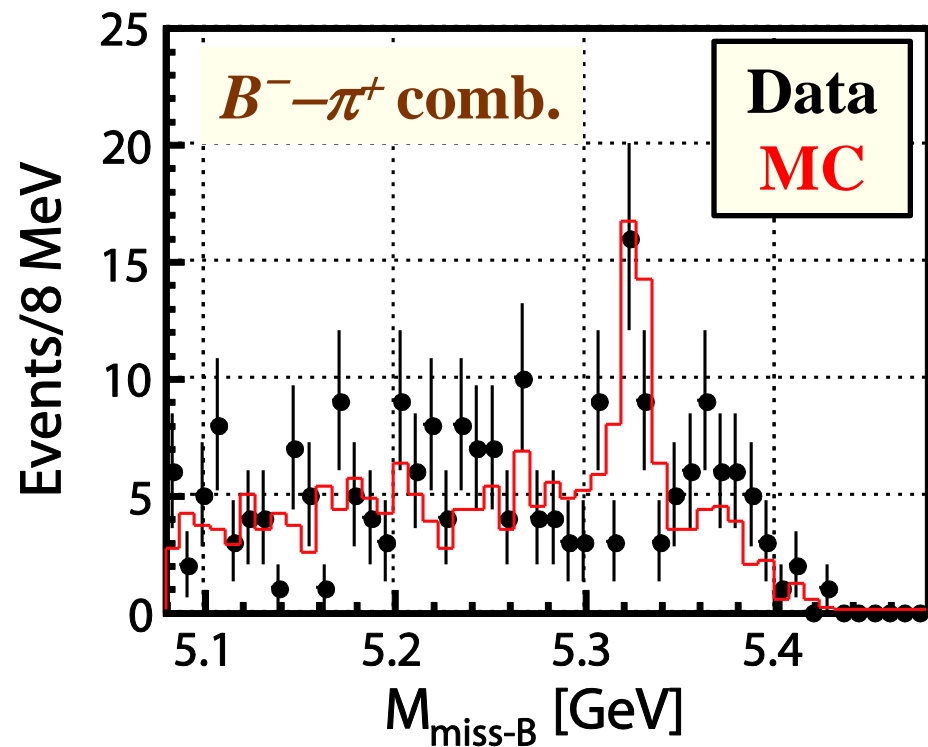
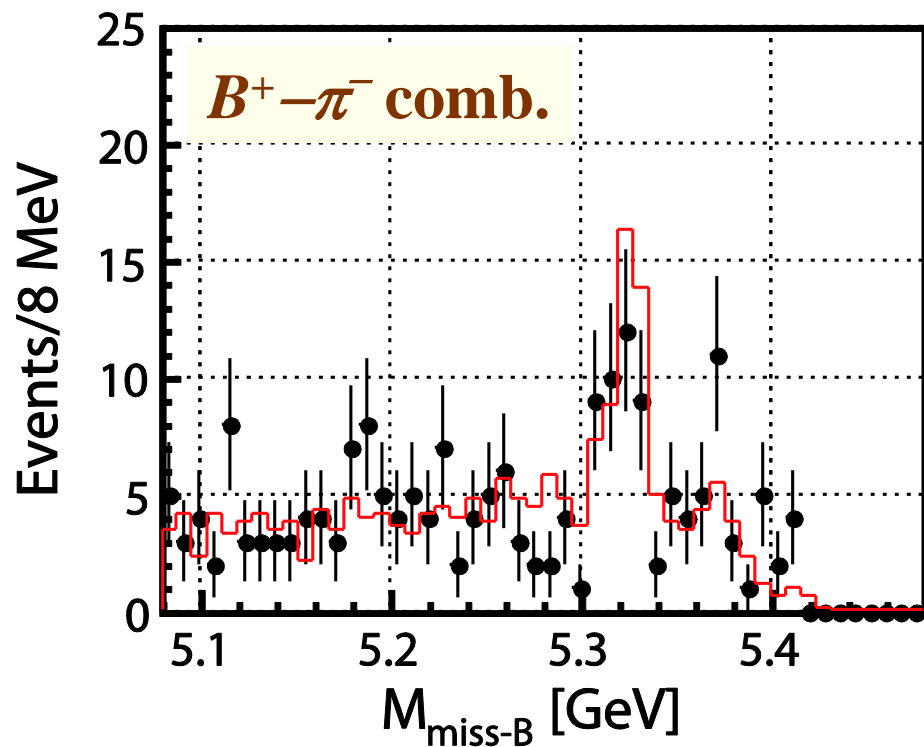
- $B_{rec}$  mass window,  $B_{rec}$  momentum,  $\pi$ -ID
  - 6 倍の量の MC を使用。

# $-2\Delta\ln(\text{Likelihood})$ 分布



# データとMC の比較

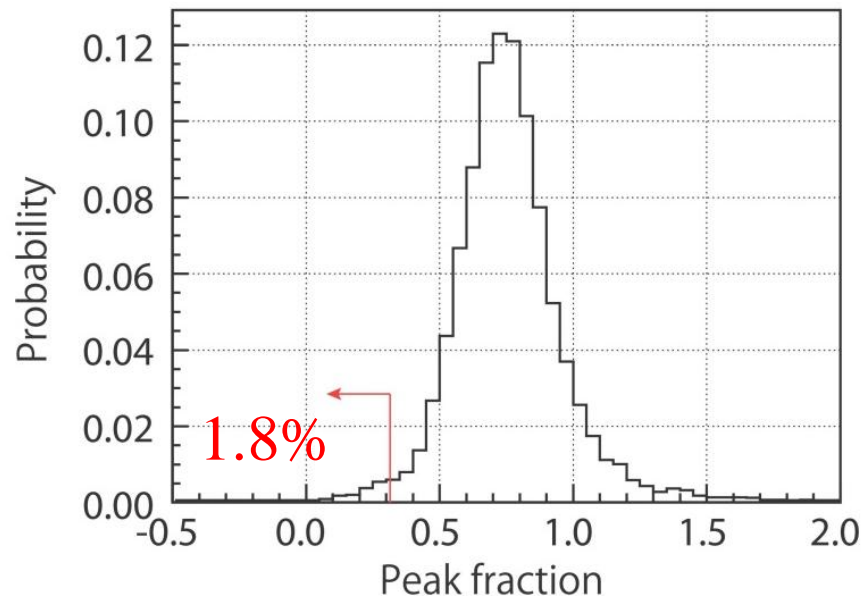
- $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$



# Toy MC test

$$\text{Fraction of } B^*\bar{B}\pi + B\bar{B}^*\pi = \begin{cases} 0.31 \pm 0.15 & (B \rightarrow J/\psi K_s) \\ 0.74 \pm 0.08 & (B \rightarrow J/\psi K^{*0} \text{ and } D^{*-}\pi^+) \end{cases}$$

- PDF shape :  $J/\psi K_s$
- Peak fraction :  $J/\psi K^{*0}$  and  $D^{*-}\pi^+$
- $A_{BB\pi}$  : PDG value
- # of events :  $J/\psi K_s$  (fluctuated by the Poisson distribution)



→ 3.6% (1.8% × 2)



# 系統誤差

## $\pi^\pm$ 検出効率の非対称度

$$\frac{\varepsilon^{\pi^+}}{\varepsilon^{\pi^-}} = \frac{N_{D^{*+}}/N_{D^0}}{N_{D^{*-}}/N_{\bar{D}^0}}$$

$$D^{*+} \rightarrow [K^- \pi^+]_{D^0} \pi_{slow}^+$$

$D^0$  からの  $K^-$ ,  $\pi^+$  はキャンセルして、slow  $\pi^+$  の検出効率が求まる。

→  $Y(4S)$  データ  $107 \text{ fb}^{-1}$  を使用して、 $\varepsilon^{\pi^+}/\varepsilon^{\pi^-} = 1.009 \pm 0.007$  を得た。

## Mixing parameter $y$

$$A_{BB\pi^\pm} = \frac{x}{1+x^2} (-\eta_{CP} \cdot \sin 2\phi_1) \cdot \frac{1-y^2}{1+y \cdot \eta_{CP} \cdot \cos 2\phi_1}$$

- $1\sigma$  upper limit : 0.246 [B. Aubert et al. (BABAR Collaboration) Phys.Rev. D70,012007(2004)]