

# Belle II 実験における $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ 崩壊を用いた フレーバータグの誤認率と $\Delta t$ 分解能の評価

奈良女子大学大学院 博士前期課程 数物科学専攻 物理学コース

高エネルギー物理学研究室

楠戸 愛美

# 目次

- 序論
- 時間依存CP非保存の測定
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ 崩壊の事象再構成
- 識別によるフレーバー誤認率の測定
- Opposite flavor-Same flavor非対称度によるフレーバー誤認率の測定
- $\Delta t$  分解能の評価

# 序論

- ビッグバン時に物質と反物質は同量生成されたと考えられているが、現在の宇宙は物質のみが残存しており、この物質-反物質非対称性が生じた機構は未解明。
- 宇宙がこの状態に至るために必要である条件の一つがCP非保存。CP変換を行ったとき物理量に変化があれば、CP非保存な状態。



C (荷電共役) 変換



P (空間) 変換

- Belle II実験では稀過程のBメソン崩壊過程を測定し、新たなCP非保存を探索しようとしている。

# Belle II 実験

SuperKEKB加速器とBelle II測定器による、高輝度のBファクトリー実験であり、2019年に本格的にデータ収集を開始した。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。

SuperKEKB 加速器:

2リングの、7 GeV の電子ビームと4 GeV の陽電子ビームを衝突させる衝突型加速器。

## 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

- ピクセル検出器 (PXD)
- シリコンバーテックス検出器 (SVD)

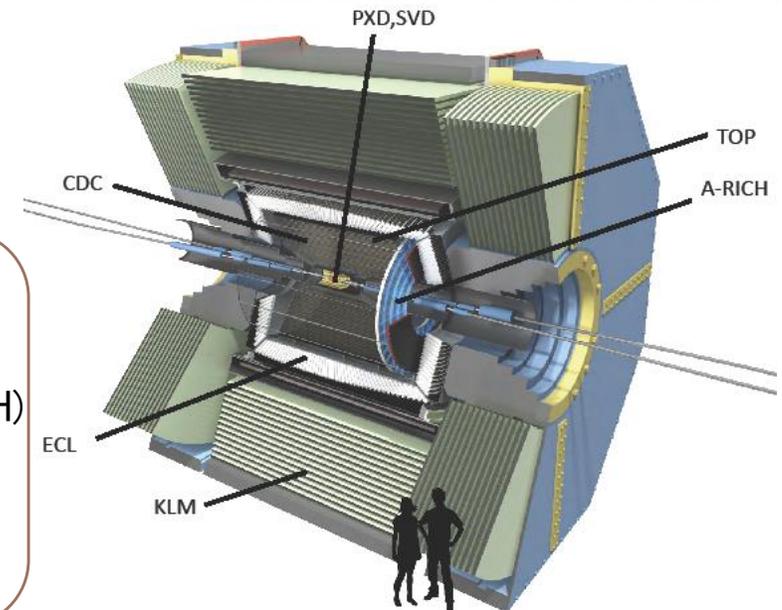
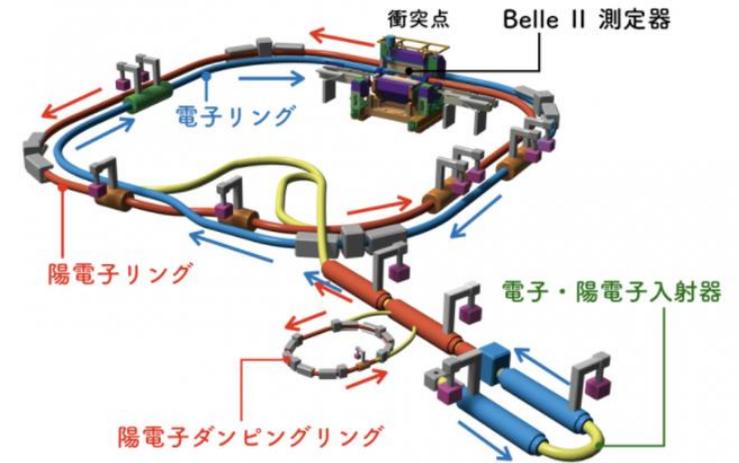
### -中央飛跡検出器 (CDC)

### - 粒子識別検出器

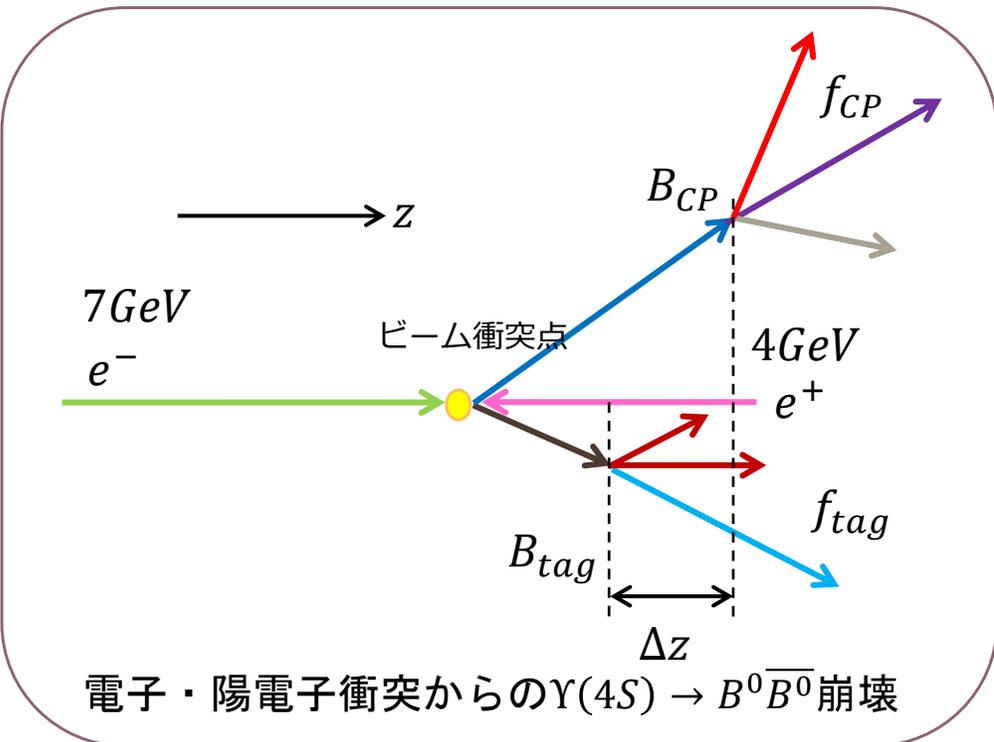
- TOPカウンター (TOP)
- エアロゲルRICH検出器 (ARICH)

### - 電磁カロリメータ (ECL)

### - $K_L$ 、 $\mu$ 粒子検出器 (KLM)



# 時間依存CP非保存の測定



## 解析手順

1. CP固有状態  $f_{CP}$  からBメソン  $B_{CP}$  を再構成する。残りの粒子はtag側のBメソン  $B_{tag}$  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

$$A_{CP}(\Delta t) = \frac{\Gamma(\bar{B}^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP})} = S_{f_{CP}} \sin(\Delta m \Delta t) + A_{f_{CP}} \cos(\Delta m \Delta t)$$

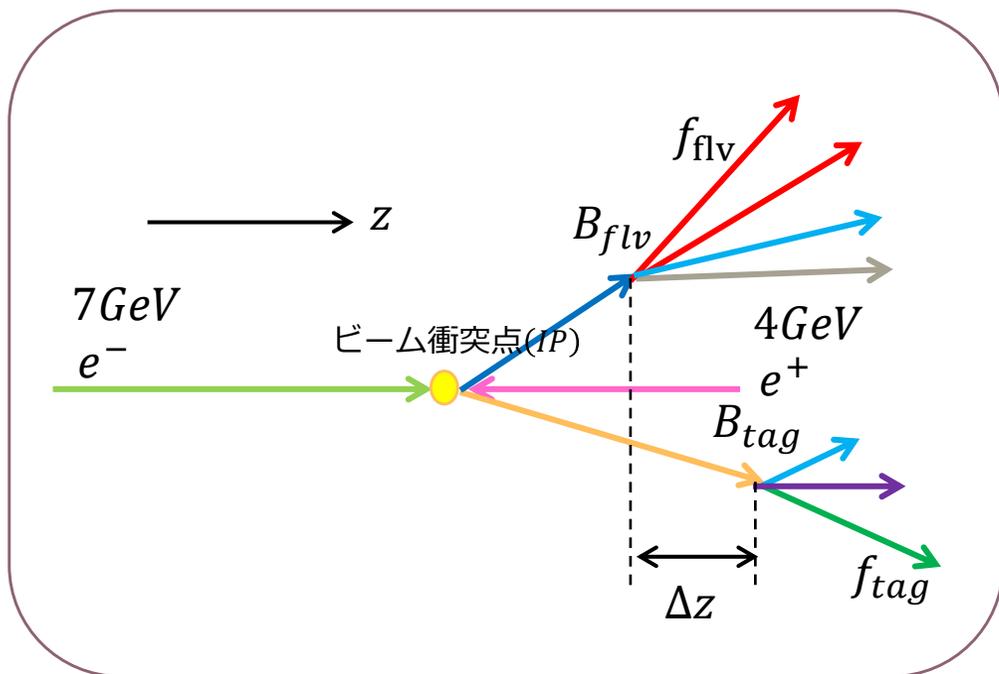
$f_{CP}$  に崩壊した  $\bar{B}^0$  と  $B^0$  の  $\Delta t$  分布が違えば CP非保存がある!!

$\Gamma$  : 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

$S_{f_{CP}}$  : 混合誘起CP非保存を表すパラメータ  
 $A_{f_{CP}}$  : 直接的CP非保存を表すパラメータ

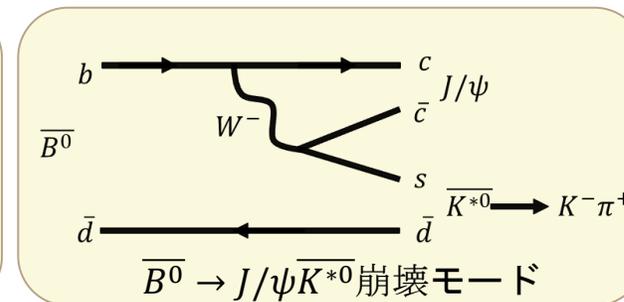
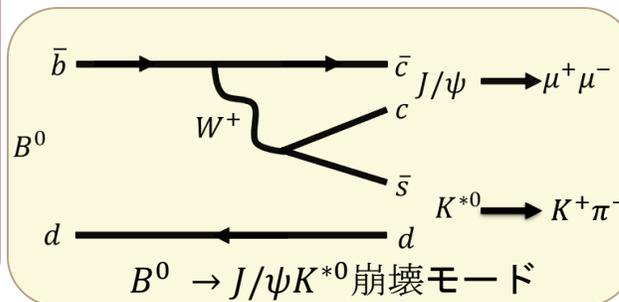
# フレーバータグとフレーバー誤認率

CP非保存の測定では、フレーバータグが校正が重要。→フレーバー誤認率  $w$



本研究では $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊モードのMCシミュレーションサンプルデータを用いた。

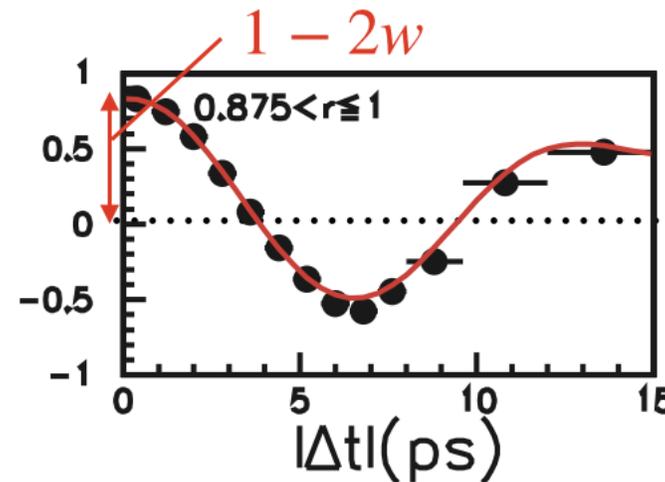
$B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊は検出された娘粒子から $B^0$ と $\bar{B}^0$ が区別できるFlavor specific 崩壊であるため、実データでのフレーバータグの校正に適している。



Opposite Flavor-Same Flavor非対称性時間発展

$$A_{OFSF} = \frac{R_{OF}(\Delta t) - R_{SF}(\Delta t)}{R_{OF}(\Delta t) + R_{SF}(\Delta t)} = (1 - 2w) \cos(\Delta m_d \Delta t)$$

$R_{OF(SF)}$  : Opposite Flavor(Same Flavor)の事象数  
 $\Delta m_d$  : 中性Bメソンの2つの質量固有状態の質量差





# $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ 崩壊の事象再構成

粒子	検出した検出器と選別条件
$\mu, K, \pi$	$\mu$ : KLMにて検出 $K, \pi$ : SVD, CDCで検出 TOPやARICHで識別
$J/\psi (\mu\mu)$	$3.05 \text{ GeV}/c^2 < M(\mu\mu) < 3.15 \text{ GeV}/c^2$
$K^{*0}$	$0.817 \text{ GeV}/c^2 < M(K\pi) < 0.967 \text{ GeV}/c^2$
$B^0$	$5.29 \text{ GeV}/c^2 < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}/c^2$ , $-0.03 \text{ GeV} < \Delta E < 0.03 \text{ GeV}$

- 再構成する際、粒子の選別条件を左のように行った。

- 不変質量とエネルギー差は以下で表される。

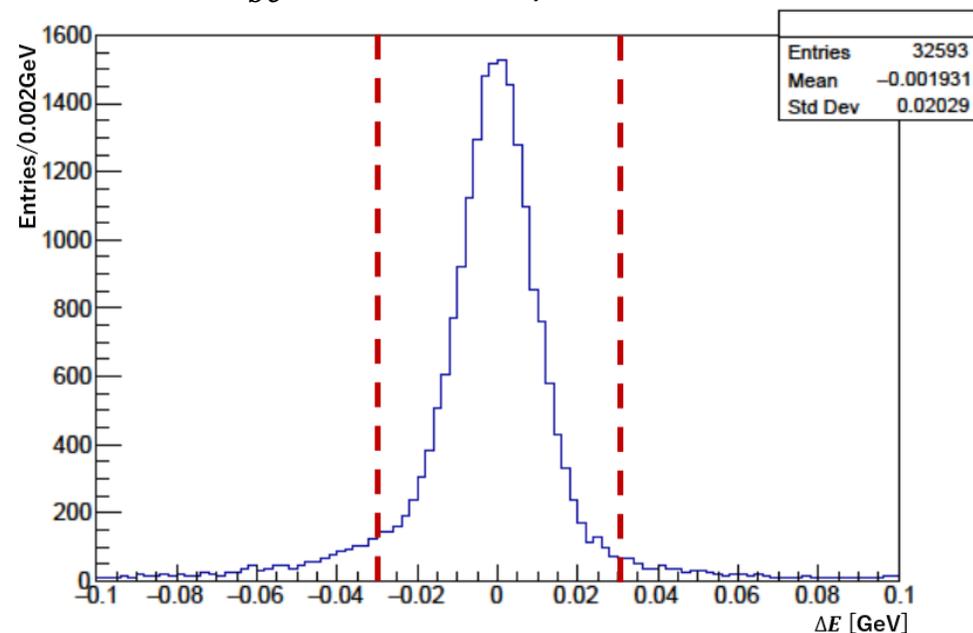
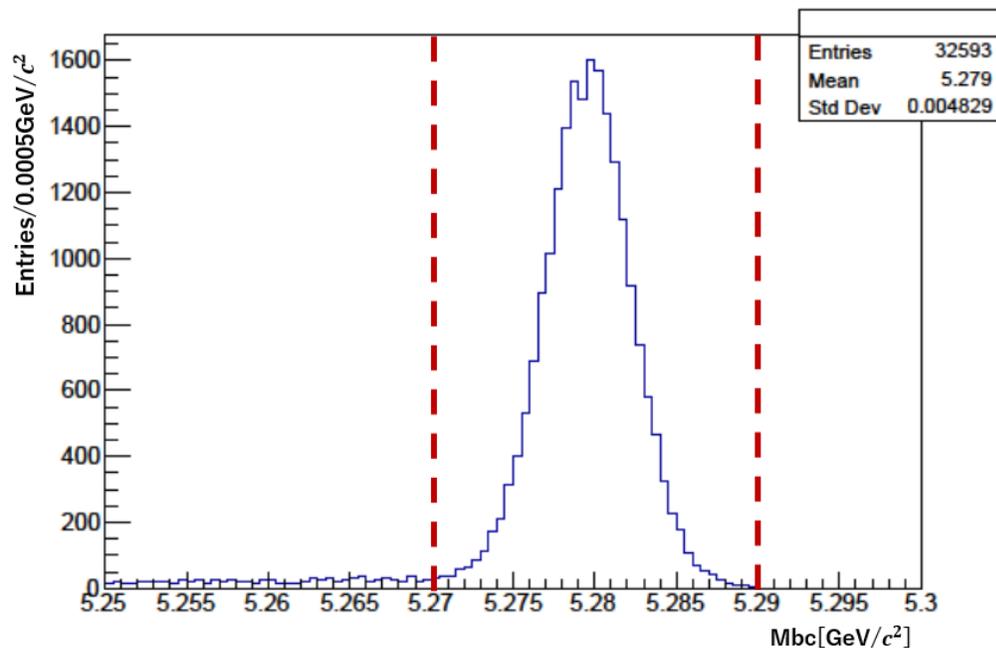
$$M_{bc} = \sqrt{E_{beam}^2 - p_B^2} \quad \Delta E = E_B - E_{beam}$$

$E_{beam}$  : ビームエネルギー

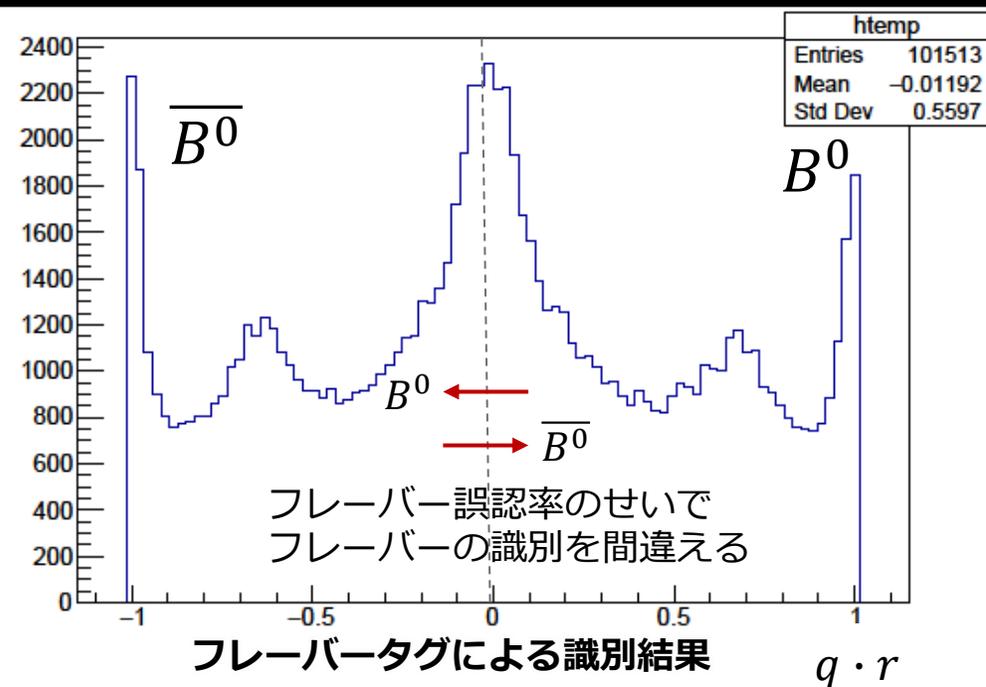
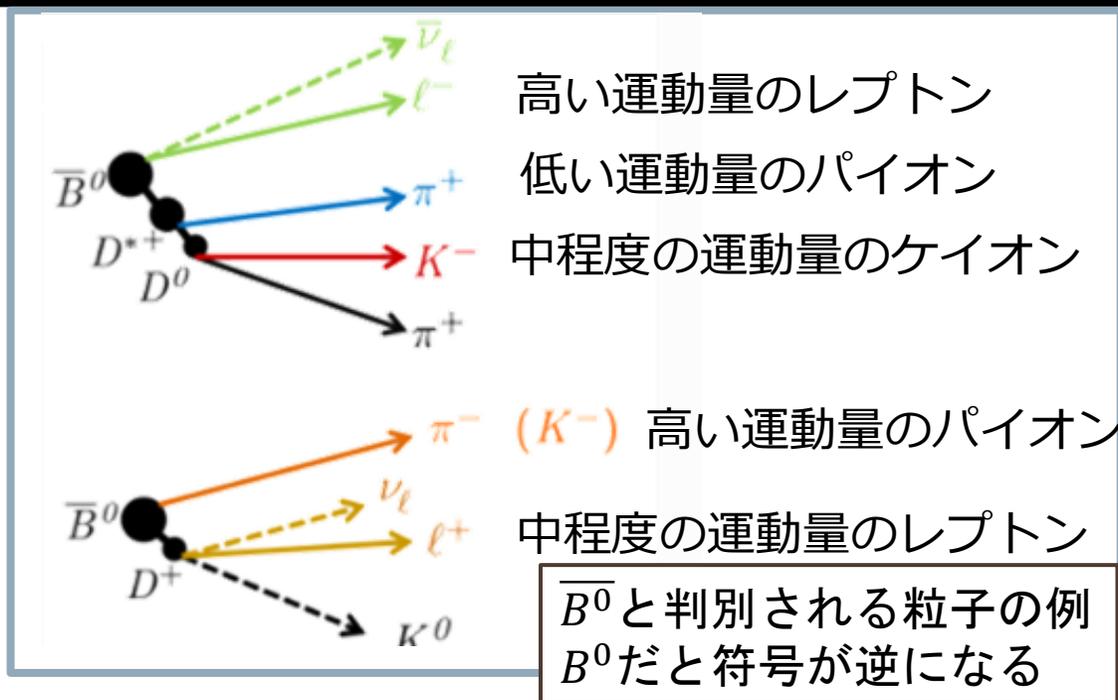
$E_B$  : Y(4S)静止系でのB候補のエネルギー

$p_B$  : Y(4S)静止系でのB候補の運動量の大きさ

- 信号事象は $M_{bc}$ :5.279GeV,  $\Delta E$ :0GeVでピーク



# フレーバータグとそのアルゴリズム



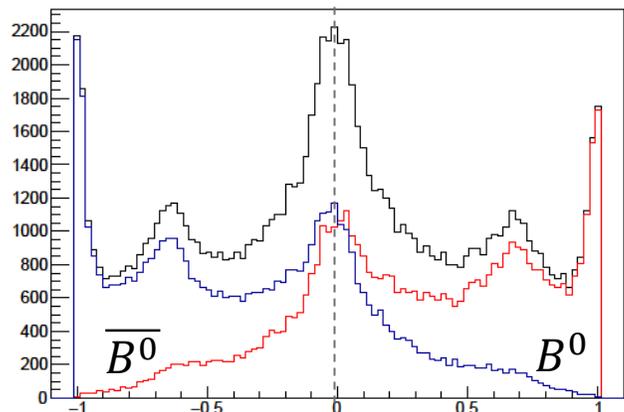
タグ側のBメソンの娘粒子から荷電粒子の種類、電荷、運動量によりフレーバーを判別し、 $q$ と $r$ の積で返される。

$q$  :  $B^0$ と $\overline{B^0}$ を識別を表す。 $q = 1$ であれば $B^0$ 、 $q = -1$ であれば $\overline{B^0}$

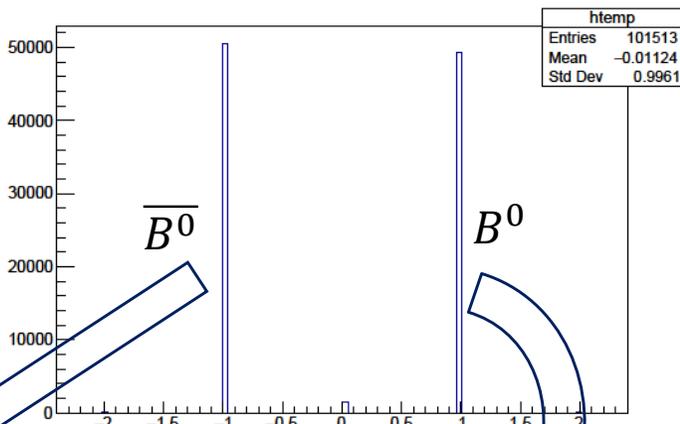
$r$  : フレーバー希釈係数。 $0 < r < 1$ の範囲でフレーバーが確かに識別できているかを表す。

フレーバータグの性能を向上するのに、フレーバータグの効率  $\varepsilon$  が高く、フレーバー誤認率  $w$  が低くなるとよい。

# 識別結果からのフレーバー誤認率



フレーバータグによる識別結果

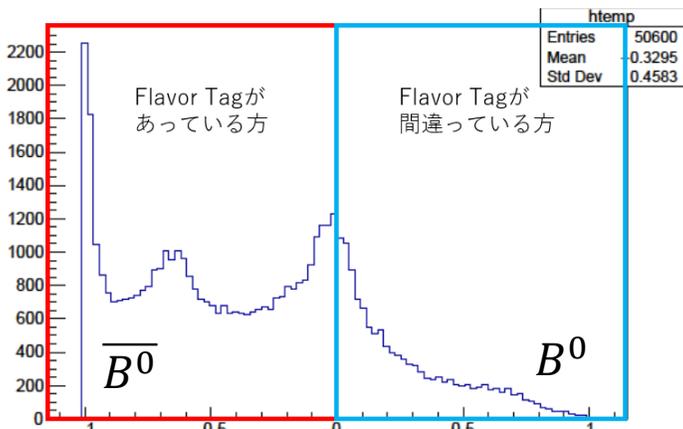


MCの正解の分布

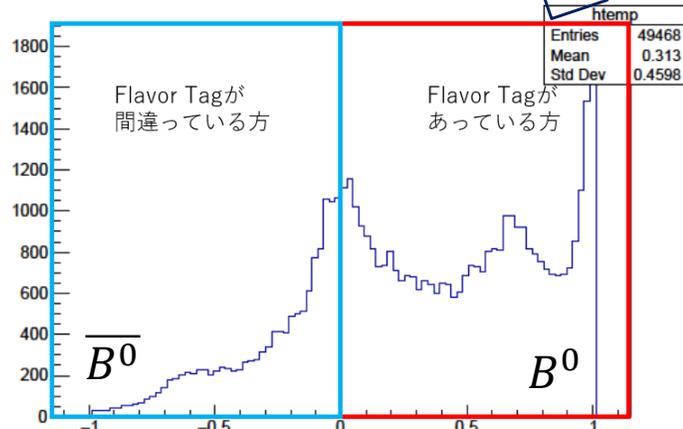
本研究ではMCシミュレーションサンプルデータを用いたため、それぞれの事象が $B^0$ と $\overline{B^0}$ のどちらであるかわかっている。

$B^0$ の事象数のみと $\overline{B^0}$ の事象数のみでそれぞれフレーバータグを適用して識別させた。

フレーバータグが間違っているの事象数を数え、左下の式を用いてフレーバー誤認率を計算した。



MCで $\overline{B^0}$ のときのフレーバータグでの識別



MCで $B^0$ のときのフレーバータグでの識別

こうして得た $w^-$ と $w^+$ を重みづけて平均することで、フレーバー誤認率  $w$ を得る。

それぞれのフレーバーのフレーバー誤認率の差を以下の式で求める。

$$\Delta w = w^+ - w^-$$

$$w^- = \frac{N(B^0 \text{ と誤認})}{N(\overline{B^0})}$$

$$w^+ = \frac{N(\overline{B^0} \text{ と誤認})}{N(B^0)}$$

# Effective tagging Efficiency

フレーバータグの性能を評価するのに、フレーバータグの効率  $\varepsilon$  とフレーバー誤認率  $w$  に注目。

高いとよくなる

低いとよくなる

$$\text{Effective Tagging Efficiency } \varepsilon^{eff} = \varepsilon(1 - 2w)^2$$

フレーバーが識別でき、  
かつ正確であるほど高くなる。

$\varepsilon^{eff}$  はCP非保存を表すパラメータ、 $S_{f_{CP}}$  や  $A_{f_{CP}}$  の誤差の逆数に比例する値。

→高いと誤差が小さくなる。

CP非保存の測定において、確認しておきたい値。

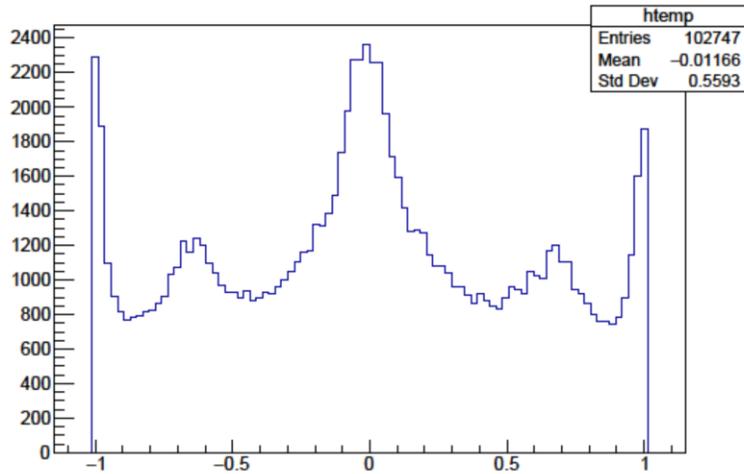
$$\begin{aligned} A_{CP}(\Delta t) &= \frac{\Gamma(\bar{B}^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(B^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(\bar{B}^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP})} \\ &= S_{f_{CP}} \sin(\Delta m \Delta t) + A_{f_{CP}} \cos(\Delta m \Delta t) \end{aligned}$$

フレーバー希釈係数  $r$  の値ごとにフレーバータグの効率やフレーバー誤認率が変化する。

適当な範囲で分けることによって総和のEffective Tagging Efficiencyが良くなる。

本研究では、フレーバー希釈係数  $r$  の値を6つに分けた。

# $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ 崩壊モードの結果



フレーバーの識別ができた事象の $qr$ 分布と $r$ を $l = 1 \sim 6$ に場合分けしたときの $\varepsilon$ 、 $w$ 、 $\Delta w$ 、 $\varepsilon^{eff}$ を表にまとめた。

$q$  :  $B^0$ と $\bar{B}^0$ を識別を表す。 $q = 1$ なら $B^0$ 、 $q = -1$ なら $\bar{B}^0$ 。

$r$  : フレーバー希釈係数。識別の確からしさを表す。

$\varepsilon$  : フレーバータグの効率。

$w$  : フレーバー誤認率。 $0 < w < 0.5$ 。

$\varepsilon^{eff}$  : フレーバータグの性能を示す。 $\varepsilon^{eff} = \varepsilon(1 - 2w)^2$ で表される。

$l$	$r$	$\varepsilon_l$	$w_l$	$\Delta w_l$	$\varepsilon_l^{eff}$
1	$0.100 < r < 0.250$	$0.1642 \pm 0.0012$	$0.3927 \pm 0.0038$	$+0.0237 \pm 0.0076$	$0.0076 \pm 0.0004$
2	$0.250 < r < 0.500$	$0.1963 \pm 0.0012$	$0.2971 \pm 0.0032$	$+0.0133 \pm 0.0065$	$0.0323 \pm 0.0008$
3	$0.500 < r < 0.625$	$0.1058 \pm 0.0010$	$0.2081 \pm 0.0039$	$+0.0308 \pm 0.0078$	$0.0360 \pm 0.0008$
4	$0.625 < r < 0.750$	$0.1154 \pm 0.0010$	$0.1445 \pm 0.0032$	$-0.0002 \pm 0.0065$	$0.0584 \pm 0.0009$
5	$0.750 < r < 0.875$	$0.0867 \pm 0.0009$	$0.0885 \pm 0.0030$	$-0.0090 \pm 0.0061$	$0.0587 \pm 0.0009$
6	$0.875 < r < 1.000$	$0.1423 \pm 0.0011$	$0.0241 \pm 0.0013$	$+0.0049 \pm 0.0026$	$0.1289 \pm 0.0011$

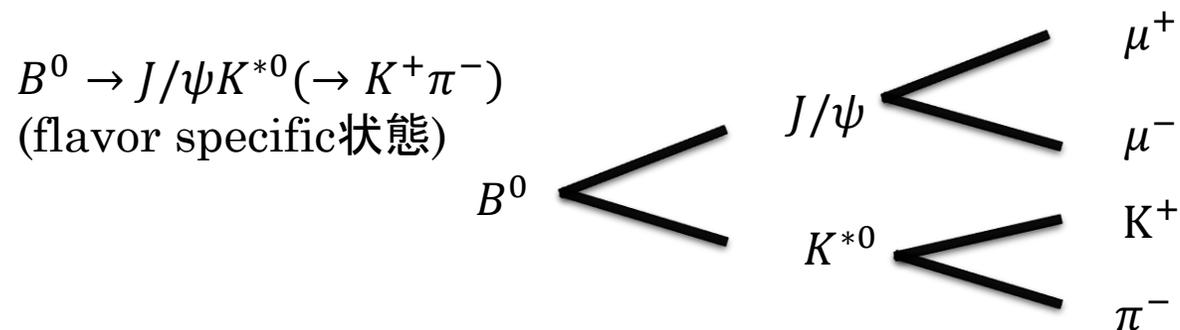
$B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$  崩壊のEffective Tagging Efficiencyは、

$$\varepsilon^{eff} = \sum_{l=1}^6 \varepsilon_l^{eff} = 0.3220 \pm 0.0020$$

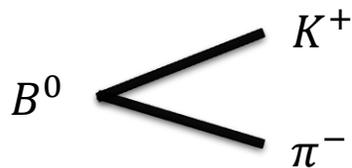
# 他の崩壊モードとの比較

終状態の粒子数が違ったり、flavor specific状態とCP固有状態の違いがあると、フレーバータグが影響を受けるか調べた。

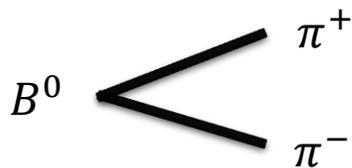
そのために  $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$  と  $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 、 $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$  の3つの崩壊モードで  $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$  と同様に、 $\varepsilon$ ,  $w$ ,  $\Delta w$ ,  $\varepsilon^{eff}$  を調べた。(本発表では  $\varepsilon^{eff}$  のみ言及する。)



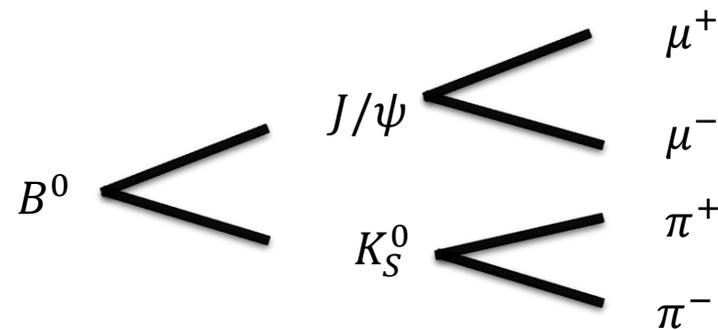
$B^0 \rightarrow K^+\pi^-$   
 (flavor specific状態)



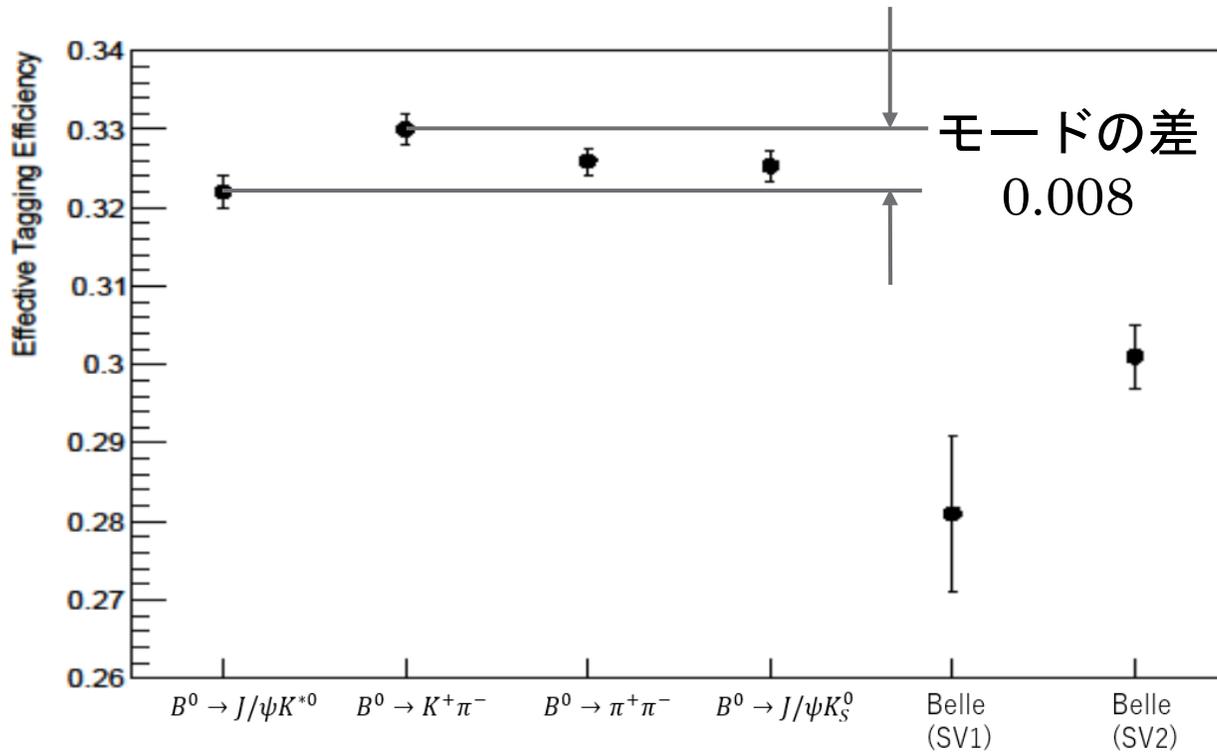
$B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$   
 (CP固有状態)



$B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0 (\rightarrow \pi^+\pi^-)$   
 (CP固有状態)



# Effective tagging efficiencyの比較



崩壊モード	$\epsilon^{eff}$
$B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$	$0.3220 \pm 0.0020$
$B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$	$0.3300 \pm 0.0020$
$B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$0.3259 \pm 0.0017$
$B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$	$0.3253 \pm 0.0019$

各モード  $\sim 10^5 B\bar{B}$  pair

Belleの実データ	$\epsilon^{eff}$
SVD1	$0.284 \pm 0.010$
SVD2	$0.301 \pm 0.004$

SVD1  $152 \times 10^6 B\bar{B}$  pair

SVD2  $620 \times 10^6 B\bar{B}$  pair

- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ ,  $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ ,  $B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ ,  $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$ 崩壊のEffective Tagging Efficiencyをまとめた。
- これらの崩壊モードの最大の差は0.008。先行研究であるBelleの実データで較正したEffective Tagging Efficiencyの差異をみると、実データの量が $1ab^{-1}$ (2~3年後のデータ量)の範囲内では、顕著に問題になる大きさではない。

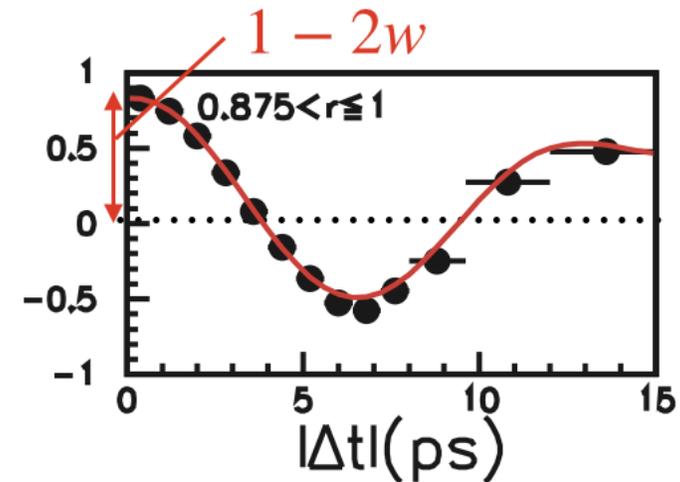
# Opposite Flavor-Same Flavor 非対称度時間発展

フレーバー誤認率はOpposite Flavor-Same Flavor 非対称度時間発展のフィットを行い、 $1 - 2w$ を抽出することで得られる。

$$A_{OFSF} = \frac{R_{OF}(\Delta t) - R_{SF}(\Delta t)}{R_{OF}(\Delta t) + R_{SF}(\Delta t)}$$

$$= (1 - 2w)\cos(\Delta m_d \Delta t)$$

$R_{OF(SF)}$  : Opposite Flavor(Same Flavor)の事象数  
 $\Delta m_d$  : 中性B メソンの2つの質量固有状態の質量差



現時点でこの手法に問題がないか、Opposite Flavor-Same Flavorが正しく識別できている場合と、フレーバータグを適用して識別させた場合の $1 - 2w$ を確認した。

# 非対称性時間発展フィットによる結果

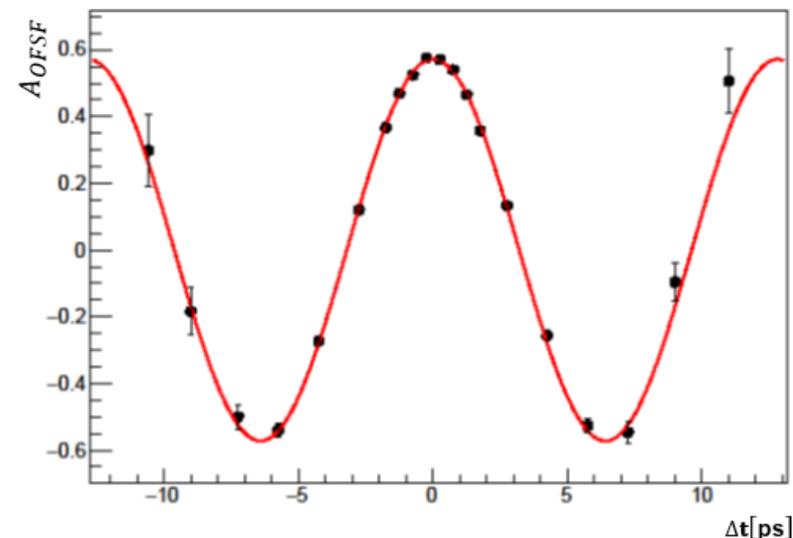
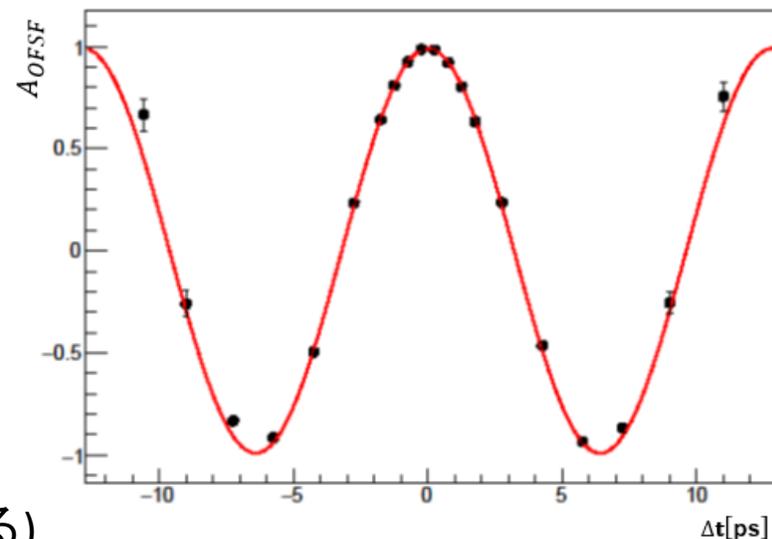
Opposite Flavor-Same Flavorが正しいフレーバーにより識別できている場合と、フレーバータグを適用して識別させた場合のOpposite Flavor-Same Flavor 非対称度時間発展  $A_{OFSF}(\Delta t)$  分布を確認した。

正しいフレーバーを用いた場合

- fit結果 :  $1 - 2w = 0.9919 \pm 0.0007$
- ほぼ 1 と一致。

フレーバータグを適用した場合( $r = 0.1 - 1.0$ のみの事象を用いる)

- fit結果 :  $1 - 2w = 0.5727 \pm 0.0028$
- この時のEffective Tagging Efficiencyを見ると、  
 $\varepsilon^{eff} = \varepsilon(1 - 2w)^2 = 0.3280 \pm 0.0023$
- 既に述べた $\Delta t$ によらない方法では  
 $\varepsilon^{eff} = 0.3220 \pm 0.0020$
- 独立した2つの方法でチェックし、一致した結果を得た。

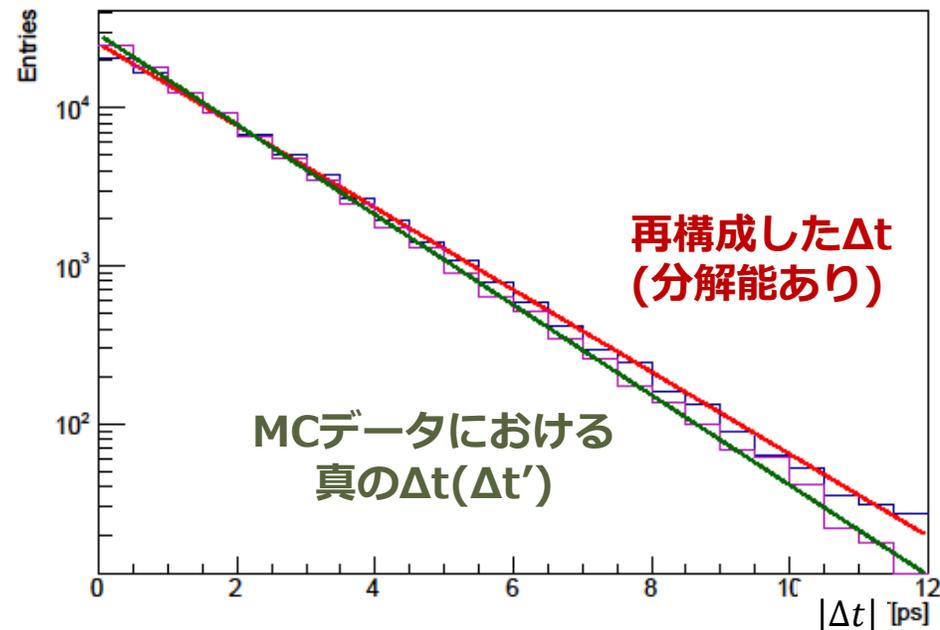


# $\Delta t$ 分解能

フレーバーの区別なしに  $\Delta t$  分布を観測すれば、B メソンの寿命で指数関数的に減少する分布になる。

実験的には分解能として、以下のようなことが合わさり  $\Delta t$  分布が広がる

- $\Upsilon(4S)$  に対して B メソンが完全に静止していないときの運動学的影響
- 検出器の分解能
- 支配的な  $b \rightarrow c$  遷移におけるチャームメソンの崩壊までの粒子の飛行による荷電粒子生成点の移動の効果



分解能を考慮するため、 $\Delta t$  分解能を定式化した確率密度関数を用いてフィットする。

$$P(\Delta t) = \int \underbrace{R(\Delta t - \Delta t')}_{\text{分解能を定式化した分解能応答関数}} \exp\left(\frac{-|\Delta t|}{\tau_B}\right) d\Delta t'$$

$\Delta t$  分解能を定式化した分解能応答関数  $\underbrace{\exp\left(\frac{-|\Delta t|}{\tau_B}\right)}_{\text{フレーバーの区別しないときの}\Delta t\text{分布}}$

$\Delta t$  : 再構成した  $\Delta t$

$\Delta t'$  : MCデータにおける真の  $\Delta t$

本研究では再構成した  $\Delta t$  分布からこの操作を行い B メソン寿命の値を抽出することで確認した。

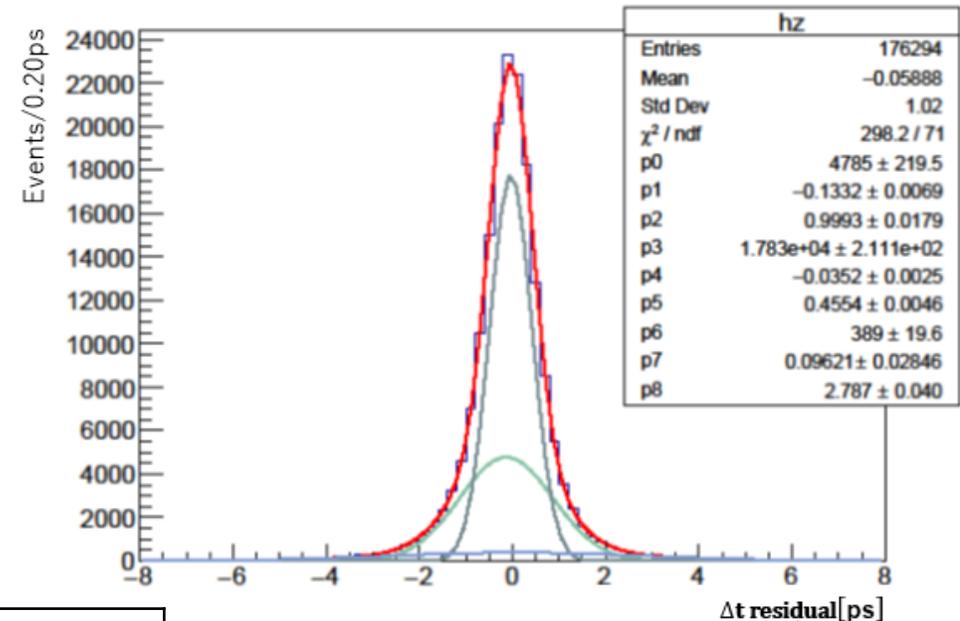
# $\Delta t$ 分解能

MCデータであれば、分解能を $\Delta t$  residual ( $= \Delta t - \Delta t'$ ) 分布で近似的に表現できる。

分解能応答関数 $R(\Delta t - \Delta t')$ に用いるため、 $\Delta t$  residual の分布を3つの正規分布の重ね合わせであるモデルでフィットした。

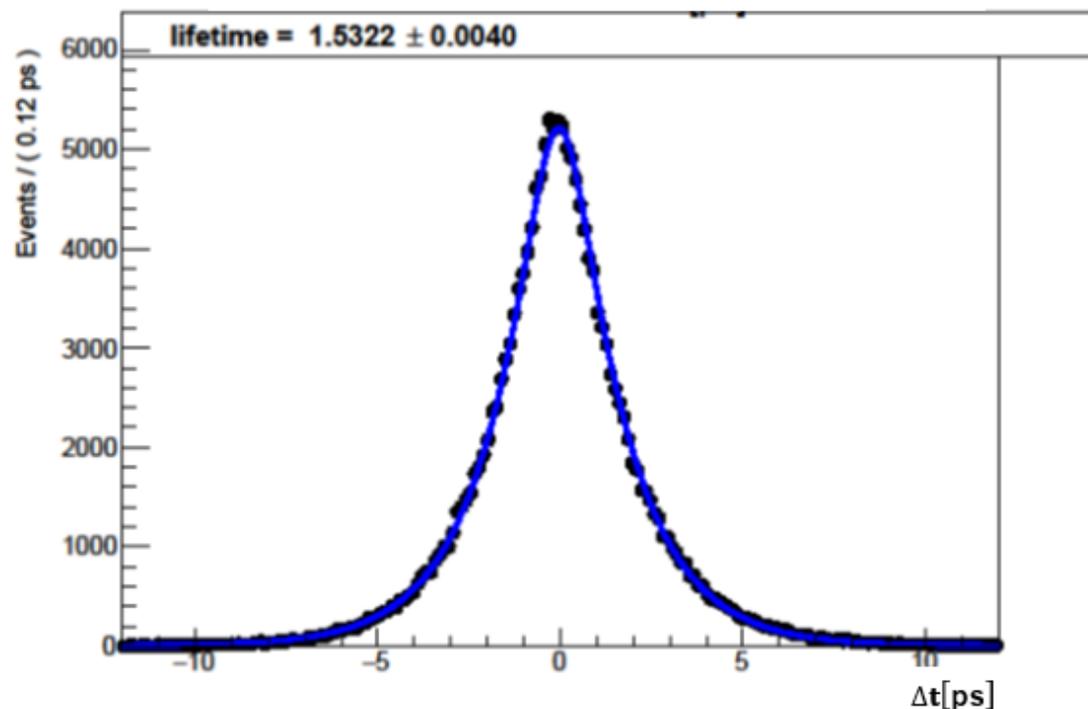
$$R(\Delta t - \Delta t') = h_1 \exp\left(-\frac{(x - \mu_1)^2}{2\sigma_1^2}\right) + h_2 \exp\left(-\frac{(x - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right) + h_3 \exp\left(-\frac{(x - \mu_3)^2}{2\sigma_3^2}\right)$$

添字	$h$	$\mu$	$\sigma$
1	$4785 \pm 220$	$-0.1332 \pm 0.0070$	$0.999 \pm 0.018$
2	$17873 \pm 221$	$-0.0352 \pm 0.0025$	$0.4555 \pm 0.0047$
3	$389 \pm 2$	$0.096 \pm 0.029$	$2.787 \pm 0.012$



$\Delta t$  residual ( $= \Delta t - \Delta t'$ ) の分布

# $\Delta t$ 分布とフィット結果



$$P(\Delta t) = \int R(\Delta t - \Delta t') \exp\left(\frac{-|\Delta t|}{\tau_B}\right) d\Delta t'$$

$\Delta t$ の分布(点)に前スライドで得た分解能応答関数と指数関数を畳みこませた確率密度関数をunbinned likelihood fitでフィットした(青線)。

抽出された $B^0$ の寿命  $\tau_{B^0} = 1.532 \pm 0.004$  ps

MCの入力値  $\tau_{B^0} = 1.525$  psと一致。

# まとめ

- 本研究では、 $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ 崩壊のMC シミュレーションサンプルデータを用いてCP非保存の測定に重要であるフレーバー誤認率と $\Delta t$  の分解能の評価を行なった。
- 崩壊時のB メソンが $B^0$ か $\bar{B}^0$ かを調べるフレーバータグの誤認率をそれぞれ $B^0$ と $\bar{B}^0$ のときのフレーバータグを行い、間違っている事象数を数えて、計算して求めた。Effective Tagging Efficiency は、 $\varepsilon^{eff} = 0.3220 \pm 0.0020$ となった。
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ 崩壊モードに対し、娘粒子の数が違う崩壊モードやCP 固有状態の崩壊モードでのEffective Tagging Efficiencyに違いが出ないかを調べた。その計算結果からモードごとの $\varepsilon^{eff}$ の差異の最大は0.008で実データの統計量が $1 \text{ ab}^{-1}$ ぐらいまでは、顕著に問題になる大きさではないことがわかった。
- 崩壊点位置の差から得た $\Delta t$ を用いて、Opposite Flavor-Same Flavor非対称度時間発展をフィットして $1 - 2w$ を得たところ、時間積分した算出法や前述した $\varepsilon^{eff}$ と一致し、実験的なフレーバータグの導出に問題がないことがわかった。
- 再構成した $\Delta t$  の分解能応答関数を3 つの正規分布の重ね合わせで表現するモデルを使用して再構成した $\Delta t$  分布をフィットし、B メソンの寿命  $\tau_B$  を抽出した。その結果  $\tau_B = 1.532 \pm 0.004 \text{ ps}$  を得て、MCシミュレーションの入力値と一致することがわかった。