

Belle II実験における $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ モード によるフレーバー識別の較正 と Δt 分解能の評価

奈良女大院, 奈良女大自然^A, 高工研^B, 東大理^C

楠戸愛美, 宮林謙吉^A, 住澤一高^B, 原康二^B, 後田裕^{BC}, 他 Belle II コラボレーション

目次

- Introduction
- CP非保存の精密測定に必要な鍵
 1. フレーバータグ (B^0 と \bar{B}^0 の識別) : 誤認率の評価
 2. Δt の再構成 : 分解能に対する理解
- 研究手法と結果
 1. フレーバー誤認率の評価
 2. Δt 分解能の取扱が正当か、 B メソン寿命抽出による確認
- まとめ

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。

2019年に本格的にデータ収集を開始し、最終的にはBelle実験の50倍のデータ(50ab^{-1})を収集を目指している。

SuperKEKB 加速器:

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。

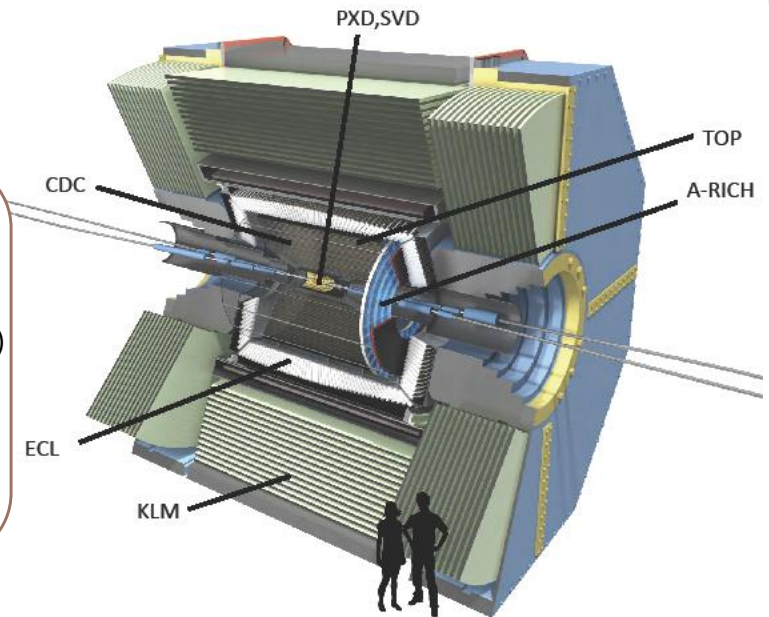
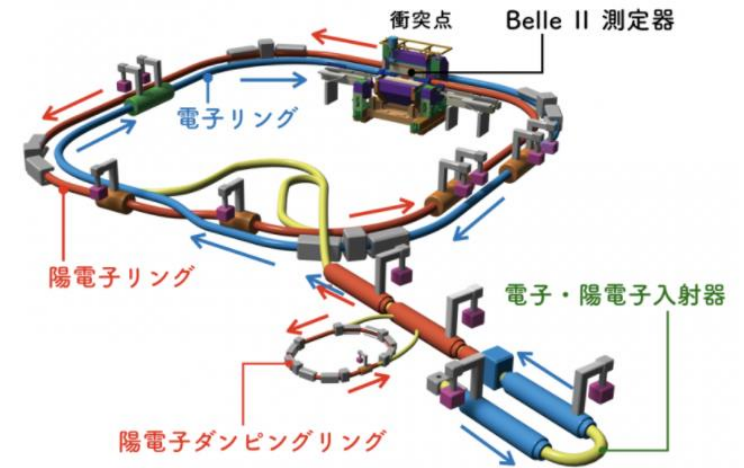
-崩壊点検出器

- 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 、 μ 粒子検出器 (KLM)



目的

Belle II実験が目指す物理の1つは新たなCP対称性の破れの測定である。

そのためには

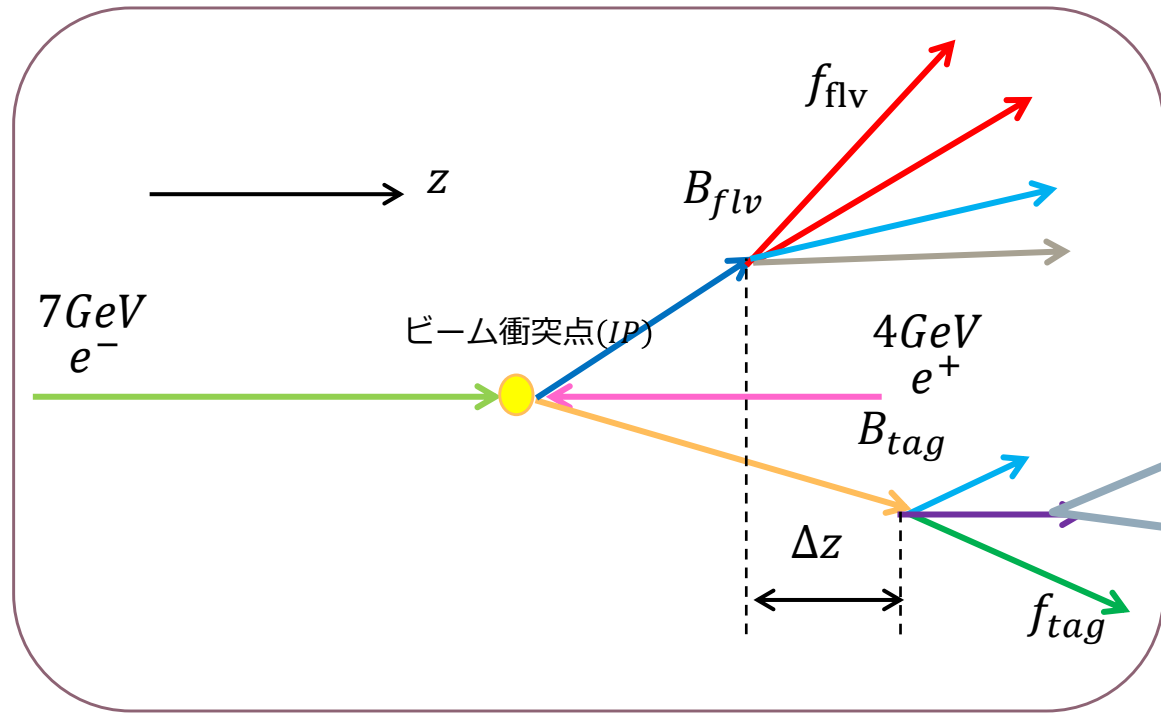
1. フレーバータグの較正

2. Δt の精密測定

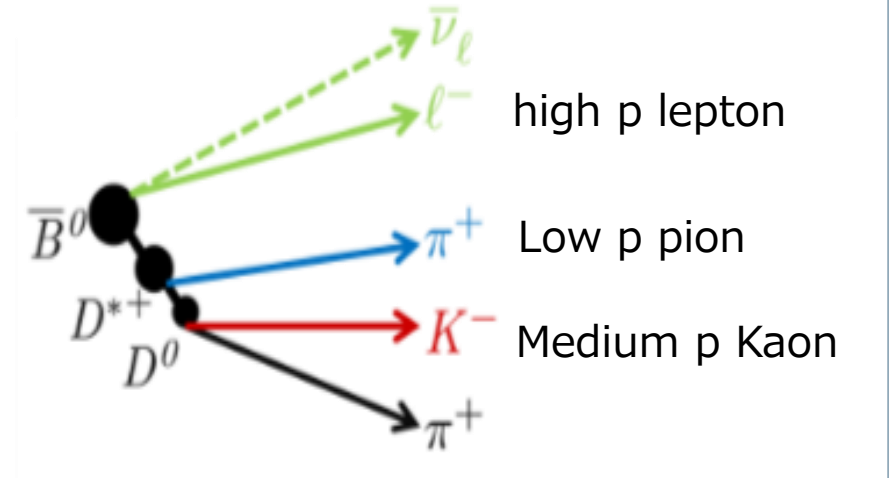
が重要！

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、フレーバータグの精密な理解が重要



フレーバータグ：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する。



\bar{B}^0 と判別される粒子の例
 B^0 だと符号が逆になる

フレーバータグの較正 = 誤認率(Wrong tag fraction)の評価を行う

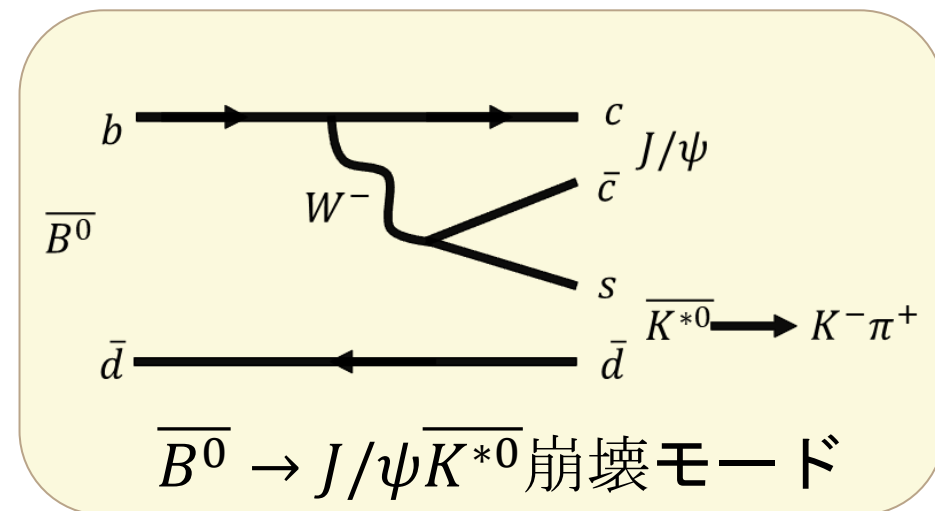
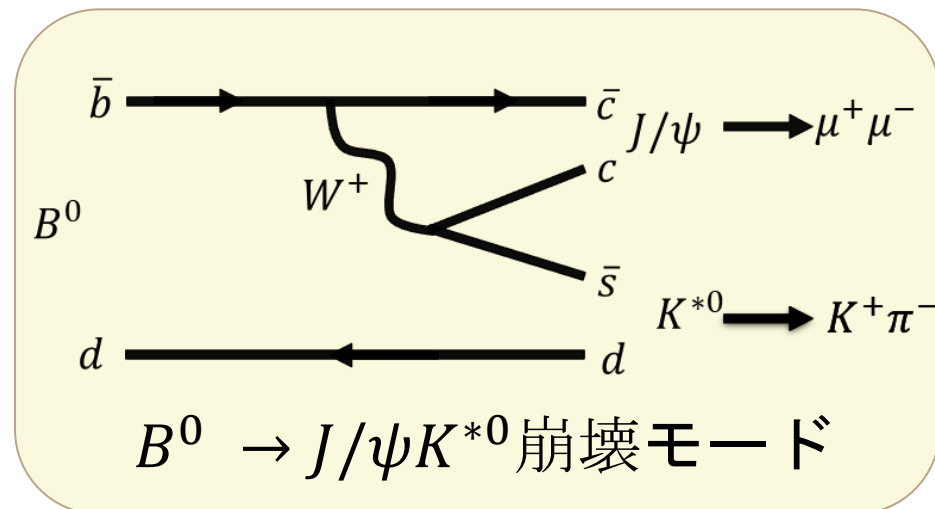
$B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊モード

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

$$B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$$

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

→フレーバータグの較正に適している。



1. フレーバータグ (B^0 と \overline{B}^0 の識別) : 誤認率の評価

フレーバータグの誤認率(フレーバー誤認率)を見積もる2つのアプローチ

- MCで事象生成時とフレーバータグが返したフレーバーの比較

- 混合のパターンからの Δt 関数としてフィット

Flavor specific崩壊モード($B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$)を用いる

→娘粒子の電荷から B_{flv} のフレーバーを判別

フレーバータグを行う

→ B_{tag} のフレーバーを判別

$B_{flv} \rightarrow B^0(\overline{B}^0)$, $B_{tag} \rightarrow \overline{B}^0(B^0)$: Opposite Flavor

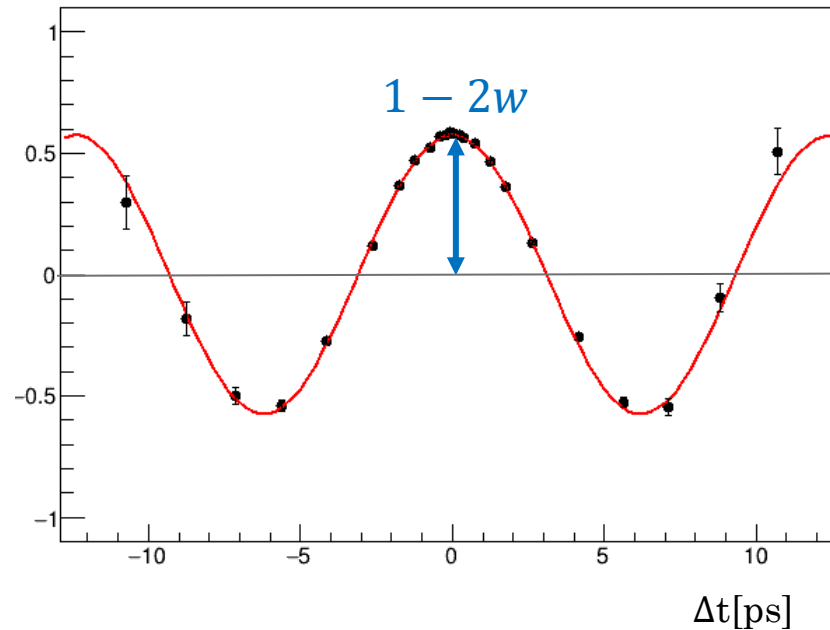
$B_{flv} \rightarrow B^0(\overline{B}^0)$, $B_{tag} \rightarrow B^0(\overline{B}^0)$: Same Flavor

Opposite Flavor-Same Flavor非対称性時間発展

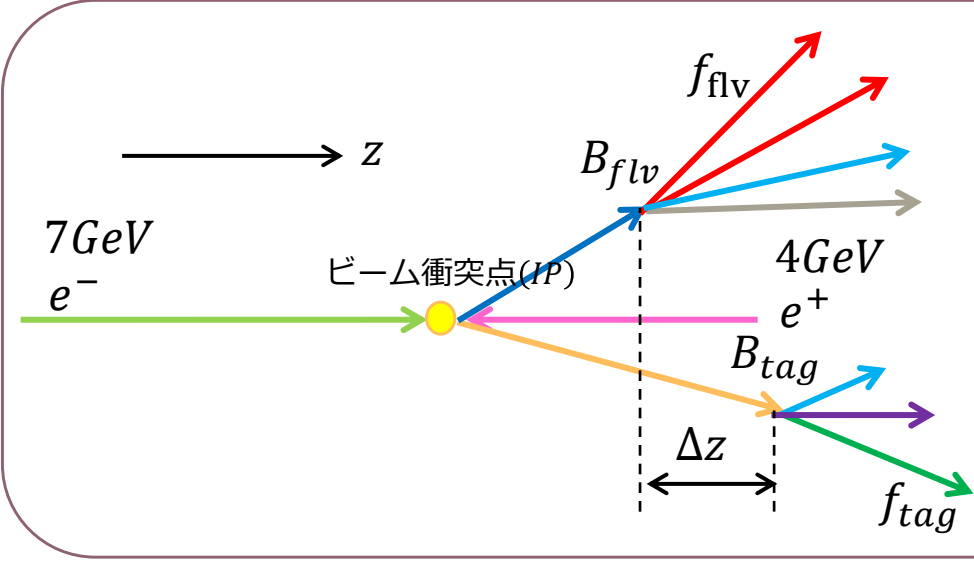
$$A_{OFSF} = \frac{R_{OF}(\Delta t) - R_{SF}(\Delta t)}{R_{OF}(\Delta t) + R_{SF}(\Delta t)} = (1 - 2w)\cos(\Delta m_d \Delta t) \quad A_{OFSF}$$

$R_{OF(SF)}$: Opposite Flavor(Same Flavor)の事象数

Δm_d : 2つの中性Bメソンの質量固有状態の質量差



2. Δt の再構成：分解能に対する理解



Bメソンの崩壊する時間差 Δt は崩壊点位置の
ビーム軸方向の差 Δz から

$$\Delta t = \Delta z / \beta \gamma c$$

$\beta \gamma$: 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

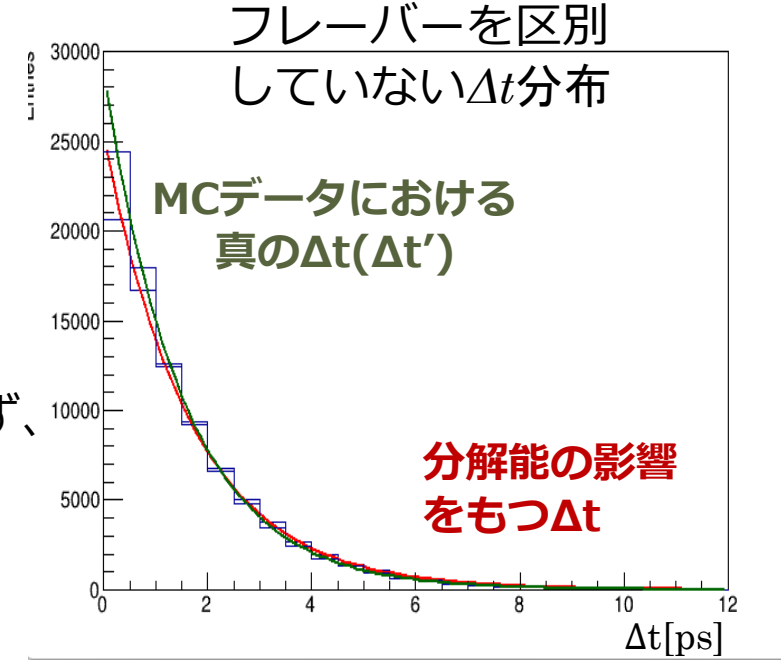
CP非保存の精密な測定において、崩壊点再構成
した際の位置分解能の見積もりが必要。

Bメソンの時間発展は Δt 分解能の影響を考慮するため
以下の確率密度関数をフィットする。

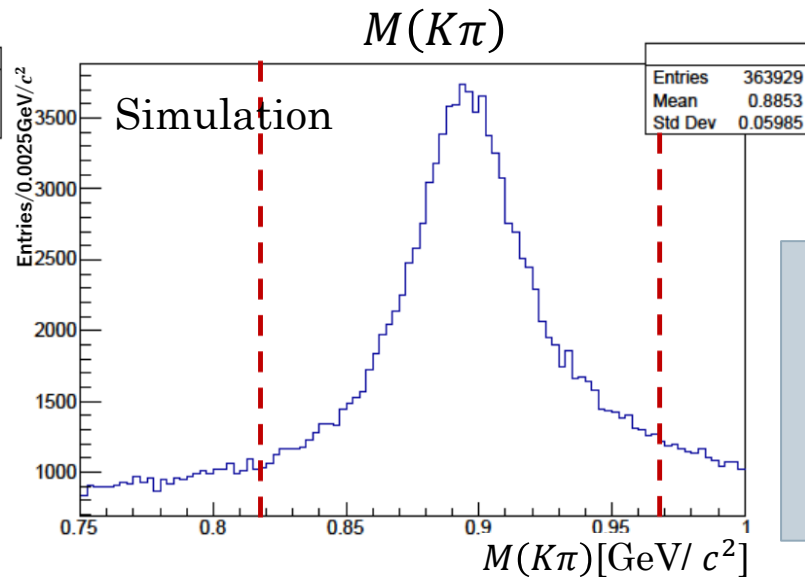
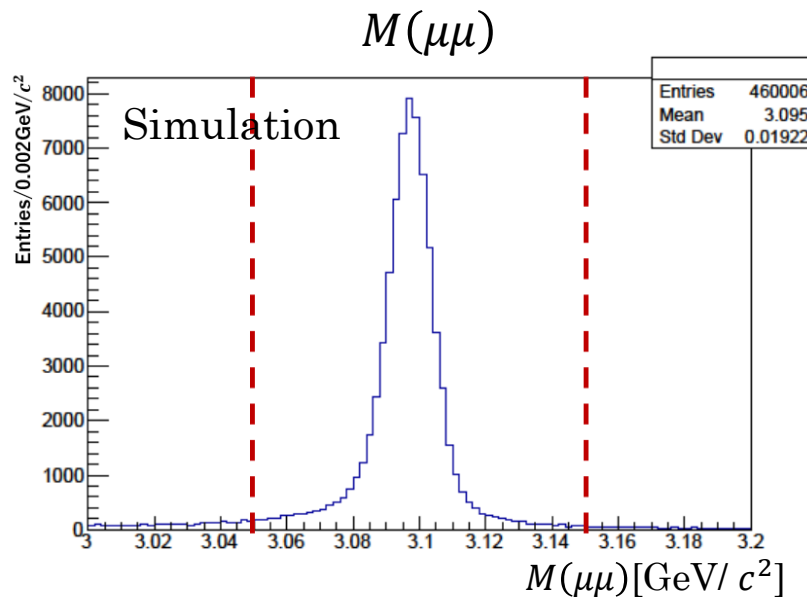
$$P_{exp}(\Delta t) = \int \underbrace{P(\Delta t')}_{\Delta t' \text{の確率分布}} \underbrace{R(\Delta t - \Delta t')}_{\Delta t \text{ 分解能を定式化した分解能応答関数} R} d\Delta t'$$

$R(\Delta t - \Delta t')$ が機能するか確かめるにはフレーバーを区別せず、

$P(\Delta t) = \frac{e^{-\frac{|\Delta t|}{\tau_{B^0}}}}{4\tau_{B^0}}$ でBメソンの寿命 τ_{B^0} をフィットで求め、
値をチェックする。



$B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0} (\rightarrow K^+ \pi^-)$ 崩壊の事象再構成



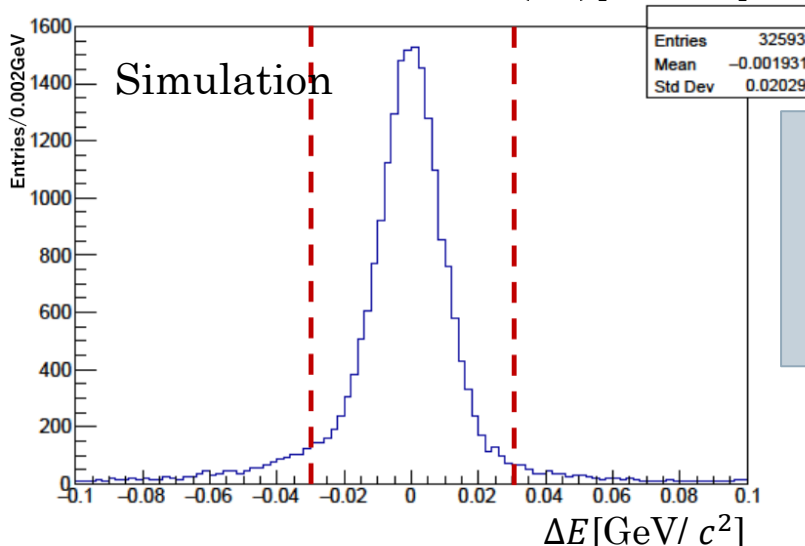
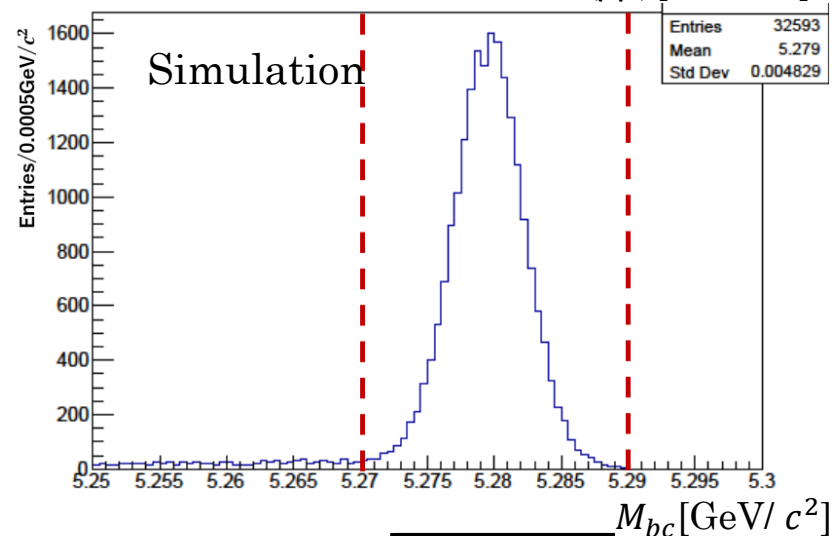
再構成には $Y(4S) \rightarrow B^0 \bar{B}^0$ 二体反応に特有の運動学的条件を利用する。

$$J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

$$3.05 \text{ GeV}/c^2 < M(\mu\mu) < 3.15 \text{ GeV}/c^2$$

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

$$0.817 \text{ GeV}/c^2 < M(K\pi) < 0.967 \text{ GeV}/c^2$$



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

$$5.29 \text{ GeV}/c^2 < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}/c^2,$$

$$-0.03 \text{ GeV} < \Delta E < 0.03 \text{ GeV}$$

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

$$M_{bc} = \sqrt{E_{beam}^2 - p_B^2}$$

$$\Delta E = E_B - E_{beam}$$

1. フレーバー誤認率の評価(MC)

事象生成時のフレーバーが B^0 の事象のみと \bar{B}^0 の事象のみのときで、それぞれFast Boosted Decision Treeによるフレーバータグを適用して識別させた。

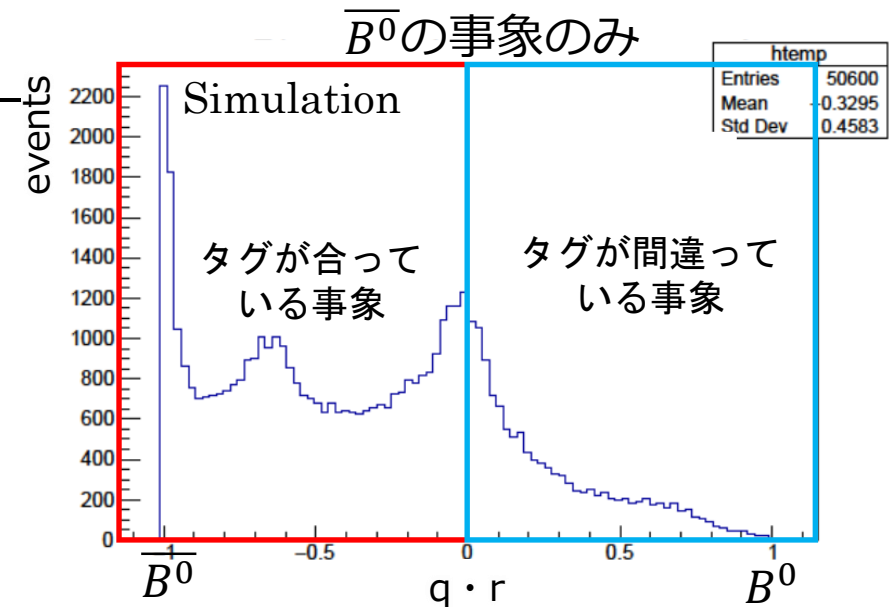
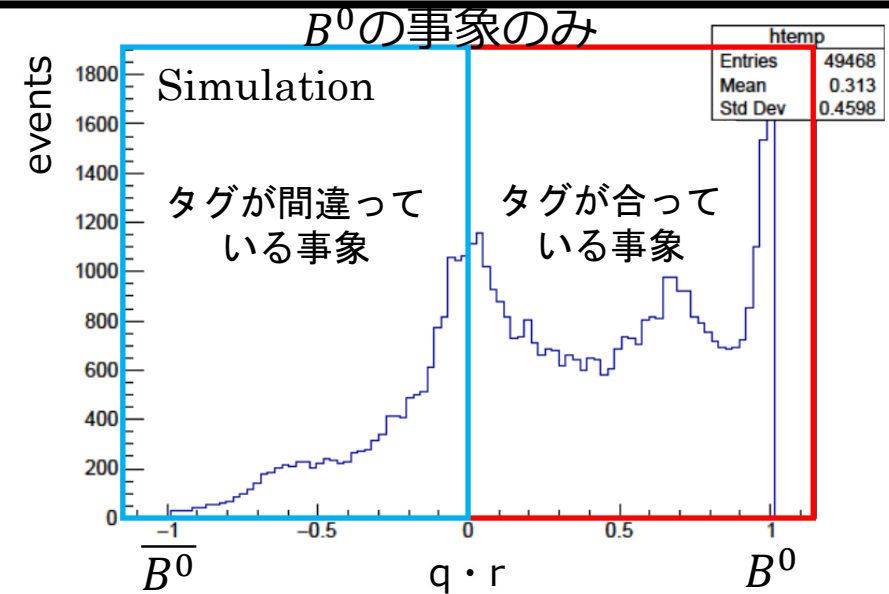
q : B^0 と \bar{B}^0 を識別を表す。 $q = 1$ は B^0 、 $q = -1$ は \bar{B}^0 を示す。

r : Flavor Tagの確からしさ。 $0 < r < 1$ で、 0 は識別できず、 1 は確実にタグしていることを表す。

フレーバータグが間違っている事象数からフレーバー誤認率 w を計算した。

フレーバータグの性能を表すのに効率 ε と w を用い、以下の式で計算される。

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



$B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ 崩壊モードのEffective tagging efficiency

Belleの例にならい、事象を r の値が $0.1 < r$ の $l = 1 \sim 6$ の6つのビンに場合分けした、それぞれの ε 、 w 、 ε^{eff} を以下の表にまとめた。

ε : フレーバータグの効率。

w : フレーバ-誤認率。

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

l	r	ε_l	w_l	ε_l^{eff}
1	0.100 ~ 0.250	0.1642 ± 0.0012	0.3927 ± 0.0038	0.0076 ± 0.0004
2	0.250 ~ 0.500	0.1963 ± 0.0012	0.2971 ± 0.0032	0.0323 ± 0.0008
3	0.500 ~ 0.625	0.1058 ± 0.0010	0.2081 ± 0.0039	0.0360 ± 0.0008
4	0.625 ~ 0.750	0.1154 ± 0.0010	0.1445 ± 0.0032	0.0584 ± 0.0009
5	0.750 ~ 0.875	0.0867 ± 0.0009	0.0885 ± 0.0030	0.0587 ± 0.0009
6	0.875 ~ 1.000	0.1423 ± 0.0011	0.0241 ± 0.0013	0.1289 ± 0.0011

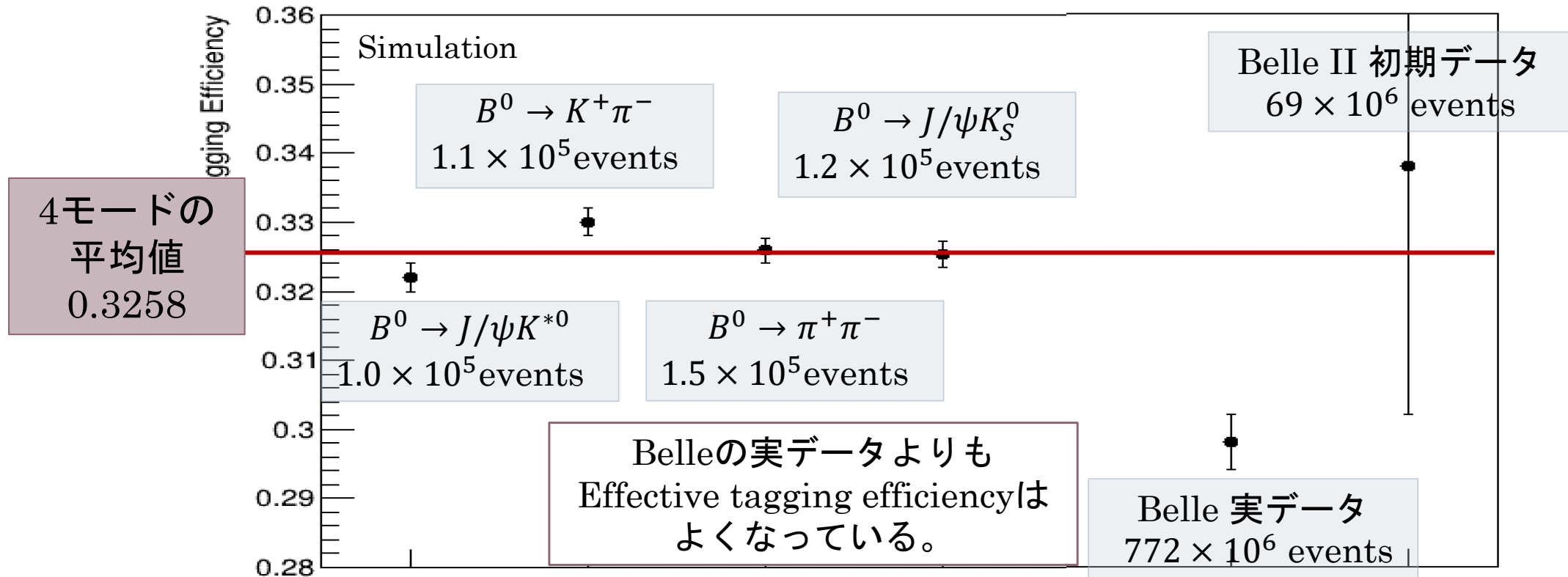
$B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$ 崩壊のEffective Tagging Efficiencyは、

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

Effective tagging efficiencyの比較

終状態の粒子数の違いや、Flavor specific状態とCP固有状態と異なっていると、Flavor Tagが影響を受けるか調べた。

4モードの平均は0.3258。各モードの値は平均値から 2σ 以内であり、顕著な差は見られなかった。



Belle : Phys. Rev. Lett. **108**, 171802 (2012)

Belle II: F. Abudinén et al. (Belle II), arXiv:2008.02707, To appear in EPJC

混合のパターンからのフレーバー誤認率

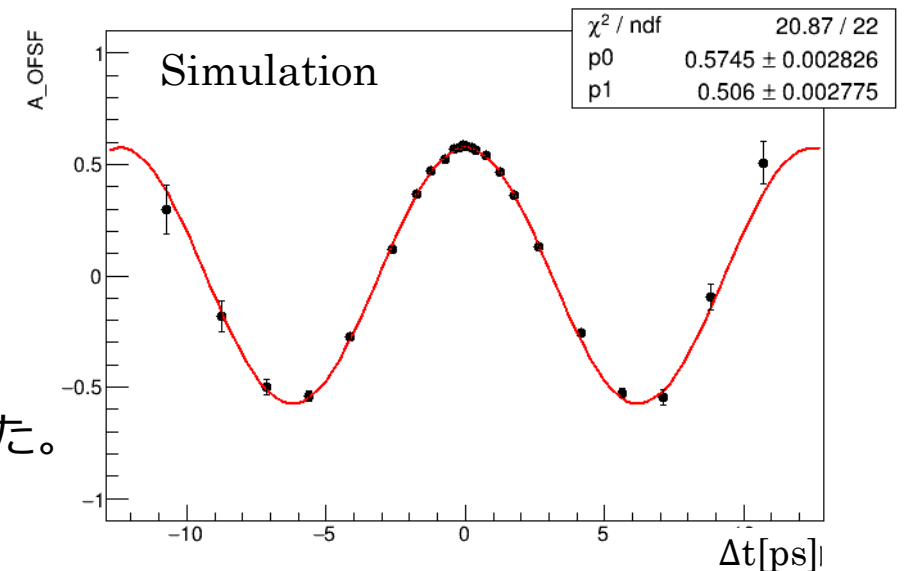
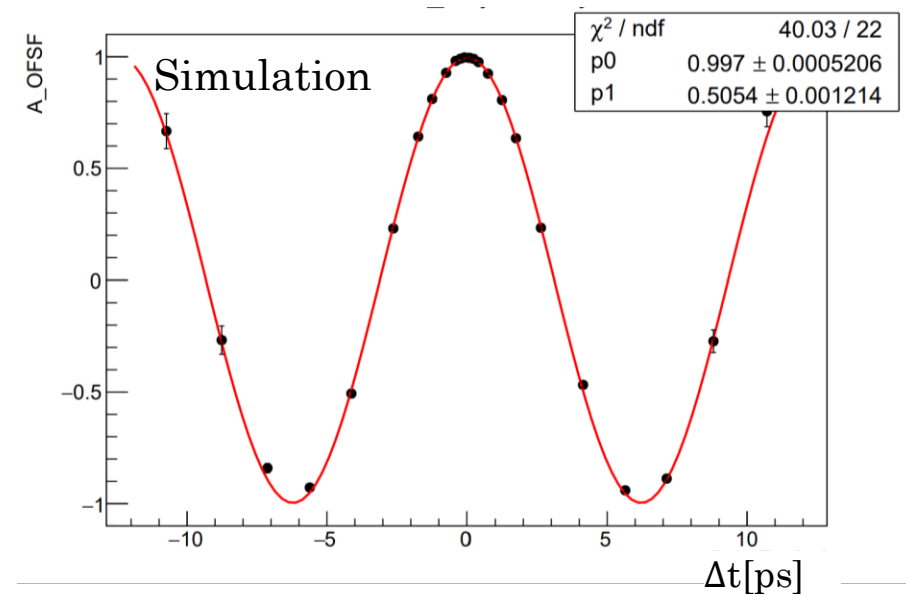
- ここで時間差はMCデータによる真の Δt を用いる。
- 事象数 2.0×10^6 events

事象生成時のフレーバーを参照した場合

- fit結果 : $1 - 2w = 0.99701 \pm 0.00052$
- 誤差はMCの統計によるものなので小さい。
- 期待される値 1との差は当面問題にならない。

Flavor Tagを適用した場合 ($r : 0.1 \sim 1.0$)

- fit結果 : $1 - 2w = 0.5745 \pm 0.0028$
- この時のフレーバー誤認率は
 $w = 0.2128 \pm 0.0014$
- 既に述べた Δt によらない方法で求めると、
 $w = 0.2113 \pm 0.0011$
- 独立した2つの方法でチェックし、一致した結果を得た。



2. Δt 分解能

Δt 分解能の影響を考慮するため以下の確率密度関数をフィットし、Bの寿命を抽出する。

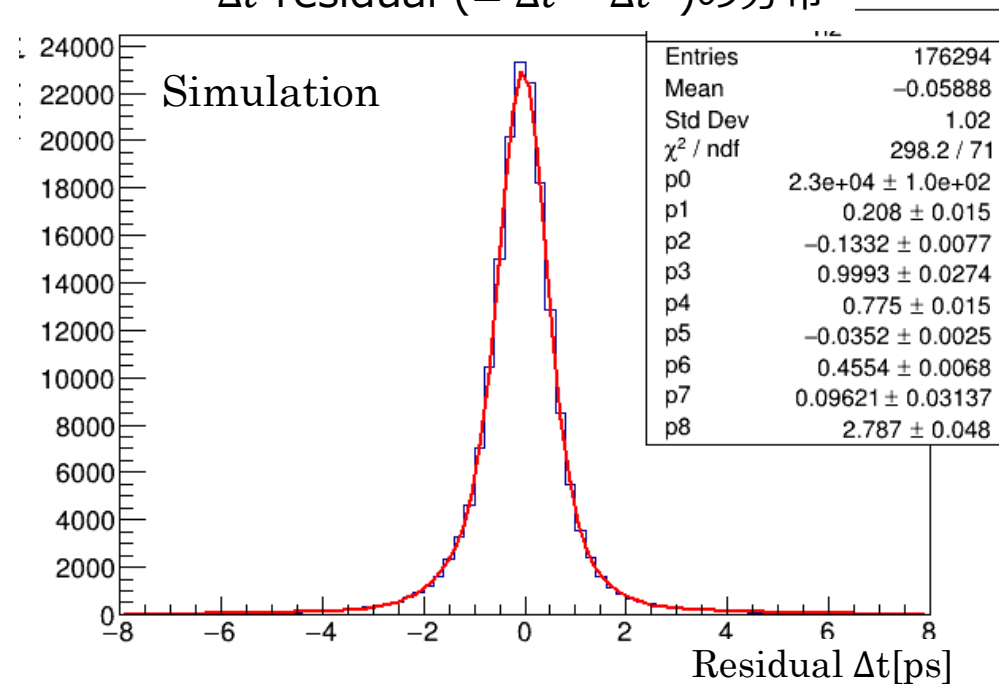
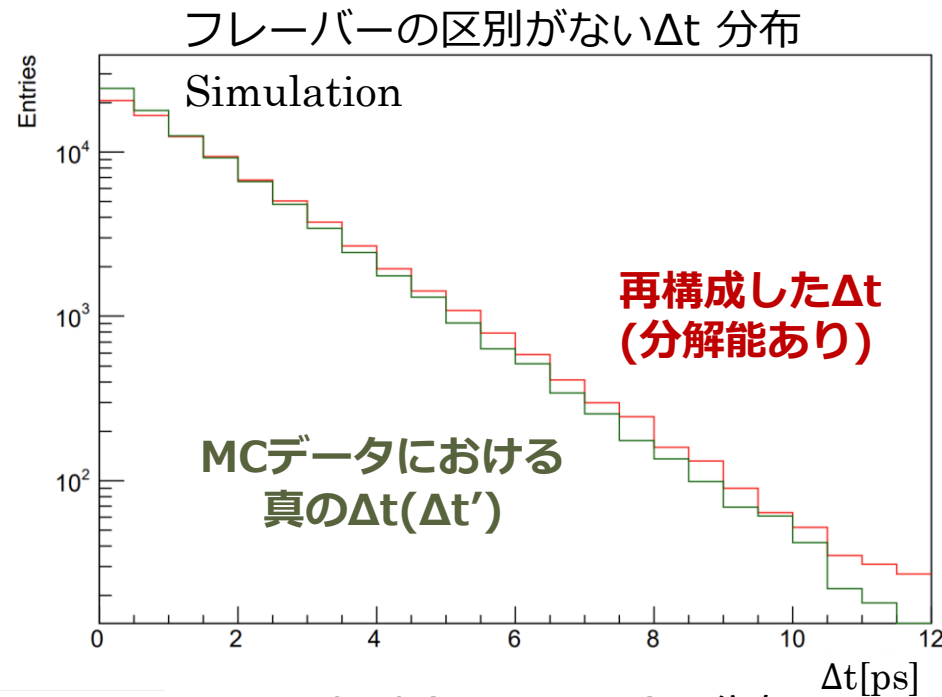
$$P_{exp}(\Delta t) = \int \underbrace{P(\Delta t')}_{\Delta t \text{の確率分布}} \underbrace{R(\Delta t - \Delta t')}_{\Delta t \text{ 分解能を定式化した分解能応答関数} R} d\Delta t', \quad P(\Delta t) = \frac{e^{-\frac{|\Delta t|}{\tau_{B^0}}}}{4\tau_{B^0}}$$

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

3つの正規分布を足し合わせたモデルでフィットし、分解能応答関数 $R(\Delta t - \Delta t' = \Delta t'')$ とする。

$$R(\Delta t'') = N(f_1 G_1(\Delta t'', \mu_1, \sigma_1) + f_2 G_2(\Delta t'', \mu_2, \sigma_2) + (1 - f_1 - f_2) G_3(\Delta t'', \mu_3, \sigma_3))$$

$$G_i(\Delta t'', \mu_i, \sigma_i) = \frac{1}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\Delta t'' - \mu_i)^2}{\sigma_i^2}\right)$$



MCデータでの τ_{B^0} の抽出

事象数 2.0×10^6 events

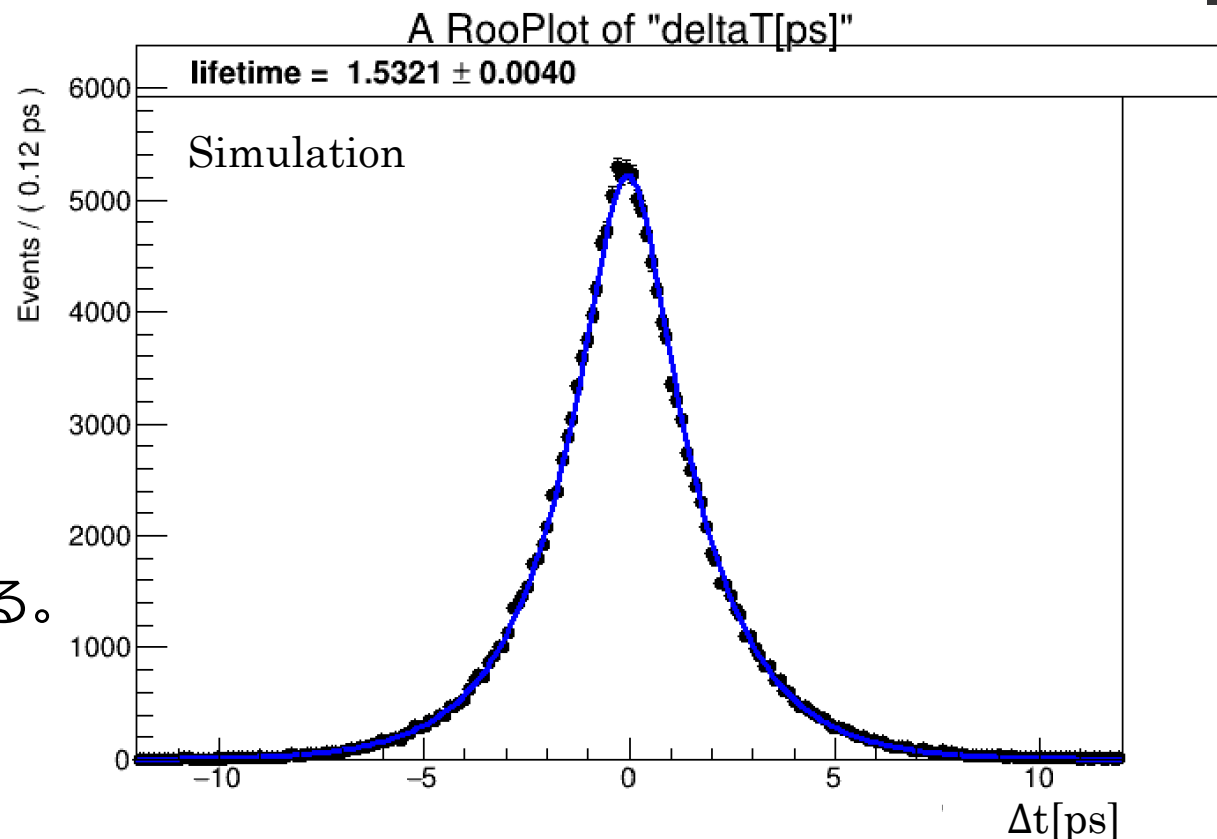
前のスライドの得た $R(\Delta t - \Delta t')$ を用いた
確率密度関数を適用する。

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

→抽出された B^0 の寿命

$$\tau_{B^0} = 1.532 \pm 0.004 \text{ ps}$$

MCの入力値 $\tau_{B^0} = 1.525 \text{ ps}$ と一致する。



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対称性の破れの測定に重要であるフレーバー誤認率と Δt の分解能の評価を行った。
- フレーバータグの性能の評価を2つの方法で行った。
 - 各崩壊モードの間でフレーバータグの性能の顕著な差はみられなかった。
 - 2つの方法で求めた誤認率は一致し、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 Δt 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 Δt 分布をフィットし、B メソンの寿命 τ_B を抽出した。
 - MCシミュレーションの入力値と一致し、実データに応用可能であることがわかった。