

Observation of Mixing-induced CP Violation in the Neutral B Meson System

B physics seminar
Eriko Kato

復習

• CKM 行列 と CP対称性の破れ

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = V \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}.$$

弱い相互作用固有状態

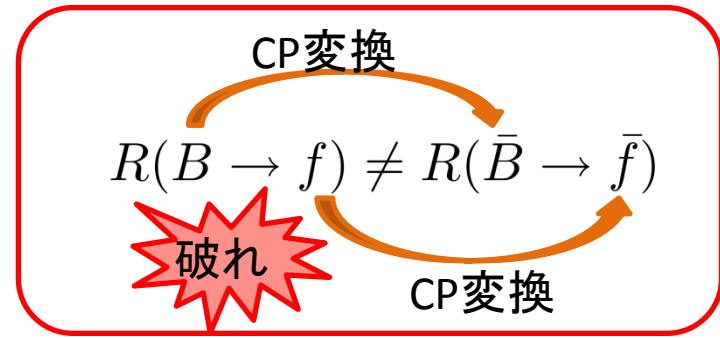
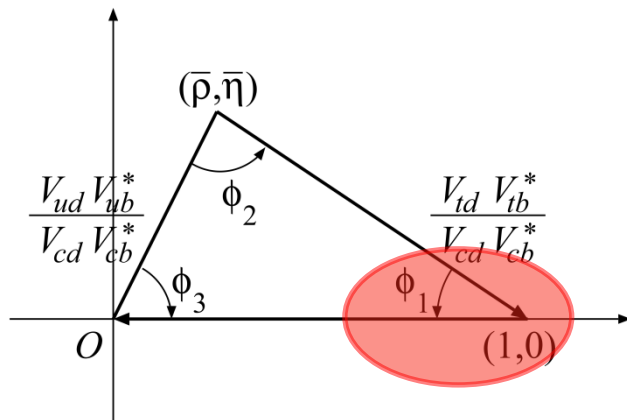
質量固有状態

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \xrightarrow{\sum_i V_{ij} V_{ik}^* = \delta_{jk}}$$

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0.$$

ユニタリティー

$$V \simeq \begin{pmatrix} 1 - (\lambda^2/2) & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - (\lambda^2/2) & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}.$$



直接的CP対称性の破れ

- 直接的 CP 対称性の破れは、崩壊にお互いに複素位相が異なる複数の振幅が寄与することによって生じる。

∴ 中性だけでなく荷電 B でも生じうる。

例えば2個の異なる寄与のとき:

$$A(B \rightarrow f) = |D_1|e^{i\phi_1}e^{i\delta_1} + |D_2|e^{i\phi_2}e^{i\delta_2}$$

$$A(\bar{B} \rightarrow \bar{f}) = |D_1|e^{-i\phi_1}e^{i\delta_1} + |D_2|e^{i\phi_2}e^{i\delta_2}$$

$|D_i|$: 振幅の絶対値、
 ϕ_i : 弱い相互作用の位相
 δ_i : 強い相互作用の位相

$$\begin{aligned} a_{CP}(t) &\equiv \frac{\Gamma_{\bar{B} \rightarrow \bar{f}_{CP}}(t) - \Gamma_{B \rightarrow f_{CP}}(t)}{\Gamma_{\bar{B} \rightarrow \bar{f}_{CP}}(t) + \Gamma_{B \rightarrow f_{CP}}(t)} \\ &= \frac{2r \sin \Delta\phi \sin \Delta\delta}{1 + r^2 + 2r \cos \Delta\phi \cos \Delta\delta} \end{aligned}$$

$$\Delta\phi \equiv \phi_1 - \phi_2$$

$$\Delta\delta \equiv \delta_1 - \delta_2$$

$$r = |D_2/D_1|$$

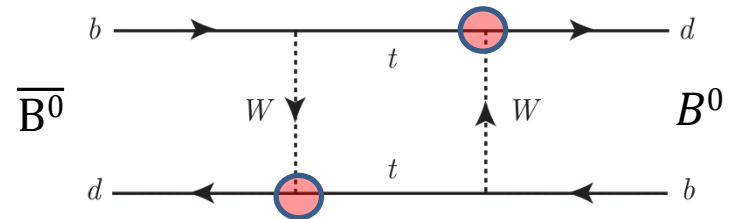
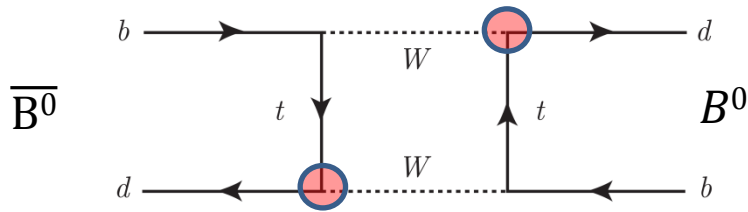
直接的な CP の破れが出現するのは

弱い相互作用の位相差 $\Delta\phi$ 、
強い相互作用の位相差 $\Delta\delta$ 、
2つの過程の振幅の比 r

} の全てがゼロでないとき

間接的CP対称性の破れ

$B^0 - \bar{B}^0$ 混合に寄与する V_{td} の複素位相によって CP 対称性が破れる



$$\Gamma_{B \rightarrow f_{CP}}(t) \neq \Gamma_{\bar{B} \rightarrow f_{CP}}(t).$$

$$a_{CP}(t) \equiv \frac{\Gamma_{\bar{B} \rightarrow f_{CP}}(t) - \Gamma_{B \rightarrow f_{CP}}(t)}{\Gamma_{\bar{B} \rightarrow f_{CP}}(t) + \Gamma_{B \rightarrow f_{CP}}(t)}$$

$$= \eta_{CP} \sin 2\varphi_1 \sin \delta m t$$

cp固有の終状態

もともと
背景事象少ない

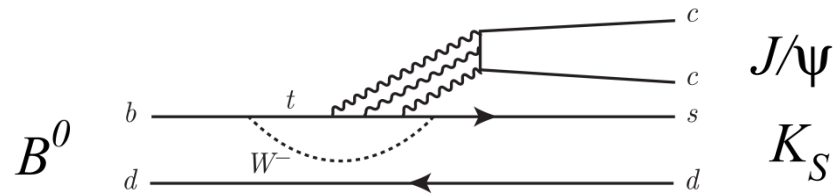
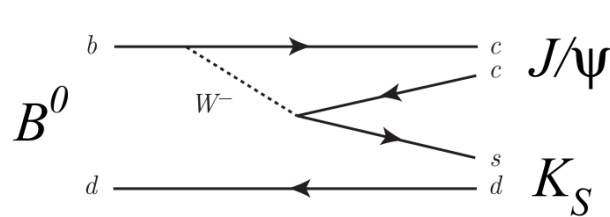
- $B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0$
- $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$
- $K_S^0 \rightarrow \pi^0 \pi^0$
- $B^0 \rightarrow \psi(2S) K_S^0$
- $\psi(2S) \rightarrow \ell^+ \ell^-$
- $\psi(2S) \rightarrow J/\psi \pi^+ \pi^-$
- $B^0 \rightarrow \chi_{c1} K_S^0$
- $B^0 \rightarrow \eta_c K_S^0$
- $\eta_c \rightarrow K_S^0 K^\pm \pi^\mp$
- $\eta_c \rightarrow K^+ K^- \pi^0$
- $B^0 \rightarrow J/\psi K^{*0}$



ここまで前回のお話。

B → J/ψ K_S

- ペンギンダイアグラムの寄与はsin2φ₁測定では無視できる。



- 振幅1つ(または同じweak phase)

➡ 間接的CP対称性の破れ

$$\langle J/\psi K^0 | \mathcal{H}_t | B^0 \rangle = V_{cb}^* V_{cs} A^t,$$

$$|A(B^0 \rightarrow J/\psi K_S)| = |A(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S)|$$

$$a_{CP}(t) \equiv \frac{\Gamma_{\bar{B} \rightarrow f_{CP}}(t) - \Gamma_{B \rightarrow f_{CP}}(t)}{\Gamma_{\bar{B} \rightarrow f_{CP}}(t) + \Gamma_{B \rightarrow f_{CP}}(t)}$$

$$\frac{A(B^0 \rightarrow J/\psi K_S)}{A(\bar{B}^0 \rightarrow J/\psi K_S)} = \frac{V_{cb} V_{cs}^*}{V_{cb}^* V_{cs}}$$

$$= \eta_{CP} \sin 2\varphi_1 \sin \delta m t$$

Flavor tagging

- ボーズアインシュタイン統計

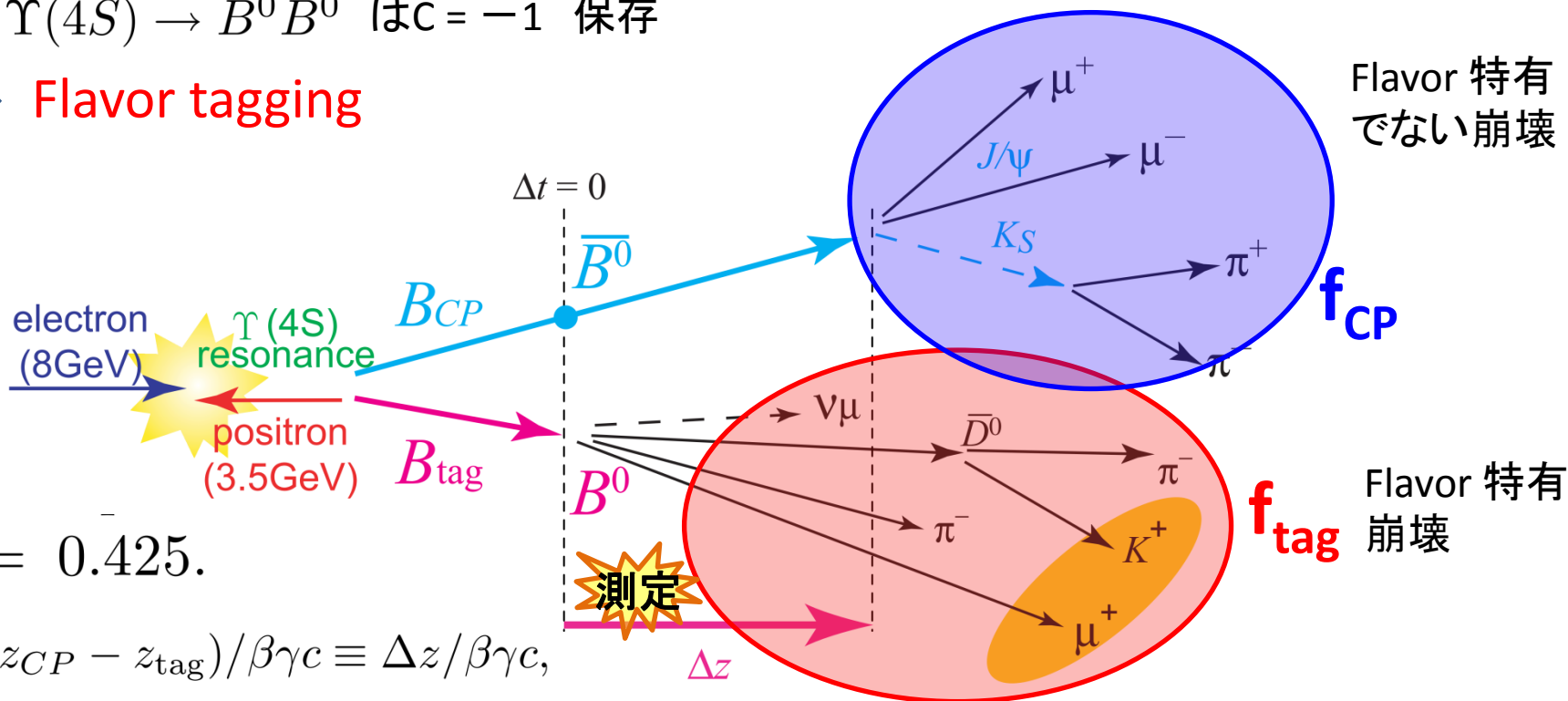
$$|\Psi(t=0)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[|B^0(\vec{k})\bar{B}^0(-\vec{k})\rangle - |B^0(-\vec{k})\bar{B}^0(\vec{k})\rangle \right] \quad (\text{反対称})$$

$$C|\Psi(t)\rangle = -|\Psi(t)\rangle$$

$$|\Psi(t)\rangle = e^{-t/\tau_{B^0}} |\Psi(t=0)\rangle,$$

$\Upsilon(4S) \rightarrow B^0\bar{B}^0$ は $C = -1$ 保存

➔ Flavor tagging



$$\beta\gamma = 0.425.$$

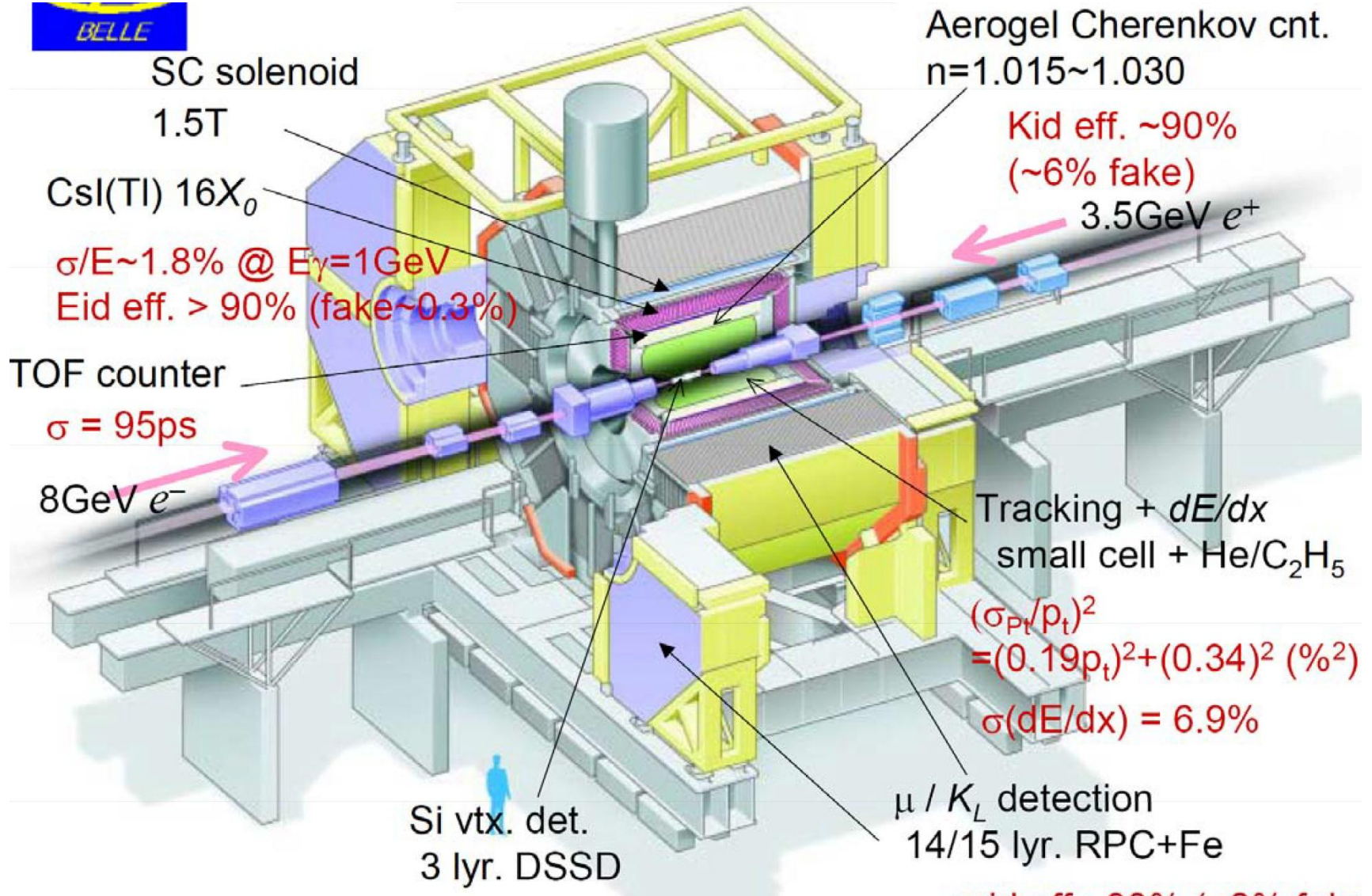
$$\Delta t \simeq (z_{CP} - z_{tag})/\beta\gamma c \equiv \Delta z/\beta\gamma c,$$

B \rightarrow J/ ψ K_s ポイント

目標: CP対称性の破れ, 各flavorの $\Gamma(\Delta t_{cp})$ 非対称性をみる。

1. Flavor tagging の評価
2. B中間子の寿命測定
3. CP固有状態でない終状態でCP非対称性見えないことの確認。

Belle検出器



f_{CP} side 再構成: J/ψ

□ J/ψ 再構成

信号: $J/\psi \rightarrow \mu + \mu^-$ と $e + e^-$.

背景事象少ない \rightarrow 条件緩和して選択効率UP

cf.) 条件: ECL energy depositが minimum ionizing と一致。

■ μ ID, electron ID: dE/dx , E/p

■ 測定悪い trk or IR から離れた trk:

IPからの最近接点の Z 成分 $\Delta Z < 5\text{cm}$

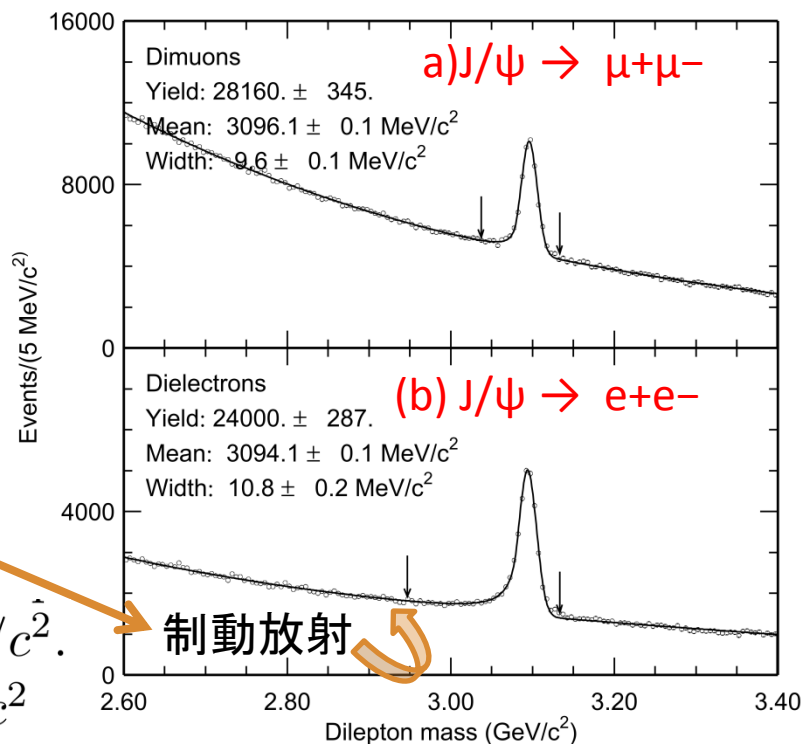
制動放射 補正: $e+e^-$ 方向の γ を 50mrad 以内のものを補正。

$$M_{\mu^+\mu^-}^2 = \left(\sqrt{M_{\mu^+}^2 + |\vec{p}_{\mu^+}|^2} + \sqrt{M_{\mu^-}^2 + |\vec{p}_{\mu^-}|^2} \right)^2 - |\vec{p}_{\mu^+} + \vec{p}_{\mu^-}|^2$$

$$-150 \leq M_{e^+e^-} - M_{J/\psi(\psi(2S))} \leq 36 \text{ MeV}/c^2.$$

$$-60 \leq M_{\mu^+\mu^-} - M_{J/\psi(\psi(2S))} \leq 36 \text{ MeV}/c^2$$

J/ψ 再構成

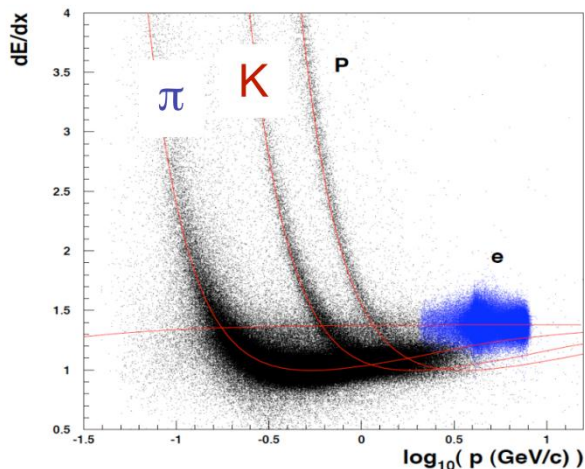


K π 同定

- Likelihood 分布

$$P(K/\pi) = \frac{L(K)}{L(K) + L(\pi)}$$

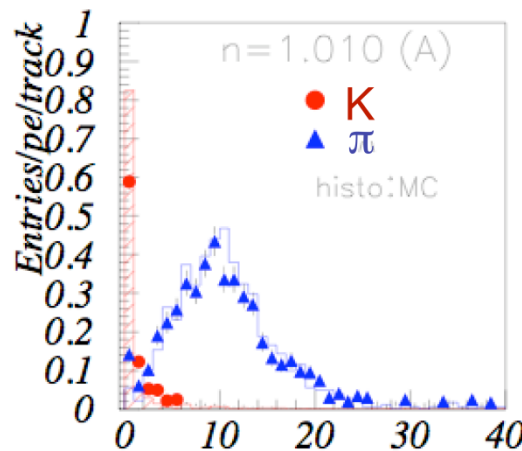
$P(K/\pi) > 0.6$ で90% K 選択効率
6% π misID



ドリフトチェンバー

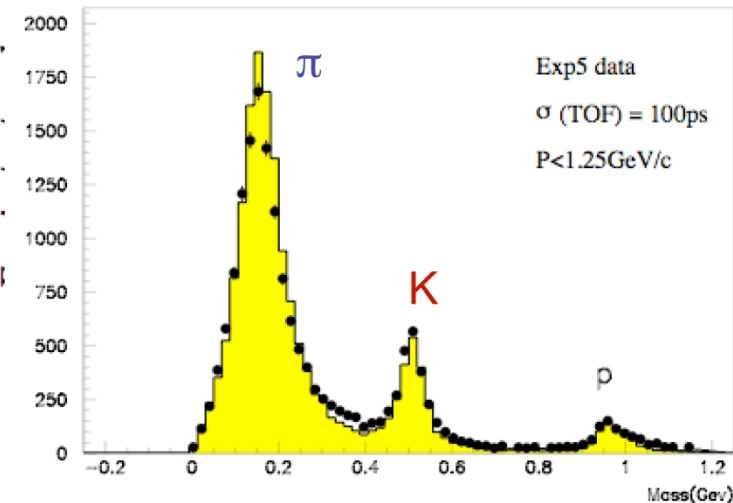
エネルギー損失 dE/dx

$\sigma(dE/dx) = 6.9\%$



エアロジェルチェレンコフ

光電子数



飛行時間検出器

飛行時間

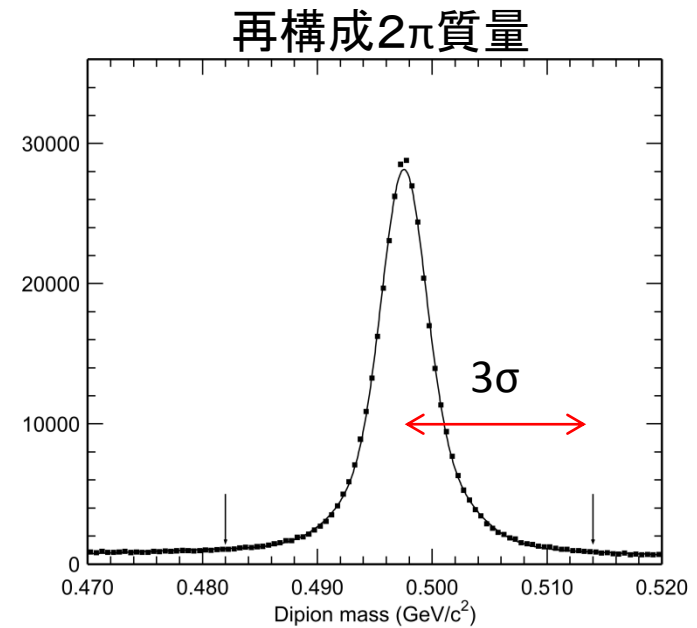
時間分解能=95ps

f_{CP} side 再構成: K_S

- $K_S \rightarrow \pi + \pi^-$

$$M_{\pi^+\pi^-}^2 = \left(\sqrt{M_{\pi^+}^2 + |\vec{p}_{\pi^+}|^2} + \sqrt{M_{\pi^-}^2 + |\vec{p}_{\pi^-}|^2} \right)^2 - |\vec{p}_{\pi^+} + \vec{p}_{\pi^-}|^2.$$

- K_S 信号の 3σ を選択



f_{CP} side 再構成: B

- B候補は

$$|M_{bc} - M_{B0}| < 3.5\sigma$$

$$|\Delta E| < 50\text{MeV}$$

で選択

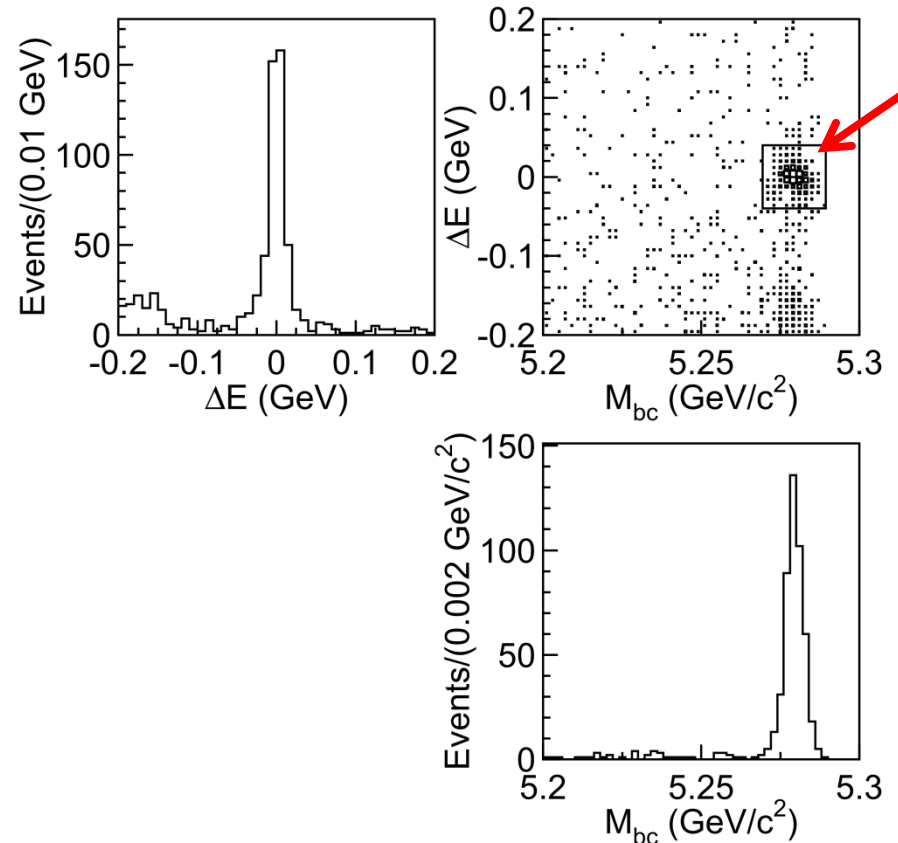
ΔE と M_{bc} を同時fit

$$\Delta E \equiv E_B^{\text{cms}} - E_{\text{beam}}^{\text{cms}}$$

$$M_{bc} \equiv \sqrt{(E_{\text{beam}}^{\text{cms}})^2 - (p_B^{\text{cms}})^2}$$

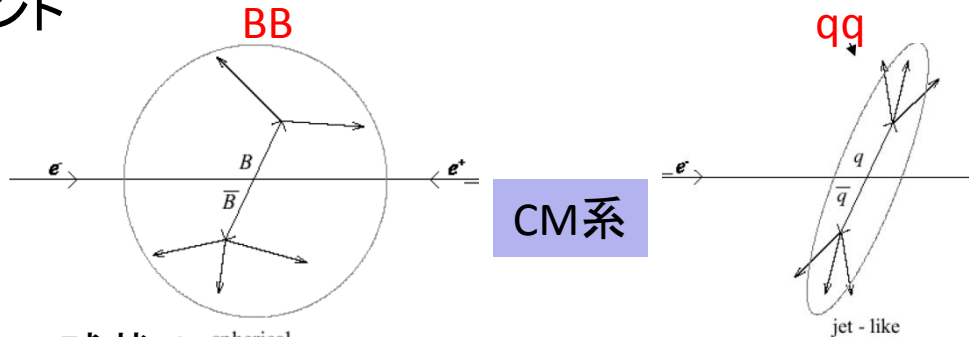
beam: ビームエネルギー (Y(4s) 静止系)

B: 再構成されたB (Y(4s) 静止系)



Continuum background suppression

■ ポイント



球状のevent shape

jet状のevent shape

■ Thrust

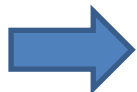
- JetのLongitudinal方向の運動量を最大化する軸を選択: \hat{T}
- Jetの鋭さTを測る。

$$T = \frac{\sum_i \hat{T} p_i}{\sum_i p_i}$$

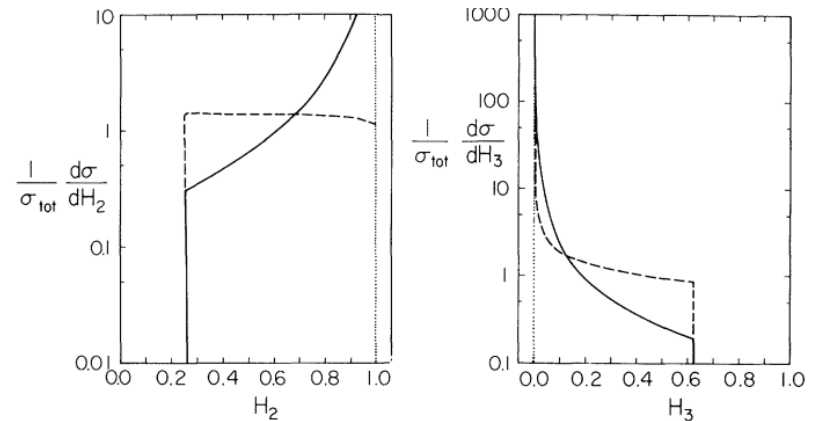
■ R2

$$R2 = \frac{H_2}{H_0}, \quad H_l = \sum_{i,j} \frac{|p_i| |p_j|}{E_{vis}^2} P_l(\cos \theta_{ij})$$

- event shapeの違いを級数展開した各モードでみる。



To 黒板



—— BB
 - - - qq

Flavor tagging

■ Semi leptonic decayの高運動量レプトンの荷電。

$$\overline{B^0} \rightarrow X l^- \bar{\nu} \quad \text{vs} \quad B^0 \rightarrow X l^+ \nu.$$

■ Dominant decayのK中間子の荷電

$$\overline{B^0} \rightarrow X K^- \quad (b \rightarrow c \rightarrow s) \quad \text{vs} \quad B^0 \rightarrow X K^+ \quad (\bar{b} \rightarrow \bar{c} \rightarrow \bar{s})$$

■ その他

$c \rightarrow s l^+ \nu$ の低運動量レプトン

cascade decay $b \rightarrow c \rightarrow s$ 後の $\Lambda(\text{usd}) \rightarrow p \pi^-$

$$B^0 \rightarrow D^{*-} (\pi^+, a^+, \rho^+) \quad \& \quad D^{*-} \rightarrow \overline{D^0} \pi^- \quad (\text{slow pion})$$

Flavor tagging 評価

$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon = \text{tagging 効率} \end{array} \right.$

$\left\{ \begin{array}{l} w = \text{wrong tagging 確率} \end{array} \right.$

- 完璧に flavor tagging できるとしたら

$$A_{true} = \frac{n_{B^0} - n_{\overline{B^0}}}{n_{B^0} + n_{\overline{B^0}}}$$

- ε 、 w を考えると、

$$\left[\begin{array}{l} n_{B^0} = \varepsilon((1-w)n_{B^0} + wn_{\overline{B^0}}) \\ n_{\overline{B^0}} = \varepsilon((1-w)n_{\overline{B^0}} + wn_{B^0}) \end{array} \right.$$

$$A_{measured} = \frac{n_{B^0} - n_{\overline{B^0}}}{n_{B^0} + n_{\overline{B^0}}} = (1-2w)A_{true} \leftarrow w \text{ 中心値ずらす} \therefore \text{data 内で } w \text{ 評価が必要}$$

$$A_{measured} \text{ 統計誤差} \propto \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}}$$

$$\text{有為性} = \frac{A_{measured}}{\delta(A_{measured})} \propto (1-2w)\sqrt{\varepsilon N}$$

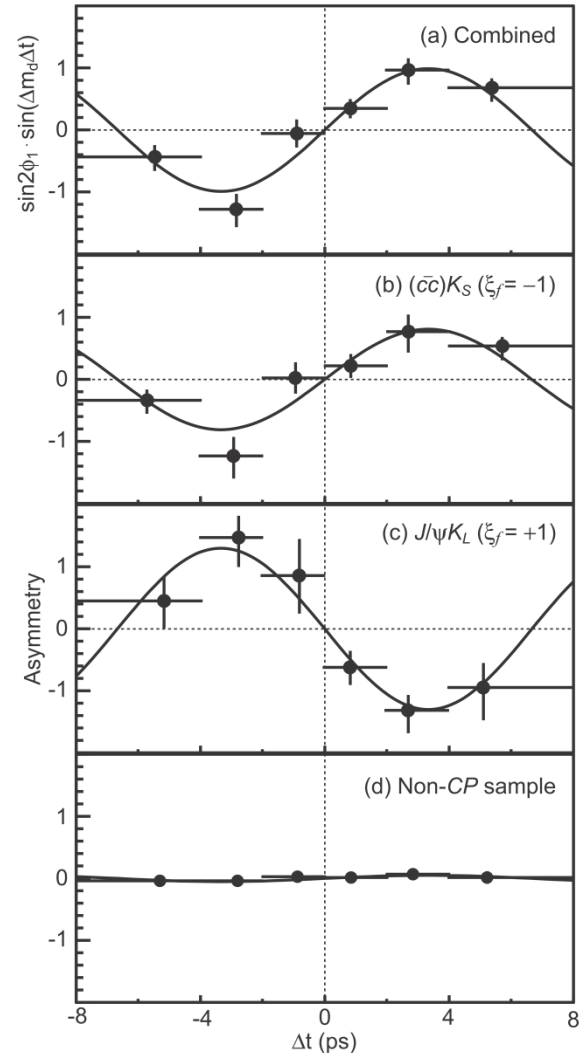
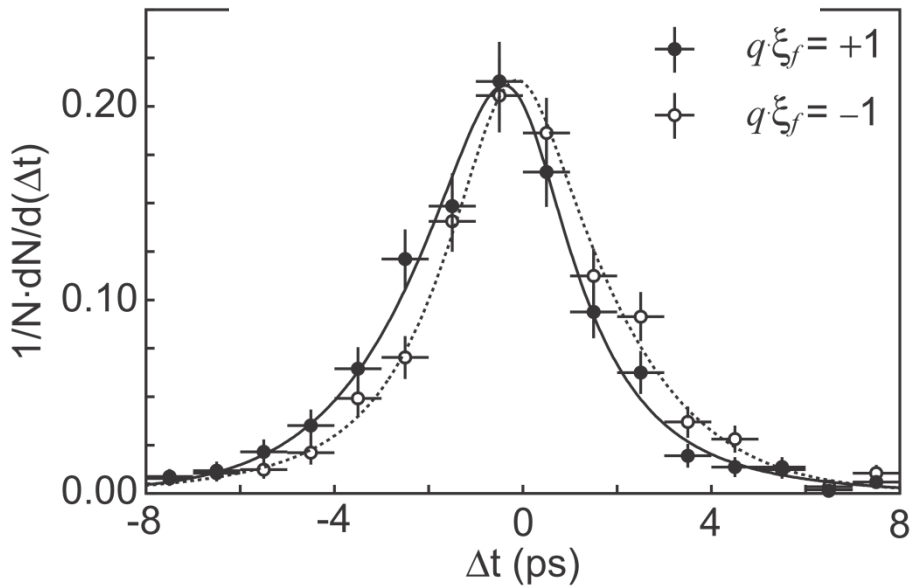
Effective efficiency

$$\varepsilon_{eff} \equiv \varepsilon(1-2w)^2$$

結果

| Sample | Events | $\sin 2\phi_1$ |
|---|--------|-----------------|
| ● $f_{\text{tag}} = B^0$ ($q = +1$) | 560 | 0.84 ± 0.21 |
| $f_{\text{tag}} = \bar{B}^0$ ($q = -1$) | 577 | 1.11 ± 0.17 |
| $(c\bar{c})K_S^0$ | 578 | 0.84 ± 0.17 |
| $J/\psi K_S^0(\pi^+\pi^-)$ | 387 | 0.81 ± 0.20 |
| $(c\bar{c})K_S^0$ except $J/\psi K_S^0(\pi^+\pi^-)$ | 191 | 1.00 ± 0.40 |
| $J/\psi K_L^0$ | 523 | 1.31 ± 0.23 |
| $J/\psi K^{*0}(K_S^0\pi^0)$ [36] | 36 | 0.97 ± 1.40 |
| All | 1137 | 0.99 ± 0.14 |

$$\sin 2\phi_1 = 0.99 \pm 0.14(\text{stat}).$$



全モード