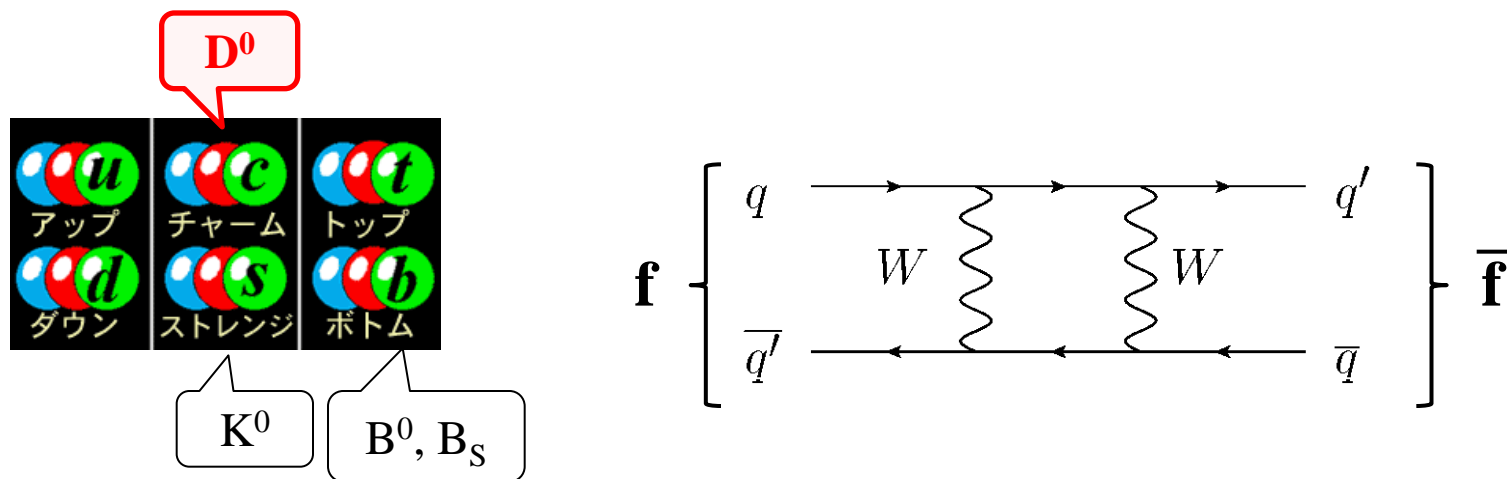


Evidence for D^0 - \bar{D}^0 mixing

Introduction

- 中性中間子では粒子 \leftrightarrow 反粒子の混合が生じる。
 - フレーバーの固有状態 \neq 質量の固有状態



D^0 中間子の混合

- アップタイプクォークの粒子・反粒子で構成
- 唯一未発見の混合現象(だった)。

→ 2007 年、Belle とBabar によって 3σ 以上の有意性で観測！

中間子混合

中間子混合のおさらい

質量の固有状態

$$|B_a\rangle = p |B^0\rangle + q |\overline{B^0}\rangle$$

$$|B_b\rangle = p |B^0\rangle - q |\overline{B^0}\rangle$$

時間発展

$$|B_a\rangle \rightarrow e_a(t) |B_a\rangle$$

$$|B_b\rangle \rightarrow e_b(t) |B_b\rangle$$

$$e_{a,b}(t) \equiv e^{-i\lambda_{a,b}t}$$

固有値

$$\lambda_{a,b} \equiv m_{a,b} - i\frac{\gamma_{a,b}}{2}$$

- 時刻0で生成されたBがt秒後には....

Original flavor

Opposite flavor

$$|B^0\rangle \rightarrow \frac{1}{2} \left[(e_a(t) + e_b(t)) |B^0\rangle + \frac{q}{p} (e_a(t) - e_b(t)) |\overline{B^0}\rangle \right]$$

$$|\overline{B^0}\rangle \rightarrow \frac{1}{2} \left[(e_a(t) + e_b(t)) |\overline{B^0}\rangle + \frac{p}{q} (e_a(t) - e_b(t)) |B^0\rangle \right]$$



固有値が等しくない場合 ($\lambda_a \neq \lambda_b$)、中間子混合が起こる。

Mixing parameter

中間子混合を表すパラメータを導入する。

$$\begin{aligned} x &\equiv \frac{m_a - m_b}{\gamma} \\ y &\equiv \frac{\gamma_a - \gamma_b}{2\gamma} = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2} \end{aligned}$$

$$\left(m \equiv \frac{m_a + m_b}{2}, \gamma \equiv \frac{\gamma_a + \gamma_b}{2} \right)$$

→ $x, y \neq 0$ であれば混合していることを示す。

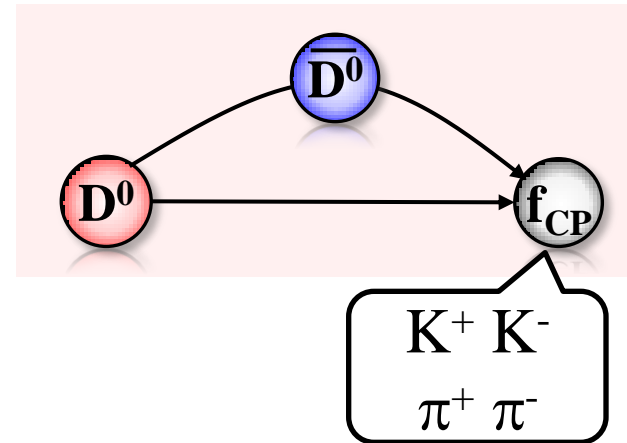
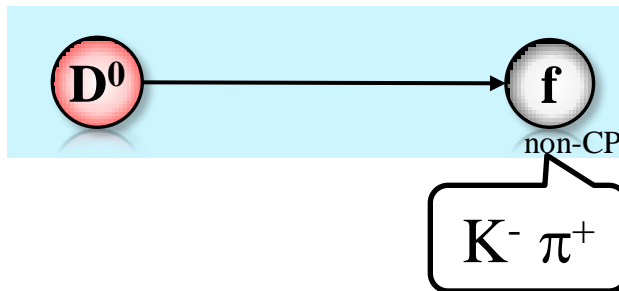
それぞれの中間子系でのx,y

- K 中間子 : $y \sim 1, x \sim 0.5$
- B 中間子 : $y \sim 0, x \sim 0.78$

→ D 中間子では、 x, y が非常に小さい ($\sim 10^{-3}$) ことが予想されており、観測が難しかった。

Measurement principle

- CP 固有状態 f_{CP} への崩壊で測定した見かけの寿命 $\tau(D^0 \rightarrow f_{\text{CP}})$ と実際の D^0 の寿命 $\tau(D^0 \rightarrow f_{\text{non-CP}})$ の差を測定する。



寿命の差の割合

$$y_{\text{CP}} \equiv \frac{\tau(D^0 \rightarrow f_{\text{nonCP}})}{\tau(D^0 \rightarrow f_{\text{CP}})} - 1$$

$$= y \cos \phi + \frac{1}{2} A_M x \sin \phi$$

$$= y \quad (\text{if } \phi = A_M = 0)$$

$$A_M \equiv \left| \frac{p}{q} \right|^2 - \left| \frac{q}{p} \right|^2, \quad \phi \equiv \arg \left(\frac{q \bar{A}_f}{p A_f} \right)$$

Apparent lifetime

CP 固有状態への崩壊するモードでの寿命を計算した。

崩壊振幅

$$\text{Amp}(D^0 \rightarrow f) \equiv A_f$$

$$\text{Amp}(\bar{D}^0 \rightarrow f) \equiv \bar{A}_f$$

$$A [D^0 \rightarrow f(t)] = e^{(-im - \frac{\gamma}{2})t} \left\{ A_f \cosh \left[(y + ix) \frac{\gamma t}{2} \right] - \frac{q}{p} \bar{A}_f \sinh \left[(y + ix) \frac{\gamma t}{2} \right] \right\}$$

$$A [\bar{D}^0 \rightarrow f(t)] = e^{(-im - \frac{\gamma}{2})t} \left\{ \bar{A}_f \cosh \left[(y + ix) \frac{\gamma t}{2} \right] - \frac{p}{q} A_f \sinh \left[(y + ix) \frac{\gamma t}{2} \right] \right\}$$

崩壊率

$$\rho \equiv \frac{q \bar{A}_f}{p A_f}$$

$$\begin{aligned} \Gamma &= |A [D^0 \rightarrow f(t)]|^2 \\ &= e^{-\gamma t} \frac{|A_f|^2}{2} \times \left\{ (1 + |\rho|^2) \cosh(y\gamma t) + (1 - |\rho|^2) \cos(x\gamma t) \right. \\ &\quad \left. - 2\text{Re}(\rho) \sinh(y\gamma t) + 2\text{Im}(\rho) \sin(x\gamma t) \right\} \end{aligned}$$

- 崩壊と混合にCP 非保存がないとすると...

$$\Gamma = |A_f|^2 e^{-\gamma(1 - \eta_f y)t}$$

$$A_f = \eta_f \bar{A}_f, \frac{q}{p} = 1$$

寿命がずれて見える！

Analysis method

粒子の寿命測定

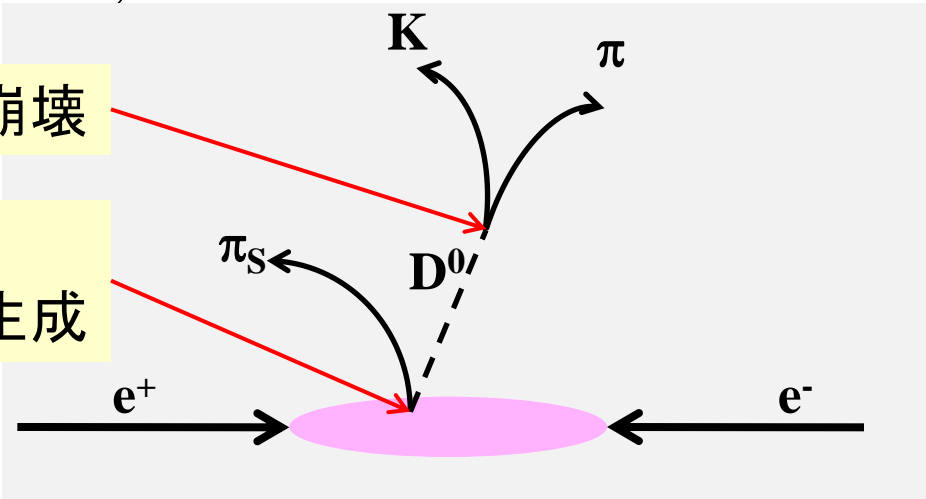
1. 粒子が生成されたことを確認して、
2. 崩壊するまでの時間を測定する

- $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi_s^+$

$$\begin{array}{l} \downarrow \\ \rightarrow K^+ K^-, \pi^+ \pi^-, K^- \pi^+ \end{array}$$

D^0 中間子が崩壊

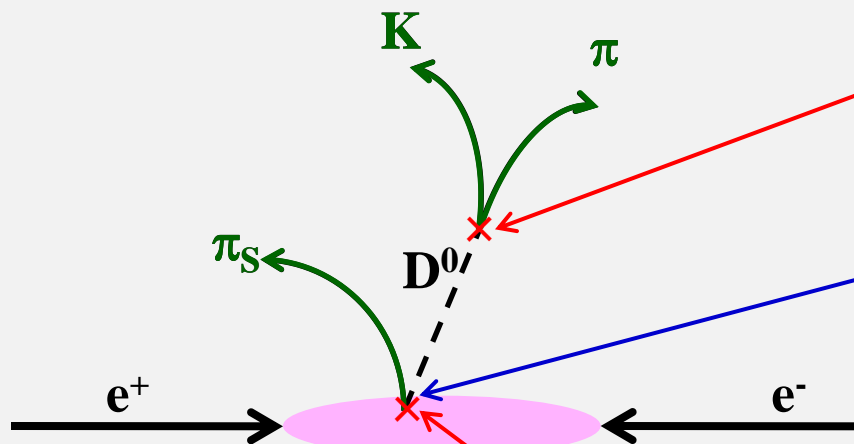
$D^{*+} \rightarrow D^0 \pi_s^+$
 D^0 中間子が生成



1. D^* から生じる π_s の電荷から D^0 を識別。

2. D^0 中間子の飛距離と運動量から、崩壊時間を測定。 $t = m_{D^0} \frac{\vec{L} \cdot \vec{p}}{p^2}$

Kと π の識別はBelleの標準的なPIDを使用
それぞれのトラックはSVDに2ヒット以上。



D^0 の崩壊点はvertex
constrained fitを用いて再構成

D^* の運動量 > 2.5 GeV (CM系)
(B崩壊からのDを除去)

D^0 の生成点は、再構成した D^0 の運動量方向と π_s のトラックが
ビーム衝突領域から生じていることを求める。(C.L. $> 10^{-3}$)

Variables for event selection

Dを選択するための変数

- Dの質量： M_{D^0}
- D*の解放エネルギー： $q = M_{D^*} - M_{D^0} - m_{\pi}$

B.G.の種類

1. Combinatorial B.G.
→ 寿命は0になる。
 2. True D^0 mesons combined with random slow pions
→ シグナルと同じ寿命になる。
 3. D^0 decays to 3 or more particles
 4. Other charm hadrons decay
→ 10~30 % 程、長い寿命になる。
- M_{D^0} と q の分布がMC とデータで一致しなかったため、データに合うようにB.G. の比率 とシグナルの幅を調整した。

Event selection

Event selection

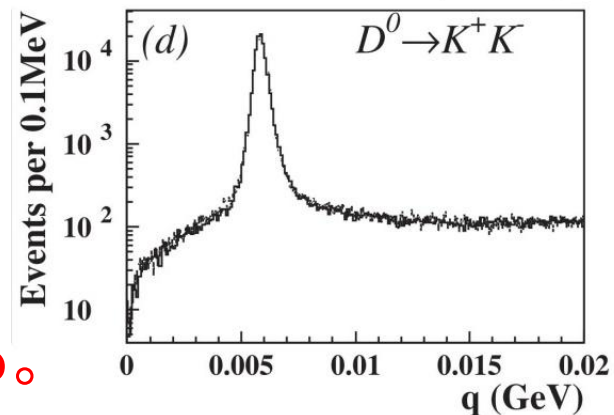
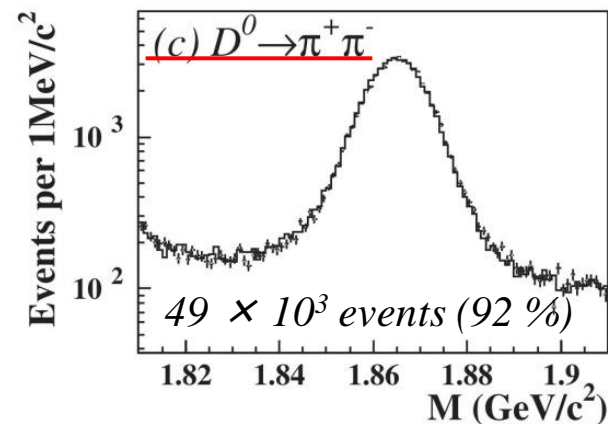
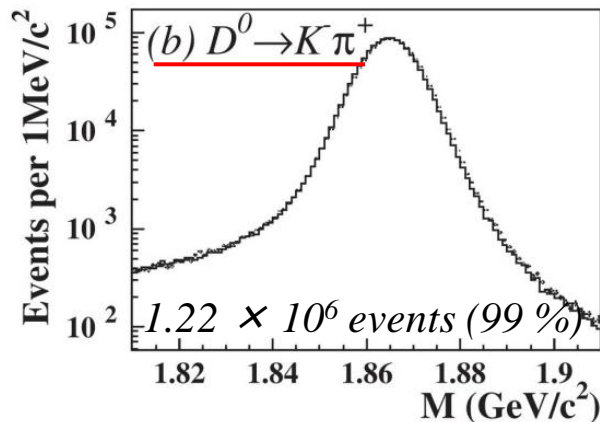
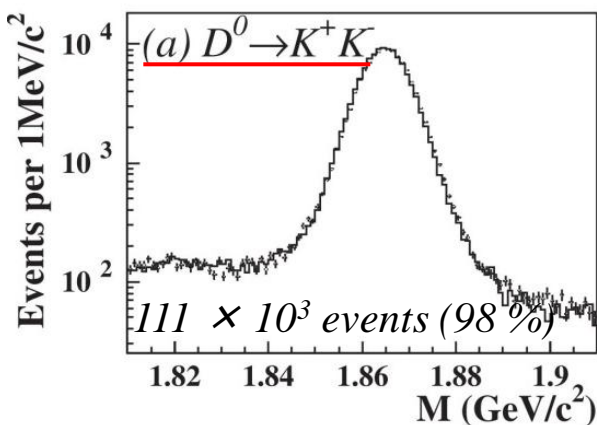
$$\frac{\Delta M_{D^0}}{\sigma_{M_{D^0}}} < 2.3$$

$$\sigma_{M_{D^0}}$$

$$|\Delta q| < 0.80 \text{ MeV}$$

$$\sigma_t < 370 \text{ fs}$$

- $\sigma_{M_{D^0}}$: 5.5 ~ 6.8 MeV
- σ_t は生成点と崩壊点の誤差行列からイベントごとに求める。
- y_{CP} の統計エラーが最小になるようにカットの範囲を決定。



→ データとtuned MC の分布は良く一致している。

フィット関数

3つのサンプルの崩壊時間 t 分布を同時に
binned maximum likelihood fit を行うことにより y_{CP} を求める。

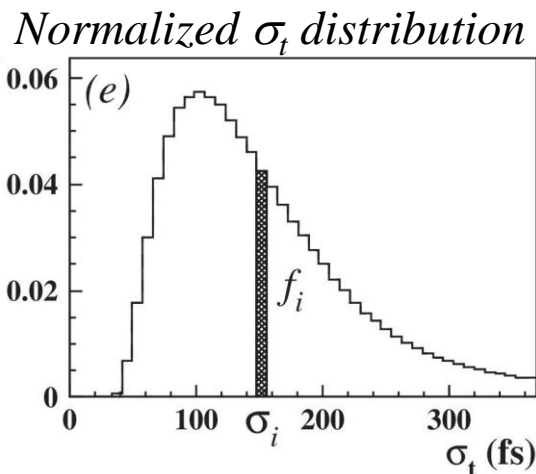
フィット関数

$$\frac{dN}{dt} = \underbrace{\frac{N_{sig}}{\tau}}_{\text{指数関数}} \int \underbrace{e^{-t'/\tau}}_{\text{指数関数}} \underbrace{R(t-t')}_{\text{応答関数}} dt' + \underbrace{B(t)}_{\text{B.G. 分布}}$$

応答関数

$$R(t-t') = \sum_{i=1}^n \underbrace{f_i}_{\text{崩壊時間のエラー}} \sum_{k=1}^3 \underbrace{w_k G(t-t'; \sigma_{ik}, t_0)}_{\text{トリプルガウシアン}}$$

$\sigma_{ik} = \underbrace{s_k}_{\text{スケールファクター}} \sigma_k^{pull} \sigma_i$
共通のオフセット



$$pulls = \frac{t_{rec} - t_{gen}}{\sigma_t}$$

B.G. 分布

B.G. 分布 : B(t)

- 2つの成分(指数関数・ δ 関数)から成る。
- シグナル部分と同様の応答関数でたたみ込み。
- M_{D0} のサイドバンドからB.G. 分布は決定する。
 - イベントの崩壊時間 t 分布をフィット。
- サイドバンドの領域を決めるのに、tuned MC を使用。

→ tuned MC とサイドバンドデータは良く一致している。

- $\chi^2/\text{ndf} = 0.85$ (KK)
- $\chi^2/\text{ndf} = 0.83$ (K π)
- $\chi^2/\text{ndf} = 0.83$ ($\pi\pi$)

Validation

MC とデータ($D \rightarrow K\pi$) を使用して、応答関数とB.G 分布のパラメトリゼーションが正しいことを確認した。

(MC) スケールファクター s_k の比はモードに依らずに、一致。

(MC) オフセット t_0 はモードに依らないが、run periodによって変化。

(Data) 崩壊時間 t の平均値がrun periodごとに変化。

→ run period ごとにフィットして、最終的な y_{CP} は平均をとって求める。

フリーパラメータ

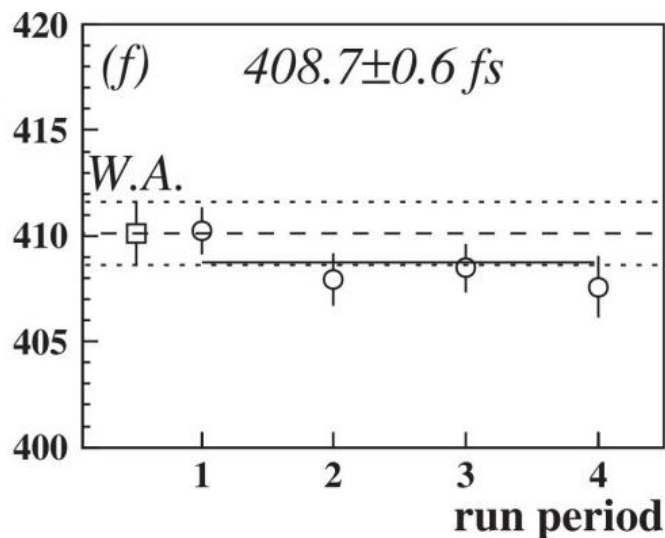
- τ_{D0} , y_{CP} , offset t_0 , normalization terms
- $K\pi$ モードの3 つのスケールファクター(s_k)
- KK , $\pi\pi$ モードの two rescale factor,

→ フィット結果はデータ($D \rightarrow K\pi$) とMCの間で、良く一致している。

応答関数の修正 (second run)

2 番目のrun periodに対して、非対称な応答関数を用いた。

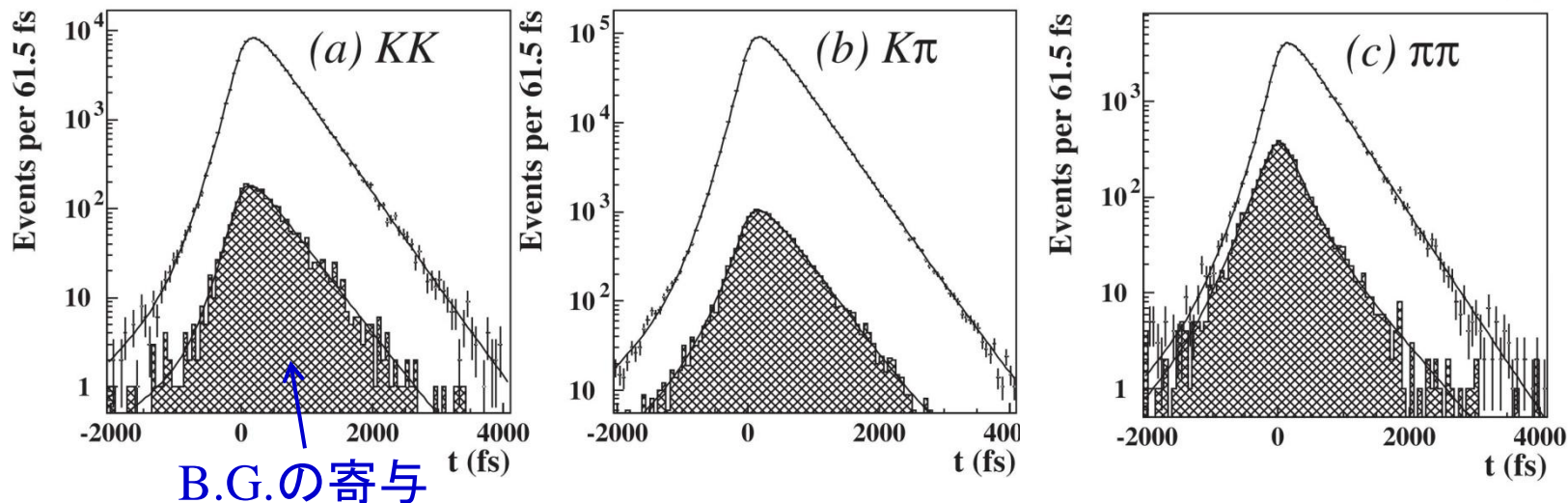
- SVD とCDC のミスアライメントが原因。
- モードに依存したオフセット Δt を追加。
 - 加えた3つの Δt はフリーパラメータとして扱う。
- 応答関数の形が多少変わっても、 y_{CP} の測定に影響は少ない。



$$\tau_{D^0} = [408.7 \pm 0.6(stat)] \text{ fs} \quad (\text{今回の解析})$$

$$\tau_{D^0} = [410.1 \pm 1.5(stat)] \text{ fs} \quad (\text{World Average})$$

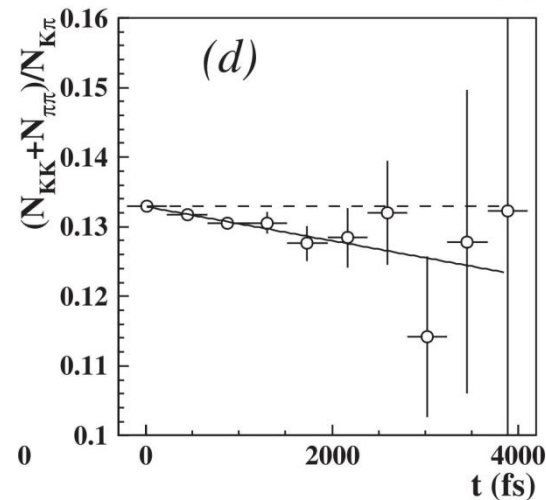
Run period ごとにフィットした結果 (540 fb⁻¹)



$$y_{\text{CP}} = [1.31 \pm 0.32(\text{stat}) \pm 0.15(\text{syst})] \%$$

$$\chi^2/\text{ndf} = 1.08$$

統計的に**4.1 σ** 、系統誤差も合わせると
3.2 σ の有意性で**D⁰中間子混合を観測!**



$y_{\text{CP}} = [1.25 \pm 0.39(\text{stat})] \% (K^+K^-/K^-\pi^+)$
 $y_{\text{CP}} = [1.44 \pm 0.57(\text{stat})] \% (\pi^+\pi^-/K^-\pi^+)$
 $\chi^2/\text{ndf} = 1.53/3$

} → モードごとにフィットしても無矛盾。
 → Run period ごとにフィットしても無矛盾。

CP violation parameter A_Γ

見かけの寿命に表れるCP非保存 A_Γ を測定した。

$$A_\Gamma = \frac{\tau(\overline{D}^0 \rightarrow K^- K^+) - \tau(D^0 \rightarrow K^+ K^-)}{\tau(\overline{D}^0 \rightarrow K^- K^+) + \tau(D^0 \rightarrow K^+ K^-)}$$

$$= \frac{1}{2} A_M y \cos\phi - x \sin\phi$$

- D^0 と反 D^0 の寿命を別々に測定することにより求められる。

$$A_\Gamma = [0.01 \pm 0.30(stat) \pm 0.15(syst)] \%$$

$$\chi^2/ndf = 1.00$$

0と矛盾しない結果。($A_M = \phi = 0$)

→ CP非保存は見られなかった。

$$A_\Gamma = [0.15 \pm 0.35(stat)] \% (K^+ K^-)$$

$$A_\Gamma = [0.28 \pm 0.52(stat)] \% (\pi^+ \pi^-)$$

モードごとにフィットしても無矛盾。

系統誤差

Source	$\Delta y_{CP}[\%]$	$\Delta A_{\Gamma}[\%]$
Acceptance	0.12	0.07
Equal t_0	0.14	0.08
M window position	0.04	<0.01
Signal/sideband background differences	0.09	0.06
Opening angle distributions	0.02	...
Background distribution $B(t)$	0.07	0.07
(A)symmetric resolution function	0.01	0.01
Selection variation	0.11	0.05
Binning of t distribution	0.01	0.01
Total	0.25	0.15

まとめ

- CP 固有状態 f_{CP} への崩壊で測定した見かけの寿命 $\tau(D^0 \rightarrow f_{\text{CP}})$ と実際の D^0 の寿命 $\tau(D^0 \rightarrow f_{\text{non-CP}})$ の差を測定することで、 D^0 中間子の混合を観測した。

$$y_{\text{CP}} \equiv \frac{\tau(D^0 \rightarrow f_{\text{nonCP}})}{\tau(D^0 \rightarrow f_{\text{CP}})} - 1$$

$$= [1.31 \pm 0.32(\text{stat}) \pm 0.15(\text{syst})] \%$$

統計的に **4.1 σ** 、系統誤差も合わせると
3.2 σ の有意性で **D^0 中間子混合を観測!**
 (混合が無い信頼度は 6×10^{-4})

$$A_{\Gamma} = \frac{\tau(\overline{D}^0 \rightarrow K^- K^+) - \tau(D^0 \rightarrow K^+ K^-)}{\tau(\overline{D}^0 \rightarrow K^- K^+) + \tau(D^0 \rightarrow K^+ K^-)}$$

$$= [0.01 \pm 0.30(\text{stat}) \pm 0.15(\text{syst})] \%$$

0 と矛盾しない結果。($A_{\text{M}} = \phi = 0$)
→ CP 非保存は見られなかった。