



Belle 実験における $B^0 \rightarrow D^{*+}D^{*-}$ 崩壊を用いた CPの破れの研究

- インTRODクシヨN
- D^*D^* 事象の再構築
- Angular analysis
- CPの破れの測定
- まとめ

大阪大学大学院理学研究科
山中卓研究室

三宅 秀樹



CP - violation

基本的な対称性

- P: パリティ変換
- C: 粒子反粒子変換
- T: 時間反転



弱い相互作用に対して非保存(P, C)

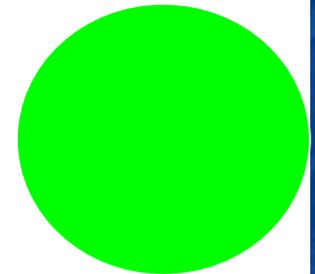
Cabibbo行列

$$V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

$$V_{ub} = A\lambda^3(\rho - i\eta)$$

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

$$-\frac{V_{ub}^* V_{ud}}{V_{cd}^* V_{cd}}$$



- 1957 ⁶⁰Cにおけるパリティの破れの発見 (C.S.Wu)
- 1964 K中間子系における間接的なCPの破れの発見 (V.Fitch, J.Cronin)
- 1973 小林益川理論
- 1999 K中間子系における直接的なCPの破れの発見 (KTeV, NA48)
- 2001 B中間子系における間接的なCPの破れの発見 (Belle, BaBar)
- 2003 超対称性理論の兆候? (Belle, BaBar)

標準理論の確立から、未知の物理の探索へ



B-factory & $B^0 - \bar{B}^0$ mixing

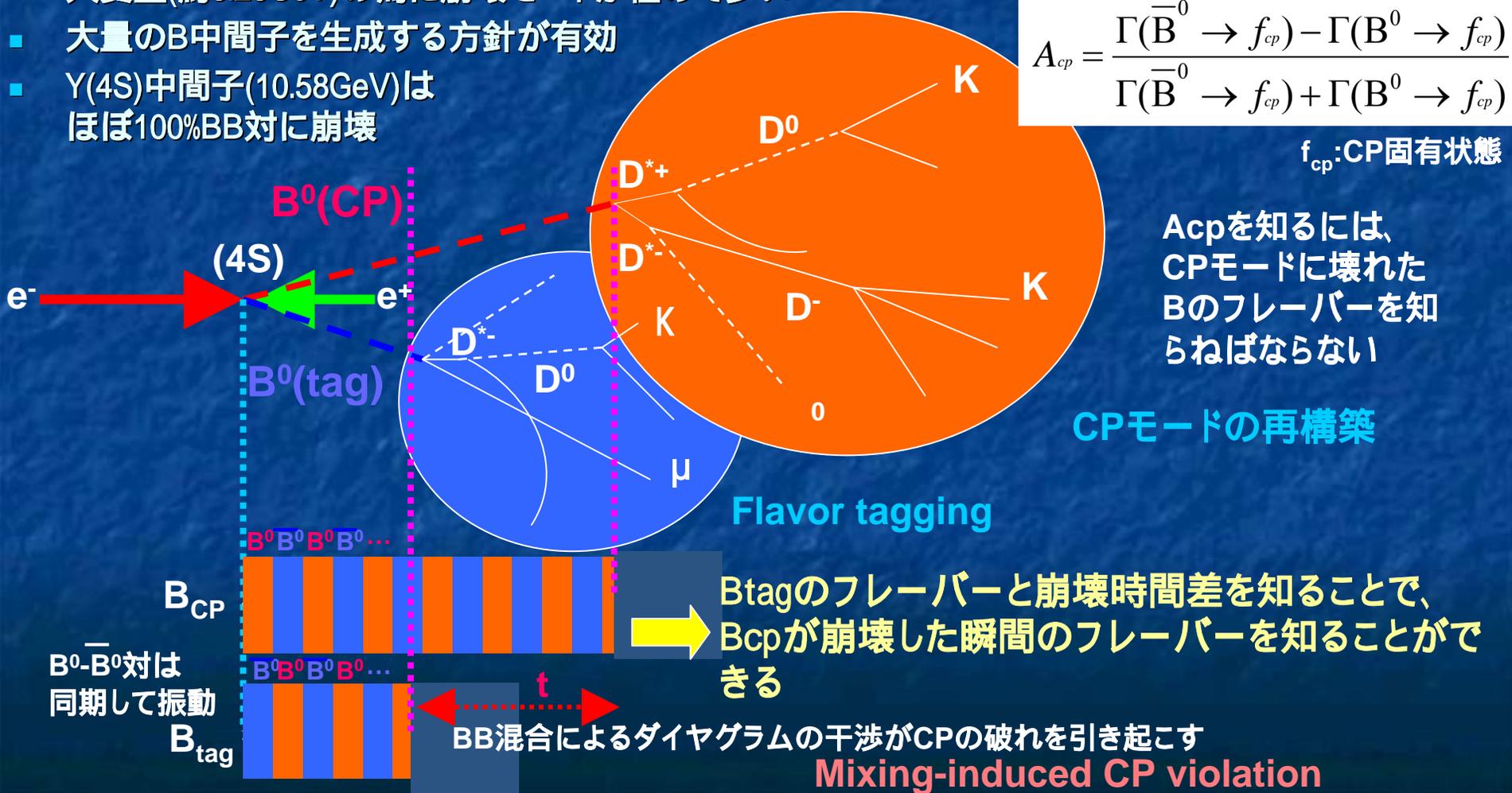
- B中間子の崩壊に伴うCPの破れは、bクォークがあらわに存在する為、K中間子のそれより大きく現れる
- 大質量(約5.28GeV)の為に崩壊モードが極めて多い
- 大量のB中間子を生成する方針が有効
- Y(4S)中間子(10.58GeV)はほぼ100%BB対に崩壊

CP非対称度 A_{cp}

$$A_{cp} = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{cp}) - \Gamma(B^0 \rightarrow f_{cp})}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{cp}) + \Gamma(B^0 \rightarrow f_{cp})}$$

f_{cp} : CP固有状態

A_{cp} を知るには、CPモードに壊れたBのフレーバーを知らねばならない



B^0 (CP)

(4S)

B^0 (tag)

B_{CP}

$B^0 - \bar{B}^0$ 対は同期して振動

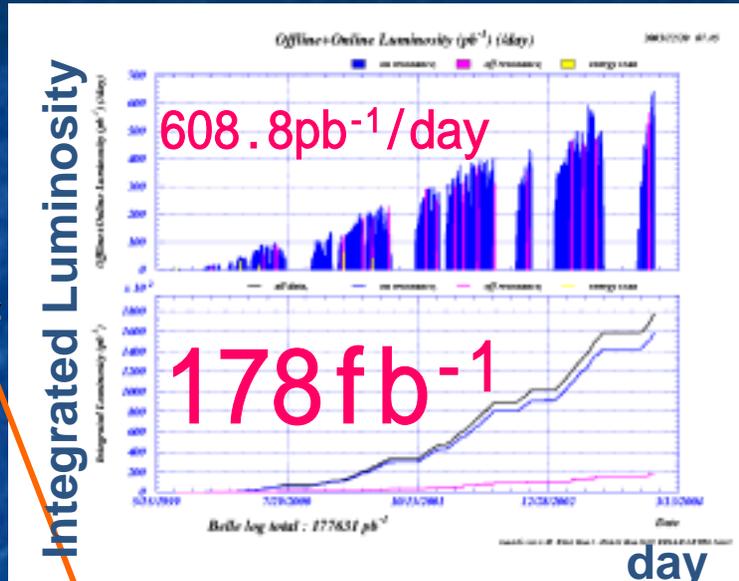
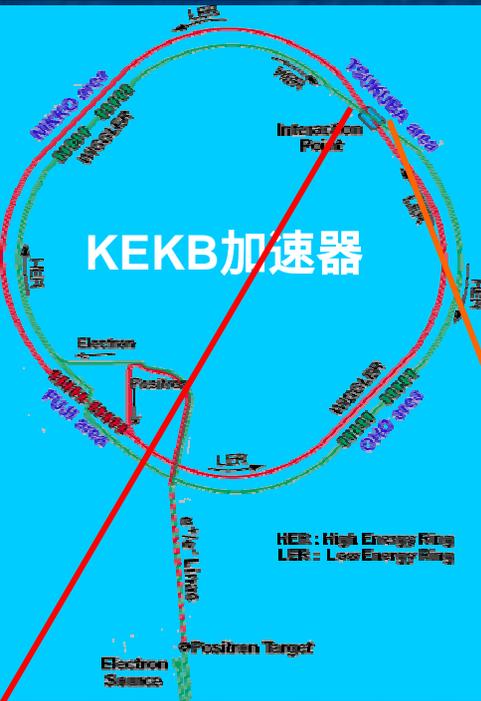
B_{tag}

t

Mixing-induced CP violation



Belle (KEK B - factory)

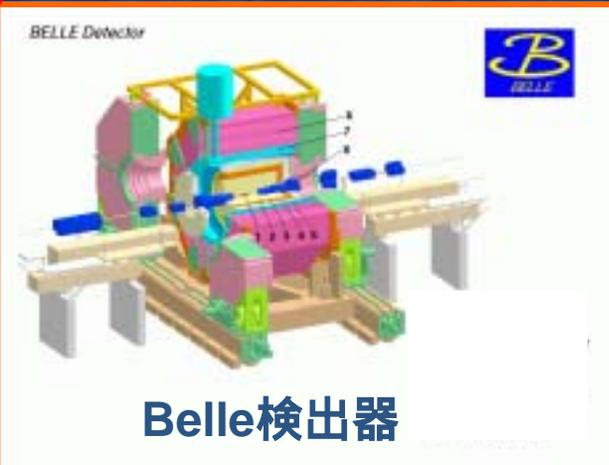


- 茨城県つくば市
- 非対称衝突型加速器 (電子8GeV陽電子3.5GeV)
- ルミノシティフロンティアとして世界最高の性能

BaBar: 152 fb⁻¹

$$11.3 \times 10^{33} (\text{cm}^2 \cdot \text{s})^{-1}$$

2003.12月現在



- 高精度なシリコンバーテックス検出器 (Z分解能 ~ 200um)
- 高い粒子識別能力(π^+ , K^+ , e^+ , μ^+ , K_L)



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

B中間子の混合による
時間に依存した
CPの破れの測定
(CP非保存パラメータ $\sin^2 \theta_{13}$)

J/ψ K_s (b → ccs遷移) による測定とは
異なるクォーク過程(b → ccd)による
独立な $\sin^2 \theta_{13}$ 測定



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

背景事象の少ない
クリーンな崩壊

b → ccs遷移による $\sin^2 \theta_{13}$ 測定のクロスチェック

異なるペンギンダイヤグラムや未知の物理の寄与

予測されているペンギンの寄与は数%

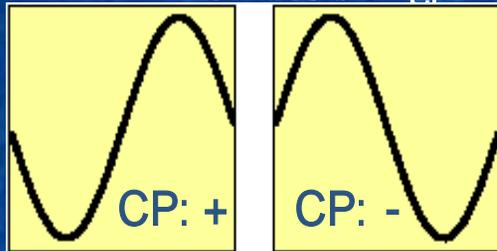
直接的CPの破れや θ_{13} 測定の可能性



CP eigenstates and Polarizations

- $B^0 \rightarrow D^+ D^{*-}$ 崩壊の終状態はCP固有状態を取り得るが、B Vector Vector 崩壊に起因して CPの偶奇混合状態となっている (S,D,P部分波の混合)。
 逆のCP位相によって見かけのCP非対称度が薄められてしまう
 しかし、混合比が分かっていたら、統計的に二つの固有状態を分離できる

CP非対称度 A_{CP}



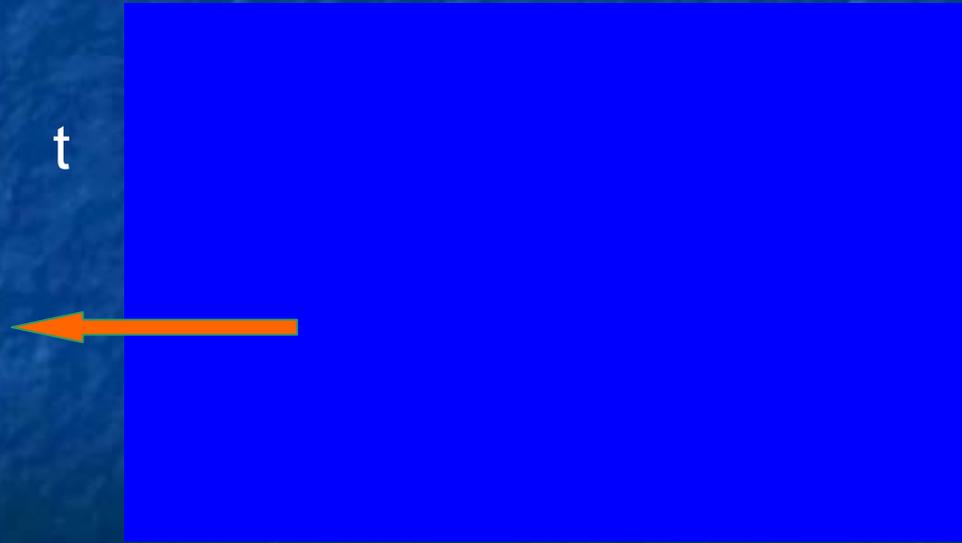
S, P波

D波

各部分波に対する偏極度の測定を行う

t

振幅	$A_0, A_{ }$	A
偏極度	$R_0, R_{ }$	R



transversity frame

崩壊平面に沿って上図のようなtransversity frameを定義すると、CP固有状態と偏極、角度分布の対応がよくなる



D*+D*- Transversity frame

Full angular PDF:

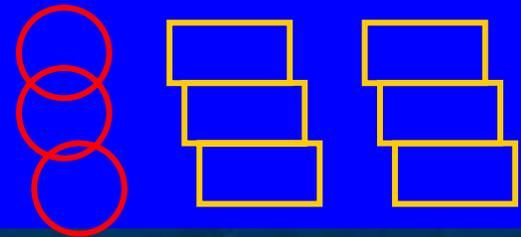
時間に依存しない角度分布

D*D* transversity frame

Integrate $\cos \theta_{tr}$

偏極度

$$R_i \equiv \frac{|A_i|^2}{\sum_{i=0, \parallel} |A_i|^2}$$



2つの角度($\cos \theta_{tr}$ と $\cos \theta_1$)の測定で、3つの偏極度が求まる



D^*+D^* reconstruction (1)

2000年1月から2003年7月にかけて得られた 140fb^{-1} の
(4S)共鳴データ(1億5千万個の $B\bar{B}$ 対)を用いた

イベントシェイプの違いを利用して、Bを經由しないチャーム対生成事象などの混入を排除する

衝突点近傍から来た荷電粒子の飛跡よりD、 D^* 、Bの不変質量を組み、再構築を行う

K_s は衝突点より十分離れた崩壊点で崩壊する事を考慮された上で、同様に再構築される

イベントシェイプの違い

中性パイ中間子については検出された二つの光子のエネルギーより同様に不変質量を組む

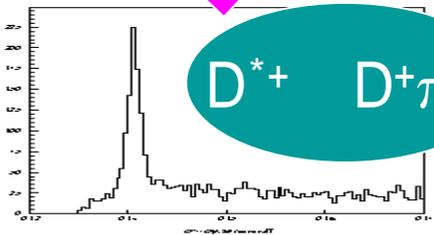


D^{*+}D^{*-} reconstruction (2)

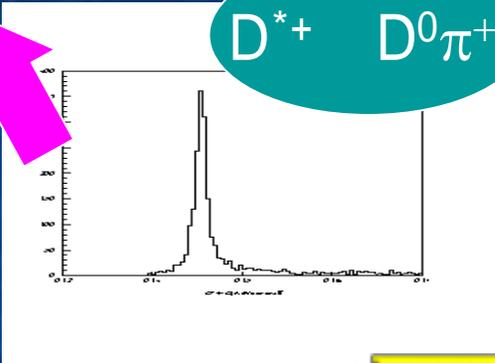
B⁰



D^{*+} D⁺π⁰_s

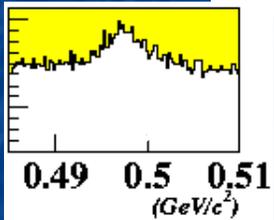
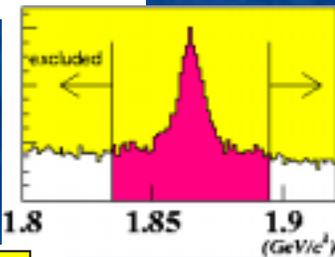


D^{*+} D⁰π⁺_s



- D⁰ K⁻π⁺
- D⁰ K⁻π⁺π⁰
- D⁰ K⁻π⁺π⁺π⁻
- (D⁰) K_sπ⁺π⁻
- (D⁰) K_sπ⁺π⁻π⁰
- (D⁰) K⁻K⁺

- D⁺ K⁻π⁺π⁺
- D⁺ K⁻K⁺π⁺
- D⁺ K_sπ⁺
- D⁺ K_sπ⁺π⁰
- D⁺ K_sK⁺



反対側(D^{*-})も同様に組む
 但しS/Nおよび検出効率を考慮して
 両側にD⁺(⁻)を含む組み合わせ及び
 K_sを含む組み合わせは除外した。



140fb⁻¹ data sample

DATA

Beam constrained mass:

$$M_{bc} \equiv \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - (\sum P_i^*)^2}$$

Energy difference:

$$\Delta E \equiv (\sum_i E_i^*) - E_{\text{beam}}$$

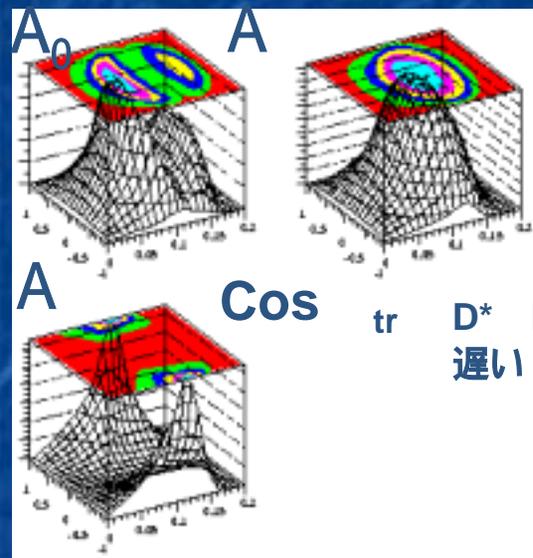
$$\begin{array}{l} M_{bc} > M_{B(\text{PDG})} - 3 \\ |E| < 40 \text{ MeV} \end{array}$$

Fitted Yield: 138.9 ± 12.9



Polarization measurement

$$PDF = \sum_{i=0,\perp,//} R_{rec_i} P_i(\cos \theta_{tr}, \cos \theta_1) + P_{BG}(\cos \theta_{tr}, \cos \theta_1)$$



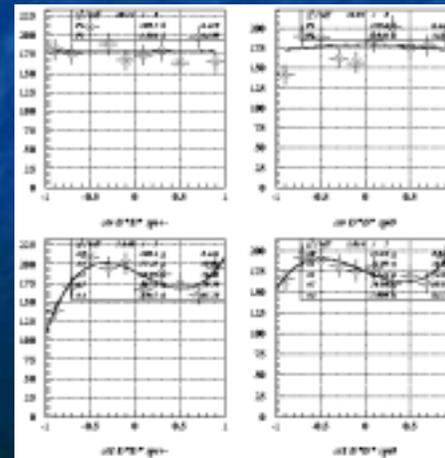
偏極毎に娘粒子の運動量分布は大きく異なり、アクセプタンスや角度分解能で施すべき補正は極めて複雑になる。
完全に偏極した、多数のMCの分布からこれらの補正を”込み”にしたPDFの形状を求めた。

由来の遅い横運動量

$$P_{BG} = P_{BG_{tr}}(\cos \theta_{tr}) P_{BG_1}(\cos \theta_1)$$

更に偏極度毎に検出効率 が異なる分も補正

$$R_{rec_i} = \frac{\varepsilon_i R_i}{\sum_{j=0,\perp,//} \varepsilon_j R_j}$$



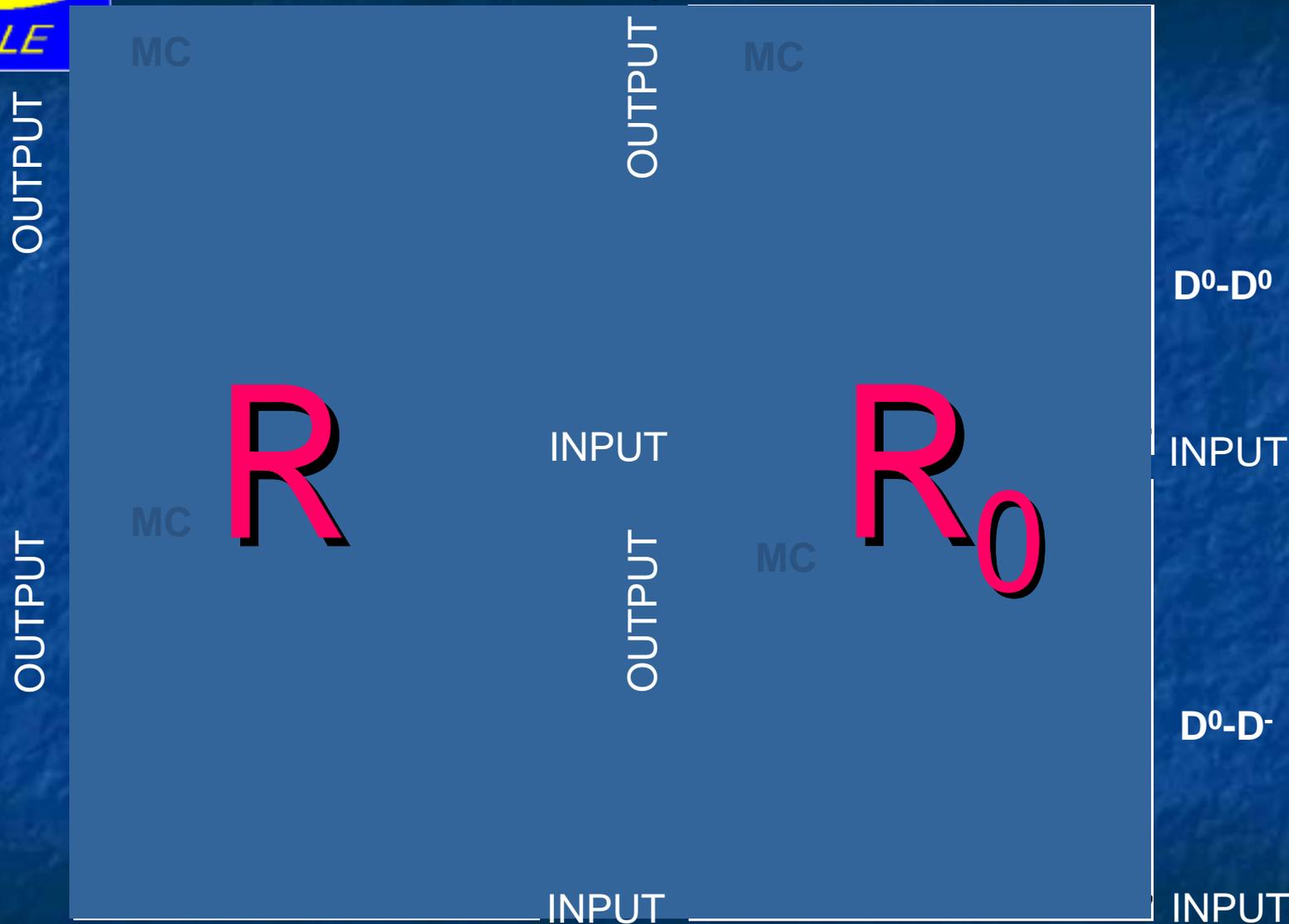
BGの形状はDATAのサイドバンドより決定

$$P_{BG_{tr}} = N_{BG} (a_1 \sin^2 \theta_{tr} + a_2 \cos^2 \theta_{tr}) = \frac{1}{2} + 3 \left(\frac{1}{2} - \alpha \cos 2\theta_{tr} \right)$$

$$P_{BG_1} = \sum_{i=0,1,2,3} P_i \cos \theta_1^i$$



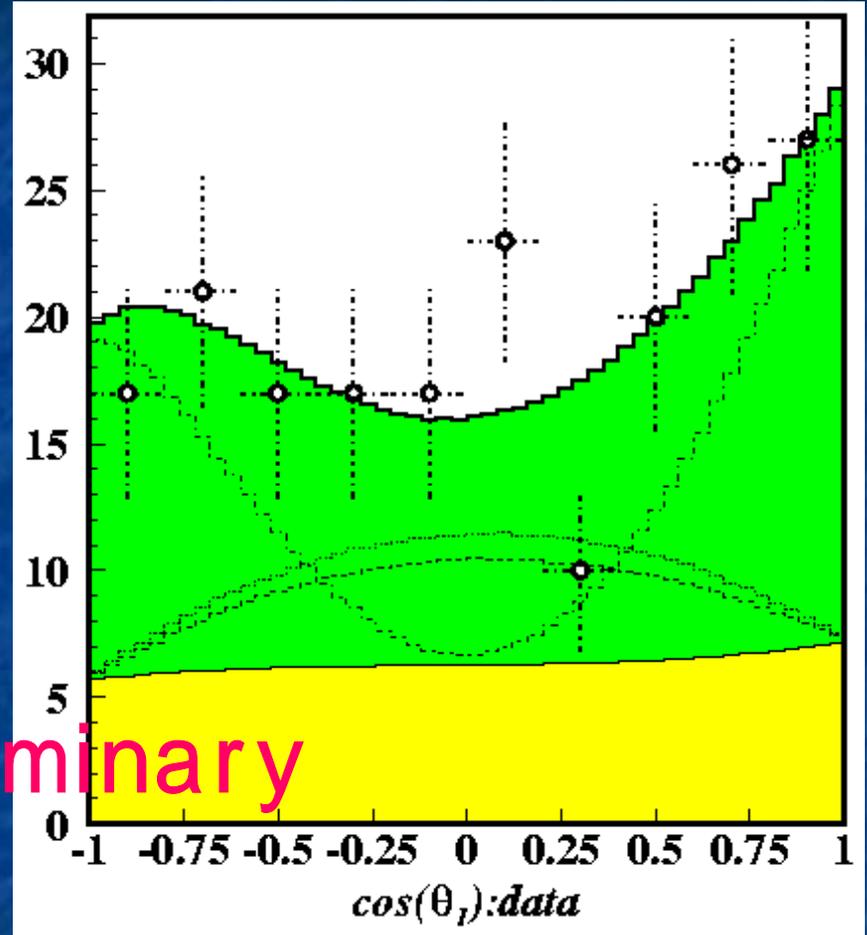
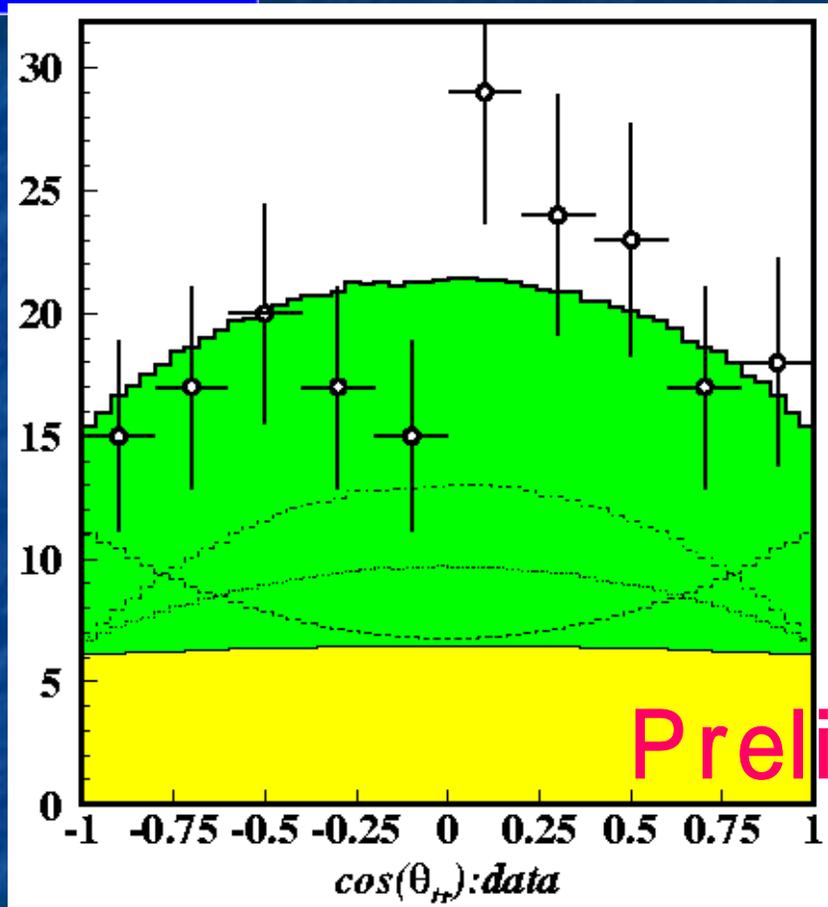
Linearity check



MC生成時に与えた入力と、再構築・フィットした結果との比較。
入力に対する線形性が正しく保たれている。



Polarization @ 140fb⁻¹



$R = 0.20^{+0.08}_{-0.07}$
 $R_0 = 0.56 \pm 0.08$

BaBar: $R = 0.063 \pm 0.055 \pm 0.009$



Systematic Uncertainty

Preliminary

	R_0	R
┌ Signal yield estimation :	$<1e-5$	$1.2e-5$
┌ BG polarization:		
■ $\cos \theta_{tr}$	0.001	0.005
■ $\cos \theta_1$	0.003	0.002
┌ Linearity shift:	0.057	0.014
┌ Slow pion efficiency:		
■ $+-$	0.053	0.012
■ 0	0.033	0.001
┌ Angular resolution:	0.012	0.016
┌ MC - PDF binning:	0.011	0.012

D* D 由来の遅い が主因

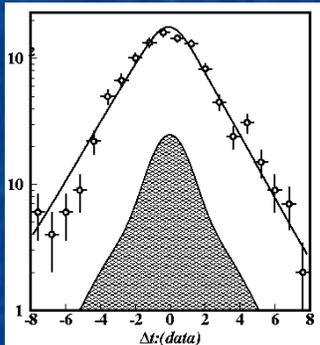
0.09

0.03



CP-fit outline

- 時間に依存した角度および t 分布より、CP非対称度を抽出する
 - CPモード側のバーテックス(Z_{cp})
 - Tagging側のバーテックス(Z_{tag})及びフレーバー情報



t 分布

尤度関数

$$L = \prod (1 - f_{ol}) (f_{sig} P_{sig} + (1 - f_{sig}) P_{bg}) + f_{ol} P_{ol}$$

検出器の分解能等の補正は、Resolution functionの形で畳み込まれる。

$$P_{sig}(q, \Delta t, \omega; A_{cp}) = \int \rho_{sig}(q, \Delta t', \omega; A_{cp}) R_{sig}(\Delta t - \Delta t') d\Delta t'$$

- f_{sig} : event毎のsignal probability
- f_{ol} : 全体にかかる微小な補正項
- q : Bのフレーバー ($B_{tag}=B^0$ の時 $q=+1$)
- t : flavor taggingの誤謬率



Signal PDF

時間に依存した角度分布:

$$\frac{1}{\Gamma} \frac{d^2\Gamma}{d \cos \theta_{tr} d \cos \theta_1 d\Delta t} = \frac{e^{-|\Delta t|/\tau_B}}{4\tau_B} \{P_{\text{odd}}(1 + A_{CP}) + P_{\text{even}}(1 - A_{CP})\}$$

時間に依存したCP非対称度:

$$A_{CP} = q(1 - 2\omega)(S_{D^*D^*} \sin \Delta m \Delta t \pm A_{D^*D^*} \cos \Delta m \Delta t)$$

$$S_{D^*D^*} = \frac{2\Im\lambda}{|\lambda^2 + 1|}$$

$$A_{D^*D^*} = \frac{|\lambda|^2 - 1}{|\lambda|^2 + 1}$$

$\sim \sin 2\theta_1$

$= 0$



opposite for Peven

- q : Bのフレーバー ($B_{\text{tag}}=B^0$ の時 $q=+1$)
- ω : flavor taggingの誤謬率
- m : B_d^0 の質量固有状態の質量差
- τ_B : B_d^0 の寿命

直接のCPの破れが無い時 ($|\lambda|=1$ のとき)



Resolution function

- 検出器分解能(CP, tag)
 - 1つ又は2つのgaussianを用い、event-by-eventに得られるvertex fitのエラー及びscale factorでぼかす
- 二次生成チャーム粒子に由来するずれの補正(tag)
 - lifetime component(exp.)と非lifetime component(dirac's delta)に分けて表現
- t における運動学的近似の補正(CP, tag)
 - $t \sim Z/C$ においてB中間子の運動量を無視した分を解析的に補正



Background PDF

Backgroundもシグナル同様にresolution functionで畳み込まれる。Effective lifetimeを持つ成分と、Dirac's delta関数で表現される速い成分に分けられる

$$P_{bg}(\Delta t) = \int \rho_{bg}(\Delta t') R_{bg}(\Delta t - \Delta t') d\Delta t'$$

$$\rho_{bg} = (1 - f_{\delta}) \frac{1}{2\tau_{bg}} \exp\left(-\frac{|t - \mu_{\tau}|}{\tau_{bg}}\right) + f_{\delta} \delta(t - \mu_{\delta})$$

$$R_{bg}(t) = (1 - f_{tail}) G(t; 0, s_{main}) + f_{tail} G(t; 0, s_{tail})$$

G: gaussian

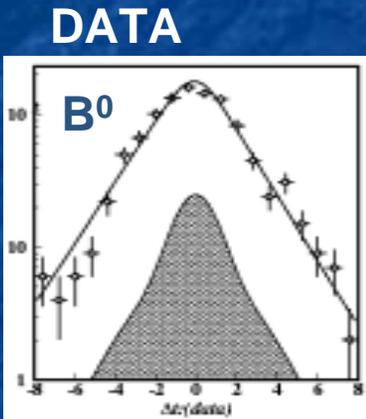


Lifetime fit

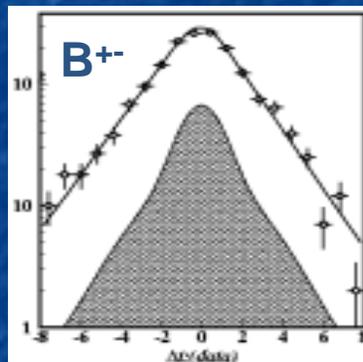
PDFが正しいかどうかを、Dataを用いて
B lifetimeをfitする事で確認する。

■ $D^{(*)}D_S^{(*)}$

約3000事象の
コントロールサンプル



$1.58 \pm 0.06 \text{ ps}$



$1.65 \pm 0.06 \text{ ps}$

W.A.

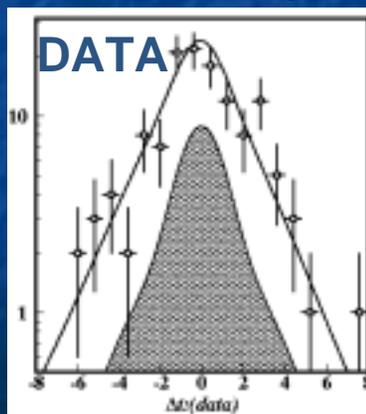
$B_0 = 1.542 \pm 0.016$

$B_+ = 1.674 \pm 0.018$

t (ps)

■ D^*D^*

約140事象



$1.59 \pm 0.21 \text{ ps}$

Lifetimeは世界平均と一致しており、
正しくfitできているように見える。

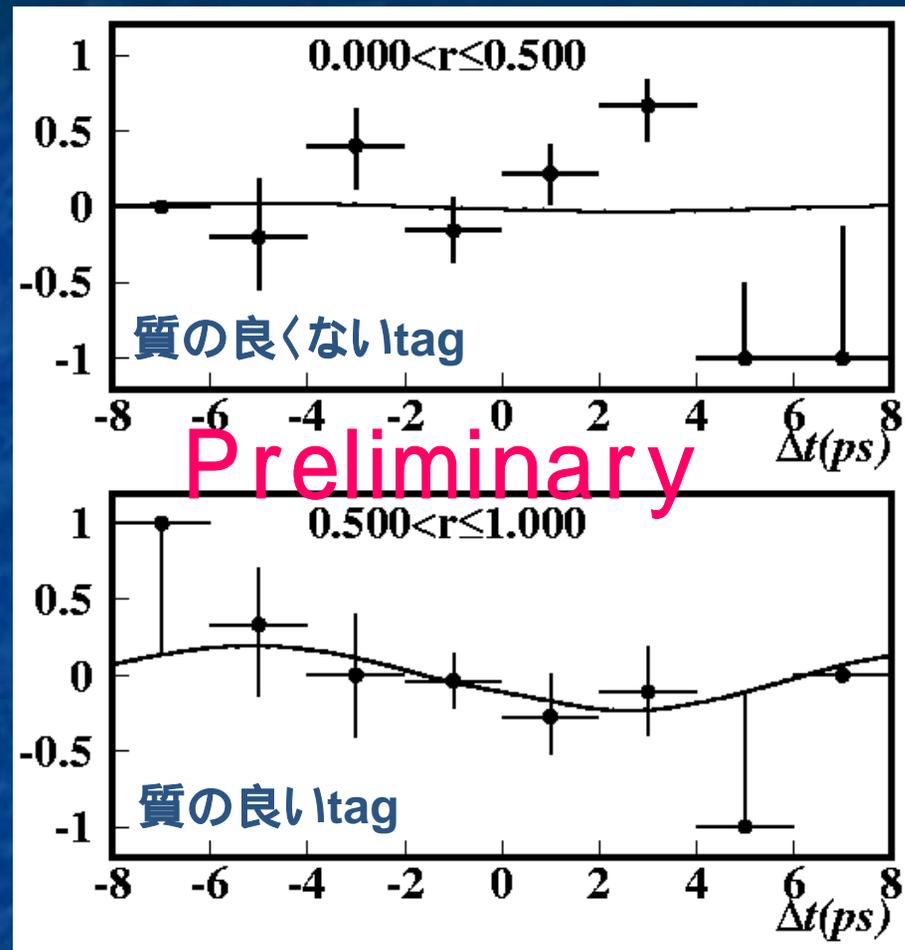


CP - fit result

- 1 parameter fit
 - $S_{D^*D^*} : +0.68^{+0.57}_{-0.61}$
- 2 parameters fit
 - $S_{D^*D^*} : +0.69^{+0.57}_{-0.61}$
 - $A_{D^*D^*} : -0.21^{+0.28}_{-0.27}$

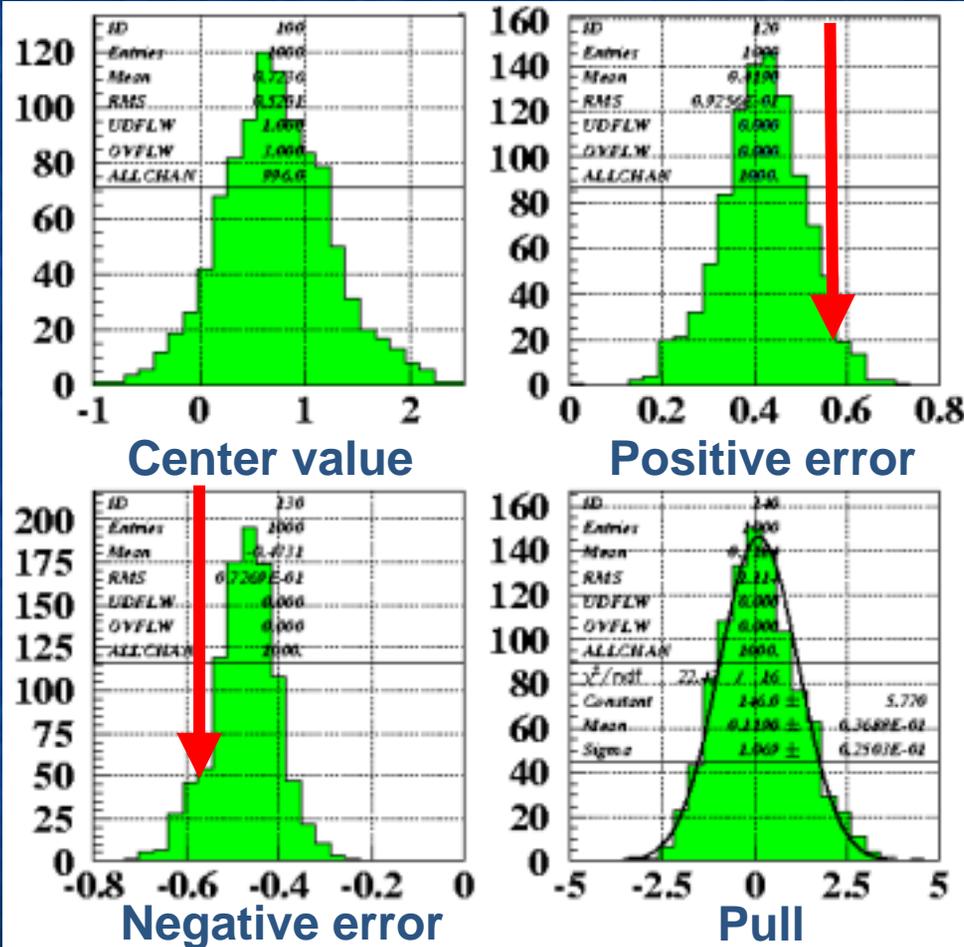
CP非対称度 A_{CP}

BaBar: $\text{Im } \gamma = 0.05 \pm 0.29 \pm 0.10$





Ensemble test



データと同じ統計量を使った
1000回の模擬実験を行い、
今回の実験結果の
統計的妥当性を調べた。



今回の実験が再現される確率は
4%であり、「十分起こり得る」

Pull: x/σ をgaussianでfitした時のエラー



Systematic Uncertainty

Preliminary

	$S_{D^*D^*}$	$A_{D^*D^*}$
┌ Vertexing :	0.096	0.042
┌ Flavor tagging:	0.054	0.029
┌ Resolution function:	0.037	0.0089
┌ Background:	0.034	0.0032
┌ Physics:	0.022	0.035
┌ Polarization:	0.053	0.011

バーテックス測定に伴うものが主因

0.13

0.064



まとめ

- Belle実験において $B^0 \rightarrow D^{*+}D^{*-}$ 崩壊の解析を行い、138.9事象を得た。

- 偏極度の測定を行った:

$$R = 0.20^{+0.08}_{-0.07} \pm 0.03$$

$$R_0 = 0.56 \pm 0.08 \pm 0.09$$

- 同様にCPの破れの測定も行った:

$$S_{D^*D^*} = +0.69^{+0.57}_{-0.61} \pm 0.13$$

$$A_{D^*D^*} = -0.21^{+0.28}_{-0.27} \pm 0.06$$

- 以上の結果は、他実験及び標準理論と矛盾しない。



Next plan

- 統計を増やす
 - イベント数そのものを増やす 厳しい
 - 今まで使っていなかった質の悪いものも使う
- PDFを細分化し、質の良いものと悪いものとを分離する
- 言うまでも無いものを書く



終了



コントロールサンプル

- We decided to use $D(^*)D_s(^*)$ as control sample, because decay topology is quite similar and yield is much plenty
- After applying final selection criteria, we got:

	B^0	B^\pm
■ DDs	~500	~1020
■ DDs*	~180	~350
■ D^*D_s	~420	~160
■ $D^*D_s^*$	~260	~140

 - Total: ~3000 events



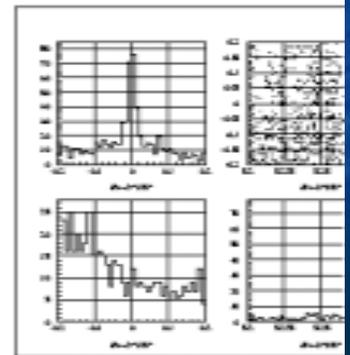
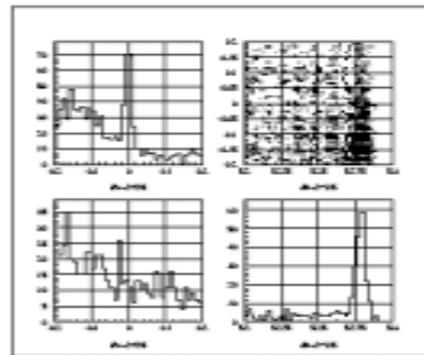
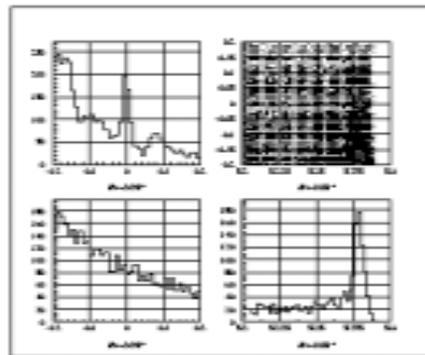
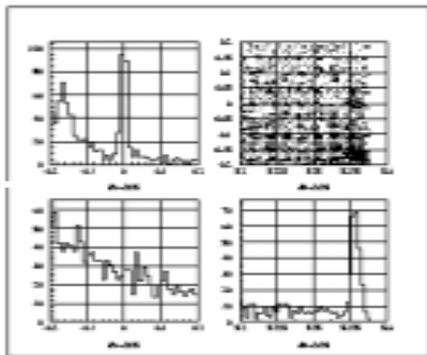
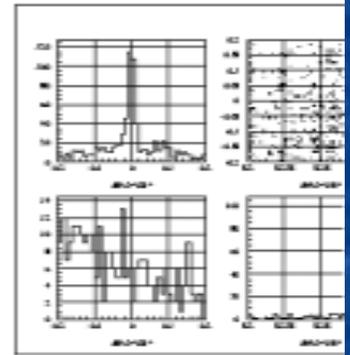
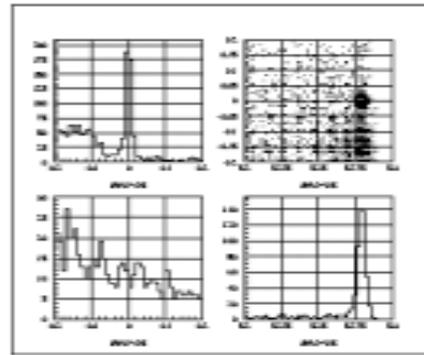
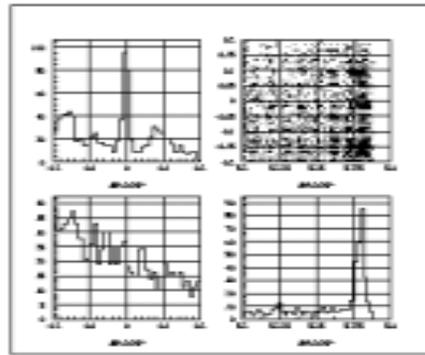
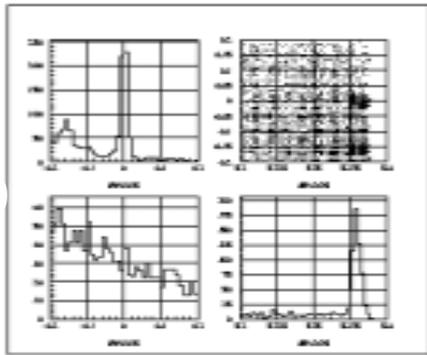
Control Samples ($E - M_{bc}$)

DDs

DDs*

D*Ds

D*Ds*



B

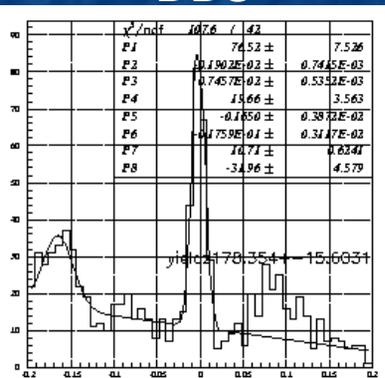
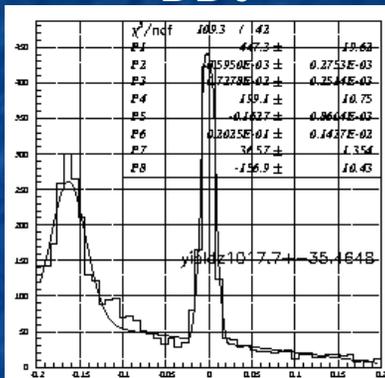
B



Control samples (cont'd)

DDs

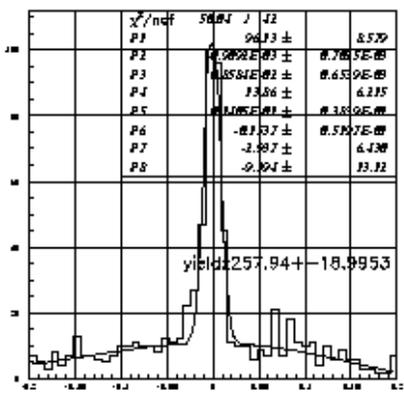
DDs*



Signal MC lifetime fit

$D^*D_s^{*+}$: 1.59 ± 0.07

$D^-D_s^{*+}$: 1.67 ± 0.12



$D^*D_s^*$

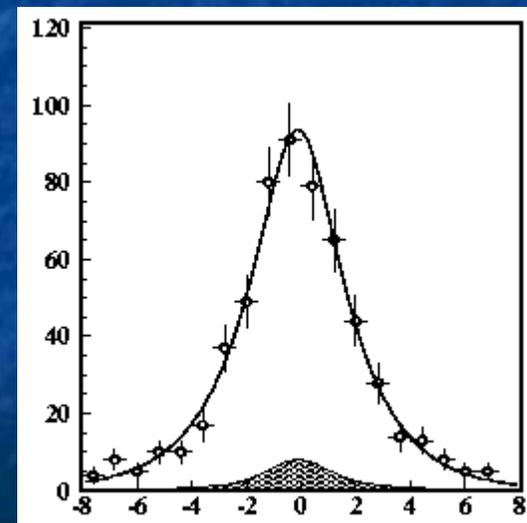
Same Rdet as D^*D^*

For data,

1 × 3 parameters are floated

$B^- D^0 D_s^-$: 1.55 ± 0.08

$B^0 D^- D_s^+$: 1.40 ± 0.14



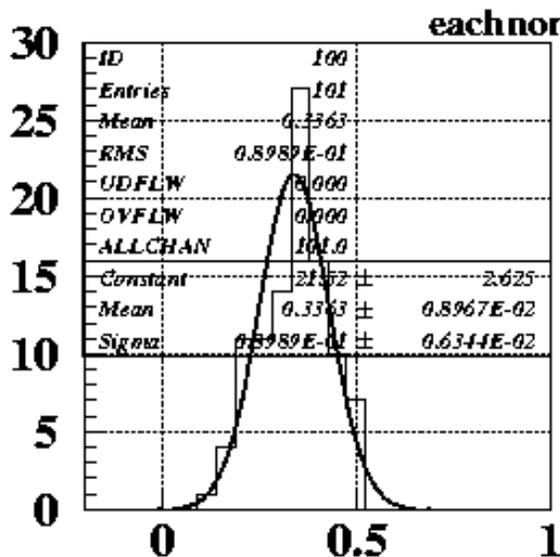
t

$D^0 D_s^+$

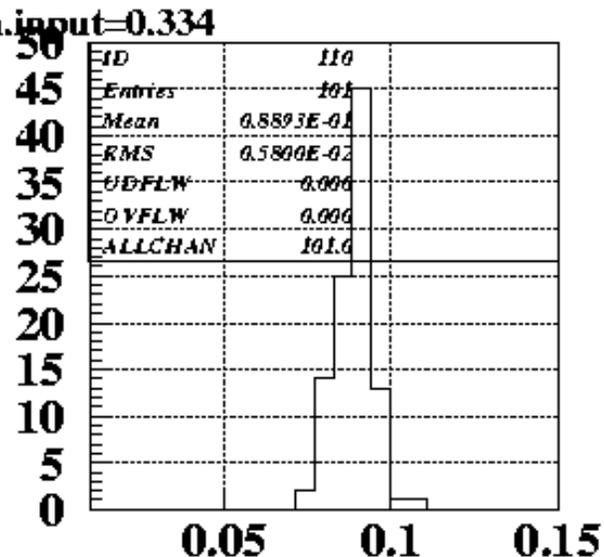
D^*D^* Rdet should be work



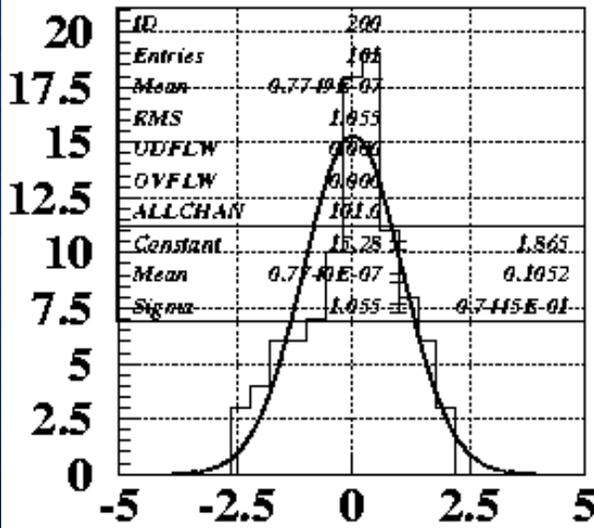
Gsim Ensemble test



Output



Erro



1.06 ± 0.07

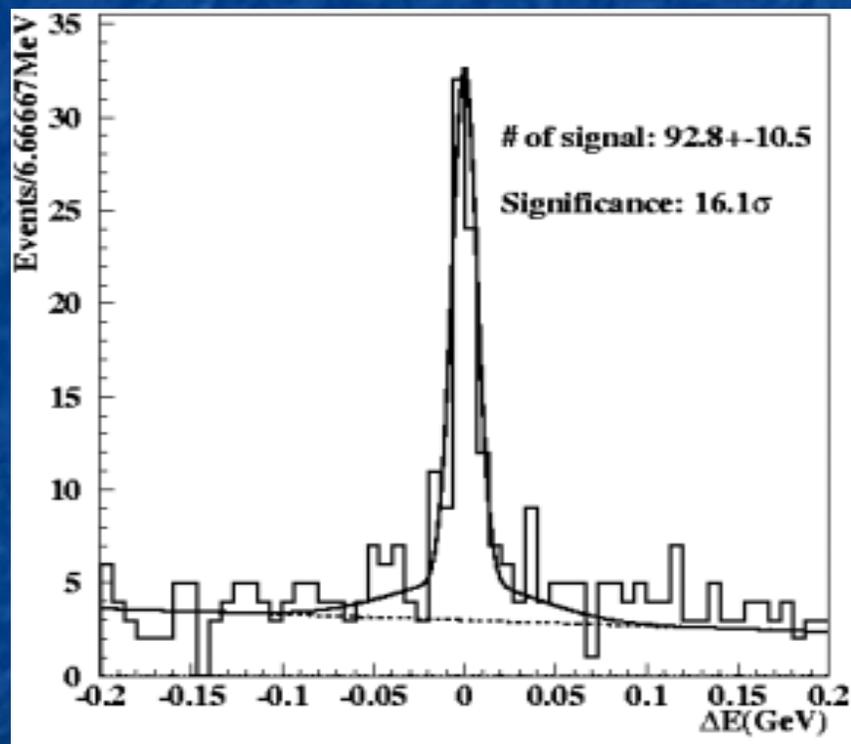
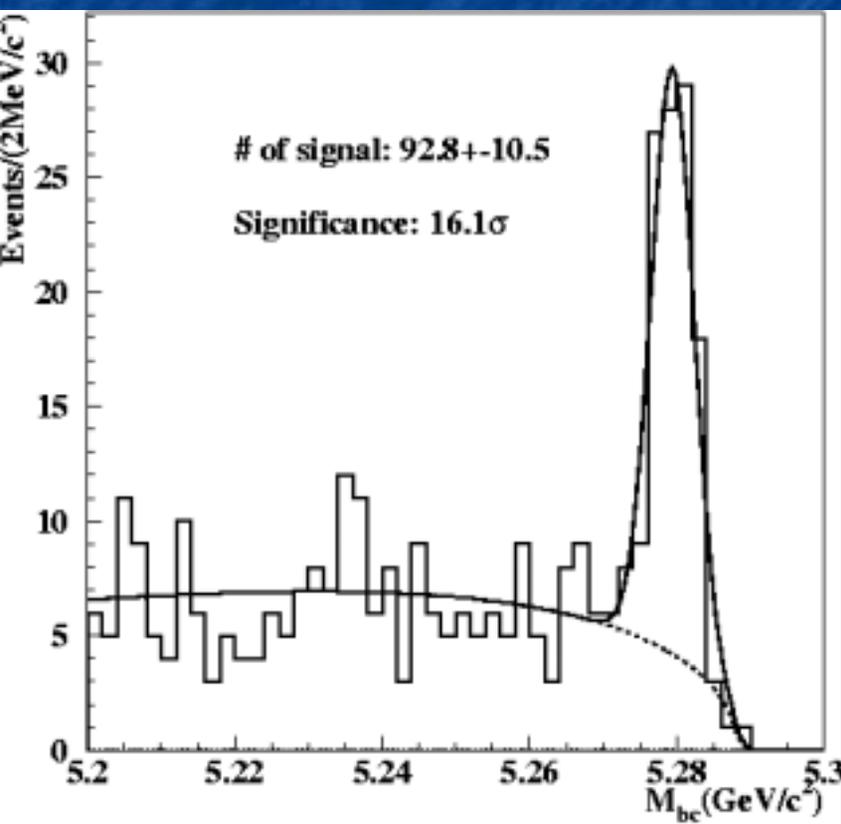
Error estimation is OK

naIMC

3



Mbc - E fit result





Ensemble test (80evts)

hoge.input=0.08

