CP非保存角ϕ_3の測定に向けた $B \to DK$, $D \to K_S K \pi$崩壊の研究

2011年5月14日

春の学校＠彦根

東北大学

鈴木　善明

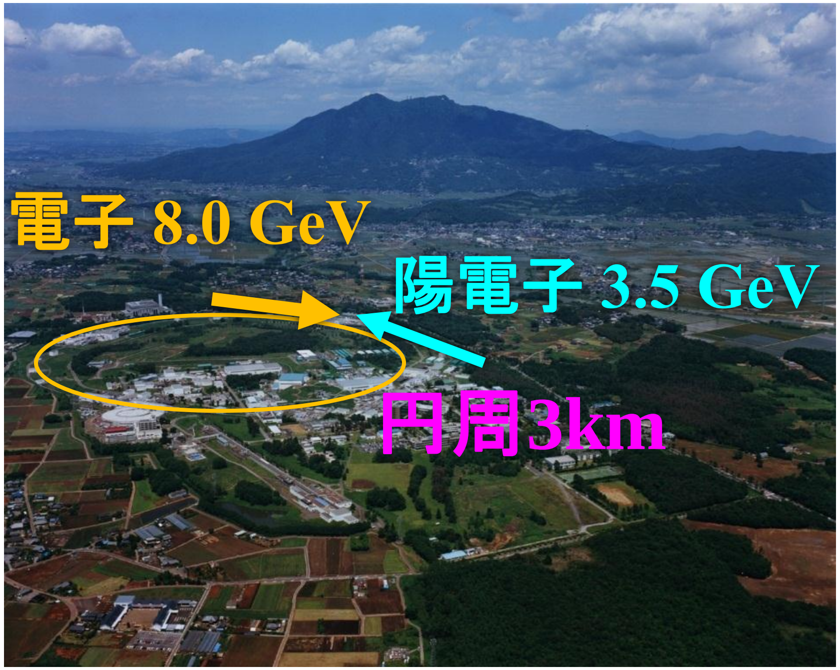
Contents

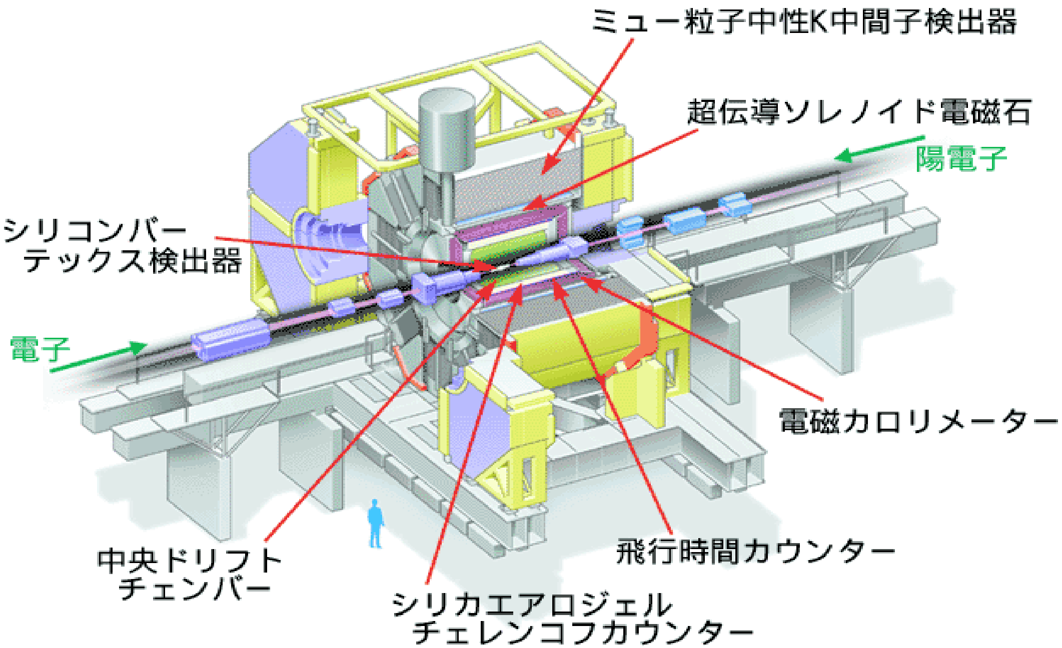
- イントロダクション
  - Belle実験
  - ϕ_3 の測定
- B→DK, D→ $K_S K\pi$ 崩壊の研究
  - KSFW Likelihood ratio
  - コントロールサンプル(B→Dπ, D→KsKπ)の研究
  - 期待される B→DK イベントの数
  - ダリッツ解析の必要性
- まとめ

- イントロダクション
  - Belle実験
  - ϕ_3の測定

イントロダクション

Belle実験





- 積分ルミノシティ : 1014 fb^{-1} (Y(4S) : 711 fb^{-1})
- BelleIIへのアップグレードのため2010年6月に運転停止。

CKM行列

- Charged current weak interaction Lagrangian

$$\mathcal{L}_{\mathrm{int,qW}} = -\frac{g}{\sqrt{2}}\left[\left(\overline{U}_L\gamma^\mu \boldsymbol{V} D_L\right)W_\mu^+ + \left(\overline{D}_L\gamma^\mu \boldsymbol{V}^\dagger U_L\right)W_\mu^-\right]$$

$$U = \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix},\ D = \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$ 質量固有状態

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

大きな複素位相を持つ

$$= \begin{pmatrix} 1-\frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1-\frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

$$\lambda = \sin\theta_c \sim 0.22$$

ユニタリー三角形

CKM行列はユニタリー行列であるから、

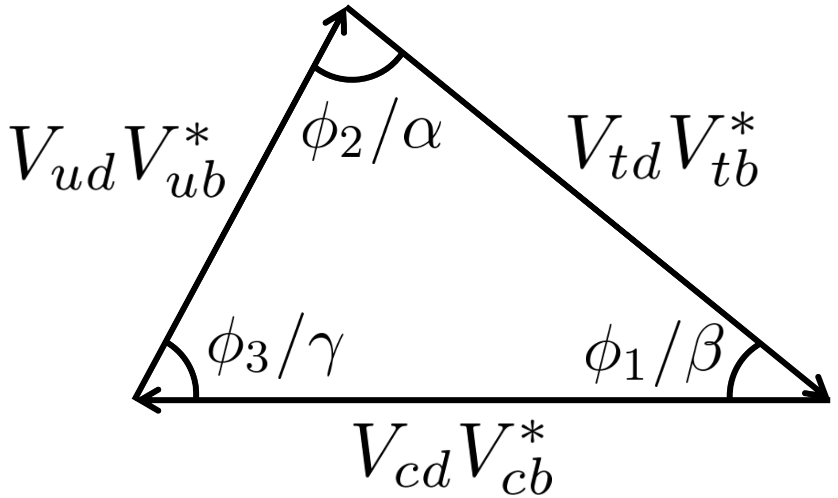
$$VV^\dagger = 1$$

$$\Rightarrow \quad V_{ud}\underline{V_{ub}^*} + V_{cd}V_{cb}^* + \underline{V_{td}}V_{tb}^* = 0$$

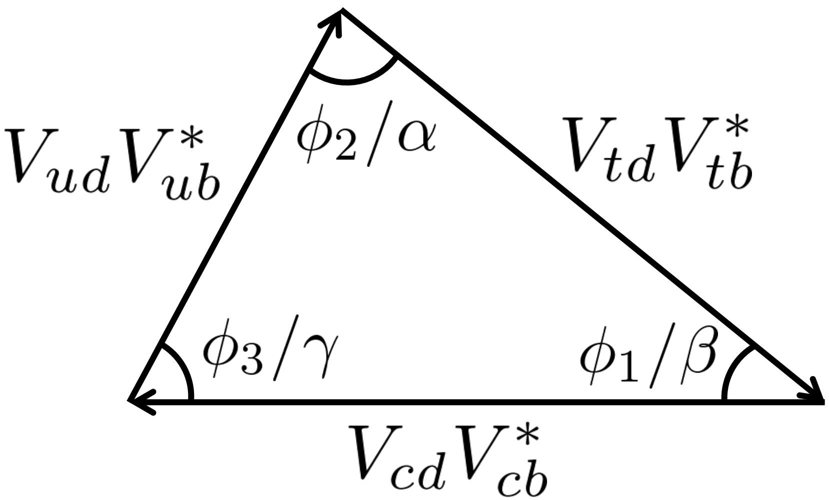
- 大きな複素位相を押し込んだ要素を含む
- 各項の大きさ(辺の長さ)が同程度

$\Downarrow$

潰れていない三角形を
描くことができる。
(角度測定がしやすい)



CP非保存角ϕ_3



$$\phi_1 = 21.15^\circ \,{}^{+0.90^\circ}_{-0.88^\circ}$$

$$\phi_2 = 89.0^\circ \,{}^{+4.4^\circ}_{-4.2^\circ}$$

$$\boxed{\phi_3 = 71^\circ \,{}^{+21^\circ}_{-25^\circ}}$$

(CKMfitter, 2010)

$$\phi_3 \equiv \arg\left(\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{-V_{cd}V_{cb}^*}\right)$$

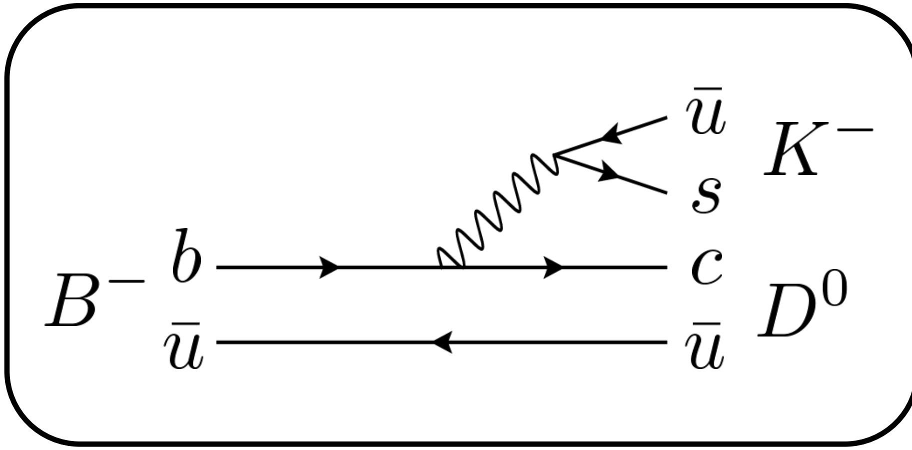
$$\sim \arg\underline{(V_{ub})}$$

b→u遷移を含む崩壊
(B→DK)で測定が可能。

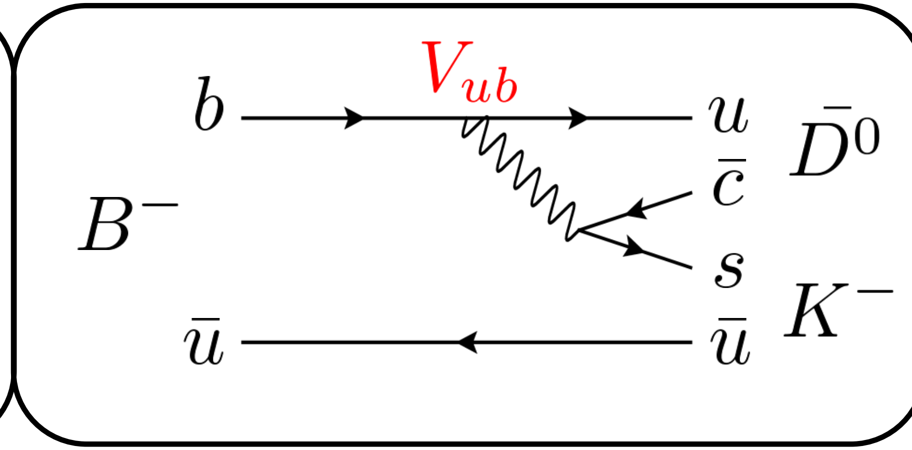
- B→DKの崩壊を用いればtree diagramのみの寄与で測定できる。
- 精度の向上が課題。

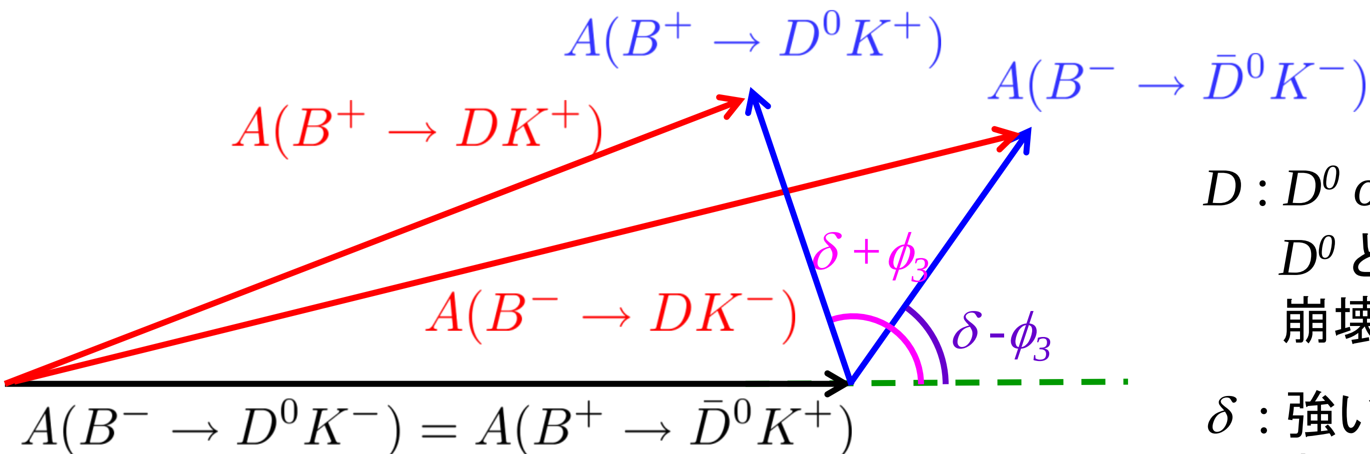
B→DK崩壊

$B^- \to D^0 K^-$



$B^- \to \bar{D}^0 K^-$





D : D^0 or $\bar{D}^0$

D^0 と $\bar{D}^0$ は同じ終状態に崩壊しうる。

δ : 強い相互作用に起因する位相差

B^- と B^+ の崩壊分岐比を測定することで δ, ϕ_3 が求まる。

$\overset{(-)}{D^0}$の崩壊

- 現在最も精度の良いϕ_3の測定はB→DK, D→$K_S\pi^+\pi^-$のダリッツ解析によるものである。

- 同様に、B→DK, D→$K_SK^\pm\pi^\mp$もϕ_3に対して高感度であると期待される。

- D→$K_S\pi^+\pi^-$と異なり、Kとπの電荷を入れ替えると異なる終状態になる。そのため、異なる崩壊として解析しなければならない。

$$B^- \longrightarrow D\,\underline{K^-}, \quad D \to \underline{K_S K^- \pi^+}$$

$$B^- \longrightarrow D\,\underline{K^-}, \quad D \to \underline{K_S K^+ \pi^-}$$

$D : D^0$ or $\overline{D^0}$

このニつは異なる終状態である。

- B→DK, D→ $K_S K\pi$ 崩壊の研究
  - KSFW Likelihood ratio
  - コントロールサンプル(B→Dπ, D→KsKπ)の研究
  - 期待される B→DK イベントの数
  - ダリッツ解析の必要性

B→DK, D→ $K_S K\pi$崩壊の研究

Selection criteria

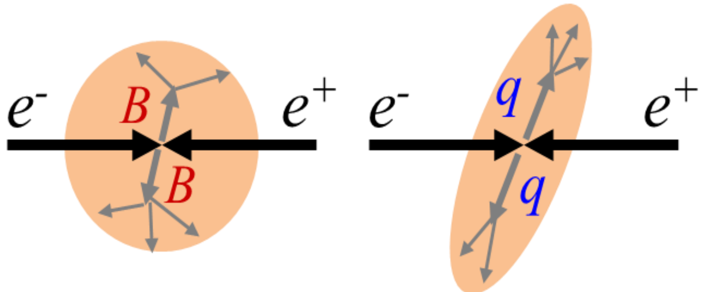
Impact parameter	$\|dr\| < 5mm$, $\|dz\| < 5cm$
M_{bc}	$5.27 < M_{bc} < 5.29$ GeV/c^2
PID	for all charged K : PID(K) > 0.6 for all charged π : PID(π) < 0.4
Mass	$\|M(\pi^+\pi^-) - M(K_S)\| < 0.0125$ GeV/c^2 $\|M(K^*K) - M(D^0)\| < 0.0159$ GeV/c^2
Best candidate selection	Use the best M_{bc}

Y(4S)の全データ(711 fb^{-1})を使用。

Likelihood Ratio (KSFW)

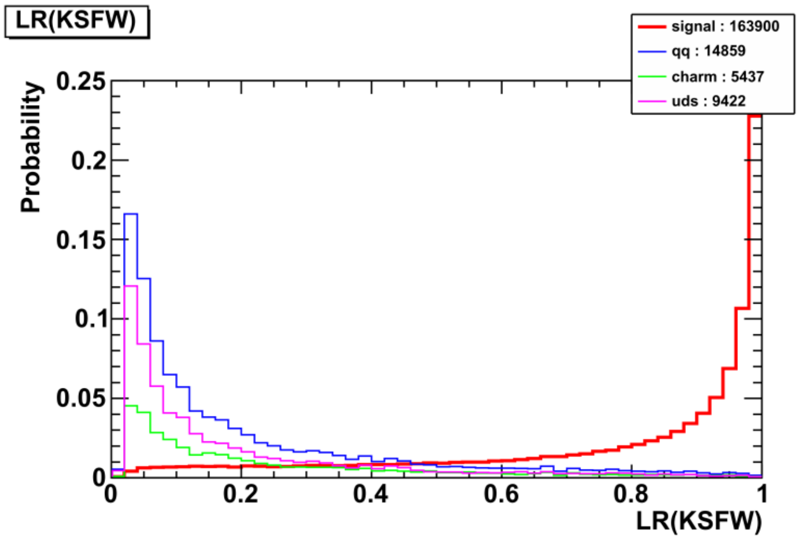
信号事象の数は2次元フィット (KSFW Likelihood vs ΔE)によって求められる。

KSFW:
運動量方向などからイベントの形状を数値化する手法。



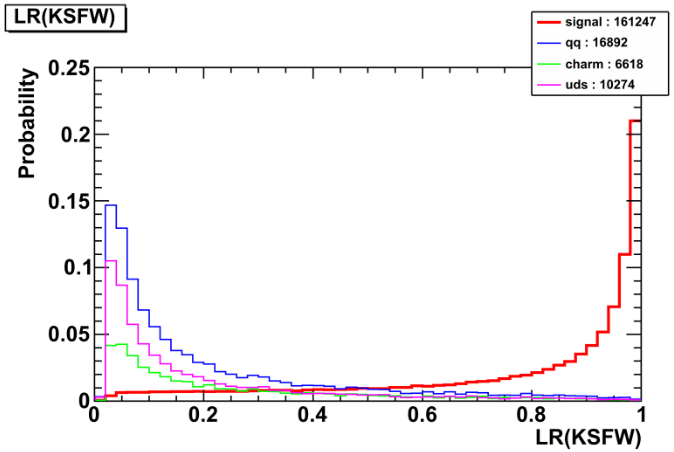
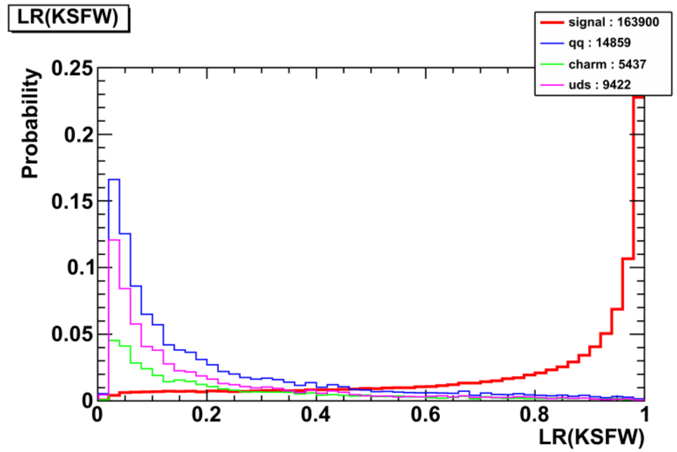
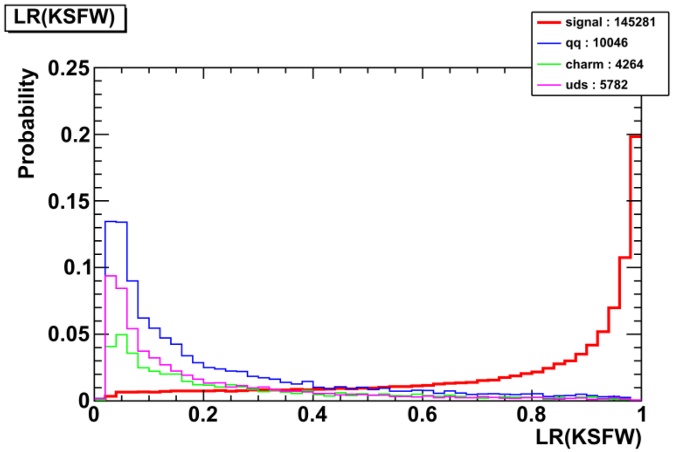
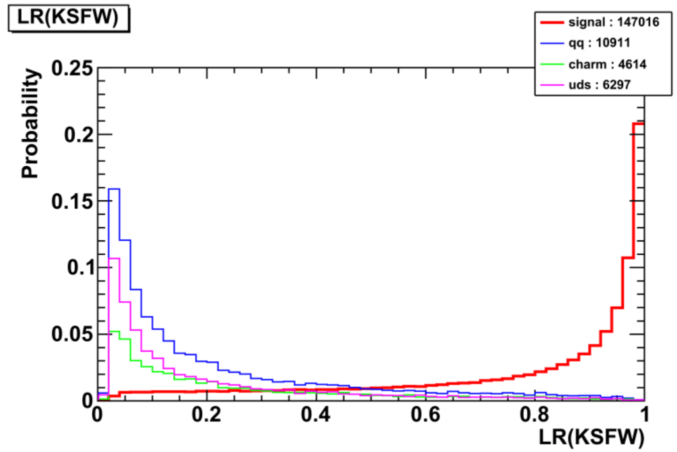
シグナル(Bを経由)は球状に、
qq̄イベントはジェット状に分布

Example of KSFW likelihood ratio



Red : signal
Blue : qq̄ (charm + uds)

KSFW Likelihood (MC)

	$D \to K_s K^- \pi^+$	$D \to K_s K^+ \pi^-$
$B^- \to D\pi^-$		
$B^- \to DK^-$		

Red : signal Blue : qq (charm + uds)

シグナルと$q\bar{q}$バックグラウンドはよく分離できている。

フィットに用いるPDF

For ΔE

for signal	Double gaussian
for $B\bar{B}$ background	Exponential
for $q\bar{q}$ background	1st chebyshev

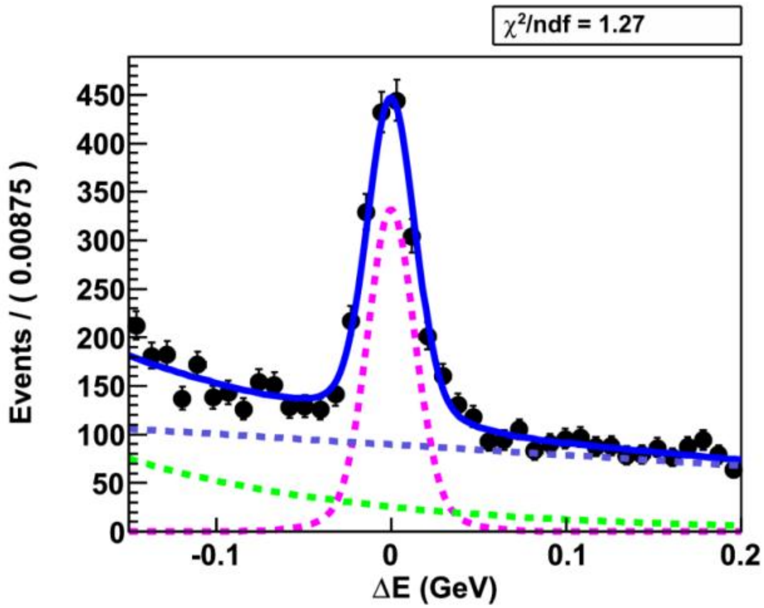
For KSFW likelihood   Histogram PDF

for signal	Obtained from signal MC
for $B\bar{B}$ background	Obtained from $B\bar{B}$ MC
for $q\bar{q}$ background	Obtained from $q\bar{q}$ MC

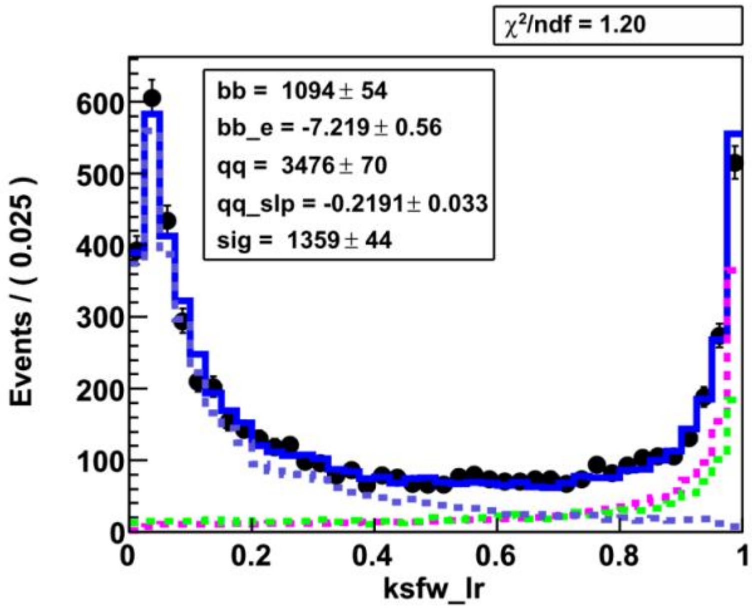
Control sample : $B^- \to D\pi^-$, $D \to K_S K^- \pi^+$

Projection for each axis

ΔE



KSFW likelihood



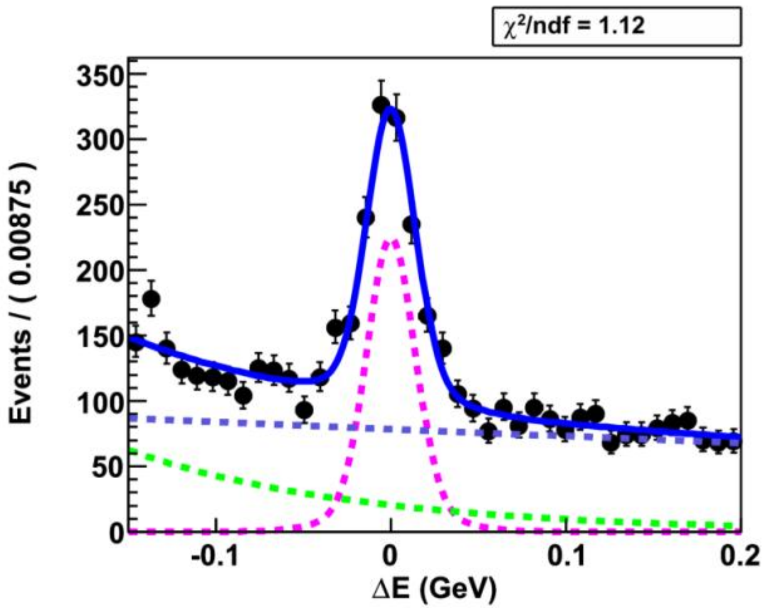
Blue solid : total pdf, Magenta dashed : signal
Blue dashed : $q\bar{q}$ BG, Green dashed : $B\bar{B}$ BG

Signal events : 1359 ± 44(stat)

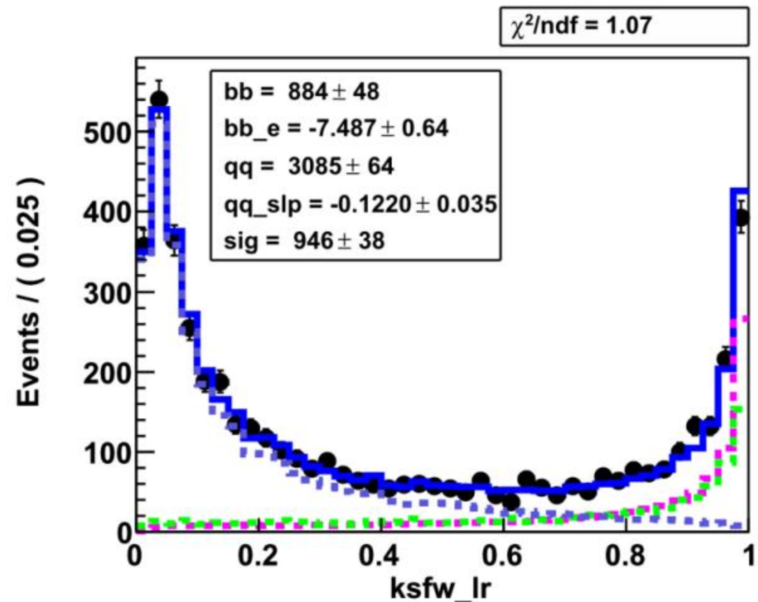
Control sample : $B^- \rightarrow D\pi^-$, $D \rightarrow K_s K^+ \pi^-$

Projection for each axis

ΔE



KSFW likelihood



Blue solid : total pdf, Magenta dashed : signal
Blue dashed : $q\bar{q}$ BG, Green dashed : $B\bar{B}$ BG

Signal events : 946 ± 38(stat)

期待されるB→DKイベントの数

$B^- \to D\pi^-$, $D \to K_s K^- \pi^+$: 1,359 ± 44(stat) events

$B^- \to D\pi^-$, $D \to K_s K^+ \pi^-$: 946 ± 38(stat) events

B→DK, D→Kπの解析によると、

(Y. Horii, K. Trabelsi, H. Yamamoto et al., PRD 78, 071901(R) (2008))

$$\frac{Br(B^- \to DK^-)}{Br(B^- \to D\pi^-)} = [\ 6.77 \pm 0.23(stat) \pm 0.30(syst)\ ] \times 10^{-2}$$

期待されるB→DK, D→KsKπイベントの数は、

$B^- \to DK^-$, $D \to K_s K^- \pi^+$: 92 ± 6 events

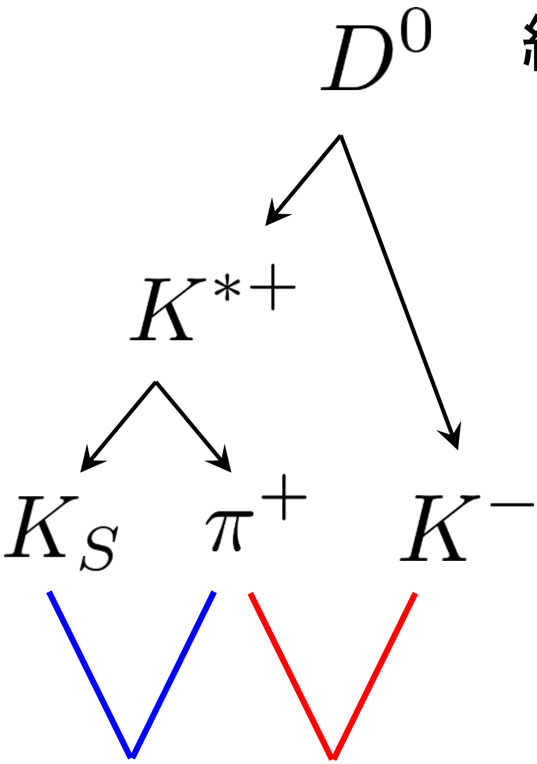
$B^- \to DK^-$, $D \to K_s K^+ \pi^-$: 64 ± 4events

Dalitz Plot

同じ終状態でも異なる共鳴状態を
経由してきている可能性がある。

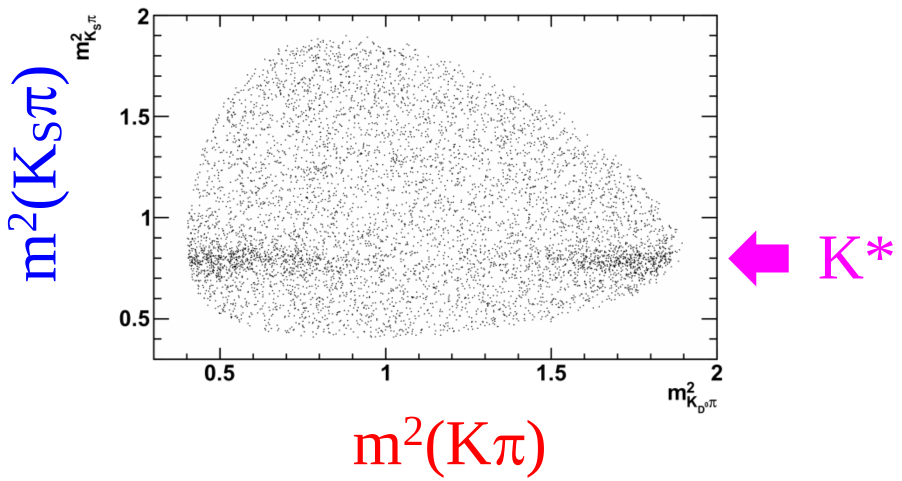
$D^0 \rightarrow ?? \rightarrow K_S K\pi$

(e.g. $D \rightarrow K^*K$, $K^{*0}K^0$, $a_0\pi$, …etc.)



実際に組み合わせて
massを出してみる。

$D^0 \rightarrow K_S K\pi$のDalitz Plot (MC)



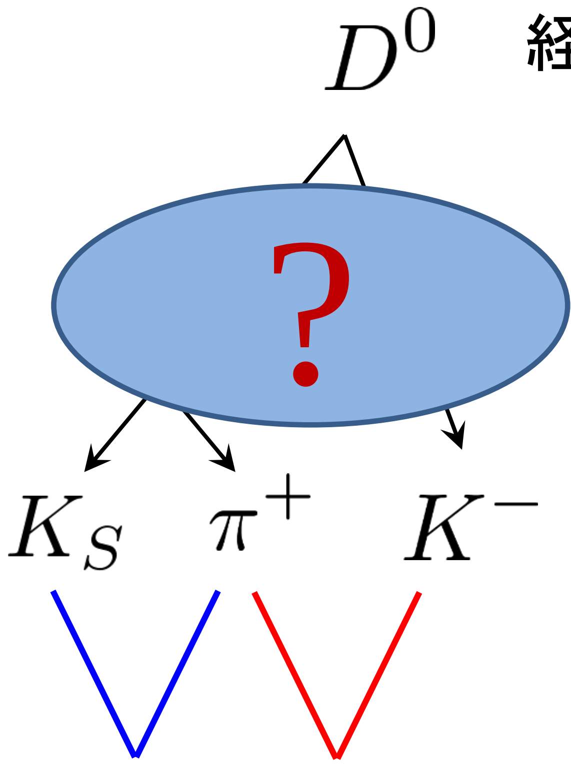
nonresonant modeは
一様に分布する

Dalitz Plot

同じ終状態でも異なる共鳴状態を
経由してきている可能性がある。

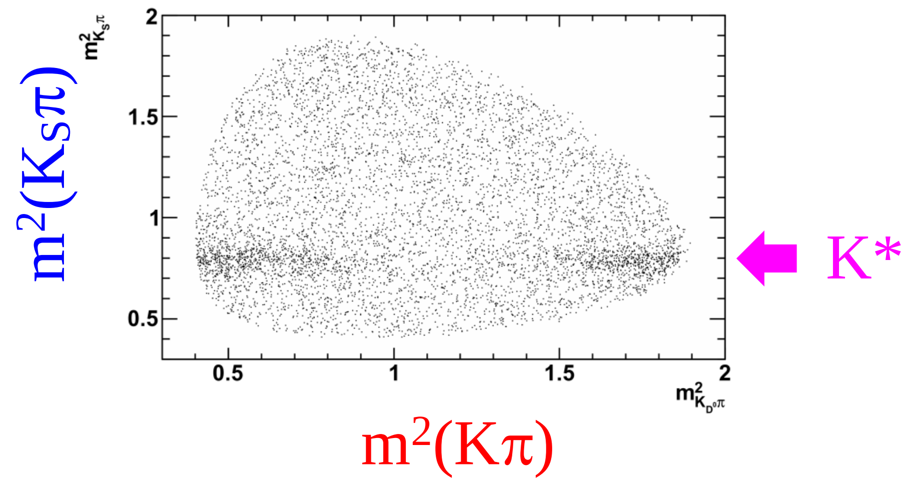
$D^0 \rightarrow ?? \rightarrow K_S K\pi$

(e.g. $D \rightarrow K^*K$, $K^{*0}K^0$, $a_0\pi$, …etc.)



実際に組み合わせて
massを出してみる。

$D^0 \rightarrow K_S K\pi$のDalitz Plot (MC)

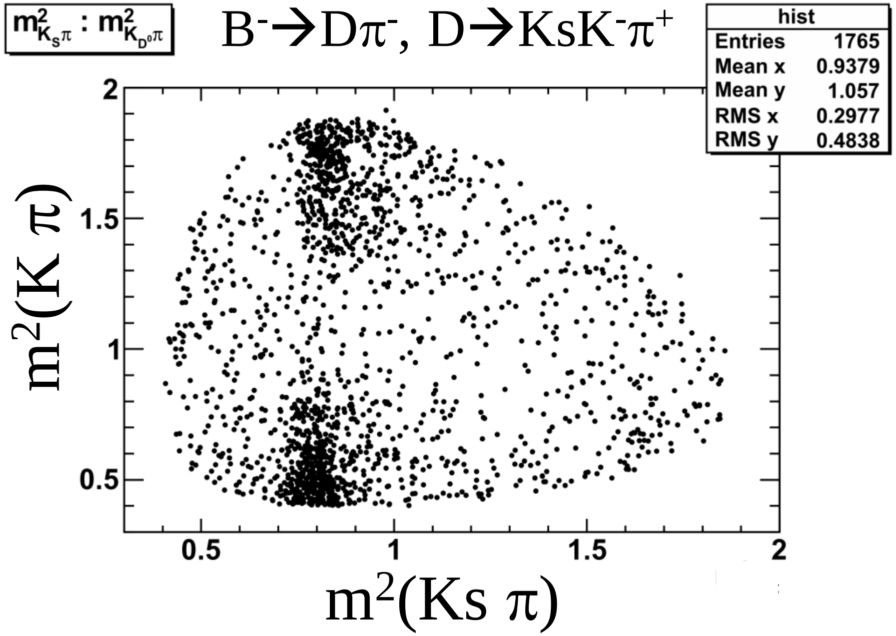


nonresonant modeは
一様に分布する

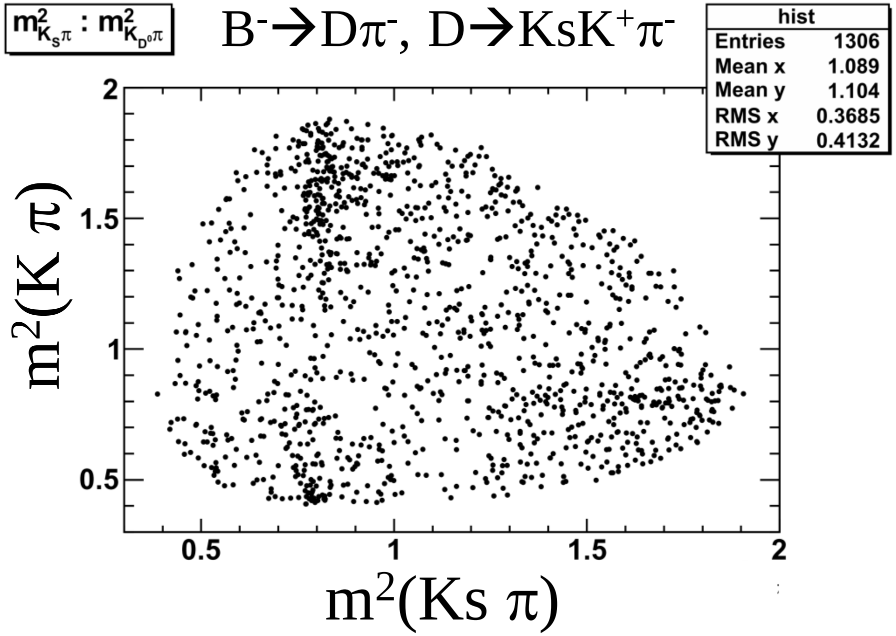
Dalitz Plot

Dalitz plot (real data) with |ΔE| > 0.04 GeV & LR(KSFW) > 0.2

$B^- \to D\pi^-$, $D \to KsK^-\pi^+$



$B^- \to D\pi^-$, $D \to KsK^+\pi^-$



K*Kのイベントが支配的

より複雑な構造が見て取れる
(K*K, $K^{*0}K^0$, non-resonant, etc.)

これらのダリッツプロットをフィットし、それぞれの共鳴状態の振幅などの情報を得る必要がある。

Tagged D events

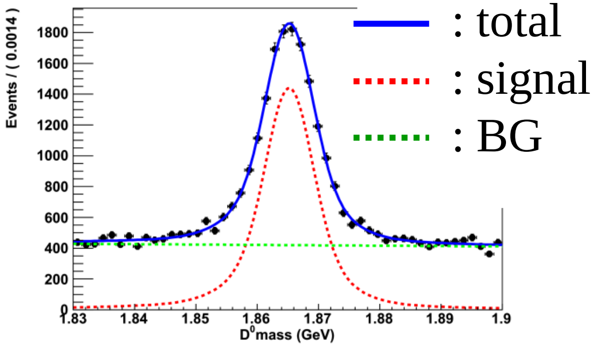
フィットに用いるD→KsKπ のダリッツ平面のモデルはtagged D (from $D^{*+} \to D^0\pi^+$, $D^{*-} \to \overline{D}{}^0\pi^-$)を用いて作られる。

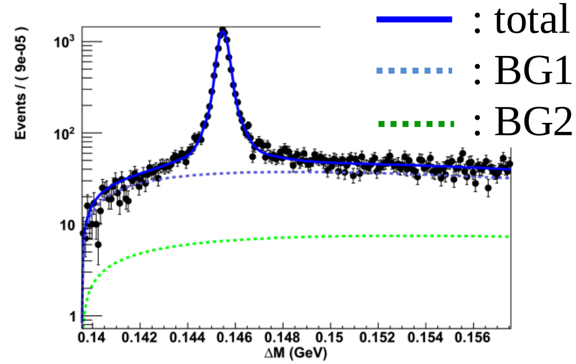
D^0 mass

ΔM (D* mass - D^0 mass)

# of events / 141 fb^{-1} with D^0 mass & ΔM 2σ cut.

$D^0 \to K_s K^- \pi^+$

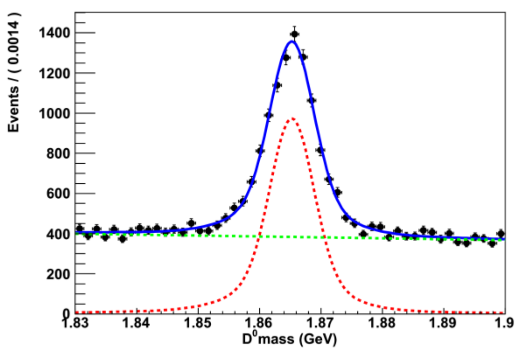


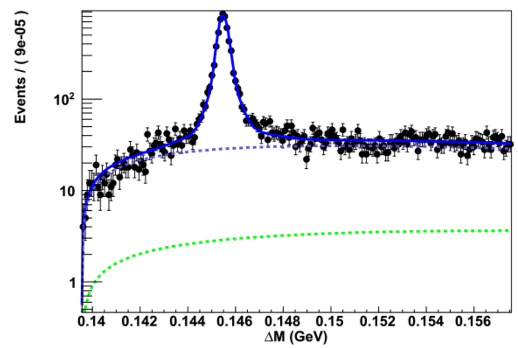


~9,300 events

Purity : > 90%

$D^0 \to K_s K^+ \pi^-$





~5,800 events

Purity : > 90%

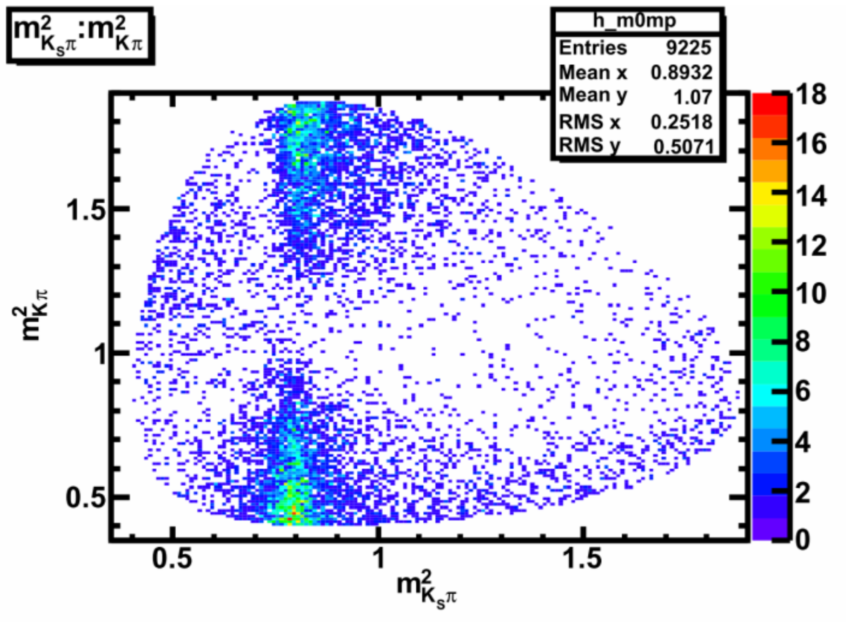
Υ(4S) の全データを用いた場合に期待されるtagged D のイベント数は

$D^0 \to K_s K^- \pi^+$: ~70,000 events

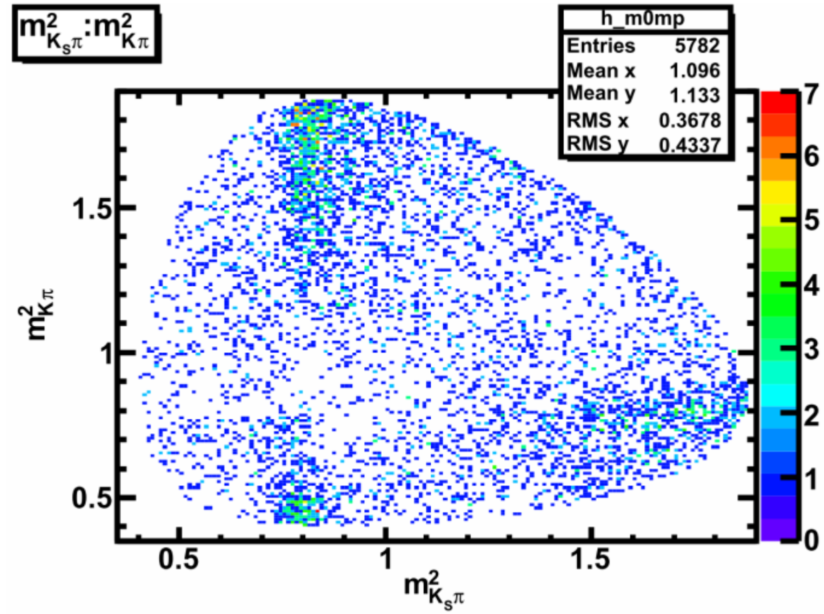
$D^0 \to K_s K^+ \pi^-$: ~44,000 events

Tagged D のDalitz Plot

$D^0 \rightarrow KsK^-\pi^+$



$D^0 \rightarrow KsK^+\pi^-$



このダリッツプロットから作成したモデルを使ってB→DKのダリッツプロットをフィットすることになる。

B→DKではD^0と$\bar{D}^0$は区別できないため、$D^0 \rightarrow KsK^-\pi^+$と$D^0 \rightarrow \bar{K}sK^-\pi^+$の両方が入ってくることになる。
そのため、二つモデルを組み合わせてフィットする必要がある。

まとめ

- B→DK, D→KsKπ崩壊を用いたϕ_3の測定は未だなされていない。

- 2次元フィット(ΔE versus LR(KSFW))を行い、B→Dπ, D→KsKπのシグナルを得た。

  $B^- \rightarrow D\pi^-$, $D \rightarrow KsK^-\pi^+$: 1,359 ± 44(stat) events

  $B^- \rightarrow D\pi^-$, $D \rightarrow KsK^+\pi^-$: 946 ± 38(stat) events

  （Belleの全データ（770M BB events）を使用）

- ダリッツ解析に用いられる$B^- \rightarrow DK^-$のイベント数を見積もった。

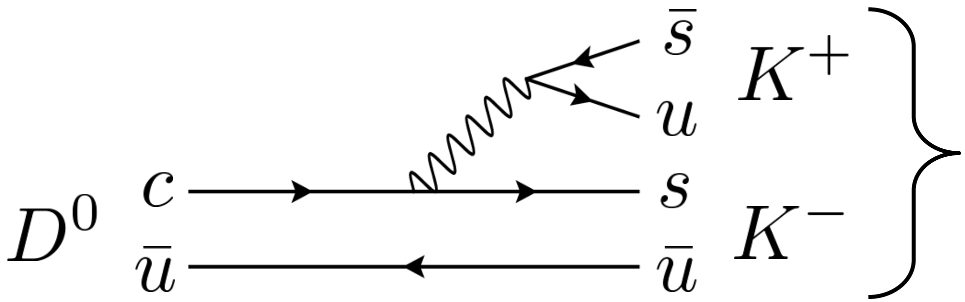
  $B^- \rightarrow DK^-$, $D \rightarrow KsK^-\pi^+$: 92 ± 6 events

  $B^- \rightarrow DK^-$, $D \rightarrow KsK^+\pi^-$: 64 ± 4events

- 今後は統計量の多いtagged D からD→KsKπ のモデルを作成する。

Back up

D→K*K崩壊



どちらかがK*
K*⁺ : 80%
K*⁻ : 20%

➡ $D^0(\overline{D}^0) \to K^{*+}K^-$
$D^0(\overline{D}^0) \to K^{*-}K^+$ の2つの終状態が存在する。

Bの電荷と合わせてモードを判別する。

$$B^{\pm} \to [K^{*\mp}K^{\pm}]_D K^{\pm}$$ Opposite mode

$$B^{\pm} \to [K^{*\pm}K^{\mp}]_D K^{\pm}$$ Same mode

また、K*は

$$K^{*\pm} \to K^{\pm}\pi^0 \ : 1/3$$
$$K^{*\pm} \to K^0\pi^{\pm} \ : 2/3$$

で崩壊する。

理論

B$^+$, B$^-$のopposite mode, same modeの分岐比

$$A[B^- \to K^-(K^{*+}K^-)_D] = |A_B A_D|\left[1 + r_B r_D e^{i(\delta_B+\delta_D-\phi_3)}\right]$$ Opposite mode

$$A[B^- \to K^-(K^{*-}K^+)_D] = |A_B A_D| e^{i\delta_D}\left[r_D + r_B e^{i(\delta_B-\delta_D-\phi_3)}\right]$$ Same mode

$$A[B^+ \to K^+(K^{*-}K^+)_D] = |A_B A_D|\left[1 + r_B r_D e^{i(\delta_B+\delta_D+\phi_3)}\right]$$ Opposite mode

$$A[B^+ \to K^+(K^{*+}K^-)_D] = |A_B A_D| e^{i\delta_D}\left[r_D + r_B e^{i(\delta_B-\delta_D+\phi_3)}\right]$$ Same mode

$$r_B = \left|\frac{\bar{A}_B}{A_B}\right| = \left|\frac{A(B^- \to \bar{D}^0 K^-)}{A(B^- \to D^0 K^-)}\right|, \quad r_D = \left|\frac{\bar{A}_D}{A_D}\right| = \left|\frac{A(\bar{D}^0 \to K^{*+}K^-)}{A(D^0 \to K^{*+}K^-}\right|$$

r_Dは他の測定で精度よく測定されている(既知数)とする。

→未知数はδ_D, δ_B, r_B, ϕ_3の4つ。分岐比の4式を連立すれば解ける。

$$\boxed{\cos\phi_3 = \frac{(R_1+R_3-2)^2-(R_2+R_4-2r_D^2)^2}{4[(R_1-1)(R_3-1)-(R_2-r_D^2)(R_4-r_D^2)]}}$$

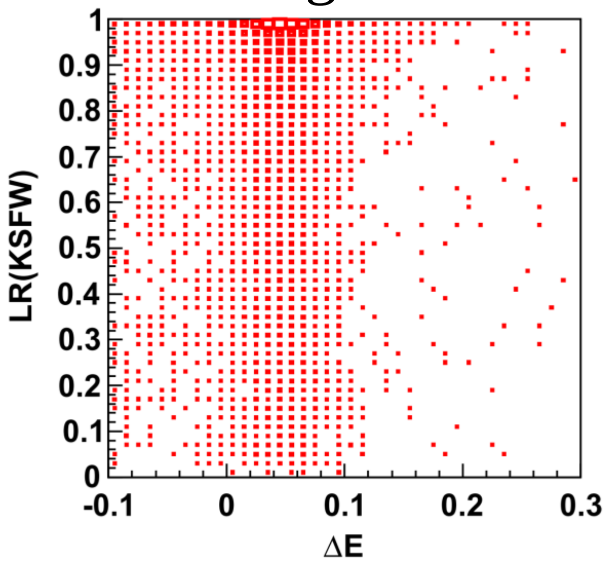
$$R_1 = \left[\frac{A[B^- \to K^-(K^{*+}K^-)_D]}{A_B A_D}\right]^2, \quad R_2 = \cdots$$

ΔEとKSFWの相関

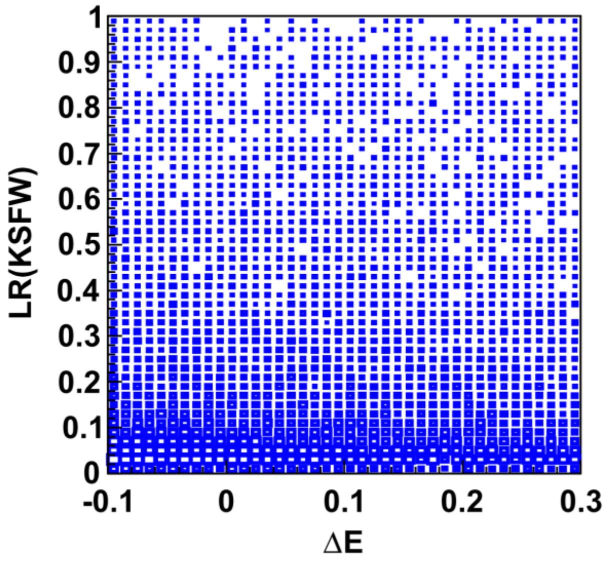
ΔEとKSFW likelihoodはほとんど相関を持たない。

そのため、2次元フィットのためのPDFは、単純にΔEとKSFW likelihoodのPDFの積として表すことが出来る。

Signal

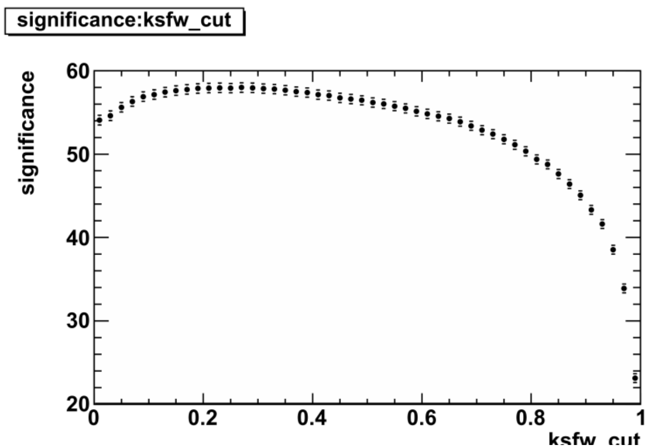
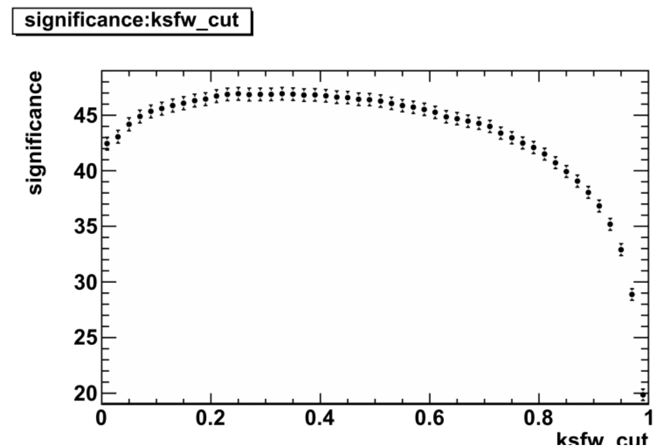
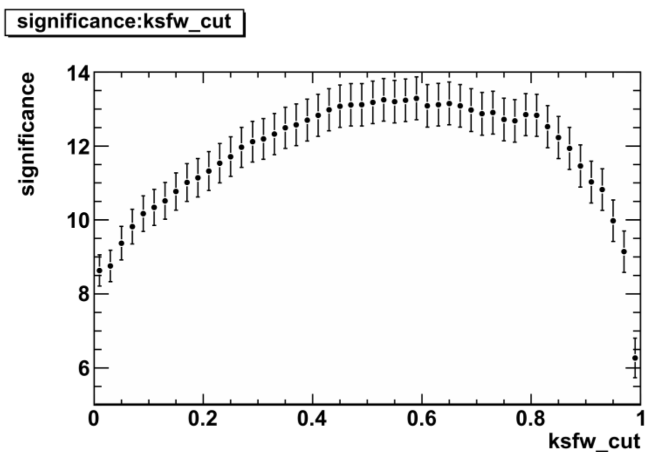
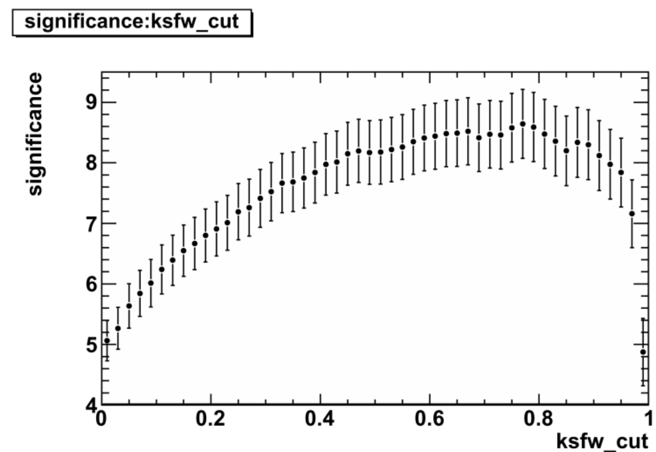


$q\bar{q}$ background



相関係数	0.0083	0.033

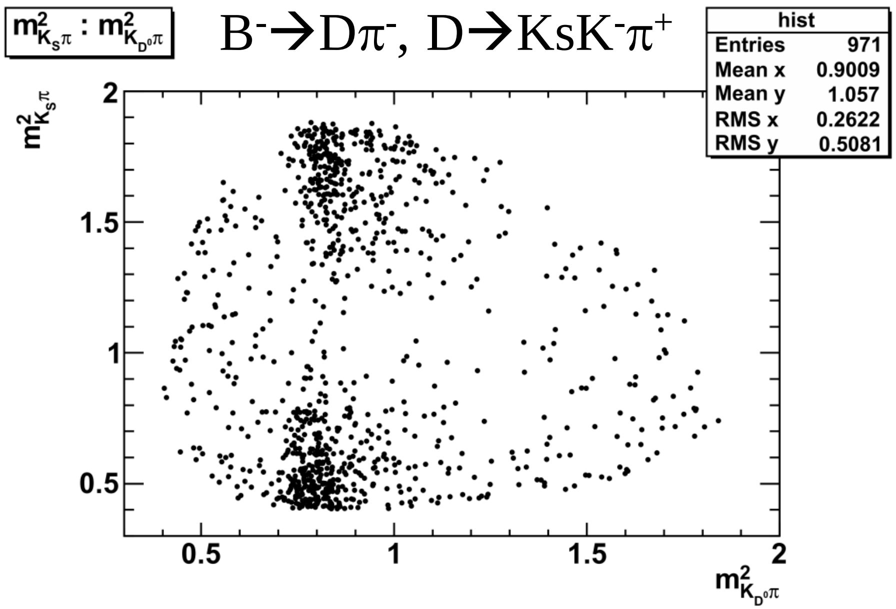
The merit of LR(KSFW)

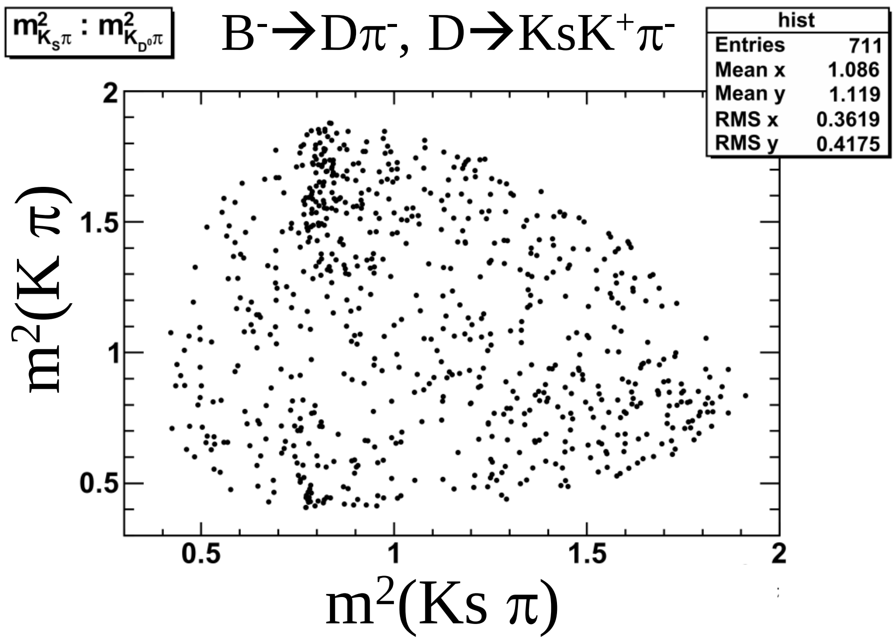
	$D \rightarrow K_s K^- \pi^+$	$D \rightarrow K_s K^+ \pi^-$
$B^- \rightarrow D\pi^-$		
$B^- \rightarrow DK^-$		

These distributions are reasonable.

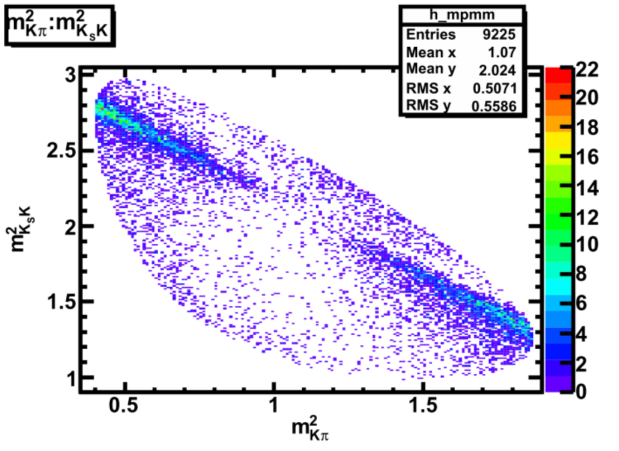
Dalitz Plot

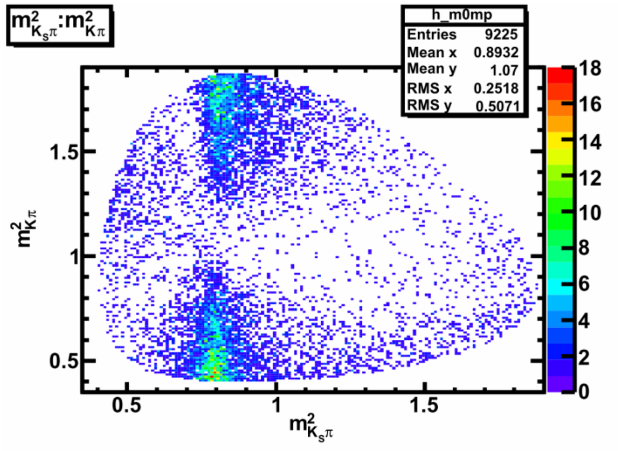
Dalitz plot (real data) with |ΔE| > 0.04 GeV & LR(KSFW) > 0.8

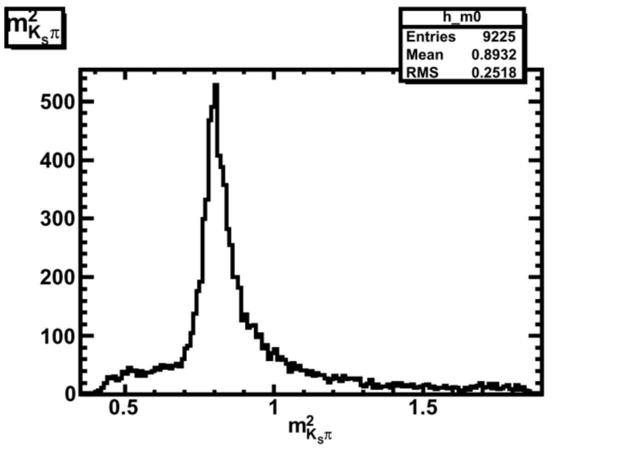


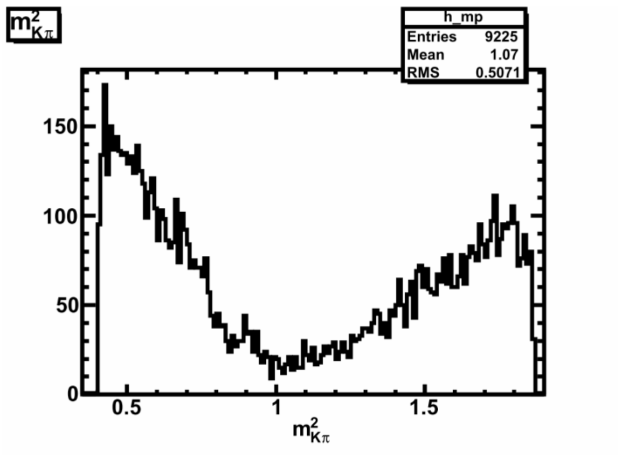


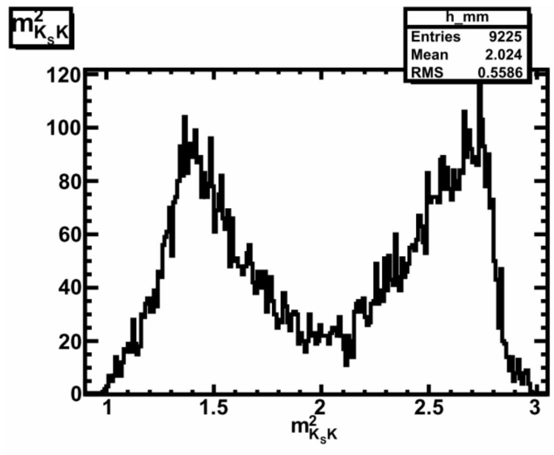
$D^0 \rightarrow KsK^-\pi^+$のDalitz Plot











$D^0 \rightarrow KsK^+\pi^-$のDalitz Plot