B中間子のDK崩壊を用いたCP非保存角phi3の研究

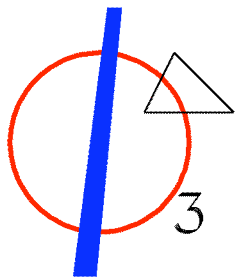
2009年2月3日

草野智則

概要

- CP非保存角ϕ_3
- Belle実験
- B➔D_1Kの解析
- 結果

CP非保存角ϕ_3



CP非保存

- CP (C:Charge, P:Parity)非保存の精密測定

  1. 消えた反物質の手がかり
  2. CP非保存はフレーバー混合に起源を持つ
     ➔フレーバーに関するパラメータの精密測定

➔CP非保存の精密測定はフレーバー物理の観点から、
標準理論(特にCKM理論)の検証や新しい物理を発見する手がかりとなる。

CKM機構

- CKM機構：弱い相互作用でCP非保存

弱い相互作用のラグランジアン：

$$\mathcal{L}_{\mathrm{int}} = -\frac{g}{\sqrt{2}}(V_{CKM}\bar{U}_L\gamma_\mu D_L W_\mu^+) + h.c$$

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

U=(u,c,t)
D=(d,s,b)
U_L、D_L:左巻き部分

CKM行列はユニタリ行列
複素位相の数は世代数をNとすると
(N-1)(N-2)/2

クォークが3世代以上
➔CKM行列はCPを破る複素位相を持つ

ユニタリティー三角形

- CKM行列はカビボ因子λで展開できる。

λ~0.22

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} \boxed{\begin{matrix} V_{ud} \\ V_{cd} \\ V_{td} \end{matrix}} & \begin{matrix} V_{us} \\ V_{cs} \\ V_{ts} \end{matrix} & \boxed{\begin{matrix} V_{ub} \\ V_{cb} \\ V_{tb} \end{matrix}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1-\frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - \underline{i\eta}) \\ -\lambda & 1-\frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1-\rho-\underline{i\eta}) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

V_{CKM}はユニタリ行列: $V_{CKM}^{\dagger} V_{CKM} = 1$

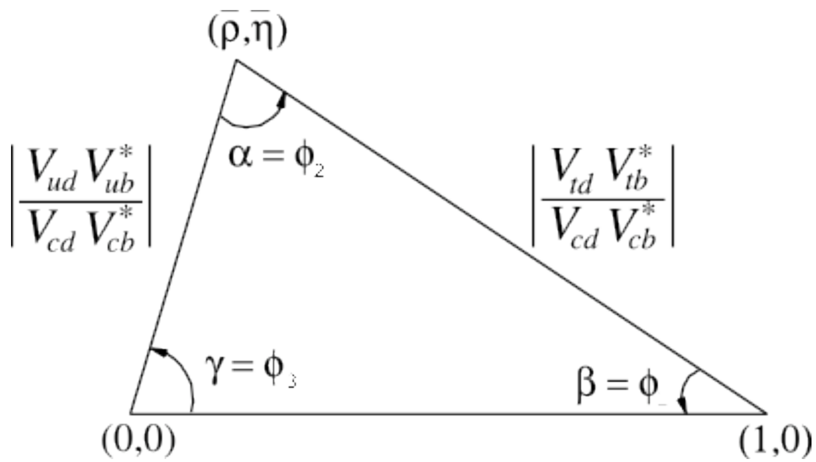
$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

➔ 複素平面上に三角形を描く

CP非保存➔三角形の面積が0でない

本研究:最も測定が困難なϕ_3の研究

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



ϕ_3の測定(1):干渉によるCPの破れ

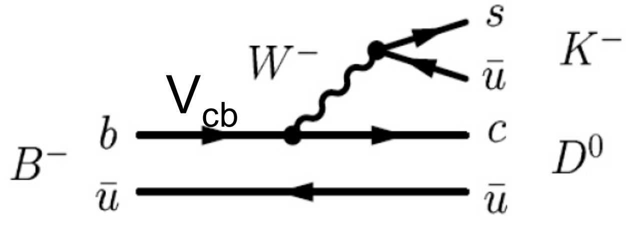
ϕ_3の測定は V$_{ub}$の位相測定

$$\phi_3 \sim \arg(V_{ub}^*)$$

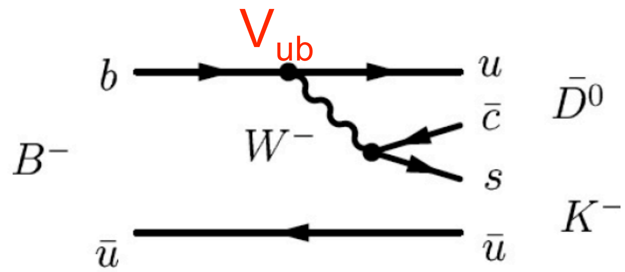
B➔DKの崩壊を用いる。

BがD^{0}または$\overline{D^0}$を経て同じ終状態fKへ崩壊する振幅

$$A(B^- \to [f]_D K^-) = A(B^- \to D^0 K^- \to f K^-) + A(B^- \to \bar{D}^0 K^- \to f K^-)$$
$$= A_B A_D \{r_D + r_B exp(i(\underline{\delta - \phi_3}))\}$$



$$A(B^+ \to [\bar{f}]_D K^+) = A(B^+ \to \bar{D}^0 K^+ \to \bar{f} K^+) + A(B^+ \to D^0 K^+ \to \bar{f} K^+)$$
$$= A_B A_D \{r_D + r_B exp(i(\underline{\delta + \phi_3}))\}$$



$$A_B(\bar{A}_B) = \left|A\left(B^- \to D^0\left(\bar{D}^0\right)K^-\right)\right| \quad A_D(\bar{A}_D) = \left|A\left(D^0 \to \bar{f}\,(f)\right)\right|$$
$$r_{B(D)} = \bar{A}_{B(D)}/A_{B(D)}$$

ϕ_3:CP変換で符号反転、δ:強い相互作用の位相差(CP変換で不変)

D^{0}と$\overline{D^0}$が同じ終状態へ崩壊
➔ϕ_3、δ起因の干渉による直接的なCPの破れ

ϕ_3の測定(2):ADS法

崩壊分岐比(Γ=A^2)からϕ_3を測定

終状態fに対してと崩壊分岐比の比$\mathcal{R}_f$とCP非対称度$\mathcal{A}_f$が求まる。

$$R_f \equiv \frac{\Gamma(B^- \to [f]_D K^-) + \Gamma(B^+ \to [\bar{f}]_D K^+)}{\Gamma(B^- \to [\bar{f}]_D K^-) + \Gamma(B^+ \to [f]_D K^+)} = r_B^2 + r_D^2 + 2r_B r_D \cos\phi_3 \cos\delta$$

$$\mathcal{A}_f \equiv \frac{\Gamma(B^- \to [f]_D K^-) - \Gamma(B^+ \to [\bar{f}]_D K^+)}{\Gamma(B^- \to [f]_D K^-) + \Gamma(B^+ \to [\bar{f}]_D K^+)} = \frac{2r_B r_D \sin\phi_3 \sin\delta}{r_B^2 + r_D^2 + 2r_B r_D \cos\phi_3 \cos\delta}$$

未知変数:ϕ_3,r_B,δ

2つの終状態f_1,f_2から$\mathcal{A}_{f1}$、$\mathcal{A}_{f2}$、$\mathcal{R}_{f1}$、$\mathcal{R}_{f2}$を測定した場合、
未知変数ϕ_3,r_B,δのうち、ϕ_3,r_Bはどの終状態でも共通

終状態f1		終状態f2		
$\mathcal{A}_{f1}(\phi_3,r_B,\delta_1)$	+	$\mathcal{A}_{f2}(\phi_3,r_B,\delta_2)$	➔	4つの未知変数
$\mathcal{R}_{f1}(\phi_3,r_B,\delta_1)$		$\mathcal{R}_{f2}(\phi_3,r_B,\delta_2)$		4つの式

2つの終状態を解析➔ϕ_3が測定可能

より多くの終状態を解析➔ϕ_3の精密測定

B➔D_1K

- 本研究で解析する崩壊：B➔D_1K
  D_1:CP evenの固有状態(K^+K^-、$\pi^+\pi^-$)

$$D_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(D^0 + \bar{D}^0)$$

ADS法に用いる崩壊の中では崩壊分岐比が大きく、精密に測定できる

$$\mathcal{A}_1 \equiv \frac{\Gamma(B^- \to D_1 K^-) - \Gamma(B^+ \to D_1 K^+)}{\Gamma(B^- \to D_1 K^-) + \Gamma(B^+ \to D_1 K^+)} = \frac{2 r_B r_D \sin\phi_3 \sin\delta}{r_B^2 + r_D^2 + 2 r_B r_D \cos\phi_3 \cos\delta}$$

$$\mathcal{R}_1 = \frac{\mathcal{R}^{DK}}{\mathcal{R}^{D\pi}} = r_B^2 + r_D^2 + 2 r_B r_D \cos\phi_3 \cos\delta$$

r_B~0.1
r_D=1

$$\mathcal{R}^{DK(\pi)} = \frac{\Gamma(B^- \to D_1 K^-(\pi^-)) + \Gamma(B^+ \to D_1 K^+(\pi^+))}{\Gamma(B^- \to D^0 K^-(\pi^-)) + \Gamma(B^+ \to D^0 K^+(\pi^+))}$$

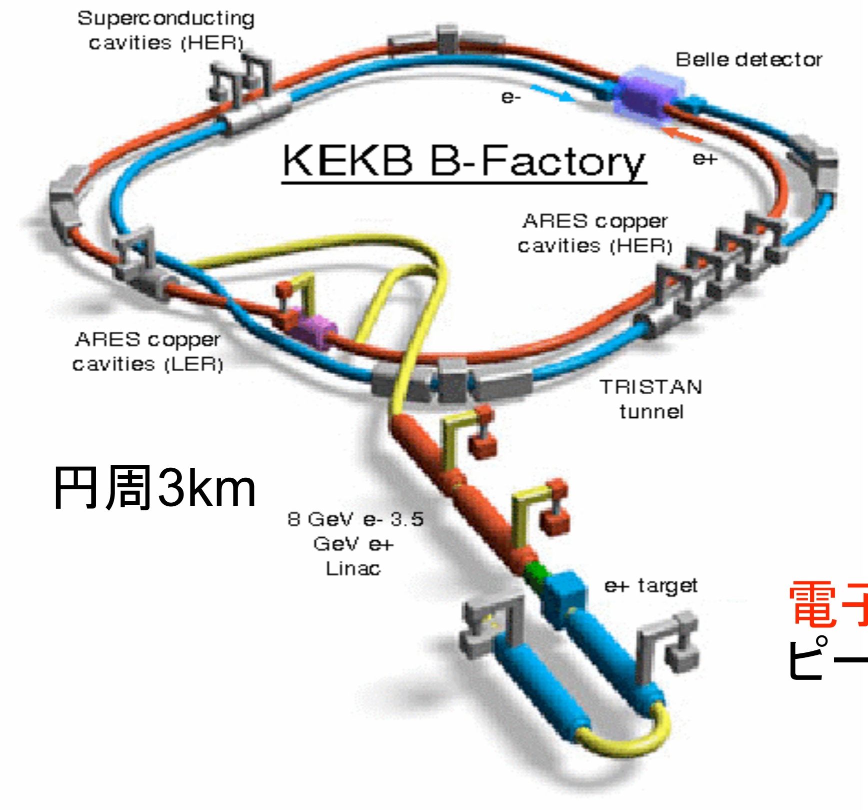
B➔Dπ：B➔DKと崩壊が似ており、比をとることにより系統誤差を相殺

本研究：B➔D_1Kから$\mathcal{A}_1$,$\mathcal{R}_1$を測定

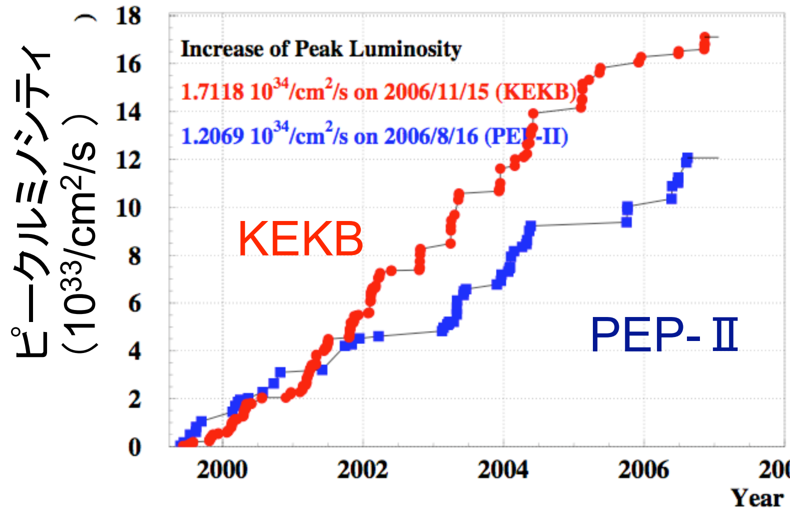
Belle実験

Belle実験

- Belle実験: 大量のB中間子を生成
- KEKB加速器: 電子8.0GeV、陽電子3.5GeV、重心エネルギー10.6GeVの非対称衝突型加速器(B中間子一対がしきい値で生成)

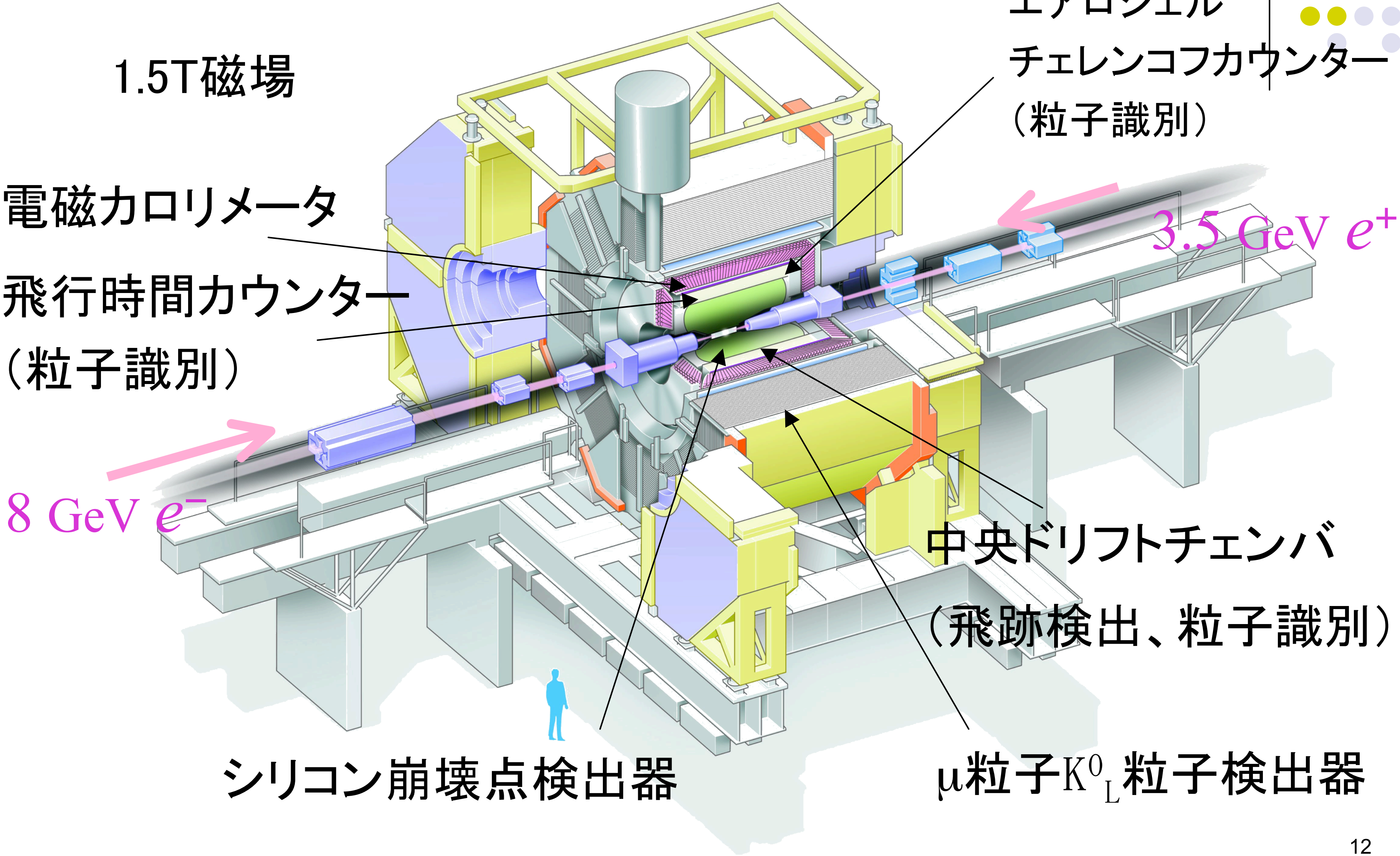


円周3km



電子陽電子衝突器として世界最高のルミノシティ
ピークルミノシティ: $1.7\times10^{34}/cm^2/s$

Belle検出器


1.5T磁場
エアロジェル
チェレンコフカウンター
（粒子識別）
電磁カロリメータ
飛行時間カウンター
（粒子識別）
3.5 GeV e^+
8 GeV e^-
中央ドリフトチェンバ
（飛跡検出、粒子識別）
シリコン崩壊点検出器
μ粒子K^0_L粒子検出器

$B \rightarrow D_1 K$の解析

解析の流れ

- データサンプル: 388×10^6のBBペアに対応

- 再構成する崩壊 $(B^-\to[K^-K^+]_D K^- \equiv B\to DK^-,\ D\to K^-K^+)$

CP非対称性の測定
$B^-\to D_1K^-$
$(B^-\to[K^-K^+]_D K + B\to[\pi^-\pi^+]_D K)$

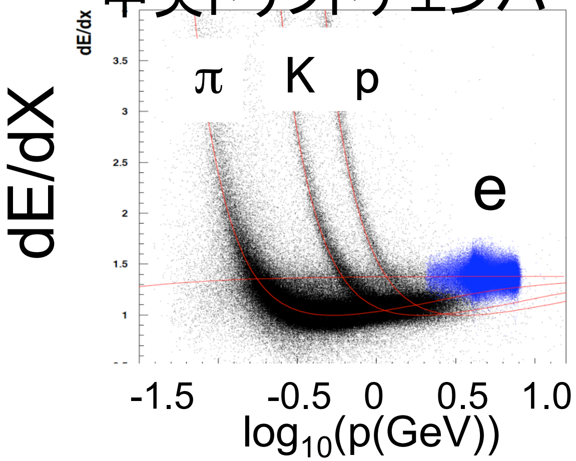
$B^-\to D_1K^-$と崩壊分岐比の比を測定
(CP非対称性ほぼなし)
$B^-\to D_1\pi^-$
$(B^-\to[K^-K^+]_D\pi^- + B^-\to[\pi^-\pi^+]_D\pi^-)$
$B^-\to[K^-\pi^+]_D K^-$
$B^-\to[K^-\pi^+]_D\pi^-$,

●Bの崩壊分岐比
＝シグナル数/BBペア/検出効率/Dの崩壊分岐比
➔検出効率、崩壊を再構成してシグナルのイベント数を求めれば良い。

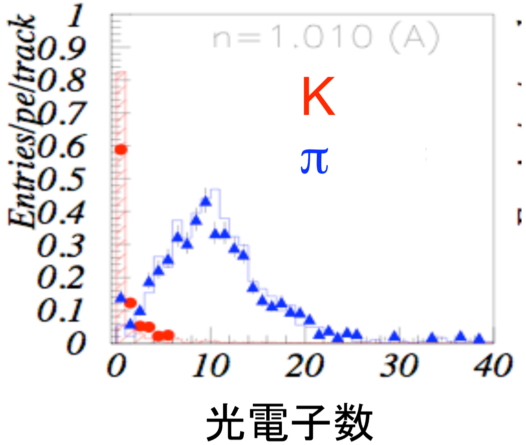
粒子の識別

この解析では終状態の粒子は$K^{\pm}$と$\pi^{\pm}$。
各検出器の情報を合わせて得るK/πに対するライクリフッド比LR(K/π)から識別。

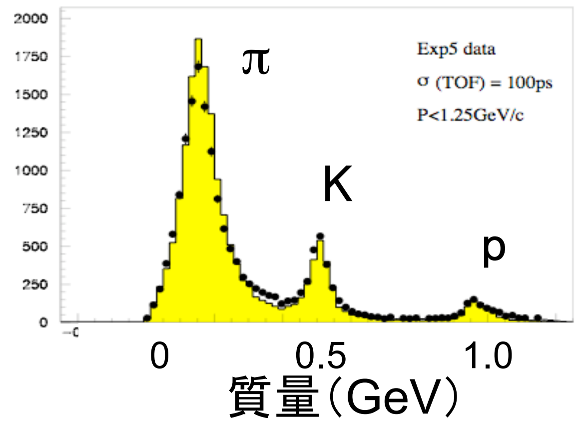
中央ドリフトチェンバ

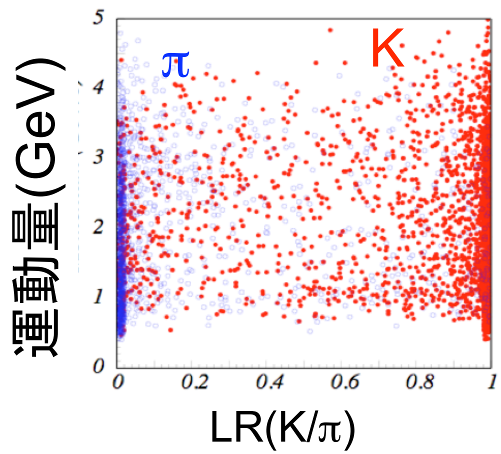


チェレンコフカウンター



飛行時間カウンター





- 粒子識別の要求
  - Dの崩壊粒子
    K:LR(K/π)>0.3, π :LR(K/π)<0.7
  - Bから直接崩壊した粒子
    K:LR(K/π)>0.8, π :LR(K/π)<0.8

イベントの選択と再構成

- D(1.865GeV)の再構成：電荷の異なる$K^\pm$、$\pi^\pm$から再構成
  ➔ 1.85GeV<(再構成した不変質量M_D)<1.88GeV
- B(5.279GeV)の再構成：DとK⁻/π⁻から再構成
  次の2つの量を利用

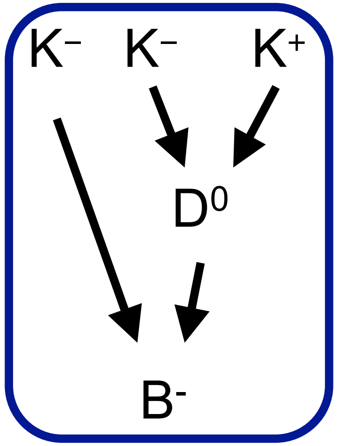
  M_{bc}: ビームコンストレインド質量

  $$M_{\rm bc} = \sqrt{\underline{E^2_{\rm beam}} - (p_D + p_{K/\pi})^2} \quad \left(m_B = \sqrt{\underline{E^2_B} - (p_D + p_{K/\pi})^2} \right)$$

  ➔ 5.27GeV<M_{bc} <5.29GeV

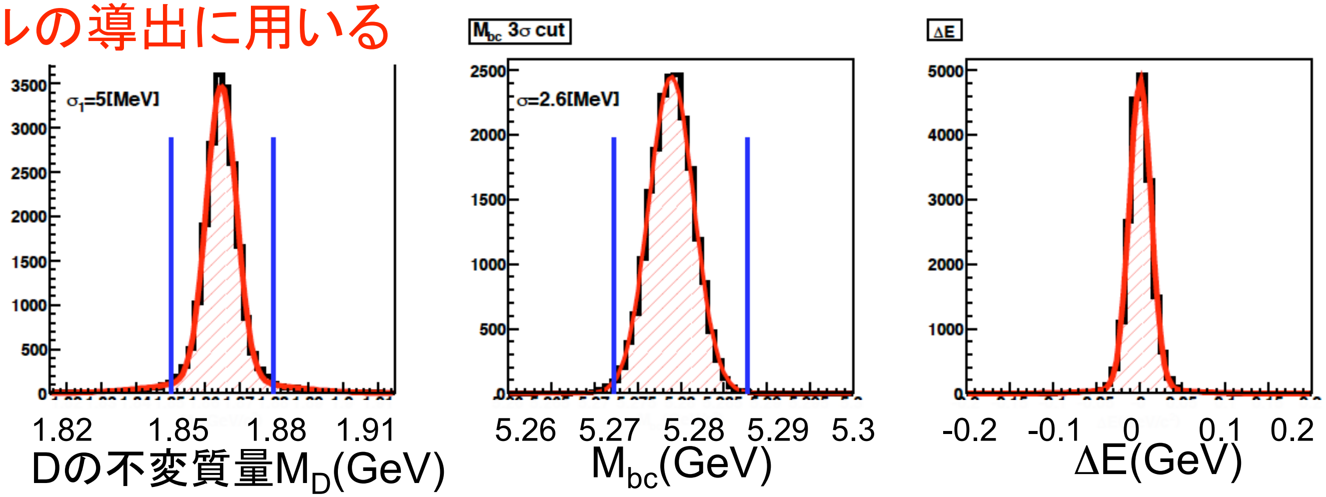
  ΔE: エネルギー差

  $$\Delta E = E_D + E_{K/\pi} - E_{\rm beam}$$ ((再構成エネルギー)-(Bが持つべきエネルギー))



シグナルの導出に用いる

シグナル
モンテカルロ



主なバックグラウンド

1. B以外の崩壊
$e^+e^- \rightarrow qq(q=u,d,c,s)$

2. Bの崩壊
非検出粒子あり
$B \rightarrow D^*\pi$,$B \rightarrow D^*K$など

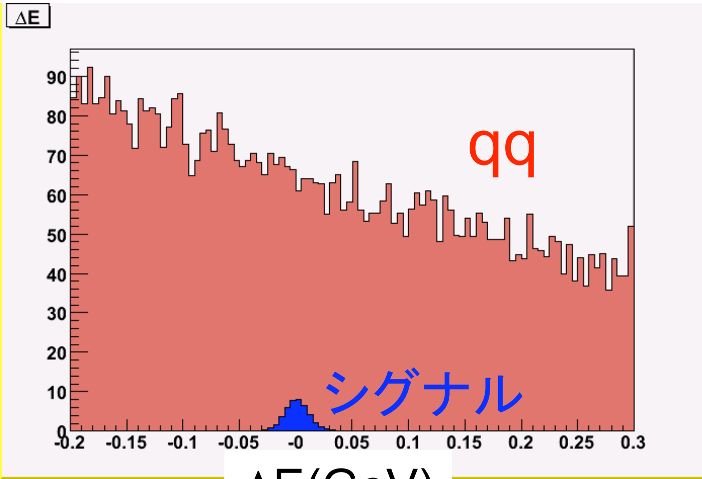
3. Bの崩壊
全粒子を検出
粒子の誤識別あり
$B \rightarrow D\pi$

4. Bの崩壊
全粒子を検出
粒子の誤識別なし
組み違え、希崩壊
$B \rightarrow [K\pi]_D\pi$、$B \rightarrow KKK$、$B \rightarrow \pi\pi K$

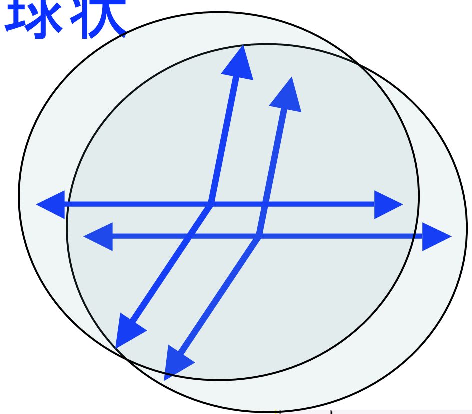
これらのバックグラウンドを除去、
およびフィットでイベント数を評価。

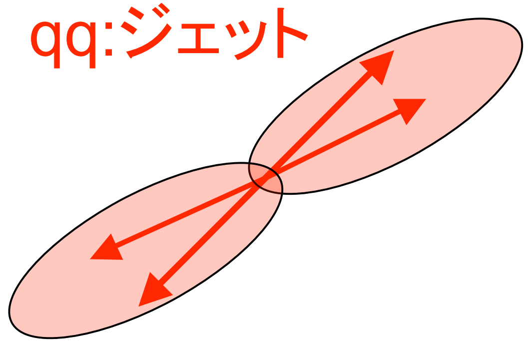
$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$バックグラウンド(1)

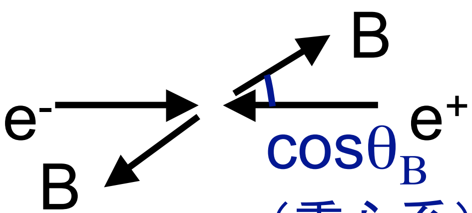
- $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$(q=u,d,c,s)、ΔEに一様分布するバックグラウンドイベントの形状、e^+e^-の重心系の角度分布($\cos\theta_B$)で区別



ΔE(GeV)

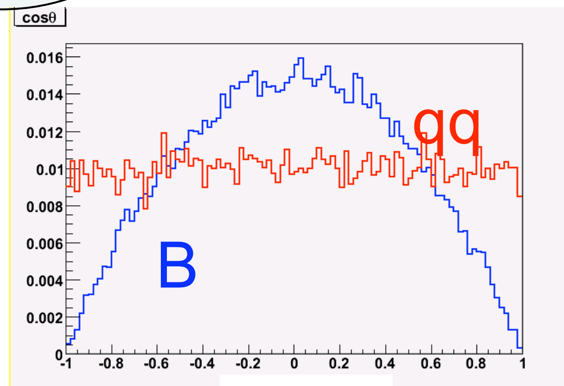






$\cos\theta_B$
（重心系）

軌道角運動量1
角度分布
$1-\cos\theta_B^2$

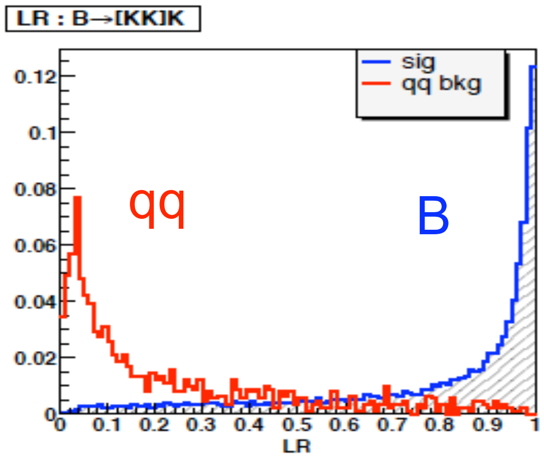


$\cos\theta_B$

角度分布
ほぼ一様

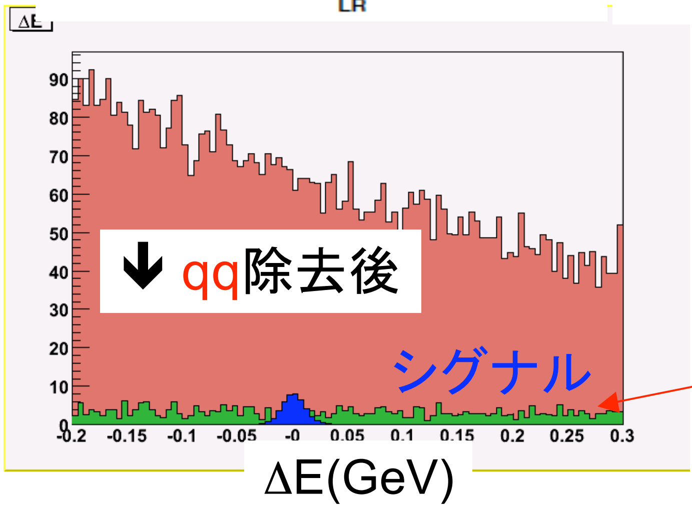
$e^+e^- \rightarrow qq$バックグラウンド(2)

- イベントの形状、e^+e^-重心系の角度分布から
  Bとqqに対するライクリフッド比:LRを得る



モンテカルロから、統計誤差に対してシグナル数が最大になるように選択基準を決定

崩壊	LR	シグナル保持率	BG除去率
$B \rightarrow [KK]_D K(\pi)$:	LR>0.45	0.86	0.82
$B \rightarrow [\pi\pi]_D K(\pi)$:	LR>0.75	0.68	0.95
$B \rightarrow [K\pi]_D K(\pi)$:	LR>0.15	0.96	0.53



$B \rightarrow DK$と$B \rightarrow D\pi$に同じ選択を課して系統誤差を相殺

残り(緑)は直線でフィット

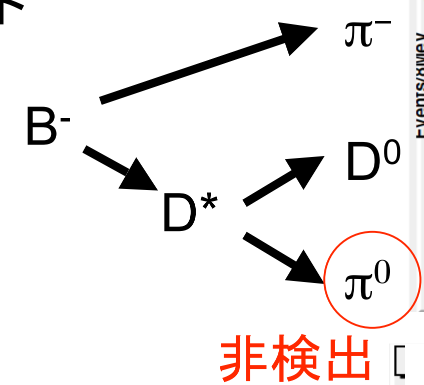
Bの崩壊によるバックグラウンド

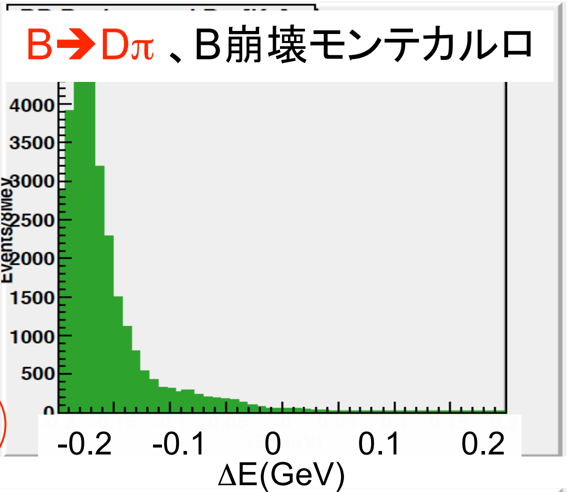
$$\Delta E = E_D + E_{K/\pi} - E_{beam}$$
$$E = (p^2_{measure} + m^2_{k/\pi})^{1/2}$$

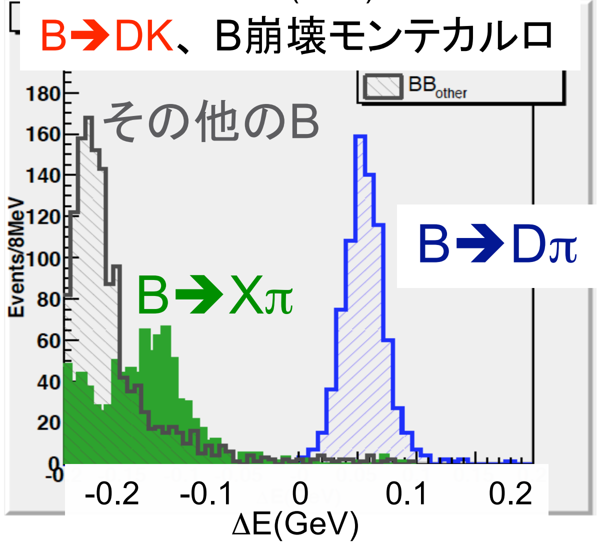
- シグナル: B➔Dπ
  バックグラウンド:Bの崩壊で非検出粒子があるもの（$B^- \to D^* \pi^-$など）
  ΔEは負にシフト
  ➔モンテカルロから形を決めてフィット

- シグナル: B➔DK
  バックグラウンド1:B➔Dπ
  (非検出粒子なし)
  π(140MeV)をK(490MeV)と誤識別
  ΔEは正にシフト
  ➔二つの非対称ガウシアンの和でフィット

  バックグラウンド2:B➔Xπ(非検出粒子あり)
  B➔D*πをB➔D*Kと誤識別など
  バックグラウンド3:その他のB
  B➔D*Kなど
  ➔ 2成分に分けてモンテカルロで形を決定

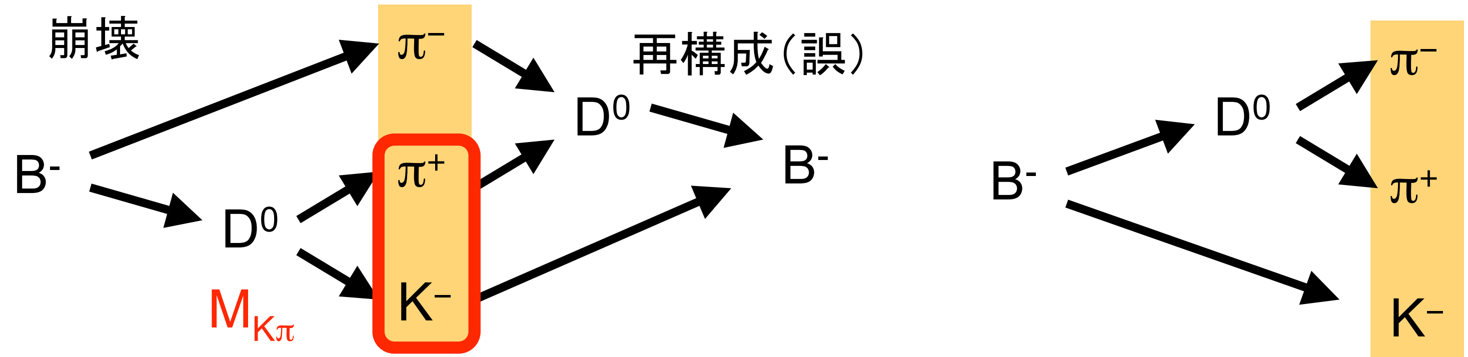






B➔$[\pi\pi]_D$K シグナルに対する B➔$[K\pi]_D\pi$ バックグラウンド

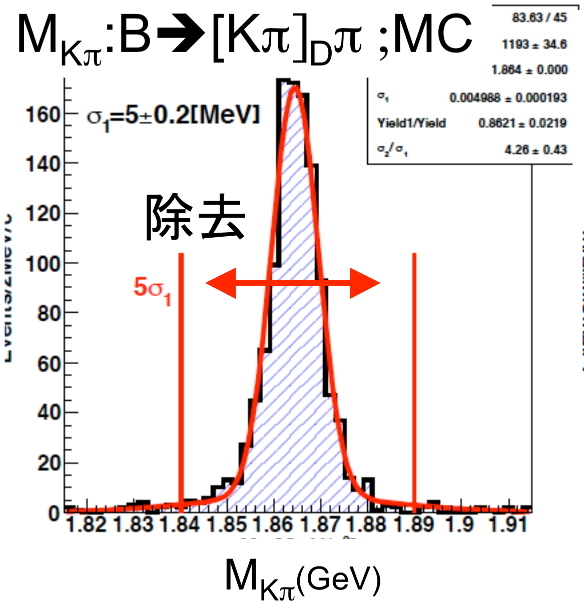
バックグラウンド：B➔$[K\pi]_D\pi$ O(10^{-5})　　シグナル：B➔$[\pi\pi]_D$K O(10^{-7})



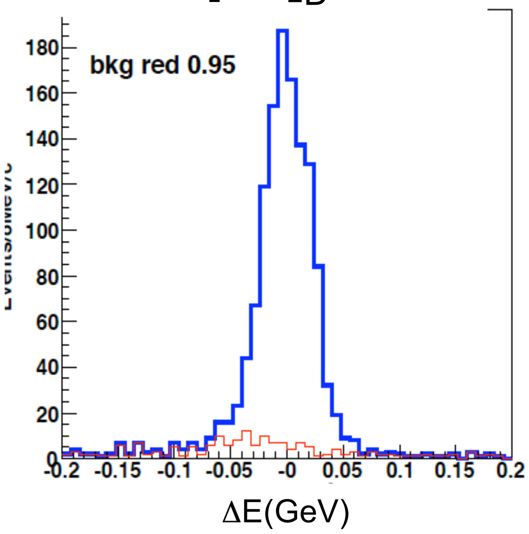
終状態がシグナルと同じ➔シグナルと同じくΔE=0でピークを持つ
$M_{K\pi}$がDの質量を持つイベントを除去

$\Delta E=E_D+E_{K/\pi}-E_{beam}$

$M_{K\pi}$:B➔$[K\pi]_D\pi$;MC



ΔE:B➔$[K\pi]_D\pi$;MC



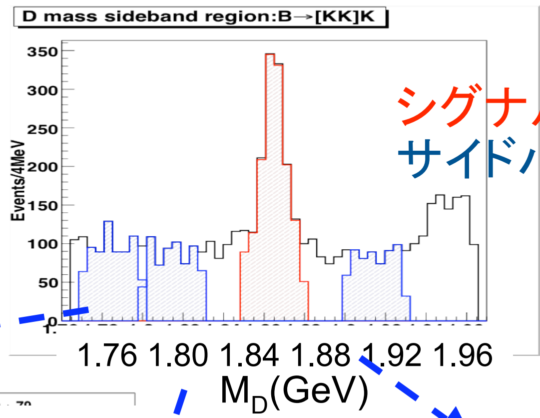
除去前
除去後

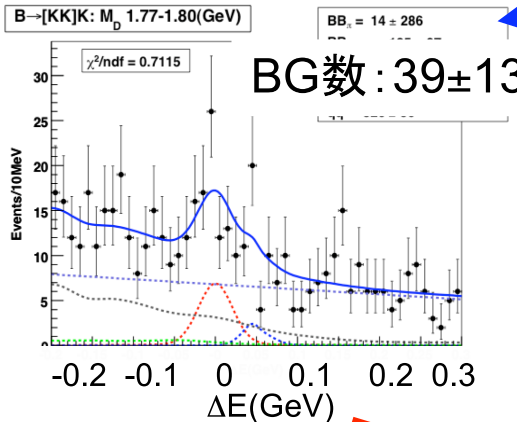
1.84GeV<$M_{K\pi}$<1.89GeVを除去
➔95%のバックグラウンドが除去
シグナルはほぼ100%保持

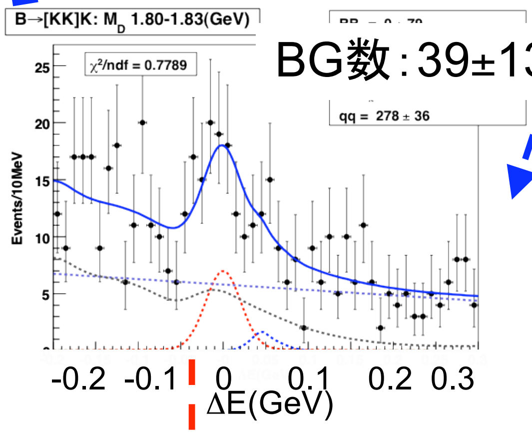
B➔$[KK]_D$K B➔$[\pi\pi]_D$Kシグナルに対するB➔KKK, B➔$\pi\pi$K バックグラウンド

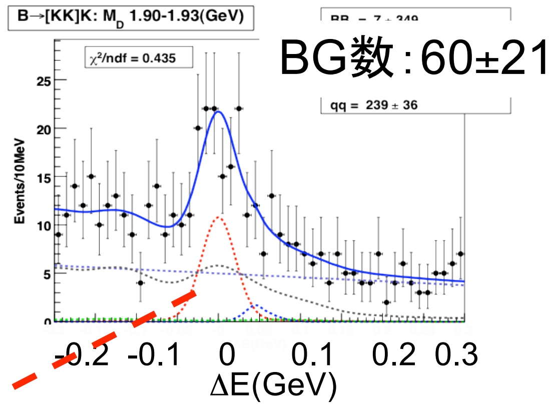
シグナル	バックグラウンド
B➔$[KK]_D$K	B➔KKK
B➔$[\pi\pi]_D$K	B➔$\pi\pi$K

Dを介さない希崩壊。Dの不変質量で一様
➔サイドバンド領域でBG数を評価

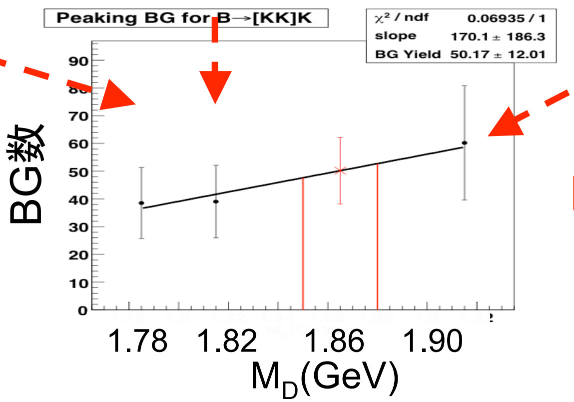








3つのサイドバンド領域から
シグナル領域の
バックグラウンドを
直線でフィットして評価

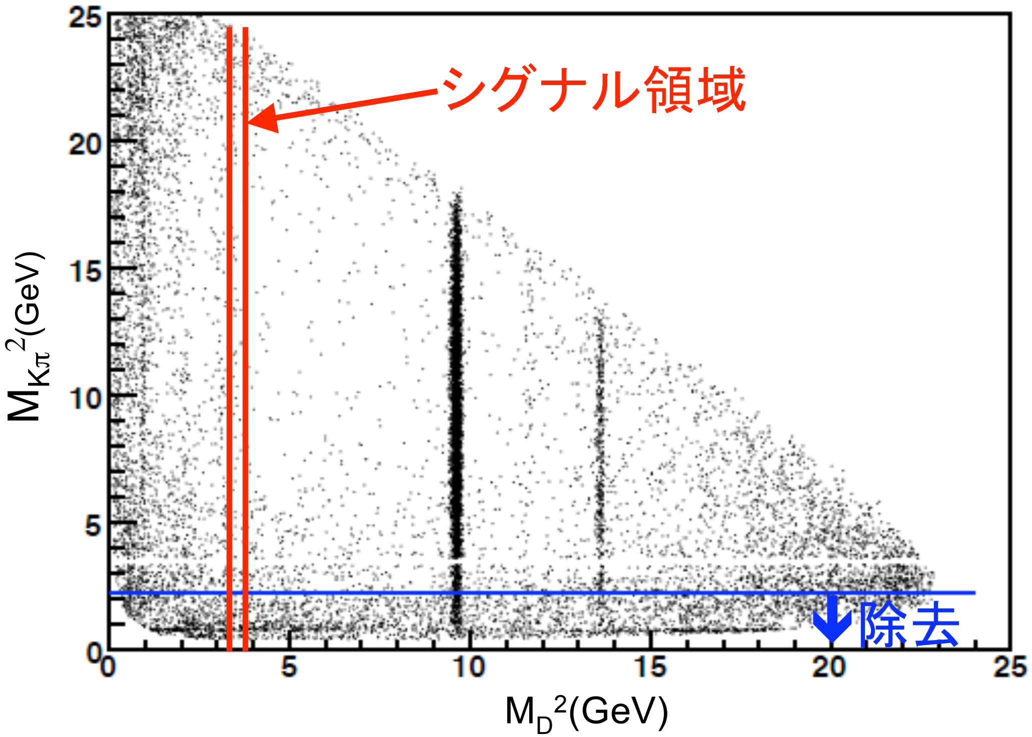


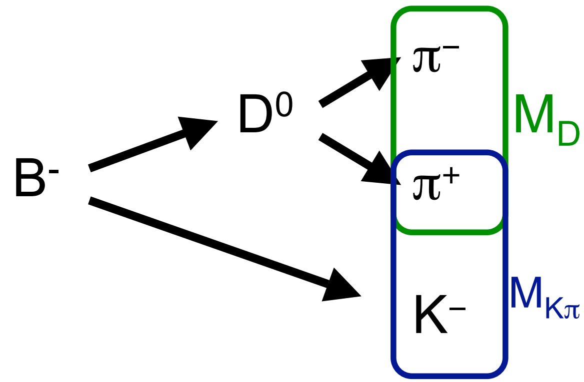
BG数: 50±12(B➔KKK)
同様に 8±7(B➔$\pi\pi$K)

ダリッツ平面を用いたバックグラウンドの除去

- シグナル：B➔$[\pi\pi]_D$K
- ダリッツ平面の分布から、統計誤差に対してシグナル数が大きくなるようなカットを導入(モンテカルロ利用)

B➔$[\pi\pi]_D$K ダリッツ平面





$M_{K\pi}^2$<2.3を除去

シグナル数/統計誤差:

4.3 ➔ 4.8

検出効率

モンテカルロを用いて、イベント選択を行った後の検出効率を求めた

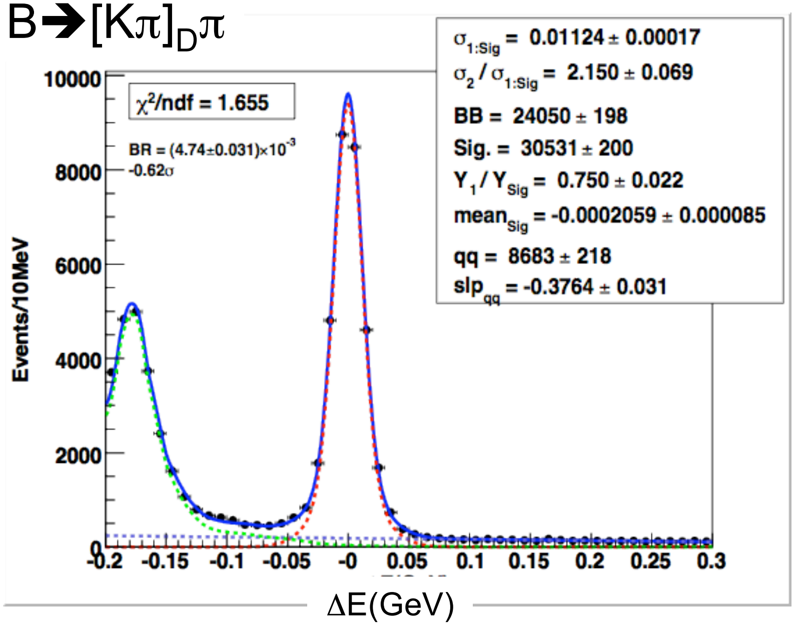
過程	検出効率(%)
$B \rightarrow D_1 K$:	27.6
($B \rightarrow [KK]_D K$:	29.2)
($B \rightarrow [\pi\pi]_D K$:	23.2)
$B \rightarrow [K\pi]_D K$:	33.9
$B \rightarrow D_1 \pi$:	35.2
($B \rightarrow [KK]_D \pi$:	36.0)
($B \rightarrow [\pi\pi]_D \pi$:	32.8)
$B \rightarrow [K\pi]_D \pi$:	42.7

B➔Dπ のシグナルの導出

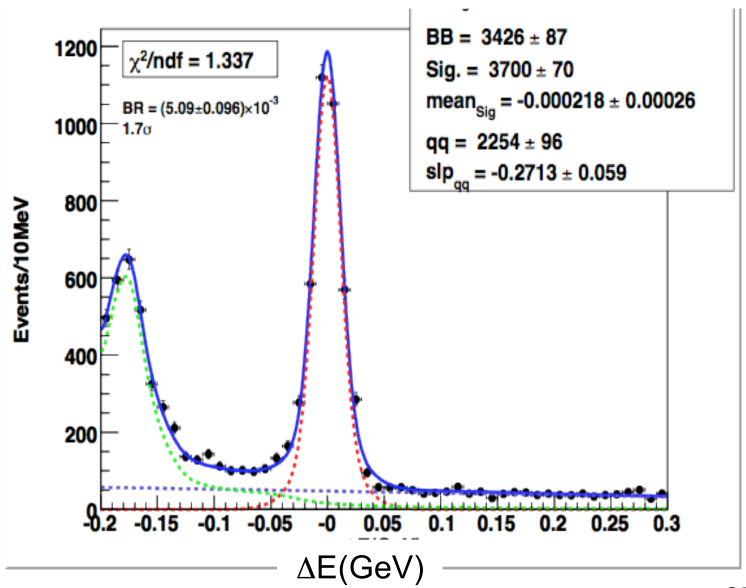
- ΔE分布をフィットしてシグナルを求める

赤：シグナル、2つのガウシアンの和
紫： $e^+e^- \to q\bar{q}(q=u,d,c,s)$ バックグラウンド、直線
緑： シグナル以外のB崩壊（B➔D*πなど）、モンテカルロ

B➔$[K\pi]_D\pi$



B➔$D_1\pi$（B➔ $[KK]_D\pi$ + B➔ $[\pi\pi]_D\pi$）



シグナル：30531±200　　3700±70

B➔DK のシグナルの導出

- ΔE分布をフィットしてシグナルを求める

赤 : シグナル、２つのガウシアンの和

紫:e^+e^-➔qq(q=u,d,c,s) バックグラウンド、直線

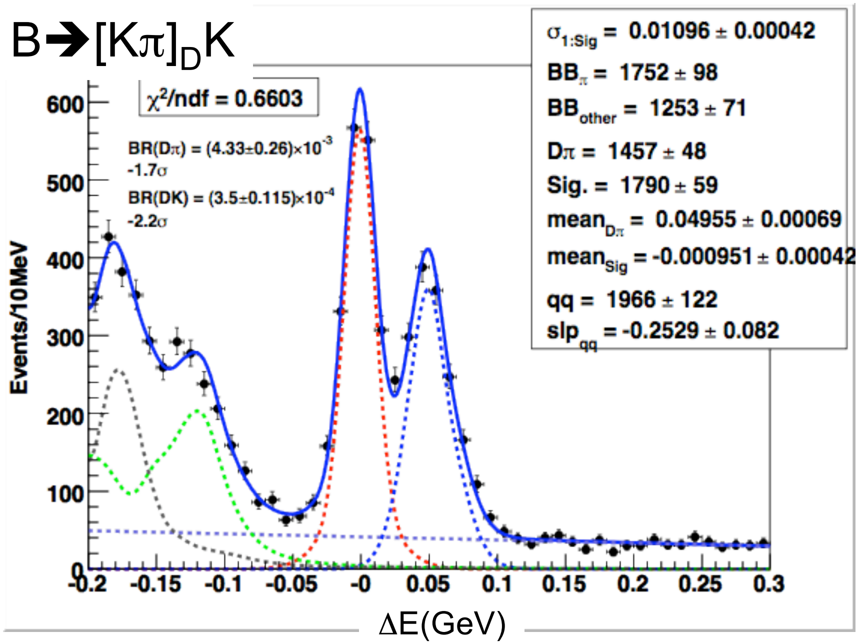
茶: B➔KKK 、B➔ππK(希崩壊)、2つのガウシアンの和

青: B➔Dπ、非対称ガウシアンの和

緑: B➔Xπ (B➔D*πなど) 、モンテカルロ

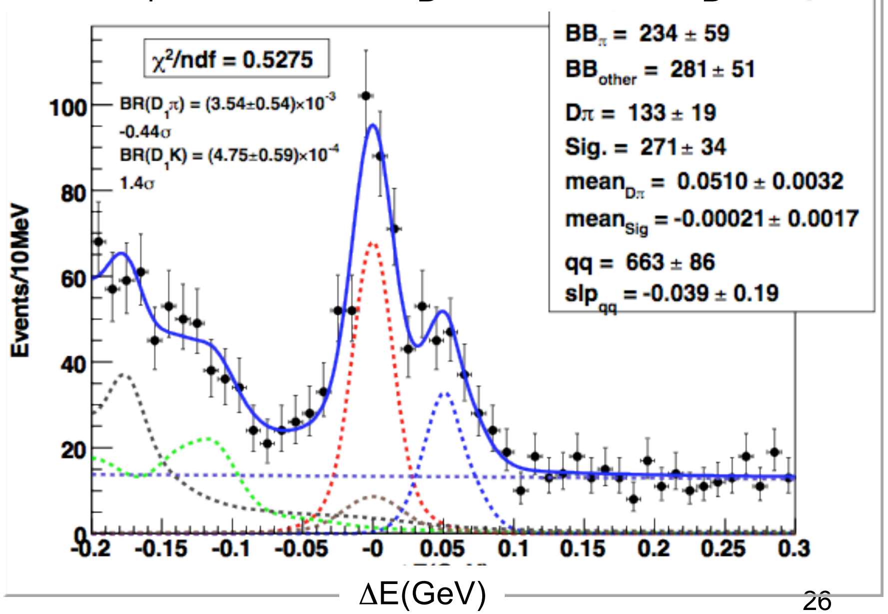
灰色 : その他のB崩壊 (B➔D*Kなど)、モンテカルロ

B➔[Kπ]$_D$K



シグナル : 1790±59

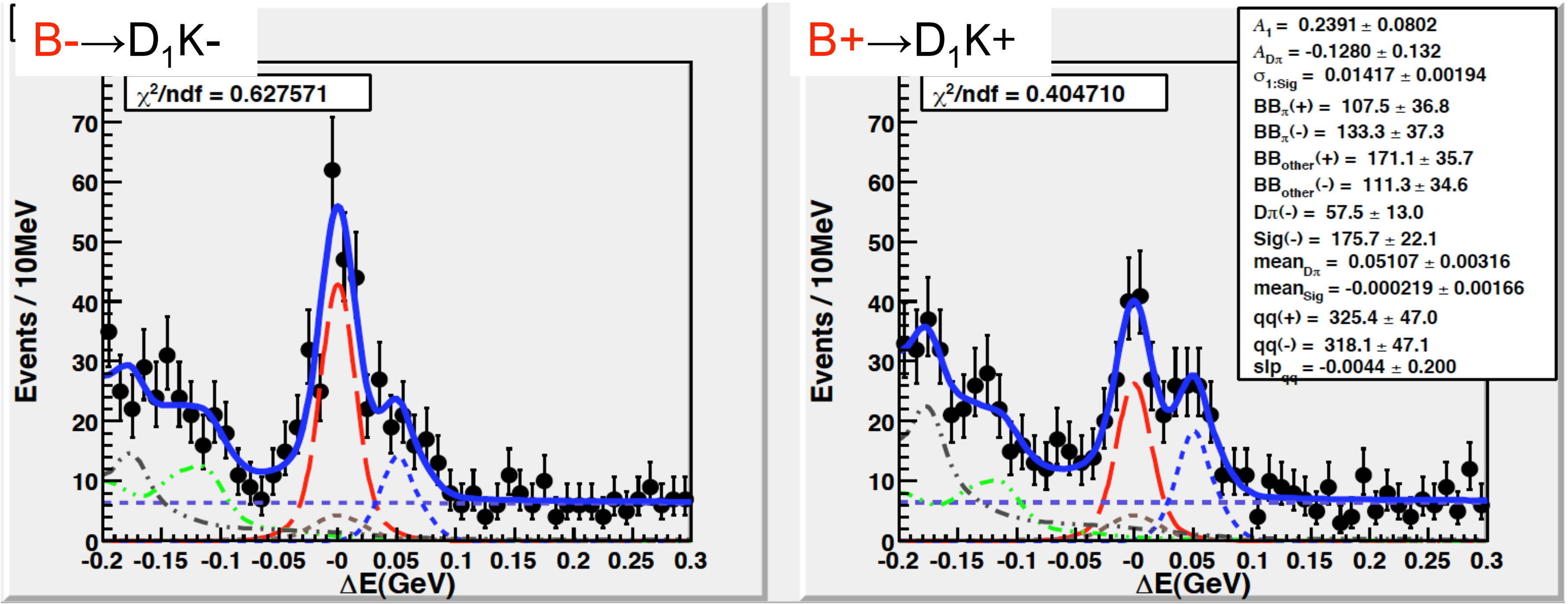
B➔D$_1$K(B➔ [KK]$_D$K + B➔ [ππ]$_D$K)



271±34

電荷を分けたΔE分布

$B^- \rightarrow D_1K^-$、$B^+ \rightarrow D_1K^+$と電荷で分離してΔE分布をフィット



B-:176±22　　B+:108±16

シグナル(赤)の数がB^-とB^+で異なる
直接的なCPの破れ

結果

系統誤差

崩壊分岐比の比$\mathcal{R}_1$とCP非対称度$\mathcal{A}_1$は以下のようにシグナル数と検出効率から求まり、系統誤差は表のようになる

$$\mathcal{R}_1 = \frac{N(B^\pm \to D_1 K^\pm) \times N(B^\pm \to [K\pi]_D \pi^\pm)}{N(B^\pm \to D_1 \pi^\pm) \times N(B^\pm \to [K\pi]_D K^\pm)} \bigg/ \frac{\epsilon(B^\pm \to D_1 K^\pm) \times \epsilon(B^\pm \to [K\pi]_D \pi^\pm)}{\epsilon(B^\pm \to D_1 \pi^\pm) \times \epsilon(B^\pm \to [K\pi]_D K^\pm)}$$

$$\mathcal{A}_1 = \frac{N^- - N^+}{N^- + N^+}$$

N:各崩壊のシグナル数
ε:検出効率

$N^\pm$: $B^\pm \to D_1 K^\pm$のシグナル数

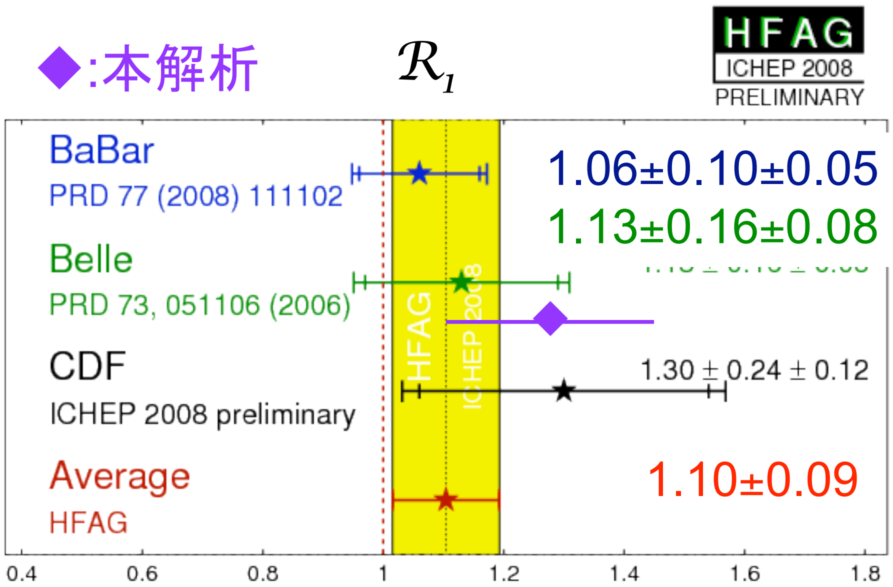
誤差の原因	$\Delta\mathcal{R}_1$	$\Delta\mathcal{A}_1$	
フィットパラメータの固定	0.015	0.003	固定したパラメータを±1σ変化
希崩壊バックグラウンド	0.065	0.008	イベント数を±1σ変化
検出効率	0.033		粒子識別、モンテカルロの統計
検出器の電荷非対称性		0.014	$B \to [K\pi]_D \pi$のCP非対称性
合計	0.074	0.016	

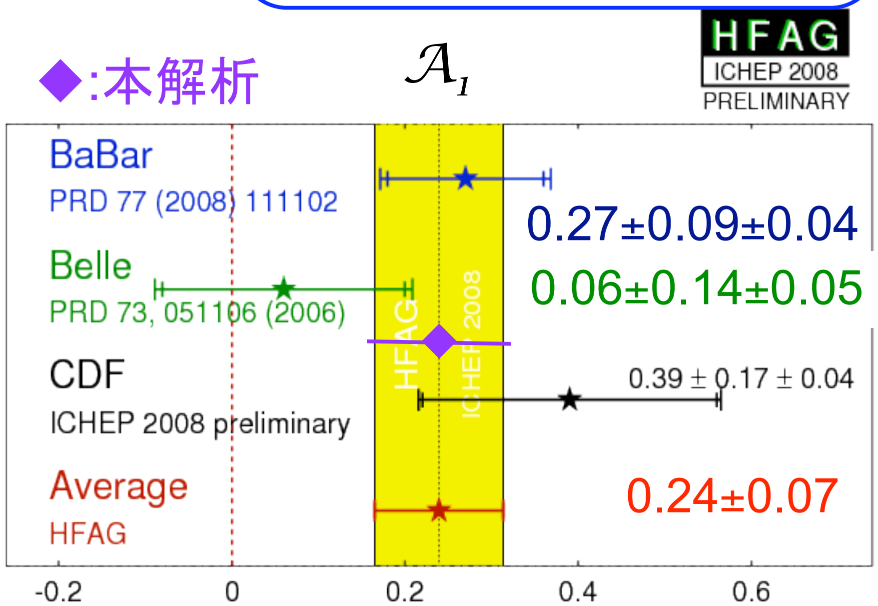
R_1とA_1の測定結果

崩壊分岐比の比$\mathcal{R}_1$、CP非対称度$\mathcal{A}_1$を測定

$\mathcal{R}_1$ =1.27±0.17(stat.)±0.07(syst.)
$\mathcal{A}_1$ =0.24±0.08(stat.)±0.02(syst.)
(暫定)

BaBar: 382MBB
Belle（前回）: 275MBB
Belle（今回）: 388MBB





$\mathcal{R}_1$,$\mathcal{A}_1$ともにBelleの過去の結果と1σで一致
$\mathcal{A}_1$についてはBelleでは初めてB➔D_1Kで、約3σのCPの破れを測定

まとめ

- B➔D_1KはADS法に用いる崩壊のなかでは
崩壊分岐比が大きく、精密測定が可能。

- Belle実験で収集された388×10^6BBペアのデータサンプルを用いた解析の結果、CP非対称度$\mathcal{A}_1$と崩壊分岐比の比$\mathcal{R}_1$ は
$\mathcal{A}_1$ =0.24±0.08(stat.)±0.02(syst.)
$\mathcal{R}_1$ =1.27±0.17(stat.)±0.07(syst.)　(暫定)
と測定され、過去のBelleの結果と1σで一致、
さらに$\mathcal{A}_1$についてはBelleでは初めてB➔D_1Kで、
約3σのCPの破れを測定

- この結果は他の崩壊の解析結果と合わせることにより、
ϕ_3の測定精度向上に大きく貢献すると考えられる。

Back Up

PID

- LR eff fake
  - D daugher (0.3~3.5GeV)

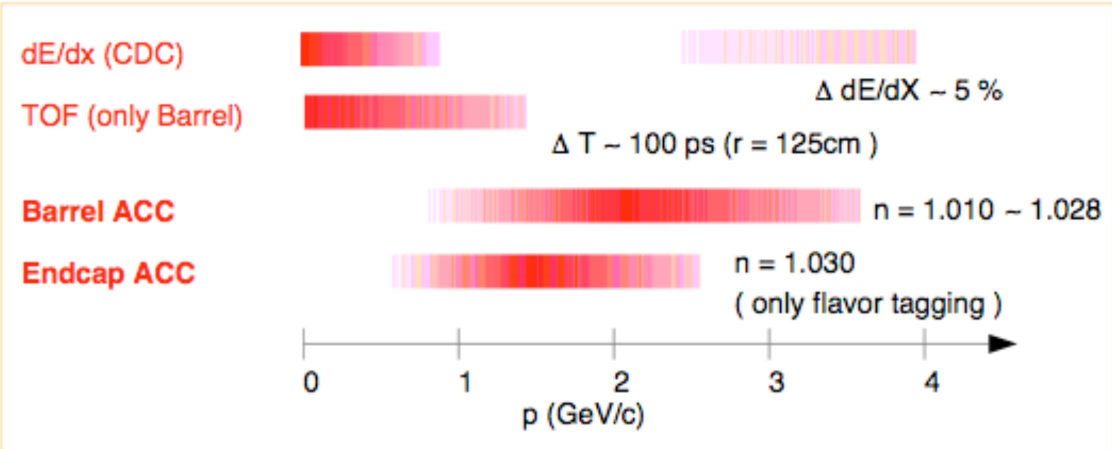
LR	eff	fake
K:>0.3	92.6	15.3
pi:<0.7	93.3	16.7
prompt(1.5~3.5GeV)		
K:>0.8	76.3	4.9
pi:<0.8	95.2	15.4

PID2

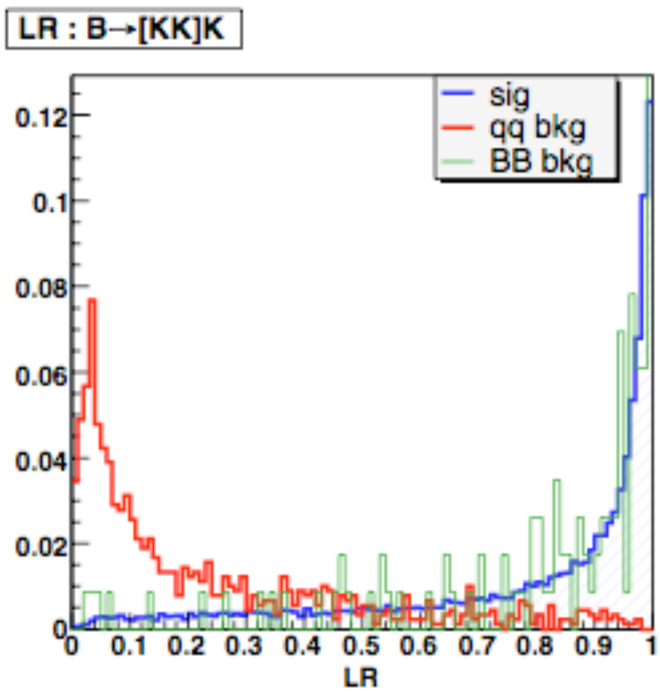
$$L_K = L_K^{CDC} \times L_K^{ACC} \times L_K^{TOF}$$

$$L_{pi} = L_{pi}^{CDC} \times L_{pi}^{ACC} \times L_{pi}^{TOF}$$

$$L_{K=} L_K / (L_K + L_{pi})$$



FoM



LR : B→[KK]K
sig
qq bkg
BB bkg
LR

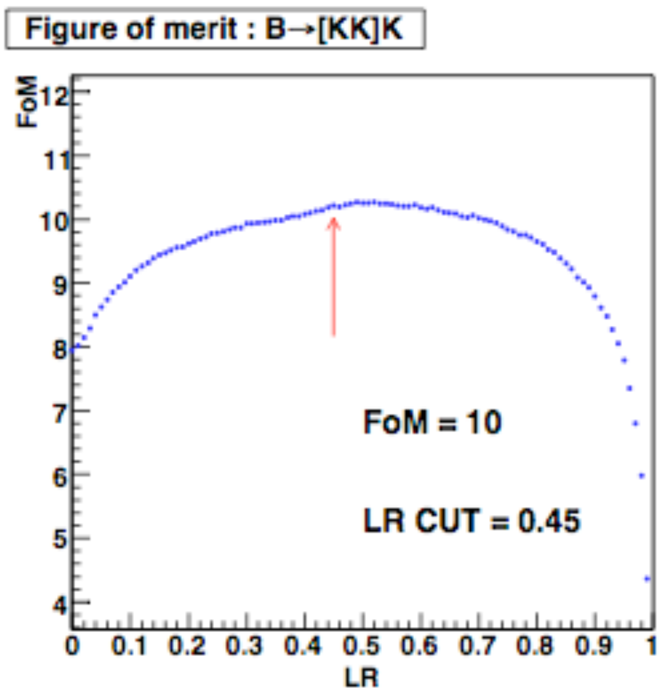
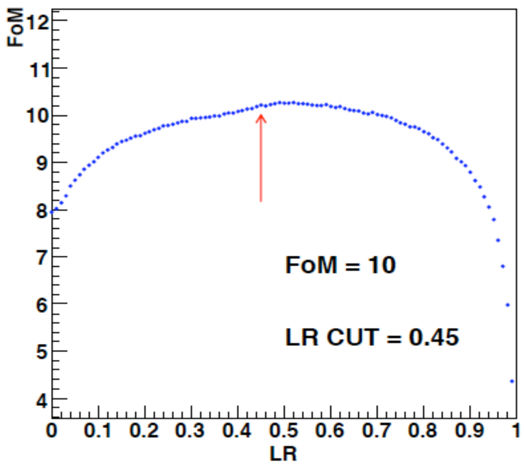


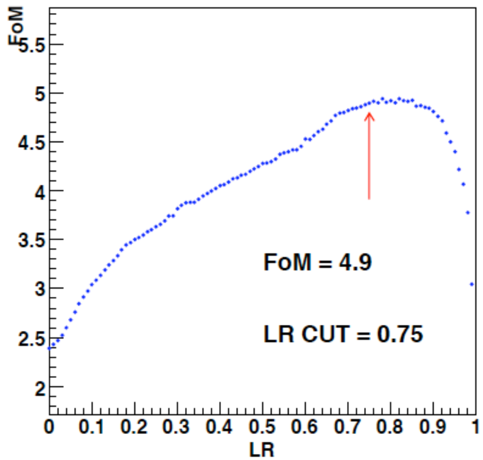
Figure of merit : B→[KK]K
FoM
FoM = 10
LR CUT = 0.45
LR

FoM

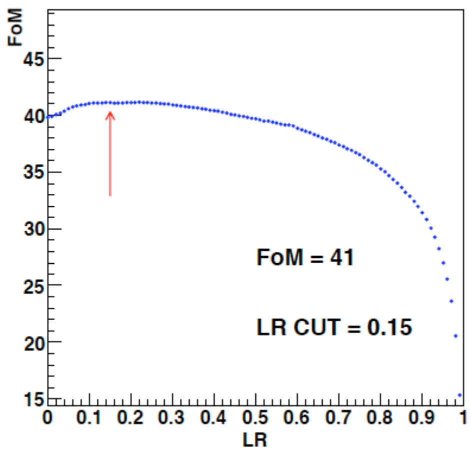
B➔$[KK]_D$K:LR>0.45



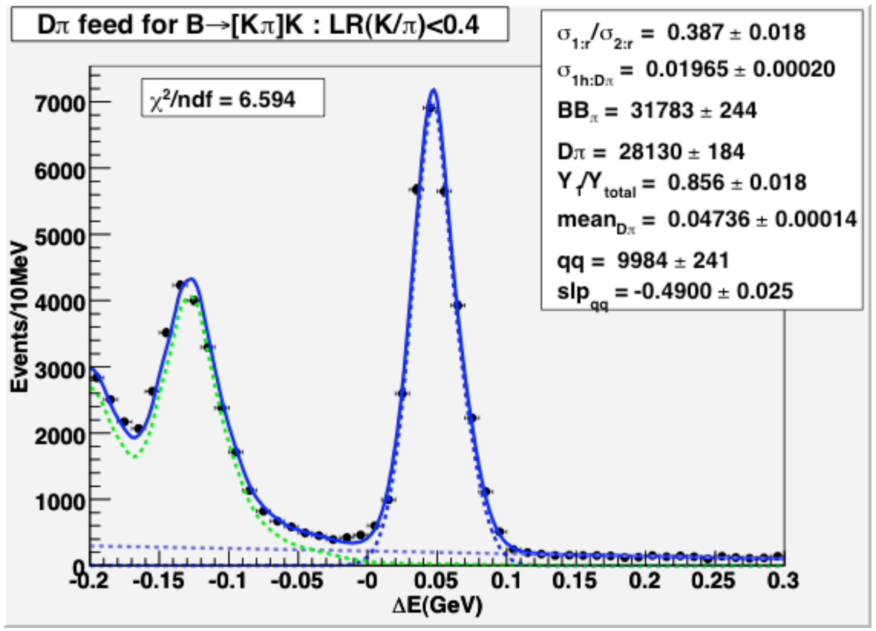
B➔$[\pi\pi]_D$K:LR>0.75



B➔$[K\pi]_D$K:LR>0.15



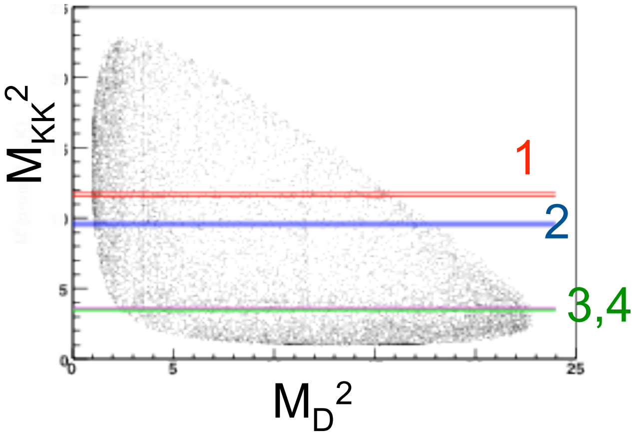
Dpi feed



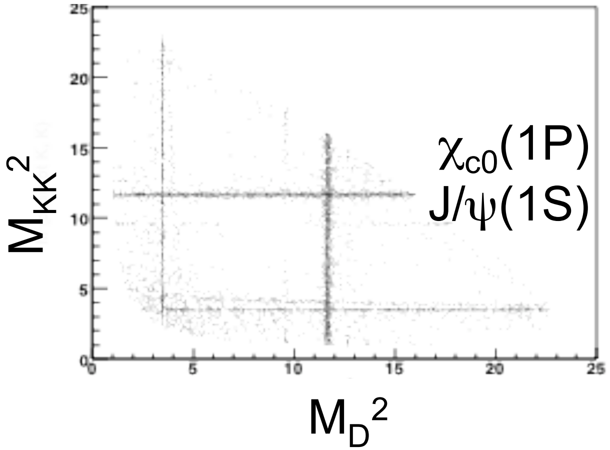
Dπ feed for B→[Kπ]K : LR(K/π)<0.4
χ²/ndf = 6.594
σ1:r/σ2:r = 0.387 ± 0.018
σ1h:Dπ = 0.01965 ± 0.00020
BBπ = 31783 ± 244
Dπ = 28130 ± 184
Yr/Ytotal = 0.856 ± 0.018
meanDπ = 0.04736 ± 0.00014
qq = 9984 ± 241
slpqq = -0.4900 ± 0.025
Events/10MeV
ΔE(GeV)

Dalitz

B→ $[KK]_D K$, Data



B→$[KK]_D K$, BB MC



M_{KK}:invariant mass of prompt K + D child K

No additional veto for B➔$[KK]_D K$.

Nonresonant MC sample