

中性B中間子の DK^{*0} 希少崩壊の研究

2011年 5月 14日

東北大学

根岸 健太郎

目次

- Belle実験
- CP非保存角 ϕ_3
- $B^0 \rightarrow DK^{*0}$ の解析
- 結果
- まとめ

Belle実験

Belle実験

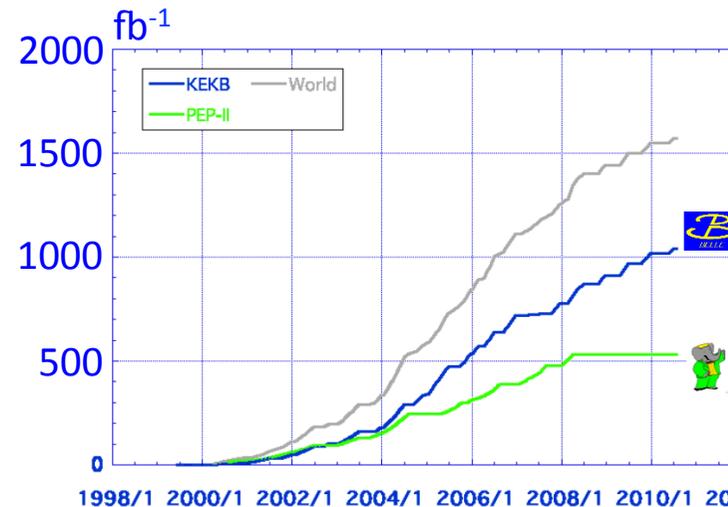
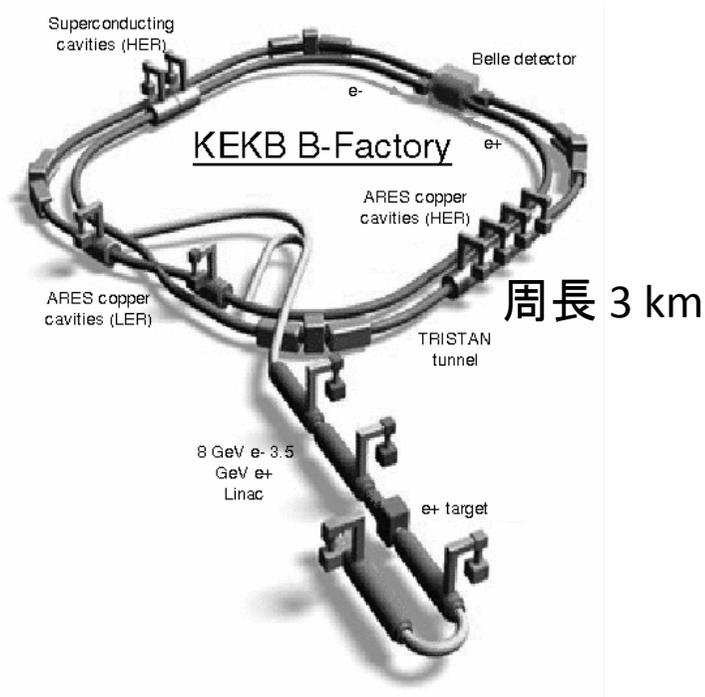
- Belle実験

- e^+e^- 衝突で $Y(4S)$ を生成

$Y(4S) \rightarrow B^+B^- \sim 50\%$
 $\rightarrow B^0\bar{B}^0 \sim 50\%$

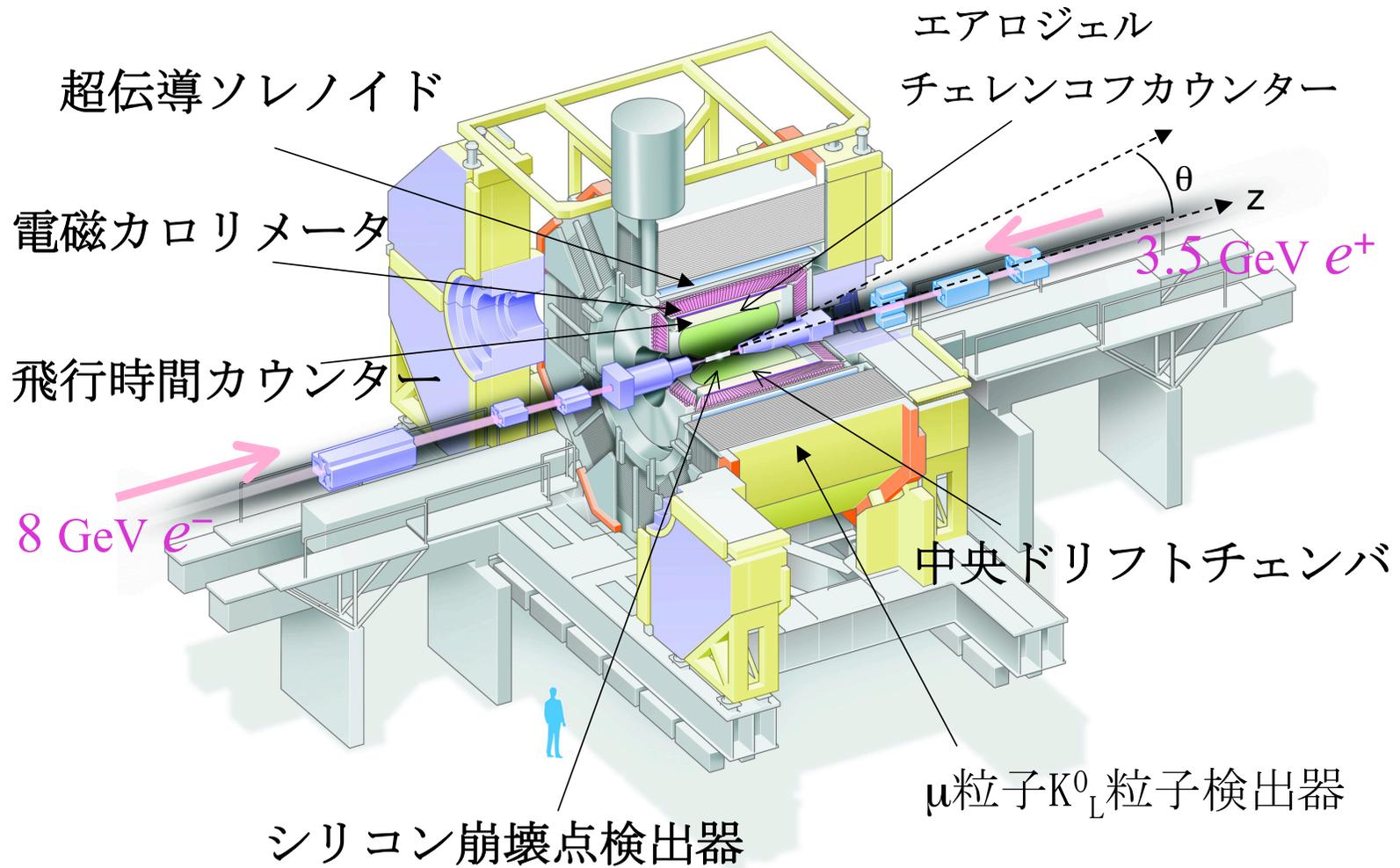
- KEKB加速器 : 電子 8.0 GeV、陽電子 3.5 GeV

重心エネルギー 10.6 GeVの非対称衝突型加速器



e^+e^- 衝突器として世界最高の積分ルミノシティ

Belle検出器



CP非保存角 ϕ_3

ユニタリ三角形

- CKM機構 : 弱い相互作用でのCP非保存を示唆
 - クォークとWボゾンの相互作用のラグランジアン

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

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

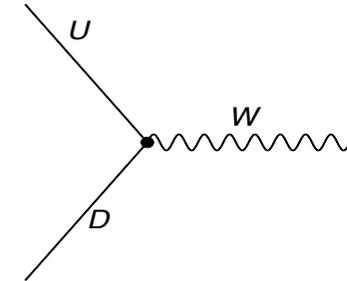
CKM行列はユニタリ: $V_{CKM}^\dagger V_{CKM} = 1$

- b列,d列に関してユニタリ条件

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

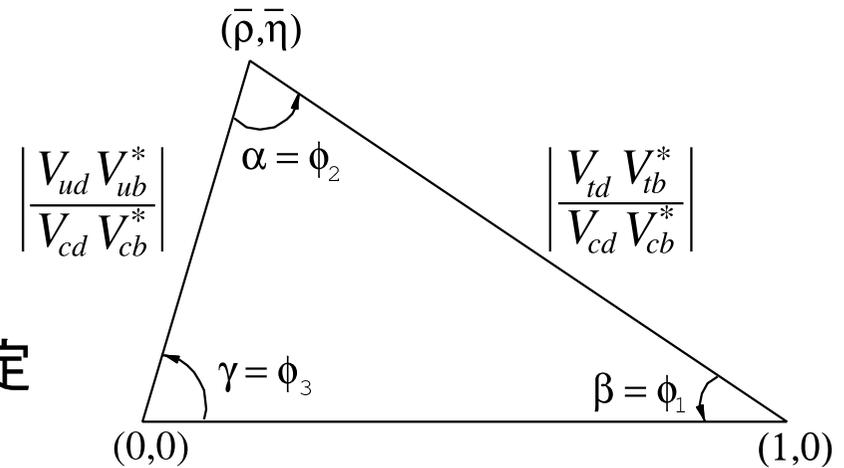
- 複素平面上に三角形を描く
 - 三角形の面積 $\neq 0 \Leftrightarrow$ CP非保存
- ユニタリ三角形の角の一つ ϕ_3 を測定

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



$$U = \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}, D = \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

U_L, D_L : 左巻き成分

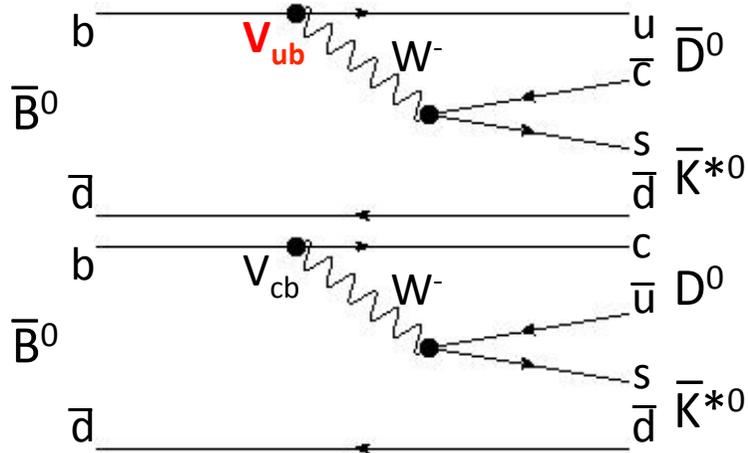


ϕ_3 測定

- ϕ_3 の測定は V_{ub} の位相の測定と同義

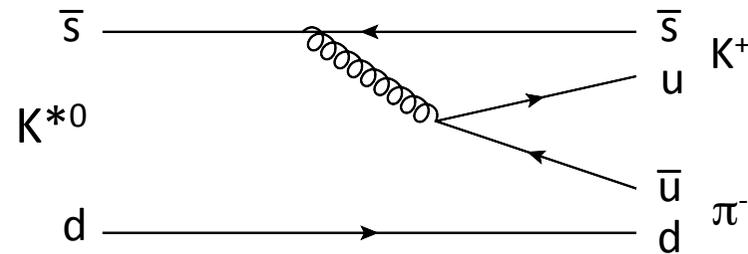
$$\phi_3 \equiv \arg \left(\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{-V_{cd}V_{cb}^*} \right) \sim -\arg(V_{ub})$$

- B → DKを用いる



- $b \rightarrow u$ 遷移を含む、経路を持つ干渉を利用する事で ϕ_3 の効果測定する。

- K*タグ



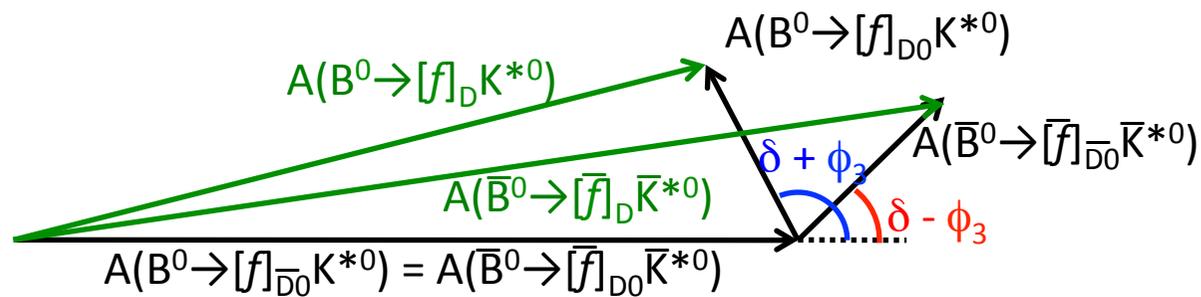
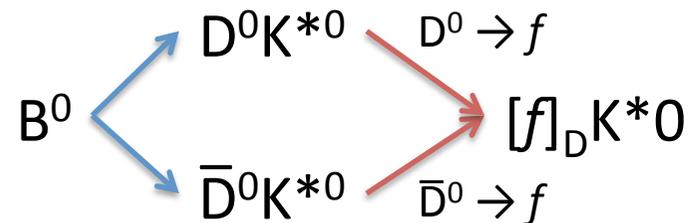
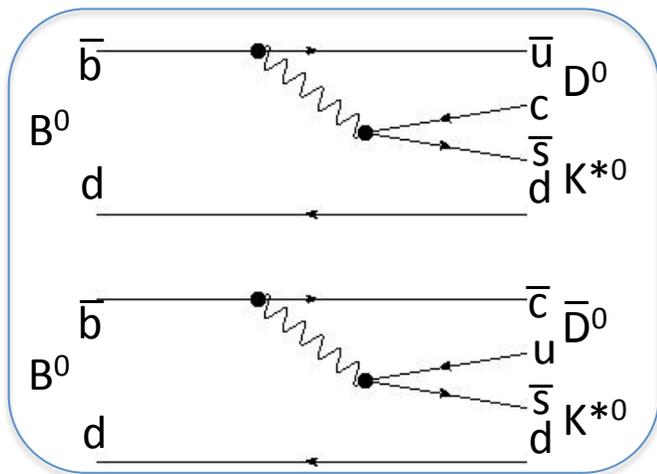
$$\begin{aligned} K^{*0} &\rightarrow K^0\pi^0 && 1/3 \\ &\rightarrow K^+\pi^- && 2/3 \end{aligned}$$

- K*を荷電 $K\pi$ で再構成する事で K^{*0} のフレーバーが決定
→Bのフレーバーが一意に決まる

B^0 - \bar{B}^0 混合の効果無しに ϕ_3 抽出可能

ADS法

- ϕ_3 測定法の一つ



δ : 強い相互作用の位相差
 CP変換で符号不変
 未知定数

ADS法 (続き)

- 典型的に求める2つの変数

$$R_{ADS} \equiv \frac{\Gamma(\overline{B^0} \rightarrow [f]_D \overline{K^{*0}}) + \Gamma(B^0 \rightarrow [\bar{f}]_D K^{*0})}{\Gamma(\overline{B^0} \rightarrow [\bar{f}]_D \overline{K^{*0}}) + \Gamma(B^0 \rightarrow [f]_D K^{*0})}$$
$$= r_S^2 + r_D^2 + 2kr_S r_D \cos \phi_3 \cos \delta$$

$$A_{ADS} \equiv \frac{\Gamma(\overline{B^0} \rightarrow [f]_D \overline{K^{*0}}) - \Gamma(B^0 \rightarrow [\bar{f}]_D K^{*0})}{\Gamma(\overline{B^0} \rightarrow [f]_D \overline{K^{*0}}) + \Gamma(B^0 \rightarrow [\bar{f}]_D K^{*0})}$$
$$= \frac{2kr_S r_D \sin \phi_3 \sin \delta}{R_{ADS}}$$

$$r_S^2 \equiv \frac{\Gamma(B^0 \rightarrow D^0 K^+ \pi^-)}{\Gamma(B^0 \rightarrow \overline{D^0} K^+ \pi^-)}$$
$$r_D^2 \equiv \frac{\Gamma(D^0 \rightarrow f)}{\Gamma(D^0 \rightarrow \bar{f})}$$

k : $B^0 \rightarrow DK\pi$ からの補正 ~ 1

本解析では $f = K^+\pi^-$ を観測し、

$B^0 \rightarrow [K^+\pi^-]_D K^{*0}$ の崩壊分岐比を求める。

(R_{ADS} の分母を求める)

$B^0 \rightarrow DK^{*0}$ の解析

イベント選択、再構成

- K^\pm/π^\pm 同定
 - Efficiency $\sim 90\%$, Fake rate $\sim 10\%$

$$m_{D^0} = 1.865 \text{ GeV}$$

$$m_{K^{*0}} = 0.896 \text{ GeV}$$

$$m_{B^0} = 5.280 \text{ GeV}$$

- D^0, K^{*0} の再構成

- D^0 : $|M_{K\pi} - m_{D^0}| < 0.015 \text{ GeV}$ ($\pm 3\sigma$)
- K^{*0} : $|M_{K\pi} - m_{K^{*0}}| < 0.050 \text{ GeV}$ ($\pm 1\Gamma$)

- B^0 の再構成

– 二つの運動学的変数を利用

$$M_{bc} \equiv \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - (\vec{p}_{D^0} + \vec{p}_{K^{*0}})^2}$$

再構成した B^0 の不変質量

$$(m_B = \sqrt{E_B^2 - (\vec{p}_{D^0} + \vec{p}_{K^{*0}})^2})$$

運動量の保存に対応

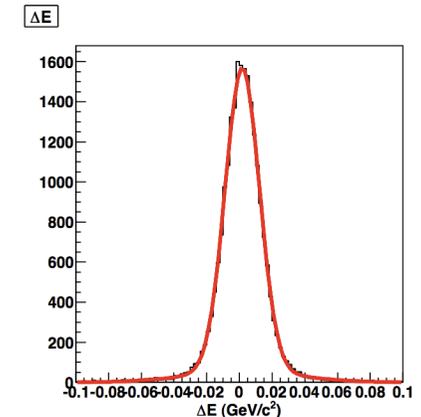
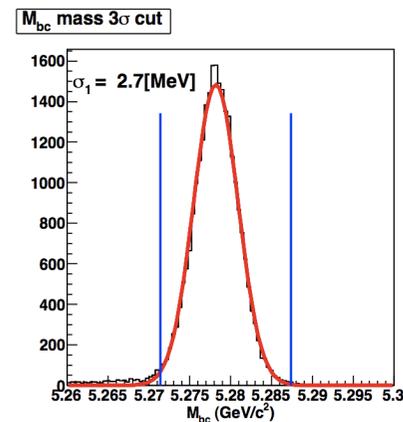
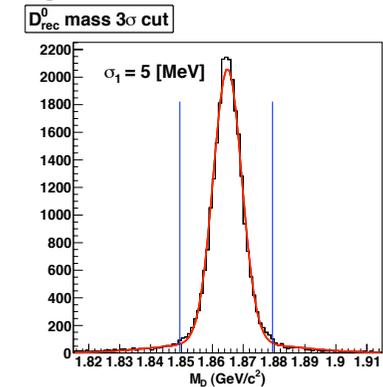
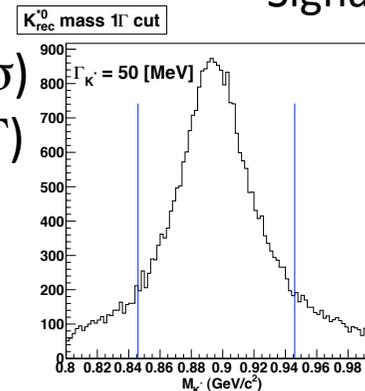
$$|M_{bc} - m_{B^0}| < 0.008 \text{ GeV} (\pm 3\sigma)$$

$$\Delta E \equiv E_{D^0} + E_{K^{*0}} - E_{\text{beam}}$$

エネルギーの保存に対応

シグナルの導出に用いる

Signal MC



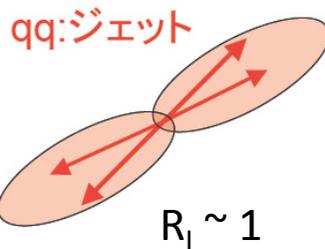
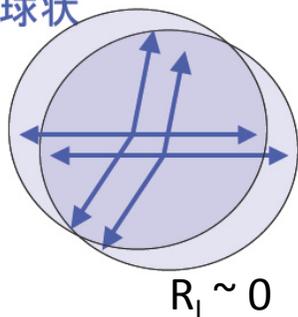
$B^0 \rightarrow DK^{*0}$ の解析

コンテニウムバックグラウンドの抑制 (KSFW, $\cos\theta_B$)

- イベントの形状からシグナルとコンテニウムバックグラウンドの尤度比(LR_{KSFW})を求める。

Belleの解析では一般的に使われる手法

B:球状



$$R_l = \frac{\sum_{i,j} |p_i| |p_j| P_l(\cos\theta_{i,j})}{\sum_{i,j} |p_i| |p_j|}$$

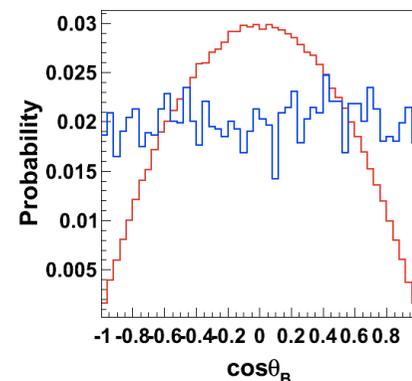
$p_{i,j}$: i,j 番目の粒子の運動量

P_l : ルジャンドル関数

$\theta_{i,j}$: i 番目 j 番目の粒子の運動量の成す角

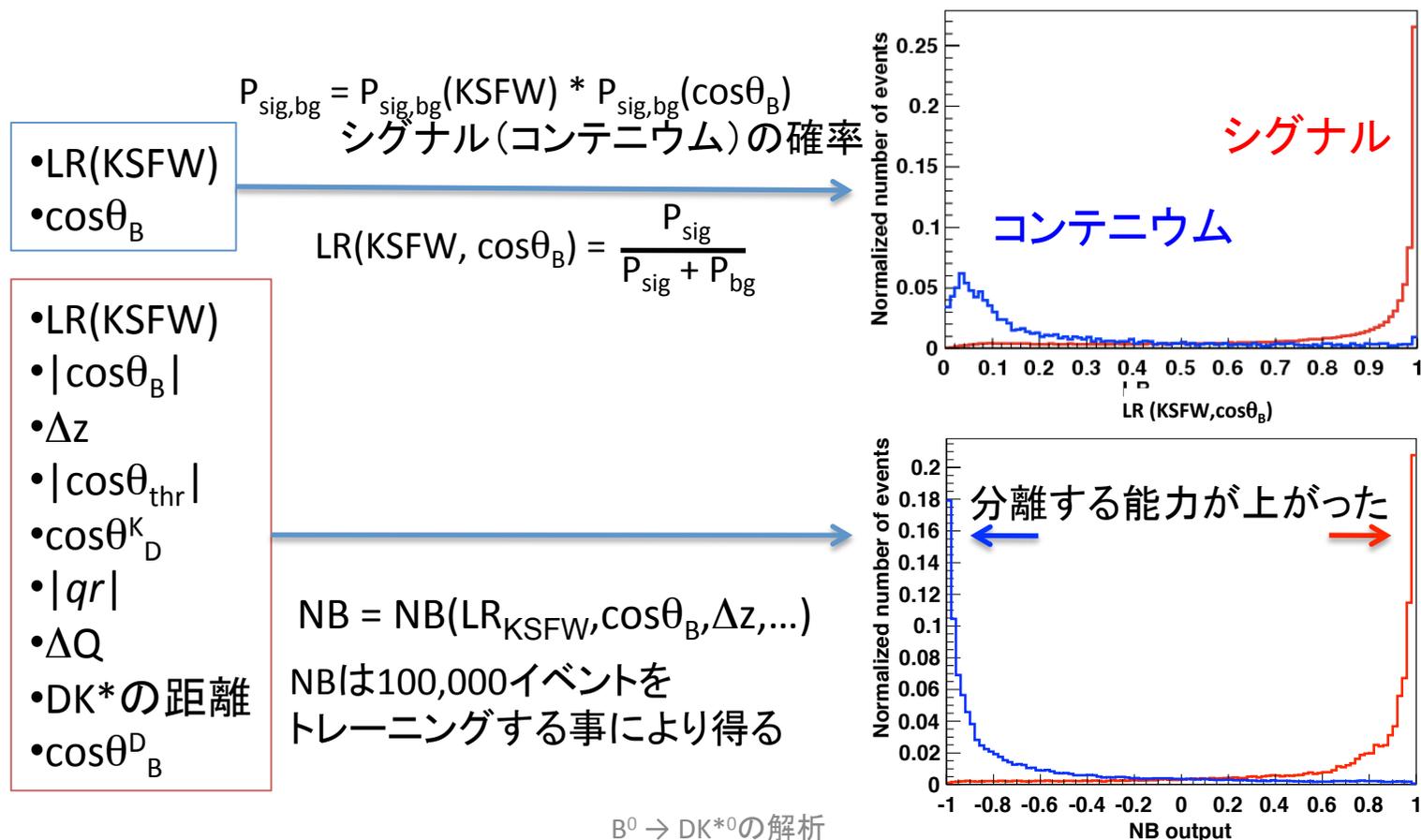
- e^+e^- 重心系のBの角度分布($\cos\theta_B$)も使う。
 - Bイベントは軌道角運動量1となる

シグナル : $1 - \cos^2\theta$
コンテニウム : ほぼ一様



コンテニウムバックグラウンドの抑制 (NeuroBayes)

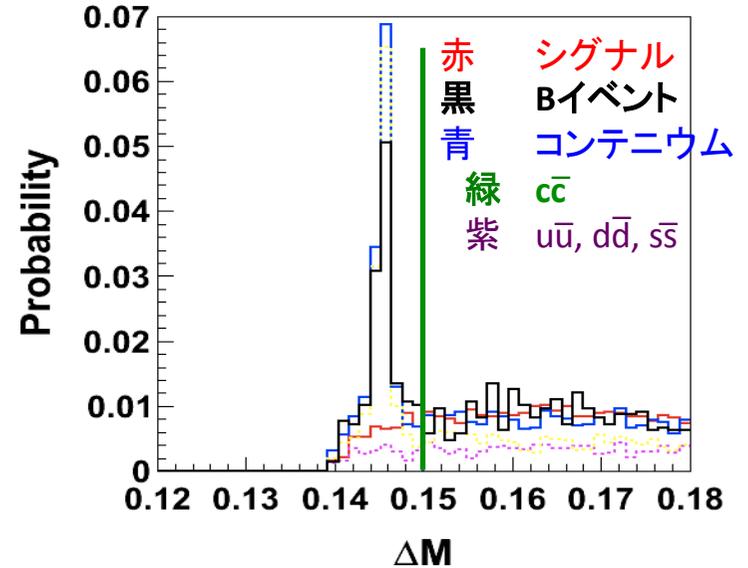
- コンテニウムバックグラウンド抑制により多くの変数を用いる。
ニューラルネット利用した。(NeuroBayesと呼ばれるパッケージ)



Bイベントからのバックグラウンド

- D*イベント
 $D^{*+} \rightarrow D^0\pi^+$ 崩壊のD⁰をとらえて
 シグナルを再構成してしまう
 $\Delta M < 0.15 \text{ GeV}$ のイベントを除去

$\Delta M : M_{D^{*\pm}} - m_{D^0}$
 $\Delta M \sim m_{\pi} (0.140 \text{ GeV})$ にピーク



- $B^0 \rightarrow D^{*-}K^+$ $(2.14 \pm 0.16) * 10^{-4}$
 $D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0\pi^-$ $(6.7 \pm 0.5) \%$
 シグナルと同じ終状態
 使用したデータ量(772M BBペア)に対し
 6.7 ± 0.2 イベントの寄与
 6.7 イベントをシグナルから差し引き、
 0.2 イベントは系統誤差に加える

- $B^0 \rightarrow \bar{D}^0\rho^0$
 $\rho^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$
 π 一つKと誤認識を含み、 $\Delta E \sim 0.05 \text{ GeV}$ にピーク
 モンテカルロを生成し、フィットに加える

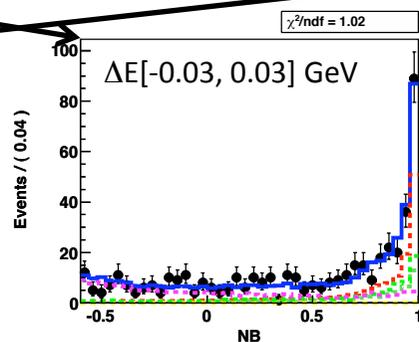
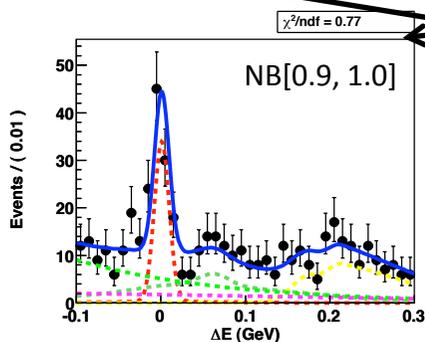
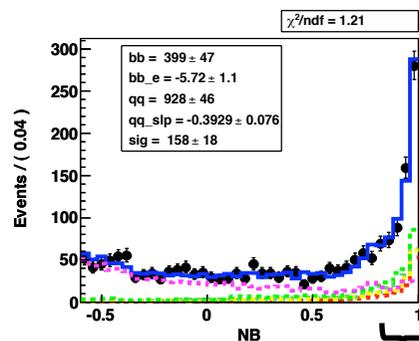
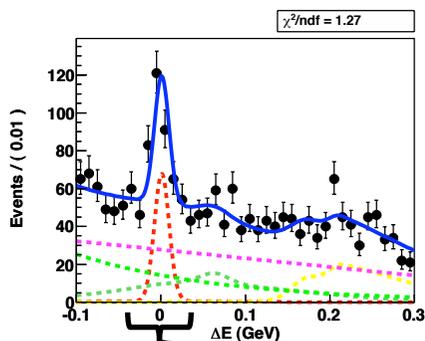
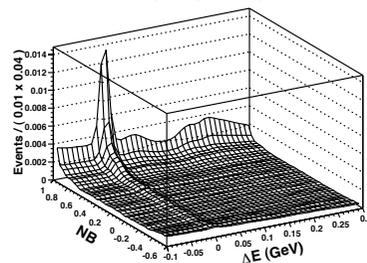
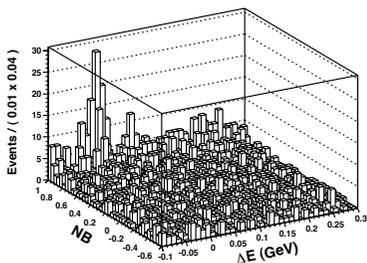
$B^+ \rightarrow D^{(*)}K^+$
 $B^+ \rightarrow D^{(*)}\pi^+$
 も同様にフィットに加える

$B^0 \rightarrow [K^+\pi^-]_D K^{*0}$ シグナルの導出

772MのBBペア相当

データ

確率密度関数



- 赤い破線 : シグナル
- 明緑色破線 : Bイベント
- 緑色破線 : $\bar{D}^0 \rho^0 \bar{D}^{*0} \pi^+ \bar{D}^{*0} K^+$
- 黄色破線 : $\bar{D}^0 \pi^+ \bar{D}^0 K^+$
- 紫色破線 : コンテニウム
- 青い実線 : 合計
- 誤差棒付き点 : データ

得られたシグナル数 = $158 \pm 18 - 6.7$

崩壊分岐比 = $(3.85 \pm 0.47) * 10^{-5}$

PDG $\text{Br}(B^0 \rightarrow \bar{D}^0 K^{*0}) = (4.2 \pm 0.6) * 10^{-5}$

標準偏差 - 0.5 σ

PDGと無矛盾なシグナルが得た。

誤差を小さく抑える事に成功

結果

系統誤差

誤差の起源	(%)
B \bar{B} ペアの数	± 1.4
トラックの検出効率 1トラック当たり $\pm 1.0\%$	± 2.0
シグナルの検出効率	± 0.2
崩壊分岐比 $\text{Br}(D^0 \rightarrow K\pi)$ の不確定	± 1.3
$[D^0\pi^-]_{D^*}K^+$ イベントの寄与	± 0.1
フィットバイアス 1,000回の疑似イベントのフィットより	0.0
合計	± 2.8

- $\text{Br}(B^0 \rightarrow [K^+\pi^-]DK^{*0}) \sim \text{Br}(B^0 \rightarrow \bar{D}^0K^{*0})$
 $= (3.85 \pm 0.47(\text{統計誤差}) \pm 0.11(\text{系統誤差}))$

測定結果

	Br($B^0 \rightarrow D^0 K^{*0}$)	(* 10^{-5})
本解析	$3.85 \pm 0.47 \pm 0.11$	
前回のBelle実験の解析(85M $B\bar{B}$) PRL 90, 141802 (2003)	$4.8^{+1.1}_{-1.0} \pm 0.5$	
PDG	4.2 ± 0.6	

- 本解析の結果は、統計、系統誤差共に小さくなっている。
- 統計誤差
 - Belle実験全体でより多くのB中間子を生成できた
 - NeuroBayes法でシグナルの保持率を高く維持したままバックグラウンドと分離出が可能であった
- 系統誤差
 - 前回のBelleの結果と比較し、より一層のBイベントのバックグラウンドの研究によるものである。

まとめ

- ϕ_3 は標準理論の検証の為に重要なパラメータの一つ
- 本解析モード $B^0 \rightarrow DK^{*0}$ 崩壊は ϕ_3 測定に有用
 - より一層の研究が求められる。
- $B^0 \rightarrow \bar{D}^0 K^{*0}$ の崩壊分岐比を求めた
$$\text{Br}(B^0 \rightarrow \bar{D}^0 K^{*0}) = (3.85 \pm 0.47 \pm 0.11) * 10^{-5}$$
 - 誤差を小さく抑える事が出来た

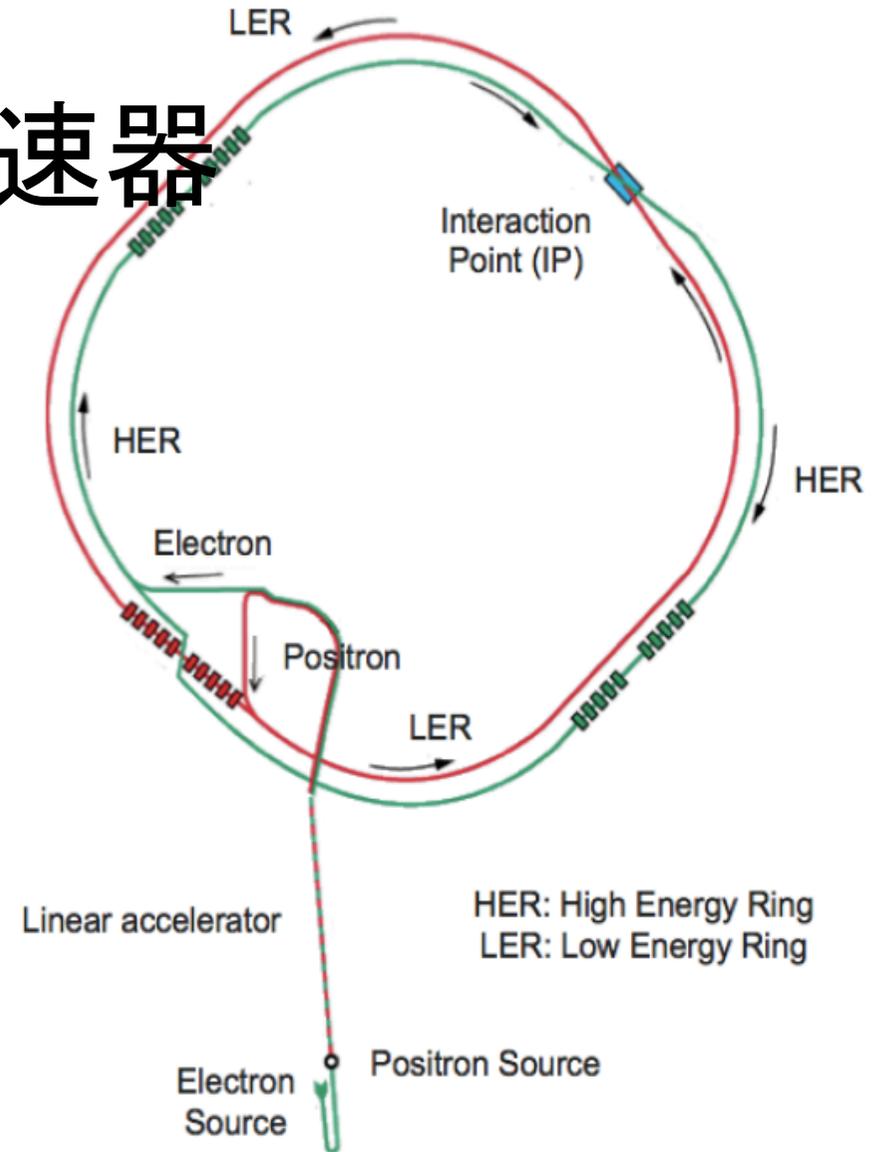
BACK UP

Plan

- $B \rightarrow D\rho$ Control Sampleの解析
 - Syst. err.の見積もり
- $f = K^-\pi^+$ (suppressed mode)の解析
 - $R_{\text{ADS}}, A_{\text{ADS}}$ の測定
- $f = K\pi\pi^0, K\pi\pi\pi$ の解析
 - ϕ_3 測定, 精度の向上

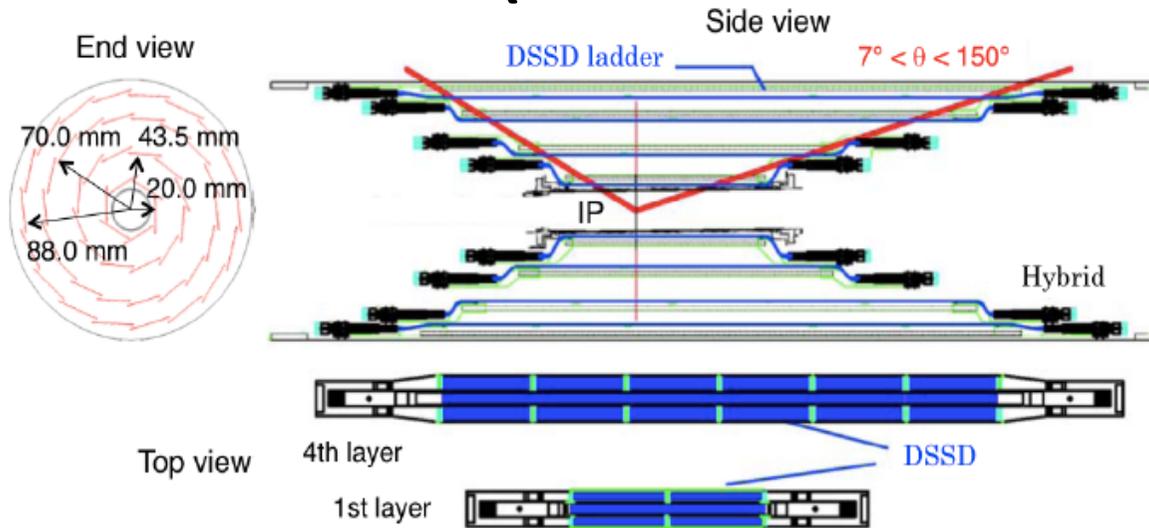
KEKB加速器

- 電子源: 熱電子銃
- 陽電子源:
電子をタングステンに入射し抽出
- 電子8.0 GeV / 陽子3.5 GeV ($\beta\gamma \sim 0.4$)
- 入射器: 2004年から連続入射法
- 電流: 双方1 A程度
- バンチ数: 双方1000程度
- バンチ当たり粒子数: 10^{10}
- ビーム: $O(1) \mu\text{m} \times O(100) \mu\text{m}$
- 衝突点での交差角: 22 mrad
- 2007年から「クラブ衝突」導入



¹The luminosity is described as $\mathcal{L} = N_+ N_- f / 4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*$, where N_{\pm} is the number of particles e^{\pm} per bunch, f is the frequency of collision, and $\sigma_{x,y}^*$ is the beam size at IP in x or y direction.

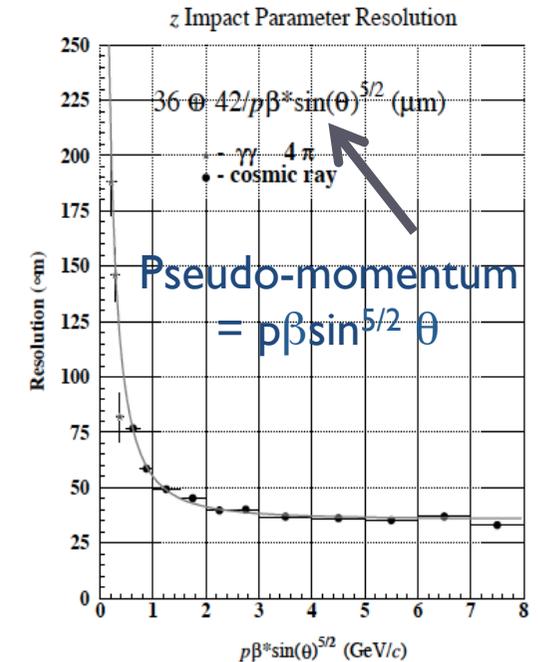
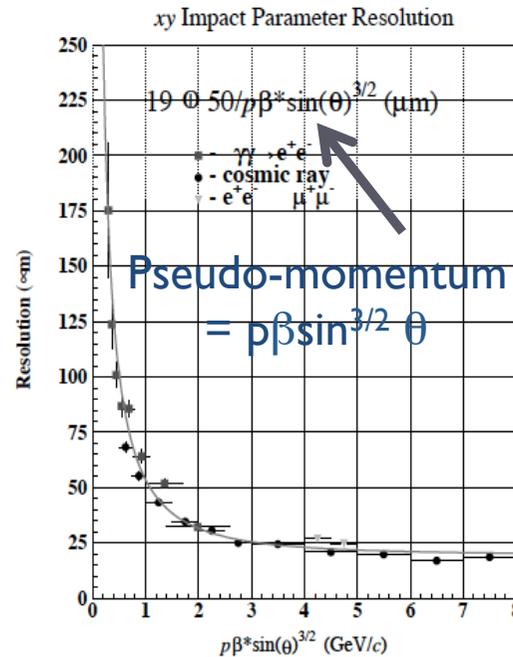
SVD (Silicon Vertex Detector)



DSSD = double-sided Si strip
 Chip size: $57.5 \times 33.5 \text{ mm}^2$
 Strip pitch: 25 (p)/50 (n) μm

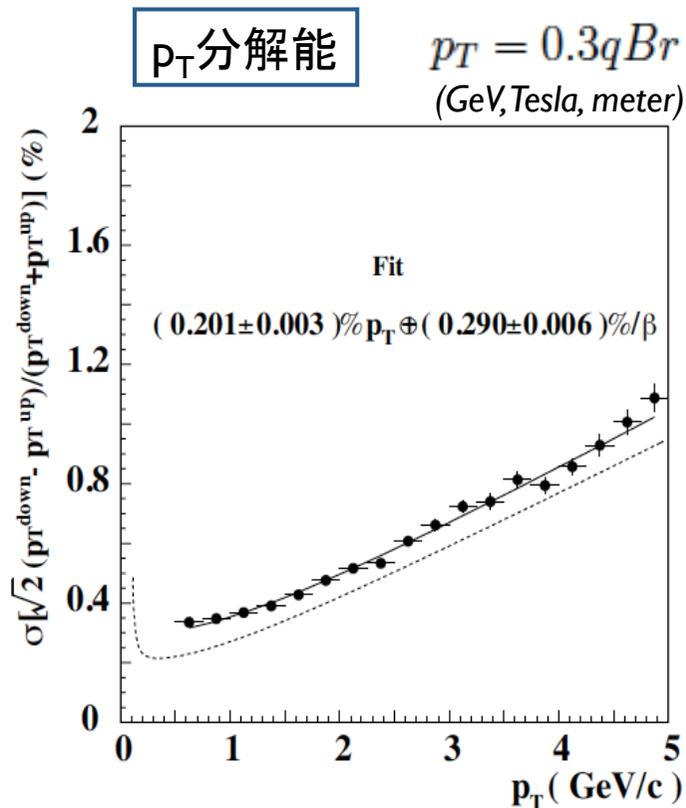
B中間子観測における
 典型的分解能: $\sigma_{\Delta z} \sim 80 \mu\text{m}$.

読み出し: VAITA集積回路を用いる。
 チップの放射線耐性は20 Mrad。
 (1 rad = 0.01 J/kg)

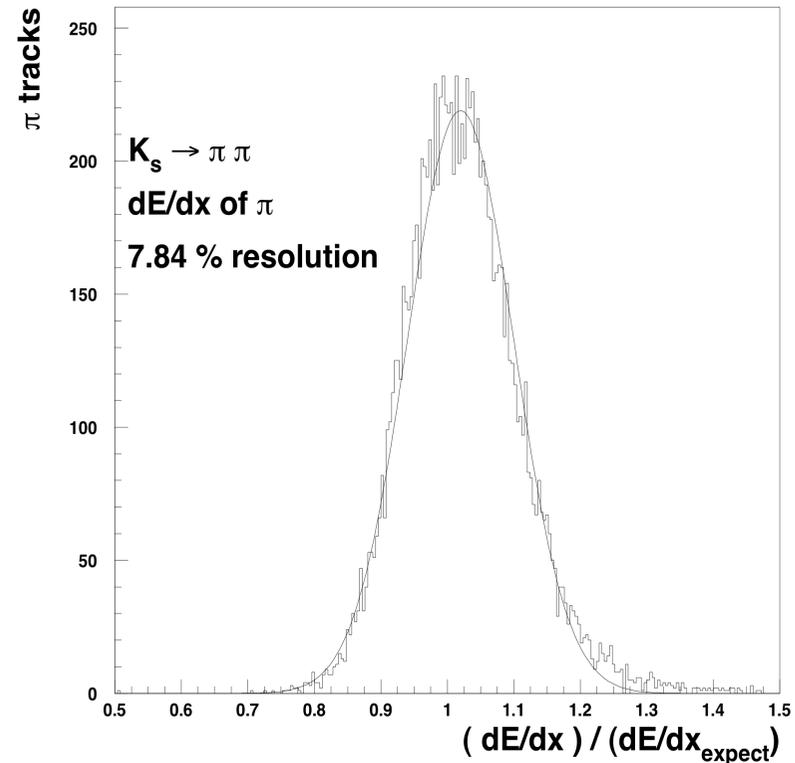


CDC (Central Drift Chamber)

- Anode: 50 layers including 18 stereo wires
(30 μ m-diameter gold-plated tungsten)
- r from beam axis = 8.3-86.3 cm
- -77 < z < 160 cm ($17^\circ < \theta < 150^\circ$)



dE/dx分解能の例

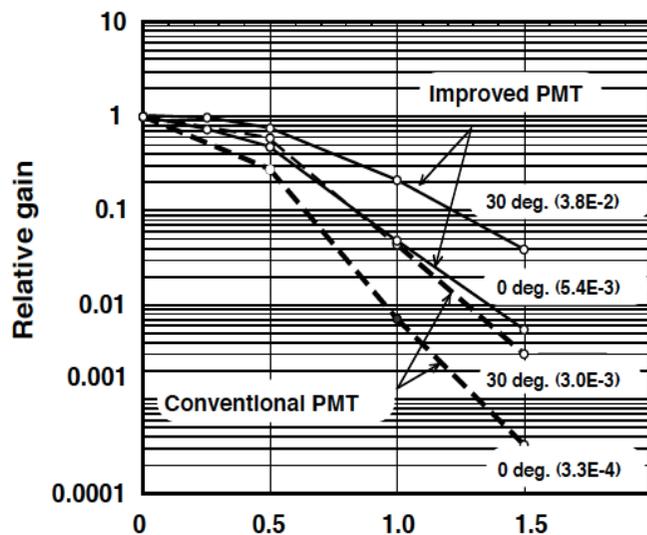
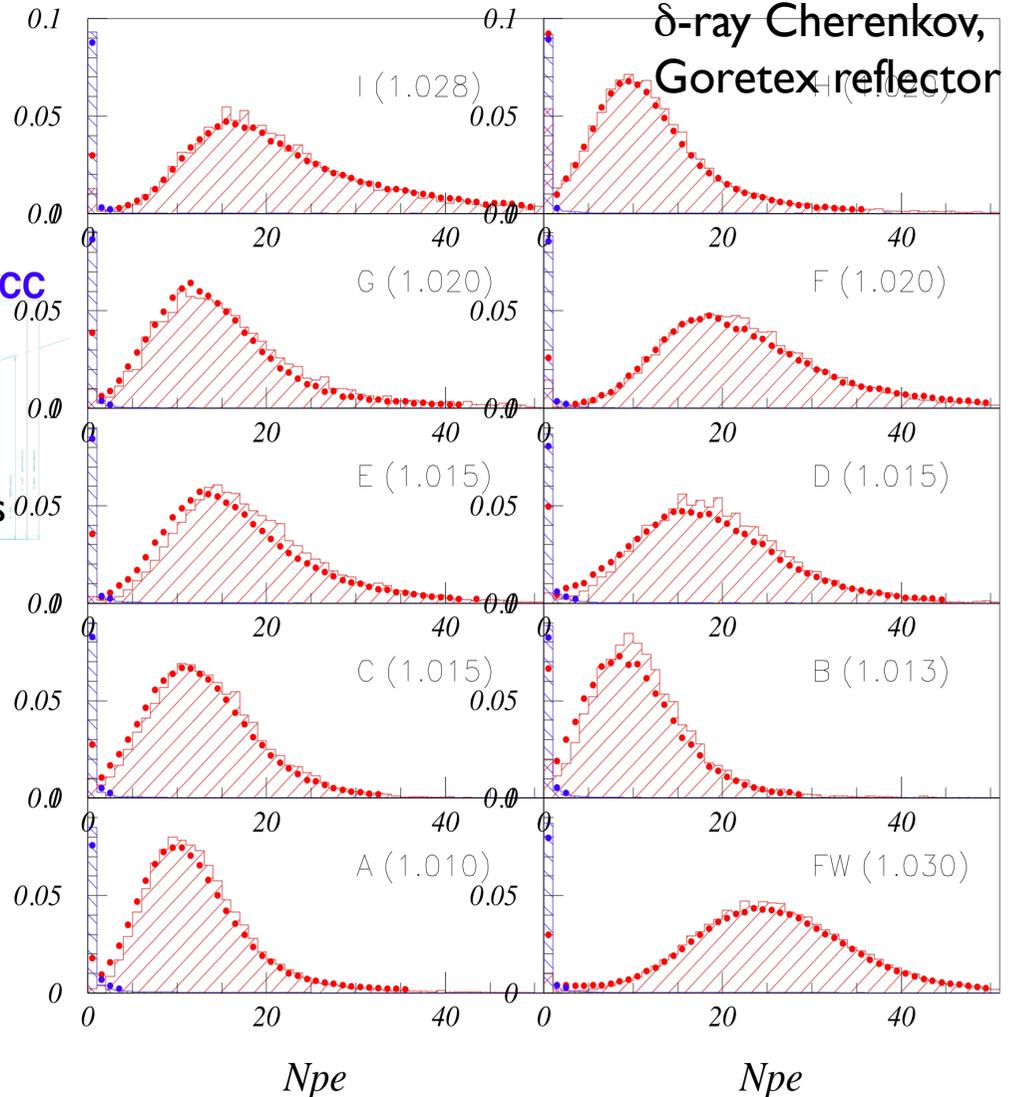
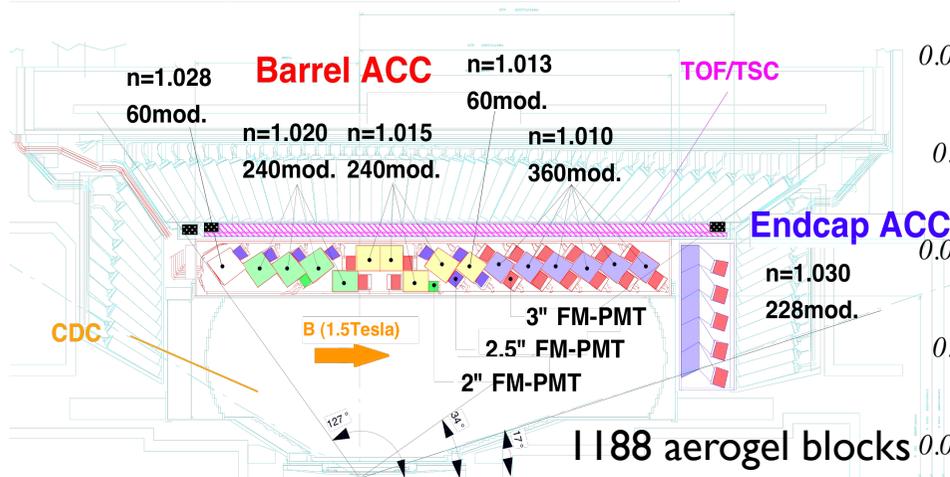


物質密度を上げれば分解能は良くなる。
Belleでは、多重クーロン散乱を避けるためにHe+C₂H₆を利用。
(Gas gain = 10^5 @ 3 kV)

ACC (Aerogel Cherenkov Counter)

$$n > \frac{1}{\beta} = \sqrt{1 + \left(\frac{m}{p}\right)^2}$$

K/π separation from 1.2 GeV to 3.5 GeV



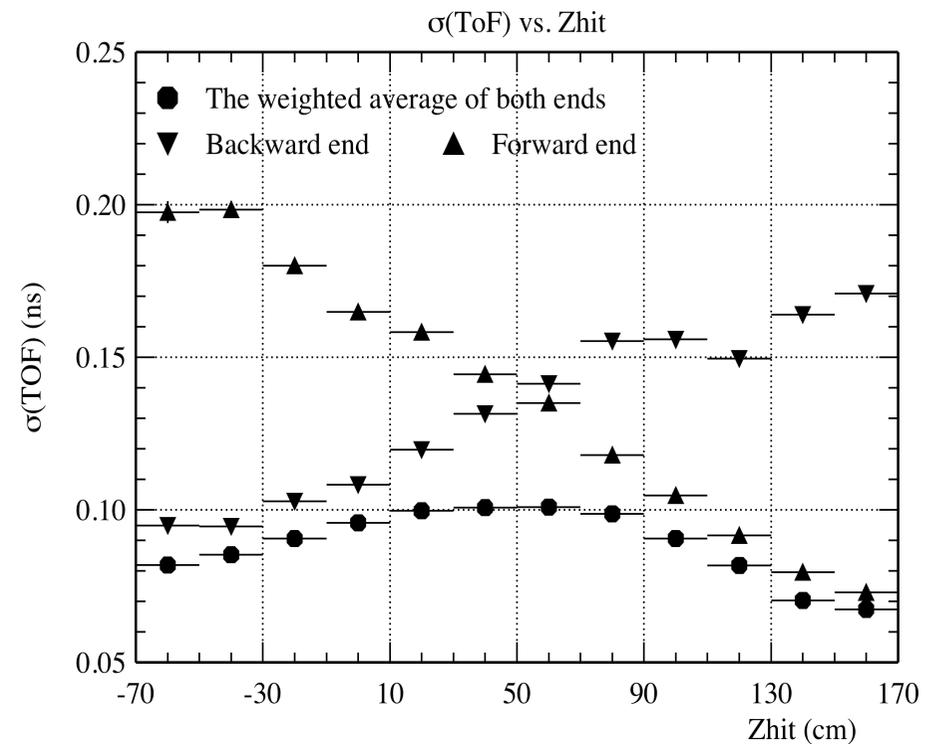
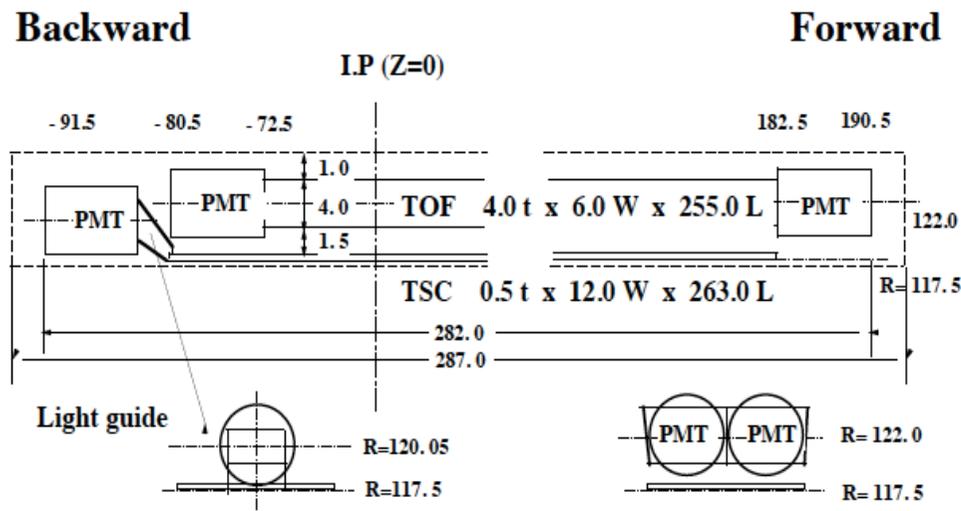
Gain $\sim 10^8$ @0T

(Poisson distribution smeared by FM PMTs.)

TOF (Time-of-Flight Counter)

- r from beam axis = 120 cm
- Length = 3-m long, $N_{\text{scintillators}} = 128$
- $\sigma_T = 100$ psec
- K/ π separation up to 1.2 GeV

飛行時間分解能

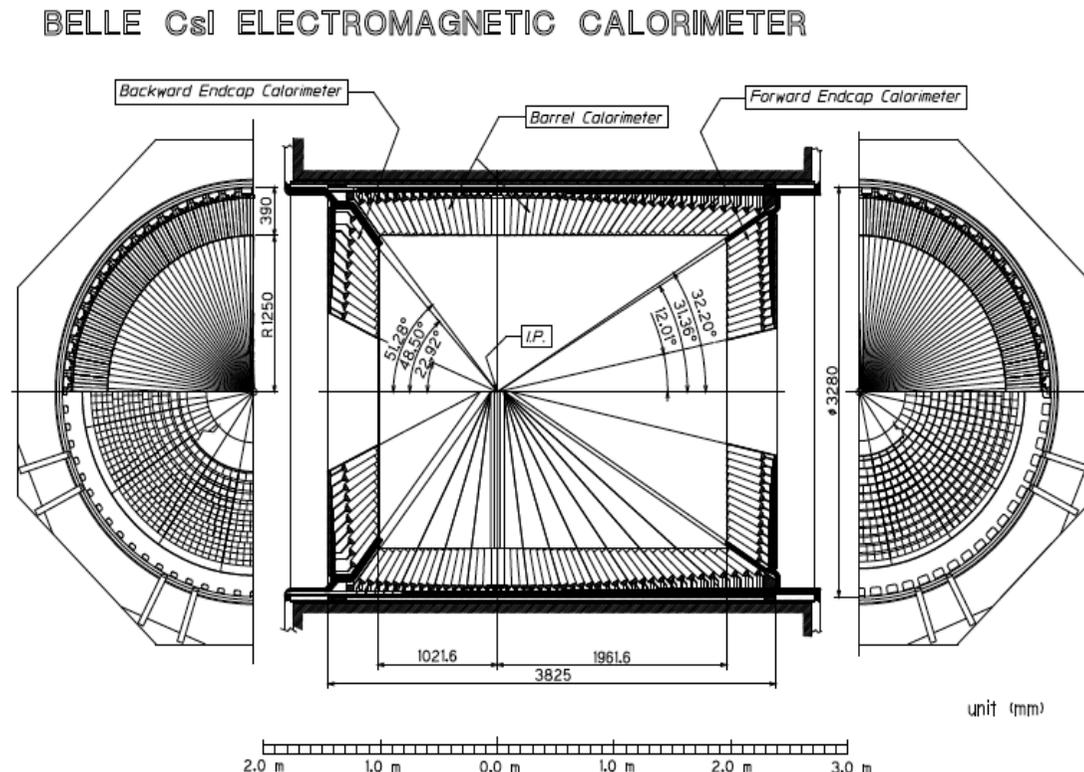


$$t = \frac{l}{c\beta} = \frac{l}{c} \sqrt{1 + \left(\frac{m}{p}\right)^2}$$

飛行距離、シンチレーションの早さ、
光量、PMT性能などが大切な要素。

ECL (Electromagnetic Calorimeter)

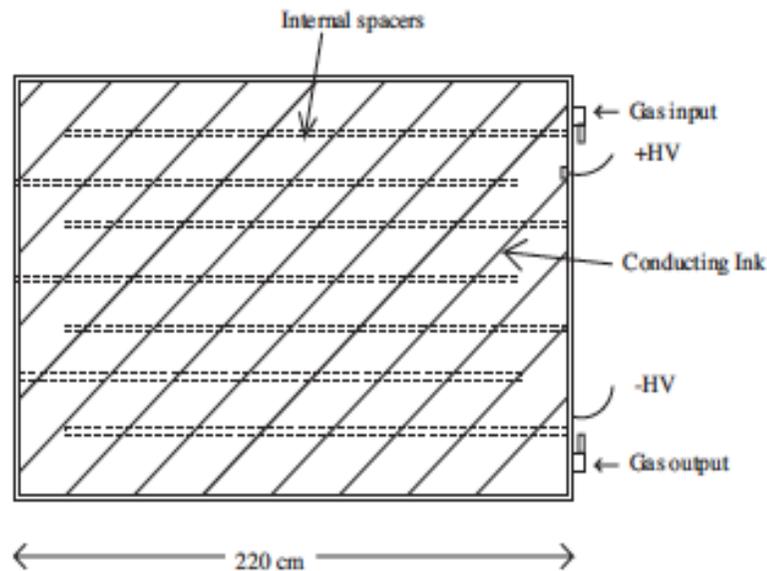
- PINフォトダイオードを用い、電磁シャワーを検出。
- エネルギー分解能は、 $\sim 1.3\%/VE$ 。位置分解能は $\sim 0.5 \text{ cm}/VE$ 。(E in GeV)
(回路ノイズ、シャワーの漏れ、較正誤差などが効いてくる。)



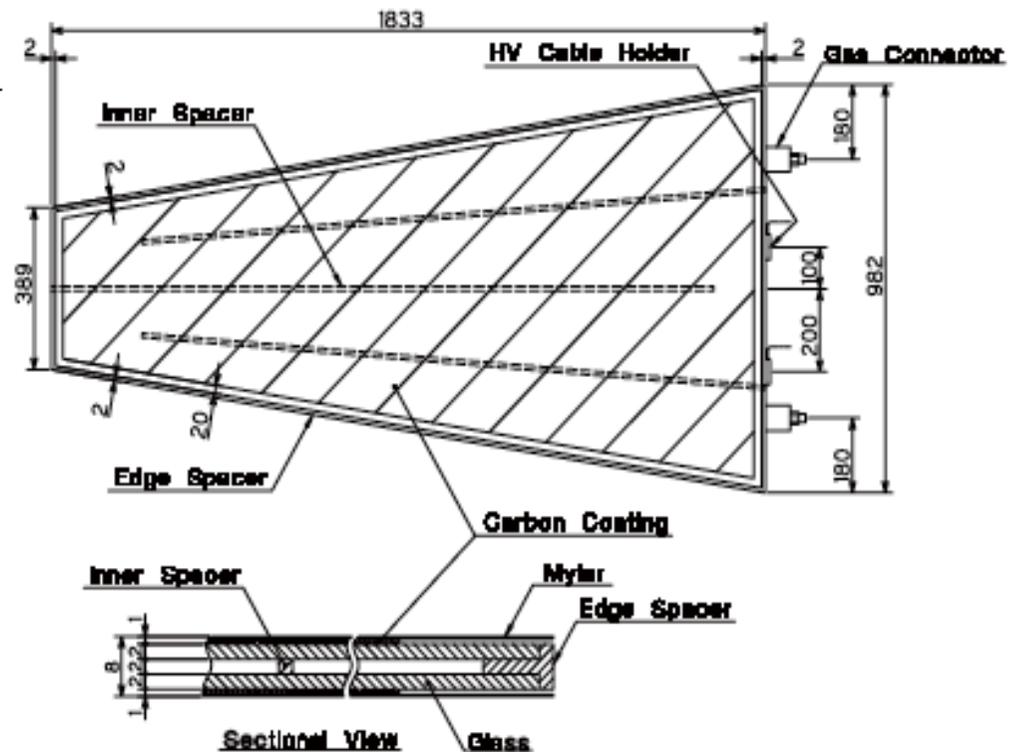
KLM (K_L /Muon Detector)

- 鉄とRPC (Registive Plate Chamber)のサンドイッチ構造(14層)。
- K_L (シャワーを発生)とMuon(長い飛跡)の検出を行う。

Gas	Symbol	Mol. weight	Density (g/l)
Argon	Ar	39.95	1.784 (0°C, 1atm)
Butane-silver	C ₄ H ₁₀	58.12	2.6 (0°C, 1atm)
HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	102.0	4.5



(a) Barrel RPC.



(b) End-cap RPC.

KSFW

- Fox-Wolfram (FW) moment ($P_l = l$ -th Legendre polynomial):

$$H_l \equiv \sum_{i,j} |\vec{p}_i| |\vec{p}_j| P_l(\cos \theta_{ij}),$$

- Fisher discriminant of Super FW (SFW):

$$\text{SFW} \equiv \sum_{l=2,4} \alpha_l \left(\frac{H_l^{\text{so}}}{H_0^{\text{so}}} \right) + \sum_{l=1}^4 \beta_l \left(\frac{H_l^{\text{oo}}}{H_0^{\text{oo}}} \right)$$

Separate signal B
and the other B.

- Kakuno-SFW:

$$\text{KSFW} \equiv \sum_{l=0}^4 R_l^{\text{so}} + \sum_{l=0}^4 R_l^{\text{oo}} + \gamma \sum_{n=1}^{N_t} |p_{t,n}|,$$

Missing momentum,
Charges of tracks, ...
Fisher coefficients are
determined for seven
missing mass regions.

Flavor tagging

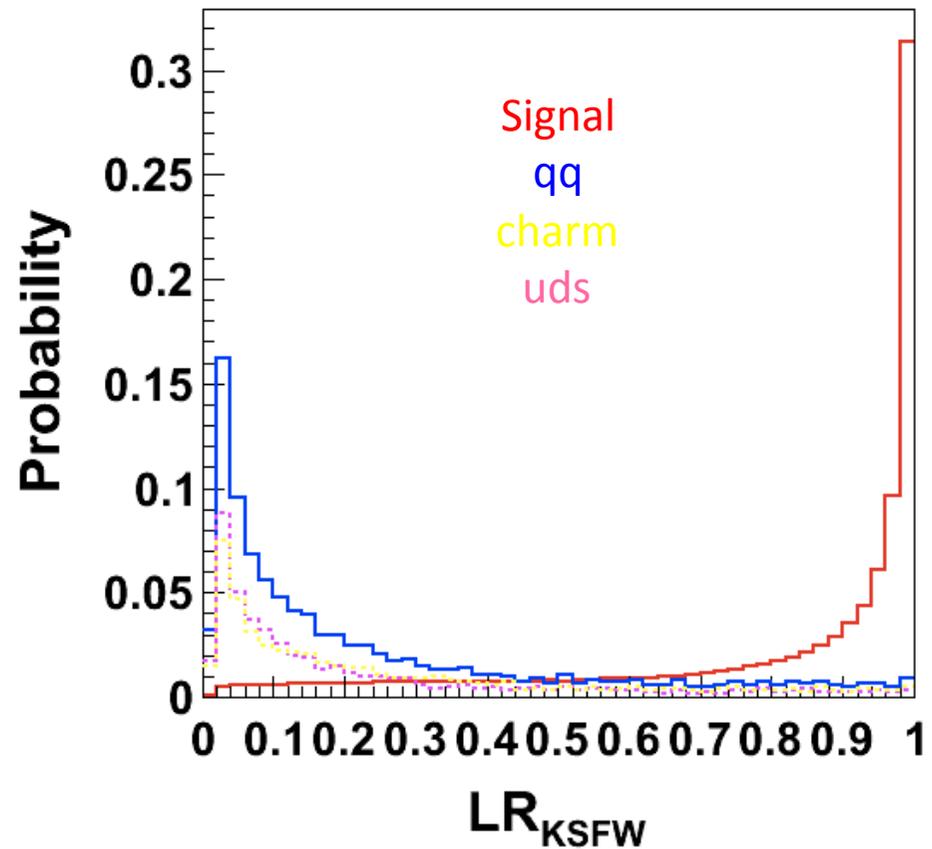
- B-flavor taggingは、下記の情報を用いて行う。

- (1) high-momentum leptons from $B^0 \rightarrow X\ell^+\nu$ decays,
- (2) kaons, since the majority of them originate from $B^0 \rightarrow K^+X$ decays through the cascade transition $\bar{b} \rightarrow \bar{c} \rightarrow \bar{s}$,
- (3) intermediate momentum leptons from $\bar{b} \rightarrow \bar{c} \rightarrow \bar{s}\ell^-\bar{\nu}$ decays, 事象ごとに、(1)から(2)に関連した約50の変数を得て、
- (4) high momentum pions coming from $B^0 \rightarrow D^{(*)}\pi^+X$ decays, 多次元Likelihood法を用いる。
- (5) slow pions from $B^0 \rightarrow D^{*-}X, D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0\pi^-$ decays, and Taggingの精度 r_{tag} は、
- (6) $\bar{\Lambda}$ baryons from the cascade decay $\bar{b} \rightarrow \bar{c} \rightarrow \bar{s}$. qq背景事象分離に用いる。

NeuroBayes Inputs

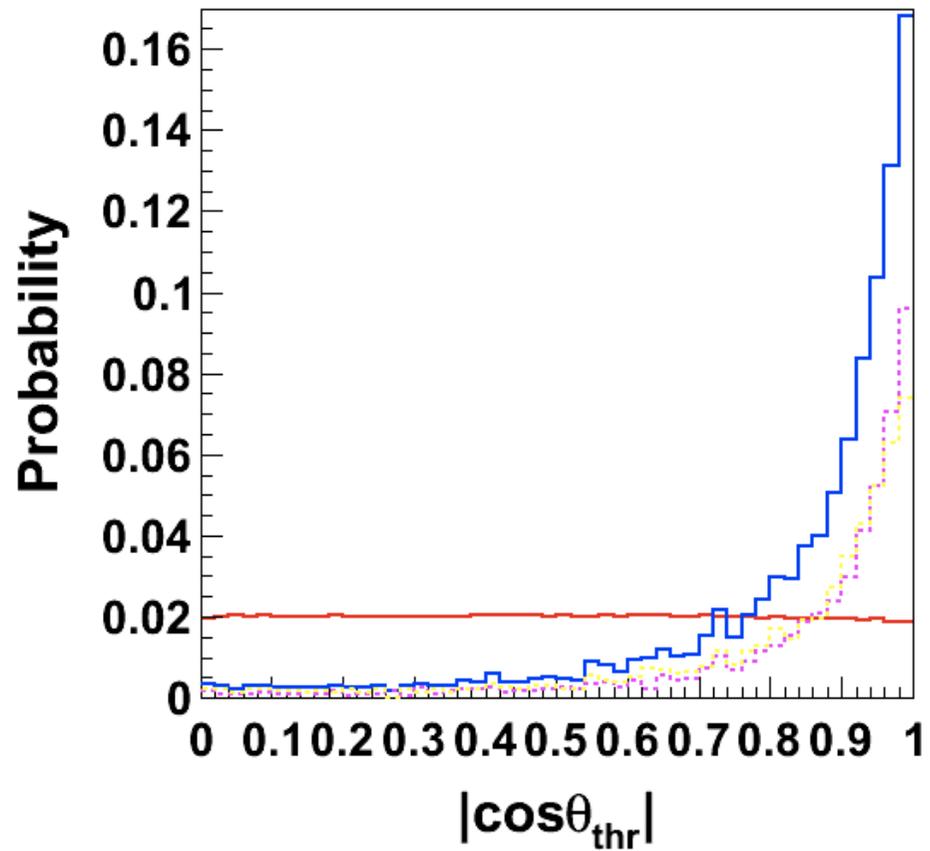
$$LR_{\text{KSFW}}$$

- LR_{KSFW} : Likelihood ratio of KSFW.
 - (I used this with cut base in previous analysis.)



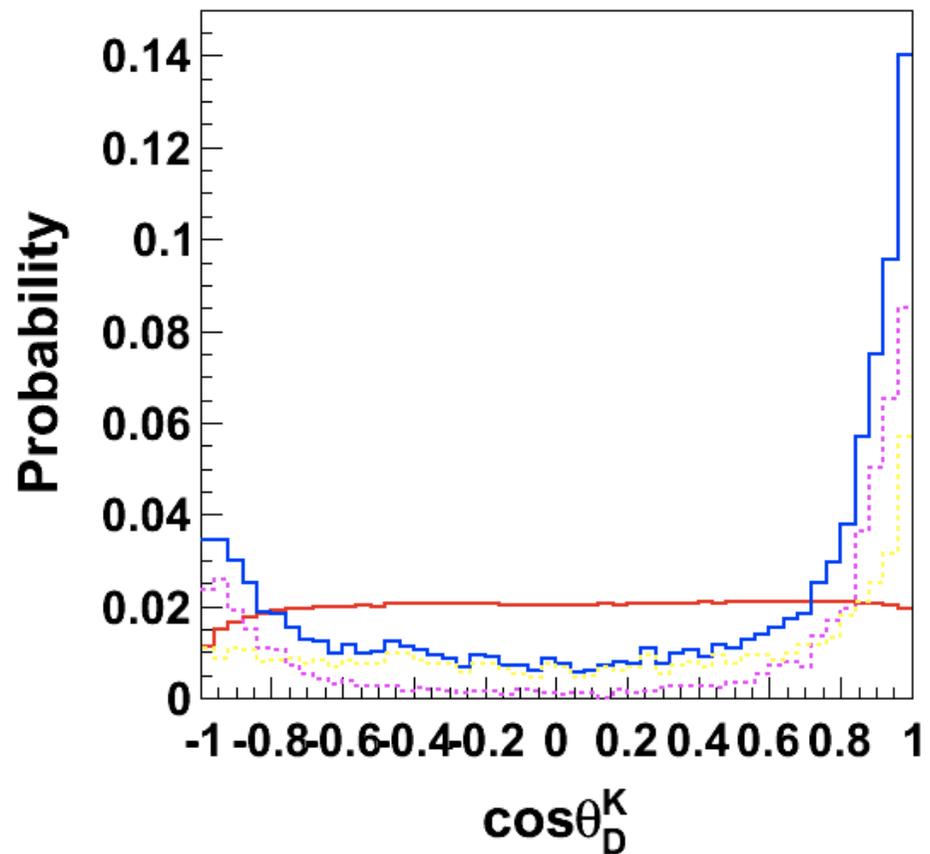
$$|\cos\theta_{\text{thr}}|$$

- $|\cos\theta_{\text{thr}}|$: the absolute value of the cosine of the angle in CM frame between the thrust axis of the B decay and the one of the detected remains.



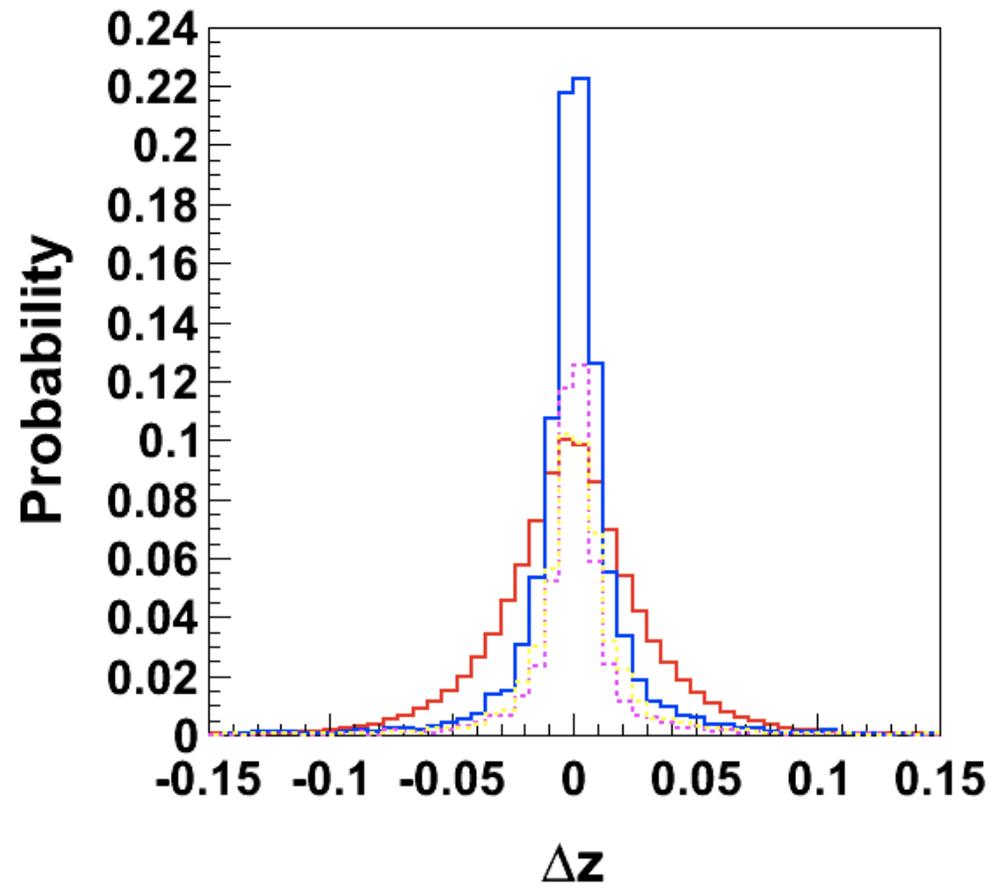
$$\cos\theta_D^K$$

- $\cos\theta_D^K$: the cosine of the angle between the daughter K direction and the opposite direction to B in the D-rest frame.



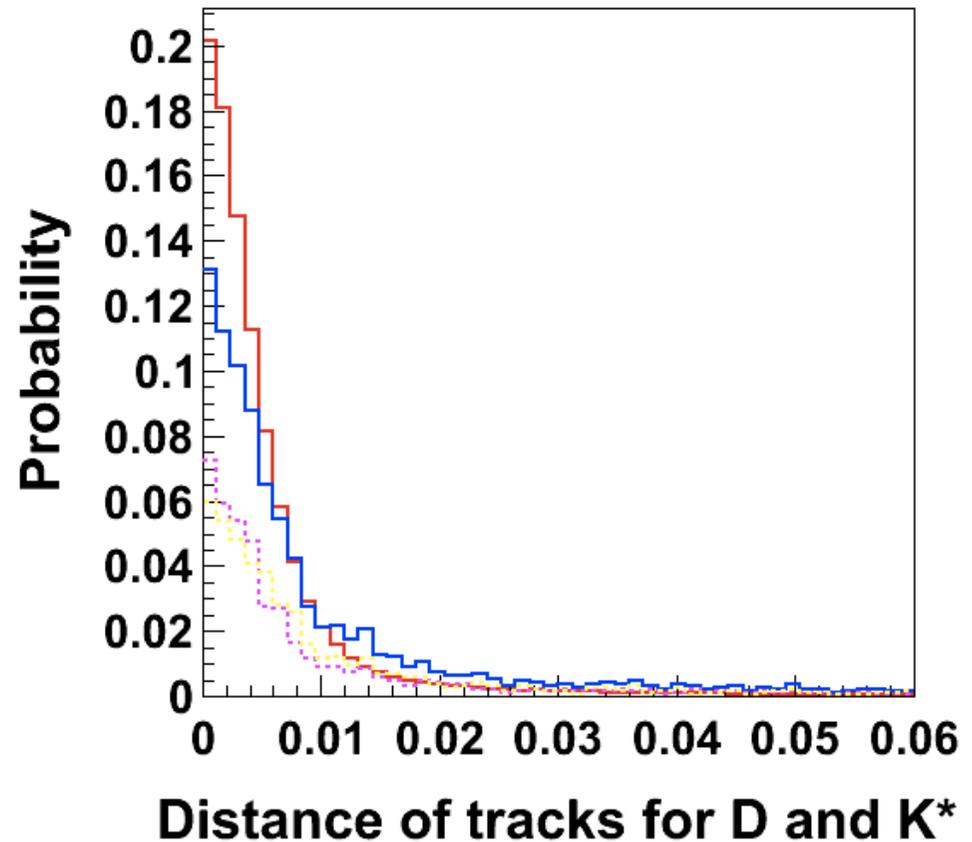
Δz

- Δz : the distance of the reconstructed and tag-side B vertices.



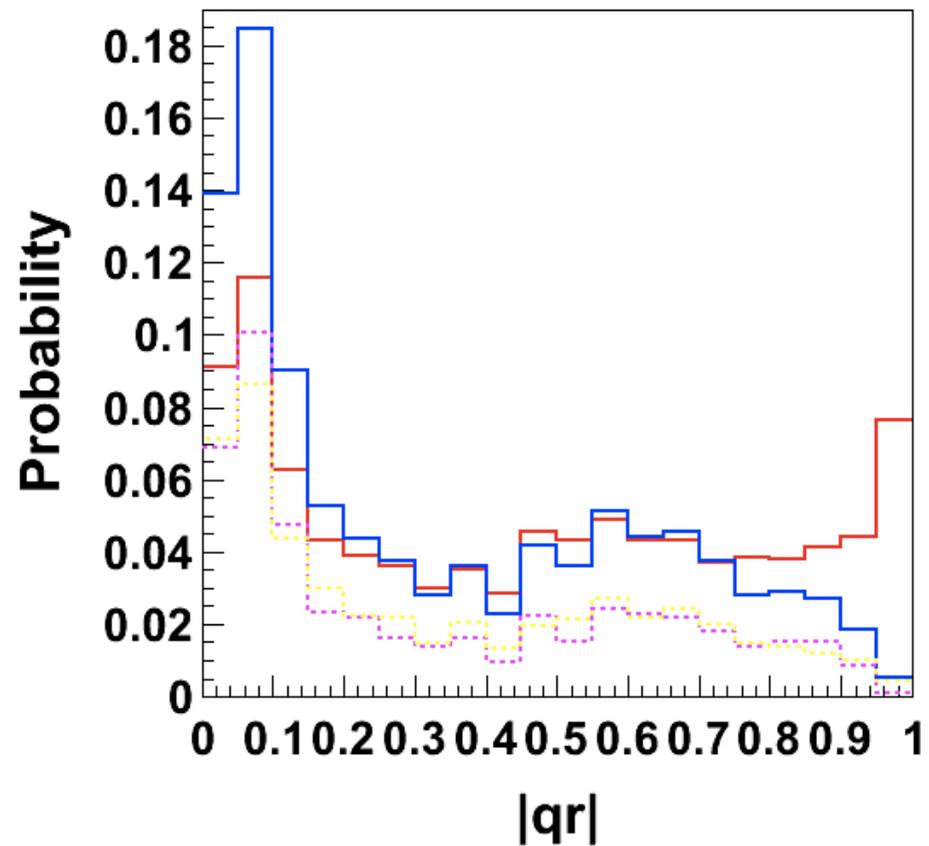
Distance of D K*

- Distance of D K* :
the distance of
closest approach
between the K*
track and the
trajectory of the D
candidate.



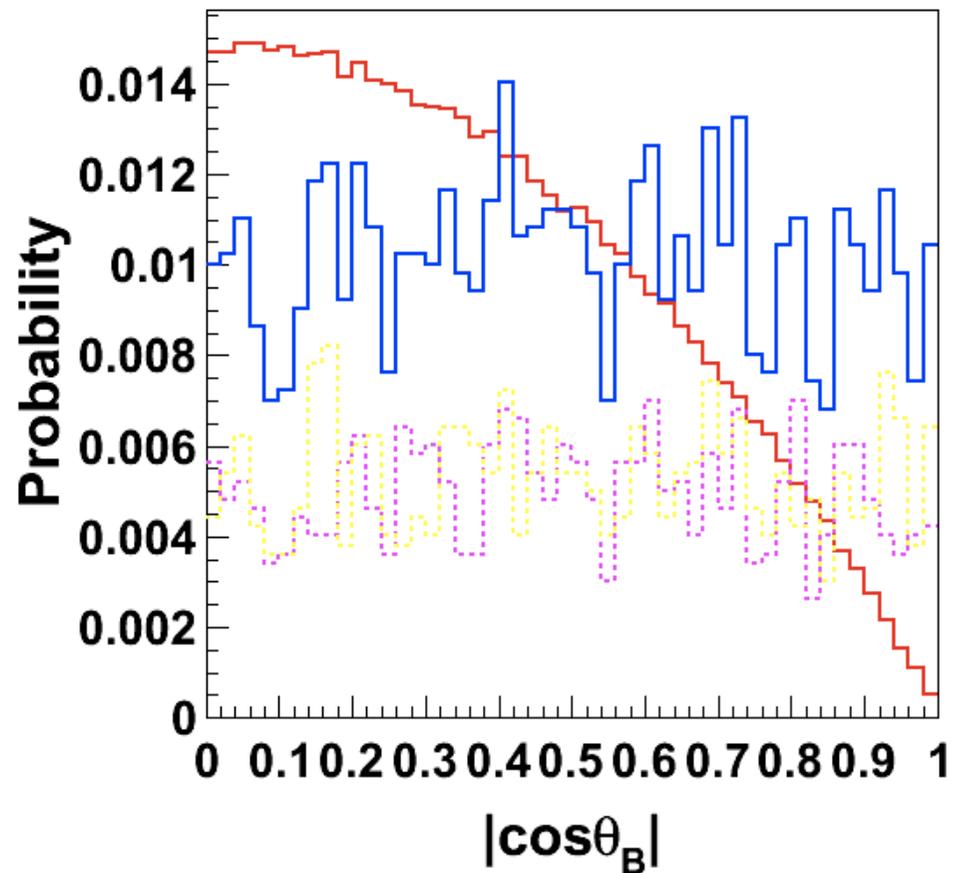
$|qr|$

- $|qr|$: the absolute value of the flavor tagging information qr , where q indicates the b-flavor and r indicates the quality of tagging.



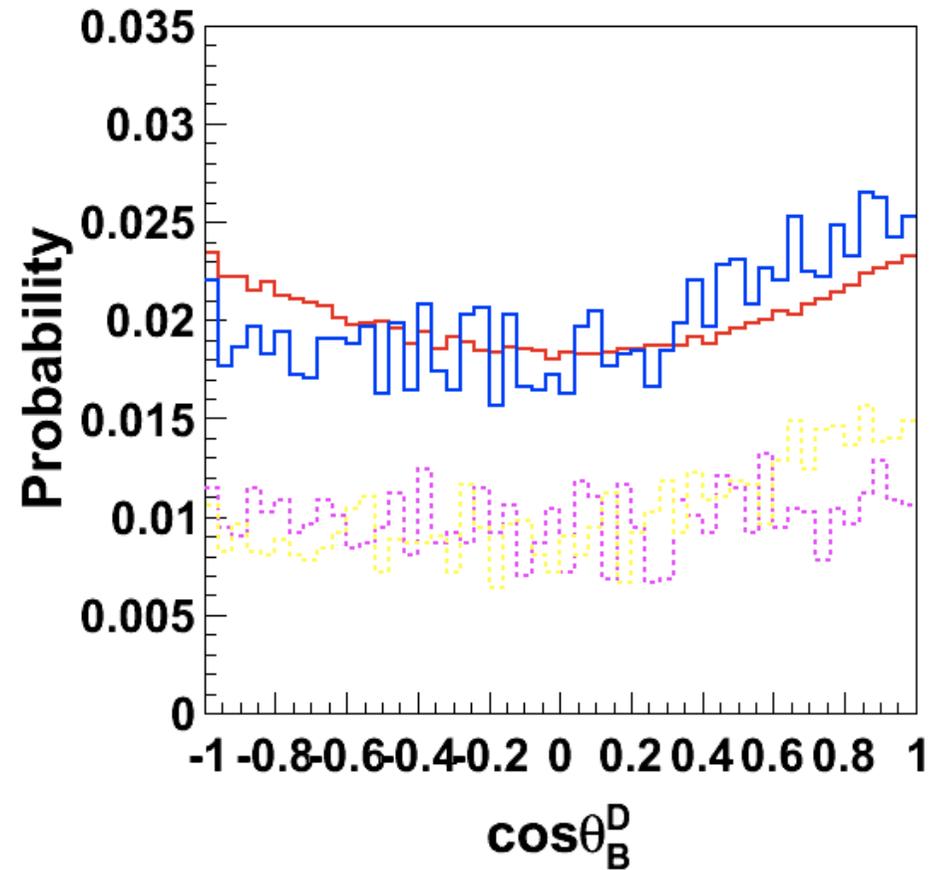
$$|\cos\theta_B|$$

- $|\cos\theta_B|$: the absolute value of cosine of the angle between the B-flight and the beam axis.



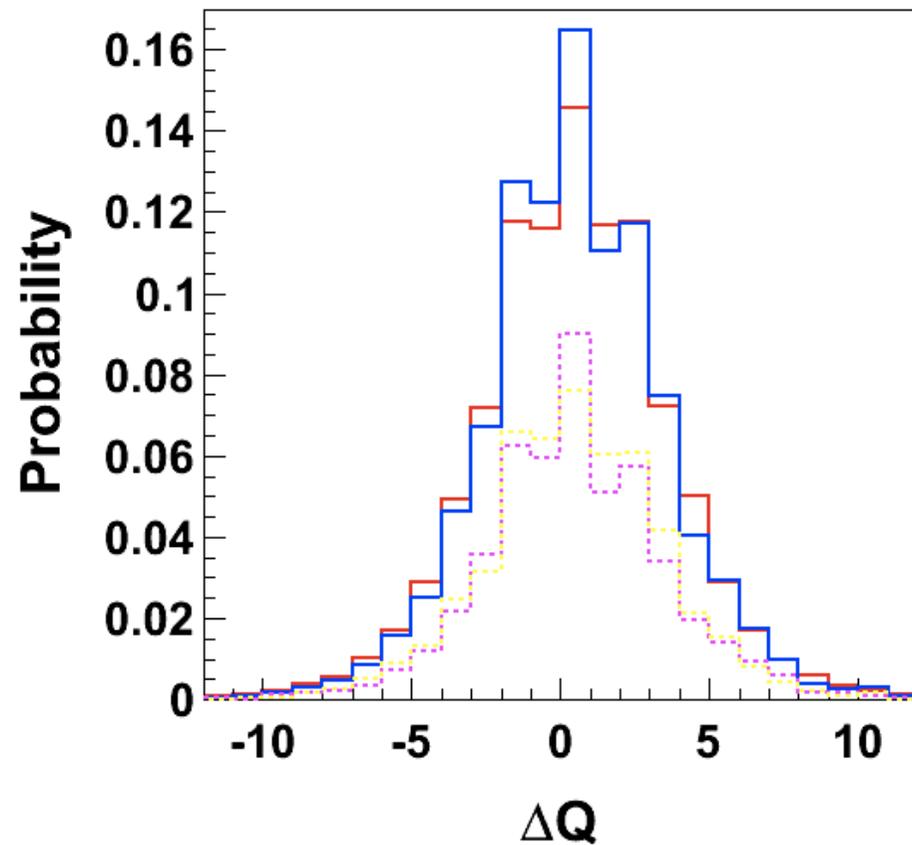
$$\cos\theta_B^D$$

- $\cos\theta_B^D$: the cosine of the angle between the D direction and the opposite direction to $Y(4S)$ in the B-rest frame.



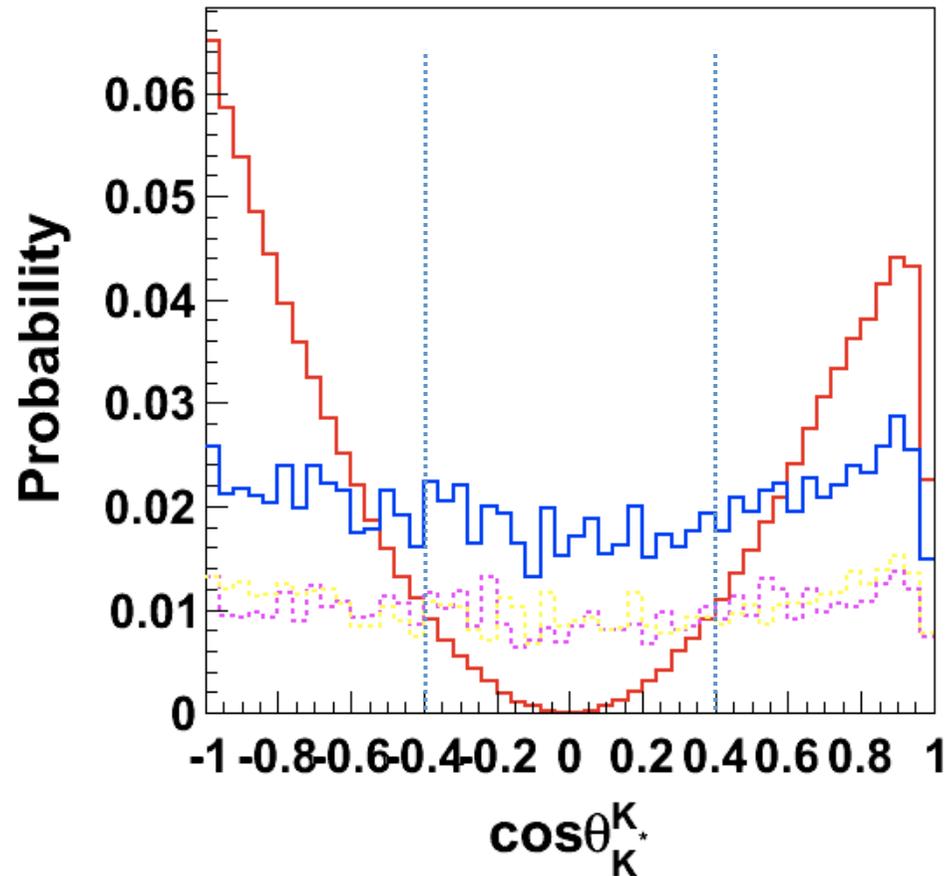
ΔQ

- ΔQ : the charge difference between the sum of the charges of particles in the D hemisphere and the one on the opposite hemisphere, excluding the particles used for the reconstruction of B meson.



$$\cos\theta_{K^*}^K$$

- $\cos\theta_{K^*}^K$: the cosine of the angle between the K direction and the opposite direction to K^* in the B-rest frame.
 - (I used this with Cut base in previous analysis)



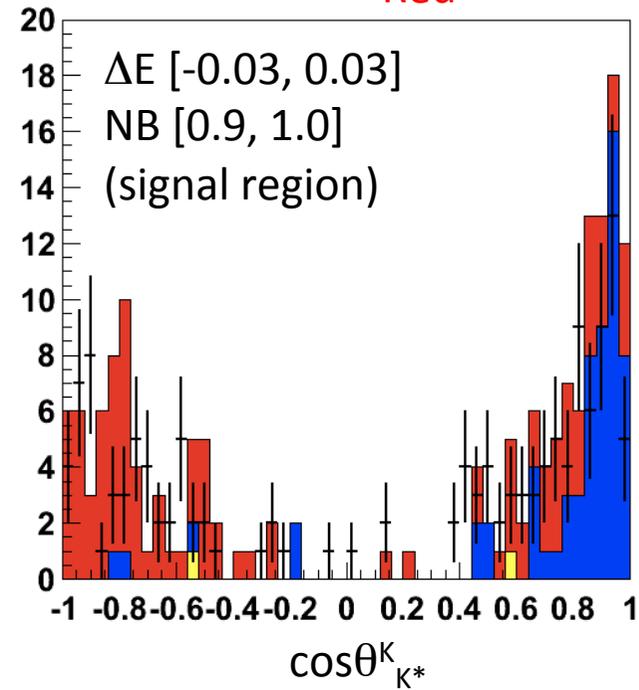
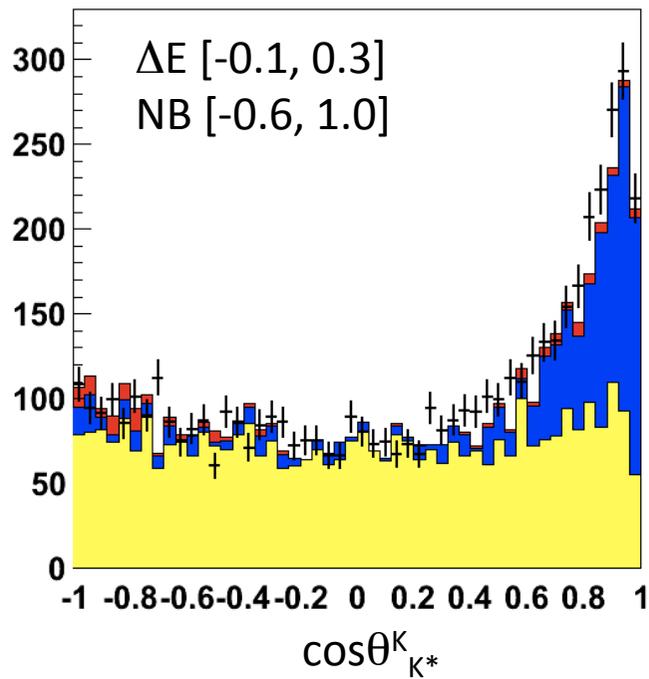
$$\cos\theta_{K^*}^K$$

Dot with error bar : data

Yellow : qq

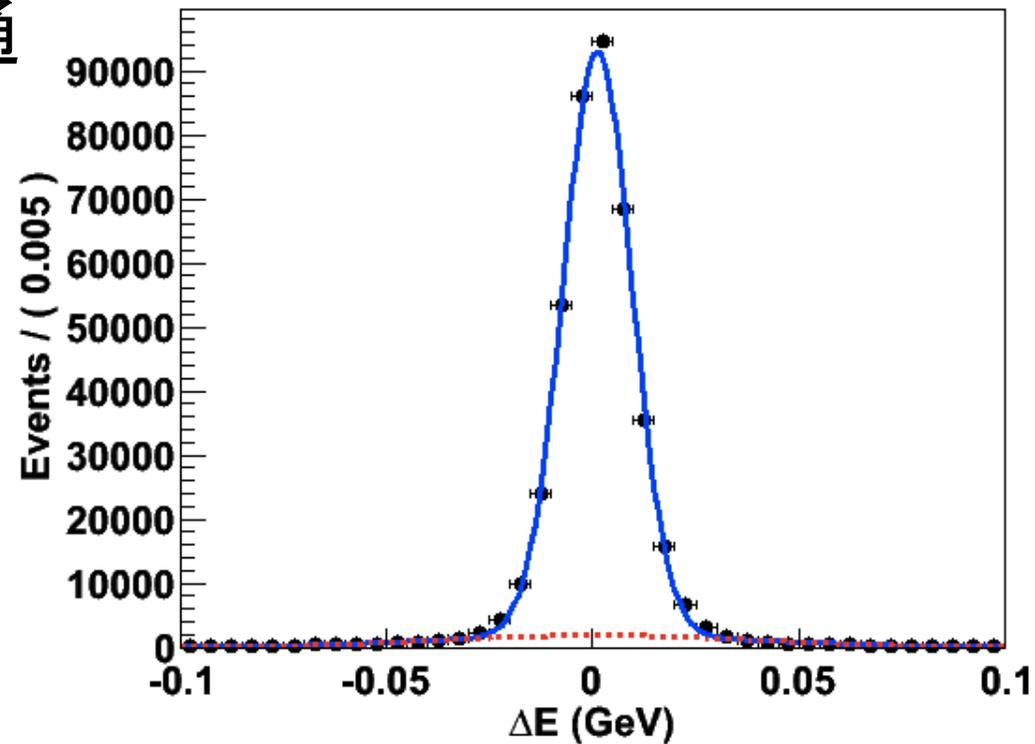
Blue : BB

Red : signal

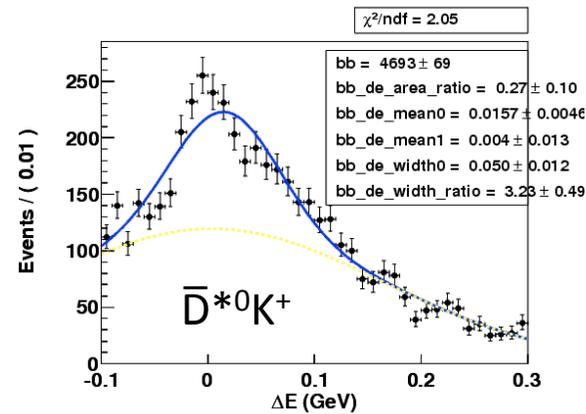
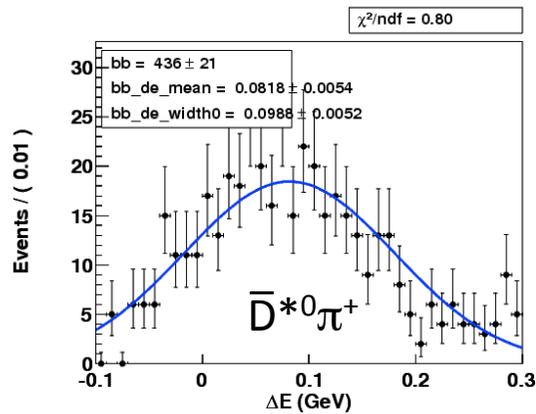
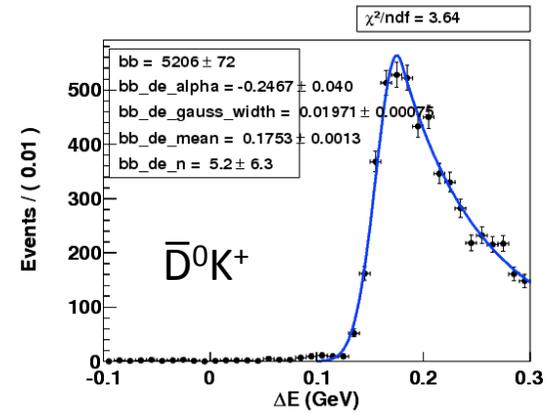
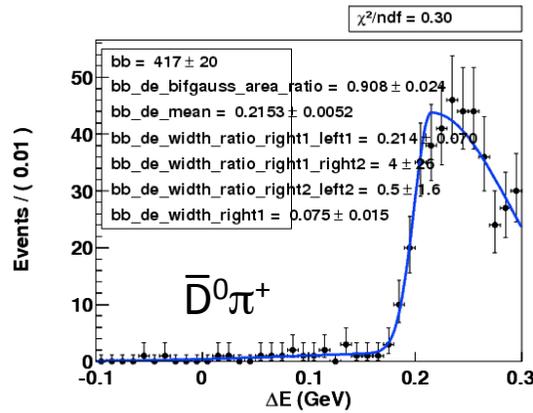
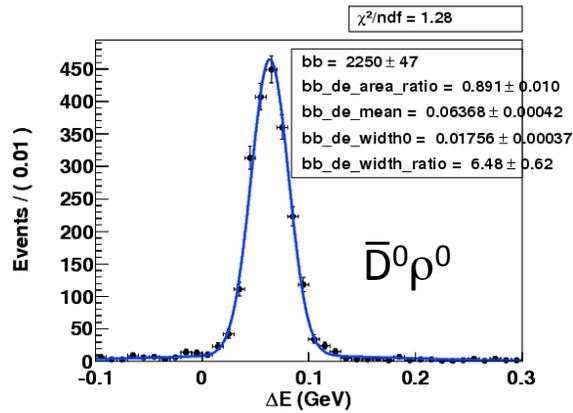


シグナルの ΔE PDF

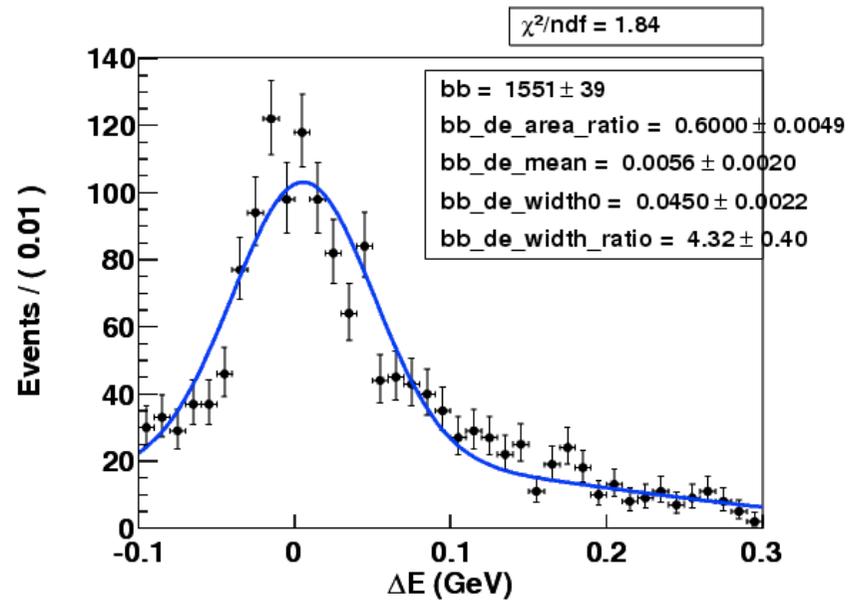
- 二つのガウス関数の和を使用
 - meanは共通



バックグラウンドの ΔE PDF

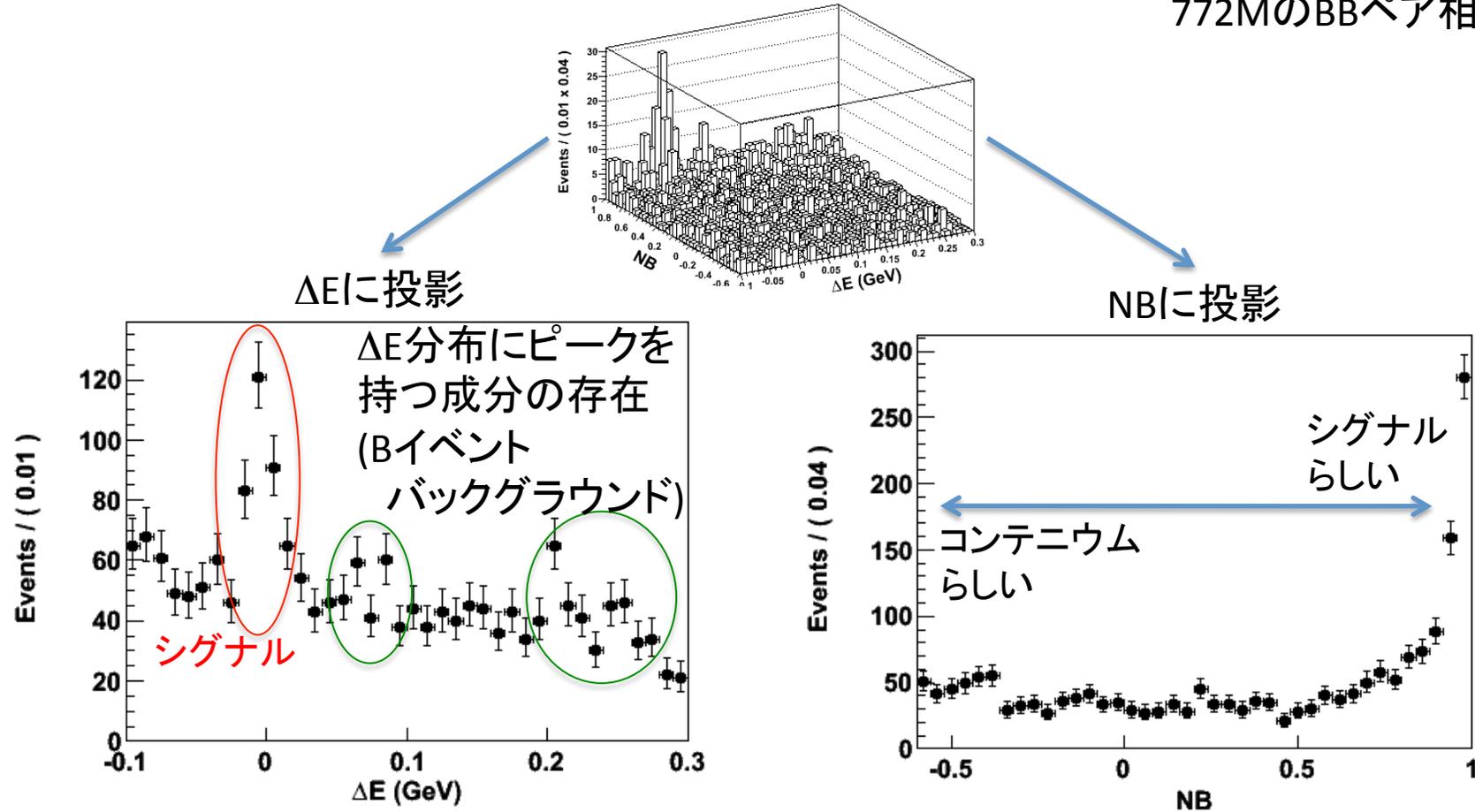


$D^{*-}K^{+}$



データの分布

772MのBBペア相当



- この分布をフィットする事でシグナル数を導出する

Comparison with other analysis

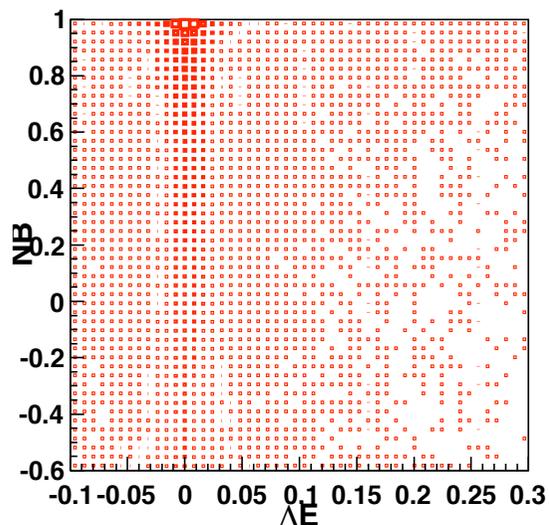
	Br($B^0 \rightarrow D^0 K^{*0}$)	(* 10 ⁻⁵)
This analysis	3.91 ± 0.47	$^{+0.16}_{-0.23}$
My previous analysis (65th JPS 23pBA9) (Cut based on KSFW, cut on $\cos\theta_{K^*}^K$)	3.86 ± 0.64	$^{+0.18}_{-0.22}$
Belle @ 85M BB (PRL 90, 141802 (2003))	4.8	$^{+1.1}_{-1.0} \pm 0.5$
BaBar @ 226M BB (arXiv:0904.2112v2 [hep-ex] (2009))	4.0	$\pm 0.7 \pm 0.3$
PDG	4.2	± 0.6

} not only $D \rightarrow K\pi$,
but also $D \rightarrow K\pi\pi^0$, $K\pi\pi\pi$
are included

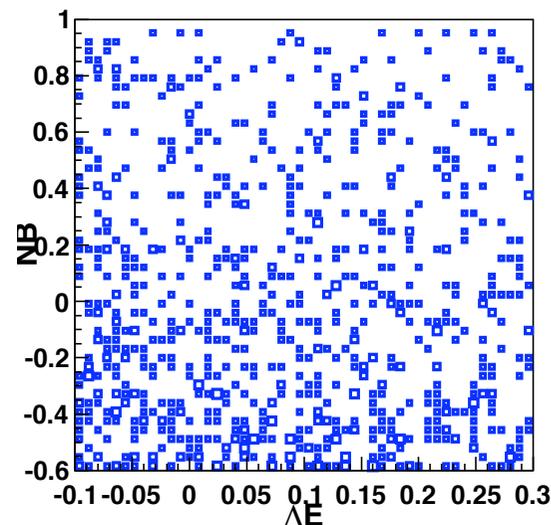
- Most precise measurement.
 - Stat. err.
 - Large statistics (772 * 10⁶ $B\bar{B}$ Data)
 - Reduction of signal loss for using neural net.
 - Syst. err.
 - BB backgrounds study

シグナルの導出

- シグナル数の導出に $\Delta E, NB$ の2次元をフィットして行う



シグナル - 1.9 %



コンテニウム - 1.5 %

- $\Delta E, NB$ に相関がほぼ無いため、フィットする確率密度関数は1次元のものを掛け合わせて作成する

確率密度関数

- ΔE の確率密度関数

- シグナル

- シグナルモンテカルロより
求めた二つのガウシアン之和

- Bイベント

- $\bar{D}^0\rho^0, \bar{D}^0\pi^+, \bar{D}^0K^+, \bar{D}^{*0}\pi^+, \bar{D}^{*0}K^+$
モンテカルロ生成し、それぞれ
対応する確率密度関数を得る、
イベント数はPDGから算出し、
形状、大きさを固定
- その他
指数関数

- コンテニウム

- 直線

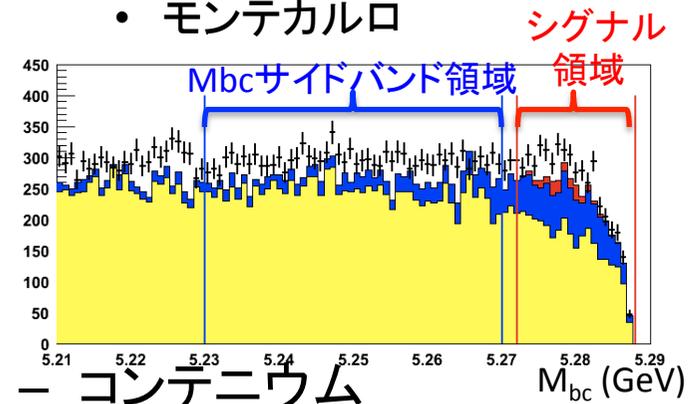
- NBの確率密度関数

- シグナル

- シグナルモンテカルロ

- Bイベント

- モンテカルロ



- コンテニウム

- M_{bc} サイドバンド (M_{bc} [5.23, 5.27] GeV) から B イベントの寄与を差し引いたもの

D	R_{ADS} @BaBar '09	Eff. @Belle '03	Expected #Sig.	
↓		(%)	Fav.	Sup.
$K\pi$	$0.067^{+0.070}_{-0.054}$	13.3	160	10.7
$K\pi\pi^0$	$0.060^{+0.055}_{-0.037}$	3.6	155	9.3
$K\pi\pi\pi$	$0.137^{+0.113}_{-0.095}$	6.2	156	21.3