

# モデル依存の無いDalitz解析を用いた $\phi_3$ 測定に向けた $B^0 \rightarrow [K_S \pi \pi]_D [K^+ \pi^-]_{K^*0}$ 崩壊 の研究

2013年 9月 21日

東北大学 根岸 健太郎,  
他 Belle Collaboration

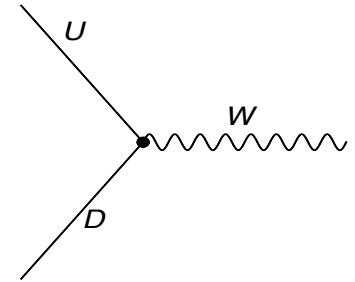
**CP非保存角  $\phi_3$**

# CP非保存角 $\phi_3$

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

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

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

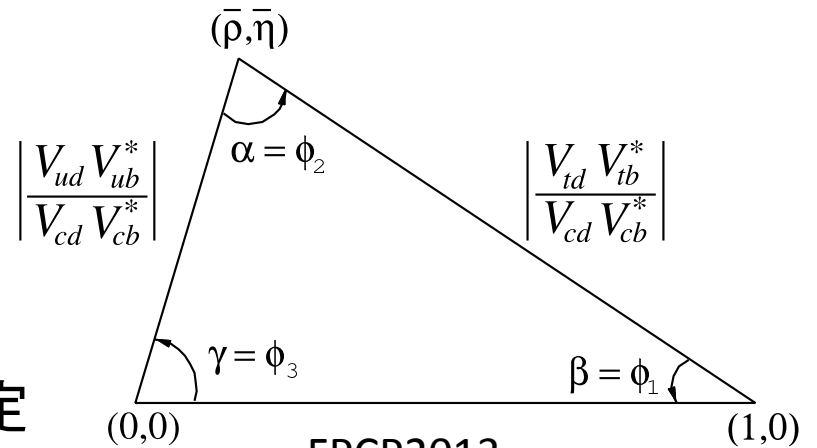


CKM行列はユニタリ:  $V_{CKM}^\dagger V_{CKM} = 1$

- 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  $\phi_3$  を測定



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

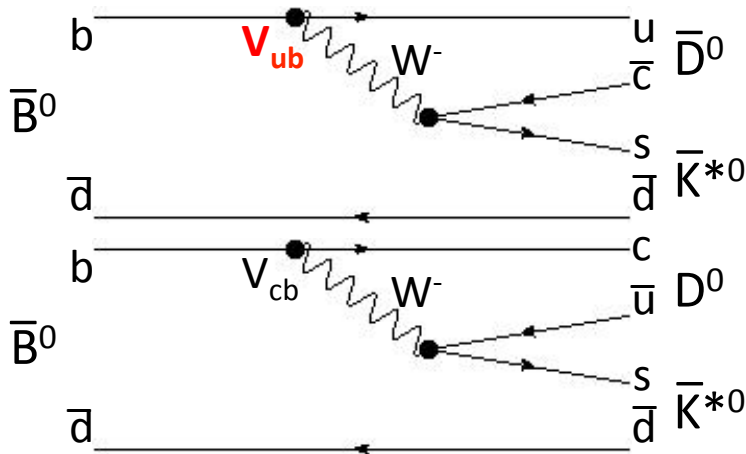
FPCP2013

$$\begin{aligned} \phi_1 &= (21.38^{+0.79}_{-0.77})^\circ \\ \phi_2 &= (85.4^{+4.0}_{-3.9})^\circ \\ \phi_3 &= (68^{+8.0}_{-8.5})^\circ \end{aligned}$$

# $\phi_3$ 測定

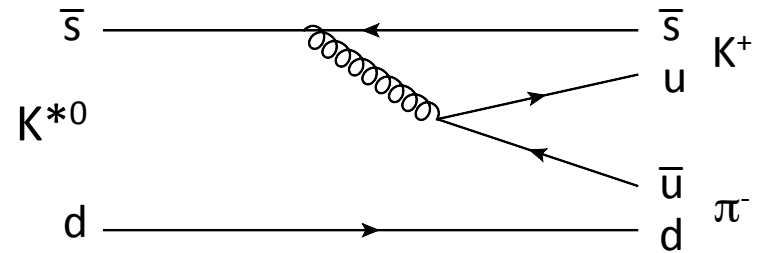
- $\phi_3$ の測定は $V_{ub}$ の位相の測定と同義  $\phi_3 \equiv \arg\left(\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{-V_{cd}V_{cb}^*}\right) \sim -\arg(V_{ub})$

- B → DKを用いる



→上の経路に $b \rightarrow u$ 遷移が存在  
二つの経路の干渉で $\phi_3$   
の効果を測定する

- 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\*<sup>0</sup>のフレーバーが決定  
→Bのフレーバーが一意に決まる

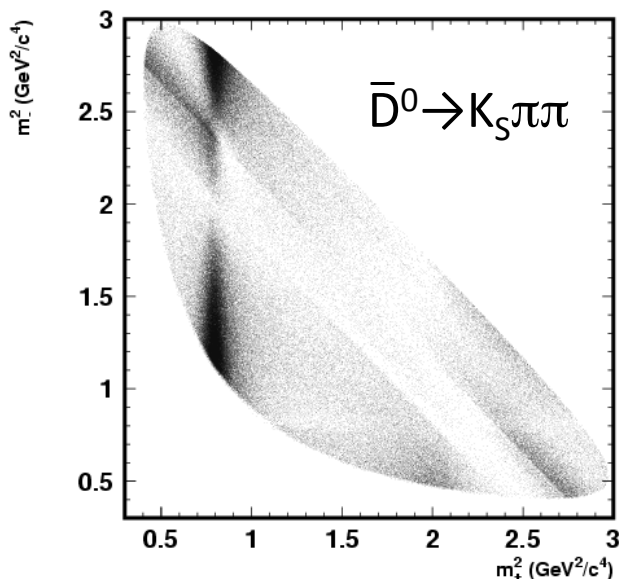
# 導入, 解析手法

# 導入

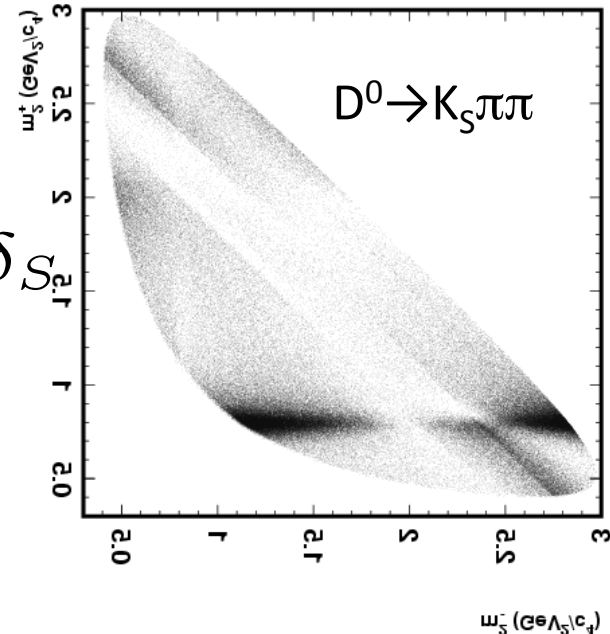
- 未だ $B^0 \rightarrow D[K^+\pi^-]_{K^*0}$ の主に $b \rightarrow u$ を介した suppressed decayは観測されず
  - 荷電Bより $b \rightarrow u$ 遷移含む崩壊の干渉が強い
  - 中性B中間子の $DK^*0$ 崩壊について研究が望まれる
- また2012年,  $B^+ \rightarrow [K_S\pi^+\pi^-]_D K^+$ にて世界初のモデル依存の無いDalitz解析を用いた $\phi_3$ 測定結果が発表された
  - $\phi_3 = (77.3^{+15.1}_{-14.9} \pm 4.1 \pm 4.3)^\circ$  PRD 85, 112014 (2012) @ Belle Collaboration ( $r_B = 0.145 \pm 0.030 \pm 0.010 \pm 0.011$ )
  - このモデル依存の無いDalitz解析を用いた $\phi_3$ 測定は将来Super-B Factoryにおいて非常に有用であり, これを用いた $B^0 \rightarrow [K_S\pi\pi]_D [K^+\pi^-]_{K^*0}$ の $\phi_3$ 測定を目指す

# 解析手法

- 一般的にDalitz法において,モデルとはDの位相空間の平面を表現するもの
  - 複数の中間共鳴状態を経由するので非常に複雑  
どんな中間共鳴状態を仮定するか of 取捨選択に不定性



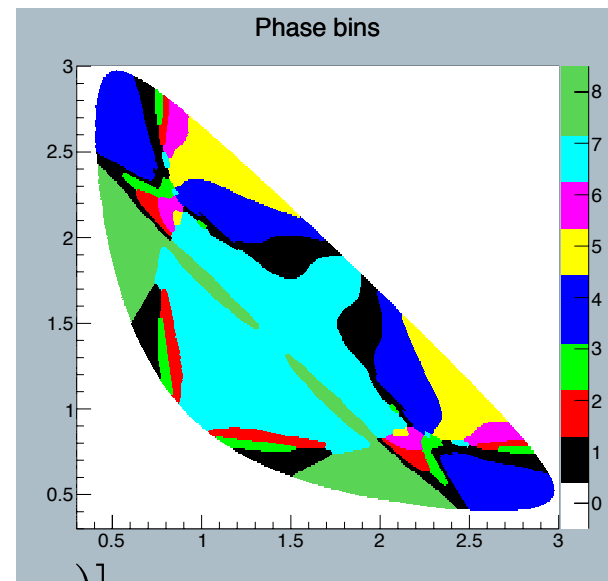
$$+ r_S e^{\pm i\phi_3 + i\delta_S}$$



この $K_S\pi\pi$ の分布を作る際に、  
モデル依存の不定性が入ってきてしまう

# 解析手法

- Dalitz法において位相空間をbin分けし bin毎の位相を用いる事で モデル不定性に依る エラーを回避する事が出来る



– i bin目に入ってくるSignal数 $N_i$ は

$$N_i = h_B [K_i + r_S^2 K_{-i} + 2k \sqrt{K_i K_{-i}} (x + c_i + y + s_i)]$$

Favored term

Suppressed term

Interference term

$N_i$ はDalitzパラメータ以外の分布のFitから求める

$h_B$  : normalization constant

$K_i$  : tagged  $D \rightarrow K_S \pi \pi$ によるイベント数

$c_i(s_i)$ : D崩壊のstrong phase, 余弦(正弦), CLEOのデータを利用

$x, (y)$ :  $r_S \cos(\delta_S \pm \phi_3), (r_S \sin(\delta_S \pm \phi_3))$

$k$  : correction constant,  $DK\pi, K^*$  higher 共鳴状態による  
また  $k \sim 1$  (BaBarより)

bin-bin間のCrossFeed

Efficiencyの差異

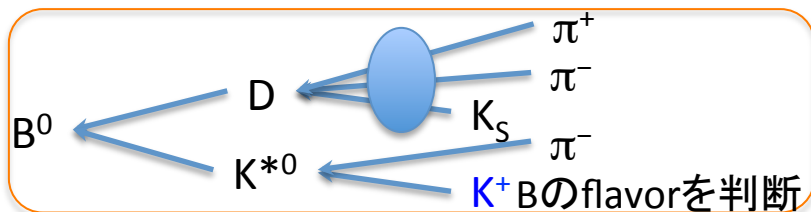
$K^{*0} \rightarrow K\pi$ のdouble miss-PIDによるflavor flip

考慮する



**$B^0 \rightarrow [K_S \pi \pi]_D K^{*0}$  の解析**

# イベント選択、再構成



$$m_{D^0} = 1.865 \text{ GeV}$$
$$m_{K^{*0}} = 0.896 \text{ GeV}$$

- 粒子識別(K/π) efficiency 90%, fake rate 10%
- K<sub>S</sub>はπ<sup>+</sup>π<sup>-</sup>から再構成, purity 94%, efficiency 85%,

## • D<sup>0</sup>の再構成

- π<sup>+</sup>, π<sup>-</sup>とK<sub>S</sub>より再構成
- $|M_{K_S\pi\pi} - m_{D^0}| < 0.010 \text{ GeV}$

## • K<sup>\*0</sup>( $\bar{K}^{*0}$ )の再構成

- K<sup>+</sup>, π<sup>-</sup>(K<sup>-</sup>, π<sup>+</sup>)より再構成
- $|M_{K\pi} - m_{K^{*0}}| < 0.050 \text{ GeV}$

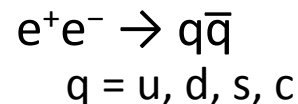
## • B<sup>0</sup>の再構成

- D<sup>0</sup>質量とB<sup>0</sup>のvertexから最良のB<sup>0</sup>を選択

- $M_{bc} \equiv \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - (\vec{p}_{D^0} + \vec{p}_{K^{*0}})^2}$   
シグナルはBの質量にピーク  
シグナルの導出に用いる

- $\Delta E \equiv E_{D^0} + E_{K^{*0}} - E_{\text{beam}}$   
シグナルは~0にピーク  
シグナルの導出に用いる

# コンティニウムバックグラウンドの抑制

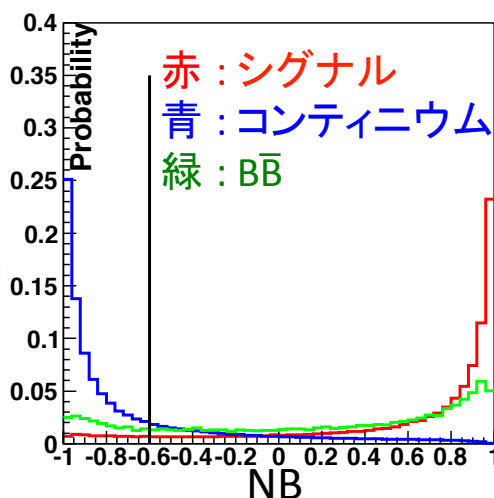


- コンティニウムバックグラウンド抑制に12の変数を用いる。  
ニューラルネット利用した。(NeuroBayesと呼ばれるパッケージ)

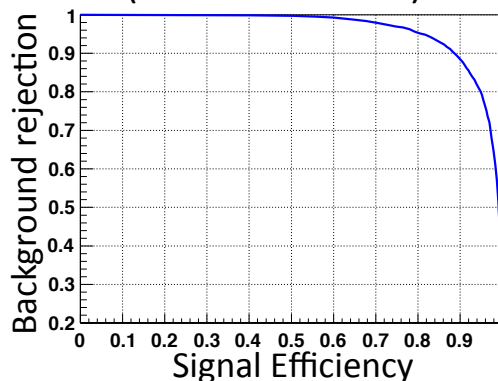
1. LR
2.  $\cos\theta_B$
3.  $\Delta z$
4. dist. DK\*
5.  $|qr|$
6.  $\cos\theta_{thr}$
7.  $\cos\theta_B^D$
8. v1\_z
9. v1\_v1
10. v2\_v2
11. v3\_v3
12. thru\_oth

100,000イベントを  
トレーニング

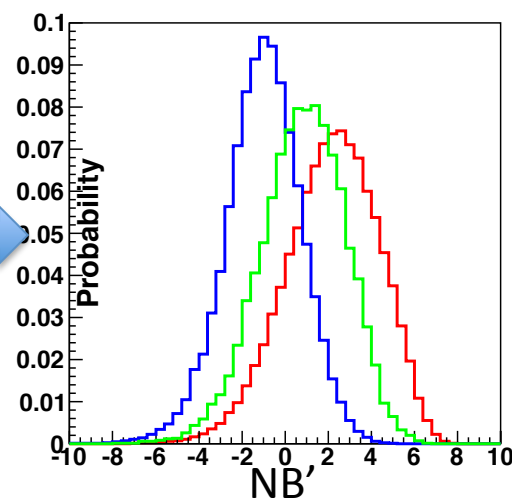
$$NB = NB(LR, \cos\theta_B, \dots)$$



(NB < -0.6 カット)



$B^0 \rightarrow [K_S \pi]_D K^{*0}$  の解析



$$NB' \equiv \ln \left( \frac{NB - NB_{low}}{NB_{high} - NB} \right)$$

$$NB_{low} = -0.6$$

$$NB_{high} = 0.9992$$

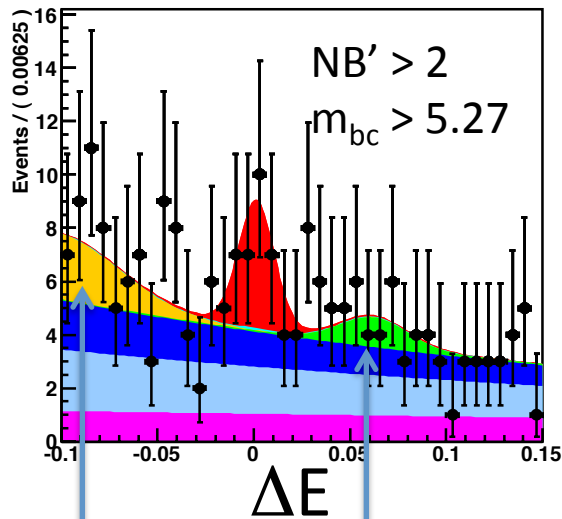
この分布をシグナルの  
導出に使用

# シグナル導出

- 3D( $\Delta E$ ,  $NB'$ ,  $M_{bc}$ )フィットによりSignal数を求める、  
ここで、Dalitz図上bin分けせず、 $B^0$ ,  $\bar{B}^0$ 判断せず $\Sigma(N_i + \bar{N}_i)$ を求めた

772  $M \bar{B}\bar{B}$

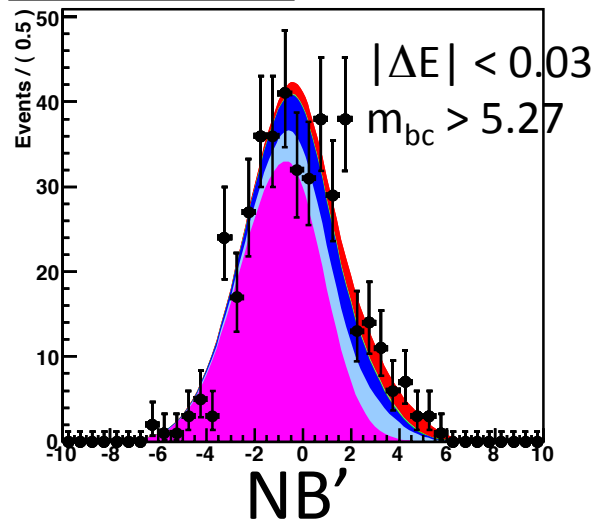
A RooPlot of " $\Delta E$  (GeV)"



1 miss-PIDイベント  
例)  $D^0\rho^0$

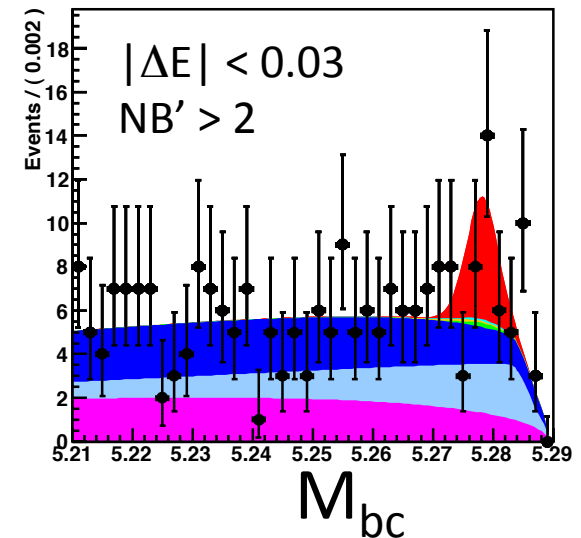
1  $\pi$  missingかつ  
miss-PIDイベント  
例)  $D^0a_1^+$ ,  $D^{*0}\rho^0$

A RooPlot of " $NB'^{TRANS}$ "



赤 : シグナル  
青 :  $D^0$  fake  $\bar{B}\bar{B}$   
水色 :  $D^0$  true  $\bar{B}\bar{B}$   
紫 : コンティニウム

A RooPlot of " $M_{bc}$ "



$$\Sigma(N_i + \bar{N}_i) = 37.4^{+11.6}_{-10.5}$$

$B^0 \rightarrow [K\pi]_D K^{*0}$ から予期されたシグナル数  
~ 45.8 イベントから  $-0.8\sigma$  程度

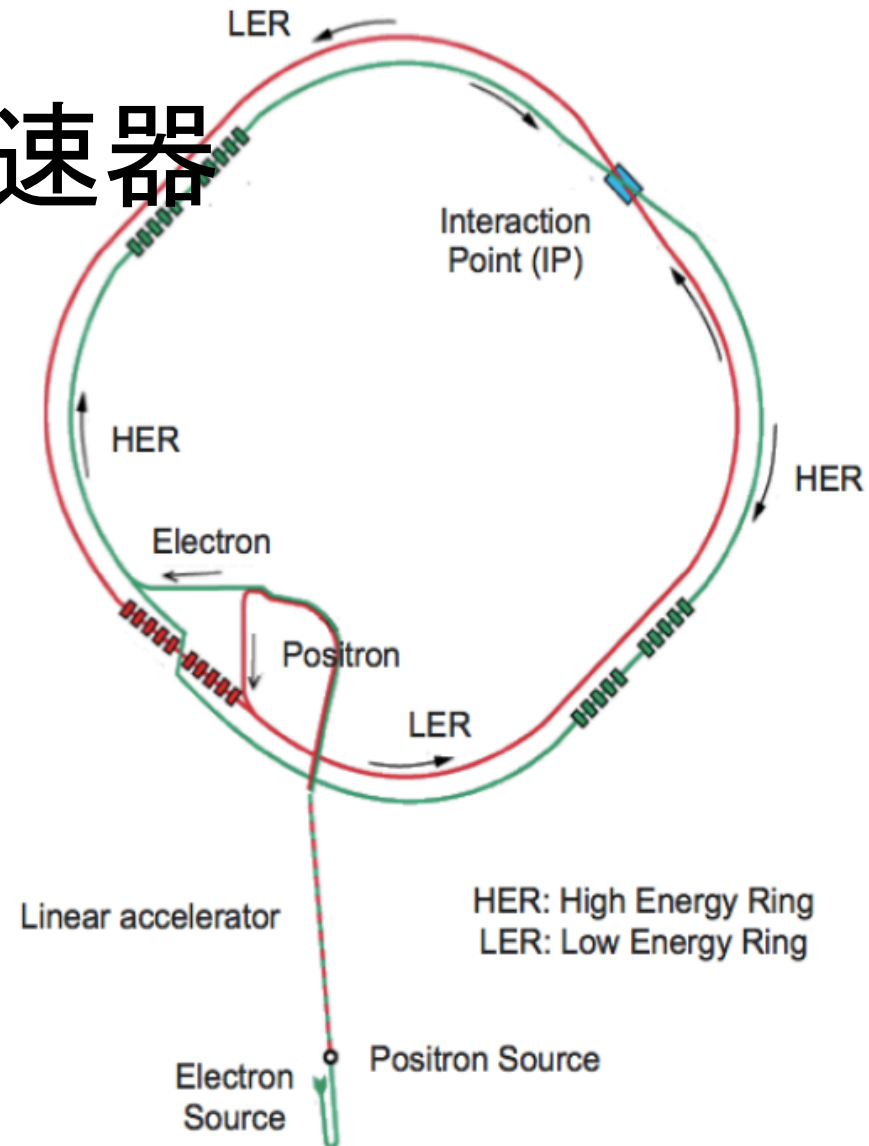
# まとめ

- 中性Bを用いた $\phi_3$ 測定が望まれる
  - $B^0 \rightarrow [K_S \pi \pi]_D K^{*0}$  Dalitz解析は  
中性Bを用いた $\phi_3$ 測定では最も有望
  - 中性Bの方が荷電Bモードより $\phi_3$ への  
制限がかけられる可能性がある
- Dalitz分布全体でのシグナル数が求まった
  - $B^0 \rightarrow [K\pi]_D K^{*0}$ の結果と良い一致
- 今年度中にDalitz分布bin分け後の3Dフィットにより、 $\phi_3$ 測定をする

# BACKUP

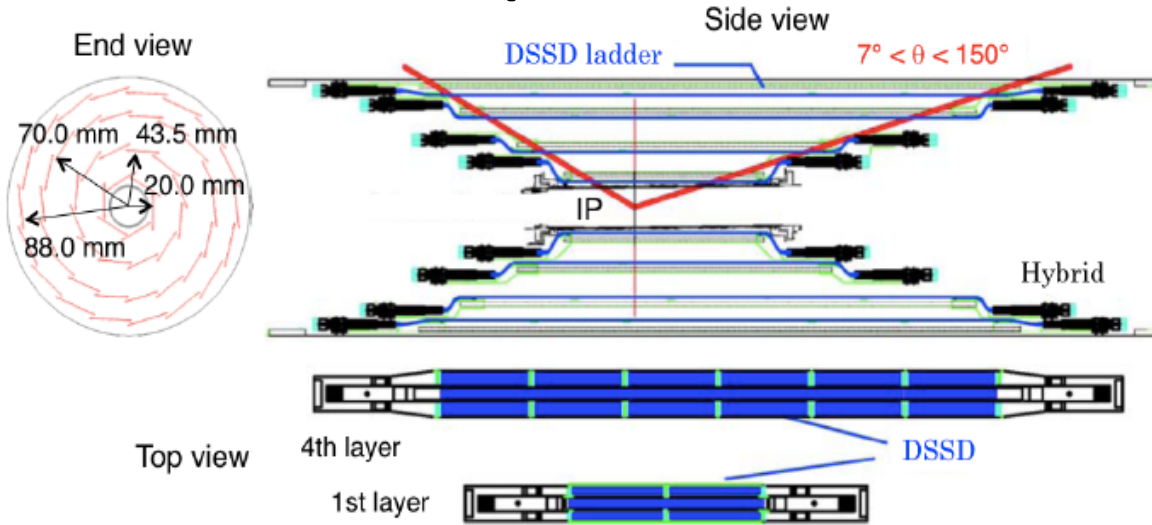
# KEKB加速器

- 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



<sup>1</sup>The 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.

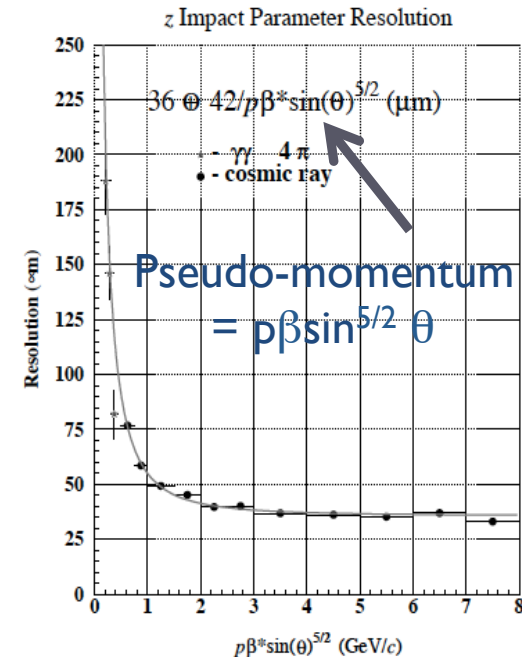
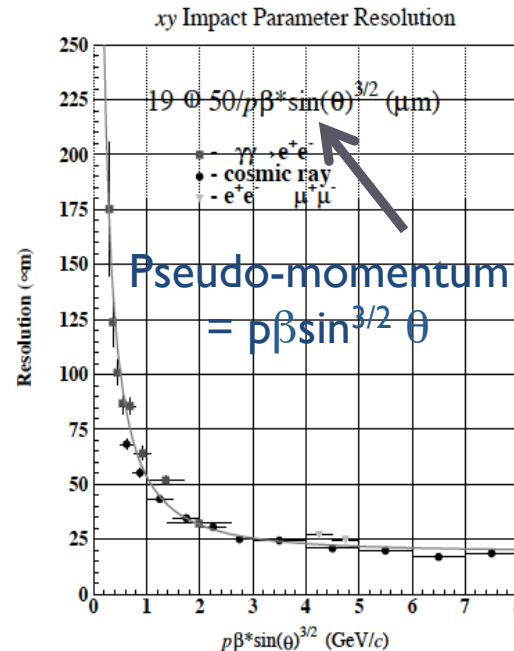
# SVD (Silicon Vertex Detector)



DSSD = double-sided Si strip  
 Chip size: 57.5 x 33.5 mm<sup>2</sup>  
 Strip pitch: 25 (p)/50 (n) μm

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

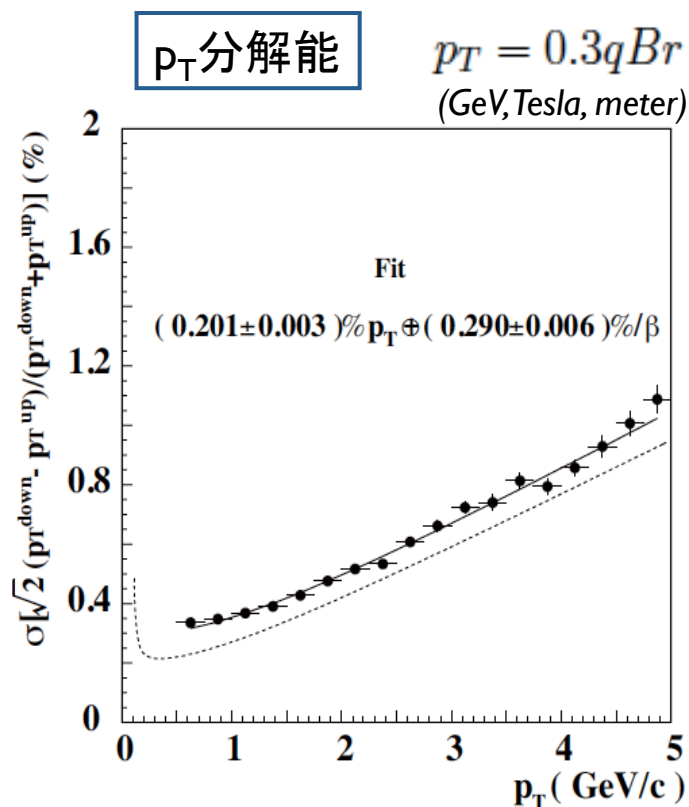
読み出し: VAITA集積回路を用いる。  
 チップの放射線耐性は20 Mrad。  
 (1 rad = 0.01 J/kg)



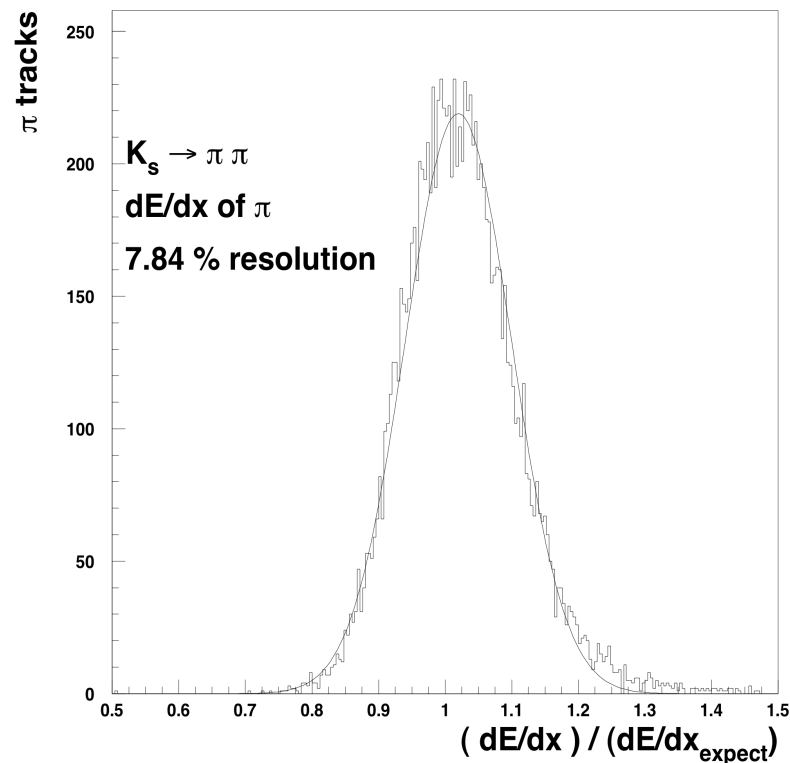


# CDC (Central Drift Chamber)

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



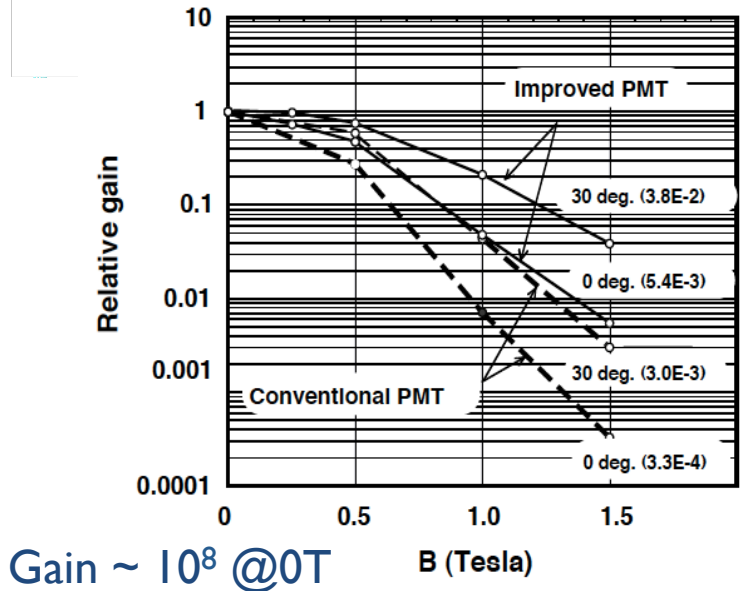
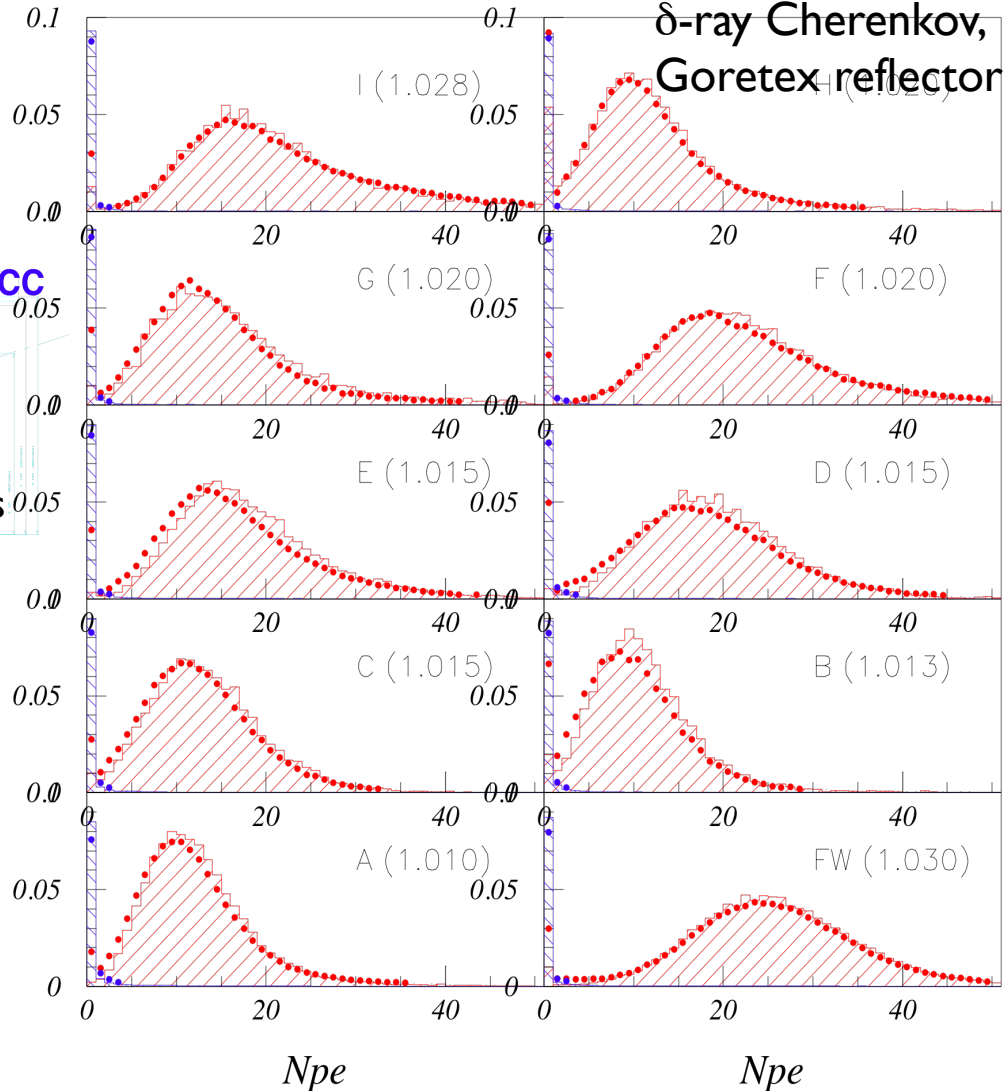
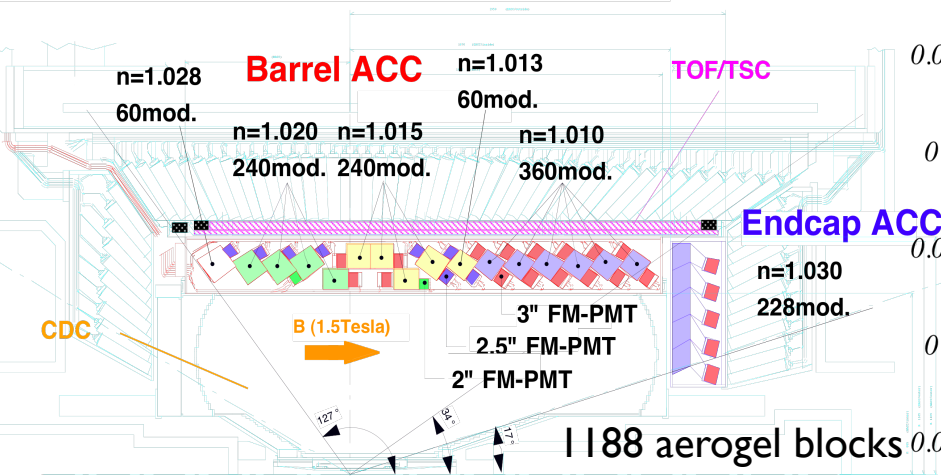
## dE/dx分解能の例



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+C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>を利用。  
(Gas gain = 10<sup>5</sup> @ 3 kV)

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

K/ $\pi$  separation from 1.2 GeV to 3.5 GeV



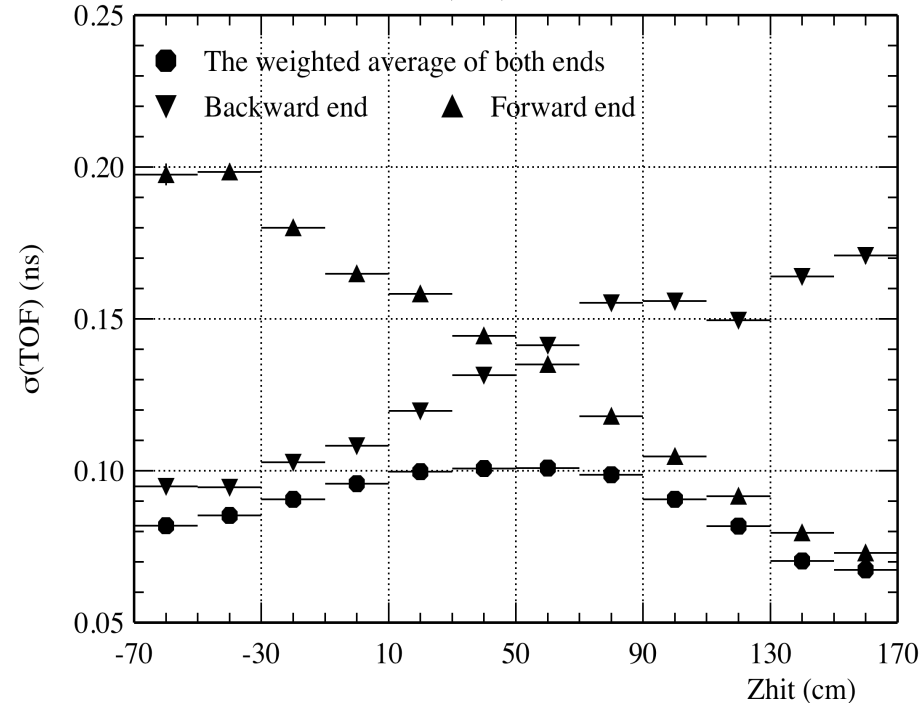
(Poisson distribution smeared by FM PMTs.)

# TOF (Time-of-Flight Counter)

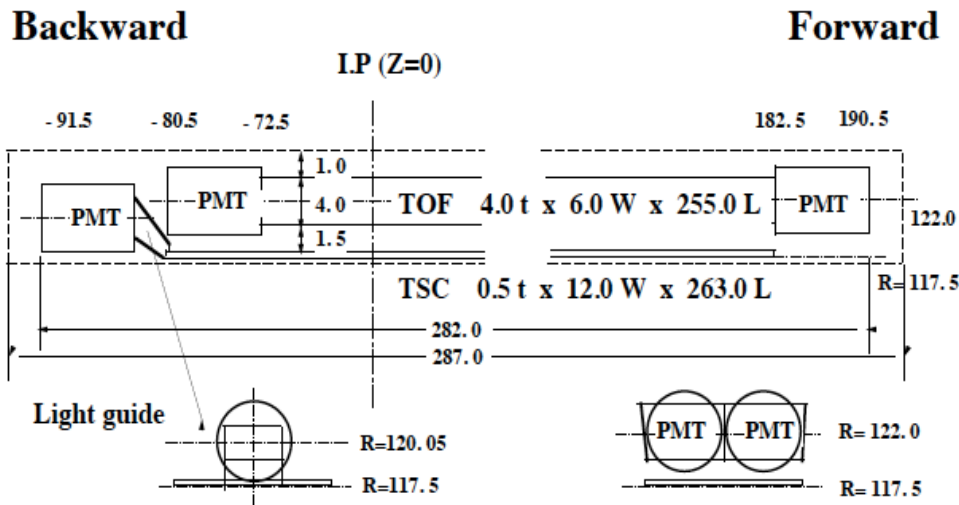
- r from beam axis = 120 cm
- Length = 3-m long,  $N_{\text{scintillators}} = 128$
- $\sigma_T = 100$  psec
- $K/\pi$  separation up to 1.2 GeV

飛行時間分解能

$\sigma(\text{ToF})$  vs.  $Z_{\text{hit}}$



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。

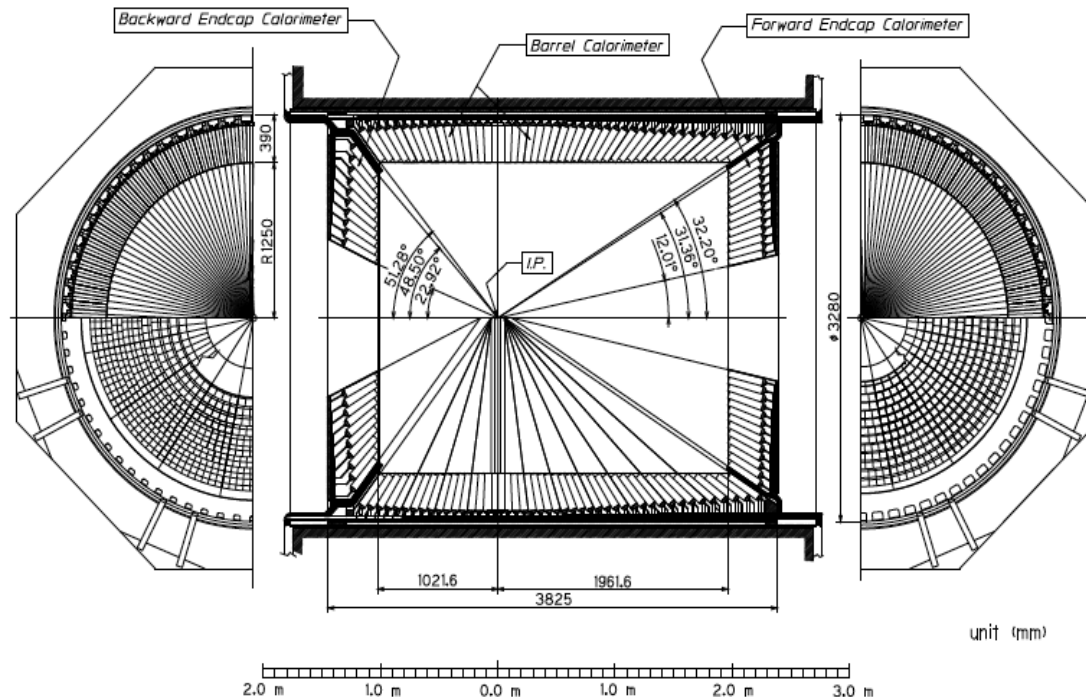


$$t = \frac{l}{c\beta} = \frac{l}{c} \sqrt{1 + \left(\frac{m}{p}\right)^2}$$

# 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。)

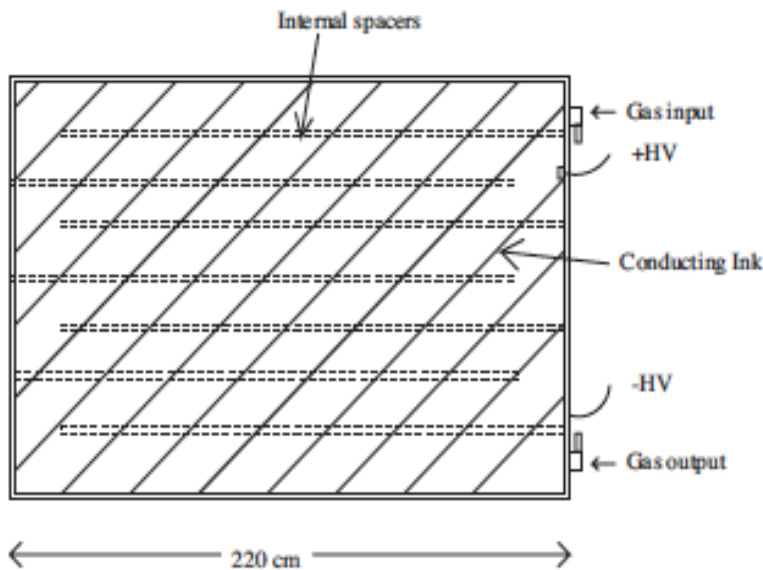
BELLE CsI ELECTROMAGNETIC CALORIMETER



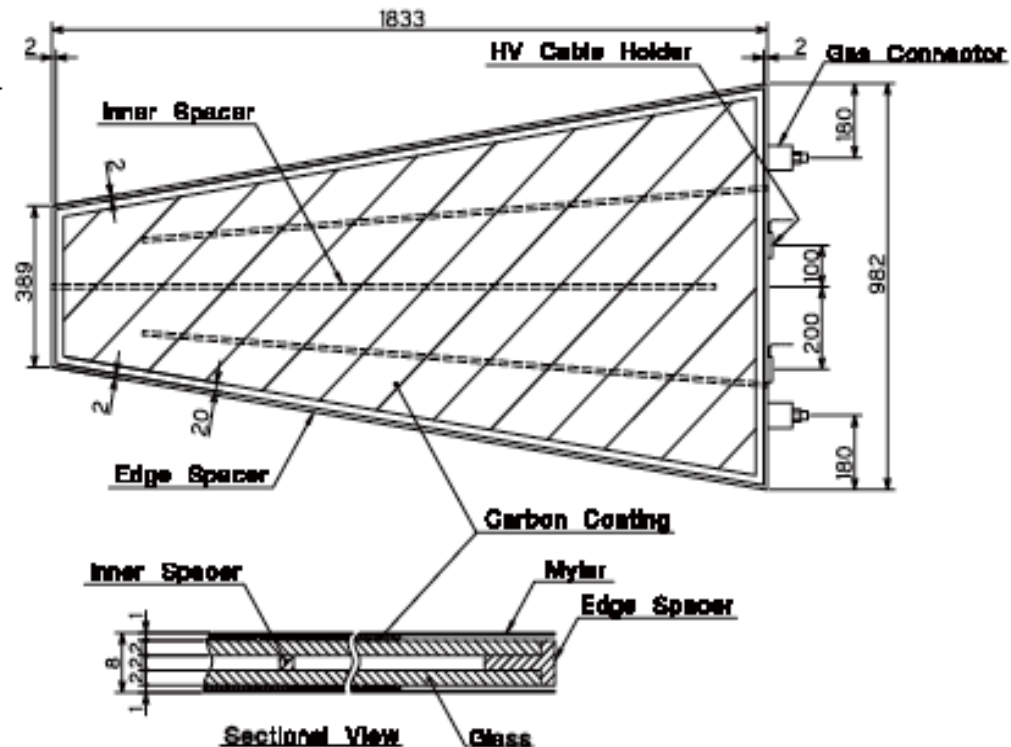
# KLM ( $K_L$ /Muon Detector)

- 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	$C_4H_{10}$	58.12	2.6 (0°C, 1atm)
HFC-134a	$CH_2FCF_3$	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,

(4) high momentum pions coming from  $B^0 \rightarrow D^{(*)}\pi^+X$  decays,

(5) slow pions from  $B^0 \rightarrow D^{*-}X, D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0\pi^-$  decays, and

(6)  $\bar{\Lambda}$  baryons from the cascade decay  $\bar{b} \rightarrow \bar{c} \rightarrow \bar{s}$ .

事象ごとに、(1)から(2)に関連した約50の変数を得て、多次元Likelihood法を用いる。

Taggingの精度 $r_{\text{tag}}$ は、qq背景事象分離に用いる。

# Belle実験



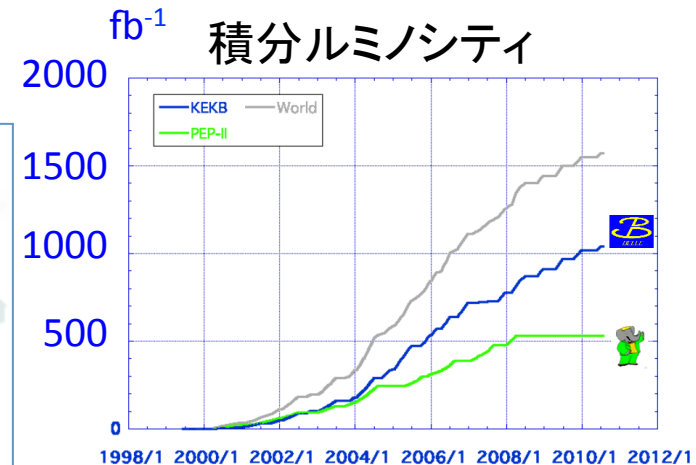
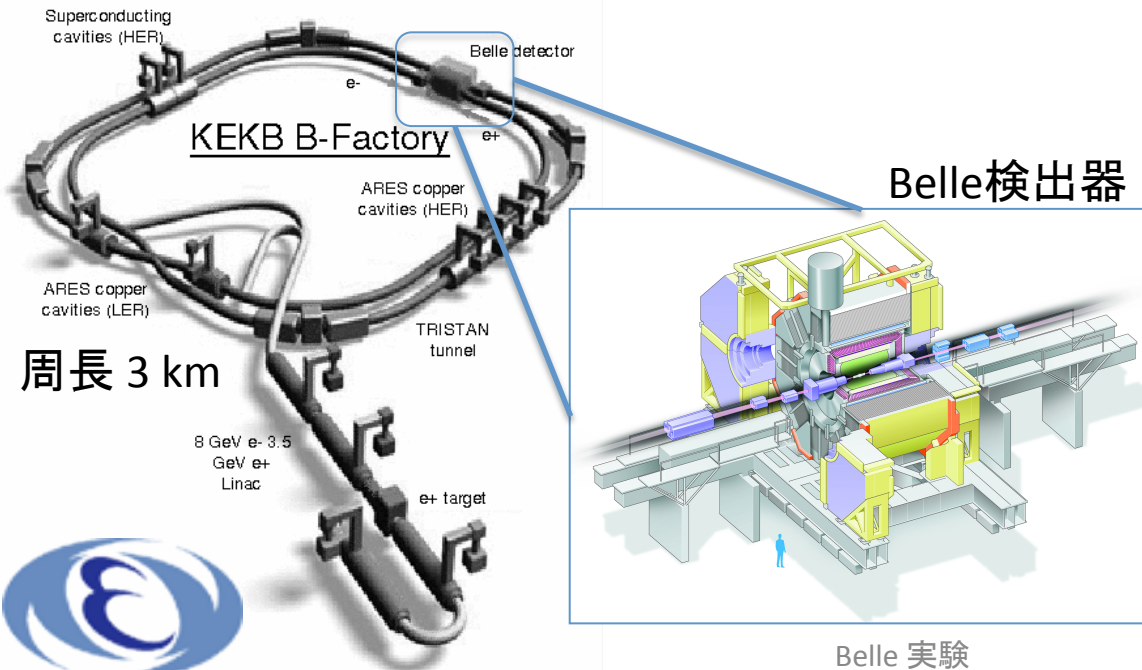
- Belle実験

- $e^+e^-$ 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 10.58 GeVの非対称衝突型加速器



現在集めた全てのデータ  
(711 fb<sup>-1</sup>相当)を使用



# 導入

- 2011年秋期JPSにて  $B^0 \rightarrow [K\pi]_D [K^+\pi^-]_{K^*0}$  を用い  $\phi_3$  測定の為のパラメタ  $R_{ADS}$  を発表

$$\begin{aligned}
 - R_{ADS} &= \frac{\Gamma(B^0 \rightarrow [K^-\pi^+]_D K^*0)}{\Gamma(B^0 \rightarrow [K^+\pi^-]_D K^*0)} = r_S^2 + r_D^2 + 2kr_S r_D \cos(\delta_S + \delta_D) \cos \phi_3 \\
 &= (4.1^{+5.6}_{-5.0} + 2.8) * 10^{-2} \\
 &< 0.16 \text{ @ } 95 \% \text{ C.L.}
 \end{aligned}$$

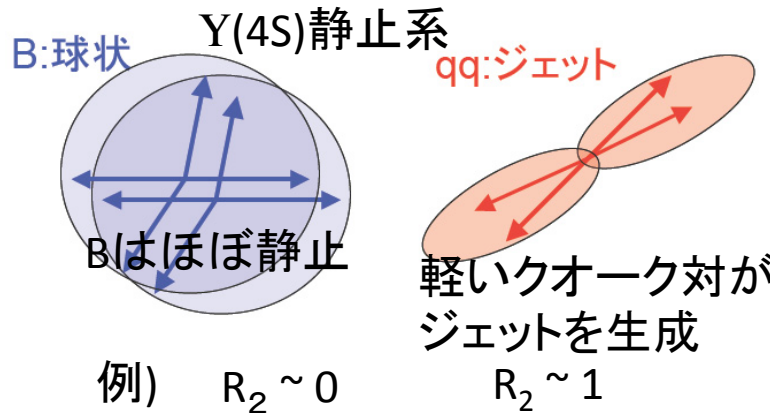
PRD 86 011101 (2012)

ここで,  $B^0 \rightarrow [K^-\pi^+]_D [K^+\pi^-]_{K^*0}$  は観測されず

- さらに中性B中間子の  $DK^*0$  崩壊について研究が望まれる
- また2012年,  $B^+ \rightarrow [K_S \pi^+ \pi^-]_D K^+$  にて世界初のモデル依存の無い Dalitz解析を用いた  $\phi_3$  測定結果が発表された
  - $\phi_3 = (77.3^{+15.1}_{-14.9} \pm 4.1 \pm 4.3)^\circ$  PRD 85, 112014 (2012)  
( $r_B = 0.145 \pm 0.030 \pm 0.010 \pm 0.011$ )
  - このモデル依存の無い Dalitz解析を用いた  $\phi_3$  測定は将来 Super-B Factory において非常に有用であり、これを用いた  $B^0 \rightarrow [K_S \pi\pi]_D [K^+\pi^-]_{K^*0}$  の  $\phi_3$  測定を目指す

# コンティニウムバックグラウンドの抑制 (KSFW, $\cos\theta_B$ ) $e^+e^- \rightarrow qq$ ( $q = u, d, s, c$ )

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



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

$p_{i,j}$ :  $i,j$ 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 :  $1 - \cos^2\theta$   
コンティニウム: ほぼ一様

