

# The Belle Silicon Vertex Detector and CP Violation



石野 宏和(東京工業大学)

for the Belle Collaboration

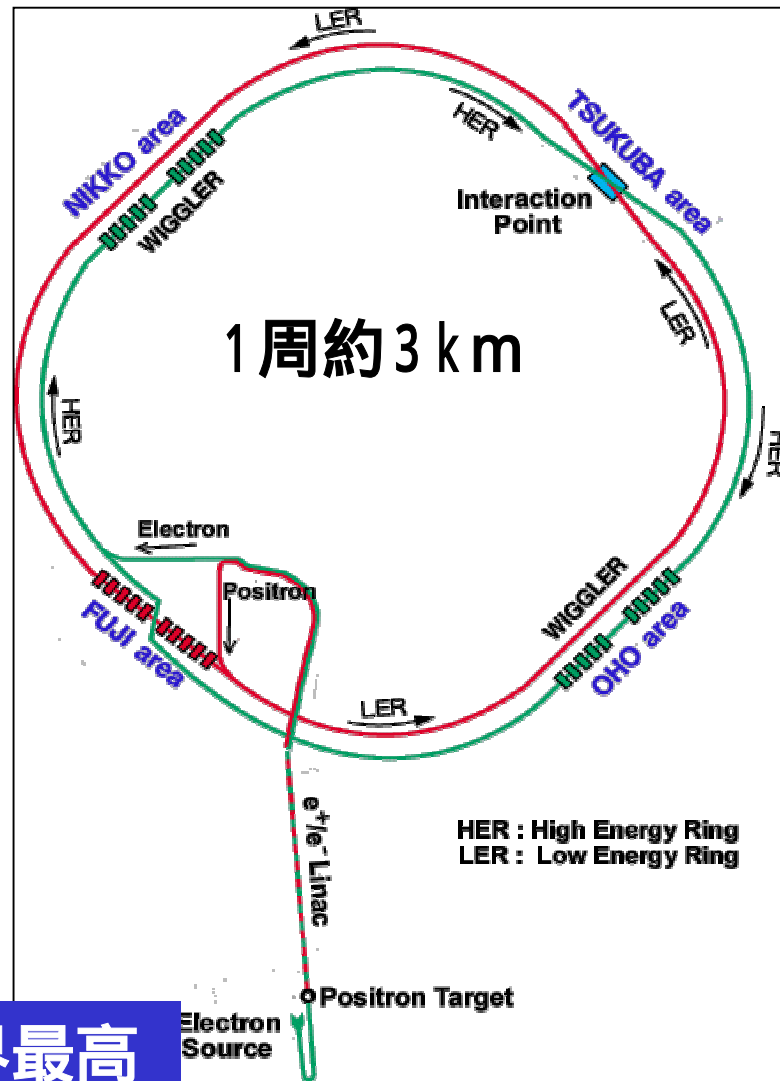
2004年3月8日

科研費特定領域 第2回研究会

@つくば国際会議場エポカル

- イントロダクション
- SVD2とその性能
- 最新のCPの破れの測定結果と展望

# Belle実験とKEKB加速器



KEKBは8 GeVの電子と3.5 GeVの陽電子の衝突型加速器。

最高ピークルミノシティは  
 $120.0 \times 10^{32} / \text{cm}^2 / \text{s}$  (3月1日)

世界最高

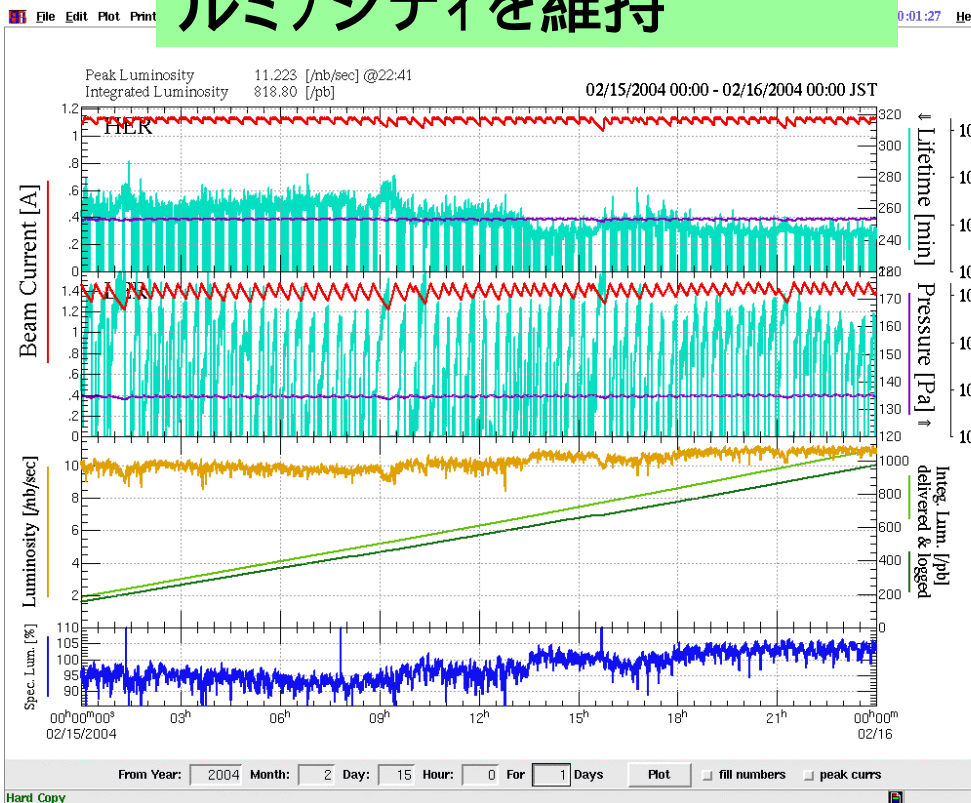
# KEKB加速器の性能

## continuous injection

絶えず $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ 以上の  
ルミノシティを維持

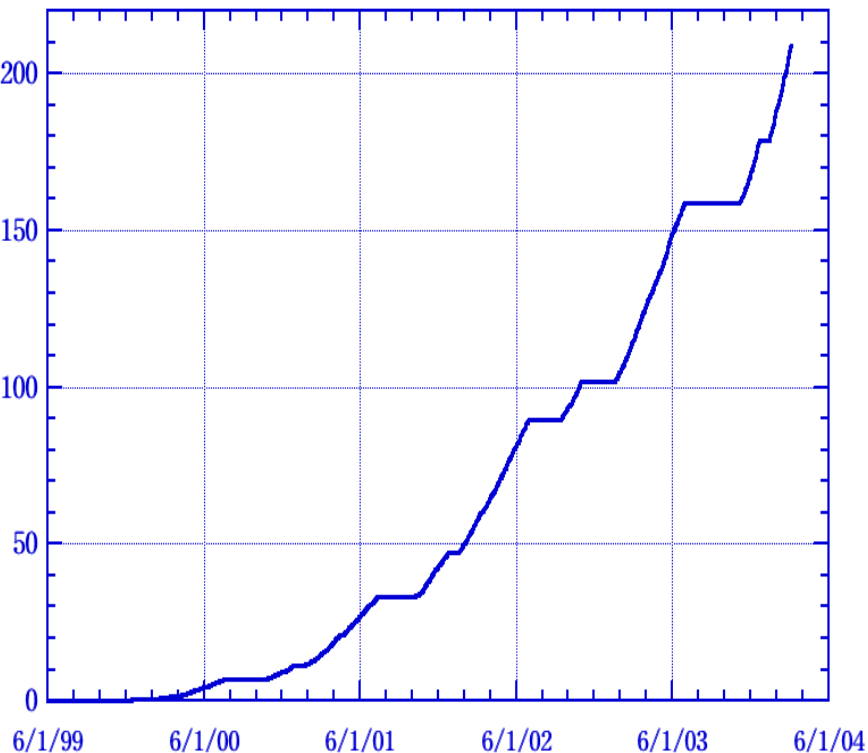
積分ルミノシティ 約 $200\text{fb}^{-1}$   
(2003年秋からは約 $50\text{fb}^{-1}$ )

Integrated Luminosity (logged)



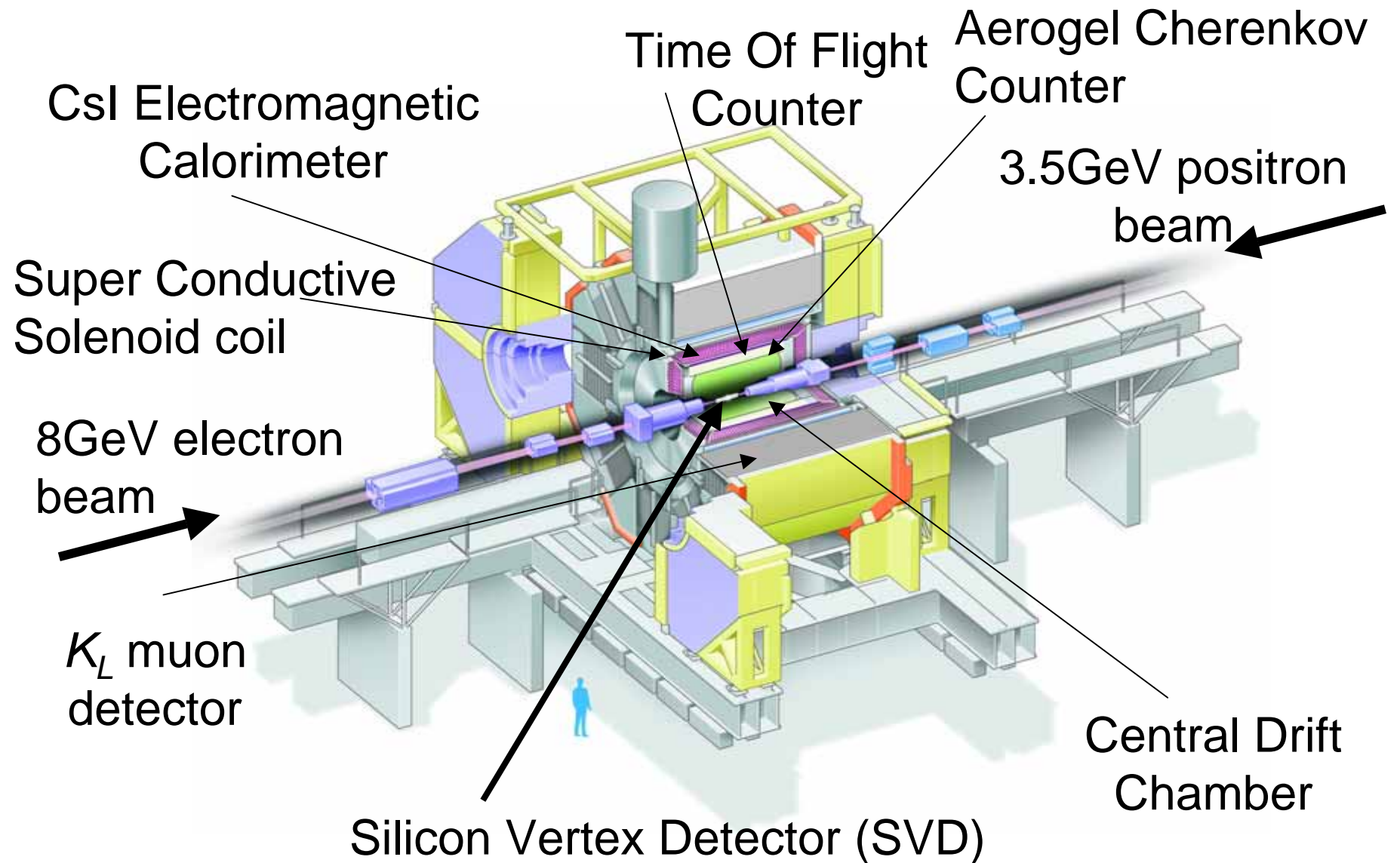
$\sim 800\text{pb}^{-1}/\text{day}$

1日に約90万個のY(4S)を生成。

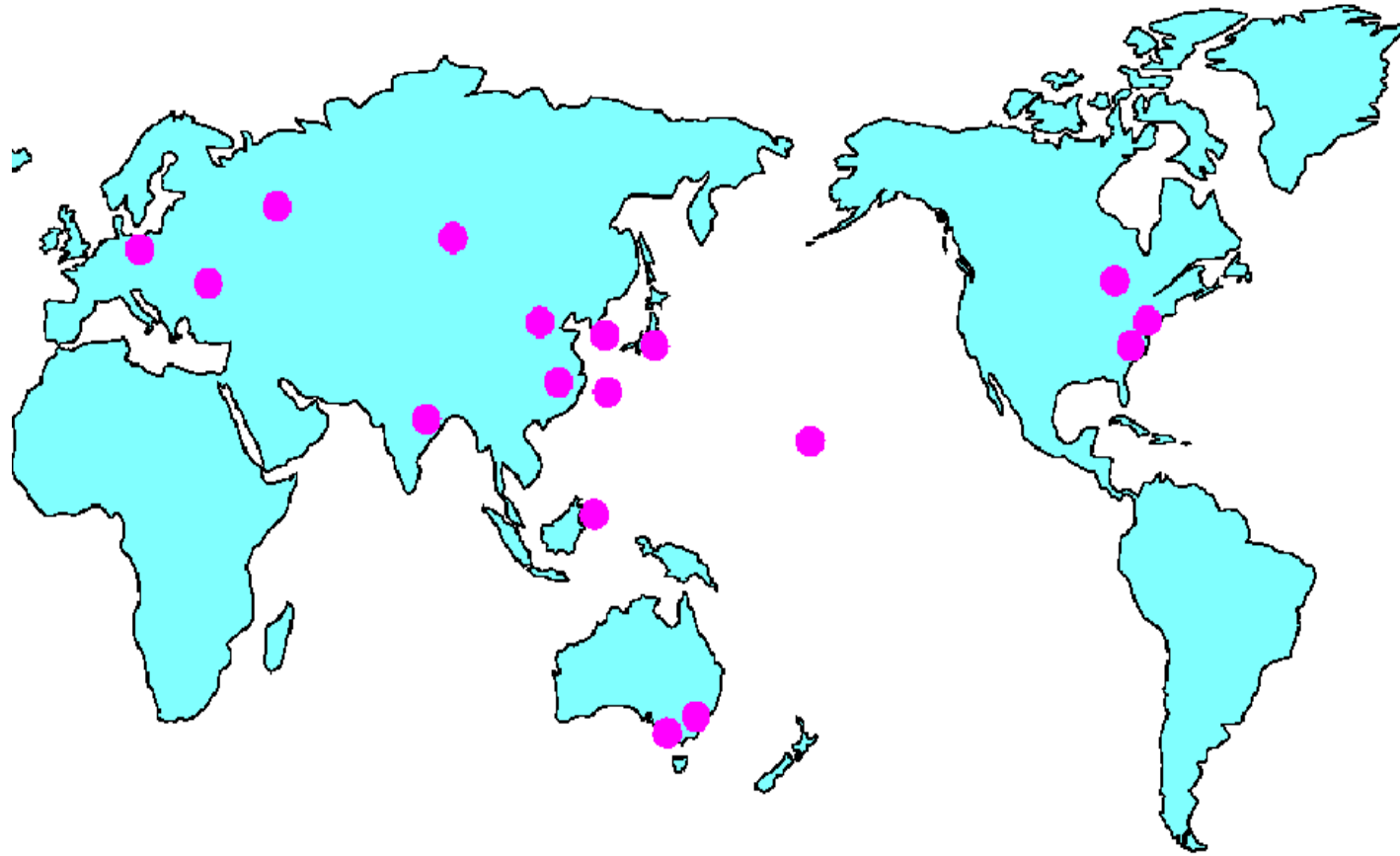


KEKBは世界最高輝度  
を持つ加速器

# Belle検出器



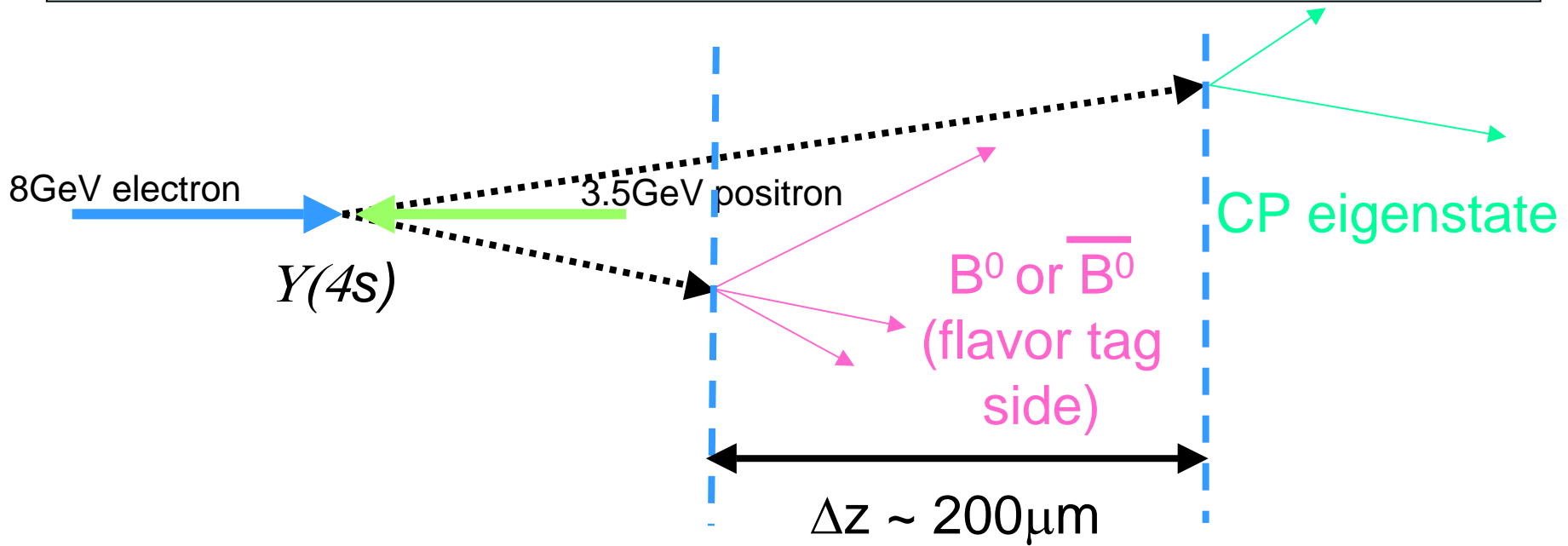
# Belle Collaboration



**274 authors, 45 institutions**

**many nations**

## 物理的動機

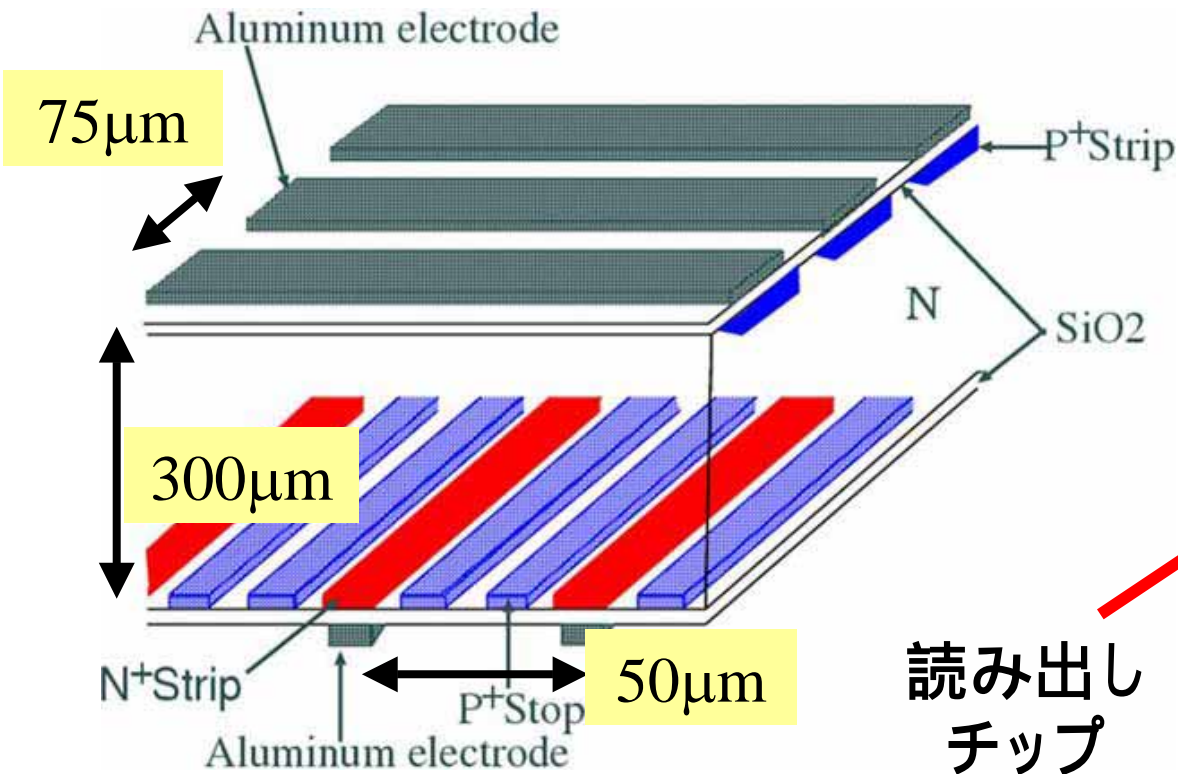


- B中間子系での時間に依存するCPの破れを測定し、CKM行列の角度を測定する。
  - 数億個の大量のB中間子と $100 \mu\text{m}$ 以下の精度でのB中間子の崩壊点の測定が必要。
  - 実験を遂行するためには世界最高強度を持つKEKB加速器とSVDが必要である。



# Silicon Vertex Detector (SVD)とは

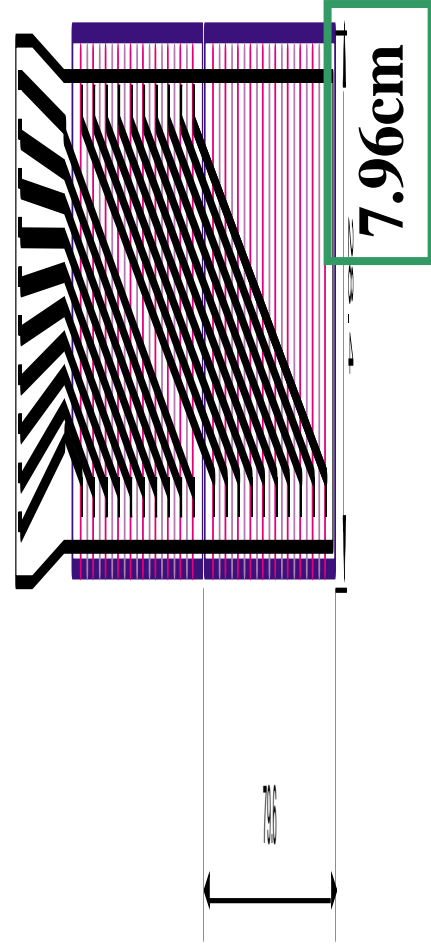
Double sided Silicon Strip Detector (DSSD) をラダー構造に配置し荷電粒子の通過位置を約 $10\mu\text{m}$ の精度で測定。



2.84cm



読み出しチップ



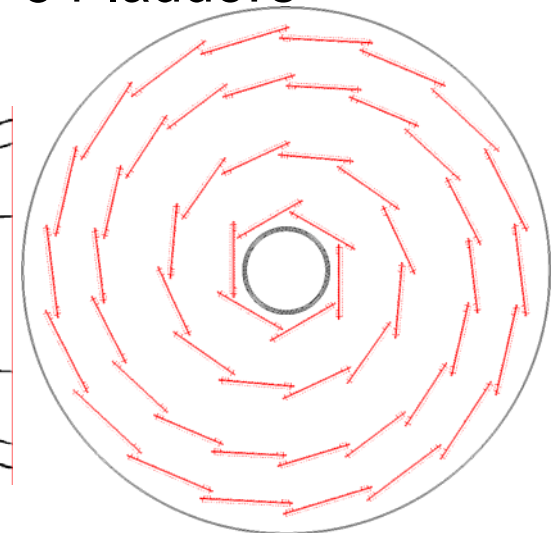
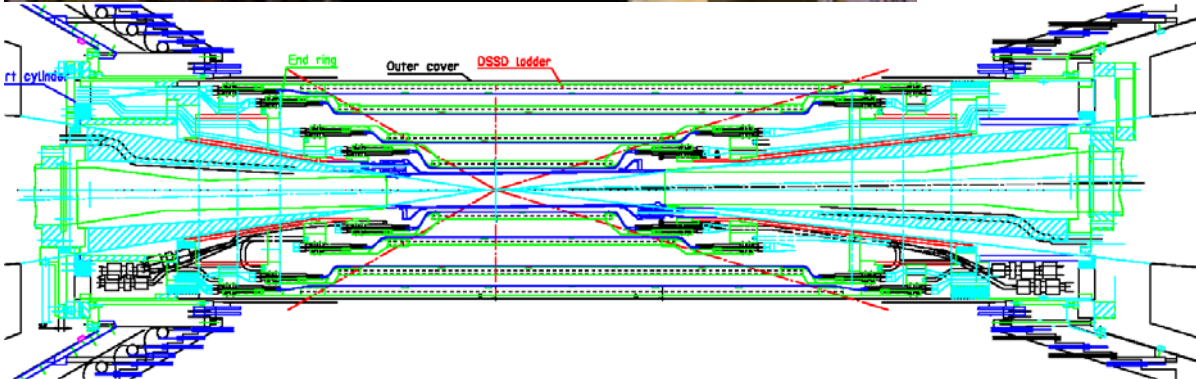
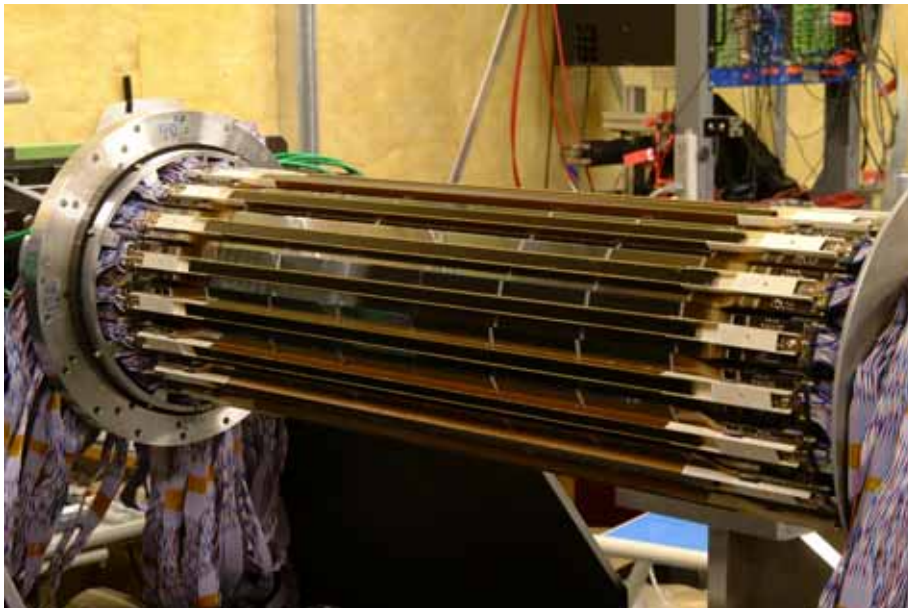
7.96cm

# SVD

ラダーを3次元的に配置し、荷電粒子のトラックパラメータを測定。

バーテックスフィットによりB中間子の崩壊点を測定。

$$6+12+18+18 \\ = 54 \text{ ladders}$$



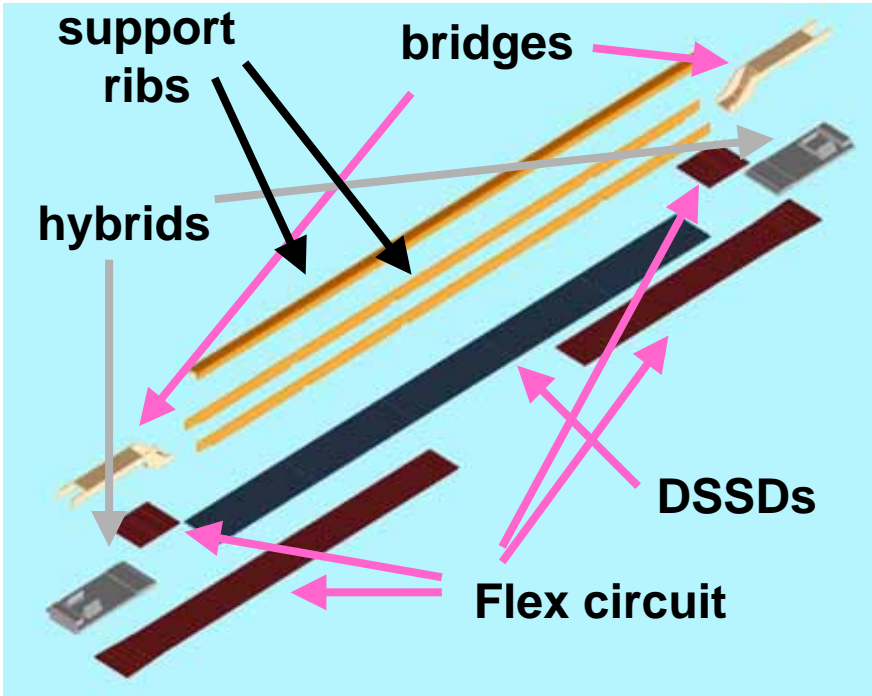


# SVDのアップグレード

- 1999年にSVD version1 (SVD1)をインストール。
  - 2003年夏まで順調に作動。
  - 4年間の間に約1Mradの放射線照射を受け、放射線耐性の限界に達しようとしていた。
- 2003年夏にSVD version2 (SVD2)をインストール。
  - 20Mrad以上の耐性を持つ。
    - 読み出しチップであるVA1TAチップが0.35 $\mu$ mプロセスでつくられた。
  - ラダーが3層から4層に増加、最内層の半径が3cmから2cmへ減少、立体角が約10%向上。
    - より高い荷電粒子検出効率とより精度良い崩壊点決定精度
  - fast shaper (75 or 300ns)とdiscriminator (TA)をVA1TAチップに実装
    - 世界初のSVDを使用したトリガーの試み。
  - データ読み出し系の改良。
    - DSPの代わりにPCをつかうことによって、約3倍以上のデータ処理速度を達成。

# SVD2ラダーの構造と組み立て

浜松フォトニクス社とメルボルン大学(オーストラリア)で組み立て。



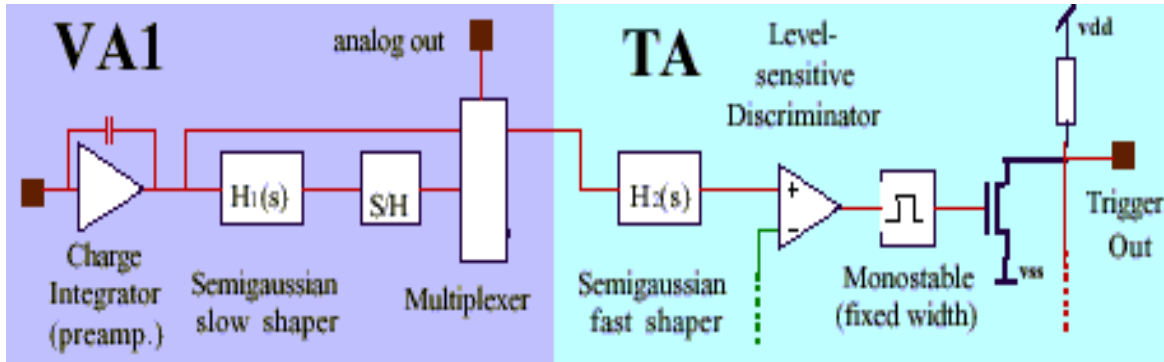
512ストリップ読み出し



VA1TA チップ



# VA1TAチップ



**VA1TA: AMS 0.35 $\mu$ m process, radiation hardness up to 20Mrad**

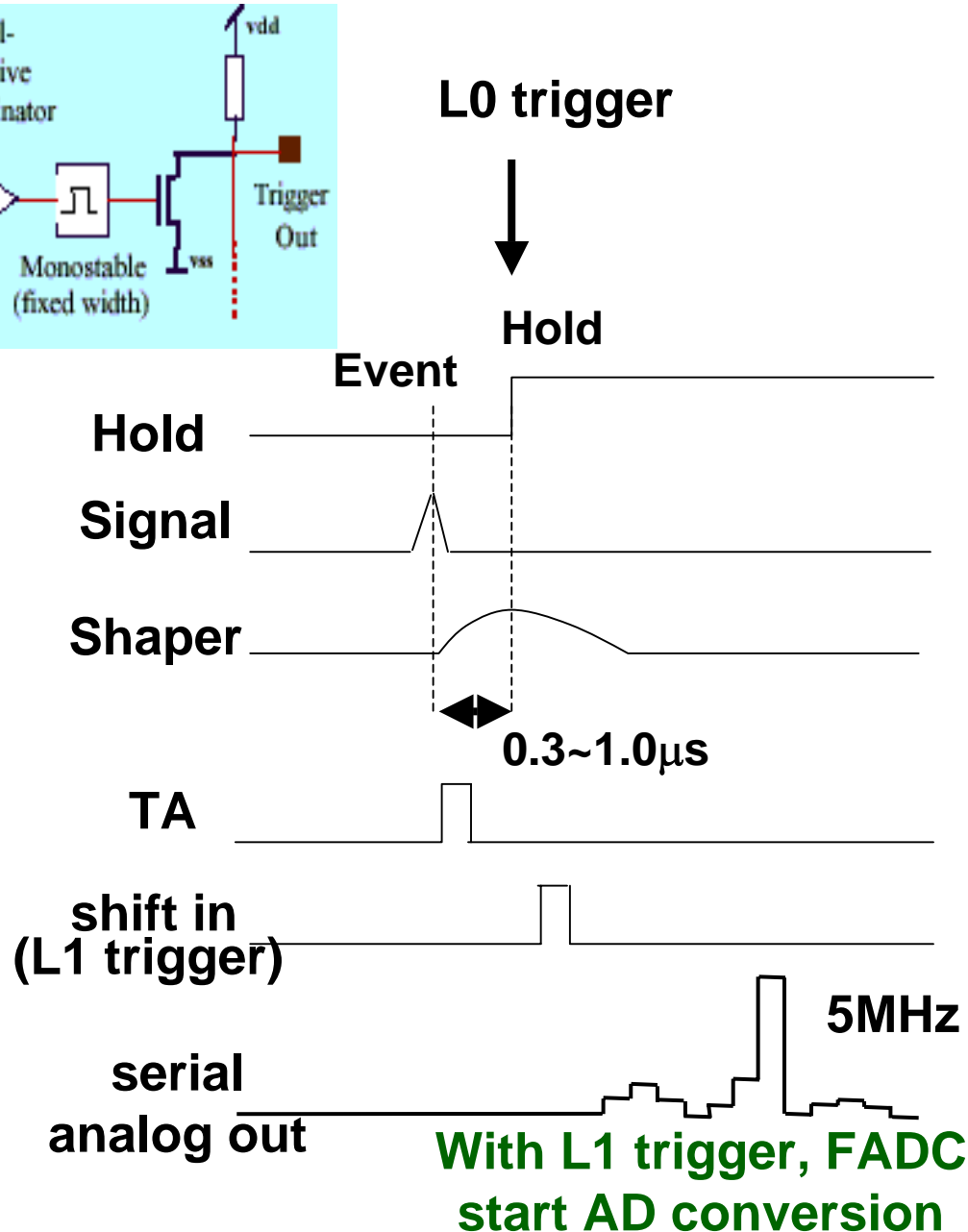
## •VA1

- shaping time 0.3~1.0 $\mu$ s
- 128 channel serial read-out with 5MHz clock

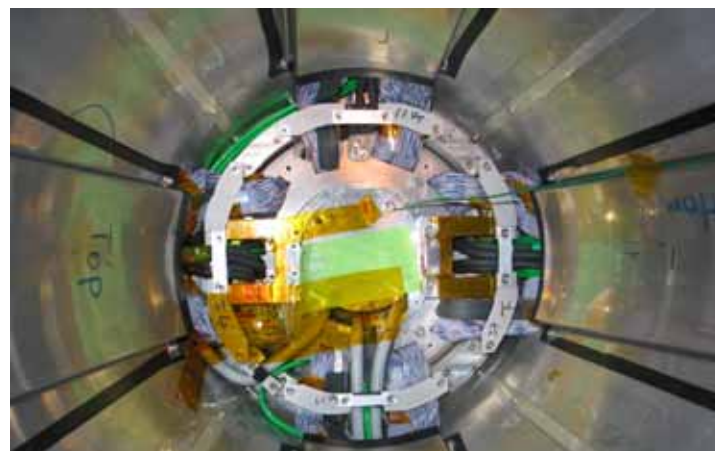
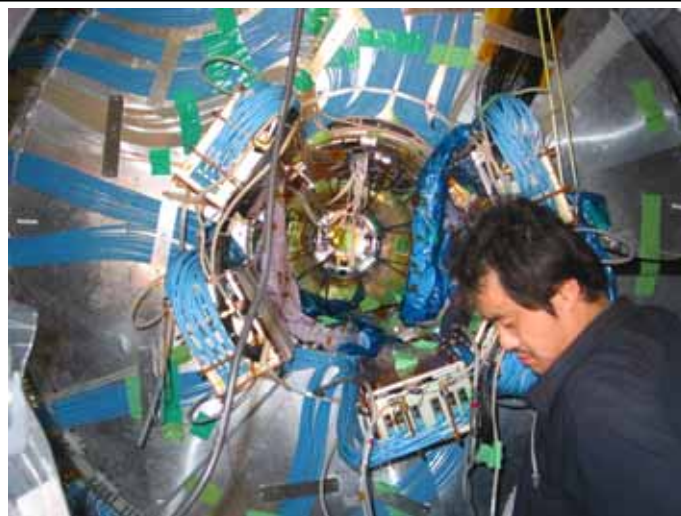
## •TA

- faster shaper (75ns or 300ns) + discriminator
- 128 wired-or out put

•Bias voltage and currents are generated by internal DAC (in total 680bits)



## SVD2のインストール



news

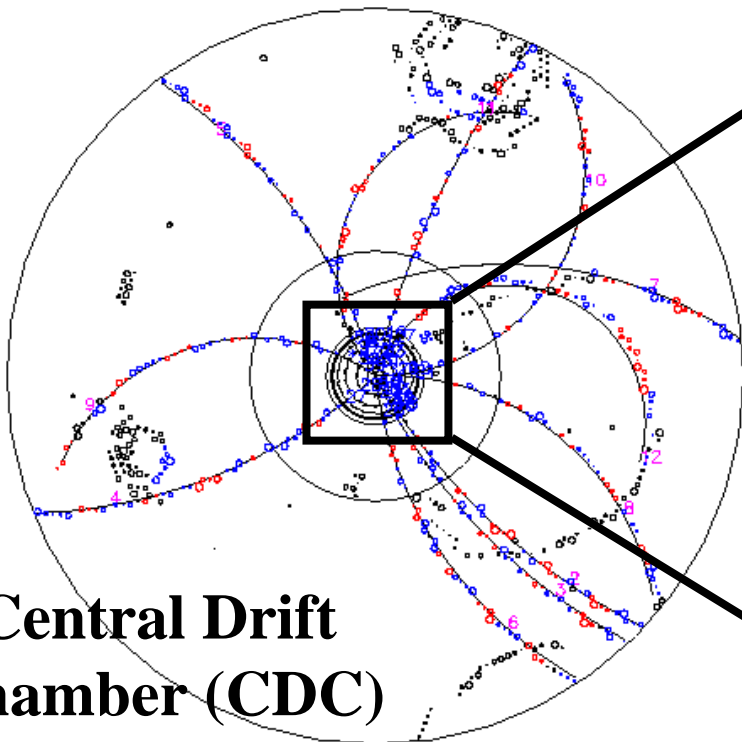
KEK工作センターの大久保隆治さん、小池重明さん、佐藤伸彦さん、鈴木純一さんがSVDの構造設計と製作について評価されて、第4回KEK技術賞を受賞なさいました。



# ハドロンイベント

**BELLE**

Exp 31 Run 253 Form 0 Event 5438  
Eher 0.00 Eler 0.00 Wed Nov 5 11z46z48 2003  
TrgID 0 DetVer 0 MagID 0 BField 1.50 DepVer 7.50  
Pbot(ch) 0.0 Etot(gm) 0.0 SVD-M 3 CDC-M 0 KLM-M 0



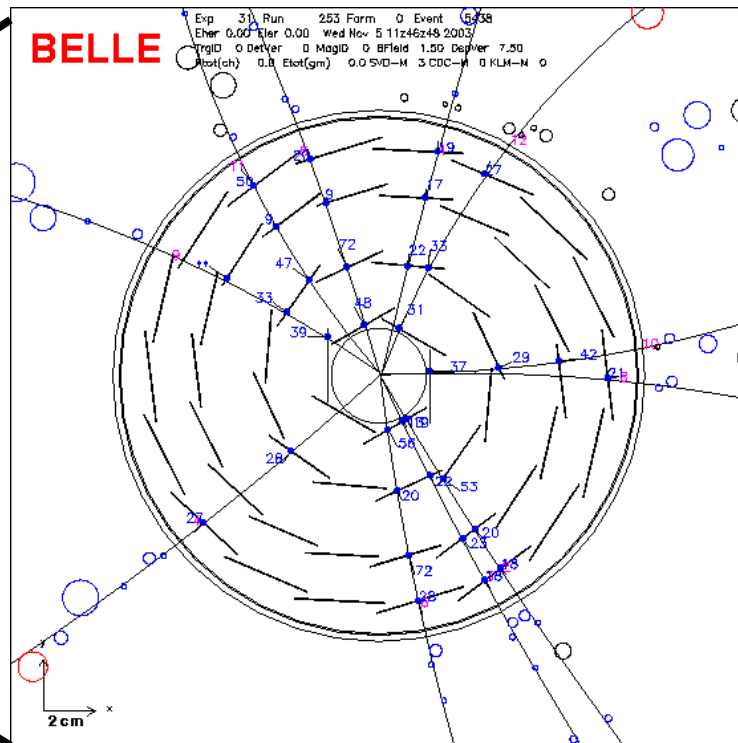
**Central Drift Chamber (CDC)**

y  
x  
**news**

**SVD2**

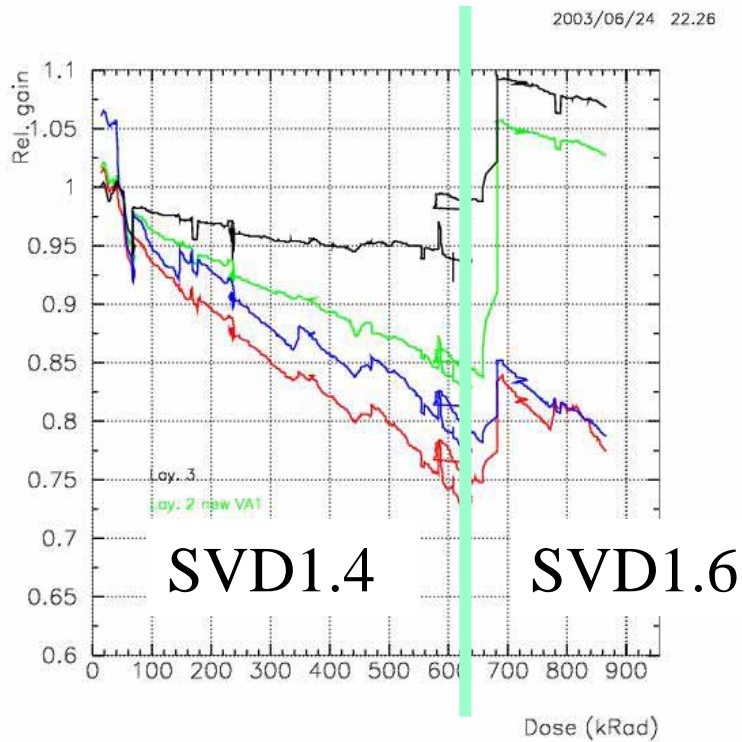
**BELLE**

Exp 31 Run 253 Form 0 Event 5438  
Eher 0.00 Eler 0.00 Wed Nov 5 11z46z48 2003  
TrgID 0 DetVer 0 MagID 0 BField 1.50 DepVer 7.50  
Pbot(ch) 0.0 Etot(gm) 0.0 SVD-M 3 CDC-M 0 KLM-M 0



# VA1TAチップのアンプゲインの経時変化

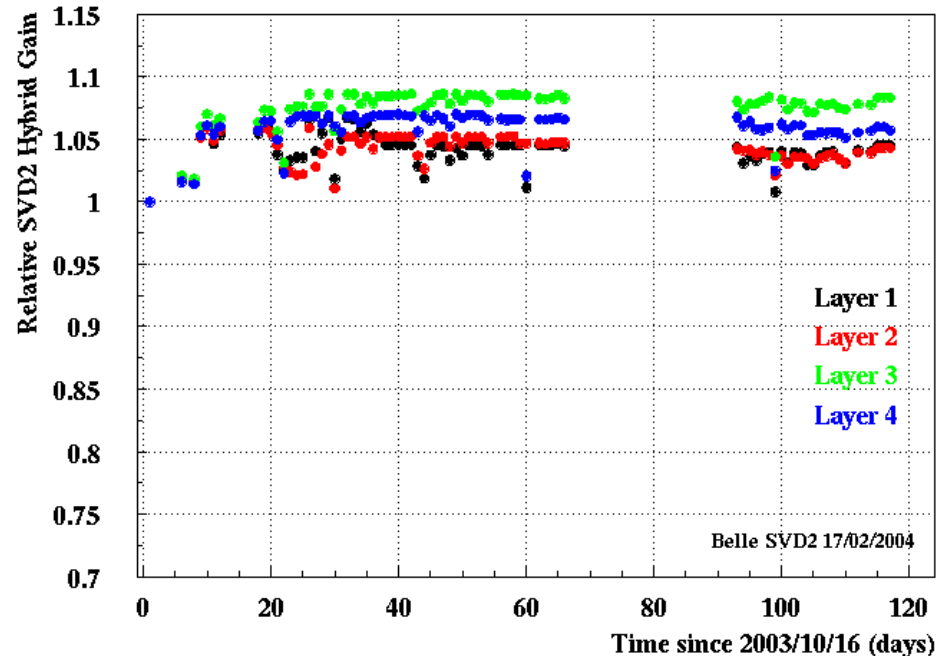
## SVD1



4年間で約1 Mradの照射を受けた。

第1層目のゲインは30%減少。

## SVD2



約4ヶ月で1層目は約40kradの照射（積分ルミノシティは約 $50\text{fb}^{-1}$ ）。

ゲインの減少はみられていない。

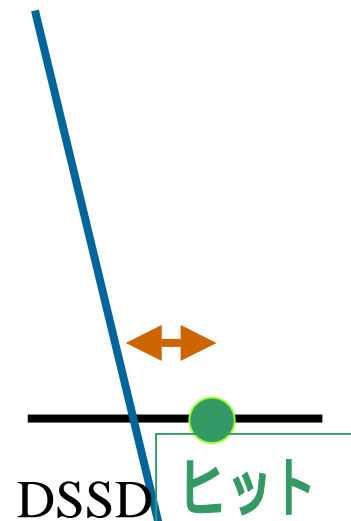


# アライメントとDSSD上の位置分解能

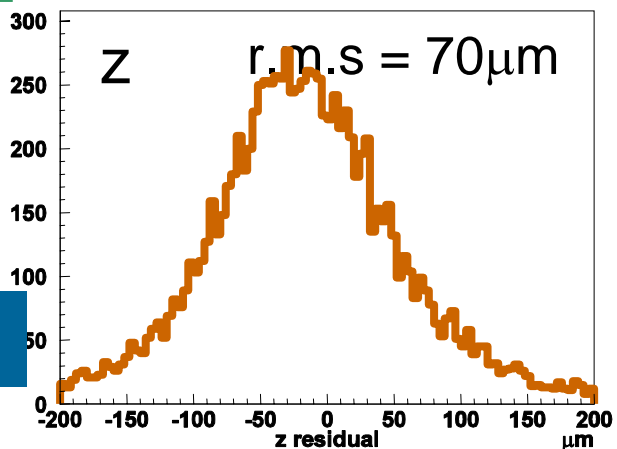
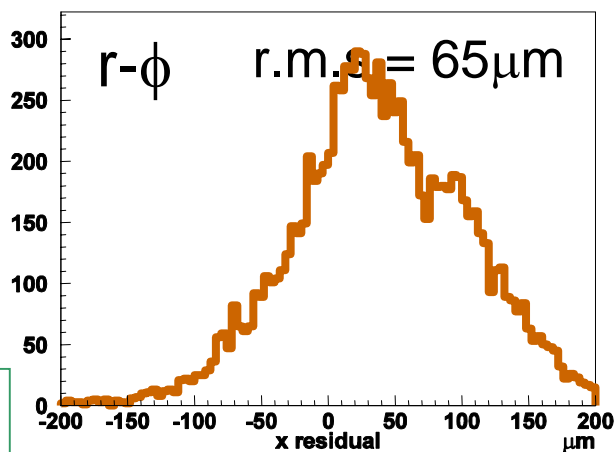
Data

アライメント前

アライメント後

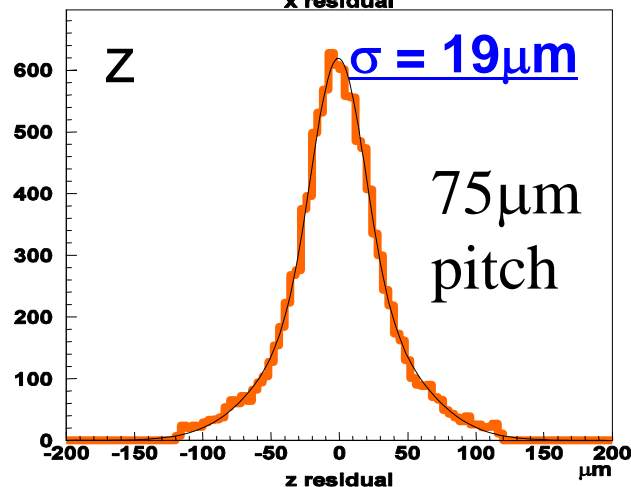
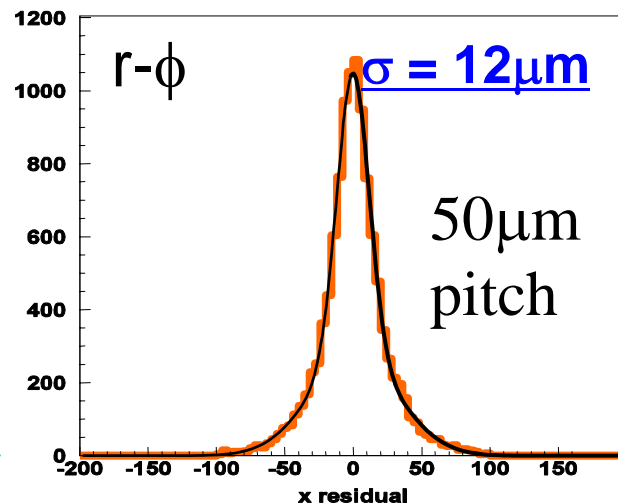


宇宙線  $\mu$



-200 $\mu\text{m}$

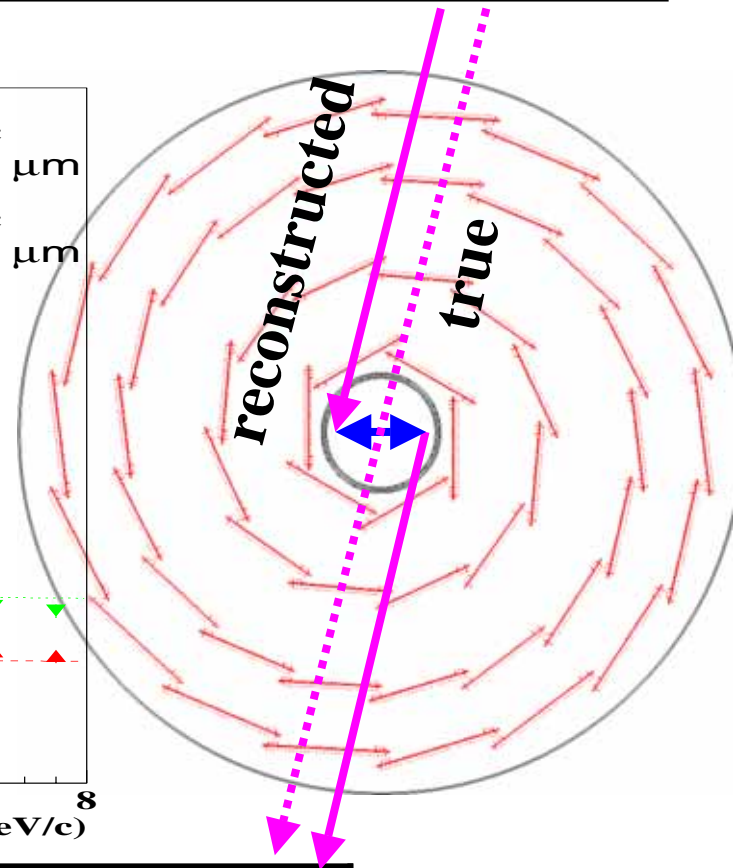
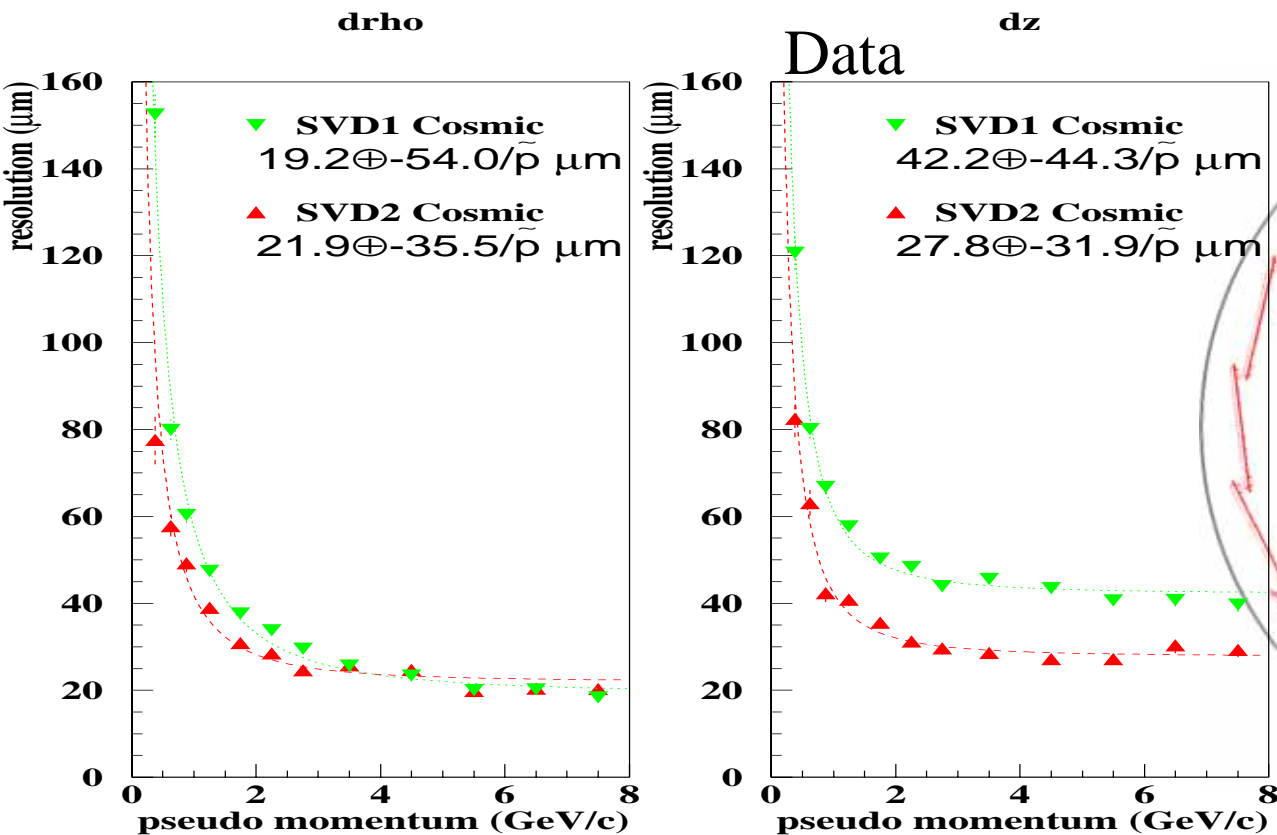
+200 $\mu\text{m}$



-200 $\mu\text{m}$

-200 $\mu\text{m}$

# Impact Parameter Resolution



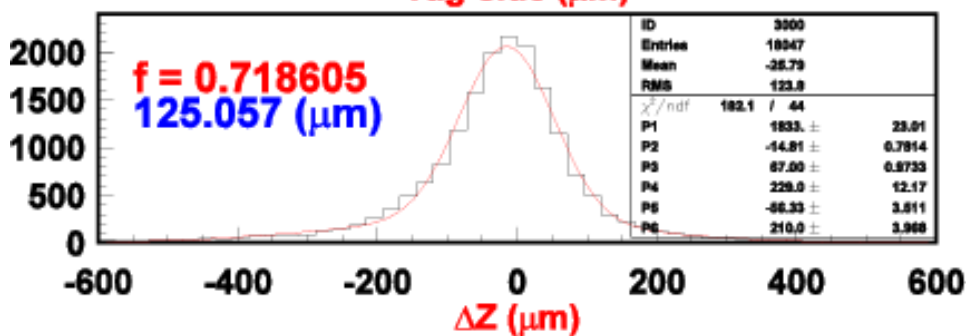
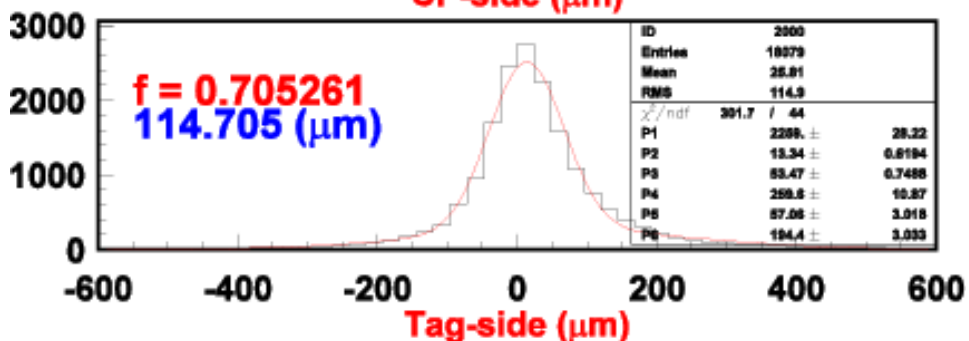
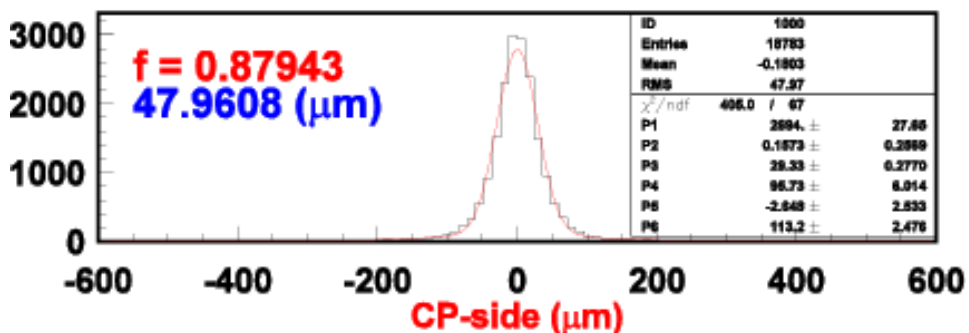
	$r-\phi$	$Z$
<b>SVD1</b>	19.2 54.0/ $p$ [ $\mu\text{m}$ ]	42.2 44.3/ $p$ [ $\mu\text{m}$ ]
<b>SVD2</b>	21.9 35.5/ $p$ [ $\mu\text{m}$ ]	27.8 31.9/ $p$ [ $\mu\text{m}$ ]

低運動量域で約20%以上改善

# $\Delta z$ 分解能 (MC)

## Residual Distribution of SVD2.0

$B \rightarrow J/\psi K_S$  MC



	SVD1	SVD2
CP side	55.6 $\mu\text{m}$	48.0 $\mu\text{m}$
Tag side	126.5 $\mu\text{m}$	114.7 $\mu\text{m}$
$\Delta z$	137.9 $\mu\text{m}$	125.1 $\mu\text{m}$

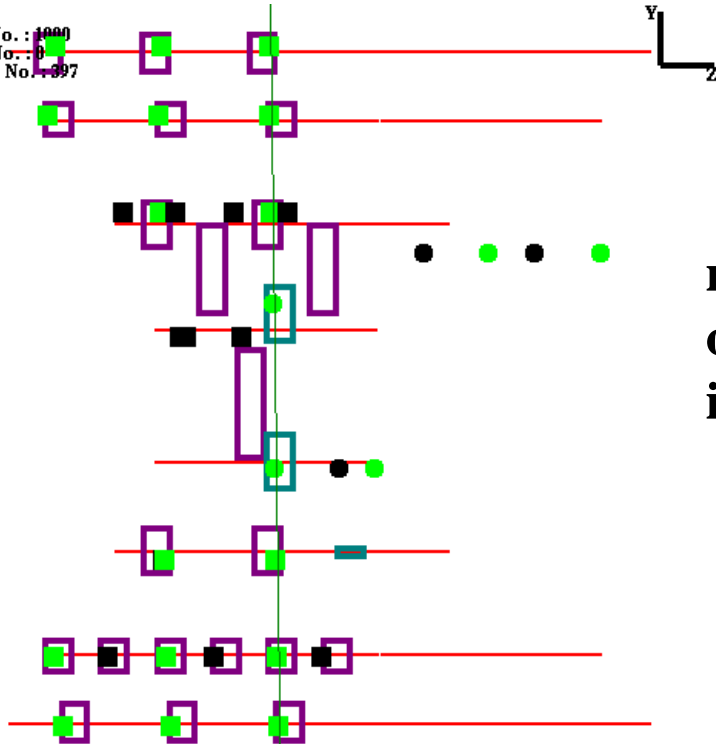
$J/\psi K_S$ の場合、 $\Delta z$ 分解能は  
約10%改善。

位置決定効率 は約7%増加。

# TAの性能

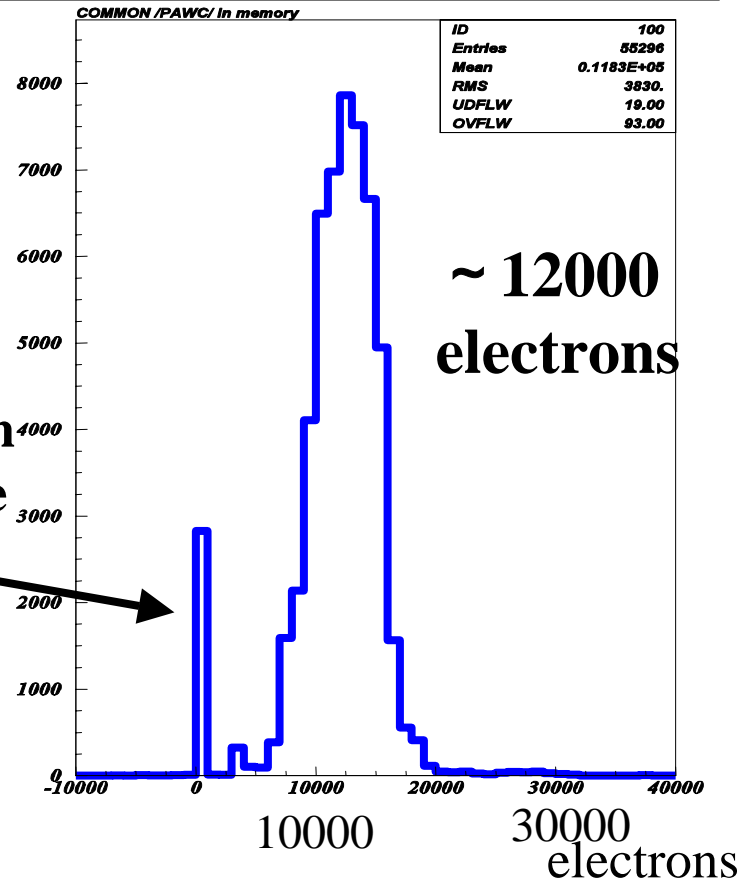
## 宇宙線ミュオン事象。

Data  
Exp No.: 1000  
Run No.: 0  
Event No.: 397



緑と黒い点はSVDのヒット位置。四角はTAによるヒット(TAヒットは128ストリップのORになっている)。

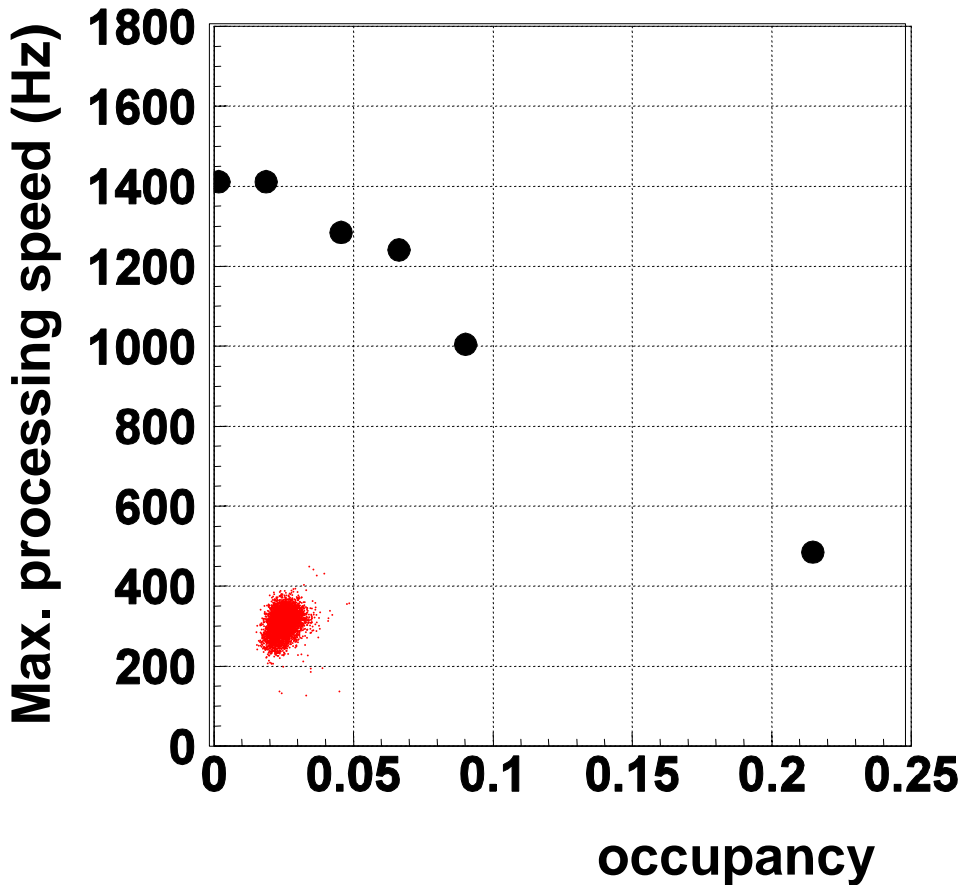
malfunction  
of cal. pulse  
input



TA discriminator の閾値  
分布

TAヒット情報を使ったトリガーロジックを開発中。

# データ収集システムの性能



オキュパンシー: 検出器のストリップのヒット数の割合。  
ヒットしたストリップ: S/Nが4以上のストリップ。

PC 12台 (2.4GHz Xeon dual CPU)を使用。

PC上でsparsification(ヒットしたストリップデータのみを捨てる)を行う。

処理速度は5%オキュパンシーで約1.3 kHz。デットタイムは5%以下。

実際のビーム状況では3%オキュパンシーで約300~400Hzのトリガー頻度。

# CPの破れ

$$\left| \begin{array}{cc} B^0 & f_{CP} \\ B^0 & \frac{+}{-} B^0 \end{array} \right| \quad \left| \begin{array}{cc} \bar{B}^0 & \\ \bar{B}^0 f_{CP} & + B^0 \end{array} \right|$$

$$A_{CP} = \frac{f_{CP} \overline{\Gamma(B^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP})} - \Gamma(B^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP}) f_{CP}}{\Gamma(B^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(B^0(\Delta t) \rightarrow f_{CP})} = S \sin(\Delta m_d \Delta t) + A \cos(\Delta m_d \Delta t)$$

$$\Delta t = \frac{\Delta z}{c\beta\gamma}$$

$$\beta\gamma = 0.425$$

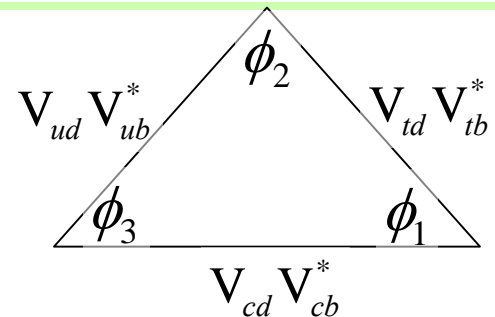
$S$  は  $B^0$  と  $\bar{B}^0$  の混合に起因する  $CP$  の破れ

$A$  は  $B^0$  と  $\bar{B}^0$  の間の直接的  $CP$  の破れ

標準模型では、 $CP$  の破れはCKM行列によって説明される。

Wolfenstein 表示

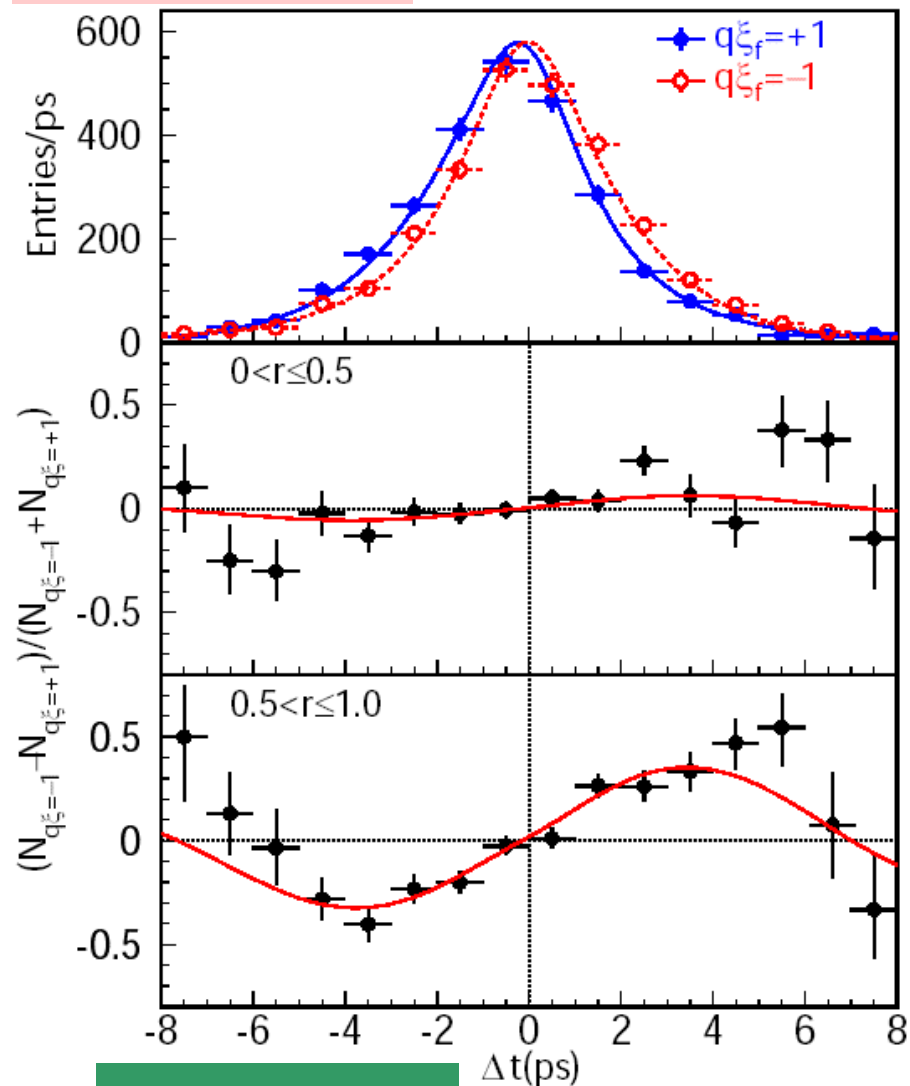
$$\begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$





# SVD1を用いたCPの破れの測定結果(1)

$b \quad \bar{c}cs$



140fb<sup>-1</sup> のデータ  
(2003年夏まで)

$$S = -\xi_{f_{CP}} \sin 2\phi_1 \quad \xi_{f_{CP}}: CP \text{固有値}$$

$$\sin 2\phi_1 = 0.733 \pm 0.057(\text{stat.}) \pm 0.028(\text{sys})$$

$$A = \frac{|\lambda|^2 - 1}{|\lambda|^2 + 1}$$

$$|\lambda| = 1.007 \pm 0.041(\text{stat.})$$

直接的CPの破れが無いことと矛盾していない。

sin2φ<sub>1</sub> は8%程度の精度で測定。

SVD2の性能評価、他のモード (b sss)との比較の良い基準。

preliminary

# SVD1を用いたCPの破れの測定結果(2)

$b \bar{s} q q$

140fb<sup>-1</sup>

SMではループダイアグラムのみ寄与。  
新物理の兆候を検知しやすい。

$B \phi K_S$

$$S(=\sin 2\phi_1) = -0.96 \pm 0.50^{+0.09}_{-0.11}$$

$b \text{ ccs}$ で測定された $\sin 2\phi_1$ と $3.5\sigma$   
離れている。

新物理の兆候?さらなる統計が必要

$$A = -0.15 \pm 0.29 \pm 0.$$

$B K^+ K^- K_S$

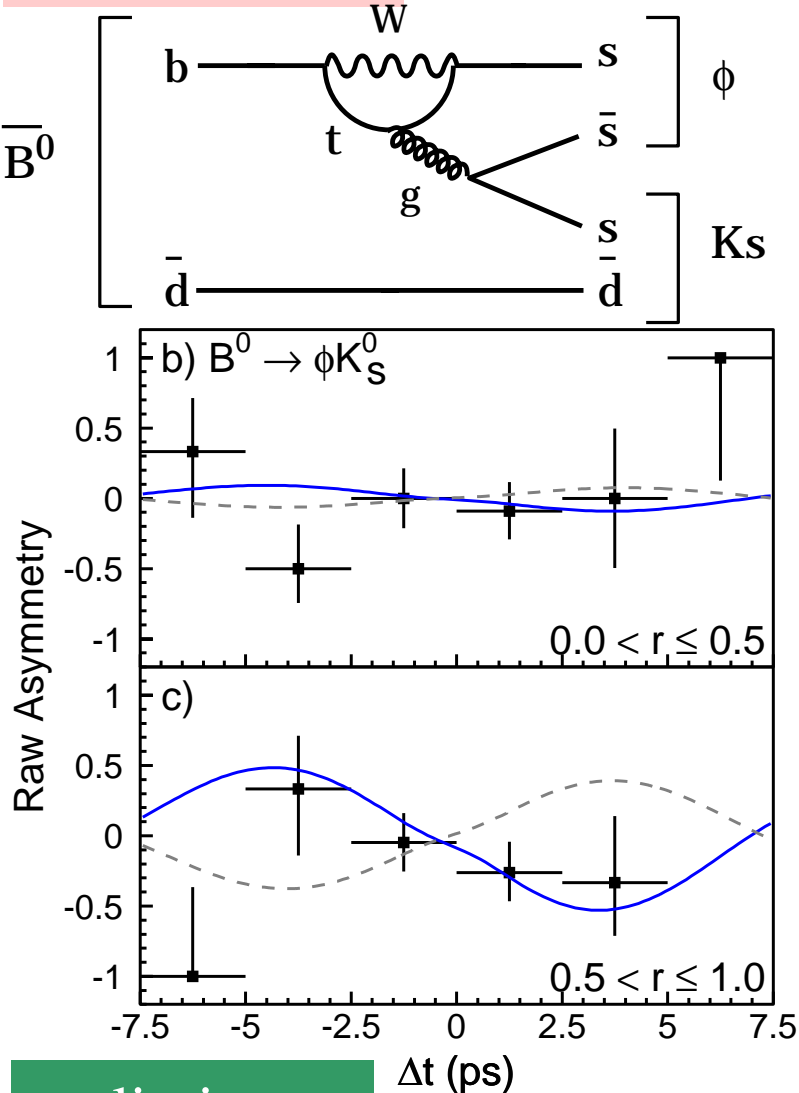
$$S = +0.51 \pm 0.26 \pm 0.05^{+0.18}_{-0.00}$$

$$A = -0.17 \pm 0.16 \pm 0.04$$

$B \eta' K_S$

$$S = +0.43 \pm 0.27 \pm 0.05$$

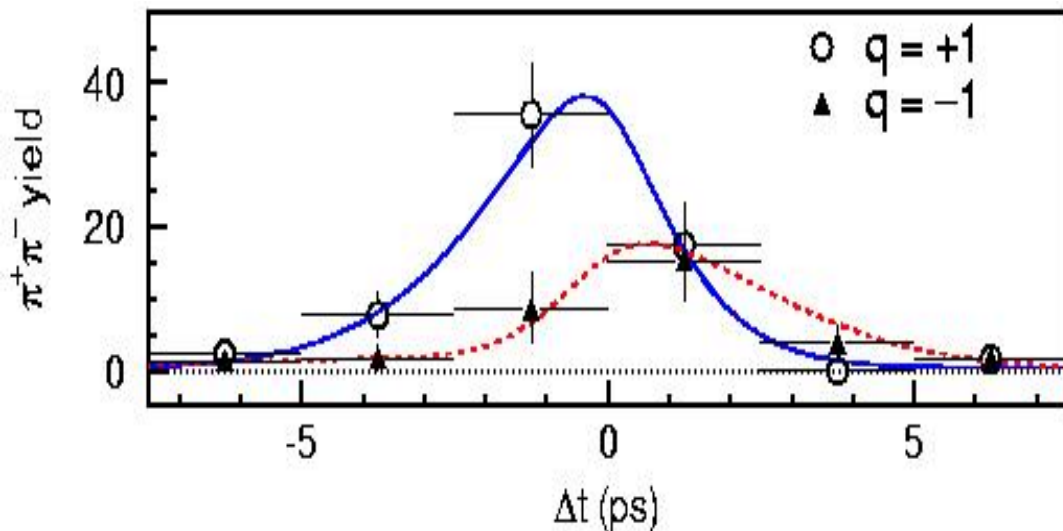
$$A = -0.01 \pm 0.16 \pm 0.04$$



preliminary

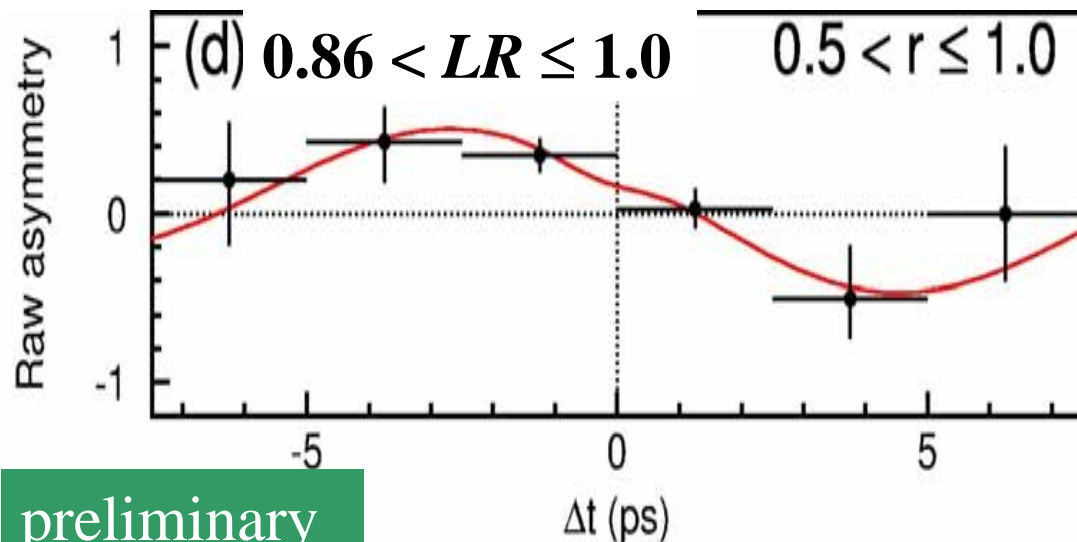
# SVD1を用いたCPの破れの測定結果(3)

$B \quad \pi^+ \pi^- \quad 140\text{fb}^{-1}$  (1529 events, including B.G.)



$$A_{\pi\pi} = +0.58 \pm 0.15 \pm 0.07$$

$$S_{\pi\pi} = -1.00 \pm 0.21 \pm 0.07$$



CP の破れ: 有意差  $5.2\sigma$

直接的CPの破れ:

有意差  $3.2\sigma$

preliminary

## SVD2での物理の展望

- 2003年秋から2004年夏までにSVD2で、約 $150\text{fb}^{-1}$ のデータが貯まると予想される。
  - 位置分解能、位置決定効率がそれぞれ約10%程度あがる。
  - SVD2で1年で貯めたデータはSVD1で4年間貯めたデータと同程度となる。
  - 両方のデータの和をとると、統計エラーが $\sim 1/\sqrt{2}$ に減る。
    - ただし、バックグラウンドに大きく依存するが。。。
  - $b \rightarrow cc\bar{s}$ での $\sin 2\phi_1$ のエラーは5, 6%になる。
  - $B \rightarrow \phi K_S$ でのSのエラーは30%程度に減少
    - 中心値が変わらないとすると、Sの差は約 $5\sigma$ に上昇。
  - $B \rightarrow \pi^+ \pi^-$ のCPの破れはSVD1で発見された。
    - 今後は直接的CPの破れを測定することが重要。
    - 中心値があまり変わらないとすると $4\sigma$ 程度の有意差で検出。

## まとめ

- KEKB加速器は世界最高のルミノシティー強度でBelle実験に億単位の大量のB中間子を供給している。
- 2003年夏にSVDがアップグレードされた。
  - 放射線耐性、位置決定の精度と効率、データ処理能力の向上。
  - トリガー機能の導入。
- SVD2は2003年秋から順調にデータを貯めつつある。
  - 2004年夏のKEKBシャットダウンまでには $150\text{fb}^{-1}$ データが貯まると見込まれている。
- SVD1は4年間順調に作動し、 $140\text{fb}^{-1}$ のデータから数々の重要な物理結果を我々に与えてくれた。
  - $b \rightarrow ccs$ モードを用いた $\sin 2\phi_1$ の精密測定。
  - $B \rightarrow \phi K_S$ モードでのSの測定。
  - $B \rightarrow \pi^+ \pi^-$ モードでのCPの破れの発見。
- 2004年夏までのSVD2のデータに乞う、ご期待。

backup slides



DSSD	L1~L3		L4	
	P(z)	N( )	P(z)	N( )
size(mm)	79.2x28.4		76.4x34.9	
Strip pitch	75 $\mu$ m	50 $\mu$ m	73 $\mu$ m	65 $\mu$ m
# of strip	1024	512	1024	512
Strip width	50 $\mu$ m	10 $\mu$ m	55 $\mu$ m	12 $\mu$ m

### SVD1のDSSDの仕様

	strip pitch	read-out pitch	# of channels
r- $\phi$	25 $\mu$ m	50 $\mu$ m	640
z	42 $\mu$ m	84 $\mu$ m	640

### SVD2のDSSDの仕様

## SVD1

Layer	Radius (mm)	Length (mm)	Ladders per layer	DSSDs per ladder
1	30.0	112.5	8	2
2	45.5	168.5	10	3
3	60.5	224.5	14	4

Beam pipe radius: 20.0mm

Total coverage :  $23^\circ < \theta < 139^\circ$  in polar angle.

Total # of channels: 81920

---

## SVD2

Layer	Radius (mm)	Length (mm)	Ladders per layer	DSSDs per ladder
1	20.0	156.5	6	2(1+1)
2	43.5	236.2	12	3(1+2)
3	70.0	395.6	18	5(2+3)
4	88.0	457.8	18	6(3+3)

Beam pipe radius: 15.0mm

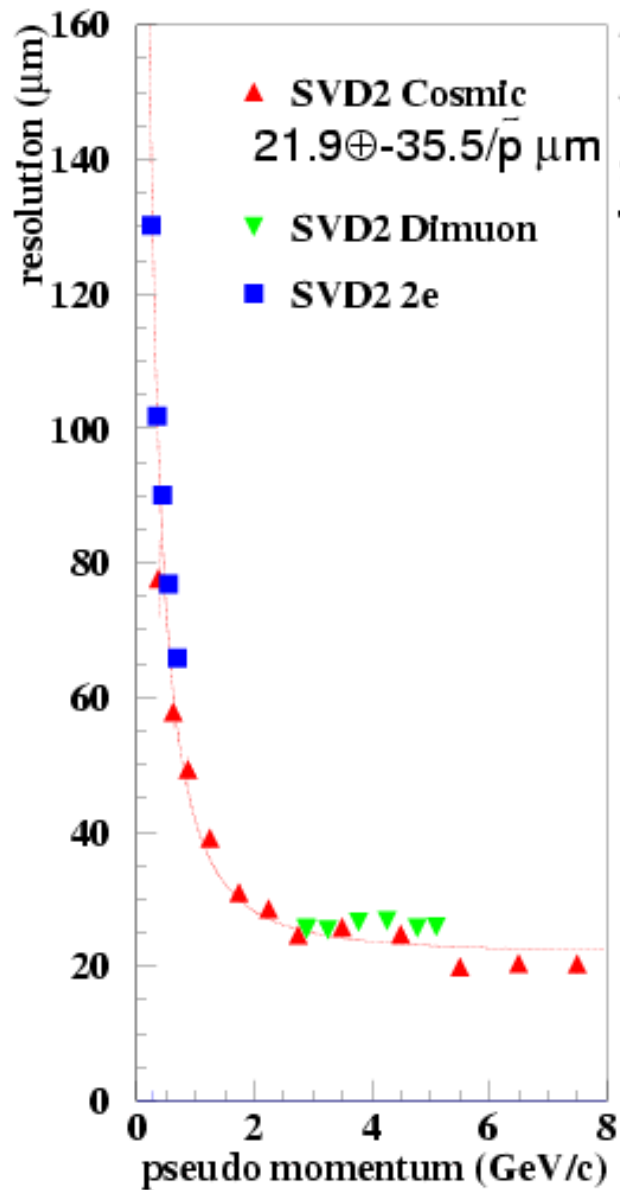
Total coverage :  
 $17^\circ < \theta < 150^\circ$  in polar angle

(matching with CDC)

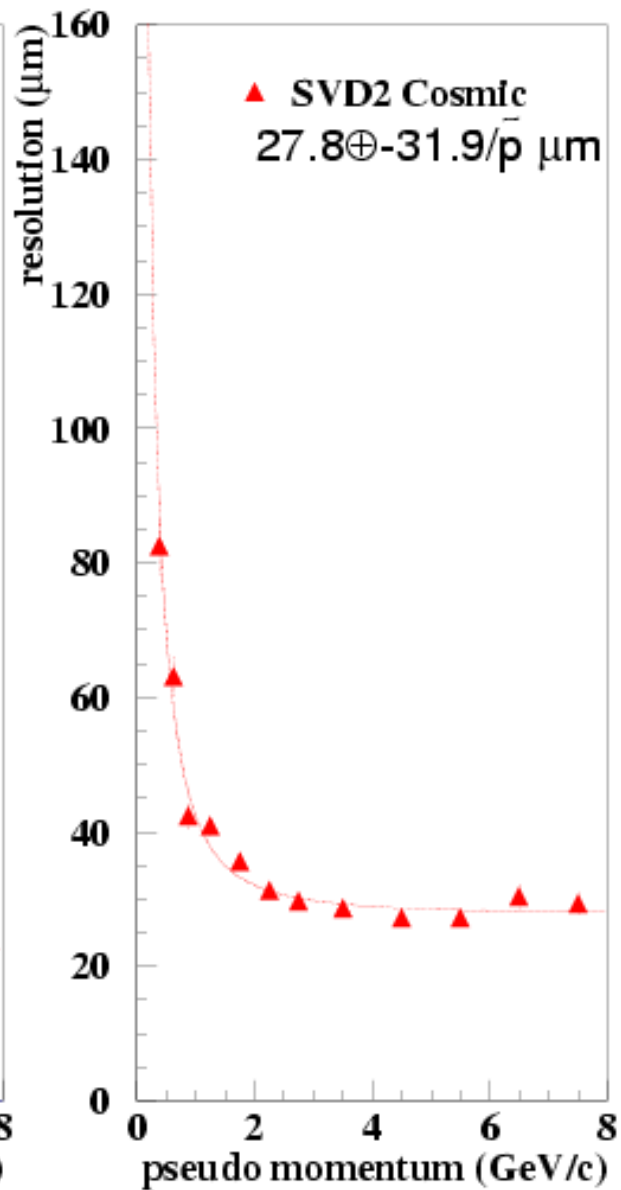
# of read-out channels:

110592

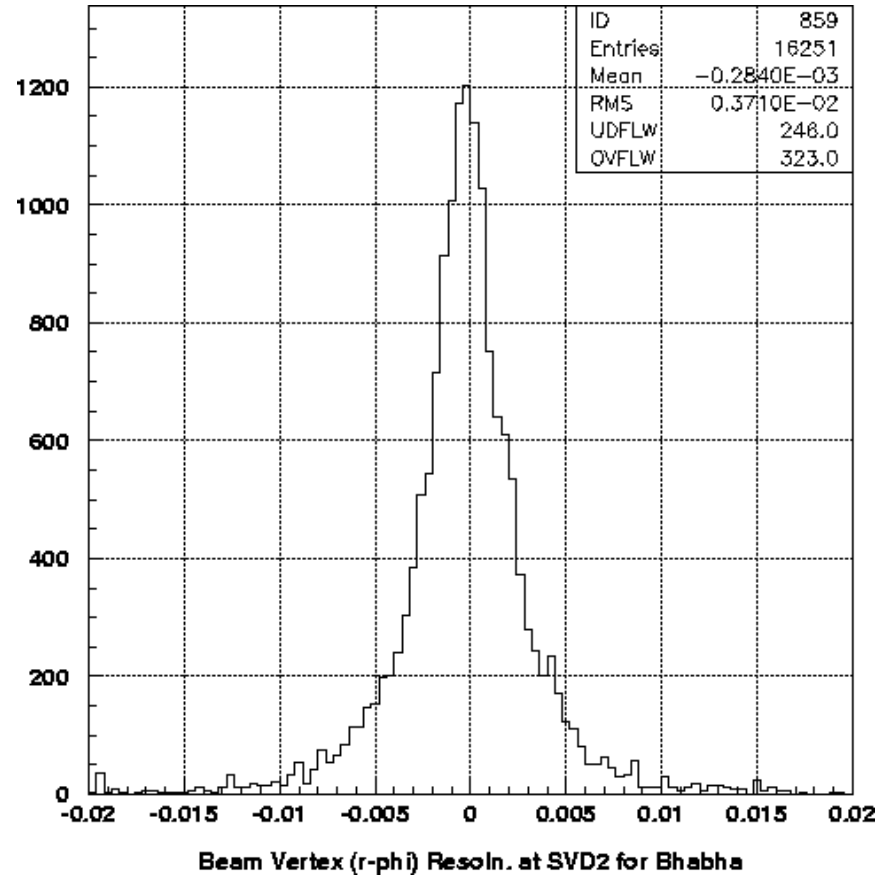
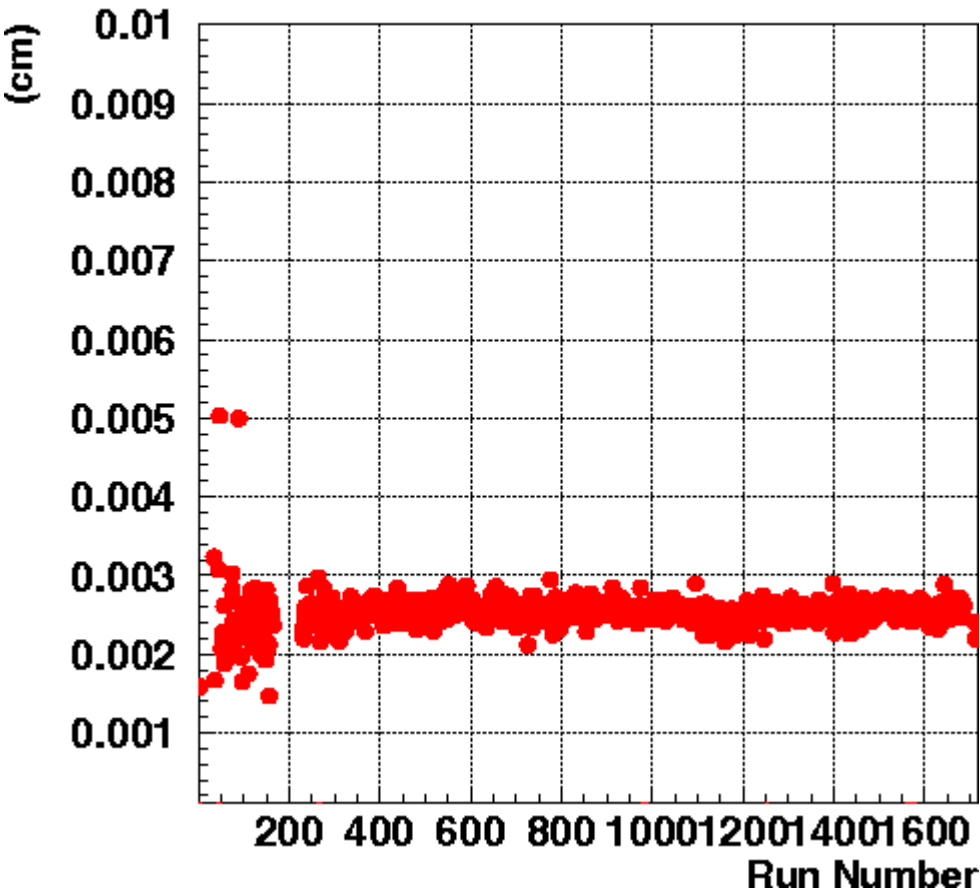
drho



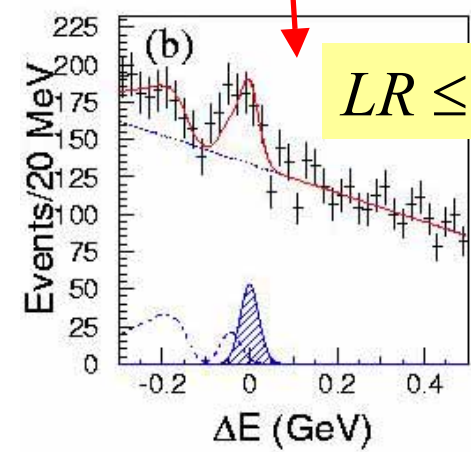
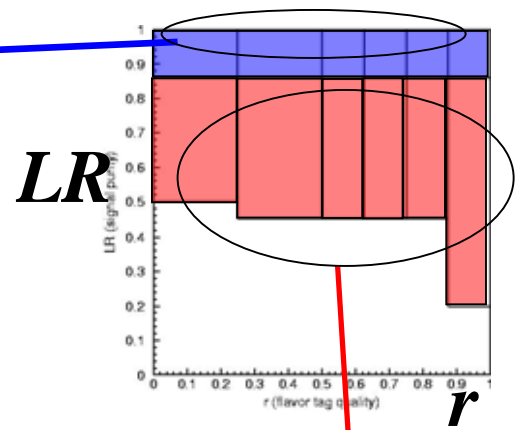
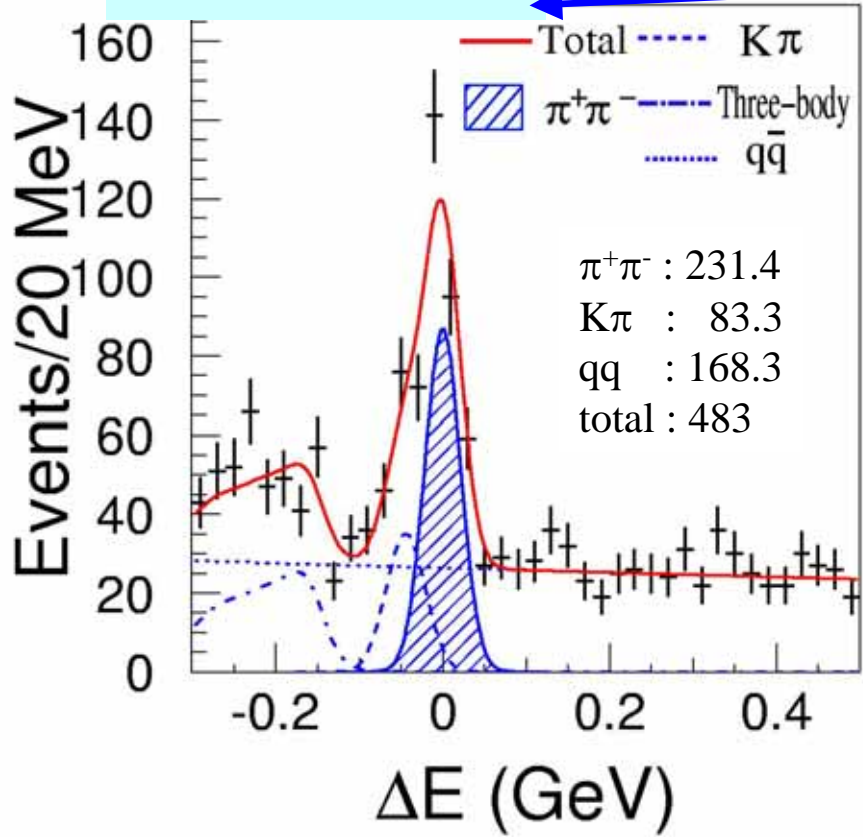
dz



Time variation of sigma of Beam Vertex for Bhabhas

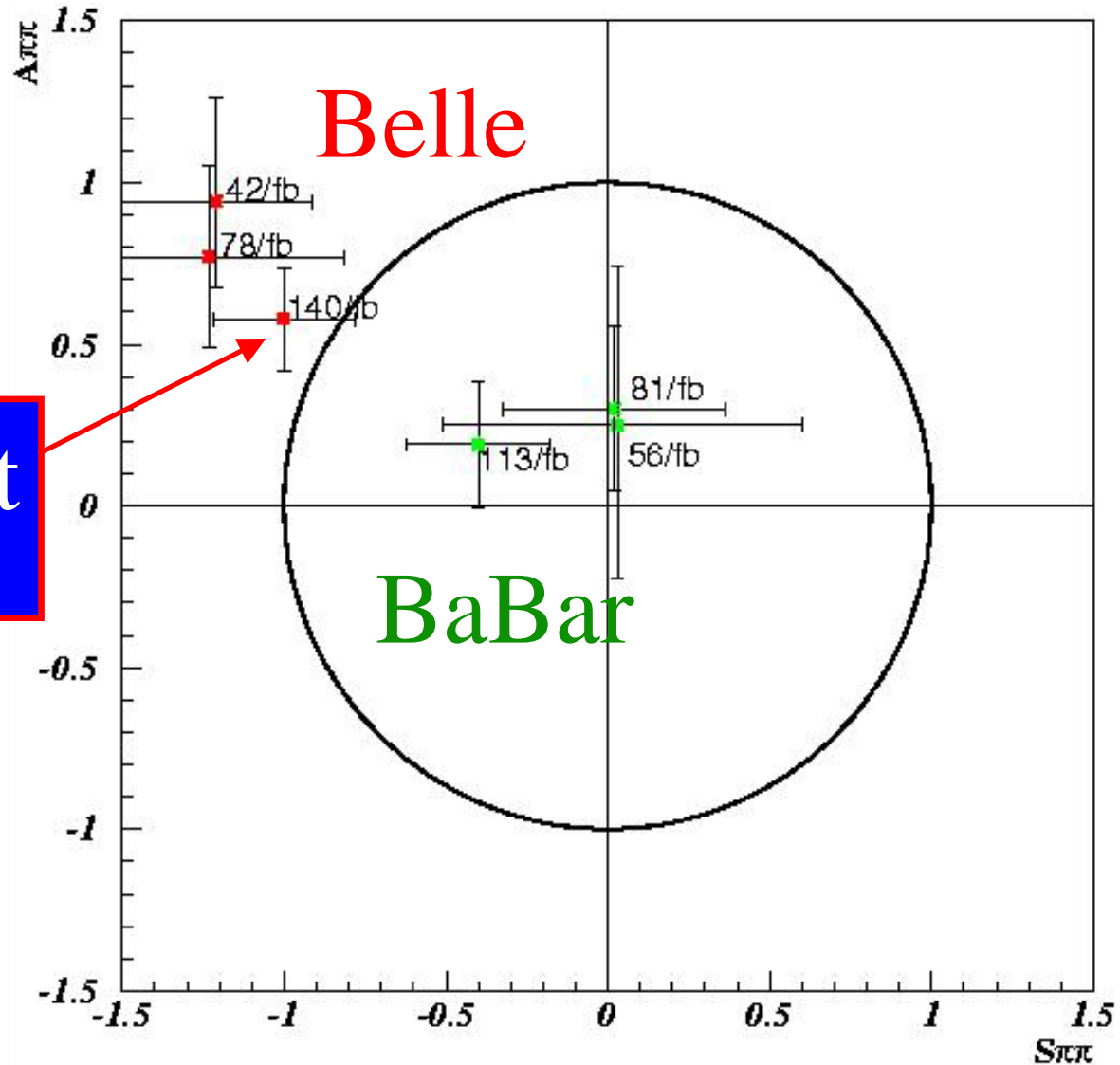


$0.86 < LR \leq 1.0$



1529 candidates (801  $B^0$ - and 728  $B^0$ -tags)  
containing  $(372 \pm 32)$   $\pi^+\pi^-$  signal events

# History of $A_{\pi\pi}$ and $S_{\pi\pi}$



This result  
Belle  $140\text{fb}^{-1}$



# Feldman-Cousins Analysis

1) Observation of  $CP$  violation

$(5.2\sigma)$

1-CL at  $(0,0) = 2.48 \times 10^{-7}$

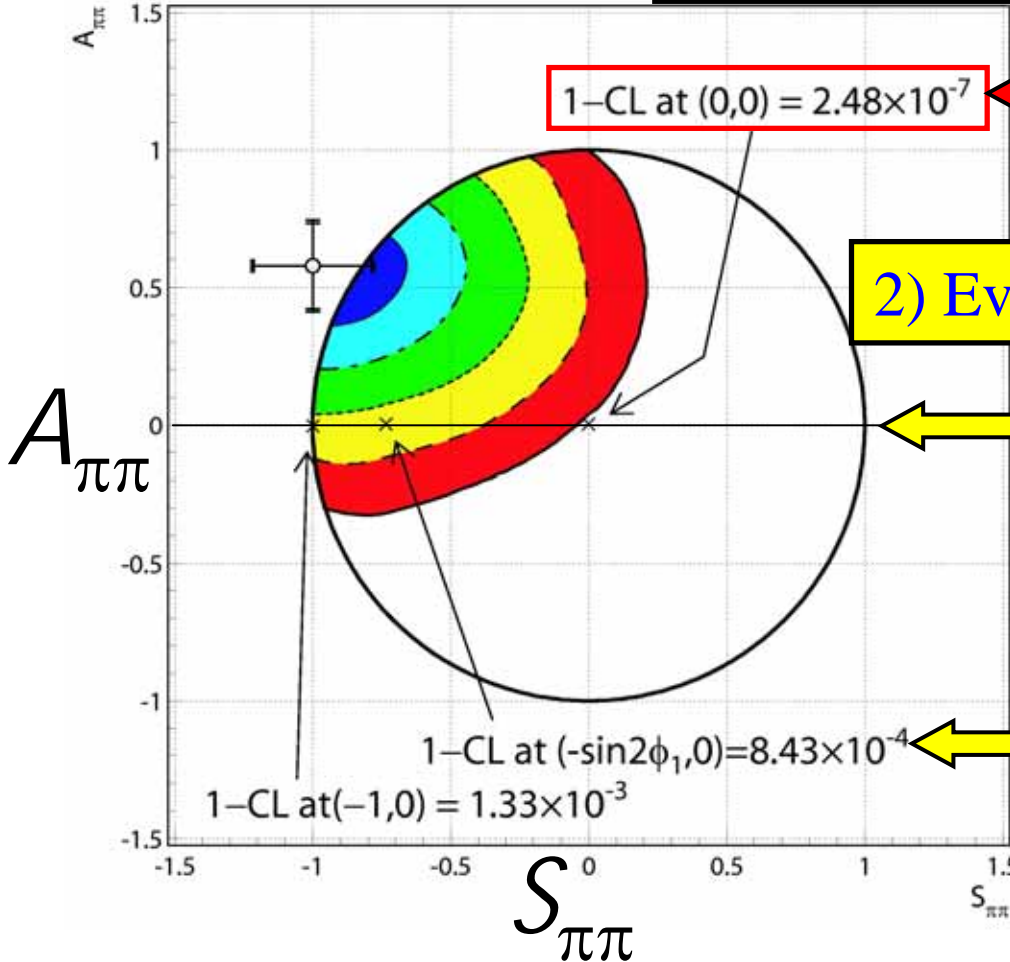
2) Evidence for direct  $CP$  violation

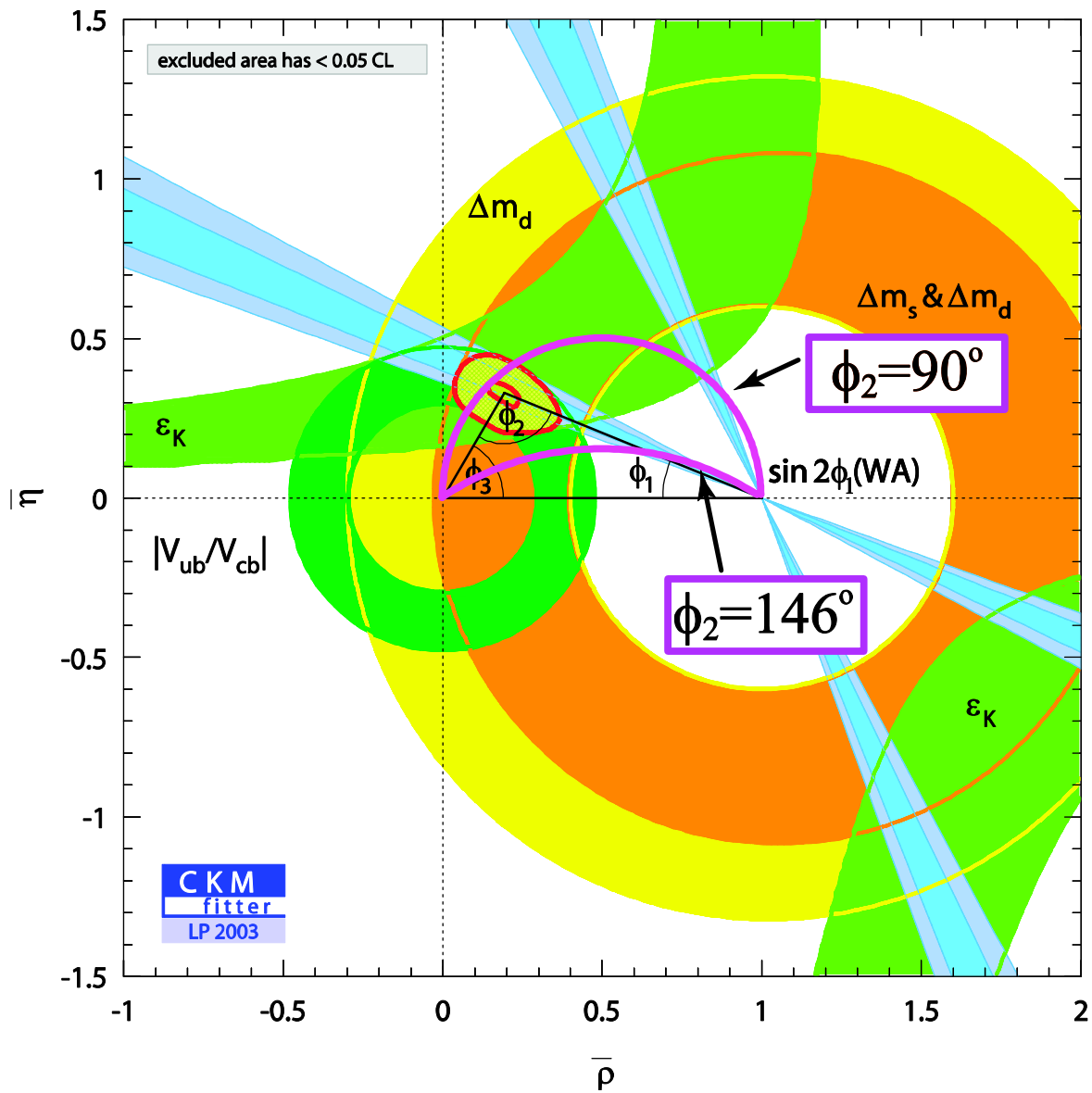
$\geq 3.2\sigma$

for  $A_{\pi\pi} = 0$  and any  $S_{\pi\pi}$

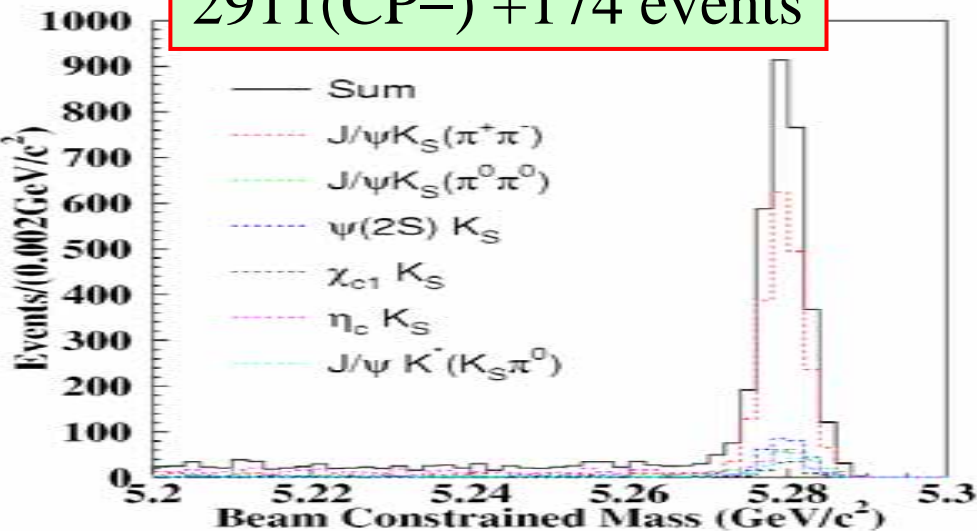
$3.3\sigma$

for “superweak” case





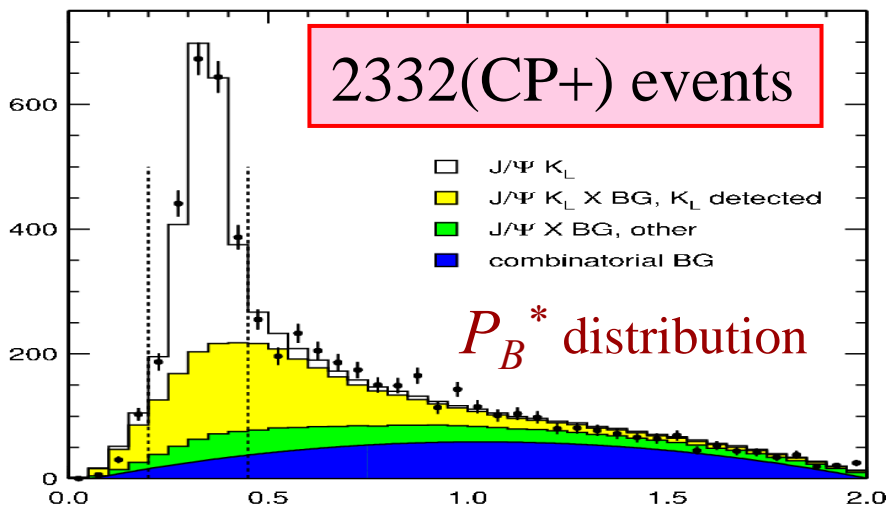
2911(CP-) + 174 events



140 fb<sup>-1</sup>, 152 x 10<sup>6</sup> BB pairs

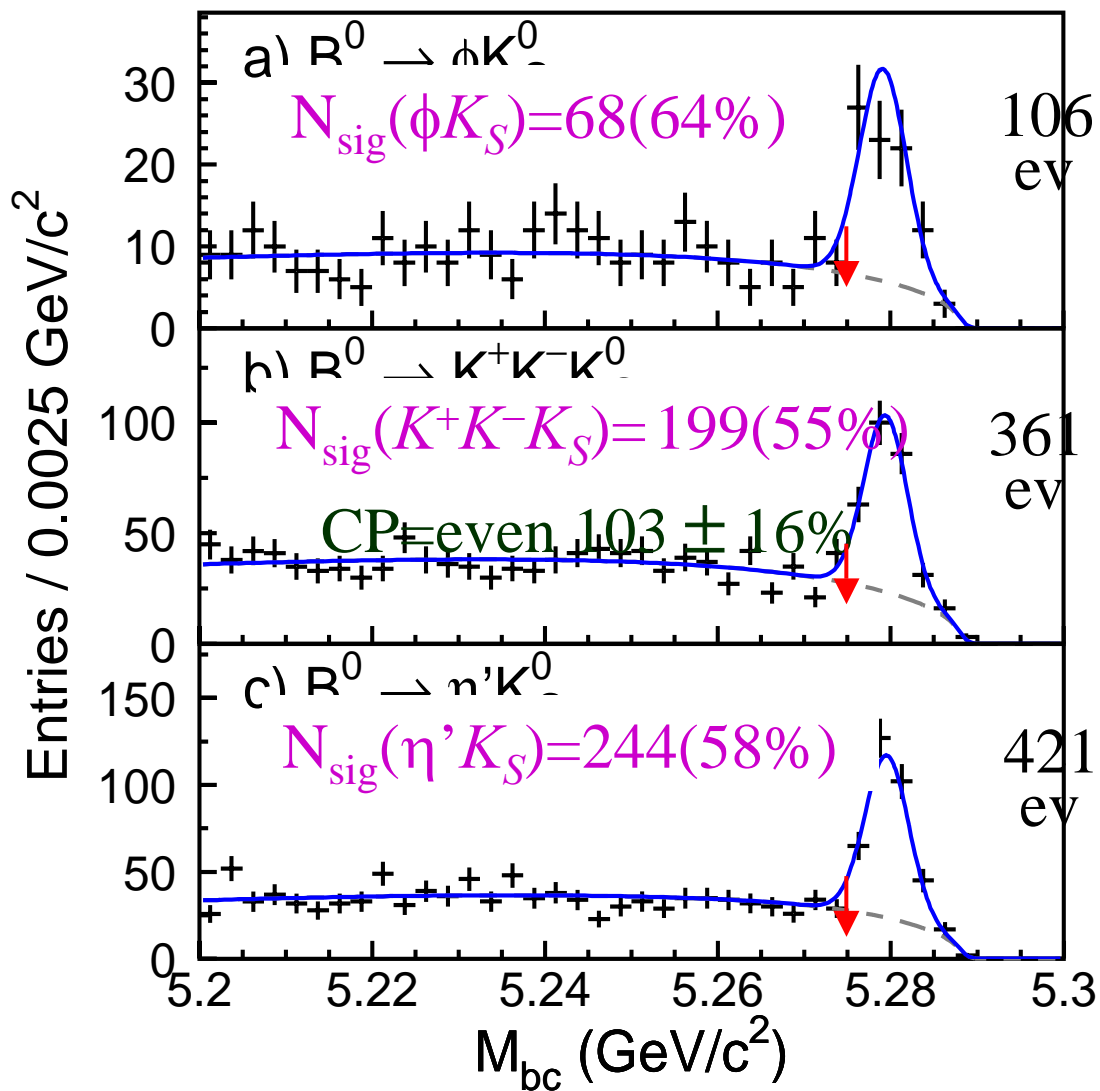
Mode	$N_{ev}$	$p$
$J/\psi K_S^0$	1997	$0.976 \pm 0.001$
$J/\psi K_S^0(\pi^0 \pi^0)$	288	$0.82 \pm 0.02$
$\psi(2S)(\ell^+ \ell^-) K_S^0$	145	$0.93 \pm 0.01$
$\psi(2S)(J/\psi \pi^+ \pi^-) K_S^0$	163	$0.88 \pm 0.01$
$\chi_{c1}(J/\psi \gamma) K_S^0$	101	$0.92 \pm 0.01$
$\eta_c(K_S^0 K^- \pi^+) K_S^0$	123	$0.72 \pm 0.03$
$\eta_c(K^+ K^- \pi^0) K_S^0$	74	$0.70 \pm 0.04$
$\eta_c(p \bar{p}) K_S^0$	20	$0.91 \pm 0.02$
All with $\xi_f = -1$	2911	$0.933 \pm 0.002$
$J/\psi K^{*0}(K_S^0 \pi^0)$	174	$0.93 \pm 0.01$
$J/\psi K_L^0$	2332	$0.60 \pm 0.03$

2332(CP+) events



(81% CP=+1)

5417 events used in Fit



$B^0$   $\phi K_S$   
 $\rightarrow \pi^+ \pi^-$   
 $\hookrightarrow K^+ K^-$

$B^0$   $K^+ K^- K_S$   
 $\rightarrow \pi^+ \pi^-$   
 $(K^+ K^- \neq \phi)$

$B^0$   $\eta' K_S$   
 $\rightarrow \pi^+ \pi^-$   
 $\hookrightarrow \pi^+ \pi^- \eta, \rho \gamma$   
 $\hookrightarrow \gamma \gamma$