

KEKB ファクトリーと B の物理

中尾 幹彦 (KEK 素核研)

`mikihiko.nakao@kek.jp`

2004 年 5 月 20 日

京都大学

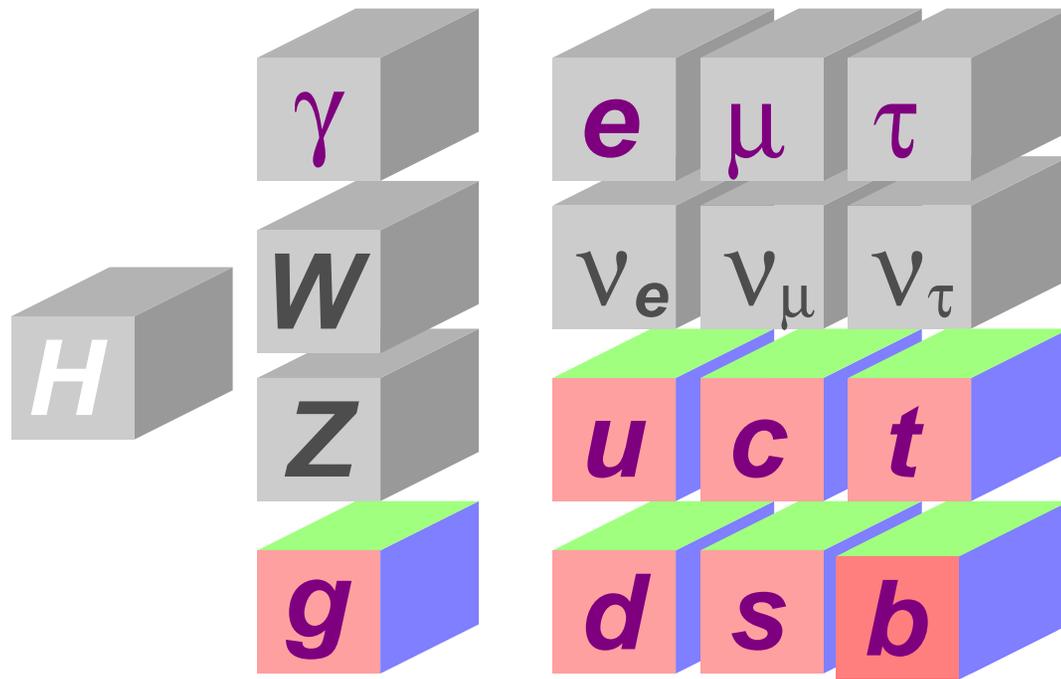
— 目次 —

- Introduction — B physics の動機と役割
- Belle — 検出器と CP の測定
- ユニタリティ三角形を決める
- ペンギン崩壊と新物理の探索
- B physics の将来 — SuperB は superb?

— 目次 —

- Introduction — B physics の動機と役割
- Belle — 検出器と CP の測定
- ユニタリティ三角形を決める
- ペンギン崩壊と新物理の探索
- B physics の将来 — SuperB は superb?

素粒子と対称性



物理法則の根本

- 6種のクォーク
6種のレプトン
- 4種類のカ
- さまざまな対称性
- **そして対称性の破れ**

素粒子物理の歴史は、新粒子の発見、対称性とその破れの発見の歴史

Bファクトリーはクォークを調べる宝庫
(すべてのクォークが登場する)

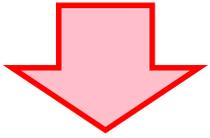
クォークと CP の 40 年

- 1960s 1963 年 クォーク理論 (Gell-mann, Zweig)
- 1964 年 K 中間子の CP 非保存の発見 (Fitch, Cronin)

クォークと CP の 40 年

1960s

1963 年 クォーク理論 (Gell-mann, Zweig)



1964 年 K 中間子の CP 非保存の発見 (Fitch, Cronin)

1967 年 宇宙創世における CP 非保存の役割 (Sakharov)

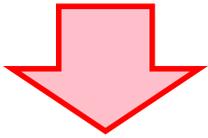
1970s

1973 年 小林益川の 6 クォークモデルと CP の破れ

クォークと CP の 40 年

1960s

1963 年 クォーク理論 (Gell-mann, Zweig)

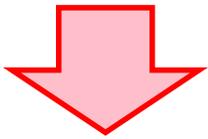


1964 年 K 中間子の CP 非保存の発見 (Fitch, Cronin)

1967 年 宇宙創世における CP 非保存の役割 (Sakharov)

1970s

1973 年 小林益川の 6 クォークモデルと CP の破れ

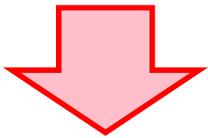


1974 年 チャームクォークの発見 (Ting, Richter 他)

1979 年 ボトムクォークの発見 (Lederman 他)

1980s

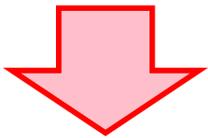
1981 年 中性 B 中間子に大きな CP の破れの可能性 (三田, Bigi)



1987 年 中性 B 中間子における (大きな) 混合の発見 (ARGUS)

1990s

1995 年 トップクォークの発見 (CDF, D0)



1999 年 K 中間子の直接的な CP 非保存の発見 (KTeV, NA48)

2000s

2001 年 B 中間子の CP 非保存の発見 (Belle, BaBar)

小林益川理論からの CP 非保存

標準理論 (SM) での
クォーク間の弱い相互作用

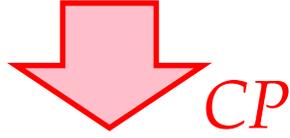
$$-\frac{g}{\sqrt{2}} (\bar{u}_L, \bar{c}_L, \bar{t}_L) \gamma^\mu W_\mu^+ V_{CKM} \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix} + \text{h.c.}$$

Cabibbo-小林-益川 (CKM) の
クォーク混合行列

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

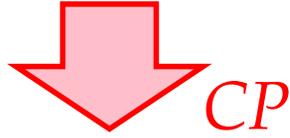
V_{CKM} は 3×3 ユニタリティー行列 \Rightarrow 3つの実数と1つの複素位相 ϕ
相互作用の振幅: $|A| e^{i\phi} e^{i\delta} \xrightarrow{CP} |A| e^{-i\phi} e^{i\delta}$ (複素振幅の非保存!)

$$X \rightarrow Y + Z: A = |A|e^{i\phi}e^{i\delta} \Rightarrow \Gamma = |A|^2$$



$$\bar{X} \rightarrow \bar{Y} + \bar{Z}: \bar{A} = |A|e^{-i\phi}e^{i\delta} \quad \bar{\Gamma} = |A|^2 \quad \boxed{\text{(観測量として CP は保存)}}$$

$$X \rightarrow Y + Z: A = |A|e^{i\phi}e^{i\delta} \Rightarrow \Gamma = |A|^2$$

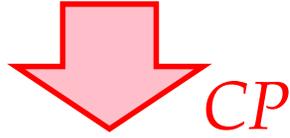


$$\bar{X} \rightarrow \bar{Y} + \bar{Z}: \bar{A} = |A|e^{-i\phi}e^{i\delta} \quad \bar{\Gamma} = |A|^2 \quad \boxed{\text{(観測量として CP は保存)}}$$

2つの異なる振幅 A と A' があれば、

$$A = |A|e^{i\phi}e^{i\delta} + |A'|e^{i\phi'}e^{i\delta'} \xrightarrow{CP} \bar{A} = |A|e^{-i\phi}e^{i\delta} + |A'|e^{-i\phi'}e^{i\delta'}$$

$$X \rightarrow Y + Z: A = |A|e^{i\phi}e^{i\delta} \Rightarrow \Gamma = |A|^2$$

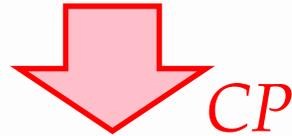


$$\bar{X} \rightarrow \bar{Y} + \bar{Z}: \bar{A} = |A|e^{-i\phi}e^{i\delta} \quad \bar{\Gamma} = |A|^2 \quad \boxed{\text{(観測量として CP は保存)}}$$

2つの異なる振幅 A と A' があれば、

$$A = |A|e^{i\phi}e^{i\delta} + |A'|e^{i\phi'}e^{i\delta'} \xrightarrow{CP} \bar{A} = |A|e^{-i\phi}e^{i\delta} + |A'|e^{-i\phi'}e^{i\delta'}$$

$$\Gamma = |A|^2 + |A'|^2 + 2|AA'|[\cos(\phi - \phi')\cos(\delta - \delta') + \sin(\phi - \phi')\sin(\delta - \delta')]$$



$$\bar{\Gamma} = |A|^2 + |A'|^2 + 2|AA'|[\cos(\phi - \phi')\cos(\delta - \delta') - \sin(\phi - \phi')\sin(\delta - \delta')]$$

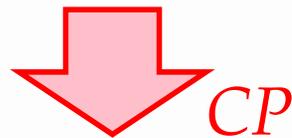
$$\boxed{\Gamma \neq \bar{\Gamma} \text{ (観測量として CP が非保存)}}$$

$$\bar{X} \rightarrow \bar{Y} + \bar{Z}: \bar{A} = |A|e^{-i\phi}e^{i\delta} \quad \bar{\Gamma} = |A|^2 \quad \boxed{\text{(観測量として CP は保存)}}$$

2つの異なる振幅 A と A' があれば、

$$A = |A|e^{i\phi}e^{i\delta} + |A'|e^{i\phi'}e^{i\delta'} \xrightarrow{CP} A = |A|e^{-i\phi}e^{i\delta} + |A'|e^{-i\phi'}e^{i\delta'}$$

$$\Gamma = |A|^2 + |A'|^2 + 2|AA'|[\cos(\phi - \phi')\cos(\delta - \delta') + \sin(\phi - \phi')\sin(\delta - \delta')]$$



$$\bar{\Gamma} = |A|^2 + |A'|^2 + 2|AA'|[\cos(\phi - \phi')\cos(\delta - \delta') - \sin(\phi - \phi')\sin(\delta - \delta')]$$

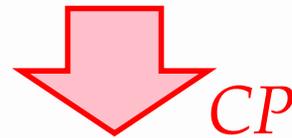
$$\boxed{\Gamma \neq \bar{\Gamma} \text{ (観測量として CP が非保存)}}$$

ただし、

2つの異なる振幅 A と A' があれば、

$$A = |A|e^{i\phi}e^{i\delta} + |A'|e^{i\phi'}e^{i\delta'} \xrightarrow{CP} A = |A|e^{-i\phi}e^{i\delta} + |A'|e^{-i\phi'}e^{i\delta'}$$

$$\Gamma = |A|^2 + |A'|^2 + 2|AA'|[\cos(\phi - \phi')\cos(\delta - \delta') + \sin(\phi - \phi')\sin(\delta - \delta')]$$



$$\bar{\Gamma} = |A|^2 + |A'|^2 + 2|AA'|[\cos(\phi - \phi')\cos(\delta - \delta') - \sin(\phi - \phi')\sin(\delta - \delta')]$$

$$\Gamma \neq \bar{\Gamma} \text{ (観測量として CP が非保存)}$$

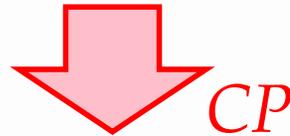
ただし、

- 2つの異なる weak 位相 ($\phi - \phi' \neq 0$) の振幅があること
(標準理論: 異なる CKM 行列要素、あるいは新物理による位相)

2つの異なる振幅 A と A' があれば、

$$A = |A|e^{i\phi}e^{i\delta} + |A'|e^{i\phi'}e^{i\delta'} \xrightarrow{CP} A = |A|e^{-i\phi}e^{i\delta} + |A'|e^{-i\phi'}e^{i\delta'}$$

$$\Gamma = |A|^2 + |A'|^2 + 2|AA'|[\cos(\phi - \phi')\cos(\delta - \delta') + \sin(\phi - \phi')\sin(\delta - \delta')]$$



$$\bar{\Gamma} = |A|^2 + |A'|^2 + 2|AA'|[\cos(\phi - \phi')\cos(\delta - \delta') - \sin(\phi - \phi')\sin(\delta - \delta')]$$

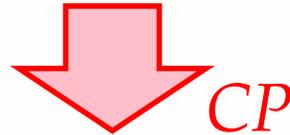
$$\Gamma \neq \bar{\Gamma} \text{ (観測量として CP が非保存)}$$

ただし、

- 2つの異なる weak 位相 ($\phi - \phi' \neq 0$) の振幅があること
(標準理論: 異なる CKM 行列要素、あるいは新物理による位相)
- 2つの振幅に CP によらない位相差 ($\delta - \delta' \neq 0$) があること
(強い相互作用によるもの、時間発展 (mixing) によるもの、…)

$$A = |A|e^{i\phi}e^{i\delta} + |A'|e^{i\phi'}e^{i\delta'} \xrightarrow{CP} A = |A|e^{-i\phi}e^{i\delta} + |A'|e^{-i\phi'}e^{i\delta'}$$

$$\Gamma = |A|^2 + |A'|^2 + 2|AA'|[\cos(\phi - \phi')\cos(\delta - \delta') + \sin(\phi - \phi')\sin(\delta - \delta')]$$



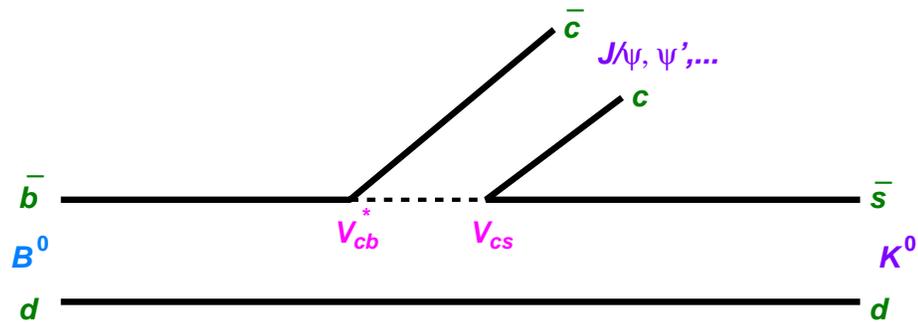
$$\bar{\Gamma} = |A|^2 + |A'|^2 + 2|AA'|[\cos(\phi - \phi')\cos(\delta - \delta') - \sin(\phi - \phi')\sin(\delta - \delta')]$$

$\Gamma \neq \bar{\Gamma}$ (観測量として CP が非保存)

ただし、

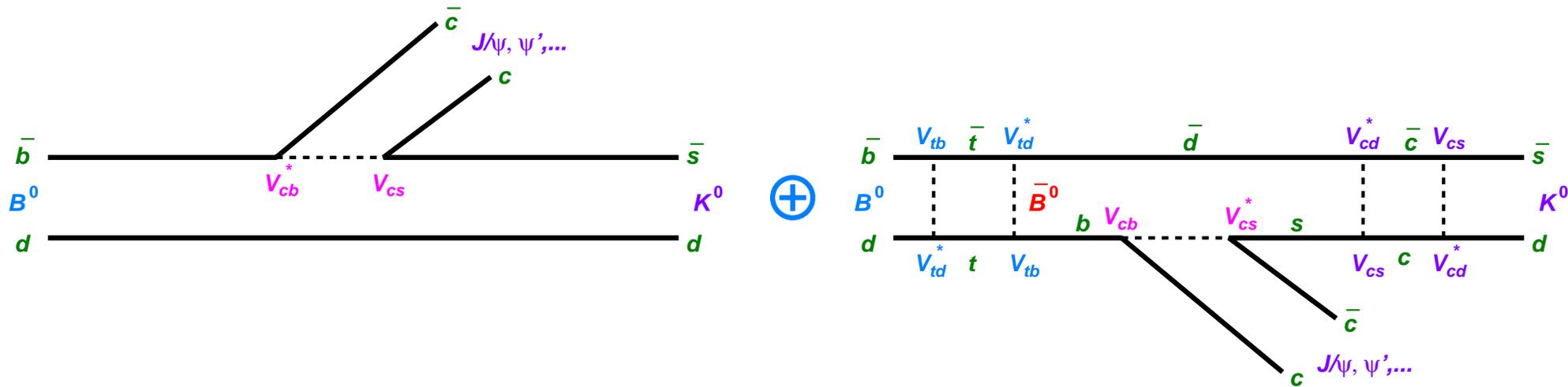
- 2つの異なる weak 位相 ($\phi - \phi' \neq 0$) の振幅があること
(標準理論: 異なる CKM 行列要素、あるいは新物理による位相)
- 2つの振幅に CP によらない位相差 ($\delta - \delta' \neq 0$) があること
(強い相互作用によるもの、時間発展 (mixing) によるもの、…)
- 2つの振幅が同程度の大きさ ($|A| \sim |A'|$) を持つこと

$B \rightarrow \text{Mixing} \rightarrow \text{CP}$ 固有状態



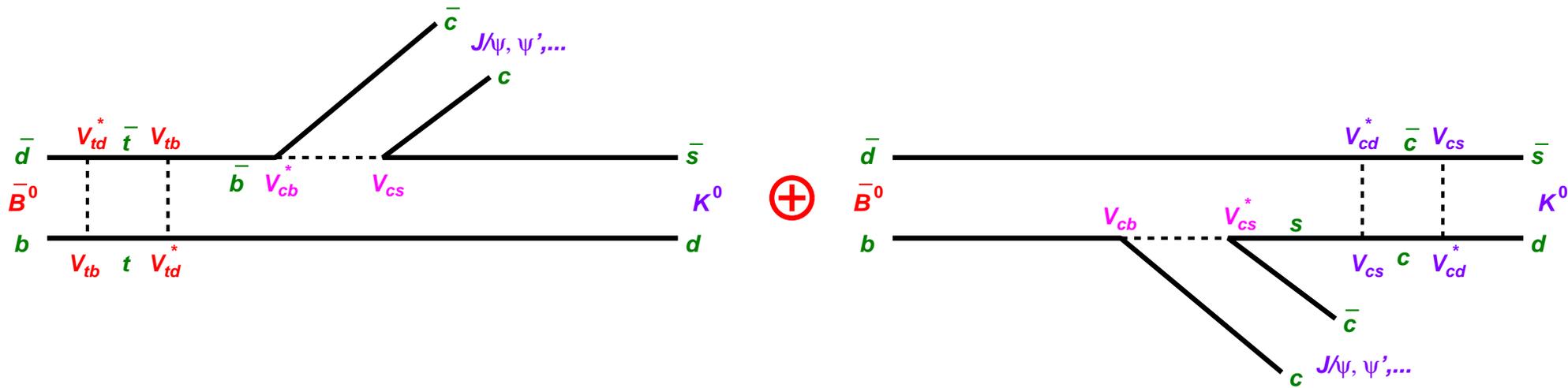
- 初期状態 B^0 の $J/\psi K^0$ への崩壊 (Golden mode)

$B \rightarrow \text{Mixing} \rightarrow \text{CP 固有状態}$



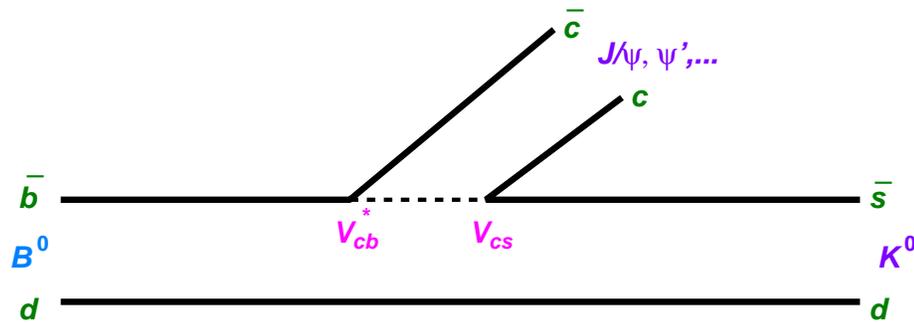
- 初期状態 B^0 の $J/\psi K^0$ への崩壊 (Golden mode)
- 時間 $t \neq 0$ では、mixing 経由の振幅 (CP に依らない位相 $\Delta m \Delta t$)

$B \rightarrow \text{Mixing} \rightarrow \text{CP 固有状態}$

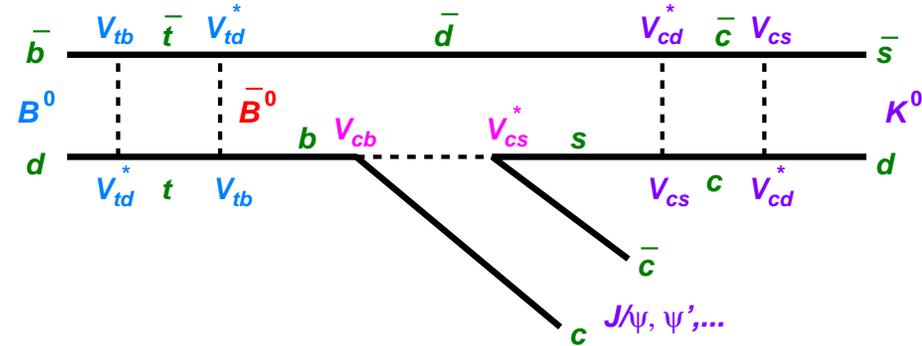


- 初期状態 B^0 の $J/\psi K^0$ への崩壊 (Golden mode)
- 時間 $t \neq 0$ では、mixing 経路の振幅 (CP に依らない位相 $\Delta m \Delta t$)
- 2つのダイアグラムの Weak phase の差は $V_{td} V_{tb}^* \neq V_{td}^* V_{tb}$

$B \rightarrow \text{Mixing} \rightarrow \text{CP}$ 固有状態

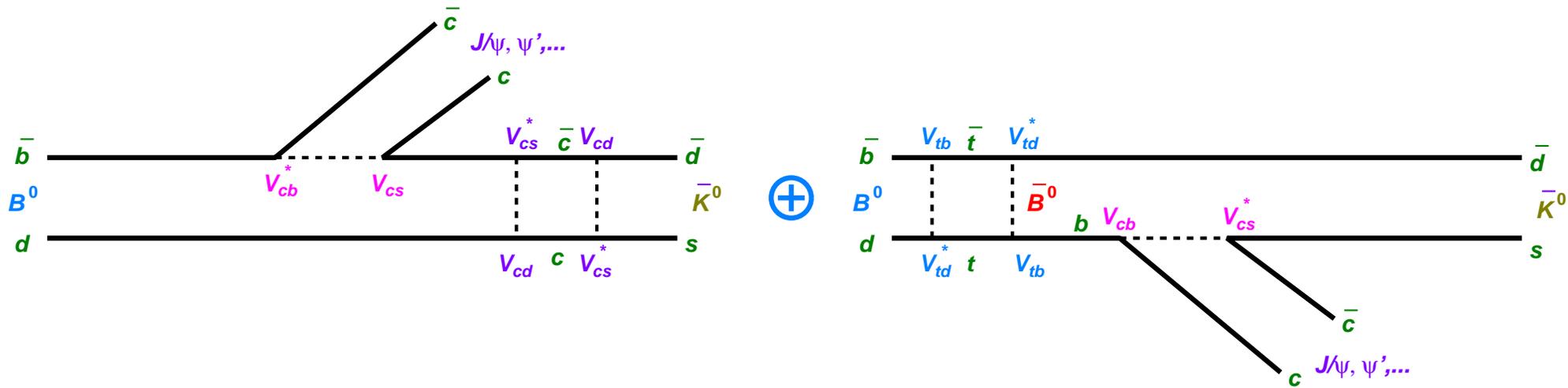


\oplus



- 初期状態 B^0 の $J/\psi K^0$ への崩壊 (Golden mode)
- 時間 $t \neq 0$ では、mixing 経由の振幅 (CP に依らない位相 $\Delta m \Delta t$)
- 2つのダイアグラムの Weak phase の差は $V_{td}^* V_{tb} \neq V_{td}^* V_{tb}$

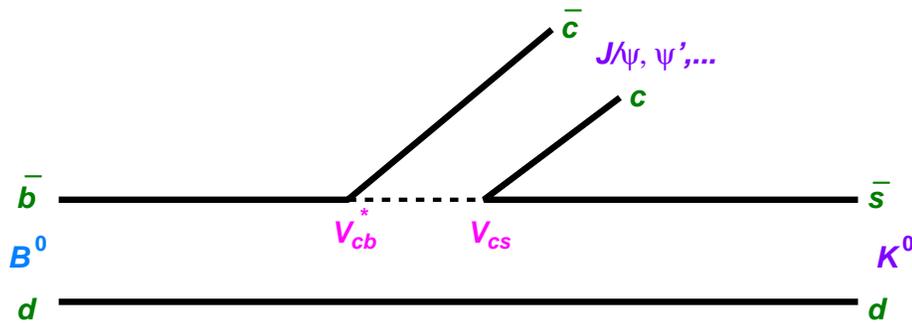
$B \rightarrow \text{Mixing} \rightarrow \text{CP}$ 固有状態



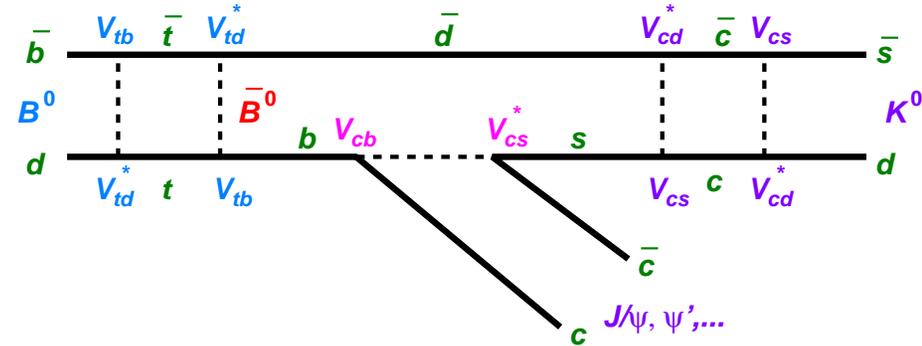
- 初期状態 B^0 の $J/\psi K^0$ への崩壊 (Golden mode)
- 時間 $t \neq 0$ では、mixing 経路の振幅 (CP に依らない位相 $\Delta m \Delta t$)
- 2つのダイアグラムの Weak phase の差は $V_{td}^* V_{tb} \neq V_{td}^* V_{tb}$
- 終状態は $K^0 - \bar{K}^0$ mixing により K_S^0 あるいは K_L^0

位相差 $\phi_1 = \pi - \arg \left(\frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{cb}^* V_{cd}} \right)$ が mixing の時間 t の関数で現れる

$B \rightarrow \text{Mixing} \rightarrow \text{CP}$ 固有状態



\oplus



- 初期状態 B^0 の $J/\psi K^0$ への崩壊 (Golden mode)
- 時間 $t \neq 0$ では、mixing 経由の振幅 (CP に依らない位相 $\Delta m \Delta t$)
- 2つのダイアグラムの Weak phase の差は $V_{td}^* V_{tb} \neq V_{td}^* V_{tb}$
- 終状態は $K^0 - \bar{K}^0$ mixing により K_S^0 あるいは K_L^0

位相差 $\phi_1 = \pi - \arg \left(\frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{cb}^* V_{cd}} \right)$ が mixing の時間 t の関数で現れる

ARGUS による $B\bar{B}$ mixing の発見 (1987)

$$\Rightarrow \Delta m = (0.472 \pm 0.017) \text{ ps}^{-1} \text{ (現在)}$$

3.3 ps で CPV が最大 ($\sin \Delta m t = 1$)

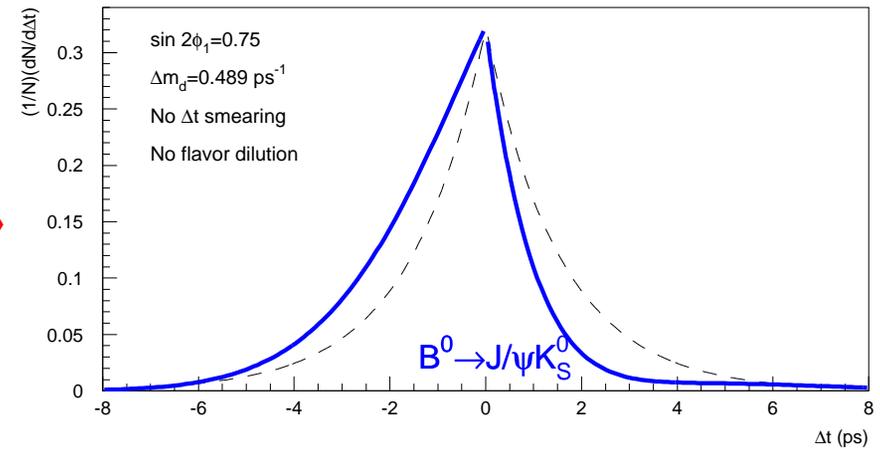
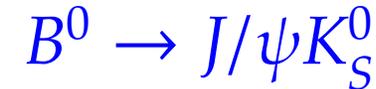
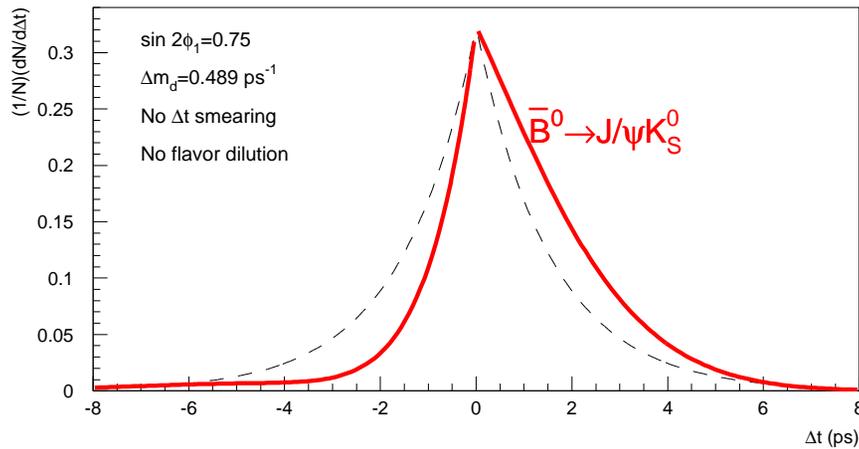
B Lifetime 1.54 ps のたかだか 2 倍 ($c\tau = 0.46 \text{ mm}$)

$O(1)$ の CPV が可能! — 奇跡的?

$K_L^0 \bar{K}_L^0$: max. CP at 0.03 ps, $\tau = 500 \text{ ps} \Rightarrow O(10^{-3})$ CPV

$D^0 \bar{D}^0$: 測定にかからない位小さいし、不定性も多い

ϕ_1 の測定原理



$$e^{-|\Delta t|/\tau} \left[1 - \sin 2\phi_1 \sin(\Delta m \Delta t) \right] \quad e^{-|\Delta t|/\tau} \left[1 + \sin 2\phi_1 \sin(\Delta m \Delta t) \right]$$

($\Delta t = 0$ は \bar{B}^0 (B^0) のフレーバー確定時刻)

$$A_{CP} = \frac{\Gamma(\bar{B}^0(t) \rightarrow J/\psi K_S^0) - \Gamma(B^0(t) \rightarrow J/\psi K_S^0)}{\Gamma(\bar{B}^0(t) \rightarrow J/\psi K_S^0) + \Gamma(B^0(t) \rightarrow J/\psi K_S^0)} = \sin 2\phi_1 \sin(\Delta m \Delta t)$$

CKM 行列の実際

Wolfenstein parametrization, $\lambda \sim 0.2, A \sim \rho \sim \eta \sim \mathcal{O}(1)$

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

ユニタリティ条件 ($VV^\dagger = 1$) から

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

$$\mathcal{O}(\lambda^3) + \mathcal{O}(\lambda^3) + \mathcal{O}(\lambda^3)$$

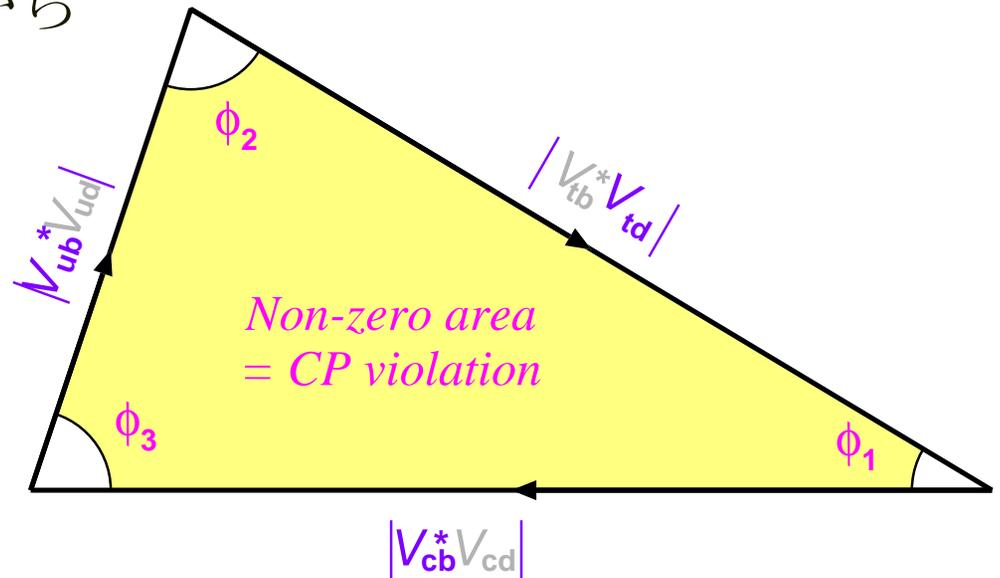
他の三角形はあまり有効でない...

$$V_{ud}V_{us}^* + V_{cd}V_{cs}^* + V_{td}V_{ts}^* = 0$$

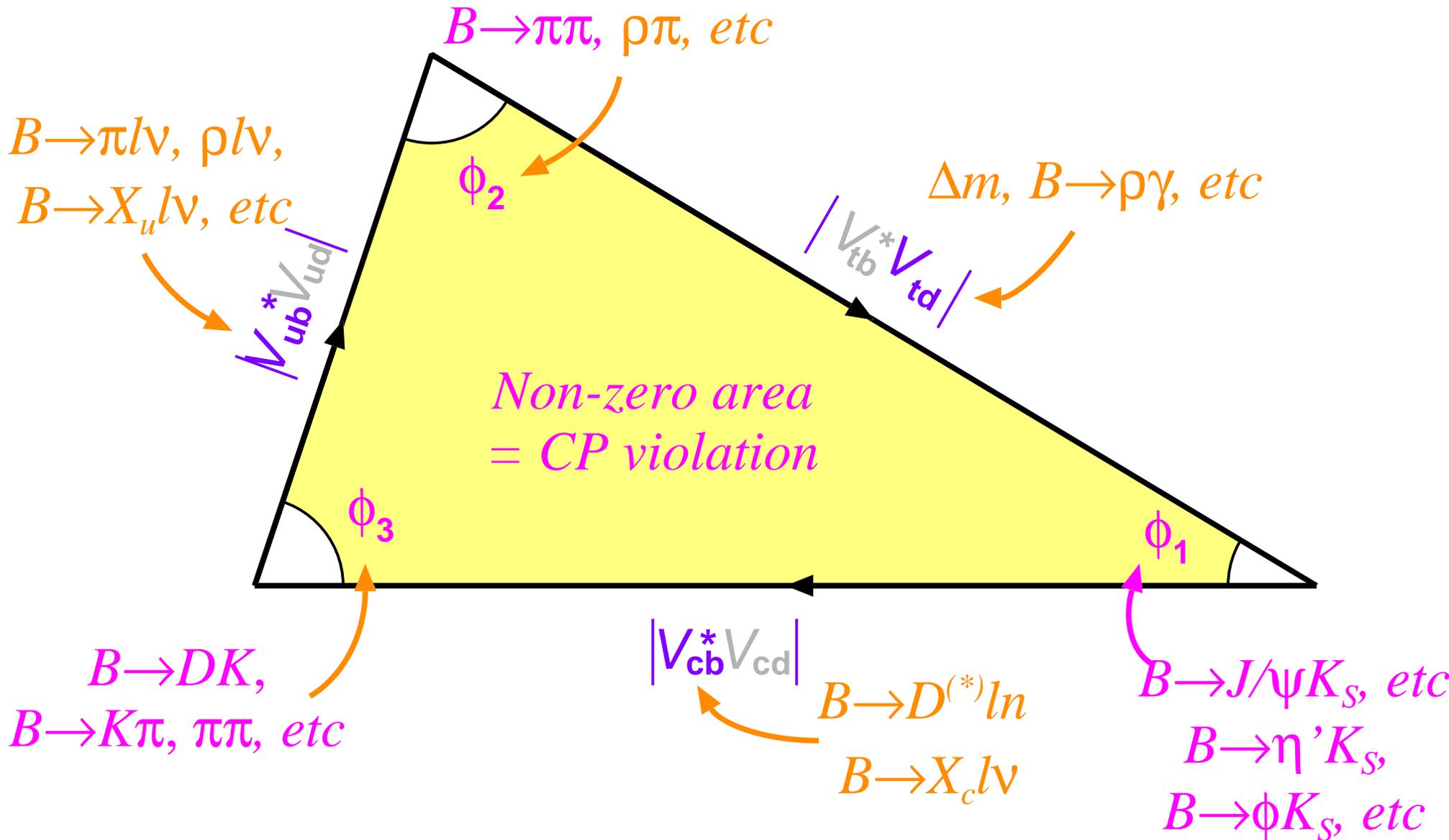
$$\mathcal{O}(\lambda) + \mathcal{O}(\lambda) + \mathcal{O}(\lambda^5)$$

$$V_{us}V_{ub}^* + V_{cs}V_{cb}^* + V_{ts}V_{tb}^* = 0$$

$$\mathcal{O}(\lambda^5) + \mathcal{O}(\lambda^2) + \mathcal{O}(\lambda^2)$$

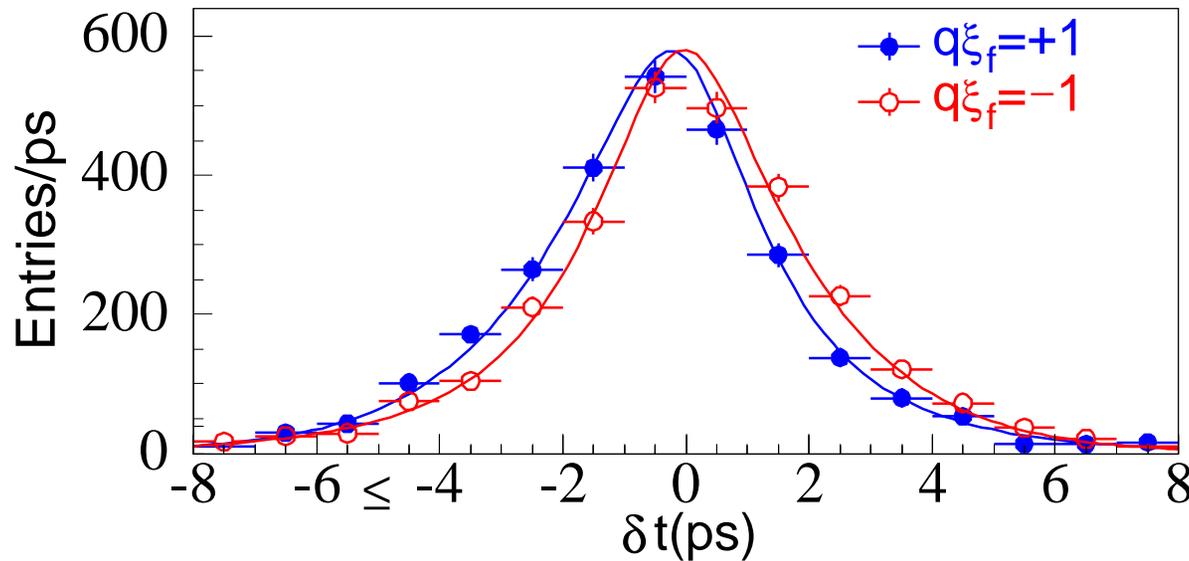


ユニタリティ三角形



すべての辺と角は B 崩壊で決められる

B physics の行先



$$\sin 2\phi_1 = 0.733 \pm 0.057 \pm 0.028$$

(Belle 2003)

B で CP は破れている
小林益川は正しい

小林益川 (標準理論) のさらなる追求

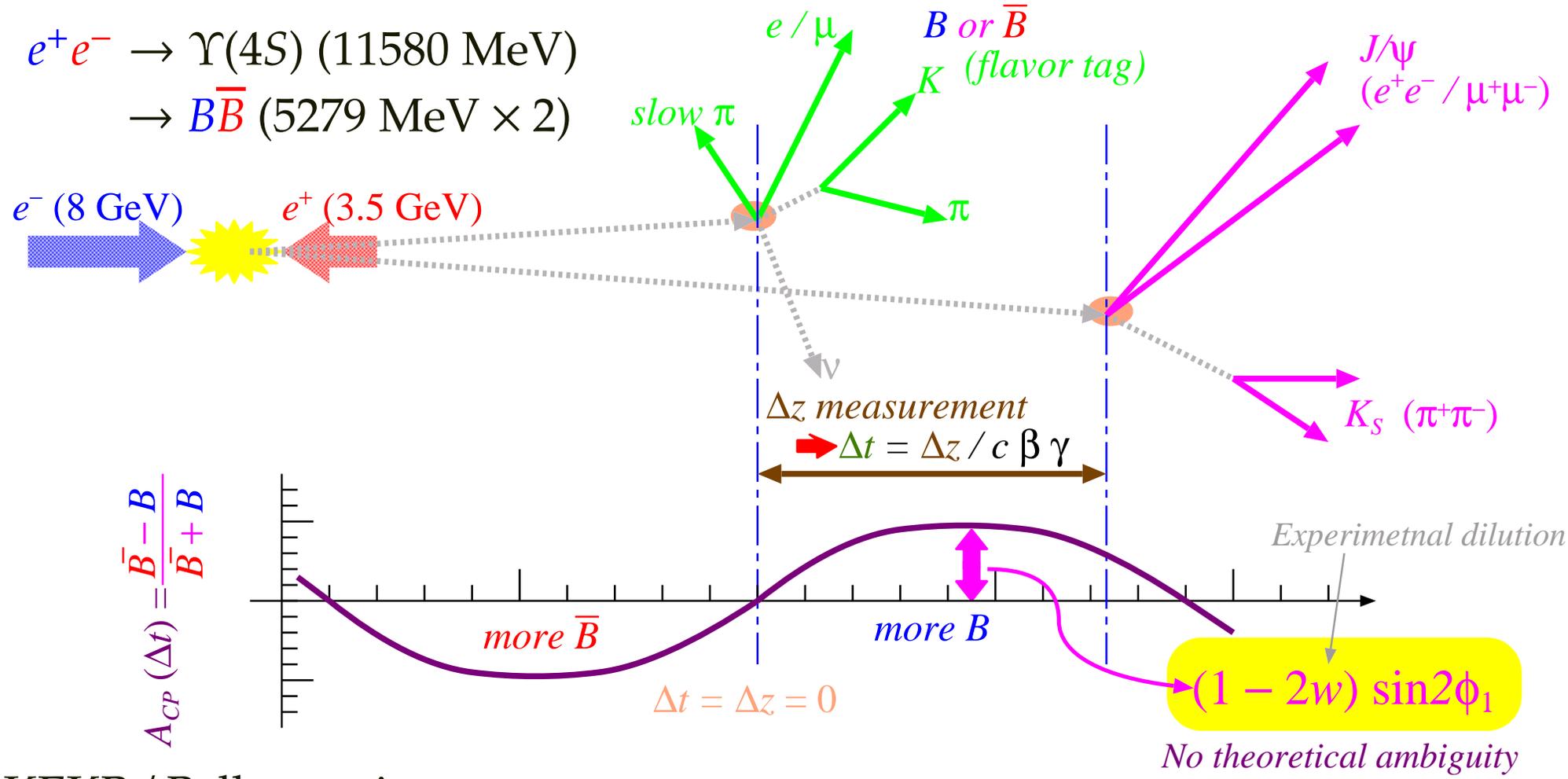
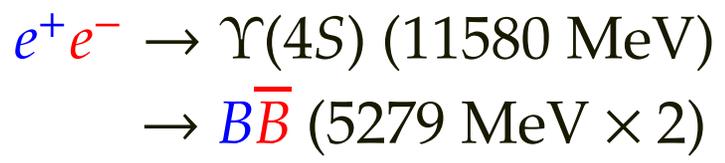
- CKM 以外の (non-SM) 複素位相はあるのか?
ユニタリティー角を 2 つ以上の方法で測り、比べる
三角形は閉じているか? ($\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = ?$)
- 標準理論は世界を正しく予言してるか?
予言の確かな崩壊過程、直接 CP 非対称性、起こり得ないことを探す

標準理論を越える物理とその理解への手掛り

— 目次 —

- Introduction — B physics の動機と役割
- Belle — 検出器と CP の測定
- ユニタリティ三角形を決める
- ペンギン崩壊と新物理の探索
- B physics の将来 — SuperB は superb?

CP非保存の測定に必要なもの



KEKB / Belle requirements

- 非対称エネルギー
- 崩壊点測定
- レプトン識別
- たくさんの B
- 精度良い運動量
- K/π 識別

The Belle Collaboration

~400 physicists from 13 regions, 59 institutions



KEKBファクトリーとBの物理 — 中尾幹彦 (KEK 素核研)

- Aomori University
- Budker Institute of Nuclear Physics
- Chiba University
- Chonnan National University
- Chuo University
- University of Cincinnati
- Ehwa Womens University
- University of Frankfurt
- Gyeongsang National University
- University of Hawaii
- Hiroshima Institute of Technology
- IHEP, Beijing
- IHEP, Vienna
- ITEP, Moscow
- Kanagawa University
- KEK
- Korea University
- Krakov Institute of Nuclear Physics
- Kyoto University**
- Kyungpook National University
- Swiss Federal Institute of Technology, Lausanne
- Jozef Stephan Institute, University of Ljubliana
- University of Maribor
- University of Melbourne
- Nagoya University
- Nara Women's University
- National Central University
- National Kaoshiung Normal University
- National Lien-Ho Institute of Technology
- Nihon Dental College
- Niigata University
- Osaka University
- Osaka City University
- Panjab University
- Peking University
- Princeton University
- Riken/BNL
- Saga University
- USTC
- Seoul National University
- Shinshu University
- University of Sydney
- Tata Institute
- Toho University
- Tohoku University
- Tohoku Gakuin University
- University of Tokyo
- Tokyo Institute of Technology
- Tokyo Metropolitan University
- Tokyo University of Agriculture and Technology
- Toyama National College
- University of Tsukuba
- Utkal University
- Virginia Polytechnic Institute
- Yonsei University



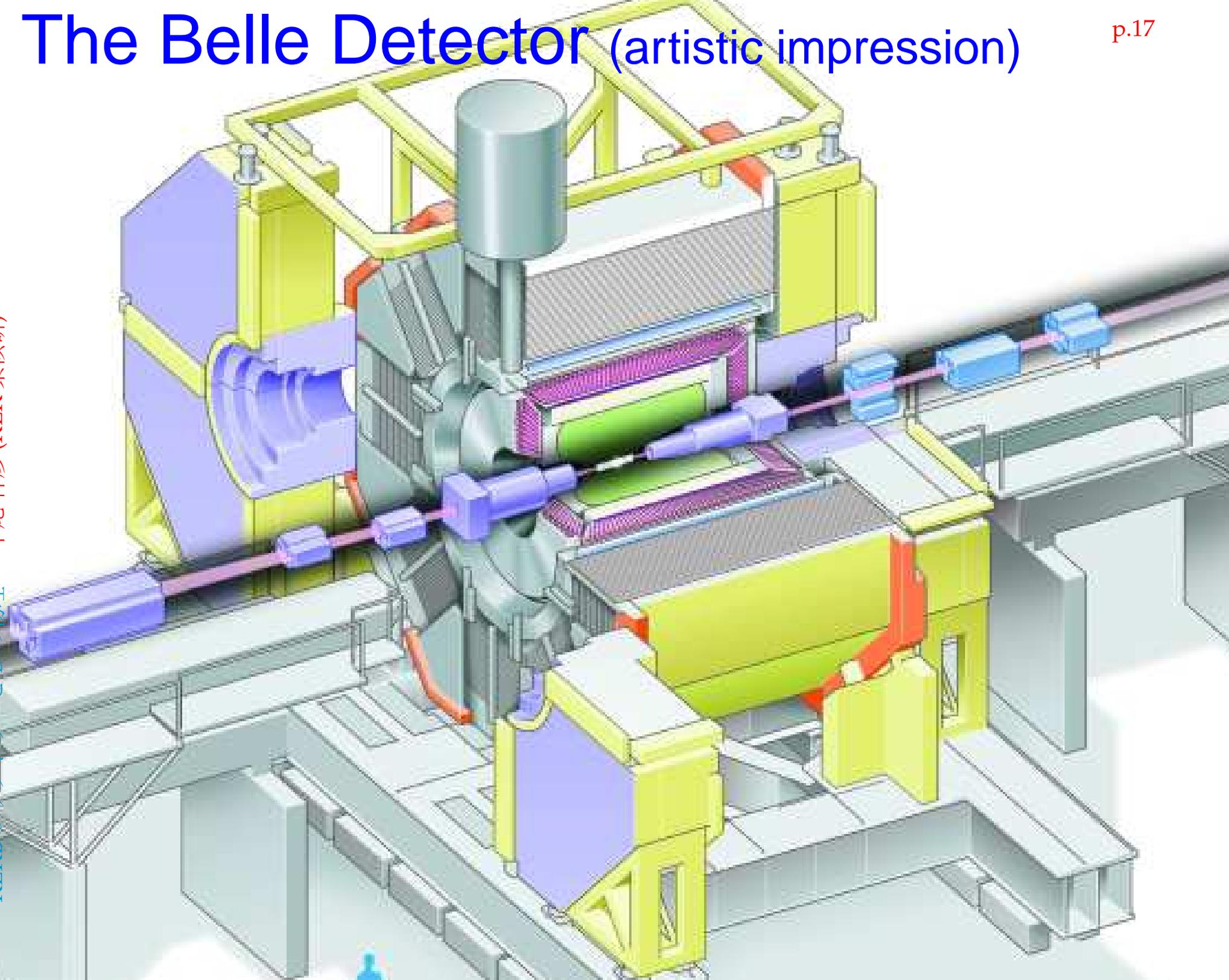
The Belle Collaboration (in work)

KEKBファクトリーとBの物理 — 中尾 幹彦 (KEK 素核研)



The Belle Detector (artistic impression)

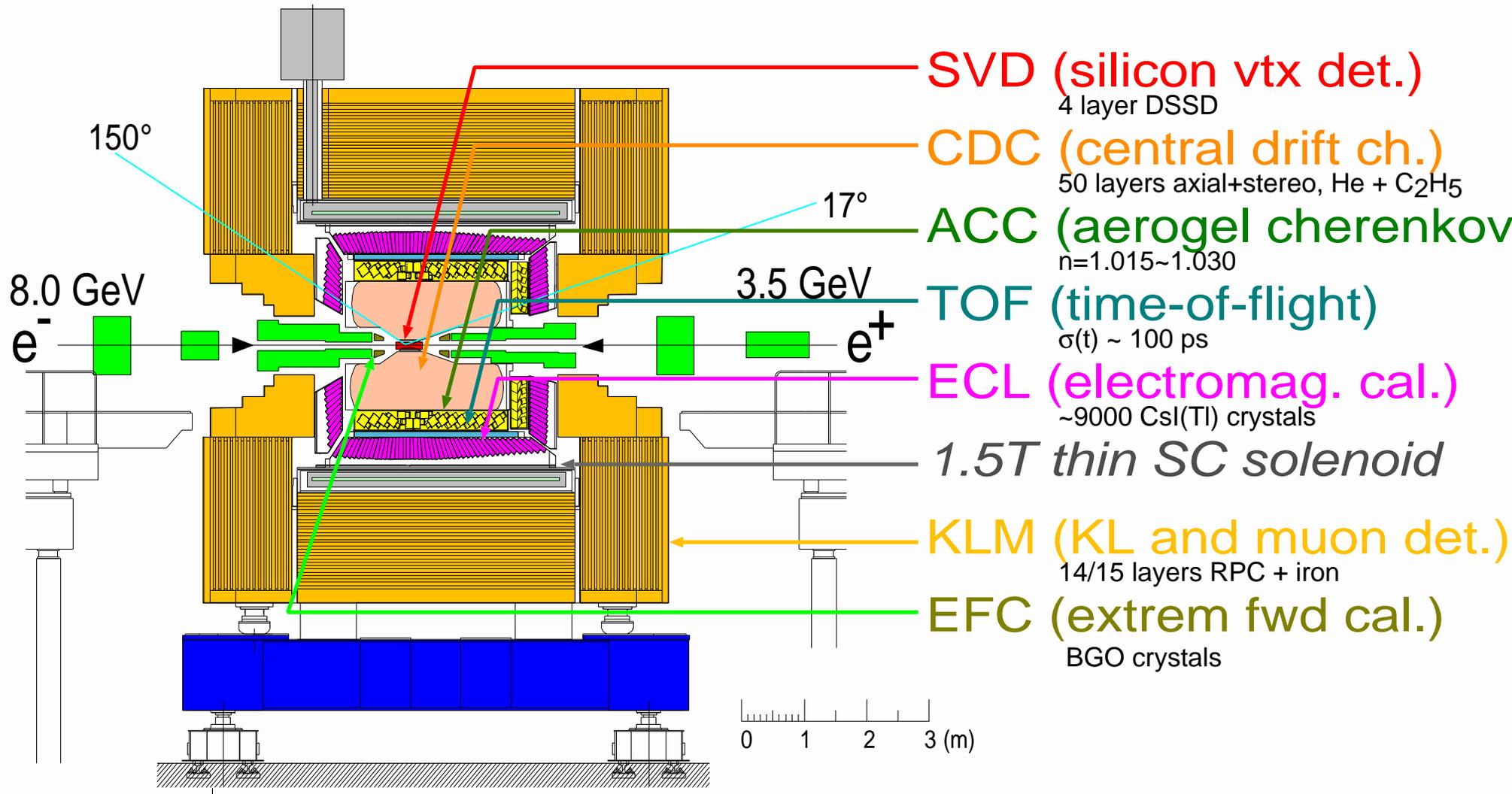
KEKB ファクトリとBの物理 — 中尾 幹彦 (KEK 素核研)



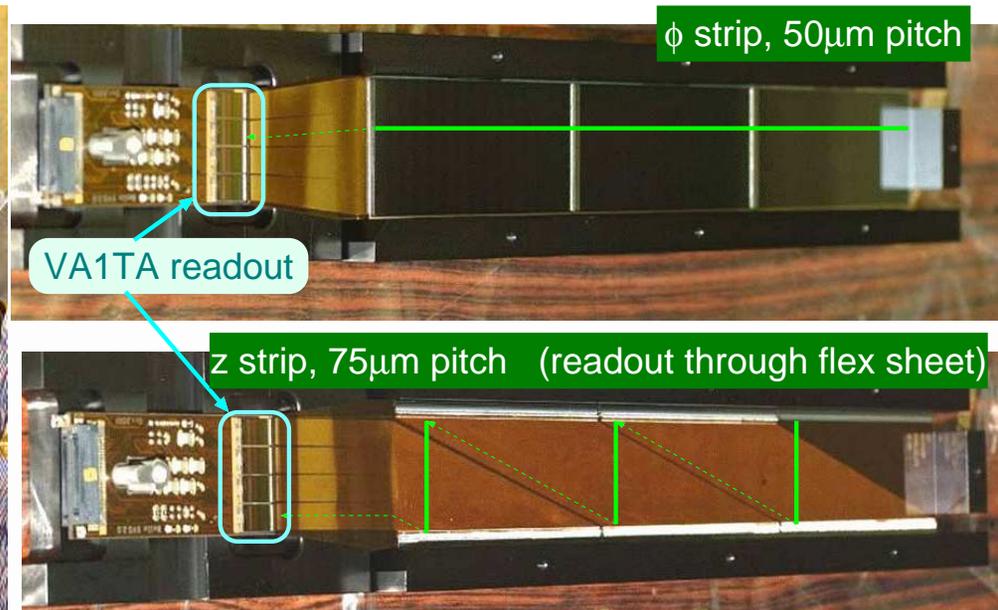
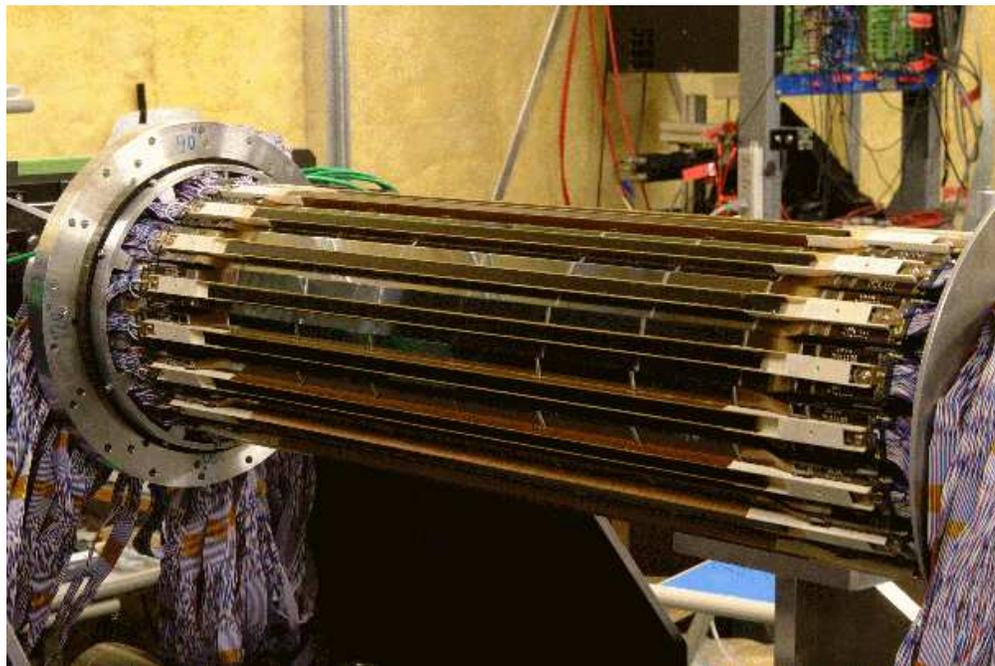
7 sub-detectors for 7 particle species ($e, \mu, \pi, K, p, \gamma, K_L^0$)

Charged particles — Precision vertex, momentum, Particle id.

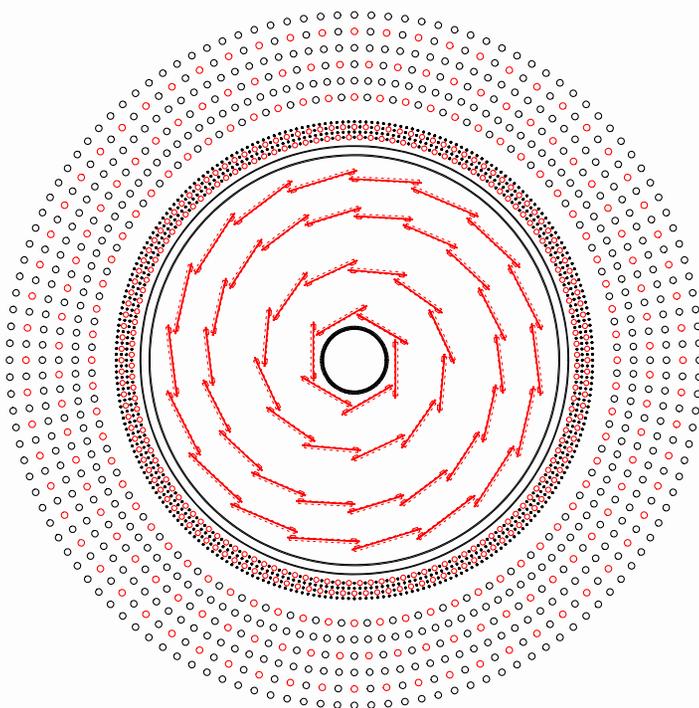
Energy and direction for γ / Direction only for K_L^0



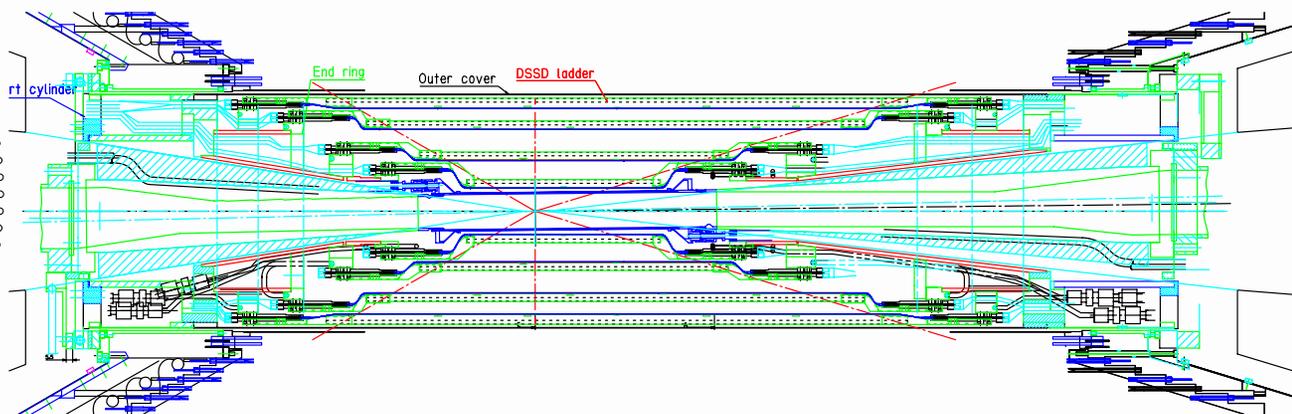
SVD2 (2003 秋から)



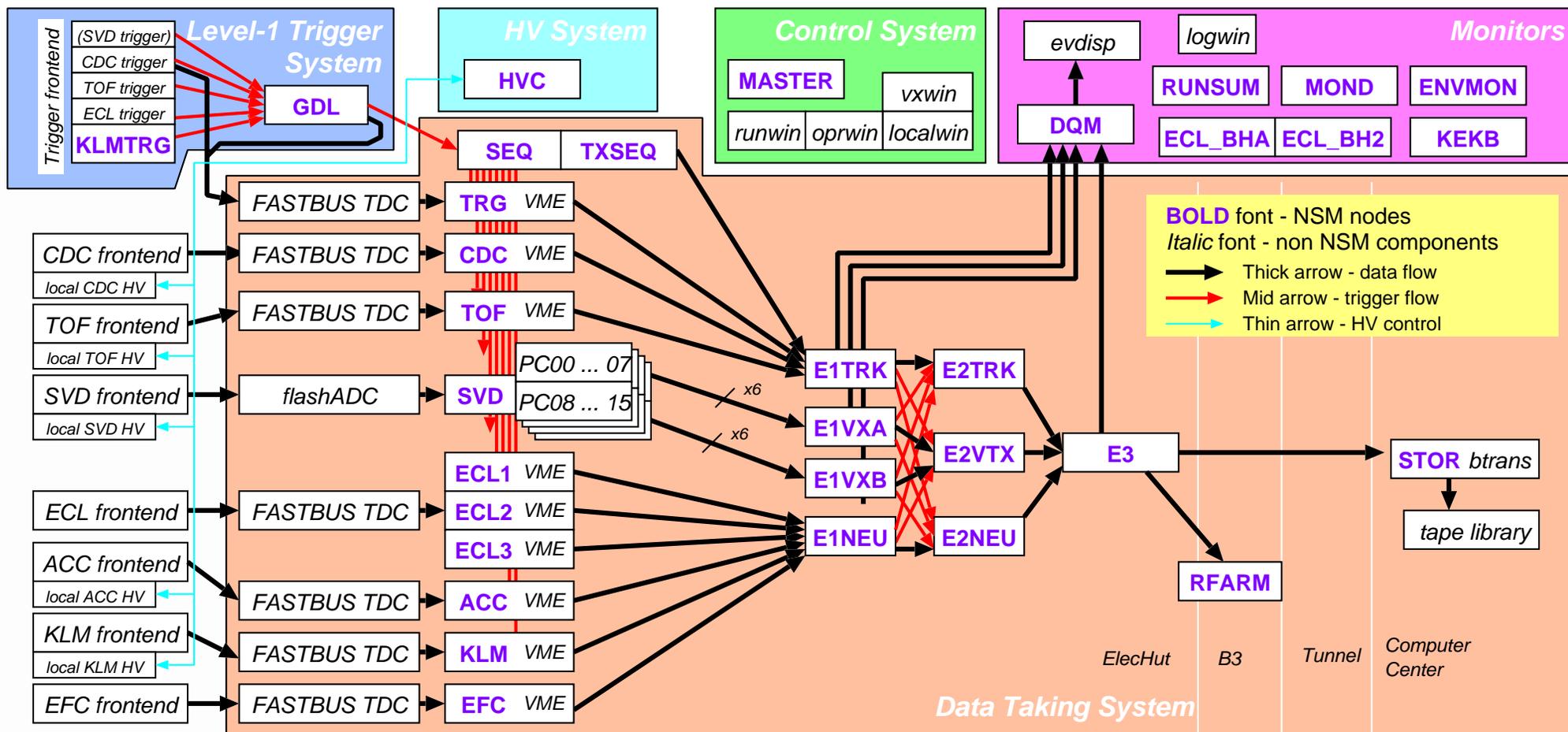
KEKB ファクトリーとBの物理 — 中尾 幹彦 (KEK 素核研)



ビームパイプ径 20mm \Rightarrow 15mm,
3層 \Rightarrow 4層, $\theta \Rightarrow$ 全CDC 立体角

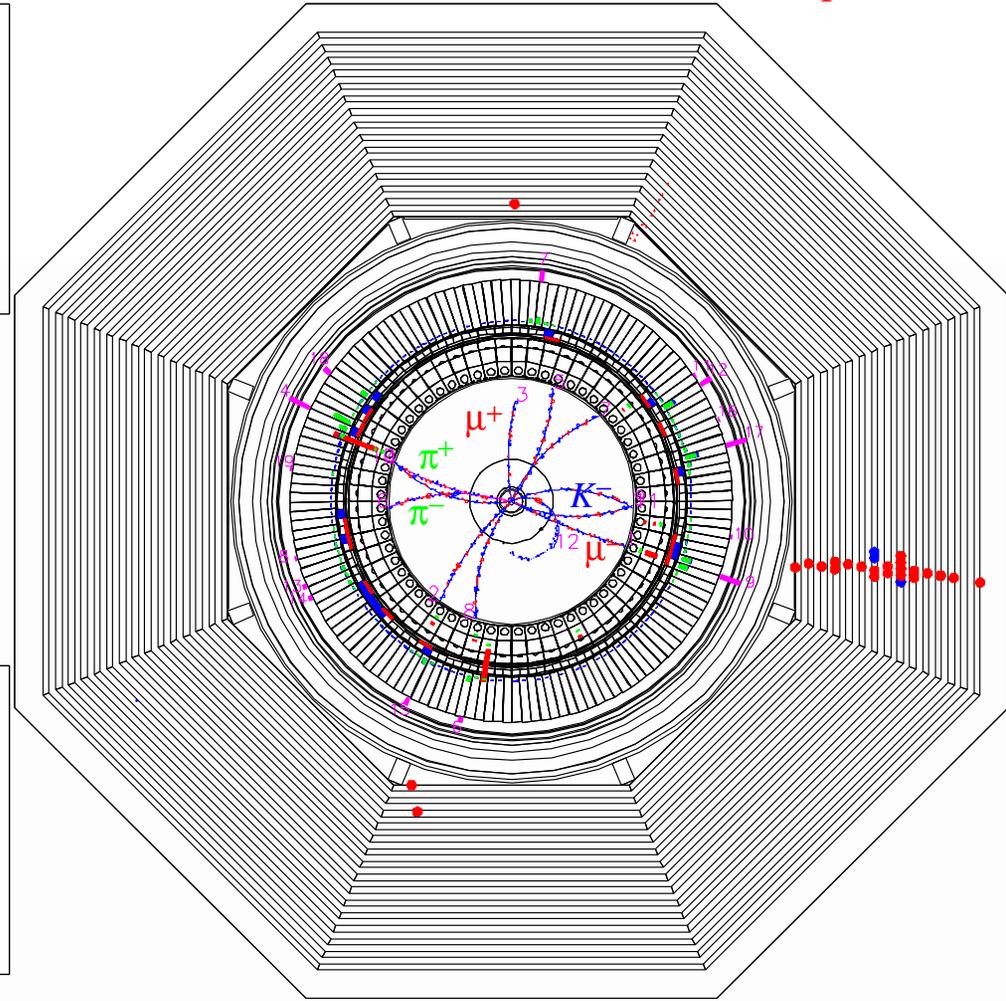
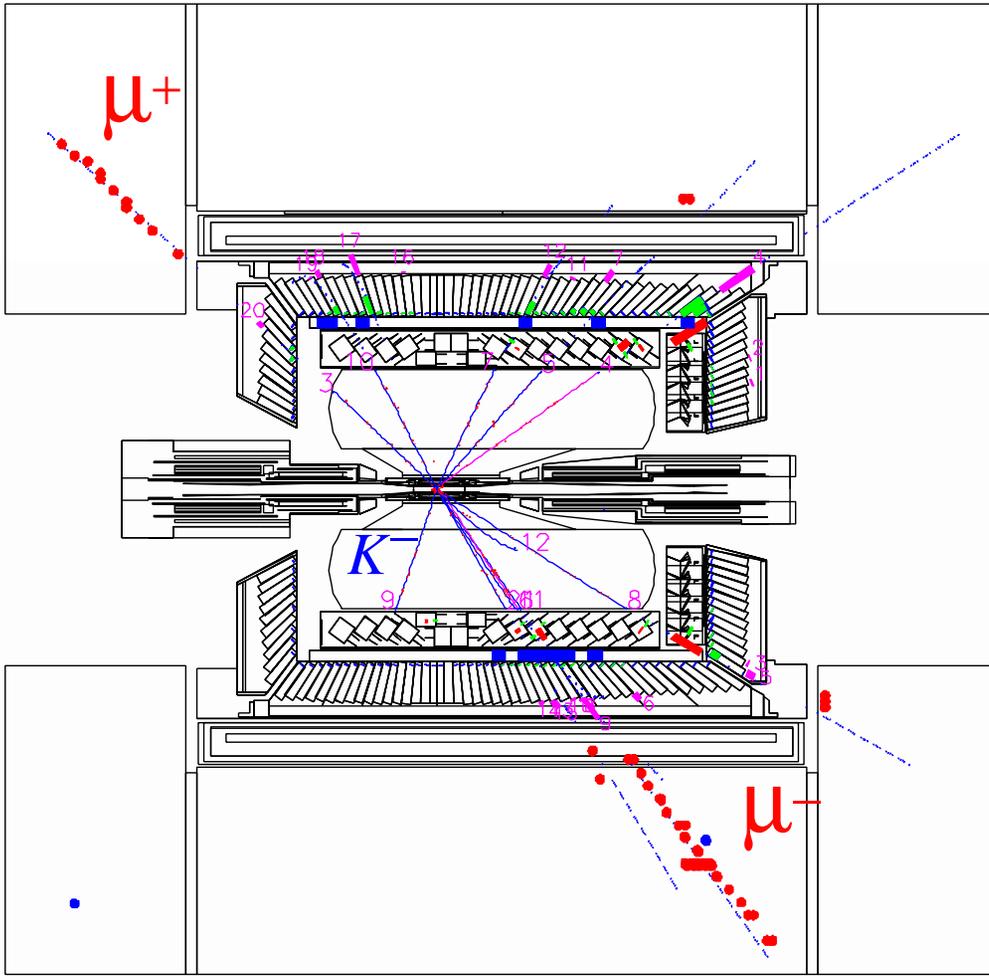


Data acquisition (少しずつ改良)



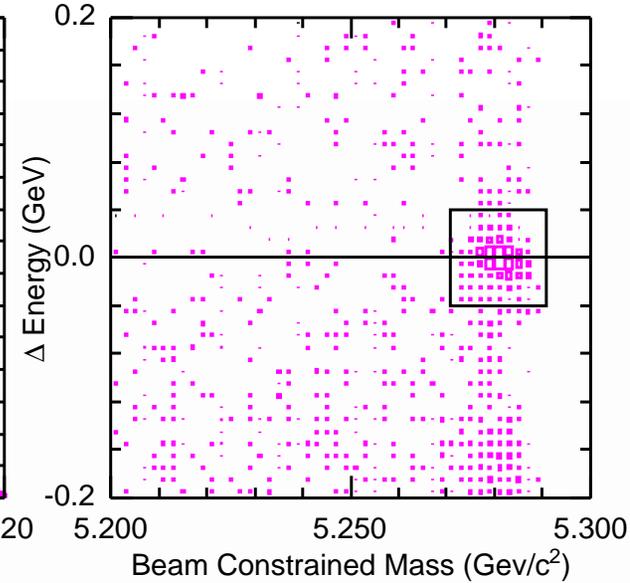
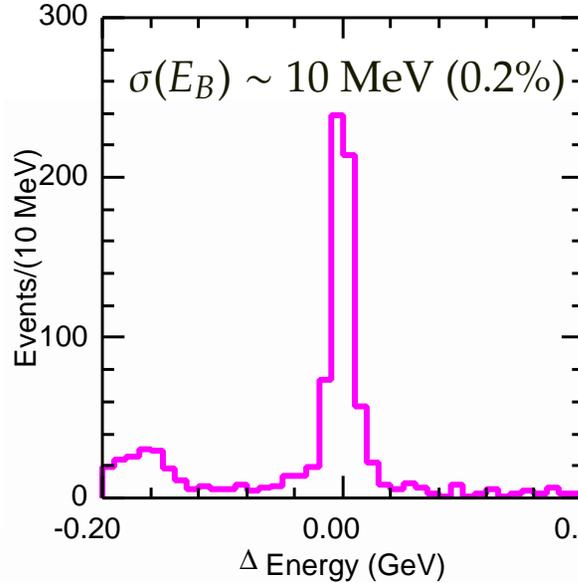
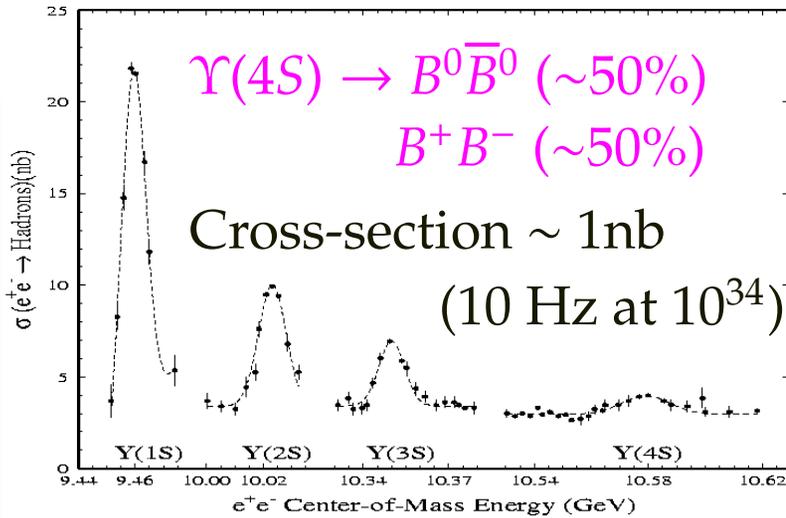
KEKB ファクトリーと B の物理 — 中尾 幹彦 (KEK 素核研)

- 共通 FASTBUS-TDC 読出 + スイッチレス・イベントビルダ
- トリガレート ~ 450 Hz (at $1.2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)
- 固有 deadtime ~ 6%
 (読出 ~ 3%, 連続入射 veto ~ 2%, テープ切替 ~ 1%, ...)
 全 deadtime < 10% — (ほぼ) > 90% の効率で運転中



$$\Upsilon(4S) \rightarrow B^0 \bar{B}^0 \left\{ \begin{array}{l} B^0 \rightarrow J/\psi K_S \left\{ \begin{array}{l} J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^- \\ K_S \rightarrow \pi^+ \pi^- \end{array} \right. \\ \bar{B}^0 \rightarrow X_c \rightarrow K^- X \end{array} \right.$$

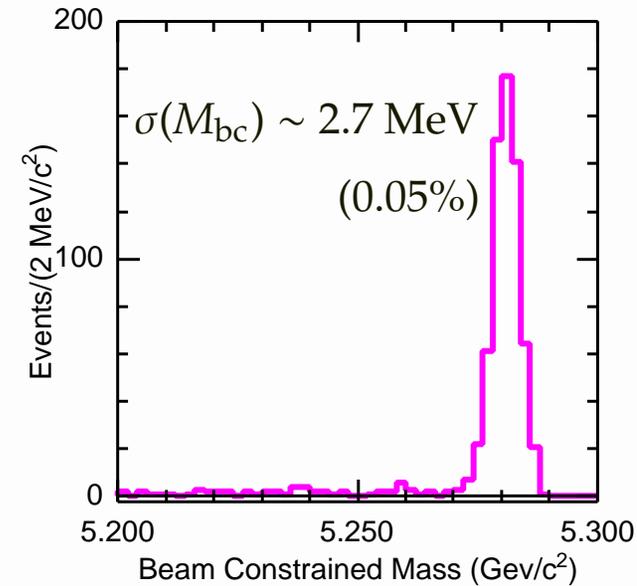
B 信号の同定



● 2つの独立な運動学変数

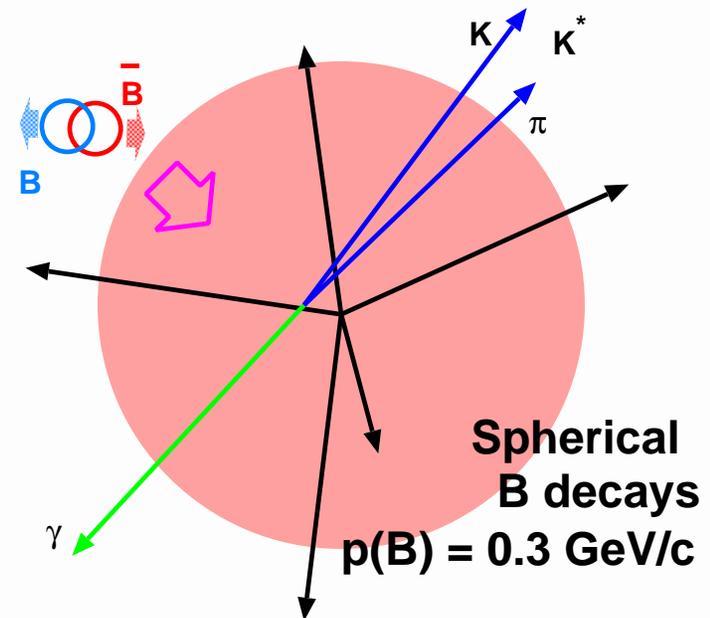
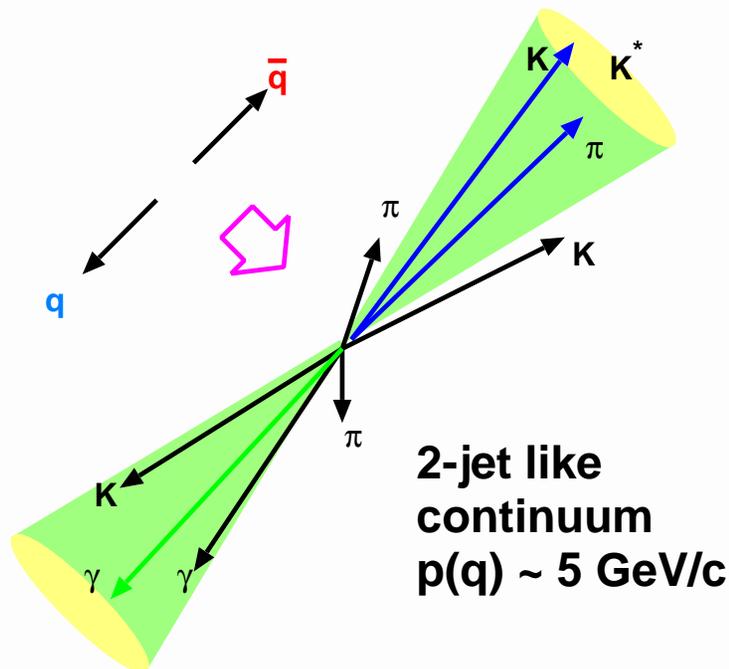
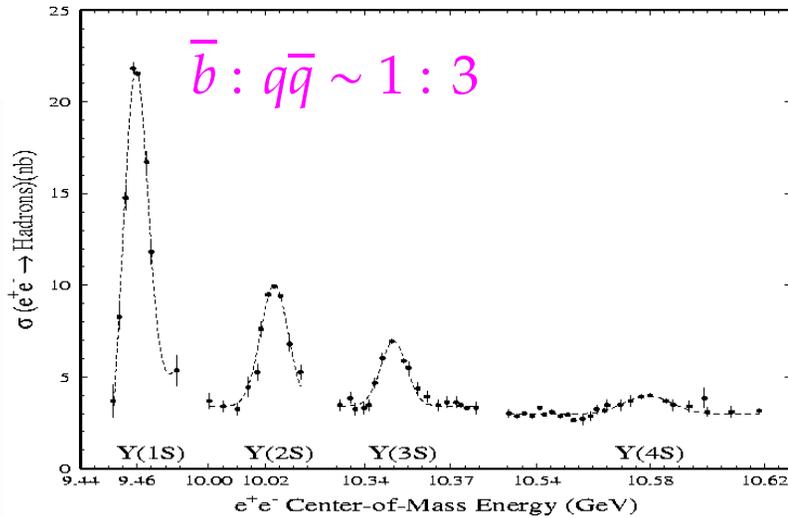
● $M_{bc} = \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - |p_B^{\text{CM}}|^2}$
(Beam-energy constrained mass)

● $\Delta E = E_B^{\text{CM}} - E_{\text{beam}}$
(Energy difference)



バックグラウンド除去

- Continuum ($q\bar{q}$) が最大のバックグラウンド
- Event shape を利用して抑制 (Fisher discriminant, Likelihood, ...)
- 必要に応じてフレーバータグ、バーテックスも組合せる



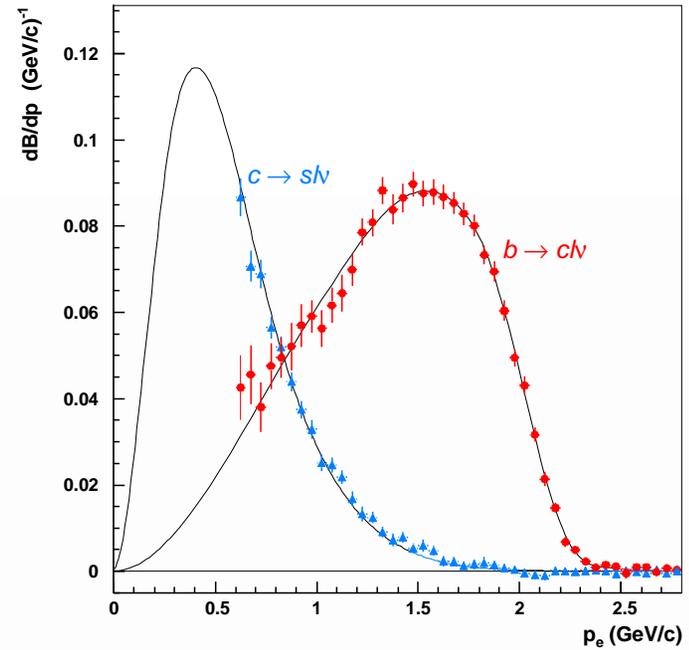
フレーバータグ (Hamlet)

— To B or not to B , that is the question. —

- レプトンタグ
 - High- p ℓ^+
 - Medium- p ℓ^-
- ハドロンタグ
 - K^-
 - $\Lambda^0 \rightarrow p\pi^-$
 - High- p π^+
 - Low- p π^-

B^0 らしい
符号

個々のフレーバー識別能力は千差万別
Lookup table で一変数 " r " ($0 < r < 1$)
に押し込めて $q = +1$ とする
(逆符号なら \bar{B}^0 らしい、 $q = -1$)



$$\bar{b} \rightarrow \bar{c}\ell^+\nu$$

$$\swarrow \bar{s}\ell^-\bar{\nu}$$

$$\swarrow K^-, \Lambda^0$$

$$\swarrow p\pi^-$$

$$B^0 \rightarrow D^{*-}\pi^+$$

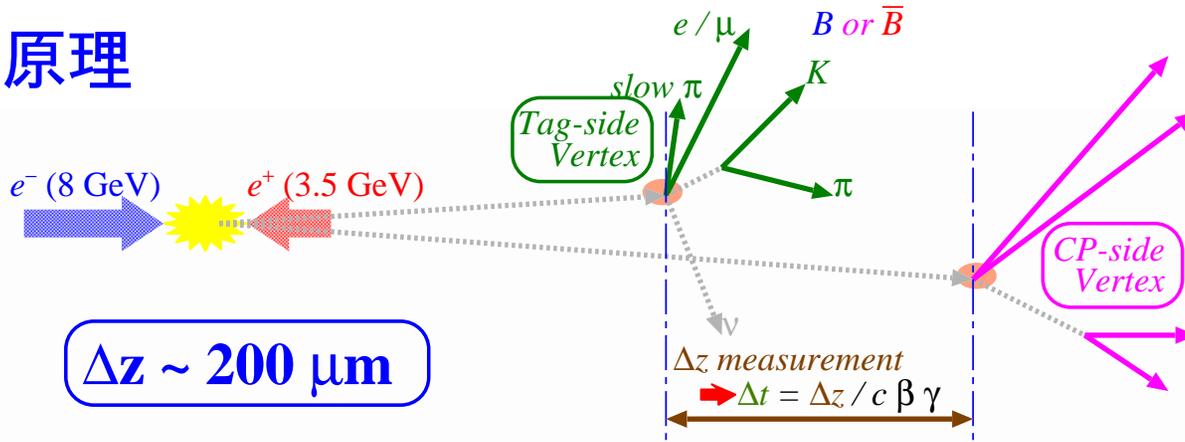
$$\swarrow \rho^+$$

$$\swarrow \pi^+\pi^0$$

$$\swarrow \bar{D}^0\pi^-_{\text{slow}}$$

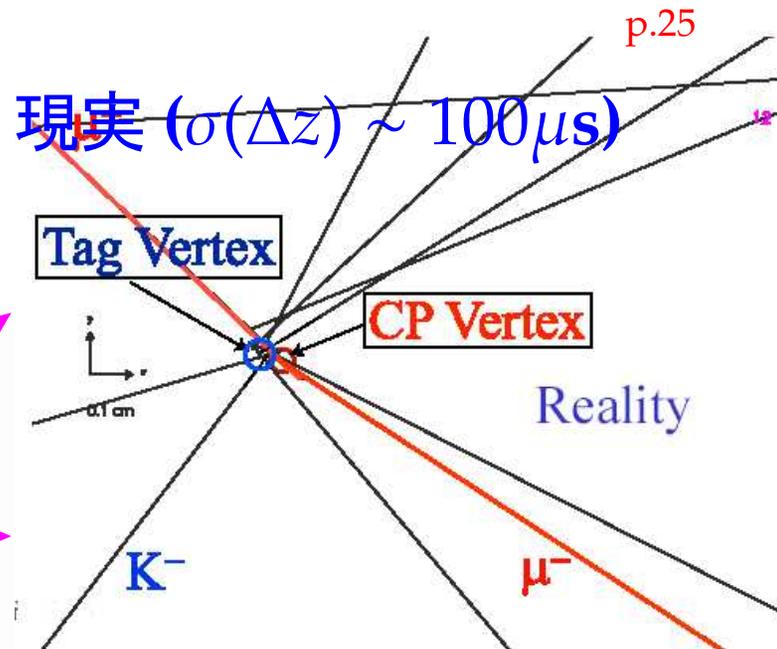
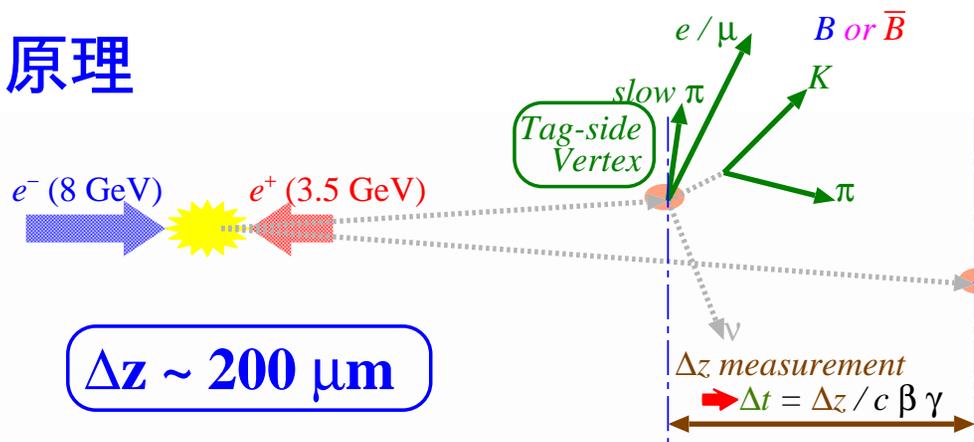
バーテックス測定

原理



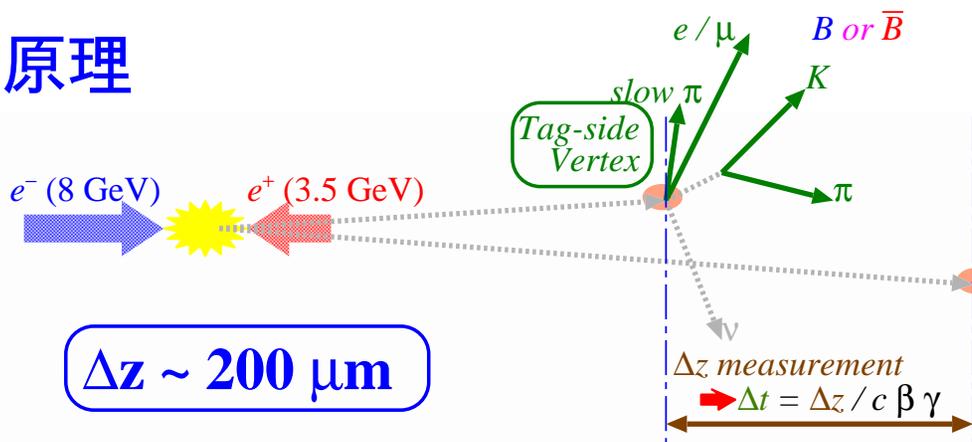
バーテックス測定

原理

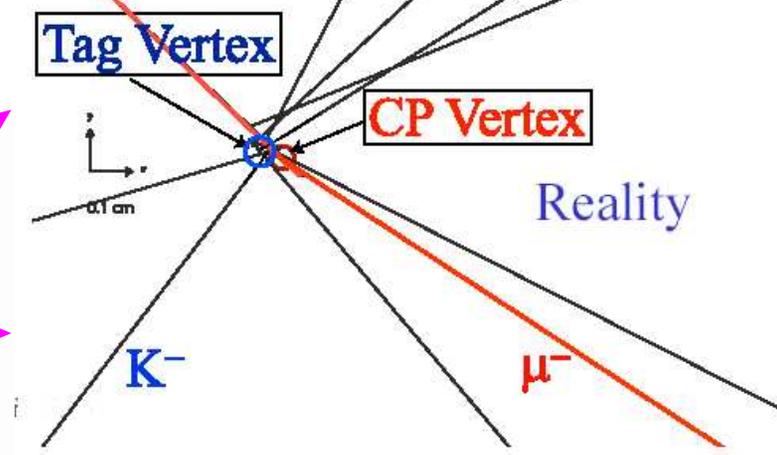


バーテックス測定

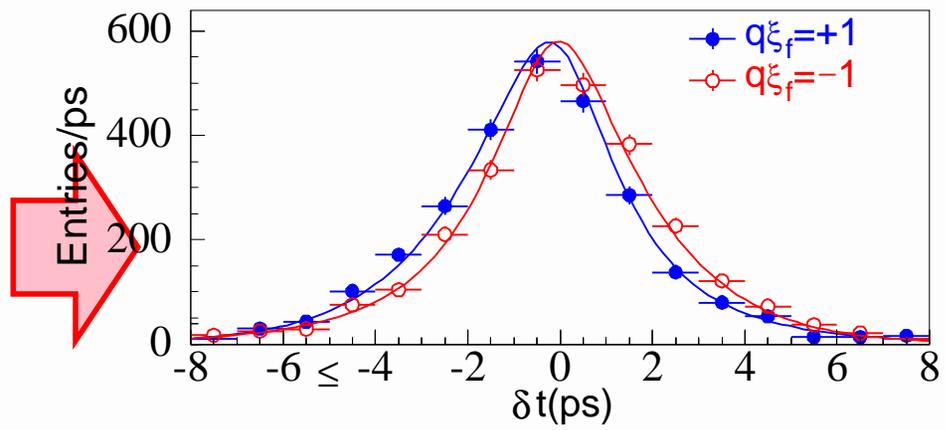
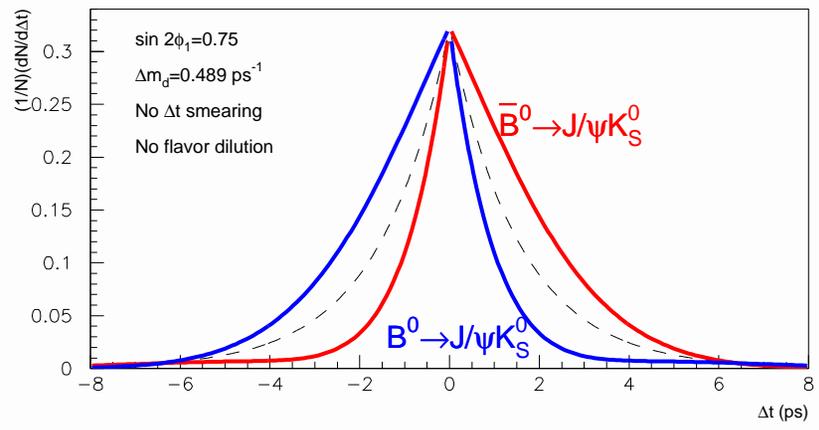
原理



現実 ($\sigma(\Delta z) \sim 100 \mu\text{s}$)



KEKB ファクトリーと B の物理 — 中尾 幹彦 (KEK 素核研)

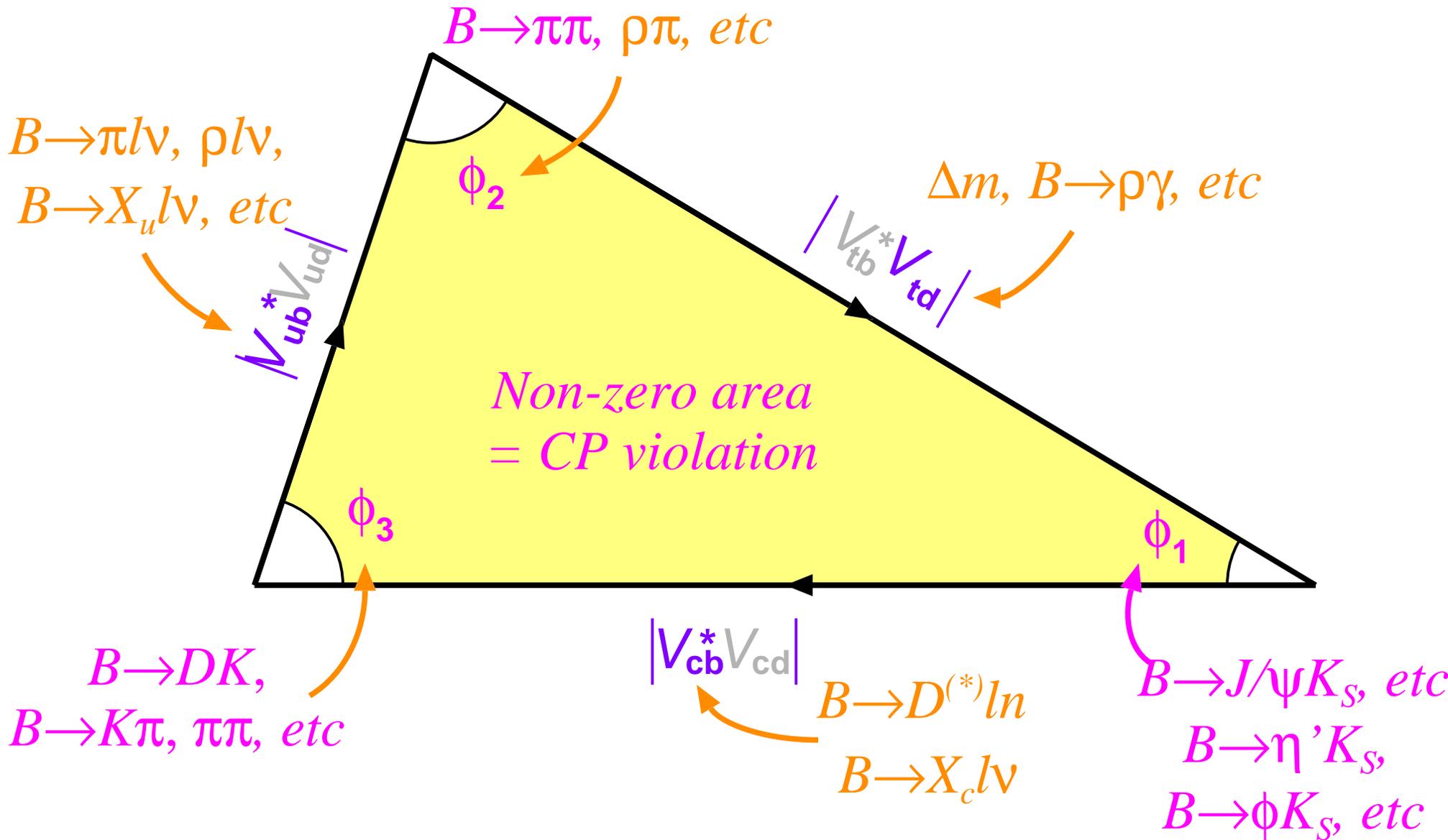


CP の破れの観測には十分

— 目次 —

- Introduction — B physics の動機と役割
- Belle — 検出器と CP の測定
- ユニタリティ三角形を決める
- ペンギン崩壊と新物理の探索
- B physics の将来 — SuperB は superb?

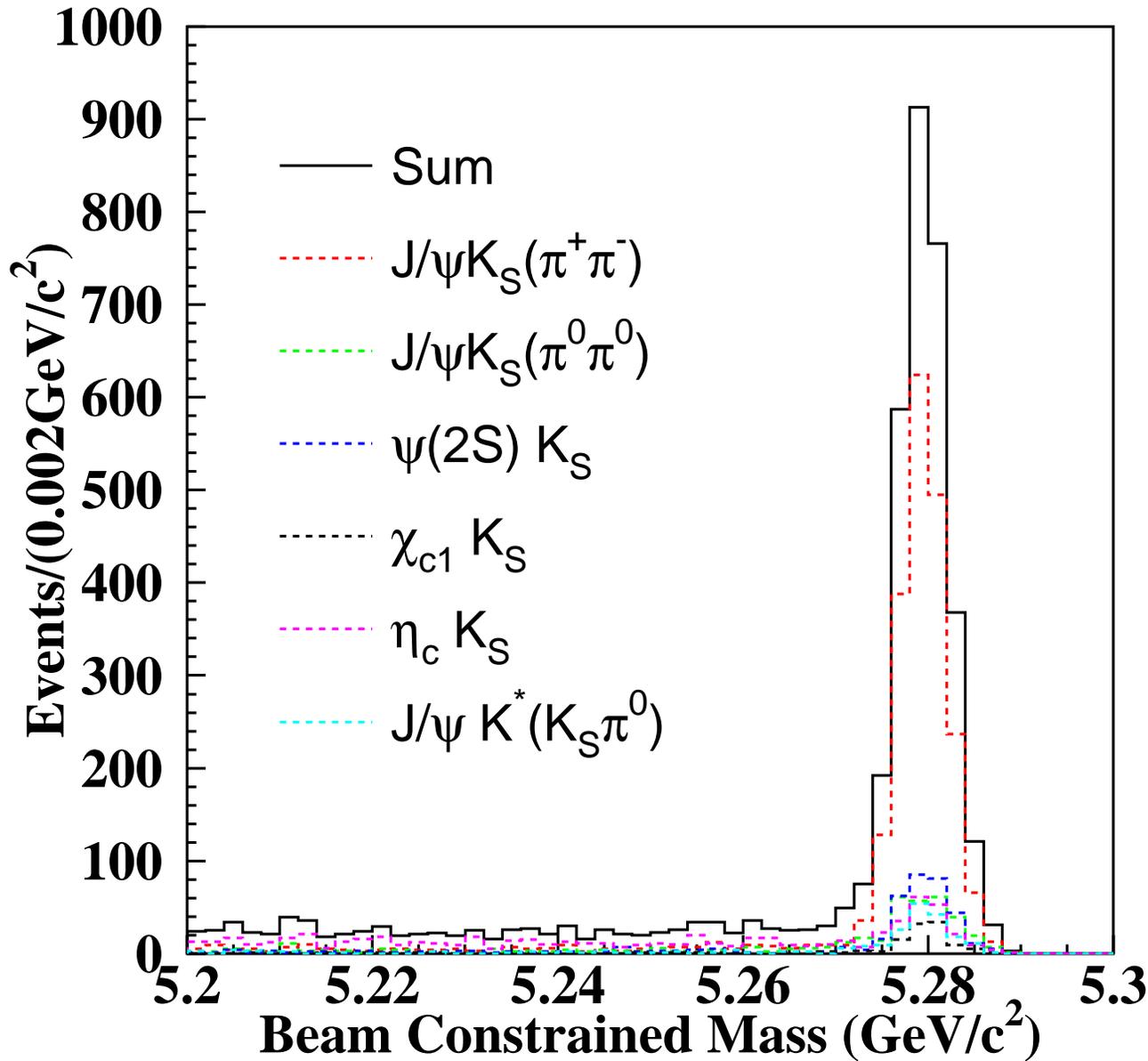
ユニタリティー三角形



CP 固有状態 ($b \rightarrow c\bar{c}s$ 事象、 K_L^0 を含まない^{p.28})

$b \rightarrow c\bar{c}s$ 崩壊の
事象を集める

(CP = -1)



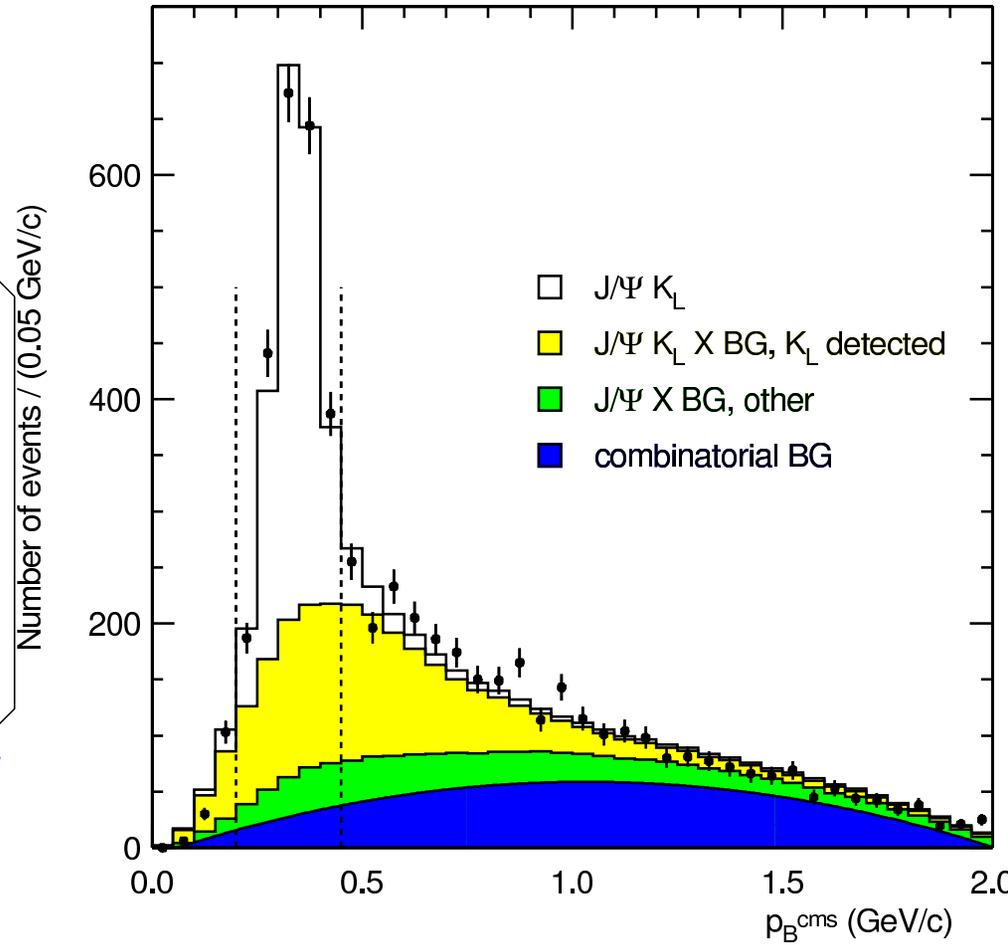
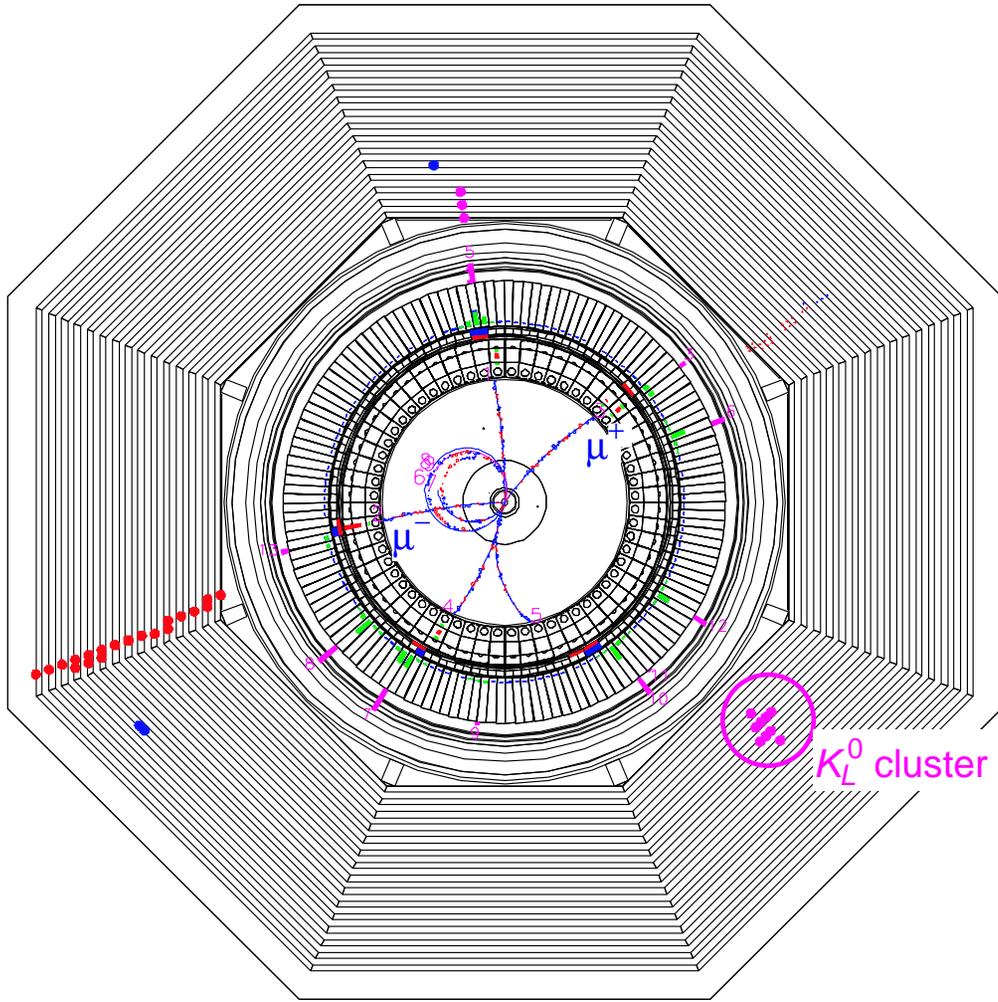
$J/\psi K_S^0$	1997
$J/\psi K_S^0(\pi^0\pi^0)$	288
$\psi(2S)(\ell^+\ell^-)K_S^0$	145
$\psi(2S)(J/\psi\pi^+\pi^-)K_S^0$	163
$\chi_{c1}(J/\psi\gamma)K_S^0$	101
$\eta_c(K_S^0 K^- \pi^+)K_S^0$	123
$\eta_c(K^+ K^- \pi^0)K_S^0$	74
$\eta_c(p\bar{p})K_S^0$	20

total 2911

(CP = -1)

$J/\psi K^{*0}(K_S^0\pi^0)$	174
-----------------------------	-----

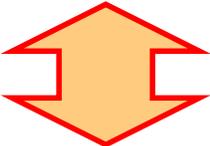
CP 固有状態 ($b \rightarrow c\bar{c}s$ 事象、 K_L^0 を含むもの) p.29



K_L^0 は方向しかわからないため、constraint は 1 つだけ

$B^0 \rightarrow J/\psi K_L^0$ only, 2332 event, purity 60%

CP 固有状態でないもの

Mode	N(event)	Purity
$D^{*-}\ell^+\nu$	84933	0.781
$D^{*-}\pi^+$	12528	0.873
$D^-\pi^+$	11560	0.903
$D^{*-}\rho^+$	9419	0.907
$J/\psi K^{*0}(K^+\pi^-)$	3681	0.954
		
$J/\psi K_S^0(\pi^+\pi^-)$	1997	0.976
B^0 total	124118	0.817
$D^0\pi^+$	48535	0.782
$J/\psi K^+$	8770	0.966
B^+ total	57305	0.810
$B^0 + B^+$ total	181423	0.815

● CP 固有状態でない崩壊は CP の 50 倍もある!

● これらは、

- フレーバータグ効率
- バーテックス分解能
- バックグラウンド除去効率
- Blind Analysis
- Cross Check

のための貴重なサンプル!

フレーバータグ実効効率

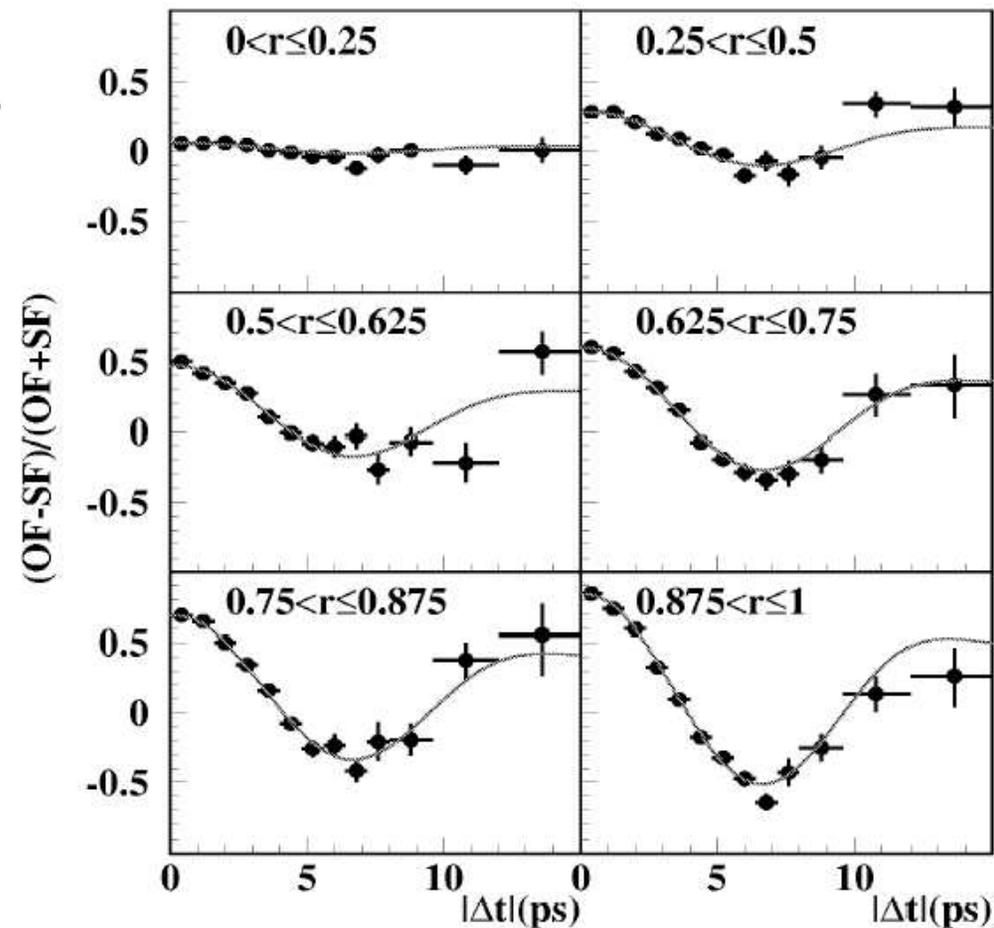
フレーバータグアルゴリズム (Hamlet) は必ず B か \bar{B} かを判断する
(ただし、必ずしも答えが正しいとは限らない \Rightarrow 確かさ r を返す)

フレーバータグを間違える割合、
 $1 - 2w$ はコントロールサンプルの
mixing の振幅で決める

$$\frac{N_{\text{OF}} - N_{\text{SF}}}{N_{\text{OF}} + N_{\text{SF}}} = \frac{1}{1 - 2w} \cos(\Delta m_d \Delta t)$$

完璧なフレーバータグなら
振幅 1 の振動

(r は MC での $1 - 2w$ で 6 つの r に分類)

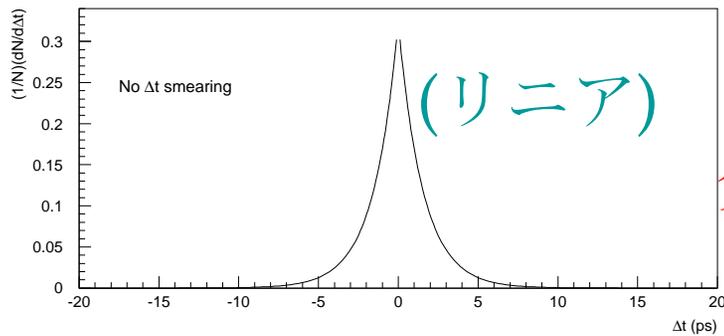


フレーバータグ実効効率は $\epsilon_{\text{effective}} = 28.7 \pm 0.5\%$

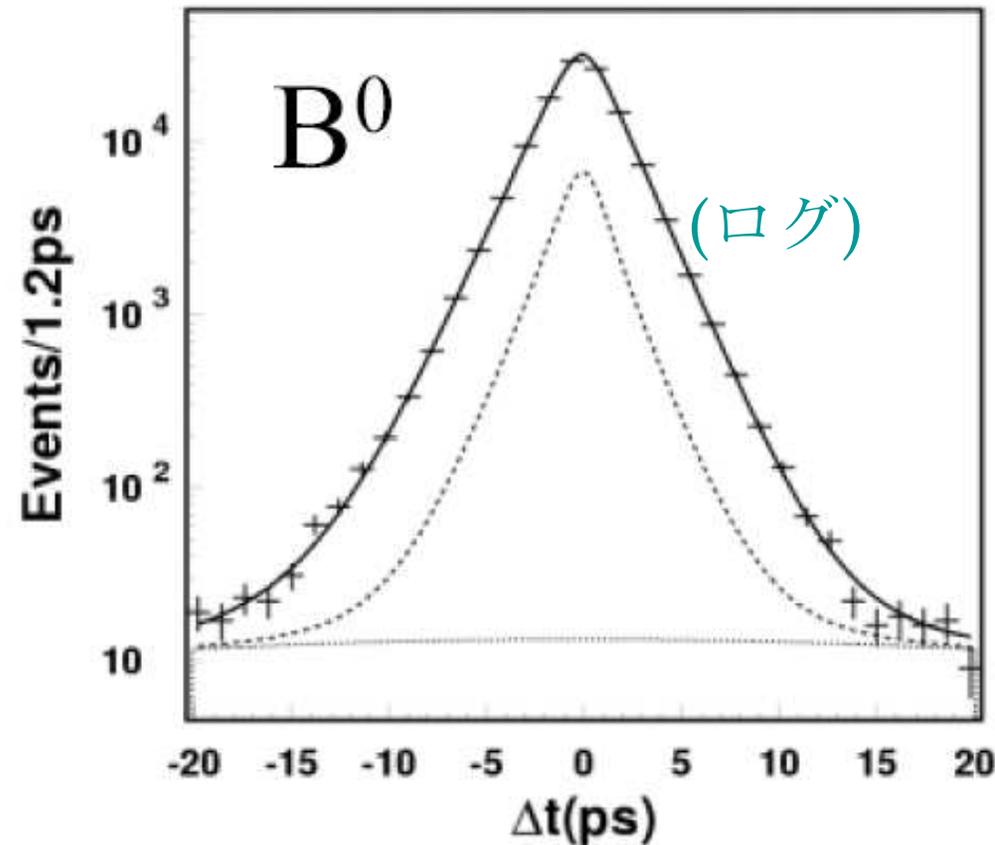
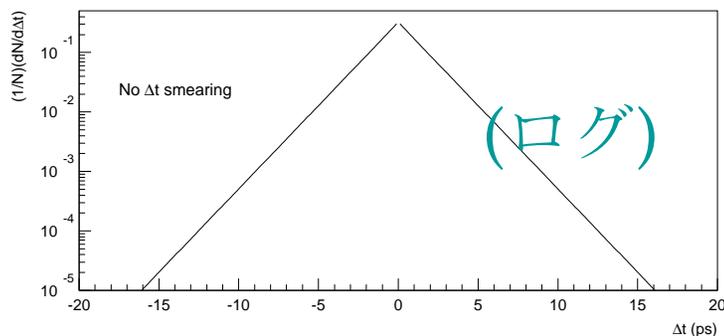
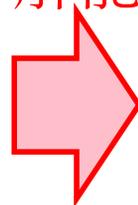
(効率が低いことと、精度良く分かってることが重要)

バーテックス分解能

mixing がなければ



分解能

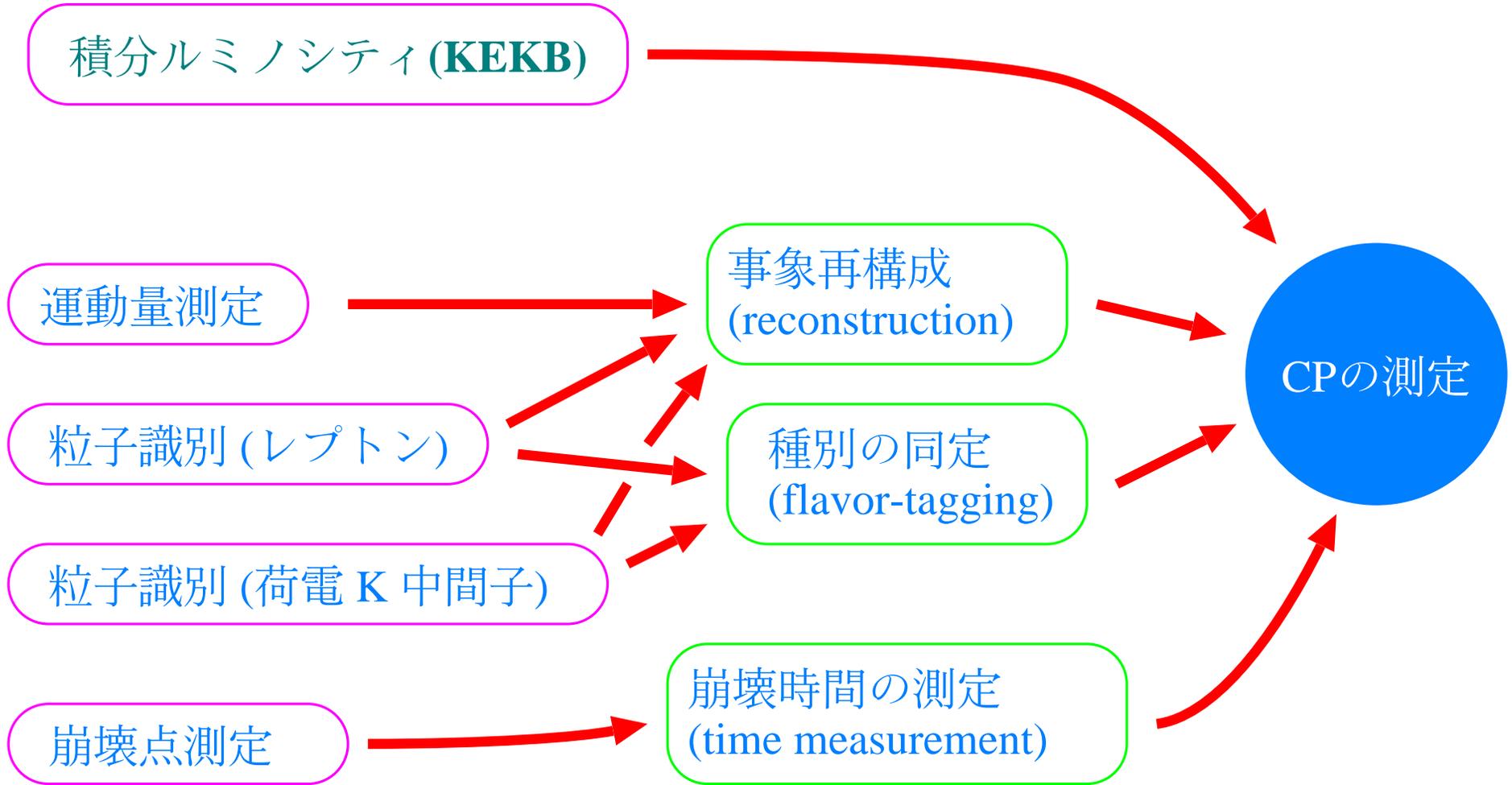


コントロールサンプルの崩壊時間分布を正確に測る

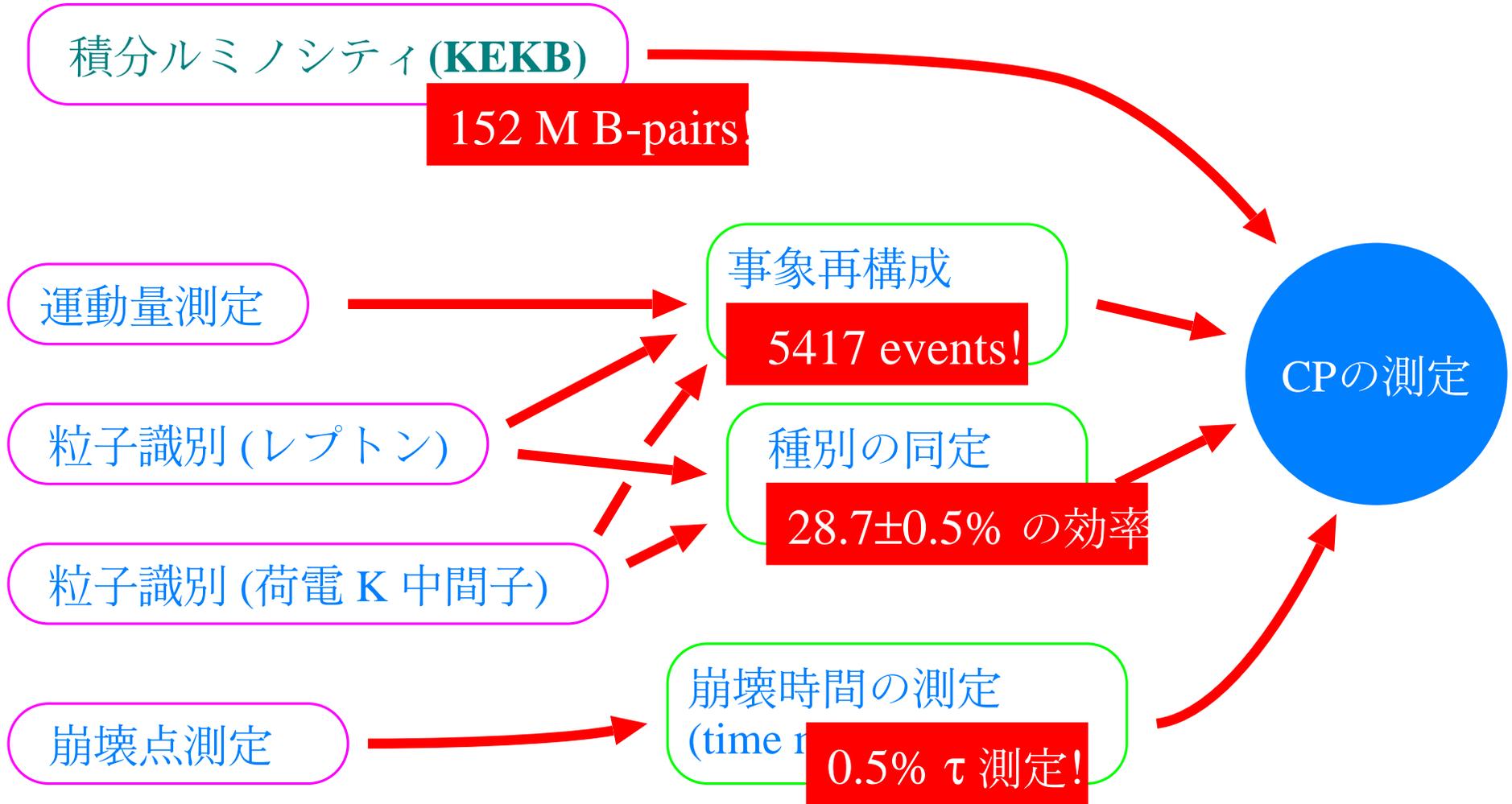
$$\tau_{B^0} = 1.533 \pm 0.008(\text{stat}) \text{ ps} \Leftrightarrow (\text{PDG2003: } 1.537 \pm 0.015 \text{ ps})$$

$$\tau_{B^+} = 1.634 \pm 0.011(\text{stat}) \text{ ps} \Leftrightarrow (\text{PDG2003: } 1.671 \pm 0.018 \text{ ps})$$

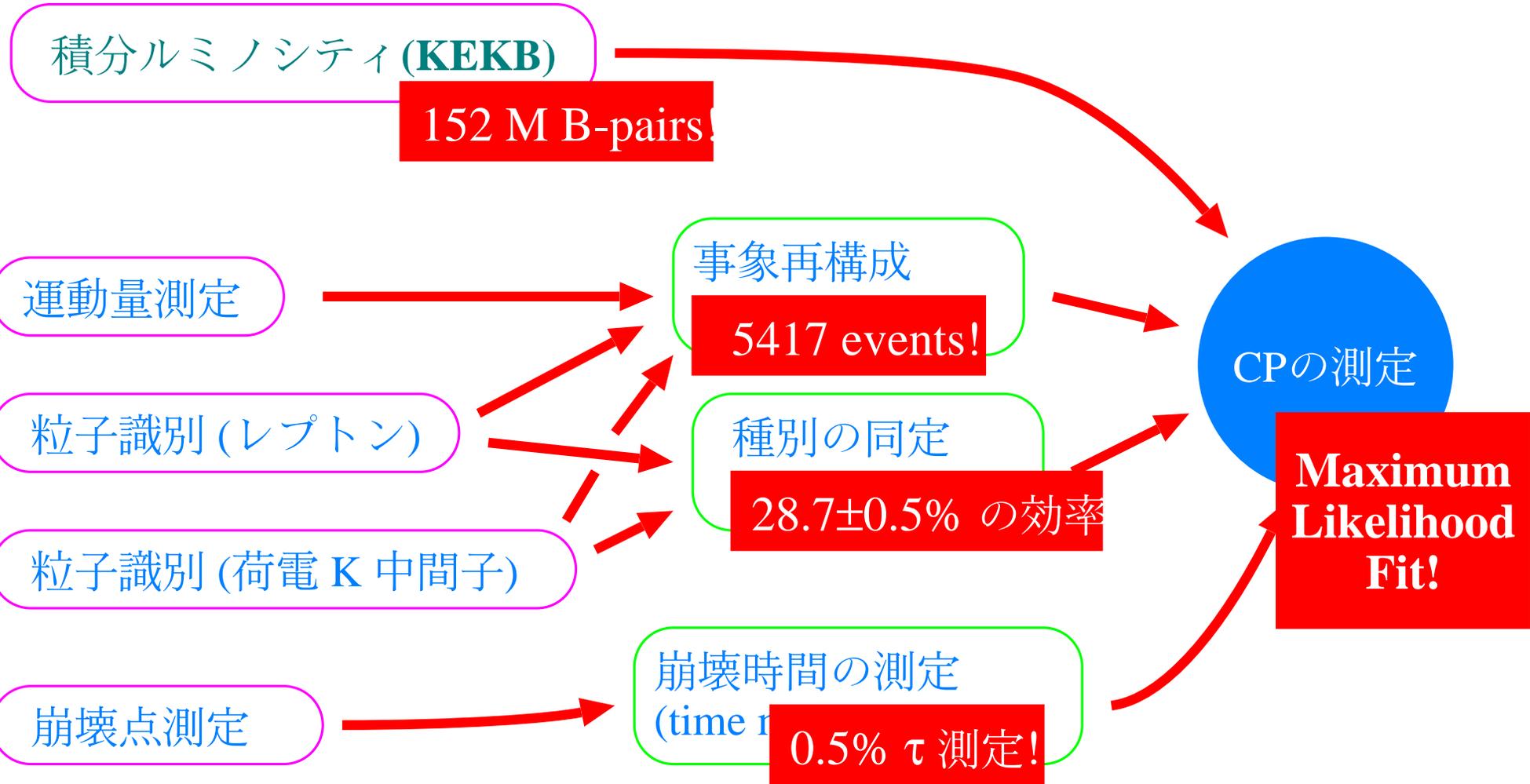
解析の流れのまとめ



解析の流れのまとめ



解析の流れのまとめ

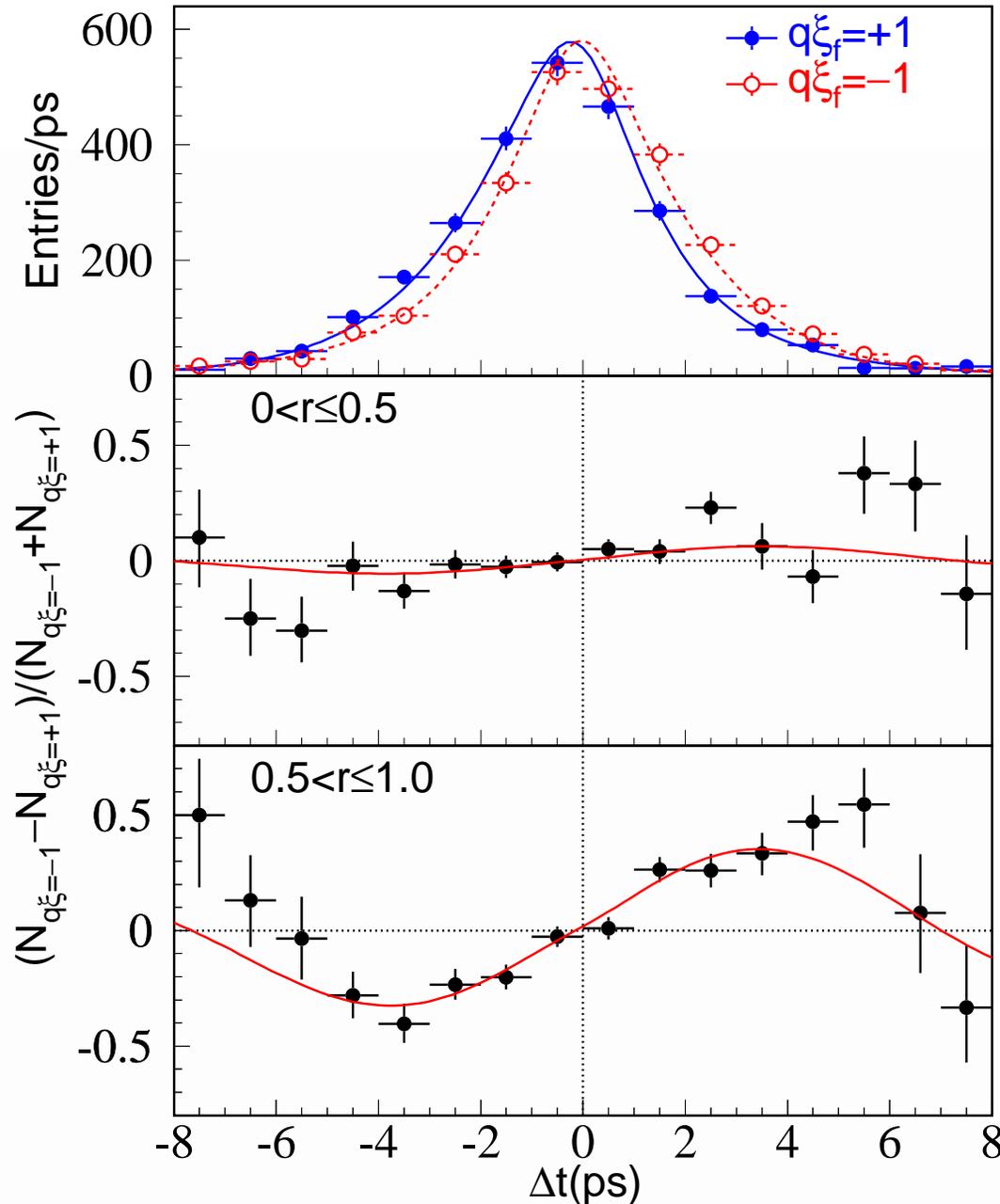


$$\sin 2\phi_1 = 0.733 \pm 0.057(\text{stat}) \pm 0.028(\text{syst})$$

2003 年夏
140 fb⁻¹

Poor tag ⇒

Good tag ⇒

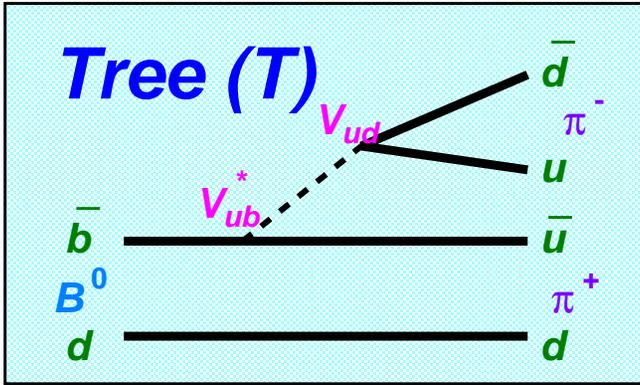


9% の
精度!

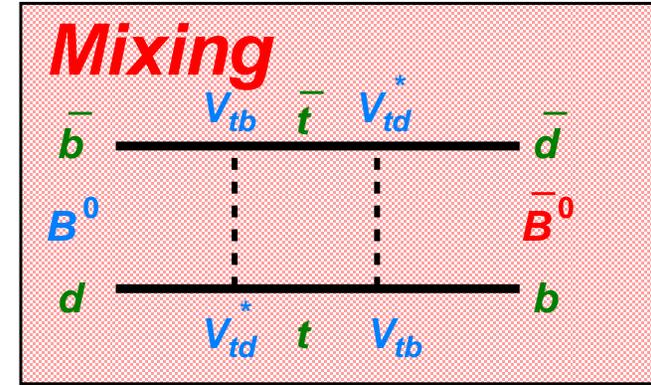
世界平均は
 0.736 ± 0.047

7% の精度

$B \rightarrow \pi^+ \pi^-$ — ϕ_2 の測定

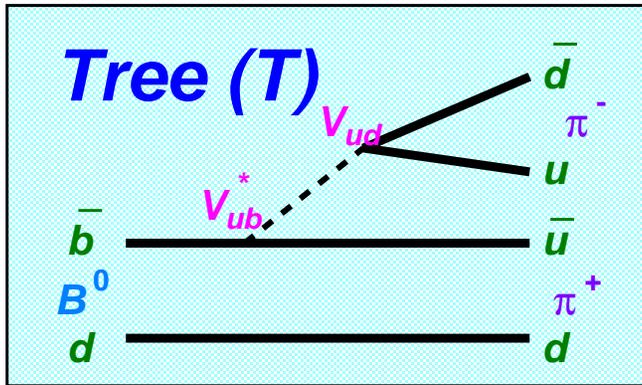


$$\lambda_{\pi\pi} = \frac{V_{ub}^* V_{ud}}{V_{ub} V_{ud}^*} \frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{tb} V_{td}^*}$$

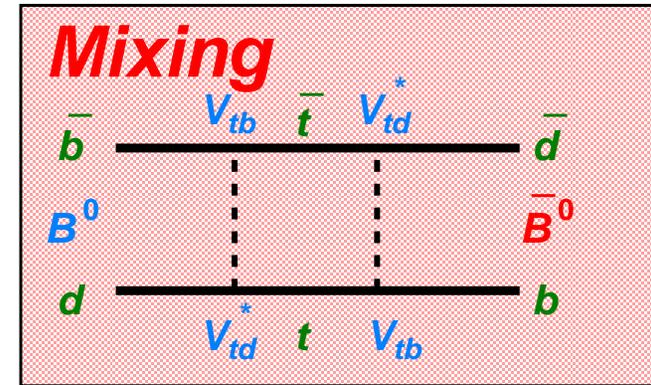


Tree と Mixing だけなら $\lambda_{\pi\pi} = e^{2i\phi_2}$

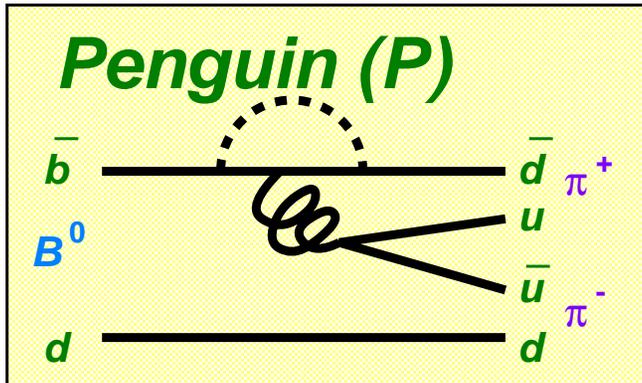
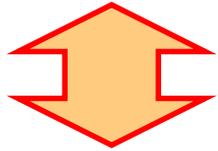
$B \rightarrow \pi^+ \pi^-$ — ϕ_2 の測定



$$\lambda_{\pi\pi} = \frac{V_{ub}^* V_{ud}}{V_{ub} V_{ud}^*} \frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{tb} V_{td}^*}$$



Tree と Mixing だけなら $\lambda_{\pi\pi} = e^{2i\phi_2}$

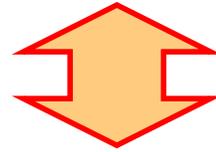


$$\lambda_{\pi\pi} = \left(\frac{V_{ub}^* V_{ud}}{V_{ub} V_{ud}^*} + \text{Penguin} \right) \frac{V_{tb}^* V_{td}}{V_{tb} V_{td}^*}$$

- $\lambda_{\pi\pi} = e^{2i\phi_2} \frac{1+|P/T|e^{i\delta}e^{i\phi_3}}{1+|P/T|e^{i\delta}e^{-i\phi_3}}$
- P と T との干渉 \Rightarrow direct CP violation
- $\phi_2 \Rightarrow \phi_{2\text{effective}}$

Direct CPV と 時間依存 CPV

$$\Gamma(\bar{B}^0) = \frac{e^{-\frac{|\Delta t|}{\tau_{B^0}}}}{4\tau_{B^0}} [1 + S \sin(\Delta m \Delta t) + A \cos(\Delta m \Delta t)]$$

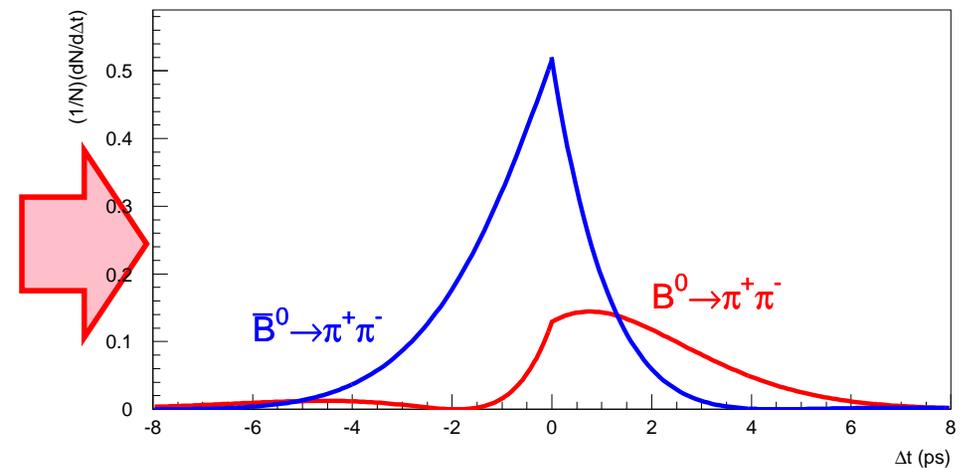
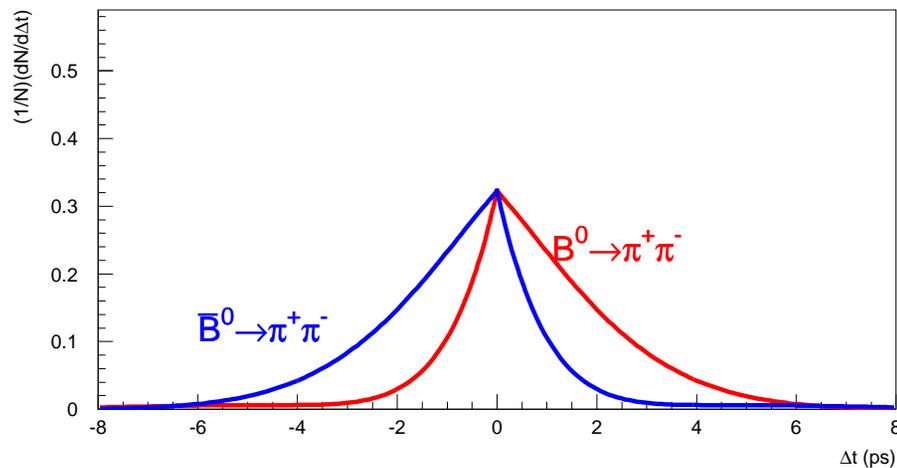


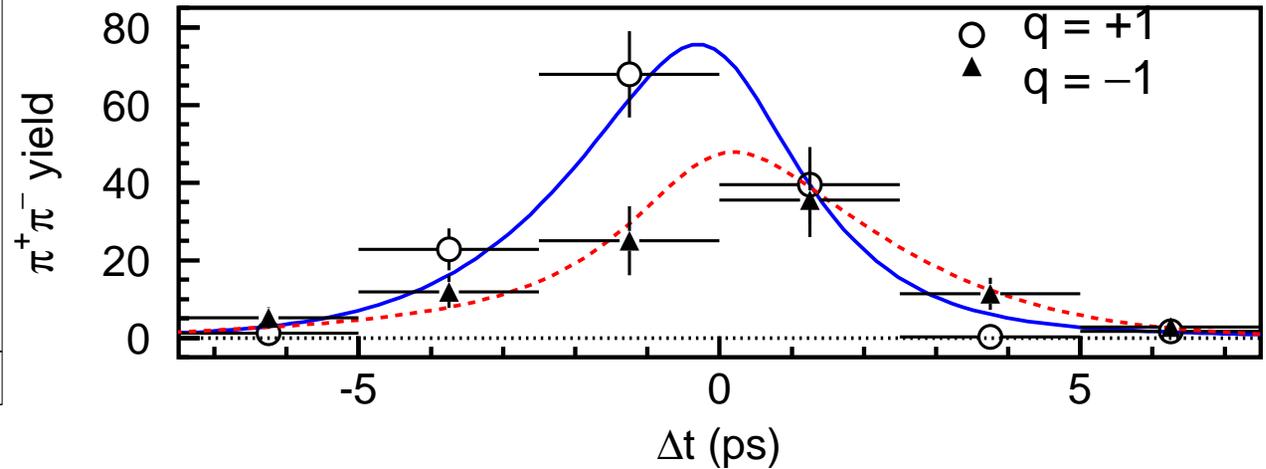
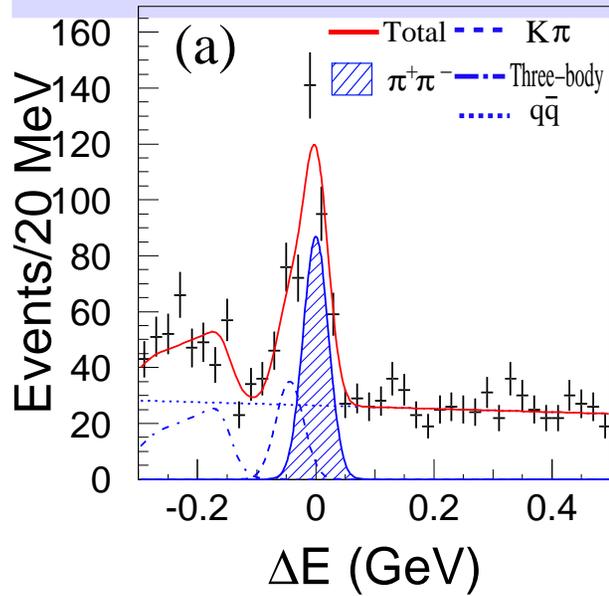
$$\Gamma(B^0) = \frac{e^{-\frac{|\Delta t|}{\tau_{B^0}}}}{4\tau_{B^0}} [1 - S \sin(\Delta m \Delta t) - A \cos(\Delta m \Delta t)]$$

Direct CPV (A) は時間積分しても消えない

$$S = 0.8, A = 0$$

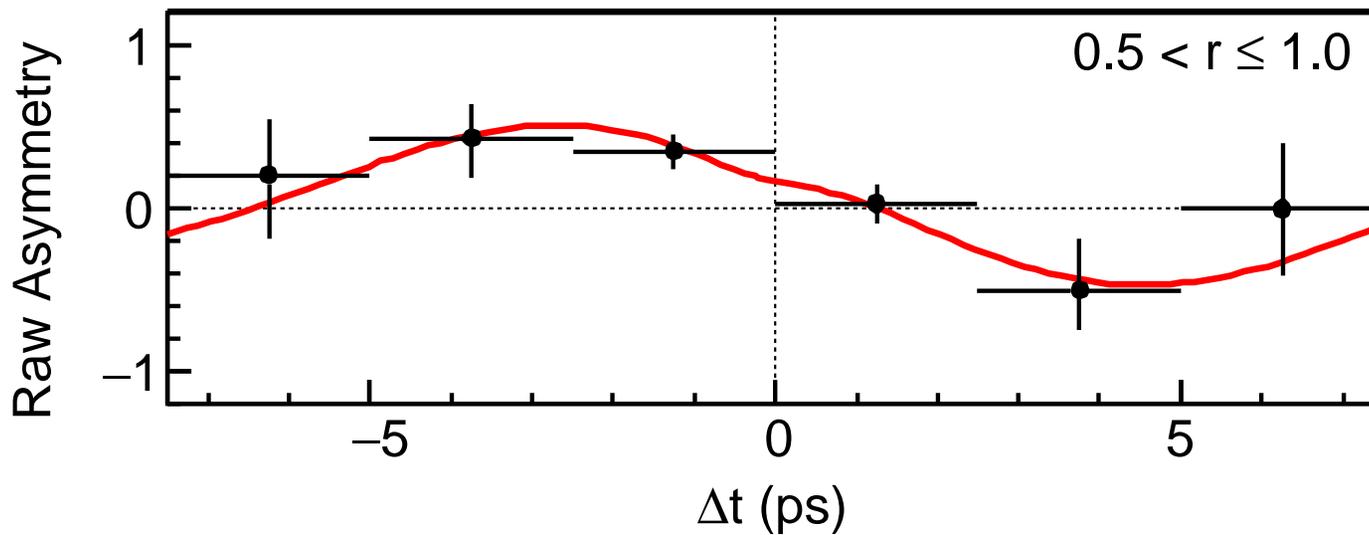
$$S = 0.8, A = 0.6$$





$$A_{\pi\pi} = +0.58 \pm 0.15(\text{stat}) \pm 0.07(\text{syst}) \quad (3.2\sigma)$$

$$S_{\pi\pi} = -1.00 \pm 0.21(\text{stat}) \pm 0.07(\text{syst}) \quad (5.2\sigma)$$

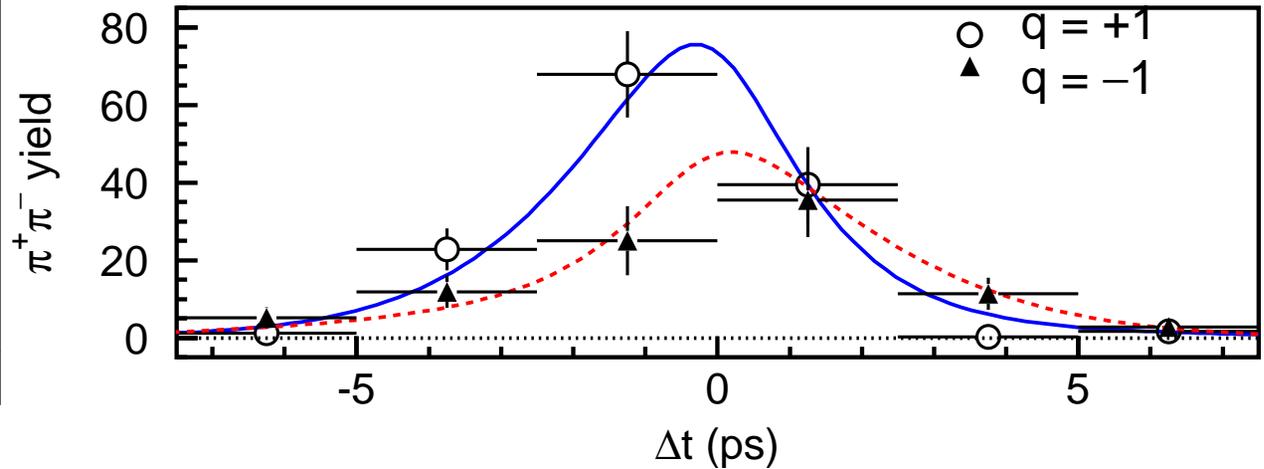
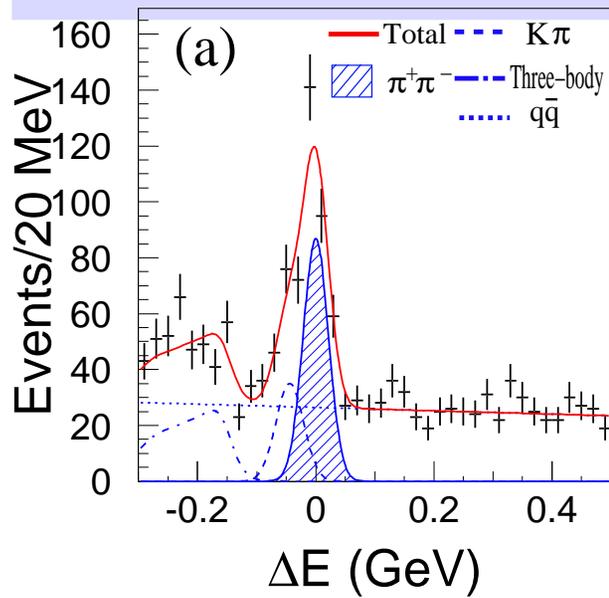


Belle 140 fb^{-1}

hep-ex/0401029

Submitted to PRL

on Jan. 18, 2004

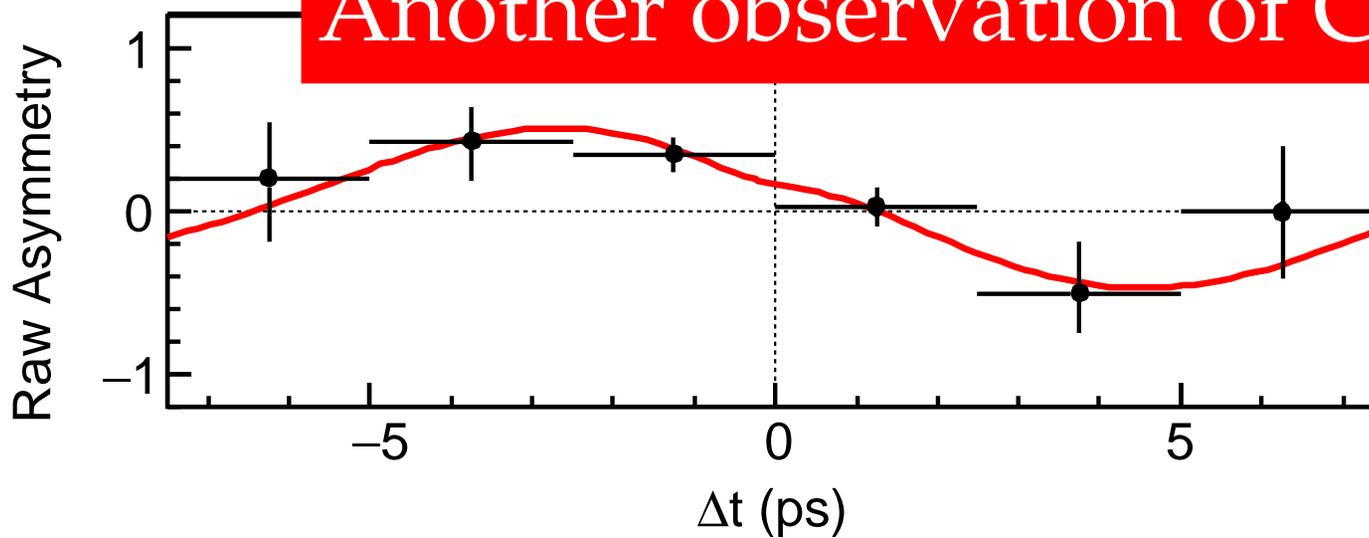


First evidence for direct CPV

$$A_{\pi\pi} = +0.58 \pm 0.15(\text{stat}) \pm 0.07(\text{syst}) \quad (3.2\sigma)$$

$$S_{\pi\pi} = -1.00 \pm 0.21(\text{stat}) \pm 0.07(\text{syst}) \quad (5.2\sigma)$$

Another observation of CPV in B decay



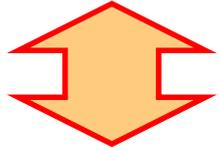
hep-ex/0401029

Submitted to PRL

on Jan. 18, 2004

$\phi_{2\text{effective}} \rightarrow \phi_2$

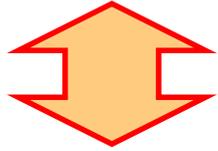
- 2つの測定 — $A_{\pi\pi}, S_{\pi\pi} = \phi_{2\text{effective}}$



- 3つの未知量 — ϕ_2, δ (strong phase), $|P/T|$

$\phi_{2\text{effective}} \rightarrow \phi_2$

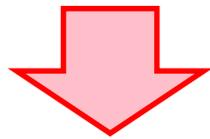
- 2つの測定 — $A_{\pi\pi}, S_{\pi\pi} = \phi_{2\text{effective}}$



- 3つの未知量 — ϕ_2, δ (strong phase), $|P/T|$

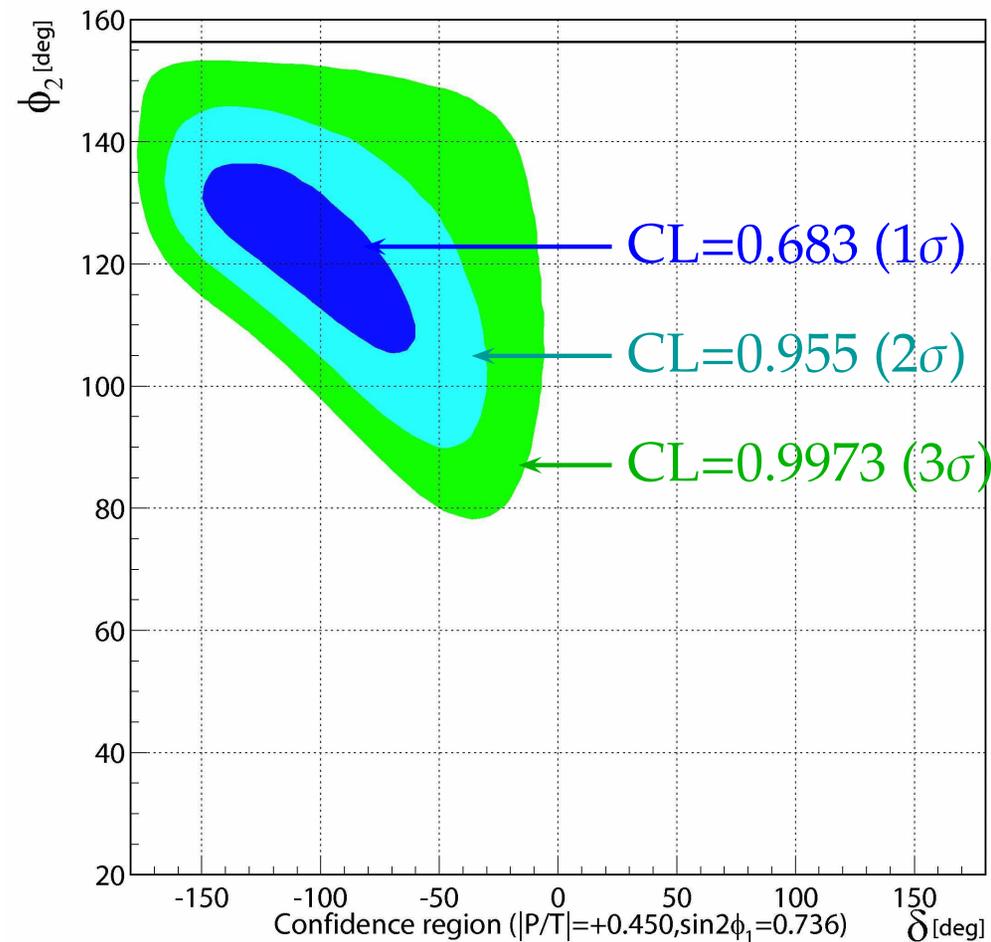
$|P/T|$ は $B \rightarrow \pi\pi$ や $B \rightarrow K\pi$ の分岐比の測定などから予想可

$$0.15 < |P/T| < 0.45$$

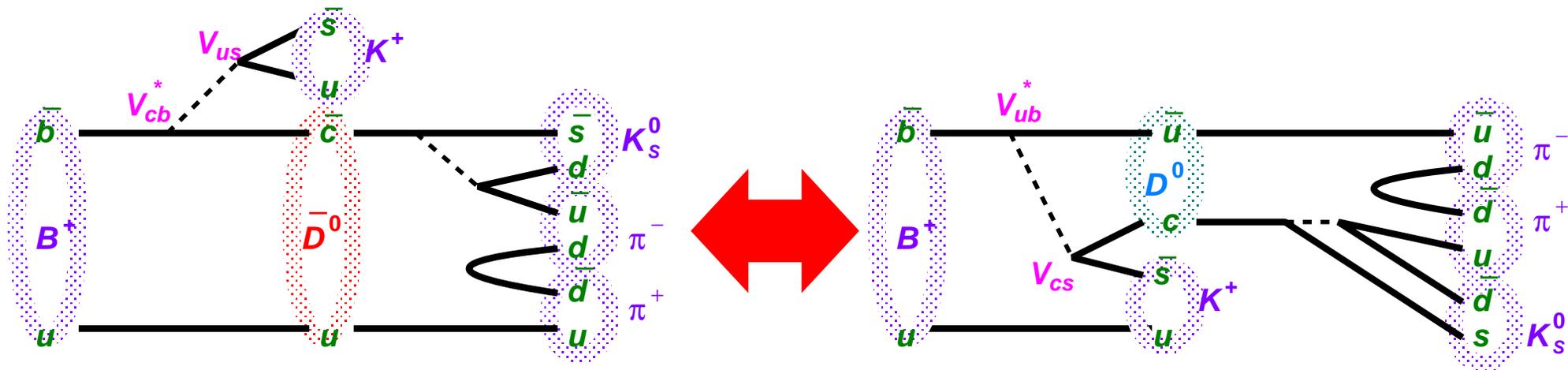


$$90^\circ \leq \phi_2 \leq 146^\circ$$

(95.5% CL)



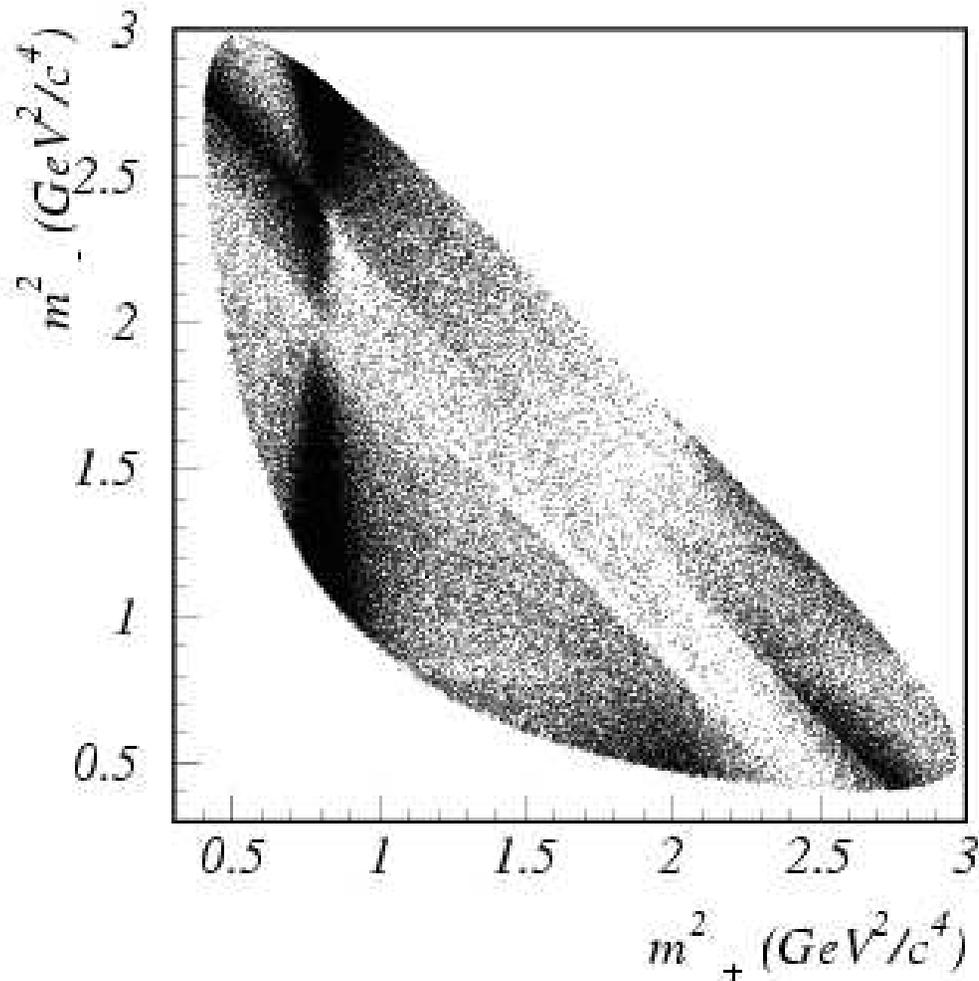
ϕ_3 の測定



- $B \rightarrow DK$ と $B \rightarrow \bar{D}K$ はともに λ^3 で位相差 $\phi_3 = \arg\left(\frac{V_{cb}^* V_{cs}}{V_{ub}^* V_{us}}\right)$
 \Rightarrow さまざまな方法が提案されてきた
- $D^0(\bar{D}^0) \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ の 3 体崩壊はさまざまな中間状態を經由

$K^*(892)^+ \pi^-$	$K^*(892)^- \pi^+$	$K_S^0 \rho^0$	$K_S^0 f_2(1270)$
$K_0^*(1430)^+ \pi^-$	$K_0^*(1430)^- \pi^+$	$K_S^0 \omega$	$K_S^0 \sigma_1$
$K_2^*(1430)^+ \pi^-$	$K_2^*(1430)^- \pi^+$	$K_S^0 f_0(980)$	$K_S^0 \sigma_2$
$K^*(1680)^+ \pi^-$	$K^*(1680)^- \pi^+$	$K_S^0 f_0(1370)$	non-res.

Dalitz 分布の解析から ϕ_3 — かなり良い方法 (Belle の発明)

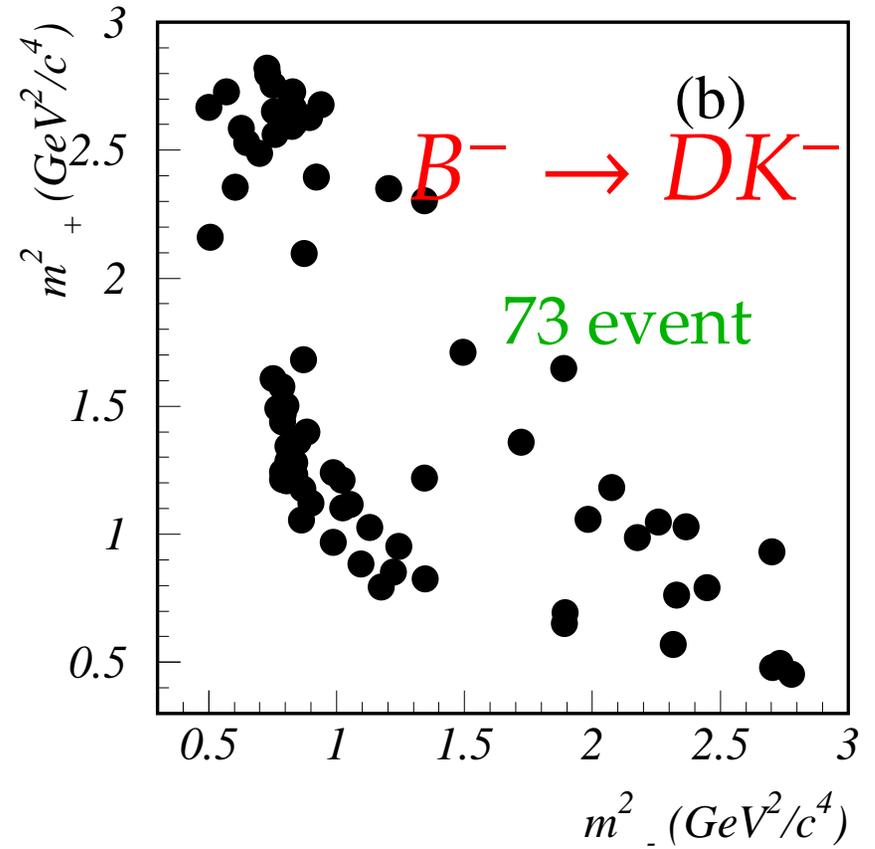
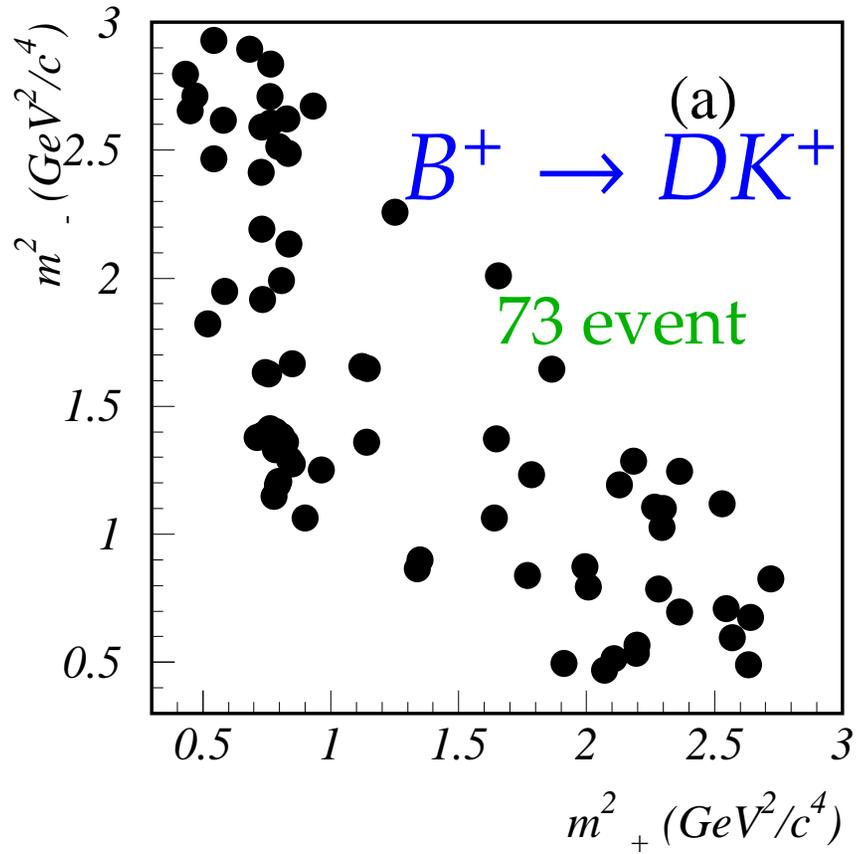


- KEKB/Belle は
チャームファクトリー?
100,870 $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi \pi$ 事象
(97% purity)
 - 非対称な分布
($M(K_S^0 \pi^+) \Leftrightarrow M(K_S^0 \pi^-)$)
- ↓
- $B^+ \rightarrow DK^+$ を見たときも
 $D^0 K^+$ と $\bar{D}^0 K^+$ の間に干渉
Dalitz 平面の各点 (m_+^2, m_-^2)
で異なる干渉パターン

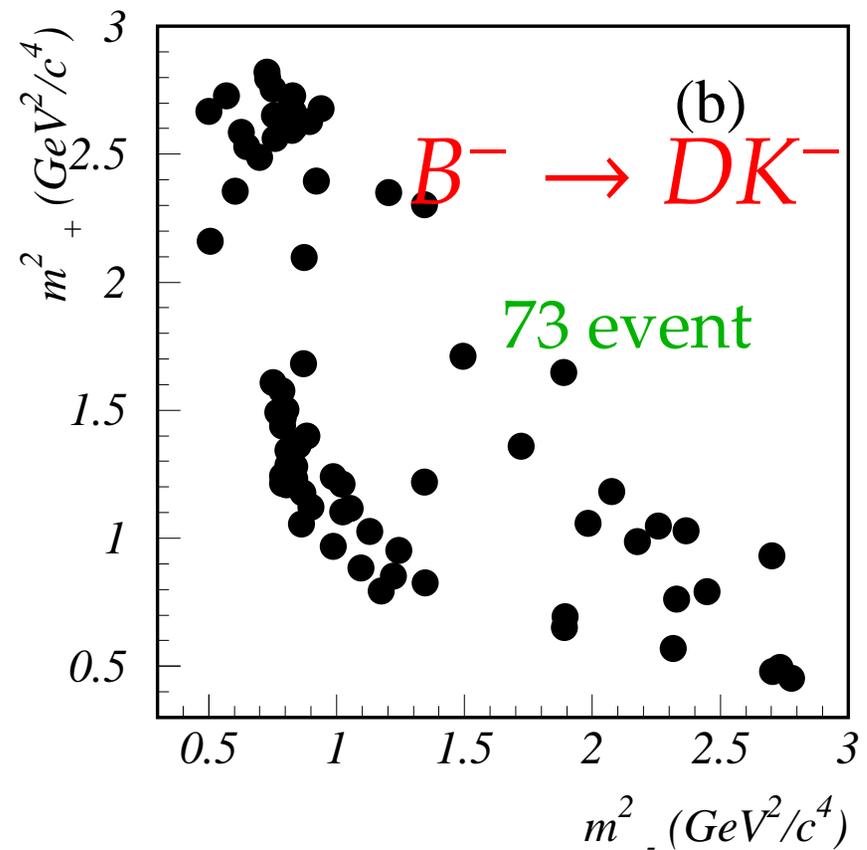
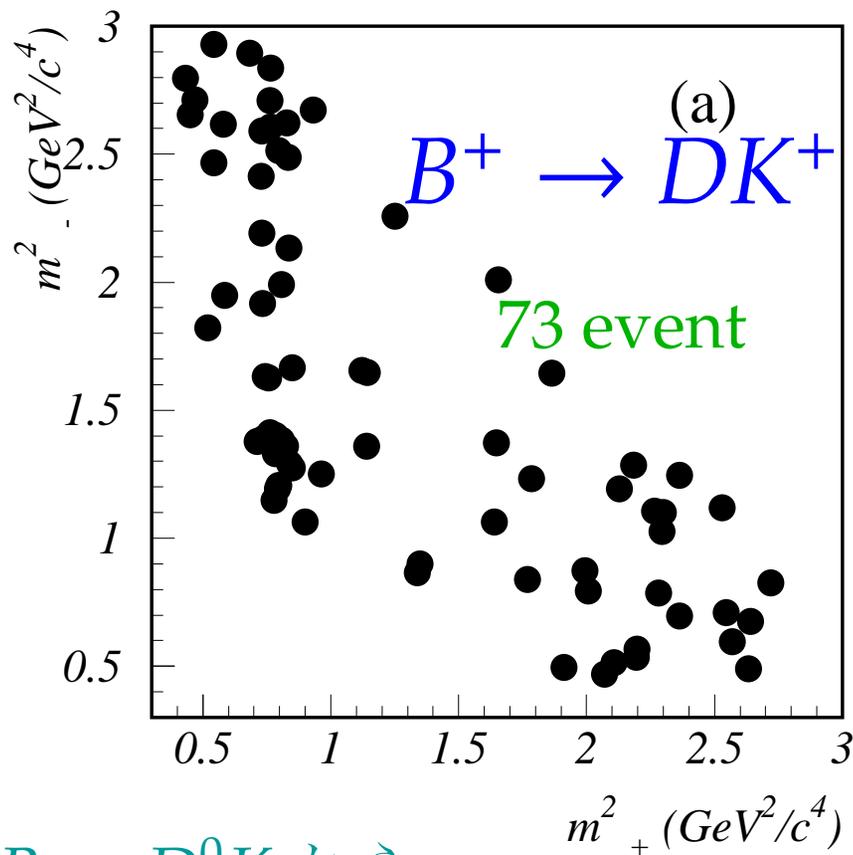
$$A_+ = f(m_+^2, m_-^2) + re^{+i\phi_3 + i\delta} f(m_-^2, m_+^2)$$

$$A_- = f(m_-^2, m_+^2) + re^{-i\phi_3 + i\delta} f(m_+^2, m_-^2)$$

Dalitz 解析からの ϕ_3



Dalitz 解析からの ϕ_3



$B \rightarrow D^0 K$ から

$$\phi_3 = 86^\circ \pm 20^\circ \pm 14^\circ \pm 11^\circ$$

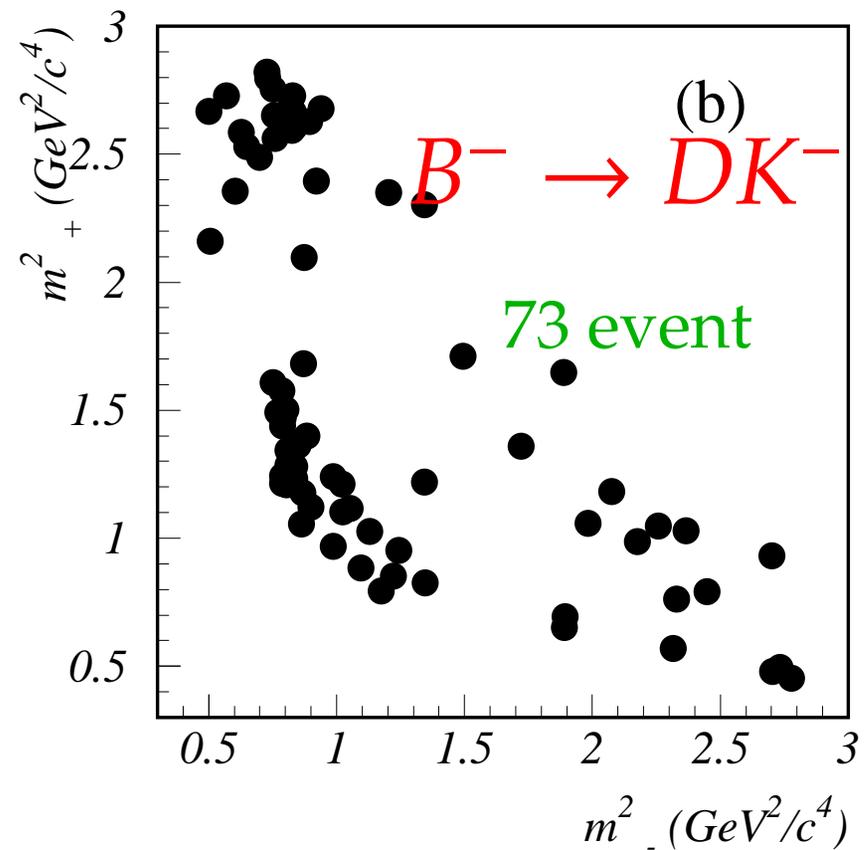
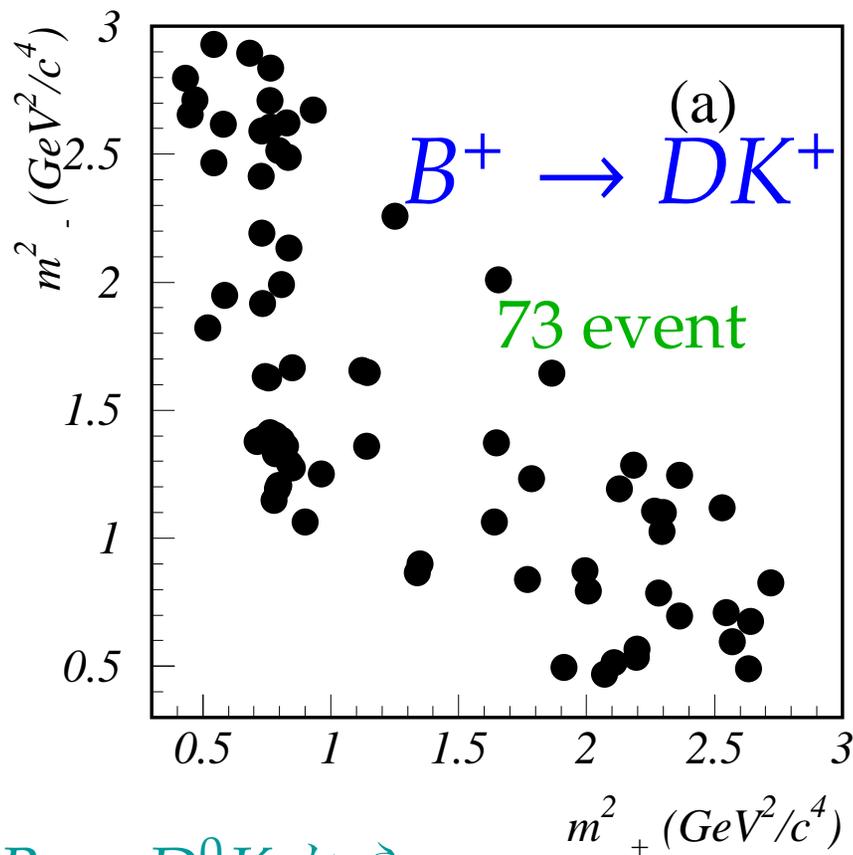
$$\phi_3 = 86^\circ \pm 49^\circ \text{ (95\% CL)}$$

$B \rightarrow D^{*0} K$ から

$$\phi_3 = 51^\circ \pm 47^\circ \pm 12^\circ \pm 11^\circ$$

$$\phi_3 = 51^\circ \pm 82^\circ \text{ (95\% CL)}$$

Dalitz 解析からの ϕ_3



$B \rightarrow D^0 K$ から

$$\phi_3 = 86^\circ \pm 20^\circ \pm 14^\circ \pm 11^\circ$$

$$\phi_3 = 86^\circ \pm 49^\circ \text{ (95\% CL)}$$

$B \rightarrow D^{*0} K$ から

$$\phi_3 = 51^\circ \pm 47^\circ \pm 12^\circ \pm 11^\circ$$

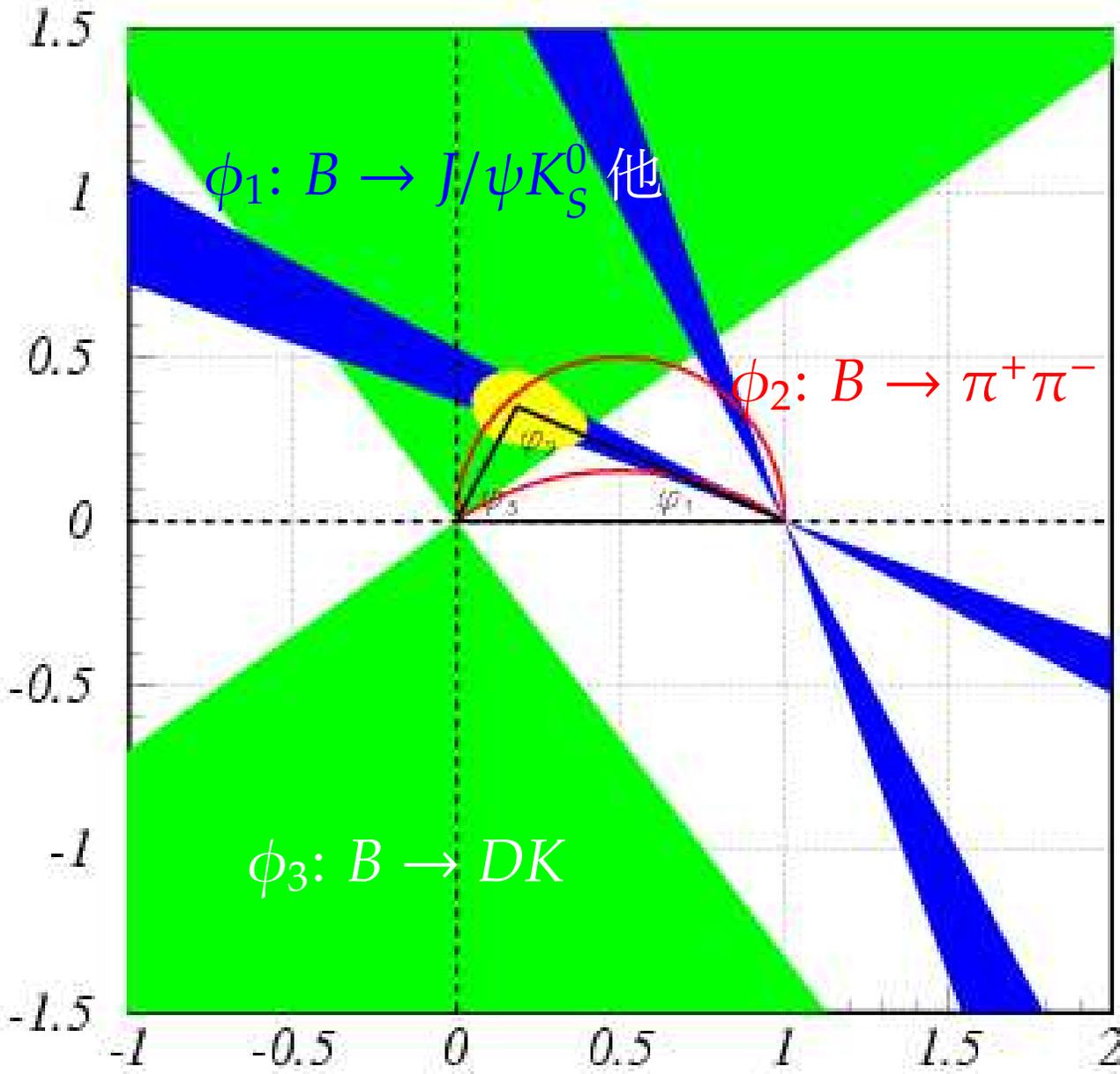
$$\phi_3 = 51^\circ \pm 82^\circ \text{ (95\% CL)}$$

Combined

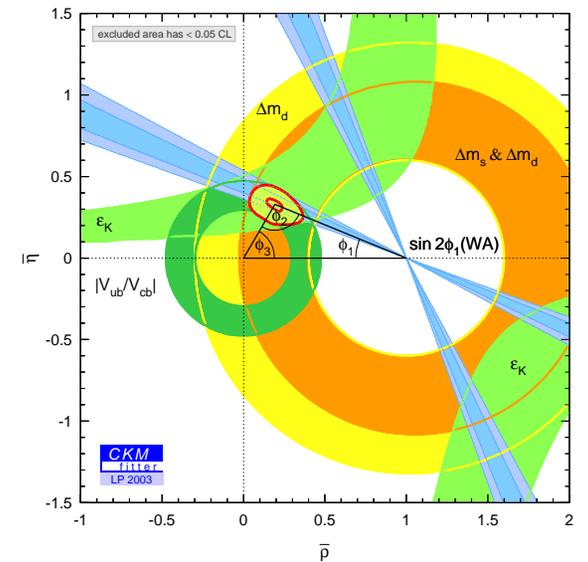
$$\phi_3 = 81^\circ \pm 19^\circ \pm 13^\circ \pm 11^\circ$$

$$\phi_3 = 81^\circ \pm 46^\circ \text{ (95\% CL)}$$

Belle が決めた三角形



Belle の ϕ_1 、 ϕ_2 、 ϕ_3 は今のところ他の測定と合う
(標準理論に矛盾はない)

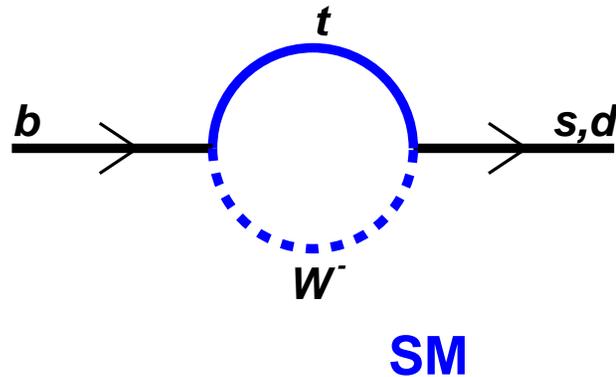


— 目次 —

- Introduction — B physics の動機と役割
- Belle — 検出器と CP の測定
- ユニタリティ三角形を決める
- **ペンギン崩壊と新物理の探索**
- B physics の将来 — SuperB は superb?

ペンギンという名の探針

CP の測定には $b \rightarrow c$ および $b \rightarrow u$ 遷移を使用してきた
標準理論では、 $b \rightarrow s$ 遷移は高次ループ (ペンギン) 効果

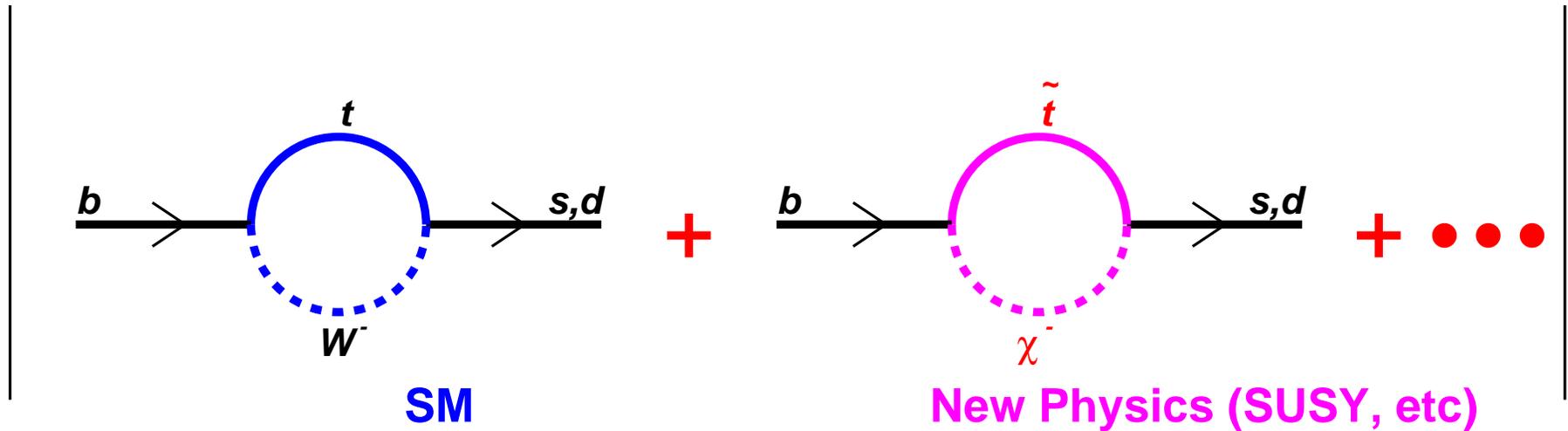


ここで、

- $m(t) = 175 \text{ GeV}$
- $m(W) = 80 \text{ GeV}$
- Coupling: $V_{ts}^* V_{tb} \sim \lambda^2$

ペンギンという名の探針

CP の測定には $b \rightarrow c$ および $b \rightarrow u$ 遷移を使用してきた
標準理論では、 $b \rightarrow s$ 遷移は高次ループ (ペンギン) 効果



ここで、

- $m(t) = 175 \text{ GeV}$
- $m(W) = 80 \text{ GeV}$
- Coupling: $V_{ts}^* V_{tb} \sim \lambda^2$

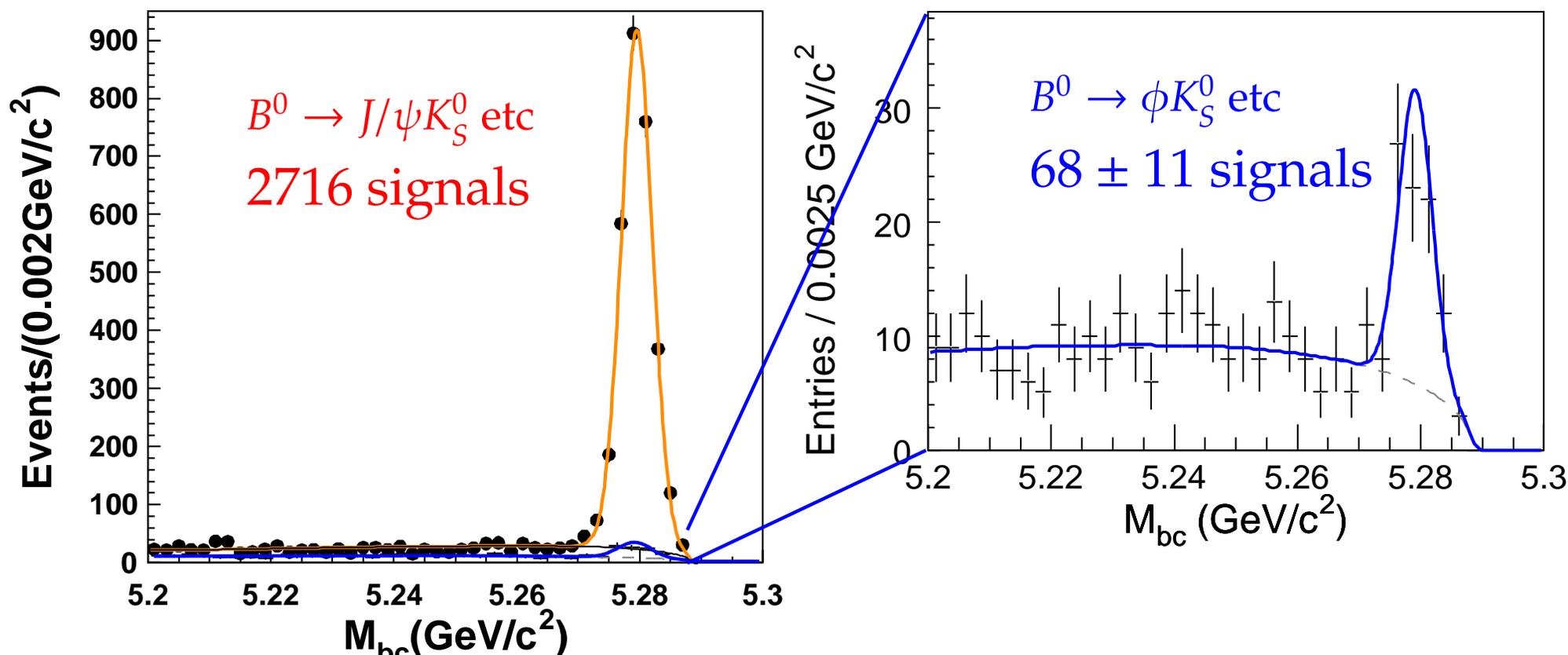
ということは、質量が $O(100 \text{ GeV})$ で
 b や s クォークと相互作用する新粒子の
寄与は、同じオーダーで効いてくる!

多数の $b \rightarrow s$ 崩壊モード \Rightarrow 新物理の探索へ Go!

新物理探索 — 標準理論からのずれ?

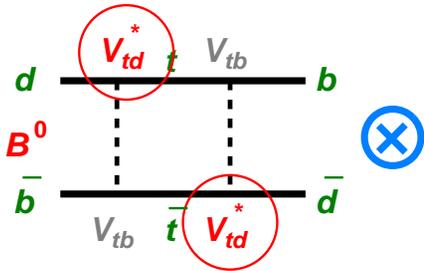
- ペンギンで CP を測る — 標準理論の CP は Belle が測定済
- ペンギンの分岐比を測る — 標準理論の計算が可能な場合
- 起り得ないものを探す — 抑制されている分岐比や direct CPV
- さらにいろいろな観測量 — 例えば γ と Z の干渉を見る

ただし、分岐比が小さい (10^{-5} か、それ以下) ので大変



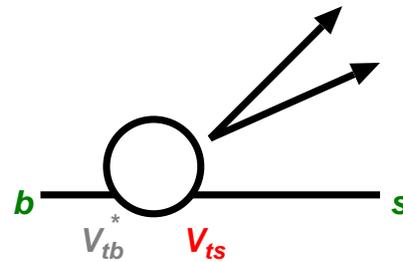
$b \rightarrow s$ ペンギンの CP

Mixing



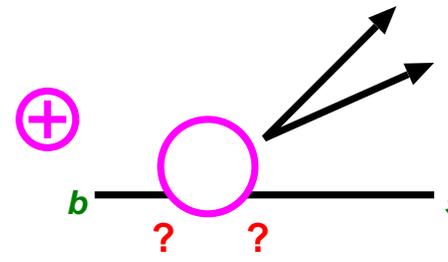
CPV phase is known!

SM penguin

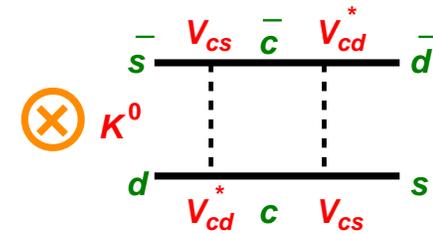


Decay part is less known

New physics?



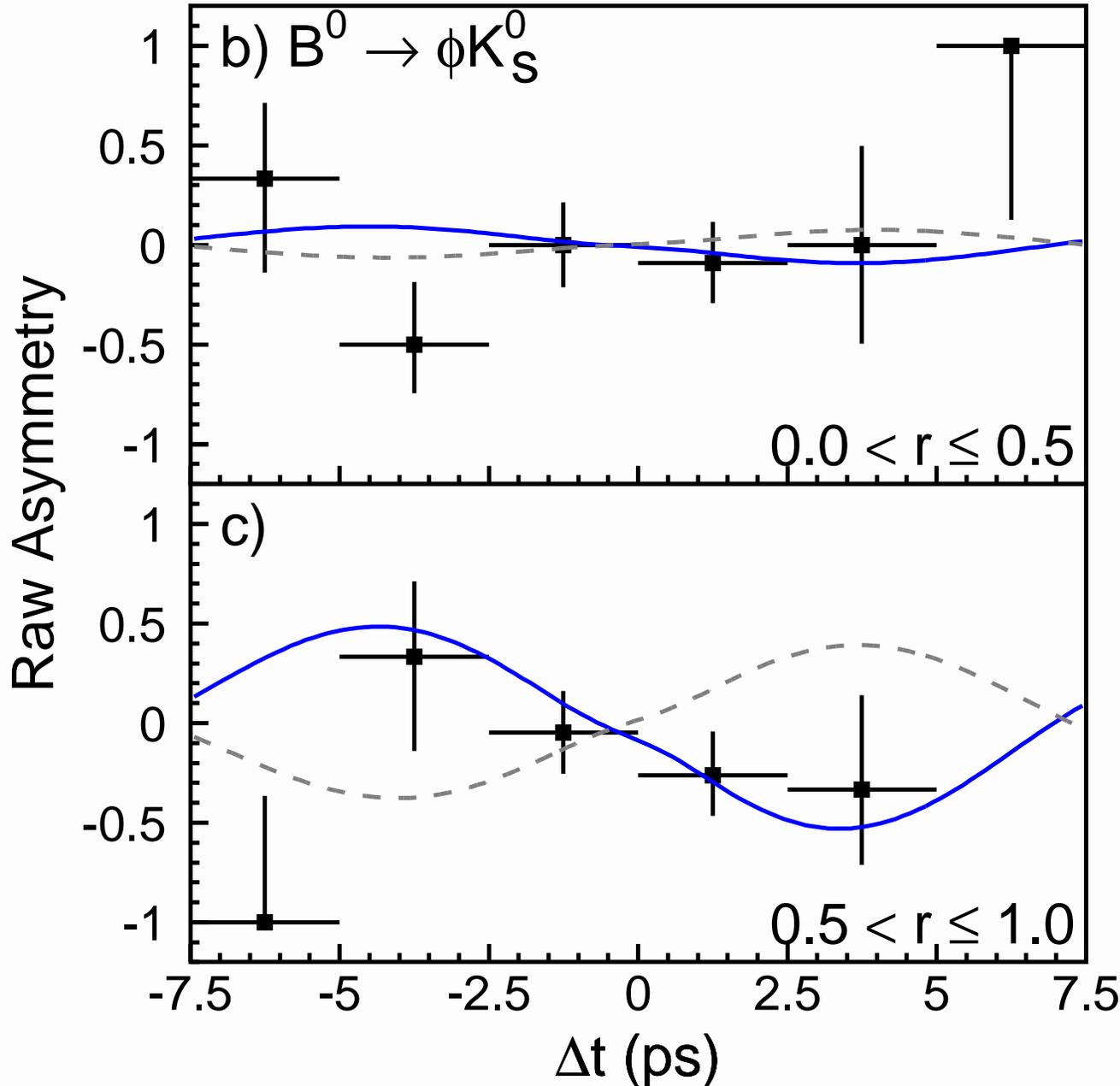
K-Mixing



K-mixing is necessary

- $b \rightarrow s$ ペンギンの CP 位相は SM なら ϕ_1 : $\arg\left(\frac{V_{td}^* V_{ts}}{V_{cd}^* V_{cs}}\right)$
- $b \rightarrow s\bar{s}s$: $B \rightarrow K_S^0 \phi$, $B \rightarrow K_S^0 K^+ K^-$, $B \rightarrow K_S^0 \eta'$, ... (他にも多数)
- 解析手法は $J/\psi K_S^0$ と同一 (誤りの入る余地が少ない)
ただし、New physics により direct CPV の可能性あり (S と A)
- ところが...

$$S_{\phi K_S^0} = -0.96 \pm 0.50 \begin{matrix} +0.09 \\ -0.11 \end{matrix} !$$



$$\sin 2\phi_1 = 0.736 \pm 0.049 \text{ (WA)}$$

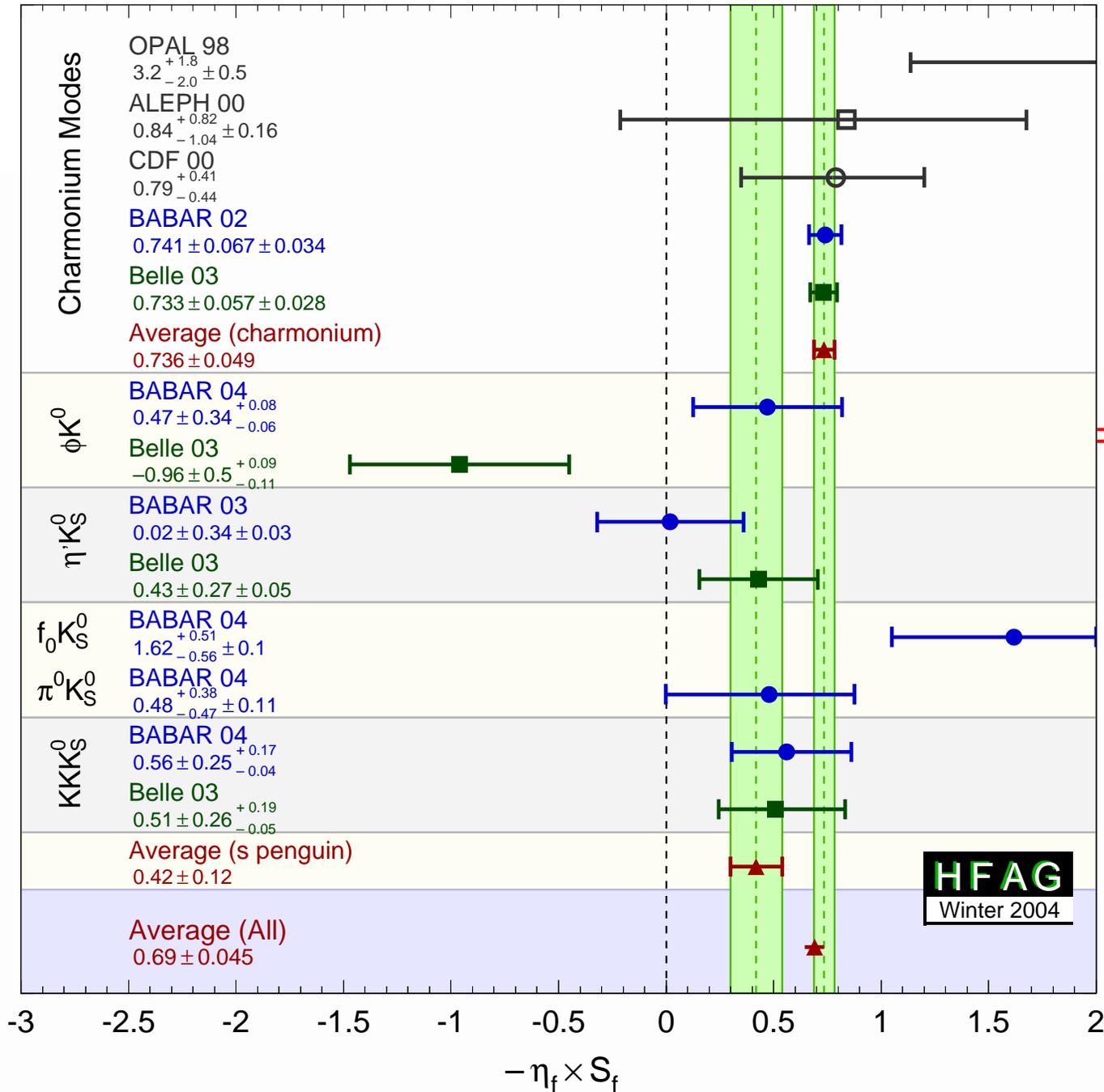
から **3.5 σ !**

$$A_{\phi K_S^0} \text{ は } -0.15 \pm 0.29 \pm 0.07$$



この「素晴らしい可能性」が「どのくらい素晴らしい」のか見当もつかない 山田 紳

本当に「未知の粒子」か？
次の手掛りが必要…



“ $\sin 2\phi_1$ ” summary

(Winter'04 updates)

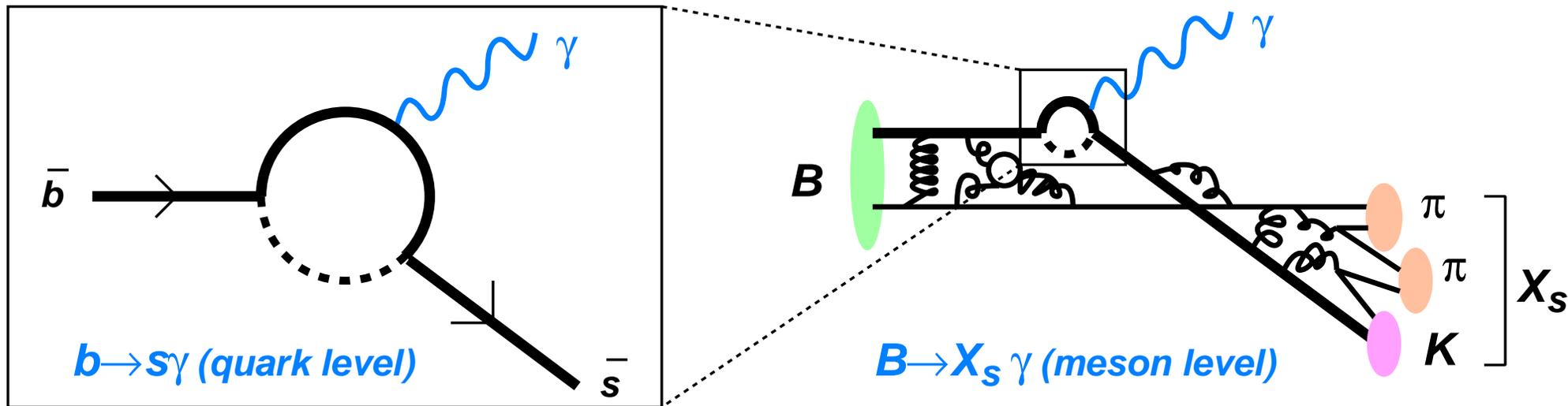
$\Rightarrow \phi K_S^0: -0.14 \pm 0.33$
 (2.6 σ from SM)
 [Belle - BaBar: 2.3 σ]

All $b \rightarrow s$
 2.4 σ away from SM

HFAG
 Winter 2004

ペンギンの分岐比

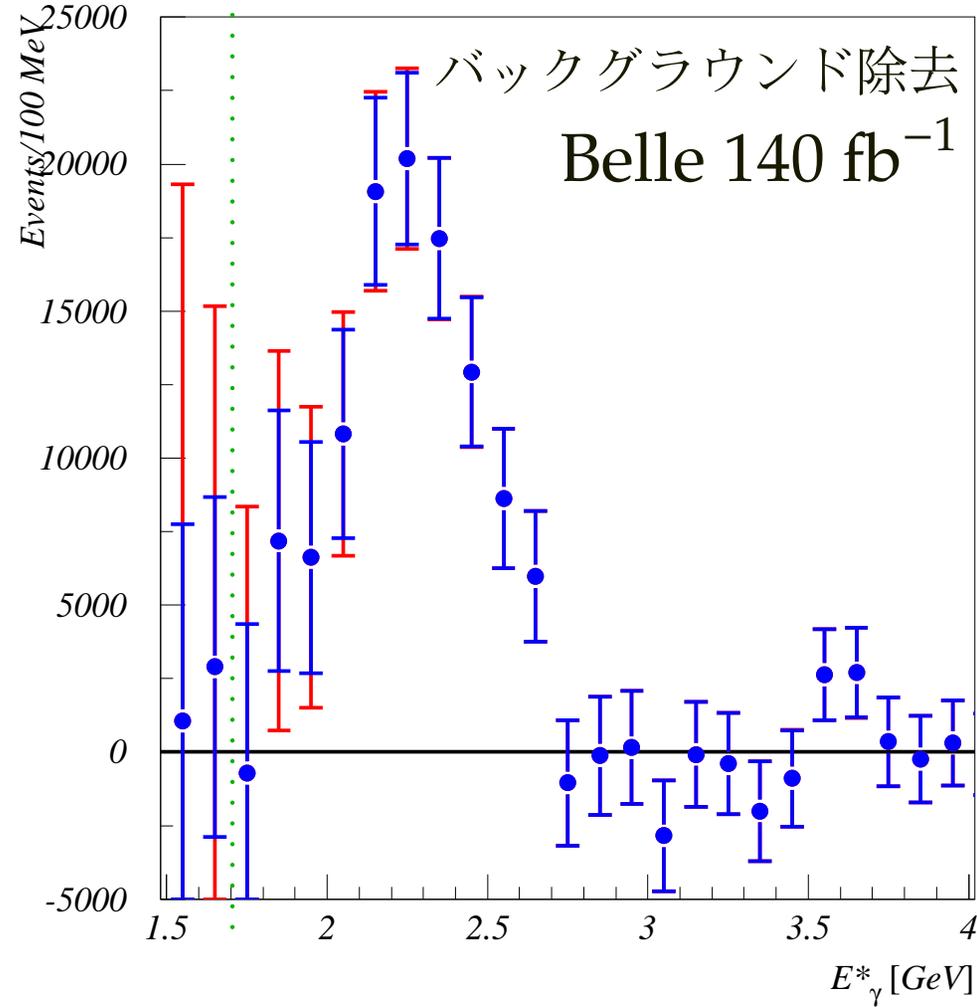
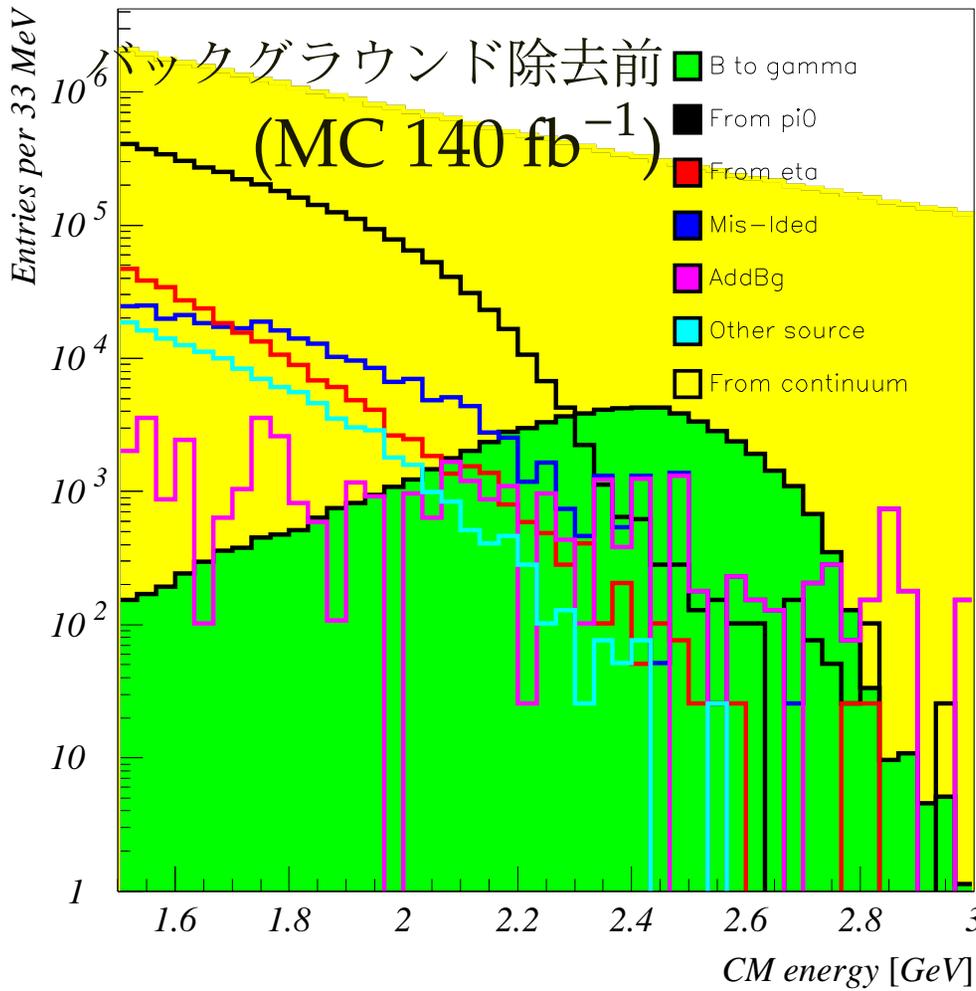
- $b \rightarrow s\gamma$ や $b \rightarrow sl^+\ell^-$ (inclusive) なら計算可能 (10% 程度の理論誤差)
Hadronic ($B \rightarrow \phi K_S^0$ など) や exclusive ($B \rightarrow K^*\gamma$ など) は当てにならない



- 振幅を強め合うものに強い制限 (新振幅どうし打消し合うものはダメ)
- $b \rightarrow s\gamma$ は 2 体崩壊なので、 $E_\gamma \sim M_B/2$ にピーク
- バックグラウンド除去がとても大変 (M_{bc} や ΔE が使えない)

インクルーシブ $b \rightarrow s\gamma$

KEKB ファクトリーと B の物理 — 中尾 幹彦 (KEK 素核研)



$$\mathcal{B}(B \rightarrow X_s \gamma) = (3.59 \pm 0.32 \begin{matrix} +0.30 & +0.11 \\ -0.31 & -0.07 \end{matrix}) \times 10^{-4}$$

E_{γ}^{min} 2.0 \Rightarrow 1.8 GeV — 理論誤差の削減に成功 ↗ hep-ex/0403004 PRL に投稿

ALEPH
PLB429,169(1998)

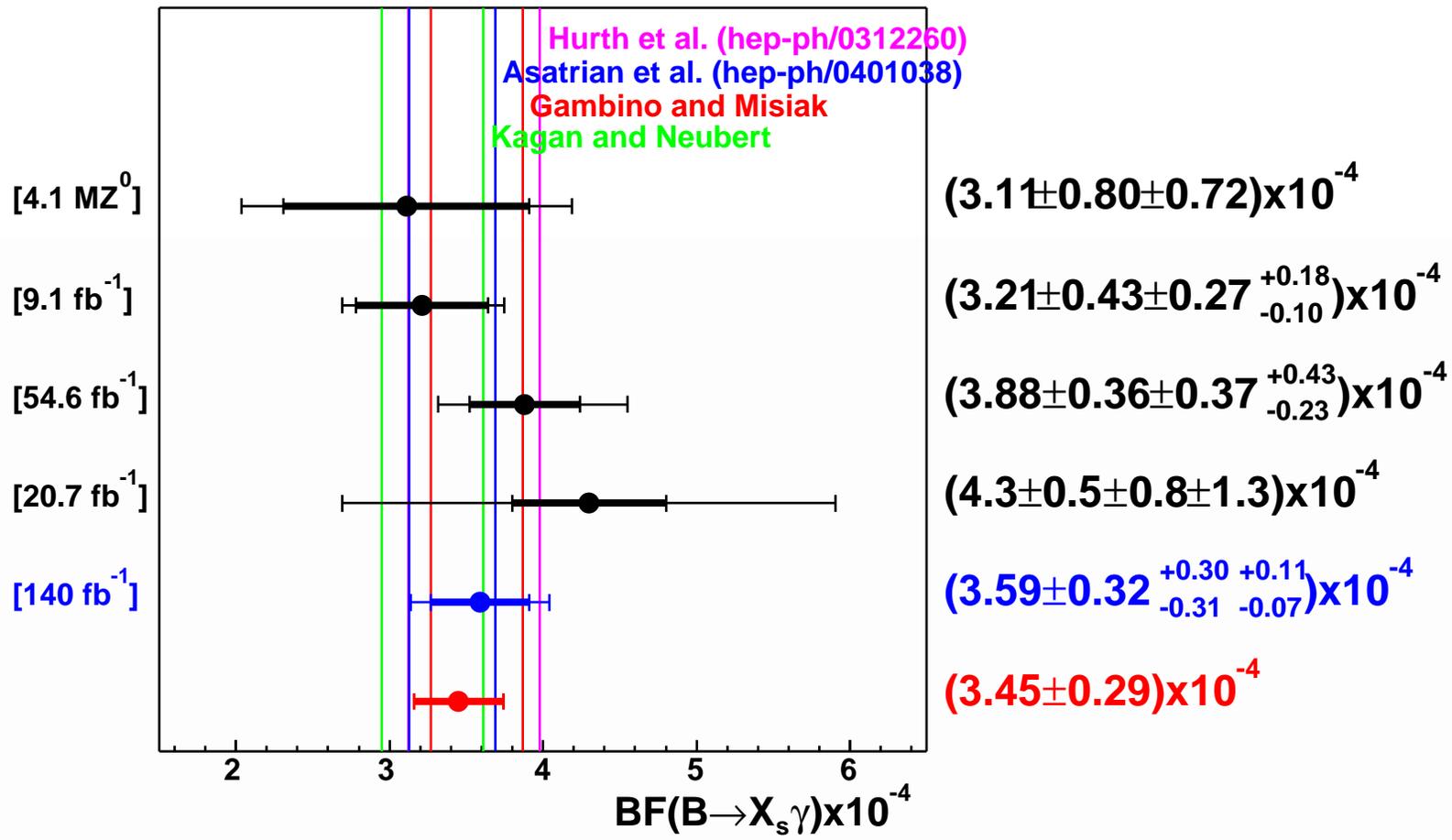
CLEO
PRL87,251807(2001)

BaBar
hep-ex/0207076

BaBar
hep-ex/0207074

Belle
hep-ex/0403004 (2004)

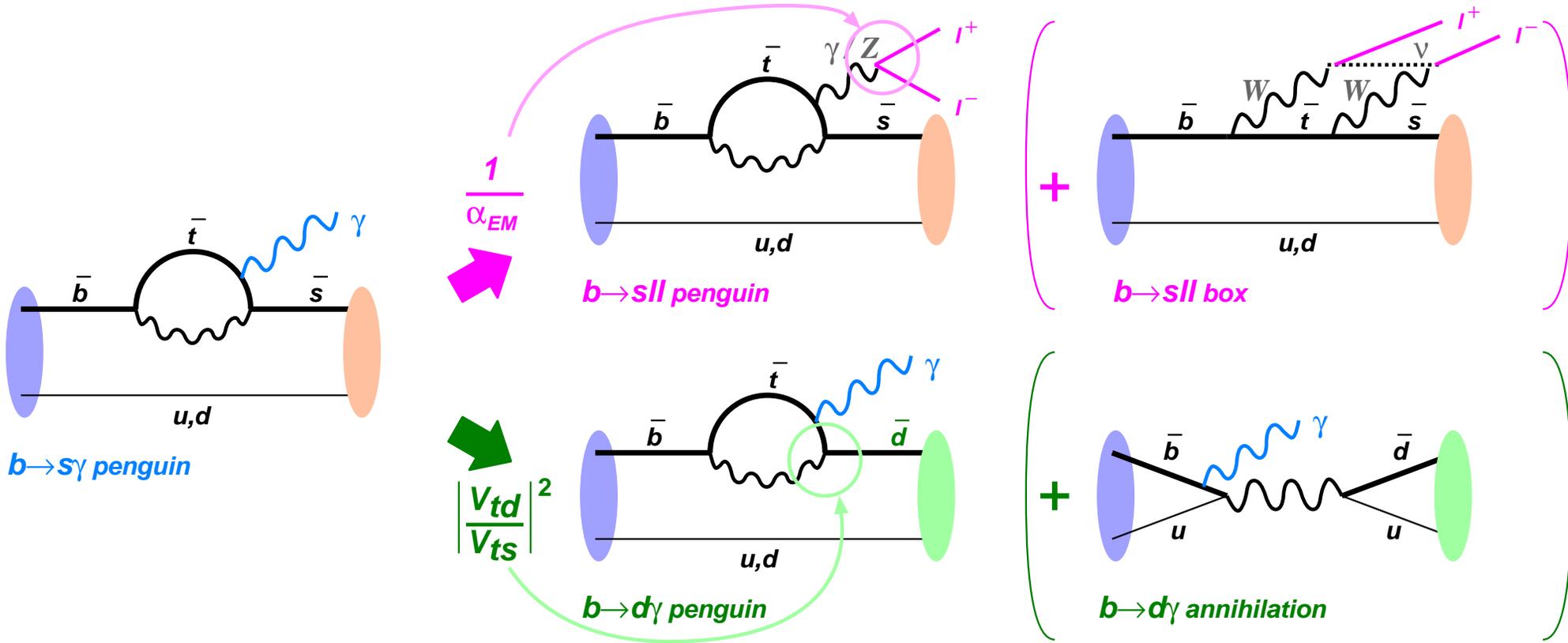
Average
by MN



$\mathcal{B}(B \rightarrow X_s \gamma) = (3.45 \pm 0.29) \times 10^{-4}$, 8% error

agree with SM, smaller error than theories (NLO)

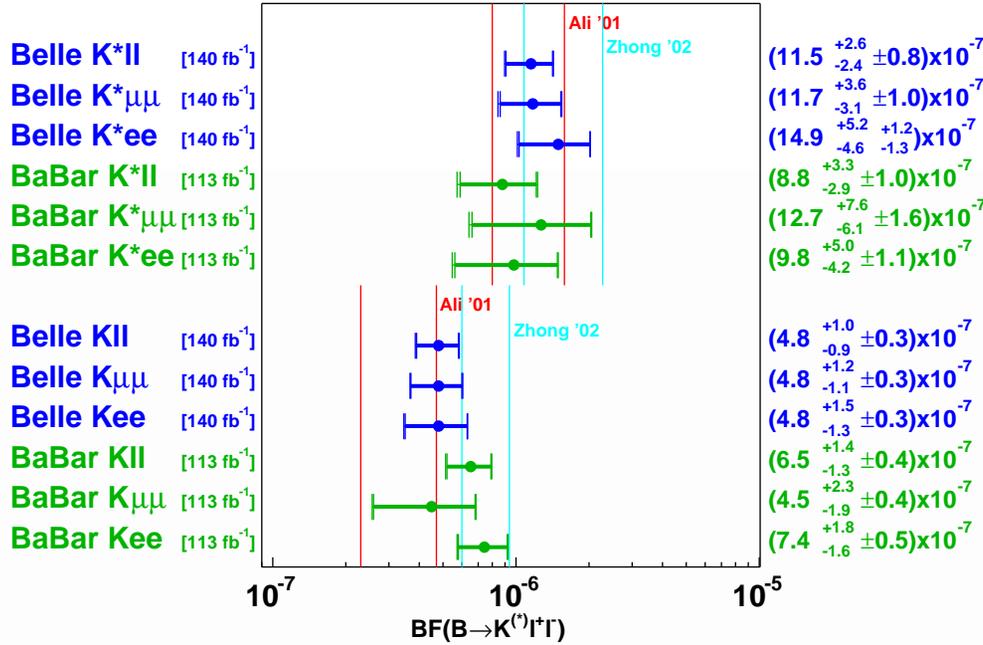
$b \rightarrow sl^+l^-$ と $b \rightarrow d\gamma$



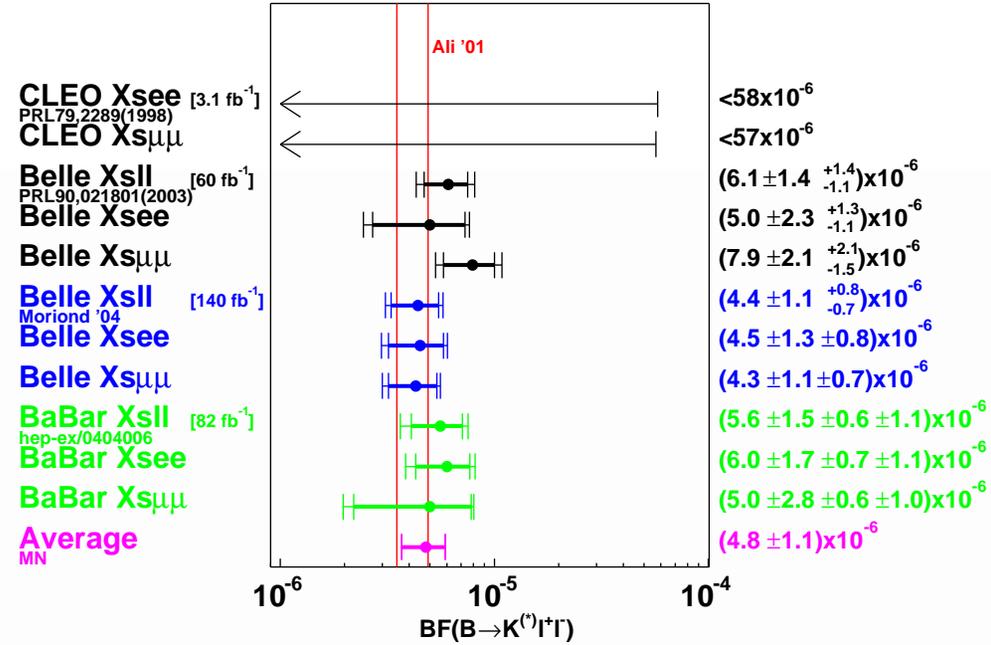
- $b \rightarrow s\gamma$ で見えないものが見えるかも
- ただし分岐比は 2 桁小さい — 今の Belle でようやく見える程度

$b \rightarrow s\gamma$ は $10^{-5} \sim 10^{-4}$ \longleftrightarrow $b \rightarrow sl^+l^-, b \rightarrow d\gamma$ は $10^{-7} \sim 10^{-6}$

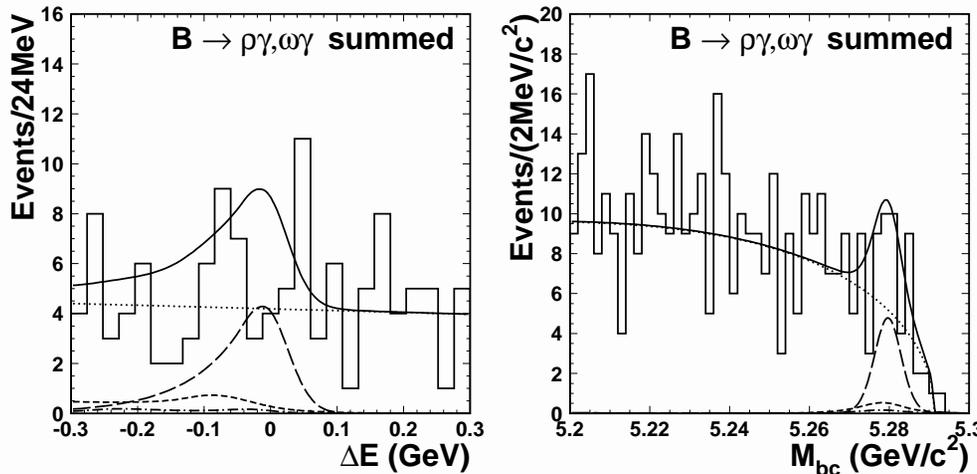
$b \rightarrow sl^+l^-$ exclusive



$b \rightarrow sl^+l^-$ inclusive



$b \rightarrow d\gamma$ exclusive

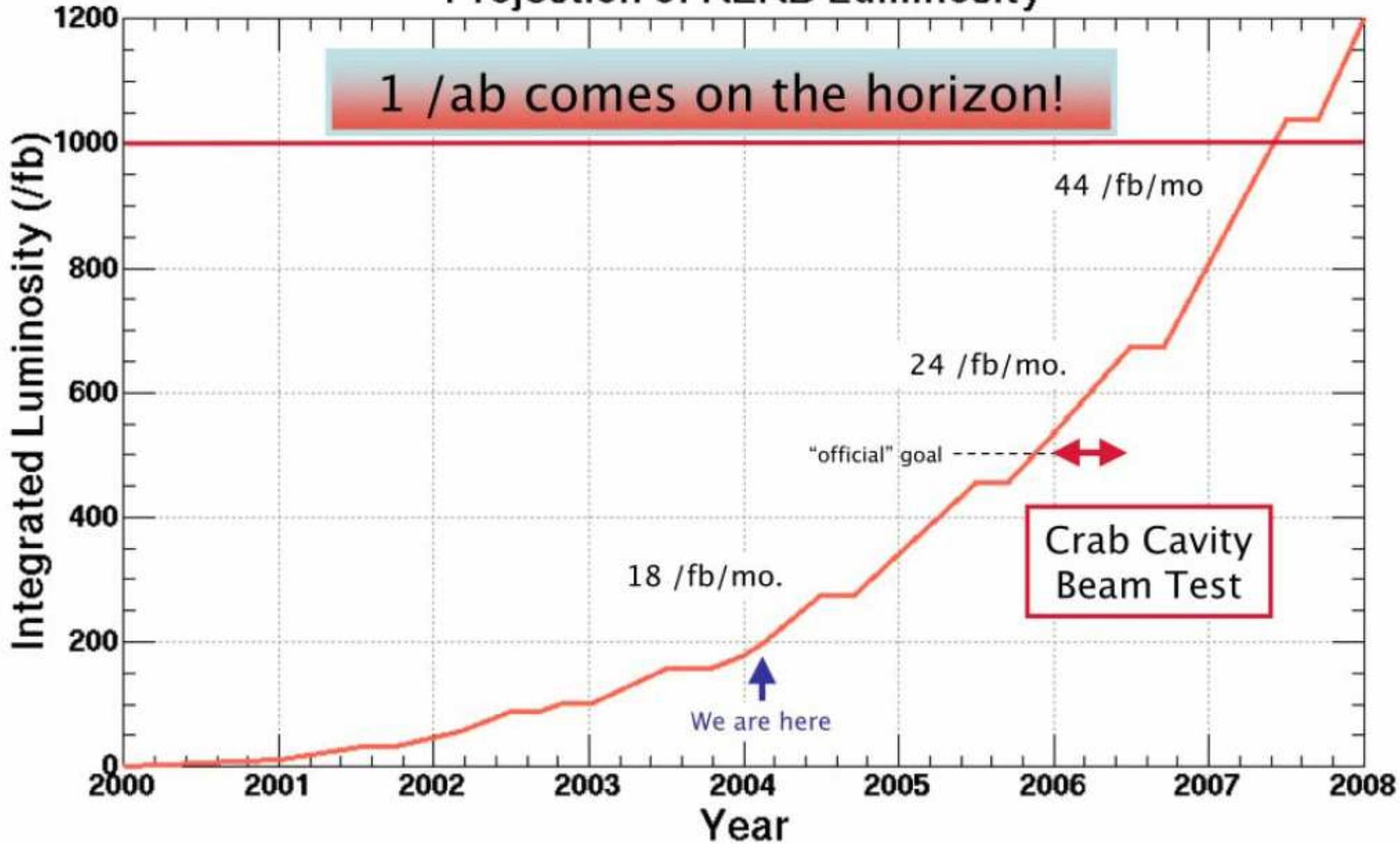


- $b \rightarrow sl^+l^-$ (inclusive/exclusive) 分岐比は SM と良く合う
- $b \rightarrow d\gamma$ (exclusive) も見えてきたかも (3.5 σ の信号)
- だが今のところ ϕK_S^0 のような驚きはなし
- 将来性のある崩壊過程を確立

— 目次 —

- Introduction — B physics の動機と役割
- Belle — 検出器と CP の測定
- ユニタリティ三角形を決める
- ペンギン崩壊と新物理の探索
- B physics の将来 — SuperB は superb?

Projection of KEKB Luminosity



$B \rightarrow \phi K_S^0$ や $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$ など、数十事象ではダメで、何かを特定するには $B \rightarrow J/\psi K_S^0$ のように数百～数千事象必要

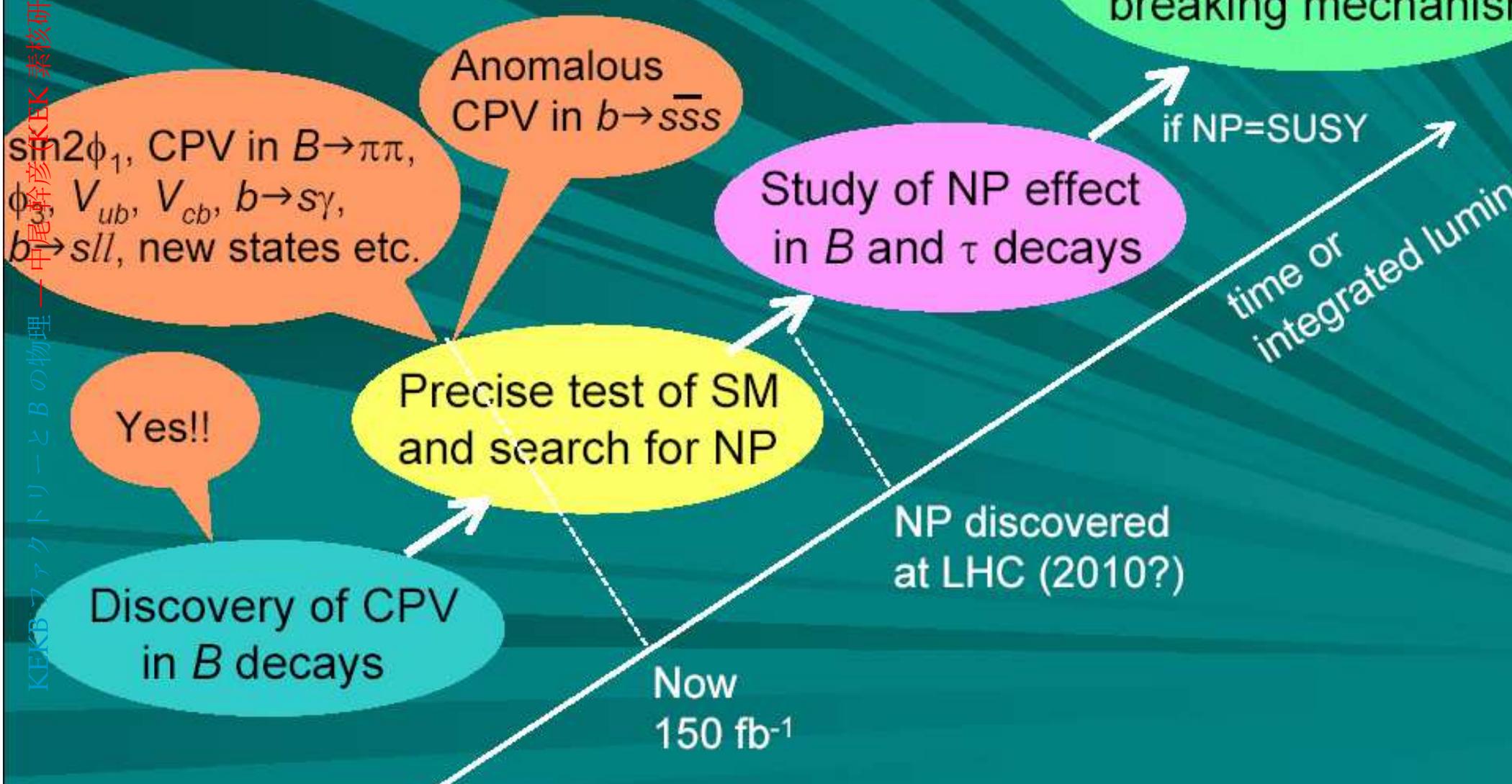
50～100 倍のピーク、 $5 \sim 50 \text{ ab}^{-1}$ の積分

- ピークルミノシティ $5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- 2008 年ごろに大規模アップグレード (~ 1 年)
- **SuperKEKB LoI** ~ 530 pages!!
 - Part I — Physics, Part II – Detector, Part III Accelerator
 - Web page: since Feb.2004 (<http://belle.kek.jp/superb>)
 - KEK Report 2004-4 in printing
- SLAC 側の計画 (SuperBaBar)
ピークルミノシティ $1 \times 10^{36} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, 2010 年以降

Roadmap of B physics

Tevatron ($m \sim 100 \text{ GeV}$) \rightarrow LHC ($m \sim 1 \text{ TeV}$)
 KEKB (10^{34}) \rightarrow SuperKEKB (10^{35})
 Concurrent program

KEKBファクトリーとBの物理 — 中尾 幹彦 (KEKB 素核研)



sin2 ϕ_1 , CPV in $B \rightarrow \pi\pi$,
 ϕ_3 , V_{ub} , V_{cb} , $b \rightarrow s\gamma$,
 $b \rightarrow sl\ell$, new states etc.

Anomalous
 CPV in $b \rightarrow s\bar{s}s$

Yes!!

Precise test of SM
 and search for NP

Study of NP effect
 in B and τ decays

Identification of SUSY
 breaking mechanism

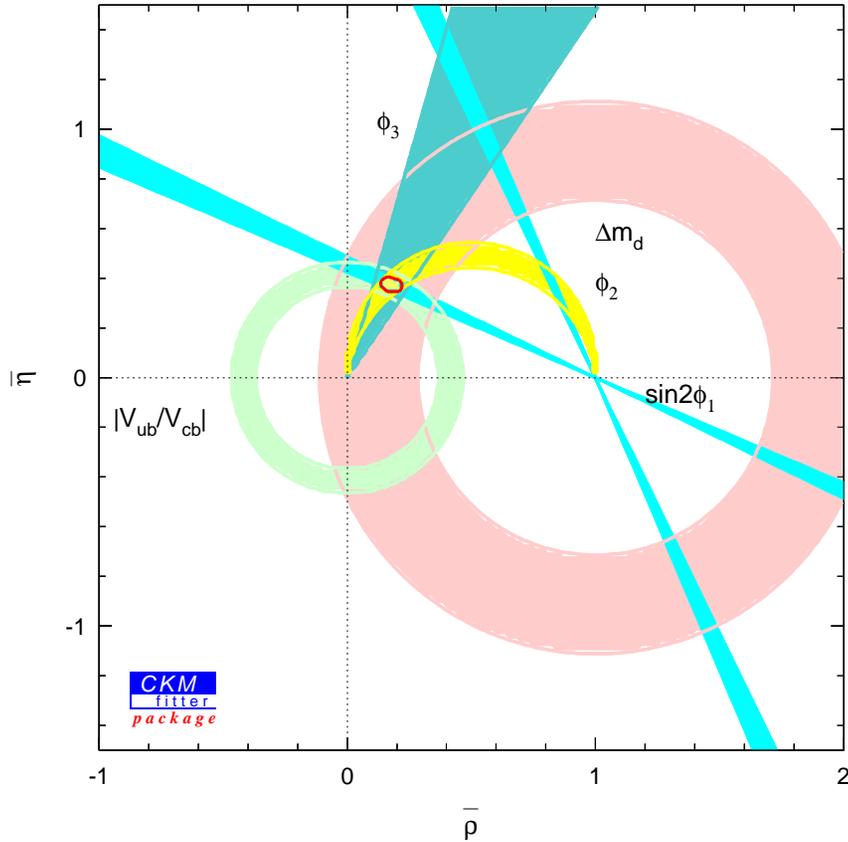
if NP=SUSY

time or
 integrated lumin

NP discovered
 at LHC (2010?)

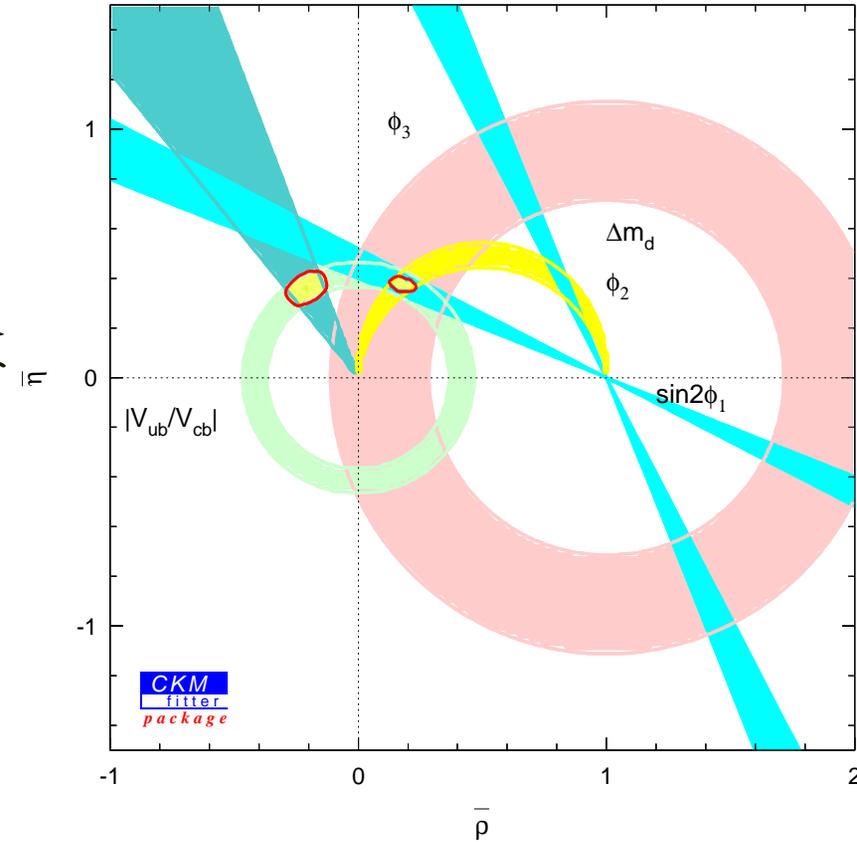
Now
 150 fb⁻¹

ユニタリティー三角形の将来



Consistent?

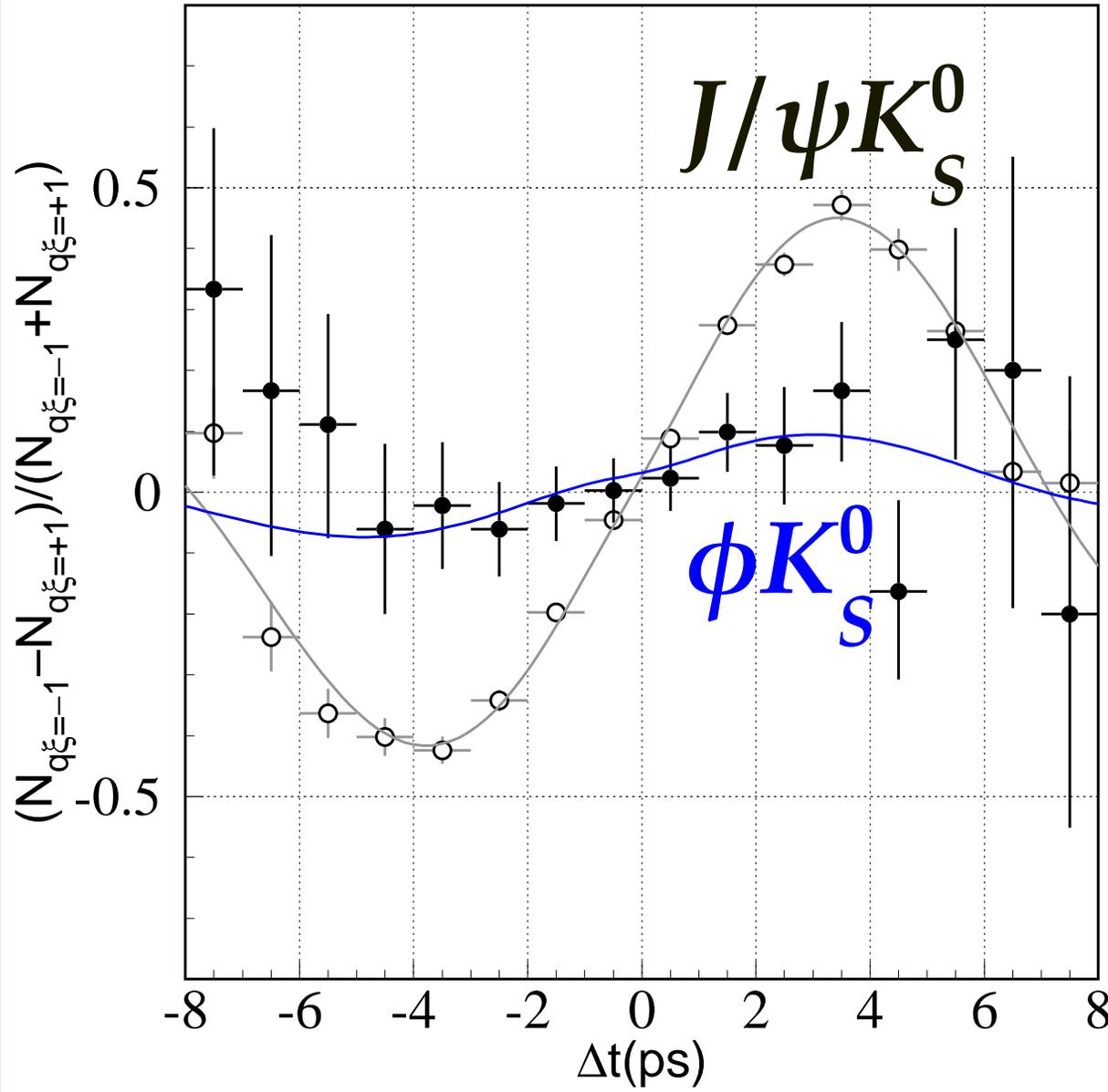
あるいは



Inconsistent!?

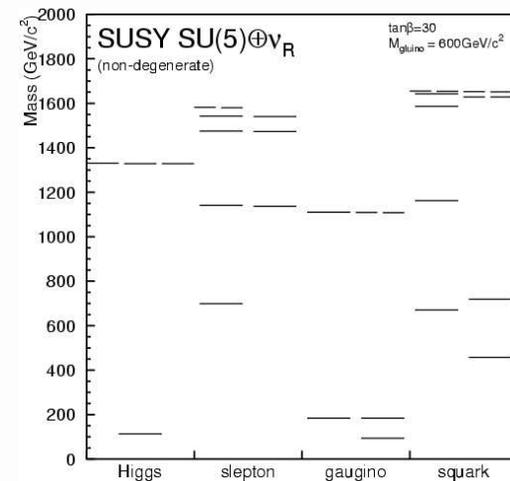
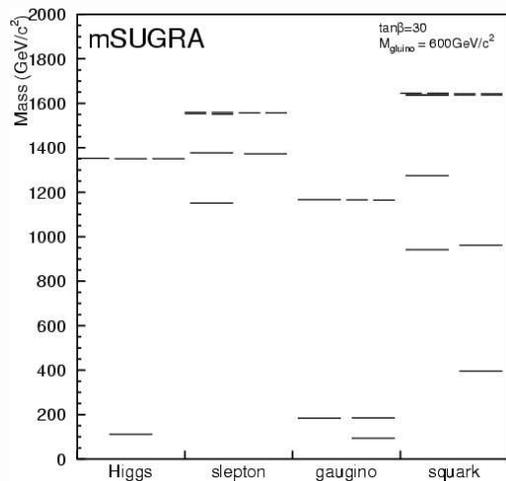
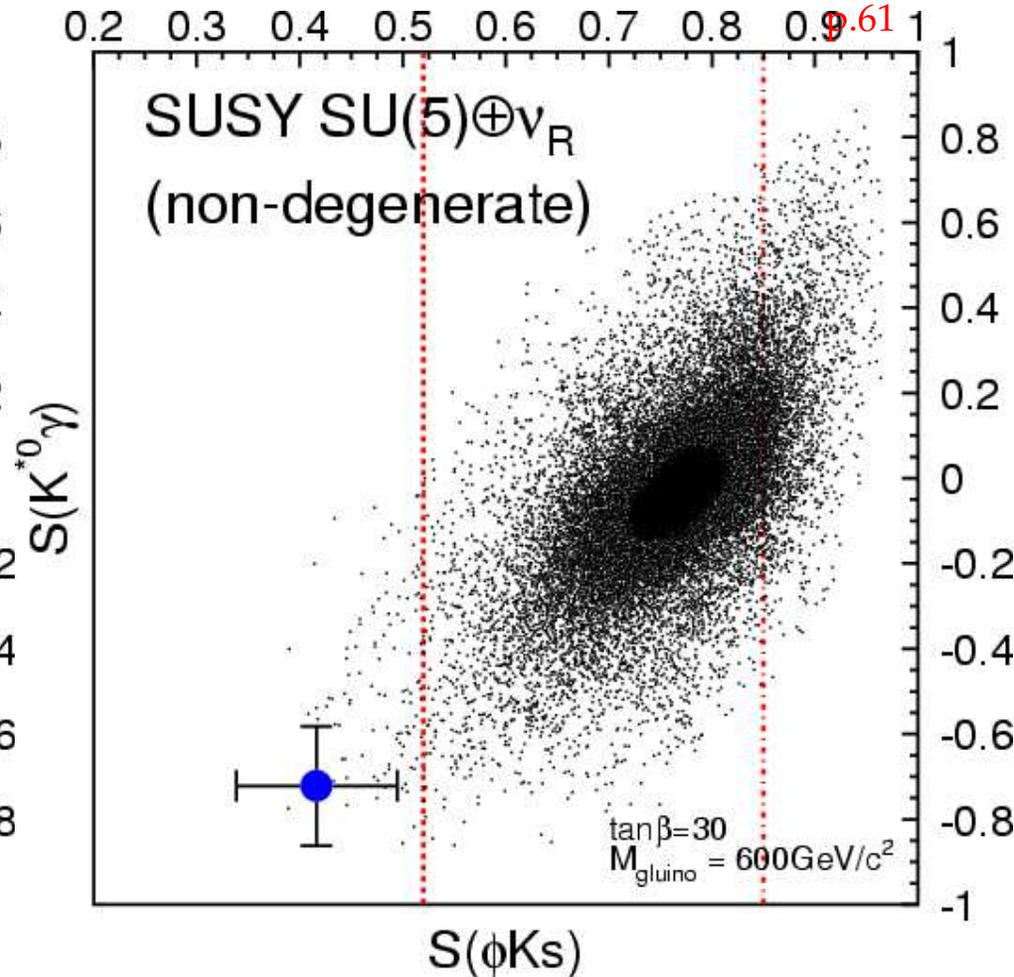
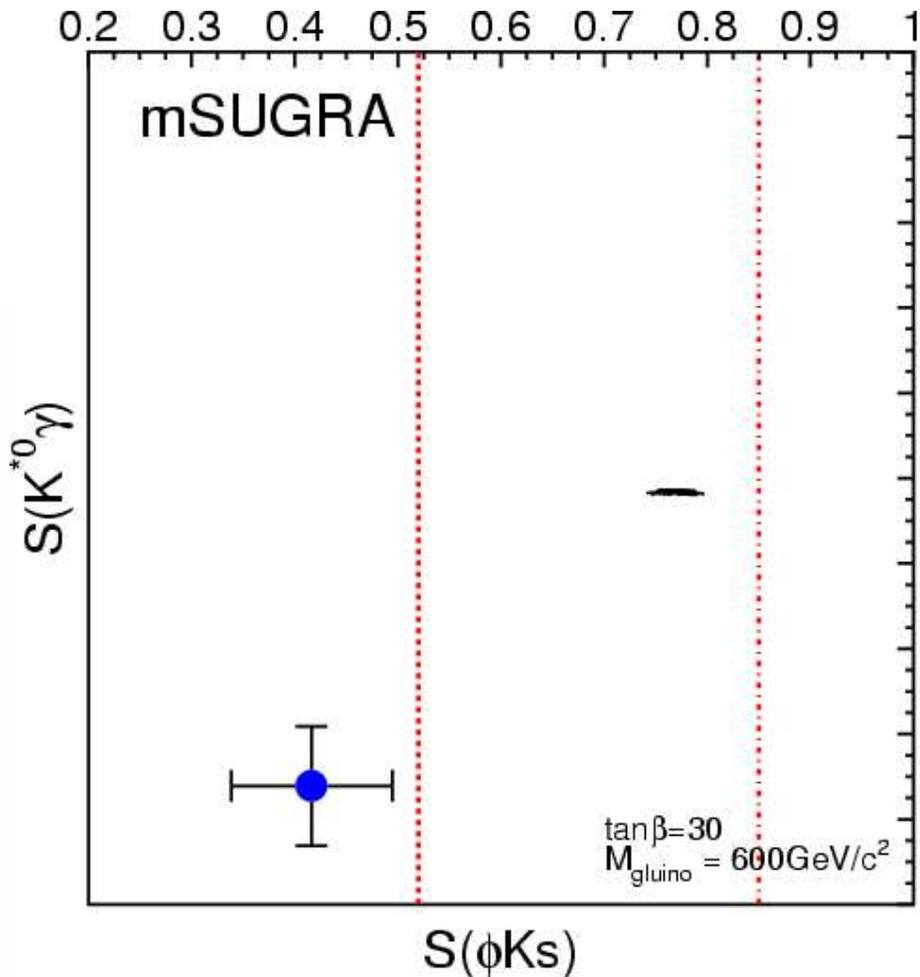
5 ab^{-1} での 2 つの可能性

$B^0 \rightarrow \phi K_S^0$ の将来



現在の $b \rightarrow s$ の平均くらい
 $\sin 2\phi_1$ からずれてたら?

5 ab^{-1} で
 ϕK_S^0 だけで
 6.2 σ の違い!



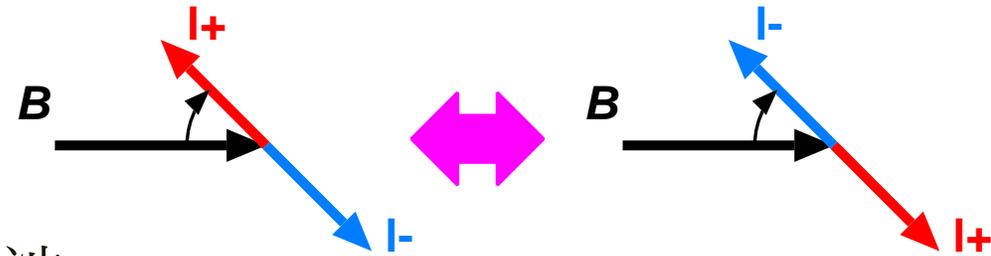
⇐ SUSY の違いを見分ける! ⇒

(質量だけでは区別が難しいかも)

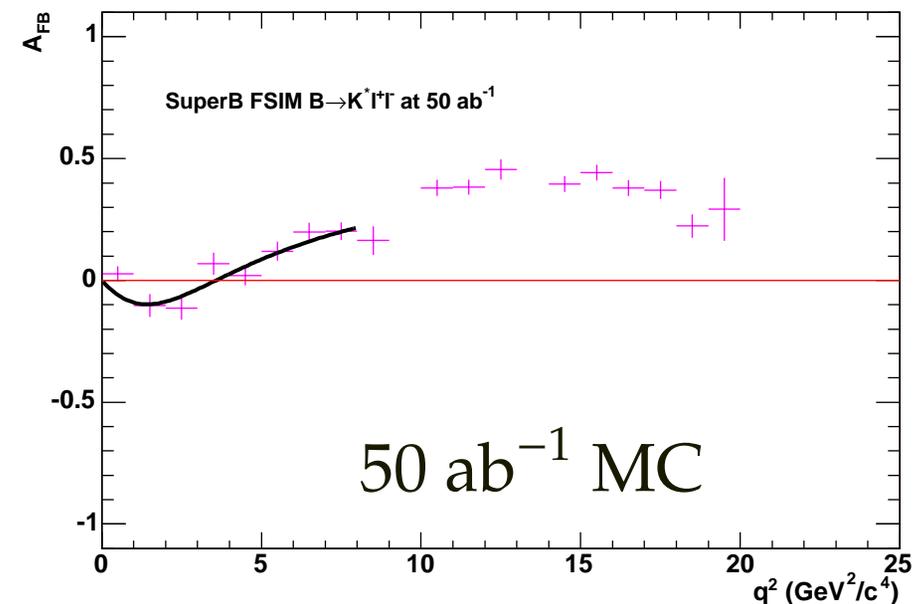
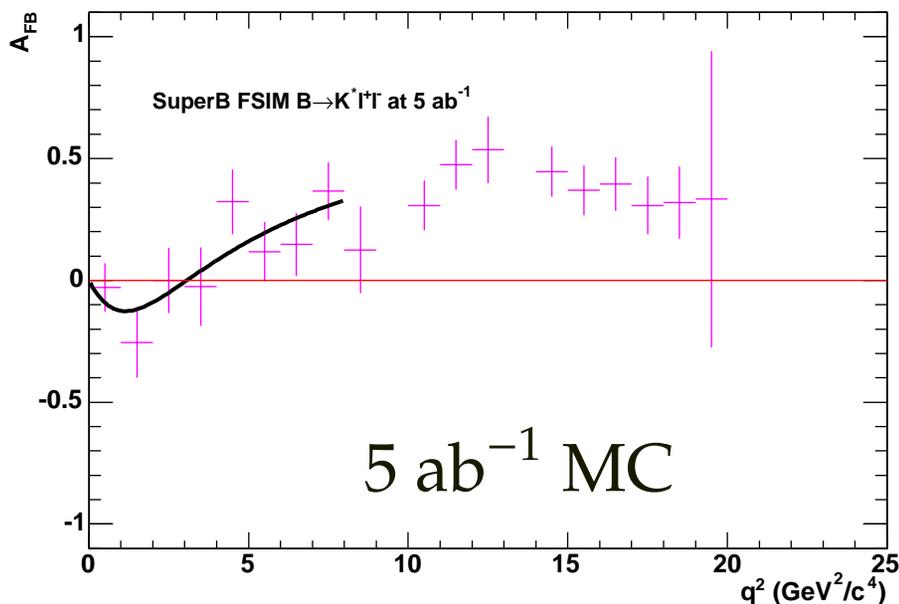
$$B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$$

forward-backward asymmetry

l+l- rest frame



- Low energy での γ と Z の干渉
ループなので、new physics の影響を受けやすい
($q^2 = O(1 \text{ GeV}^2)$ では 90 GeV も $O(1 \text{ TeV})$ も似たようなもの)
- SM では 3 GeV^2 付近で符号が負 \Rightarrow 正
- SUSY では符号も振幅もいかようにも変わり得る



τ の物理

$$\sigma(\tau^+\tau^-) \sim \sigma(B\bar{B})$$

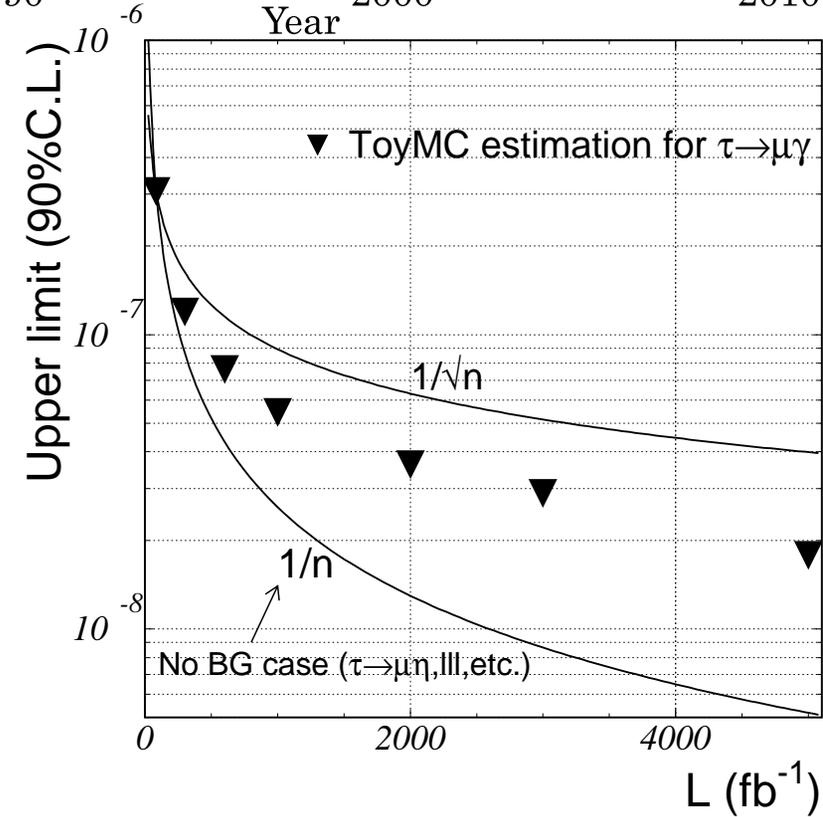
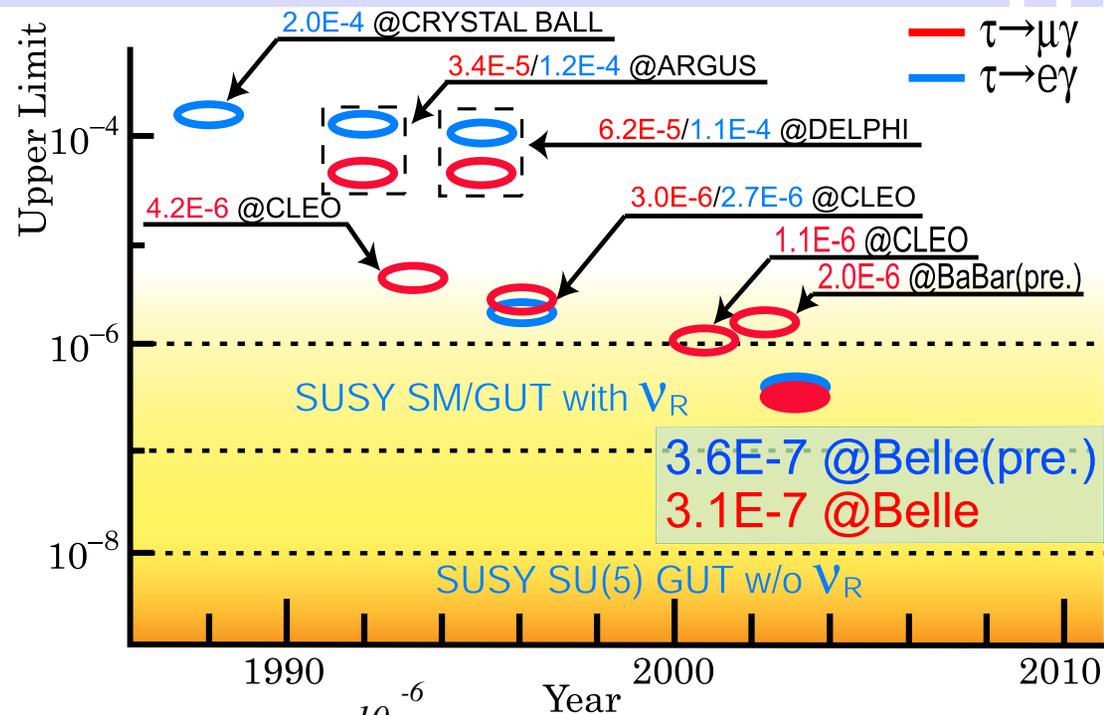
5×10^9 τ -pair (τ -factory!)

物理トピック

- Lepton flavor violation
- CP violation (EDM, decay rate)
- Rare decays

$$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\gamma) < 1 \sim 2 \times 10^{-8} \text{ at } 5 \text{ ab}^{-1}$$

同様に、 $\tau \rightarrow \mu\eta, \tau \rightarrow e\eta, \tau \rightarrow \ell\ell^+\ell^-$



Summary of physics reach

Studied for SuperKEKB LoI

Observable	SuperKEKB		LHCb
	(5 ab ⁻¹)	(50 ab ⁻¹)	(0.002ab ⁻¹)
$\Delta\mathcal{S}_{\phi K_S^0}$	0.079	0.031	0.2
$\Delta\mathcal{S}_{K^+K^-K_S^0}$	0.056	0.026	
$\Delta\mathcal{S}_{\eta'K_S^0}$	0.049	0.024	×
$\Delta\mathcal{S}_{K_S^0K_S^0K_S^0}$	0.14	0.04	×
$\Delta\mathcal{S}_{\pi^0K_S^0}$	0.10	0.03	×
$\sin 2\chi^S(B_s \rightarrow J/\psi\phi)$	×	×	0.058
$\Delta\mathcal{S}_{K^{*0}\gamma}$	0.14	0.04	×
$\mathcal{B}(B \rightarrow X_s\gamma)$	5%	5%	×
$A_{CP}(B \rightarrow X_s\gamma)$	0.011	5×10^{-3}	×
C_9 from $A_{FB}(B \rightarrow K^*\ell^+\ell^-)$	32%	10%	
C_{10} from $A_{FB}(B \rightarrow K^*\ell^+\ell^-)$	44%	14%	
$\mathcal{B}(B_s \rightarrow \mu^+\mu^-)$	×	×	4σ (3 years)
$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+\nu\nu)$		5.1σ	×
$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow D\tau\nu)$	8%	2.5%	×
$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow D\tau\nu)$	3.5σ	9%	×
$\sin 2\phi_1$	0.019	0.014	0.022
ϕ_2 ($\pi\pi$ isospin)	3.9°	1.2°	×
ϕ_2 ($\rho\pi$)	2.9°	0.9°	×
ϕ_3 ($DK^{(*)}$)	4°	1.2°	8°
ϕ_3 ($B_s \rightarrow KK$)	×	×	5°
ϕ_3 ($B_s \rightarrow D_sK$)	×	×	14°
$ V_{ub} $ (inclusive)	5.8%	4.4%	×
$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\gamma)$	$< 1.8 \times 10^{-8}$		

まとめ1 — Bの物理の現状

- $\sin 2\phi_1$ はもはや 7% の精度!
- $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ でも CP の破れ $\Rightarrow \phi_2$ への制限
- ϕ_3 にも制限がかかり、三つの角度が出揃った!
- (V_{ub} の精度も上がっている)

標準理論 (小林益川) は、世の中を非常に良く記述している

- $b \rightarrow s$ ペンギンの CPV は標準理論を越える足掛かり
- 次の手掛かりとなるたくさんの崩壊過程の発見・確立

まとめ2 — Bの物理の近未来

- ab^{-1} で数える時代はもうすぐそこ (~ 2007年)
次の新しい手掛かりはすぐそこにあるかもしれない
- LHC時代の素粒子物理
 - 新物理の存在の証明 — LHCによる新粒子の直接発見
 - B, τ などのフレーバーの物理により、新物理の同定
 - LHCb と BTeV と (少なくとも一つの) B-factory at $\Upsilon(4S)$
重なる部分も多いが、多数の手掛かりを得るために補い合うことが重要

エネルギー・フロンティアとルミノシティ・フロンティアの協調