

B physics with full reconstruction tag technique at B-factory

Takahiro Matsumoto
(Tokyo Metropolitan University)

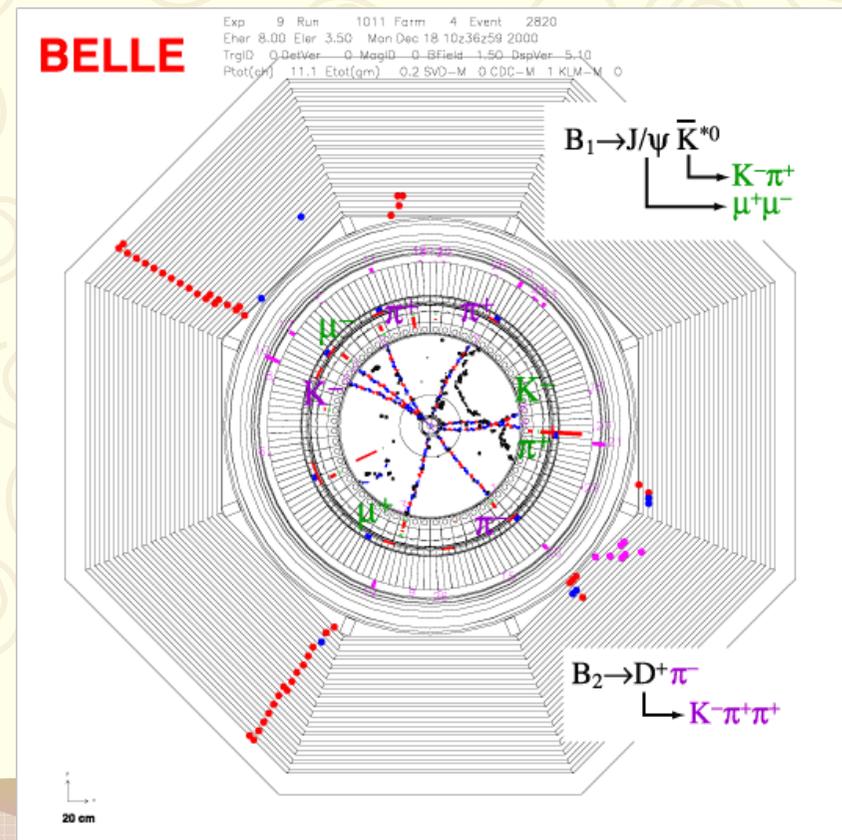
Introduction

Full recon タグを用いた
物理結果 (Belle, Preliminary)

– $|V_{ub}|$ の測定

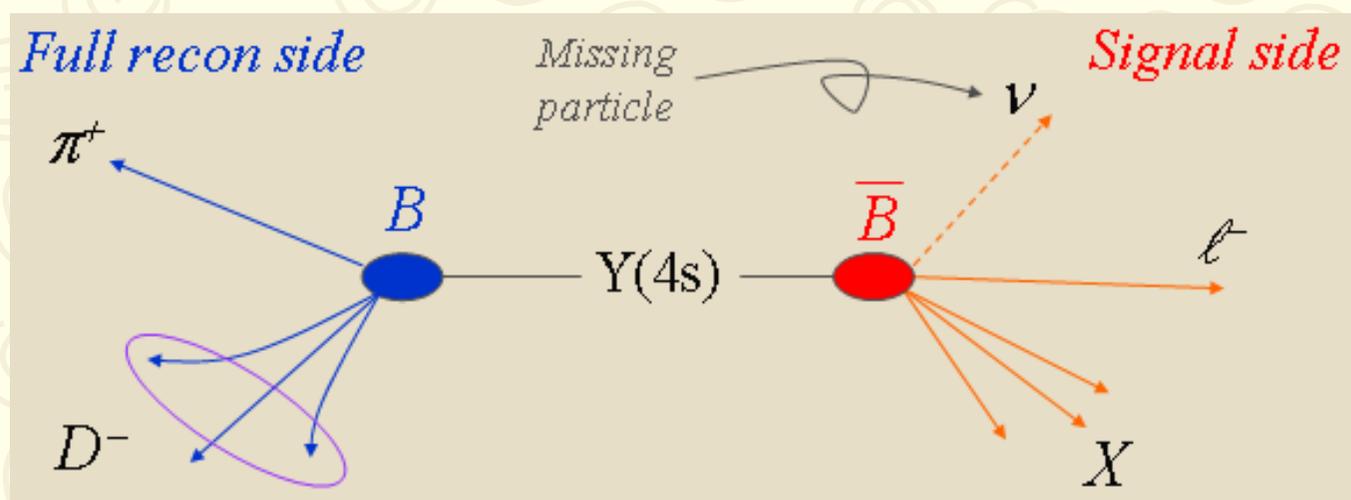
– $B \rightarrow \tau \nu$ 探索

Super B 計画



Full reconstruction tag とは？

- ❑ Bファクトリー実験で生成された B 中間子対の内、片側をハドロニックな崩壊過程 ($B \rightarrow D\pi$ など) により全再構成すること。
- ❑ 反跳側の B 中間子の運動量、フレーバーを知ることができる究極の手法 (**B 中間子ビーム**)。
- ❑ タグ効率は $O(0.1\%)$ と小さいが、Belle 実験における B 中間子収集事象の増加に伴い、物理解析への応用が去年からようやく注目されはじめてきた。



* ν を終状態に含む崩壊過程に対して最も威力を発揮する。

Full recon を用いた物理結果 (Belle)

$|V_{ub}|$ 関連



- 崩壊分岐比、 $|V_{ub}|$ 測定 (hep-ex/0408115)



$|V_{cb}|$ 関連

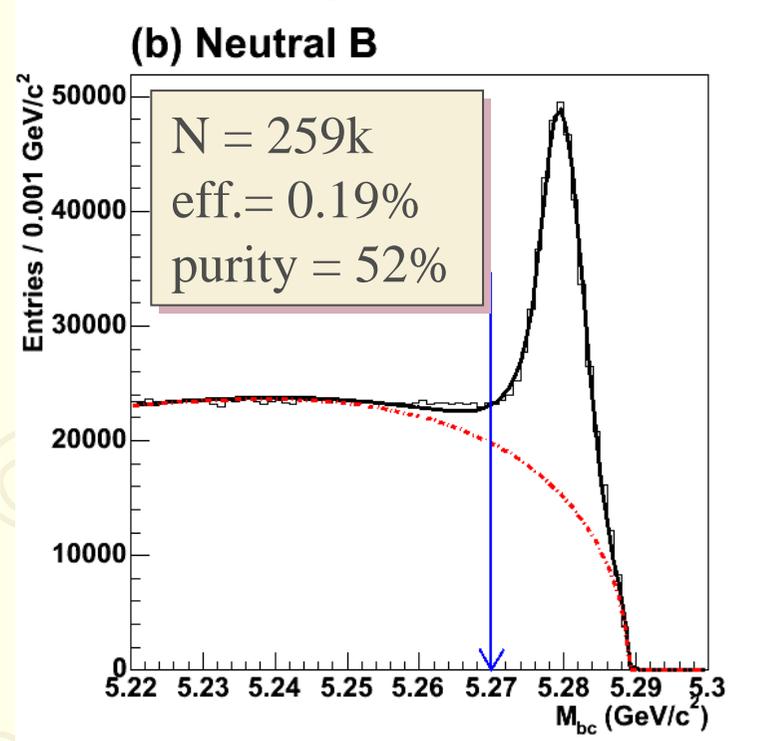
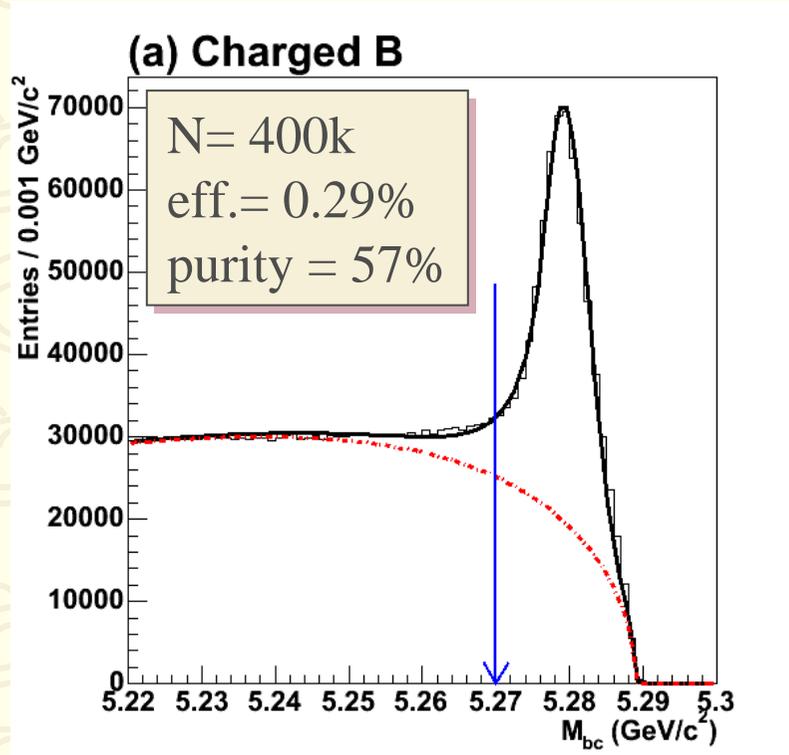


- 崩壊分岐比測定 (hep-ex/0411066, submitted to PLB)
- Hadronic mass moments 測定 (hep-ex/0408139)
- Electron energy moments 測定 (hep-ex/0409015)

全再構成された B 中間子事象

250fb⁻¹

事象数 ~660k、収集効率 ~0.3%、Purity ~ 0.5



Beam constrained mass

$$M_{bc} = \sqrt{E_{beam}^2 - P_B^2}$$

B中間子事象に対して

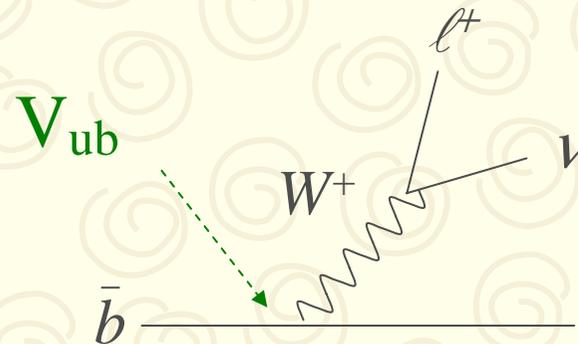
m ~ 5.28 GeV/c²、σ ~ 3 MeV/c²

今年中には 100万個以上の全再構成事象を収集できる！

$B \rightarrow X_u \ell \nu$ w/ full recon

目的

– $|V_{ub}|$ の測定



PDG formula $|V_{ub}| = 0.00424 \left[\frac{B(B \rightarrow X_u \ell \nu) 1.61 ps}{0.002 \tau_B} \right]^{1/2}$ + latest HQ parameters (5% uncertainty)

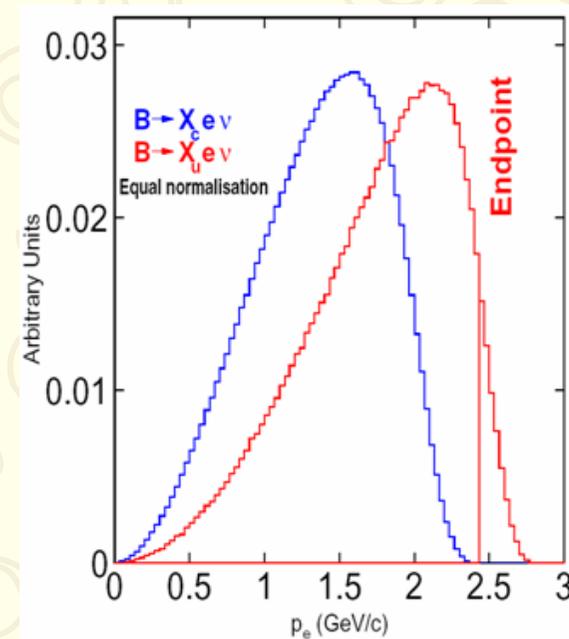
チャレンジングである点

- 約50倍のバックグラウンド、 $B \rightarrow X_c \ell \nu$ の抑制
- $|V_{ub}|$ 測定における理論の不定性をできるだけ抑える

2つの方法の比較

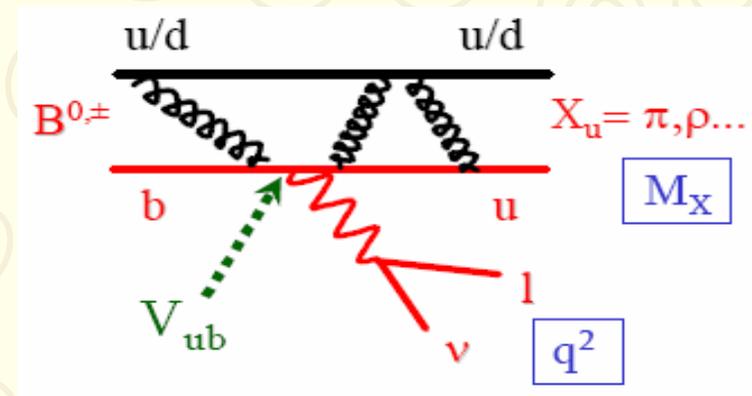
Endpoint lepton energy (タグなし)

- きついカット ($p_\ell > 2.3 \text{ GeV}/c$)が必要
- 約10%の事象しか使用できない
- 全体の崩壊分岐比への外挿時における理論の不定性が大きくなる



M_X, q^2 変数による方法 (タグあり)

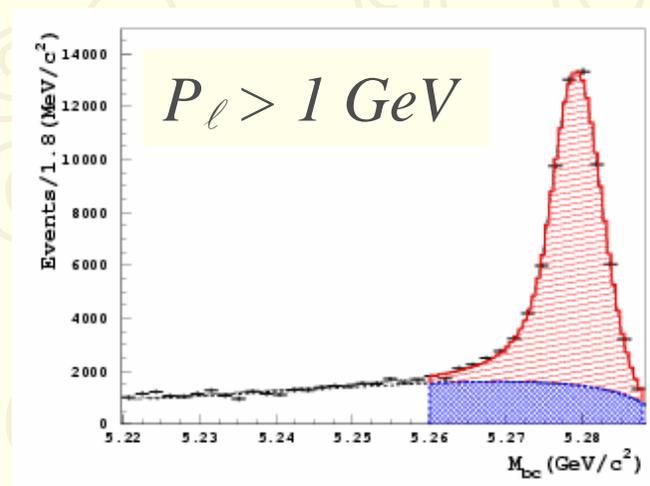
- バックグラウンドをより制御できる
- より広い領域のフェーズスペースにおける事象を利用できる
- 理論の不定性をより制御できる可能性がある!



$B \rightarrow X_u \ell \nu$ w/ full recon

Recoil selection

- Lepton momentum
 - $P_l > 1.0 \text{ GeV}/c$
- Missing momentum square
 - $-1.0 < MM^2 < 0.5 \text{ GeV}^2/c^4$
 - (ν が一つある事象を選択)

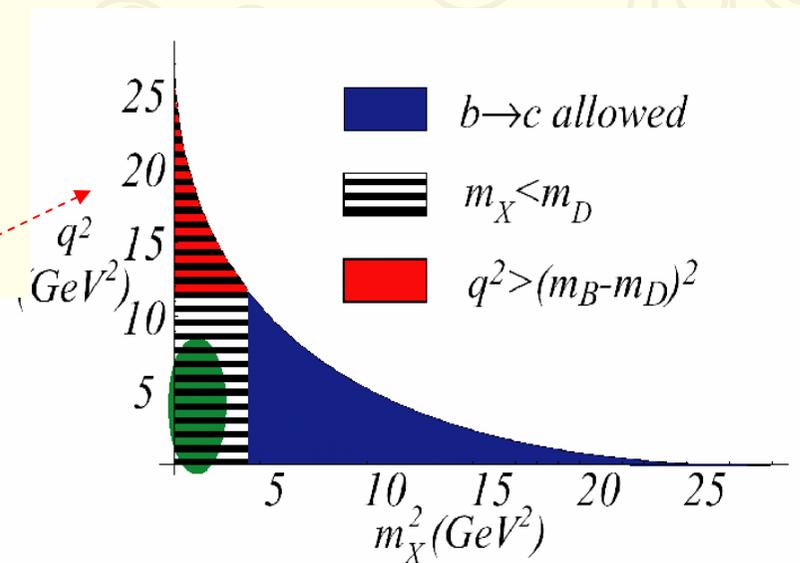


Veto for $B \rightarrow X_c \ell \nu$

- Kaon Veto
- $N(\text{lepton}) = 1$

$$M_X < 1.7 \text{ GeV}/c^2, \quad q^2 > 8 \text{ GeV}^2$$

Event fraction, $f_u = 0.294$



$\Delta B(B \rightarrow X_u \ell \nu)$ 測定 ($M_X < 1.7 \text{ GeV}/c^2$, $q^2 > 8 \text{ GeV}^2$)

M_X distribution ($q^2 > 8 \text{ GeV}^2$)

M_X 分布から

– $N(b \rightarrow u) = 174 \pm 26$

M_X , q^2 で限られた領域における崩壊分岐比をまず推定する

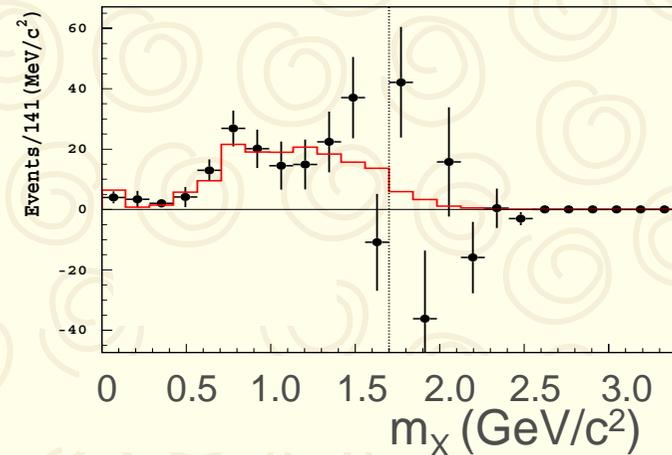
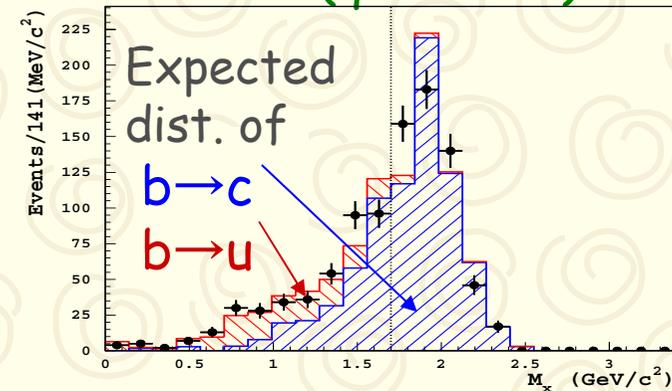
$$\Delta B(B \rightarrow X_u \ell \nu) = B(B \rightarrow X \ell \nu) (N_{b \rightarrow u} / N_{sl}) (\eta / \epsilon_{b \rightarrow u})$$

$N_{sl} = (50.7 \pm 0.4) \times 10^3$

$\eta = 0.74 \pm 0.05$ ← detection bias

$\epsilon_{b \rightarrow u} = 0.274$ ← $b \rightarrow u$ selection eff.

$B(B \rightarrow X \ell \nu) = 0.1073 \pm 0.0028$ (PDG2004)
→ 系統誤差をへらすため使用



$$\Delta B(B \rightarrow X_u \ell \nu) = [0.99 \pm 0.15 \pm 0.18 \pm 0.04 \pm 0.07] \times 10^{-3}$$

stat. syst. $b \rightarrow u$

いよいよ $|V_{ub}|$ 測定

f_u の推定

$$B(B \rightarrow X_u \ell \nu) = \Delta B(B \rightarrow X_u \ell \nu) / f_u$$

f_u は OPE (Operator Product Expansion) に基づく摂動QCDで計算する。しかし、摂動計算をより正しく行うために Shape Function に実験で決めたパラメータを適用する必要がある。

- **B quark mass**、**Fermi motion** inside B meson
- $B \rightarrow X_s \gamma$ の E_γ スペクトラム分布から評価

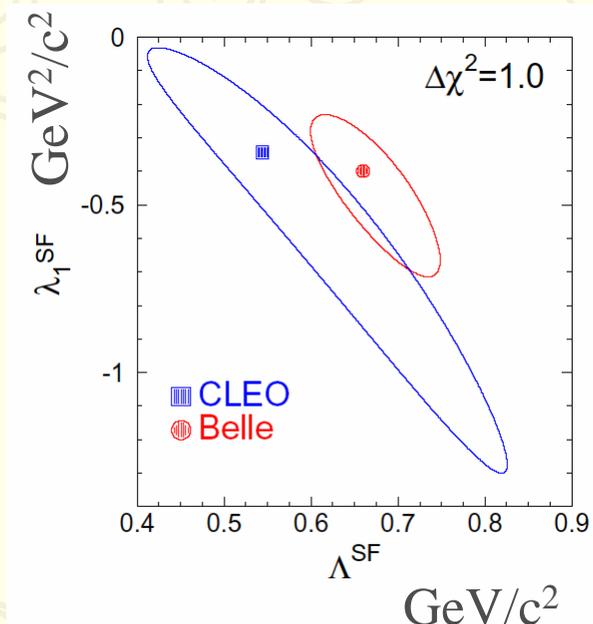
$$f_u = 0.294 \pm 0.044$$

崩壊分岐比から $|V_{ub}|$ 測定

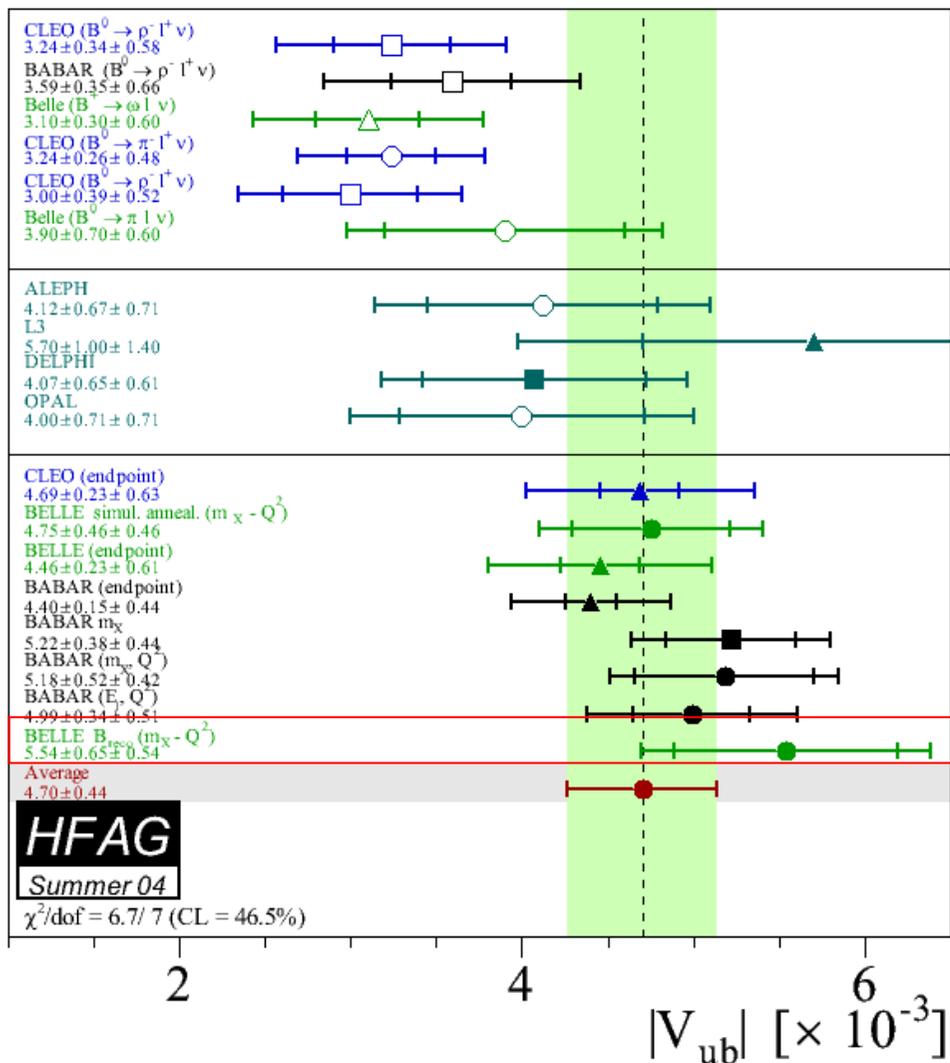
$$|V_{ub}| = [5.54 \pm 0.42 \pm 0.50 \pm 0.12 \pm 0.19 \pm 0.42 \pm 0.27] \times 10^{-3}$$

stat. syst. $b \rightarrow u$. $b \rightarrow c$. f_u $\text{Br} \rightarrow |V_{ub}|$

hep-ex/0407052



$|V_{ub}|$ の測定値



さまざまな $|V_{ub}|$ 値...

HFAG では、同じ理論体系に基づく値を今のところ使っている。

$|V_{ub}| = (4.70 \pm 0.44) \times 10^{-3}$
- 10%の誤差

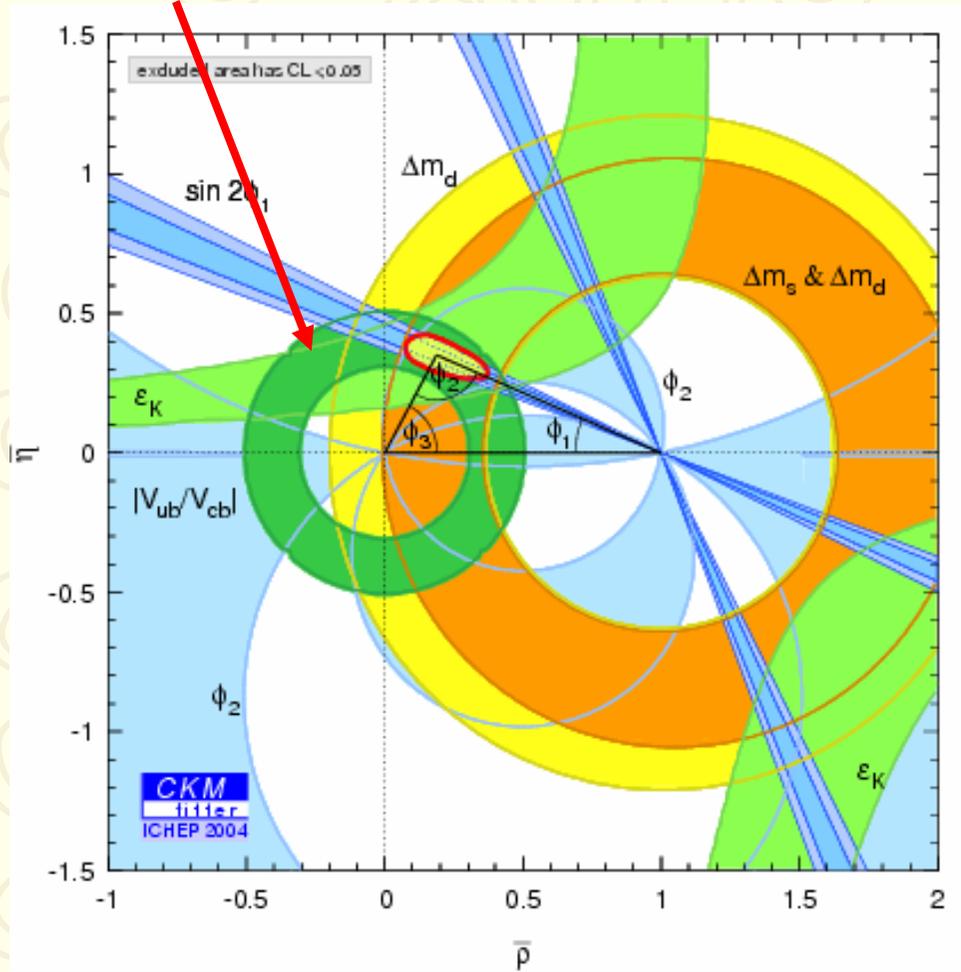
将来への見通し

- Full recon サンプルの増加
- 実験データにより理論不定性をもっと抑える
- Unquenched 手法に基づく Form factor を用いた Exclusive による $|V_{ub}|$

などにより、より精度の高い $|V_{ub}|$ 測定を目指す！

ユニタリティー三角形と $|V_{ub}|$

$|V_{ub}/V_{cb}|$



- $|V_{ub}/V_{cb}|^2 \sim \rho^2 + \eta^2$
- $|V_{ub}|$ (+ $|V_{cb}|$) の精密測定により小林益川モデルを検証できる
- $B \rightarrow J/\Psi K_S$ による $\sin 2\phi_1$ 測定と異なる側面からの検証という意味で重要

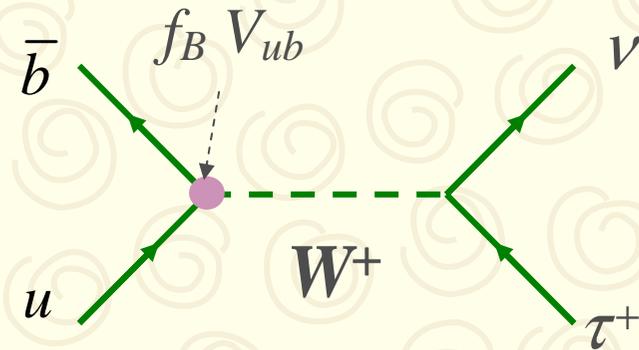
B⁺ → τ⁺ ν の探索

同様に |V_{ub}| に関わるが、崩壊分岐比は小さい

$$\Gamma(B^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau) = \frac{G_F^2 m_B m_\tau^2}{8\pi} \left(1 - \frac{m_\tau^2}{m_B^2}\right) f_B^2 |V_{ub}|^2$$

Helicity suppression

Calculated through Lattice QCD



SM: (1.2 +/- 0.5) x 10⁻⁴ (CKM fitter, hep-ph/0406184)

目的

- SM prediction のテスト
- New physics の探索

$$r_H = 1 - \tan^2 \beta \frac{m_B^2}{m_{H^\pm}^2}$$

- ex.) もしCharged Higgs があると → Br = Br(SM) x r_H
→ tanβ/M_H に制限

$B^+ \rightarrow \tau^+ \nu$ w/ full recon

❏ チャレンジングである点

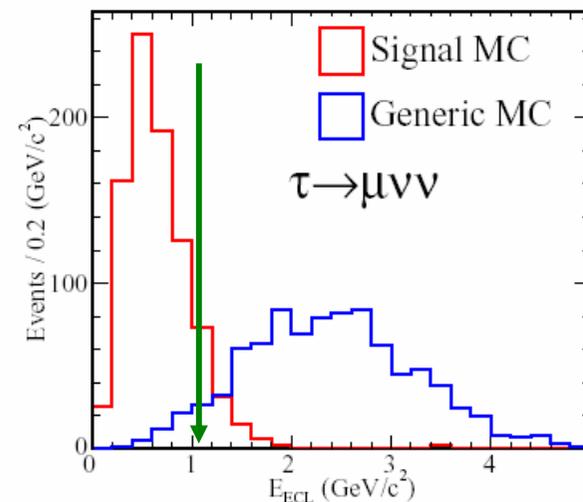
- $B^+ \rightarrow \tau^+ \nu$, $\tau^+ \rightarrow \ell \nu \nu$, $n \pi \nu$
- 終状態に複数のニュートリノ

❏ Recoil selection

- No extra charged track/ π^0
- Missing momentum cut depending on the mode
 - $P_{\text{miss}} > 1.0 \sim 1.2 \text{ GeV}/c$
- Mass cuts for intermediate states
- Residual energy, E_{ECL}
 - $E_{\text{ECL}} = E_{\text{tot}} - E_{\text{rec},B} - E_{\text{track}}$
 - $E_{\text{ECL}} < 1.0 \sim 2.2 \text{ GeV}$

Decay Mode	Branching ratio (%)
$\tau^- \rightarrow \mu^- \nu \bar{\nu}$	$17.37 \pm 0.06\%$
$\tau^- \rightarrow e^- \nu \bar{\nu}$	$17.84 \pm 0.06\%$
$\tau^- \rightarrow \pi^- \nu$	$11.06 \pm 0.11\%$
$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \nu$	$25.40 \pm 0.14\%$
$\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \nu$	$9.52 \pm 0.09\%$

~ 80% の τ 崩壊を使用

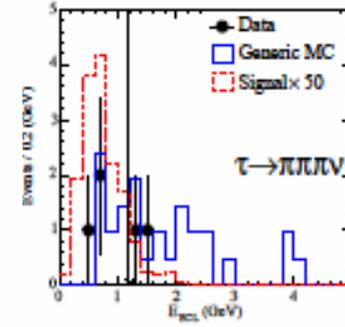
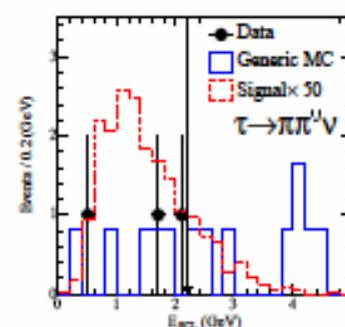
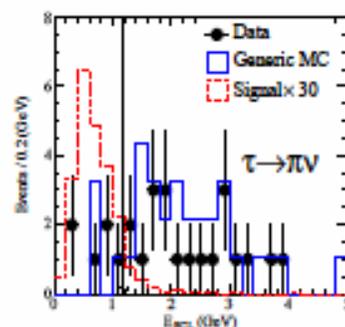
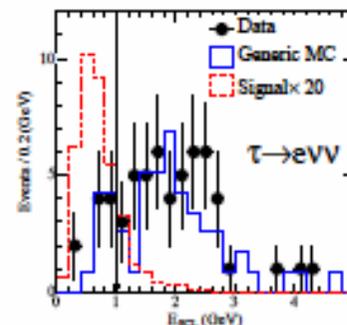
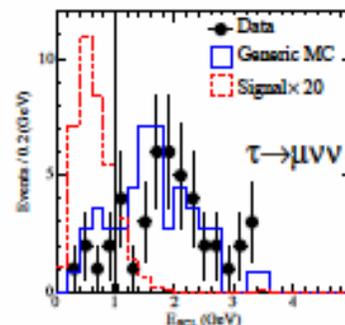


B⁺ → τ⁺ν の結果

シグナル領域における事象数をカウント

CLを用いてBr(B⁺ → τ⁺ν)のUpper limitを求める
(CL(s+b)/CL(b) = 1 - 0.9)

* Modified frequentist approach
- NIM A434, 435, 1999

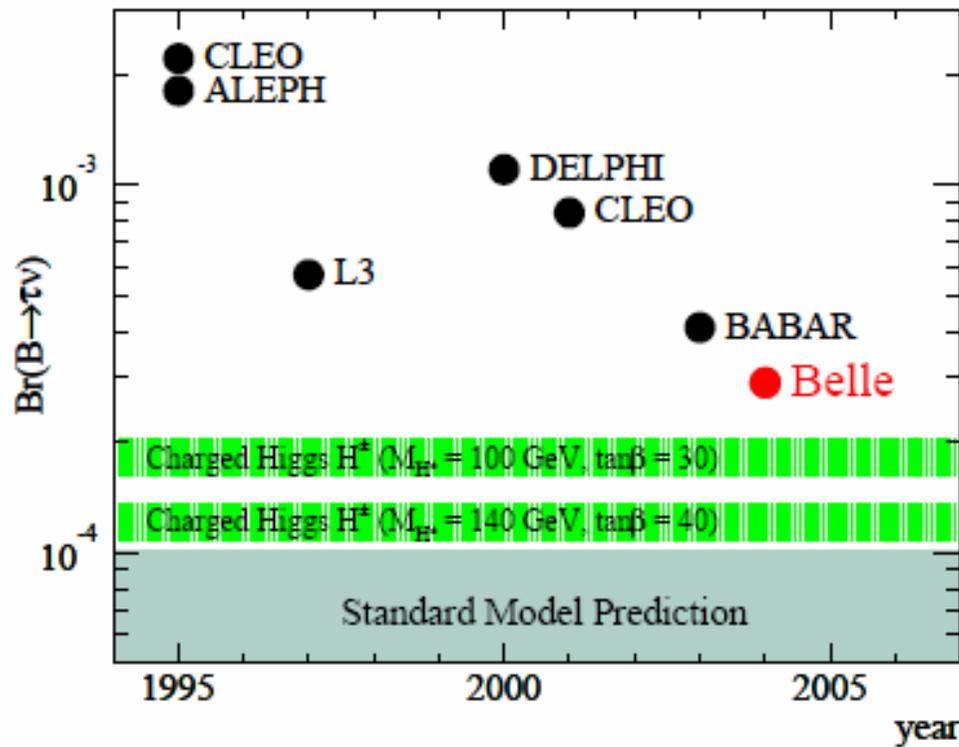


τ Decay Mode	Efficiency × BR (%)	Background Expected	Observed Events	Observed limit (90% C.L.)
τ ⁻ → μ ⁻ ν [̄]	9.2 ± 1.6	9.8 ± 2.9	6	3.0 × 10 ⁻⁴
τ ⁻ → e ⁻ ν [̄]	8.8 ± 1.6	9.4 ± 2.9	10	4.6 × 10 ⁻⁴
τ ⁻ → π ⁻ ν [̄]	4.1 ± 0.5	5.4 ± 2.1	6	7.2 × 10 ⁻⁴
τ ⁻ → π ⁻ π ⁰ ν	1.8 ± 0.2	4.1 ± 1.6	3	10.5 × 10 ⁻⁴
τ ⁻ → π ⁺ π ⁻ π ⁺ ν	1.6 ± 0.2	4.8 ± 1.6	3	11.7 × 10 ⁻⁴
Combined				2.9 × 10 ⁻⁴

140fb⁻¹

観測された事象数はバックグラウンドの予測と一致

Br(B⁺ → τ⁺ν) の歴史

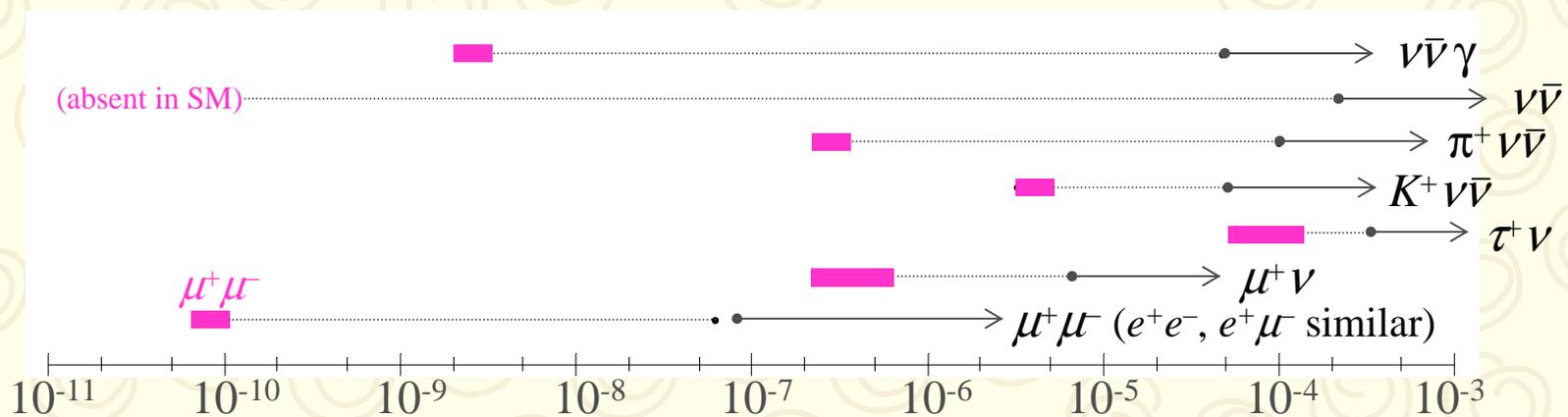


- Belle の結果が最も厳しいリミットを与える。
- 年々、SMの予測値に近づいてきている。
- B⁺ → τ⁺ν 観測まであともう少し？ (数年?)

$$\text{Br}(B^+ \rightarrow \tau^+ \nu) < 2.9 \times 10^{-4} \text{ (@90\% CL), } \tan\beta/M_{H^+} < 0.33 \text{ GeV}^{-1}$$

もっとルミノシティが欲しい！

- Full recon タグを用いて $|V_{ub}|$ 測定、 $B \rightarrow \tau \nu$ を用いた新しい物理探索が可能。しかし、これらの測定は始まったばかり。実質的に意味のある測定をするためには、ルミノシティを格段にあげる必要がある。
- ν を終状態に含む他過程の探索も同様 (SM値から遠い...)
 - $B \rightarrow K \nu \nu, D^{(*)} \tau \nu$ etc.

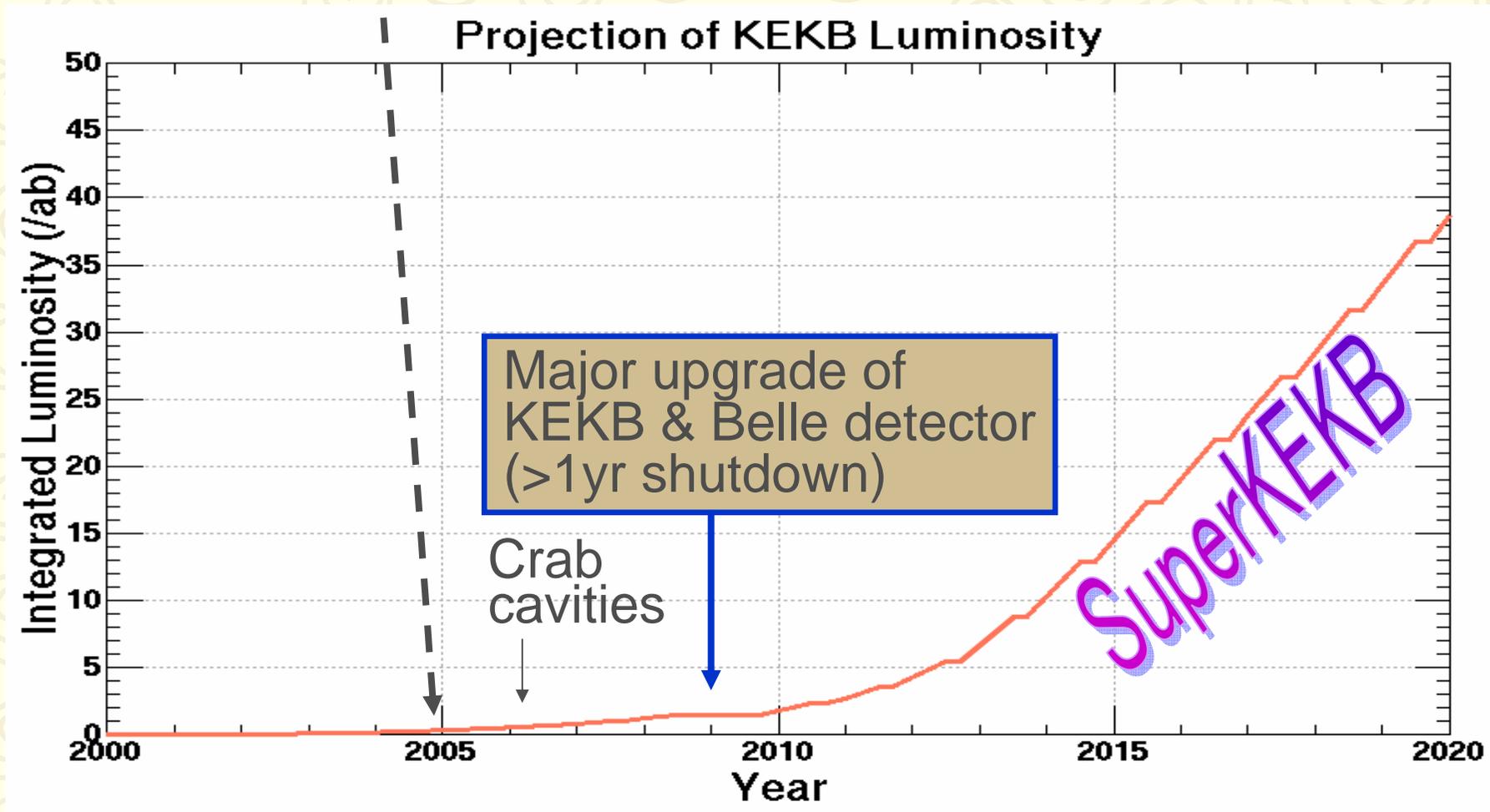


Super B Factory at KEK!

More than 10^{10} $B\bar{B}$
Or $\sim x 100$ Data

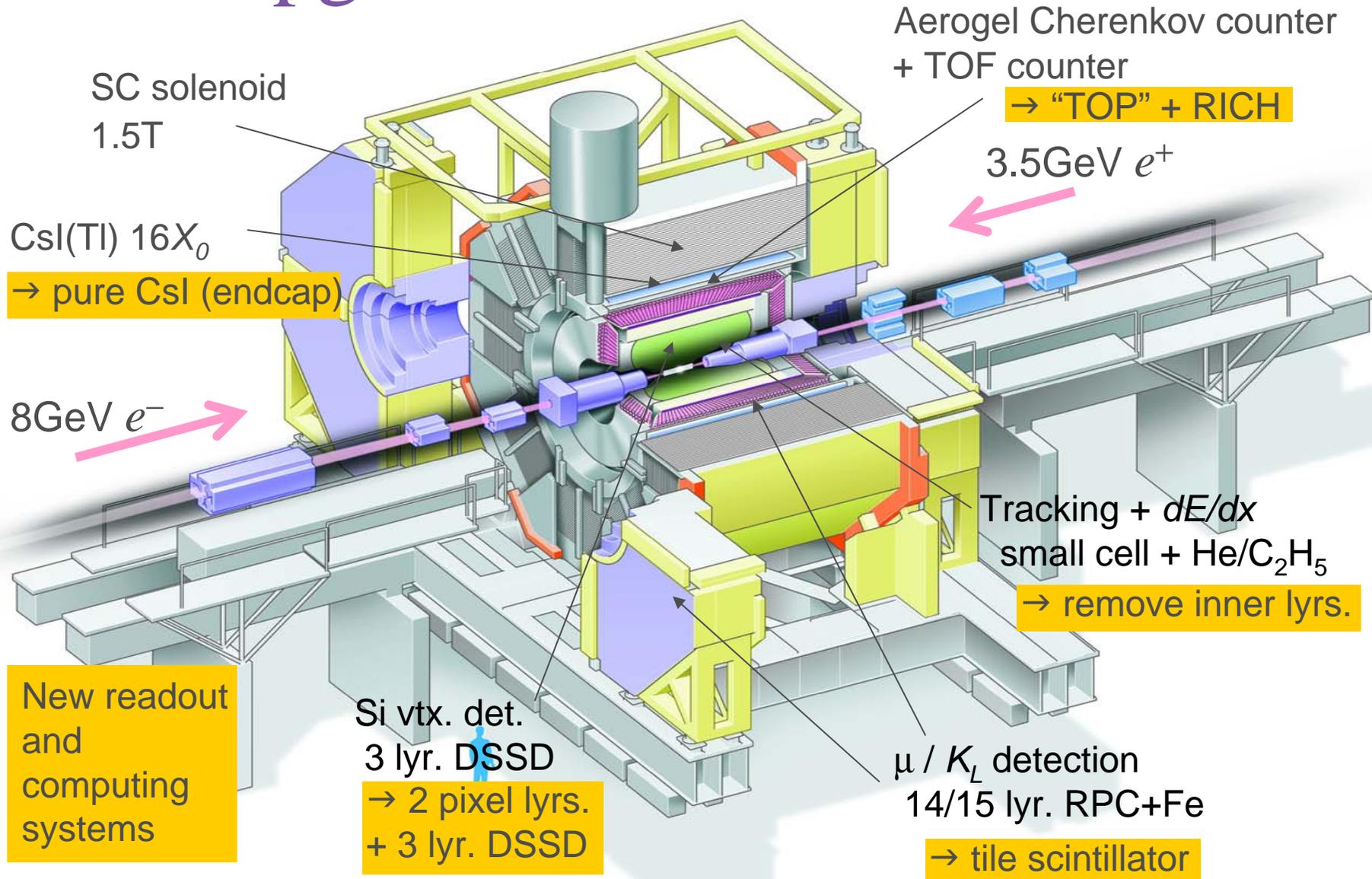
World records !

L_{peak} ($\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$) 1.5×10^{34} \rightarrow 5×10^{34} \rightarrow 5×10^{35}
 L_{int} 360 fb^{-1} \rightarrow $\sim 1 \text{ ab}^{-1}$ \rightarrow $\sim 10 \text{ ab}^{-1}$



Belle Upgrade

- 検出器性能の改良 (PID など)
- 20倍のバックグラウンドで Operation



Summary of physics reach

LoI Executive Summary Table 1

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	×
$\Delta\mathcal{S}_{K_S^0 K_S^0 K_S^0}$	0.14	0.04	×
$\Delta\mathcal{S}_{\pi^0 K_S^0}$	0.10	0.03	×
$\sin 2\chi (B_s \rightarrow J/\psi\phi)$	×	×	0.058
$\mathcal{S}_{K^{*0}\gamma}$	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 ($B_s \rightarrow D_s K$)	×	×	14°
$ V_{ub} $ (inclusive)	5.8%	4.4%	×
$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\gamma)$	$< 1.8 \times 10^{-8}$		

Items with Full recon tag
* Impossible at LHCb

Summary

- Full recon タグにより、運動量、フレーバーが既知の究極の B中間子ビームを得ることができる。
- KEKB加速器の性能向上により、100万個に近い全再構成 B中間子事象が既に得られており、多様な物理測定が始められている。
- しかしながら、殆どの物理測定は統計でリミットされている。より高いルミノシティが必要不可欠。
- Super B プロジェクトでは、最終的には現在の 100倍に近いデータを収集する予定。これらのデータを用いて、小林・益川モデルを十分な精度でのテストし、新しい物理の発見、モデルの検証へと結びつけていきたい。