

Bの物理

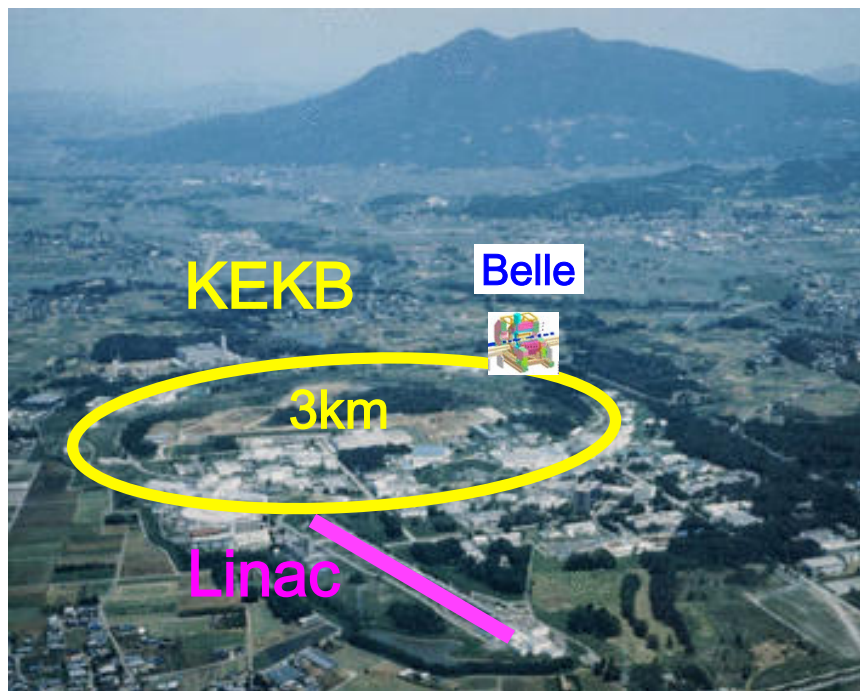
西田 昌平

KEK

将来計画検討小委員会

2009年11月7日

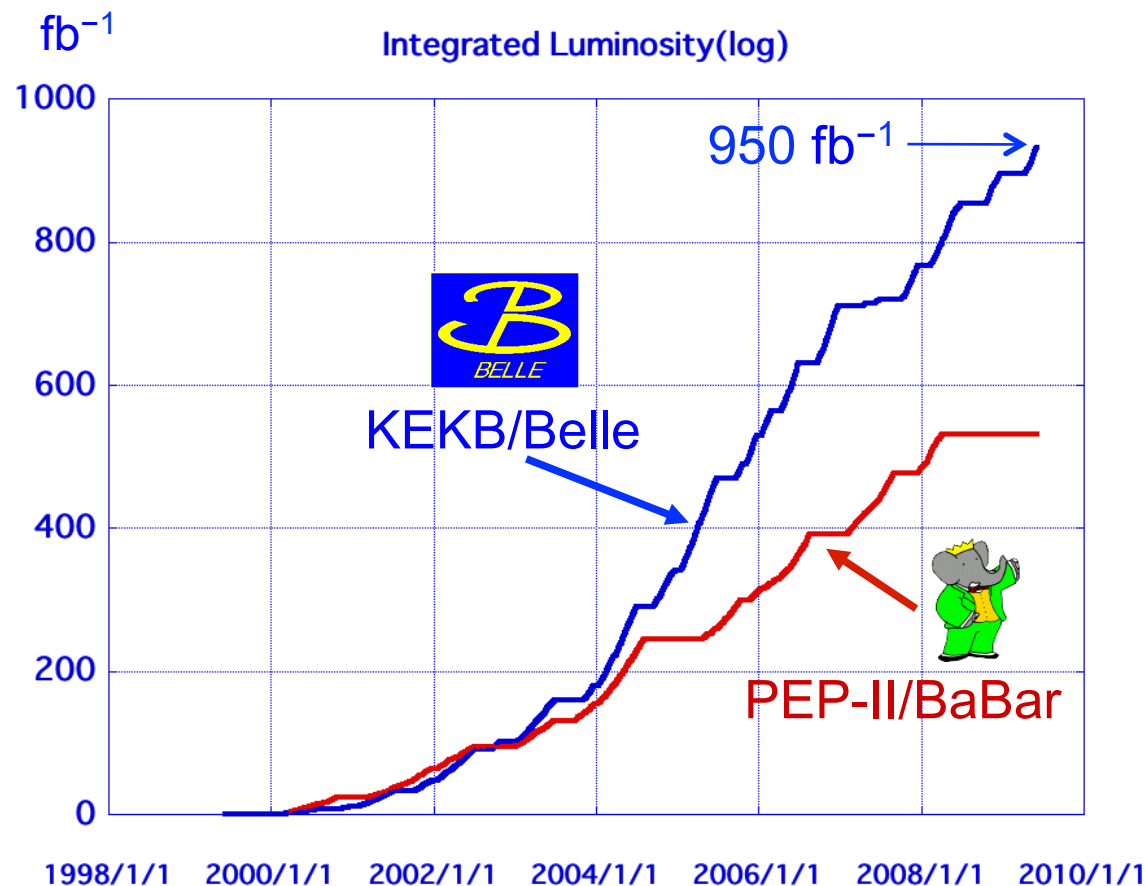
- Introduction
 - ✓ Belle実験
 - ✓ Belleのアップグレードと他の実験
- Belle II におけるBの物理
 - ✓ $b \rightarrow s$ 遷移のCP非対称性
 - ✓ $b \rightarrow s\gamma$ のCP非対称性、偏極度
 - ✓ 現在「ずれ」が見えている(?)モード: $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$, $B \rightarrow K\pi$
 - ✓ $B \rightarrow \tau \nu$
 - ✓ ユニタリティー三角形
 - ✓ LHCb との比較
- まとめ

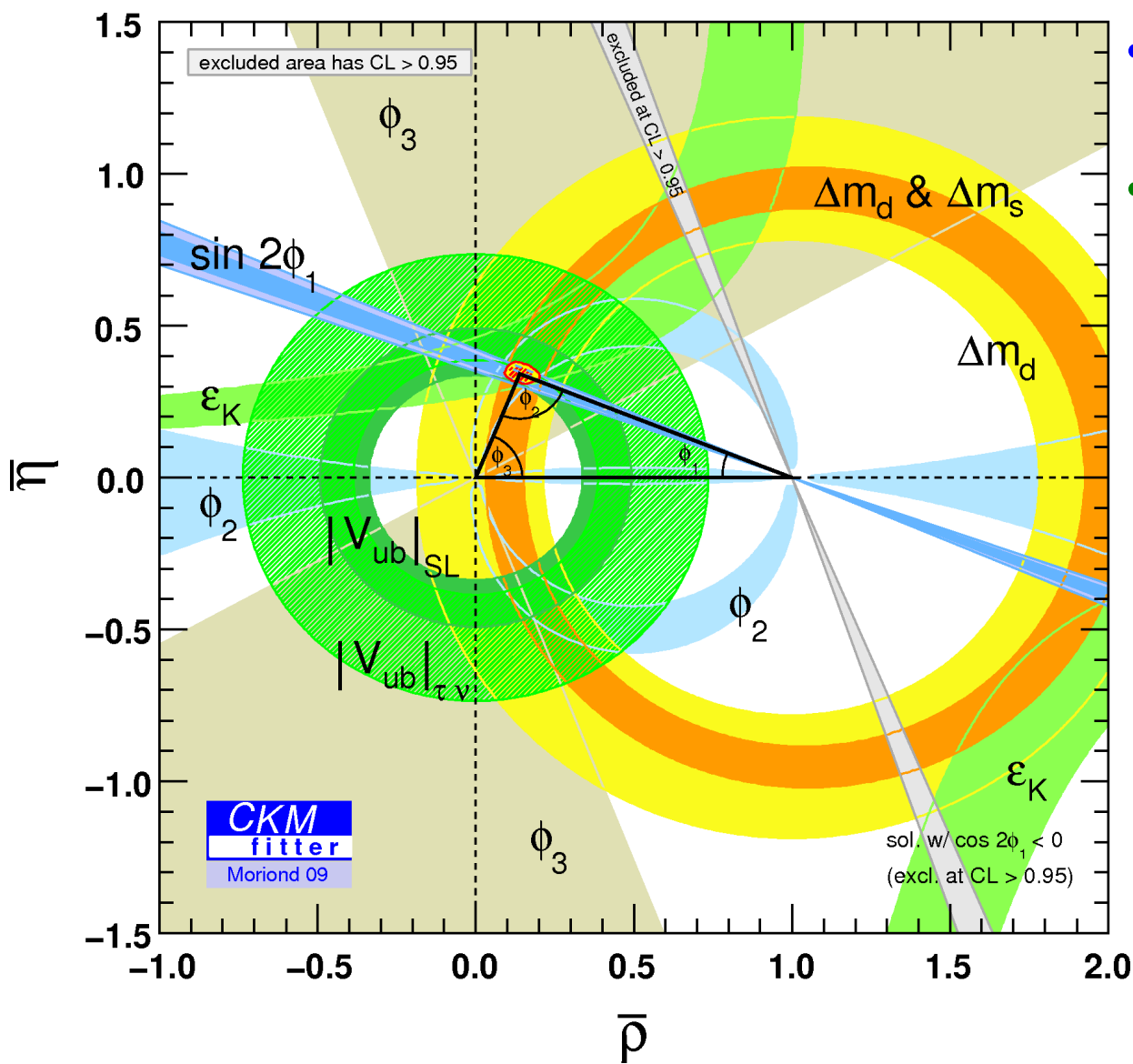


- 周長 3km
- 非対称電子陽電子衝突型
加速器KEKB
 - 電子8GeV
 - 陽電子3.5GeV

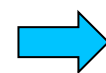
$$e^+e^- \rightarrow \Upsilon(4S) \rightarrow B\bar{B} \quad (1.1\text{nb})$$

$$1 \text{ fb}^{-1} \sim 10^6 B\bar{B}$$

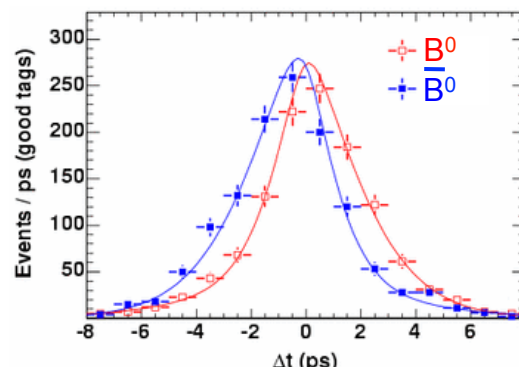




- B中間子系でのCP対称性の破れの発見
- ユニタリティー三角形の精密測定



小林益川理論の証明

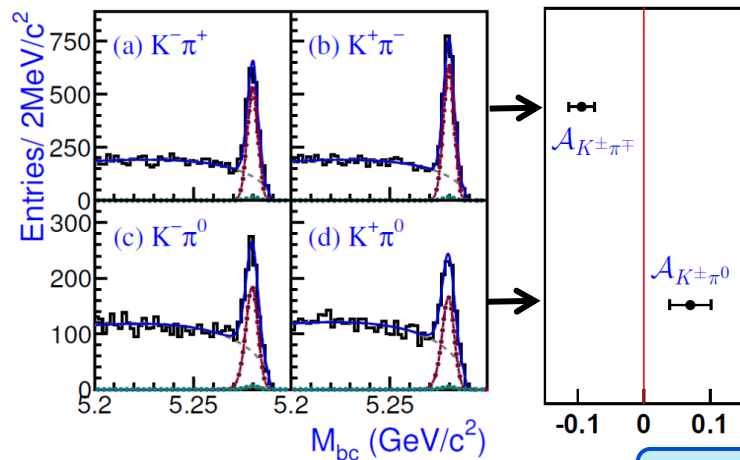


今後のBファクトリーは、
新しい物理の研究が課題

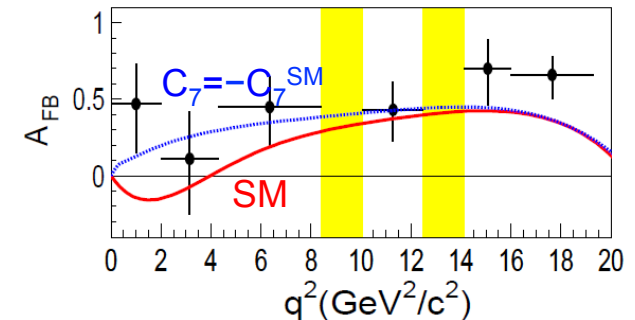
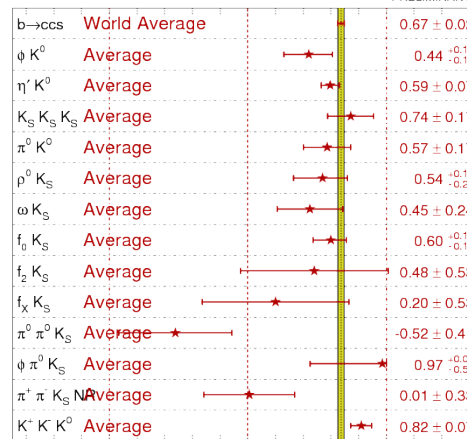
$b \rightarrow s$ 遷移でCP非対称性に異常？

$B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$ の前後方非対称性に異常？

B^0 と $B^\pm$ でCP非対称性の大きさに差異

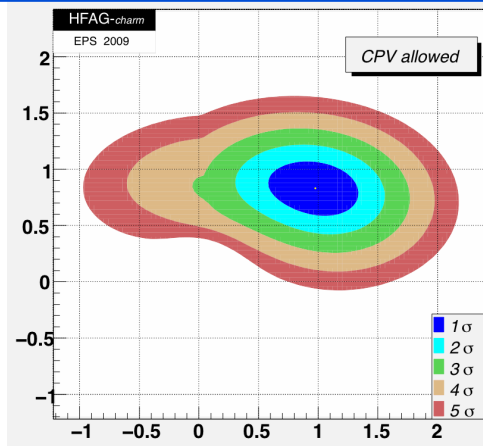


$\sin(2\beta^{\text{eff}}) \equiv \sin(2\phi_1^{\text{eff}})$

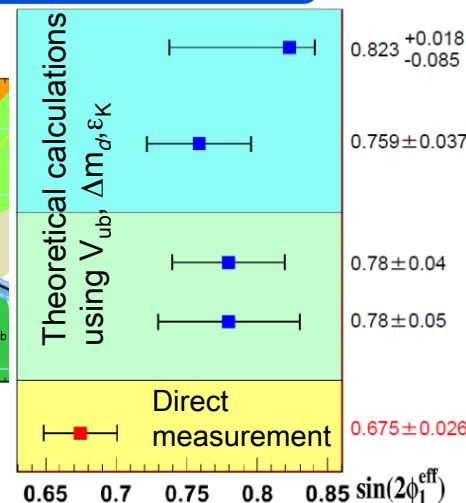
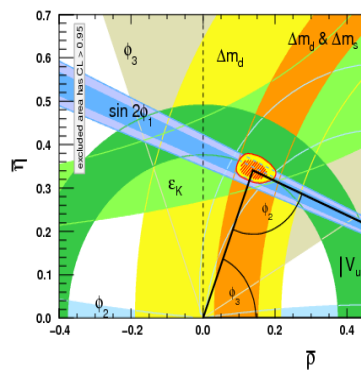


Belleでも新物理の信号が見え始めている？

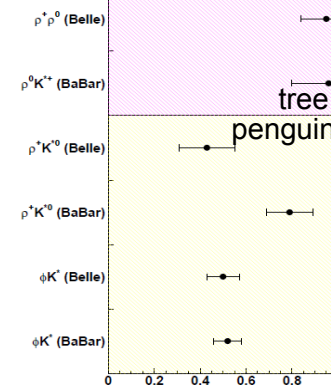
予想外に大きな D^0 - $\bar{D}^0$ 混合



ユニタリティー三角形に矛盾？

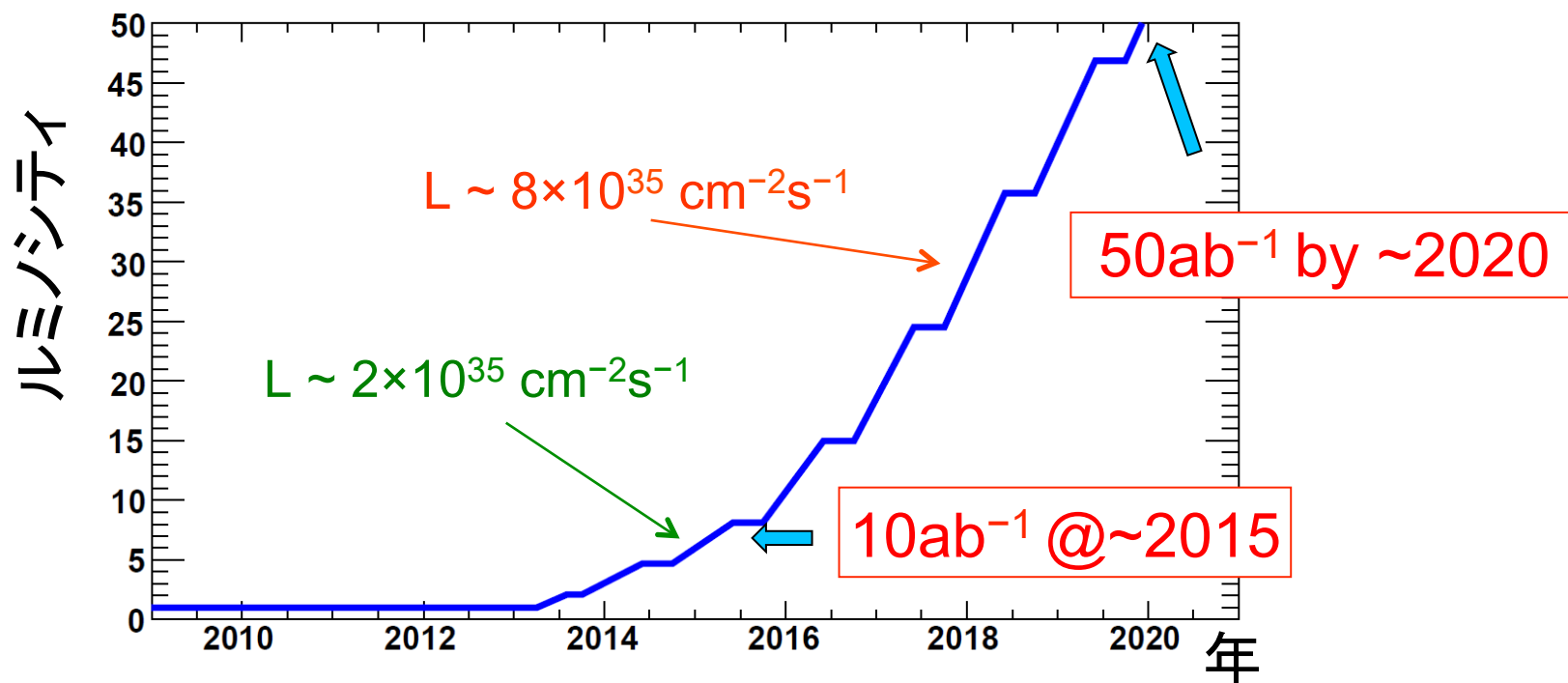


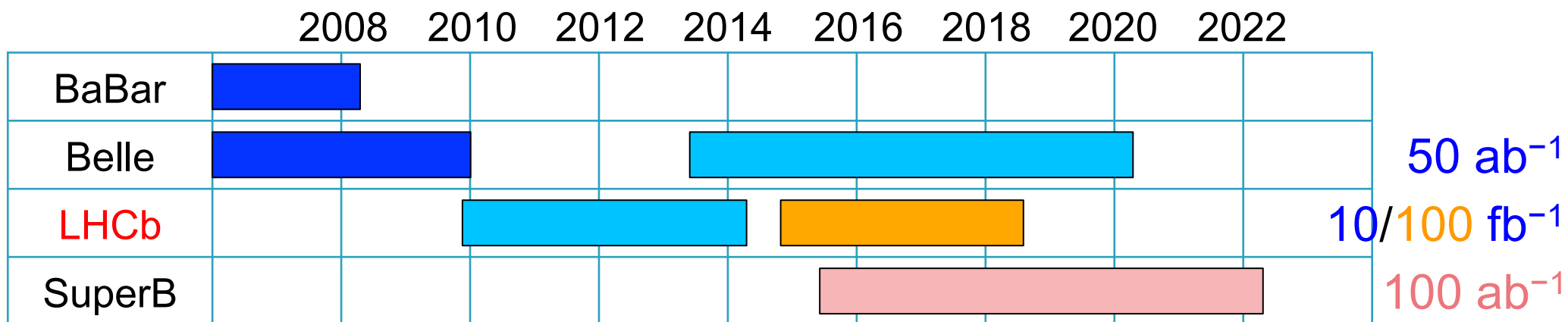
$f_L(B \rightarrow VV) \neq 1$



- (LHCで発見されると期待される) TeVスケールの新物理の解明。
- 小林益川行列のCP位相以外の、新しいCP位相の探索。
- これまでの「兆候？」の検証

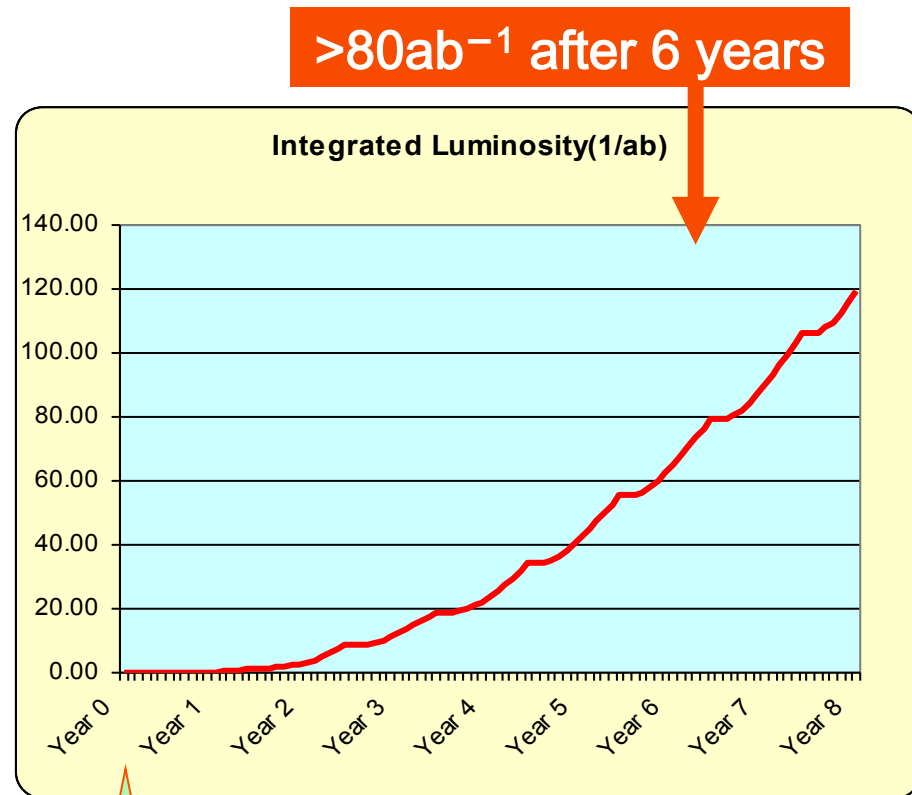
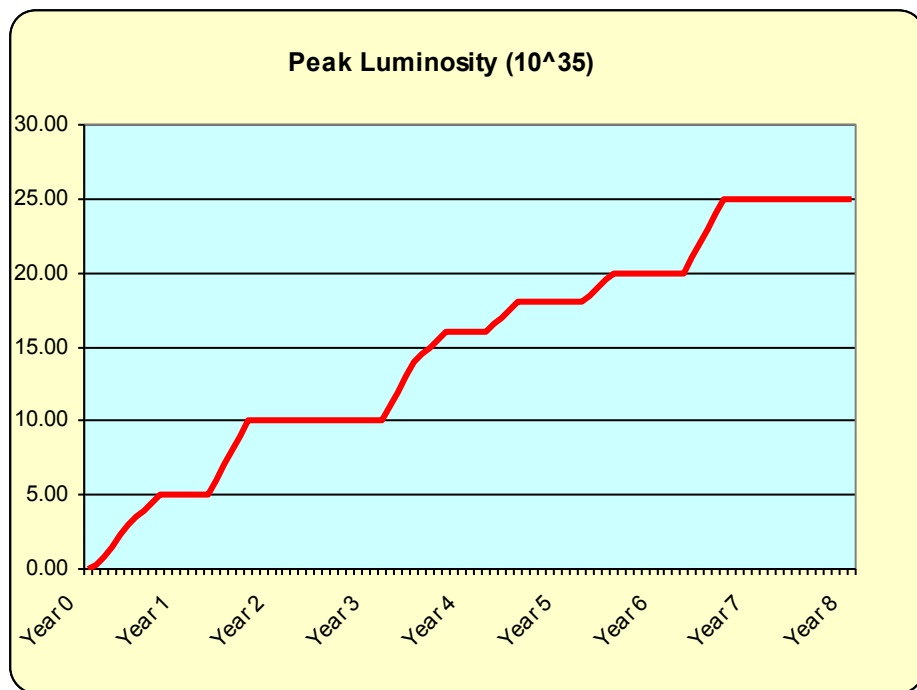
→ SuperKEKB加速器&Belle II実験





- BaBar (SLAC) は 2008年4月7日に運転終了
- Belle (KEK) は 2009年末で運転終了予定(2010年度も走る可能性も)
→ 3年間のシャットダウンを経て、2013年度にBelle II として再開
- LHCb (CERN)はLHCでのBの実験
 - 開始後5年間で10 fb^{-1} のデータを蓄積
 - アップグレード後、100 fb^{-1} のデータを蓄積
- SuperB(伊)は、7年間で > 100 ab^{-1} 。2015年開始？

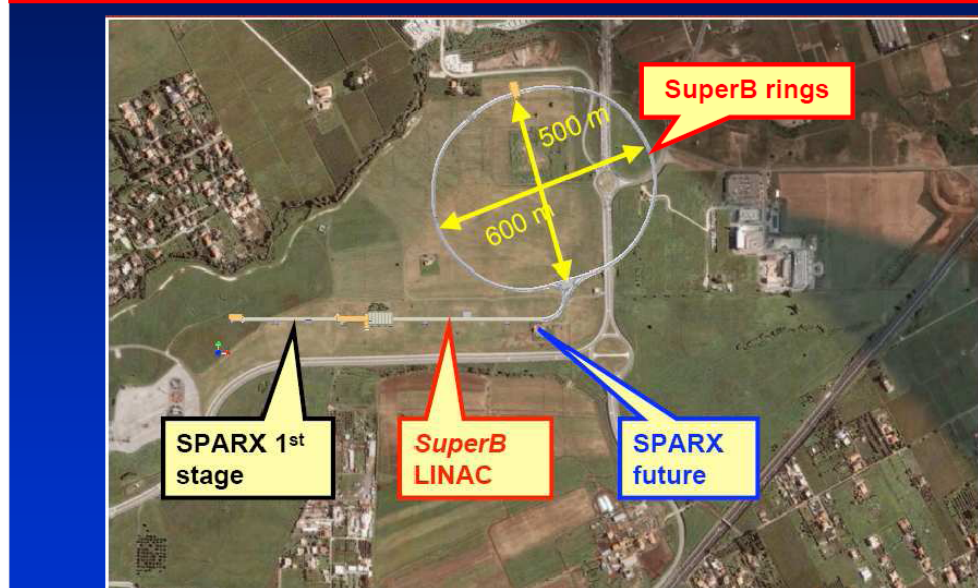
- 物理の目標は SuperKEKB と同じ
- 片側のビームを偏極させる(τ の物理)、charm threshold で走るのが重要と主張



2015?

[M.Giorgi @ SuperB Physics Workshop (2009/04)]

SuperB footprint on Tor Vergata site



21

Or Frascati



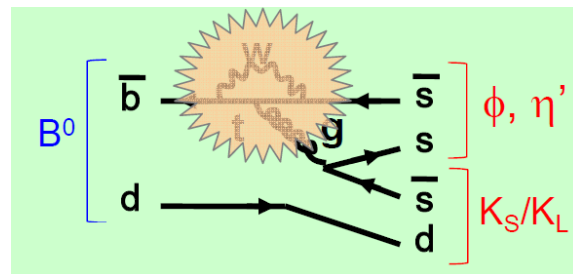
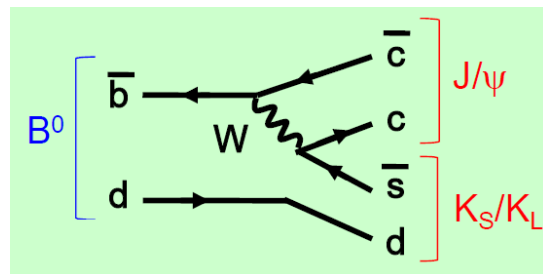
- 物理のゴールは共通。
- サイトはまだ決まっていない(トンネルもインフラも整っていない)。
- 測定器はSLACから移設して改造、加速器の磁石もLERはSLACから移設。

- Introduction
 - ✓ Belle実験
 - ✓ Belleのアップグレードと他の実験
- Belle II におけるBの物理
 - ✓ $b \rightarrow s$ 遷移のCP非対称性
 - ✓ $b \rightarrow s\gamma$ のCP非対称性、偏極度
 - ✓ 現在「ずれ」が見えている(?)モード: $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$, $B \rightarrow K\pi$
 - ✓ $B \rightarrow \tau \nu$
 - ✓ ユニタリティー三角形
 - ✓ LHCb との比較
- まとめ

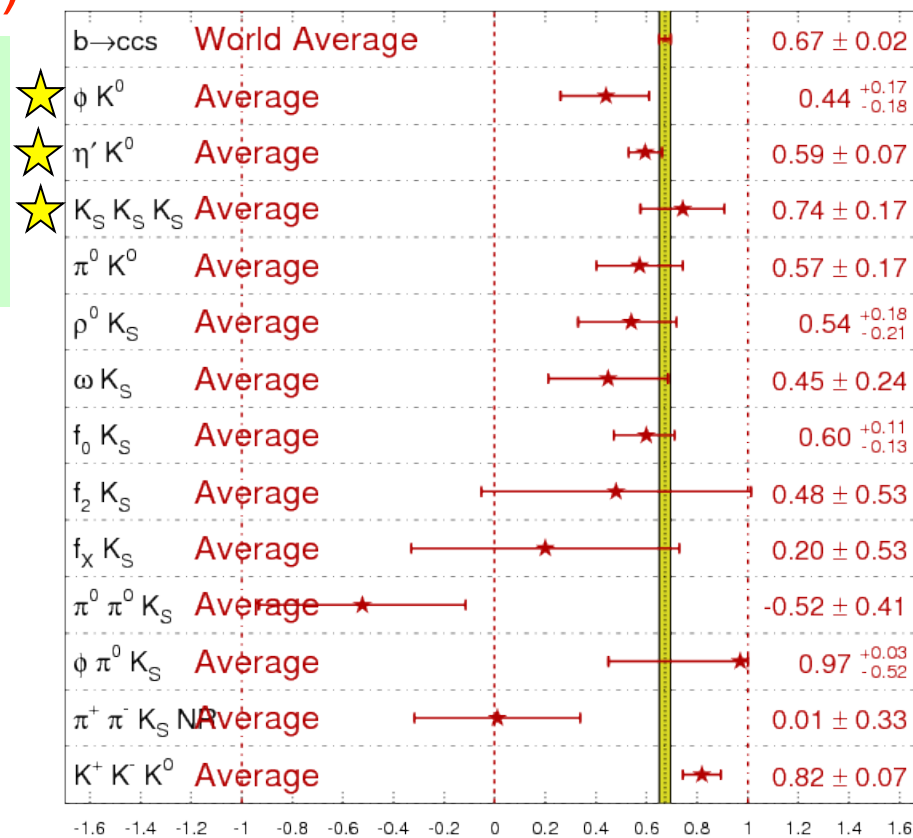
新物理の識別に用いるモードの例: **b→s 遷移でのCP非対称性**

$B \rightarrow J/\psi K^0$ (b→c) **$B \rightarrow \phi K^0, \eta' K^0$ (b→s)**

$\sin(2\beta^{\text{eff}}) \equiv \sin(2\phi_1^{\text{eff}})$ **HFAG**
FPCP 2009
PRELIMINARY



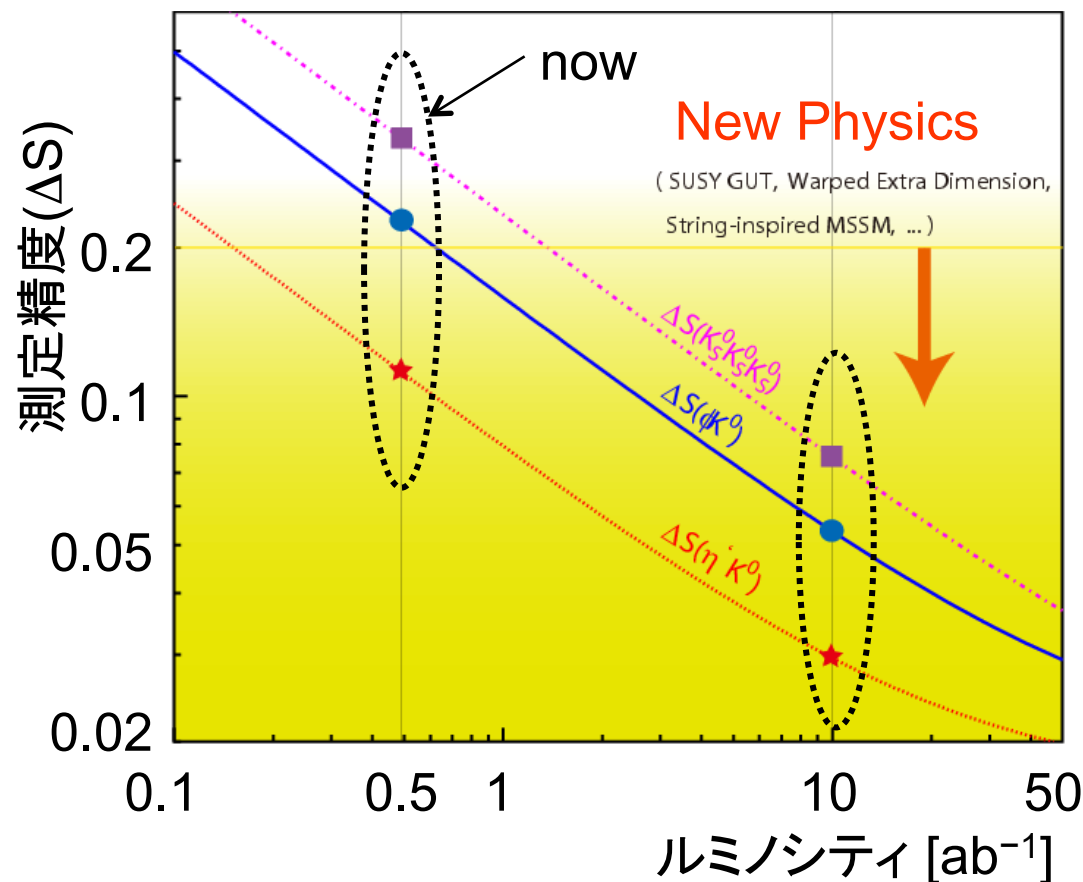
- $B \rightarrow J/\psi K^0$ は、Belleで $\sin 2\phi_1$ を測定する「黄金モード」。理論的にクリーン。
- 現在の平均 = 0.67 ± 0.02
- 50 ab^{-1} で ~ 0.012 の精度
- **b→sは、標準模型で“ $\sin 2\phi_1^{\text{eff}}$ ” $\sim \sin 2\phi_1$**
- **SUSY粒子などがループに寄与**
- **標準模型の理論的不定性が少ないモード: $\phi K^0, \eta' K^0, K^0 K^0 K^0$**



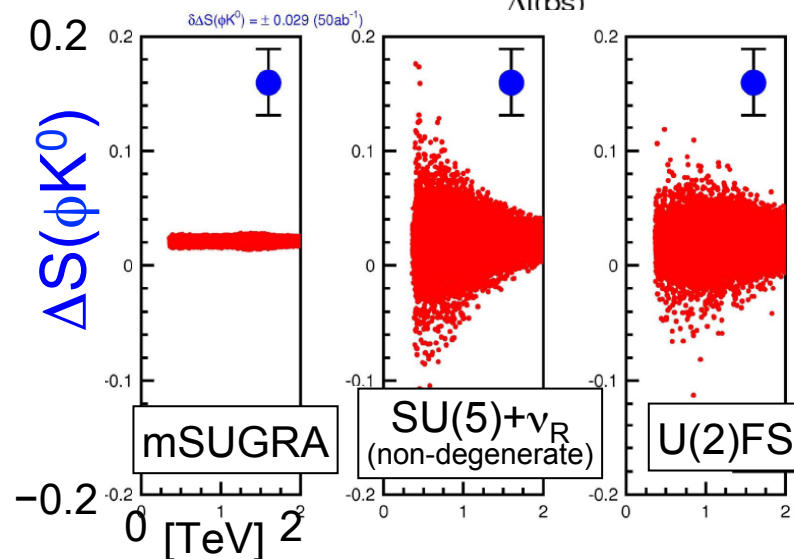
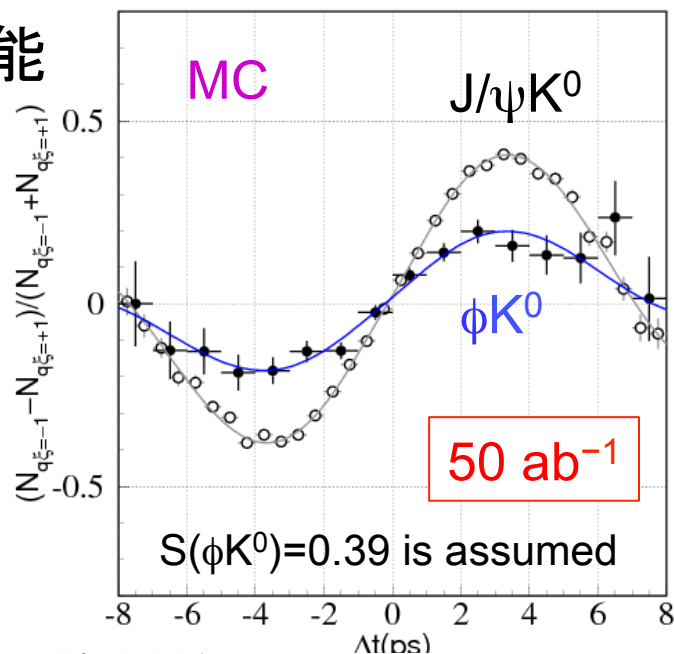
現在の平均 = 0.59 ± 0.06
($\sin 2\phi_1$ から 1.3σ のずれ)

$b \rightarrow s$ 遷移でのCP非対称性

10-50 ab^{-1} のデータで $O(0.01)$ の精度で測定可能



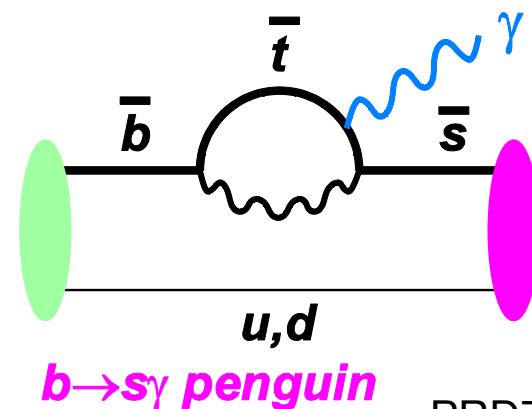
SUSYの模型の識別に用いる情報の一つとして有用



$b \rightarrow s \gamma$: FCNC 過程。新物理に感度。

これまでも、

- 分岐比: 荷電ヒッグスの質量に強い制限
- γ のエネルギー・スペクトラム: B 中間子中の b クォークの運動 (V_{ub} の測定に有用)



PRD78,071702

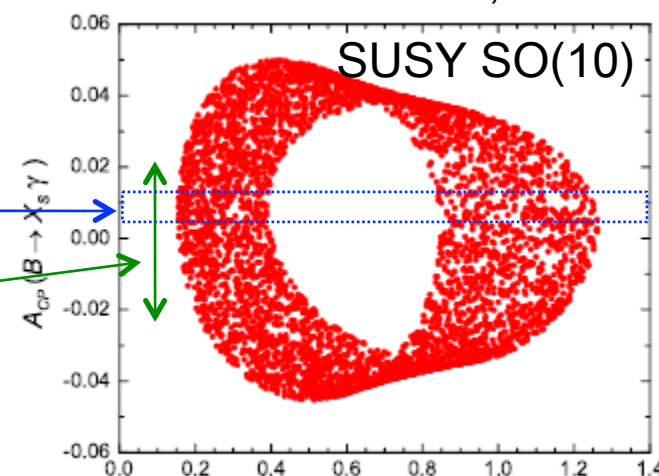
今後の新物理の探索には CP Asymmetry が有効
標準模型では、

$$A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma) = (0.44^{+0.24}_{-0.14}) \times 10^{-2}$$

$$A_{CP}(B \rightarrow X_{s+d} \gamma) \sim 10^{-4}$$

	5 ab^{-1}	50 ab^{-1}
$\sigma A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma)$	0.011	0.005
$\sigma A_{CP}(B \rightarrow X_{s+d} \gamma)$	0.02	0.006

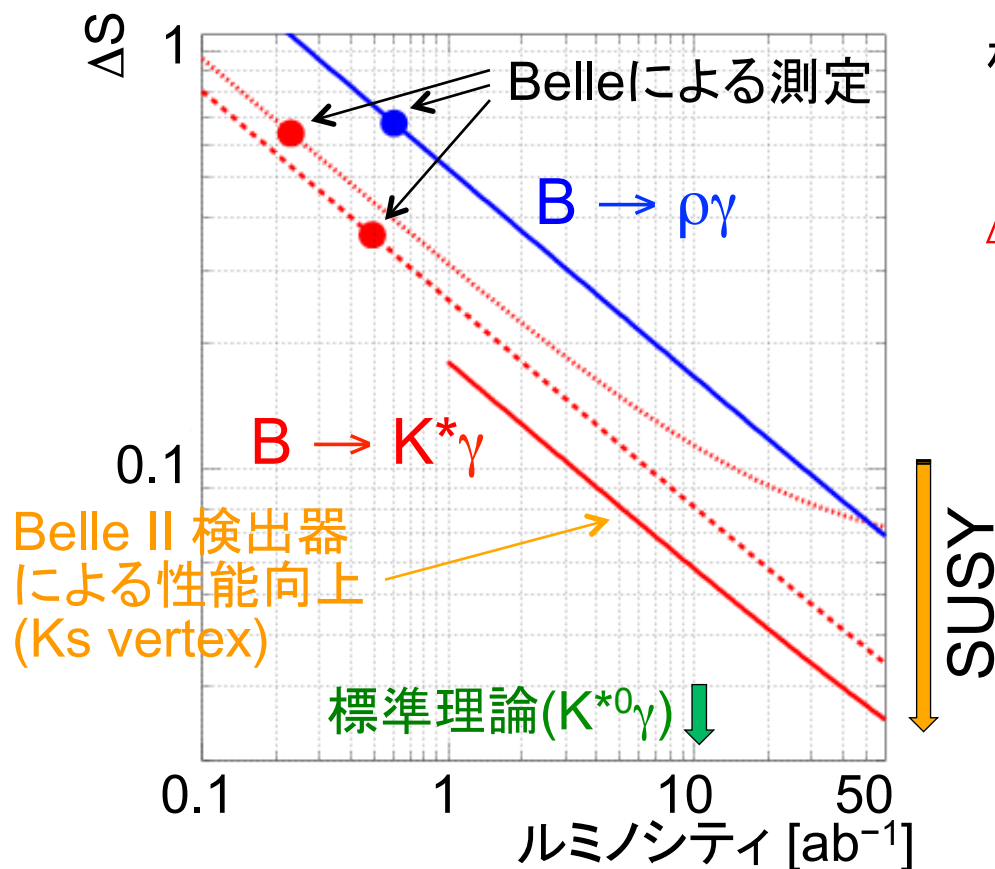
SM
5 ab^{-1}



NP amplitude in B_s mixing
semi-inclusive analysis
fully inclusive analysis

- 標準模型では、電弱相互作用は左巻きに作用
✓ $b \rightarrow s(d)\gamma$ 過程からの光子はほぼ左巻き
- 右巻きのカレントは新物理の信号
✓ time-dependent CPV が起こる

Possible deviation from SM
O(1): Warped extra dim.
O(1): L-R symmetric model
O(0.1): SUSY SU(5)

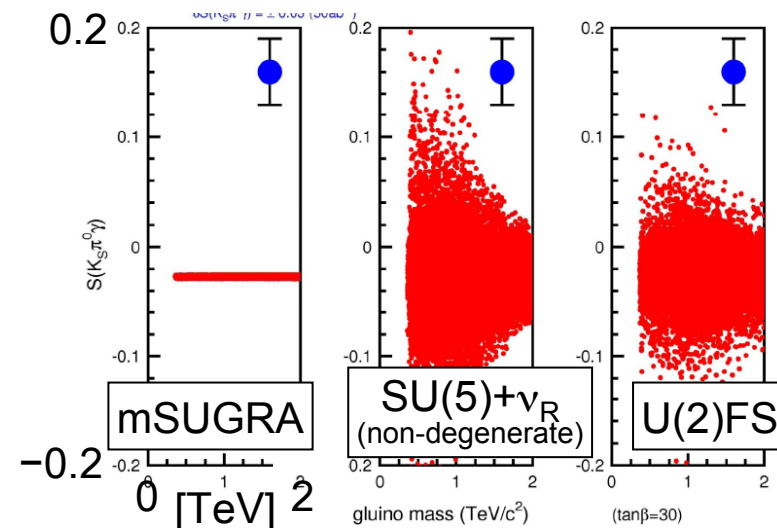


標準理論では

$$|S(K^{*0}\gamma)| < 0.02, \quad S(\rho^0\gamma) \sim 0$$

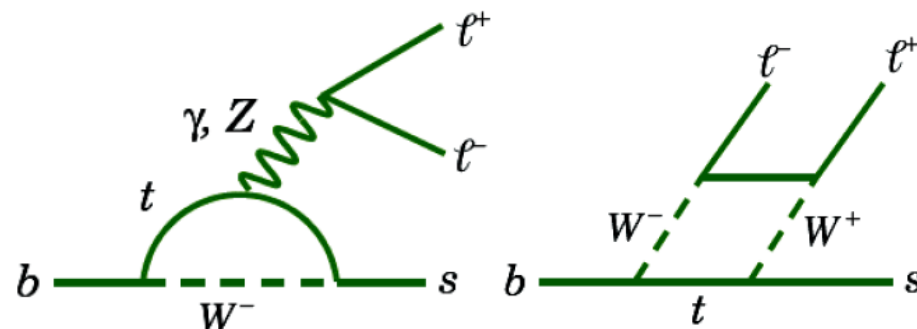
$$\Delta S(K^{*0}\gamma) = 0.027 @ 50 \text{ ab}^{-1}$$

$$\Delta S(\rho^0\gamma) = 0.075 @ 50 \text{ ab}^{-1}$$

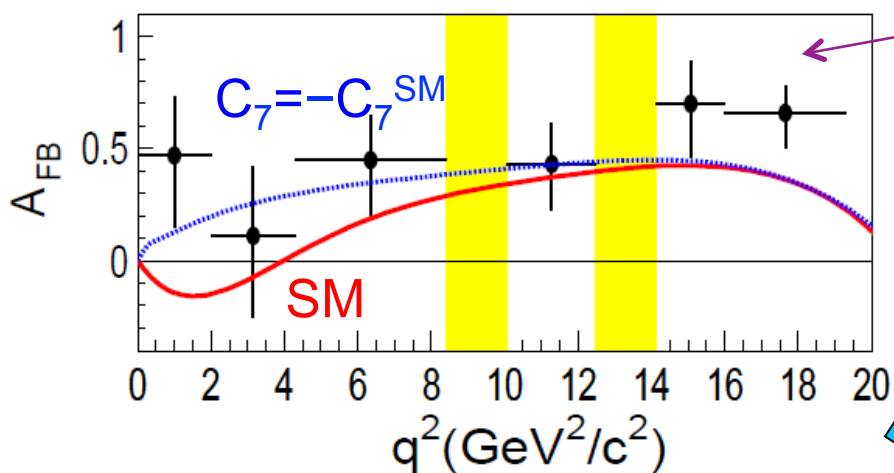


- Introduction
 - ✓ Belle実験
 - ✓ Belleのアップグレードと他の実験
- Belle II におけるBの物理
 - ✓ $b \rightarrow s$ 遷移のCP非対称性
 - ✓ $b \rightarrow s\gamma$ のCP非対称性、偏極度
 - ✓ 現在「ずれ」が見えている(?)モード: $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$, $B \rightarrow K\pi$
 - ✓ $B \rightarrow \tau \nu$
 - ✓ ユニタリティー三角形
 - ✓ LHCb との比較
- まとめ

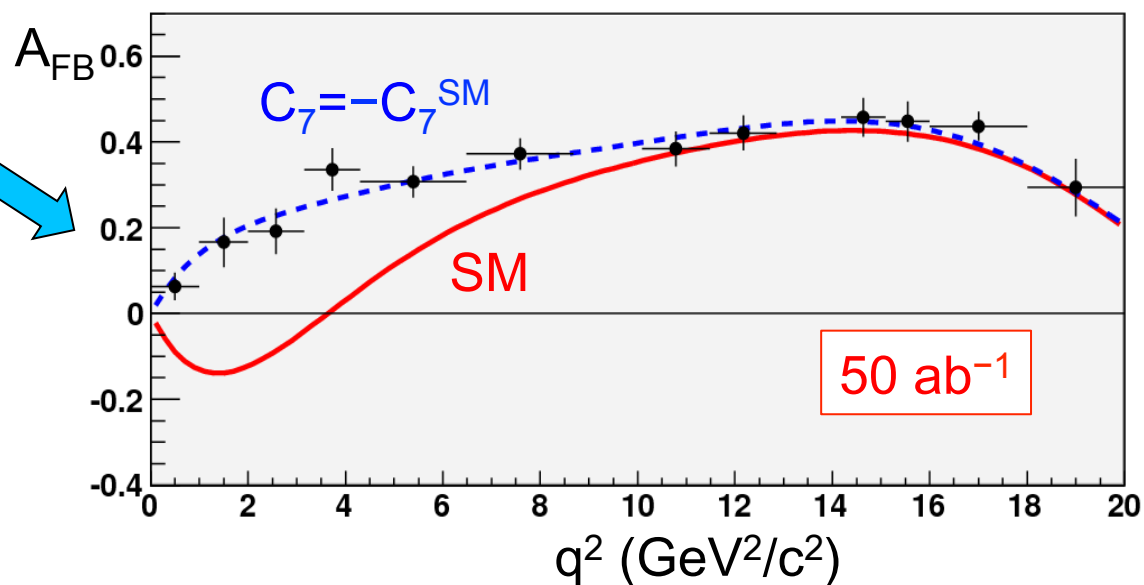
- FCNC 過程：新物理の探索
- C_7, C_9, C_{10} Wilson 係数に感度あり。
- 多くの観測量：分岐比, $A_{FB}, \mu/e$ 比



前後方非対称性 (A_{FB})



Belle 2009
(新物理のヒント?)

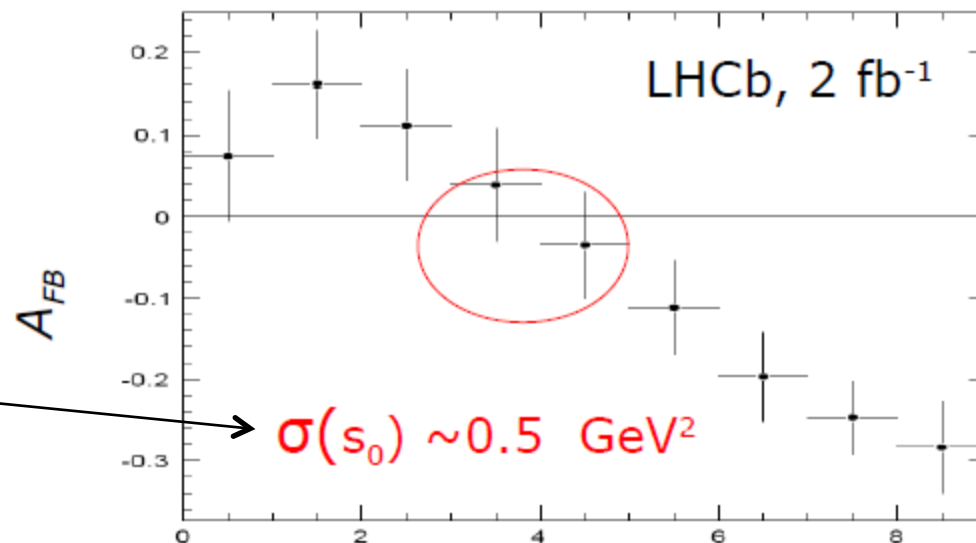


SMの予想には理論的不定性があるが、 $A_{FB} = 0$ を横切る点 (q_0^2) は不定性が小さい

SM : $q_0^2 \sim 4 \text{ GeV}^2$

LHCb 2 fb^{-1} : 13%
 LHCb 100 fb^{-1} : 2%
 Belle 50 ab^{-1} : 5%

opposite sign convention wrt B factories

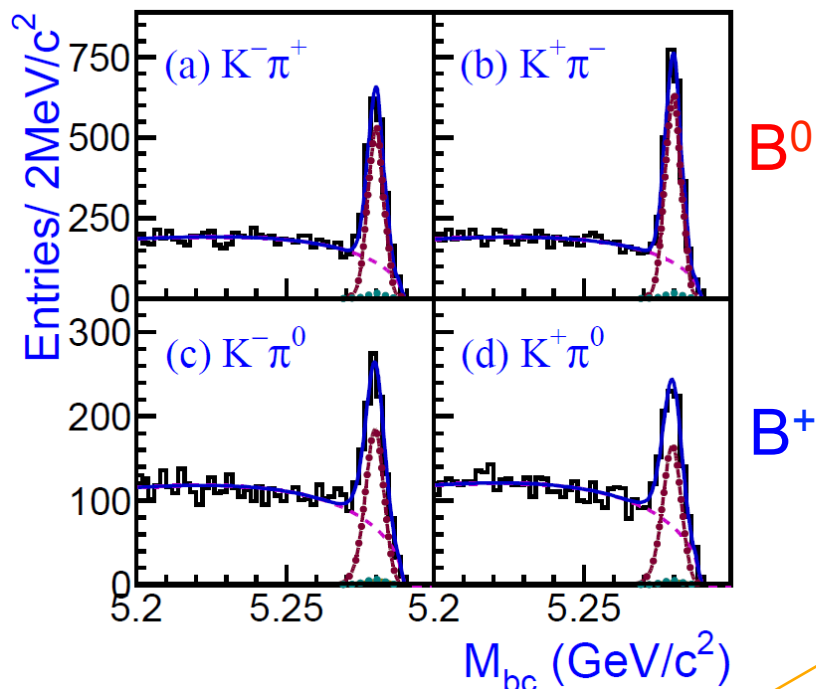


μ モードに限ればややLHCbに分があるか

$B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-$ (semi-inclusive)

- $X_s = K + n \pi$ (例えば、 $n=0 \dots 4$)
- $B \rightarrow X_s \gamma$ で終状態を研究可能
- 理論的に不定性が小さい
- BelleII(e^+e^- collider)でのみ可能

B → Kπ の直接的CP非対称性



$$A_{CP}(B^0 \rightarrow K^+ \pi^-) = -0.098^{+0.012}_{-0.011}$$

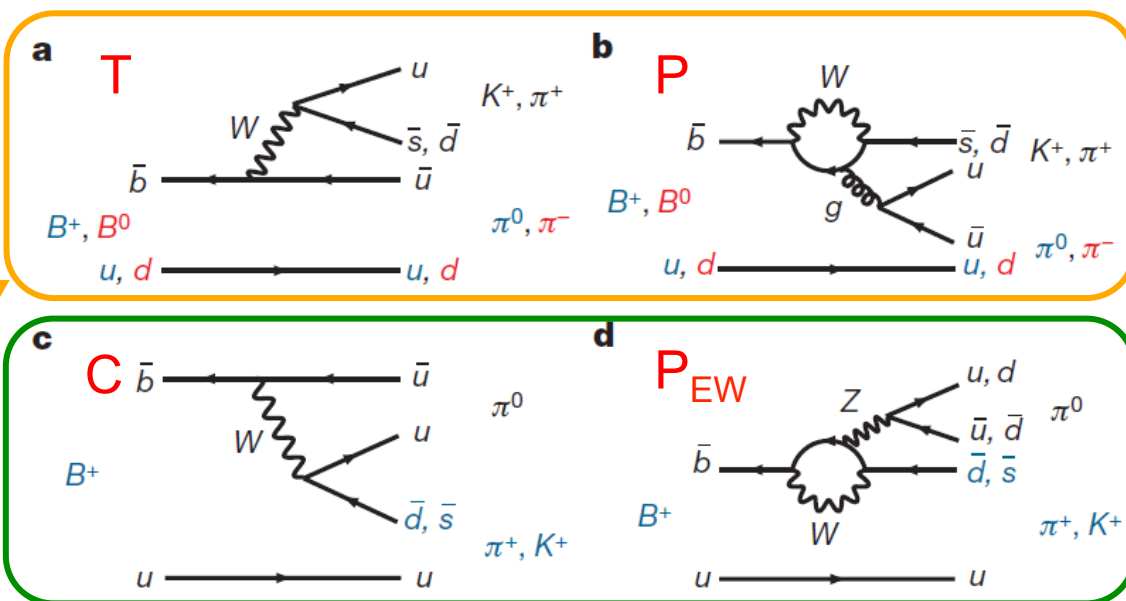
$$A_{CP}(B^+ \rightarrow K^+ \pi^0) = +0.050 \pm 0.025$$

$$\Delta A_{K\pi} = A(K^+ \pi^-) - A(K^+ \pi^0)$$

$$= -0.147 \pm 0.028 \quad (5.3\sigma)$$

B^0 , B^+ の両方に寄与

B^+ にのみ寄与



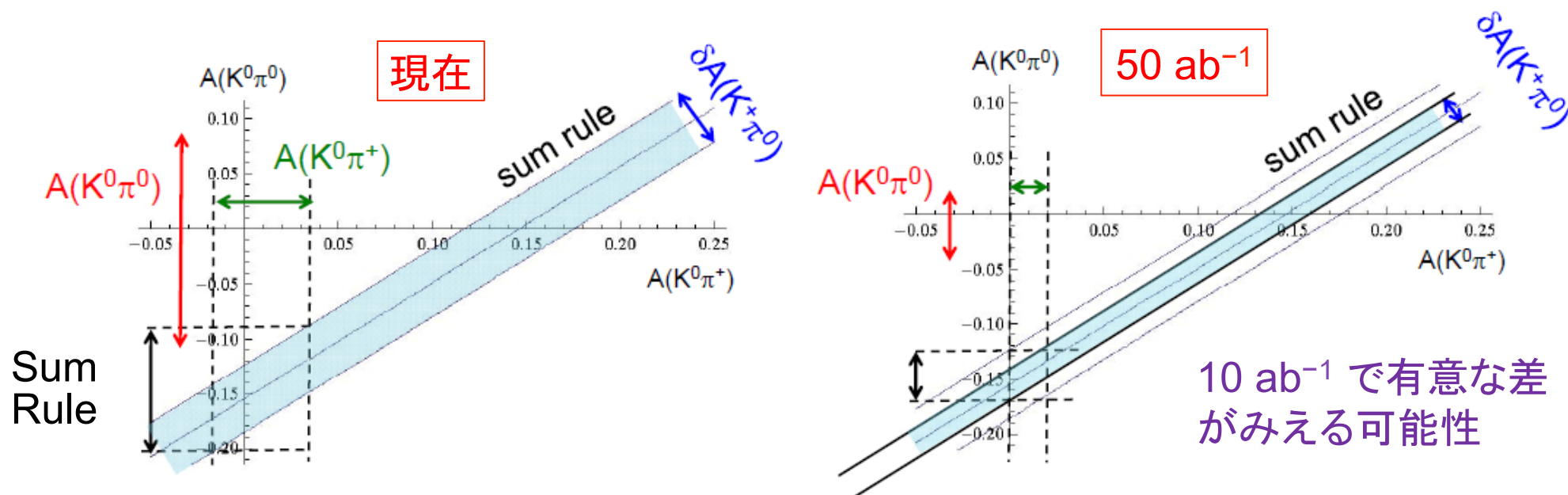
- B^+ では新物理の影響で P_{EW} の寄与が大きい可能性
- C の寄与が予想外に大きければ標準理論で説明が可能とも

新物理の寄与があるかを実験的に明らかにするには、
モデルによらない以下の関係式が有用(Sum Rule)

$0.14 \pm 0.13 \pm 0.06$
@ 600 fb⁻¹ (Belle)

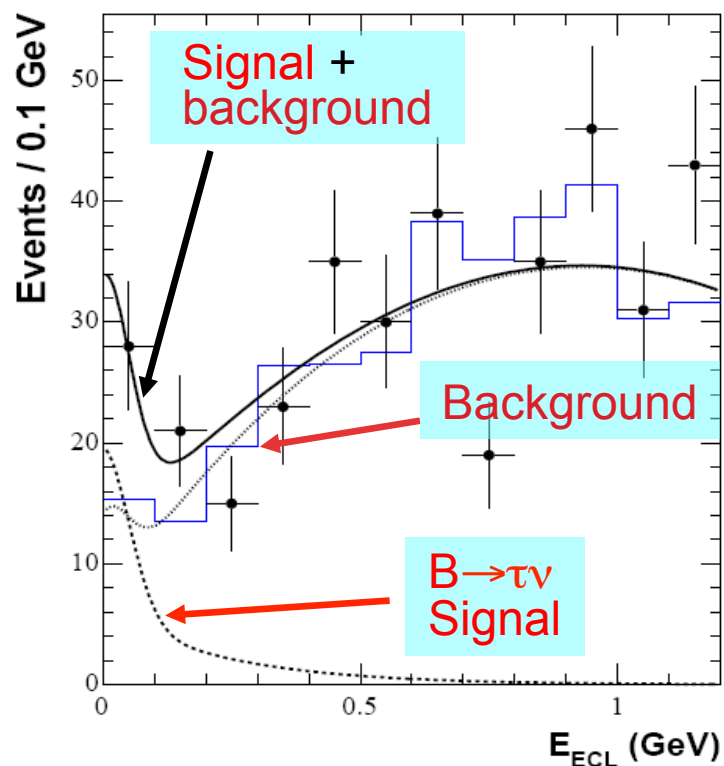
$$\mathcal{A}_{CP}(K^+\pi^-) + \mathcal{A}_{CP}(K^0\pi^+) \frac{\mathcal{B}(K^0\pi^+)}{\mathcal{B}(K^+\pi^-)} \frac{\tau_0}{\tau_+} = \mathcal{A}_{CP}(K^+\pi^0) \frac{2\mathcal{B}(K^+\pi^0)}{\mathcal{B}(K^+\pi^-)} \frac{\tau_0}{\tau_+} + \mathcal{A}_{CP}(K^0\pi^0) \frac{2\mathcal{B}(K^0\pi^0)}{\mathcal{B}(K^+\pi^-)}$$

- B → Kπ の諸々の終状態の分岐比と非対称性を測定
- K⁰π⁰ の非対称性が難しい ⇒ SuperKEKBが必要



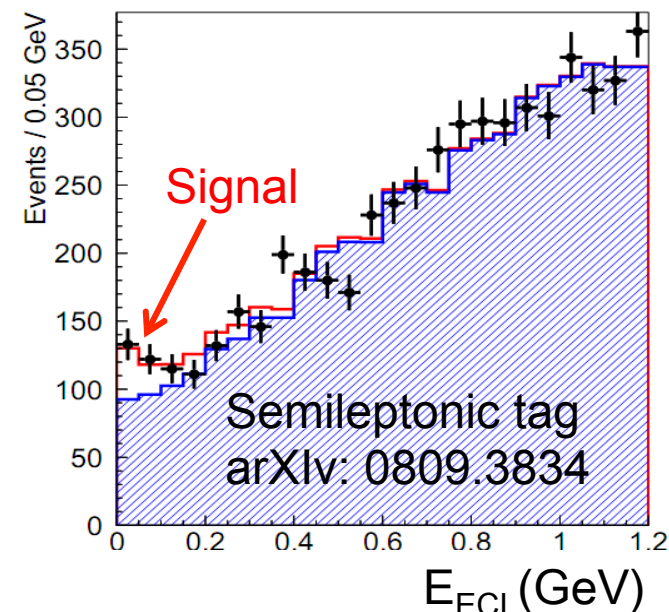
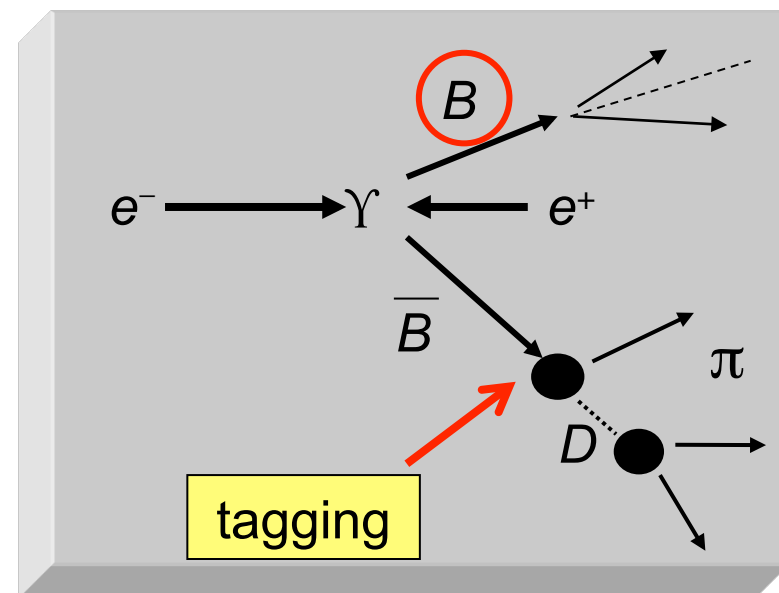
- 対で生成されるB中間子の一方をタグ
⇒ ν や τ を含むモードを研究できる
- e^+e^- 衝突型Bファクトリーでのみ可能な研究
- $|V_{ub}|$ (semi-leptonic), $B \rightarrow \tau \nu$, $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$

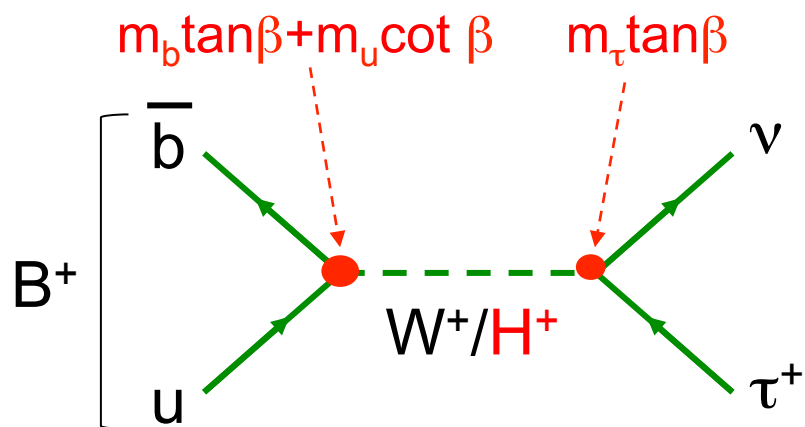
Full reconstruction



$B \rightarrow \tau \nu$

- First evidence by Belle w/ full reconstruction (2006).
- New result with semileptonic tag (2008)





$$\mathcal{B}(B \rightarrow \tau\nu) = \mathcal{B}(B \rightarrow \tau\nu)_{\text{SM}} \times r_H$$

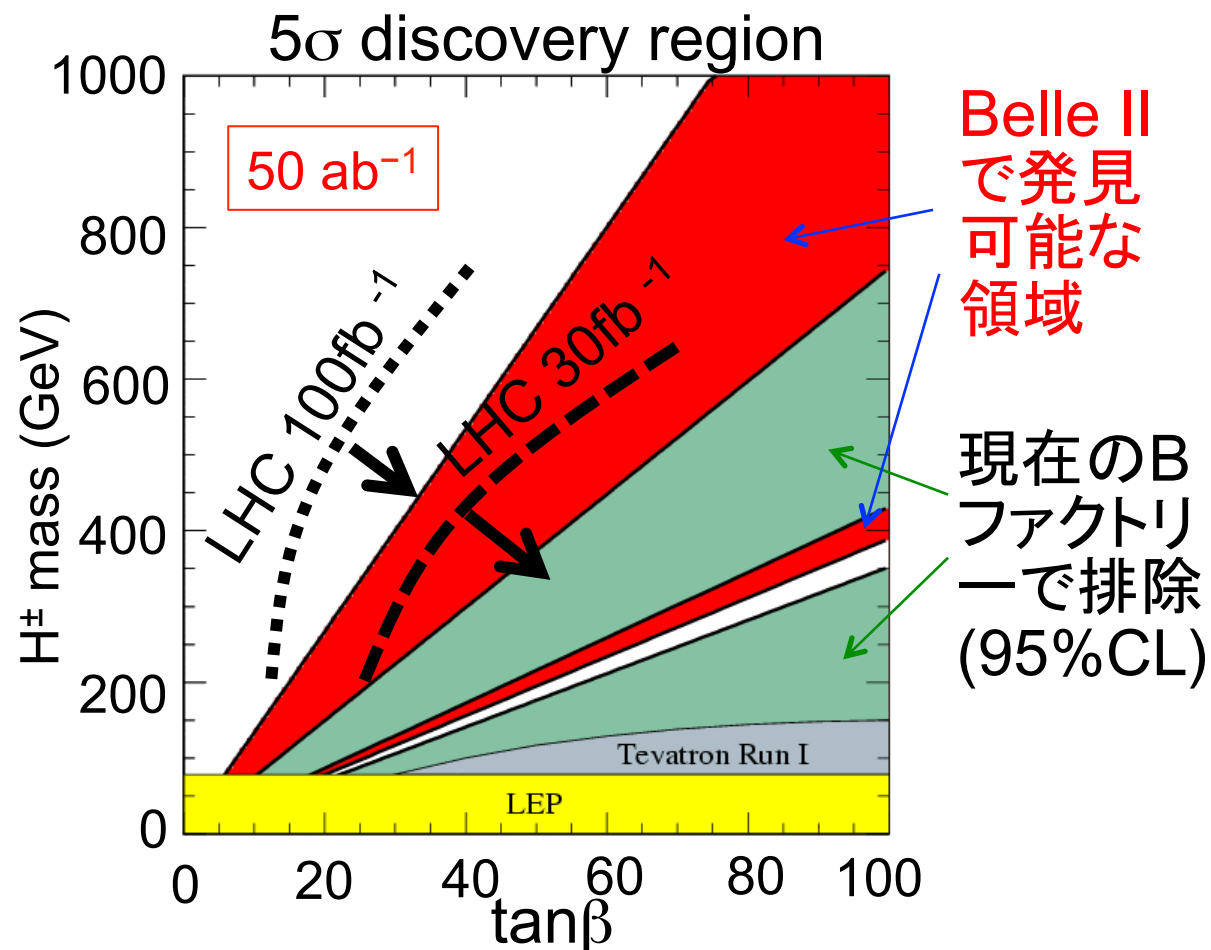
$$r_H = \left(1 - \frac{m_B^2}{m_H^2} \tan^2 \beta\right)^2$$

$$\mathcal{B}(B \rightarrow \tau\nu) = (1.43 \pm 0.37) \times 10^{-4} \quad [\text{HFAG}(2009)]$$

$$\sigma \sim 2\% @ 50 \text{ ab}^{-1}$$

f_B と $|V_{ub}|$ の誤差を数%まで減らすことが重要 (右図はともに 2.5% を仮定)

- 標準模型では W-消滅過程
- SUSYでは荷電ヒッグス($H^\pm$)の寄与

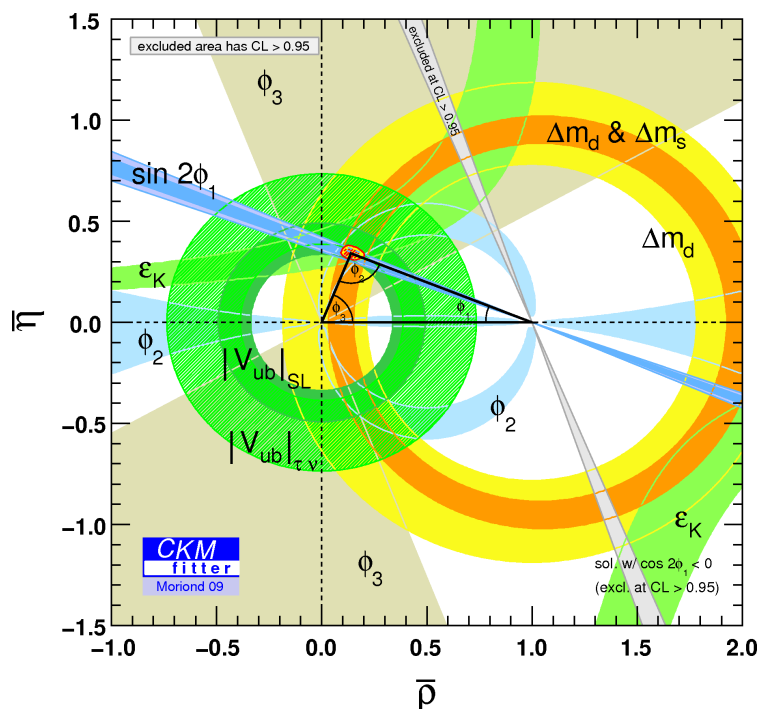


b-H[±]-u 結合を測定する唯一の手段

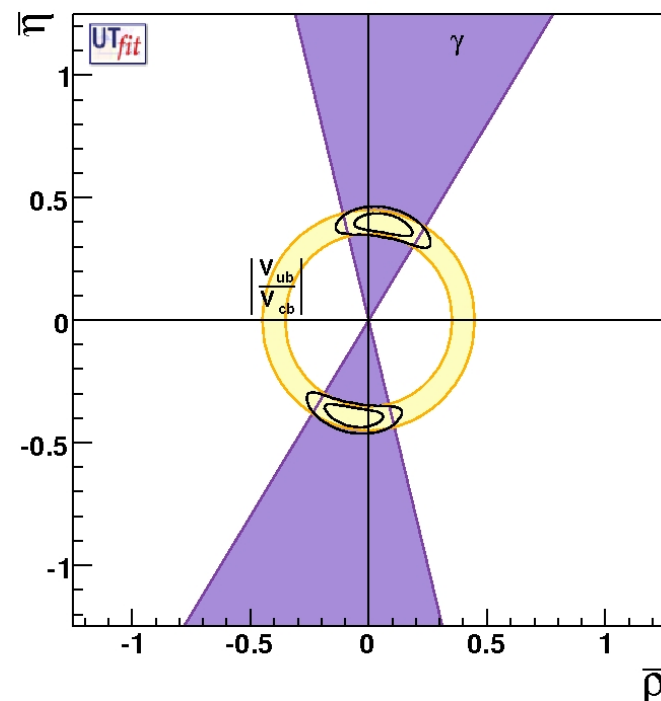
- Introduction
 - ✓ Belle実験
 - ✓ Belleのアップグレードと他の実験
- Belle II におけるBの物理
 - ✓ $b \rightarrow s$ 遷移のCP非対称性
 - ✓ $b \rightarrow s\gamma$ のCP非対称性、偏極度
 - ✓ 現在「ずれ」が見えている(?)モード: $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$, $B \rightarrow K\pi$
 - ✓ $B \rightarrow \tau \nu$
 - ✓ ユニタリティー三角形
 - ✓ LHCb との比較
- まとめ

- ユニタリティー三角形のさらなる精密測定は重要
- ループ過程とツリー過程で違い

global fit



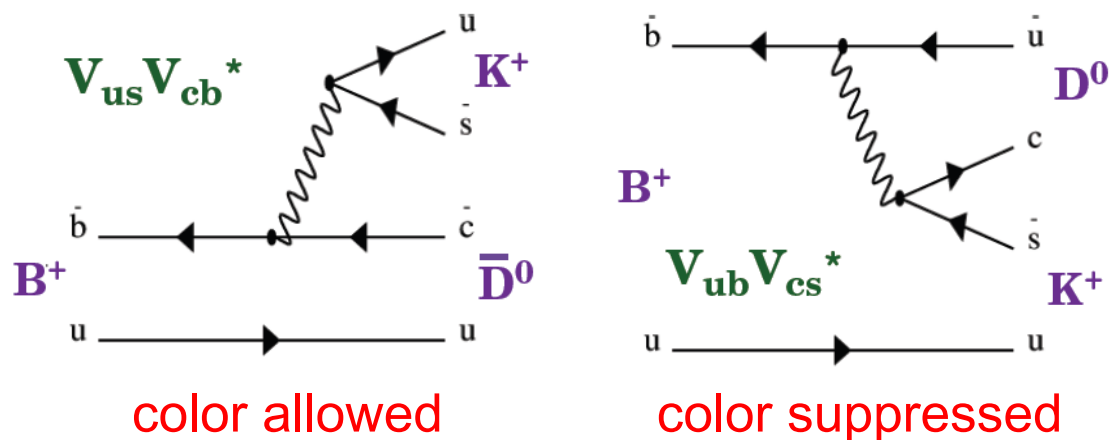
ツリー過程のみのフィット



ϕ_3 の測定精度を上げることは重要

ϕ_3 の測定

- $B^+ \rightarrow D^{(*)0} K^{(*)+}$: GLW + ADS method
- Dalitz analysis of $B^+ \rightarrow D^{(*)0} K^{(*)+}$
- tCPV of $B^0 \rightarrow D^{(*)+} \pi^-$ to measure $\sin(2\phi_1 + \phi_3)$



needs 10 fb^{-1} data
at $\psi(3770)$ to study
 D_{CP} decay

$\sigma\phi_3 \sim 2.5^\circ$ ($B \rightarrow DK$ Dalitz) : limited by D model uncertainty

$\sigma\phi_3 \sim 6^\circ$ ($B \rightarrow DK$ ADS+GLW)

LHCb でも測定可能 ($2.5^\circ @ 10 \text{ fb}^{-1}$)

- ユニタリティー三角形のさらなる精密測定は重要

- ✓ ϕ_2 ($B \rightarrow \pi\pi, \rho\pi, \rho\rho$)
- ✓ ϕ_3 ($B \rightarrow DK, D^*\pi \dots$)
- ✓ $|V_{ub}|$ (B semi-leptonic)
- ✓ ...

50 ab^{-1} では

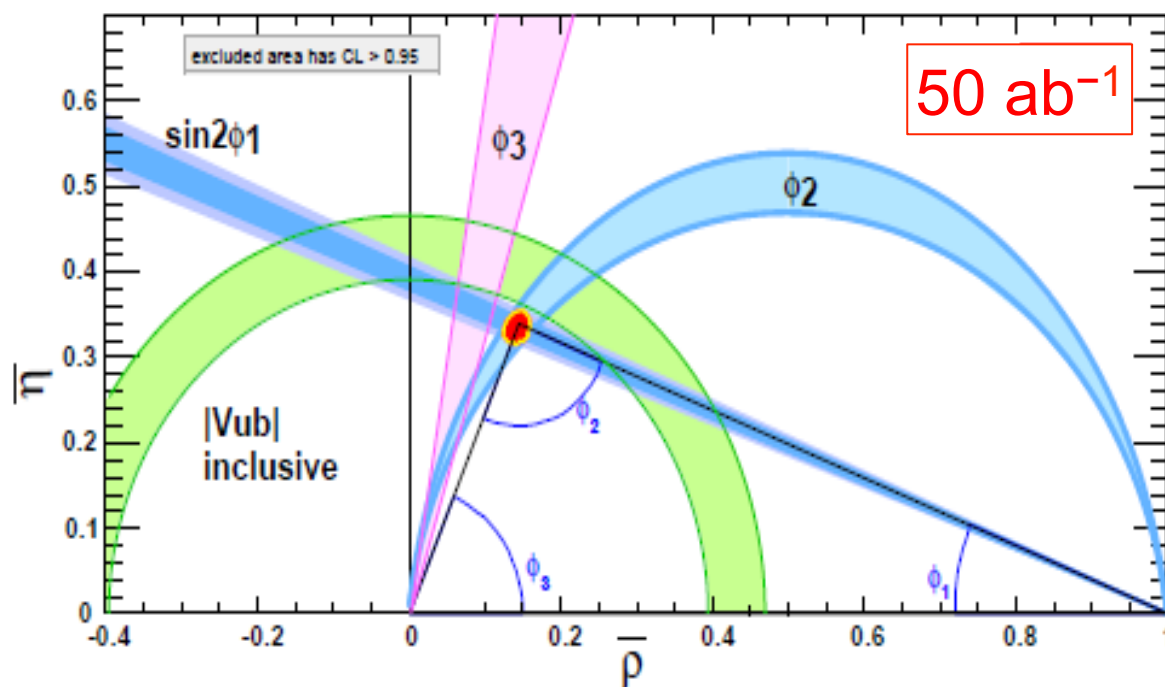
- $\sigma\phi_2 \sim 3^\circ$ ($B \rightarrow \pi\pi$)
- $\sigma\phi_2 \sim 1^\circ$ ($B \rightarrow \rho\pi, \rho\rho$)
- $\sigma\phi_3 \sim 2.5^\circ$ ($B \rightarrow DK$ Dalitz)
- $\sigma\phi_3 \sim 6^\circ$ ($B \rightarrow DK$ ADS+GLW)

$$\Delta \sin 2\phi_1 = 0.014$$

$$\Delta(f_B \sqrt{B_d}) = 0.005 \pm 0.015$$

$$\Delta |V_{ub}| = 4.4\%$$

$$\Delta\phi_3 = 1.2^\circ$$



	Belle	Belle II	Belle II	LHCb
	$\sim 0.5 \text{ ab}^{-1}$	5 ab^{-1}	50 ab^{-1}	$10 \text{ fb}^{-1} [5\text{yrs}]$
$\Delta S(\phi K_S)$	0.22	0.073	0.029	0.14
$\Delta S(\eta' K_S)$	0.11	0.038	0.020	---
ϕ_s from $S(J/\psi\phi)$	---	---	---	0.01
$S(K^*\gamma)$	0.36	0.12	0.03	---
$S(\rho\gamma)$	0.68	0.22	0.08	---
$\Delta B/B(B \rightarrow \tau\nu)$	3.5σ	10%	3%	---
$B_s \rightarrow \mu\mu$	•	•	•	$5\sigma @ 6 \text{ fb}^{-1}$
$\tau \rightarrow \mu\gamma \text{ } [\times 10^{-9}]$	<45	<30	<8	---
$\tau \rightarrow \mu\mu\mu \text{ } [\times 10^{-9}]$	<209	<10	<1	---
ϕ_2	11°	2°	1°	4.5°
ϕ_3	16°	6°	2°	2.4°

<得意分野>

LHCb

- 終状態が荷電粒子のみのモード
- B_s (時間依存)
- B_c, Λ_b
-

Belle II

- γ, π^0 を含むモード
- ν を含むモード
- τ の崩壊
- K_S への崩壊点
-

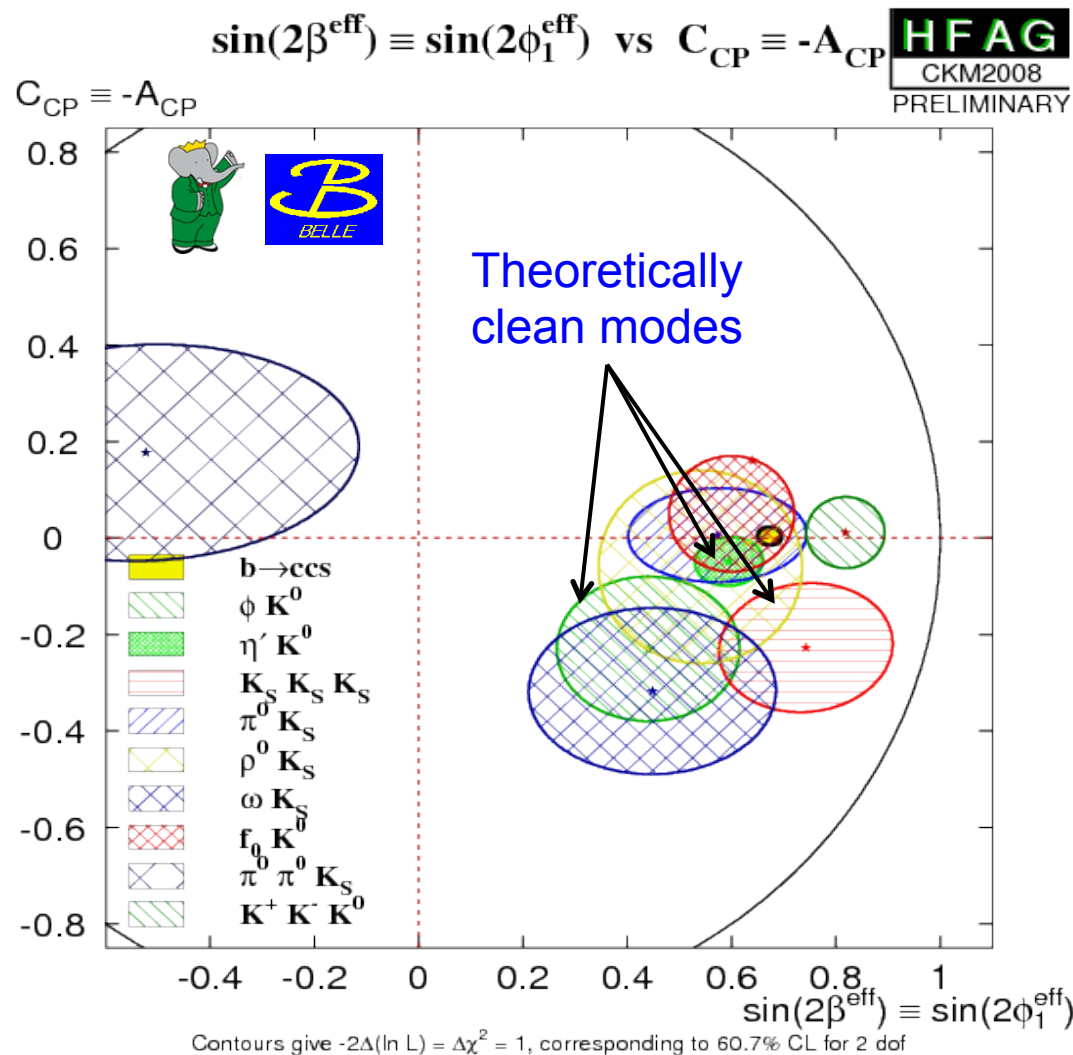
- SuperKEKB / Belle II では、多くのモードを調べることにより、「新物理の模型の識別」を行う。
 - ✓ Belleで見えている「新物理の兆候」を50倍のルミノシティで検証
 - ✓ $S(B \rightarrow \phi K^0)$, $S(B \rightarrow K^* \gamma)$, $S(B \rightarrow \rho \gamma)$
 - ✓ $B \rightarrow \tau \nu$ (b - H^+ - u 結合の測定)
 - ✓ ユニタリティー三角形のさらなる精密測定

その他にも、

- $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$, $\ell \nu$, $K \nu \nu$
- $B \rightarrow VV$
- Baryonic B decays, other rare (or exotic) B decays
- Charm, τ , charmonia, exotic hadrons (next talk)
- Two-photon physics, electroweak physics
- B_s ($\Upsilon(5S)$), $\Upsilon(1S)$, $\Upsilon(2S)$, $\Upsilon(3S)$
-

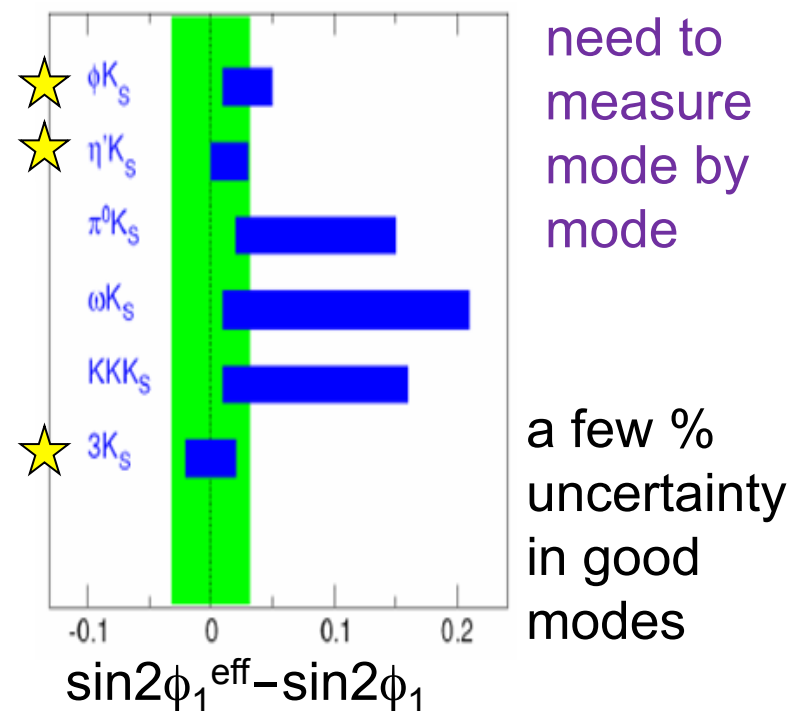
Backup

Present status



Average for clean modes
 $= 0.59 \pm 0.06$
 (1.3 σ away from $\sin 2\phi_1$)

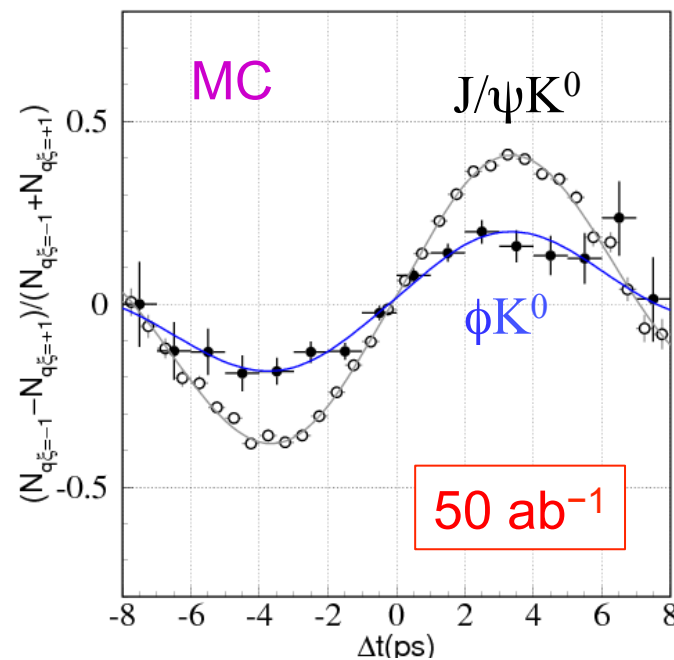
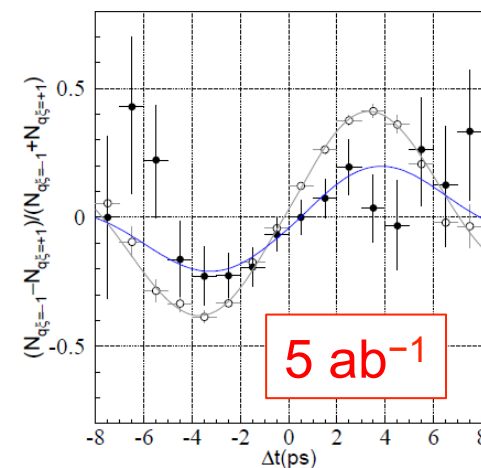
recent QCDF estimates



Clean modes: $\phi K^0, \eta' K^0, 3K^0$

b→s 遷移でのCP非対称性

		Statistical	Systematic		Total
			reducible	irreducible	
$\mathcal{S}_{J/\psi K^0}$ ($\sin 2\phi_1$)	(492 fb ⁻¹)	0.031	0.012		0.036
	(5 ab ⁻¹)	0.010	0.004	0.012	0.016
	(50 ab ⁻¹)	0.003	0.001		0.012
$\mathcal{A}_{J/\psi K^0}$	(492 fb ⁻¹)	0.021	0.006		0.025
	(5 ab ⁻¹)	0.007	0.002	0.013	0.015
	(50 ab ⁻¹)	0.002	0.001		0.013



$S(\phi K^0)=0.39$ is assumed

$b \rightarrow s \gamma$: FCNC 過程。新物理に感度。

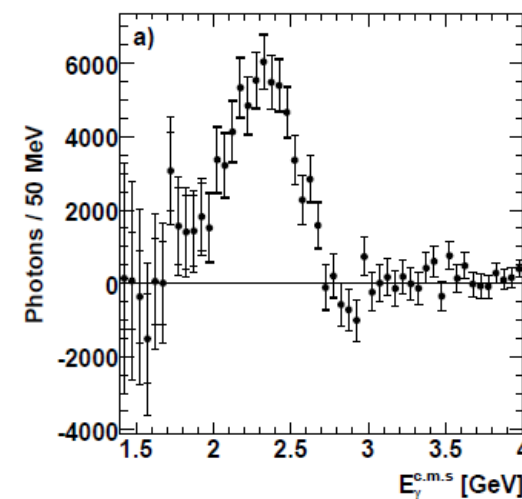
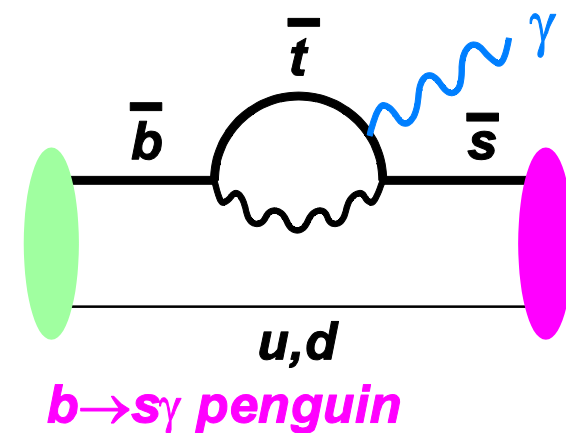
- 分岐比: H^+ の質量に強い制限
- γ スペクトラム: B 中間子の中の b クォークの運動。 V_{ub}

$$\mathcal{B}(B \rightarrow X_s \gamma) = (3.45 \pm 0.15 \pm 0.40) \times 10^{-4}$$

Belle (arXiv:0907.1384); $E_\gamma > 1.7$ GeV

c.f.) 理論 $(3.15 \pm 0.23) \times 10^{-4}$

- E_γ の低いところ $\rightarrow$ 大幅な統計の増加が必要
- B の運動量の影響 $\rightarrow$ full reconstruction



NP RH currents

$b \rightarrow s \gamma$ decays

DCPV

suppressed by $|V_{ub}V_{us}^*/V_{tb}V_{ts}^*|$,
 $\alpha_s(m_b)$ (strong phase), $(m_c/m_b)^2$ (GIM);
 SM: $A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma) = (0.44 \pm^{0.24}_{0.14})\%$

T. Hurth et al., Nucl.Phys. B704, 56 (2005)

semi-inclusive analysis (no $b \rightarrow d \gamma$):

$K+(1-4)\pi$; $KKK(\pi)$, $K_S KK(\pi)$;

$A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma; M_{X_s} < 2.1 \text{ GeV}) = (0.2 \pm 5.0 \pm 3.0)\%$

Belle, PRL93, 031803 (2004), 140 fb⁻¹

syst.: detector charge asymmetry $\rightarrow D\pi$ sample
 possible bkg. asymmetry $\rightarrow$ measured asymm.

inclusive $B \rightarrow X_{s+d} \gamma$

$A_{CP}(B \rightarrow X_{s+d} \gamma) = O(m_s^2 / m_b^2) \sim 10^{-4}$

cancellation between $B \rightarrow X_s \gamma$, $B \rightarrow X_d \gamma$

$$\sigma(A_{CP}(b \rightarrow s \gamma)) =$$

$$0.011 \text{ @ } 5 \text{ ab}^{-1}$$

$$0.005 \text{ @ } 50 \text{ ab}^{-1}$$

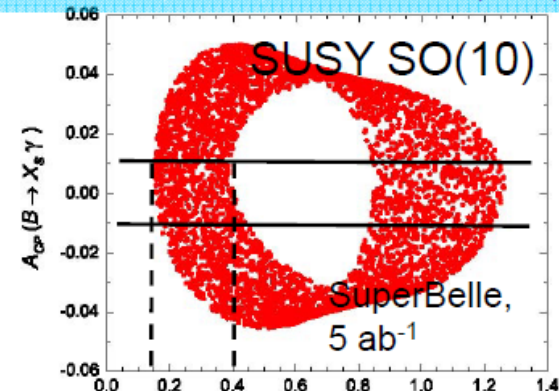
above SM, but large
range of NP tested

$$\sigma(A_{CP}(b \rightarrow s+d \gamma)) =$$

$$0.02 \text{ @ } 5 \text{ ab}^{-1}$$

$$0.006 \text{ @ } 50 \text{ ab}^{-1}$$

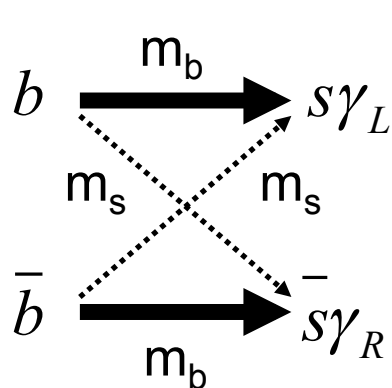
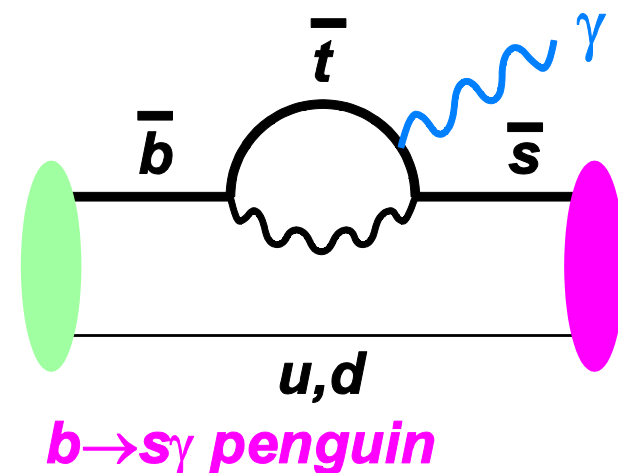
B. Dutta, Y. Mimura, PRD78, 071702 (2008)



NP ampl. B_s mix

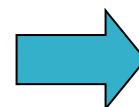
$A_s^{\text{NP}}/A_s^{\text{SM}}$

- SM electroweak is purely left-handed.
✓ photon from $b \rightarrow s\gamma$ is almost left-handed.
- Right-handed current is a signature of New Physics.
- Interference of left- and right-handed amplitudes may lead to large mixing induced CP violation in radiative B decay.



SM expectation
 $S \sim -2(m_s/m_b) \times \sin 2\phi_1$

NP with different
chiral structure makes
a large difference



Possible deviation from SM
O(1): Warped extra dim.
O(1): L-R symmetric model
O(0.1): SUSY SU(5)

- $b \rightarrow d\gamma$ might be more sensitive. ($S \sim 0$ in SM)

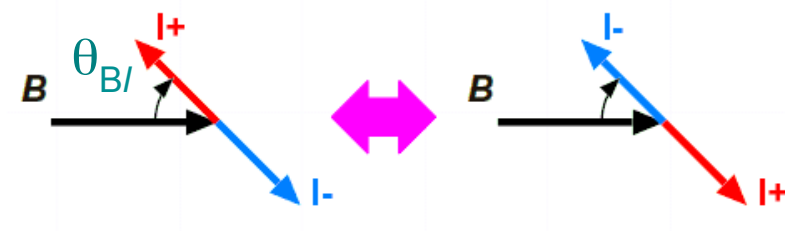
Asymmetries

F_L : K^* longitudinal polarization fraction

A_{FB} : Forward Backward Asymmetry

$$\frac{d\Gamma}{d\cos\theta_{K^*}} = \frac{3}{2} F_L \cos^2 \theta_{K^*} + \frac{3}{4} (1 - F_L) \sin^2 \theta_{K^*}$$

$$\frac{d\Gamma}{d\cos\theta_{Bl}} = \frac{3}{4} F_L \sin^2 \theta_{Bl} + \frac{3}{8} (1 - F_L) (1 + \cos^2 \theta_{K^*}) + A_{FB} \cos \theta_{Bl}$$



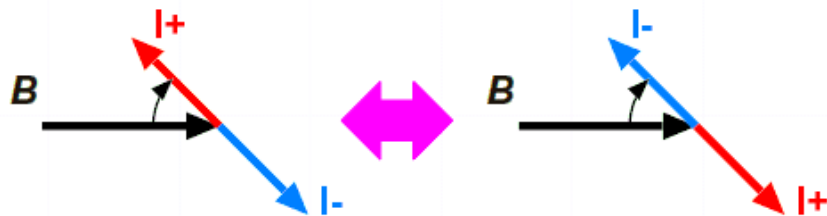
θ_{K^*} : angle btw K and opposite of B in K^* rest frame.

A_I : Isospin Asymmetry

$$A_I \equiv \frac{(\tau_{B^+}/\tau_{B^0}) \times B(B^0 \rightarrow K^{(*)0} l l) - B(B^\pm \rightarrow K^{(*)\pm} l l)}{(\tau_{B^+}/\tau_{B^0}) \times B(B^0 \rightarrow K^{(*)0} l l) + B(B^\pm \rightarrow K^{(*)\pm} l l)}$$

BaBar observed large discrepancy from null asymmetry at low q^2 region.

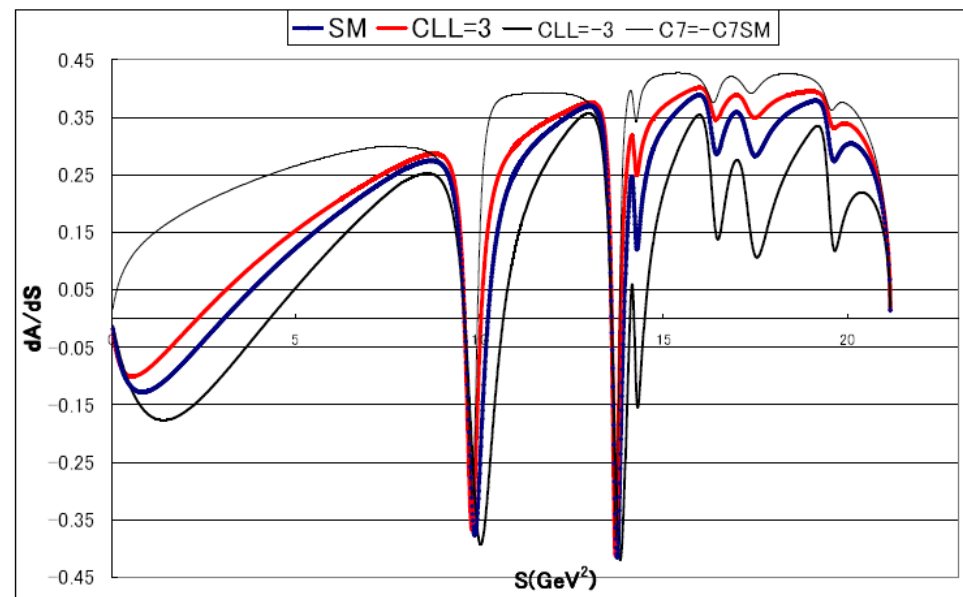
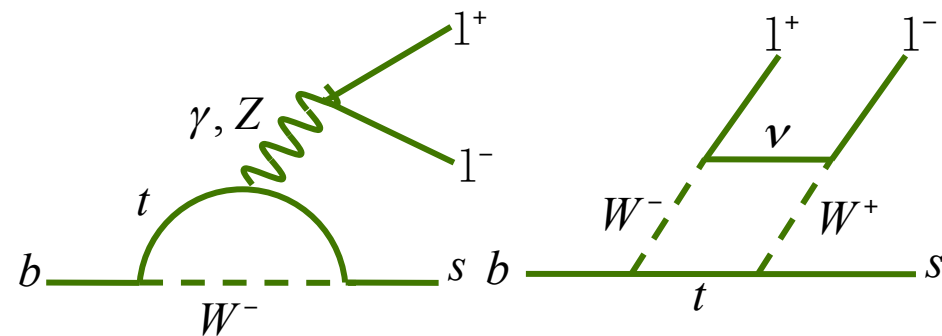
A_{FB} (Forward-backward asymmetry)



- Good electroweak probe for $b \rightarrow s$.
- Sensitive to C_7, C_9, C_{10} Wilson coefficients. (c.f. wrong sign C_7 is allowed by $b \rightarrow s \gamma$)
- q_0 (the point with $A_{FB}=0$) is sensitive to New Physics.

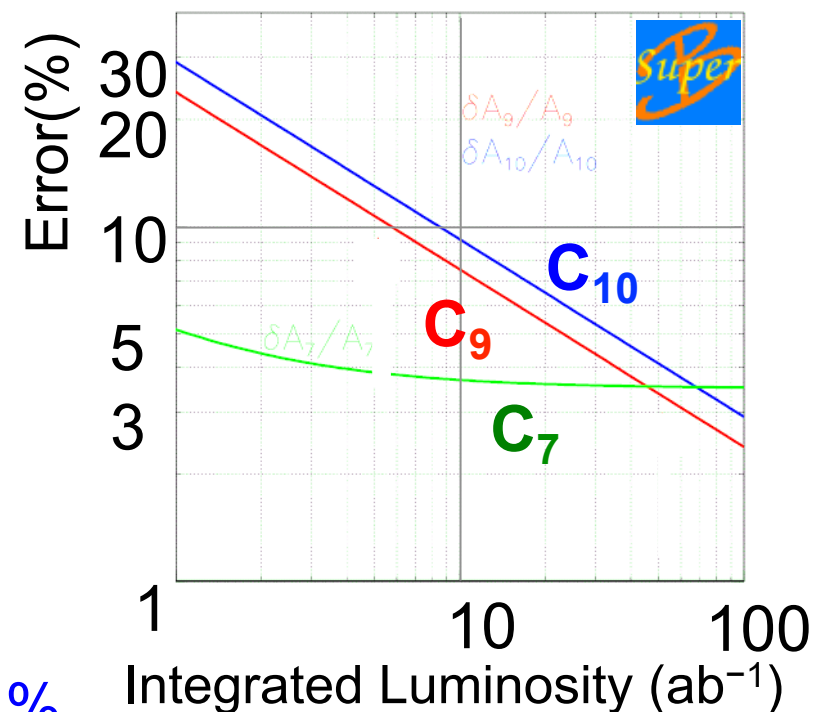
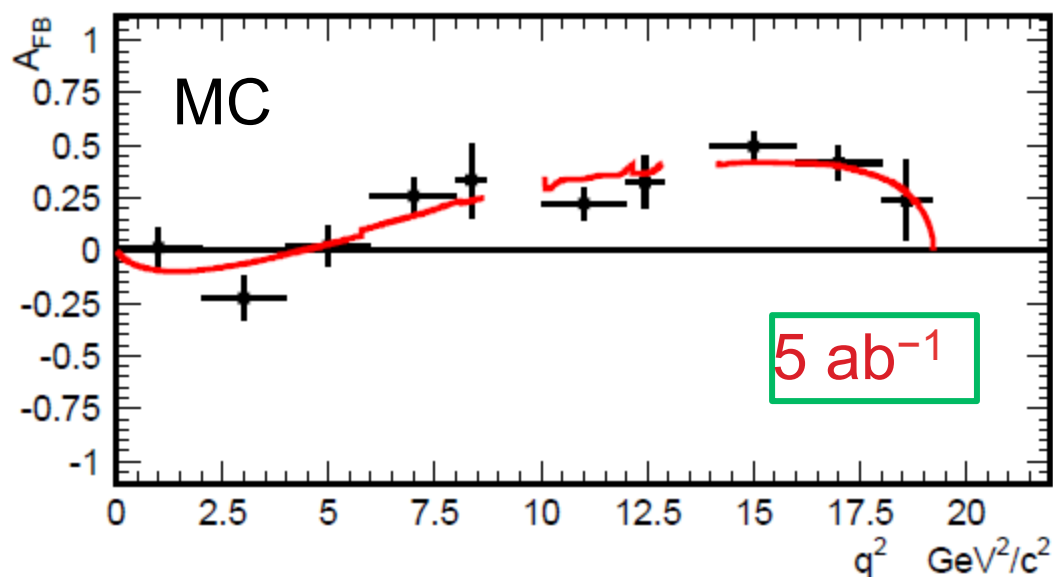
$$\text{SM: } q_0^2 = (4.2 \pm 0.6) \text{ GeV}^2$$

$$q_0 \propto C_7 / \text{Re}(C_9)$$



A_{FB} for $b \rightarrow s \ell \ell$

other variable: BF ratio btw $K_{\mu\mu}$ and K_{ee} (>1 might be NP)



C_9 , C_{10} q^2 independent terms can be determined with accuracies of 11% and 14% (4% and 4%), respectively, at 5 ab⁻¹ (50 ab⁻¹).

$$\Delta q_0 \sim 11\% (5\%)$$

Note: $Xs\ell\ell$ is better to avoid form factor uncertainty (experimentally challenging).

- Effective Hamiltonian is expressed in term of Operator Product Expansion.

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}}V_{tb}V_{ts}^* \sum_{i=1}^{10} C_i(\mu)O_i(\mu)$$

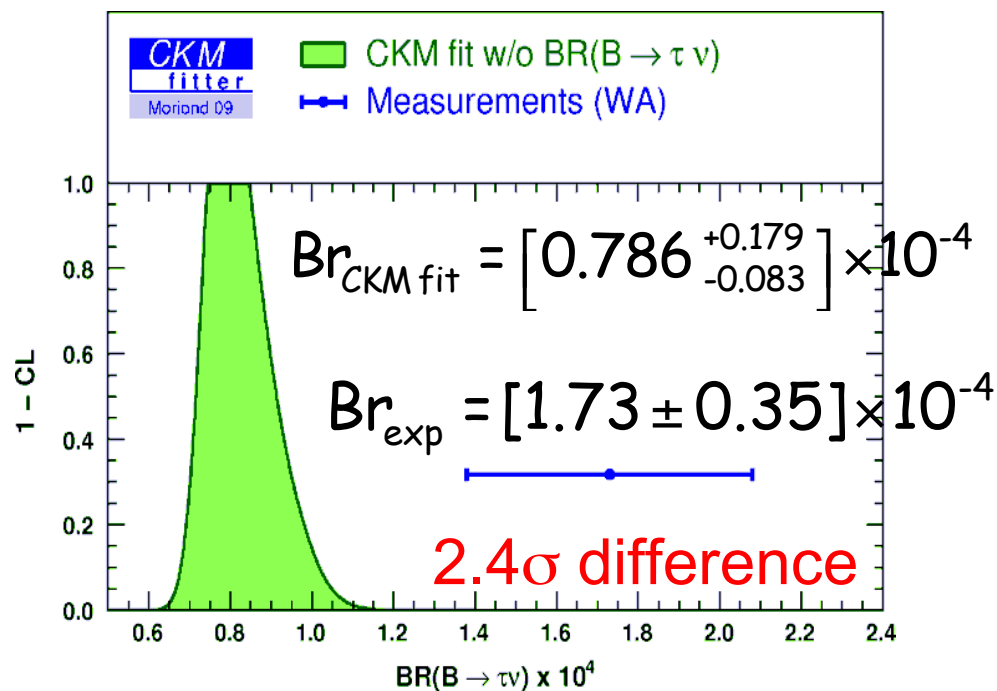
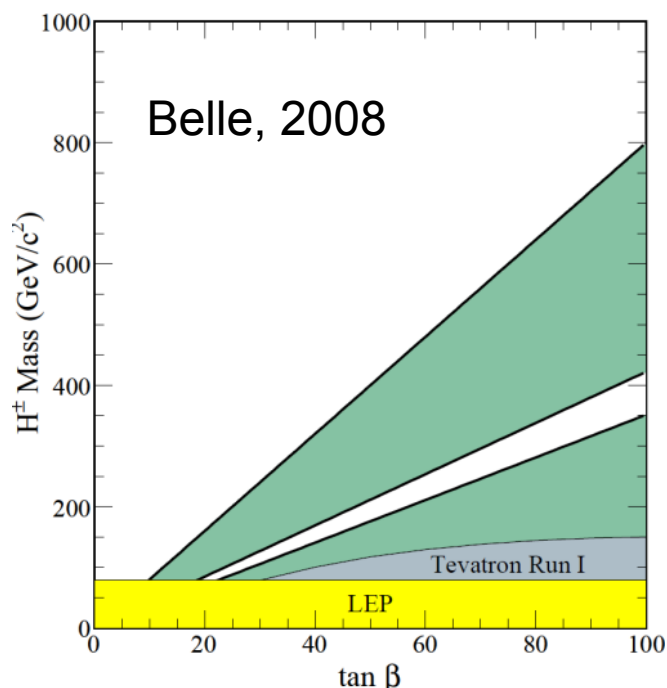
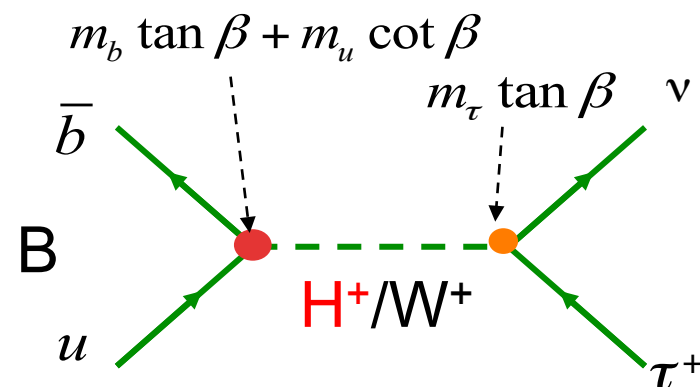
- $O_{1,2}$: current current operator
- O_{3-6} : QCD penguin operator
- O_7 : electro- magnetic operator
- O_8 : chromo-magnetic operator
- O_9 : semileptonic vector operator
- O_{10} : semileptonic axial vector operator
- C_i : Wilson coefficient
- Wilson coefficient is a strength of corresponding short distance operator.
- Precise measurement of Wilson coefficients is one of the goals for B physics.
- For $b \rightarrow s\gamma$ and $b \rightarrow ll$ case, only O_7 , O_9 and O_{10} appear in the Hamiltonian.

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_1 &= (\bar{s}_\alpha \gamma_\mu L c_\beta)(\bar{c}_\beta \gamma^\mu L b_\alpha), \\ \mathcal{O}_2 &= (\bar{s}_\alpha \gamma_\mu L c_\alpha)(\bar{c}_\beta \gamma^\mu L b_\beta), \\ \mathcal{O}_3 &= (\bar{s}_\alpha \gamma_\mu L b_\alpha) \sum_{q=u,d,s,c,b} (\bar{q}_\beta \gamma^\mu L q_\beta), \\ \mathcal{O}_4 &= (\bar{s}_\alpha \gamma_\mu L c_\beta) \sum_{q=u,d,s,c,b} (\bar{q}_\beta \gamma^\mu L q_\alpha), \\ \mathcal{O}_5 &= (\bar{s}_\alpha \gamma_\mu L b_\alpha) \sum_{q=u,d,s,c,b} (\bar{q}_\beta \gamma^\mu R q_\beta), \\ \mathcal{O}_6 &= (\bar{s}_\alpha \gamma_\mu L c_\beta) \sum_{q=u,d,s,c,b} (\bar{q}_\beta \gamma^\mu R q_\alpha), \\ \mathcal{O}_7 &= \frac{e}{16\pi^2} \bar{s}_\alpha \sigma_{\mu\nu} (m_s L + m_b R) b_\alpha F^{\mu\nu}, \\ \mathcal{O}_8 &= \frac{g}{16\pi^2} \bar{s}_\alpha \sigma_{\mu\nu} (m_s L + m_b R) T_{\alpha\beta}^a b_\beta G^{a\mu\nu}, \\ \mathcal{O}_9 &= \frac{e^2}{16\pi} \bar{s}_\alpha \gamma^\mu L b_\alpha \bar{\ell} \gamma_\mu \ell, \\ \mathcal{O}_{10} &= \frac{e^2}{16\pi} \bar{s}_\alpha \gamma^\mu L b_\alpha \bar{\ell} \gamma_\mu \gamma_5 \ell, \end{aligned}$$

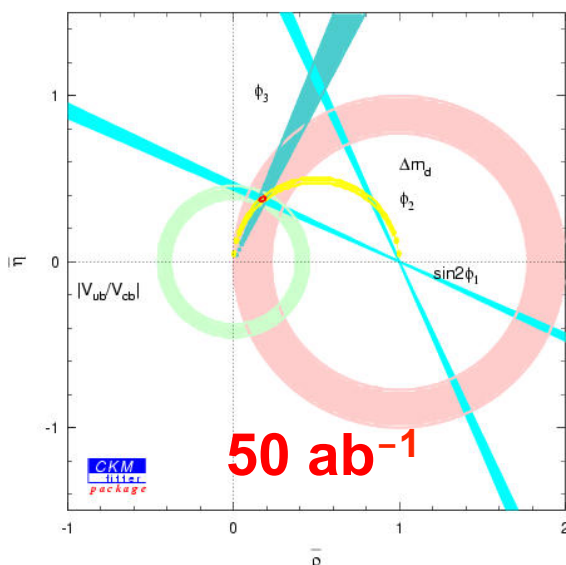
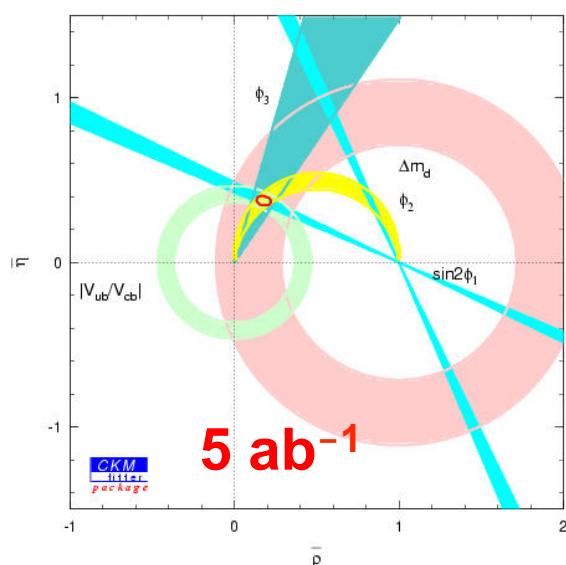
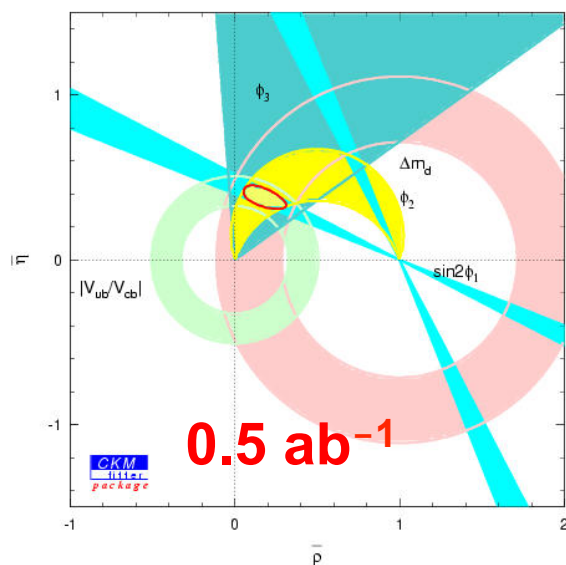
In the SM, W annihilation:

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

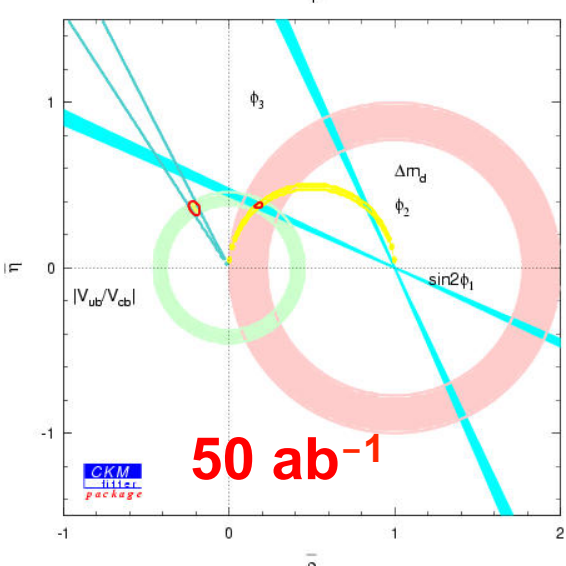
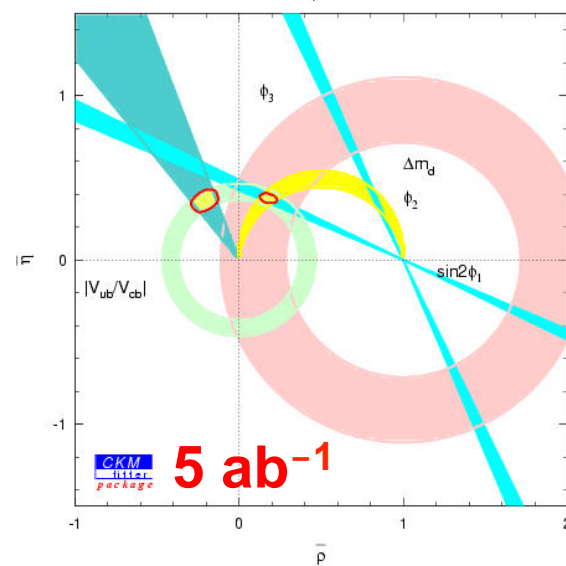
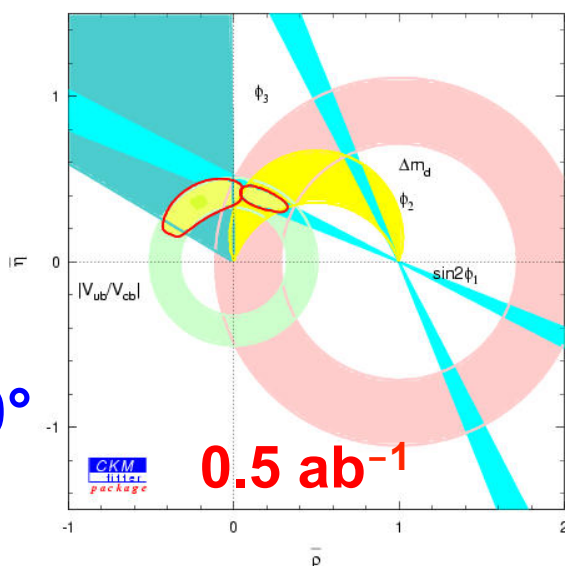
Contribution from charged Higgs



SM
 $\phi_3 = 65^\circ$



New Physics
 $\phi_3 = 120^\circ$



Letter of Intent for KEK Super B Factory (KEK-Report 2004-4)

Observable	Belle 2006	SuperKEKB		[†] LHCb	
	($\sim 0.5 \text{ ab}^{-1}$)	(5 ab^{-1})	(50 ab^{-1})	(2 fb^{-1})	(10 fb^{-1})
Hadronic $b \rightarrow s$ transitions					
$\Delta \mathcal{S}_{\phi K^0}$	0.22	0.073	0.029		0.14
$\Delta \mathcal{S}_{\eta' K^0}$	0.11	0.038	0.020		
$\Delta \mathcal{S}_{K_S^0 K_S^0 K_S^0}$	0.33	0.105	0.037	-	-
$\Delta \mathcal{A}_{\pi^0 K_S^0}$	0.15	0.072	0.042	-	-
$\mathcal{A}_{\phi\phi K^+}$	0.17	0.05	0.014		
Radiative/electroweak $b \rightarrow s$ transitions					
$\mathcal{S}_{K_S^0 \pi^0 \gamma}$	0.32	0.10	0.03	-	-
R_K		0.07	0.02		0.043
$\mathcal{B}(B \rightarrow X_s \gamma)$	13%	7%	6%	-	-
$A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma)$	0.058	0.01	0.005	-	-
C_9 from $\overline{A}_{\text{FB}}(B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-)$	-	11%	4%		
C_{10} from $\overline{A}_{\text{FB}}(B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-)$	-	13%	4%		
C_7/C_9 from $\overline{A}_{\text{FB}}(B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-)$	-		5%		7%
$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu})$	$^{\dagger\dagger} < 3 \mathcal{B}_{\text{SM}}$	?	30%	-	-
$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} \nu \bar{\nu})$	$^{\dagger\dagger} < 40 \mathcal{B}_{\text{SM}}$	?	35%	-	-
Radiative/electroweak $b \rightarrow d$ transitions					
$\mathcal{S}_{\rho\gamma}$	-	0.3	0.1		
$\mathcal{B}(B \rightarrow X_d \gamma)$	-	24%		-	-

Observable	Belle 2006	SuperKEKB		[†] LHCb	
	($\sim 0.5 \text{ ab}^{-1}$)	(5 ab^{-1})	(50 ab^{-1})	(2 fb^{-1})	(10 fb^{-1})
Leptonic/semileptonic B decays					
$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \tau^+ \nu)$	3.5σ	10%	3%	-	-
$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \mu^+ \nu)$	$^{\dagger\dagger} < 2.4 \mathcal{B}_{\text{SM}}$	4.3 ab^{-1} for 5σ discovery		-	-
$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow D\tau\nu)$	-	7.9%	2.5%	-	-
$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow D\tau\nu)$	-	28.5%	9.0%	-	-
LFV in τ decays					
$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\gamma) [10^{-9}]$	< 45	< 30	< 8	-	-
$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\eta) [10^{-9}]$	< 65	< 20	< 4	-	-
$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\mu\mu) [10^{-9}]$	< 209	< 10	< 1	-	-
Unitarity triangle parameters					
$\sin 2\phi_1$	0.026	0.016	0.012	~ 0.02	~ 0.01
$\phi_2 (\pi\pi)$	11°	10°	3°	-	-
$\phi_2 (\rho\pi)$	$68^\circ < \phi_2 < 95^\circ$	3°	1°	10°	4.5°
$\phi_2 (\rho\rho)$	$62^\circ < \phi_2 < 107^\circ$	3°	1°	-	-
ϕ_2 (combined)		2°	1°	10°	4.5°
$\phi_3 (D^{(*)}K^{(*)})$ (Dalitz)	20°	7°	2.5°	8°	
$\phi_3 (DK^{(*)})$ (ADS+GLW)	-	16°	5°	$5\text{-}15^\circ$	
$\phi_3 (D^{(*)}\pi)$	-	18°	6°		
ϕ_3 (combined)		6°	2°	4.2°	2.4°
$ V_{ub} $ (inclusive)	6%	5%	3%	-	-
$ V_{ub} $ (exclusive)	15%	12% (LQCD)	5% (LQCD)	-	-
$^{\dagger\dagger\dagger}\bar{\rho}$	20.0%		3.4%		
$^{\dagger\dagger\dagger}\bar{\eta}$	15.7%		1.7%		

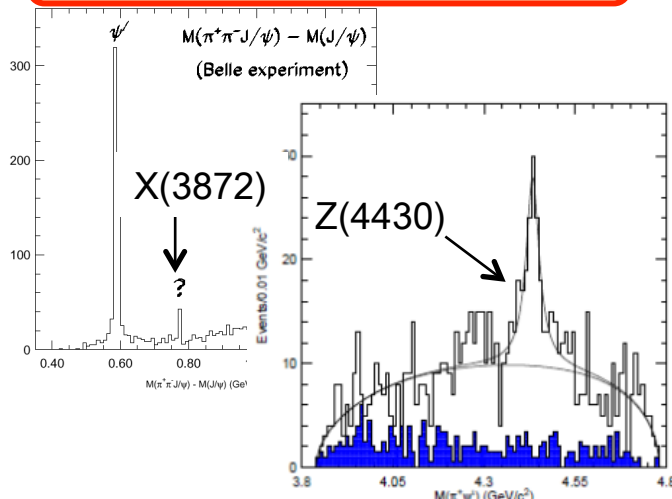
Comparison with LHCb

Observable	Belle	Belle/SuperKEKB	LHCb [†]	
			(2 fb ⁻¹)	(10 fb ⁻¹)
B_s physics	(25 fb ⁻¹)	(5 ab ⁻¹)		
$\mathcal{B}(B_s \rightarrow \gamma\gamma)$	$< 8.7 \times 10^{-6}$	0.25×10^{-6}	-	-
$\Delta\Gamma_s^{CP}/\Gamma_s$ ($Br(B_s \rightarrow D_s^{(*)} D_s^{(*)})$)	3%	1% (model dependency)	-	-
$\Delta\Gamma_s/\Gamma_s$ ($B_s \rightarrow f_{CP}$ t-dependent)	-	1.2%	-	-
ϕ_s (with $B_s \rightarrow J/\psi\phi$ etc.)	-	-	0.02	0.01
$\mathcal{B}(B_s \rightarrow \mu^+\mu^-)$	-		6 fb ⁻¹ for 5 σ discovery	
ϕ_3 ($B_s \rightarrow KK$)	-		7-10°	
ϕ_3 ($B_s \rightarrow D_s K$)	-		13°	
Υ decays	(3 fb ⁻¹)	(500 fb ⁻¹)		
$\mathcal{B}(\Upsilon(1S) \rightarrow \text{invisible})$	$< 2.5 \times 10^{-3}$	$< 2 \times 10^{-4}$		
	(~ 0.5 ab ⁻¹) [‡]	(5 ab ⁻¹)	(50 ab ⁻¹)	
Charm physics				
D mixing parameters				
x	0.25%	0.10%	0.07%	0.25% ^{††}
y	0.18%	0.08%	0.05%	0.05% ^{††}
$\delta_{K\pi}$	11°	6°	4°	
$ q/p $	0.16	0.07	0.05	
ϕ	0.13 rad	0.07 rad	0.04 rad	
A_D	2.4%	1%	0.3%	
New particles				
Electroweak parameters		(~ 10 ab ⁻¹)		
$\sin^2 \Theta_W$	-	3×10^{-4}		

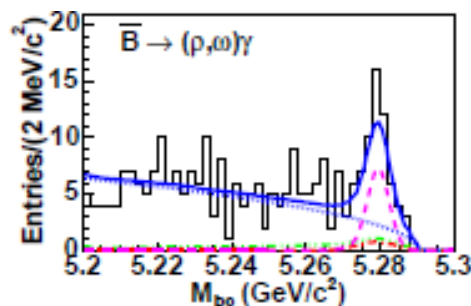
	$b \rightarrow s \gamma$			$b \rightarrow s l l$	$B \rightarrow \tau \nu$	$b \rightarrow s q q$	$B \rightarrow D \tau \nu$	$B \rightarrow K \pi$
	$\text{Br}(b \rightarrow s \gamma)$	$A_{\text{CP}}(X_s \gamma)$	$S_{\text{CP}}(K_S \pi^0 \gamma)$	$dA_{\text{FB}}(K^{*\text{II}})/dq^2$	Br	$\Delta S(\phi K_S)$	Br	$A(K^0 \pi^0)$
current	12.6% (605fb ⁻¹)	0.058 (140fb ⁻¹)	0.32 (480fb ⁻¹)	0.24 (605fb ⁻¹)	25% (605fb ⁻¹)	0.27 (605fb ⁻¹)		0.14 (605 fb ⁻¹)
5 ab ⁻¹	7.7%	0.011	0.09	0.11	10%	0.10	8%	
50 ab ⁻¹	6.8%	0.005	0.03	0.07	3%	0.05	2.5%	0.03

	$b \rightarrow s \gamma$			$b \rightarrow s l l$	$B \rightarrow \tau \nu$	$b \rightarrow s q q$	$B \rightarrow D \tau \nu$	$B \rightarrow K \pi$
	$\text{Br}(b \rightarrow s \gamma)$	$A_{\text{CP}}(X_s \gamma)$	$S_{\text{CP}}(K_S \pi^0 \gamma)$	$dA_{\text{FB}}(K^{*\text{II}})/dq^2$	Br	$\Delta S(\phi K_S)$	Br	$A(K^0 \pi^0)$
current	12.6% (605fb ⁻¹)	0.058 (140fb ⁻¹)	0.32 (480fb ⁻¹)	0.24 (605fb ⁻¹)	25% (605fb ⁻¹)	0.27 (605fb ⁻¹)		0.14 (605 fb ⁻¹)
5 ab ⁻¹	7.7%	0.011	0.09	0.11	10%	0.10	8%	
50 ab ⁻¹	6.8%	0.005	0.03	0.07	3%	0.05	2.5%	0.03

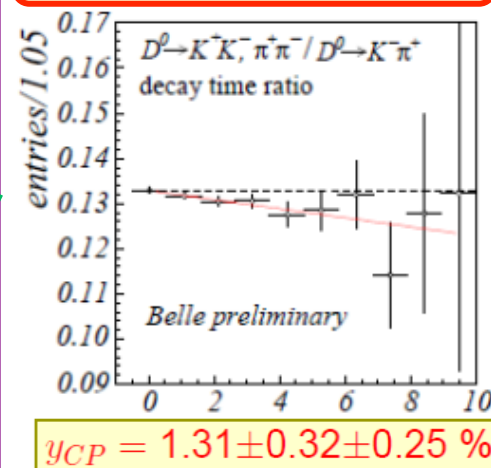
エキゾチックハドロンが発見



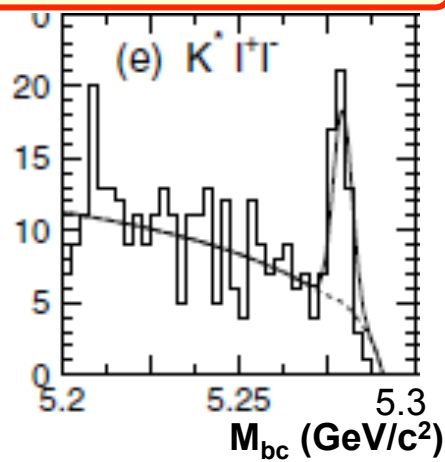
$b \rightarrow d\gamma$ 遷移の発見



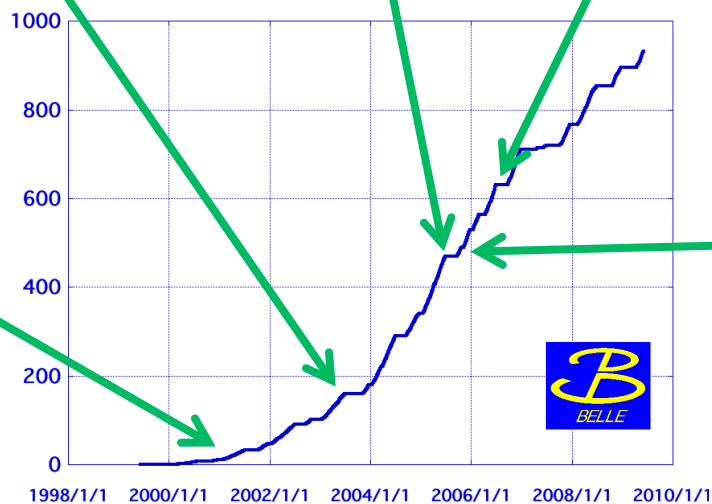
D^0 - $\bar{D}^0$ 混合の発見



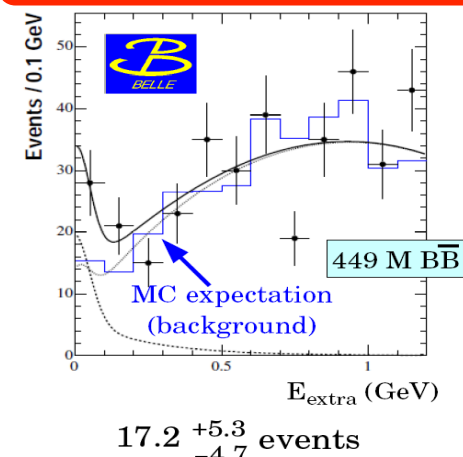
$B \rightarrow K^* l^+ l^-$ 崩壊の発見



Integrated Luminosity(log)



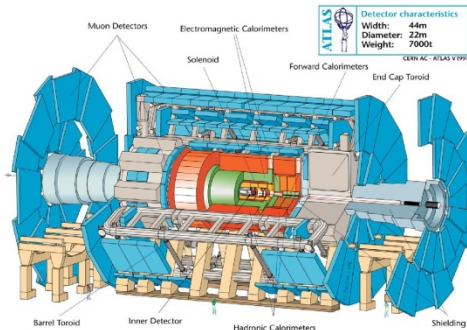
$B \rightarrow \tau \nu$ 崩壊の発見





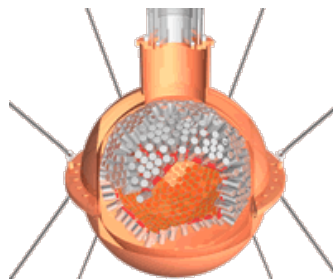
- 階層性問題: 標準模型のスケール(100GeV)とプランクスケール(10^{19} GeV)
- 新物理: 超対称性(SUSY)、余剰次元、複合ヒッグス(Little Higgs etc.) ...
- 代表例は SUSY : 上記の問題が一気に解決
- SUSY の中にも、いろいろな模型がある。
 - ✓ 超対称性は低いエネルギーでは破れているが、その破れの機構に様々な模型がある。

LHC

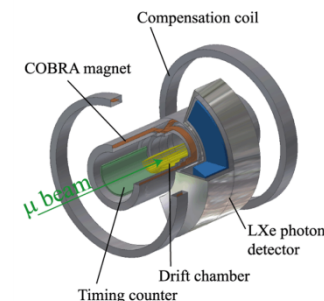


超対称性粒子の探索

暗黒物質探索



LFV



$\mu \rightarrow e\gamma$ 探索

Bファクトリー

- SUSYなどでは、小林益川機構にあらわれるCPを破る位相の他に、多くの新しい位相が導入される。
- SUSY(または他の新物理)がTeV領域にあるのであれば、Bの崩壊などに新しい位相の影響が現れる。
- Bファクトリーは τ も大量に生成
⇒ レプトンフレーバーの破れ(LFV)の研究もできる。

Belle II では新物理が関与するモードを精査

→ 超対称性理論のどの模型がもっとも正しいか、複数の角度から検証

代表的なSUSY模型

Belle II (又は他の実験)

での観測量

	mSU GRA	MSSM+ ν_R		SU(5)+ ν_R		U(2) FS	...
		degenerate	non-degenerate	degenerate	non-degenerate		
$A_{CP}(s\gamma)$						✓	
$S(K^*\gamma)$				✓	✓	✓	
$S(\rho\gamma)$				✓	✓	✓	
$S(\phi K_S)$				✓	✓	✓	
$S(B_s \rightarrow J/\psi \phi)$				✓	✓	✓	
$\mu \rightarrow e\gamma$		✓		✓	✓	?	
$\tau \rightarrow \mu\gamma$		✓	✓	✓	✓	?	
$\tau \rightarrow e\gamma$			✓		✓	?	

⋮ ✓:標準模型からのずれ [based on T.Goto et.al. PRD77, 095010(2008)]

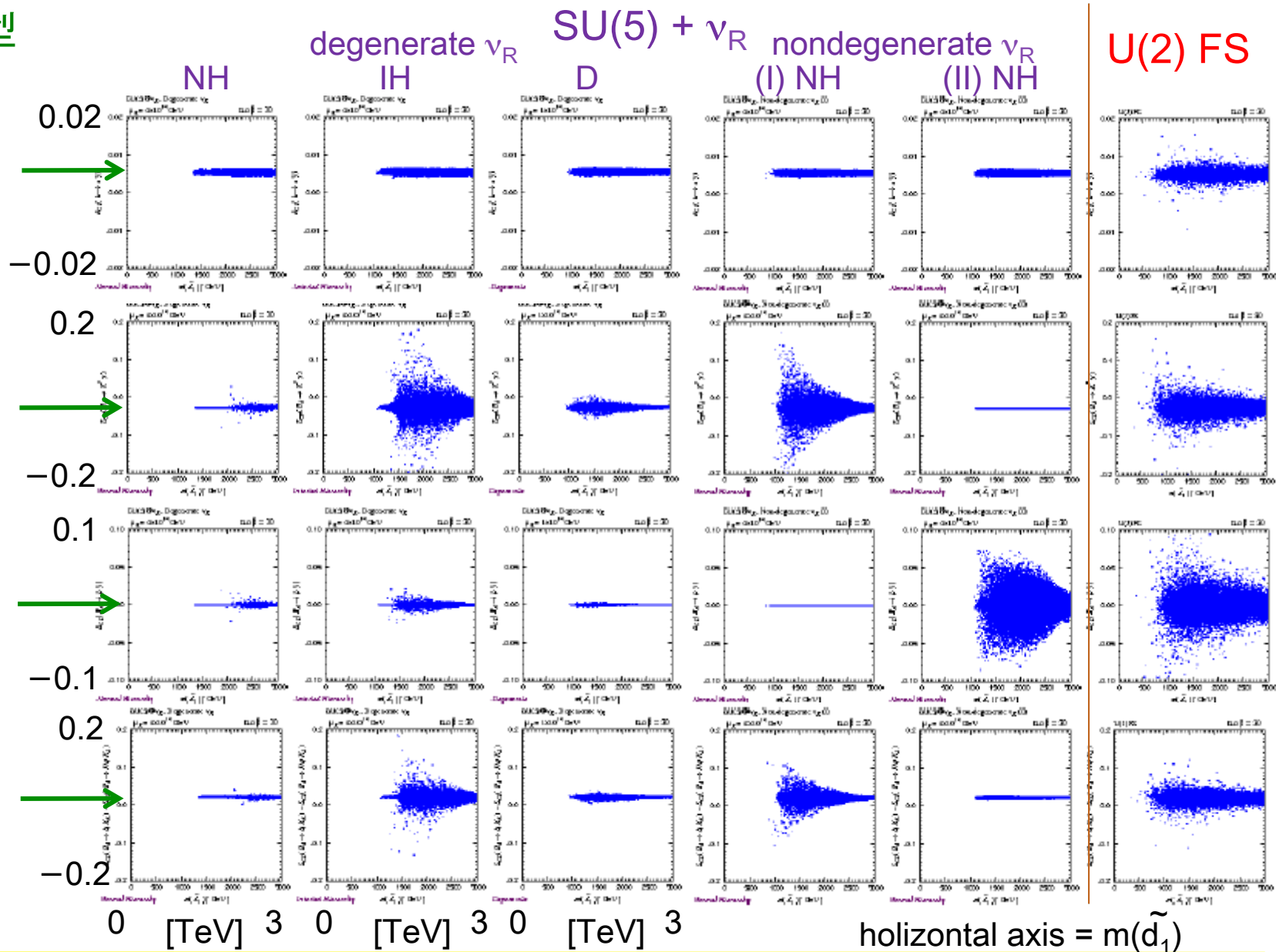
→ 標準模型

$A_{CP}(b \rightarrow s\gamma)$

$S(B \rightarrow K^*\gamma)$

$S(B \rightarrow \rho\gamma)$

$S(\phi K_S) - S(J/\psi K_S)$



エネルギーフロンティア

SUSY粒子を直接検出

但し、SUSY粒子の質量スペクトルだけから、新物理のモデルの識別は困難。

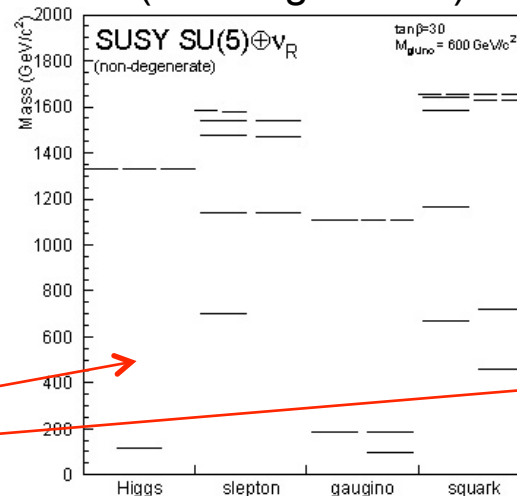
異なるモデルでも似たような質量スペクトル

ルミノシティフロンティア

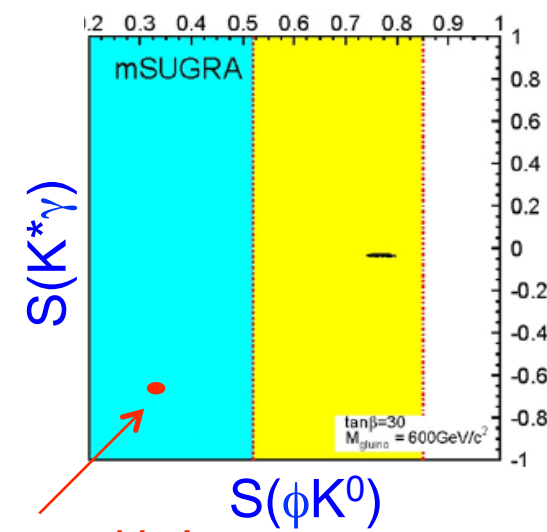
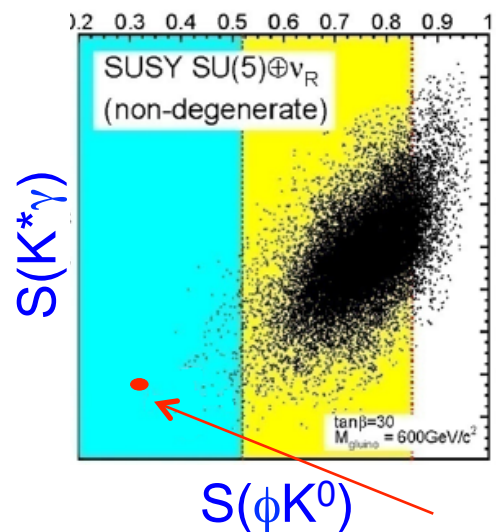
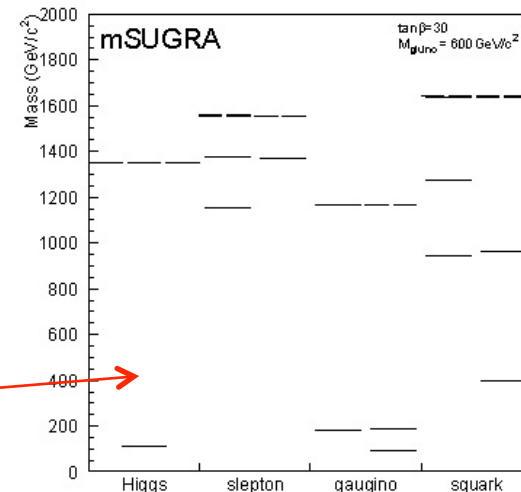
SUSY 粒子間・SUSY-SM 粒子の相互作用の研究

様々なモードで標準モデルからのずれを測定し、新物理のモデルを同定。

SU(5)+ ν_R (non-degenerate)



mSUGRA



50 ab^{-1} での精度

LHCがTeV領域に新物理を発見した場合

- 新物理の種類:
SUSY, 余剰次元, Little Higgs, ... ?
- SUSYの破れの機構は?
- 新物理でのCP対称性の破れ

フレーバー物理
(ルミノシティフロンティア)と
エネルギーフロンティア
は相補的

新物理の海へ
の大航海時代

MSSM+ ν_R
degenerate

SU(5)+ ν_R
degenerate

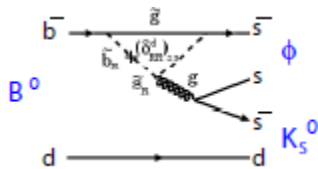
SU(5)+ ν_R
non-degenerate

新しい物理

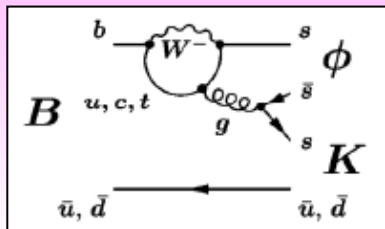
MSSM+ ν_R
non-degenerate

U(2)FS

Belle II = 羅針盤



Higgs



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

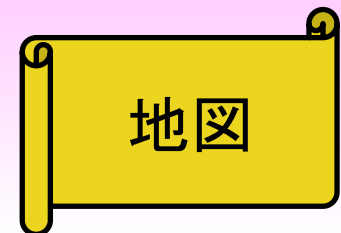
Luminosity Frontier

Energy Frontier

top

W, Z

標準模型



万が一、TeV領域に新物理がなかった場合

- FCNC過程は、現在も新しい物理に多くの制限を与えている。
⇒さらなる追究で、新物理へ迫る

暗闇の中を
フレーバー物理で探索

MSSM+ ν_R
degenerate

SU(5)+ ν_R
degenerate

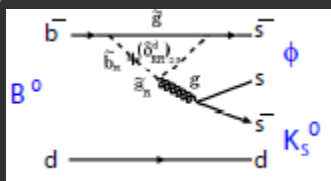
SU(5)+ ν_R
non-degenerate

新しい物理

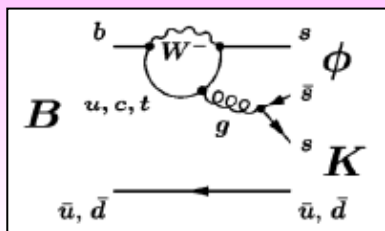
MSSM+ ν_R
non-degenerate

Belle II = 羅針盤

U(2)FS



Higgs



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

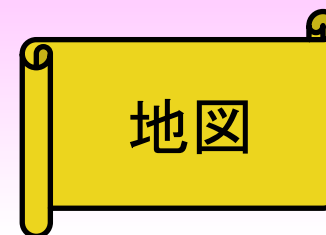
Luminosity Frontier

Energy Frontier

top

W, Z

標準模型



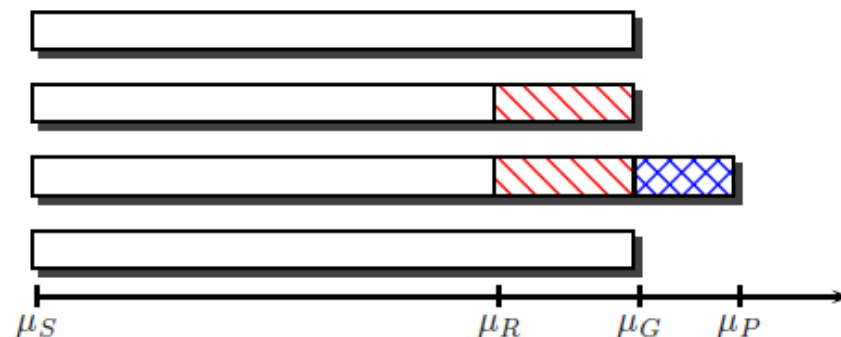
LHCでSUSYが見つかった場合、
BelleIIでのFlavor物理の信号を見る
ことにより、SUSYの破れの機構
を調べることができる。

mSUGRA

MSSM with RN

SU(5) GUT with RN

U(2) model



MSSM + right-handed neutrino

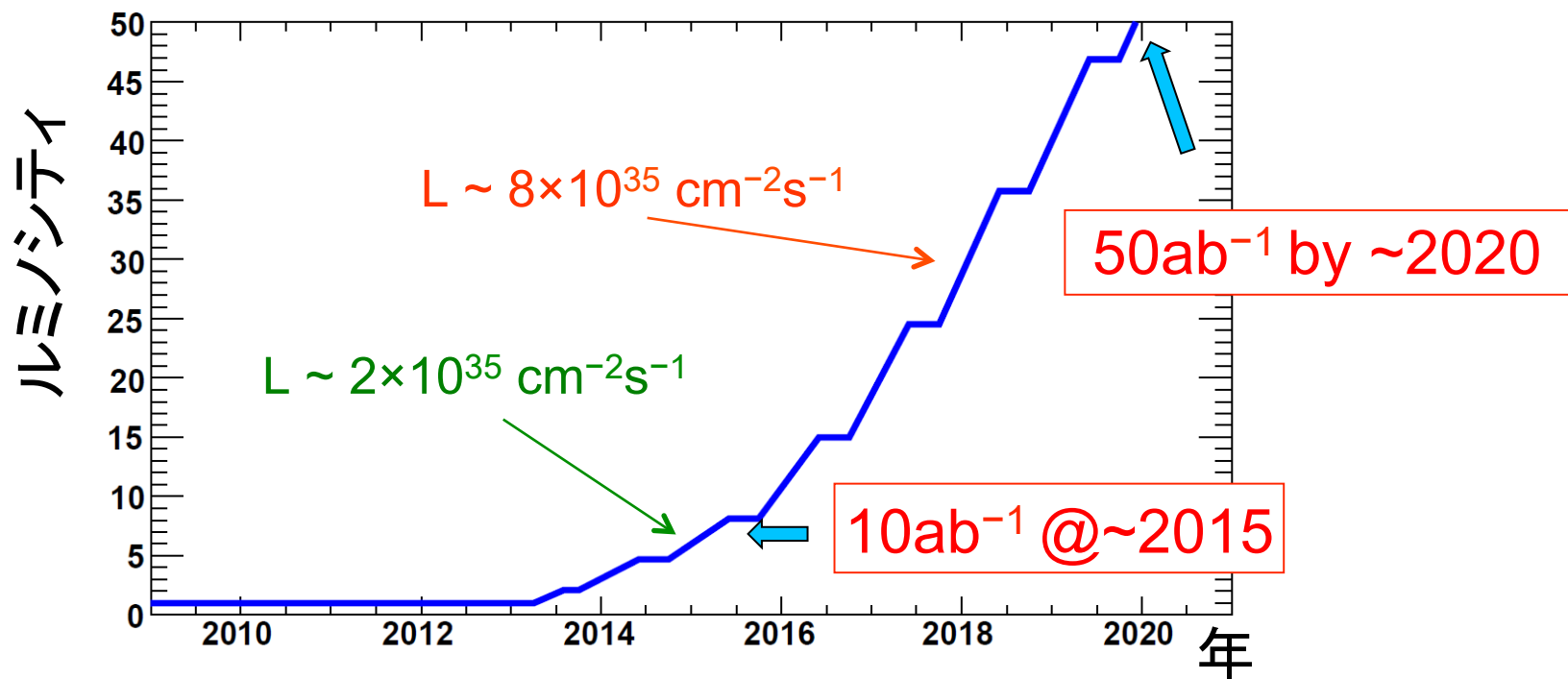
SU(5) + right-handed neutrino

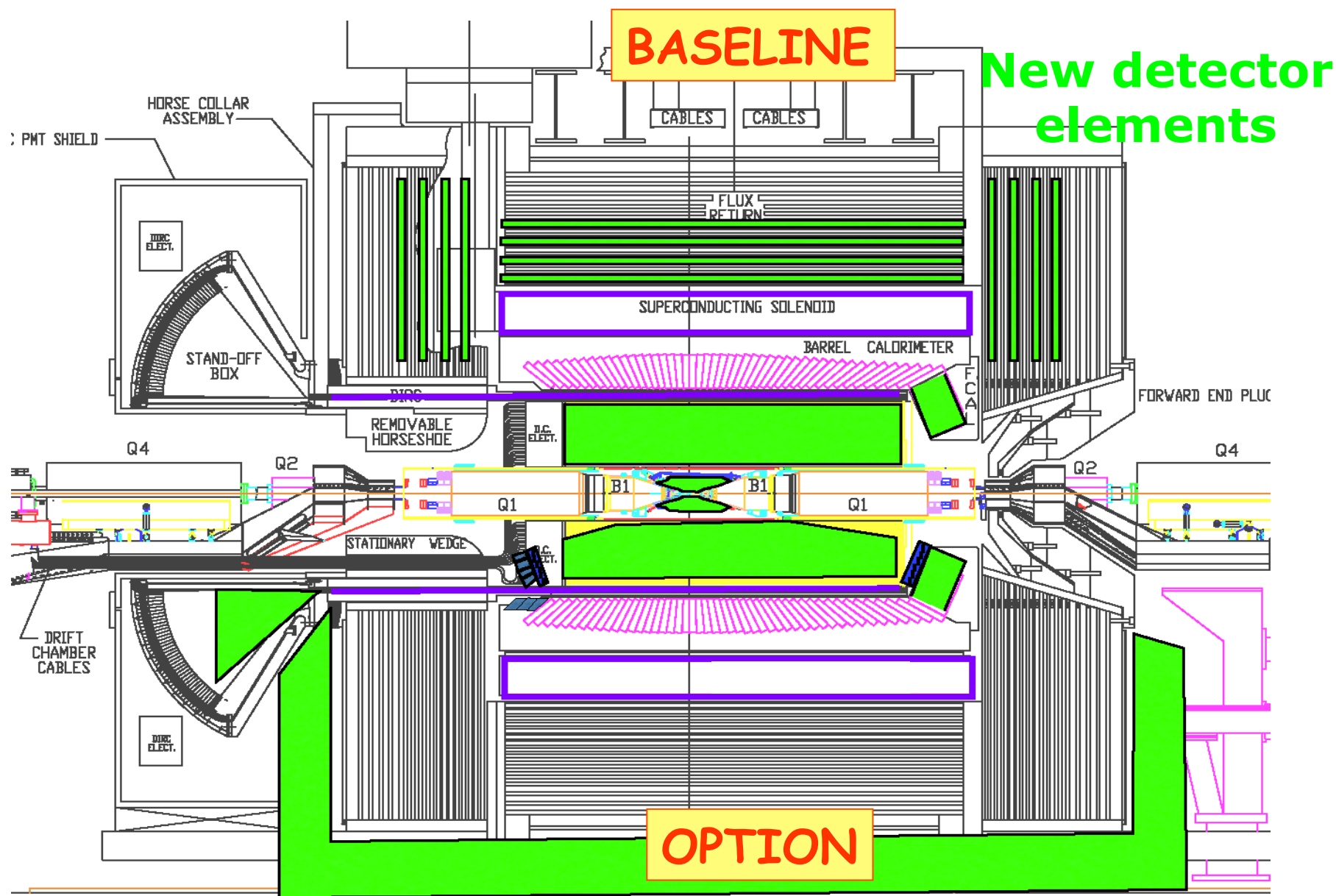
U(2) Flavor Symmetry

 MSSM
  MSSM+RN
  SU(5)+RN

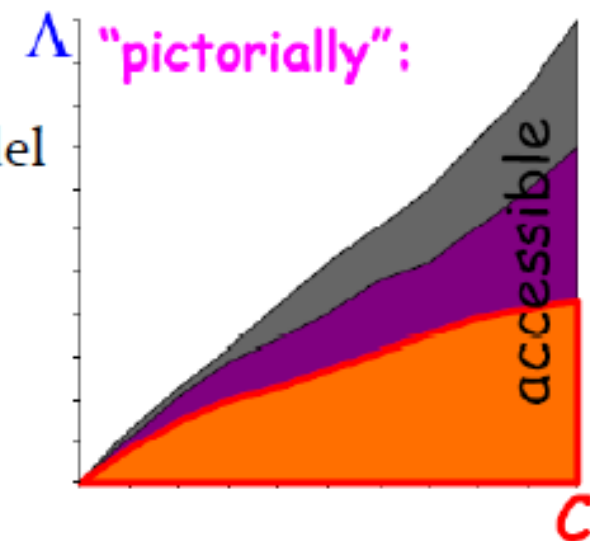
Model	$A_{CP}(s\gamma)$	$S_{CP}(K^*\gamma)$	$A_{CP}(d\gamma)$	$S_{CP}(\rho\gamma)$	$\Delta S_{CP}(\phi K_S)$	$S_{CP}(B_s \rightarrow J/\psi\phi)$	$\Delta m_{B_s}/\Delta m_{B_d}$ vs. ϕ_3	$\mu \rightarrow e\gamma$	$\tau \rightarrow \mu\gamma$	$\tau \rightarrow e\gamma$
mSUGRA										
MSSM+RN										
Degenerate ν_R , NH								✓		
Degenerate ν_R , IH								✓	✓	
Degenerate ν_R , D								✓	✓	
Non-degen. ν_R (I), NH									✓	
Non-degen. ν_R (II), NH										✓
SU(5)+RN										
Degenerate ν_R , NH		•		•	•	•		✓		
Degenerate ν_R , IH		✓		•	✓	✓	•	✓	✓	
Degenerate ν_R , D		•		•	•	•		✓	✓	
Non-degen. ν_R (I), NH		✓			✓	✓	•	✓	✓	
Non-degen. ν_R (II), NH				✓			•	✓		✓
U(2)FS	✓	✓		✓	✓	✓	•	-	-	-

LHC時代における 新物理の解明のため KEKBの高度化が重要





- Flavor precision measurements sensitive to New Physics (NP)
 - Measure interference effect in known processes
 - Measure decays: rare or forbidden in Standard Model
- NP effects governed by
 - New Physics Scale Λ
 - Effective coupling C
 - Different Intensities (from interactions)
 - Different Patterns (for instance from symmetries)



With $7\text{-}10 \times 10^{10}$ pair $b\bar{b}$, $c\bar{c}$, $\tau\bar{\tau}$ ($75\text{-}100 \text{ ab}^{-1}$) it is possible

NP(Λ) found at LHC

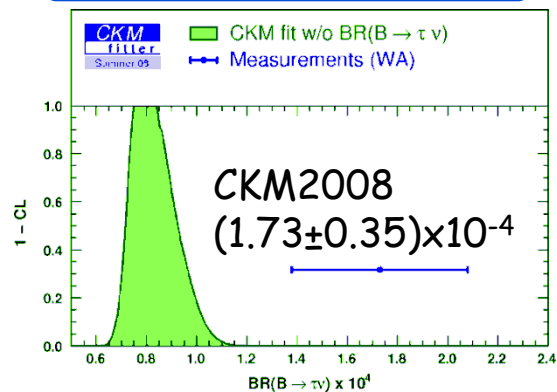
- Determine couplings FV e CPV of NP
- Look for heavier states
- Study the flavor structure of NP

NP(Λ) not found at LHC

- Look for indirect signals of NP
- Link them to explaining NP models
- Constrain regions in parameter space with NP(Λ) sensitivity up several tens of TeV.

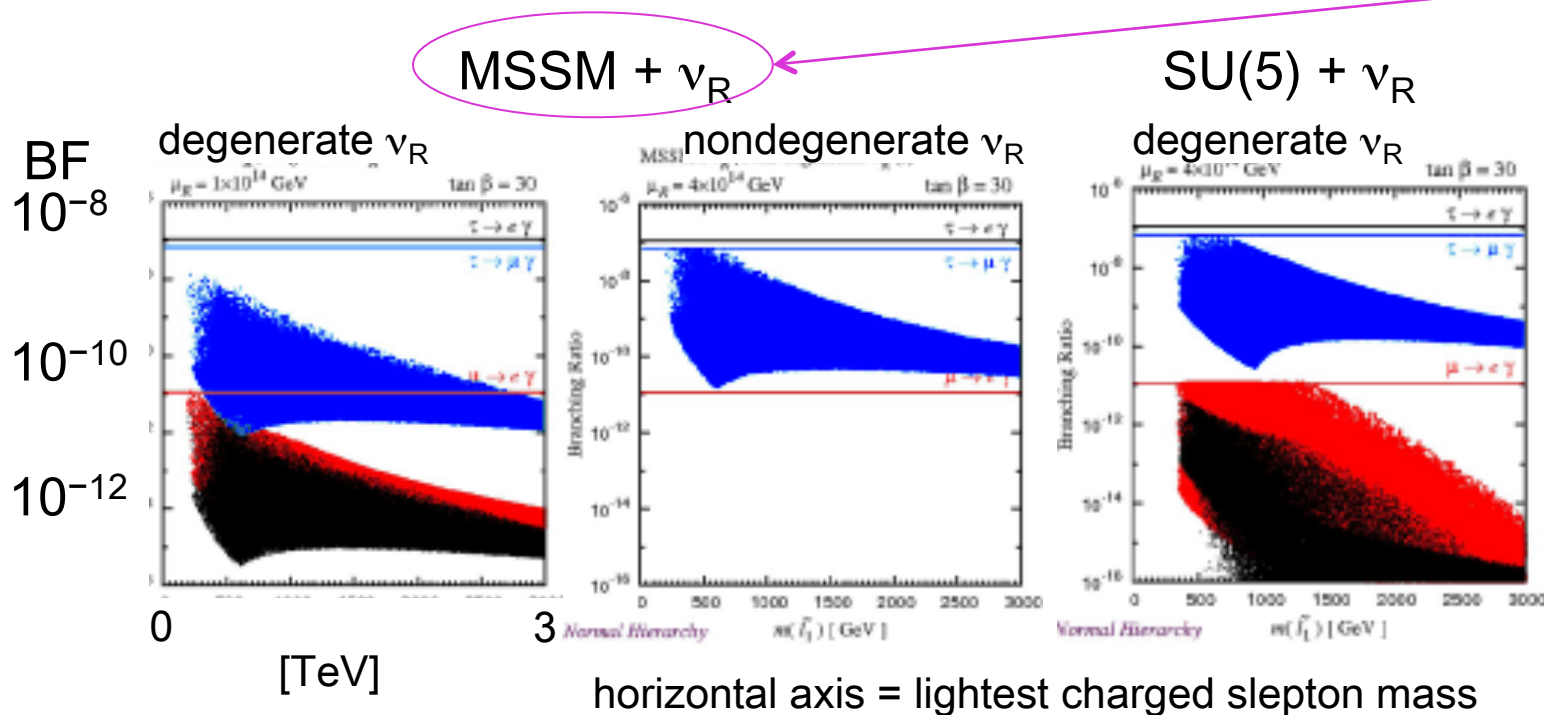
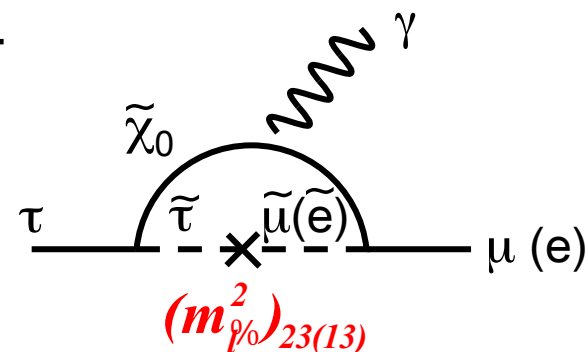
Some phenomena as LFV in t decay show clear signals of NP

大きな $B \rightarrow \tau \nu$ の分岐比



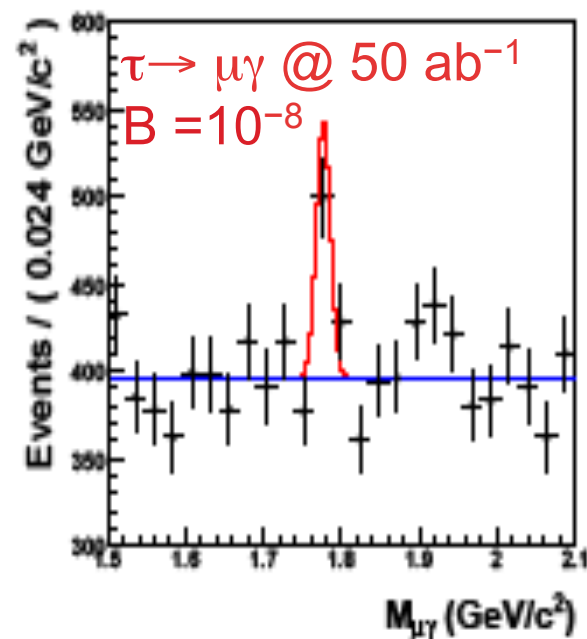
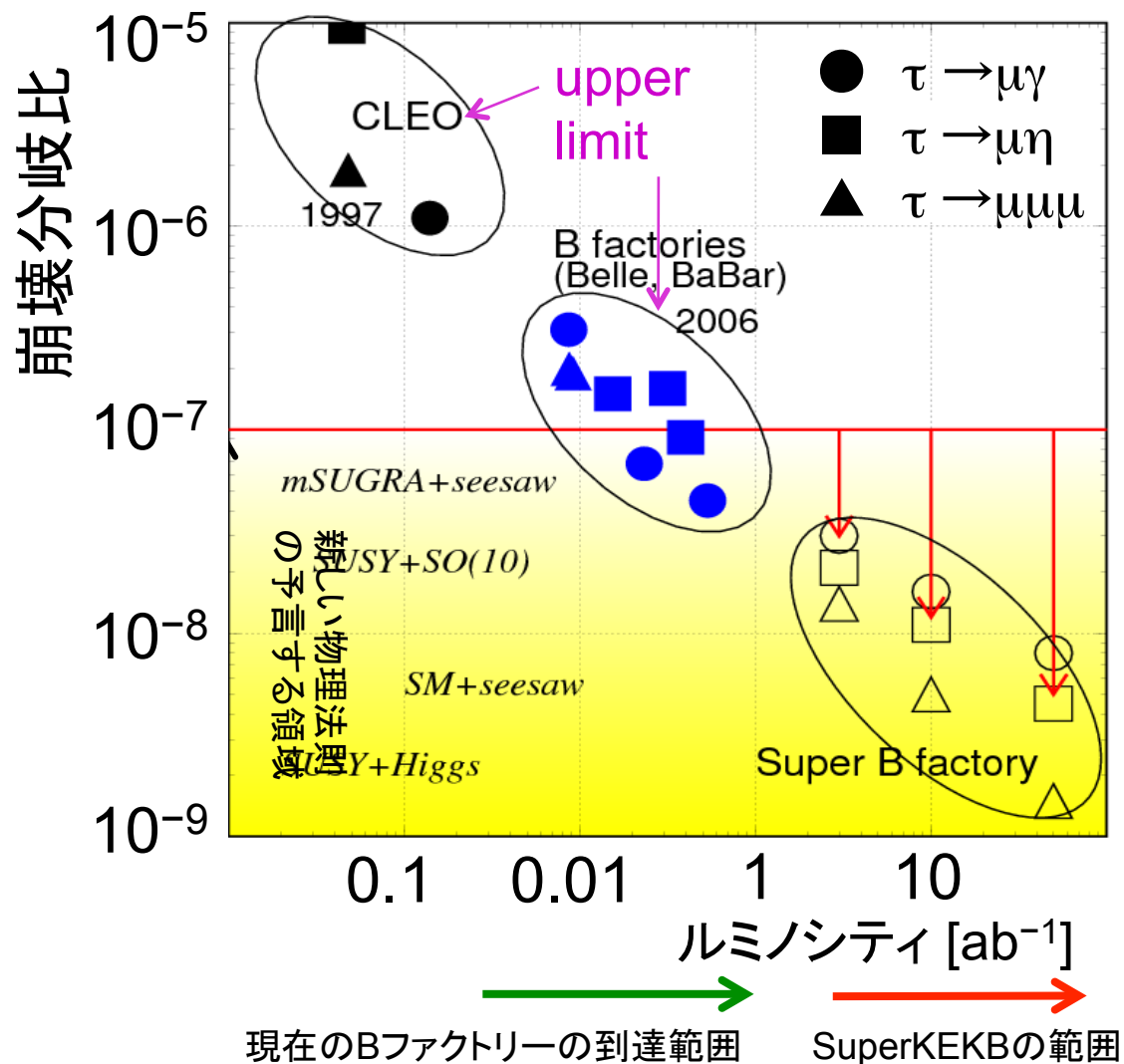
Lattice 計算に頼らず、CKMの他の制限から分岐比を求めると、測定値とずれる。

- **レプトンフレイバーの破れ(LFV)**: 標準模型では禁止
- 多くの新物理モデルでは予言されている
- Bファクトリーでは、大量の τ 対が作られる (τ ファクトリー)。
- τ の崩壊: 第3世代と第2(1)世代の混合



クォークセクターには新物理の効果があまり現れないモデル

$\tau \rightarrow \mu \gamma$
 $\tau \rightarrow e \gamma$
 $\mu \rightarrow e \gamma$



$$\frac{Br(\tau \rightarrow \mu ee)}{Br(\tau \rightarrow \mu\gamma)} = \begin{cases} 0.3 - 1.6 & \text{little Higgs} \\ \sim 0.01 & \text{MSSM} \end{cases}$$

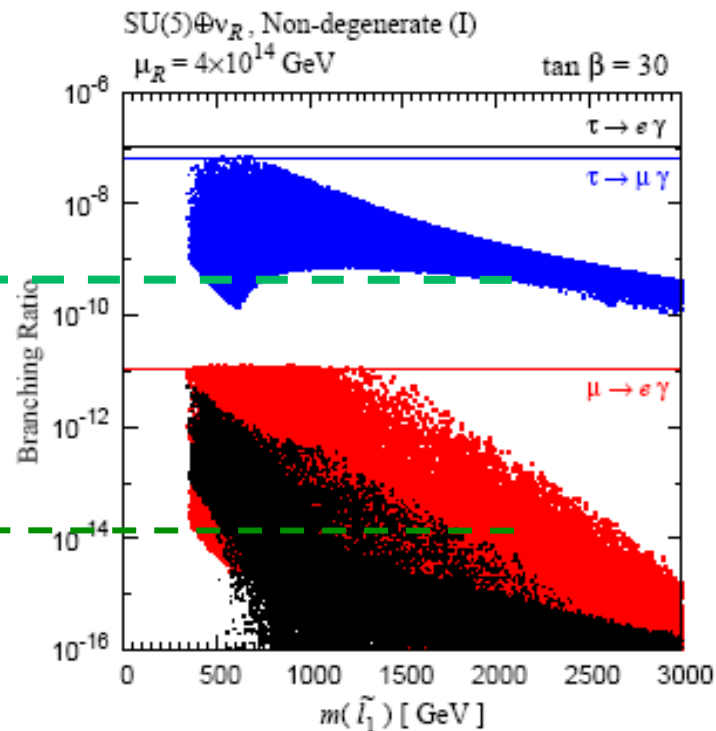
Sensitivity @ 50 ab^{-1}

$$B(\tau \rightarrow \mu ee) \sim 10^{-9}$$

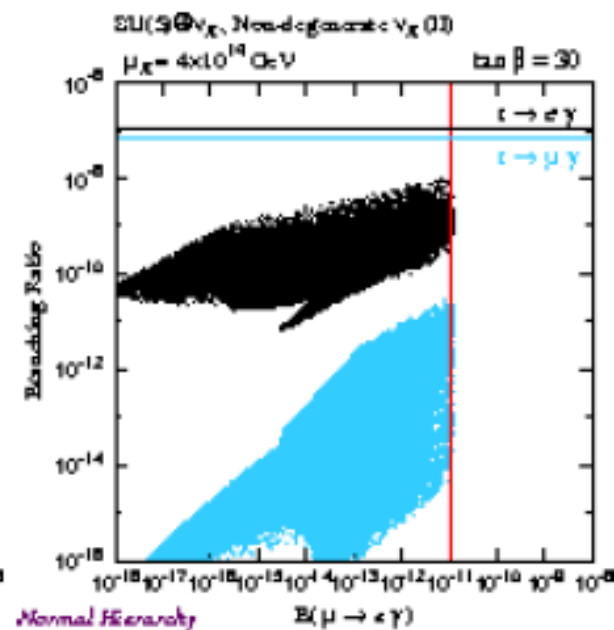
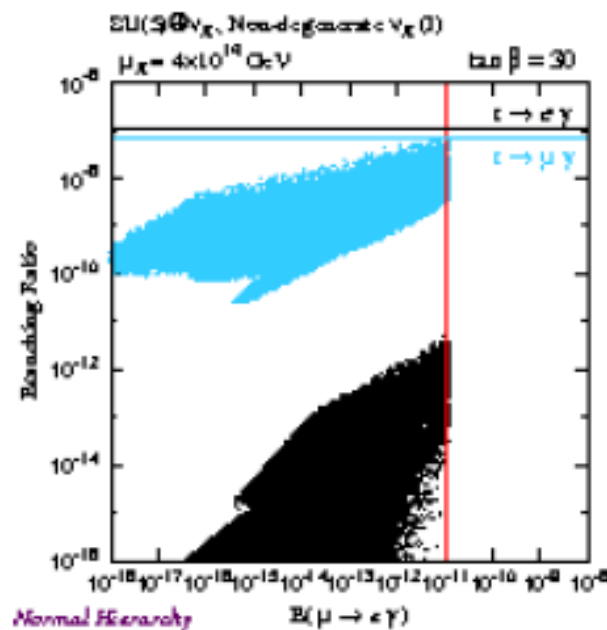
$$B(\tau \rightarrow \mu\gamma) \sim 7 \times 10^{-9}$$

崩壊モードによってモデルの識別も可能

$$\tau \rightarrow \mu(e)\gamma \text{ v.s. } \mu \rightarrow e\gamma$$



T.Goto et al., 2007



$$B(\mu \rightarrow e\gamma)$$

$$\tau \rightarrow \mu\gamma$$

$$\tau \rightarrow e\gamma$$

$$\mu \rightarrow e\gamma$$

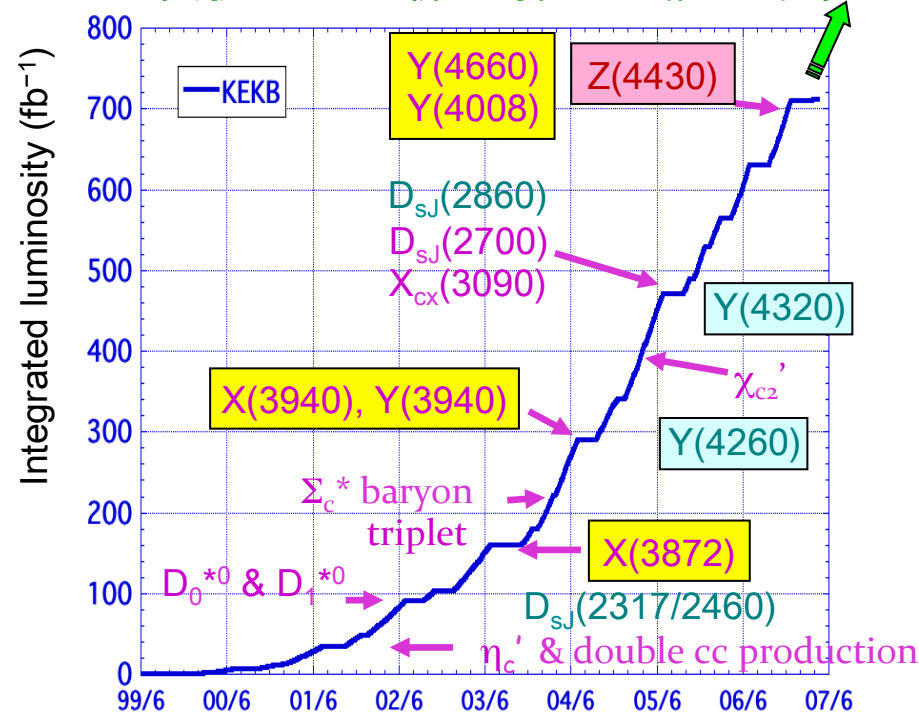
e^+e^- is advantageous in...	LHCb is advantageous in...
CPV in $B \rightarrow \phi K_S, \eta' K_S, \dots$	CPV in $B \rightarrow J/\psi K_S$
CPV in $B \rightarrow K_S \pi^0 \gamma$	Most of B decays not including ν or γ
$B \rightarrow K \nu \nu, \tau \nu, D^{(*)} \tau \nu$	Time dependent measurements of B_S
Inclusive $b \rightarrow s \mu \mu$, see $\tau \rightarrow \mu \gamma$ and other LFV	$B_{(S,d)} \rightarrow \mu \mu$
$D^0 \bar{D}^0$ mixing	B_C and bottomed baryons

These are complementary to each other !!

- BF, A_{CP} of $B \rightarrow X_s \gamma, B \rightarrow X_d \gamma$
- $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$
- $B \rightarrow \ell \nu$
- $B \rightarrow K \nu \nu$
- $B \rightarrow VV$
- Baryonic B decays
- Other rare (or exotic) B decays
- Rare D decays
- Charmonia and New Particles
- Other exotic hadrons
- τ Physics
- Two-photon Physics
- Electroweak Physics
- B_s ($Y(5S)$)
- $Y(1S), Y(2S), Y(3S)$
-

+ 予期していない物理

Belle実験における新共鳴粒子の相次ぐ発見



「多彩なフレーバーでさぐる新しいハドロン存在形態の包括的研究」

世界をリードする素粒子原子核分野の実験・理論研究者が、「ハドロン」という共通のキーワードを得て結集、その境界領域に新しいハドロン物理学を創成する。

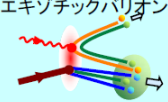
E01 (理論研究) QCDに基づく統一的理解+実験への予言

クォークがどのように質量を獲得し、どのような形態でハドロンに閉じ込められるのかを探る

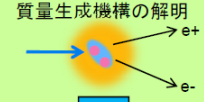
A01 (Bファクトリー)
エキゾチックメソン

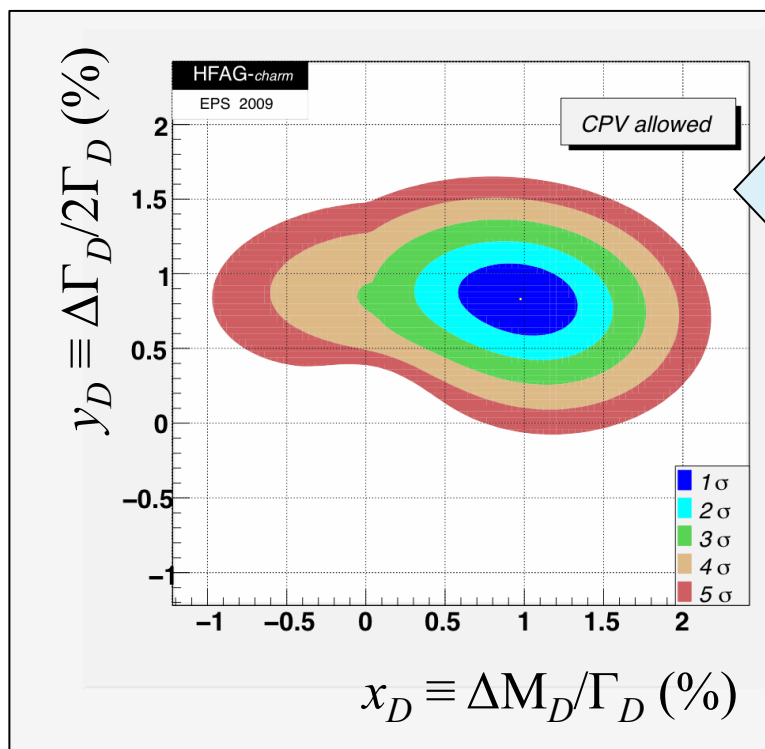


B01 (LEPS)
エキゾチックバリオン



C01 (J-PARC E16)
質量生成機構の解明





$$x_D = (0.98^{+0.24}_{-0.26})\%$$

$$y_D = (0.83 \pm 0.16)\%$$

Belle, BaBar,
CDF, CLEOc の平均値

標準模型の予想

$$x_D, y_D \leq \sim 1\%$$

標準理論の予想よりも
大きな D⁰- $\bar{D}^0$ 混合？



新しい物理の
兆候の可能性

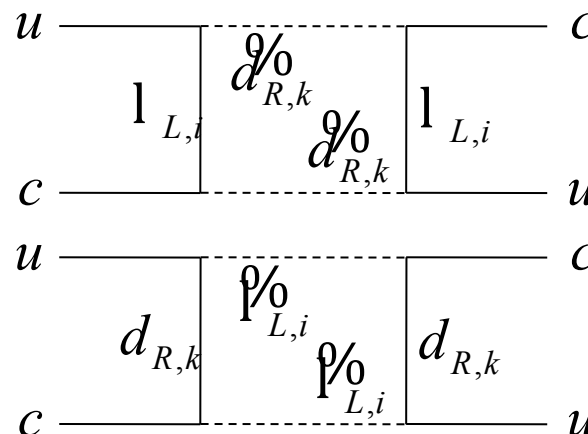


D⁰- $\bar{D}^0$ 混合を通じた
新物理の同定

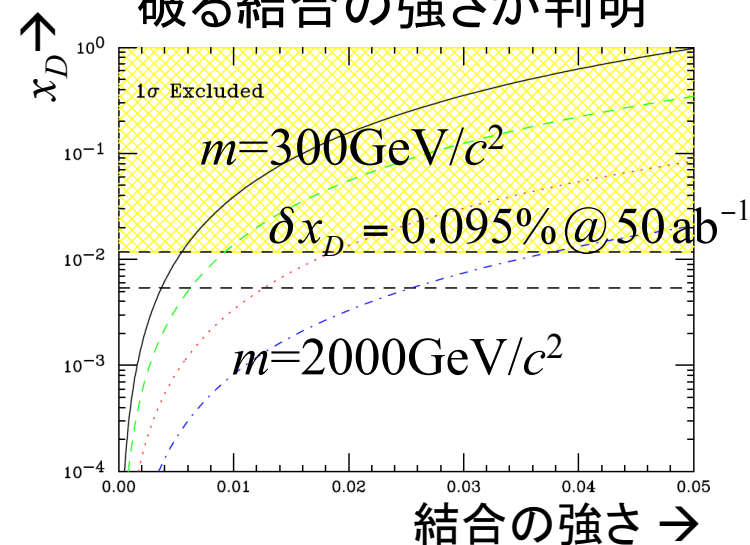
D⁰- $\bar{D}^0$ 混合で探る新しい物理

新しい物理の
シナリオの一例

R-parityを破るSUSY粒子が
box-diagram中に存在し
大きなD⁰- $\bar{D}^0$ 混合を生成



x_D の精密測定とSUSY粒子の
質量 ($m_{\tilde{d}}=m_{\tilde{\ell}}$) から R-parity を
破る結合の強さが判明



D⁰- $\bar{D}^0$ 混合とCP対称性の破れ

D⁰- $\bar{D}^0$ 混合の存在により
D中間子系でのCP対称性の
破れも実験的に決定可能。

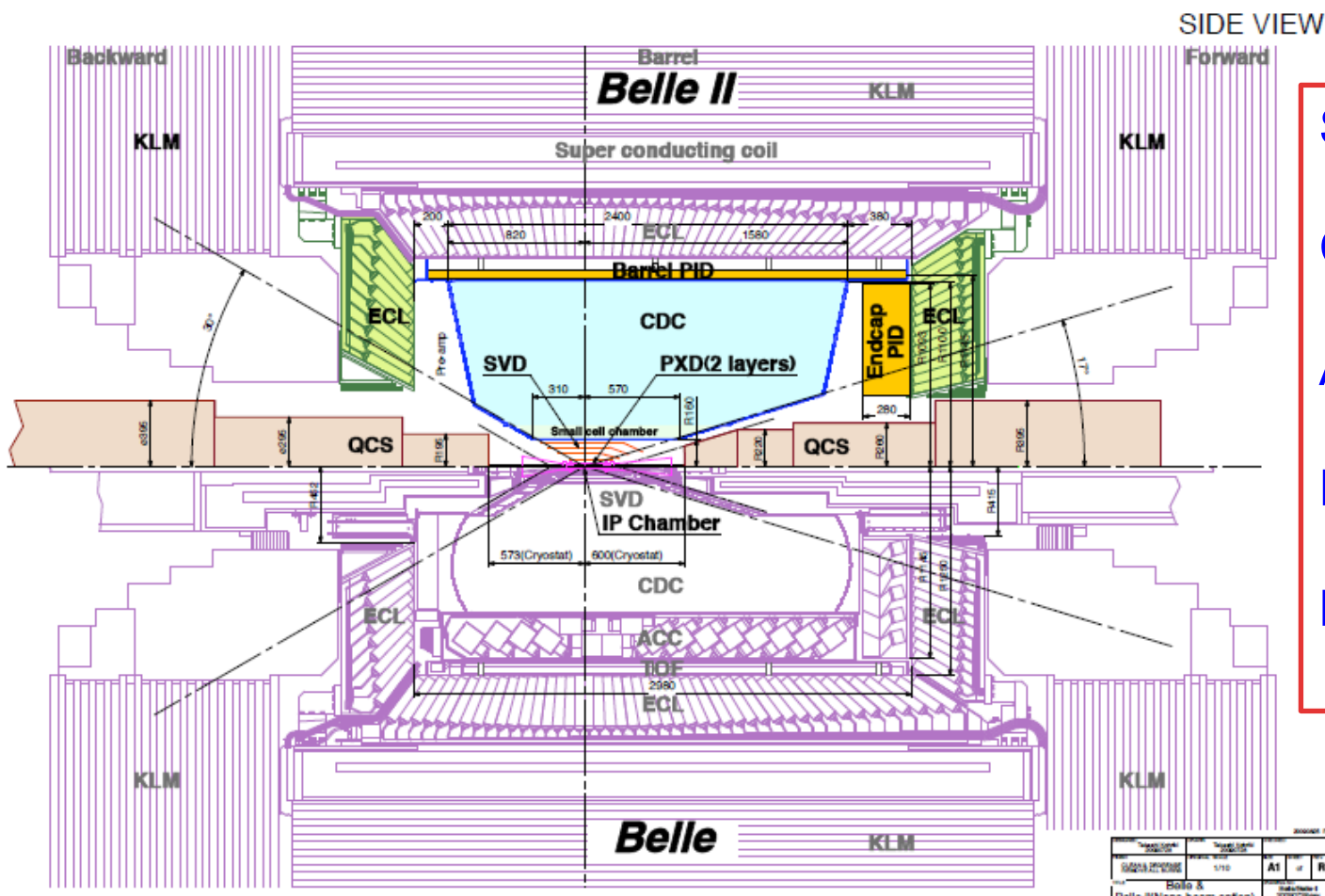


標準模型はCPの破れを<O(0.1%)と予想。
予想からの変位パターンが新しい物理のモ
デルを同定。また、up-type quark が関与
する貴重な事例。

CP violation in decay (direct CP violation)

$$a_{\text{実験}}^d = (-0.11 \pm 0.34)\% \text{ (現在の実験最新値)}$$

$$\delta a_{D \rightarrow KK}^d = 0.1\% @ 50 \text{ ab}^{-1}$$



SVD: 4 lyr → 2 DEPFET
 lyrs + 4 DSSD lyrs
CDC: small cell, long lever
 arm
ACC+TOF
 → TOP+A-RICH
ECL: waveform sampling,
 pure CsI for endcaps
KLM: RPC → Scintillator
 +SiPM (end-caps)

- 現在のBelleよりも、高いイベントレートとバックグラウンドに耐える
- Vertexing, 粒子識別など、現在よりも性能も向上。

- 素粒子物理学のさらなる発展は、TeV領域の新物理(超対称性)の解明なしにはありえない。
 - ✓ エネルギーフロンティア実験とフレーバー物理の協調
- SuperKEKB / Belle II では、多くのモードを調べることにより、「新物理のモデルの識別」を行う。
 - ✓ Belleで見えている「新物理の兆候」を50倍のルミノシティで検証
 - ✓ τ を用いたレプトンフレーバーの破れの研究
 - ✓ 新しいCP非対称性の起源の研究
 - ✓ B, τ , charm などの豊富な物理

「ルミノシティーフロンティア」における
フレーバー物理実験が重要

- Grand questions in flavor physics
 - ✓ Why three generations ?
 - ✓ Why masses and mixing parameters with strange patterns ?
 - ✓ Why did antimatter disappear in the early universe ?
 - ✓ ...
- The Standard Model (SM) does not give answers
 - ✓ Profound principles (of Gauge, Relativity, Quantum)
 - ✓ However, “Flavor Principle” is missing
- These exciting questions will remain unanswered even if SUSY is found at LHC.

Long-term step-by-step experimental approach in flavor physics needed to address these grand questions.

Quark Flavor Physics

V_{ud}

V_{us}

V_{ub}

V_{cd}

V_{cs}

V_{cb}

V_{td}

V_{ts}

V_{tb}

Cabibbo-Kobayashi-Maskawa matrix

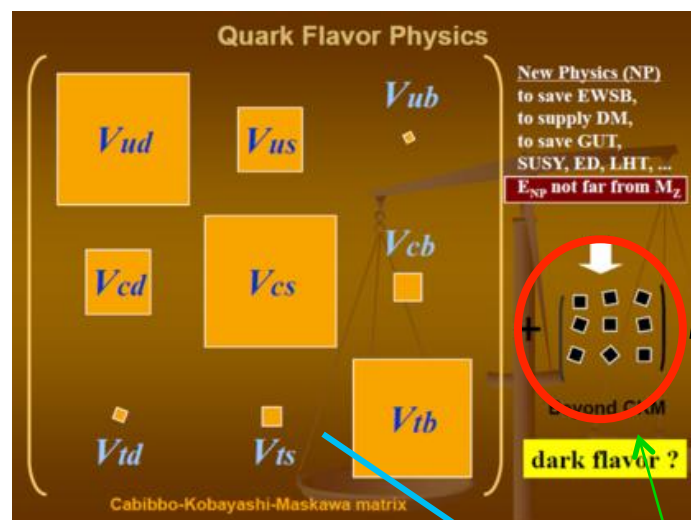
New Physics (NP)
to save EWSB,
to supply DM,
to save GUT,
SUSY, ED, LHT, ...

E_{NP} not far from M_Z

+

Beyond CKM

dark flavor ?



- New CP-violating phases ?
✓ tCPV in $b \rightarrow s$ transition.
- New right-handed currents ?
✓ photon helicity in $b \rightarrow s\gamma$
- Effects from new Higgs fields ?
✓ $B \rightarrow \tau\nu$, $D\tau\nu$
- New flavor violation ?
✓ LFV ($\tau \rightarrow \mu\gamma$)

- New flavor symmetry to explain the CKM hierarchy ?
✓ Precise unitarity triangle measurement

- Direct detection of NP in flavor physics.
- Measure properties of NP, if NP is found in LHC.
- Constrain NP at higher energy scale (if NP not found).

T. Goto, Y.Okada, Y.Shimizu, T.Shindou, M.Tanaka,
hep-ph/0306093, also in SuperKEKB LoI

Representative SUSY scenarios a la SUGRA

SUSY Models

1 mSUGRA

- $\mathcal{L}_{\text{soft}}$ is flavor blind
- KM mixings $\rightarrow$ mixing in $\tilde{q}_L$

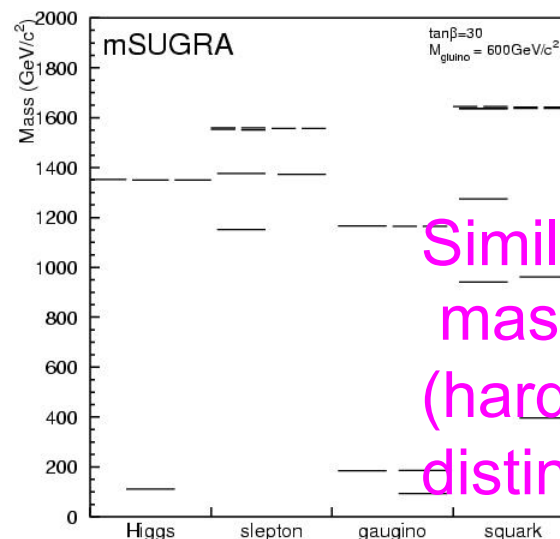
2 SUSY SU(5) w/ V_R

- Large mixing in V $\rightarrow$ mixing in $\tilde{d}_R, \tilde{l}_L$
 - KM mixings $\rightarrow$ mixing in $\tilde{q}_L$
- Mass of V_R
- Degenerate
 - Non-degenerate
- small 2-3 mixing in $\tilde{d}_R$
large 2-3 mixing in $\tilde{d}_R$
- New CP phase

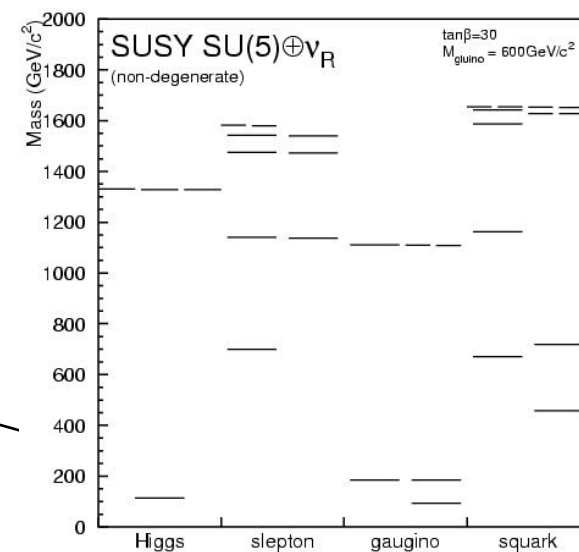
3 U(2) flavor symmetry

- 1,2 gen. (u,d,c,s,e, μ) U(2) doublet
- 3rd gen. (t,b, τ) U(2) singlet $\rightarrow O(\lambda^2)$ 2-3 mixing in $\tilde{q}_L$

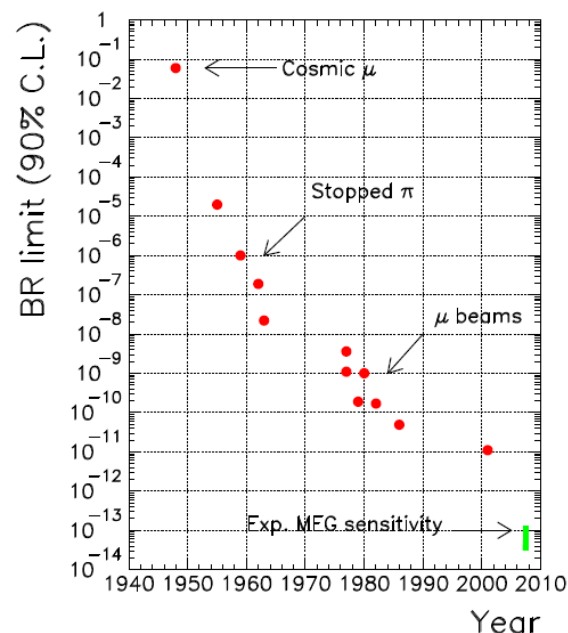
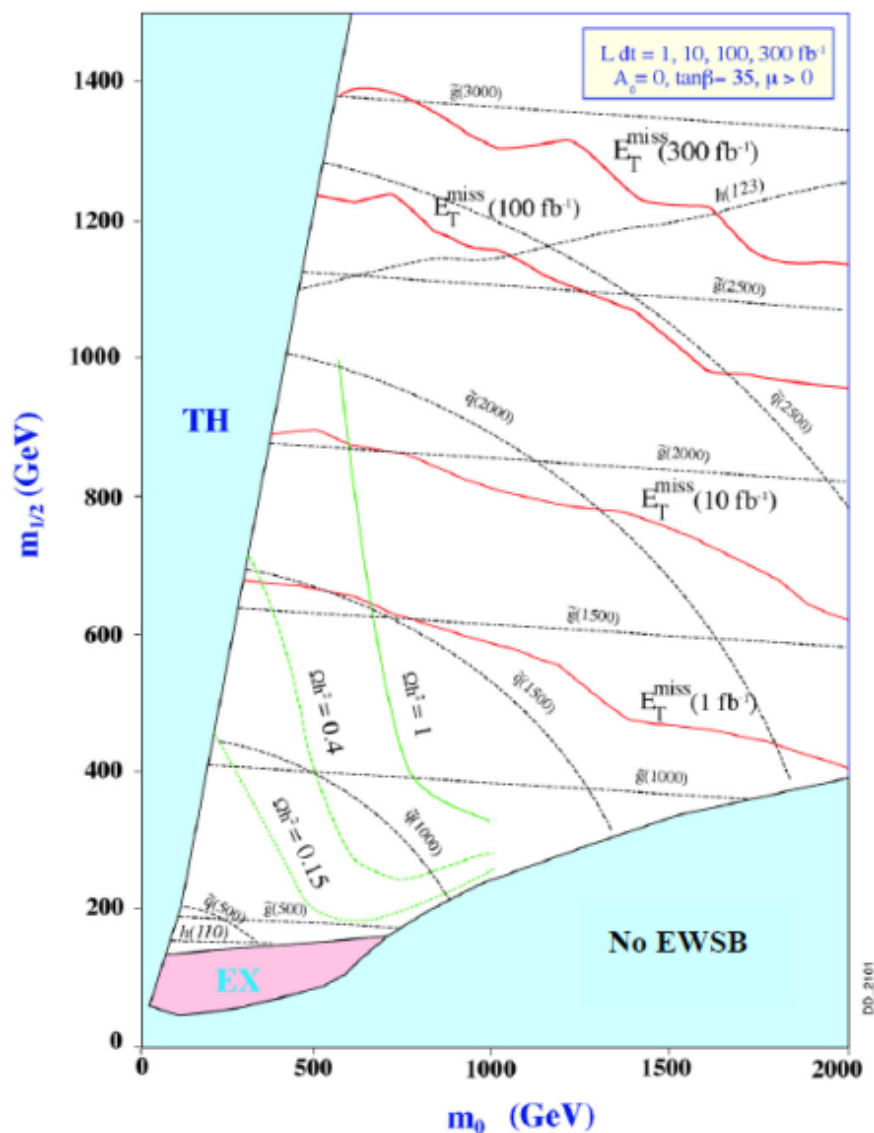
squark $(m_{\tilde{d}_R})_{23}$ $\leftrightarrow$ slepton $(m_{\tilde{l}_L})_{23}$



Similar SUSY
mass spectra
(hard to
distinguish)

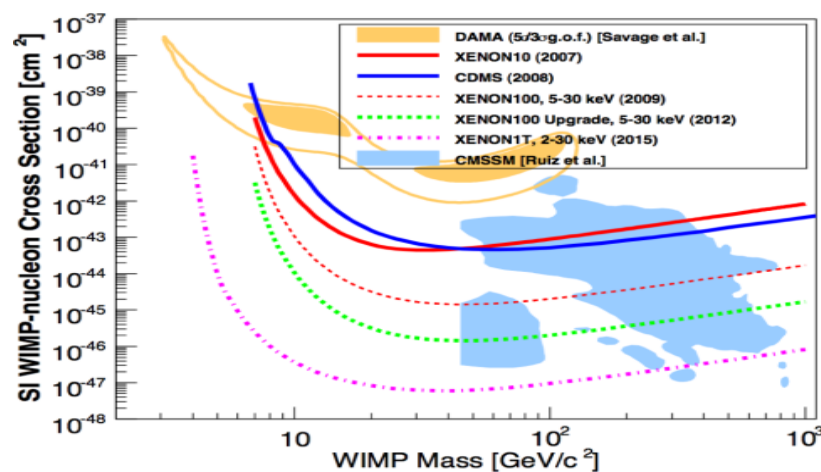


LHC

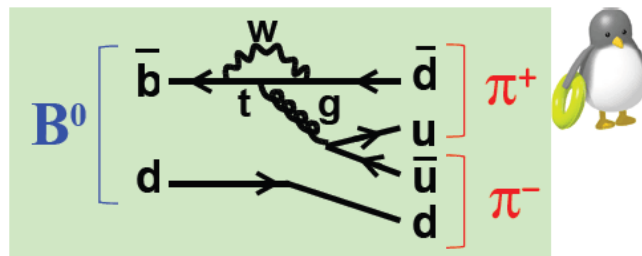
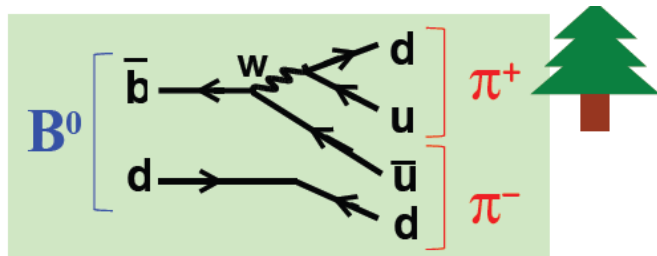


$\mu \rightarrow e\gamma$

dark matter



tCPV of $B \rightarrow \pi\pi, \rho\pi, \rho\rho$

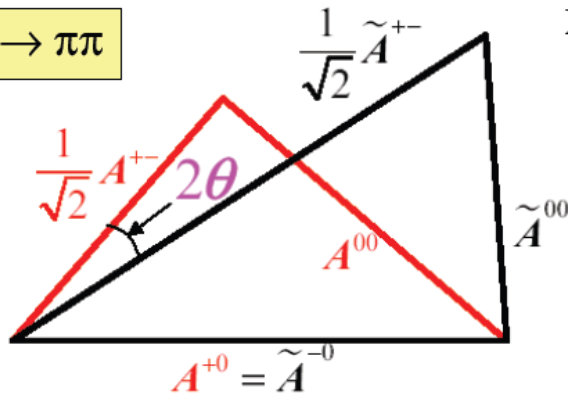


$$A_{CP} = \mathbf{S} \sin(\Delta m \Delta t) + \mathbf{A} \cos(\Delta m \Delta t)$$

$\mathbf{S} \neq \sin 2\phi_2$ due to large penguin contribution.

➡ isospin analysis

$B \rightarrow \pi\pi$



M. Gronau and D. London, PRL 65, 3381 (1990)

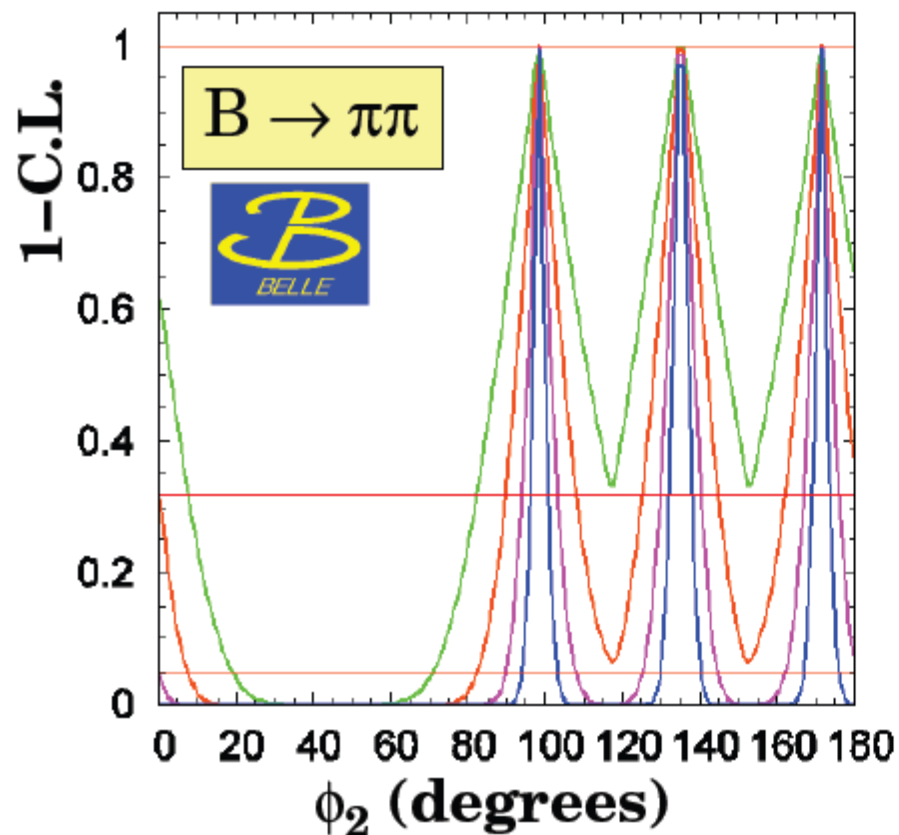
	<i>Amplitude for</i>
$A^{+-}(\bar{A}^{+-})$	$B^0(\bar{B}^0) \rightarrow \pi^+\pi^-$
$A^{00}(\bar{A}^{00})$	$B^0(\bar{B}^0) \rightarrow \pi^0\pi^0$
$A^{+0}(\bar{A}^{-0})$	$B^+(B^-) \rightarrow \pi^+\pi^0(\pi^-\pi^0)$

$$\tilde{A}^{ij} = e^{2\phi_i} \bar{A}^{ij}$$

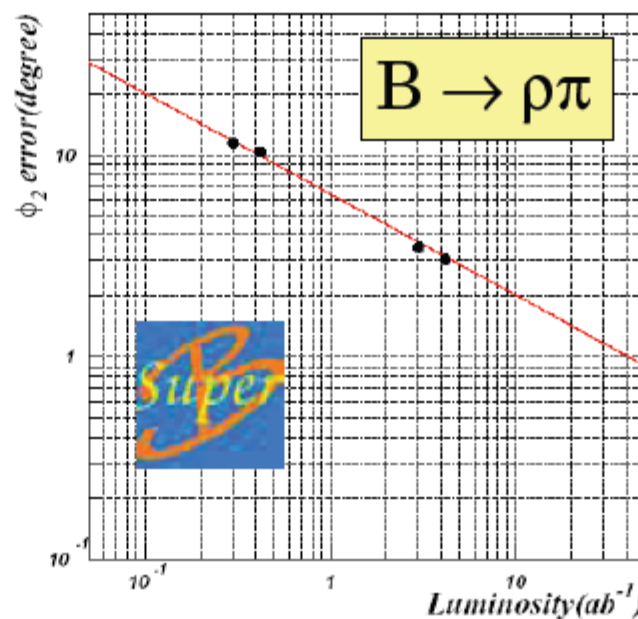
$$S_{\pi\pi} = \sqrt{1 - A_{\pi\pi}^2} \sin(2\phi_2 + 2\theta)$$

$B \rightarrow \rho\pi$

time-dependent
Dalitz analysis



present — $\Delta\phi_2 \sim 19^\circ$
 1 ab^{-1} — $\Delta\phi_2 \sim 9^\circ$
 4 ab^{-1} — $\Delta\phi_2 \sim 5^\circ$
 16 ab^{-1} —



Dalitz Analysis

$\Delta\phi_2 =$
 2.9° (5 ab^{-1}),
 0.9° (50 ab^{-1})

B $\rightarrow \rho\rho$

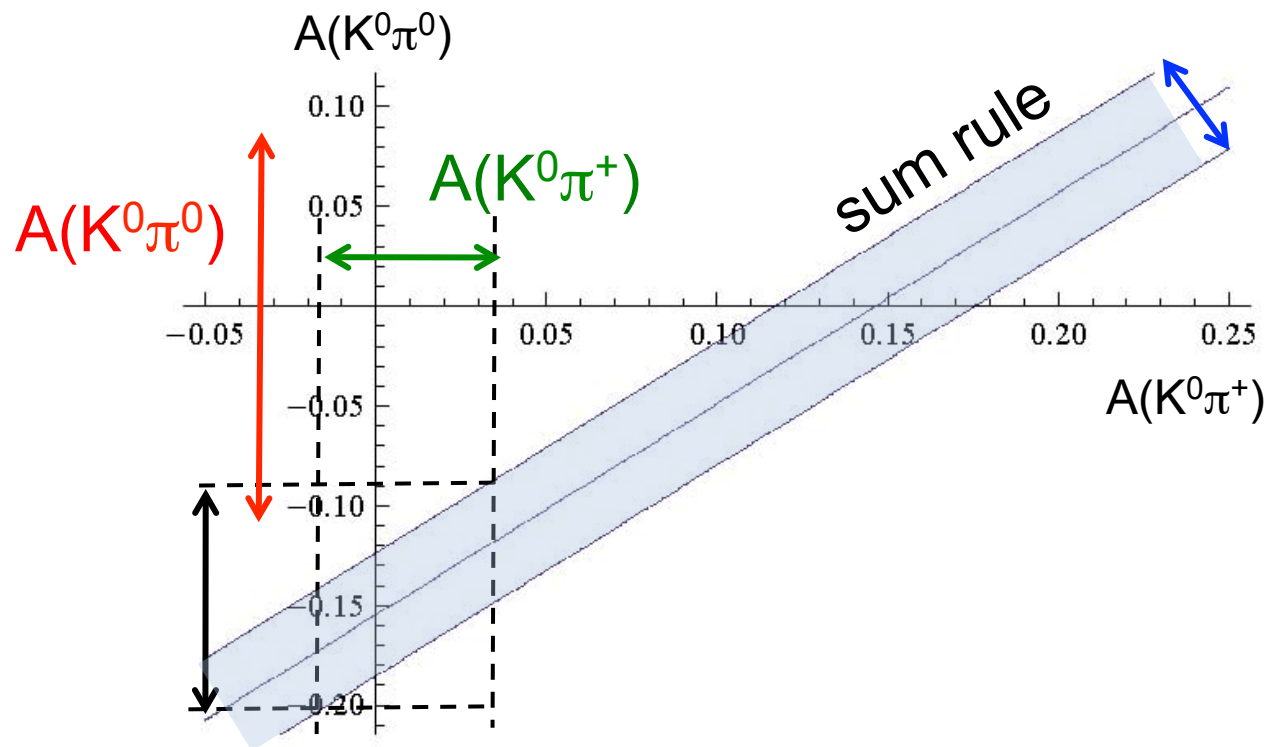
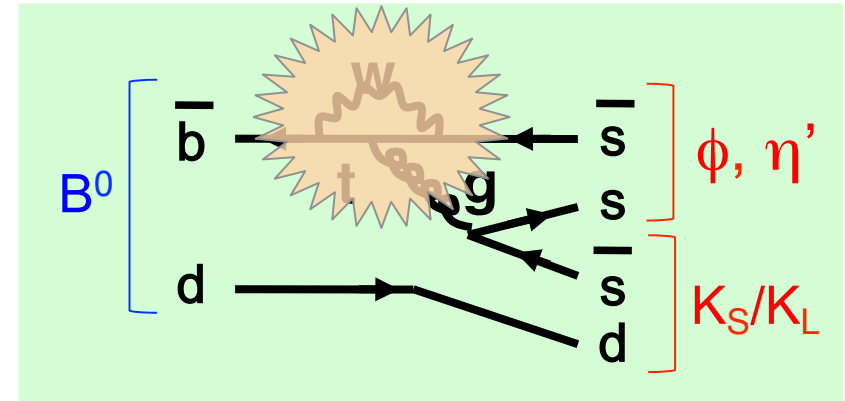
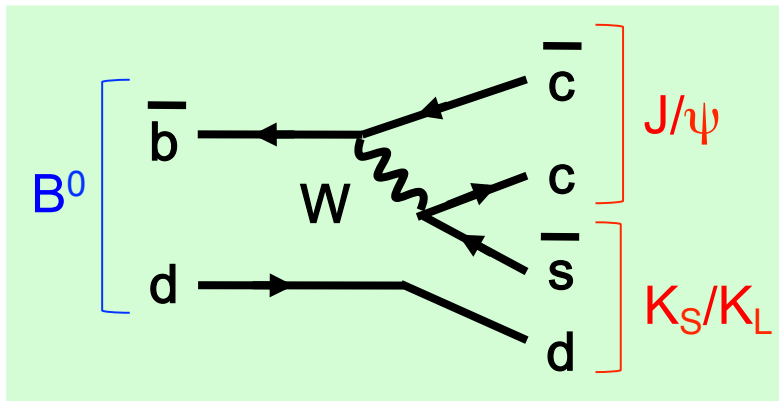
$\mathcal{B}(\text{B}^0 \rightarrow \rho^0 \rho^0)$?

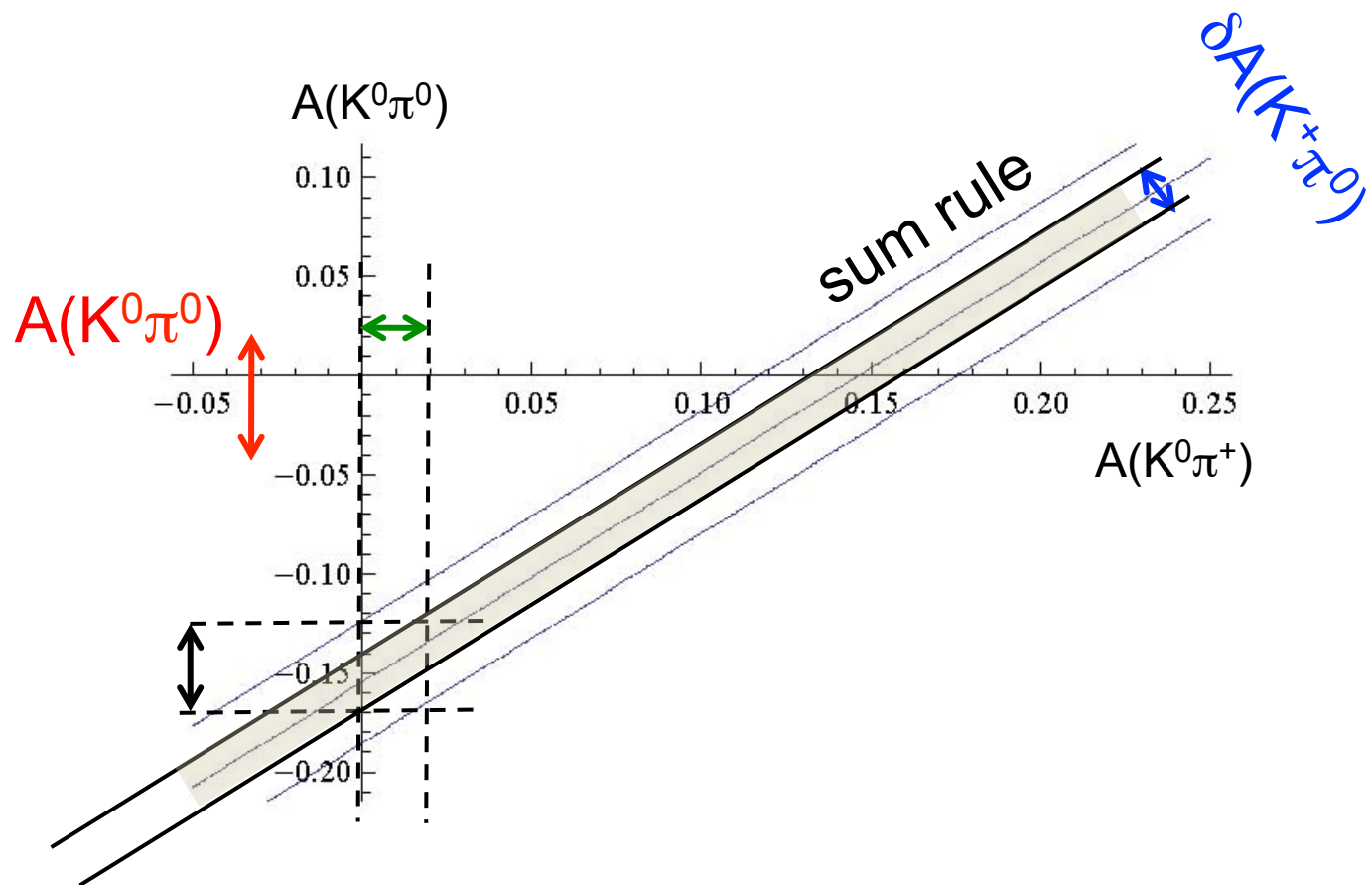


	B (10^{-6})	Pol	C_{long}	S_{long}
Expected stat. error for $B = 3 \times 10^{-5}$	0.4	0.003	0.03	0.04
Syst. errors hard to improve	4.5	< 0.01	~ 0.01	~ 0.02
Naive estimate of total error	5	$\lesssim 0.01$	$\lesssim 0.04$	$\lesssim 0.05$

$\Delta\alpha \sim 1.5^\circ$ (10 ab^{-1})

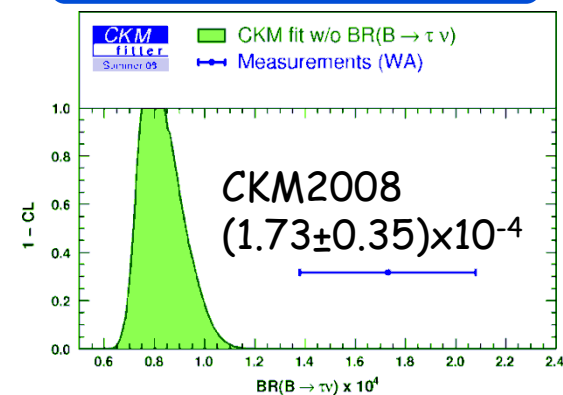
作業用のページ





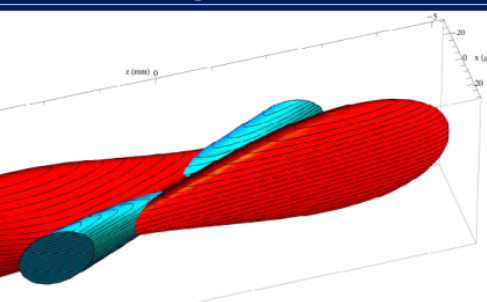
Garbage

大きな $B \rightarrow \tau \nu$ の分岐比



How it works

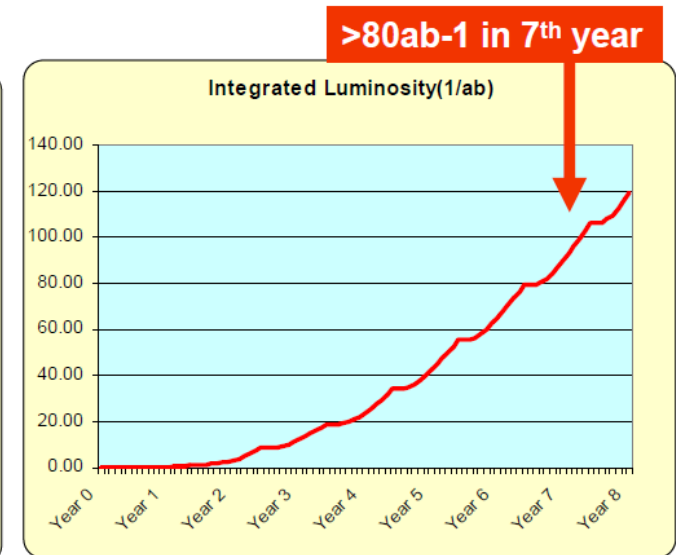
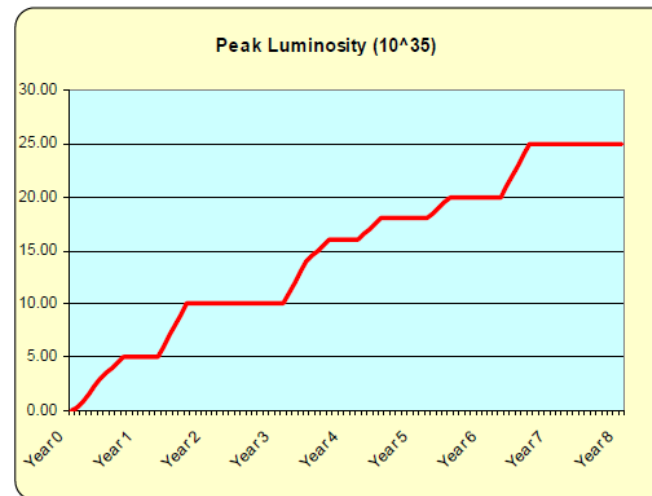
F: Waist line is orthogonal to the axis of other beam



ON: Waist moves parallel to the axis of other beam: particle density in the overlap between bunches

11

Plots by E. Paoloni



After 7th year integrated Luminosity can grow at rate of $\sim 40 \text{ ab}^{-1}/\text{year}$

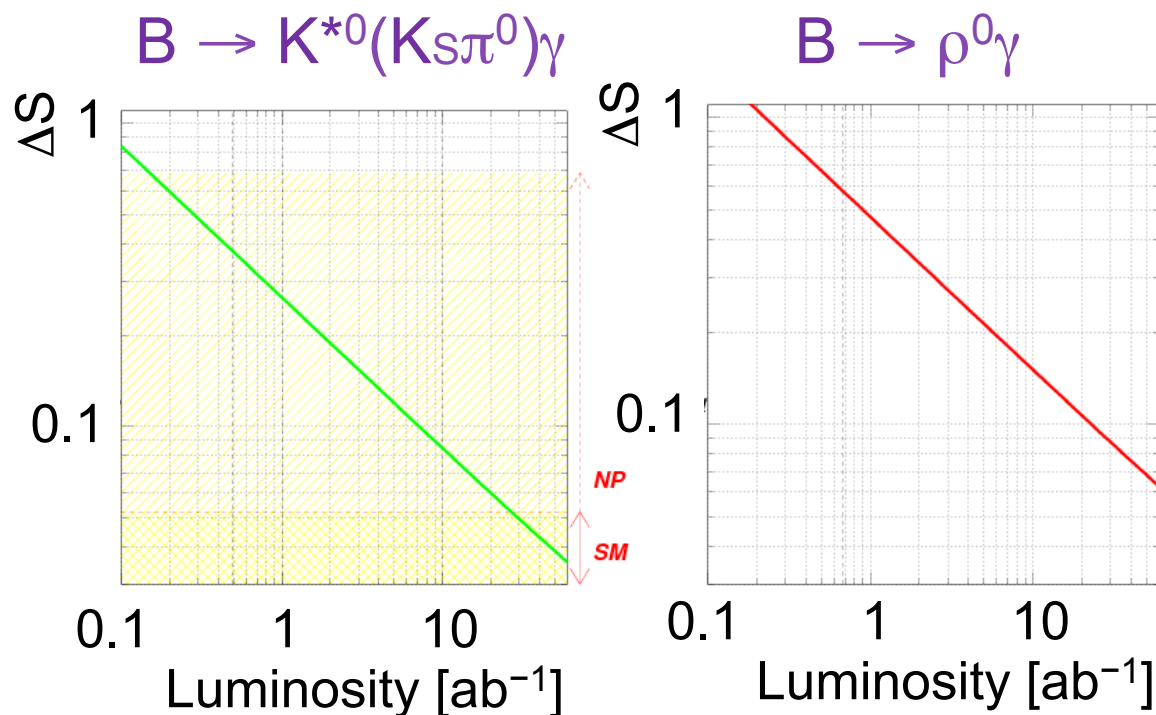
CERN May 30, 2008

Marcello A. Giorgi



15

- 標準模型では、電弱相互作用は左巻きに作用
✓ $b \rightarrow s(d)\gamma$ 過程からの光子はほぼ左巻き
- 右巻きのカレントは新物理の信号
✓ 右巻きと左巻きの干渉により、time-dependent CPV が起こる



標準理論

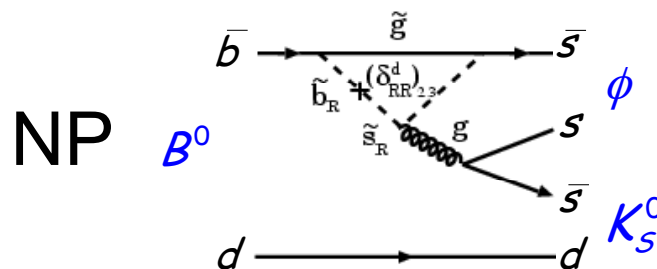
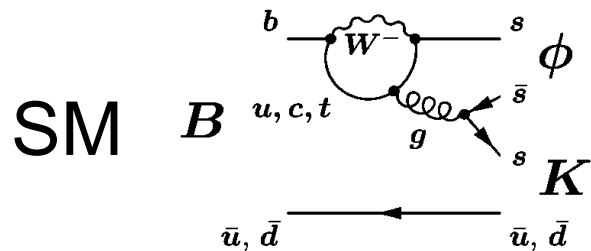
$$S(K^{*0}\gamma) < 0.02$$

$$S(\rho^0\gamma) \sim 0$$

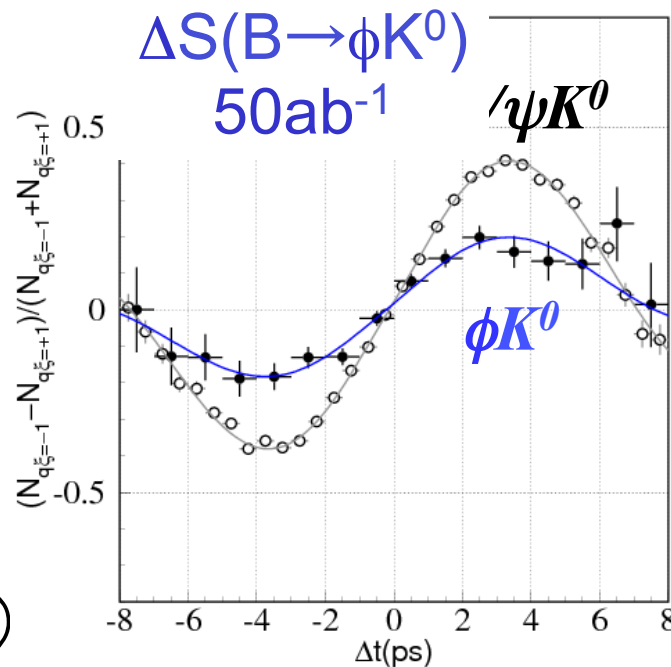
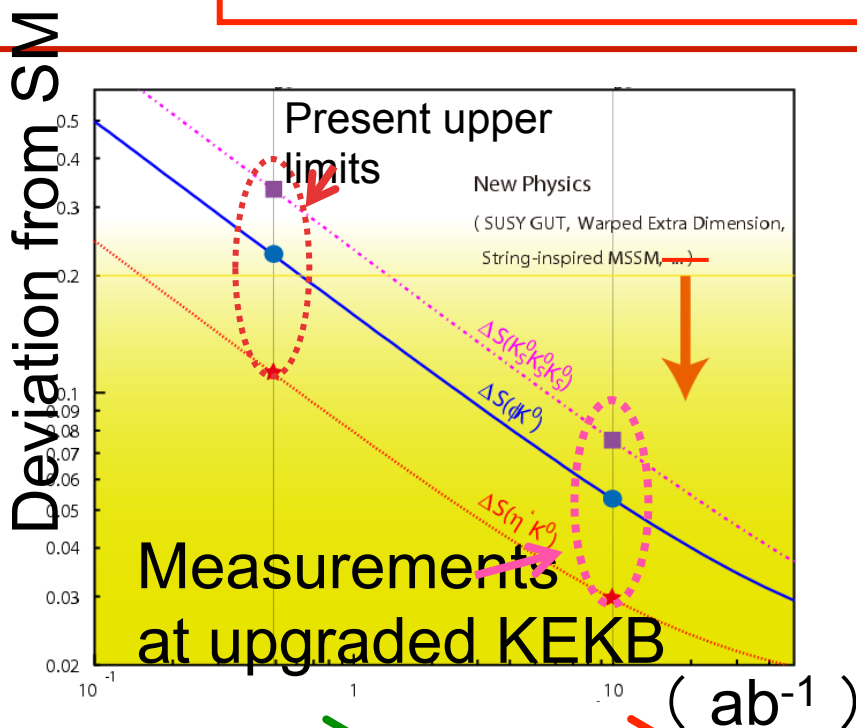
Possible deviation from SM
 O(1): Warped extra dim.
 O(1): L-R symmetric model
 O(0.1): SUSY SU(5)

$$\Delta S(K^{*0}\gamma) = 0.039 @ 50 \text{ ab}^{-1}$$

$$\Delta S(\rho^0\gamma) = 0.068 @ 50 \text{ ab}^{-1}$$



$$A_{CP}(t) = \sin 2(\phi_1 + \phi_{NP}) \times \sin(\Delta m_d t)$$



Present B
factories

Upgraded
KEKB

Bの物理

将来計画検討小委員会

SuperKEKBでは新物理が関与するモードを精査

→ 超対称性理論のどの模型がもっとも正しいか、複数の角度から検証

SuperKEKB (又は他のフレーバー実験) での観測量

代表的なSUSY模型 ↓	$A_{CP}(s\gamma)$	$S(K^*\gamma)$	$S(\rho\gamma)$	$S(\phi K_S)$	$S(B_s \rightarrow J/\psi \phi)$	$\mu \rightarrow e\gamma$	$\tau \rightarrow \mu\gamma$	$\tau \rightarrow e\gamma$
	mSUGRA							
	MSSM+ v_R (degenerate)					✓	✓	
	MSSM+ v_R (nondegenerate)						✓	✓
	SU(5)+ v_R (degenerate)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
	SU(5)+ v_R (nondegenerate)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	U(2) FS	✓	✓	✓	✓	—	—	—

✓: 標準模型からのずれ

[based on T.Goto et.al. PRD77, 095010(2008)]

LHC will hopefully find a signature of New Physics in TeV scale, but we still have the questions like:

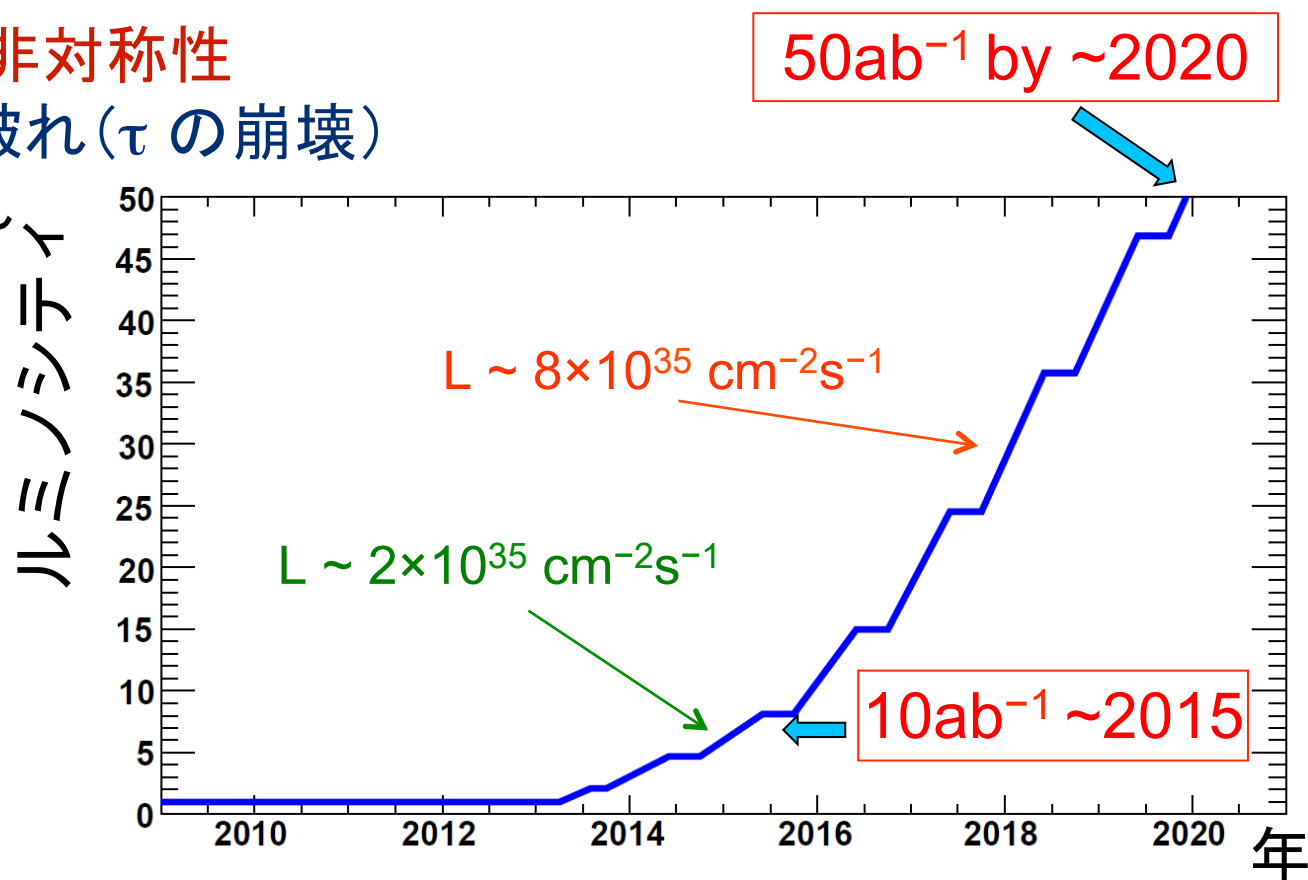
- What kind of New Physics ? (SUSY, extra-dimension, Little Higgs...)
- What is the scenario of the SUSY breaking ?
- Why the anti-matter disappeared in the early Universe?
- Why three generations ? Mass, mixing patterns?

Flavor Physics (Luminosity Frontier) is complementary to Energy Frontier.

If energy scale of New Physics is $\gg$ TeV scale, Luminosity Frontier experiments can still search for NP.

- Many stringent constraints to NP is now in FCNC process; further study may reach to NP.

- $b \rightarrow s$ 遷移でのCP非対称性
- $b \rightarrow s(d)\gamma$ の光子の偏極度
- $B \rightarrow \tau \nu$
- $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$
- $B \rightarrow K\pi$ の直接的CP非対称性
- レプトンフレーバーの破れ (τ の崩壊)
- D^0 - $\bar{D}^0$ 混合とCPの破れ
-



Pattern of deviations from the Standard Model

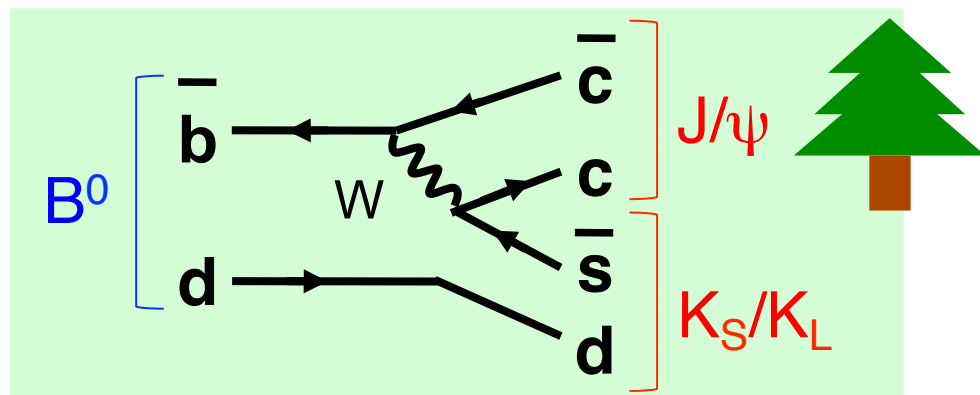
Y.Okada

Observ- ables SUSY models	Unitarity triangle	$B \rightarrow \phi K_S$	$b \rightarrow s \gamma$ Indirect CPV	$b \rightarrow s \gamma$ Direct CPV	$\tau \rightarrow \mu \gamma$
mSUGRA	—	—	—	—	—
SU(5) SUSY GUT + v_R (degenerate)	—	—	+	—	—
SU(5) SUSY GUT + v_R (non-degenerate)	+	+	++	—	++
U(2) Flavor symmetry	+	+	++	+	

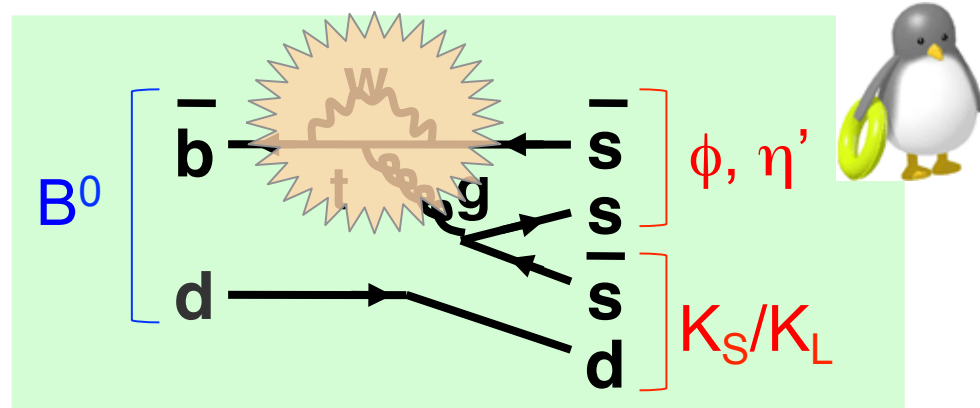
++: large +: sizable -: small

クォーク、レプトンセクターの両方で、様々な測定量により、New Physics のシナリオを識別できる。

$B \rightarrow J/\psi K^0$ ($b \rightarrow c$)

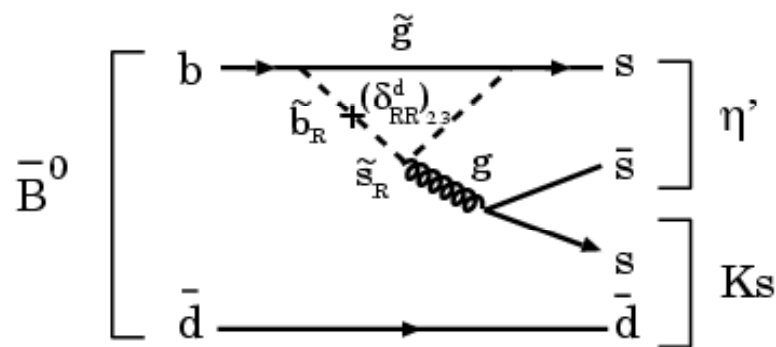


$B \rightarrow \phi K^0, \eta' K^0$ ($b \rightarrow s$)



- Golden mode at present Belle to measure $\sin 2\phi_1$
- Theoretically very clean: now already reference
- Present world average
 $= 0.67 \pm 0.02$
- Precision ~ 0.012 @ 50 ab^{-1}

- In the SM, “ $\sin 2\phi_1^{\text{eff}}$ ” $\sim \sin 2\phi_1$
- New Physics contribution to loop



	Belle	Belle II	Belle II	LHCb
	$\sim 0.5 \text{ ab}^{-1}$	5 ab^{-1}	50 ab^{-1}	$10 \text{ fb}^{-1} [5\text{yrs}]$
$\Delta S(\phi K_S)$	0.22	0.073	0.029	0.14
$\Delta S(\eta' K_S)$	0.11	0.038	0.020	---
ϕ_s from $S(J/\psi\phi)$	---	---	---	0.01
$S(K^*\gamma)$	0.36	0.12	0.03	---
$S(\rho\gamma)$	0.68	0.22	0.08	---
$C_7/C_9 [A_{FB}(K^*\ell^+\ell^-)]$	•	•	5%	7%
$\Delta B/B(B \rightarrow \tau\nu)$	3.5σ	10%	3%	---
$B_s \rightarrow \mu\mu$	•	•	•	$5\sigma @ 6 \text{ fb}^{-1}$
$\tau \rightarrow \mu\gamma \quad [\times 10^{-9}]$	<45	<30	<8	---
$\tau \rightarrow \mu\mu\mu \quad [\times 10^{-9}]$	<209	<10	<1	---
ϕ_2	11°	2°	1°	4.5°
ϕ_3	16°	6°	2°	2.4°

<得意分野>

LHCb

- 終状態が荷電粒子のみのモード
- B_s (時間依存)
- B_c , Λ_b
-

Belle II

- γ , π^0 を含むモード
- ν を含むモード
- τ の崩壊
- K_S への崩壊点
-