

Super B の物理

岡田安弘 (KEK/総合研究大学院大学)

2012年8月27日－29日

京都大学

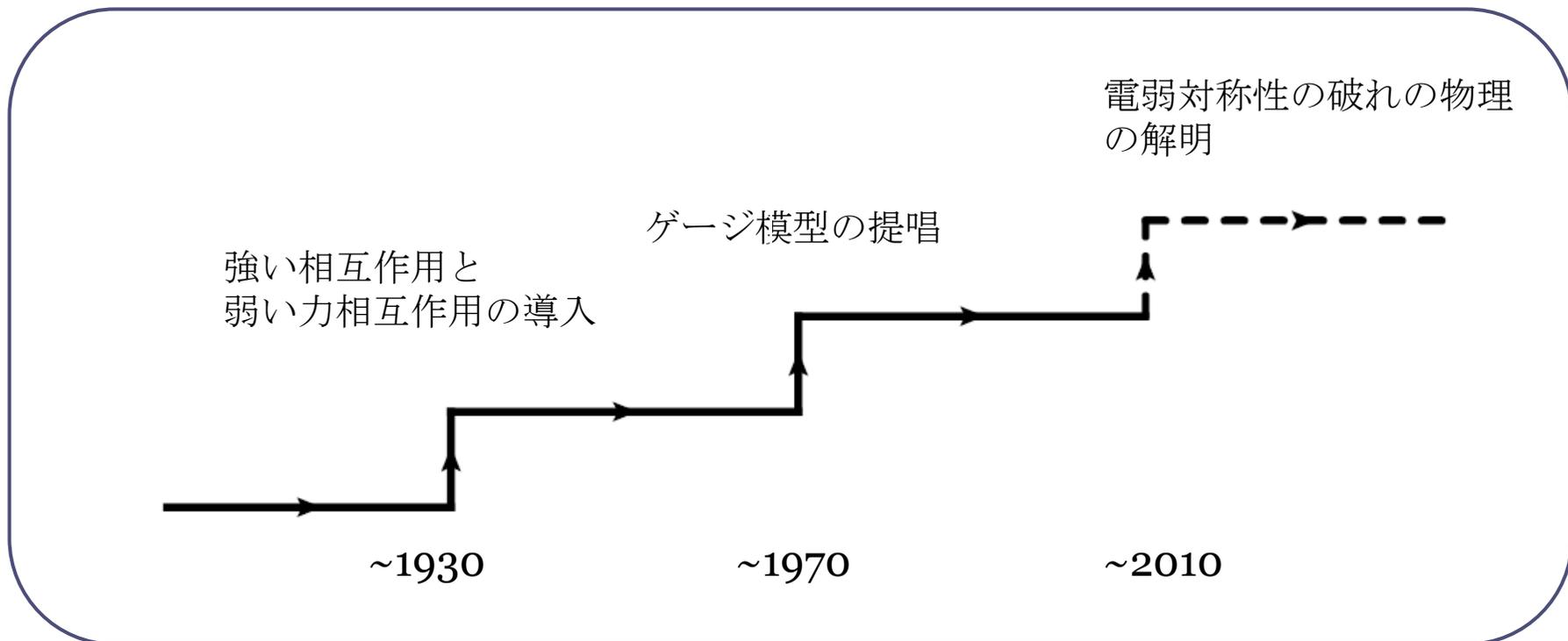
将来計画検討小委員会 ICEPP 東大
2009年11月7日 とそのアップデート

これからの B ファクトリーが目指すもの
T e V 領域の新しい素粒子像の解明に
フレーバー物理の側面から寄与すること。

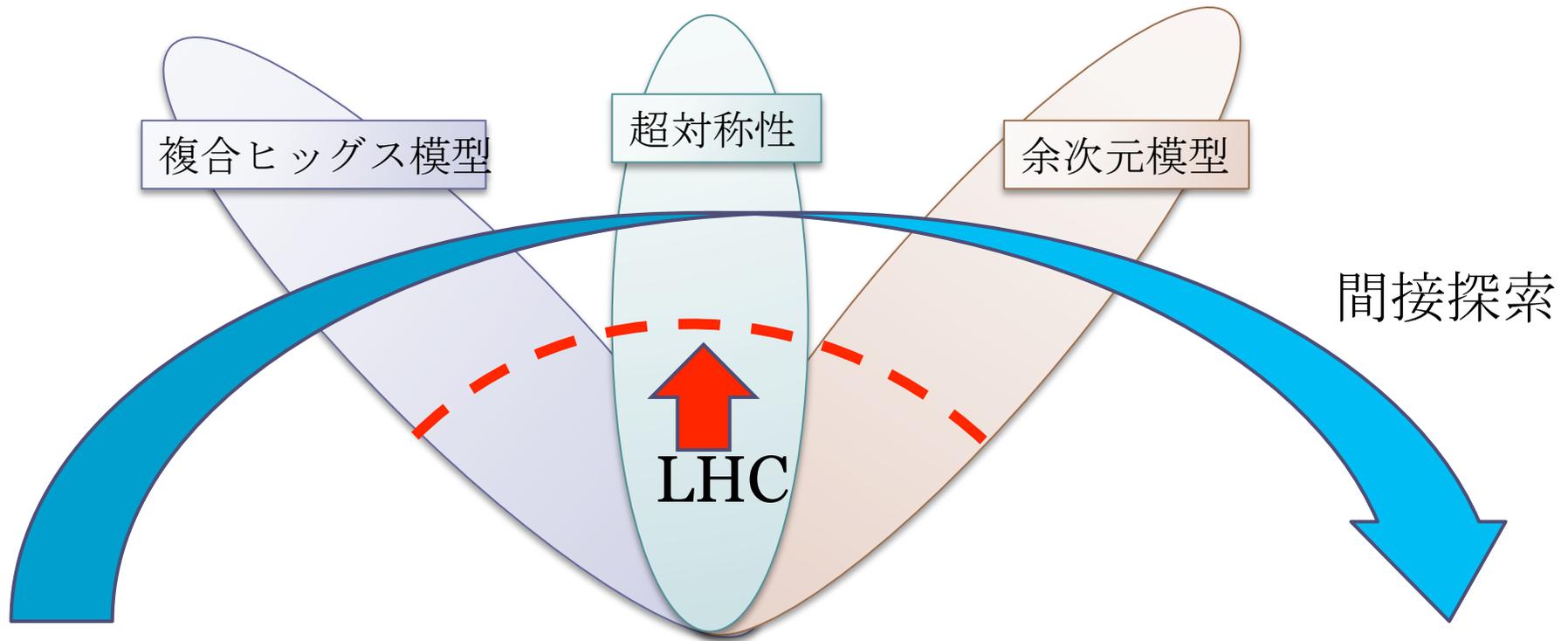
TeVスケールの物理

TeVの物理＝電弱対称性の破れの背後にある物理を解明する

40年に一度くらいの大きなステップ

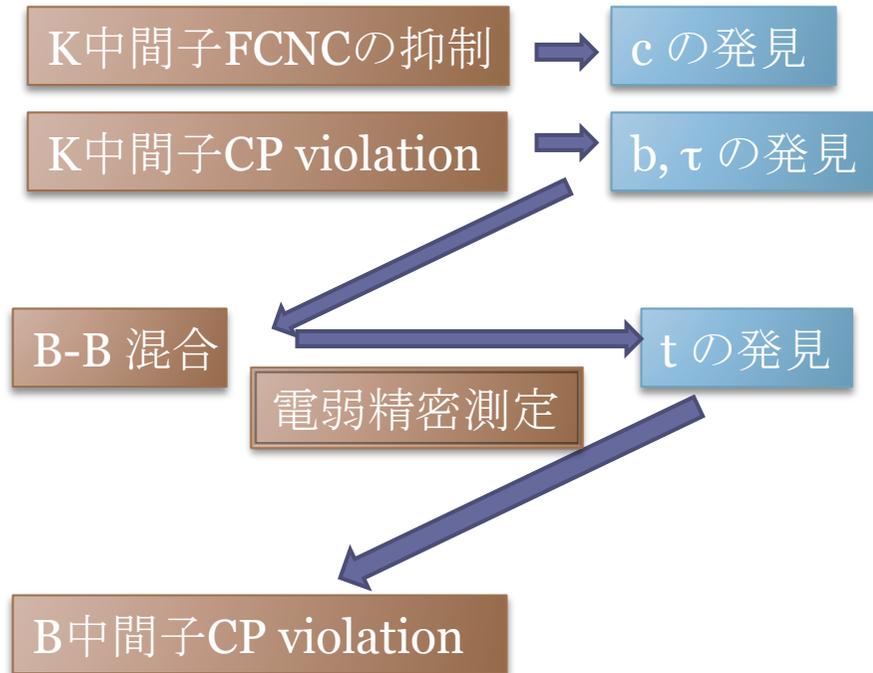


LHC 実験はTeV物理の入り口

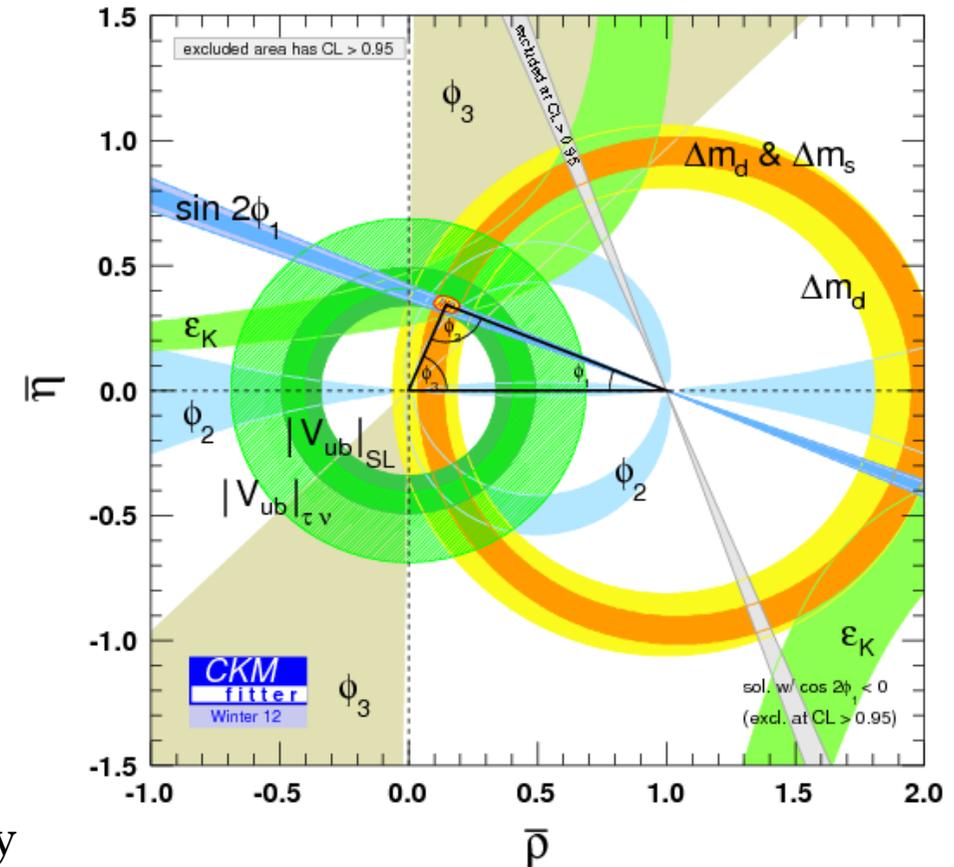


TeV物理に関しては、いろいろな理論的な可能性が提案されている。
LHCではどの方向が正しいか決まるかもしれない。
TeV物理の全貌を解明し、それが素粒子や宇宙の基本的な問題とどのように
係わるのかを明らかにするのは、21世紀前半の課題。

直接探索と間接探索 CKMの例



直接探索による新粒子発見と
 間接探索による新現象発見のinterplay
 により理論の全貌があきらかになる。



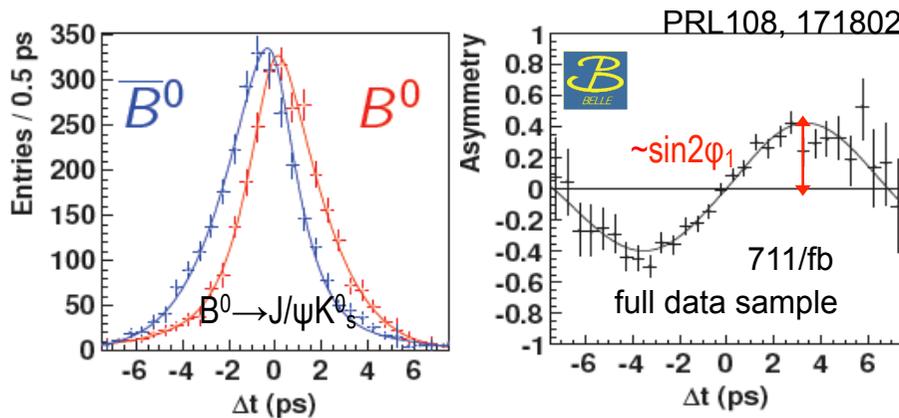
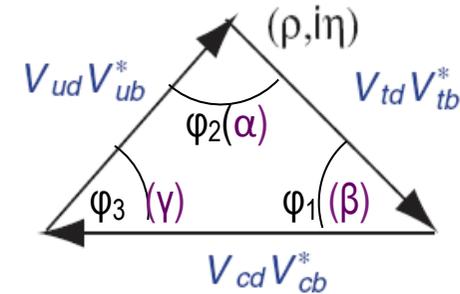
KEKB/Belle → SuperKEKB/Belle II

- Success of B-Factories: world Highest Luminosity
- confirmation of Kobayashi-Maskawa mechanism: CP violation due to a complex phase in CKM matrix

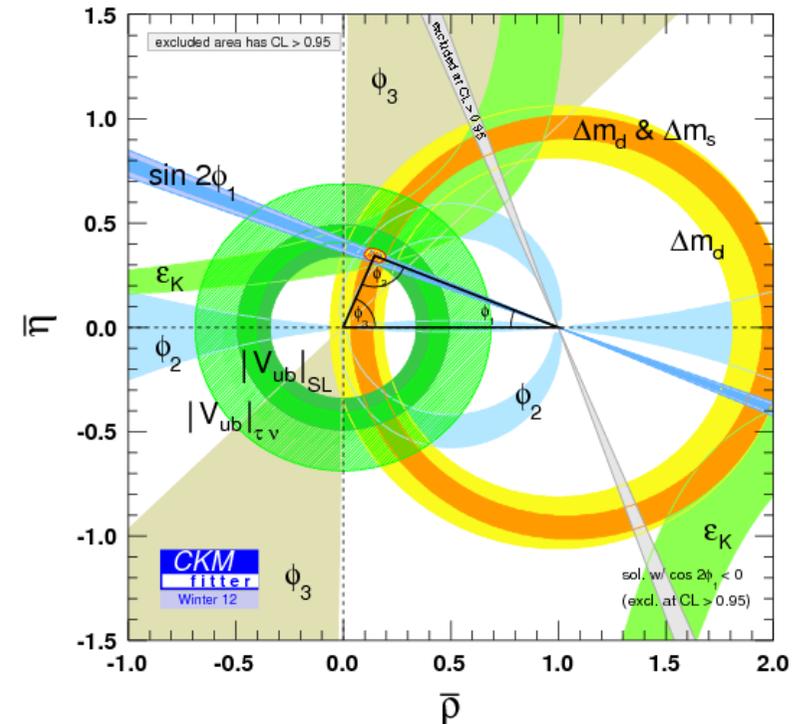
2001: Discovery of CPV in B mesons
 2008: Nobel Prize for Kobayashi and Maskawa
 2011: Most precise $\sin 2\phi_1$ from $b \rightarrow c\bar{c}s$ processes



Unitarity Triangle for B system

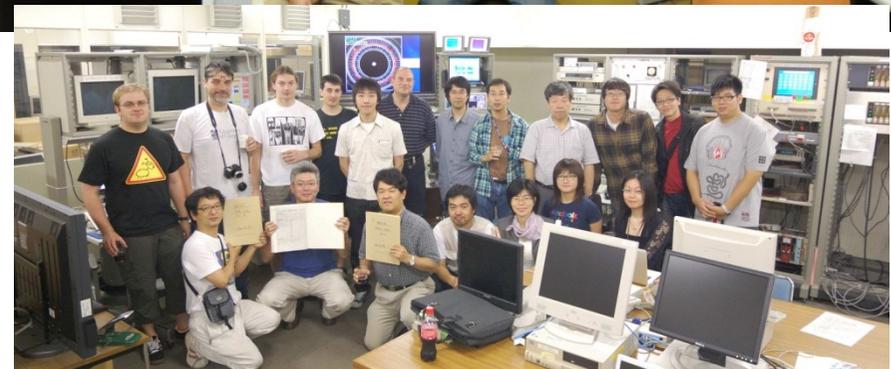
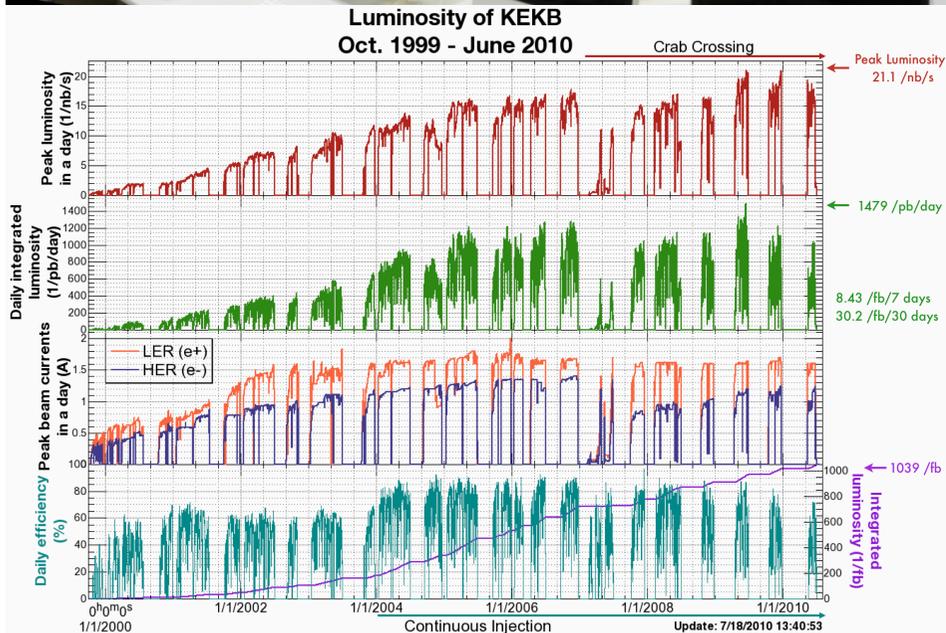


$$\sin 2\phi_1^{B \rightarrow (c\bar{c})K^0} = 0.67 \pm 0.02 \pm 0.01$$



- 10 years of precise measurements of UT
- Hints of New Physics in flavor sector

The last beam abort of KEKB on June 30, 2010



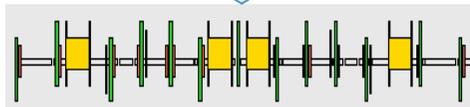
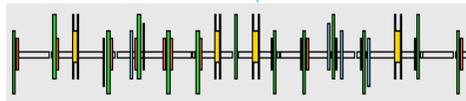
First physics run on June 2, 1999
 Last physics run on June 30, 2010
 $L_{\text{peak}} = 2.1 \times 10^{34} / \text{cm}^2 / \text{s}$
 $L > 1 \text{ ab}^{-1}$

SuperKEKB and Belle II

Belle II

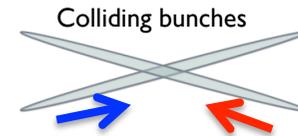
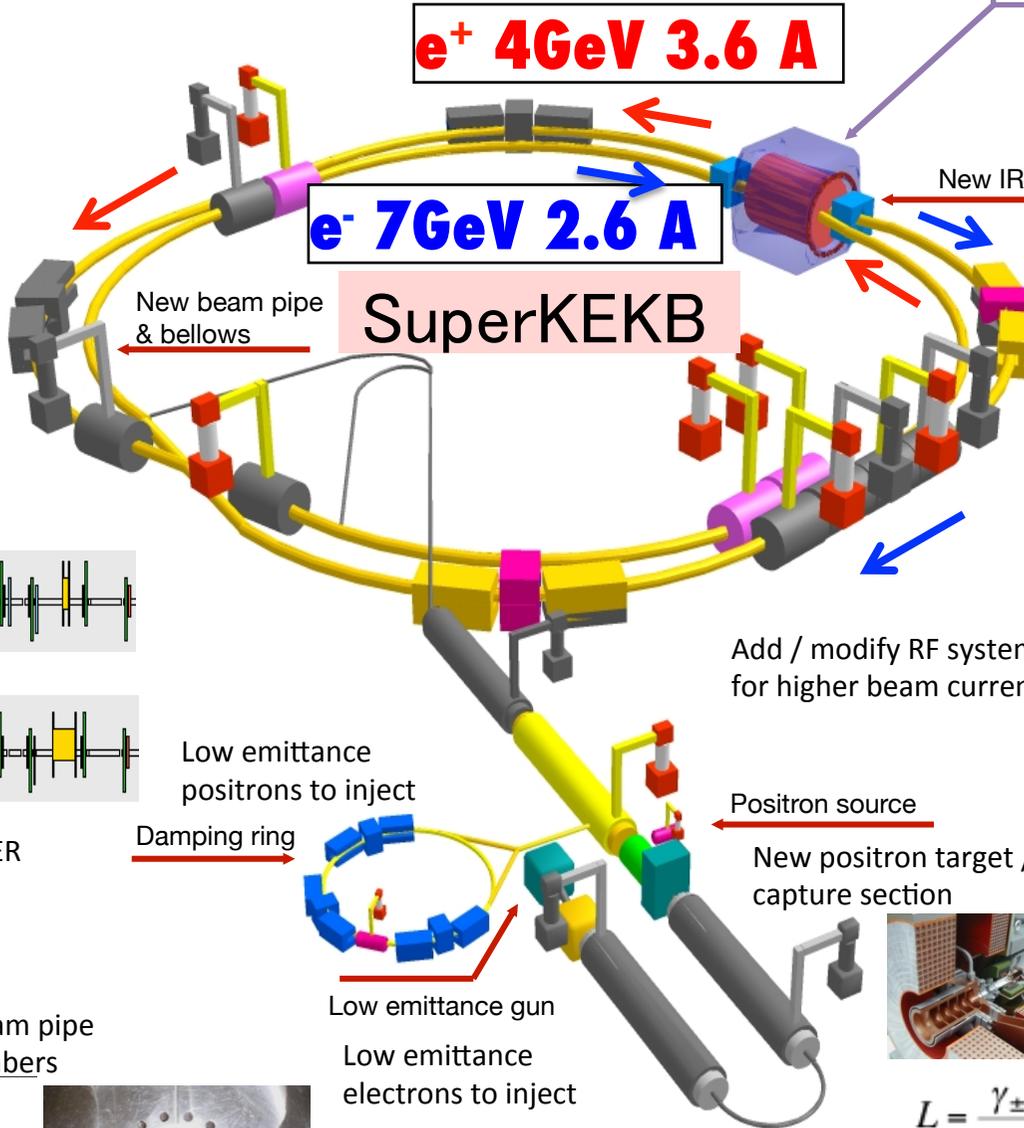
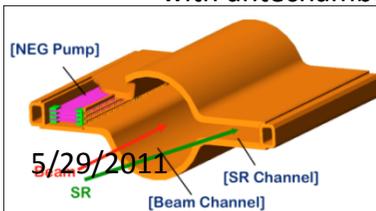


Replace short dipoles with longer ones (LER)



Redesign the lattices of HER & LER to squeeze the emittance

TiN-coated beam pipe with antechambers



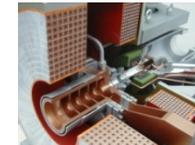
New superconducting / permanent final focusing quads near the IP



Add / modify RF systems for higher beam current

Positron source

New positron target / capture section



Low emittance gun

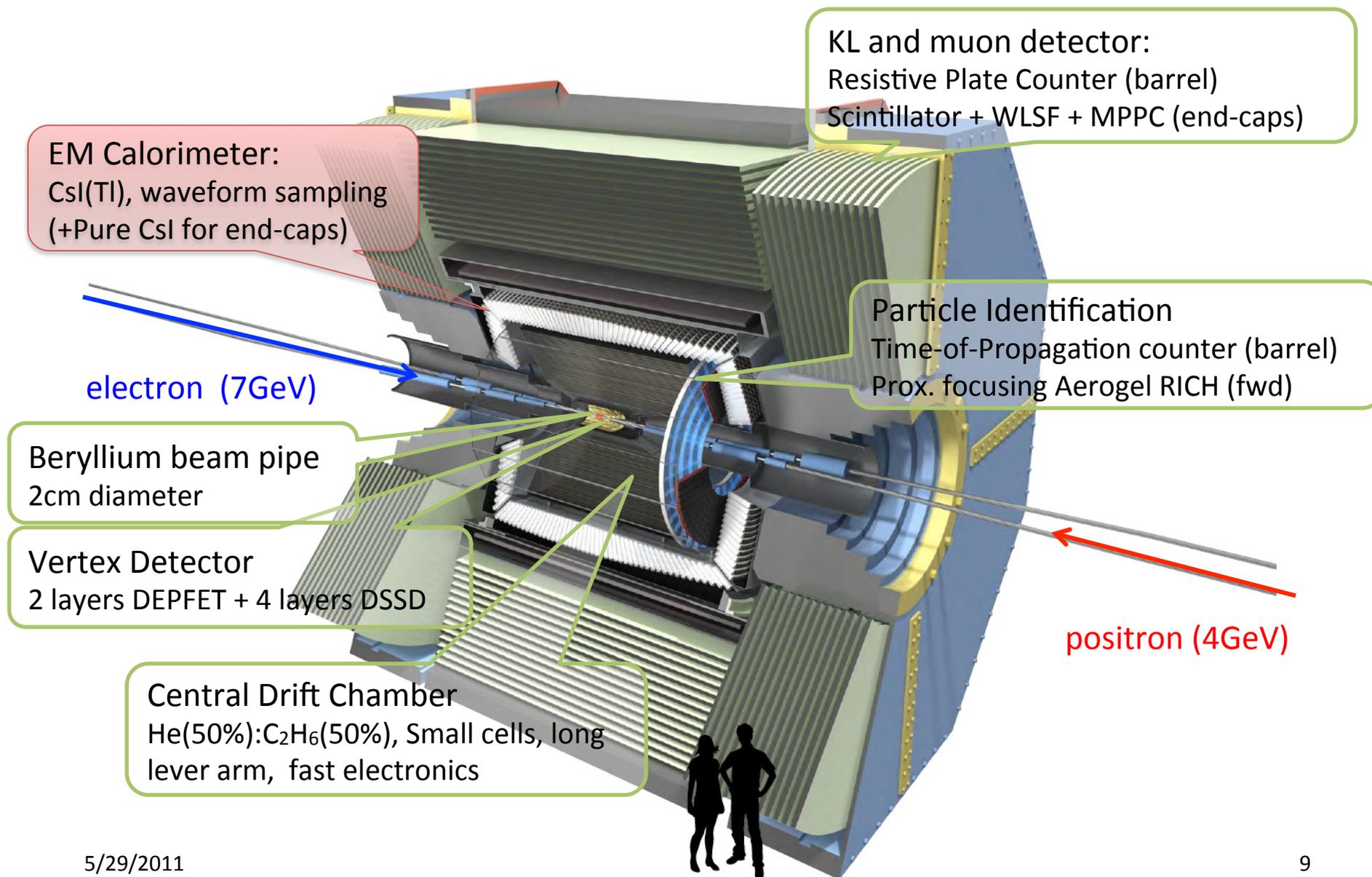
Low emittance electrons to inject

Damping ring

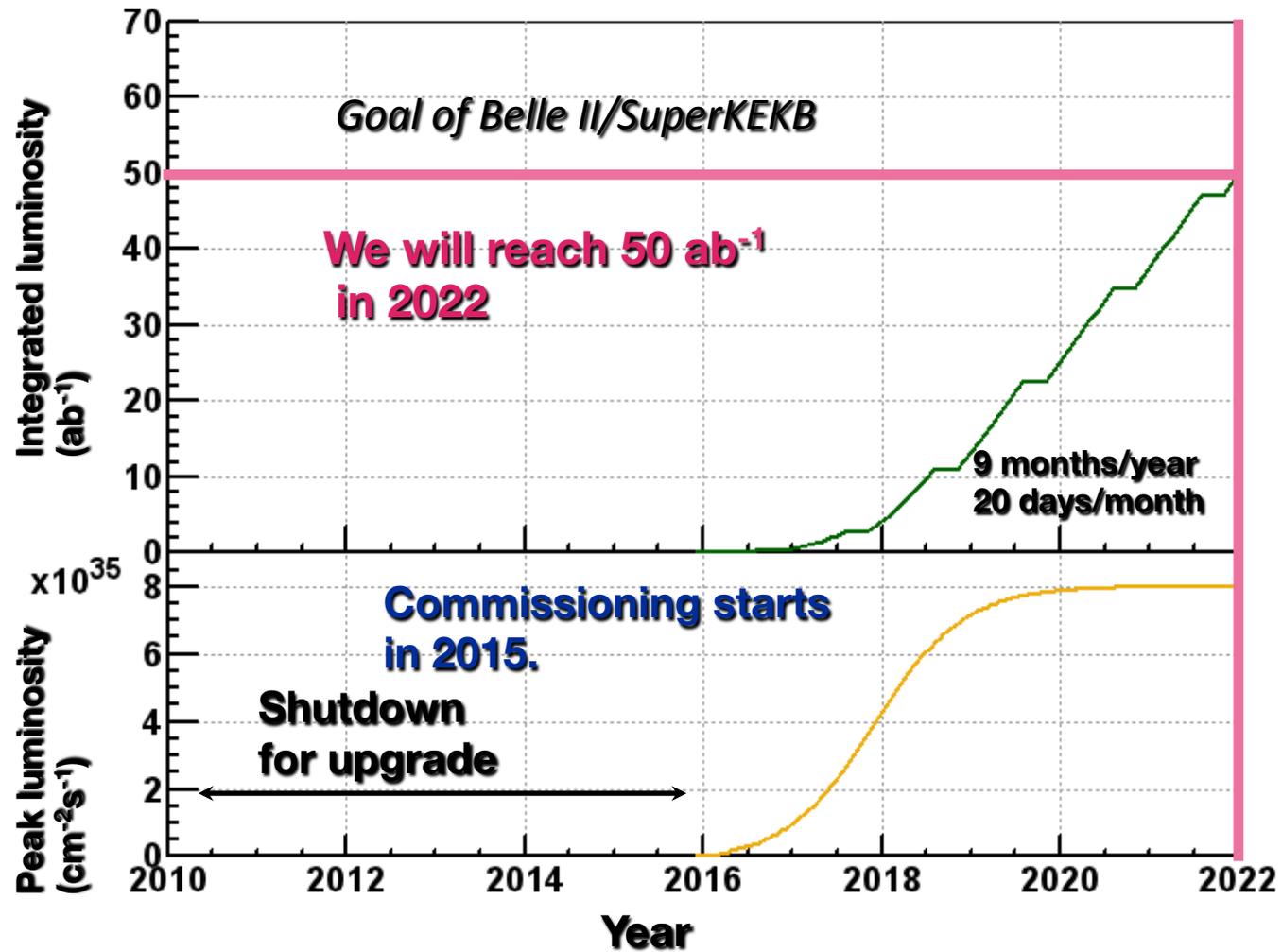
$$L = \frac{\gamma_{\pm}}{2e r_e} \left(1 + \frac{\sigma_y^*}{\sigma_x^*} \frac{I_{\pm} \xi_{\pm y}}{\beta_y^*} \left(\frac{R_L}{R_y} \right) \right)$$

Target: $L = 8 \times 10^{35} / \text{cm}^2 / \text{s}^8$

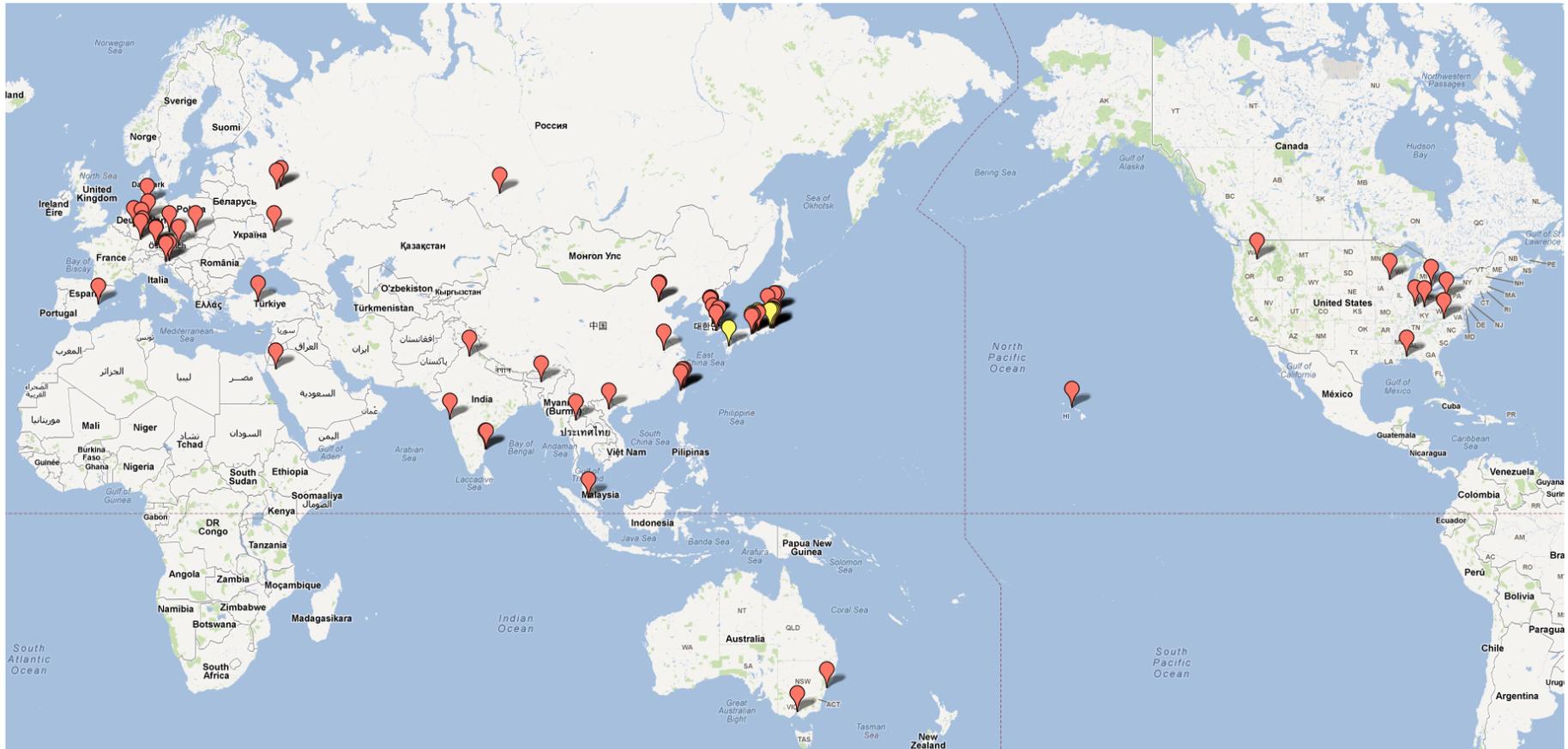
Belle II Detector



SuperKEKB luminosity prospect



The Belle II collaboration



20 countries, 67 institutes, ~400 collaborators (as of Jul. 2012)

Bファクトリーで探る新しい物理

Super B Factory の物理の意義の検討いろいろなところで行われてきた。

- Super KEKB LoI (hep-ex/0406071)
- SLAC Super B workshop (hep-ph/0503261)
- Super B CDR (arXiv:0709.0451)
- CERN workshop “Flavour in the era of the LHC

B, D, タウ崩壊の物理で標準模型の予言からのずれをどの程度測定することが出来るか。

様々な新しい物理のモデルは標準模型の予言からどのようなパターンずれが期待できるか。

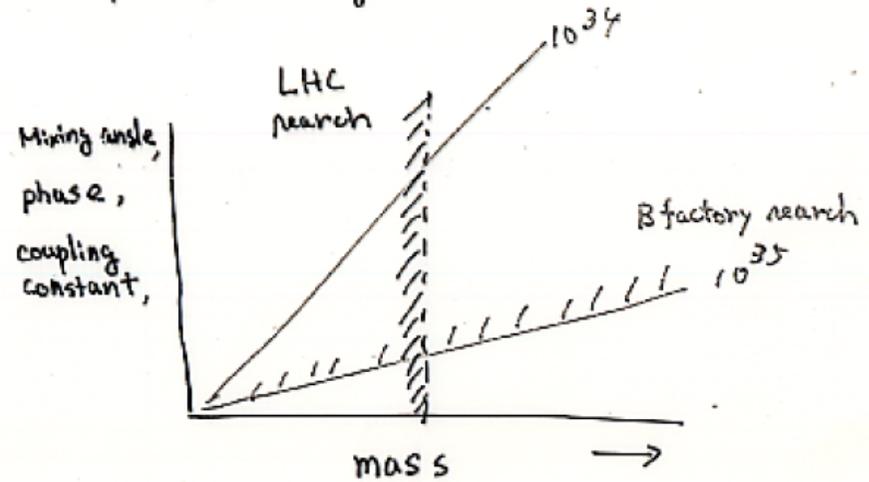
Ac comment on Beyond 10^{35} study

2001.5.17. Yokada
d KIK

Complete "Process - New Physics" matrix

New Physics Process	SUSY		GR SUSY	WR Z'	extra funk	2HDM MHDM	extra dim.
	MSUGRA	Minimal Flavor Mixing					
Bd Unitarity triangle							
$b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ (inclusive)							
$B \rightarrow K^{(*)} \ell^+ \ell^-$							
$b \rightarrow s \tau \tau$							
$B \rightarrow K^{(*)} \nu \bar{\nu}$							
$b \rightarrow s \gamma$ Direct Asymmetry							
$B \rightarrow K_1 \gamma$ indirect asymmetry							
$b \rightarrow d \gamma$							
$B \rightarrow \rho \gamma$							
$B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$							
$B \rightarrow \tau \nu$							
$B \rightarrow \phi K_s$							

① Try to present the potential of 10^{35} Machine by such a figure as



② Present your results at the 10^{35} meeting on August 23, 2001

次世代Bファクトリーの物理の特徴

- 様々な物理量により新しい相互作用の性質を探ることができる。

新しいCP位相
 $S(B \rightarrow \phi K_S) - S(B \rightarrow J/\psi K_S)$
 $A(B \rightarrow \pi K)$
 $S(b \rightarrow s\gamma)$
 DD mixing

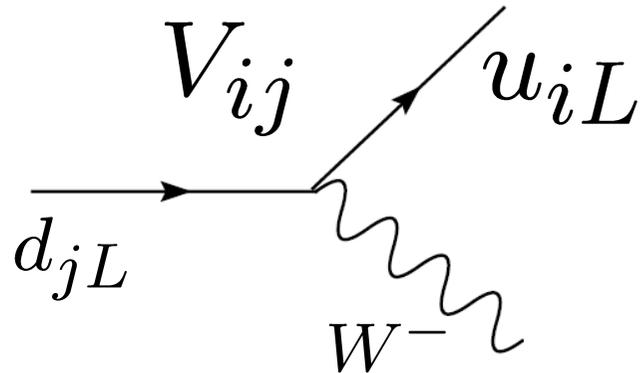
Chiral structure
 $S(B \rightarrow K_S \gamma)$
 $A_{FB}(B \rightarrow K^* l l)$

レプトンフレーバーの破れ
 $\tau \rightarrow \mu \gamma, \tau \rightarrow e \gamma,$
 $\tau \rightarrow \mu \mu \mu, \tau \rightarrow \mu \mu e, \tau \rightarrow \mu e e, \tau \rightarrow e e e,$
 $\tau \rightarrow \mu \eta, \tau \rightarrow \mu \pi, \tau \rightarrow \mu K \dots\dots\dots$

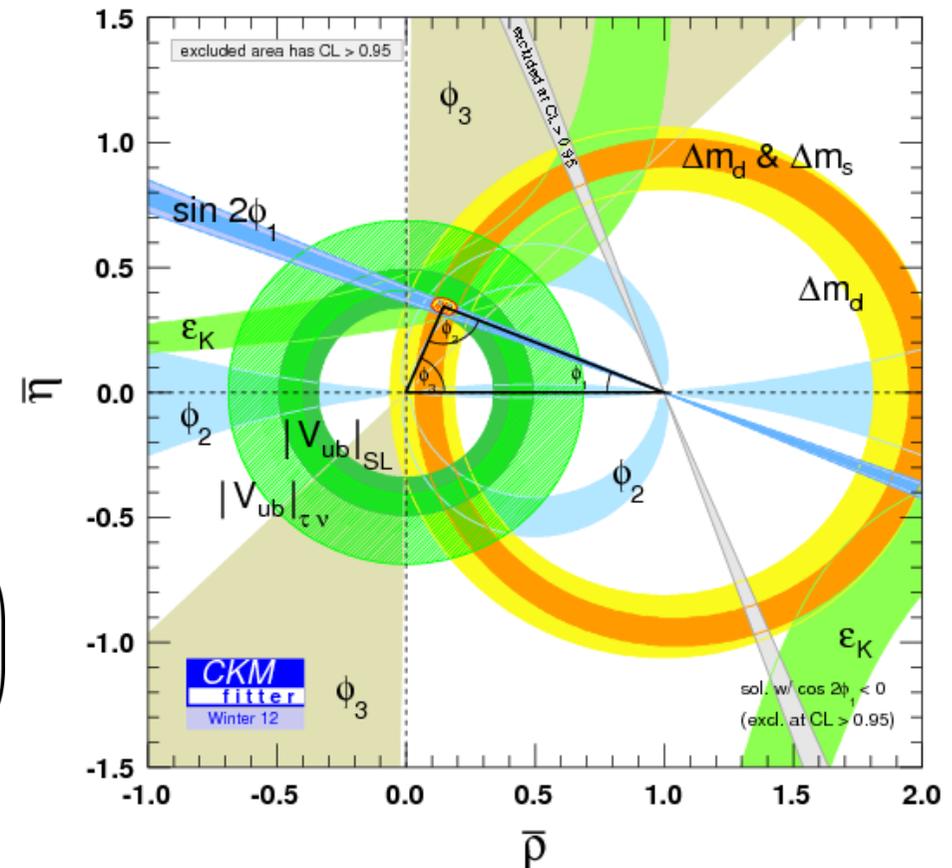
新しい”Weak Interaction”
 $B \rightarrow \tau \nu$
 $B \rightarrow D \tau \nu$

クォークのフレーバー物理の現状

Cabibbo-Kobayashi-Maskawa 行列のスキームうまくいっている。



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

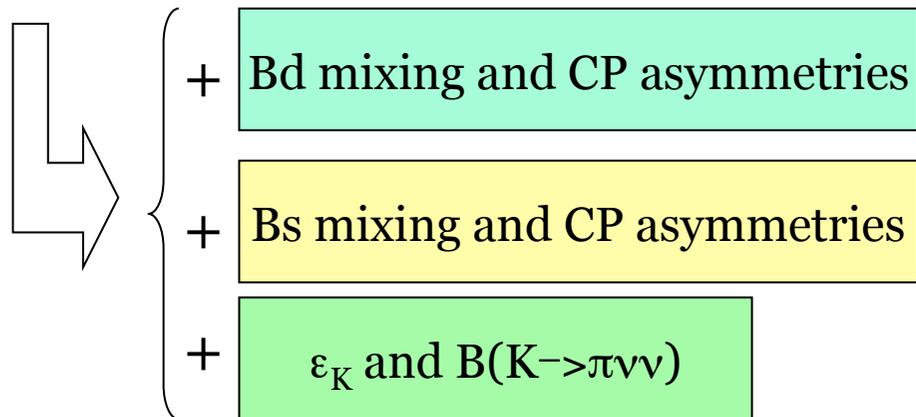


New Physics Search については不十分

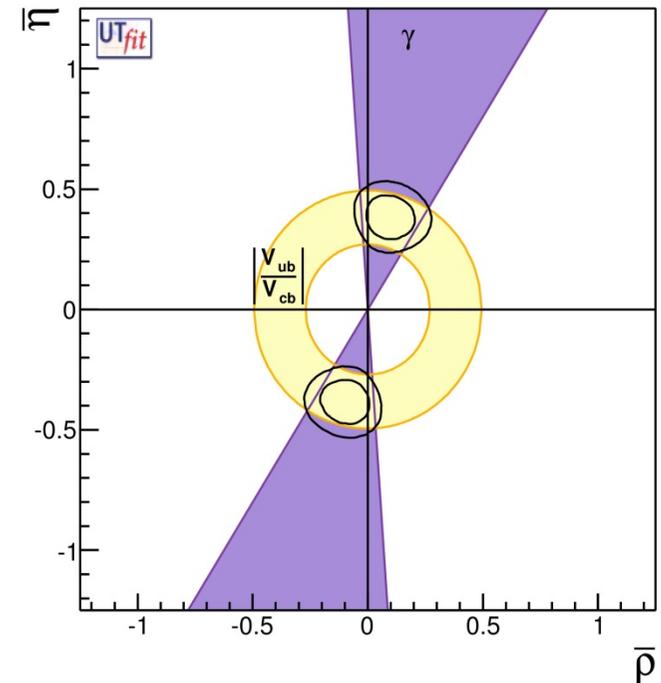
CKM fit はうまくいっているように見えるが、まだ数 10% の New physics の寄与はあり得る。Model-independent にループ効果を決めるには tree-level の parameter determination の精度を飛躍的にあげる必要がある。

$$|V_{ub}|, \phi_3/\gamma$$

$$V_{ub} = |V_{ub}|e^{-i\phi_3}$$



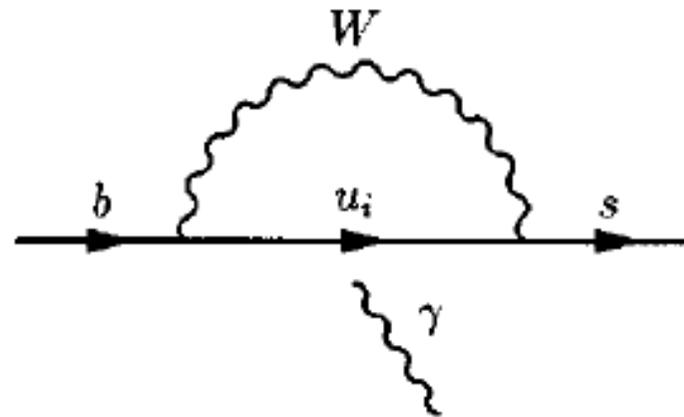
Fit by tree level processes



こうして初めて、どこにどれだけ New physics の効果があるかわかる。

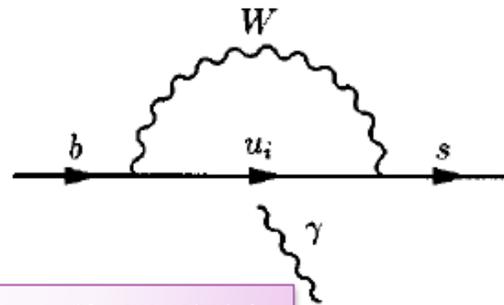
ペンギン物理

- フレーバーチェンジングニュートラルカレントを表す三角形のファインマン図のことをペンギンダイアグラムという。
- $b \rightarrow s\gamma$ 過程は最も重要なB稀崩壊過程。1993年にCLEO実験で発見された。分岐比は 3.5×10^{-4} 程度で実験の誤差と標準模型の理論計算の精度はともに10%程度に達している。両者の一致は良い。標準模型を超える物理に対して有用な制約を与えている。



b- \rightarrow s γ と新しい物理

標準模型ではb-s γ の振幅はほとんど位相を持たない。Photonのpolarizationはほとんどleft-handed 新しい物理の効果は必ずしもそうとは限らない。



$$\sim V_{ts}^* V_{tb} \bar{s}_L \sigma^{\mu\nu} b_R F_{\mu\nu}$$

CP非対称性

b- \rightarrow s γ のdirect CP violation およびB- \rightarrow K* γ などのtime-dependent CP violationはそれぞれ新しい位相やカイラリティー違った相互作用の存在に敏感。

$$A_{CP} = \frac{B(b \rightarrow s\gamma) - B(\bar{b} \rightarrow s\gamma)}{B(b \rightarrow s\gamma) + B(\bar{b} \rightarrow s\gamma)} \quad |A_{CP}| < 1\% \text{ in SM}$$

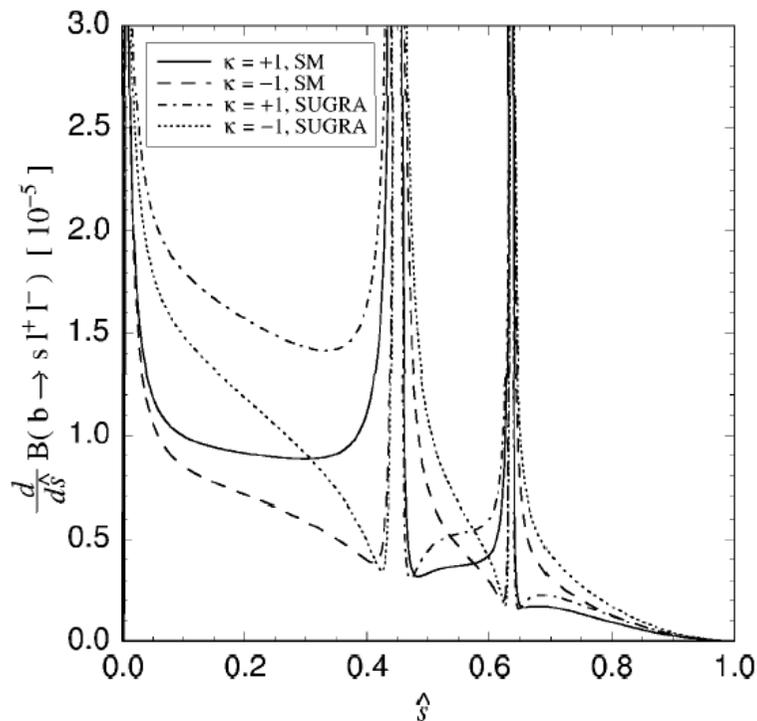
$$A_{CP}^{mix}(B \rightarrow K^* \gamma) = \frac{2\text{Im}(e^{-i\phi^M} C_7 C_7')}{|C_7|^2 + |C_7'|^2} \quad A_{CP} \sim O(\text{ms}/\text{mb}) \text{ in SM}$$

(C'₇はC₇とは逆のカイラリティーのオペレータ)

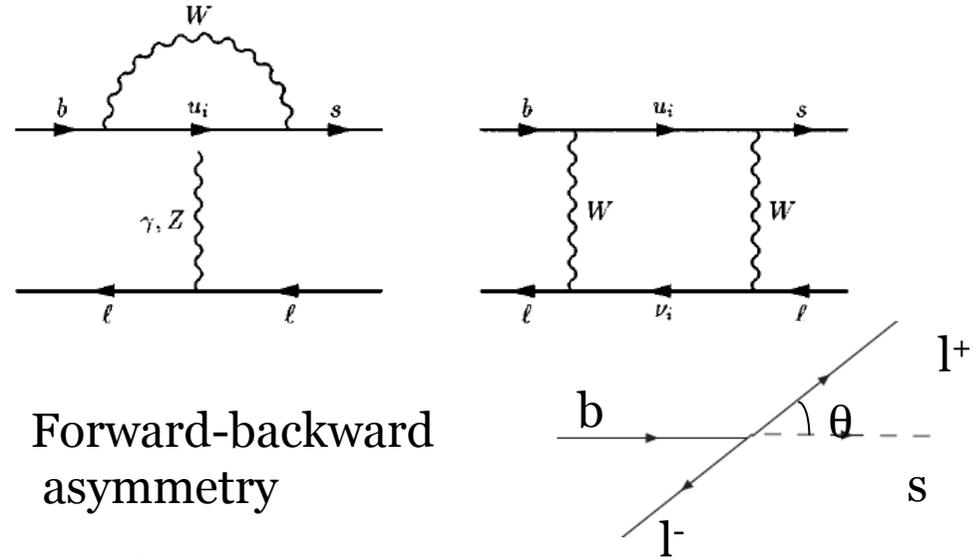
b → sll

- b → sll や B → K*ll は penguin だけでなく box diagram からの寄与がある。
- 新しい物理に対してより多くの情報が得られる。

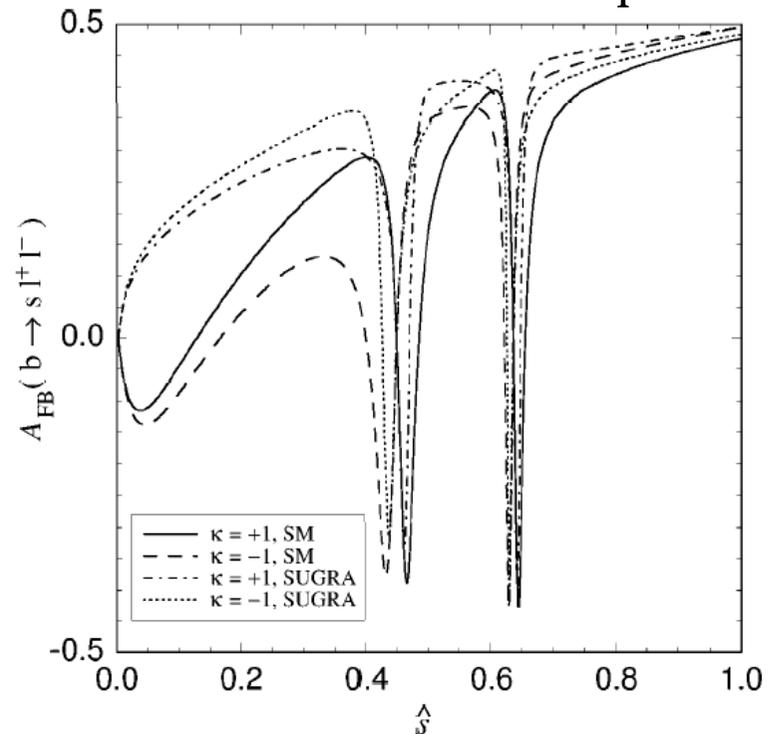
Lepton invariant mass 分布



T.Goto, Y.O., Y.Shimizu, M.Tanaka, 1997

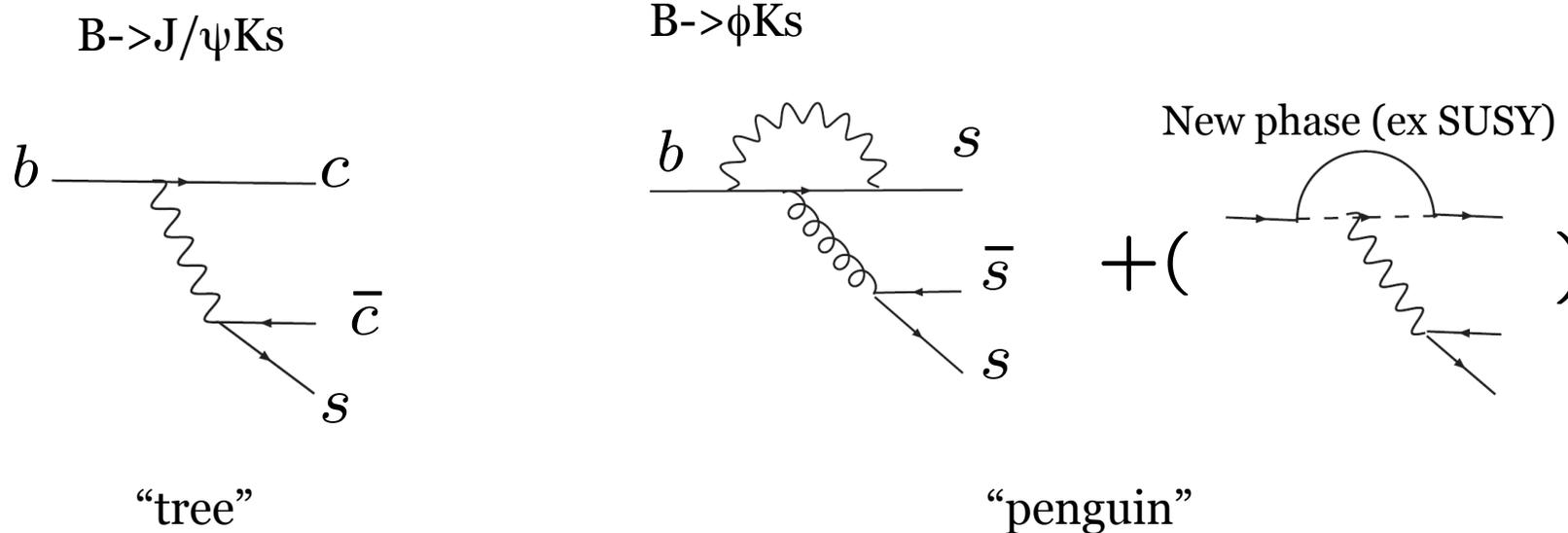


Forward-backward asymmetry



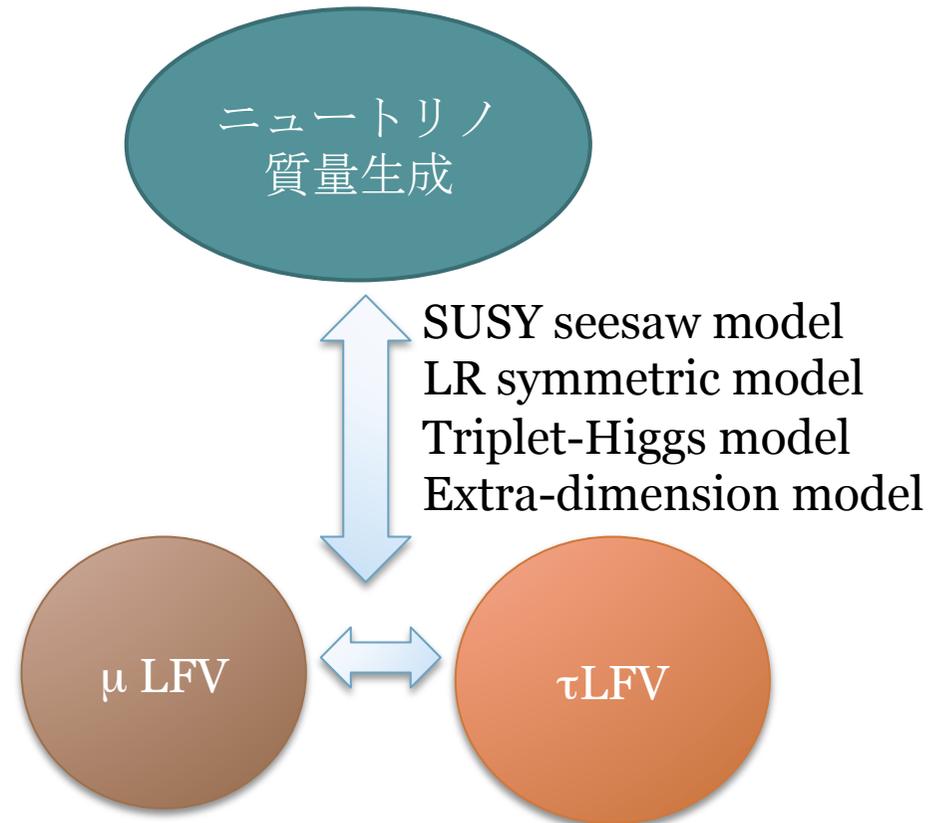
ハドロンのペンギン過程

- 一般に **$b \rightarrow sg$** などによるハドロンへの崩壊では、理論的不定性が大きいので新しい物理の効果を抜き出すのは大変。
- **$B \rightarrow J/\psi K_s$** と **$B \rightarrow \phi K_s$** の**time-dependent CP violation** の差は標準模型では良い精度で一致するはず。新しい物理を探る良い方法。



Lepton Flavor Violation

- $\mu \rightarrow e \gamma$ や $\tau \rightarrow \mu \gamma$ はクォークの $b \rightarrow s \gamma$ に対応する過程。
- ニュートリノ振動の確立後はこれらのLFV過程は起こるはずとされている。どのぐらいの大きさの分岐比になるかは、ニュートリノ質量生成の物理の詳細による。単純なDirac質量やSeesawモデルではほとんど無視できるぐらいの分岐比。
- 超対称モデルでは実験の上限値の近くまで大きくなりうる。



Process	Current	Future
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$	2.4×10^{-12}	10^{-13} (MEG)
$\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$	1.0×10^{-12}	
$\mu^- A \rightarrow e^- A$ (Ti)	6.1×10^{-13}	10^{-17} (COMET, Mu2e)
tau LFV	$10^{-8} - 10^{-7}$	10^{-9} (Super BF)

ミュー粒子とタウ粒子のLFVの関係は新しい物理の模型による。
MEGでLFVが発見されたらタウ崩壊でLFVを探すことは緊急性が高い。

Super B, experimental prospects

50-75 ab⁻¹

	Observable	Super Flavour Factory sensitivity
CKM parameters →	$\sin(2\beta) (J/\psi K^0)$	0.005–0.012
	$\gamma (B \rightarrow D^{(*)} K^{(*)})$	1–2°
	$\alpha (B \rightarrow \pi\pi, \rho\rho, \rho\pi)$	1–2°
	$ V_{ub} $ (exclusive)	3–5%
	$ V_{ub} $ (inclusive)	2–6%
	$\bar{\rho}$	1.7–3.4%
b-s transition →	$S(\phi K^0)$	0.02–0.03
	$S(\eta' K^0)$	0.01–0.02
	$S(K_S^0 K_S^0 K_S^0)$	0.02–0.04
B-→ (D) τν →	ϕ_D	1–3°
	$\mathcal{B}(B \rightarrow \tau\nu)$	3–4%
	$\mathcal{B}(B \rightarrow \mu\nu)$	5–6%
	$\mathcal{B}(B \rightarrow D\tau\nu)$	2–2.5%
EW penguin →	$\mathcal{B}(B \rightarrow \rho\gamma)/\mathcal{B}(B \rightarrow K^*\gamma)$	3–4%
	$A_{CP}(b \rightarrow s\gamma)$	0.004–0.005
	$A_{CP}(b \rightarrow (s+d)\gamma)$	0.01
	$S(K_S^0 \pi^0 \gamma)$	0.02–0.03
	$S(\rho^0 \gamma)$	0.08–0.12
	$A^{\text{FB}}(B \rightarrow X_s \ell^+ \ell^-) s_0$	4–6%
tau LFV →	$\mathcal{B}(B \rightarrow K\nu\bar{\nu})$	16–20%
	$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\gamma)$	$2-8 \times 10^{-9}$
	$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\mu\mu)$	$0.2-1 \times 10^{-9}$
	$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\eta)$	$0.4-4 \times 10^{-9}$

o(10%) physics (Now)
=> o(1%) physics (Future)

CERN Flavour WS report: **arXiv:0801.1833**

LHCb 実験との比較：車の両輪

LHCb 利点：Bs のCPの破れ、Bs $\rightarrow\mu\mu$

Conclusions

LHCb is a heavy flavour precision experiment searching for New Physics in **CP Violation** and **Rare Decays**

A program to do this has been developed and the methods, including calibrations and systematic studies, are being worked out..

CP Violation: 2 fb⁻¹ (1 year)*

- γ from trees: 5° - 10°
- γ from penguins: $\approx 10^\circ$
- B_s mixing phase: 0.023
- β_s^{eff} from penguins: 0.11

Rare Decays: 2 fb⁻¹ (1 year)*

- Bs \rightarrow K* $\mu\mu$ s₀ : 0.5 GeV²
- B \rightarrow s γ A_{dir}, A_{mix} : 0.11
A_Δ : 0.22
- B_s $\rightarrow\mu\mu$ BR.: 6 x 10⁻⁹ at 5σ

We appreciate the collaboration with the theory community to continue developing new strategies.

We are excitingly looking forward to the data from the LHC.

* Expect uncertainty to scale statistically to 10 fb⁻¹. Beyond: see Jim Libby's talk on Upgrade 40

Recent LHCb results



ϕ_s results from $J/\psi\phi$

LHCb values

$$\Gamma = 0.6580 \pm 0.0054$$

$$\pm 0.0066 \text{ (ps}^{-1}\text{)}$$

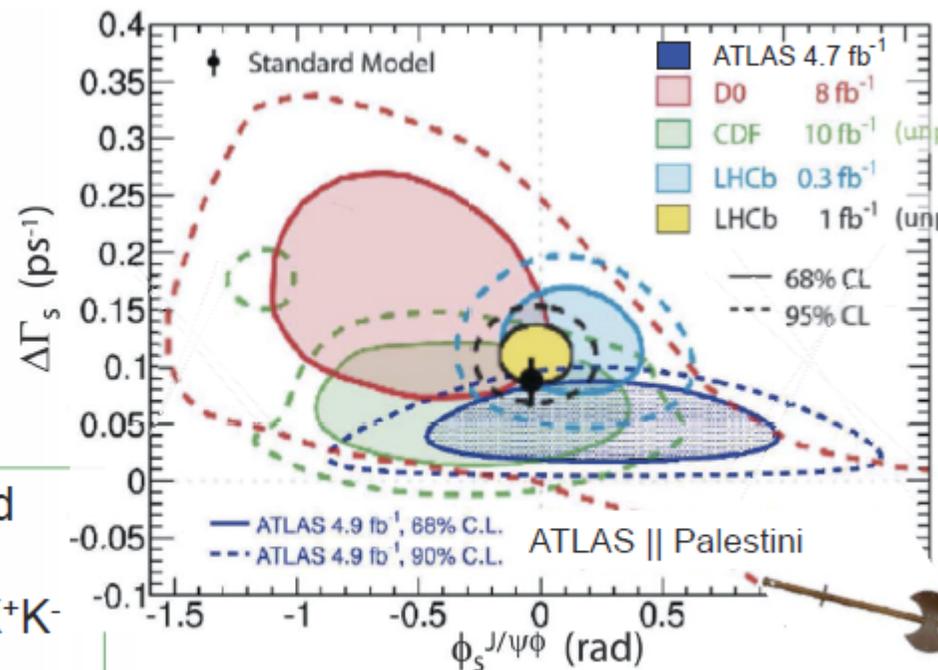
$$\Delta\Gamma = 0.116 \pm 0.018$$

$$\pm 0.006 \text{ (ps}^{-1}\text{)}$$

$$\phi_s = 0.001 \pm 0.101$$

$$\pm 0.027 \text{ (rad)}$$

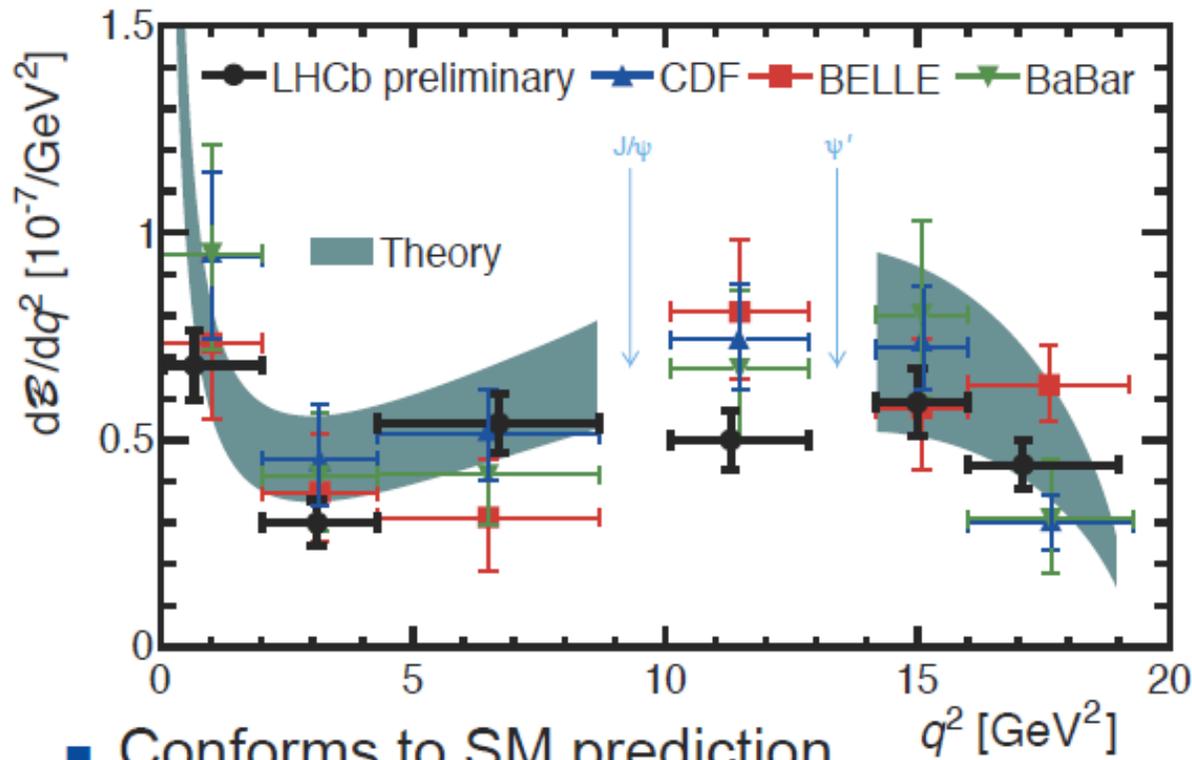
Ambiguity removed using interference with K^+K^- S-wave



- Combining LHCb results: $\phi_s = -0.002 \pm 0.083 \pm 0.027 \text{ rad}$



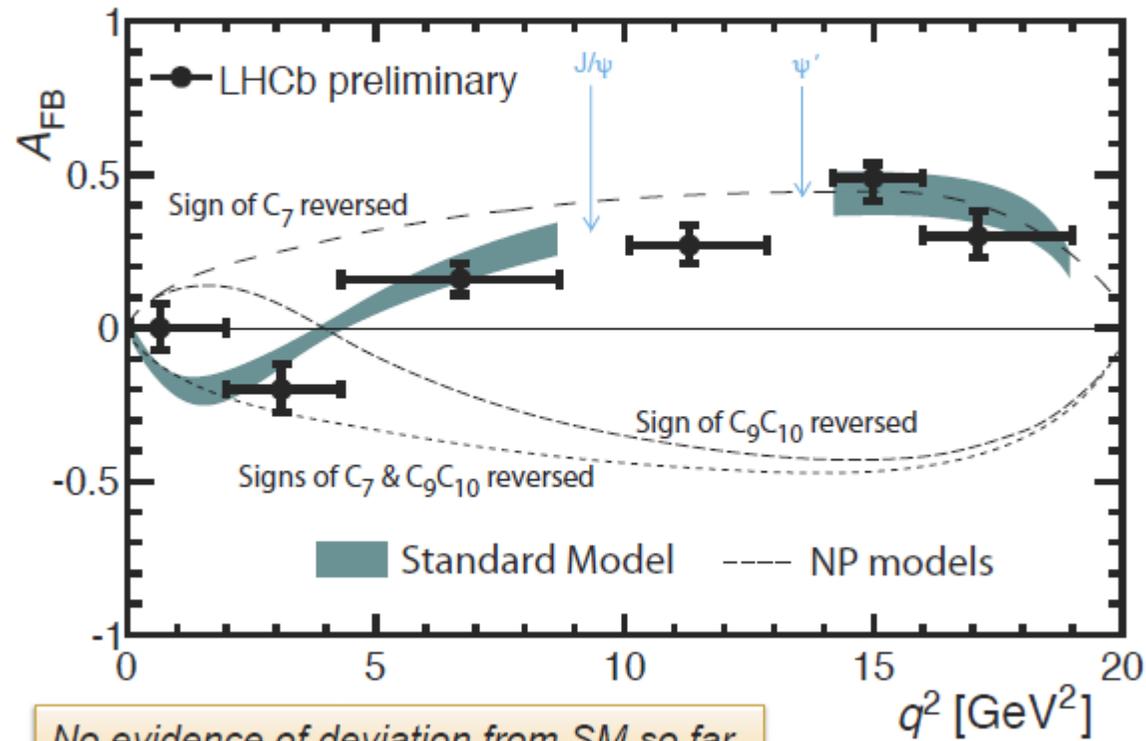
$B^0 \rightarrow K^{*0} e^+ e^-$



LHCb ||
 Gallas
 Torreira,
 BaBar ||
 Eigen,
 CDF ||
 Miyake,
 Belle
 PRL 103,
 171801
 (2009)



Forward-Backward asymmetry



ICHEP, Melbourne, July 9, 2012

29

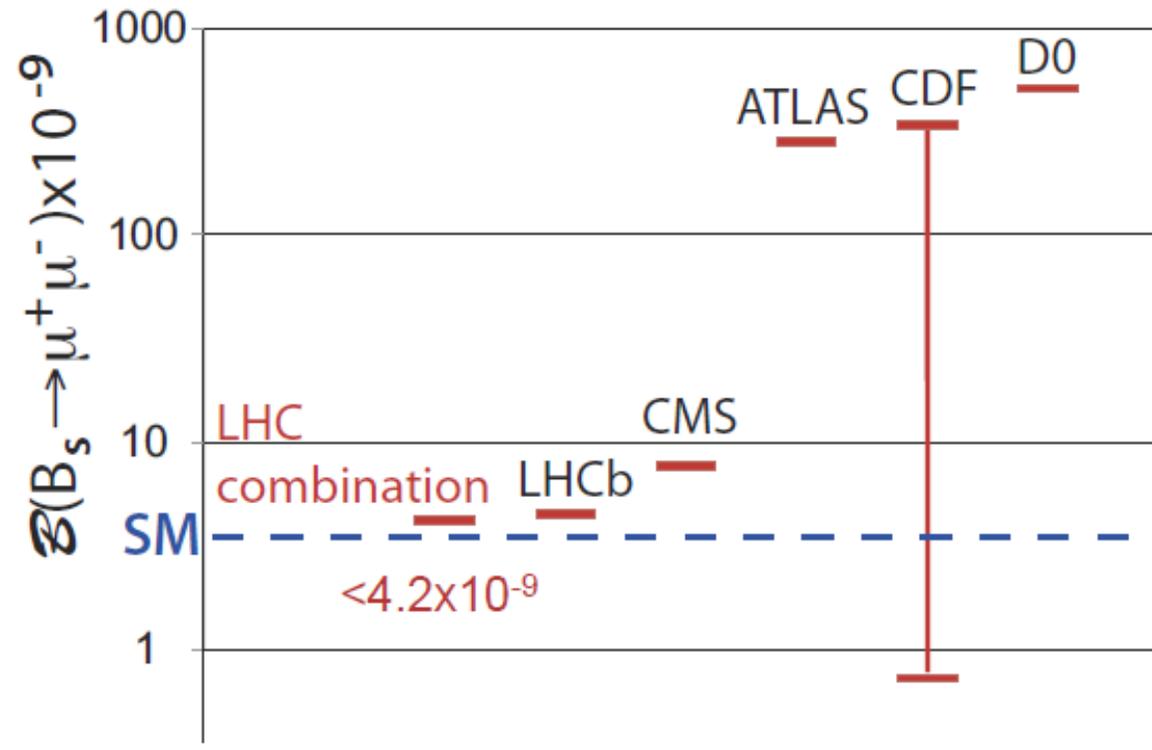
S.Stone, ICHEP2012

Recent LHCb results



Results

95% confidence level limits



New physics examples

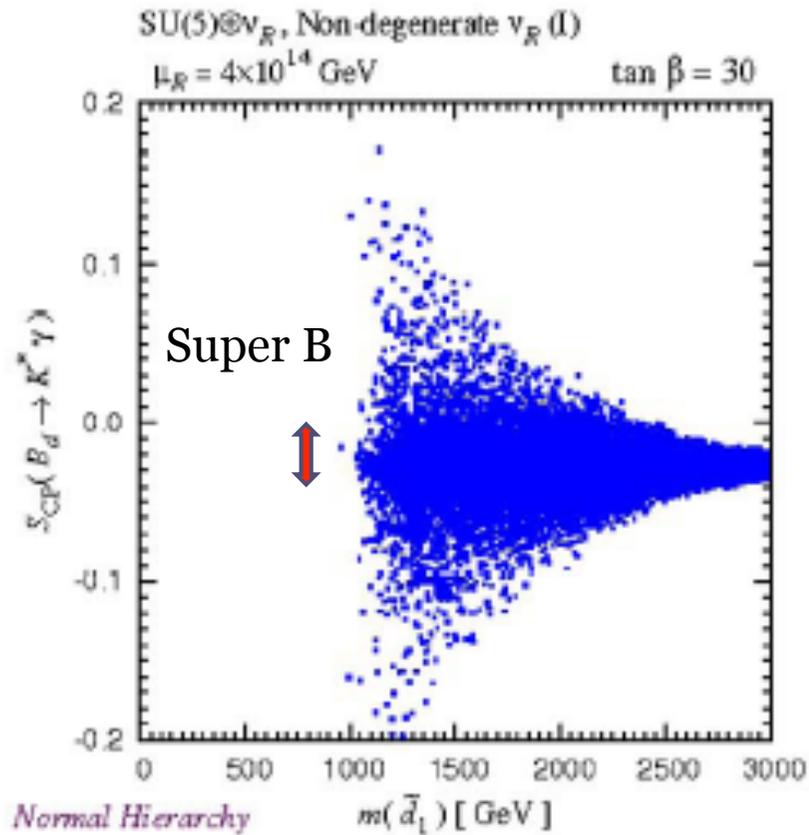
- SUSY
- Charged Higgs boson
- Little Higgs model
- Extra-dimension

次世代Bファクトリーが動き出すころは LHCの初期の成果は出そろっているはず。

LHC でSUSY が見つかったら

- 大統一があるか、ニュートリノの質量はシーソー機構によるのか、新たな**CP**の破れの原因はあるか、などの問題が重要となる。
- クォークおよび荷電レプトンの**LFV**に様々なシグナルが見える可能性がある。

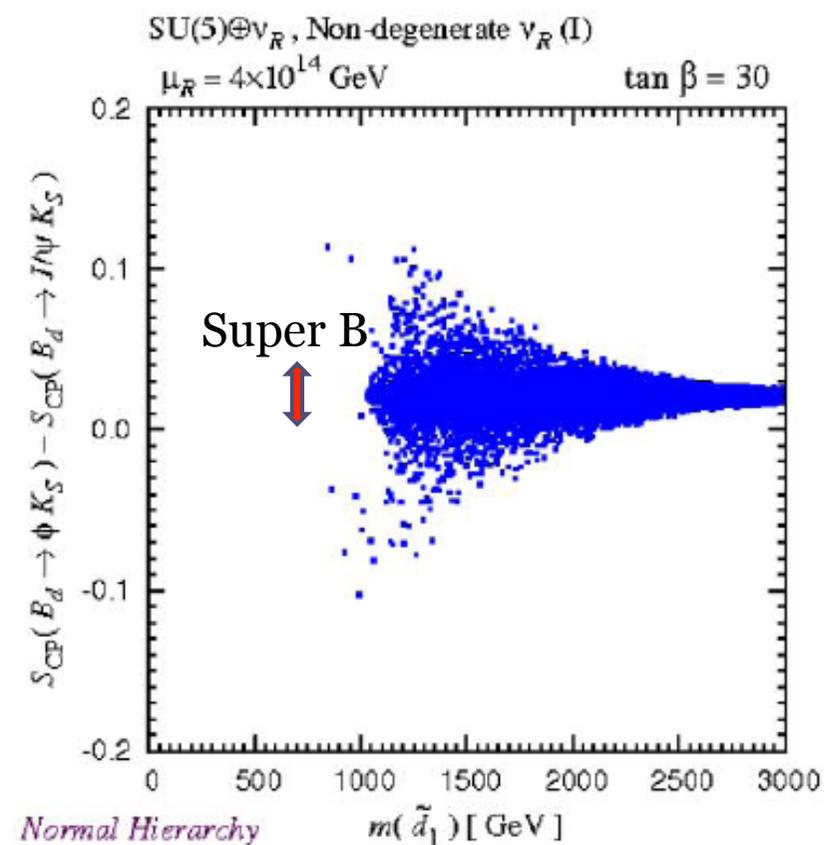
Bd- \rightarrow K* γ モードのTime-dependent CP asymmetry



Right-handed sdown sector の
 フレーバー混合の効果 (Seesaw+GUT)

T.Goto, Y.O., T.Shindou, M.Tanaka, 2007

B- \rightarrow ϕ Ks と B- \rightarrow J/ ψ Ks のTime-dependent CP asymmetry の差



新しいCPを破る位相の効果

(T.Moroi, 2000)

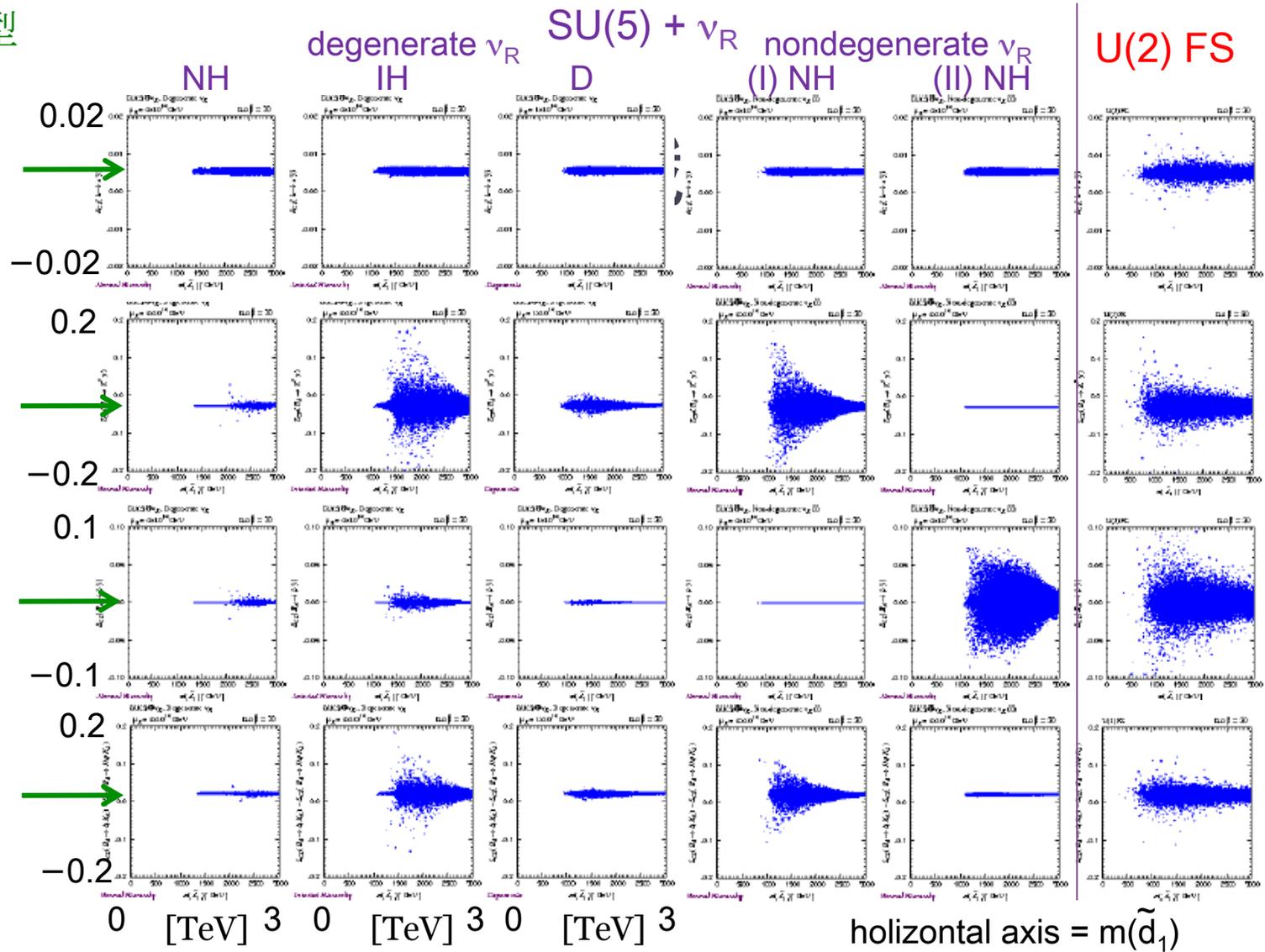
→ 標準模型

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

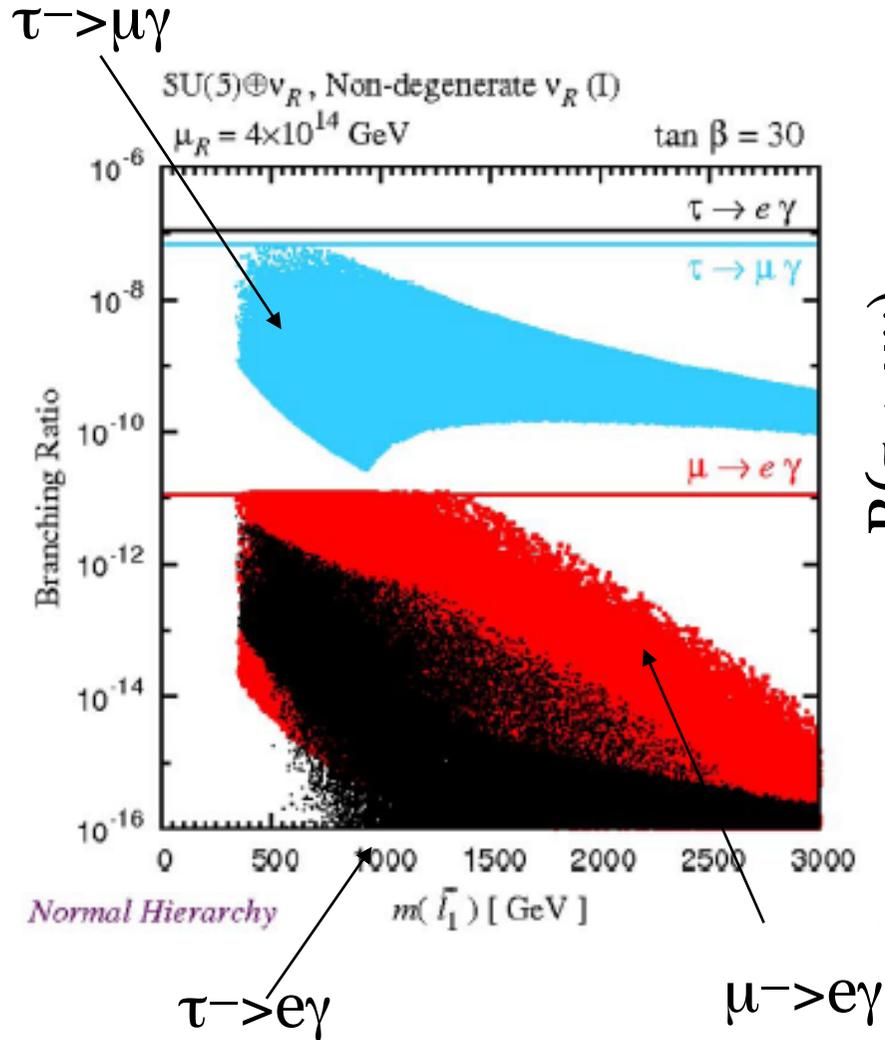
$S(B \rightarrow K^*\gamma)$

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

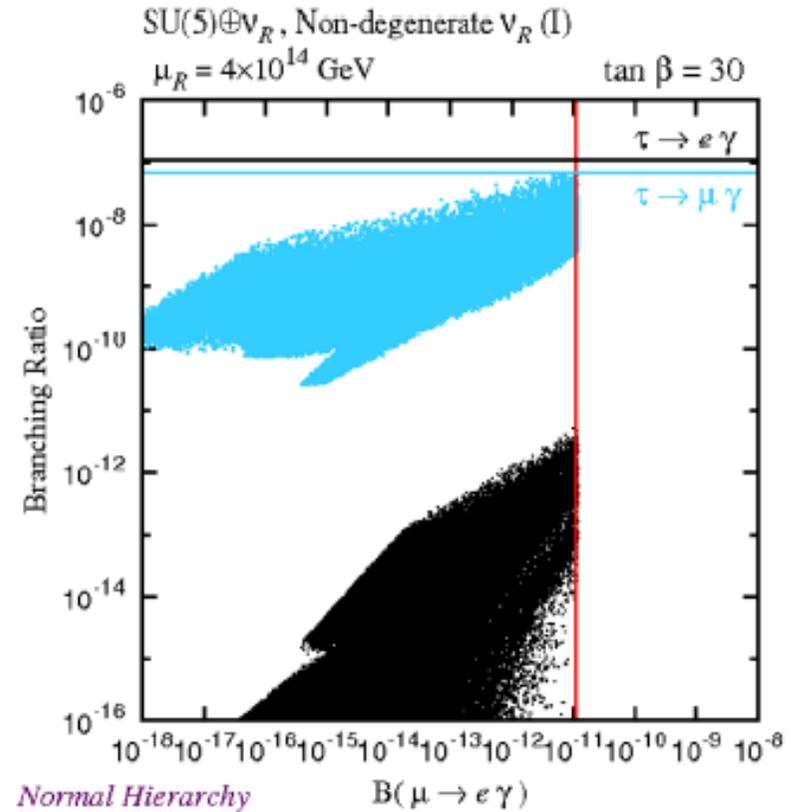
$S(\phi K_S) - S(J/\psi K_S)$



Lepton Flavor Violation $\tau^- \rightarrow \mu\gamma, \tau^- \rightarrow e\gamma$ vs. $\mu^- \rightarrow e\gamma$



$B(\tau^- \rightarrow \mu\gamma)$

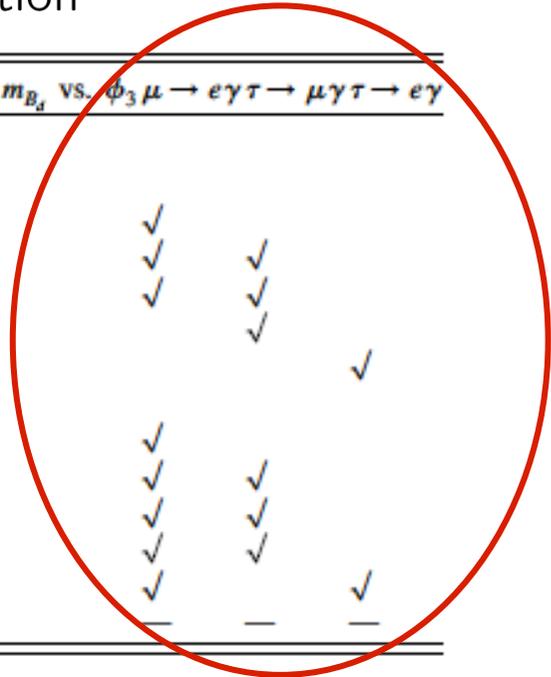


$B(\mu^- \rightarrow e\gamma)$

Summary table of flavor signals for mSUGRA, SUSY seesaw, SUSY GUT, MSSA with U(2) flavor symmetry

✓ large deviation
 • possible deviation LFV

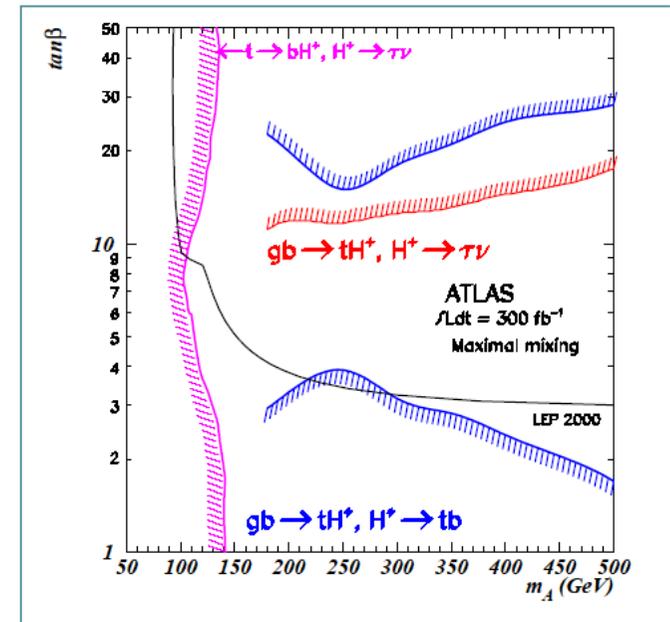
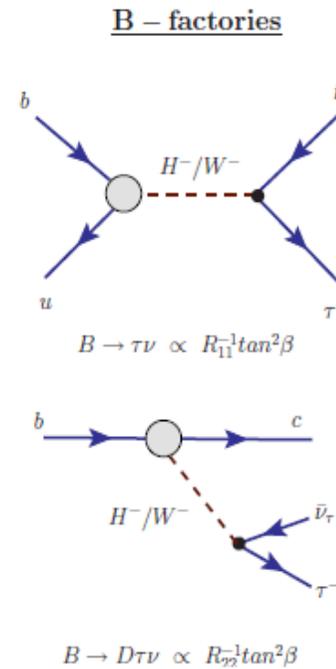
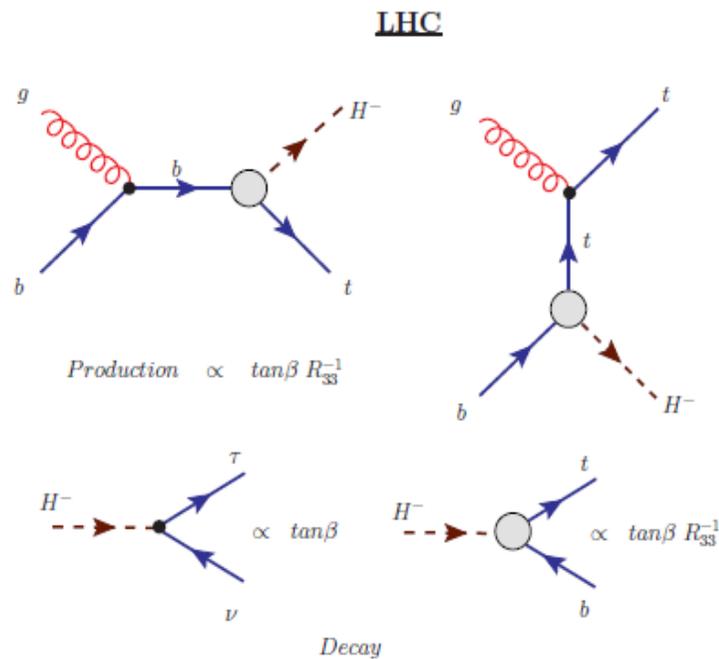
Model	$A_{CP}(s\gamma)$	$S_{CP}(K^*\gamma)$	$A_{CP}(d\gamma)$	$S_{CP}(\rho\gamma)$	$\Delta S_{CP}(\phi K_S)$	$S_{CP}(B_s \rightarrow J/\psi\phi)$	$\Delta m_{B_s}/\Delta m_{B_d}$	vs. $\phi_3 \mu \rightarrow e\gamma\tau \rightarrow \mu\gamma\tau \rightarrow e\gamma$
mSUGRA								
MSSM + RN								
Degenerate ν_R , NH								
Degenerate ν_R , IH								
Degenerate ν_R , D								
Nondegenerate ν_R (I), NH								
Nondegenerate ν_R (II), NH								✓
SU(5) + RN								
Degenerate ν_R , NH	•	•	•	•	•	•	•	
Degenerate ν_R , IH	✓	•	✓	✓	✓	•	•	
Degenerate ν_R , D	•	•	•	•	•	•	•	
Nondegenerate ν_R (I), NH	✓		✓	✓	✓	•	•	
Nondegenerate ν_R (II), NH			✓	✓	✓	•	•	
U(2)FS	✓	✓	✓	✓	✓	•	•	



Large LFV signals=> possible slepton mixing signals at LHC

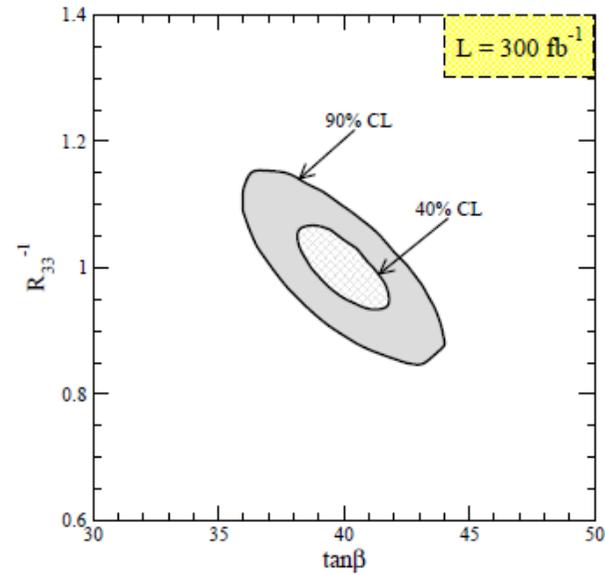
LHC で荷電ヒッグスボソンがみつかったら

LHC charged Higgs search と B factory はMSSM の同じパラメーター領域に敏感。
Bの崩壊と比較してCharged Higgs coupling universality のテストができる。

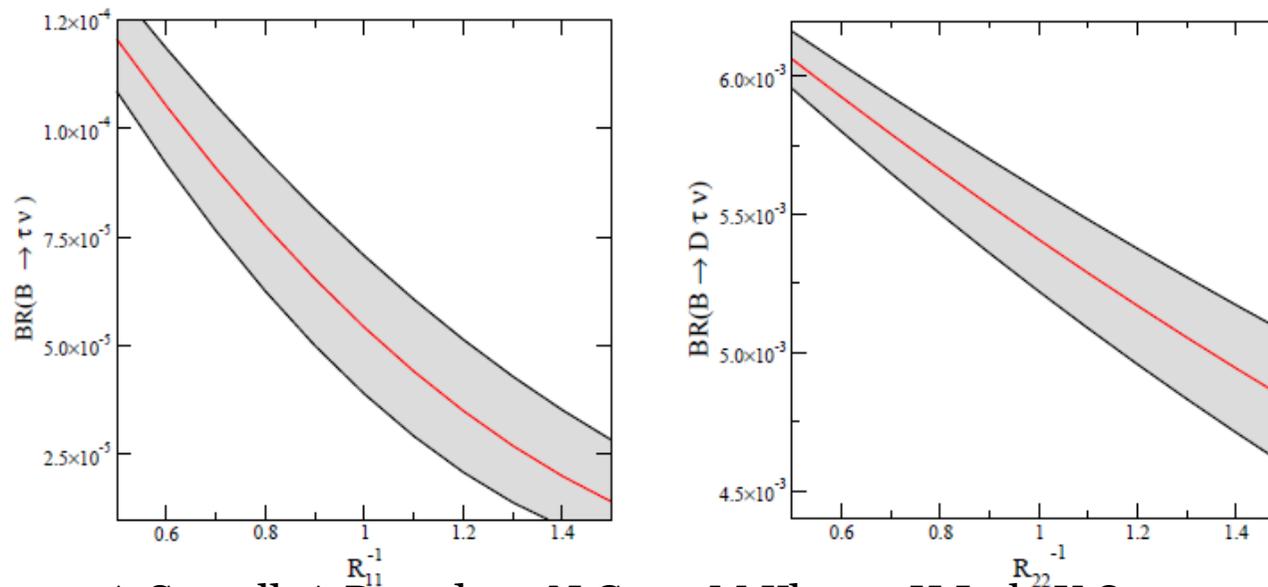


$M_H = 300 \text{ GeV}$

LHC charged Higgs production
 における $\tan\beta$ と tbH coupling
 determination



$B \rightarrow \tau\nu$, $B \rightarrow D\tau\nu$ における cbH , ubH coupling determination



A.Cornell, A.Deandrea, N.Gaur, M.Klasen, H.Itoh, Y.O. 2009

LHCでLittle Higgs with T parityの新粒子が見つかったら

SU(5)/SO(5) non-linear sigma model

$[SU(2) \times U(1)]^2 \rightarrow SU(2)_L \times U(1)_Y$ at f

$SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$ at $v=246$ GeV

At ~ 10 TeV, UV completion theory

At $f \sim O(1)$ TeV

T-odd bosons: W_H, Z_H, ϕ_{ij} ,

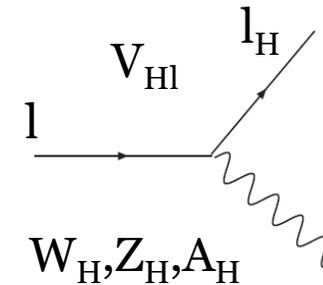
T-odd fermions: u_H, d_H, l_H

Top partners T_+, T_-

Less than ~ 200 GeV

T-odd heavy photon A_H

SM particles



New flavor mixing in heavy lepton/quark sectors.

FCNC やLFV過程に効く

LFV signals はLHT とSUSYでは違う特徴をもつ。

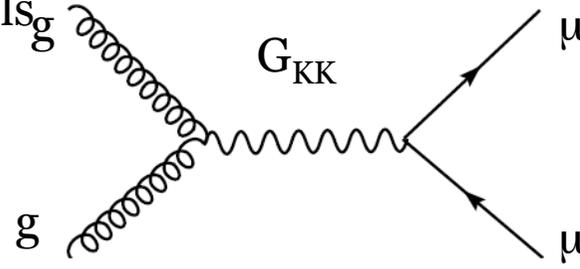
ratio	LHT	MSSM (dipole)	MSSM (Higgs)
$\frac{Br(\mu^- \rightarrow e^- e^+ e^-)}{Br(\mu \rightarrow e \gamma)}$	0.02... 1	$\sim 6 \cdot 10^{-3}$	$\sim 6 \cdot 10^{-3}$
$\frac{Br(\tau^- \rightarrow e^- e^+ e^-)}{Br(\tau \rightarrow e \gamma)}$	0.04... 0.4	$\sim 1 \cdot 10^{-2}$	$\sim 1 \cdot 10^{-2}$
$\frac{Br(\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-)}{Br(\tau \rightarrow \mu \gamma)}$	0.04... 0.4	$\sim 2 \cdot 10^{-3}$	0.06... 0.1
$\frac{Br(\tau^- \rightarrow e^- \mu^+ \mu^-)}{Br(\tau \rightarrow e \gamma)}$	0.04... 0.3	$\sim 2 \cdot 10^{-3}$	0.02... 0.04
$\frac{Br(\tau^- \rightarrow \mu^- e^+ e^-)}{Br(\tau \rightarrow \mu \gamma)}$	0.04... 0.3	$\sim 1 \cdot 10^{-2}$	$\sim 1 \cdot 10^{-2}$
$\frac{Br(\tau^- \rightarrow e^- e^+ e^-)}{Br(\tau^- \rightarrow e^- \mu^+ \mu^-)}$	0.8... 2.0	~ 5	0.3... 0.5
$\frac{Br(\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-)}{Br(\tau^- \rightarrow \mu^- e^+ e^-)}$	0.7... 1.6	~ 0.2	5... 10
$\frac{R(\mu Ti \rightarrow e Ti)}{Br(\mu \rightarrow e \gamma)}$	$10^{-3} \dots 10^2$	$\sim 5 \cdot 10^{-3}$	0.08... 0.15

M.Blanke, A.Buras, B.Duling, S.Recksiegel, S.Tarantino, 2009

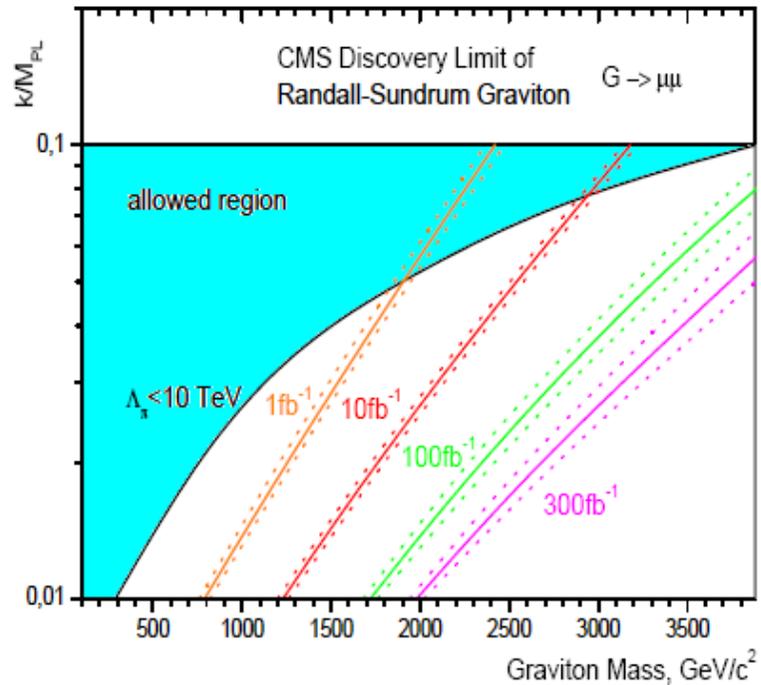
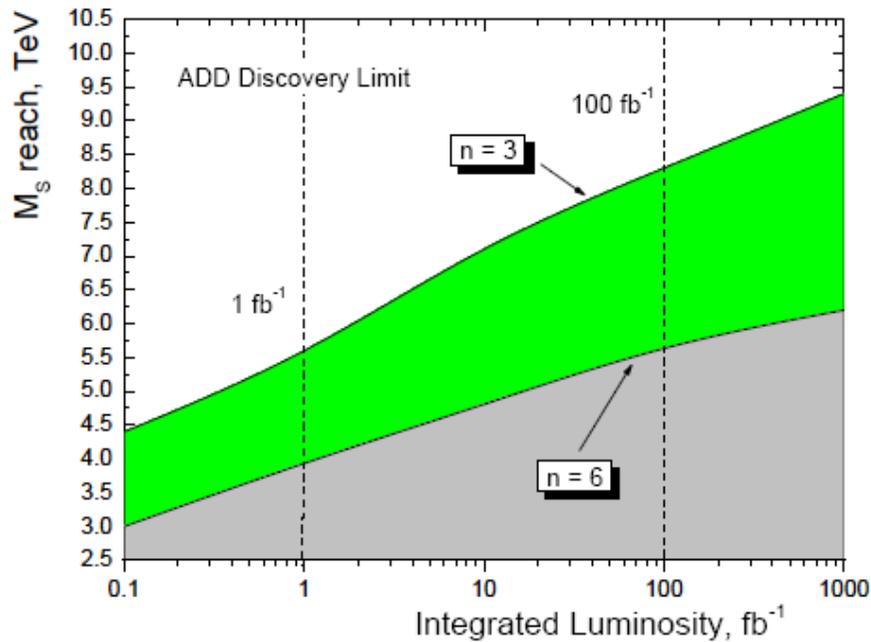
LHC で余次元が見つかったら

LHC reach on extra-dim models

Flat extra dim,
KK graviton exchange to $\mu\mu$



Warped extra dim,
 $G_{KK} \rightarrow \mu\mu$



KK graviton exchange

T.Rizzo in SLAC WS Proc.

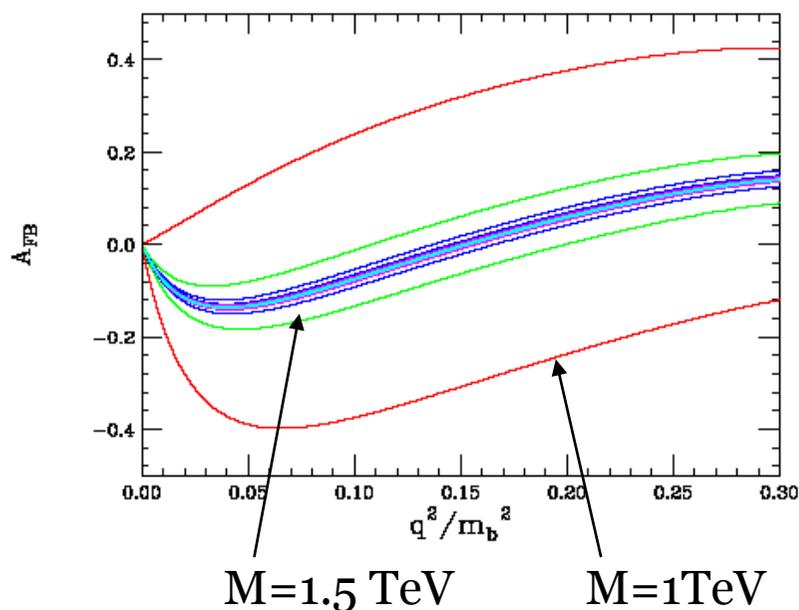
KK graviton exchange can induce tree-level FCNC coupling.

$$O_{grav} = \frac{X}{M^4} T_{\mu\nu} T^{\mu\nu}$$

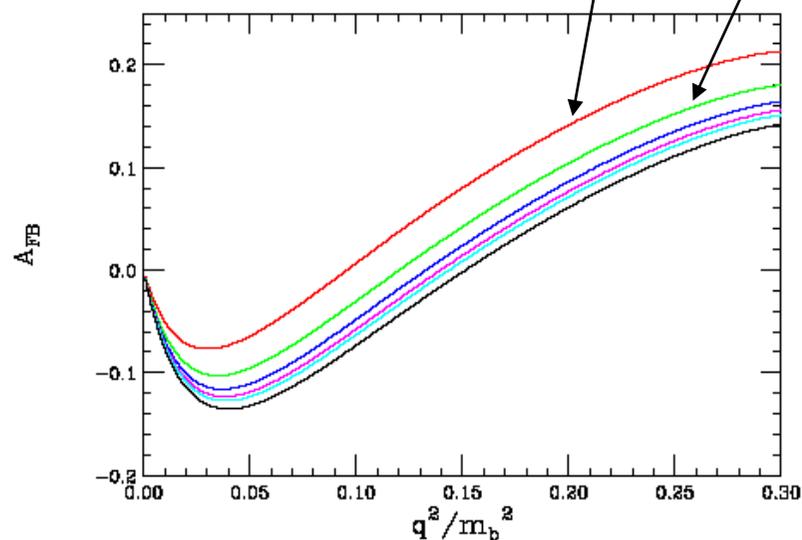
Differential branching ratio of $b \rightarrow sll$ processes

Lepton FB asymmetry: $A_{FB}(s)$

Flat Extra Dim



Warped extra dim



Examples of New Physics Models and flavor signals
2003 SLAC WS Proceedings, hep-ph/0503261

Model	B_d Unitarity	Time-dep. CPV	Rare B decay	Other signals		
mSUGRA(moderate $\tan \beta$)	-	-	-	-	MFV	
mSUGRA(large $\tan \beta$)	B_d mixing	-	$B \rightarrow (D)\tau\nu$ $b \rightarrow sl^+l^-$	$B_s \rightarrow \mu\mu$ B_s mixing	MFV	
SUSY GUT with ν_R	-	$B \rightarrow \phi K_S$ $B \rightarrow K^*\gamma$	-	B_s mixing τ LFV, n EDM		
Effective SUSY	B_d mixing	$B \rightarrow \phi K_S$	$A_{CP}^{b \rightarrow s\gamma}, b \rightarrow sl^+l^-$	B_s mixing		
KK graviton exchange	-	-	$b \rightarrow sl^+l^-$	-		
Extra Dimension models	Split fermions in large extra dimensions	B_d mixing	-	$b \rightarrow sl^+l^-$	$K^0\bar{K}^0$ mixing $D^0\bar{D}^0$ mixing	
	Bulk fermions in warped extra dimensions	B_d mixing	$B \rightarrow \phi K_S$	$b \rightarrow sl^+l^-$	B_s mixing $D^0\bar{D}^0$ mixing	
	Universal extra dimensions	-	-	$b \rightarrow sl^+l^-$ $b \rightarrow s\gamma$	$K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu}$	MFV

標準模型の予言からのずれのパターンは模型によって違う

まとめ

- **TeV** の物理を解明するには直接探索と間接探索の両面が必要。
- 間接探索の役割は新しい相互作用の性質を探ること。
- **B**ファクトリーの特徴は様々な過程のいろいろな観測量により、たくさんの質的に違った情報を得ることができる点。
- 今までの**B**ファクトリーではいろいろな物理量が測定できるようになっていきた。現在見つかっている過程が新しい物理の探索に有用となるためには、ほとんどの場合一ケタぐらい精度を上げる必要がある。