

TeVスケール物理に対する b, c, τ の役割

岡田安弘 (KEK/総合研究大学院大学)

2009年11月7日

将来計画検討小委員会 ICEPP 東大

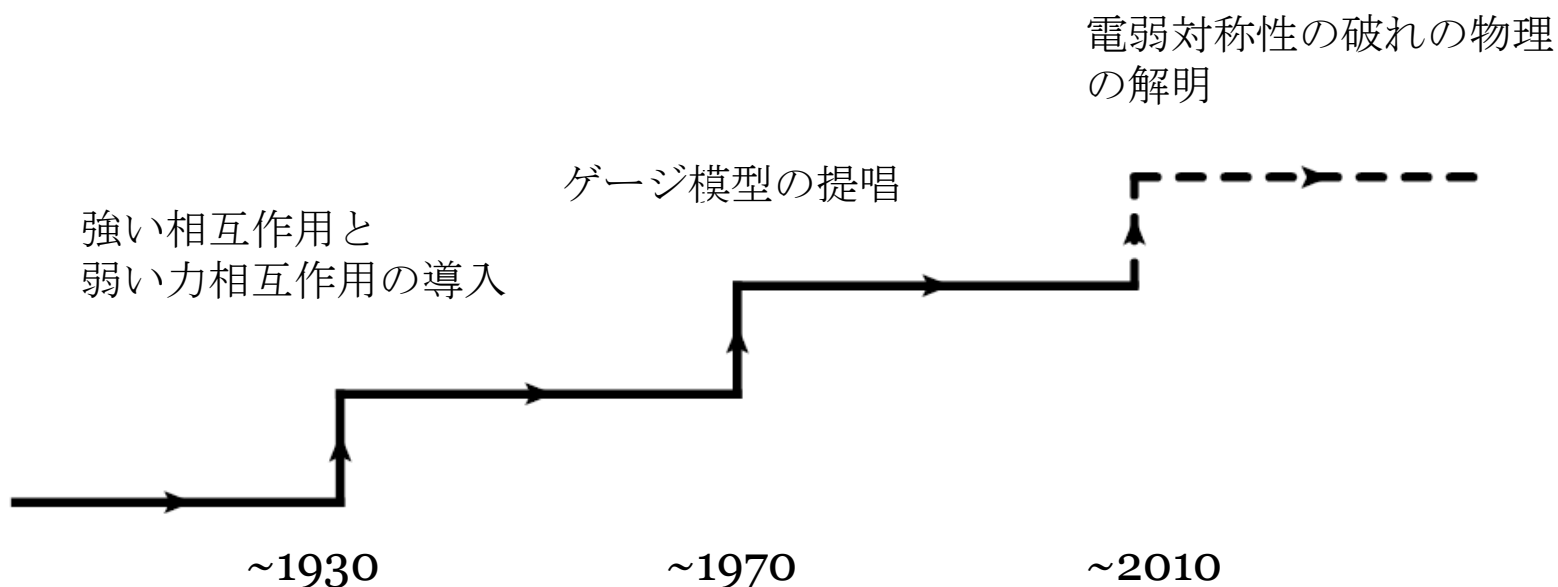
これからの B ファクトリーが目指すもの

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。

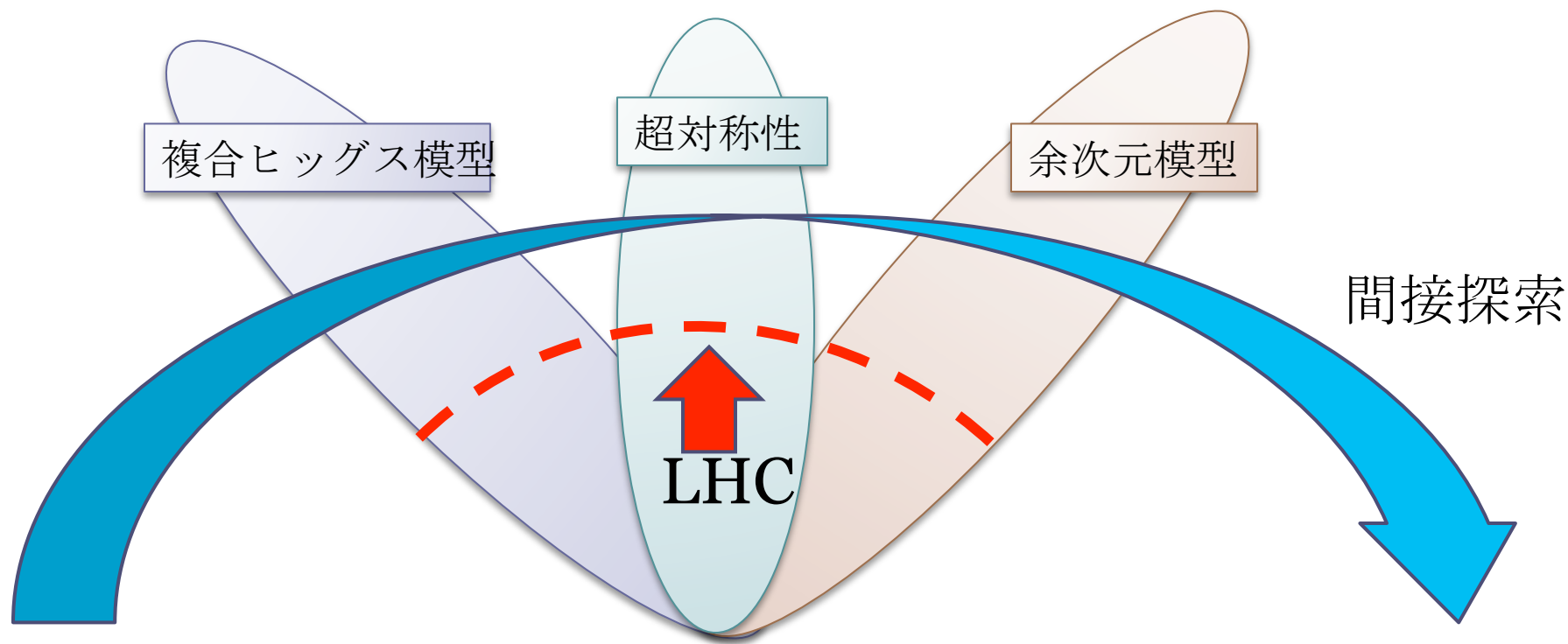
TeVスケールの物理

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

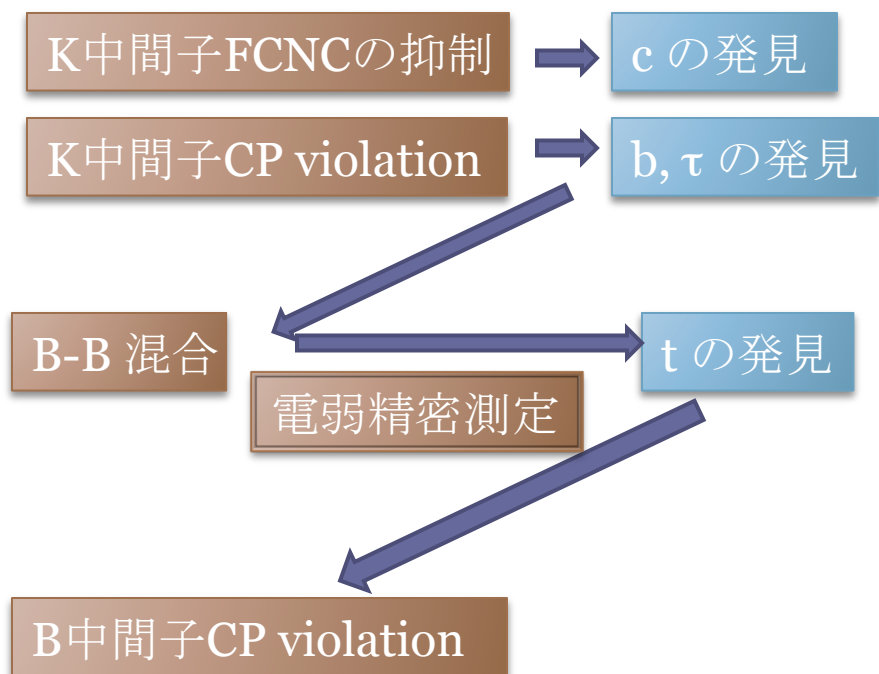


TeV物理に関しては、いろいろな理論的な可能性が提案されている。

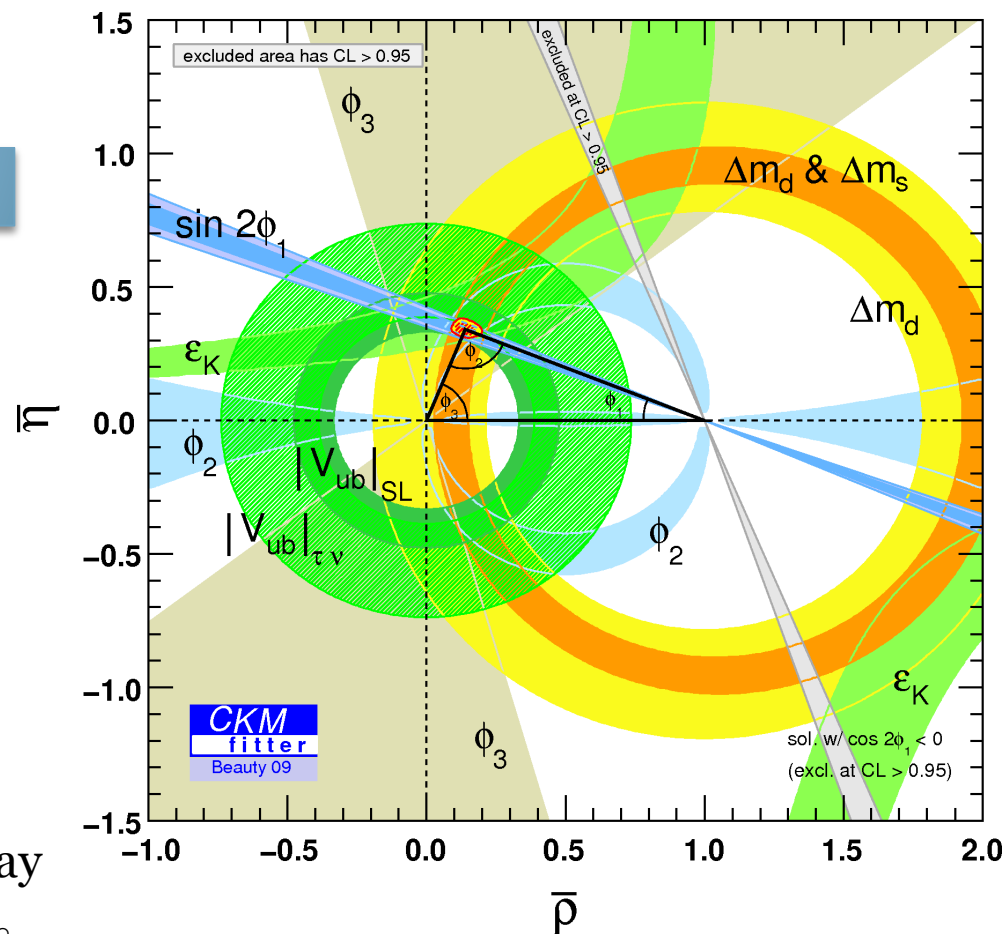
LHCではどの方向が正しいか決まるかもしれない。

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。



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模型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。

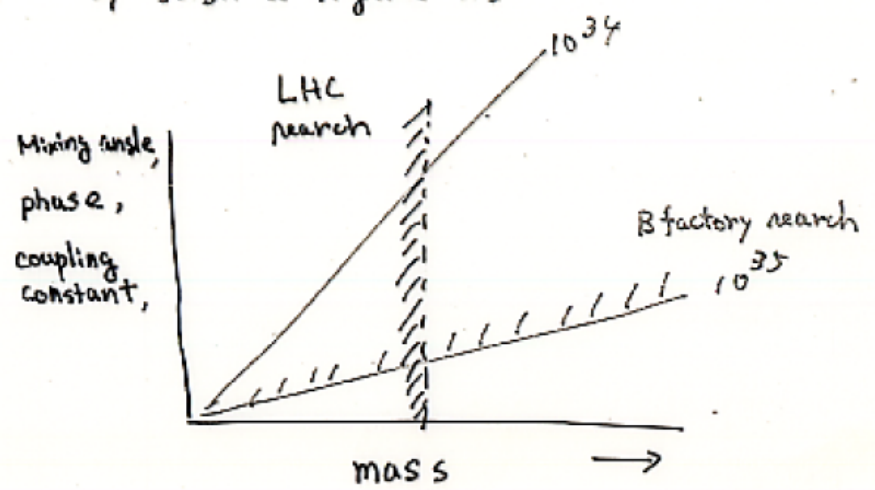
Ac comment on Beyond 10^{35} study

2001.5.17. Y. Okada
d KKK

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

Complete "Process - New Physics" matrix

New Physics Process	SUSY		K SUSY	WR Z	extra flavor	2HDM, extra MH, dim.
	NSUSY	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						
$B \rightarrow K \gamma$ indirect asymmetry						
$b \rightarrow d \gamma$						
$B \rightarrow \rho \gamma$						
$B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$						
$B \rightarrow \tau \nu$						
$B \rightarrow \phi K_s$						



② Present your results at
the 10^{25} 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

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

$\tau \rightarrow \mu \mu \mu, \tau \rightarrow \mu \mu e, \tau \rightarrow \mu e e, \tau \rightarrow e e e,$

$\tau \rightarrow \mu \eta, \tau \rightarrow \mu \pi, \tau \rightarrow \mu K \dots\dots\dots$

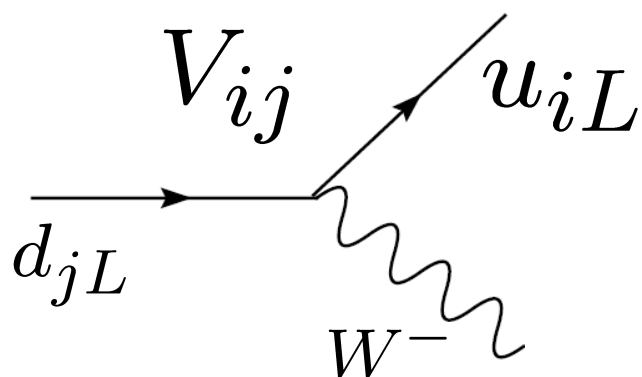
新しい”Weak Interaction”

$B \rightarrow \tau \nu$

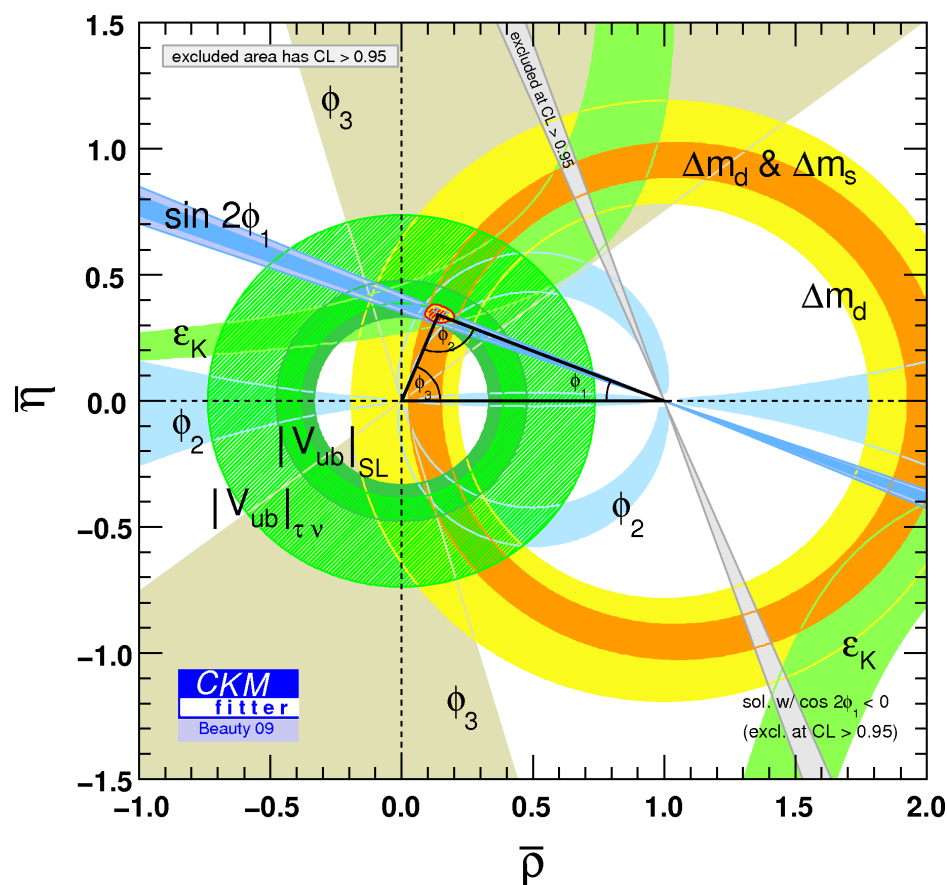
$B \rightarrow D \tau \nu$

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。



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

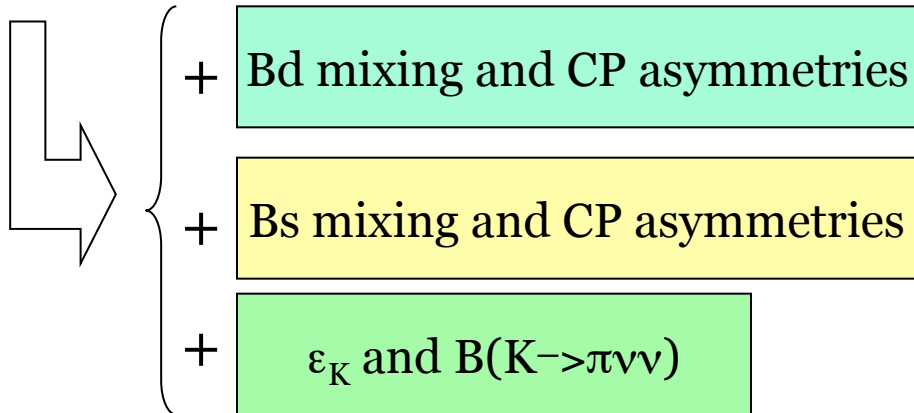


New Physics Search については不十分

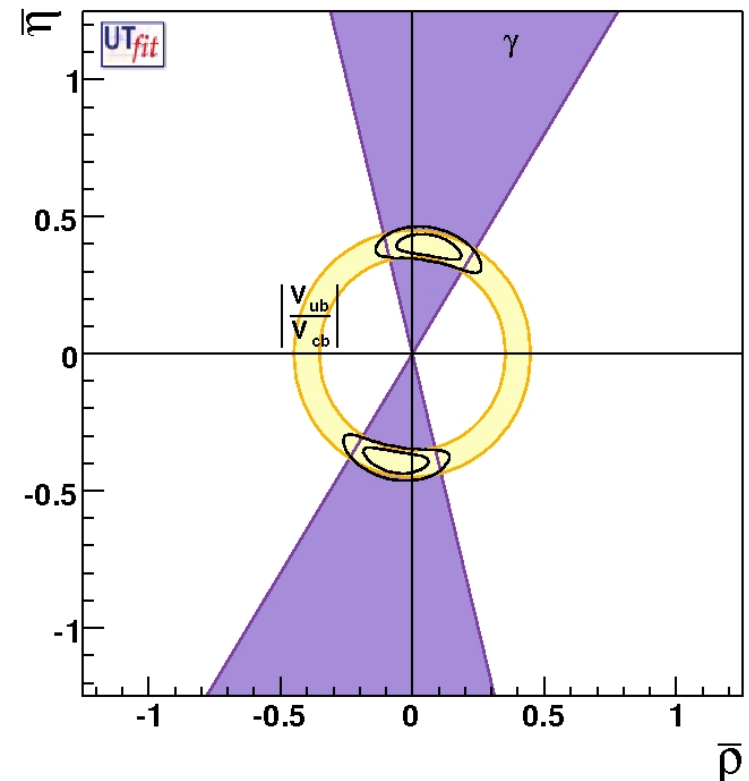
CKM fit はうまくいっているように見えるが、まだ数 10 % の New physics の寄与はあり得る。
Model-independent にループ効果を決めるには tree-level の parameter determination の精度を飛躍的にあげる必要がある。

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

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



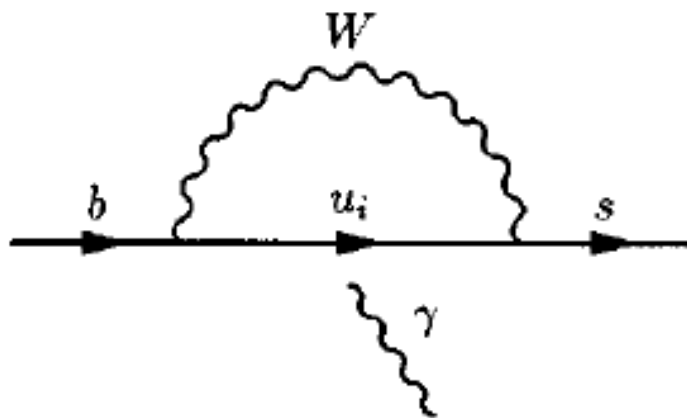
Fit by tree level processes



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。

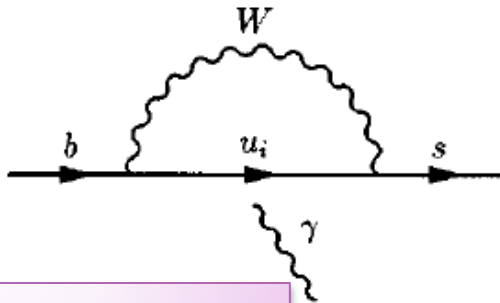
ペンギン物理

- 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。



CP非対称性

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

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。

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

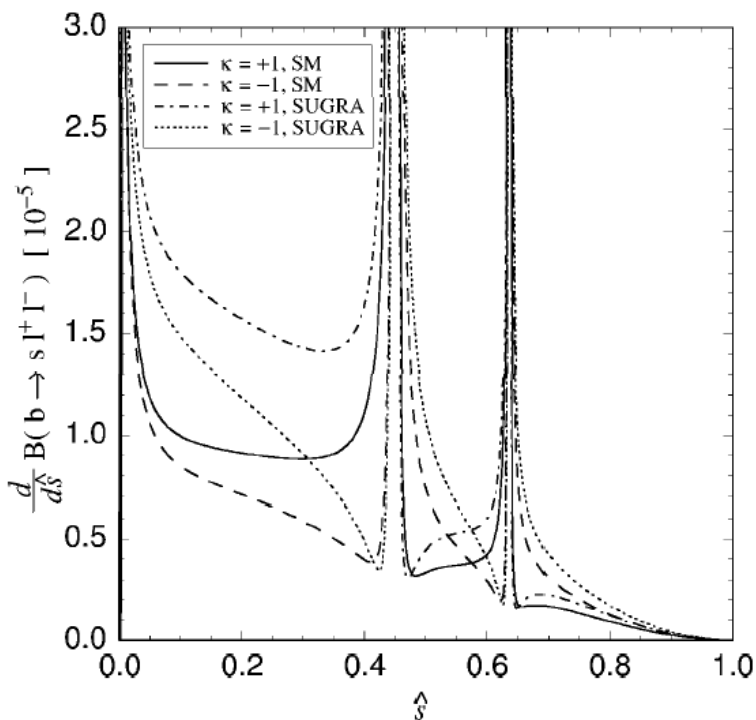
$$A_{CP}^{mix}(B \rightarrow K^* \gamma) = \frac{2\text{Im}(e^{-i\phi^M} C_7 C_7')}{|C_7|^2 + |C_7'|^2} \quad A_{CP} \sim \mathcal{O}(\text{ms/mb}) \text{ in SM}$$

(C'₇はC₇とは逆のカイラリティーのオペレータ)

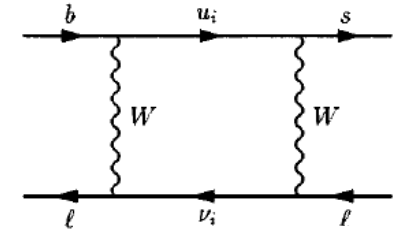
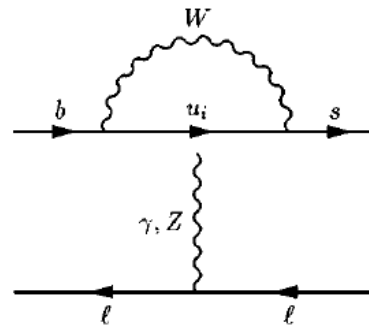
$b \rightarrow s l l$

- $b \rightarrow s l l$ や $B \rightarrow K^* l l$ 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。

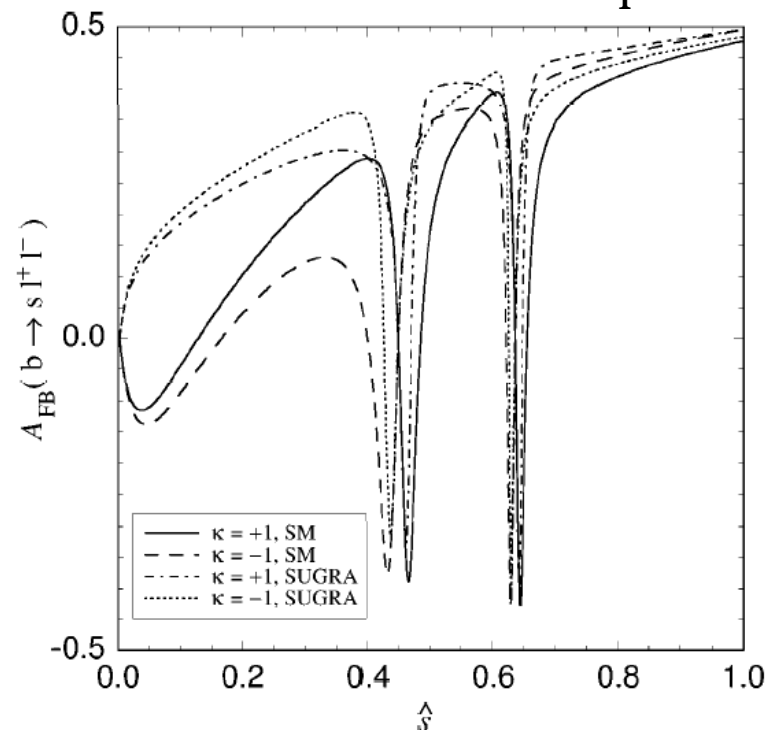
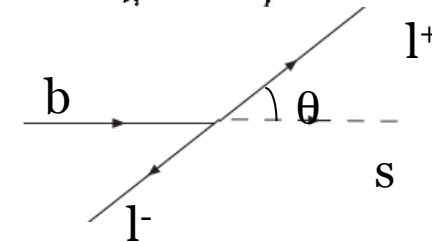
Lepton invariant mass 分布



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



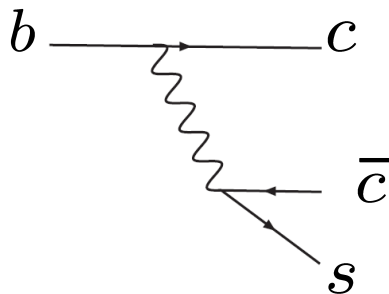
Forward-backward asymmetry



ハドロンのペンギン過程

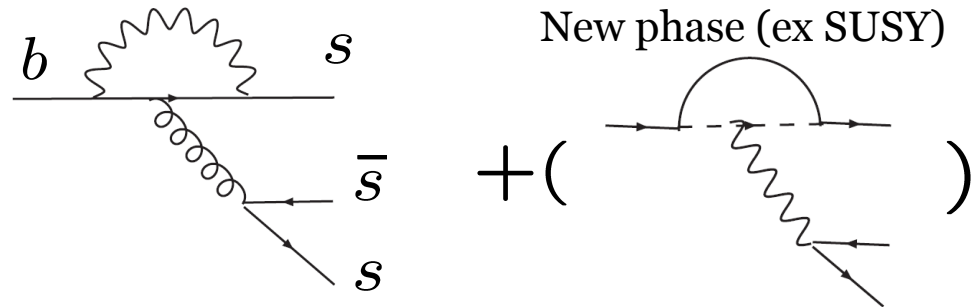
- 一般に $b \rightarrow sg$ などによるハドロンへの崩壊では、理論的不定性が大きいので新しい物理の効果を抜き出すのは大変。
- $B \rightarrow J/\psi Ks$ と $B \rightarrow \phi Ks$ の **time-dependent CP violation** の差は標準模型では良い精度で一致するはず。新しい物理を探る良い方法。

$B \rightarrow J/\psi Ks$



“tree”

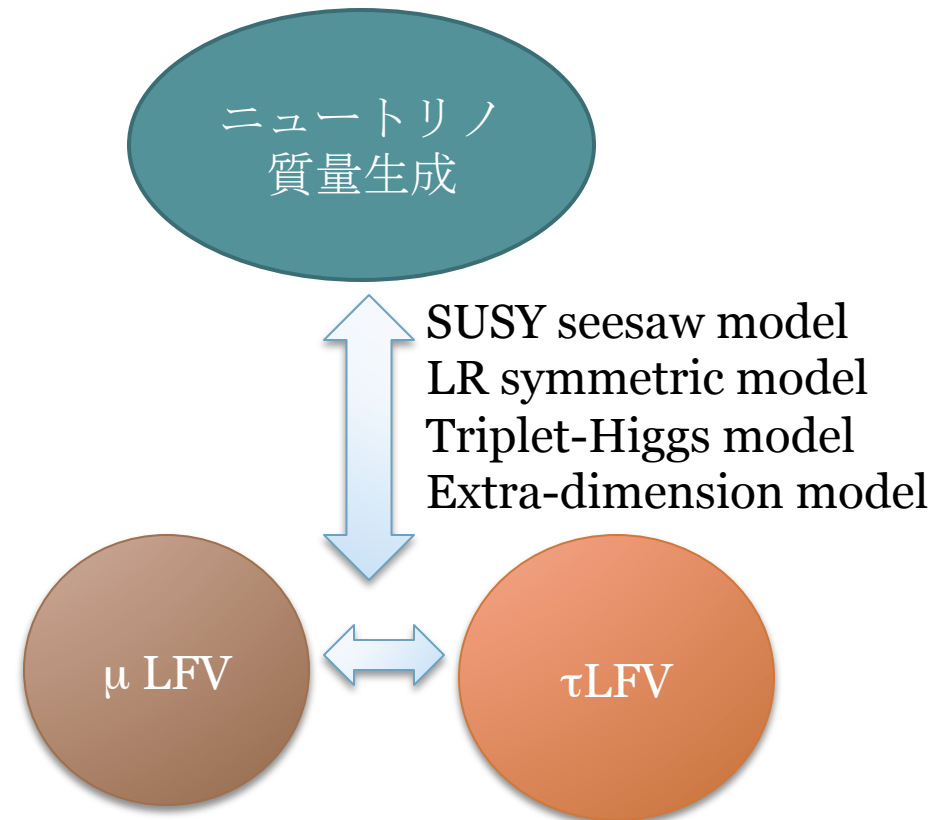
$B \rightarrow \phi Ks$



“penguin”

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 模型ではほとんど無視できるぐらいの分岐比。
- 超対称模型では実験の上限値の近くまで大きくなりうる。



Process	Current	Future
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$	1.2×10^{-11}	10^{-13} (MEG)
$\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$	1.0×10^{-12}	
$\mu^- A \rightarrow e^- A$ (Ti)	6.1×10^{-13}	
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。

1. Introduction: charm and New Physics

Charm transitions serve as excellent probes of New Physics

Unique access to up-quark sector

1. Processes forbidden in the Standard Model to all orders

Examples: $D^0 \rightarrow p^+ \pi^- \nu$

2. Processes forbidden in the Standard Model at tree level

Examples: $D^0 - \bar{D}^0$, $D^0 \rightarrow X \gamma$, $D \rightarrow X \nu \bar{\nu}$

3. Processes allowed in the Standard Model

Examples: 1. relations, valid in the SM, but not necessarily in general

CKM triangle relations

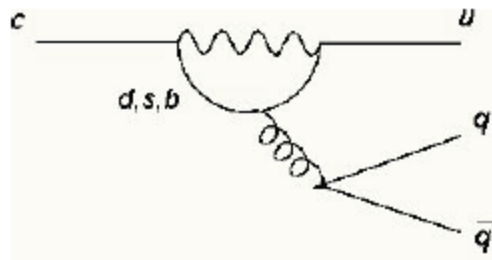
2. SM rates and uncertainties are known

Unique feature: not-so-heavy quark

A comment on the size of CPV

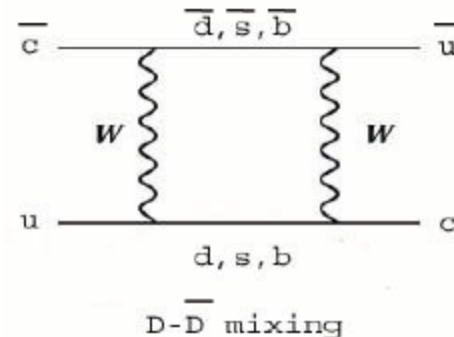
- Generic expectation is that CP-violating observables in the SM are small

$\Delta c = 1$ amplitudes



Penguin amplitude

$\Delta c = 2$ amplitudes



D- $\bar{D}$ mixing

- The Unitarity Triangle for charm:

$$V_{ud}V_{cd}^* + V_{us}V_{cs}^* + V_{ub}V_{cb}^* = 0$$

$$\sim \lambda \quad \sim \lambda \quad \sim \lambda^5$$

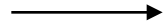
With b -quark contribution neglected:
only 2 generations contribute
⇒ **real 2x2 Cabibbo matrix**

Any CP-violating signal in the SM will be small, at most $O(V_{ub}V_{cb}^*/V_{us}V_{cs}^*) \sim 10^{-3}$
Thus, $O(1\%)$ CP-violating signal can provide a "smoking gun" signature of New Physics

Super B, experimental prospects

50-75 ab^{-1}

CKM parameters



Observable	Super Flavour Factory sensitivity
$\sin(2\beta) (J/\psi K^0)$	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%
$\bar{\eta}$	0.7–1.7%
$S(\phi K^0)$	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
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%
$\mathcal{B}(B \rightarrow \rho\gamma)/\mathcal{B}(B \rightarrow K^*\gamma)$	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%
$\mathcal{B}(B \rightarrow K\nu\bar{\nu})$	16–20%
$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\gamma)$	$2-8 \times 10^{-9}$
$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\mu\mu)$	$0.2-1 \times 10^{-9}$
$\mathcal{B}(\tau \rightarrow \mu\eta)$	$0.4-4 \times 10^{-9}$

b-s transition



B- $\rightarrow$ (D) $\tau\nu$



EW penguin



tau LFV



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→ $\mu\mu$

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)*

- $B_s \rightarrow K^* \mu\mu$ s_0 : 0.5 GeV²
- $B \rightarrow s \gamma$ $A_{\text{dir}}, A_{\text{mix}}$: 0.11
 A_Δ : 0.22
- $B_s \rightarrow \mu\mu$ BR.: 6×10^{-9} at 5 σ

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

New physics examples

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

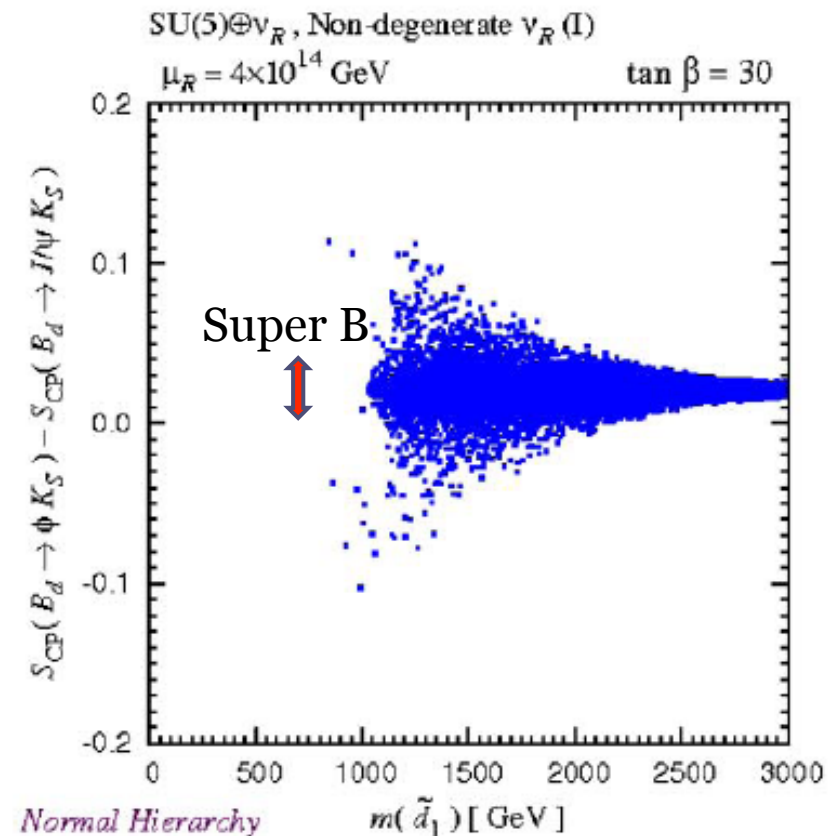
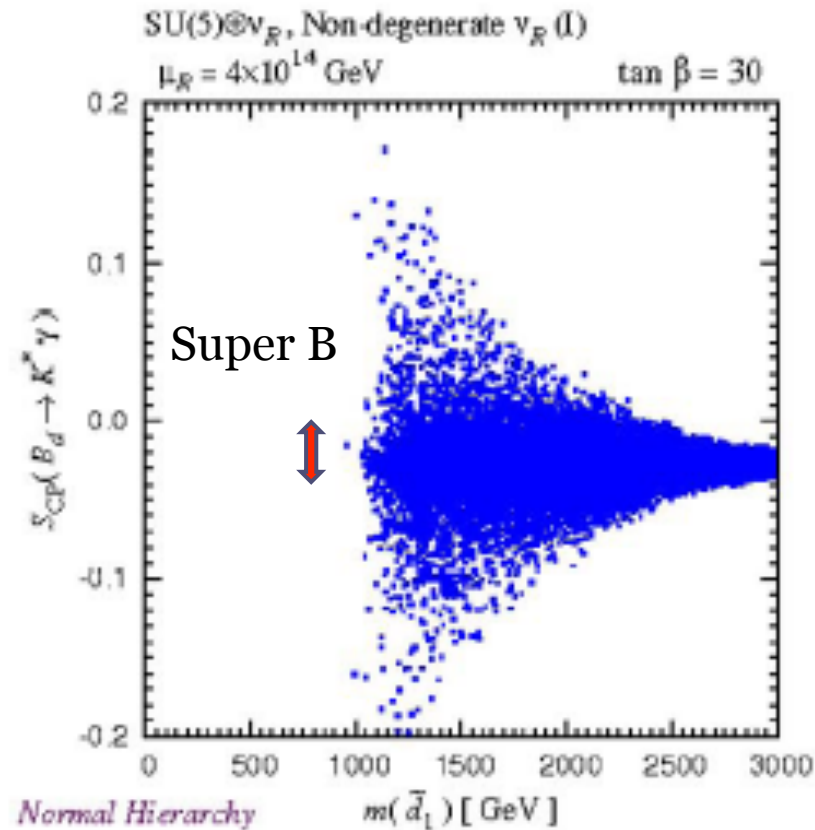
次世代Bファクトリーが動き出すころは LHCの初期の成果は出そろっているはず。

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。

$B_d \rightarrow K^* \gamma$ モードのTime-dependent CP asymmetry

$B \rightarrow \phi K_S$ と $B \rightarrow J/\psi K_S$ のTime-dependent CP asymmetry の差



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

新しいCPを破る位相の効果
 (T.Moroi, 2000)

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

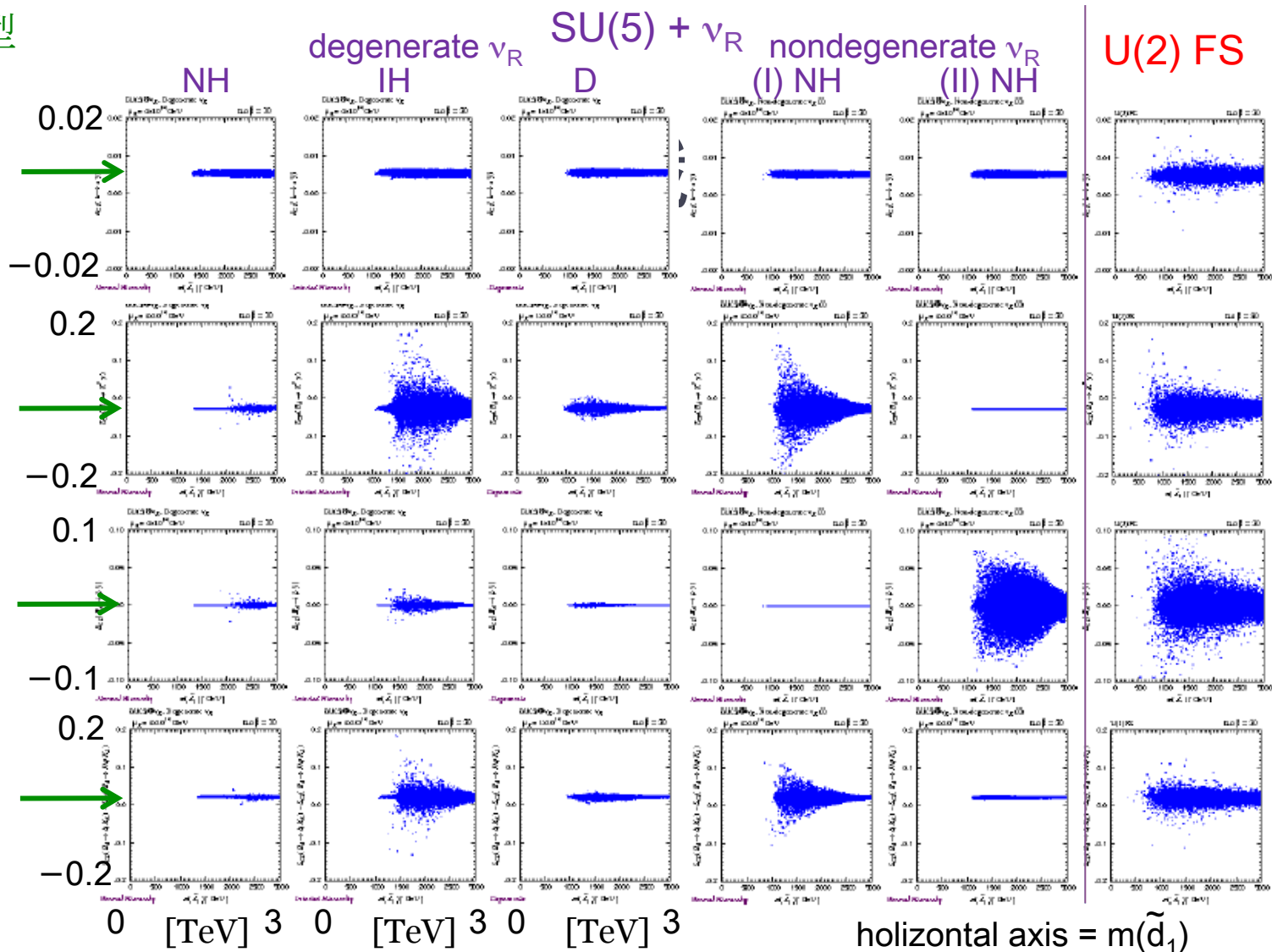
→ 標準模型

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

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

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

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

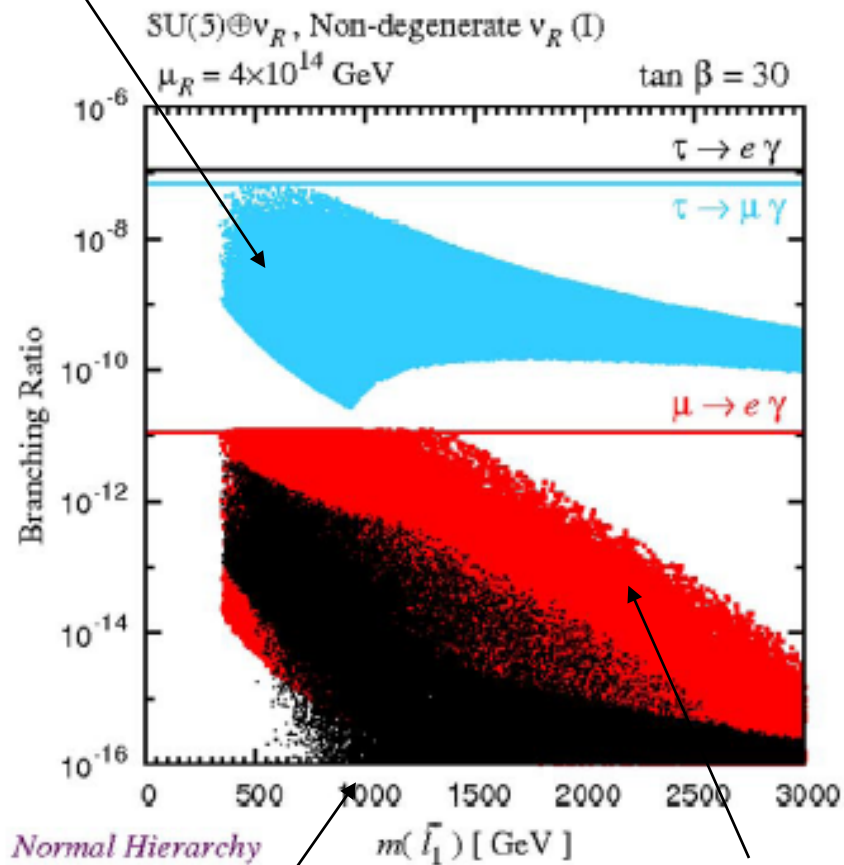


T.Goto,Y.O., T.Shindou,M.Tanaka, 2007

Lepton Flavor Violation

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

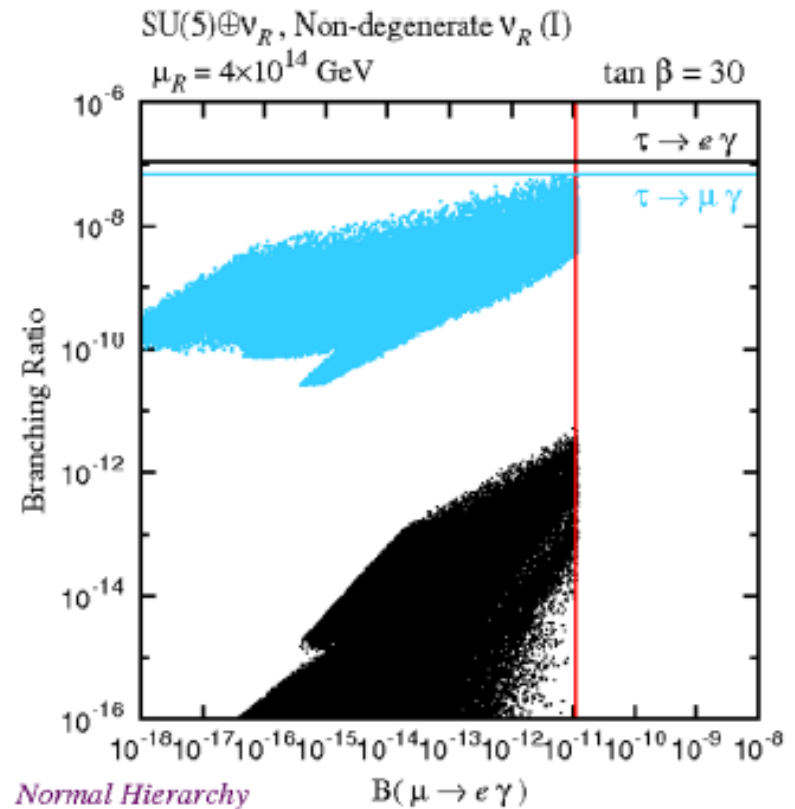
$\tau^- \rightarrow \mu^- \gamma$



$\tau^- \rightarrow e^- \gamma$

$\mu^- \rightarrow e^- \gamma$

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



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

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

✓ large deviation

• possible deviation

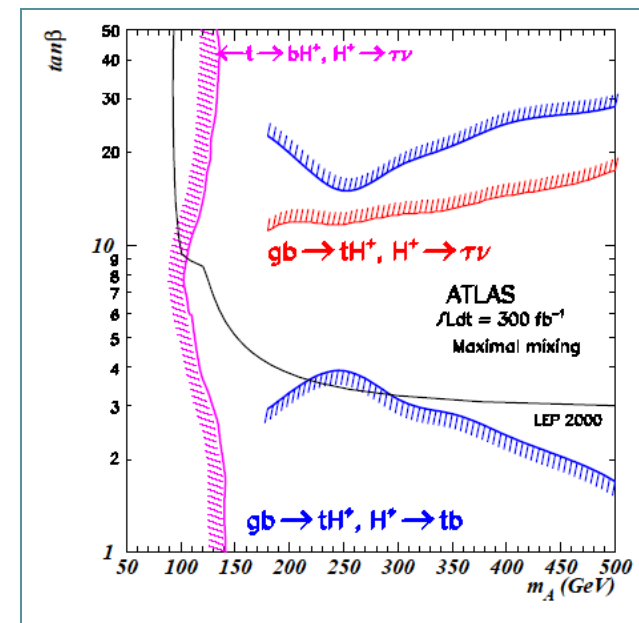
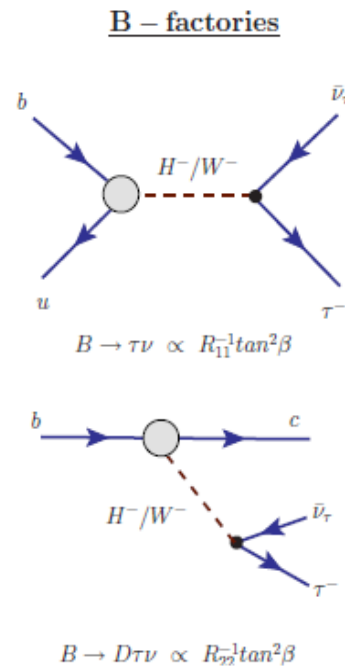
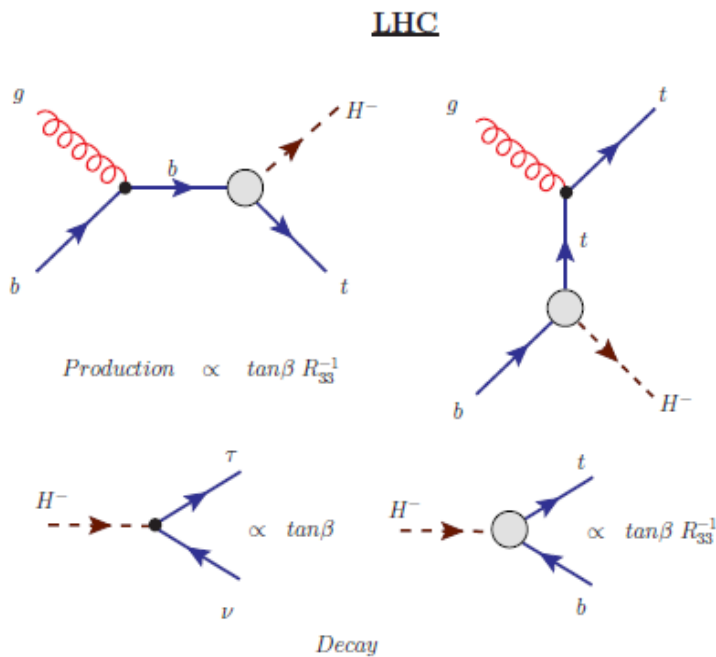
LFV

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

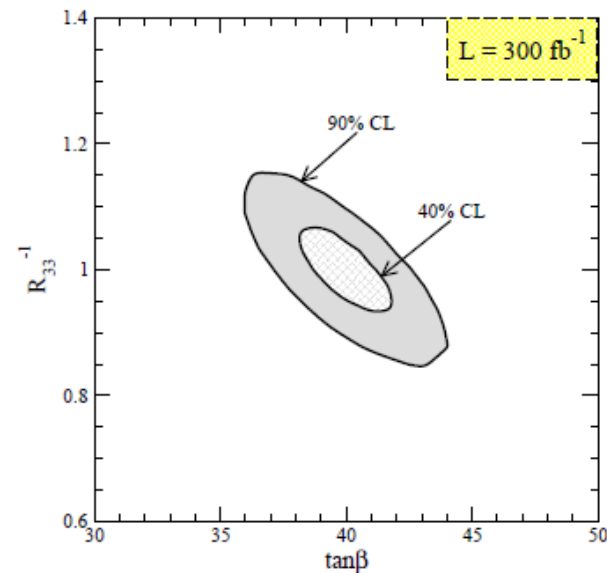
LHC で荷電ヒッグスボソンがみつかったら

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。

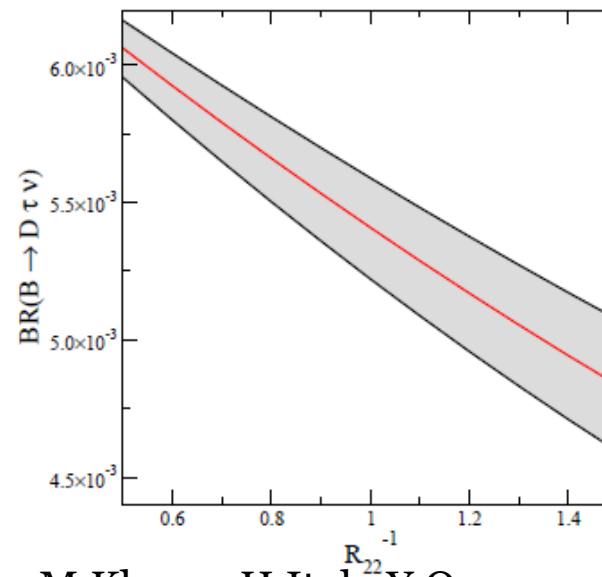
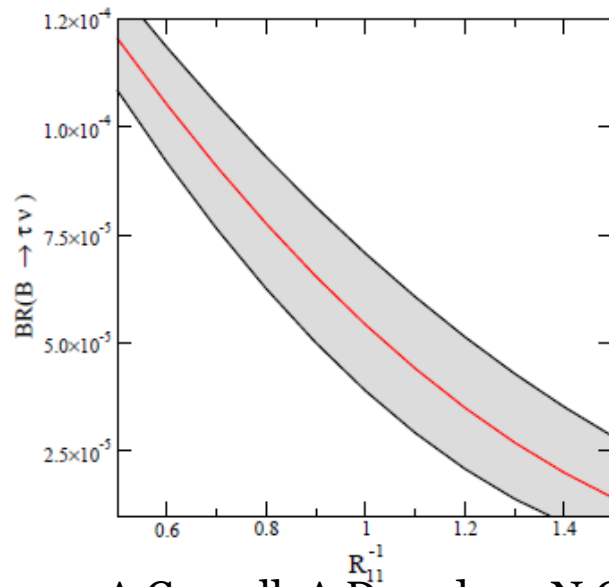


$$M_H = 300 \text{ GeV}$$

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

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

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

At ~10 TeV, UV completion theory

At $f \sim O(1) \text{ TeV}$

T-odd bosons: W_H, Z_H, ϕ_{ij} ,

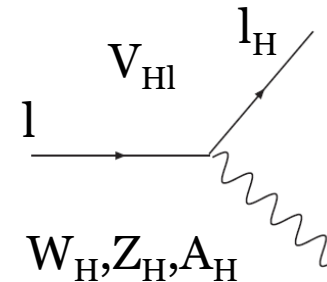
T-odd fermions: u_H, d_H, l_H

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。

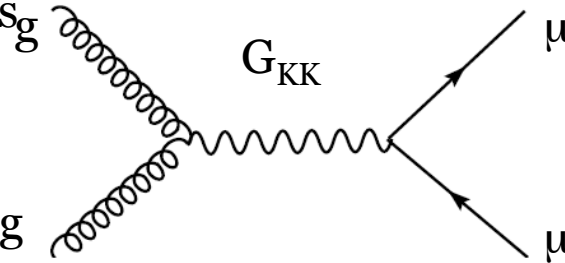
ratio	LHT	MSSM (dipole)	MSSM (Higgs)
$\frac{Br(\mu^- \rightarrow e^- e^+ e^-)}{Br(\mu \rightarrow e \gamma)}$	0.02...1	$\sim 6 \cdot 10^{-3}$	$\sim 6 \cdot 10^{-3}$
$\frac{Br(\tau^- \rightarrow e^- e^+ e^-)}{Br(\tau \rightarrow e \gamma)}$	0.04...0.4	$\sim 1 \cdot 10^{-2}$	$\sim 1 \cdot 10^{-2}$
$\frac{Br(\tau^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-)}{Br(\tau \rightarrow \mu \gamma)}$	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
$\frac{R(\mu \text{Ti} \rightarrow e \text{Ti})}{Br(\mu \rightarrow e \gamma)}$	$10^{-3} \dots 10^2$	$\sim 5 \cdot 10^{-3}$	0.08...0.15

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

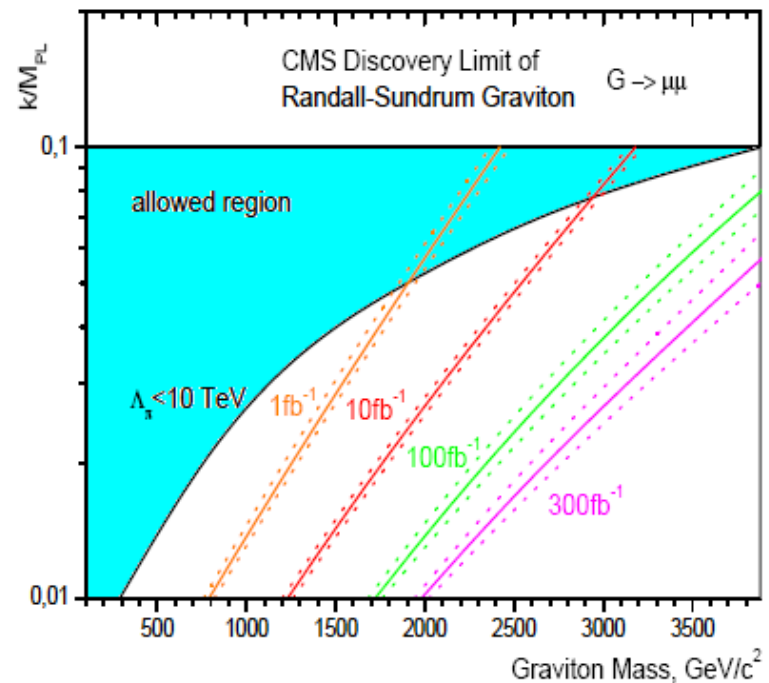
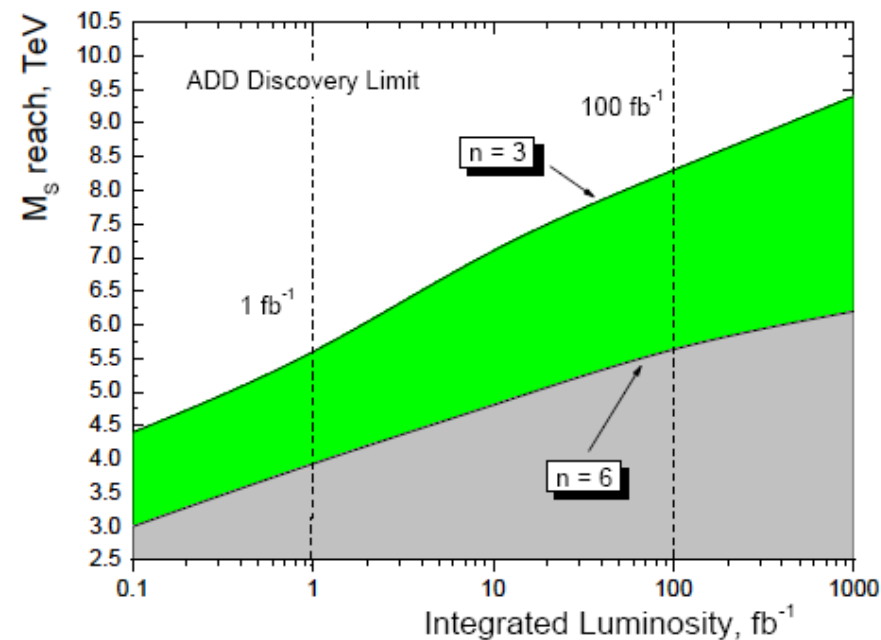
LHC で余次元が見つかったら

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.

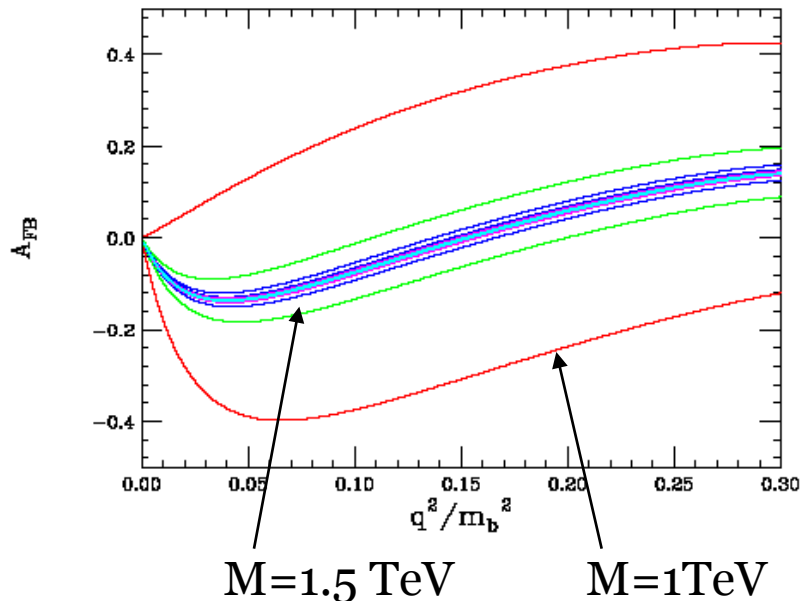
KK graviton exchange can induce tree-level FCNC coupling.

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

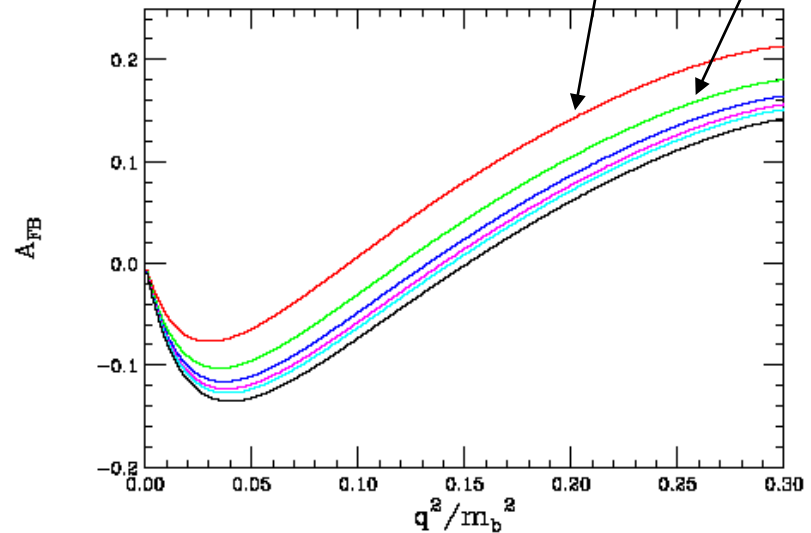
Differential branching ratio of $b \rightarrow sll$ processes

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 $\tan \beta$)	-	-	-	-
mSUGRA(large $\tan \beta$)	B_d mixing	-	$B \rightarrow (D)\tau\nu$ $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$	$B_s \rightarrow \mu\mu$ B_s mixing
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	$B \rightarrow \phi K_S$	$A_{CP}^{b \rightarrow s\gamma}, b \rightarrow s\ell^+\ell^-$	B_s mixing
KK graviton exchange	-	-	$b \rightarrow s\ell^+\ell^-$	-
Split fermions in large extra dimensions	B_d mixing	-	$b \rightarrow s\ell^+\ell^-$	$K^0\bar{K}^0$ mixing $D^0\bar{D}^0$ mixing
Bulk fermions in warped extra dimensions	B_d mixing	$B \rightarrow \phi K_S$	$b \rightarrow s\ell^+\ell^-$	B_s mixing $D^0\bar{D}^0$ mixing
Universal extra dimensions	-	-	$b \rightarrow s\ell^+\ell^-$ $b \rightarrow s\gamma$	$K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu}$

MFV**MFV****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。
- 現行の**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った。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。