

CPの破れと新物理学模型の展望

進藤哲央 (DESY[†])

2009年3月28日

立教大学、立教池袋中学・高校

小林誠氏・益川敏英氏ノーベル物理学賞受賞記念シンポジウム

「CPの破れとクォーク世代数予言の物理とその発展」

[†] 4月1日より工学院大学所属

小林益川理論と2つの予言

- 質量とフレーバー固有状態のずれに含まれるCP位相がK中間子系でのCPの破れの起源

$$\mathcal{L} = W^\mu \bar{u}_i \gamma_\mu \frac{1 - \gamma_5}{2} V_{ij} d_j$$

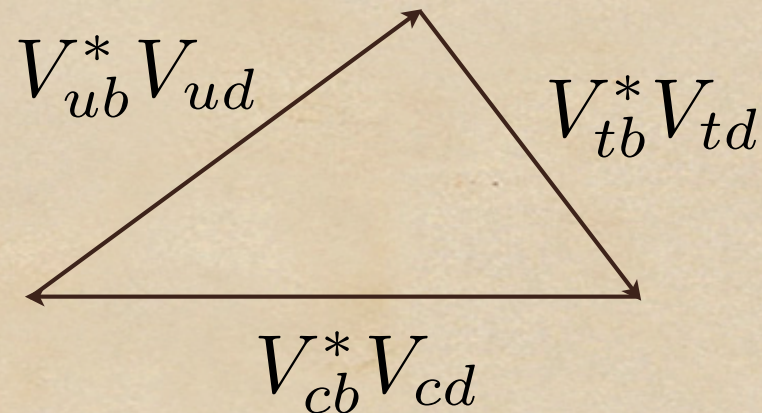
- クォークは3世代以上必要
- クォークが3世代のみ存在すると仮定
- クォークの質量が決まった場合、フレーバーに関する自由度は、3つの回転角と1つの位相
- K中間子系やB中間子系に現れる様々なCPの破れの起源は、1つのCP位相と関係がつく

ユニタリティーのチェック

CKM行列 V はユニタリー行列

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

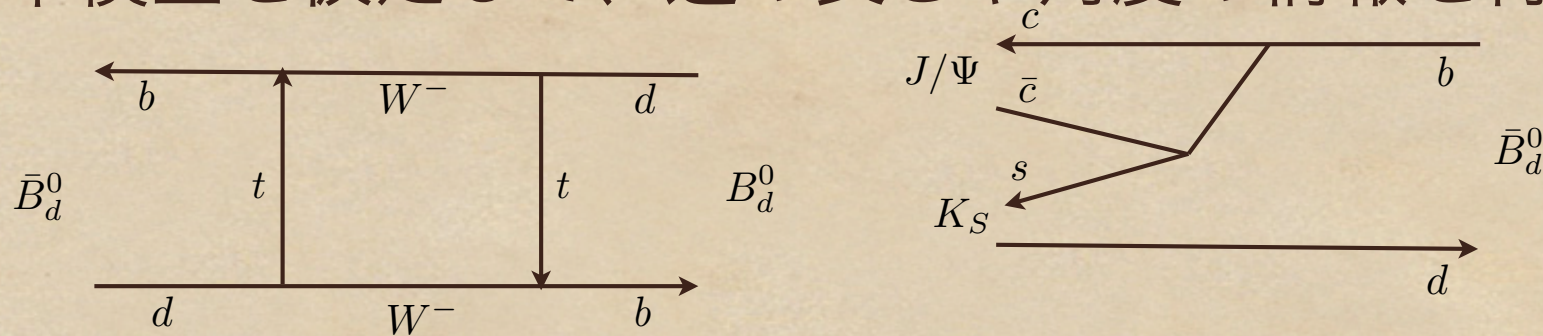
この条件式は複素平面上に三角形を描く



これを実験でチェックするためには、角度や
辺の長さの情報をいかに引き出すかが重要

標準模型の場合

標準模型を仮定して、辺の長さや角度の情報を得る



B-B混合 $\rightarrow \Delta m_d$

B_s - B_s 混合 $\rightarrow \Delta m_d/\Delta m_s$

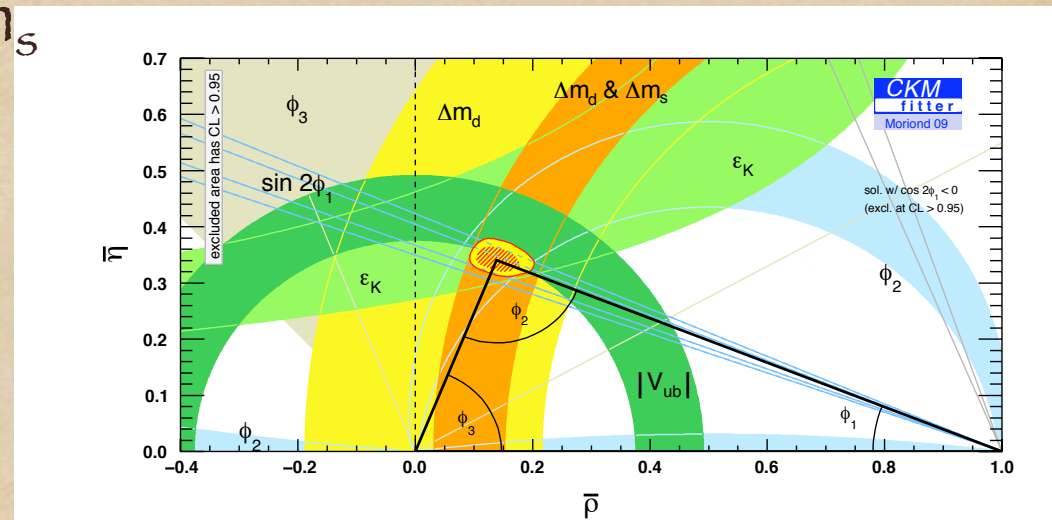
K-K混合 $\rightarrow \epsilon_K$

$B \rightarrow J/\psi K_s$ $\rightarrow \varphi_1$

$B \rightarrow \pi\pi, \rho\rho$ $\rightarrow \varphi_2$

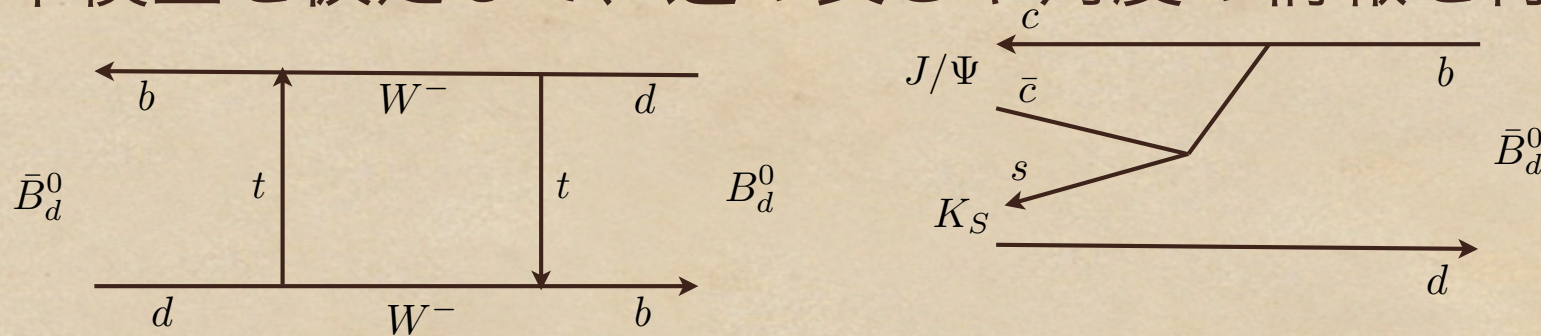
$B \rightarrow D^{(*)}K$ $\rightarrow \varphi_3$

Semileptonic $\rightarrow |V_{ub}/V_{cb}|$



標準模型の場合

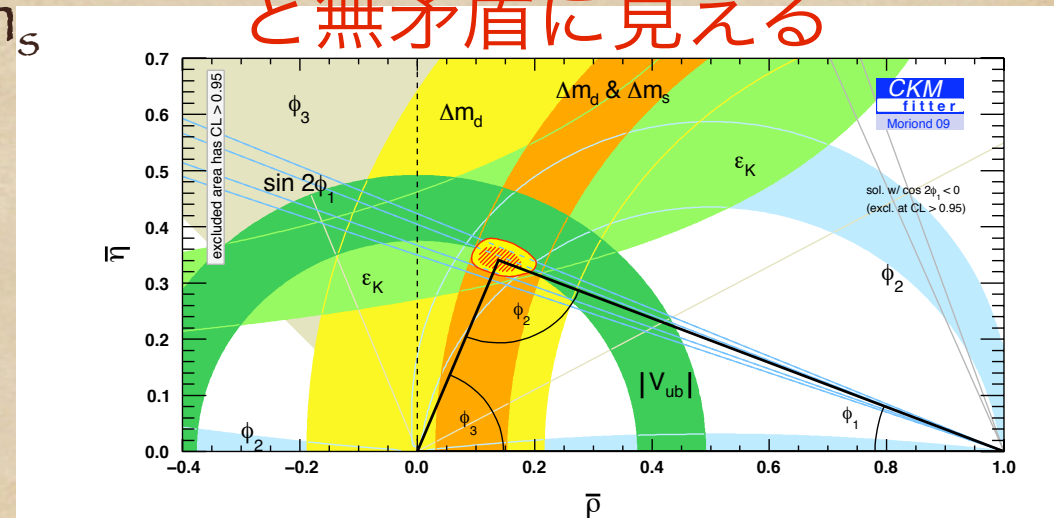
標準模型を仮定して、辺の長さや角度の情報を得る



現在の実験結果は標準模型

と無矛盾に見える

B-B混合	→	Δm_d
B_s - B_s 混合	→	$\Delta m_d/\Delta m_s$
K-K混合	→	ϵ_K
$B \rightarrow J/\psi K_s$	→	φ_1
$B \rightarrow \pi\pi, \rho\rho$	→	φ_2
$B \rightarrow D^{(*)}K$	→	φ_3
Semileptonic	→	$ V_{ub}/V_{cb} $



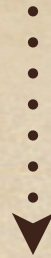
標準模型を超える

- 標準模型は、非常に多くの実験事実を矛盾なく説明できる(低エネルギー有効理論として確立)
- しかし...
 - Fine Tuning問題(ゲージ階層性問題)
 - 大統一理論への期待
 - ニュートリノ質量の存在
 - 宇宙論の示唆
 - ダークマター
 - バリオン数生成 → 新たなCPの破れ

標準模型を超える物理の存在が期待される

標準模型を超える

標準模型を超える理論



新しいフレーバーと
CPの物理

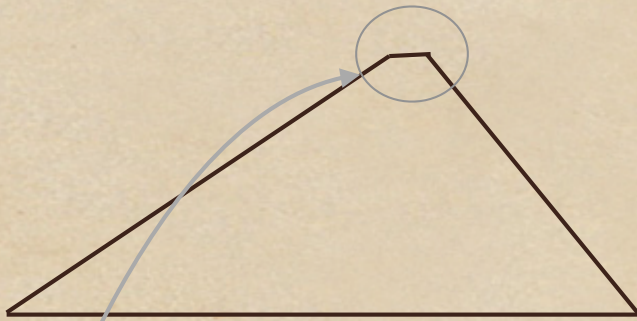


ユニタリティー三角形に影響

ユニタリティ三角形への影響

2つの可能性

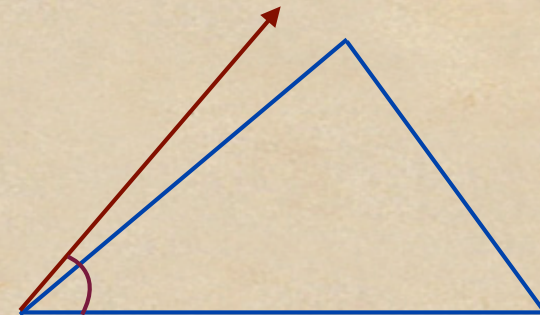
多角形化



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

精度を上げていくと
多角形が見える

複数の観測に矛盾



小林益川模型以外の起源

色々な観測量を比較す
ることでズレが見える

CKM行列@Tree Level

標準模型を超える物理の影響はループを通してやってくる

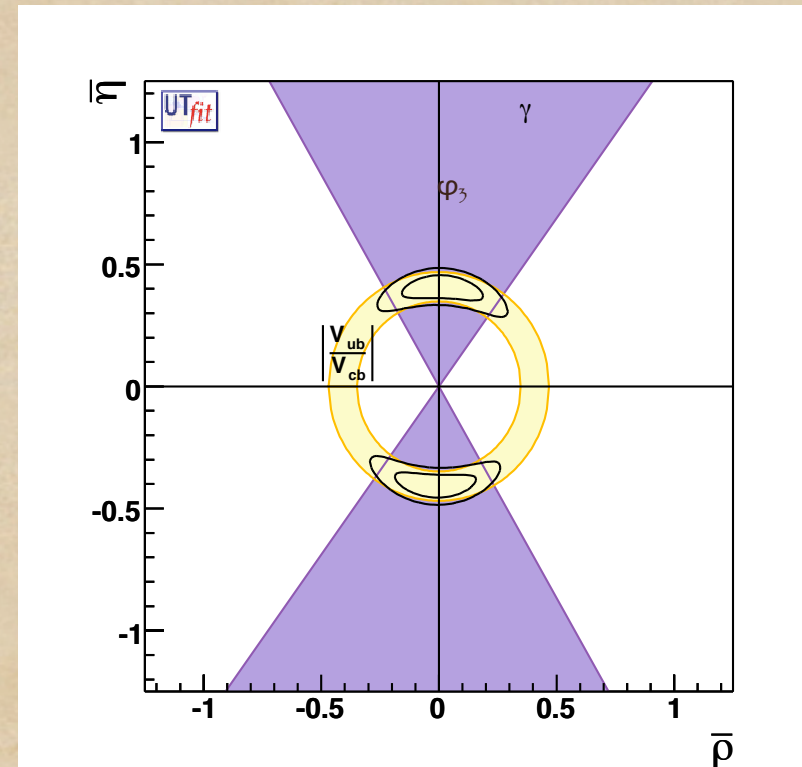
$|V_{ub}|, \varphi_3$

+ B_d 混合とそのCP

+ B_s 混合とそのCP

+ ε_K

標準模型を超える物理



φ_3 のように、標準模型のTree Levelで
決まる量を精密に測ることが重要

現在ズレが見えている可能性

● $\sin 2\varphi_1$ の標準模型と実験で測られたもののズレ。

- $B_K, \epsilon_K, \xi_s, \Delta m_s / \Delta m_d, |V_{cb}|$ (from lattice) $\rightarrow 0.87 \pm 0.09$
- $B_K, \epsilon_K, \xi_s, \Delta m_s / \Delta m_d, |V_{ub}| / |V_{cb}|, |V_{cb}| \rightarrow 0.78 \pm 0.04$
- $B \rightarrow J/\psi K_s \rightarrow 0.681 \pm 0.025$
- Clean Penguin modes $\rightarrow 0.58 \pm 0.06$

● $K^+\pi^-$ と $K^+\pi^0$ モードのDirect CP

- $ACP(K^+\pi^-) - ACP(K^+\pi^0) = 14.4 \pm 2.9\%$

● $B_s \rightarrow J/\psi \phi \dots 2.2\sigma$ のずれ (CDF, D0)

現在ズレが見えている可能性

● $\sin 2\varphi_1$ の標準模型と実験で測られたもののズレ。

- $B_K, \epsilon_K, \xi_s, \Delta m_s / \Delta m_d, |V_{cb}|$ (from lattice) $\rightarrow 0.87 \pm 0.09$
- $B_K, \epsilon_K, \xi_s, \Delta m_s / \Delta m_d, |V_{ub}| / |V_{cb}|, |V_{cb}| \rightarrow 0.78 \pm 0.04$
- $B \rightarrow J/\psi K_s \rightarrow 0.681 \pm 0.025$
- Clean Penguin modes $\rightarrow 0.58 \pm 0.06$

● $K^+\pi^-$ と $K^+\pi^0$ モードのDirect CP

- $ACP(K^+\pi^-) - ACP(K^+\pi^0) = 14.4 \pm 2.9\%$

● $B_s \rightarrow J/\psi \phi \dots 2.2\sigma$ のずれ (CDF, D0)

決め手となるほどのズレは残念ながらない

現在ズレが見えている可能性

● $\sin 2\varphi_1$ の標準模型と実験で測られたもののズレ。

- $B_K, \epsilon_K, \xi_s, \Delta m_s / \Delta m_d, |V_{cb}|$ (from lattice) $\rightarrow 0.87 \pm 0.09$
- $B_K, \epsilon_K, \xi_s, \Delta m_s / \Delta m_d, |V_{ub}| / |V_{cb}|, |V_{cb}| \rightarrow 0.78 \pm 0.04$
- $B \rightarrow J/\psi K_s \rightarrow 0.681 \pm 0.025$
- Clean Penguin modes $\rightarrow 0.58 \pm 0.06$

● $K^+\pi^-$ と $K^+\pi^0$ モードのDirect CP

- $ACP(K^+\pi^-) - ACP(K^+\pi^0) = 14.4 \pm 2.9\%$

● $B_s \rightarrow J/\psi \Phi \dots 2.2\sigma$ のずれ (CDF, D0)

決め手となるほどのズレは残念ながらない

しかし我々人類はLHCという強力なツールを持っている

現在ズレが見えている可能性

● $\sin 2\varphi_1$ の標準模型と実験で測られたもののズレ。

- $B_K, \epsilon_K, \xi_s, \Delta m_s / \Delta m_d, |V_{cb}|$ (from lattice) $\rightarrow 0.87 \pm 0.09$
- $B_K, \epsilon_K, \xi_s, \Delta m_s / \Delta m_d, |V_{ub}| / |V_{cb}|, |V_{cb}| \rightarrow 0.78 \pm 0.04$
- $B \rightarrow J/\psi K_s \rightarrow 0.681 \pm 0.025$
- Clean Penguin modes $\rightarrow 0.58 \pm 0.06$

● $K^+\pi^-$ と $K^+\pi^0$ モードのDirect CP

- $ACP(K^+\pi^-) - ACP(K^+\pi^0) = 14.4 \pm 2.9\%$

● $B_s \rightarrow J/\psi \phi \dots 2.2\sigma$ のずれ (CDF, D0)

決め手となるほどのズレは残念ながらない

しかし我々人類はLHCという強力なツールを持っている

標準模型を超える物理の直接的な早期発見が期待

現在ズレが見えている可能性

● $\sin 2\varphi_1$ の標準模型と実験で測られたもののズレ。

- $B_K, \epsilon_K, \xi_s, \Delta m_s / \Delta m_d, |V_{cb}|$ (from lattice) $\rightarrow 0.87 \pm 0.09$
- $B_K, \epsilon_K, \xi_s, \Delta m_s / \Delta m_d, |V_{ub}| / |V_{cb}|, |V_{cb}| \rightarrow 0.78 \pm 0.04$
- $B \rightarrow J/\psi K_s \rightarrow 0.681 \pm 0.025$
- Clean Penguin modes $\rightarrow 0.58 \pm 0.06$

● $K^+\pi^-$ と $K^+\pi^0$ モードのDirect CP

- $ACP(K^+\pi^-) - ACP(K^+\pi^0) = 14.4 \pm 2.9\%$

● $B_s \rightarrow J/\psi \Phi \dots 2.2\sigma$ のずれ (CDF, D0)

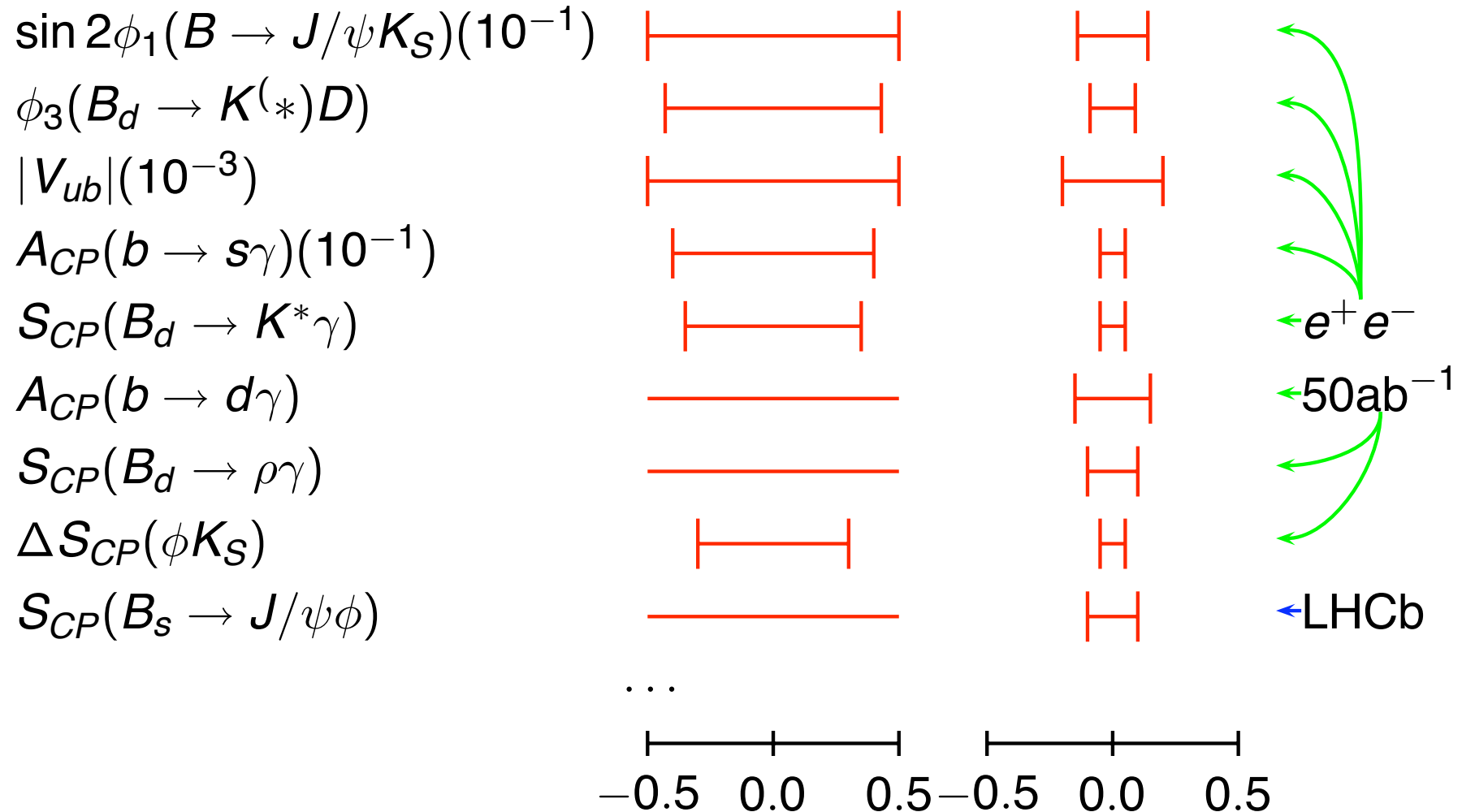
決め手となるほどのズレは残念ながらない

しかし我々人類はLHCという強力なツールを持っている

標準模型を超える物理の直接的な早期発見が期待

新粒子が発見されると、微妙なズレに対する見方が変わる

現在と将来のSensitivity



4世代模型

- 非常に単純な標準模型の拡張

see e.g. A. Soni et al, arXiv:0807.1971

- 第4世代のクォーク (t' , b') を導入 →

- CKM行列は 4×4

- 6個の回転角と3個のCP位相が存在

- $m_{t'} \approx 400 - 600 \text{ GeV}$

- 特徴

- $B_s - B_s, b \rightarrow s$ のCPへは t' が支配的 (t の寄与が落ちる)

- $B_d - B_d, b \rightarrow d$ では t が支配的 (V_{td} の位相)

- 電弱ペンギンの寄与がdecoupleしない!!

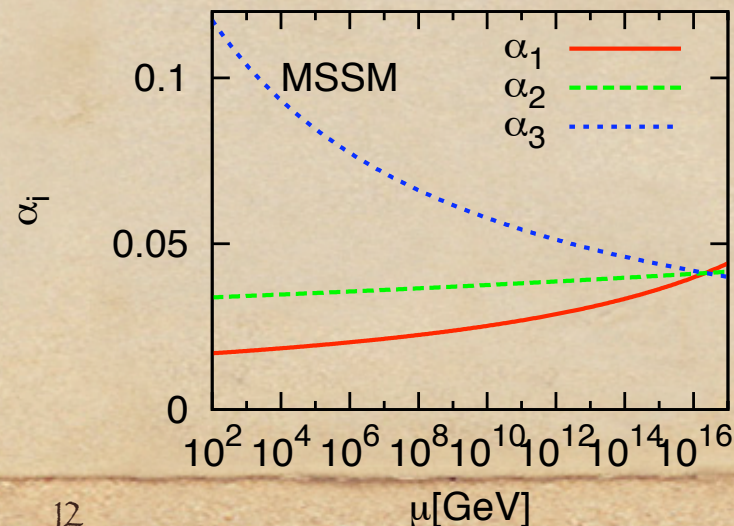
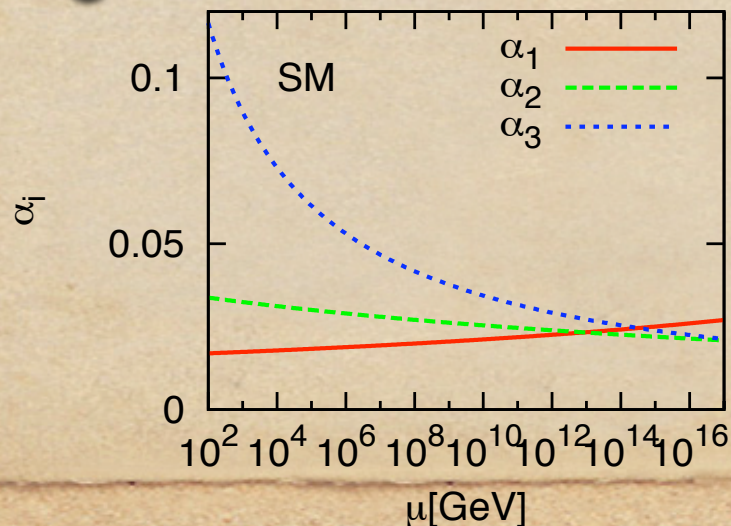
$$\text{ループ関数: } C_0 = \frac{x}{8} \left[\frac{x-6}{x-1} + \frac{3x+2}{(x-1)^2} \ln x \right] \quad x = m_{t'}/m_W$$

$B \rightarrow K |^+|^-, K \nu \nu$ 等に大きな寄与が期待

超対称性模型

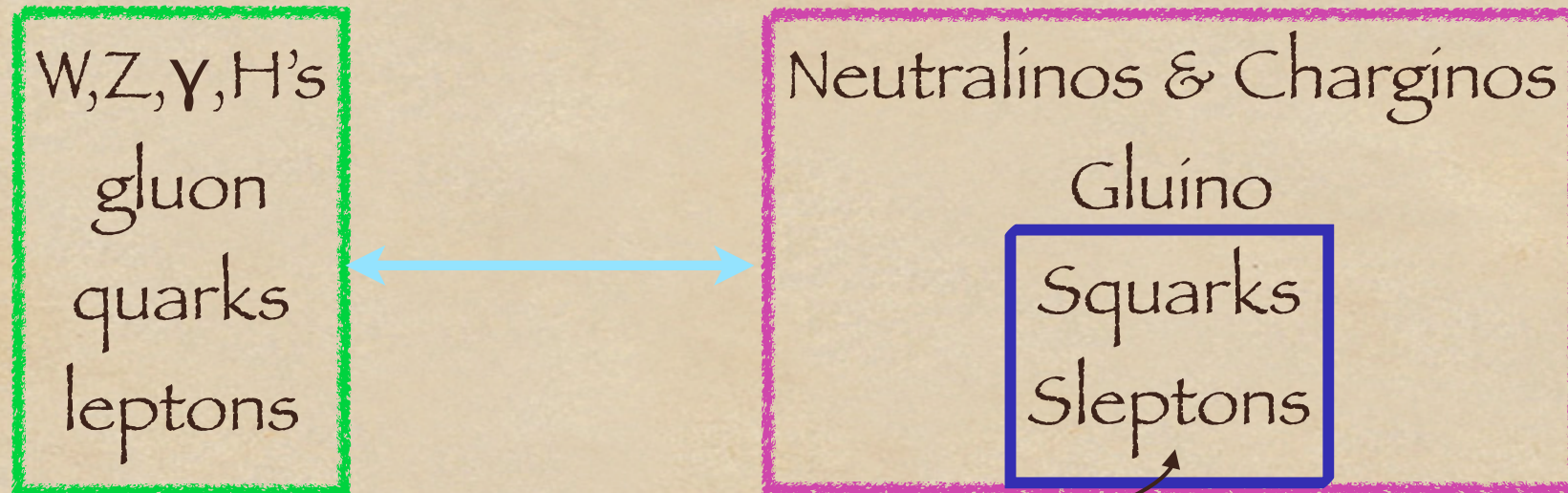
超対称性模型は、標準模型を超える物理の非常に魅力的な候補の一つである。

- Fine Tuning問題の解になる可能性がある
- 軽いHiggsが预言される ($< 120\text{GeV}$)
- Dark Matterの候補が理論に含まれている
- 大統一理論と相性がよい



超対称性模型とフレーバー物理

標準模型の粒子に超対称性粒子がパートナーとして存在



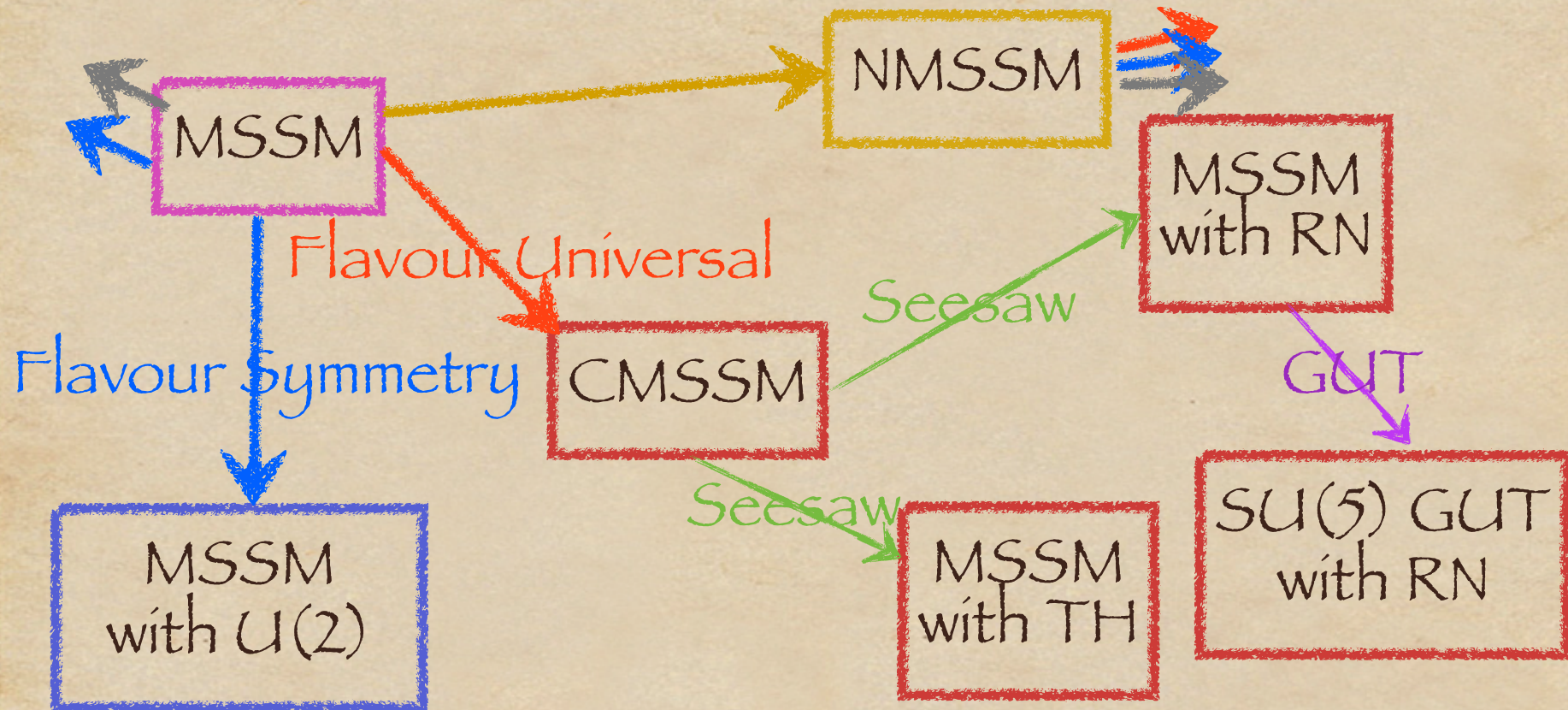
新しいフレーバー構造

超対称性の破れの構造 (Universal, FS, etc)

途中のスケールの物理, GUT, Seesaw, etc)

TeVスケールでのフレーバー構造

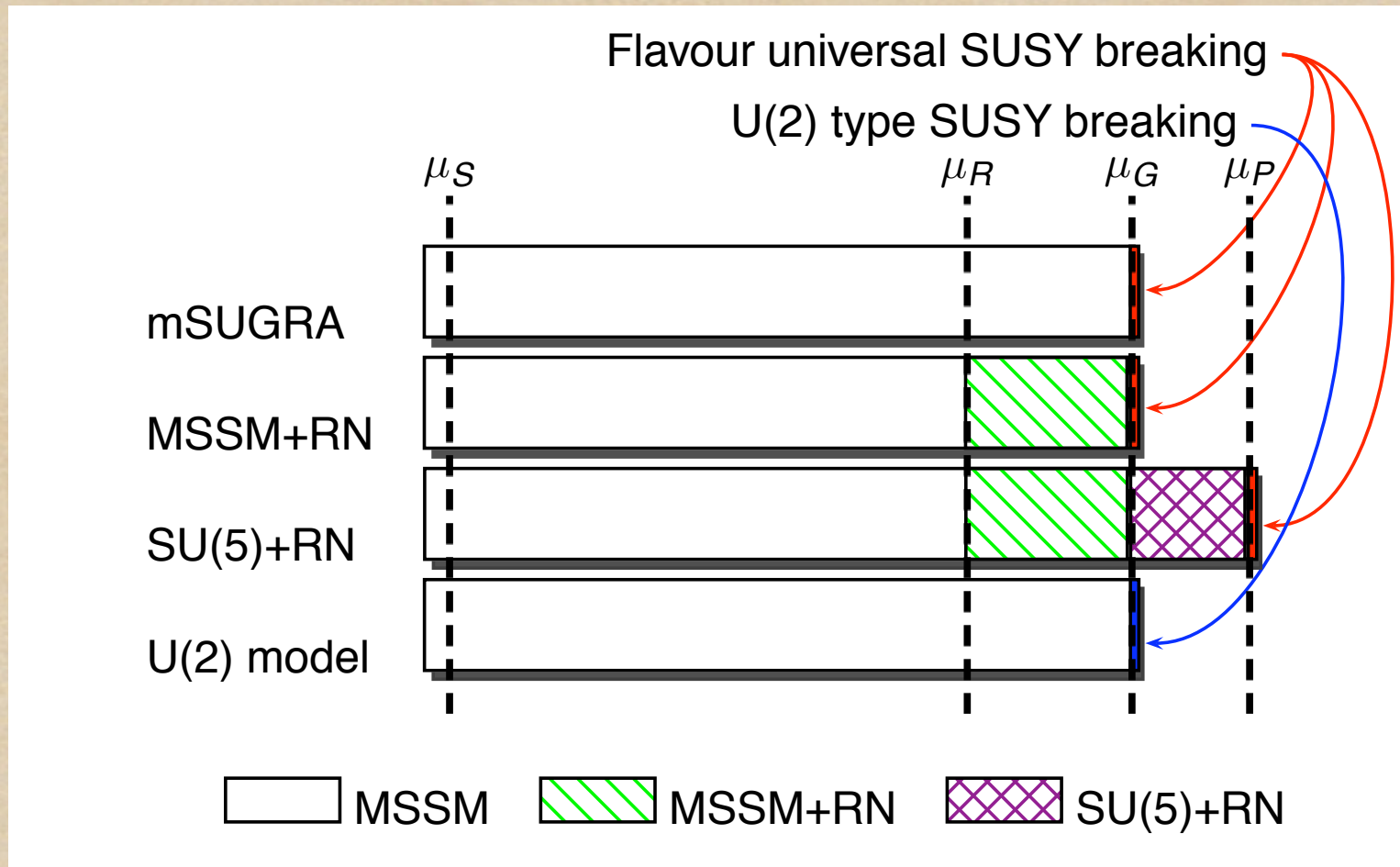
色々な超対称性フレイバーモデルの例



MSSMはパラメータの数が非常に多いが
その領域の多くはすでに死んでいる

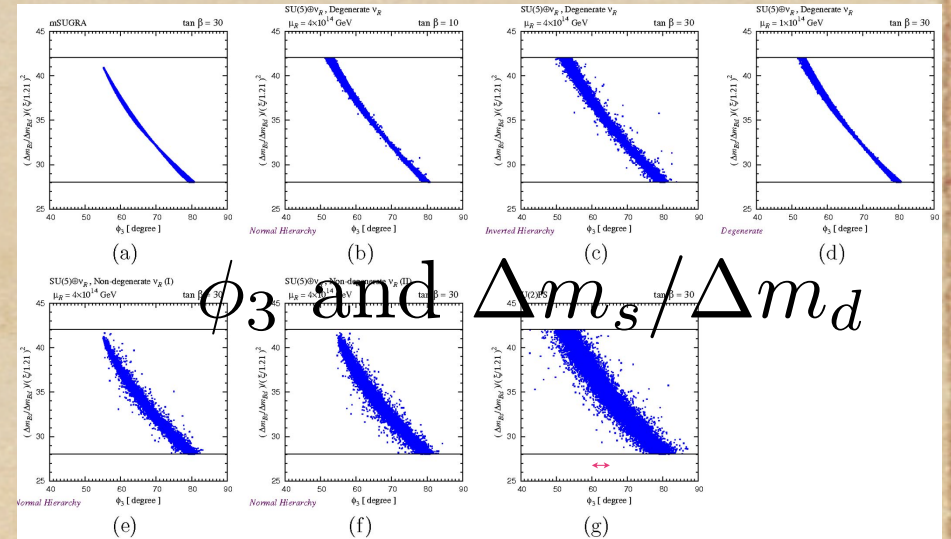
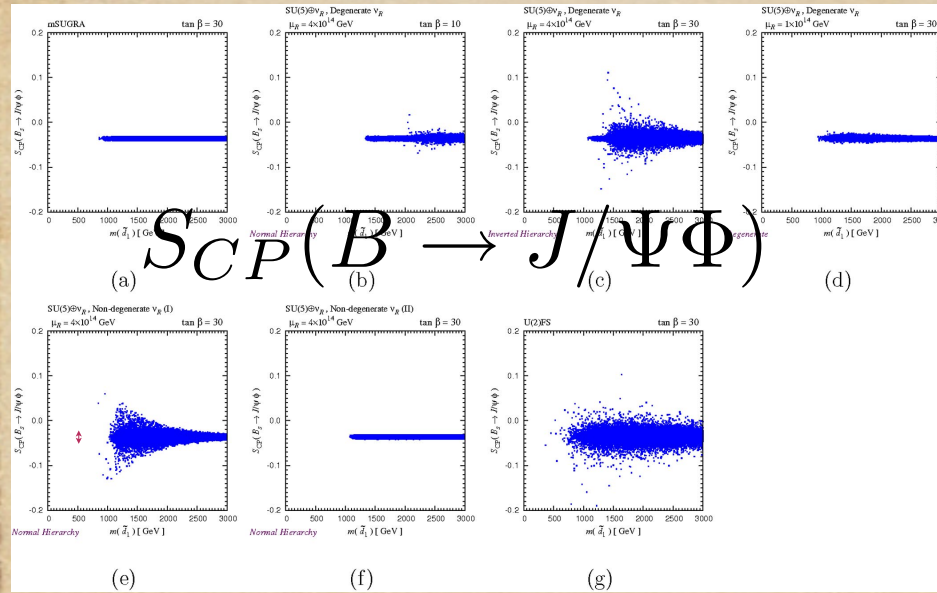
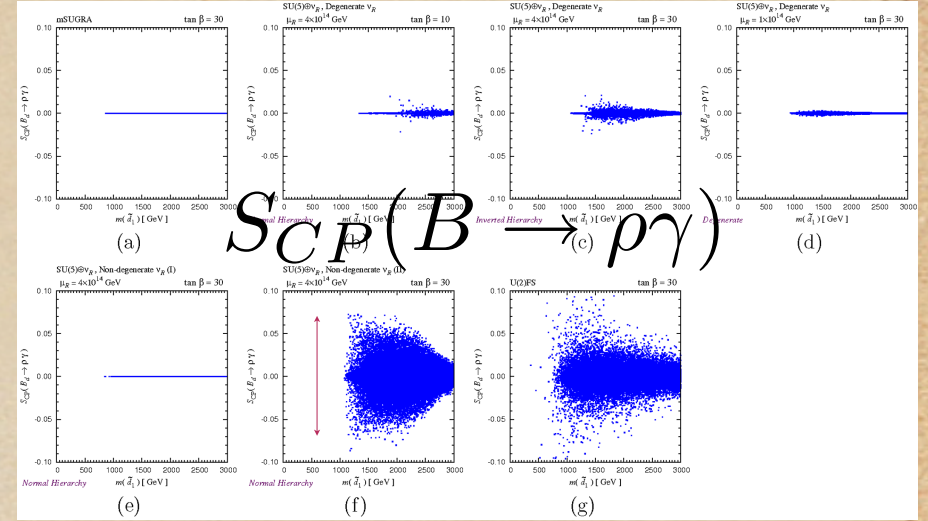
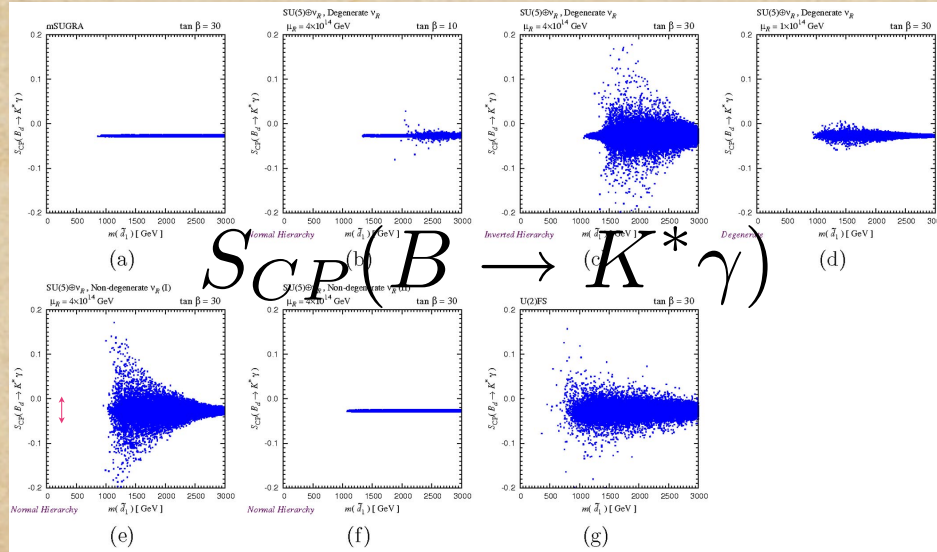
フレイバー構造を制限する理論等が存在すると期待

境界条件と途中のスケールの例



模型によって、フレーバーシグナルに色々な
パターンが生じ得る

シグナルパターンの例



T.Goto, Y. Okada, T.S. and M. Tanaka, PRD77, 095010

標準模型からのズレのパターン (I)

	$A_{CP}(s\gamma)$	$S_{CP}(K^*\gamma)$	$A_{CP}(d\gamma)$	$S_{CP}(\rho\gamma)$
mSUGRA	~	~	~	~
SU(5)RN deg	~	+	~	+
SU(5)RN non-deg (I)	~	++	~	~
SU(5)RN non-deg (II)	~	~	~	++
U(2) FS	++	++	~	++

+: possible deviation ++: possible large deviation

標準模型からのズレのパターン (II)

	$\Delta S_{CP}(\phi K_S)$	$S_{CP}(J/\Psi\Phi)$	$\Delta\phi_3$
mSUGRA	~	~	~
SU(5)RN deg	+	+	~
SU(5)RN non-deg (I)	++	++	+
SU(5)RN non-deg (II)	~	~	+
U(2) FS	++	++	+

+: possible deviation ++: possible large deviation

まとめーCPの破れをテコにして

何故CPやフレーバーの物理に注目するか？

● 歴史的Lesson

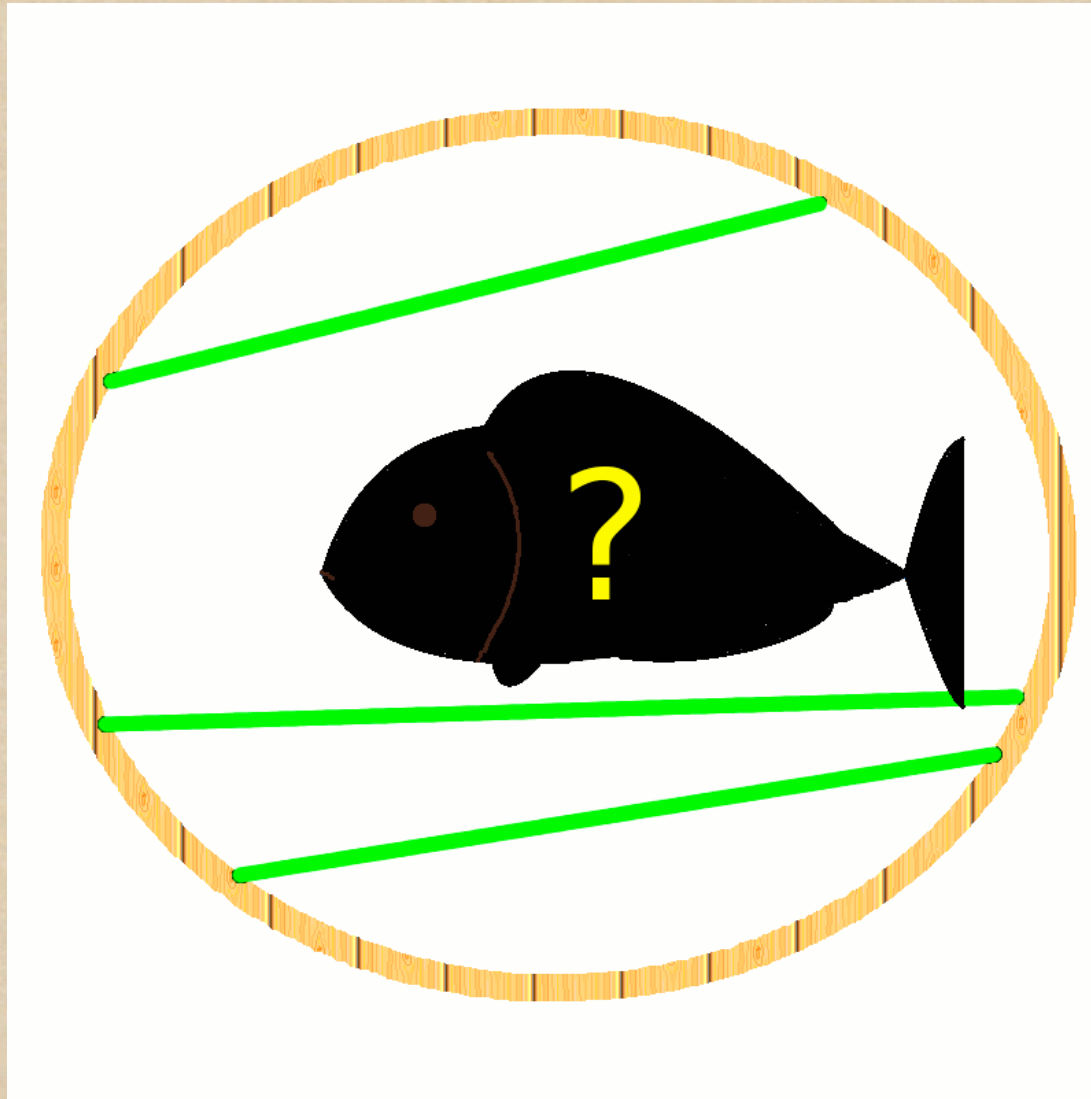
- BやKシステムでのCPの破れは、実はCKM行列の1つの位相が起源だった → 互いに相関
- 低エネルギースケールの知識から、より基本的な理論の情報が引き出せた(3世代目の存在)
- 標準模型を超える物理が直接発見されると期待
 - さらにCP位相やフレーバーを詳しく調べる
 - より高エネルギースケールでの物理の片鱗が垣間見えるかもしれない

まとめ — NP fishをつかまえる

まとめ — NP fishをつかまえる

現在

まとめ — NP fishをつかまえる



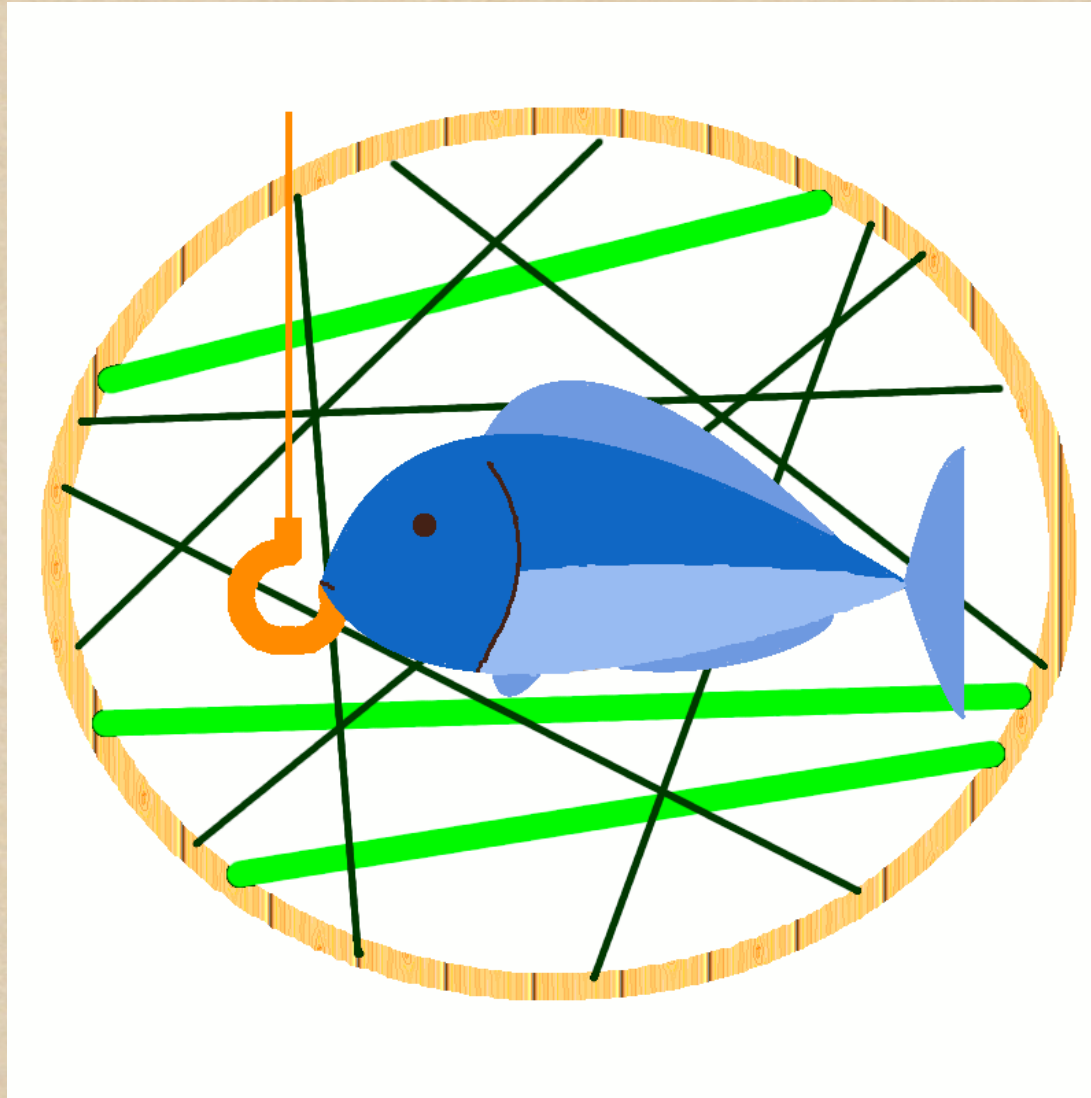
現在

まとめ — NP fishをつかまえる

まとめ — NP fishをつかまえる

将来

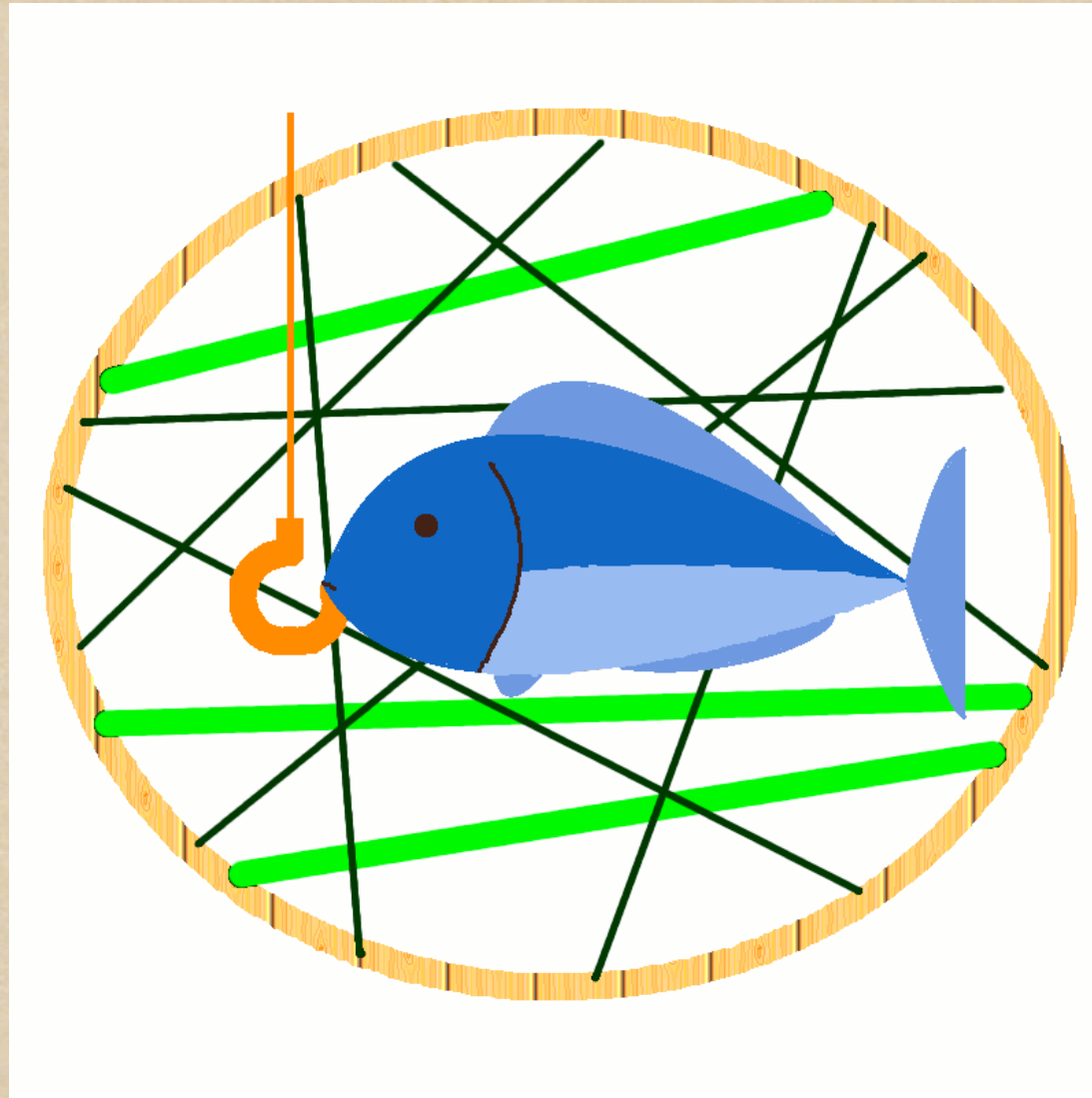
まとめ — NP fishをつかまえる



将来

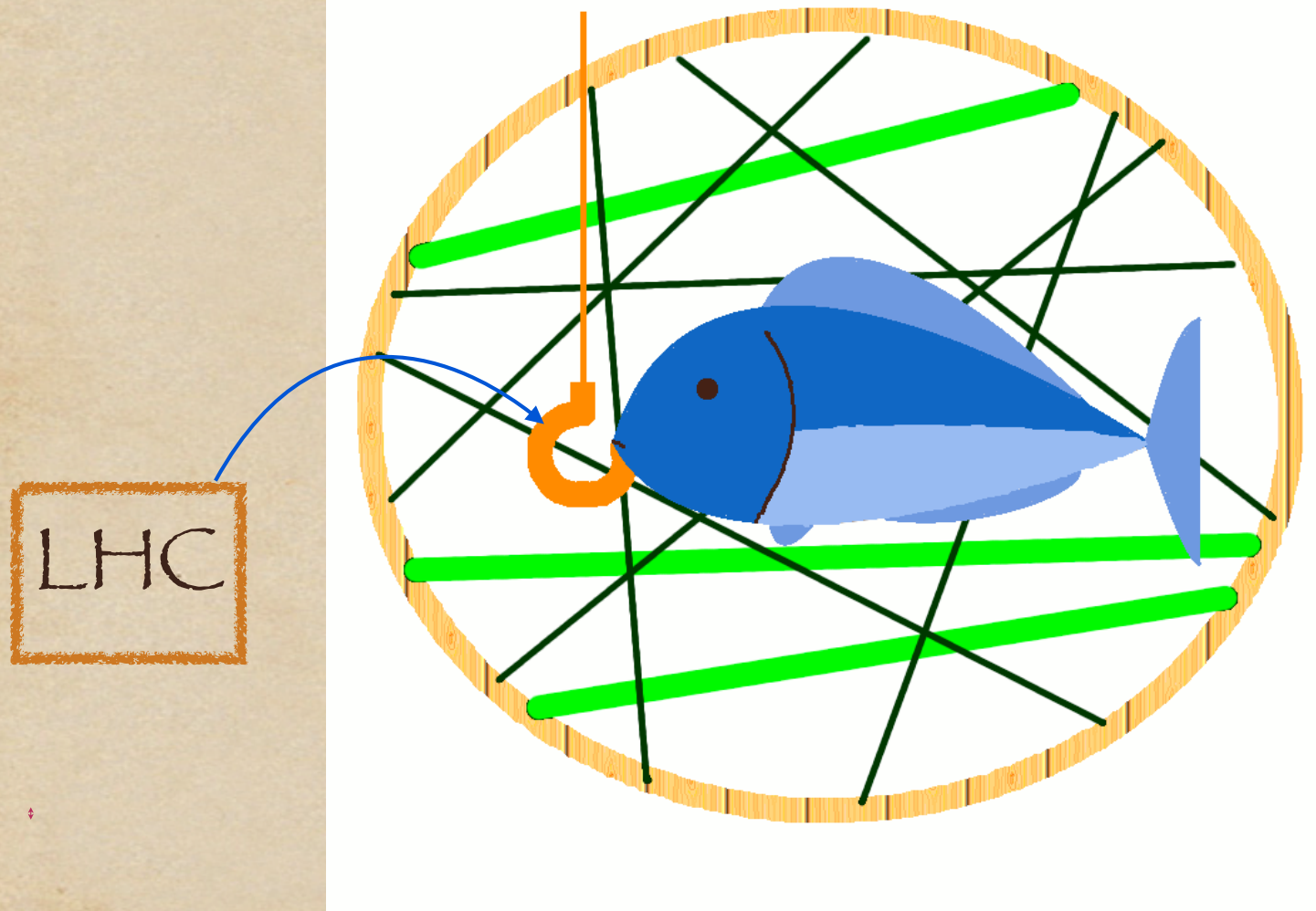
まとめ — NP fishをつかまえる

LHC



将来

まとめ — NP fishをつかまえる



将来