

質量起源と超対称性の 物理



Towards a Summary

日笠健一(東北大)

2004.3.9

第2回特定領域研究会

Wide-ranging subjects

- Energy Frontier: Tevatron collider
- Luminosity/Intensity Frontier:
 - B
 - K
 - τ
- Detector R&D
- Theories

金さんの要望

- B K τ t W Z 実験データからの超対称性への制限
- (特定領域内の) 各分野間の関連・連携

至難の業！

- 後半2年間の課題
- むずかしさ(複雑さ)はどこにあるか？

領域のキーワード

フレーバー(世代)構造 と対称性の破れ

Standard Model



既知の粒子

gauge bosons



photon



Z-boson



gluon



W-boson

quarks



up



down



charm



strange

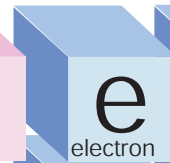


top



bottom

leptons



electron



e-neutrino



muon



mu-neutrino



tau



tau-neutrino

ゲージ対称性

- 局所対称性：非常に大きな自由度
 - 時空の各点においてそれぞれ勝手な変換
- 相互作用の形に大きな制約
 - + くりこみ可能性
- 相互作用の普遍性
 - 1つの結合定数ですべて決定される
 - 粒子の「電荷」(ゲージ群の表現)が同じであれば相互作用に差はない

ゲージ相互作用の普遍性

- 電磁相互作用
 - 電荷が同じなら電磁力は等しい
- 強い相互作用
 - フレーバーによらずクォークの強い力は等しい
- 弱い相互作用
 - クォークとレプトンの弱い力は等しい
 - 但し up to CKM mixing: フレーバー混合

ゲージ対称性の破れ

- ゲージ対称性を破る物理量
 - ゲージボソン (W^\pm, Z^0) の質量
 - クォーク・レプトンの質量
- ラグランジアンがゲージ対称性を破ると理論の整合性がくずれる
 - 高エネルギーで散乱振幅がユニタリ性を破る
- 破れは「自発的」である必要
 - ラグランジアンは対称, 真空が非対称

ゲージ対称性の破れの起源

- 実験的に確認されている相互作用：
 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ のゲージ相互作用のみ
- $SU(2) \times U(1)$ の破れを起こすためにはこれ以外の
未知の相互作用が必要

gauge bosons



photon



gluon

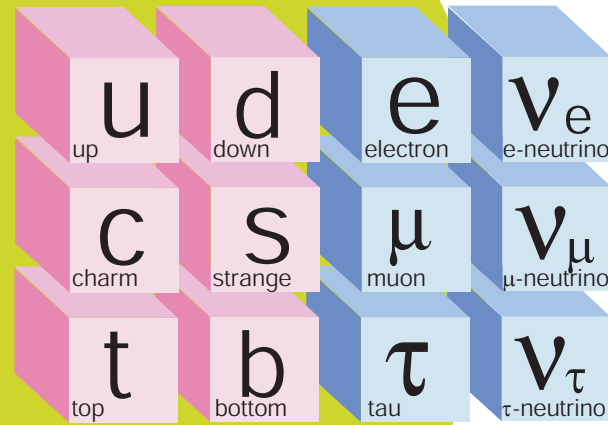


Z-boson

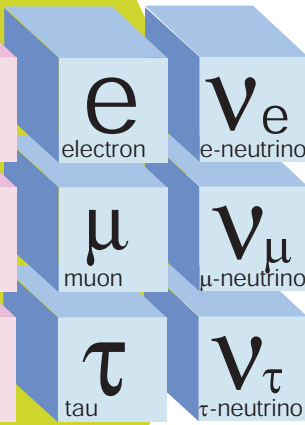


W-boson

quarks



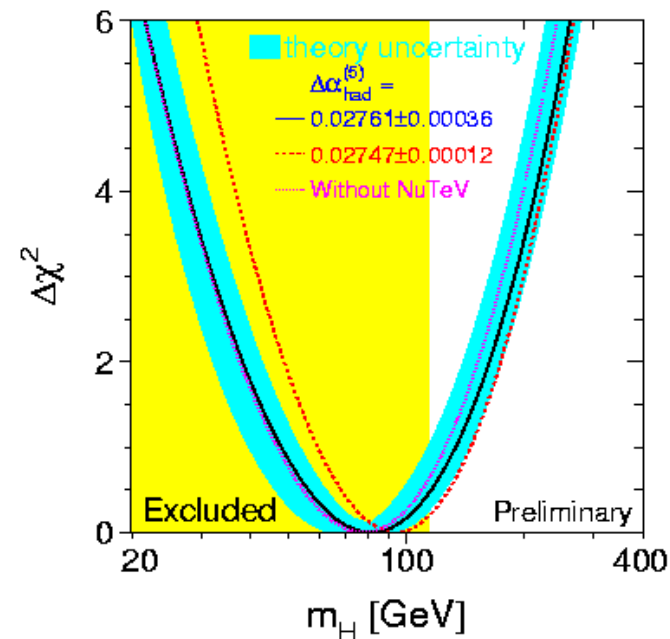
leptons



Higgs field

Fit to precision measurements

- A light Higgs boson (weakly interacting Higgs sector) preferred by electroweak data
 - Consistent with MSSM upper limit (130 GeV)
 - Within the reach of a 300 GeV LC



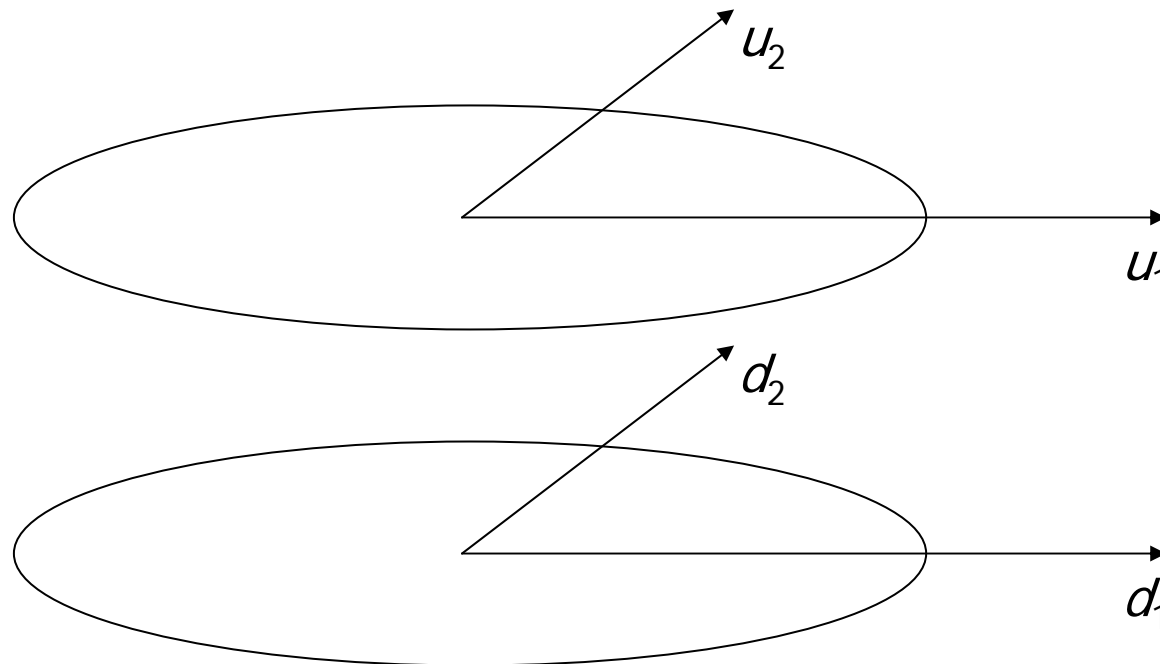
標準模型：3つの“Universality”

- ゲージ相互作用
 - ゲージ結合定数は(各ゲージ群に)一つだけ
- ヒッグスセクター
 - あらゆる質量は Higgs vev に比例(例外: Q_{CD})
- 世代構造
 - あらゆるフレーバー混合は CKM 行列で決定される

世代の違いの起源は湯川結合のみ

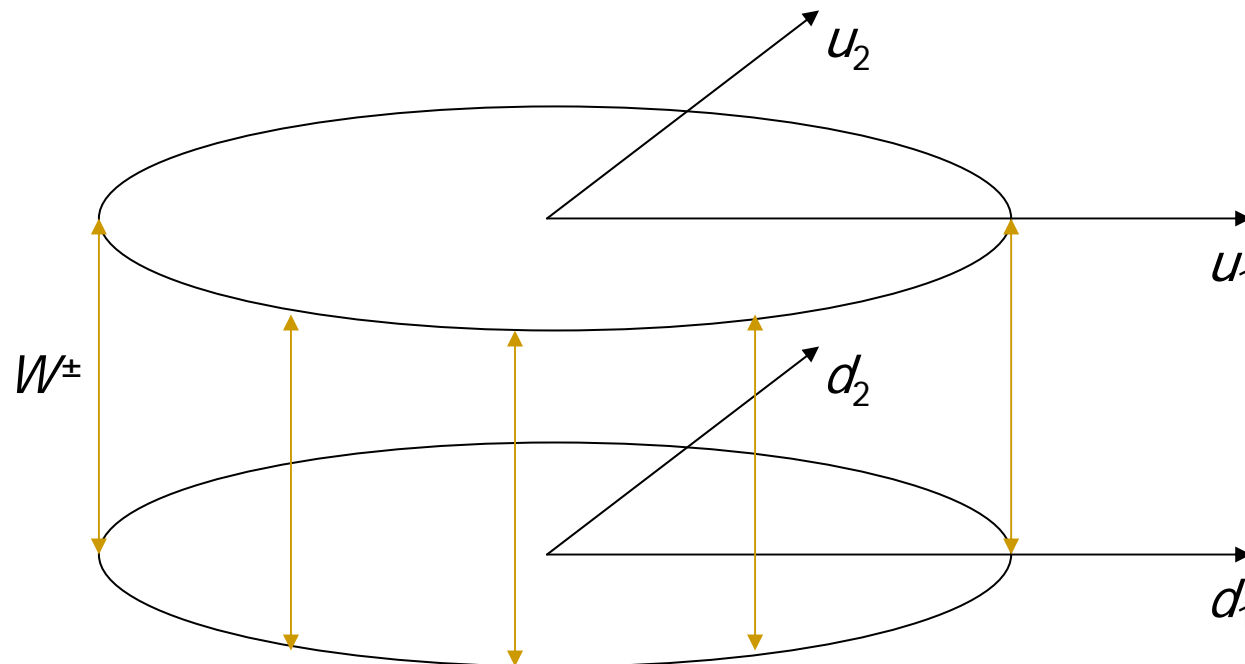
Generation mixing

If no Yukawa coupling, generation labels has no meaning



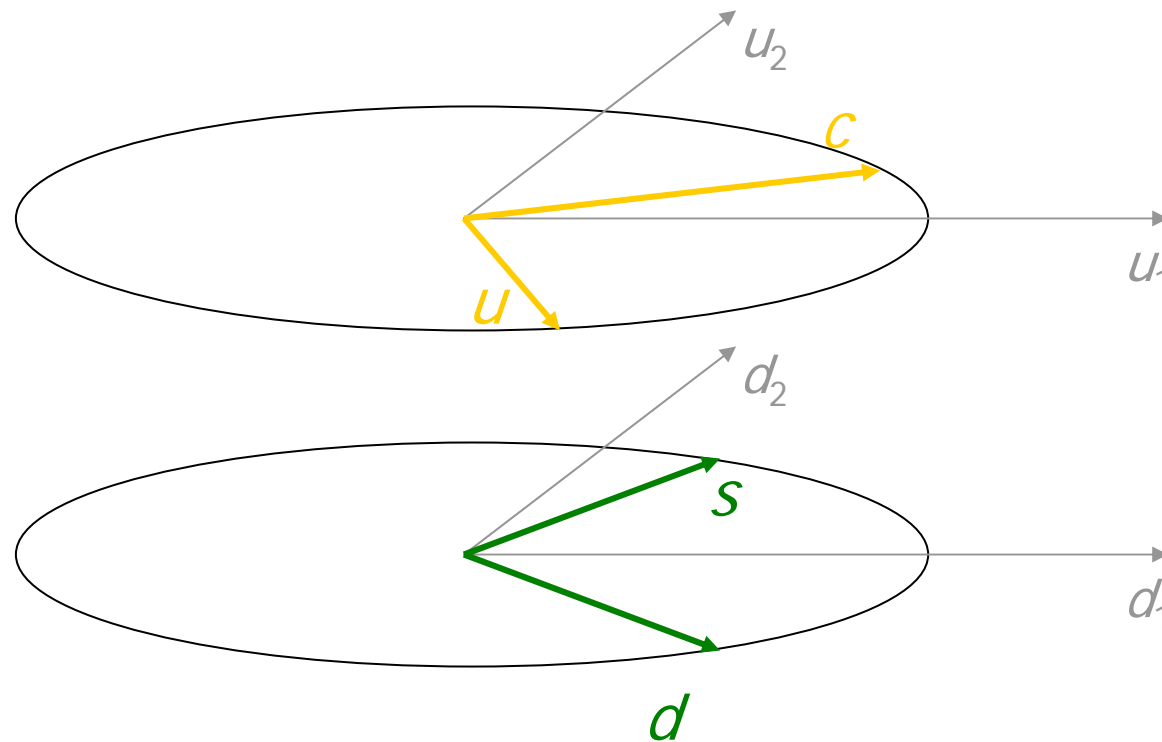
Generation mixing

Charged current interactions connects ups and downs



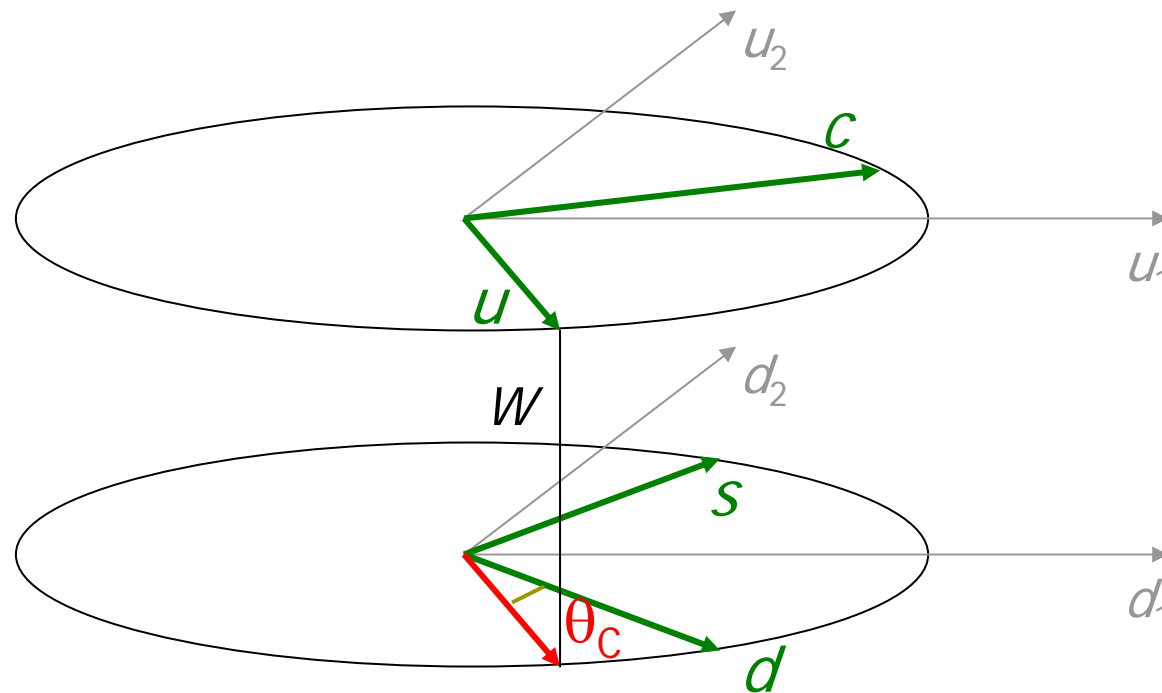
Generation mixing

Yukawa couplings breaks the generation symmetry



Generation mixing

Mismatch of ups and downs gives the Cabibbo mixing



An important window of BSM

- FCNC (フレーバーを変える中性カレント)
- FCNC相互作用は標準模型ではきわめて小さい
- GIM 機構
 - No FCNC coupling (Zds etc.) at tree level
 - Suppression by small quark mass and/or small CKM mixing
- New physics model に対して重要な制限
- 逆に New physics はいつ見えてもおかしくない

FCNC is highly suppressed

$$B(K^+ \rightarrow \mu\nu) = 63\%$$



$$B(K_L^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 7 \times 10^{-9}$$

- Important hurdle for model builders
- 無神経なモデルはこれにより簡単に排除される
(and especially $K^0 - \bar{K}^0$ mixing)

Supersymmetry



超対称性

- 相対性原理の拡張として唯一の可能性
 - Haag-Lopuszanski-Sohnius 定理
- 超対称な場の理論はきれいな性質を持つ
 - 真空のゼロ点エネルギーの問題なし
 - 摂動論的輻射補正の非存在
- 局所的超対称性 重力の出現
- ストリング理論の構築に必須

超対称性@ weak scale

□ 階層性の問題:

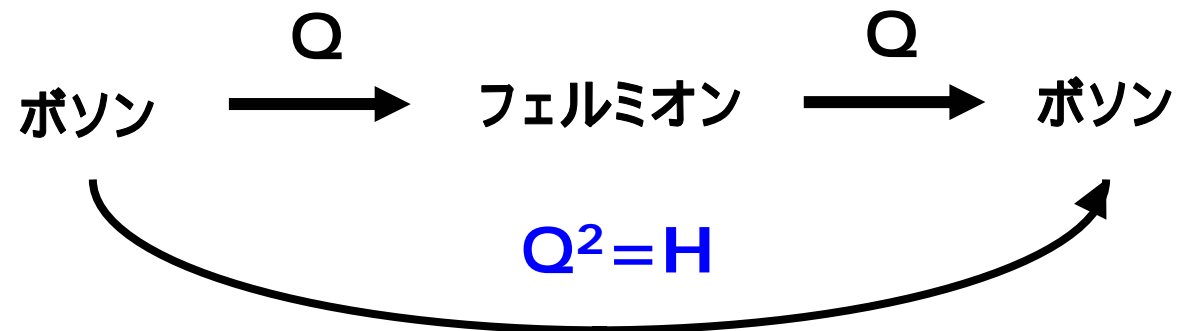
- Fermi scale と GUT/Planck scale の大きな差をいかに保つか
- Fermi scale に超対称性があれば, 輻射補正から階層性を保護できる

超対称粒子が Fermi scale に存在

□ 他の可能性: (large) extra dimensions

超対称対

- ボソンとフェルミオンが必ず対になって存在



唯一の例外: 真空 (ゼロエネルギー状態)

gauge bosons



photon



gluon

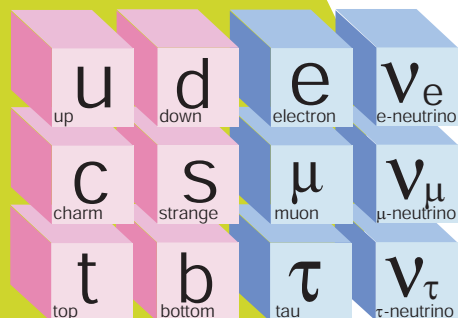


Z-boson



W-boson

quarks



leptons

Higgs field

gauginos



photino



gluino

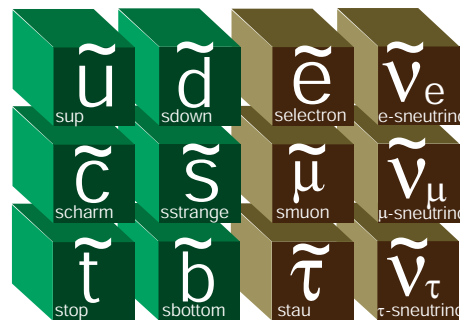


Z-ino



W-ino

squarks



sleptons

超対称対

- ボソンとフェルミオンが必ず対になって存在
- 超対称性 $[Q, H]=0$ 対は縮退
- 世の中に超対称対は見あたらない
超対称性は破れている必要

超対称性の破れ

- 超対称性を破るためには、標準模型の相互作用に含まれない外部の機構が必要: **hidden sector**
- Hidden sector で超対称性が自発的に破れて、標準模型の sector に何らかの機構で伝わる
- 標準模型の sector に限ってみると、超対称性を「手で」破っているように見える: **soft breaking parameters**

Basic Parameters: Standard Model

- Gauge sector
 - three gauge couplings
- Higgs sector
 - μ^2 (Higgs mass term)
 - λ (Higgs 4点 coupling)
- Yukawa sector
 - **Only source** of generation difference
 - 2x27 couplings (13 physical)
 - 6 quark masses, 4 CKM parameters
 - 3 lepton masses

MSSM parameters (I): supersym.

- 超対称な parameter はほぼ SM と同じ
- Higgs sector: only 1 param. instead of 2
 - μ (Higgsino mass)
 - 4点相互作用は gauge coupling で決まる
Higgs mass の上限
- Yukawa sector は SM と同じ
 - Coupling の大きさは $\cos \beta$ or $\sin \beta$ だけ異なる
 - 世代構造は CKM in SM をそのまま引き継いでいる

MSSM parameters (II): breaking

- 2x3 gaugino masses
- 2 Higgs masses
- 2x1 Higgs mass mixing (B term)
- 27 squark mass terms [(3×3) x3]
- 18 slepton mass terms [(3×3) x2]
- 2x27 Higgs-sfermion couplings (A term)
[(3×3) x3]

(all up to rephasing)

New sources of generation mixing

- Squark masses (and A terms) give new sources of generation mixing, which are totally independent of CKM (Yukawas) in SM.
- These produce mismatch of quark and squark mass eigenstates, or viewed in a different way, interactions such as
 - gluino-strange- s down
 - gluino-bottom- s down

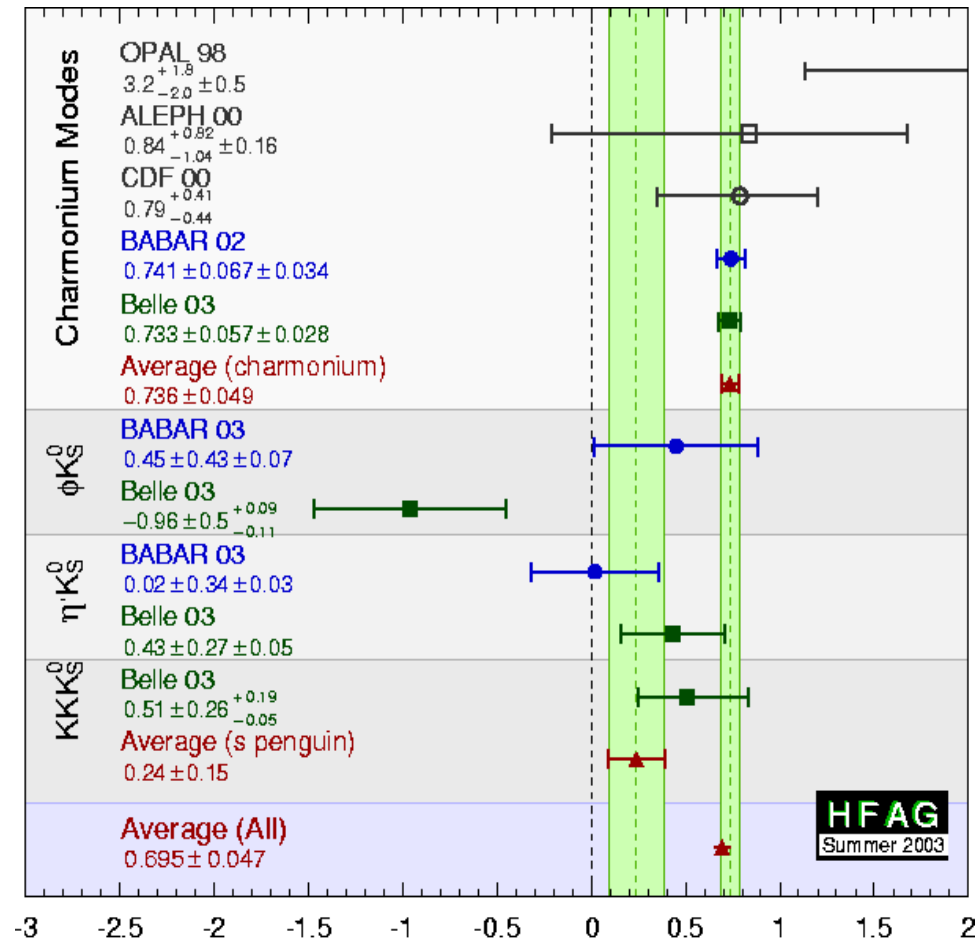
SUSY flavor problem

- ❑ MSSM solves nothing about generation structure, but only complicates it
- ❑ Arbitrary soft parameters are mostly in immediate conflict with K^0 - \bar{K}^0 mixing
- ❑ Various schemes to avoid the problem are proposed: e.g. “xxx mediation”
- ❑ Many of these scenarios assume CKM as a unique source of mixings

Example: CP angle in $B \rightarrow \phi K_s$

- SM expectation: same angle as in $B \rightarrow \psi K_s$
- Difference
 - $B \rightarrow \psi K_s$: tree process
 - $B \rightarrow \phi K_s$: penguin process (suppressed)
- New physics effect can be more visible in $B \rightarrow \phi K_s$

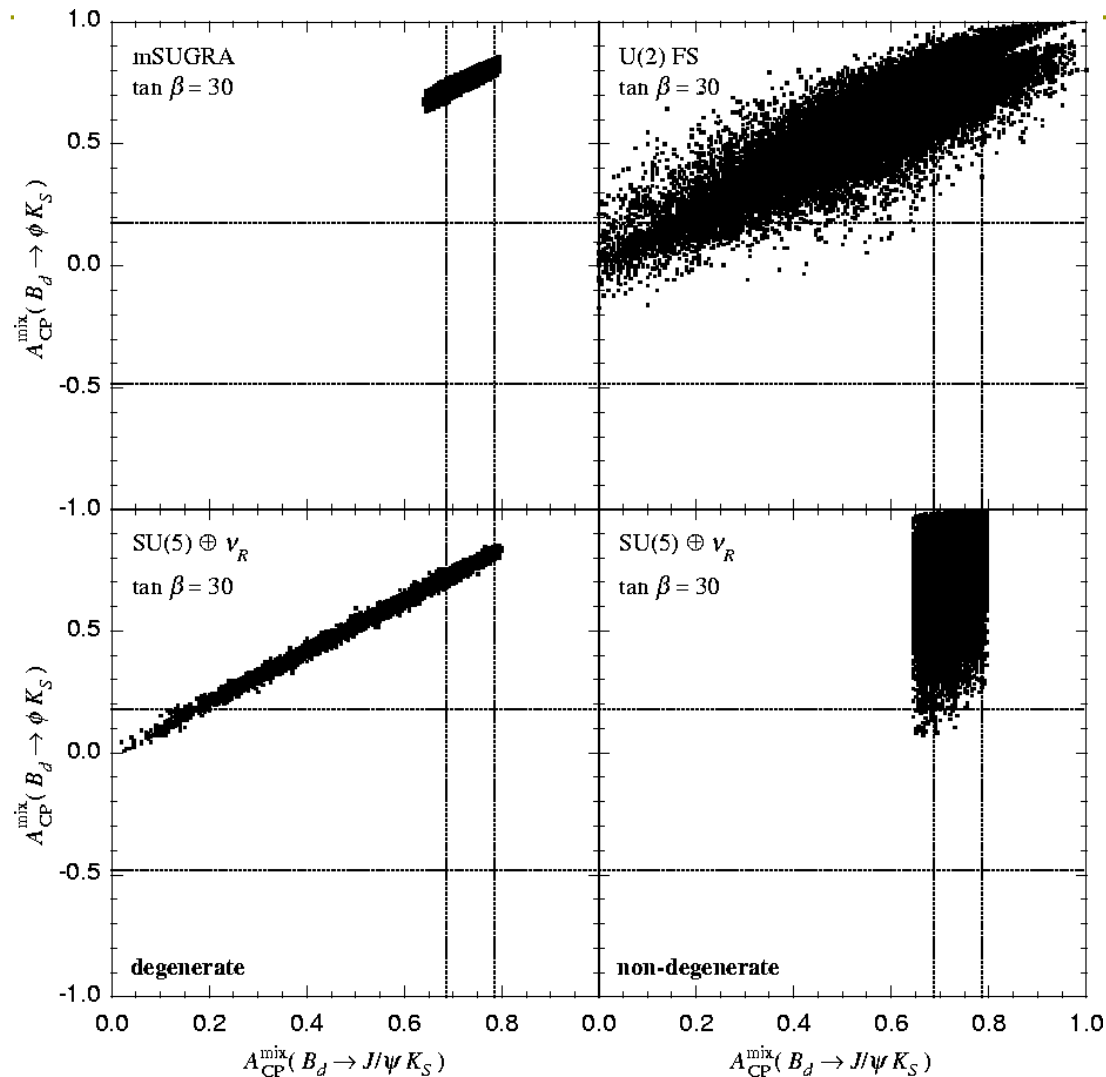
Results for “ $\sin 2\phi_1$ ”



How theorists behave

- Wait and see
 - 99% of 99%CL “new physics” will go away
- Play and enjoy
 - Write as much papers as you can, before it goes away
 - If real, you may hit a gold mine

Predictions of SUSY models



- mSUGRA
CKM only
- SU(5) + ν_R
large ν mixing
effects in
quark sector
- U(2) family
symmetry
new source of
large
deviation

Goto et al.
hep-ph/0306093

Conclusions



Physics of Flavor

- MSSM says nothing about generation structure, but only complicates it
- We have no fundamental understanding of fermion masses and mixings
 - Theorists are not wise enough to pinpoint the physics underlying the CKM structure
 - Many possibilities are open
- Any experimental input is very useful

Windows for New Physics

- Energy frontier
 - Direct production of new particles
 - Effects of new interactions
- Forbidden processes
 - Nucleon decays
 - lepton #, lepton flavor violation
- Highly suppressed processes
 - FCNC

最後に、期待

- Tevatron collider
 - Increasing luminosity wide-ranging physics output
- KEK B (B, τ , charm)
 - World-record and still increasing luminosity
very rich physics output
 - Overwhelming data for PDG
 - Hints of new physics?
- Rare K decays
 - Delving towards unexplored region