



ヒッグス結合定数の輻射補正と 将来実験での精密測定による 拡張ヒッグスモデルの検証

菊地 真史子 (富山大学)

共同研究者

兼村晋哉 (富山大学)、柳生慶 (国立中央大学)

S. Kanemura, M. Kikuchi, K. Yagyu,
Physics Letters B731 (2014) 27-35

素粒子物理学の進展2014 @京都大学基礎物理学研究所
2014年7月28日 - 8月1日

標準理論ヒッグスセクターの課題

ヒッグスボソンの発見 → (2012) 標準理論で予言されていた最後の粒子
性質は標準理論の予言と無矛盾 (質量起源)

標準理論は電弱対称性の破れの機構も含め大成功

しかしながら、

ヒッグスセクターの構造や本質は依然として未知！
負の質量項、ダイナミクス、素スカラー場か複合場か、
第2第3のヒッグスはあるか…

ヒッグスセクターの解明が今後の最重要課題の一つ

拡張ヒッグスセクターの可能性

ヒッグスセクターの形

アイソスピン2重項 1 個

標準理論 (最小ヒッグス模型)

$$V(\Phi) = -\mu^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4$$

- 標準理論の最小ヒッグスセクターは仮定であり、原理なし。
→ ノンミニマルなヒッグスセクターの可能性あり
- ヒッグスセクターの形を決められるのは実験だけ
→ ボトムアップで現象論的に決定する研究が重要になる

ヒッグスセクターと新物理学

- 未解決現象
ニュートリノ振動、暗黒物質、宇宙のバリオン数非対称性、…
- 理論的問題
階層性問題、力の統一、…

標準理論の諸問題を解決する新物理モデルはしばしば特徴のある拡張されたヒッグスセクターを伴う

ヒッグスセクターの構造と性質 \Leftrightarrow 新物理の方向性

例えば

新物理模型

B-L Gauge,
Dark Matter, ...

MSSM, Dark Matter,
 m_ν (Radiative
seesaw), CPV, ...

m_ν (Type II
Seesaw),
, LR model, ...

予言



方向性を決定



ヒッグスセクター

$\Phi +$
 S (一重項)

$\Phi +$
 Φ (二重項)

$\Phi +$
 Δ (三重項)

予言



決定



実験

第2第3のヒッグス場
 H, A, H^+, H^{++}, \dots の直接探索

電弱精密測定
発見された h の精密測定

将来実験での2ndヒッグス探索

直接探索

粒子衝突により生成される付加的ヒッグスボソンのシグナルのイベント数を見積もり、実験データと比較する

H, A, H^+, H^{++}, \dots

間接探索

付加的ヒッグス場の存在は、場の混合や輻射補正を通じて標準理論的なヒッグス(h)の結合定数をずらす

$htt, hbb, h\tau\tau, hWW, hZZ, h\alpha\alpha, hgg, hhh, \dots$

将来のHL-LHCやILCでの精密測定によって、標準理論の予言からのズレをみる。

理論計算と精密測定を指紋照合することにより、ヒッグスセクターを決定する可能性を追究する

ヒッグス結合定数

$$\kappa_X \equiv \frac{g_{hXX}(2HDM)}{g_{hXX}(SM)}$$

弱ゲージ場との結合 $hVV(V=W,Z)$

ヒッグス機構の検証

標準理論からのずれは拡張ヒッグスの証

測定精度 ILC・・・最大0.2-0.3%

例 シングレット模型、
2ダブレット模型
 $\kappa_V \leq 1$
エキゾチックな場合
 $\kappa_V \geq 1$

光子との結合 $h\gamma\gamma$

ループ効果で表れるため新粒子の効果に敏感

測定精度 HL-LHC・・・最大2-5%

ILC ……最大2-8%

ヒッグス結合定数

湯川結合 hff ($f=t, b, \tau, c, \dots$)

質量起源、フレーバー構造

ずれのパターンは拡張ヒッグスの詳細に敏感

測定精度 ILC... htt 最大 2-3%

hbb 最大 1%, $h\tau\tau$ 最大 1-2%

ヒッグス自己結合 hhh

ヒッグスポテンシャルの情報と直結

場の混合によるずれに加えて、大きな量子効果

測定精度 HL-LHC... 最大50%

ILC ... 最大13-20%

ヒッグス結合定数精密測定

Snowmass Higgs Working Group Report (2013)

| Facility | LHC | HL-LHC | ILC500 | ILC500-up | ILC1000 | ILC1000-up | CLIC | TLEP (4 IPs) |
|---|----------|-----------|---------|-----------|--------------|----------------|-----------------|--------------|
| \sqrt{s} (GeV) | 14,000 | 14,000 | 250/500 | 250/500 | 250/500/1000 | 250/500/1000 | 350/1400/3000 | 240/350 |
| $\int \mathcal{L} dt$ (fb ⁻¹) | 300/expt | 3000/expt | 250+500 | 1150+1600 | 250+500+1000 | 1150+1600+2500 | 500+1500+2000 | 10,000+2600 |
| κ_γ | 5 – 7% | 2 – 5% | 8.3% | 4.4% | 3.8% | 2.3% | -/5.5/<5.5% | 1.45% |
| κ_g | 6 – 8% | 3 – 5% | 2.0% | 1.1% | 1.1% | 0.67% | 3.6/0.79/0.56% | 0.79% |
| κ_W | 4 – 6% | 2 – 5% | 0.39% | 0.21% | 0.21% | 0.2% | 1.5/0.15/0.11% | 0.10% |
| κ_Z | 4 – 6% | 2 – 4% | 0.49% | 0.24% | 0.50% | 0.3% | 0.49/0.33/0.24% | 0.05% |
| κ_ℓ | 6 – 8% | 2 – 5% | 1.9% | 0.98% | 1.3% | 0.72% | 3.5/1.4/<1.3% | 0.51% |
| $\kappa_d = \kappa_b$ | 10 – 13% | 4 – 7% | 0.93% | 0.60% | 0.51% | 0.4% | 1.7/0.32/0.19% | 0.39% |
| $\kappa_u = \kappa_t$ | 14 – 15% | 7 – 10% | 2.5% | 1.3% | 1.3% | 0.9% | 3.1/1.0/0.7% | 0.69% |

ここまで精密な精度で測られるならば、
理論計算の方も輻射補正の効果を含めて計算し、
精密な理論予言を揃えるべき

我々のプロジェクト

ボトムアップでヒッグスセクターの構造を h の物理から間接的に決定するためには、将来実験での測定精度に見合った**精密な理論計算**が必要

シンプルで拡張性のあるヒッグスモデル（ Φ に追加の**シングレット**、**ダブルット**または**トリプレット**場を含む）で、各結合定数の標準理論の予言からのずれを**輻射補正**を加えて計算する

| | htt | hbb | $h\tau\tau$ | hWW | hZZ | $h\gamma\gamma$ | hhh |
|---------------|---------------|-------|-------------|-------|-------|-----------------|-------|
| シングレットモデル | $\Phi+S$ | | | | | | |
| 2ヒッグスダブルットモデル | $\Phi+\Phi$ | | | | | | |
| トリプレットモデル | $\Phi+\Delta$ | | | | | | |
| | | | | | | | |

各モデルごとにずれのパターンを評価し、将来実験で h の物理から間接的にヒッグスセクターを決定するための戦略研究

数値計算のコードを完成させてパブリックにする

結合定数の指紋照合

様々な拡張ヒッグスモデルのヒッグス結合定数を1ループレベルで評価する。

2HDM

湯川相互作用
が異なる4つの
タイプのモデル

| | htt | hbb | $h\tau\tau$ | hWW | hZZ | $h\gamma\gamma$ | hhh |
|-----------------|-------|-------|-------------|---|-------|-----------------|-------|
| $\Phi+S$ | | | | | | | |
| $\Phi+\Phi(I)$ | 済 | 済 | 済 | 済 | 済 | 済 | 済 |
| $\Phi+\Phi(II)$ | 済 | 済 | 済 | 済 | 済 | 済 | 済 |
| $\Phi+\Phi(X)$ | 済 | 済 | 済 | 済 | 済 | 済 | 済 |
| $\Phi+\Phi(Y)$ | 済 | 済 | 済 | 済 | 済 | 済 | 済 |
| $\Phi+\Delta$ | | | | 済 | 済 | 済 | 済 |
| | | | | Kanemura, Kikuchi, Yagyu; PRD87, 015012 (2013) | | | |

Precision measurements
of Higgs couplings



Theoretical predictions
at loop level



Testing
models₁₁



このトークでは

Two Higgs doublet model(2HDM)におけるヒッグス結合定数の輻射補正の最新結果を報告する

Kanemura, Kikuchi, Yagyu; PLB731 (2014) 27-35

FCNCをツリーで禁止する離散対称性を課した2HDMでは4つのタイプの湯川結合があり得る

全てのタイプの2HDMですべてのヒッグス結合定数を1ループレベルで計算 (オンシェルくりこみ)

標準理論からのずれのパターンを議論する

2HDMにおけるヒッグス結合定数のループ計算のこれまでの研究

hhh

*Hollik, Penaranda, Eur. Phys. J. C23 (2002) [in the MSSM Higgs sector]
Kanemura, Kiyoura, Okada, Senaha, Yuan PLB558, (2003);
Kanemura, Okada, Senaha, Yuan, PRD70 (2004).*

hVV

Kanemura, Okada, Senaha, Yuan, PRD70 (2004).

hff

*Guasch, Hollik, Penaranda, PLB515 (2001) [in the MSSM Higgs sector]
Kanemura, Kikuchi, KY, PLB731 (2014) [in 2HDM with 4 types of Yukawa interactions]*

hyy

*Ginzburg, Krawczyk, Osland, Nucl. Instrum. Meth. A 472, (2001);
Bernal, Lopez-Val, Sola, PLB 677 (2009);
Posch, PLB 696 (2011); Lopez-Val, Sola, PLB 702 (2011);
Ferreira, Santos, Sher, Silva, PRD85 (2012); Arhrib, Benbrik, Gaur, PRD85 (2012).*

Two Higgs doublet models

$$\Phi_1, \Phi_2 \quad (I=1/2, Y=1/2)$$

In general, there is the possibility to cause dangerous **FCNCs**.
To avoid FCNCs, Φ_1 and Φ_2 should have different quantum numbers with each other.

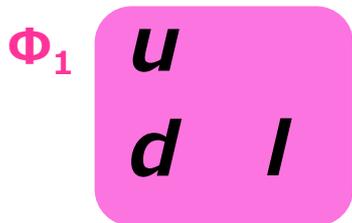
Discrete Z_2 symmetry

$$\Phi_1 \rightarrow +\Phi_1$$

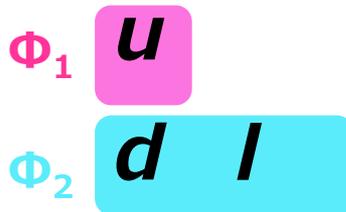
$$\Phi_2 \rightarrow -\Phi_2$$

4 types of Yukawa interactions

Barger, Hewett, Phillips(1990), Grossman (1993);
Aoki, Kanemura, Tsumura, Yagyu(2009);
Logan, MacLennan(2009);
Su, Thomas(2009)

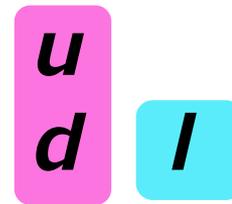


Type I



Type II

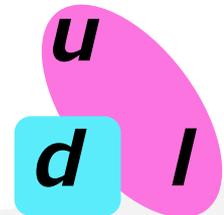
MSSM



Type X

(Lepton specific)

e.g. Radiative seesaw



Type Y
(Flipped)

Higgs potential

$$\Phi_i = \begin{pmatrix} \omega_i^+ \\ \phi_i \end{pmatrix}, \quad \phi_i = \frac{1}{\sqrt{2}}(h_i + v_i + z_i).$$

- CP invariance & softly broken Z_2

Soft-breaking scale of Z_2 sym.

$$M^2 = \frac{m_3^2}{\sin\beta\cos\beta}$$

$$V_{\text{THDM}} = m_1^2|\Phi_1|^2 + m_2^2|\Phi_2|^2 - m_3^2(\Phi_1^\dagger\Phi_2 + \text{h.c.}) \\ + \frac{1}{2}\lambda_1|\Phi_1|^4 + \frac{1}{2}\lambda_2|\Phi_2|^4 + \lambda_3|\Phi_1|^2|\Phi_2|^2 + \lambda_4|\Phi_1^\dagger\Phi_2|^2 + \frac{1}{2}\lambda_5\left[(\Phi_1^\dagger\Phi_2)^2 + \text{h.c.}\right].$$

- Mass eigenstates

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H \\ h \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z \\ A \end{pmatrix}, \\ \begin{pmatrix} \omega_1^+ \\ \omega_2^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega^+ \\ H^\pm \end{pmatrix}.$$

h ,

SM-like Higgs

H, A, H^\pm

Extra Higgs

- Parameters(8)

$$v^2 = v_1^2 + v_2^2 = (246\text{GeV})^2, \quad \tan\beta = \frac{v_2}{v_1}$$

$$v \quad m_h \quad m_H \quad m_A \quad m_{H^\pm} \quad a \quad \beta \quad M^2$$

6 free parameters

ツリーレベル

ヒッグス結合定数①

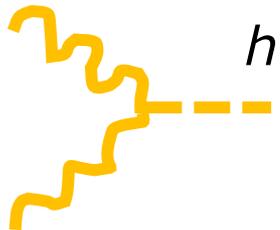
場の混合

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_\alpha & -s_\alpha \\ s_\alpha & c_\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H \\ h \end{pmatrix}$$

真空期待値の混合

$$\tan\beta = \frac{v_2}{v_1}, \quad v^2 = v_1^2 + v_2^2$$

- ゲージ結合 $hVV (V=Z, W)$


$$h = \sum_i \frac{g^2}{2} v_i h_i W^+ W^-$$

$$\kappa_W \equiv \frac{g_{hWW(2HDM)}}{g_{hWW(SM)}} = \sin(\beta - \alpha)$$

標準模型ライクリミット

$$\kappa_V = \sin(\beta - \alpha) \rightarrow 1$$

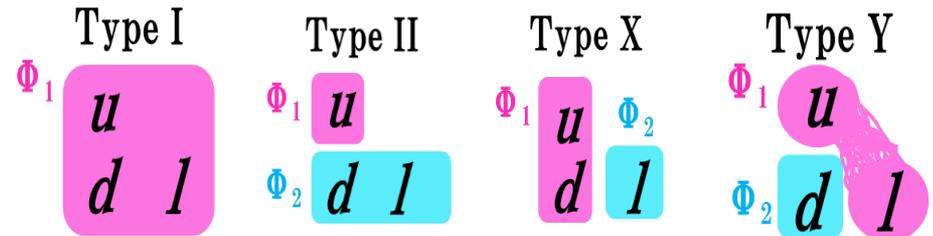
κ_V は標準理論へのデカップル度合を示す重要なパラメーター

ツリーレベル

ヒッグス結合定数② 湯川結合

- 湯川結合 ($htt, hbb, h\tau\tau$)

$$h = \frac{m_f}{v_i} h_{if} f f$$



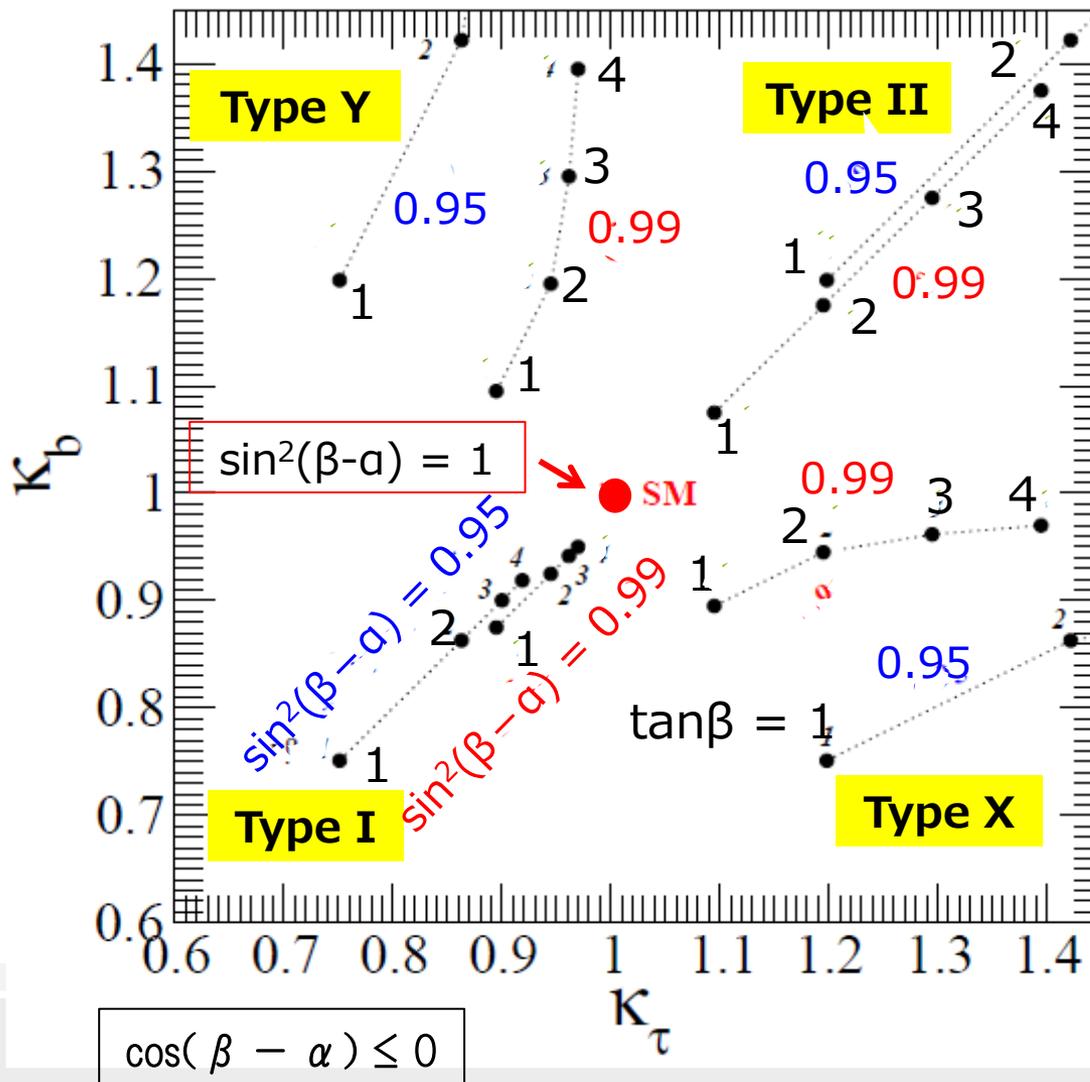
K_f は結合するヒッグス場の種類が異なると形が異なる

If f couples to Φ_1 $K_f = \sin(\beta - \alpha) + \cot\beta \cos(\beta - \alpha)$

If f couples to Φ_2 $K_f = \sin(\beta - \alpha) - \tan\beta \cos(\beta - \alpha)$

ツリーレベル

ヒッグス結合定数② 湯川結合



間接探索が有利な領域

理論的制限 × LHC直接探索

- 摂動ユニタリティー
- 真空安定性
- 300fb^{-1}
- 3000fb^{-1}

$$gg \rightarrow H/A \rightarrow \tau^+\tau^-$$

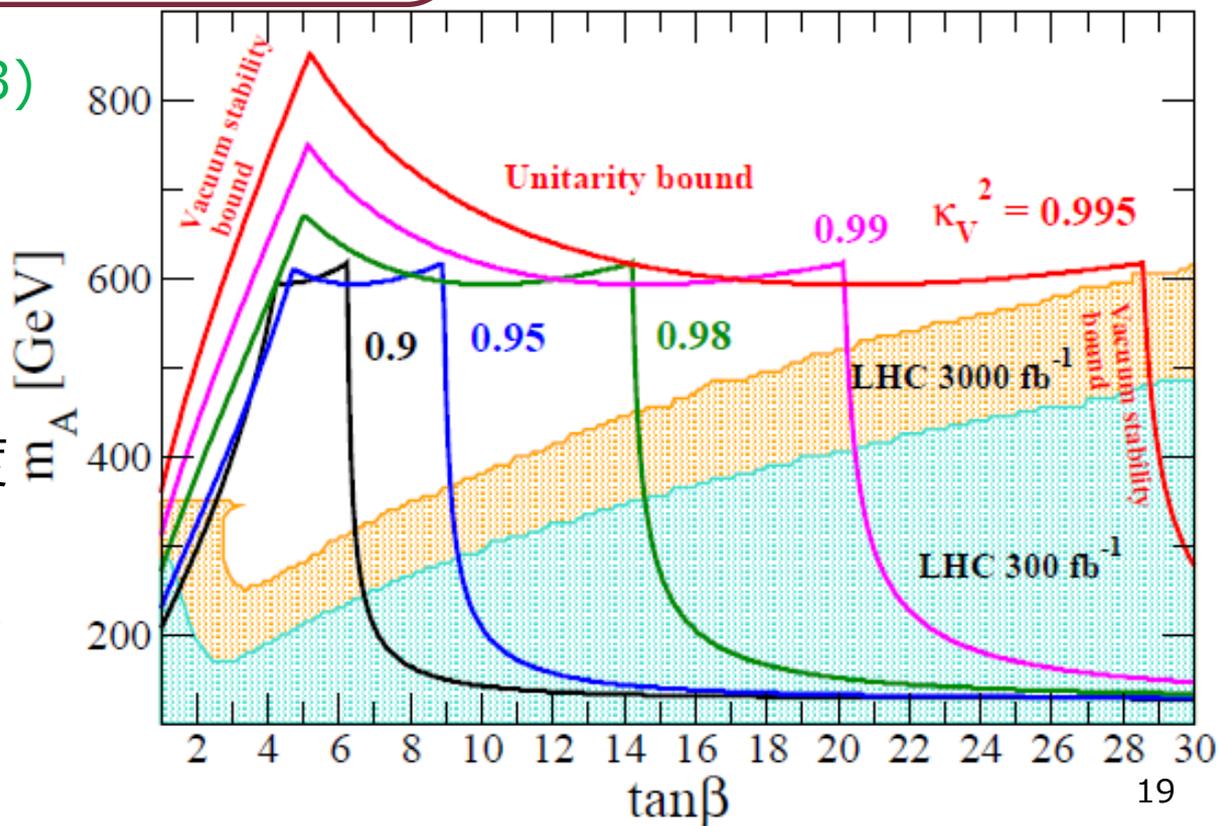
$$gg \rightarrow bbH/A \rightarrow bb\tau^+\tau^-$$

$$gg \rightarrow \tau^+\tau^-H/A \rightarrow \tau^+\tau^-\tau^+\tau^-$$

Type-II THDM

ILC White paper (2013)

$\sin^2(\beta - \alpha)$ が $O(1)\%$ 程度
1からズれている場合、
直接探索は難しくて結合定
数の指紋照合で模型検証
できる領域がある。



輻射補正の効果

- Decoupling 定理

重い質量の効果は質量の逆べきで効く $\frac{1}{M^2}$

- Decoupling 定理の破れ (non-decoupling 効果)

- カイラルフェルミオンループ効果

$$m_f \sim y_f v \quad \Delta\rho \sim c \frac{N_c}{(4\pi)^2} \frac{m_t^2}{v^2} + \dots \quad \text{正べきの効果}$$

- スカラーループ効果

$$m_\phi^2 \sim \lambda_i v^2 + M^2 \quad (M^2 \ll m_\phi^2)$$

$$\Delta\rho \sim c' \frac{1}{(4\pi)^2} \frac{(m_A - m_{H^+})^2}{v^2} + \dots$$

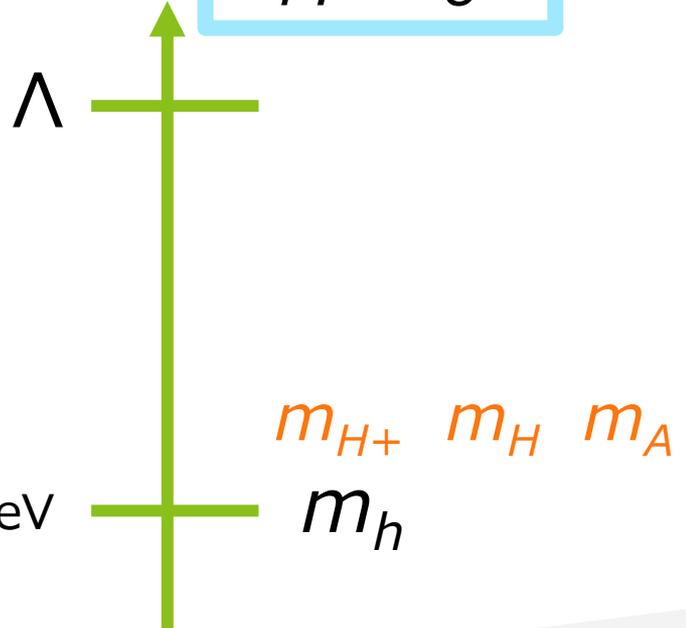
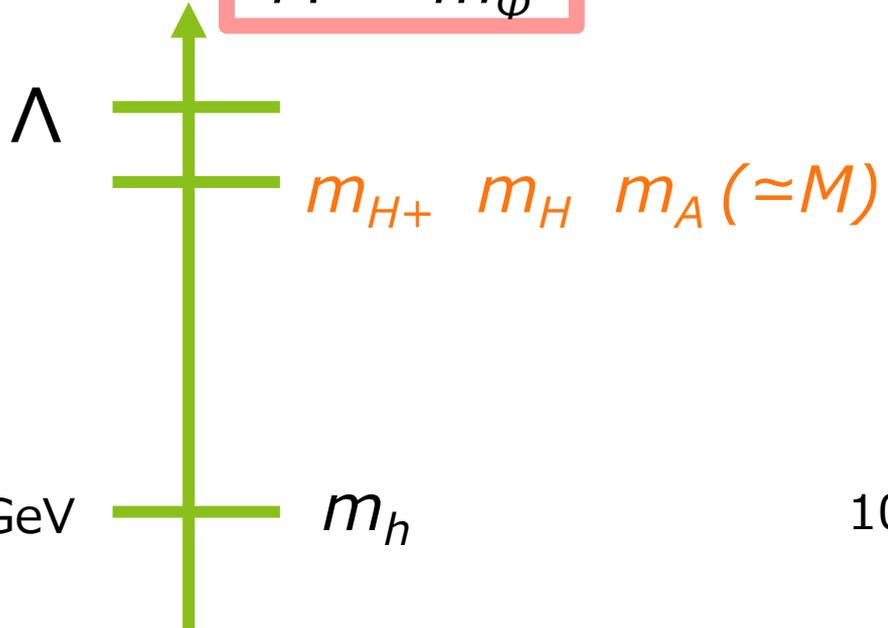
正べきの効果

新物理のスケールを探る

$$m_\phi^2 = M^2 + \lambda_i v^2 \quad (\Phi : H^+, H, A)$$

$$M \sim m_\phi$$

$$M \sim 0$$



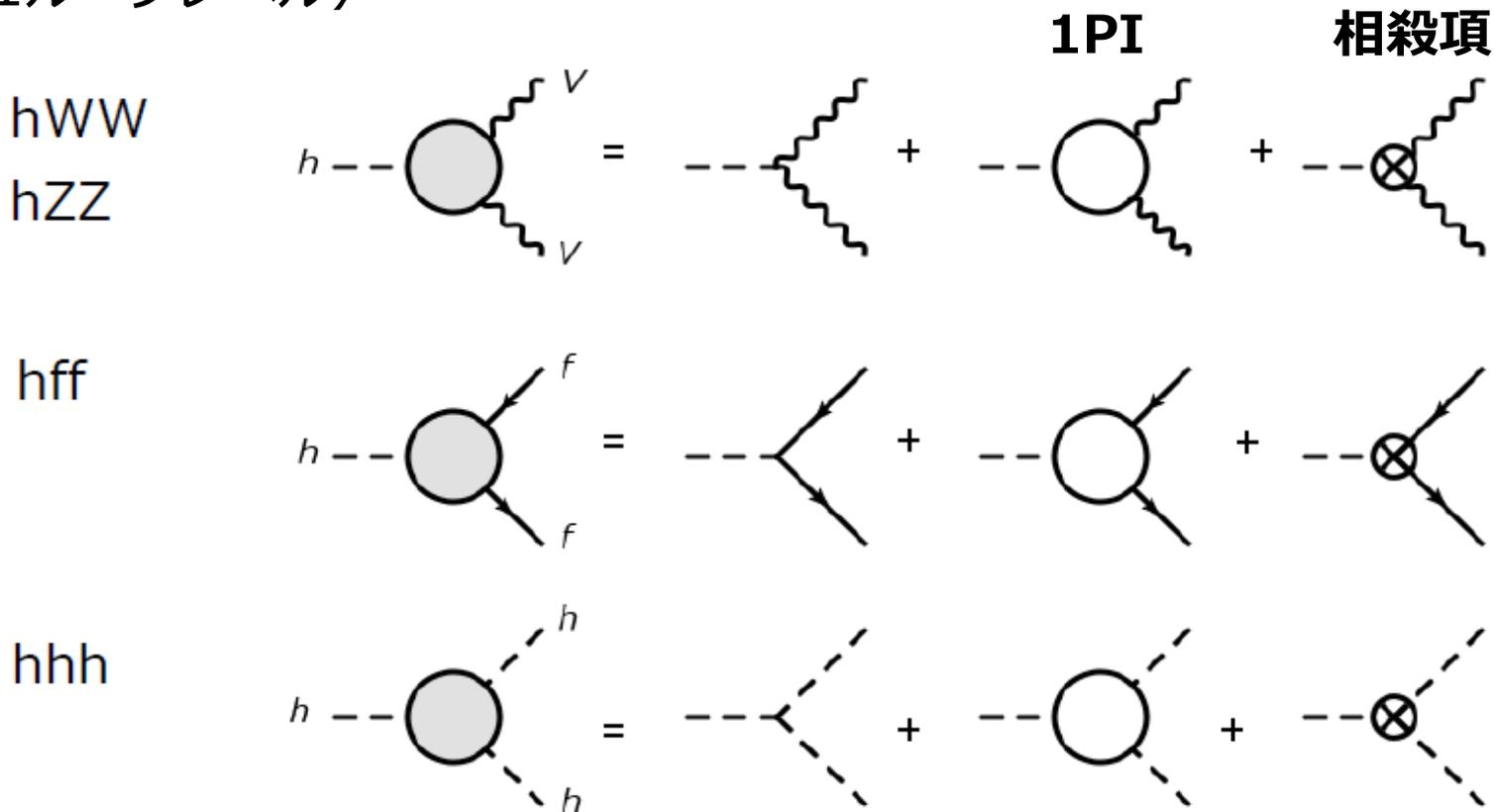
直接測定が難しくても、結合定数のズレから新物理の情報が見える可能性

- 直接測定×間接測定・・・チェック
- Non-decoupling 効果で大きなループ効果

結合定数 1 ループ計算

Guasch, Hollik, Penaranda (2001);
 Kanemura, Okada, Senaha, Yuan(2002);
 Kanemura, Kikuchi, Yagyu(2014)

オンシェルくりこみ法で、電弱・ヒッグスセクターのループ補正を計算した。
 (1ループレベル)



Renormalized conditions in $V(\Phi_1, \Phi_2)$

パラメーター ; $m_h, m_H, m_A, m_{H^+}, v, a, \beta, M$

相殺項 ; $\delta T_h, \delta T_H, \delta m_h, \delta m_H, \delta m_A, \delta m_{H^+}, \delta a, \delta \beta, \delta M, \delta v$

$\delta Z_h, \delta Z_H, \delta Z_A, \delta Z_{H^+}, \delta Z_{G^0}, \delta Z_{G^+}, \delta C_{hH}, \delta C_{GA}, \delta C_{G^+H^+}$

くりこみ条件

$$\delta T_h \quad \text{●} \quad \left. \dots \right|_{p^2=m_h^2} = 0 \quad \delta T_h = -T_h^{1PI}[0]$$

$$\delta m_h^2 \quad \Pi_{hh}(m_h^2) = 0 \quad \delta m_h^2 = \Pi_{hh}^{1PI}[m_h^2] + \frac{s_\alpha^2}{c_\beta} \frac{\delta T_1}{v} + \frac{c_\alpha^2}{s_\beta} \frac{\delta T_2}{v}$$

$$\delta \beta \quad \begin{aligned} \Pi_{G^0A}(m_A^2) &= 0 \\ \Pi_{G^0A}(m_Z^2) &= 0 \end{aligned} \quad \delta \beta = \frac{1}{2(m_Z^2 - m_A^2)} \left(\Pi_{GA}^{1PI}[m_Z^2] - \Pi_{GA}^{1PI}[m_A^2] - \frac{2m_Z^2}{m_A^2} \Pi_{GA}^{1PI}[m_A^2] \right) + \frac{s_\beta}{m_A^2} \frac{\delta T_1}{v} - \frac{c_\beta}{m_A^2} \frac{\delta T_2}{v}$$

$$\delta Z_h \quad \frac{d}{dp^2} \Pi_{hh}(m_h^2) = 1 \quad \delta Z_h = -\frac{d}{dp^2} \Pi_{hh}^{1PI}(m_h^2)$$

1ループレベル

ゲージ結合 hZZ

$$m_\phi^2 \sim \lambda_i v^2 + M^2$$

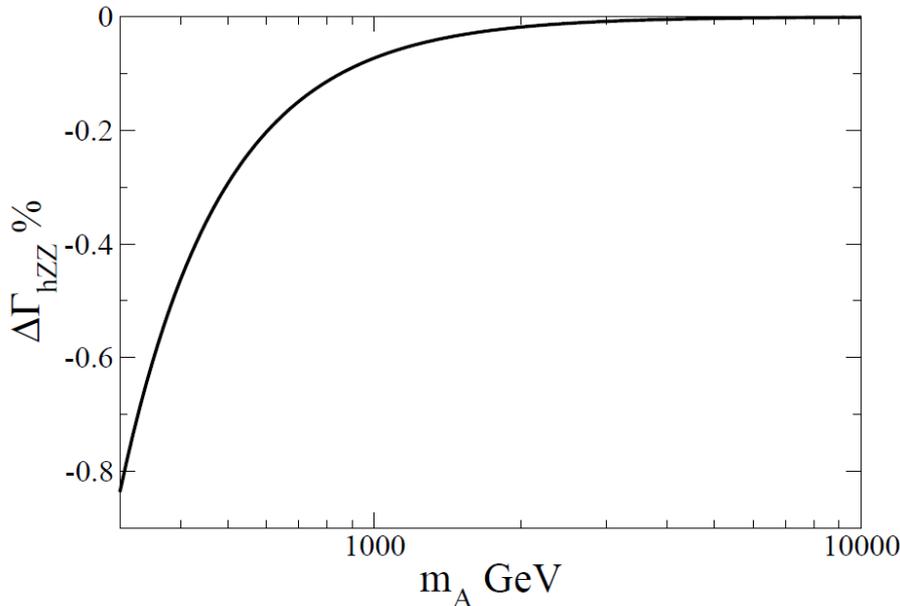
$$\sin(\beta - \alpha) = 1$$

$$m_H = m_A = m_{H^\pm} (= m_\phi)$$

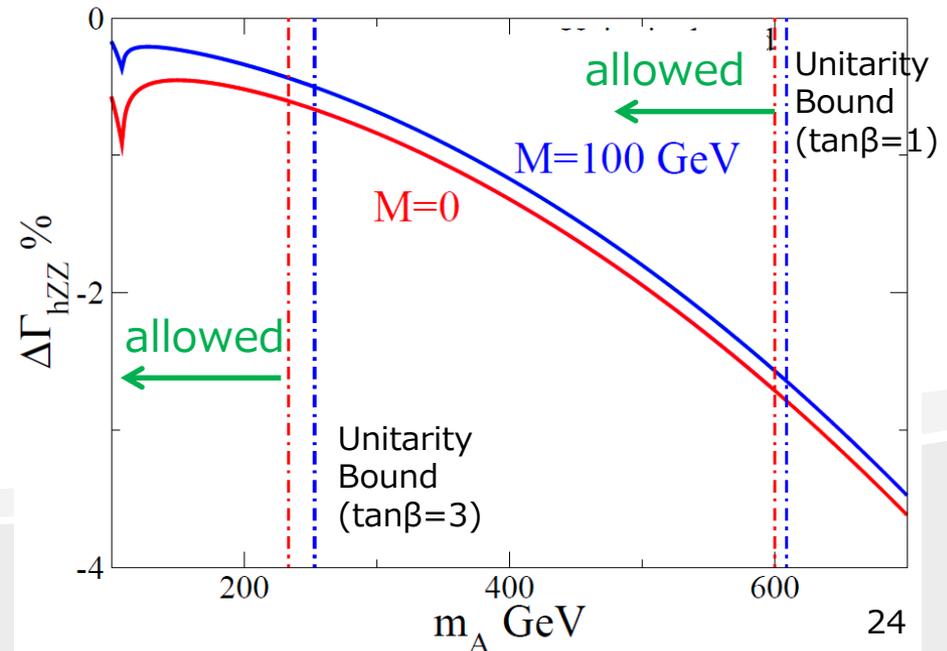
$$\Delta\Gamma_{hVV} \equiv \frac{\Gamma_{hVV}^{\text{THDM}} - \Gamma_{hVV}^{\text{SM}}}{\Gamma_{hVV}^{\text{SM}}}$$

デカップリングの振る舞い

$$m_A^2 = M^2 + (300\text{GeV})^2$$



ノンデカップリング効果



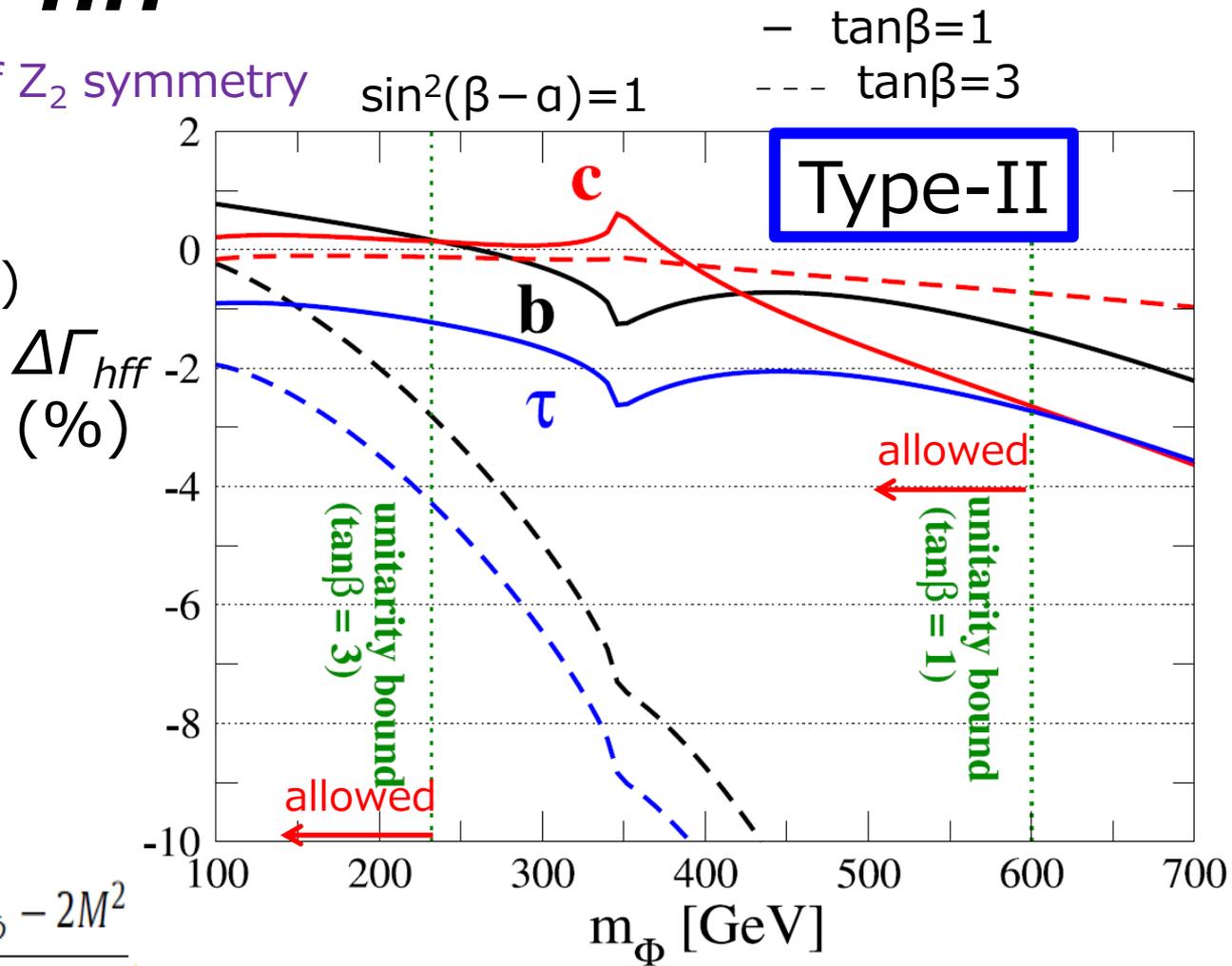
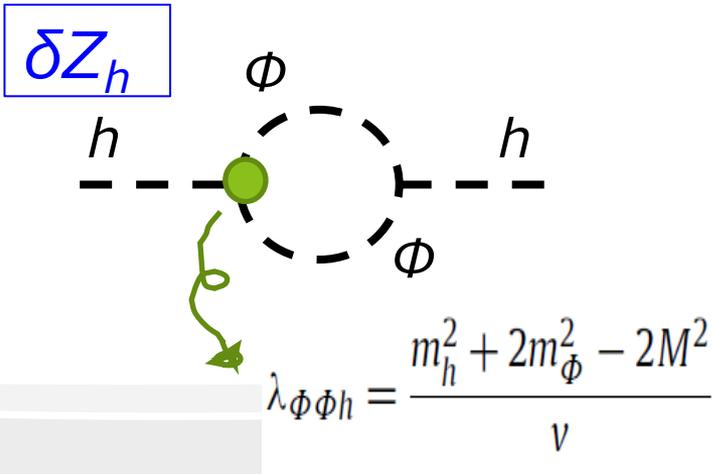
1ループレベル

湯川結合 hff

Soft breaking scale of Z_2 symmetry

$$M^2 = 0$$

$$m_H = m_A = m_{H^\pm} (= m_\phi)$$



1ループレベル

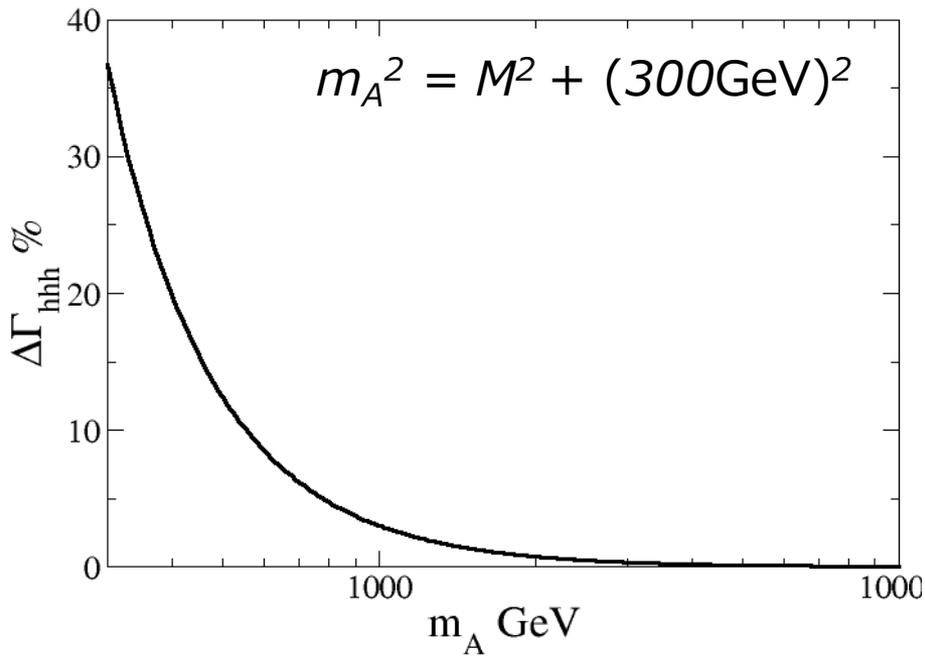
hhh結合

$$\Delta\Gamma_{hhh} \equiv \frac{\Gamma_{hhh}^{\text{THDM}} - \Gamma_{hhh}^{\text{SM}}}{\Gamma_{hhh}^{\text{SM}}}$$

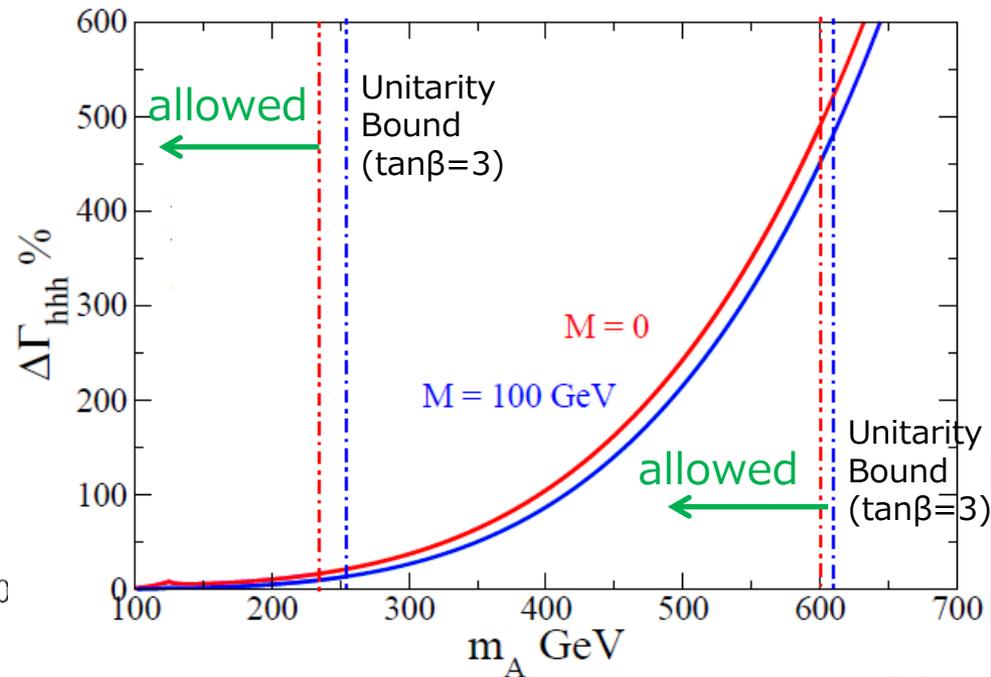
$$\sin(\beta - \alpha) = 1 \quad m_H = m_A = m_{H^\pm} (= m_\phi)$$

$$\Delta\Gamma_{hhh} \simeq + \sum_{\Phi=A,H,H^\pm} c_\Phi \frac{4}{3} \frac{m_\Phi^4}{16\pi^2 m_h^2 v^2} \left(1 - \frac{M^2}{m_\Phi^2}\right)^3$$

デカップリングの振る舞い



ノンデカップリング効果



K_T VS K_b

◆ スキャン解析

$$100 \text{ GeV} \leq m_{H^+, H, A} \leq 1000 \text{ GeV}$$

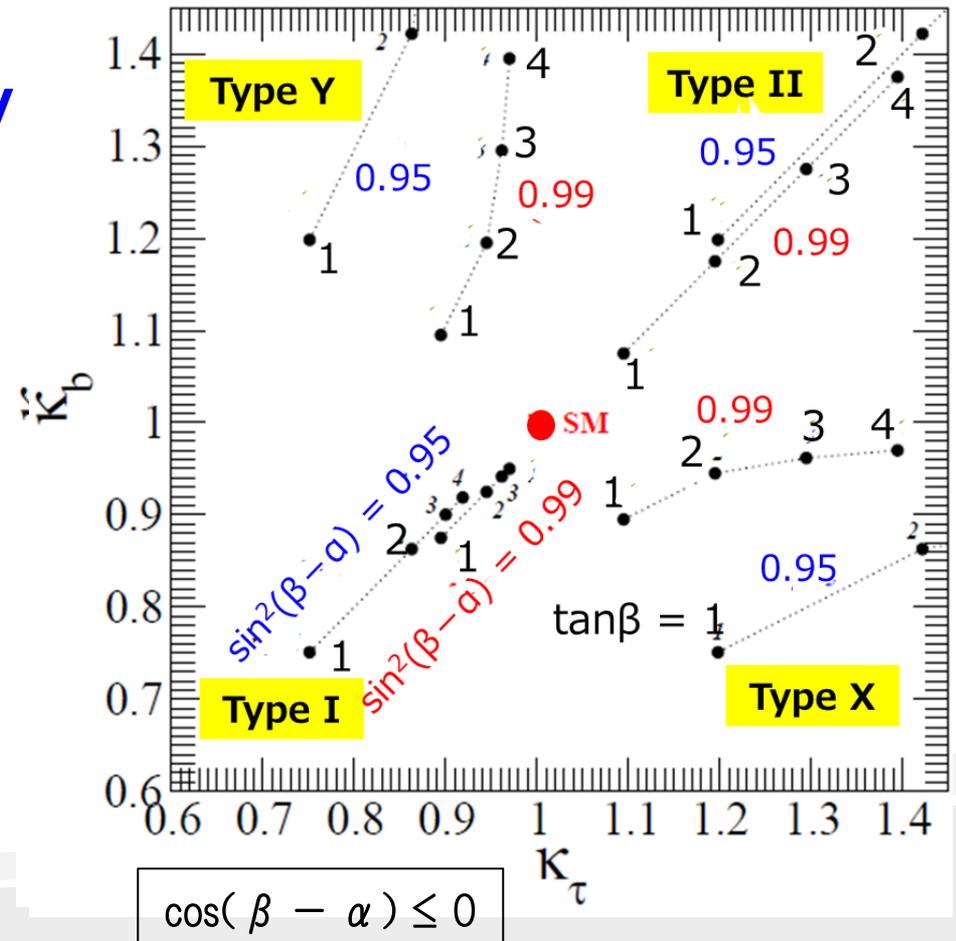
$$0 \leq M \leq m_{H^+, H, A}$$

↳ Soft breaking scale of Z_2 sym.

◆ 理論的制限

- Perturbative Unitarity
- Vacuum Stability

Tree Level



1ループレベル

K_T VS K_b

◆ スキャン解析

$$100 \text{ GeV} \leq m_{H^+, H, A} \leq 1000 \text{ GeV}$$

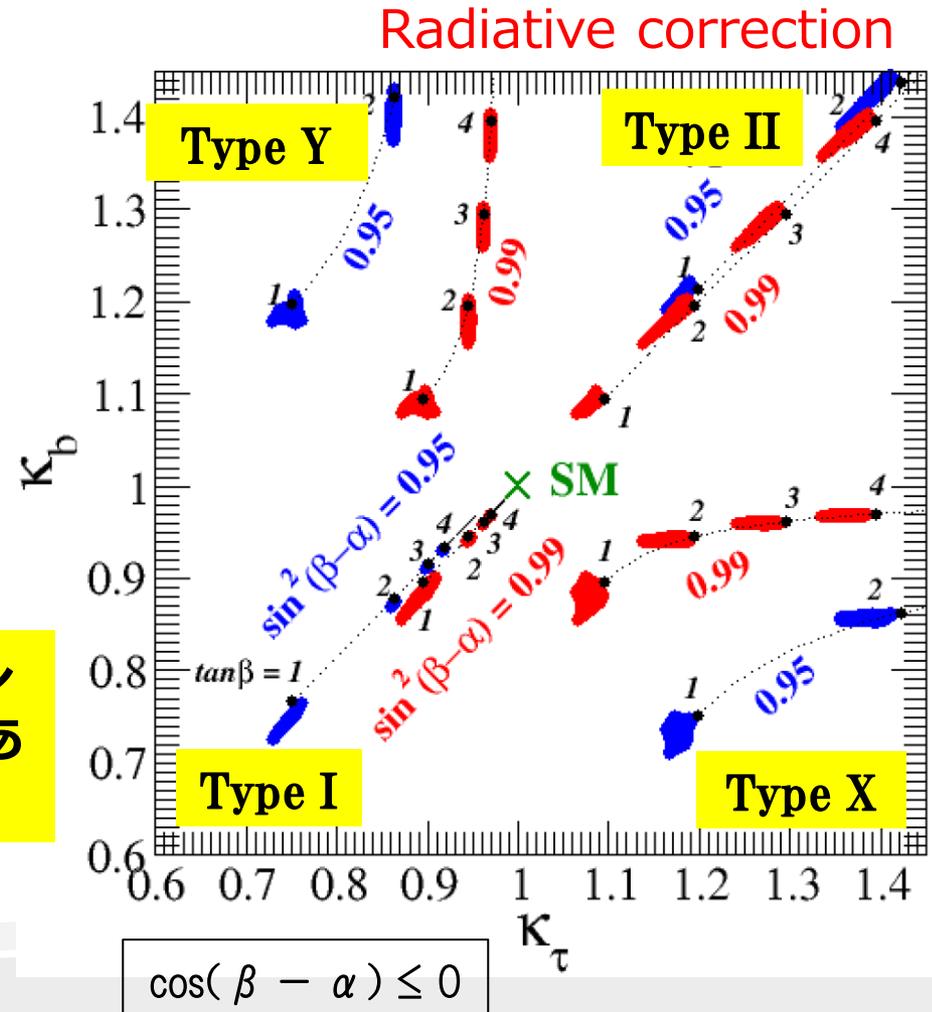
$$0 \leq M \leq m_{H^+, H, A}$$

↳ Soft breaking scale of Z_2 sym.

◆ 理論的制限

- Perturbative Unitarity
- Vacuum Stability

hff 結合はループ補正によってツリーレベルの予言から最大数%ズれることがあり得る。



1ループレベル

K_T VS K_b

◆ スキャン解析

$$100 \text{ GeV} \leq m_{H^+, H, A} \leq 1000 \text{ GeV}$$

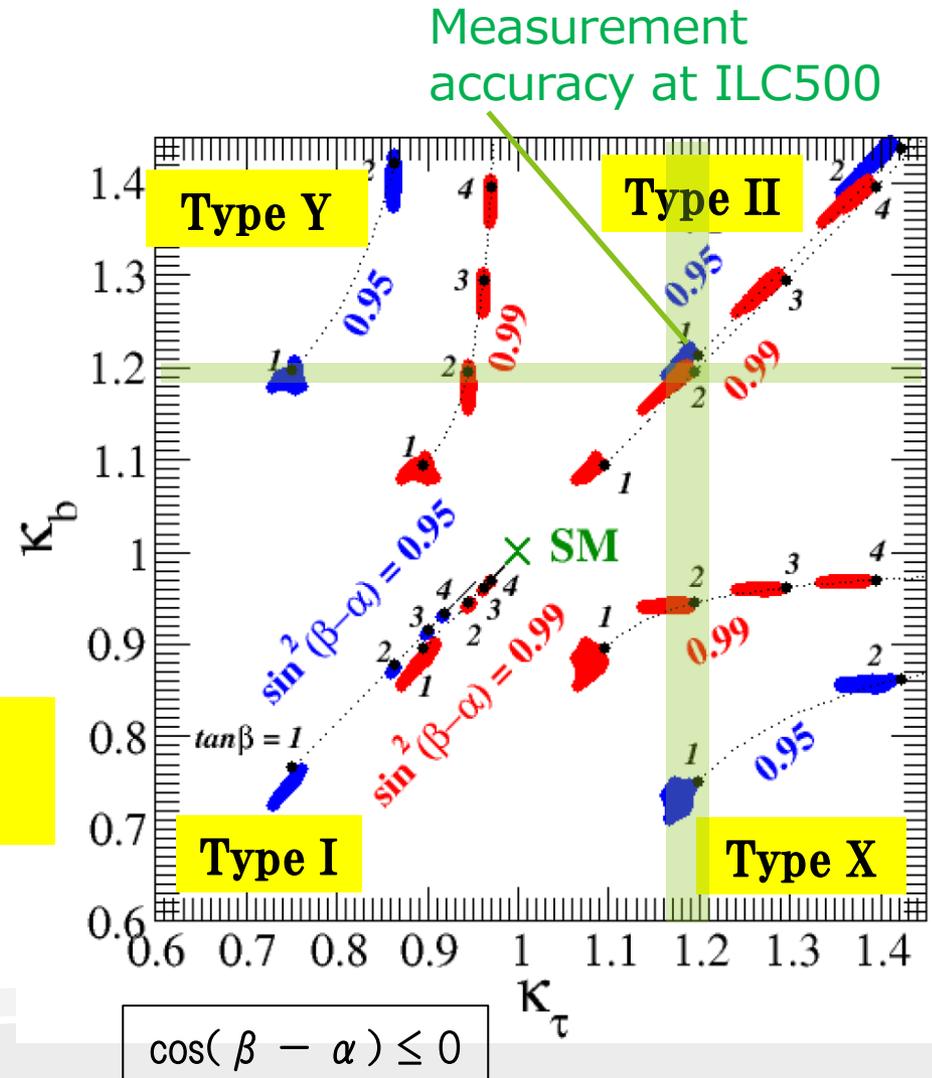
$$0 \leq M \leq m_{H^+, H, A}$$

↳ Soft breaking scale of Z_2 sym.

◆ 理論的制限

- Perturbative Unitarity
- Vacuum Stability

将来の精密測定と比較するためには、
輻射補正の効果は無視できない。





まとめ

- 結合定数測定と理論計算の比較でヒッグスセクターの構造を決定するためには、将来実験での測定精度に見合った**精密な理論計算**が必要
- さまざまな拡張ヒッグスモデルで、各結合定数の標準理論の予言からのずれのパターンを輻射補正を入れて計算し、数値計算コードを完成させ、将来の精密実験での指紋照合に備える
- 電弱・スカラーループ補正の計算コードを作成中

2HDM(I, II, X, Y)およびトリプレット模型に関してはすべての結合を1ループレベルで計算するコードが完成した

- このトークでは2HDMの最新結果について報告した
-
- 今後：シングレット模型、イナート2重項模型等で同様の計算、QCD補正の計算、各崩壊モードの崩壊率等もそれぞれの模型で評価する