ヒッグス結合定数輻射補正計算とILCの精密測定による拡張ヒッグス模型の識別

arXiv:1705.05399 [hep-ph]

桜井 亘大 （富山大、大阪大）

共同研究者：

兼村 晋哉 (大阪大)
柳生 慶 (Univ. of Florence)
菊地 真吏子 (National Taiwan Univ.)

ILC夏の合宿2017 (乗鞍高原温泉 BELL鈴蘭小屋, 7月23日)

目次

1.イントロダクション
- モチベーション、ストラテジー

2. H-COUPについて

様々な拡張ヒッグス模型での1ループレベルの
ヒッグス結合定数を計算する自作のコード

3. H-COUPのゲージ依存性の問題の改善

4. H-COUPを用いた拡張ヒッグス模型の識別

イントロダクション

- 125GeV ヒッグスボソンの発見 (LHC, 2012年)

  ➡ 低エネルギー有効理論(100GeV程度)として標準理論(SM)が確立

- しかし、SMでは説明できない未解決問題がある

  ・未解決諸現象
  - ニュートリノ振動
  - 暗黒物質
  - 宇宙のバリオン数非対称性
  - etc.

  ・理論的問題
  - 階層性問題
  - 強いCP問題
  - etc.

→ 標準理論の背後に新物理ある

ヒッグス物理＝新物理の窓

- ヒッグスセクターは依然として未解明
  - ・ヒッグス場の数と表現
  - ・ヒッグスポテンシャルの対称性

  ヒッグスセクターの構造
  - ・　　〃　　に現れる負の質量項
  - ・ヒッグスの本質 (素スカラー場？複合場? .....)
  - ・etc.

- 特にヒッグスセクターの構造は新物理模型と密接に関わっているため重要

新物理模型		ヒッグスセクター
B-L model, DM, MSSM, 1st OPT, Radiative seesaw Type-II seesaw, etc.	予言 ⇒ ⇐ 調査	$\Phi + s$ (Singlet) $\Phi + \Phi$ (Doublet) $\Phi + \Delta$ (Triplet) etc.

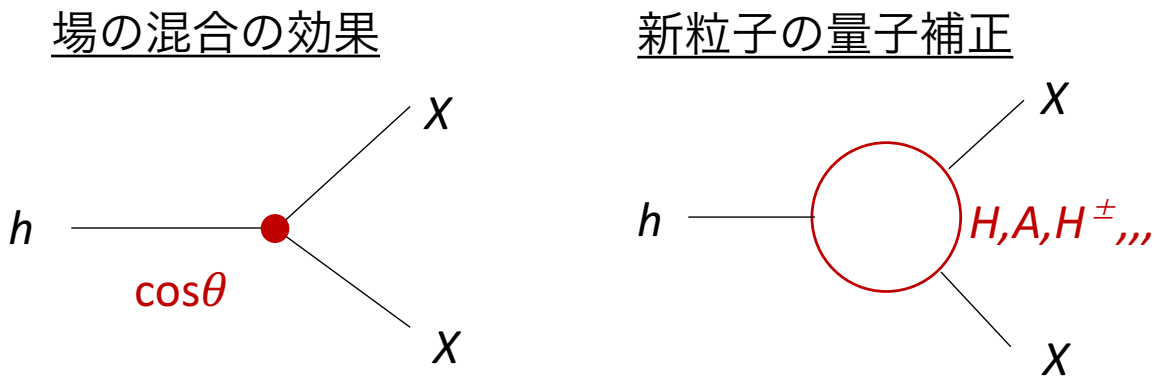
→ヒッグスセクターの構造を解明できれば、新物理に迫ることができる

ヒッグスセクターの検証

➡ ヒッグス結合定数(発見されたヒッグスボソンとSM粒子の結合)に注目

htt, hbb, hcc, $h\tau\tau$, hZZ, hWW, hhh, hgg, $h\gamma\gamma$, $hZ\gamma$

- 一般に、拡張ヒッグス模型におけるヒッグス結合定数は場の混合の効果や新粒子の量子補正によりSMの値からずれ得る



- そのずれのパターンは模型ごとに異なる

➡ ずれのパターンから模型を識別できる可能性がある

ヒッグス結合定数の測定精度

$$\Delta\kappa_X \equiv \frac{g_{hXX}^{exp}}{g_{hXX}^{SM}}$$

現在のデータ(LHC Run I)

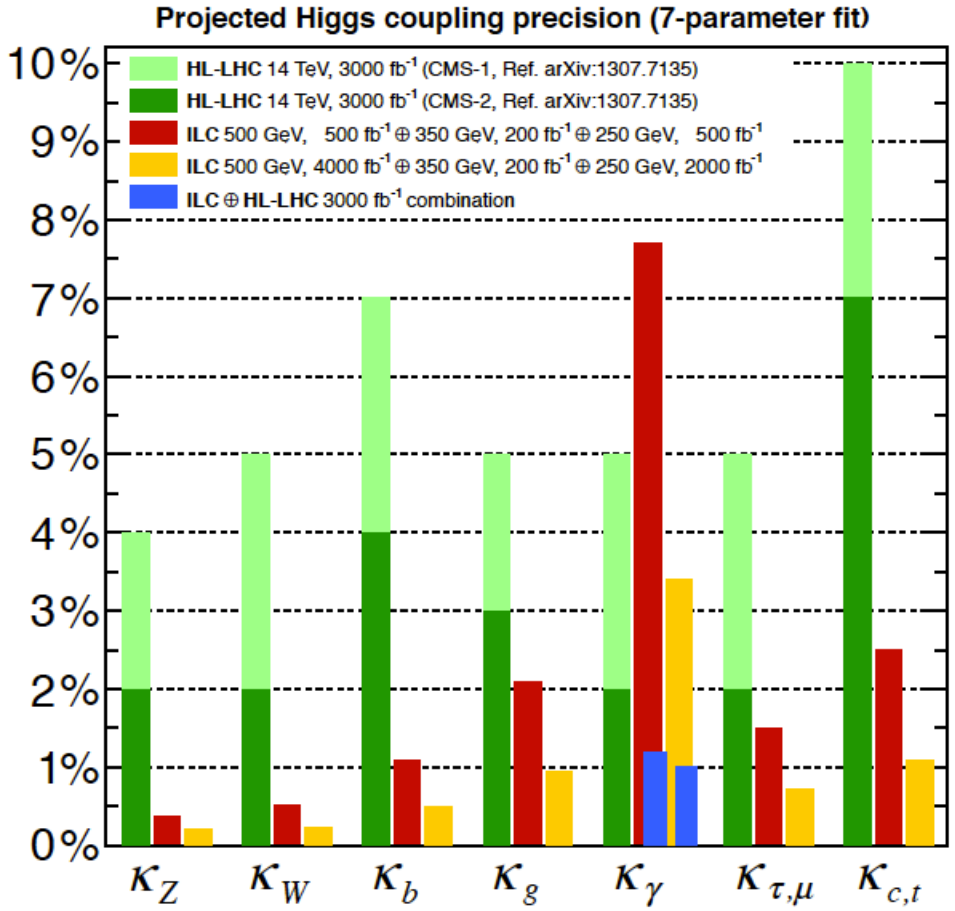
ATLAS and CMS, JHEP08(2016)045

$O(10)\%$

κ_Z	-0.98 $[-1.08, -0.88] \cup [0.94, 1.13]$
κ_W	0.87 $[0.78, 1.00]$
κ_t	$1.40^{+0.24}_{-0.21}$
$\lvert\kappa_\tau\rvert$	$0.84^{+0.15}_{-0.11}$
$\lvert\kappa_b\rvert$	$0.49^{+0.27}_{-0.15}$
$\lvert\kappa_g\rvert$	$0.78^{+0.13}_{-0.10}$
$\lvert\kappa_\gamma\rvert$	$0.87^{+0.14}_{-0.09}$

将来実験の測定精度(HL-LHC and ILC)

ArXiv:1506.05992[hep-ph]



・将来加速器実験 HL-LHC, ILCでは結合定数が数%或はそれ以下の精度で測定される

・将来的にSMからのずれが観測されるかもしれない

ヒッグスセクターの構造決定

htt, hbb,hcc, hττ, hZZ, hWW, hhh,hgg, hγγ, hZγ

輻射補正計算

指紋照合

HL-LHC, ILC, CLIC, FCC-ee, ...

将来加速器実験による
精密測定データ

ヒッグスセクターの構造決定

・この様なストラテジーから、様々な拡張ヒッグス模型における
ヒッグス結合定数を輻射補正を含めて計算した

・ヒッグス結合定数を評価する自作の数値計算コード(H-COUP)を作成した

H-COUP

Kanemura, Kikuchi, KS, Yagyu

SM + 2nd シンプレストな7種類の拡張ヒッグス模型における
1ループレベルのヒッグス結合定数を数値的に評価するFortranコード

- Higgs Singlet Model (HSM) $\Phi + s$ (Singlet) アイソスピンの
- Two Higgs Doublet Model (THDM) $\Phi + \Phi$(Doublet)
  - Type-I
  - Type-II
  - Type-X
  - Type-Y
- Higgs Triplet Model (HTM) $\Phi + \Delta$ (Triplet)
- Inert Doublet Model (IDM) $\Phi + \Phi_{inert}$(Doublet)

H-COUP

Kanemura, Kikuchi, KS, Yagyu

SM + 2nd シンプレストな7種類の拡張ヒッグス模型における
1ループレベルのヒッグス結合定数を数値的に評価するFortranコード

	htt	hbb	$h\tau\tau$	hVV	hhh	hgg	$h\gamma\gamma$	$hZ\gamma$
HSM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Type-I	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Type-II	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Type-X	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Type-Y	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
IDM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
HTM				✓	✓	✓	✓	✓

Kanemura, Kikuchi, Yagyu, NPB907 (2016)
Kanemura, Kikuchi, Yagyu, NPB917 (2017)

Kanemura, Okada, Senaha, Yuan, PRD70 (2004)
Kanemura, Kikuchi, Yagyu, PLB731 (2014)
Kanemura, Kikuchi, Yagyu, NPB96 (2015)

Kanemura, Kikuchi, KS, NPB96 (2015)

Aoki, Kanemura, Kikuchi, Yagyu, PLB714 (2012)
Aoki, Kanemura, Kikuchi, Yagyu, PRD87 (2013)

H-COUP ver. 1.0を近日公開する

H-COUPのゲージ依存性

- 我々はオンシェルスキームでヒッグス結合定数の繰り込み計算を行った

- 通常のオンシェルスキームではヒッグス場の混合角の繰り込みでゲージ依存性が残ることが知られている
  Y. Yamada, PRD 64, 036008 (2001), J. R. Espinosa, Y. Yamada, PRD 67, 036003 (2003)

- この混合角の繰り込みを通じて、H-COUPで計算されたヒッグス結合定数はゲージに依存している
  M. Krause, R. Lorenz, M. Muhlleitner, R. Santos, H. Ziesche, JHEP 09 (2016) 143

- 今回、ピンチテクニックを用いてこのゲージ依存性を取り除いた(HSM, THDMで)

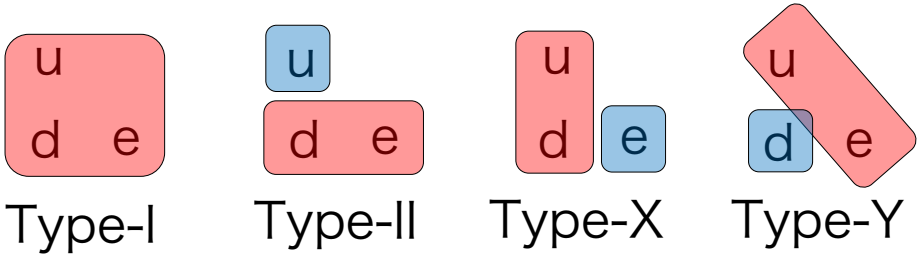
  →以下では具体例としてTHDMを扱う

Two Higgs Doublet Model

- 対称性 $SU(2)_L \times U(1)_Y \times Z_2$(softly-broken) ：ツリーレベルのFCNCを禁止する

  $\Phi_1 \to \Phi_1,\ \Phi_2 \to -\Phi_2$

  4種類の湯川相互作用が存在する



- Φ_1とΦ_2の成分：

$$\Phi_1 = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v_1 + h_1 + iz_1) \end{pmatrix}, \Phi_2 = \begin{pmatrix} \omega_2 \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v_2 + h_2 + iz_2) \end{pmatrix}$$

- 質量固有状態：$R(\theta)$ は2×2回転行列

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} = R(\alpha) \begin{pmatrix} H \\ h \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = R(\beta) \begin{pmatrix} G^0 \\ A \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} w_1^+ \\ w_2^+ \end{pmatrix} = R(\beta) \begin{pmatrix} G^\pm \\ H^+ \end{pmatrix}$$

h :SM-like ヒッグスボソン　$H, A, H^\pm$: 付加的ヒッグスボソン

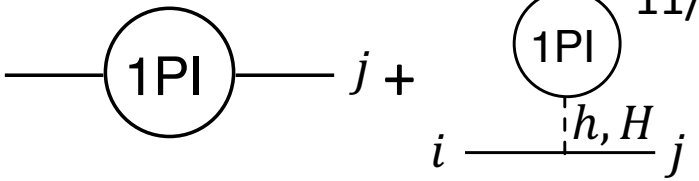
- インプットパラメータ：　8個

  v (=246GeV), m_h(=125GeV), $m_H, m_A, m_{H^\pm}, \alpha, \beta, M^2$

- カウンタータームパラメータ：　20個　$\delta\alpha, \delta\beta$はゲージに依存している

  $\delta v, \delta m_\Phi^2, \delta M^2, \delta\alpha, \delta\beta, \delta Z_\Phi, \delta C_{\Phi_1\Phi_2}$　$(\Phi = h, H, A, H^+, G^0, G^\pm)$

ゲージ依存性

$\Pi_{ij}(q^2) \equiv i$ 

Nielsen恒等式： N. K. Nielsen, NPB101 (1975) 173, Y. Yamada, PRD64(2001)036008

$$\partial_\xi \Pi_{ij}(q^2) = \left(q^2 - m_i^2\right)\Lambda_i(q^2) + \left(q^2 - m_j^2\right)\Lambda_j(q^2)$$

$\Lambda_i(q^2), \Lambda_j(q^2)$:ループ関数の和

ex.1) δm_h^2 (ヒッグスボソン質量m_h^2のカウンターターム)

$$\delta m_h^2 = \Pi_{hh}(m_h^2)$$

➡ $\partial_\xi(\delta m_h^2) = 0$ (Nielsen恒等式より)

ex.2) $\delta\alpha$ (CP-even ヒッグスh, H の混合角αのカウンターターム)

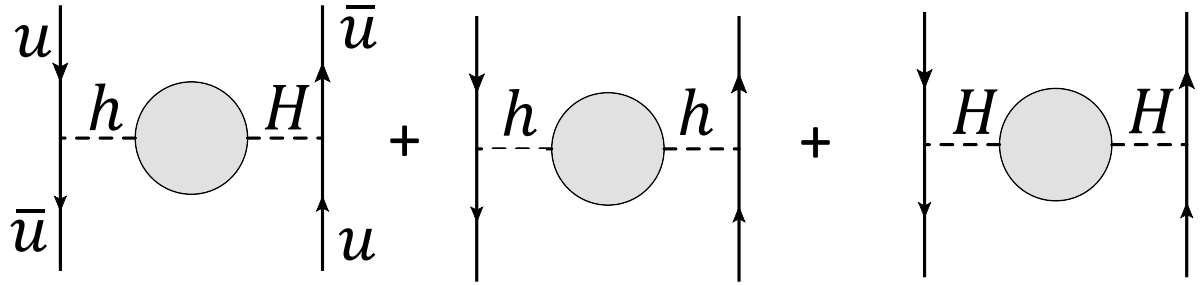
$$\delta\alpha = -\frac{1}{2(m_H^2 - m_h^2)}\left[\Pi_{hH}\left(m_h^2\right) + \Pi_{hH}(m_H^2)\right]$$

➡ $\partial_\xi(\delta\alpha) \neq 0$ (Nielsen恒等式より)

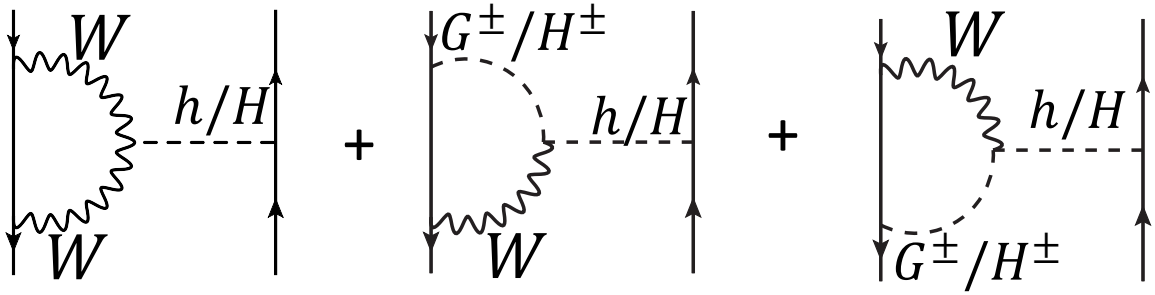
ピンチテクニック (ξ_W part)

Toy process : $u\bar{u} \to u\bar{u}$

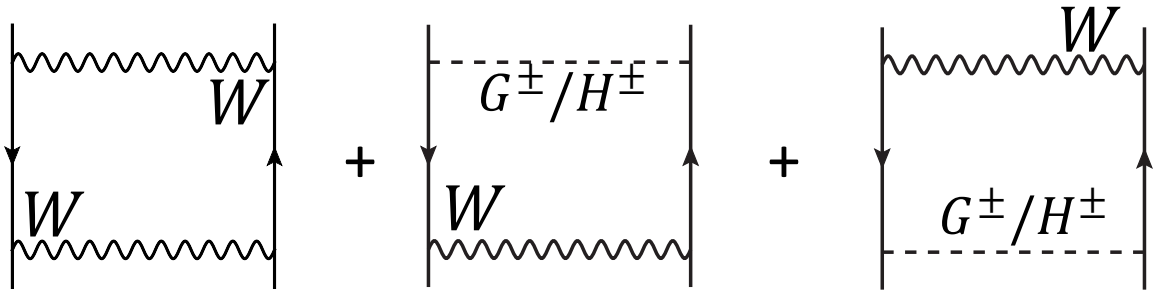
$\mathcal{M}_{self}$ =



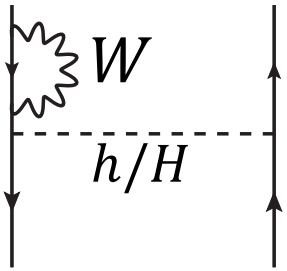
$\mathcal{M}_{vert} \ni$



$\mathcal{M}_{box} \ni$



$\mathcal{M}_{wave} \ni$

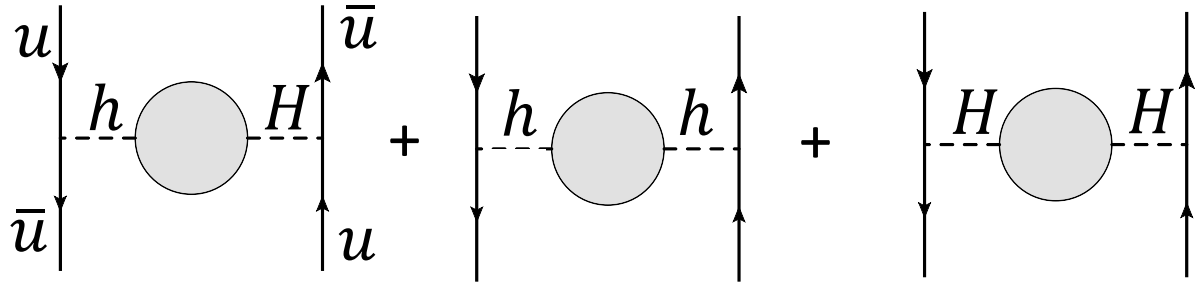


ピンチテクニック (ξ_W part)

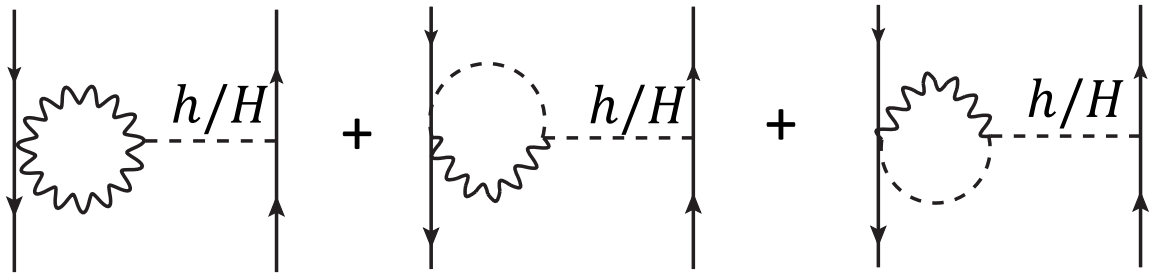
Toy process : $u\bar{u} \to u\bar{u}$

$\mathcal{M}^{PT}_{vert}, \mathcal{M}^{PT}_{box}, \mathcal{M}^{PT}_{wave}$: ピンチターム

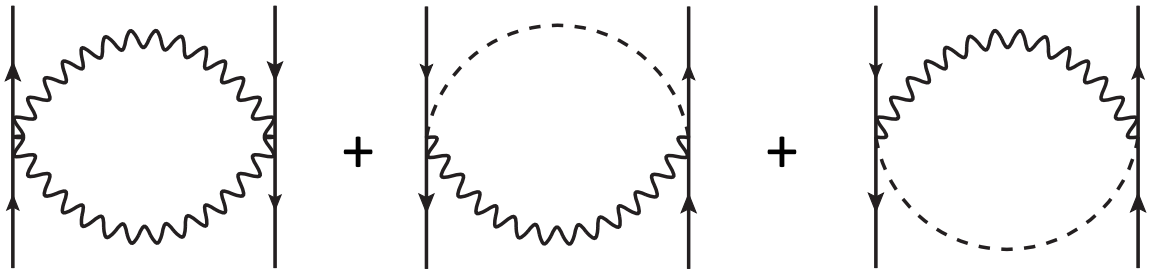
$\mathcal{M}_{self}$ =



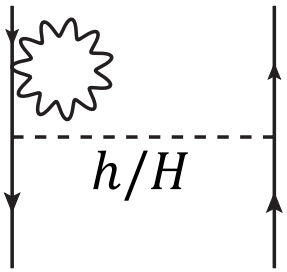
$\mathcal{M}^{PT}_{vert}$ =



$\mathcal{M}^{PT}_{box}$ =



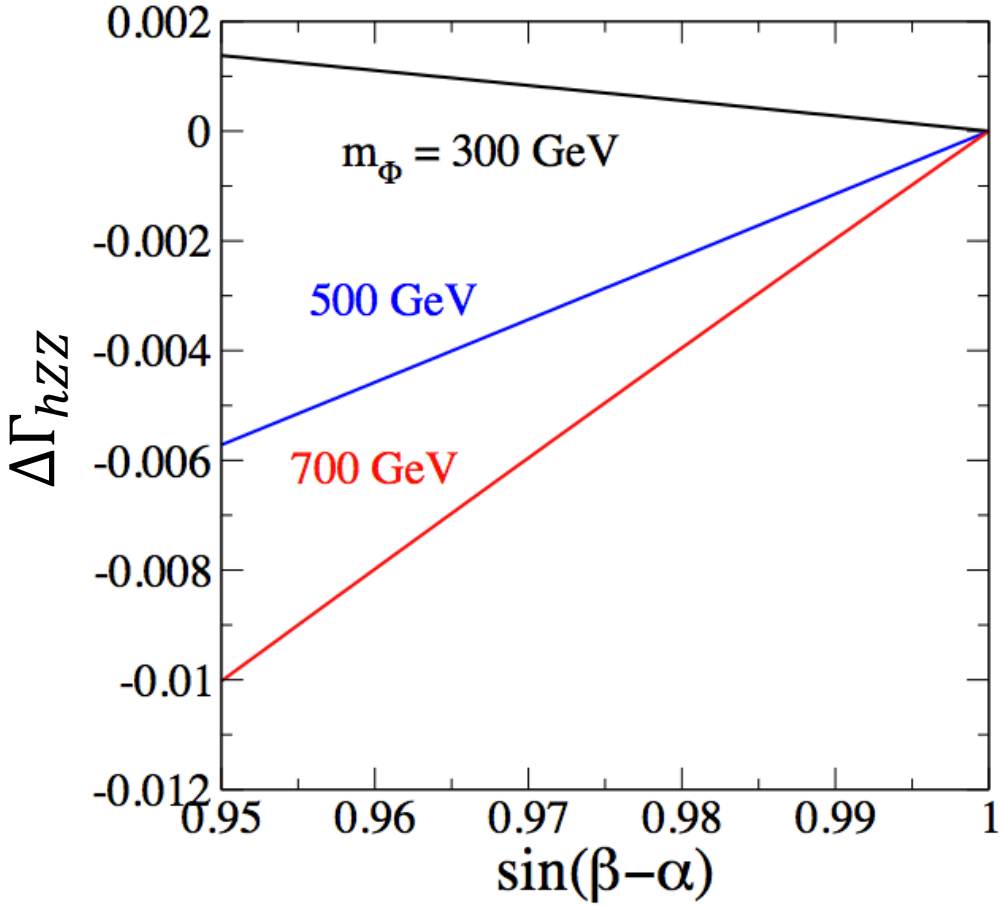
$\mathcal{M}^{PT}_{wave}$ =



$$\frac{\partial}{\partial \xi_W}(\mathcal{M}_{self} + \mathcal{M}^{PT}_{vert} + \mathcal{M}^{PT}_{box} + \mathcal{M}^{PT}_{wave}) = 0$$

つまり、ピンチターム(PT)を加えることで
ゲージ不変なΠ_{hH}を得ることができた

ゲージ依存性の数値的評価



$$\Delta\Gamma_{hZZ} \equiv \frac{\boxed{\Gamma_{hZZ}^{\overline{OS}} - \Gamma_{hZZ}^{OS}}}{\Gamma_{hVV}^{\overline{OS}}}$$

$\Gamma_{hZZ}^{\overline{OS}}$: 修正後の繰り込まれた*hZZ*結合

Γ_{hZZ}^{OS} : 修正前の　　〃

$$\boxed{-\frac{m_Z^2}{m_A^2\, v} c_{\beta-\alpha}[\Pi_{AG^0}^{PT}(m_A^2) + \Pi_{AG^0}^{PT}(0)]}$$

コードを修正する前と後の差は$O(0.01)$%程度

Fingerprinting

- HSM, 4タイプのTHDM(Type-I, Type-II, Type-X, Type-Y)を区別できるか議論する

- H-COUPを用いて、ヒッグス結合定数のSMからのずれの相関(ずれのパターン)を数値的に評価した

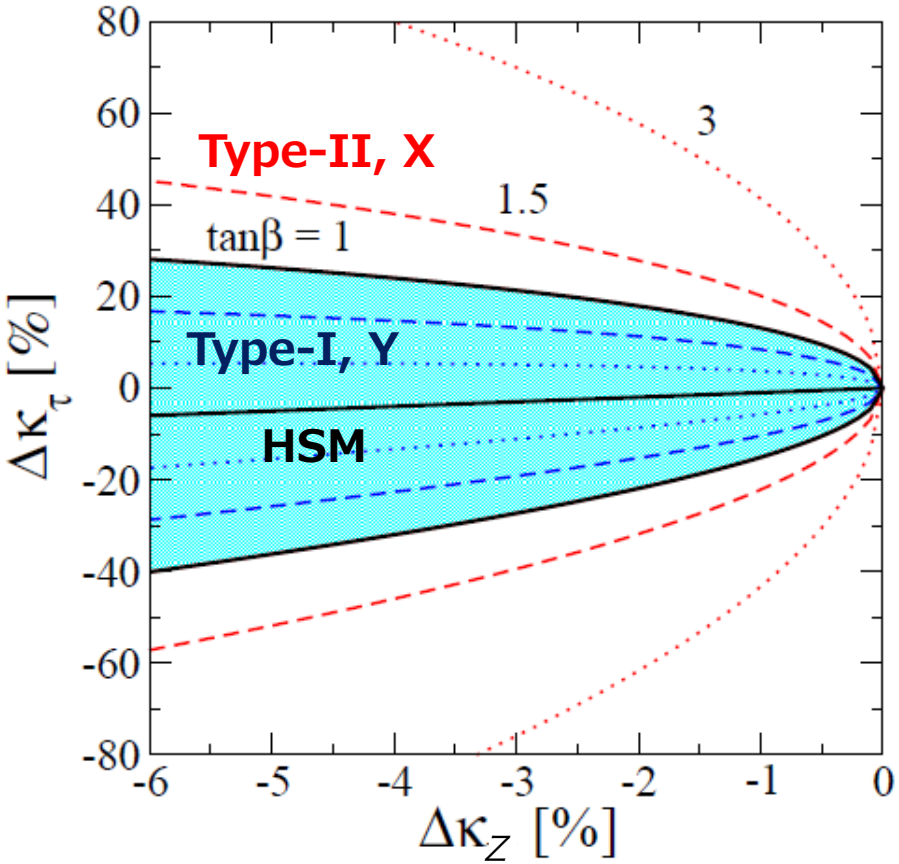
- 以下の理論的制限を考慮しスキャン解析を行った：

  ・摂動ユニタリティ　　・真空安定性
  ・トリビアリティ($\Lambda = 3$TeV)　　・Wrong vacuum (HSM)

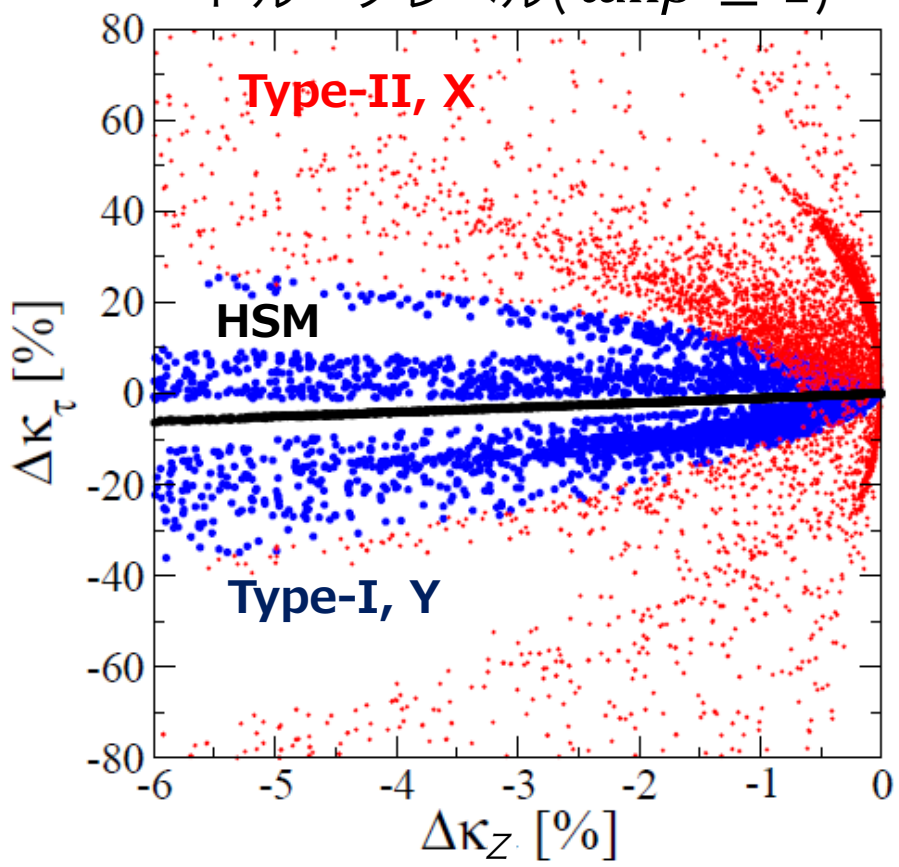
$\Delta\kappa_\tau$ VS $\Delta\kappa_Z$

$$\Delta\kappa_X \equiv \frac{g_{hXX}^{THDM,\,HSM} - g_{hXX}^{SM}}{g_{hXX}^{THDM,\,HSM}}$$

ツリーレベル



1-ループレベル($\tan\beta \geq 1$)



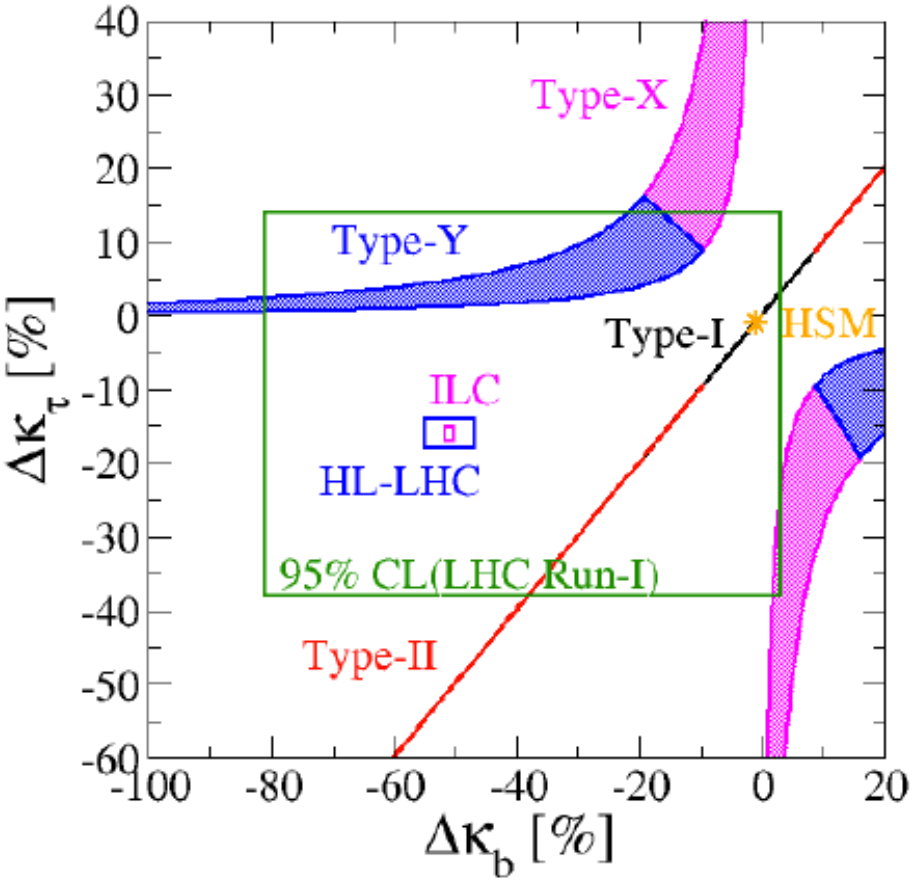
- $|\Delta\kappa_Z| < 1\%$かつ$|\Delta\kappa_\tau| \ll 1$なら、全ての模型の予言が重なる
- $|\Delta\kappa_Z| > 1\%$なら 、$\Delta\kappa_\tau$のずれの大きさで、Type-II,XとHSM,Tpye-I,Yを区別し得る

$\Delta\kappa_\tau$ VS $\Delta\kappa_b$

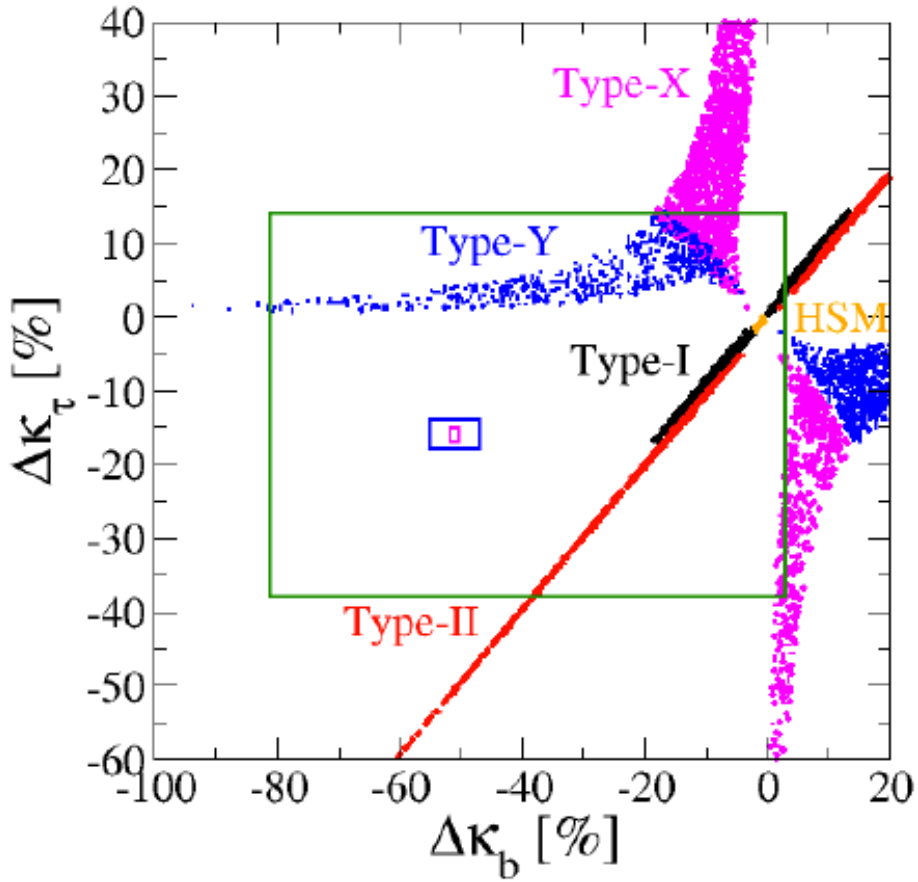
$$\Delta\kappa_X \equiv \frac{g_{hXX}^{THDM,HSM} - g_{hXX}^{SM}}{g_{hXX}^{THDM,HSM}}$$

$\Delta\kappa_Z$ = (-**1.0** ± 0.58)%, $tan\beta \geq 1$

ツリーレベル



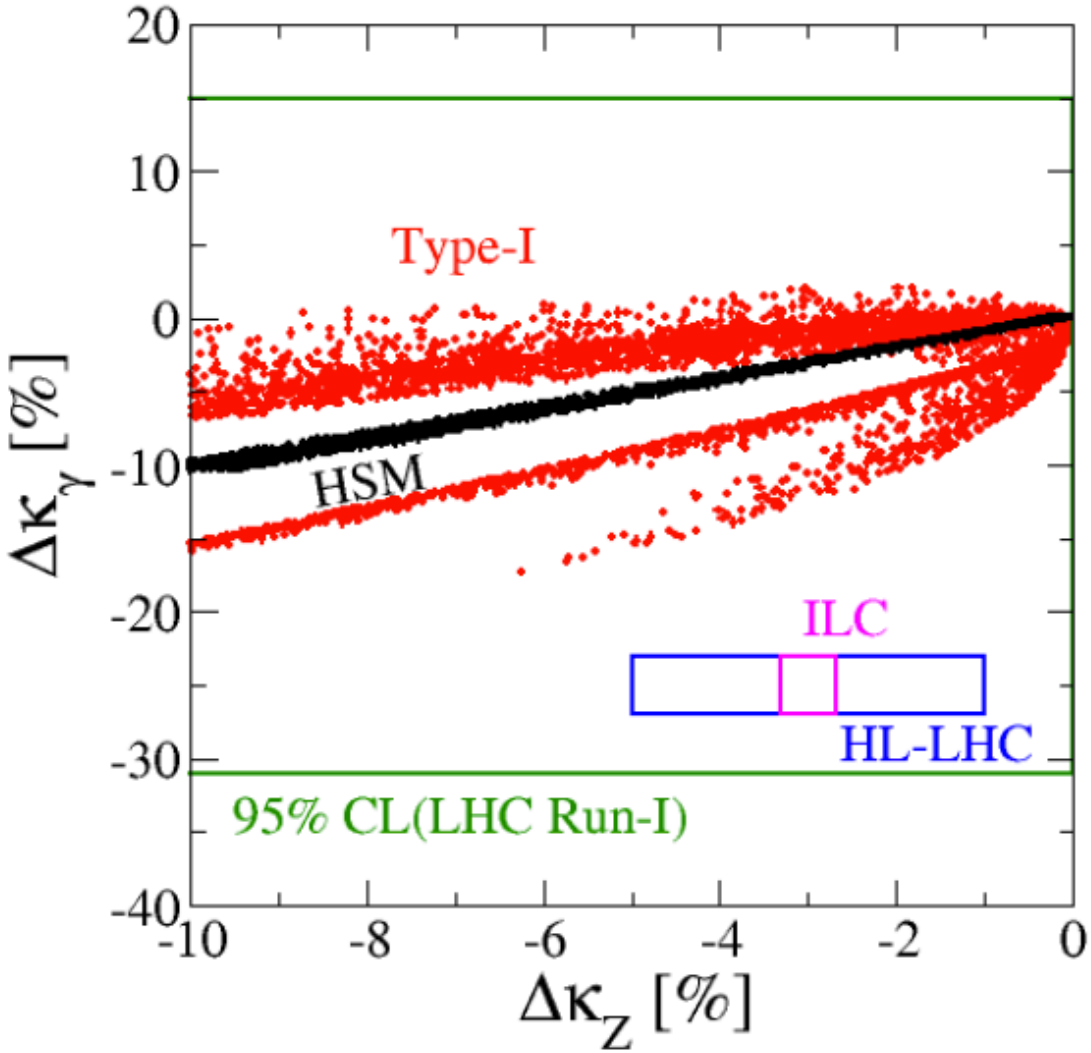
1-ループレベル



$\Delta\kappa_b, \Delta\kappa_\tau$の正負で、Type-II(I)とHSM,Tpye-X(Y)を区別し得る

$\Delta\kappa_\gamma$ VS $\Delta\kappa_Z$

$$\Delta\kappa_\gamma \equiv \frac{\Gamma_{h\to\gamma\gamma}^{THDM,\,HSM} - \Gamma_{h\to\gamma\gamma}^{SM}}{g_{h\to\gamma\gamma}^{THDM,\,HSM}}$$



・ $|\Delta\kappa_Z| < 1\%$でも$\Delta\kappa_\gamma$からTHDMとHSMを区別し得る

まとめ

arXiv:1705.05399 [hep-ph]

H-COUP: SM, HSM, THDM(I, II, X, Y), IDM × 1-loop renormalized htt, hbb,hcc, hττ, hZZ, hWW, hhh, hgg, hγγ, hZγ

- H-COUPは、様々な拡張ヒッグス模型における1ループレベルのヒッグス結合定数を数値的に評価するFortranコードである
- 今回、H-COUPのゲージ依存性の問題を改良した
- 改良されたH-COUPを用いて各模型のヒッグス結合定数の標準理論からのずれ$\Delta\kappa_X$の相関を調べた

  ➡ HSM, THDMの４つのタイプを識別できる可能性がある

- 今後は、　H-COUPを利用して、ヒッグスボソンの崩壊率、生成断面積の計算を行っていく予定である