

ヒッグス結合定数の輻射補正の研究と 将来実験の精密測定を用いた ヒッグスセクターの構造決定

菊地 真吏子（富山大学）

Shinya Kanemura, MK, Kei Yagyu, Nuclear Physics B 896, 80 (2015)

目次

1. イントロダクション
2. 拡張ヒッグス模型のヒッグス結合定数のズレ(ループ込)
3. 解析結果(模型の識別とパラメーターの決定)
4. まとめ

ヒッグス発見とヒッグスの物理

□ ヒッグスボソン発見 (2012.07)

$m_h \cong 125\text{GeV}$,
 spin/parity 0^+
 $h\gamma\gamma$, hgg , hZZ , hWW , hbb , $h\tau\tau$

Scaling factor :

$$\kappa_X \equiv \frac{g_{hXX}}{g_{hXX}^{\text{SM}}}$$

ATLAS [ATLAS-CONF-2014-009](#),

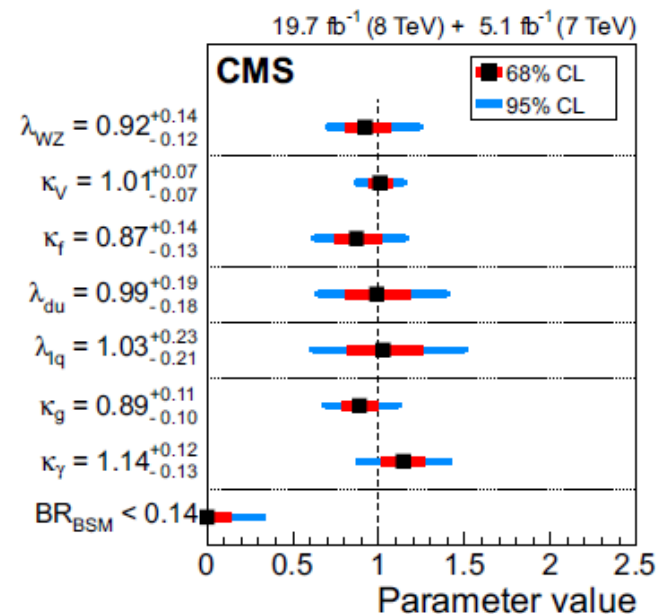
$$\kappa_V = 1.01 \pm 0.07, \quad \kappa_F = 0.87_{-0.13}^{+0.14}, \quad \kappa_g = 0.89_{-0.10}^{+0.11}, \quad \kappa_\gamma = 1.14_{-0.13}^{+0.12},$$

CMS [Eur. Phys. J. C \(2015\)75](#)

$$\kappa_V = 1.15 \pm 0.08, \quad \kappa_F = 0.99_{-0.15}^{+0.08}, \quad \kappa_g = 1.08_{-0.13}^{+0.15}, \quad \kappa_\gamma = 1.19_{-0.12}^{+0.15},$$

性質は標準理論のヒッグスボソンのものと無矛盾

標準理論の質量生成機構は実証された



ヒッグスセクターは未知

□ これでヒッグスの物理は終わり？

⇒ No !!

ヒッグスセクターについては未知な部分が多く残っている

- ヒッグス場の本質
- ヒッグスセクターの形(表現、数)
- 対称性
- ...

発見されたヒッグスボソンを手がかりとして、
ヒッグスセクターの構造・本質を究明することが必要とされる！

様々な拡張されたヒッグスセクターも含めてその理論的、現象論的性質を研究することが重要

ヒッグスセクターと新物理

新物理模型

B-L Gauge,
DM, NMSSM
...

MSSM, Inert DM,
輻射シーソー模型, CPV,
1 次的電弱相転移...

タイプ2シーソー
模型、LR模型、
...

要求



方向性を決定



低エネルギー
有効理論の
ヒッグスセクター

$\Phi +$
S (一重項)

$\Phi +$
 Φ (二重項)

$\Phi +$
 Δ (三重項)

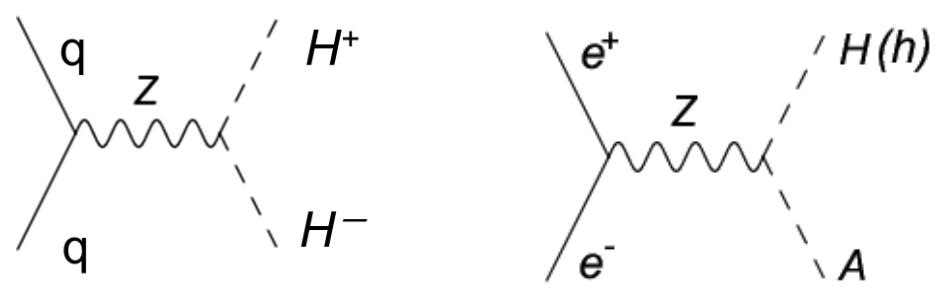
Φ : 標準理論のヒッグス二重項

ヒッグスセクターの構造 = 新物理理論と密接に関係

実験を用いたボトムアップな方法によるヒッグスセクターの構造決定は、新物理理論構築のための最重要研究の一つ！

加速器実験での拡張ヒッグスモデルの検証

□付加的ヒッグスボソンの直接探索



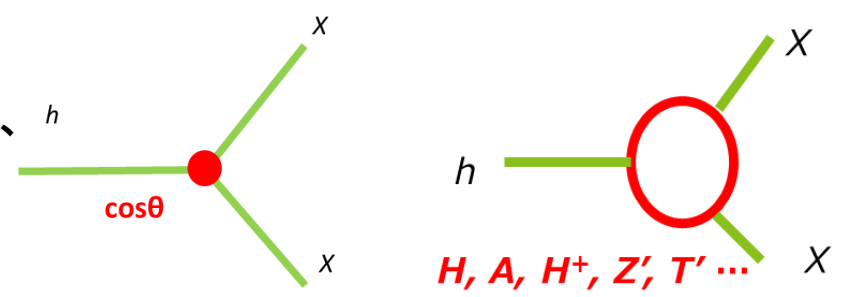
□様々な観測量の標準理論の予言からのズレ

電弱STUパラメーター、...

発見されたヒッグスボソンの結合定数

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

新物理の場の混合やループの効果によって、標準理論の予言からずれる。そのパターンには模型の特徴が表れる。



ヒッグス結合定数

弱ゲージ場との結合 $hVV(V=W,Z)$

ヒッグス機構の検証

湯川結合 $hff(f=t,b,\tau,c,\dots)$

質量起源、フレーバー構造

光子との結合 $h\gamma\gamma$

次元6のオペレーターが存在

ループ効果で表れるため新粒子の効果に敏感

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

ヒッグス結合定数

- **ズレのパターンはヒッグスセクターの構造に強く依存する！**
 ヒッグス場の表現、ヒッグス場の個数、
 ヒッグスセクターがもつ新たな対称性、...

例 *hff* 結合

標準理論の値より ↑ or ↓

$$\Delta\kappa_X = \frac{g_{hXX} - g_{hXX}^{SM}}{g_{hXX}^{SM}}$$

$$\Delta\kappa_V = -(1/2)x^2$$

$$(x < 0)$$

$$\Delta\kappa_u$$

$$\Delta\kappa_d$$

$$\Delta\kappa_e$$

If $\Delta\kappa_V = 1\%$

Φ+S模型

$$-(1/2)x^2$$

$$-(1/2)x^2$$

$$-(1/2)x^2$$

1%

Type I 2HDM

$$-\cot\beta |x|$$

$$-\cot\beta |x|$$

$$-\cot\beta |x|$$

O(10)%

Type X 2HDM

$$-\cot\beta |x|$$

$$-\cot\beta |x|$$

$$+\tan\beta |x|$$

O(10)%

MSSM

(Type II 2HDM)

$$-\cot\beta |x|$$

$$+\tan\beta |x|$$

$$+\tan\beta |x|$$

O(10)%

ズレのパターンは模型の識別に有効。

様々な新物理模型においてズレのパターンを調べるのが重要。

将来実験でのヒッグス結合定数測定精度

- HL-LHC や将来の電子・陽電子加速器実験でのヒッグス結合定数の精密測定が期待されている。
- ILCではほとんどの結合定数が1%かそれ以上の精度で測定される！
- 精密測定との比較のためには、輻射補正を含めた h (発見されたヒッグスボソン)の結合定数の解析が必要

Facility	LHC	HL-LHC	ILC500	ILC500-up
\sqrt{s} (GeV)	14,000	14,000	250/500	250/500
$\int \mathcal{L} dt$ (fb $^{-1}$)	300/expt	3000/expt	250+500	1150+1600
κ_γ	5 – 7%	2 – 5%	8.3%	4.4%
κ_g	6 – 8%	3 – 5%	2.0%	1.1%
κ_W	4 – 6%	2 – 5%	0.39%	0.21%
κ_Z	4 – 6%	2 – 4%	0.49%	0.24%
κ_ℓ	6 – 8%	2 – 5%	1.9%	0.98%
$\kappa_d = \kappa_b$	10 – 13%	4 – 7%	0.93%	0.60%
$\kappa_u = \kappa_t$	14 – 15%	7 – 10%	2.5%	1.3%

我々のプロジェクト

- 様々な拡張ヒッグス模型において、発見されたヒッグスボソン (h) の各種結合定数を量子補正の効果も含めて包括的に計算する
- 標準理論からのズレのパターンを系統的に評価、将来実験を用いてヒッグスセクターの構造を解明し、新物理の方向性を決定する

$\phi, \phi+S, \phi+\phi, \phi+\Delta, \dots$

$hVV, hff, h\tau\tau, hgg, hhh, \dots$

輻射補正の解析



将来実験での
精密測定



ヒッグスセクターの構造決定 !!

シングレット模型(HSM)

Kanemura, MK, Yagyu, in preparation

2 ヒッグスダブルレット模型(2HDM)

Kanemura, MK, Yagyu, NPB 896,80(2015)

Kanemura, MK, Yagyu, PLB731 (2014)27

トリプレット模型(HTM)

Aoki, Kanemura, MK, Yagyu; PRD87,015012(2013),

Kanemura, MK, Yagyu, in preparation

イナート二重項模型

Kanemura, MK, Sakurai, in preparation

	htt	hbb	$h\tau\tau$	hWW	hZZ	$h\tau\tau$	hhh
$\phi+S$			現在計算中				
$\phi+\phi(I)$	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
IDM	済	済	済	済	済	済	済

...

我々のプロジェクト

- 様々な拡張ヒッグス模型において、発見されたヒッグスボソン(h)の各種結合定数を量子補正の効果も含めて包括的に計算する
- 標準理論からのズレのパターンを系統的に評価、将来実験を用いてヒッグスセクターの構造を解明し、新物理の方向性を決定する

そのために必要な拡張ヒッグス模型におけるヒッグス結合定数1ループ計算の数値計算プログラム群を作成する。

「HCOUPLINGS(仮)」は、近々公開する予定

シングレット模型(HSM)

Kanemura, MK, Yagyu, in preparation

2ヒッグスダブルレット模型(2HDM)

Kanemura, MK, Yagyu, NPB 896,80(2015)
Kanemura, MK, Yagyu, PLB731 (2014)27

トリプレット模型(HTM)

Aoki, Kanemura, MK, Yagyu; PRD87,015012(2013),
Kanemura, MK, Yagyu, in preparation

イナート二重項模型

Kanemura, MK, Sakurai, in preparation

	htt	hbb	$h\tau\tau$	hWW	hZZ	$h\gamma\gamma$	hhh
$\Phi+S$			現在計算中				
$\Phi+\Phi(I)$	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
IDM	済	済	済	済	済	済	済

...

TWO HIGGS DOUBLET MODELS



TWO HIGGS DOUBLET MODELS

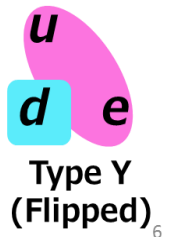
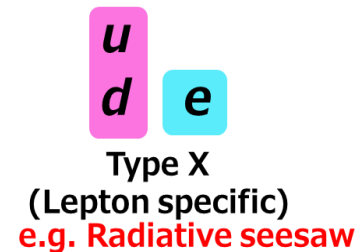
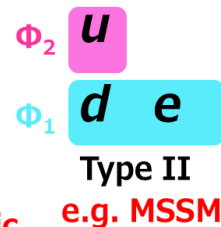
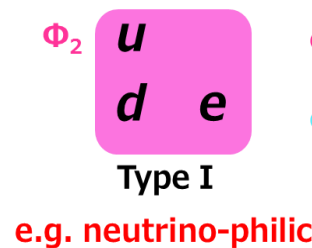
- $\Phi + \Phi$ のヒッグスセクターは様々な新物理モデルに含まれる

MSSM,

ループでニュートリノ微小質量を説明する模型,
付加的なCP位相

- FCNCをツリーで禁止するために**離散 Z_2 対称性**を課す

$$\begin{aligned}\Phi_1 &\rightarrow +\Phi_1 \\ \Phi_2 &\rightarrow -\Phi_2\end{aligned}$$



フェルミオンへの Z_2 電荷のアサインの仕方によって
4つのタイプの湯川相互作用が存在する

Barger, Hewett, Phillips(1990), Aoki,
Kanemura, Tsumura, Yagyu(2009),
Logan, Su, Haber, ...

TWO HIGGS DOUBLET MODELS

- CP不変 & softly broken Z_2

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

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

- 質量固有状態

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\alpha & -\sin\alpha \\ \sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H \\ h \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} z \\ A \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} \omega_1^+ \\ \omega_2^+ \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\beta & -\sin\beta \\ \sin\beta & \cos\beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega^+ \\ H^\pm \end{pmatrix}.$$

$h,$
 H, A, H^\pm

SM-like Higgs boson
Extra Higgs bosons

- パラメーター(8)

$$m_\Phi^2 \cong \lambda' v^2 + M^2$$

($\Phi : H, A, H^\pm$) Soft breaking scale of Z_2 sym.

$$v \simeq 246 \text{ GeV} \quad m_h \simeq 126 \text{ GeV}$$

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

6 free parameters

$$v^2 = v_1^2 + v_2^2 \sim (246 \text{ GeV})^2$$

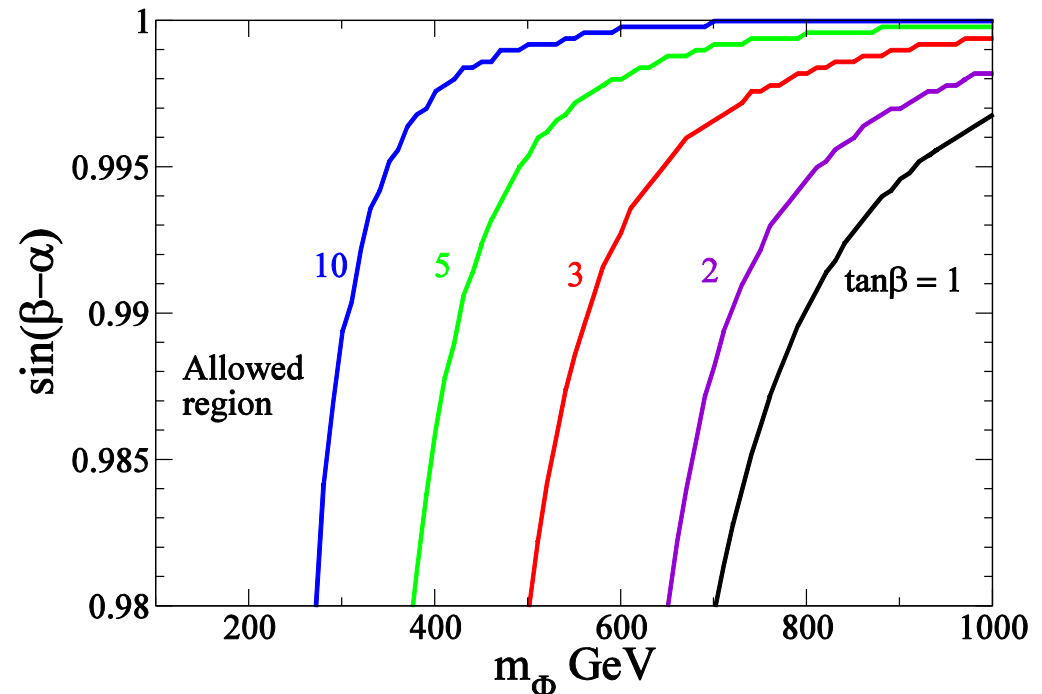
$$\tan\beta = \frac{v_2}{v_1}$$

2HDMの h (SM-like ヒッグスボソン) の結合定数

ゲージ結合

 $hVV \quad V = W, Z$ $(\cos(\beta - \alpha) < 0)$ $\kappa_V = \sin(\beta - \alpha) \rightarrow 1$ SM like limit $(\kappa_V < 1)$

□ 摂動ユニタリティー と真空安定性の制限での許容領域

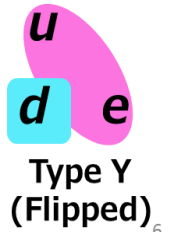
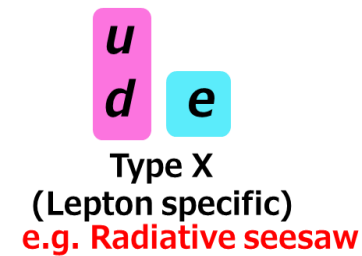
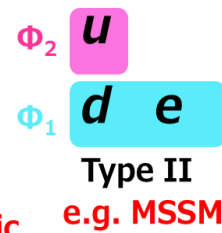
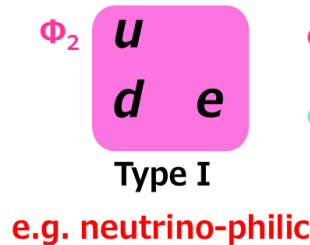
 $\kappa_V = \sin(\beta - \alpha)$  $m_\phi = m_{H^+} = m_A = m_H$

結合定数のズレは新物理のスケールを示す

2HDMの h (SM-like ヒッグスボソン) の結合定数

湯川結合

hff



相互作用するヒッグス場の種類によって κ の形異なる

If f couples to Φ_2

$$\kappa_f = \sin(\beta - \alpha) + \cot\beta \cos(\beta - \alpha)$$

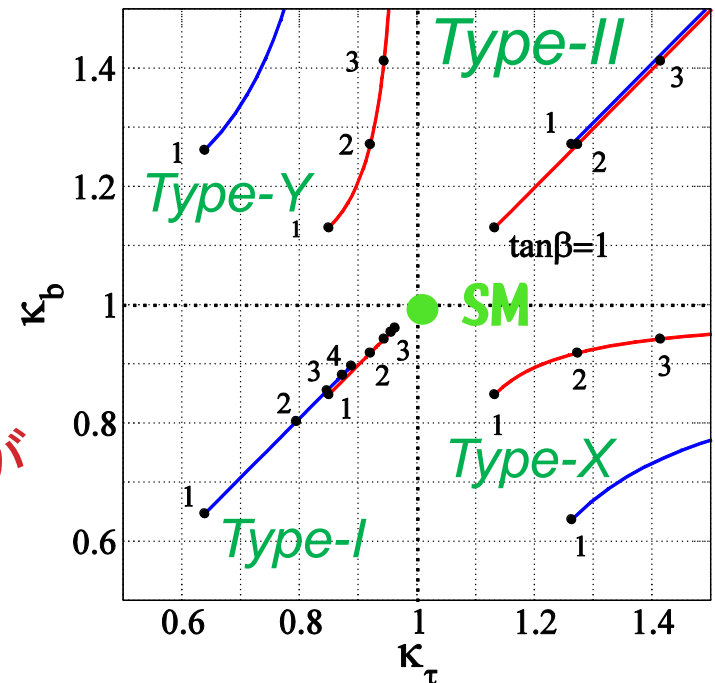
If f couples to Φ_1

$$\kappa_f = \sin(\beta - \alpha) - \tan\beta \cos(\beta - \alpha)$$

4タイプで hbb と $h\tau\tau$ のズレのパターンが異なり、模型の識別に有効

$$x = -0.14 \quad [\sin(\beta - \alpha) = 0.99]$$

$$x = -0.32 \quad [\sin(\beta - \alpha) = 0.95]$$



2HDMの h (SM-like ヒッグスボソン) の結合定数

湯川結合

 hff

$$x = \beta - \alpha - \frac{\pi}{2}$$

$$\left(\beta - \alpha = \frac{\pi}{2} - x \right)$$

SM-like; $x \ll 1$

$$\cos(\beta - \alpha) = x$$

$$\left[\sin(\beta - \alpha) = 1 - \frac{x^2}{2} \right]$$

相互作用するヒッグス場の種類によって κ の形異なる

$$x = -0.14 \quad [\sin(\beta - \alpha) = 0.99]$$

$$x = -0.32 \quad [\sin(\beta - \alpha) = 0.95]$$

If f couples to Φ_2

$$K_f = \sin(\beta - \alpha) + \cot\beta \cos(\beta - \alpha)$$

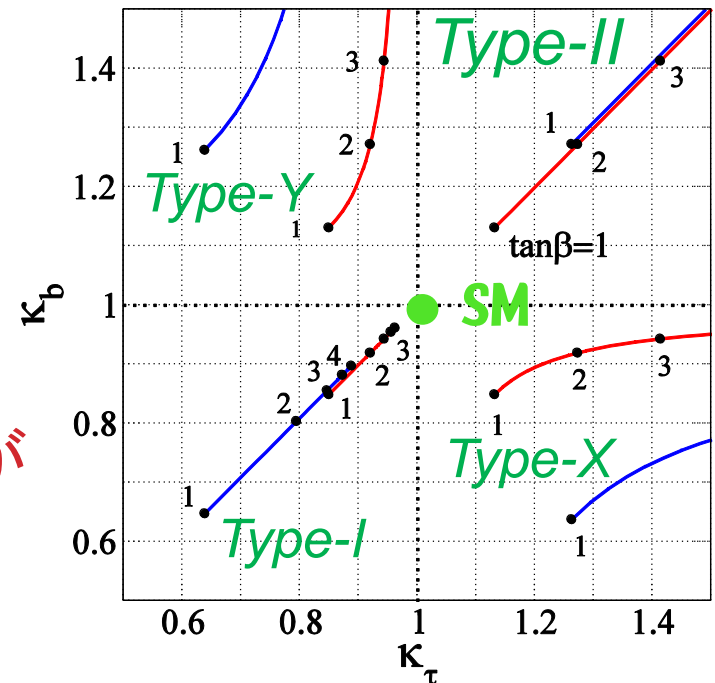
$$= 1 + \cot\beta x - \frac{x^2}{2}$$

If f couples to Φ_1

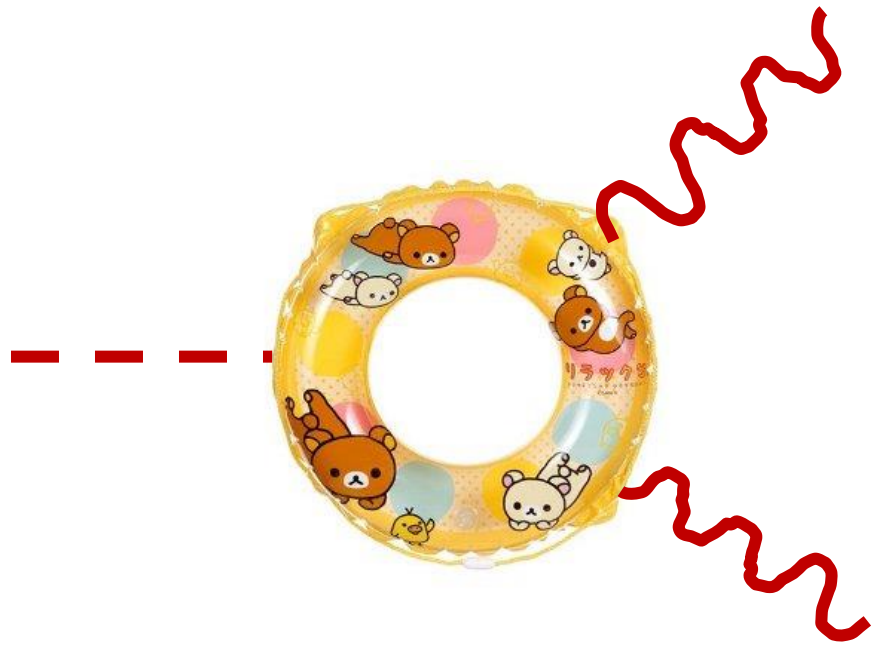
$$K_f = \sin(\beta - \alpha) - \tan\beta \cos(\beta - \alpha)$$

$$= 1 - \tan\beta x - \frac{x^2}{2}$$

4タイプで hbb と $h\tau\tau$ のズレのパターンが異なり、模型の識別に有効



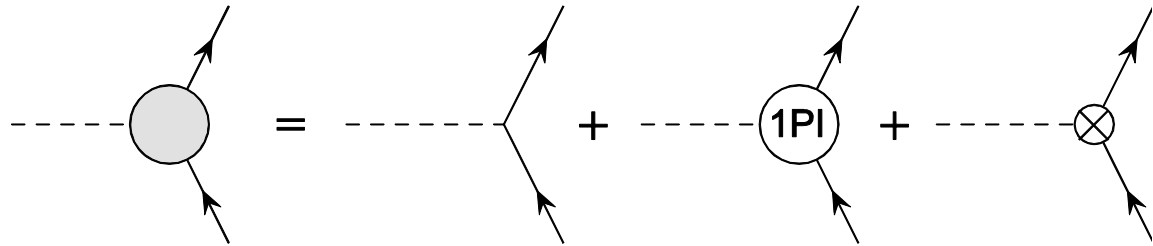
輻射補正の研究



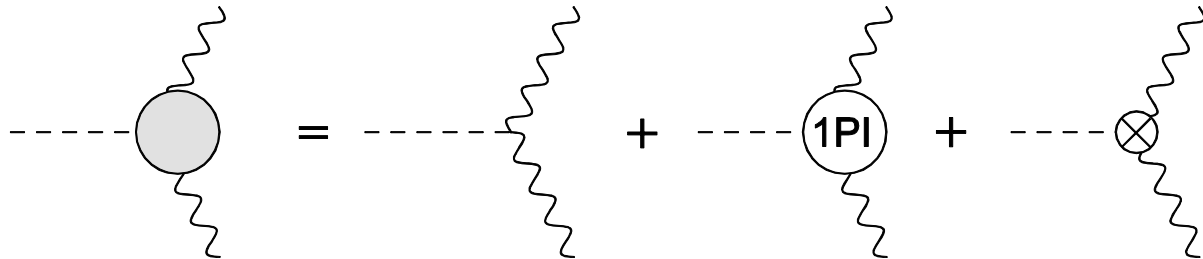
結合定数の輻射補正の研究

- 4タイプの2HDMの hZZ , hWW , $h\gamma\gamma$, hgg , $h\gamma Z$, hbb , $h\tau\tau$, htt , hhh を1ループレベルで計算した
- オンシェルくりこみ法

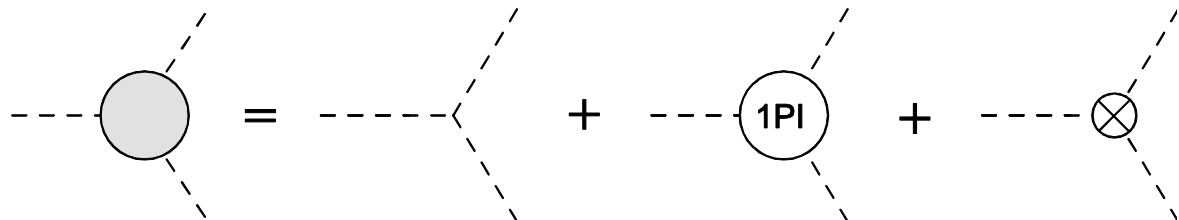
hZZ
 hWW



hbb , $h\tau\tau$,
 htt , ...



hhh



結合定数の輻射補正の研究

- 4タイプの2HDMの hZZ , hWW , $h\gamma\gamma$, hgg , $h\gamma Z$, hbb , $h\tau\tau$, htt , hhh を1ループレベルで計算した
- オンシェルくりこみ法

hZZ
 hWW

Hollik, Penaranda, Eur. Phys. J. C23 (2002) [MSSM]
Kanemura, Kiyoura, Okada, Senaha, Yuan PLB558, (2003)
Kanemura, Okada, Senaha, Yuan, PRD70 (2004)
Kanemura, Kikuchi, Yagyū NPB896 (2015)

hbb , $h\tau\tau$,
 htt , ...

Guasch, Hollik, Penaranda, PLB515 (2001) [MSSM]
Guasch, Hafliger, Spira, PRD68 (2003) [MSSM]
Arhrib, Peyranere, Hollik, Penaranda, PLB579, 361 (2004) [MSSM]
Kanemura, Kikuchi, Yagyū, PLB731 (2014)
Kanemura, Kikuchi, Yagyū NPB896 (2015)

hhh

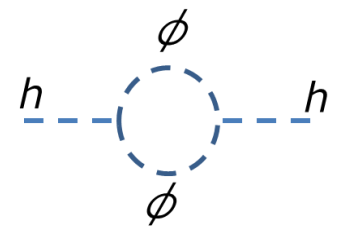
Kanemura, Okada, Senaha, Yuan, PRD70 (2004).
Osland, Pandita Selbuz, PRD78, 015003 (2008)
Kanemura, Kikuchi, Yagyū NPB896 (2015)

スケールファクター近似公式 (1 LOOP)

近似公式 (SM like limit) $x \ll 1$

$\Delta\kappa_X = \kappa_X - 1$ (1-loop level) ($\Phi = H^\pm, A, H$)

$$\Delta\hat{\kappa}_V \simeq -\frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{16\pi^2} \frac{1}{6} \sum_{\Phi=A,H,H^\pm} c_\Phi \frac{m_\Phi^2}{v^2} \left(1 - \frac{M^2}{m_\Phi^2}\right)^2,$$



$$m_\Phi^2 \sim \lambda v^2 + M^2$$

ループの効果

$$m_\Phi^2 \left(1 - \frac{M^2}{m_\Phi^2}\right)^2 \begin{cases} \propto \frac{1}{m_\Phi^2} & (M \gg v) \text{ デカップリング} & (\eta \rightarrow 0) \\ \propto m_\Phi^2 & (M \sim v) \text{ ノンデカップリング} & (\eta \rightarrow 1) \end{cases}$$

デカップリングの度合い: $\eta = 1 - \frac{M^2}{m_\Phi^2}$

$$\Delta\hat{\kappa}_\tau \simeq \Delta\hat{\kappa}_V + \xi_e x,$$

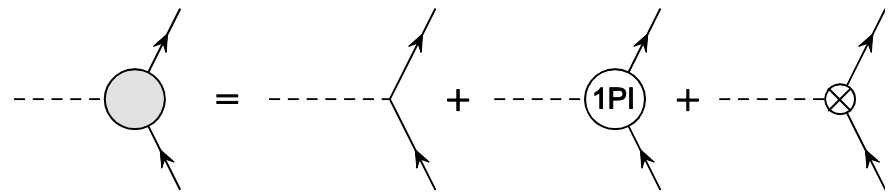
$$\Delta\hat{\kappa}_b \simeq \Delta\hat{\kappa}_V + \xi_d x - \frac{1}{16\pi^2} \xi_u \xi_d \frac{4m_t^2}{v^2} \left[1 - \frac{M^2}{m_{H^\pm}^2} + \frac{m_t^2}{m_{H^\pm}^2} \left(1 + \ln \frac{m_t^2}{m_{H^\pm}^2}\right)\right] - \frac{1}{16\pi^2} \frac{1}{3} \xi_d^2 \sum_{\Phi=A,H,H^\pm} \frac{m_b^4}{v^2 m_\Phi^2}$$

$$\Delta\hat{\kappa}_c \simeq \Delta\hat{\kappa}_V + \xi_u x,$$

$$\Delta\hat{\kappa}_t \simeq \Delta\hat{\kappa}_V + \xi_u x - \frac{1}{16\pi^2} \frac{1}{3} \left[\xi_u^2 \sum_{\Phi=A,H,H^\pm} \frac{m_t^4}{v^2 m_\Phi^2} + \xi_d^2 \frac{m_b^2 m_t^2}{v^2 m_{H^\pm}^2} \right]$$

湯川相互作用タイプの識別

- ヒッグスセクターの形
湯川相互作用のタイプは？



◆ スキャン解析

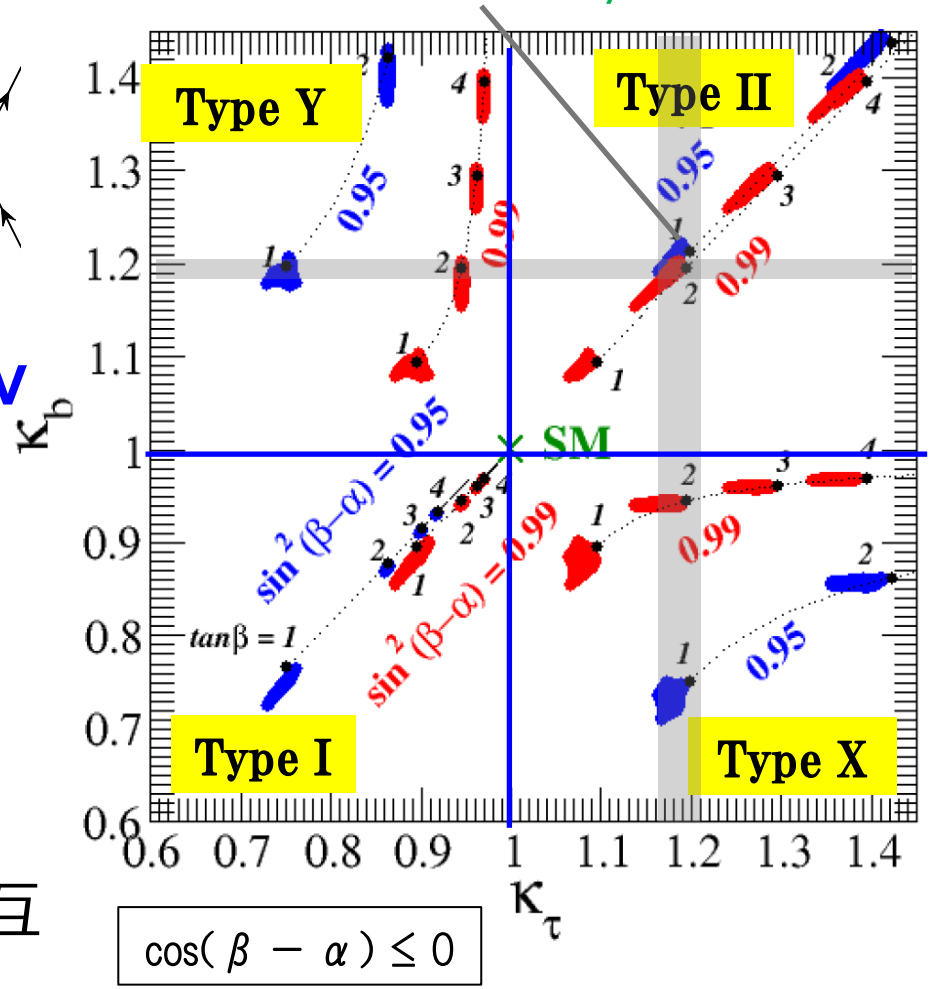
$100 \text{ GeV} \leq m_{H^+, H, A} \leq 1000 \text{ GeV}$
 $0 \leq M \leq m_{H^+, H, A}$

◆ 理論的制限

- 摂動ユニタリティー
- 真空安定性

輻射補正を考慮した場合でも
 κ_b と κ_τ のずれのパターンで湯川相互作用のタイプの識別は可能

Measurement accuracy at ILC500



パラメーターの決定

- 様々な内部パラメーター 新物理のスケール、質量、混合パラメーター
- 付加的ヒッグスのデカップリング特性

□ パラメーター決定の解析

LHC3000 ILC500 1σ

Case A

$\Delta\hat{\kappa}_V = -2.0$	± 2.0	$\pm 0.4\%$
$\Delta\hat{\kappa}_\tau = +5$	± 2.0	$\pm 1.9\%$
$\Delta\hat{\kappa}_b = +5$	± 4.0	$\pm 0.9\%$

Errors are from
in Snowmass
2014 Rep.



Type II

- スキャン解析でCaseAを満たすパラメーター領域を調べる

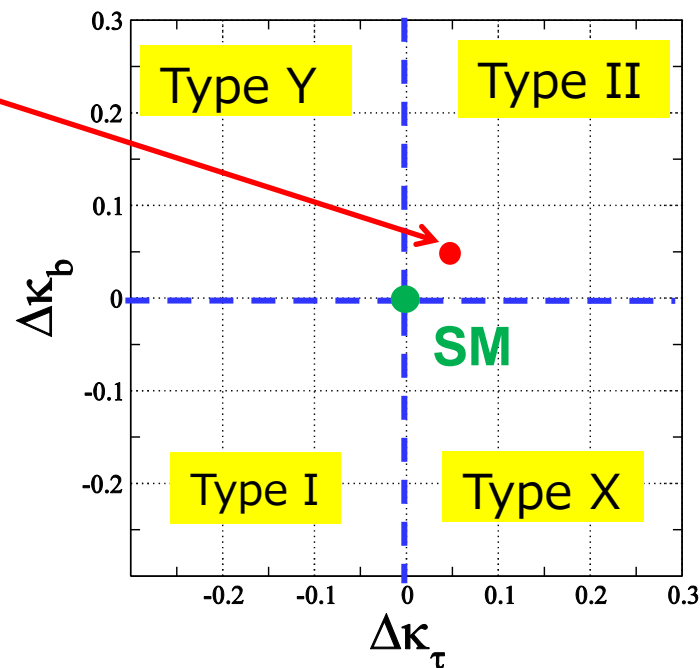
$$x \leq 0$$

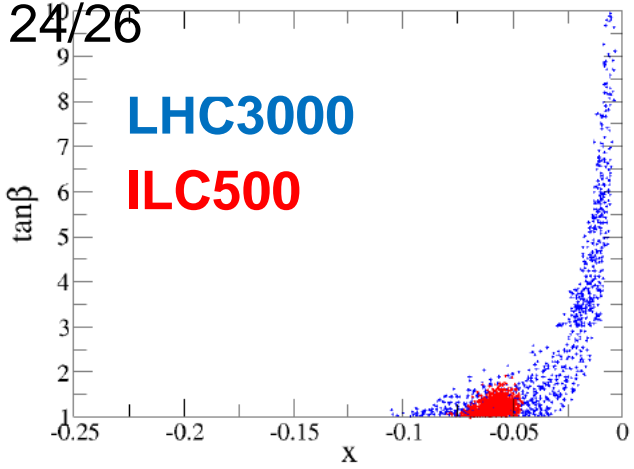
$$300\text{GeV} \leq m_\phi$$

$$1 \leq \tan\beta$$

$$0 \leq M \leq m_\phi$$

$$\Phi = H^+, H, A$$

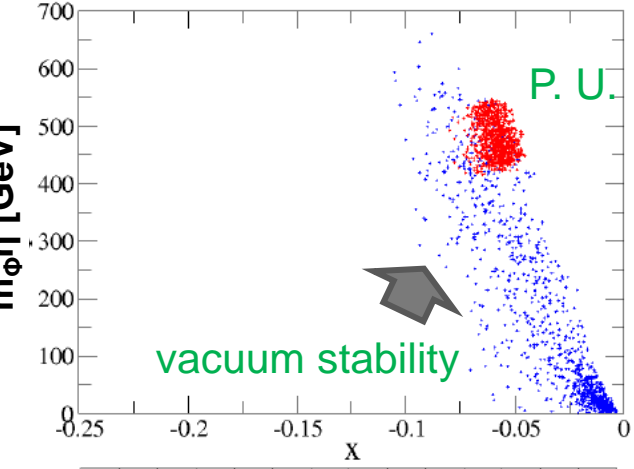




□ x vs tanβ

- $\Delta\hat{\kappa}_\tau - \Delta\hat{\kappa}_V \simeq -\tan\beta x$
- ILCでは混合パラメーターが精度よく決定できる

HL-LHC $-0.1 < x < 0, \quad 1 < \tan\beta$
 ILC $-0.075 < x < -0.05, \quad 1 < \tan\beta < 1.7$



□ x vs (ループ補正の大きさ)

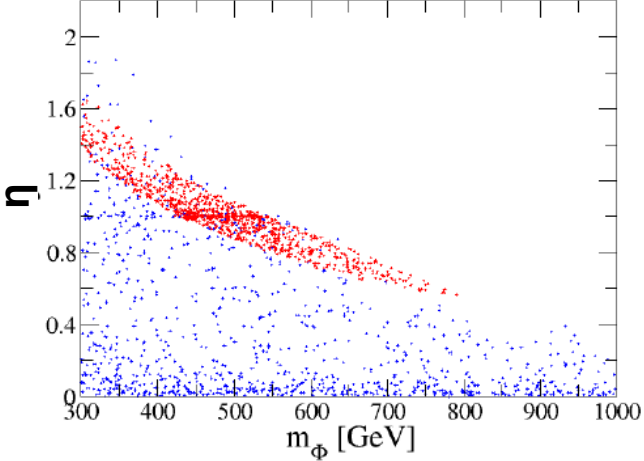
- ILC500 : $-0.024 < \Delta\kappa_V < -0.016$ を満たすためにはループ効果が必要!

$$\Delta\hat{\kappa}_V \simeq -\frac{1}{2}x^2 - \frac{1}{16\pi^2} \frac{1}{6} \sum_{\Phi=A,H,H^\pm} c_\Phi \frac{m_\Phi^2}{v^2} \left(1 - \frac{M^2}{m_\Phi^2}\right)^2,$$

Mixing Loop

P. U. : Perturbative unitarity bound

$$\eta = 1 - \frac{M^2}{m_\Phi^2}$$



□ m_φ VS η (デカップリングの度合い)

- m_φの上限、ηの上限・下限の情報を得られる

$\Delta\hat{\kappa}_V$	= -2.0	±2.0	±0.4%
$\Delta\hat{\kappa}_\tau$	= +5	±2.0	±1.9%
$\Delta\hat{\kappa}_b$	= +5	±4.0	±0.9%

➡ $m_\phi < 800 \text{ GeV}$

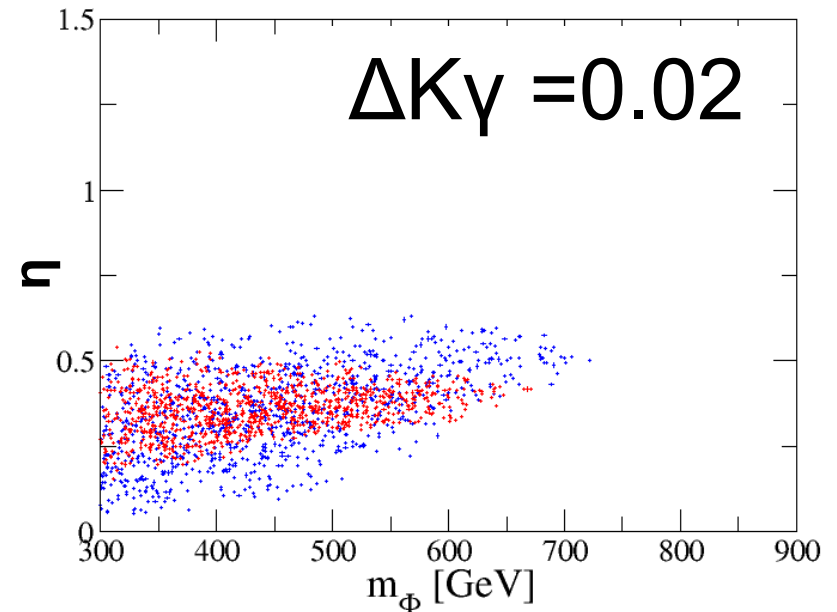
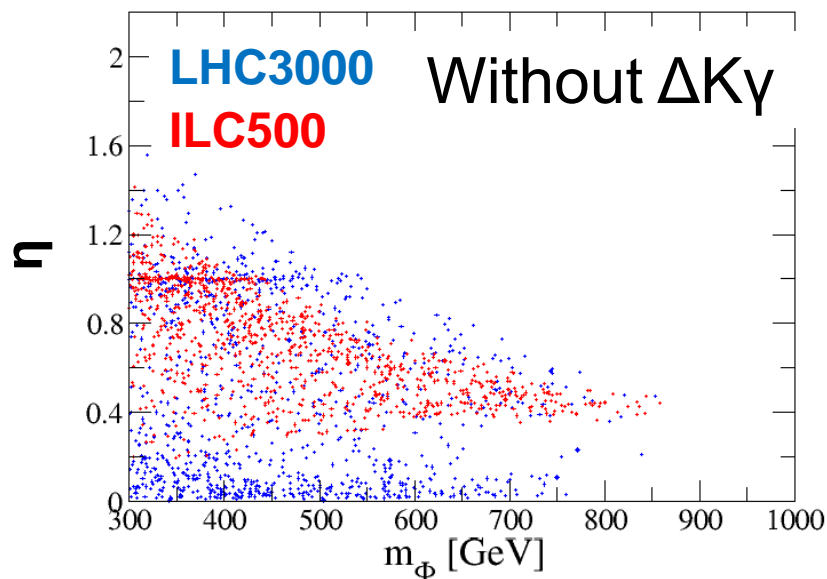
$h \rightarrow \gamma\gamma$ インプット追加

LHC3000 ILC500

$$\begin{array}{l} \Delta\hat{\kappa}_V = -2.0 \pm 2.0 \pm 0.4\% \\ \Delta\hat{\kappa}_\tau = +18 \pm 2.0 \pm 1.9\% \\ \Delta\hat{\kappa}_b = +18 \pm 4.0 \pm 0.9\% \end{array} + \Delta\kappa_\gamma = +2.0 \pm 2.0\% (\text{LHC3000})$$

$$\Gamma(h \rightarrow \gamma\gamma) \simeq \frac{G_F \alpha_{\text{em}}^2 m_h^3}{128\sqrt{2}\pi^3} \left| -\frac{1}{3} \left(1 - \frac{M^2}{m_{H^\pm}^2} \right) + \sum_f Q_f N_c^f \left(1 + \xi_f x - \frac{x^2}{2} \right) I_f + \left(1 - \frac{x^2}{2} \right) I_W \right|^2$$

Kanemura, MK, Yagyu (2015)



$h \rightarrow \gamma\gamma$ の情報を使うことで、 m_ϕ やループ効果に関するパラメーターの値をさらに絞り込むことができる

まとめ

- 将来実験でのヒッグス結合の精密測定と比較によってヒッグスセクターの構造決定を目指すために、様々な拡張ヒッグス模型においてヒッグス結合を高次補正まで含めて計算する
- 精密測定の結果がでたときに迅速に理論値と実験値を比較できるように、数値計算コード群を作成、整備する。(近日公開)
- 将来の精密測定で得られた様々な結合定数のズレのパターンから模型を同定し、様々な結合定数の実験値を輻射補正を含めた理論計算にインプットすることで模型の様々な内部パラメーターの情報を引き出すことができる
 - ヒッグスセクターを構造決定し、新物理理論構築に繋げる

$\phi, \phi+S, \phi+\phi, \phi+\Delta, \dots$

$hVV, hff, h\tau\tau, hgg, hhh, \dots$

輻射補正の解析



将来実験での
精密測定



ヒッグスセクター
の構造決定 !!