

ヒッグスセクターの構造 と新物理

兼村晋哉



大阪大学
OSAKA UNIVERSITY

新テラスケール研究会、2018年7月27日名古屋大学

標準理論

クォークとレプトン 3世代

相互作用: ゲージ原理で決まる

$$SU(3)_C \times SU(2)_I \times U(1)_Y$$

カラー アイソスピン ハイパーチャージ

$$g_\mu^\alpha \quad W_\mu^a \quad B_\mu$$

グルオン 弱ボソン 光子

質量生成: 電弱対称性の自発的破れ

$$SU(2)_I \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{\text{em}}$$

	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$
$q_L = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	2	1/3
u_R	1	4/3
d_R	1	-2/3
$l_L = \begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix}$	2	-1
e_R	1	-2

ゼロ質量

$$A_\mu$$

光子

有質量ベクトル場

$$W_\mu^\pm \quad Z_\mu^0$$

弱ボソン

標準理論

クォークとレプトン 3世代

相互作用: ゲージ原理で決まる

$$SU(3)_C \times SU(2)_I \times U(1)_Y$$

カラー アイソスピン ハイパーチャージ

$$g_\mu^\alpha \text{ グルオン}$$

$$W_\mu^a$$

$$B_\mu$$

	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$
$q_L = \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix}$	2	1/3
u_R	1	4/3
d_R	1	-2/3
$l_L = \begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix}$	2	-1
e_R	1	-2

質量生成: 電弱対称性の自発的破れ

$$SU(2)_I \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{\text{em}}$$

ゼロ質量

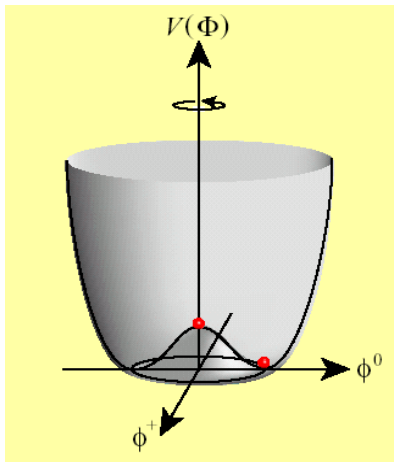
$$A_\mu$$

フォトン

有質量

$$W_\mu^\pm \quad Z_\mu^0$$

弱ボソン



暫定的にスカラー場(ヒッグス場)を導入

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix}$$

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

$\mu^2 < 0$ と仮定

$$\phi^0 = \frac{1}{\sqrt{2}} (v + h + iz)$$

↓真空期待値246GeV

↑
ヒッグス粒子

LHC実験の成果

ATLAS/CMS
July 2012

新スカラー粒子(ヒッグス粒子)の発見

質量 125 GeV, ...

スピン・パリティ 0^+

様々な粒子と結合

$h\gamma\gamma$, hgg , hZZ , hWW , $h\tau\tau$, htt , hbb , ...

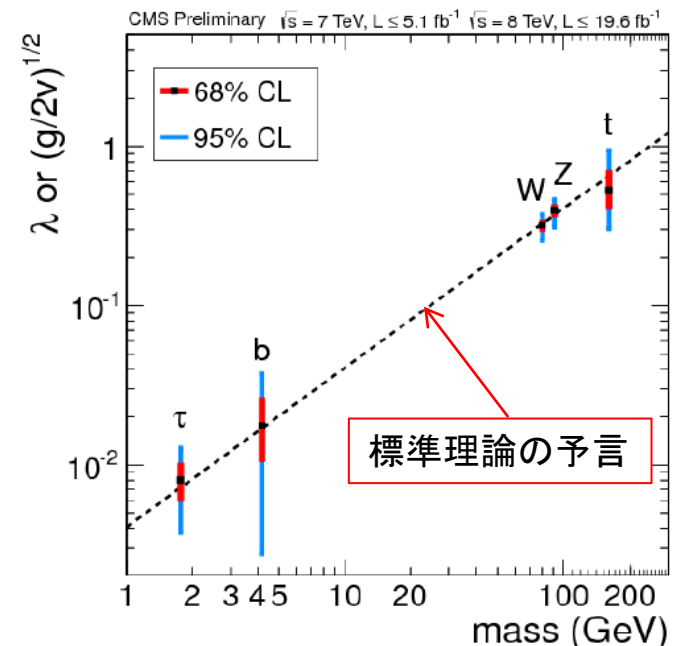
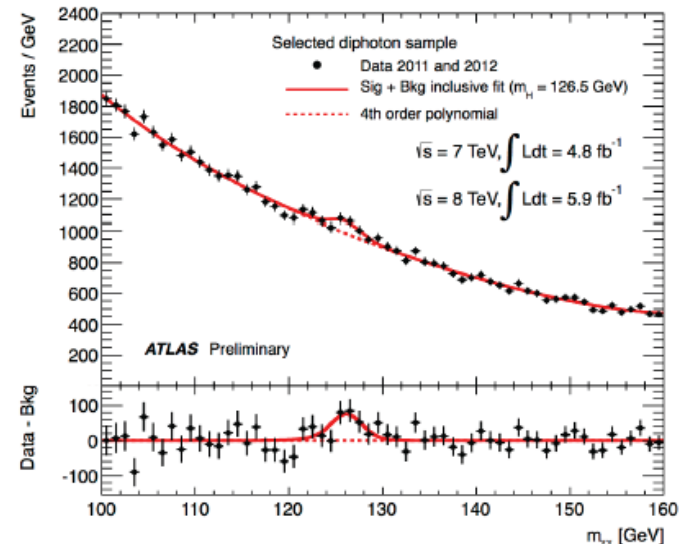
ヒッグス粒子と同定

測定されたヒッグス粒子の結合は
標準理論の予言と一致(無矛盾)

暫定的に導入したヒッグスセクターは正しい?

超対称粒子等の新物理粒子は見つからず

標準理論で十分なのか?



素粒子物理が目指すもの

大統一のパラダイム

大統一、重力との統一 重力の量子論

世代構造の謎

フレーバー問題

標準理論の抱える問題

ヒッグス問題

強いCP問題

未解決の諸問題

ニュートリノ振動(微小質量)

バリオン数生成

暗黒物質, 暗黒エネルギー

宇宙インフレーション問題

標準理論を超えた新物理は必ずある

ヒッグス物理が重要な鍵

新物理に向かう色々なアプローチある中で

電弱対称性の破れの物理(ヒッグス物理)が鍵である

理由: 標準理論の脆弱部分

ヒッグスセクターの構造、全貌は未知

背後の物理、新物理との関係

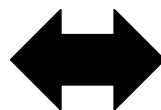
現行と将来の各種実験で検証できる

ヒッグス粒子の発見によりヒッグスの構造探究が次のフロンティア

標準理論を超えた新物理に実証的に迫ることが可能

ヒッグスの本性と新物理

ヒッグスの本質
を問う事



新物理のパラダイム
を考える事

- 素スカラー場
- 複合場
- ベクトル場の余剰成分
- 擬南部ゴールドストーン粒子
-

超対称性, 共形不変性
動的対称性の破れ
ゲージヒッグス統合模型
最小複合ヒッグス模型
.....

それぞれの新物理のシナリオが
ヒッグスセクターの性質を規定する

背後の物理シナリオ $\Leftrightarrow$ 個性あるヒッグスセクター

超対称理論

Boson $\Leftrightarrow$ Fermion

超対称粒子

ヒッグス2重項2個の拡張ヒッグス

古典的スケール不変な理論 Bardeen

$$\mu^2_{\text{tree}} = 0$$

次元創生(CW機構)により質量発生

特徴的な多重ヒッグス場

ヒッグス3点結合が普遍的に5/3倍に

Hashino, SK, Orikasa, 2015

最小複合ヒッグス模型

大局対称性の破れ

$$G \rightarrow H$$

Dim[G/H] 個のNG粒子

Georgi, Kaplan

ヒッグス粒子が擬南部ゴールドストーン粒子

ヒッグス粒子の結合定数が
全て標準理論の値から小さくなる

一般的な拡張ヒッグスセクターを考える

多重項構造

Φ_{SM} +Singlet, Φ_{SM} +Doublet (2HDM),
 Φ_{SM} +Triplet, ...

ヒッグスセクターの持つ対称性

離散対称性？ 連続対称性？
近似的？ 自発的に破れている？

結合の強さ

相互作用が強い？ 弱い？

新物理の
シナリオに
直結！

加速器でのヒッグスセクターの探究

ヒッグス粒子の発見によりヒッグスセクターの構造探究が次のフロンティア

- 付加的なヒッグス粒子の直接探索

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

ハドロンコライダー
LHCが有利

- 標準理論からのずれ探索による間接検証

電弱パラメータ $m_W, S, T, U, Zff, Wff', WWV, \dots$

ヒッグス結合 $hWW, hZZ, h\gamma\gamma, hff, hhh, \dots$

$h(125)$ の結合は将来実験で精密測定

高輝度LHC (3000 fb^{-1})
電子陽電子コライダー

時代は再び精密測定時代に！

LHC → HL-LHC

直接探索可能領域は1.5-2倍に延伸

LHC → HL-LHC → ILC250

ヒッグス結合の測定精度は10数倍以上に

LEPの精密測定、Fermilab, LHCの直接探索へ

Z, Wの物理の測定

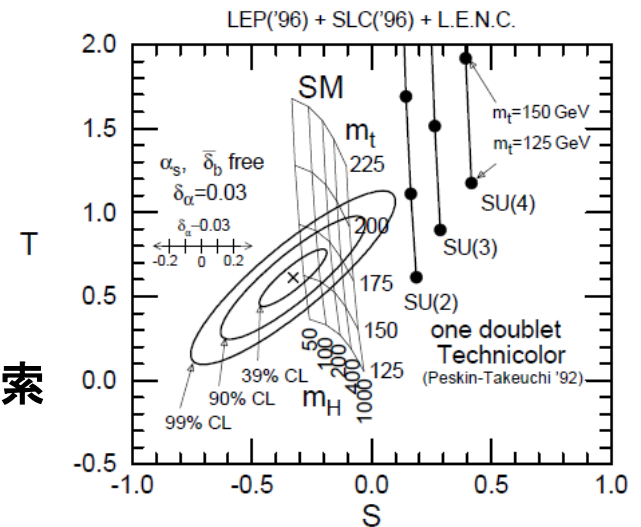
Top, ヒッグス、新物理の探索



ILCの精密測定、HL-LHC, 次世代ハドロンコライダーでの探索

ヒッグス物理の測定

何が出ても新物理！



Hagiwara et al. (1994) 11

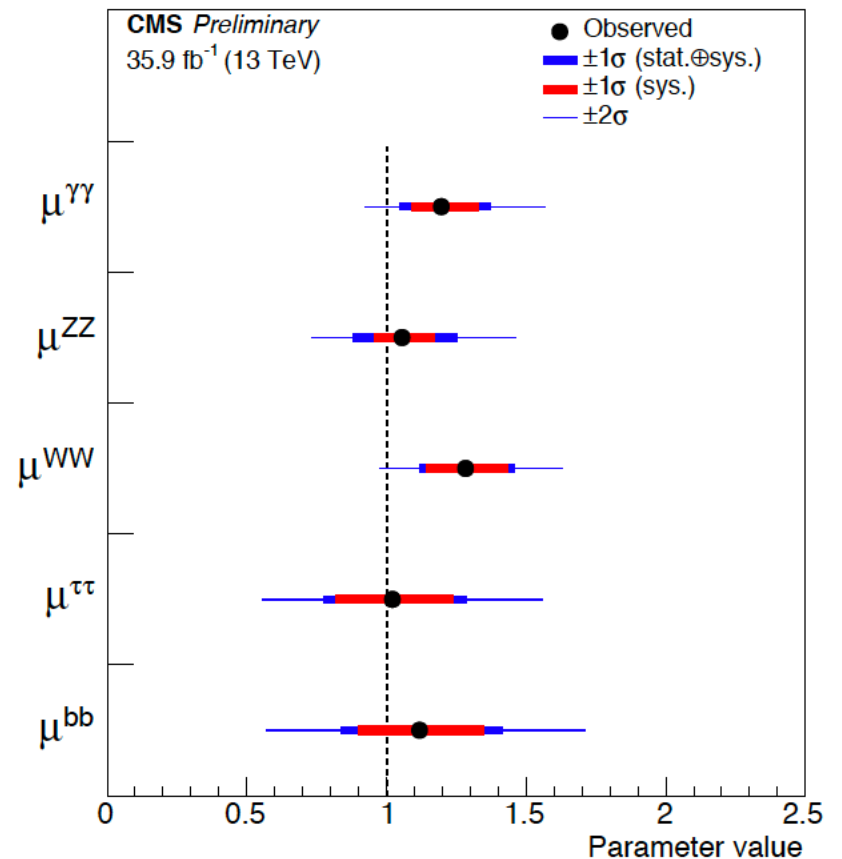
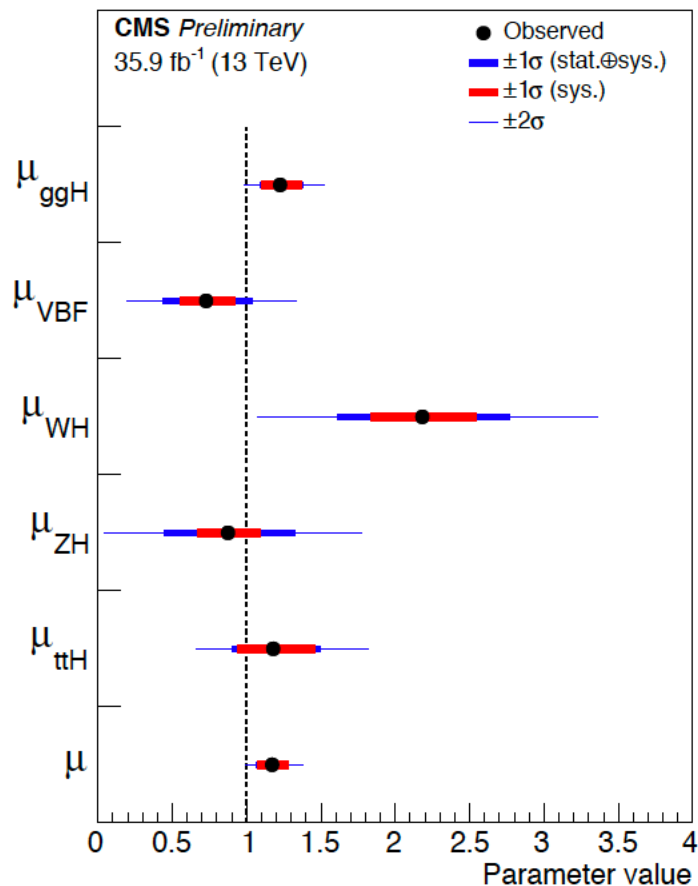
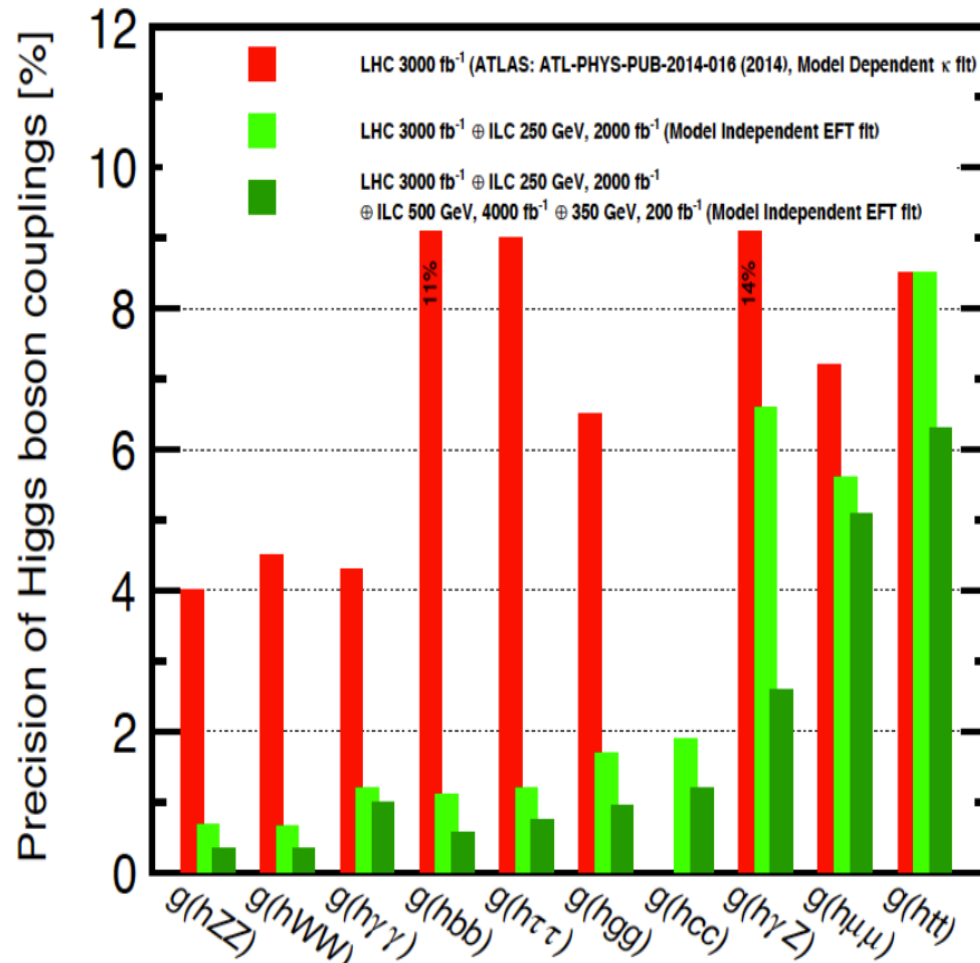


Figure 5: Summary plot of the fit to the per-production mode (left) and per-decay mode (right) signal strength modifiers μ_i . The thick and thin horizontal bars indicate the $\pm 1\sigma$ and $\pm 2\sigma$ uncertainties, respectively. Also shown are the $\pm 1\sigma$ systematic components of the uncertainties. The last point in the per-production mode summary plot is taken from a separate fit and indicates the result of the combined overall signal strength μ .

Higgs Precision at HL-LHC, ILC250, ...

[K. Fujii, et al., arXiv:1710.07621]



ILC250はHL-LHCとのシナジーで効果が上がる

将来実験



このトーク

- イン트로ダクション
- 拡張ヒッグス模型と新物理
- ヒッグス精密測定からわかること
- ヒッグスポテンシャルの検証
- シナジーの一例
- まとめ

一般的な拡張ヒッグスセクターを考える

多重項構造

Φ_{SM} +Singlet, Φ_{SM} +Doublet (2HDM),
 Φ_{SM} +Triplet, ...

ヒッグスセクターの持つ対称性

離散対称性？ 連続対称性？
近似的？ 自発的に破れている？

結合の強さ

相互作用が強い？ 弱い？

新物理の
シナリオに
直結！

Higgs singlet extension (HSM)

$$V_0 = -\mu_\Phi^2 |\Phi|^2 + \lambda_\Phi |\Phi|^4 + \mu_{\Phi S} |\Phi|^2 S + \frac{\lambda_{\Phi S}}{2} |\Phi|^2 S^2 + \mu_S^3 S + \frac{m_S^2}{2} S^2 + \frac{\mu'_S}{3} S^3 + \frac{\lambda_S}{4} S^4$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} G^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v_\Phi + \phi_1 + iG^0) \end{pmatrix}, \quad S = v_S + \phi_2 \quad (\phi_1, \phi_2) \rightarrow (h, H) \text{ with } \theta$$

Two Higgs doublet model (2HDM)

$$V_{\text{THDM}} = m_1^2 |\Phi_1|^2 + m_2^2 |\Phi_2|^2 - (m_3^2 \Phi_1^\dagger \Phi_2 + \text{h.c.}) + \frac{1}{2} \lambda_1 |\Phi_1|^4 + \frac{1}{2} \lambda_2 |\Phi_2|^4 + \lambda_3 |\Phi_1|^2 |\Phi_2|^2 \\ + \lambda_4 |\Phi_1^\dagger \Phi_2|^2 + \frac{1}{2} [\lambda_5 (\Phi_1^\dagger \Phi_2)^2 + \lambda_6 |\Phi_1|^2 \Phi_1^\dagger \Phi_2 + \lambda_7 |\Phi_2|^2 \Phi_1^\dagger \Phi_2 + \text{h.c.}],$$

$$\Phi_i = \begin{pmatrix} \omega_i^\pm \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v_i + h_i + iz_i) \end{pmatrix} \quad (i = 1, 2)$$

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

$\underbrace{h \quad H \quad A \quad H^\pm}_{\text{Additional bosons}}$
 $\uparrow$
 $h(125)$

$\underbrace{H \quad A \quad H^\pm}_{\text{Additional bosons}}$
 $\uparrow$
 $h(125)$

$\underbrace{H \quad A \quad H^\pm}_{\text{Additional bosons}}$
 $\uparrow$
 $h(125)$

With the softly broken Z_2 symmetry (FCNC) $\lambda_6 = \lambda_7 = 0$

4 types of Yukawa interaction (Type I, II, X, Y)

結合のズレ＝新物理スケール

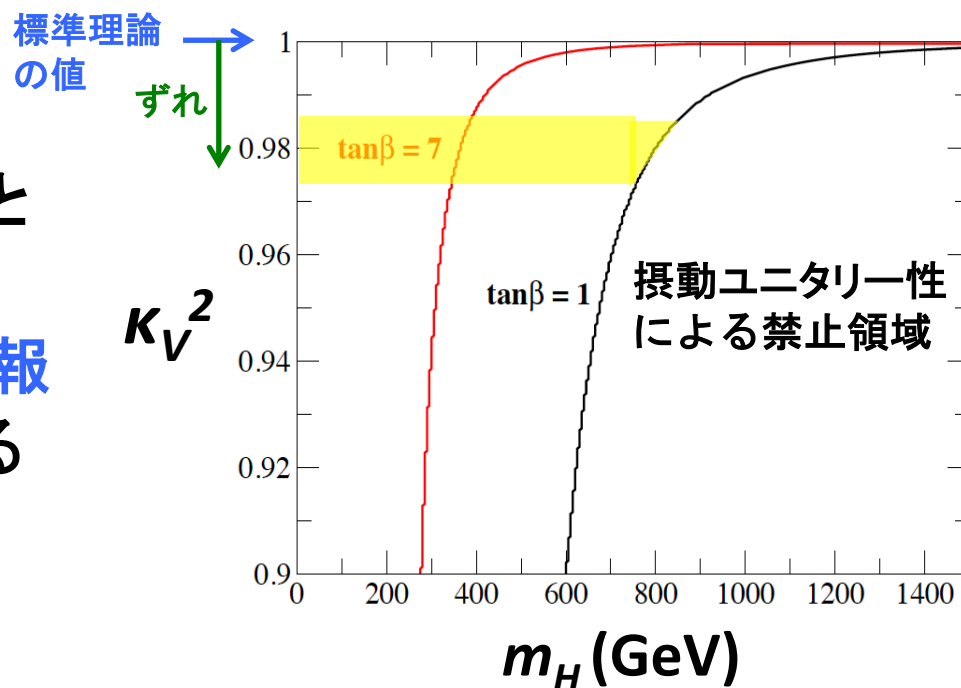
標準理論の値からのズレを表すスケール因子 K_i

$h(125)$ とゲージ場 V ($=W, Z$) の結合 hVV $K_V^2 = \sin^2(\beta - \alpha)$

K_V^2 の測定値が 1 (標準理論)
から有意に約 2% ずれていると



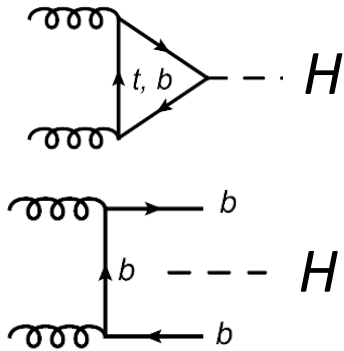
第2のヒッグス H の質量の情報
上限値 約 800 GeV が得られる



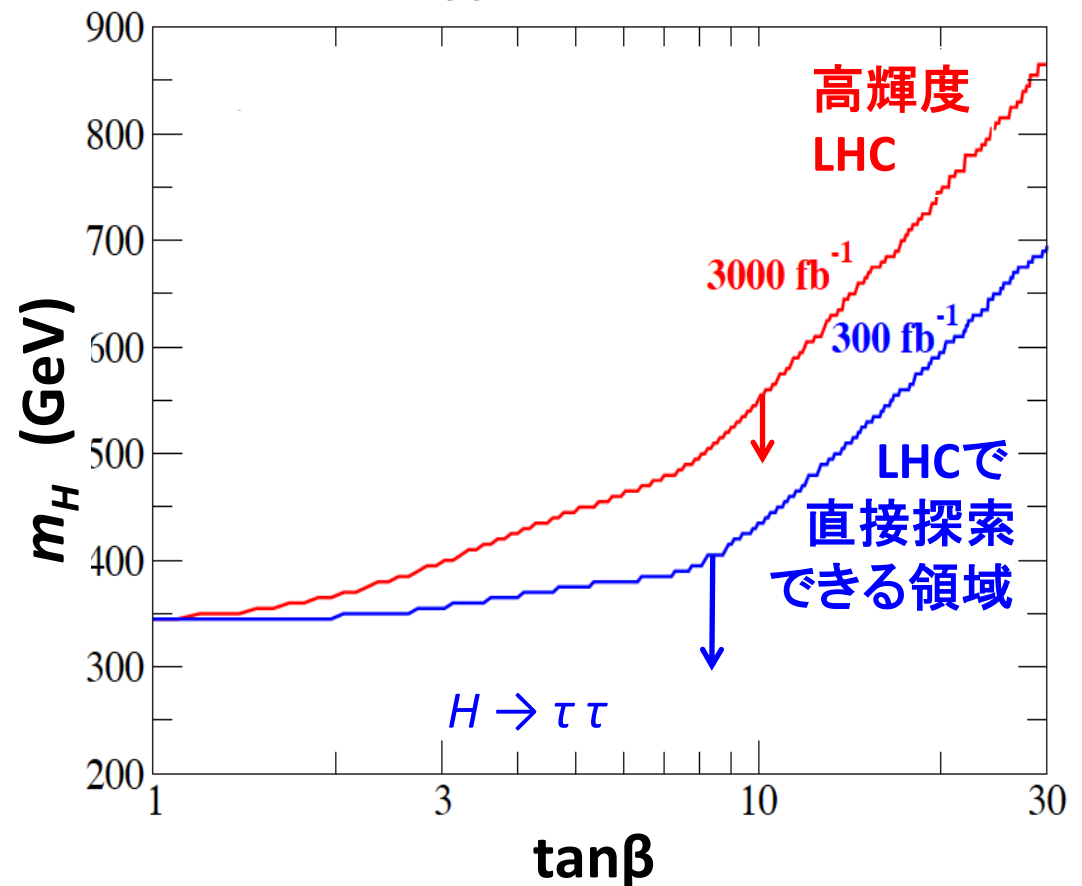
ヒッグス結合の精密測定は直接探索と類似の探索能力！

直接探索と間接探索の相補性

LHCでの H (重いヒッグス)
の直接探索



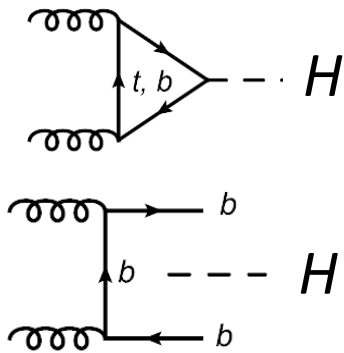
Type-II 2HDM



SK, Tsumura, Yagyu, Yokoya, 2014

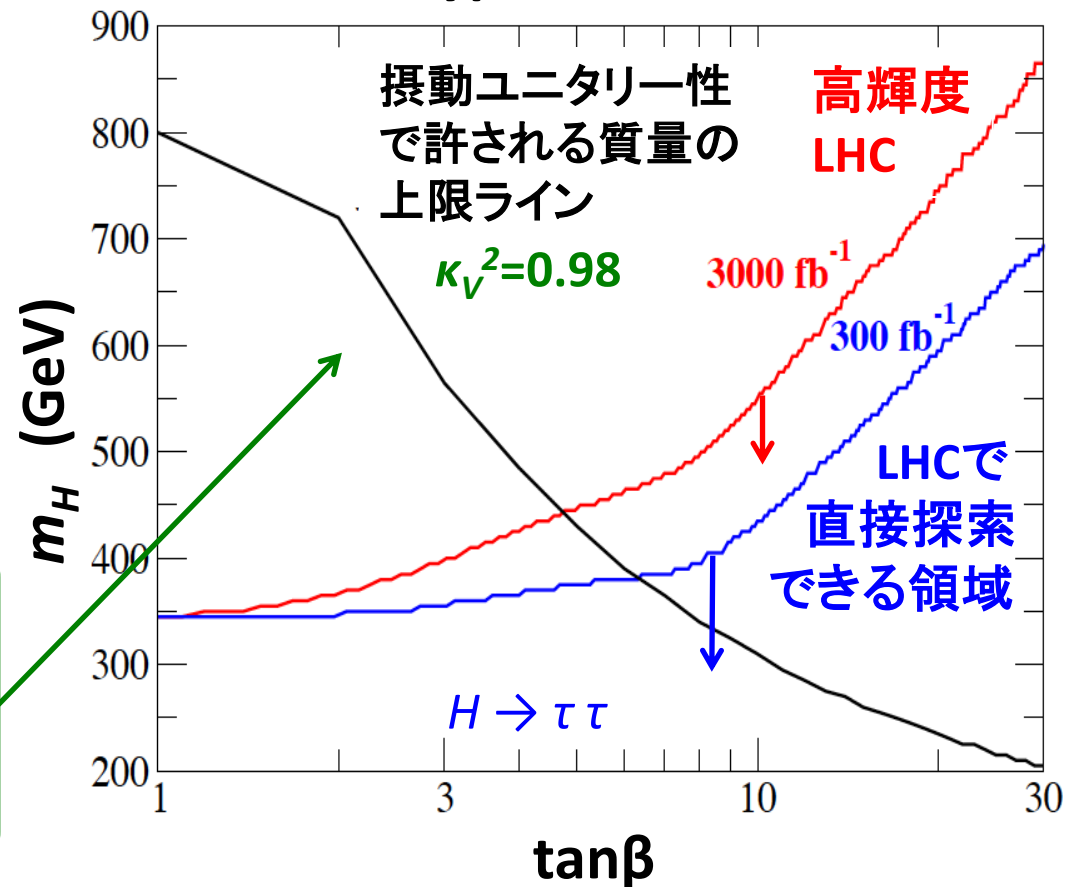
直接探索と間接探索の相補性

LHCでの H (重いヒッグス) の直接探索



直接探索できない領域でも、ヒッグス結合のずれの検出によって間接的に探索できる

Type-II 2HDM



拡張ヒッグス模型の湯川結合

実験からの制限「フレーバーを変える中性カレント(FNCN)が無い」を考慮すると各クォークとレプトンは片方のヒッグスだけと結合

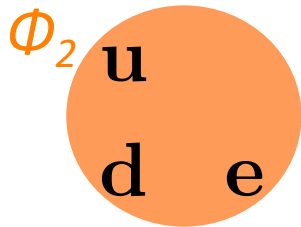
ある種の対称性が(少なくとも近似的に)ある

Glashow, Weinberg 1964

$$\Phi_1 \rightarrow +\Phi_1, \quad \Phi_2 \rightarrow -\Phi_2$$

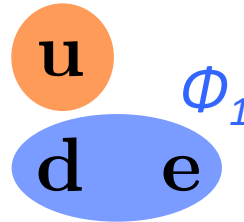
クォーク・レプトンの量子数付与の組合せで湯川結合は4タイプ

Barger, Hewett, Phillips



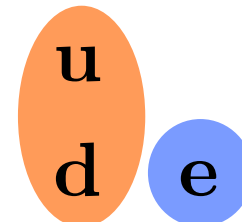
Type-I

ニュートリノ
2HDM



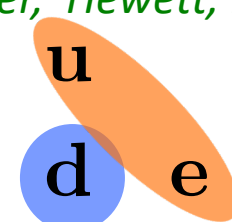
Type-II

超対称模型



Type-X

量子補正による
ニュートリノ質量模型



Type-Y

ポイント: 各タイプごとに湯川結合のずれ方が異なる

ずれのパターン

ゲージ場との結合

湯川結合

hVV

$h\tau\tau$

hbb

hcc

$\cos(\beta-\alpha) < 0$
の場合

	K_V	K_τ	K_b	K_c
Type-I	↓	↓	↓	↓
Type-II	↓	↑	↑	↓
Type-X	↓	↑	↓	↓
Type-Y	↓	↓	↑	↓

各結合の
ずれの方
向を矢
印で示
した

hVV や hff を測り、ずれのパターンを見る事で拡張ヒッグスモデルを**指紋照合**できる

2HDMの指紋照合

$x = \cos(\beta - \alpha)$ **SM-like: $|x| \ll 1$**

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

When a **Fermion** couples to Φ_1

$$\kappa_f = 1 + \text{cot}\beta x + \dots$$

and if it couples to Φ_2

$$\kappa_f = 1 - \tan\beta x + \dots$$

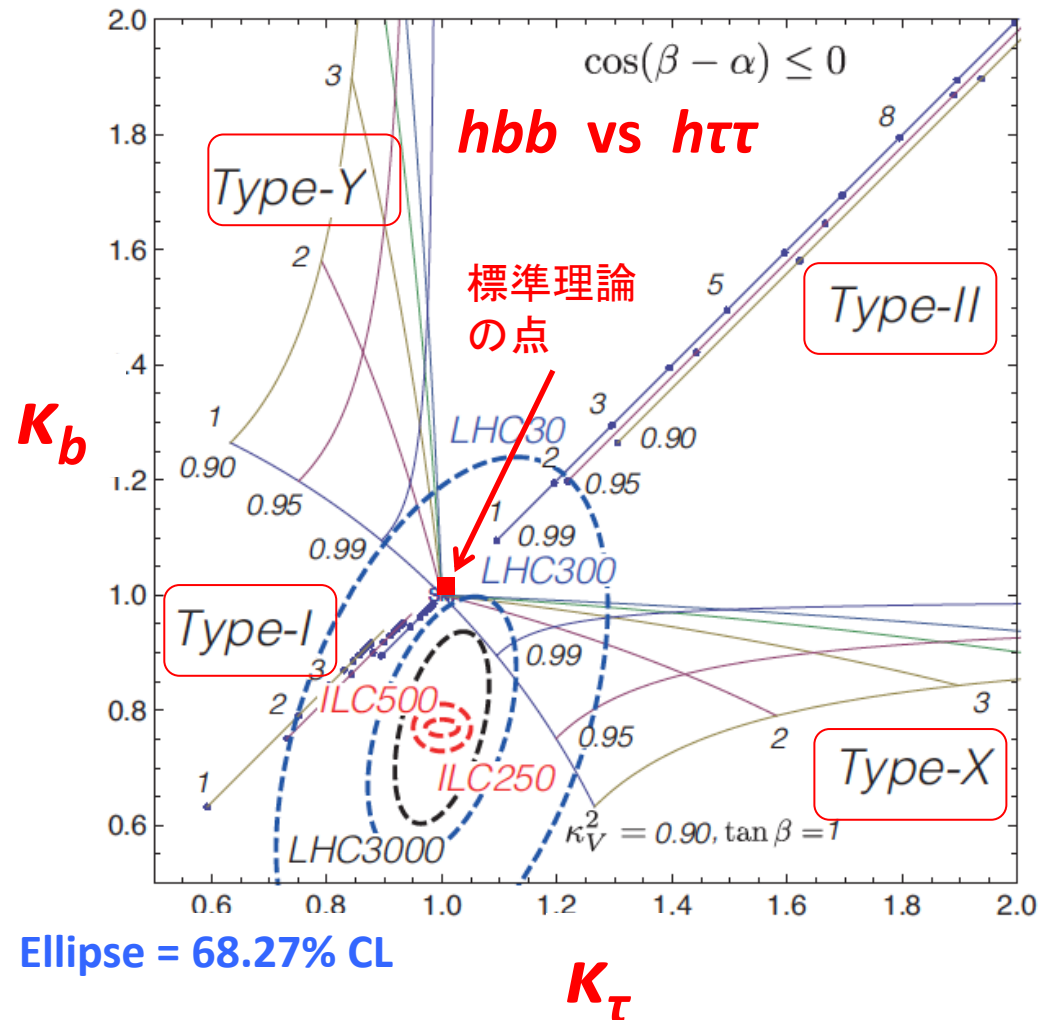
ゲージ場との結合 κ_V^2
のずれが将来実験で
検出できる場合



湯川結合 $\kappa_\tau, \kappa_b, \kappa_c, \dots$

のずれのパターンから4つ
のモデルは必ず区別できる

SK, K. Tsumura, K. Yagyu, H. Yokoya, 2014

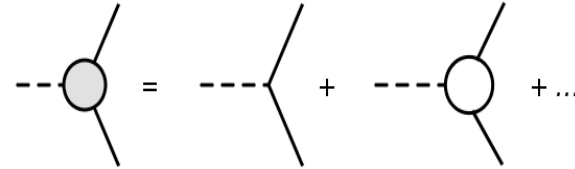


輻射補正の重要性

今後、ヒッグス粒子の結合 $h\gamma\gamma, hgg, hWW, hZZ, h\tau\tau, hbb, htt, \dots$

は徹底的に精度良く測られる

量子補正を含む解析が必要



高精度理論計算

×

将来の精密測定



新物理!

H-COUP Project *SK, Kikuchi, Sakurai, Yagyu*

様々なヒッグス模型で、系統的に各結合に対する量子効果を計算、
ずれのパターンを包括的に研究

プログラム H-COUP ver. 1 公開済み(2017)

arXiv: 1710.04603

扱った
モデル群

Additional Singlet

2HDM (I)

2HDM (II)

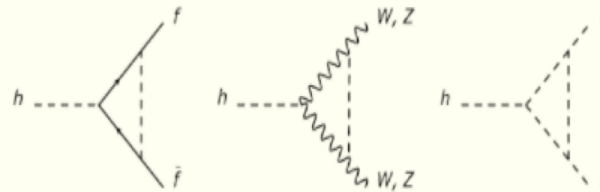
2HDM (X)

2HDM (Y)

Inert doublet/singlet

Triplet model

H-COUP



H-COUP is a calculation tool composed of a set of Fortran codes to compute the renormalized Higgs boson couplings with radiative corrections in various non-minimal Higgs models, such as the Higgs singlet model, four types of two Higgs doublet models and the inert doublet model. The involved on-shell renormalization scheme is adopted, where the gauge dependence is eliminated.

Authors: Shinya Kanemura, Mariko Kikuchi, Kodai Sakurai and Kei Yagyu

The manual for H-COUP version 1.0 can be taken on [arXiv:1710.04603 \[hep-ph\]](https://arxiv.org/abs/1710.04603).

Downloads

- H-COUP version 1.0 : [\[HCOUP-1.0.zip\]](#) [The manual is [here](#)]

In order to run H-COUP version 1.0, you need to install LoopTools (www.feynarts.de/looptools/).

History

Contact

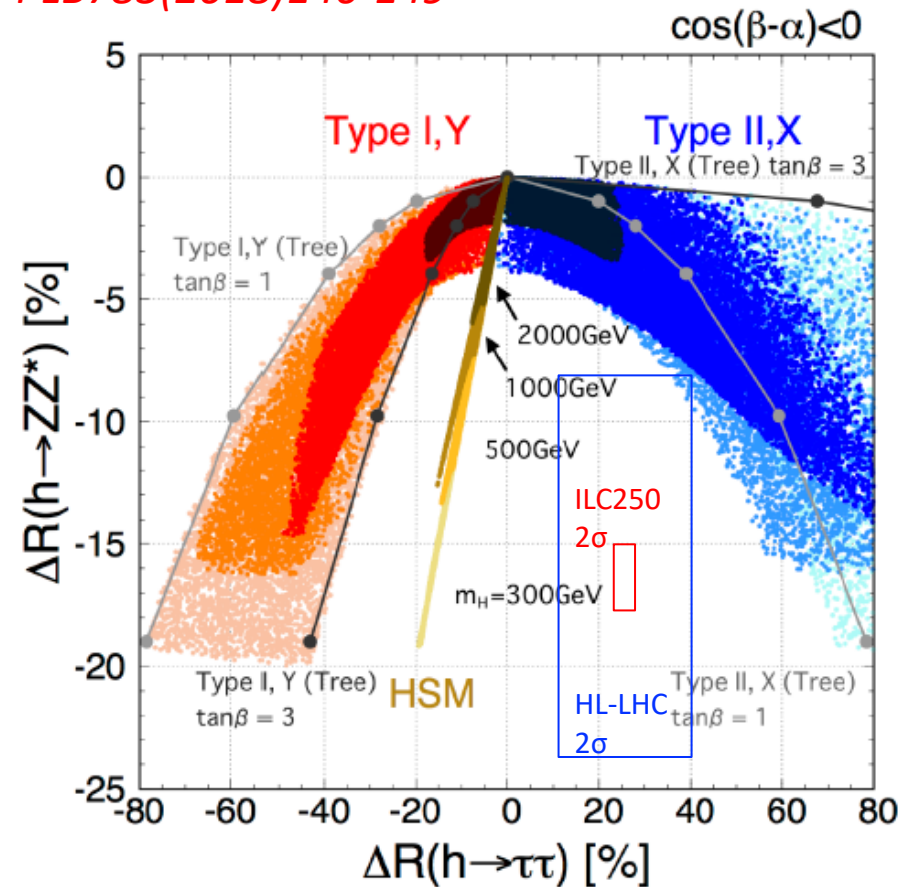
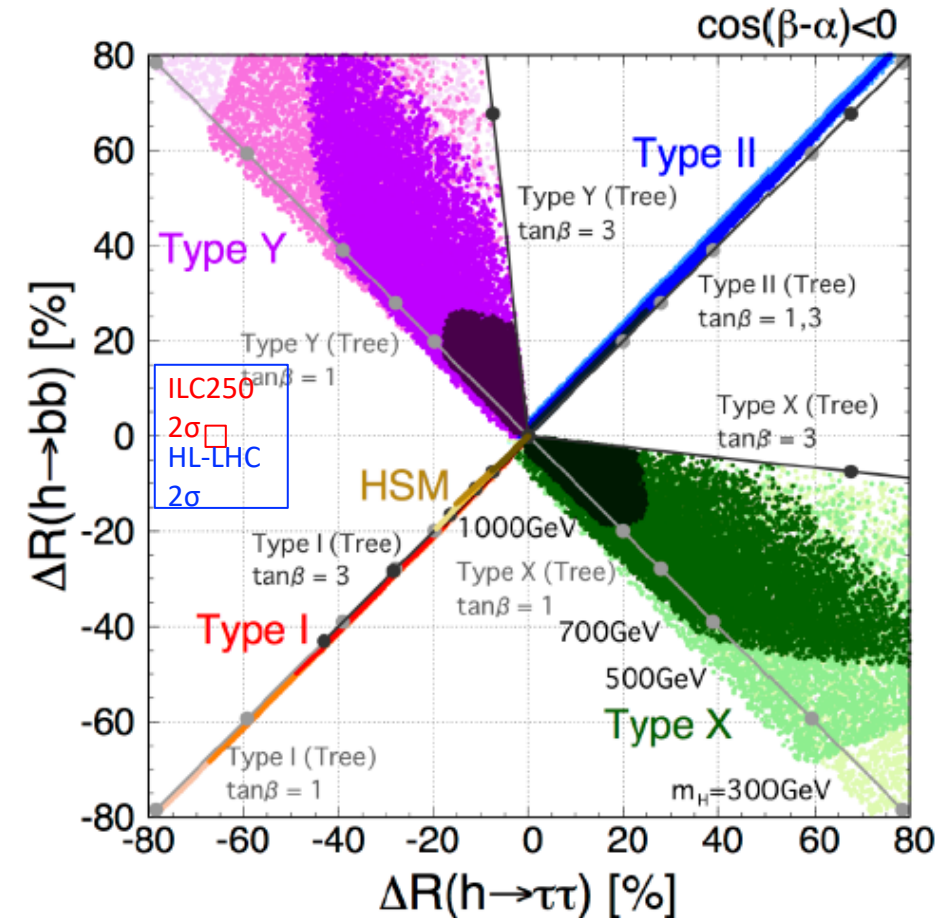
H-COUPの
ウェブページ

ここから
コードを
ダウンロード
できる

$$\Delta R(h \rightarrow XX) = \frac{\Gamma_{\text{NP}}(h \rightarrow XX)}{\Gamma_{\text{SM}}(h \rightarrow XX)} - 1$$

H-COUP Project arXiv: 1710.04603

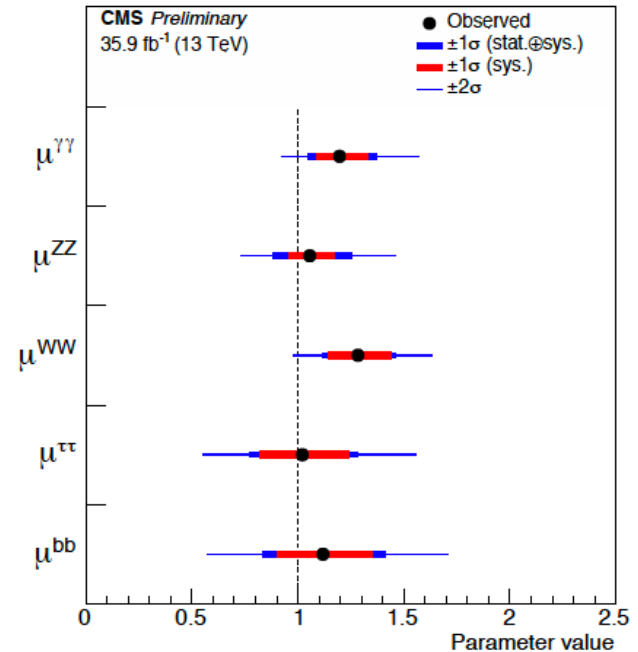
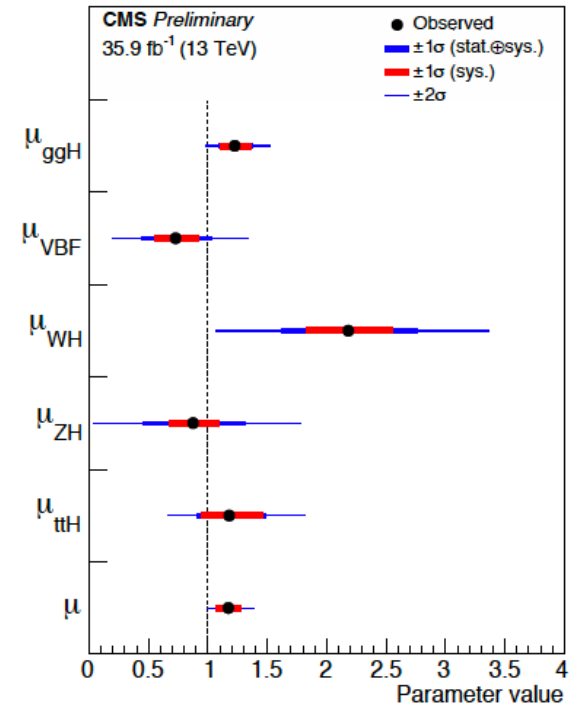
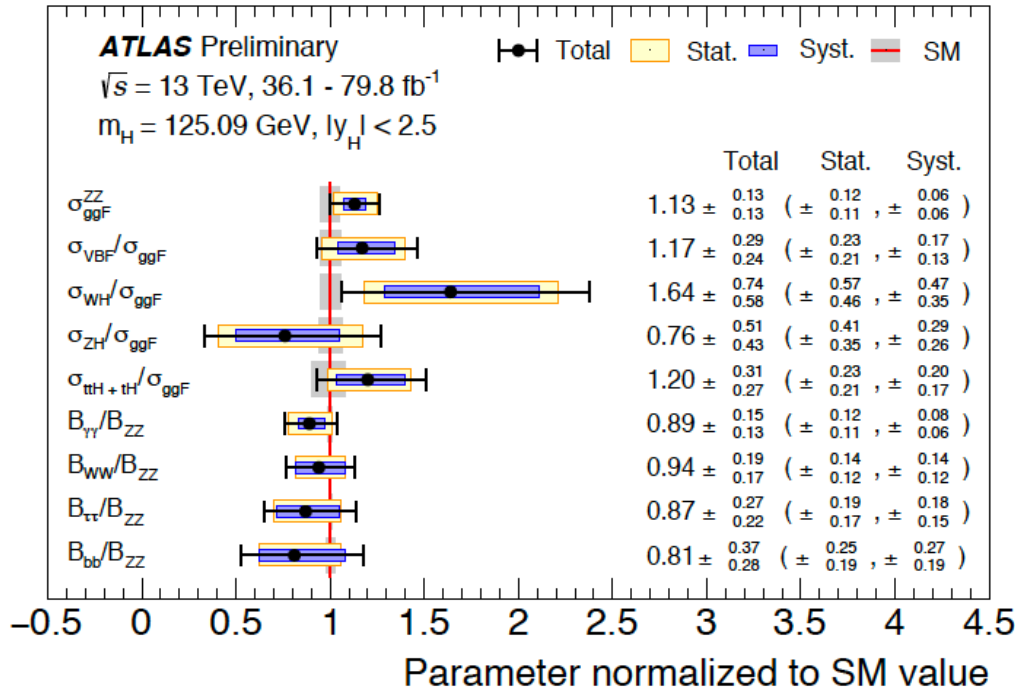
*SK, Kikuchi, Mawatari, Sakurai, Yagyu 2018
PLB783(2018)140-149*



Full set of 1-loop corrections (EW + QCD + Higgs) to the decay rates in various Higgs sectors and **future precision measurements at ILC250** make us possible to fingerprint models and also to get information of inner parameters such as mass of the second Higgs boson

By Production and Decay

- Several possible choices for model parameters allowed to account for SM deviations in combinations
- Ratios of cross sections and branching ratios cancel out some uncertainties



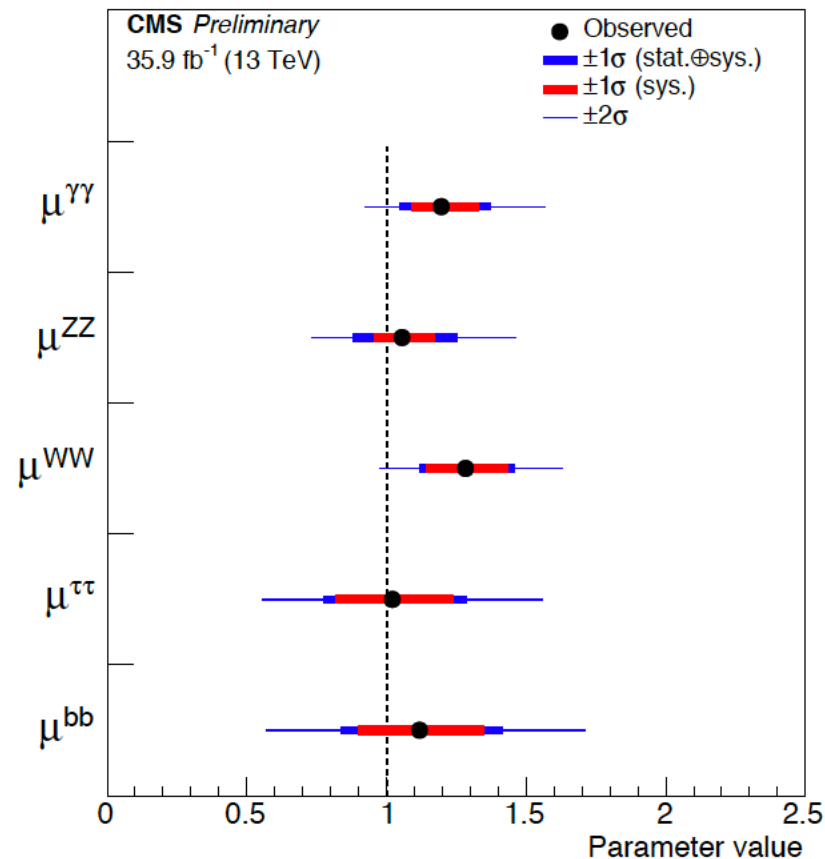
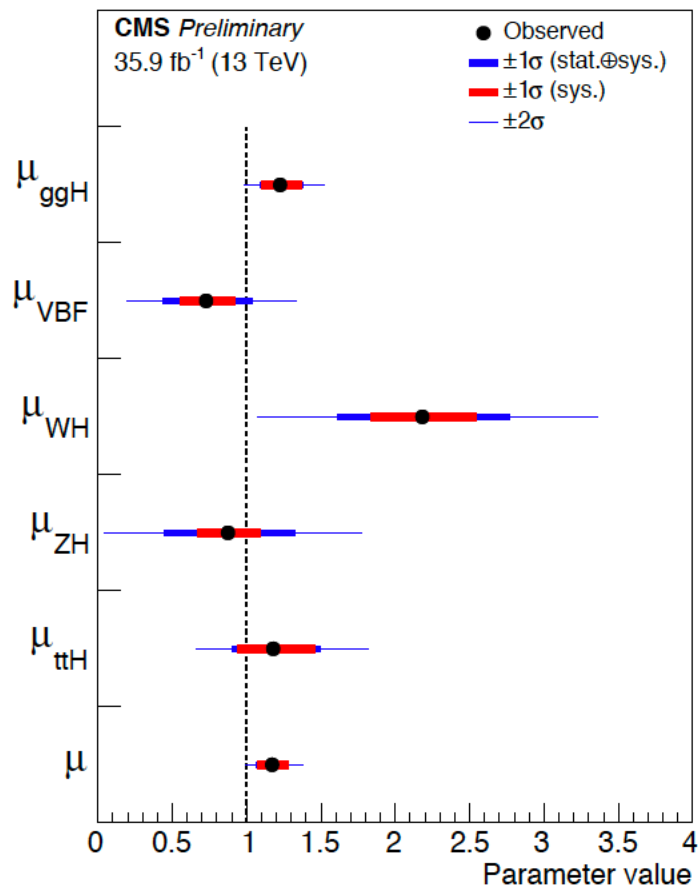


Figure 5: Summary plot of the fit to the per-production mode (left) and per-decay mode (right) signal strength modifiers μ_i . The thick and thin horizontal bars indicate the $\pm 1\sigma$ and $\pm 2\sigma$ uncertainties, respectively. Also shown are the $\pm 1\sigma$ systematic components of the uncertainties. The last point in the per-production mode summary plot is taken from a separate fit and indicates the result of the combined overall signal strength μ .

これまでの測定結果

まだまだ精度が出ていないが、
中心値だけ見ると

- WH生成が大きい方にずれている
- $H \rightarrow WW$ が大きい方にずれている
- ZH生成はずれてない
- $H \rightarrow ZZ$ はずれていない
- $\kappa_W > \kappa_Z$ なる物理？
- $\kappa_V (V=W,Z) > 1$ なる物理？

$\kappa_W \neq \kappa_Z$ となる物理

- $\rho = 1$ となる模型 (カストディアル対称性のある模型) では常に $\kappa_W = \kappa_Z$ (ツリーレベル)
 - Doublet-Singlet Model,
 - Two Doublet Model, 2重項 実3重項 複素3重項
 - Georgi-Machacek Model $(T, Y) = (1/2, 1/2) + (1, 0) + (1, 1)$
 - Doublet-Septet model $(T, Y) = (1/2, 1/2) + (3, 2)$
7重項
- $\rho \neq 1$ となる模型では $\kappa_W \neq \kappa_Z$ となる
 - Doublet-Triplet model (Type II seesaw)
 - データで強く制限 (事実上有意にずれるのは無理)

$$\rho_{\text{tree}} = \frac{m_W^2}{m_Z^2 \cos^2 \theta_W} = \frac{\sum_i v_i^2 [T_i(T_i + 1) - Y_i^2]}{2 \sum_i v_i^2 Y_i^2}$$

$$\kappa_W = 2 \sum_i \{T_i(T_i + 1) - Y_i^2\} \left(\frac{v_i}{v}\right) R_{ih}$$

$$\kappa_Z = 4 \sum_i Y_i^2 \left(\frac{v_i}{v}\right) R_{ih}$$

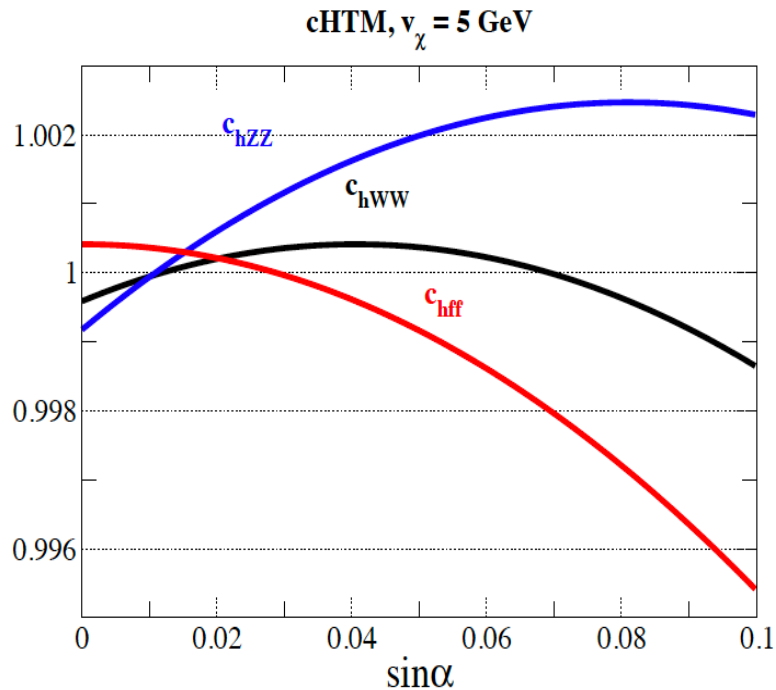
カストディアル
対称性がない模型
 $\rho \neq 1$ (tree)

cHTM 複素3重項
rHTM 実3重項

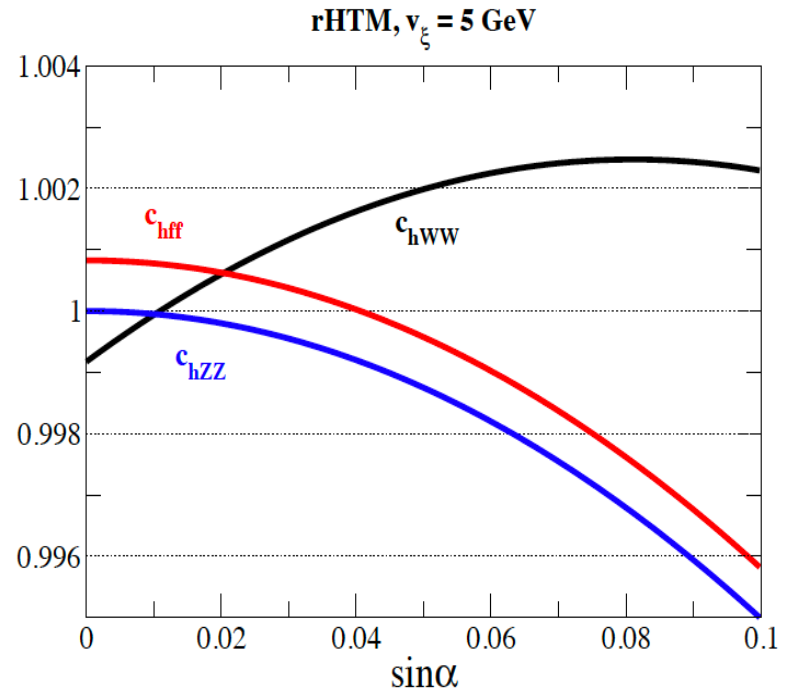
Model	$\tan \beta$	$\tan \beta'$	c_{hWW}	c_{hZZ}
$\phi_1 + \phi_2$ (THDM)	v_{ϕ_2}/v_{ϕ_1}	v_{ϕ_2}/v_{ϕ_1}	$\sin(\beta - \alpha)$	$\sin(\beta - \alpha)$
$\phi + \chi$ (cHTM)	$\sqrt{2}v_\chi/v_\phi$	$2v_\chi/v_\phi$	$\cos \beta \cos \alpha + \sqrt{2} \sin \beta \sin \alpha$	$\cos \beta' \cos \alpha + 2 \sin \beta' \sin \alpha$
$\phi + \xi$ (rHTM)	$2v_\xi/v_\phi$	-	$\cos \beta \cos \alpha + 2 \sin \beta \sin \alpha$	$\cos \alpha$
$\phi + \chi + \xi$ (GM model)	$2\sqrt{2}v_\Delta/v_\phi$	$2\sqrt{2}v_\Delta/v_\phi$	$\cos \beta \cos \alpha + \frac{2\sqrt{6}}{3} \sin \beta \sin \alpha$	$\cos \beta \cos \alpha + \frac{2\sqrt{6}}{3} \sin \beta \sin \alpha$
$\phi + \varphi_7$	$4v_{\varphi_7}/v_\phi$	$4v_{\varphi_7}/v_\phi$	$\cos \beta \cos \alpha + 4 \sin \beta \sin \alpha$	$\cos \beta \cos \alpha + 4 \sin \beta \sin \alpha$

3重項模型($\kappa_W \neq \kappa_Z$)

S. K, Kikuchi, Yagyu, 2013



複素3重項場の加わった模型(cHTM)

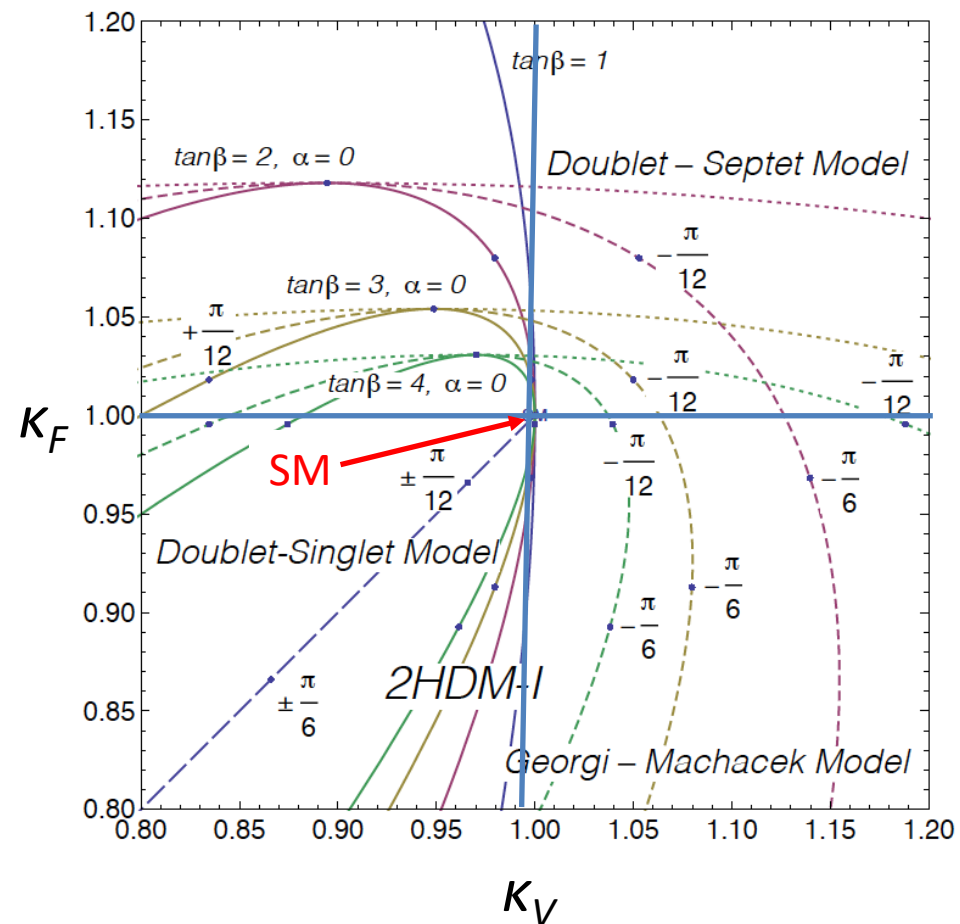


実3重項場の加わった模型(rHTM)

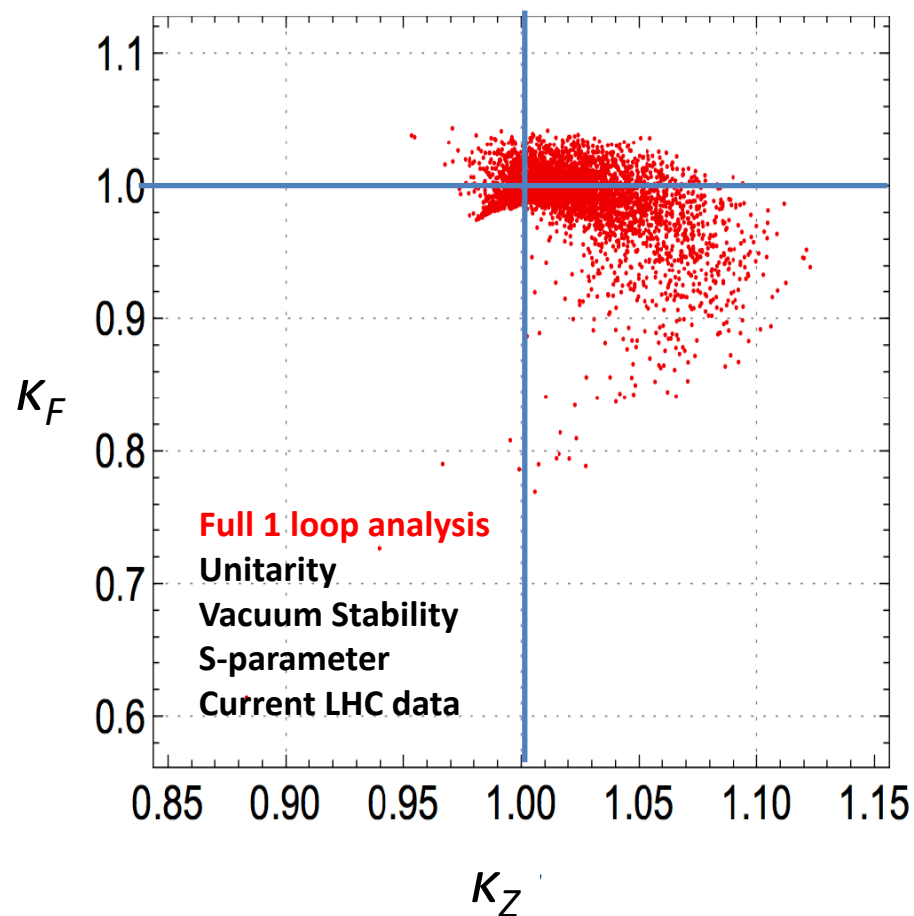
$\kappa_V (V=W,Z) > 1$ になる物理

- 電弱 ρ パラメータ $\rho=1 \Leftrightarrow \kappa_W = \kappa_Z$
 - H^{++} 伴う模型 (Triplet model, GM model, Septet)
 - WW弾性散乱に関する摂動ユニタリー性の議論から,
 $\kappa_V > 1$ となる場合には H^{++} による媒介が必要になる
 - GMモデル(Georgi-Machacek model)の場合
$$(T, Y) = \phi (1/2, 1/2) + \xi (1, 0) + \chi (1, 1)$$
 - $\kappa_W = \kappa_Z > 1$ は普通に可能
 - H^{++} の直接探索
- Custodial Symmetry
 $V_\xi = V_\chi$

エキゾチックモデルのずれ ($\kappa_V > 1$)



SK, Tsumura, Yokoya, Yagyu, 2014



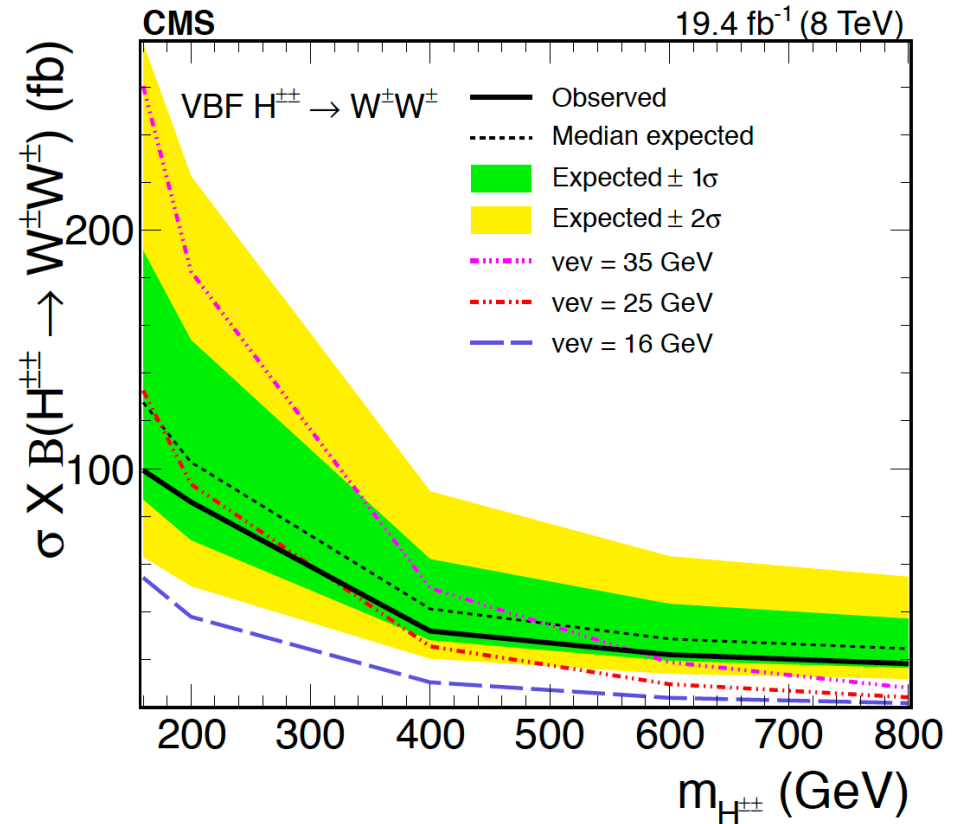
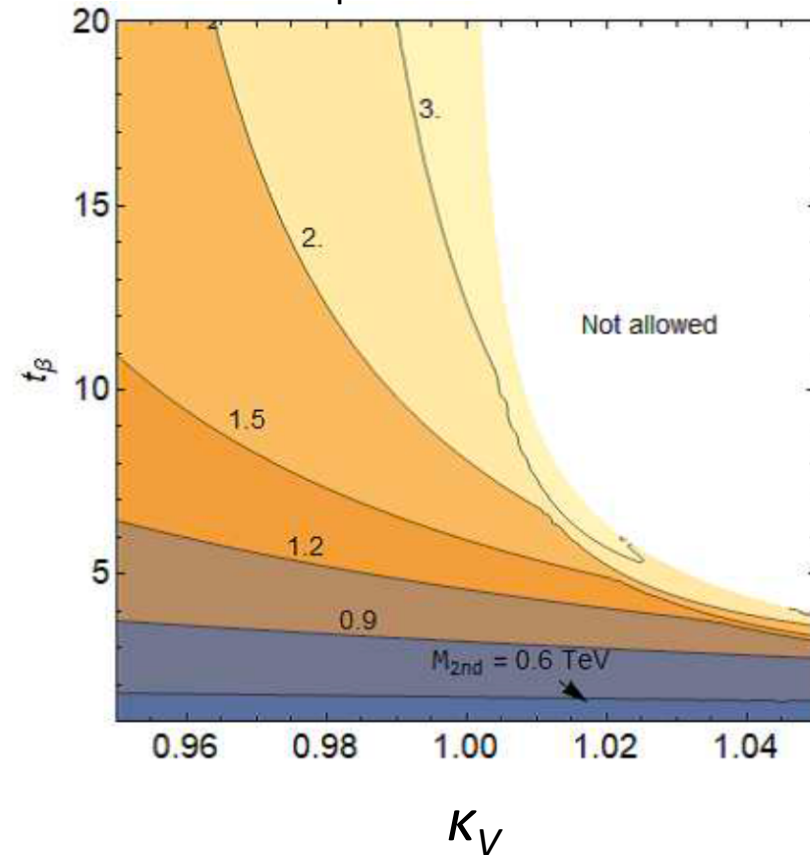
Chiang, Kuo, Yagyu, 2018

Georgi Machacek模型

$$\tan B = v_\phi / v_\Delta$$

Blasi et al. 2017

CMS arXiv: 1410.6315



H^{++} mainly decays into W^+W^+

これまでの測定結果

まだまだ精度が出ていないが、
中心値だけ見ると

- WH生成が大きい方にずれている
- $H \rightarrow WW$ が大きい方にずれている
- ZH生成はずれてない
- $H \rightarrow ZZ$ はずれていない

• $\kappa_W > \kappa_Z$ なる物理？

← 多分ありえない！

• $\kappa_V (V=W,Z) > 1$ なる物理？

← あり得るが
エキゾチック

Wait for more data!

ヒッグスポテンシャルの物理

電弱対称性の破れの核心部分(未検証)

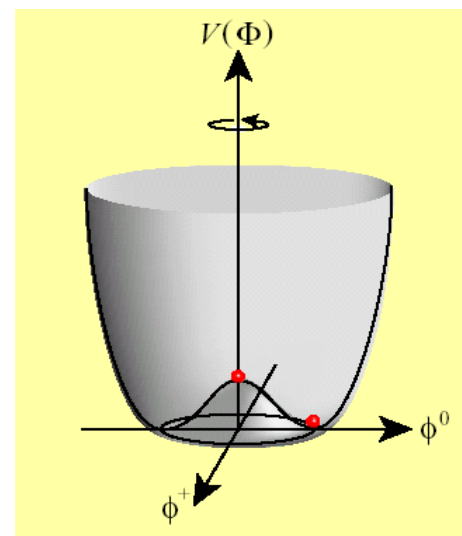
- 背後に潜む新物理

- 負の質量項はどこから
- 自己結合定数はどこから

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

- 電弱相転移の物理の解明

- 1次的相転移かどうか、強さは？
- 宇宙バリオン数生成問題との関連
- 相転移のメカニズム



知りたい！

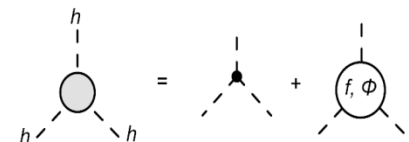
自己結合

対称性の自発的破れの本質を理解する為には、ヒッグスポテンシャルを再構成することが重要

$$V_{\text{Higgs}} = \frac{1}{2} \underline{m_h^2} h^2 + \frac{1}{3!} \underline{\lambda_{hhh}} h^3 + \frac{1}{4!} \lambda_{hhhh} h^4 + \dots$$

有効ポテンシャル $V_{\text{eff}}(\varphi) = -\frac{\mu_0^2}{2}\varphi^2 + \frac{\lambda_0}{4}\varphi^4 + \sum_f \frac{(-1)^{2s_f} N_{C_f} N_{S_f}}{64\pi^2} m_f(\varphi)^4 \left[\ln \frac{m_f(\varphi)^2}{Q^2} - \frac{3}{2} \right]$

くりこみ条件

$$\left. \frac{\partial V_{\text{eff}}}{\partial \varphi} \right|_{\varphi=v} = 0, \quad \left. \frac{\partial^2 V_{\text{eff}}}{\partial \varphi^2} \right|_{\varphi=v} = m_h^2, \quad \left. \frac{\partial^3 V_{\text{eff}}}{\partial \varphi^3} \right|_{\varphi=v} = \lambda_{hhh}$$


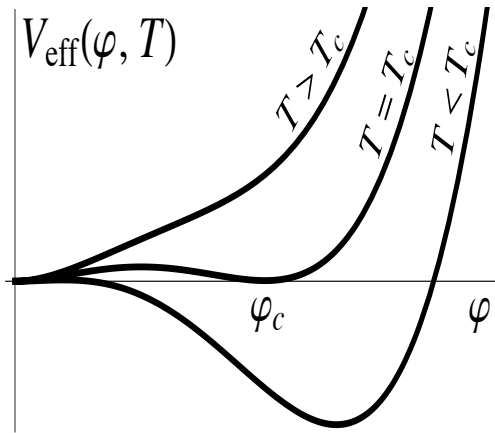
標準模型
における
トップループ
の効果

$$\lambda_{hhh}^{\text{SMloop}} \sim \frac{3m_h^2}{v} \left(1 - \frac{N_c \textcolor{red}{m}_t^4}{3\pi^2 v^2 m_h^2} + \dots \right)$$

ノンデカップリング効果

電弱バリオン数生成

真空泡の生成と発展



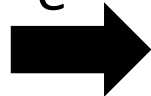
サハロフの第3条件 (熱的非平衡)



スファレロン脱結合条件
(強い1次相転移の条件)

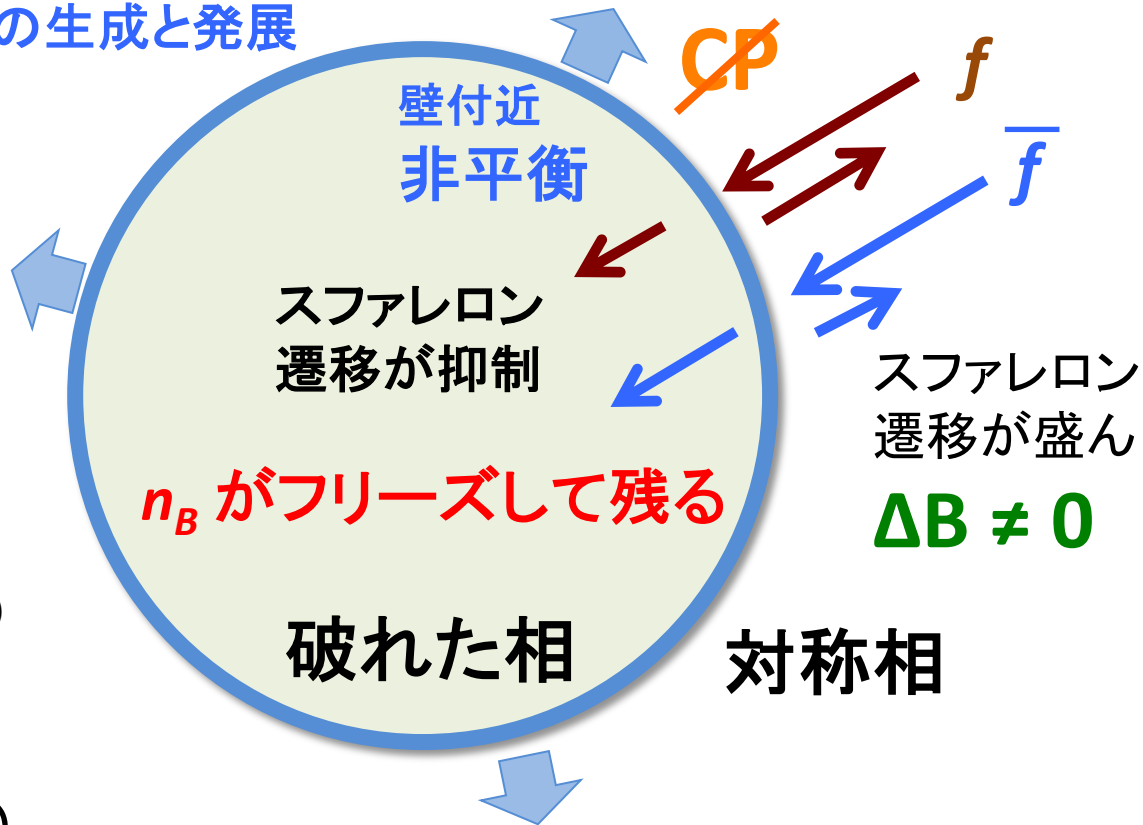
$$\Gamma_{\text{sph}} < H(T_c)$$

$$\begin{aligned} \Gamma_{\text{sph}} &\sim e^{-E_{\text{sph}}/T_c} \\ &\sim e^{-\alpha' \phi_c/T_c} \end{aligned}$$



$$\frac{\phi_c}{T_c} \gtrsim 1$$

ヒッグスポテンシャル
の物理



強い一次電弱相転移と hhh 結合

強い一次電弱相転移
 $\Leftrightarrow hhh$ 結合にも大きなずれ

hhh 結合に 10-20 %以上のずれ
の有無を調べることで
電弱バリオン数生成は検証可能!

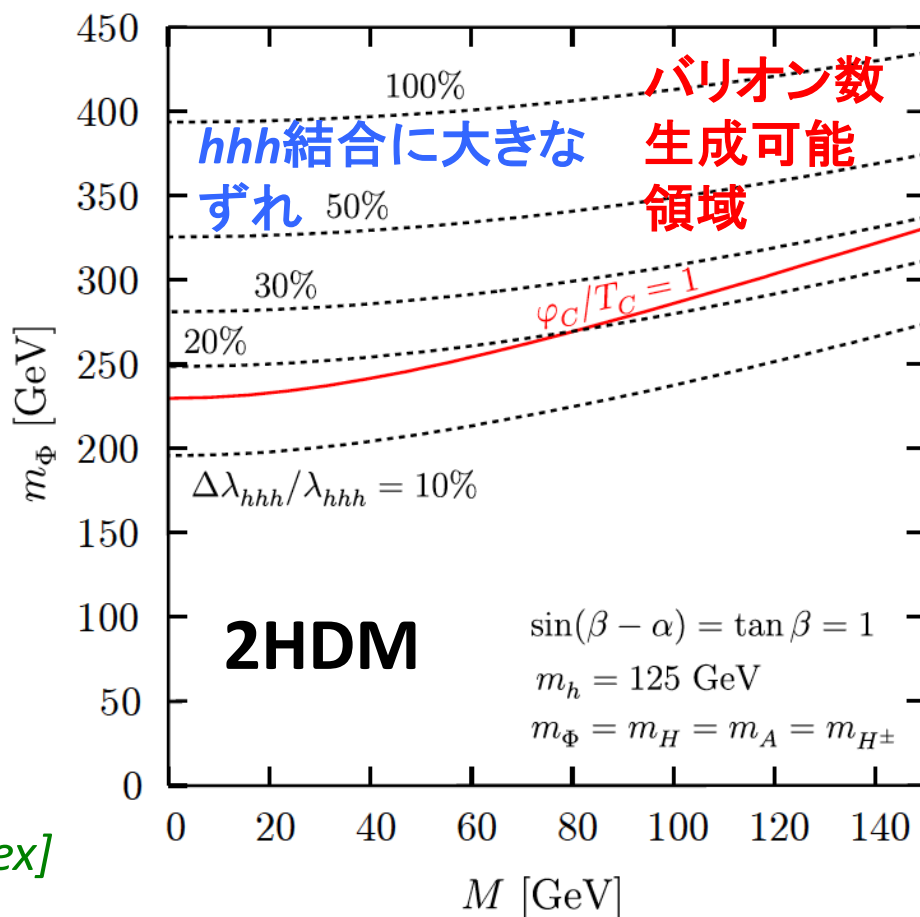
どの実験で?

残念ながら LHC では λ_{hhh} を
望みの精度では測るのは無理

ILC (1 TeV) だけが 10 %で測れる

K. Fujii et al., arXiv:1506.05992 [hep-ex]

S.K., Y. Okada, E. Senaha (2005)



宇宙物理の問題を加速器実験で検証できる好例

スカラー混合による一次的相転移

熱的ループ効果 ↓

$$V_{\text{eff}} = D(T^2 - T_0^2)\varphi^2 - \overbrace{(ET - e)}^{\text{非熱的效果}\uparrow}\varphi^3 + \frac{\lambda(T)}{4}\varphi^4$$

非熱的效果 ↑

Higgs singlet model

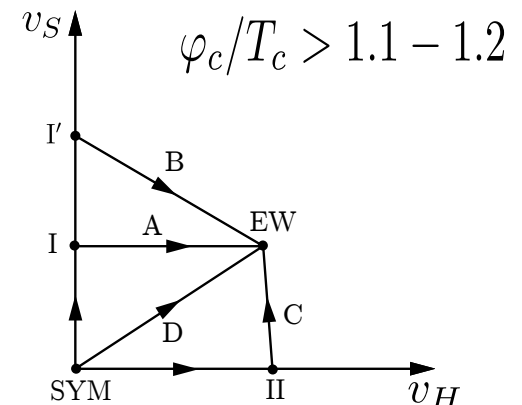
$$V_0 = -\mu_\Phi^2|\Phi|^2 + \lambda_\Phi|\Phi|^4 + \mu_{\Phi S}|\Phi|^2 S + \frac{\lambda_{\Phi S}}{2}|\Phi|^2 S^2 + \mu_S^3 S + \frac{m_S^2}{2}S^2 + \frac{\mu'_S}{3}S^3 + \frac{\lambda_S}{4}S^4$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} G^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v_\Phi + \phi_1 + iG^0) \end{pmatrix}, \quad S = v_S + \phi_2 \quad (\phi_1, \phi_2) \rightarrow (h, H) \text{ with } \theta$$

Multi-field analysis of EWPT is necessary

$$(v_\Phi, v_S)$$

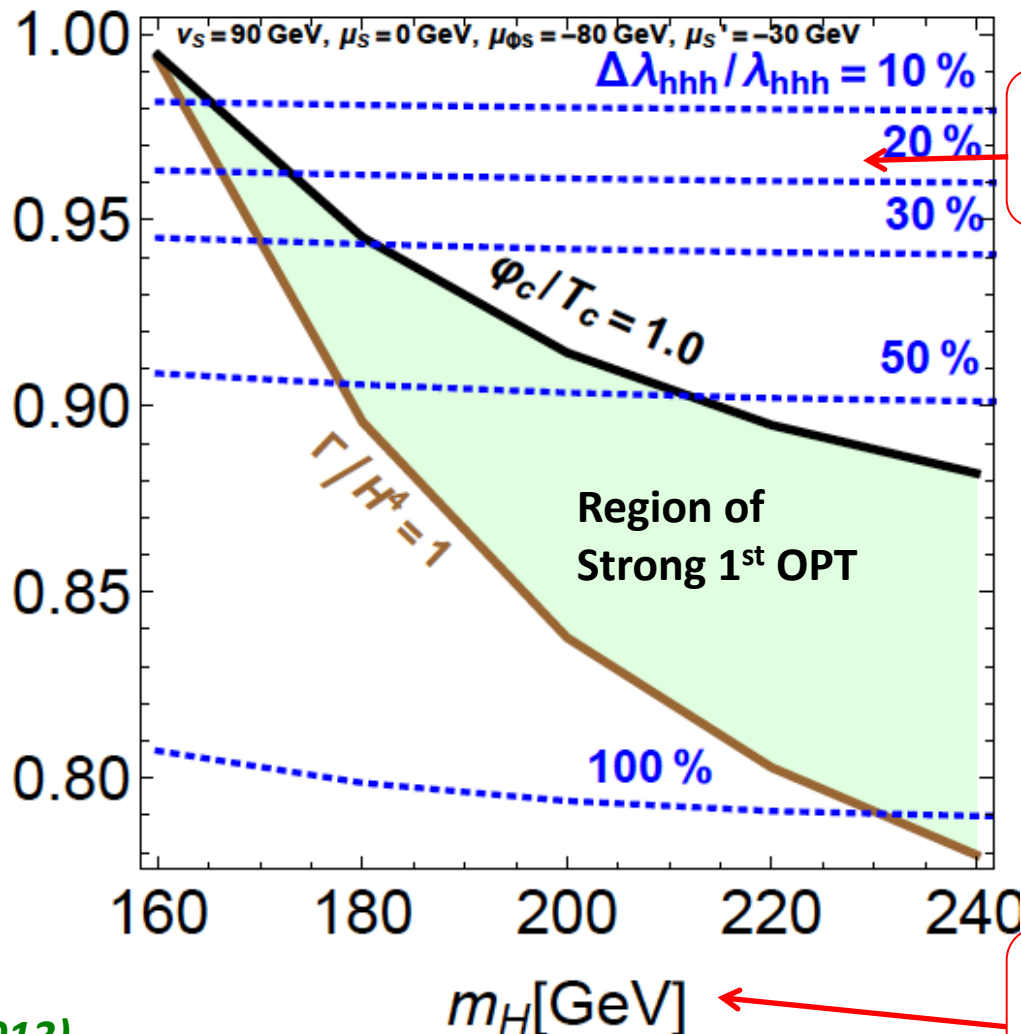
Public tool “**CosmoTransition**” is used.



スカラー混合による一次的相転移

$$K = K_V = K_f \\ = \cos\theta$$

Precision
measurement
at ILC/LHC



Self-coupling hhh
measurement at ILC

Direct searches of
the second Higgs
at LHC

Fuyuto, Senaha (2013)

K. Hashino, M. Kakizaki, S.K., T. Matsui, P. Ko, Phys. Lett. B 766, 49 (2017)

重力波によるヒッグスポテンシャル探究

2016年aLIGOでブラックホール連星の重力波 (~ 100 Hz) を初観測

→ 重力波天文学の始まり

地上実験 aLIGO, KAGRA, aVirgo...

重力波物理学への夢

極初期宇宙で起きた現象を重力波で観れるか？

インフレーション, 一次的電弱相転移等, ...

電弱相転移からの重力波の振動数は相転移温度で決まる

$T = 100\text{GeV} \rightarrow f = 10^{-1} - 10^{-3} \text{ Hz}$ LIGO/KAGRAの感度領域
($10 - 10^3 \text{ Hz}$) から外れている

将来の宇宙での重力波観測 (2030年代)

LISA実験(欧州) 感度領域 ミリHz 周辺 2034年実験開始

DECIGO計画(日本) 感度領域 デシHz 周辺

初期宇宙の物理からの重力波をサーベイできる

1次相転移由来の重力波

泡の衝突

“プラズマ乱流”

“音波”

(Compressional plasma)

“壁の衝突”

(Envelope approximation)

泡の衝突で球対称性が破れる
→ 重力波発生

アインシュタイン方程式

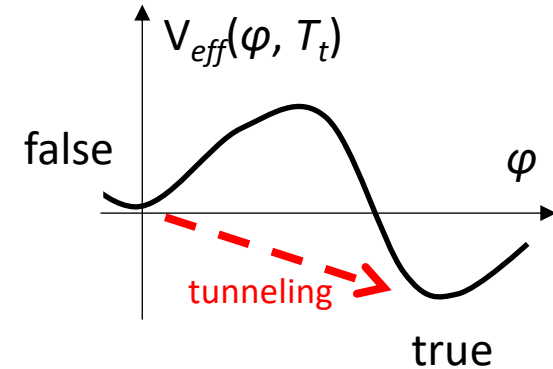
$$\square \bar{h}_{\mu\nu} = \kappa \underline{T}_{\mu\nu}$$

重力波源

泡の力学から重力波スペクトルへ

泡の核形成率 $\Gamma(T) = \Gamma_0 \exp(-S_3/T)$

相転移条件 $\Gamma(T)/H^4 = 1$ を課して
相転移温度 T_t を決定



潜熱(解放される擬真空のエネルギー) α ポテンシャルの深さ

核形成率の変化率(相転移時間の逆数) β 相転移の速さ

これらのパラメータから重力波スペクトルが計算できる

例) 音波(プラズマ疎密波)由来のGWの強度とピーク振動数(Fitting function)

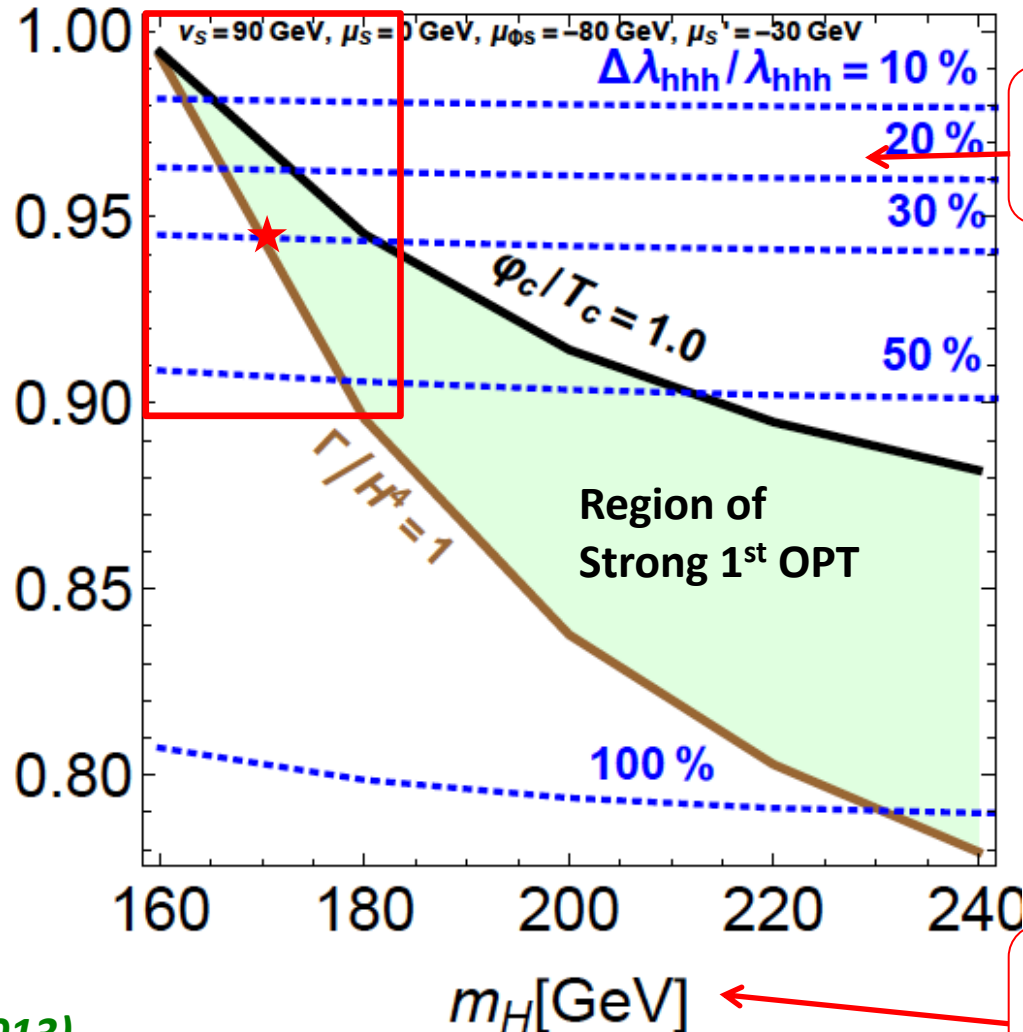
$$\tilde{\Omega}_{\text{sw}} h^2 \simeq 2.65 \times 10^{-6} \frac{v_b}{\tilde{\beta}} \left(\frac{\kappa(v_b, \alpha) \alpha}{1 + \alpha} \right)^2 \quad \tilde{f}_{\text{sw}} \simeq 1.9 \times 10^{-5} \text{Hz} \frac{\tilde{\beta}}{v_b}$$

C. Caprini et al., arXiv:1512.06239

スカラー混合による一次的相転移

$$K = K_V = K_f \\ = \cos\theta$$

Precision
measurement
at ILC/LHC



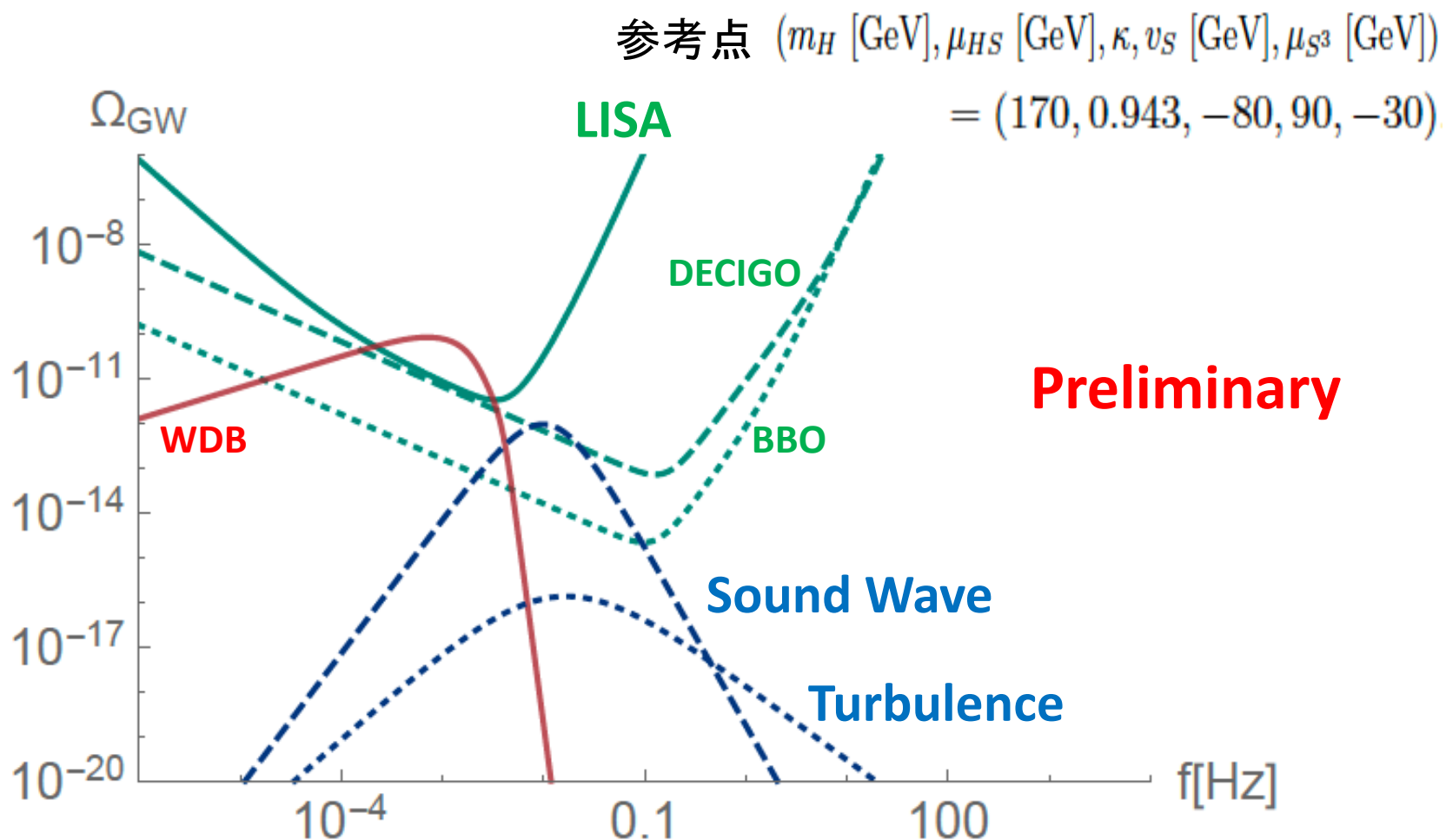
Self-coupling hhh
measurement at ILC

Direct searches of
the second Higgs
at LHC

Fuyuto, Senaha (2013)

K. Hashino, M. Kakizaki, S.K., T. Matsui, P. Ko, Phys. Lett. B 766, 49 (2017)

重力波スペクトル (スカラー混合模型)



Doublet-Singlet Mixing model

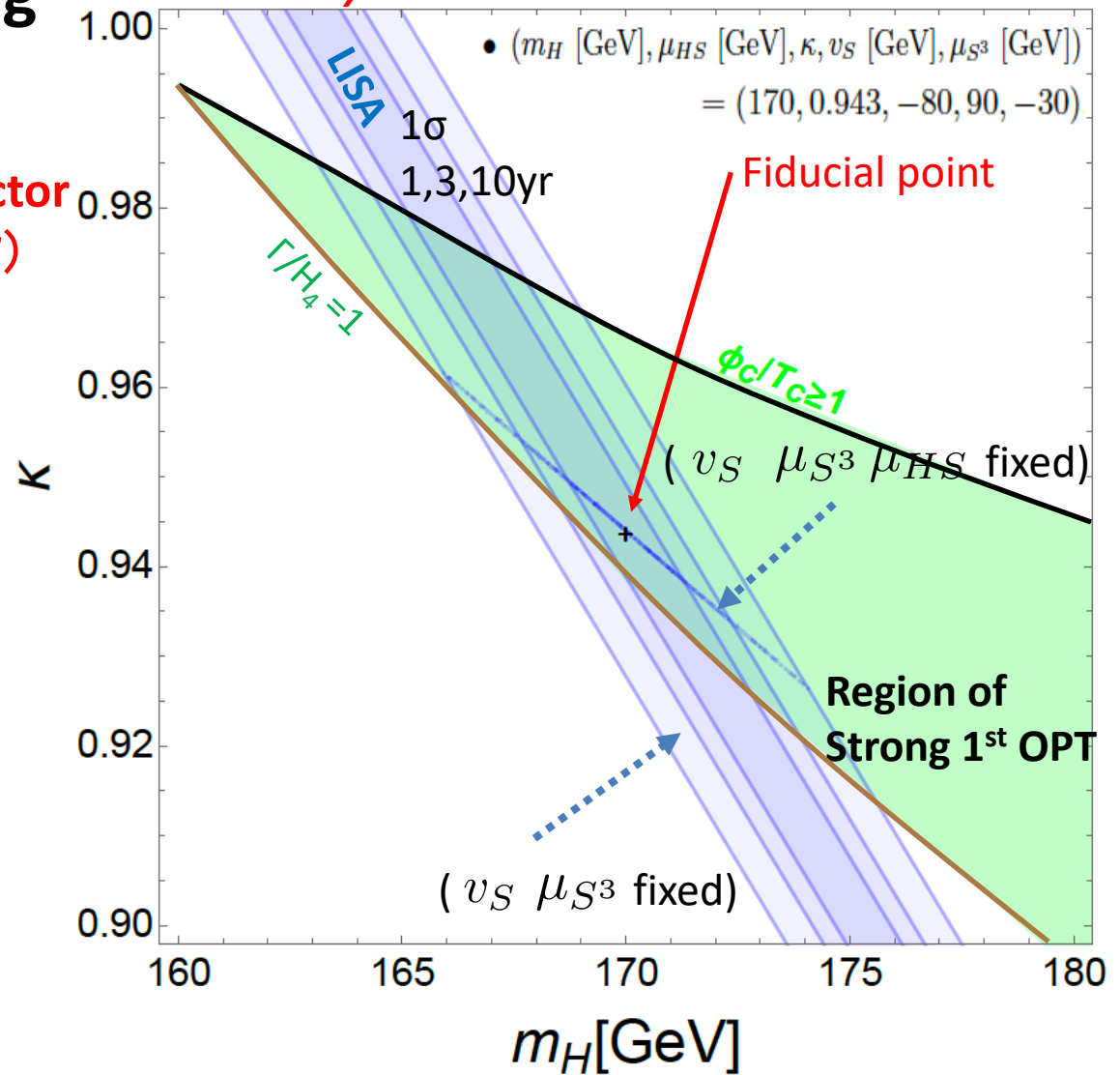
$K (= K_f = K_V = \cos\theta)$: Scaling Factor
 m_H : Mass of the 2nd Higgs (H)

Green:

電弱相転移が
強い一次相転移になる領域

Blue: LISAの観測
で決まる領域

By Hashino, Jinno, Kakizaki, SK, Takahashi, Takimoto
Preliminary



Doublet-Singlet Mixing model

$K (= K_f = K_V = \cos\theta)$: Scaling Factor
 m_H : Mass of the 2nd Higgs (H)

Green:

電弱相転移が
強い一次相転移になる領域

Blue: LISAの観測
で決まる領域

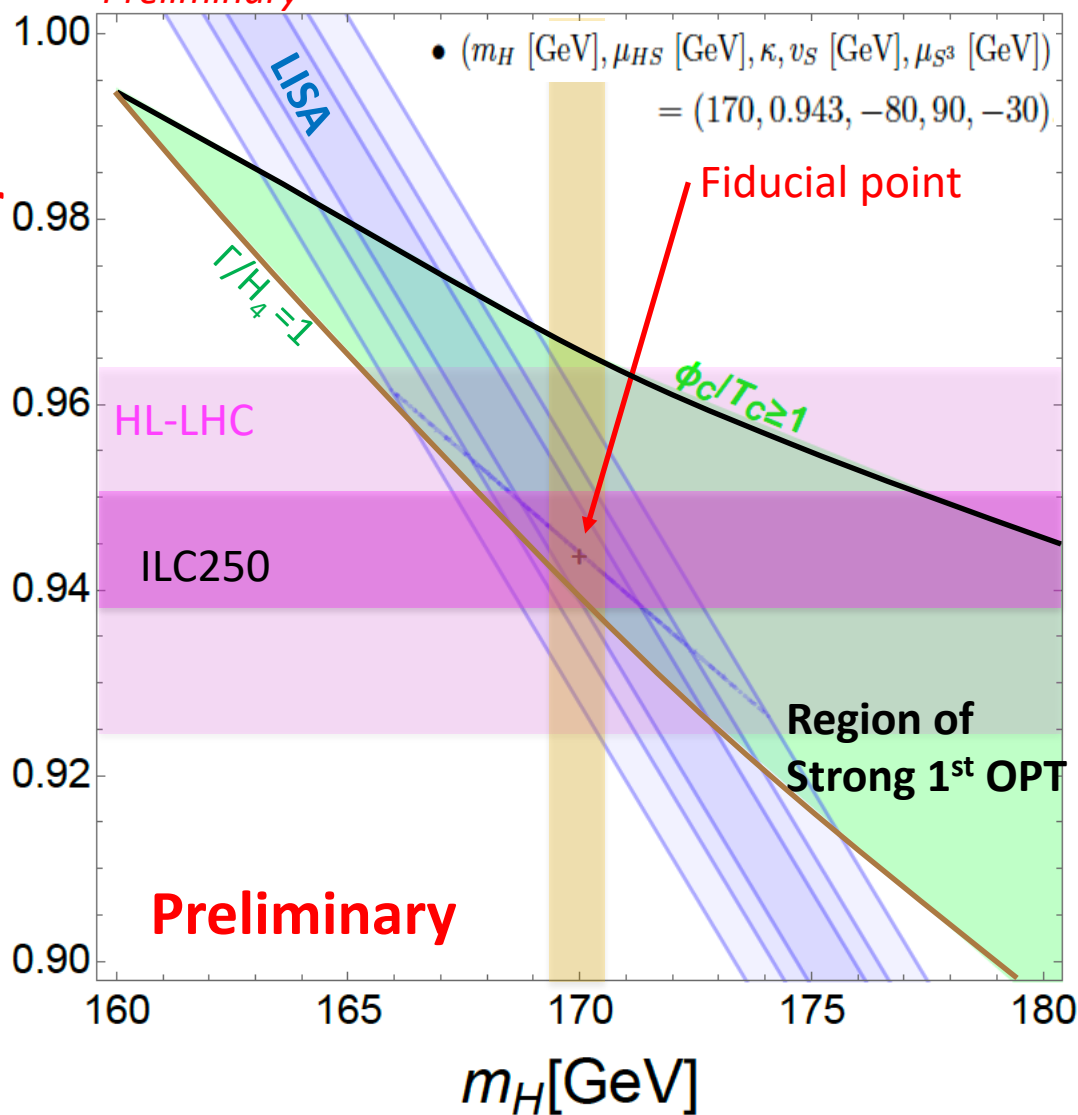
$\Delta\kappa \sim 2\%$ (HL-LHC)
 0.6% (ILC250)

$\Delta m_H \sim 1 \text{ GeV(?)}$ at (HL-)LHC

模型は HL-LHC, ILC250, LISA で
立体的に検証できる

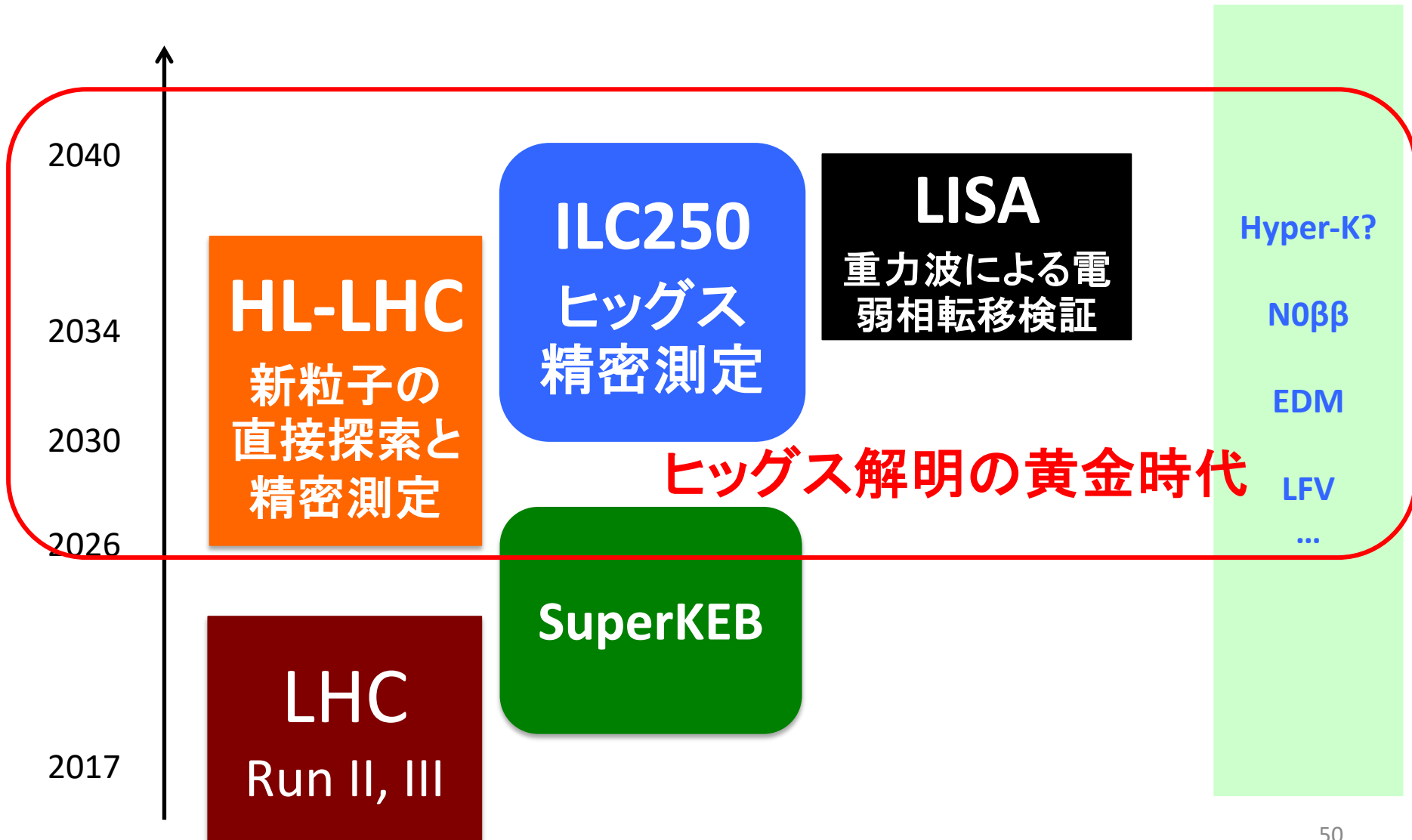
By Hashino, Jinno, Kakizaki, SK, Takahashi, Takimoto

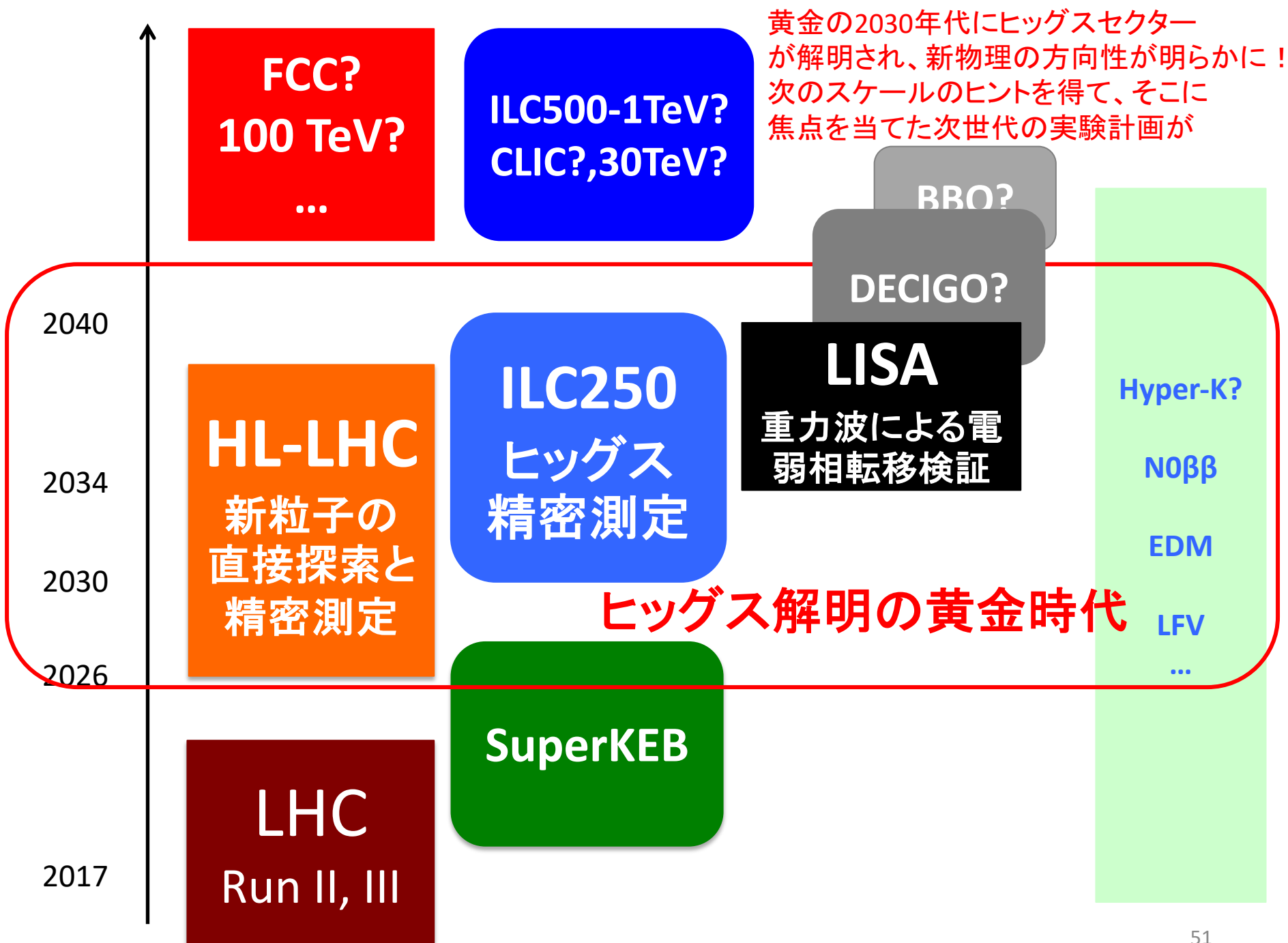
Preliminary



2 parameter analysis と
3 parameter analysis

将来実験





まとめ

- ヒッグス粒子は発見されたが、ヒッグスセクターの構造(個数、表現、対称性、...)は未知
- ヒッグスセクターの構造決定＝新物理
- 将来
 - (HL-) LHC 新粒子の探索
 - HL-LHC, ILC250 ヒッグス精密測定
 - LISA/DECIGO 電弱相転移(ヒッグスポテンシャル)
- 2030年代、ヒッグスセクターが解明され新物理の方向性が明らかに

Backup Slides

Doublet-Singlet Mixing model

$K (= \cos\theta)$: Scaling Factor
 m_H : Mass of the 2nd Higgs H

Green:
電弱相転移が
強い一次相転移になる領域

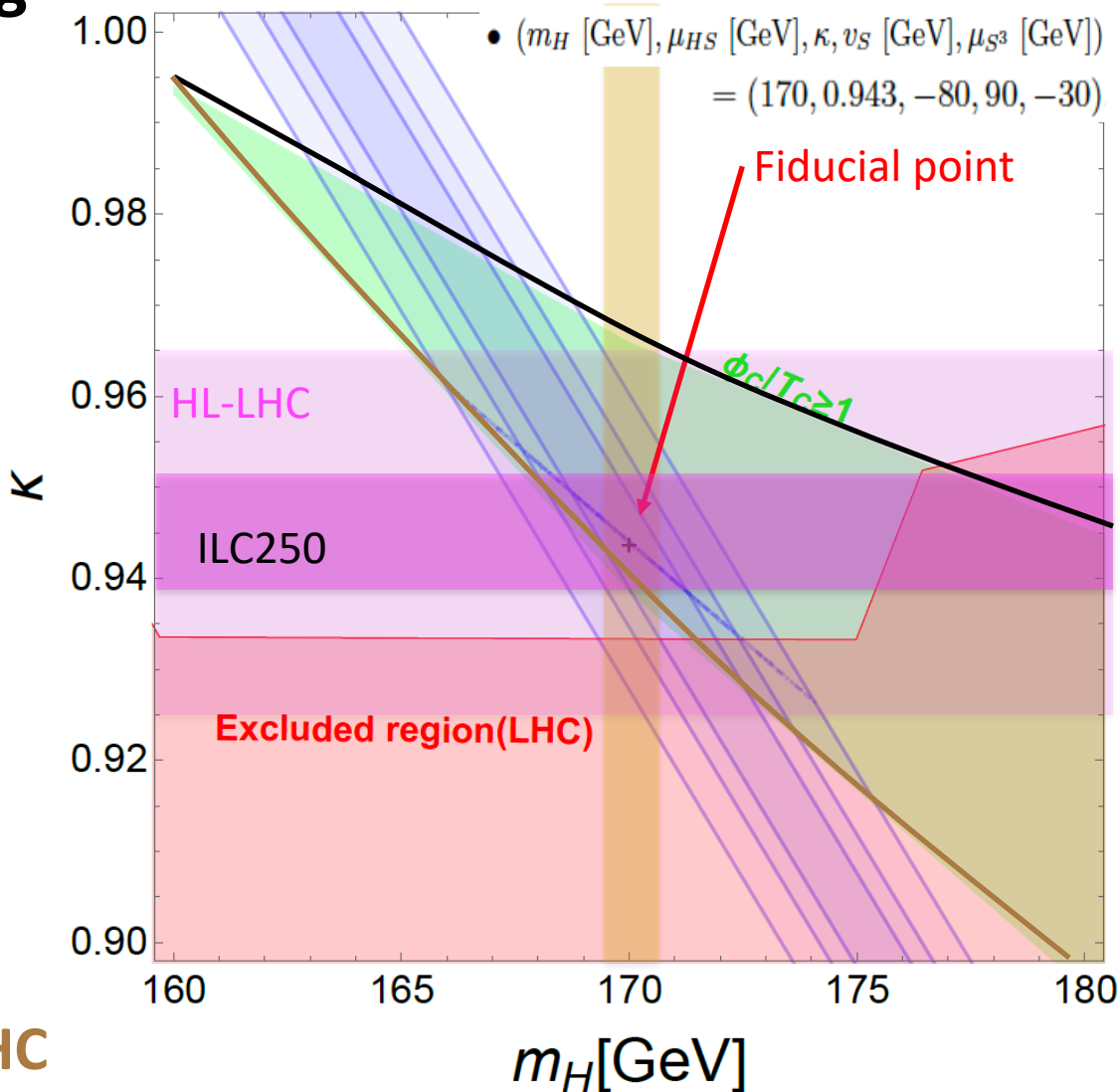
Blue: LISAの観測
で決まる領域

$\Delta\kappa \sim 2\%$ (HL-LHC)
 0.6% (ILC250)

$\Delta m_H \sim 1 \text{ GeV(?)}$ at (HL-)LHC

模型は HL-LHC, ILC250, LISA で
立体的に検証できる

By Hashino, Jinno, Kakizaki, SK, Takahashi, Takimoto
Preliminary

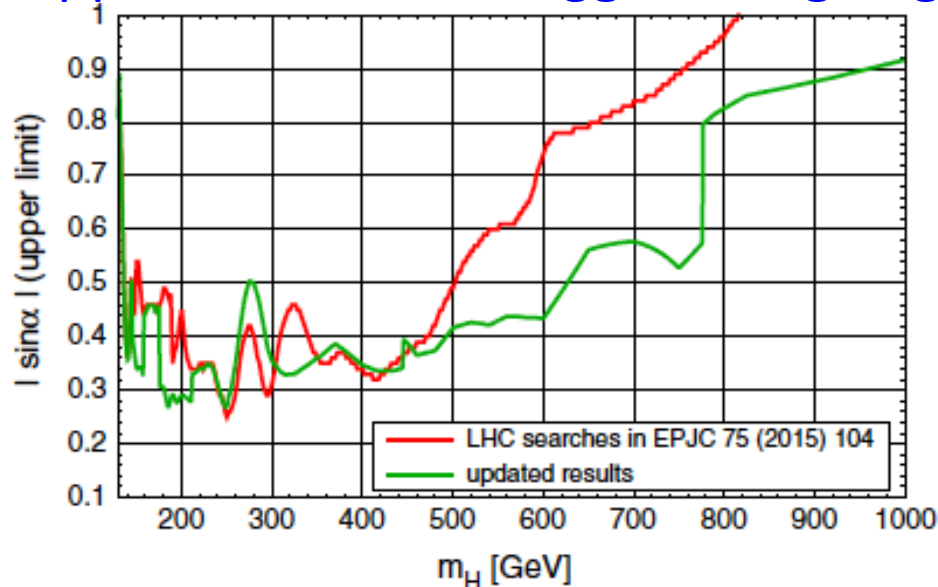


2 parameter analysis と
3 parameter analysis

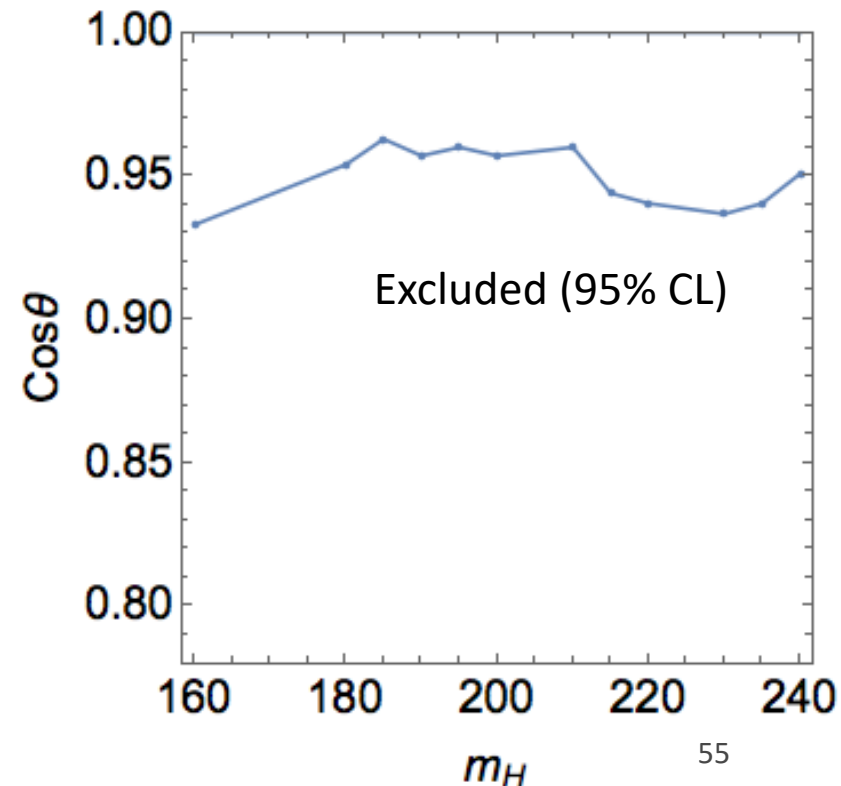
ダイレクトサーチからの制限

Upper limit on the Higgs mixing angle $|\sin \theta|$

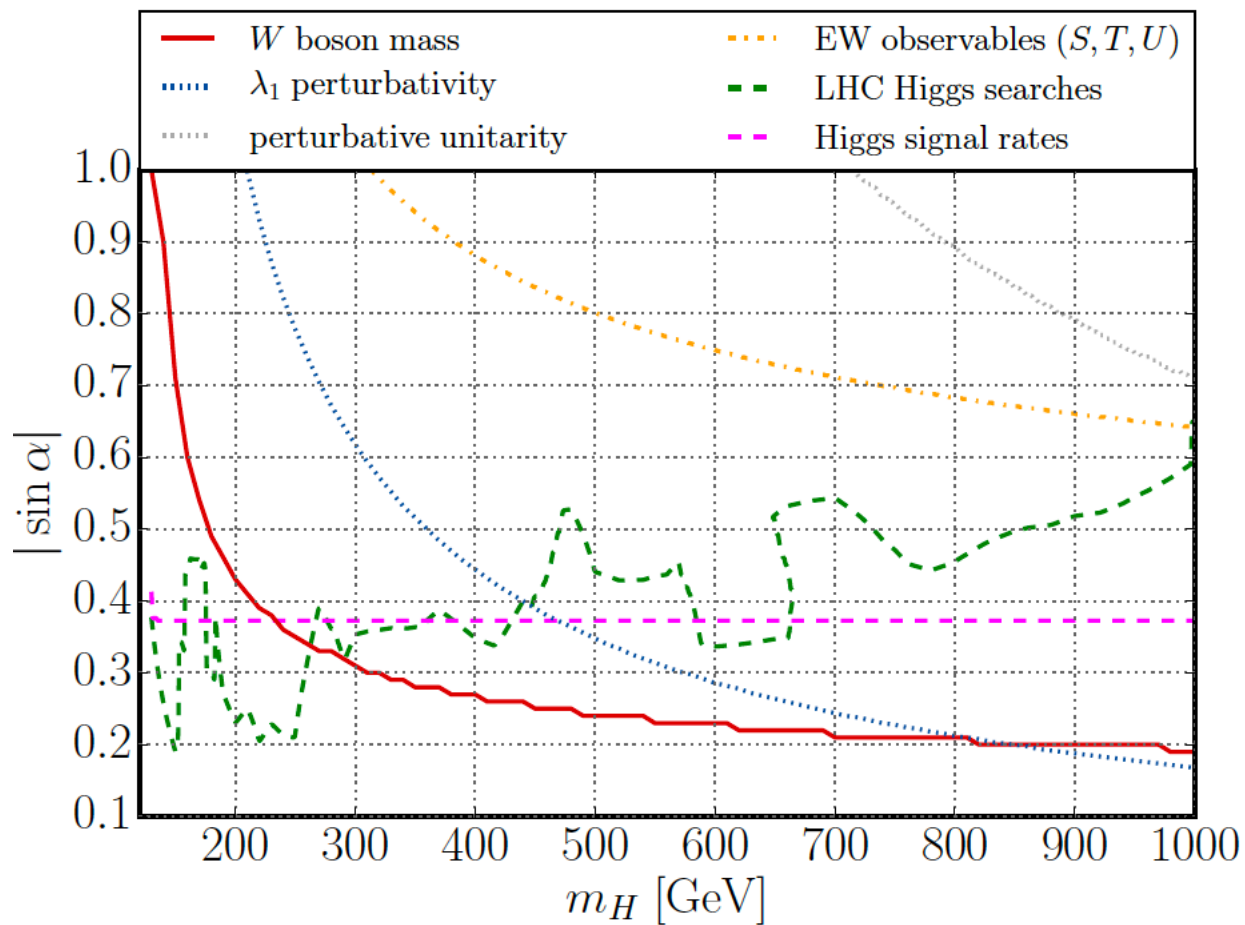
[Robens, Stefaniak (2016)]



→ Constraints on the Higgs boson coupling $\kappa (= \cos \theta)$



Range of m_H [GeV]	Search channel
130–145	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
145–158	$H \rightarrow VV$ ($V=W,Z$)
158–163	SM comb.
163–170	$H \rightarrow WW$
170–176	SM comb.
176–211	$H \rightarrow VV$ ($V=W,Z$)
211–225	$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$
225–445	$H \rightarrow VV$ ($V=W,Z$)



別の Fiducial Values

By Hashino, Jinno, Kakizaki, SK, Takahashi, Takimoto
Preliminary

$(\Omega_{\text{peak}} h^2, f_{\text{peak}})$

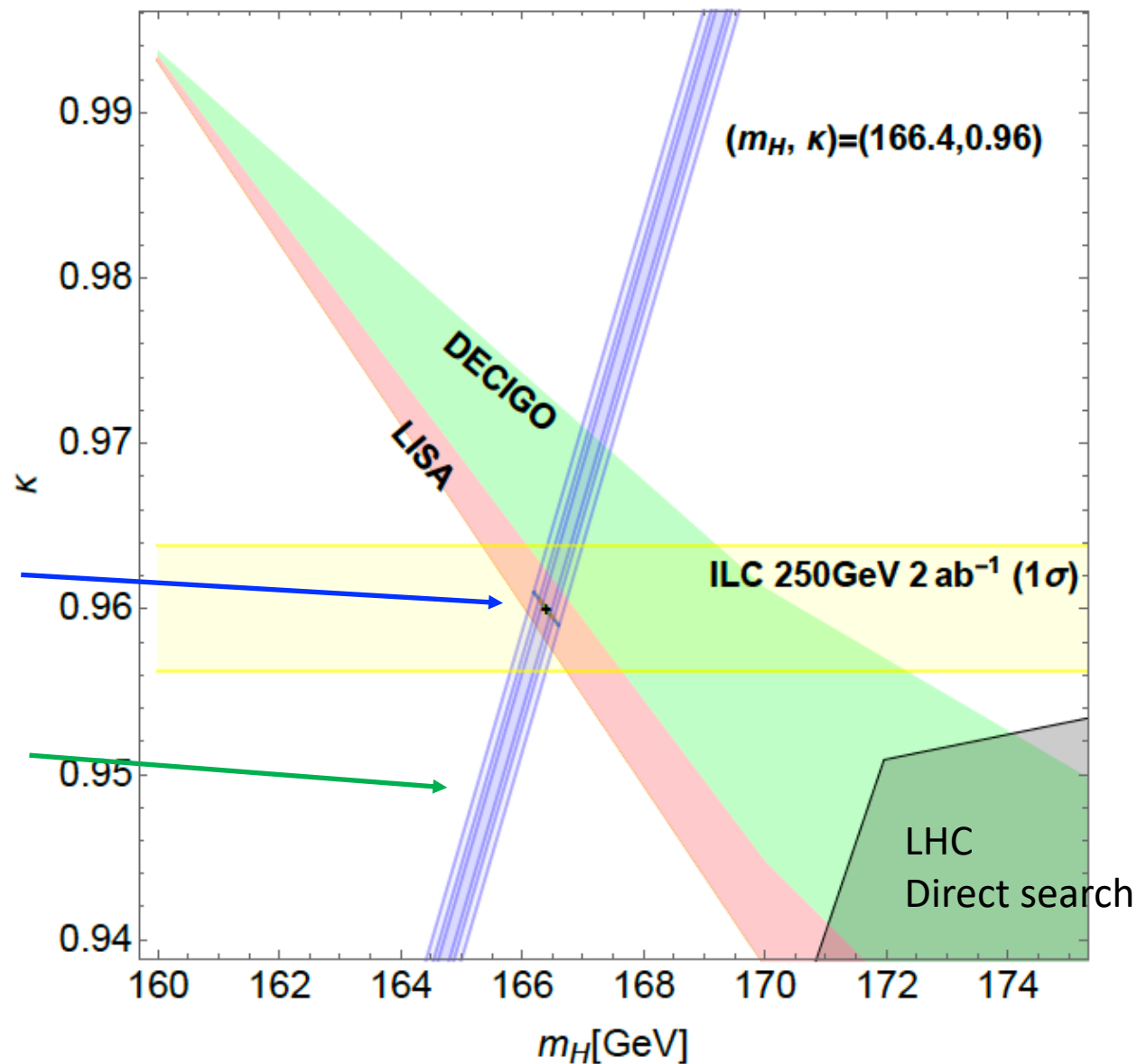


2 parameter analysis

$(m_H, \kappa, \mu_{\text{HS}}, v_s, \mu_{\text{S3}})$

3 parameter analysis

$(m_H, \kappa, \mu_{\text{HS}}, v_s, \mu_{\text{S3}})$



Preliminary

Fisher Analysis

GW spectrum for
parameter set $\{p\}$

GW spectrum for
fiducial parameter set $\{\hat{p}\}$

Likelihood function

$$\delta\chi^2(\{p\}, \{\hat{p}\}) = 2T_{\text{obs}} \int_0^\infty df \frac{[S_h(f, \{p\}) - S_h(f, \{\hat{p}\})]^2}{[S_{\text{eff}}(f) + S_h(f, \{\hat{p}\})]^2}$$

Observation period

Effective sensitivity of interferometer

↓ Taylor expansion at $\{p\} = \{\hat{p}\}$

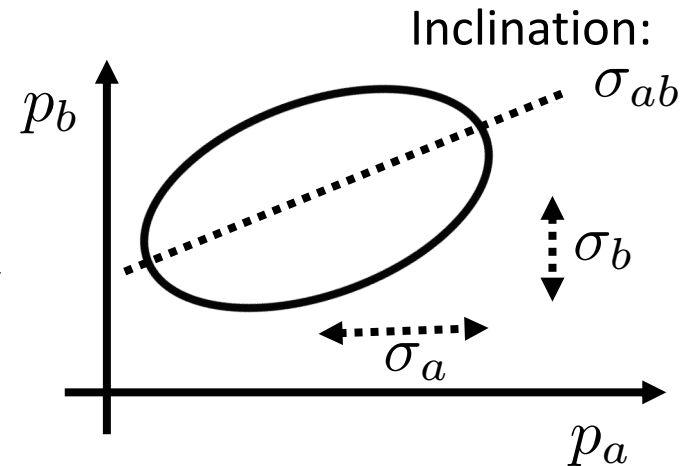
$$\delta\chi^2(\{p\}, \{\hat{p}\}) \simeq \mathcal{F}_{ab}(p_a - \hat{p}_a)(p_b - \hat{p}_b)$$

Fisher information matrix

$$\mathcal{F}_{ab} = 2T_{\text{obs}} \int_0^\infty df \frac{\partial_{p_a} S_h(f, \{\hat{p}\}) \partial_{p_b} S_h(f, \{\hat{p}\})}{[S_{\text{eff}}(f) + S_h(f, \{\hat{p}\})]^2}$$

The inverse $\mathcal{F}_{ab}^{-1}$ is the covariance matrix

Confidence ellipse



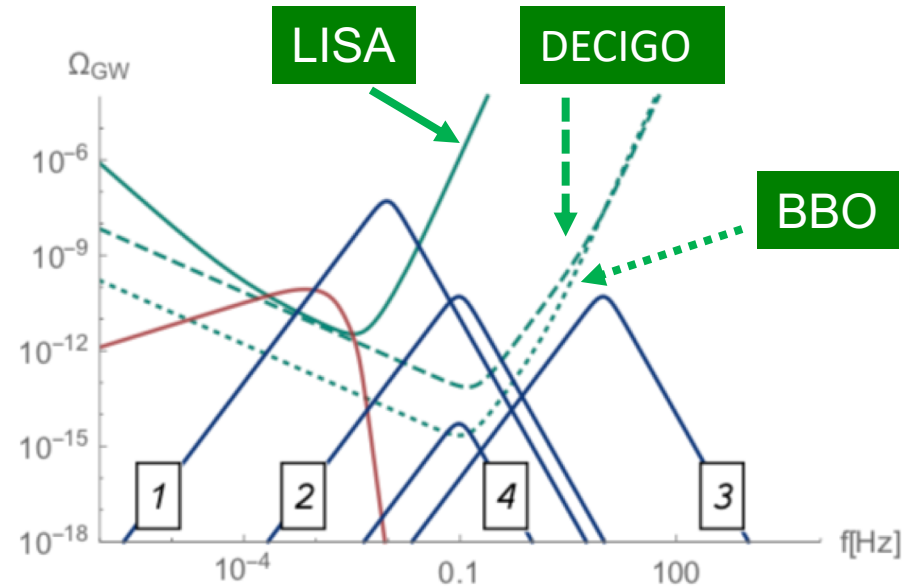
We assume that these expressions are applicable to a single-detector like LISA

Constraints on the shape of spectrum

GW spectrum

Fiducial values

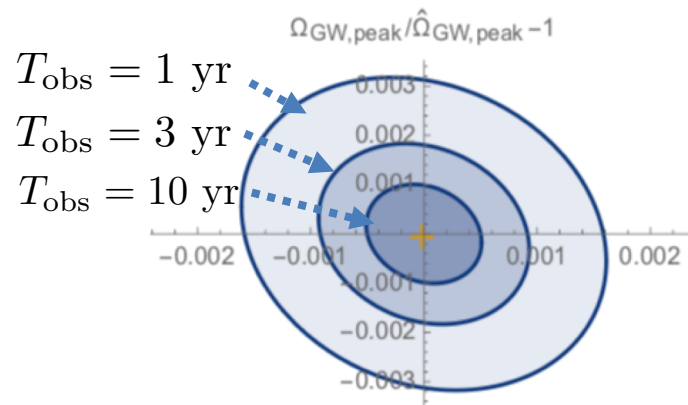
- Point 1: $(f_{\text{peak}}, \Omega_{\text{peak}}) = (10^{-2} \text{ Hz}, 10^{-7})$,
- Point 2: $(f_{\text{peak}}, \Omega_{\text{peak}}) = (10^{-1} \text{ Hz}, 10^{-10})$,
- Point 3: $(f_{\text{peak}}, \Omega_{\text{peak}}) = (10 \text{ Hz}, 10^{-10})$,
- Point 4: $(f_{\text{peak}}, \Omega_{\text{peak}}) = (10^{-1} \text{ Hz}, 10^{-14})$.



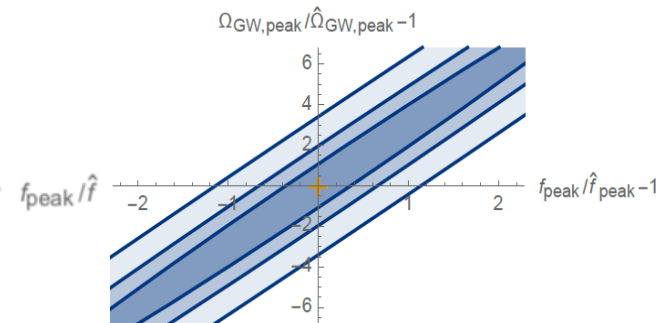
Expected constraints on the GW spectrum

LISA

1 σ confidence ellipse in $(f_{\text{peak}}, \Omega_{\text{peak}})$ for P1 and P2



Point 1



Point 2

Constraints on transition parameters

Constraining parameters

- The GW spectrum is determined by f_{peak} , Ω_{peak}

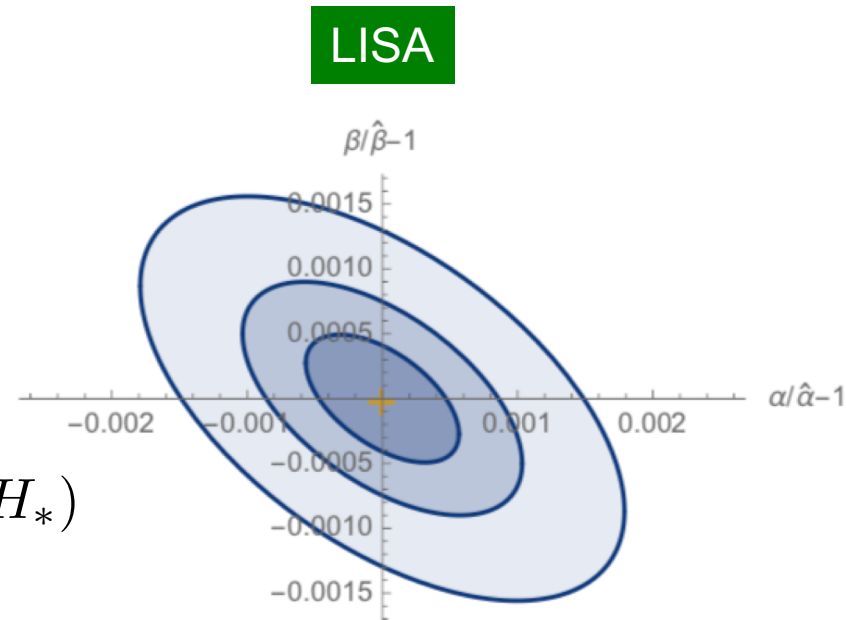
→ Our Fisher analysis generically constrain
2 combinations of underlying parameters

Quantities describing transition dynamics

$$T_*, \quad v_w, \quad \alpha, \quad \frac{\beta}{H_*}$$

Expected constraints on the transition parameters

- Fiducial values
 $(\alpha, \beta/H_*, v_w, T_*) = (1, 100, 1, 100 \text{ GeV})$
- 1σ confidence ellipse in $(\alpha, \beta/H_*)$
for fixed T_* and v_w



Properties of the representative **LISA** configurations

C.Caprini *et al.*, arXiv:1512.06239

Name	C1	C2	C3	C4
Full name	N2A5M5L6	N2A1M5L6	N2A2M5L4	N1A1M2L4
# links	6	6	4	4
Arm length [km]	5M	1M	2M	1M
Duration [years]	5	5	5	2
Noise level	N2	N2	N2	N1

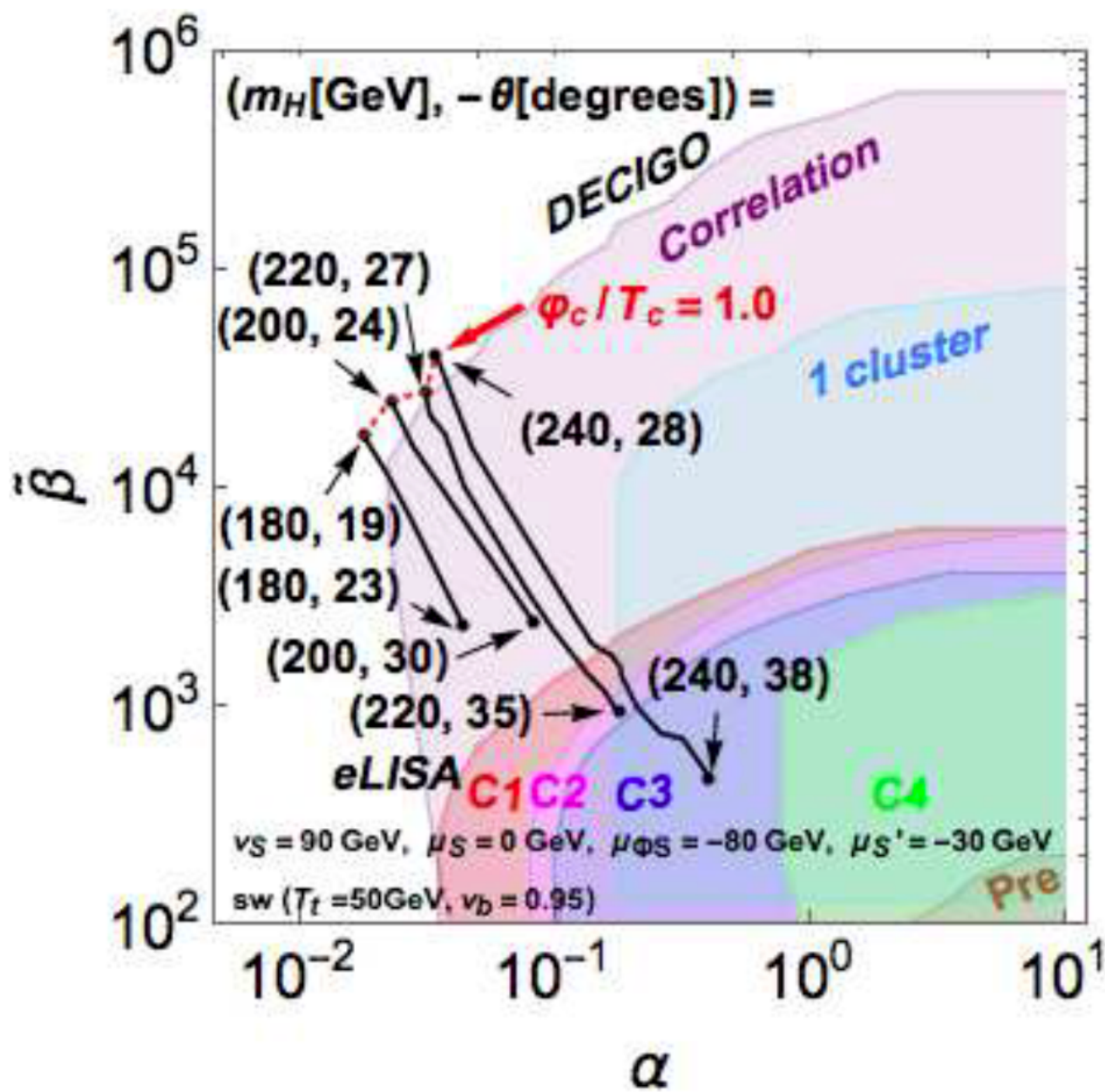
LISA has been approved in 2016
It will start from 2034

FP (Fabry-Perot)-**DECIGO**

1 cluster (arm length 1000km)

Correlation between 2 cluster

S. Kawamura et al, Class. Quant. Grav. 28, 094011 (2011)

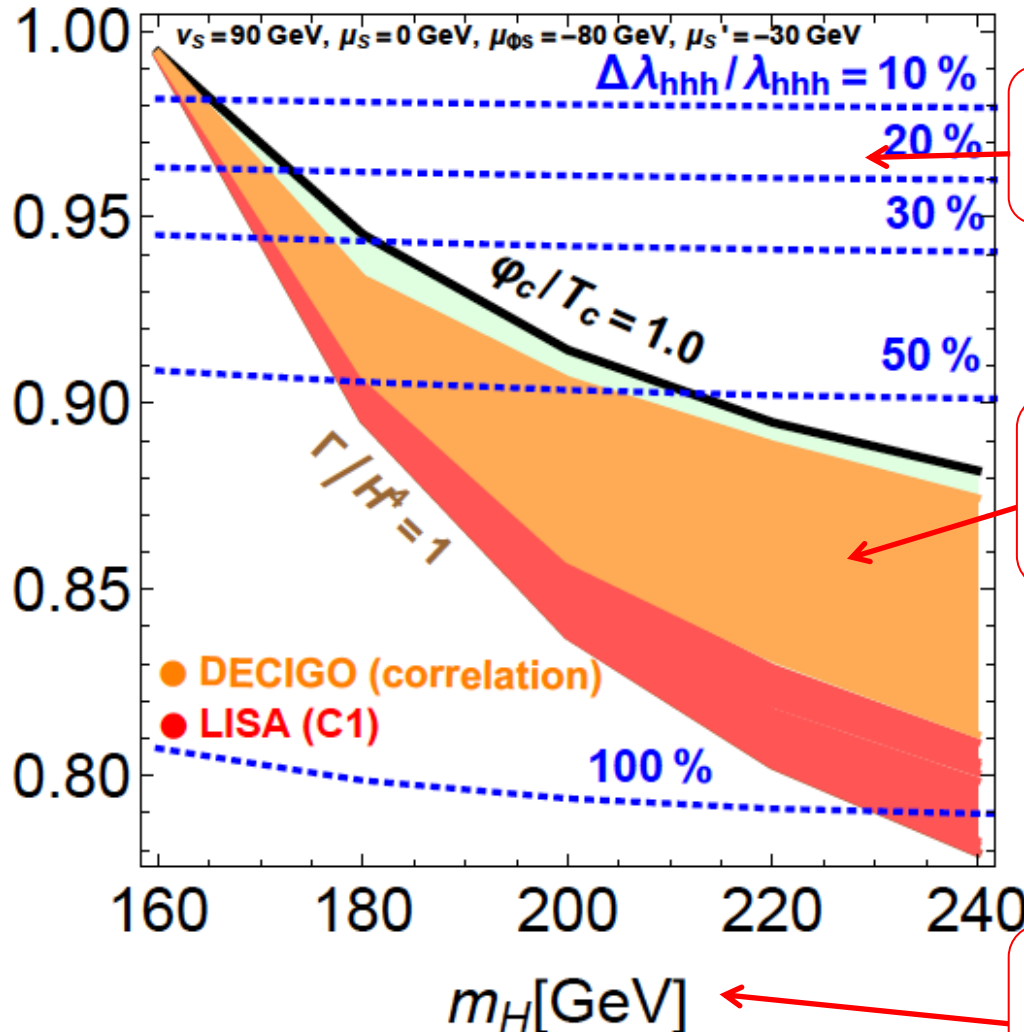


Model of EW Baryogenesis will be well tested by the synergy of HL-LHC, **ILC250**, LISA/DECIGO,

$$K = K_V = K_f$$

$$= \cos\theta$$

Precision measurement at ILC250



Self-coupling hhh measurement at ILC

Measurement of Gravitational Waves at LISA/DECIGO

Direct searches of the second Higgs at LHC