

ヒッグス崩壊分岐比精密測定による MSSMの付加的ヒッグス粒子の間接探索

柿崎 充 (富山大学)

加速器・物理合同 ILC 夏の合宿2015
@群馬県 ホテル天坊

- 共同研究者:
兼村晋哉, 菊地真吏子, 松井俊憲, 横谷洋(富山大学)
- Ref.: arXiv:1505.03761

イントロダクション

- CERN LHCでのヒッグス粒子発見、性質の検証

- 標準理論 (SM) は $O(100)$ GeV以下のエネルギー領域を記述する有効理論として確立

これは終わりではなく新しい時代の幕開け

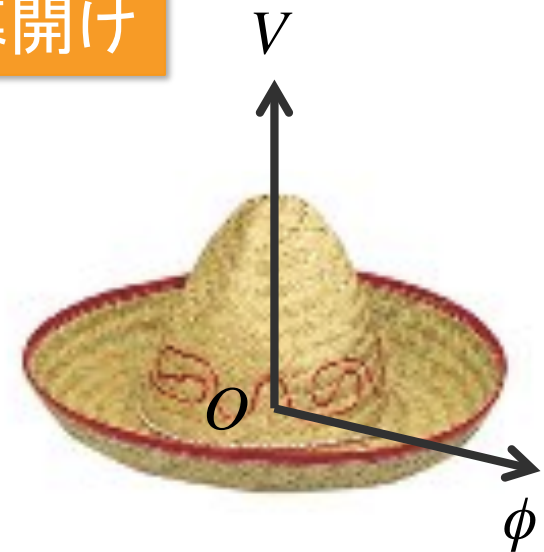
- 標準理論に残る謎

- 階層性問題
- ヒッグス粒子は素粒子か？複合粒子か？
- 電弱対称性の破れの背後にあるダイナミクス？
- ヒッグス自己結合定数の起源は？
- ヒッグス粒子は一つか？複数あるのか？

- ヒッグス粒子 = 新しい物理理論への窓

- 標準模型的ヒッグス \neq 標準模型のヒッグス

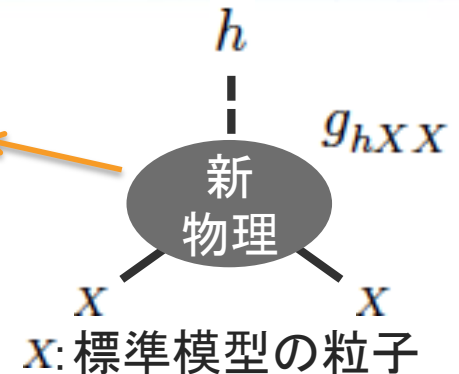
ヒッグス粒子の性質を調べることで
新物理理論の手がかりが得られる



新物理理論探索の戦略

- 新物理理論の影響はヒッグス結合に残っている

ヒッグス結合定数のずれの指紋照合: $\kappa_X = \frac{g_{hXX}}{g_{hXX}|_{SM}}$



- 新物理理論のエネルギースケールの決定
- 新物理模型の区別

ILCでは κ_X をパーセントレベルで測定可能 [ILC Higgs White Paper]

ヒッグス粒子の崩壊分岐比を精密に预言する事が必要

- 本講演の内容:

- 最小超対称標準模型(MSSM)ではヒッグス結合への輻射補正はノンデカップリング効果により増大
- MSSMの標準模型的ヒッグスボソンの崩壊分岐比を1ループレベルで計算
- ILCで間接的に探索可能なMSSMの付加的ヒッグス粒子の質量スケールは、LHCでの直接的な探索限界より高くなり得る

MSSM におけるボトム湯川結合へのループ補正

- MSSMヒッグスセクター:

	$SU(3)_C$	$SU(2)_L$	$U(1)_Y$
H_1	1	2	-1/2
H_2	1	2	+1/2

h : 標準理論的ヒッグス $m_h = 125\text{GeV}$
 H, A, H^\pm : 付加的ヒッグス $m_H \cong m_A \cong m_{H^\pm}$

- ボトム湯川相互作用: [ILC Technical Design Report; ILC Higgs White Paper]

$$-\mathcal{L}_b = \lambda_b \bar{b}_R H_1 Q_L \quad \longrightarrow \quad -\mathcal{L}_b = (\lambda_b + \delta\lambda_b) \bar{b}_R H_1 Q_L + \Delta\lambda_b \bar{b}_R Q_L H_2^*$$

- 超対称性の破れの効果 \longrightarrow "Wrong Higgs coupling"

[Hall, Rattazzi, Sarid (1994); Hempfling (1994); Eberl, Hidaka, Kraml, Majerotto, Yamada (2000); Haber, Mason (2008); Endo, Moroi, Nojiri (2015)]

- ボトムクォーク質量:

$$m_b = \frac{\lambda_b v}{\sqrt{2}} \cos \beta \quad \longrightarrow \quad m_b = \frac{\lambda_b v}{\sqrt{2}} \cos \beta (1 + \Delta_b) \quad \Delta_b \equiv \frac{\delta\lambda_b}{\lambda_b} + \frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} \tan \beta$$

- 標準理論的ヒッグスボソンのボトム湯川結合:

$$g_{hb\bar{b}}^0 = \frac{gm_b \sin \alpha}{2m_W \cos \beta} \quad \longrightarrow \quad g_{hb\bar{b}} = \frac{gm_b \sin \alpha}{2m_W \cos \beta} \left[1 + \frac{1}{1 + \Delta_b} \left(\frac{\delta\lambda_b}{\lambda_b} - \Delta_b \right) (1 + \cot \alpha \cot \beta) \right]$$

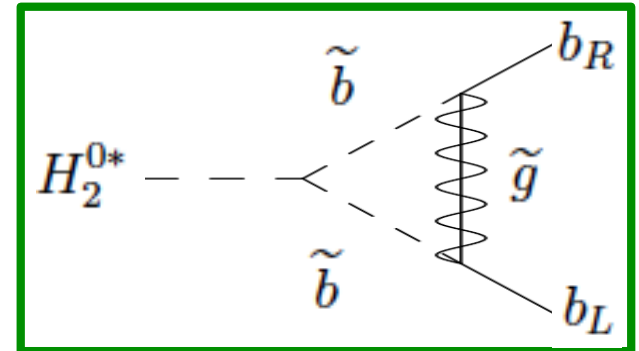
標準理論的ヒッグス粒子のボトム湯川結合の特徴

- MSSMに現れる新しい質量スケール: m_{SUSY}, m_A

- 超対称粒子の質量スケール $\mu \sim M_3 \sim A_t \sim m_{\text{SUSY}}$ が大きいとき

$$g_{hb\bar{b}} \simeq \frac{gm_b}{2m_W} \frac{\sin \alpha}{\cos \beta} [1 - \Delta_b(1 + \cot \alpha \cot \beta)]$$

$$\Delta_b \simeq \left(\frac{2\alpha_s}{3\pi} \frac{\mu M_3}{m_{\text{SUSY}}^2} + \frac{\lambda_t^2}{16\pi^2} \frac{\mu A_t}{m_{\text{SUSY}}^2} \right) \tan \beta$$



- m_A が小さいとき、超対称粒子による輻射補正はデカップルせず $\tan \beta$ に比例
(タイプII 2ヒッグス二重項模型にはない効果)

- 付加的ヒッグス粒子の質量スケール m_A が大きいとき

$$1 + \cot \alpha \cot \beta = -\frac{2m_Z^2}{m_A^2} \cos 2\beta + \mathcal{O}\left(\frac{m_Z^4}{m_A^4}\right)$$

- 超対称粒子による輻射補正の効果はデカップル

数値解析の方法

- 使用コード: FeynHiggs2.10.3 [www.feynhiggs.de, Hahn, Heinemeyer, Hollik, Rzehak, Weiglein]
 - ヒッグスセクターの粒子の質量、混合角はオンシェルスキームで2ループレベルで計算
 - ヒッグスボソンの崩壊幅は1ループレベルで計算 [Williams, Weiglein(2008)]
- 現象論的制限:
 - CP 保存; カラー、電荷を破る真空を回避
 - スフェルミオンの質量二乗パラメータは正
 - LHC で得られた超対称粒子の質量への制限
 - 一番軽いニュートラリーノがLSP
- 簡単化のための仮定:
 - 第1,第2世代のスフェルミオン質量は縮退
 - ユニバーサル A-パラメータ: $A_f = \lambda_f A_0$, ($f = t, b, \tau, \dots$)

MSSMパラメータと質量に対する制限

- インプットパラメータ:

- 固定したパラメータ:

Parameter	Value
$\tilde{m}_{L,E_{1,2}}$	1000 GeV
$\tilde{m}_{Q,U,D_{1,2}}$	4000 GeV

- スキャン領域:

Parameter	Scan bounds
m_A	[200 GeV, 3000 GeV]
$\tan \beta$	[1, 60]
\tilde{m}_{L_3,E_3}	[100 GeV, 1000 GeV]
\tilde{m}_{Q_3,U_3,D_3}	[500 GeV, 4000 GeV]
$ A_0 $	$[0 \text{ GeV}, 3(\tilde{m}_{Q_3}\tilde{m}_{U_3})^{1/2}]$
$ \mu $	[100 GeV, 1000 GeV]
$ M_1 $	[100 GeV, 1000 GeV]
$ M_2 $	[100 GeV, 1000 GeV]
M_3	[1400 GeV, 4000 GeV]

- 質量に対する制限:

Observables	Constraints
m_h	[122 GeV, 128 GeV]
$m_{\tilde{g}}$	> 1400 GeV
$m_{\tilde{\chi}_1^0}$	> 90 GeV
$m_{\tilde{\chi}_1^\pm}$	> 400 GeV
$m_{\tilde{t}_1}$	> 640 GeV
$m_{\tilde{b}_1}$	> 620 GeV
$m_{\tilde{\tau}_1}$	> 90 GeV

ILC 500 での MSSM の付加的ヒッグス質量の到達領域

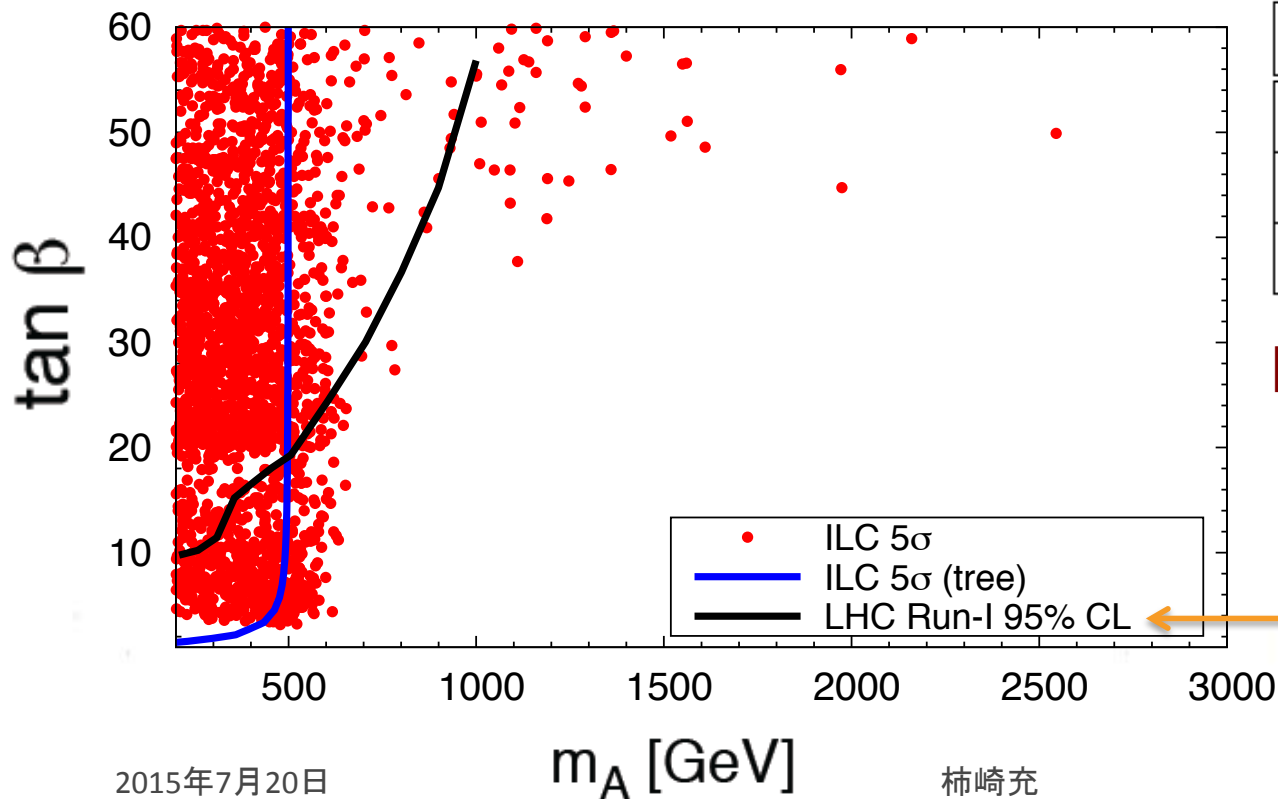
- ヒッグスボソン崩壊分岐比の比:

$$R = \frac{\text{Br}(h \rightarrow WW)}{\text{Br}(h \rightarrow b\bar{b})} \Big|_{\text{MSSM}} / \frac{\text{Br}(h \rightarrow WW)}{\text{Br}(h \rightarrow b\bar{b})} \Big|_{\text{SM}}$$

ヒッグス粒子の生成断面積、全崩壊幅の不定性が相殺

- ILC 500

ILC: $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$, $L = 500 \text{ fb}^{-1}$



- ILC での精度:

R	95%CL	5σ
ILC500	0.050	0.125
ILC500 LumiUp	0.027	0.068
ILC1000 LumiUp	0.021	0.052

[ILC Higgs White Paper(2013)]

[ATLAS (2014)]

ILC 500 での MSSM の付加的ヒッグス質量の到達領域

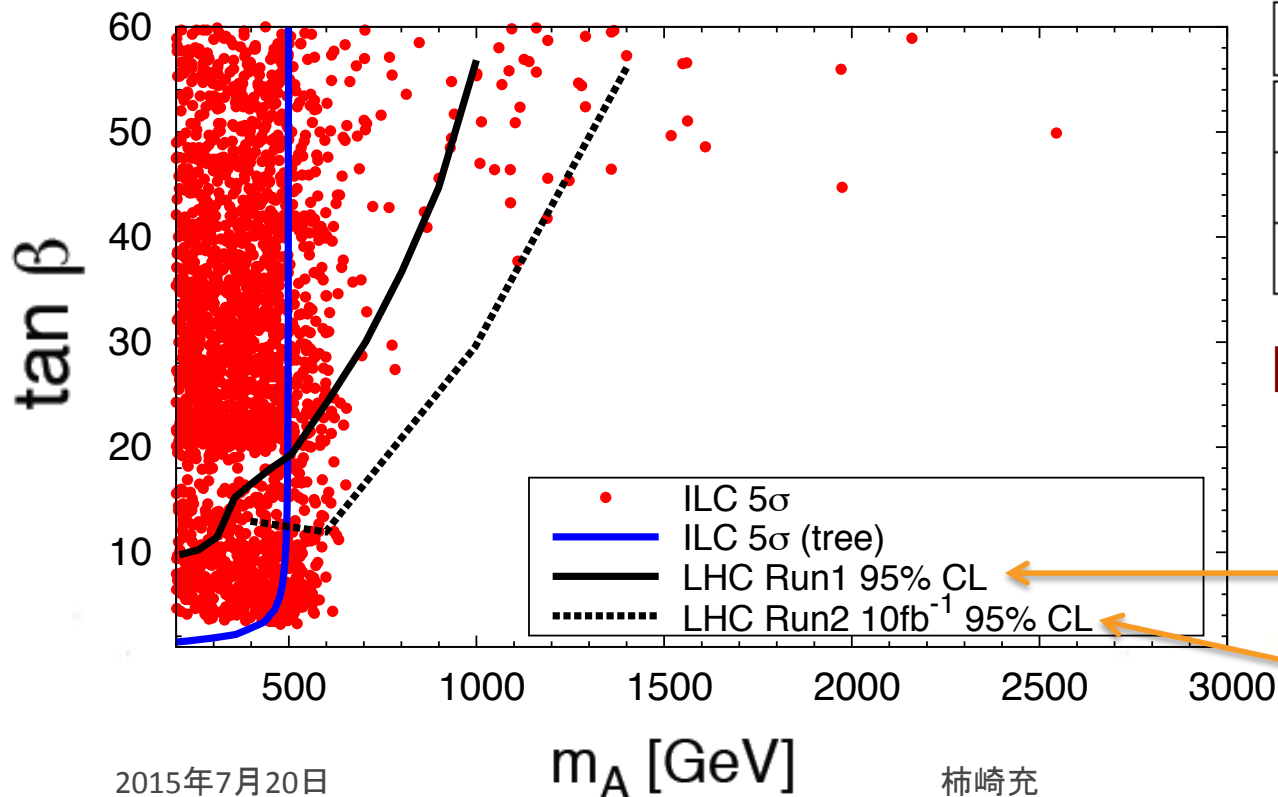
- ヒッグスボソン崩壊分岐比の比:

$$R = \frac{\text{Br}(h \rightarrow WW)}{\text{Br}(h \rightarrow b\bar{b})} \Big|_{\text{MSSM}} / \frac{\text{Br}(h \rightarrow WW)}{\text{Br}(h \rightarrow b\bar{b})} \Big|_{\text{SM}}$$

ヒッグス粒子の生成断面積、全崩壊幅の不定性が相殺

- ILC 500

ILC: $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$, $L = 500 \text{ fb}^{-1}$



- ILC での精度:

R	95%CL	5 σ
ILC500	0.050	0.125
ILC500 LumiUp	0.027	0.068
ILC1000 LumiUp	0.021	0.052

[ILC Higgs White Paper(2013)]

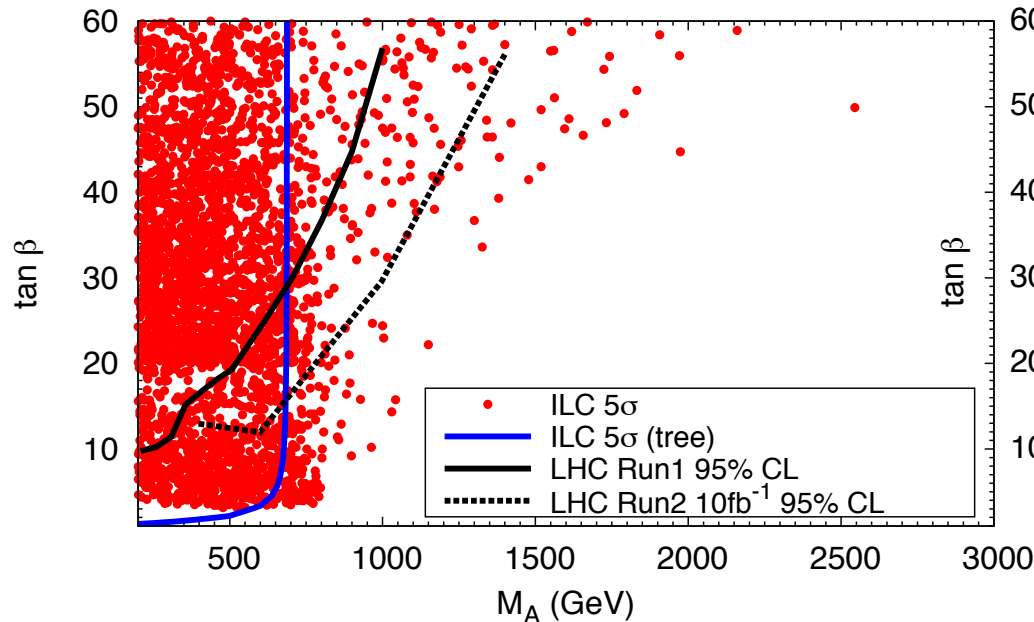
[ATLAS (2014)]

[Morinaga, JPS 70th Annual Meeting (2015)]

ILC(ルミノシティアップグレード)での MSSM の付加的ヒッグス質量の到達領域

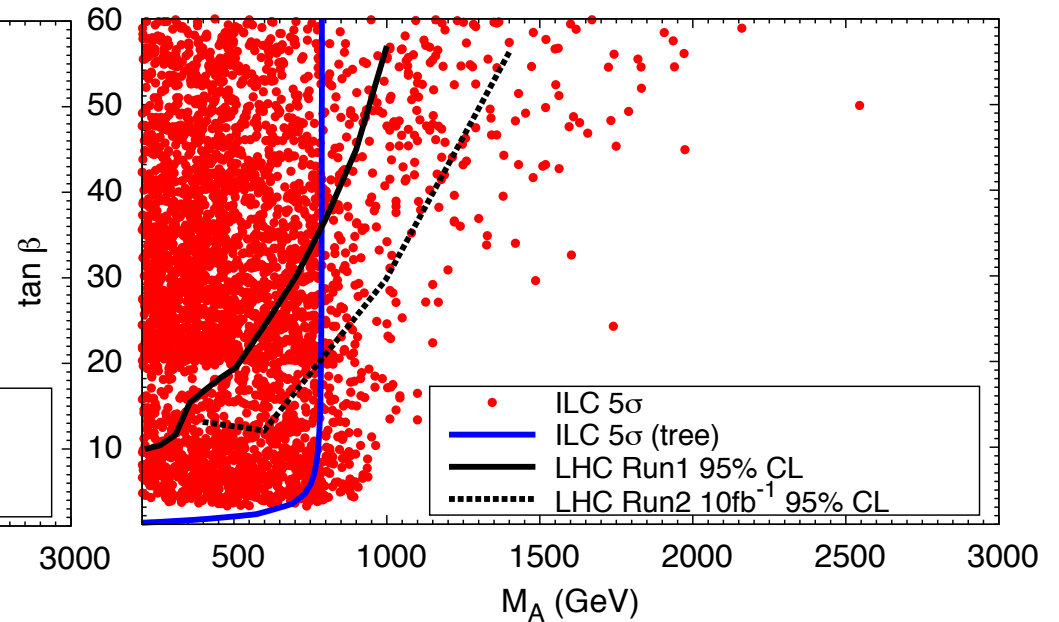
- ILC 500 LumiUp:

ILC: $\sqrt{s} = 500 \text{ GeV}$, $L = 1600 \text{ fb}^{-1}$



- ILC 1000 LumiUp:

ILC: $\sqrt{s} = 1 \text{ TeV}$, $L = 2500 \text{ fb}^{-1}$



[ILC Higgs White Paper; ATLAS (2014); Morinaga, JPS 70th Annual Meeting (2015)]

- ILCでのヒッグス崩壊分岐比の精密測定による間接的なMSSMの付加的ヒッグス質量の到達範囲はLHCの限界より大きくなり得る
- 輻射補正を考慮に入れた付加的ヒッグス質量の到達領域はツリーレベルでの予言値と大きく異なる

結論

- MSSMにおいて、輻射補正の効果を加えて標準理論的ヒッグス粒子の崩壊分岐比の計算を行った
- 超対称粒子の輻射補正によるヒッグス結合のずれは、ノンデカップリング効果のため、ツリーレベルの予言値から大きくずれ得る
- ILCで間接的に探索可能なMSSMの付加的ヒッグス粒子の質量スケールは、LHCでの直接的な探索限界より高くなり得る
- ヒッグス結合の指紋照合は電弱対称性の破れの背後にある新物理模型(MSSM, NMSSM, コンポジット模型等)を探索し区別するのに非常に有用

Backup slides

ILC でのヒッグス粒子崩壊モードに対する測定精度

- 125 GeV ヒッグス粒子の断面積と崩壊幅の積の測定精度:

$$\Delta(\sigma \cdot BR)/(\sigma \cdot BR)$$

(1 σ)

\sqrt{s} and \mathcal{L} (P_{e^-}, P_{e^+})	250 fb ⁻¹ at 250 GeV (-0.8,+0.3)	1600 fb ⁻¹ at 500 GeV (-0.8,+0.3)	1600 fb ⁻¹ at 500 GeV (-0.8,+0.3)
	$\nu\bar{\nu}h$	$\nu\bar{\nu}h$	$\nu\bar{\nu}h$
$\Delta\sigma/\sigma$	-	-	-
BR(invis.)	-	-	-
mode	$\Delta(\sigma \cdot BR)$	$\Delta(\sigma \cdot BR)$	$\Delta(\sigma \cdot BR)$
$h \rightarrow bb$	0.7%	0.4%	0.3%
$h \rightarrow c\bar{c}$	6.2%	3.5%	2.0%
$h \rightarrow qq$	4.1%	2.3%	1.4%
$h \rightarrow WW^*$	2.4%	1.3%	1.0%
$h \rightarrow \tau^+\tau^-$	9.0%	5.0%	2.0%
$h \rightarrow ZZ^*$	8.2%	4.6%	2.6%
$h \rightarrow \gamma\gamma$	23%	13%	5.4%
$h \rightarrow \mu^+\mu^-$	-	-	20%

[ILC Higgs White paper (2013)]

ILC でのヒッグス結合の測定精度

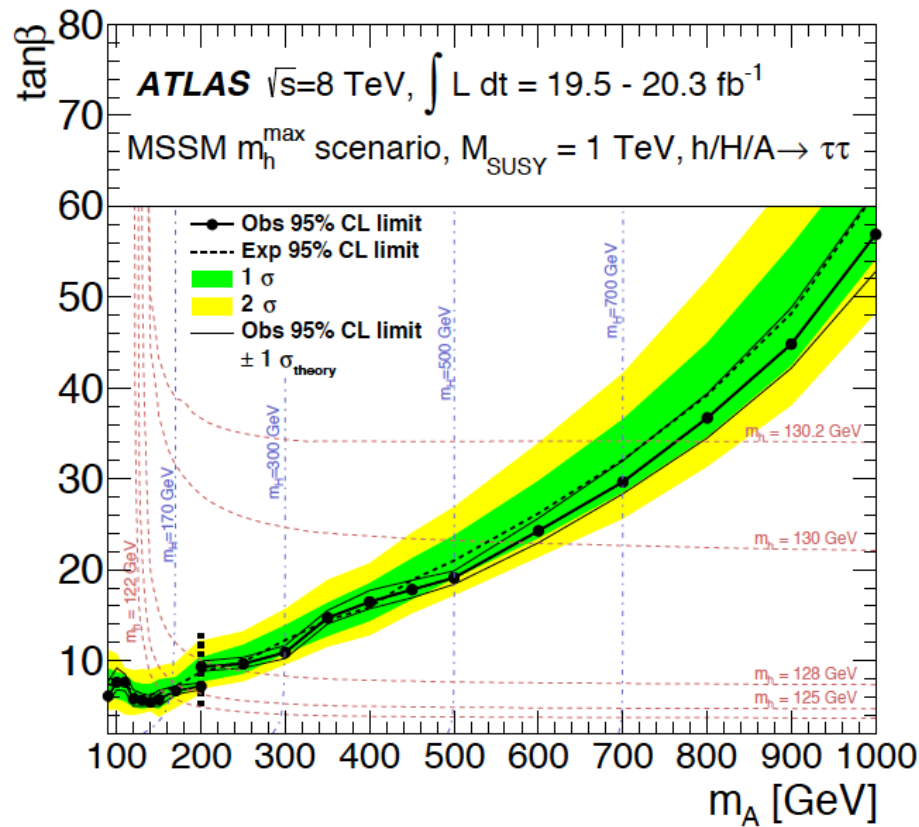
- 125 GeV ヒッグス粒子と標準理論粒子の結合に対する精度:
(1 σ)

	ILC(250)	ILC(500)	ILC500(LumUp)	ILC(LumUp)
\sqrt{s} (GeV)	250	250+500	250+500	250+500+1000
L (fb ⁻¹)	250	250+500	1150+1600	1150+1600+2500
$\gamma\gamma$	18 %	8.4 %	4.5 %	2.4 %
qq	6.4 %	2.3 %	1.2 %	0.9 %
WW	4.8 %	1.1 %	0.6 %	0.6 %
ZZ	1.3 %	1.0 %	0.5 %	0.5 %
$t\bar{t}$	–	14 %	7.8 %	1.9 %
bb	5.3 %	1.6 %	0.8 %	0.7 %
$\tau^+\tau^-$	5.7 %	2.3 %	1.2 %	0.9 %
$c\bar{c}$	6.8 %	2.8 %	1.5 %	1.0 %
$\mu^+\mu^-$	91 %	91 %	42 %	10 %
$\Gamma_T(h)$	12 %	4.9 %	2.5 %	2.3 %
hhh	–	83 %	46 %	13 %
BR(invis.)	< 0.9 %	< 0.9 %	< 0.4 %	< 0.4 %

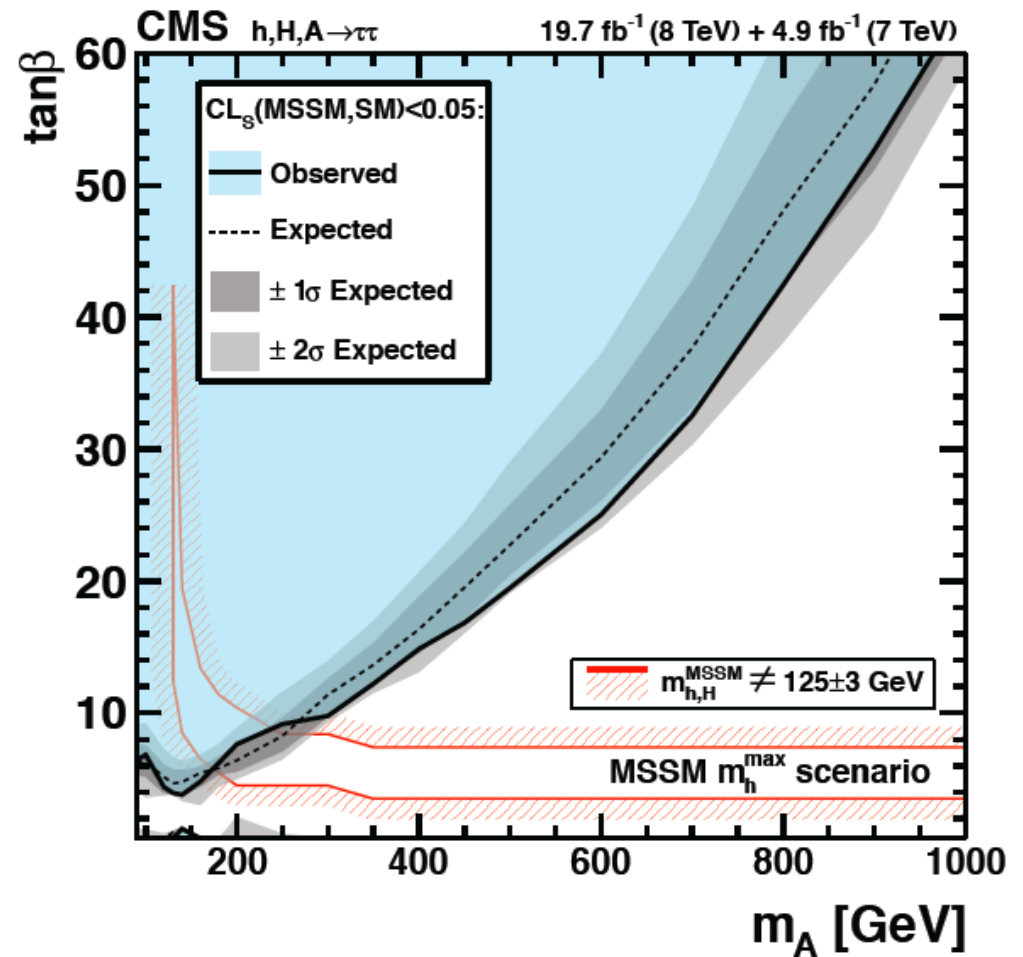
[ILC Higgs White paper (2013)]

LHC での MSSM の付加的ヒッグス粒子の棄却域

- $A/H \rightarrow \tau^+\tau^-$ モードに基づく解析:



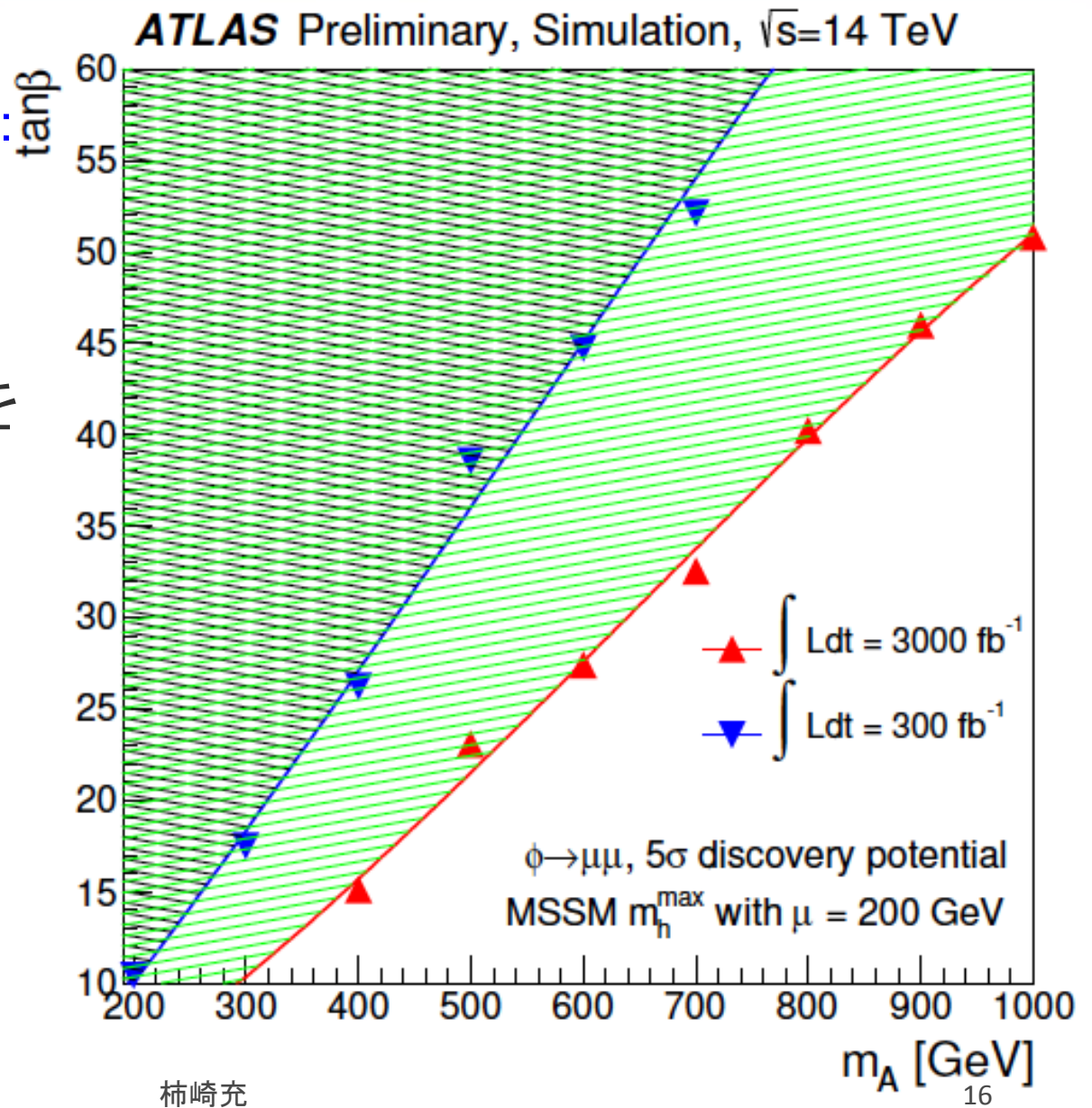
[arXiv:1409.6064]



[arXiv:1408.3316]

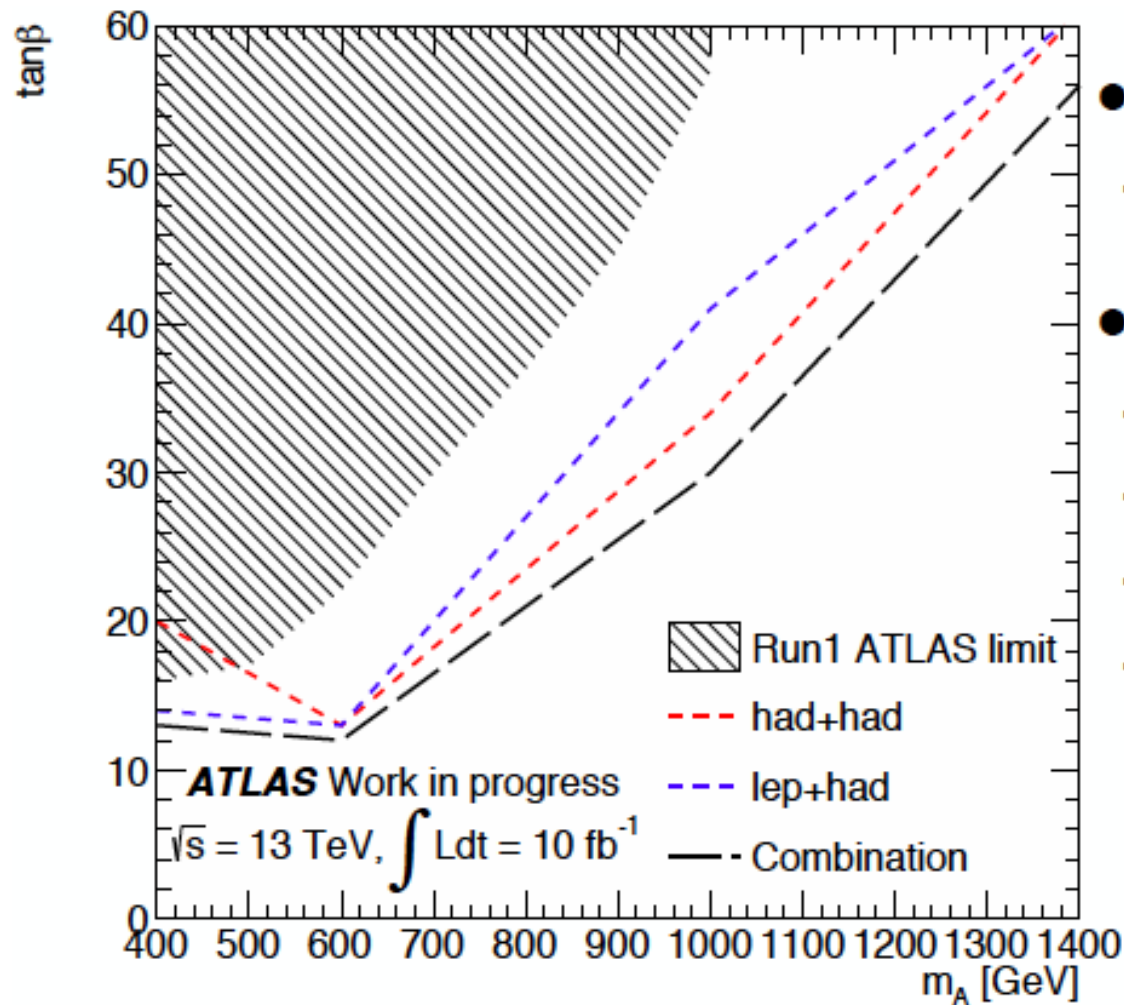
LHC でのMSSMの付加的ヒッグス質量の到達範囲

- $A/H \rightarrow \mu^+ \mu^-$ モードに基づく5シグマ発見領域:
[ATLAS-PHYS-PUB-2013-016]
- 付加的ヒッグス質量を正確に測定できる



LHC における付加的 MSSM ヒッグス粒子の棄却域

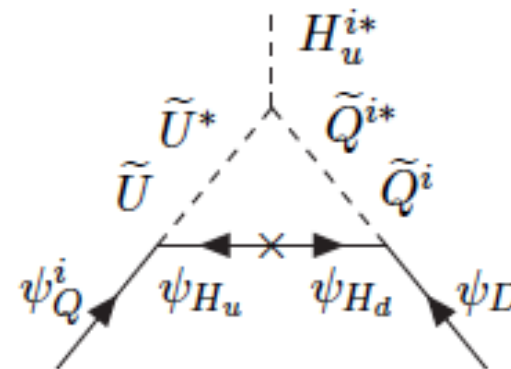
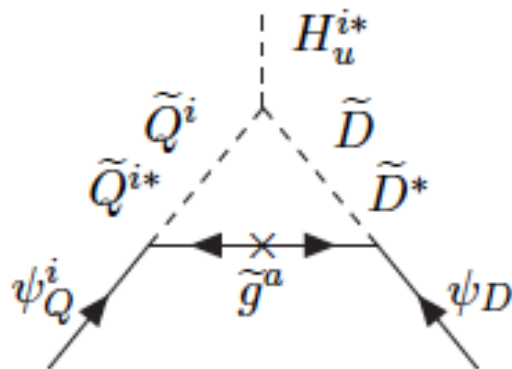
- LHC ATLAS Run2 での 95% CL 棄却域



[From Morinaga, JPS 70th Annual Meeting (2015)]

Wrong Higgs coupling

- “wrong Higgs coupling” に寄与する1ループ図:



- 3点スカラー相互作用:

$$\mathcal{L}_{\text{int}} = \mu h_t H_d^i \tilde{Q}^{i*} \tilde{U}^* + \mu h_b H_u^i \tilde{Q}^{i*} \tilde{D}^* - \epsilon_{ij} \left[h_b A_b H_d^i \tilde{Q}^j \tilde{D} - h_t A_t H_u^i \tilde{Q}^j \tilde{U} \right] + \text{h.c.}$$

[Haber, Mason(2008)]

MSSMの湯川結合

- ボトム湯川結合への輻射補正:

$$g_{h^0 b\bar{b}} = -\frac{gm_b}{2m_W} \frac{\sin \alpha}{\cos \beta} \left[1 + \frac{1}{1 + \Delta_b} \left(\frac{\delta h_b}{h_b} - \Delta_b \right) (1 + \cot \alpha \cot \beta) \right]$$

$$\Delta_b \simeq \frac{\Delta h_b}{h_b} \tan \beta$$

$$\Delta h_b \simeq h_b \left[\frac{2\alpha_s}{3\pi} \mu M_3 \mathcal{I}(M_{\tilde{b}_1}, M_{\tilde{b}_2}, M_g) + \frac{h_t^2}{16\pi^2} \mu A_t \mathcal{I}(M_{\tilde{t}_1}, M_{\tilde{t}_2}, \mu) \right]$$

$$\mathcal{I}(a, b, c) = \frac{a^2 b^2 \ln(a^2/b^2) + b^2 c^2 \ln(b^2/c^2) + c^2 a^2 \ln(c^2/a^2)}{(a^2 - b^2)(b^2 - c^2)(a^2 - c^2)} \sim 1/\max(a^2, b^2, c^2)$$