

電弱対称性の自発的破れと 新物理学

兼村晋哉

富山大学理学部

京都産業大学益川塾 2010年7月10日

内容

- 標準模型とヒッグス
- 拡張ヒッグス模型とその性質
- 加速器実験での検証
- ヒッグスセクターの詳細からの新物理探求
- まとめ

Higgs (Dark Field)

We know nothing about Higgs

- Anything to trigger $SU(2) \times U(1) \rightarrow U(1)$
- VEV: the order parameter. $\langle \phi \rangle, \langle \psi \psi \rangle, ..$
 - Unique mass scale (exc. for Λ_{QCD})
- Origin of Mass:
 - Higgs mechanism W, Z mass
 - Yukawa interaction quarks and leptons
- In the SM a scalar field is responsible for **everything**.

自発的対称性の破れ(標準模型)

ゲージ対称性:

$$SU(3)_c \times SU(2)_l \times U(1)_Y$$

自発的対称性の破れ:

$$SU(2)_l \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{EM}$$

SM のヒッグスセクター

スカラーアイソ2重項

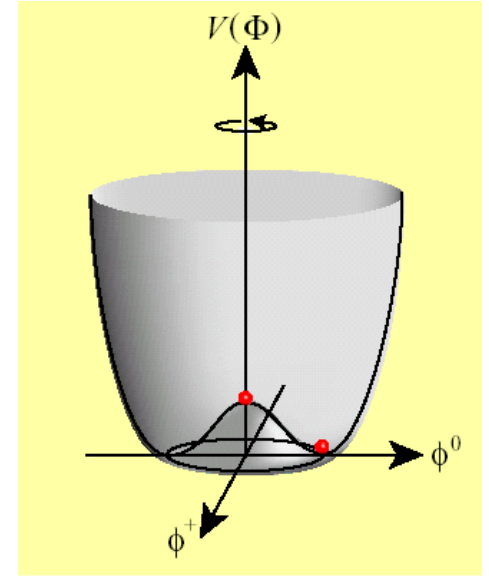
$$\Phi = \begin{bmatrix} w^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(H + v + iz^0) \end{bmatrix}$$

$$V(\Phi) = -\mu^2 |\Phi|^2 + \lambda |\Phi|^4 \quad \langle \Phi \rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}}v \end{bmatrix}$$

質量はパラメータ

$$m_H^2 = 2\lambda v^2$$

軽いヒッグス → 弱結合
 重いヒッグス → 強結合



ヒッグスは質量の起源

ゲージ場
 (Higgs mechanism)

$$|D_\mu \Phi|^2 \rightarrow \frac{g^2 v^2}{2} W^+ W^-$$

フェルミオン

$$y_b (\bar{Q}_L \Phi) b_R \rightarrow \frac{y_b v}{\sqrt{2}} \bar{b} b$$

標準模型に特有の質量と結合定数の関係

すべての質量は
結合定数 × 真空期待値で決まる

$$\frac{2m_W}{g} = \frac{\sqrt{2}m_b}{y_b} = \frac{\sqrt{2}m_c}{y_c} = \frac{\sqrt{2}m_\tau}{y_\tau} = \frac{m_H}{2\sqrt{\lambda}} = v$$

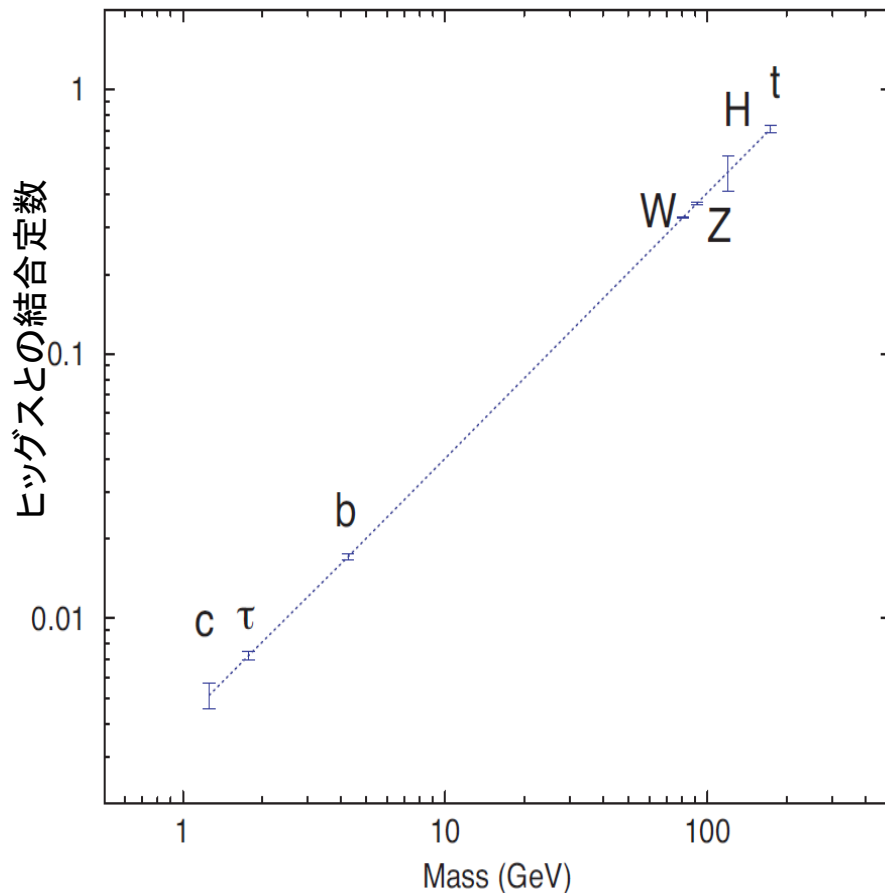
Not measured

標準模型はこの質量と結合定数の
ユニバーサリティによってテストできる

他のヒッグス模型では一般にこの
関係は、特徴あるパターンで崩れる

質量と結合定数の両方をできるだけ
精密に測る必要がある。

質量vsヒッグスとの結合

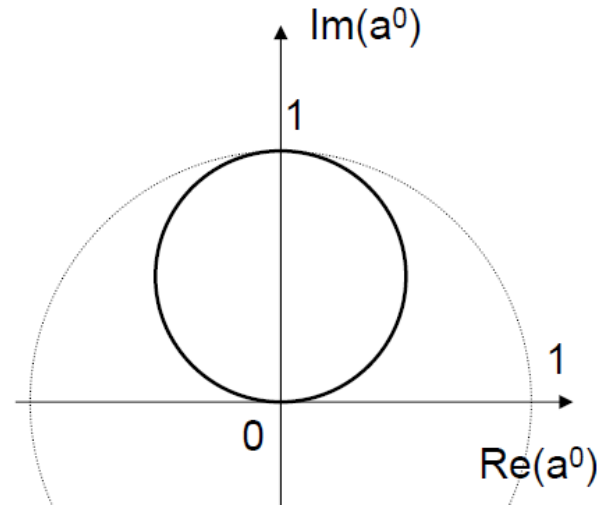


SMヒッグス場の質量

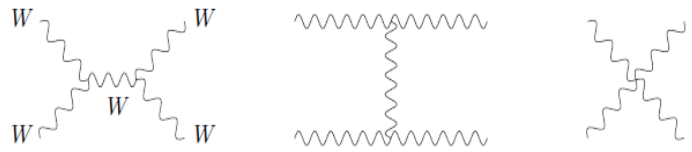
ゲージ場の縦波散乱 $W_L^+W_L^- \rightarrow W_L^+W_L^-$

S波振幅 $(a^0)_{fi} \quad |a^0|^2 = \text{Im}(a^0)$

ツリーレベルユニタリティ $|a^0| < 1$



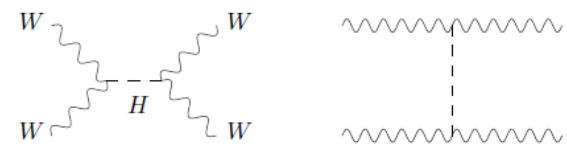
(1) No Higgs boson



$$a^0 \simeq \frac{G_F s}{8\pi\sqrt{2}}$$

$$s < \frac{8\pi\sqrt{2}}{G_F} \sim (1.6\text{TeV})^2$$

(2) Incl. Higgs mediation



$$a^0 \simeq G_F m_H^2$$

$$m_H < 1 \text{ TeV}$$

拡張ヒッグスでは、ユニタリティは模型のパラメータを制限する

SMヒッグス場の質量

理論的な制限

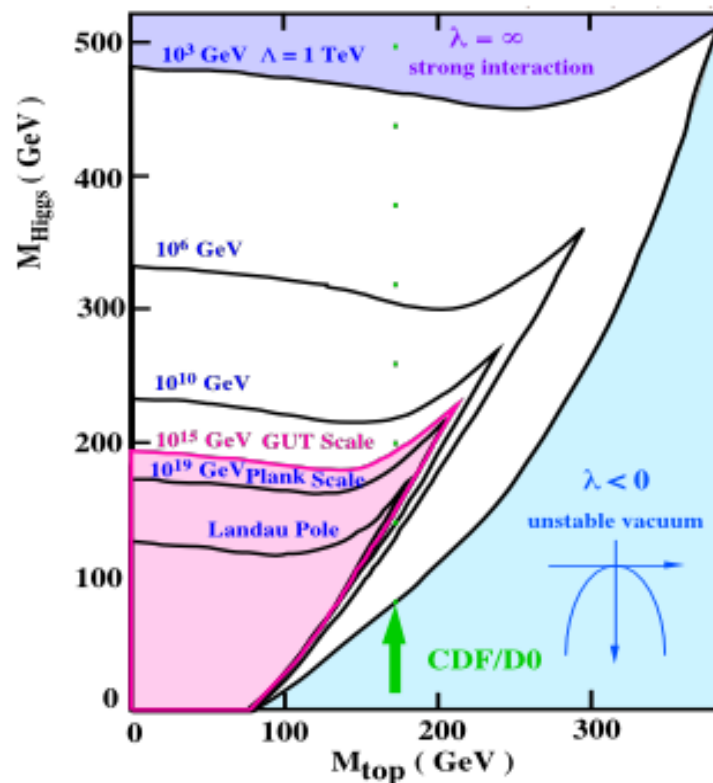
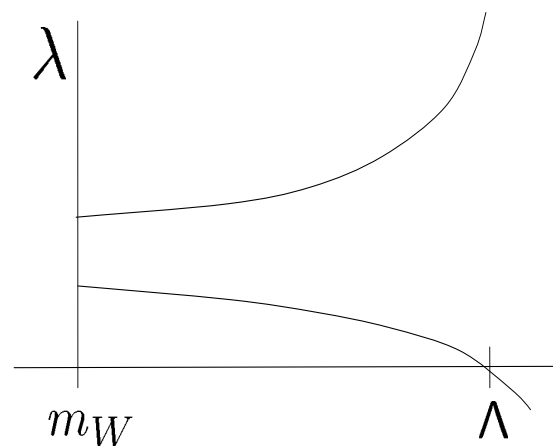
理論の適用限界(カットオフ Λ)を
仮定して、そのエネルギーまでに
理論が破綻しない

くりこみ群方程式

$$16\pi^2 \mu \frac{d}{d\mu} \lambda = 24\lambda^2 - 6y_t^4 + \dots$$

$$130\text{GeV} < M_H < 190\text{GeV} (\Lambda = 10^{19}\text{GeV})$$

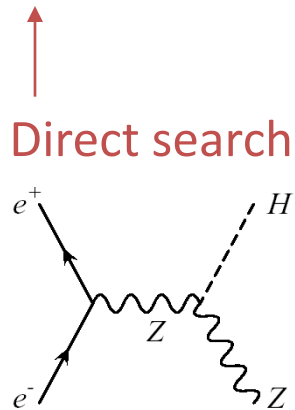
$$60\text{GeV} < M_H < 700\text{GeV} (\Lambda = 10^3\text{GeV})$$



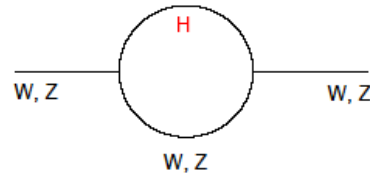
Mass bounds from Current Data

Search at LEP

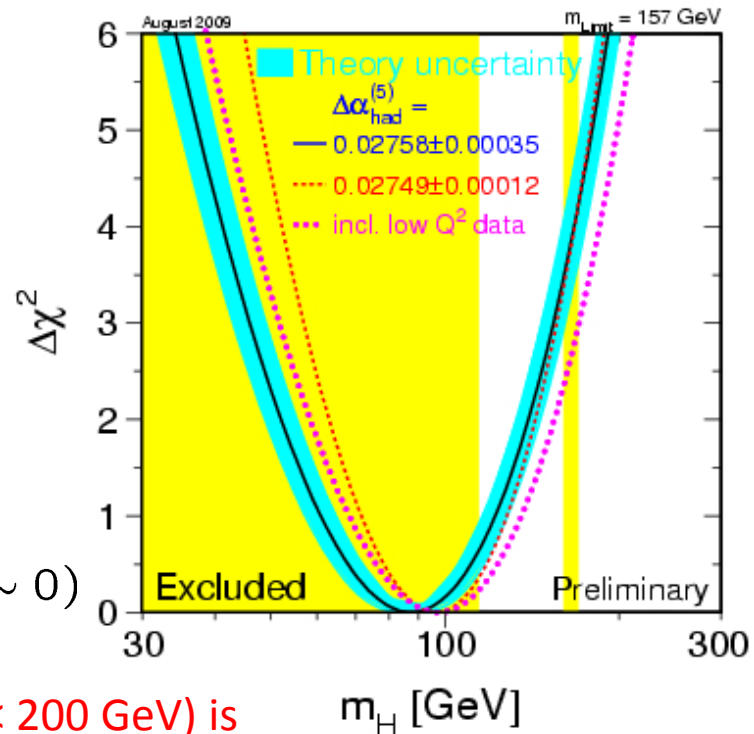
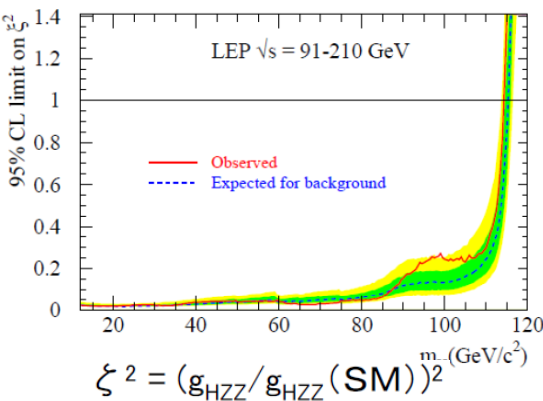
114 < m_H < 186 GeV (95% CL) [incl. direct search]



Indirect bound via the oblique correction



$$\Delta T_{\text{Higgs}} \simeq -\ln \frac{m_H^2}{M_W^2} (\sim 0)$$



In the SM, a light Higgs (< 200 GeV) is favored from both theory (triviality) and the data

(At Tevatron 160 < m_H < 170 GeV excluded.)

In the SM, both the LEP data and the theoretical consideration indicate a light Higgs boson

Higgs sector: weak coupling theory ?

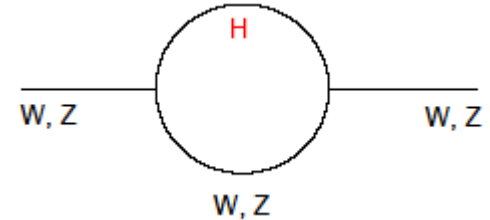
New Physics candidate Supersymmetry ?

$$\lambda \sim \mathcal{O}(g^2)$$

Is a strong coupled Higgs boson really excluded?

Oblique correction (S,T,U parameter)

$$\rho = \frac{m_W}{m_Z \cos \theta_W}, \quad \Delta\rho = \rho - 1 = \alpha T$$



SM Higgs potential
has $SU(2)_V$ (custodial symmetry)

$$M = (\tilde{\Phi}, \Phi) = \begin{bmatrix} -\phi^0 & \phi^+ \\ \phi^- & \phi^0 \end{bmatrix}$$

$$M \rightarrow M' = g_L^\dagger M g_R \quad (g_{L,R} \in SU(2)_{L,R})$$

$$SU(2)_L \times SU(2)_R \rightarrow SU(2)_V$$

Veltman's theorem \rightarrow logarithmic dependence of $m\phi$
in the T parameter

$$\Delta T_{\text{Higgs}} \simeq -\ln \frac{m_H^2}{M_W^2} (\sim 0) \quad \longrightarrow \quad m_H \sim M_W$$

If $SU(2)_V$ is not valid,
power contribution of mass appear in the T parameter

e.g. $SU(2)_V$ is broken in Yukawa sector

$$\Delta T_{\text{top}} \propto \frac{m_t^2}{M_W^2}$$

ヒッグスは弱結合か

- SM: LEPデータと理論(高い Λ)は共に軽いヒッグス($m_H < 200\text{GeV}$)を好む
- 他のヒッグスモデルでは**重いヒッグス**も許され得る

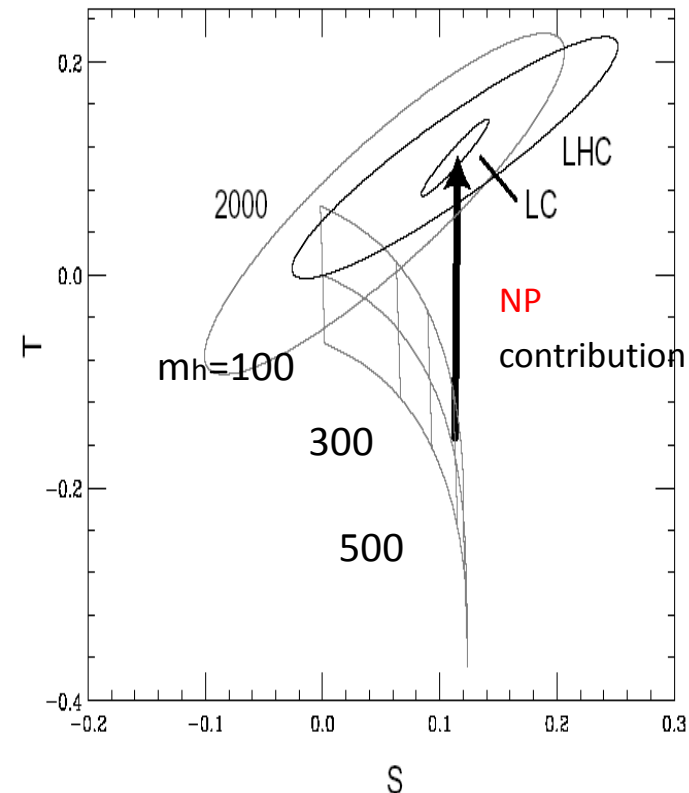
– 有効理論($\Lambda \sim O(\text{TeV})$)の場合

$$\Delta T_{\text{Dim6}} \sim -\ln \frac{m_h^2}{M_W^2} + \frac{N_c C_{Dt}}{16\pi^2 \alpha_{em}} \frac{m_t^2}{\Lambda^2} \left(\ln \frac{\Lambda^2}{m_t^2} - 1 \right) (\sim 0)$$

– 2重項2個(2HDM)の模型

$$\Delta T_{\text{Higgs}} \sim -\ln \frac{m_h^2}{M_W^2} + \frac{(m_A^2 - m_{H^\pm}^2)^2}{M_W^2 m_A^2} (\sim 0).$$

重い(>300GeV)ヒッグスが許される



結局、模型、 Λ を決めないと制限はつかない

Extended Higgs sectors

— as a window to new physics

— SM Higgs sector—

one Higgs doublet ← simple

but no reason

strong constraint from LEP data

($m_h < \text{about } 200 \text{ GeV}$)

— Extended Higgs sector—

two (or more) Higgs doublets

(+ singlet, triplet....)

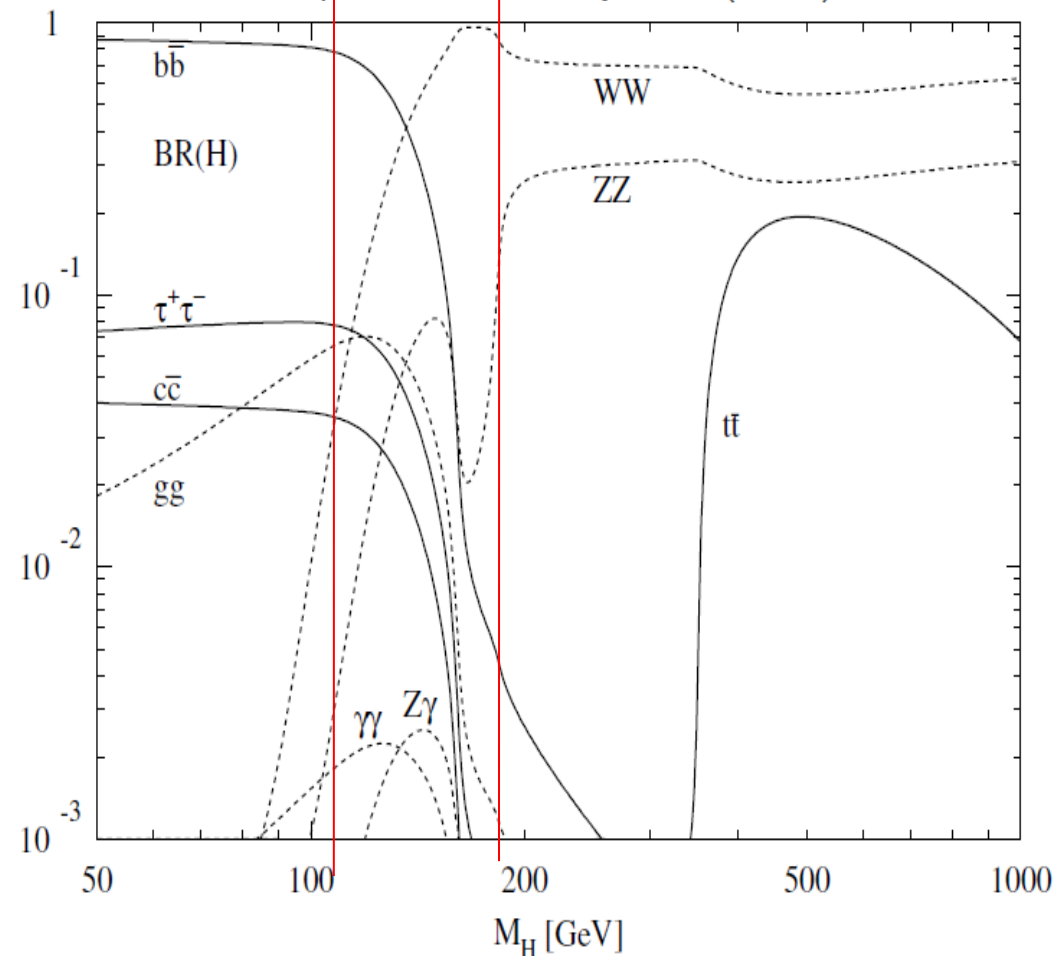
new physics source (CP phase, ...)

strong Higgs OK

Decay branching ratios of SM Higgs

LEP Allowed Region

M. Spira Fortsch. Phys. 46 (1998)



- Low mass $< 140\text{GeV}$

Yukawa coupling

$bb, \tau\tau, cc$

gg (top-loop)

$\gamma\gamma$ (top-loop)

- Higher masses

Almost $WW(*), ZZ(*)$

Goldplated mode

Large S/N

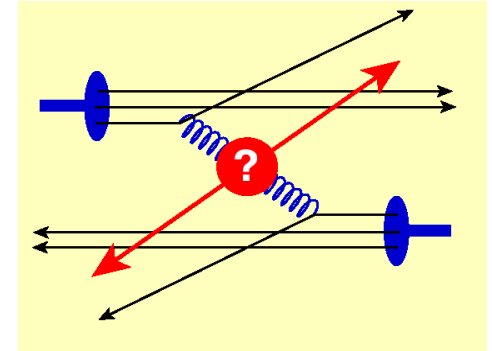
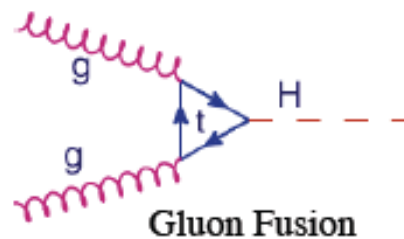
($t\bar{t}$ never dominant)

LHCでのヒッグス探索 (2008~)

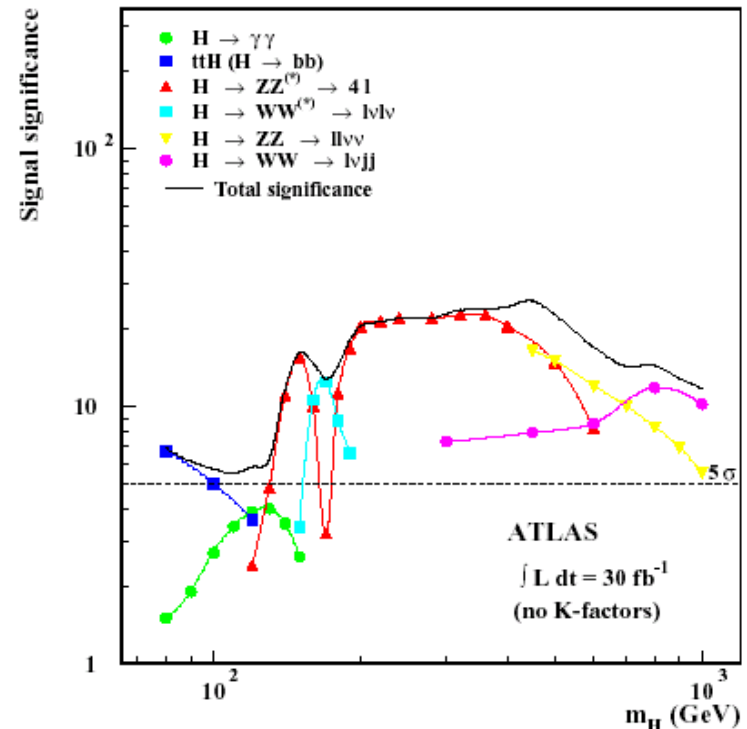
- ハドロン加速器(陽子陽子衝突)

$E = 7 \text{ TeV}$ 、 $L = 1 \text{ fb}^{-1}$

$E = 14 \text{ TeV}$ 、 $L = 10\text{-}3000 \text{ fb}^{-1}$

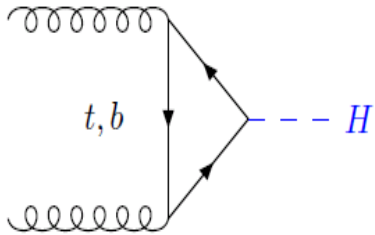


- 実験が始まった
- ヒッグスはたくさんできる
- 発見に有利 (SMヒッグスは発見できる)
- QCDバックグラウンドが非常に大きい
- 精密測定にはやや不向き



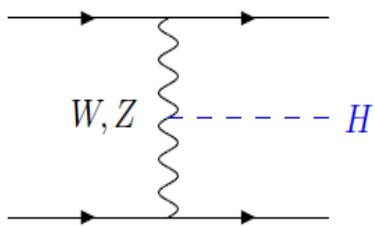
Production of the SM Higgs @LHC

Gluon Fusion

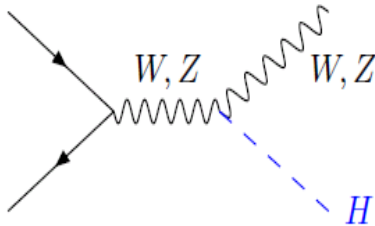


$H \rightarrow \gamma\gamma$ (110-140GeV)
 $H \rightarrow ZZ \rightarrow \text{IIII}$ (140-1000GeV)
 $H \rightarrow WW$ (130-170)

Vector Boson Fusion (VBF)

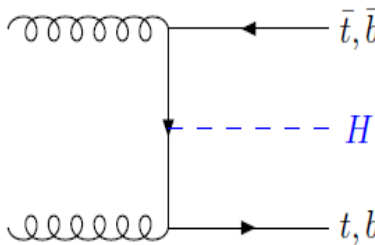


$H \rightarrow \tau\tau$ (110-140GeV)
 $H \rightarrow WW$ (130-200GeV) g_{HWW}
 $H \rightarrow \gamma\gamma$ (110-140GeV)
 $H \rightarrow bb$ (110-140GeV) Y_b



W association

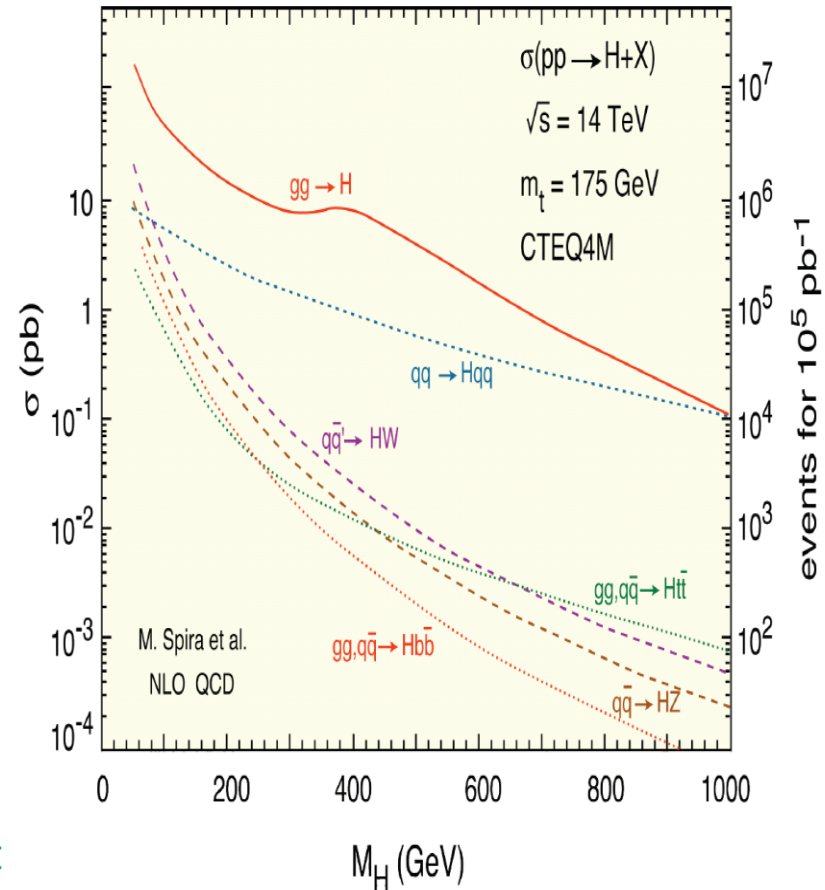
$H \rightarrow WW$ (140-170GeV) g_{HWW}



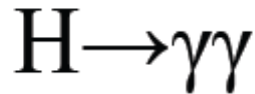
Top association

$H \rightarrow bb$ (110-130GeV) Y_t
 $H \rightarrow \tau\tau$ (110-130GeV) Y_t
 $H \rightarrow WW$ (130-180GeV) Y_t

Production cross section



$100 < m_H < 150 \text{ GeV}$



$$\frac{\sigma_M}{M} = \frac{1}{2} \left[\frac{\sigma_{E_1}}{E_1} \oplus \frac{\sigma_{E_2}}{E_2} \oplus \frac{\sigma_\theta}{\tan(\theta/2)} \right]$$

ATLAS (Liq.Ar Accordion sampling)
better uniformity and angular resolution

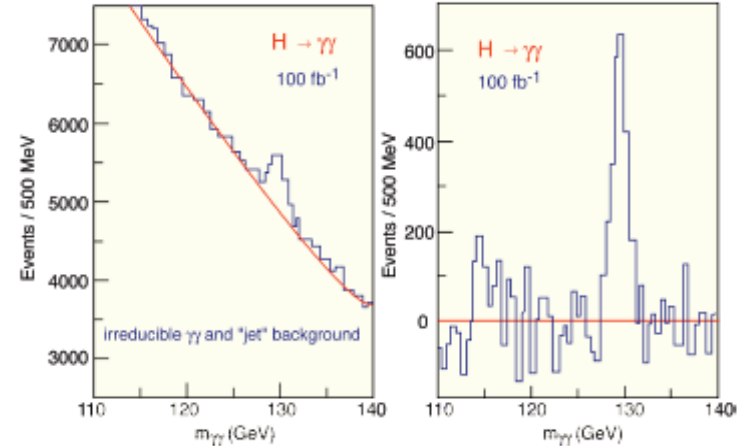
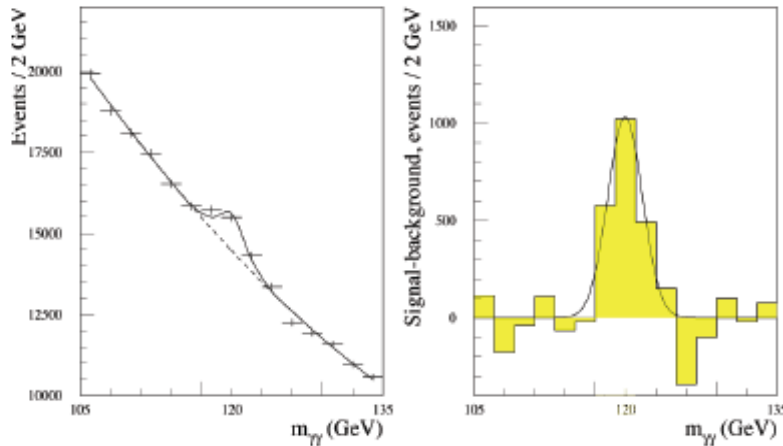
CMS (PbWO₄ crystal + APD)
better energy resolution

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{200(400)\text{MeV}}{E} \oplus 0.7\%$$

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{2.7\%}{\sqrt{E}} \oplus \frac{155(210)\text{MeV}}{E} \oplus 0.55\%$$

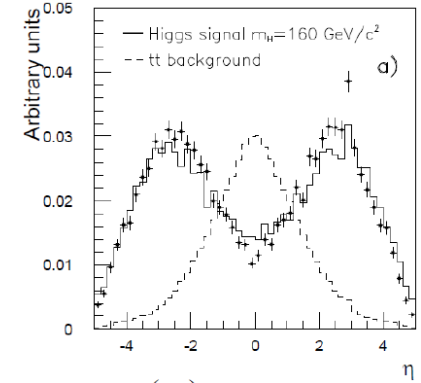
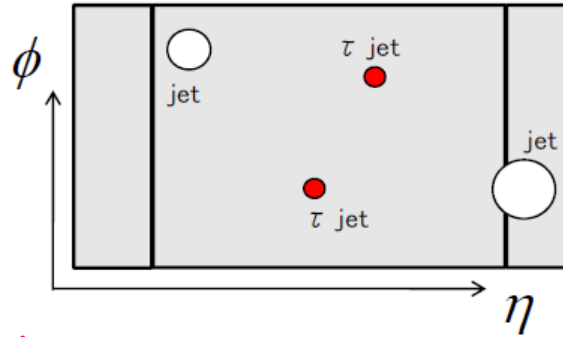
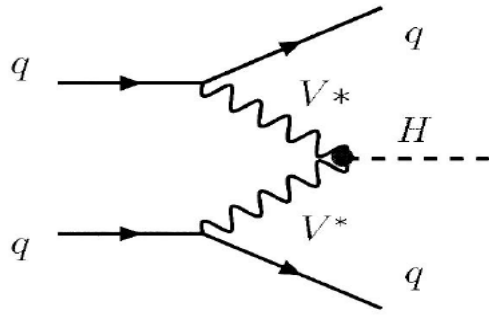
$$\sigma_\theta = \frac{50\text{mrad}}{\sqrt{E}}$$

Photon pointing using high p_T tracks
originating from Higgs vertex.



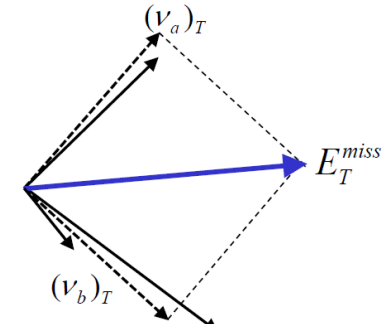
H \rightarrow $\tau\tau$ from VBF

D. Rainwater, D. Zeppenfeld and K. Hagiwara, Phys. Rev. D59(1999) 014037
 S. Asai et al., Eur. Phys. J. C32 S2(2004)19-54

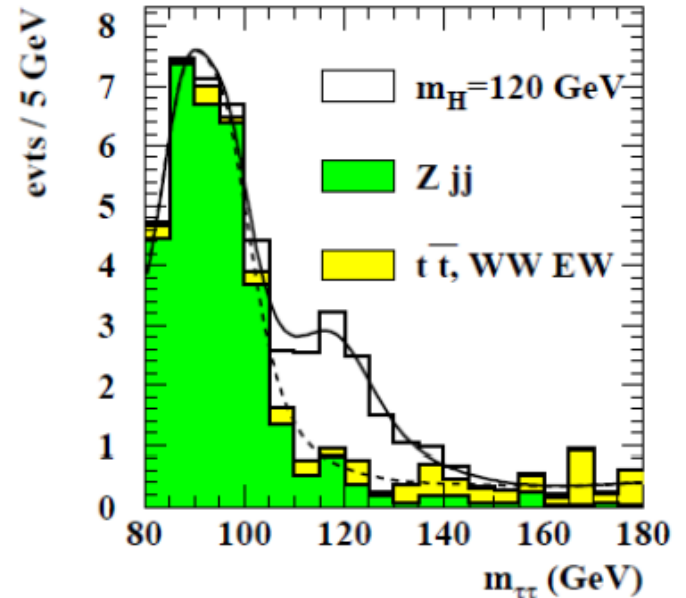


- Forward jet Tagging
- B-jet veto
- Central jet veto
- Co-linear approx. for tau's

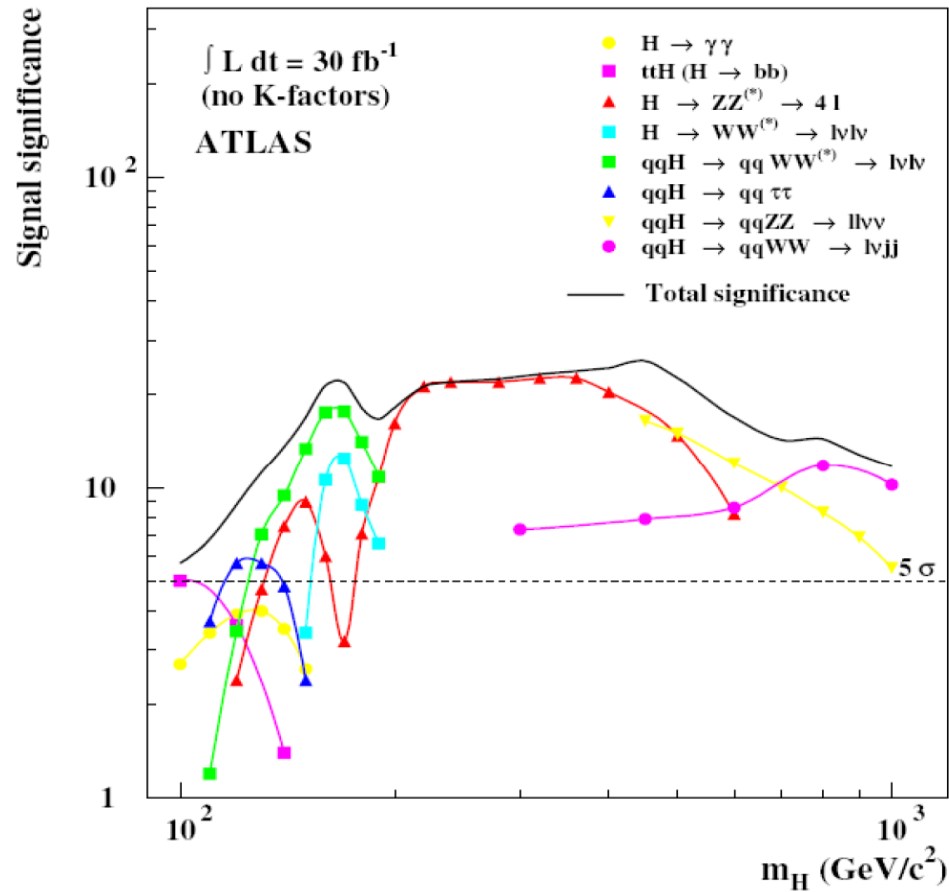
Forward two jets
 Small hadronic activity except for jets
 from produced Higgs bosons



cuts	signal	tt+jets	WW+jets	Z+jets	total B
total cross section	304 fb	55 pb	17 pb	5227 pb	
(1) lepton acceptance	5.55	2014	688	2161.6	4864
(2) Forward jet tagging	1.31	42	9.88	29.7	81.6
(3) $p_{miss}^T > 50$ GeV/c.	0.85	29.2	7.59	13.61	50.4
(4) $M_{jj} > 700$ GeV/c	0.76	20.9	7.47	10.55	38.9
(5) Central jet veto	0.55	2.7	5.79	5.67	14.2
(6) Angular cuts	0.4	0.74	1.24	3.96	5.94
(7) τ reconstruction	0.37	0.12	0.281	3.33	3.73
(8) Mass window	0.27	0.03	0.02	0.19	0.24



Discovery Potential

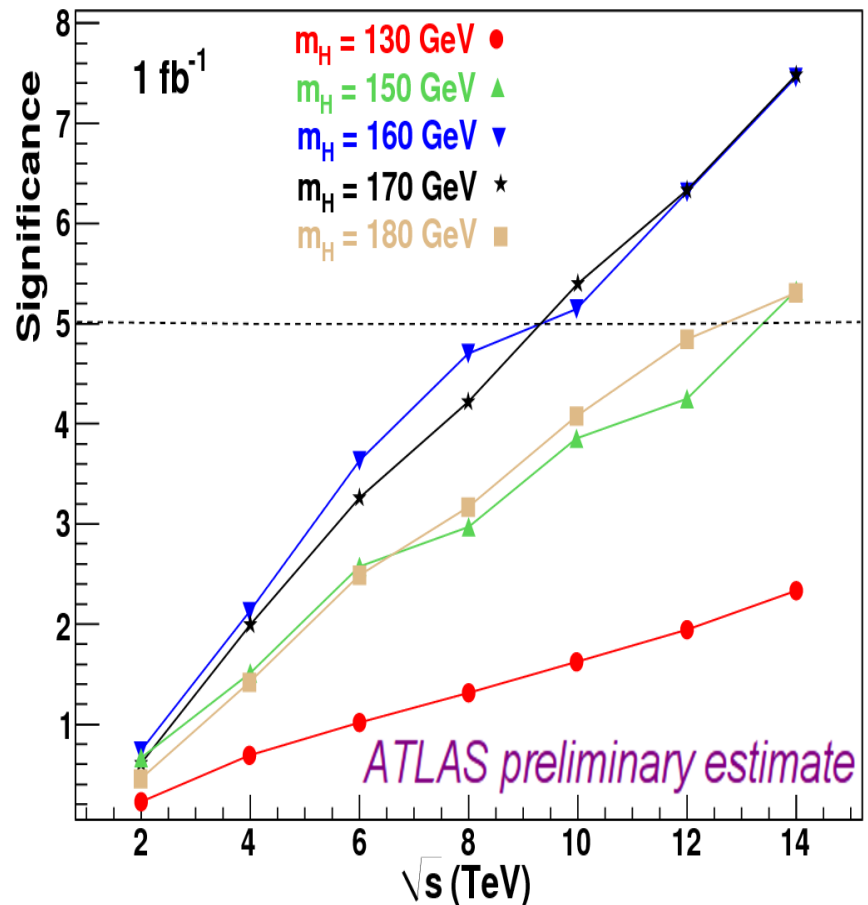


LHC (2010-2011)

3.5 TeV + 3.5 TeV with 1fb^{-1}

- Signal significance only for $WW \rightarrow l\nu l\nu$ with 1fb^{-1}
- At 7 TeV, 5 sigma discovery is not possible with 1fb^{-1}
- For the Higgs boson search, it can only improve the Tevatron results...
- Wait till 2012~

Combination of 0j and 2j, H to WW to ll



近い将来(?)に期待されるヒッグス粒子の発見は何をもたらすか

- 素粒子標準理論の検証

質量起源: 自発的対称性の破れのアイデア
など、標準模型の基本的な考え方を確認

- 質量、相互作用などヒッグスセクターの詳細を識ることで、標準模型を超える「New Physics」の方向性を探る

Why new physics ?

ヒッグス場 仮想的なスピン0の粒子

二次の紫外発散のくりこみ： 階層性の問題

大統一のパラダイム

$SU(3) \times SU(2) \times U(1) \rightarrow SU(5)、SO(10)、...$

重力の量子化、弦理論、...

フレーバー、世代の問題

なぜ自然は3度も同じことを繰り返すのか？

トップ質量だけなぜ電弱スケールなのか、。。。

宇宙物理の問題

宇宙のバリオン数生成

暗黒物質、暗黒エネルギー

ニュートリノ実験

ニュートリノ振動の発見 \rightarrow ニュートリノに微小質量

標準模型の枠では説明不可能

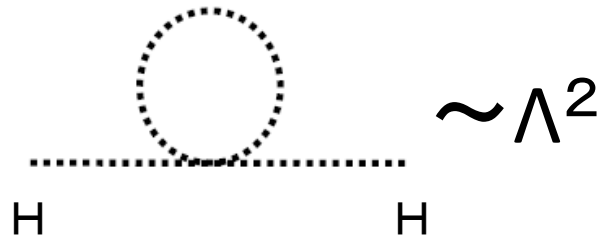
新しい理論(new physics)によって合理的に理解できると考えられる。

New Physics 模型とヒッグス

ヒエラルキー問題 ($\Lambda \sim 10^{16-19} \text{GeV}$)

輻射補正

$m_H = O(100) \text{GeV}$



むちゃくちゃな
ファインチューニング

SMが超高エネルギーまで成り立つ状況は考えにくい

TeVスケール(1~10TeV)で新物理学

– 新物理学のシナリオ

- 超対称性(SUSY) (boson \leftrightarrow fermion)
- 力学的対称性の破れ (Higgs = composite)
- リトルヒッグス (Higgs=pseudo NG boson, collective SB)
- 余剰次元 (ADD, RS, ...)

New physicsの模型の多くは 特徴ある拡張ヒッグス模型を 低エネルギー有効理論として導く

- 標準模型: **アイソスピン二重項1個**
- New physics 拡張されたヒッグス模型
 - 超対称模型 二重項2個 弱結合
 - リトルヒッグス 二重項1個と三重項、他 強結合
 - テクニカラー模型 二重項2個以上 強結合
 - 電弱バリオン数生成 二重項複数 強結合、など
 - ニュートリノ質量(Zee模型) 二重項2個と一重項1個 弱結合

質量スペクトル、相互作用の詳細も理論によって異なる

New physics模型の性質 ⇔ 拡張ヒッグス模型の性質

拡張ヒッグス模型

データからの制限: ρ パラメータ + FCNC

EW ρ parameter =nearly unity

$$\rho \equiv \frac{m_W^2}{m_Z^2 \cos^2 \theta_W} = \frac{\sum_i [4T_i(T_i + 1) - Y_i^2] |v_i|^2 c_i}{\sum_i 2Y_i^2 |v_i|^2}$$

T_i : SU(2)_L isospin

Y_i : hypercharge

v_i : v.e.v.

c_i : 1 for complex representation

1/2 for real representation

可能性:

1. 複数の2重項 (D) + singlets (S)

離散対称性でFCNCを制御

2. D + 3重項 (T)

a) TのVEVが微小なら $\rho \sim 1$ はOK

b) 複数の表現導入し対称性で $\rho = 1$ を
キープ (D+T₀+T₂: Georgi-Machasek模型)

$$v_D^2 + 8v_T^2 = v^2$$

$$v_D \sim v_T$$

青木さんのトーク

2HDM

ツリーレベルで $\rho=1$ かつ FCNC がでない最も簡単な拡張ヒッグス

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} w_i^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(h_i + v_i + ia_i) \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2) \quad \langle \Phi_i \rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}}v_i \end{bmatrix} \quad \frac{v_2}{v_1} \equiv \tan \beta$$

質量固有状態と混合角

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H \\ h \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} z_1^0 \\ z_2^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z^0 \\ A^0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} w_1^\pm \\ w_2^\pm \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta & -\sin \beta \\ \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^\pm \\ H^\pm \end{bmatrix}$$

Mass eigenstates

$$\Phi_1 \text{ and } \Phi_2 \Rightarrow \underbrace{h, H, A^0, H^\pm}_{\text{Goldstone bosons}}$$

↑ ↑ ↑ charged

CP even CP odd

FCNC の制御

- THDM with a softly-broken discrete symmetry:

$(\Phi_1 \rightarrow \Phi_1, \Phi_2 \rightarrow -\Phi_2)$: Natural flavour conservation

- Yukawa interaction (Model I, II):

$$\mathcal{L}_I = -y_D \bar{Q}_L \Phi_1 b_R - y_U \bar{t}_R \Phi_1^\dagger Q_L + (h.c.)$$

$$\mathcal{L}_{II} = -y_D \bar{Q}_L \Phi_1 b_R - y_U \bar{t}_R \Phi_2^\dagger Q_L + (h.c.)$$

- Higgs potential (\supset MSSM Higgs sector)

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

8 parameters : $\Rightarrow \{m_h, m_H, m_A, m_{H^\pm}, \alpha, \beta, v, M_{\text{soft}}\}$

v (VEV) $\simeq 246$ GeV, $\tan \beta (= \langle \Phi_2 \rangle / \langle \Phi_1 \rangle)$

α : mixing angle between h and H

M_{soft} ($= \frac{m_3}{\sqrt{\cos \beta \sin \beta}}$): soft-breaking scale
of the discrete symm.

$$m_h^2 = v^2 \left(\lambda_1 \cos^4 \beta + \lambda_2 \sin^4 \beta + \frac{\lambda}{2} \sin^2 2\beta \right) + \mathcal{O}\left(\frac{v^2}{M_{\text{soft}}^2}\right),$$

$$m_H^2 = M_{\text{soft}}^2 + v^2 (\lambda_1 + \lambda_2 - 2\lambda) \sin^2 \beta \cos^2 \beta + \mathcal{O}\left(\frac{v^2}{M_{\text{soft}}^2}\right),$$

$$m_{H^\pm}^2 = M_{\text{soft}}^2 - \frac{\lambda_4 + \lambda_5}{2} v^2,$$

$$m_A^2 = M_{\text{soft}}^2 - \lambda_5 v^2.$$

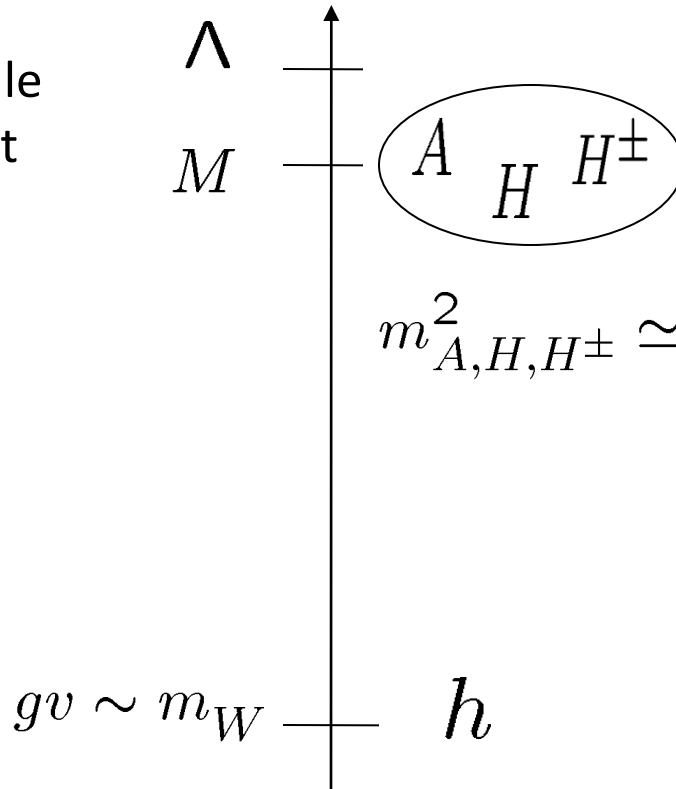
M_{soft} : soft breaking scale

of the discrete symmetry

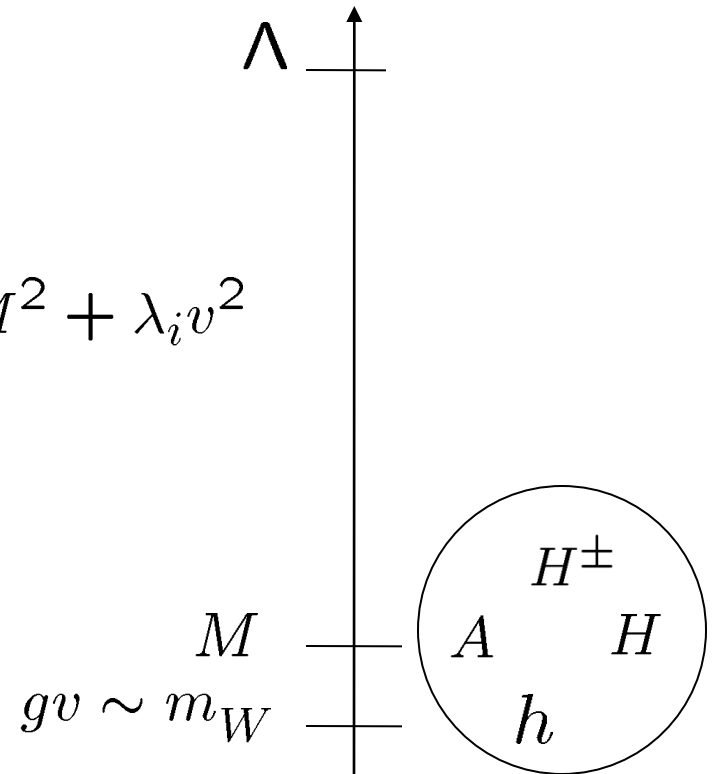
Decoupling/Non-decoupling

Λ : Cutoff

M : Mass scale
irrelevant
to VEV



$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \frac{v^2}{\Lambda^2} \mathcal{O}^{(6)}$$



$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = \mathcal{L}_{\text{nonSM}} + \frac{v^2}{\Lambda^2} \mathcal{O}^{(6)}$$

Non-decoupling effect

Type2-2HDM (MSSM) Higgs couplings

Higgs mixing

$$\text{VEV's: } v_1^2 + v_2^2 = v^2 \simeq (246 \text{ GeV})^2$$

$$\begin{pmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H \\ h \end{pmatrix}$$

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

SM

Gauge coupling:

$$\phi VV \quad (V = Z, W)$$

\Rightarrow

$$\begin{array}{cc} hVV & HVV \\ \sin(\beta - \alpha), & \cos(\beta - \alpha) \end{array}$$

Yukawa coupling:

$$\phi b\bar{b}$$

\Rightarrow

$$\begin{array}{cc} hb\bar{b} & Hb\bar{b} \\ \frac{\sin \alpha}{\cos \beta}, & \frac{\cos \alpha}{\cos \beta} \end{array}$$

$$\phi t\bar{t}$$

\Rightarrow

$$\begin{array}{cc} Ht\bar{t} & ht\bar{t} \\ \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}, & \frac{\cos \alpha}{\sin \beta} \end{array}$$

2HDM type2 (MSSM)

SM-like regime

$$\begin{array}{ll} hVV & HVV \\ \sin(\beta - \alpha) & \cos(\beta - \alpha) \end{array}$$

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

Only the lightest Higgs h couples
to weak gauge bosons

h behaves like the SM Higgs boson

$$g_{hVV} \simeq g_{hVV}(SM)$$

Heavy Higgs boson couplings
with gauge bosons vanish

$$g_{HVV} \simeq 0$$

Many λ couplings \rightarrow mass prediction changed

Lightest Higgs mass

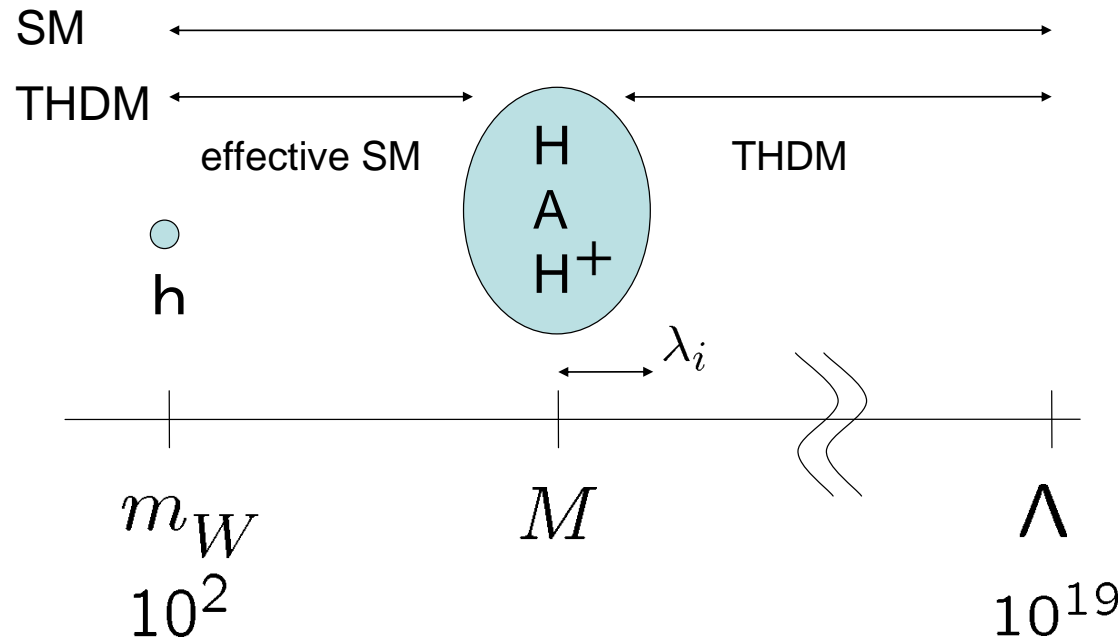
$$m_h^2 = \lambda v^2$$

Additional Higgs masses

$$m_\phi^2 \simeq M^2 + \lambda' v^2$$

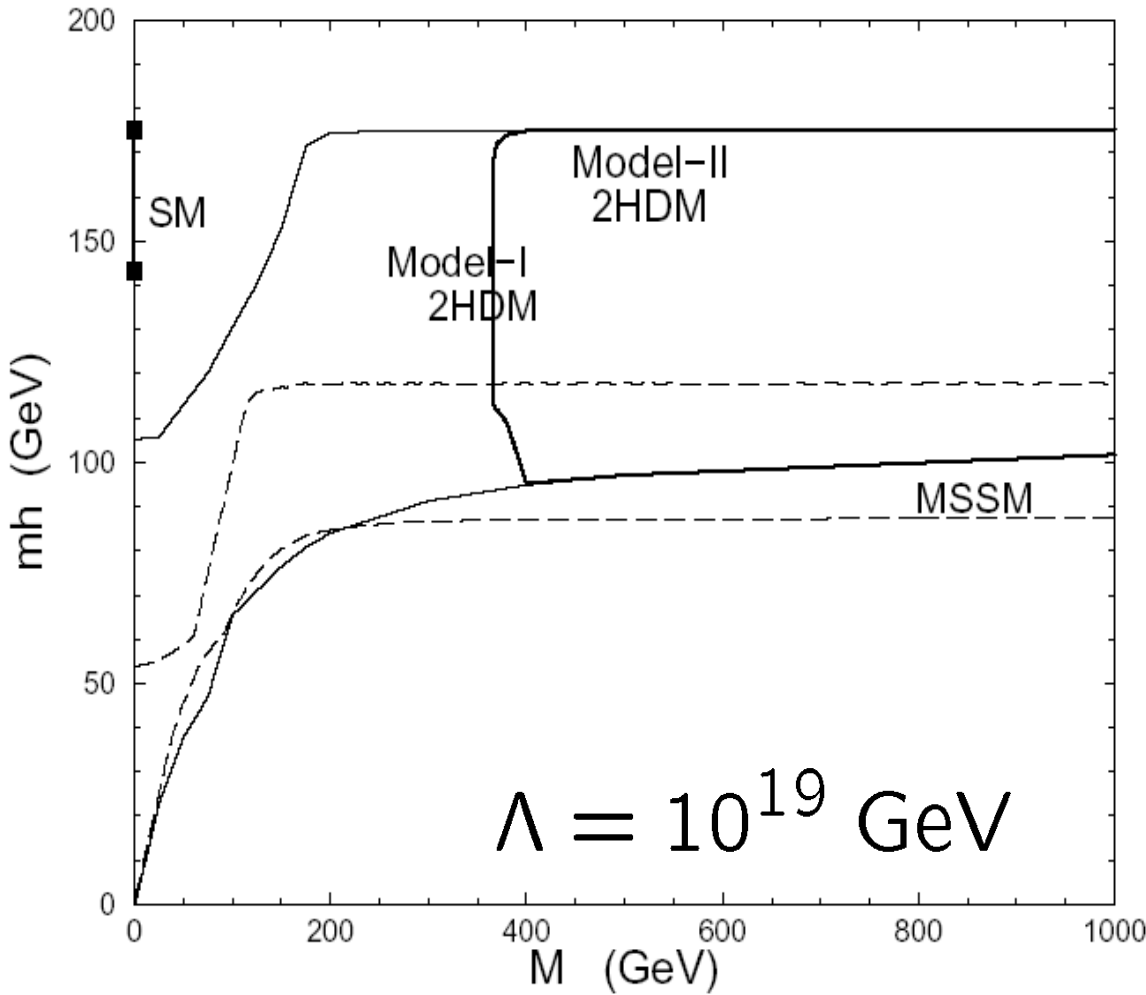
RGE

$$16\pi^2 \mu \frac{d}{d\mu} \lambda = 24\lambda^2 - 6y_t^2 + A(\lambda', \lambda'', \dots)$$



Mass of the lightest Higgs boson

- SM
- 2HDM type1
- 2HDM type 2
- MSSM



The predicted region of mass can be different even if all the other phenomena behave like the SM in the low energy.

Kanemura, Kasai, Okada
1999

最小超対称標準模型 (MSSM)

2HDM (Type2)

$$\lambda = 0 (g^2)$$

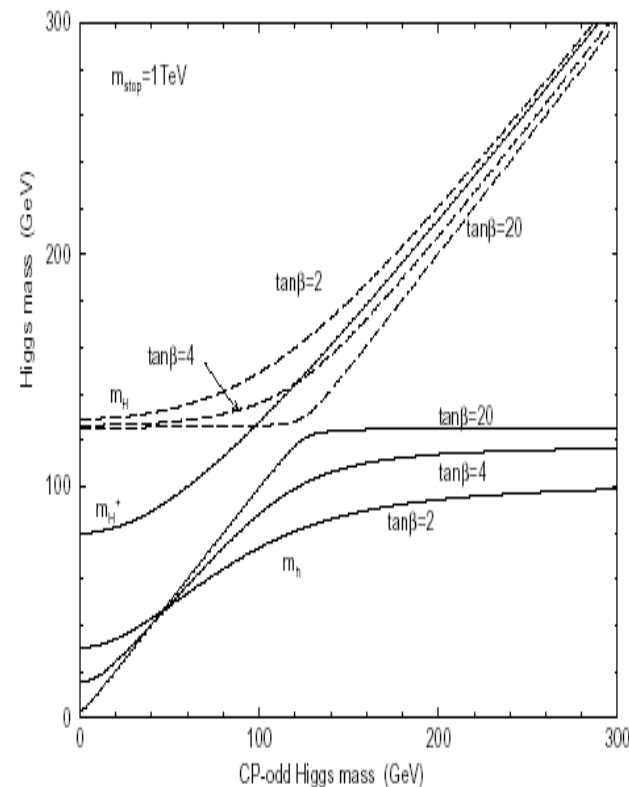
$$V = m_1^2 |H_1^0|^2 + m_2^2 |H_2^0|^2 + (m_3^2 H_1^0 H_2^0 + \text{h.c.}) + \frac{g^2 + g'^2}{8} (|H_1^0|^2 - |H_2^0|^2)^2$$

軽いCP偶のヒッグスの質量はZの質量で規制

$$m_h^2 < m_Z^2 \cos^2 2\beta + \frac{3}{2\pi^2} \frac{m_t^4}{v^2} \ln \frac{m_{\text{stop}}^2}{m_t^2} + \dots$$

重いヒッグス質量の関係式

$$m_{H^\pm}^2 = m_A^2 + M_W^2$$



NMSSM (D+D+S⁰)

Two Higgs doublets \hat{H}_1 , and \hat{H}_2 and a Higgs singlet superfield \hat{N}

$$W = \lambda N H_1 H_2 - \frac{k}{3} N^3$$

additional scalar and pseudoscalar bosons, (and a new higgsino)

μ problem

7 physical states

3 scalars

H_1, H_2, H_3

2 pseudo scalars

A_1, A_2

1 pair of charged Higgs bosons

H^\pm

$$m_{h_{\text{tree}}}^2 < M_Z^2 \left(\cos^2 2\beta + \frac{2\lambda^2}{g^2 + g'^2} \sin^2 2\beta \right)$$

hの質量はmZで規制されない

Fat Higgs model

Harnik, Kribs, Larson, Murayama

Composite H1, H2, N

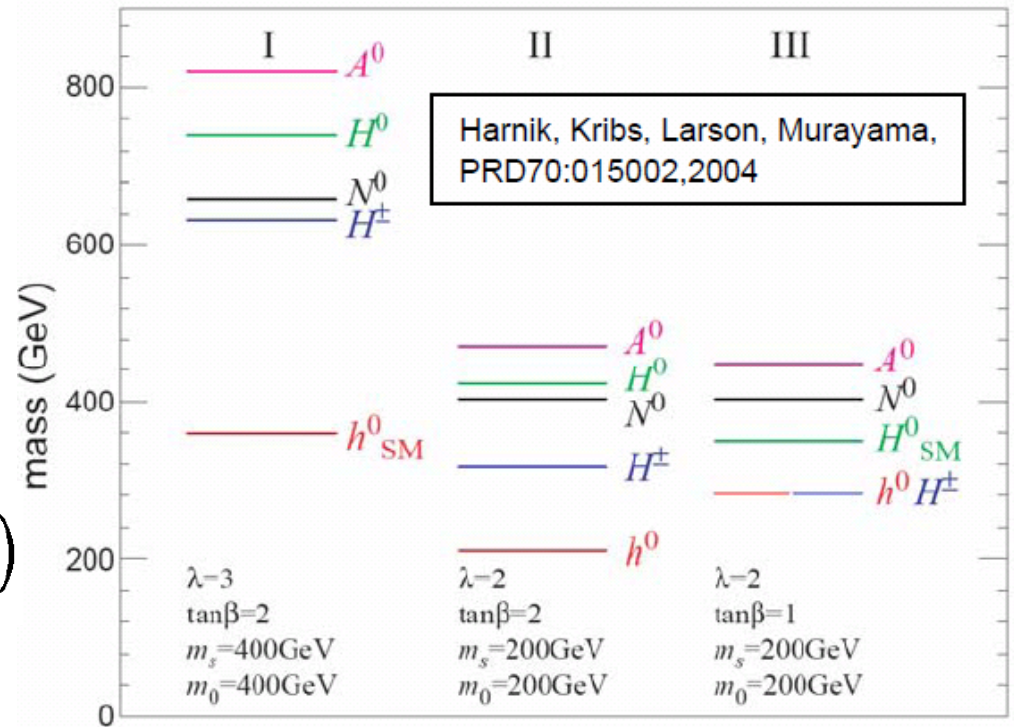
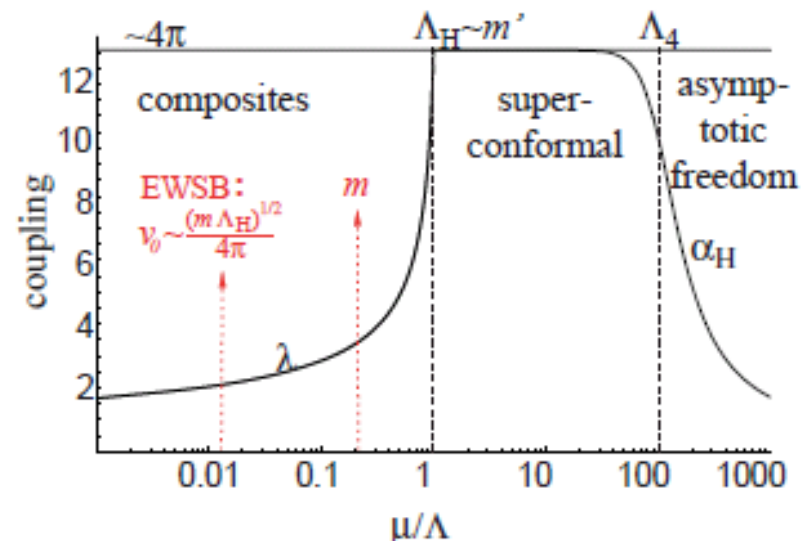
低エネルギーで強結合NMSSM

$$W = \lambda(NH_1H_2 - v_0^2)$$

ツリーレベルでSM的ヒッグスの質量を自然に重くできる
(No little hierarchy)

$$m_h^2 \simeq \lambda^2 v^2 + \mathcal{O}(m_Z^2)$$

$$M_{H^\pm}^2 = M_A^2 - \lambda^2 v^2$$



付加的なヒッグス質量同士の関係

General 2HDM $M_{H^\pm}^2 = M_A^2 + (\lambda_4 - \lambda_5)v^2$

MSSM $M_{H^\pm}^2 = M_A^2 + M_W^2$ $M_{H^\pm} > M_A$

NMSSM (strong) $M_{H^\pm}^2 = M_A^2 - \lambda^2 v^2$ $M_{H^\pm} < M_A$

CPV case ..

質量スペクトルによって理論が区別できる

余剰次元とヒッグス

$$\Lambda_\pi = \bar{M}_{Pl} e^{-kr_c \pi}$$

- Ex) Randall-Sumdrum model
- Radion: 余剰次元のサイズに対応するスピン0場
- Radion-Higgs 混合

$$ds^2 = e^{-2k|y|} \eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu - dy^2$$

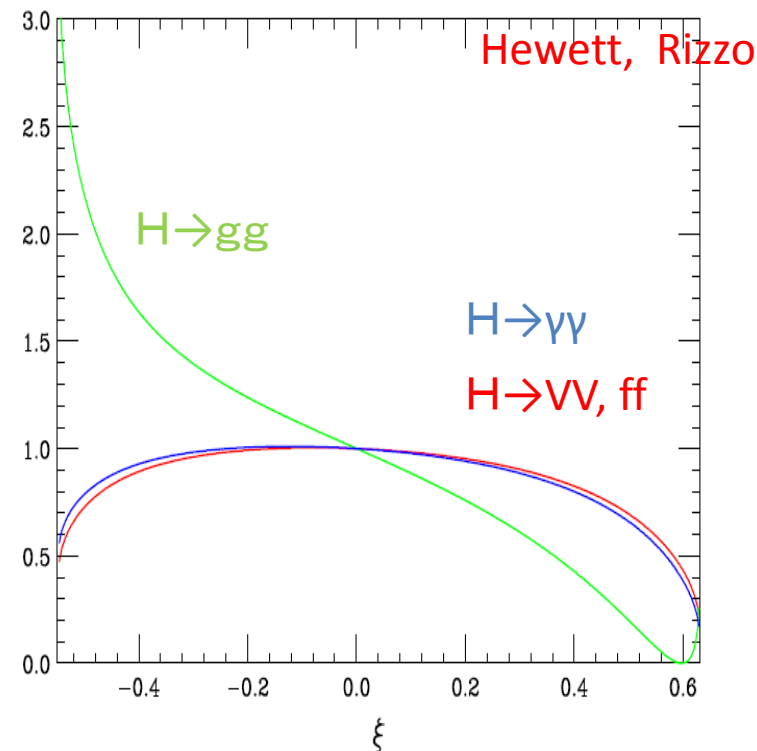
$$y = r_c \phi$$

崩壊率のSM値との比
(=結合定数の比)

$$S_{rH} = -\xi \int d^4x \sqrt{-g_{ind}} R^{(4)} [g_{ind}] H^\dagger H$$

$$\mathcal{L} = \frac{-1}{v} (m_f \bar{f} f - m_V^2 V_\mu V^\mu) \left[\cos \theta - t \sin \theta - \frac{v}{\Lambda} \sin \theta / Z \right] h$$

- Hff, HVV, H $\gamma\gamma$ の結合定数が、ユニバーサルに小さくなる



ニュートリノ質量とヒッグス

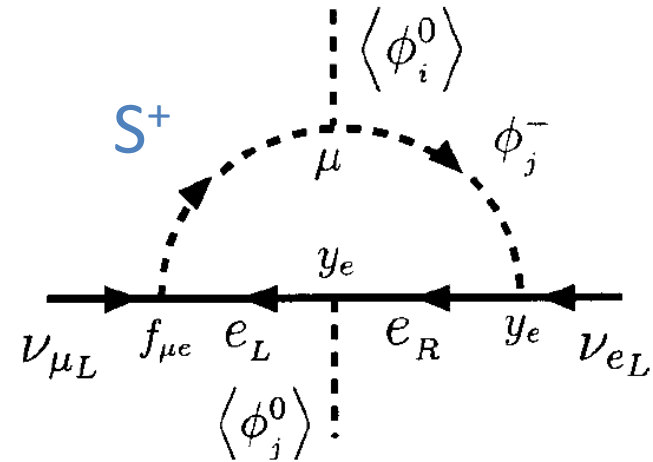
シーソー機構以外の可能性 \Rightarrow EWスケールでのループ効果

- Zee 模型 $D+S^+$

No RH- ν

S^+ はレプトン数2

1-loop で ν 質量生成



- Krause et al の模型 $D+S^++S^++NR$

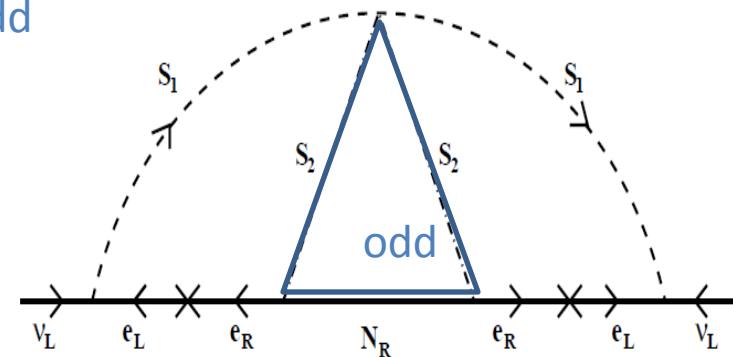
Z_2 対称性

3-loop で ν 質量生成

NRは暗黒物質候補

odd

Krauss et al

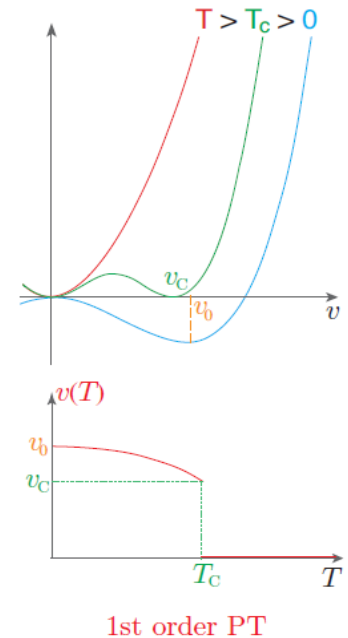


荷電ヒッグスの物理

宇宙論とヒッグス(電弱バリオン数生成)

電弱理論はサハロフの3条件を満たす

- B (バリオン量子数)の非保存
 - 軸性アノマリー、高温でのスファレロン効果
(高温ではいつも $B+L$ は破れている)
- C, CP の非保存
 - 電弱模型のラグランジアンは C, CP は非保存
- 熱平衡状態からのずれ
 - 電弱相転移が1次的であれば実現可能



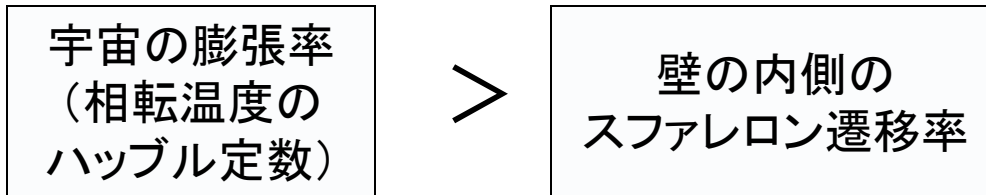
電弱バリオン数生成のシナリオ

様々な現象論的帰結、ヒッグス物理との密接なつながり

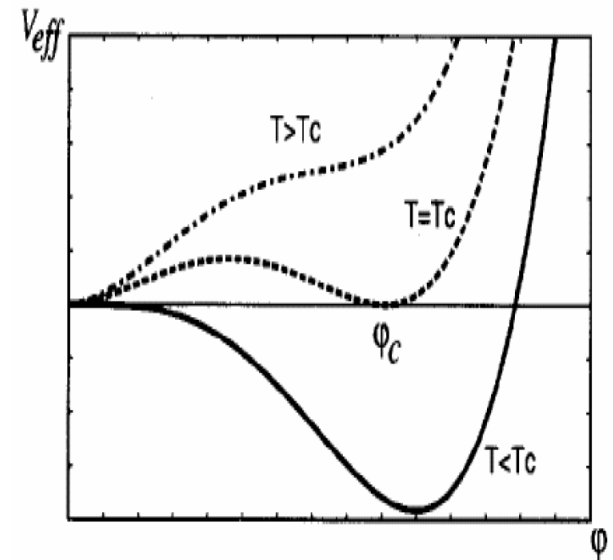
強い一次的相転移の条件

たとえ電弱相転移でバリオン数が生成されても、相転移付近で壁の内側 (broken phase側) でスファレロン遷移が十分抑えられていなければ、作ったバリオン数が消えてしまう。

バリオン数が消えないための条件



$$\phi_c/T_c > 1$$



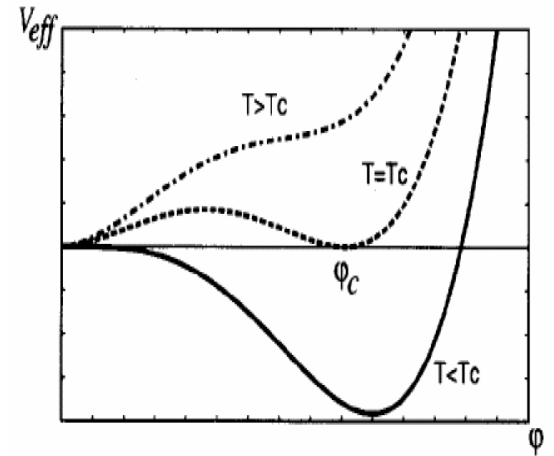
高温でのヒッグスポテンシャルのふるまい

$$V_T(\phi, T) = D(T^2 - T_0^2)\phi^2 - ET\phi^3 + \frac{\lambda_T}{4}\phi^4 + \dots$$

$$\phi_c/T_c = 2E/\lambda_{T_c}$$

$$E = \frac{1}{12\pi v^3}(6m_W^3 + 3m_Z^3)$$

$$\lambda_T = m_h^2/2v^2 + \text{log corrections}$$



バリオン数が消えないための条件より

$$\phi_c/T_c > 1 \Rightarrow 2E/\lambda_{T_c} > 1$$

- 場の3次の係数Eが大きい(またはヒッグス場が軽い)ことを必要とする
標準模型のEでは ヒッグス質量が軽く(<56GeV)出てしまい
LEP実験からの下限値(>115GeV)と矛盾

ヒッグスセクターの拡張が必要

ヒッグス二重項2個の模型、超対称模型、高次演算子、....

2HDMの場合

$$V_T(\phi, T) = D(T^2 - T_0^2)\phi^2 - ET\phi^3 + \frac{\lambda_T}{4}\phi^4 + \dots$$

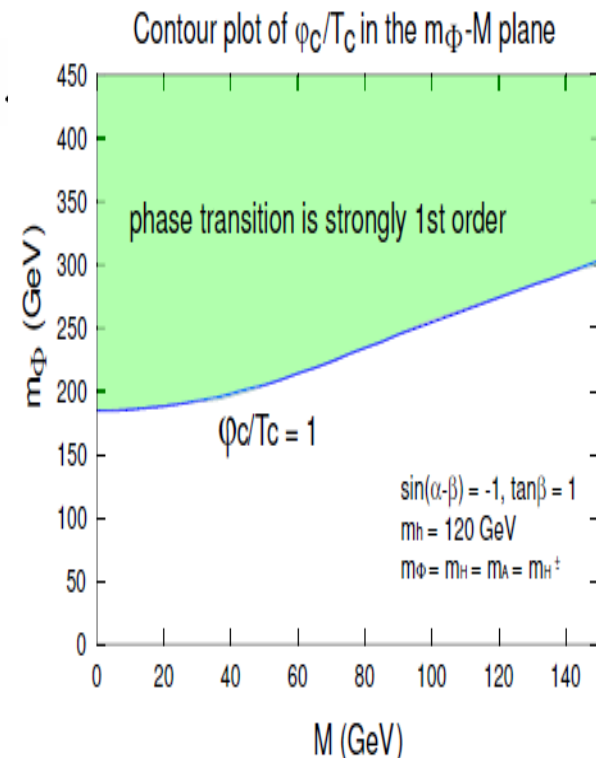
$$\phi_c/T_c = 2E/\lambda_{T_c}$$

$$E = \frac{1}{12\pi v^3}(6m_W^3 + 3m_Z^3) + (\text{付加的粒子効果})$$

$$\phi_c/T_c > 1 \Rightarrow 2E/\lambda_{T_c} > 1$$

$$\lambda_{T_c} \sim m_h$$

- 2HDMでは付加的粒子のノンデカップリング効果で、場の3次の係数Eを十分大きくできる
ヒッグス質量をO(100) GeVにとれる



加速器の物理(ゼロ温度の物理)
にどんなシグナルができるか?

$$V(\phi, T) \iff V(\phi)$$

ヒッグス自己結合に対する量子効果

SK, Okada, Senaha (2005)

- 最も軽いヒッグス場 h (標準模型的な性質を持つ)の3点結合

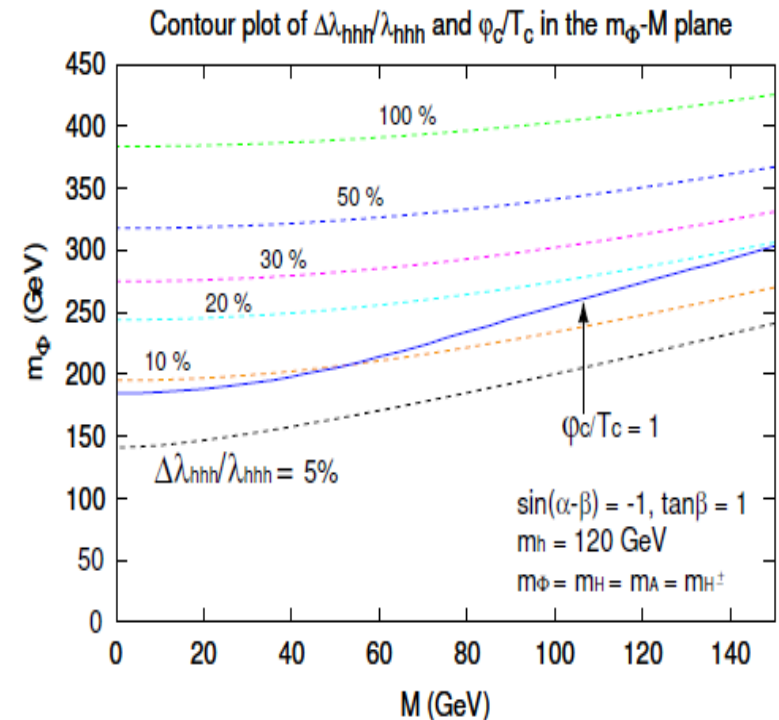
hhh

$$\frac{\lambda_{hhh}^{2\text{HDM}}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}} = 1 + \frac{1}{3\pi^2} \frac{m_\Phi^4}{m_h^2 v^2} \left(1 - \frac{M^2}{m_\Phi^2}\right)^3$$

($\Phi = H, A, H^\pm$)

付加的ヒッグス場が重いとき

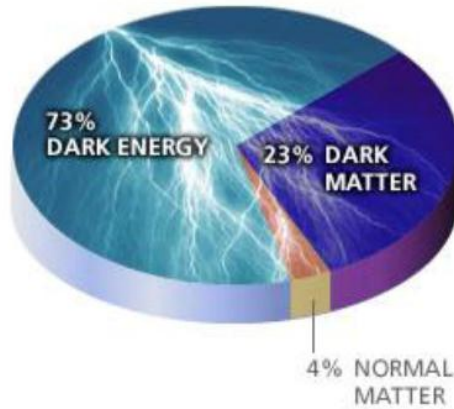
大きな量子効果 (> 数10%)



バリオン生成が可能な領域
と重なると

電弱バリオン生成が実現する模型 → hhh 結合の大きなずれ

宇宙論とヒッグス (Higgs portal dark matter)



暗黒物質とは、未だに正体がわからないが、存在は様々な観測で確立されている物質

- ・電荷を持たない
- ・バリオンではない
- ・非相対論的速度で運動
- ・相互作用が弱い
- ・熱的残存量 $\Omega h^2 \simeq 0.1$
- ・安定
- などなど

暗黒物質としてZ2-oddなゲージシングレットを考えると、SM粒子とはヒッグスを通じてのみ相互作用 = **Higgs Portal DM**

実スカラー: $\mathcal{L}_S = \mathcal{L}_{SM} + \frac{1}{2}(\partial\phi)^2 - \frac{c_s}{2}|H|^2\phi^2 - \frac{d_s}{4!}\phi^4$

マヨラナ: $\mathcal{L}_\chi = \mathcal{L}_{SM} + \frac{1}{2}\bar{\chi}(i\partial - M_F)\chi - \frac{c_\chi}{2\Lambda}|H|^2\bar{\chi}\chi - \frac{d_\chi}{2\Lambda}\bar{\chi}\sigma^{\mu\nu}\chi B_{\mu\nu}$

実ベクトル: $\mathcal{L}_V = \mathcal{L}_{SM} + \frac{1}{4}V_\mu V^\mu + \frac{c_V}{2}|H|^2 V_\mu V^\mu - \frac{d_V}{4!}(V_\mu V^\mu)^2$

$$\mathcal{L}_{Sint} = -\frac{c_s}{2}|H|^2\phi^2 - \frac{d_s}{4!}\phi^4$$

$$\mathcal{L}_{\chi int} = -\frac{c_\chi}{2\Lambda}|H|^2\bar{\chi}\chi - \frac{d_\chi}{2\Lambda}\bar{\chi}\sigma^{\mu\nu}\chi B_{\mu\nu}$$

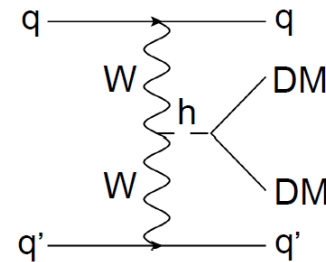
$$\mathcal{L}_{Vint} = +\frac{c_V}{2}|H|^2 V_\mu V^\mu - \frac{d_V}{4!}(V_\mu V^\mu)^2$$

Higgs portal dark matter

検証

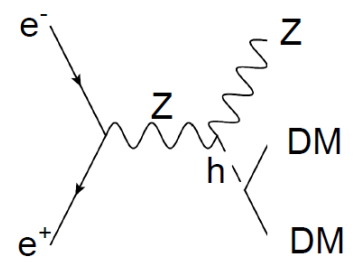
- DM残存量 (WMAP)
- 直接測定 (CDMS, XENON)
- LHC, ILCでのHiggs現象
 - $MDM < mh/2$ インビジブル崩壊
 - $MDM > mh/2$ 生成過程を見る

LHCにおけるシグナル

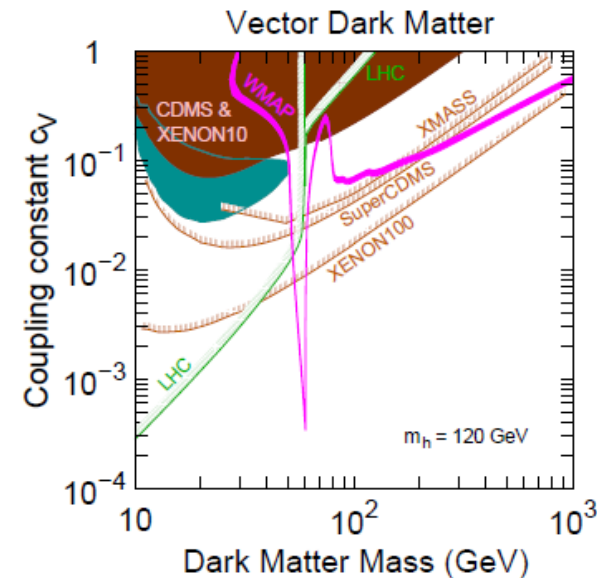
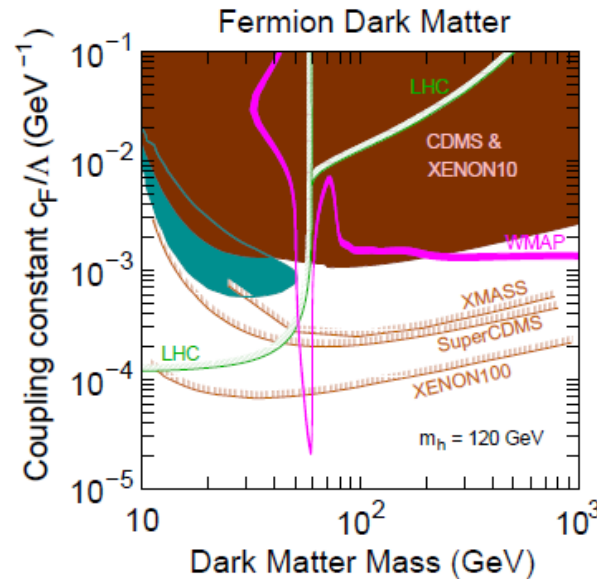
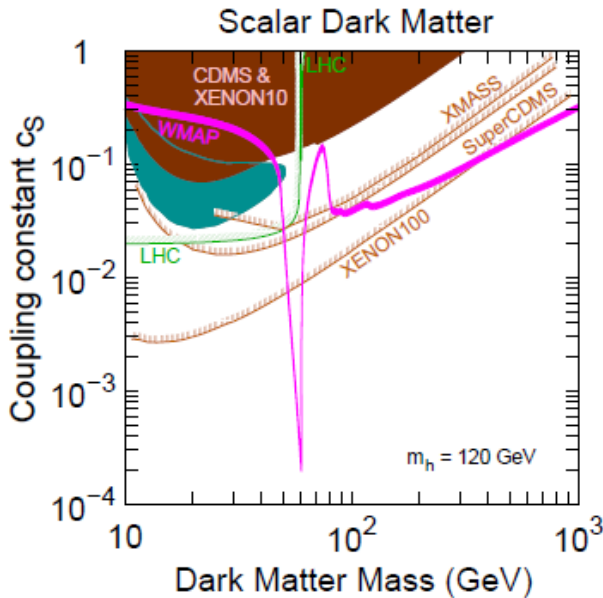


縦方向にエネルギーが保存していないW-fusion過程に注目

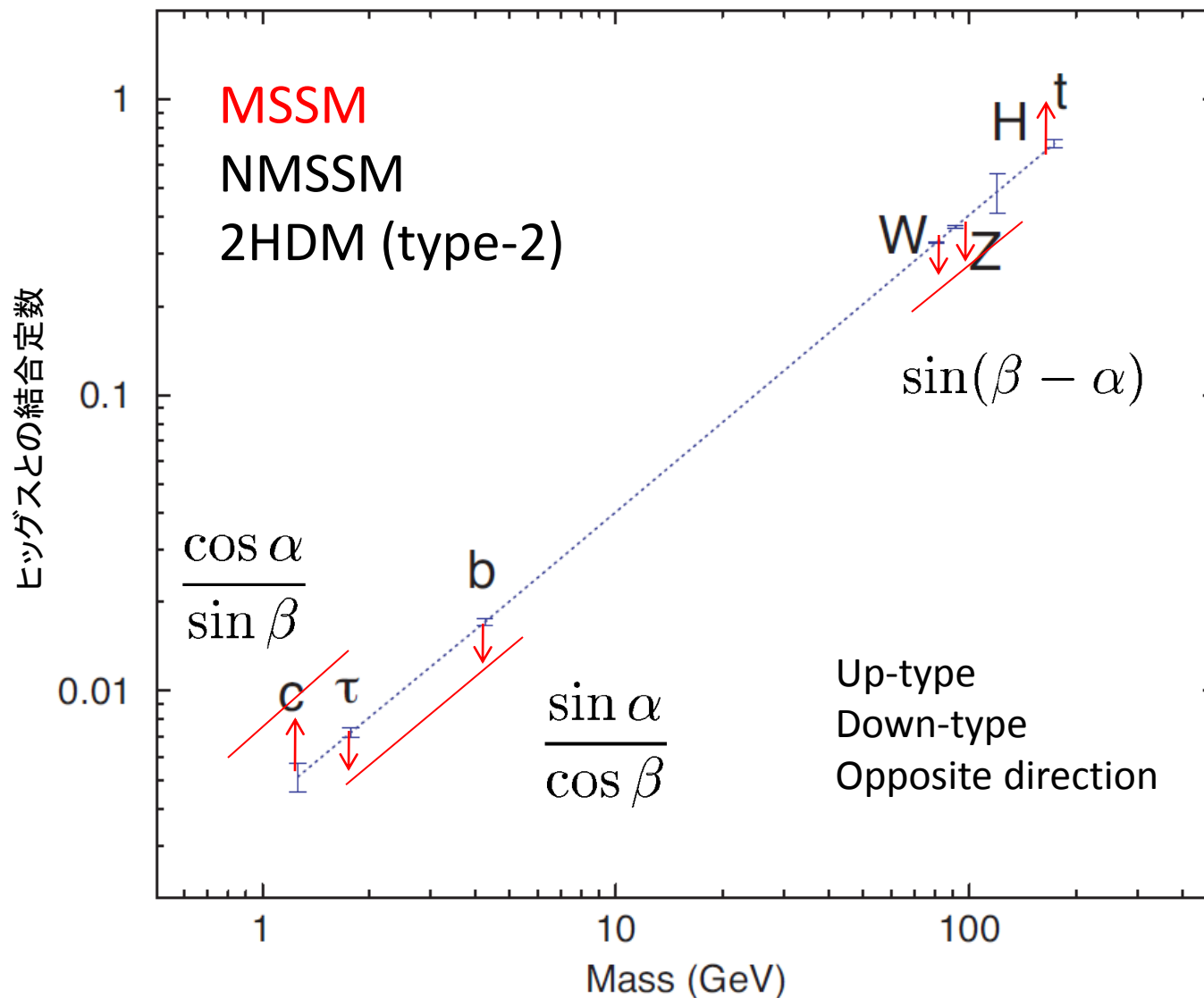
ILCにおけるシグナル



エネルギーが保存していないSingle Zボソン過程に注目

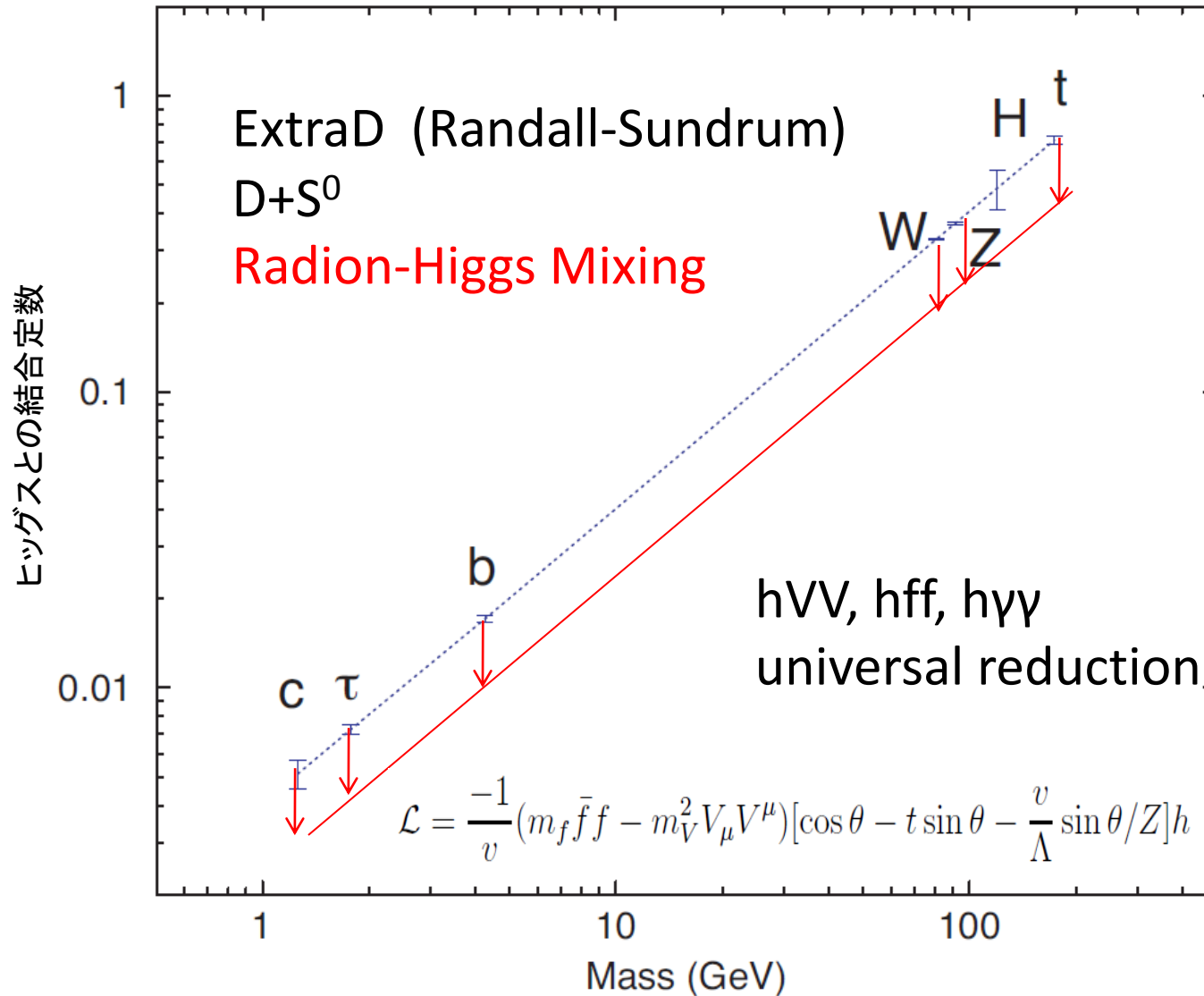


軽いヒッグスが一個見つかったとき



$$v_u^2 + v_d^2 = v^2$$

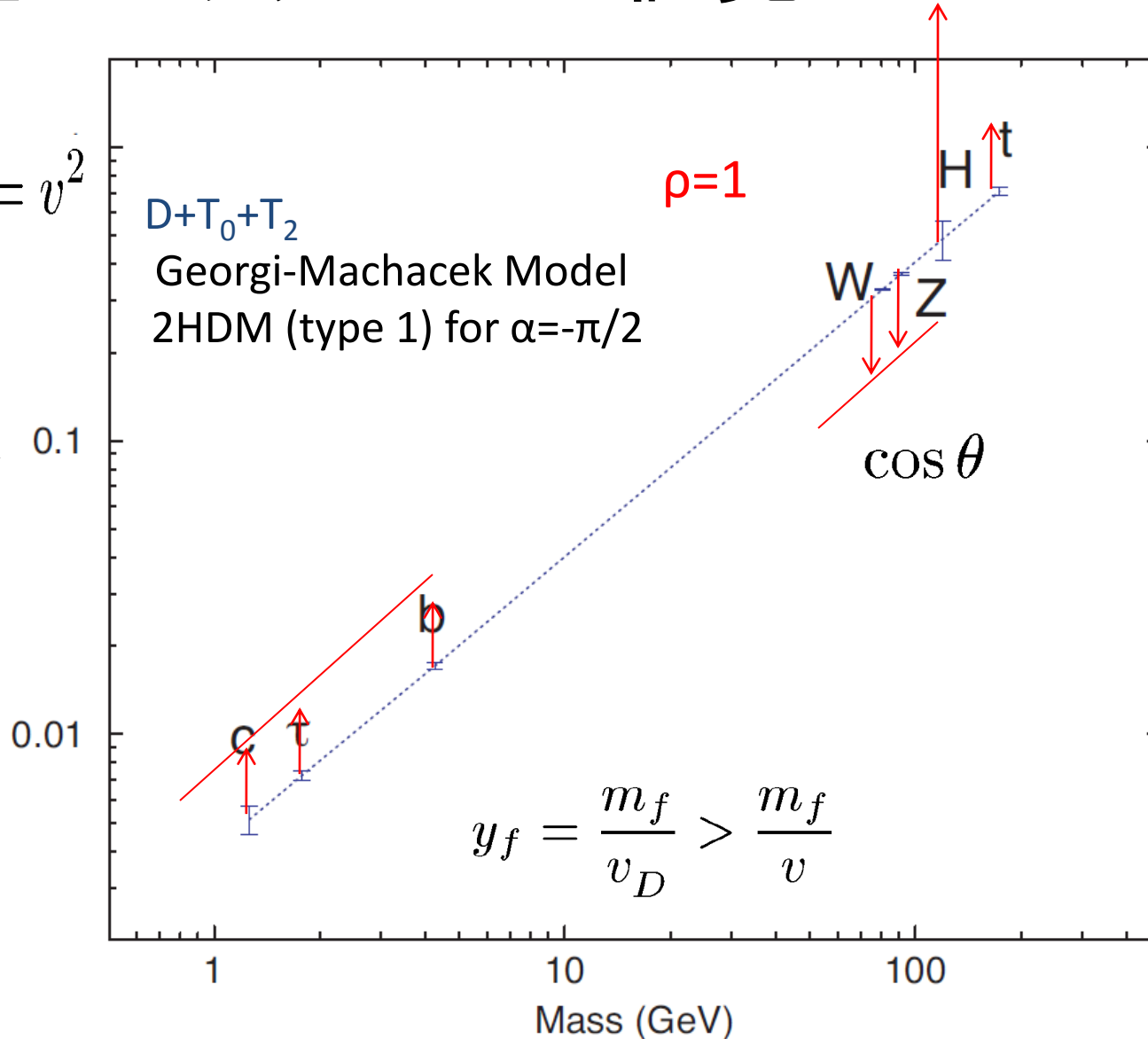
軽いヒッグスが一個見つかったとき



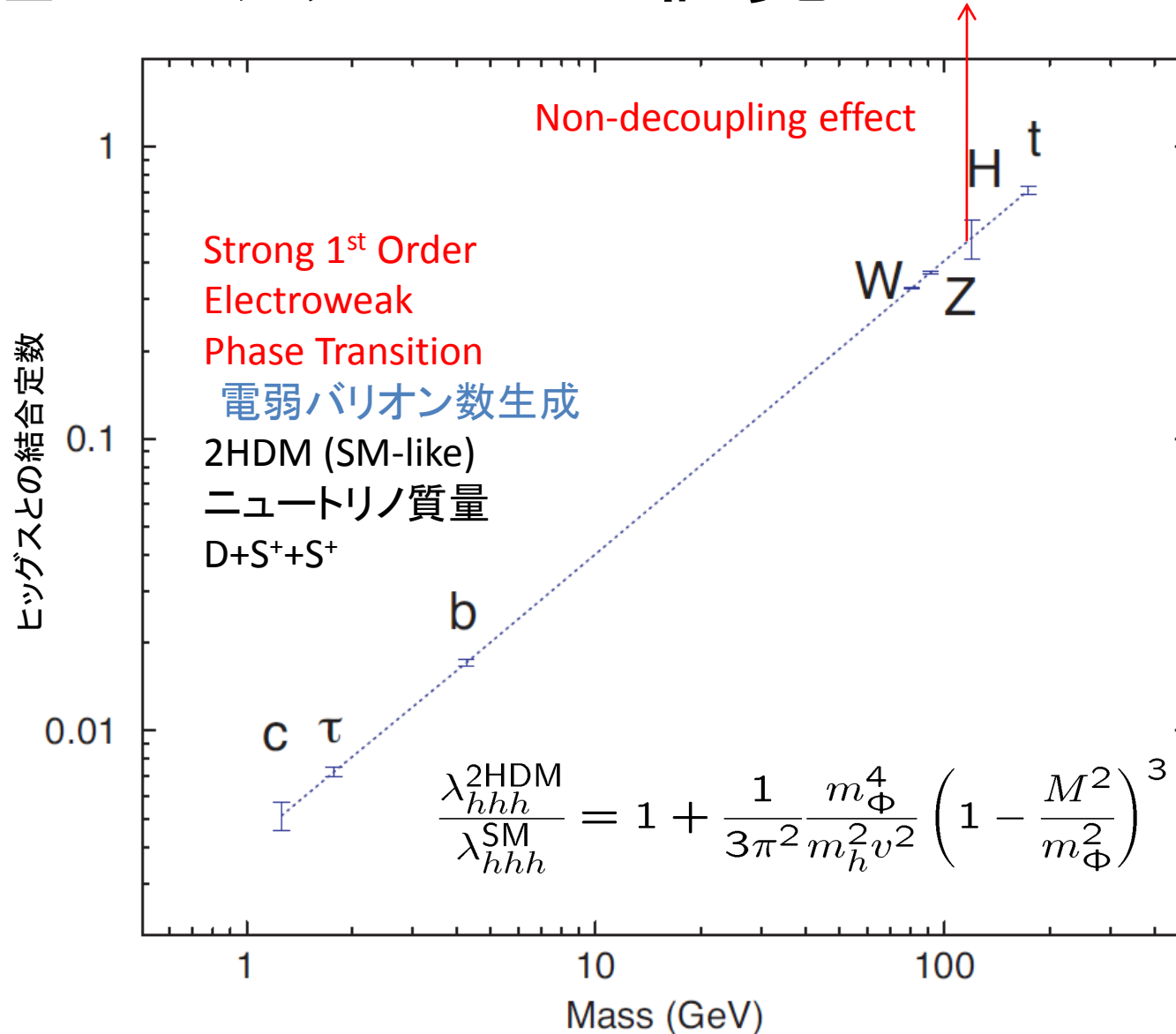
軽いヒッグスが一個見つかったとき

$$v_D^2 + 8v_T^2 = v^2$$

クォークはD
とのみ結合
W, ZはDとT
の両方と結合



軽いヒッグスが一個見つかったとき



Coupling measurement

$$\sigma(H)BR(H \rightarrow X) = \frac{\sigma(H)^{SM} \Gamma_p \Gamma_X}{\Gamma_p^{SM} \Gamma}$$

To be measured

$$\Gamma_g, \Gamma_W, \Gamma_Z, \Gamma_\gamma, \Gamma_\tau, \Gamma_b, y_t^2$$

Put a mild theoretical assumption

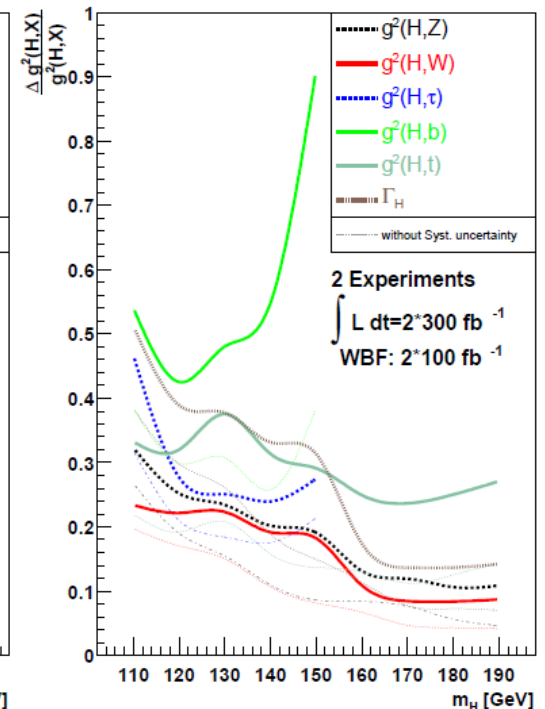
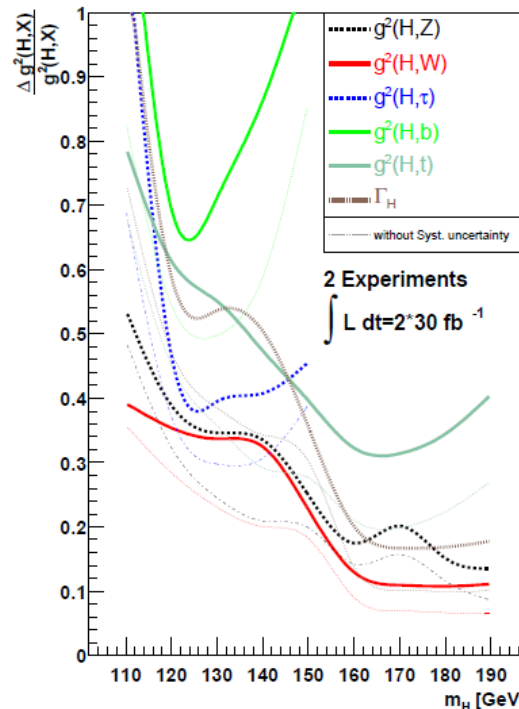
$$\Gamma_V < \Gamma_V^{SM}$$

Combined with measurement of H->VV in WBF, this gives an upper bound on the total width

Duhrssen, Heinemeyer, Logan, Rainwater,
Weiglein, Zeppenfeld hep-ph/0406323

Relative precision of
coupling-square

25-35% for g_{ttH}^2 and $g_{\tau\tau H}^2$
 10-25% for g_{VVH}^2
 40-60% for g_{bbH}^2



Precision Measurement for Higgs Mass and Couplings at LHC

J.J. Blaising, et al., Europe's Future Strategy, Jan. 2006

LHC with $L=300\text{fb}^{-1}$

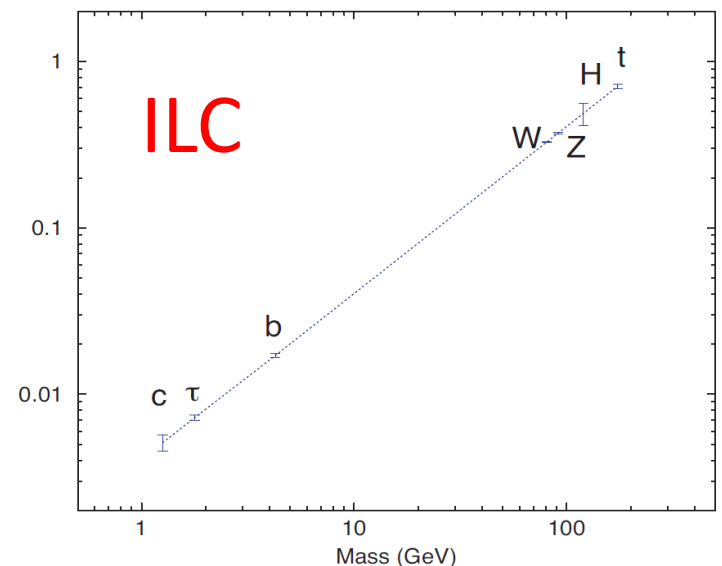
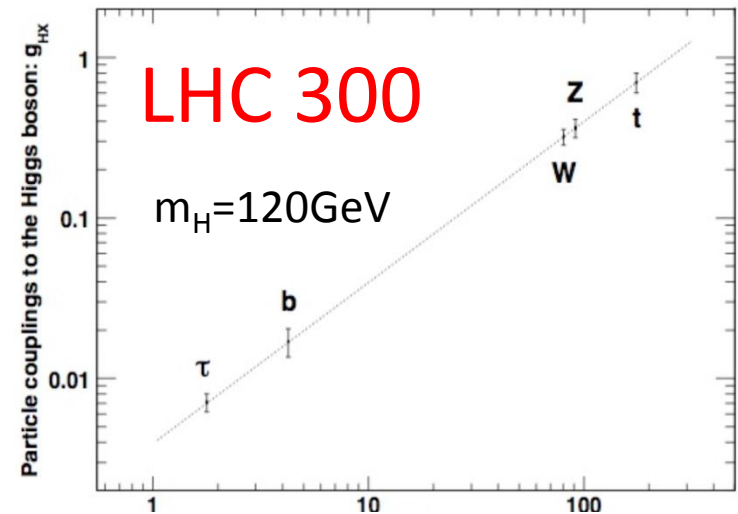
- $\Delta m_H \sim 0.1\%$
- Coupling $\sim 10\text{-}30\%$

with mild assumptions

In these expected accuracies, the mass-coupling relation can be tested at LHC

International Linear Collider (ILC)
will make it much more accurate!!

Charm Yukawa, Self-coupling



結合定数の測定 (ILC)

電子陽電子衝突

衝突エネルギー 500-1000GeV

ルミノシティ 100-1000 fb⁻¹

単純なキネマティクス

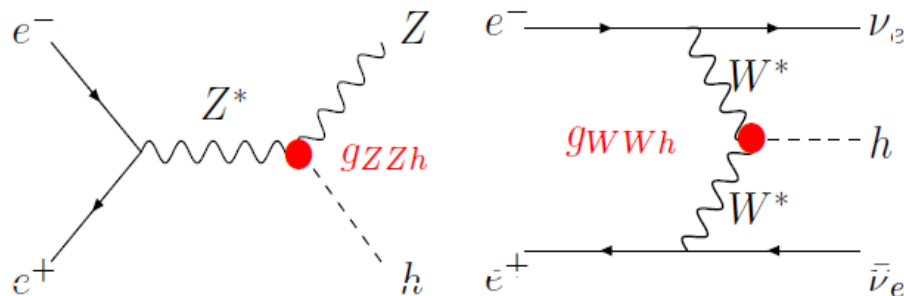
少ないバックグラウンド

偏極電子(陽電子)が使える

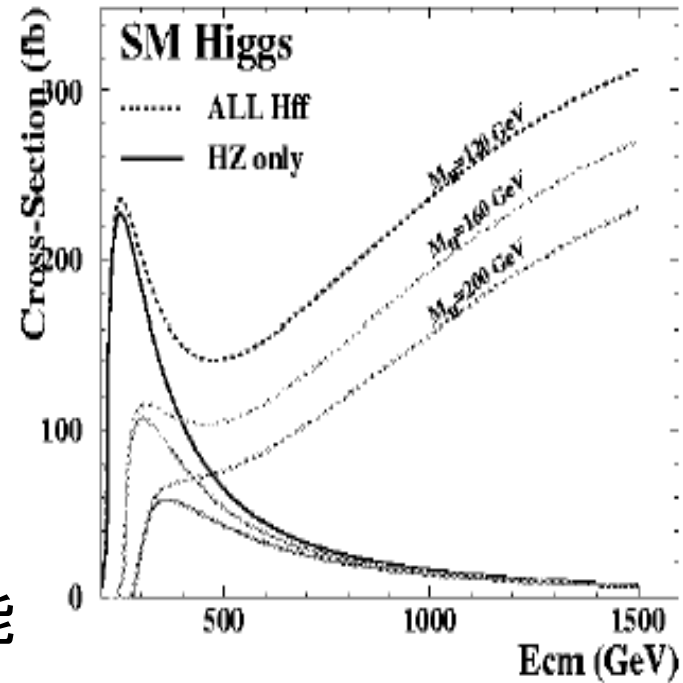
10万個程度のヒッグスができる

精密測定が可能

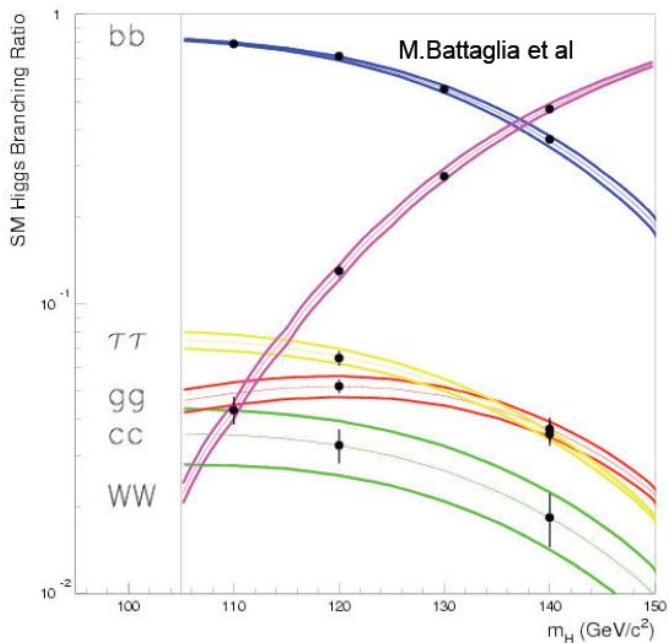
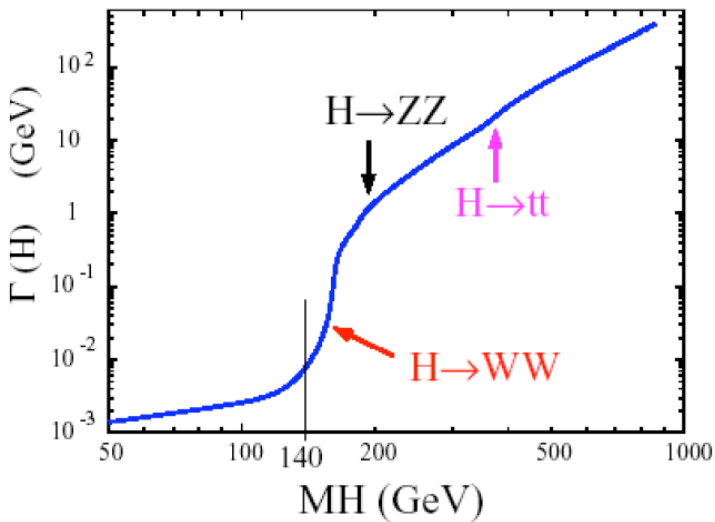
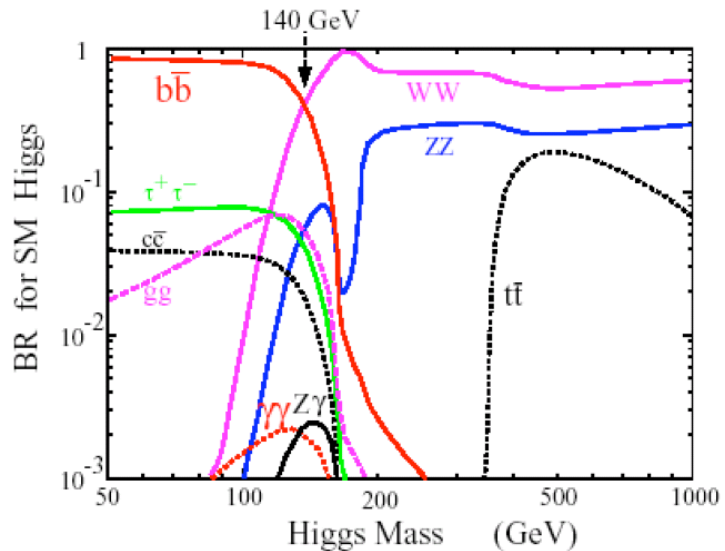
ゲージ結合の測定



$$\frac{\Delta \lambda_{VVh}}{\lambda_{VVh}} \sim \mathcal{O}(1)\%$$



湯川結合の測定 (ILC)



Absolute values of Yukawa coupling determination

$$|y_f|^2 = C(m_H) \times \text{Br}(H \rightarrow f\bar{f}) \times \Gamma_{\text{tot}}$$

$$\frac{\delta y_b}{y_b} \sim 3\%$$

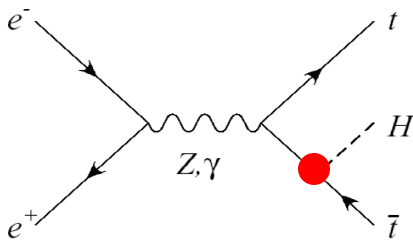
$$\frac{\delta y_\tau}{y_\tau} \sim 4\%$$

$$\frac{\delta y_c}{y_c} \sim 8\%$$

$$y_c$$

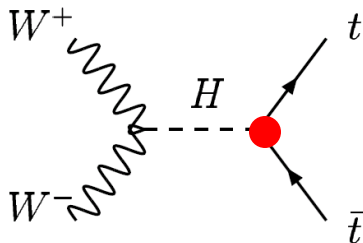
Top-Yukawa coupling

- Top is exceptionally heavy $y_t^{\text{SM}} \simeq 1$
- Measurement of the top Yukawa should reveal the mass generation mechanism and also nature of EWSB.
- Sensitive to new physics effects



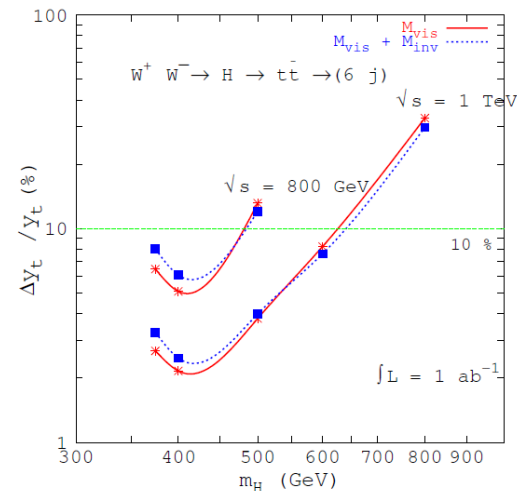
For $m_H=100-120\text{GeV}$,
mainly from ttH process

$$\delta y_t / y_t \sim 15 - 20\%$$



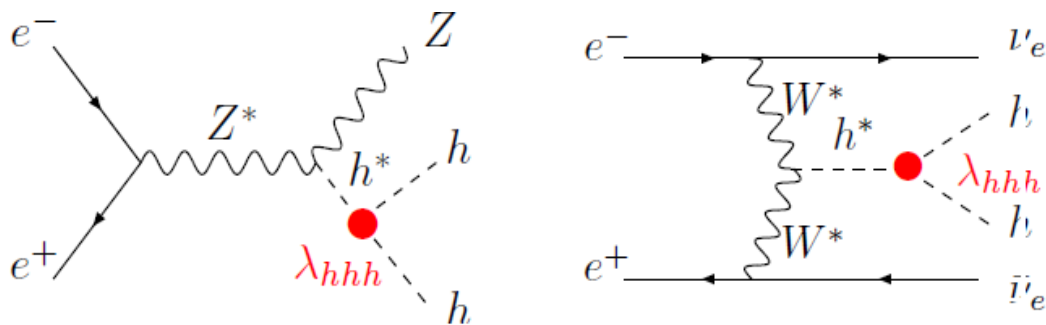
For $m_H=360-500\text{GeV}$,
mainly from tt from W -fusion

$$\delta y_t / y_t < 10\%$$

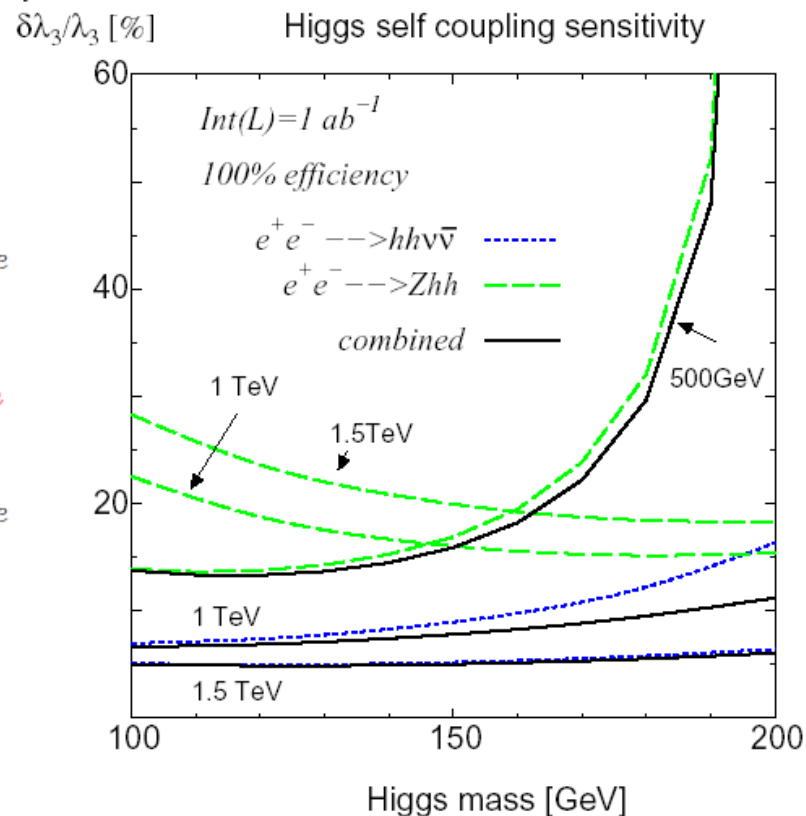


ヒッグス自己結合 (hhh) の測定

線形加速器 (ILC) で測定できる



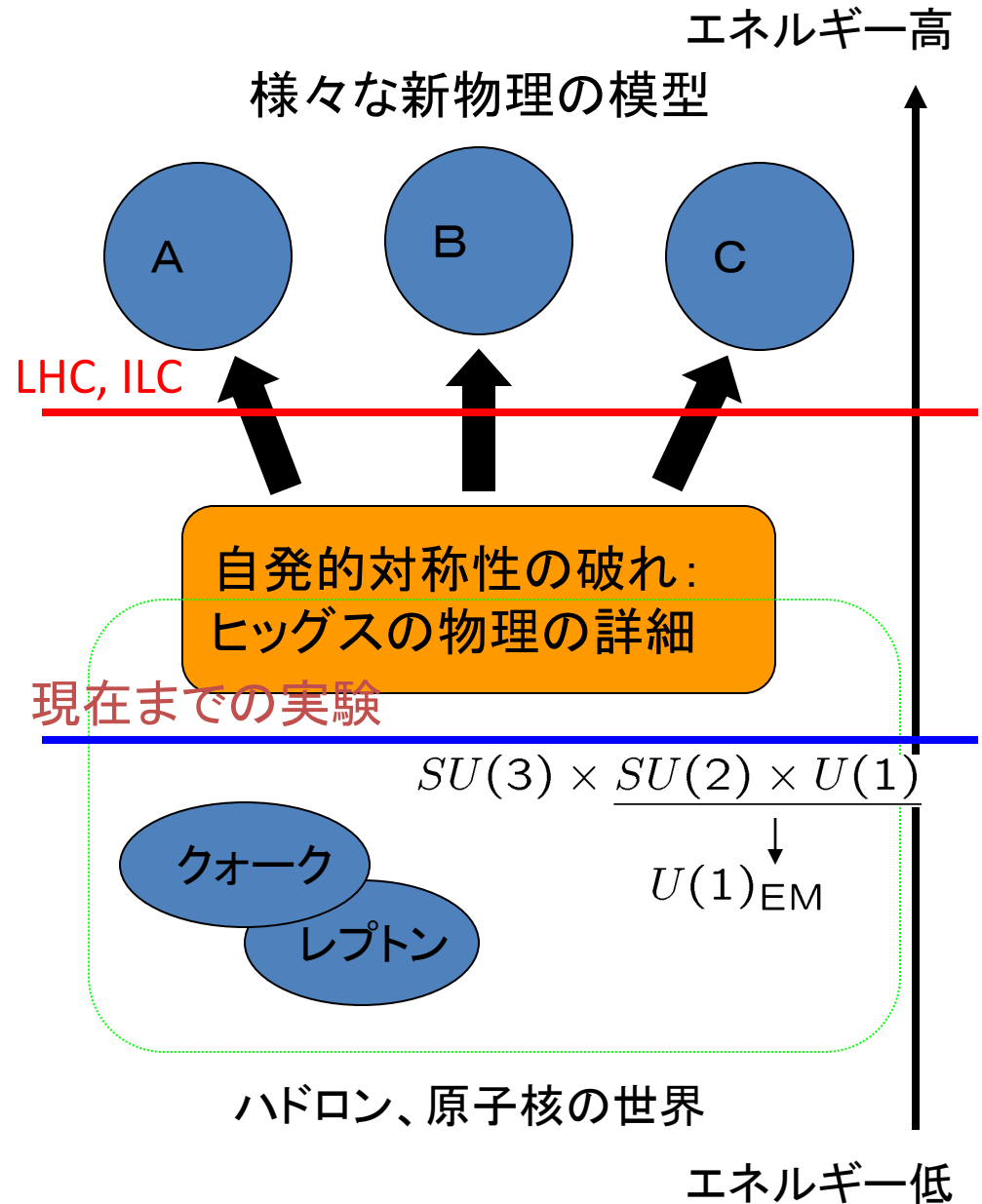
10-20%の精度で測れる

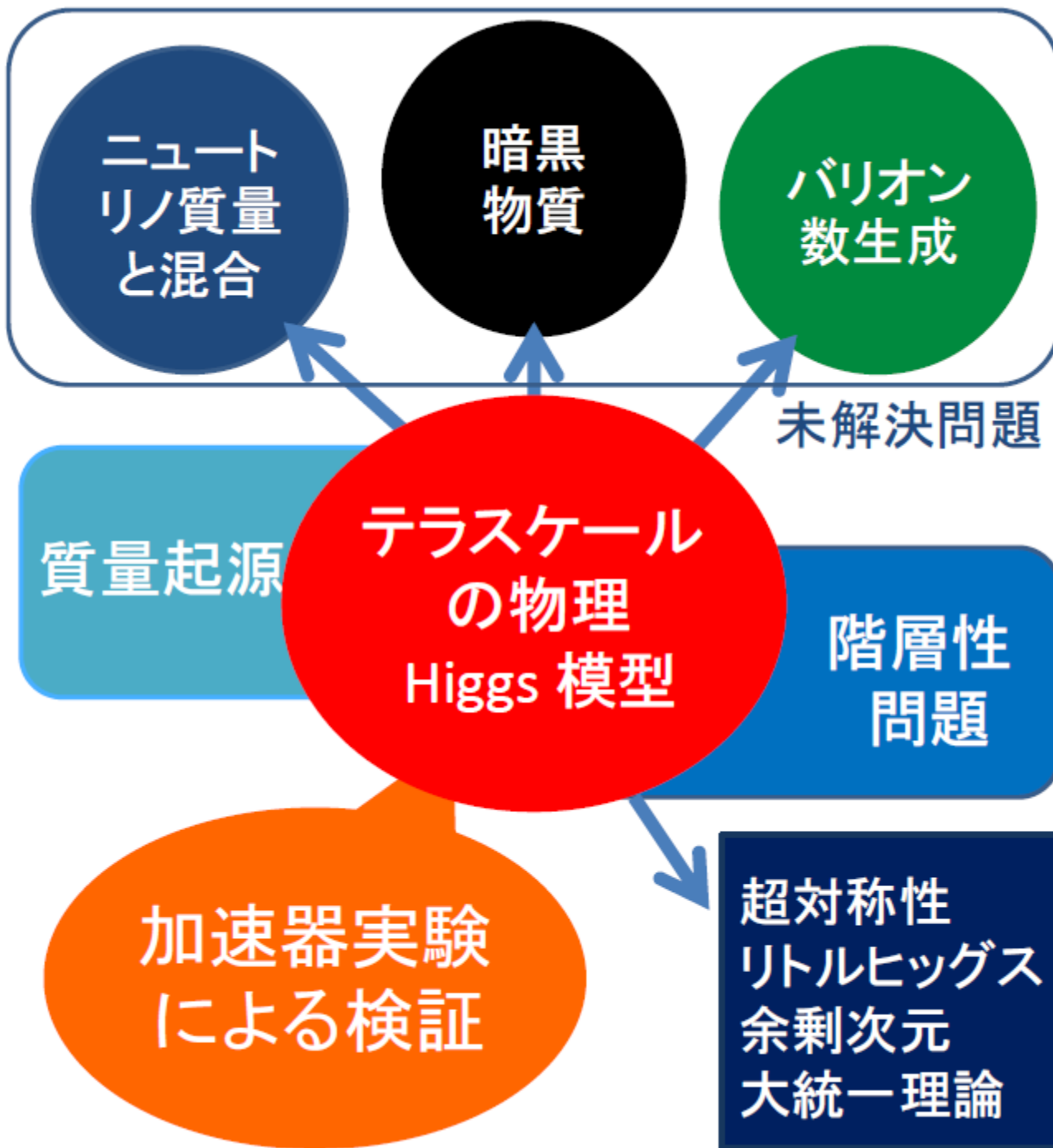


電弱バリオン数生成のモデルはILCで検証可能

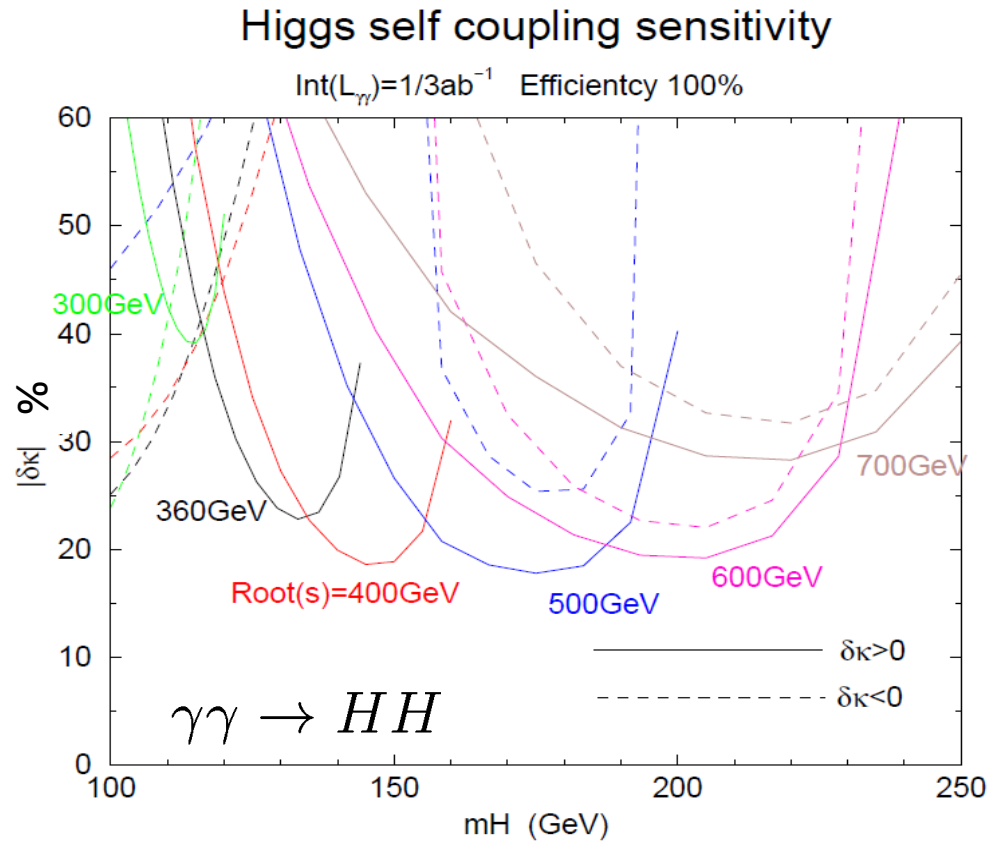
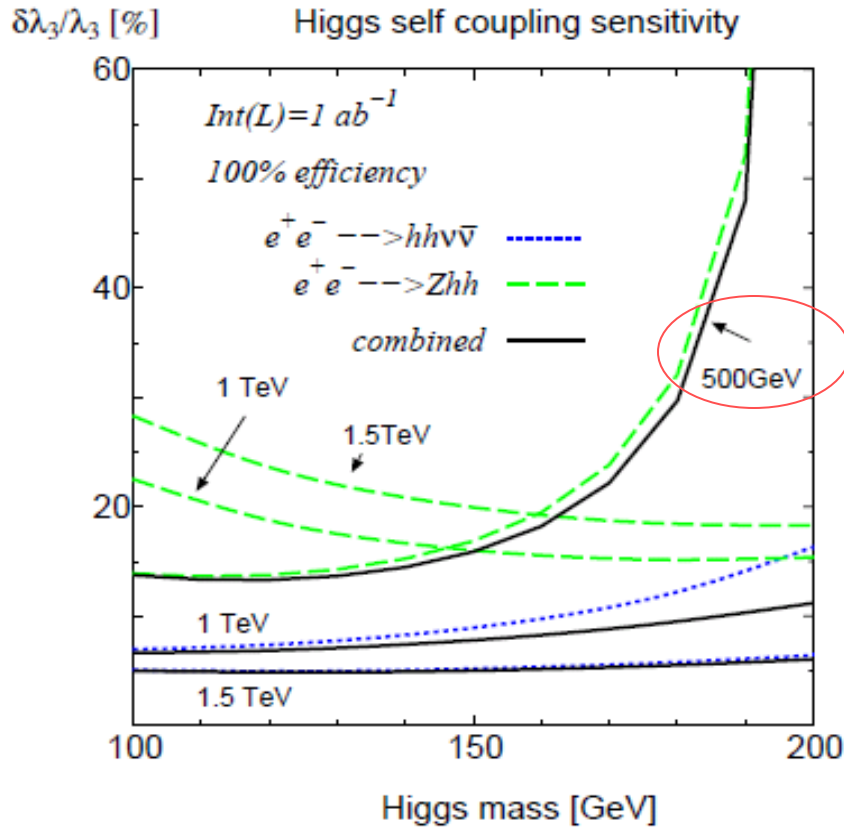
まとめ： ヒッグスセクターは new physics の窓

- ヒッグス
質量起源のなぞを解く鍵
標準模型の検証
- ヒッグスの探索と詳細の研究は今後10年間の最重要課題である。
LHC実験、ILC実験
- ヒッグスの物理を解明することで**新物理学**の方向性を決めることができる。





Estimation of HHH sensitivity



$$\lambda_{e_1} = \lambda_{e_2} = 0.45$$

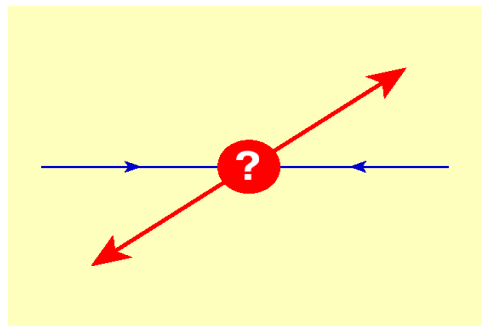
$$\lambda_{\gamma_1} = \lambda_{\gamma_2} = -1$$

国際線形加速器 (ILC) 201x?

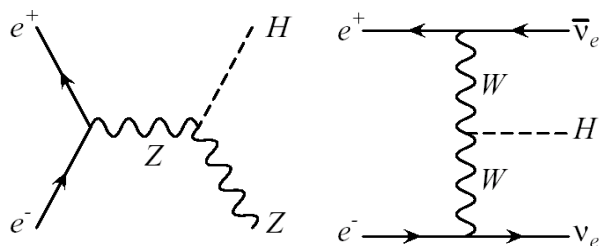
- 電子陽電子リニアコライダー

衝突エネルギー 500-1000GeV
 ルミノシティ 100-1000 fb⁻¹/yr

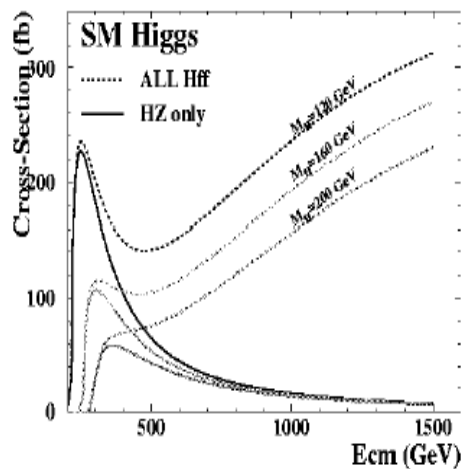
単純なキネマティクス
 少ないバックグラウンド
 偏極電子(陽電子)が使える



ヒッグスボソンの生成

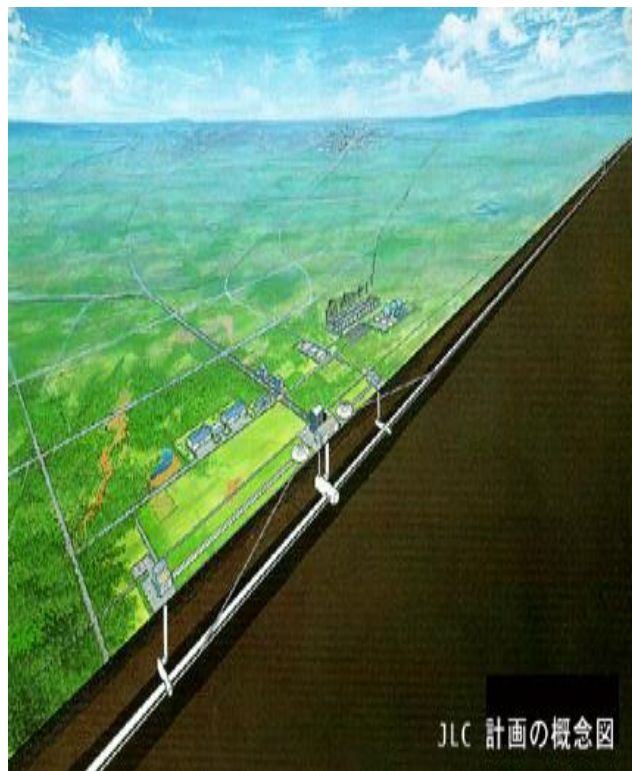


$\sigma \sim 200 \text{ fb}$



10万個程度のヒッグスができる

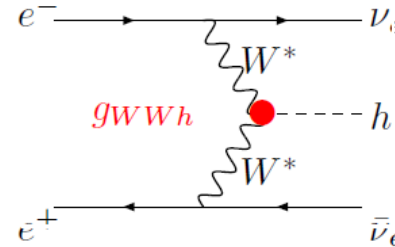
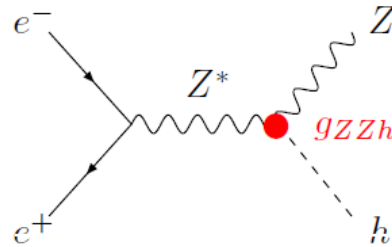
精密測定が可能



ILC 計画の概念図

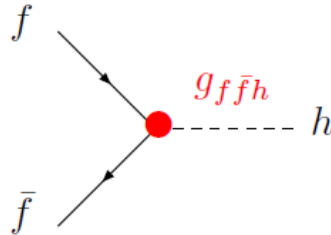
ILCでのヒッグスの相互作用の測定

ゲージ場との相互作用



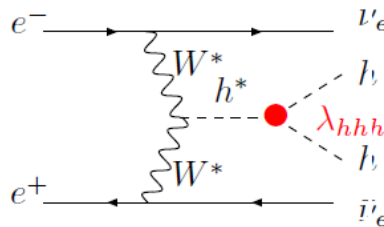
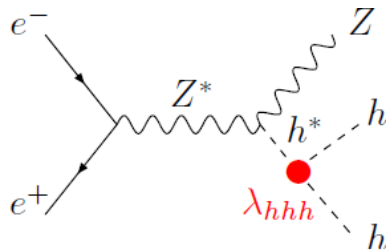
$$\frac{\Delta\lambda_{VVh}}{\lambda_{VVh}} \sim \mathcal{O}(1)\%$$

フェルミオンとの相互作用



$$\frac{\Delta\lambda_{hff\bar{f}}}{\lambda_{hff\bar{f}}} \sim (\text{a few-several})\%$$

ヒッグス自己相互作用



$$\frac{\Delta\lambda_{hhh}}{\lambda_{hhh}} \sim \mathcal{O}(10)\%$$