

軽いヒッグスの物理

兼村晋哉 富山大学理学部

シンポジウム「ヒッグスとコライダー」日本物理学会秋季大会
京都産業大学、2012年9月12日

序：電弱対称性の自発的破れ

素粒子標準模型における2つの大きな柱

1. ゲージ原理：素粒子の相互作用 $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$
実験でよく検証されてきた

2. 電弱ゲージ対称性の自発的破れ

$$v = \left(\frac{1}{\sqrt{2}G_F} \right)^{1/2} \simeq 246\text{GeV} \quad \text{既知} \quad \rightarrow \quad Q^A |0\rangle \neq 0$$

ヒッグス機構：NGボソンを吸収してW, Zが質量獲得

カイラル対称性の破れ：クォーク・レプトンが質量獲得

$U(1)_{em}$

ヒッグス
セクター

ヒッグスセクターの正体は何か？ よく解っていない

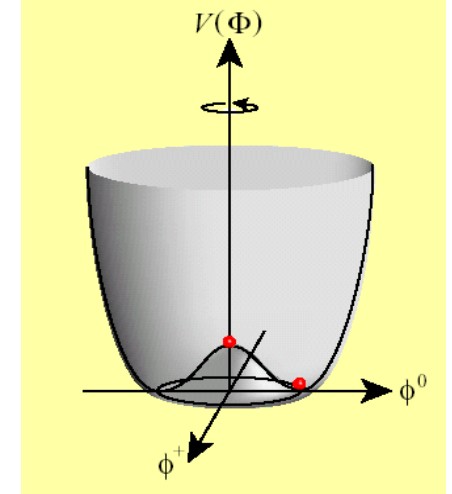
LHC実験で125GeVに新粒子が発見された：すべてはここから始まる！

序：標準模型のヒッグスセクター

アイソスピン2重項 スカラー場 が $I = \frac{1}{2}, Y = 1$ の最小形

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

$\mu^2 < 0$ \longrightarrow $\langle \phi \rangle = v \simeq 246 \text{ GeV}$



素粒子の質量起源

ヒッグス機構

湯川結合

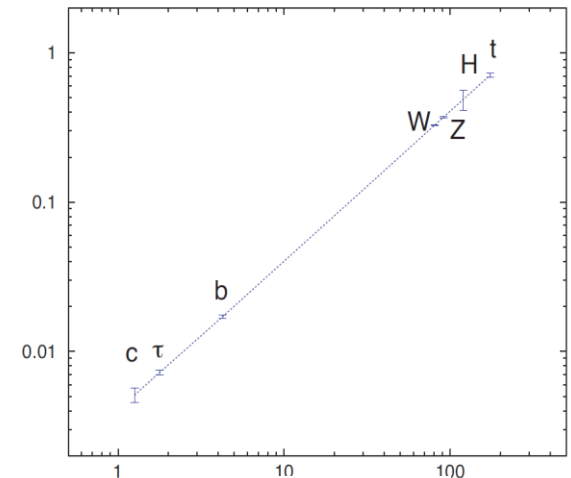
自己結合

$$m_W = \frac{g}{2} v$$

$$m_f = \frac{y_f}{\sqrt{2}} v$$

$$m_H = \sqrt{2\lambda} v$$

ヒッグスとの結合定数



素粒子の質量

質量と結合定数の比にユニバーサルな関係がある

序： SM Higgs = Just a guess!

- SMヒッグスはくりこみ可能性の下で3つの単純な仮定を置いた(スカラー場、2重項1個、 $\mu^2 < 0$)
- SMヒッグスの仮定には原理なし
→新物理学に伴う拡張ヒッグスモデルの可能性
- ヒッグスセクターに関する3つの質問
 - ヒッグスセクターの本質(素スカラー場、複合場)
 - ヒッグスセクターの形(Minimal/Non-minimal)
 - ヒッグスセクターのダイナミクス(How EWSB?)

序 : Beyond the Standard Model

物理法則の統一的理解

- 大統一パラダイム
- 湯川の構造(フレーバー)

標準模型のヒッグスの問題

- 階層性問題

標準模型で説明できない様々な現象

- バリオン数生成問題
- ニュートリノ質量問題
- 暗黒物質問題
- インフレーション
- 暗黒エネルギー

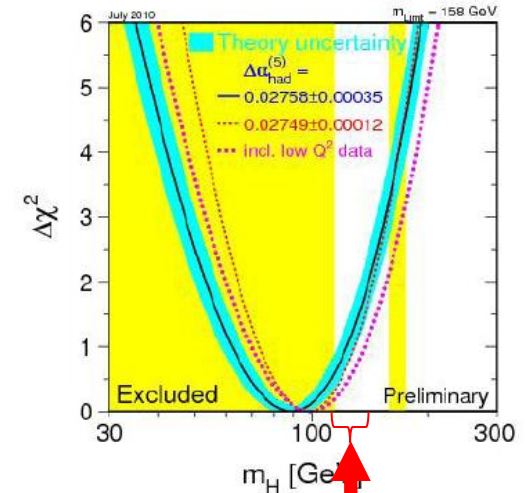
BSMの**新物理模型**が必要

どのスケールに？

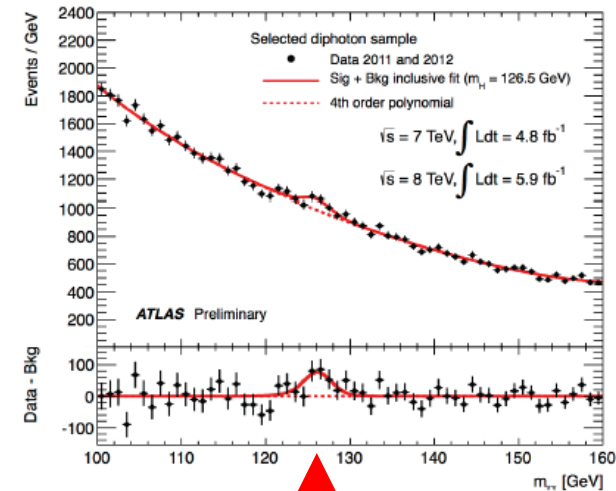
これらの問題を解決するテラスケール新物理シナリオの中には、ヒッグス物理が本質的な役割を果たしているモノも多い

2012年7月

- LHCが**125GeV**に新粒子を発見
 - LEPが示唆する「軽い」ヒッグスの質量領域
 - 崩壊モードの情報
- 今の所、他の新物理粒子(超対称粒子等)は発見されていない



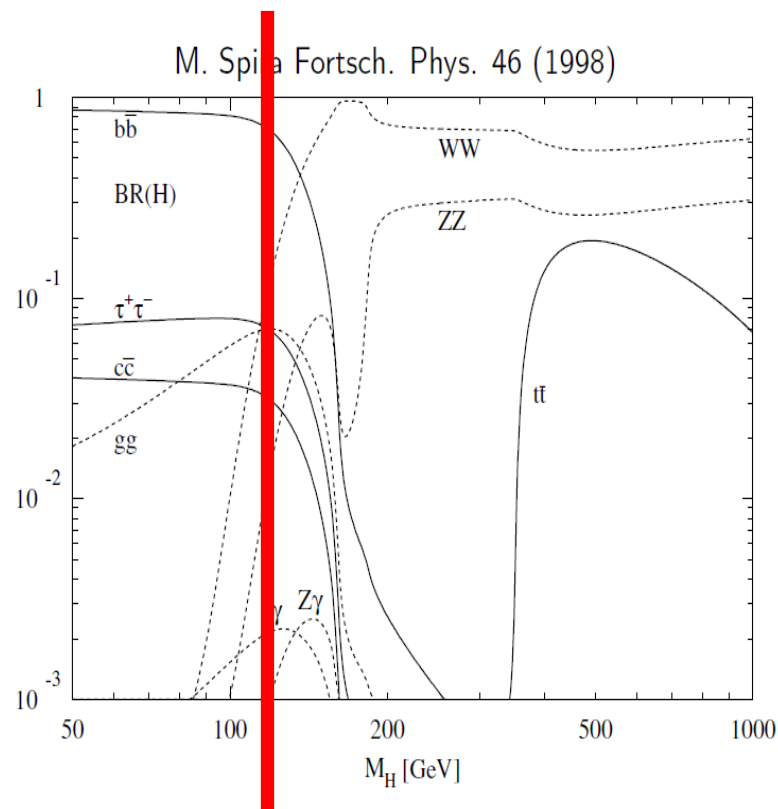
SMヒッグス質量の許容領域



新粒子発見！

序： 軽いヒッグスの物理

- 125GeVの意味するところは？
- 本当にヒッグスなのか？
 - SMヒッグスか？
 - 拡張されたヒッグスモデルに属するSM的ヒッグス粒子？
- 新物理学モデルとの関係は？
- 新現象との関係は？



色々な崩壊モード
を研究できる

[1] 新粒子は発見される前に質量が解っていた

精密測定 × 輻射補正計算
= 新粒子質量の間接測定

ローパラメータ

$$\rho = \frac{M_W}{M_Z \cos^2 \theta_W} = 1$$

輻射補正

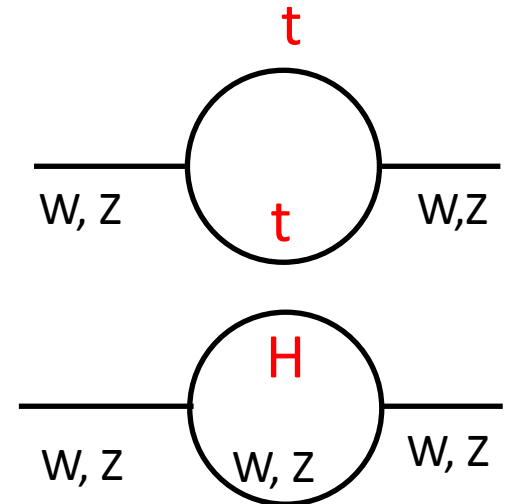
$$\Delta\rho = 4\sqrt{2}G_F [\Pi_T^{33}(p^2 = 0) - \Pi_T^{11}(p^2 = 0)]$$

トップクォークとヒッグスの効果

$$\Delta\rho \simeq \alpha\Delta T \simeq \frac{3G_F}{8\sqrt{2}\pi^2} \left(m_t^2 - M_Z^2 \sin^2 \theta_W \ln \frac{m_H^2}{m_W^2} \right)$$

トップは2乗

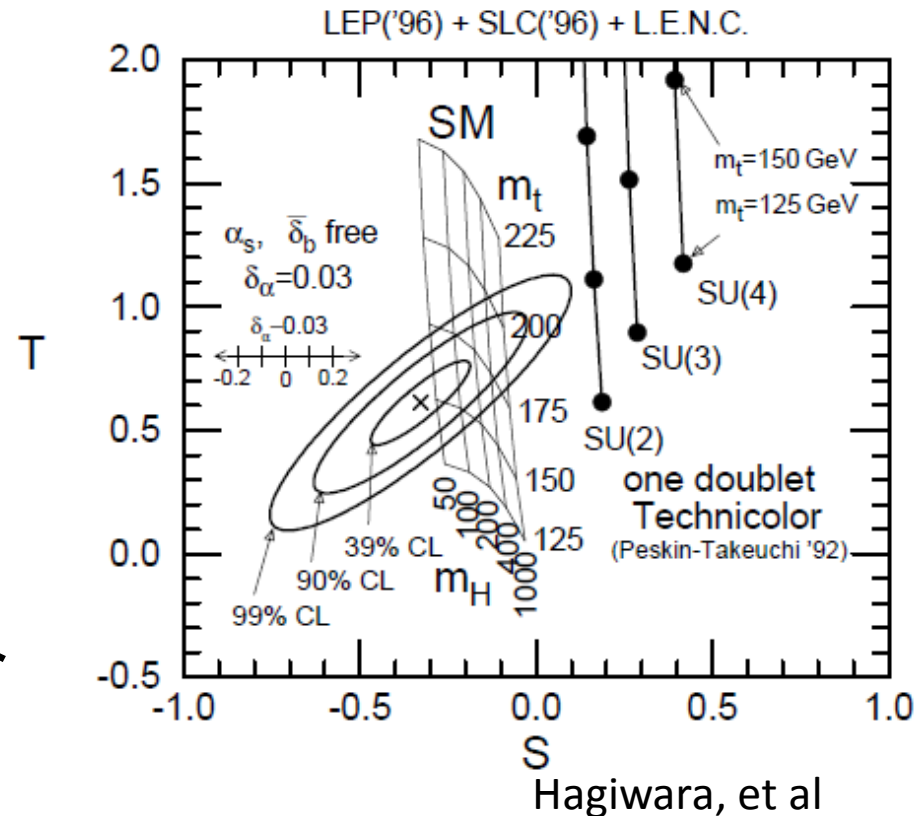
ヒッグスはログ



粒子は発見前に質量が解っていた！

トップクォークの場合

- ローパラメータ (Tパラメータ) への寄与が**質量の2乗**
- ヒッグス質量の寄与はlogなのでとりあえず後回し
- LEP1実験 (レプトンコライダー) の精密実験の結果と比較してトップ質量は**150-200 GeV**に絞られていた
- 1994年トップクォークがテバトロン (ハドロンコライダー) で発見された！ (**約170 GeV**)



$$\alpha \Delta T_t \simeq \frac{3G_F}{8\sqrt{2}\pi^2} m_t^2$$

同じことはヒッグス場でも繰り返された

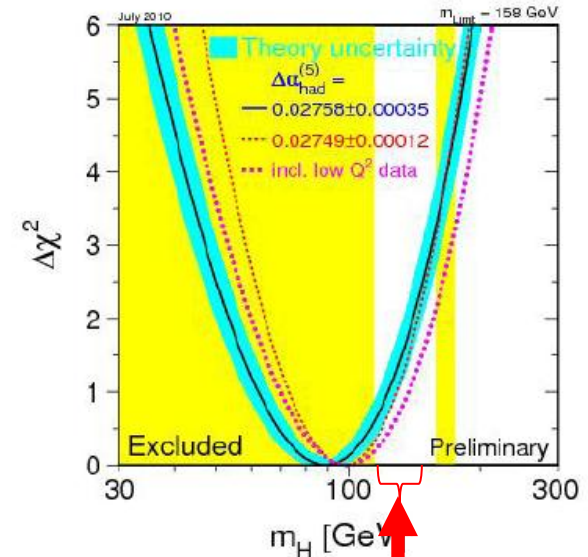
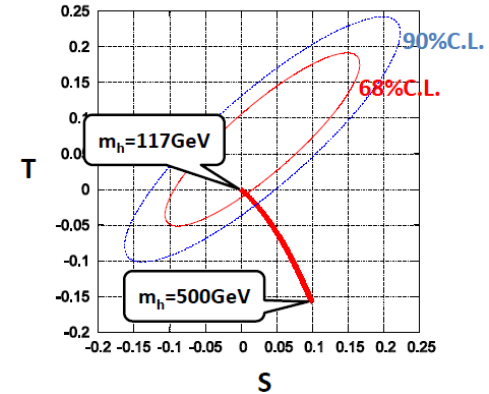
ヒッグス質量の間接測定

- トップ質量は今度はインプット
- 電弱パラメータはヒッグス質量のみの関数

$$\alpha\Delta T_H \propto -\ln \frac{m_H^2}{m_W^2}$$

- LEP2の精密測定と比較
- 114GeVから約150 GeV程度以下と予想

LHCで125GeVに新粒子発見！



LEP Electroweak Working Group 2010
SMヒッグス質量
の許容領域

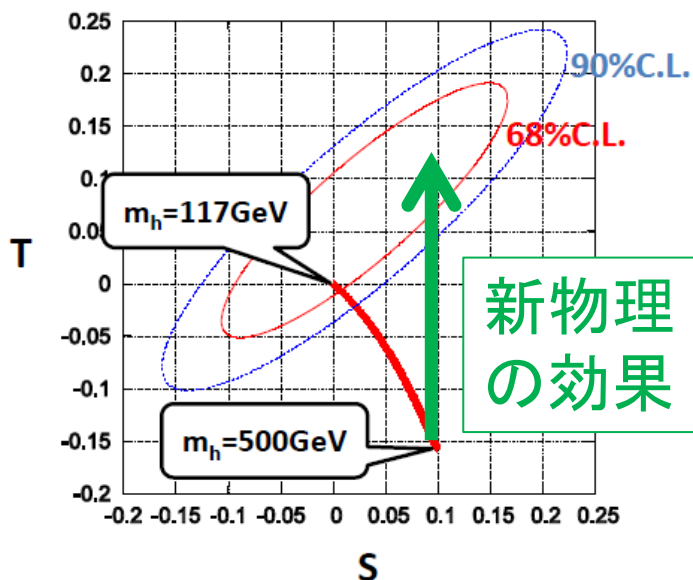
LEPと無矛盾な重いヒッグスの可能性 もあった

$$\Delta m = m_A - m_{H^\pm}$$

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

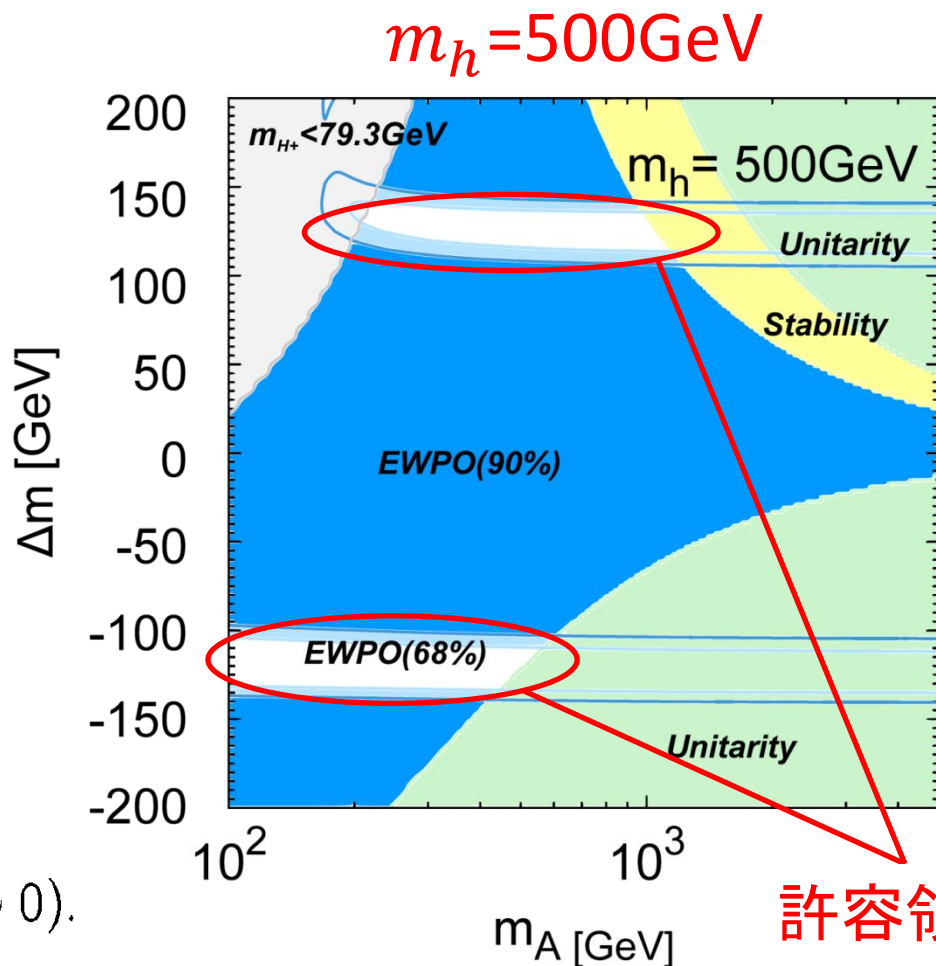
$$m_A^2 = m_{H^\pm}^2 = M^2$$

例えば付加的な新物理
効果があれば「重い」ヒッ
クス場の可能性もあった



2重項2個の拡張ヒッグス模型の場合

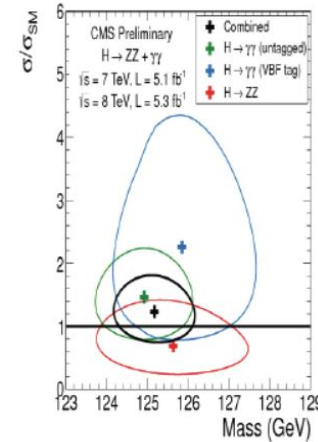
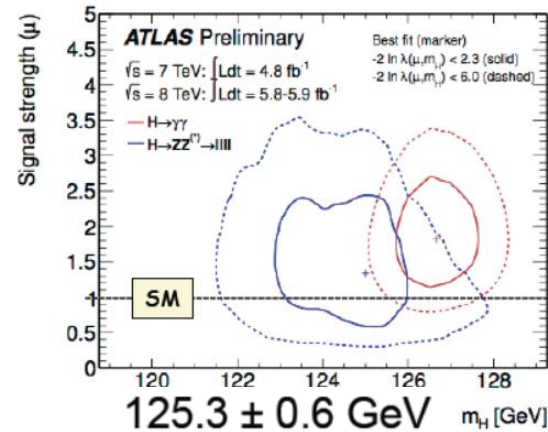
$$\Delta T_{\text{Higgs}} \sim -\ln \frac{m_h^2}{M_W^2} + \frac{(m_A^2 - m_{H^\pm}^2)^2}{M_W^2 m_A^2} (\sim 0).$$



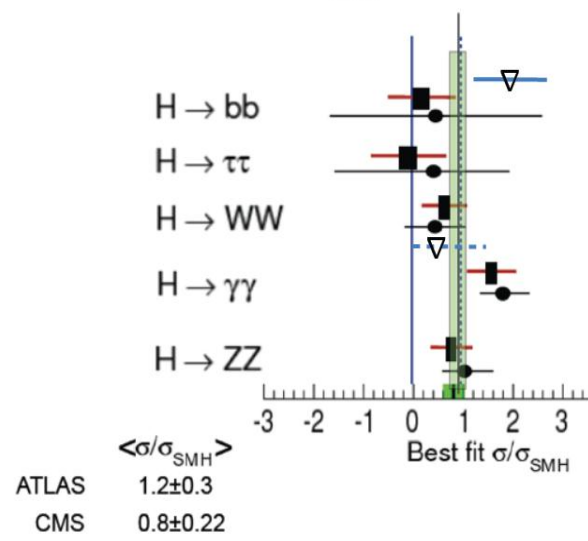
許容領域

LHCが決着をつけた

- 125GeVに新粒子！
- SMを仮定して電弱精密データから予見されていたヒッグスの質量領域に**一致**
- これがヒッグス場だとすると...
 - 標準模型がヒッグスセクターでも「概ね」正しいことを示している
 - 拡張されたヒッグスセクターだとしても、125GeVに**SM的なヒッグス場**を含む



$\langle \sigma/\sigma_{SMH} \rangle = 0.94 \pm 0.18$



ATLAS ●
 CMS ■
 Tevatron ▽

ATLAS $bb \pi WW \sim 5 \text{ fb}^{-1}$
 CMS $bb \pi WW \sim 10 \text{ fb}^{-1}$

ATLAS $\gamma\gamma ZZ \sim 10 \text{ fb}^{-1}$
 CMS $\gamma\gamma ZZ \sim 10 \text{ fb}^{-1}$

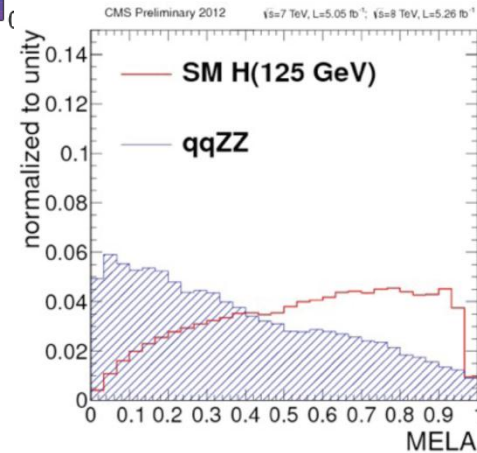
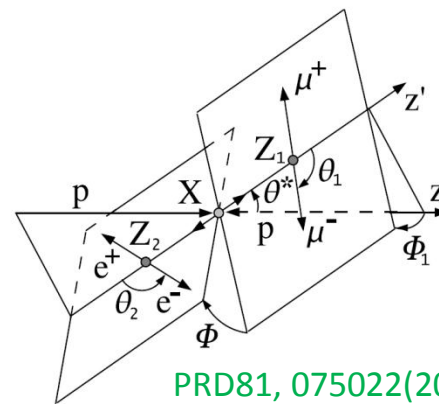
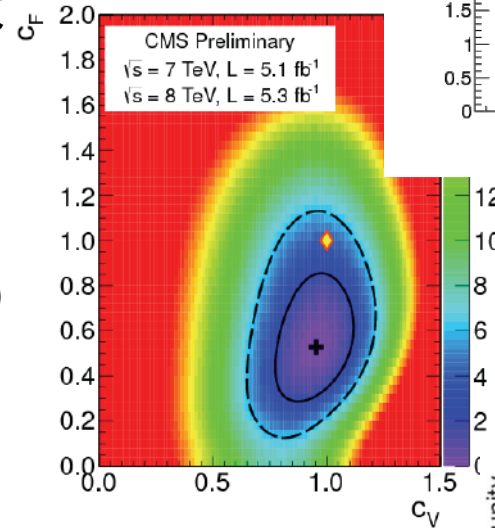
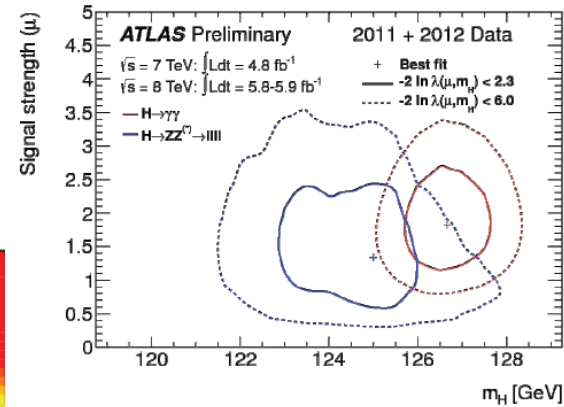
Hawkins
 Incandela
 Shalhout

125GeV新粒子は本当にヒッグスか？

1. $\gamma\gamma$ モードでの共鳴：新粒子は**スピン0、2**
2. WWモードが標準模型の値と $O(1)$ で一致
 弱結合なら HWW と思ってよい
 強結合なら $(\varphi/\Lambda)F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$ の可能性も
 φ : ヒッグス以外のスピン0、2の粒子
3. ZZへの崩壊モード($e^+e^-\mu^+\mu^-$ の角分布)
 hZZ (縦波)と $(\varphi/\Lambda)F_{\mu\nu}F^{\mu\nu}$ (横波)を**区別**
しつつある

ヒッグス(EWSBに関与する粒子)
 の可能性が高い

本当に“SM”のヒッグスかどうか？



LHC実験結果はSMとコンシステント

125GeVにヒッグスと矛盾しない新粒子
他に新粒子の兆候なし

標準模型の125GeVのヒッグスと仮定した場合、
ループレベルまで含めてSMと矛盾しない結果

自然はヒッグスセクターを含めても標準模型が良い近似！

次は、より高い精度で新物理探索へ

[2] 標準模型とヒッグス場の質量

- ヒッグス質量はSM最後のパラメータだった
- その質量はヒッグスポテンシャルの物理、ダイナミクスと関係

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

軽いヒッグス = 弱結合

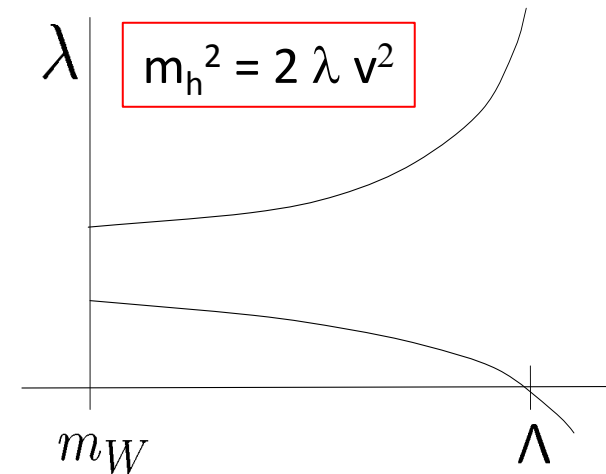
重いヒッグス = 強結合

$$125\text{GeV} \Leftrightarrow \lambda=0.13$$

標準模型の適用限界

標準理論があるエネルギースケール Λ まで成り立つと要請

- ランダウポールが無い ($\lambda \neq \infty$)
- 真空が安定 ($\lambda > 0$)



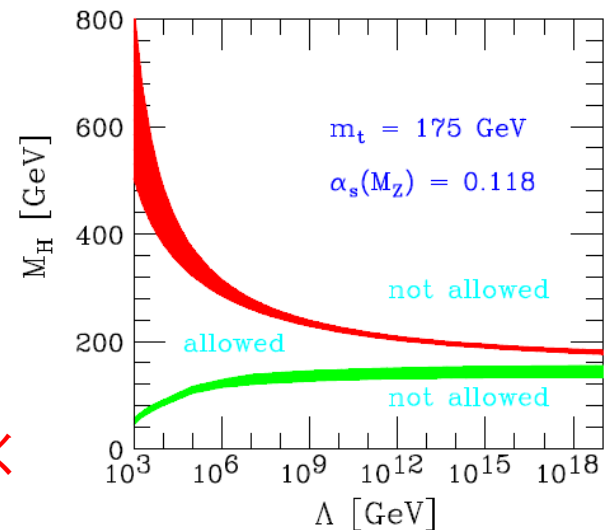
くり込み群方程式

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

λ が大きければベータ関数は正となり上に行く

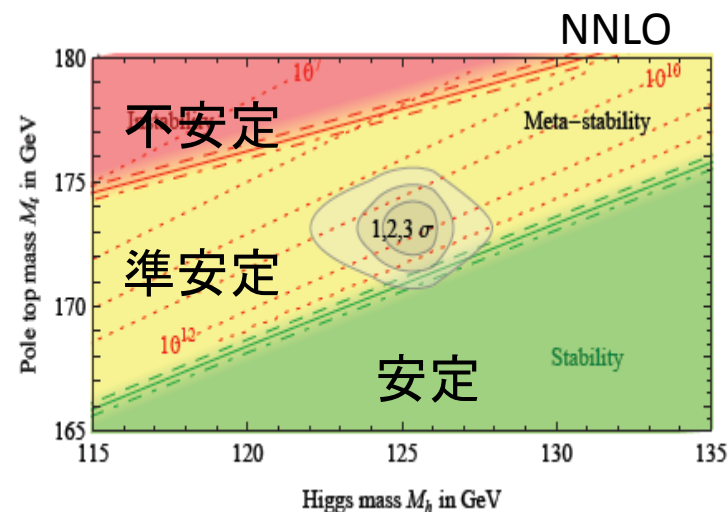
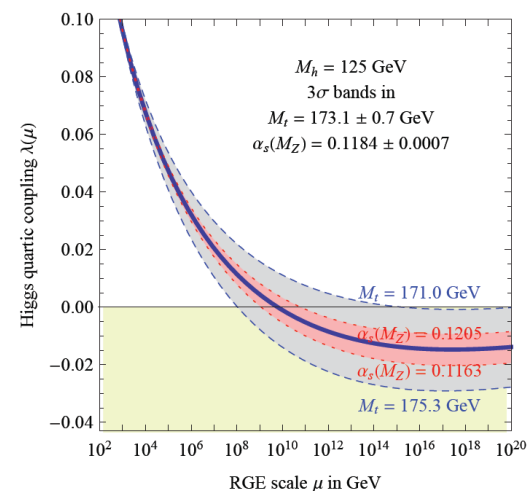
トップ湯川結合は $m_t = 175 \text{ GeV}$ から $O(1)$ と決まっている

λ が小さければトップの効果に負けて落ちていく



125GeVの標準模型ヒッグス場

- 標準模型ではプランクスケールまで理論がもたない
- 手前で $\lambda < 0$ に突入し真空安定でなくなる (2σ)
- SMを仮定するとプランクスケールでは真空は準安定
- プランクスケールまでにSMが書き換わる必要性の証拠？



[3] New Physics

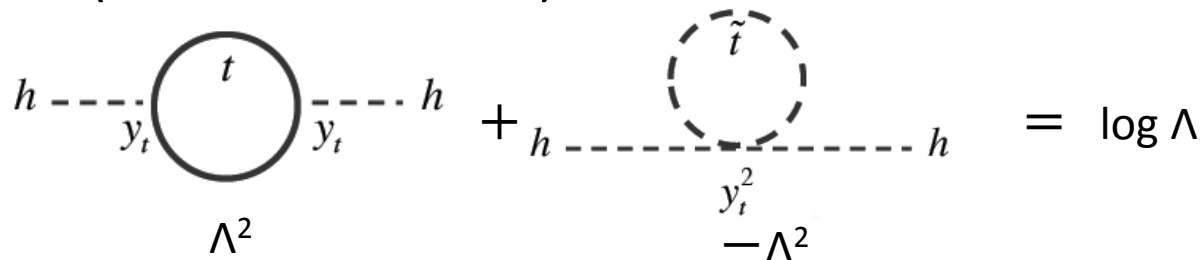
- | | TeV領域 | はるかに高い領域 |
|-------------|-------|----------|
| • 新物理のスケール | | |
| • 大統一のパラダイム | × | ○ |
| • 階層性問題 | ○ | × |
| • フレーバー問題 | △ | ○ |
| • バリオン数生成 | △ | △ |
| • ニュートリノ質量 | △ | △ |
| • 暗黒物質 | ○ | × |
| • 暗黒エネルギー | × | ○ |
| • インフレーション | △ | ○ |
- テラスケールに新物理の兆候があるはず
 - 少なくとも階層性問題と暗黒物質問題はテラスケール新物理を示唆
 - バリオン数生成、ニュートリノ微小質量、インフレーションもヒッグスの物理(テラスケールの物理)が役割を果たしている可能性がある

階層性問題

- SMヒッグスボソンは**スカラー場**
- ヒッグス質量の輻射補正:**2次発散**
- 高エネルギーまで理論成り立つとすると**ファインチューニング**の問題
- **テラスケール**でNew Physics (2次発散を消す)
例: SUSY (Boson \leftrightarrow Fermion)

$$\delta m_H^2 = \frac{\Lambda_{cutoff}^2}{16\pi^2}$$

Huge fine tuning if $m_H \ll \Lambda \sim \text{GUT scale}$



ヒッグスの本質の問題

新物理の方向性との対応

ヒッグスの本質と新物理模型

ヒッグス場の本質 \Leftrightarrow 新物理学のシナリオ

- スカラー場 $\langle \phi \rangle$ 超対称性
 - 複合場 $\langle \Psi \Psi \rangle$ 力学的対称性の破れ
 - 擬南部ゴールドストーンボソン リトルヒッグス機構
 - 余剰次元ゲージ場の成分 ゲージヒッグス統合模型
 -
- 其々のシナリオは特有の(拡張された)ヒッグスセクターを予言

ヒッグスセクター = 新物理学の窓

実験は未だTeV領域に新粒子見ず

新粒子(グルイノ、スクォーク等)の質量には強い制限

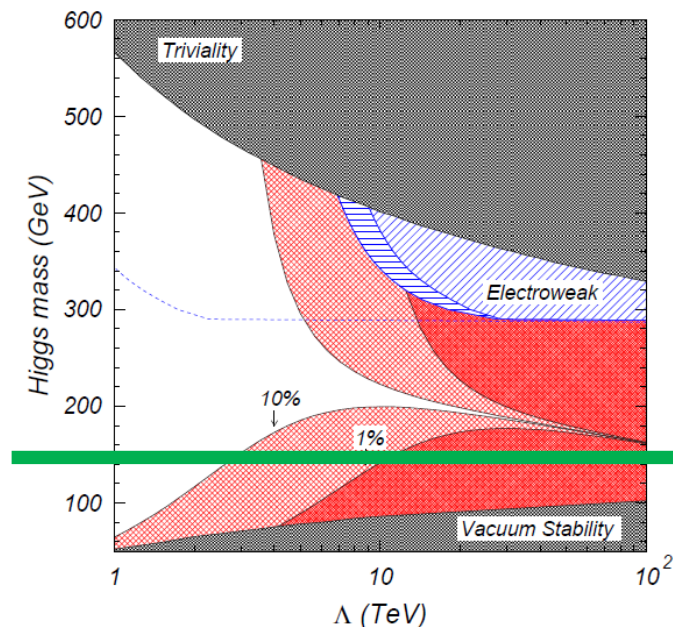
$$\begin{aligned} g q &\rightarrow \tilde{g} \tilde{q} \\ q q &\rightarrow \tilde{q} \tilde{q} \\ q \bar{q} &\rightarrow \tilde{q} \tilde{q}^* \end{aligned} \quad m_{\tilde{g}}, m_{\tilde{q}_{1,2}} > 1 - 1.5 \text{ TeV}$$

ストップ、スボトムは制限なし

ヒッグス場の本質(2次発散を解く物理)が直接見える物理のスケールは **TeVよりもっと高い可能性が出てきた**
 $\Lambda = 10 \text{ TeV}$ だとファインチューニング1% (100-99=1)

今後のLHC実験(14TeV)が待たれる

低エネルギーでのヒッグスセクターの形は？
一見SM的だが、**多様な拡張模型**の可能性有り



2 Higgs doublet model (2HDM)

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

Φ_1 and $\Phi_2 \Rightarrow h, H, A^0, H^\pm \oplus$ Goldstone bosons
 $\begin{array}{cccc} \uparrow & \uparrow & \uparrow & \text{charged} \\ \text{CPEven} & \text{CPodd} & & \end{array}$

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

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

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

$$m_{A^0}^2 = M_{\text{soft}}^2 - \lambda_5 v^2.$$

M_{soft} : soft breaking scale

$$\Phi_i = \begin{bmatrix} w_i^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(h_i + v_i + i a_i) \end{bmatrix} \quad (i = 1, 2)$$

Diagonalization

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

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

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

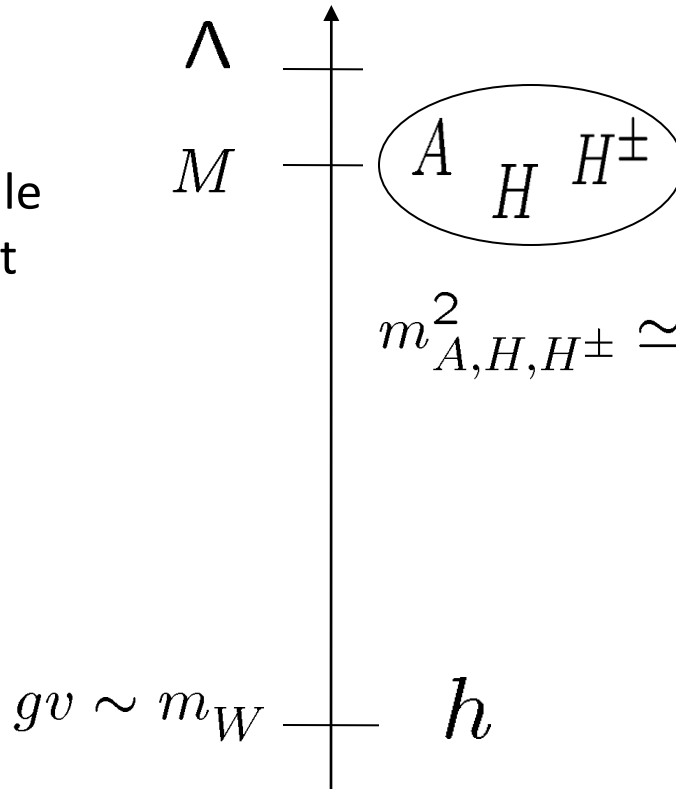
$$M_{\text{soft}} \left(= \frac{m_3}{\sqrt{\cos \beta \sin \beta}} \right):$$

soft-breaking scale
of the discrete symm.

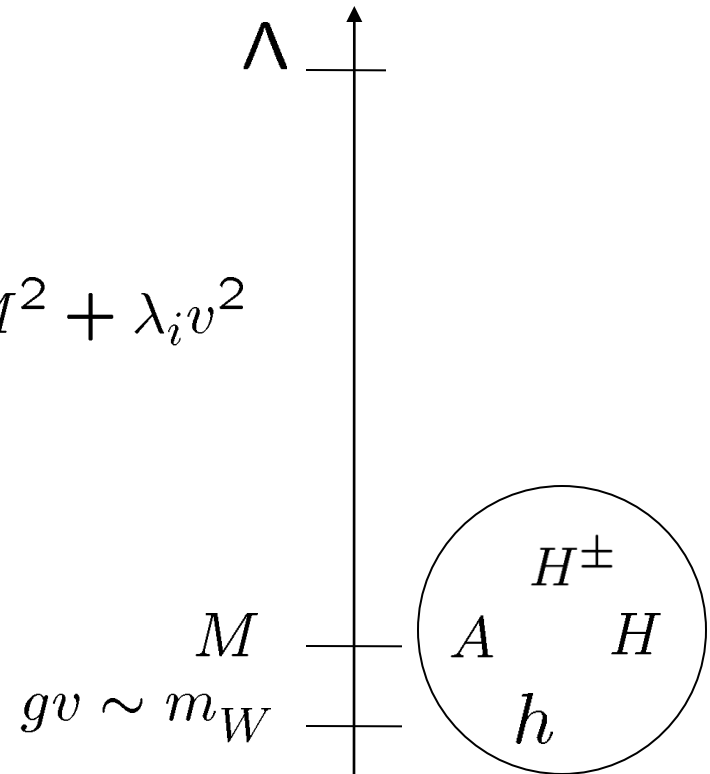
拡張ヒッグス模型 (2つのシナリオ)

Λ : Cutoff

M : Mass scale
irrelevant
to VEV



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



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

Non-decoupling effect

ヒッグスの形と新物理模型

ヒッグスセクターの形 \Leftrightarrow 新物理学のシナリオ

- SM的2重項+1重項
- SM的2重項+2重項(弱結合)
- SM的2重項+2重項(強結合)
- SM的2重項+3重項
-

B-Lが自発的に破れる模型

最小超対称模型, CPを破る模型,
ニュートリノ質量(輻射シーソー模型)

リトルヒッグス模型、
電弱バリオン数生成の模型

ニュートリノ質量模型(タイプ2シーソー)
Left-Right 模型

.....

其々のシナリオが特有の拡張されたヒッグスセクターに対応

ヒッグスセクター = 新物理学の窓

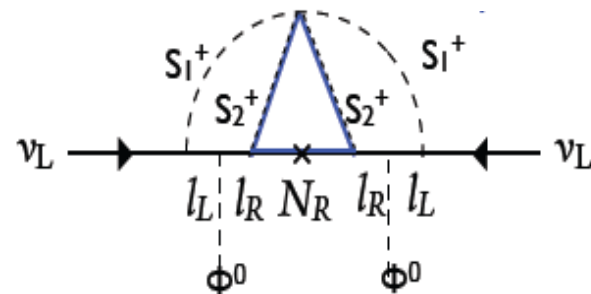
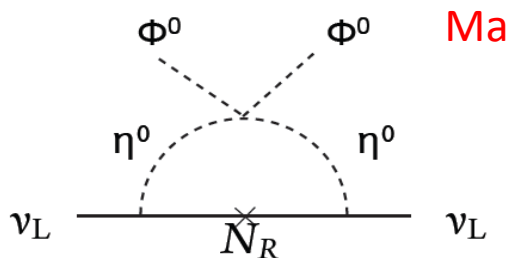
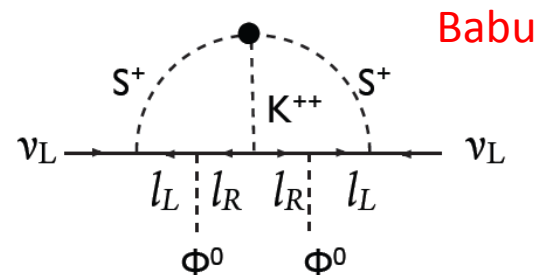
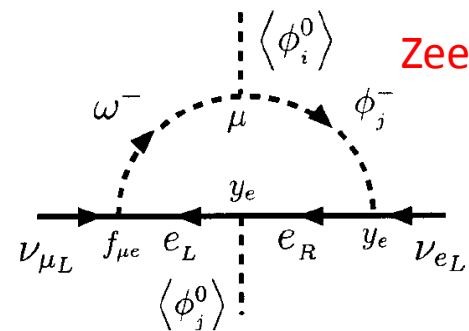
ニュートリノとヒッグス

- 輻射補正による微小質量の導出のシナリオ

- Zee (1980, 1985)
- Zee, Babu, Ma, Sarker,
- Krauss-Nasri-Trodden (2002)
- Ma (2006),

- 特徴

ニュートリノ微小質量はヒッグスの拡張とTeV新物理のループ効果で自然に導出
コライダーで検証可能

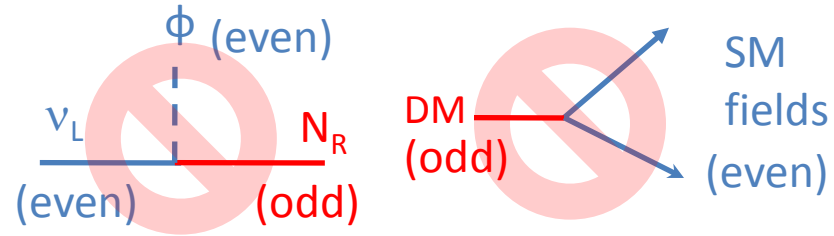


Krauss et al

輻射シーソー模型 with Z_2

右巻きニュートリノを導入

ツリーでのヒッグス場との湯川結合を禁止するため離散対称性 Z_2 を導入
一番軽い Z_2 奇粒子は安定 (DM候補)



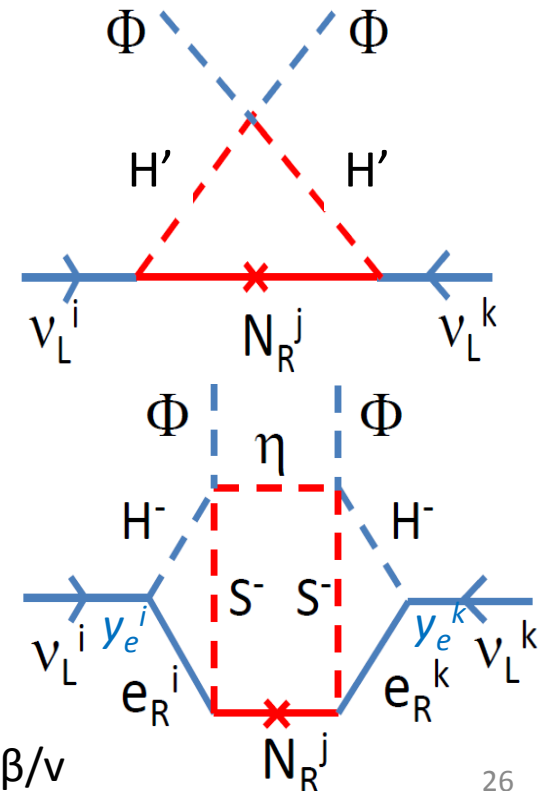
Ex) 1-loop Ma (2006) 最もシンプル

- SM + NR + Inert doublet (H')
- 暗黒物質 [H' or N_R]
 - H' case
 - N_R (LFV and Ωh^2 not compatible)

Ex) 3-loop Aoki, SK, Seto, PRL 102, 051805 (2009)

ニュートリノ微小質量が $O(1)$ 結合から

- 2HDM + $\eta^0 + S^+ + N_R$
- 暗黒物質 [η^0 (or N_R)]
- 電弱バリオン数生成



$$y_e^i = m_e^i \tan\beta/v$$

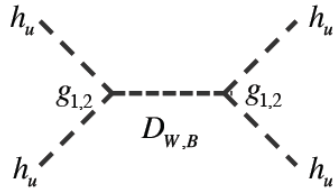
[4] 125 GeV ヒッグスと超対称性

ヒッグスポテンシャル $V = |D|^2 + |F|^2 + (\text{soft-breaking})$

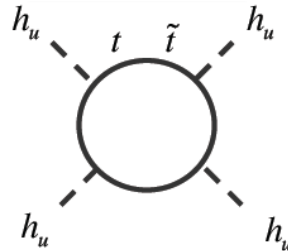
MSSM は 2HDM (H_u, H_d)

ヒッグス自己相互作用は D 項の寄与 (ゲージ結合) のみ

$$m_h^2 < m_Z^2 \cos^2 2\beta + \frac{3m_t^4}{2\pi^2 v^2} \left[\ln \frac{m_{\tilde{t}}^2}{m_t^2} + \frac{A_t^2}{m_t^2} \left(1 - \frac{A_t^2}{12m_{\tilde{t}}^2} \right) \right] \quad X_t = A_t - \mu/\tan\beta$$



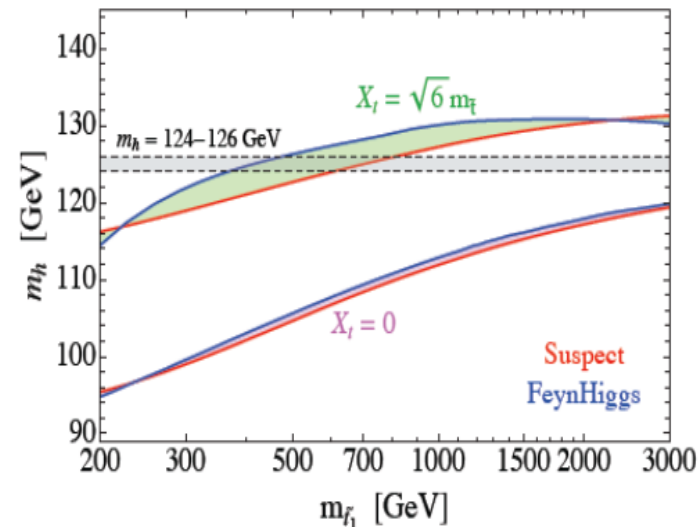
ループ効果



ツリーレベルでは Z の質量以下
125 GeV を実現するには トップ、
ストップループを利かすしかない

大きいストップ質量、
大きいストップレフトライト混合 A_t

MSSM Higgs Mass



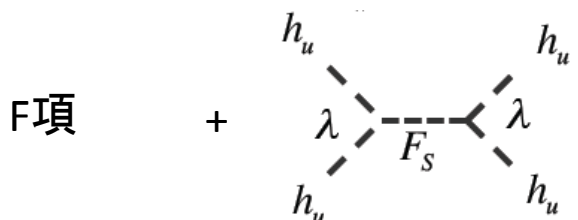
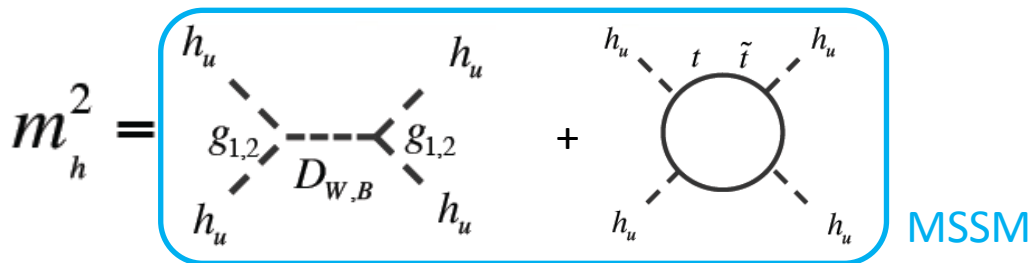
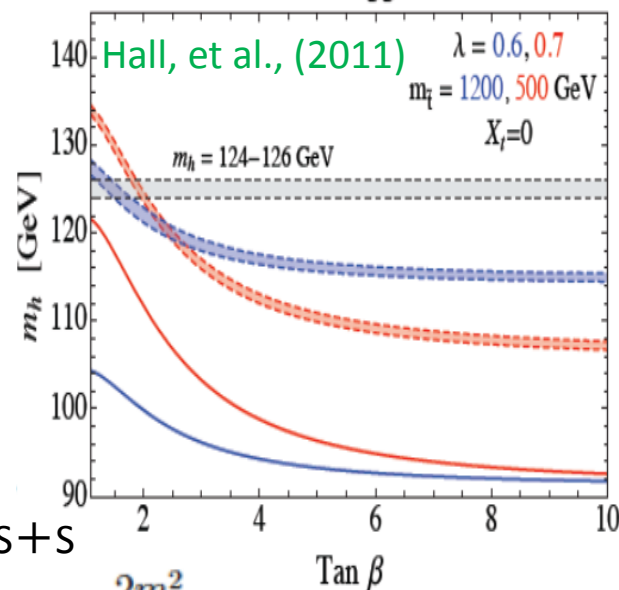
$M_{\text{SUSY}} \sim 10 \text{ TeV}$ ($A_t=0$) 階層性問題とのテンション!

拡張SUSY模型

新粒子の追加により新たなF項やD項やループ効果により質量を上げられる

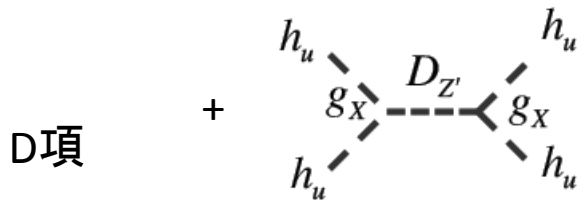
$$W = W_{\text{MSSM}} + \lambda_S S H_u H_d + \mu H_u H_d + \frac{M_s^2}{2} S^2$$

NMSSM Higgs Mass



1重項(S)、3重項(T)等の追加

例: NMSSM $\Delta m_h^2 = \frac{\lambda_S^2 v^2}{2} \sin^2 2\beta$

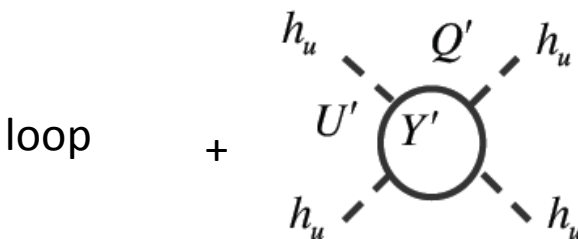


新たなゲージ対称性U(1)_X

例: MSSM+右巻きニュートリノ+S+S

$$\Delta m_h^2 \simeq 2g_X^2 x^2 (v_{H_u}^2 + v_{H_d}^2) \cos^2(2\beta) \frac{2m_S^2}{2m_S^2 + m_{Z'}^2}$$

Endo, Hamaguchi, Iwamoto, Yokozaki (2011)



ループを回るベクトル的マターの追加

MSSM + 10(Q', U', E') + 10(Q-bar', U-bar', E-bar')

$$\Delta m_h^2 = \frac{3Y'^4 v^2}{4\pi^2} \ln \frac{m_S^2}{m_F^2}$$

Moroi, Okada '92

電弱バリオン数生成

$$\frac{n_B}{s} = \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{s} = (6.21 \pm 0.16) \times 10^{-10}$$

この量の説明は素粒子物理の重要問題

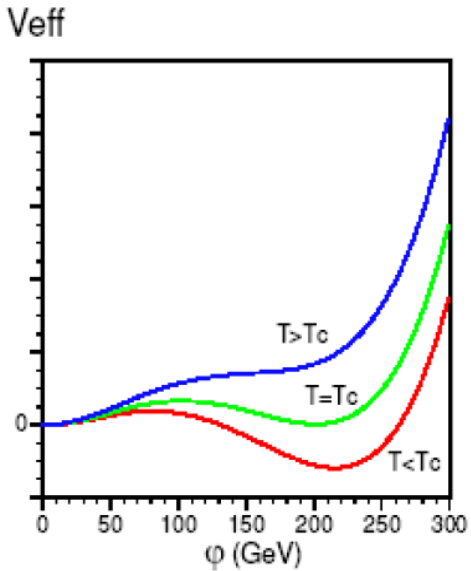
サハロフの3条件
 バリオン数非保存過程
 C, CPの破れ
 熱的非平衡の条件



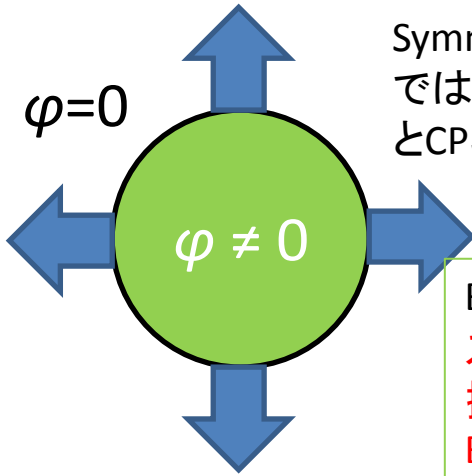
電弱バリオン数生成のシナリオ
 スファレロン効果
 湯川相互作用やその他の部分のCPの破れ
 電弱相転移が**一次的相転移**

スファレロン遷移の
 デカップリング条件

$$\phi_c / T_c > 1$$



Broken Phaseの泡が膨張



Symmetric Phase
 ではスファレロン遷移($\Delta B \neq 0$)
 とCP非保存によりB数が生成

Broken Phaseでは
 スファレロン遷移が
 抑制され生成された
 B数を凍結しなければ
 ならない

電弱バリオン数生成は**ヒッグス物理と密接なつながり**

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

電弱バリオン数生成

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

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

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

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

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

○標準模型では $m_h < 60$ GeV **排除!**

○125GeVのSM的ヒッグスを伴う

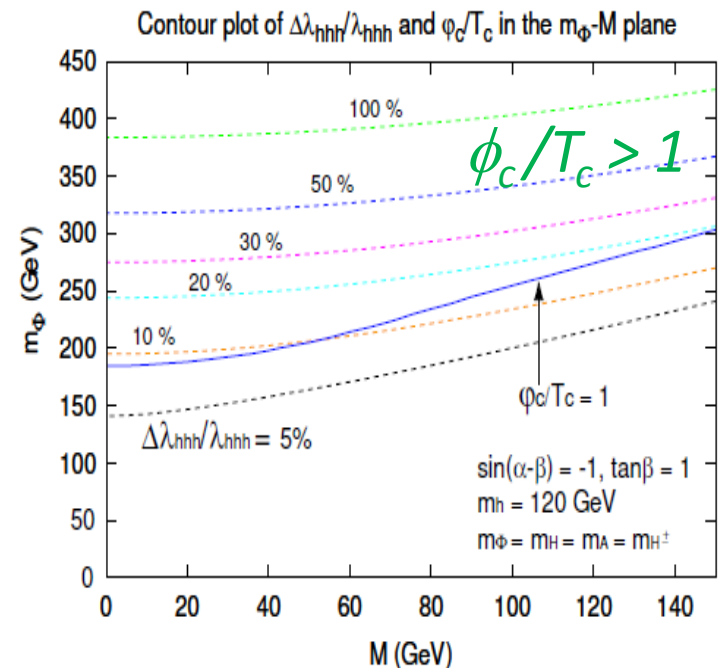
拡張ヒッグス模型 (例: 2HDM) 可能!

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

125GeVヒッグスの時、付加粒子との結合が
やや強結合になる(ポテンシャルが**強結合**)

同じノンデカップリング効果はゼロ温度の
 hhh 結合をずらす(20-30%以上)

電弱バリオン数生成は hhh 結合の測定で検証可能



SK, Okada, Senaha, 2004

どのようにモデルを区別するか

- ヒッグスの本質
 - 素スカラー場, 複合場(擬南部ゴールドストーン), 余剰次元, ...
- ヒッグスの形
 - SM, SM+S, SM+D, SM+T,
- ダイナミクス(弱結合か強結合か)
 - Weak and Light, Strong but Light

モデルの違い

125GeVヒッグスの結合定数 ($h\gamma\gamma$, hgg , hWW , hZZ , htt , hff , hhh) に対するSMからのずれ方の**パターンの違い**として出る

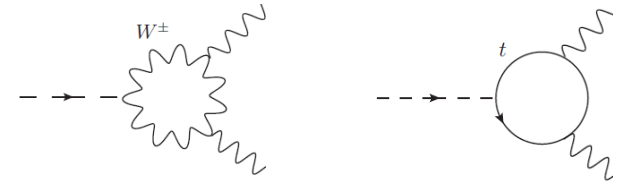
新粒子の量子効果: 1ループ過程である $h\rightarrow\gamma\gamma$, $h\rightarrow gg$ に大きなずれ
 hhh 結合にもノンデカップリング効果で大きな補正

混合 $h \Leftrightarrow \phi$: ゲージ結合、湯川結合に特有のずれ

Di-photon Decay Width

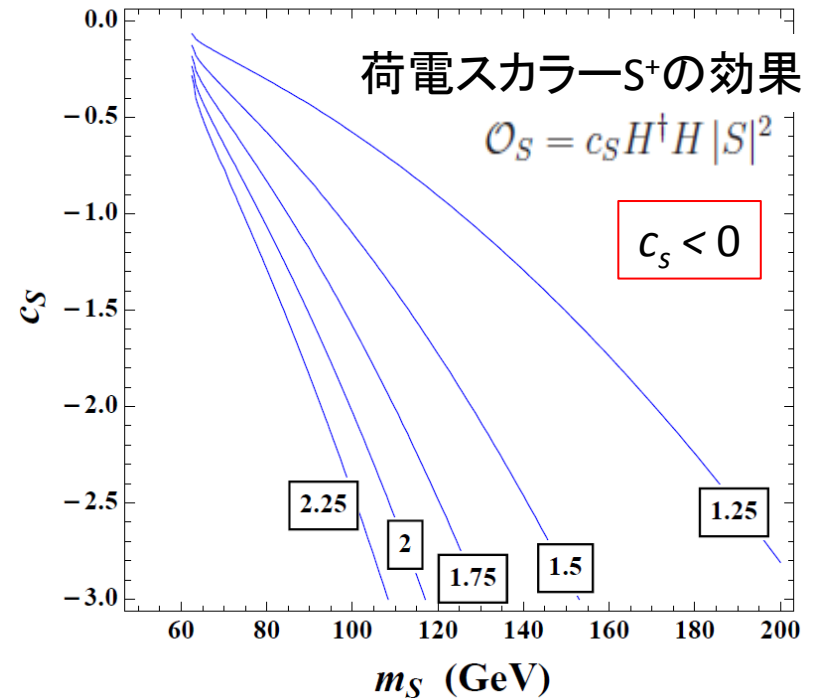
- Di-photonのデータの中心は factor 1.5-2 程度, SM値より大
- 大きい $\gamma\gamma$ シグナルを実現する新物理粒子
 - W' boson
 - Singly/Doubly charged scalars
 - New charged leptons
 -
- 様々な模型で実現できる

本当のずれかどうか
統計が増えるのを待つ

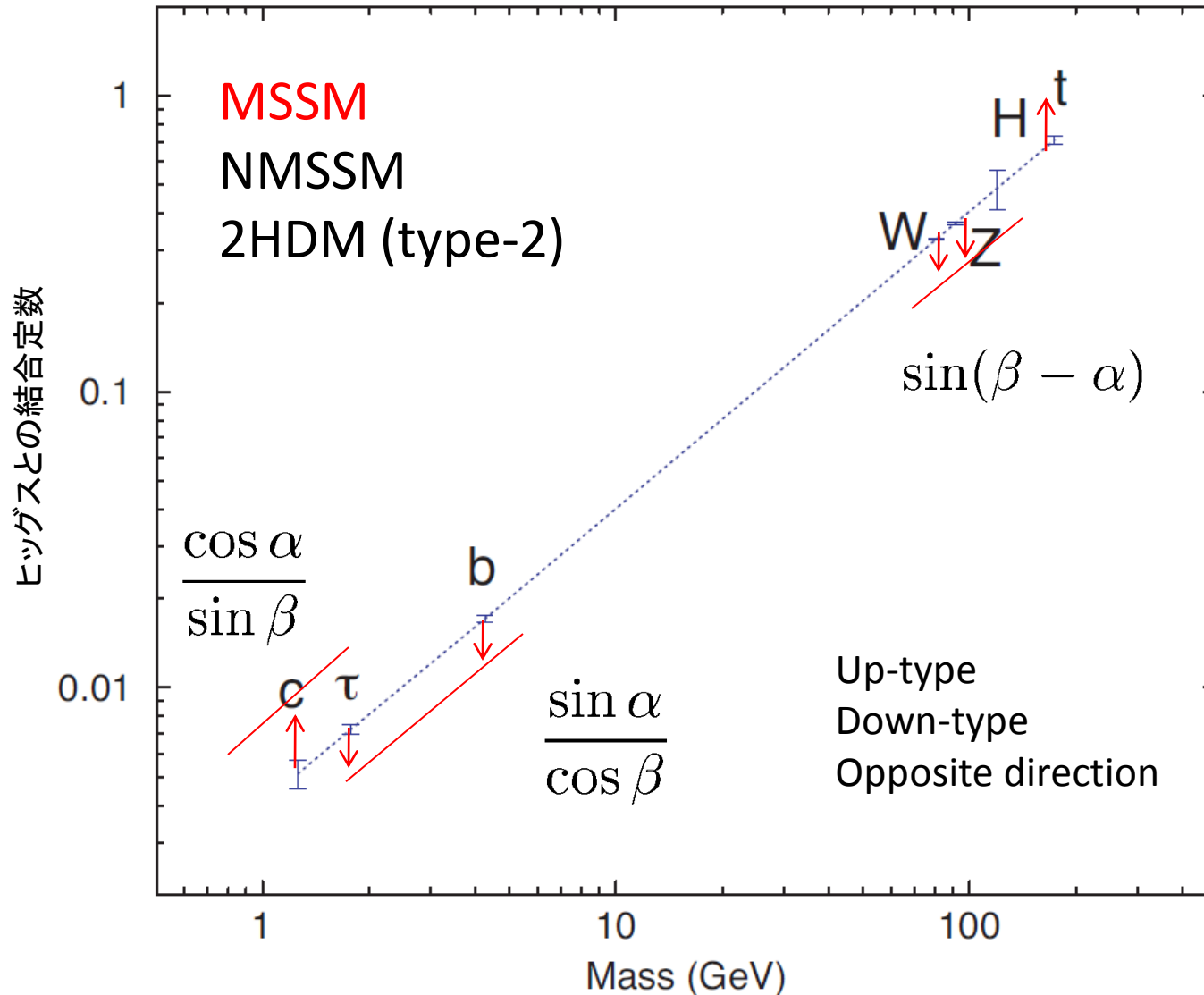


destructive

$R_{\gamma\gamma}$

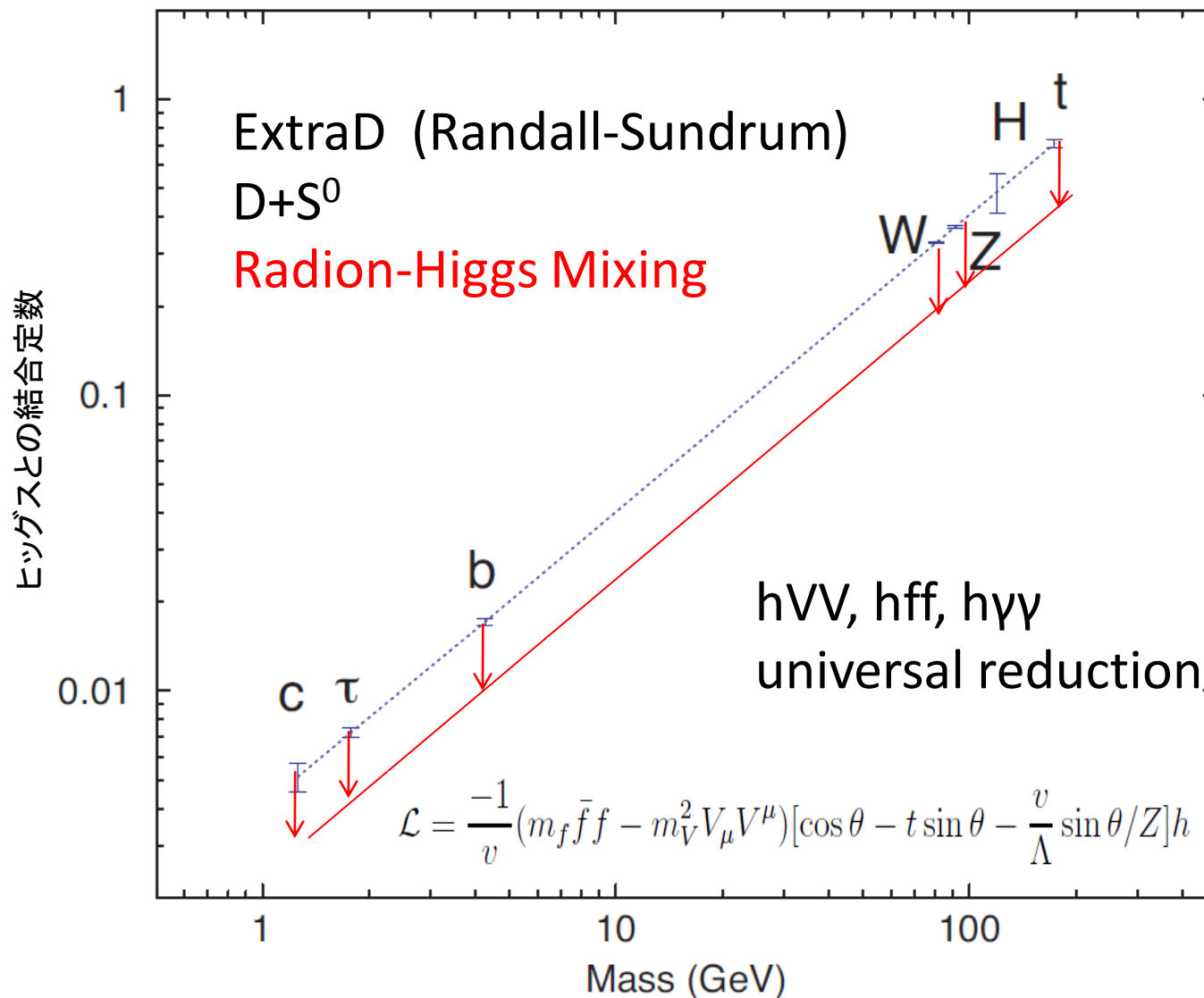


SMヒッグス結合からのずれ

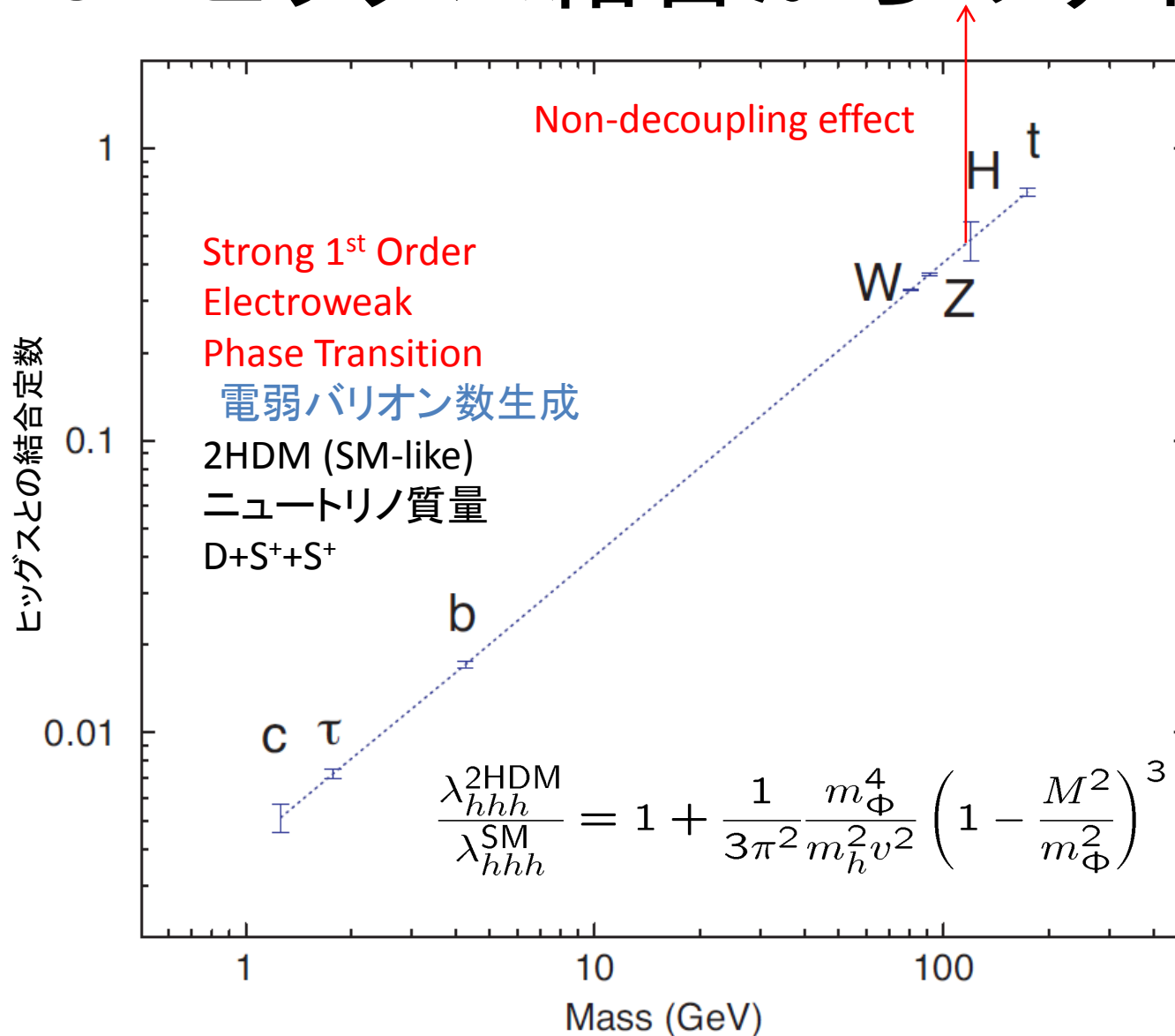


$$v_u^2 + v_d^2 = v^2$$

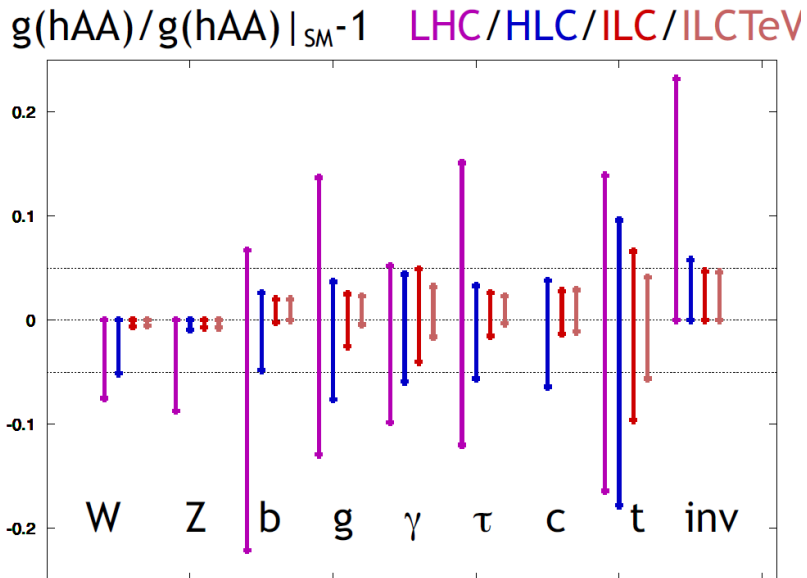
SMヒッグス結合からのずれ



SMヒッグス結合からのずれ



国際線形加速器が必要

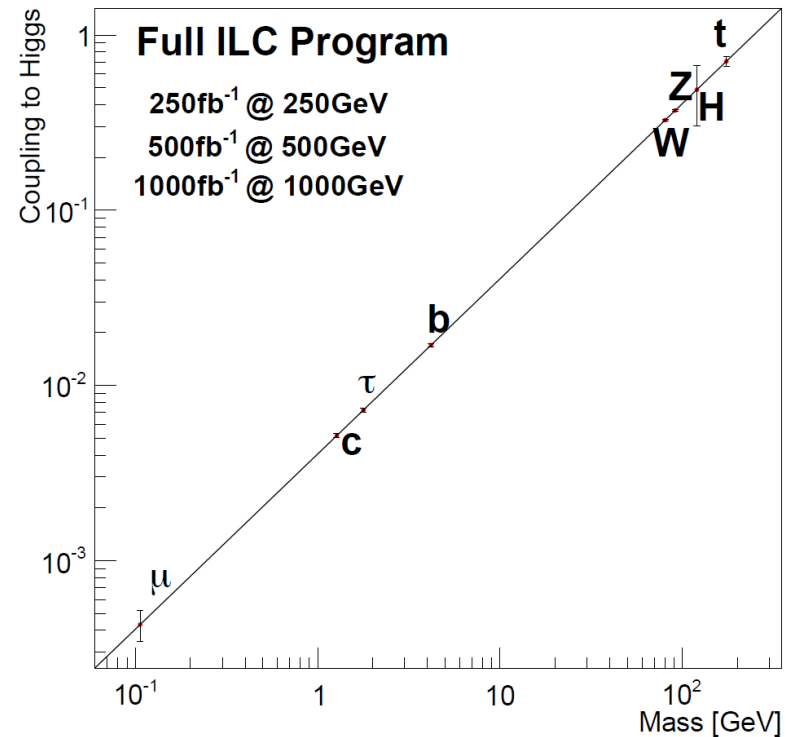


M. Peskin, 2012

O(few)% レベルの測定
 LHCでは難しいhhh結合、チャーム湯川、
 ミューオン湯川も計れる

素粒子質量起源の解明、新物理模型の仕分け

LEPがヒッグス質量を予見したようにILCも新物理のスケールを決定できる



まとめ

- 126GeVのヒッグスらしきものの発見で、素粒子の質量起源（電弱対称性の自発的破れのメカニズム）解明の糸口を得た
SM的ヒッグス（≠ SMヒッグス）
- ヒッグスセクターの構造と性質は、標準模型を超えた新物理理論と密接な関係にある
- 標準模型の限界の見極めと新物理（次世代ラグランジアン）確立のためにヒッグスセクターの詳細にわたる研究が必要
 - LHC実験で標準模型にない新粒子が見つかるかどうかは、模型に強く依存する（14TeV LHC, HL-LHCに期待）
 - 軽いヒッグスの徹底解明によって標準模型を超えた物理の方向性を決定できる
 - LHC実験での更なる新粒子発見と、今後のILCの精密測定で次世代ラグランジアンを特定すること
- ヒッグス物理による新物理探究は今後10–20年の物理

ヒッグス物理

＝新物理学の窓

ヒッグスポテンシヤル

ヒッグスセクターのダイナミクス

⇔ 新物理学のシナリオ

125GeVのSM的ヒッグスの存在の下で

- ・ダイナミクスが弱結合

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

超対称性(弱結合拡張ヒッグス模型)

Planck Scale まで見渡せる物理

Grand Unification

- ・ダイナミクスは高エネルギーで強結合

$$m_h^2 \neq 2 \lambda v^2$$

強結合拡張ヒッグス模型

摂動効果でニュートリノ質量生成

電弱バリオン数生成

コンポジット模型(擬南部ゴールドストン)

SUSY ファットヒッグス模型

125GeV 実現には結合定数が複数あるか、新原理が必要

ヒッグスセクター = 新物理学の窓