



# ヒッグスと新物理

瀬名波 栄問 (名古屋大)

2014年7月21日@ILC合宿

# アウトライン

- ・ 標準模型ヒッグス
- ・ ヒッグスと新物理
- ・ バリオン非対称宇宙
- ・ 暗黒物質
- ・ ニュートリノ質量
- ・ まとめ

# ヒッグス発見

2012年7月ヒッグスが発見された。

PDG:

Higgs Bosons —  $H^0$  and  $H^\pm$

$H^0$  Mass  $m = 125.9 \pm 0.4$  GeV

$H^0$  signal strengths in different channels <sup>[n]</sup>

Combined Final States =  $1.07 \pm 0.26$  (S = 1.4)

$W W^*$  Final State =  $0.88 \pm 0.33$  (S = 1.1)

$Z Z^*$  Final State =  $0.89^{+0.30}_{-0.25}$

$\gamma\gamma$  Final State =  $1.65 \pm 0.33$

$b\bar{b}$  Final State =  $0.5^{+0.8}_{-0.7}$

$\tau^+ \tau^-$  Final State =  $0.1 \pm 0.7$

[HTTP://PDG.LBL.GOV](http://pdg.lbl.gov)

Page 4

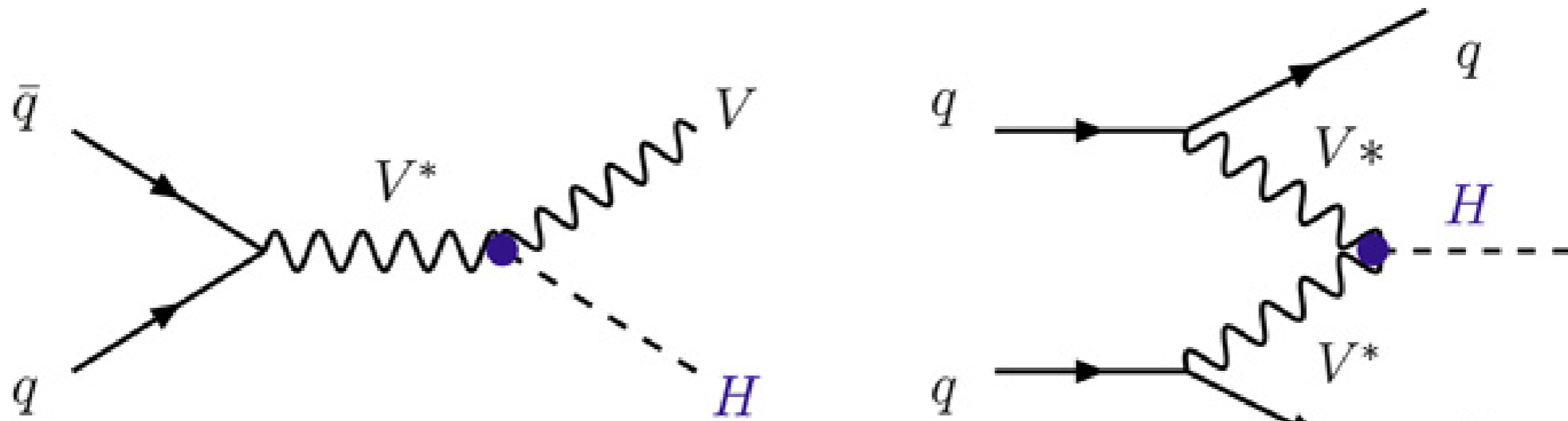
Created: 7/31/2013 15:19

最新結果では、

$$m_H = 125.36 \pm 0.37(\text{stat}) \pm 0.18(\text{syst}) \text{ GeV, (ATLAS)}$$

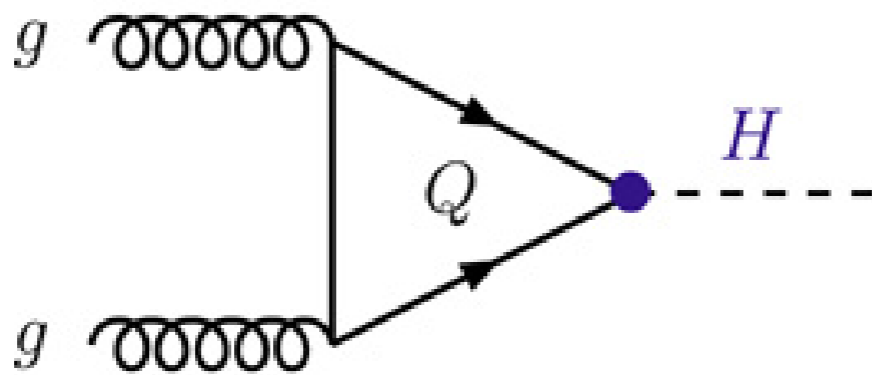
$$m_H = 125.03 \pm 0.30 \left[ \begin{array}{l} +0.26 \\ -0.27 \end{array} (\text{stat}) \begin{array}{l} +0.13 \\ -0.15 \end{array} (\text{syst}) \right] \text{ GeV, (CMS)}$$

# ヒッグス生成プロセス@LHC

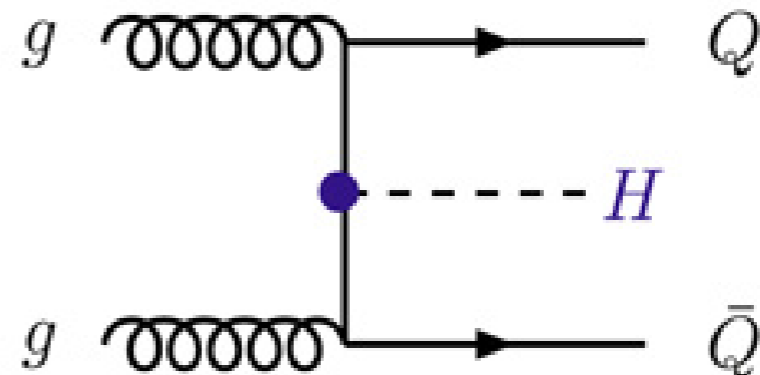


associated production (AP) w/ $V=W, Z$

vector boson fusion (VBF)



gluon fusion (ggF)



associated production w/ $Q=t, b$ ,

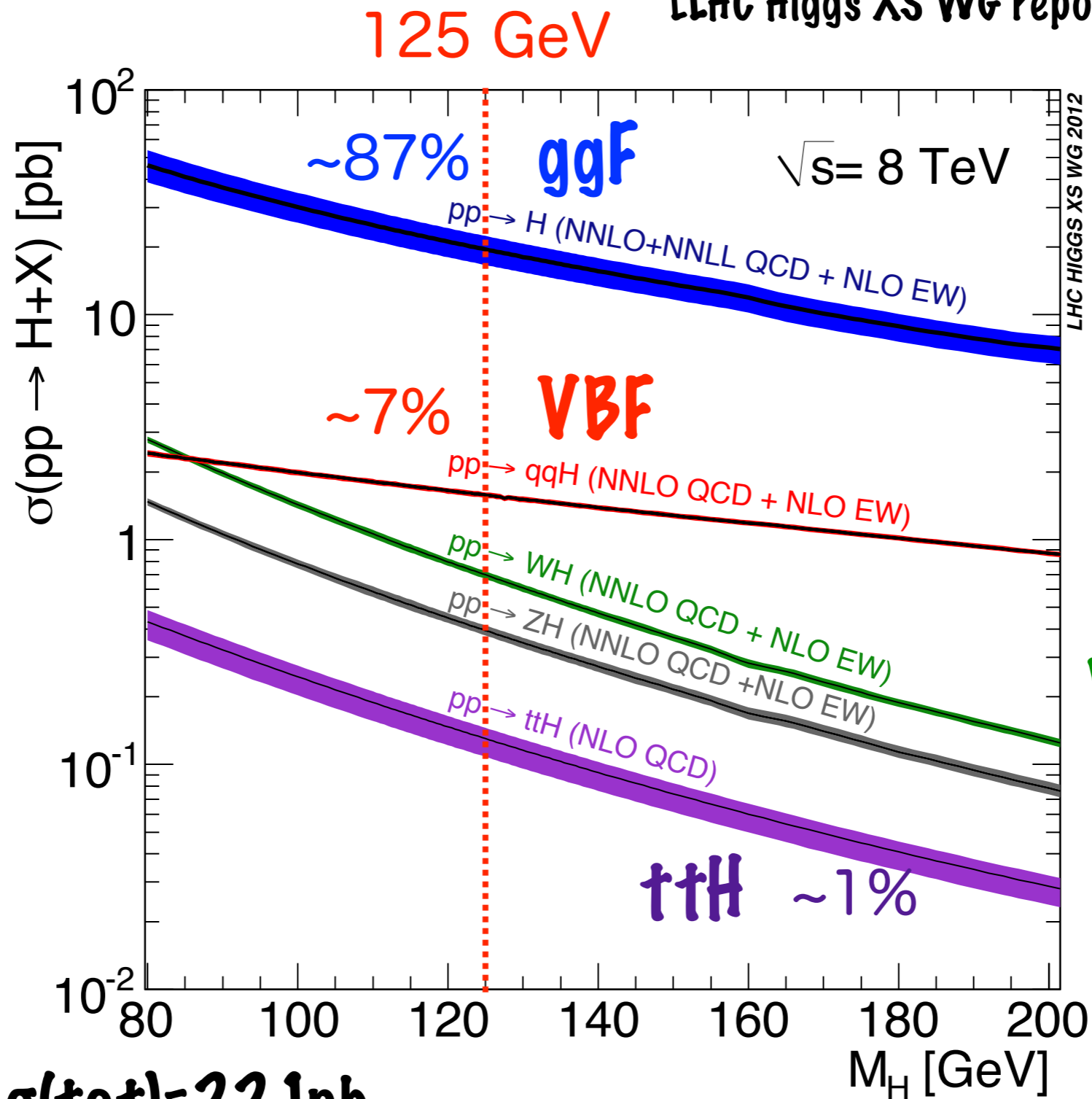
Fig. 3.1. The dominant SM Higgs boson production mechanisms in hadronic collisions.

Fig. from A. Djouadi, Phys.Rept. 457 (2008) 1



# ヒッグス生成断面積

[LHC Higgs XS WG report, arXiv: 1307.13471]



$m_h = 125 \text{ GeV}, \sigma(\text{tot}) = 22.1 \text{ pb}$

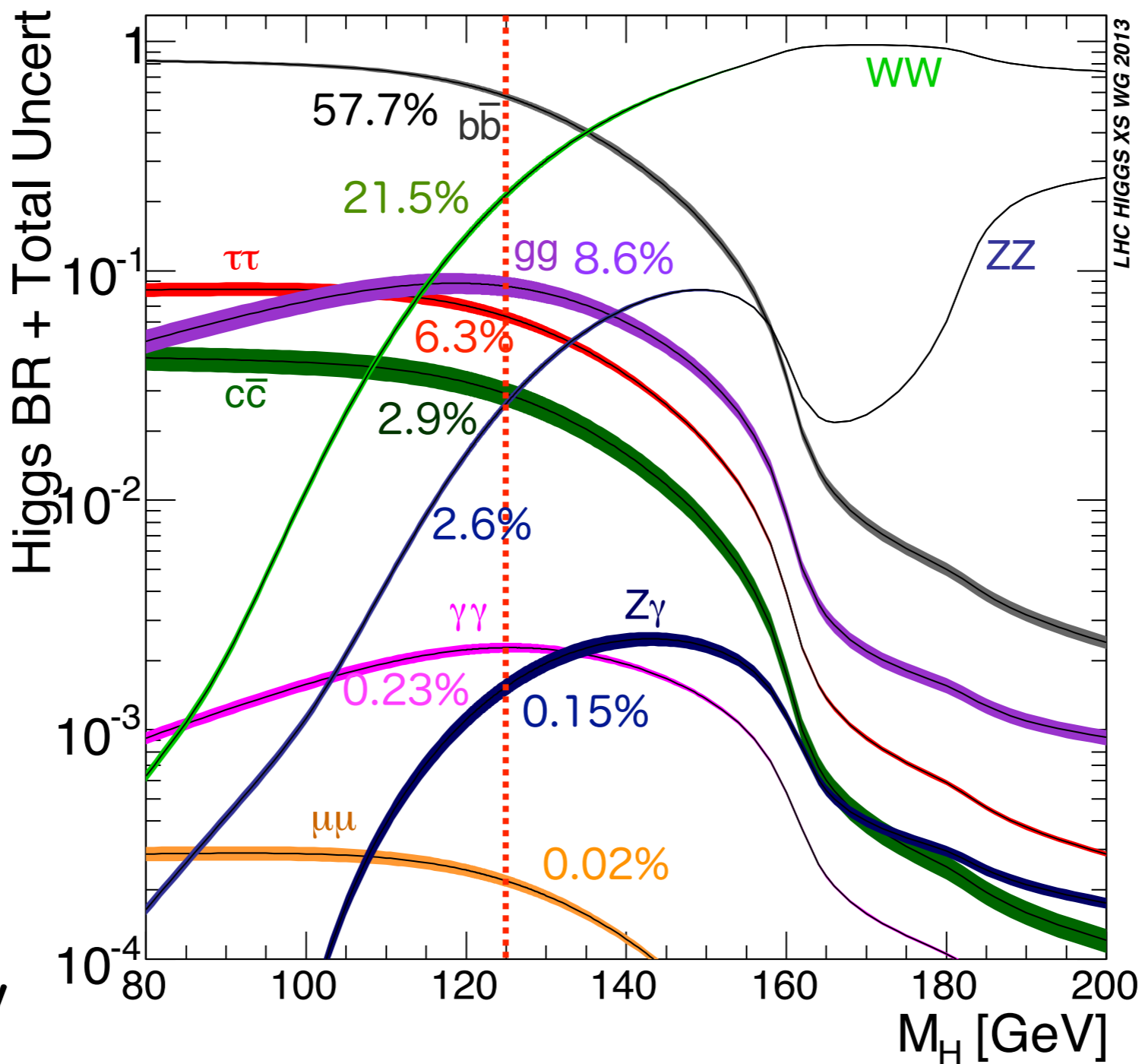
**ggF:** 19.3 pb, **VBF:** 1.6 pb, **WH:** 0.7 pb, **ZH:** 0.4 pb, **ttH:** 0.13 pb

# 分岐比

$$\Gamma(h \rightarrow f\bar{f}) \propto \frac{N_C m_f^2 m_h}{v^2}$$

125 GeV

[LHC Higgs XS WG report, arXiv: 1307.13471]



$$\Gamma(h \rightarrow VV) \propto \frac{m_h^3}{v^2}$$

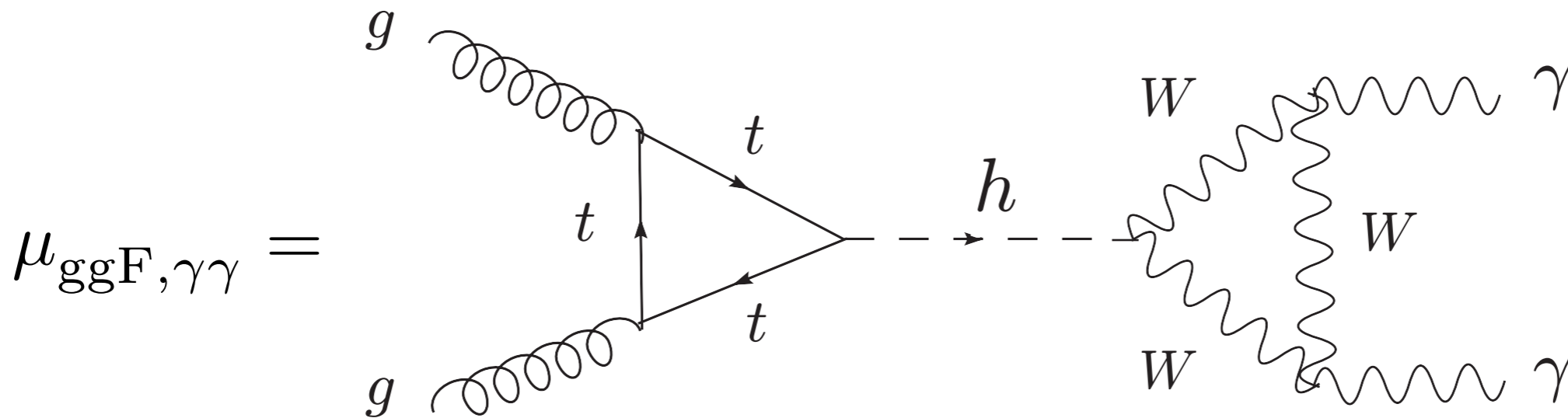
$m_h = 125 \text{ GeV}$

$b\bar{b} : 57.5\%$ ,  $WW^* : 21.5\%$ ,  $gg : 8.6\%$ ,  $\tau\tau : 6.3\%$ ,  $c\bar{c} : 2.9\%$

$ZZ^* : 2.6\%$ ,  $\gamma\gamma : 0.23\%$ ,  $Z\gamma : 0.15\%$ ,  $\mu\mu : 0.02\%$

# 信号強度

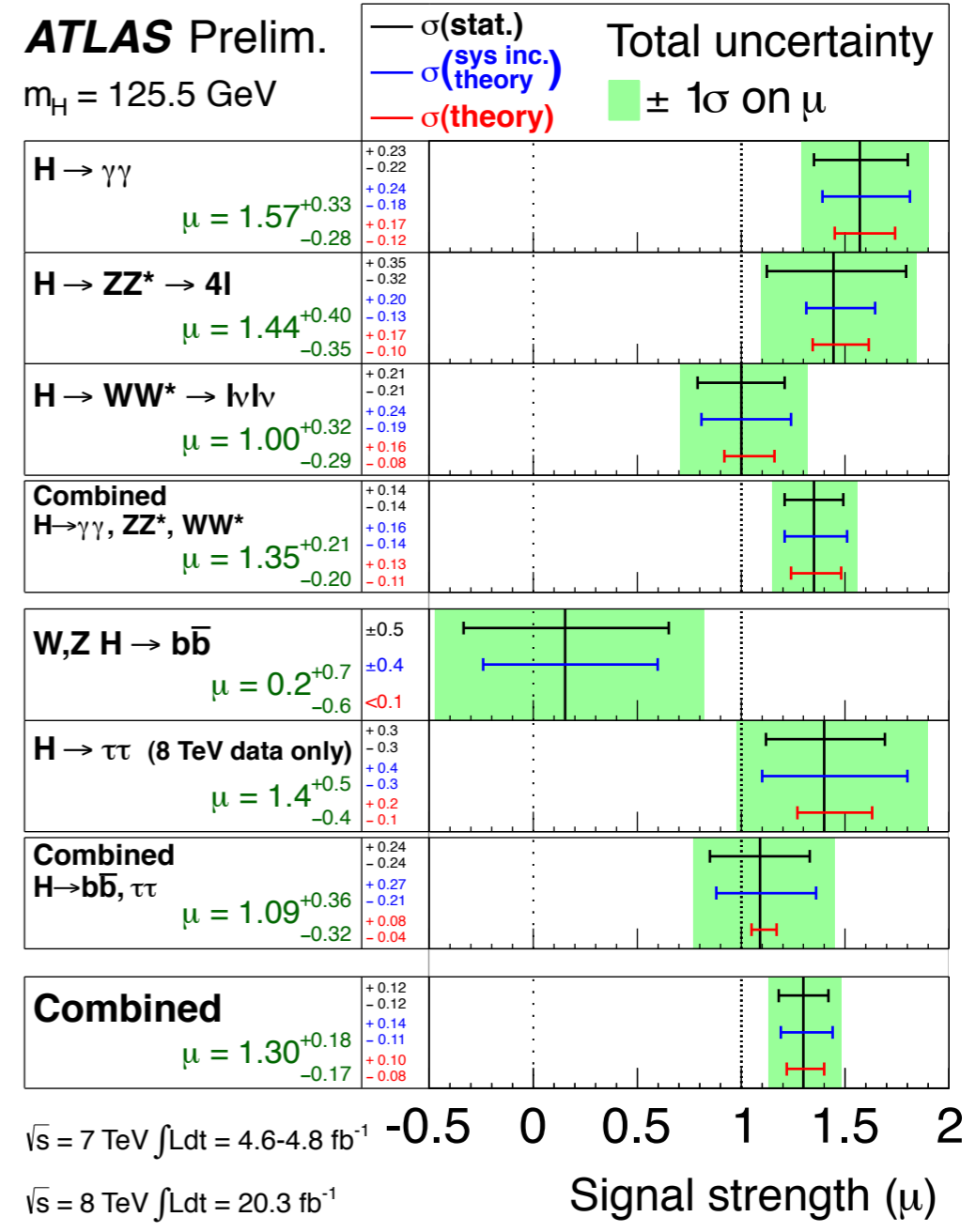
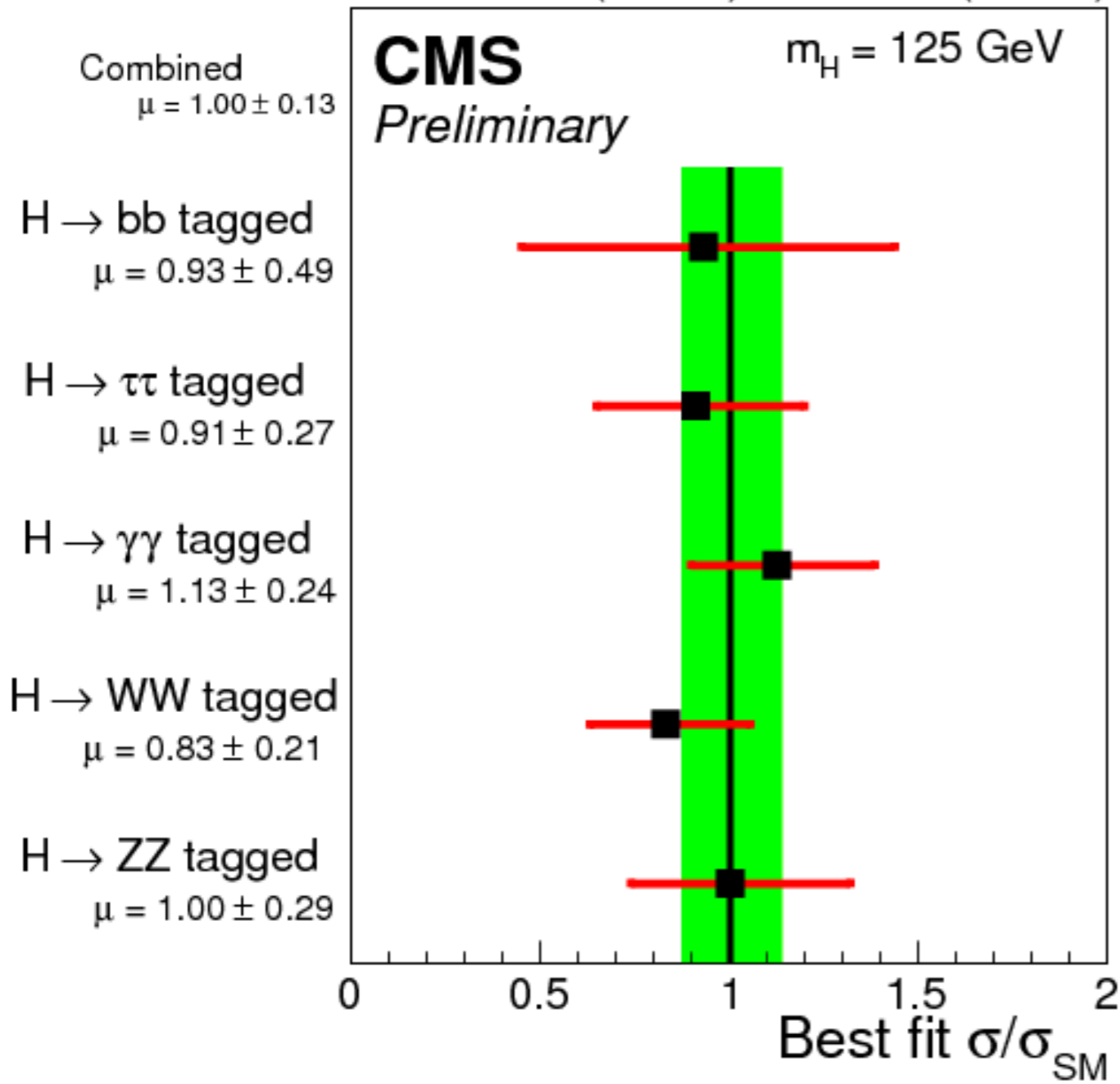
$$\mu_{i,X} = \frac{\sigma_i \cdot \text{Br}(h \rightarrow X)}{\sigma_i^{\text{SM}} \cdot \text{Br}^{\text{SM}}(h \rightarrow X)} \quad \begin{array}{l} i = \text{ggF}, \text{VBF}, \text{VH}, \text{ttH}, \\ X = \gamma\gamma, VV^*, \tau\tau, b\bar{b}, \end{array}$$



いろいろなチャンネルで信号強度を測る

# 現状

19.7 fb<sup>-1</sup> (8 TeV) + 5.1 fb<sup>-1</sup> (7 TeV)



今のところ、標準模型と無矛盾

# 標準模型のヒッグス

- 標準模型はゲージ対称性に基づく.  $SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

## ヒッグスの役割

1. 電弱対称性を自発的に破る.
2. 質量の起源を与える.

実験でチェックするには？

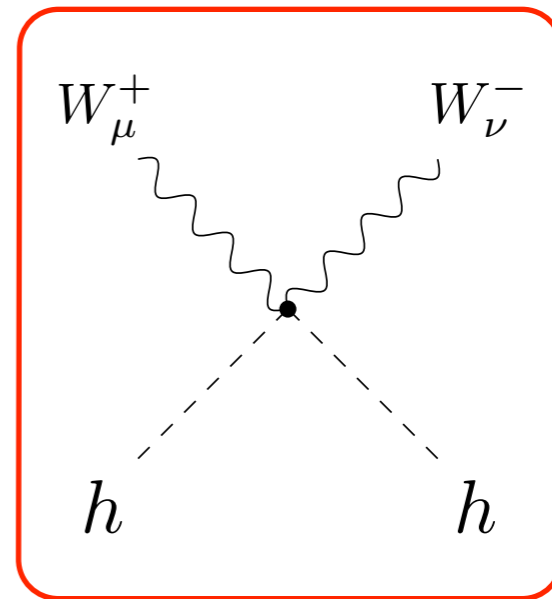
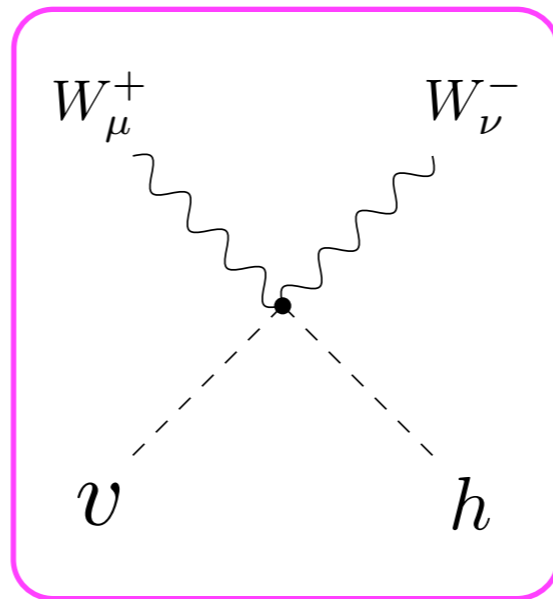
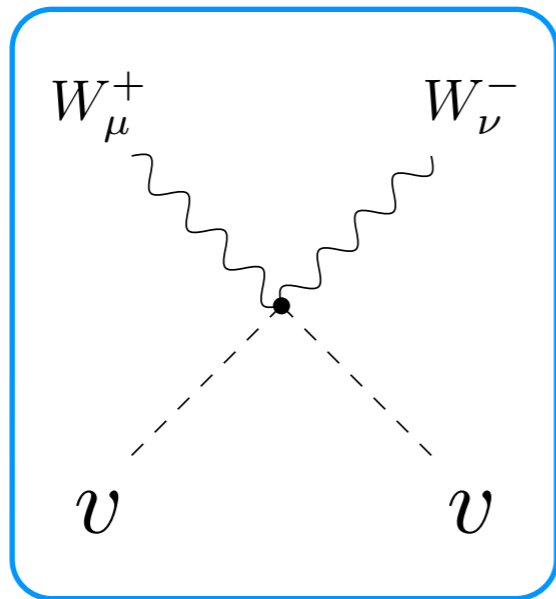
# 質量生成

- ヒッグスは質量の起源を与える。

$$(D_\mu \Phi)^\dagger D^\mu \Phi \xrightarrow{\Phi^0 \rightarrow v+h} m_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} + \frac{2m_W^2}{v} h W_\mu^+ W^{-\mu} + \frac{m_W^2}{v^2} h^2 W_\mu^+ W^{-\mu} + (W \rightarrow Z)$$

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

ヒッグス  
2重項



このようにWが質量を獲得したのであれば、**hWW**結合も必ずある。

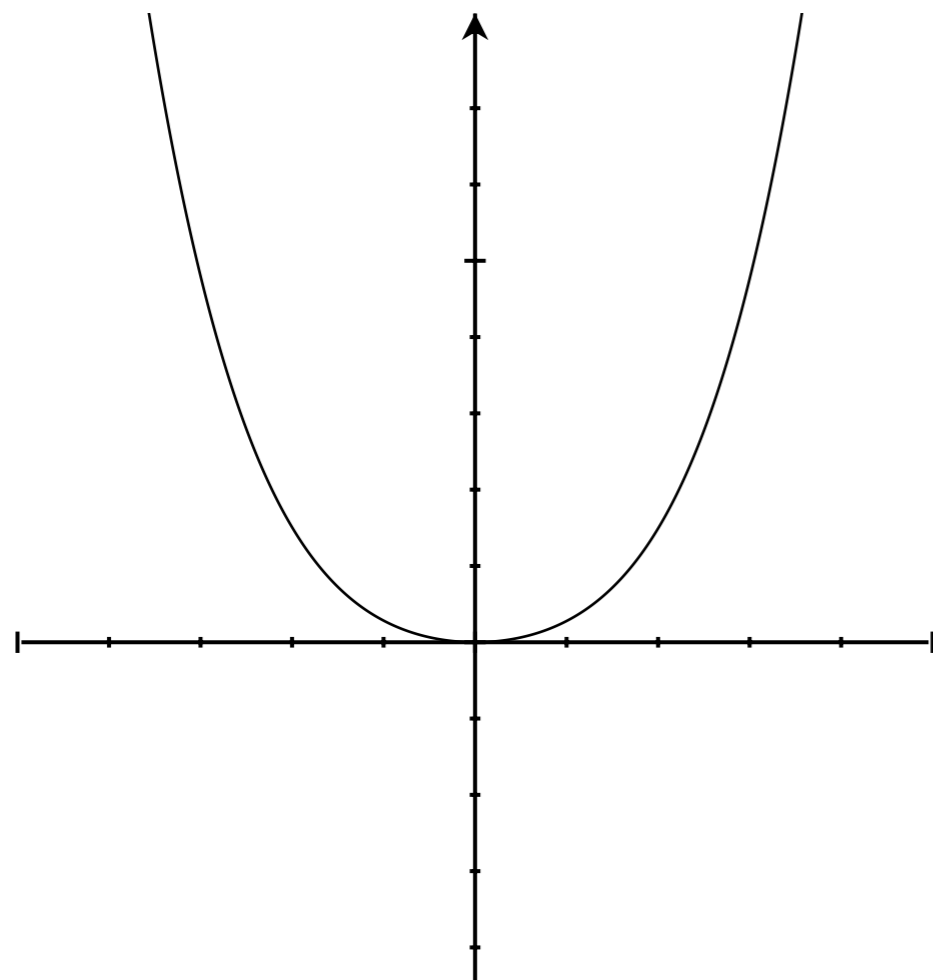
- フェルミオンも同様  $y_f \Phi \bar{f} f \xrightarrow{\Phi^0 \rightarrow v+h} m_f \bar{f} f + \frac{m_f}{v} h \bar{f} f + \dots$

- 結合定数は質量に比例. 標準模型では, 
$$\begin{aligned} g_{HWW} &= m_W/v \\ g_{H\bar{f}f} &= m_f/v \end{aligned}$$
 予言

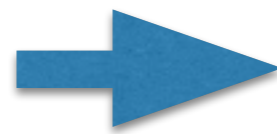
# 電弱対称性の破れ

- ヒッグスは電弱対称性を自発的に破る。

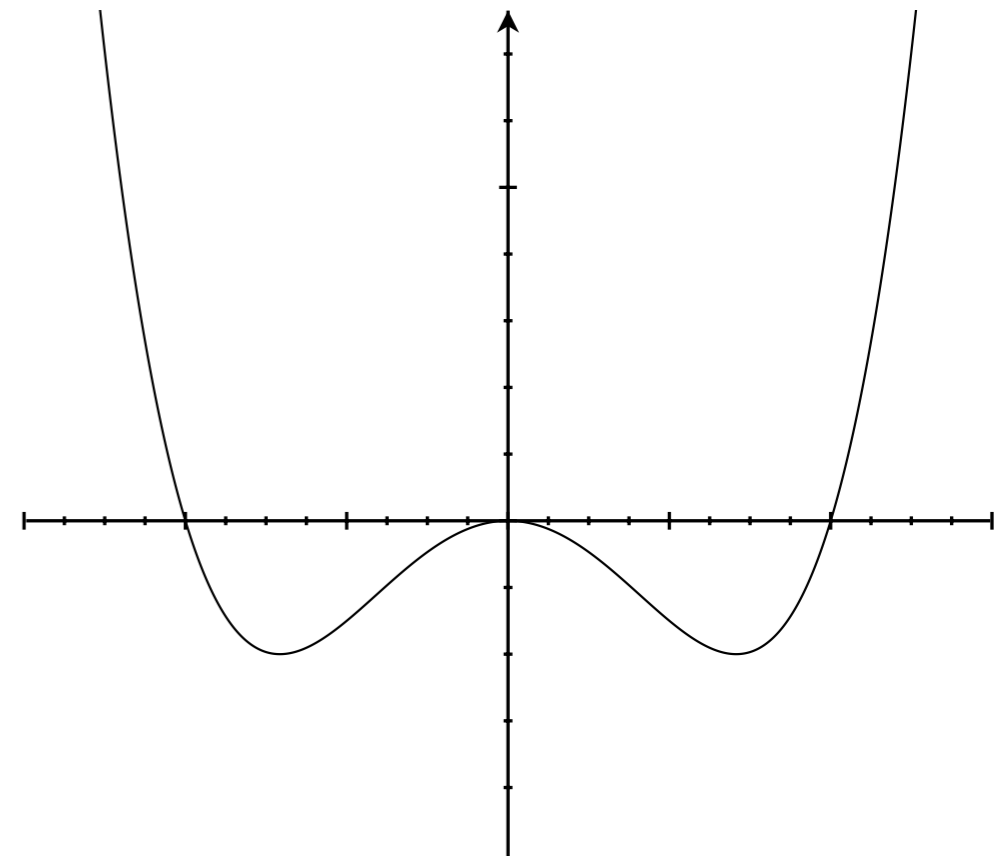
$$V(\Phi) = -\mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$$



高温



真空の転移



低温

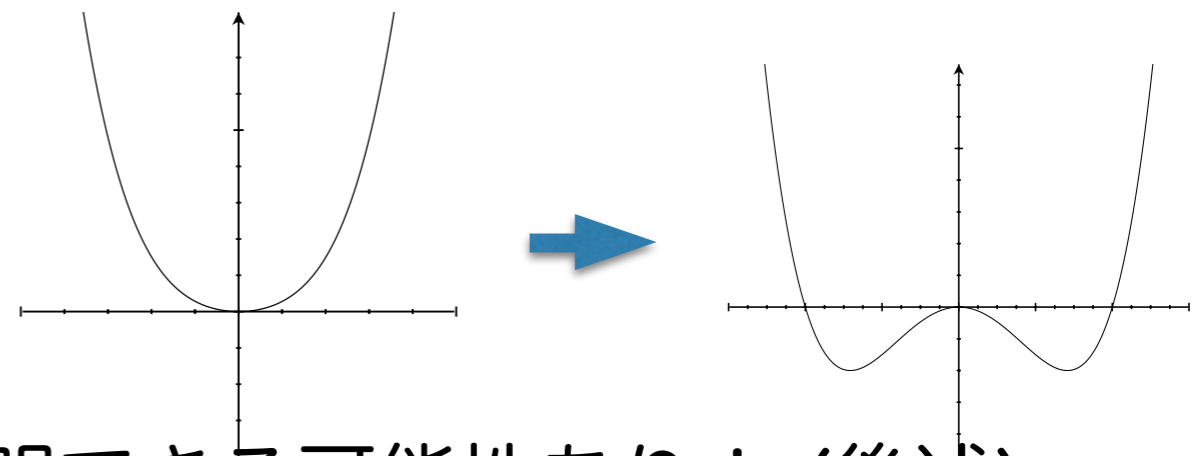
# 電弱対称性の破れ

- ヒッグスは電弱対称性を自発的に破る。

$$V(\Phi) = -\mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 \xrightarrow{\Phi^0 \rightarrow v+h} \frac{m_h^2}{2} h^2 + \boxed{\frac{m_h^2}{2v} h^3} + \frac{m_h^2}{8v^2} h^4$$

- hhh結合定数はヒッグスが期待値を持って初めて出現。
- 元のヒッグスポテンシャルの形を知りたいのなら、ヒッグスの自己結合定数を調べればよい。hhh, hhhh, (hhhhh?)

- 電弱相転移が1次だったのか、それとも2次だったのか分るかも知れない。

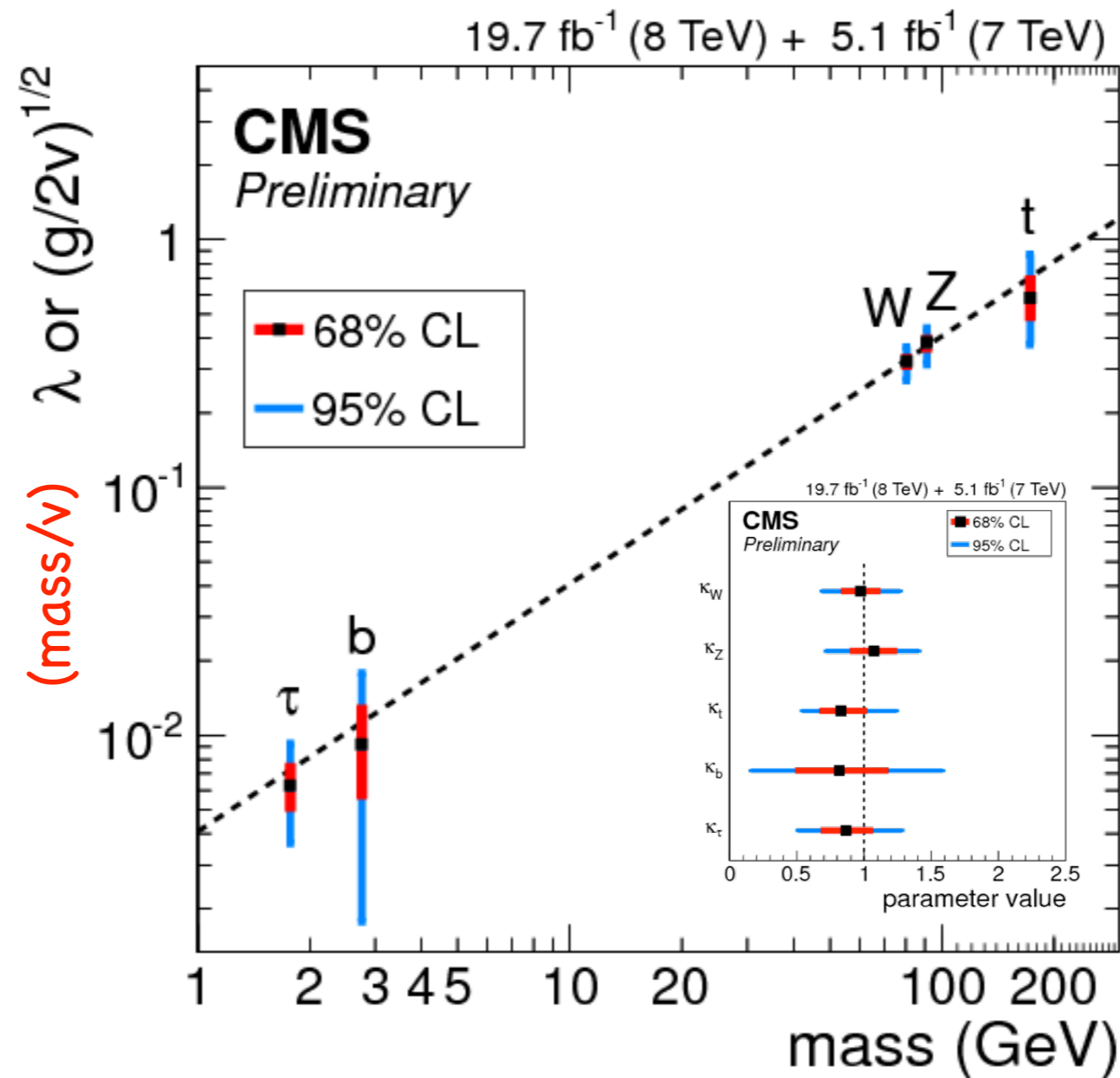


- 1次なら宇宙のバリオン非対称性を説明できる可能性あり！ (後述)。



# 質量 vs. 結合定数

- 結合定数を測って、質量との関係を見る。



- 破線が標準模型の予言. 今の所データは標準模型と無矛盾.
- 新物理があると, 結合定数と質量の関係式が変わる.

# SM-like $\neq$ SM

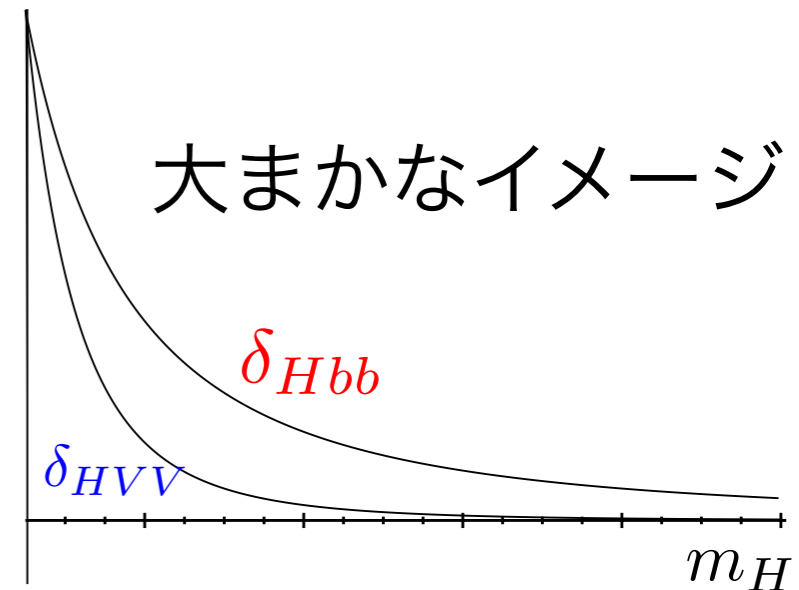
- 新粒子が重い場合, ヒッグスセクターは標準模型のようにみえる.
- これらを区別するには, 結合定数の精密測定が必要.
- 結合定数によって, 新粒子の効果の現れ方が異なる.

例: 2重項拡張模型 (type II):  $m_h=125$  GeV

[Haber, 1401.0152]

$$\frac{\lambda_V}{[\lambda_V]_{\text{SM}}} = 1 + \overset{\delta_{HV V}}{\mathcal{O}\left(\frac{Z_6^2 m_Z^4}{(m_H^2 - m_h^2)^2}\right)} \sim 1/(m_H)^4$$

$$\frac{\lambda_b}{[\lambda_b]_{\text{SM}}} = 1 + \overset{\delta_{Hbb}}{\mathcal{O}\left(\frac{Z_6 m_Z^2 \tan \beta}{m_H^2 - m_h^2}\right)} \sim 1/(m_H)^2$$



- この模型ではHV V結合定数には, 新物理の効果が出にくい.

# 標準模型の問題点

## - 観測的な問題

- ・ 暗黒物質
- ・ バリオン非対称宇宙
- ・ ニュートリノ質量/混合角

## - 理論的な問題

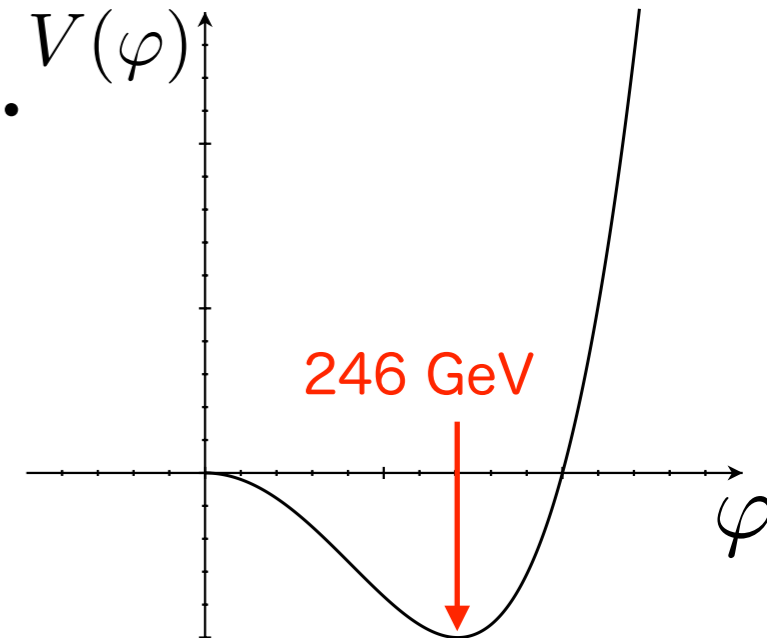
- ・ 微調整の問題

(- 真空の安定性)

# 真空の安定性

- 標準模型の真空は本当に安定なのだろうか.

$$V(\varphi) = -\frac{\mu^2}{2}\varphi^2 + \frac{\lambda}{4}\varphi^4$$



- $\lambda = m_h^2/2v^2 > 0$  なので安定に見える.
- しかし,  $\lambda$  はスケールによって値が変化.  $\lambda \rightarrow \lambda(Q)$ .  
高エネルギー ( $\phi$  が大) でも  $\lambda(Q) > 0$  かは非自明.

$$V(\varphi) = -\frac{\mu^2}{2}\varphi^2 + \frac{\lambda}{4}\varphi^4 \xrightarrow{\varphi \gg v} \frac{\lambda(Q)}{4}\varphi^4$$

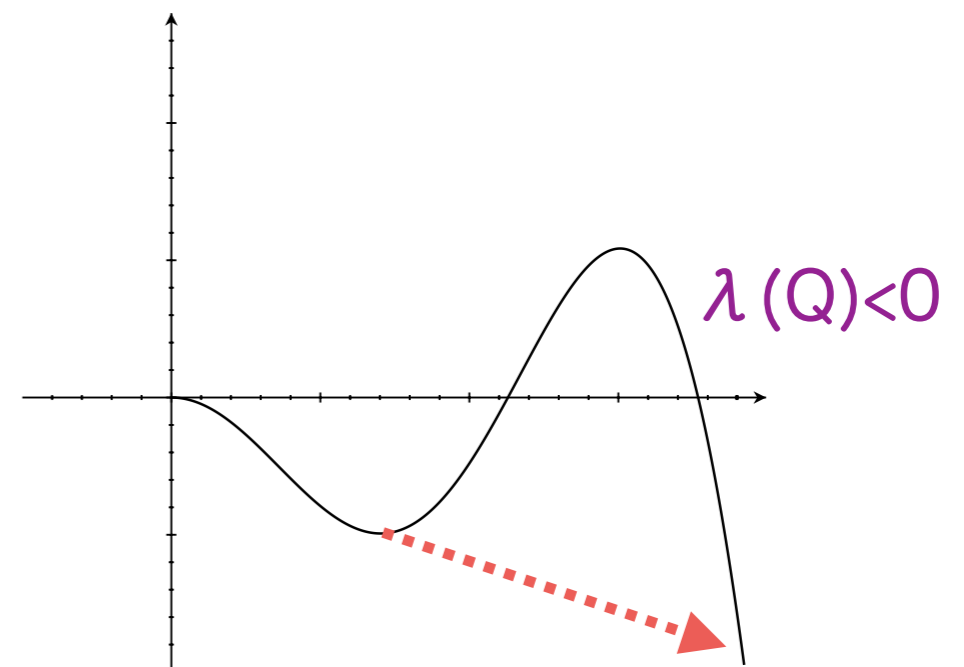
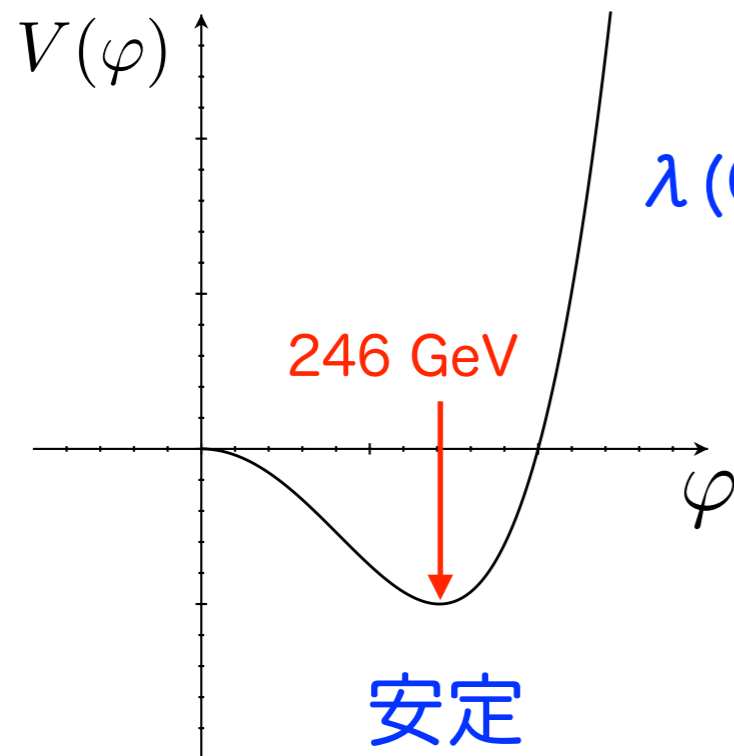
- $\phi$  の大きな領域では, 低次の項は無視.

# 真空の安定性

- $\lambda(Q)$ はくりこみ群方程式で評価できる.

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = \frac{1}{16\pi^2} [24\lambda^2 - 6y_t^4 + 12\lambda y_t^2 + \dots], \quad t = \ln(Q/v)$$

- $\lambda$ と $y_t$ の大きさ(ヒッグスとトップの質量)によって次のような可能性がある.



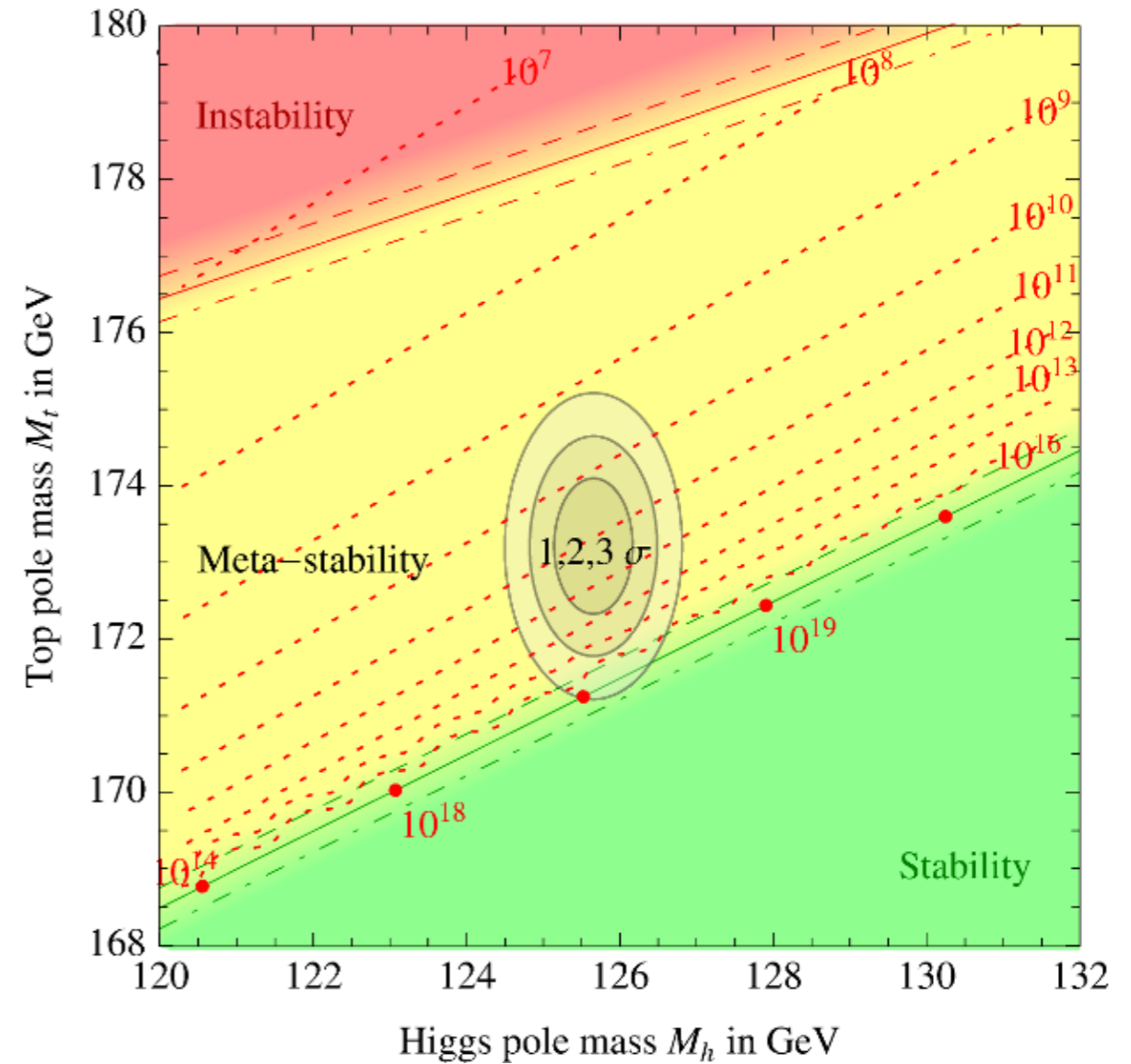
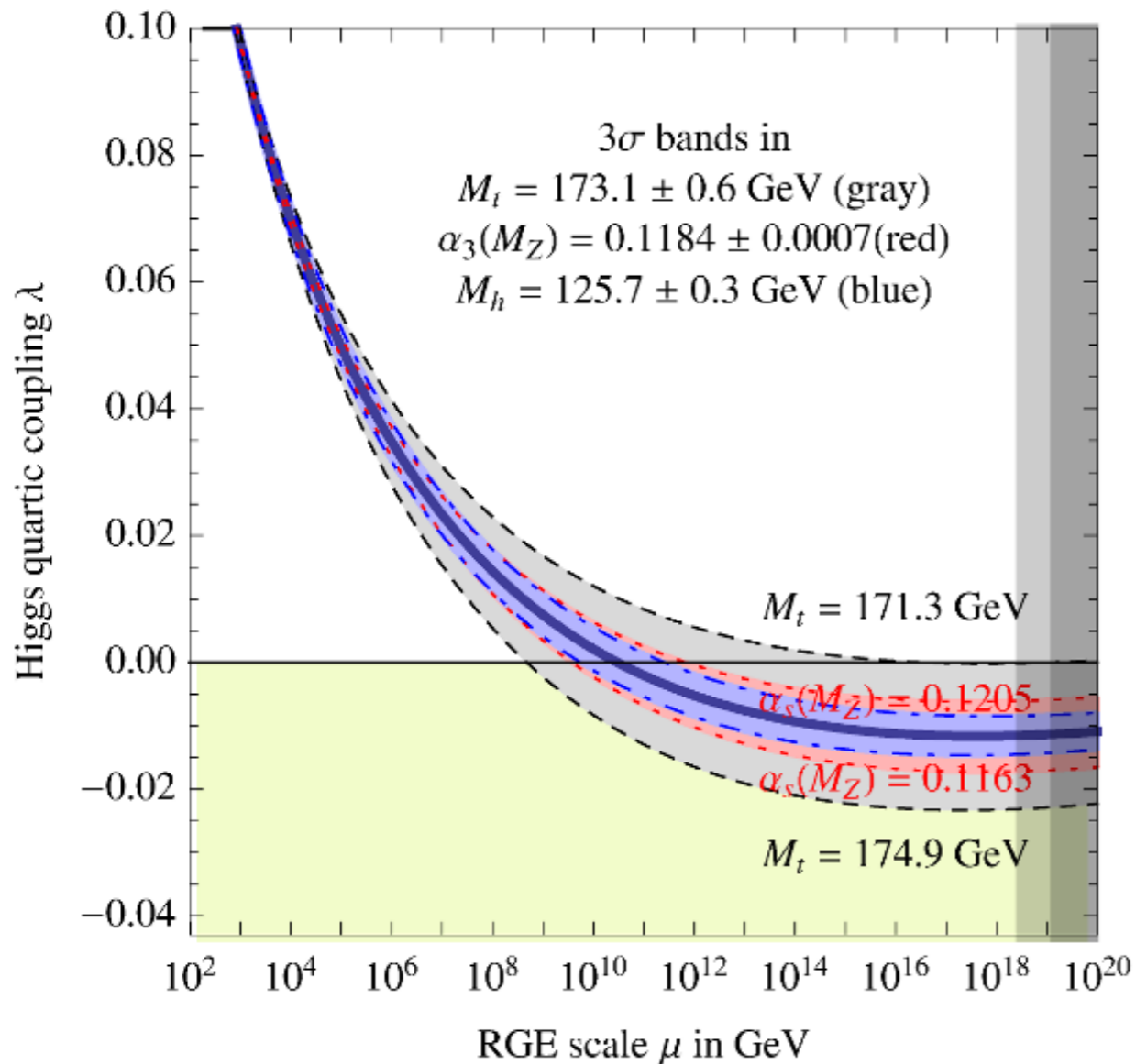
遷移確率 = 小  
遷移確率 = 大

寿命 > 宇宙年齢  
寿命 < 宇宙年齢

準安定  
不安定

標準模型の真空はどうなっているか?

# 真空の安定性



- 我々の真空が安定か準安定かはトップの質量に強く依存.
- $\Delta m_t = 0.5$  GeV@HL-LHC,  $\Delta m_t = 0.1$  GeV@ILC

# ヒッグスと新物理

拡張模型のほとんどはヒッグスセクターが拡張されている

ヒッグスを通して新物理を探る

暗黒物質

ヒッグス

バリオン数生成

ニュートリノ質量

ヒッグスセクターは新物理の窓。

# 拡張ヒッグス

- 標準模型の問題点を解決するモデルは、ヒッグスセクターが拡張されている。

- SU(2)の下でどのような表現のヒッグス場が良い?

$\rho$ パラメーターが一つの指針:

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

(T: アイソスピン, Y: ハイパーチャージ)

$$\begin{pmatrix} \phi_{T_3} \\ \phi_{T_3-1} \\ \vdots \\ \phi_{-T_3+1} \\ \phi_{-T_3} \end{pmatrix}$$

n重項

(2T<sub>3</sub>+1)

1重項:  $\rho=0$

2重項:  $\rho=1$

3重項:  $\rho=1/2$

精密測定の結果:  $\rho = 1.0004^{+0.0003}_{-0.0004}$  (95% C.L.)



# 拡張ヒッグス

- 1重項ヒッグスと2重項ヒッグスを追加しても  $\rho=1$ .  
(但し, 量子補正で1からずれるのである特定の場合だけ可.)
- 3重項ヒッグスの導入はツリーレベルでも注意が必要.

$$\rho = \frac{v_{\Phi}^2 + 2v_{\Delta}^2}{v_{\Phi}^2 + 4v_{\Delta}^2} \quad \begin{array}{l} v_{\Phi} : 2\text{重項ヒッグスの期待値} \\ v_{\Delta} : 3\text{重項ヒッグスの期待値} \end{array}$$

$$\rho = 1.0004^{+0.0003}_{-0.0004} \longrightarrow v_{\Delta} \lesssim 3.5 \text{ GeV}$$

- 7重項( $T_3=3, Y=2$ )はツリーで  $\rho=1$ . 詳細は津村さんへ!

# 拡張ヒッグス

拡張ヒッグスの観点から以下の問題を考える.

	1重項	2重項	3重項
暗黒物質	$S^0$ w/ $Z_2$	$\Phi'^0$ w/ $Z_2$	$\Delta^0$ w/ $Z_2$
バリオン数生成	$S^0$ w/o $Z_2$	$\Phi'^0$ w/o $Z_2$	$\Delta^0$ w/o $Z_2$
ニュートリノ質量	$S^\pm, S^{\pm\pm}$ (Zee-Babu模型)	$\Phi'^0$ w/ $Z_2$ (Ma模型)	$\Delta^0$ w/o $Z_2$ (タイプIIシーソー)

スカラー粒子が如何に有用かが分かる.

# 2重項ヒッグス模型

2重項ヒッグスが2個

$\Phi_1, \Phi_2$

湯川結合を一般的に書くと,

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = & \bar{q}_L (f_1^{(d)} \Phi_1 + f_2^{(d)} \Phi_2) d_R + \bar{q}_L (f_1^{(u)} \tilde{\Phi}_1 + f_2^{(u)} \tilde{\Phi}_2) u_R \\ & + \bar{l}_L (f_1^{(e)} \Phi_1 + f_2^{(e)} \Phi_2) e_R + \text{h.c.}, \quad (\tilde{\Phi}_{1,2} = i\tau^2 \Phi_{1,2}^*) \end{aligned}$$

FCNCをツリーレベルで禁止する為に, 離散対称性を課す.  
一般に, 次の4つのパターンがある.

	type I	type II	type X(III)	type Y(IV)
$\Phi_1$		$d \quad e$	$e$	$d$
$\Phi_2$	$u \quad d \quad e$	$u$	$u \quad d$	$u \quad e$

# 湯川結合定数

	I	II	X (III)	Y (IV)
$hu\bar{u}$	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$
$hd\bar{d}$	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$-\frac{\sin \alpha}{\cos \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$-\frac{\sin \alpha}{\cos \beta}$
$he\bar{e}$	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$-\frac{\sin \alpha}{\cos \beta}$	$-\frac{\sin \alpha}{\cos \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$

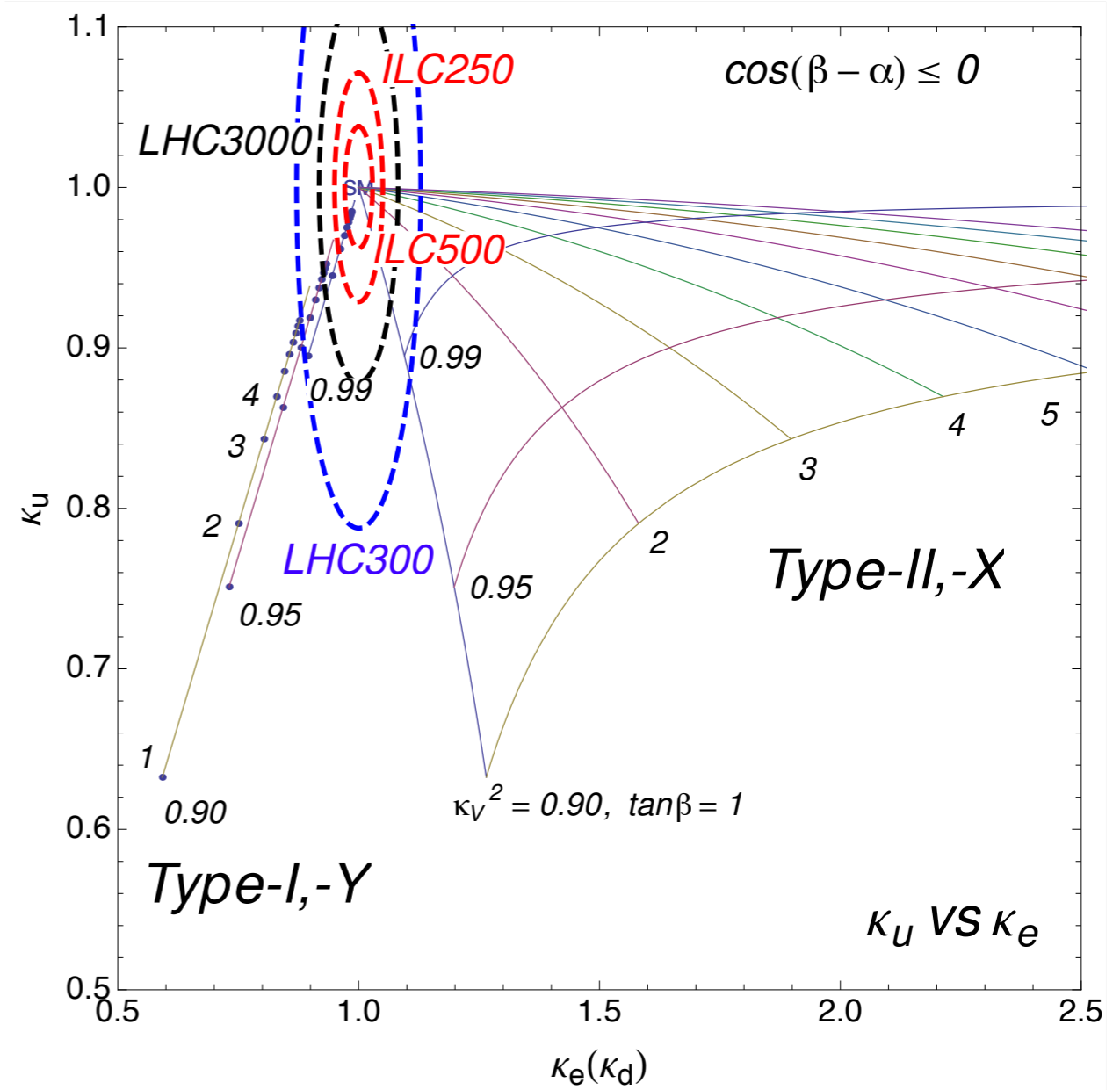
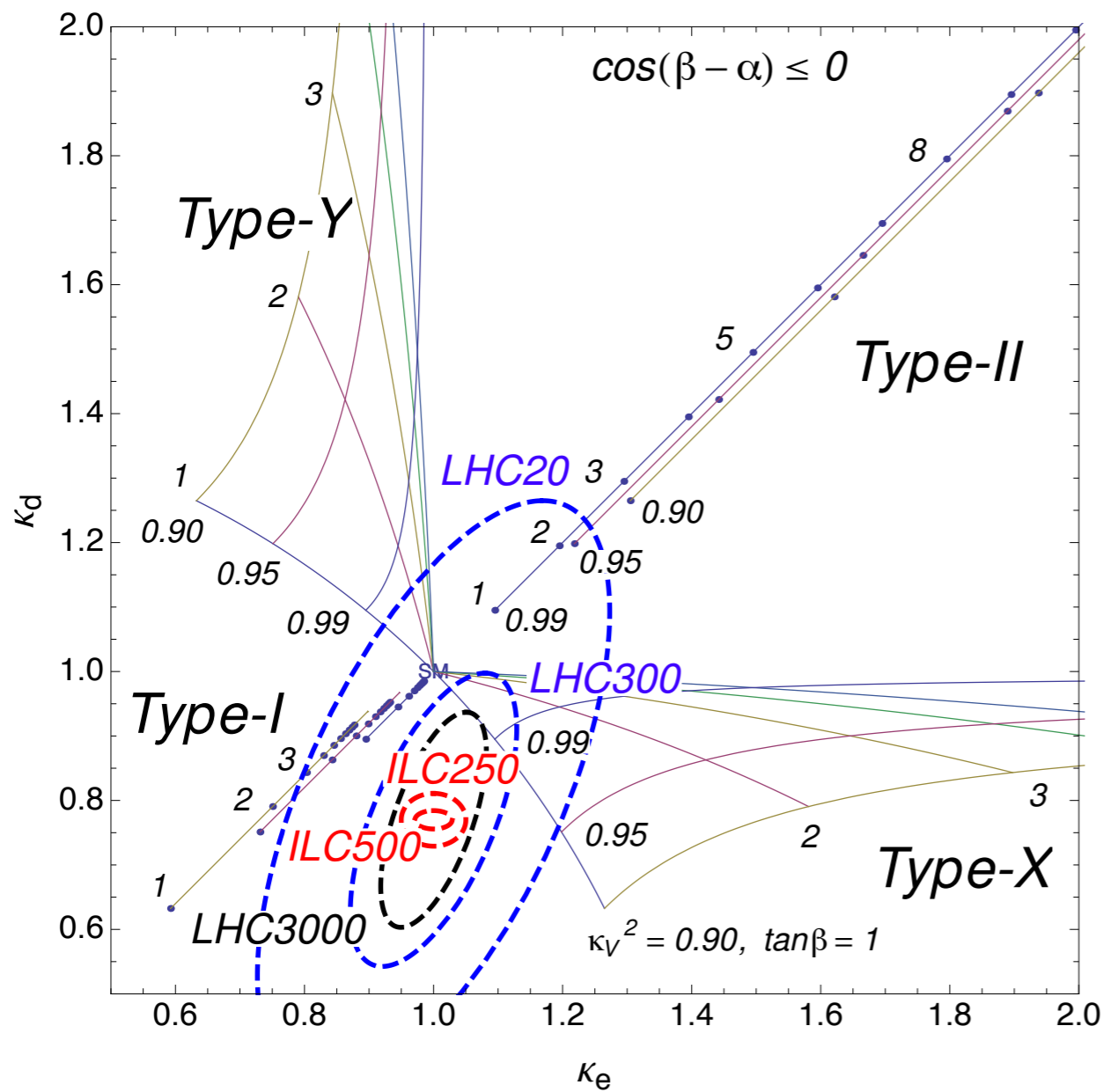
$$\tan \beta = \frac{v_2}{v_1}$$

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

$\alpha$  : h-H混合角

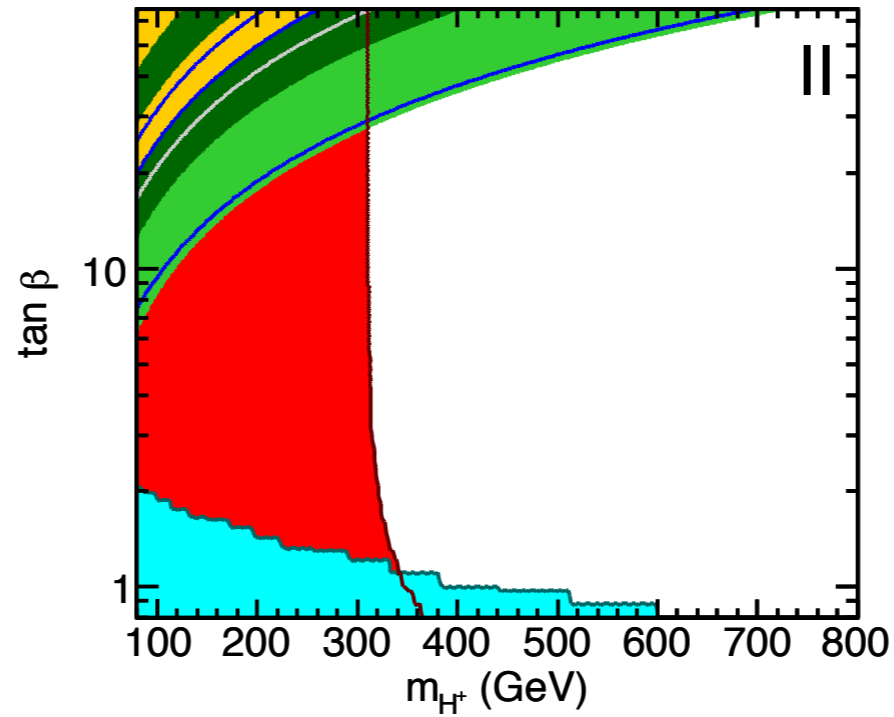
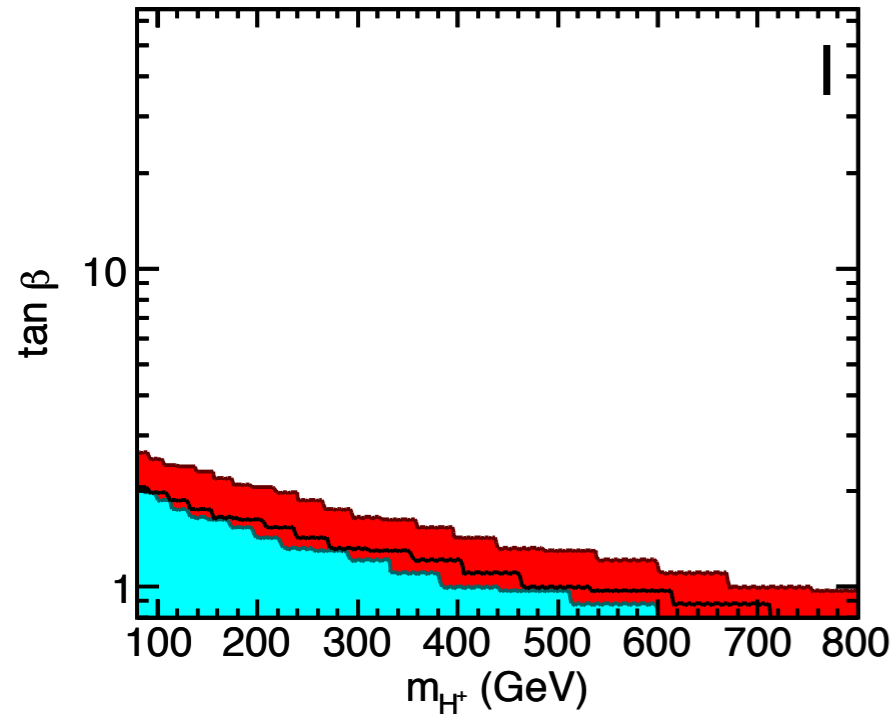
# 湯川結合定数のずれ方

Kanemura, Tsumura, Yagyu, Yokoya, 1406.3294



湯川結合はタイプによって標準模型からのずれ方が全く異なる。(量子補正込みでタイプの識別可 [Kanemura, Kikuchi, Yagyu, 1401.0515])

# フレーバーからの制限

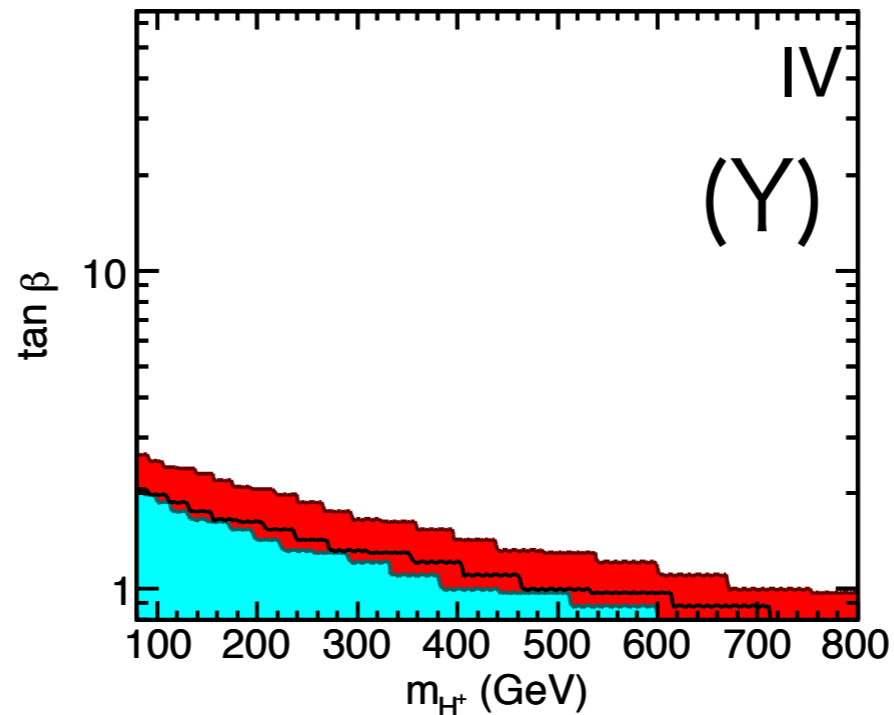
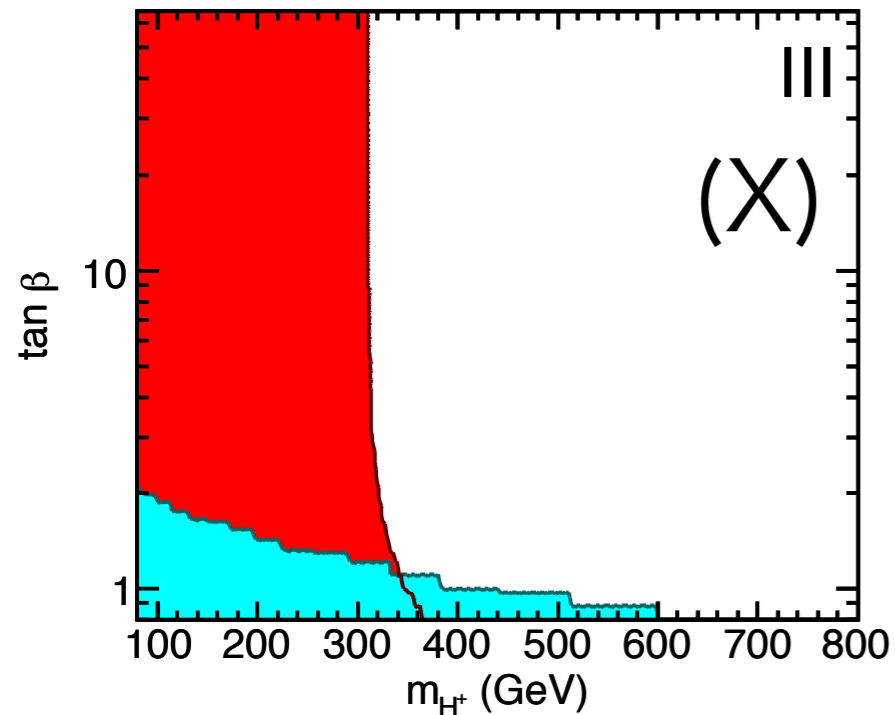


$B \rightarrow X_s \gamma$  (red)

$\Delta M_{B_d}$  (cyan)

$D_s \rightarrow \tau \nu$  (light green)

$D_s \rightarrow \mu \nu_\tau$  (dark green)



白い領域が許されている。

# ヒッグスとCPの破れ

- ヒッグスセクターを拡張すると, CPを破る可能性がある.

$$\mathcal{L}_{H\bar{f}f} = -g_f H \bar{f} \left( g_{H\bar{f}f}^S + i g_{H\bar{f}f}^P \gamma_5 \right) f ,$$

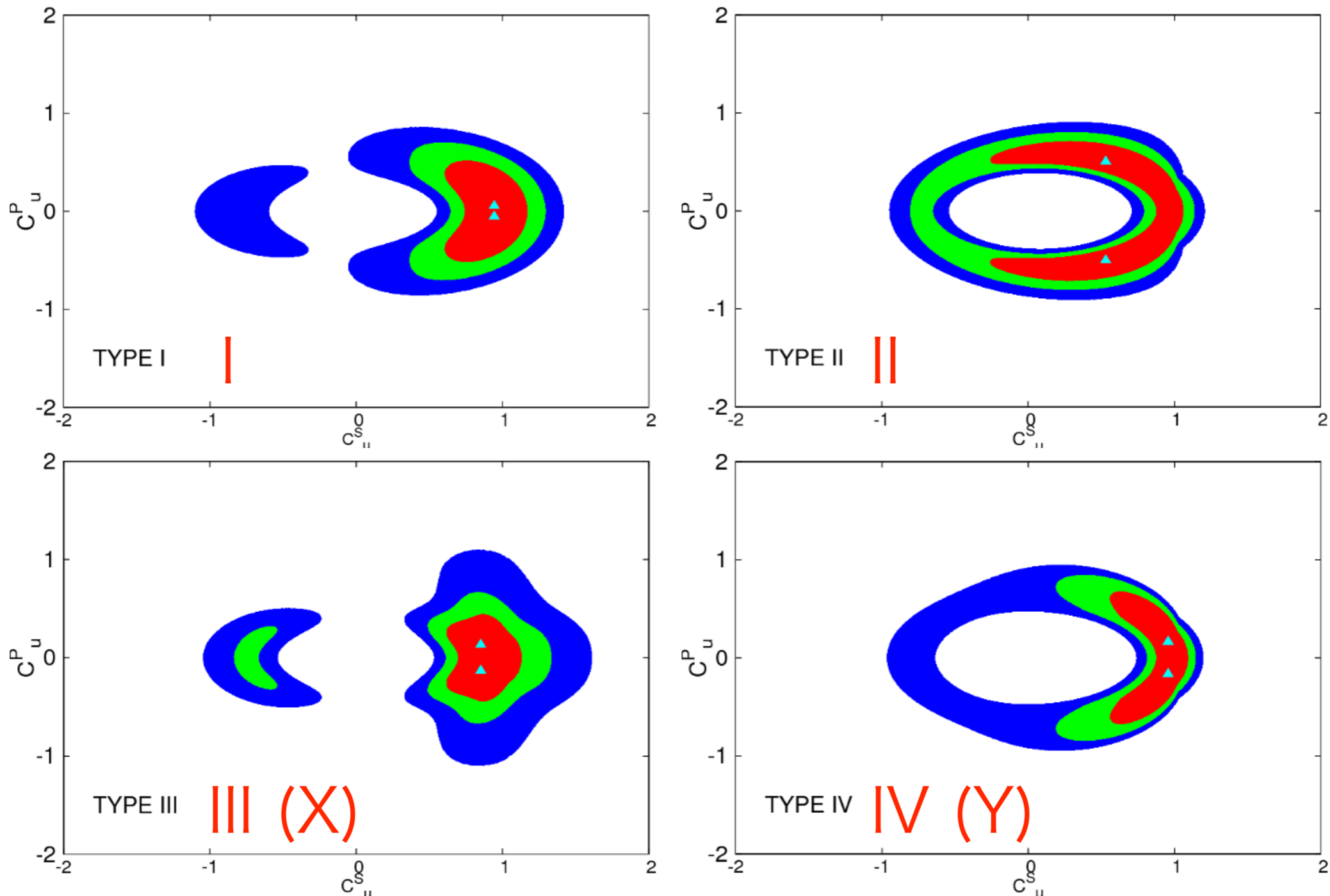
CP-even 結合      CP-odd 結合

- 125GeVヒッグスがピュアなCP-oddである可能性は角度分布で除外. 但し, CP混合状態である可能性は残っている.
- CPを破る結合定数も含めて $\chi^2$ フィットしてみる.
- 電子や中性子の電子双極子モーメントの制限も考慮する.

# $\chi^2$ フィット

[Cheung, Lee, Tseng, 1310.3937]

$(C_u^S - C_u^P)$  plane  $C_u^S = g_{H\bar{t}t}^S$ ,  $C_u^P = g_{H\bar{t}t}^P$  EDMの制限無しの場合



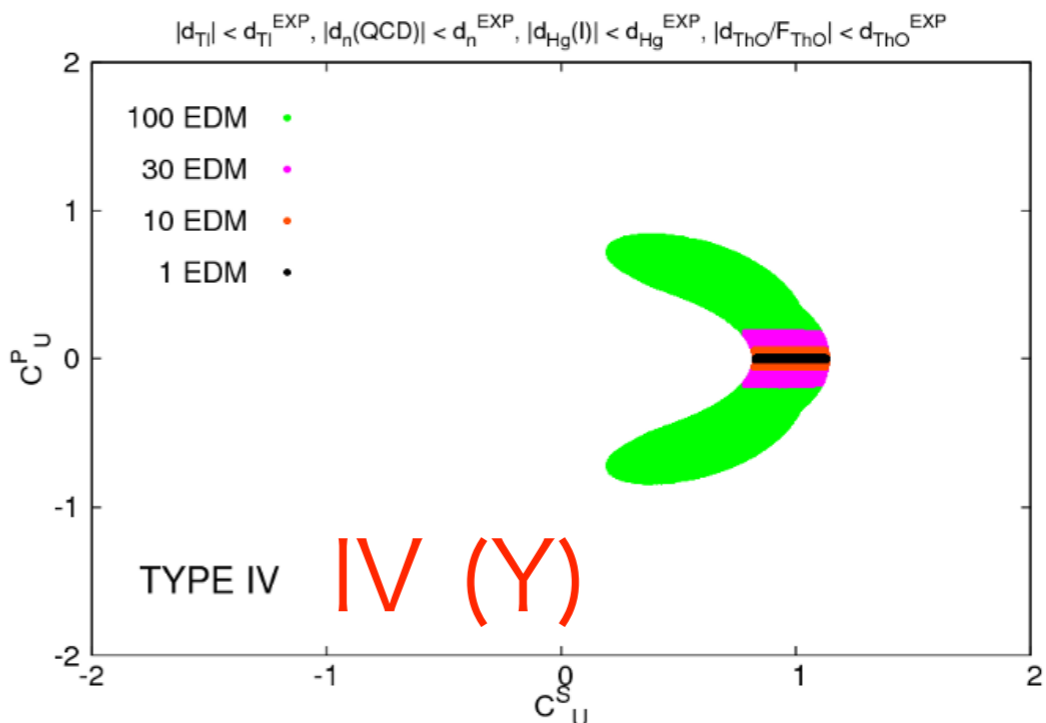
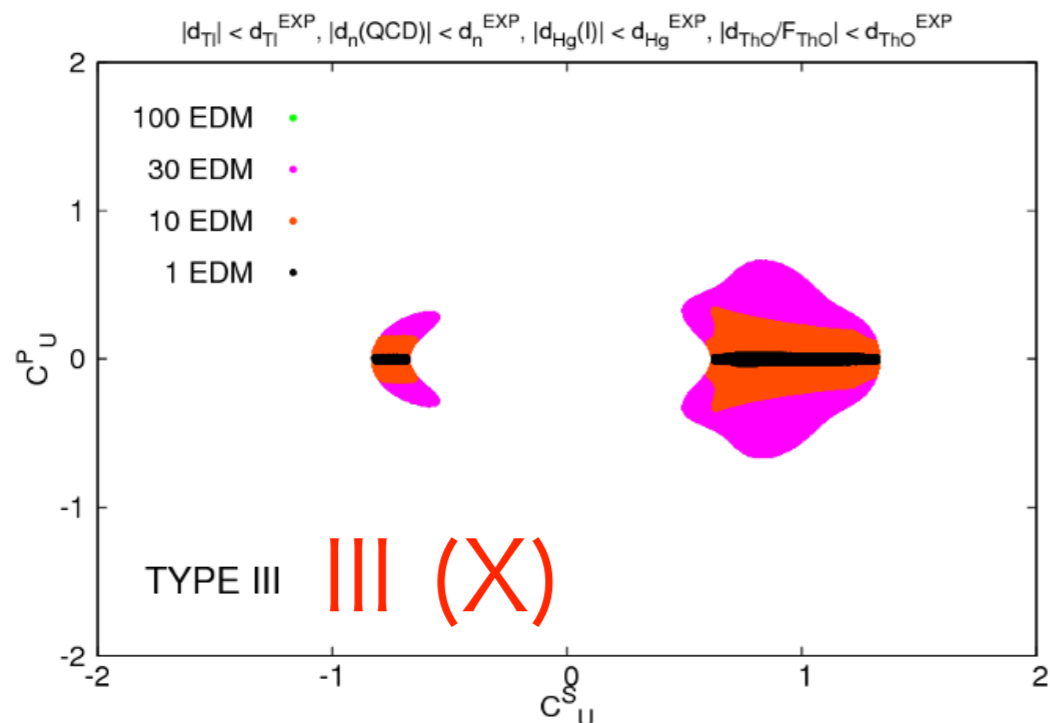
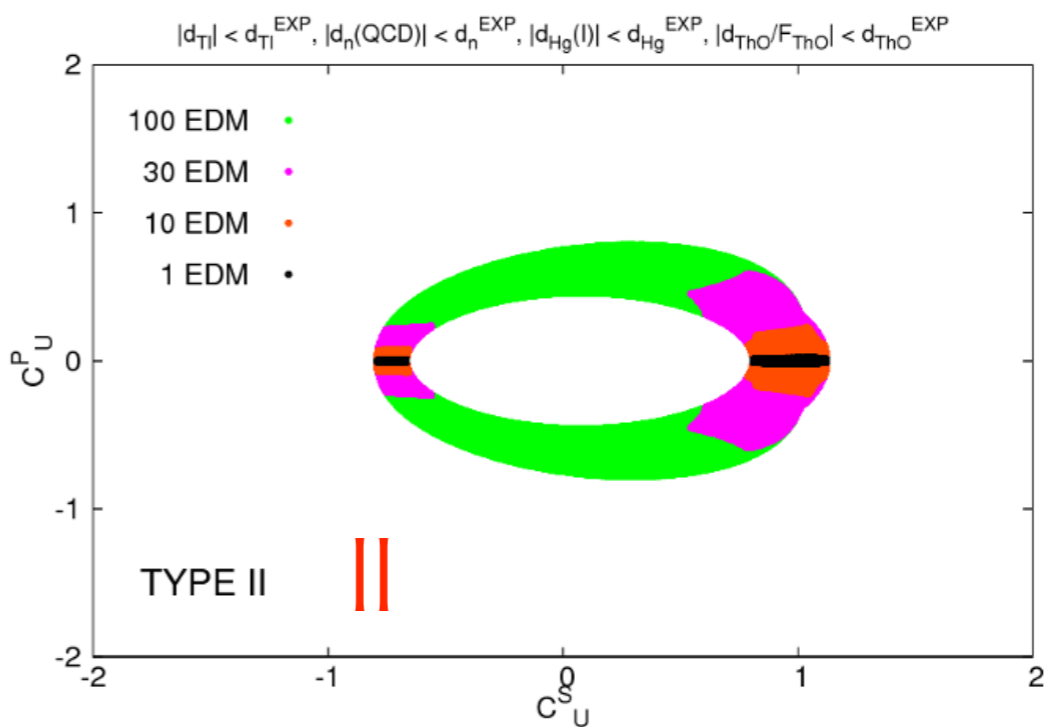
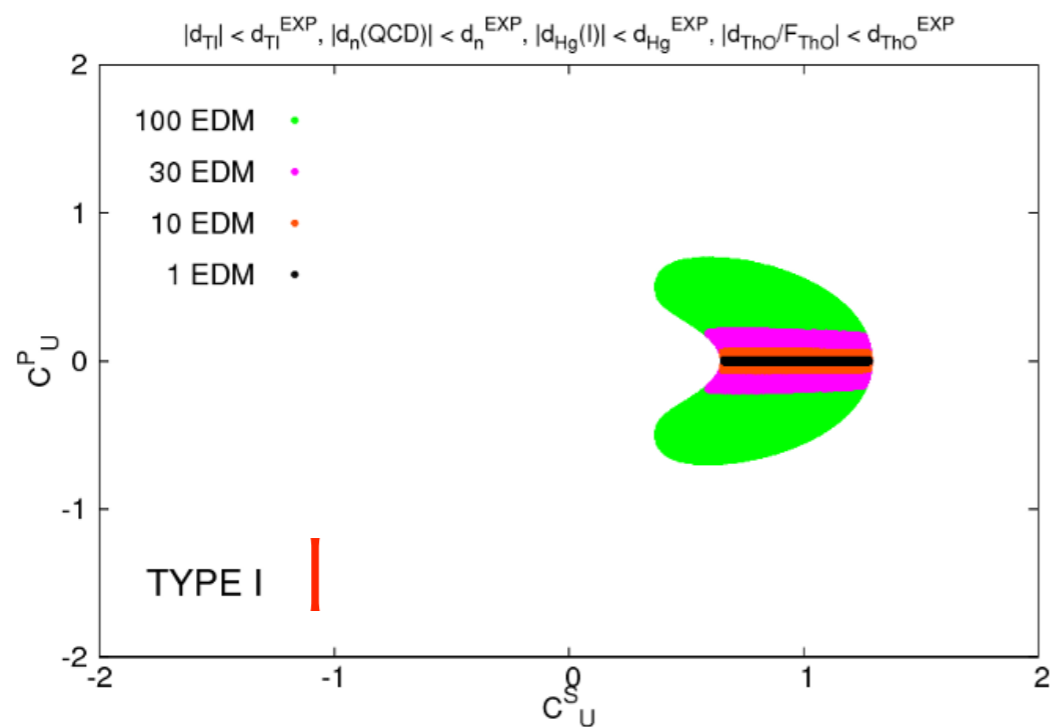
$C_u^S = C_u^P = 1/2$  の可能性をまだ残している.



# $\chi^2$ フィット

EDMの制限を入れた場合

[Cheung, Lee, E.S., Tseng, 1403.4775]



CP-odd結合定数は厳しく制限されている。  $|C_u^P| < 0.01$

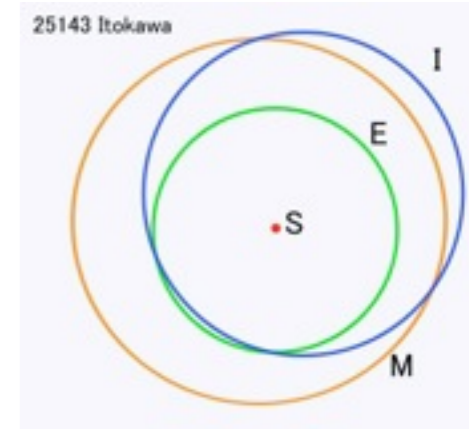
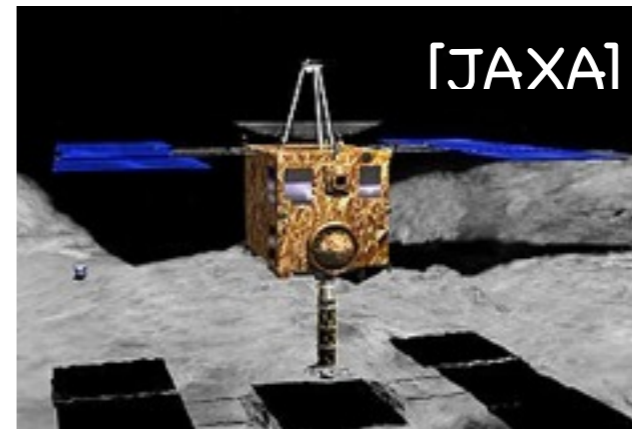
# ヒッグスと バリオン数生成

# バリオン非対称宇宙

- 宇宙は物質で出来ている。

これまで『触れる』実験をたくさん行ったが、対消滅の経験なし。(月、火星、イトカワ)

『触れない』実験。



- 遠方の銀河が反物質で出来ている可能性は?

-> 宇宙論的に厳しい。例えば、軽元素合成までに物質と反物質を分離できたとしても、

$T=38 \text{ MeV}$ での地平線内の全エネルギーは $10^{-7} M_{\odot}$

<< 銀河団の質量 ( $\approx 10^{12} M_{\odot}$ ,  $M_{\odot}$ は太陽質量,  $1.1 \times 10^{57} \text{ GeV}$ )

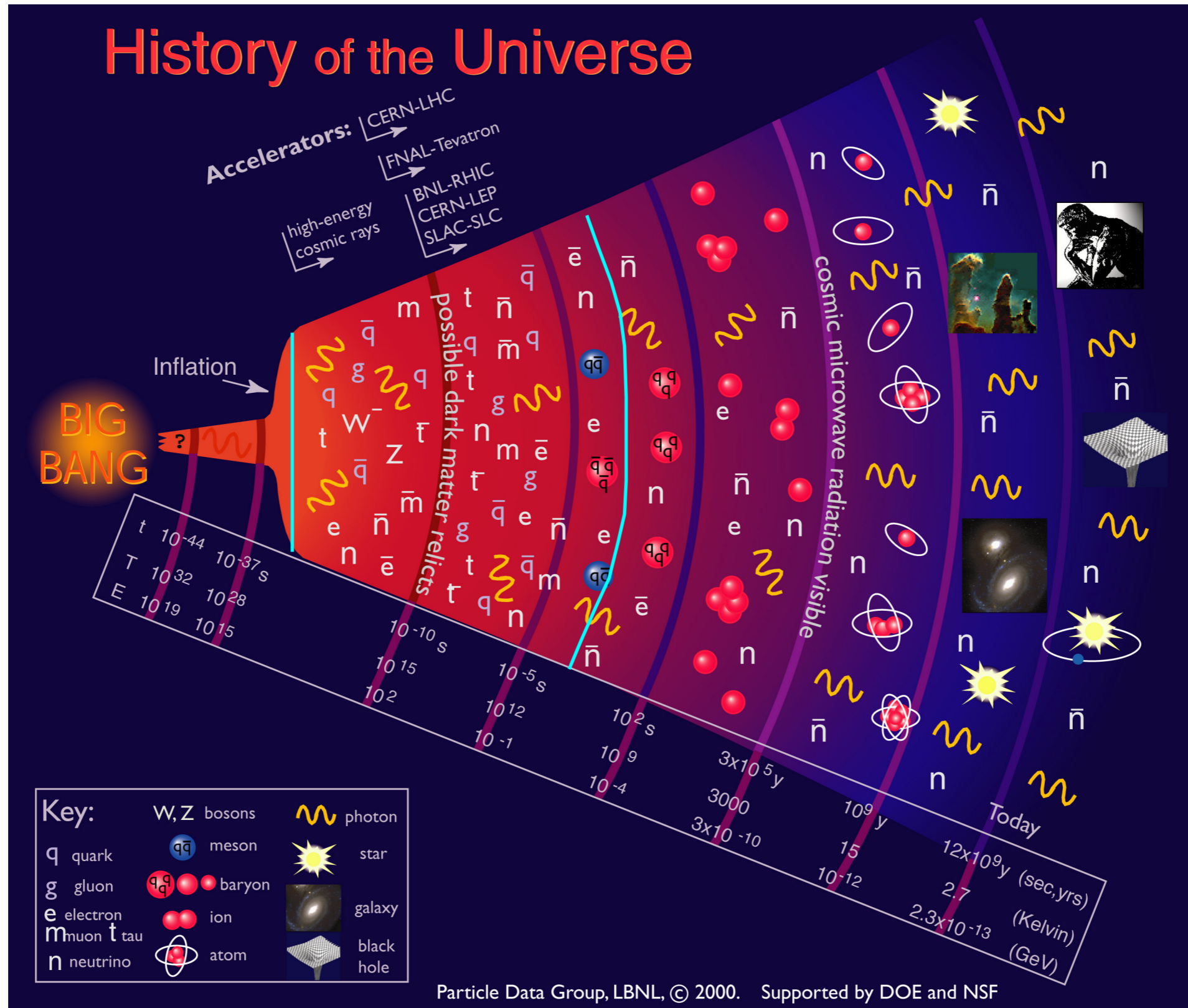
# Sakharovの条件

□ バリオン対称宇宙( $\eta=0$ )から, バリオン数( $\eta \neq 0$ )を作るには次の条件が必要. [Sakharov, '67]

- (1) バリオン数の破れ
- (2) CとCPの破れ
- (3) 非平衡の実現

バリオン数はいつ頃できたのか.

# バリオン数生成の時期



□ インフレーションの後 (スケールは模型に依る)

□ 軽元素合成 ( $T \approx 0(1)$  MeV)の前.

どのようなシナリオが可能か.



# 可能性は無数

[Shaposhnikov, J.Phys.Conf.Ser.171:012005,2009.]

1. GUT baryogenesis. 2. GUT baryogenesis after preheating. 3. Baryogenesis from primordial black holes. 4. String scale baryogenesis. 5. Affleck-Dine (AD) baryogenesis. 6. Hybridized AD baryogenesis. 7. No-scale AD baryogenesis. 8. Single field baryogenesis. 9. Electroweak (EW) baryogenesis. 10. Local EW baryogenesis. 11. Non-local EW baryogenesis. 12. EW baryogenesis at preheating. 13. SUSY EW baryogenesis. 14. String mediated EW baryogenesis. 15. Baryogenesis via leptogenesis. 16. Inflationary baryogenesis. 17. Resonant leptogenesis. 18. Spontaneous baryogenesis. 19. Coherent baryogenesis. 20. Gravitational baryogenesis. 21. Defect mediated baryogenesis. 22. Baryogenesis from long cosmic strings. 23. Baryogenesis from short cosmic strings. 24. Baryogenesis from collapsing loops. 25. Baryogenesis through collapse of vortons. 26. Baryogenesis through axion domain walls. 27. Baryogenesis through QCD domain walls. 28. Baryogenesis through unstable domain walls. 29. Baryogenesis from classical force. 30. Baryogenesis from electrogenesis. 31. B-ball baryogenesis. 32. Baryogenesis from CPT breaking. 33. Baryogenesis through quantum gravity. 34. Baryogenesis via neutrino oscillations. 35. Monopole baryogenesis. 36. Axino induced baryogenesis. 37. Gravitino induced baryogenesis. 38. Radion induced baryogenesis. 39. Baryogenesis in large extra dimensions. 40. Baryogenesis by brane collision. 41. Baryogenesis via density fluctuations. 42. Baryogenesis from hadronic jets. 43. Thermal leptogenesis. 44. Nonthermal leptogenesis.

## 近い将来, 検証可能なシナリオ

- 電弱バリオン数生成
  - TeVスケールレプトジェネシス
  - ニュートリノ振動バリオン数生成
- ↔ ヒッグス物理
- ↔ ニュートリノ物理

# 電弱バリオジェネシス

[Kuzmin, Rubakov, Shaposhnikov, PLB155,36 ('85)]

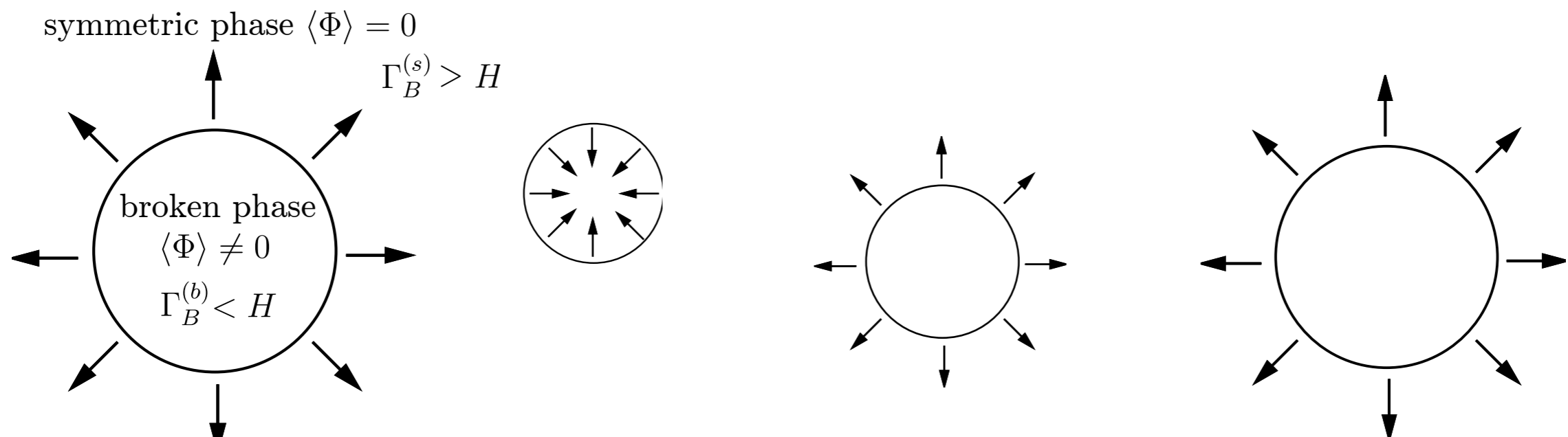
## Sakharovの条件

Bの破れ: スファレロン過程 (高温で頻繁に起こる)

Cの破れ: カイラルゲージ相互作用

CPの破れ: 小林-益川位相, 標準模型の拡張模型では他にも物理的CP位相が存在.

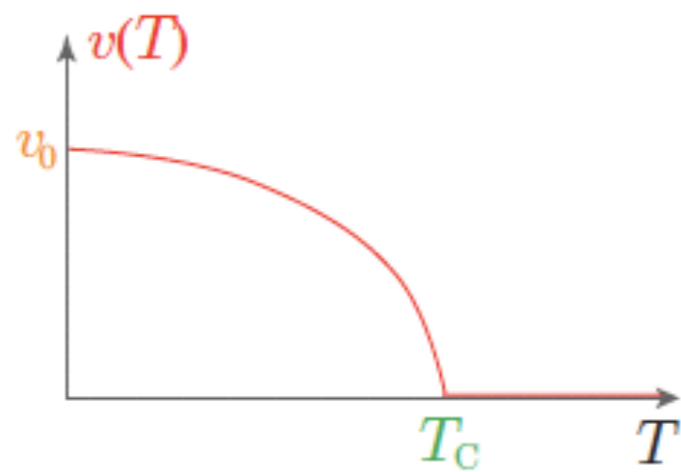
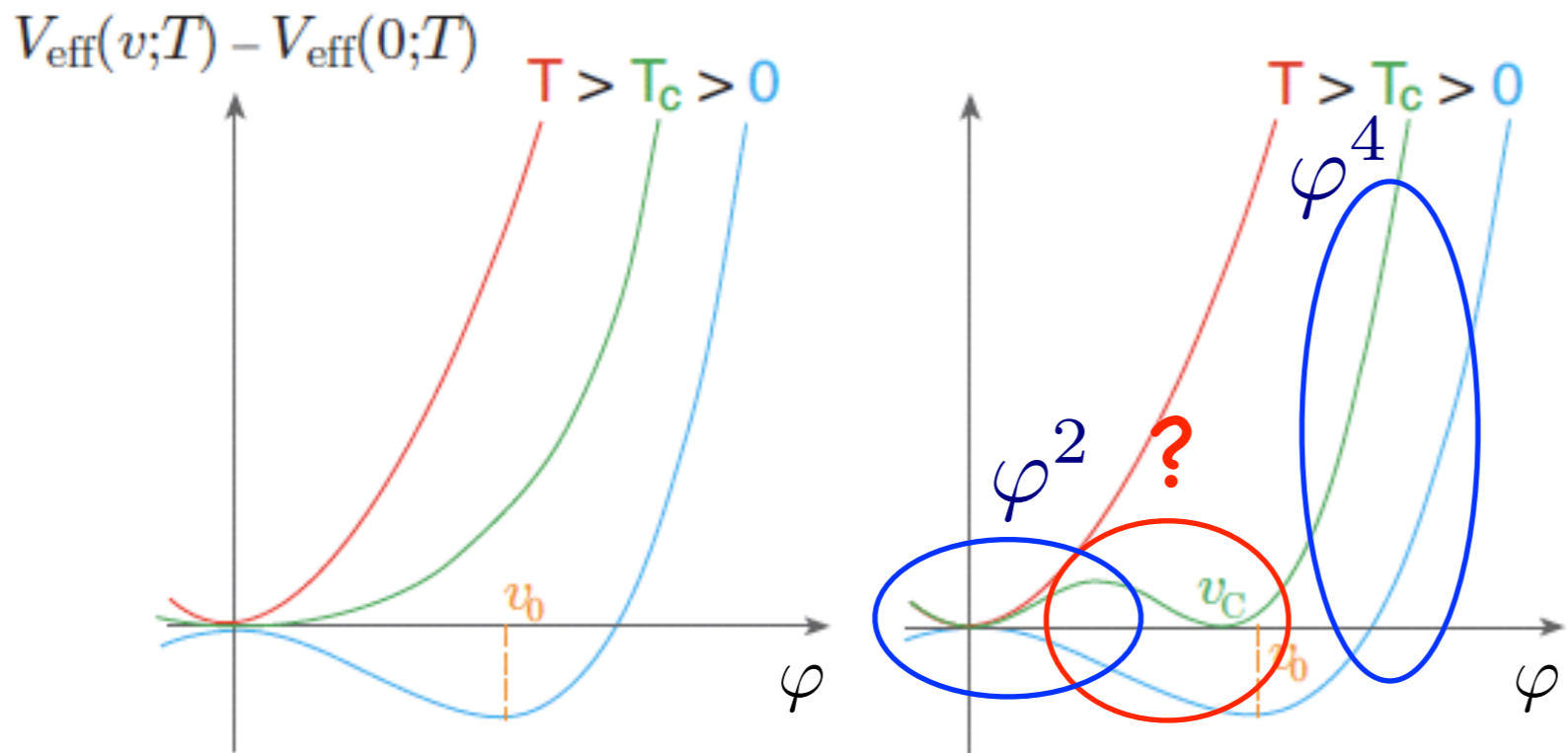
非平衡の実現: 電弱相転移が『強い』一次.



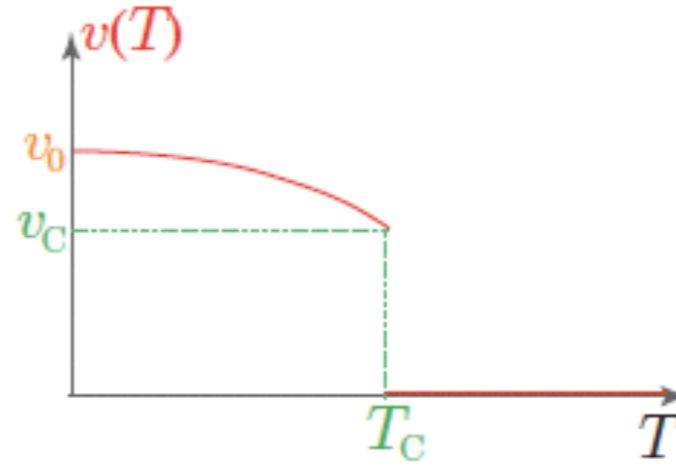
バリオン数は膨張する泡によって作られる.

# 相転移の次数

自由エネルギーの1(2)階微分に不連続性 = 1(2)次相転移.



2nd order PT



1st order PT

[From K. Funakubo's slide]

1次転移になる為には、ポテンシャルに負の寄与が必要.

1. ツリーレベルの混合で出す.
2. 有限温度のボゾンループで出す.

バリオン数生成の為には、 $v_c/T_c > (1.0-1.4)$  が必要!



# 標準模型での可能性

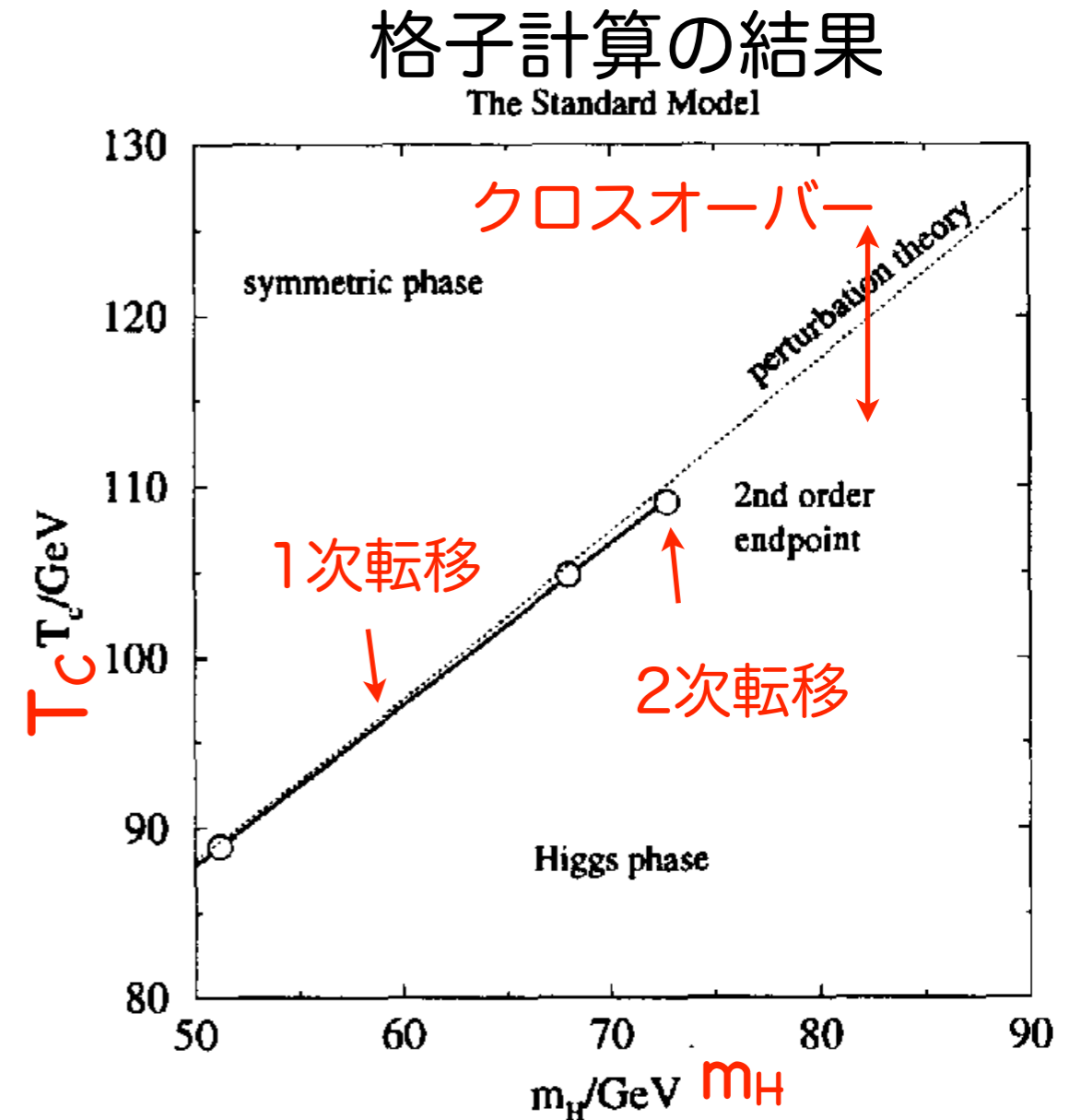
- 相転移の次数はヒッグスの質量に強く依存する。

## 結論

- 125GeVヒッグスでは、相転移が1次ではない(クロスオーバー)。
- > 標準模型ではバリオン非対称性は出せない。

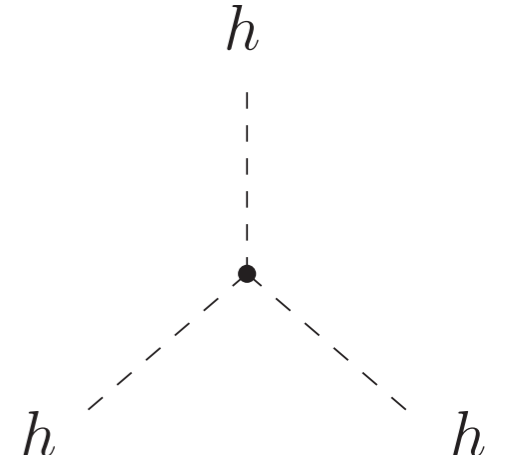
- ヒッグスセクターに一つの新粒子を入れるだけでもこの問題は簡単に解決する。

1重項ヒッグスと2重項ヒッグスの場合をみる。



# hhh vs. $v_c/T_c$

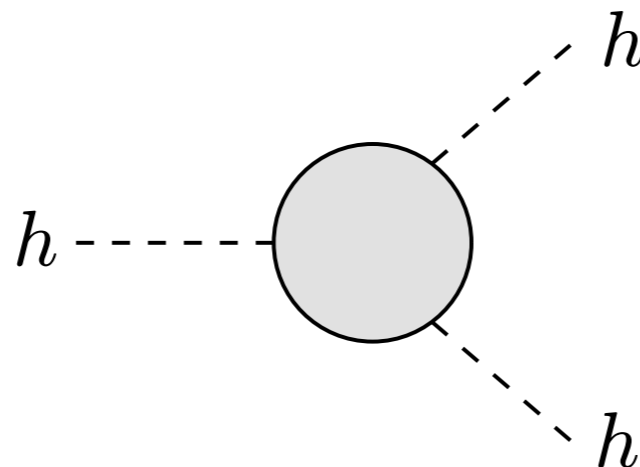
- 電弱対称性が破れて初めて出現する結合定数
- 対称性の破れの情報を持っている.



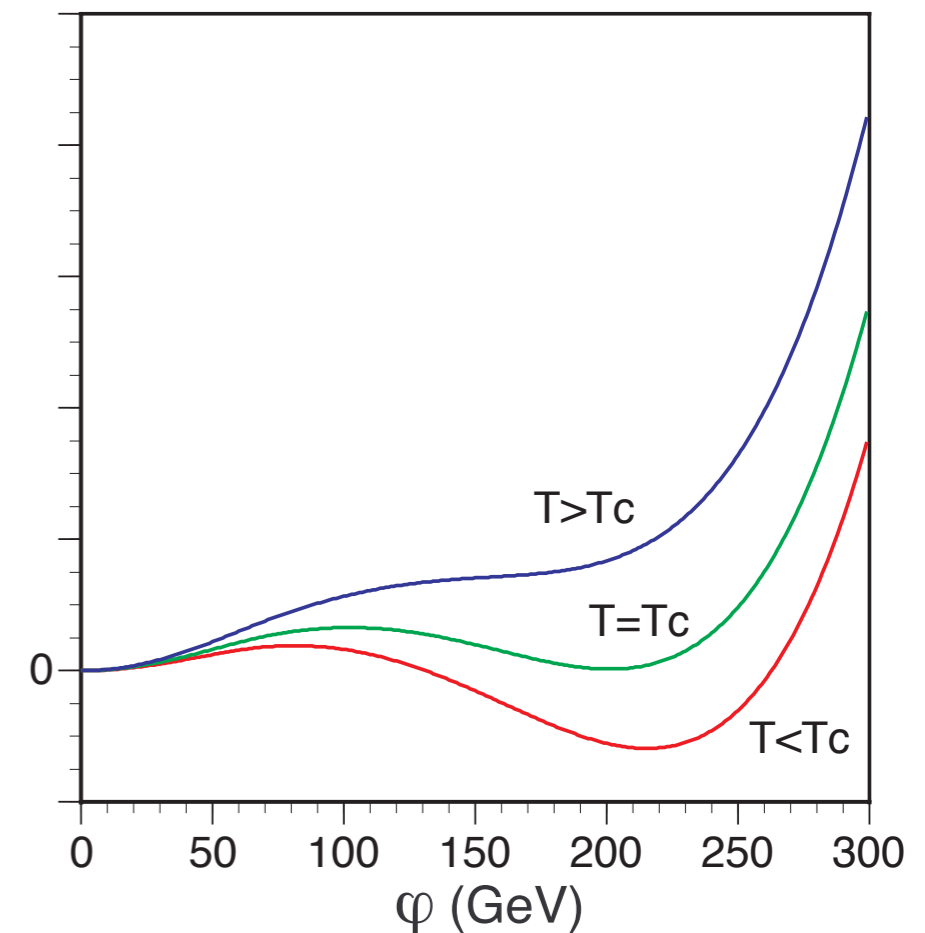
hhh結合定数に対する新物理の効果  
⇔ 相転移の次数を決める効果

$$\Delta\lambda_{hhh} = \frac{\lambda_{hhh} - \lambda_{hhh}^{\text{SM}}}{\lambda_{hhh}^{\text{SM}}} \quad \text{vs.} \quad v_c/T_c$$

を調べればよい.



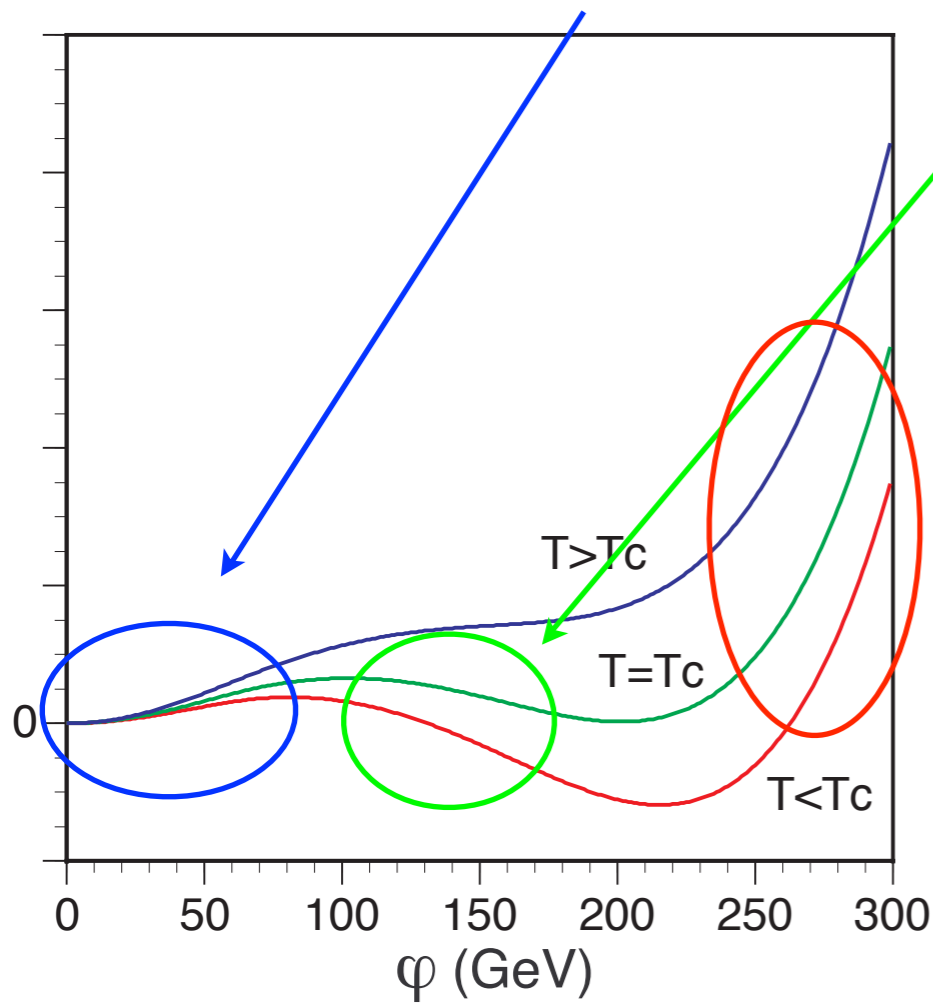
$V_{\text{eff}}$



$v_c/T_c > (1.0-1.4)$

# $v_C/T_C$

$$V_{\text{eff}} \simeq D(T^2 - T_0^2)\varphi^2 - ET\varphi^3 + \frac{\lambda_T}{4}\varphi^4 \xrightarrow{T=T_C} \frac{\lambda_{T_C}}{4}\varphi^2(\varphi - v_C)^2$$



□ 臨界温度( $T_C$ )は2つの真空が縮退する温度で定義.

□ ボゾンループによって一次相転移が実現.

$$v_C = \frac{2ET_C}{\lambda_{T_C}} \Rightarrow \frac{v_C}{T_C} = \frac{2E}{\lambda_{T_C}}$$

$$\lambda_{T_C} \simeq \lambda \simeq m_h^2/(2v^2)$$

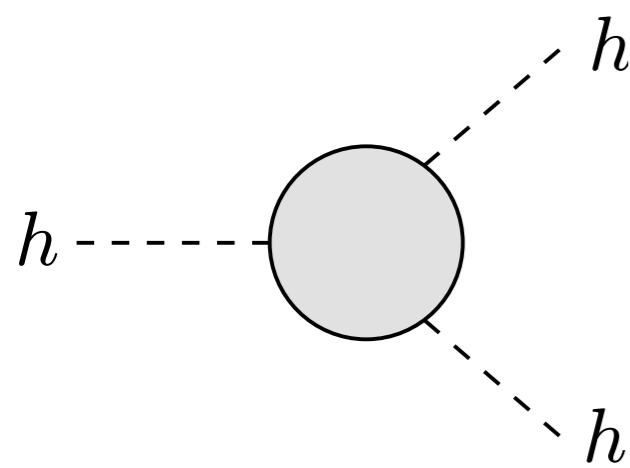
**Eが大きくなる条件とは?**



# hhh結合定数への量子補正

重いヒッグスのhhh結合定数への量子補正を計算する。

[S. Kanemura, S. Kiyoura, Y. Okada, E.S., C.-P. Yuan, PLB558 (2003) 157]



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

(ヒッグス-ゲージ結合定数、ヒッグス-湯川結合定数が標準模型と同じになる極限)

$$\lambda_{hhh}^{2\text{HDM}} \simeq \frac{3m_h^2}{v} \left[ 1 + \sum_{\Phi=H,A,H^\pm} \frac{c}{12\pi^2} \frac{m_\Phi^4}{m_h^2 v^2} \left( 1 - \frac{M^2}{m_\Phi^2} \right)^3 \right].$$

$c=1(2)$ : 中性(荷電)ヒッグス

重いヒッグスの質量を大きくする極限には2種類ある  $m_\Phi^2 \simeq M^2 + \lambda_i v^2$

For  $M^2 \ll \lambda_i v^2$  ( $m_\Phi^2 \simeq \lambda_i v^2$ ), the quantum corrections would grow with  $m_\Phi^4$ .  
⇒ nondecoupling極限 (結合定数を大きくする)

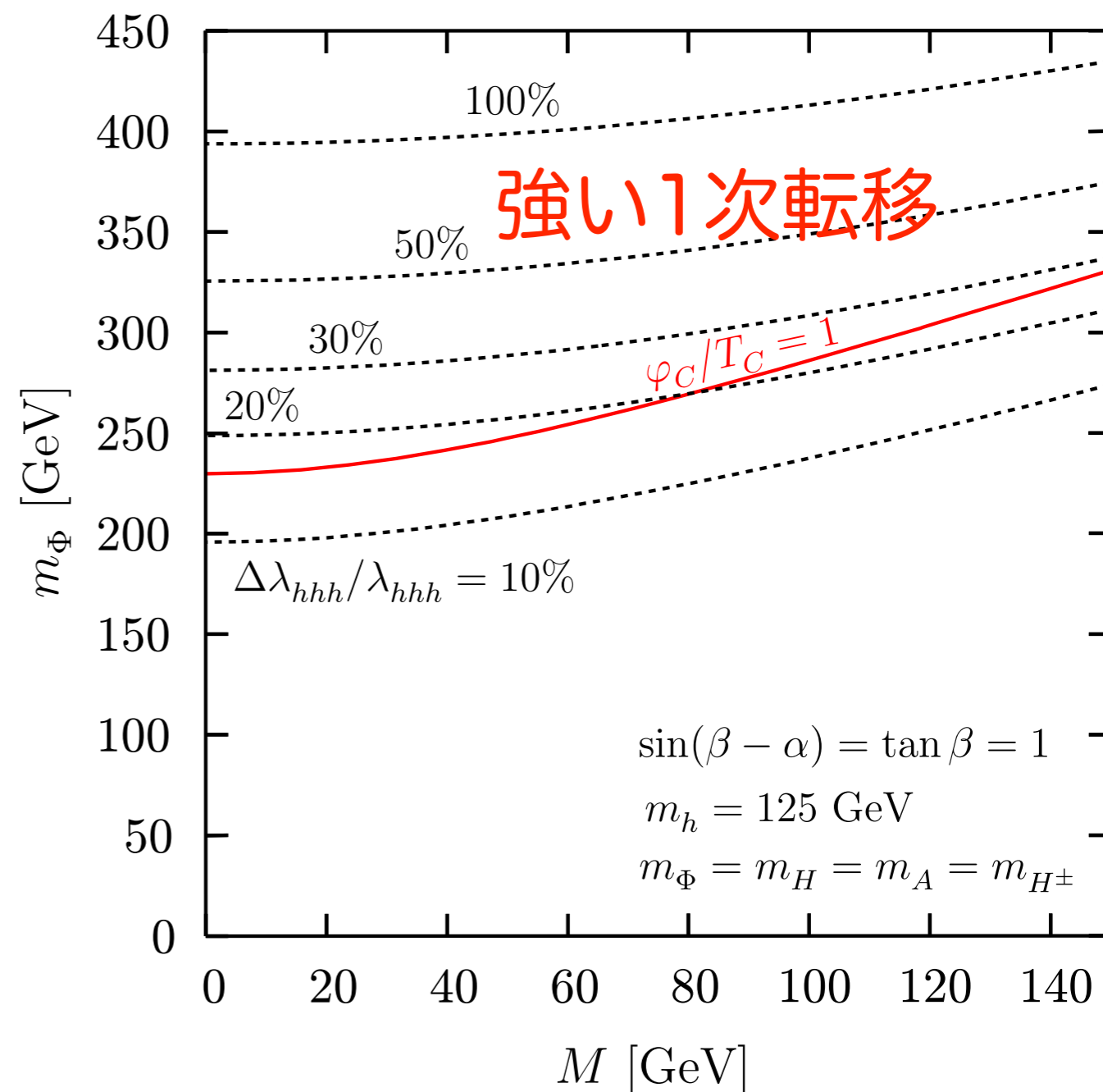
For  $M^2 \gg \lambda_i v^2$  ( $m_\Phi^2 \simeq M^2$ ), the quantum corrections would be suppressed.  
⇒ 通常のdecoupling極限 (1/質量)

重いヒッグス粒子がnondecoupling的 ⇒  $\lambda_{hhh}$  ↑

# 2重項ヒッグス拡張模型

[Kanemura, Okada, E.S., PLB606,(2005)361]

- 標準模型に2重項ヒッグスを追加.
- $M$ は電弱対称性が破れる前から存在する質量変数.
- 強い一次相転移は重いヒッグスの量子効果によって引き起こされる.



- $\Delta\lambda_{hhh}$ が(15-20)%以上ならば, 電弱相転移は強い1次.

# 1重項ヒッグス拡張モデル

H: 2重項 S: 1重項

$$V_0 = -\mu_H^2 H^\dagger H + \lambda_H (H^\dagger H)^2$$

$$+ \mu_{HS} H^\dagger H S + \frac{\lambda_{HS}}{2} H^\dagger H S^2 \quad \text{H-S混合項}$$

$$+ \mu_S^3 S + \frac{m_S^2}{2} S^2 + \frac{\mu'_S}{3} S^3 + \frac{\lambda_S}{4} S^4,$$

標準モデルとは異なる相転移にするには, H-S混合項が重要

# hhh結合定数

$$\lambda_{H_1 H_1 H_1}^{\text{rSM, tree}} = 6 \left[ \lambda_H v c_\alpha^3 + \frac{\mu_{HS}}{2} s_\alpha c_\alpha^2 + \frac{\lambda_{HS}}{2} s_\alpha c_\alpha (v s_\alpha + v_S c_\alpha) + \left( \frac{\mu'_S}{3} + \lambda_S v_S \right) s_\alpha^3 \right]$$

$\alpha$ : h-H 混合角 ( $\mu_{HS}$ ,  $\lambda_{HS}$  の函数)

$$\xrightarrow{\alpha \rightarrow 0} \frac{3m_{H_1}^2}{v} \quad (\text{SM-like})$$



# 1重項ヒッグス拡張模型

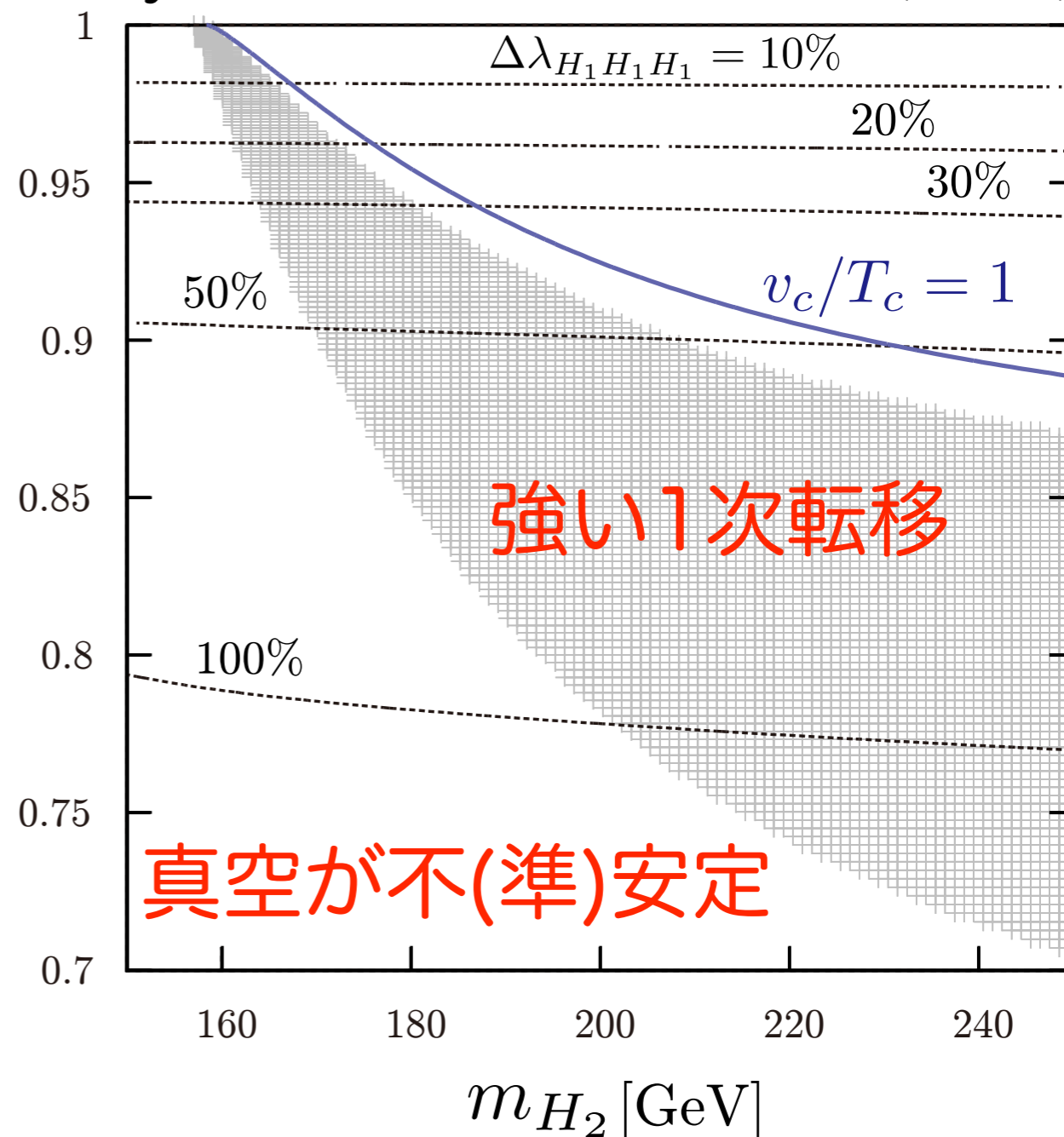
[Fuyuto, E.S., PRD90, 015015 (2014)]

- 標準模型に1重項ヒッグスを追加.

$$\kappa = \frac{g_{H_1 V V}}{g_{h V V}^{\text{SM}}} = \frac{g_{H_1 f f}}{g_{h f f}^{\text{SM}}} = \cos \alpha$$

- 強い1次相転移はH-Sの混合によって引き起こされる.

- このとき,  $HVV$ ,  $Hff$ ,  $hhh$ は標準模型からずれる.



# $\lambda_{hhh}$ の測定

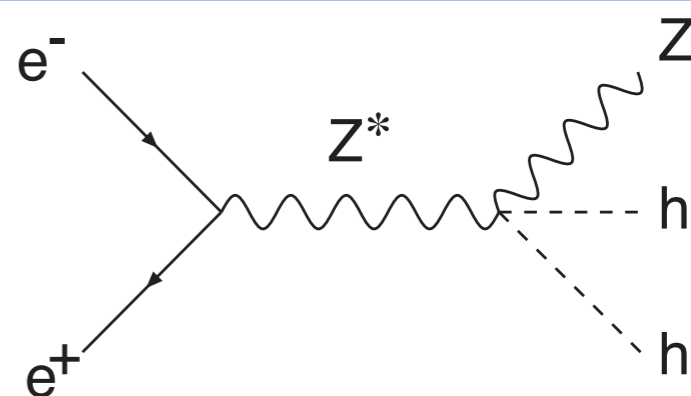
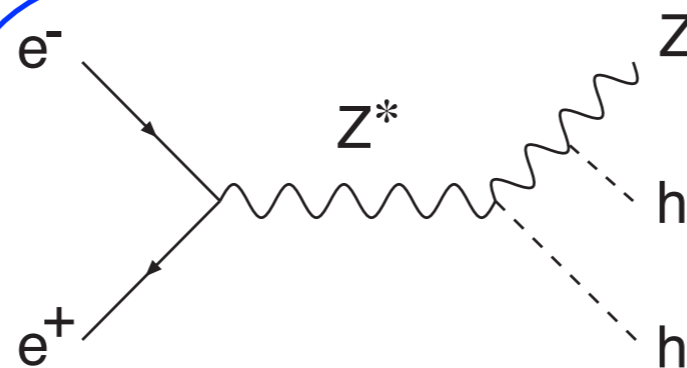
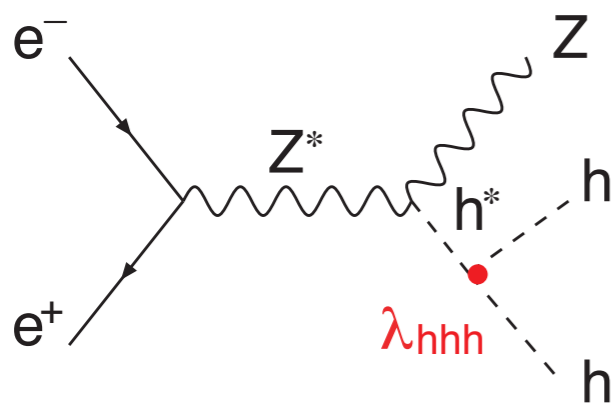
$\lambda_{hhh}$ は $h$ を2個生成するプロセスに含まれている。

以下ではLCを例にとる。

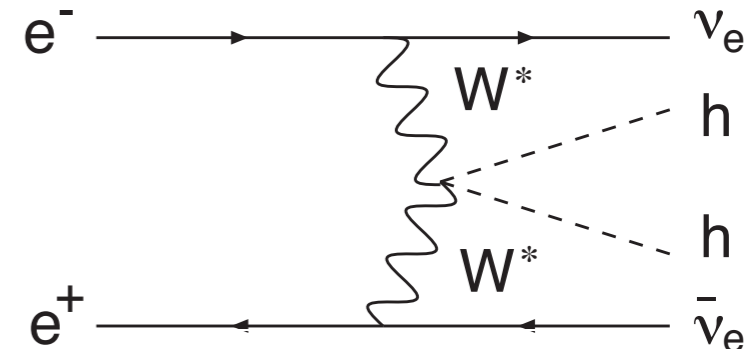
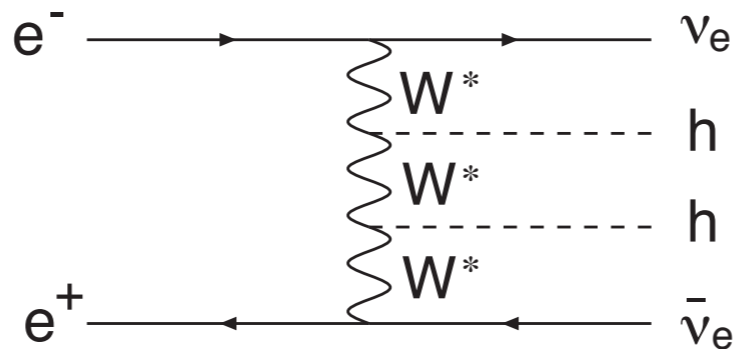
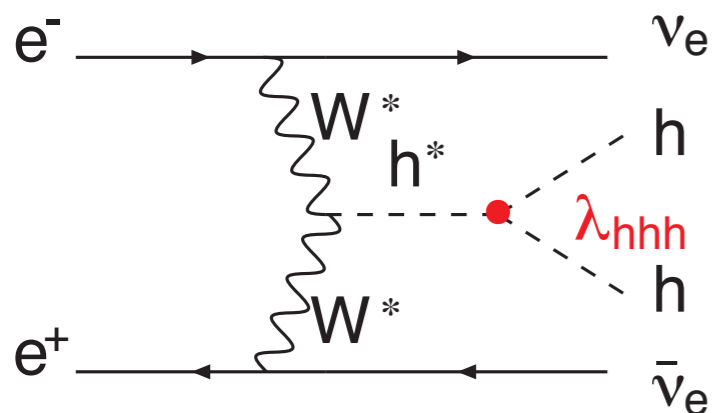
例: @LC

Higgsstrahlung

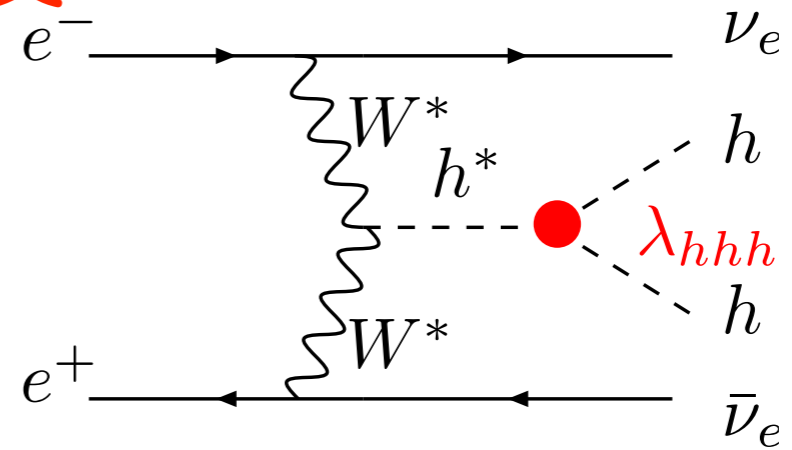
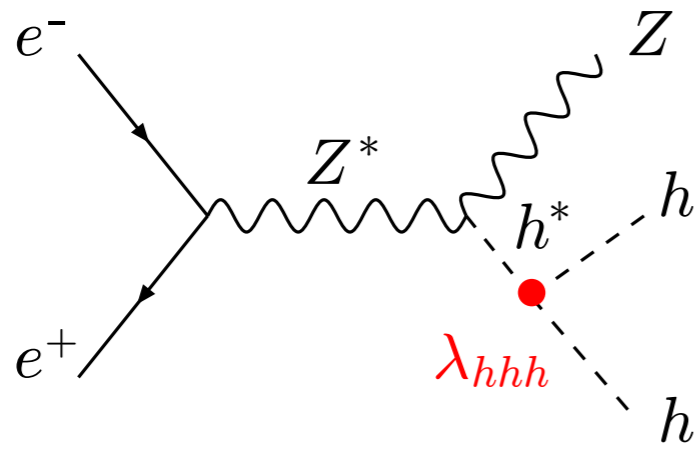
バックグラウンド



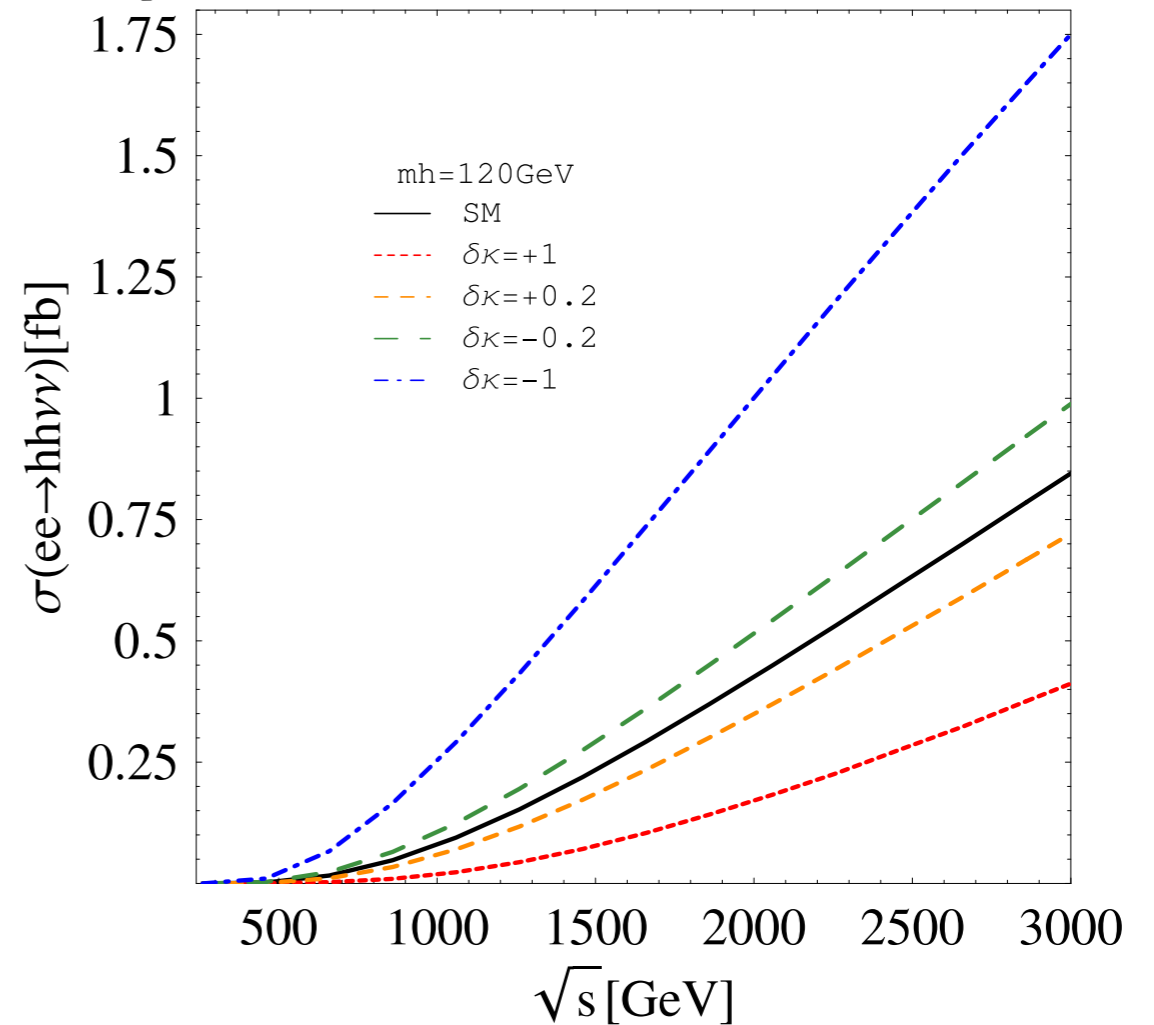
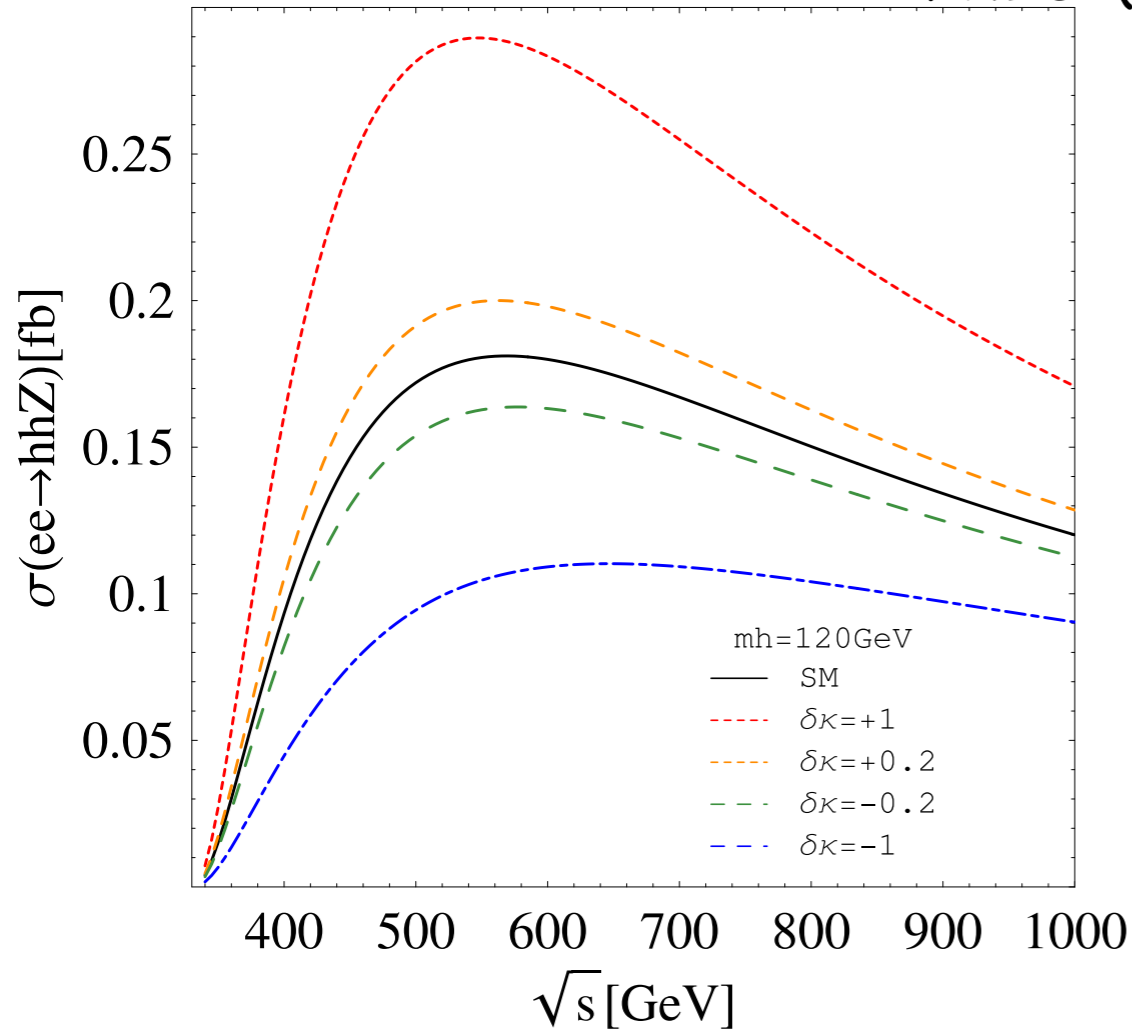
WW-fusion



# 生成断面積



$\lambda_{hhh} = \lambda_{hhh}^{\text{SM}} (1 + \Delta\kappa),$  [E.Asakawa, D.Harada, S.Kanemura, Y.Okada, K.Tsumura, PRD82(2010)115002]



$\sqrt{s} < 1\text{TeV}$ なら, 生成断面積は  $O(0.1)\text{fb}$

$\sqrt{s} = 500\text{GeV}$ だとHiggsstrahlungが効くが,  $1\text{TeV}$ くらいになるとWW-fusion過程が効く。

# ヒッグス結合測定@ILC

ILC white paper, 1310.0763

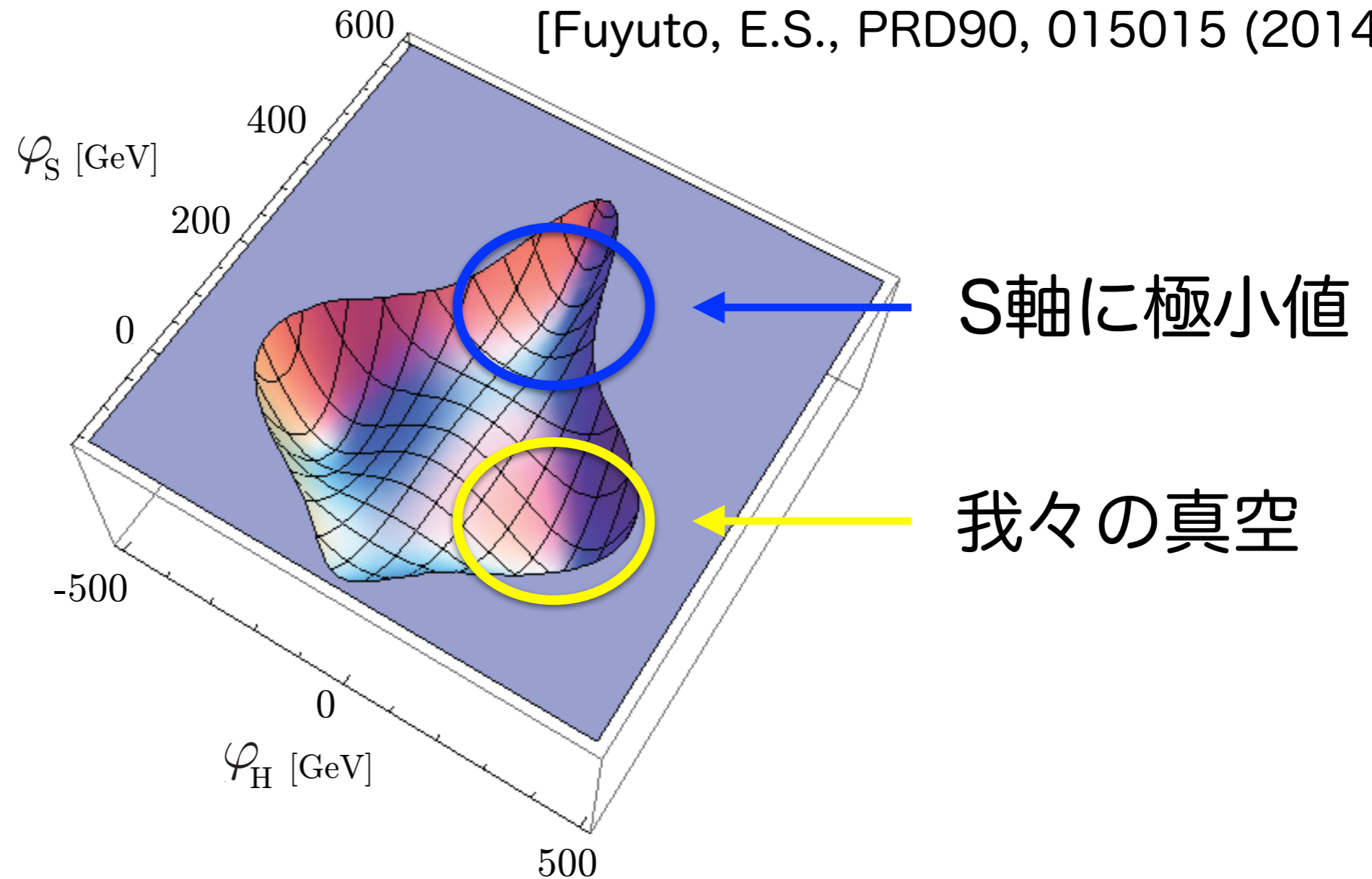
**Table 9.1.** Summary of expected accuracies  $\Delta g_i/g_i$  for model independent determinations of the Higgs boson couplings. The theory errors are  $\Delta F_i/F_i = 0.1\%$ . For the invisible branching ratio, the numbers quoted are 95% confidence upper limits.

	ILC(250)	ILC(500)	ILC(1000)	ILC(LumUp)
$\sqrt{s}$ (GeV)	250	250+500	250+500+1000	250+500+1000
L ( $\text{fb}^{-1}$ )	250	250+500	250+500+1000	1150+1600+2500
$\gamma\gamma$	18 %	8.4 %	4.0 %	2.4 %
$gg$	6.4 %	2.3 %	1.6 %	0.9 %
$WW$	4.8 %	1.1 %	1.1 %	0.6 %
$ZZ$	1.3 %	1.0 %	1.0 %	0.5 %
$t\bar{t}$	–	14 %	3.1 %	1.9 %
$b\bar{b}$	5.3 %	1.6 %	1.3 %	0.7 %
$\tau^+\tau^-$	5.7 %	2.3 %	1.6 %	0.9 %
$c\bar{c}$	6.8 %	2.8 %	1.8 %	1.0 %
$\mu^+\mu^-$	91%	91%	16 %	10 %
$\Gamma_T(h)$	12 %	4.9 %	4.5 %	2.3 %
$hhh$	–	83 %	21 %	13 %
BR(invis.)	< 0.9 %	< 0.9 %	< 0.9 %	< 0.4 %

$\Delta \lambda_{hhh}/\lambda_{hhh}=13\%$ で測定できるならば、電弱バリオン数生成のシナリオを直接精査できる。

# ヒッグスポテンシヤル

[Fuyuto, E.S., PRD90, 015015 (2014)]



1重項模型での我々の予言は、この形のヒッグスポテンシヤル!

# まとめ

- ヒッグスセクターは新物理の窓
- SM-like  $\neq$  SM. 結合定数の精密測定が重要
- ヒッグスの3点自己結合定数の測定によって電弱相転移の次数が分かる. (宇宙のバリオン数生成と関連)

Backup

# ニュートリノ質量

- 標準模型では, ニュートリノの質量はゼロ.

## 質量生成機構

- シーソー機構

タイプ1: 右巻きニュートリノを導入

タイプ2: 3重項ヒッグスを導入

タイプ3: 3重項フェルミオンを導入

- 輻射シーソー機構 ← 新しいスカラー粒子が必要

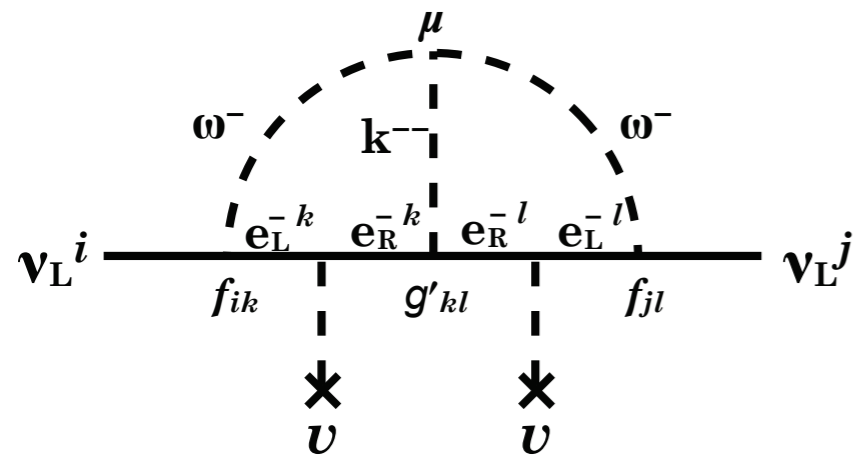
量子補正によって質量を生成する.



# 輻射シーソーモデル

- 量子補正によってニュートリノの質量が生成される。

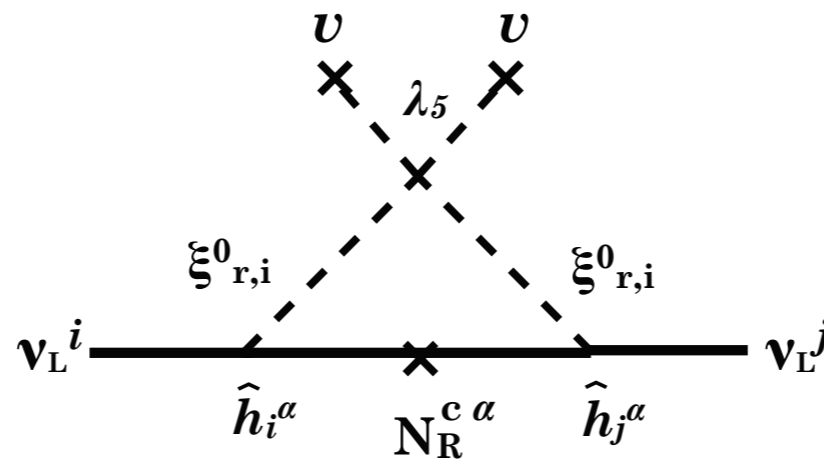
## Zee-Babuモデル



diagrams from [arXiv:1007.0706]

1重項荷電ヒッグス  
( $\omega^+$ ,  $k^{++}$ )

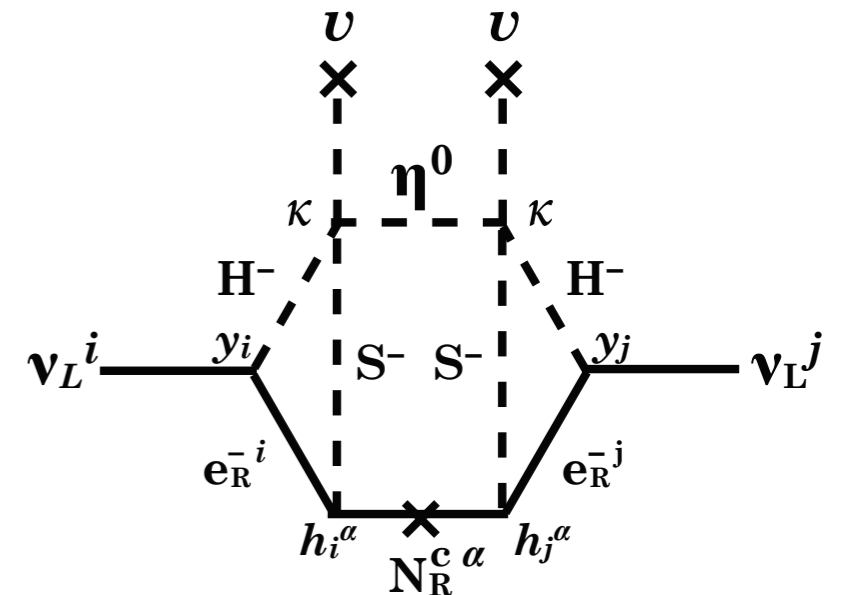
## Maモデル



2重項ヒッグス( $\zeta$ )  
RHニュートリノ( $N_R$ )

暗黒物質

## AKSモデル



1重項荷電ヒッグス( $S^+$ )  
1重項中性ヒッグス( $\eta^0$ )  
2重項ヒッグス( $\Phi$ )  
RHニュートリノ( $N_R$ )

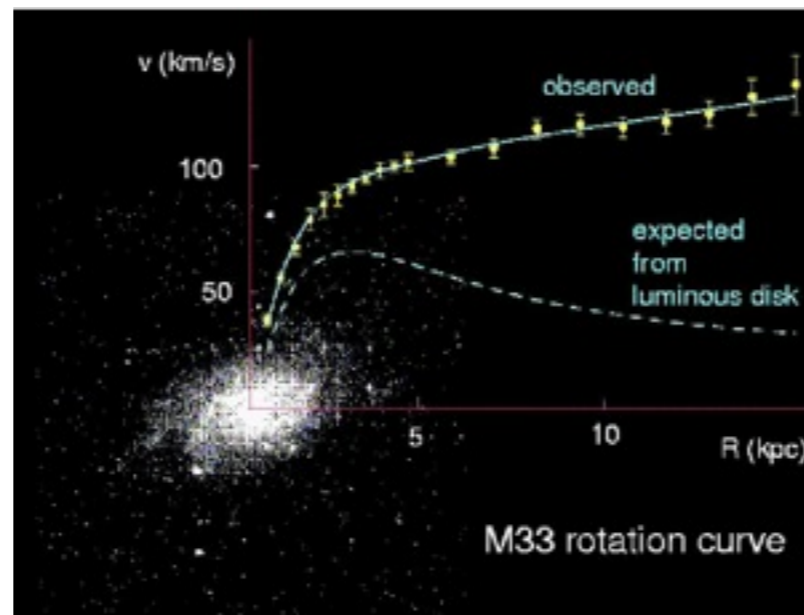
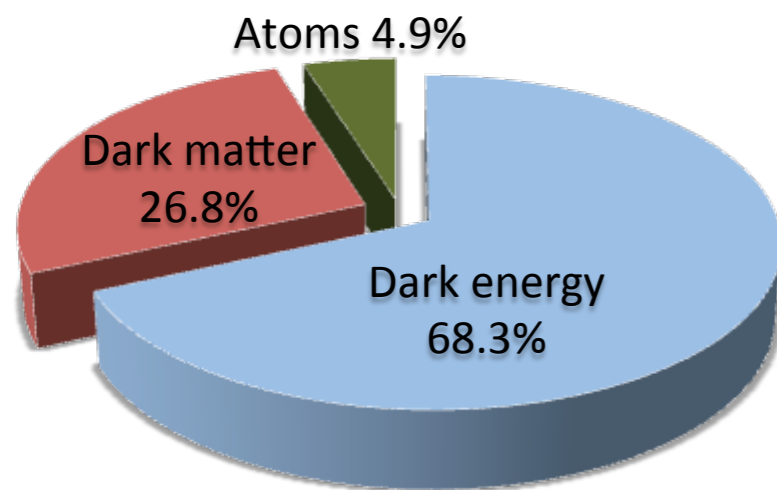
暗黒物質

バリオン数生成

# 暗黒物質

## 暗黒物質の証拠

CMB, BBN, BAO, rotation curveなど



Planck

$$\Omega_{\text{CDM}} h^2 = 0.1196 \pm 0.0031 \quad (68\% \text{ C.L.})$$

where  $h$  is the Hubble constant in units of 100 km/Mpc/s.

# ヒッグスポータル暗黒物質

portal= 扉、入り口. 暗黒物質へ通じる扉

標準模型

ヒッグス

スカラー, フェルミオン,  
ベクトル粒子いずれも可.

暗黒物質

暗黒物質はヒッグスセクター  
とのみ相互作用する.

