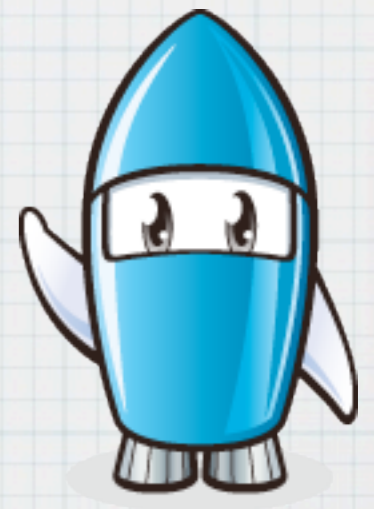
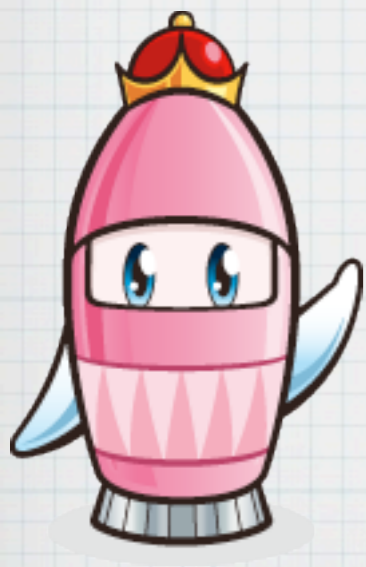


# ニュートリノ質量とILC

進藤哲央（工学院大学）

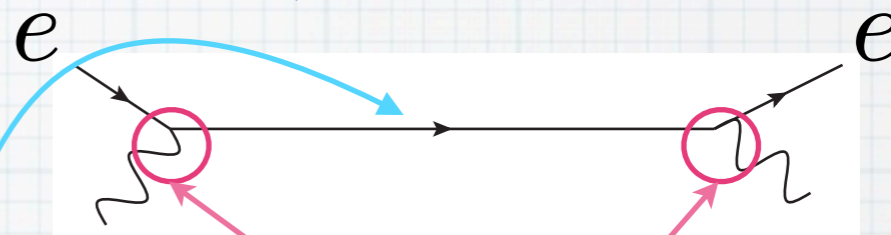


# ニュートリノ質量

- ニュートリノ質量は非常に小さい
- トリチウムの $\beta$ 崩壊による制限:  $m < 2\text{eV}$
- 2重 $\beta$ 崩壊や宇宙論等からの制限も $0(0.1\text{eV})$ 以下を示唆
- 電子質量に比べてもかなり小さい
- 近似的にはmassless?
- 「標準模型」はニュートリノ質量が0になるように作られている

# ニュートリノ振動

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$



質量固有状態で伝播

$$i \frac{d}{dt} \nu_i(t) = E_i \nu_i \simeq \left( p + \frac{m_i^2}{2p} \right) \nu_i(t)$$

フレーバー固有状態  
として生成・観測

$$\nu_e(t) = (\cos^2 \theta e^{-iE_1 t} + \sin^2 \theta e^{-iE_2 t}) \nu_e + \sin \theta \cos \theta (e^{-iE_1 t} - e^{-iE_2 t}) \nu_\mu$$

よって  $P(\nu_e \rightarrow \nu_e) = 1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{1.27 \Delta m_{12}^2 [\text{eV}^2]}{E_\nu [\text{MeV}]} L [\text{m}]$

$$\begin{aligned} \Delta m_{\text{atm}}^2 &\sim 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2 & \sin^2 2\theta_{\text{atm}} &\simeq 1 \\ \Delta m_{\odot}^2 &\sim 8.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2 & \tan^2 \theta_{\odot} &\simeq 0.4 \\ & & \sin \theta_{13} &\sim 0.1 \end{aligned}$$

SK, KamLAND, SNO, K2K, Daya Bay, T2K etc

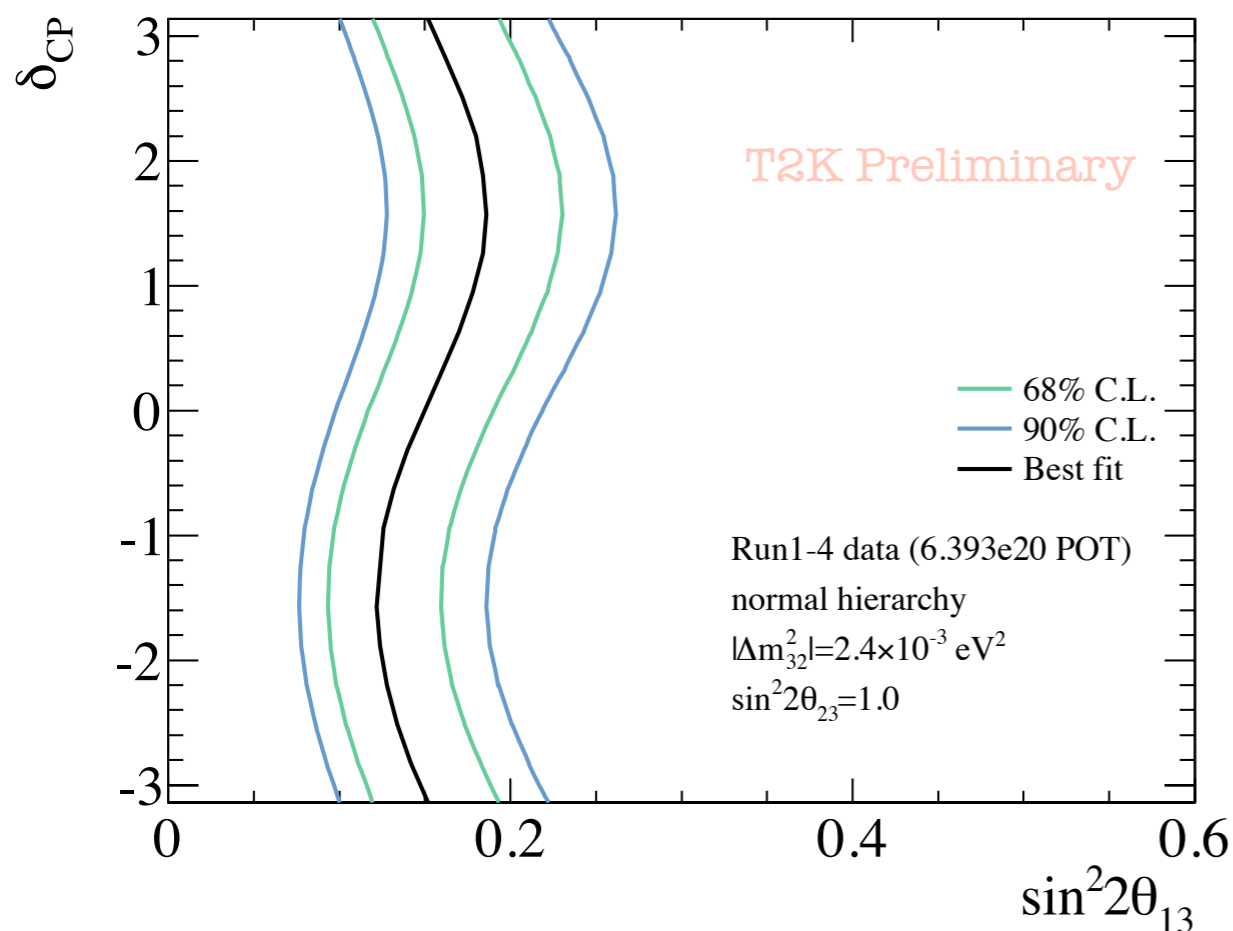
# $\nu_e$ Appearance Results

EPSでのT2Kのトーク

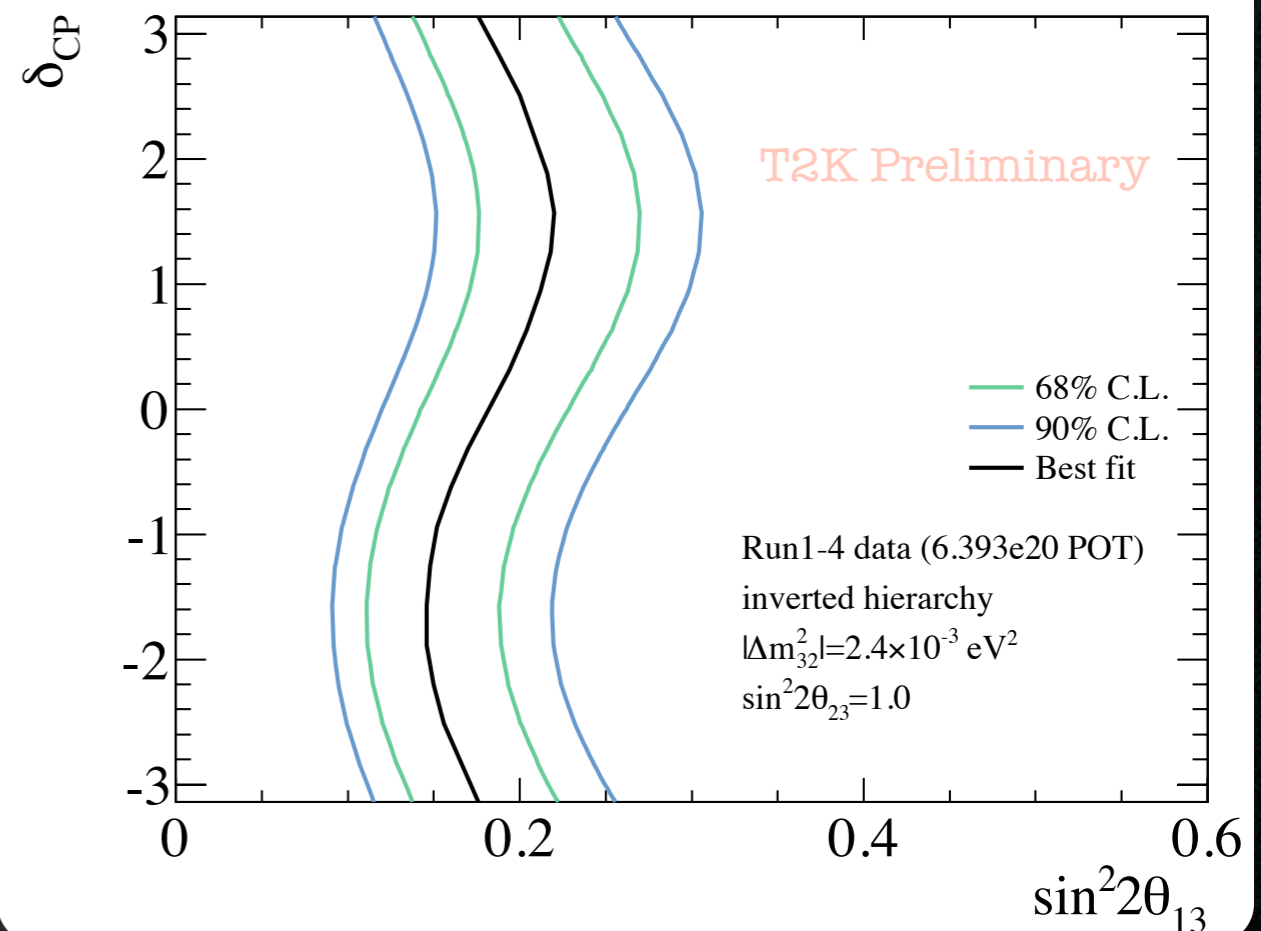
- **Observed 28 events** (expected  $20.44 \pm 1.8$  for  $\sin^2 2\theta_{13}=0.1$ )
- Comparing the best p- $\theta$  fit likelihood to null hypothesis gives a **7.5 $\sigma$  significance for non-zero  $\theta_{13}$**

(For  $\sin^2 2\theta_{23}=1$ ,  $\delta_{CP}=0$ , and normal mass hierarchy)

T2K  $\delta_{CP}$  vs  $\sin^2 2\theta_{13}$  (Normal Hierarchy)



T2K  $\delta_{CP}$  vs  $\sin^2 2\theta_{13}$  (Inverted Hierarchy)



**First ever observation ( $>5\sigma$ ) of an explicit  $\nu$  appearance channel**

# Summary

EPSでのT2Kのトーク

- **T2K has made an observation of  $\nu_e$  appearance from a  $\nu_\mu$  beam**
  - **$\theta_{13}=0$  is excluded with a significance of  $7.5\sigma$  ( $\delta_{CP}=0, \sin^2 2\theta_{23}=1$ )**
- J-PARC achieved steady operation at 220 kW for much of Run 4
- We have now analyzed  $6.39 * 10^{20}$  POT accumulated by April 12th, 2013
  - This is 2.1 times the Run 1-3 data used for the 2012 analysis
- Analysis improvements have significantly enhanced the sensitivity to  $\nu_e$  appearance (from below  $5\sigma$  to  $5.5\sigma$ )
  - Near detector event selection now contains a  $CC1\pi^+$  sample
  - The new fitQun reconstruction algorithm removes 70% of the  $\pi^0$  background relative to the previous analysis
    - More improvement is expected as fitQun becomes more fully integrated into T2K analyses
- The  $\nu_\mu$  disappearance contours are sensitive to the octant chosen
  - Both contours are now provided

# ニュートリノ質量の起源

ニュートリノ質量のスケール  $< 0.1 \text{ eV}$  ←  $\frac{\text{電子質量}}{1/50000000}$  以下

第0近似として

「標準模型」はニュートリノ質量が0になるように作られている

標準模型にどうやって組み込んでいくか?

- ニュートリノ湯川

$$y_\nu \bar{\nu}_R \ell_L \cdot \phi_1 \rightarrow m_\nu \bar{\nu}_R \nu_L$$

$$m_\nu = \mathcal{O}(0.1 \text{ eV}) \Rightarrow y_\nu = \mathcal{O}(10^{-12})$$

- dim 5 オペレータ

$$\frac{c_{ij}}{M} (\ell_{Li} \cdot \phi) (\ell_{Lj} \cdot \phi) \rightarrow (m_\nu)_{ij} \bar{\nu}_i^c \bar{\nu}_j$$

1. 重い  $M$   $c_{ij} = \mathcal{O}(1) \rightarrow M \sim 10^{14} \text{ GeV}$

2. 小さい  $c_{ij}$   $c_{ij} = \mathcal{O}(10^{-11}) \rightarrow M \sim 1 \text{ TeV}$

- ...

# 様々な模型

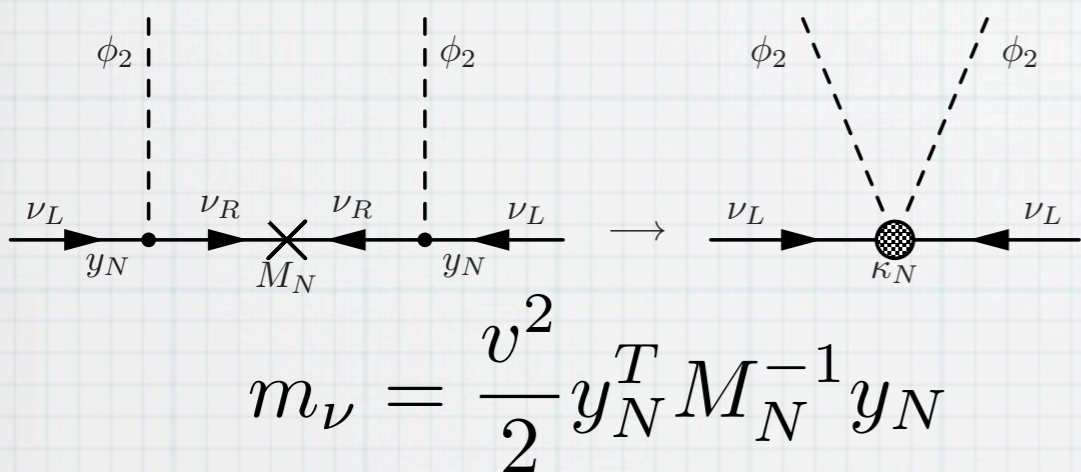
- シーソー機構: 非常に大きなmassで抑制
  - type I
  - type II
  - ...
- 輻射シーソー: ループファクターで抑制
- 余剰次元模型: 波動関数の重なりで抑制
- ...

# 例1: type I シーソーモデル

非常に重い右巻きニュートリノを導入

同時に説明

ニュートリノ質量の起源



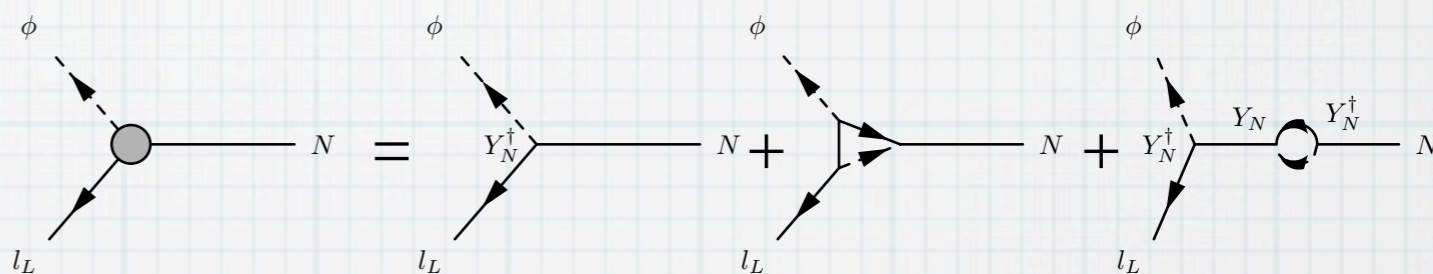
ただし、このモデルは一般に非常に高いmass scaleでの拡張模型になっている

さらに

$M_N$ が軽い→結合が弱い

直接測定はほぼ不可能!

バリオジェネシス



右巻きニュートリノのCPを破る崩壊によって#(B-L)が生成

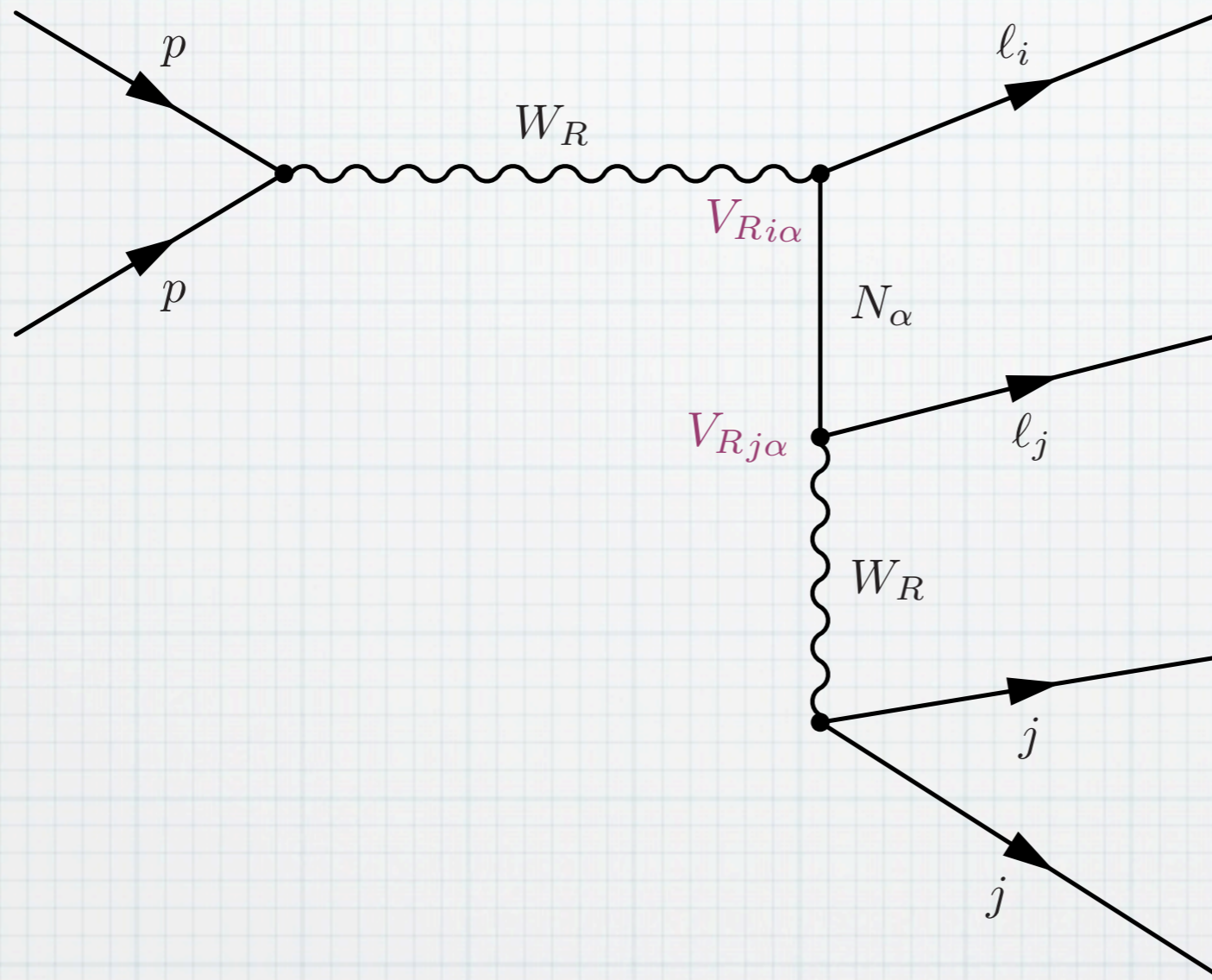


スファレロンによって#Bに変換

(Left-Right模型でRHNが軽ければ検証できるかも)



# RHN in LR-model



# 例2:type II シーソーモデル

トリプレットヒッグス( $Y=1$ )を導入

$$\mathcal{L} = \frac{Y_{\Delta}}{2} \bar{\ell}^c \Delta \ell$$

$\Delta$ の中性成分が非常に小さなvev( $\sim 0.1$  eV)を持つ



小さなニュートリノ質量

このモデルのヒッグスポテンシャル:

$$V = \mu^2 H^\dagger H + \frac{\lambda}{2} (H^\dagger H)^2 + m_{\Delta}^2 \text{tr}(\Delta^\dagger \Delta) + \frac{\lambda_T^1}{2} [\text{tr}(\Delta^\dagger \Delta)]^2 + \lambda_T^2 \det(\Delta^\dagger \Delta) \\ + \lambda_T^3 (H^\dagger H) \text{tr}(\Delta^\dagger \Delta) + \lambda_T^4 H^\dagger \cdot H \text{tr}(\Delta^\dagger \cdot \Delta) + \left( \frac{\mu_T}{\sqrt{2}} H \cdot \Delta^\dagger H + \text{h.c.} \right)$$

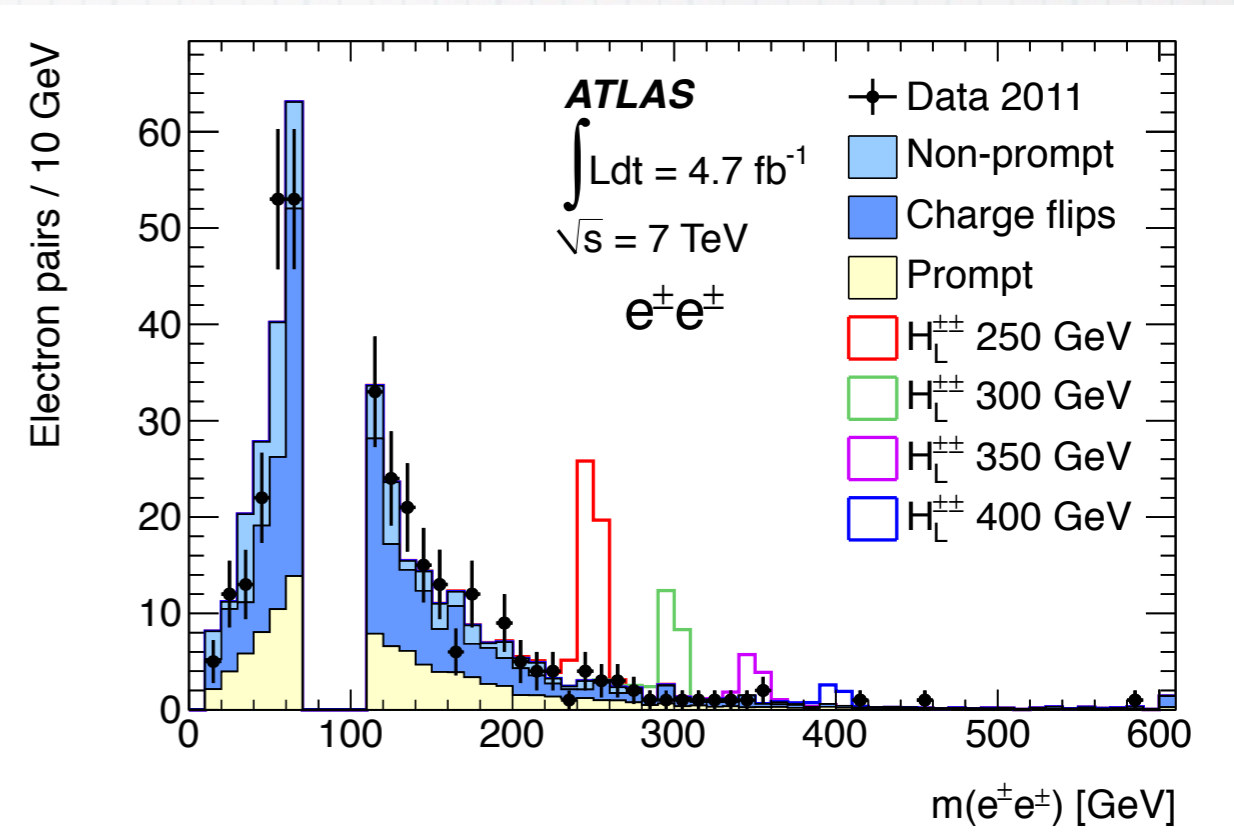
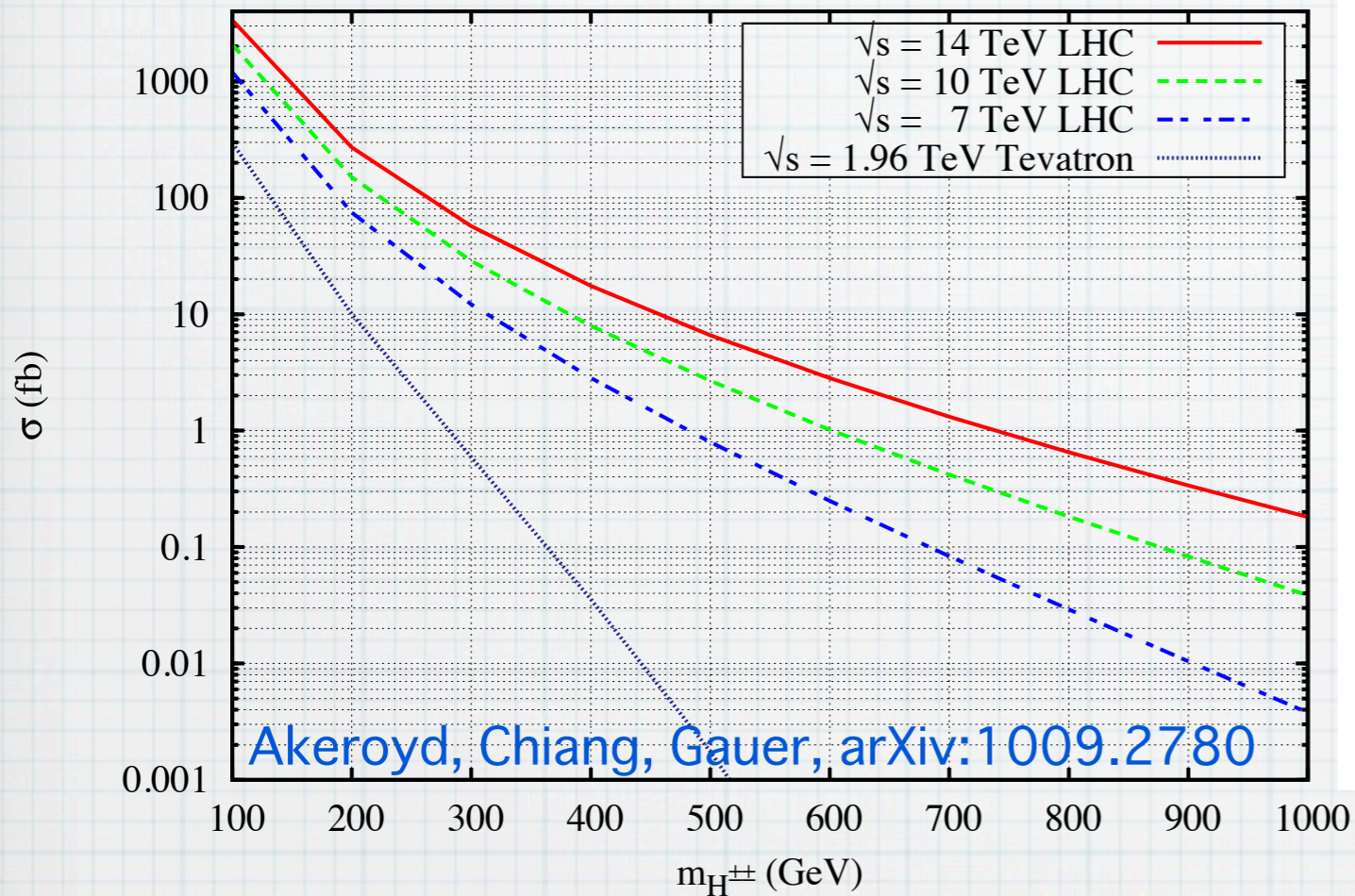
$$v_{\Delta} \sim \frac{\mu_T v^2}{2m_{\Delta}^2} \quad \mu_T \text{ が小さければ, 軽いトリプレットヒッグスも可能!}$$

SM-like Higgs結合の精密測定にも足跡がある!(菊池さんのトーク)

また, 複荷電ボゾンが登場

# 複荷電ボゾンの現象論

LHCでの例:  $q\bar{q} \rightarrow \gamma^*, Z^* \rightarrow H^{++}H^{--} \rightarrow l^+l^+l^-l^-$

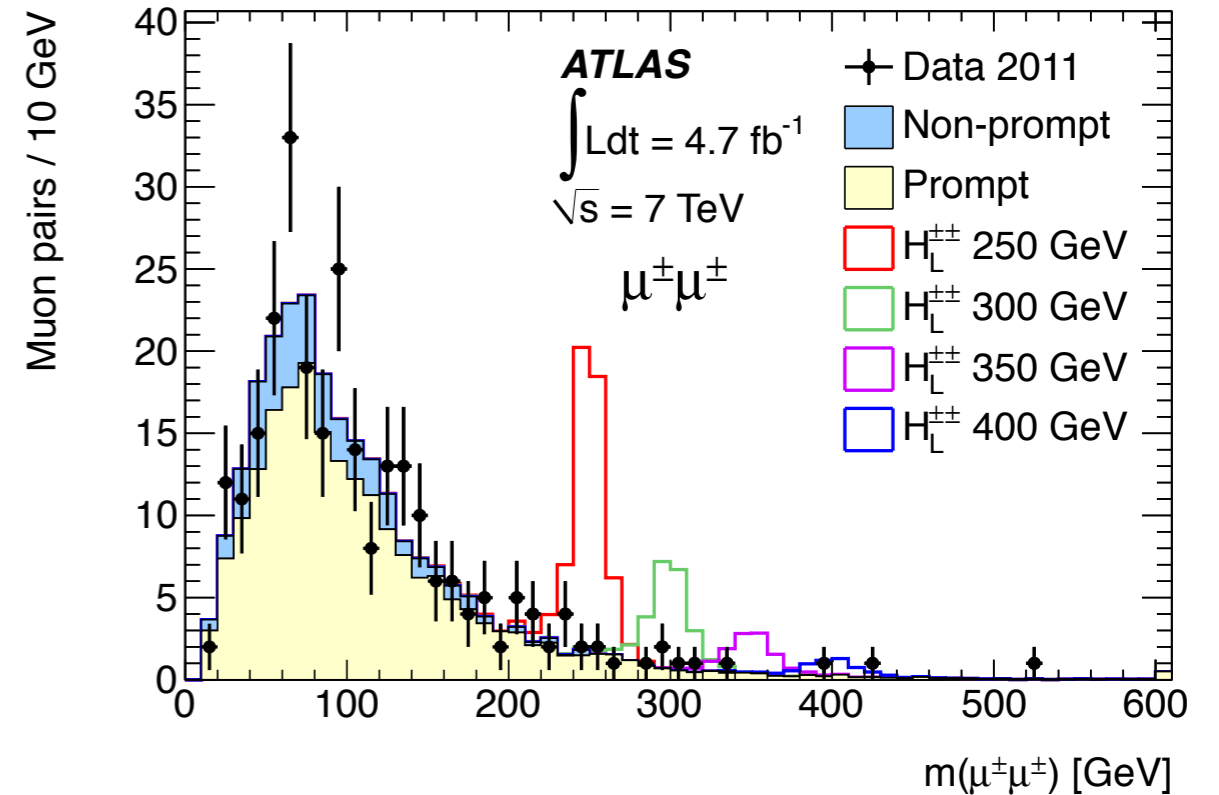
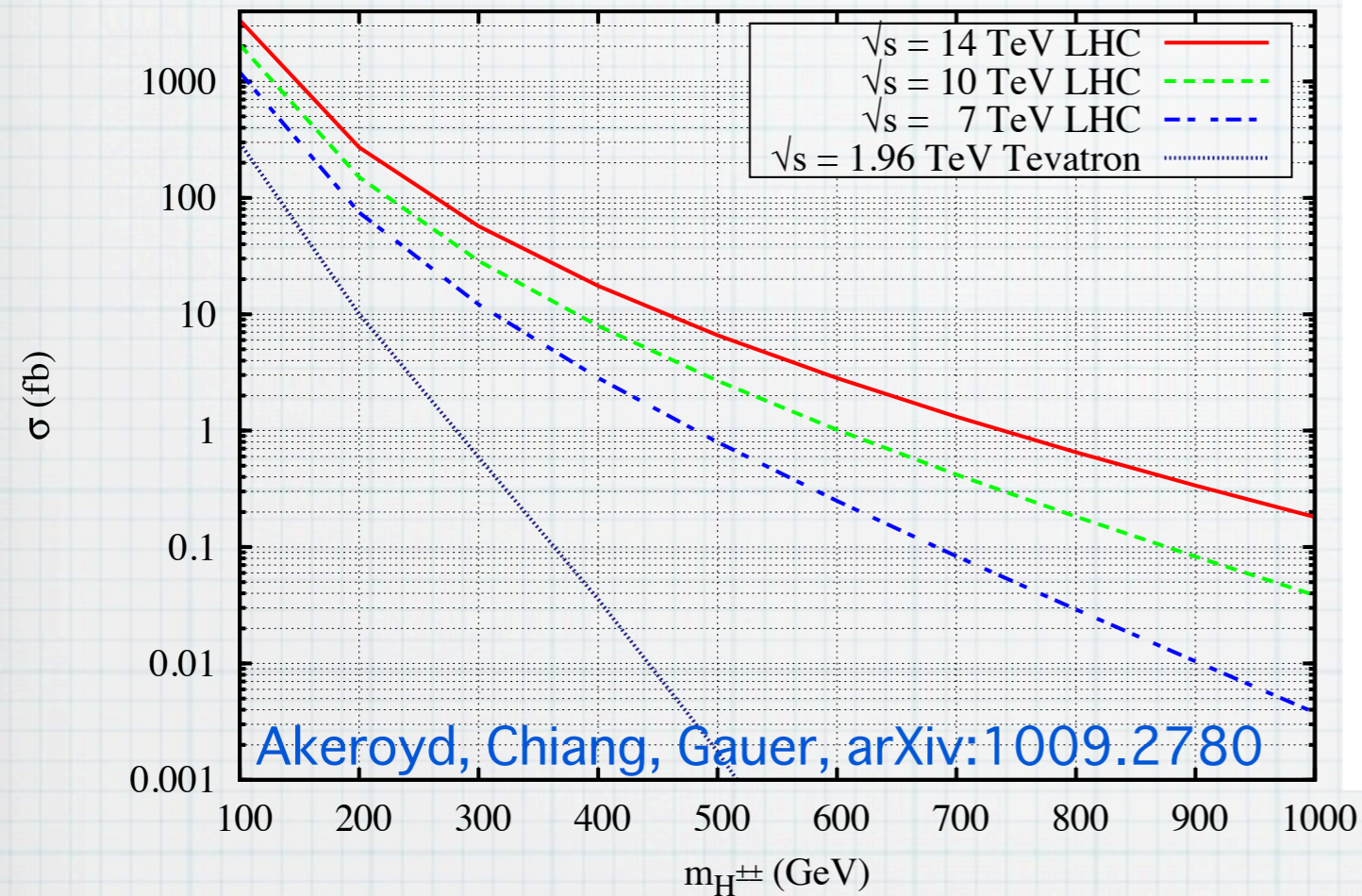


ATLAS, arXiv:1210.5070

$e^+e^-$  コライダーだと  $e^+e^- \rightarrow H^{++}H^{--}$   
 $\sqrt{s}/2$  程度の質量までなら探索できる

# 複荷電ボゾンの現象論

LHCでの例:  $q\bar{q} \rightarrow \gamma^*, Z^* \rightarrow H^{++}H^{--} \rightarrow l^+l^+l^-l^-$



ATLAS, arXiv:1210.5070

$e^+e^-$ コライダーだと  $e^+e^- \rightarrow H^{++}H^{--}$

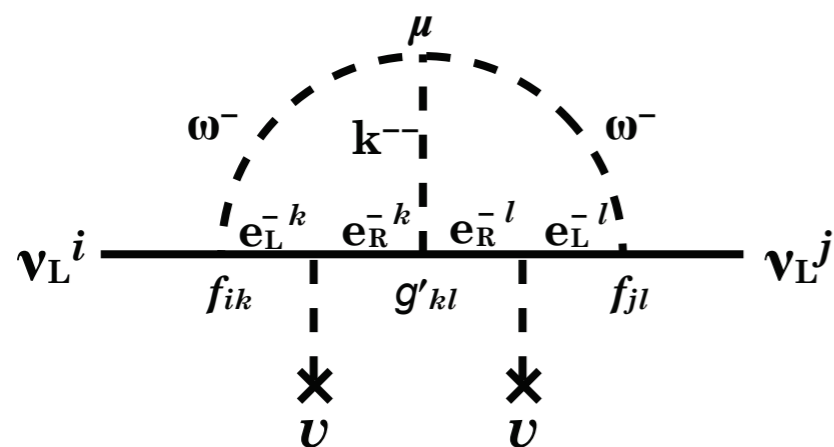
$\sqrt{s}/2$ 程度の質量までなら探索できる

# 例3: 輻射シーソーモデル

輻射補正によってニュートリノ質量を生成

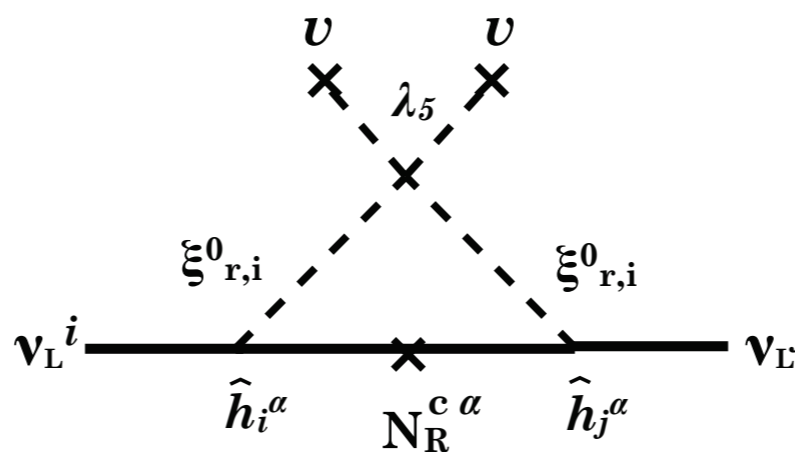
## 模型の例

Zee-Babu model



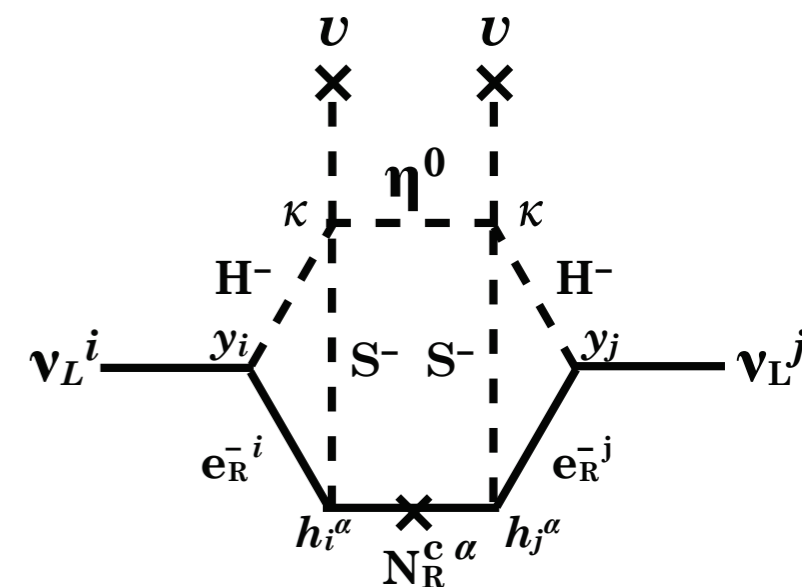
A. Zee NPB264,99; K.S. Babu PLB203,132

Ma model



E. Ma, PRD73,077301

Aoki-Kanemura-Seto model



M. Aoki, S. Kanemura, O. Seto, PRL102,051805

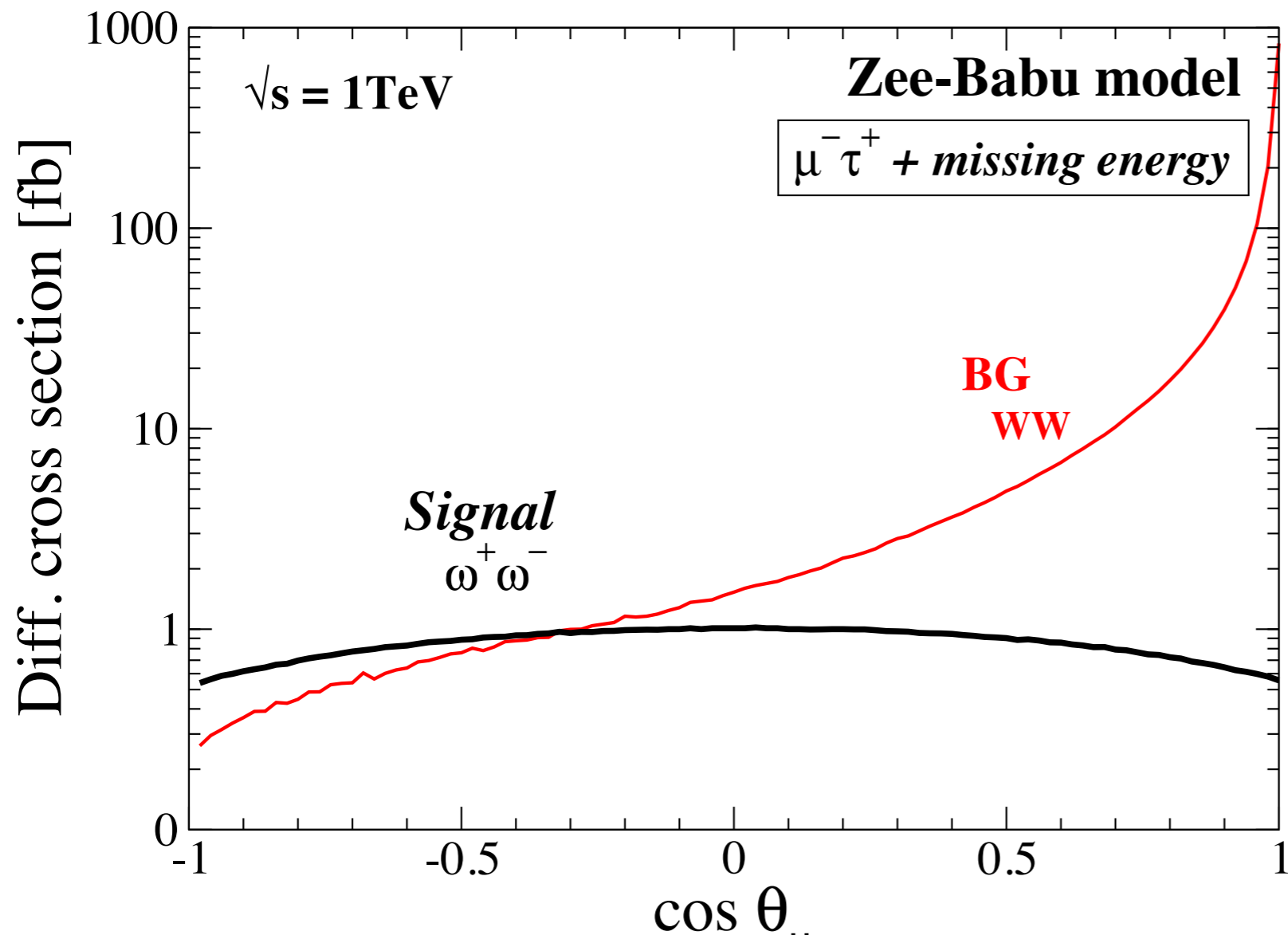
Diagrams from M. Aoki and S. Kanemura, PLB689,28

- ヒッグスセクターの拡張 → 電弱バリオジェネシスの可能性
- TeVスケールの物理 → 実験による検証可能性
- 新しいスカラー達は多くの場合colourを持たない
- Leptonとのカップリングがある! ILCで検証するのにつけて

# 輻射シーソーモデル@ILC

M. Aoki and S. Kanemura, PLB689,28

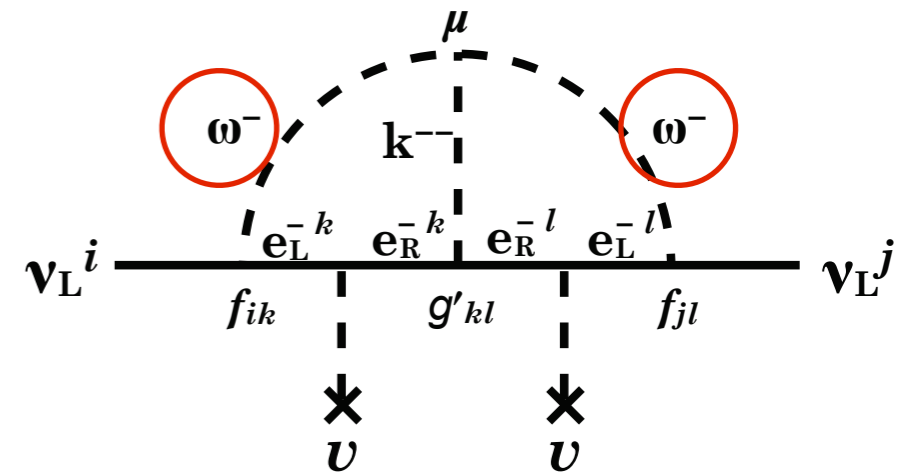
$$e^+e^- \rightarrow \omega^+\omega^- \rightarrow \mu^-\tau^+ (+\text{missing energy})$$



$$m_\omega = 300 \text{ GeV}, m_k = 1200 \text{ GeV}, \mu = 800 \text{ GeV},$$

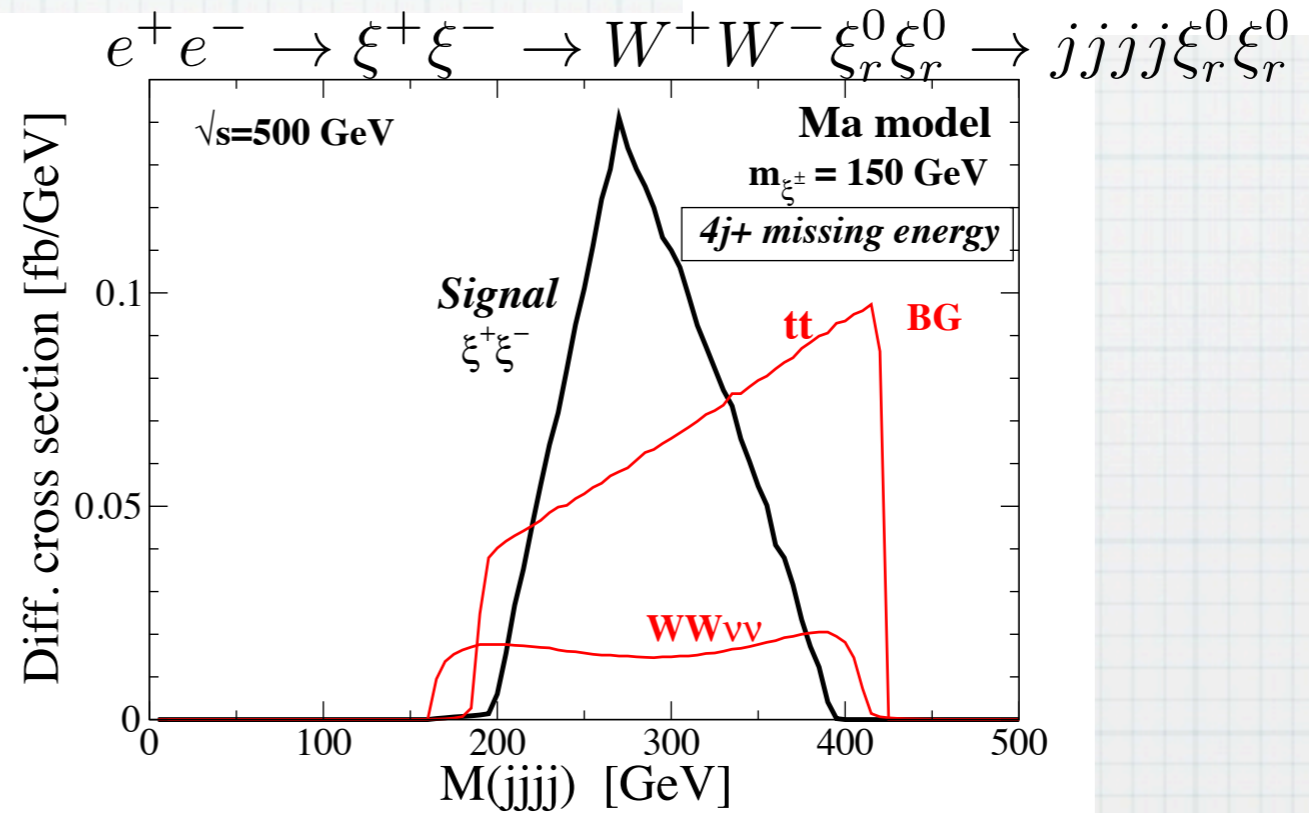
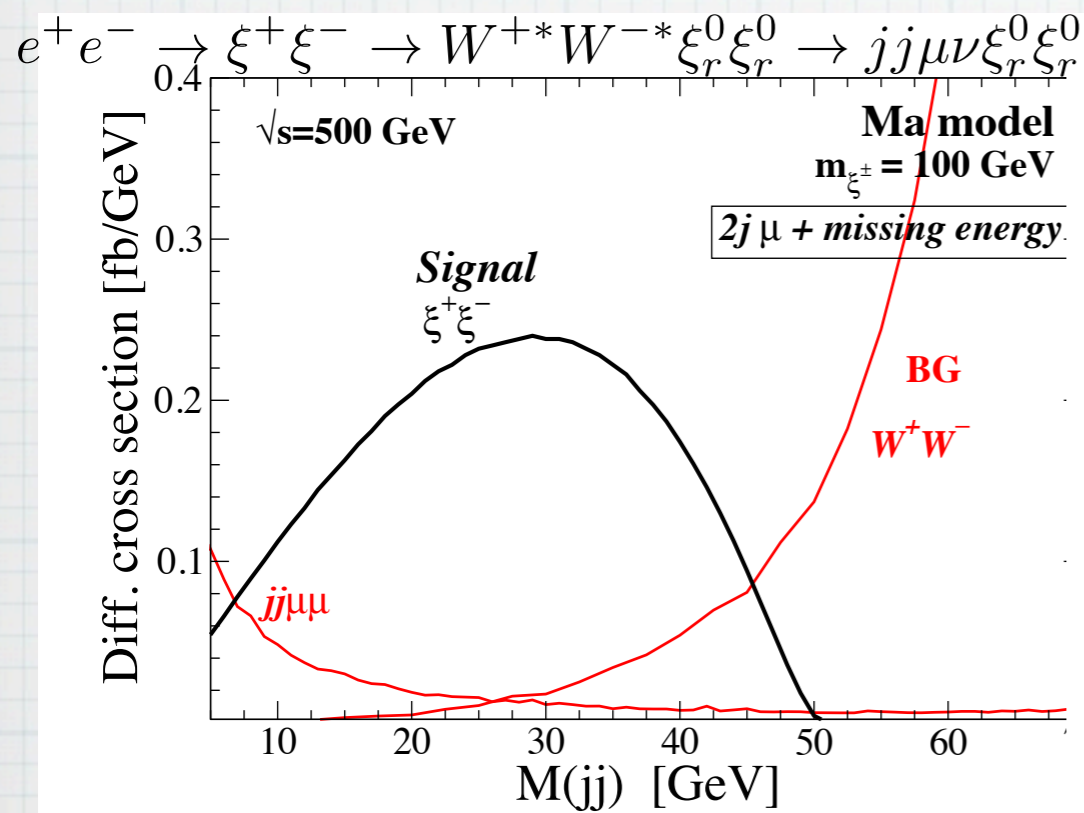
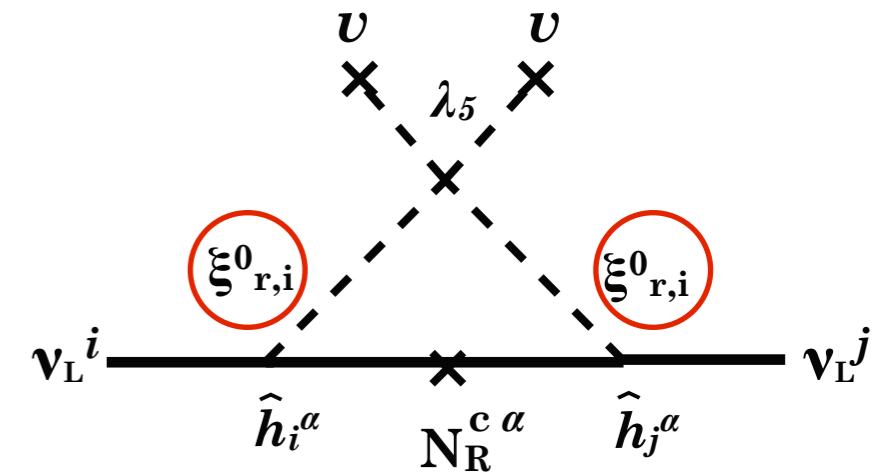
$$f_{e\mu} = f_{e\tau} = 0.013, f_{\mu\tau} = 0.027,$$

$$g_{ee} = 0.17, g_{\mu\mu} = 1.8, g_{\tau\tau} = 0.0061, g_{e\mu} = 5.7 \times 10^{-5}, g_{e\tau} = 0.011, g_{\mu\tau} = -0.081,$$



# 輻射シーソーモデル@ILC

M. Aoki and S. Kanemura, PLB689,28

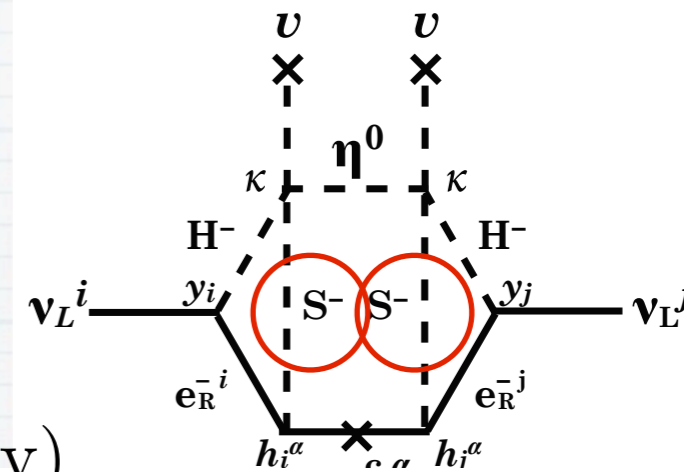


$$m_{\xi_r} = 50 \text{ GeV}, m_{\xi_i} = 60 \text{ GeV}, m_{\xi^\pm} \sim 100 \text{ GeV}, m_{N_R^1} = m_{N_R^2} = 3 \text{ TeV},$$

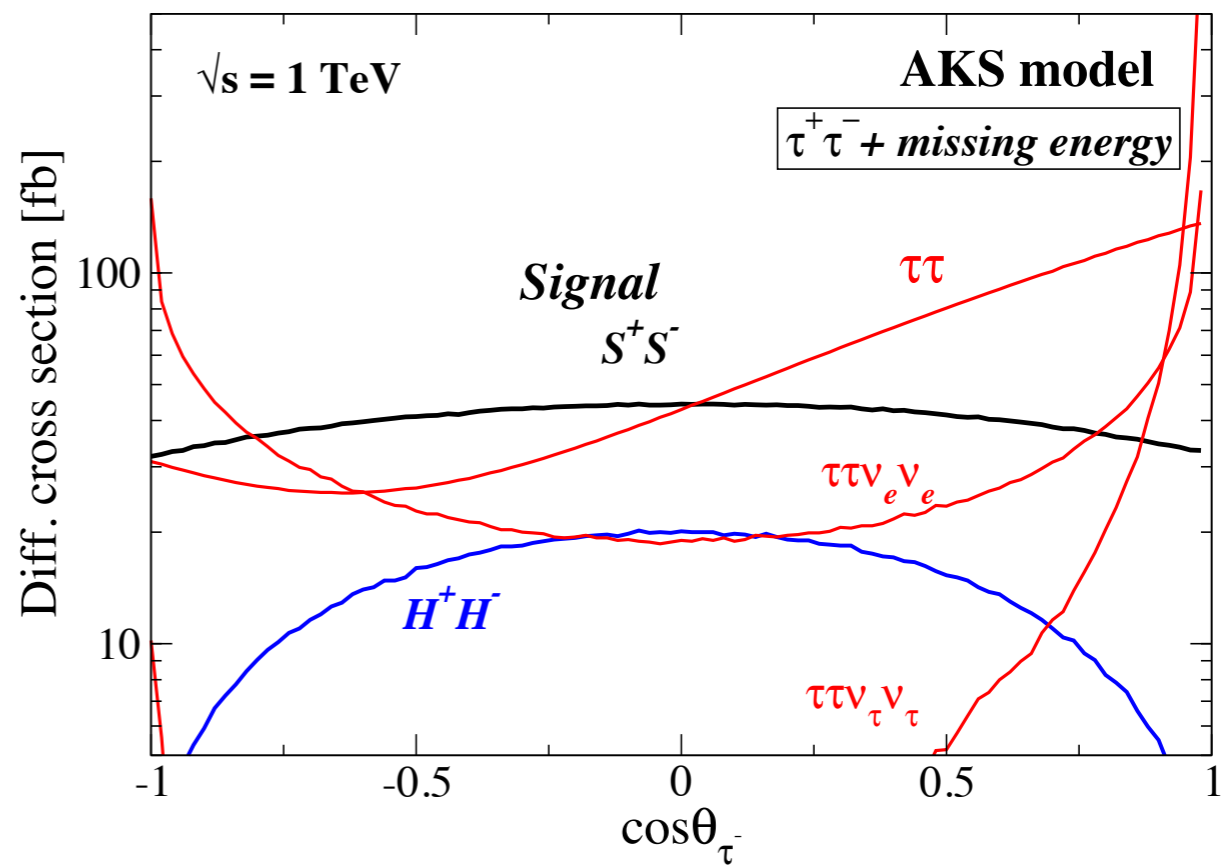
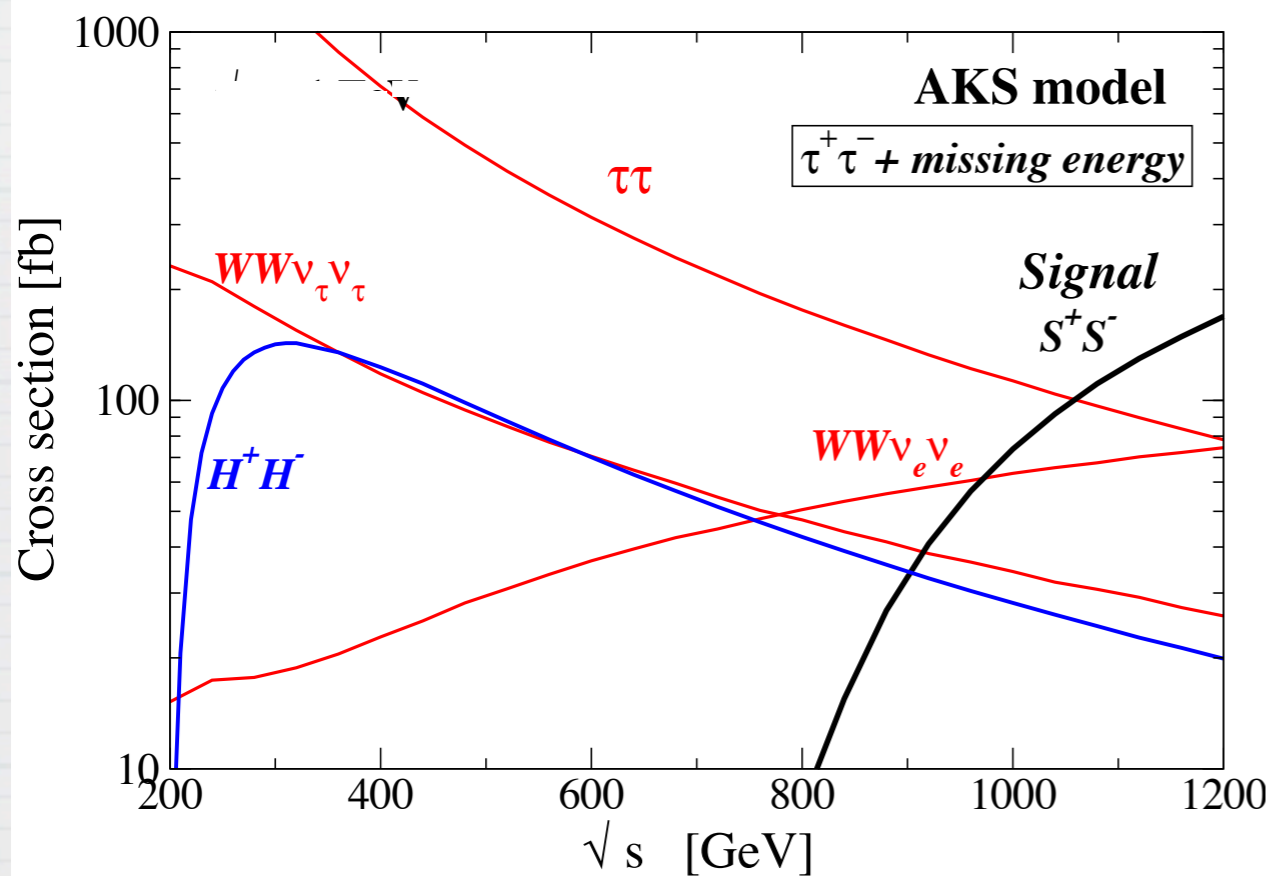
$$\lambda_5 = -1.8 \times 10^{-2}, \hat{h}_e^\alpha, \hat{h}_\mu^\alpha, \hat{h}_\tau^\alpha \sim 10^{-5},$$

# 輻射シーソーモデル@ILC

M. Aoki and S. Kanemura, PLB689,28



$$e^+e^- \rightarrow S^+S^- \rightarrow \tau^+\tau^- \text{ (+ missing energy)}$$



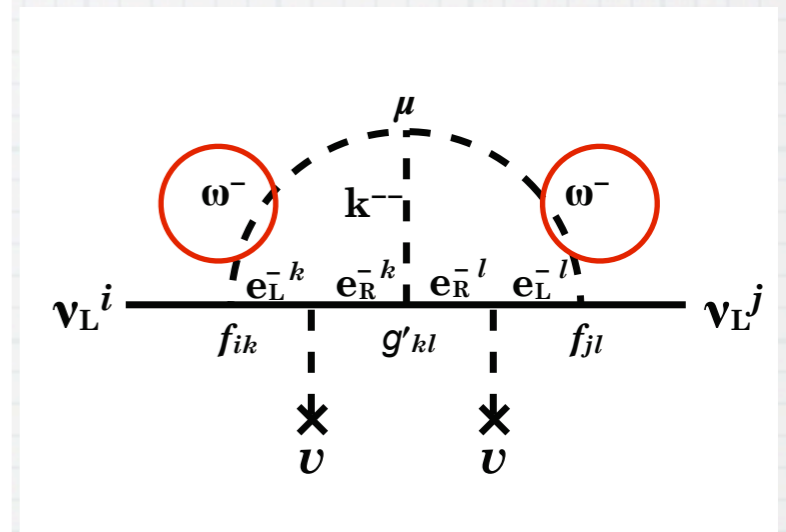
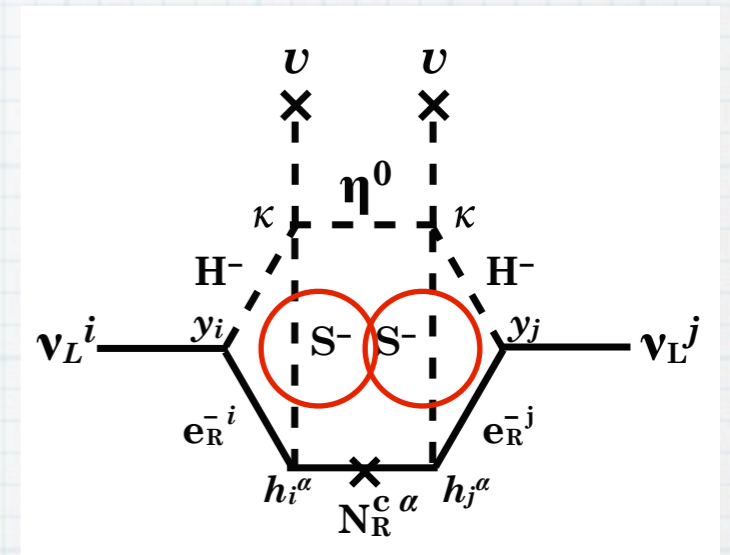
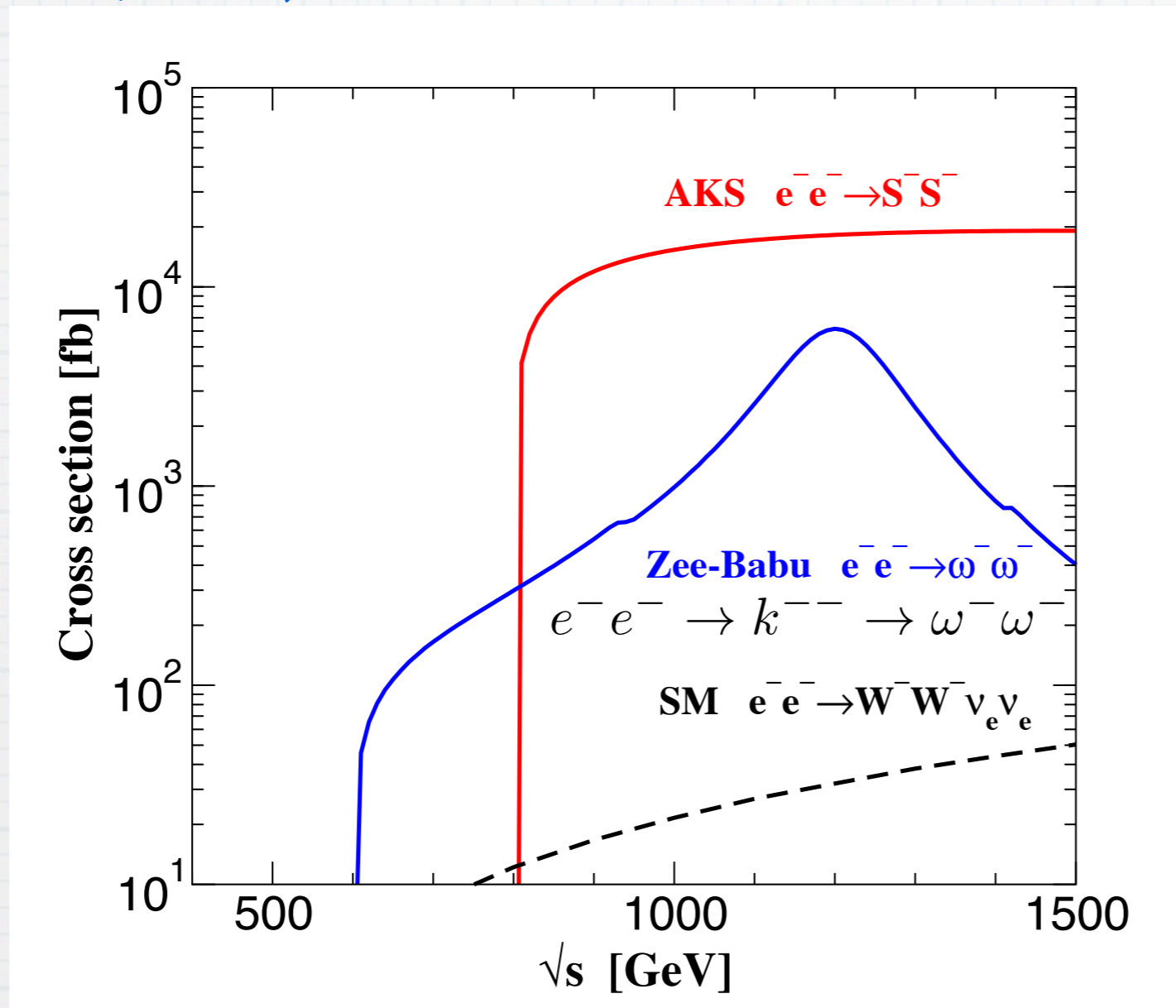
$$m_\eta = 50 \text{ GeV}, m_{H^\pm} = 100 \text{ GeV}, m_{S^\pm} = 400 \text{ GeV}, m_{N_R^1} = m_{N_R^2} = 3 \text{ TeV},$$

$$h_e^1 = h_e^2 = 2 \gg h_\mu^1, h_\mu^2 \gg h_\tau^1, h_\tau^2, \kappa \sim \mathcal{O}(1), \sin(\beta - \alpha) = 1, \tan \beta = 10.$$



# 輻射シーソーモデル@ILC

M. Aoki and S. Kanemura, PLB689,28



$e^-e^-$ オプションだとMajorana性が見えてくる

# 高いスケールを目指して

- 輻射シーソー模型の場合の基本理論はどうなっているのか？
- 単純なGUT(特にSUSY GUT)にうまく埋めこめるか？
- 大きな結合定数が要求される場合がある→ランダウポール
- 新たなnon-singlet場→ゲージカップリングのrunを変更
- Grand desertの果ての統一とは異なる可能性を考えたい

# SUSY SU(2)<sub>H</sub>模型

あるスケールで強結合理論になる

S. Kanemura, T.S, T. Yamada, PRD86,055023

SUSY SU(2)<sub>H</sub> × SU(2)<sub>L</sub> × U(1)<sub>Y</sub> × Z<sub>2</sub>

SU(2)<sub>H</sub> doublets

Fields	SU(2) <sub>L</sub>	U(1) <sub>Y</sub>	Z <sub>2</sub>
$\begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \end{pmatrix}$	2	0	+
T <sub>3</sub>	1	+1/2	+
T <sub>4</sub>	1	-1/2	+
T <sub>5</sub>	1	+1/2	-
T <sub>6</sub>	1	-1/2	-

$$N_f = N_c + 1$$

confinement

これが機能する  
最も単純な場合

Field	SU(2) <sub>L</sub>	U(1) <sub>Y</sub>	Z <sub>2</sub>
$H_u = \begin{pmatrix} M_{13} \\ M_{23} \end{pmatrix}$	2	+1/2	+
$H_d = \begin{pmatrix} M_{14} \\ M_{24} \end{pmatrix}$	2	-1/2	+
$N = M_{56}, N_\Phi = M_{34}, N_\Omega = M_{12}$	1	0	+
$\Phi_u = \begin{pmatrix} M_{15} \\ M_{25} \end{pmatrix}$	2	+1/2	-
$\Phi_d = \begin{pmatrix} M_{16} \\ M_{26} \end{pmatrix}$	2	-1/2	-
$\Omega_+ = M_{35}$	1	+1	-
$\Omega_- = M_{46}$	1	-1	-
$\zeta = M_{36}, \xi = M_{45}$	1	0	-

スケール  $\Lambda_H$  以下では T<sub>i</sub> のメソン  $M_{ij} \sim T_i T_j$  で理論が記述される

↑  
ヒッグス場と同等

# SU(2)<sub>H</sub>模型の有効理論

新しいスカラー場がわらわら登場 → 輻射シーソーに使える?!

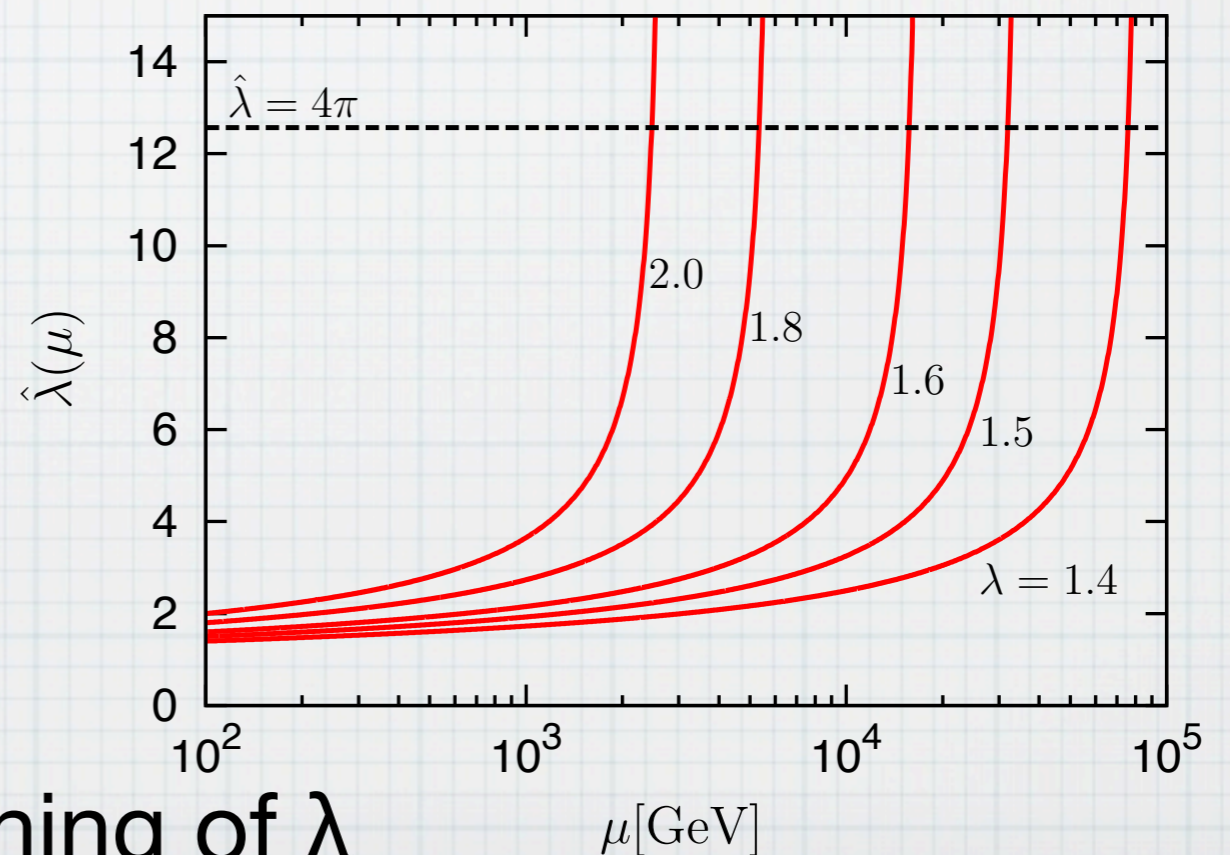
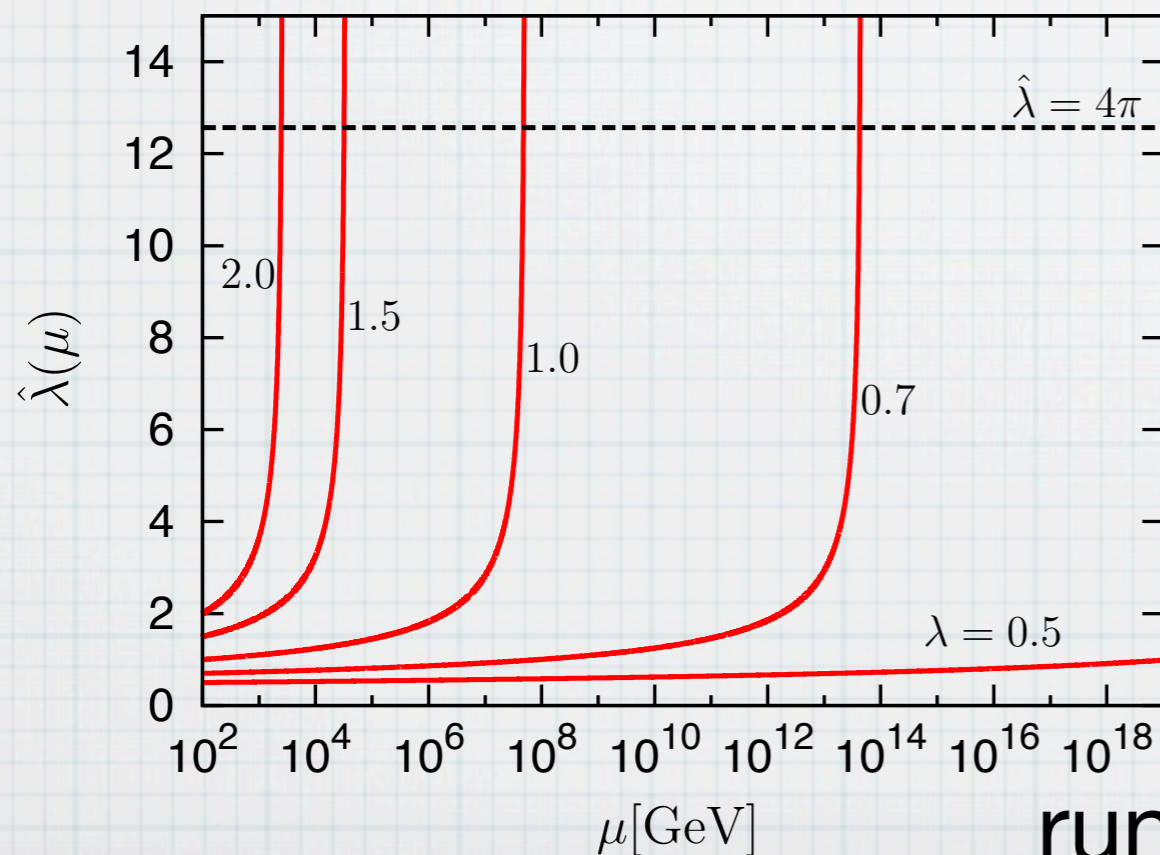
Low energy effective theory: S. Kanemura, E. Senaha, T.S, T. Yamada, JHEP1305,066

MSSM-like Higgs fields

$$W = -\mu H_u H_d - \mu_\Phi \Phi_u \Phi_d - \mu_\Omega (\Omega_+ \Omega_- - \zeta \eta)$$

$$+ \hat{\lambda} \{ H_d \Phi_u \zeta + H_u \Phi_d \eta - H_u \Phi_u \Omega_- - H_d \Phi_d \Omega_+ \}$$

$\hat{\lambda}(\Lambda_H) \simeq 4\pi$  (Naive dimensional analysis)



# ついでに電弱バリオジェネシス

Benchmark:

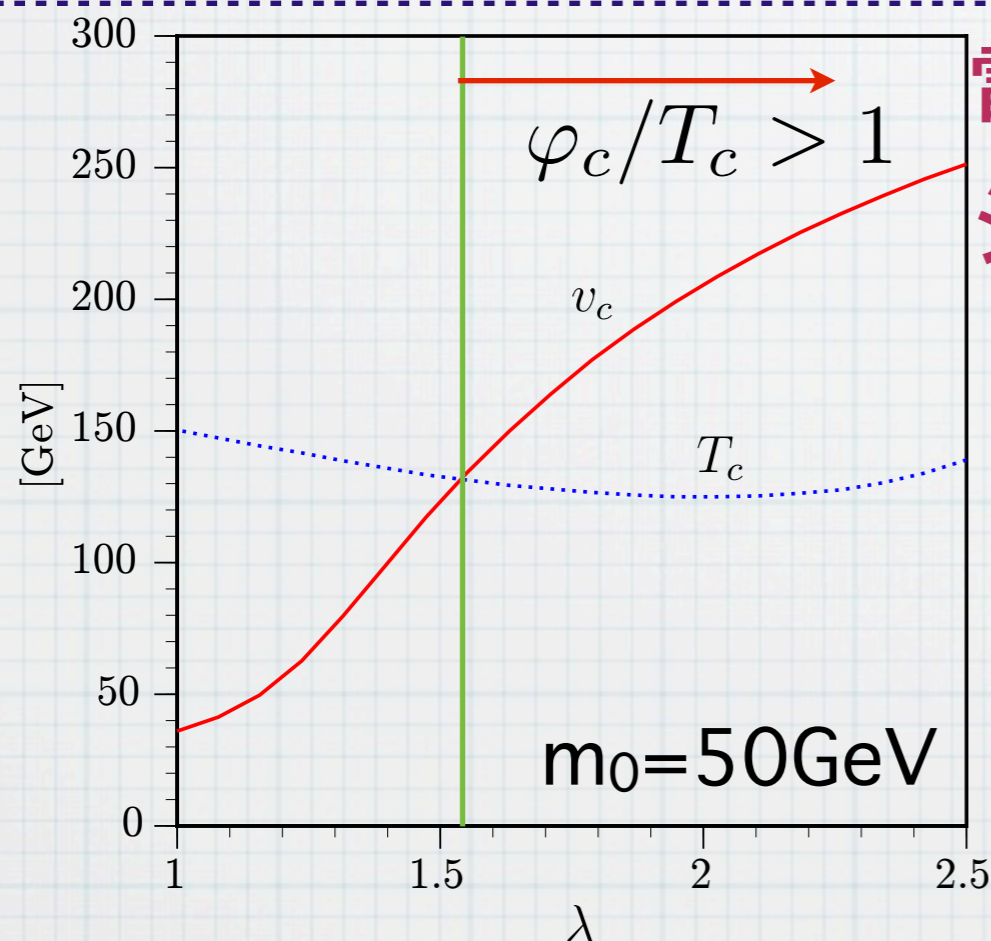
$$m_h = 126 \text{ GeV}$$

$$\tan \beta = 15, m_{H^+} = 350 \text{ GeV}, \mu = 200 \text{ GeV}, M_{\tilde{t}} = M_{\tilde{q}} = 2000 \text{ GeV}$$

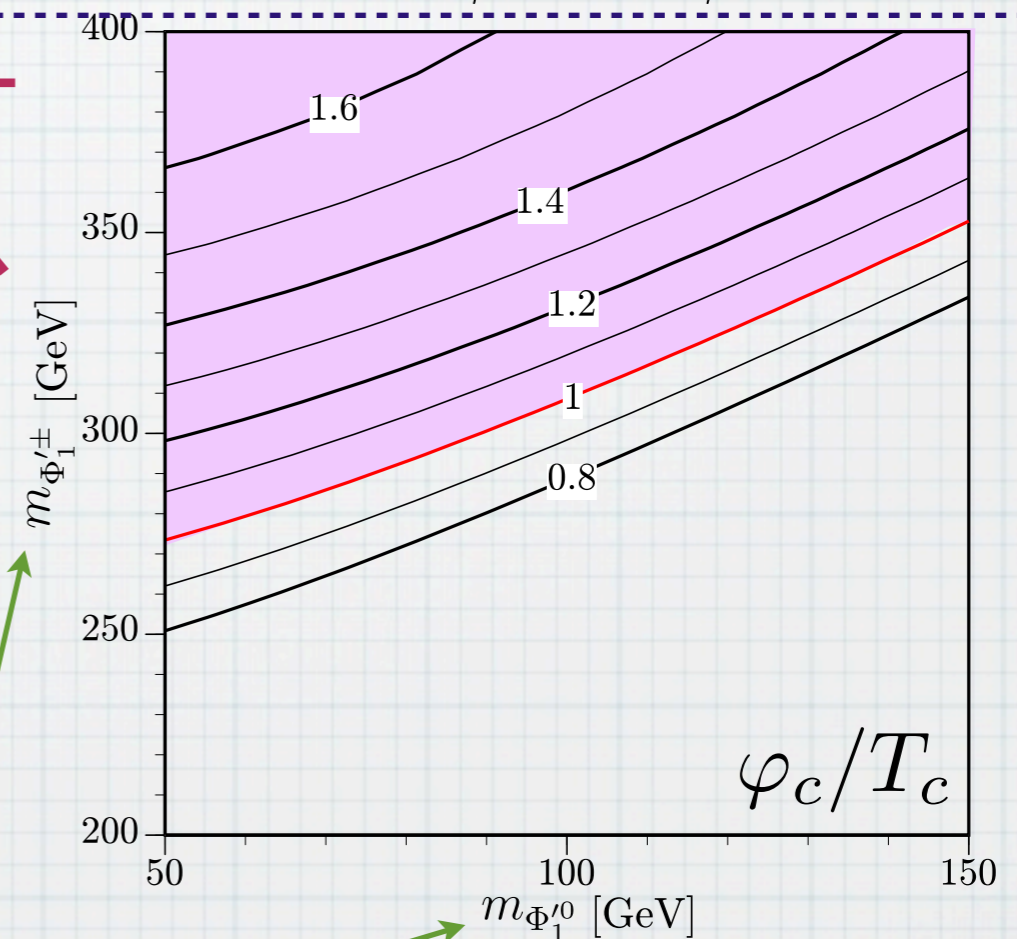
$$\bar{m}_{\Omega^+}^2 = \bar{m}_{\Phi_d}^2 = \bar{m}_{\zeta}^2 = (1500 \text{ GeV})^2, \bar{m}_{\eta}^2 = (2000 \text{ GeV})^2, \mu_{\Phi} = \mu_{\Omega} = 550 \text{ GeV}$$

$$m_0^2 \equiv \bar{m}_{\Phi_u}^2 = \bar{m}_{\Omega^-}^2 \quad (\text{Scanned})$$

$$(m_{\phi}^2 = \bar{m}_{\phi}^2 + c_{\phi} \lambda^2 v^2)$$



電弱バリオ  
ジェネシス  
が機能す  
るかも

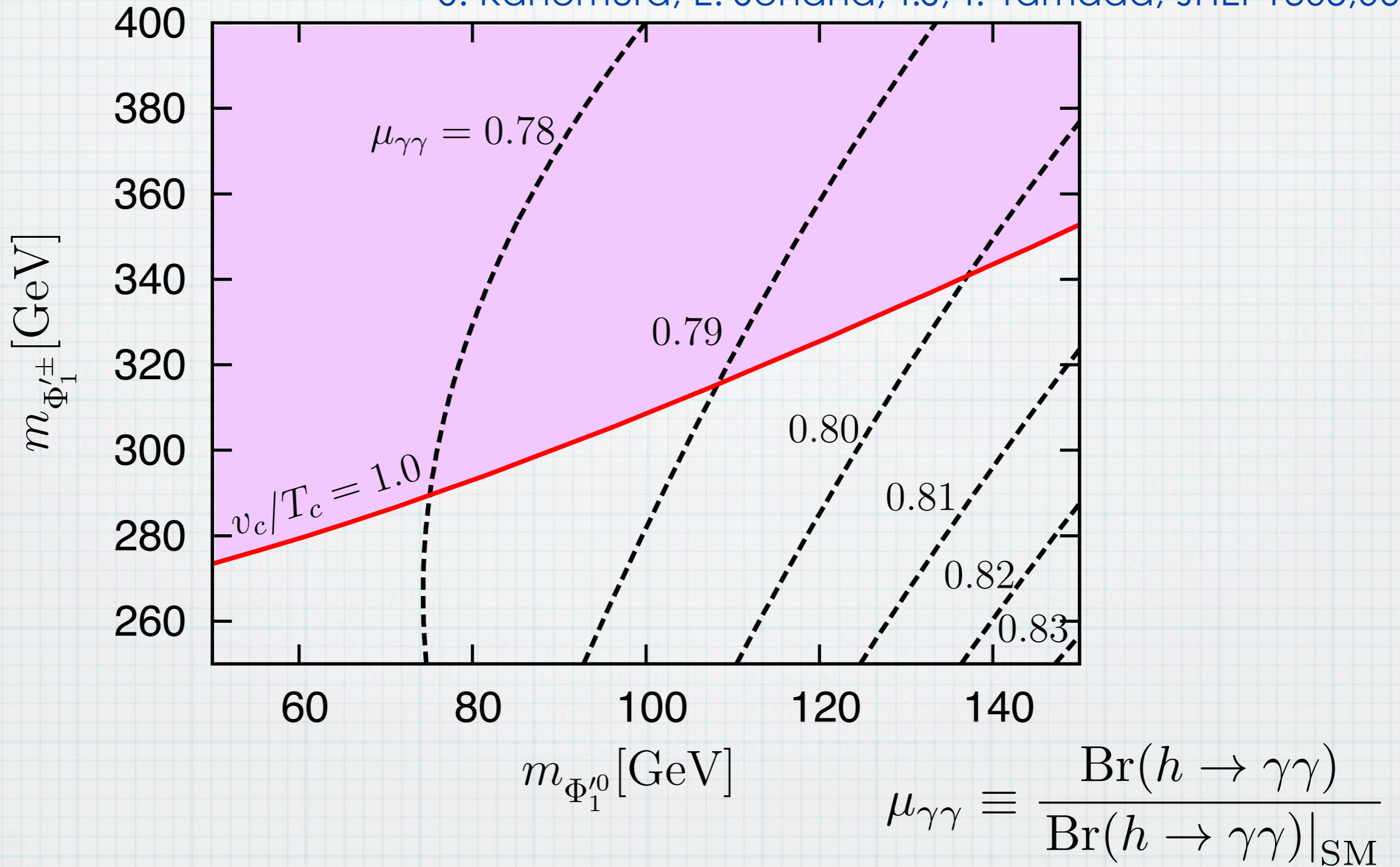


$\varphi_c/T_c > 1$  is realized!

Lightest  $Z_2$  odd masses

# $h\gamma\gamma$ 結合

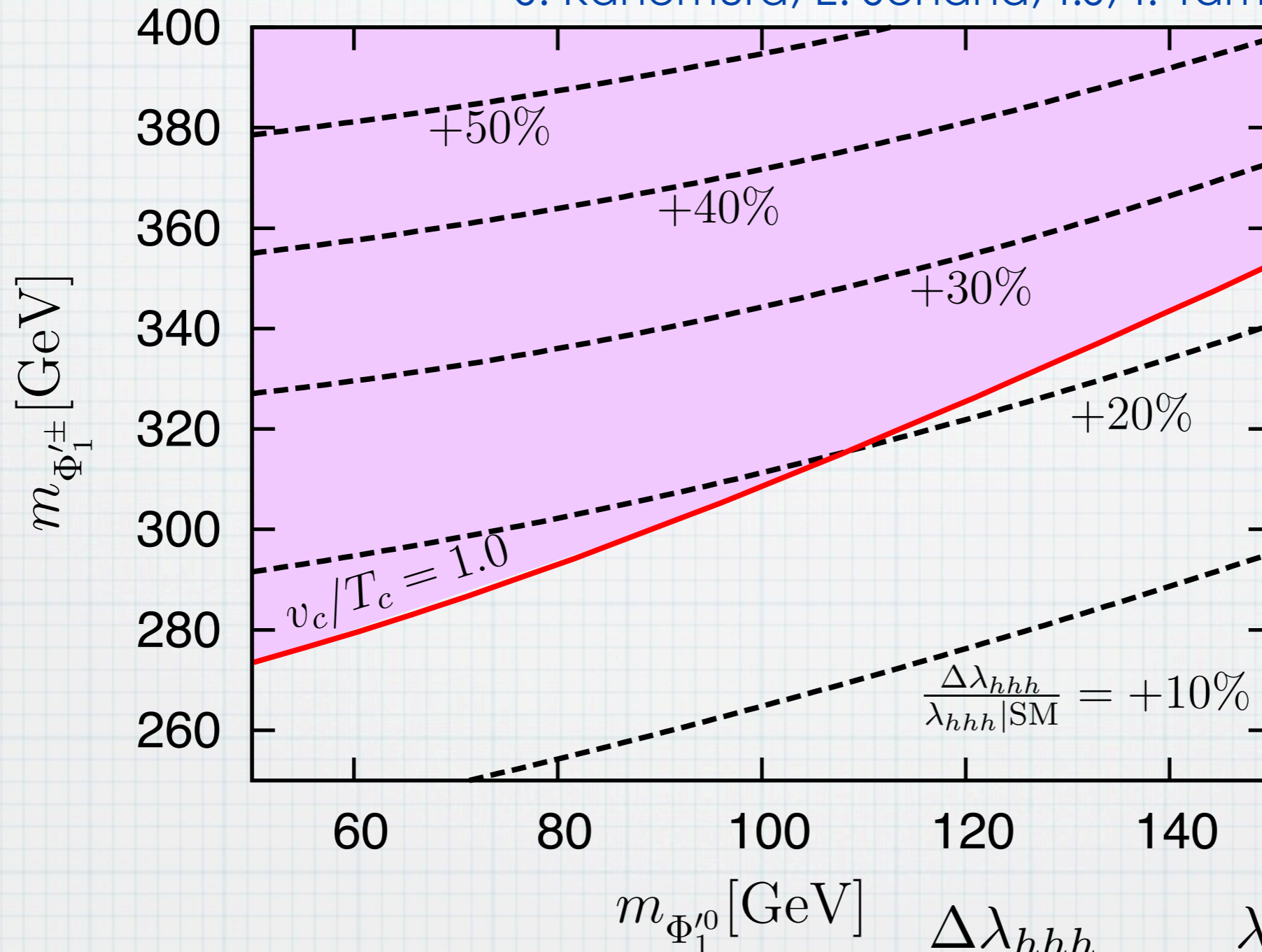
S. Kanemura, E. Senaha, T.S, T. Yamada, JHEP1305,066



$v_c/T_c > 1$  の領域で標準模型の予言値から20%近くずれる

# hhh結合

S. Kanemura, E. Senaha, T.S, T. Yamada, JHEP1305,066



$$\frac{\Delta\lambda_{hhh}}{\lambda_{hhh}(\text{SM})} \equiv \frac{\lambda_{hhh} - \lambda_{hhh}(\text{SM})}{\lambda_{hhh}(\text{SM})}$$

$v_c/T_c > 1$  の領域で標準模型の予言値から~+20%以上のずれ

# $SU(2)_H$ モデルと輻射シーソー

S. Kanemura, N. Machida, T.S. and T. Yamada, in preparation

- SUSY Maモデルに必要なextra scalar:  $Z_2$ -odd doublet &  $Z_2$ -odd neutral singlet
- SUSY AKSモデルに必要なextra scalar:  $Z_2$ -odd charged singlet &  $Z_2$ -odd neutral singlet &  $Z_2$ -odd doublet

全て図らずして $SU(2)_H$ モデルに含まれている!!

$Z_2$ -odd RHNさえ加えれば材料は揃う



- $\Lambda_H$ より上のスケールでも基本場(複合場ではない)
- ソフトに破れる(右巻きの質量だけが破る)B-L対称性を仮定



# 1-loop model

S. Kanemura, N. Machida, T.S. and T. Yamada

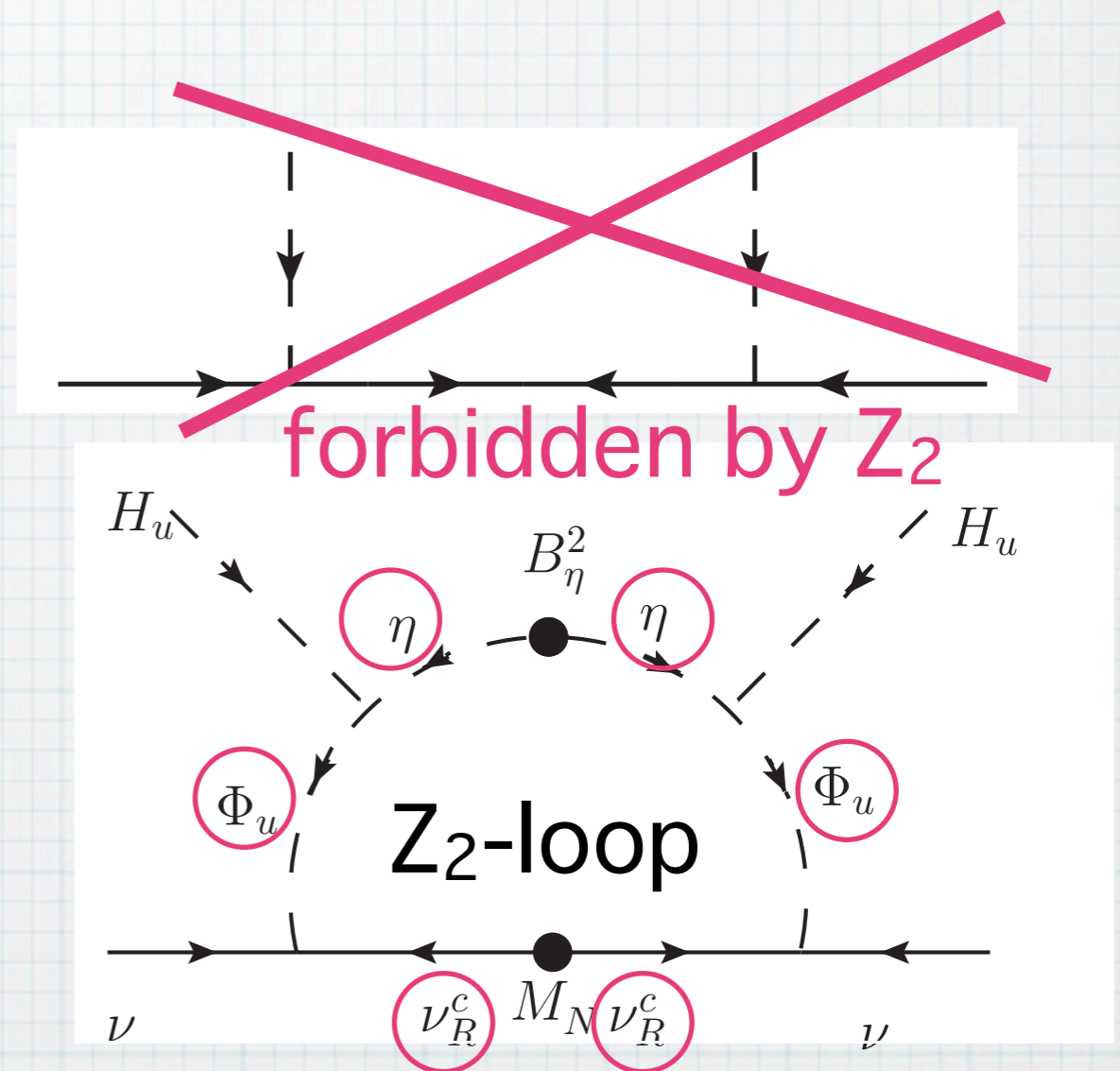
$L(N^c) = -1$  (RHN is lepton)

$\Lambda_H$ 以下では:

$$\mathcal{L} = (y_N)_{ij} N_i^c L_j \cdot \Phi_u + \frac{M_i}{2} N_i^c N_i^c$$

- 1-loop の寄与が支配的
- $B_\eta \eta^2, B_\eta \zeta^2, m_{\zeta\eta} \zeta^\dagger \eta$  のような soft-SUSY-breaking が必要

SUSY version of the Ma-model



# 3-loop model

S. Kanemura, N. Machida, T.S. and T. Yamada

$L(N^c) = 1$  (RHN is anti-lepton)

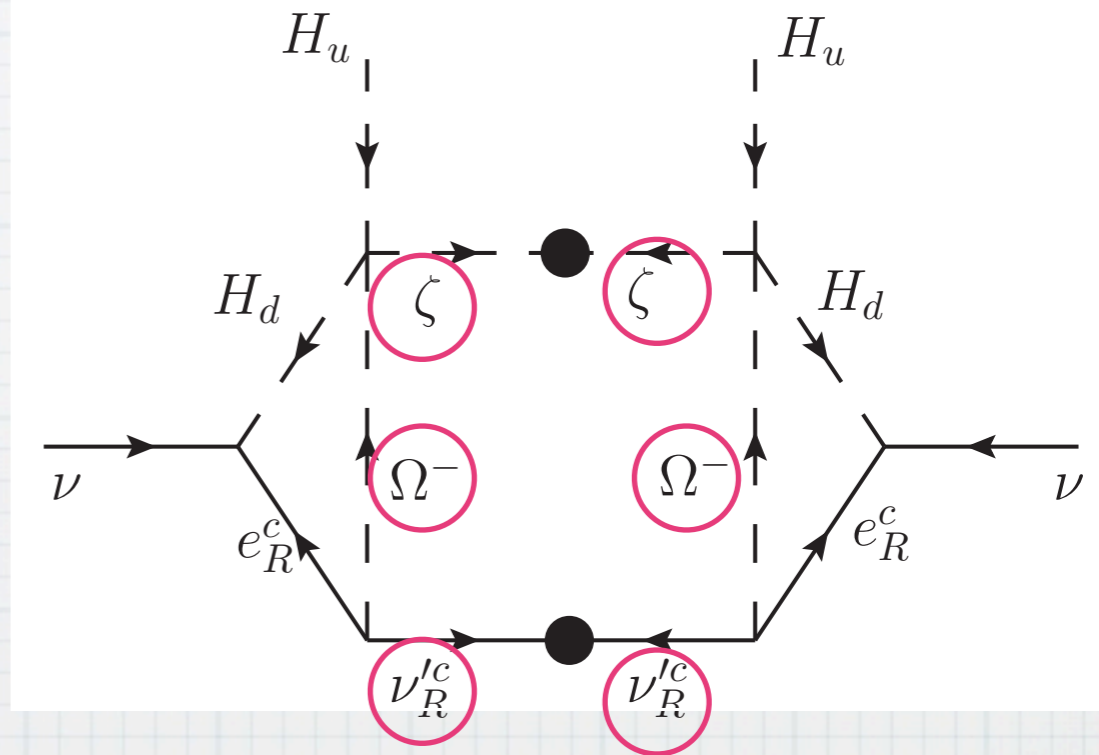
$\Lambda_H$ 以下では:

$$\mathcal{L} = (h_N)_{ij} N_i^c L_j \Omega^- + \frac{M_i}{2} N_i^c N_i^c$$

- 1-loop, 2-loopが描けないので, 3-loopが支配的な寄与

$y_N N^c L \cdot \Phi_u$  is forbidden by Lepton number

- SUSY version of the AKS-model



# まとめ

- ニュートリノ質量の生成機構を検証したい
- type Iシーソーだと直接検証はやや難しい
- type IIだと複荷電ボゾン探し
- 輻射シーソーモデルはILCでの検証にうってつけ
- 輻射シーソーモデルの統一理論的描像
- 砂漠+GUTではなく、すぐ上のスケールに沃野が広がる可能性
- SUSY  $SU(2)_H$ モデルには材料が綺麗に埋めこまれている  
→より基本的な理論の候補