

# Proton Decay in SUSY SU(5) GUTs Revisited after Discovery of the Higgs Boson

based on

J.Hisano, TK, N.Nagata : Phys. Lett. B 723 (2013) 324

J.Hisano, D.Kobayashi, TK, N.Nagata : JHEP 1307 (2013) 038

素粒子宇宙物理学専攻 E-H-QG研

桑原 拓巳

2014/2/13 修士論文発表会

# Brief summary

---

- 大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) 実験
  - 質量126GeVのHiggs粒子の発見
  - 標準模型を超える物理 (特にSUSY粒子の質量) への制限



高いスケールで破れる超対称性の可能性

高いスケールで破れる超対称性を仮定した場合に

- 大統一理論に関する評価
- 大統一模型の間接的な検証
  - 陽子崩壊に関する評価

# Outline

- Introduction
- GUT particle mass spectrum
- Proton decay
- Summary



# Introduction

-Standard Model-

## ● 素粒子標準模型 (SM)

多くの実験的・観測的事実をうまく説明する模型

	物質粒子
Q	LH quark
L	LH lepton
u	RH up quark
d	RH down quark
e	RH electron

LH: 左巻き  
RH: 右巻き

	ゲージ粒子
g	Gluon
W	W, Z boson
$\gamma$	photon

	Higgs粒子
H	Higgs boson

様々な問題点・説明不足な点

- $U(1)_{EM}$  電荷の量子化
- Dark matter (DM) 候補 etc.

## 超対称大統一理論 (SUSY GUTs)

### 大統一理論 (GUTs)

SMのゲージ群をより大きな群に埋め込む

▶ 標準模型の力の統一 + 物質場の統一

U(1)<sub>EM</sub>電荷の量子化の説明

▶  $\sim 10^{16}$  GeV程度のエネルギーでの物理

- 加速器実験において、GUT粒子を直接検出することは不可能
- 予言される現象：核子崩壊 を通じて間接的に検証

# Introduction

-SUSY-

## 超対称性 (SUSY)

- ▶ 超対称パートナー + additional な Higgs multiplet が導入 (minimal setup)
- ▶ ゲージ結合定数の統一の改善
- ▶ DM候補となる粒子

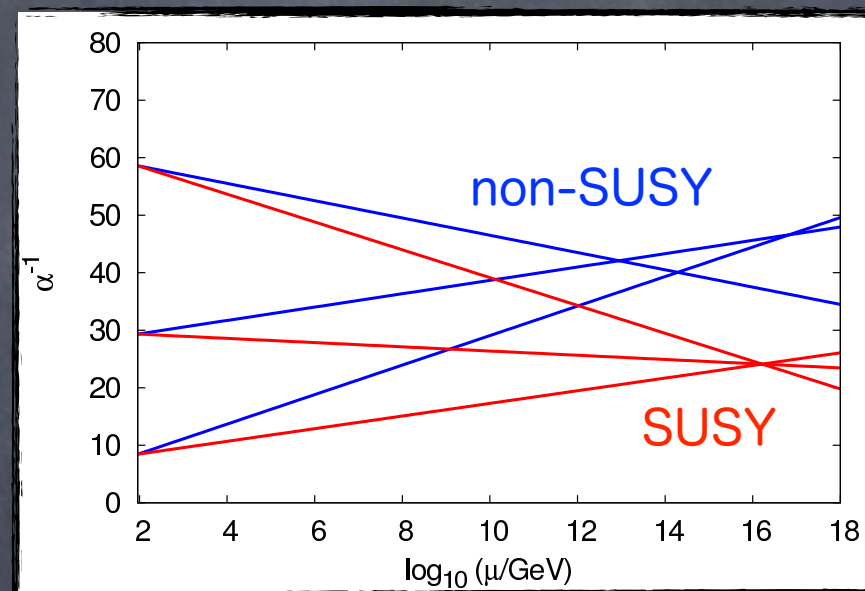
minimal setup (MSSM) でのHiggs質量

$$m_h < m_Z |\cos 2\beta|$$

Z bosonの質量 (~91 GeV)より

軽いHiggsが预言される

( $\tan \beta$  は 2つのHiggsの真空期待値の比)



質量への量子補正を大きくすることで観測されたHiggsの質量を説明

加えて、LHC実験における超対称粒子の質量に関する制限を考えると...

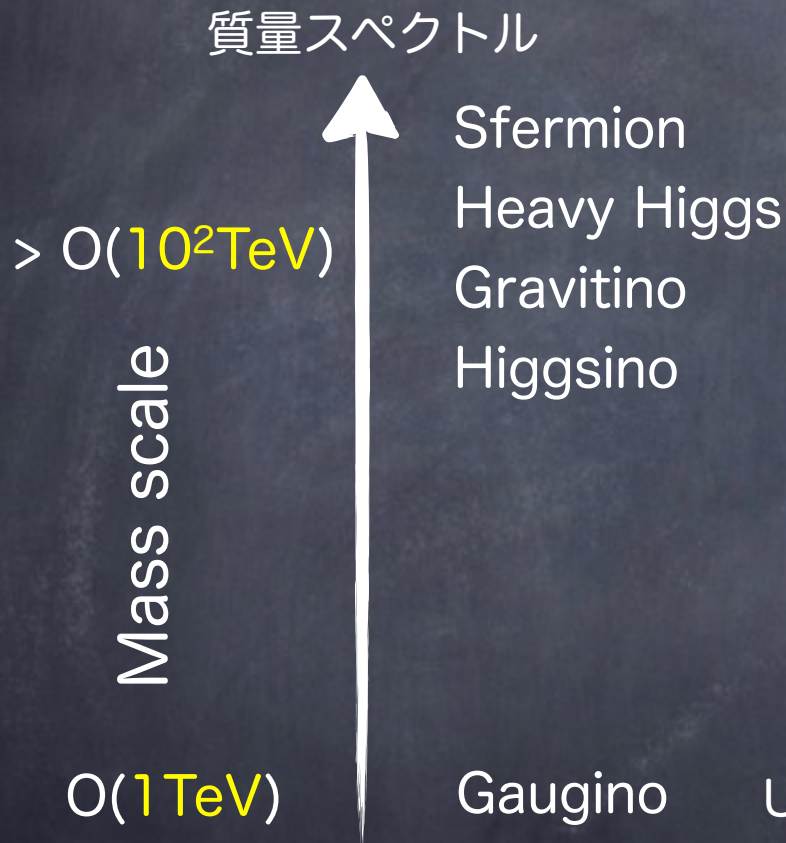


高いスケールで破れる超対称性の可能性

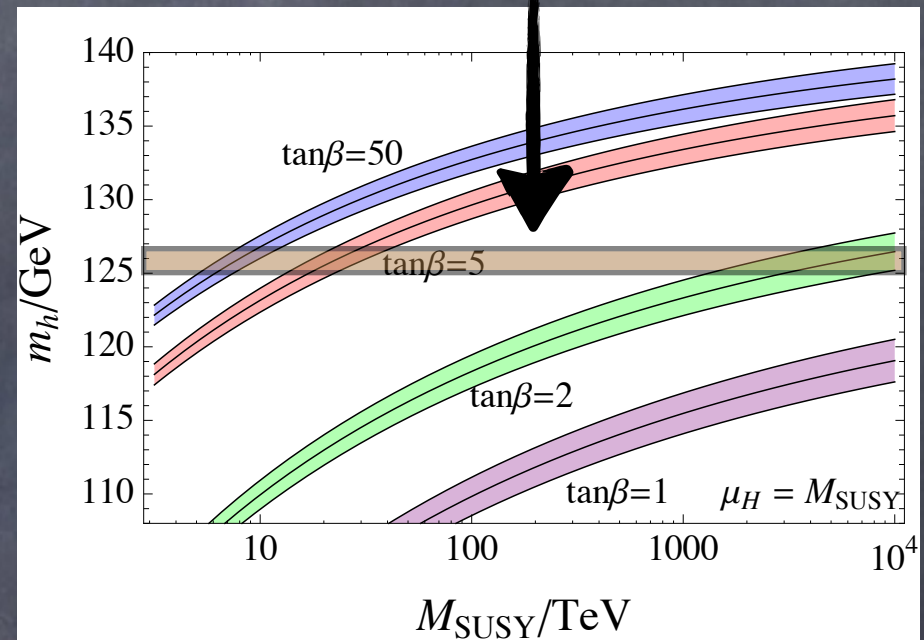


# High-Scale SUSY

-split mass spectrum and Higgs mass-



観測されたHiggsの質量を再現する領域



M.Ibe and T.T.Yanagida (2011)

U(1)<sub>R</sub>対称性によって軽い質量が保証されている

Anomaly-mediation機構

G.F.Giudice, M.A.Luty, H.Murayama and R.Rattazzi (1998)

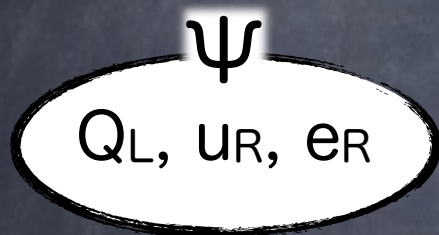
L.Randall and R.Sundrum (1999)

# SUSY SU(5) GUT

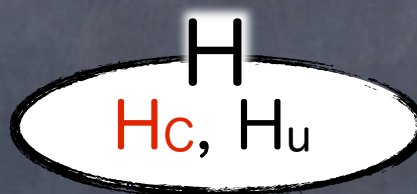
-particle contents-

SM粒子とその超対称粒子はSU(5)多重項に埋め込まれる

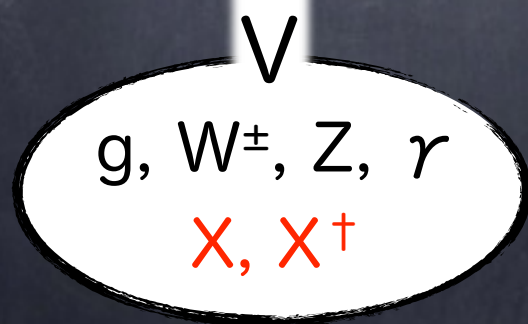
物質粒子



Higgs Sector



Gauge Sector



大統一模型に埋め込むために新しく

$H_c$  : Color三重項Higgs

$X$  : X-type Gauge粒子

$\Sigma$  : 随伴Higgs粒子

を導入する必要がある。

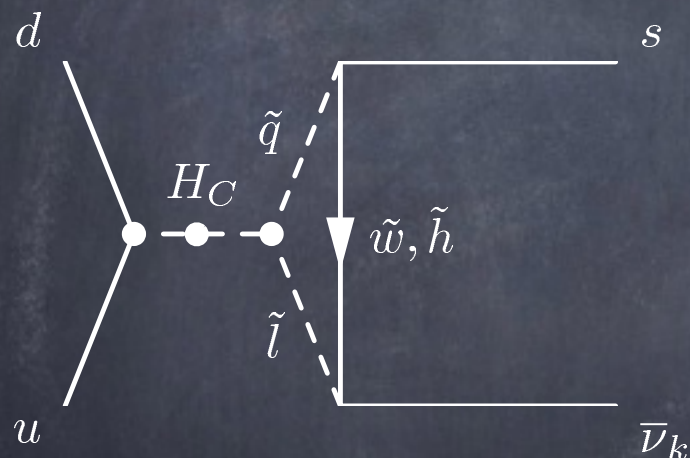


## Proton Decay

- 加速器実験において、GUT粒子を直接検出することは不可能
- 予言される現象：核子崩壊

最も支配的な崩壊モード

$$\tau_p(p \rightarrow K^+ + \bar{\nu}) \propto (M_{H_C} M_{\text{SUSY}})^2$$



Color三重項Higgsを媒介

実験的な制限が厳しく、  
 ==超対称の破れのスケールが低い( $\sim 1\text{ TeV}$ )場合には  
 最も単純な超対称SU(5)大統一模型は**Exclude**

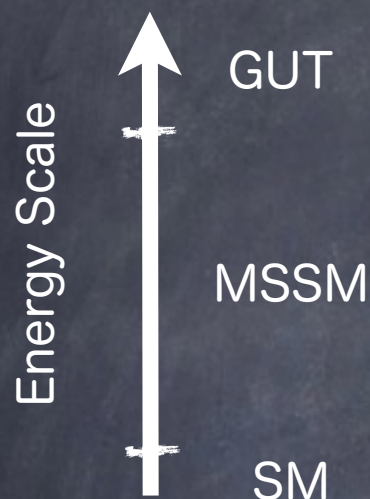
**本研究の動機**..... 高いスケールで破れる超対称性を仮定した場合  
 この崩壊モードに関する陽子の寿命がどの程度制限されているか？

# Outline

- Introduction
- GUT particle mass spectrum
- Proton decay
- Summary

# GUT mass spectrum

-RGE analysis-



理論の変わるエネルギースケール以下では…  
そのエネルギーより重い粒子を取り除いた模型を用いる

重い粒子の効果は結合定数への  
補正項として含まれる

e.g. GUTとMSSMの間でのゲージ結合定数の関係

$$\frac{1}{\alpha_3^s(\mu)} = \frac{1}{\alpha_G(\mu)} - \frac{1}{2\pi} \left[ -4 \ln \frac{M_X}{\mu} + 3 \ln \frac{M_\Sigma}{\mu} + \ln \frac{M_{H_C}}{\mu} \right],$$

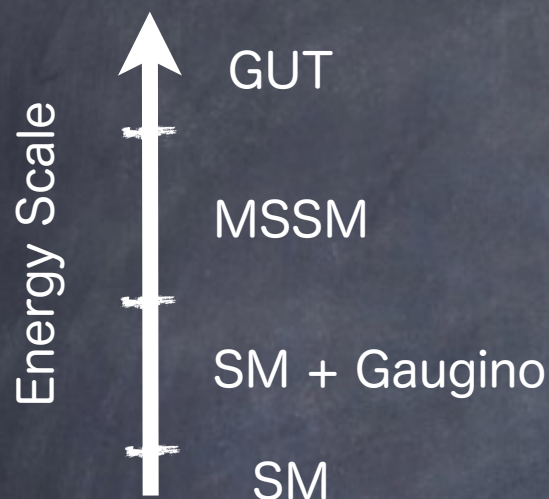
$$\frac{1}{\alpha_2^s(\mu)} = \frac{1}{\alpha_G(\mu)} - \frac{1}{2\pi} \left[ -6 \ln \frac{M_X}{\mu} + 2 \ln \frac{M_\Sigma}{\mu} \right],$$

$$\frac{1}{\alpha_1^s(\mu)} = \frac{1}{\alpha_G(\mu)} - \frac{1}{2\pi} \left[ -10 \ln \frac{M_X}{\mu} + \frac{2}{5} \ln \frac{M_{H_C}}{\mu} \right]$$



# GUT mass spectrum

-RGE analysis-



High-scale SUSY シナリオの、  
それぞれのスケールで同様の関係式が得られる。

適切な線形結合をとり、 $\alpha_G$ を消去。

定性的な理解のために...

くりこみ群方程式 (RGEs @ 1-loop) を用いる。

$$\frac{3}{\alpha_2(m_Z)} - \frac{2}{\alpha_3(m_Z)} - \frac{1}{\alpha_1(m_Z)} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{12}{5} \ln \frac{M_{HC}}{m_Z} - 2 \ln \frac{M_S}{m_Z} + 4 \ln \frac{M_3}{M_2} \right]$$

$$\frac{5}{\alpha_1(m_Z)} - \frac{3}{\alpha_2(m_Z)} - \frac{2}{\alpha_3(m_Z)} = \frac{1}{2\pi} \left[ 12 \ln \frac{M_X^2 M_\Sigma}{m_Z^3} + 4 \ln \frac{M_3 M_2}{m_Z^2} \right]$$

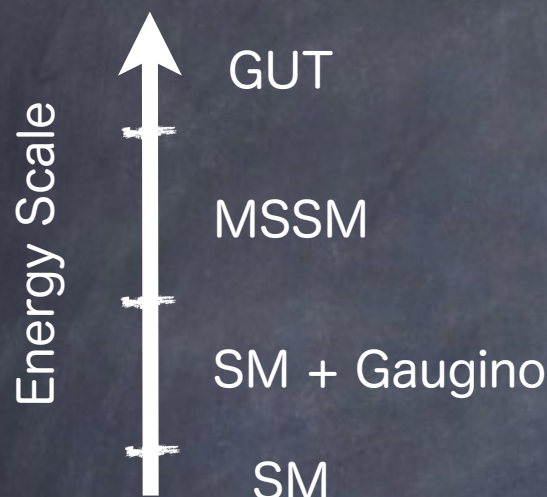
$M_S$  : Sfermionの質量 ~ SUSYの破れのスケール

$M_3$  : gluino (gluonの超対称パートナー) の質量

$M_2$  : wino (W bosonの超対称パートナー) の質量

# GUT mass spectrum

-RGE analysis-



High-scale SUSY シナリオの、  
それぞれのスケールで同様の関係式が得られる。

適切な線形結合をとり、 $\alpha_G$ を消去。

定性的な理解のために...

くりこみ群方程式 (RGEs @ 1-loop) を用いる。

$$\frac{3}{\alpha_2(m_Z)} - \frac{2}{\alpha_3(m_Z)} - \frac{1}{\alpha_1(m_Z)} = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{12}{5} \ln \frac{M_{HC}}{m_Z} - 2 \ln \frac{M_S}{m_Z} + 4 \ln \frac{M_3}{M_2} \right]$$

$$\frac{5}{\alpha_1(m_Z)} - \frac{3}{\alpha_2(m_Z)} - \frac{2}{\alpha_3(m_Z)} = \frac{1}{2\pi} \left[ 12 \ln \frac{M_X^2 M_\Sigma}{m_Z^3} + 4 \ln \frac{M_3 M_2}{m_Z^2} \right]$$

$M_S = M_{SUSY}$  と  $M_{HC}$  の関係  $M_S \nearrow \Rightarrow M_{HC} \nearrow$

重い粒子からの補正と同程度の寄与を含めるために

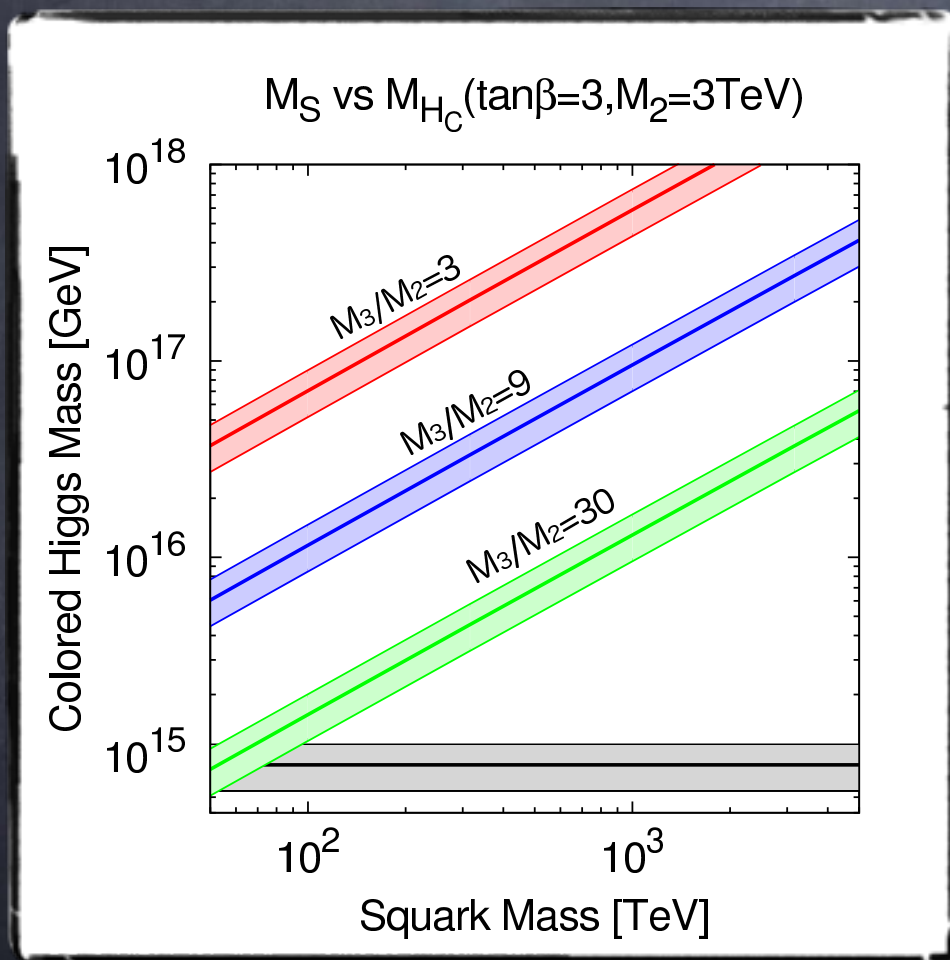
2-loop RGEs を用いて数值的に解析。



# Numerical results

-Color-triplet Higgs mass-

## Color三重項Higgs の質量



Error : 強い相互作用の結合定数の不定性

$$\alpha_s(m_Z) = 0.1184(7)$$

灰色の領域 : 低エネルギーSUSYの場合

$$M_S = 1\text{TeV}, M_3 = 1\text{TeV}, M_2 = 0.3\text{TeV}$$

$$M_{H_C} = (8.774 \pm 2.251) \times 10^{14}\text{GeV}$$

Color三重項Higgsの質量が重くなる



$p \rightarrow K \nu$  の崩壊モードに関する

寿命が長くなる

Color三重項Higgsの質量  $\sim 10^{16}\text{GeV}$

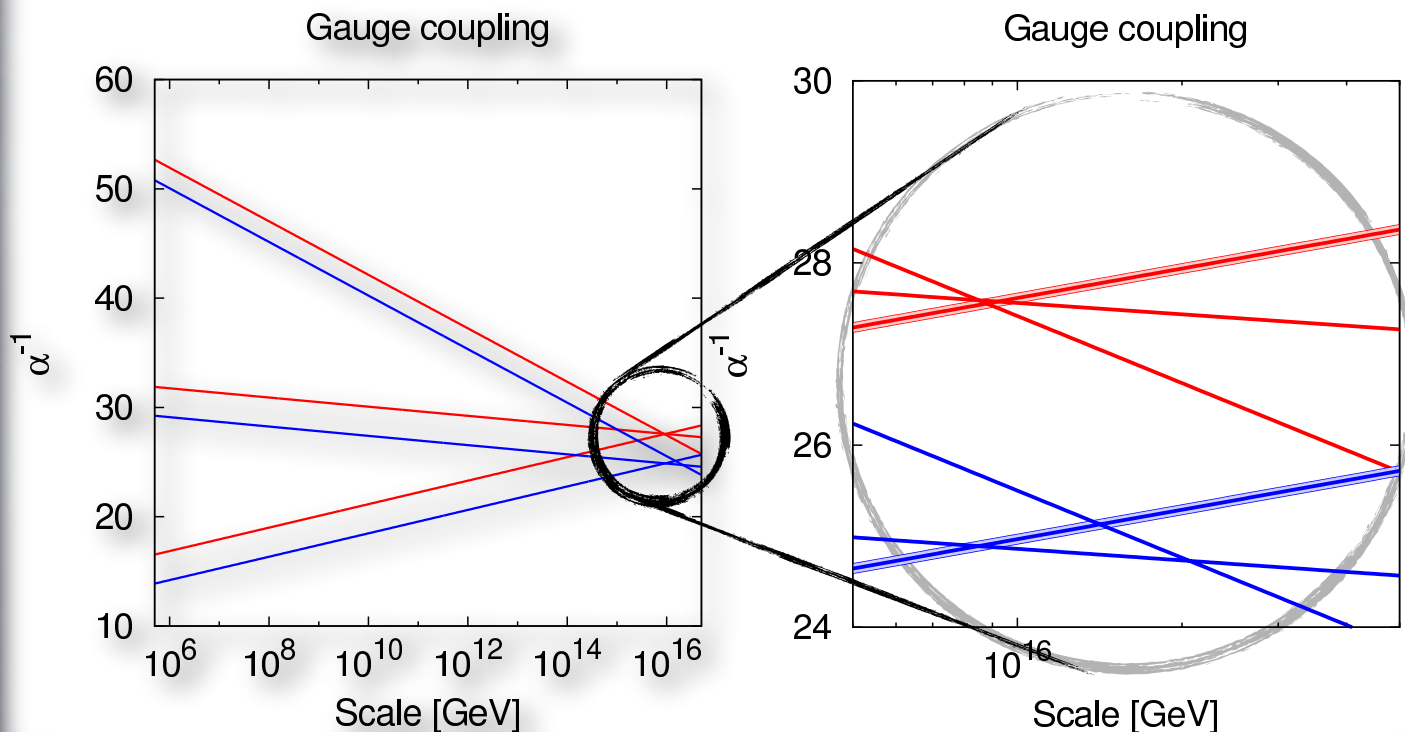
他のGUT粒子の質量と同じオーダーになる

大統一の改善

J.Hisano, TK, N.Nagata (2013)



# Gauge coupling unification



Red: High-scale SUSY

$$M_S = 10^2 \text{ TeV}$$

$$M_2 = 3 \text{ TeV}$$

$$M_3/M_2 = 9$$

Blue: 低エネルギーSUSY

$$M_S = 1 \text{ TeV}$$

$$M_2 = 300 \text{ GeV}$$

$$M_3/M_2 = 3$$

Error bar :

$$\alpha_s(m_Z) = 0.1184(7)$$

Color三重項Higgsが $10^{16}$  GeV 程度の質量を持つと、  
 => ゲージ結合定数への補正が小さくなる @ GUT scale.  
 => ゲージ結合定数の統一がより良くなる

# Outline

- Introduction
- GUT particle mass spectrum
- Proton decay
- Summary

# Proton decay

-problems for dimension-five-

最も単純に拡張した超対称SU(5)大統一模型

(+ 低エネルギーSUSY)

---> ある崩壊モードに関して短い寿命を理論的に予言

$$\tau_p(p \rightarrow K^+ \bar{\nu}) \sim 10^{30} \text{ years}$$

T. Goto and T. Nihei (1999)

H. Murayama and A. Pierce (2001)

現在の観測制限 @Super-Kamiokande

$$\tau_{\text{exp}}(p \rightarrow K^+ \bar{\nu}) > 5.9 \times 10^{33} \text{ years}$$

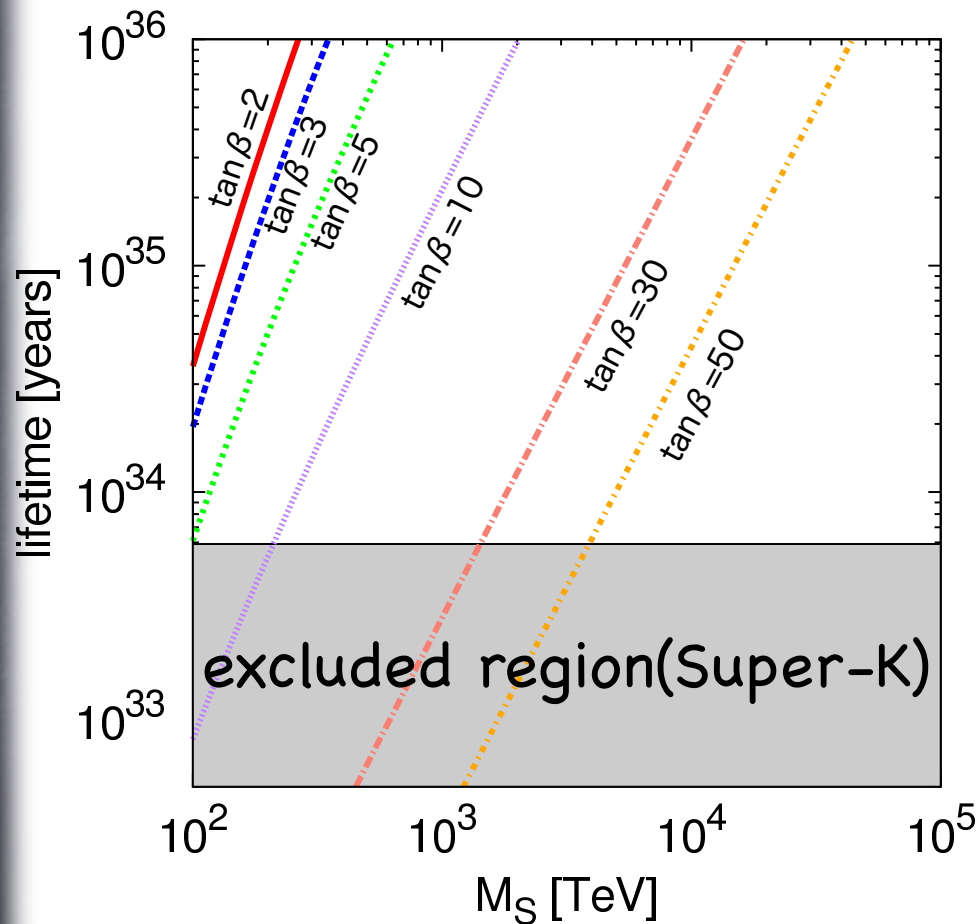
この問題を避けるためには...

- この崩壊を引き起こす演算子を対称性によって禁止・抑制
- “High-scale SUSY”



# Results

- Proton lifetime analysis -



陽子の寿命のパラメーター依存性

$$\tau_p \propto \frac{1}{\tan^4 \beta} (M_{H_C} M_S)^2$$

setup:

$$M_2 = 3 \text{ TeV}$$

$$M_{H_C} = 10^{16} \text{ GeV}$$

陽子の寿命 :

観測事実と無矛盾

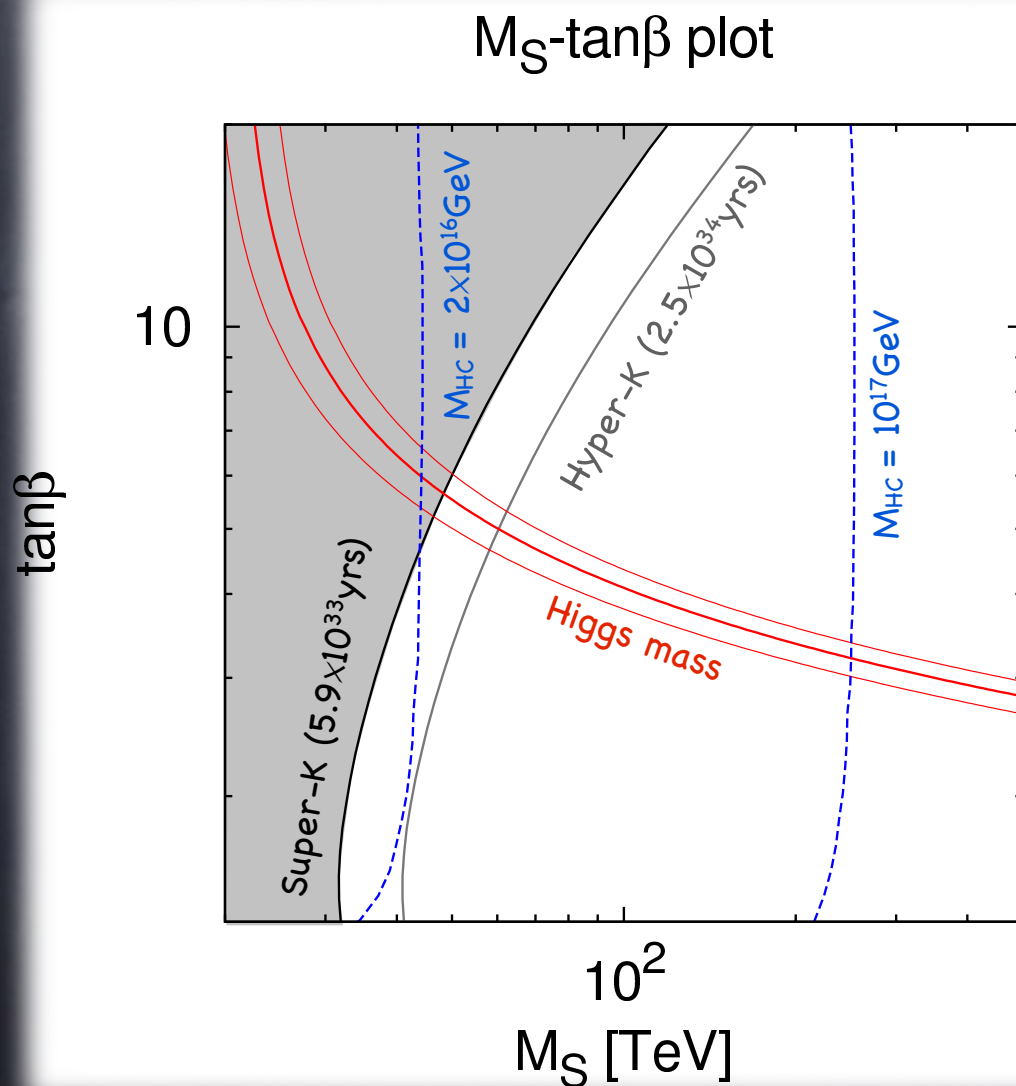
将来実験 (Hyper-K) では

$$\tau_{\text{exp}}(p \rightarrow K^+ + \bar{\nu}) > 2.5 \times 10^{34} \text{ yrs}$$

J.Hisano, D.Kobayashi, TK, N.Nagata (2013)

# Higgs mass v.s. Proton decay

-Contour-Plot-



Setup:

$M_2$  : 3TeV

$M_3$  : 10TeV

Higgs質量のError bar

$m_h = 125.9 \pm 0.4$  GeV

$\alpha_s(m_Z) = 0.1184 \pm 0.0007$

$m_t^{\text{pole}} = 173.07 \pm 0.52 \pm 0.72$  GeV

$M_{HC}$  : くりこみ群による解析から決定

陽子崩壊からの制限

- Black : Super-K ( $5.9 \times 10^{33}$  yrs)
- Gray : Hyper-K ( $2.5 \times 10^{34}$  yrs)

# Outline

- Introduction
- GUT particle mass spectrum
- Proton decay
- Summary



# Summary

---

- High-scale SUSYにおいて大統一が改善しうる.
- High-scale SUSYを仮定した場合に、陽子崩壊からの観測制限 (Super-K)とは無矛盾. 将来実験(Hyper-K)において観測される見込みがある.
- 大統一模型の構築という観点では寿命の短い陽子崩壊を引き起こす演算子を禁止・抑制する機構を加える必要はない.

Thank you for your attentions.