Discrete Gauged R-Symmetry and GUT

丸　信人 (理研理論物理)

K.Hamaguchi & N.M. PRD67 (2003) 115003;

K.Kurosawa, N.M. & T.Yanagida PLB512 (2001) 203

原子核三者若手夏の学校 08/22/2003 @代々木

Introduction

SUSY現象論において、R対称性は重要な役割を果たす

✓ 宇宙項を抑制

$\langle V \rangle = |\langle F \rangle|^2 - 3|\langle W \rangle|^2 \ll M_P^4$ SUSY ⇒ $\langle F \rangle = 0$ R-sym ⇒ $\langle W \rangle = 0$

✓ μ-項を禁止 $W = \mu H_u H_d, \mu \simeq O(M_W) \ll M_P$

✓ R-parityで、B & L数を破るdim-4相互作用を禁止

$$W = LL\bar{E} + LQ\bar{D} + \bar{U}\bar{D}\bar{D}$$ ⇒ rapid p-decay

R-parity: 普通の粒子 even、超対称粒子 odd

➡ これらの性質を持つアノマリーのない離散Rゲージ対称性はあるだろうか？？？

離散Rゲージ対称性を考えることの理由（いいわけ）

✓量子重力効果(wormhole)で大局的対称性は破れる
✓弦理論でコンパクト化の結果、
内部空間の回転群の部分群として残ることがある
✓超重力理論でゲージ化された$U(1)_R$は
プランクスケールで破れる

プランクスケールで、離散Rゲージ対称性が
残っていることを仮定するのはそれほど
不自然なことではない

Gauge mediationの場合

[Hamaguchi-Maru]

Minimal SU(5), SU(5) w/ 5+5*, SU(5) w/ 10+10*について
$\mu \simeq 1TeV$を満たすanomaly free solutions Z_{NR}を探した。

→ **軽いgravitino massの予言**

ただし。。。次の条件を満たさないといけない

μ-term: $W = \left(\frac{\langle W \rangle}{M_P^3} \right)^y M_P H_u H_d = \mu H_u H_d, \mu \simeq 1TeV, 1/2 \leq y \leq 1$

(背後にgauge mediationを想定)

<u>yのbound</u>

$y \simeq \log(M_P/\mu)/\log(M_P/m_{3/2}) \xrightarrow{m_{3/2} \leq \mu \ll M_P \text{(仮定)}} 0 < y \leq 1$

$M_{mess}^2 \geq 0 \to \sqrt{F} \geq O(10TeV) \times (m_{soft}/100GeV) \Leftrightarrow m_{3/2} \geq O(0.01eV) \longrightarrow y \geq 1/2$

R-parity violating bilinear

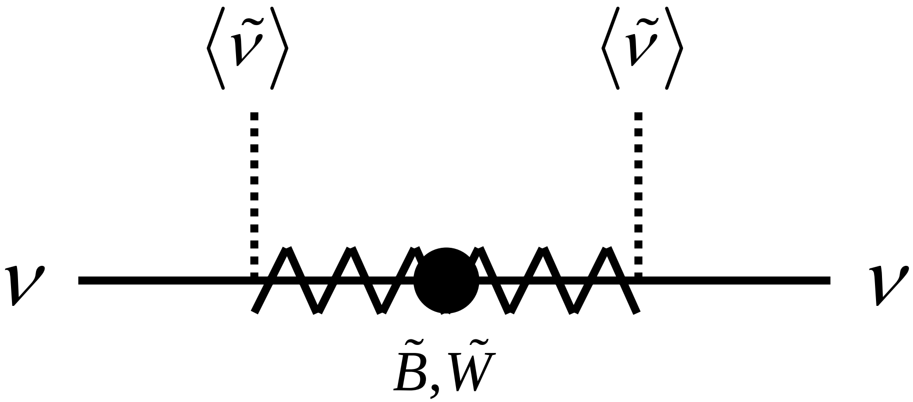
[Takayama-Yamaguchi etc]

$$W = \left(\frac{\langle W \rangle}{M_P^2} \right)^z M_P L H_u \equiv \hat{\mu} L H_u, \quad \hat{\mu} < O\left(10^{-4} \sim 10^{-1}\right) GeV$$ (z:non-negative #)

large ν-massを避けるため
（ν massはシーソーで出す）

$$V \supset \hat{\mu} m \tilde{\nu} H_u + m^2 \left|\tilde{\nu}\right|^2 \rightarrow \langle \tilde{\nu} \rangle \sim \frac{v_u}{m} \hat{\mu}$$

B-term Soft breaking mass



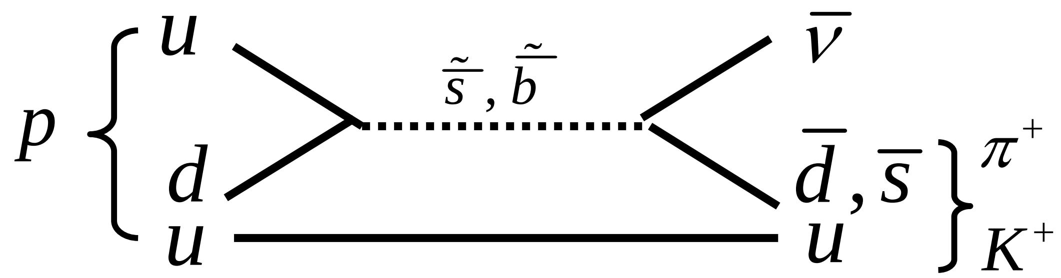
$$\rightarrow \quad m_\nu \sim \frac{\langle \tilde{\nu} \rangle^2}{M_\lambda} \sim \frac{\hat{\mu}^2 v_u^2}{m^3} < 10^{-5} eV$$

R-parity violating trilinear

[Hinchliffe-Kaeding, Dreiner]

$$W \simeq \left(\frac{\langle W\rangle}{M_P^3}\right)^{z'} \left(L_iL_jE_k^c, L_iQ_jD_k^c, U_i^cD_j^cD_k^c\right) \equiv \left(\lambda_{ijk}L_iL_jE_k^c, \lambda'_{ijk}L_iQ_jD_k^c, \lambda''_{ijk}U_i^cD_j^cD_k^c\right)$$

$\lambda'_{11j}\lambda''_{11j} \le 2\times10^{-27}\left(m_{soft}/100GeV\right)^2 \left(j=2,3\right)$ ← Proton decay



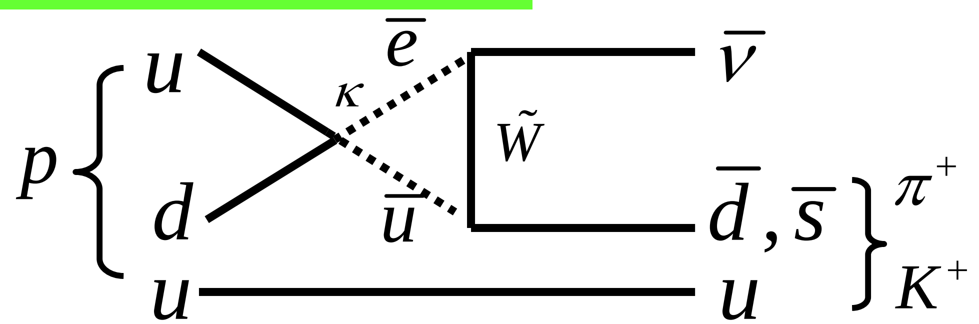
Dim 5

[Sakai-Yanagida,Weinberg]

$$W \simeq \frac{1}{M_P}\left(\frac{\langle W\rangle}{M_P^3}\right)^{z''} QQQL \equiv \frac{1}{M_{eff}}QQQL, M_{eff} > O\left(10^{25}GeV\right)$$

← Proton decay

$U^cU^cD^cE^c$ についても同様

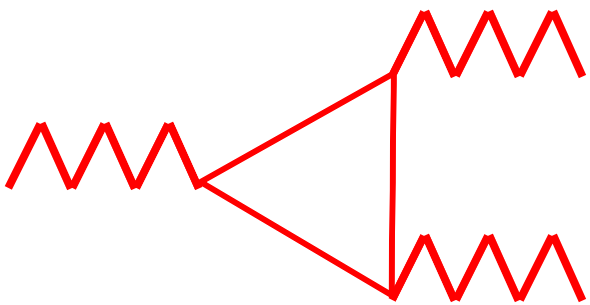


Anomaly cancellation (minimal SU(5) case)

	T	$\bar{F}$	$\bar{N}$	H	$\bar{H}$	θ
SU(5)	10	5*	1	5	5*	
Z_{NR}	t	$\bar{f}$	$\bar{n}$	h	$\bar{h}$	α

← 電荷はすべて整数で、世代によらないとする

Z_{NR}



SU(5)

SU(5)

= 0 (mod N/2)

[Ibanez, Ibanez-Ross]

課さない

- $Z_{NR}[gravity]^2$ ⟶ １重項で自由に調節可能
- $[Z_{NR}]^3$ ⟶ 分数電荷の重い場のアノマリーの寄与で解が変わる

$$W = TTH + T\bar{F}\bar{H} + \bar{F}\bar{N}H + \frac{1}{2}M_m\bar{N}^2$$ ⟶ 電荷に対する制限

Results

	Z_{NR}	$m_{3/2}$
Minimal SU(5)	Z_{6R}, Z_{30R}	$10^{-3} eV$
Minimal SU(5) & 5+5*	Z_{46R}, Z_{230R}	$2.9 keV, 0.0035 eV$
Minimal SU(5) & 10+10*	$Z_{110R}, Z_{330R}, Z_{990R}$	$4.0\times 10^{-4} eV \le m_{3/2} \le 3.2 MeV$ (10 solutions)

Minimal SU(5)

$m_{3/2}$	Bilinear $< O\left(10^{-4}\right) GeV$	Trilinear $\leq (4-5)\times 10^{-14}$
$10^{-3} eV$	$3\times 10^{-20} GeV$	1×10^{-23}

Minimal SU(5) & 5+5*

$m_{3/2}$	Bilinear	Trilinear
$2.9 keV$	$6\times 10^{-14} GeV$	6×10^{-17}
$0.035 eV$	$7\times 10^{-19} GeV$	7×10^{-22}

Minimal SU(5) & 10+10*

$m_{3/2}$	Bilinear	Trilinear
$3.2 MeV$	$7\times 10^{-11} GeV$	7×10^{-14}
$420 keV$	$9\times 10^{-12} GeV$	9×10^{-15}
$49 keV$	$1\times 10^{-12} GeV$	1×10^{-15}
$5.2 keV$	$1\times 10^{-13} GeV$	1×10^{-16}
$490 eV$	$1\times 10^{-14} GeV$	1×10^{-16}
$41 eV$	$8\times 10^{-16} GeV$	8×10^{-19}
$2.9 eV$	$6\times 10^{-17} GeV$	6×10^{-20}
$0.18 eV$	$4\times 10^{-18} GeV$	4×10^{-21}
$0.95\times 10^{-2} eV$	$2\times 10^{-19} GeV$	2×10^{-22}
$0.4\times 10^{-3} eV$	$9\times 10^{-21} GeV$	9×10^{-24}

Gravity Mediationの場合

[Kurosawa-Maru-Yanagida]

μ問題についてはGiudice-Masiero機構が使える [Giudice-Masiero (1988)]

一般にvisible sectorとhidden sectorがcoupleする超重力理論で

$$K = H(5)\bar{H}(\bar{5}) + h.c. \quad \Rightarrow \quad W_{eff} = \langle W_{hidden} \rangle H\bar{H} \simeq m_{3/2} H\bar{H}$$

R電荷に対する条件： $R(H\bar{H}) \neq 2, R(H\bar{H}) = 0$ mod N

(Colored Higgsはmissing partner機構等で重くする)

同様にminimal SU(5)かつ世代によらない
charge assignmentで、アノマリー相殺条件を解くと $\Rightarrow$ Z_{4R}, Z_{20R}

- ただし、extra matter $5_{-1} \oplus 5_1^*$ が必要
- R電荷の和がゼロなのでGM機構によりグラヴィティーノ質量を獲得
- Z_{4R}, Z_{20R} は $LLH_u H_u$ を除いたすべてのバリオン、レプトン数を破る
  次元４、５の相互作用を禁止
- SUSY breakingの結果Ｒパリティが残るので、次元４相互作用は完全に禁止

まとめ

●SUSY SU(5) GUTにおいて、
アノマリーフリー離散Rゲージ対称性が存在するか解析した。

- ● μ 項は、繰り込み不可能項で生成→1TeVに固定
- ●Minimal SU(5) GUT: $m_{3/2} \simeq 10^{-3} eV$ Z_{6R}, Z_{30R}
- ●5+5*,10+10*を加えると、
  $m_{3/2} \geq 10^{-3} eV$ を満たす多くの解が存在
- ●Extra matter は superheavy
  $m_{5,5^*} \sim 3.5\times 10^{11}, 2.9\times 10^{16} GeV, m_{10,10^*} \sim 10^{15-17} GeV$

● R_p は必ず破れてしまうが、$\not{R}_p$ couplingは対称性でコントロール。

- ● $\not{R}_p$ bilinear, trilinear couplingsに対する
  陽子崩壊、ν質量からの制限を満たす解を見つけた。
- ●B、L数を破るDim-5 operatorsが自然に抑制
  →陽子の安定性は対称性で保証

●予言されるグラヴィティーノ質量は、0.001eV-1MeVでLSP
→寿命>>宇宙年齢なのでダークマターの可能性

- Gravity mediationの場合、

  - μ項はGM機構でグラヴィティーノ質量スケール(TeV)
  - Minimal SU(5)に5+5*を加えることでアノマリー相殺
  - 解は、Z_{4R}, Z_{20R}
  - Simple charge assignments R(matter)=1, R(Higgs)=0
  - 5+5*の質量もGM機構でグラヴィティーノ質量(TeV)

    ➡ コライダー実験で検証可能
  - バリオン、レプトン数を破る次元４，５相互作用を禁止
  - 超対称性の破れの後、Ｒパリティが残る。次元４禁止

Anomaly cancellation

Yukawa & ν_R mass

$2t+h=2\alpha$ (mod N)

$t+\bar{f}+\bar{h}=2\alpha$ (mod N)

$\bar{f}+\bar{n}+h=2\alpha$ (mod N)

$2\bar{n}=2\alpha$ (mod N)

μ-term

$2\alpha y+h+\bar{h}=2\alpha$ (mod N)

$h+\bar{h}\neq 2\alpha$ (mod N)

$$Z_{NR}[SU(3)_C]^2=\frac{3}{2}\left\{3(t-\alpha)+\left(\bar{f}-\alpha\right)\right\}+3\alpha+\frac{T_2(R)}{2}\left\{(\xi-\alpha)+\left(\bar{\xi}-\alpha\right)\right\}=\frac{N}{2}k,\left(k\in\mathbb{Z}\right)$$

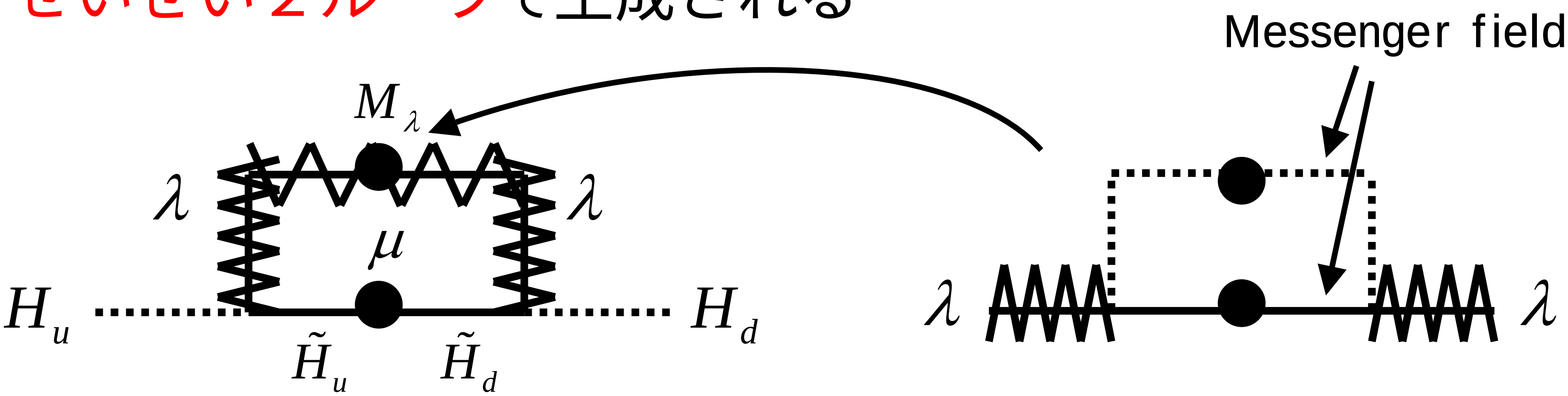
$$Z_{NR}[SU(2)_L]^2=\frac{1}{2}\left\{9(t-\alpha)+3\left(\bar{f}-\alpha\right)\right\}+\frac{1}{2}\left(h+\bar{h}-2\alpha\right)+2\alpha+\frac{T_2(R)}{2}\left\{(\xi-\alpha)+\left(\bar{\xi}-\alpha\right)\right\}=\frac{N}{2}k',\left(k'\in\mathbb{Z}\right)$$

Extra matterを導入するときは、１重項なしに $Z_{NR}[gravity]^2$ を課す

$$Z_{NR}[gravity]^2=30(t-\alpha)+15\left(\bar{f}-\alpha\right)+3\left(\bar{n}-\alpha\right)+2(h-\alpha)+2\left(\bar{h}-\alpha\right)$$
$$+D(\xi)(\xi-\alpha)+D\left(\bar{\xi}\right)\left(\bar{\xi}-\alpha\right)+(8+3+1)\alpha-21\alpha \quad \text{(mod N or N/2)}$$

B-term?

せいぜい２ループで生成される



$$B\mu \sim \frac{g^2}{16\pi^2}\mu M_\lambda \Rightarrow B \sim 10^{-2} M_\lambda \sim 10 GeV$$

loop suppressed

Higgs potential minimization

$$2B\mu = \left(2\mu^2 + m_{H_u}^2 + m_{H_d}^2\right)\sin 2\beta$$

$$B \sim 0 \Rightarrow \sin 2\beta \sim 0, \therefore \beta \sim 0, \pi/2$$

Large tan **β** is preferred
(tan **β** << 1 is excluded)

Cosmology of gravitino LSP

Gravitino lifetime >> age of universe $\left(10^{10}\,yr\right)$ → Dark matter

$$\tau_{3/2}\left(\psi_{3/2}\rightarrow\gamma\nu\right)\simeq 2\times10^{19}\,yr\left(\frac{1GeV}{m_{3/2}}\right)^{3}\left(\frac{7\times10^{-13}}{U_{\gamma\nu}^{2}}\right)$$

[Takayama-Yamaguchi]

νとphotinoの混合角

NLSPをphotinoとすると、$\tilde{\gamma}\rightarrow\gamma+\tilde{G}$ で崩壊

もし、この崩壊がBBNで起こるとBBNシナリオが崩れる

$1\sec\leq\tau_{\tilde{\gamma}}\leq100\sec$

[Moroi-Murayama-Yamaguchi etc]

$$\tau_{NLSP}\sim6\times10^{-2}\sec\left(\frac{m_{3/2}}{1MeV}\right)^{2}\left(\frac{m_{NLSP}}{100GeV}\right)^{-5}$$

→ completely avoided

Relic abundance of gravitinos

$$\Omega_{3/2}h^2 \simeq 0.3\left(\frac{m_{gluino}}{1TeV}\right)^2\left(\frac{m_{3/2}}{10MeV}\right)^{-1}\left(\frac{T_R}{10^6 GeV}\right)$$

$\Omega_{3/2} = \rho_{3/2}/\rho_c$ $\begin{cases} \rho_{3/2}: \text{ Present energy density of the gravitino} \\ \rho_c: \text{ Critical energy density of the present universe} \end{cases}$

h : Present Hubble parameter in units of 100km/secMpc

T_R : Reheating temperature

Overclosure limit: $\boxed{\Omega_{3/2} < 1}$ ➡ Constraints of $m_{3/2}$ & T_R