



(the basic of)

# Phenomenology of *R*-Parity violating SUSY

岩本 祥 [Sho Iwamoto]

The University of Tokyo / JSPS Fellow

2010/08/08

夏の学校2010 @ 長野県下高井郡木島平村

M. Endo, K. Hamaguchi and SI.

*Cosmological Constraints on R-parity violation.*

JCAP 1002:032, 2010 [arXiv:0912.0585]

の, 初歩的なintroductionとして

お詫び:

マジ基礎。

Review =  $\frac{19.5\text{分}}{20\text{分}}$

日本語。

ゲレンデがとけるほど眠い。

自己紹介。

みしよです。

みしよ

検索

一番上に出るよ！

*R*-parityの破

れた  
た

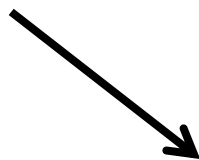
SUSY

の研究をしています。

# $R$ -parityの破れた



なにこれ



た

# SUSY

の研究をしています。

# 1. *R*-parity violating SUSY

それってなに？

# SM / MSSM

## Standard Model

ほぼカンペキ！たとえば……

**Baryon**数と**Lepton**数が  
“たまたま” 保存量になってる



理論的には陽子は崩壊しない

( $B=1$ の粒子の中で一番軽いから)

※実験：陽子の寿命  $\tau > 5 \times 10^{29}$  年

一致！ 

# SM / MSSM

## Standard Model

Baryon数とLepton数が  
“たまたま” 保存量になってる

場  $\rightarrow Q, U, D, E, L$ ; Higgs, Gauge場

=材料が少ない

対称性  $\rightarrow SU(3) \times SU(2) \times U(1)$

=制約が厳しい

$\rightarrow$  作れる相互作用が少ない!

(Gauge相互作用と  $H^\dagger L \bar{E}$ ,  $H^\dagger Q \bar{D}$ ,  $H Q \bar{U}$ )



# SM / MSSM

## Standard Model

ほぼカンペキ！

ただし「階層性」という不自然さ 

余剰次元

超対称性

など.....

様々な拡張

# SM / MSSM

## Standard Model

ほぼカンペキ！

ただし「階層性」という不自然さ 

超対称性

## MSSM

(Minimal Supersymmetric Standard Model)

階層性問題は解決。

しかし.....この理論では陽子が崩壊！

**Why?**

# Proton Decay Problem

超対称性 =

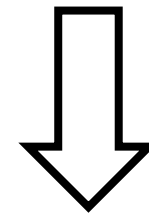
boson — fermion の対称性

$$\gamma \quad \longleftrightarrow \quad \tilde{\gamma} \quad [\text{photino}]$$

$$\tilde{e} \quad [\text{selectron}] \quad \longleftrightarrow \quad e$$

$$\tilde{q} \quad [\text{squark}] \quad \longleftrightarrow \quad q$$

新しい材料が登場



新しい 危険な 相互作用

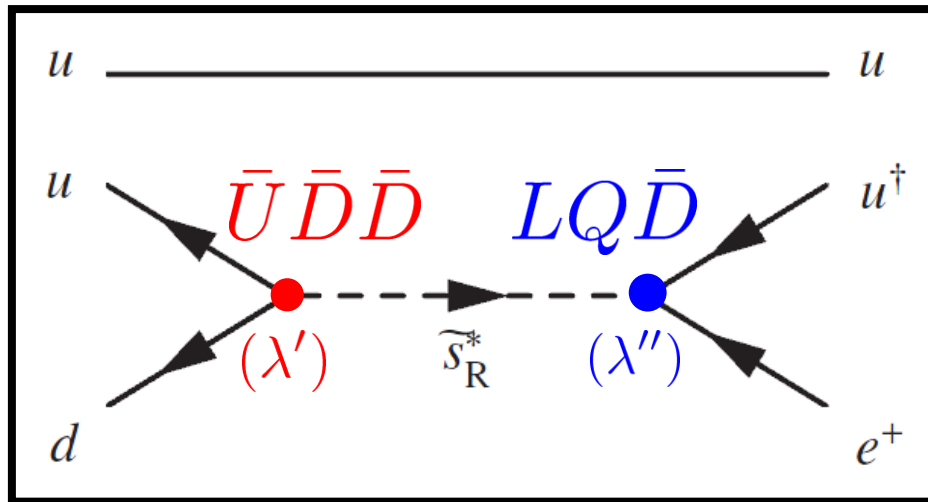
# Proton Decay Problem

- Superpotential of the MSSM

$$W \ni H_u H_d, H_d L \bar{E}, H_d Q \bar{D}, H_u Q \bar{U},$$

$$\cancel{L} \left[ LH_u, LL\bar{E}, LQ\bar{D} \right] \left[ \bar{U}\bar{D}\bar{D} \right] \cancel{B}$$

Both  $\cancel{B}$  and  $\cancel{L} \Rightarrow$  Proton Decay ☹️



$$p \rightarrow e^+ \pi^0$$

陽子の寿命

$$\tau \sim \frac{(9 \times 10^{-13} \text{ s})}{|\lambda' \lambda''|^2} \left( \frac{m_{\tilde{s}_R}}{1 \text{ TeV}} \right)^4$$

# Conclusion

**MSSM**

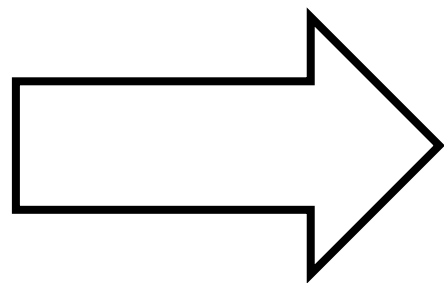
**陽子崩壞！**

強引に条件を増やし

$B$  と  $L$  を

$$W \ni H_u H_d, H_d L \bar{E}, H_d Q \bar{D}, H_u Q \bar{U},$$


保存させよう！

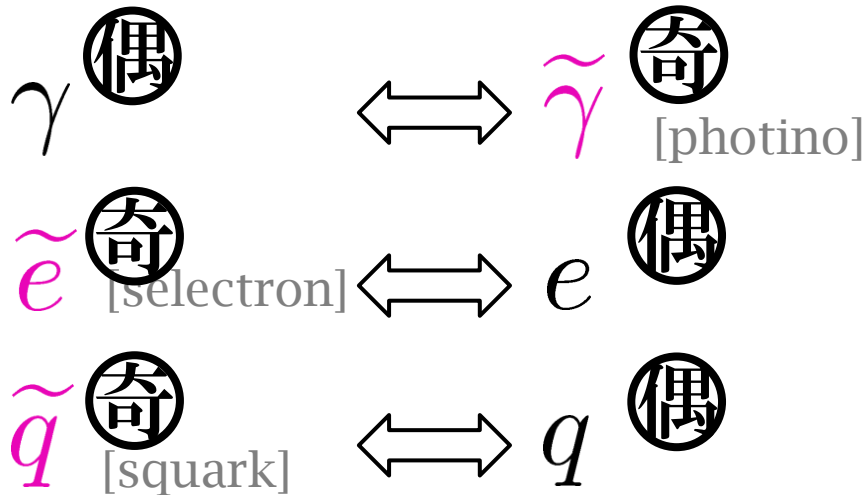


ふつうは

“ $R$ -parity”を使う

# R-parity

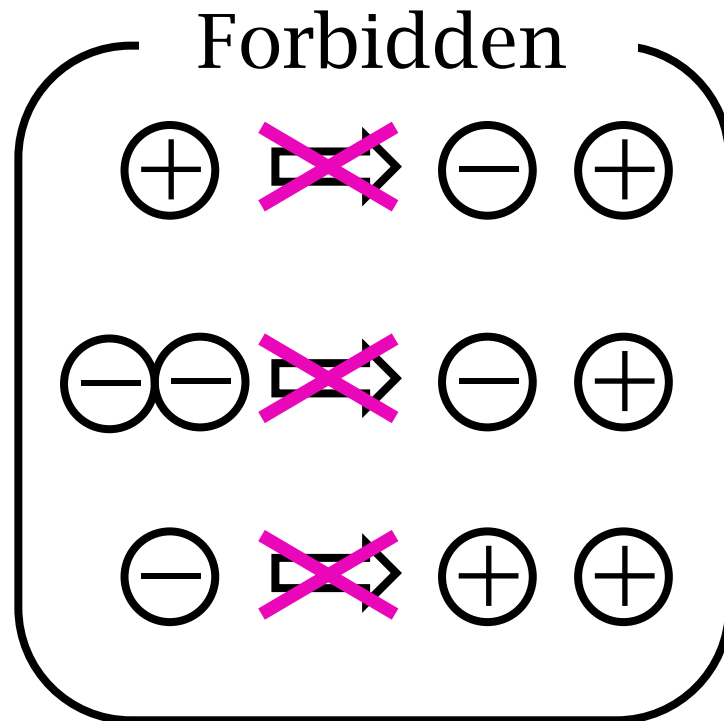
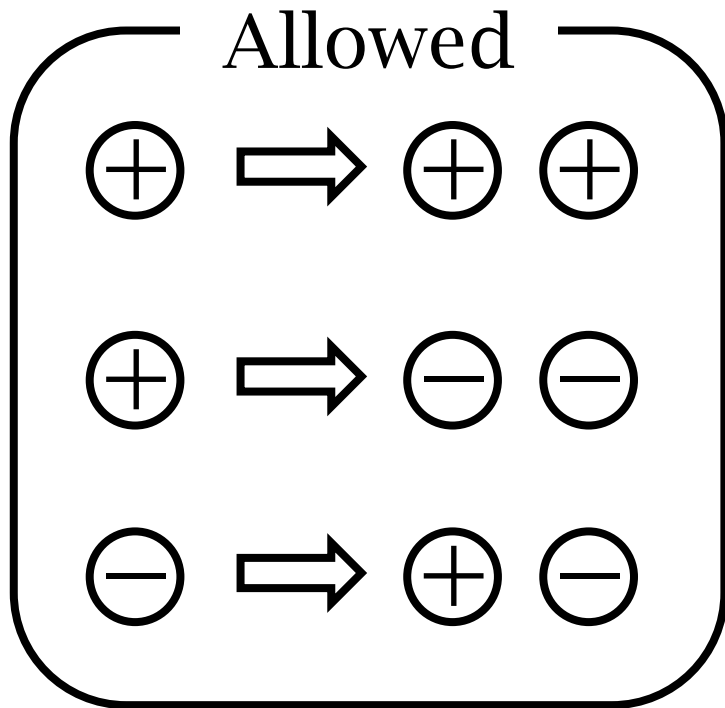
R-parity: 標準模型の粒子  $\rightarrow +$  (偶)  
超対称粒子  $\rightarrow -$  (奇)



# R-parity

標準模型の粒子  $\rightarrow +$  (偶)  
超対称粒子  $\rightarrow -$  (奇)

R-parityが保存していると





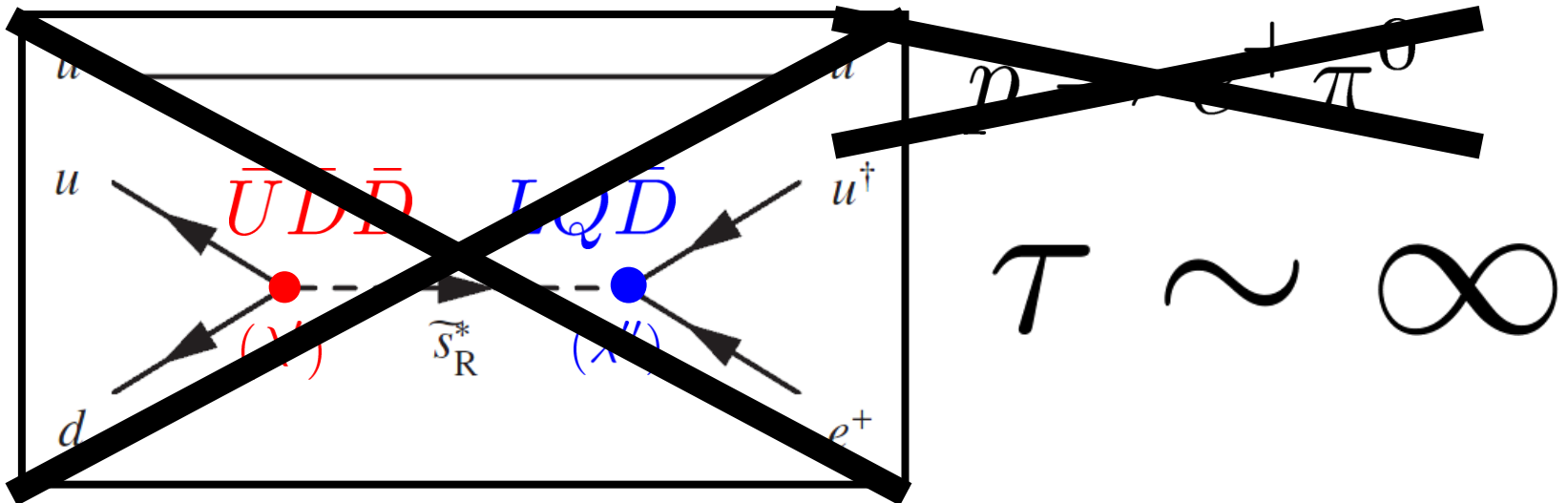
# R-parity

- Superpotential of the MSSM **with R-Parity conservation**

$$W \ni H_u H_d, H_d L \bar{E}, H_d Q \bar{D}, H_u Q \bar{U},$$

$$\cancel{L} \left[ \cancel{L H_u}, \cancel{L L \bar{E}}, \cancel{L Q \bar{D}}, \right] \cancel{B} \left[ \cancel{\bar{U} \bar{D} \bar{D}} \right]$$

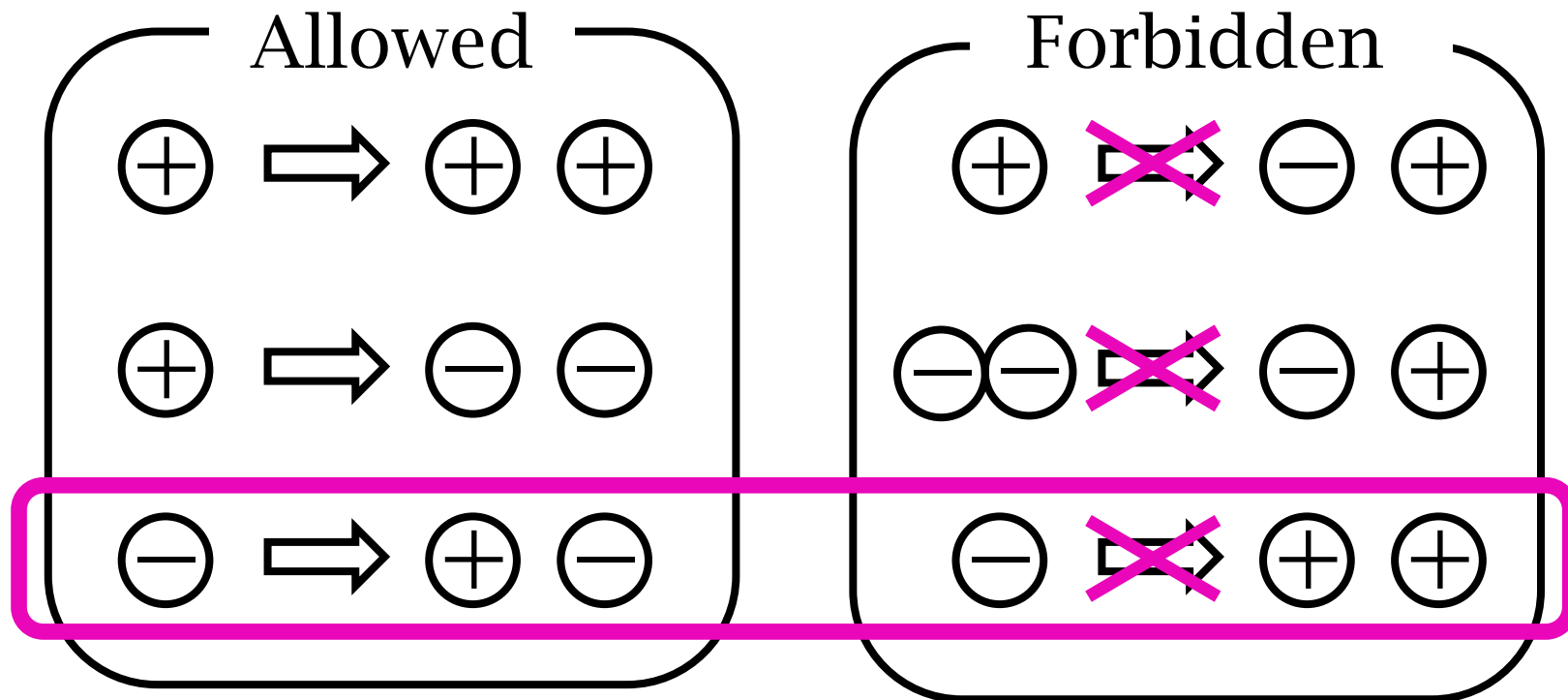
~~Both  $B$  and  $L$~~   $\Rightarrow$  Proton is stable. 😊



# R-parity

標準模型の粒子  $\rightarrow +$  (偶)  
超対称粒子  $\rightarrow -$  (奇)

R-parityが保存していると



# R-parity

標準模型の粒子	→ +	(偶)
超対称粒子	→ -	(奇)

## 更なる利点

R-parityが保存していると

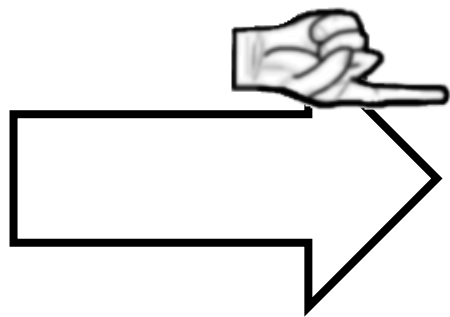
⊖ の崩壊 = 必ず ⊖ が作られる

→ **最も軽い超対称粒子(LSP)**は崩壊しない

# 暗黒物質の有力な候補

★陽子崩壊を回避

★暗黒物質も説明



ふつうは



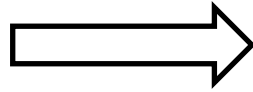
“**R-parity**”を使う



# Conclusion

**MSSM**

**陽子崩壊！**



普通は*R*-parity

# Proton Decay Problem

- Superpotential of the MSSM

$$W \ni H_u H_d, H_d L \bar{E}, H_d Q \bar{D}, H_u Q \bar{U},$$
$$\cancel{L} \left[ L H_u, L L \bar{E}, L Q \bar{D}, \right] \bar{U} \bar{D} \bar{D} \cancel{B}$$

Both  $\cancel{B}$  and  $\cancel{L} \Rightarrow$  Proton Decay ☹️



じゃあ  $\cancel{B}$  か  $\cancel{L}$  の一方だけ  
強引に消せばいい!

# R-parity Violating SUSY

R-parity保存以外の2つの手法

☆  $\cancel{L}$  だけがあり,  $B$  は保存している ( $B$  の保存, という制約)

$$W \ni H_u H_d, H_d L \bar{E}, H_d Q \bar{D}, H_u Q \bar{U},$$
$$\cancel{L} \quad LH_u, \quad LL\bar{E}, \quad LQ\bar{D}, \quad \text{[grey box]}$$

☆  $\cancel{B}$  だけがあり,  $L$  は保存している ( $L$  の保存, という制約)

$$W \ni H_u H_d, H_d L \bar{E}, H_d Q \bar{D}, H_u Q \bar{U},$$
$$\text{[grey box]} \quad \bar{U} \bar{D} \bar{D} \quad \cancel{B}$$

(※陽子崩壊を避けるため,  $m_{\text{LSP}} > m_{\text{proton}}$  が必要)

# Introductory Diagram

Standard Model



不自然！(階層性問題)

Supersymmetry

MSSM

このままでは陽子崩壊=破滅



Lの保存を仮定

R-parityの  
保存を仮定

Bの保存を仮定

~~B~~-MSSM

MSSM with R-parity

L-MSSM

😊 Dark Matter!!

MSSM without R-parity

(ただしDark Matterは説明できない)



# MSSM without R-parity

## 特徴

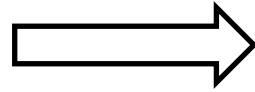
◎LSPも崩壊する

◎ $B$  または  $L$  が破れている

# Conclusion

MSSM

陽子崩壊！



普通は*R*-parity

別の方法もある！

(~~*B*~~や~~*L*~~があっても良い)

## 2. Constraints

$B$  や  $L$  の相互作用の大きさには  
どのような制約があるの？

$B \cdot L = \text{Exotic}$

→わりと色々な制限

- 加速器実験
- 宇宙論的制限

ところで

ヤバイ。

宇宙ヤバイ。まじでヤバイよ、マジヤバイ。

宇宙ヤバイ。

まず広い。もう広いなんてもんじゃない。超広い。

広いとかっても

「東京ドーム20個ぶんくらい？」

とか、もう、そういうレベルじゃない。

(以下略)

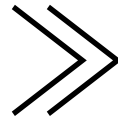
(2ちゃんねるのとあるコピペより)

宇宙がヤバいので  
宇宙論からの制限  
を話したい。

# Baryon Asymmetry of the Universe

宇宙

物質



反物質 (anti-baryon)

(baryon)

ふしぎ!

# Baryon Asymmetry of the Universe

## 「Сахаров(サハロフ)の3条件」

- ◎  $B$  (または  $L$ ) の破れ
- ◎ CP の破れ
- ◎ 宇宙が非平衡であること



もうちょい詳しく

が必要。



# おてがるなBaryonのつくりかた

- (1)まず, なんとかしてBaryon Number  $B$  を破ります
- (2)次に, なんかウマイことをしてbaryonを注ぎます
- (3)最後に, 漏れないように穴を小さくします



「非平衡」の要求

# 一方で

もしも、 $\beta$  の相互作用が  
十分大きいと

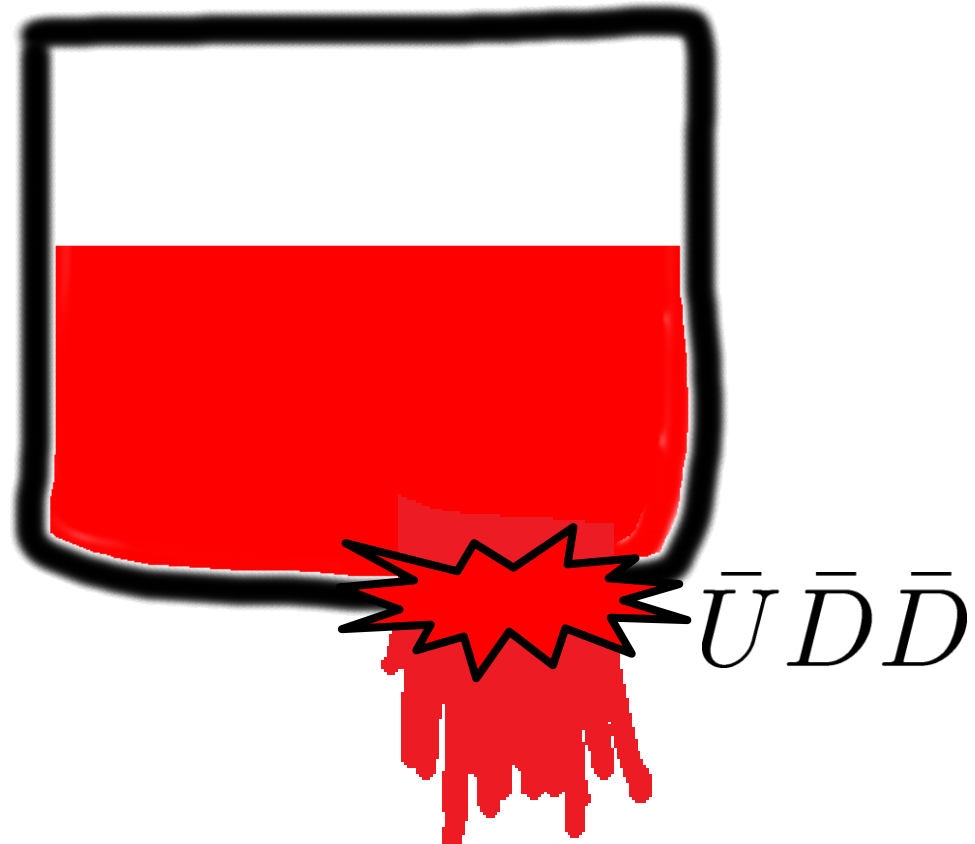
☆  $\beta$  だけがあり、 $L$  は保存している ( $L$  を強引に保存させる)

$$W \ni H_u H_d, H_d L \bar{E}, H_d Q \bar{D}, H_u Q \bar{U},$$

$\bar{U} \bar{D} \bar{D}$   $\beta$

(※陽子崩壊を避けるため、 $m_{\text{LSP}} > m_{\text{proton}}$  が必要)

# おてがるなBaryonのつくりかた



おてがるなBaryonのつくりかた

Baryonが

“WASH-OUT”

される



$\bar{U} \bar{D} \bar{D}$

# ので、

## この相互作用はあまり大きくない

※結合定数  $\lambda'' \lesssim (4 \text{ to } 5) \times 10^{-7}$

※抜け道もある

- Electroweak baryogenesis
- Affleck-Dine

☆  $B$  だけがあり,  $L$  は保存している ( $L$  を強引に保存させる)

$$W \ni H_u H_d, H_d L \bar{E}, H_d Q \bar{L}, H_u Q \bar{U}, \bar{U} \bar{D} \bar{D} \quad B$$

(※陽子崩壊を避けるため,  $m_{\text{LSP}} > m_{\text{proton}}$  が必要)

# Conclusion

MSSM

陽子崩壊！

普通はR-parity

別の方法もある！

(~~B~~や~~L~~があっても良い)

宇宙論

(Wash-out)

~~B~~

は  
そこそこ小さい

# 更に実は

標準模型の非摂動効果 “Sphaleron”

(初期宇宙でのみ元気に活動)

Baryon  $\longleftrightarrow$  Anti-Lepton

変換

$B$ の破れ  $\longleftrightarrow$   $L$ の破れ

変換

(Lepton flavor violationが存在すれば)

$L$  がデカい場合も  
wash-outが起きる

結局、 $B$  も  $L$  も  
それほど大きいわけじゃない  
(でも、無いともいえない)



# Conclusion

MSSM

陽子崩壊！

普通はR-parity

別の方法もある！

(~~B~~や~~L~~があっても良い)

宇宙論

(Wash-out)

~~B~~ & ~~L~~ は  
そこそこ小さい

# Conclusion

論文の内容：  
どれくらい  
小さいの？

LFVがあれば

$$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \lambda \lesssim 1 \times 10^{-6} \\ \lambda' \lesssim 3 \times 10^{-7} \\ \kappa \lesssim 1.5 \times 10^{-6} \\ \lambda'' \lesssim 4 \times 10^{-7} \end{array} \right.$$

$$\text{For } W_{\underline{L}} = W_{\text{RPC}} + \lambda_{ijk} L_i L_j \bar{E}_k + \lambda'_{ijk} L_i Q_j \bar{D}_k + \kappa_i L_i H_u$$

$$W_{\underline{B}} = W_{\text{RPC}} + \lambda''_{ijk} \bar{U}_i \bar{D}_j \bar{D}_k$$

$$m_{\tilde{q}} = 600 \text{ GeV}, \quad m_{\tilde{H}} = 300 \text{ GeV}, \quad m_{\tilde{l}} = 100 \text{ GeV}.$$

# おわり

発表資料は数日後に↓

みしよ

検索