

Rパリティが保存された超対称 2-loop 輻射シーソー模型の コライダー現象論

進藤 哲央(工学院大学)

共同研究者

青木真由美(金沢大), 兼村晋哉(富山大), 柳生慶(富山大)

● M. Aoki, S. Kanemura, T.S., and K. Yagyu, JHEP1007,084

● M. Aoki, S. Kanemura, T.S., and K. Yagyu, in progress

標準模型のほころび

★ 有限の小さなニュートリノ質量

ニュートリノ振動の観測 → 質量²乗差と混合角の測定

parameter	bf±1σ	1σ acc.	2σ range	3σ range
Δm_{21}^2 [10^{-5}eV^2]	7.9 ± 0.3	4%	7.3 – 8.5	7.1 – 8.9
$ \Delta m_{31}^2 $ [10^{-3}eV^2]	$2.5^{+0.20}_{-0.25}$	10%	2.1 – 3.0	1.9 – 3.2
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.30^{+0.02}_{-0.03}$	9%	0.26 – 0.36	0.24 – 0.40
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.50^{+0.08}_{-0.07}$	16%	0.38 – 0.64	0.34 – 0.68
$\sin^2 \theta_{13}$	–	–	≤ 0.025	≤ 0.041

T. Schwetz, Phys.Scripta T127:1

$$U_{\text{PMNS}} \sim \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & s_{13} e^{i\delta} \\ -s_{12} c_{23} & c_{12} c_{23} & s_{23} \\ s_{12} s_{23} & -c_{12} s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & & \\ & e^{i\alpha_{21}} & \\ & & e^{i\alpha_{31}} \end{pmatrix}$$

まだ決まらないパラメータ達

質量の絶対値

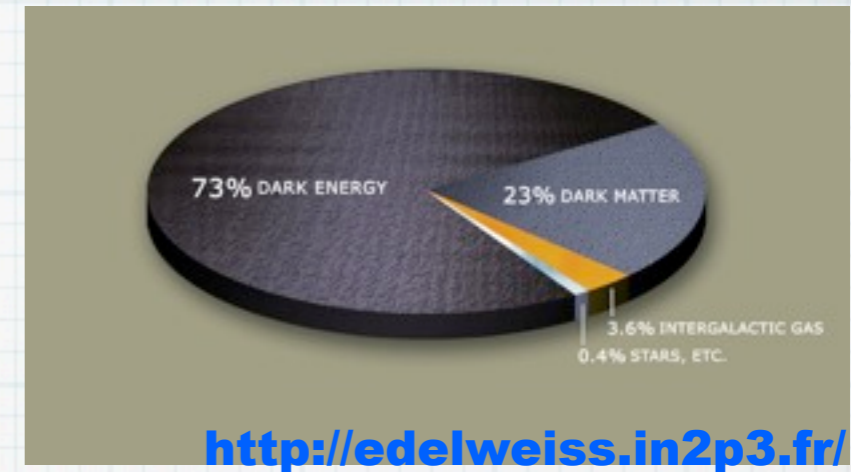
$\text{sign}(\Delta m_{31}^2)$
 $\sin^2 \theta_{13}$
 $\theta_{23} > \frac{\pi}{4}$ or $\theta_{23} < \frac{\pi}{4}$?
 $\delta, \alpha_{21}, \alpha_{31}$

標準模型のほころび

★ ダークマターの候補がない

★ 宇宙のバリオン数

$$\eta_B = (6.21 \pm 0.16) \times 10^{-10}$$



★ 2次発散の問題

$$\sim \lambda \Lambda^2$$

★ その他の怪しげな現象達

MUON g-2 **PAMELA**等の宇宙線観測 $\text{Br}(B \rightarrow \tau \nu)$

DAMA, GOGENT, CDMS II etc $\text{Br}(D_s \rightarrow \tau \nu)$ A_{FB} of $\bar{t}t$

等々

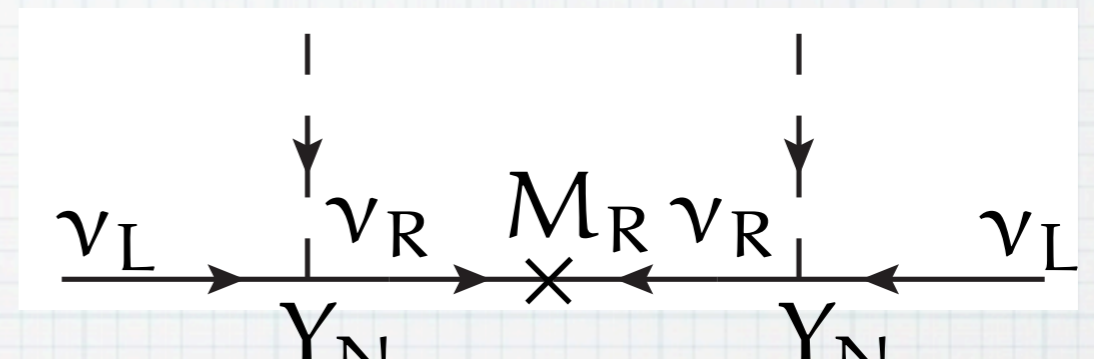
ニュートリノ質量生成機構

有名なのは**(Type I)**シーソー模型

重い右巻きニュートリノを導入



Integrated out



$$m_\nu = \langle H \rangle^2 Y_N^T M_R^{-1} Y_N$$

右巻きニュートリノ質量によって強く抑制

この模型は非常によく調べられている

他の可能性はないか?

他の**type**のシーソー
(新粒子の重い質量で
抑制)

この模型に注目する
輻射補正による
質量生成(輻射
シーソー模型)

余剰次元を
利用

SUSY Zee-Babu model

輻射シーソー模型

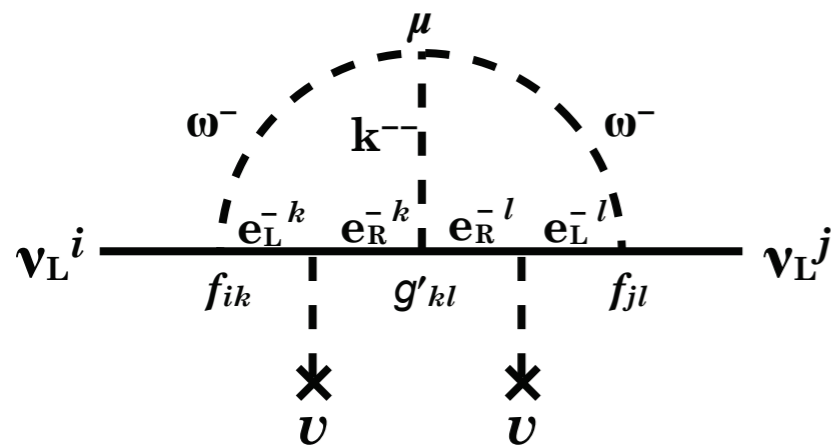
Loopファクター + 新粒子の質量による抑制

Extra scalars are introduced

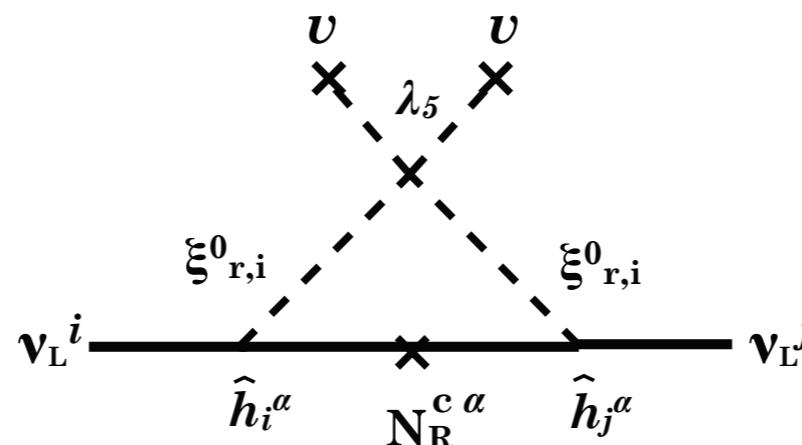
これらはレプトンセクターと結合する

具体的な模型の例:

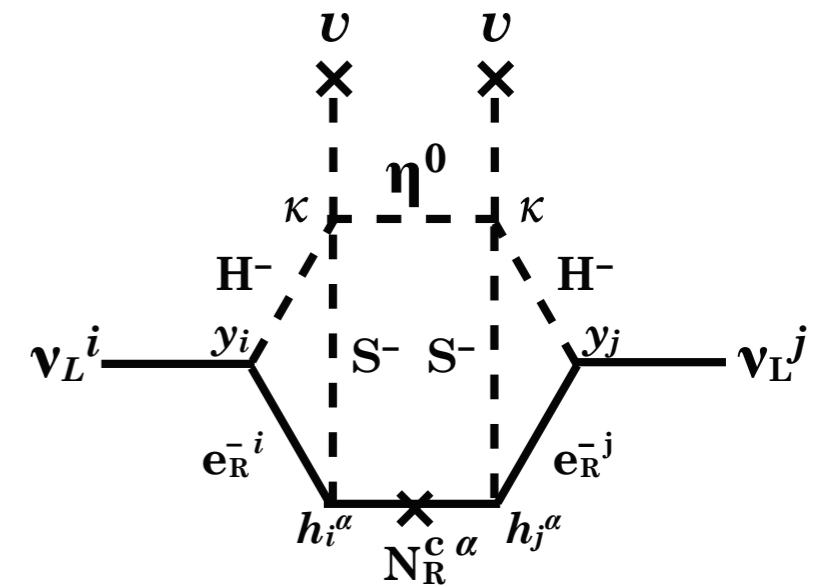
Zee-Babu model



Ma model



AKS model



輻射シーソー模型

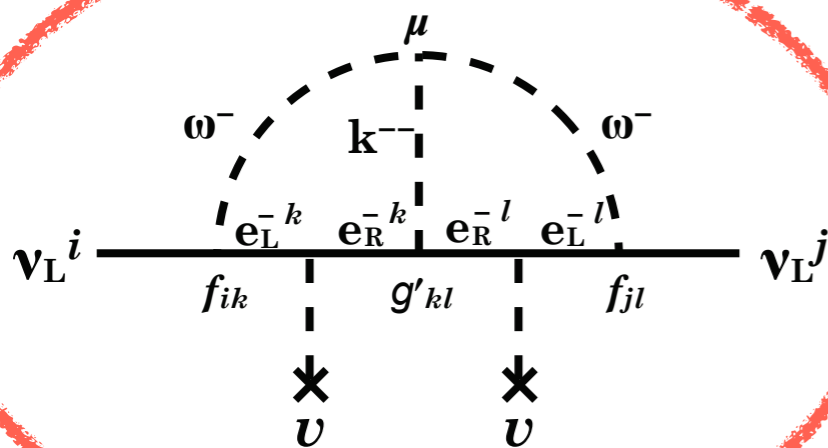
Loopファクター + 新粒子の質量による抑制

Extra scalars are introduced

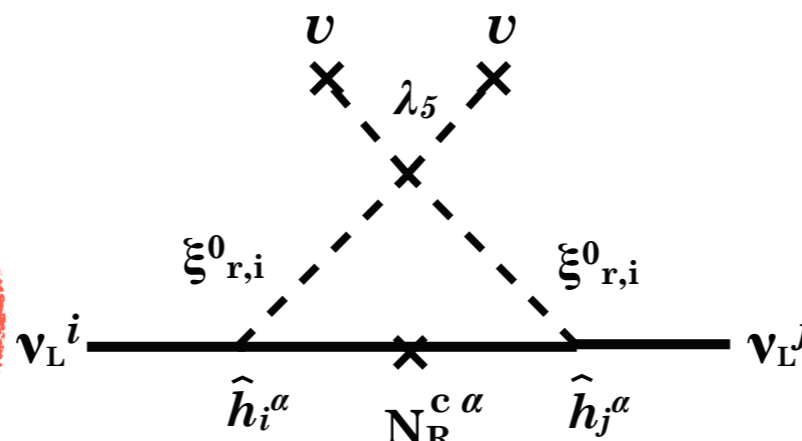
これらはレプトンセクターと結合する

具体的な模型の例:

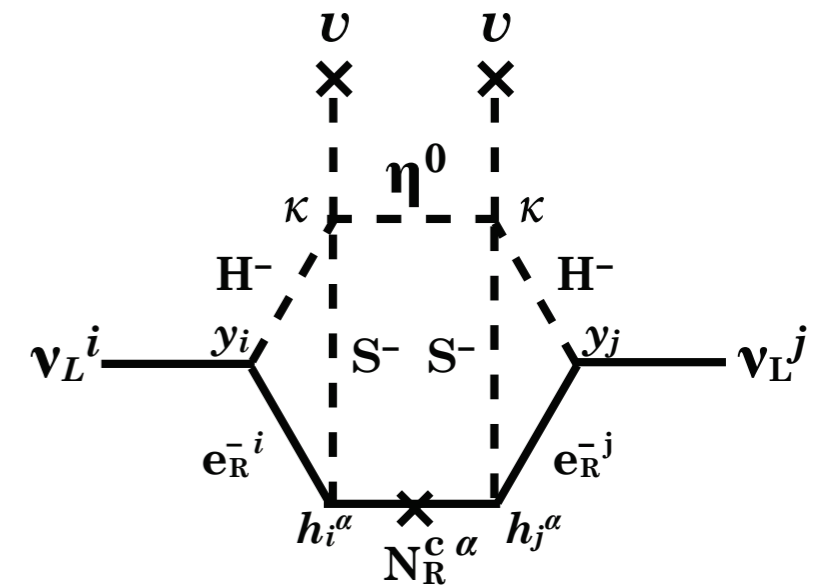
Zee-Babu model



Ma model



AKS model



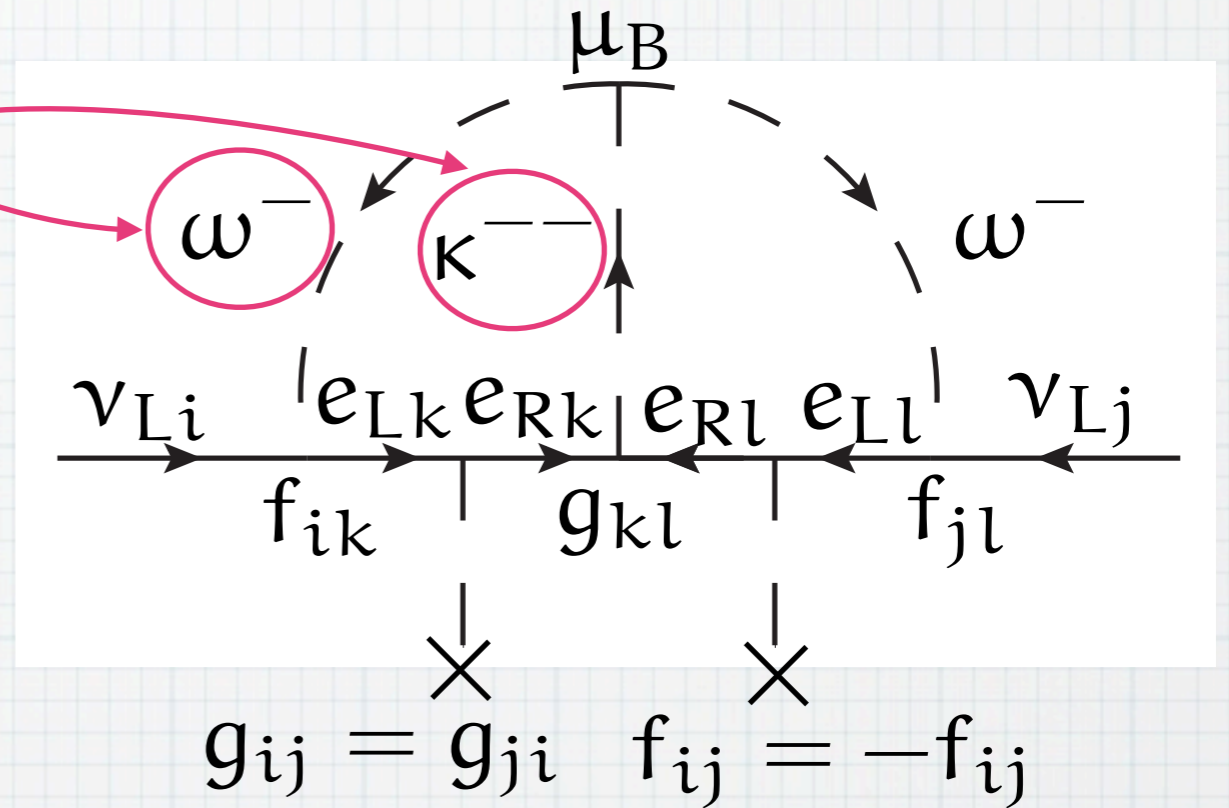
Zee-Babu Model

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

うまく機能するシンプルな模型

2つの新しいスカラー

	SU(2)	U(1)	U(1) _L
ω^-	1	-1	2
κ^{--}	1	-2	2



$$(m_\nu)_{ij} = \frac{8\mu_B}{(16\pi^2)^2} f_{ik} m_{ek} g_{kl} m_{el} f_{jl} I(m_\omega^2, m_\kappa^2) \text{ Loop function}$$

$\det(m_\nu) = 0 \Rightarrow$ 予言:最も軽い質量は0

データを説明する質量を生成可能

$$m_\omega = \mathcal{O}(100)\text{GeV} \quad \mu_B = \mathcal{O}(100)\text{GeV}$$

$$m_\kappa = \mathcal{O}(100)\text{GeV} \quad f_{ij} = \mathcal{O}(0.1) \quad g_{ij} = \mathcal{O}(0.1)$$

Super Zee-Babu Model

Zee-Babu模型でニュートリノ質量生成は説明可だが...

- * **DM**の候補がない
- * **2次発散問題**
- * **Baryogenesis**

SUSYはこれらのいくつかを解決

* **R-parity**を考えれば**LSP**が**DM**の候補

* **SUSY**では**2次発散**が打ち消しあう

* **SUSY**模型にはたくさんの**CP**位相がある

加速器現象論としても**SUSY Zee-Babu**模型は面白い

e.g.: doubly charged scalar, doubly charged fermion ...

Super Zee-Babu Model

Aoki, Kanemura, T.S., and Yagyu, JHEP1007,084

Extra Fields:	spin 0	spin 1/2	SU(2)	U(1)
Ω_a^+	ω_a^+	$\tilde{\omega}_a^+$	1	1
Ω_b^-	ω_b^-	$\tilde{\omega}_b^-$	1	-1
K_a^{--}	κ_a^{--}	$\tilde{\kappa}_a^{--}$	1	-2
K_b^{++}	κ_b^{++}	$\tilde{\kappa}_b^{++}$	1	2

アノマリーを消す & fermion mass を得るためペアで導入

Most general Lagrangian

Super potential: $W = W_{\text{MSSM}} + f_{ij} L_i \cdot L_j \Omega_a^+ + g_{ij} E_i^c E_j^c K_a^{--}$
 $+ \lambda_a K_a^{--} \Omega_a^+ \Omega_a^+ + \lambda_b K_b^{++} \Omega_b^- \Omega_b^-$
 $+ m_{\tilde{\omega}} \Omega_a^+ \Omega_b^- + m_{\tilde{\kappa}} K_a^{--} K_b^{++}$

Soft Breaking terms:

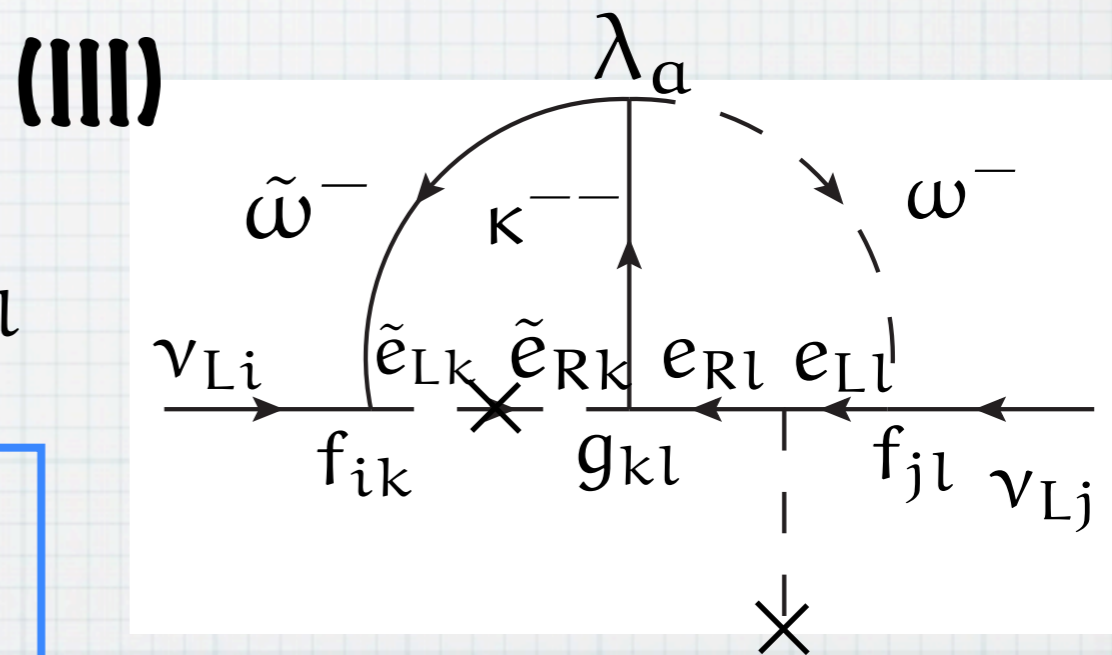
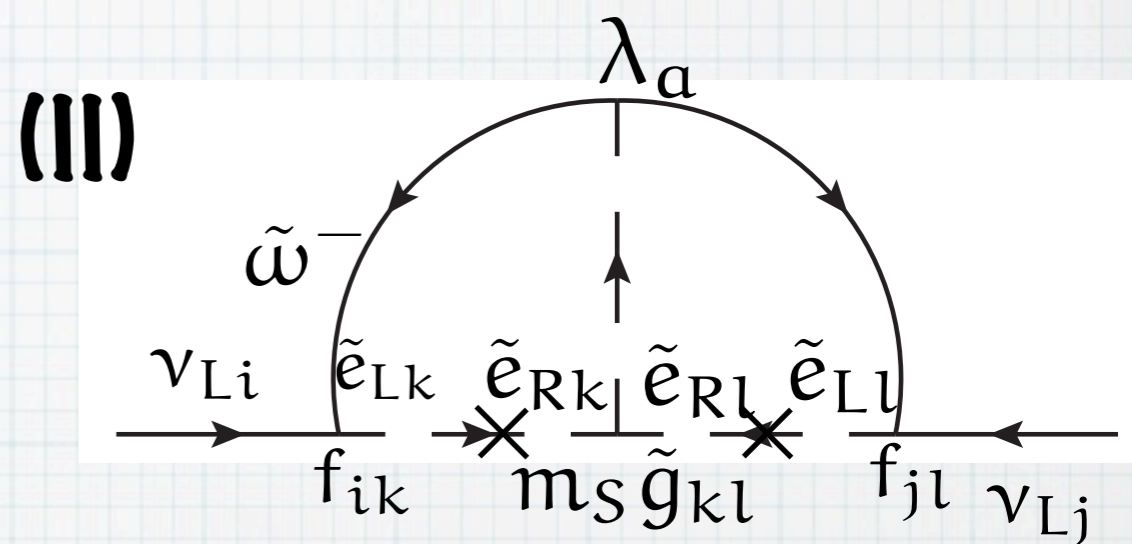
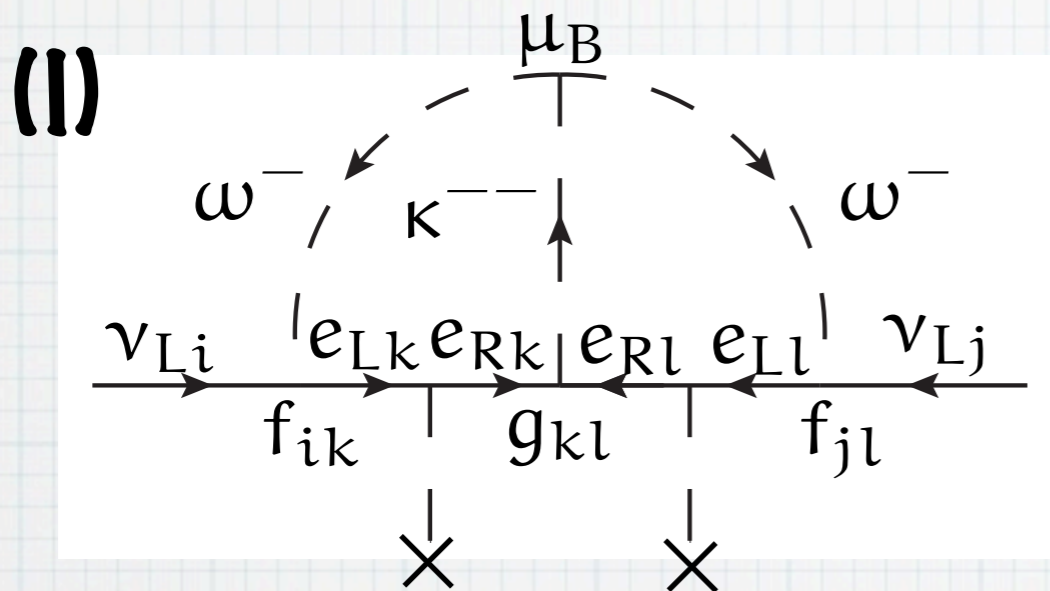
$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{soft}} - M_+^2 \omega_a^- \omega_a^+ - M_-^2 \omega_b^- \omega_b^+ - M_{--}^2 \kappa_a^{++} \kappa_a^{--} - M_{++}^2 \kappa_a^{++} \kappa_b^{--}$$

$$- (A_\omega)^{ij} \omega_a^+ \tilde{l}_{Li} \cdot \tilde{l}_{Lj} - (A_\kappa)^{ij} \kappa_a^{--} \tilde{e}_{Ri}^* \tilde{e}_{Rj}^* - A_a \kappa_a^{--} \omega_a^+ \omega_a^+ - A_b \kappa_b^{++} \omega_b^- \omega_b^-$$

$$- B_\omega m_{\tilde{\omega}} \omega_a^+ \omega_b^- - B_\kappa m_{\tilde{\kappa}} \kappa_a^{--} \kappa_b^{++}$$

ニュートリノ質量

ニュートリノ質量行列は次で生成



$$(m_\nu)_{ij} = \frac{1}{(16\pi^2)^2} f_{ik} m_{ek} H_{kl} m_{el} f_{jl}$$

カップリングやloop function
で決まる対称行列

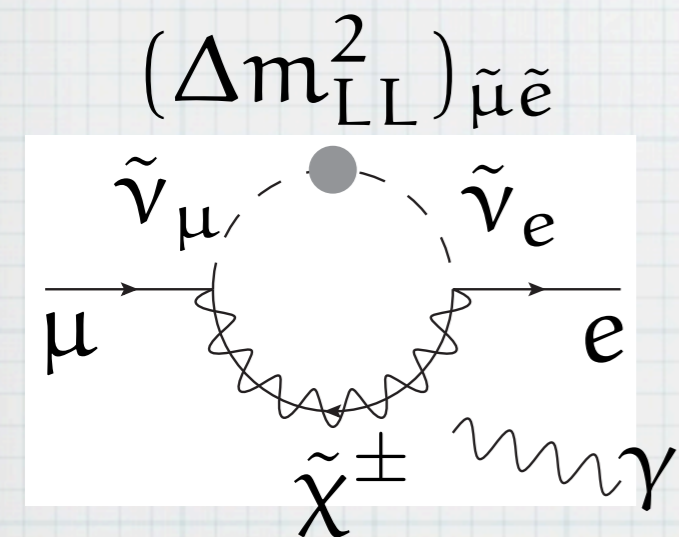
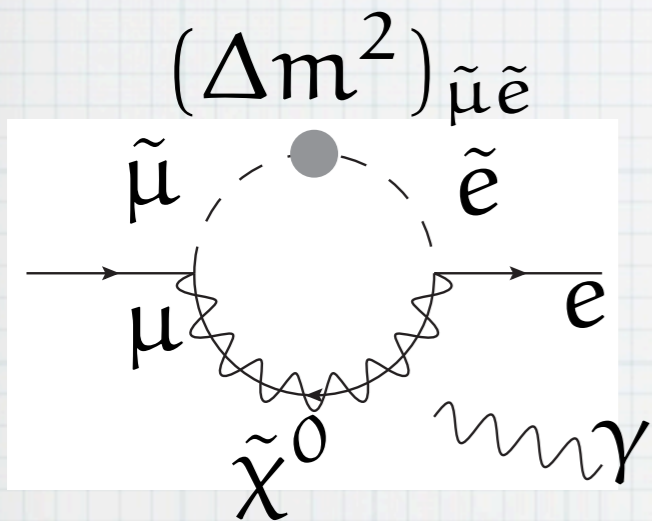
$m_\omega, m_\kappa, m_{\tilde{\omega}}, m_{\tilde{\kappa}} \lesssim m_S \Rightarrow$ (I)の寄与が支配的

Lepton Flavour Violation

LFV in MSSM

$l_i \rightarrow l_j + \gamma$ および $l_i^+ \rightarrow l_j^- l_k^+ l_l^+$ を考える

MSSMでは**LFV**のソースは**slepton**のフレーバー混合



例: **SUSY type I seesaw** 模型

ニュートリノ湯川が**RGE**を通じてス

レプトンの**LL**混合に寄与する

$$(\Delta m_{LL}^2)_{ij} \simeq -\frac{1}{8\pi^2} (y_N^\dagger y_N)_{ij} (3 + |A_0|^2) m_0^2 \ln \frac{M_P}{M_N}$$

但し, 湯川とニュートリノ

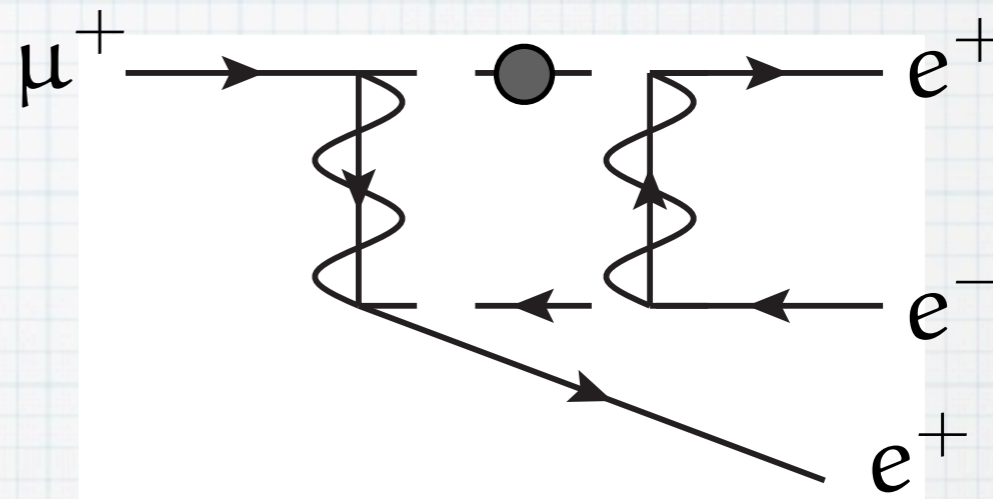
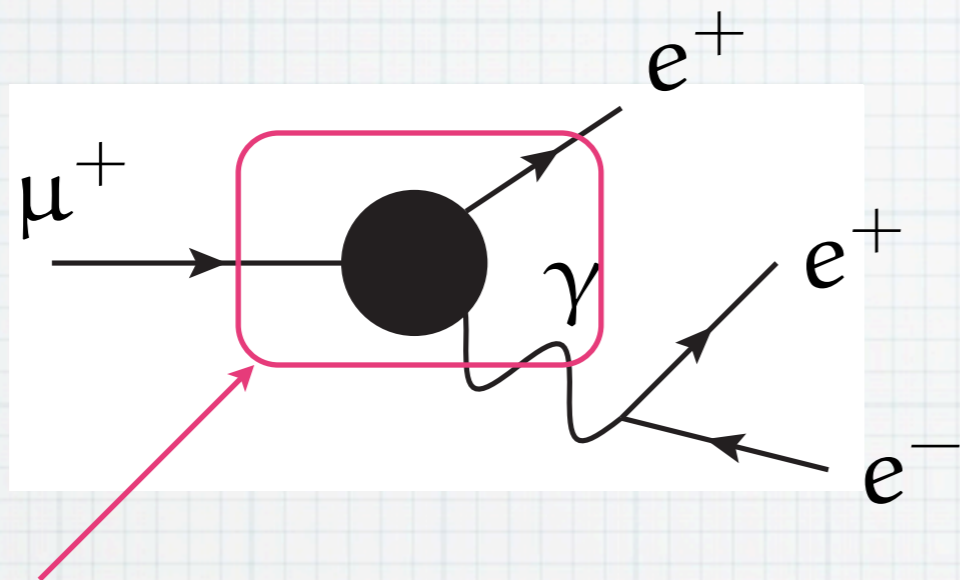
質量行列との相関は弱い

$$(y_N)_{ij} \propto \sqrt{M_i} \mathbf{R}_{ik} \sqrt{m_k} (U_{PMNS}^\dagger)_{kj}$$

余分なパラメータ (**Casas and Ibarra, NBP618,171**)

LFV in MSSM

$l_i^+ \rightarrow l_j^- l_k^+ l_l^+$ は抑制される傾向



$\mu \rightarrow e\gamma$ と同じ **op.**

$$\frac{B(l_i^+ \rightarrow l_j^- l_j^+ l_j^+)}{B(l_i \rightarrow l_j \gamma)} \simeq \frac{\alpha}{8\pi} \left(\frac{16}{3} \ln \frac{m_{l_i}}{2m_{l_j}} - \frac{14}{9} \right) \quad \text{Hisano et al., PRD53,2442}$$

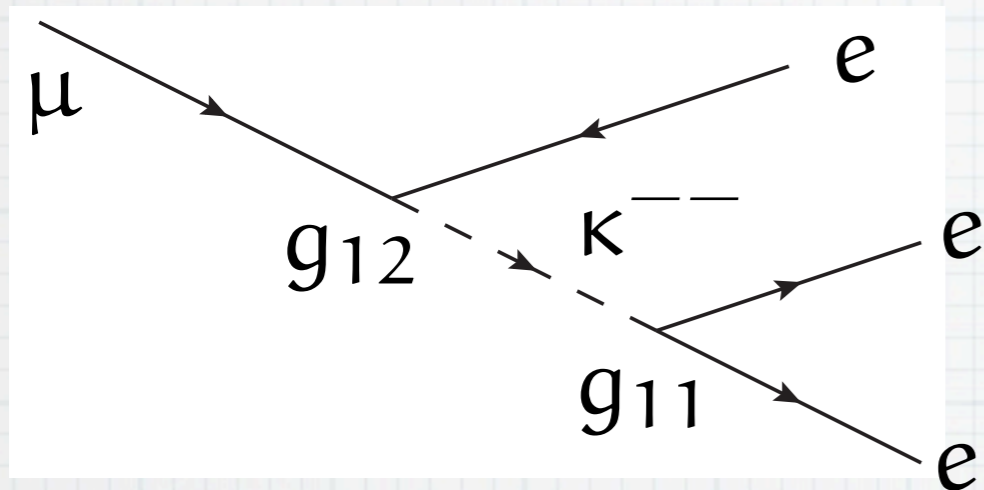
$$B(\mu \rightarrow eee) \lesssim 10^{-13} \quad B(\tau \rightarrow \mu\mu\mu) \lesssim 10^{-10} \dots$$

が期待される 逆転する場合も考えることは可能

現在の制限: $B(\mu \rightarrow eee) < 1.0 \times 10^{-12}$ $B(\tau \rightarrow \mu\mu\mu) < 3.2 \times 10^{-8}$

LFV in SUSY Zee-Babu model

Zee-Babu模型ではtreeのLFV過程が存在



$$B(\mu \rightarrow eee) \propto |g_{11}g_{12}|^2 m_W^4 / m_\kappa^4$$



m_κ が非常に重い

もしくは

$g_{11}g_{12}$ が十分に小さい必要

同様に

$$B(\tau^+ \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^+) \propto |g_{32}g_{22}|^2 / m_\kappa^4$$

$$B(\tau^+ \rightarrow \mu^- e^+ e^+) \propto |g_{32}g_{11}|^2 / m_\kappa^4$$

$$B(\tau^+ \rightarrow e^- \mu^+ \mu^+) \propto |g_{31}g_{22}|^2 / m_\kappa^4$$

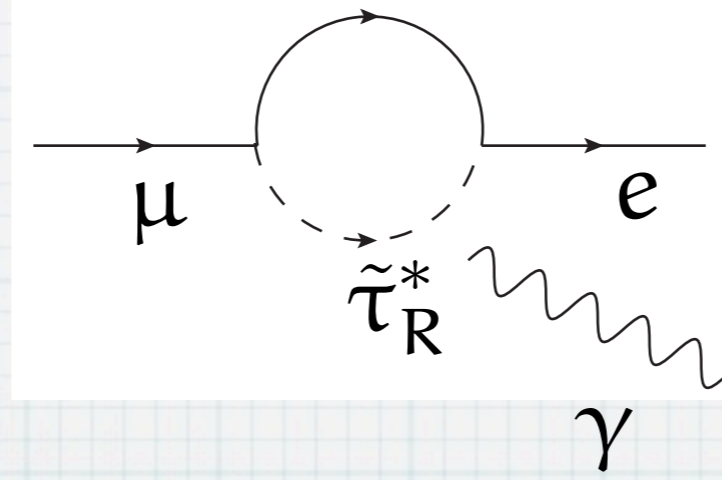
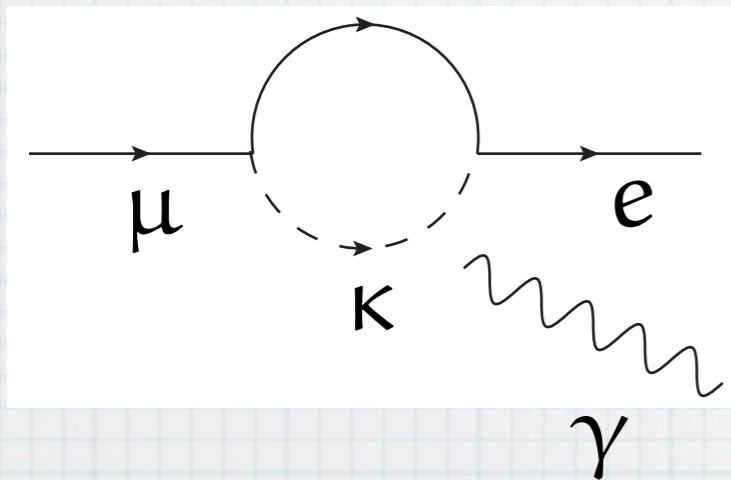
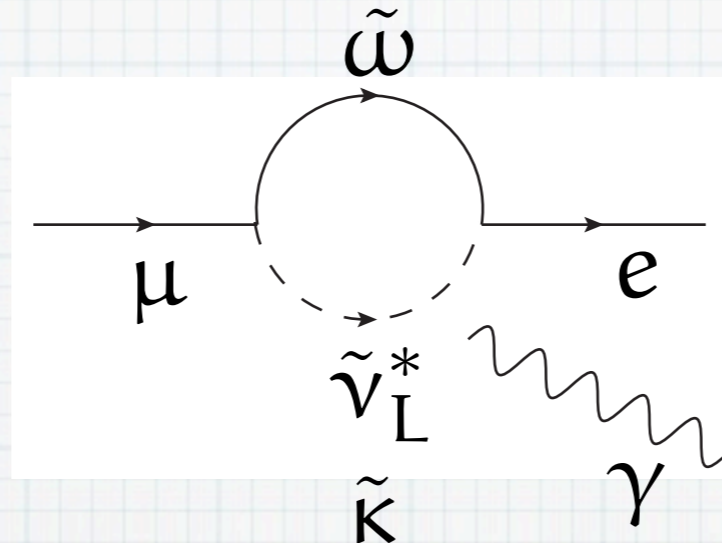
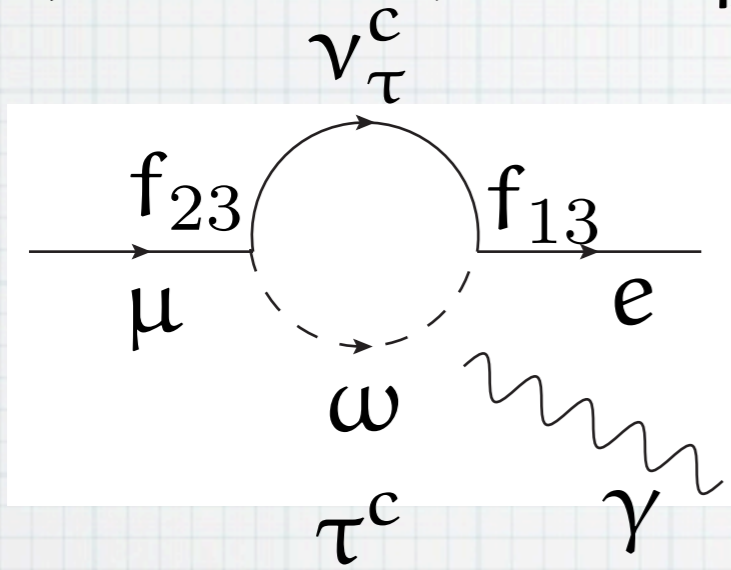
$$B(\tau^+ \rightarrow e^- e^+ e^+) \propto |g_{31}g_{11}|^2 / m_\kappa^4$$

等が自然に大きくなり得る

さらに g_{ij} の構造とニュートリノ質量行列に相関

LFV in SUSY Zee-Babu model

$\mu \rightarrow e + \gamma$ への模型特有の寄与も大きい



MSSM的な寄与に加えて、これらの寄与が存在する

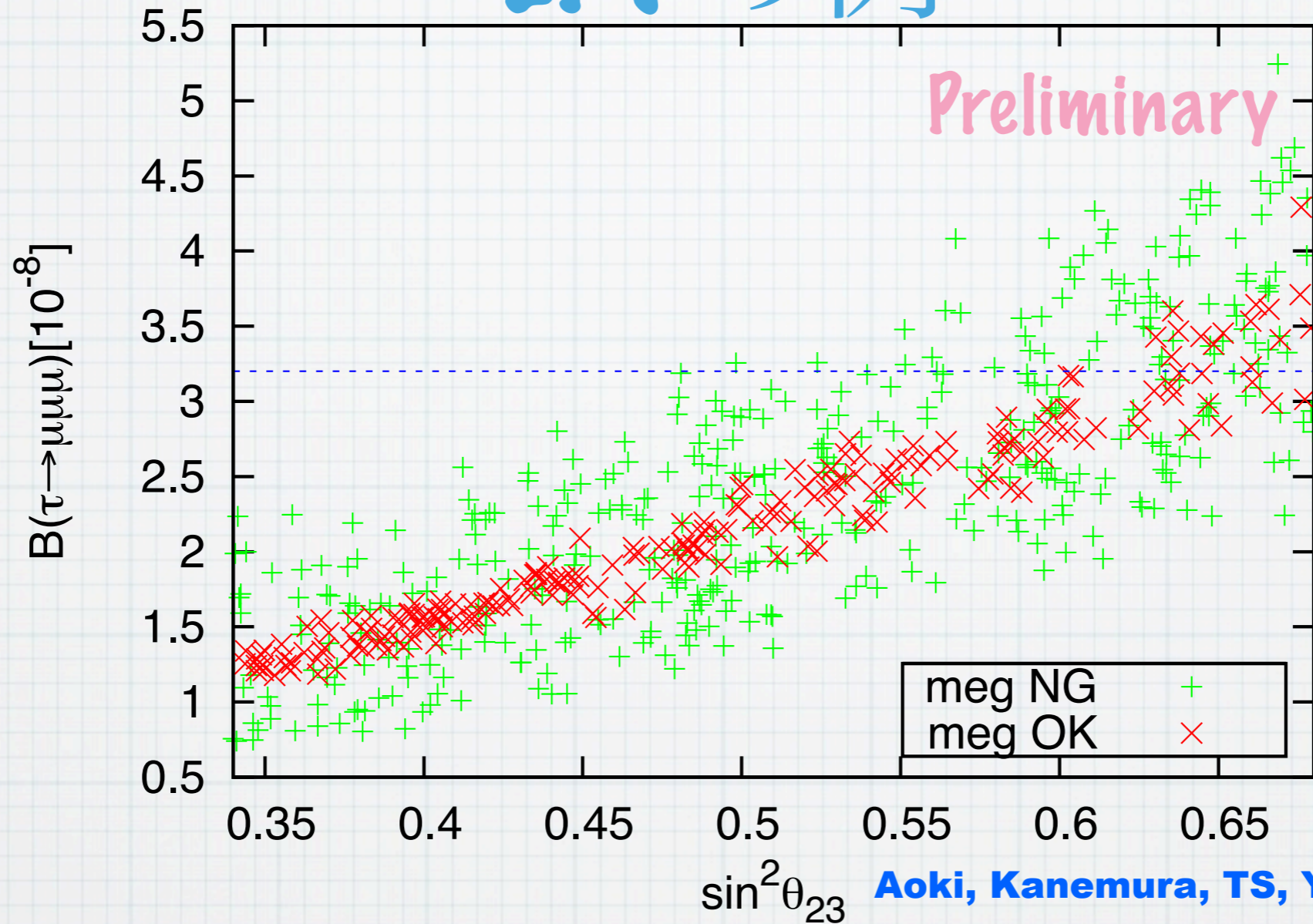
$$B(\mu \rightarrow e\gamma) \propto |f_{13}f_{23}|^2$$

ニュートリノ混合を正しく導くために **non-zero** f_{ij} が必要

たとえば **MSSM** 的寄与がなくても **LFV** が出る

$\mu \rightarrow e + \gamma$ が自然に大きくなる ← **MEG** で見つかるかも

LFVの例



$$\begin{aligned}
 m_\omega &= 800\text{GeV} & m_{\tilde{\omega}} &= 800\text{GeV} & \mu_B &= 800\text{GeV} \\
 m_\kappa &= 600\text{GeV} & m_{\tilde{\kappa}} &= 300\text{GeV} & g_{22} &= 0.3 \\
 m_{\tilde{\nu}_{Li}} &\simeq m_{\tilde{e}_{Li}} \simeq 1000\text{GeV} & & & m_{\tilde{e}_{Ri}} &\simeq 110\text{GeV}
 \end{aligned}$$

混合角と質量2乗差は**3σ**の範囲を考慮
Normal Hierarchy neutrinoの場合

その他のプロセス

$$\begin{aligned} m_\omega &= 800\text{GeV} & m_{\tilde{\omega}} &= 800\text{GeV} & \mu_B &= 800\text{GeV} \\ m_\kappa &= 600\text{GeV} & m_{\tilde{\kappa}} &= 300\text{GeV} & g_{22} &= 0.3 \\ m_{\tilde{\nu}_{Li}} &\simeq m_{\tilde{e}_{Li}} \simeq 1000\text{GeV} & & & m_{\tilde{e}_{Ri}} &\simeq 110\text{GeV} \end{aligned}$$

$$B(\tau^+ \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^+) \sim 10^{-8}$$

$$B(\tau \rightarrow e\gamma) \sim 10^{-14} - 10^{-9}$$

$$B(\tau \rightarrow \mu\gamma) \sim 10^{-12} - 10^{-10}$$

$$B(\tau^+ \rightarrow e^- e^+ e^+) \sim 10^{-14} - 10^{-8}$$

$$B(\tau^+ \rightarrow e^- \mu^+ \mu^+) \sim 10^{-11} - 10^{-8}$$

$$B(\tau^+ \rightarrow e^- e^+ \mu^+) \sim 10^{-16} - 10^{-9}$$

$$B(\tau^+ \rightarrow \mu^- e^+ \mu^+) \sim 10^{-19} - 10^{-10}$$

Preliminary

全部の **slepton mass** が同じくらいだと思うと

このモデルでは $B(\mu \rightarrow e\gamma) \sim B(\tau \rightarrow \mu\gamma)$

となる傾向がある。

$f_{ij} (f_{ij} = -f_{ji})$ が全部同じオーダー

Collider Phenomenology

リファレンスポイント

SUSY Zee-Babuの特徴はdoubly charged singletの存在

doubly charged粒子達が軽い状況を考える

$$m_{\kappa} = 300\text{GeV}, \quad m_{\tilde{\kappa}} = 200\text{GeV}$$

$$m_{\omega} = m_{\tilde{\omega}} = 600\text{GeV}$$

$$g_{\mu\mu} = -0.13, \quad g_{\mu\tau} = 6.1 \times 10^{-3}, \quad g_{\tau\tau} = -4.6 \times 10^{-4}$$

$$g_{ee}, g_{e\mu}, g_{e\tau} \sim 10^{-7}$$

$$2f_{e\mu} = 2f_{e\tau} = f_{\mu\tau} = 7.4 \times 10^{-2},$$

$$m_{\tilde{\chi}^0} = 100\text{GeV}$$

$$m_{\tilde{\mu}} = 100\text{GeV}$$

他のSUSY粒子は全部重い

DM

1TeV

100GeV

その他のSUSY粒子達

ω $\tilde{\omega}$

κ

$\tilde{\kappa}$

\tilde{B} $\tilde{\mu}$

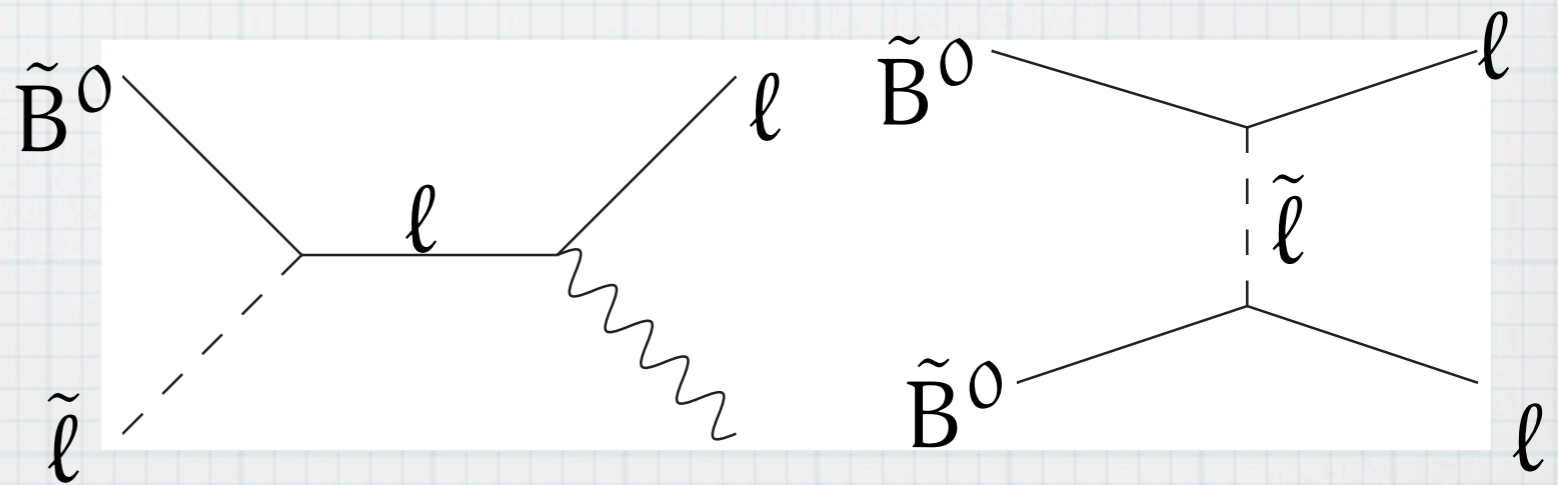
DMに関するコメント

DM残存量



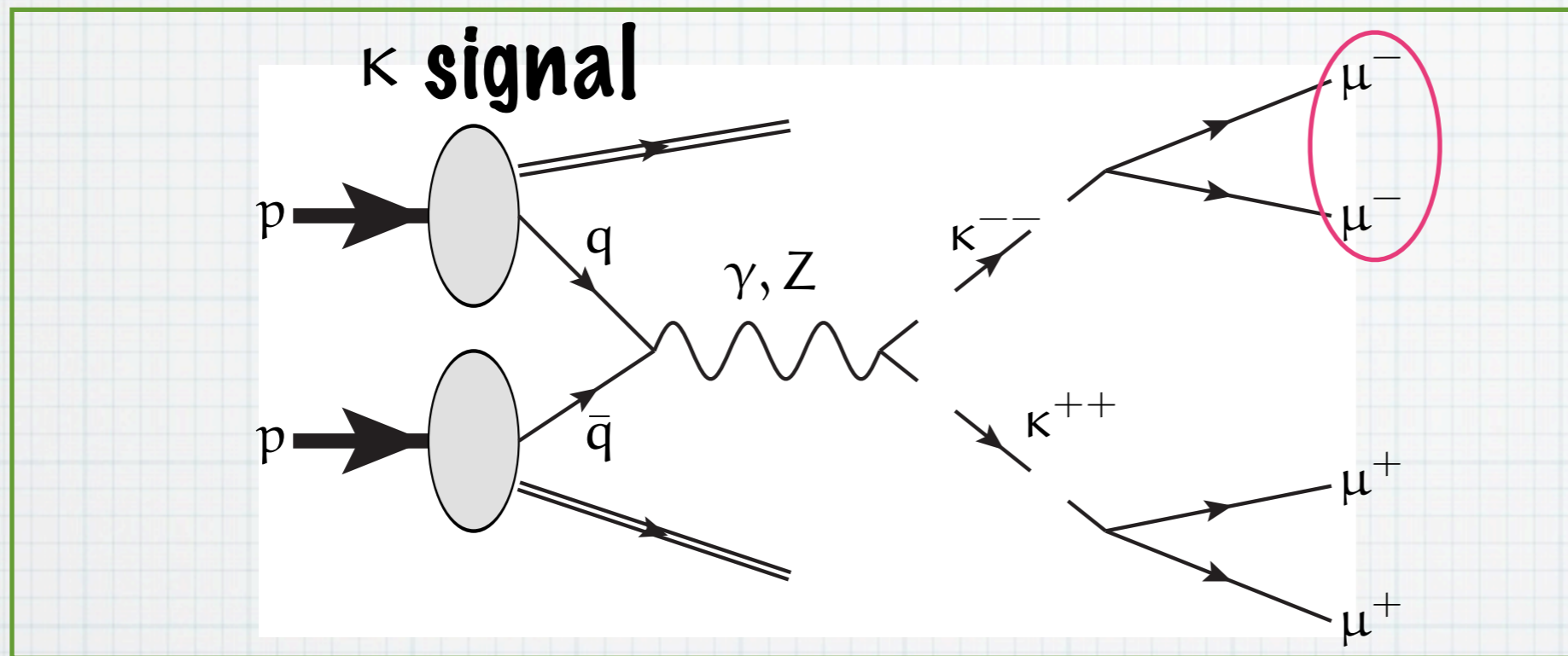
MSSM部分のスペクトルが
ある程度決まる

- * 我々のモデルでは、**R-parity**を課して、**Bino like** ニュートラリーノがダークマターと仮定.
- * このシナリオでは**Bino**と**slepton**が縮退すれば残存量を説明できる.

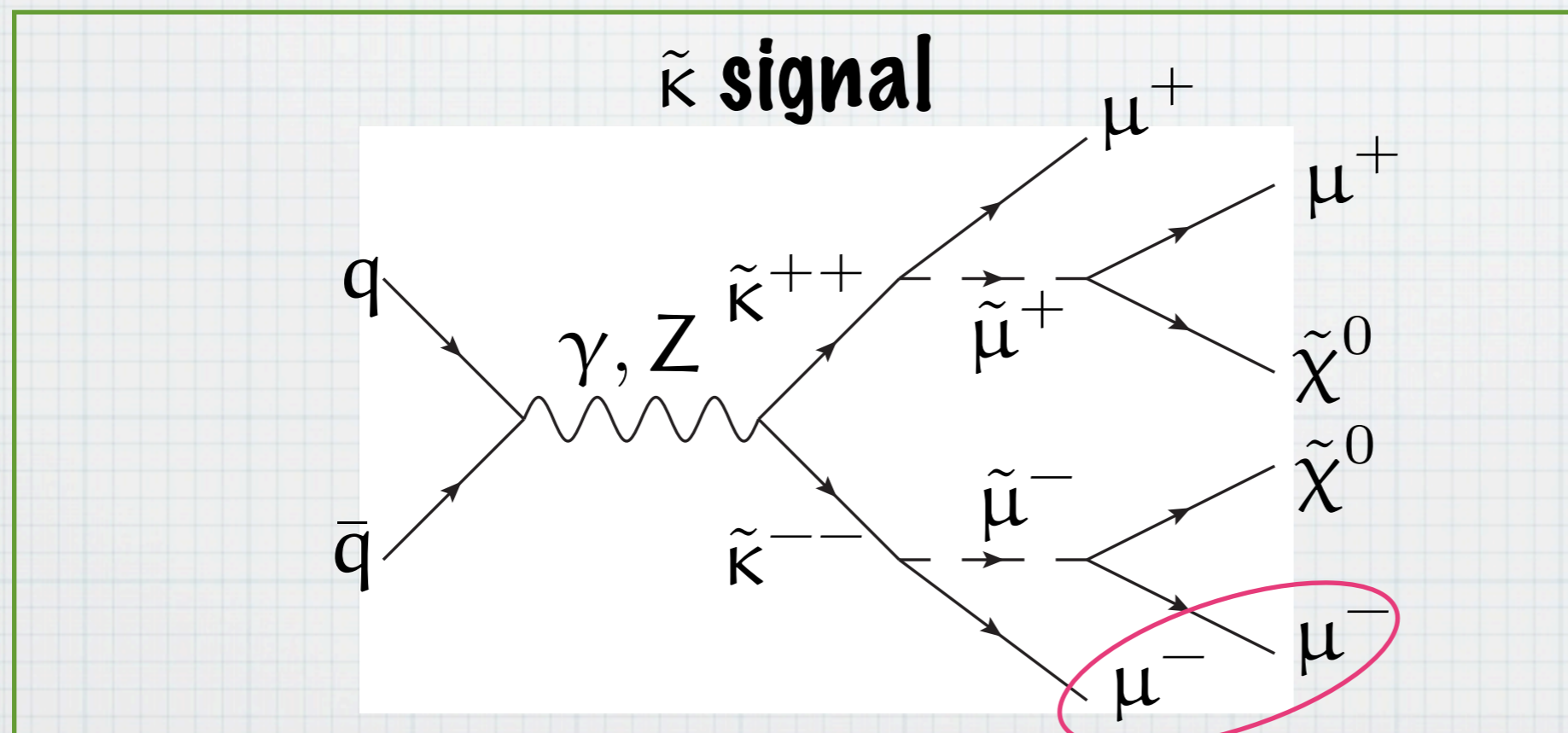


$$m_{\tilde{B}} \simeq 100\text{GeV} \quad + \quad m_{\tilde{\ell}} \simeq 110\text{GeV} \Rightarrow \Omega_{\tilde{B}} h^2 \simeq 0.11$$

LHC Phenomenology



**same-sign muon
に注目**

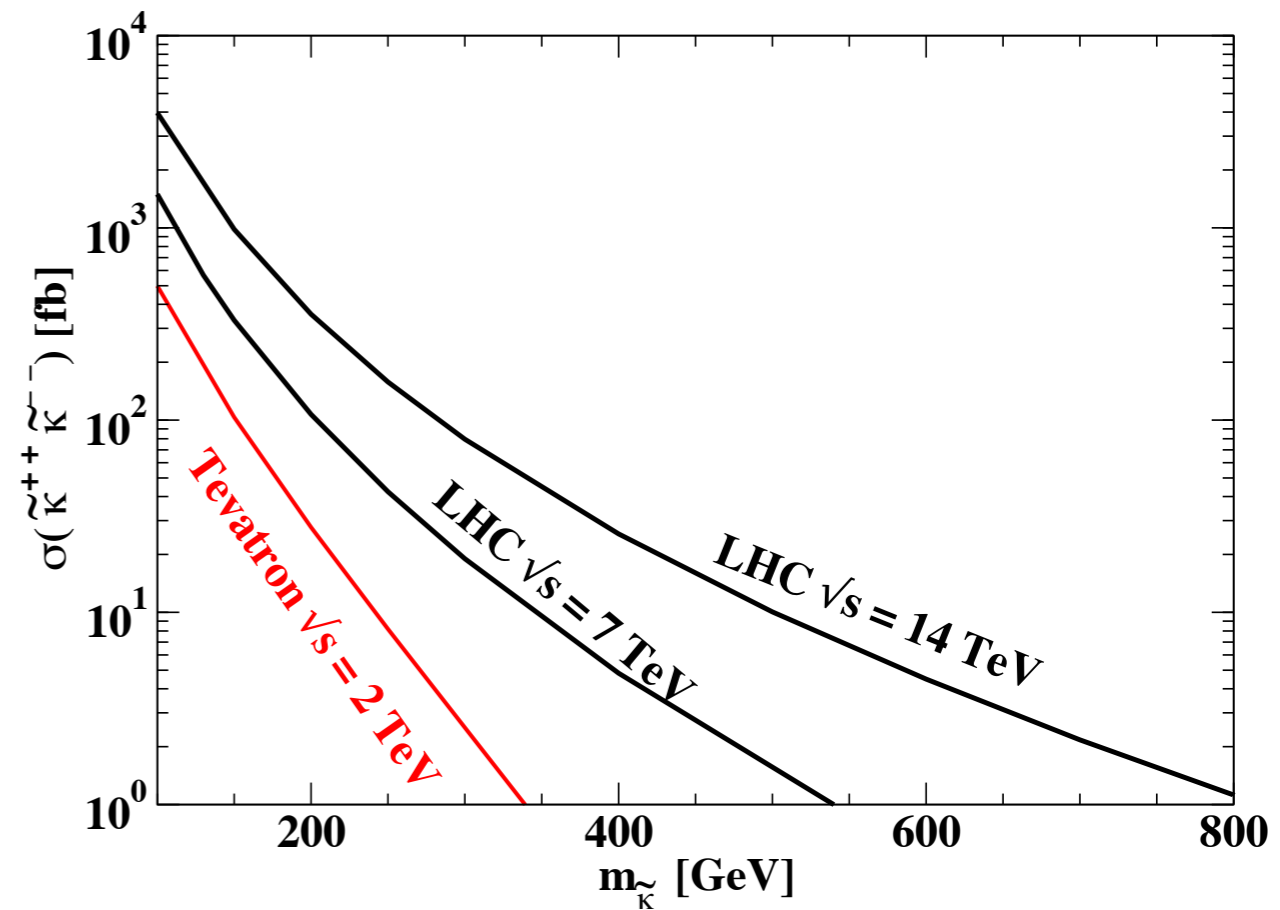
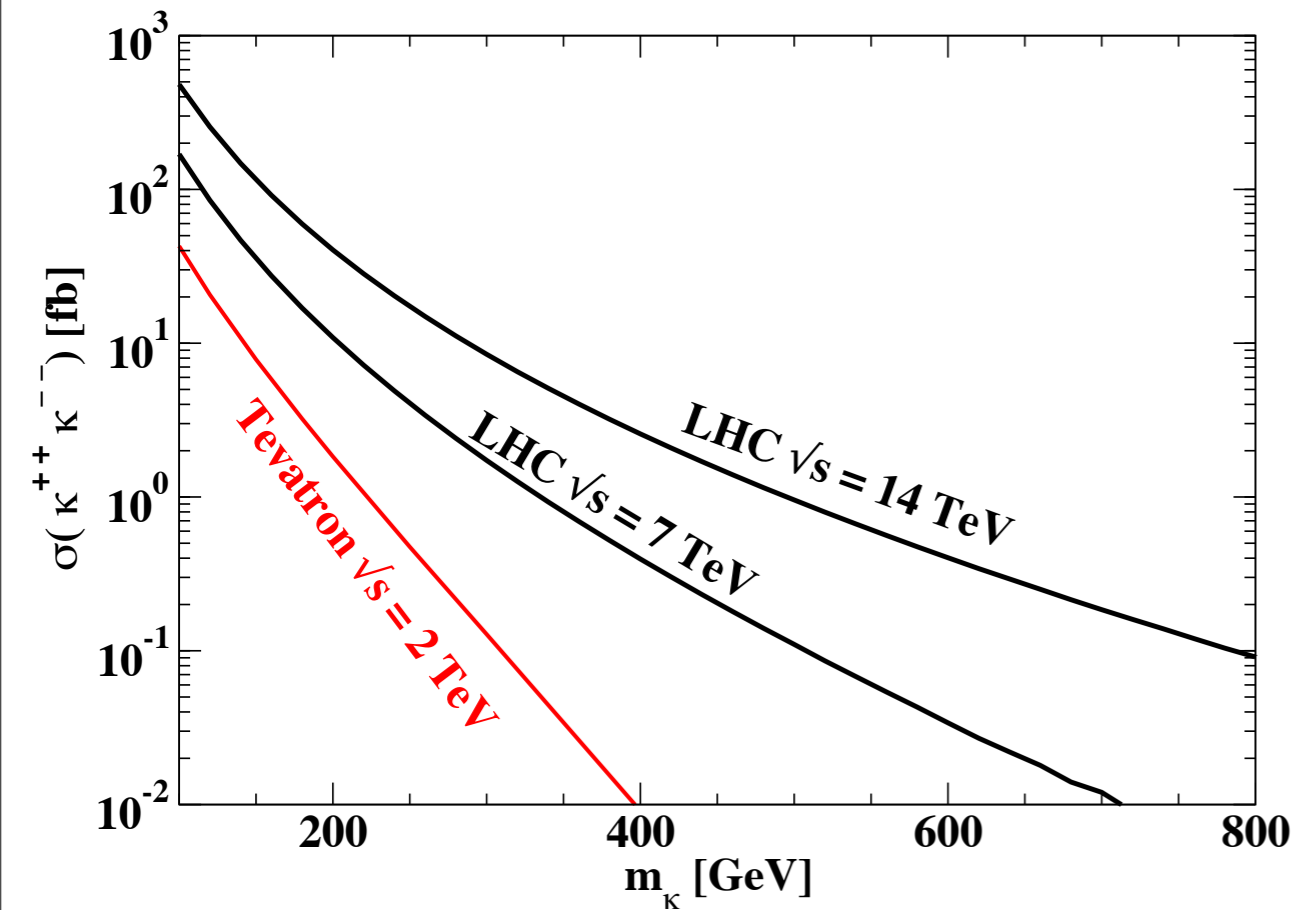


LHC Phenomenology

Production cross section of $\tilde{\kappa}$

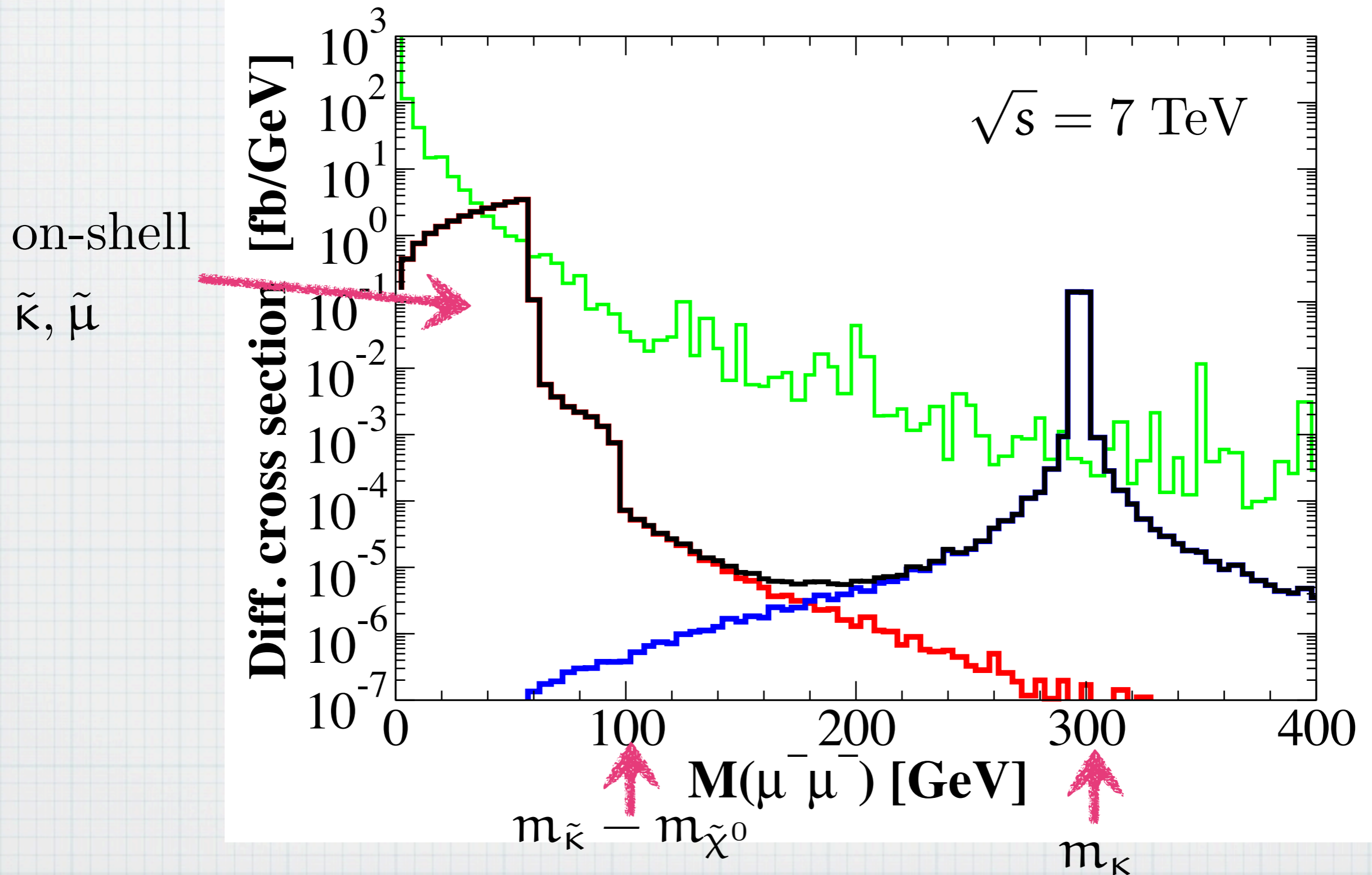
Production cross section of κ

M. Aoki, S. Kanemura, T.S. and K. Yagyu, JHEP 1007:084,2010



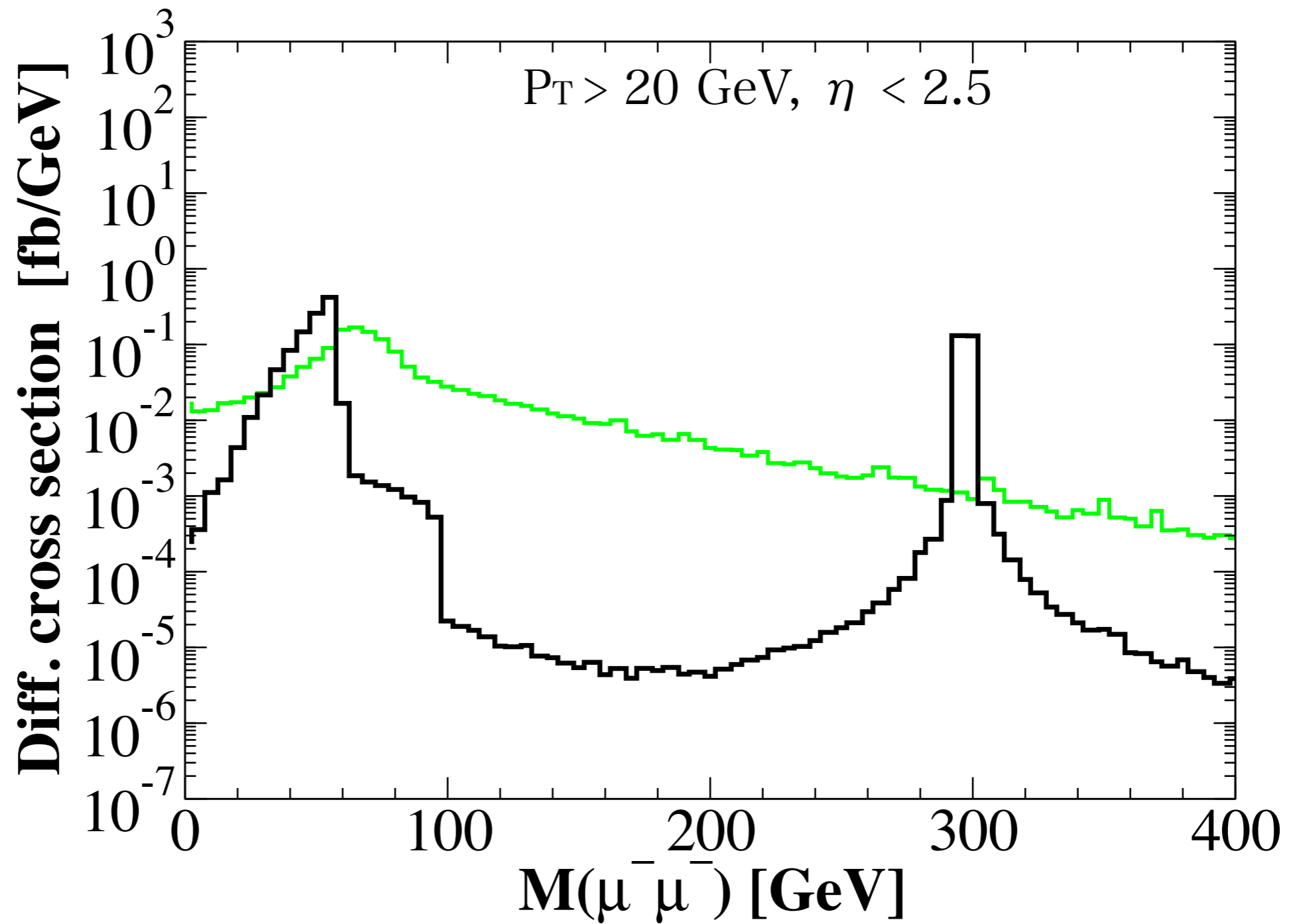
LHC Phenomenology

M. Aoki, S. Kanemura, T.S. and K. Yagyu, in preparation



LHC Phenomenology

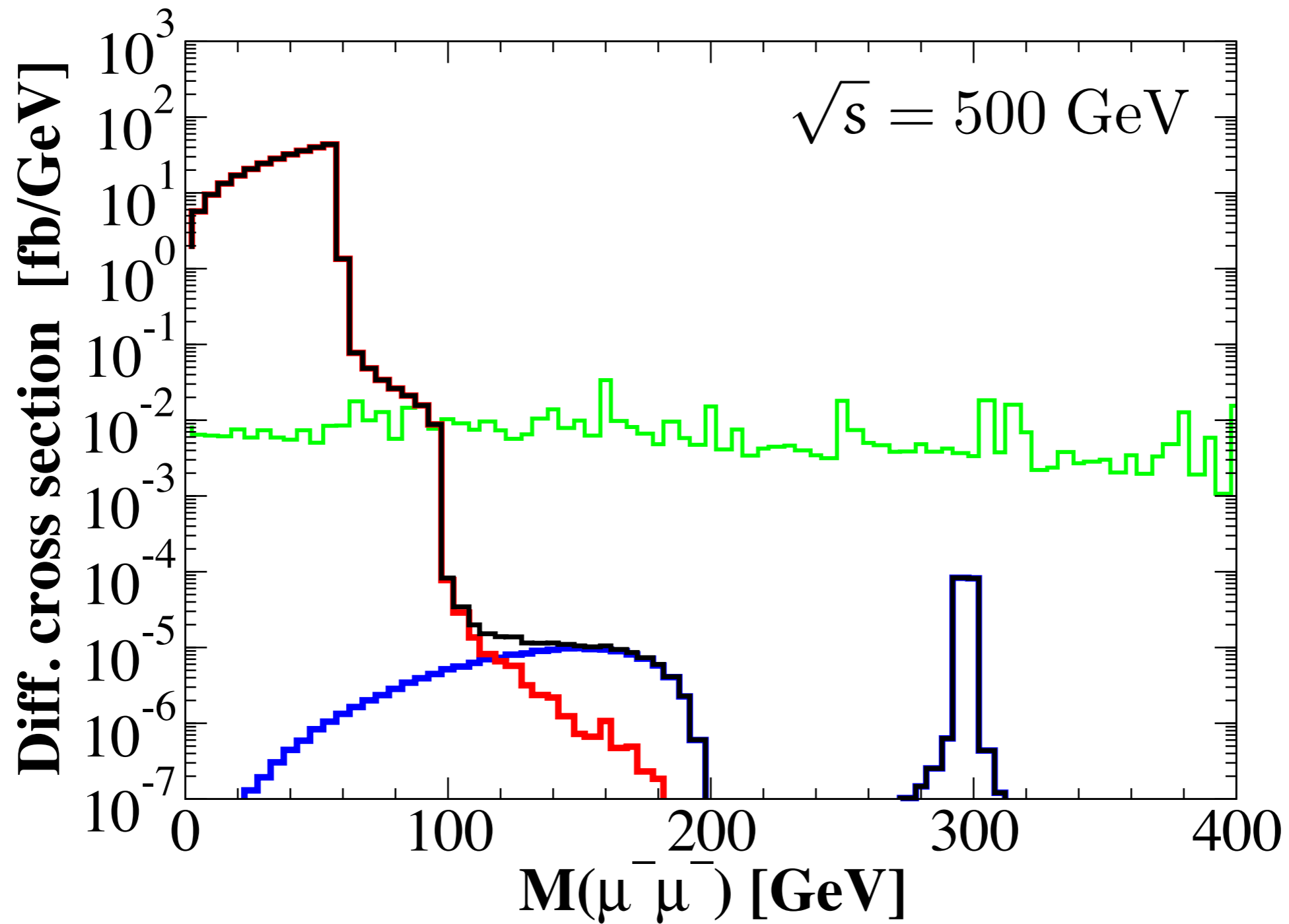
M. Aoki, S. Kanemura, T.S. and K. Yagyu, in preparation



ILC

$$e^+ e^- \rightarrow \underbrace{\mu^+ \mu^+}_{\tilde{K}^{++}} \underbrace{\mu^- \mu^-}_{\tilde{K}^{--}} + \cancel{E}$$

M. Aoki, S. Kanemura, T.S. and K. Yagyu, in preparation



Summary

- * ニュートリノ質量のモデルとして**2-loop**で質量を生成するモデル(**Zee-Babu**モデル)を考え、それを**SUSY**化した
- * **SUSY Zee-Babu**モデルでの**LFV**は**SUSY seesaw**モデルとは異なる特徴をもつ。
 $l \rightarrow lll$
- * 例: $l \rightarrow lll$ が大きくなる傾向
- * **doubly charged particle**が含まれるため、コライダーでの現象論も面白い
- * 全てが**TeV**スケールで決まるので、**testable**である