

A way to crosscheck μ -e conversion in
the case of no signals of $\mu \rightarrow e\gamma$ and $\mu \rightarrow 3e$

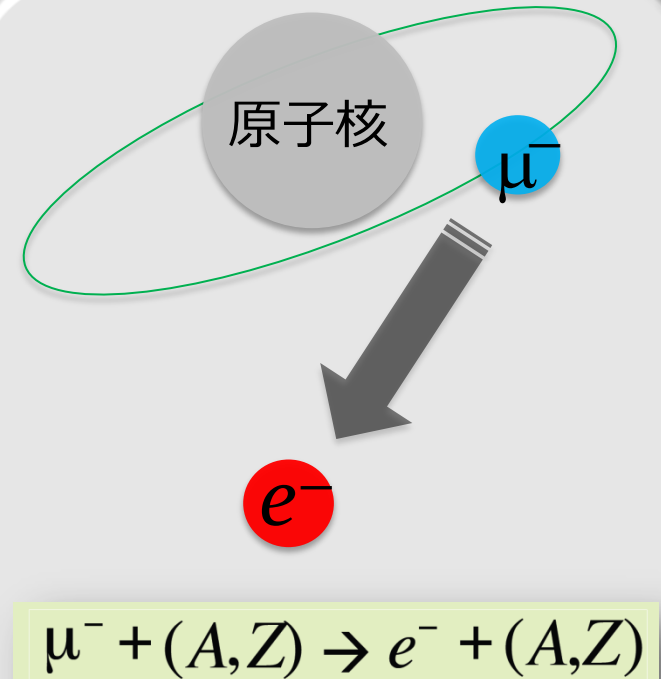
山中 真人 (名古屋大学)

共同研究者 佐藤 丈
arXiv:1409.1697

μ -e conversion以外のミュオンLFV反応が見つからない
場合、何を頼りに、どうやってLFV相互作用を探るか

Waiting for μ -e conversion

- ☑ COMETとDeeMeがいよいよ始動！
- ☑ μ -e conv.の発見
= 標準模型を超える物理の動かぬ証拠
- ☑ もし、 $\mu \rightarrow e\gamma$ や $\mu \rightarrow 3e$ も見つかったら、
 - ▣ LFV相互作用の種類を特定
 - ▣ 反応に関わるパラメーターの決定



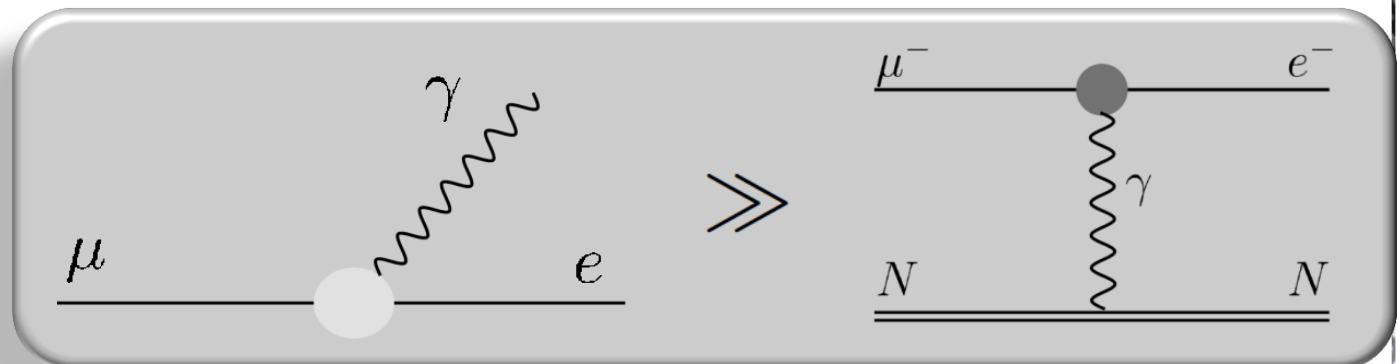
Waiting for μ -e conversion

- ☑ μ -e conv.の発見後、 $\mu \rightarrow e\gamma$ が未来永劫見つからなければ、
 - ☐ フォトンを経介とするLFV、及び、それをもたらす模型が排除

例えば、SUSYなど

- ☑ なぜ？？？

- ☐ フォトンとクォークの相互作用が余分に必要のため、
$$\text{BR}(\mu^- N \rightarrow e^- N) \simeq \alpha \times \text{BR}(\mu \rightarrow e\gamma)$$



Waiting for μ -e conversion

- ☑ μ -e conv.の発見後、 $\mu \rightarrow e\gamma$ が未来永劫見つからなければ、
 - ☐ フォトンを媒介とするLFV、及び、それをもたらす模型が排除

例えば、SUSYなど

- ☑ $\mu \rightarrow 3e$ も見つからなかったら、
 - ☐ μ -e conv.の発見をどうやって確立？
 - ☐ もしや、 μ -e conv.の発見は間違いなのか。
LFVなんて無いのか …？

Waiting for μ -e conversion

- ☑ μ -e conv.の発見後、 $\mu \rightarrow e\gamma$ が未来永劫見つからなければ、
 - ❏ フォトンを媒介とするLFV、及び、それをもたらす模型が排除

例えば、SUSYなど

- ☑ $\mu \rightarrow 3e$ も見つからなかったら、
 - ❏ μ -e conv.の発見をどうやって確立？
 - ❏ もしや、 μ -e conv.の発見は間違いなのか。
LFVなんて無いのか …？

混乱を重ね、LFVや新物理を見失う可能性有り
近未来の危機を避けるべく対策を

Aim of this work

- ☑ 注目するシナリオ

μ -e conv. を発見。

しかし、他のミュオンLFVが未来永劫見つからない。

- ☑ この研究の目的

- 📖 μ -e conv. 発見の確立手段を考案

- 📖 他のミュオンLFV反応無しで、 μ -e conv.に関わるパラメーターをどれだけ精度良く決められるか検討

μ -e conv. のみ発見はあり得るのか？
その場合、期待される特殊なシグナルは？

μ -e conv. のみ発見はあり得るのか？

☑ どんなLFV相互作用の形が期待される？

☑ ~~$\mu \rightarrow e\gamma$~~

■ 重い媒介粒子によるLFV相互作用

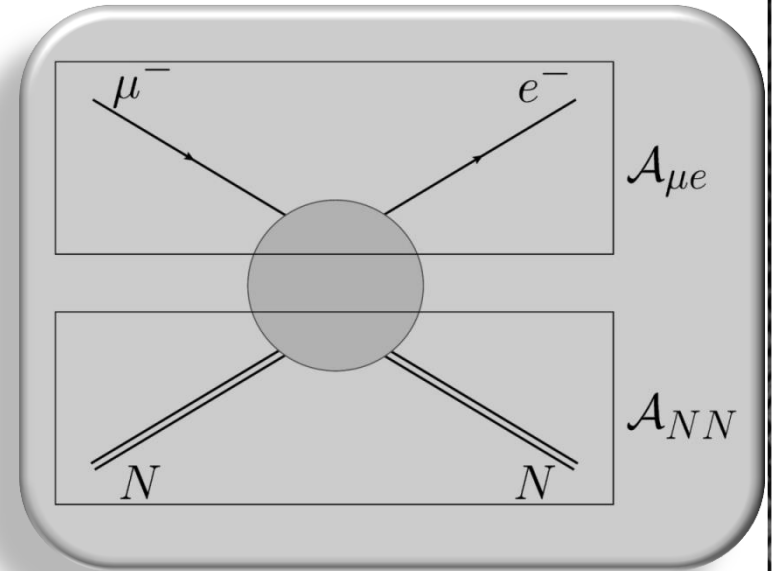
☑ ~~$\mu \rightarrow 3e$~~

■ 媒介粒子と e^-e^+ の相互作用は弱

☑ μ -e conversion

■ 媒介粒子はクォーク and/or グルーオンと相互作用

■ ミューオン数と電子数を1ずつ破る相互作用



どんなシグナルが現れ得るか？

☑ お馴染みのミュオンLFV以外に起こる反応は？

☑ $\mathcal{A}_{\mu e} \times \mathcal{A}_{\mu e}^*$

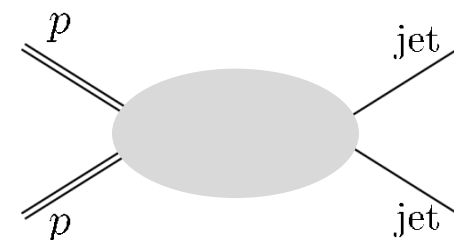
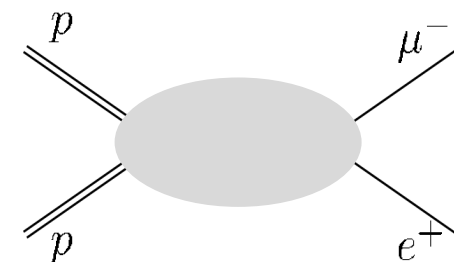
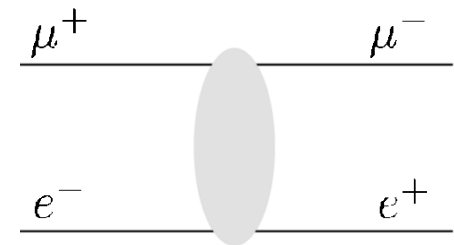
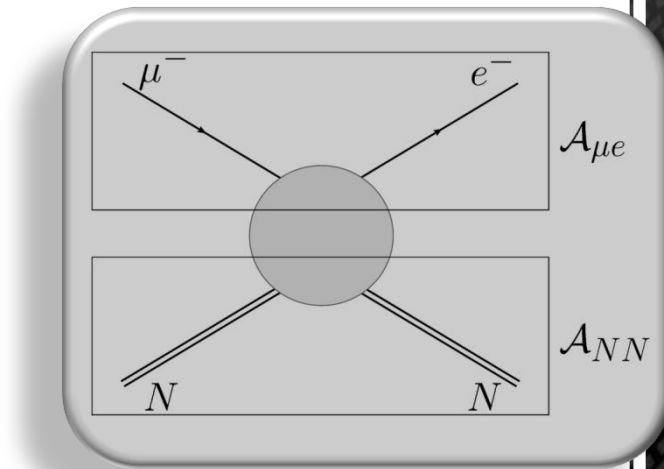
muonium conversion

☑ $\mathcal{A}_{\mu e} \times \mathcal{A}_{NN}$

$pp \rightarrow \mu^- e^+$

☑ $\mathcal{A}_{NN} \times \mathcal{A}_{NN}^*$

$pp \rightarrow \text{dijet}$



ベンチマーク: R-parity violating SUSY

❑ ~~$\mu \rightarrow e\gamma$~~

■ 重い媒介粒子によるLFV相互作用

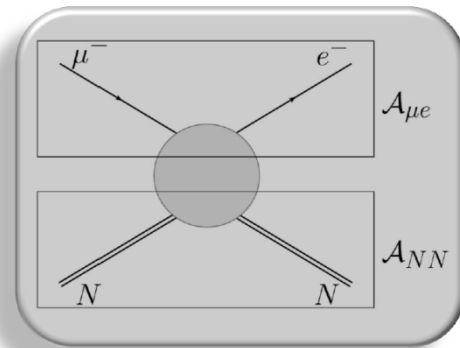
❑ ~~$\mu \rightarrow 3e$~~

■ 媒介粒子と e^-e^+ の相互作用は微弱

❑ μ -e conversion

■ 媒介粒子はクォーク and/or グルーオンと相互作用

■ ミューオン数と電子数を1ずつ破る相互作用



Benchmark: R-parity violating SUSY

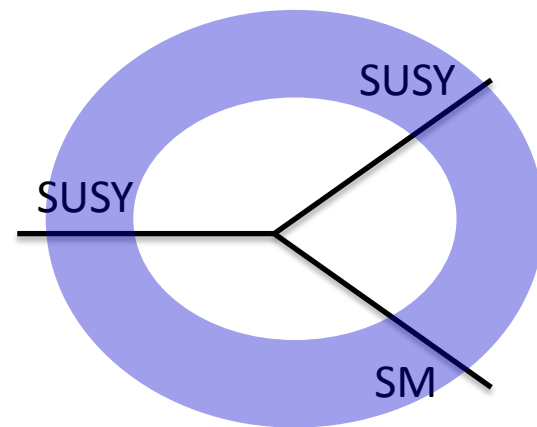
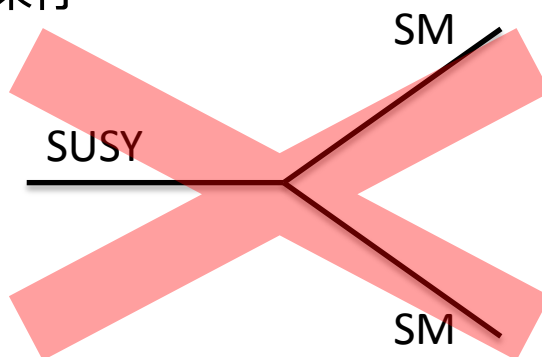
- ☑ 一般的なSUSYラグランジアンには、R-parityの破れを伴う項有り

$$\mathcal{W}_{\text{RPV}} = \lambda_{ijk} L_i L_j E_k^c + \lambda'_{ijk} L_i Q_j D_k^c + \lambda''_{ijk} U_i^c D_j^c D_k^c$$

陽子崩壊を禁止するため手で落とす

- ☑ R-parityとは？

- ☐ SUSY粒子: -1
- ☐ 標準模型粒子: $+1$
- ☐ 積が反応の前後で保存



興味のあるシナリオを実現するための設定

- ☑ 一般的なSUSYラグランジアンには、R-parityの破れを伴う項有り

$$\mathcal{W}_{\text{RPV}} = \lambda_{ijk} L_i L_j E_k^c + \lambda'_{ijk} L_i Q_j D_k^c + \lambda''_{ijk} U_i^c D_j^c D_k^c$$

- ☑ 設定(1) 右巻きレプトンと左巻きレプトンは異なる世代


$$\lambda_{ijk} \quad (i \neq k \text{ and } j \neq k)$$

- ☑ 設定(2) SUSY粒子の寄与は第3世代スフェルミオンだけ

- ☑ 設定(3) クォークの世代構造はCKM行列と同様


$$\lambda'_{ijj} \gg \lambda'_{ijk} \quad (j \neq k)$$

興味のあるシナリオを実現するための設定

- ☑ 一般的なSUSYラグランジアンには、R-parityの破れを伴う項有り

$$\mathcal{W}_{\text{RPV}} = \lambda_{ijk} L_i L_j E_k^c + \lambda'_{ijk} L_i Q_j D_k^c + \lambda''_{ijk} U_i^c D_j^c D_k^c$$

- ☑ 結果として得られるラグランジアン

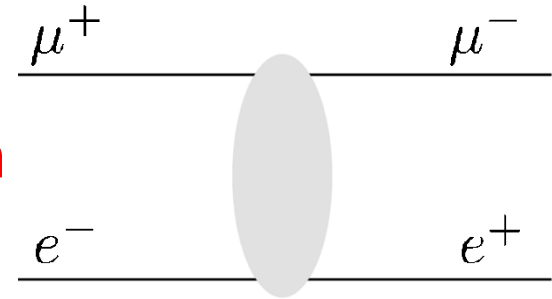
$$\mathcal{L}_{\text{RPV}} = \mathcal{L}_\lambda + \mathcal{L}_{\lambda'},$$

$$\mathcal{L}_\lambda = 2[\lambda_{312} \tilde{\nu}_{\tau L} \bar{\mu} P_L e + \lambda_{321} \tilde{\nu}_{\tau L} \bar{e} P_L \mu + \lambda_{132} \tilde{\tau}_L \bar{\mu} P_L \nu_e + \lambda_{231} \tilde{\tau}_L \bar{e} P_L \nu_\mu] + \text{h.c.}$$

$$\mathcal{L}_{\lambda'} = [\lambda'_{311} (\tilde{\nu}_{\tau L} \bar{d} P_L d - \tilde{\tau}_L \bar{d} P_L u) + \lambda'_{322} (\tilde{\nu}_{\tau L} \bar{s} P_L s - \tilde{\tau}_L \bar{s} P_L c)] + \text{h.c..}$$

Exotic processes in benchmark RPV

muonium conversion

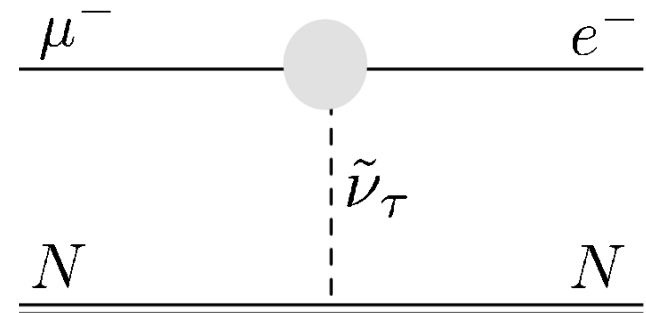


$$\mathcal{L}_{\text{RPV}} = \mathcal{L}_{\lambda} + \mathcal{L}_{\lambda'},$$

$$\mathcal{L}_{\lambda} = 2[\lambda_{312}\tilde{\nu}_{\tau L}\bar{\mu}P_L e + \lambda_{321}\tilde{\nu}_{\tau L}\bar{e}P_L \mu + \lambda_{132}\tilde{\tau}_L\bar{\mu}P_L \nu_e + \lambda_{231}\tilde{\tau}_L\bar{e}P_L \nu_{\mu}] + \text{h.c.}$$

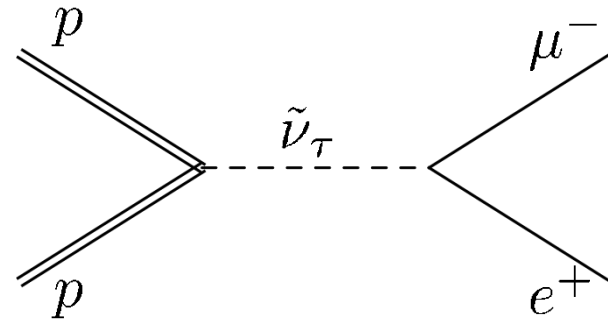
$$\mathcal{L}_{\lambda'} = [\lambda'_{311}(\tilde{\nu}_{\tau L}\bar{d}P_L d - \tilde{\tau}_L\bar{d}P_L u) + \lambda'_{322}(\tilde{\nu}_{\tau L}\bar{s}P_L s - \tilde{\tau}_L\bar{s}P_L c)] + \text{h.c.}.$$

μ-e conversion



Exotic processes in benchmark RPV

$pp \rightarrow \mu^- e^+$

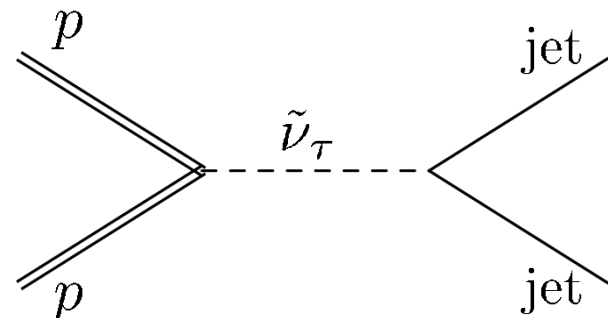


$$\mathcal{L}_{\text{RPV}} = \mathcal{L}_\lambda + \mathcal{L}_{\lambda'},$$

$$\mathcal{L}_\lambda = 2 \left[\lambda_{312} \tilde{\nu}_{\tau L} \bar{\mu} P_L e + \lambda_{321} \tilde{\nu}_{\tau L} \bar{e} P_L \mu + \lambda_{132} \tilde{\tau}_L \bar{\mu} P_L \nu_e + \lambda_{231} \tilde{\tau}_L \bar{e} P_L \nu_\mu \right] + \text{h.c.}$$

$$\mathcal{L}_{\lambda'} = \left[\lambda'_{311} (\tilde{\nu}_{\tau L} \bar{d} P_L d - \tilde{\tau}_L \bar{d} P_L u) + \lambda'_{322} (\tilde{\nu}_{\tau L} \bar{s} P_L s - \tilde{\tau}_L \bar{s} P_L c) \right] + \text{h.c.}$$

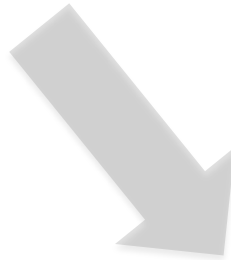
$pp \rightarrow \text{dijet}$



Numerical result and discussion

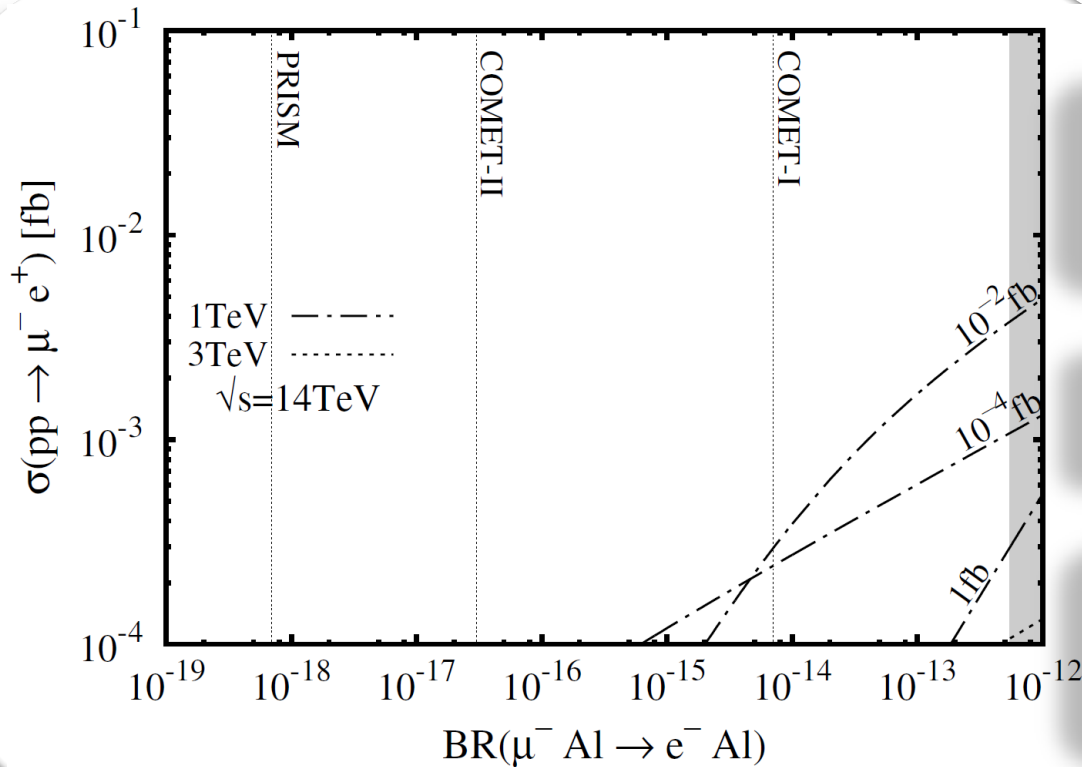
Correlation of μ -e conv. and LHC signals

- ☑ どうやって μ -e conv. 発見を確立？
- ☑ どうやって他の模型と判別？



- ☑ 観測量の相関をチェックするべし
 - ▣ $\text{BR}(\mu^- + N \rightarrow e^- + N)$
 - ▣ $\sigma(pp \rightarrow \mu\bar{e})$
 - ▣ $\sigma(pp \rightarrow jj)$

Correlation of μ -e conv. and LHC signals



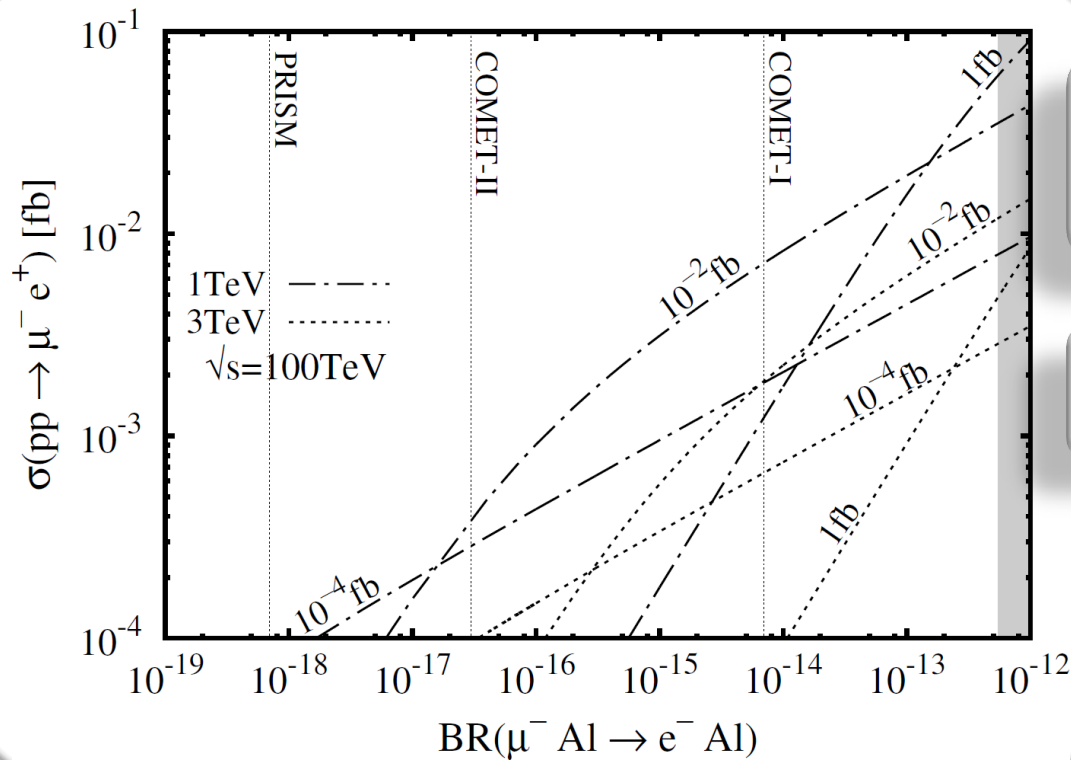
$\sigma(pp \rightarrow \mu^- e^+)$ as a function
of $\text{BR}(\mu^- \text{Al} \rightarrow e^- \text{Al})$

each line : $\sigma(pp \rightarrow jj)$

縦の点線: μ -e conv.探索実験で
予定されている目標精度

- ❑ 特徴: 大きな $\sigma(pp \rightarrow jj)$ でも小さな $\sigma(pp \rightarrow \mu^- e^+)$ の可能性
- ❑ 観測量同士の相関を明らかにしておくことで、モデルの判別、棄却が可能

Correlation of μ -e conv. and LHC signals



$\sigma(pp \rightarrow \mu^- e^+)$ as a function
of $\text{BR}(\mu^- \text{Al} \rightarrow e^- \text{Al})$

each line : $\sigma(pp \rightarrow jj)$

- ☑ μ -e conv.と模型の確立のため、こういった相関をプロットすることが肝心
- ☑ しっかりと相関をチェックできるのは $\sim 3 \text{ TeV}$ のスレプトンまで
- ☑ R-parity violating SUSYでこの相関が描かれたのは初

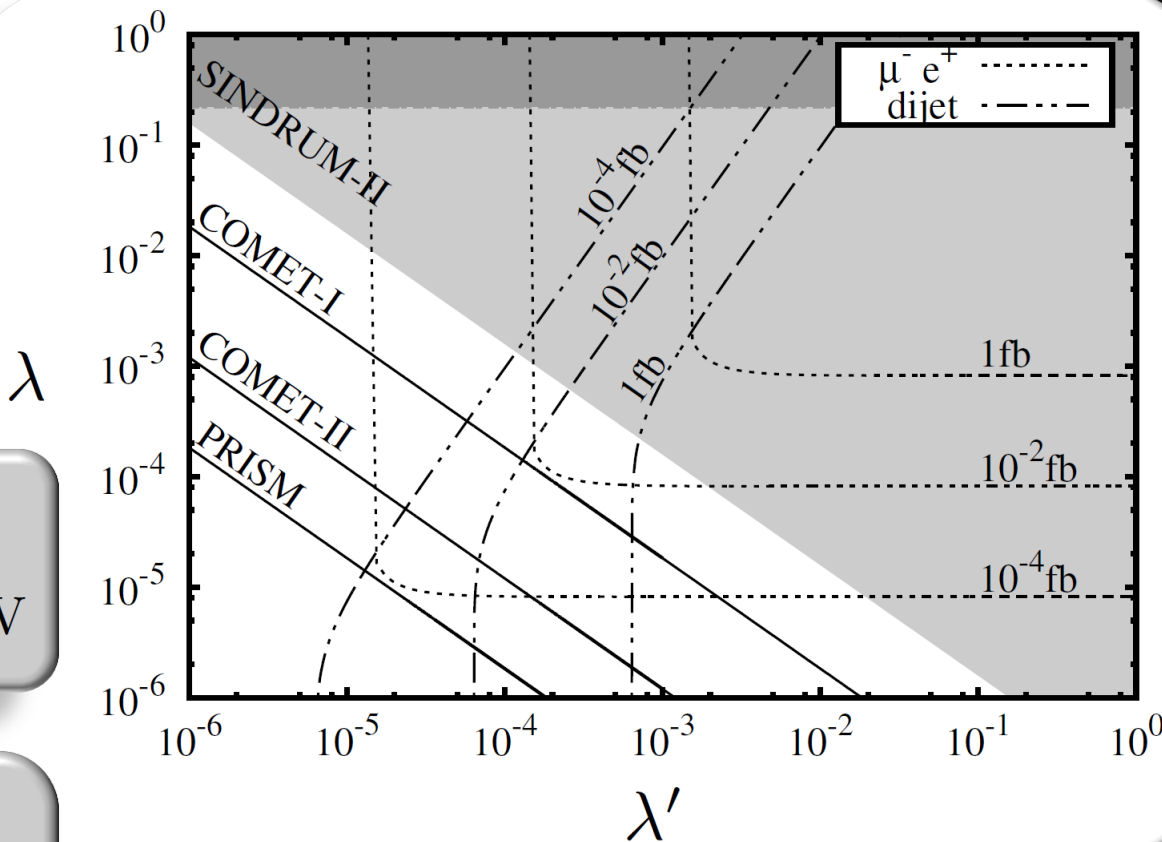
Determination of model parameters

Contour plot of

- BR($\mu^- + N \rightarrow e^- + N$)
- $\sigma(pp \rightarrow \mu\bar{e})$
- $\sigma(pp \rightarrow jj)$

- スレプトン質量 $m_{\tilde{\nu}_\tau} = 1\text{TeV}$
- 衝突エネルギー $\sqrt{s} = 100\text{TeV}$

- 薄灰色の領域: SINDRUM-II
実験の結果で排除
- 実線: μ -e conv.探索実験で
予定されている目標精度

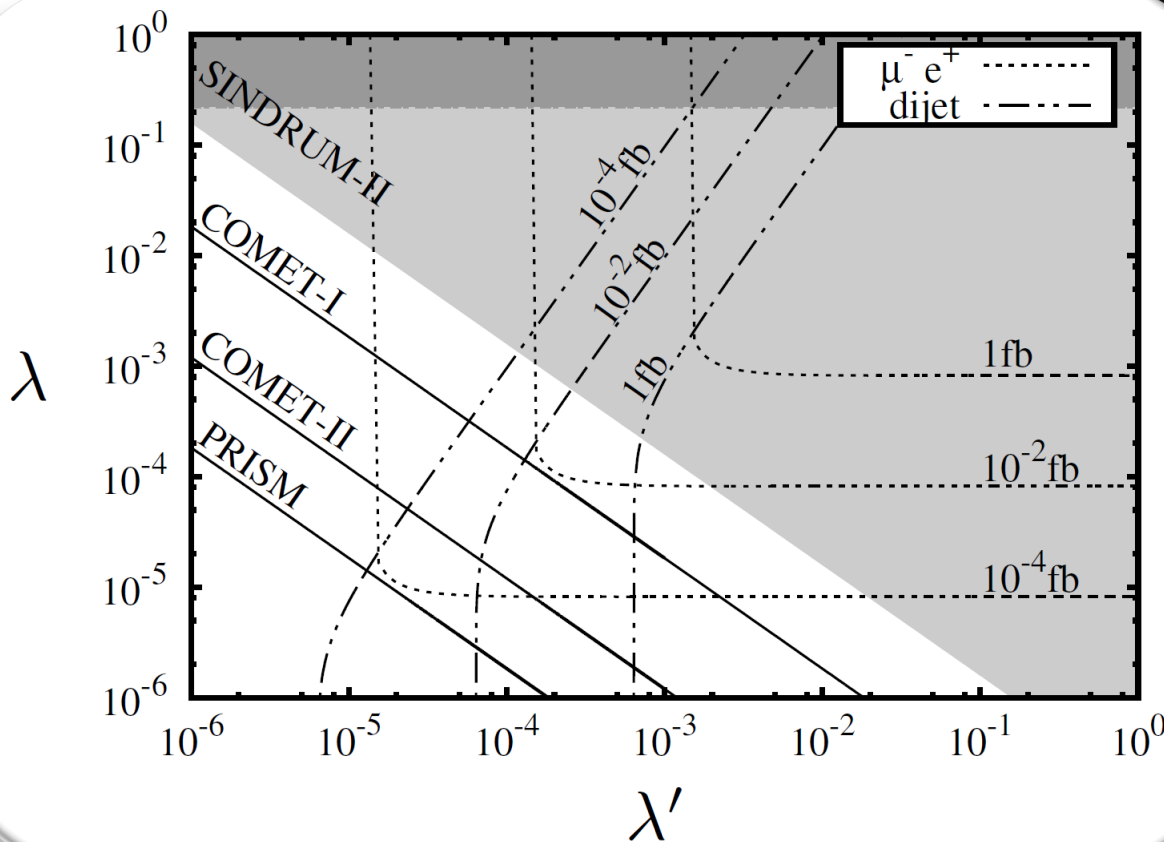


Determination of model parameters

Contour plot of

- $\text{BR}(\mu^- + N \rightarrow e^- + N)$
- $\sigma(pp \rightarrow \mu\bar{e})$
- $\sigma(pp \rightarrow jj)$

- ☒ μ -e conv.探索実験は
LHC実験が調べ得る領域
を完全にカバー



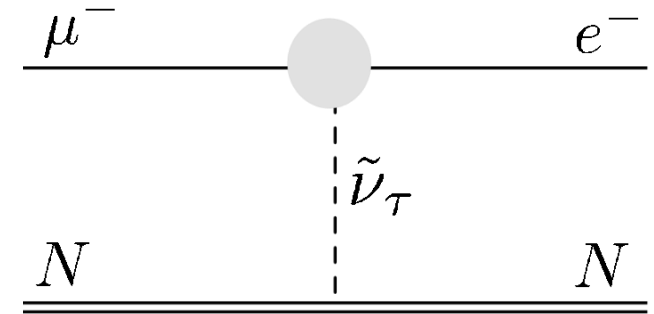
- ☒ J-PARCとLHC実験だけでLFV相互作用と背後の模型をかなり精査可能

Summary

- ❑ 注目したシナリオ： μ -e conv.のみが発見され、他のミューオンLFV反応は未来永劫見つからない
- ❑ LFV相互作用、及び、背後の模型を見失わないために重要なテーマ：
 - ❑ μ -e conv.発見をどうやって確立するか？
 - ❑ LFV相互作用や背後の物理の情報をどこから得るか？
- ❑ 頼りになるのは、muonium conversion、 $pp \rightarrow \mu^- e^+$ 、 $pp \rightarrow \text{dijet}$
- ❑ 一例として、R-parity violating SUSYを用いて、模型判別の可能性やLFV相互作用の決定精度を検討
- ❑ $\text{BR}(\mu^- N \rightarrow e^- N)$ 、 $\sigma(pp \rightarrow \mu^- e^+)$ 、 $\sigma(pp \rightarrow jj)$ の3つの観測量の相関を利用することでR-parity violating SUSYのLFV相互作用を精査可能

Backup slides

μ -e conversion



- Amplitude: overlap of wave functions of μ , e , and nucleus

$$\mathcal{M} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_{q=d,s} \int d^3 \mathbf{x} \left(g_{LS(q)} \bar{\psi}^{(e)} P_R \psi_{1S}^{(\mu)} + g_{RS(q)} \bar{\psi}^{(e)} P_L \psi_{1S}^{(\mu)} \right) \langle N | \bar{q} q | N \rangle$$

Function of λ_{ijk} , λ'_{ijk} ,
and tau sneutrino mass

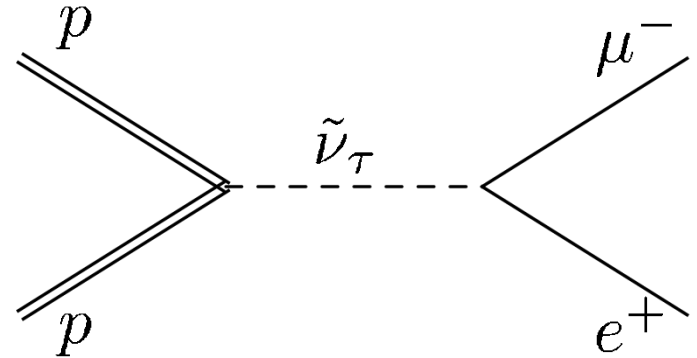
Matrix element determined by
nucleon density for each N

- Branching ratio

$$\begin{aligned} \text{BR}(\mu^- \text{Al} \rightarrow e^- \text{Al}) &= 2.092 \times 10^{-15} \left(\frac{1 \text{TeV}}{m_{\tilde{\nu}_\tau}} \right)^4 \left(\frac{\lambda'_{311} \lambda}{10^{-8}} \right)^2 \left| 1 + 0.530 \left(\frac{\lambda'_{322}}{\lambda'_{311}} \right) \right|^2 \\ &= 5.881 \times 10^{-16} \left(\frac{1 \text{TeV}}{m_{\tilde{\nu}_\tau}} \right)^4 \left(\frac{\lambda'_{322} \lambda}{10^{-8}} \right)^2 \left| 1 + 1.886 \left(\frac{\lambda'_{311}}{\lambda'_{322}} \right) \right|^2 \end{aligned}$$

$pp \rightarrow \mu^- e^+$ and $pp \rightarrow \text{dijet@LHC}$

- ☑ Dominant: s-channel resonance
- ☑ Cross sections are approximated by the Breit-Wigner formula



$$\begin{aligned}\sigma(pp \rightarrow f_1 f_2) &= F(\sqrt{s}, m_{\tilde{\nu}_\tau}, q_1, q_2) \times \Gamma_{\tilde{\nu}_\tau} \text{BR}(\tilde{\nu}_\tau \rightarrow q_1 q_2) \text{BR}(\tilde{\nu}_\tau \rightarrow f_1 f_2) \\ &= F(\sqrt{s}, m_{\tilde{\nu}_\tau}, q_1, q_2) m_{\tilde{\nu}_\tau} \times \gamma_{\tilde{\nu}_\tau} \text{BR}(\tilde{\nu}_\tau \rightarrow q_1 q_2) \text{BR}(\tilde{\nu}_\tau \rightarrow f_1 f_2)\end{aligned}$$

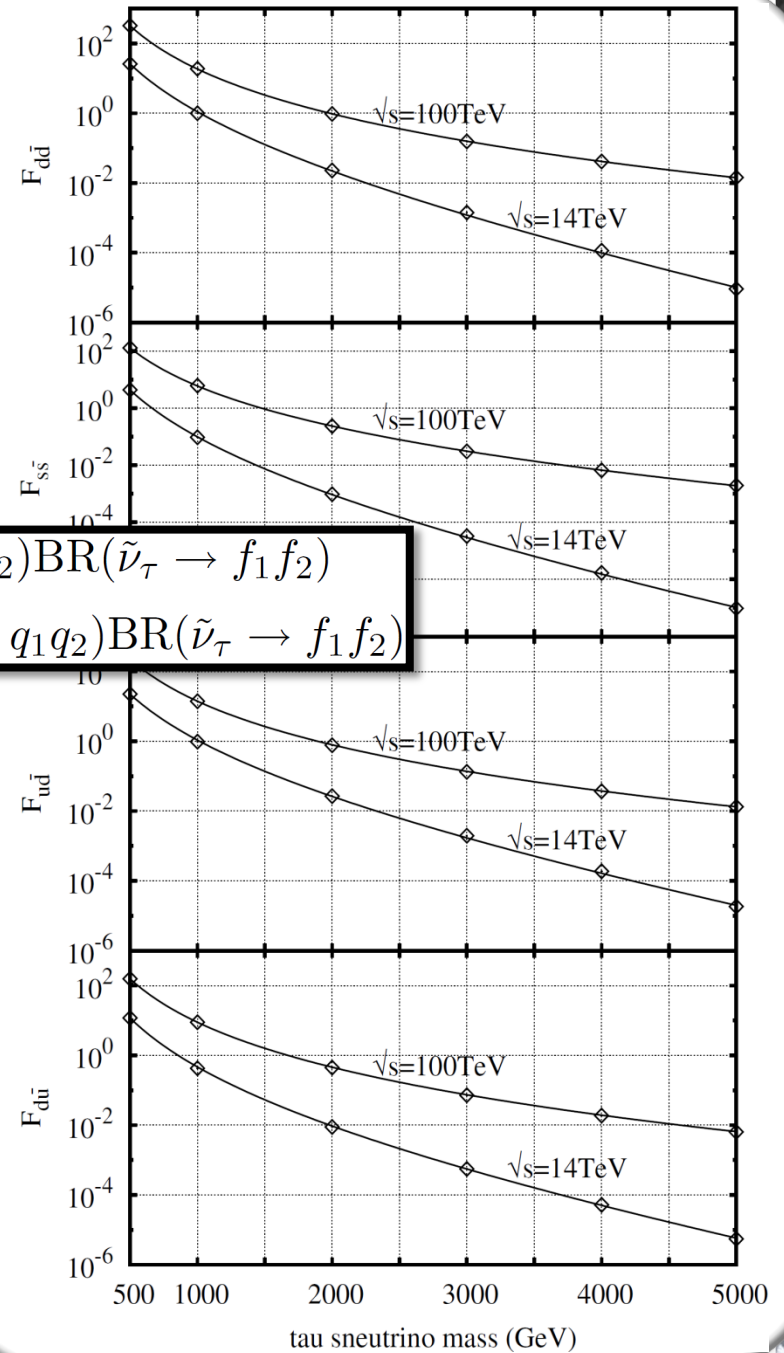
Determined by initial quarks
and mediator mass

Depends only on couplings

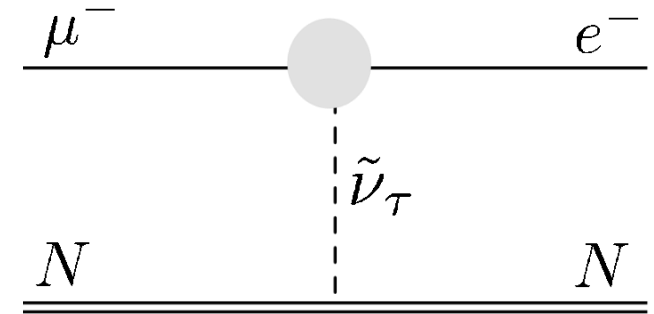
$$\gamma_{\tilde{\nu}_\tau} = \Gamma_{\tilde{\nu}_\tau} / m_{\tilde{\nu}_\tau}$$

Cross section

$$\begin{aligned}\sigma(pp \rightarrow f_1 f_2) &= F(\sqrt{s}, m_{\tilde{\nu}_\tau}, q_1, q_2) \times \Gamma_{\tilde{\nu}_\tau} \text{BR}(\tilde{\nu}_\tau \rightarrow q_1 q_2) \text{BR}(\tilde{\nu}_\tau \rightarrow f_1 f_2) \\ &= F(\sqrt{s}, m_{\tilde{\nu}_\tau}, q_1, q_2) m_{\tilde{\nu}_\tau} \times \gamma_{\tilde{\nu}_\tau} \text{BR}(\tilde{\nu}_\tau \rightarrow q_1 q_2) \text{BR}(\tilde{\nu}_\tau \rightarrow f_1 f_2)\end{aligned}$$



μ -e conversion



- Amplitude: overlap of wave functions of μ , e , and nucleus

$$\mathcal{M} = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_{q=d,s} \int d^3\mathbf{x} \left(g_{LS(q)} \bar{\psi}_{\kappa,W}^{\mu(e)} P_R \psi_{1S}^{(\mu)} + g_{RS(q)} \bar{\psi}_{\kappa,W}^{\mu(e)} P_L \psi_{1S}^{(\mu)} \right) \langle N | \bar{q} q | N \rangle$$

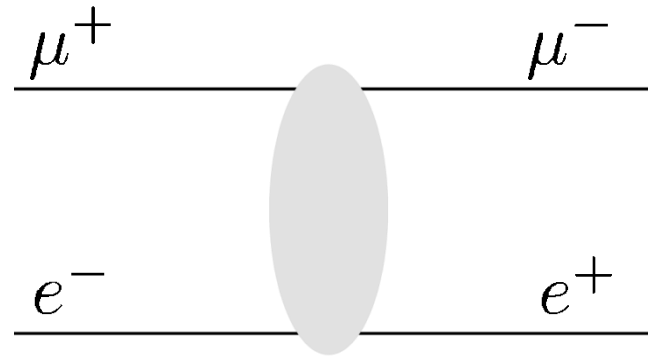
Function of nucleon density for each N

$$g_{LS(d)} = \frac{\sqrt{2}}{G_F} \frac{2}{m_{\tilde{\nu}_\tau}^2} \lambda'_{311} \lambda_{312}^* \quad g_{RS(d)} = \frac{\sqrt{2}}{G_F} \frac{2}{m_{\tilde{\nu}_\tau}^2} \lambda_{311}'^* \lambda_{321}$$

- Branching ratio

$$\begin{aligned} \text{BR}(\mu^- \text{Al} \rightarrow e^- \text{Al}) &= 2.092 \times 10^{-15} \left(\frac{1\text{TeV}}{m_{\tilde{\nu}_\tau}} \right)^4 \left(\frac{\lambda'_{311} \lambda}{10^{-8}} \right)^2 \left| 1 + 0.530 \left(\frac{\lambda'_{322}}{\lambda'_{311}} \right) \right|^2 \\ &= 5.881 \times 10^{-16} \left(\frac{1\text{TeV}}{m_{\tilde{\nu}_\tau}} \right)^4 \left(\frac{\lambda'_{322} \lambda}{10^{-8}} \right)^2 \left| 1 + 1.886 \left(\frac{\lambda'_{311}}{\lambda'_{322}} \right) \right|^2 \end{aligned}$$

Muonium conversion

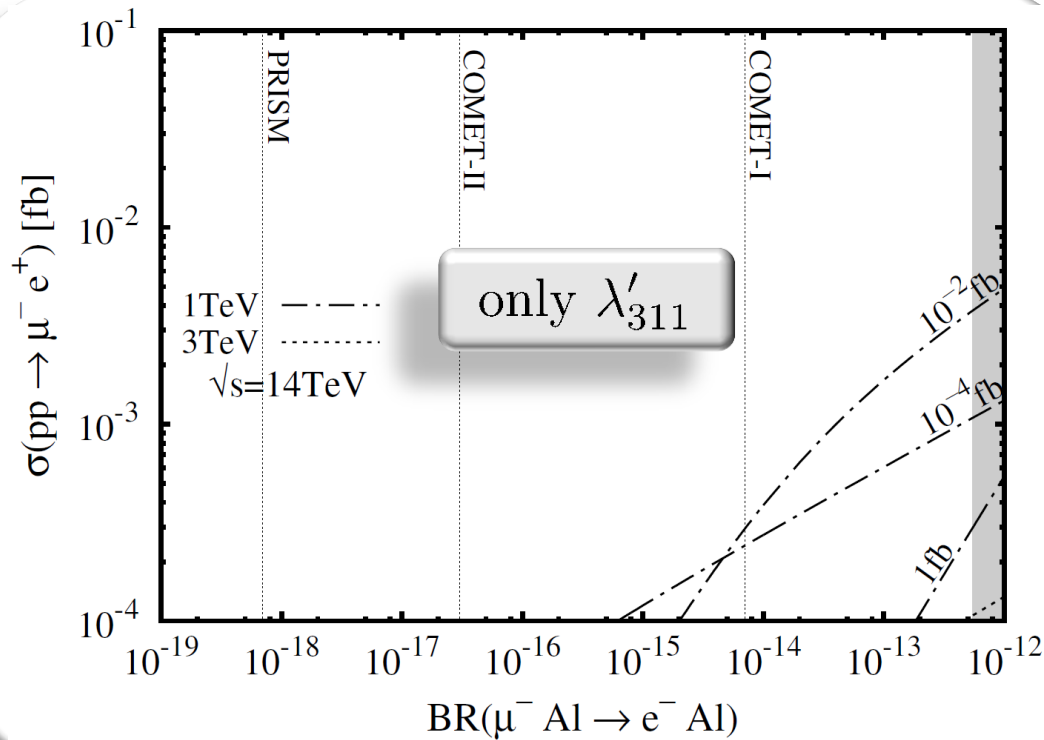


$$\mathcal{L}(M \rightarrow \bar{M}) = \frac{\lambda_{321}\lambda_{312}^*}{2m_{\tilde{\nu}_\tau}^2} (\bar{\mu}\gamma_\mu P_L e)(\bar{\mu}\gamma^\mu P_R e) + \text{h.c.}$$

$$G_{M\bar{M}} \leq 3.0 \times 10^{-3} G_F$$

$$|\lambda_{321}\lambda_{312}^*| \left(\frac{1\text{TeV}}{m_{\tilde{\nu}_\tau}} \right)^2 \leq 4.948 \times 10^{-2}$$

Correlation of μ -e conv. and LHC signals



☑ HogeHoge

