

# Search for charged lepton flavor violation

山中 真人 (京都産業大学, 益川塾)

# はじめに

- ☑ インテンシティ実験におけるCLFV探索に関する話題はこの後の実験のプロ達にお任せします
- ☑ LHCにおけるCLFV探索やCLFVに関する最近の理論サイドの話題に絞ります

# Charged lepton flavor violation (CLFV)

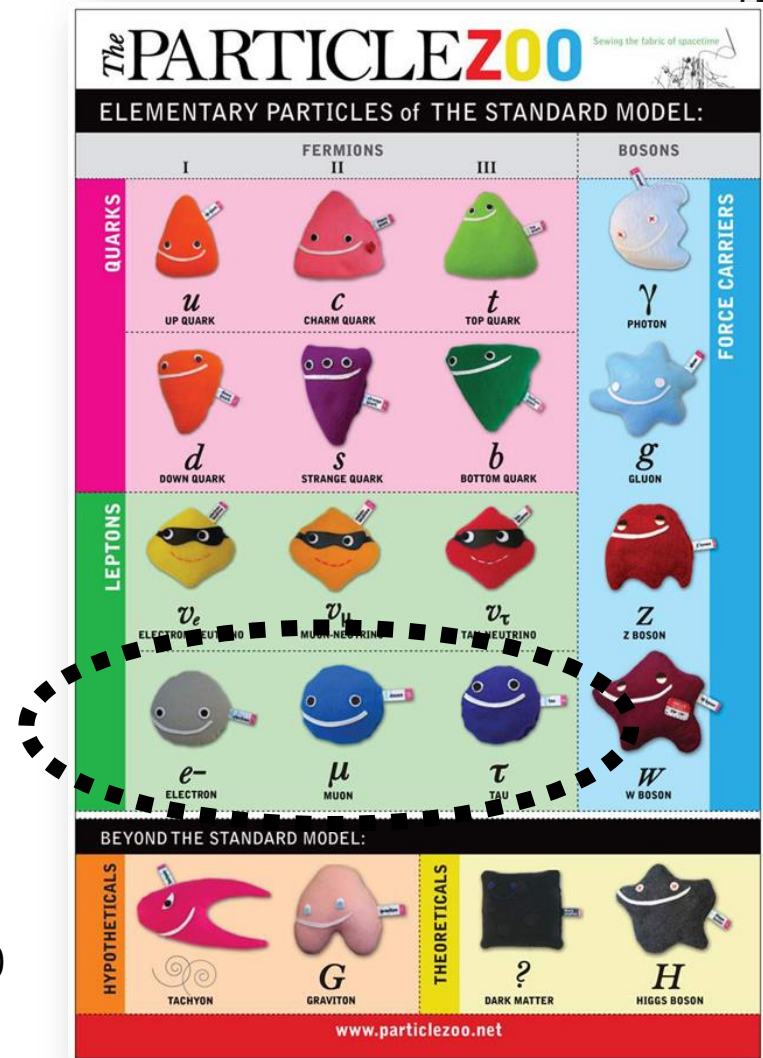
- ❑ 偉大なる標準理論の予言

荷電レプトンは世代を跨ぐ反応を起こさない  
(荷電レプトンフレーバーの破れ(CLFV)は禁止)

- ❑ 偉大なる標準理論も世代や質量階層性の起源に関しては手も足も出ず

- ❑ CLFVは、標準模型由来の寄与が入らないため、世代の謎に不定性無く探りを入れられる優れたメス

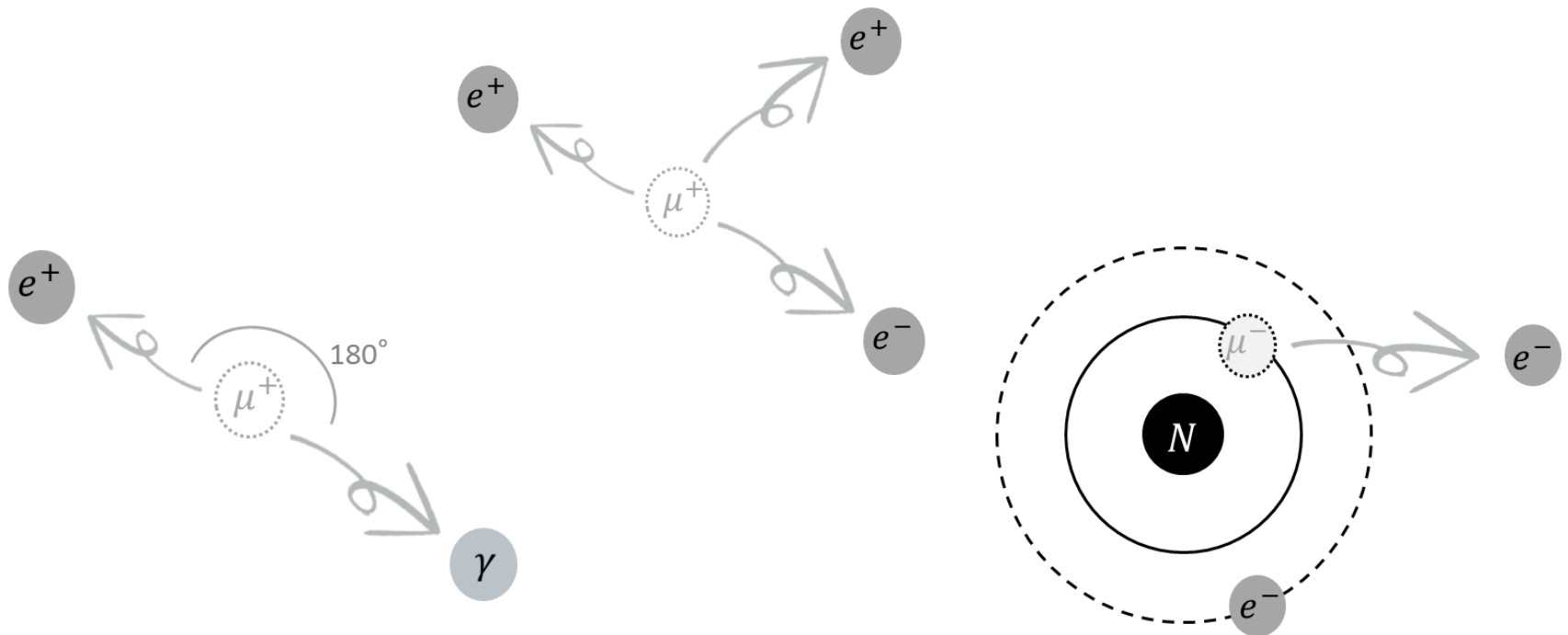
- ❑ かつ、「CLFVの発見 = 標準模型を超える物理の証拠」であり、世代以外の謎に対しても貴重な足掛かり



# Charged lepton flavor violation (CLFV)

## ☑ 様々な反応でCLFVを探索中

- ☑  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$  BR  $< 4.2 \times 10^{-13}$  MEG collaboration, EPJC (2016)
- ☑  $\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+$  BR  $< 1.0 \times 10^{-12}$  SINDRUM collaboration, NPB (1988)
- ☑  $\mu - e$  conversion BR  $< 7.0 \times 10^{-13}$  SINDRUM-II collaboration, EPJC (2006)



# Charged lepton flavor violation (CLFV)

- ☑ “未知”の理解には多角的な情報が不可欠
  - ☐ LFV search for high-mass resonances@LHC
  - ☐ Higgs CLFV search@LHC
  - ☐  $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$  in muonic atom
- ☑ “未知”を的確に伝える表現も必要
  - ☐ Improvement on hadronic matrix element for tau CLFV decay
  - ☐ Correlation between  $\mu \rightarrow e\gamma$  and  $\mu \rightarrow 3e$  in SUSY models



## LHC実験におけるCLFV探索

- ☑ LFV search for high-mass resonances
- ☑ Higgs LFV

LFV search for high-mass resonances@LHC

# LFV search for high-mass resonances

☑ FCNCをもたらす  $Z'$  や重いスカラーは、様々な動機を背景に、数々の新物理に登場

☑ GUT

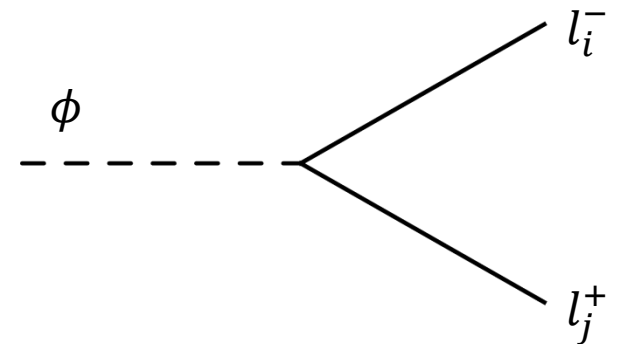
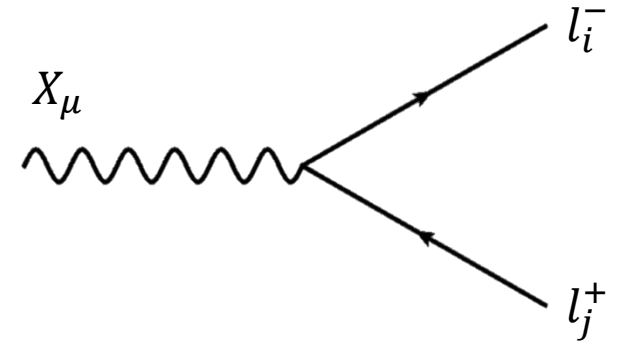
☑ フレーバー対称性模型

☑ 余剰次元模型

☑ 複合粒子模型

☑ R-parityを破った超対称模型

☑ 輻射シーソー模型 などなど

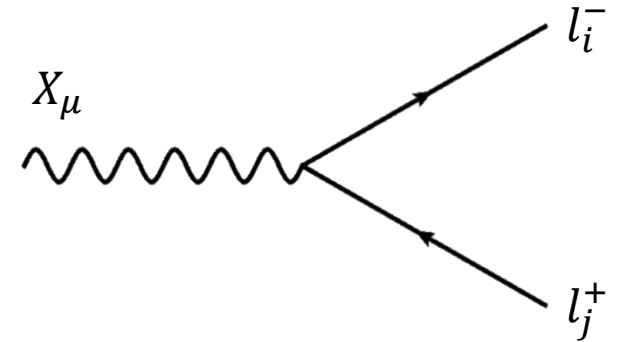




# Z'がもたらすLFVの例

- 相互作用固有状態の基底における Z' とレプトンの相互作用

$$\mathcal{L} = \frac{g_X}{\sin \theta_W} \bar{l}'_i q_{ij}^{l'} \gamma^\mu l'_j X_\mu$$



- フレーバーごとに異なる強さで相互作用

$$q_{ij}^{l'} = \begin{pmatrix} q^e & & \\ & q^\mu & \\ & & q^\tau \end{pmatrix}$$

- 質量固有状態の基底 (= 湯川結合が対角的) に変換

$$\mathcal{L} = \frac{g_X}{\sin \theta_W} \bar{l}_i Q_{ij}^l \gamma^\mu l_j X_\mu \quad Q^l = U^{l\dagger} q^{l'} U^l = \begin{pmatrix} Q_{11}^l & Q_{12}^l & Q_{13}^l \\ Q_{21}^l & Q_{22}^l & Q_{23}^l \\ Q_{31}^l & Q_{32}^l & Q_{33}^l \end{pmatrix}$$

# Z'がもたらすLFVの例

- ☑ Z'モデルの構造が反映される
- ☑ 例：Randall-Sundrum型の余剰次元モデル  
 $Q_{ij}^l$  は余剰次元中におけるレプトン波動関数の位置情報を含む

- ☑ 質量固有状態の基底 (= 湯川結合が対角的) に変換

$$\mathcal{L} = \frac{g_X}{\sin \theta_W} \bar{l}_i Q_{ij}^l \gamma^\mu l_j X_\mu \quad Q^l = U^{l\dagger} q^{l'} U^l = \begin{pmatrix} Q_{11}^l & Q_{12}^l & Q_{13}^l \\ Q_{21}^l & Q_{22}^l & Q_{23}^l \\ Q_{31}^l & Q_{32}^l & Q_{33}^l \end{pmatrix}$$

# CMS ( $\sqrt{s} = 13\text{TeV}, 2.7\text{fb}^{-1}$ )

☑ 大きな運動量に対しても高いエネルギー分解能でシグナルを探索

■  $1.6\% @ M_{e\mu} = 200\text{GeV}$

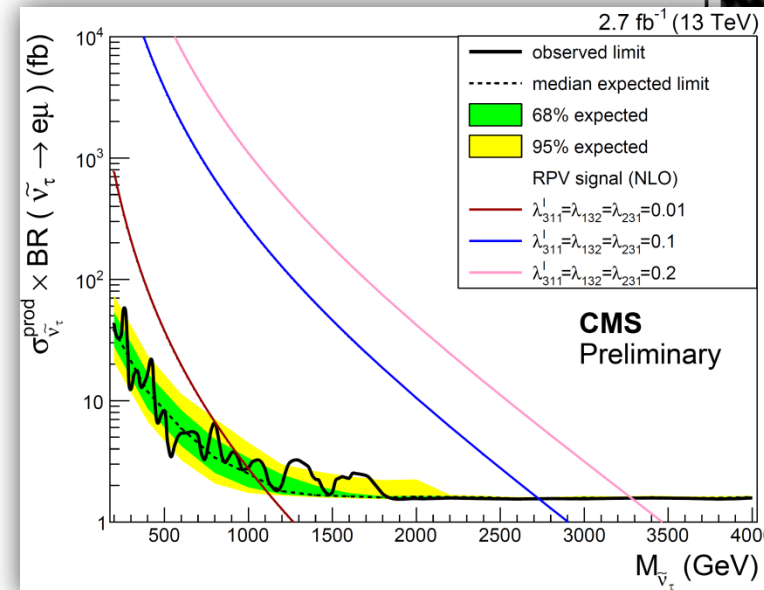
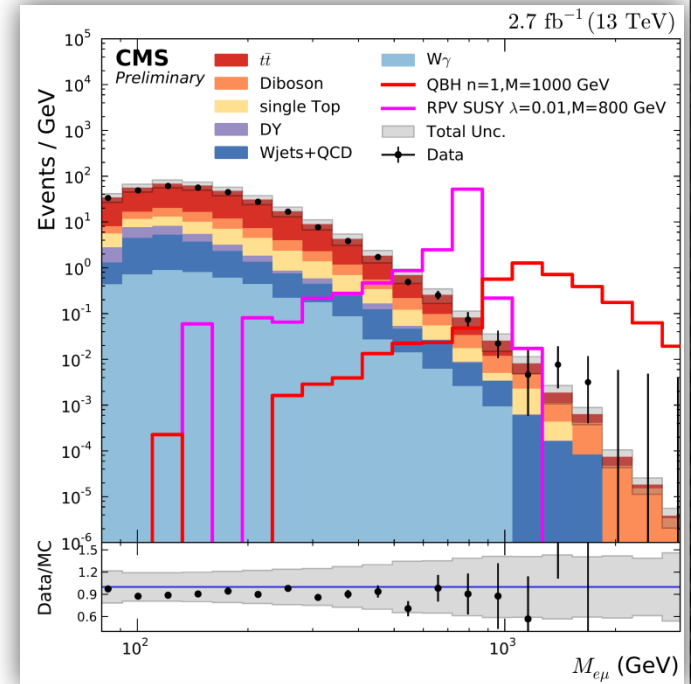
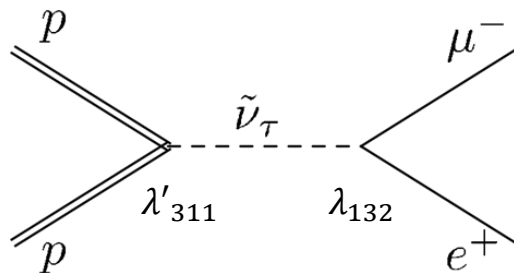
■  $4.1\% @ M_{e\mu} = 4\text{TeV}$

☑ これまでにLFVの兆候無し

☑ Rパリティが破れたSUSYを例にパラメーターを制限

■  $M_{e\mu} > 1.0\text{TeV}$  for  $\lambda_{132} = \lambda_{231} = \lambda'_{311} = 0.01$

■  $M_{e\mu} > 3.3\text{TeV}$  for  $\lambda_{132} = \lambda_{231} = \lambda'_{311} = 0.2$



# ATLAS ( $\sqrt{s} = 13\text{TeV}, 3.2\text{fb}^{-1}$ )

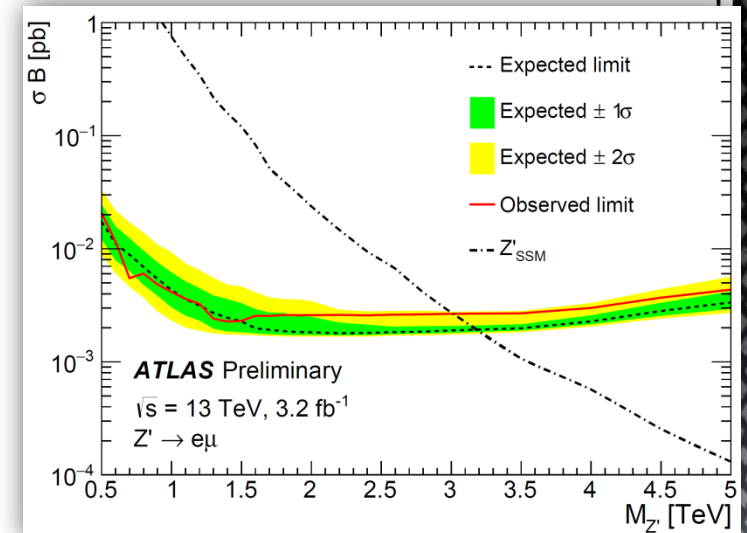
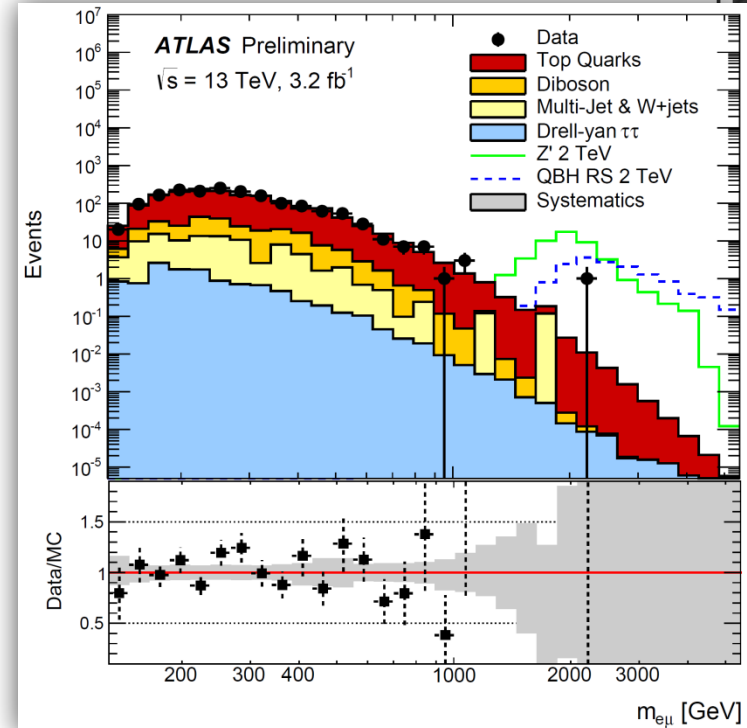
☑ ATLASでもLFVの兆候は無し

☑  $Z'$ 生成断面積と崩壊分岐比の積に制限

$$\sigma(pp \rightarrow Z') \times BR(Z' \rightarrow e\mu) \lesssim 3 \text{ fb}$$

☑  $M_{e\mu} \approx 2.1\text{TeV}$ にわずかに超過 (信頼度 $1.7\sigma$ )

☑ この超過は本物になり得るか？



# ATLAS ( $\sqrt{s} = 13\text{TeV}, 3.2\text{fb}^{-1}$ )

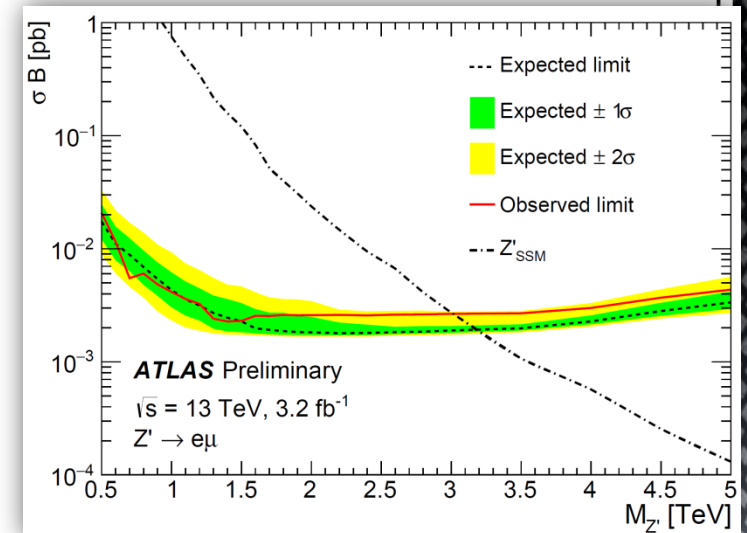
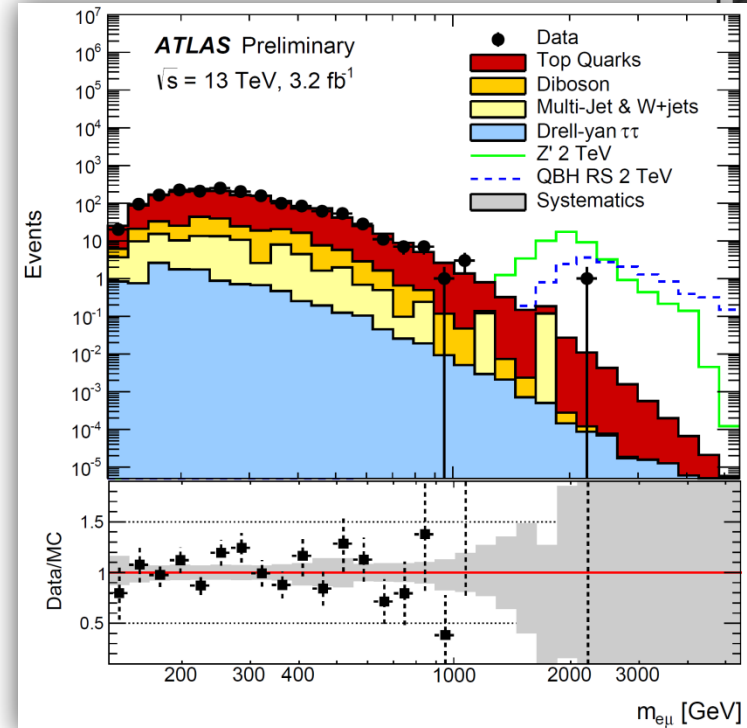
☑ ATLASでもLFVの兆候は無し

☑  $Z'$ 生成断面積と崩壊分岐比の積に制限

$$\sigma(pp \rightarrow Z') \times BR(Z' \rightarrow e\mu) \lesssim 3 \text{ fb}$$

☑  $M_{e\mu} \approx 2.1\text{TeV}$  にわずかに超過 (信頼度 $1.7\sigma$ )

☑ この超過は本物になり得るか？

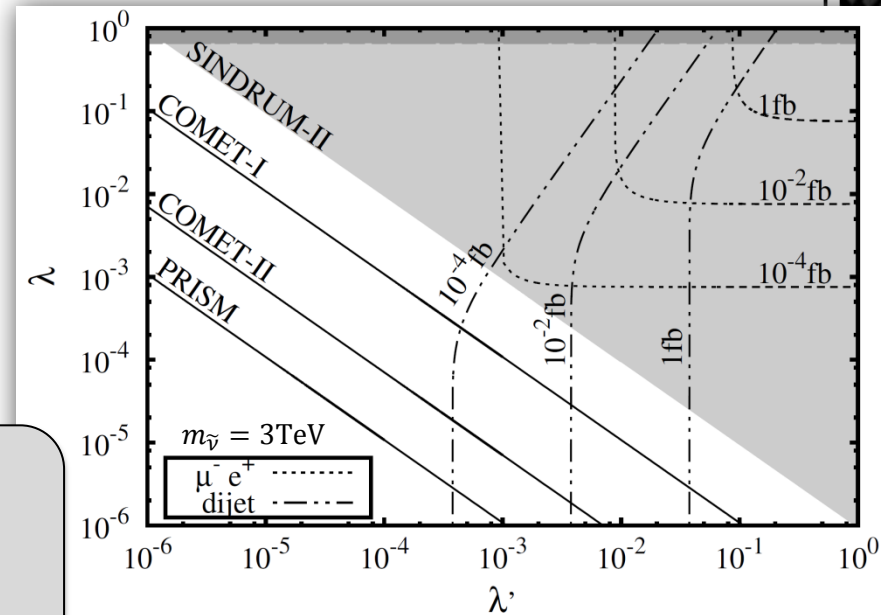
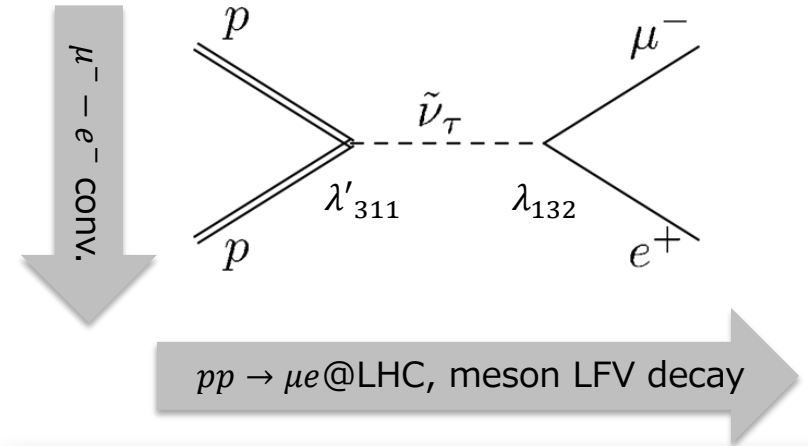


# $\mu^- - e^-$ 転換や meson CLFV decay の制限を忘れずに

☑  $pp \rightarrow \mu e$  が起こるならば  $\mu^- - e^-$  転換や  $K \rightarrow \mu e$  などが起こる

☑  $\mu^- - e^-$  転換や  $K \rightarrow \mu e$  などの制限により  $\sigma(pp \rightarrow \mu e) \lesssim 10^{-4} \text{ fb}$

☑ 13TeV~14TeV Runを仮定すると、およそ1000倍のルミノシティがCLFV resonanceの発見に必要



RPVカップリング  $\lambda, \lambda'$  の関数として描いた  $\sigma(pp \rightarrow \mu^- e^+)$  と  $\text{BR}(\mu^- Al \rightarrow e^- Al)$  の相関。  
灰色の領域はSINDRUM-IIの結果により排除。

Higgs LFV@LHC

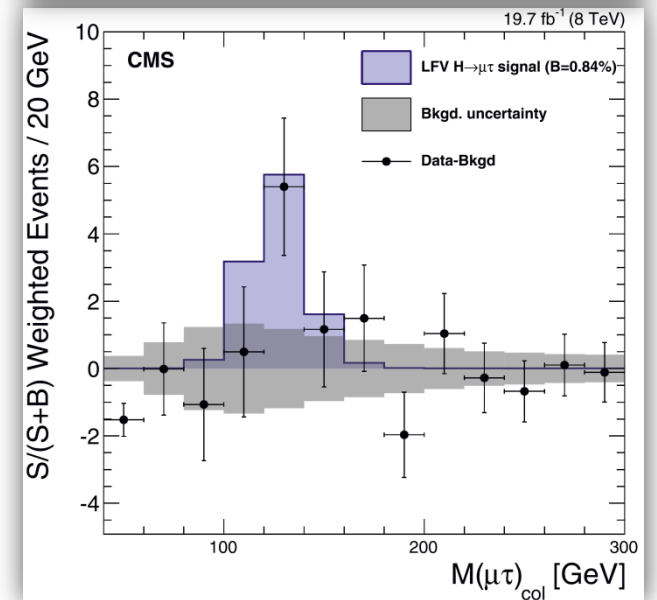
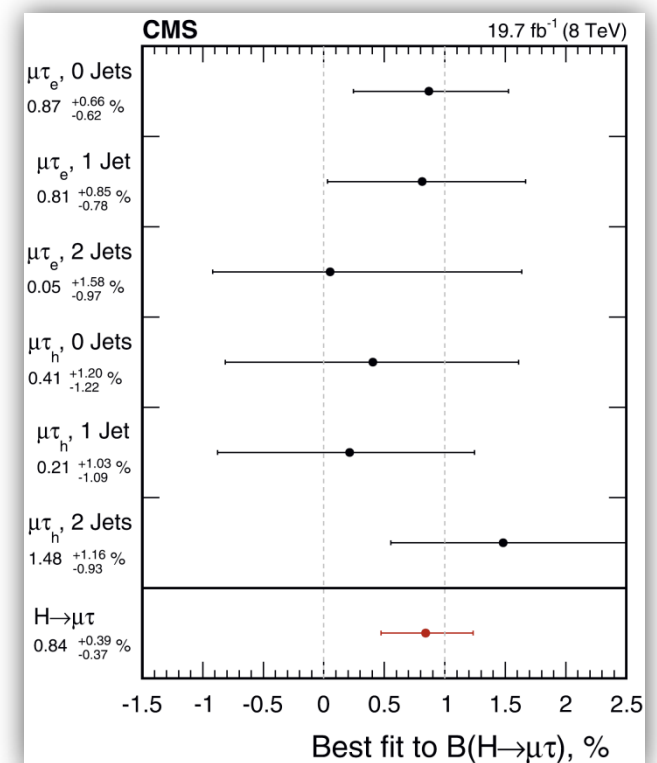
# $h \rightarrow \tau\mu$ @LHC (2014年)

- ☑ 2014年、CMSが  $h \rightarrow \tau\mu$  を報告
- ☑  $19.7 \text{ fb}^{-1} @ \sqrt{s} = 8\text{TeV}$  のデータで解析
- ☑ タウ崩壊を荷電レプトン終状態 ( $\tau_e$ )、ハドロン終状態 ( $\tau_h$ ) それぞれで再構築  
➡  $\tau_e$ 、 $\tau_h$  の両方で  $h \rightarrow \tau\mu$  を確認
- ☑ 崩壊分岐比は0イベントに対し $2.4\sigma$ の超過

$$B(H \rightarrow \mu\tau) = (0.84^{+0.39}_{-0.37})\%$$

- ☑ 崩壊分岐比に上限@95%信頼度

$$B(H \rightarrow \mu\tau) < 1.51\%$$





# $h \rightarrow \tau\mu$ @LHC (2014年)

- ☑ ヒッグスのLFV崩壊率

$$\Gamma(H \rightarrow \ell^\alpha \ell^\beta) = \frac{m_H}{8\pi} (|Y_{\ell^\beta \ell^\alpha}|^2 + |Y_{\ell^\alpha \ell^\beta}|^2)$$

- ☑ LFV崩壊率とBR上限から、LFV湯川に制限

$$\sqrt{|Y_{\mu\tau}|^2 + |Y_{\tau\mu}|^2} < 3.6 \times 10^{-3}$$

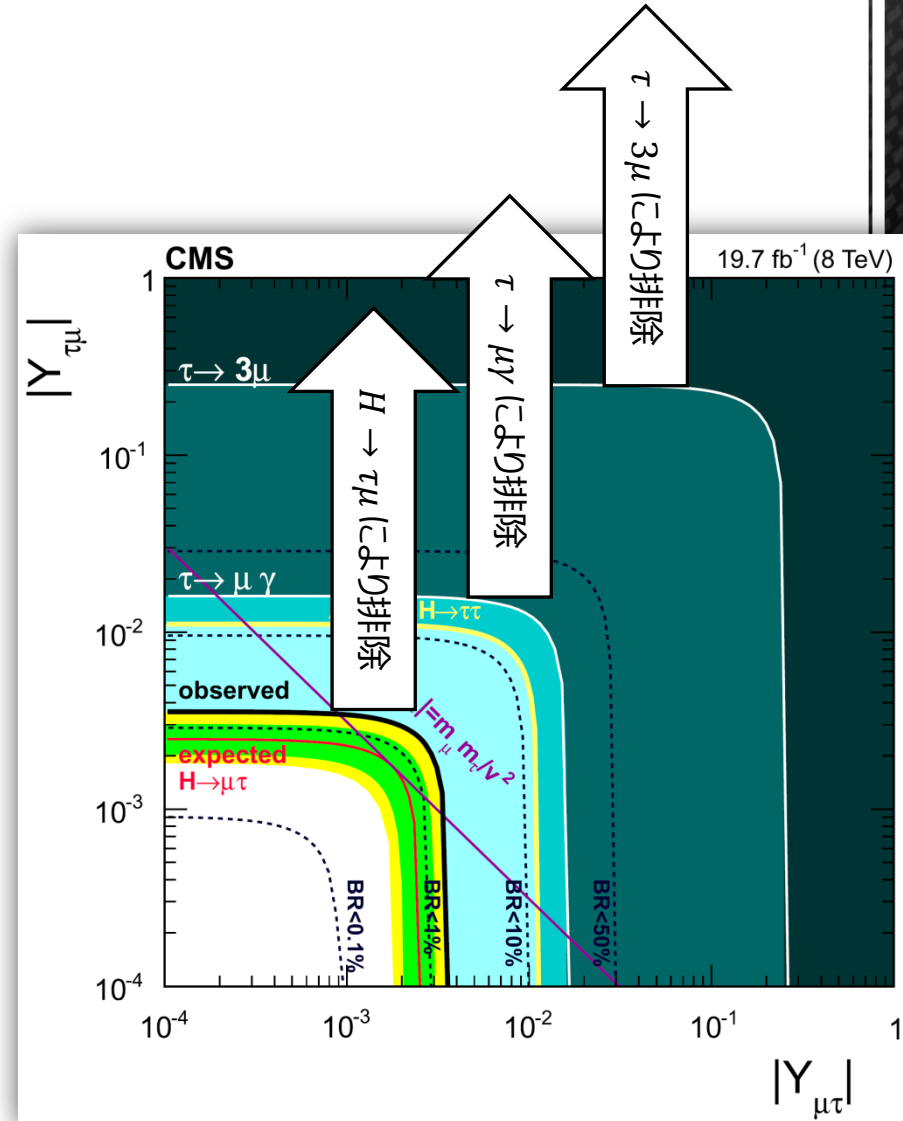
- ☑ LFV湯川  $Y_{\tau\mu}$ 、 $Y_{\mu\tau}$  に対する最も強く、かつ、不定性の小さな制限

$\tau \rightarrow 3\mu$  などは2 loop dipole ope.を含んだ制限

- ☑ ちなみに、ATLASの結果は、

$$\text{Br}(H \rightarrow \mu\tau) = (0.77 \pm 0.62)\%$$

ATLAS collaboration, JHEP 1511 (2015)



CMS collaboration, PLB749 (2015)

# $h \rightarrow \tau\mu$ @LHC (2016年11月現在)

See slides on Higgs Couplings workshop 2016

## ☑ CMSの最新結果 ( $\sqrt{s} = 13\text{TeV}$ , $2.3\text{fb}^{-1}$ )

Best fit BR  $\mathcal{B}(H \rightarrow \mu\tau) = -0.76^{+0.81\%}_{-0.84\%}$

BRの上限  $\mathcal{B}(H \rightarrow \mu\tau) < 1.20\%$

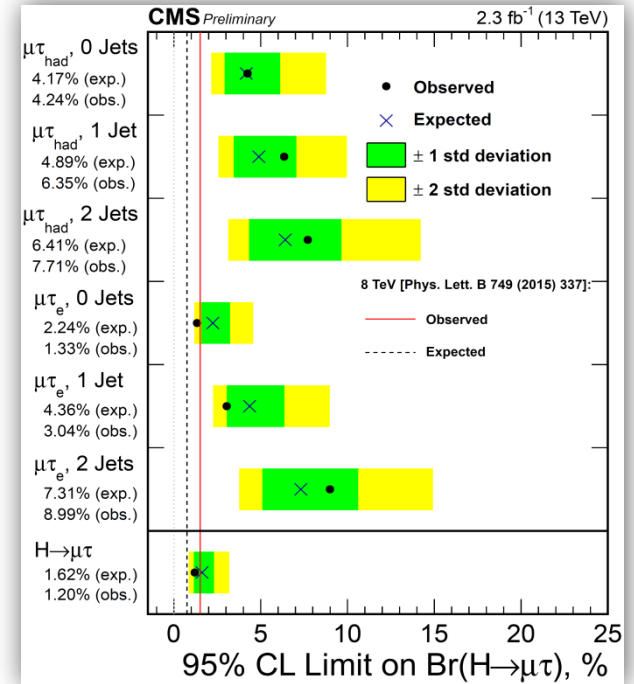
湯川に対する制限  $\sqrt{|Y_{\mu\tau}|^2 + |Y_{\tau\mu}|^2} < 3.16 \times 10^{-3}$

## ☑ ATLASの最新結果 ( $\sqrt{s} = 8\text{TeV}$ , $20.3\text{fb}^{-1}$ )

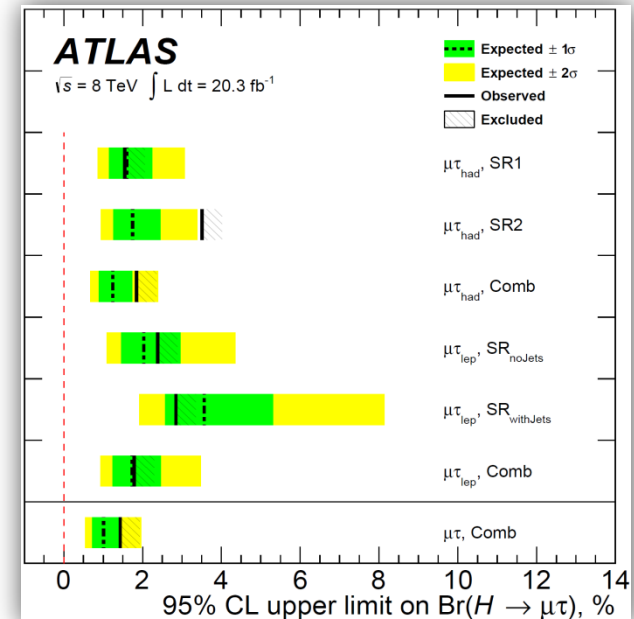
Best fit BR  $\text{Br}(H \rightarrow \mu\tau) = (0.53 \pm 0.51)\%$

BRの上限  $\text{Br}(H \rightarrow \mu\tau) < 1.43\%$

## ☑ 今のところ、 $h \rightarrow \tau\mu$ は未発見と考えて良さそう



CMS PAS HIG-16-005 (2016/06/09)



ATLAS collaboration, arXiv:1604.07730

# $h \rightarrow \tau e$ @LHC (2016年11月現在)

See slides on Higgs Couplings workshop 2016

- ☑ CMSの最新結果 ( $\sqrt{s} = 8\text{TeV}$ ,  $19.7\text{fb}^{-1}$ )

BRの上限  $\mathcal{B}(H \rightarrow e\tau) < 0.69\%$

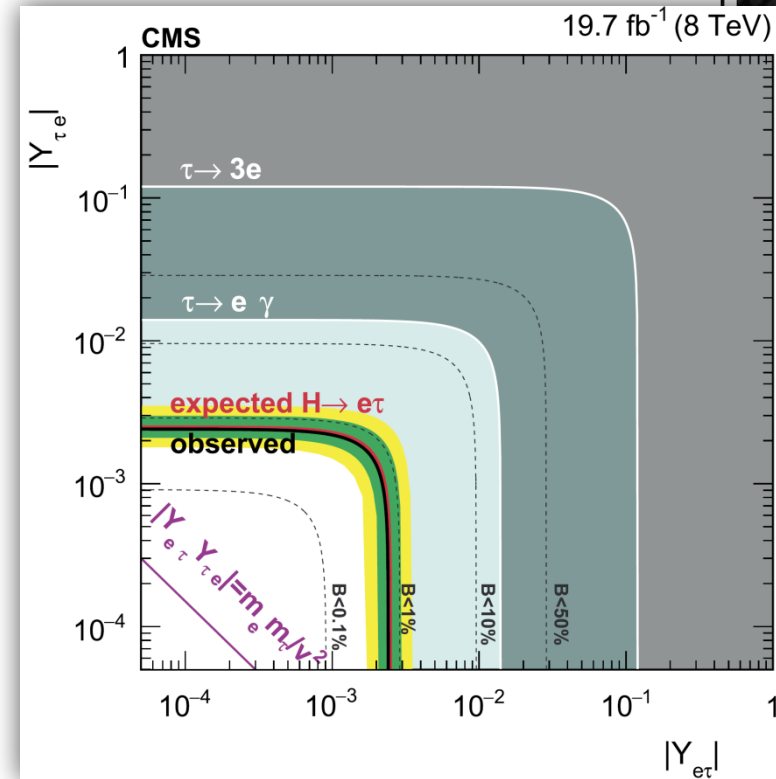
湯川に対する制限  $\sqrt{|Y_{e\tau}|^2 + |Y_{\tau e}|^2} < 2.4 \times 10^{-3}$

- ☑ ATLASの最新結果 ( $\sqrt{s} = 8\text{TeV}$ ,  $20.3\text{fb}^{-1}$ )

BRの上限  $\text{Br}(H \rightarrow e\tau) < 1.04\%$

- ☑  $h \rightarrow \tau e$  も未発見と考えると良さそう

- ☑ 発見には至らなかったが、LHCがLFV湯川相互作用の検証に高い感度を持つことが分かった。  
来年度以降のrunに期待。



CMS collaboration, PLB763 (2016)

## LFVの理論研究に関する最近の進展 (進展もどき)

- ☑ タウLFV探索におけるhadronic matrix elementの進展
- ☑  $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$  in muonic atom
- ☑  $\mu \rightarrow 3e$ に寄与するZ boson dipole operator ?

## タウLFV探索におけるhadronic matrix elementの進展

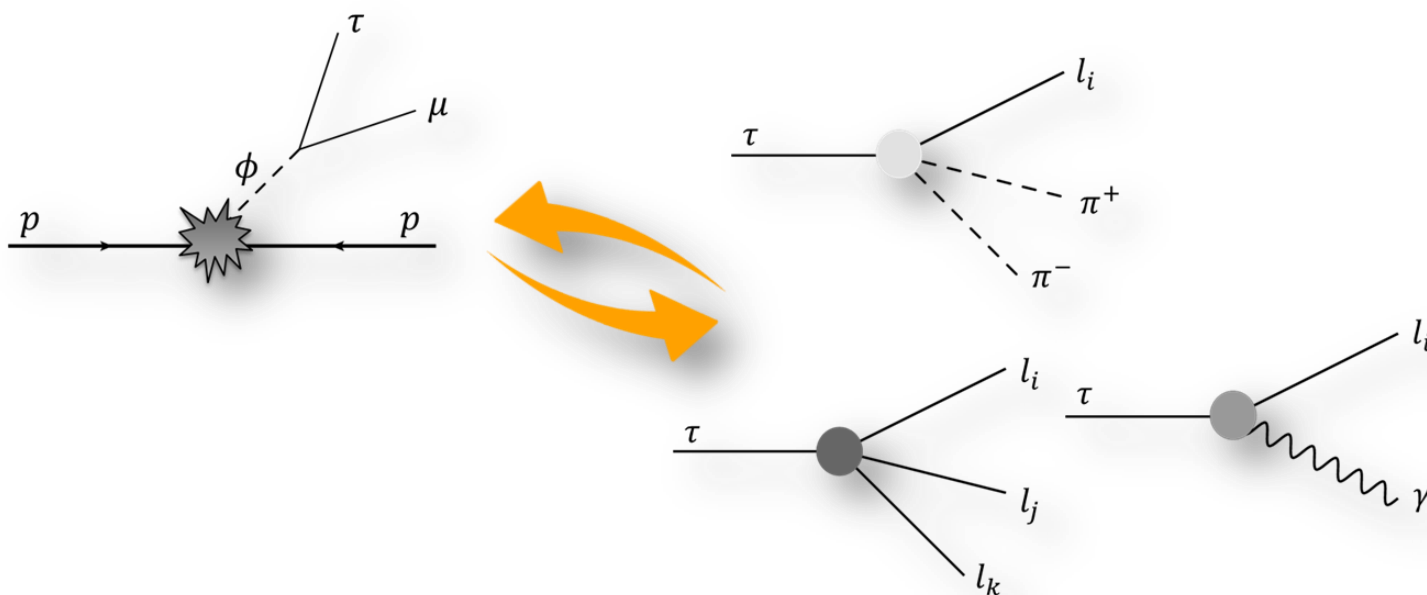
J. Daub, H. Dreiner, C. Hanhart, B. Kubis, U. Meibner, JHEP01 (2013)

A. Petrov, D. Zhuridov, PRD89 (2014)

A. Celis, V. Cirigliano, E. Passemar, PRD89 (2014)

# (ヒッグスが経由する)タウLFVの検証に向けて

- ☑ SMヒッグスや新物理の“ヒッグス”によるタウLFVがLHCで見つかった時、相互検証は？

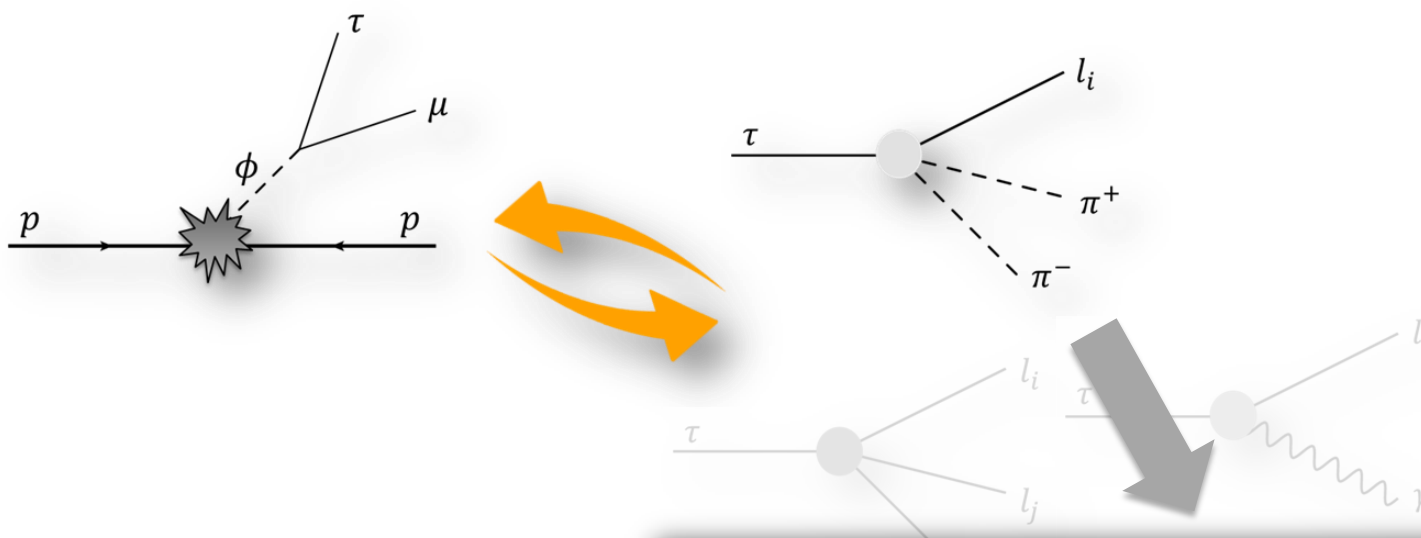


- ☑ Belle-IIでのタウLFV精密測定に向け、タウ崩壊の理論計算も精度向上が必須
- ☑ 特に重要なものはハドロニックLFV崩壊

# (ヒッグスが経由する)タウLFVの検証に向けて

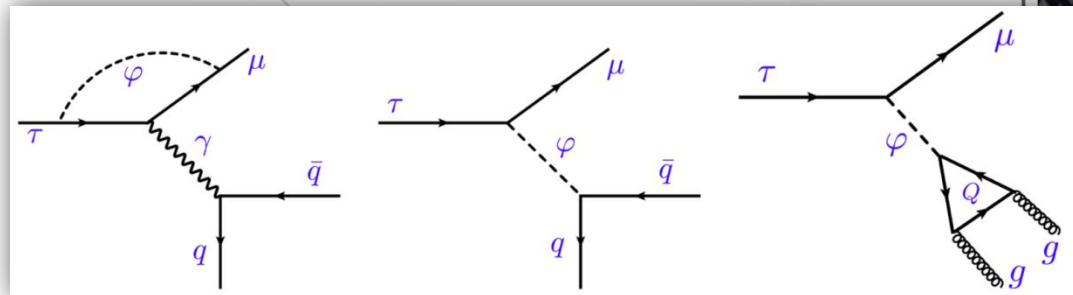
- ☑  $pp \rightarrow h \rightarrow l_i l_j$  と等価な相互作用、かつ、 $\pi$ 対不変質量で photonic dipole ope. も探査可

後で詳しく



- ☑ 進展1：素過程と終状態をつなぐハドロニック行列要素の見直し

- ☑ 進展2：グルーオンとの反応が大きな寄与になり得る



# Matrix element for hadronic LFV decay

## ☑ カイラル摂動論に基づき導かれる行列要素

R. Chivukula, J. Flynn, H. Georgi, PLB171 (1986)  
D. Black, T. Han, H. He, M. Sher, PRD66 (2002)

### ■ ベクトル型演算子

$$\langle 0 | \bar{u} \gamma^\mu u | \rho^0 \rangle = - \langle 0 | \bar{d} \gamma^\mu d | \rho^0 \rangle = i \epsilon^\mu K_\rho, \quad \langle 0 | \bar{s} \gamma^\mu s | \phi \rangle = i \epsilon^\mu K_\phi$$

$$K_\rho = \frac{m_\rho^2}{g_\rho}, \quad K_\phi = \frac{3m_\phi^2}{g_\phi} \quad g_\rho = 5.1, \quad g_\phi = 12.9$$

### ■ スカラー型演算子

$$\langle 0 | \bar{s} s | KK \rangle = \frac{m_K^2}{m_u + m_s}, \quad \langle 0 | \bar{u} u | \pi\pi \rangle = \langle 0 | \bar{d} d | \pi\pi \rangle = \frac{m_\pi^2}{2(m_u + m_d)}$$

### ■ などなど

## ☑ ある程度の移行運動量を持つハドロン化は共鳴を取り入れた行列要素で記述するべき

G. Ecker, J. Gasser, A. Pich, E. Rafael. NPB321 (1989)



# Improvements on Matrix element for tau decay

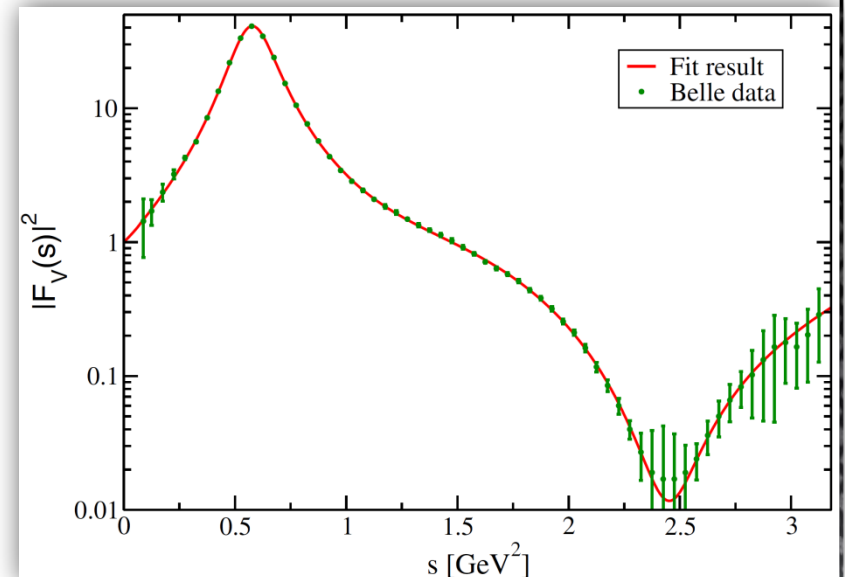
J. Daub, H. Dreiner, C. Hanhart, B. Kubis, U. Meibner, JHEP01 (2013)

A. Celis, V. Cirigliano, E. Passemar, PRD89 (2014)

- ☑  $\tau \rightarrow l\pi^+\pi^-$  に対する dipole ope. の寄与を求めるうえで必要となる行列要素

$$\left\langle \pi^+(p_{\pi^+}) \pi^-(p_{\pi^-}) \left| \frac{1}{2} (\bar{u}\gamma^\alpha u - \bar{d}\gamma^\alpha d) \right| 0 \right\rangle \equiv F_V(s) (p_{\pi^+} - p_{\pi^-})^\alpha$$

- ☑ BelleやBABARにおける  $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$  や  $\tau \rightarrow \nu_\tau \pi\pi$  の測定結果を用いて  $F_V(s)$  を求める



A. Celis, V. Cirigliano, E. Passemar, PRD89 (2014)

# Improvements on Matrix element for tau decay

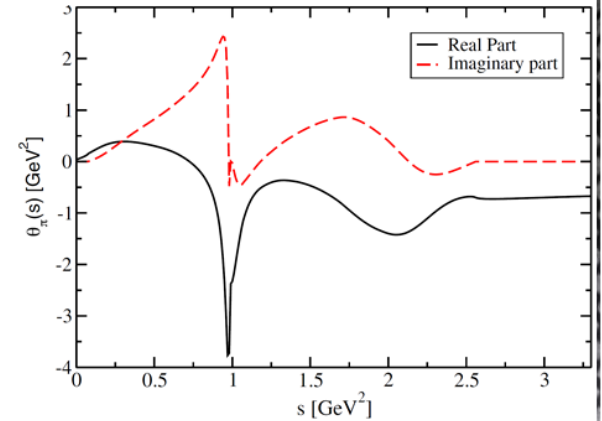
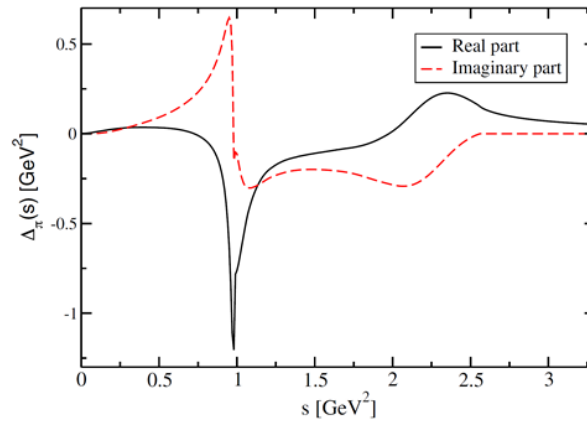
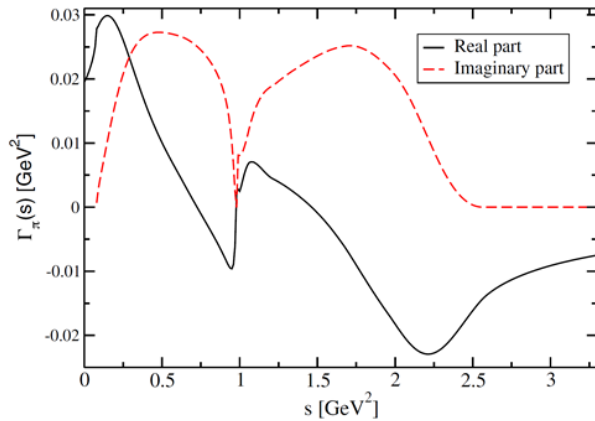
- ☑  $\tau \rightarrow l\pi^+\pi^-$  に対するスカラー型演算子の寄与を求める際に必要となる行列要素

$$\langle \pi^+(p_{\pi^+})\pi^-(p_{\pi^-}) | m_u \bar{u}u + m_d \bar{d}d | 0 \rangle \equiv \Gamma_\pi(s)$$

$$\langle \pi^+(p_{\pi^+})\pi^-(p_{\pi^-}) | m_s \bar{s}s | 0 \rangle \equiv \Delta_\pi(s)$$

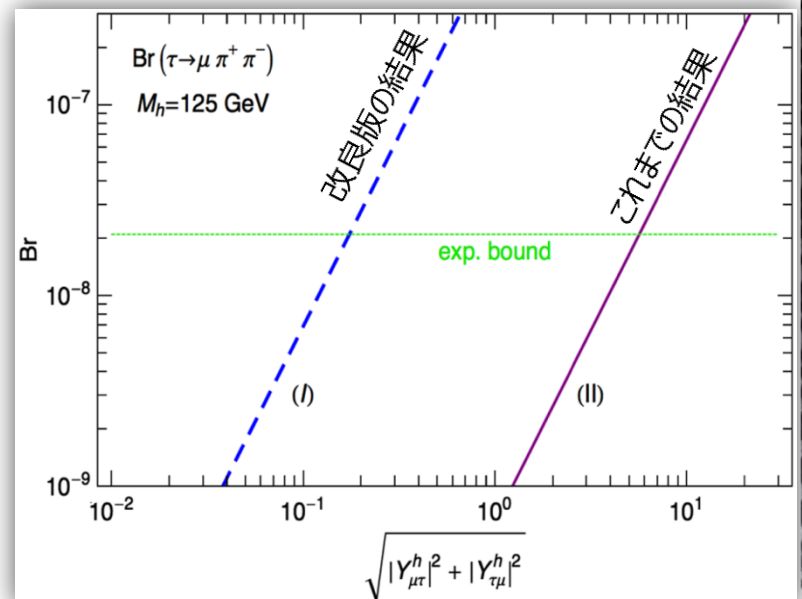
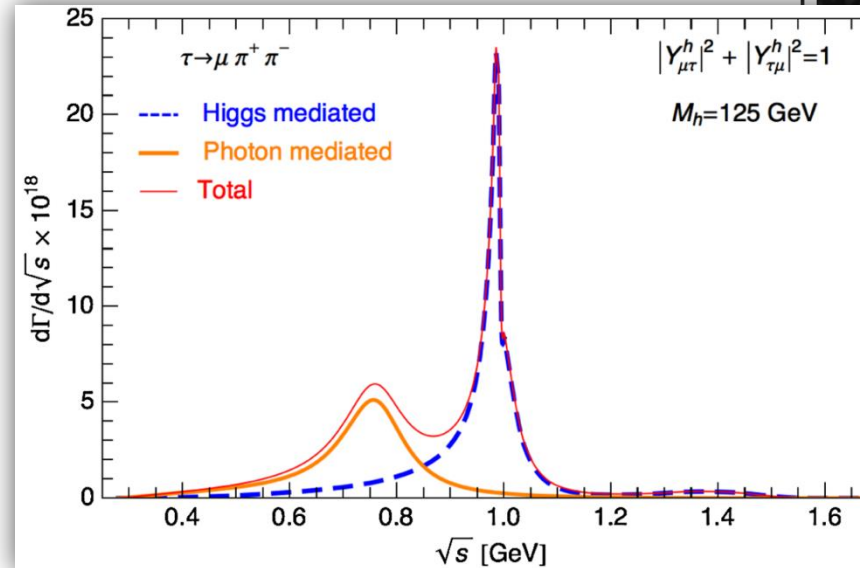
$$\langle \pi^+(p_{\pi^+})\pi^-(p_{\pi^-}) | \theta_\mu^\mu | 0 \rangle \equiv \theta_\pi(s)$$

$$\theta_\mu^\mu = -9 \frac{\alpha_s}{8\pi} G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} + \sum_{q=u,d,s} m_q \bar{q}q$$



# Improvements on Matrix element for tau decay

- ☑ 行列要素の改良により、Dipole型演算子の寄与に  $\rho$  中間子、そして、スカラー型の寄与に  $f_0(980)$  のピークがはっきりと見える
- ☑  $d\Gamma/d\sqrt{s}$  の精密測定で、各演算子の寄与の有無・割合を明らかにし、LFVの起源に迫る
- ☑ 行列要素の改良により、タウLFV崩壊率は大きく上昇。LFV湯川に強い制限。
- ☑ タウLFV崩壊により探れる情報は数多い。行列要素の改善等、今後も丁寧に研究すべき。



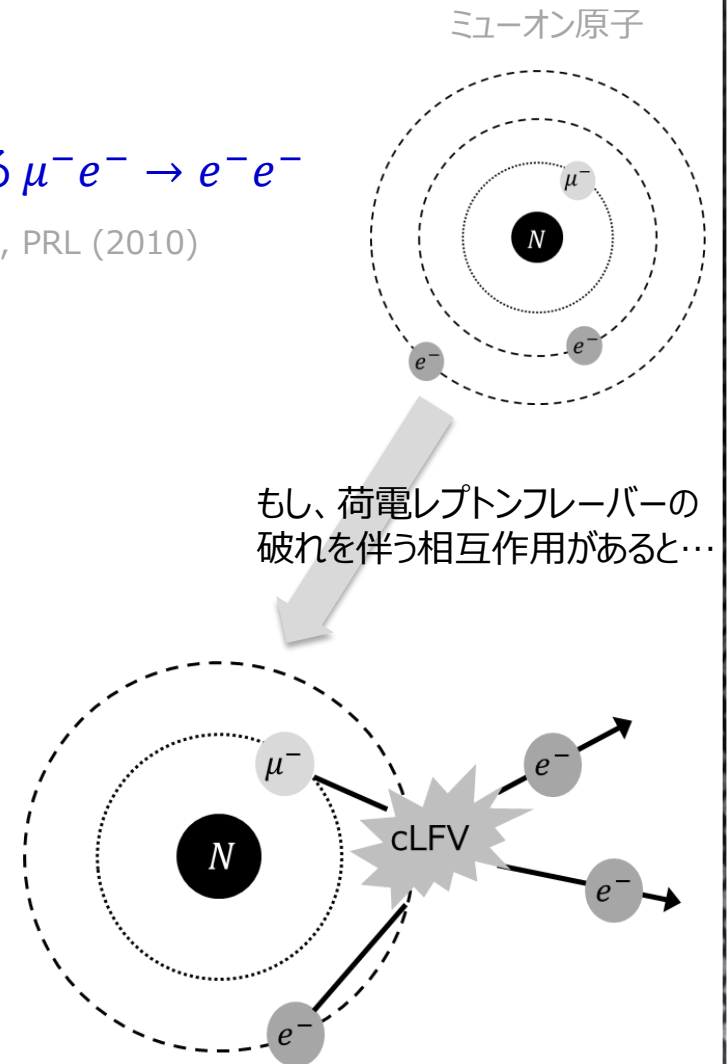
ミュオニック原子を用いた新たなCLFV探索反応

# ミュオン原子中における $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$

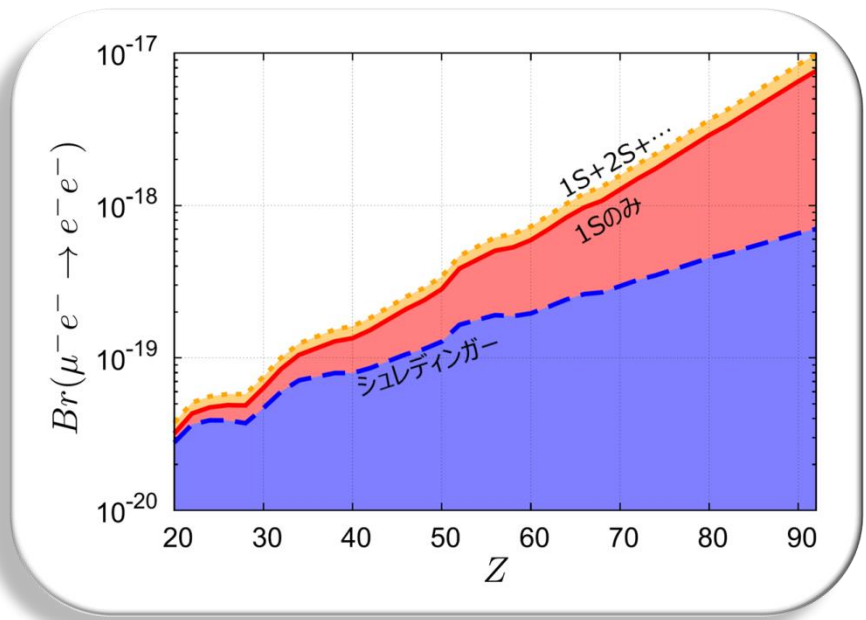
- ☑ CLFVを探る新たな反応: ミュオン原子中における  $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$

M. Koike, Y. Kuno, J. Sato, M.Y., PRL (2010)

- ☑ 様々なタイプのCLFV相互作用を探り出せる
- ☑ 非常に見やすいシグナル:  
(ミュオン質量)/2 のエネルギーを持った電子が互いに逆方向に
- ☑ 未知の相互作用がクォークやグルーオンと繋がっている必要無し
- ☑ 原子核や中間子の物理に含まれる不定性に縁無し



# $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$ の発見にいくつのミュオンが必要か？



( $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$  発見のため少なくとも必要なミュオンの数)の逆数

Collaboration	Searching for	Intensity
MEG	$\mu \rightarrow e\gamma$	$10^{7.5} \mu/s$
MUSIC	$\mu \rightarrow 3e$	$10^8 \mu/s$
COMET	$\mu^- N \rightarrow e^- N$	$10^{11} \mu/s$
Mu2E (E973)	$\mu^- N \rightarrow e^- N$	$10^{11} \mu/s$
PRISM	$\mu^- N \rightarrow e^- N$	$10^{12} \mu/s$

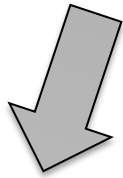
- ☑ 軽い原子核( $Z \lesssim 20$ )であれば、波動関数の歪み等をそれほど気にしなくて良い
- ☑ 重い原子核の場合、強いクーロン場により波動関数が原子核方向に引き寄せられ、それらの重なりで計算される反応率が増大
- ☑ 鉛の場合:  
少なくとも $\sim 3 \times 10^{17}$ 個のミュオンが必要  
シュレディンガー近似の場合、 $\sim 2 \times 10^{18}$ 個
- ☑ 近い将来の実験で発見が期待できる

$\mu \rightarrow 3e$ に寄与するZ boson dipole operator ?

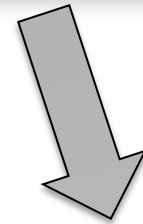
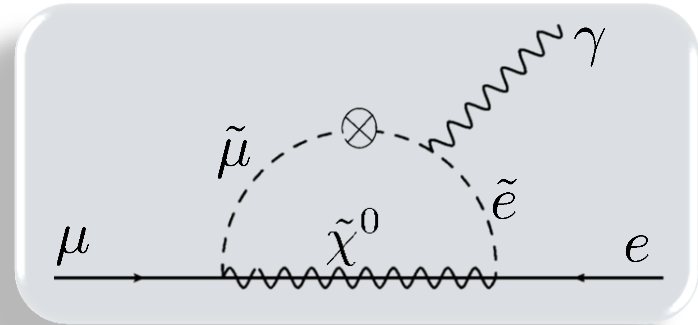
# CLFV in SUSY models

- ☑ スレプトン質量の世代構造  $\neq$  荷電レプトン湯川の世代構造
- ☑ 荷電レプトンを質量固有状態に回すと、スレプトン質量に非対角成分

$$\mathbf{m}_{\mathbf{L}}^2 = \begin{pmatrix} m_{\tilde{e}\tilde{e}}^2 & \Delta m_{\tilde{e}\tilde{\mu}}^2 & \Delta m_{\tilde{e}\tilde{\tau}}^2 \\ \Delta m_{\tilde{\mu}\tilde{e}}^2 & m_{\tilde{\mu}\tilde{\mu}}^2 & \Delta m_{\tilde{\mu}\tilde{\tau}}^2 \\ \Delta m_{\tilde{\tau}\tilde{e}}^2 & \Delta m_{\tilde{\tau}\tilde{\mu}}^2 & m_{\tilde{\tau}\tilde{\tau}}^2 \end{pmatrix}$$



- ☑ 超対称性の破れの伝達機構や右巻きニュートリノの質量に感度
- ☑ (一般的には)LHCでは測定困難



- ☑  $l_i \rightarrow l_j \gamma$  が最も大きなCLFVとなる



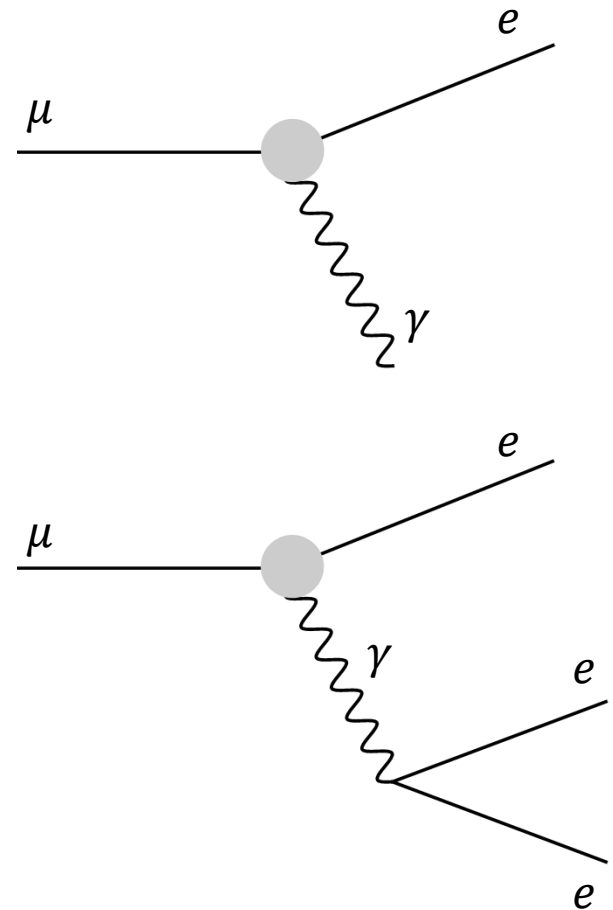
# Correlation between $\mu \rightarrow e\gamma$ and $\mu \rightarrow 3e$

☑ 素朴に考えると、 $\text{BR}(\mu \rightarrow 3e) \ll \text{BR}(\mu \rightarrow e\gamma)$

☑ また、 $Z_\mu e^+ e^-$  のカップリングと  $Z$  のプロパゲーターの抑圧により、 $\mu \rightarrow 3e$  に  $Z$  ボソンの寄与はほぼ無く、BR同士にシンプルな関係式

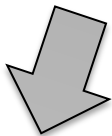
$$\text{Br}(l_i \rightarrow 3l_j) \simeq \frac{\alpha}{3\pi} \left( \log\left(\frac{m_{l_i}^2}{m_{l_j}^2}\right) - \frac{11}{4} \right) \text{Br}(l \rightarrow l' \gamma)$$

☑ この関係式の確認がSUSY模型の検証と言っても過言ではなかった



# Correlation between $\mu \rightarrow e\gamma$ and $\mu \rightarrow 3e$

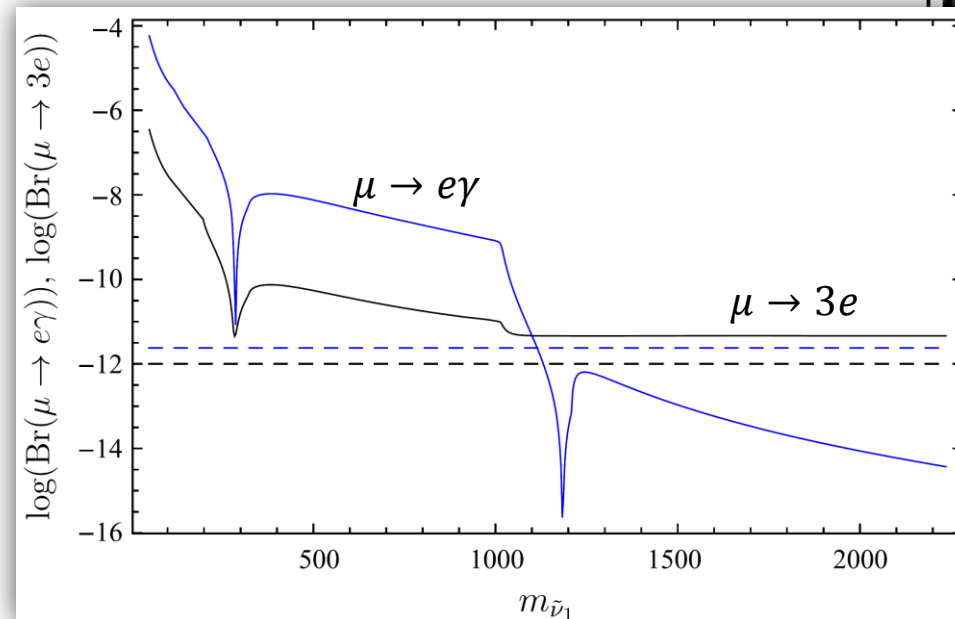
- ☑ Zボソンの寄与が小さいのは絶妙なキャンセルのせいだ。  
わずかなきっかけにより、Zボソンの寄与が増大し、 $\text{BR}(\mu \rightarrow 3e) > \text{BR}(\mu \rightarrow e\gamma)$  となる



M. Hirsch, F. Staub, A. Vicente, PRD85 (2012)

- ☑ 右巻きスニュートリノと左巻きスニュートリノの混合
- ☑ Rパリティの破れ、などなど

- ☑ 例：左右スニュートリノの混合により、 $\text{BR}(\mu \rightarrow 3e) > \text{BR}(\mu \rightarrow e\gamma)$  となり得る
- ☑ SUSY検証において大きなインパクト。  
パブリックコードにも取り入れられたようだ



# Correlation between $\mu \rightarrow e\gamma$ and $\mu \rightarrow 3e$

- ❑ Zボソンの寄与が小さいのは絶妙なキャンセルのせいだ。  
わずかなきっかけにより、Zボソンの寄与が増大し、 $BR(\mu \rightarrow 3e) > BR(\mu \rightarrow e\gamma)$  となる

M. Hirsch, F. Staub, A. Vicente, PRD85 (2012)

PHYSICAL REVIEW D **91**, 059902(E) (2015)

## **Erratum: Enhancing $l_i \rightarrow 3l_j$ with the $Z^0$ -penguin [Phys. Rev. D **85**, 113013 (2012)]**

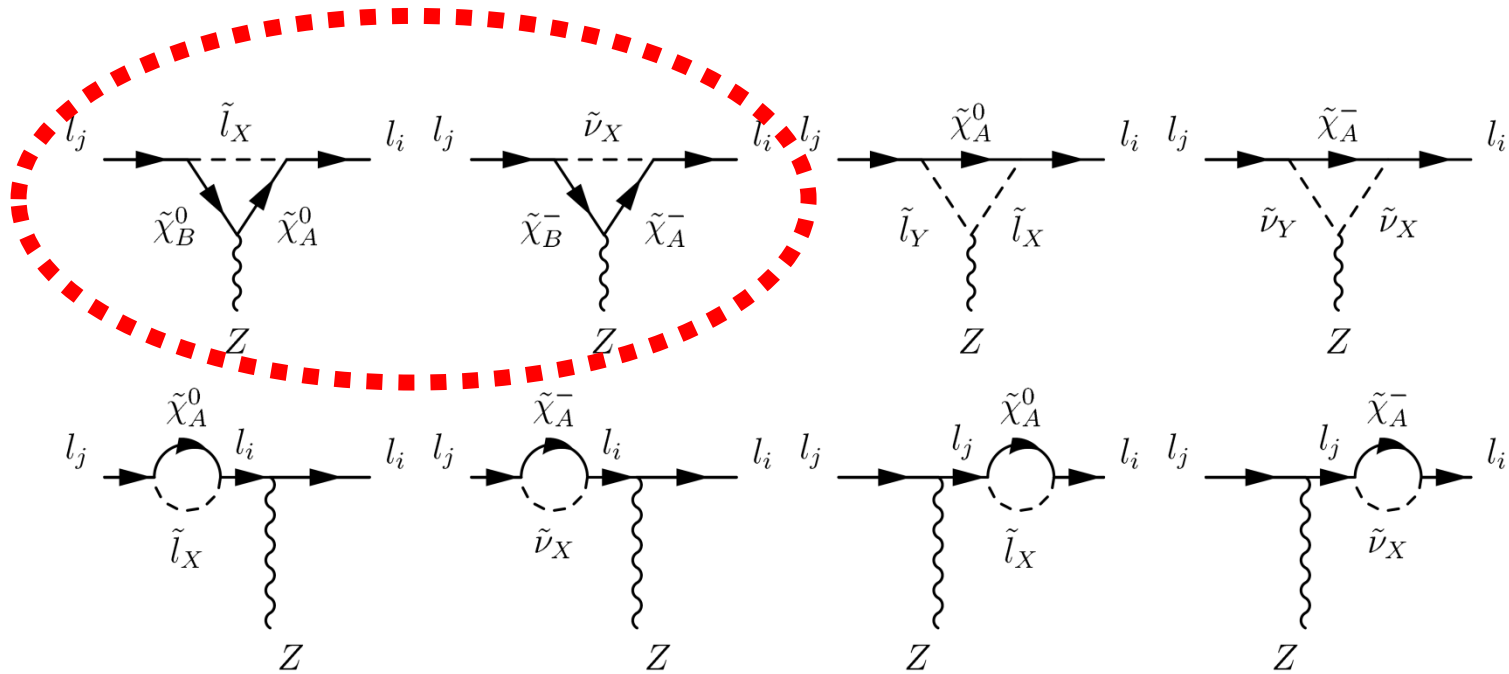
M. Hirsch, F. Staub, and A. Vicente

(Received 24 February 2015; published 10 March 2015)

The enhancement of lepton flavor violation rates due to Z-penguins observed in Ref. [1] was a consequence of an error in the literature. Correcting this error, the effect is gone.

- ❑ 単純な計算ミスであったことが判明

# Correlation between $\mu \rightarrow e\gamma$ and $\mu \rightarrow 3e$



- ❑  $\tilde{l}\tilde{\chi}\tilde{\chi}$  のトライアングルループ計算においてミスが判明。いくつかの研究で検証済。

E. Arganda, M. Herrero, arXiv:1403.6161 など

- ❑ 先行研究においてHigh scale seesawでは落とせることが示されていた定数項を、他の拡張シナリオにおいても落としてしまったがゆえに生じた計算ミスだったようだ

- ❑ SUSY模型では、やはり、 $BR(\mu \rightarrow 3e) \ll BR(\mu \rightarrow e\gamma)$

まとめ

# まとめ

- ☑ CLFVは世代の謎や新物理を多角的に、かつ、標準模型由来の不定性無く探り出すプローブ
- ☑ TeVスケール粒子がもたらすCLFVがLHCで探索されたが、発見には至らず。  
現状、 $\mu e$ フレーバーの破れに対してはLHCより  $\mu^- - e^-$  転換探索実験などが大幅リード。
- ☑ CLFV湯川相互作用もLHCで探索中。 $h \rightarrow \mu\tau$  の報告があったが、どうやら誤報。  
タウCLFV湯川相互作用に対してはLHCが現在最も高感度。来年以降の発見に期待。
- ☑ タウCLFVを探るうえでタウのハドロニックCLFV崩壊モードが重要。  
素過程とハドロンをつなぐ行列要素の改良により、関係するパラメーターの制限は大きく変動。
- ☑ ミューオンCLFVを探る新たな反応が提案された： $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$  in muonic atom
- ☑ SUSY模型における $\mu \rightarrow e\gamma$ と $\mu \rightarrow 3e$ の相関がZボソンの寄与で大きく歪むという研究が行われた。  
後に計算ミスであったことが判明。SUSY模型ではやはり $BR(\mu \rightarrow 3e) \ll BR(\mu \rightarrow e\gamma)$

Backup slides

# $h \rightarrow \tau\mu$ @LHC

Event yields in the signal region,  $100 < M_{\text{col}} < 150$  GeV after fitting for signal and background. The expected contributions are normalized to an integrated luminosity of  $19.7 \text{ fb}^{-1}$ . The LFV Higgs boson signal is the expected yield for  $B(H \rightarrow \mu\tau) = 0.84\%$  with the SM Higgs boson cross section.

Sample	$H \rightarrow \mu\tau_h$			$H \rightarrow \mu\tau_e$		
	0-Jet	1-Jet	2-Jet	0-Jet	1-Jet	2-Jet
Misidentified leptons	$1770 \pm 530$	$377 \pm 114$	$1.8 \pm 1.0$	$42 \pm 17$	$16 \pm 7$	$1.1 \pm 0.7$
$Z \rightarrow \tau\tau$	$187 \pm 10$	$59 \pm 4$	$0.4 \pm 0.2$	$65 \pm 3$	$39 \pm 2$	$1.3 \pm 0.2$
ZZ, WW	$46 \pm 8$	$15 \pm 3$	$0.2 \pm 0.2$	$41 \pm 7$	$22 \pm 4$	$0.7 \pm 0.2$
$W\gamma$	–	–	–	$2 \pm 2$	$2 \pm 2$	–
$Z \rightarrow ee$ or $\mu\mu$	$110 \pm 23$	$20 \pm 7$	$0.1 \pm 0.1$	$1.6 \pm 0.7$	$1.8 \pm 0.8$	–
$t\bar{t}$	$2.2 \pm 0.6$	$24 \pm 3$	$0.9 \pm 0.5$	$4.8 \pm 0.7$	$30 \pm 3$	$1.8 \pm 0.4$
$t\bar{t}$	$2.2 \pm 1.1$	$13 \pm 3$	$0.5 \pm 0.5$	$1.9 \pm 0.2$	$6.8 \pm 0.8$	$0.2 \pm 0.1$
SM H background	$7.1 \pm 1.3$	$5.3 \pm 0.8$	$1.6 \pm 0.5$	$1.9 \pm 0.3$	$1.6 \pm 0.2$	$0.6 \pm 0.1$
Sum of backgrounds	$2125 \pm 530$	$513 \pm 114$	$5.4 \pm 1.4$	$160 \pm 19$	$118 \pm 9$	$5.6 \pm 0.9$
LFV Higgs boson signal	$66 \pm 18$	$30 \pm 8$	$2.9 \pm 1.1$	$23 \pm 6$	$13 \pm 3$	$1.2 \pm 0.3$
Data	2147	511	10	180	128	6

CMS collaboration, PLB749 (2015)



# Search for tau CLFV

