

# レプトンフレーバーの破れを伴う True Muoniumの崩壊

横浜国立大学 大学院理工学府 港遼太郎

共同研究者：佐藤朗(大阪大学), 須田亮介(埼玉大学), 山中真人(法政大学)

Work in Progress

# Lepton Flavor Violation

## LFV(Lepton Flavor Violation)

反応の前後でレプトンフレーバーが非保存

→標準模型を超える新物理 (例：ニュートリノ振動)

## CLFV(Charged Lepton Flavor Violation)

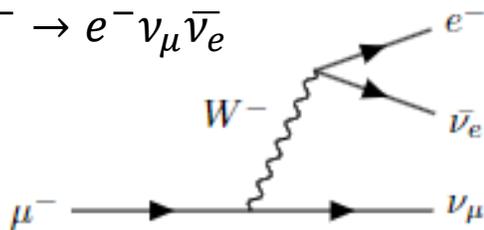
荷電レプトンのLFV反応、見つければ新物理

→実験的に未発見で探索中(COMET, MEG, ...)

$L_\mu: 1 \rightarrow 0$   
 $L_e: 0 \rightarrow 1$  **LFV!**

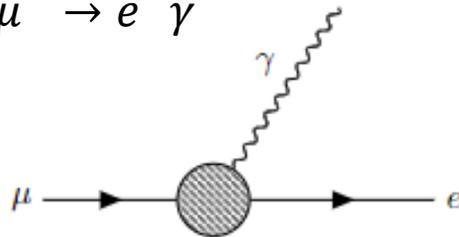
標準模型

$$\mu^- \rightarrow e^- \nu_\mu \bar{\nu}_e$$

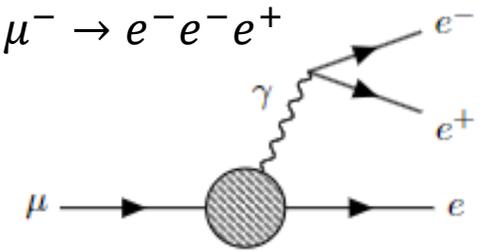


CLFV

$$\mu^- \rightarrow e^- \gamma$$

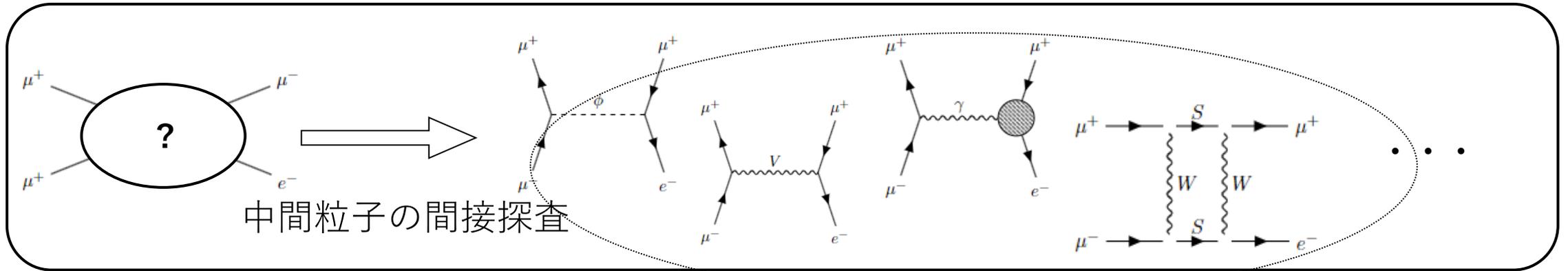


$$\mu^- \rightarrow e^- e^- e^+$$



# 動機・目的

LFVが見えたとして、背景物理をどのように特定するか？



$\mu \rightarrow e\gamma$   
 $\mu \rightarrow 3e$   
 $\mu - e$  転換  
...

その他のLFV反応と比較して有力な媒介粒子を特定

→ 比較のためのLFV反応は多ければ多いほど良い

**新しいLFV反応( $\mu^+\mu^-$ )  $\rightarrow \mu^+e^-$  を考案**

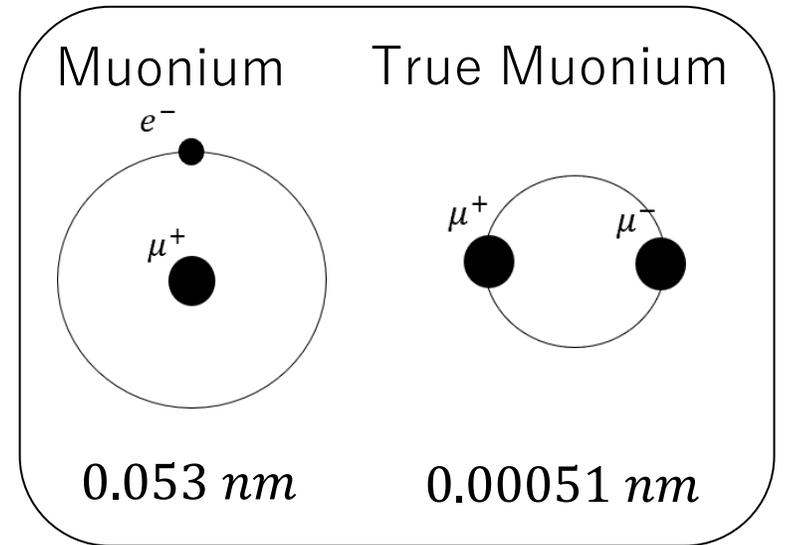
$\mu\mu e$  演算子についての評価はこれまで行われていない！

# True Muoniumについて

## True Muonium : $\mu^+ \mu^-$ の束縛状態

(Muonium:  $\mu^+ e^-$  の束縛状態)

→ True Muoniumの崩壊過程に注目



・ 実験的に未発見

→ 複数の生成過程が考案中 (コライダー衝突より現実的?)

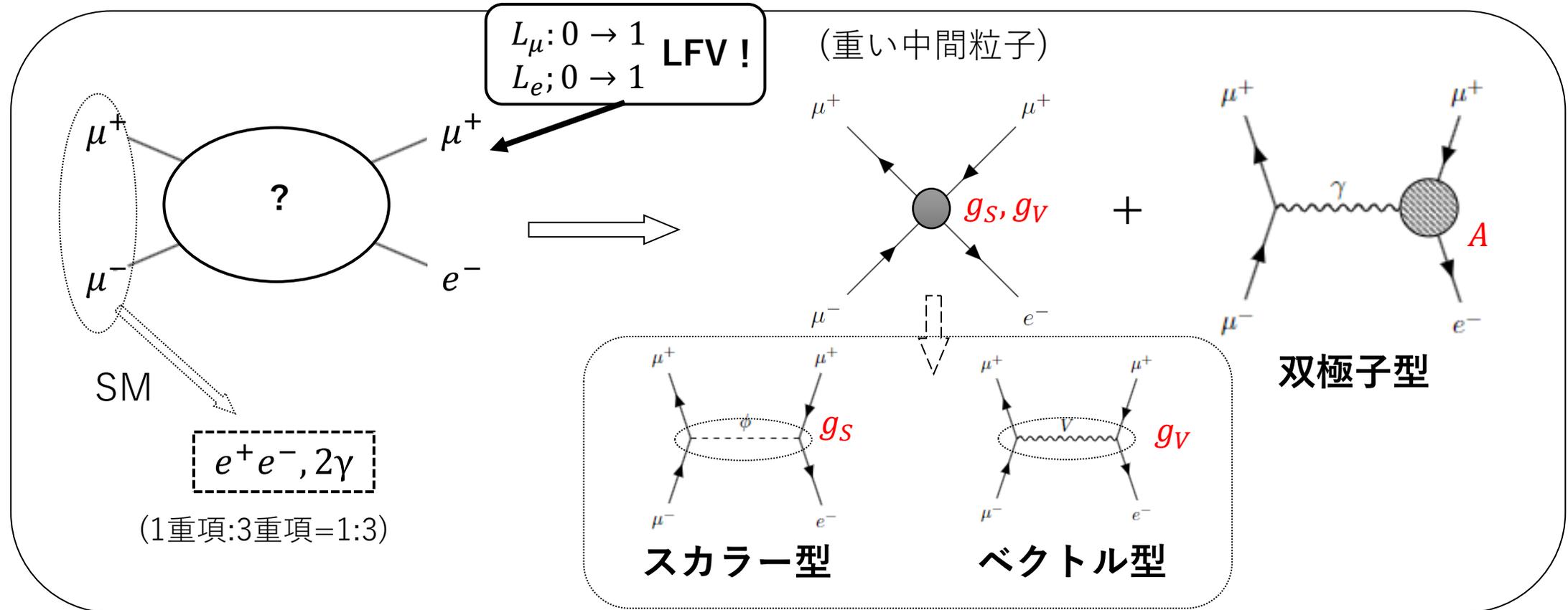
### True Muonium生成過程の候補

- 1 : ミューオンの質量エネルギー程度の $e^+e^-$ の加速器衝突 ( $e^+e^- \rightarrow (\mu^+\mu^-)$ ) [1]
- 2 : 固定原子と電子の衝突 ( $eZ \rightarrow (\mu^+\mu^-) X$ , Jlab HPS, CERN DIRAC) [2]
- 3 : メソンの崩壊 ( $\eta \rightarrow (\mu^+\mu^-)\gamma$ ,  $K_L \rightarrow (\mu^+\mu^-)\gamma$ ) [3](LHCb)
- 4 : 低エネルギー $\mu^+\mu^-$ 衝突 ( $\mu^+\mu^- \rightarrow (\mu^+\mu^-)\gamma$ ,  $\gamma\mu^+\mu^- \rightarrow (\mu^+\mu^-)2\gamma$ ,  $\mu^+\mu^-\mu^+ \rightarrow (\mu^+\mu^-)\gamma$ ) [4]

- 背景(LFV, True Muonium)
- **研究内容(模型, 制限)**
- 計算結果(分岐比の上限)

# 以下の3つの中間粒子の型を仮定

- ・ スカラー型、ベクトル型、双極子型



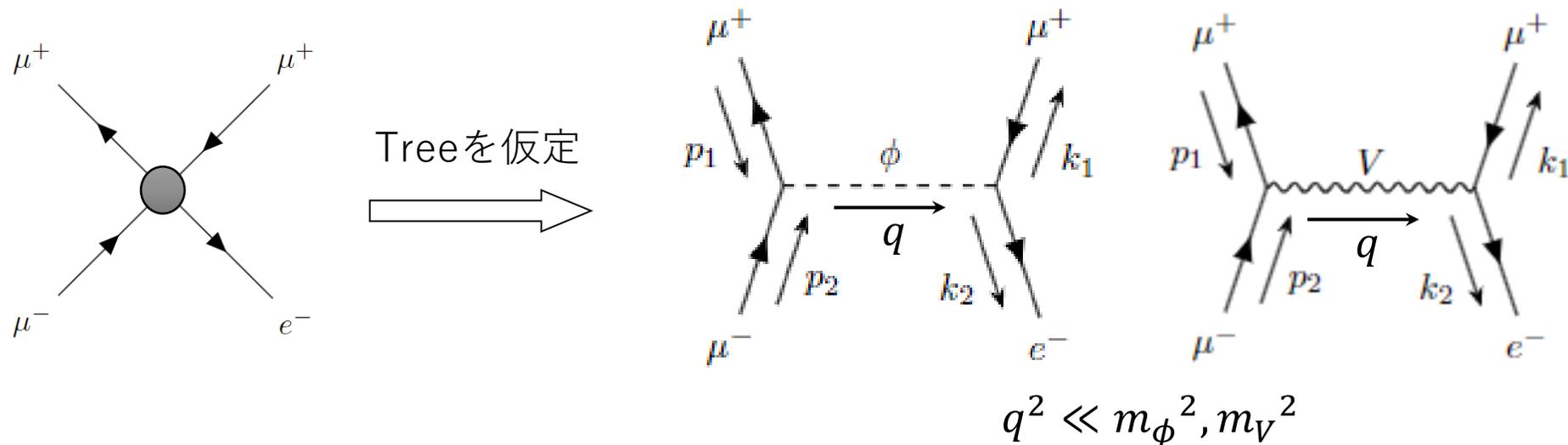
独立な結合定数  $g_s, g_v, A$  に対する分岐比の依存性を評価

↓ カイラリティ(L,R)

$(g_{SLL}, g_{SRR}, g_{VLL}, g_{VRR}, g_{VRL}, g_{VLR}, A_L, A_R)$

# スカラー、ベクトル型演算子(4fermi)

中間状態が十分に重いと接触相互作用とみなせる



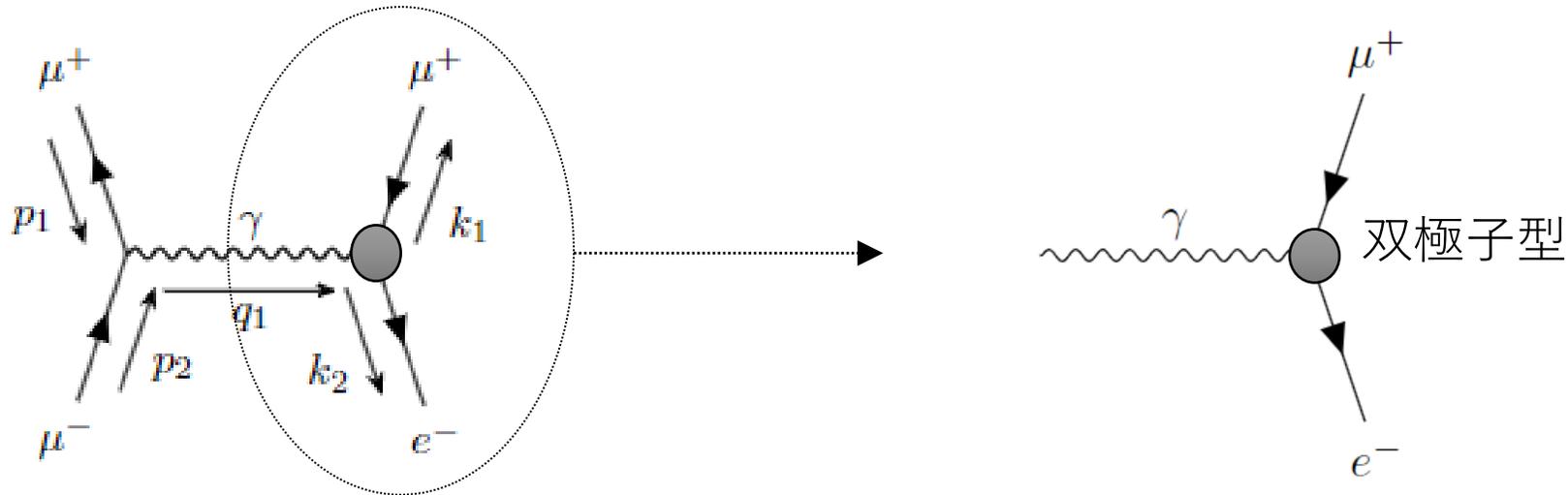
$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{(S)} \supset -\frac{1}{\Lambda^2} [g_{SLL}(\bar{\psi}_\mu P_L \psi_\mu)(\bar{\psi}_e P_L \psi_e) + g_{SRR}(\bar{\psi}_\mu P_R \psi_\mu)(\bar{\psi}_e P_R \psi_e)]$$

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{(V)} \supset -\frac{1}{\Lambda^2} [g_{VLL}(\bar{\psi}_e \gamma^\mu P_L \psi_e)(\bar{\psi}_\mu \gamma_\mu P_L \psi_\mu) + g_{VRR}(\bar{\psi}_e \gamma^\mu P_R \psi_e)(\bar{\psi}_\mu \gamma_\mu P_R \psi_\mu) \\ + g_{VRL}(\bar{\psi}_e \gamma^\mu P_R \psi_e)(\bar{\psi}_\mu \gamma_\mu P_L \psi_\mu) + g_{VLR}(\bar{\psi}_e \gamma^\mu P_L \psi_e)(\bar{\psi}_\mu \gamma_\mu P_R \psi_\mu)]$$

# 双極子型演算子

双極子型演算子+ゲージ相互作用

$\mu \rightarrow e\gamma$ を引き起こす双極子型のループを検証



$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{(D)} \supset -e\bar{\psi}_\mu\gamma^\mu A_\mu\psi_\mu - \frac{v_{\text{Higgs}}}{\Lambda^2} (A_L\bar{\psi}_e\sigma^{\mu\nu}P_L\psi_\mu F_{\mu\nu} + A_R\bar{\psi}_e\sigma^{\mu\nu}P_R\psi_\mu F_{\mu\nu})$$

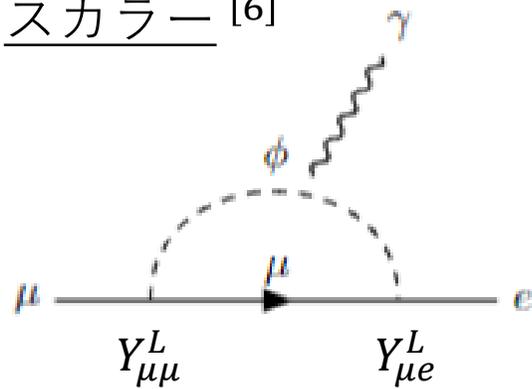
$\rightarrow g_{SLL}, g_{SRR}, g_{VLL}, g_{VRR}, g_{VRL}, g_{VLR}, A_L, A_R$  について分岐比への依存性を評価

# MEG実験からの制限

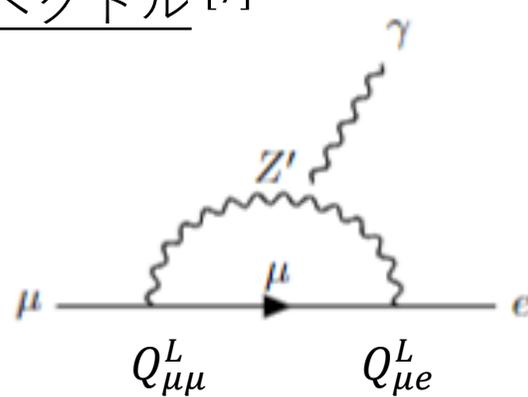
MEG+MEG II 実験 [5] からの制限

$$BR(\mu \rightarrow e\gamma) < 3.1 \times 10^{-13}$$

スカラー [6]

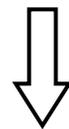


ベクトル [7]



$$\mathcal{L}_{Sint} = -\bar{\psi}_i Y_{ij} \psi_j \phi + h.c.$$

$$\mathcal{L}_{Vint} = -\bar{\psi}_i Q_{ij} \gamma^\mu \psi_j Z'_\mu + h.c.$$

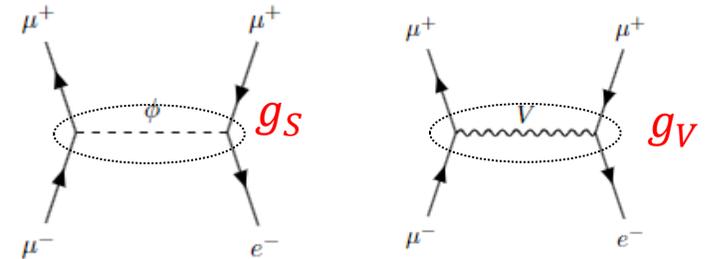


(4felmiに対応)

$$\frac{g_{SLL}}{\Lambda^2} = \frac{Y_{\mu e}^L Y_{\mu\mu}^L}{m_\phi^2}$$

$$\frac{g_{VLL}}{\Lambda^2} = \frac{Q_{\mu e}^L Q_{\mu\mu}^L}{m_{Z'}^2}$$

$(\mu^+ \mu^-) \rightarrow \mu^+ e^-$  の制限



$$g_{SLL}^2 + g_{SRR}^2 \lesssim 3.35 \times 10^{-10}$$

$$g_{VLL}^2 + g_{VRR}^2 \lesssim 2.18 \times 10^{-7}$$

$$g_{VLR}^2 + g_{VRL}^2 \lesssim 2.42 \times 10^{-8}$$

$$(\Lambda \sim 1 [\text{TeV}])$$

- 背景(LFV, True Muoniumについて)
  - 研究内容(模型, 制限)
  - **計算結果(分岐比の上限)**

# 分岐比の評価

分岐比(→他の定数を0とした場合の依存性に着目)

$$\begin{aligned} BR(\mu^+\mu^- \rightarrow \mu^+e^-) &= \frac{\Gamma(\mu^+\mu^- \rightarrow \mu^+e^-)}{\Gamma(\mu^+\mu^-)} \\ &= \left(\frac{1[\text{TeV}]}{\Lambda[\text{TeV}]}\right)^4 [6.59 \times 10^{-16}(|g_{SLL}|^2 + |g_{SRR}|^2) + 3.89 \times 10^{-14}(|g_{VLL}|^2 + |g_{VRR}|^2) \\ &\quad + 3.59 \times 10^{-14}(|g_{VLR}|^2 + |g_{VRL}|^2) + 8.44 \times 10^{-8}(|A_L|^2 + |A_R|^2) + (\text{干渉項})] \end{aligned}$$

MEG+MEG II 実験 [5]からの制限

$$BR(\mu \rightarrow e\gamma) < 3.1 \times 10^{-13}$$

↓ ( $\Lambda \sim 1[\text{TeV}]$ )

$$\begin{aligned} \underline{g_{SLL}^2 + g_{SRR}^2 \lesssim 3.35 \times 10^{-10}, \quad g_{VLL}^2 + g_{VRR}^2 \lesssim 2.18 \times 10^{-7}} \\ \underline{g_{VLR}^2 + g_{VRL}^2 \lesssim 2.42 \times 10^{-8}, \quad A_L^2 + A_R^2 \lesssim 10^{-20}} \end{aligned}$$

# 結論

## 各結合定数の分岐比の上限値

$$A_L \rightarrow BR(\mu\mu \rightarrow \mu e) < 10^{-27}$$

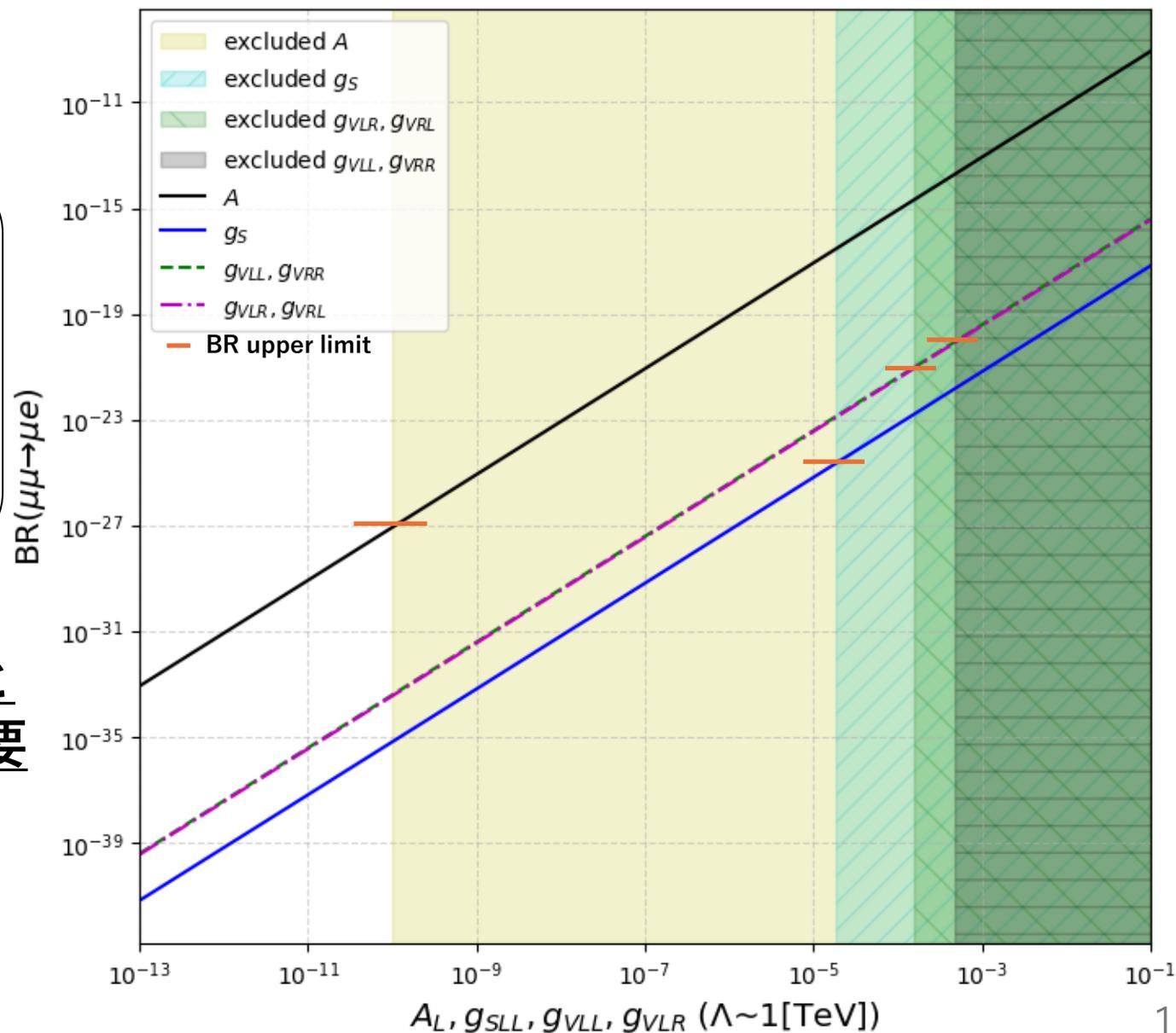
$$g_S \rightarrow BR(\mu\mu \rightarrow \mu e) < 10^{-25}$$

$$g_{VLR}, g_{VRL} \rightarrow BR(\mu\mu \rightarrow \mu e) < 10^{-21}$$

$$g_{VLL}, g_{VRR} \rightarrow BR(\mu\mu \rightarrow \mu e) < 10^{-20}$$

→新粒子がtreeで寄与と仮定すると  
最低 $10^{20}$ 個のTrue Muoniumが必要

グラフ:各結合定数に対する分岐比



## まとめ

- True Muonium崩壊過程から新しいLFV反応( $\mu^+\mu^-$ )  $\rightarrow \mu^+e^-$ を考案
- スカラー型、ベクトル型、双極子型の3種の演算子で評価を行った
- LFV反応を見るには最低でも $10^{20}$ 個のTrue Muoniumが必要

## 展望

→制限を弱くして、より少ないTrue Muoniumで検証できないか？

- スカラー、ベクトル： $\mu \rightarrow e\gamma$ で制限されないモデルを探す
- 双極子： $\mu \rightarrow 3e$ から制限されるoff shell光子の場合を加えて計算

# 参考文献

- [1] Ruben Gargiulo and Stefano Palmisano .2023
- [2] Andrzej Banburski and Philip Schuster .2012
- [3] Y. Ji and H. Lamm .2018
- [4] Takahisa ITAHASHI .2015
- [5] The MEGIIcollaboration .2024
- [6] Yuji Omura, Eibun Senaha, Kazuhiro Tobe .2015
- [7] L. Lavoura .2003