

Lepton flavor violating decay of true muonium: $(\mu^+\mu^-) \rightarrow \mu^\pm e^\mp$

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(広島工業大学)
 arXiv:2507.01193

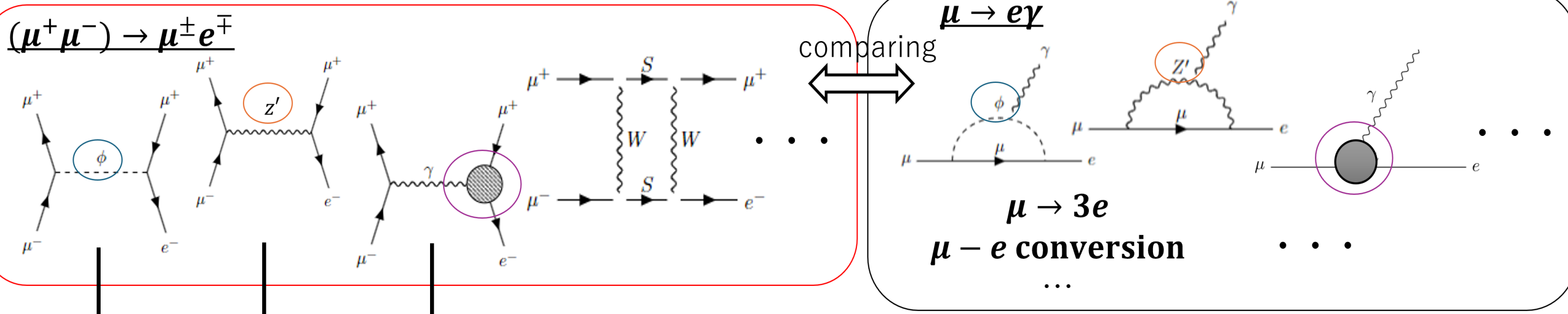
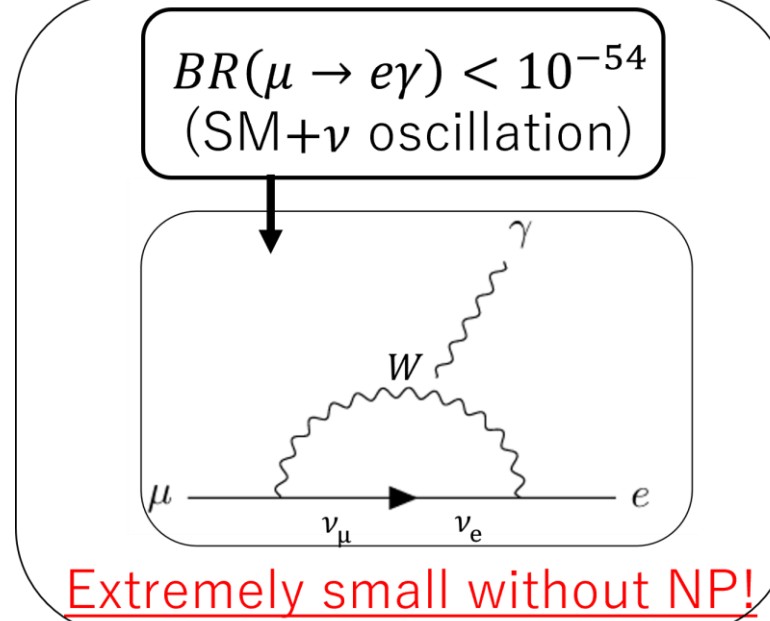
1. Charged Lepton Flavor Violation (CLFV)

Charged Lepton Flavor Violation (CLFV)

荷電レプトンでレプトンフレーバー非保存過程
 → 実験的に未発見で探索中、新物理の証拠
 (MEG, COMET, Mu3e, Mu2e ...)

・動機

CLFV新粒子は終状態に直接表れず、単一の反応での測定が困難



相補的な反応との比較が背景物理の特定に重要

Work: 新しいCLFV過程 $(\mu^+\mu^-) \rightarrow \mu^\pm e^\mp$ を考案

→ Four-Fermi型と双極子型の両方の演算子を同時に考慮

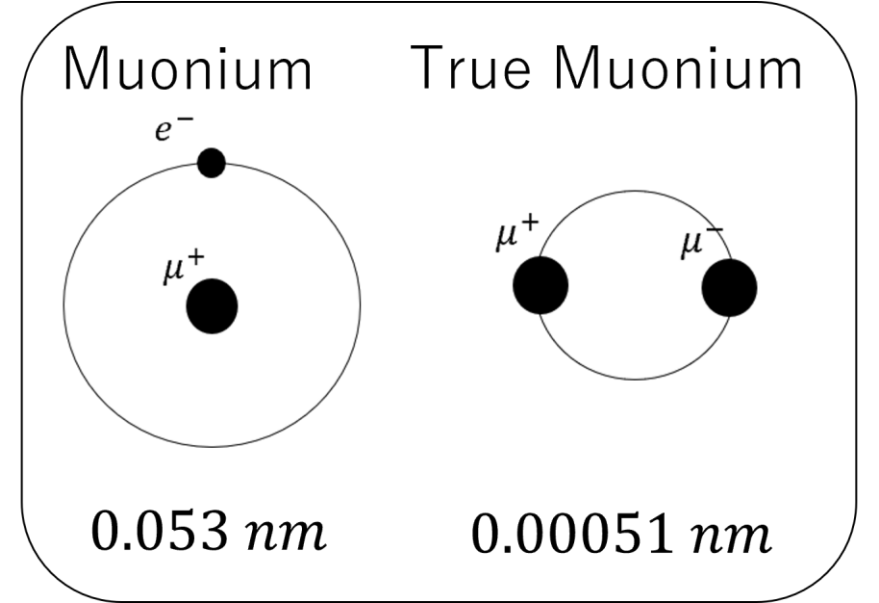
2. True Muonium $(\mu^+\mu^-)$ について

True Muonium $(\mu^+\mu^-)$: $\mu^+\mu^-$ 束縛状態

(Muonium (μ^+e^-) : μ^+e^- 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



生成過程の候補

- コライダーを用いた実験
 - LHCb ($pp \rightarrow \eta X, \eta \rightarrow (\mu^+\mu^-)\gamma$)
 - DIMUS ($\mu^+\mu^- \rightarrow (\mu^+\mu^-)$)
 - Belle II ($e^+e^- \rightarrow (\mu^+\mu^-)$)
- 固定標的実験
 - HPS ($eZ \rightarrow (\mu^+\mu^-)X$)
- 低エネルギーμビームを使用
 - LEMA ($\mu^+\mu^- \rightarrow (\mu^+\mu^-)\gamma$)

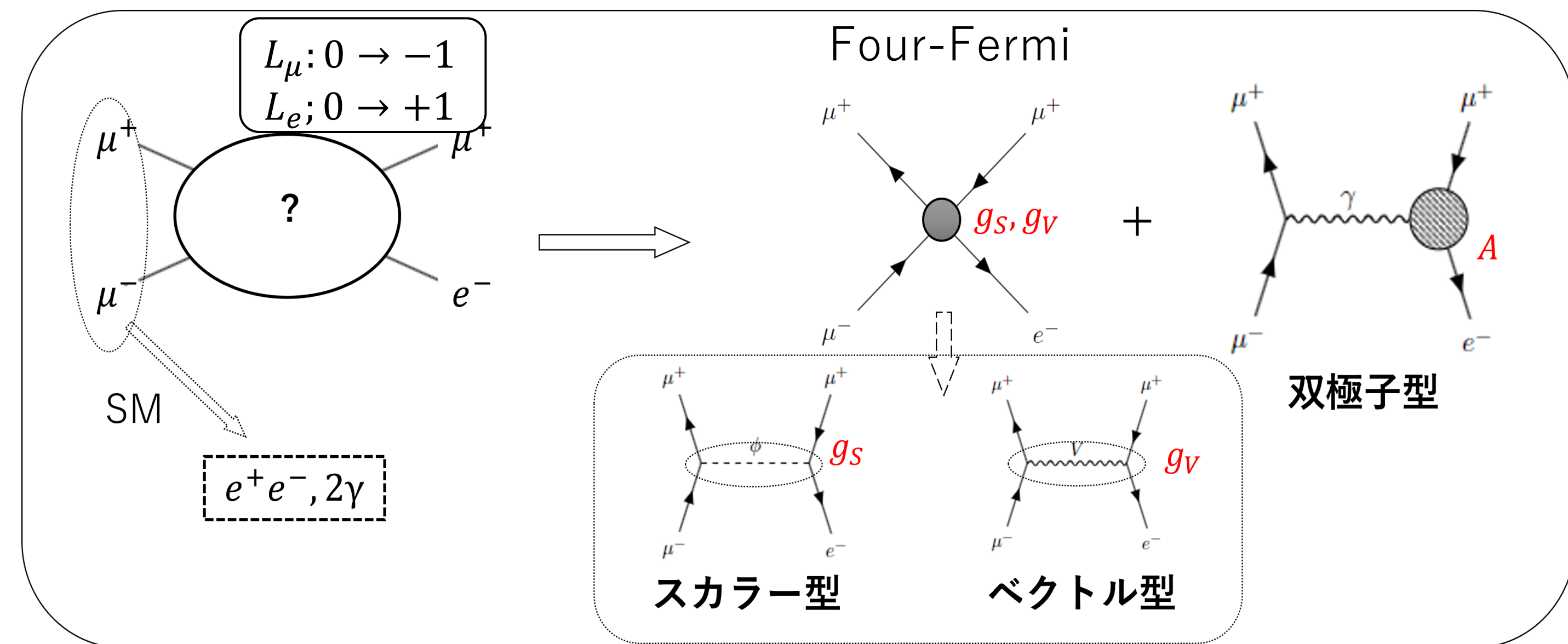
$\mu^+\mu^-$ 衝突と比較した利点

- 明確なシグナル (Back-to-back, $|\mathbf{p}_\mu| \approx 3m_\mu/4, |\mathbf{p}_e| \approx 3m_\mu/4$)
- ミュオン加速技術の成立前に検証可能
- 磁場による多角的検証の可能性 (例 $\mu^+e^- \rightarrow \mu^-e^+$ の転換率)

(K. Horikawa and K. Sasaki, 1996)

3. スカラー、ベクトル、双極子型演算子を用いたCLFV過程の分類

スカラー、ベクトル、双極子型の3つの中間粒子の型を仮定



Four-Fermi (スカラー・ベクトル)型

(Λ : 新物理のスケール)

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

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

双極子型

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

→ 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

4. 計算結果

分岐比 ($m_e \sim 0$)

$$BR(\mu\mu \rightarrow \mu e) = \frac{\Gamma(\mu\mu \rightarrow \mu e)}{\Gamma(\mu\mu)}$$

$$= \left(\frac{1[TeV]}{\Lambda}\right)^4 [6.54 \times 10^{-15} (|g_{SLL}|^2 + |g_{SRR}|^2) + 1.05 \times 10^{-13} (|g_{VLL}|^2 + |g_{VRR}|^2) + 8.93 \times 10^{-14} (|g_{VLR}|^2 + |g_{VRL}|^2) + 4.20 \times 10^{-14} \text{Re}(g_{VLL}g_{VLR}^* + g_{VRR}g_{VRL}^*) + 2.81 \times 10^{-7} (|A_L|^2 + |A_R|^2) + (\text{SVD interference terms})]$$

MEG+MEG II 実験からの制限

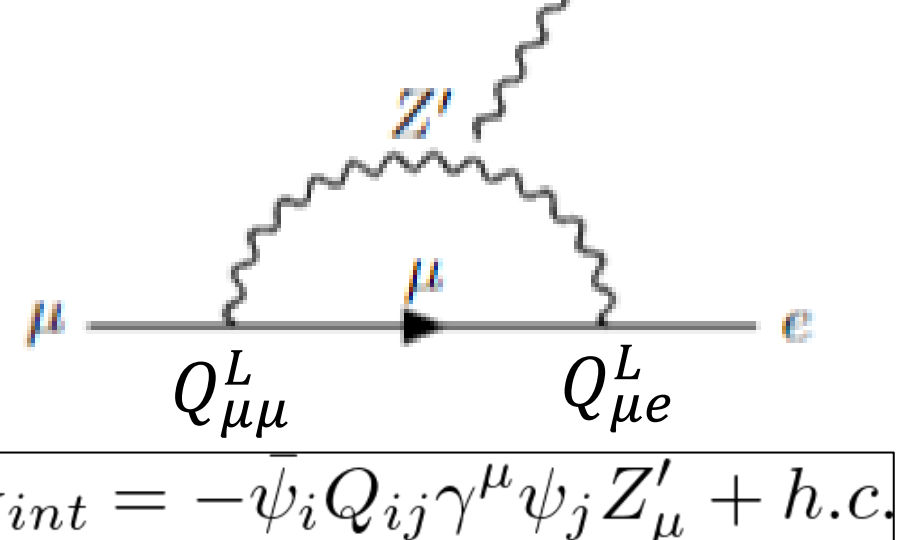
$$BR(\mu \rightarrow e\gamma) < 3.1 \times 10^{-13}$$

(The MEGII collaboration .2024)

$$g_{SLL}^2 + g_{SRR}^2 \lesssim 3.35 \times 10^{-10}, \quad g_V^2 \lesssim 2.72 \times 10^{-8} \text{ (uni)}$$

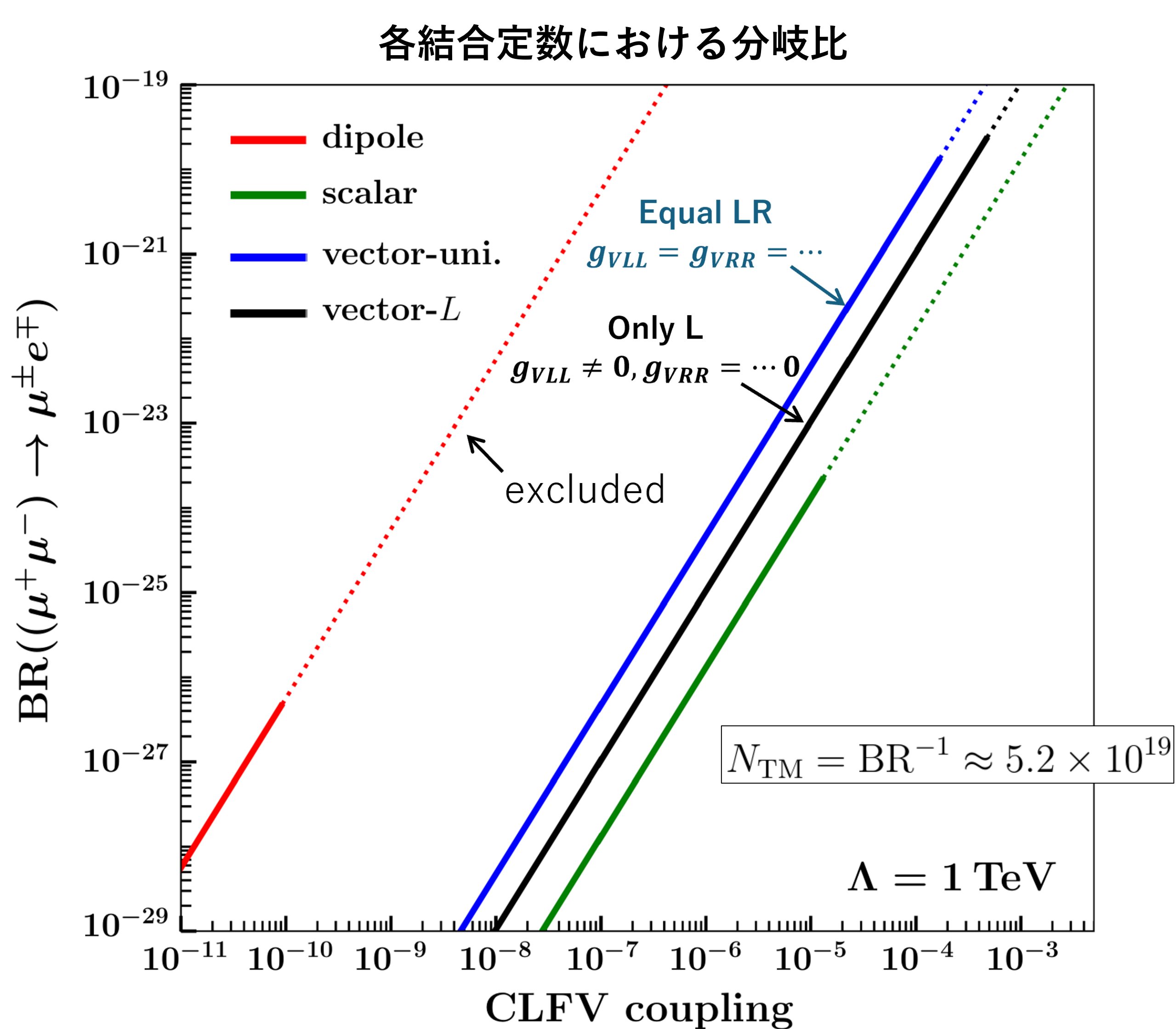
$$g_{VLL}^2 \lesssim 2.18 \times 10^{-7} \text{ (L)}, \quad A_L^2 + A_R^2 \lesssim 1.64 \times 10^{-20}$$

(例) ベクトル制限



$$\mathcal{L}_{int} = -\psi_i Q_{ij} \gamma^\mu \psi_j Z'_\mu + h.c.$$

4-1. 単一の演算子が寄与

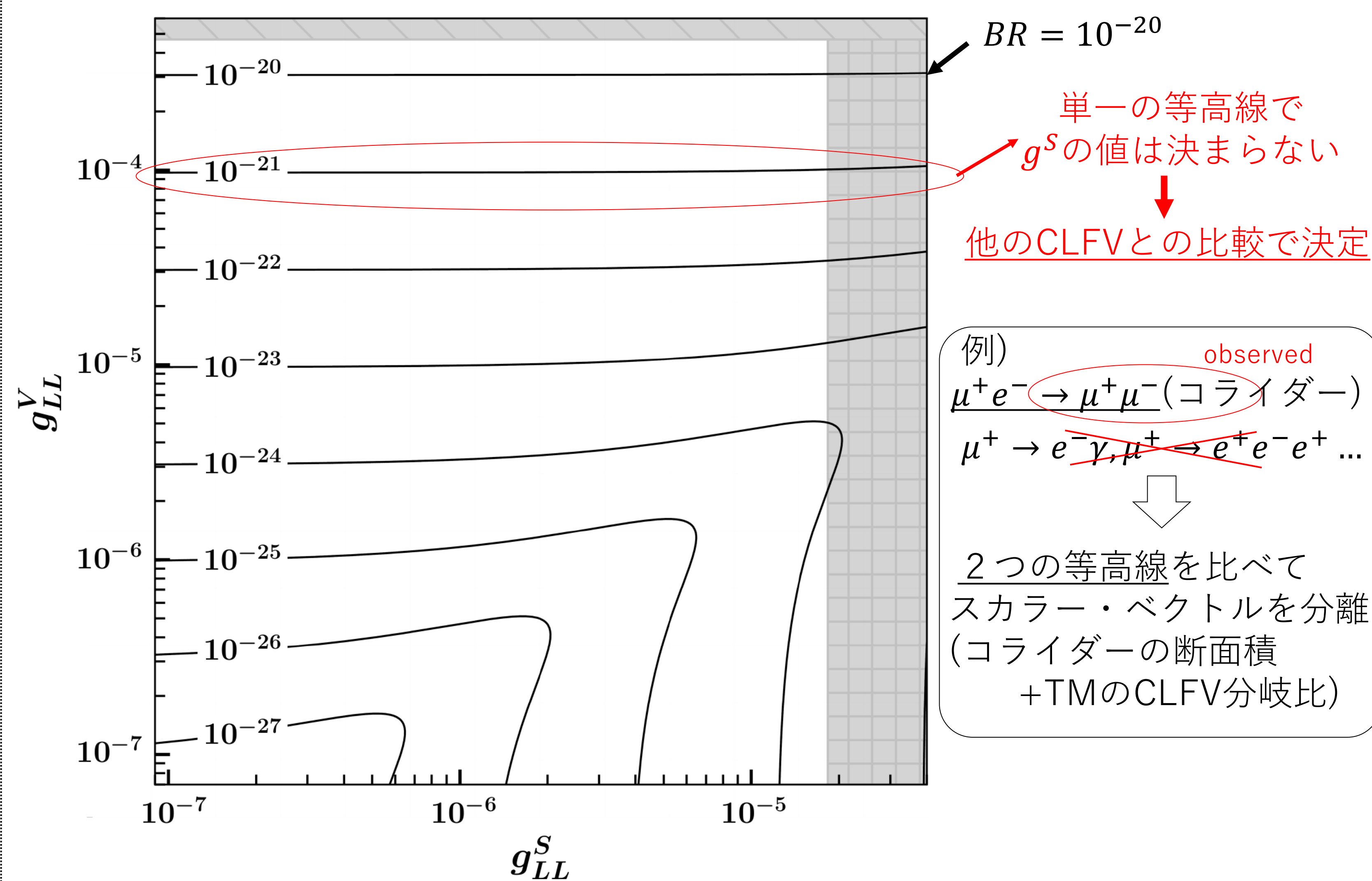


分岐比の上限 $A_L \rightarrow BR \sim 10^{-27}, g_S \rightarrow BR \sim 10^{-24}, g_V \rightarrow BR \sim 10^{-20}$

→ 5.2×10^{19} 個の True Muonium で CLFV の検証ができる可能性

4-2. 二つの演算子が同時に寄与

例) スカラーとベクトルの干渉 (g_{SLL}, g_{VLL} の寄与のみ考慮した分岐比)



(例) $\mu^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ (コライダー)
 $\mu^+ \rightarrow e^-\gamma, \mu^+ \rightarrow e^+e^-e^+ \dots$

2つの等高線を比べて
 スカラー・ベクトルを分離
 (コライダーの断面積 + TMのCLFV分岐比)

→ 相補的な過程との比較で個々の演算子の寄与を明らかに

5. まとめと展望

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
- CLFVを見るには最低でも 5.2×10^{19} 個の True Muonium が必要
- 二つの演算子の干渉による寄与を計算

展望

- 1重項・3重項に特定の反応を調査
- $\mu \rightarrow e\gamma$ で制限されない中間状態を調査 (sterile ν 等)
- $\mu \rightarrow 3e$ で制限される off-shell dipole を評価