

レプトンフレイバーの破れを 伴う真ミューオニウムの崩壊

埼玉大学 須田亮介

共同研究: 港遼太郎氏(横浜国立大学)

佐藤朗氏(大阪大学)

山中真人氏(広島工業大学)

arXiv:2507.01193

CLFVの多角的な検証が必要

既存探索の演算子

$$\bar{e}\sigma^{\mu\nu}\mu F_{\mu\nu}$$

$$(\bar{e}\Gamma\mu)(\bar{e}\Gamma'e)$$

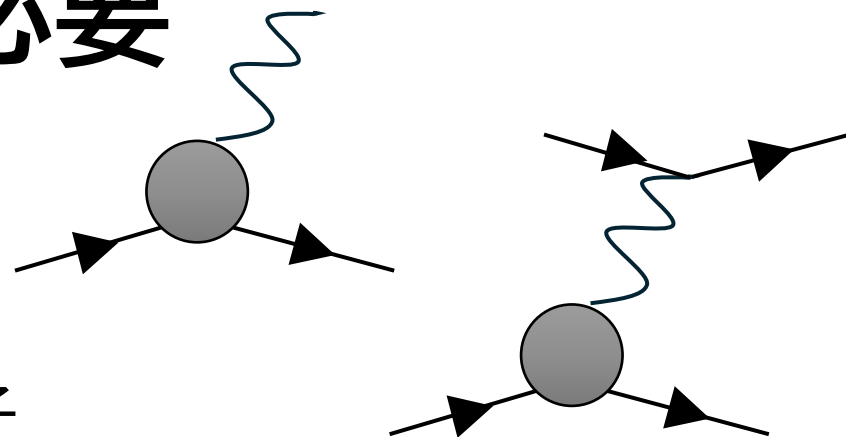
$$(\bar{e}\Gamma\mu)(\bar{q}\Gamma'q)$$

今回扱うフレーバー構造

$$(\bar{e}\Gamma\mu)(\bar{\mu}\Gamma'\mu)$$

代表例:

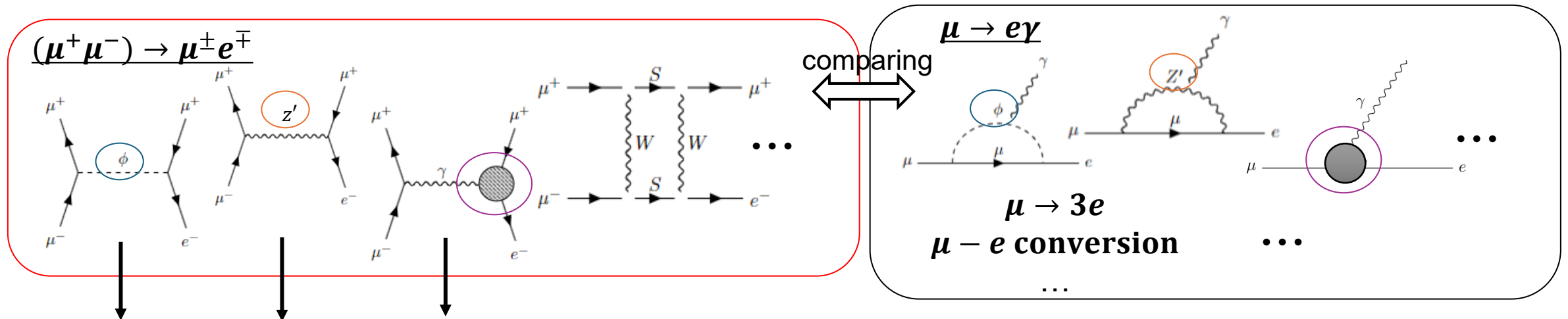
- $\mu \rightarrow e\gamma$: MEG II
- (e線をつけて) $\mu e e e$ 演算子
 - $\mu \rightarrow e e e$: Mu3e
 - $\mu e \rightarrow e e$: コライダー/束縛状態(ミューオニウム)/束縛状態(ミューオン原子)
- (核子の線をつけて)ミューオン原子下の反応
 - $\mu N \rightarrow e N$: COMET
- μ 線をつけたものを考えてもよいのでは? $\mu\mu\mu e$ 演算子
 - $\mu e \rightarrow \mu\mu$: コライダー
 - $\mu\mu \rightarrow \mu e$...コライダー/束縛状態(真ミューオニウム)←これ!



新しいCLFV過程の考案

動機

CLFV新粒子は終状態に直接表れず、単一の反応での特定が困難



他のCLFV過程と比較して背景物理を抽出

→相補的なCLFV過程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

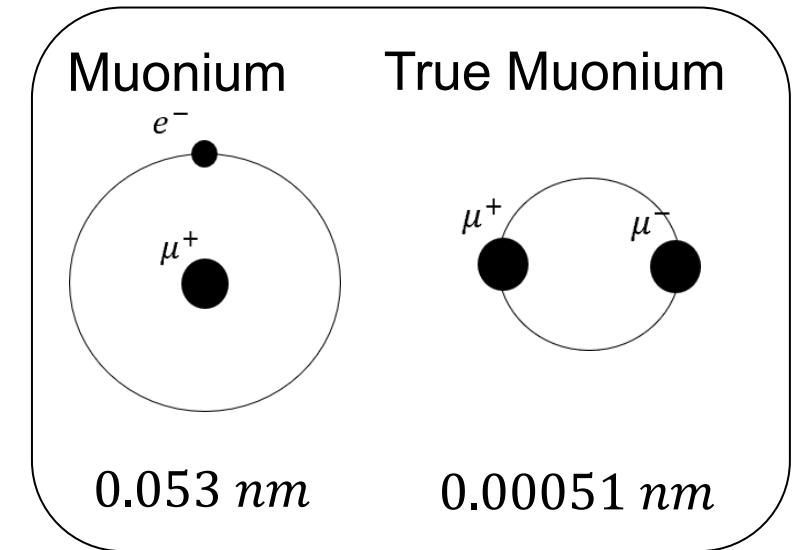
True Muoniumとは？

スピンと名称
Singlet: para
Triplet: ortho

True Muonium ($\mu^+ \mu^-$): $\mu^+ \mu^-$ bound state

(cf Muonium ($\mu^+ e^-$): $\mu^+ e^-$ 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

$$\tau_{\text{TM}}(2\gamma) = 0.602 \text{ ps} \quad \tau_{\text{TM}}(e^+e^-) = 1.81 \text{ ps} \\ \longrightarrow \tau_{\text{TM}} = 1.51 \text{ ps} = 2.29 \times 10^{12} \text{ GeV}^{-1}$$

生成過程の候補

1) コライダーを用いた実験

- ・LHCb ($pp \rightarrow \eta X, \eta \rightarrow (\mu^+ \mu^-) \gamma$)
Cid Vidal et al., 2019
- ・DIMUS ($\mu^+ \mu^- \rightarrow (\mu^+ \mu^-)$)
Fox et al., 2022
- ・Belle II ($e^+ e^- \rightarrow (\mu^+ \mu^-)$)
Gargiulo et al., 2025

2) 固定標的実験

- ・HPS ($eZ \rightarrow (\mu^+ \mu^-) X$)
Banburski & Schuster, 2012

3) 低エネルギー μ ビームを使用

- ・LEMA ($\mu^+ \mu^- \rightarrow (\mu^+ \mu^-) \gamma$)
Itahashi et al., 2015

なぜTrue Muoniumか

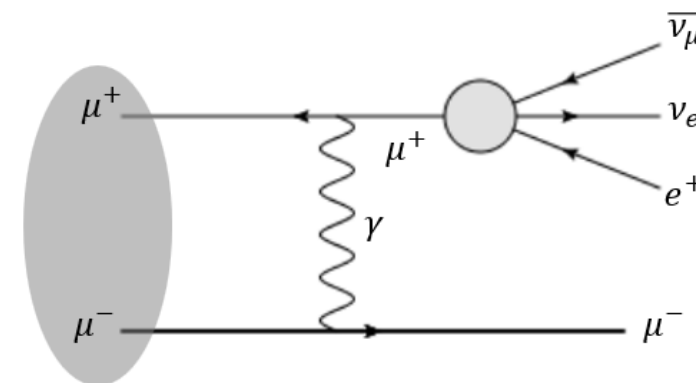
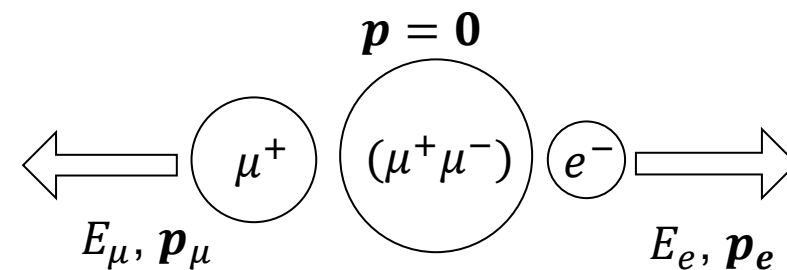
- ・明確なシグナルを持つ

$$(\cos\theta_{\mu e}=-1, |\mathbf{p}_{\mu}| \simeq 3m_{\mu}/4, |\mathbf{p}_e| \simeq 3m_{\mu}/4)$$

→ μ, e の角度・同時性・運動量を測定することで判別可能

→上記のパラメーターの元で $(\mu^+\mu^-) \rightarrow \mu^-e^+\bar{\nu}_{\mu}\nu_e$
のバックグラウンドは強く制限される

$$BR\left((\mu^+\mu^-) \rightarrow \mu^-e^+\bar{\nu}_{\mu}\nu_e\right) \propto \frac{m_e^4}{m_{\mu}}$$



- ・早い段階での実験可能性

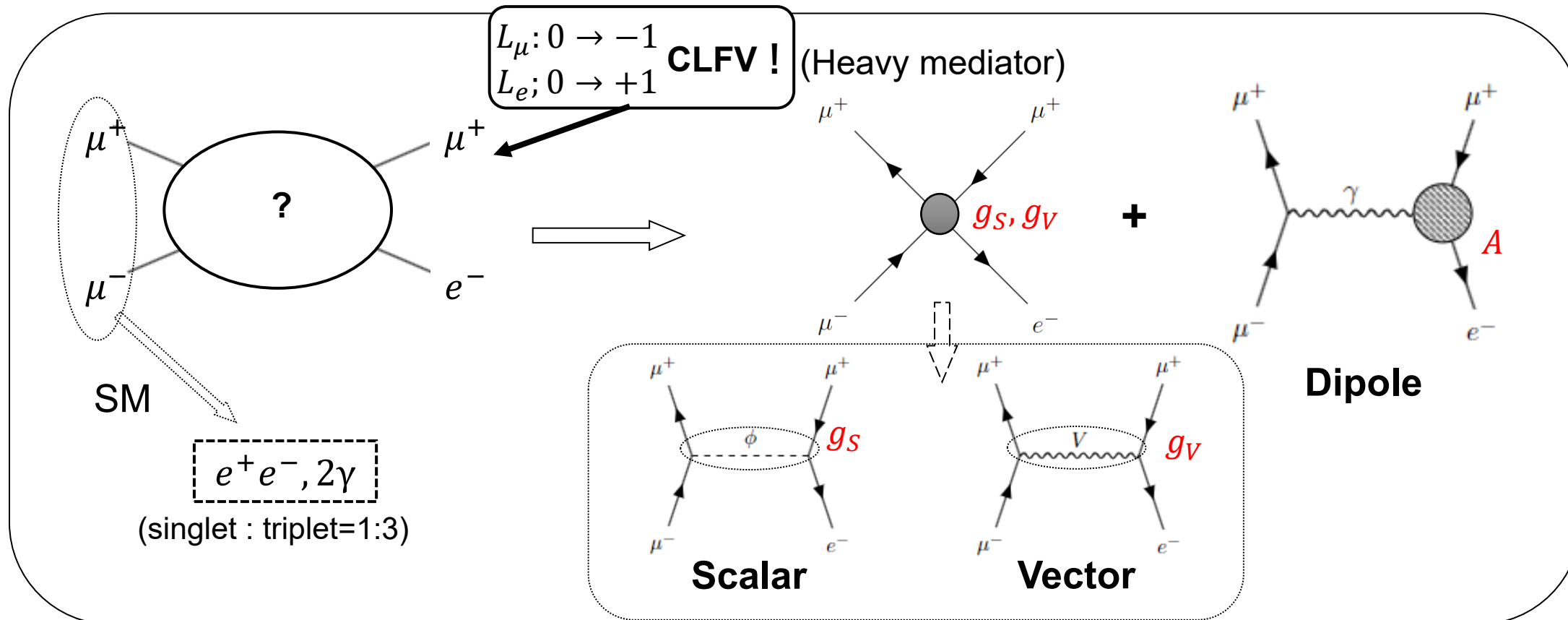
ミューオンコライダーのミューオン加速技術の成立前に検証可能

(ミューオンコライダーの技術: ミューオンを「作って」「止めて冷やして」「加速」)

TMのLFV崩壊率の計算

演算子の種類

- ・スカラー、ベクトル、双極子型の演算子を仮定



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

↓ Chirality (L,R)

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

有効ラグランジアン

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = -\frac{1}{\Lambda^2} \left[\sum_{X=L,R} g_{XX}^S (\bar{e} P_X \mu) (\bar{\mu} P_X \mu) \text{ 「スカラー」} \right. \\ \left. + \sum_{X,Y=L,R} g_{XY}^V (\bar{e} \gamma^\rho P_X \mu) (\bar{\mu} \gamma_\rho P_Y \mu) \text{ 「ベクトル」} \right. \\ \left. + v \sum_{X=L,R} A_X \bar{e} \sigma^{\rho\nu} P_X \mu F_{\rho\nu} + \text{H.c.} \right] \text{ 「双極子」}.$$

$$P_{L,R} = (1 \mp \gamma_5)/2, \quad \sigma^{\mu\nu} = \frac{i}{2} [\gamma^\mu, \gamma^\nu].$$

scalar

g_{LL}^S, g_{RR}^S

vector

$g_{LL}^V, g_{RR}^V, g_{LR}^V, g_{RL}^V$

dipole

A_L, A_R

計算設定(初期ベンチマークとして)

今回はシンプルな設定で： 特定の実験に寄りすぎない(➡今後)

- Unpolarized
- para-TM : ortho-TM = singlet : triplet = 1:3

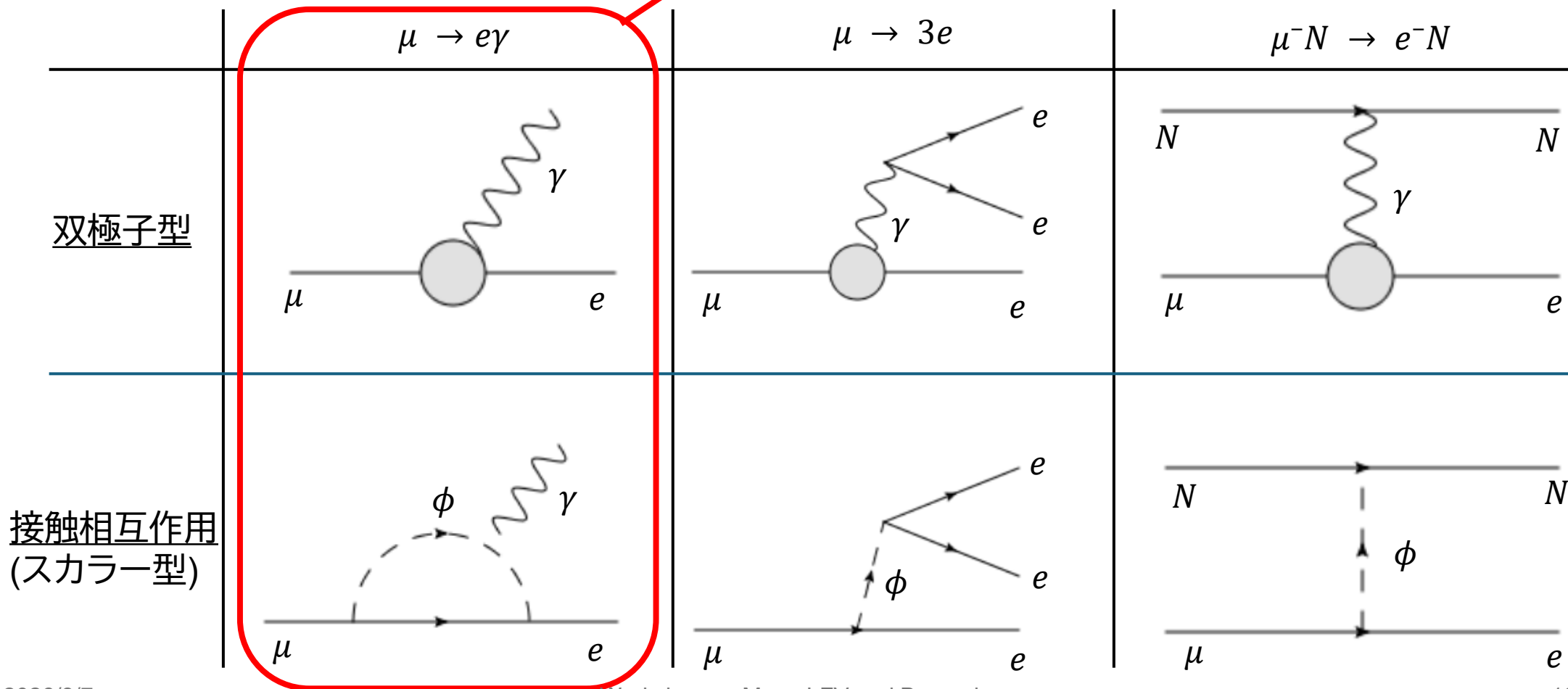
相補的な過程である $\mu \rightarrow e\gamma$ からそれぞれBRの上限を算出

- 単一の演算子をONしたもの
- 2種類の演算子をONして干渉を見たもの

相補的なCLFV過程の例

異なるCLFV過程が同じ演算子からの寄与を受ける

今回は $\mu \rightarrow e\gamma$ から分岐比の上限を求める



結果 (単一の演算子)

分岐比の上限

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

$$g_S \rightarrow BR(\mu\mu \rightarrow \mu e) \sim 10^{-24}$$

$$g_V \rightarrow BR(\mu\mu \rightarrow \mu e) \sim 10^{-20}$$

$$N_{\text{TM}} = \text{BR}^{-1} \approx 5.2 \times 10^{19}$$

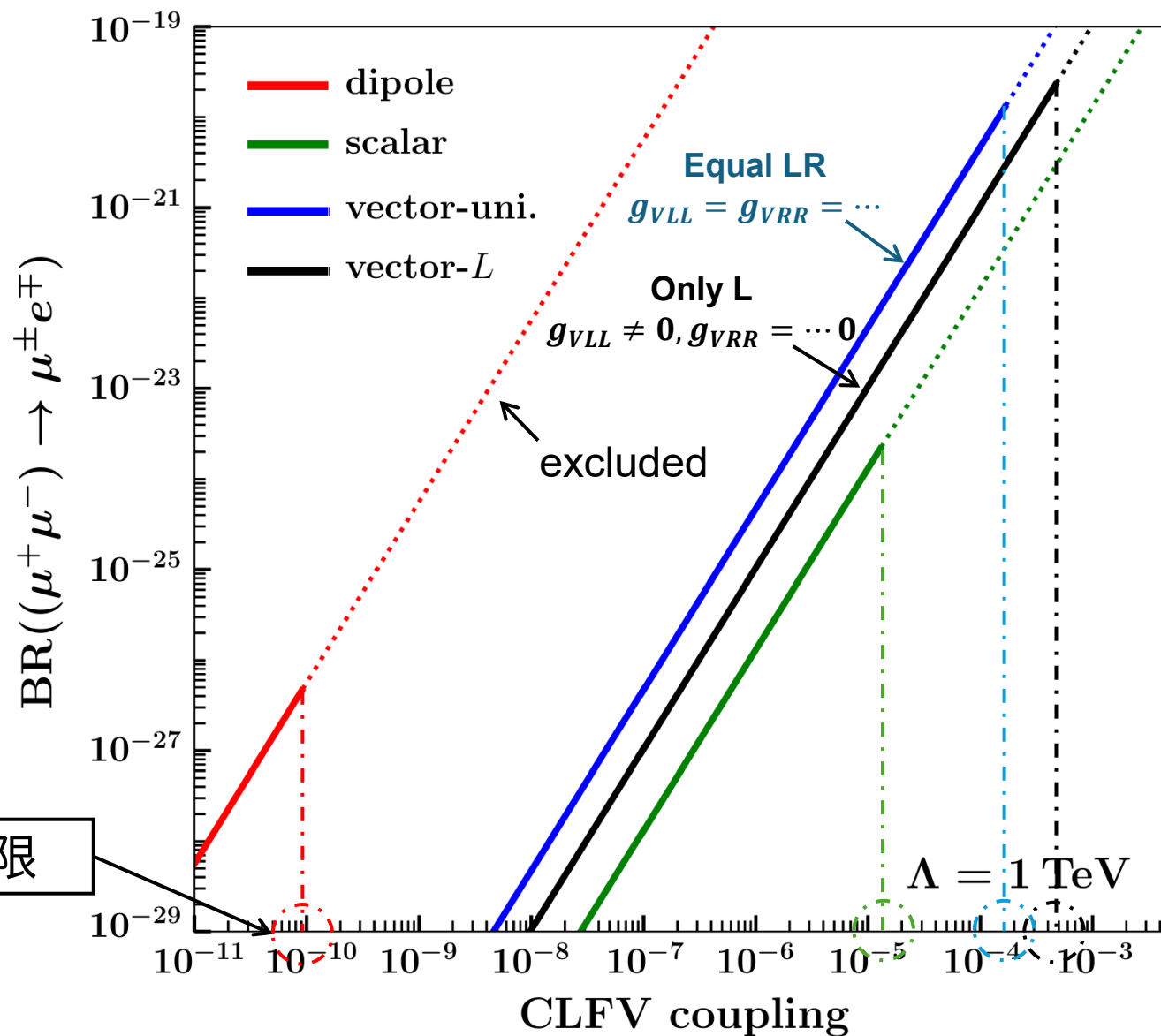
**5.2×10^{19} 個のTrue Muoniumで
CLFVの検証ができる可能性**

MEG ($\mu \rightarrow e\gamma$)による結合定数への制限

$\mu \rightarrow e\gamma$ がtree-levelで寄与するため
双極子型が最も制限を受ける

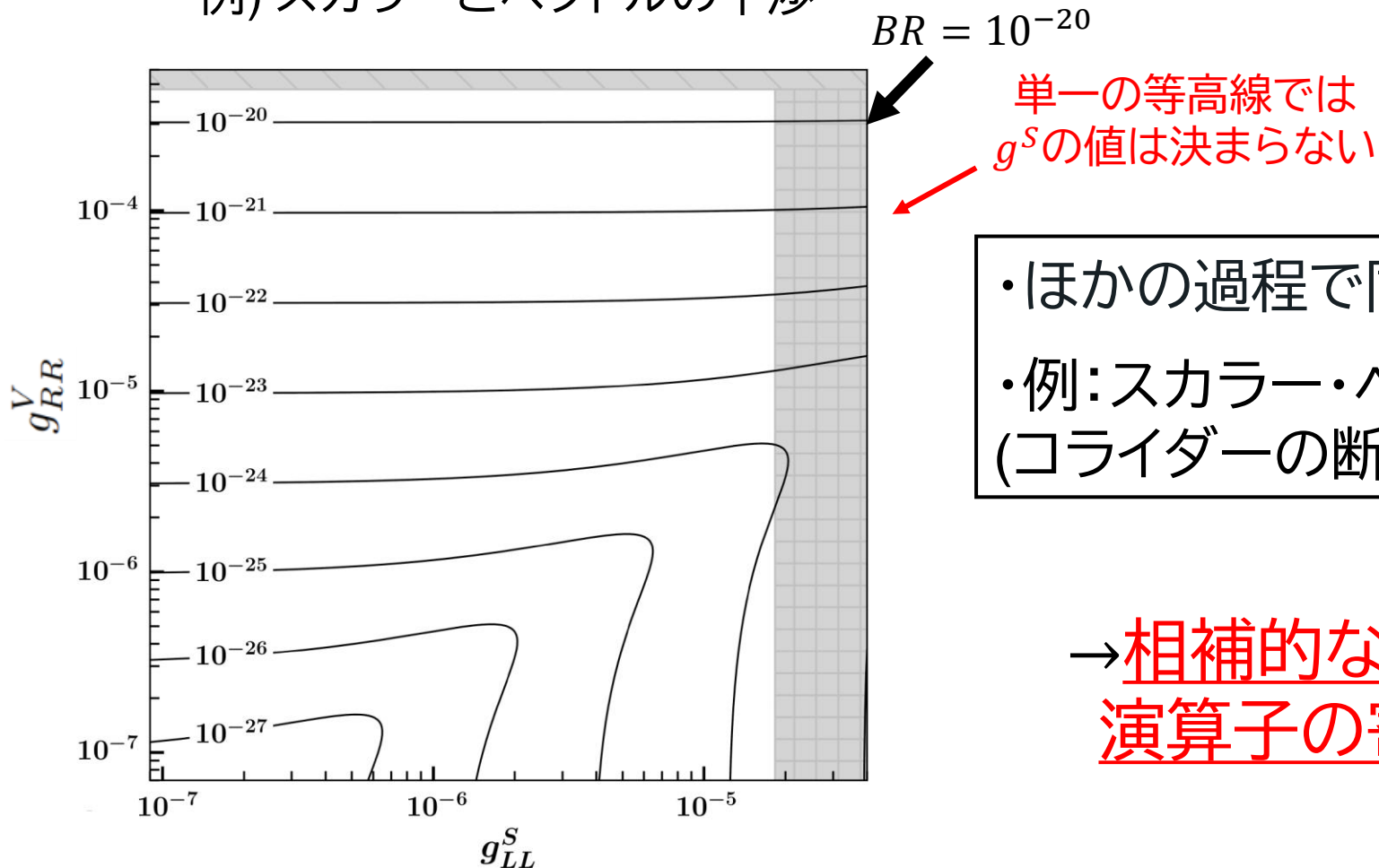
The MEGII collaboration .2024

各結合定数の分岐比



結果 (2つの演算子)

例) スカラーとベクトルの干渉



等高線: $BR = 10^{-20}, 10^{-21}, \dots$
斜線: MEG IIによる制限
 g_{SLL}, g_{VLL} の寄与のみ考慮した分岐比

- ほかの過程で同様の等高線図を描いて比較
- 例: 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できる

まとめと展望

まとめ

- 真ミューオニウム(TM)崩壊でCLFVを探索することを提案した
- 各種有効相互作用から崩壊率を計算した
- CLFVを見るには最低でも 5.2×10^{19} 個のTMが必要。。。

展望

- 実験の具体設定に沿った計算
 - polarized 初期状態
 - para/ortho単独
 - 磁場の入れ方
- UVモデルを詳細に仮定した計算

Appendix

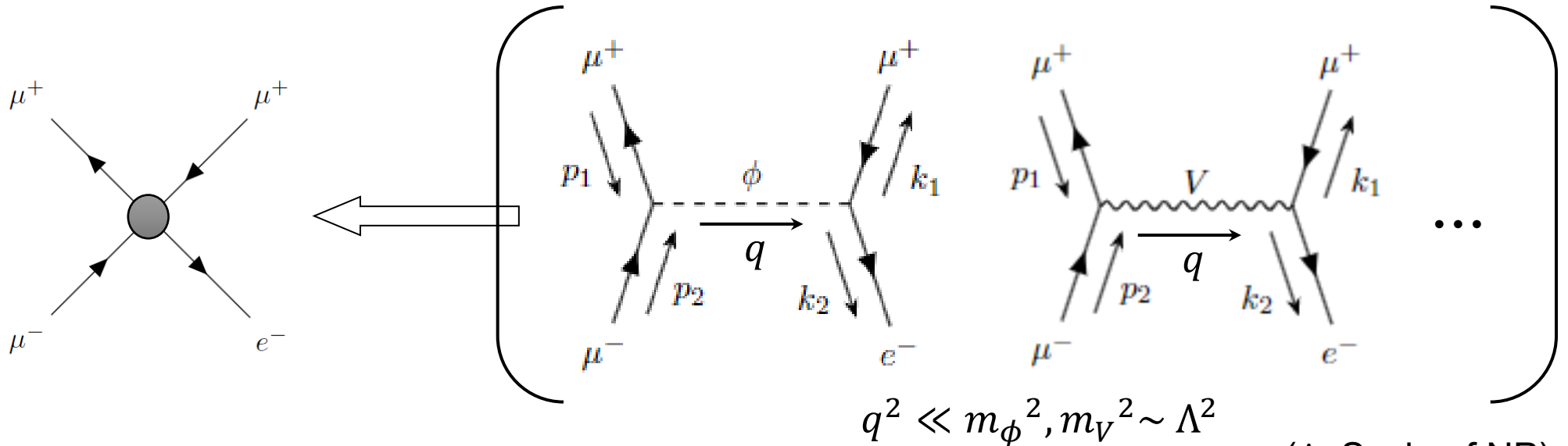
Four-Fermi(スカラー・ベクトル)型

中間状態が十分に重いと接触相互作用とみなせる

m_μ^2

$$\frac{1}{q^2 - M^2} \sim \frac{1}{M^2}$$

運動量依存性がない



(Λ : Scale of NP)

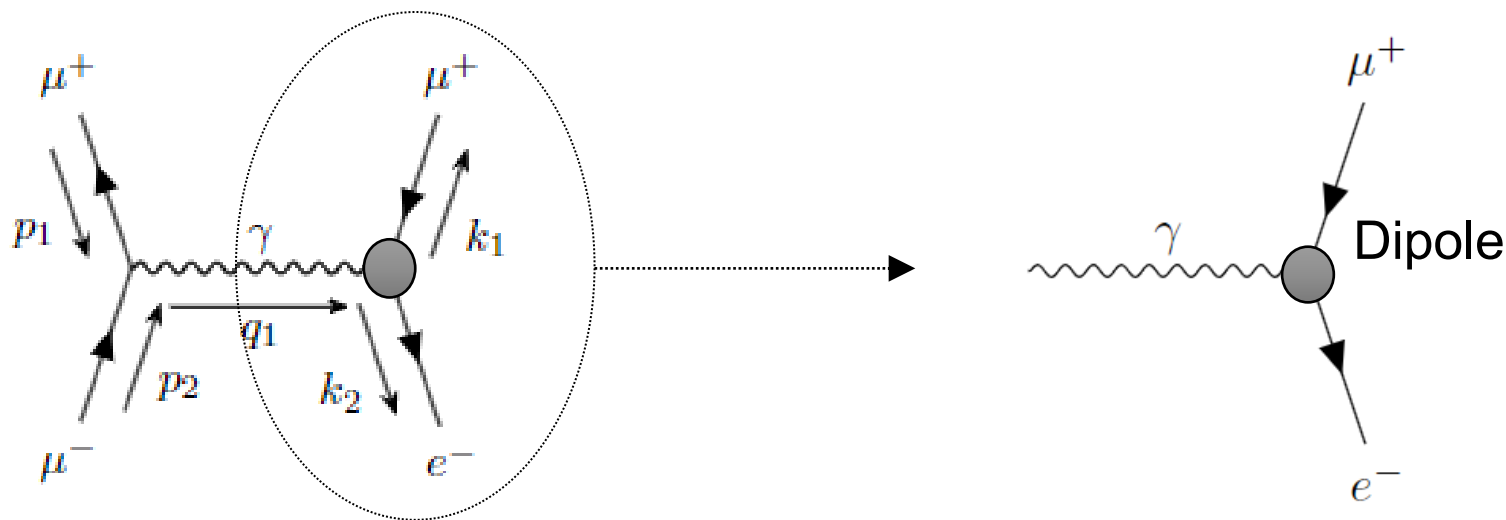
$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{(S)} \supset -\frac{1}{\Lambda^2} [g_{SLL}(\bar{\psi}_\mu P_L \psi_\mu)(\bar{\psi}_e P_L \psi_e) + g_{SRR}(\bar{\psi}_\mu P_R \psi_\mu)(\bar{\psi}_e P_R \psi_e)]$$

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

双極子型

光子を放出してフレーバを破る

- $\mu \rightarrow e\gamma$ から直接制限を受ける
- プロパゲータが $\frac{1}{q^2}$ に比例し運動量依存性を持つ



$$L_\alpha = \begin{pmatrix} \nu_{\alpha L} \\ \ell_{\alpha L} \end{pmatrix},$$

$$\begin{pmatrix} \nu & \ell \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ v \end{pmatrix} \xrightarrow{\text{一重項}} \ell v$$

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

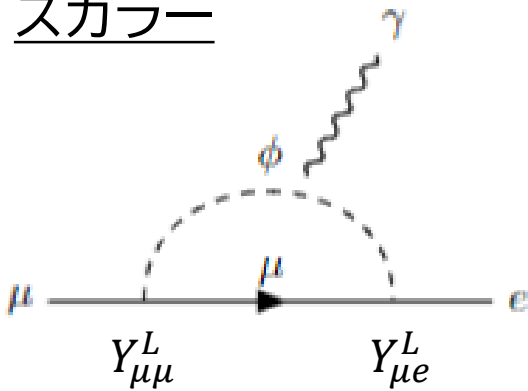
実験からの制限

MEG + MEG II 実験からの制限

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

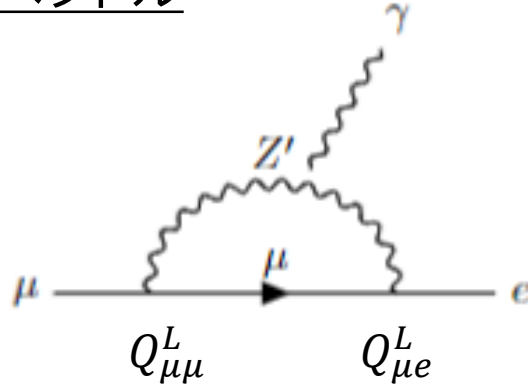
The MEGII collaboration .2024

スカラー

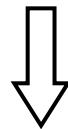


$$\mathcal{L}_{Sint} = -\bar{\psi}_i Y_{ij} \psi_j \phi + h.c.$$

ベクトル



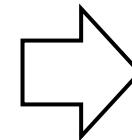
$$\mathcal{L}_{Vint} = -\bar{\psi}_i Q_{ij} \gamma^\mu \psi_j Z'_\mu + h.c.$$



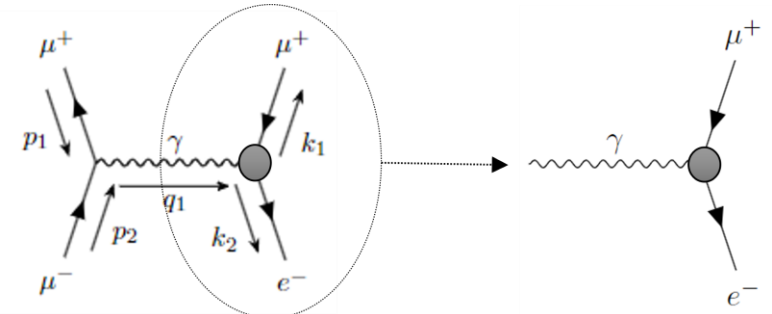
(Four-Fermi)

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

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

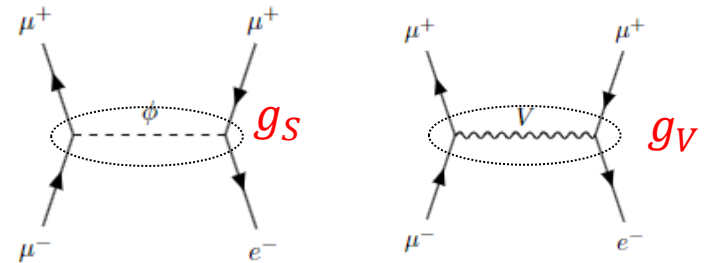


双極子型



$$A_L^2 + A_R^2 \lesssim 1.64 \times 10^{-20}$$

スカラー、ベクトル



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

$$\text{LRが等しい} \rightarrow g_V^2 \lesssim 2.72 \times 10^{-8} \text{ (uni)}$$

$$g_{VLL} = g_{VRR} = \dots \rightarrow g_{VLL}^2 \lesssim 2.18 \times 10^{-7} \text{ (L)}$$

$$\text{Lのみ} \rightarrow g_{VLL} \neq 0, g_{VRR} = \dots = 0$$

$$(\Lambda \sim 1 [TeV])$$

反応分岐比

分岐比($m_e \sim 0$)

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

MEG + MEG II 実験からの制限

The MEGII collaboration .2024

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

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

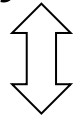
$$\begin{aligned} g_{SLL}^2 + g_{SRR}^2 &\lesssim 3.35 \times 10^{-10}, \quad g_V^2 \lesssim 2.72 \times 10^{-8} \text{ (uni)} \\ g_{VLL}^2 &\lesssim 2.18 \times 10^{-7} \text{ (L)}, \quad A_L^2 + A_R^2 \lesssim 1.64 \times 10^{-20} \end{aligned}$$

Estimated Number of Muons Produced

$2.24 \times 10^{14} \mu^-/s, 3.0 \times 10^{14} \mu^+/s$ are expected produced at the muon production point of the muon collider

$\rightarrow 10^{21} \mu / year$ can be produced

C. Accettura et al, 2025



$$N_{\text{TM}} = \text{BR}^{-1} \approx 5.2 \times 10^{19}$$

If an efficient method for generating True Muonium, CLFV decay proposed in this study could be discovered!

Vector-universal vs Vector-left

Assuming $g_V^{(vector-uni)} = g_{VLL}^{(vector-L)}$

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

$$BR(vector - uni) \sim BR(vector - L) \times 8$$

→Enhanced around a digit by interference terms

- On the other hand, scalar and dipole are different factor of two simply

Working Hypothesis

(1) four Fermi effective operator

- scalar LR universal (scalar)

$$(g_S = g_{SLL} = g_{SRR} \neq 0)$$

- vector LR universal (vector-uni)

$$(g_V = g_{VLL} = g_{VRR} = g_{VLR} = g_{VRL} \neq 0)$$

- vector L only (vector-L)

$$(g_{VLL} \neq 0, g_{VRR} = g_{VLR} = g_{VRL} = 0)$$

(2) dipole operator LR universal (dipole)

$$(A = A_L = A_R \neq 0)$$

