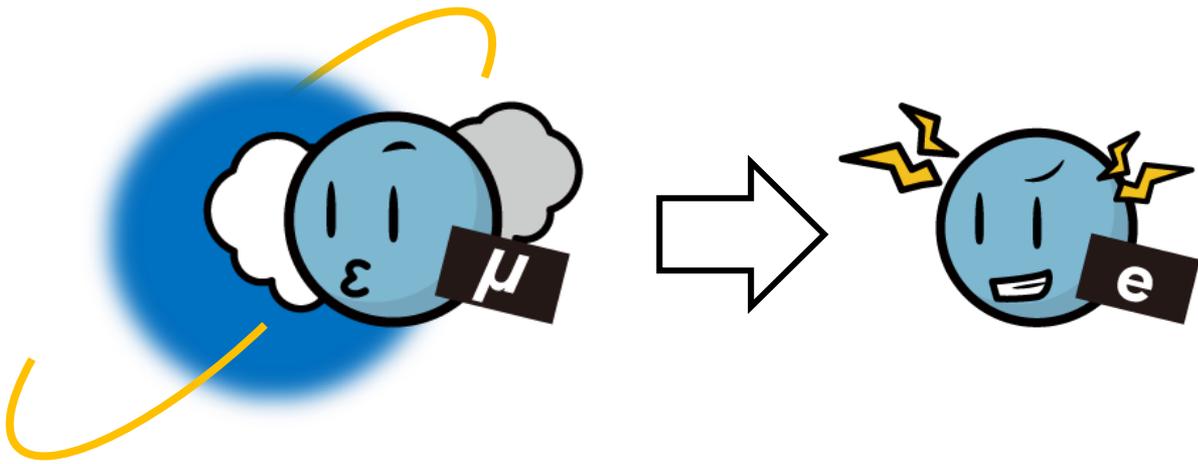


ミューオン原子と荷電レプトンフレーバー非保存



埼玉大学
上坂 優一

自己紹介

うえさか ゆういち

上坂 優一

(1990年生 兵庫県豊岡市)

埼玉大学 研究員

2018年3月 大阪大学 PhD取得

キーワード：

荷電レプトンフレーバーの破れ

レプトン-原子核系における素粒子反応

- ✓ ミューオン原子
- ✓ レプトン-原子核衝突
- ✓

内容

✓ 荷電レプトンフレーバー非保存過程の探索

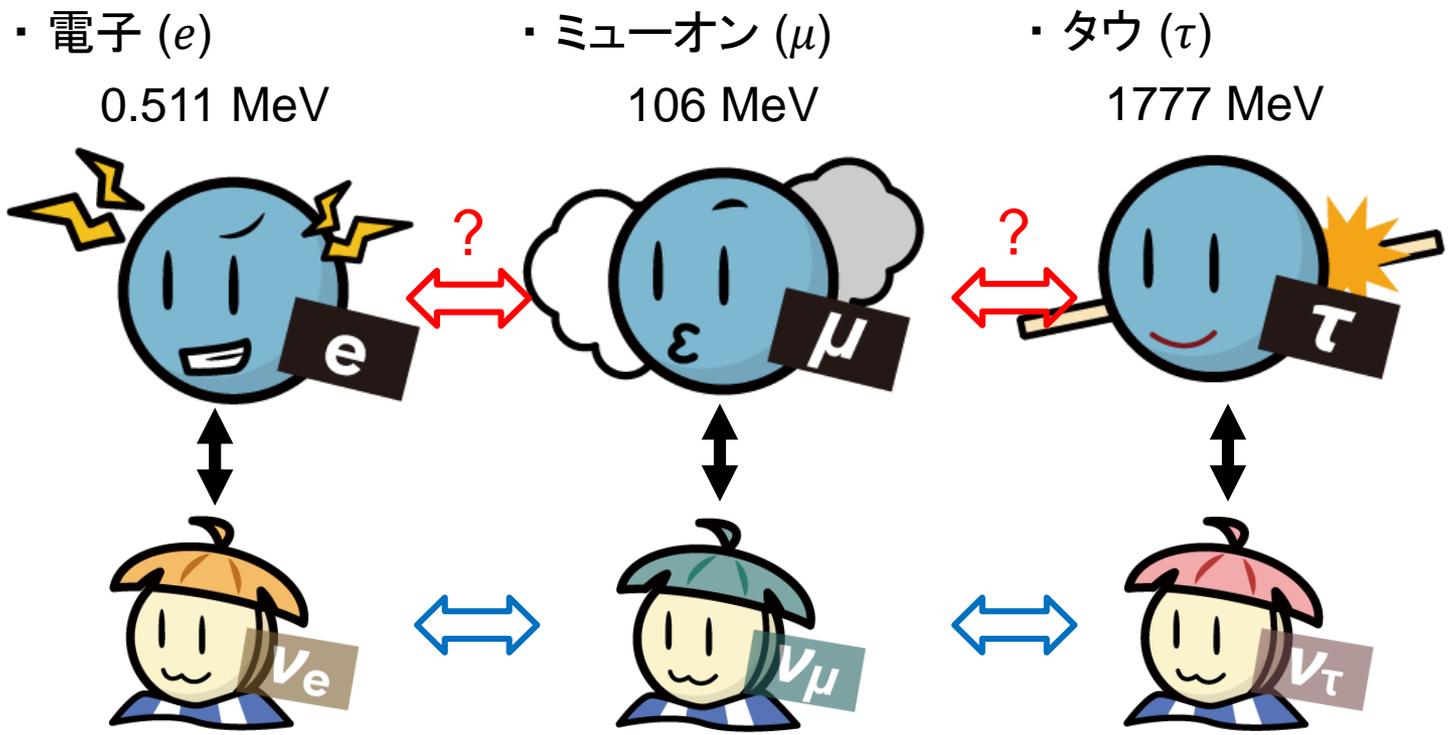
(特にミュオン関係のものについて)

✓ ミュオン原子中での $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$ 過程

YU, Y. Kuno, J. Sato, T. Sato, & M. Yamanaka, Phys. Rev. D **97**, 015017 (2018).

YU, Y. Kuno, J. Sato, T. Sato, & M. Yamanaka, Phys. Rev. D **93**, 076006 (2016).

レプトンのフレーバー



- L_e, L_μ, L_τ の3つ (荷電レプトンの質量固有状態で定義)
ニュートリノのフレーバーは荷電レプトンから定義
- 3つのレプトンフレーバーは保存量 ← ホント？
- **ニュートリノ振動** ← ニュートリノでのレプトンフレーバーの破れ (LFV)
⇒ 荷電レプトンでの LFV (CLFV) は？

Charged Lepton Flavor Violation (CLFV)

- 新物理探索の有力候補 -

➤ 反応の前後でレプトンフレーバーが保存しない過程 = LFV 過程

➡ 荷電レプトンにおける LFV = CLFV

• 標準模型 (SM) の枠組みでレプトンフレーバーは **保存量**

allowed

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

$$\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$$

forbidden (CLFV)

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

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

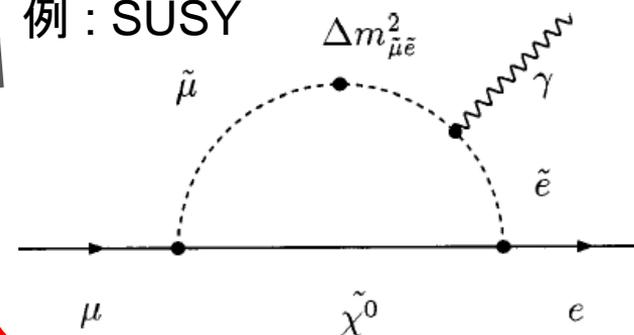
• 多くの “SMを超える模型” が CLFV を予言

• ニュートリノ混合の寄与は小

予想される崩壊分岐比

$$\text{Br}(\mu \rightarrow e \gamma) < 10^{-54}$$

例: SUSY



➤ これまでに様々なCLFVモードが探索されてきた (いずれも未発見)

ミューオンを用いたCLFV探索

ミューオンの利点

1. 大強度ビームが利用可
2. 長寿命

1) $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ (BR: 崩壊分岐比)

$BR < 4.2 \times 10^{-13}$ by MEG

Eur. Phys. J. C 76 (2016) 434.

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

$BR < 1.0 \times 10^{-12}$ by SINDRUM

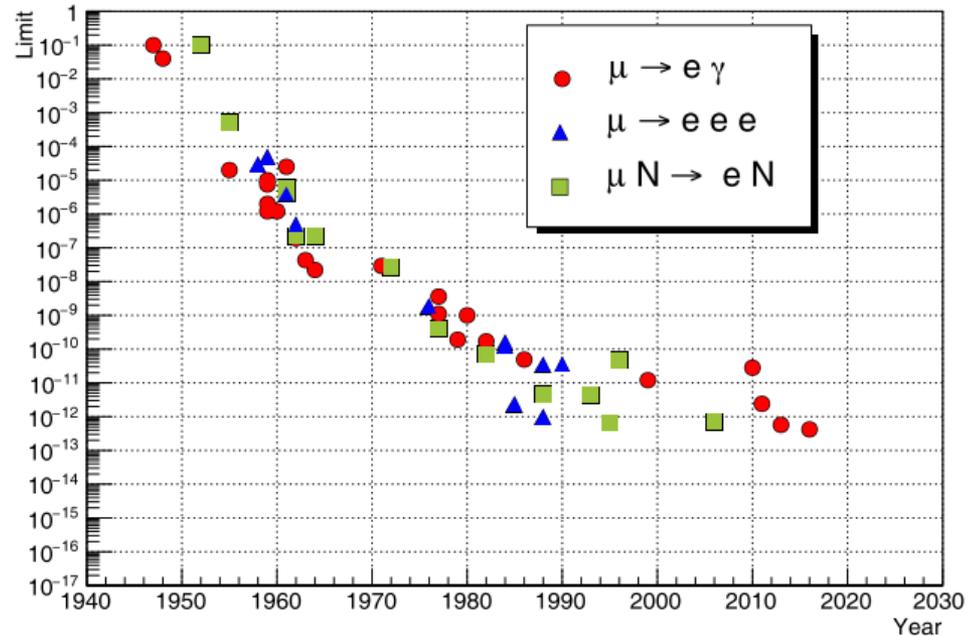
Nucl. Phys. B 299 (1988) 1.

3) $\mu^- N \rightarrow e^- N$ N : 原子核

$BR < 7 \times 10^{-13}$ by SINDRUM II

Eur. Phys. J. C 47 (2006) 337.

探索の歴史

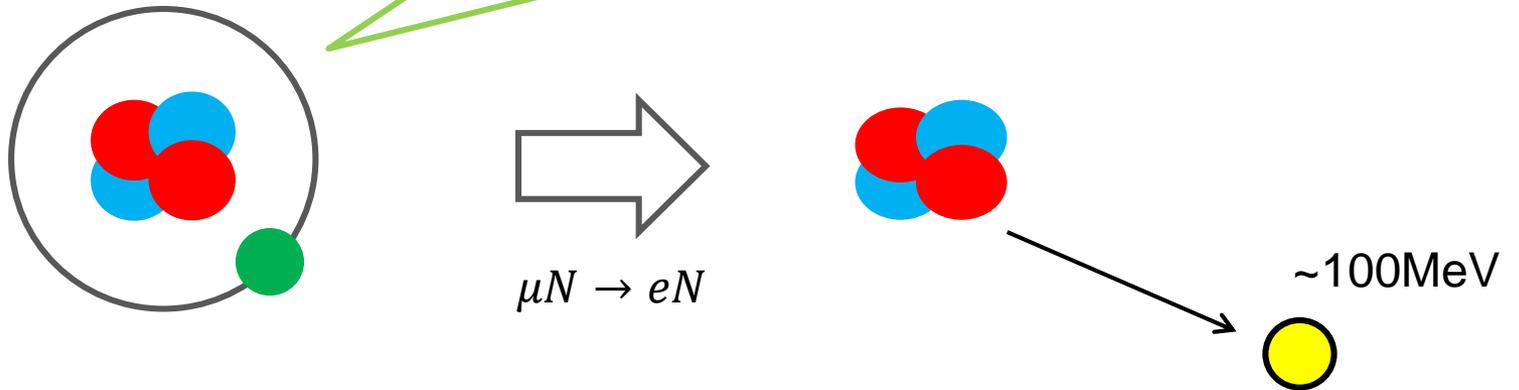


L. Calibbi & G. Signorelli, Riv. Nuovo Cim. 41, no. 2, 1 (2018).

※ 1) と 2) は自由ミューオン、3) はミューオン原子を用いたCLFV探索

$\mu^- \rightarrow e^-$ 転換過程

ミュオン原子：通常原子の電子1つをミュオンに取り替えたもの



- ・ 原子核の反跳により $E_e = m_\mu - B_\mu$ の電子1つが放出
- ・ 原子核-ミュオン間CLFV
- ・ 計画されている将来の探索実験：
COMET, DeeMe @ J-PARC
Mu2e @ Fermi Lab

Experiment	N	BR	Year
SINDRUM II	Pb	$< 4.6 \times 10^{-11}$	1996
SINDRUM II	Ti	$< 6.1 \times 10^{-13}$	1998
SINDRUM II	Au	$< 7.0 \times 10^{-13}$	2006
COMET, Mu2e	Al	10^{-17}	
DeeMe	C/Si	5×10^{-14}	

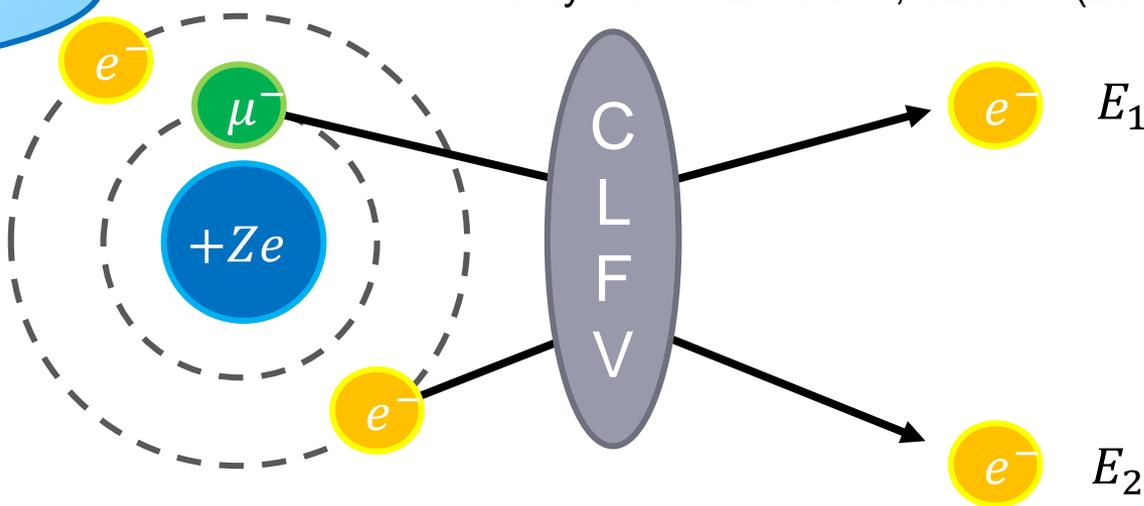
$\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$ 過程

M. Koike, Y. Kuno, J. Sato, & M. Yamanaka,
Phys. Rev. Lett. **105**, 121601 (2010).

ミューオン原子を用いた
新たなCLFV探索

proposed to be
measured in **COMET**

R. Abramishili et al.,
COMET Phase-I Technical Design Report,
KEK Report 2015-1 (2015).



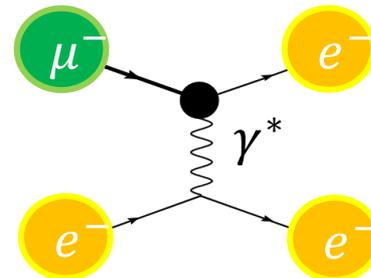
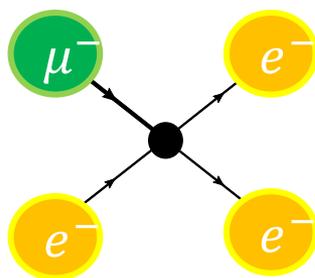
特徴

- clear signal : 電子2つ ($E_1 + E_2 \simeq m_\mu + m_e - B_\mu - B_e$)

- 2種のCLFV相互作用

- ✓ $\mu e e e$ vertex

- ✓ $\mu e \gamma$ vertex



- 原子番号 Z : 大 \Rightarrow 崩壊率 Γ : 大 (およそ $\Gamma \propto (Z - 1)^3$)

崩壊率評価

- 原子核Coulombポテンシャルが十分小さい場合
“束縛状態が空間的に十分広がっている”と近似

$$\Gamma = \sigma v_{\text{rel}} \int dV \rho_{\mu} \rho_e$$

$$\Gamma_{\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-} = 2\sigma v_{\text{rel}} |\psi_{1S}^e(0)|^2$$

(1S電子 2つ)

M. Koike, Y. Kuno, J. Sato, & M. Yamanaka,
Phys. Rev. Lett. **105**, 121601 (2010).

σ : $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$ の断面積 (自由粒子) v_{rel} : μ^- と e^- の相対速度

$$\psi_{1S}^e(\vec{x}) = \sqrt{\frac{(m_e(Z-1)\alpha)^3}{\pi}} \exp(-m_e(Z-1)\alpha|\vec{x}|)$$

: 束縛電子の1S波動関数 (非相対論)

➔ $\Gamma \propto (Z-1)^3$

※ Z 依存性は相互作用に依らない (factorization のため)

崩壊分岐比

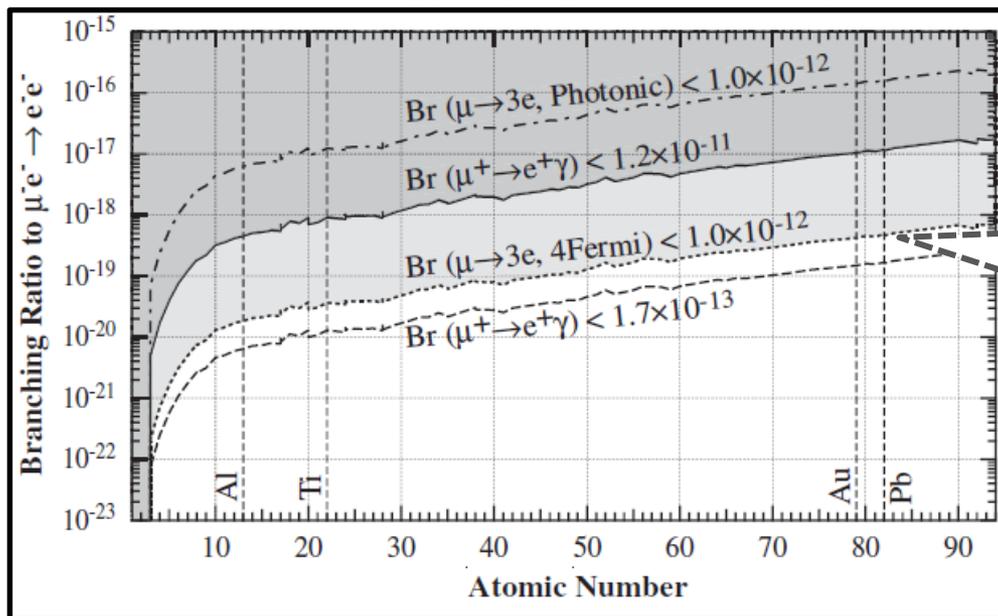
ミューオン原子のうち、どれだけが $\mu^-e^- \rightarrow e^-e^-$ 崩壊をするか

$$\text{Br}(\mu^-e^- \rightarrow e^-e^-) \equiv \tilde{\tau}_\mu \Gamma(\mu^-e^- \rightarrow e^-e^-)$$

$\tilde{\tau}_\mu$: ミューオン原子の寿命

cf. : 2.2 μ s for a muonic H ($Z = 1$)
80ns for a muonic Pb ($Z = 82$)

他のCLFV探索実験からの制限



- 原子番号が大きな μ 原子ほどパラメータを強く制限

接触型過程が主要な場合

$$\text{BR} < 5.0 \times 10^{-19} \text{ for Pb } (Z = 82)$$

- 将来実験 (COMET) での目標の μ 原子生成量は $O(10^{18-19})$

M. Koike, Y. Kuno, J. Sato, & M. Yamanaka,
Phys. Rev. Lett. **105**,121601 (2010).

従来評価の改善すべき点

- Koike *et al.* (波動関数の重なり から 相互作用 を factorize)

$$\Gamma_{\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-} = 2\sigma v_{\text{rel}} |\psi_{1S}^e(0)|^2 \propto (Z - 1)^3$$

(原子核Coulombポテンシャルが十分小さいときに成立)

- 放出電子は back-to-backのみ (運動量が保存)
- Z 依存性が過程に依らない ($\Gamma \propto (Z - 1)^3$)

近似の内容

- 束縛レプトンの軌道半径大
- 束縛レプトン：非相対論的
- 放出 e^- ：平面波

原子番号 Z の大きな原子では.....

- ← 軌道半径は小さくなる
- ← 束縛電子の相対論的効果
- ← Coulomb歪曲

より定量的な評価が必要 (特に Z の大きな場合で重要)

✓ $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$ 過程の遷移確率計算の定量性を向上

1. factorization近似を行わずに遷移確率を定式化
2. レプトン波動関数: 相対論的Coulomb波動関数

取り込まれる効果

- 束縛レプトンの有限の広がり
- 束縛レプトン: 相対論的効果
- 放出 e^- : 原子核Coulombによる歪曲

⇒ 全体でCLFV崩壊率はどのように増減するか

計算手法

$$\Gamma = \sum_f \sum_{\bar{i}} (2\pi) \delta(E_f - E_i) \left| \langle \psi_e^{s_1}(\mathbf{p}_1) \psi_e^{s_2}(\mathbf{p}_2) | \mathcal{L}_I | \psi_\mu^{s_\mu}(1S) \psi_e^{s_e}(1S) \rangle \right|^2$$

散乱波を角運動量の固有状態で展開 (部分波展開)

$$\psi_e^{p,s}(\mathbf{r}) = \sum_{\kappa,\mu,m} 4\pi i^{l_\kappa} (l_\kappa, m, 1/2, s | j_\kappa, \mu) Y_{l_\kappa, m}^*(\hat{p}) e^{-i\delta_\kappa} \psi_p^{\kappa,\mu}(\mathbf{r})$$

動径波動関数に対するDirac方程式

$$\frac{dg_\kappa(r)}{dr} + \frac{1+\kappa}{r} g_\kappa(r) - (E + m + e\phi(r)) f_\kappa(r) = 0$$

$$\frac{df_\kappa(r)}{dr} + \frac{1-\kappa}{r} f_\kappa(r) + (E - m + e\phi(r)) g_\kappa(r) = 0$$

$$\psi_p^{\kappa,\mu}(\mathbf{r}) = \begin{pmatrix} g_\kappa(r) \chi_\kappa^\mu(\hat{r}) \\ if_\kappa(r) \chi_{-\kappa}^\mu(\hat{r}) \end{pmatrix}$$

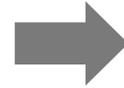
ϕ : 原子核クーロンポテンシャル

(束縛電子に対しては μ^- の電荷密度を除いたものを使用)

崩壊分岐比の上限値 (接触型)

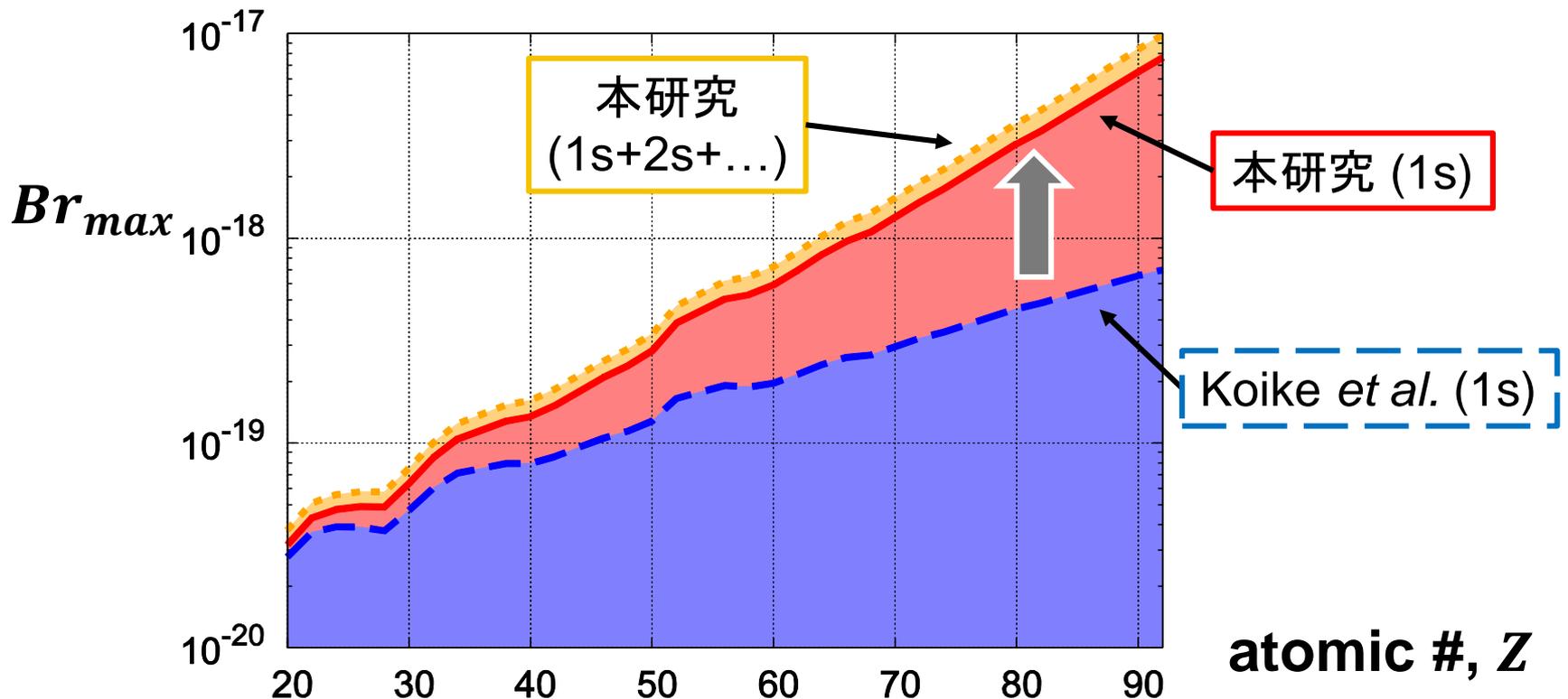
$$BR(\mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+) < 1.0 \times 10^{-12}$$

(SINDRUM, 1988)



$$BR(\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-) < B_{max}$$

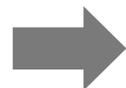
$(g_1(\bar{e}_L \mu_R)(\bar{e}_L e_R))$



崩壊分岐比の上限値 (光子型)

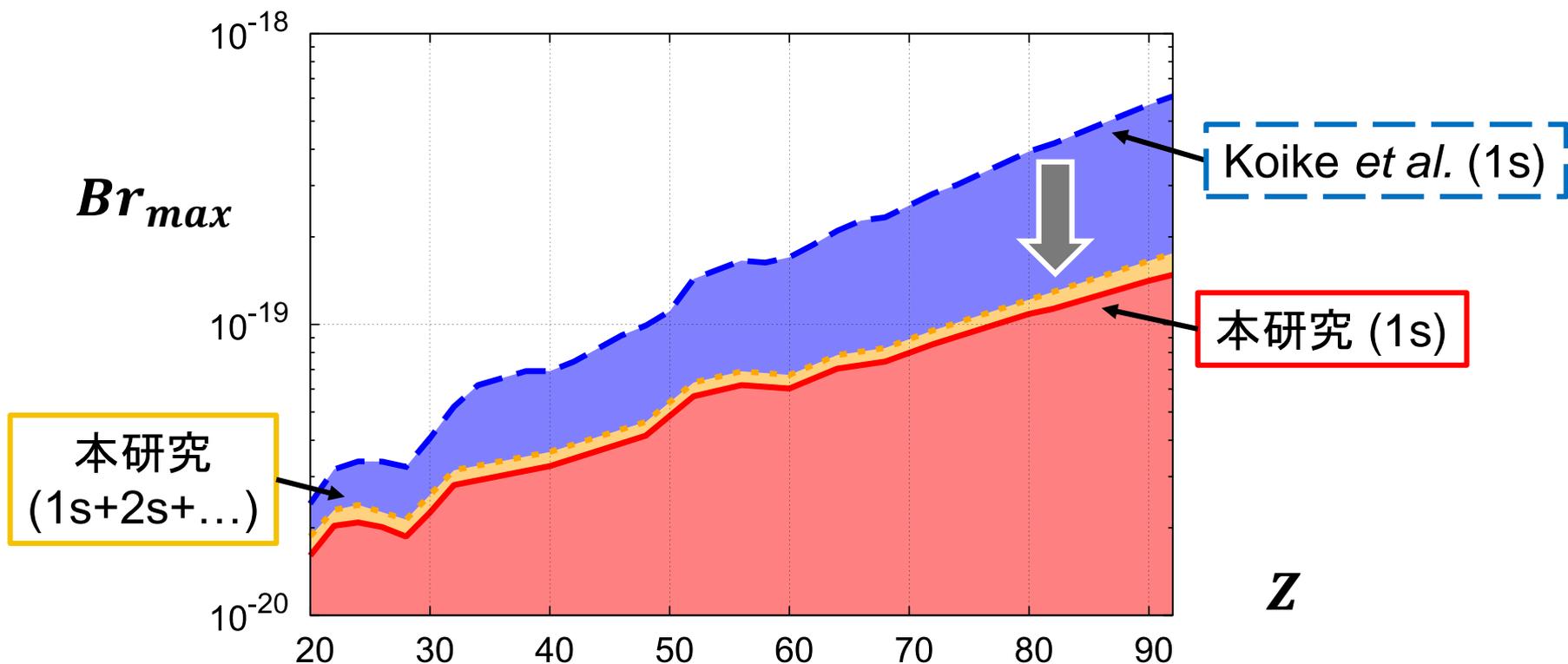
$$BR(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 4.2 \times 10^{-13}$$

(MEG, 2016)



$$BR(\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-) < B_{max}$$

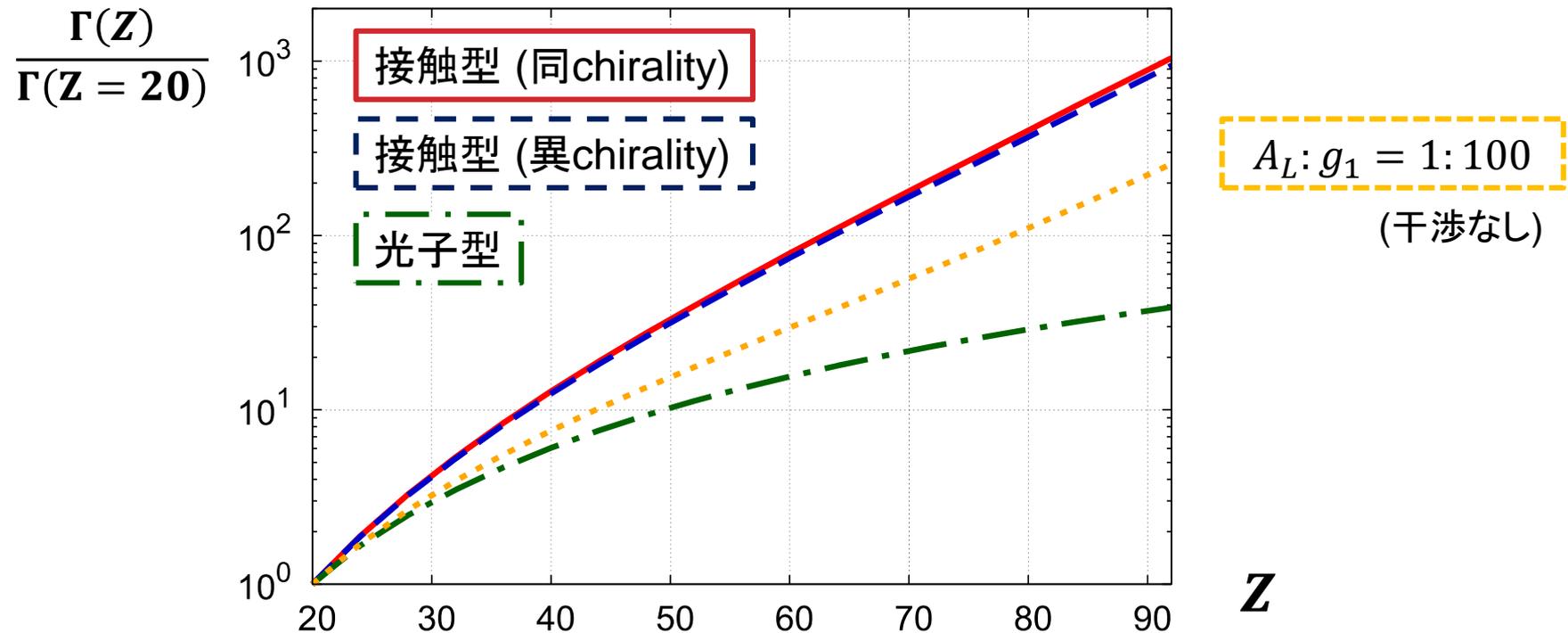
$$(A_R m_\mu \bar{e}_L \sigma^{\mu\nu} \mu_R F_{\mu\nu})$$



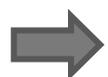
相互作用判別法

方法 1. 崩壊率の原子番号依存性

崩壊率の Z 依存性



➤ 相互作用によって崩壊率の Z 依存性に差異



数種のミュオン原子を用いることで相互作用の判別が可能

まとめ

- 荷電レプトンフレーバー非保存過程

- ✓ 新物理に sensitive
- ✓ ミューオン稀崩壊から強く制限

- ミューオン原子中の $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$ 過程

- ✓ CLFV探索の有力候補のひとつ
- ✓ 遷移確率の評価

$$\langle O_I \rangle^2 \left| \int \bar{\psi}_1 \bar{\psi}_2 \psi_\mu \psi_e \right|^2 \rightarrow \left| \int \bar{\psi}_1 \bar{\psi}_2 O_I \psi_\mu \psi_e \right|^2$$

- 散乱電子の歪曲
- 束縛電子の相対論的取扱い が重要

- 崩壊率

- 接触型過程: **増大** ($Z = 82$ で7倍)
- 光子型過程: **減少** ($Z = 82$ で1/4倍)

散乱電子の歪曲が
過程によって異なる影響