

# Electron beam dump 実験 による cLFV 探索

cLFV相互作用を持った軽いゲージ粒子に対する  
electron beam dump 実験からの制限  
という意味です

発表者：荒木威（奥羽大学）

共同研究者：浅井健人（埼玉大学），下村崇（宮崎大学）

based on arXiv:2107.07487 [hep-ph].

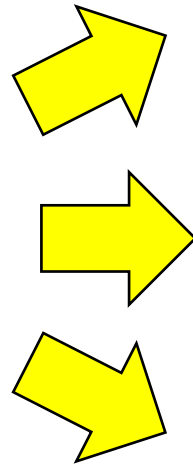
# Introduction

## ☆ 背景

- 新粒子がなかなか見つからない。。。
- 視点を変えて、**小**質量(MeV-GeV)で**弱**相互作用( $<10^{-4}$ )する中性粒子が注目されている？

### (Example)

- dark photon,
- dark higgs,
- $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ ,
- ALPs  
(axion like particles),
- etc.

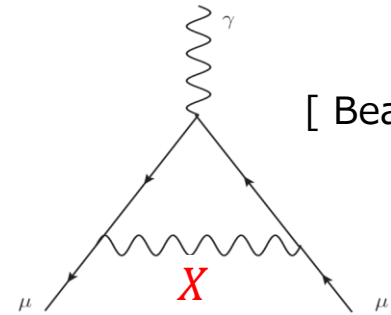


## ➤ inelastic DM



[ Smith, Weiner, PRD64(2001) ]

## ➤ Muon g-2



[ Beak, et al, PRD64(2001) ]

[ Altmannshofer, et al, PRL113(2014) ]

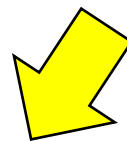
## ➤ Hubble tension

[ Escudero, et al, JHEP03(2019) ]

# ☆ Minimal dark photon model

- 新たな  $U(1)$  ゲージ対称性を導入。
- 新しい粒子は新ゲージ粒子( $X^\mu$ )だけ。
- SM粒子は新しい  $U(1)$  の下で中性。
- 新ゲージ粒子は kinetic mixing を通じてSMの荷電レプトンと結合する。

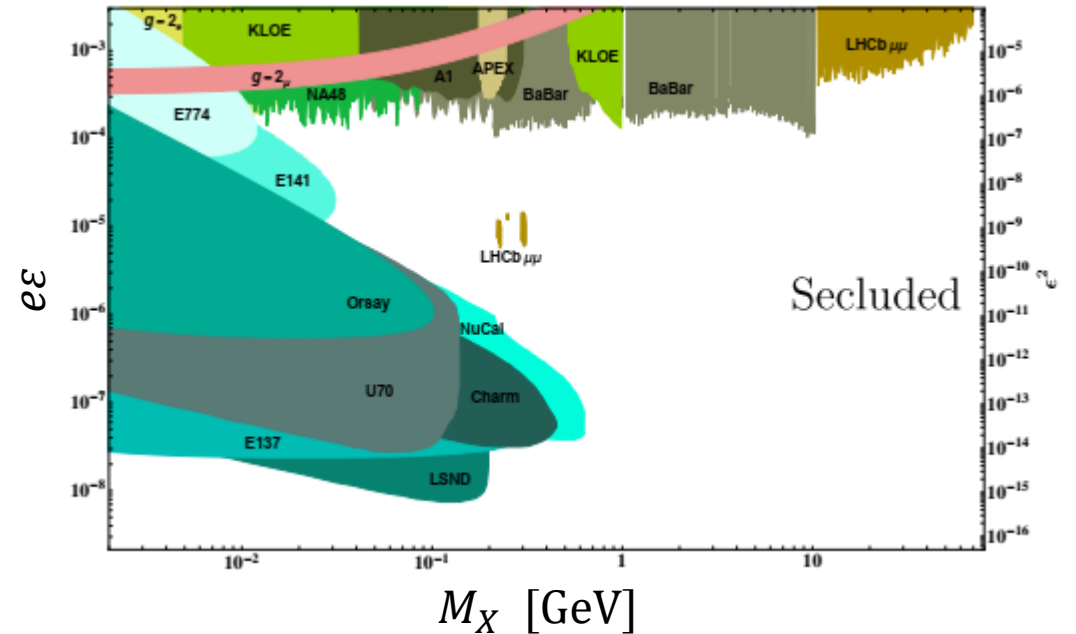
$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \dots - \frac{\varepsilon'}{2} F^{\rho\sigma} X_{\rho\sigma} + \frac{1}{2} M_X^2 X^2$$


 $X - \gamma$  mixing

$$\mathcal{L}_{int} = e\varepsilon X_\rho J_{em}^\rho = e X_\rho \bar{\ell}_\alpha \begin{pmatrix} \varepsilon & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon \end{pmatrix} \gamma^\rho \ell_\beta + \dots$$

$(\varepsilon = \varepsilon' \cos \theta_W)$ 
※ quark との相互作用はこのトークでは考えない
  
 $(\alpha, \beta = e, \mu, \tau)$

- $X$  は荷電レプトンと lepton flavor **conserving** かつ **universal** な結合。

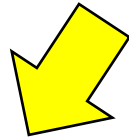


[ Bauer, Foldenatuer, Jaeckel, JHEP07(2018) ]

# ☆ Minimal $L_\mu - L_\tau$ model

- 新たな  $U(1)$ ゲージ対称性を導入。
- 新しい粒子は新ゲージ粒子( $X^\mu$ )だけ。
- ミュー・レプトンとタウ・レプトンのみが charge を持つ。  $\ell_\mu, \nu_\mu: 1$   $\ell_\tau, \nu_\tau: -1$

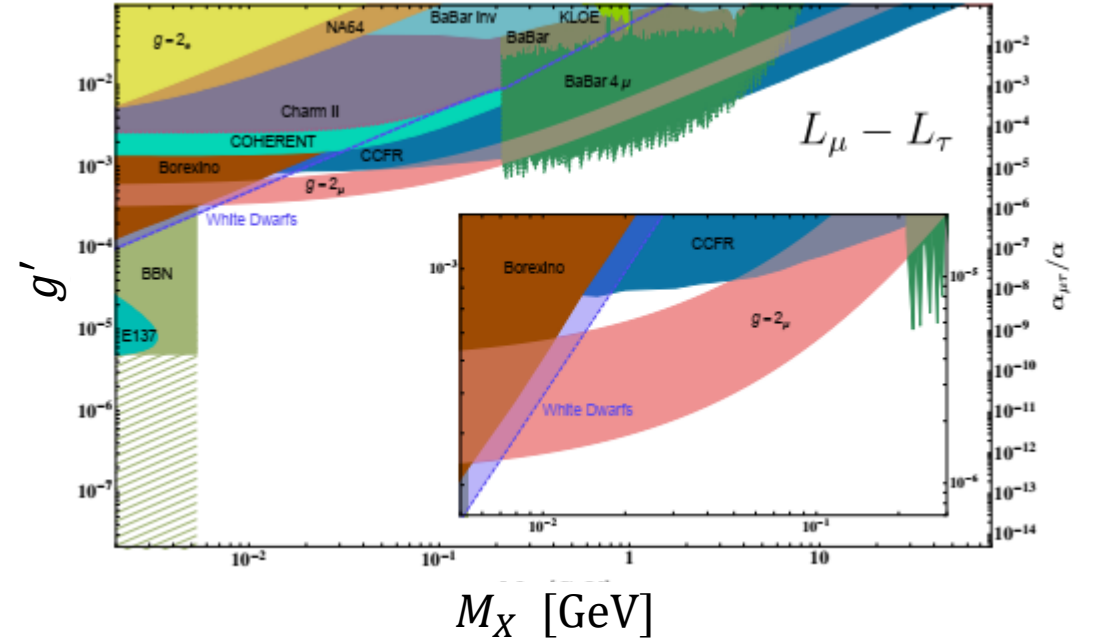
$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \dots + \underline{g' X_\rho J_{\mu\tau}^\rho} + \frac{1}{2} M_X^2 X^2$$



$$\mathcal{L}_{int} = g' X_\rho J_{\mu\tau}^\rho = g' X_\rho \bar{\ell}_\alpha \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \gamma^\rho \ell_\beta + \dots$$

( $\alpha, \beta = e, \mu, \tau$ )

- $X$ は荷電レプトンと lepton flavor **conserving** かつ **non-universal** な結合。
- tree では電子との相互作用はないが 1-loop で存在する。



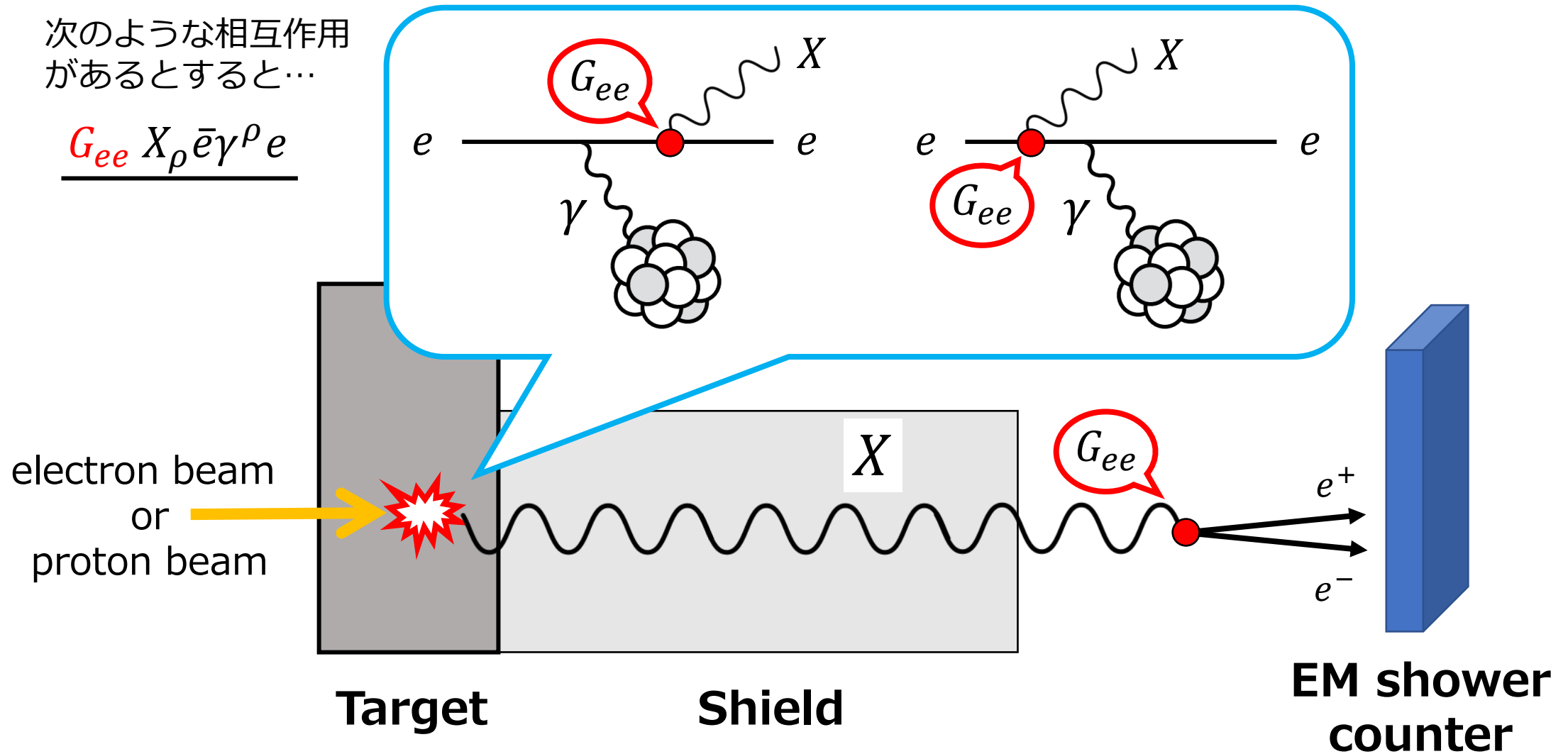
[ Bauer, Foldenatuer, Jaeckel, JHEP07(2018) ]

# ☆ beam dump experiment

- 長寿命な中性粒子を探索するのに適した実験。

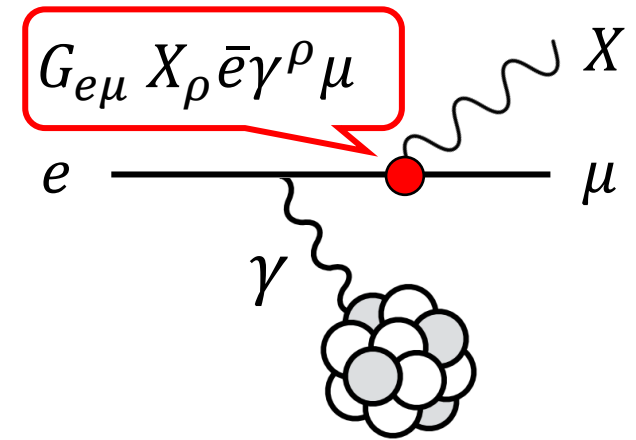
次のような相互作用  
があるとすると…

$$\underline{G_{ee} X_\rho \bar{e} \gamma^\rho e}$$



## ☆ 研究の動機と目的

- これまでの beam dump 実験からの制限は lepton flavor conserving な相互作用しか考えていない。
- 拡張されたモデルでは lepton flavor violating な相互作用も生じるのでは？（後述）。
- その場合 beam dump の制限はどうなるのか？
- $\mu \rightarrow e\gamma$  や  $\mu \rightarrow eee$  の制限以下に新たな制限を（間接的に）設けられるのでは？
- 2つの簡単なラグランジアンを考え、E137 electron beam dump実験の制限を導く。
- 注目するパラメータ領域は、 $\frac{O(\text{MeV-GeV})}{(\text{質量})}$ 、 $\frac{O(10^{-8} - 10^{-4})}{(\text{結合定数})}$ 。



# Outline

---

- Introduction.
- cLFV in gauge sector.
- Interaction Lagrangian in this talk.
- Number of expected events.
- Results.
- Summary.

# cLFV in gauge sector

- $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$  が破れていないと Majorana neutrino 質量行列は

$$Q_{L_\mu-L_\tau}(\bar{\nu}^c \nu)_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 2 & 0 \\ -1 & 0 & -2 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad M_\nu = \begin{pmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times \\ 0 & \times & 0 \end{pmatrix} \quad \times \dots \text{非0成分}$$

荷電レプトン(Dirac)の質量行列は

$$Q_{L_\mu-L_\tau}(\bar{\ell}_L \ell_R)_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & -2 \\ 1 & 2 & 0 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad M_\ell = \begin{pmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times \end{pmatrix}$$

しか許されない。

- しかしこのままだと現実的な neutrino mass と MNS 行列が出ない。

$$m_2^\nu = m_3^\nu \quad \theta_{12} = \theta_{13} = 0 \quad \theta_{23} = 45^\circ$$

- 対称性を自発的に破るスカラーを導入し、質量行列の非0成分を増やす必要がある。



## (つづき)

- ここでは荷電レプトンの質量行列に非対角項が出たとする。

$$M_\ell = \begin{matrix} \bar{L}H_{\text{SM}}\ell_R & \bar{L}H_1\ell_R & \bar{L}H_2\ell_R \\ \begin{pmatrix} \times & 0 & 0 \\ 0 & \times & 0 \\ 0 & 0 & \times \end{pmatrix} & + \begin{pmatrix} 0 & 0 & \times \\ \times & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \times \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} & + \dots \end{matrix} \quad \times \dots \text{非0成分}$$

- 荷電レプトンの質量行列が非対角的になると mixing が生まれ、gauge sector に LFV な項（非対角成分）が現れる。

$$g' \bar{\ell}_i \gamma^\rho \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \ell_j X_\rho \quad g' \bar{\ell}_\alpha \gamma^\rho \left[ V_{\alpha i}^+ \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} V_{j\beta} \right] \ell_\beta X_\rho$$


$$\ell_i \rightarrow V_{i\alpha} \ell_\alpha$$

[ Foot, et al, PRD50(1994) ]

- このシナリオは lepton flavor non-universal な場合のみ可能。
- universal な場合でも loop で生じることが考えられる。

※ 1-loop induced dipole operator [ Nomura, Okada, Uesaka, JHEP01(2021) ]

# Int. Lagrangian in this talk

■ このトークでは以下の2つの相互作用ラグランジアンを考える。

1.  $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$  type

$$\mathcal{L}_{int} = g' \bar{\ell}_\alpha \begin{pmatrix} s^2 & \overset{\text{LFV}}{sc} & 0 \\ sc & c^2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \gamma^\rho \ell_\beta X_\rho$$

$(s = \sin \theta)$   
 $(\alpha, \beta = e, \mu, \tau)$

パラメータ

$$g', \theta, M_X$$

2. dark photon type

$$\mathcal{L}_{int} = e \bar{\ell}_\alpha \begin{pmatrix} \varepsilon & \overset{\text{LFV}}{\varepsilon'} & 0 \\ \varepsilon' & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon \end{pmatrix} \gamma^\rho \ell_\beta X_\rho$$

$(\alpha, \beta = e, \mu, \tau)$

パラメータ

$$\varepsilon, \varepsilon', M_X$$

■ とともに新粒子は  $X$  のみでパラメータは3つ。

# Number of expected events

- イベント数の計算は以下の式を用いる。

$$N = N_e \frac{N_{\text{avo}} X_0}{A} \sum_{\ell=e,\mu} \int_{m_X}^{E_0 - m_\ell} dE_X \int_{E_X + m_\ell}^{E_0} dE_e \int_0^{T_{\text{sh}}} dt$$

$$\times \left[ I_e(E_0, E_e, t) \frac{1}{E_e} \frac{d\sigma_{\text{brems}}}{dx} \Big|_{x=\frac{E_X}{E_e}} e^{-L_{\text{sh}}/L_X} (1 - e^{-L_{\text{dec}}/L_X}) \text{Br}(X \rightarrow e^+e^-) \right]$$

$$L_X = \beta\gamma \frac{\hbar}{\Gamma_{\text{total}}} c$$

- 生成断面積は Weizäcker-Williams 近似を用いる。

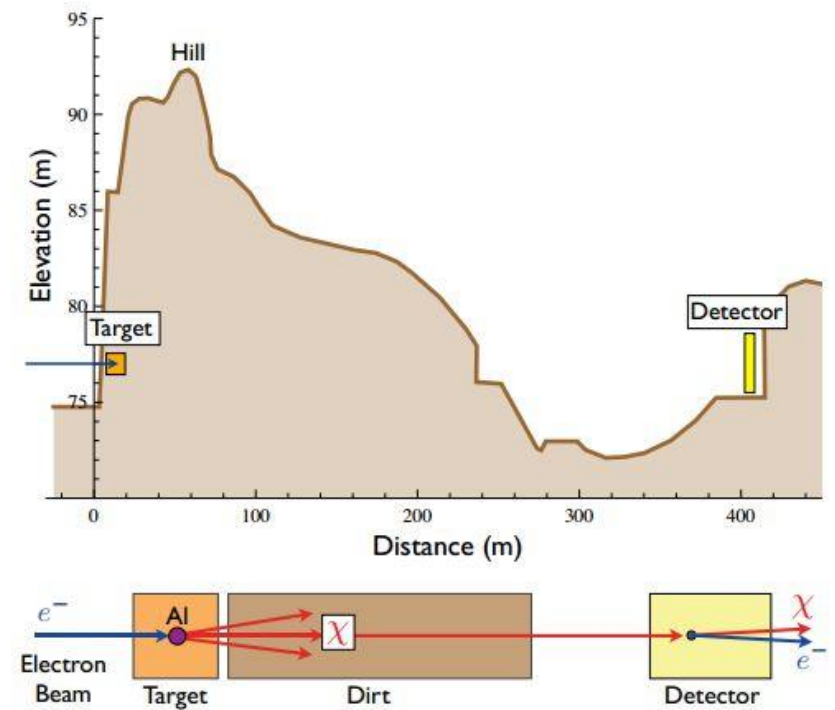
$$\frac{d\sigma_{\text{brems}}}{dx} = \frac{\alpha\xi}{\pi} \frac{E_0 x \beta_X}{1-x} \frac{d\sigma_{\text{scat}}}{dx}$$

# (つづき)

- E137 electron beam dump実験を考える。

	target	$E_0$ [GeV]	$N_{el}$ #electrons	Coulomb	$L_{sh}$ [m]	$L_{dec}$ [m]	$N_{obs}$	$N_{95\%up}$
KEK	$^{183.84}_{74}W$	2.5	$1.69 \times 10^{17}$	27 mC	2.4	2.2	0	3
E141	$^{183.84}_{74}W$	9	$2 \times 10^{15}$	0.32 mC	0.12	35	$1126^{+1312}_{-1126}$	3419
E137	$^{26.98}_{13}Al$	20	$1.87 \times 10^{20}$	30 C	179	204	0	3
Orsay	$^{183.84}_{74}W$	1.6	$2 \times 10^{16}$	3.2 mC	1	2	0	3
E774	$^{183.84}_{74}W$	275	$5.2 \times 10^9$	0.83 nC	0.3	2	$0^{+9}_{-0}$	18

[ Andreas, Ph.D. thesis (2013) ]



[ Batell, Essig, Surujon, PRL113 (2014) ]

- Electron energy  $> 3$  GeV,  $\theta < \tan^{-1}(1.5/383)$ 。
- 3イベント以上のパラメータ領域を 95% C.L. の exclusion region とする。

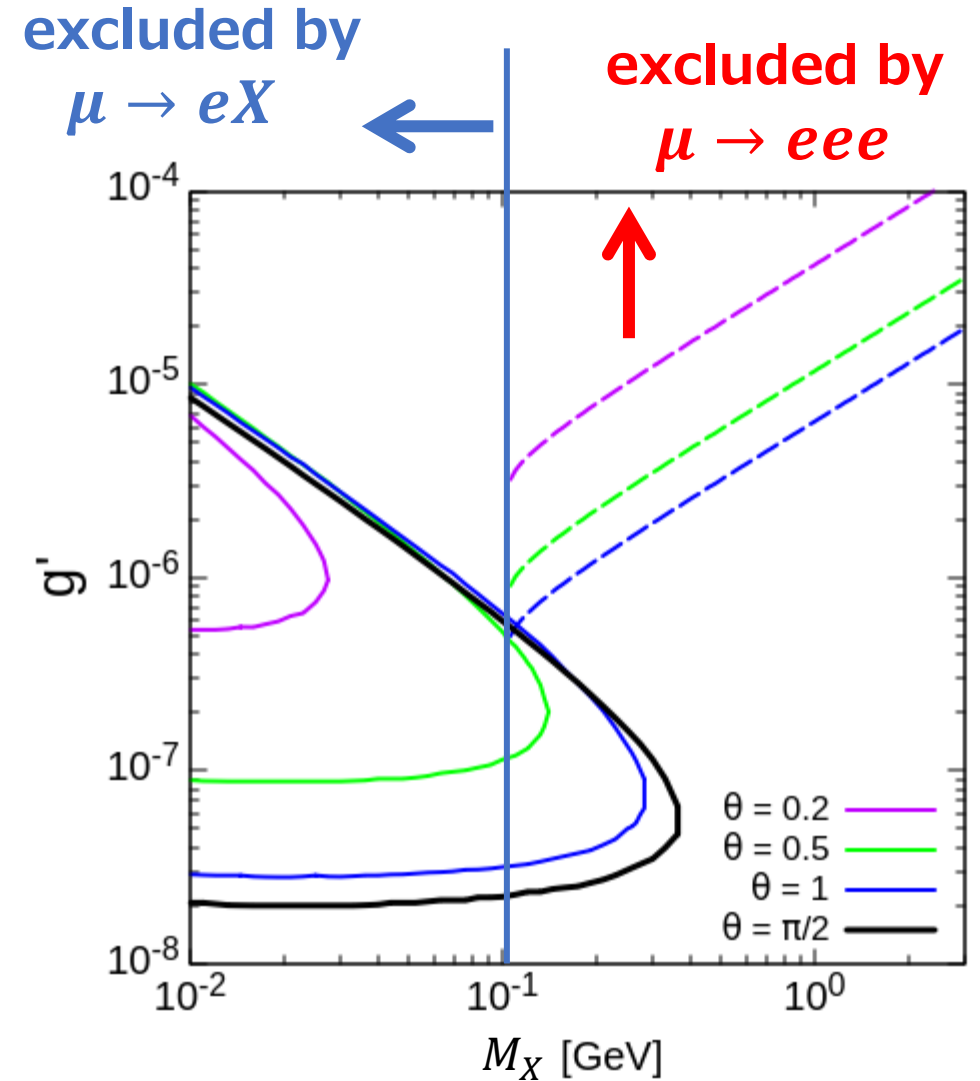
# Results

## ☆ $L_\mu - L_\tau$ type

$$\mathcal{L}_{int} = g' \overline{\ell_\alpha} \begin{pmatrix} s^2 & sc & 0 \\ sc & c^2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \gamma^\rho \ell_\beta X_\rho \quad (s = \sin \theta)$$

- mixingが増大  $\Rightarrow \bar{e}e$  成分が増大。
- 生成断面積もシグナル( $X \rightarrow \bar{e}e$ )も増大し制限領域が拡大する。
- $\theta > 0.4$  rad くらいで未制限領域を exclude できるようになる。

※ しかも  $\mu \rightarrow 3e$  の制限より下！！

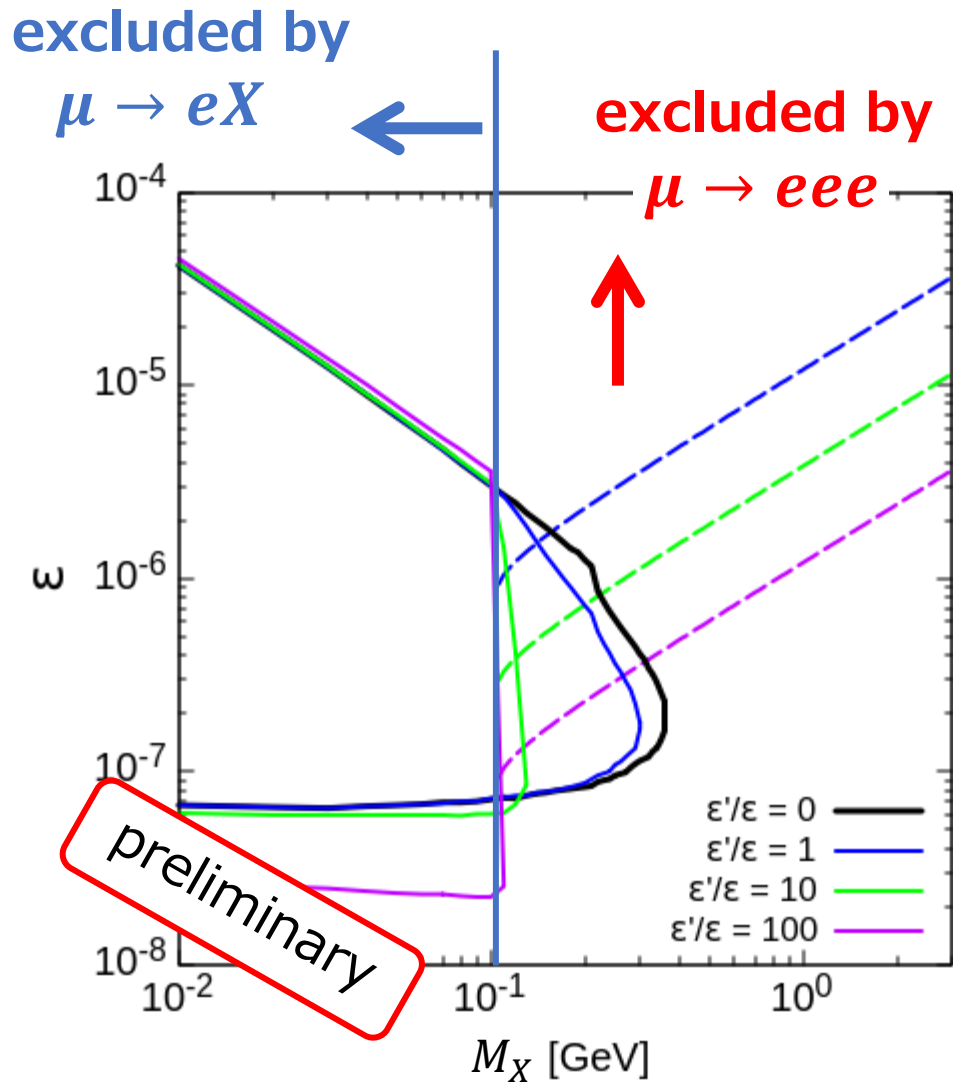


## ☆ dark photon type

$$\mathcal{L}_{int} = e \bar{\ell}_\alpha \begin{pmatrix} \varepsilon & \varepsilon' & 0 \\ \varepsilon' & \varepsilon & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon \end{pmatrix} \gamma^\rho \ell_\beta X_\rho$$

$(\alpha, \beta = e, \mu, \tau)$

- LFVを大きくしても生成断面積は増えない ( $L_\mu - L_\tau$  も同様)。
- LFVが大きくなると  $Br(X \rightarrow ee)$  が減少してしまい、制限領域が狭くなってしまふ。



# ☆ 生成断面積

- $x = 1$  ( $E_{A'} = E_e$ )、LFCとLFVの結合定数が等しい ( $g = 10^{-6}$ とする) として比較。

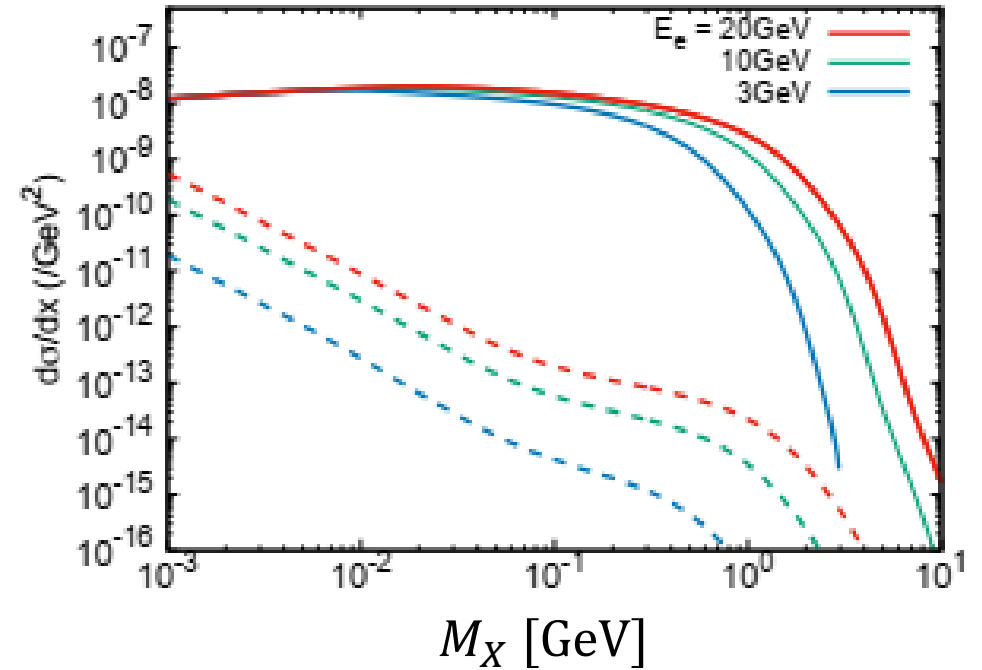
## LFC

$$\frac{d\sigma_{brems}}{dx} \sim \frac{\alpha g^2}{2\pi} \xi\beta \times \frac{1}{m_e^2}$$

## LFV

$$\frac{d\sigma_{brems}}{dx} \sim \frac{\alpha g^2}{2\pi} \xi\beta \times \theta_{\max}^2 \frac{E_e^2}{M_X m_\mu^2}$$

※ 実線 … LFC  
破線 … LFV



- LFVの生成はあまり効かない。。。。

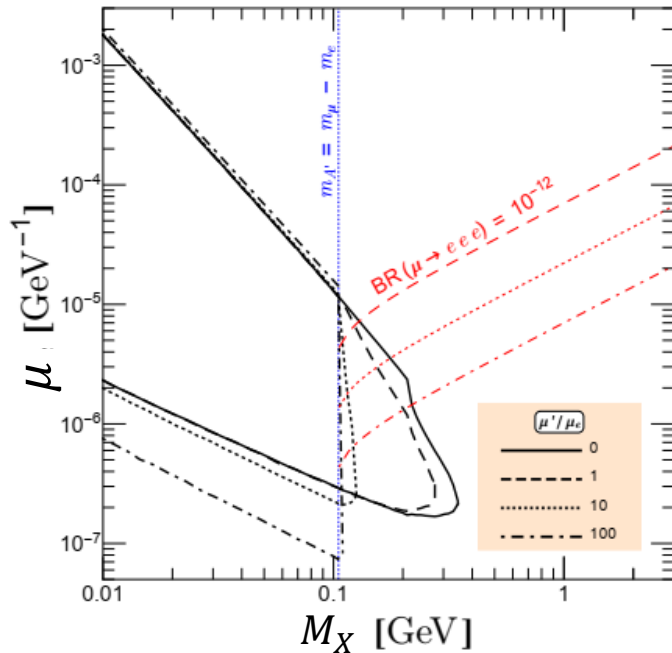
# ☆ その他の軽い粒子

## ■ Vector with dipole int.

$$\mathcal{L}_{int} = \frac{1}{2} \bar{\ell}_\alpha \begin{pmatrix} \mu & \mu' & 0 \\ \mu' & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{pmatrix} \sigma^{\mu\nu} \ell_\beta X'_{\mu\nu}$$

(  $\alpha, \beta = e, \mu, \tau$  )

LFV

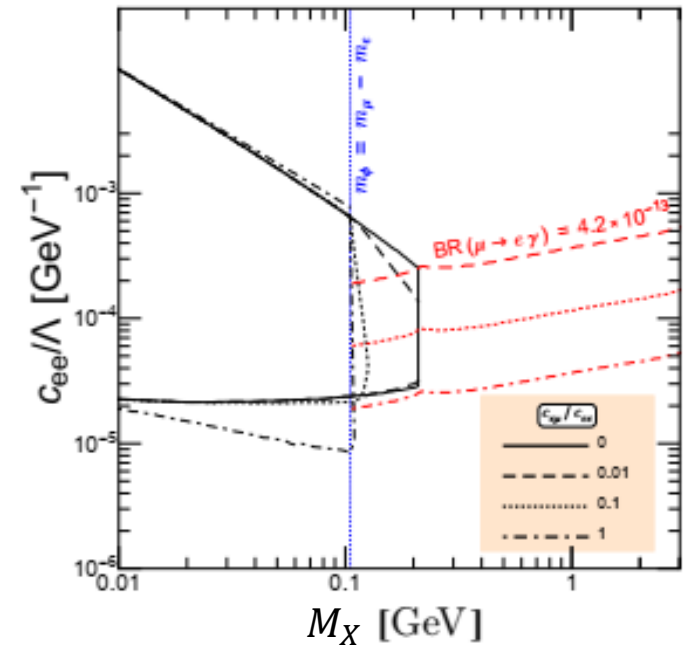


## ■ ALPs

$$\mathcal{L}_{int} = \frac{\partial_\rho X}{\Lambda} \bar{\ell}_\alpha \begin{pmatrix} c & c' & 0 \\ c' & c & 0 \\ 0 & 0 & c \end{pmatrix} \gamma^\rho \gamma_5 \ell_\beta$$

(  $\alpha, \beta = e, \mu, \tau$  )

LFV





# Summary

---

- 質量が小さく、SM粒子と弱く相互作用する中性粒子に対して、古くから electron beam dump 実験の制限が考えられてきた。
- dark photon model と  $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$  model に cLFV ( $e\mu$ ) 相互作用を加え、electron beam dump の制限にどのような寄与をもたらすか調べた。
- $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$  type の場合は cLFV の寄与が大きくなるにつれ制限領域が拡大し、未制限領域に新たな制限が設けることも可能。
- dark photon type の場合は LFV の寄与が大きくなると  $\mu \rightarrow eX$  の制限に埋もれてしまう。
- このトークでは  $e\mu$  成分しか考えなかったが、 $e\tau, \mu\tau$  成分を入れて基本的な振る舞いは変わらないと思われる。生成数は増えないし tau decay の閾値まで制限が届かない。

**backup slides**

☆ もし  $X \rightarrow \mu e$  も検出できたなら

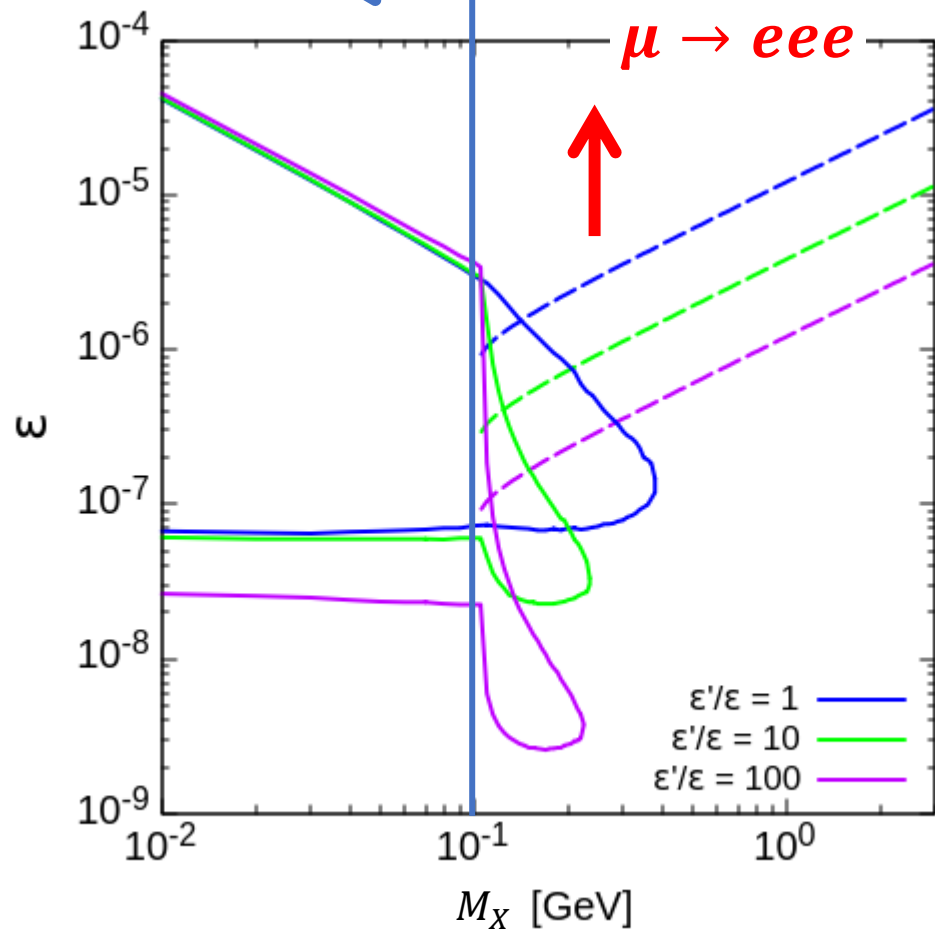
excluded by

$\mu \rightarrow eX$

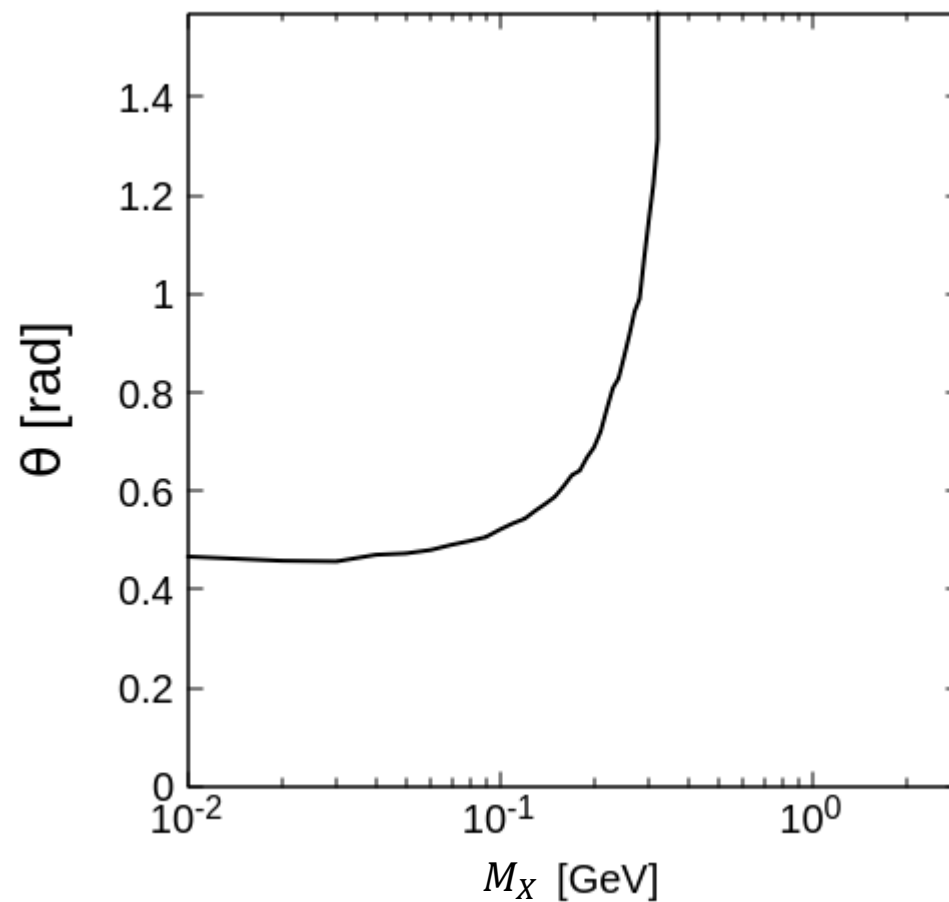


excluded by

$\mu \rightarrow eee$



☆  $L_\mu - L_\tau$  , 縦軸 mixing



# Production cross section

## ■ vectorial int.

