

~~F2K~~, FASER実験における 軽い新粒子探索

共同研究者：

浅井健人，音野瑛俊，下村崇，田窪洋介

荒木 威

(あらかき たけし)

自己紹介

～2008 金沢大学
台湾の清華大学
中国IHEP
益川塾（京都産業大学）
埼玉大学
工学院大学
2019～ 奥羽大学

Introduction

☆ Light new particles?

■ TeVスケールの新粒子（新物理）が見つからない。。。

■ これまでとは視点を変えて

小さな質量 (MeV - GeV)

このトークで
注目する領域

微弱な相互作用 ($10^{-9} - 10^{-4}$)

を持った新粒子も一考の余地があるのではないか。

■ ミューオンの $(g - 2)_\mu$ や Hubble tension の解決策（もしくは緩和策）として期待できる。

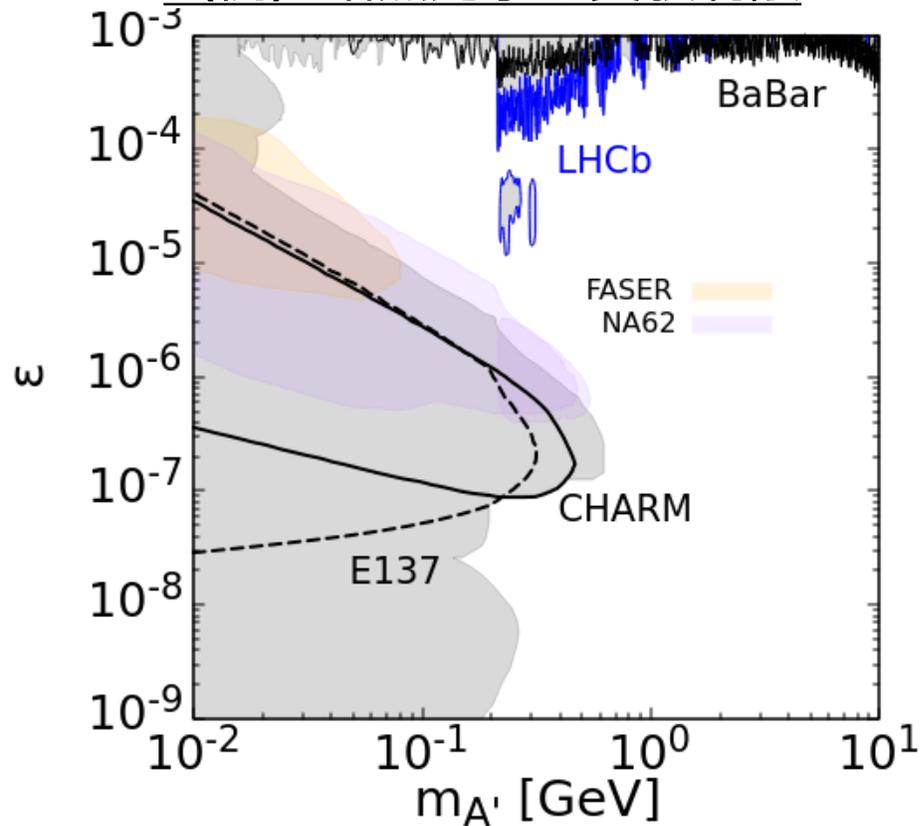
■ 軽い暗黒物質または媒介粒子の可能性も議論されている。

Introduction

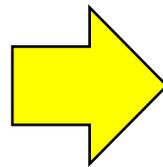
☆ Current limits and future sensitivities

- 実験分野でも軽い新粒子に対する関心が高まっている。

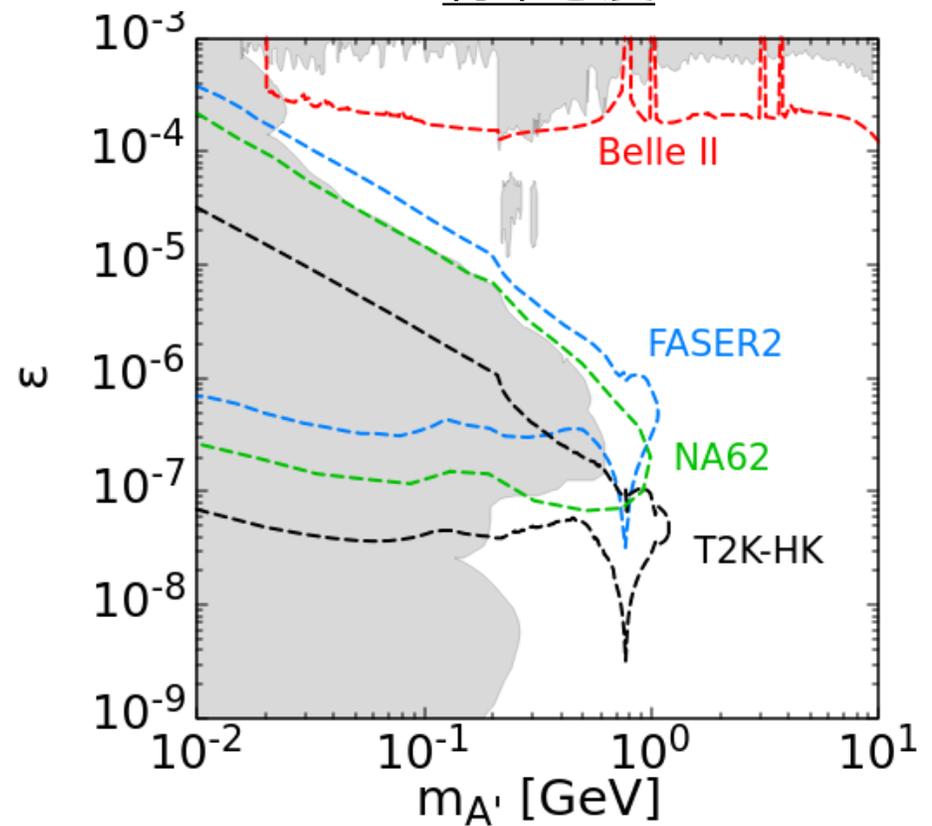
(例) 暗黒光子の実験制限



将来



将来感度



Reference model: Dark photon

- 軽い新粒子の典型例として、いわゆる暗黒光子模型を考える。

$$\mathcal{L}_{\text{DP}} = -\frac{1}{4} F'_{\mu\nu} F'^{\mu\nu} - \frac{\varepsilon}{2 \cos \theta_w} F'_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \xrightarrow{\text{対角化}} -\varepsilon e A'_\mu J_{\text{em}}^\mu + \dots$$

- ここで A'_μ が暗黒光子で J_{em}^μ はSMの電磁カレント。

$$j_{\text{em}}^\mu = \bar{u} \gamma^\mu \left(\frac{2}{3} \right) u + \bar{d} \gamma^\mu \left(-\frac{1}{3} \right) d + \bar{e} \gamma^\mu (-1) e$$

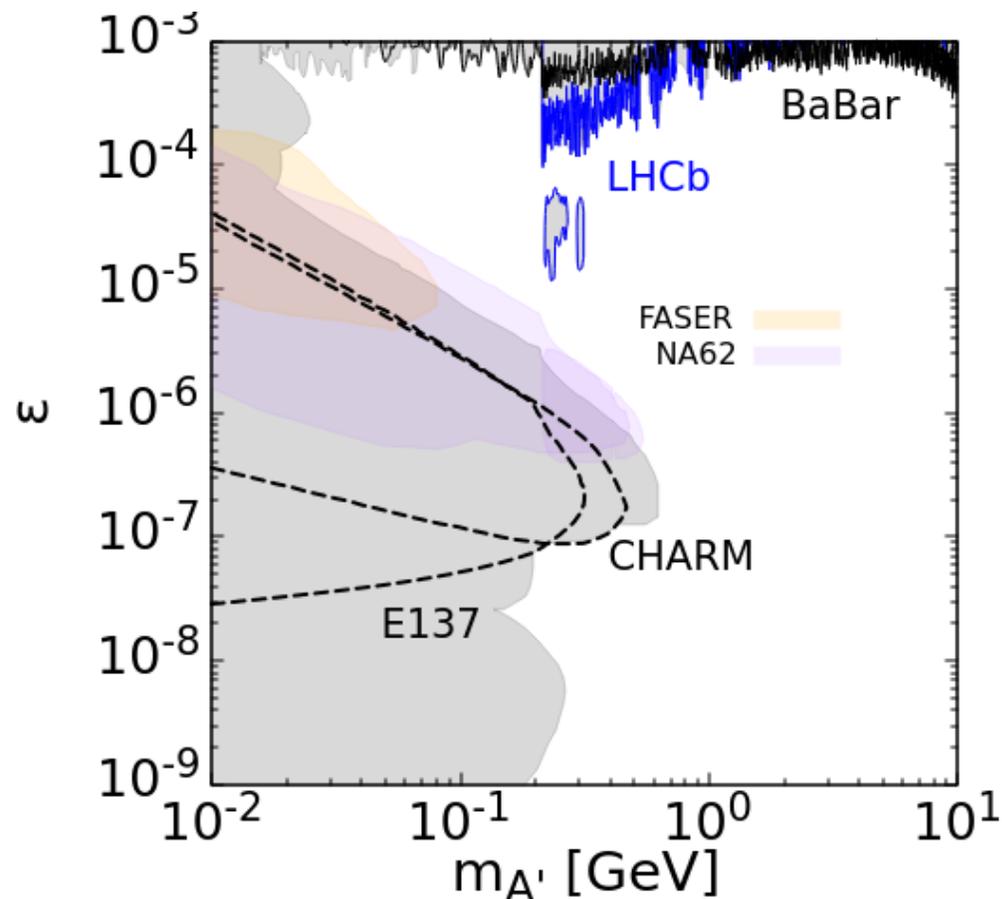
- 暗黒光子の質量は手で入れてしまうことが多い。

$$\mathcal{L}_{\text{DP}} = -\varepsilon e A'_\mu J_{\text{em}}^\mu + \frac{1}{2} (m_{A'})^2 A'_\mu A'^\mu$$

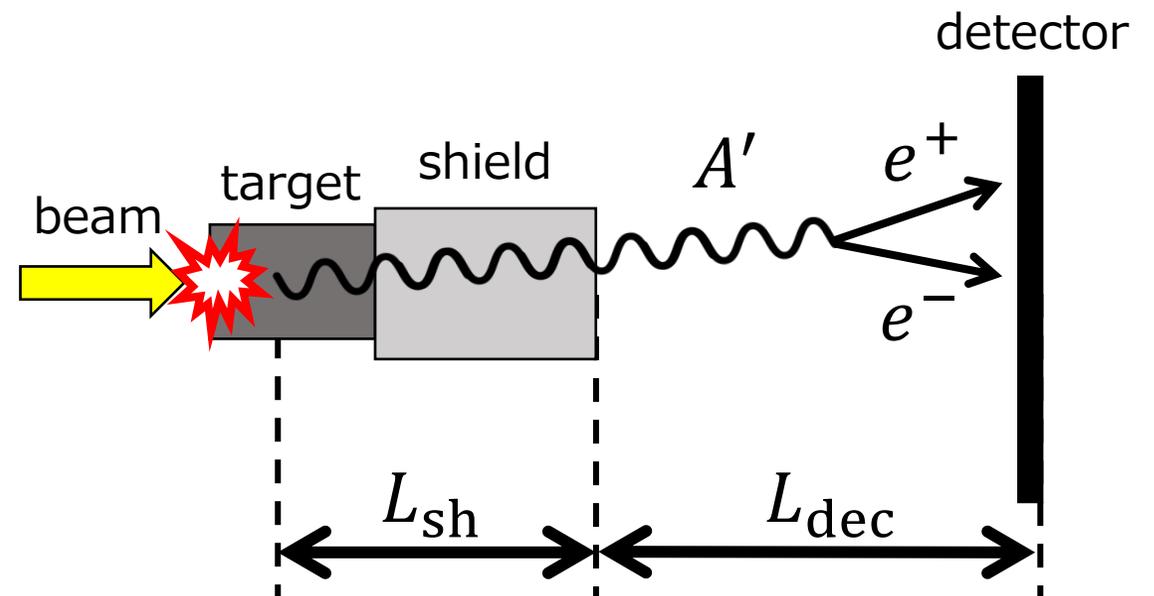
パラメータは ε と $m_{A'}$ の2つ

Beam dump experiments

- $\varepsilon < 10^{-4}$ になると新粒子が長寿命になってくるので、Beam dump実験が感度を持つようになる。



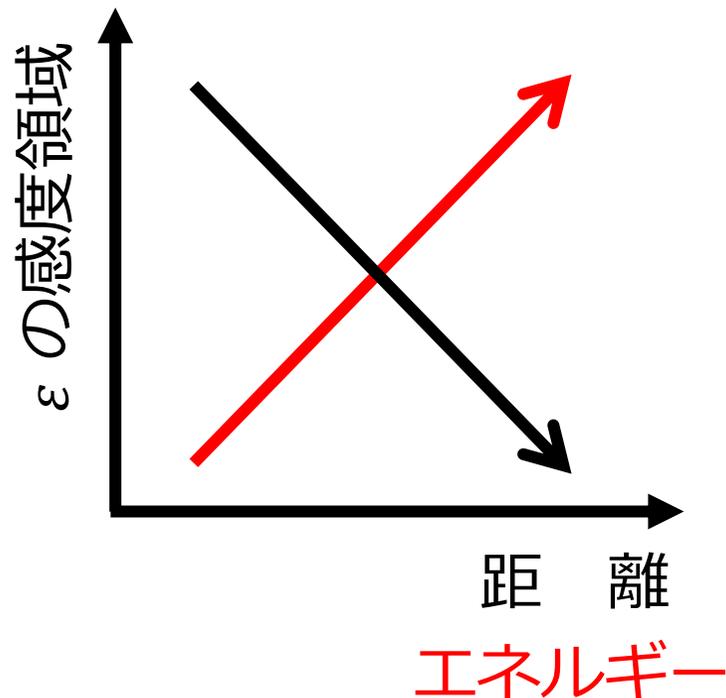
	Beam	E [GeV]	L_{sh}	L_{dec}
CHARM	proton	400	480	35
E137	electron	20	179	204



Beam dump experiments

☆ Typical setup of beam dump exp.

- (生成過程の詳細にも依るが)
新粒子の崩壊長から感度領域をザックリ見積もると、、、



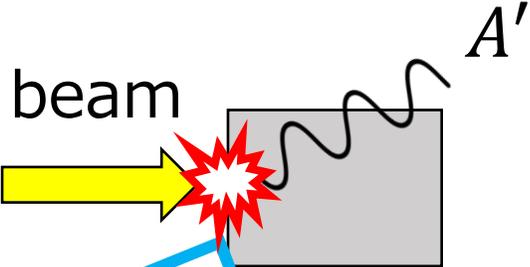
$$\left(\frac{\varepsilon}{10^{-6}}\right)^2 \simeq \left(\frac{100 \text{ m}}{d}\right) \times \left(\frac{E_{A'}}{10 \text{ GeV}}\right) \times \left(\frac{10^{-1} \text{ GeV}}{m_{A'}}\right)^2$$

長距離 ⇒ 小さな ε (長寿命) に感度
高エネルギー ⇒ 大きな ε (短寿命) に感度

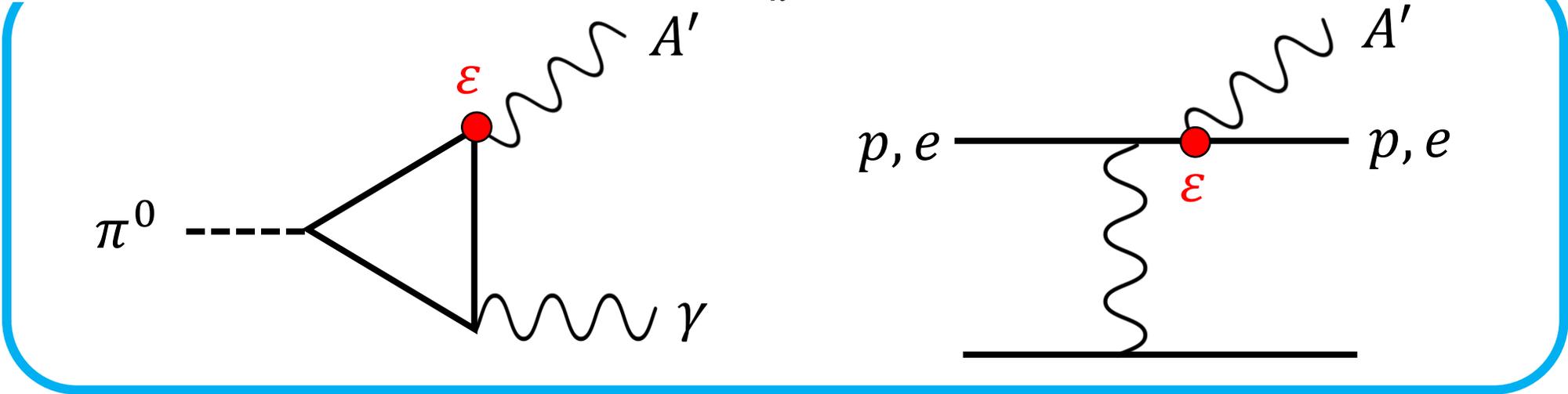
Beam dump experiments

☆ Production of light particles at beam dump exp.

- 電子ビーム ⇒ 制動放射
- 陽子ビーム ⇒ 制動放射 + **メソン崩壊**



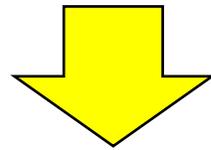
$$BR(\pi^0 \rightarrow A'\gamma) = BR(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) \times 2\varepsilon^2 \left(1 - \frac{m_{A'}^2}{m_{\pi^0}^2}\right)^3$$



Motivation and goals

暗黒光子モデルの制限（右図）を計算する際、質量の起源は考えられていない。

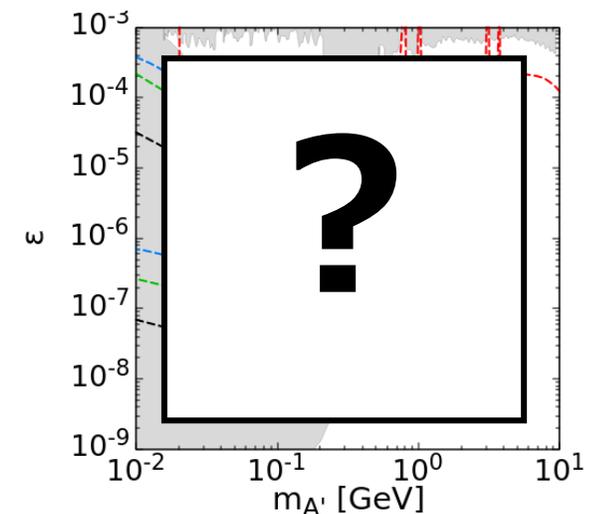
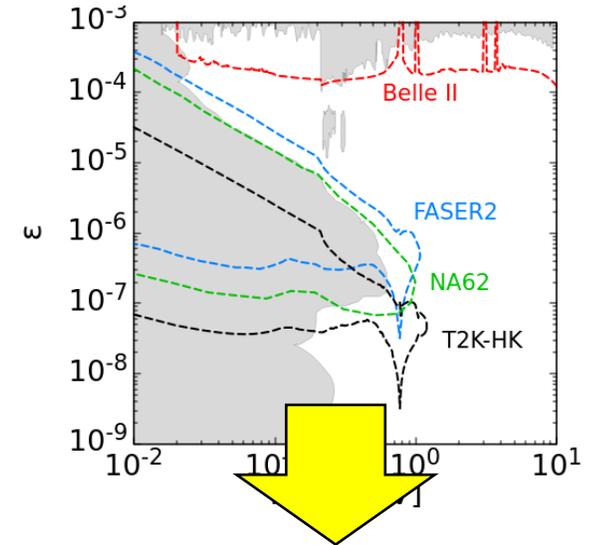
$$\mathcal{L}_{DP} = -\varepsilon e A'_\mu J_{em}^\mu + \frac{1}{2} (m_{A'})^2 A'_\mu A'^\mu$$



質量を与えるスカラー場を入れたらどうなるか？

$$\underline{|D_\mu \phi|^2 - V(\phi)}$$

色々（次頁）変わるので、排除領域も変わる？



Motivation and goals

☆ dark photon + 1 singlet

■ SM singletのスカラーを追加する。

$$\dots - \frac{\varepsilon}{2 \cos \theta_w} F'_{\mu\nu} F^{\mu\nu} + \underbrace{|D_\mu \phi|^2 - \lambda |H|^2 |\phi|^2}_{\text{red line}} \dots$$

$$\ast D_\mu = \partial_\mu - i g' A'_\mu$$

■ 質量項だけでなく他にも項が出てきて… (次頁に続く)

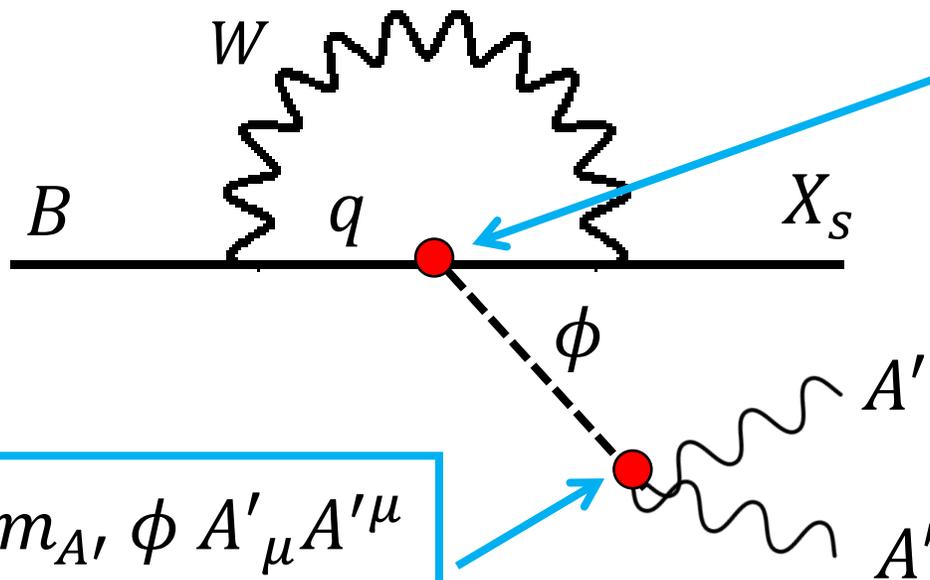
$$|D_\mu \phi|^2 \begin{cases} \longrightarrow \frac{1}{2} m_{A'}^2 A'_\mu A'^\mu & \ast m_{A'} = g' \langle \phi \rangle \\ \longrightarrow g' m_{A'} \phi A'_\mu A'^\mu \end{cases}$$

$$\lambda |H|^2 |\phi|^2 \longrightarrow \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h \\ \phi \end{pmatrix} \longrightarrow \sum_f (y_f \times \theta) \phi \bar{f} f$$

Motivation and goals

☆ Production via scalar decay

■ 陽子ビームなら新たな生成が考えられる ⇒ 排除領域が広がる？



$$\sum_f (y_q \times \theta) \phi \bar{q} q$$

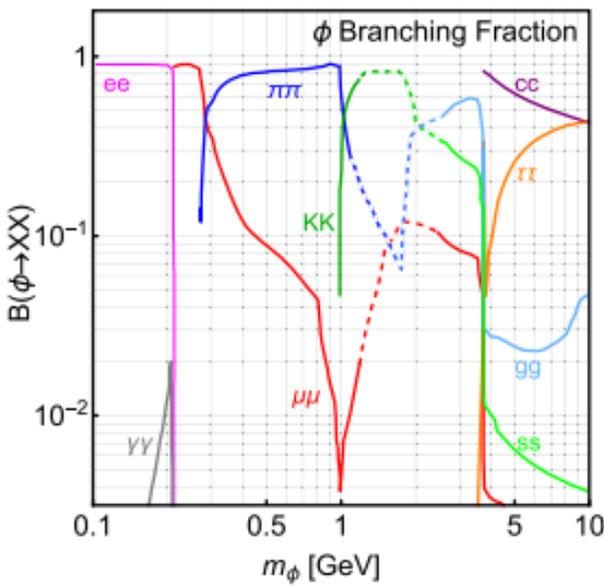
$$\text{Br}(B \rightarrow X_s \phi) \simeq 5.7 \left(1 - \frac{m_\phi^2}{m_b^2}\right)^2 \theta^2$$

$$g' m_{A'} \phi A'_\mu A'^\mu$$

$$\Gamma_{\phi \rightarrow A' A'} = \frac{g'^2 m_{A'}^2}{8\pi m_\phi} \beta_\phi(A') \left(2 + \frac{m_\phi^4}{4m_{A'}^4} \left(1 - \frac{2m_{A'}^2}{m_\phi^2}\right)^2\right)$$

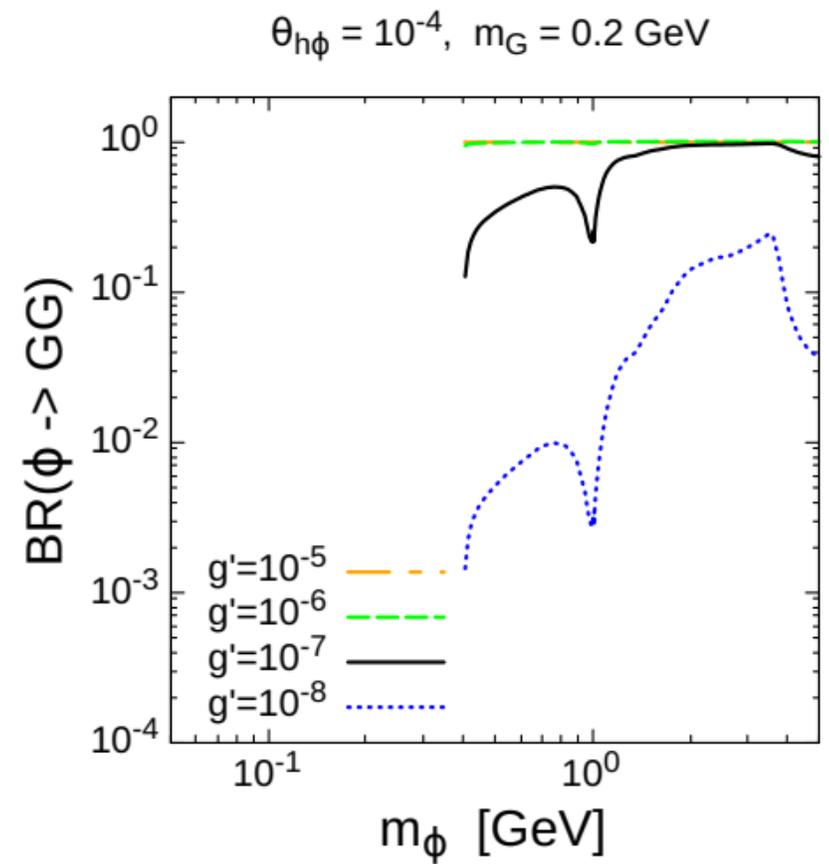
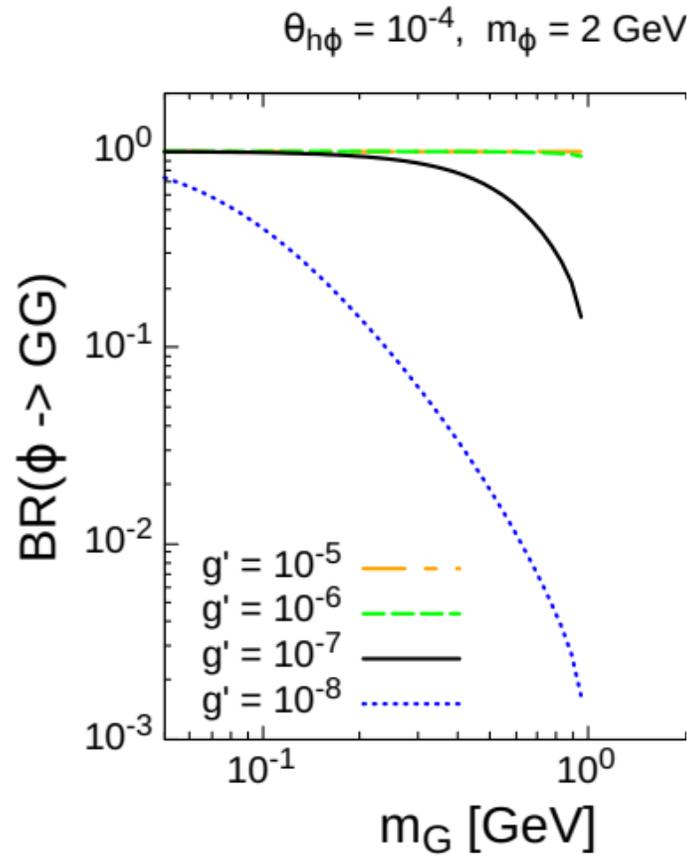
Motivation and goals

☆ How large is $\phi \rightarrow A'A'$?



VS

$B(\phi \rightarrow A'A')$



Motivation and goals

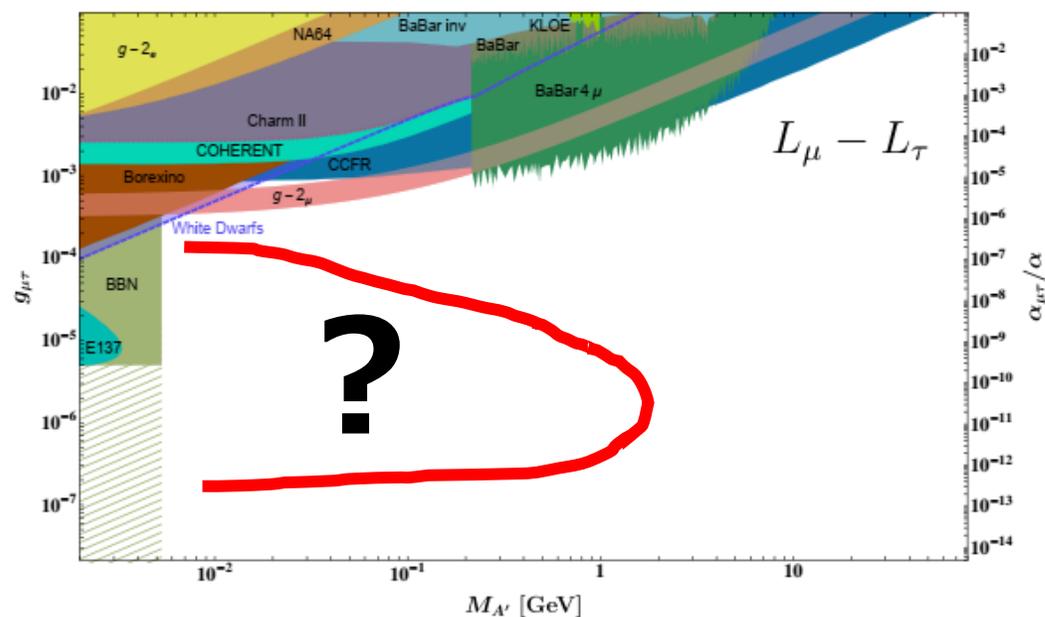
☆ Impact on leptonic force

- 例えば $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ という模型はクォークと電子との相互作用が無く、beam dumpからの制限がほぼない。
- が、暗黒光子の場合と同様に、これまでの解析は質量を手で入れている。

※ 1-loopで発生する

- 新たなスカラーを入れれば

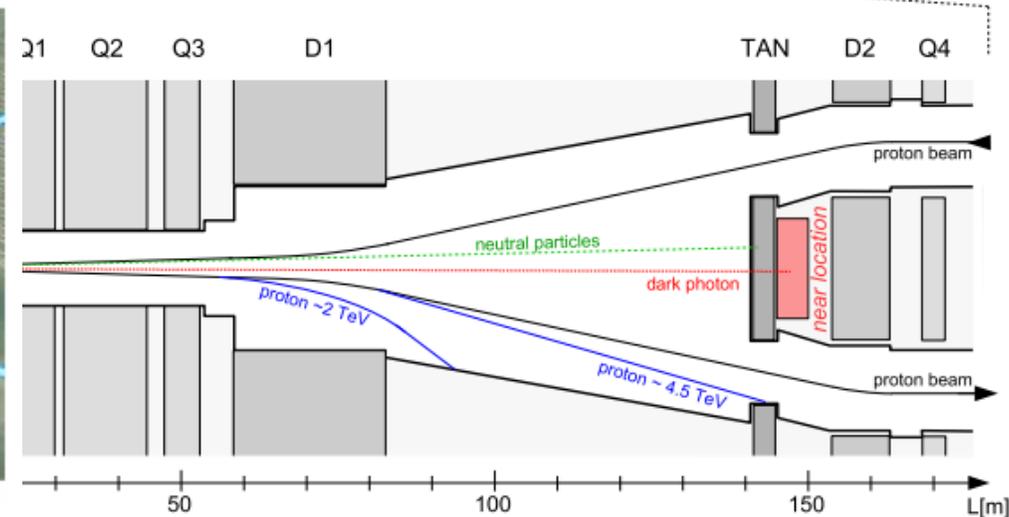
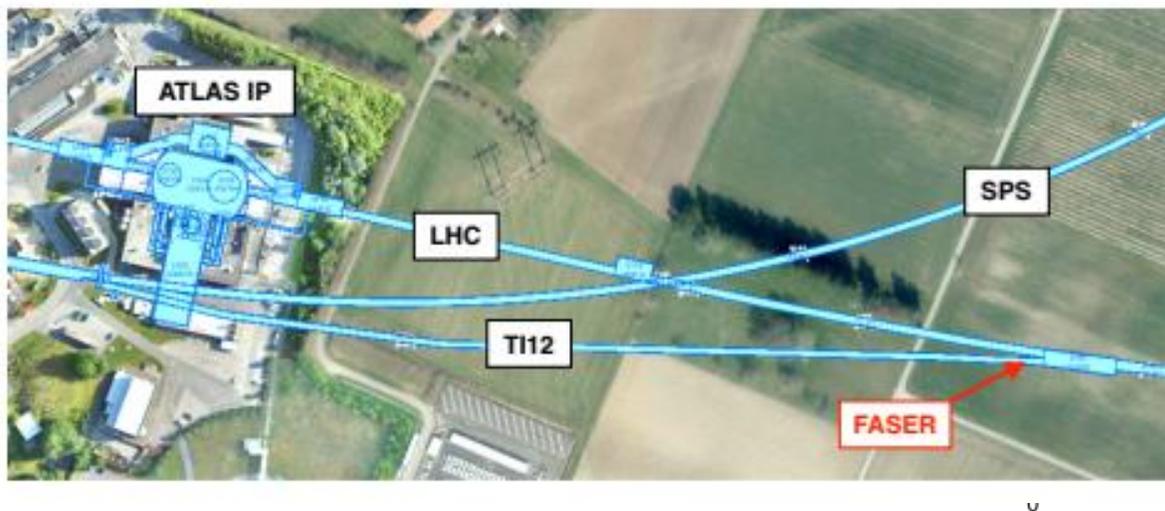
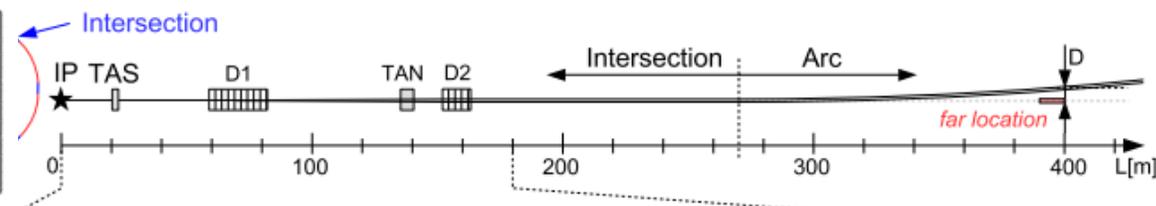
$$B \rightarrow \phi \rightarrow Z'Z'$$
 から生成できる。
 ⇒ 制限が出るのでは？



ForwArd Search ExpeRiment (FASER)

- FASER2実験 (HL-LHC) による検証を考える。
- ちなみにFASERはすでに稼働中。

	L_{min} (m)	L_{max} (m)	R (m)	\mathcal{L} (ab^{-1})
FASER	478.5	480	0.1	0.15
FASER 2	475	480	1.0	3.0



ForwArd Search ExpeRiment (FASER)

■ Low cost, low back ground !

10

FASER experimental concept

Low cost!

- Small detector (20 cm diameter, 5 m long).
- The detectors developed for the other experiments will be recycled as much as possible (tracker, calorimeter, DAQ system).
- Construction cost: <1MCHF

Quick!

- Aim to construct the detector during LHC Long-Sutdown2 and start data-taking at the beginning of Run3.
- It is big advantage to use detectors that are already used in the other experiments and whose performance is already known.

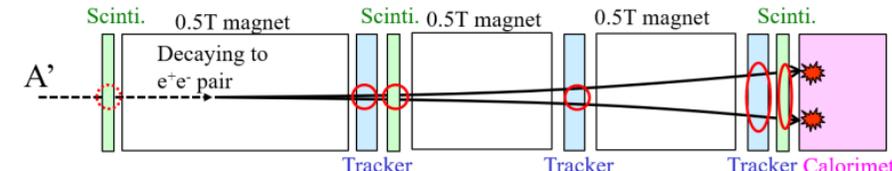
Excellent sensitivity!

- FASER can explore large parameter space of new particles by utilizing large cross-section of pp collision in the forward region at LHC.

12

Signal & Background in FASER

Benchmark signal: e^+e^- tracks originated from a dark photon



Background

- Natural rock and LHC shielding eliminates most potential backgrounds.
- High energetic muons with radiation and neutrinos are the main backgrounds.

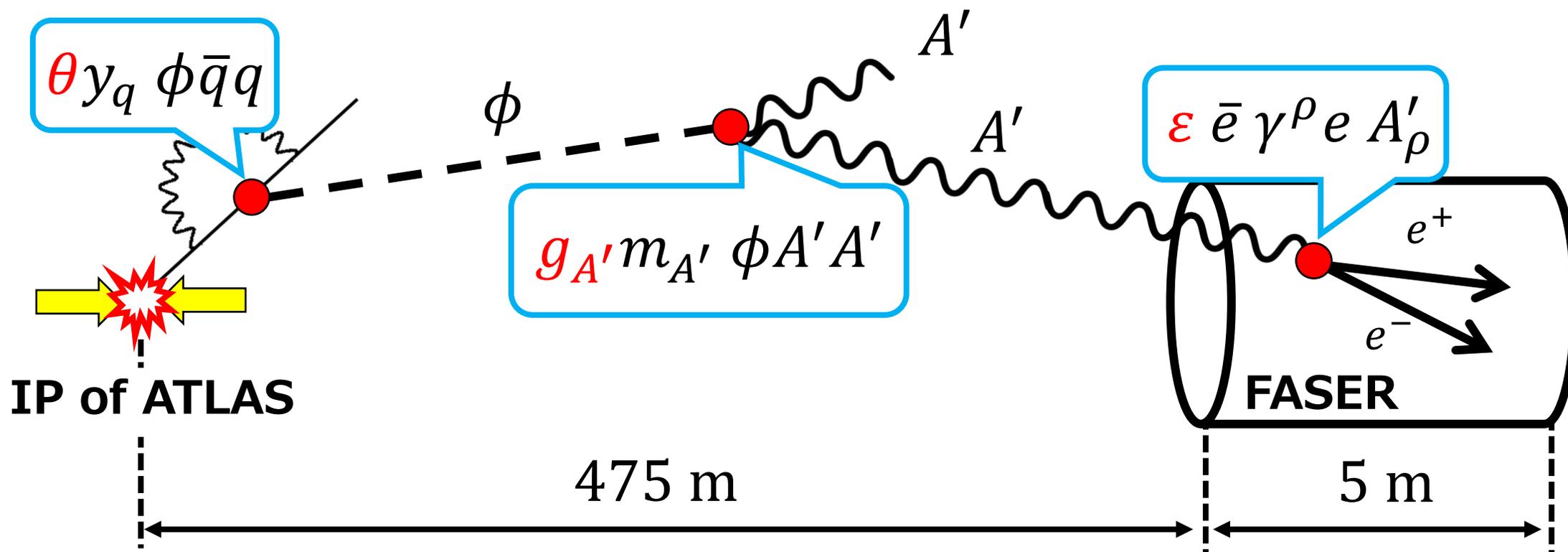
> 80k muon events with γ or EM/HD shower
 > A few (~ 100 GeV) CC/NC neutrino events

150 fb⁻¹ @Run3

Can be reduced to negligible level, assuming charged particle veto with efficiency of 99.99%

ForwArd Search ExpeRiment (FASER)

- ATLASのIPで生成されたBメソンから ϕ が生成。
- ϕ が A' に2体崩壊。
- 片方、もしくは両方の A' がFASER2検出器内で2つの荷電粒子に崩壊。



Model parameters

- 模型のパラメータは5つ。

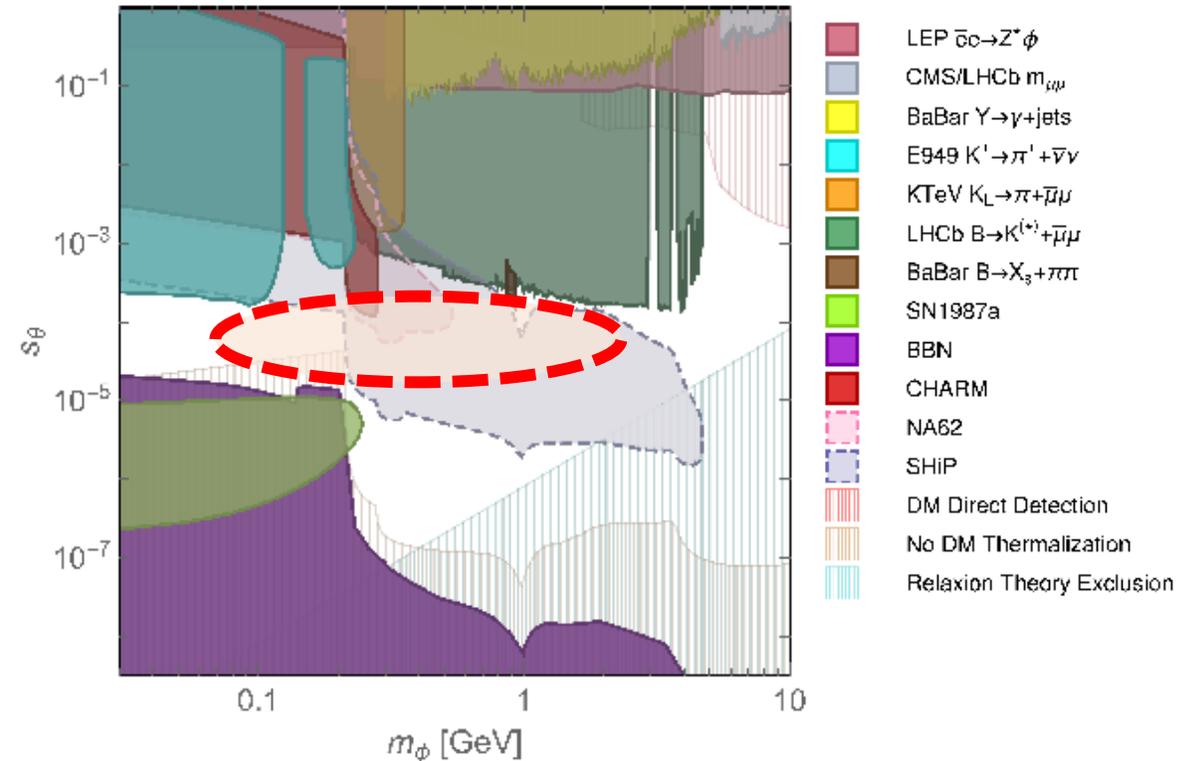
$$\varepsilon, m_{A'}, \quad + \quad g', \theta, m_\phi$$

- $B \rightarrow \phi \rightarrow A'A'$ なので

$$m_\phi \lesssim 5.0 \text{ GeV}$$

$$m_{A'} \lesssim 2.5 \text{ GeV}$$

- scalar mixing は $\theta = 10^{-4}$ に固定。



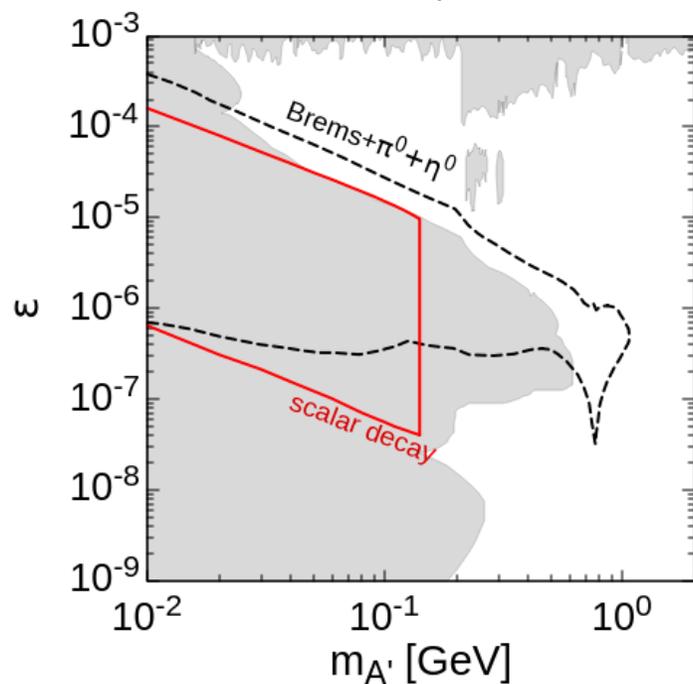
W. Winkler, arXiv: 1809.01876

Results

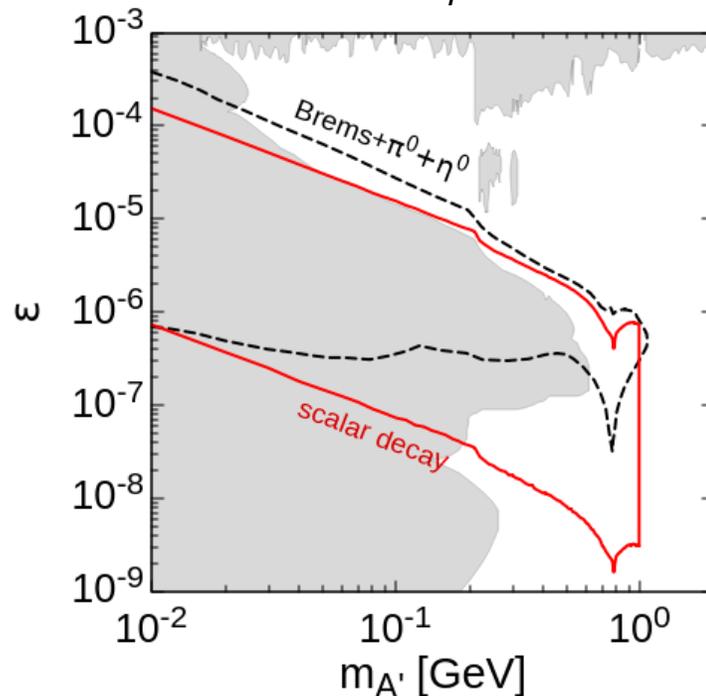
☆ dark photon + 1 singlet

- 従来の『制動放射 + π, η メソン崩壊』からの制限とは異なる領域を排除できる。

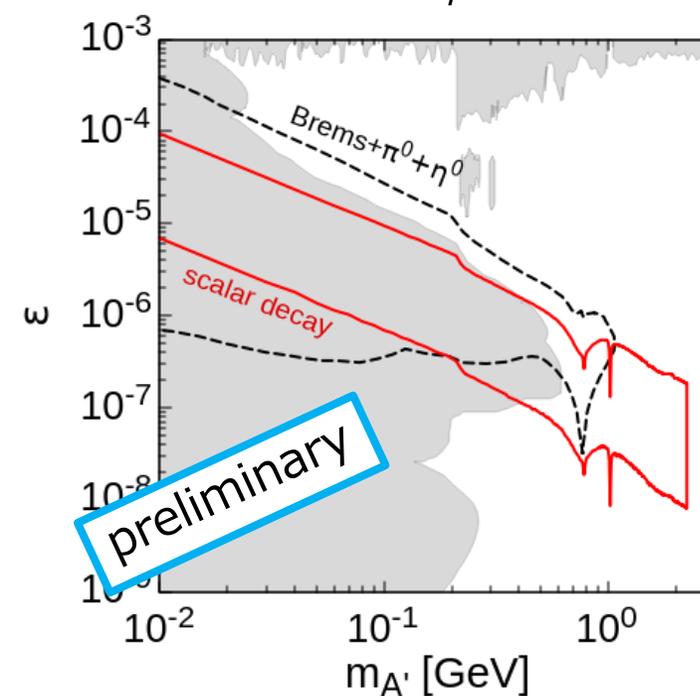
$g' = 10^{-4}, m_\phi = 0.3 \text{ GeV}$



$g' = 10^{-4}, m_\phi = 2.0 \text{ GeV}$



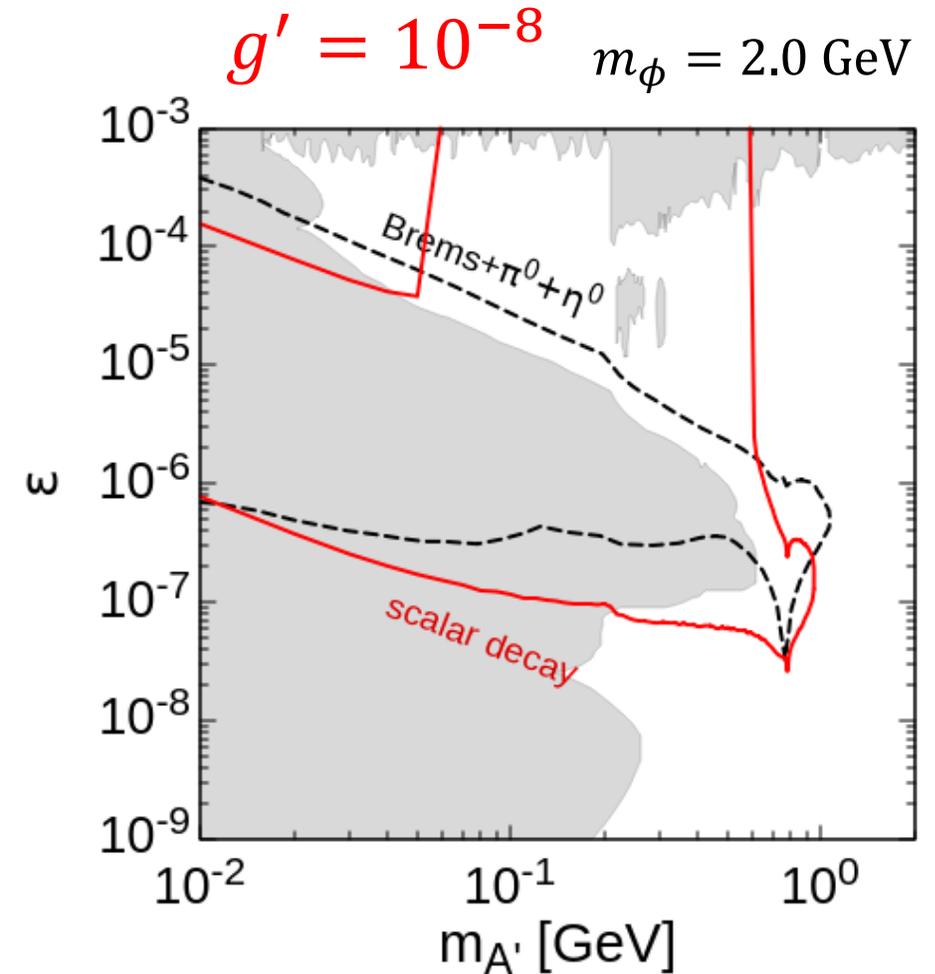
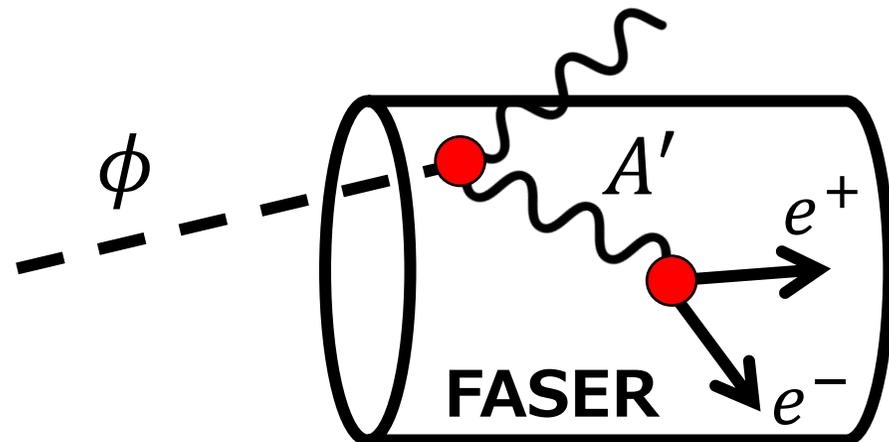
$g' = 10^{-4}, m_\phi = 4.5 \text{ GeV}$



Results

☆ dark photon + 1 singlet

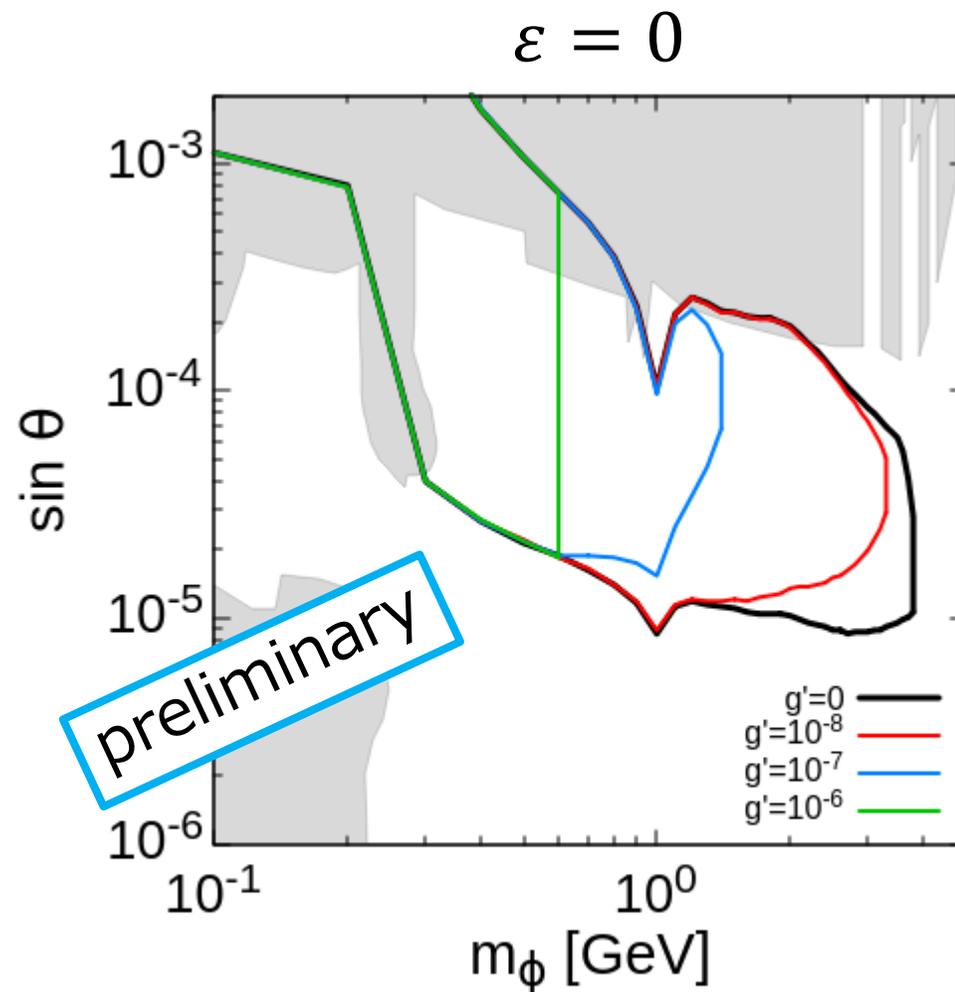
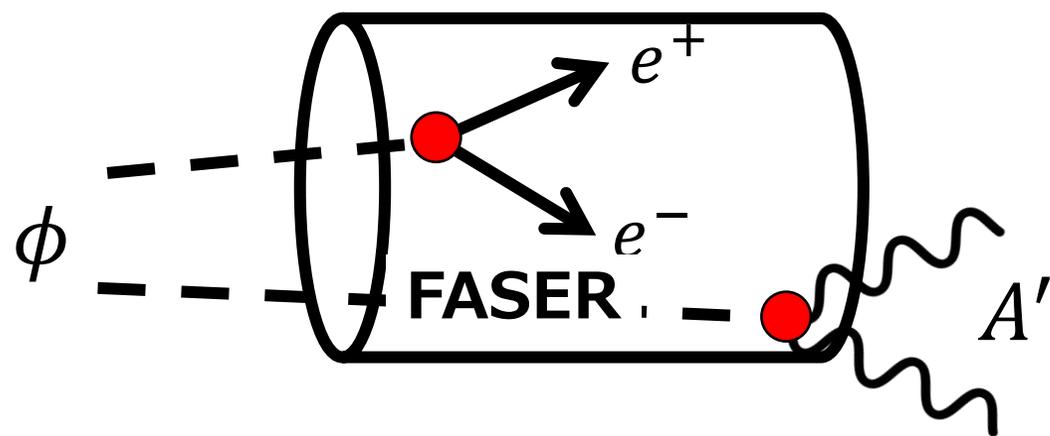
- $g' < 10^{-7}$ になるとスカラーが長寿命になり検出器に到達できる。
- この場合、暗黒光子はいくらでも短寿命でよいので、大きな ε の領域にも感度が出る。



Results

☆ dark photon + 1 singlet

- $g' < 10^{-7}$ になるとスカラーが長寿命になり検出器に到達できる。
- スカラーが2つの荷電粒子に崩壊するシナリオも考えられる。



Results

☆ $U(1)_{L_\mu - L_\tau}$

■ ミュー族とタウ族のみが charge を持つ。

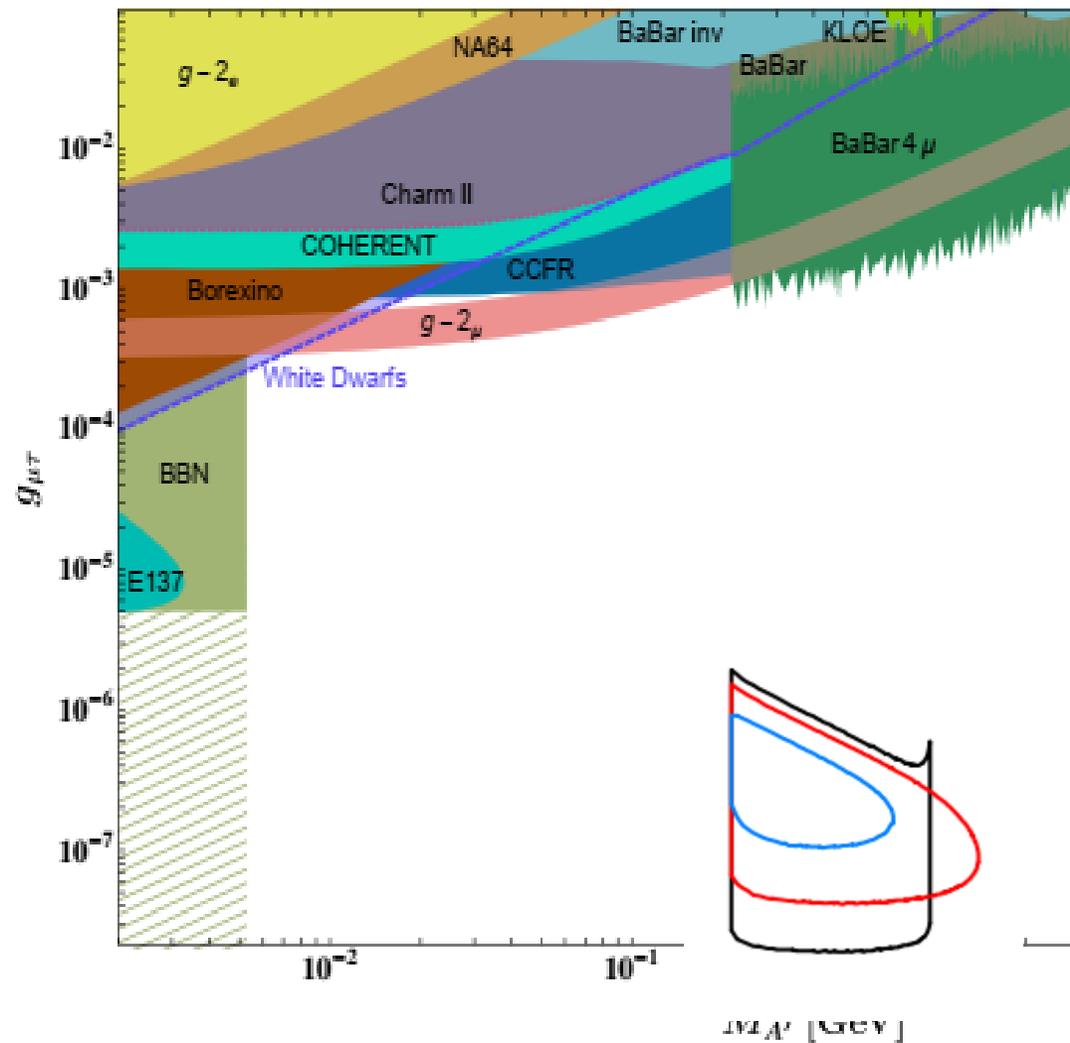
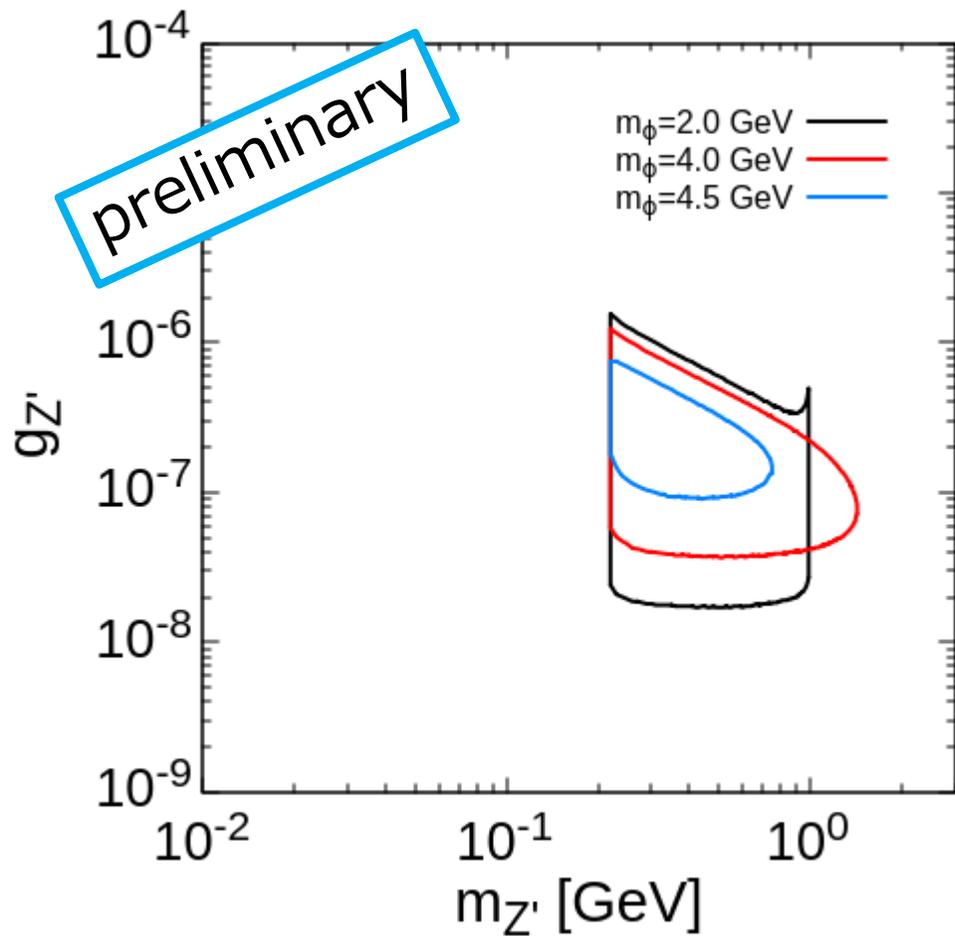
	e, ν_e	μ, ν_μ	τ, ν_τ	others
$U(1)_{L_\mu - L_\tau}$	0	1	-1	0

$$\mathcal{L} = g_{Z'} \left(\bar{\mu} \gamma^\alpha \mu + \bar{\nu}_\mu \gamma^\alpha P_L \nu_\mu - \bar{\tau} \gamma^\alpha \tau - \bar{\nu}_\tau \gamma^\alpha P_L \nu_\tau \right) Z'_\alpha$$

- クォークと電子との相互作用がなので beam dump の制限がほぼない。
- ただし、これまでの解析はゲージ粒子の質量項を手で入れてる。

Results

☆ $U(1)_{L\mu=L\tau}$



LFV search

☆ Lepton flavor violating dark photon

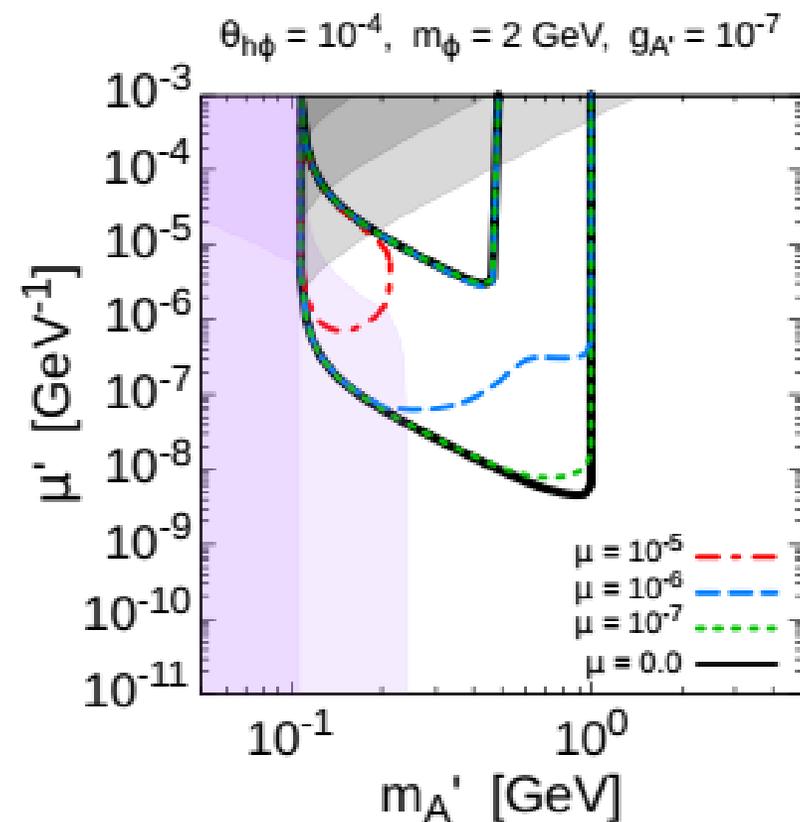
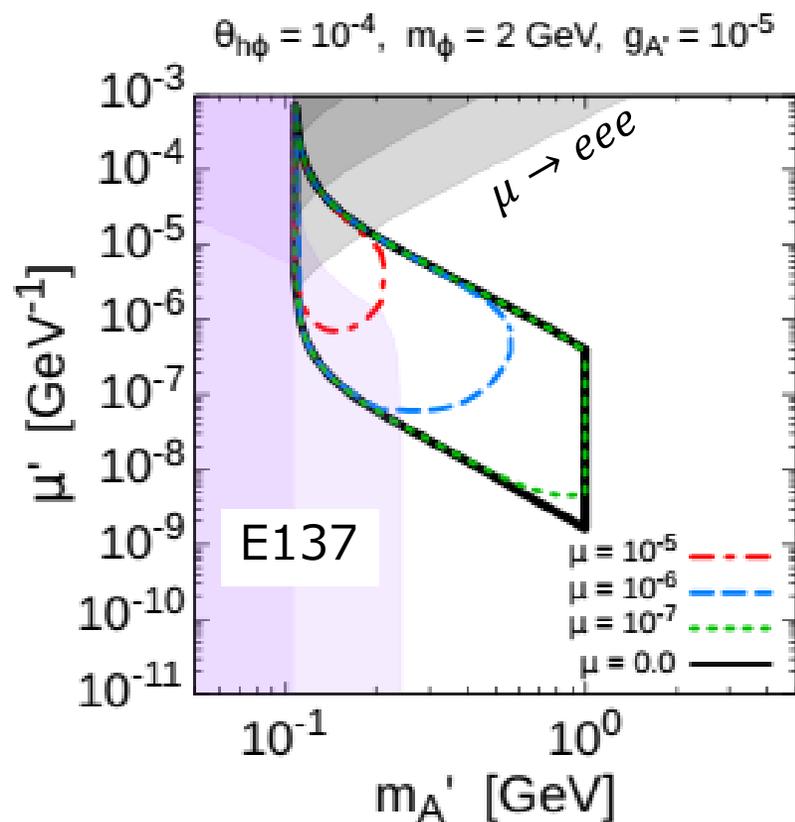
- FASERでは $e\mu$ を識別できるとのことなので、手でLFVな項を入れてみる。
- (ただし dipole type 相互作用を考える。)

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{dipole}} &= \frac{1}{2} \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \mu_{\ell} \bar{\ell} \sigma^{\rho\sigma} \ell A'_{\rho\sigma} + \frac{\mu'}{2} (\bar{\mu} \sigma^{\rho\sigma} e + \bar{e} \sigma^{\rho\sigma} \mu) A'_{\rho\sigma} \\ &= \frac{1}{2} \bar{\ell}_{\alpha} \sigma^{\mu\nu} \begin{pmatrix} \mu & \mu' & 0 \\ \mu' & \mu & 0 \\ 0 & 0 & \mu \end{pmatrix} \ell_{\beta} F'_{\mu\nu} \end{aligned}$$

LFV search

☆ Lepton flavor violating dark photon

■ ミューオンの稀崩壊では探れない領域を探索できる。



LFV search

☆ Lepton flavor violating $U(1)_{L_\mu=L_\tau}$

■ $U(1)_{L_\mu=L_\tau}$ では荷電レプトンの項は対角的。

$$M_\ell = \begin{pmatrix} m_e & 0 & 0 \\ 0 & m_\mu & 0 \\ 0 & 0 & m_\tau \end{pmatrix} \quad g_{Z'} \bar{\ell}_i \gamma^\rho \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \ell_j Z'_\rho$$

■ 質量行列を非対角にするとLFVゲージ相互作用が出てくる。

$$\text{質量行列: } \begin{matrix} \text{flavor eigenstate} \\ \begin{pmatrix} m_1 & \times & \times \\ \times & m_2 & \times \\ \times & \times & m_3 \end{pmatrix} \end{matrix} \quad \Rightarrow \quad \begin{matrix} \text{mass eigenstate} \\ \begin{pmatrix} m_e & 0 & 0 \\ 0 & m_\mu & 0 \\ 0 & 0 & m_\tau \end{pmatrix} \end{matrix}$$

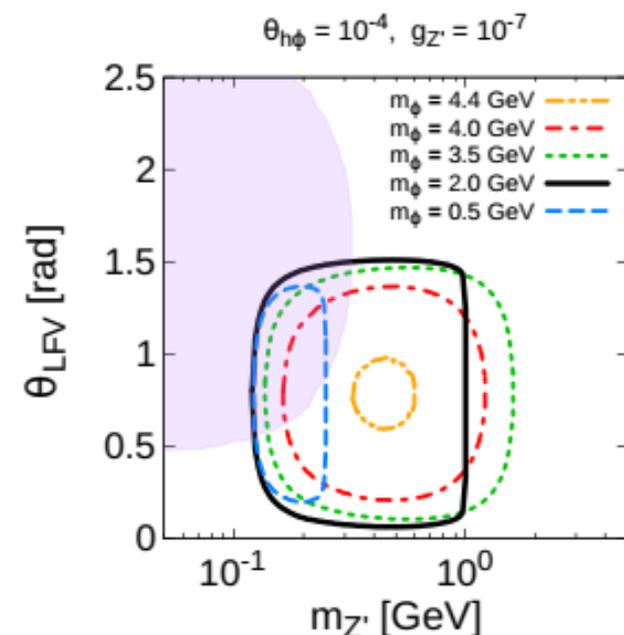
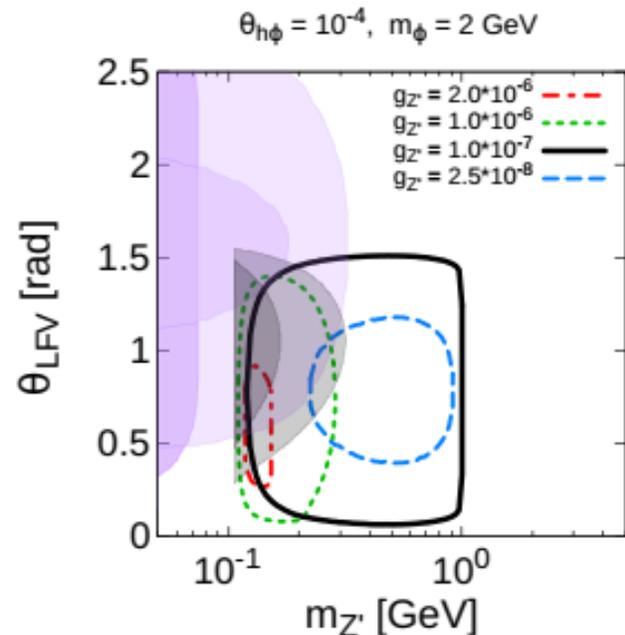
$$\text{ゲージ相互作用: } g_{Z'} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \quad \Rightarrow \quad g_{Z'} \begin{pmatrix} 0 & \times & \times \\ \times & 1 & \times \\ \times & \times & -1 \end{pmatrix}$$

LFV search

☆ Lepton flavor violating U(1)_{L_μ-L_τ}

■ ここでは簡単のため12 mixingのみを仮定する。

$$\begin{pmatrix} c & s & 0 \\ -s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \times g_{Z'} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} c & -s & 0 \\ s & c & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = g_{Z'} \begin{pmatrix} c^2 & sc & 0 \\ sc & s^2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}$$



backup

U(1) $L_\mu - L_\tau$ model

☆ Basic framework

- ミュー族とタウ族のみがchargeを持つU(1)ゲージ対称性。

	e, ν_e	μ, ν_μ	τ, ν_τ	others
$U(1)_{L_\mu - L_\tau}$	0	1	-1	0

$$\mathcal{L} = g_{Z'} (\bar{\mu} \gamma^\alpha \mu + \bar{\nu}_\mu \gamma^\alpha P_L \nu_\mu - \bar{\tau} \gamma^\alpha \tau - \bar{\nu}_\tau \gamma^\alpha P_L \nu_\tau) Z'_\alpha$$

- レプトン質量への制限が非常に強い。

$$M_\ell = \begin{pmatrix} m_e & 0 & 0 \\ 0 & m_\mu & 0 \\ 0 & 0 & m_\tau \end{pmatrix} \quad M_\nu = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \\ 0 & m_2 & 0 \end{pmatrix} \quad \text{Good for } \theta_{23}, \text{ but } \theta_{12} = 0.$$

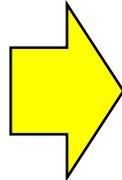
U(1) $L_\mu - L_\tau$ model

☆ Neutrino mixing and masses

■ 荷電レプトンは対角的。ニュートリノ質量とmixingは

$$M_\ell = \begin{pmatrix} m_e & 0 & 0 \\ 0 & m_\mu & 0 \\ 0 & 0 & m_\tau \end{pmatrix}$$

$$M_\nu = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_2 \\ 0 & m_2 & 0 \end{pmatrix}$$

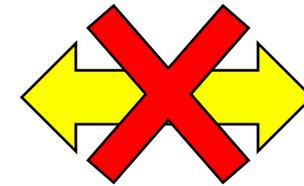


$$m_{\nu_2} = m_{\nu_3}$$

$$\theta_{12} = 0^\circ$$

$$\theta_{13} = 0^\circ$$

$$\theta_{23} = 45^\circ$$



$$m_{\nu_2}^{\text{exp}} \neq m_{\nu_3}^{\text{exp}}$$

$$\theta_{12}^{\text{exp}} \simeq 33.6^\circ$$

$$\theta_{13}^{\text{exp}} \simeq 8.5^\circ$$

$$\theta_{23}^{\text{exp}} \simeq 47.7^\circ$$

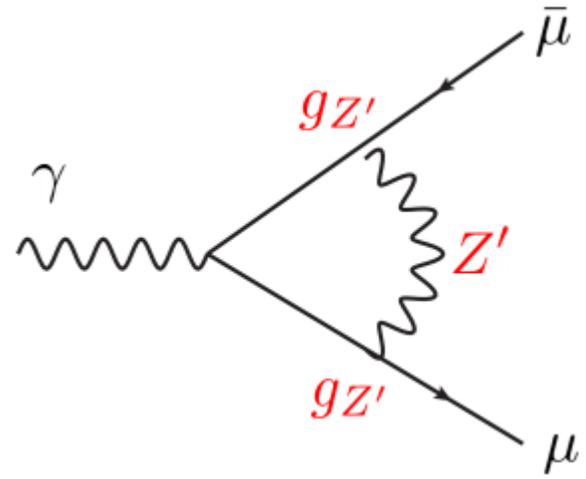
■ 対称性を破らないとニュートリノ振動実験を説明できない。

U(1) $L_\mu - L_\tau$ model

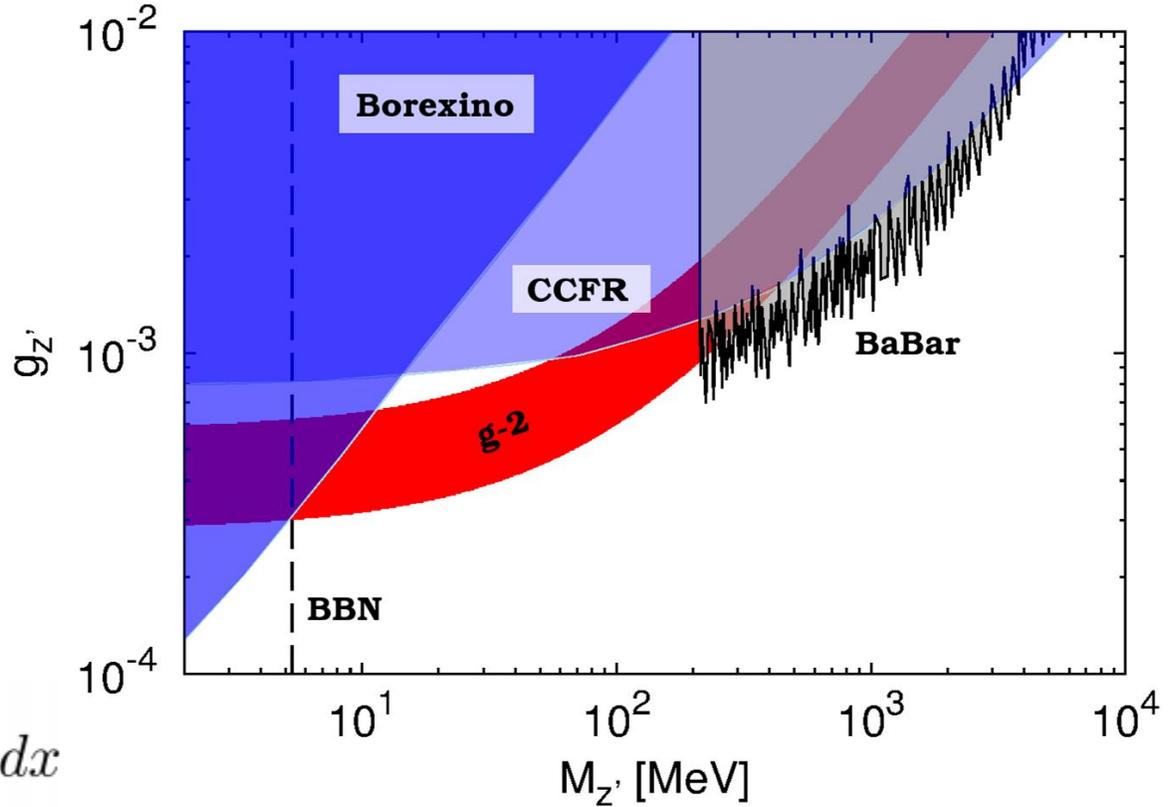
☆ Muon g-2

■ ミューオン g-2 を説明できるパラメータ領域がある。

$$g_{Z'}(\bar{\mu}\gamma^\alpha\mu)Z'_\alpha$$



$$a_\mu^{Z'} = \frac{g_{Z'}^2}{8\pi^2} \int_0^1 \frac{2m_\mu^2 x^2 (1-x)}{x^2 m_\mu^2 + (1-x)M_{Z'}^2} dx$$



U(1) $L_\mu - L_\tau$ model

☆ loop induced kinetic mixing

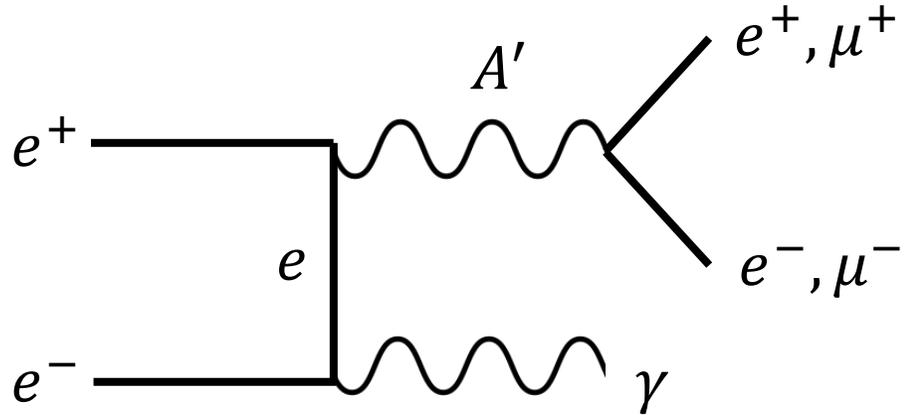
- 1 loop で kinetic mixing が出る（発散なし）。
- これにより電子やクォークとの相互作用が生じる。

$$\begin{aligned}
 \Pi(q^2) &\equiv \text{Diagram 1} + \text{Diagram 2} \\
 &= \frac{8eg_{Z'}}{(4\pi)^2} \int_0^1 x(1-x) \ln \frac{m_\tau^2 - x(1-x)q^2}{m_\mu^2 - x(1-x)q^2} dx, \quad (5)
 \end{aligned}$$

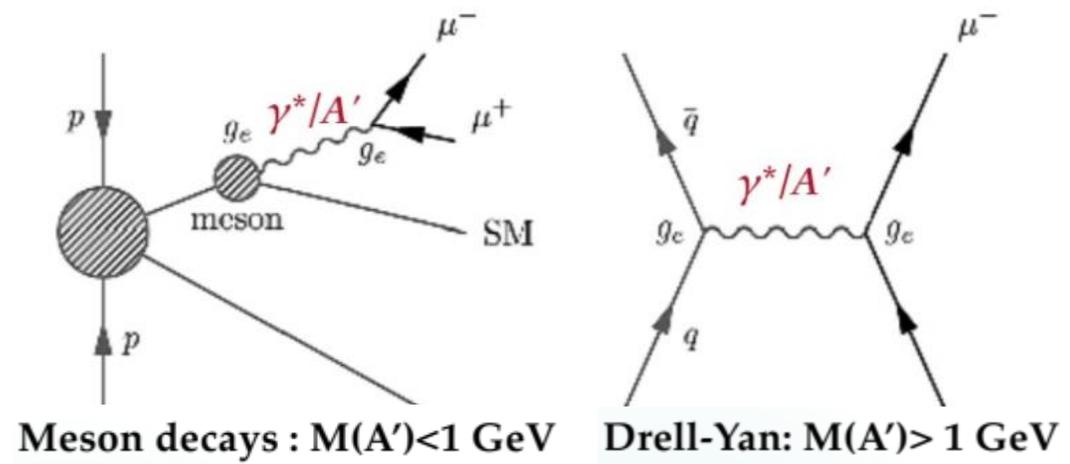
Collider search

■ 加速器実験における探索。

BaBar



LHCb



■ 現状で $\varepsilon > 10^{-3}$ 、将来的には $\varepsilon > 10^{-4}$ くらいを排除。