

レプトンビームダンプ実験での ゲージボソン探索

仁木敦也（東京大学）

Based on

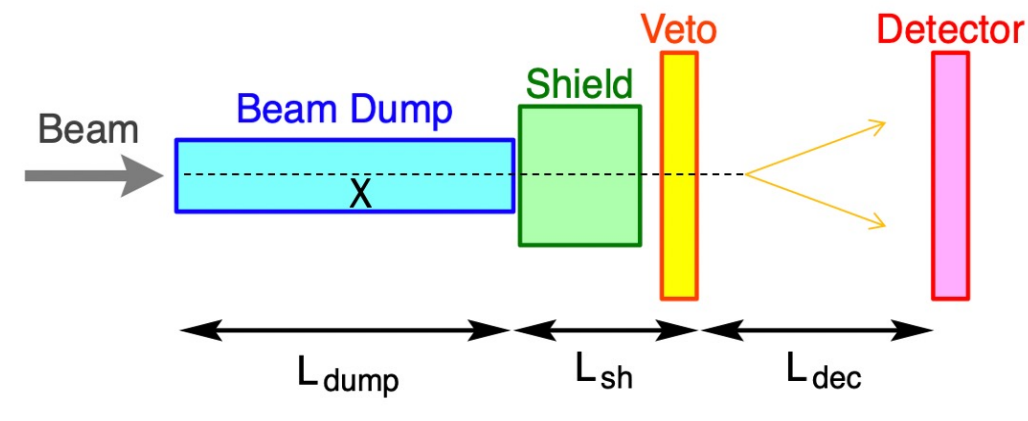
T. Moroi, AN, arXiv: 2205.11766 (hep-ph)

K. Asai, T. Moroi, AN, Phys. Lett. B 818 (2021) 136374

目次

1. ビームダンプ実験
2. 模型 $U(1)_{L_i-L_j}$
3. ビームダンプ実験でのイベントと感度
4. 結果: ILCビームダンプとMAPビームダンプ
5. まとめ

ビームダンプ実験



ビームを厚い標的($> 10X_0$)に入射する**固定標的実験**

- ・高いルミノシティ: $\mathcal{L} \sim N_e N_{Avo} X_0 \sim 10^8 \text{ fb}^{-1} / \text{year}$ for ILC BD
- ・小さいバックグラウンド、シールドで荷電粒子を止める

固定標的を貫通するような粒子の崩壊を観測する



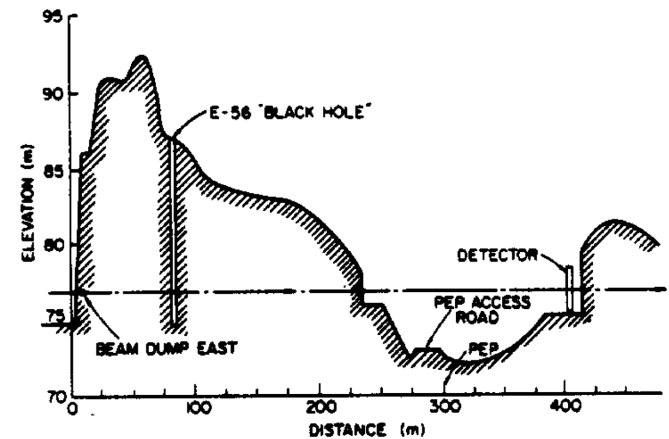
長寿命粒子($c\tau \sim O(10-100) \text{ m}$)の探索に適している

ビームダンプ実験

- E137 at SLAC

20 GeV 電子ビーム、 $N_e \sim 10^{20}$
標的はアルミニウム
背後の幅179 mの丘がシールドを担う

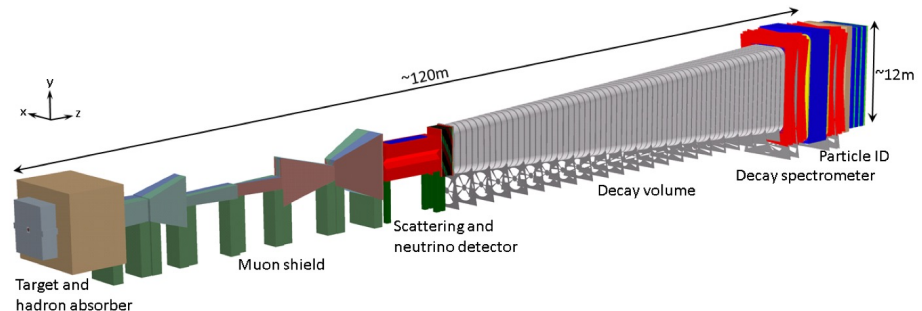
[Bjorken, Ecklund, Nelson, Abashian, Church '88]



- SHiP at CERN SPS

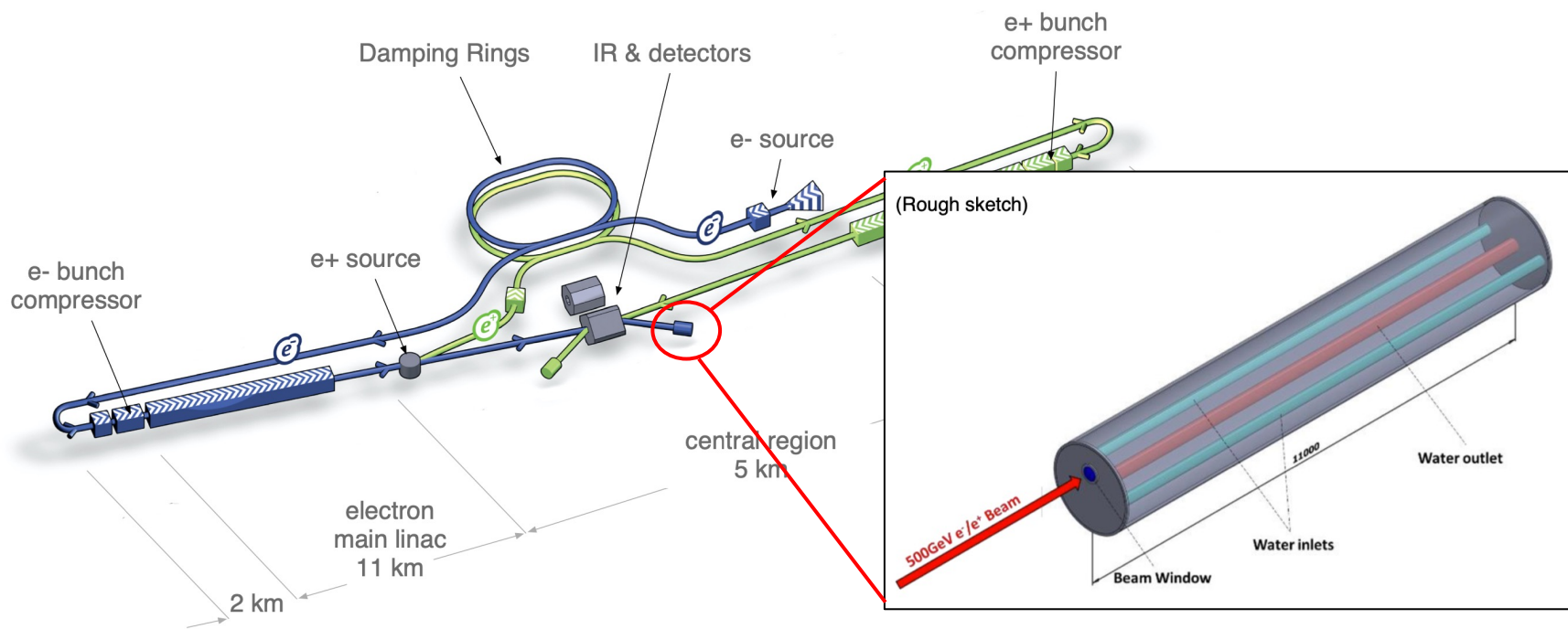
400 GeV 陽子ビーム、 $N_p \sim 10^{20}$
標的はタングステン
(将来実験)

SHiP Collaboration, CERN-SHiP-NOTE-2016-004



ビームダンプ実験

ILC (ee) やMAP ($\mu\mu$) などの将来のレプトンコライダーのビームダンプを活用すれば固定標的実験を行える



ILC Beam Dump

ビームダンプ実験

- ・ ILC

125 GeV at ILC250 電子・陽電子ビーム、 $N_e \sim 10^{21}/\text{year}$

標的は水

- ✓ 過去実験に比べて一桁高いエネルギーとルミノシティ
- ✓ 陽電子ビーム

- ・ MAP

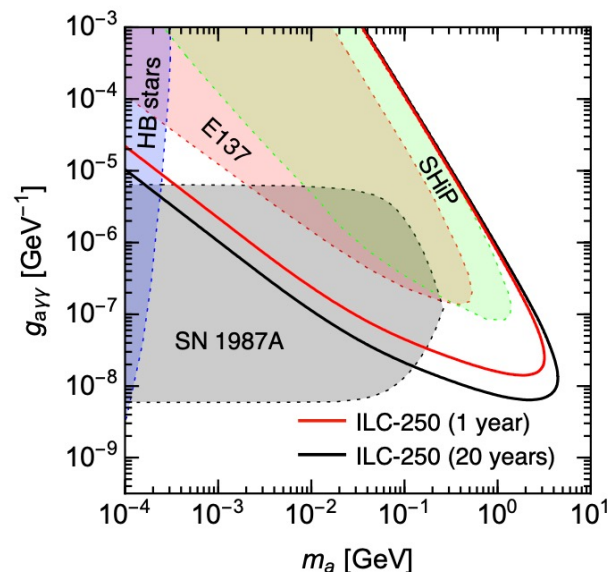
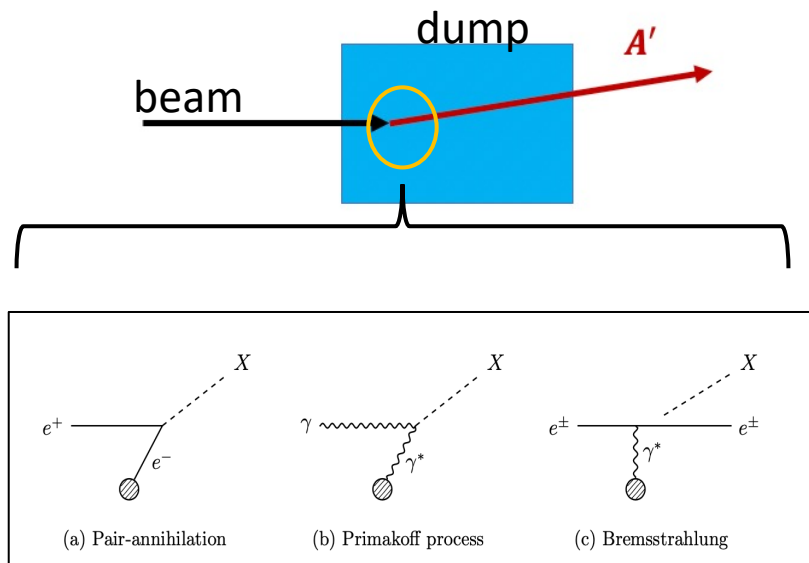
1500 GeV ミューオンビーム、 $N_\mu \sim 10^{20}/\text{year}$

- ✓ 高いエネルギーとルミノシティ
- ✓ ミューオンビーム

レプトンビームを用いたビームダンプ実験はレプトフィリックな粒子の探索にはハドロンビームに比べ有利になる

新物理の探索

レプトンビームダンプでは様々な模型の粒子を生成できる



Dark Photon
 A' = Axion Like Particle
 Light Scalar

[Kanemura, Moroi, Tanabe '15]
 [Sakaki, Ueda '20]
 [Asai, Iwamoto, Sakaki, Ueda '21]

またMesonも大量に生成されて、その崩壊から**Heavy Neutral Lepton**を作る

[Nojiri, Sakaki, Tobioka, Ueda '22]
 [Giffin, Gori, Tsai, Tuckler '22]

模型： $U(1)_{L_i-L_j}$

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}X_{\mu\nu}X^{\mu\nu} - \frac{\epsilon_0}{2}X_{\mu\nu}F^{\mu\nu} + \frac{1}{2}m_{A'}^2 A'_\mu A'^\mu + eA_\mu J_{EM}^\mu \\ + g' A'_\mu J_{DS}^\mu + g' A'_\mu \sum_{\ell=e,\mu,\tau} Q_\ell (\bar{\ell}\gamma^\mu \ell + \bar{\nu}_\ell \gamma^\mu P_L \nu_\ell) + \dots,$$

$$\text{w/ } Q_\ell \equiv \begin{cases} 1 & : \ell = i, \\ -1 & : \ell = j, \\ 0 & : \text{otherwise.} \end{cases}$$

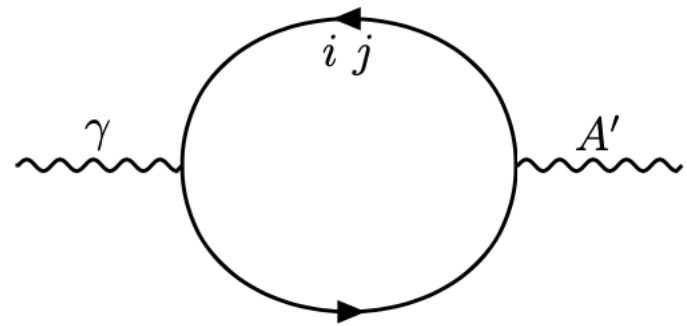
レプトン数 L_i ($i = e, \mu, \tau$) の差をゲージ化、(レプトン)フレーバー i, j は新しいゲージ相互作用を持つ。

→新しく導入されるゲージボソンは**レプトフィリック**

※今回は簡単のために tree-level kinetic mixing $\epsilon_0 = 0$ とする

模型： $U(1)_{L_i-L_j}$

1-loop でSM photonとレプトフィリックなゲージボソンはmixingする。
レプトン i, j 以外のSM粒子はこの1-loop mixingを介して相互作用する。

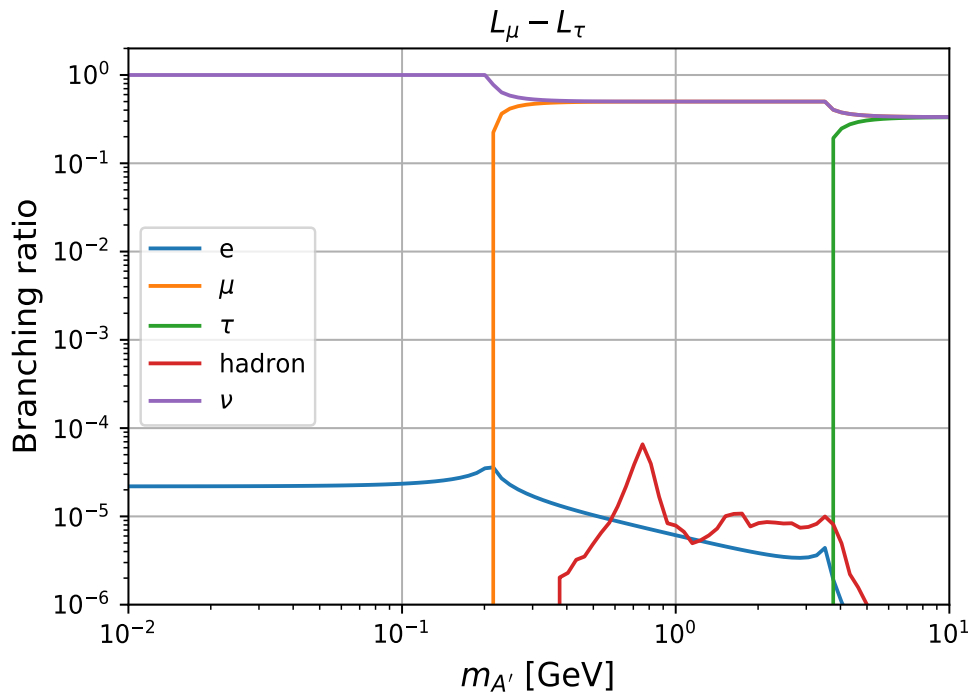


e.g. $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ 模型

$$\Delta\epsilon(q^2 \ll m_\mu^2) = \frac{eg'}{12\pi^2} \ln \frac{m_\tau^2}{m_\mu^2} \simeq \frac{g'}{70}$$

模型: $U(1)_{L_i-L_j}$

e.g. $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ 模型

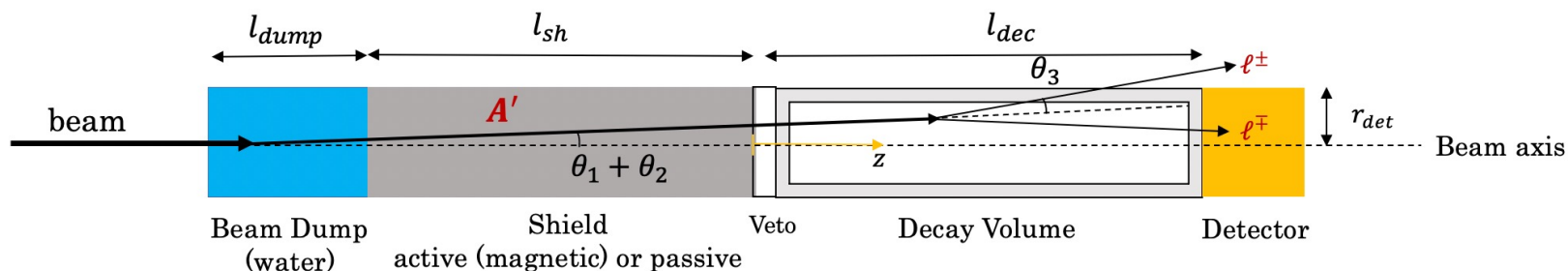


主な崩壊モード

$$A' \rightarrow \ell_i^+ \ell_i^-, \bar{\nu}_i \nu_i \quad (i = \mu, \tau)$$

電子やクォークとは1-loopで結合するので、電子やハドロンへの崩壊分岐比は抑制される。

ビームダンプ実験でのイベント



ILC ビームダンプ実験

- 電子or陽電子ビーム
- ダンプ長 (水): 11 m ~ 30 X_0
- シールド長: 50 m
- Decay Volume: 50 m

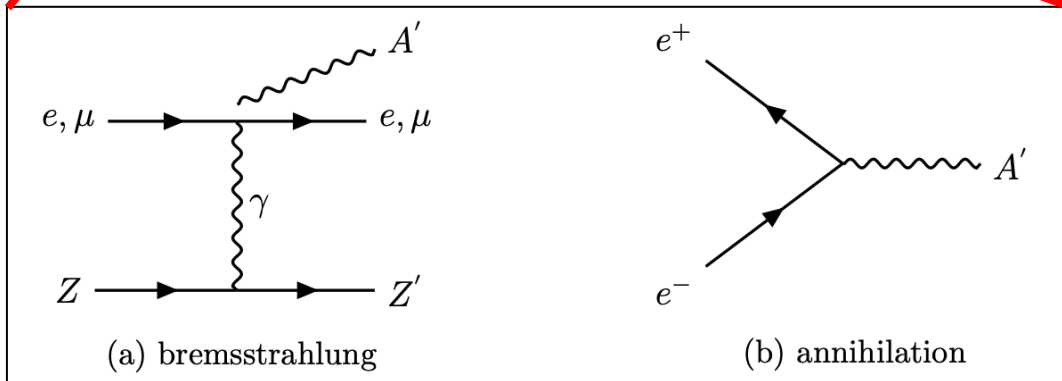
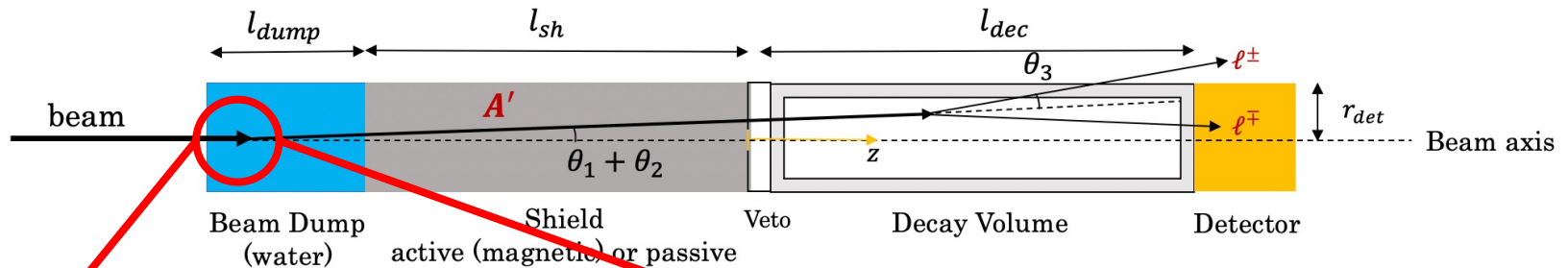
MAP ビームダンプ実験

- ミューオンビーム
- 標的 (水or鉛): 11 m
- シールド長: 10-200 m (?)
- Decay Volume: 50 m

固定標的中で入射粒子と物質が反応する事で
新粒子が生成される

Decay Volumeまで到達した粒子の崩壊を観測
する

ビームダンプ実験でのイベント



ビーム粒子以外にも物質中で二次的に e^\pm, μ, γ が生成されて物質と反応する

$U(1)_{L_\mu - L_\tau}$ のゲージボソンなど
ミューオンフィリックな粒子の
探索では二次粒子ミューオンの
効果は大きい

e^\pm ビームの標的中での素過程

イベント数の見積もり

(イベント数) = (入射する粒子数) : $4 \times 10^{21} / \text{year} @ \text{ILC}$

× (標的粒子数密度) : $\frac{N_{\text{Avogadro}} \rho}{A} / \text{cm}^3$ (ρ : 標的の密度 A : 質量数)

× (始状態粒子の経路長) : 始状態粒子の標的中での総飛程距離

× (素過程の散乱断面積)

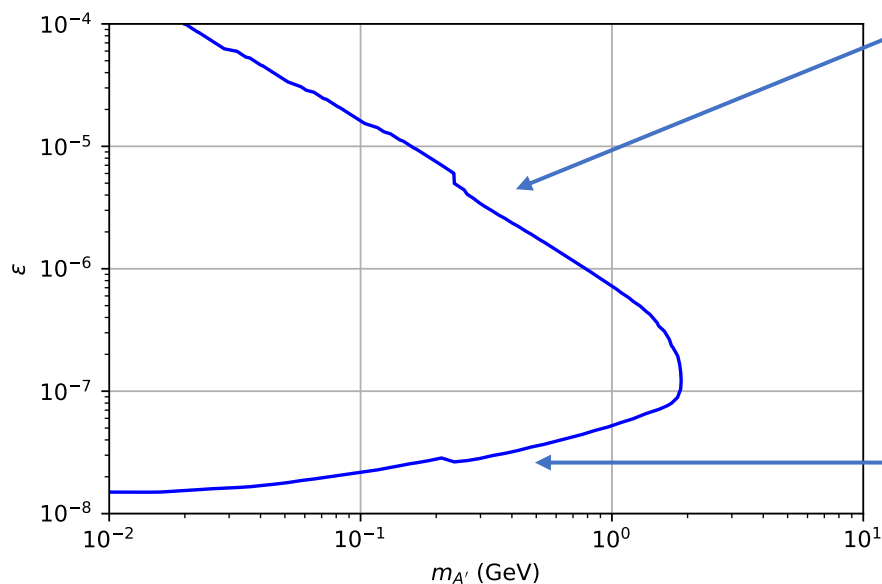
× (アクセプタンス) : シグナルが検出される確率

アクセプタンス

- 新粒子は Decay Volume で崩壊しなければいけない (Decay Probability)
- 崩壊してできた粒子は前方に置かれた検出器の方向に飛ばなければならない (Angular Acceptance)

ビームダンプ実験による制限

e.g. 制動放射



上端は **Decay Probability**によって
決まる: Decay Volumeに辿り付く前
に崩壊するか否か

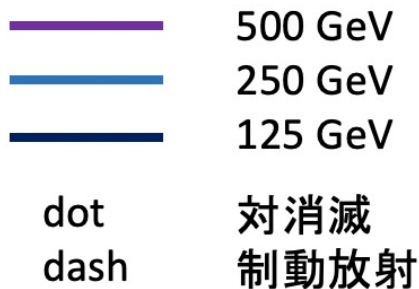
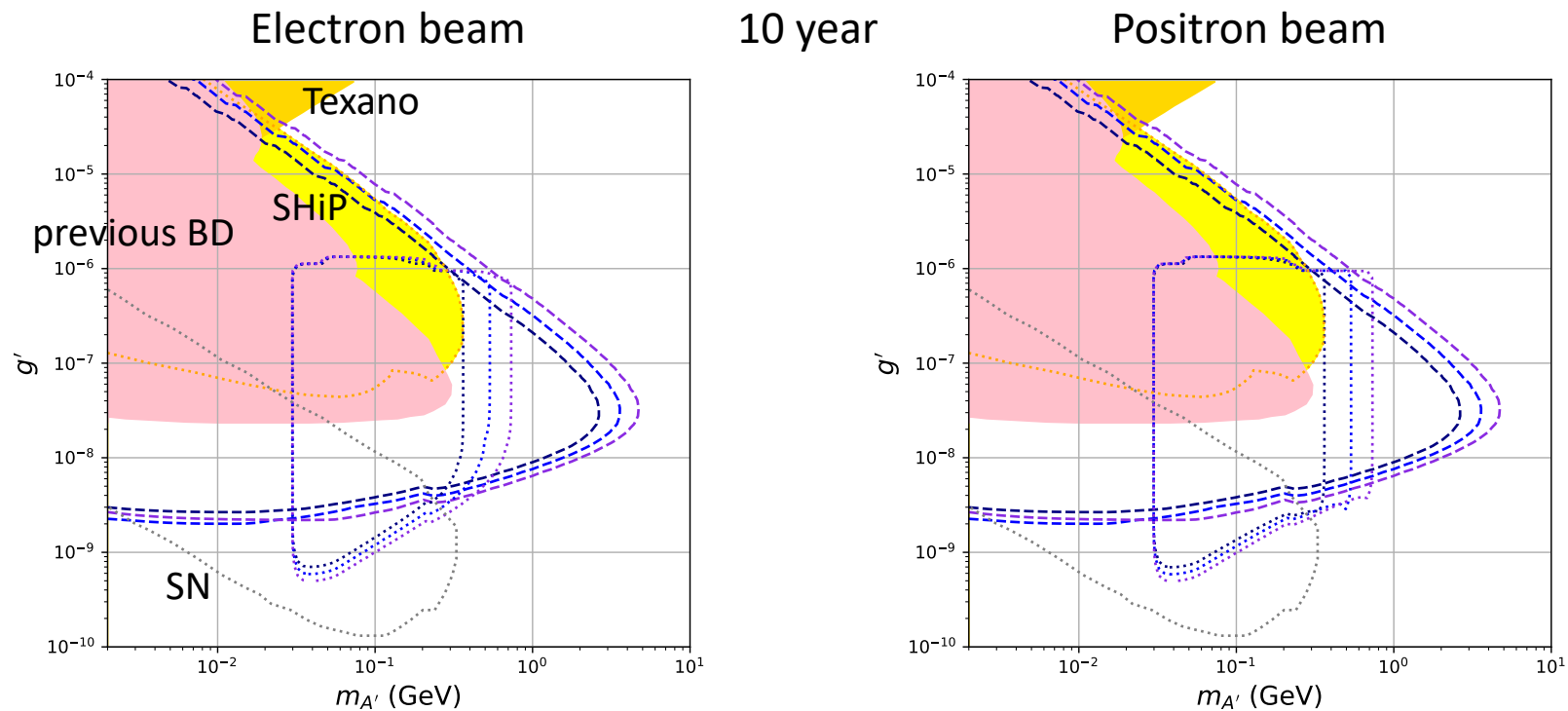
$$(\text{イベント数}) \propto \exp(m_{A'} \Gamma_{A'})$$

下端は十分に新粒子を生成できるか
で決まる

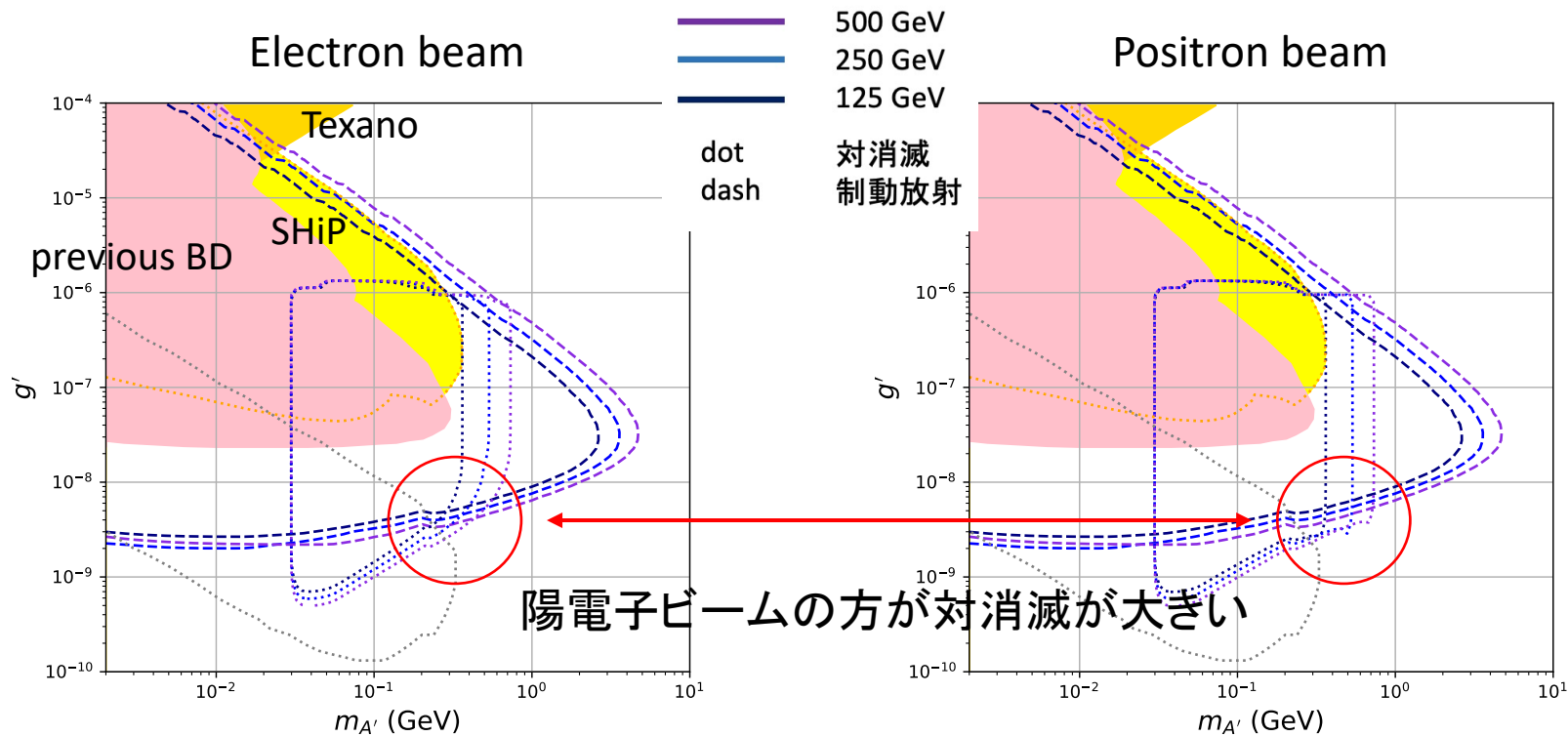
$$(\text{イベント数}) \sim \frac{g'^2}{m_{A'}^2} \cdot m_{A'} \Gamma_{A'} = g'^4$$

断面積 アクセプタンス

ILCビームダンプ: $U(1)_{L_e-L_\mu}$



ILCビームダンプ: $U(1)_{L_e-L_\mu}$

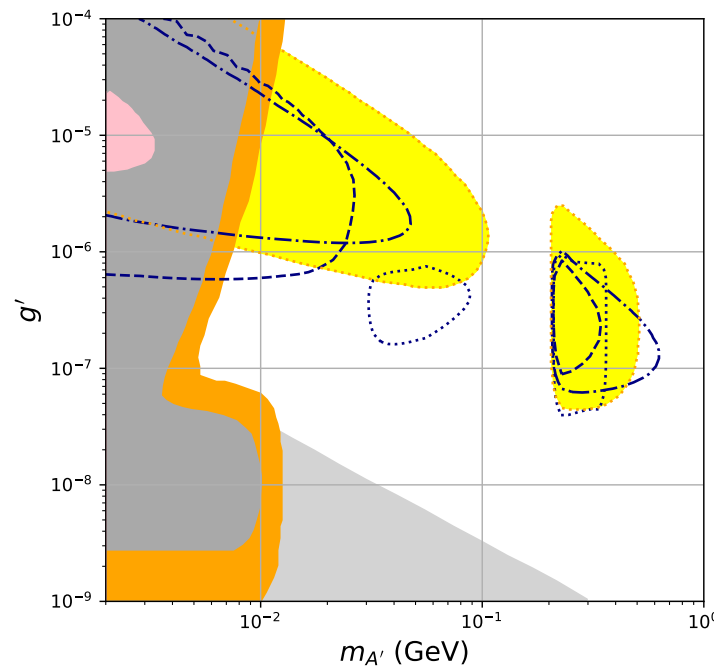
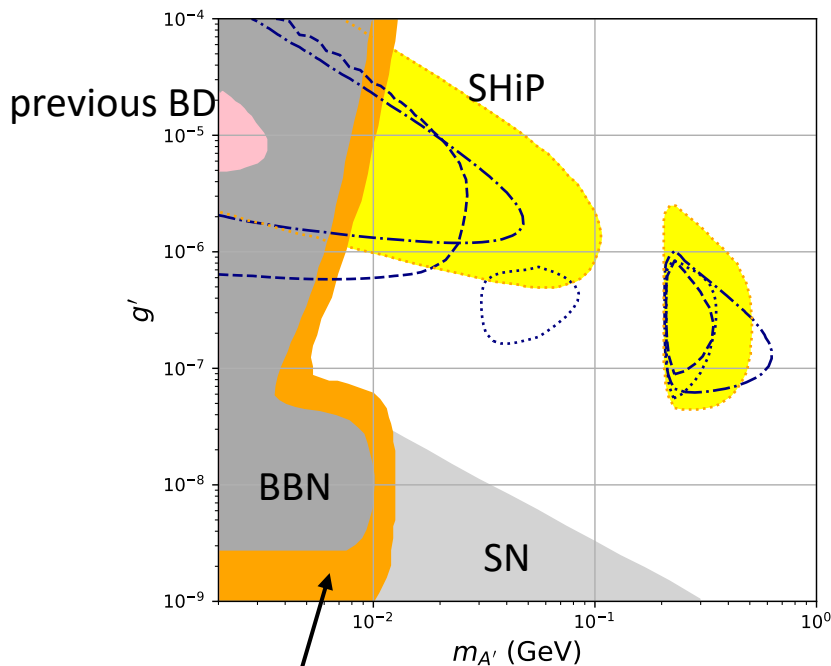


レプトフィリックな粒子なので陽子ビームダンプ実験よりも感度が良くなる。
 $U(1)_{L_e-L_\tau}$ 模型でもゲージボソンが電子と結合するので似た感度になる。

ILCビームダンプ: $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$

Electron beam

Positron beam



$E_{beam} = 125 \text{ GeV}$

Alleviating Hubble tension
(not constraint)

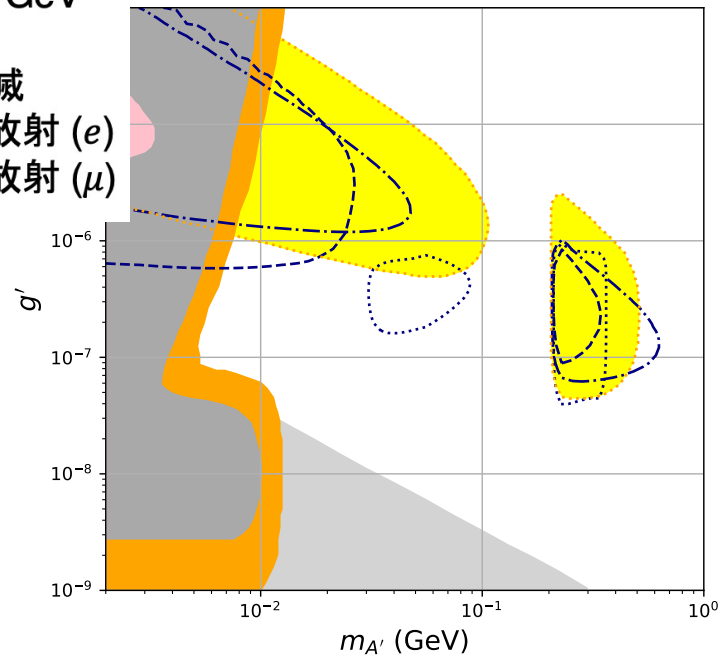
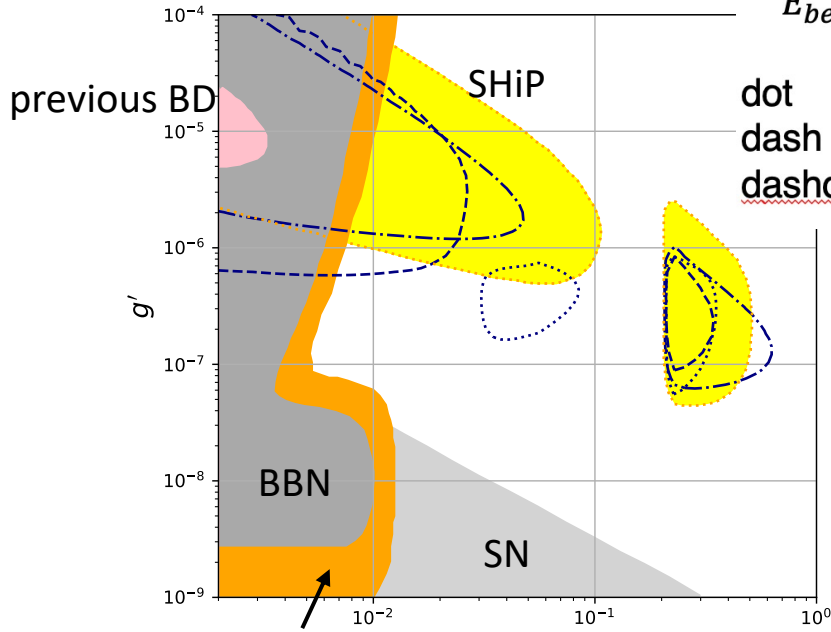
dot 対消滅
dash 制動放射 (e)
dashdot 制動放射 (μ)

ILCビームダンプ: $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$

Electron beam

Positron beam

$E_{beam} = 125 \text{ GeV}$



dot 対消滅
dash 制動放射 (e)
dashdot 制動放射 (μ)

Alleviating Hubble tension
(not constraint)

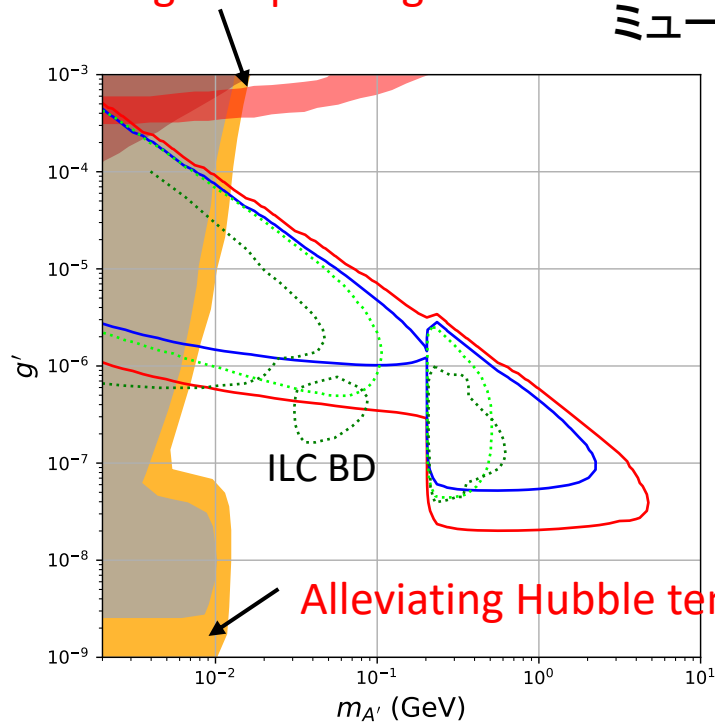
ゲージボソンが電子とは**結合しない**。なのでILCビームダンプ実験もイベント数が抑制されてしまう。

二次ミュオンは低エネルギーにはなるが1-loop抑制がない。

MAP ビームダンプ: $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$

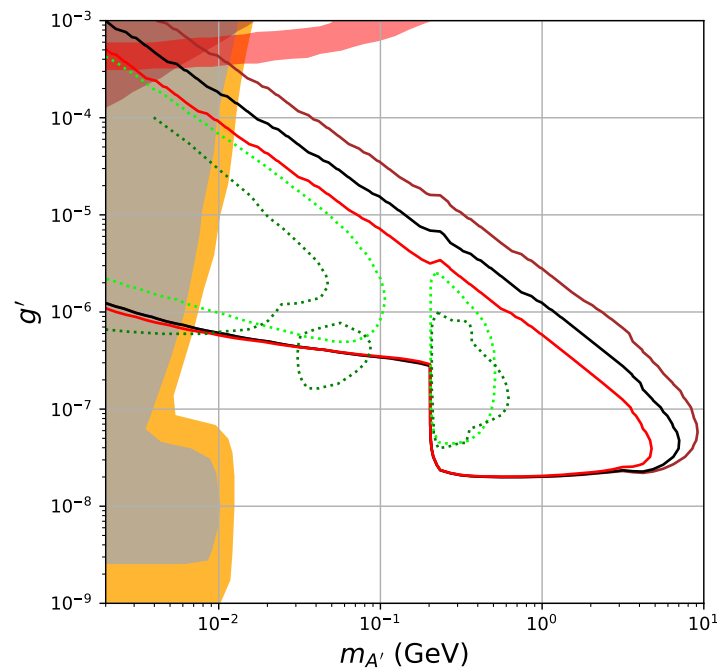
ミュオンビーム
 $E_{beam} = 1500 \text{ GeV}$
 ミュオンの制動放射

Muon g-2 explaining



シールド長: 200 m

標的
 水: 青
 鉛: 赤



シールド長

10 m : 茶
 50 m : 黒
 200 m : 赤

まとめ

- 将来実験のレプトンコライダーのビームダンプを使った固定標的実験による $U(1)_{L_i-L_j}$ ゲージボソンの探索を考えた。
- 過去実験や陽子ビームダンプ実験では感度がない領域を探索できる。特に $U(1)_{L_\mu-L_\tau}$ ではHubble Tensionを緩和する領域を探索できる。
- 二次粒子の効果は必ずしも小さくない。特に新粒子がミュオンフィリクなら二次ミュオンの効果は無視できない。

Backups

ビームダンプ実験

ILCビームダンプ実験は様々な長寿命粒子に感度がある

模型	生成過程	文献、参照
Dark Photon, $U(1)_D$	Bremsstrahlung Annihilation	S. Kanemura et al., 1507.02809 K. Asai et al., 2105.13768
Leptophilic Extension, $U(1)_{L_i-L_j}$	Bremsstrahlung Annihilation	K. Asai, T. Moroi and AN, 2104.00888 T. Moroi and AN, 2205.11766
Axion Like Particle	Bremsstrahlung Primakoff	Y. Sakaki et al., 2009.13790 K. Asai et al., 2105.13768
Heavy Neutral Lepton		M. M. Nojiri et. al., 2206.13523 P. Giffin et. al., 2206.13745
Fermionic Dark Matter in Dark Sector		D. Ueda's talk at ECFA HA WG1

イベント数の見積もり

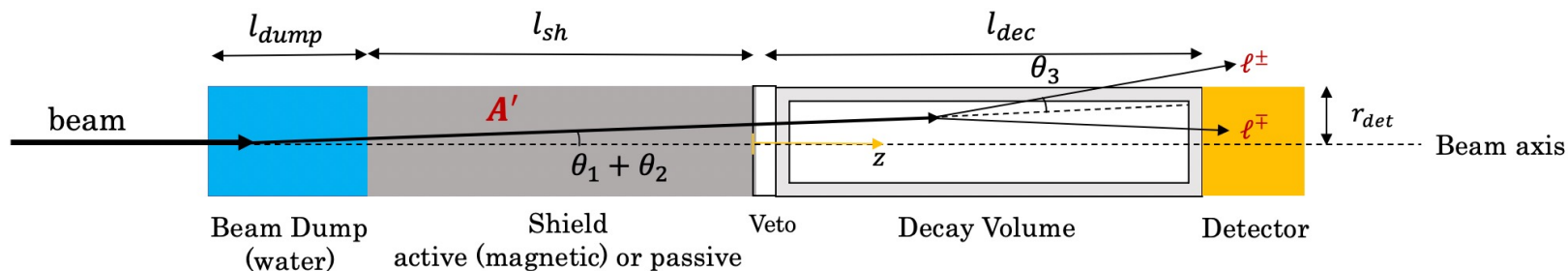
Angular Acceptance: $r_{\perp} < r_{det}$

Electron, Positron

$$r_{\perp} \simeq \theta_1(L_{dump} + \delta_{\mu}) + (\theta_1 + \theta_2)(L_{shield} + z - \delta_{\mu}) + (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)(L_{dec} - z),$$

Muon

$$r_{\perp} \simeq (\theta_1 + \theta_2)(L_{dump} + L_{sh} + z) + (\theta_1 + \theta_2 + \theta_3)(L_{dec} - z),$$



イベント数の見積もり

e beam dump experiment

- 電子の制動放射

$$N_e^{brem} = B_{vis} N_e \frac{N_{Avo} \rho}{A} \int_{m_{A'} + m_e}^{E_{beam}} dE_e \int_{m_{A'}}^{E_e - m_e} dE_{A'} \sum_{e^\pm} \frac{dl_{e^\pm}}{dE_e} \frac{1}{E_e} \left[\frac{d\sigma}{dx} \right]_{x=\frac{E_{A'}}{E_e}} \mathcal{A}_e^{brem},$$

- 対消滅

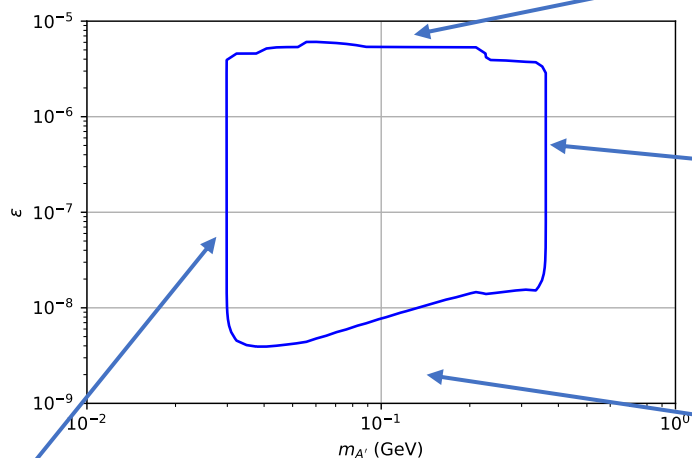
$$N_e^{ann} = N_e \left(\frac{N_{Avo} \rho}{A} Z \right) \int_{m_{A'} + m_e}^{E_{beam}} dE_e \frac{dl_{e^+}}{dE_e} \sum_{\ell=e,\mu} \sigma_{ann}^\ell \Theta(E_{CM} - 2m_\ell) \mathcal{A}_e^{ann}.$$

- ミューオンの制動放射

$$N_\mu = B_{vis} N_e \frac{N_{Avo} \rho}{A} \int_{m_\mu}^{E_{beam}} dE_{\mu 0} \int_{m_{A'} + m_\mu}^{E_{\mu 0}} dE_\mu \int_{m_{A'}}^{E_\mu - m_e} dE_{A'} \frac{dl_\mu}{dE_\mu} \frac{dY_{\mu 0}}{dE_{\mu 0}} \frac{1}{E_\mu} \left[\frac{d\sigma}{dx} \right]_{x=\frac{E_{A'}}{E_\mu}} \mathcal{A}_e^\mu,$$

ビームダンプ実験による制限

- 対消滅反応



Angular Acceptance
始状態の e^+ が低エネルギーで広がっている

上端は Decay Probabilityによって決まる
Decay Volumeに辿り付く前に崩壊するか否か

$$(\text{イベント数}) \propto \exp \frac{m_{A'}^2 g'^2}{E_{A'}} \propto \exp(g'^2)$$

$$m_{A'} = \sqrt{2m_e E_{A'}} \simeq \sqrt{2m_e E_e} < \sqrt{2m_e E_{beam}}$$

下端は十分に新粒子を生成できるかで決まる

$$(\text{イベント数}) \sim \frac{1}{E_e} \cdot \frac{g'^2}{m_{A'}^2} \cdot m_{A'}^2 g'^2 \propto \frac{g'^4}{m_{A'}^2}$$

制動放射とはkinematicsが異なる。

$m_{A'} = \sqrt{2m_e E_{A'}}$, $E_{A'} \simeq E_e$ から $E_e, E_{A'}$ は $m_{A'}$ に依存する。

Discrimination of Models after the Discovery

the final states (observed particles) depend on the model;

observables $r_e = \frac{\Gamma(X \rightarrow e^+ e^-)}{\Gamma_X^{vis}}, r_\mu = \frac{\Gamma(X \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{\Gamma_X^{vis}}, r_h = \frac{\Gamma(X \rightarrow hadrons)}{\Gamma_X^{vis}}$

	r_e	r_μ	r_h
$U(1)_{e-\mu}$	0.5	0.5	0
$U(1)_{e-\tau}$	1.0	0	0
$U(1)_X$	$\frac{1}{2+R}$	$\frac{1}{2+R}$	$\frac{R}{2+R}$

w/ R: R-ratio

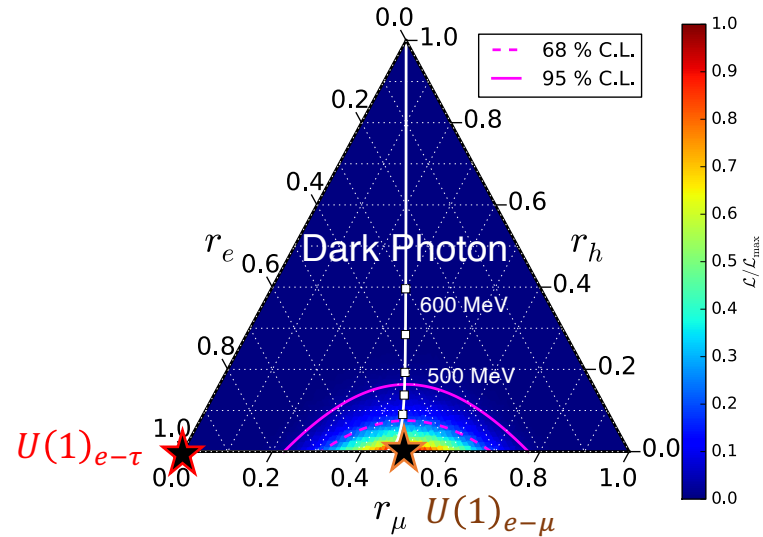
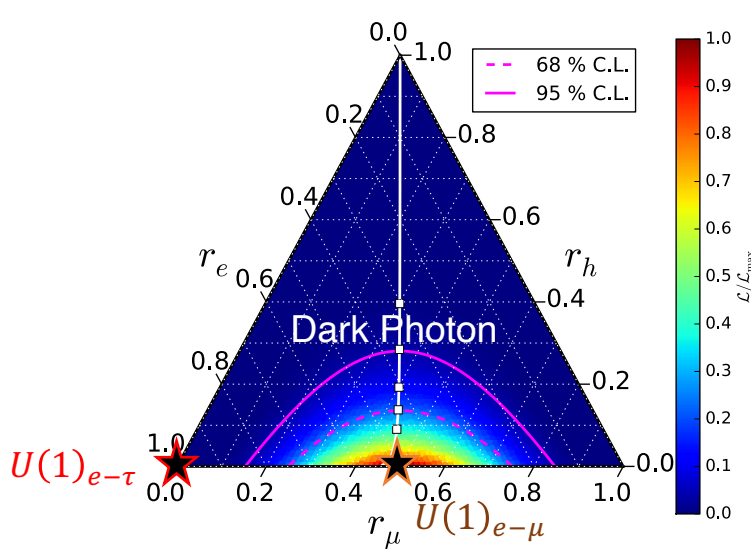
✓ **Model:** it may be identified using information about final states and its mass.

We estimate how much we can discriminate the models, adopting Poisson distribution like likelihood function.

e.g. $U(1)_{e-\mu}$ Gauge Boson

$U(1)_{e-\mu}, N_{sig} = 10, (n_e, n_\mu, n_h) = (5, 5, 0)$

$U(1)_{e-\mu}, N_{sig} = 20, (n_e, n_\mu, n_h) = (10, 10, 0)$



White line: theoretical prediction of dark photon model

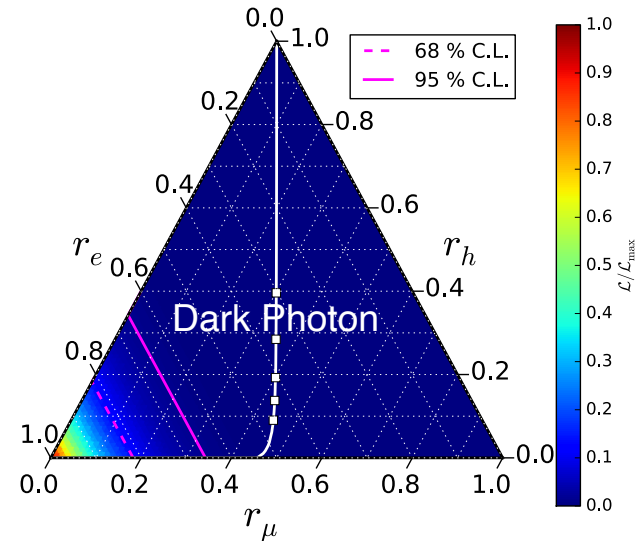
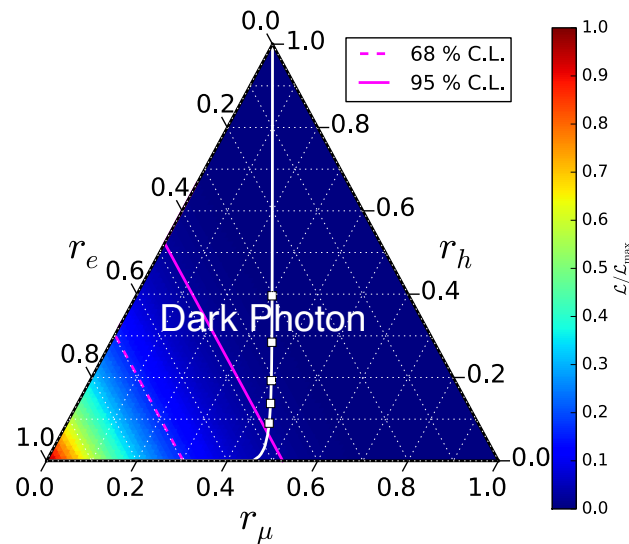
White points: Dark photon prediction with mass = 400, 450, 500, 550, 600 MeV from below

We can discriminate $U(1)_{e-\tau}$ model 95% level with 10 signals.
 With 20 signals and $m_X \geq 500 \text{ MeV}$, we can discriminate dark photon model.

e.g. $U(1)_{e-\tau}$ Gauge Boson

$U(1)_{e-\tau}, N_{sig} = 5, (n_e, n_\mu, n_h) = (5, 0, 0),$

$U(1)_{e-\tau}, N_{sig} = 10, (n_e, n_\mu, n_h) = (10, 0, 0)$



White line: theoretical prediction of dark photon model

White points: Dark photon prediction with mass = 400, 450, 500, 550, 600 MeV from below