

Impact of the $b \rightarrow sll$ anomalies on dark matter physics

大川 翔平 (名古屋大)

based on arXiv:1706.04344

共同研究者: 川村淳一郎 (東大), 大村雄司 (KMI, 名古屋大)



基研研究会 「素粒子物理学の進展2017」
2017年 8月 1日

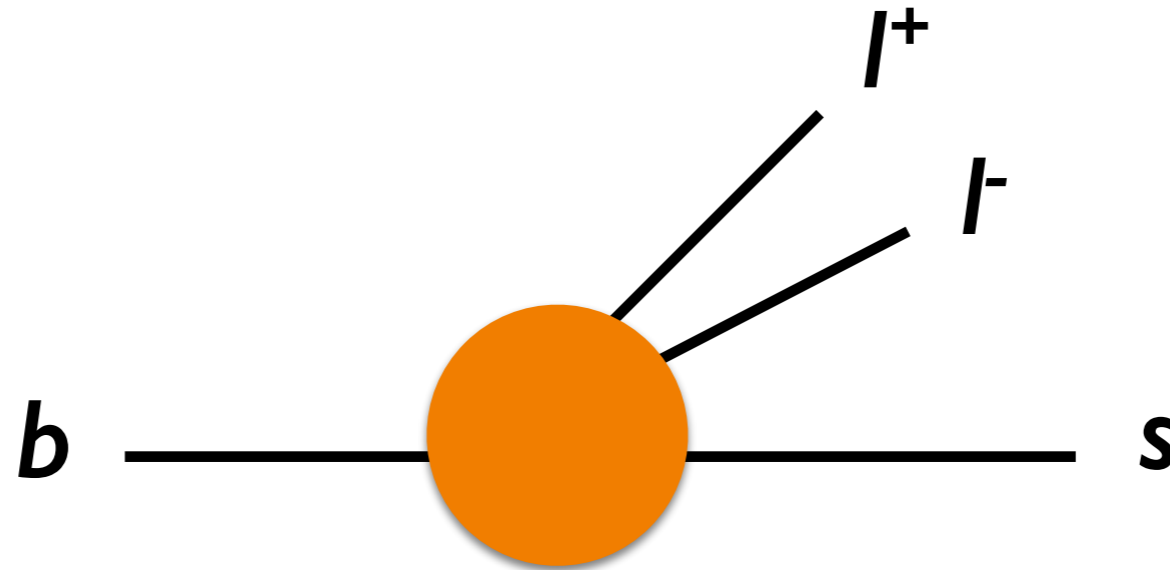


目次

- イントロダクション
 - ◆ $b \rightarrow sll$ アノマリー, 標準模型の寄与, 新物理の候補
- セットアップ
- 現象論
 - ◆ LHC, フレーバー, ダークマターの物理
- まとめ

イントロダクション

$b \rightarrow sll$ 過程のアノマリーに関する話。



最近, 標準模型からの“ずれ”が幾つか報告されている、

- ◆ $B \rightarrow K^{(*)}ll$ ($l=e,\mu$) 崩壊のレプトンフレーバー普遍性 [\[1406.6482\]](#)
- ◆ $\Lambda_b \rightarrow \Lambda\mu\mu$, $B_s \rightarrow \phi\mu\mu$ の崩壊分岐比 [\[1503.07138; 1506.08777\]](#)
- ◆ $B \rightarrow K^*\mu\mu$ 崩壊の角度分布 [\[1308.1707; 1512.04442\]](#)

@ LHCb

B中間子崩壊のレプトンフレーバー普遍性

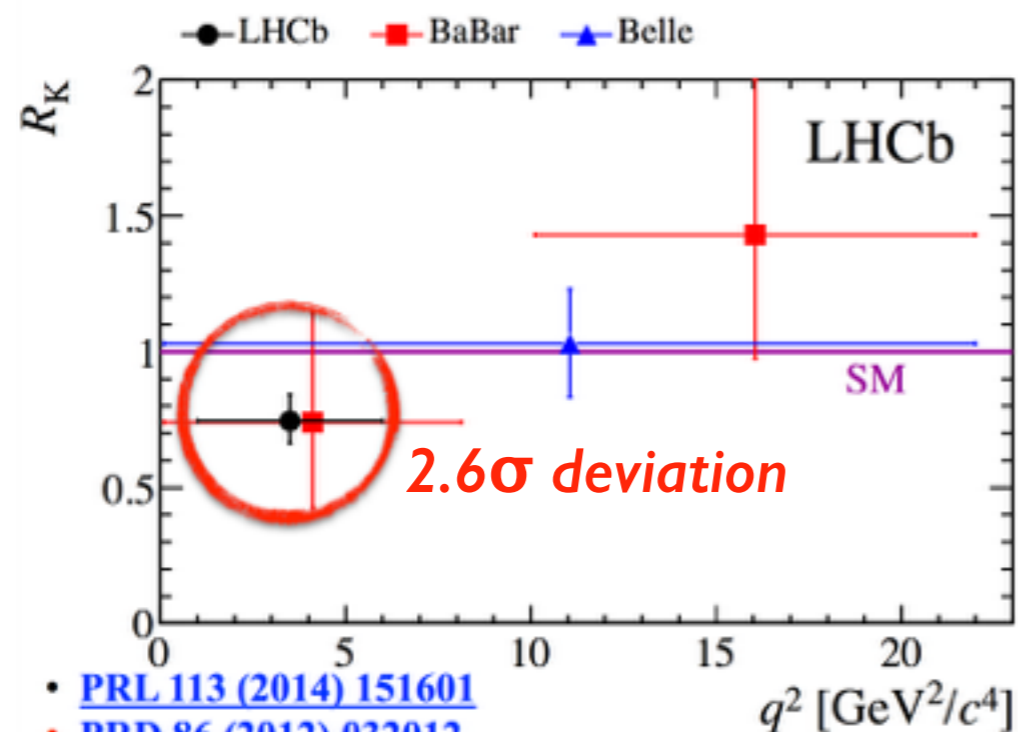
※SMでは $R_{K^{(*)}}=1$

$$R_K = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)} = 0.754_{-0.074}^{+0.090} \pm 0.036 \quad \text{for } 1 \text{ GeV}^2 \leq q^2 \leq 6 \text{ GeV}^2$$

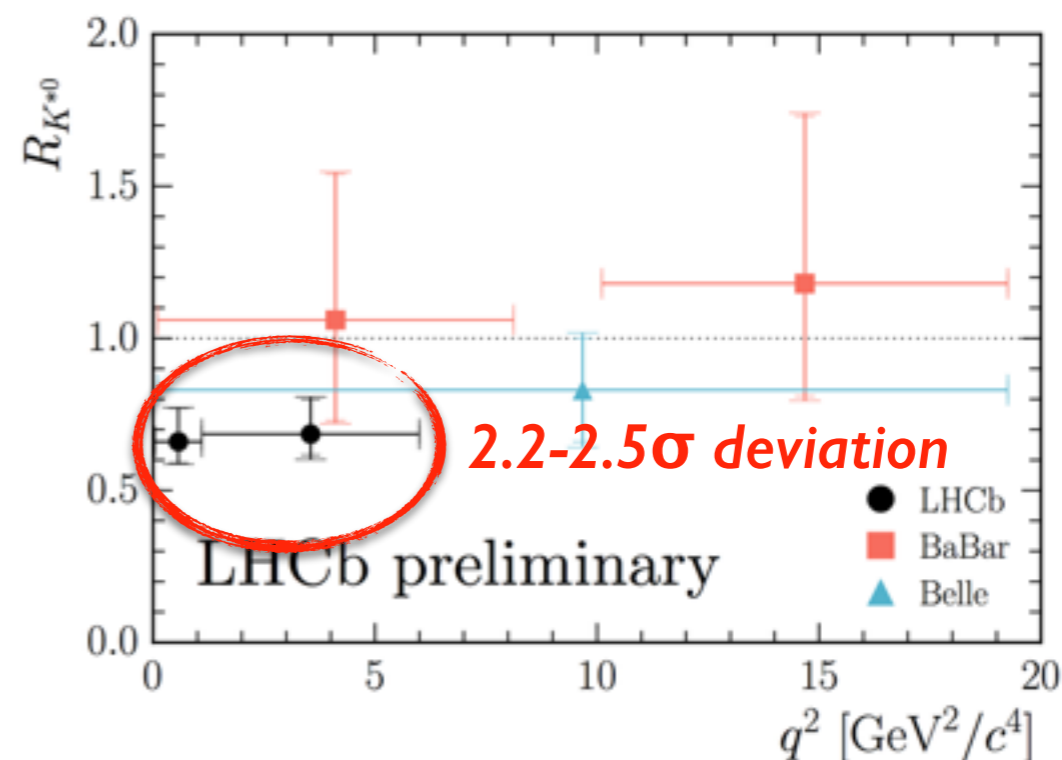
[LHCb collaboration, 1406.6482]

$$R_{K^*} = \frac{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} e^+ e^-)} = \begin{cases} 0.660_{-0.070}^{+0.110} \pm 0.024 & \text{for } (2m_\mu)^2 \leq q^2 \leq 1.1 \text{ GeV}^2 \\ 0.685_{-0.069}^{+0.113} \pm 0.047 & \text{for } 1.1 \text{ GeV}^2 \leq q^2 \leq 6.0 \text{ GeV}^2 \end{cases}$$

[Bifani's Talk @ CERN]

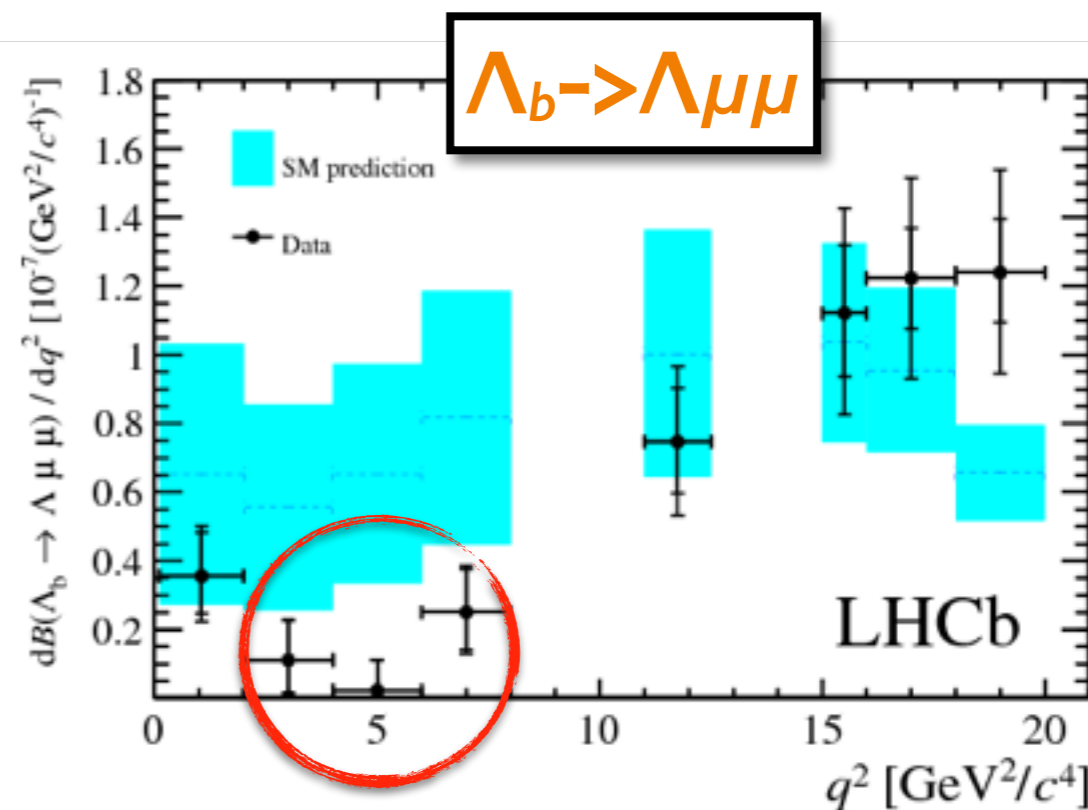
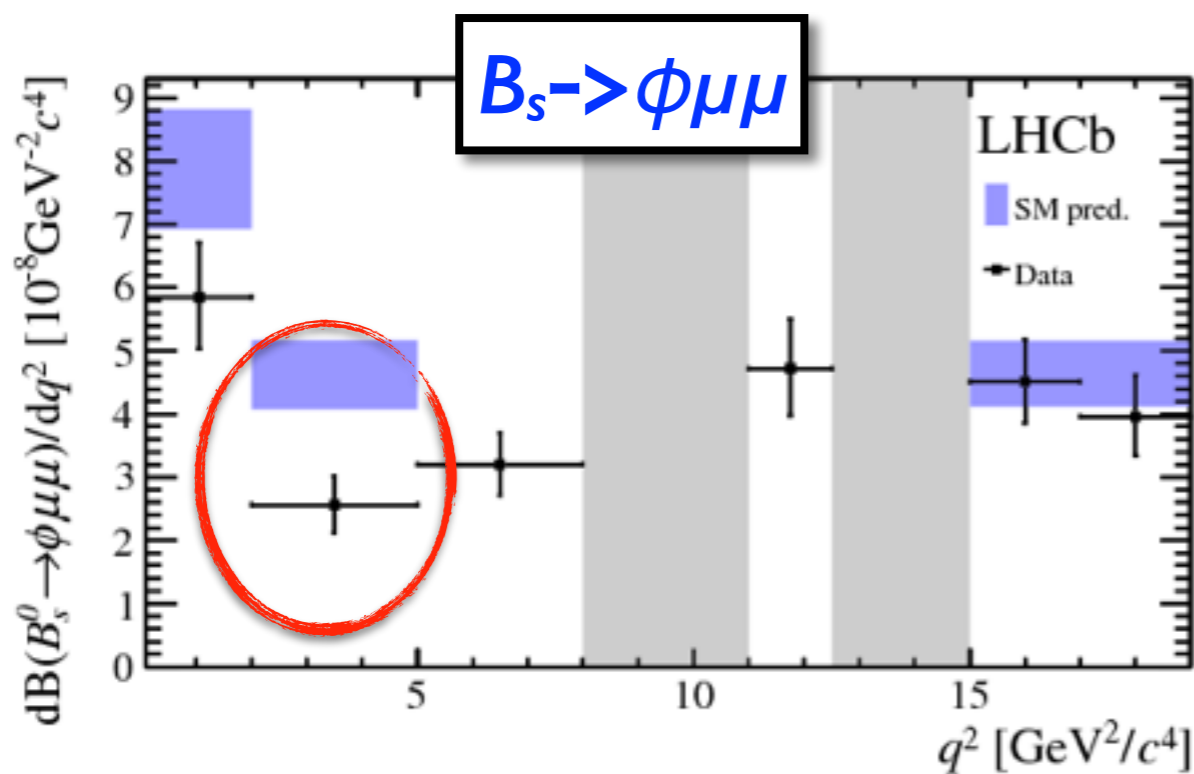


- [PRL 113 \(2014\) 151601](#)
- [PRD 86 \(2012\) 032012](#)
- [PRL 103 \(2009\) 171801](#)



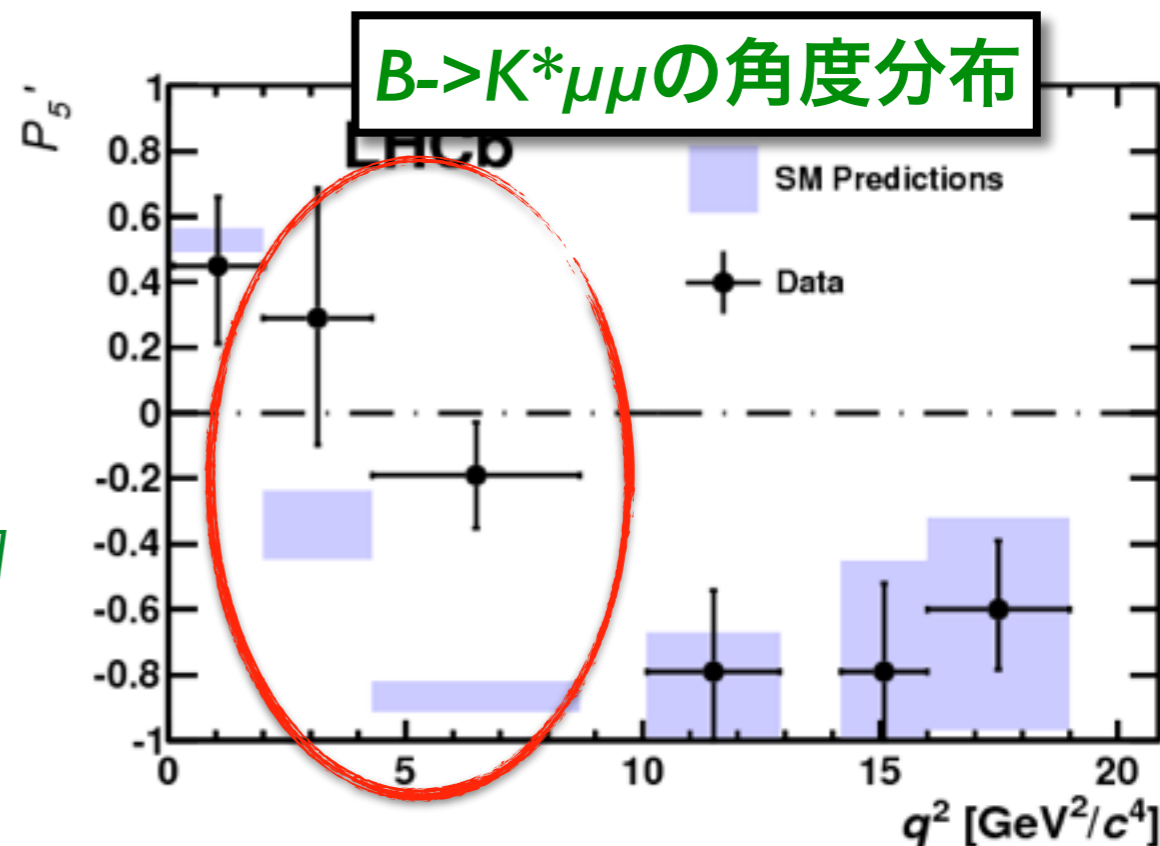
Bifani's Talk Slide @ CERN seminar

他の崩壊、角度分布

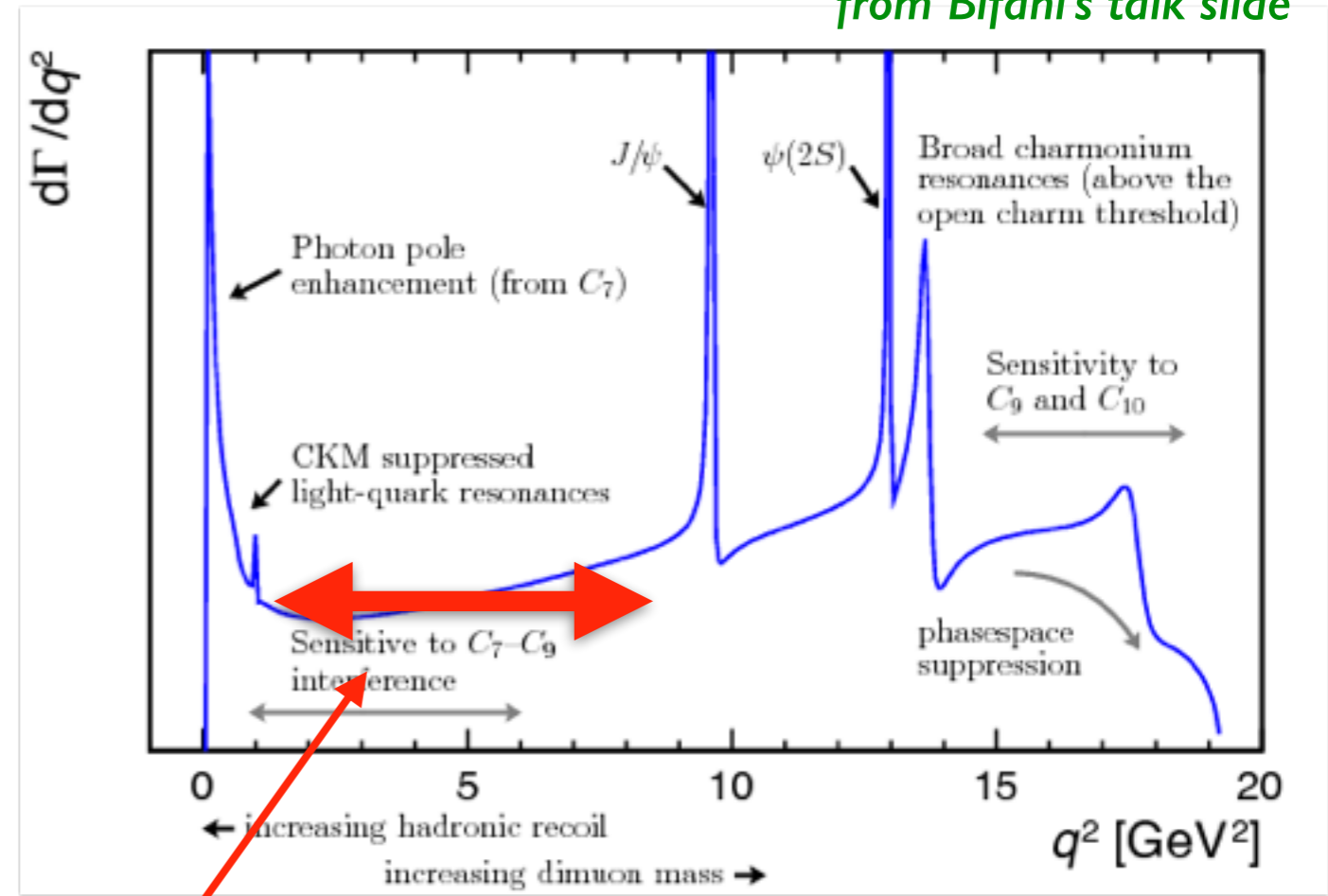
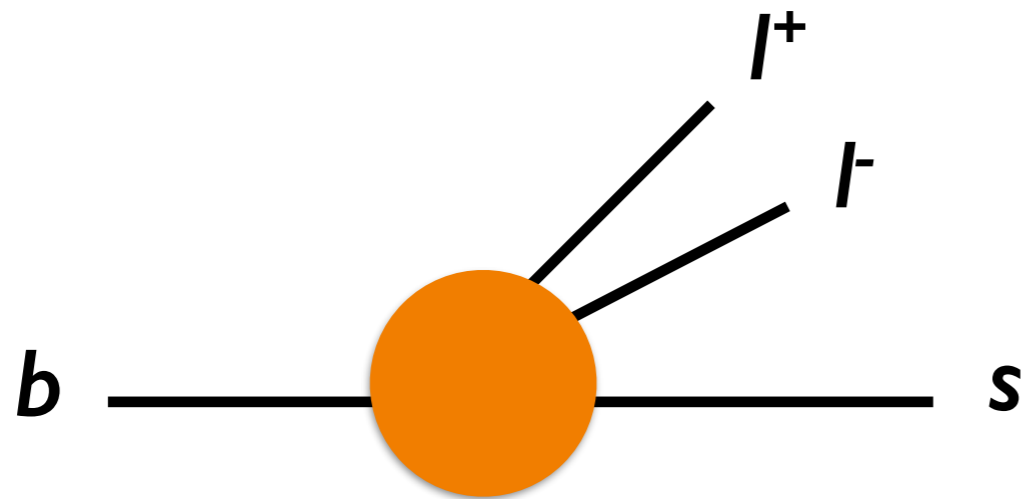


- ◆ $b \rightarrow s \mu \mu$ 崩壊
- ◆ $1 < q^2 < 6$ [GeV²] 辺り
- ◆ いずれも $b \rightarrow s \mu \mu$ が小さく出てる
- ◆ $b \rightarrow \text{see}$ は consistent っぽい?

[Hiller, Schmaltz, 1408.1627; LHCb, 1406.6482]

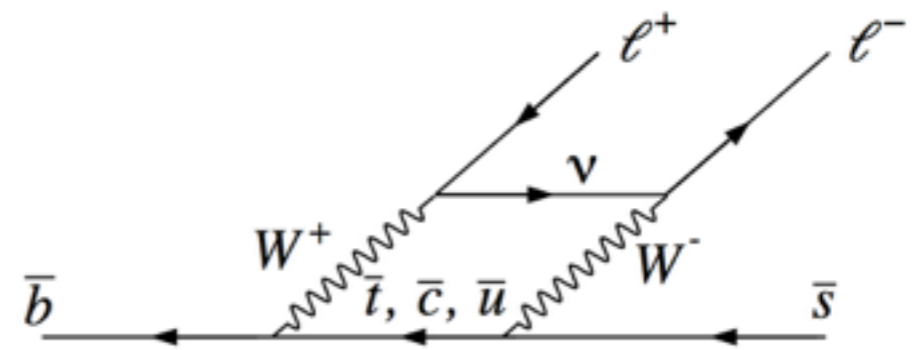
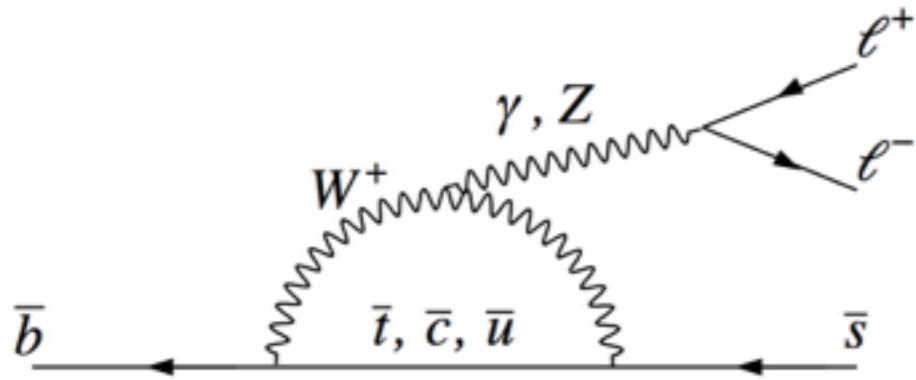


from Bifani's talk slide



この領域に新物理の寄与あり??

標準模型の寄与



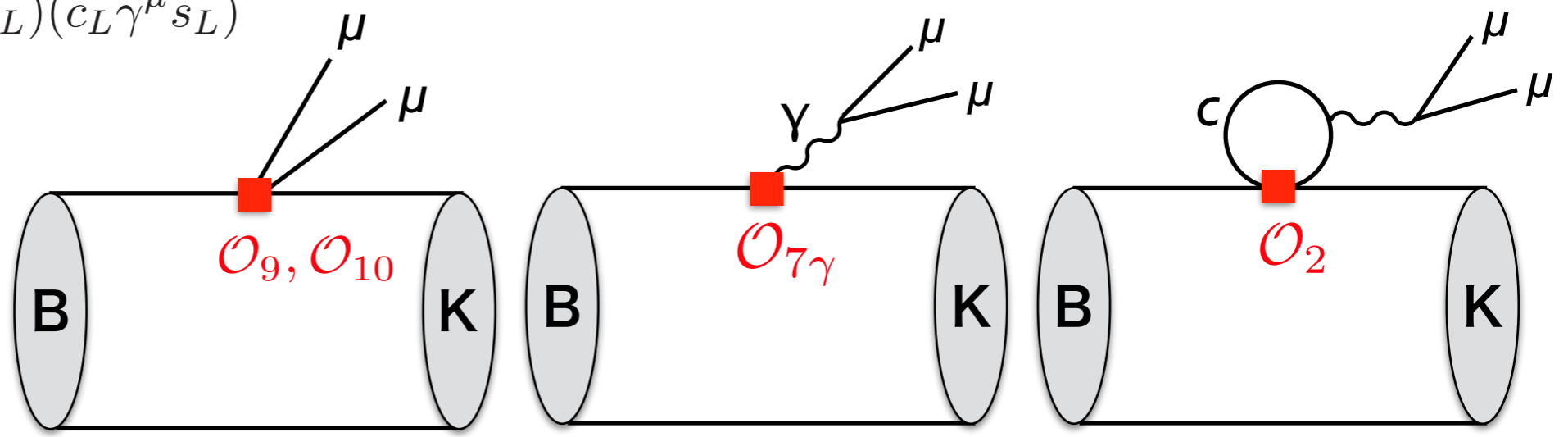
from Bifani's talk slide

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \frac{e^2}{16\pi^2} \sum_{i,l} \left(C_i^l \mathcal{O}_i^l + C_i'^l \mathcal{O}_i'^l \right) + h.c.$$

- $\mathcal{O}_9 = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L) (\bar{l} \gamma^\mu l)$
- $\mathcal{O}_{10} = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L) (\bar{l} \gamma^\mu \gamma_5 l)$
- $\mathcal{O}_{7\gamma} = m_b (\bar{s}_L \sigma_{\mu\nu} b_R) F^{\mu\nu}$
- $\mathcal{O}_2 = (\bar{b}_L \gamma_\mu c_L) (\bar{c}_L \gamma^\mu s_L)$

標準模型では,

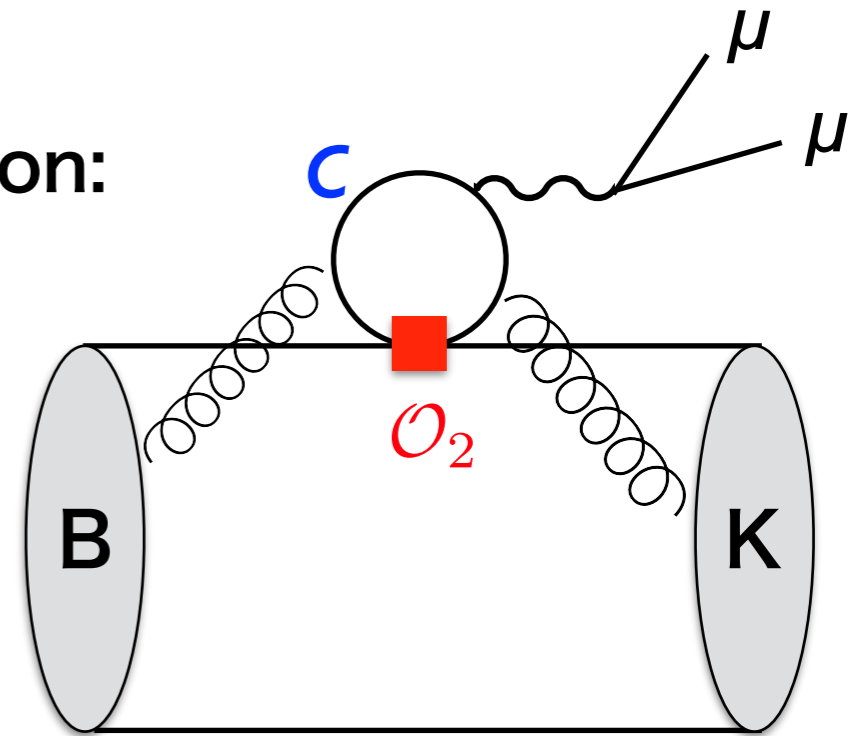
$$C_7 \simeq -0.3, C_9 \simeq 4, C_{10} \simeq -4$$



※まだ不確定な部分

◆ チャームループの long distance contribution:

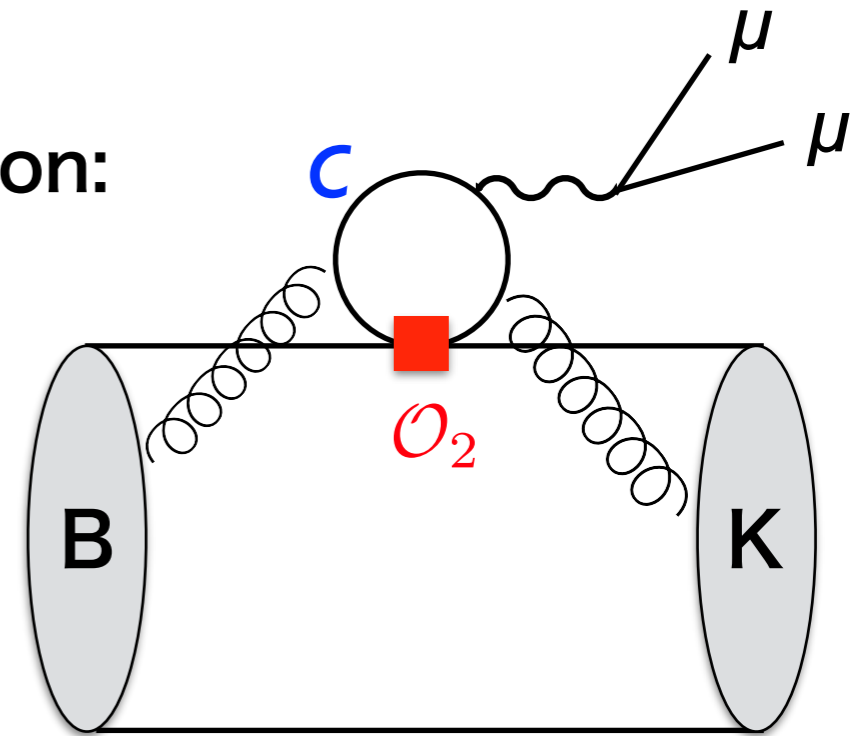
- B→K(*)II の形状因子は heavy quark limit で計算
ループの寄与は $\mathcal{O}(10\%)$ [9812358; 1503.05534]
- lepton non-universality RK(*) には効かない
- branching ratio, 角度分布には重要な寄与



※まだ不確定な部分

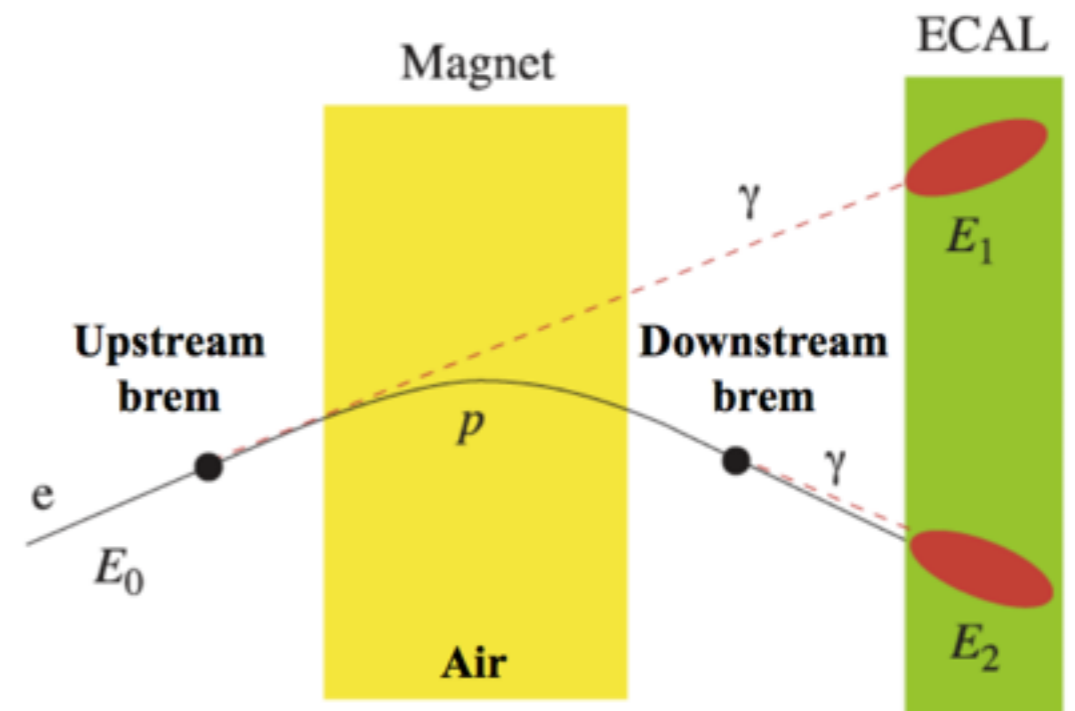
◆ チャームループの long distance contribution:

- B→K(*)II の形状因子は heavy quark limit で計算
ループの寄与は $\mathcal{O}(10\%)$ [9812358; 1503.05534]
- lepton non-universality RK(*) には効かない
- branching ratio, 角度分布には重要な寄与

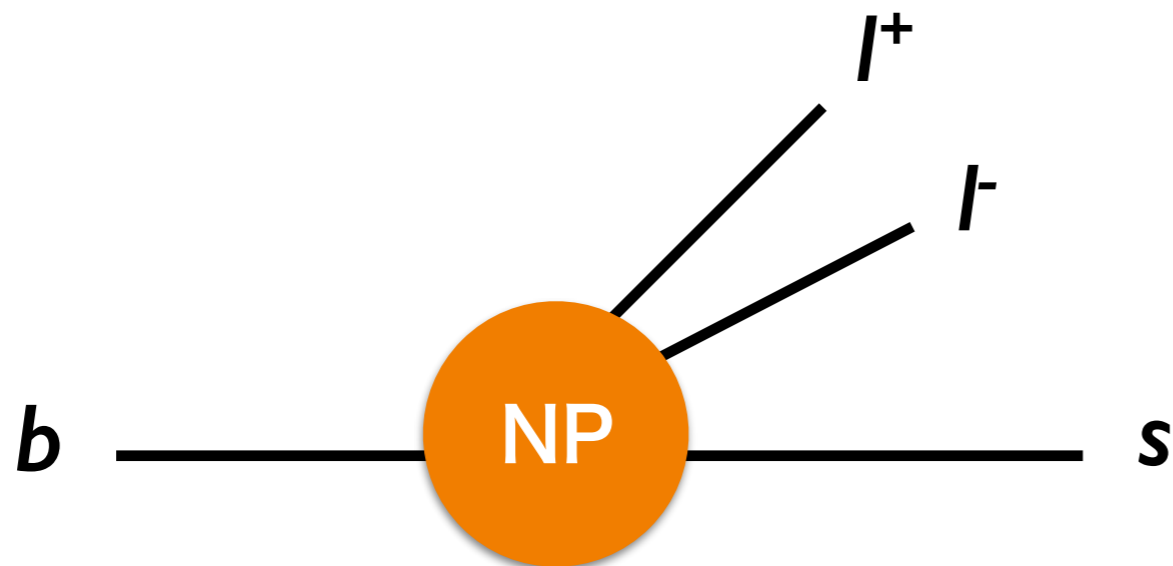


◆ Br(B→Kee)の観測:

- e は bremsstrahlung で多くのエネルギーを失う
- momentum, mass resolution が落ちる
- 運動量の再構成を改善するためリカバリー
- ミスるとイベントは実際とは違う q^2 bin で観測される



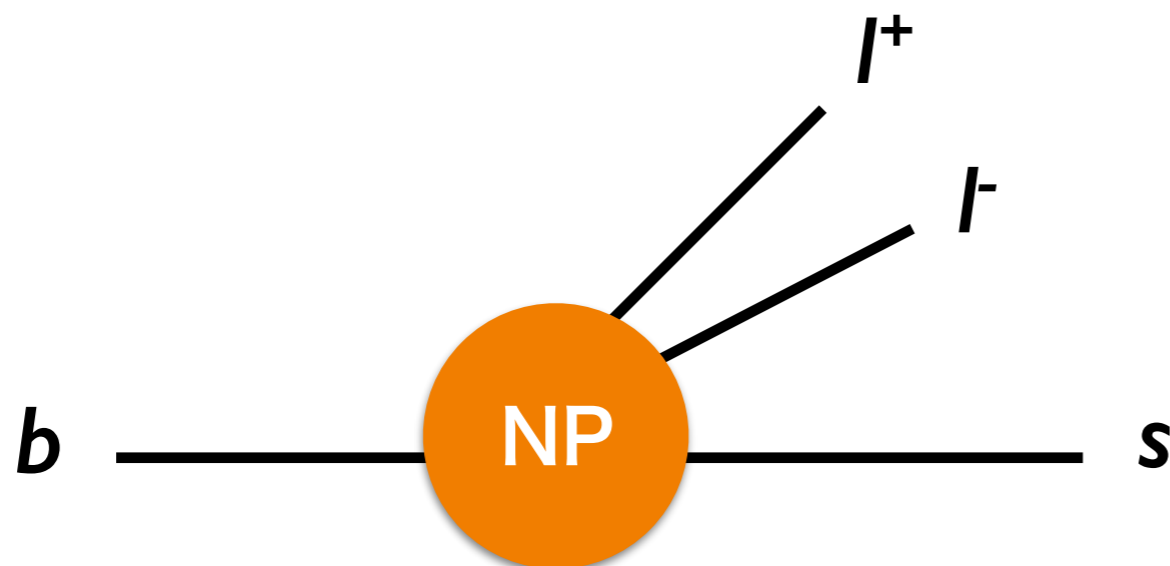
新物理の兆候だと思つと、



$$(\bar{b}\Gamma P_{L,R} s)(\bar{\mu}\Gamma P_{L,R} \mu)$$

$$\Gamma = \{1, \gamma^\mu, \sigma^{\mu\nu}, \gamma^\mu \gamma_5, \gamma_5\}$$

新物理の兆候だと思つと、



$$(\bar{b}\Gamma P_{L,R}S)(\bar{\mu}\Gamma P_{L,R}\mu)$$

$$\Gamma = \{1, \gamma^\mu, \sigma^{\mu\nu}, \gamma^\mu \gamma_5, \gamma_5\}$$

問.

- ◆ どんな相互作用があれば良さそうか？
- ◆ どのくらいの大きさが必要か？
- ◆ 新物理モデルの候補は？
- ◆ 他の観測量との相関は？ (R(D), R(D*), g-2, etc.)

グローバルフィット

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \frac{e^2}{16\pi^2} \sum_{i,l} \left(C_i^l \mathcal{O}_i^l + C_i^{\prime l} \mathcal{O}_i^{\prime l} \right) + h.c.$$

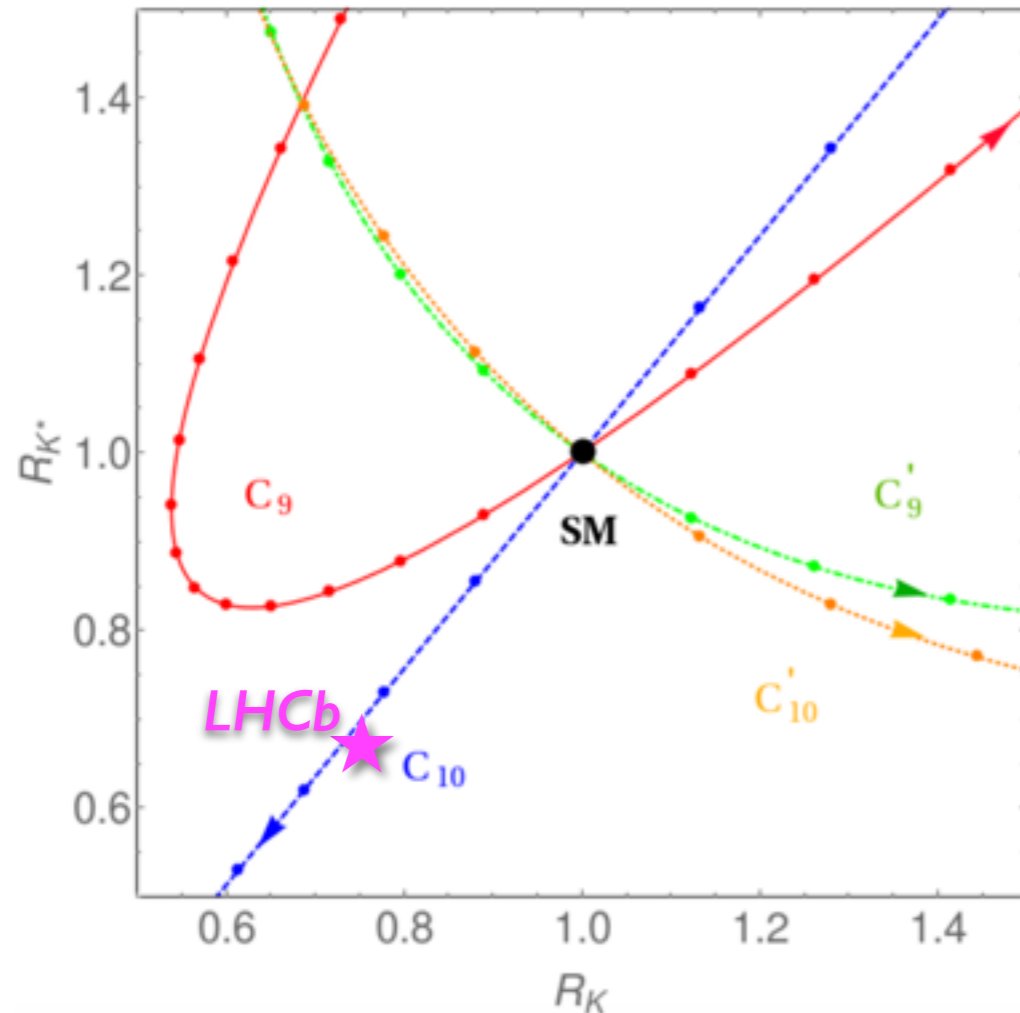
$$\mathcal{O}_9^l = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L) (\bar{l} \gamma^\mu l) \quad \mathcal{O}_9^{\prime l} = (\bar{b}_R \gamma_\mu s_R) (\bar{l} \gamma^\mu l)$$

$$\mathcal{O}_{10}^l = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L) (\bar{l} \gamma^\mu \gamma_5 l) \quad \mathcal{O}_{10}^{\prime l} = (\bar{b}_R \gamma_\mu s_R) (\bar{l} \gamma^\mu \gamma_5 l)$$

$$C_9^{SM} \simeq 4, \quad C_{10}^{SM} \simeq -4$$

$$C_7^{SM} \simeq -0.3$$

[Geng, Grinstein, et al., 1704.05446]



[Altmannshofer, Stangl, Straub, 1704.05435]

Coeff.	best fit	1 σ	2 σ	pull
C_9^μ	-1.59	[-2.15, -1.13]	[-2.90, -0.73]	4.2 σ
C_{10}^μ	+1.23	[+0.90, +1.60]	[+0.60, +2.04]	4.3 σ
C_9^e	+1.58	[+1.17, +2.03]	[+0.79, +2.53]	4.4 σ
C_{10}^e	-1.30	[-1.68, -0.95]	[-2.12, -0.64]	4.4 σ
$C_9^\mu = -C_{10}^\mu$	-0.64	[-0.81, -0.48]	[-1.00, -0.32]	4.2 σ
$C_9^e = -C_{10}^e$	+0.78	[+0.56, +1.02]	[+0.37, +1.31]	4.3 σ
$C_9^{\prime\mu}$	-0.00	[-0.26, +0.25]	[-0.52, +0.51]	0.0 σ
$C_{10}^{\prime\mu}$	+0.02	[-0.22, +0.26]	[-0.45, +0.49]	0.1 σ
$C_9^{\prime e}$	+0.01	[-0.27, +0.31]	[-0.55, +0.62]	0.0 σ
$C_{10}^{\prime e}$	-0.03	[-0.28, +0.22]	[-0.55, +0.46]	0.1 σ

他の演算子

- ◆ スカラー:

$$(\overline{s_L} b_R)(\overline{l_R} l_L)$$

→ $Bs \rightarrow \mu\mu$ から強く制限される [\[Hurth, Isidori, et.al, 0807.5039\]](#)

他の演算子

- ◆ スカラー:

$$(\overline{s}_L b_R)(\overline{l}_R l_L)$$

→ $Bs \rightarrow \mu\mu$ から強く制限される [\[Hurth, Isidori, et.al, 0807.5039\]](#)

- ◆ テンソル:

$$\mathcal{O}_T = [\overline{s}\sigma_{\mu\nu}b][\overline{l}\sigma^{\mu\nu}l], \quad \mathcal{O}_{T5} = [\overline{s}\sigma_{\mu\nu}b][\overline{l}\sigma^{\mu\nu}\gamma_5 l]$$

→ RK にはそれほど効かない [\[Hiller, Schmaltz, 1408.1627; Bardhan, et.al., 1705.09305\]](#)

他の演算子

- ◆ スカラー:

$$(\bar{s}_L b_R)(\bar{l}_R l_L)$$

→ $Bs \rightarrow \mu\mu$ から強く制限される [Hurth, Isidori, et.al, 0807.5039]

- ◆ テンソル:

$$\mathcal{O}_T = [\bar{s}\sigma_{\mu\nu}b][\bar{l}\sigma^{\mu\nu}l], \quad \mathcal{O}_{T5} = [\bar{s}\sigma_{\mu\nu}b][\bar{l}\sigma^{\mu\nu}\gamma_5l]$$

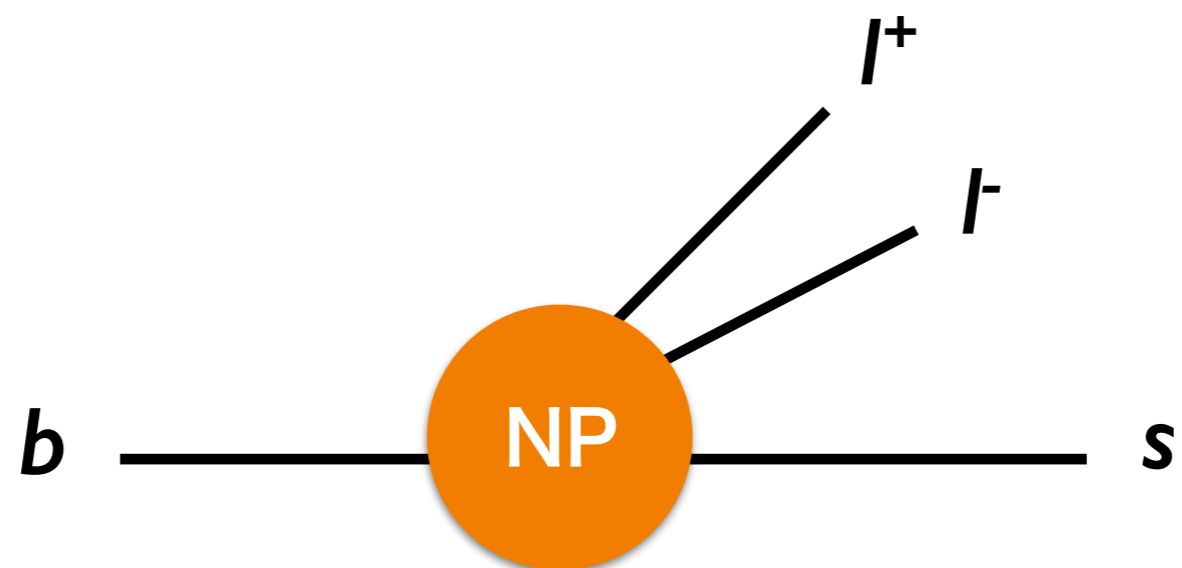
→ RK にはそれほど効かない [Hiller, Schmaltz, 1408.1627; Bardhan, et.al., 1705.09305]

- ◆ ペンギン:

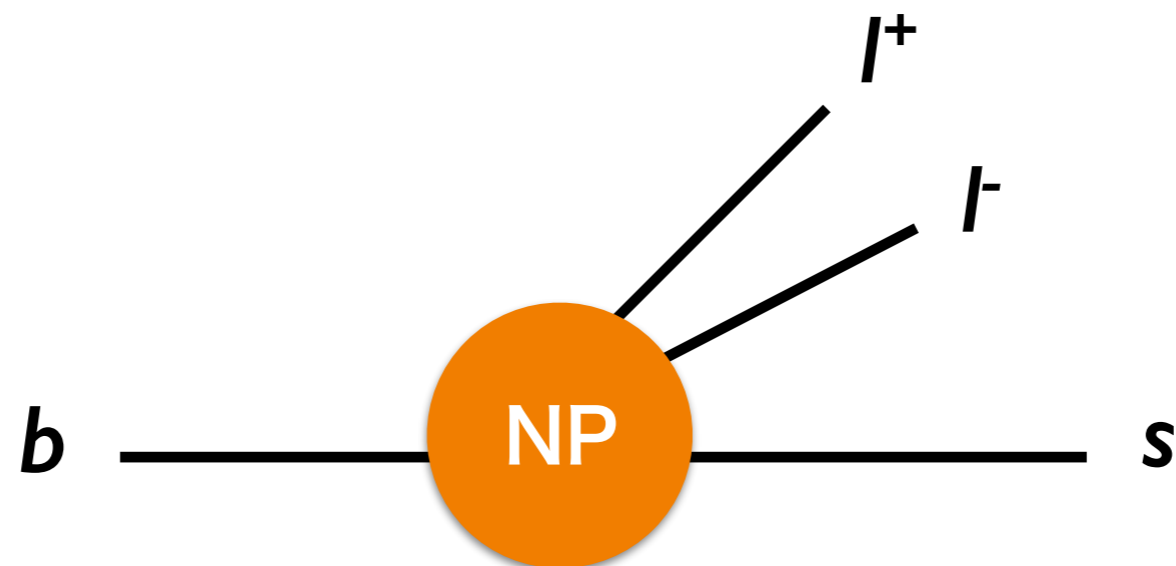
$$\mathcal{O}_{7\gamma} = m_b(\bar{s}_L\sigma_{\mu\nu}b_R)F^{\mu\nu}, \quad \mathcal{O}'_{7\gamma} = m_b(\bar{s}_R\sigma_{\mu\nu}b_L)F^{\mu\nu}$$

→ $b \rightarrow s\gamma$ の制限がきつい, non-universality には効かない

グローバルフィットからの示唆



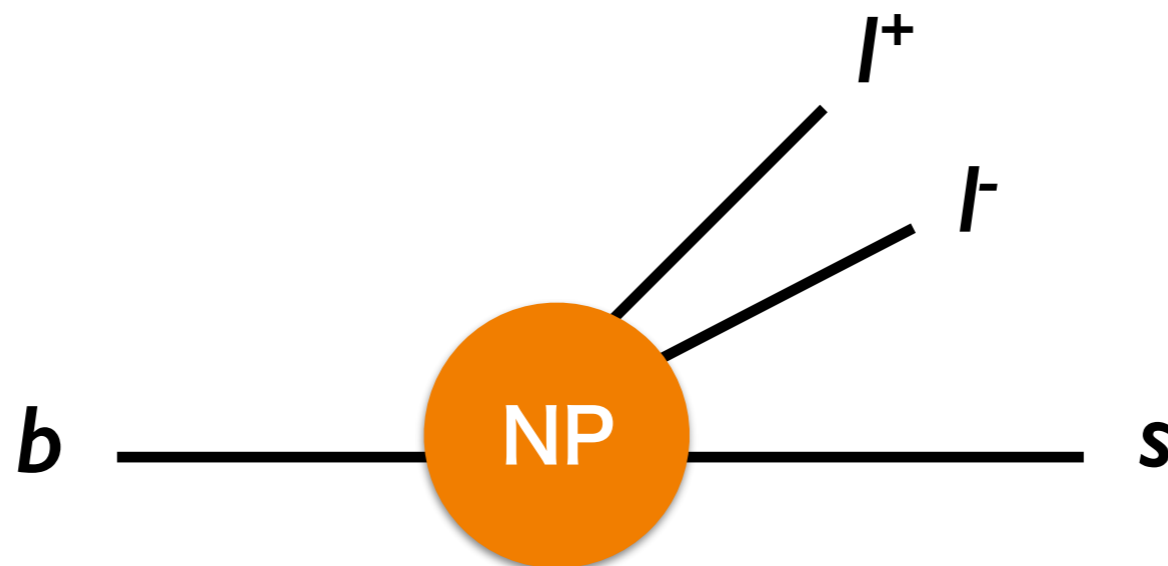
グローバルフィットからの示唆



- ◆ b-s は左巻きにカップルしていた方が良さそう

$$\mathcal{O}_9^\mu = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L)(\bar{\mu} \gamma^\mu \mu), \quad \mathcal{O}_{10}^\mu = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L)(\bar{\mu} \gamma^\mu \gamma_5 \mu)$$

グローバルフィットからの示唆

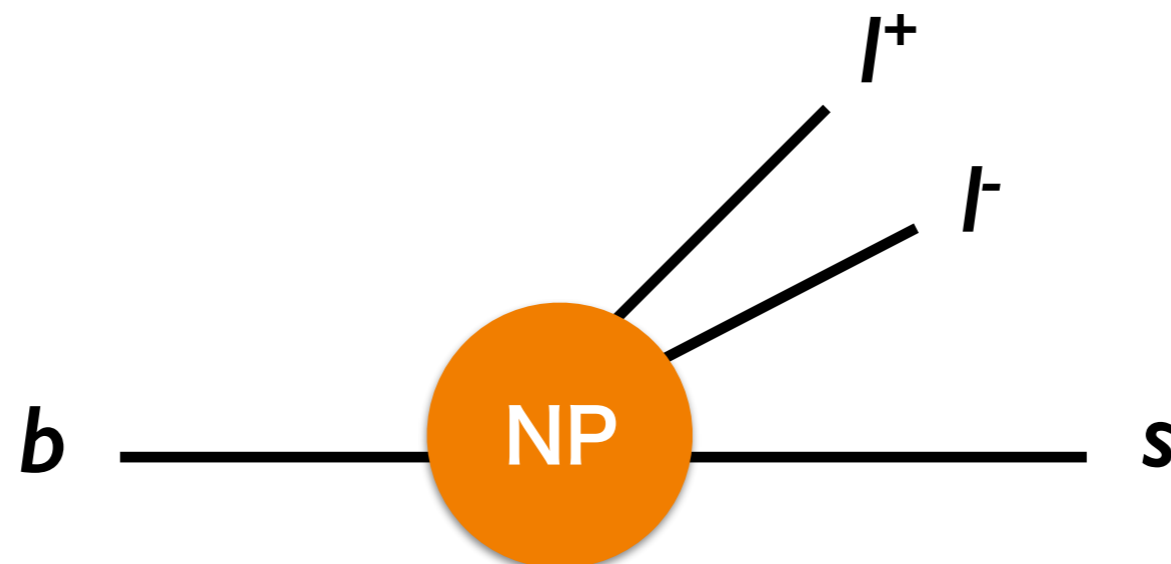


- ◆ b-s は左巻きにカップルしていた方が良さそう

$$\mathcal{O}_9^\mu = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L)(\bar{\mu} \gamma^\mu \mu), \quad \mathcal{O}_{10}^\mu = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L)(\bar{\mu} \gamma^\mu \gamma_5 \mu)$$

- ◆ レプトンはまだはっきりしていない; $C_9, C_{10}, C_9 = -C_{10}, \dots$

グローバルフィットからの示唆



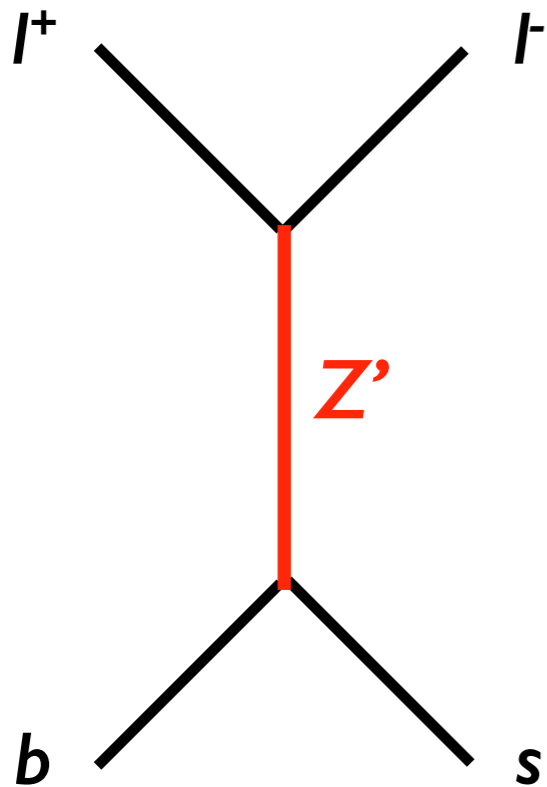
- ◆ b-s は左巻きにカップルしていた方が良さそう

$$\mathcal{O}_9^\mu = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L)(\bar{\mu} \gamma^\mu \mu), \quad \mathcal{O}_{10}^\mu = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L)(\bar{\mu} \gamma^\mu \gamma_5 \mu)$$

- ◆ レプトンはまだはっきりしていない; $C_9, C_{10}, C_9 = -C_{10}, \dots$
- ◆ 標準模型の20%-30%くらいの大きさが必要

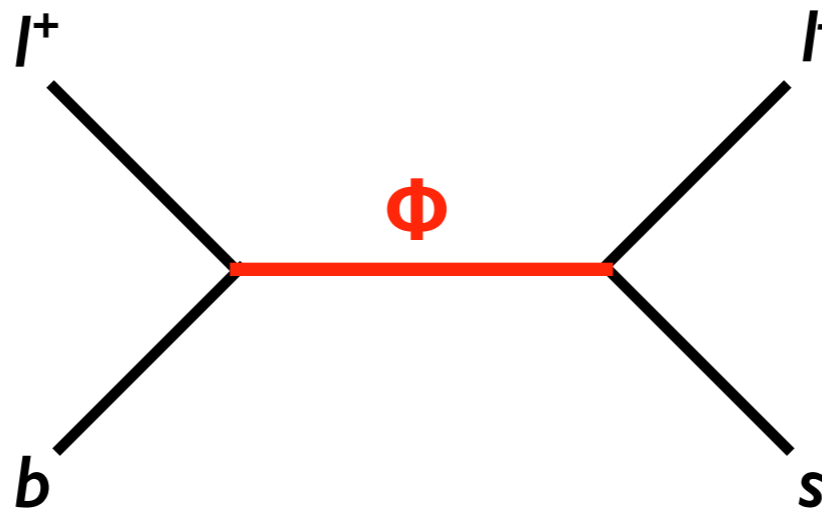
アノマリーを説明する候補

中性ベクトル



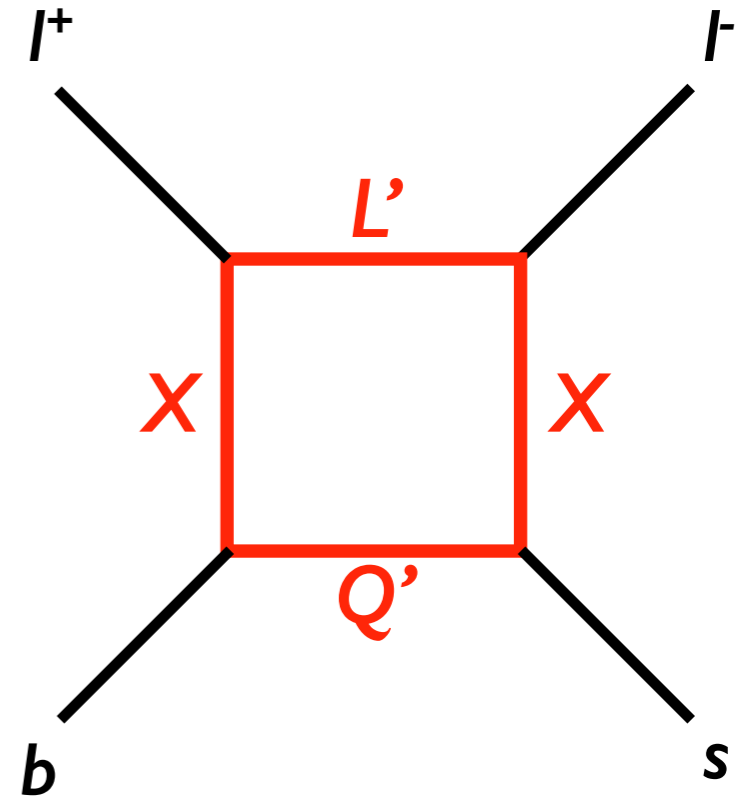
[1604.03088;1608.01349;1002.2758;1312.1302;1503.03477;1508.07009;1511.07447;1611.03507;1701.05788;1702.02699;1702.08666;1705.05643;1704.06200;1704.08158;1705.00915;1705.03447;1705.03858;1705.08423;1706.02696;1704.06240;1704.07397;etc.]

レプトクォーク



[1511.01900;1605.06313;1608.08501;1609.04367;1609.08895;1609.09078;1704.05835;1704.05849;1705.09188;1703.09226;1706.01463;1704.07397;etc.]

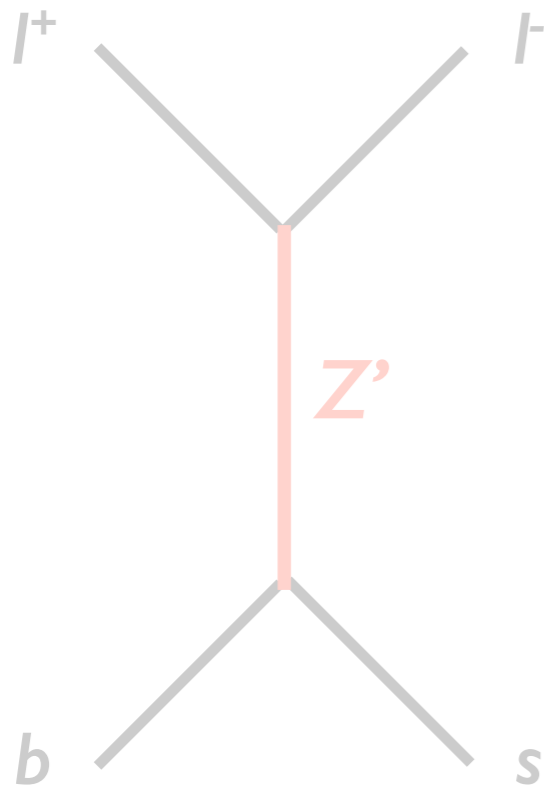
箱型



[1509.05020;1608.07832;1507.06660;1612.08867;1705.07007;1704.06005;etc.]

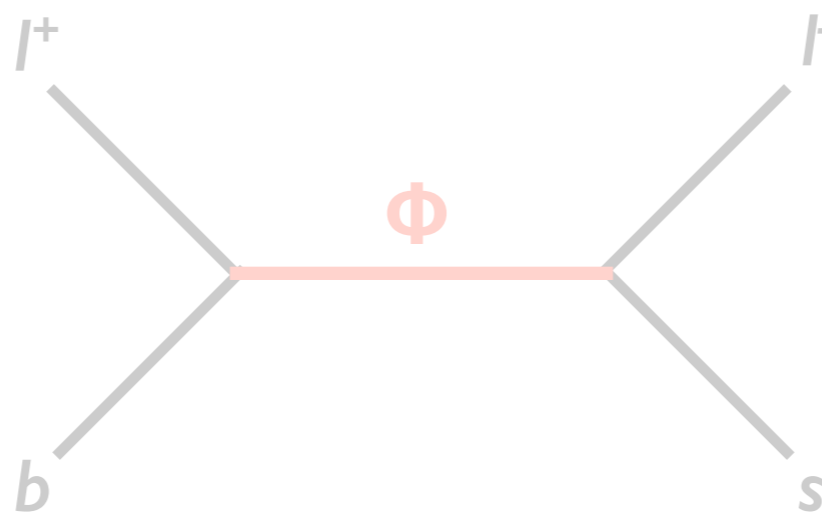
アノマリーを説明する候補

中性ベクトル



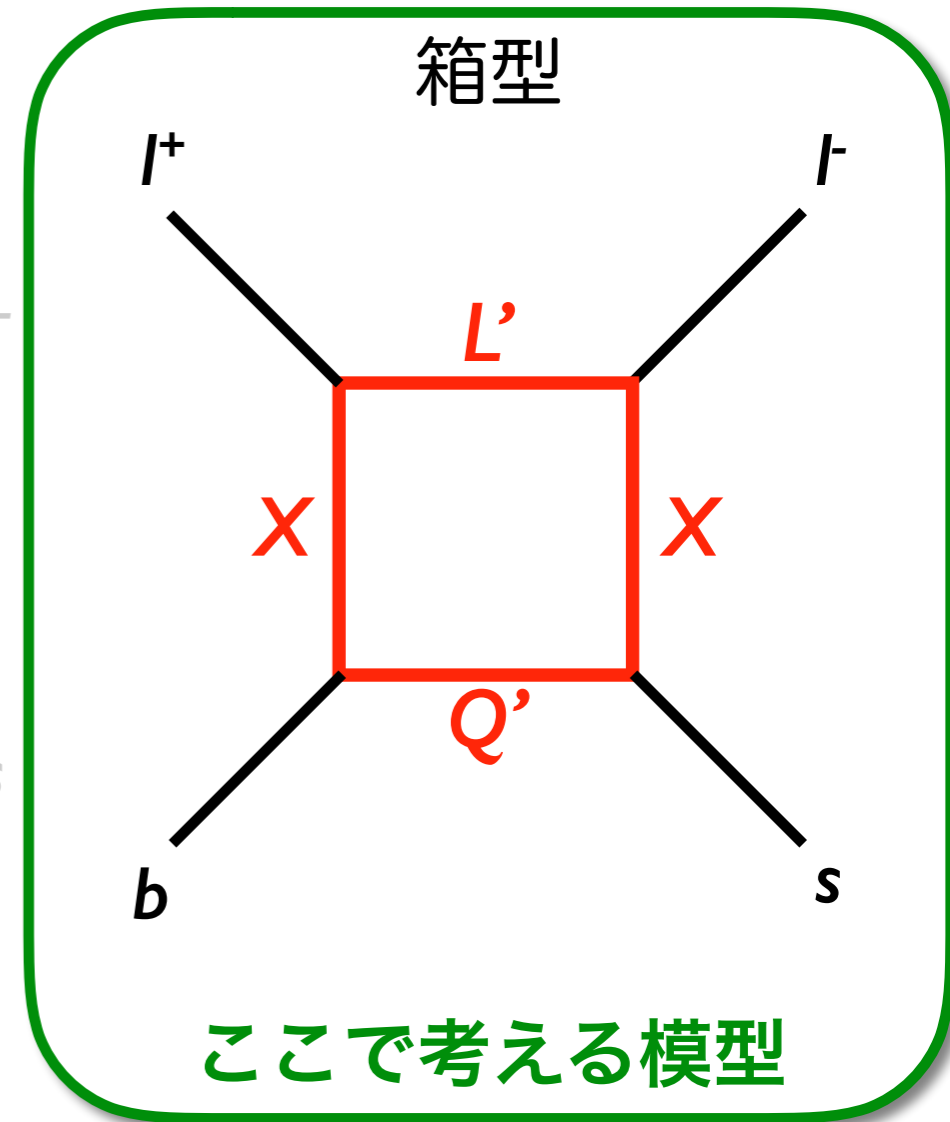
[1604.03088;1608.01349;1002.2758;1312.1302;1503.03477;1508.07009;1511.07447;1611.03507;1701.05788;1702.02699;1702.08666;1705.05643;1704.06200;1704.08158;1705.00915;1705.03447;1705.03858;1705.08423;1706.02696;1704.06240;1704.07397;etc.]

レプトクォーク



[1511.01900;1605.06313;1608.08501;1609.04367;1609.08895;1609.09078;1704.05835;1704.05849;1705.09188;1703.09226;1706.01463;1704.07397;etc.]

箱型



ここで考える模型

特に,,,

$X=DM$ ってあり得るのか？

Kawamura, SO and Omura, 1706.04344

セットアツプ

セットアップ

Kawamura, SO and Omura, I706.04344

◆ 新粒子:

Fields	spin	SU(3) _c	SU(2) _L	U(1) _Y	U(1) _X
Q'	1/2	3	2	1/6	1
L'	1/2	1	2	-1/2	1
X	0	1	1	0	-1

ダークマター候補

◆ 相互作用:

$$m_{Q'} \overline{Q'_L} Q'_R + m_{L'} \overline{L'_L} L'_R + \lambda_q^i \overline{Q'_R} X^\dagger Q_L^i + \lambda_l^i \overline{L'_R} X^\dagger l_L^i + h.c.$$

$$Q_L^i = (V_{ij}^\dagger u_L^j, d_L^i)^T$$

興味あるのは μ のところ

$$\lambda_\mu \overline{L'_R} X^\dagger \mu_L + h.c.$$

$$|\lambda_\mu| \gg |\lambda_e|, |\lambda_\tau|$$

セットアップ

Kawamura, SO and Omura, I706.04344

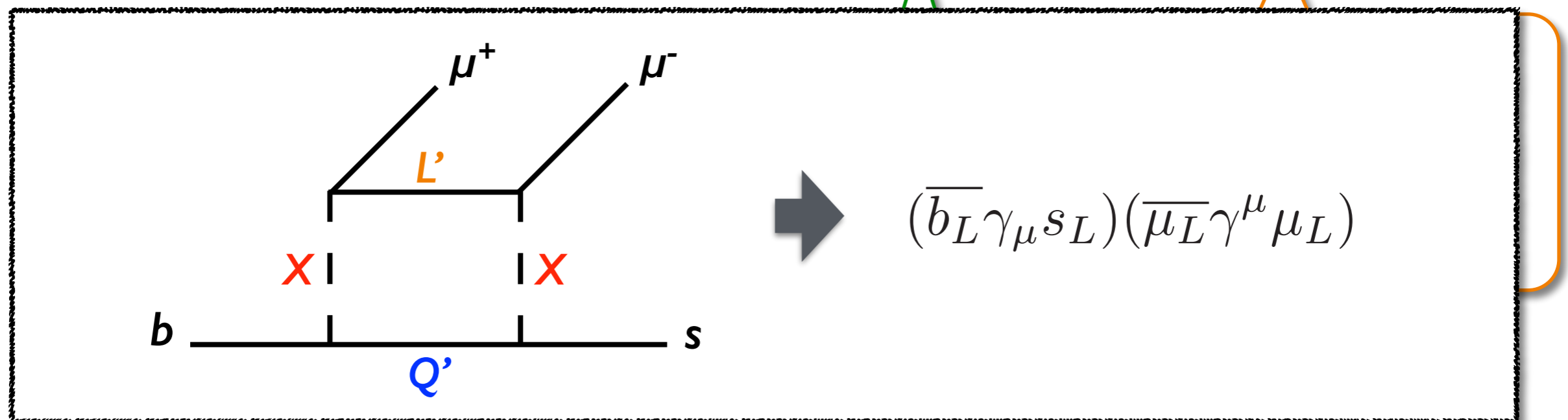
◆ 新粒子:

Fields	spin	SU(3) _c	SU(2) _L	U(1) _Y	U(1) _X
Q'	1/2	3	2	1/6	1
L'	1/2	1	2	-1/2	1
X	0	1	1	0	-1

ダークマター候補

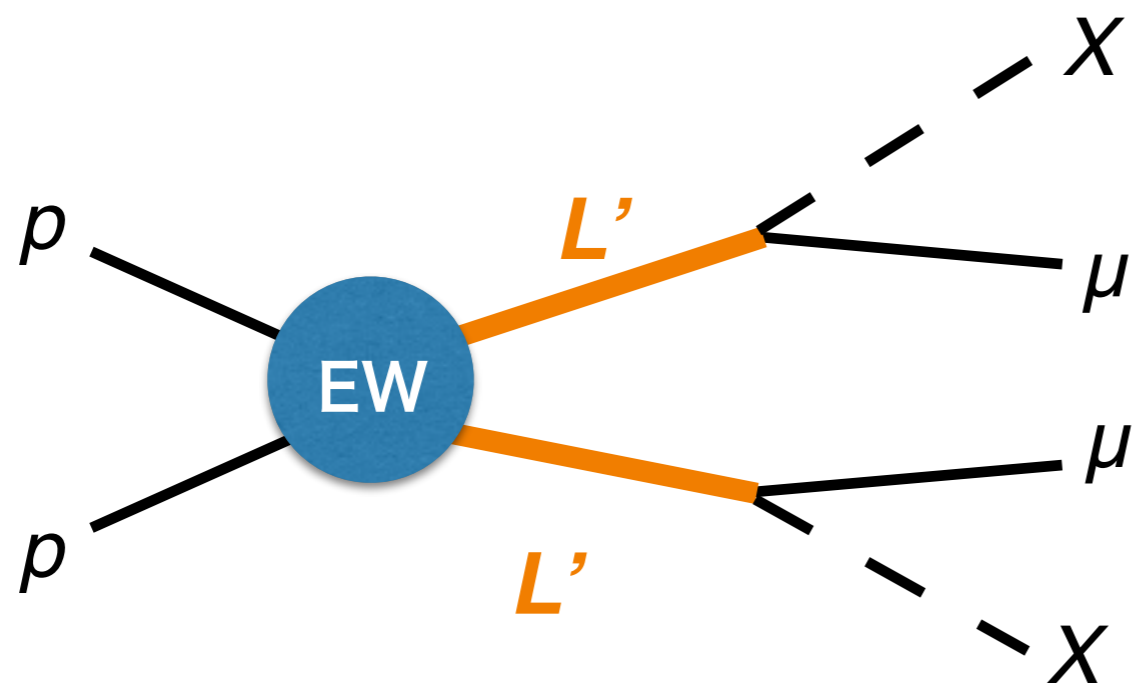
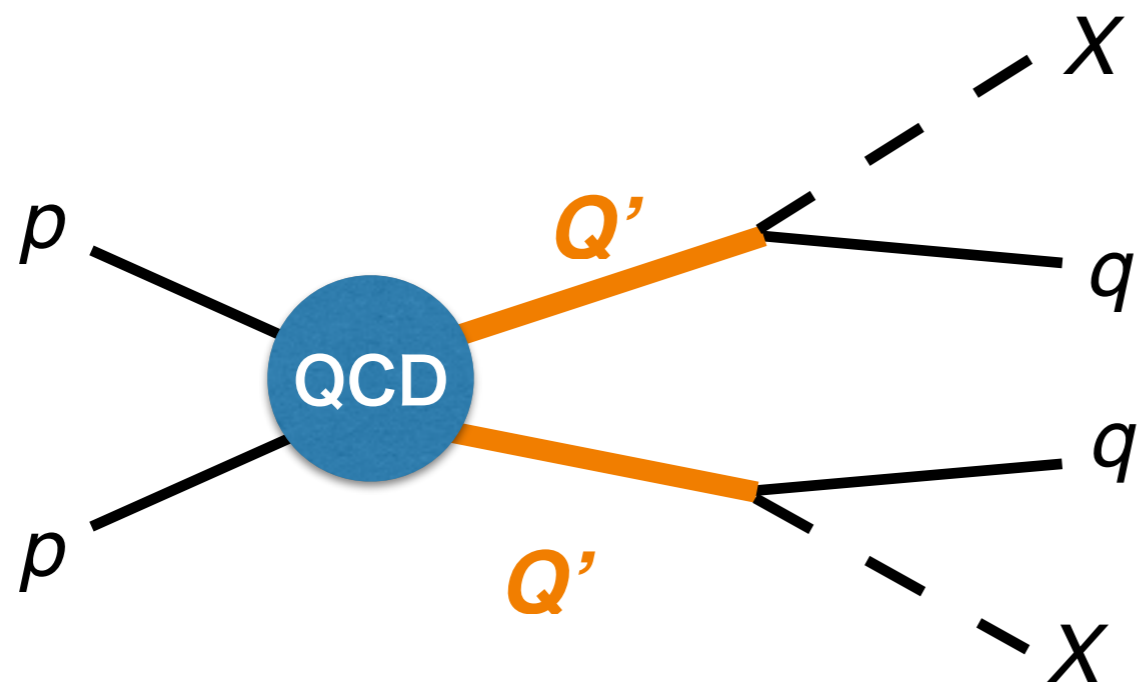
◆ 相互作用:

$$m_{Q'} \overline{Q}'_L Q'_R + m_{L'} \overline{L}'_L L'_R + \lambda_q^i \overline{Q}'_R X^\dagger Q_L^i + \lambda_l^i \overline{L}'_R X^\dagger l_L^i + h.c.$$

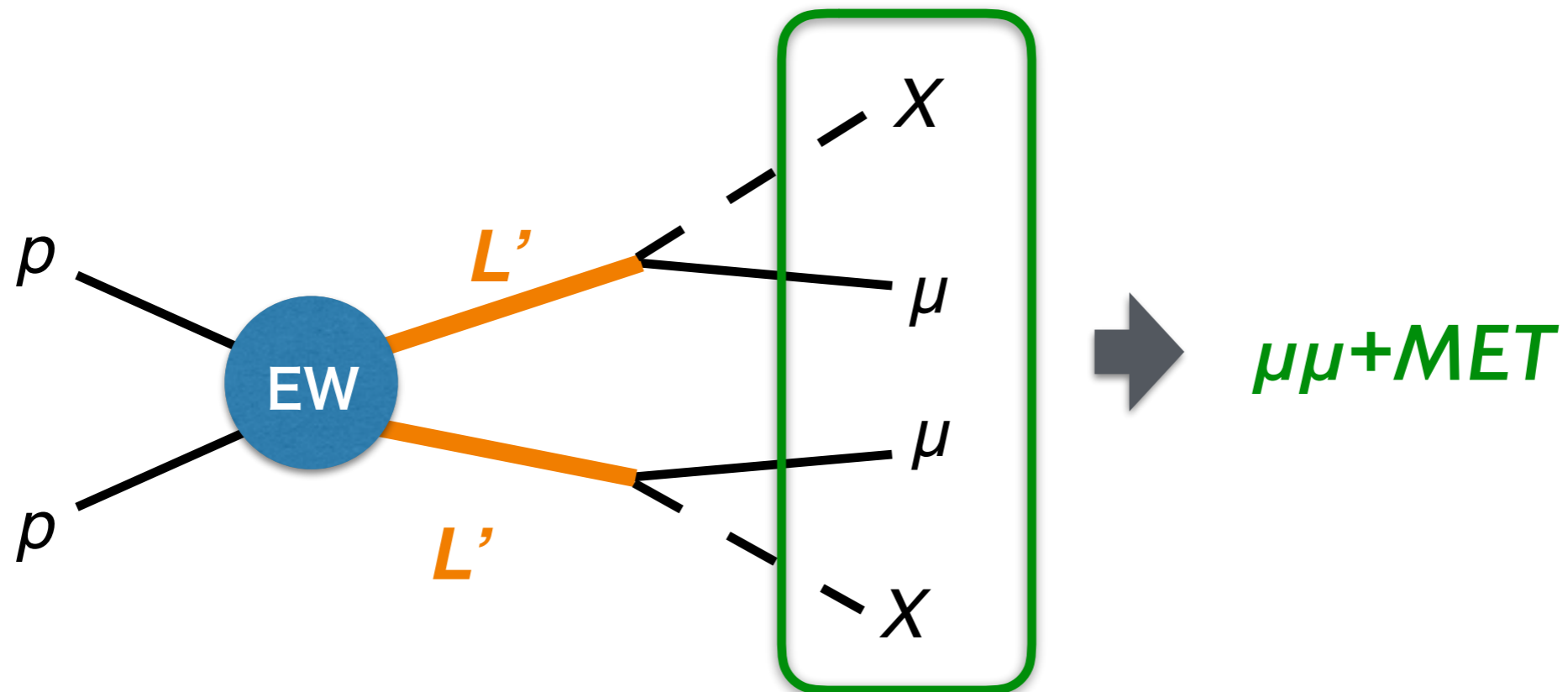
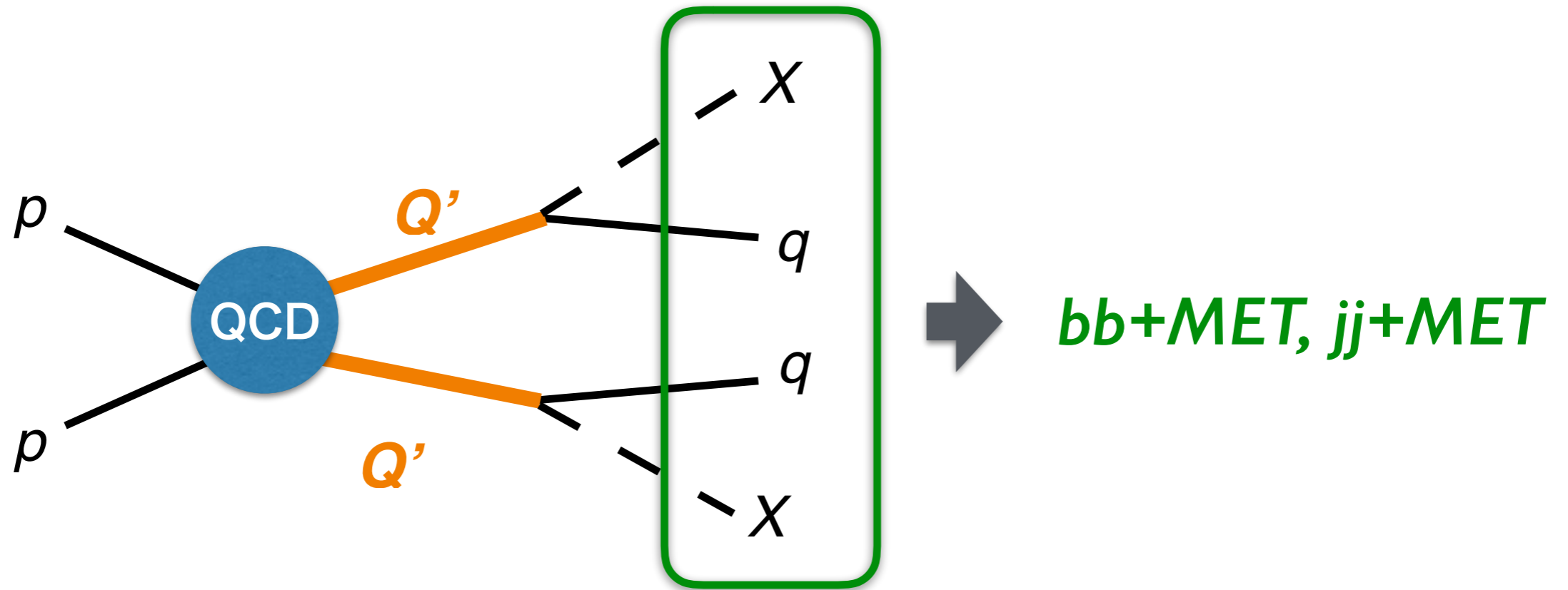


現象論

直接探索@LHC



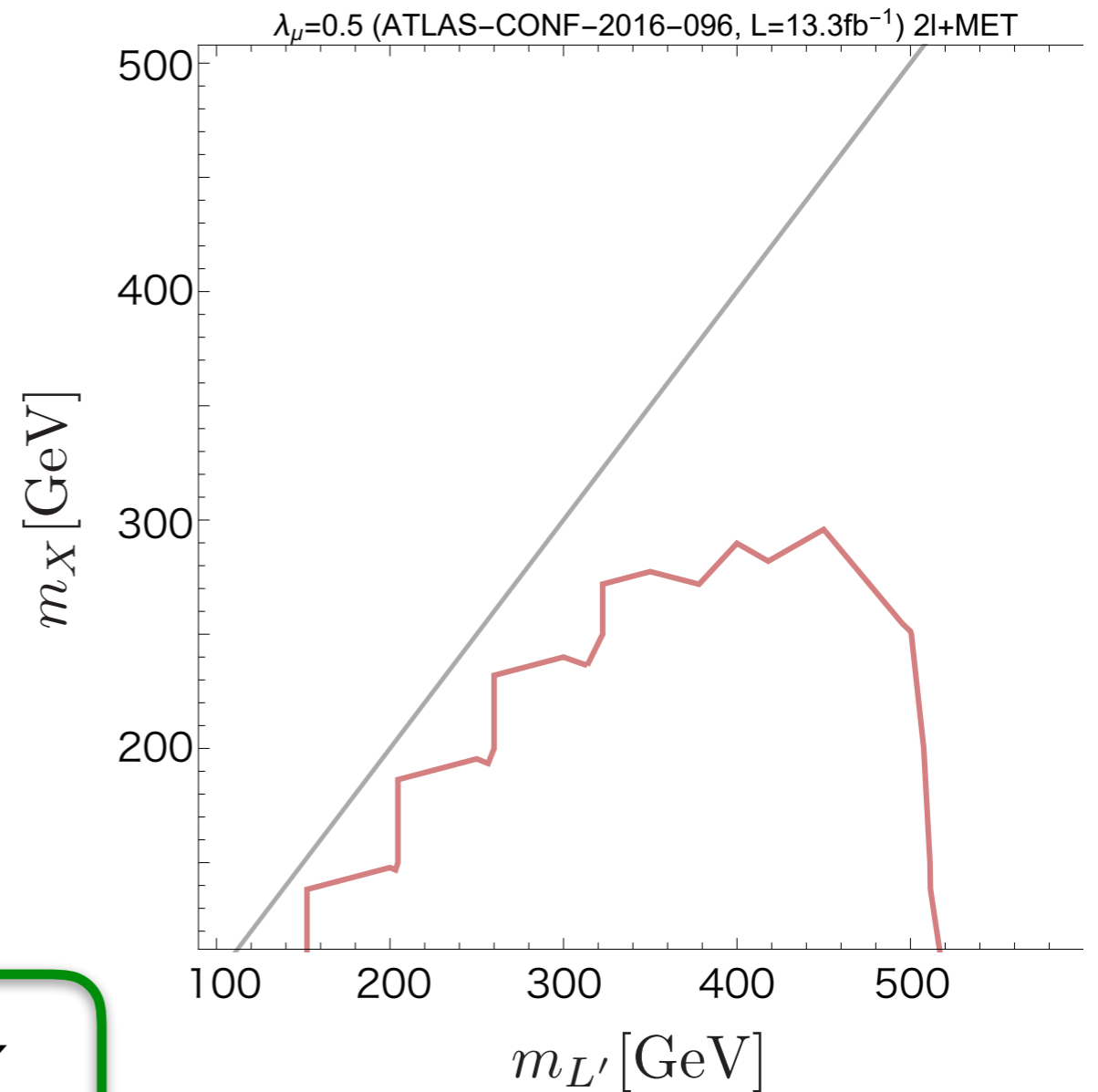
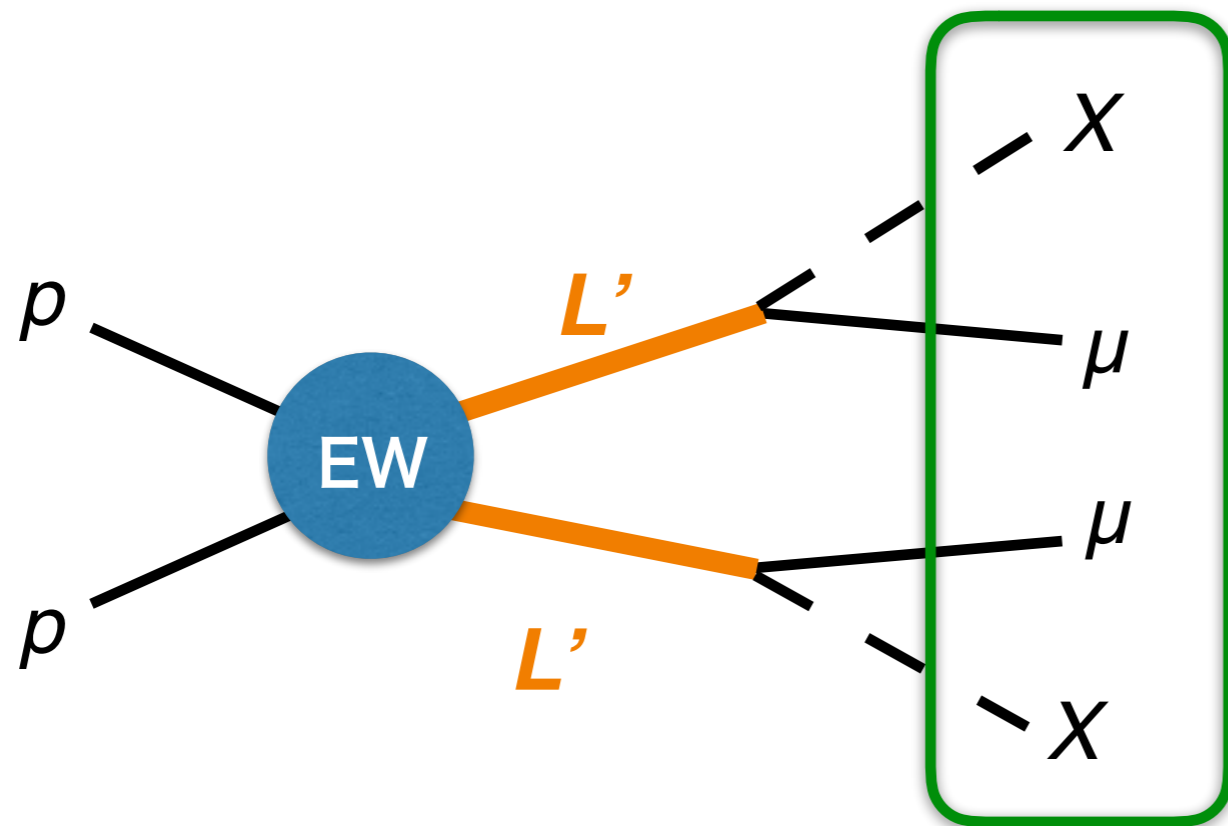
直接探索@LHC



直接探索@LHC

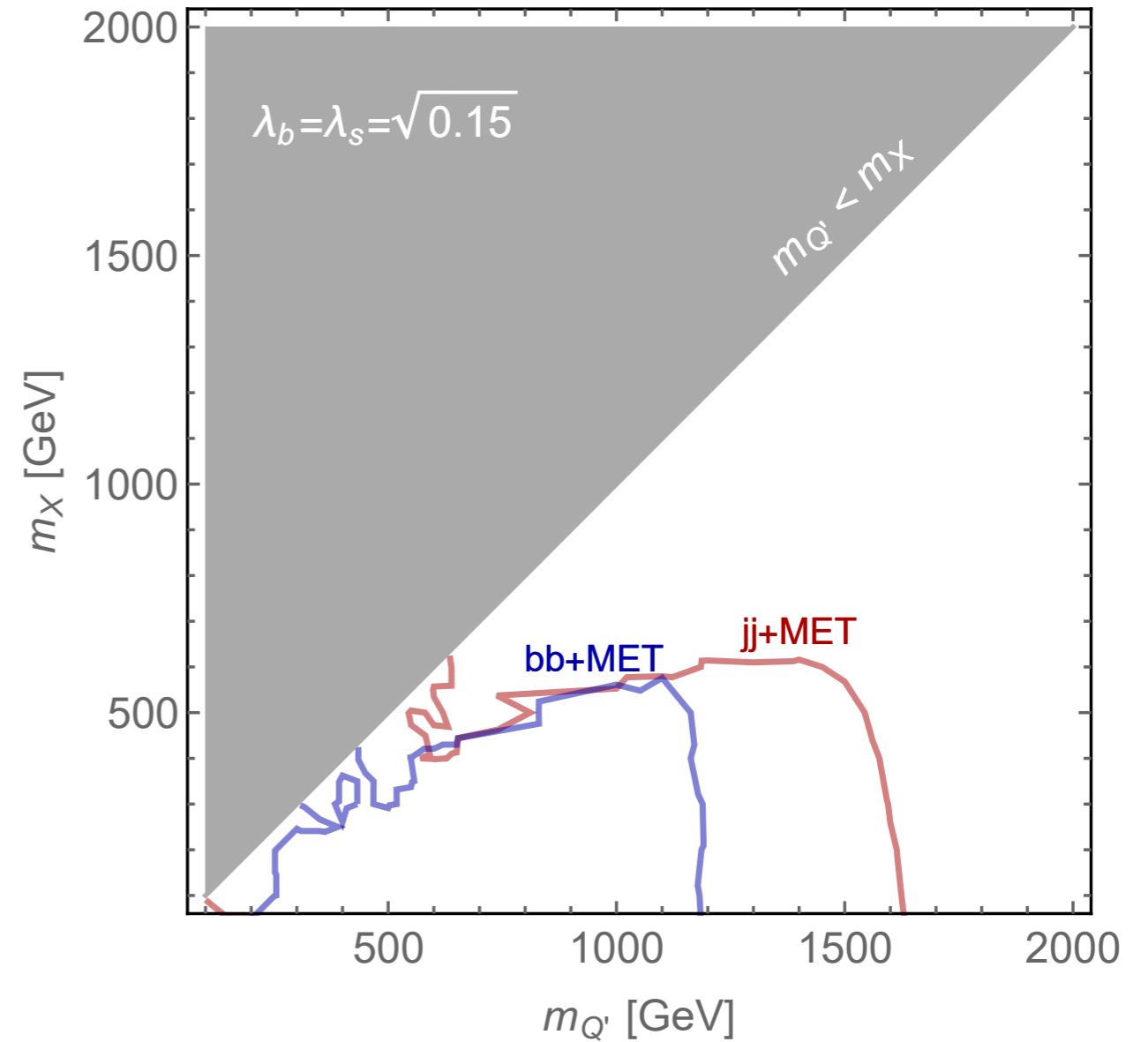
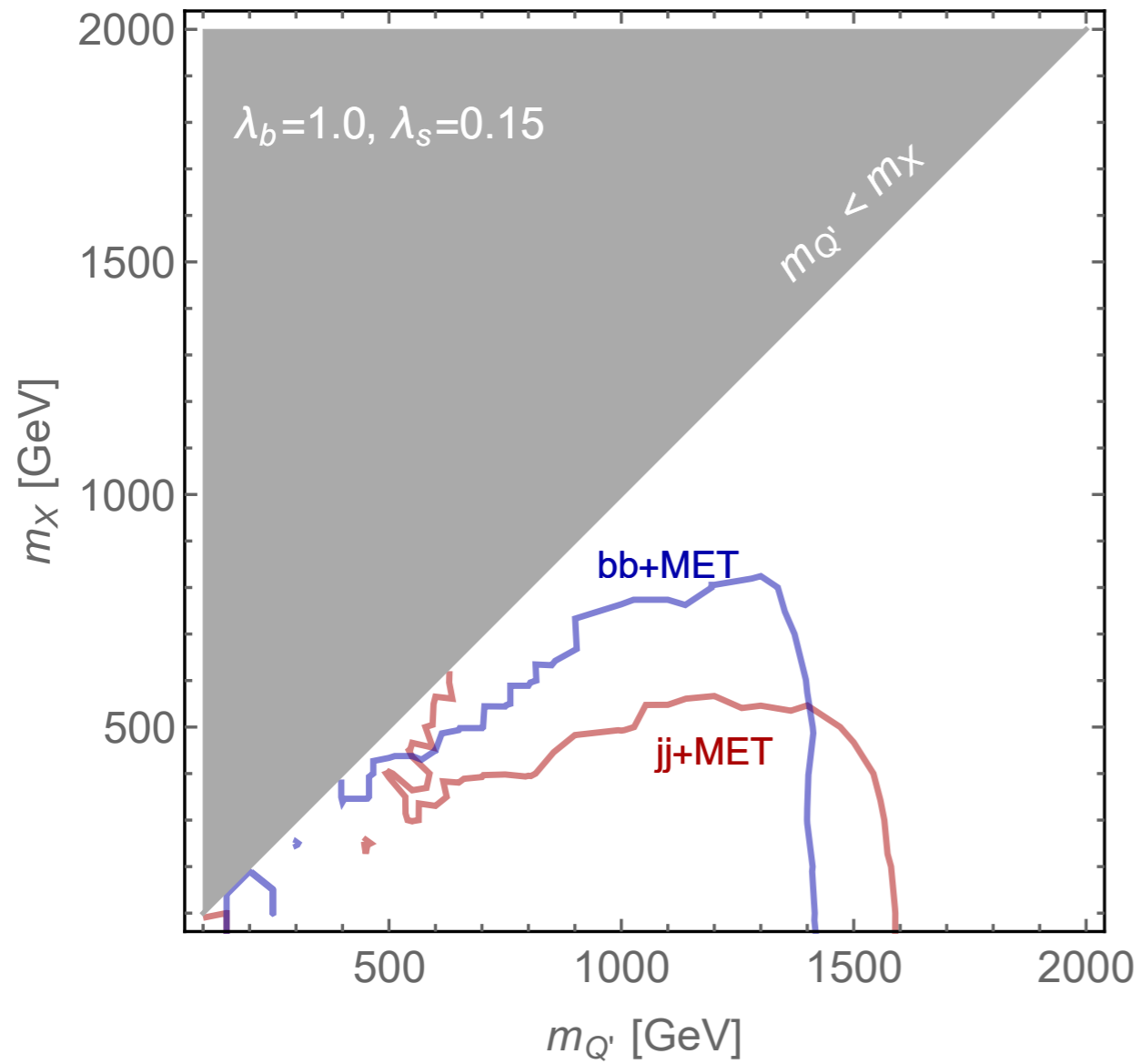
$$m_{L'} \gtrsim 500 \text{ GeV}$$

なら全然問題ない



$\mu\mu + MET$

直接探索@LHC



from $\mu\mu+MET$

$$m_{L'} \gtrsim 500 \text{ GeV}$$

*use data, $L=36.1 \text{ fb}^{-1}$ for Q' ; 13.3 fb^{-1} for L'

フレーバー物理

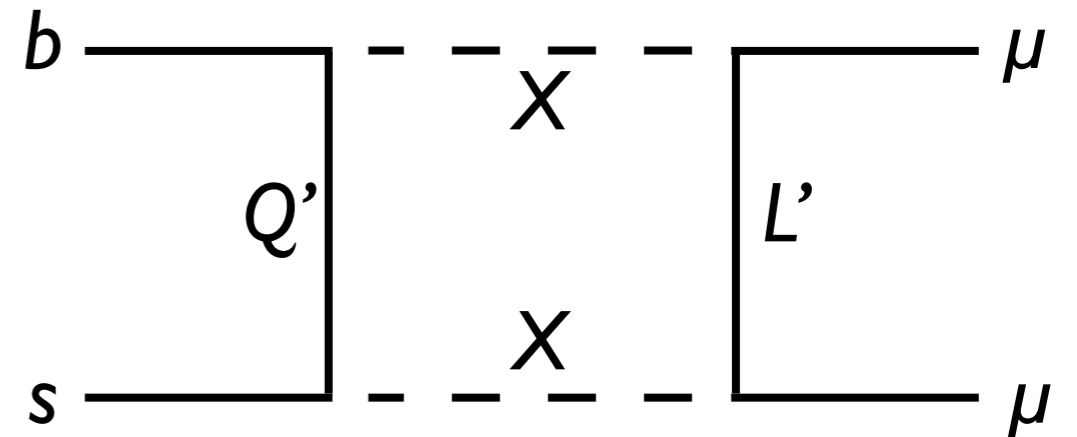
RK(*)アノマリー

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \frac{e^2}{16\pi^2} \sum_i (C_i \mathcal{O}_i + h.c.)$$

$$\mathcal{O}_9^l = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L) (\bar{l} \gamma^\mu l), \quad \mathcal{O}_{10}^l = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L) (\bar{l} \gamma^\mu \gamma_5 l)$$

◆ この模型の寄与

$$\Delta C_9 = -\Delta C_{10} = \frac{\lambda_b \lambda_s^* |\lambda_\mu|^2}{m_{Q'}^2} \times (\text{loop})$$



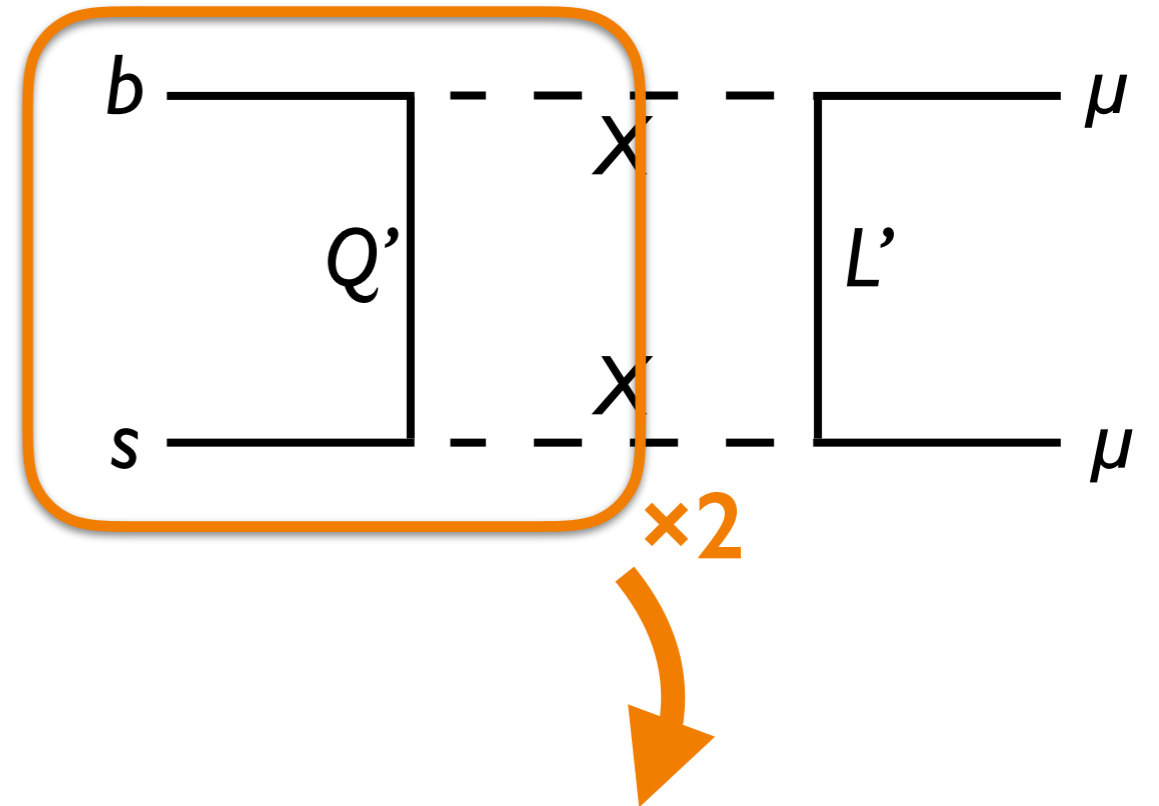
RK(*)アノマリー

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \frac{e^2}{16\pi^2} \sum_i (C_i \mathcal{O}_i + h.c.)$$

$$\mathcal{O}_9^l = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L)(\bar{l} \gamma^\mu l), \quad \mathcal{O}_{10}^l = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L)(\bar{l} \gamma^\mu \gamma_5 l)$$

- ◆ この模型の寄与

$$\Delta C_9 = -\Delta C_{10} = \frac{\lambda_b \lambda_s^* |\lambda_\mu|^2}{m_{Q'}^2} \times (\text{loop})$$



RK(*)アノマリー

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \frac{e^2}{16\pi^2} \sum_i (C_i \mathcal{O}_i + h.c.)$$

$$\mathcal{O}_9^l = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L) (\bar{l} \gamma^\mu l), \quad \mathcal{O}_{10}^l = (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L) (\bar{l} \gamma^\mu \gamma_5 l)$$

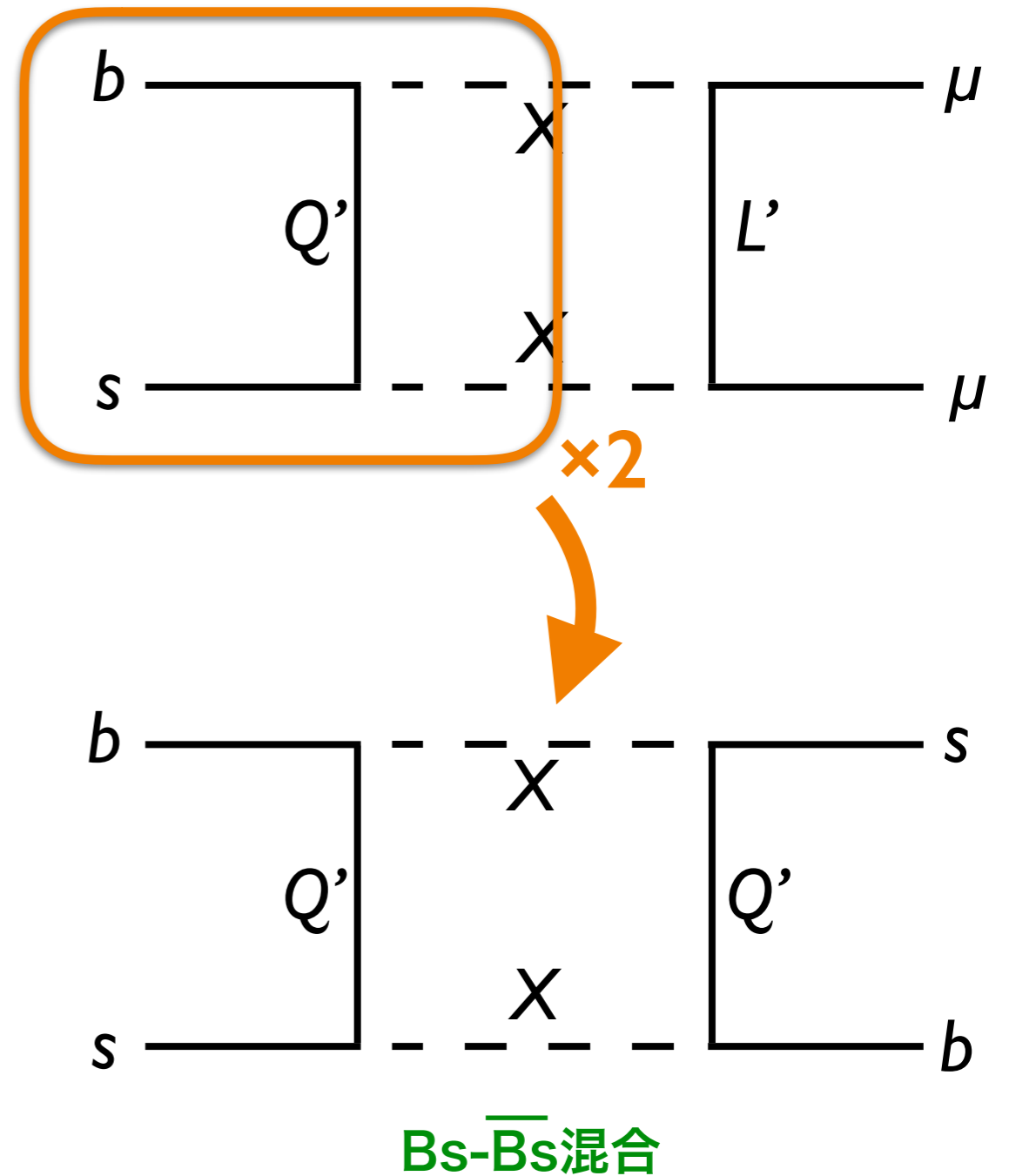
- ◆ この模型の寄与

$$\Delta C_9 = -\Delta C_{10} = \frac{\lambda_b \lambda_s^* |\lambda_\mu|^2}{m_{Q'}^2} \times (\text{loop})$$

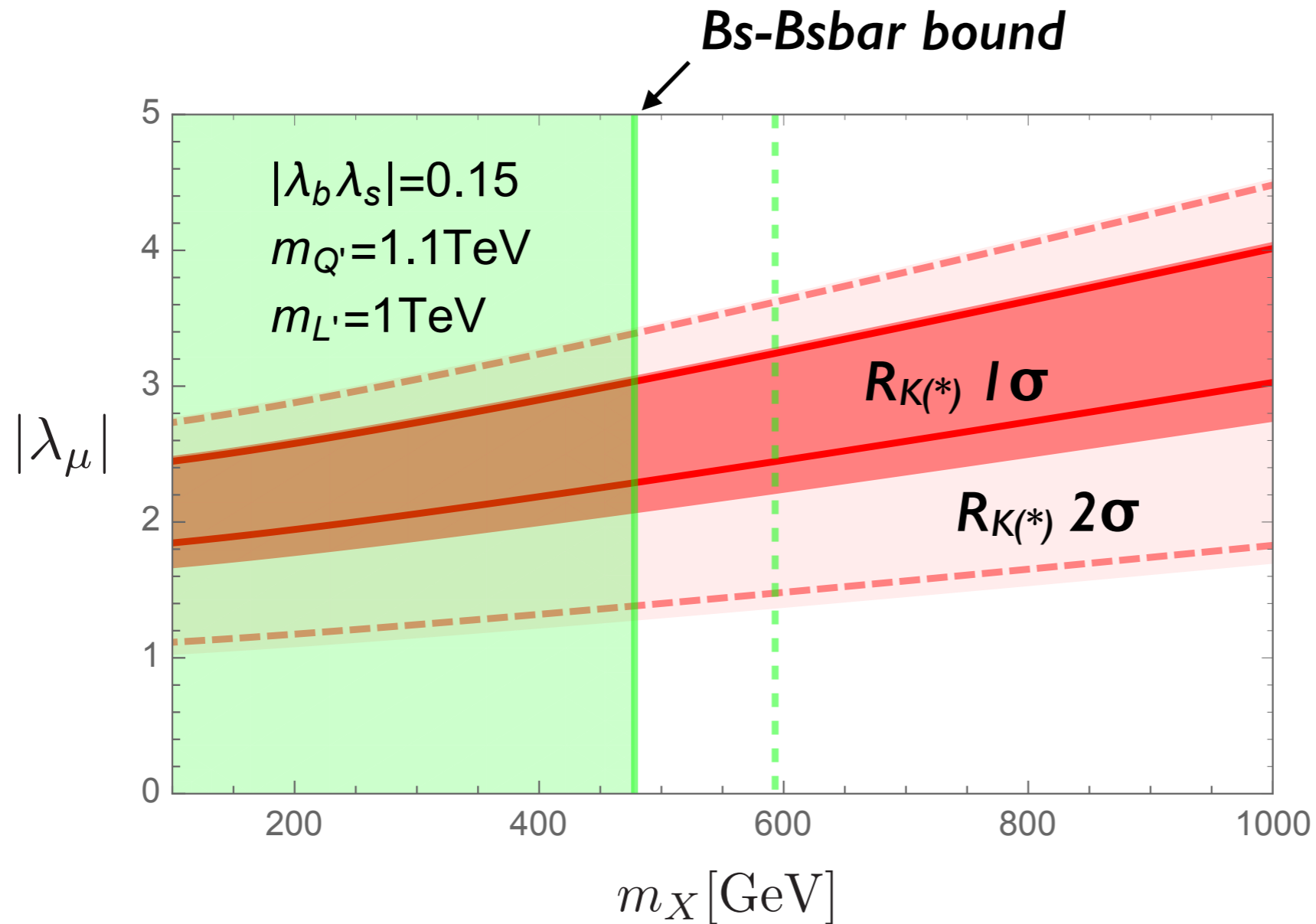
- ◆ Bs-Bsbar混合と強い相関がある

$$\mathcal{H}_{\text{eff}}^{\Delta F=2} = (C_1)_{sb} (\bar{s}_L \gamma_\mu b_L) (\bar{s}_L \gamma^\mu b_L) + h.c.$$

$$(C_1)_{sb} = \frac{(\lambda_b \lambda_s^*)^2}{m_{Q'}^2} \times (\text{loop})$$



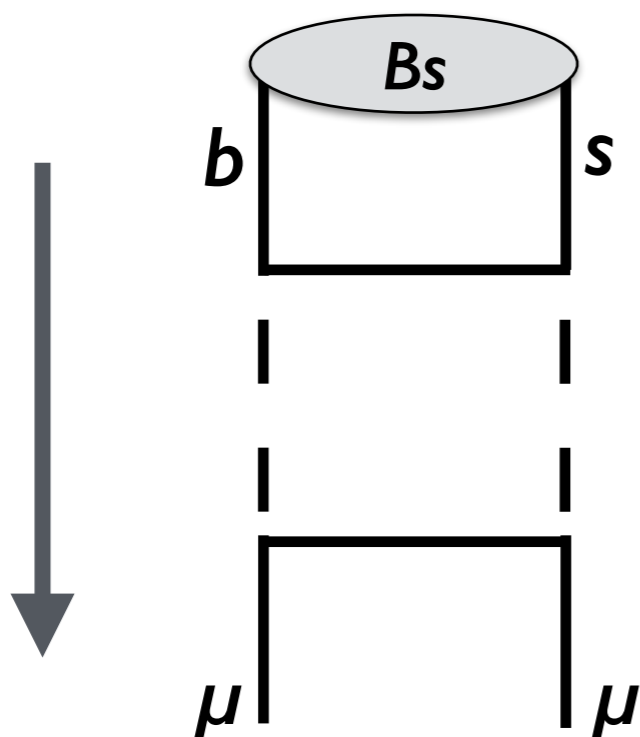
RK(*)アノマリー



- ◆ RK(*) を説明するには, 大きな $|\lambda_\mu|$ が必要
- ◆ 質量が小さいと Bs混合の制限にかかる

他の過程との相関

$B_s \rightarrow \mu\mu$



現在の制限

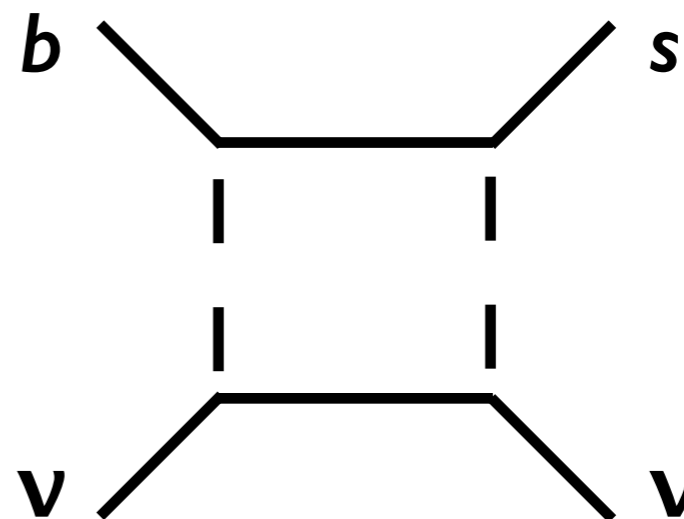
$$\text{BR}(B_s \rightarrow \mu\mu)_{SM} = (3.65 \pm 0.23) \times 10^{-9}$$

$$\text{BR}(B_s \rightarrow \mu\mu)_{\text{exp}} = (3.0 \pm 0.6) \times 10^{-9}$$

[LHCb collaboration, 1703.05747]

$$\frac{\text{BR}(B_s \rightarrow \mu\mu)}{\text{BR}(B_s \rightarrow \mu\mu)_{SM}} = |1 - 0.24\Delta C_{10}^\mu|^2$$

$B \rightarrow K\nu\nu$



$$\begin{aligned} & (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L) (\bar{l}_L \gamma^\mu l_L) \\ &= (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L) (\bar{\mu}_L \gamma^\mu \mu_L) + (\bar{b}_L \gamma_\mu s_L) (\bar{\nu}_L \gamma^\mu \nu_L) \end{aligned}$$

制限はまだ厳しくない

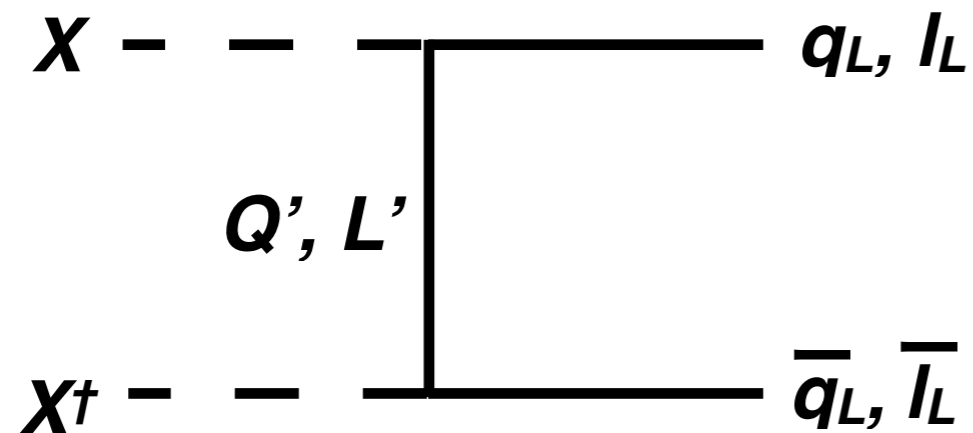
$$-16.5 \leq \Delta C_L^\nu \leq 29.2$$

[Arnan, Hofer, Mescia, 1608.07832]

ダークマター物理

ダークマターの(熱)残存量

対消滅断面積



$$\sigma v \approx \frac{|\lambda_{q,l}|^4}{m_{Q',L'}^2} \left(a \frac{m_{q,l}^2}{m_{Q',L'}^2} + b \frac{m_X^2}{m_{Q',L'}^2} v^2 \right)$$

suppressed

- ◆ s波はフェルミオン質量で抑制 \Rightarrow p波が支配的
- ◆ 大きな湯川はスカラーダークマターと相性が良い

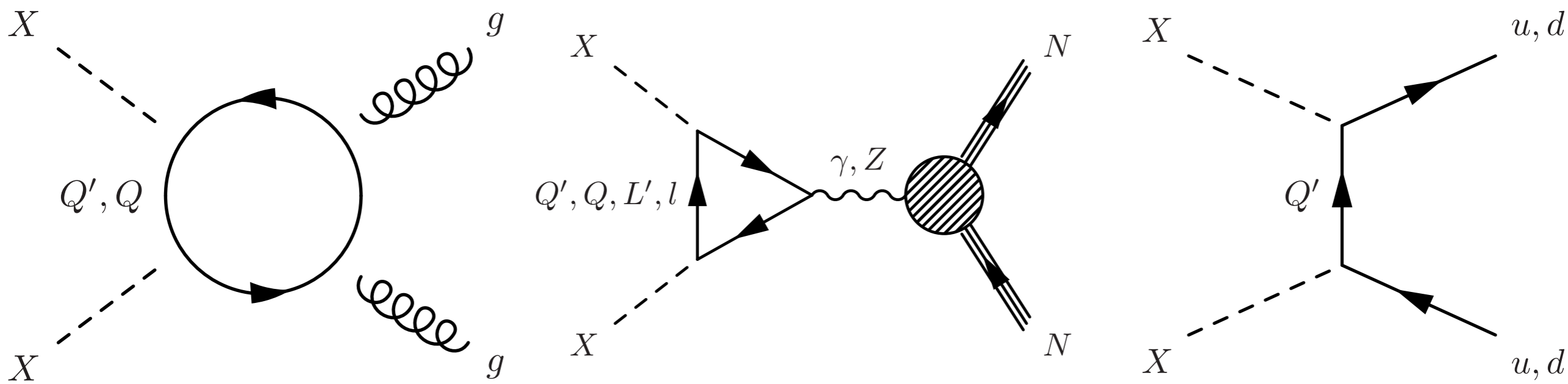
※ X=Complex scalar 以外だと,

Dirac \Rightarrow s-wave, Majorana \Rightarrow p-wave, Real \Rightarrow d-wave

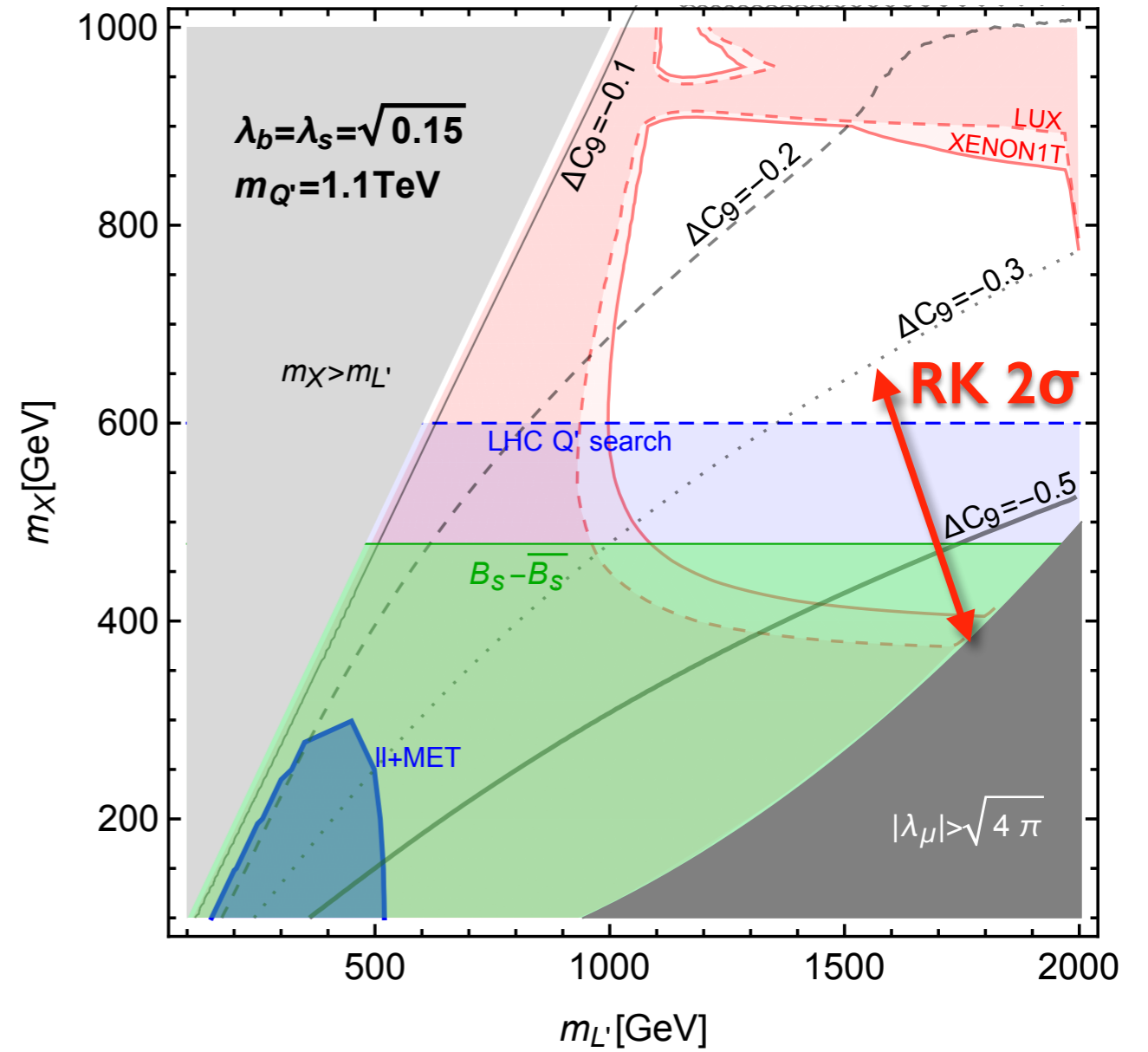
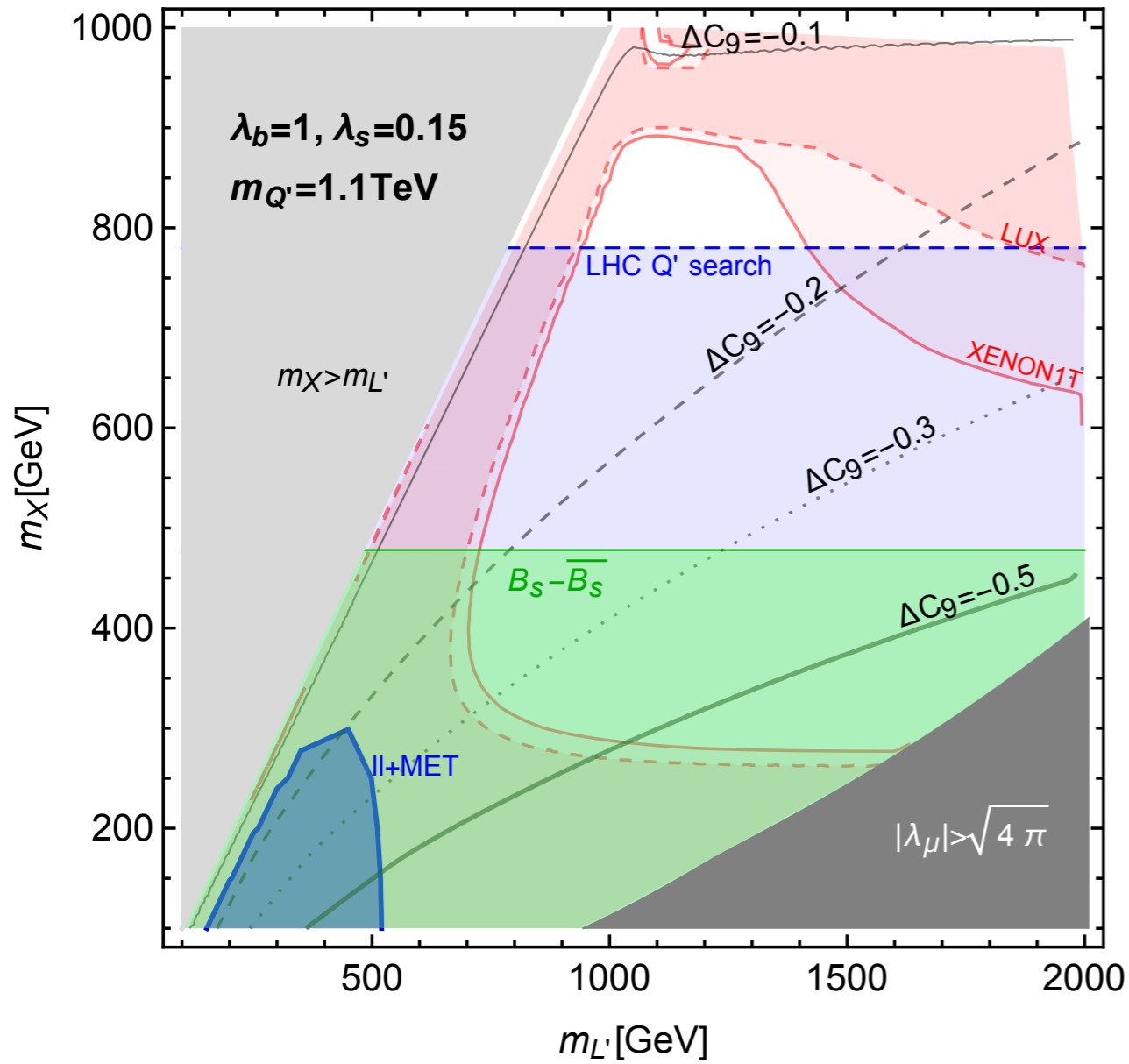
が支配的

ダークマターの直接検出

湯川が大きいので、ツリーだけでなくループも効く



($m_{L'}$, m_X) プロット



global fit: $\Delta C_9^\mu = -\Delta C_{10} \in [-0.81, -0.48](1\sigma), [-1.0, -0.32](2\sigma)$

まとめ

◆ 最近の $b \rightarrow sll$ アノマリー

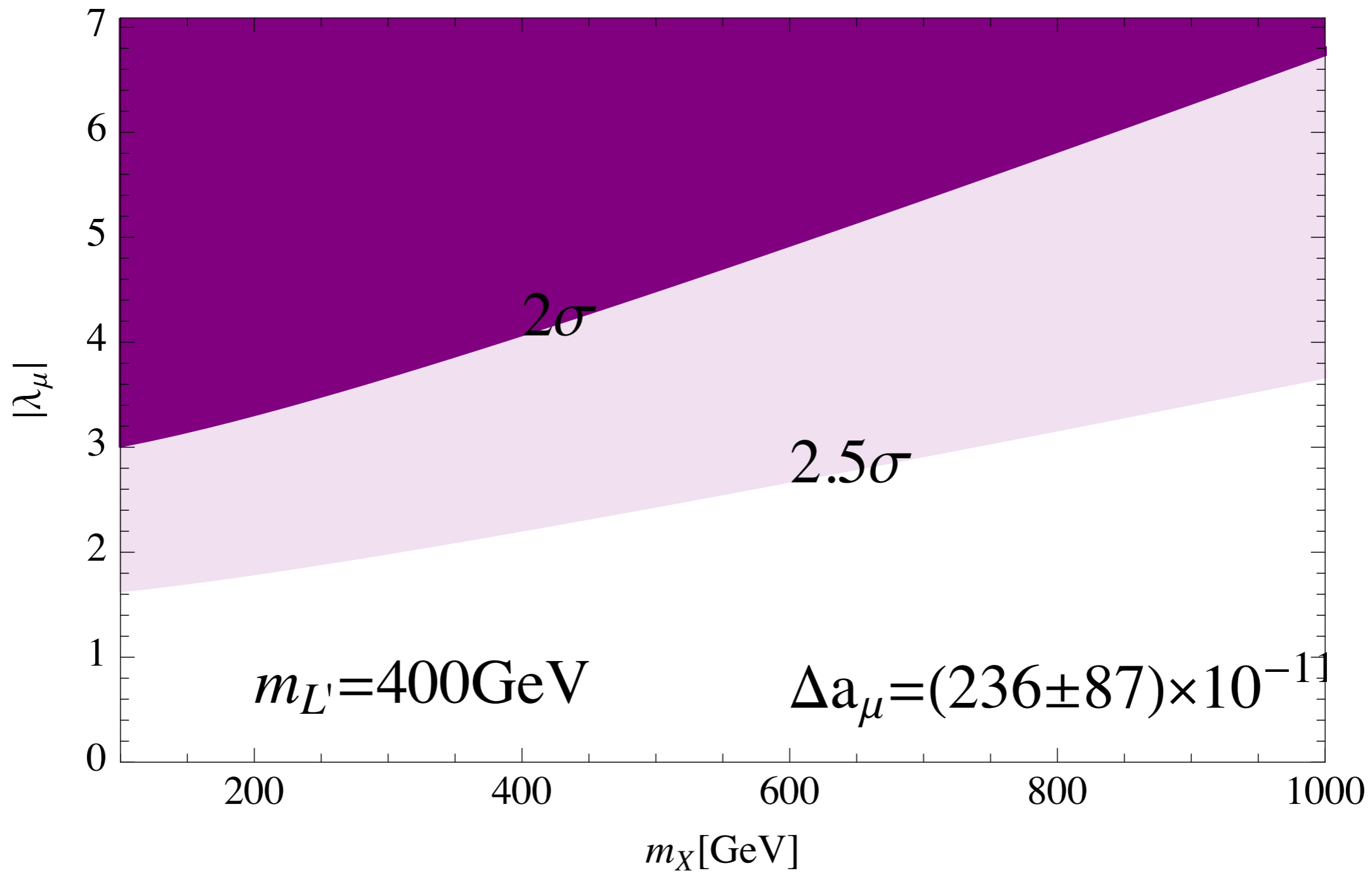
- $RK \sim 0.75$, $RK^* \sim 0.66-0.68$ (SM: $RK^* = 1$)
- 標準模型の20%-30%くらいの寄与が必要

◆ 模型: $\lambda_q^i \overline{Q}'_R X^\dagger Q_L^i + \lambda_\mu \overline{L}'_R X^\dagger \mu_L + h.c.$

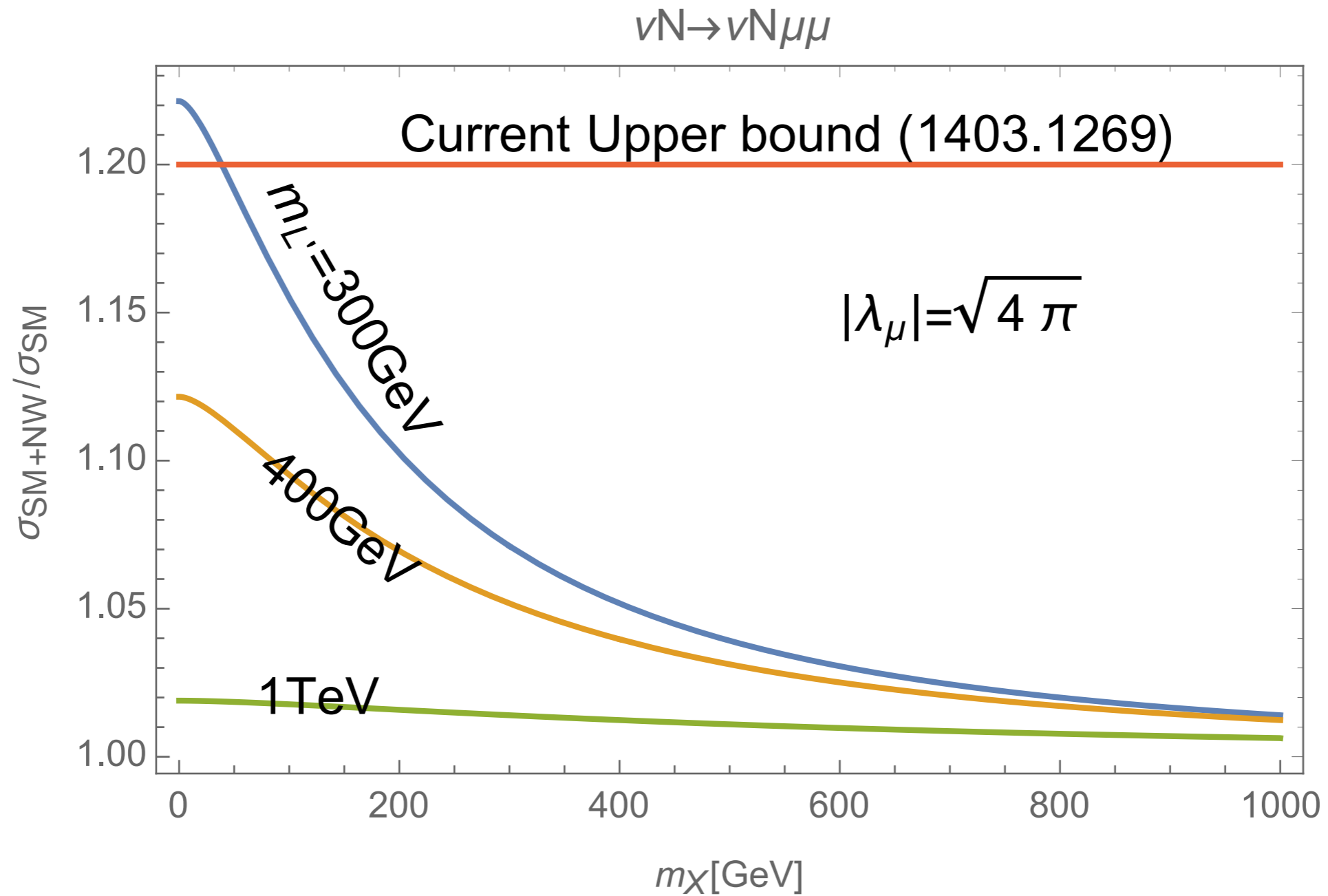
- スカラーダークマターだと大きな $|\lambda_\mu|$ は相性が良い
- RK^* は 2σ 以内なら説明できるが、中心値は難しそう。。
- $B \rightarrow K\nu\nu$, $B_s \rightarrow \mu\mu$, etc. が相関して出る
- XENON1Tで決着がつく

Back up

Muon $g-2$



Neutrino trident production



X=Dirac & Q',L'=Scalar の場合

