

# レプトンフレーバーの破れを伴う 深非弾性散乱の断面積定式化

山中 真人 (横浜国立大学)

M. Takeuchi, Y. Uesaka and MY, PLB772 (2017)

Y. Kiyoyama, M. Takeuchi, Y. Uesaka and MY, JHEP 04 (2022) 044

Y. Kiyoyama, M. Takeuchi, Y. Uesaka and MY, arXiv:2303.XXXXX

# 新物理の証拠、探索手段

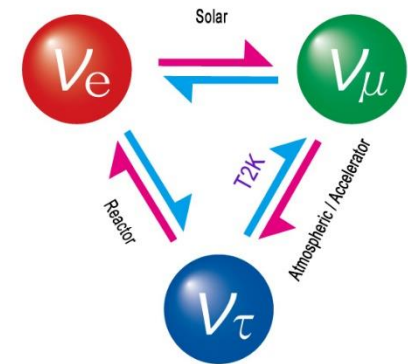
## 標準理論 ≠ 万物の理論

### 残された謎の数々

- ニュートリノ質量の由来は？
- 暗黒物質/暗黒エネルギーの正体は？
- 物質・反物質非対称の起源は？
- なぜ6フレーバー？なぜ物質粒子質量は階層的？？

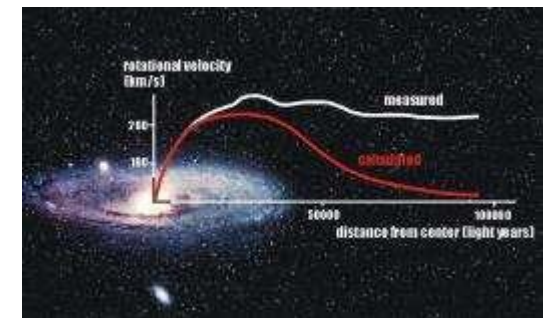
### レプトンフレーバーの破れ (LFV)

- 根源的素粒子模型への貴重な足掛かり
- 理論的に多くの動機、様々な種の実験



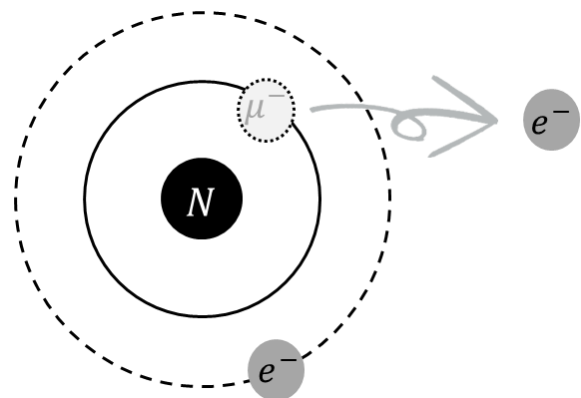
Neutrino oscillation between three generations

J-PARC News - March 2013



<https://phys.org/news>

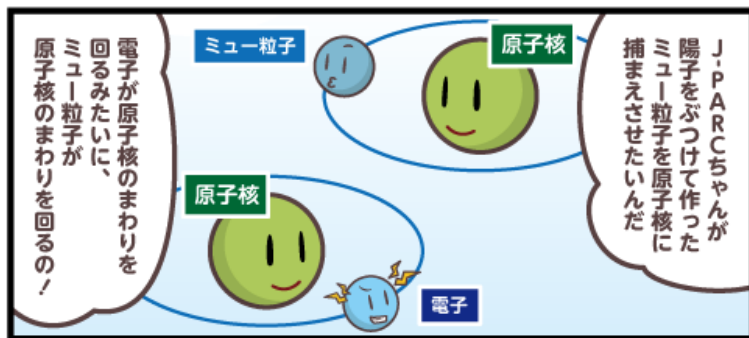
# LFV過程の例



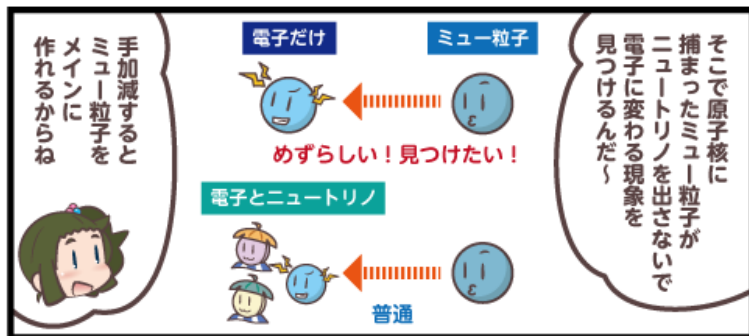
ミュオン-電子転換



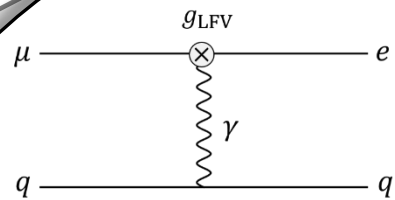
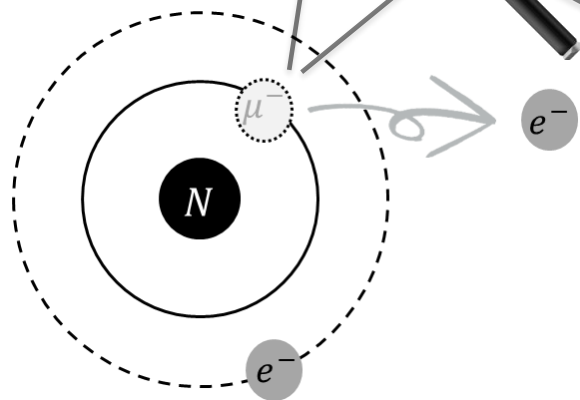
COMET(コメット)ちゃん  
ミュオン粒子が電子だけに変身するのがとっても見たい。  
J-PARCのハドロン実験施設で実験する予定。



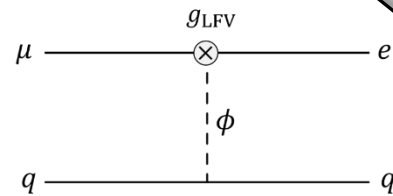
J-PARCちゃんの手加減  
手加減して陽子パンチをすることで、ミュオン粒子の元になる粒子以外の生成を抑えることができます。



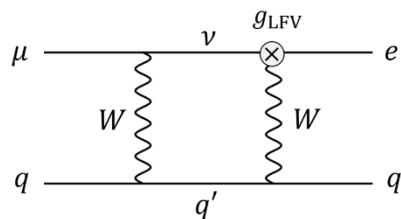
# 背後の物理をどう探り出すか



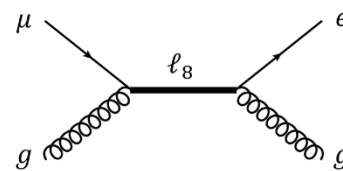
SUSY, Type-II SeeSaw



extra dimension models,  
extended Higgs models



Majorana  $\nu$ , sterile  $\nu$



composite, leptoquark

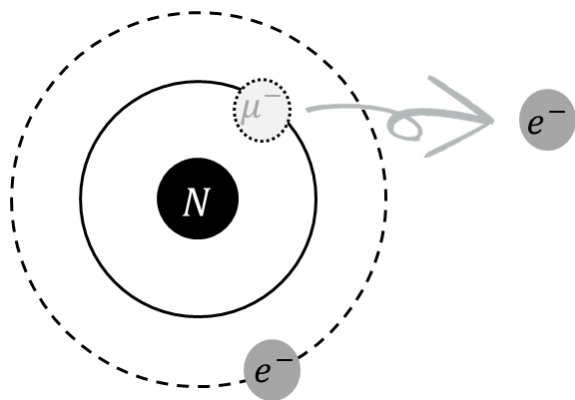
反応の中間状態に入る”未知”を**間接的に**検証

観測量に直接顔を出さず

# 背後の物理をどう探り出すか

## 重要かつ必須

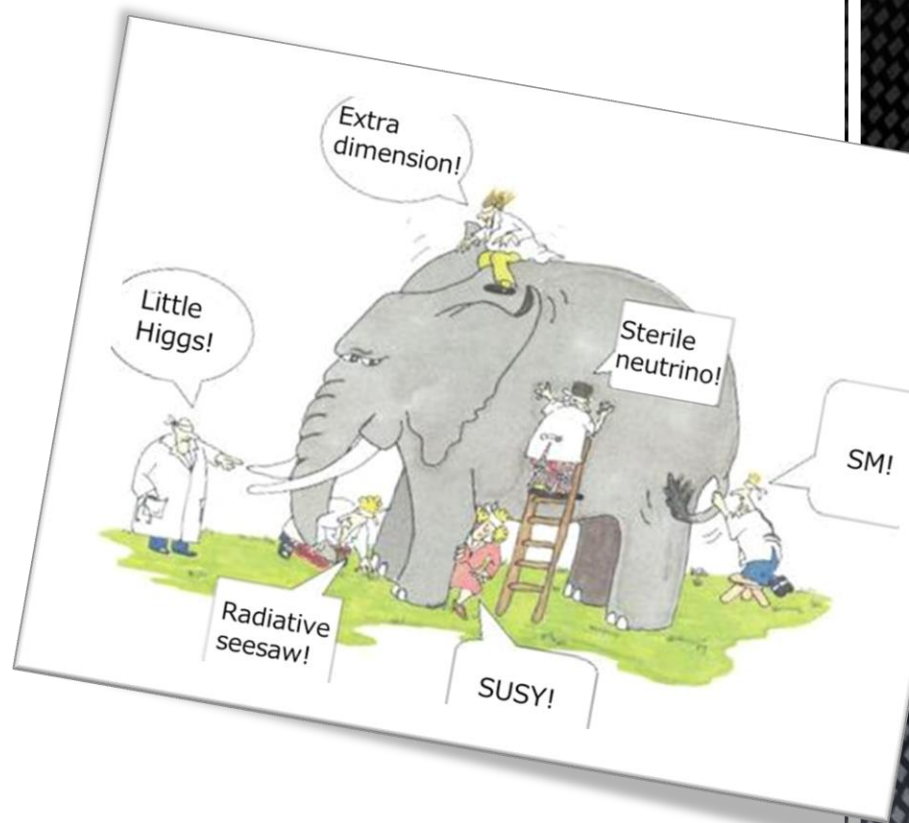
1. “未知”を多角的に描き出すため  
できる限り多くのLFV観測量
2. LFV理論パラメーターと観測量の  
正確な接続



反応の中間状態に入る”未知”を**間接的に**検証

観測量に直接顔を出さず

*The more LFV processes,  
the “elephant” is more clearly illustrated!*

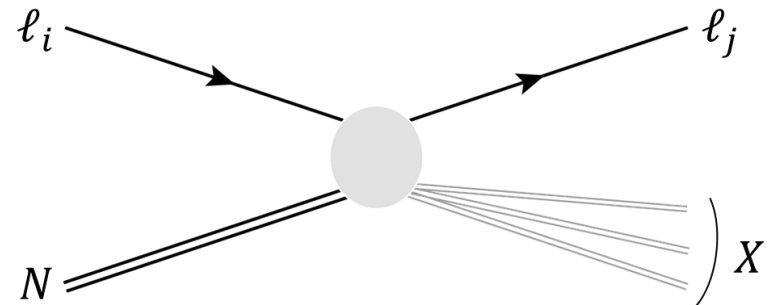


# Lepton Flavor Violating Deep-Inelastic Scattering (LFV-DIS)

LFV検証にとって優れたプローブ

**レプトンフレーバー非保存非弾性散乱**

$\ell_i + N \rightarrow \ell_j + X$  ( $N$ : 核子,  $X$ : ハドロン)

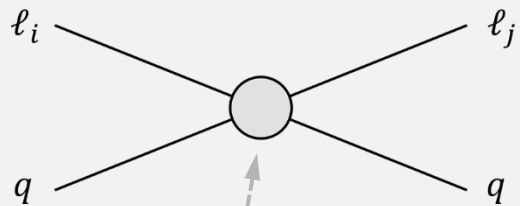


- 複数の実験で探索・クロスチェック可能 (LHeC,  $\nu$ -factory, ILC, など)
- タウハドロニックLFV ( $\tau \rightarrow e\pi\pi$  等)やLHCでの探索( $pp \rightarrow \mu\tau$  等)と相補的
- 偏極ビームを用いて、LFV演算子の左右度合を精査可能
- イベント数が多大@固定標的実験: イベント数 $\propto$ (ビーム強度 $N_{\ell_i}$ ) $\times$ (核子数 $\propto$  mol数)

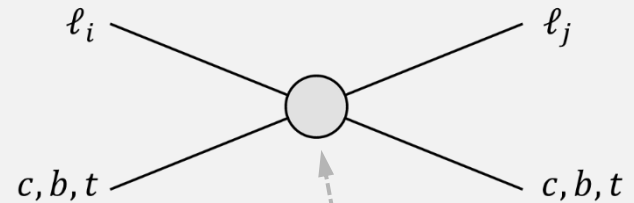
# LFV媒介粒子とクォークの相互作用の分別

Universal

$q \in \{u, d, c, s, t, b\}$

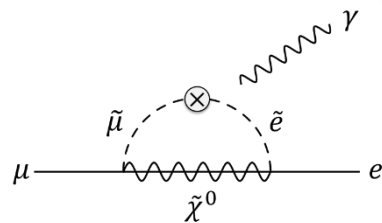


Non-Universal



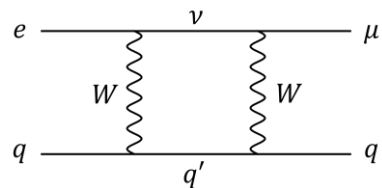
フォトン双極子型

(SUSY, type-IIシーソー  
モデルなど)



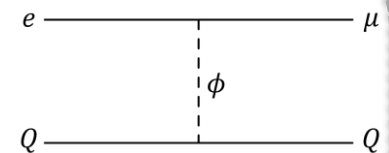
ボックス型

(ステライルニュートリノ  
モデルなど)



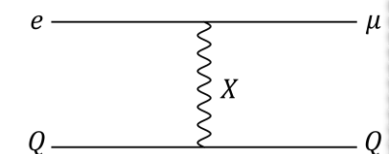
ヒッグスLFV

(拡張ヒッグスモデルなど)

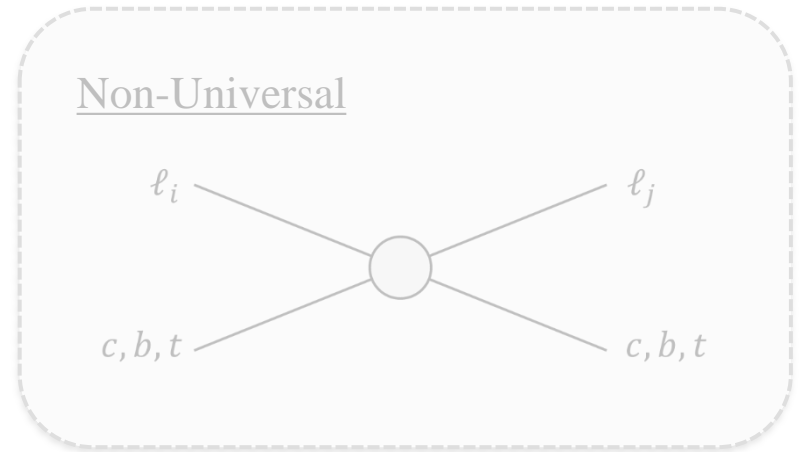
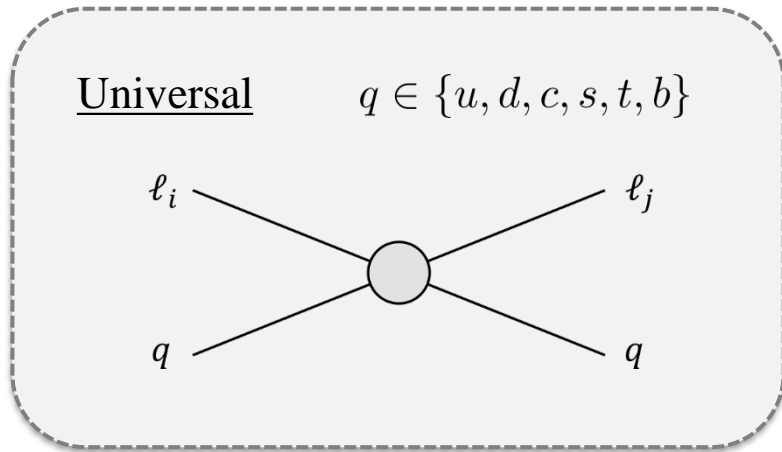


重いゲージボソン

(余剰次元モデル, フレー  
バー対称性モデルなど)



# Flavor universal interaction type

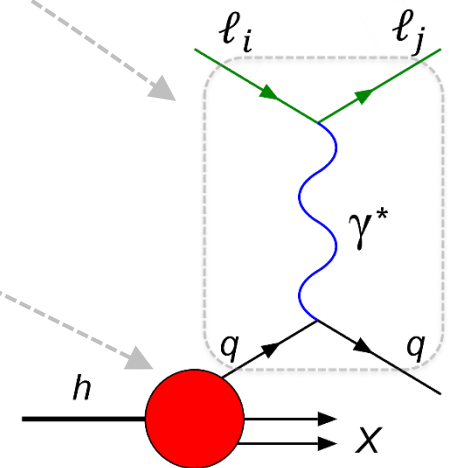


$$\sigma_{\ell_i N \rightarrow \tau X} = \sum_{q=u,d} \int dx dy \frac{d^2 \hat{\sigma}_{\ell_i q \rightarrow \tau q}}{dx dy} f_q(x, Q^2)$$

パートン分布関数 (PDF)

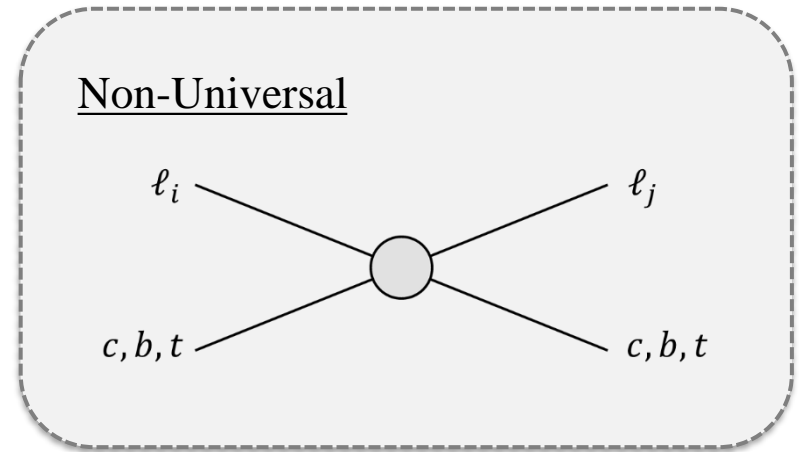
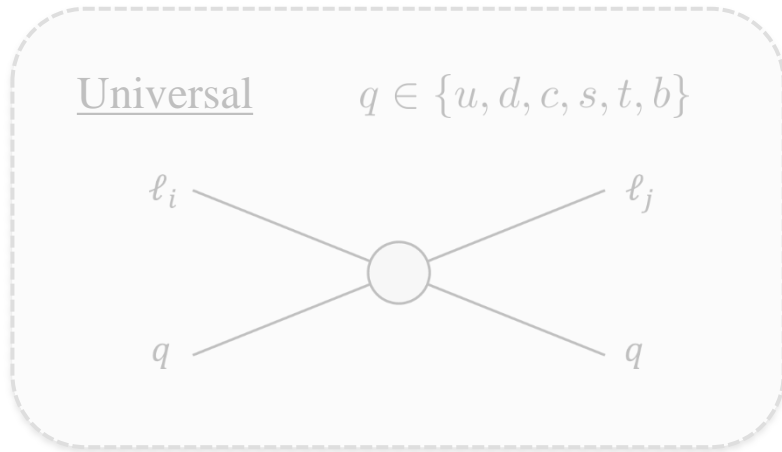
質量0の荷クォークによる素過程と共にお馴染みの方法で評価

S. Gninenko, M. Kirsanov, et al, MPLA (2002),  
M. Sher, I. Turan, PRD (2004), and so on





# Flavor non-universal interaction type



LFV媒介粒子は $c, b, t$ とのみ相互作用  $\Longrightarrow$

誘発されるLFV演算子は？

核子内に重いクォークは不在  $\Longrightarrow$

LFV-DIS ( $eN \rightarrow \tau X$ )の素過程は？

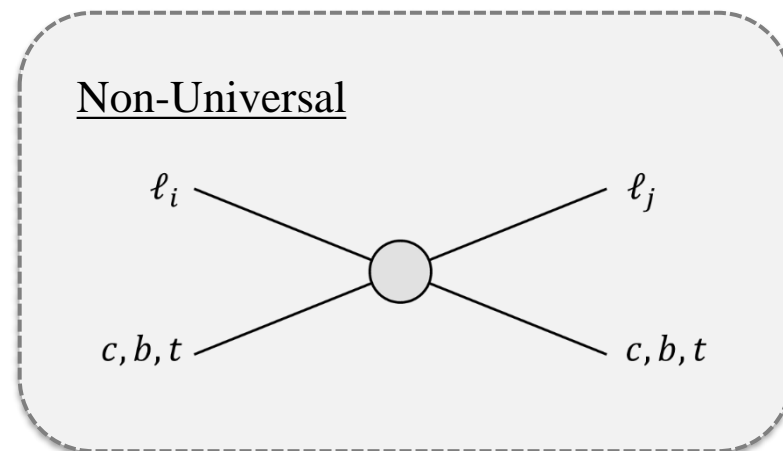
重過ぎてトップはDISで生成不可@近未来  $\Longrightarrow$

媒介粒子とクォークの相互作用を  
特定しきれるか？

# 狙い：LFVパラメーターとDIS観測量の正確な接続

## 目次

1. 導入
2. LFV演算子
3. 断面積定式化
3. 数値解析
4. まとめ



LFV媒介粒子は $c, b, t$ とのみ相互作用  $\Longrightarrow$

**誘発されるLFV演算子は？**

核子内に重いクォークは不在  $\Longrightarrow$

**LFV-DIS ( $eN \rightarrow \tau X$ )の素過程は？**

重過ぎてトップはDISで生成不可@近未来  $\Longrightarrow$

**媒介粒子とクォークの相互作用を  
特定しきれるか？**

# LFV演算子

# LFV相互作用 (標準理論を最小拡張)

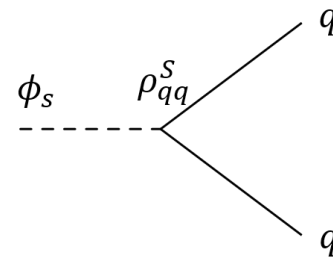
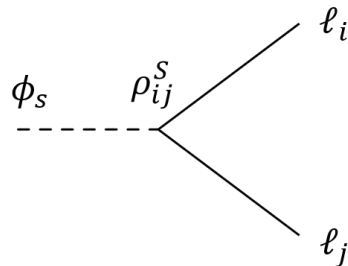
様々なモデルに応用可能

拡張ヒッグス模型, レプトクォーク,  
Rパリティが敗れたSUSY, フレーバー  
対称性模型, 余剰次元模型など

□ LFV媒介粒子 : スカラー粒子

□ 設定 : 媒介粒子は主に重いフェルミオンと結合

$$\mathcal{L}_S = - \sum_{i,j} (\rho_{ij}^S \bar{\ell}_j P_L \ell_i \phi_S + h.c.) - \sum_q \rho_{qq}^S \bar{q} q \phi_S$$



クォークとの結合 (フレーバー対角なものに限定)

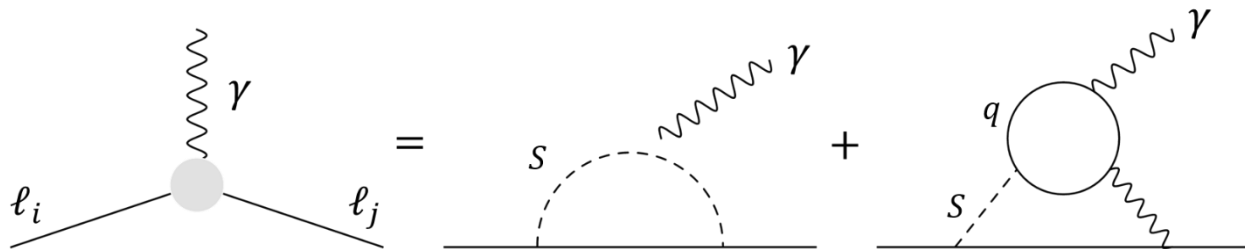
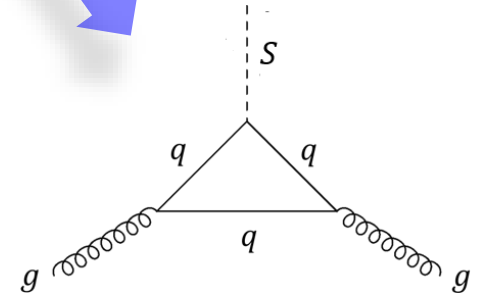
A) クォーク質量に比例  $\rho_{cc}^S : \rho_{bb}^S : \rho_{tt}^S = m_c : m_b : m_t$

B) 1フレーバーのみに結合 例 :  $\rho_{bb}^S \neq 0, \rho_{cc}^S = \rho_{tt}^S = 0$

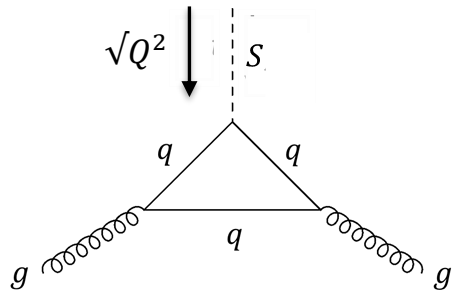
# LFV演算子

$$\mathcal{L}_S = - \sum_{i,j} (\rho_{ij}^S \bar{\ell}_j P_L \ell_i \phi_S + h.c.) - \sum_q \rho_{qq}^S \bar{q} q \phi_S$$

媒介粒子とフェルミオンの相互作用より、ゲージ場と寄与する2種類のLFV有効演算子



# $\phi_S gg$ 有効結合



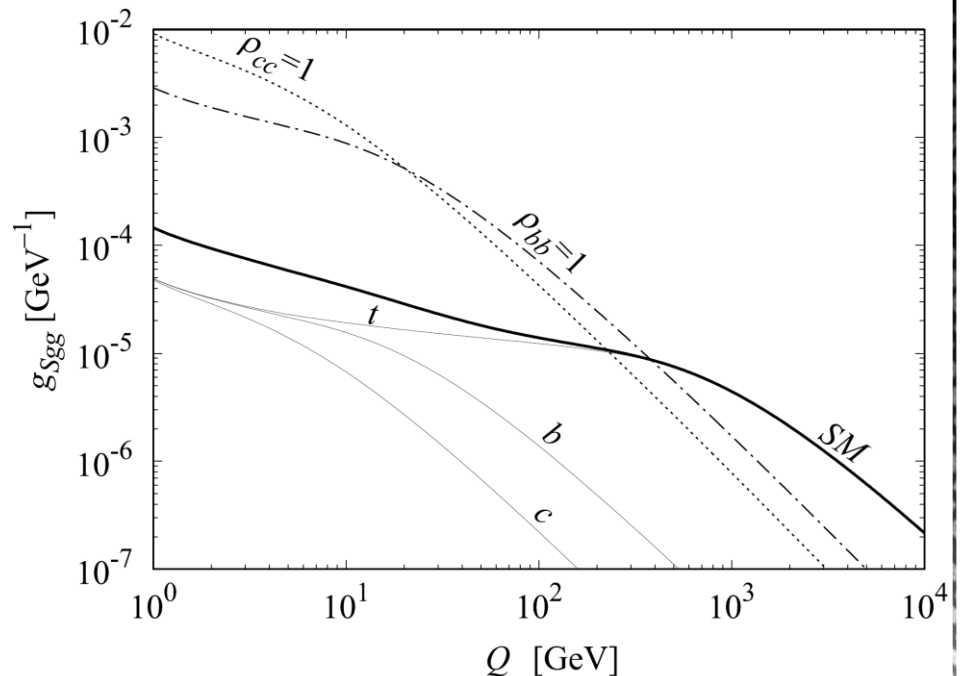
LFVパラメーターとDIS観測量の高精度接続のため、  
移行運動量依存性などを正確な取り入れながら！

$$\mathcal{L}_G = g_{Sgg} \phi_S G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu}$$

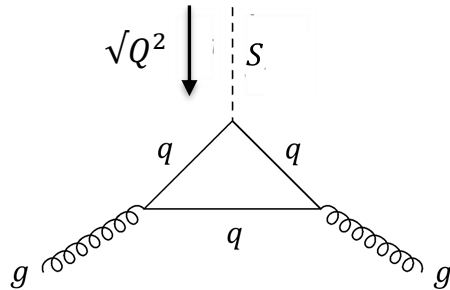
(1)  $\rho_{cc}^S = 1, \rho_{bb}^S = \rho_{tt}^S = 0$

(2)  $\rho_{bb}^S = 1, \rho_{cc}^S = \rho_{tt}^S = 0$

(3)  $\rho_{cc}^S = y_c, \rho_{bb}^S = y_b, \rho_{tt}^S = y_t$



# $\phi_S gg$ 有効結合



LFVパラメーターとDIS観測量の高精度接続のため、  
移行運動量依存性などを正確な取り入れながら！

$$\mathcal{L}_G = g_{Sgg} \phi_S G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu}$$

$c, b, t$  それぞれが異なる移行運動量依存性

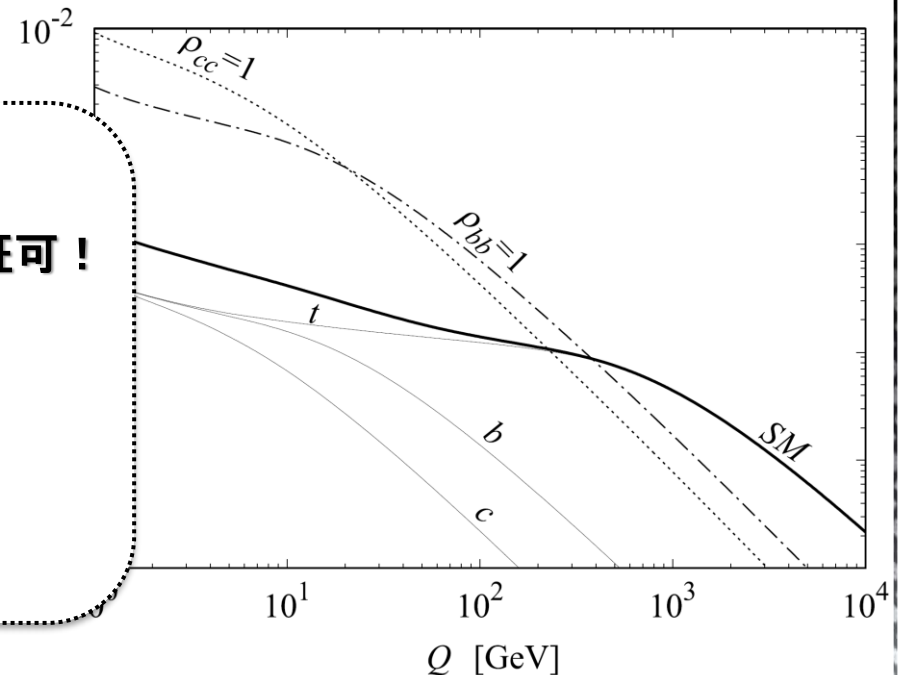
$E_e$ を動かし、媒介粒子-クォーク相互作用を検証可！

cf. 典型的移行運動量

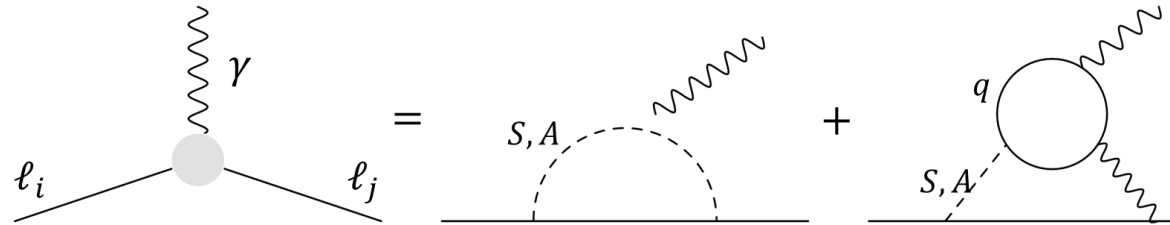
$3 \text{ GeV} \lesssim Q \lesssim 9 \text{ GeV}$  (for  $E_e = 100 \text{ GeV}$ )

$5 \text{ GeV} \lesssim Q \lesssim 20 \text{ GeV}$  (for  $E_e = 1 \text{ TeV}$ )

数値解析のセクションで詳しく



# フォトン双極子LFV演算子



$$\mathcal{L}_{\text{dipole}} = -\frac{e}{2}m_j \sum_{X=S,A} \left( A_{ij}^X \bar{\ell}_j \sigma^{\mu\nu} P_L \ell_i F_{\mu\nu} + A_{ji}^X \bar{\ell}_j \sigma^{\mu\nu} P_R \ell_i F_{\mu\nu} \right)$$

$$A_{ij} = \frac{1}{16\pi^2 v^2} \left( A_1 + A_2^{t,b} + A_2^W \right)$$

例: 媒介粒子質量の関数として求めた係数 $A_{ij}$  in 2HDM

模型構造や媒介粒子質量に高感度

双極子LFV演算子経由のDIS反応率は模型判別に有効

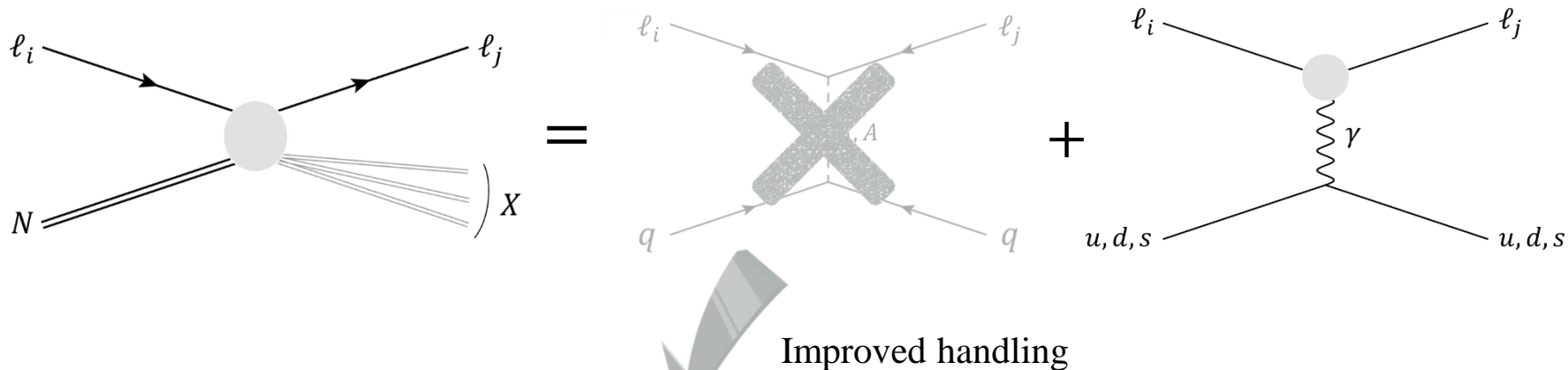
$m_\phi$ [GeV]	125	200	300	400	500
$10^3 \times \tilde{A}_1^f(r_{\tau/\phi})$	2.0025	0.8872	0.4345	0.2605	0.1747
$10^3 \times \tilde{A}_2^{t,H}(r_{t/\phi})$	6.2431	4.6631	3.4720	2.7435	2.2504
$10^3 \times \tilde{A}_2^{t,A}(r_{t/\phi})$	8.9039	6.5746	4.8361	3.7840	3.0785
$10^3 \times \tilde{A}_2^{b,H}(r_{b/\phi})$	0.0407	0.0208	0.0114	0.0073	0.0052
$10^3 \times \tilde{A}_2^{b,A}(r_{b/\phi})$	0.0508	0.0255	0.0138	0.0088	0.0062
$10^3 \times \tilde{A}_{2,\phi}^W(r_{W/\phi})$	-14.0380	-8.8698	-5.1773	-2.9841	-1.5079



# 断面積定式化

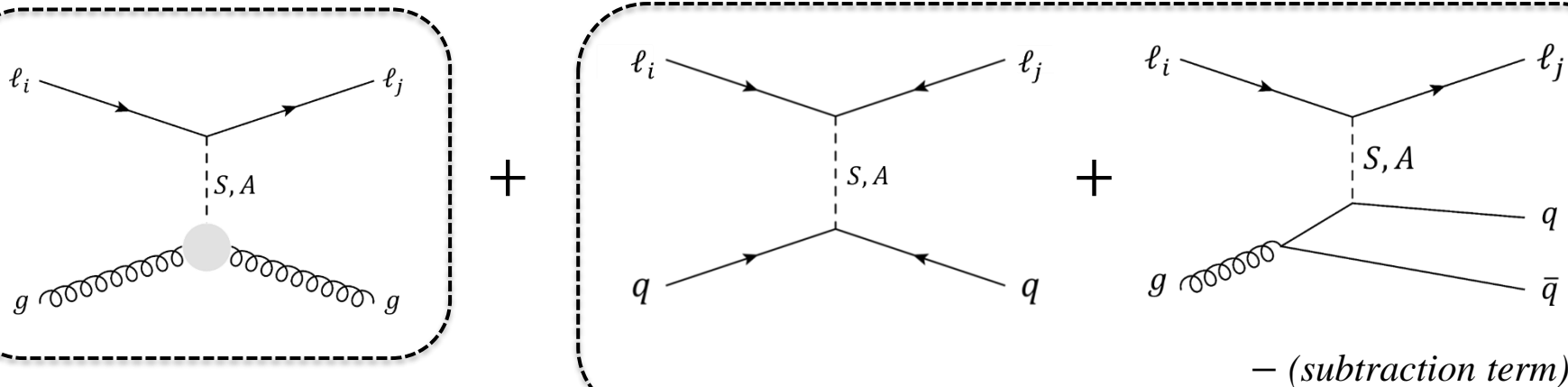
# LFV-DIS $\ell_i N \rightarrow \ell_j X$ の素過程

本研究で新たに取り入れた重要要素 (1)  $\phi gg$  結合 (2) クォーク数保存



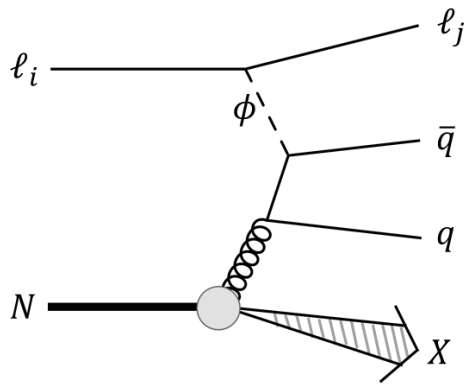
M. Takeuchi, Y. Uesaka, MY, PLB (2017)

ACOT scheme [PRD50 (1994)]



# ACOT scheme

M. Aivazis, J. Collins, F. Olness, W. Tung, PRD50 (1994)



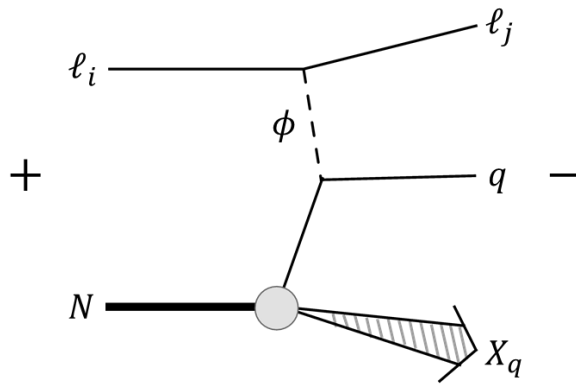
$m_q \neq 0$ で取り込む寄与



$c, b, t$ クォーク生成を伴う素過程  
@低運動量移行

最低次の反応過程  
(from クォーク数保存)

振幅  $\propto \ln(Q^2/m_q^2)$



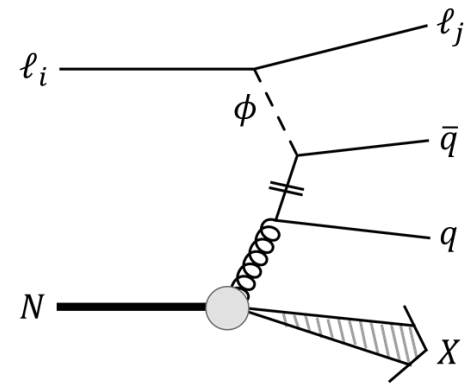
$m_q = 0$ で取り込む寄与



$c, b, t$ クォーク生成を伴う素過程  
@高運動量移行

$Q^2 \gg m_q^2$ で発散する部分をQCD補正と共に処理し、 $c, b, t$ のPDF構築

$c, b, t$ のPDFで記述される反応過程



帳尻合わせ部分  
(二重数え打消しの働き)

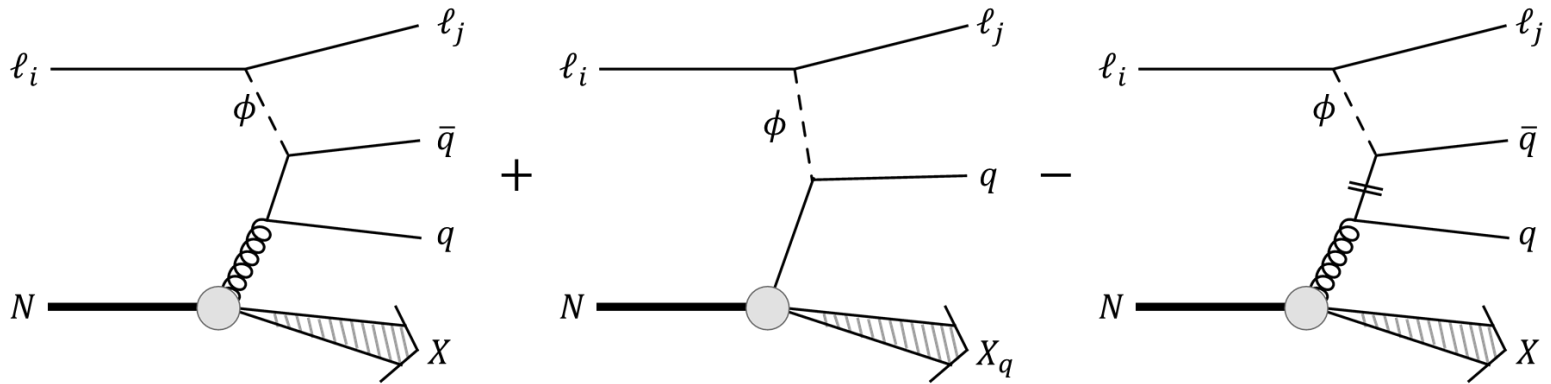
クォーク数保存やクォーク質量を取り込みながら、DIS過程を記述可能

ACOTを考慮したスカラー構造関数は導出済

[Y. Kiyo, M. Takeuchi, Y. Uesaka, MY, JHEP (2022)]

# ACOT scheme

M. Aivazis, J. Collins, F. Olness, W. Tung, PRD50 (1994)



$m_q \neq 0$ で取り込む寄与

$m_q = 0$ で取り込む寄与

帳尻合わせ部分  
(二重数え打消しの働き)

ACOTにより2つのエネルギースケール ( $Q^2 \sim 4m_q^2$  と  $Q^2 \gg m_q^2$ ) を繋ぎ合わせた断面積

$$\frac{d^2\sigma}{dxdy} = \int_0^1 d\xi \left\{ \frac{d^2\hat{\sigma}_{l_i g \rightarrow l_j q \bar{q}}}{dxdy} f_g(\xi, Q^2) + \frac{d^2\hat{\sigma}_{l_i q \rightarrow l_j q}}{dxdy} f_q(\xi, Q^2) + \frac{d^2\hat{\sigma}_{l_i \bar{q} \rightarrow l_j \bar{q}}}{dxdy} f_q(\xi, Q^2) \right. \\ \left. - \left( \frac{d^2\hat{\sigma}_{l_i q \rightarrow l_j q}}{dxdy} + \frac{d^2\hat{\sigma}_{l_i \bar{q} \rightarrow l_j \bar{q}}}{dxdy} \right) \frac{\alpha_s}{2\pi} \int_\xi^1 \frac{dz}{z} f_g(z, Q^2) P_{gq}(\xi/z) \ln\left(\frac{Q^2}{m_q^2}\right) \right\}$$

帳尻合わせ部分

# 断面積

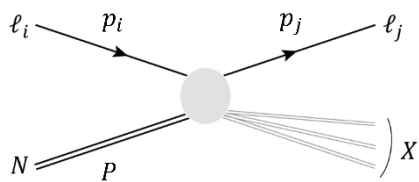
See e.g. T. Stavreva, F. I. Olness, et al, PRD85

$$\begin{array}{ll}
 x : \text{Bjorken変数} & x = \frac{Q^2}{2P \cdot q} \\
 y : \text{非弾性度} & y = \frac{2P \cdot q}{2P \cdot k_i}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 \text{核子運動量 } P \\
 \text{パートン運動量 } k_i \\
 \text{両運動量の関係 } k_i = \xi P
 \end{array}$$

運動量割合  $\xi = \frac{Q^2 + w^2}{Q^2} x$

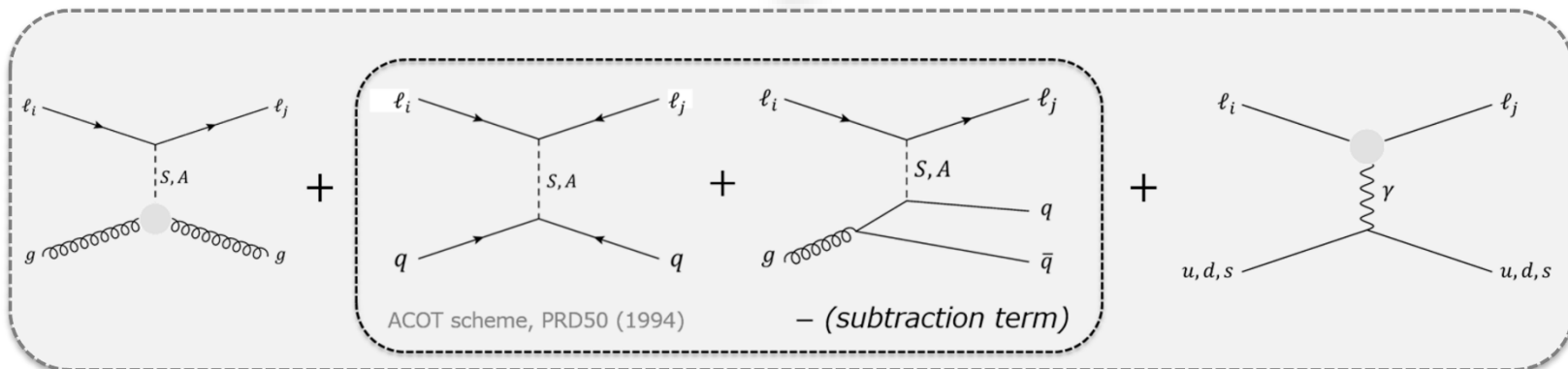
$\hat{X}$ の不変質量  $w^2 = (p_q + p_{q'})^2$

移行運動量  $Q^2 = -q^2 = -(p_i - p_j)^2$

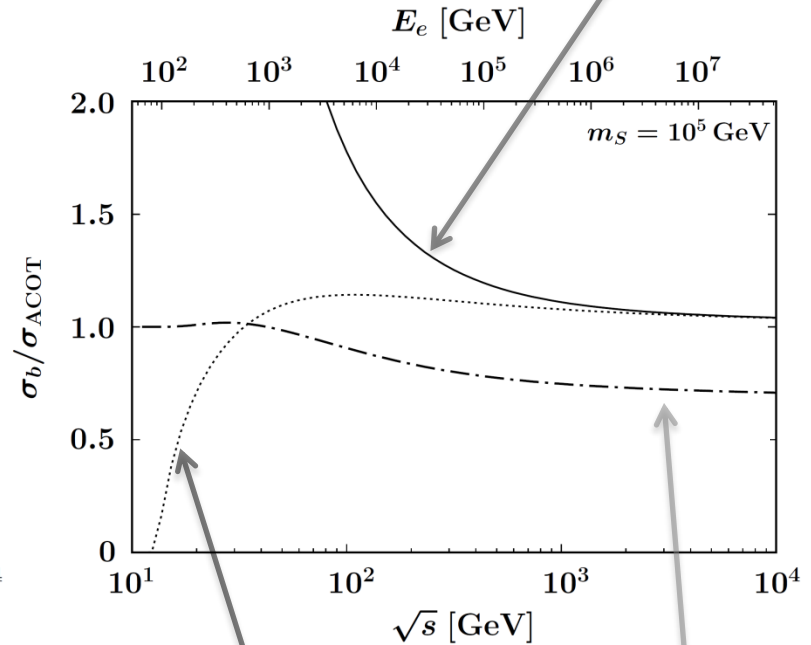
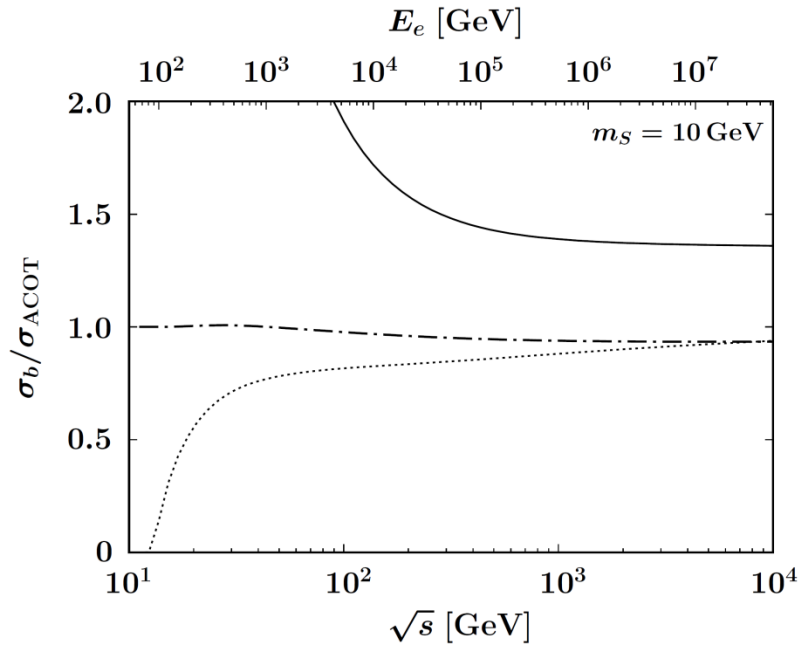
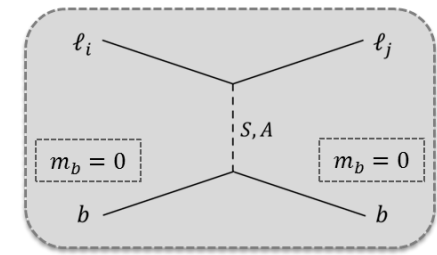


$$= \sum_{\hat{p}=g,q} \int dxdy \int_0^1 d\xi \frac{d^2 \hat{\sigma}_{l_i \hat{p} \rightarrow l_j \hat{X}}}{dxdy} f_{\hat{p}}(\xi \hat{p}, Q^2)$$

パートン分布関数  
( $x$ ではなく $\xi$ の関数!)



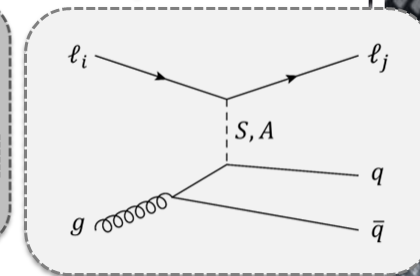
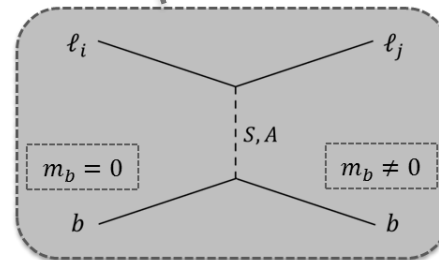
# 定式化手法による断面積の違い



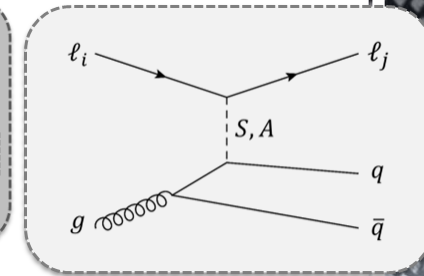
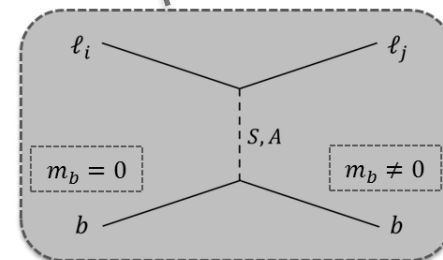
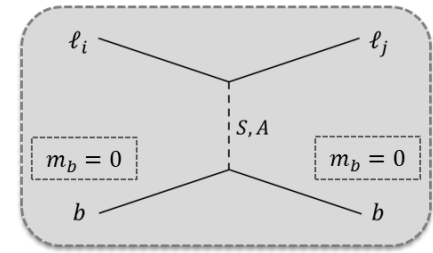
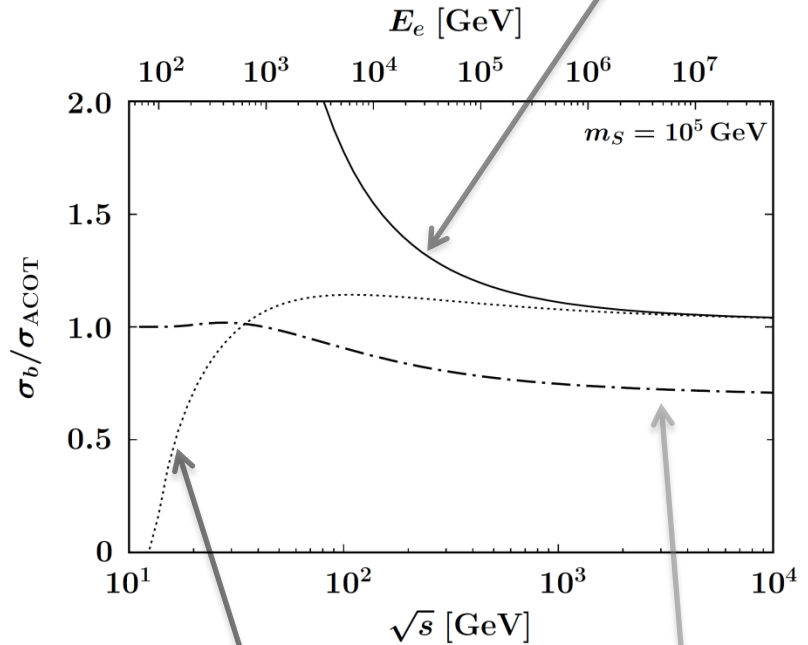
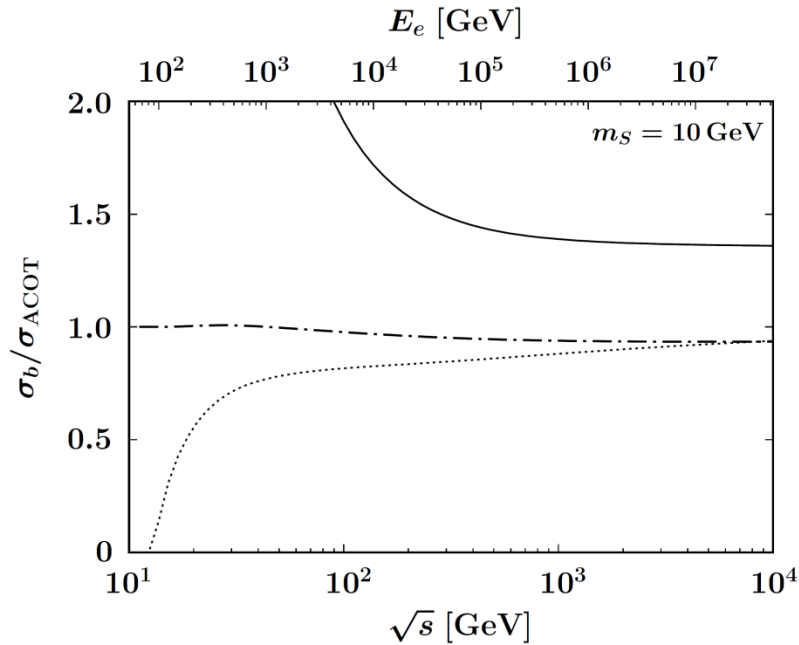
## 縦軸の意味

ACOT以外で求めた $\sigma(\ell_i N \rightarrow \ell_j X_b)$  (= 正確さを欠く計算)

ACOT処方により求めた $\sigma(\ell_i N \rightarrow \ell_j X_b)$  (= 正しい計算)



# 定式化手法による断面積の違い



- ◆  $b\bar{b}$ 生成閾値の遙か上でもボトム質量の影響
- ◆ **ACOT処方: スカラー媒介粒子によるDIS理解に不可欠、特に媒介粒子質量が小さい場合**
- ◆  $\ell_i g \rightarrow \ell_j b\bar{b}$ : 次(々)世代実験のエネルギースケールであればこの素過程が最も精度良く近似

# 数値解析

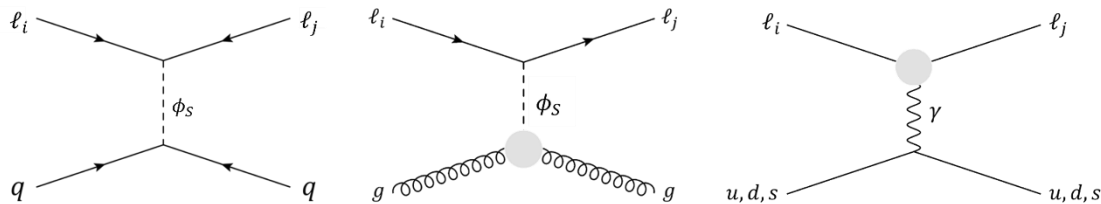
媒介粒子の質量は？

$$\mathcal{L}_S = -\sum_{i,j} (\rho_{ij}^S \bar{\ell}_j P_L \ell_i \phi_S + h.c.) - \sum_q \rho_{qq}^S \bar{q} q \phi_S$$

LFV結合定数の大きさは？

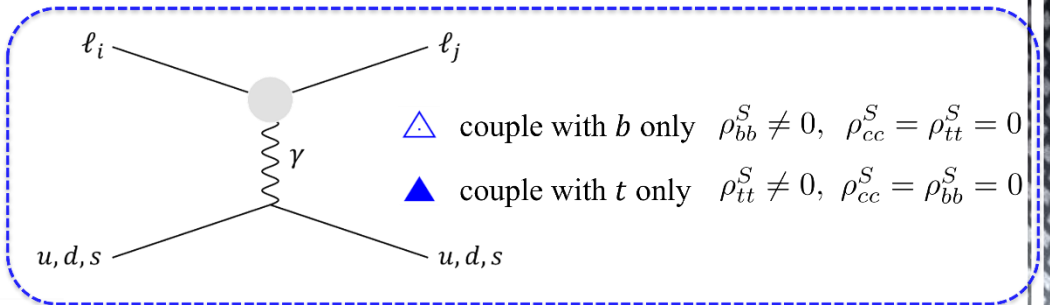
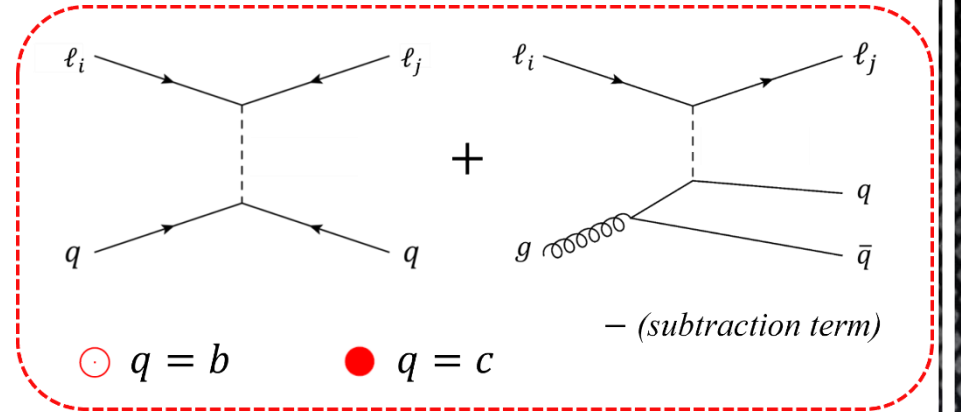
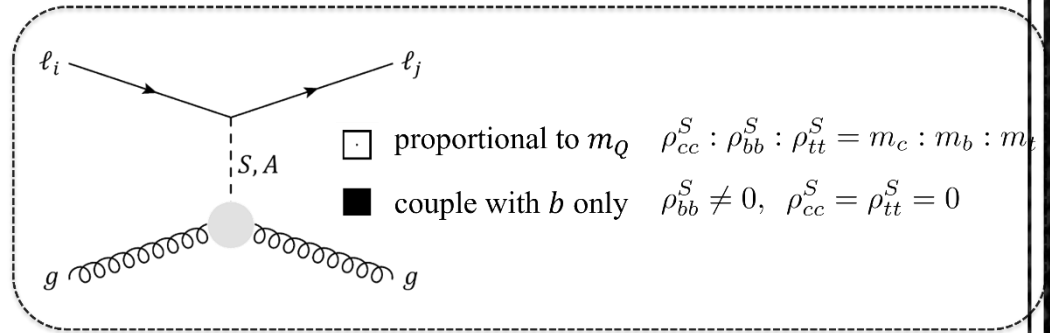
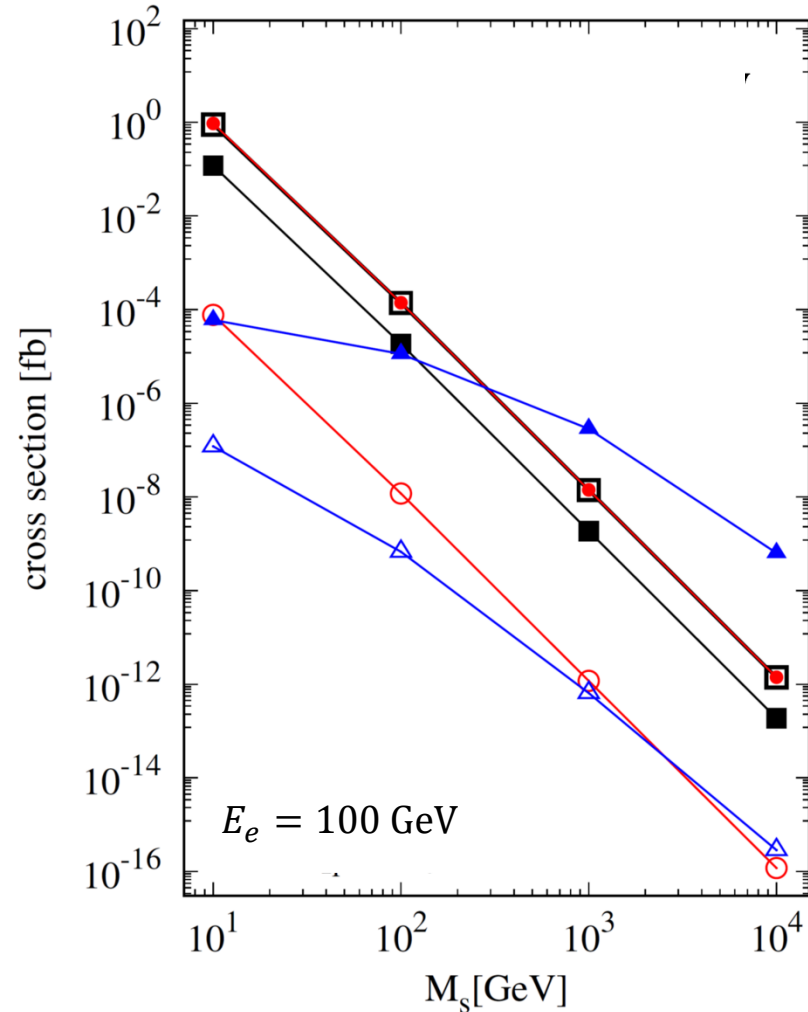
どのクォークが結合？

どの素過程が優勢？ (= どのLFV演算子が支配的？)

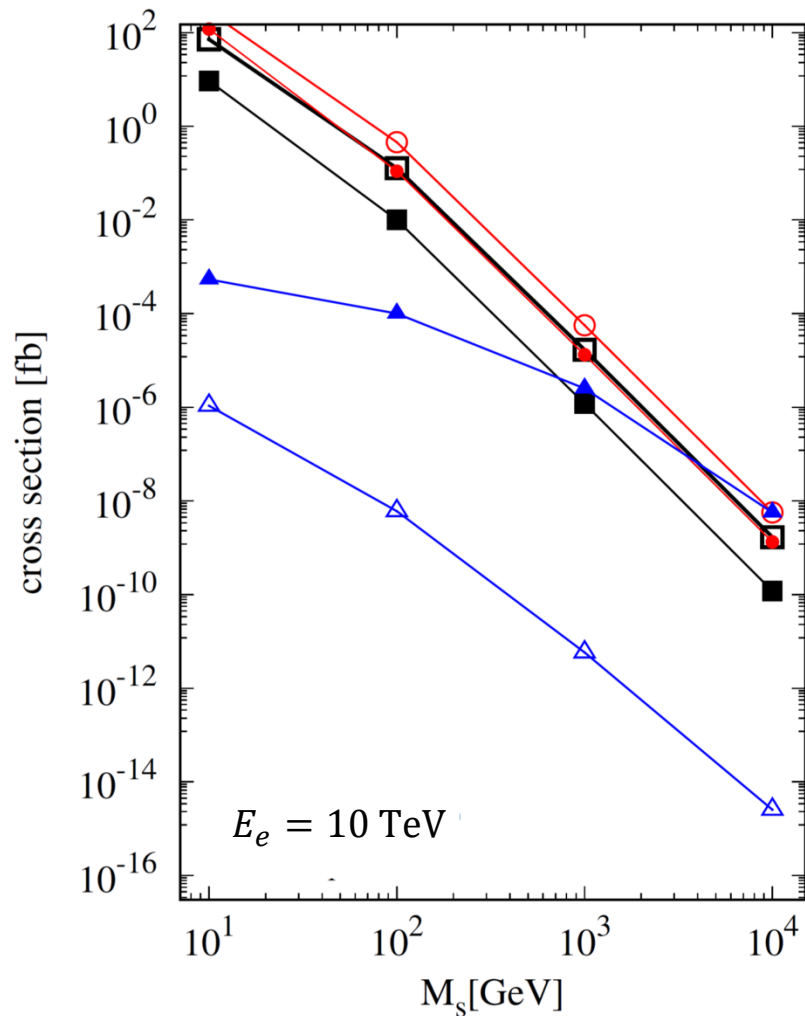
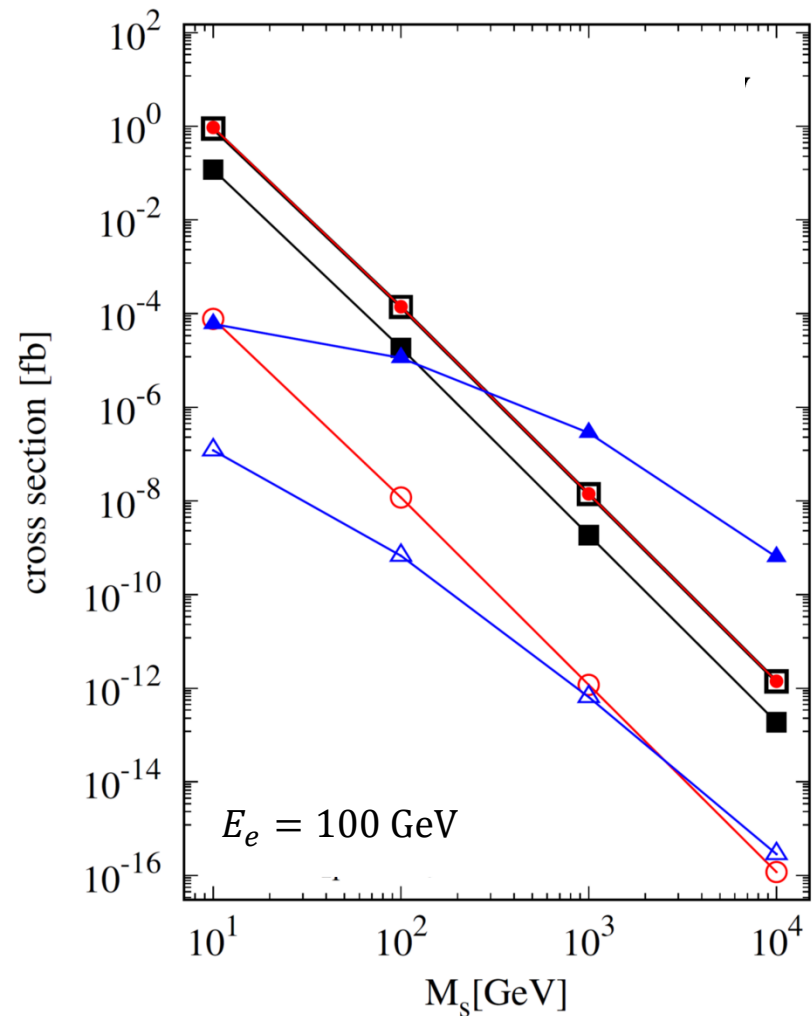




# 媒介粒子質量依存性



# 媒介粒子質量依存性



# 媒介粒子質量依存性

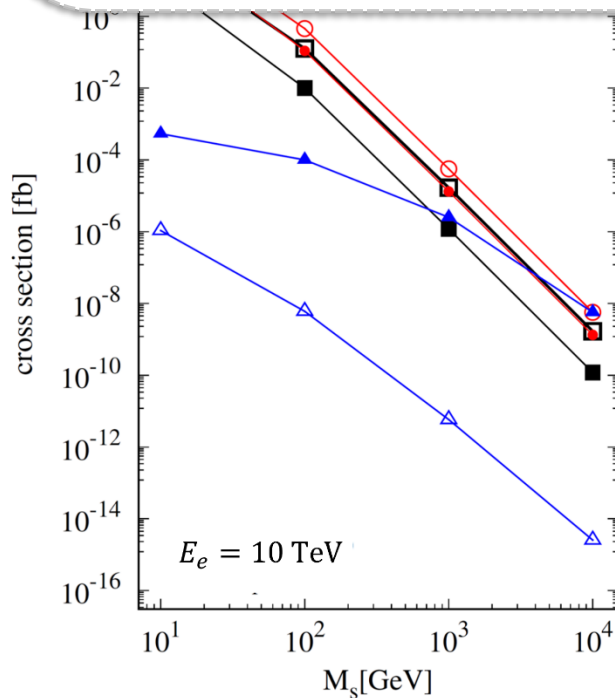
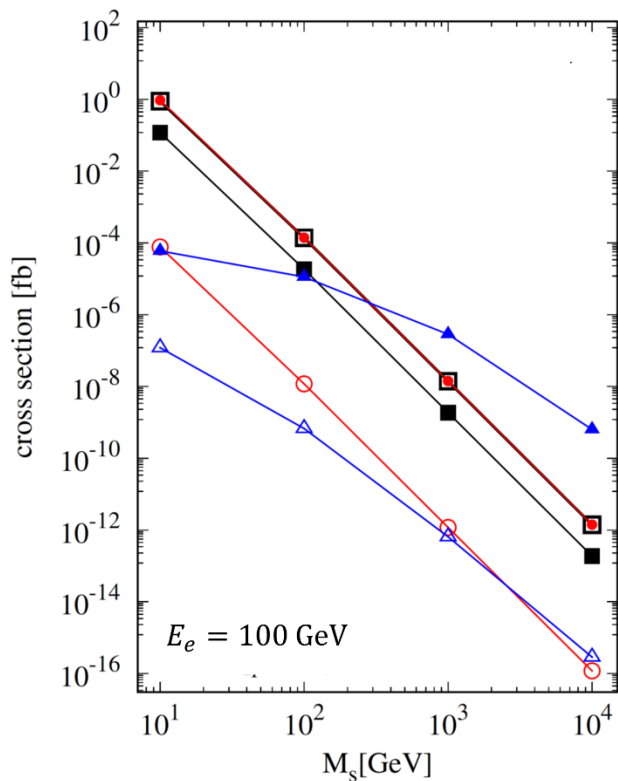
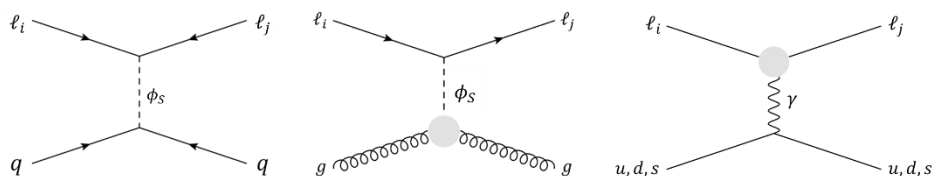
媒介粒子<sup>☑</sup>の質量は？

$$\mathcal{L}_S = -\sum_{i,j} (\rho_{ij}^S \bar{\ell}_j P_L \ell_i \phi_S + h.c.) - \sum_q \rho_{qq}^S \bar{q} q \phi_S$$

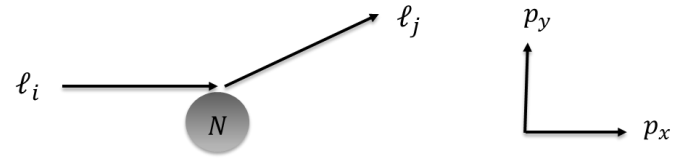
LFV結合定数<sup>☑</sup>の大きさは？

どのクォークが結合？

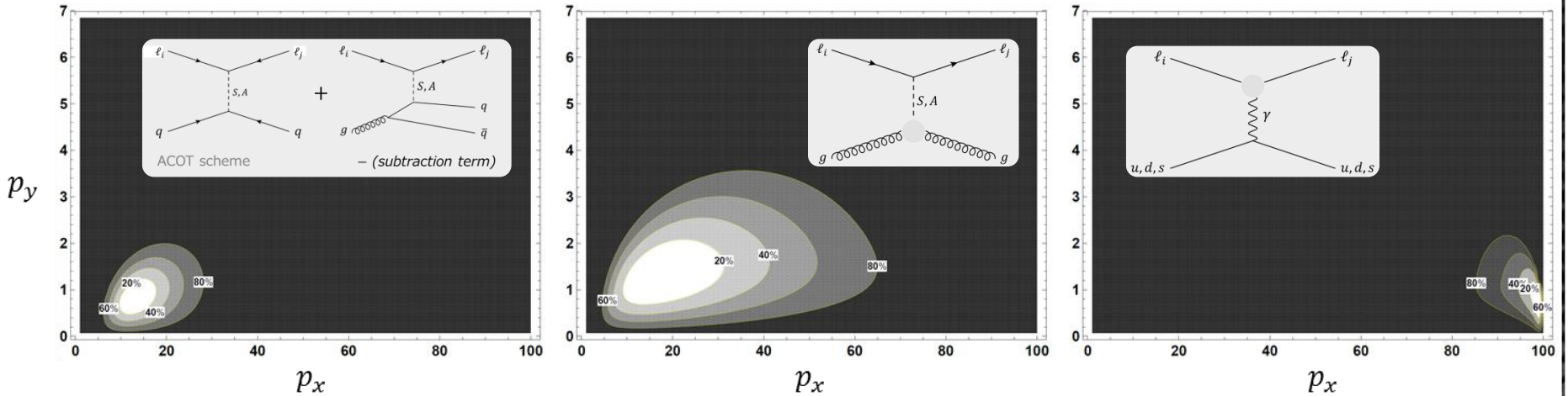
どの素過程が優勢？ (= どのLFV演算子が支配的？)



# 運動量分布



$E_e = 100 \text{ GeV}, m_S = 10 \text{ GeV}$

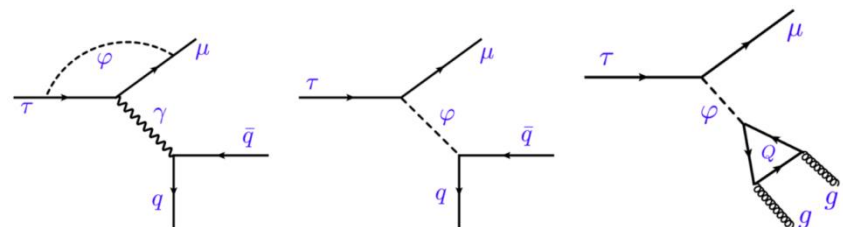


◆ 素過程ごとにはっきりと異なる運動量分布

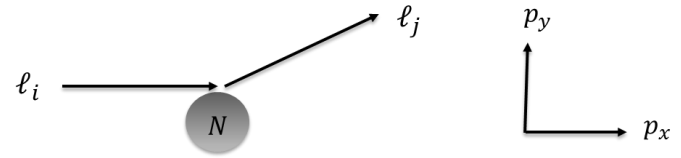
◆ どのLFV演算子が支配的か(=背後の物理は誰か)に高感度

◆  $\tau$  LFV崩壊の情報と繋げ感度倍増

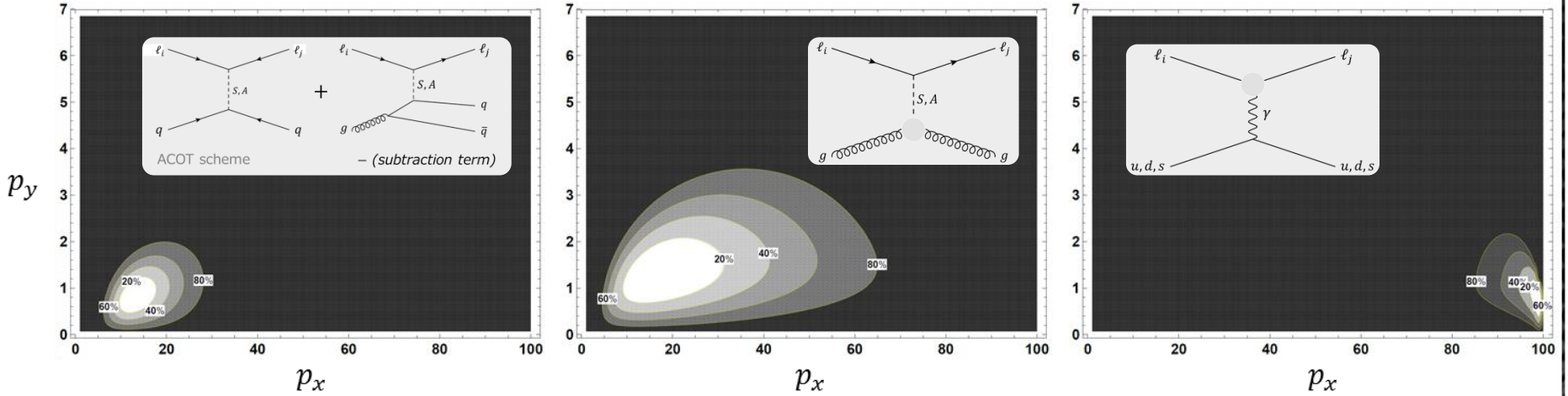
A. Celis, V. Cirigliano, E. Passemar, PRD89 (2014)  
T. Husek, K. Monsalvez-Pozo, J. Portoles, JHEP01 (2021)



# 運動量分布



$E_e = 100 \text{ GeV}, m_S = 10 \text{ GeV}$



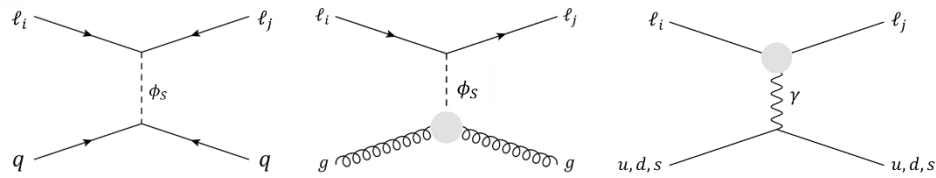
媒介粒子の質量は？

$$\mathcal{L}_S = -\sum_{i,j} (\rho_{ij}^S \bar{l}_j P_L l_i \phi_S + h.c.) - \sum_q \rho_{qq}^S \bar{q} q \phi_S$$

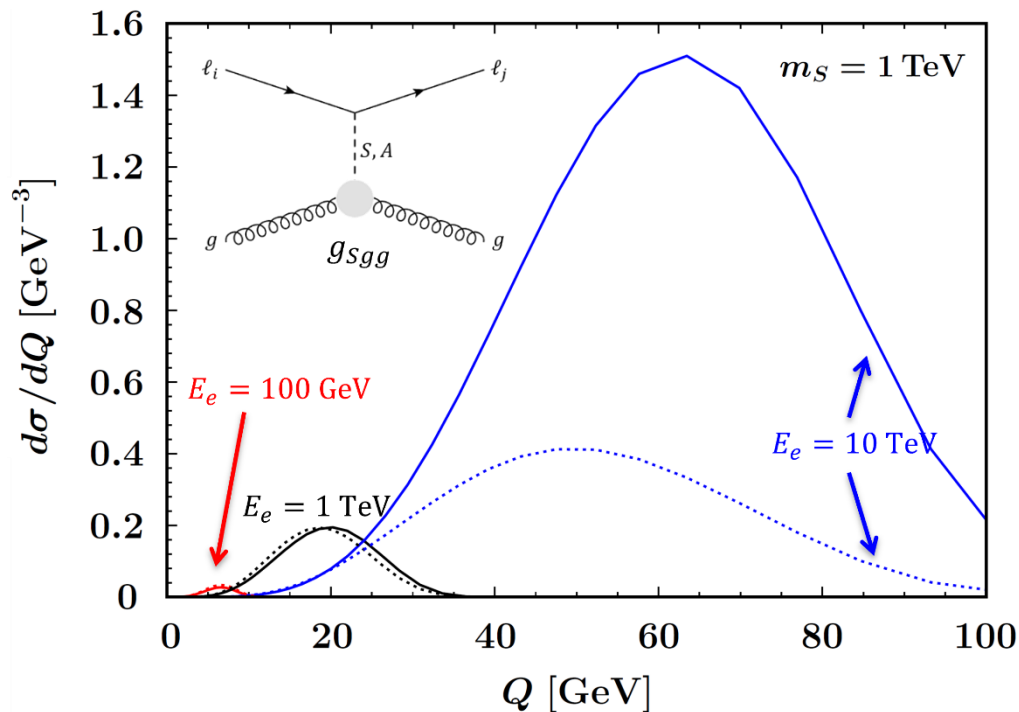
LFV結合定数の大きさは？

どのクォークが結合？

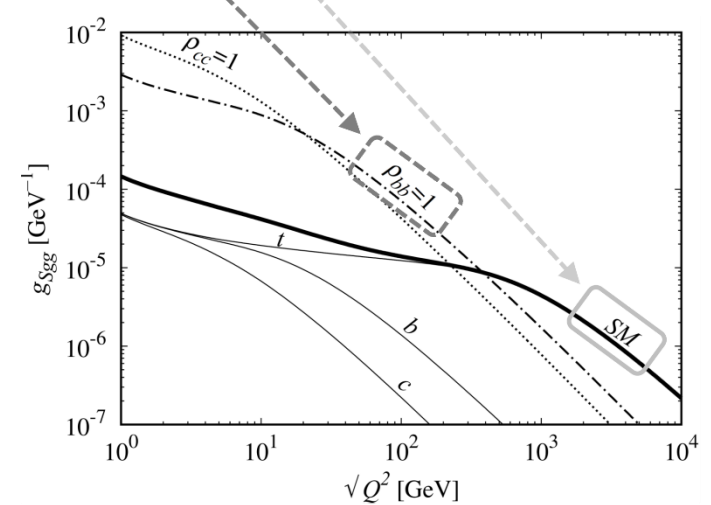
どの素過程が優勢？ (= どのLFV演算子が支配的？)



# 媒介粒子とクォークの結合

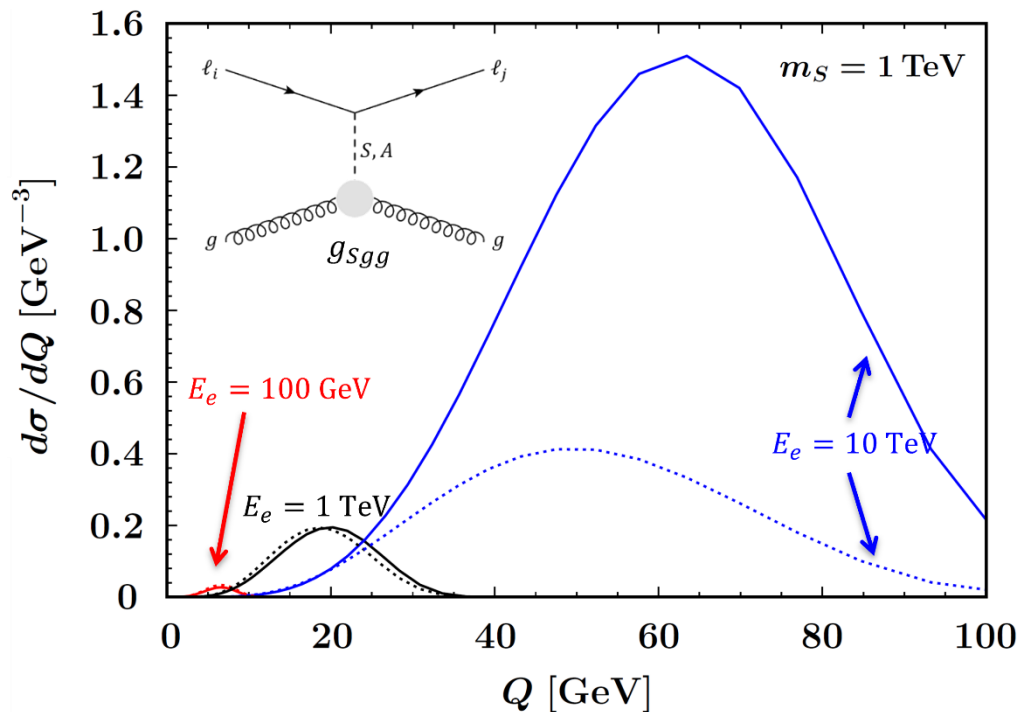


— Proportional to  $m_q \rho_{cc}^S : \rho_{bb}^S : \rho_{tt}^S = m_c : m_b : m_t$   
 - - - Couple with  $b$  only  $\rho_{bb}^S \neq 0, \rho_{cc}^S = \rho_{tt}^S = 0$

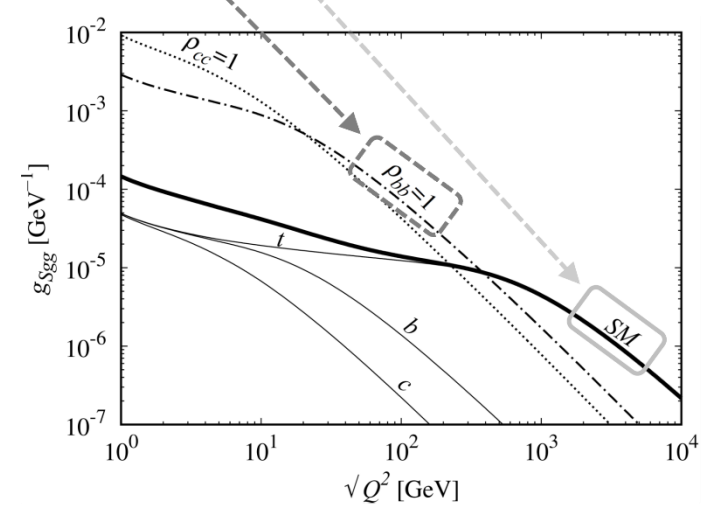


ピーク位置と微分断面積  $d\sigma/dQ$  に大きな違い (for  $E_e = 10 \text{ TeV}$ )

# 媒介粒子とクォークの結合



— Proportional to  $m_q \rho_{cc}^S : \rho_{bb}^S : \rho_{tt}^S = m_c : m_b : m_t$   
 - - - Couple with  $b$  only  $\rho_{bb}^S \neq 0, \rho_{cc}^S = \rho_{tt}^S = 0$

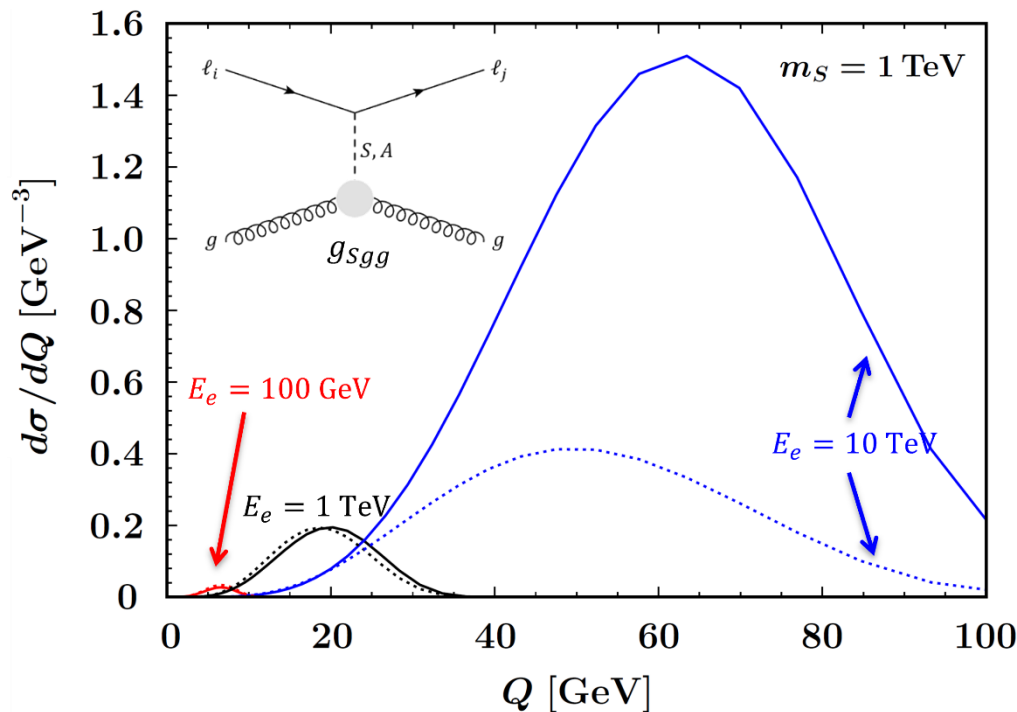


**ピーク位置と微分断面積  $d\sigma/dQ$  に大きな違い (for  $E_e = 10\text{TeV}$ )**

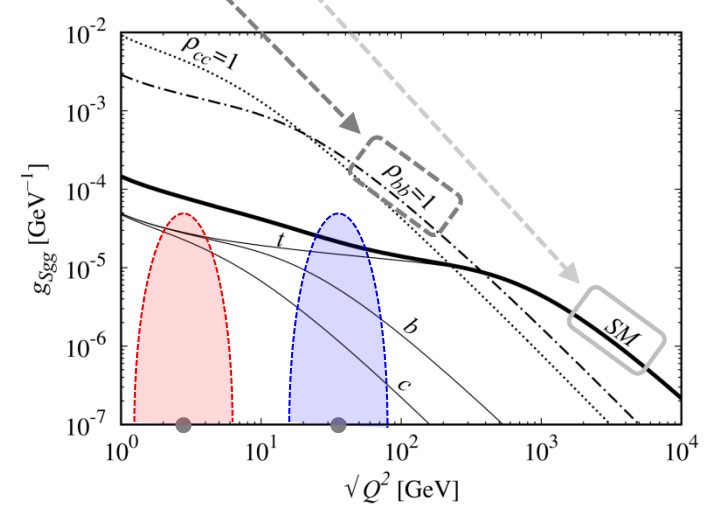
媒介粒子-グルーオン-グルーオン結合  $g_{Sgg}$  :  
 以下の2物理量に強く依存

(i) 移行運動量  $\sqrt{Q^2}$       (ii) 内線クォーク質量  $m_q$

# 媒介粒子とクォークの結合



— Proportional to  $m_q \rho_{cc}^S : \rho_{bb}^S : \rho_{tt}^S = m_c : m_b : m_t$   
 - - - Couple with  $b$  only  $\rho_{bb}^S \neq 0, \rho_{cc}^S = \rho_{tt}^S = 0$



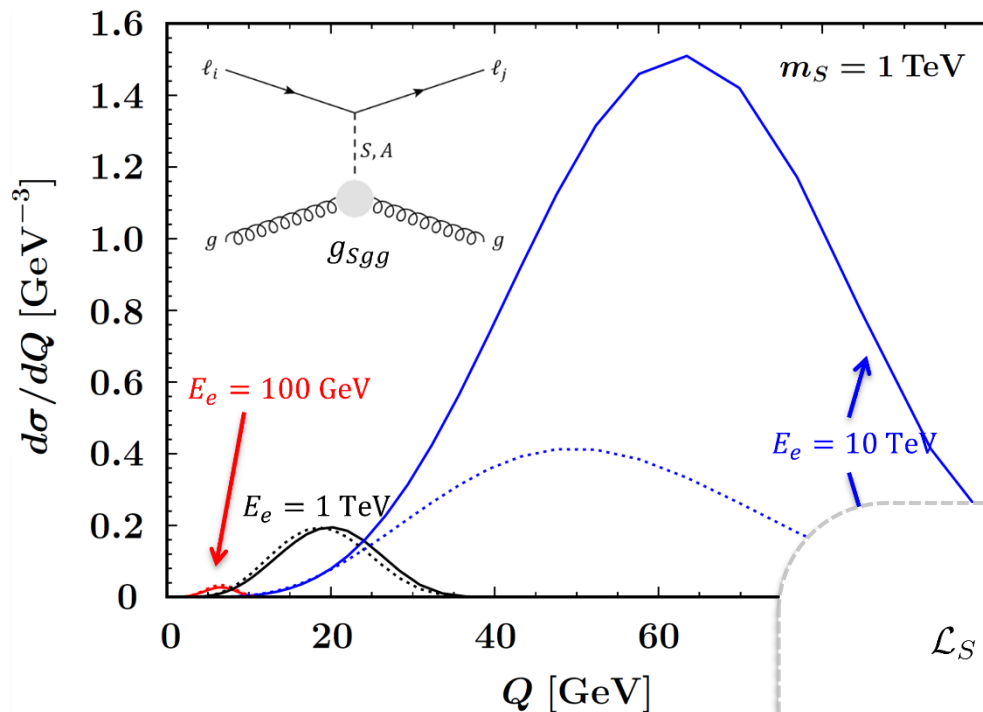
**ピーク位置と微分断面積  $d\sigma/dQ$  に大きな違い (for  $E_e = 10\text{TeV}$ )**

媒介粒子-グルーオン-グルーオン結合  $g_{Sgg}$  :  
 以下の2物理量に強く依存  
 (i) 移行運動量  $\sqrt{Q^2}$       (ii) 内線クォーク質量  $m_q$

典型的運動量移行  
 $Q_{typ} \approx 35\text{GeV}$  for  $E_e = 10\text{TeV}$   
 $Q_{typ} \approx 5\text{GeV}$  for  $E_e = 100\text{GeV}$

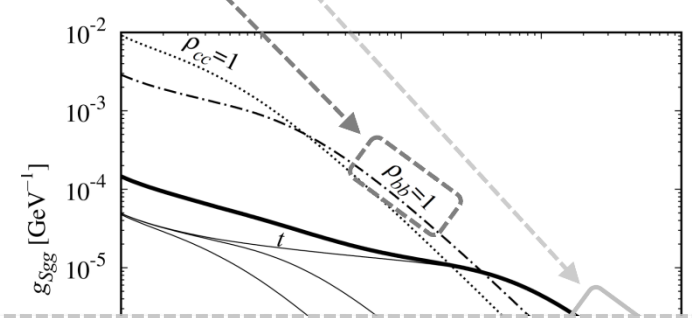


# 媒介粒子とクォークの結合



— Proportional to  $m_q \rho_{cc}^S : \rho_{bb}^S : \rho_{tt}^S = m_c : m_b : m_t$

⋯ Couple with  $b$  only  $\rho_{bb}^S \neq 0, \rho_{cc}^S = \rho_{tt}^S = 0$



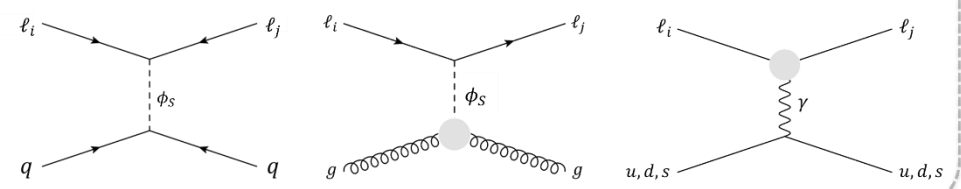
媒介粒子の質量は？

$$\mathcal{L}_S = - \sum_{i,j} (\rho_{ij}^S \bar{\ell}_j P_L \ell_i \phi_S + h.c.) - \sum_q \rho_{qq}^S \bar{q} q \phi_S$$

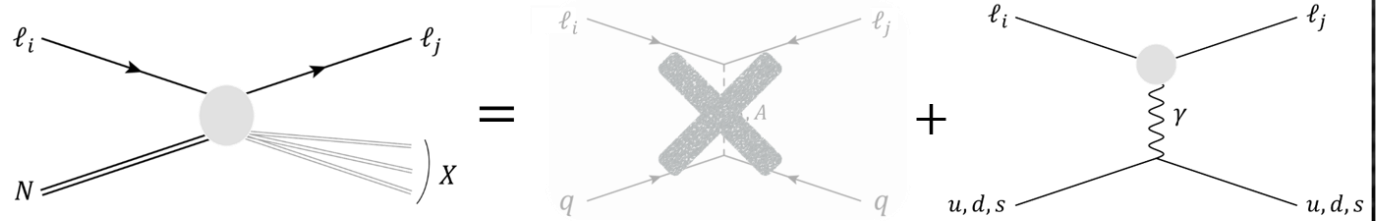
LFV結合定数の大きさは？

どのクォークが結合？

どの素過程が優勢？ (= どのLFV演算子が支配的？)



# まとめ



□ LFV-DIS: LFV探索の有力手段

□ 2つの重要要素を取り入れた上でLFV-DISを断面積定式化・解析

(1) グルーオン生成素過程  $\ell_i g \rightarrow \ell_j g$

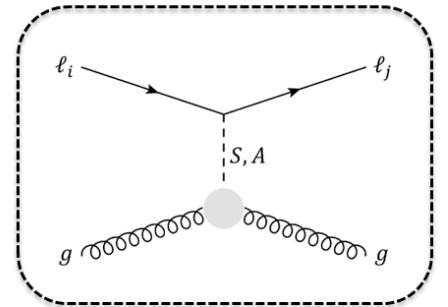
(2) クォーク質量とクォーク数保存  
(with ACOT手法)

□ 重いクォークの影響(クォーク数保存と質量)とグルーオンの寄与より断面積が大きく変動

□ 素過程ごとの運動量分布を具に測定することでLFV演算子や関連パラメーターを決定可能



Improved handling



+

