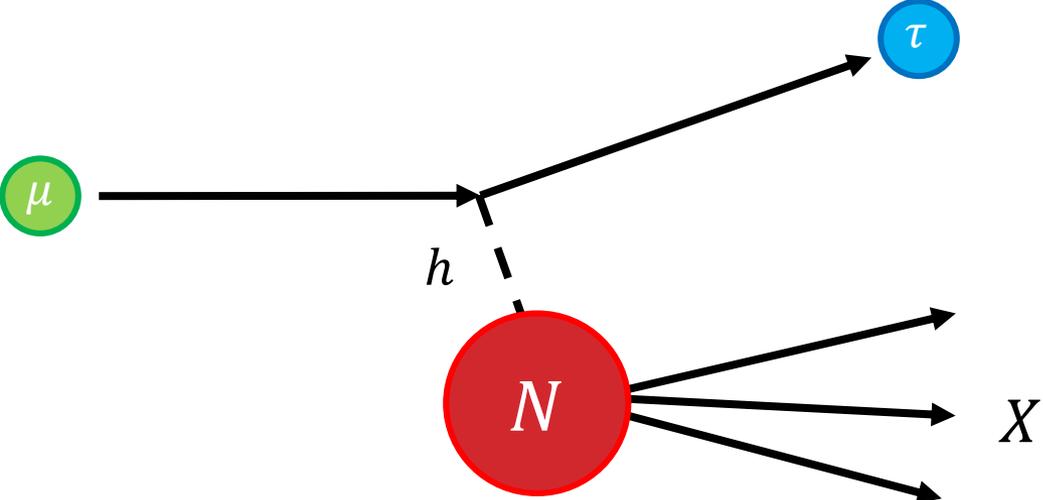


# ヒッグスLFVに伴うCLFV過程 $\mu N (eN) \rightarrow \tau X$

M. Takeuchi, YU, & M. Yamanaka, Phys. Lett. B **772**, 279 (2017).  
arXiv:1705:01059 [hep-ph].



上坂 優一<sup>1</sup>

共同研究者

竹内道久<sup>2</sup>, 山中真人<sup>3</sup>

<sup>1</sup>阪大理, <sup>2</sup>東大IPMU, <sup>3</sup>京産大益川塾

# 目次

## 1. 導入

- 荷電レプトンフレーバーの破れ (CLFV)
- ヒッグス稀崩壊  $h \rightarrow \mu\tau$
- $\mu N(eN) \rightarrow \tau X$ 過程

## 2. 定式化

- Deep inelastic scattering (DIS)
- $\ell g \rightarrow \tau g$
- $\ell g \rightarrow \tau q \bar{q}$

## 3. 結果

## 4. まとめ

# 1. 導入

# Charged Lepton Flavor Violation (CLFV)

- 新物理探索の有力候補 -

➤ レプトンフレーバー数  $L_e, L_\mu, L_\tau$

	$e^-$	$\mu^-$	$\tau^-$	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$	$e^+$	$\mu^+$	$\tau^+$	$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$	他
$L_e$	+1	0	0	+1	0	0	-1	0	0	-1	0	0	0
$L_\mu$	0	+1	0	0	+1	0	0	-1	0	0	-1	0	0
$L_\tau$	0	0	+1	0	0	+1	0	0	-1	0	0	-1	0

➤ 荷電レプトンにおけるレプトンフレーバー数の破れ = **CLFV**

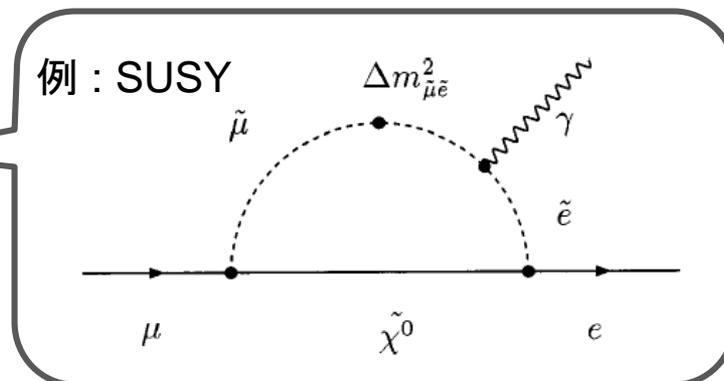
例)  $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma, \mu^+ \rightarrow e^+ e^- e^+, \mu^- N \rightarrow e^- N, \tau^+ \rightarrow \mu^+ \gamma, \text{etc.}$

✓ “ニュートリノセクターでのレプトンフレーバーの破れ”は既知 (ニュートリノ振動)

• 標準模型の枠組みでは**禁止**

• “標準模型を超える模型”の多くで予言

➤ 見つければ、ただちに新物理存在の証拠



# Higgs “CLFV” decay

- 2015年に LFV 崩壊の報告 (CMSによれば SMから  $2.4\sigma$  のズレ)

$$\text{Br}(h \rightarrow \mu\tau) = 0.82 \pm 0.33 \%$$

(CMS & ATLAS, combined)

- 上限値 (信頼水準 95%)

$$\text{Br}(h \rightarrow \mu\tau) < 1.20 \%$$



$$\sqrt{|Y_{\tau\mu}|^2 + |Y_{\mu\tau}|^2} < 3.16 \times 10^{-3}$$

参考:

$$\text{Br}(h \rightarrow e\tau) < 0.70 \%$$

$$\text{Br}(h \rightarrow e\mu) < 0.036 \%$$

もしhiggsがLFVを持つならば、他のCLFV探索に影響があるのでは？



他の実験で cross check できないか

# $\tau$ レプトンを用いたCLFV崩壊探索

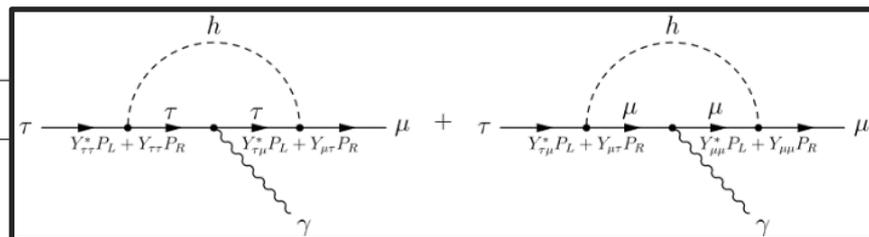
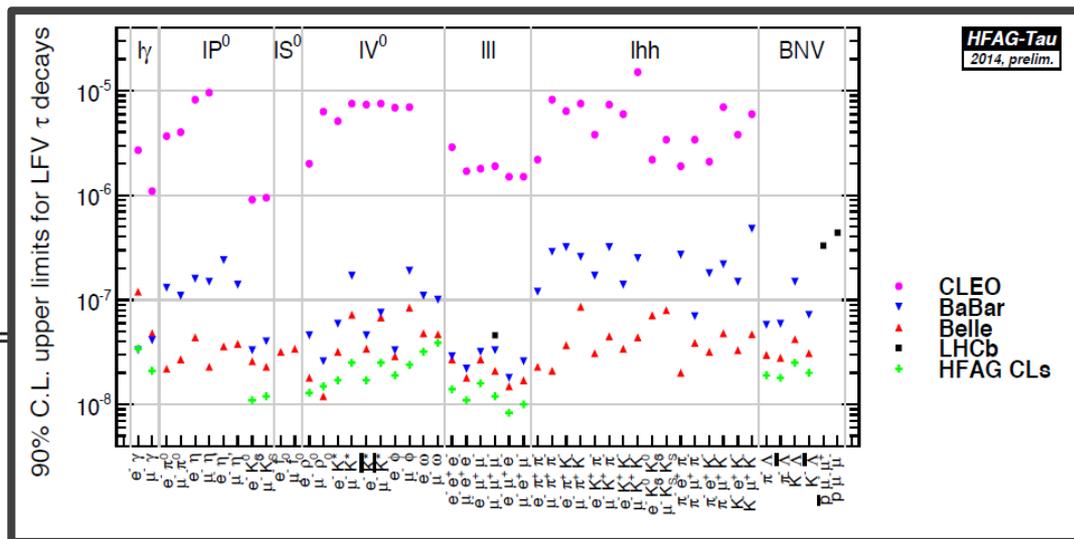
➤ B-factoryの副産物を利用

$\tau^-$  decay mode Upper bound on BR (90% C.L.)

$\mu\gamma$	$4.4 \times 10^{-8}$
$\mu^- \mu^+ \mu^-$	$2.1 \times 10^{-8}$
$\mu\pi^0$	$1.1 \times 10^{-7}$
$\mu\eta$	$6.5 \times 10^{-8}$
$\mu\eta'$	$1.3 \times 10^{-7}$
$\mu\pi^+\pi^-$	$2.1 \times 10^{-8}$
$\mu\rho$	$1.2 \times 10^{-8}$
$\mu f_0$	$3.4 \times 10^{-8}$

崩壊分岐比の上限値  $\sim 10^{-8}$

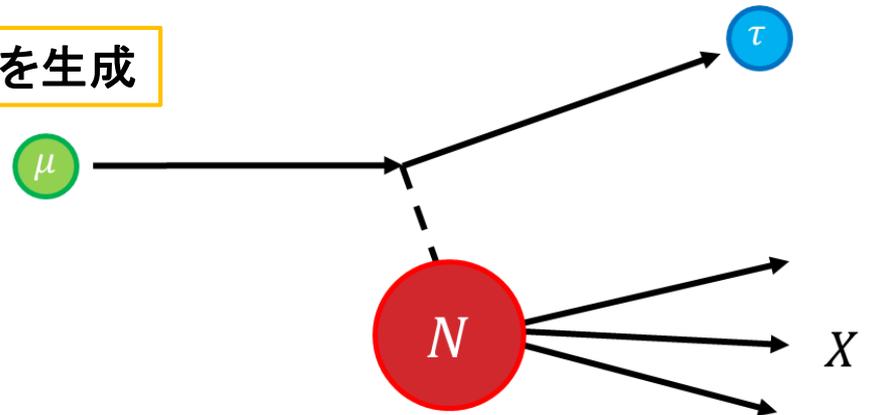
$\text{Br}(\tau \rightarrow X) \equiv \Gamma(\tau \rightarrow X)/\Gamma(\tau \rightarrow \text{all})$  : 崩壊分岐比



Channel	Coupling	Bound
$\tau \rightarrow \mu\gamma$	$\sqrt{ Y_{\tau\mu} ^2 +  Y_{\mu\tau} ^2}$	0.016
$\tau \rightarrow 3\mu$	$\sqrt{ Y_{\tau\mu}^2 +  Y_{\mu\tau} ^2}$	$\lesssim 0.25$
muon $g-2$	$\text{Re}(Y_{\mu\tau}Y_{\tau\mu})$	$(2.7 \pm 0.75) \times 10^{-3}$
muon EDM	$\text{Im}(Y_{\mu\tau}Y_{\tau\mu})$	$-0.8 \dots 1.0$

# $\mu N(eN) \rightarrow \tau X$ 過程

軽レプトン ( $e, \mu$ ) を核子  $N$  にぶつけて、 $\tau$  を生成



これまでの探索例：

HERA ( $ep$  collider) での

Leptoquark探索

Aktas *et al.*, Eur. Phys. J. C **52**, 833 (2007).

H1: Search for LFV ( $e^-p$ : 13.7 pb $^{-1}$ , $e^+p$ : 66.5 pb $^{-1}$ )								
Channel		Selection results			Selection efficiency			
		Data	SM MC	$m_{LQ}$	$S_0^R$	$V_{1/2}^L$	$V_0^R$	$\tilde{S}_{1/2}^L$
$ep \rightarrow \mu X$	$e^-p$	0	$0.18 \pm 0.06$	150 GeV	58.0%	60.9%	60.1%	57.7%
				500 GeV	47.2%	38.5%	42.3%	37.8%
	$e^+p$	0	$1.03 \pm 0.32$	150 GeV	55.5%	57.9%	58.7%	55.8%
				500 GeV	40.9%	40.5%	36.6%	41.4%
$ep \rightarrow \tau X$	$e^-p$	0	$0.75 \pm 0.21$	150 GeV	28.3%	27.6%	27.1%	28.1%
				500 GeV	21.3%	14.4%	17.1%	13.8%
	$e^+p$	1	$4.90 \pm 0.85$	150 GeV	26.8%	26.4%	26.9%	27.0%
				500 GeV	17.0%	16.7%	14.1%	17.3%
$ep \rightarrow \tau X$ $\hookrightarrow \tau \rightarrow e\nu_e\nu_\tau$	$e^-p$	0	$0.28 \pm 0.19$	150 GeV	9.0%	7.8%	7.6%	8.9%
				500 GeV	6.7%	4.0%	5.2%	3.8%
	$e^+p$	0	$1.24 \pm 0.55$	150 GeV	8.3%	7.2%	7.3%	8.4%
				500 GeV	4.8%	5.1%	4.0%	5.3%
$ep \rightarrow \tau X$ $\hookrightarrow \tau \rightarrow \mu\nu_\mu\nu_\tau$	$e^-p$	0	$0.18 \pm 0.06$	150 GeV	7.4%	7.6%	7.6%	7.4%
				500 GeV	6.3%	4.7%	5.4%	4.6%
	$e^+p$	0	$1.03 \pm 0.32$	150 GeV	7.8%	8.0%	8.1%	7.8%
				500 GeV	5.2%	5.2%	4.5%	5.3%
$ep \rightarrow \tau X$ $\hookrightarrow \tau \rightarrow h\nu_\tau$	$e^-p$	0	$0.29 \pm 0.06$	150 GeV	11.9%	12.2%	11.9%	11.8%
				500 GeV	8.3%	5.7%	6.5%	5.4%
	$e^+p$	1	$2.63 \pm 0.57$	150 GeV	10.7%	11.2%	11.5%	10.8%
				500 GeV	7.0%	6.4%	5.6%	6.7%

$\mu$  ビームを用いた実験も技術的には可能? (COMPASS実験(LHC)など)

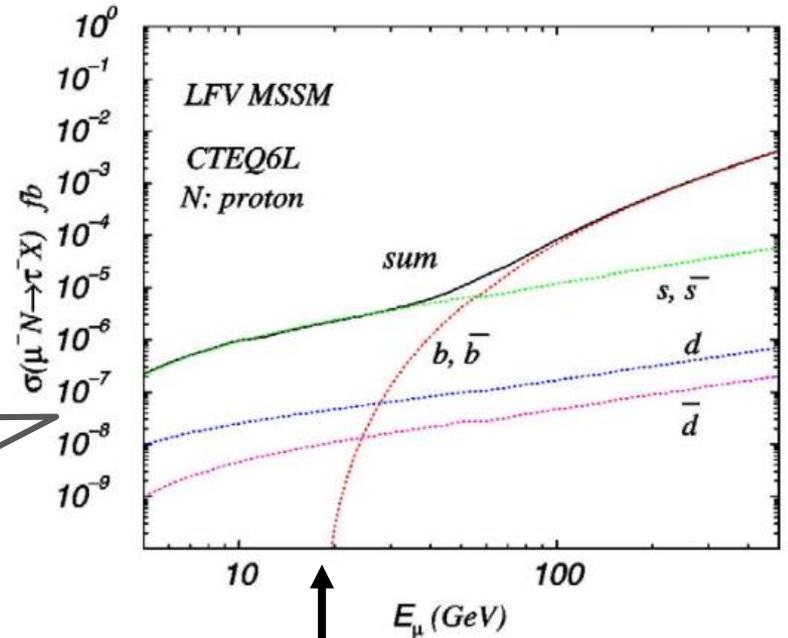
# Higgs交換による $\mu N(eN) \rightarrow \tau X$

先行研究 (Kanemura *et al.*, 2005)

$\bar{\tau} \ell \bar{q} q$

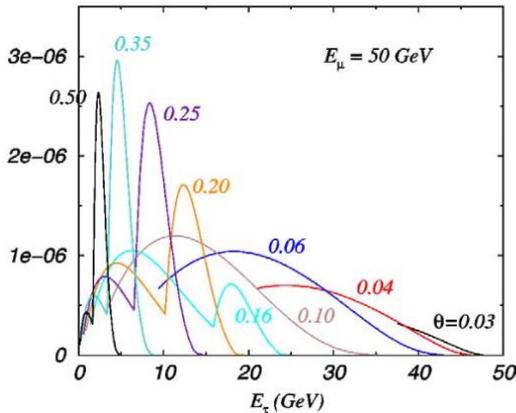
- heavy higgsによる4-Fermi型CLFV  
SUSYを仮定 (down-type クォークとの結合が重要)
- 素過程は  $eq \rightarrow \tau q$

$E > 50\text{GeV}$  ではbottom quarkの寄与が重要

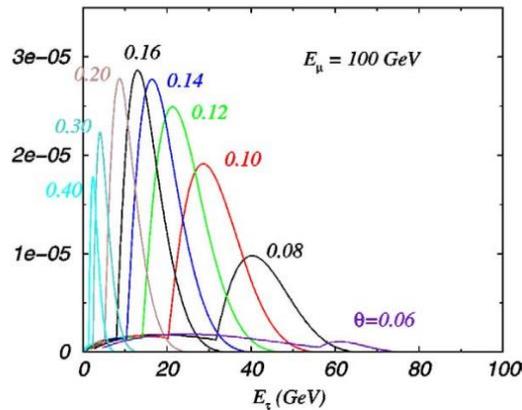


$b$  クォーク生成の“閾値”

$d^2\sigma/dE_c d\theta$  (fb/GeV)

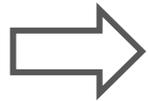


$d^2\sigma/dE_c d\theta$  (fb/GeV)



# 従来の解析について

1. ボトム PDFを用いて断面積の評価がされていた



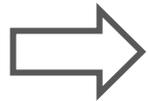
ボトムがmasslessだと見なせない領域で

ボトム PDF (5-flavor PDF) を使っていいのか?

- ボトム数保存のために終状態は  $b\bar{b}$  であるべき
- **終状態質量**による相空間の抑制を無視できないはず

核子ターゲット実験の場合  $\tau b$  閾値 :  $E_\ell > 19\text{GeV}$   $\iff$   $\tau b\bar{b}$  閾値 :  $E_\ell > 55\text{GeV}$

2. 素過程として、quarkとの反応のみ考えられてきた



higgsのような“重いフェルミオンと強く結合する粒子”がCLFVの源なら、**gluon**との反応も大きいのではないか? (quark loopを通して結合)

- gluonのPDFは非常に大きくなる
- 終状態に重いハドロンを作る必要がない

# 本研究

目的

higgs LFVによる  $\ell N \rightarrow \tau X$  過程の解析

素過程として

$$\textcircled{1} \ell g \rightarrow \tau q \bar{q}$$

$$\textcircled{2} \ell g \rightarrow \tau g$$

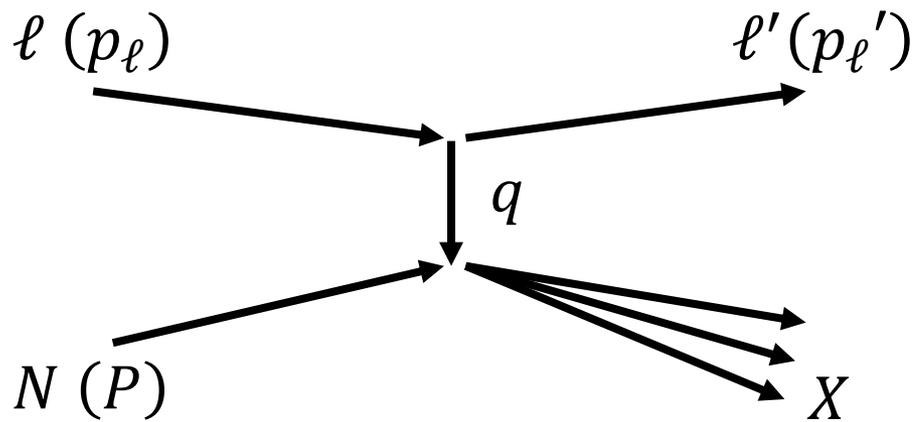
を考慮

1. 陽に  $q\bar{q}$  を終状態として取り扱うことで、相空間の抑制を解析に含める  
特に  $q\bar{q}$  閾値付近での定量性を向上

2. これまで考えられていなかった素過程を評価に取り入れる  
この素過程を含めることで全断面積の増加を期待

## 2. 定式化

# レプトン-核子散乱



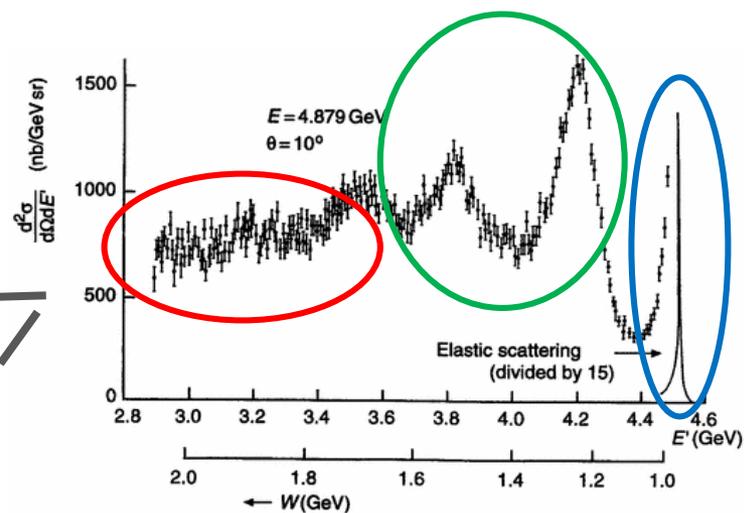
$$Q^2 = -q^2 > 0$$

$$\left( \begin{array}{l} x = \frac{Q^2}{2P \cdot q} : \text{Bjorken変数} \\ y = \frac{2P \cdot q}{2P \cdot p_\ell} : \text{非弾性度} \end{array} \right.$$

$$W^2 = \left( \sum_f p_f \right)^2 : \text{終状態ハドロン不変質量}$$

- ✓ 弾性散乱 (ES) :  $W = M_N$
- ✓ 核子共鳴 :  $W = M_\Delta, \dots$
- ✓ 深非弾性散乱 (DIS) : large  $W$

今回はDIS領域に注目



# パートン描像

✓  $Q^2 \gg M^2$  であるとき、パートンを自由粒子として取り扱い可能 (インパルス近似)

パートン間の干渉を無視し、反応の全断面積を素過程断面積の和で記述

$$\sigma = \sum_i \int_0^1 \sigma_i(\xi) f_i(\xi) d\xi$$

✓ パートン分布関数 (PDF)

$$p = \xi P \quad (0 < \xi < 1)$$

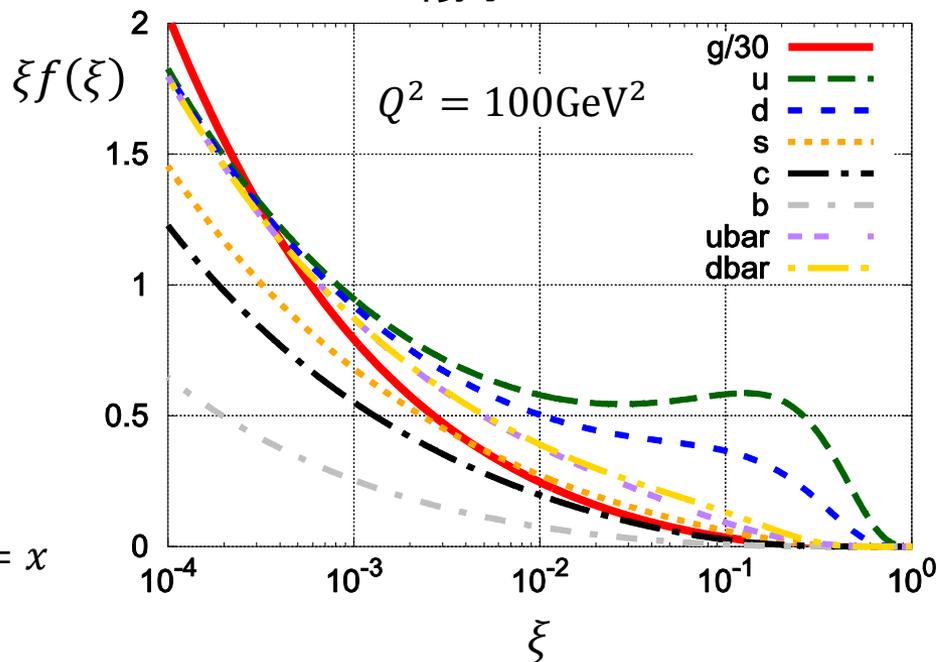
$p$  : パートンの運動量

$P$  : 核子の運動量

$$\sum_{\text{parton}} \xi f_{\text{parton}}(\xi) d\xi = 1$$

※散乱過程でパートン質量を無視すれば  $\xi = x$

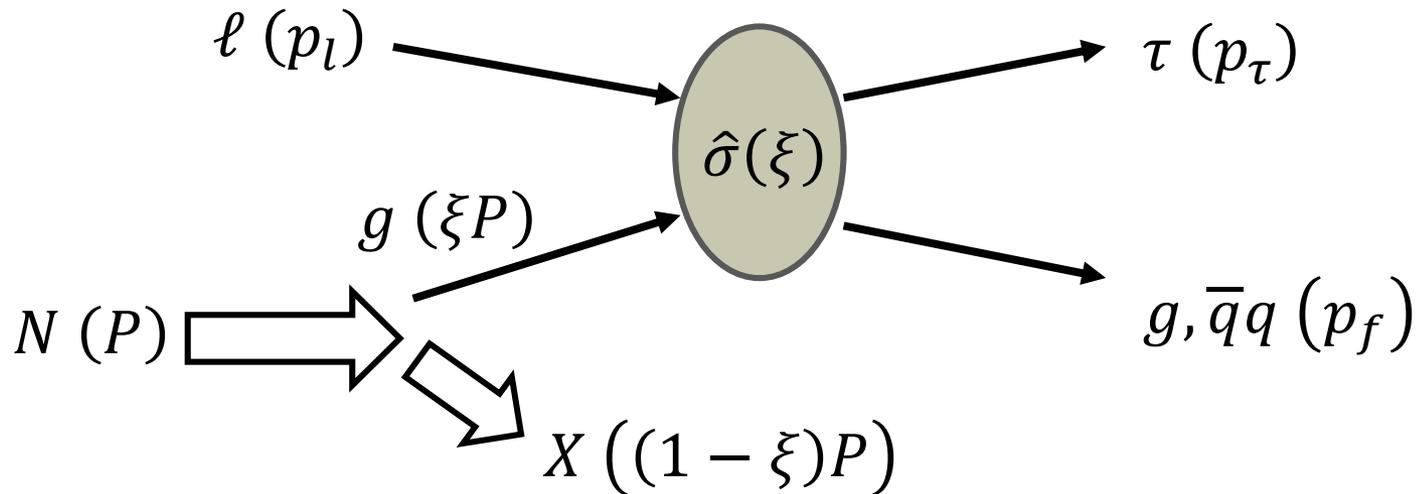
陽子のPDF



# 断面積の計算方法

1. 素過程の断面積  $\hat{\sigma}$  を計算 (このとき、gluonの運動量は  $\xi P$ )

$\xi$  : momentum fraction



2. PDF による重み付け積分

$f_g$  : グルーオンPDF

$$\frac{d^2 \sigma_{\ell N \rightarrow \tau X}}{dx dy} = \sum_{\hat{X}} \int_{\xi_{\min}}^1 d\xi \frac{d^2 \hat{\sigma}_{\ell g \rightarrow \tau \hat{X}}(\xi)}{dx dy} f_g(\xi, Q^2)$$

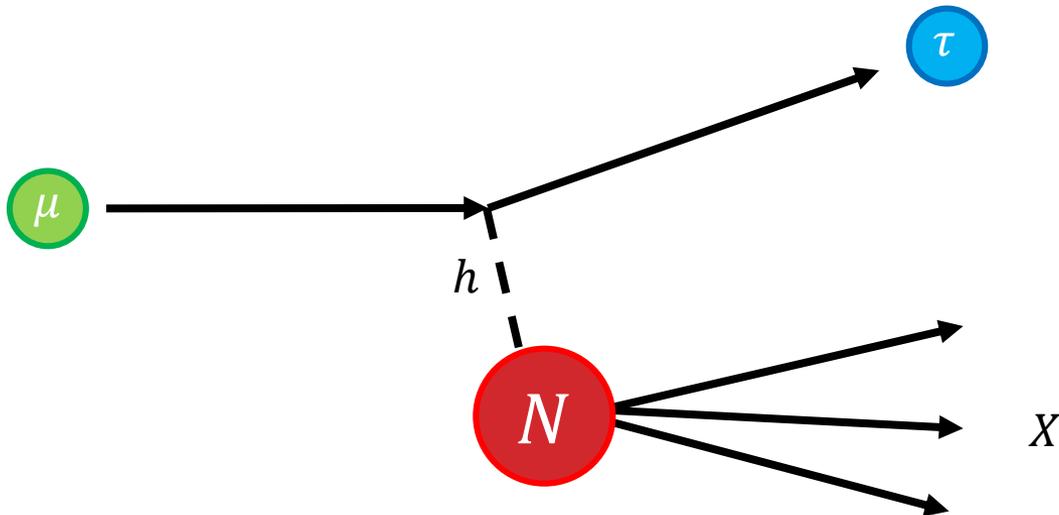
$x$  : Bjorken 変数       $y$  : 非弾性度      ( $x, y$  のとり得る領域は  $\tau$  質量によって制限)

# 有効 CLFV Lagrangian

$$\mathcal{L}_I = \mathcal{L}_I^{\text{SM}} + \mathcal{L}_I^{\text{CLFV}}$$

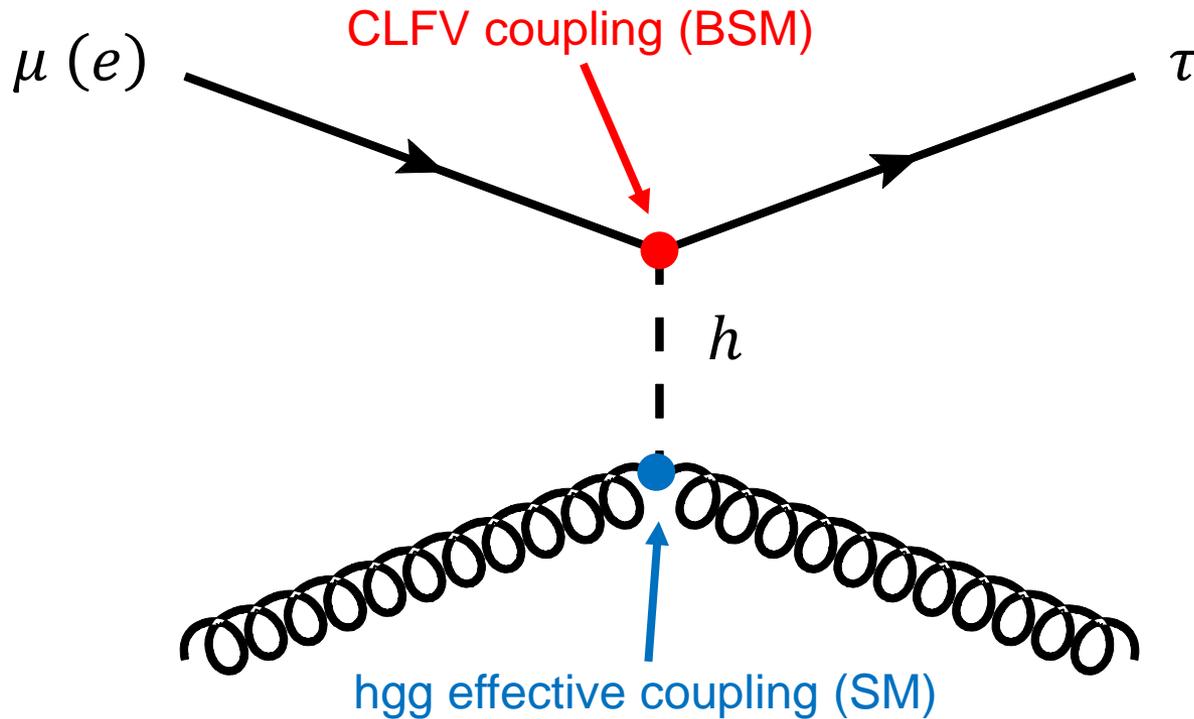
$$\mathcal{L}_I^{\text{SM}} = - \sum_q \frac{m_q}{v} h \bar{q} q$$

$$\mathcal{L}_I^{\text{CLFV}} = -h\bar{\tau}(\rho_{i\tau} P_L + \rho_{\tau i} P_R)\ell_i + \text{H. c.}$$



$\rho$  : CLFV結合定数  
(higgs 稀崩壊からの上限值を仮定)

$$lg \rightarrow \tau g$$



$$\frac{d^2 \sigma_{\ell p \rightarrow \tau X}^g}{dx dy} = \frac{d^2 \sigma_{\ell g \rightarrow \tau b \bar{b}}(x)}{dx dy} f_g(x, Q^2) \quad \xi = x$$

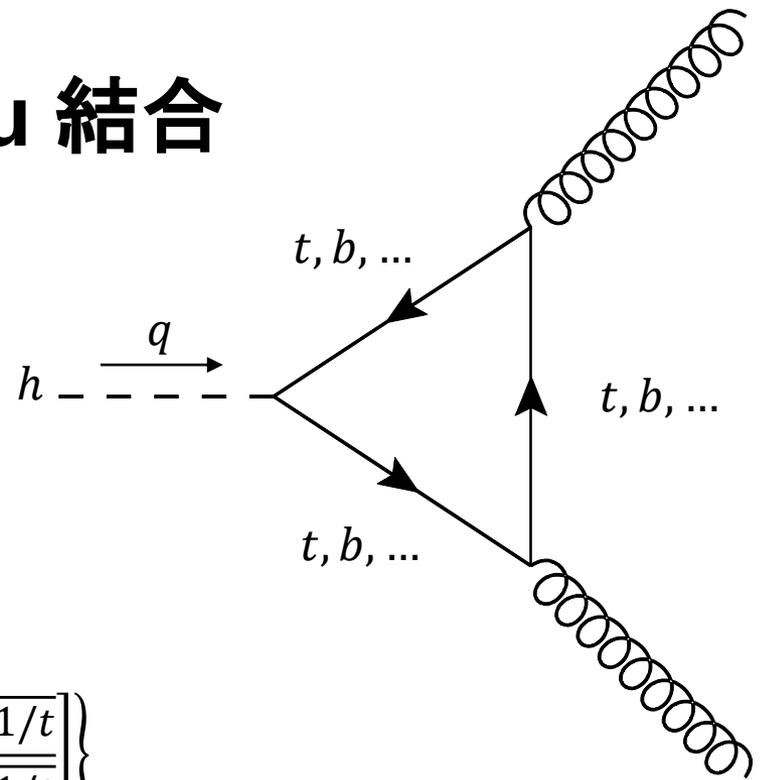
# Higgs-glu-glu 結合

➤ higgsは quark loopを通して gluonと結合

$$\mathcal{L}_{hgg}^{eff} = g_{hgg} h G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu}$$

$$g_{hgg} = \frac{\alpha_s}{8\pi v} \sum_{i=t,b,\dots} c\left(\frac{q^2}{4m_i^2}\right)$$

$$c(t) = \frac{1}{t} \left\{ 1 - \frac{1}{4} \left( 1 - \frac{1}{t} \right) \log^2 \left[ -\frac{1 + \sqrt{1 - 1/t}}{1 - \sqrt{1 - 1/t}} \right] \right\}$$

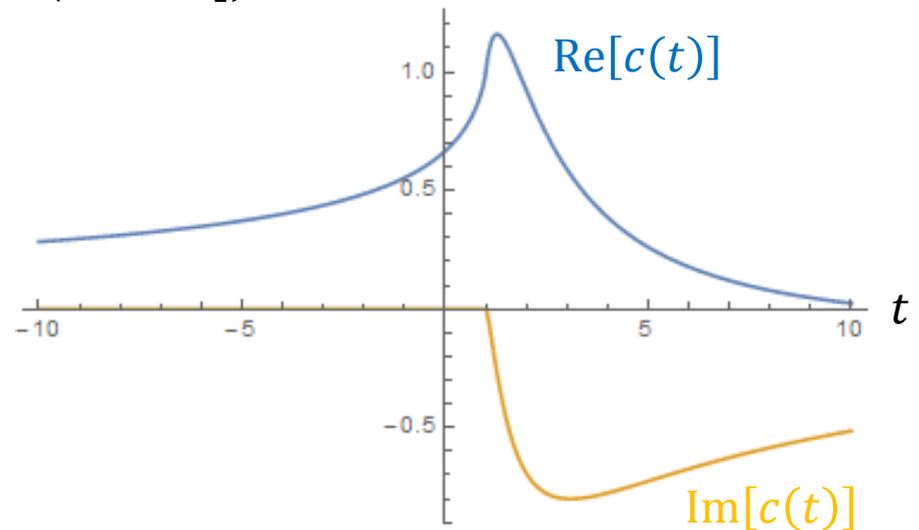


• 今の場合、 $q^2 < 0$  の領域に注目

※ top だけでなく、bottom、charmの寄与も重要

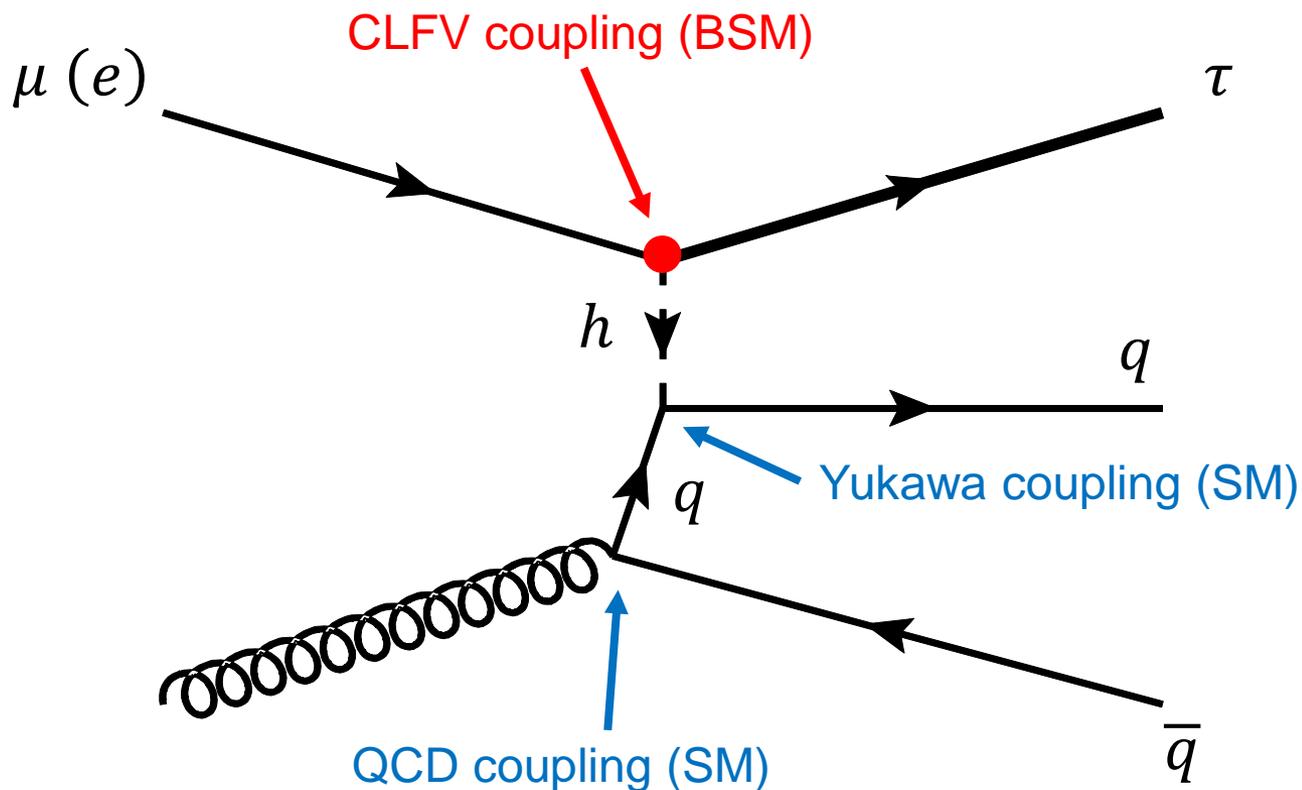
e.g.)  $Q^2 = -q^2 = (10\text{GeV})^2$

$$\sum_{i=t,b,\dots} c\left(\frac{q^2}{4m_i^2}\right) \approx \underset{\substack{\uparrow \\ \text{top}}}{0.67} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{bottom}}}{0.53} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{charm}}}{0.24} + \dots$$



$$lg \rightarrow \tau q \bar{q}$$

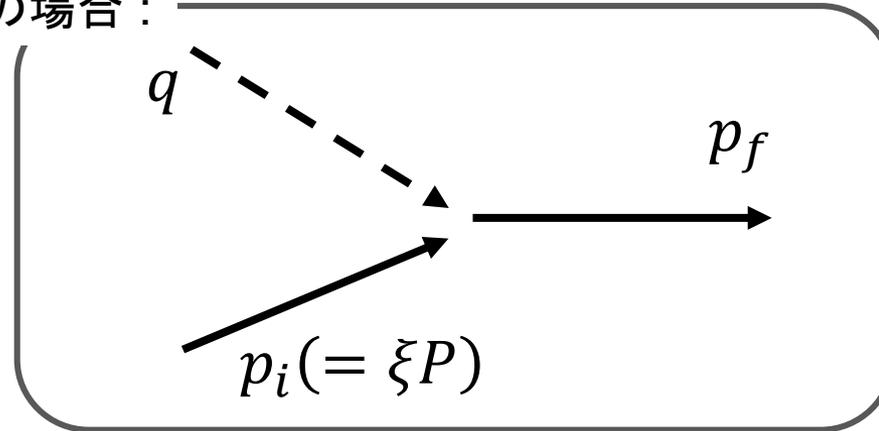
$lq \rightarrow \tau q$  の代わりに導入



- 終状態クォークの質量を考慮して断面積を評価可能

# $x$ と $\xi$ の関係

終状態パートンが1つの場合：



運動量保存より、

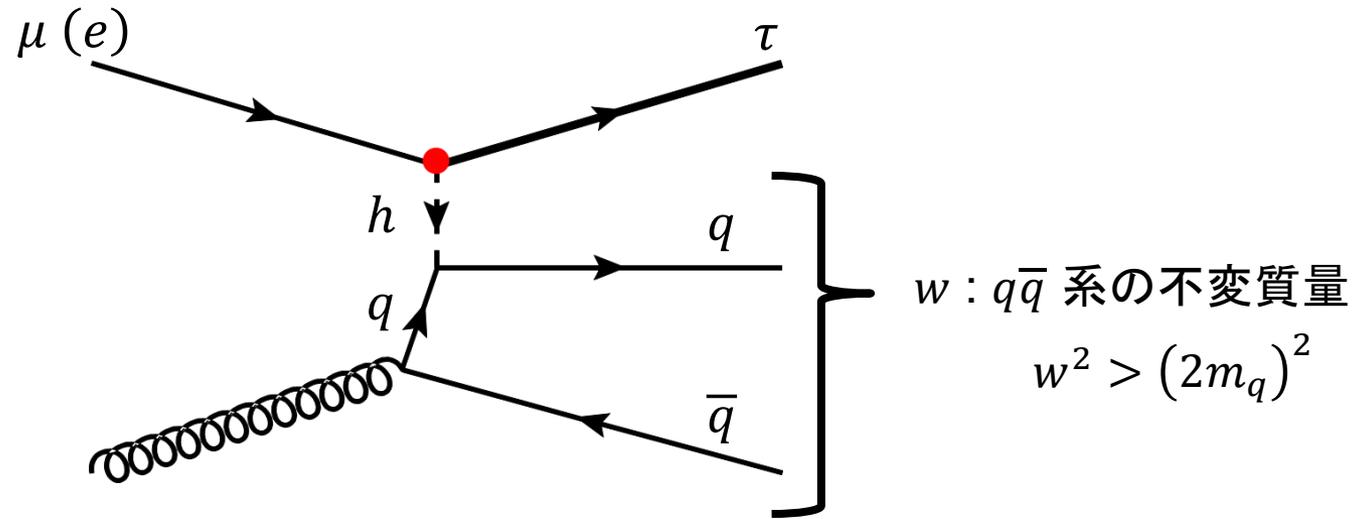
$$p_f^2 = (p_i + q)^2 \\ = 2\xi P \cdot q - Q^2$$

$$\Rightarrow \xi = \frac{Q^2 + p_f^2}{Q^2} x \quad \left( x = \frac{Q^2}{2P \cdot q} \right)$$

$p_f^2 = 0$  のとき、 $\xi = x$  が成立

$$lg \rightarrow \tau q \bar{q}$$

※  $\xi = x$  ではないことに注意



$$\Rightarrow \xi = \frac{Q^2 + w^2}{Q^2} x$$

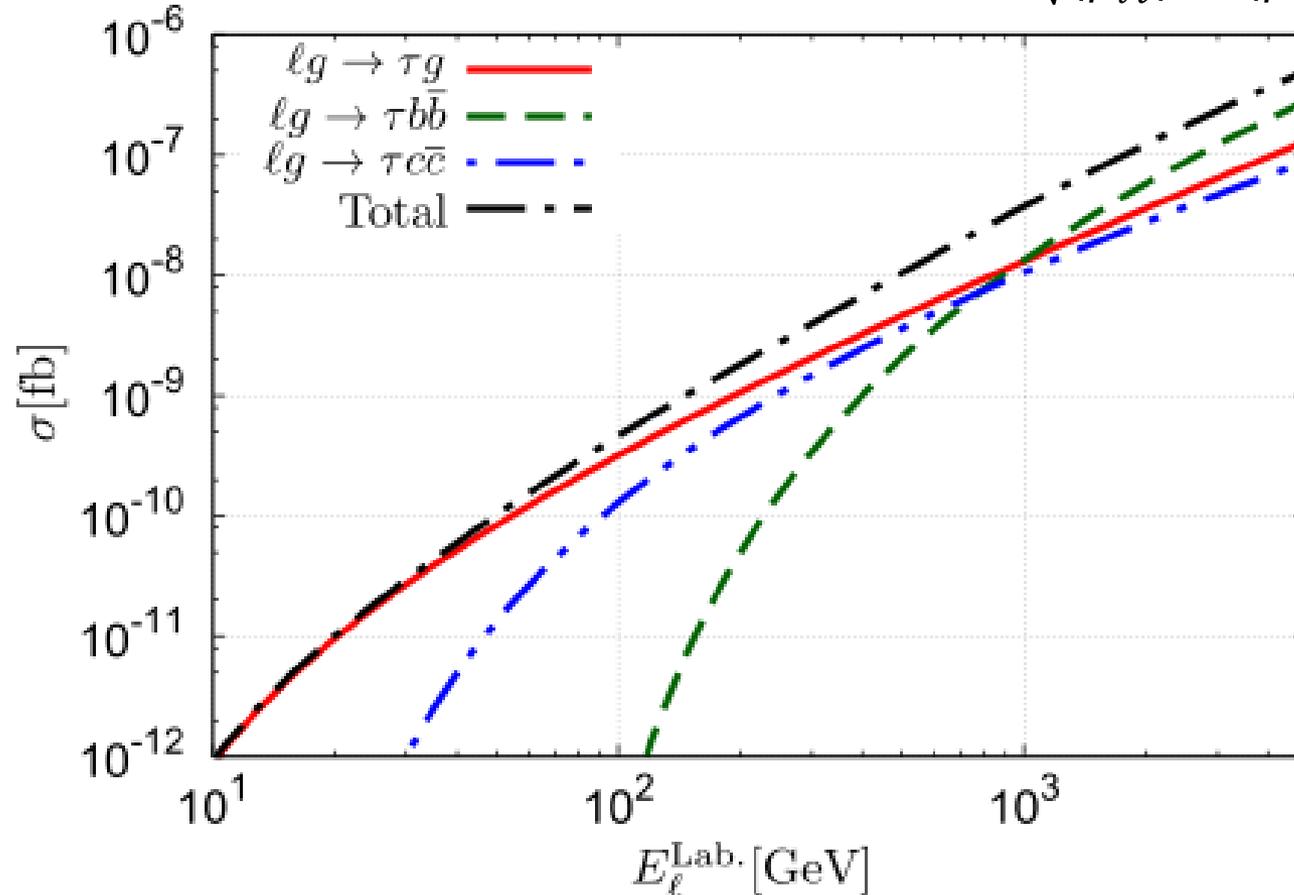
$$\frac{d^2 \sigma_{lp \rightarrow \tau X}^q}{dx dy} = \int_{\frac{Q^2 + 4m_q^2}{Q^2} x}^1 d\xi \frac{d^2 \sigma_{lg \rightarrow \tau q \bar{q}}(\xi)}{dx dy} f_g(\xi, Q^2)$$

(今の場合、 $x, y$  積分と別に  $\xi$  積分が非自明に残る)

# 3. 結果

# 断面積 (固定ターゲット)

$$\sqrt{|\rho_{\ell\tau}|^2 + |\rho_{\tau\ell}|^2} < 2.4 \times 10^{-3}$$

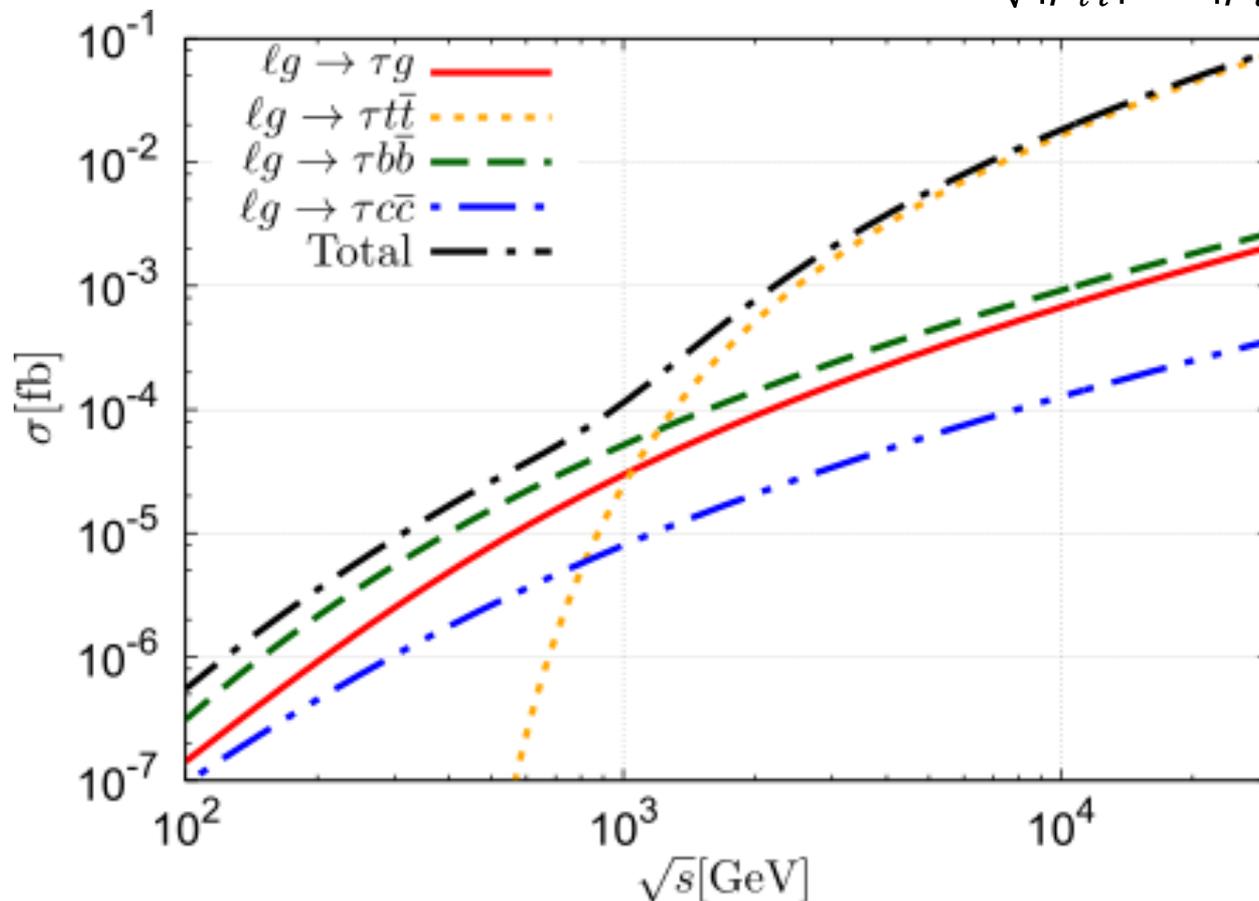


$E_\ell < 1\text{TeV}$  では  $\ell g \rightarrow \tau g$  が特に重要

{	7.8倍 ( $E_\ell = 50\text{GeV}$ )
	1.8倍 ( $E_\ell = 500\text{GeV}$ )

# 断面積 ( $\ell p$ 衝突)

$$\sqrt{|\rho_{\ell\tau}|^2 + |\rho_{\tau\ell}|^2} < 2.4 \times 10^{-3}$$



高エネルギーでは  $t\bar{t}$  のチャンネルが開いて、主要な寄与に

# 探索実験に向けて

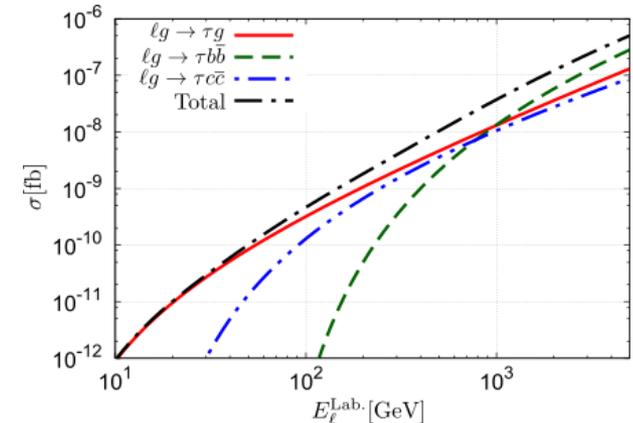
## 1. 固定ターゲット実験

1年に得られるイベント数  $N$

$$N \simeq 6 \times 10^{-16} \cdot N_\ell \left( \frac{\sigma}{1\text{fb}} \right) \left( \frac{T_m}{1\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}} \right)$$

$N_\ell$  : 年あたりに作られる  $\ell$  の数

$T_m$  : ターゲットの  $\text{cm}^2$  当たりの質量  $\sim 100\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$



$eN \rightarrow \tau X$

ILC (PWFA) :  $E_e = 500\text{GeV}$  (5TeV),  $N_e = 10^{22}/\text{year}$   $\Rightarrow \mathcal{O}(10)$  ( $\mathcal{O}(10^3)$ ) events/year

$\mu N \rightarrow \tau X$

neutrino factory :  $E_\mu = \mathcal{O}(100)\text{GeV}$ ,  $N_\mu = 10^{20}/\text{year}$   $\Rightarrow \mathcal{O}(10^{-1})$  events/year

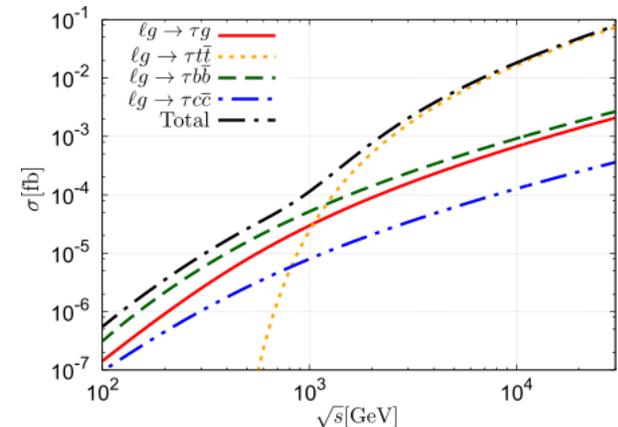
## 2. コライダー実験

$ep \rightarrow \tau X$

TLHeC (VHE-TLHeC) :  $\sqrt{s} \simeq 1.3(3.5)\text{TeV}$

ルミノシティ  $\simeq \mathcal{O}(10^3) \text{fb}^{-1}/\text{year}$

$\Rightarrow \mathcal{O}(100)$  events



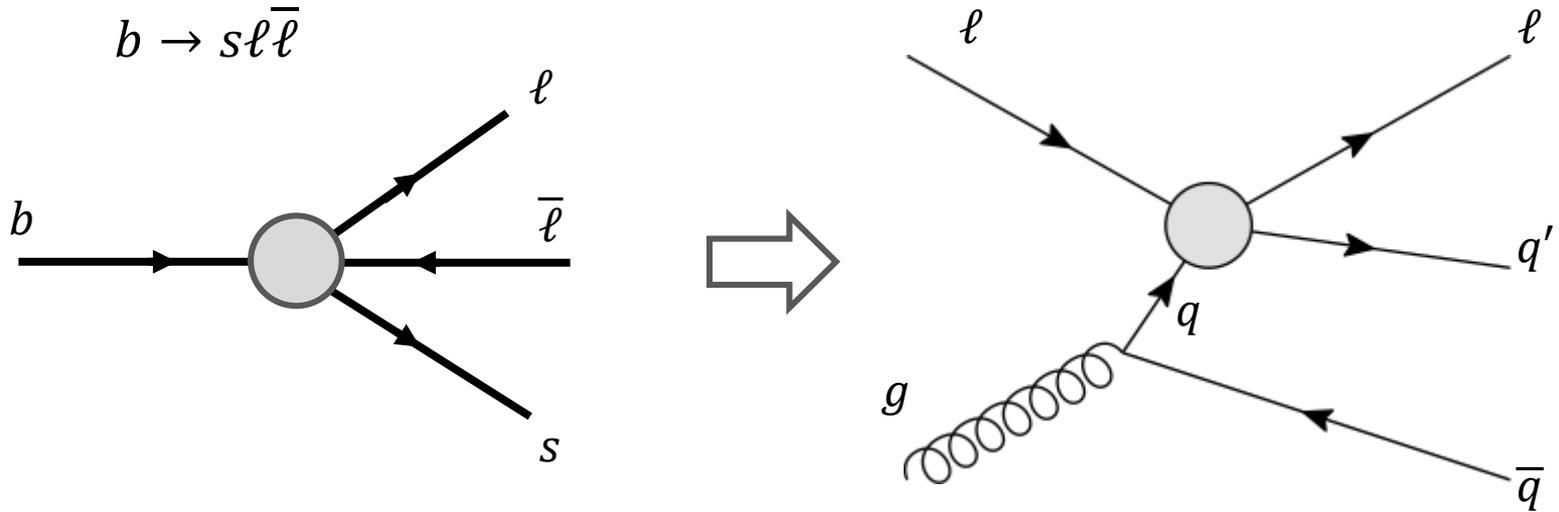
## 4. まとめ

# まとめ

- CLFVは新物理探索のための有力なprobe
  - higgsのLFV崩壊 ( $h \rightarrow \mu\tau$ ) があるとなれば  
他のCLFV探索でも見えるはず
  - 今回  $lN \rightarrow \tau X$  過程に注目
  - higgsが仲介するとなれば、核子中のgluonの寄与が重要
  - 終状態粒子の質量は重要な因子となるはず  
可能な限り質量を適切に取り扱える定式化によって評価
- 
- 新しく導入したグルーオン過程は  $E_\ell < 1\text{TeV}$  で重要
  - $eN \rightarrow \tau X$  は将来の実験での検証可能性あり  
( SMヒッグスLFVの場合  $\mu N \rightarrow \tau X$  は難しそう? )

# 発展

- $\ell N$  散乱による  $B \rightarrow K\ell\bar{\ell}$  anomaly 検証可能性について



詳細は 山中さんのポスター発表にて

“A crosscheck on the  $B$  to  $K^*\ell\bar{\ell}$  anomaly at lepton-nucleus scattering experiments”

(ポスターセッション2, 8/3)

**Ex. Backup**

# $eg \rightarrow \tau q \bar{q}$ と $eq \rightarrow \tau q$ の比較

