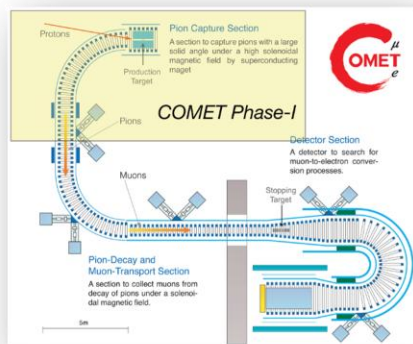


レプトン-核子散乱によるCLFV媒介 粒子とクォークの相互作用の検証

山中 真人 (広島工業大学)

Y. Kiyo, M. Takeuchi, Y. Uesaka and MY, PLB871, 140022 (2025)

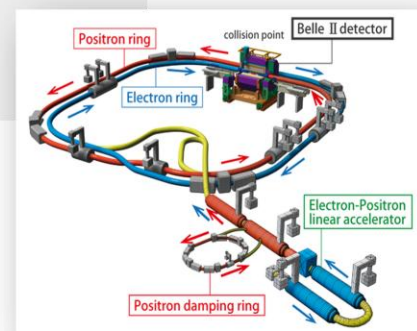
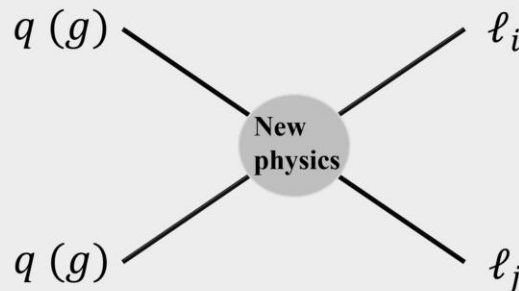
クォークやグルーオンを含むLFV反応の数々



$\mu^- \rightarrow e^-$ conversion

$$pp \rightarrow \ell_i \ell_j @ \text{LHC}$$

$$K \rightarrow \mu e, D \rightarrow \tau e, B \rightarrow \tau e, \dots$$



LFV媒介粒子の性質(質量、クォーク・グルーオンとの相互作用など)を検証

↓

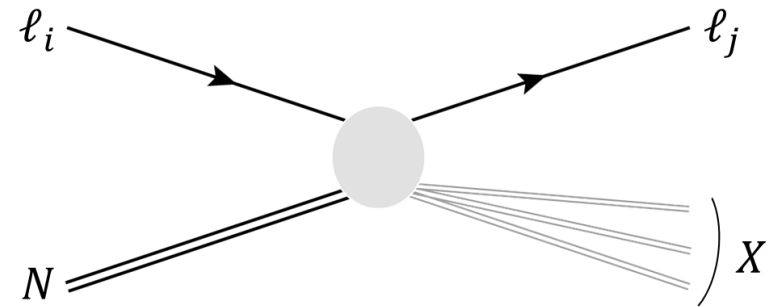
背後の素粒子模型を解き明かす大きな一歩!

レプトンフレーバー非保存非弾性散乱 (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

$$\ell_i + N \rightarrow \ell_j + X \quad (N: \text{核子})$$



- 複数の実験で探索・クロスチェック可能 (LHeC, ν -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_{ℓ_i}) $\times$ (核子数 $\propto$ mol数)
- LFV媒介粒子とクォーク(グルーオン)の相互作用に対し高精度探索!!

相互作用、LFV演算子

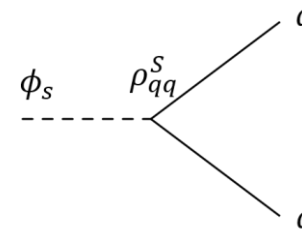
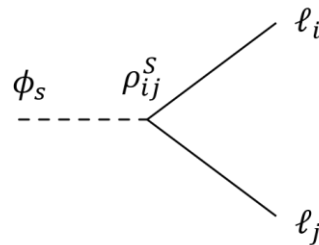
□ LFV媒介粒子：スカラー粒子

□ 考察シナリオ：媒介粒子が重いフェルミオンと主に相互作用

ヒッグス, KKゲージ粒子, フラボ
ン, R-parityが破れたスレプトン,
レプトクォーク, など

多くの模型・シナリオに応用可！

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



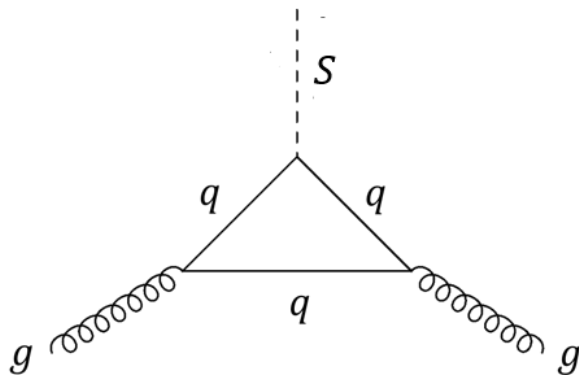
クォークとの相互作用 (フレーバー対角成分のみ)

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

B) 1種とのみ結合 例: $\rho_{bb}^S \neq 0, \rho_{cc}^S = \rho_{tt}^S = 0$

LFV媒介粒子とグルーオンの有効相互作用

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



$$g_{Sgg} = \sum_{q=c,b,t} \frac{\alpha_s \rho_{qq}^S}{8\pi m_q} \frac{4m_q^2}{q_S^2} \left[1 + \left(1 - \frac{4m_q^2}{q_S^2} \right) f\left(\frac{4m_q^2}{q_S^2} \right) \right]$$

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

$$\frac{4m_q^2}{q_S^2} \rightarrow -\infty \rightarrow \frac{2}{3}$$

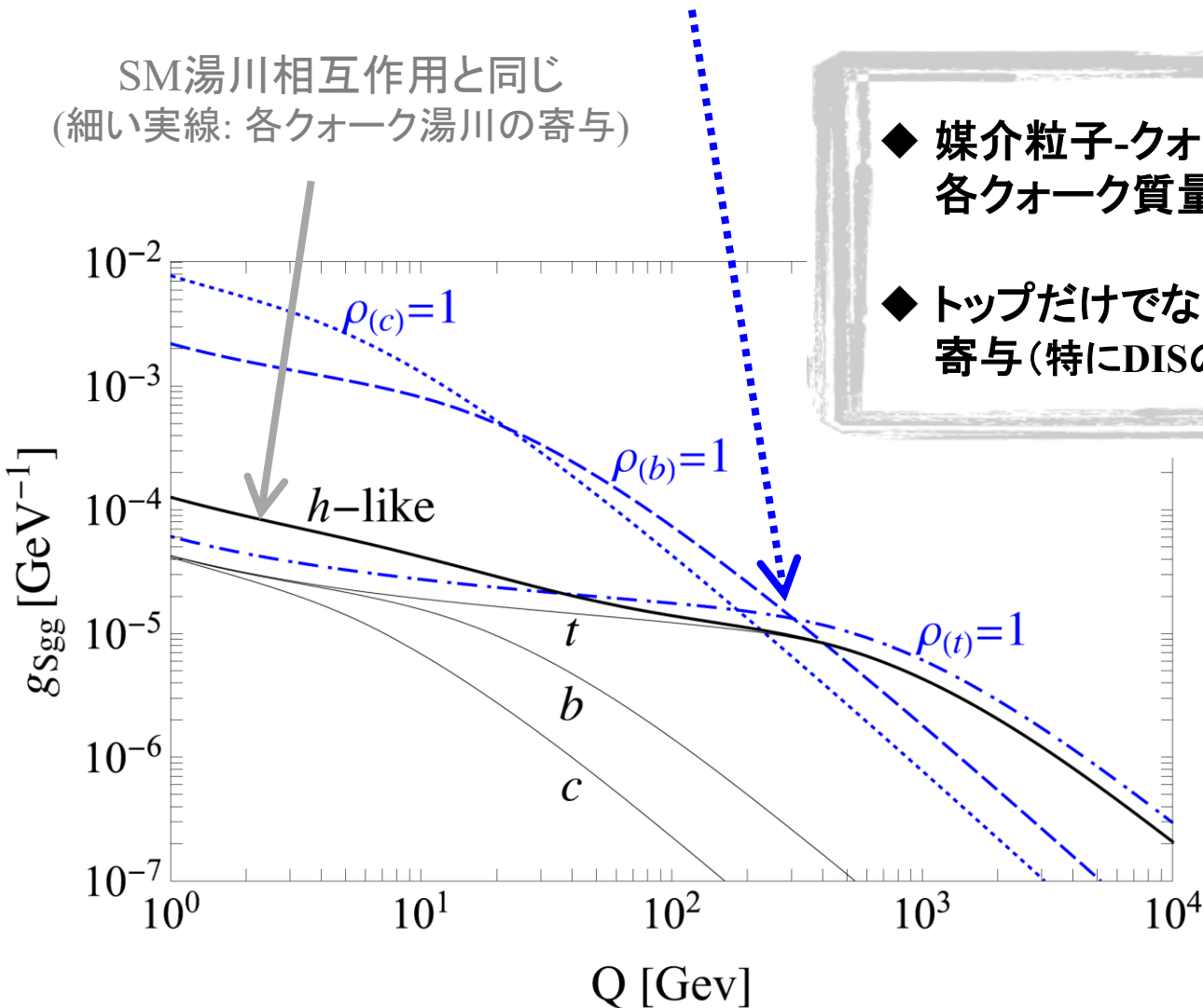
LHCでのヒッグス生成と同じ有効相互作用

ただ、LHCほどの高エネだと事実上の寄与はトップのみ

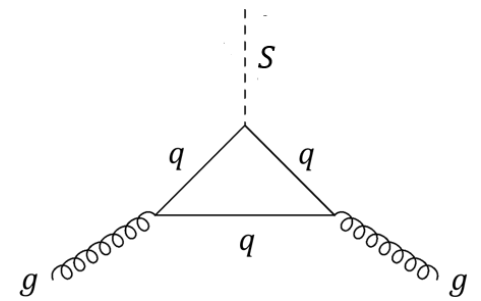
LFV媒介粒子とグルーオンの有効相互作用

青線: 1種のクォークにのみ結合というシナリオ

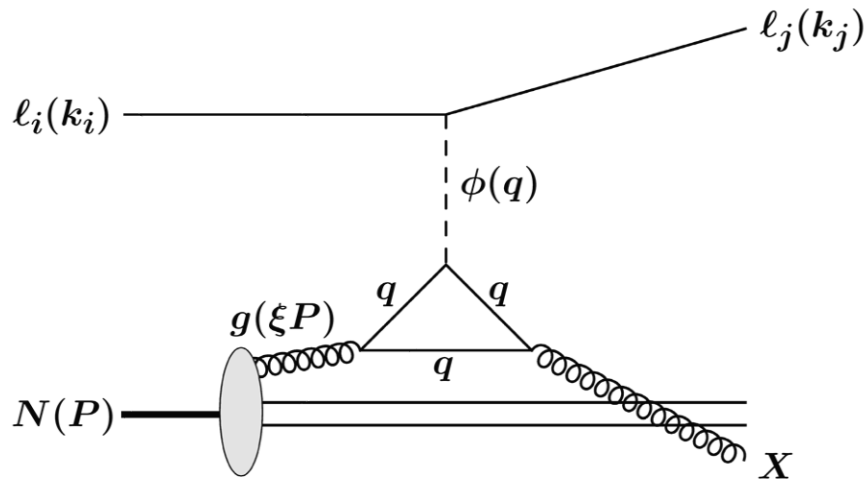
SM湯川相互作用と同じ
(細い実線: 各クォーク湯川の寄与)



- ◆ 媒介粒子-クォーク相互作用・移行運動量・各クォーク質量に強く依存
- ◆ トップだけでなく、チャーム・ボトムも大きな寄与 (特にDISの典型的移行運動量あたりで)



LFV-DIS断面積



- 運動量割合 $\xi = \frac{Q^2 + w^2}{Q^2} x$
- $\hat{X}$ の不変質量 w^2
- 移行運動量 $Q^2 = -q^2 = -(k_i - k_j)^2$

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

PDF ξ の関数！ x の関数に非ず！

各素過程の微分断面積

x : Bjorken変数

$$x = \frac{Q^2}{2P \cdot q}$$

y : 非弾性度

$$y = \frac{2P \cdot q}{2P \cdot p_i}$$

核子運動量 P

パートン運動量 p_i

両運動量の関係 $p_i = \xi P$

LFV媒介粒子とクォークの相互作用の種類を選別

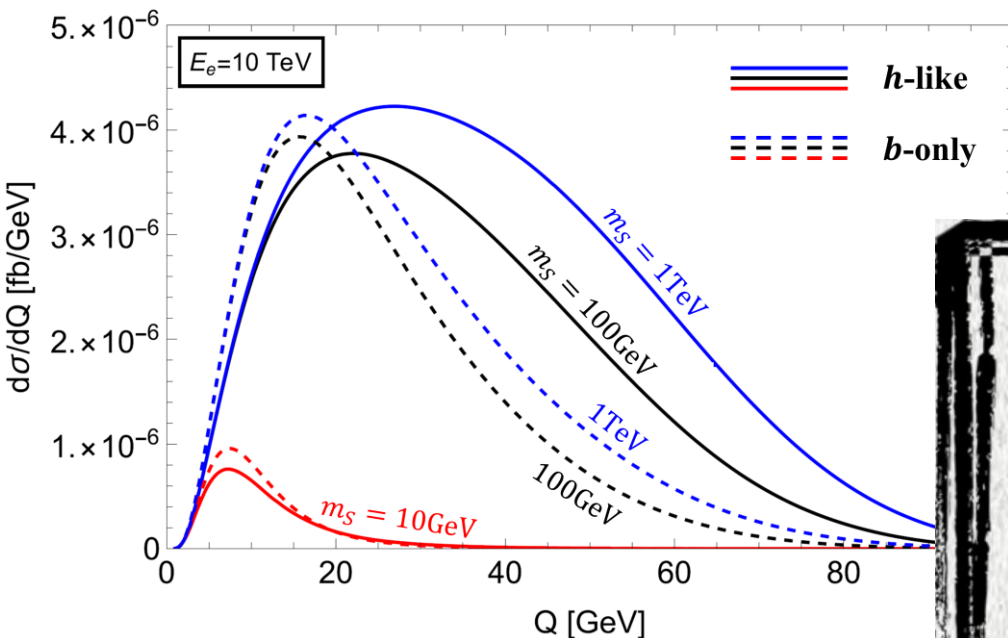
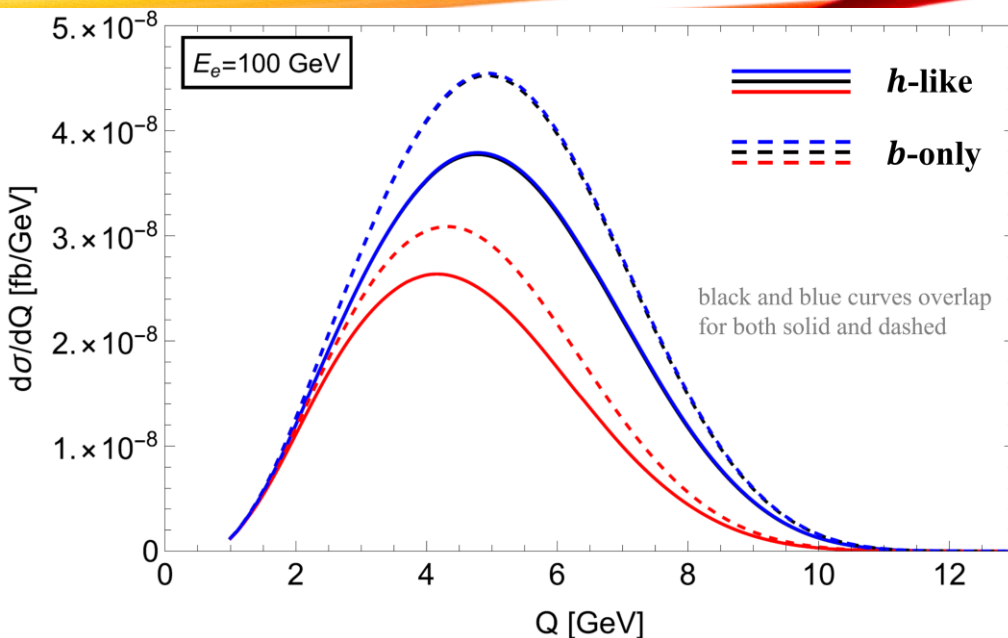
2つの相互作用の種類を選別に挑戦

h -like scenario

$$\rho_{qq}^S = m_q/v \quad (\text{SM Yukawa})$$

b -only scenario

$$\rho_{bb}^S \neq 0, \quad \rho_{cc}^S = \rho_{tt}^S = 0$$



「将来実験で $\text{BR}(\tau \rightarrow e\pi\pi) = 5 \times 10^{-10}$ が測定された」を仮定した結合定数で計算

素過程 $\ell_i g \rightarrow \ell_j g$ の微分断面積 $d\sigma/dQ$ を
 ビームエネルギー動かしながら測定

媒介粒子-クォーク相互作用の
 種類を精度良く選別可能！

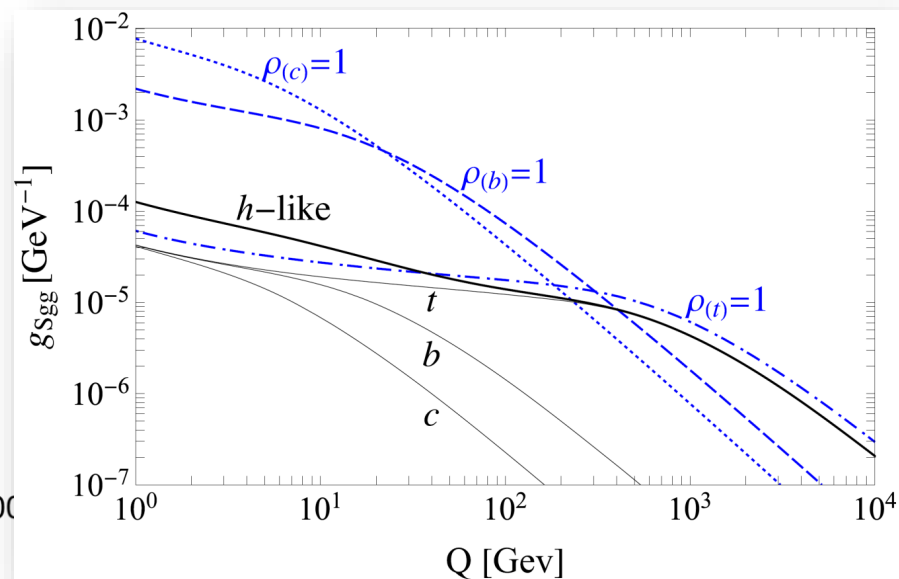
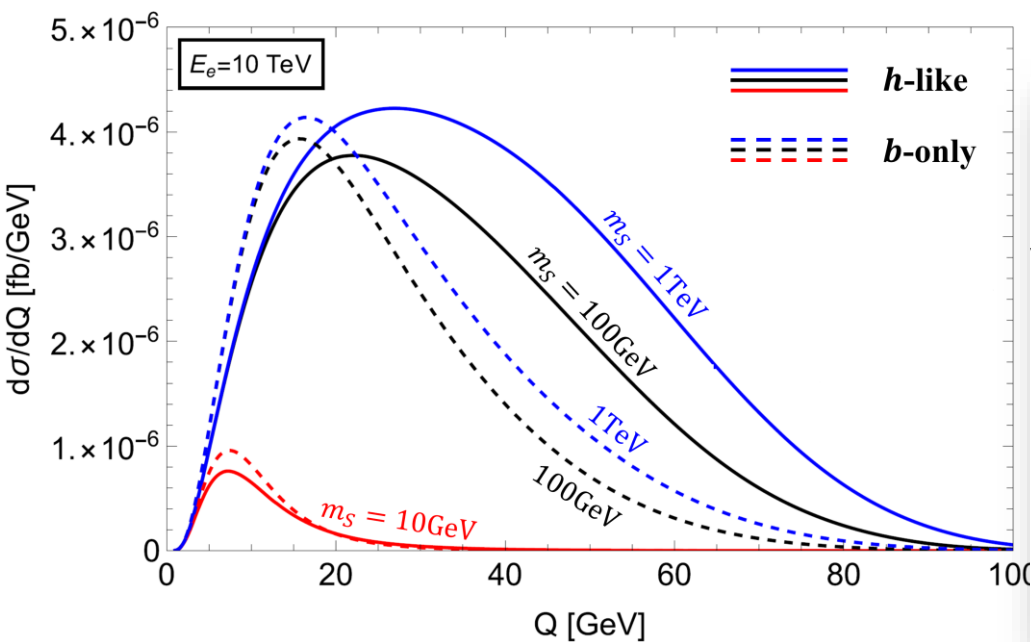
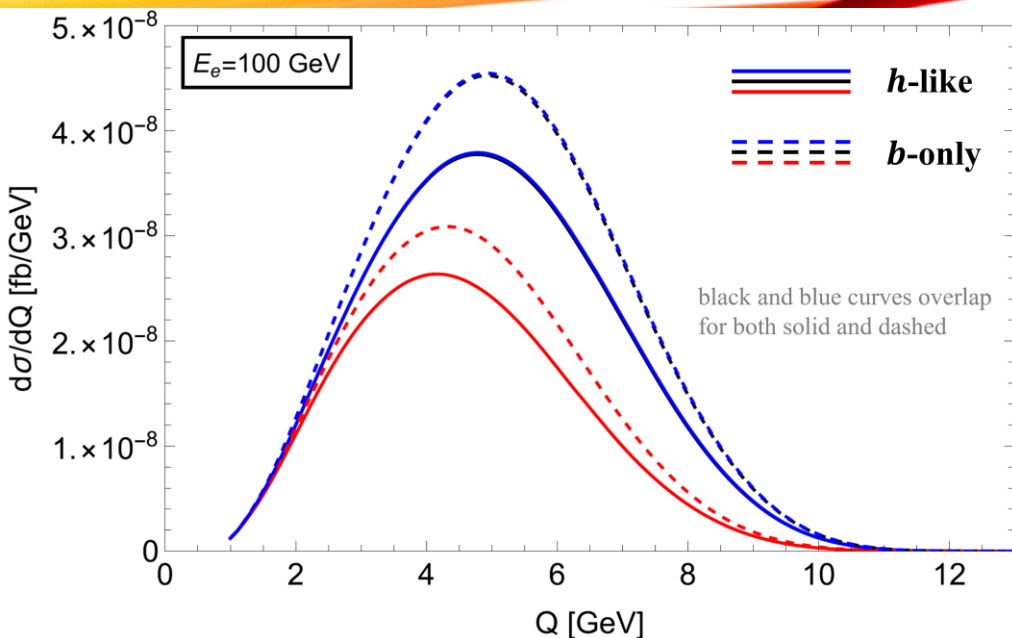
LFV媒介粒子とクォークの相互作用の種類を選別

選別にとって鍵となるポイント

$d\sigma/dQ$ のピーク位置の移動

有効結合定数 g_{Sgg} に対する各種クォークの寄与がどの程度の Q から落ちていくかに依存

(PDFと共に微分断面積を畳み込む際に
この Q 依存性が大きく影響)



LFV媒介粒子とクォークの相互作用の種類を選別

媒介粒子質量の決定にとって重要な鍵

m_S が小さい場合

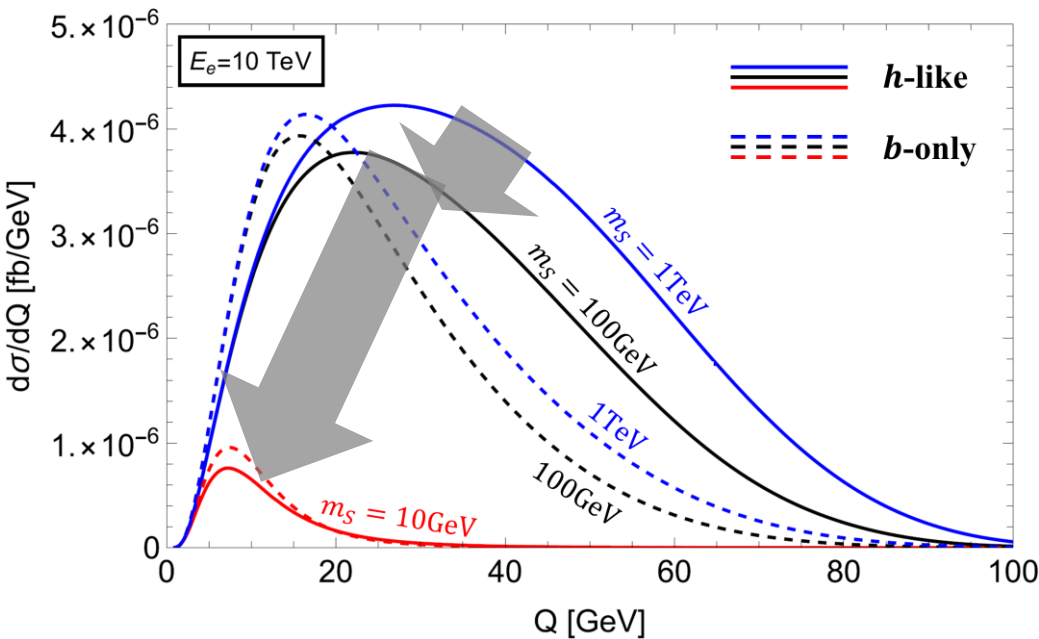
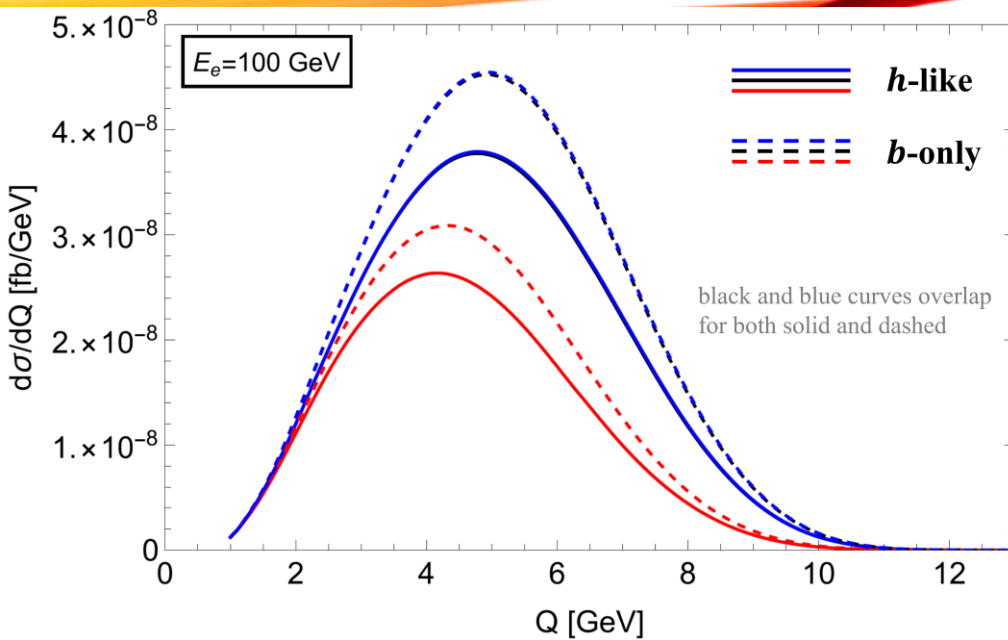
$d\sigma/dQ$ のピーク位置 ←

$d\sigma/dQ$ の大きさ ↓

m_S が小さいほど遷移振幅が小さな Q を好む。
 小さな Q だけで畳み込む時、小 Q で落ちていくチャームが十分に寄与できず断面積減。

m_S が大きくなってくると遷移振幅が Q の選り好みをしなくなり、畳み込みの際にトップ・ボトム
 の寄与を十分に拾える。

(有効結合定数 g_{Sgg} の Q 依存性を参照)

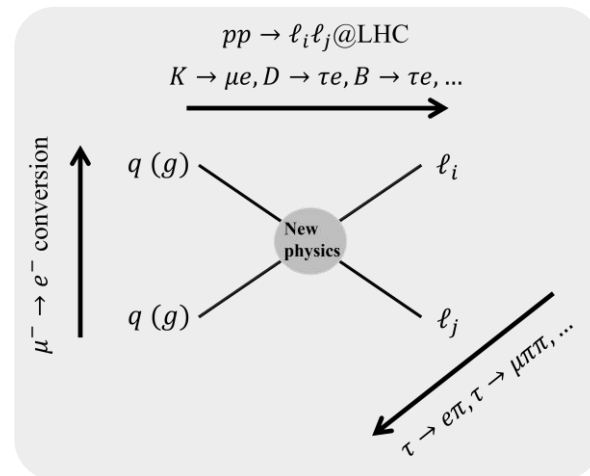
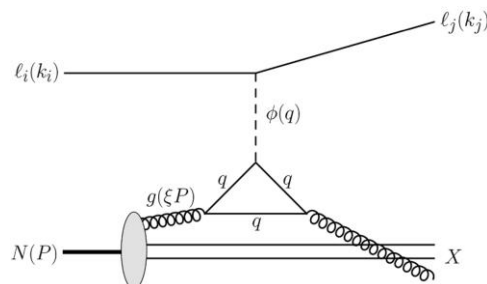


まとめ

Lepton Flavor Violation (LFV)

新物理の証拠であり、かつ、そのフレーバー構造が炙り出される現象

重要な課題: LFV媒介粒子とクォーク(グルーオン)の相互作用をどう説明?



レプトンフレーバー非保存深非弾性散乱 (LFV-DIS)

媒介粒子とクォーク(グルーオン)の相互作用を調べるうえで信頼度・期待度の高いプローブ

鍵: 媒介粒子とグルーオンの有効結合定数

素過程 $\ell_i g \rightarrow \ell_j g$ の微分断面積 $d\sigma/dQ$ をビームエネルギー動かしながら精密測定するべし!

