

LFV-DIS via scalar exchange

山中 真人 (南部陽一郎物理学研究所, 大阪市立大学)



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

Y. Kiyo, M. Takeuchi, Y. Uesaka and MY, arXiv:2107.10840

Y. Kiyo, M. Takeuchi, Y. Uesaka and MY, arXiv:2110.XXXXX

レプトンフレーバーの破れ (LFV)

粒子種	質量	レプトン数
電子 e	511 keV	電子数 +1
ミューオン μ	105 MeV	ミューオン数 +1
タウ粒子 τ	1.777 GeV	タウ数 +1
電子ニュートリノ ν_e	< 0.17 eV	電子数 +1
ミューニュートリノ ν_μ	< 0.17 eV	ミューオン数 +1
タウニュートリノ ν_τ	< 0.17 eV	タウ数 +1

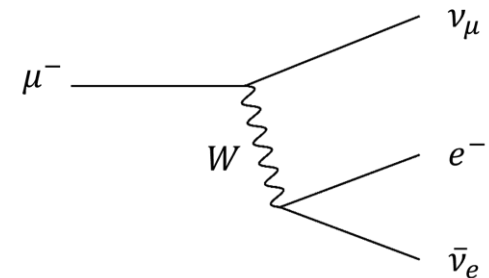
反粒子のレプトン数は逆符号。例えば、陽電子の電子数は -1 。

標準理論： 各反応でレプトンフレーバーが必ず保存

レプトンフレーバー非保存反応

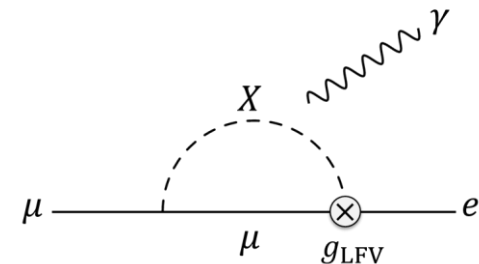
= 標準理論を超える模型の動かぬ証拠！

例: ミューオン崩壊 in 標準理論



$$\begin{array}{llll}
 \text{ミューオン数} & +1 & \rightarrow & +1 \\
 \text{電子数} & 0 & \rightarrow & (+1) + (-1)
 \end{array}$$

例: ミューオン崩壊 in 未知模型



$$\begin{array}{llll}
 \text{ミューオン数} & +1 & \rightarrow & 0 \\
 \text{電子数} & 0 & \rightarrow & +1
 \end{array}$$

レプトンフレーバーの破れ (LFV)

LFVの源をどうやって特定？

反応の中間状態に入る“未知”を間接的に検証

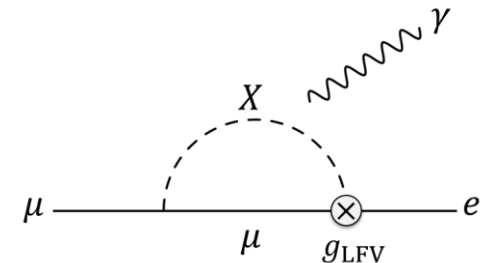
具体的に不可欠なものは？

1. 多角的に“未知”を描き出すため多くの反応

- ◆ $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$
- ◆ $\mu^- \rightarrow e^-$ conversion in nuclei
- ◆ $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$ in muonic atom
- ◆ $\tau \rightarrow 3\mu, \tau \rightarrow e\pi\pi, \tau \rightarrow \mu\gamma, \dots$
- ◆ $pp \rightarrow e\mu (e\tau, \mu\tau)$ などなど

2. LFVパラメーターと観測量の正確な接続

- ◆ LFV媒介粒子がもたらす有効演算子
- ◆ 各有効演算子に伴う特徴的兆候
- ◆ 実験舞台依存性 などなど

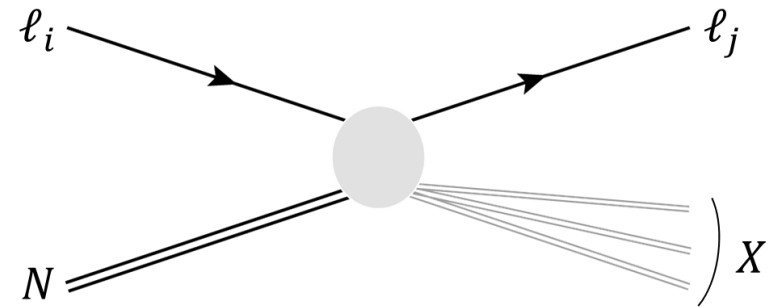


レプトンフレイバー非保存非弾性散乱 (LFV-DIS)

LFV検証にとって優れたプローブ

レプトンフレイバー非保存非弾性散乱

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

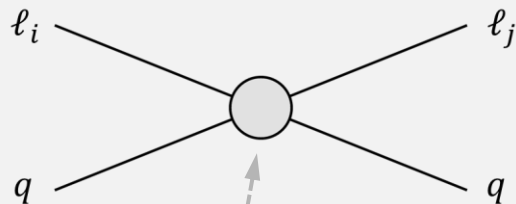


- 複数の実験で探索・クロスチェック可能 (LHeC, ν -factory, ILC, など)
- タウハドロニックLFV ($\tau \rightarrow e\pi\pi$ 等)やLHCでの探索($pp \rightarrow \mu\tau$ 等)と相補的
- 偏極ビームを用いて、LFV演算子の左右度合を精査可能
- イベント数が多大@固定標的実験: イベント数 $\propto$ (ビーム強度 N_{ℓ_i}) $\times$ (核子数 $\propto$ mol数)

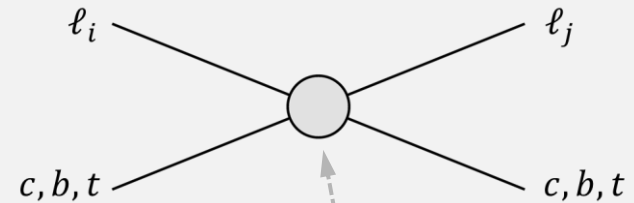
レプトンフレーバー非保存非弾性散乱 (LFV-DIS)

Universal

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

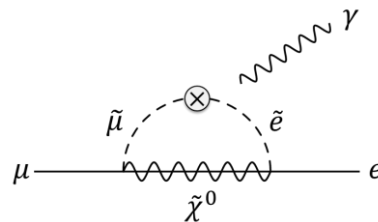


Non-Universal



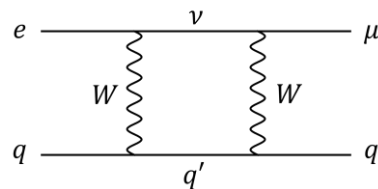
フォトン双極子型

(SUSY, タイプIIシーソー模型など)



ボックス型

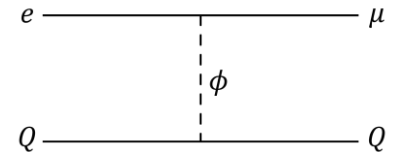
(ステライルニュートリノ模型など)



などなど

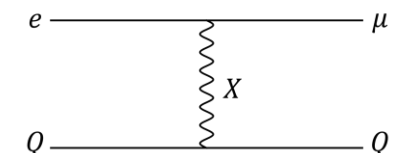
ヒッグスLFV

(拡張ヒッグス模型など)



大質量ゲージボソン

(余剰次元模型, フレーバー対称性模型など)

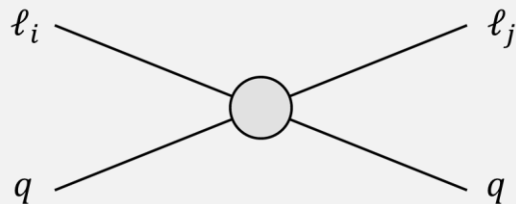


などなど

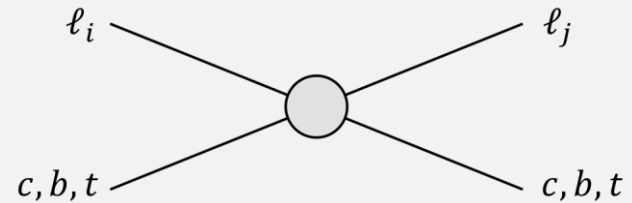
レプトンフレーバー非保存非弾性散乱 (LFV-DIS)

Universal

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



Non-Universal



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

アップ(ダウン)のPDF

質量0の荷クォークを素過程に入れて、お馴染みの方法で計算

x : Bjorken変数

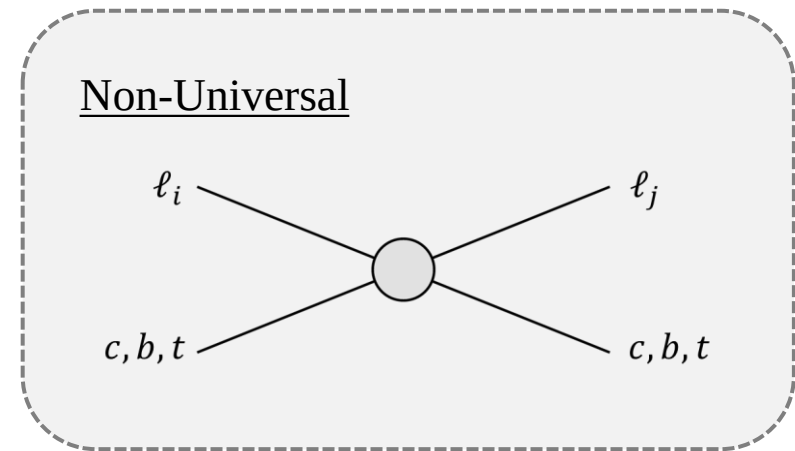
y : 散乱の弾性度合

S. Gninenko, M. Kirsanov, et al, MPLA (2002),
M. Sher, I. Turan, PRD (2004),
A. Abada, V. Romeri, A. Teixeira, JHEP (2016),
and so on

レプトンフレイバー非保存非弾性散乱 (LFV-DIS)

概要

1. 導入
2. 相互作用、LFV演算子
3. 断面積定式化
4. 数値結果
5. まとめ



核子内に c, b, t はいない $\Longrightarrow$ $eN \rightarrow \tau X$ の素過程は？

c, b, t と LFV 媒介粒子が相互作用 $\Longrightarrow$ c, b, t がもたらす LFV 演算子は？

c, b, t は核子に比べ大きな質量 $\Longrightarrow$ c, b, t 質量の影響を取り込む術は？

これらを加味すると、特徴的兆候は？

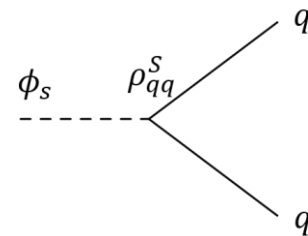
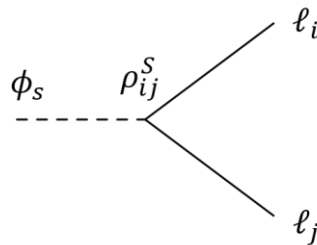
相互作用、LFV演算子

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!

- LFV媒介粒子 : スカラー粒子 or 擬スカラー粒子
- 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

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



クォークとの相互作用 (フレーバー対角成分のみ)

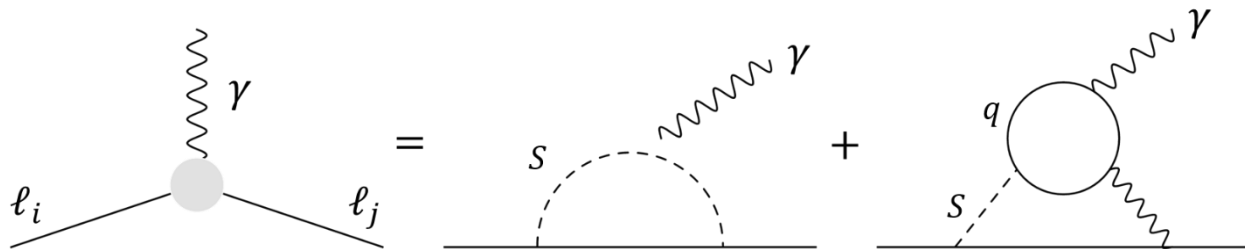
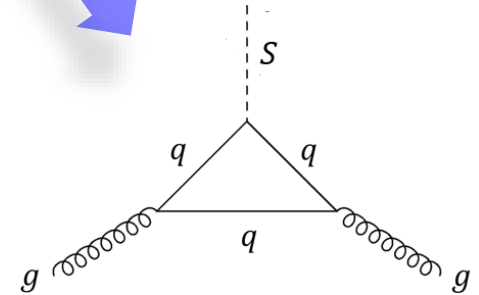
A) 質量に比例 $\rho_{cc}^S : \rho_{bb}^S : \rho_{tt}^S = m_c : m_b : m_t$

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

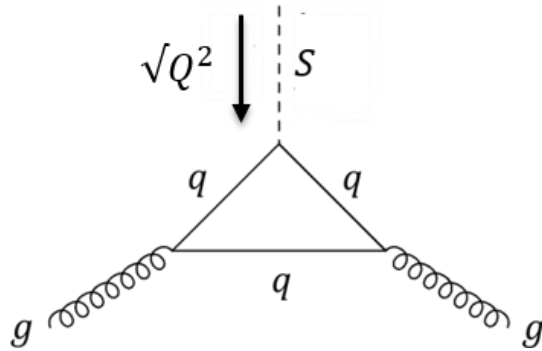
相互作用、LFV演算子

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

フェルミオンとの相互作用から
2種類のLFV有効相互作用



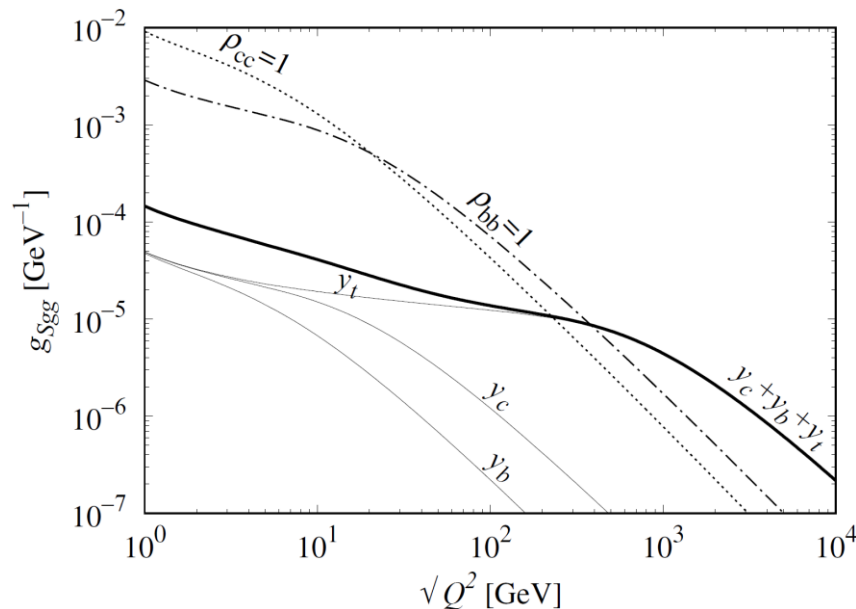
相互作用、LFV演算子



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

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

$$f(\tau_q) = -\frac{1}{4} \log^2 \left[-\frac{1 + \sqrt{1 - \tau_q}}{1 - \sqrt{1 - \tau_q}} \right] \quad \left(\tau_q = \frac{4m_q^2}{q^2} < 0 \right)$$

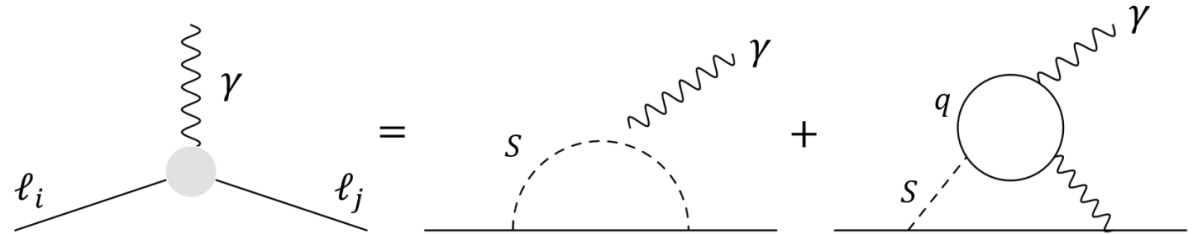


観測量からLFVの情報を精確に抜き出すため、
丁寧に計算

- ◆ 強い移行運動量依存性
- ◆ 媒介粒子-クォーク相互作用型への依存性
- ◆ トップだけでなく、ボトムやチャームも大きな寄与

LHCでのヒッグス生成にはトップの寄与が圧倒的

相互作用、LFV演算子



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

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

e.g. coefficients in 2HDM as a function of scalar mass

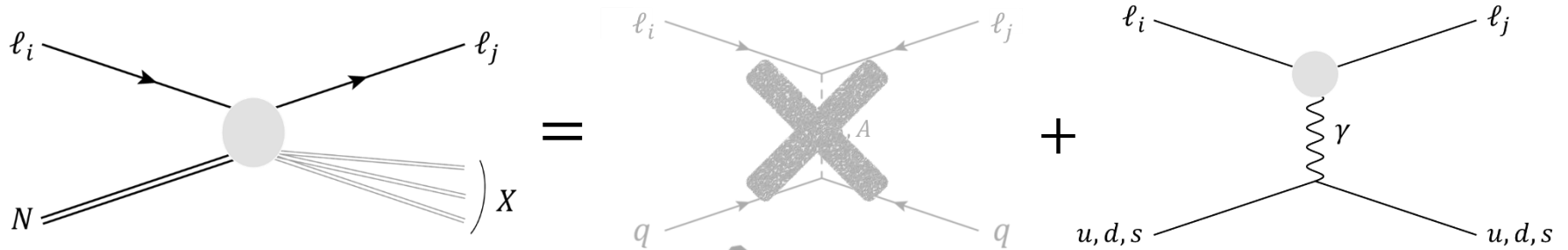
m_ϕ [GeV]	125	200	300	400	500
$10^3 \times \tilde{A}_1^f(r_{\tau/\phi})$	2.0025	0.8872	0.4345	0.2605	0.1747
$10^3 \times \tilde{A}_2^{t,H}(r_{t/\phi})$	6.2431	4.6631	3.4720	2.7435	2.2504
$10^3 \times \tilde{A}_2^{t,A}(r_{t/\phi})$	8.9039	6.5746	4.8361	3.7840	3.0785
$10^3 \times \tilde{A}_2^{b,H}(r_{b/\phi})$	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

媒介粒子の質量や真空期待値を持つか否かに応じ、有効結合定数は大きく変動

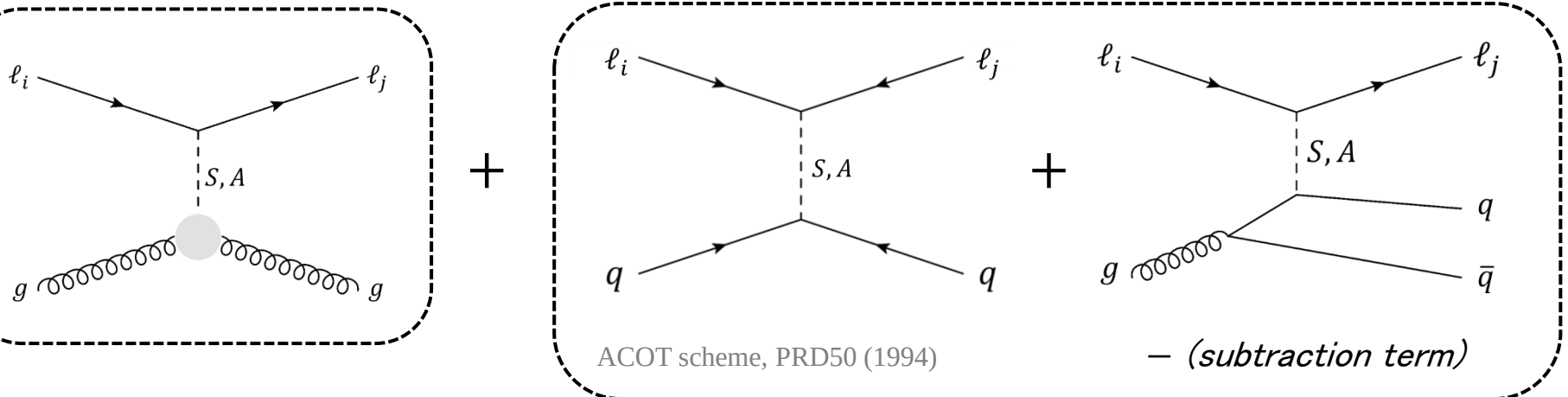
この演算子を介したイベント数の測定は
模型やシナリオ判別に有効

LFV-DIS断面積

グルーオンとの有効相互作用やクォーク数の保存を考慮すると、素過程は、

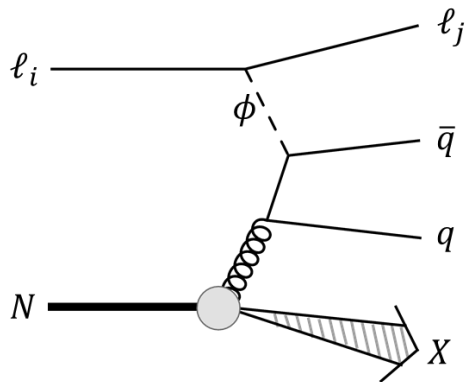


既存の考え方を更改



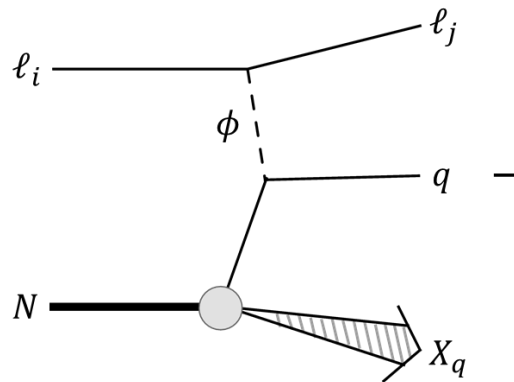
ACOT scheme

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

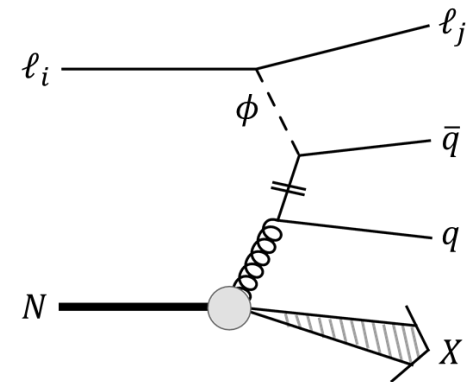


Scheme with $m_q \neq 0$

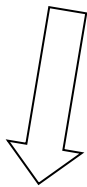
+



Scheme with $m_q = 0$



Subtraction contribution
to cancel double counting



c, b, t 生成を伴う素過程@low Q^2

クォーク数保存より、これが
最低次の反応過程

振幅 $\propto \ln(Q^2/m_q^2)$



c, b, t 生成を伴う素過程@high Q^2

$Q^2 \gg m_q^2$ 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

クォーク数保存やクォーク
質量を正しく取り込みなが
ら、DIS過程を記述可能

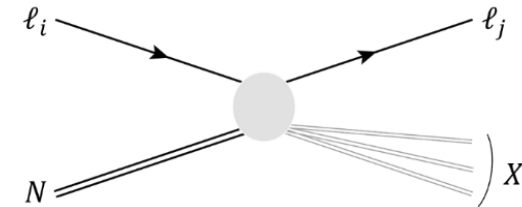
ACOT処方と共にスカラー
カレントに対する構造関数
を導出 arXiv:2107.10840

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 $w^2 = (p_q + p_{q'})^2$

移行運動量 $Q^2 = -q^2 = -(p_i - p_j)^2$



PDF ξ の関数！ x の関数に非ず！

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

各素過程の微分断面積（前頁、前々頁）

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

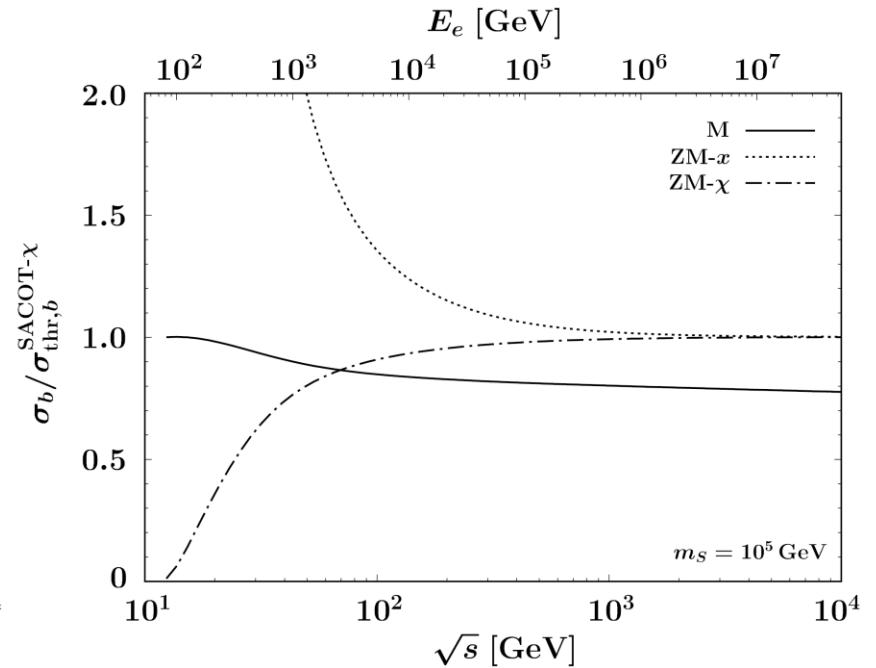
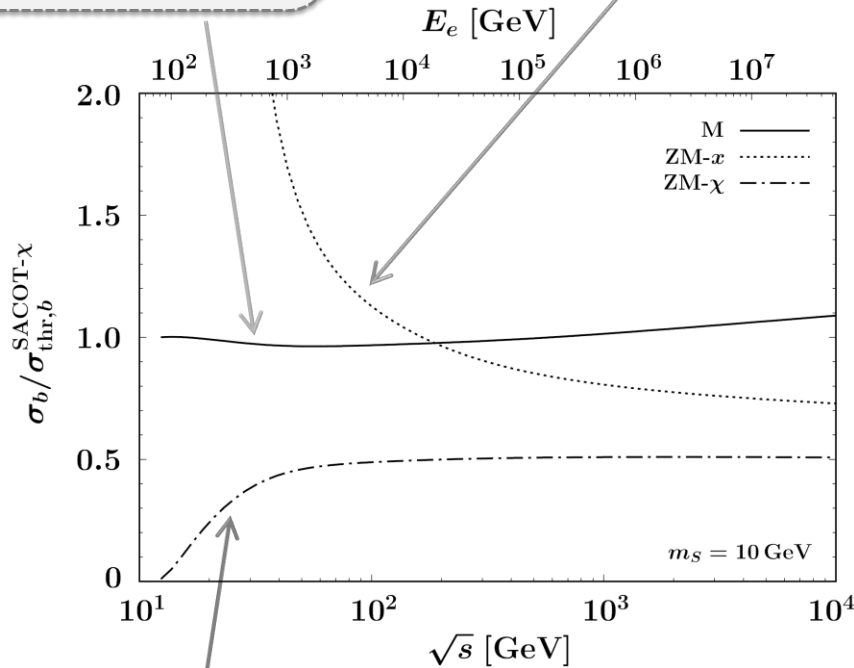
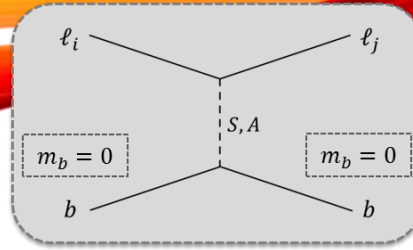
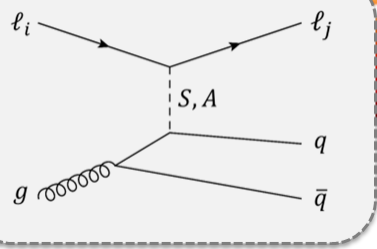
y : 非弾性度 $y = \frac{2P \cdot q}{2P \cdot k_i}$

核子運動量 P

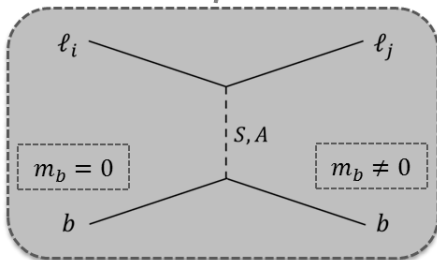
パートン運動量 k_i

両運動量の関係 $k_i = \xi P$

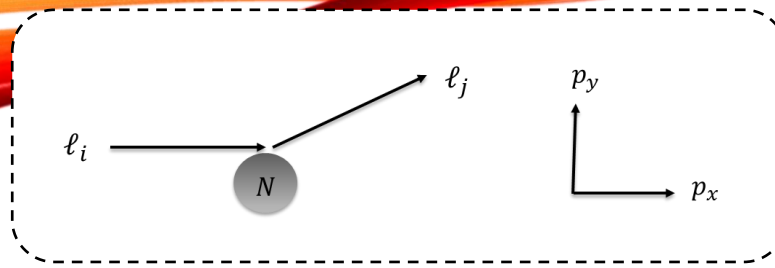
断面積の処方依存性



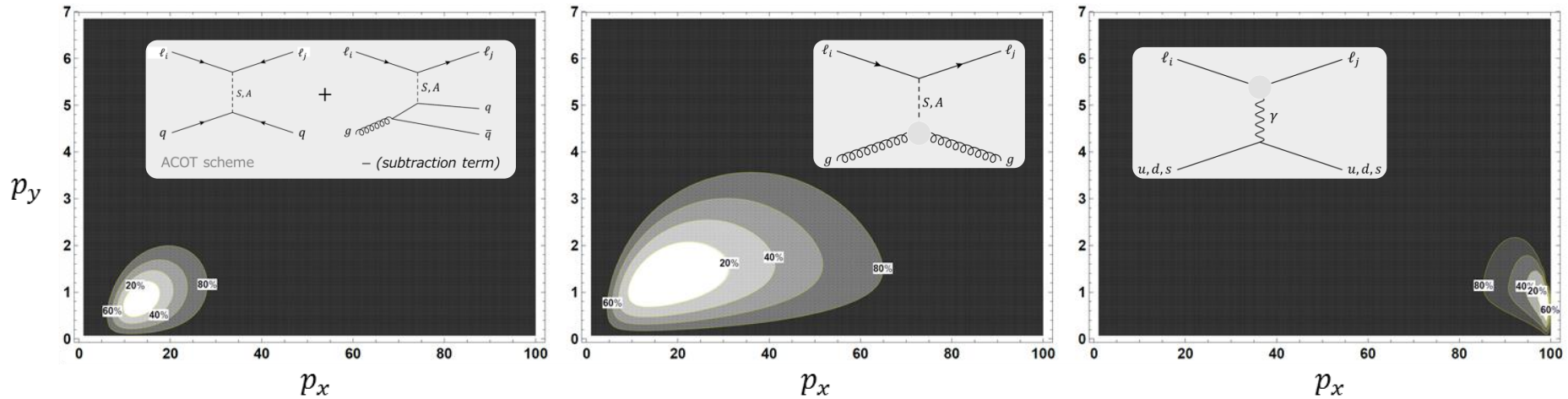
- ◆ $m_b = 0$ の処方**は**ボトム生成閾値の遥か上で有効
- ◆ 次(次々)世代実験のエネルギーであれば素過程 $\ell_i g \rightarrow \ell_j b \bar{b}$ でまあまあ精度良く記述可
- ◆ 媒介粒子質量の情報を正しく読み取るためにもLFV-DIS解析にACOT処方**は**不可欠



運動量分布

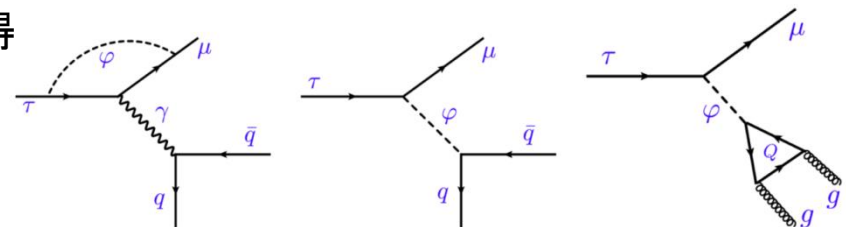


Beam energy = 100 GeV, $m_S = 10$ GeV

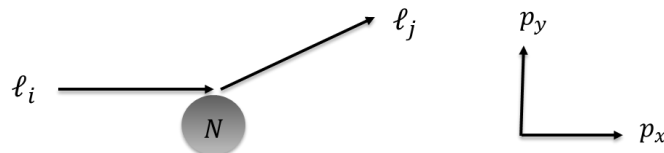


- ◆ 各素過程で全く異なる終状態運動量分布
- ◆ 媒介粒子とクォーク/グルーオン/光子との相互作用に感度抜群のプロープ
- ◆ τ LFV崩壊と組み合わせて多量の情報取得

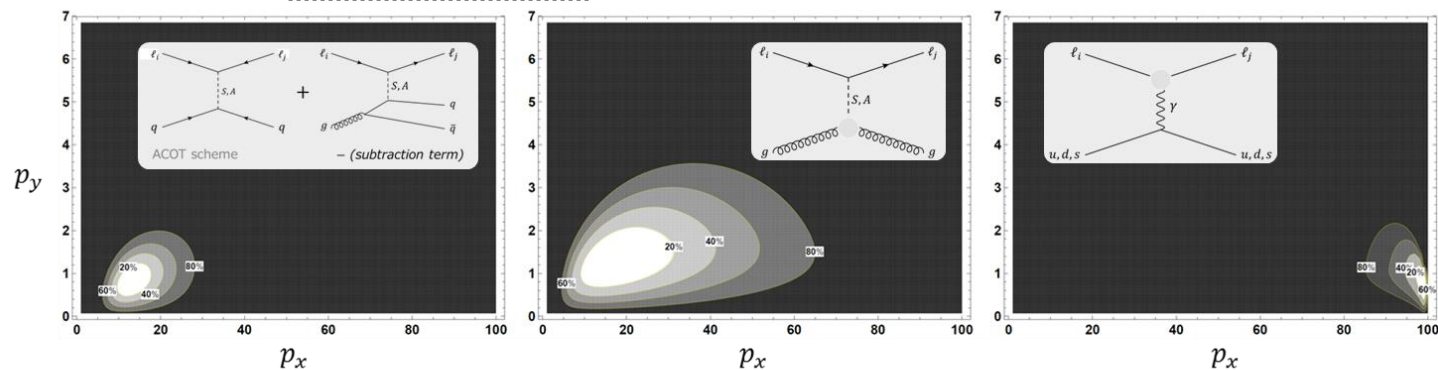
A. Celis, V. Cirigliano, E. Passemar, PRD89 (2014)
T. Husek, K. Monsalvez-Pozo, J. Portoles, JHEP01 (2021)



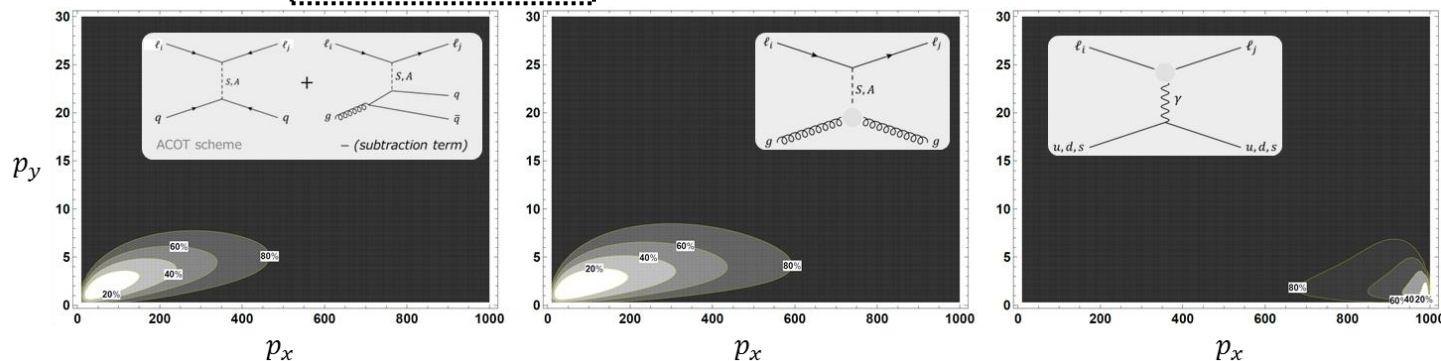
運動量分布



媒介粒子質量 10GeV; ビームエネルギー 100GeV



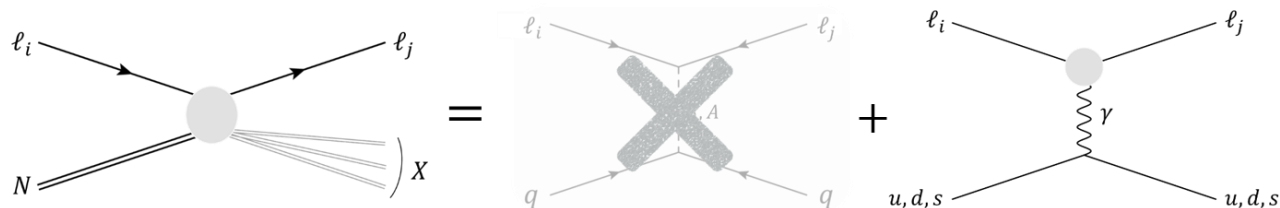
媒介粒子質量 10GeV; ビームエネルギー 1TeV



b 生成がたやすくなり、 τ 運動量分布が g 生成と似たような振舞い

相互作用情報を抜き取るためには、エネルギー高過ぎてもあまり得は無い

まとめ



□ **LFV-DIS** -- LFV検証に有効、複数の実験計画

□ **c, b, t と主に相互作用するLFV媒介粒子**

- 理論的・実験的動機を基に様々なシナリオ
- グルーオンや光子とLFV有効相互作用

□ **LFV-DIS断面積**

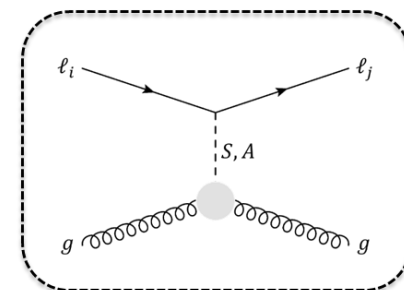
- ACOT処方でクォーク数や質量を正しく加味
- クォーク質量やグルーオン演算子により大きく変動
- 各素過程が特徴的運動量分布

□ **展望**

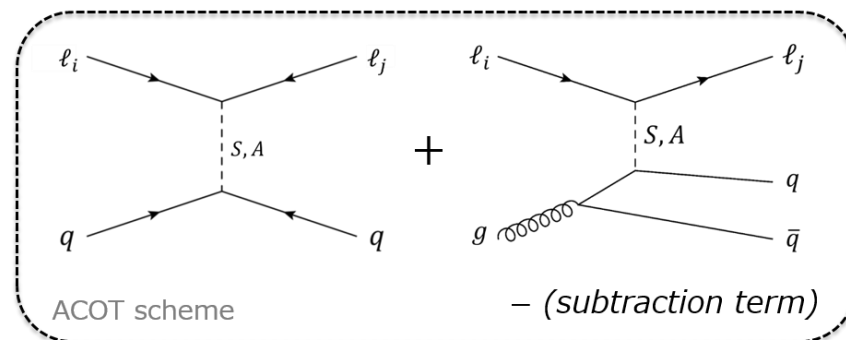
- 他のLFV過程との相関を検討
- 検出効率等を含め、将来実験における感度を考察



Improved handling



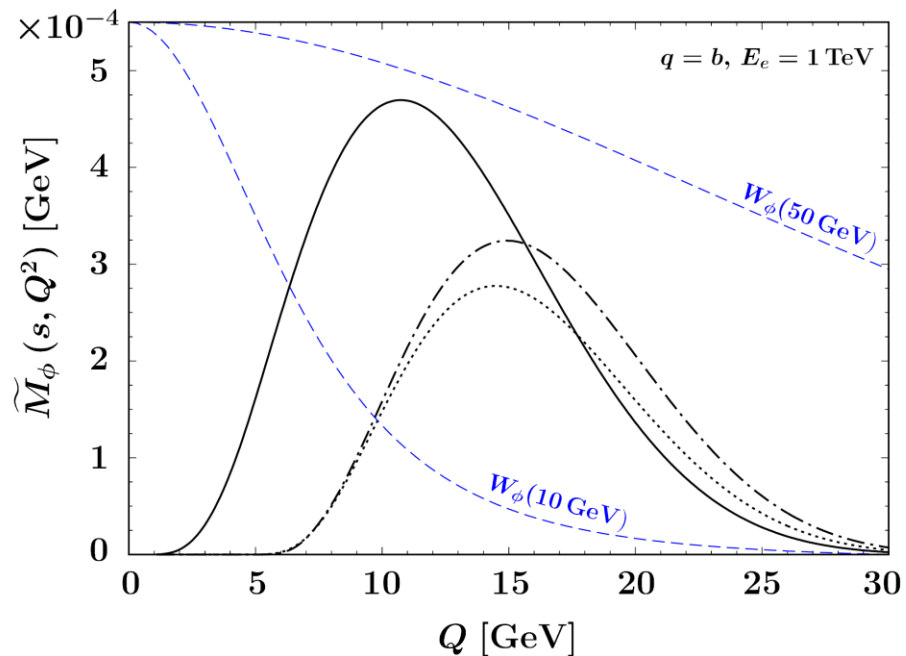
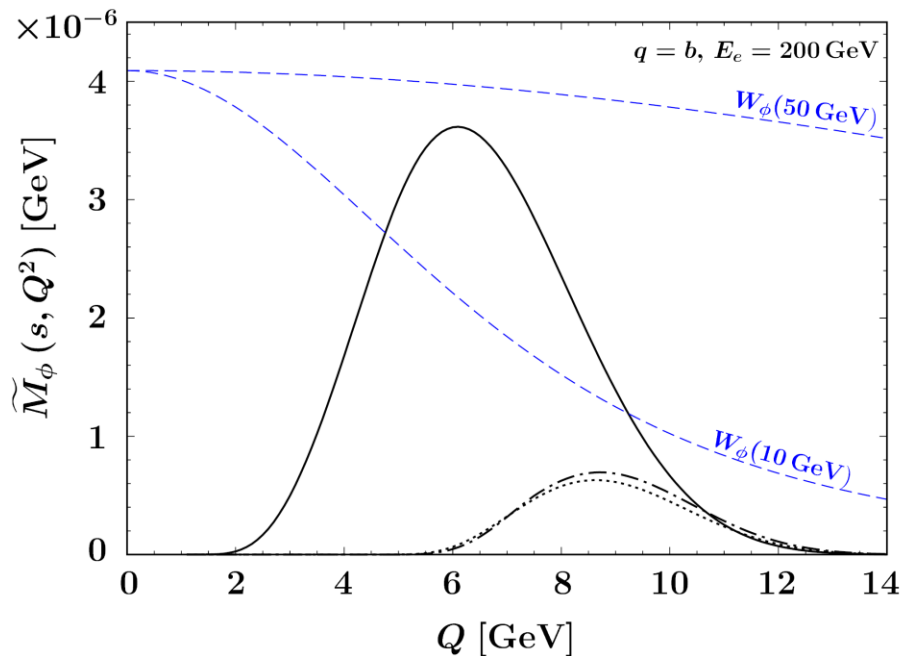
+





Backup slides

媒介粒子質量依存性の理解



M —————

ZM- χ (thr) - · - · - ·

M0- χ (thr) ·······

$$\frac{d\sigma}{dQ} = \frac{1}{m_\phi^4} W_\phi(m_\phi^2, Q^2) \widetilde{M}_\phi(s, Q^2)$$

$$\widetilde{M}_\phi(s, Q^2) = \frac{(Q^2)^{\frac{3}{2}} (Q^2 + m_\tau^2)}{8\pi s^2} M_\phi(s, Q^2)$$

$$W_\phi(m_\phi^2, Q^2) = \left(\frac{m_\phi^2}{Q^2 + m_\phi^2} \right)^2$$