

$D_s^+ \rightarrow \tau^+ \nu, \mu^+ \nu$ の長距離QED補正と $|V_{cs}|$ への影響

宮本 隼 (B4) Collaborators: 佐々木 鈺太 (B4) 北原 鉄平 (千葉大学)
Flavor Physics Workshop 2024

Abstract:

「標準模型のUnitarityが破れている」可能性が報告された。
長距離補正を含めた正しい補正を与えることにより、Unitarityの破れが本当にあるのか?を検証する。

1 Introduction

Sirlin factor (α_e の短距離補正) によりCKM行列のUnitarityが破れる(佐々木)

Bremsstrahlung を含む α_e の長距離補正(低運動量) を考慮するべき

$$\Gamma_{\text{tree}} = \frac{G_F^2 |V_{cs}|^2 f_{D_s}^2 m_l^2}{8\pi} \left(1 - \frac{m_l^2}{m_{D_s}^2}\right)^2$$

低運動量の補正なので $D_s^+ \rightarrow l^+ \nu$ の有効理論で考える

$$\Gamma_{\text{total}} = \Gamma_{\text{tree}} \times \left(1 + \frac{\alpha_e}{2\pi} \left[\text{(sirlin factor)} + \text{(長距離補正)} \right] + \mathcal{O}(\alpha_e^2)\right)$$

負のとき $|V_{cs}|$ は大きくなる(Sirlin factorは正)

Approach

- ① 長距離補正に現れる, 赤外発散 (IR) がcancelすることを確認する
- ② V_{cs} の E_{max} (解析において無視されるphotonのエネルギー最大値) 依存性を求める
- ③ BESIIIの解析のcut条件と E_{max} を対応させる
- ④ Unitarityの破れの回復を確認する

2 Vertex correction



$$r = \frac{m_l^2}{m_{D_s}^2}$$

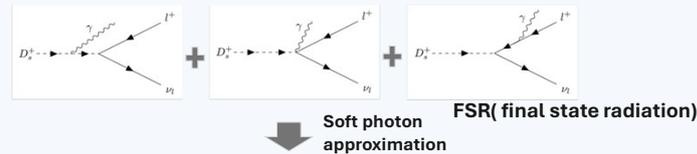
$$\frac{\Gamma_{\text{(virtual,a)}}}{\Gamma_{\text{tree}}} = \frac{\alpha_e}{2\pi} \left[\underbrace{\frac{5}{2} \left(\frac{1}{\epsilon} + \ln \frac{\mu^2}{m_{D_s}^2} \right)}_{\text{UV}} + \underbrace{\frac{1+r}{1-r} \ln r \ln \left(\frac{m_{D_s}^2}{m_\gamma^2} \right)}_{\text{IR}} + \frac{11}{2} - \frac{2}{1-r} \ln r + \frac{1+r}{2(1-r)} \ln^2 r \right]$$

$$\frac{\Gamma_{\text{(virtual,b)}}}{\Gamma_{\text{tree}}} = \frac{\alpha_e}{2\pi} \left[\underbrace{-\frac{3}{2} \left(\frac{1}{\epsilon} + \ln \frac{\mu^2}{m_{D_s}^2} \right)}_{\text{UV}} - \frac{7}{2} \right]$$

$$\frac{\Gamma_{\text{(virtual,c)}}}{\Gamma_{\text{tree}}} = \frac{\alpha_e}{2\pi} \left[\underbrace{-3 \left(\frac{1}{\epsilon} + \ln \frac{\mu^2}{m_{D_s}^2} \right)}_{\text{UV}} + 3 \ln r - 4 \right]$$

$$\frac{\Gamma_{\text{virtual}}}{\Gamma_{\text{tree}}} = \frac{\alpha_e}{2\pi} \left[\underbrace{-2 \left(\frac{1}{\epsilon} + \ln \frac{\mu^2}{m_{D_s}^2} \right)}_{\text{UV}} + \underbrace{\frac{1+r}{1-r} \ln r \ln \left(\frac{m_{D_s}^2}{m_\gamma^2} \right)}_{\text{IR}} - 2 + \left(3 - \frac{2}{1-r} \right) \ln r + \frac{1+r}{2(1-r)} \ln^2 r \right]$$

3 Real photon emission



$$\frac{\Gamma_{\text{real}}}{\Gamma_{\text{tree}}} = \frac{\alpha_e}{2\pi} \left[\underbrace{\left(-2 - \frac{1+r}{1-r} \ln r \right) \ln \left(\frac{E_{\text{max}}^2}{m_\gamma^2} \right)}_{\text{IR}} + f(r) \right]$$

$$f(r) = -4 \ln 2 - \frac{1+r}{1-r} \left[(1+2 \ln 2) \ln r + \frac{1}{2} \ln^2 r - \ln r \ln(1+r) \right] + \text{Li}_2 \left(\frac{r}{1+r} \right) - \text{Li}_2 \left(\frac{1}{1+r} \right) + 4 \text{Li}_2 \left(\frac{1-r}{1+r} \right) - \text{Li}_2 \left(\left(\frac{1-r}{1+r} \right)^2 \right)$$

4 Self Energy

$$\frac{d\Sigma_{D_s, \text{self}}}{dp^2} \Big|_{p^2=m_{D_s}^2} = \frac{\alpha_e}{2\pi} \left[\underbrace{\left(\frac{1}{\epsilon} + \ln \frac{\mu^2}{m_{D_s}^2} \right)}_{\text{UV}} + \underbrace{\ln \frac{m_{D_s}^2}{m_l^2}}_{\text{IR}} \right]$$

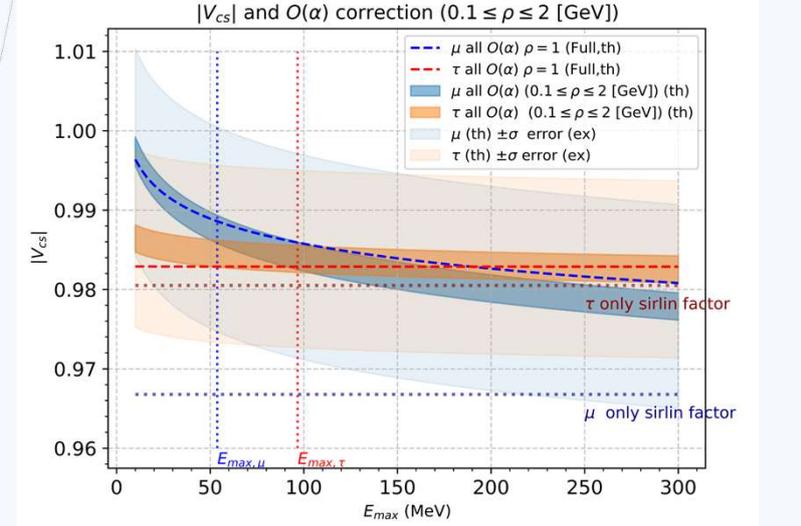
$$\frac{d\Sigma_{l, \text{self}}}{dp^2} \Big|_{p^2=m_l^2} = \frac{\alpha_e}{2\pi} \left[\underbrace{-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\epsilon} + \ln \frac{\mu^2}{m_{D_s}^2} \right)}_{\text{UV}} + \underbrace{\ln \frac{m_{D_s}^2}{m_l^2}}_{\text{IR}} + \frac{3}{2} \ln r - 2 \right]$$

5 結果

$$\Gamma_{\text{total}}(\rho, E_{\text{max}}) / \Gamma_{\text{tree}} = 1 + \frac{\alpha_e}{2\pi} \left[\underbrace{-\frac{3}{2} \ln \frac{\rho^2}{m_{D_s}^2}}_{\text{effective th lim}} + \underbrace{\left(2 + \frac{1+r}{1-r} \ln r \right) \ln \left(\frac{m_{D_s}^2}{E_{\text{max}}^2} \right)}_{\text{depend on } E_{\text{max}}} + f(r) - 4 + \left(\frac{9}{2} - \frac{2}{1-r} \right) \ln r + \frac{1+r}{2(1-r)} \ln^2 r \right]$$

負の値 (μ の方が絶対値で大きい) = $|V_{cs}|$ を大きくする
① IRのcancelが確認できた

BESIIIの解析ではPhotos(FSRの補正をする)が使用されている
⇒ 計算結果を対応させる (photon emission 3つ目を差し引く)
② E_{max} 依存性が求まった

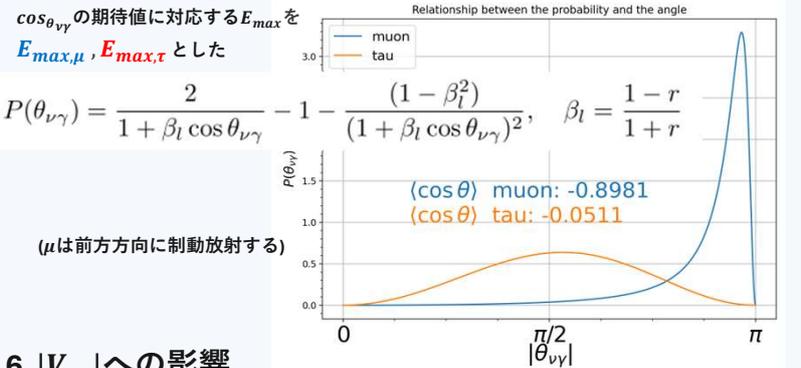


BESIIIのcut条件 (E_{max} に関するもの)

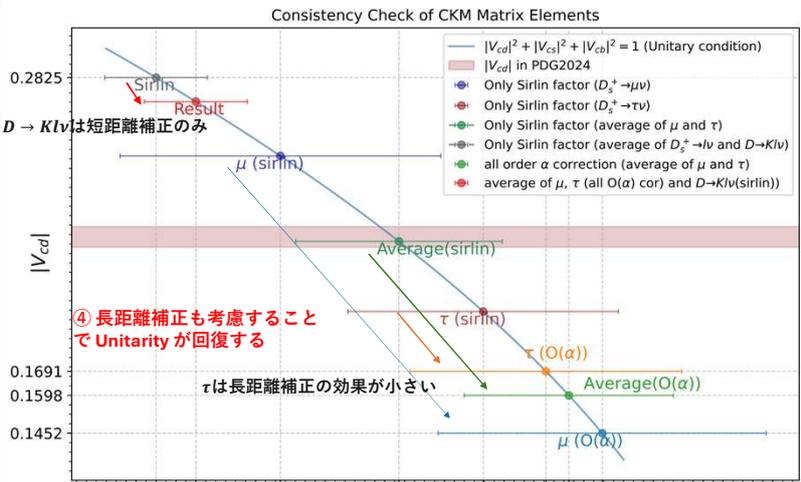
$$-0.2 \leq M_{\text{miss}}^2 \leq 0.2 \text{ [GeV}^2\text{]}$$

$$E_\gamma \leq E_{\text{max}} = \frac{2 \times 10^5}{m_{D_s} (1 - \cos \theta_{\nu\gamma})} \text{ [MeV]}$$

③ BESIIIの解析と対応させた $\cos \theta_{\nu\gamma}$ 依存性があるため, Soft photon emissionの角度依存性を考慮する



6 $|V_{cs}|$ への影響



- 長距離補正(崩壊channelに依存)によりUnitarityの回復がみられた
- $D \rightarrow Kl \nu$ の長距離補正も考慮すればより正確に検証できる