

クォークセクター： Bアノマリーの現状まとめ

山田洋一（東北大）

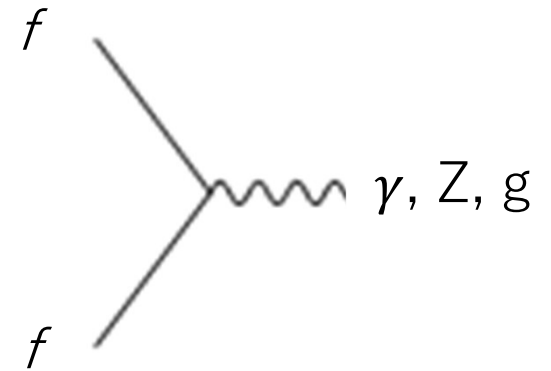
- Lepton Flavor Universality (LFU)
- $B \rightarrow D^{(*)} l^- \bar{\nu}$ でのLFUの破れ？ (B anomaly, charged current)
- $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$ でのLFUの破れ？ (B anomaly, FCNC)
- Effective theory と parameter fit
- アノマリーを説明するBSMの候補

参考: D. London and J. Matias, 2110.13270

標準模型(SM) のゲージ相互作用

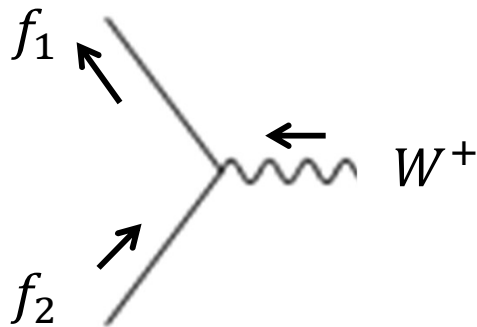
- Gluon, γ , Z (中性カレント相互作用)

クォークやレプトンのフレーバーを変えない



- W^\pm (荷電カレント相互作用)

$SU(2)_L$ ゲージ doublet $(f_1, f_2)_L$ と結合：フレーバーを変える



Coupling の強さはすべて共通

質量固有状態 $u_i = (u, c, t), d_j = (d, s, b), l_i = (e, \mu, \tau),$
 $\nu_i = (\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau)$

$$L_{int} = -\frac{g_w}{\sqrt{2}} \bar{u}_i V_{ij} \gamma^\mu P_L d_j W_\mu^+ - \frac{g_w}{\sqrt{2}} \bar{\nu}_i \gamma^\mu P_L l_i W_\mu^+ + (\text{h.c.})$$

- クォークとWの結合の強さは1つのユニタリ行列 V (CKM行列) で決まる。

$$V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

- レプトン $(e, \nu_e), (\mu, \nu_\mu), (\tau, \nu_\tau)$ とWの結合はフレーバー(or 世代)によらずすべて共通 **Lepton Flavor Universality (LFU)**

LFU の例

- On-shell W decays (RPP 2022)

$$\frac{\Gamma(\mu^+ \nu_\mu)}{\Gamma(e^+ \nu_e)} = 0.996 \pm 0.008, \quad \frac{\Gamma(\tau^+ \nu_\tau)}{\Gamma(e^+ \nu_e)} = 1.043 \pm 0.024$$

- Leptonic decays of tau (RPP 2022)

$$B(\tau^- \rightarrow \nu_\tau \bar{\nu}_e e^-) = 17.82 \pm 0.04 \%,$$

$$B(\tau^- \rightarrow \nu_\tau \bar{\nu}_\mu \mu^-) = 17.39 \pm 0.04 \%$$

($O(\alpha \log m_\tau/m_{e,\mu})$ corr あり)

ところが、B mesons の崩壊に関して、LFU を大きく破る結果が
2012 年頃からいくつもの過程で報告され続けている
(B アノマリー)

$B^- = (b\bar{u}), \bar{B} = (b\bar{d})$ の崩壊

b クォークの崩壊で起こる

- Main modes (charged current)

$$b \rightarrow c + W^{-*} \rightarrow c + (l^- \bar{\nu}_l, d_j \bar{u}_i)$$

hadronic: $D\pi, J/\psi K, \dots$

semi-leptonic: $D^{(*)} l^- \bar{\nu}_l, \dots$

- FCNC (flavor-changing neutral current) modes

SM では摂動の高次でのみおこる (\rightarrow rare modes)

$$K^{(*)} l^- l^+, l^+ l^-, K^* \gamma, \dots$$

2012年頃から、これらの崩壊に関してSM, 特にLFUからずれた結果が報告され続けている。

アノマリ — (1)

Semi-leptonic decays of B

• $b \rightarrow c(u) + W^{-*}, \quad W^{-*} \rightarrow l^{-}\bar{\nu}_l \quad (l = e, \mu, \tau)$

$|V_{cb}| \sim 0.04, \quad |V_{ub}| \sim 0.004 \quad \Rightarrow$:主に charm mesons に崩壊

Branching ratios

$B(B \rightarrow X_c \mu^{-}\bar{\nu}) \sim 0.1$ (inclusive)

うち $B(B \rightarrow D\mu^{-}\bar{\nu}) \sim 0.02, \quad B(B \rightarrow D^*\mu^{-}\bar{\nu}) \sim 0.06$

- Decay amplitudes

$$A(B \rightarrow D^{(*)} l^{-} \bar{\nu}) \sim C \frac{g_w^2}{M_W^2} L(l)_\mu V_{cb} \langle D^{(*)} | \bar{c}_L \gamma^\mu b_L | B \rangle$$

Meson form factor の評価が必要

しかし、レプトンフレーバーだけが異なるモード間では decay rates (\propto branching ratios) は、
(m_l に依存する効果を除いて) 等しくなるはずである。

Test of LFU in $b \rightarrow cl^{-}\bar{\nu}$

- $e - \mu$ 間では成立

$$\frac{B(B \rightarrow D^* e \bar{\nu})}{B(B \rightarrow D^* \mu \bar{\nu})} = 1.01 \pm 0.01 \pm 0.03 \text{ (Belle, 1809.03290)}$$

- $(e, \mu) - \tau$ 間 : decay width は τ の質量の効果で抑えられる。
SM での予言値 (HFLAV, 2206.07501)

$$R_{D^*}^{\mu} = \frac{B(B \rightarrow D^* \tau \bar{\nu})}{B(B \rightarrow D^* \mu \bar{\nu})} = 0.254 \pm 0.005,$$

$$R_D^{\mu} = \frac{B(B \rightarrow D \tau \bar{\nu})}{B(B \rightarrow D \mu \bar{\nu})} = 0.299 \pm 0.003,$$

B アノマリー (charged)

- BaBar, 1205.5442

$$R_D^l = \frac{2*B(B \rightarrow D\tau\bar{\nu})}{B(B \rightarrow De\bar{\nu}) + B(B \rightarrow D\mu\bar{\nu})} = 0.440 \pm 0.058 \pm 0.042 ,$$
$$R_{D^*}^l = 0.332 \pm 0.024 \pm 0.018,$$

SM の理論値(0.299, 0.254)より 2-3 σ 超過

続く実験でも同様の超過が観測される。

- Belle, 1910.05864

$$R_D^l = 0.307 \pm 0.037 \pm 0.016, R_{D^*}^l = 0.283 \pm 0.018 \pm 0.014$$

- LHCb, 2022

$$R_D^l = 0.441 \pm 0.060 \pm 0.066, R_{D^*}^l = 0.281 \pm 0.018 \pm 0.024$$

等

他の $b \rightarrow c\tau\bar{\nu}$ 反応

- $B_c^+ \rightarrow J/\psi l^+ \nu$ ($[c\bar{b}] \rightarrow [c\bar{c}]l^+ \nu$)

$$B(B_c^+ \rightarrow J\psi\tau^+ \nu)/B(B_c^+ \rightarrow J\psi\mu^+ \nu) :$$

$$0.71 \pm 0.17 \pm 0.18 \text{ (LHCb, 1711.05623),}$$

$$0.25 \sim 0.28 \text{ (SM) より } 2\sigma \text{ 近く大きい}$$

- $\Lambda_b(udb) \rightarrow \Lambda_c^+(udc)l^-\bar{\nu}$

$$B(\Lambda_b \rightarrow \Lambda_c\tau\bar{\nu})/B(\Lambda_b \rightarrow \Lambda_c\mu\bar{\nu}) :$$

$$0.324 \pm 0.004 \quad \text{SM (Bernlochner et al, 1812.07593)}$$

$$0.242 \pm 0.026 \pm 0.040 \pm 0.059 \text{ (LHC, 2201.03497)}$$

$$\Rightarrow \text{実際は } 0.285 \pm 0.073 \text{ (Bernlochner et al, 2206.11282) ?}$$

$$\text{SM と一応consistent, } B \rightarrow D^{(*)}l^-\bar{\nu} \text{ とは逆傾向(抑制) ?}$$

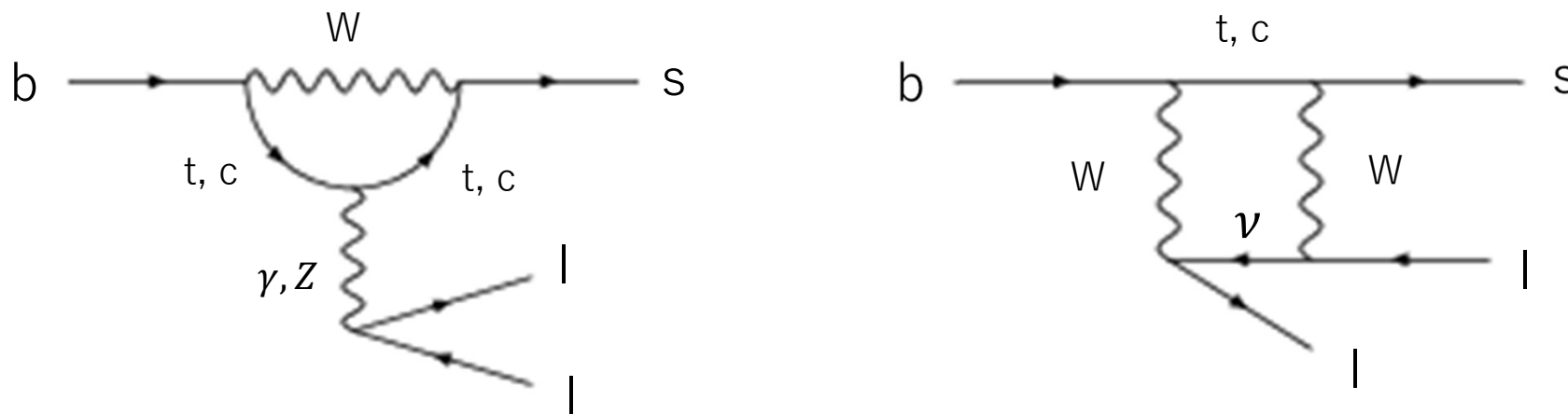
アノマリー(2) $b \rightarrow sl^-l^+$ decays

Flavor-changing neutral current (FCNC)

⇒ SM では摂動の高次でのみ起こる

u-quark loop は V_{CKM} で強く抑制

⇒ long-distance の寄与による計算の不定性が小さい



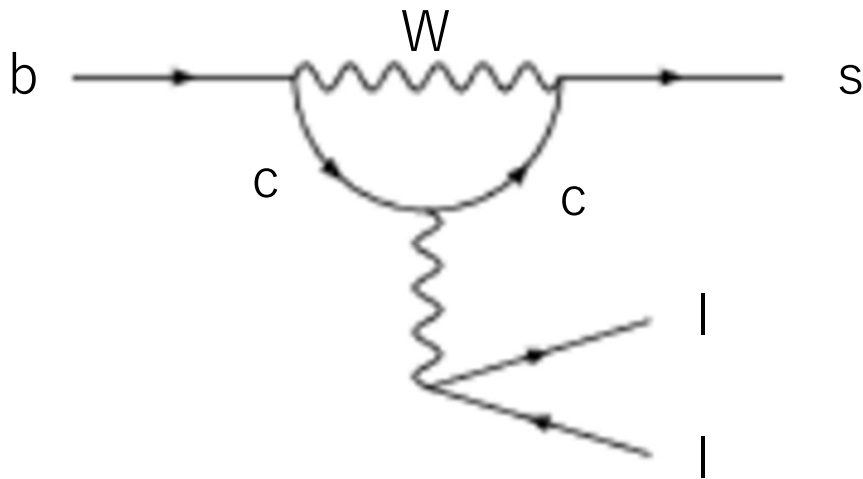
New physics の効果を見るのに適している

Branching ratios (PDG 2022) rare decays

$$B(B \rightarrow Kl^+l^-) \sim 5 \times 10^{-7}$$

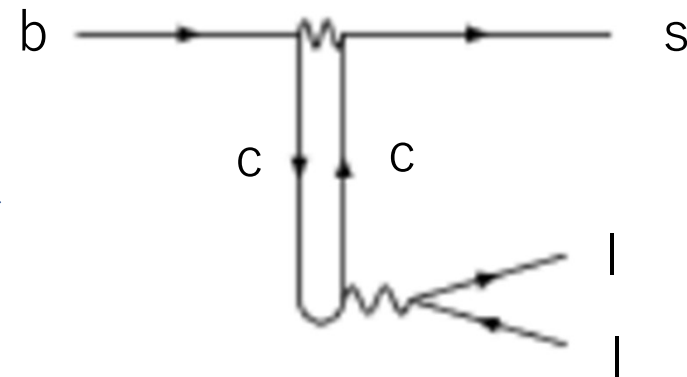
$$B(B \rightarrow K^*l^+l^-) \sim 10^{-6}$$

($B \rightarrow K\psi$, $\psi \rightarrow l^+l^-$ 共鳴の部分を除いて)



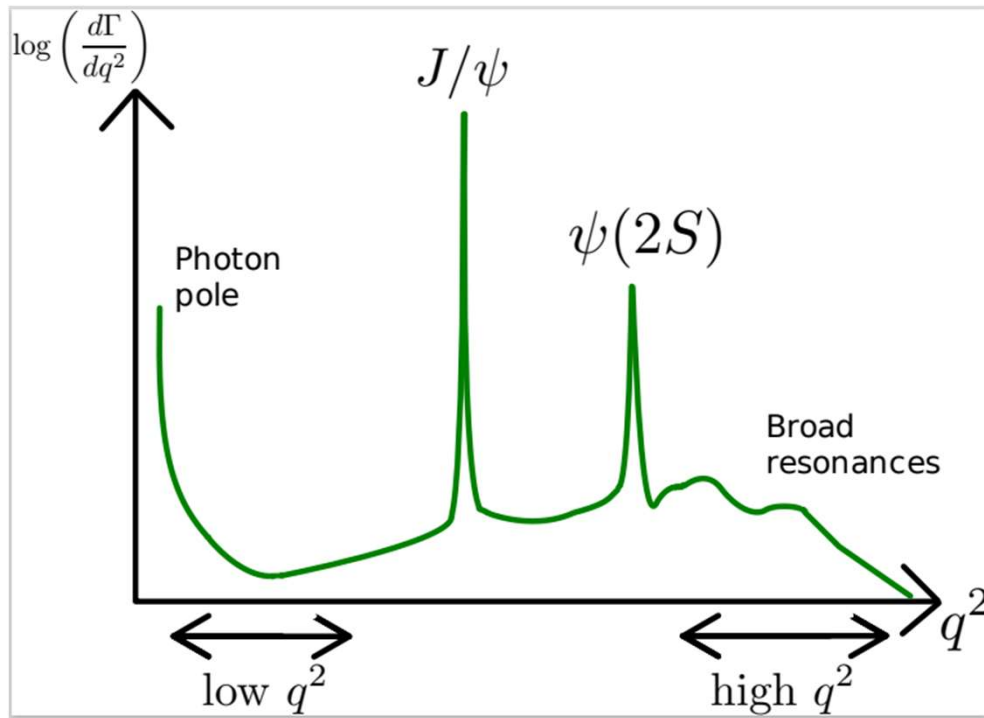
$$m_c < m_b$$

Long-range interactions



Nonlocal form factor
 $\psi(c\bar{c})$ 共鳴を含む

$d\Gamma(B \rightarrow K^{(*)}l^+l^-)/dq^2$ の q^2 依存性
 (q^2 : l^+l^- の不変質量²)



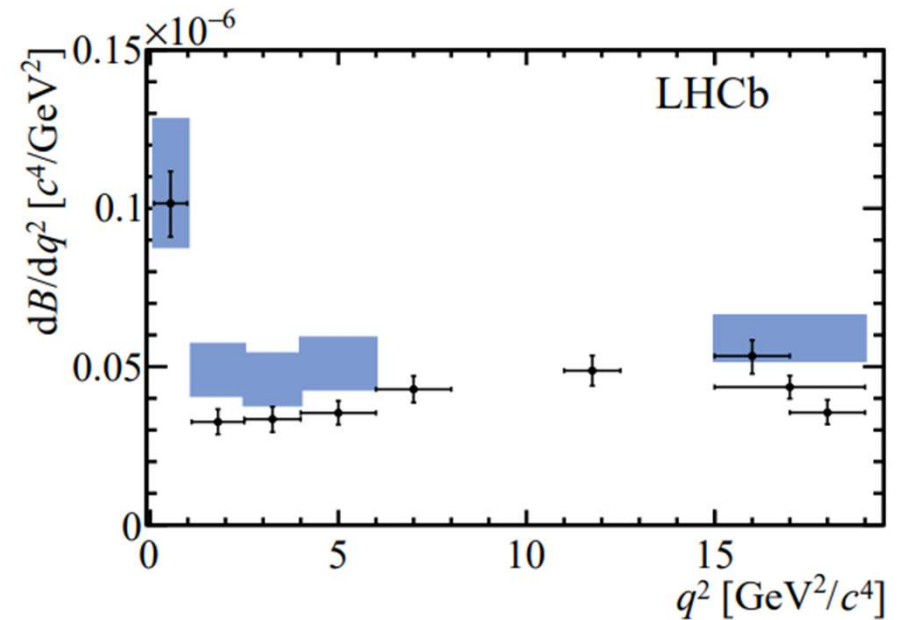
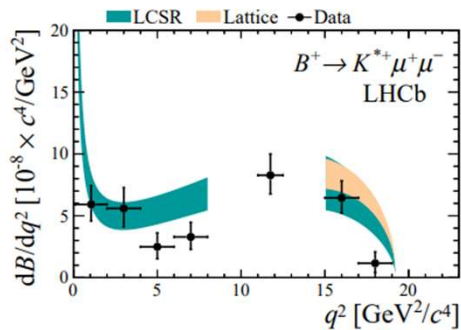
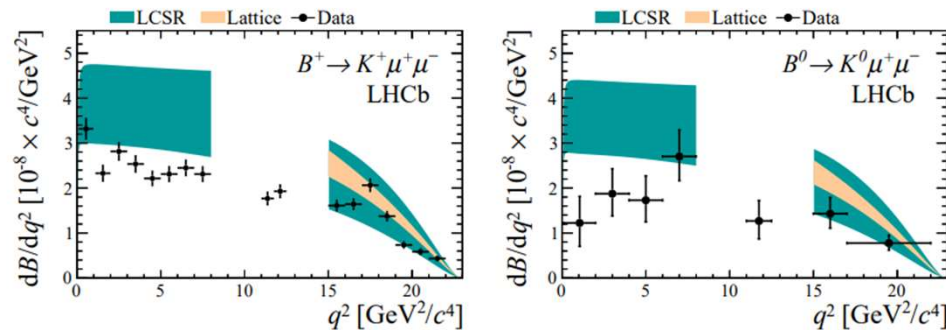
$B \rightarrow K^{(*)}J/\psi, J/\psi \rightarrow l^+l^-$ が干渉
 $b \rightarrow sl^+l^-$ (short range) の効果を見るために
 q^2 に条件を課して $c\bar{c}$ 共鳴の効果を取り除く
 (例 : $q^2 \in [1.1, 6] \text{ GeV}^2$)
 ($m(J/\psi)^2 = 9.6 \text{ GeV}^2$)

$B(B \rightarrow K^*J/\psi) \sim 10^{-3}$:
 $B(B \rightarrow K^*l^+l^-) \sim 10^{-6}$ よりはるかに大きい
 ψ 共鳴のすそ野も無視できない

Radiative decays $b \rightarrow s\gamma^*, \gamma^* \rightarrow l^+l^-$ も干渉
 $B(B \rightarrow K^*\gamma) \sim 4 \times 10^{-5}$

$B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$ の測定

- $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^- \rightarrow K^+ \pi^- \mu^+ \mu^-$ の角度分布の1つがSMから 3σ のずれ (LHCb, 1308.1707)
- $dB/dq^2(B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-)$ がSM より小さい



LHCb, 1403.8044

LHCb, 1606.04731, $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$

Decay rate の計算

$b \rightarrow sl^+l^-$ 過程を effective 4-fermiinteractions $(\bar{s}_L\gamma^\mu b_L)(\bar{l}^-\gamma_\mu(1,\gamma_5)l^-)$ interaction とみなす。

hadron form factor $\langle K^{(*)}(p')|\bar{s}_L\gamma^\mu b_L|B(p)\rangle$ の評価が必要
主に、

Light-cone sum rule (LCSR) (small q^2 , large recoil in $B \rightarrow K^{(*)}$),
lattice QCD (LQCD) (mainly large q^2 , small recoil in $B \rightarrow K^{(*)}$),
の組み合わせで計算

$\Gamma_{\text{SM}}(B \rightarrow K^{(*)}l^+l^-)$ には 10% 程の不定性が残る。

Hadron physics の不定性を抑える手法：
異なるレプトン間で分岐比の比を直接扱う

μ/e ratio

$$R_{K^*}[q_{min}^2, q_{max}^2] \equiv \frac{B(B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-)[q_{min}^2, q_{max}^2]}{B(B \rightarrow K^* e^+ e^-)[q_{min}^2, q_{max}^2]}$$
$$= \frac{N(B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-)}{N(B \rightarrow K^* J/\psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-))} \frac{N(B \rightarrow K^* J/\psi(\rightarrow e^+ e^-))}{N(B \rightarrow K^* e^+ e^-)} \times (\text{efficiencies})$$

Hadron form factor や μ/e の detection efficiency の違いは大きく打ち消される。

SM での理論値 : 0(1)% で 1 [Capderia et al, 1701.08672]

$$R_K = 1.00 \pm 0.01, \quad R_{K^*}[1.1, 6.0] = 1.000 \pm 0.006,$$
$$R_{K^*}[0.045, 1.1] = 0.922 \pm 0.022 \text{ (near } \mu\mu \text{ threshold)}$$

R_{K,K^*} の実験値： 標準模型の予言より有意に低い。

B アノマリー (neutral)

- LHCb (1705.05802)

$$R_{K^{*0}}[1.1, 6.0] = 0.69 \pm \frac{0.11}{0.07} \pm 0.05, \quad R_{K^{*0}}[0.045, 1.1] = 0.66 \pm \frac{0.11}{0.07} \pm 0.03$$

- LHCb (2103.11769, 2110.09501)

$$R_{K^+}[1.1, 6.0] = 0.846 \pm \frac{0.042}{0.039} \pm \frac{0.013}{0.012}, \quad R_{K_S^0}[1.1, 6.0] = 0.66 \pm \frac{0.20}{0.14} \pm \frac{0.02}{0.04}$$

- Belle (1904.02440) (SM, LHCb の双方と consistent)

$$R_{K^{*0}}[1.1, 6.0] = 1.06 \pm \frac{0.63}{0.38} \pm 0.14, \quad R_{K^{*0}}[0.045, 1.1] = 0.46 \pm \frac{0.55}{0.27} \pm 0.13$$

関連: $b \rightarrow s\mu^+\mu^-$ による $B_s(b\bar{s})$ decays

- $B(B_s \rightarrow \phi\mu^+\mu^-)[1.1, 6.0] = (2.88 \pm 0.22) \times 10^{-8} \text{ GeV}^{-2}$
(LHCb, 2105.114007)

SM: $(5.37 \pm 0.66) \times 10^{-8} \text{ GeV}^{-2}$ (LCSR + LQCD)

$(4.77 \pm 1.01) \times 10^{-8} \text{ GeV}^{-2}$ (LCSR)

(3.6 σ or 1.8 σ) 低くずれている。 $B \rightarrow K^{(*)}\mu^+\mu^-$ と同じ傾向

- $B(B_s \rightarrow \mu^+\mu^-)$

SM: $(3.66 \pm 0.14) \times 10^{-9}$ 精度よい

(ATLAS, CMS, LHCb) average on 2021:

$(2.69 \pm_{0.35}^{0.37}) \times 10^{-9}$ SMからずれ?

New average (Hurth et al., 2210.07221) including CMS (2022) data

$(3.52 \pm_{0.30}^{0.32}) \times 10^{-9}$ SMとconsistent?

Effective Field Theory による B アノマリーの説明

LHC では SM を超える新粒子は見つかっていない。

→ B アノマリーを説明する新物理(もしあれば)のスケールは M_W より十分大きいと思われる。

↓

$E < M_W$ での新物理の効果は、

4-Fermi interaction を含む有効理論(EFT)で記述できる。

$$L_{eff} = L(q(\neq t), l, \nu, \gamma, g) + \Delta L_{eff}(\text{dim}=6) + \dots$$

- $\Delta L_{\text{eff}}(d = 6)$: 4-Fermi $qqll$ 有効相互作用:
 $\bar{c}b\mu^-\bar{\nu}$ や $\bar{s}bl^+l^-$ の形の operators の多項式。
その係数 (Wilson 係数) を SM からずらすことで
B アノマリーを説明する。

ΔL_{eff} の具体的な形は New physics に対する重要な情報を与える

$b \rightarrow c\mu^-\bar{\nu}$ アノマリーに関するEFT

$$H_{eff} = 2\sqrt{2}G_F V_{cb} [(1 + C_{V1})(\bar{c}_L \gamma^\mu b_L)(\bar{\tau}_L \gamma_\mu \nu_{\tau L}) + C_{V2}(\bar{c}_R \gamma^\mu b_R)(\bar{\tau}_L \gamma_\mu \nu_{\tau L}) + C_{S1}(\bar{c}_L b_R)(\bar{\tau}_R \nu_{\tau L}) + C_{S2}(\bar{c}_R b_L)(\bar{\tau}_R \nu_{\tau L}) + C_T(\bar{c} \sigma^{\mu\nu} b)(\bar{\tau}_R \sigma_{\mu\nu} \nu_{\tau L})] (+ \nu_R ?)$$

($C_{V1}, C_{V2}, C_{S1}, C_{S2}, C_T$): new physics の寄与を表す Wilson 係数

R_D, R_{D^*} の表式 (simplified the formulas in Iguro et al, 2210.10751)

$$\frac{R_D}{R_D^{SM}} \sim |1 + C_{V1} + C_{V2}|^2 + |C_{S1} + C_{S2}|^2 + |C_T|^2 + 1.5 \text{Re}[(1 + C_{V1} + C_{V2})(C_{S1}^* + C_{S2}^*)] + \text{Re}[(1 + C_{V1} + C_{V2})C_T^*],$$
$$\frac{R_{D^*}}{R_{D^*}^{SM}} \sim |1 + C_{V1} - C_{V2}|^2 + 16|C_T|^2 - 6 \text{Re}[(1 + C_{V1} - C_{V2})(C_T^*)]$$

Fit の例 : Iguro et al., 2210.10751

- Fit に用いる観測量: $R_{D^{(*)}}, F_L^{D^*}$ (生成された D^* の縦偏極の割合)

1D fit (C_i のうち 1 つだけを 0 から動かす)

	Fitted $C_i(1\sigma)$	χ^2	"Pull"
(SM)		21.8	0
C_{V1}	+0.08(2)	2.8	4.4
C_{S1}	0.20(5)	7.5	3.8

O_{S1} は τ_R^- を含む (SM, C_{V1} は τ_L^-) $\Rightarrow \tau$ の縦偏極が SM から変わる

$b \rightarrow s\mu^+\mu^-$ アノマリーに関するEFT

$$H_{eff} = -\frac{4G_\mu}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \frac{e^2}{16\pi^2} [\sum_{l=e,\mu} (C_{9l}^{(l)} O_{9l}^{(l)} + C_{10l}^{(l)} O_{10l}^{(l)} + C_{Sl}^{(l)} O_{Sl}^{(l)} + C_{Pl}^{(l)} O_{Pl}^{(l)} + C_{Tl} O_{Tl} + C_{T5l} O_{T5l}) + C_7^{(l)} O_7^{(l)}],$$

$$O_{9l}^{(l)} = (\bar{s}_{L(R)} \gamma_\mu b_{R(L)}) (\bar{l} \gamma^\mu l), \quad O_{10l}^{(l)} = (\bar{s}_{L(R)} \gamma_\mu b_{R(L)}) (\bar{l} \gamma^\mu \gamma_5 l),$$

$$O_{Sl}^{(l)} = (\bar{s}_{L(R)} b_{R(L)}) (\bar{l} l), \quad O_{Pl}^{(l)} = (\bar{s}_{L(R)} b_{R(L)}) (\bar{l} \gamma_5 l),$$

$$O_{Tl} = (\bar{s} \sigma_{\mu\nu} b) (\bar{l} \sigma^{\mu\nu} l), \quad O_{T5l} = (\bar{s} \sigma_{\mu\nu} b) (\bar{l} \sigma^{\mu\nu} \gamma_5 l),$$

$$O_7^{(l)} = \frac{m_b}{e} (\bar{s}_{L(R)} \sigma^{\mu\nu} b_{R(L)}) F_{\mu\nu} \quad (\text{for } \gamma^* \rightarrow l^+ l^-)$$

SM contributions

$$C_{9l}^{SM}(eff) \sim 4.1 + Y(q^2), \quad C_{10l}^{SM} \sim -4.2, \quad C_7^{SM} \sim -0.3$$

実験結果との fit

- 近年の例

Altmann, Alguero et al., Hurth et al., Ciuchini et al., ...

- 用いる観測量

LFU を破る量 $R_{K(*)}$, ... のみを用いる (理論の不定性を避ける)

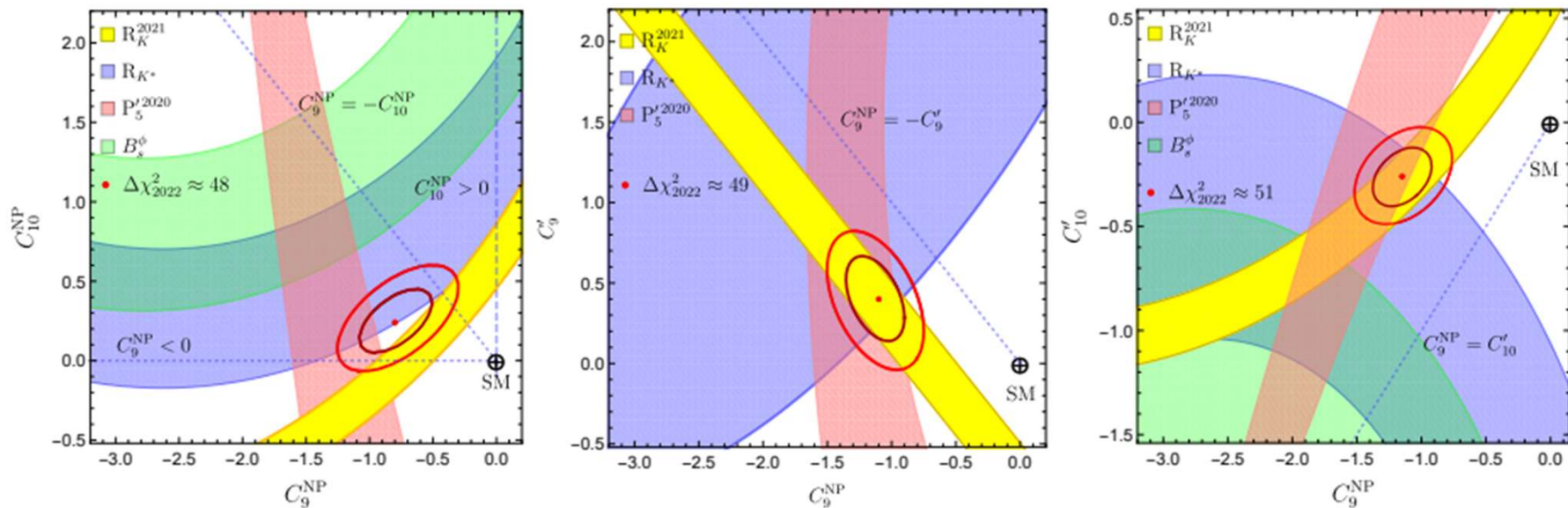
もっと多数の量も用いる

- 有効理論

C_{9l}^{NP} , C_{10l}^{NP} の他にどの相互作用をSMからずらす？

例：Alok et al, 2203.13217

- 観測量 $R_{K^{(*)}}, B(B_S \rightarrow \mu^+ \mu^-), dB/dq^2(B \rightarrow K^{(*)} \mu^+ \mu^-),$
angular distributions of $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-, B_S \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$
- Parameters for fit: $\delta C_{9\mu}^{(\prime)}, \delta C_{10}^{(\prime)}$

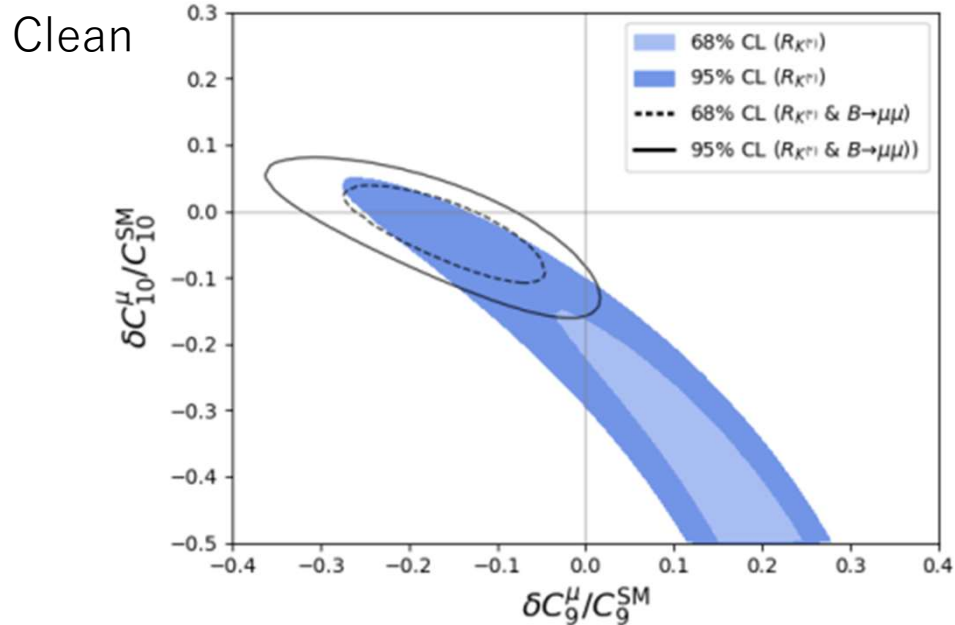


2 dim. Fitting: Favor $(\delta C_9, \delta C_{10}), (\delta C_9, \delta C_9^{\prime}), (\delta C_9, \delta C_{10}^{\prime})$ $\chi^2: 200 \rightarrow 150$

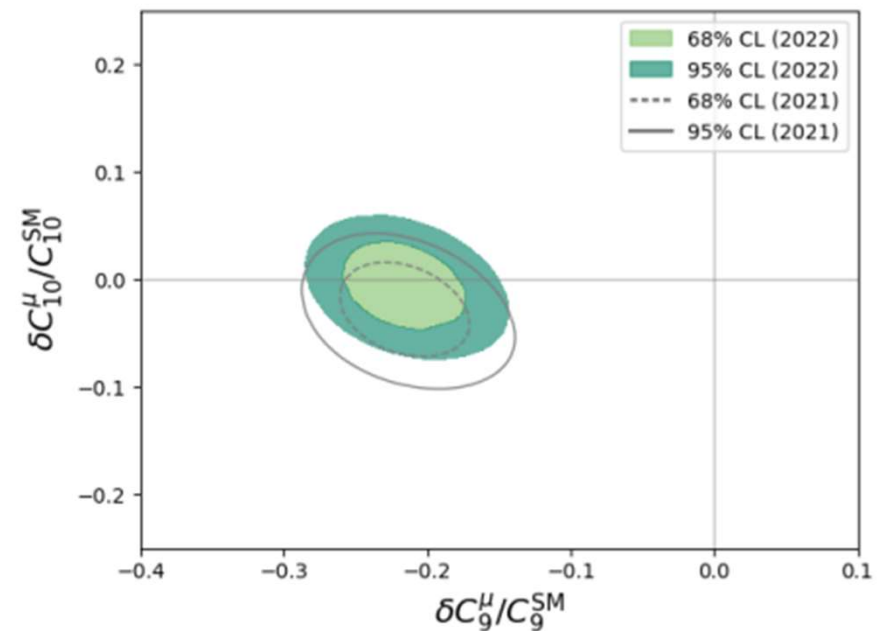
例：Hurth et al., 2210.07221

- Parameters for fit: $\delta C_{9e}, \delta C_{9\mu}, \delta C_{10e}, \delta C_{10\mu}$
- 観測量: “clean” : $R_{K^{(*)}}$ in $q^2 \in [1, 6] \text{ GeV}^2, B(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)$
All: $b \rightarrow s$, such as $\partial\Gamma/\partial q^2$, angular analysis, ...

2 dimensional fitting by $(\delta C_{9\mu}, \delta C_{10\mu})$: -20% shift of $\delta C_{9\mu}$ がよい



All



“20 dimensional fit” (Hurth et al., 2210.07221)

All observables with $\chi_{\text{SM}}^2 = 225.8$, nr. obs.= 173			
2021 fit results ($\chi_{\text{min}}^2 = 151.6$; Pull _{SM} = 5.5(5.6) σ)			
δC_7 0.05 ± 0.03		δC_8 -0.70 ± 0.40	
$\delta C'_7$ -0.01 ± 0.02		$\delta C'_8$ 0.00 ± 0.80	
δC_9^μ -1.16 ± 0.17	δC_9^e -6.70 ± 1.20	δC_{10}^μ 0.20 ± 0.21	δC_{10}^e degenerate w/ ↓
$\delta C'^\mu_9$ 0.09 ± 0.34	$\delta C'^e_9$ 1.90 ± 1.50	$\delta C'^\mu_{10}$ -0.12 ± 0.20	$\delta C'^e_{10}$ degenerate w/ ↑
$\delta C_{Q_1}^\mu$ 0.04 ± 0.10	$\delta C_{Q_1}^e$ -1.50 ± 1.50	$\delta C_{Q_2}^\mu$ -0.09 ± 0.10	$\delta C_{Q_2}^e$ -4.10 ± 1.5
$\delta C'^\mu_{Q_1}$ 0.15 ± 0.10	$\delta C'^e_{Q_1}$ -1.70 ± 1.20	$\delta C'^\mu_{Q_2}$ -0.14 ± 0.11	$\delta C'^e_{Q_2}$ -4.20 ± 1.2

All observables with $\chi_{\text{SM}}^2 = 253.5$, nr. obs.= 183			
2022 fit results ($\chi_{\text{min}}^2 = 179.1$; Pull _{SM} = 5.5(5.5) σ)			
δC_7 0.06 ± 0.03		δC_8 -0.80 ± 0.40	
$\delta C'_7$ -0.01 ± 0.01		$\delta C'_8$ -0.30 ± 1.30	
δC_9^μ -1.14 ± 0.19	δC_9^e -6.50 ± 1.90	δC_{10}^μ 0.21 ± 0.20	δC_{10}^e degenerate w/ ↓
$\delta C'^\mu_9$ 0.05 ± 0.32	$\delta C'^e_9$ 1.40 ± 2.30	$\delta C'^\mu_{10}$ -0.03 ± 0.19	$\delta C'^e_{10}$ degenerate w/ ↑
$\delta C_{Q_1}^\mu$ 0.04 ± 0.20	$\delta C_{Q_1}^e$ -1.60 ± 1.70	$\delta C_{Q_2}^\mu$ -0.15 ± 0.08	$\delta C_{Q_2}^e$ -4.10 ± 0.9
$\delta C'^\mu_{Q_1}$ -0.03 ± 0.20	$\delta C'^e_{Q_1}$ -1.50 ± 2.10	$\delta C'^\mu_{Q_2}$ -0.16 ± 0.08	$\delta C'^e_{Q_2}$ -4.00 ± 1.2

$\delta C_{10}^{(r)e}$, $\delta C_{Q_2}^{(r)e}$: e セクターのデータ不足による？

Fit の傾向

- 1 parameter fit: おおむね $\delta C_{9\mu} \sim -1$ が best fit
- 他に prefer される係数：用いる観測量の選び方に大きく依存している。
- どれだけの Wilson 係数を fit に用いるかにも依存

ex. $\delta C_{9e}^{(l)}, \delta C_{10e}^{(l)}, \delta C_{S\mu}^{(l)}, \dots$

B アノマリーと新物理

もし B アノマリーの存在が確立したら、それはSMを超えた新しい物理の存在を示すものとなる。

B アノマリーを説明する新物理の例

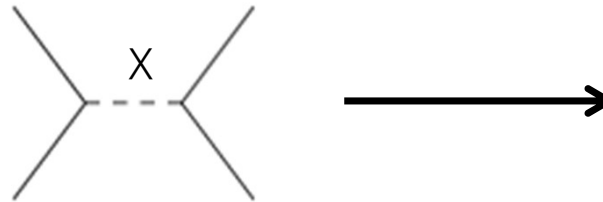
- tree-level:

Z'/W' , leptoquark (LQ), ...

- loop-level (for neutral B anomaly) :

その他もろもろの模型

新物理のスケール



$$\frac{\lambda^2}{M_X^2} qqll \text{ to } H_{eff}$$

- $b \rightarrow sl^+l^-$

Tree-level で $|C_i^{NP}| \sim O(1)$ を生成するための条件

$$\frac{4G_F}{\sqrt{2}} |V_{tb}V_{ts}^*| \frac{e^2}{16\pi^2} |C_i^{NP}| \sim \frac{\lambda^2}{M_X^2} \Rightarrow M_X \sim \frac{\lambda}{\sqrt{|C_i^{NP}|}} \times 35 \text{ TeV}$$

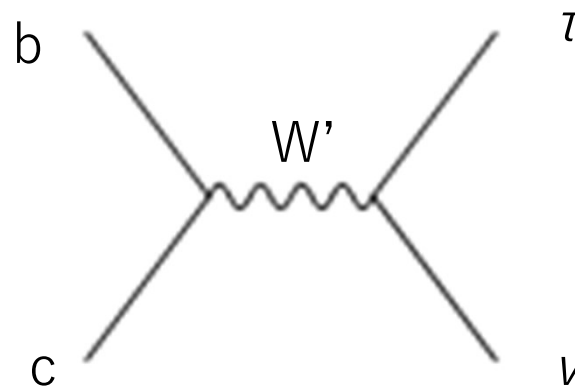
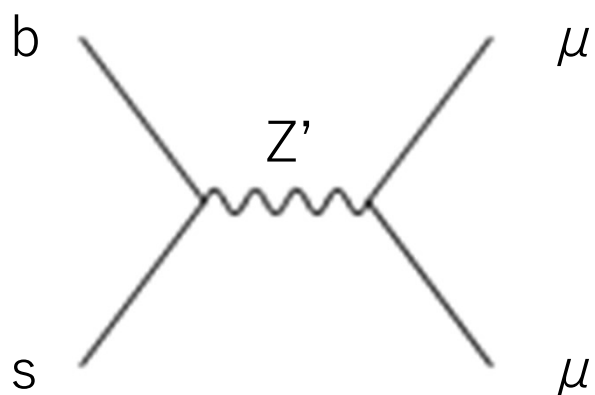
Loop で生成する場合 $M_X \sim M_X^{tree} \times \frac{\lambda}{4\pi} \sim \frac{\lambda^2}{\sqrt{|C_i^{NP}|}} \times 3 \text{ TeV}$

- $b \rightarrow c\tau\bar{\nu}$ Tree-level で $|C_i| \sim O(0.1)$ を生成するためには $2\sqrt{2}G_F V_{cb} |C_i| \sim \lambda^2 / M_X^2 \Rightarrow M_X \sim \lambda \times 3 \text{ TeV}$ (loop では苦しい)

新物理の候補

(1) Z' (neutral) / W' (charged)

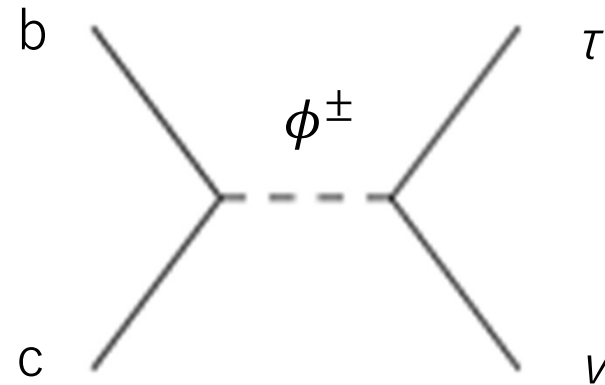
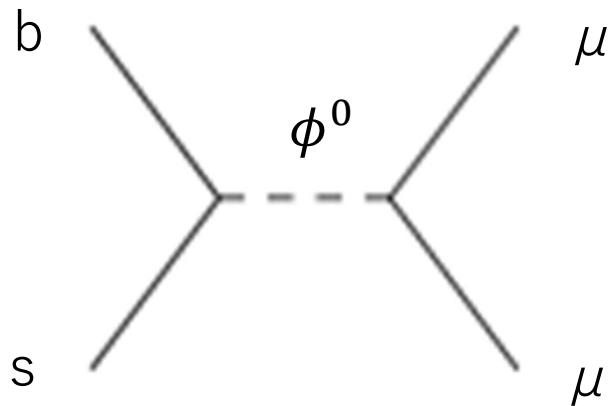
Altmannshofer et al; Crivellin et al; Ko et al; ... / Asadi et al; Greljo et al, ...



- ゲージ群はSMから拡張される $U(1)_{(L_\mu - L_\tau)}$, $SU(2)_R$ (W_R with ν_R), etc.
- q, l の世代に依存して結合の強さが変わる必要がある
- 理論には他の粒子を加える必要も ($U(1)_{(L_\mu - L_\tau)}$ を bs に結合させるためなど)

(2) Higgs-like scalars

Crivellin et al; Chiang et al; ... / Celis et al; Chen-Nomura; ...



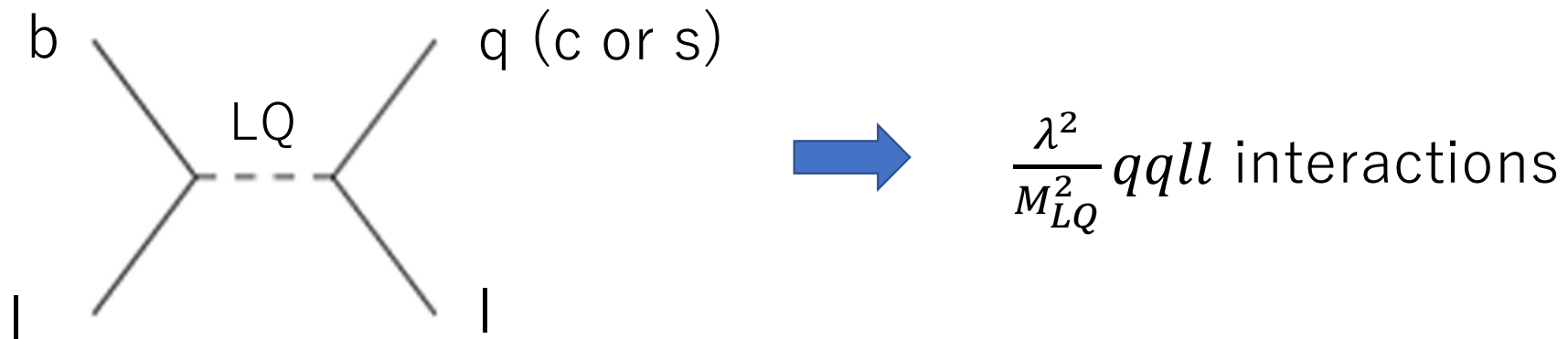
Neutral: $C_{S\mu}, C_{P\mu}$ のみが生じる。(fit と合わない?)

Charged: C_{S1}, C_{S2} のみが生じる。(Large $B(B_c^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau)$)

(3) Leptoquark (LQ)

$l-q$ -(LQ) のように結合する未知粒子

- 「レプトン数、バリオン数の両方を持つ」と見なせる
- スピン 0 or 1
- 各種の拡張模型に現れる (GUT, R-violating SUSY, etc.)



B アノマリーに寄与できるLQ

$b_{L,R}$ と結合が可能なLQ の $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ 表現

• スカラー:

$$S_3(\bar{3}, 3, \frac{1}{3}), S_1(\bar{3}, 1, \frac{1}{3}), R_2(\bar{3}, 2, -\frac{7}{6}), \tilde{S}_1(\bar{3}, 2, -\frac{1}{6}), \tilde{R}_2(\bar{3}, 2, -\frac{1}{6})$$

• ベクトル

$$U_1(\bar{3}, 1, -\frac{2}{3}), U_3(\bar{3}, 3, -\frac{2}{3}), V_2(\bar{3}, 1, -\frac{5}{6})$$

候補

$$b \rightarrow c\tau^- \bar{\nu}_\tau : S_1, R_2, U_1$$

$$b \rightarrow s\mu^+ \mu^- : S_3, U_1, U_3$$

どの LQ がよいか？ [Angelescu et al, 1808.08179](#)

Scalars

- S_3 $\delta C_9 = -\delta C_{10} < 0$ を作れる neutral 説明可？
 $C_{V1} < 0$ charged 逆
- R_2 $C_{S2} = 4C_T$ imaginary なら charged 説明可？
 $\delta C_9 = \delta C_{10}$ (tree) neutral 逆
- \tilde{R}_2 $\delta C'_9 = -\delta C'_{10}$ R_K と R_{K^*} を同時に減らせない
charged に寄与なし
- S_1 C_{V1}, C_{S2}, C_T を作る charged 説明可？
neutral : tree の寄与なし

Vectors

- U_1 $C_{V1} > 0$ と $\delta C_9 = -\delta C_{10} < 0$ を両立できる
 $R_{K^{(*)}}$ と $R_{D^{(*)}}$ を同時に説明できるか？
- U_3 $\delta C_9 = -\delta C_{10} < 0$ は可能 $C_{V1} < 0$

LQ direct production search: $M > (1-2)$ TeV

single U_1 solution (Angelescu et al, 2103.12504)

U_1 は μ と τ の両方に結合する必要

$R_{K^{(*)}}, R_{D^{(*)}}, M = 1.8$ TeV, その他のbounds

$\Rightarrow B(B \rightarrow K\mu\tau) > 0.7 \times 10^{-7}$

複数の新粒子を組み合わせて $R_{D^{(*)}}, R_{K^{(*)}}$ を同時に説明することももちろん可能

例 2つの scalar LQ $S_1 + S_3$ (Bhaskar et al, 2204.09031)

2 TeV のLQ に以下のような couplings を与えて、
 $R_{D^{(*)}}, R_{K^{(*)}}$, および Δa_μ (anomalous magnetic moment of μ), CDF による ΔM_W (exp vs SM) も説明

x_{32}^L	y_{32}^L	x_{32}^R	x_{23}^L	y_{23}^L	y_{22}^L	R_K^{VV}
-1	1	-0.0053	0.945	0.945	0.0028	1.045
1	1	0.0087	0.945	-0.945	0.0027	1.0446

x : $S_1 - q - l$ couplings

y : $S_3 - q - l$ couplings

B アノマリーに関連する現象

- $B_c^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ decay の分岐比

$b \rightarrow c \tau \bar{\nu}_\tau$ をスカラー型 O_{S1}, O_{S2} で説明しようとする、この分岐比が極めて大きくなる。未発見だが B~60% もありうる？

- $b \rightarrow s \nu \bar{\nu}$

$b \rightarrow s l^- l^+$ と SU(2)対称性に関連する。

$B \rightarrow K^{(*)} \nu \bar{\nu}$: Belle II で見つかるか？

- Anomalous magnetic moment of μ

$b \rightarrow s \mu^- \mu^+$ に寄与する粒子は μ と結合する。 $\Rightarrow a_\mu$ にも寄与？

まとめ

- B mesons の崩壊に関して、lepton flavor universality を破るアノマリーが、 $b \rightarrow c\tau^-\bar{\nu}$ と $b \rightarrow sl^+l^-$ のそれぞれに関する様々なモードについて報告されている(主にLHCbから)。
- SM と比べて、 $b \rightarrow c\tau^-\bar{\nu}$ が多く $b \rightarrow s\mu^+\mu^-$ が少なく出る傾向は、ここ10年程続いている。
- これらのアノマリーを説明するBSM 物理が各種提案されている。
- Belle の $R_{D^{(*)}}$, $R_{K^{(*)}}$ の結果は LHCb より SM よりに見える？
⇒ Belle II に期待