

Theory lecture: B物理 最近のanomaliesを中心に

Takaaki Nomura (KIAS)



1. イントロダクション: B物理 Overview

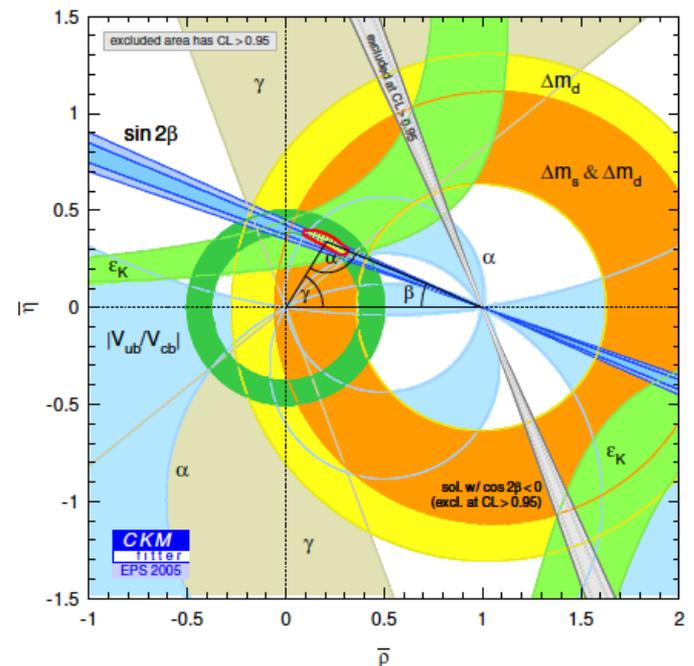
Bメソン: bクォークと軽いクォークでできている

$$B^0(\bar{b}d), B^+(\bar{b}u), B_s(\bar{b}s), \dots$$

Bの崩壊から標準模型(SM)のフレーバー構造を検証

CKM行列要素、CPの破れ

BaBar実験、Belle実験、
LHCb実験, etc.



1. イントロダクション

Bメソンの(稀)崩壊を通してさらにフレーバー物理の探求

✓ LHCbが稼働中

✓ さらにBelle II実験がデータを取り始める



より精密な測定が行われる

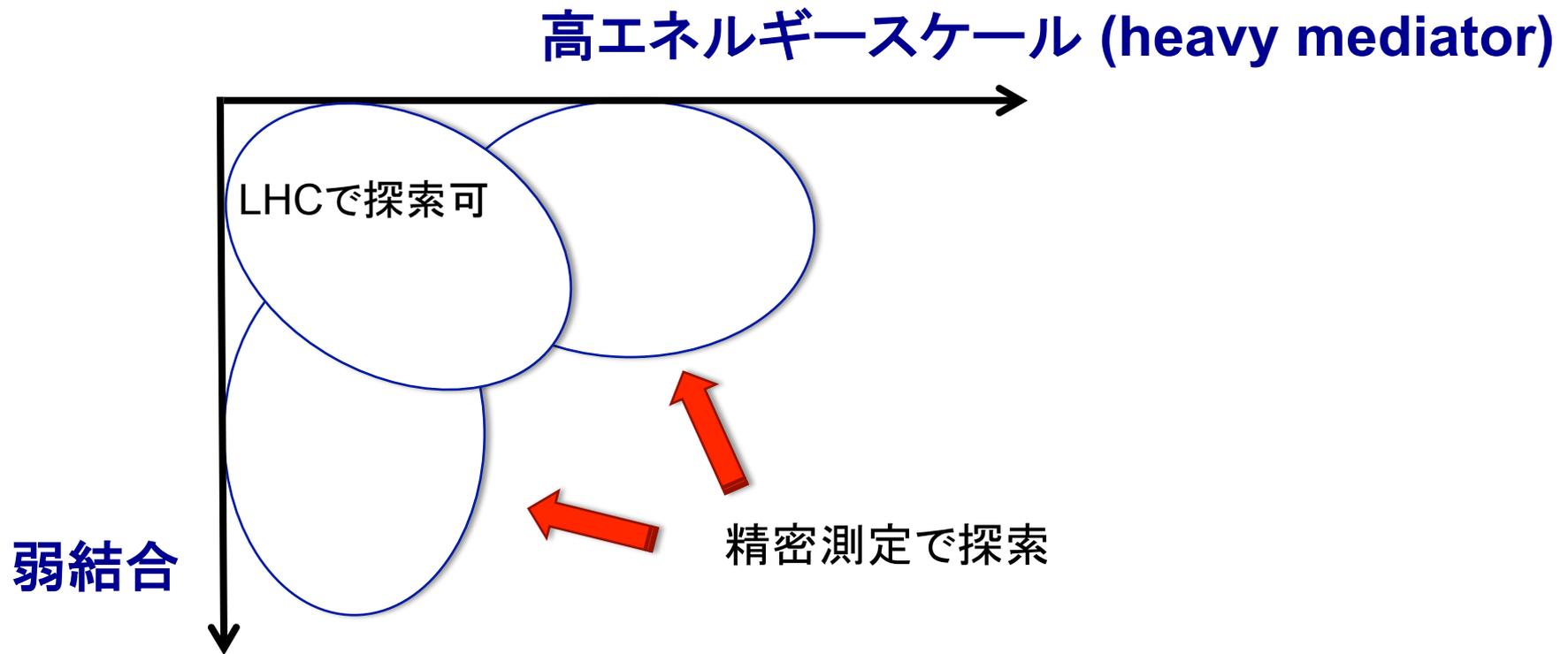


標準模型の確認 + 新物理の探索

1. イントロダクション

Bメソンの崩壊の精密測定により新物理を(間接)探索

標準模型の予言との矛盾 = 新物理の影響



レプトン・クォークのフレーバーの物理への影響を調べられる

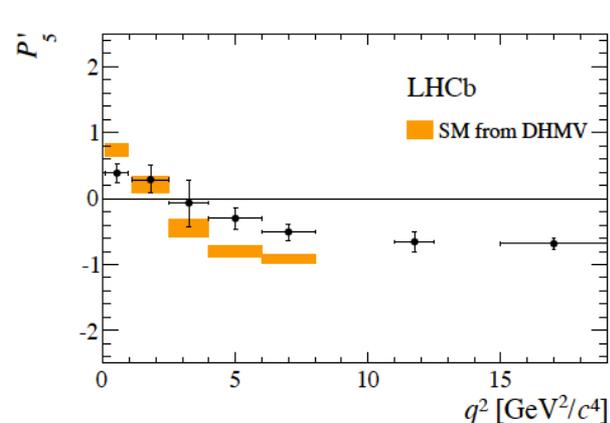
➡ 特にSemileptonic な稀B崩壊に注目

1. イントロダクション

B物理に関する観測にアノマリー: $b \rightarrow s l^+ l^-$ と $b \rightarrow c l \nu$

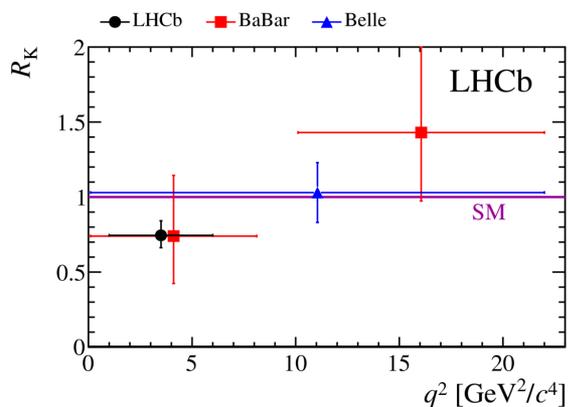
アノマリー: 標準模型からの予言値と実験値のズレ

❖ $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$ 過程の観測量でのアノマリー



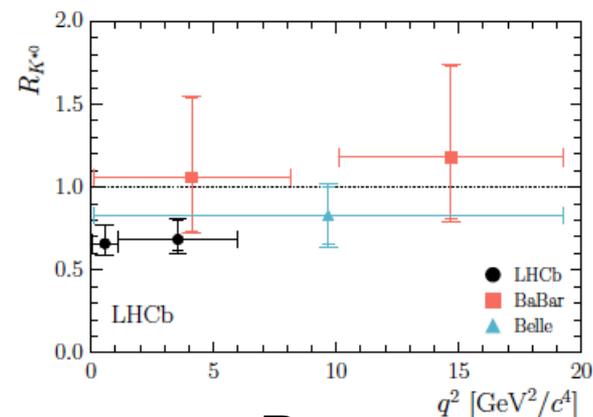
P'_5

LHCb, JHEP 1602 (2016) 104



R_K

LHCb, PRL 113 (2014) 151601

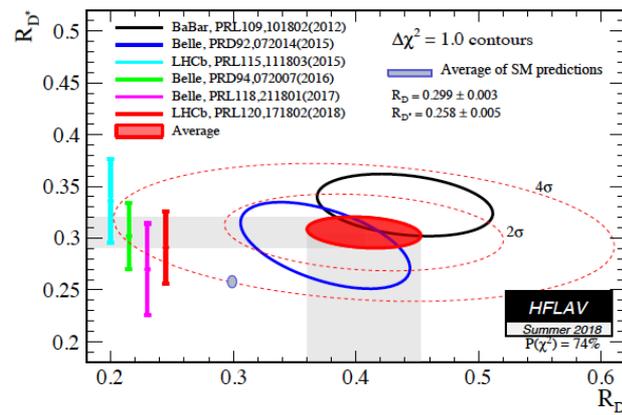


$R_{K^{*}}$

LHCb, JHEP 1708 (2017) 055

❖ $B \rightarrow D^{(*)} l \nu$ の観測量にもアノマリー

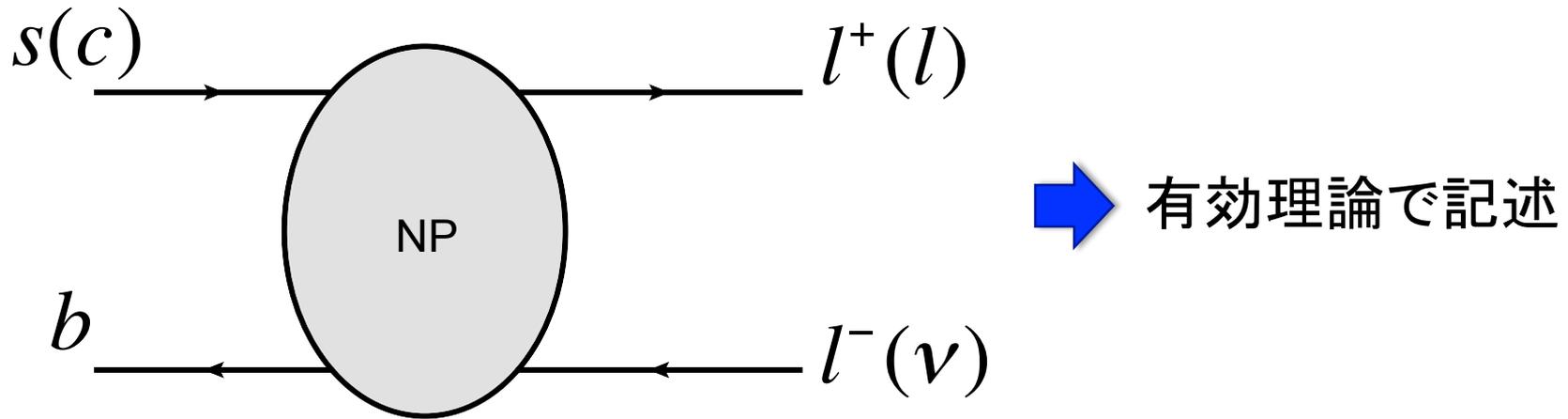
BaBar (2012), Belle (2015), LHCb (2015)



HFLAV
Summer 2018
 $P(\chi^2) = 74\%$

1. イントロダクション

❖ アノマリーは新物理(NP)の兆候かもしれない



❖ 新粒子の候補としては..

Z' ボソン, leptoquarks, exotic scalar/fermions, 等

❖ 他の実験でも新粒子を直接/間接検出できるかも

Semileptonic B decays

B物理を通じた新物理の探索の具体例として
観測されたアノマリーに関連したBの崩壊過程について議論します

◆ B decay from $b \rightarrow s l^+ l^-$

今回は主にこの過程を中心に話します

◆ B decay from $b \rightarrow c l \nu$

こちらも少しコメントします

説明する事柄

- 有効理論による取り扱い
- 観測量の定義
- 実験結果 + global fit からの示唆
- 示唆される新物理の候補

1. イントロダクション
2. B崩壊レビュー
3. 新物理への示唆
4. まとめ

標準模型での相互作用とフレーバー

□ 荷電レプトンフレーバー: e, μ , τ

- ✓ ゲージ相互作用はフレーバーに寄らない
- ✓ HiggsとのYukawa相互作用はフレーバーを変えない
その強さは質量に比例

□ クォークフレーバー: u,d,c,s,b,t

- ✓ Wボソンのゲージ相互作用はフレーバーを変える
(CKM行列を通して)

$$\frac{g}{\sqrt{2}} W_{\mu}^{+} \bar{u}_i \gamma^{\mu} P_L d_j V_{CKM}^{ij} + h.c. \quad V_{CKM} \approx \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

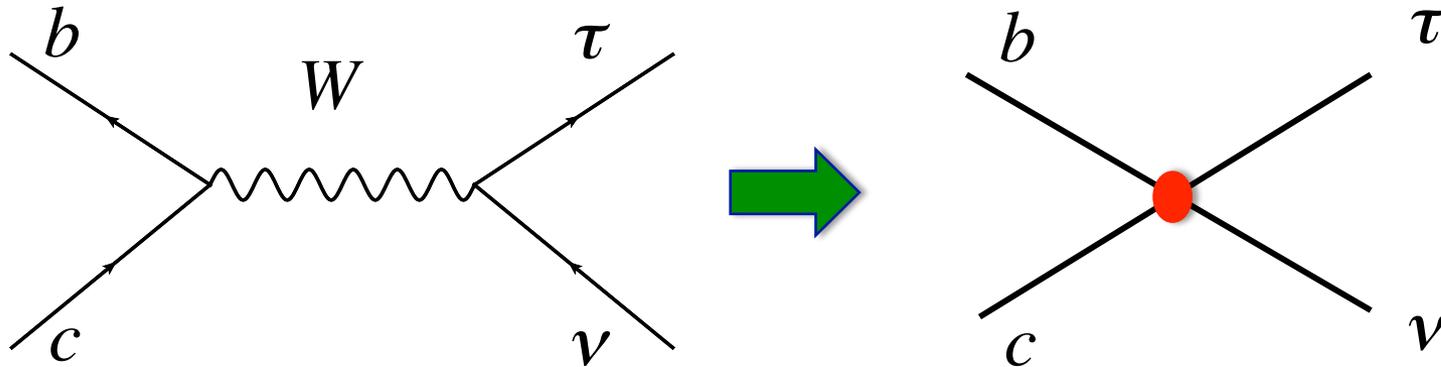
- ✓ 中性ゲージボソンの相互作用はフレーバーを変えない
- ✓ Higgsとの相互作用はレプトンと同様

有効理論とBの崩壊過程

クォークフレーバーを変える過程に興味がある

➡ 高エネルギー/重い自由度 (Bメソン質量に比べて) の伝播

例)



$$M \sim g^2 V_{cb}^* \frac{1}{q^2 - M_W^2} (\bar{c} \gamma^\mu P_L b) (\bar{\tau} \gamma^\mu P_L \nu_\tau) \approx \underbrace{g^2 V_{cb}^* \frac{1}{M_W^2} (\bar{c} \gamma^\mu P_L b) (\bar{\tau} \gamma^\mu P_L \nu_\tau)}_{C_i \times O_i}$$

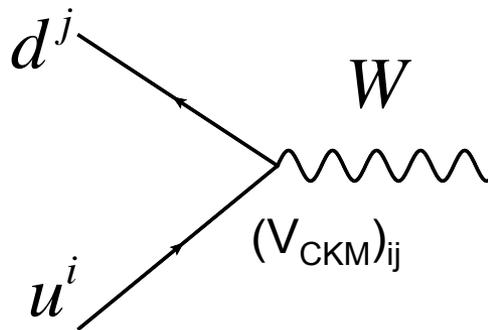
$C_i \times O_i$
(係数 × Operator)

- ✓ 高エネルギー効果は有効係数として扱う
- ✓ 低エネルギー効果は有効演算子を用いて計算

具体例として $b \rightarrow s l^+ l^-$ 過程の計算を見ていきます

- ◆ Flavor changing neutral current (FCNC) による過程
- ◆ SMでは1ループの寄与が主要な寄与

Wボソンがループダイアグラムの中を伝播する



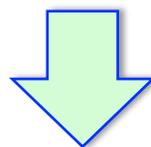
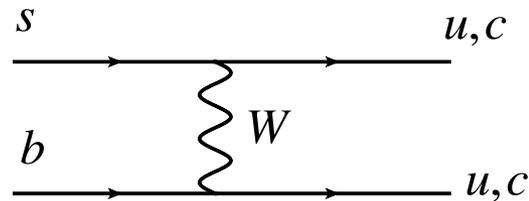
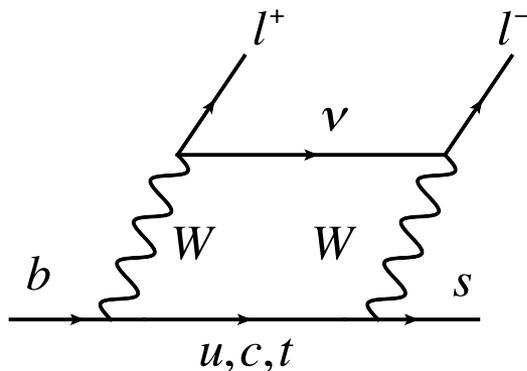
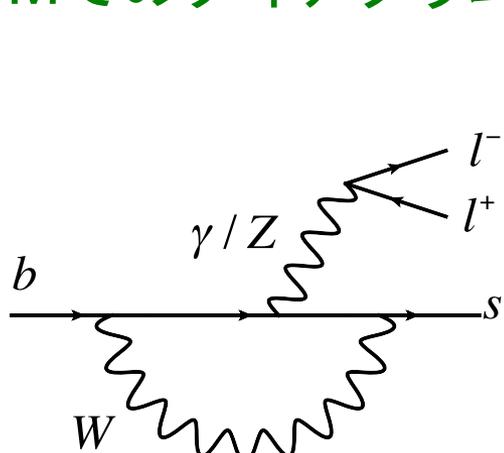
CKM要素とループファクタで抑制される

- ◆ SMの寄与は小さい→新物理の影響に対しsensitive
- ◆ フレーバー物理のテストに良い

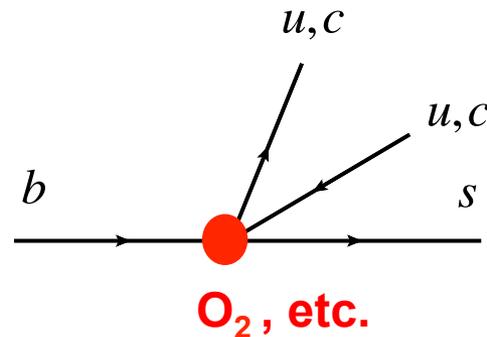
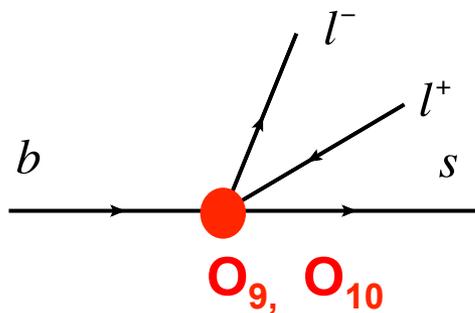
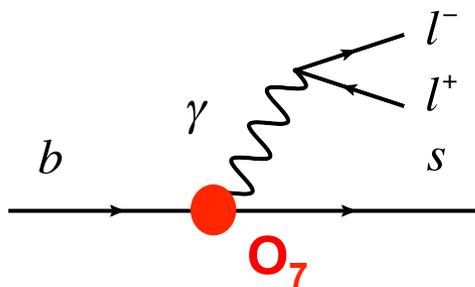
2.B崩壊レビュー

$b \rightarrow s l^+ l^-$ 過程に寄与する effective operator

SMでのダイアグラム



高エネルギー効果をintegrate out



有効ハミルトニアン

$$H_{eff}(b \rightarrow sl^+l^-) = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \sum_i C_i O_i$$

Effective Operators

$$O_9^l = \frac{e^2}{16\pi^2} (\bar{b} \gamma_\mu P_L s) (\bar{l} \gamma^\mu l), \quad O_{10}^l = \frac{e^2}{16\pi^2} (\bar{b} \gamma_\mu P_L s) (\bar{l} \gamma^\mu \gamma_5 l)$$

$$O_{7\gamma} = \frac{e}{16\pi^2} m_b (\bar{b} \sigma^{\mu\nu} P_L s) F_{\mu\nu}, \quad O_2 = (\bar{b} \gamma^\mu P_L c) (\bar{c} \gamma_\mu P_L s)$$

O'_7, O'_9, O'_{10} : Obtained by $P_L \rightarrow P_R$

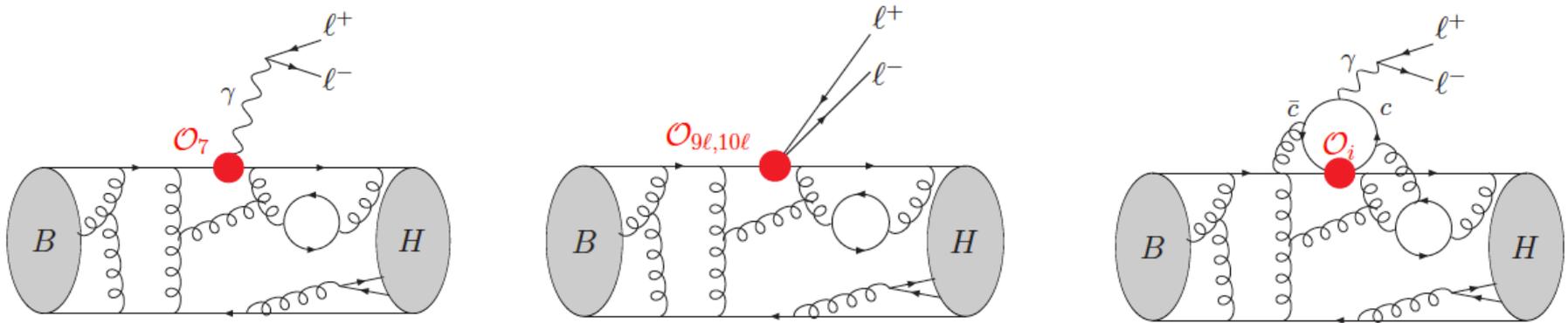
C_i : Wilson Coefficient (係数)

重い粒子・高エネルギー自由度の効果により決まる

In the SM: $C_9(\mu_b) \approx 4.1$, $C_{10}(\mu_b) \approx -4.2$, $C_7(\mu_b) \approx -0.3$, $C'_{7,9,10}(\mu_b) \approx 0$

2.B崩壊レビュー

メソンの崩壊振幅はeffective operatorを用いて計算される



Figs from 1809.06229

$$\langle M l^+ l^- | H_{eff} | B \rangle = \langle l^+ l^- | O_{lepton} | 0 \rangle \langle M | O_{quark} | B \rangle$$

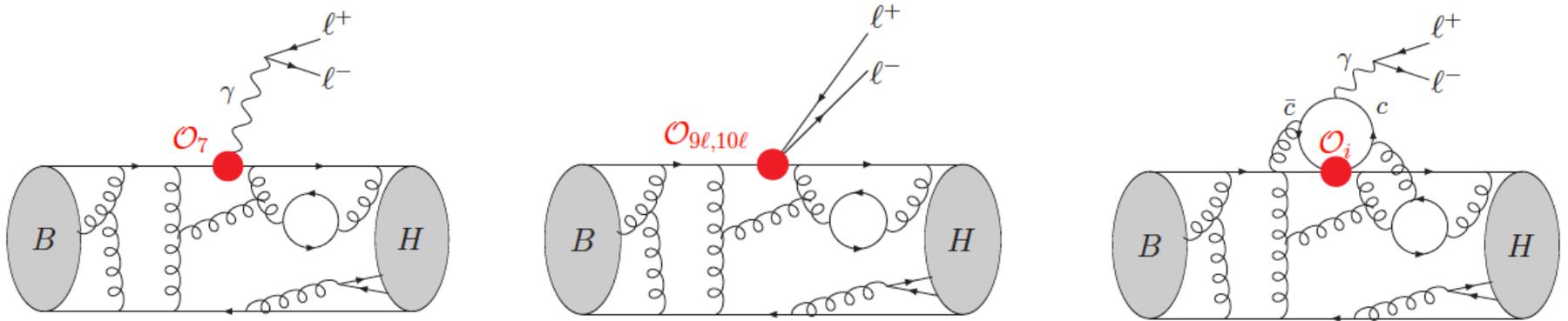
メソンの遷移振幅

$$q^2 : q = p_{l^+} + p_{l^-}$$

- ハドロン物理(QCD)の効果: **Form factors (FF) $F(q^2)$**
- ハドロン物理の不定性は**FF**に含まれる
- 不定性は観測量の比をとることで抑制できる

2.B崩壊レビュー

メソンの崩壊振幅はeffective operatorを用いて計算される



$$\langle M l^+ l^- | H_{eff} | B \rangle = \langle l^+ l^- | O_{lepton} | 0 \rangle \langle M | O_{quark} | B \rangle$$

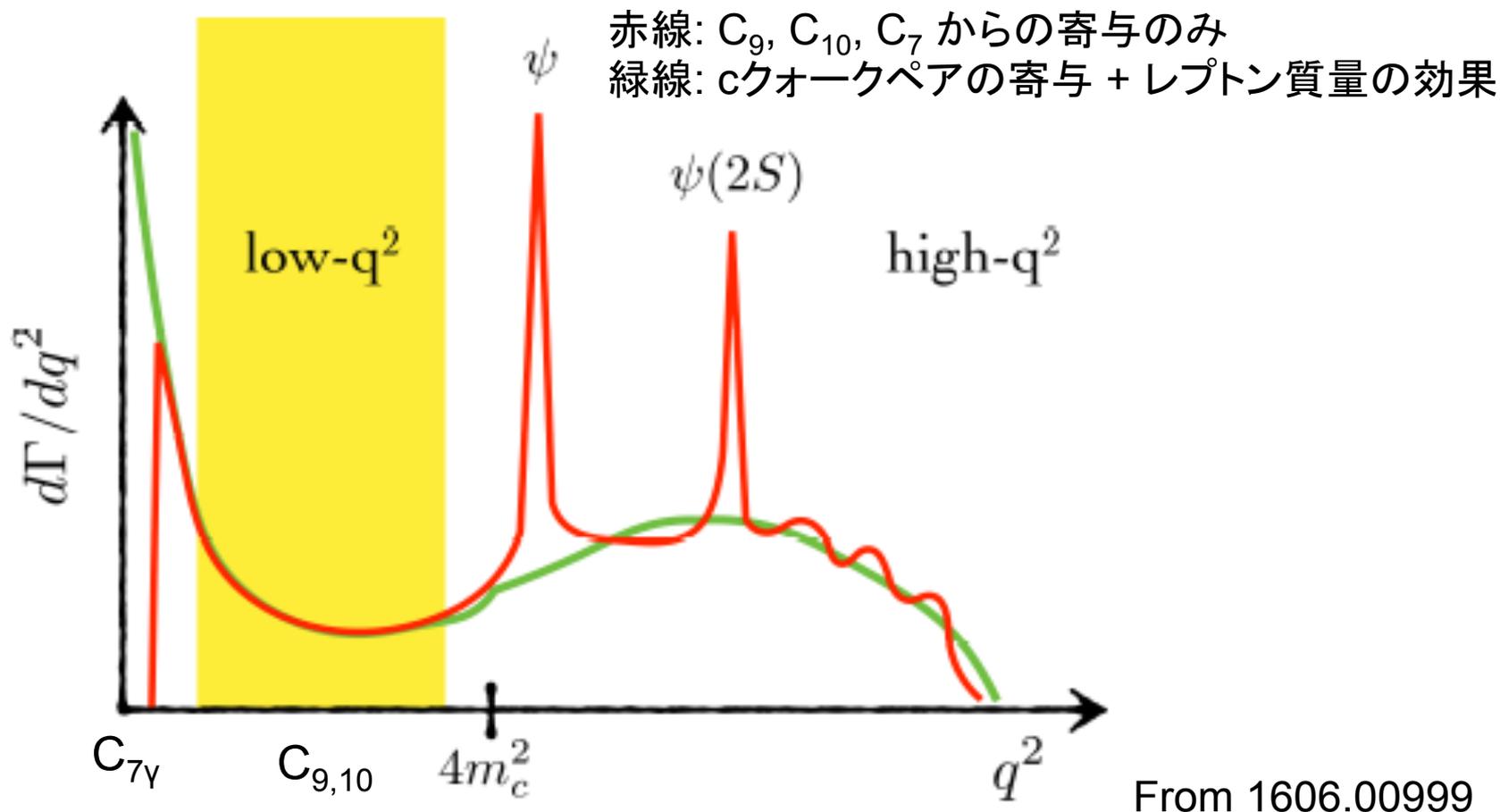
メソンの遷移振幅

$$q^2 : q = p_{l^+} + p_{l^-}$$

- **FF** は 低 q^2 領域では light-cone QCD sum rule (LCSR) で計算される
- 高 q^2 領域では Lattice QCDで計算される
- Heavy quark (HQ) limitでは関連する**FF** の数は少なくて済む

2.B崩壊レビュー

q^2 の領域と対応するeffective operator



$1 \text{ GeV}^2 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2$: O_9, O_{10} operator からの寄与が主

2.B崩壊レビュー

B \rightarrow K $l^+ l^-$ decay

Form factors :

$$\langle K(k) | \bar{s} \gamma^\mu b | B(p) \rangle = F_+(q^2) \left((p+k)^\mu - \frac{m_B^2 - m_K^2}{q^2} q^\mu \right) + \frac{m_B^2 - m_K^2}{q^2} q^\mu F_0(q^2)$$

$$\langle K(k) | \bar{s} \sigma^{\mu\nu} b | B(p) \rangle = -i (p^\mu k^\nu - p^\nu k^\mu) \frac{2F_T(q^2)}{m_B + m_K}$$

Decay width :

$$\frac{d\Gamma}{dq^2} = N_K |k|^3 F_+(q^2)^2 \left(|C_{10}^l + C_{10}^{l'}|^2 + \left| C_9^l + C_9^{l'} + 2 \frac{m_b}{m_B + m_K} C_7 \frac{F_T(q^2)}{F_+(q^2)} - 8\pi^2 h_k \right|^2 + O\left(\frac{m_l^4}{q^4}\right) + \frac{m_l^2}{m_B^2} \times O\left(\alpha_s, \frac{q^2}{m_B^2} \frac{\Lambda_{QCD}}{m_b}\right) \right)$$

$q = k - p$, h_k : ハドロン物理の効果, N_K : 質量次元を持った係数

$C_{9,10}$ からの寄与が主要 ($q^2 > 1 \text{ GeV}^2$)

2.B崩壊レビュー

B \rightarrow K* |⁺l⁻ decay

Form factors :

$$\langle K^*(k, \varepsilon) | \bar{s} \gamma_\mu b | \bar{B}(p) \rangle = i \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} p^\rho k^\sigma \frac{2}{m_B + m_{K^*}} V(q^2)$$

$$\begin{aligned} \langle K^*(k, \varepsilon) | \bar{s} \gamma_\mu \gamma_5 b | \bar{B}(p) \rangle &= 2m_{K^*} A_0(q^2) \frac{\varepsilon^* \cdot q}{q^2} q_\mu + (m_B + m_{K^*}) A_1(q^2) \left(\varepsilon_\mu^* - \frac{\varepsilon^* \cdot q}{q^2} q_\mu \right) \\ &\quad - A_2(q^2) \frac{\varepsilon^* \cdot q}{m_B + m_{K^*}} \left((k+p)_\mu - \frac{m_B^2 - m_{K^*}^2}{q^2} q_\mu \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \langle K^*(k, \varepsilon) | \bar{s} \gamma_\mu \gamma_5 b | \bar{B}(p) \rangle &= \varepsilon_{\mu\nu\rho\sigma} \left[\varepsilon^{\rho*} (p+k)^\sigma T_1(q^2) + \varepsilon^{\rho*} q^\sigma \frac{m_B^2 - m_{K^*}^2}{q^2} (T_2(q^2) - T_1(q^2)) \right. \\ &\quad \left. + 2 \frac{\varepsilon^* \cdot q}{q^2} p^\rho k^\sigma \left(T_2(q^2) - T_1(q^2) + \frac{q^2}{m_B^2 - m_{K^*}^2} T_3(q^2) \right) \right] \end{aligned}$$

K メソンよりも複雑: 7 FF

2.B崩壊レビュー

B \rightarrow K* l+l- decay

Decay width :

$$\frac{d\Gamma}{dq^2} = \frac{d\Gamma_{\perp}}{dq^2} + \frac{d\Gamma_0}{dq^2}$$

$$\frac{d\Gamma_0}{dq^2} = N_{K^*0} |k|^3 V_0(q^2)^2 \left(\left| C_{10}^l - C_{10}^{\prime l} \right|^2 + \left| C_9^l - C_9^{\prime l} + 2 \frac{m_b}{m_B} C_7 \frac{T_0(q^2)}{V_0(q^2)} - 8\pi^2 h_{k^*0} \right|^2 \right) + O\left(\frac{m_l^2}{q^2}\right)$$

$$\frac{d\Gamma_{\perp}}{dq^2} = N_{K^*\perp} |k| q^2 V_{\perp}(q^2)^2 \left(\left| C_{10}^l \right|^2 + \left| C_9^{\prime l} \right|^2 + \left| C_{10}^{\prime l} \right|^2 + \left| C_9^l + 2 \frac{m_b m_B}{q^2} C_7 \frac{T_{\perp}(q^2)}{V_{\perp}(q^2)} - 8\pi^2 h_{k^*\perp} \right|^2 \right) + O\left(\frac{m_l^2}{q^2}\right) + O\left(\frac{\Lambda_{QCD}}{m_b}\right)$$

$$V_{\pm}(q^2) = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{m_V}{m_B} \right) A_1(q^2) \mp \frac{\lambda^{1/2}}{m_B(m_B + m_V)} V(q^2) \right],$$

$$V_0(q^2) = \frac{1}{2m_V \lambda^{1/2} (m_B + m_V)} \left[(m_B + m_V)^2 (m_B^2 - q^2 - m_V^2) A_1(q^2) - \lambda A_2(q^2) \right],$$

$$T_{\pm}(q^2) = \frac{m_B^2 - m_V^2}{2m_B^2} T_2(q^2) \mp \frac{\lambda^{1/2}}{2m_B^2} T_1(q^2),$$

$$T_0(q^2) = \frac{m_B}{2m_V \lambda^{1/2}} \left[(m_B^2 + 3m_V^2 - q^2) T_2(q^2) - \frac{\lambda}{(m_B^2 - m_V^2)} T_3(q^2) \right],$$

$$\lambda = 4m_B^2 |k|^2$$

$C_{9,10}$ の寄与が主要 ($q^2 > 1 \text{ GeV}^2$)

Observables from $b \rightarrow s l^+ l^-$

□ Differential branching fractions for $b \rightarrow s l^+ l^-$

単純だがハドロン物理(QCDの効果)の不定性が大きい

□ Angular distribution observable in $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ ($K^* \rightarrow K \pi$)

Optimal observables を定義 (観測量の比をとる)

➡ ハドロン物理の不定性が抑制される

□ Lepton Flavor Universality (LFU) observable

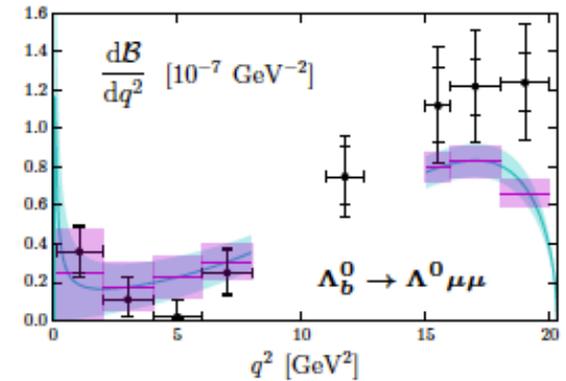
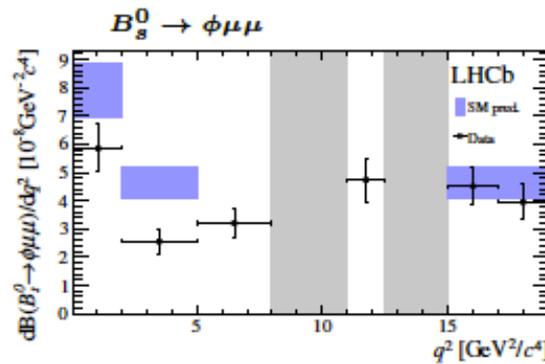
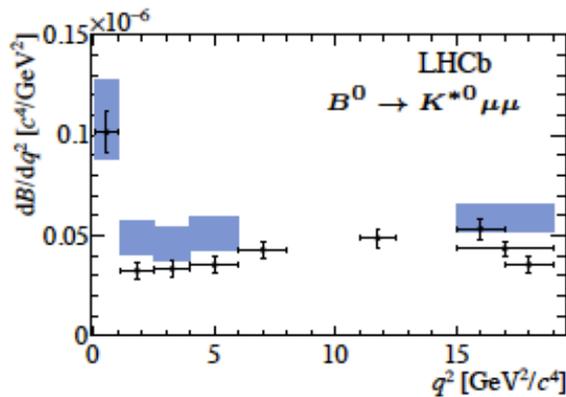
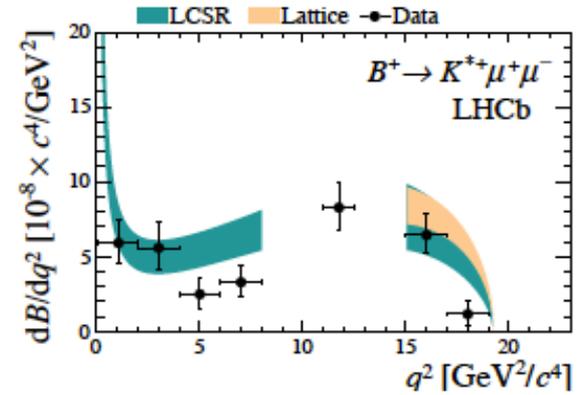
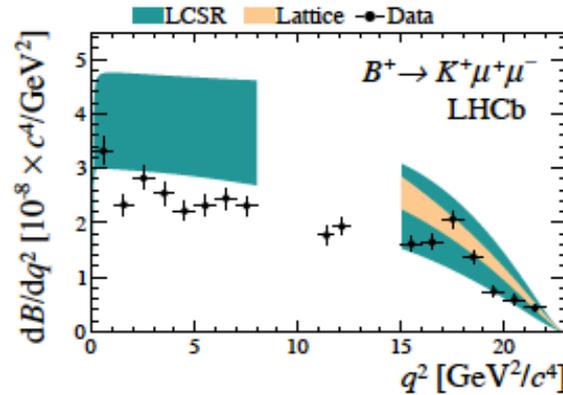
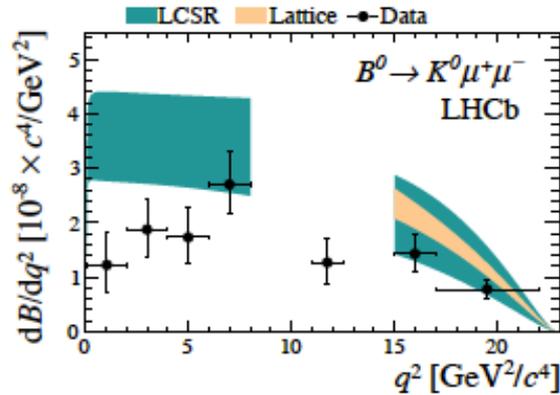
電子モードとミュオンモードに対する分岐比(Branching ratio)の比

➡ 理論的計算の不定性が少くてすむ

2.B崩壊レビュー

□ Differential branching fractions for $b \rightarrow s l^+ l^-$

LHCb, 1403.8044



LHCb, 1606.04731

LHCb, 1506.08777

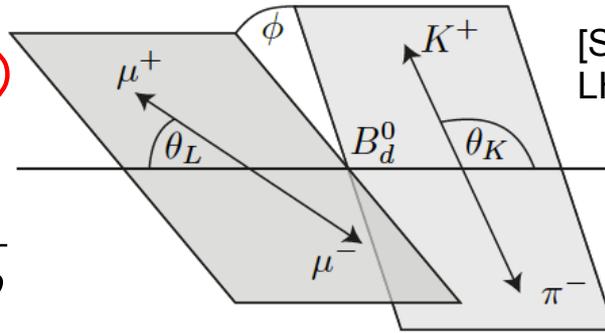
LHCb, 1503.07138

✓ low q^2 の領域で予言とずれてる

✓ ハドロン物理からの不定性大

□ Angular distribution observable in $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ ($K^* \rightarrow K \pi$)

● 定義(オリジナル)



[S. Descotes-Genon et al, JHEP 1301, 048 (2013);
LHCb JHEP 1602, 104]

$$\frac{d^4\Gamma}{dq^2 d\cos\theta_K d\cos\theta_L d\phi}$$

$$= \frac{9}{32\pi} \left[J_{1s} \sin^2 \theta_K + J_{1c} \cos^2 \theta_K + \left(J_{2s} \sin^2 \theta_K + J_{2c} \cos^2 \theta_K \right) \cos 2\theta_L \right. \\ + J_3 \sin^2 \theta_K \sin^2 \theta_L \cos 2\phi + J_4 \sin 2\theta_K \sin 2\theta_L \cos \phi + J_5 \sin 2\theta_K \sin \theta_L \cos \phi \\ + \left(J_{6s} \sin^2 \theta_K + J_{6c} \cos^2 \theta_K \right) \cos \theta_L + J_7 \sin 2\theta_K \sin \theta_L \sin \phi + J_8 \sin 2\theta_K \sin 2\theta_L \sin \phi \\ \left. + J_9 \sin^2 \theta_K \sin^2 \theta_L \sin 2\phi \right]$$

Optimized angular observables

$$P_1 = \frac{\Sigma_3}{2\Sigma_{2s}}, \quad P_2 = \frac{\Sigma_{6s}}{8\Sigma_{2s}}, \quad P_3 = -\frac{\Sigma_9}{4\Sigma_{2s}}, \quad P_4' = \frac{\Sigma_4}{\sqrt{-\Sigma_{2s}\Sigma_{2c}}},$$

$$P_5' = \frac{\Sigma_5}{2\sqrt{-\Sigma_{2s}\Sigma_{2c}}}, \quad P_6' = -\frac{\Sigma_7}{2\sqrt{-\Sigma_{2s}\Sigma_{2c}}}, \quad P_7' = -\frac{\Sigma_8}{\sqrt{-\Sigma_{2s}\Sigma_{2c}}}$$

$$\left(\Sigma_i = \frac{J_i + \bar{J}_i}{2} \right)$$

2.B崩壊レビュー

□ Angular distribution observable in $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ ($K^* \rightarrow K \pi$)

[S. Descotes-Genon et al, JHEP 1301, 048 (2013);
LHCb JHEP 1602, 104]

● $m_l \rightarrow 0$ の極限下

$$\frac{1}{d(\Gamma + \bar{\Gamma}) / dq^2} \frac{d^4(\Gamma + \bar{\Gamma})}{dq^2 d\cos\theta_K d\cos\theta_L d\phi}$$

$$= \frac{9}{32\pi} \left[\frac{1}{4} (1 - F_L) \sin^2 \theta_K + F_L \cos^2 \theta_K - \frac{1}{4} (1 - F_L) \sin^2 \theta_K \cos 2\theta_L - F_L \cos^2 \theta_K \cos 2\theta_L \right.$$

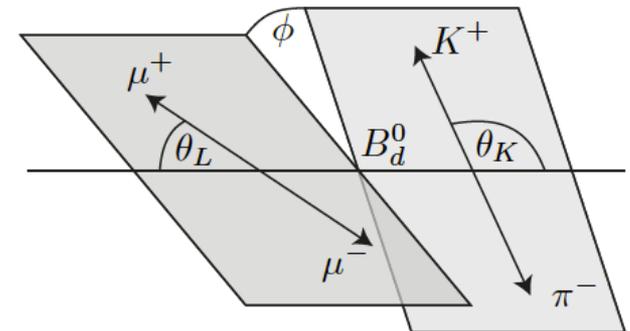
$$+ S_3 \sin^2 \theta_K \sin^2 \theta_L \cos 2\phi + S_4 \sin 2\theta_K \sin 2\theta_L \cos \phi + S_5 \sin 2\theta_K \sin \theta_L \cos \phi$$

$$+ \frac{4}{3} A_{FB} \sin^2 \theta_K \cos \theta_L + S_7 \sin 2\theta_K \sin \theta_L \sin \phi + S_8 \sin 2\theta_K \sin 2\theta_L \sin \phi$$

$$\left. + S_9 \sin^2 \theta_K \sin^2 \theta_L \sin 2\phi \right]$$

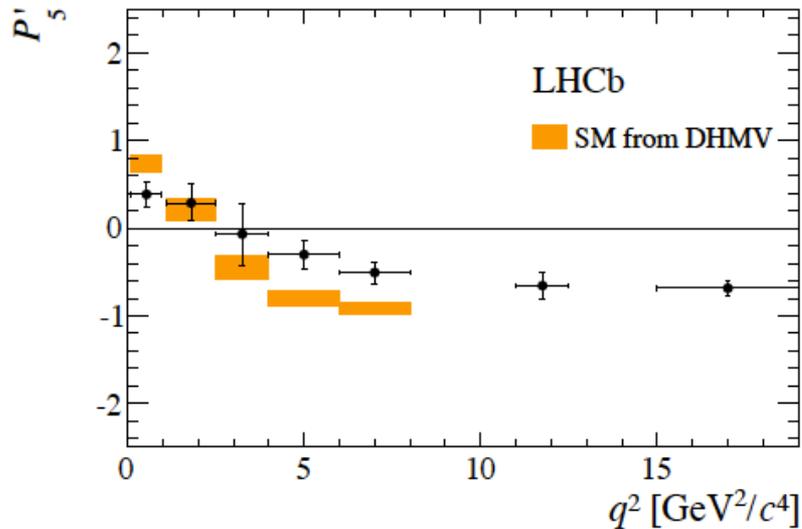
Optimized angular observables

$$P'_{4,5,6,8} = \frac{S_{4,5,6,7}}{\sqrt{F_L (1 - F_L)}}$$

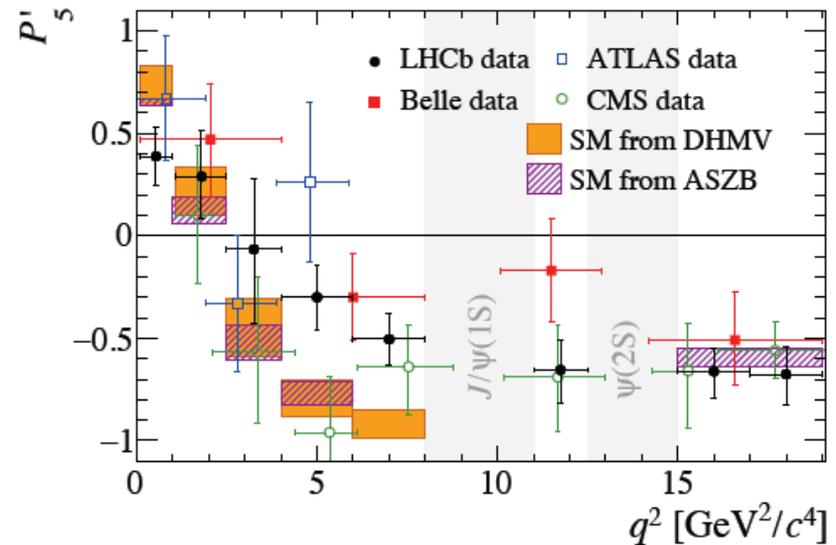


2.B崩壊レビュー

✧ P'_5 の実験値とSMからの予言の間にズレ

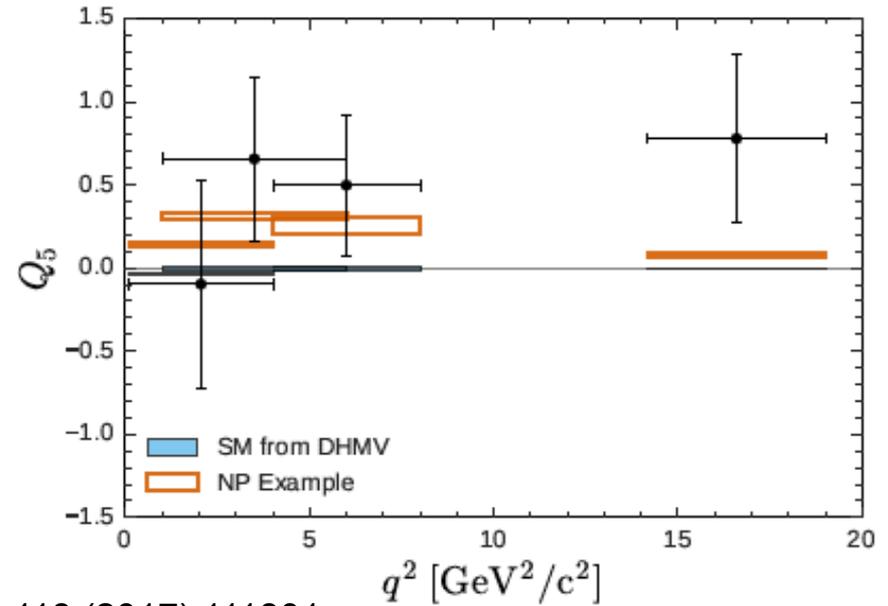
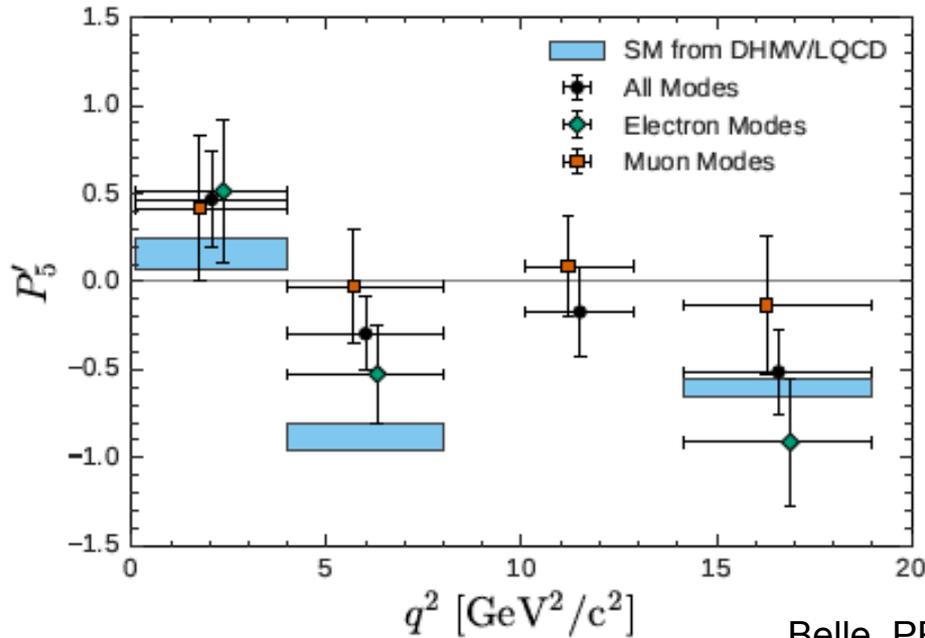


LHCb, JHEP 1602 (2016) 104



- LHCb での観測値がSMの予言からずれていた
- Belle & ATLAS のデータも同じ方向に予言値からズレ
- CMS の値はSMの予言と今のところconsistent

✧ Angular observable: electron vs muon by Belle



Belle, PRL 118 (2017) 111801

$$Q_i = P_i^{\prime\mu} - P_i^{\prime e}$$

- ✓ Q_i は P_i よりは不定性が小さい
- ✓ SMからのズレはミュオンの場合だけに見える(?)
- ✓ 確かめるにはもっとデータが必要; 今後の LHCb, Belle II

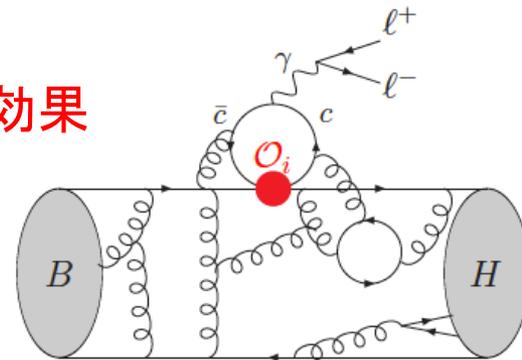
2.B崩壊レビュー

❖ Optimized observables は比較的クリーンな観測量

➤ FFからの不定性は比をとることで一部キャンセル

❖ ただし不定性は残る

➤ チャームループからのlong distance 効果



❖ ミューオンと結合する新粒子？

❖ P'_5 はBelle II実験でテストされる

□ Lepton Flavor Universality (LFU) test in $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$

❖ LFU ratio:

$$R_M[q_{\min}^2, q_{\max}^2] = \frac{\int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} dq^2 \frac{d\Gamma(B \rightarrow M \mu^+ \mu^-)}{dq^2}}{\int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} dq^2 \frac{d\Gamma(B \rightarrow M e^+ e^-)}{dq^2}} \quad (M=K, K^*)$$

- クリーンな観測量: 比をとることでFFの不定性がキャンセル
(特に $q^2 > 1 \text{ GeV}^2$ の領域ではレプトン質量の効果を無視できる)
- チャームループの寄与はLFUの破れには効かない
- QED の量子補正の効果は小さい (a few % level)

□ Lepton Flavor Universality (LFU) test in $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$

For K:

$$\frac{d\Gamma}{dq^2} = N_K |k|^3 F_+(q^2)^2 \left(\left| C_{10}^l + C_{10}^{\prime l} \right|^2 + \left| C_9^l + C_9^{\prime l} + 2 \frac{m_b}{m_B + m_K} C_7 \frac{F_T(q^2)}{F_+(q^2)} - 8\pi^2 h_k \right|^2 + O\left(\frac{m_l^4}{q^4}\right) + \frac{m_l^2}{m_B^2} \times O\left(\alpha_s, \frac{q^2}{m_B^2} \frac{\Lambda_{QCD}}{m_b}\right) \right)$$

For K^* :

$$\frac{d\Gamma}{dq^2} = \frac{d\Gamma_{\perp}}{dq^2} + \frac{d\Gamma_0}{dq^2}$$

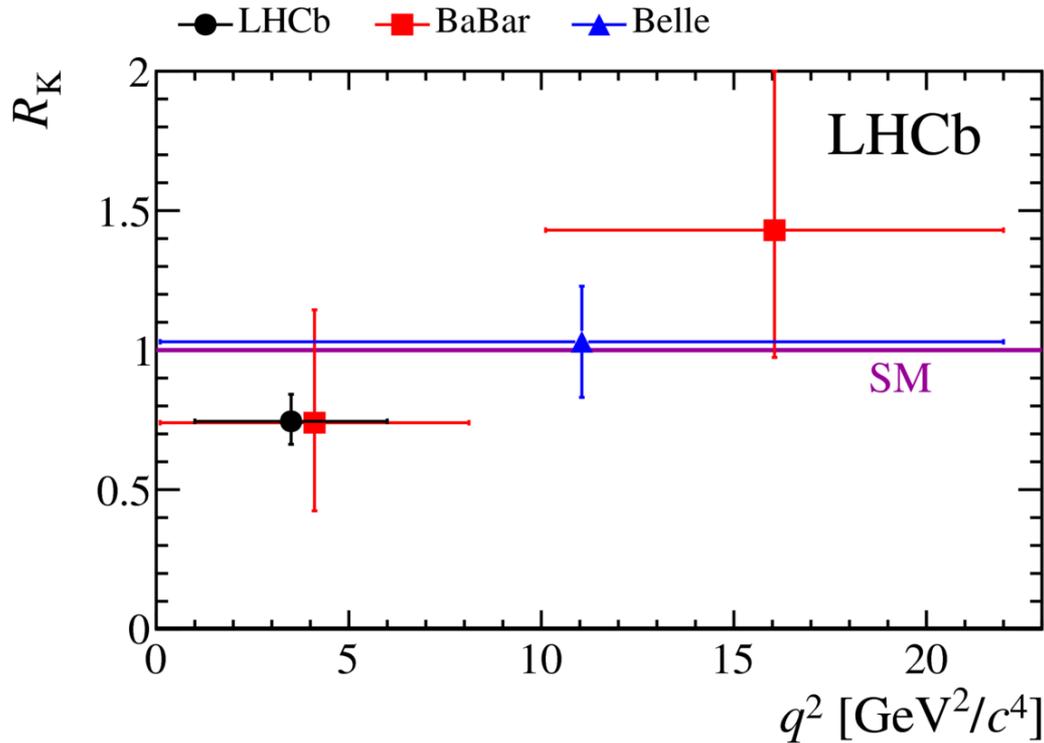
$$\frac{d\Gamma_0}{dq^2} = N_{K^{*0}} |k|^3 V_0(q^2)^2 \left(\left| C_{10}^l - C_{10}^{\prime l} \right|^2 + \left| C_9^l - C_9^{\prime l} + 2 \frac{m_b}{m_B} C_7 \frac{T_0(q^2)}{V_0(q^2)} - 8\pi^2 h_{k^*0} \right|^2 \right) + O\left(\frac{m_l^2}{q^2}\right)$$

$$\frac{d\Gamma_{\perp}}{dq^2} = N_{K^{*\perp}} |k| q^2 V_{\perp}(q^2)^2 \left(\left| C_{10}^l \right|^2 + \left| C_9^{\prime l} \right|^2 + \left| C_{10}^{\prime l} \right|^2 + \left| C_9^l + 2 \frac{m_b m_B}{q^2} C_7 \frac{T_{\perp}(q^2)}{V_{\perp}(q^2)} - 8\pi^2 h_{k^*\perp} \right|^2 \right) + O\left(\frac{m_l^2}{q^2}\right) + O\left(\frac{\Lambda_{QCD}}{m_b}\right)$$

In the SM: $C_9(\mu_b) \approx 4.1$, $C_{10}(\mu_b) \approx -4.2$, $C_7(\mu_b) \approx -0.3$, $C'_{7,9,10}(\mu_b) \approx 0$

| Observable | SM predictions 1704.05340, 1704.05446, 1703.09189, 1605.07633 | | | |
|---|---|------------------------------|---------------------|-------------------|
| $R_K (1.0 < q^2 < 6.0 \text{ GeV}^2/c^4)$ | 1.00 ± 0.01 | $1.0004_{-0.0007}^{+0.0008}$ | — | 1.000 ± 0.010 |
| $R_{K^*} (0.045 < q^2 < 1.1 \text{ GeV}^2/c^4)$ | 0.92 ± 0.02 | $0.920_{-0.006}^{+0.007}$ | 0.9259 ± 0.0041 | 0.906 ± 0.028 |
| $R_{K^*} (1.1 < q^2 < 6.0 \text{ GeV}^2/c^4)$ | 1.00 ± 0.01 | $0.996_{-0.002}^{+0.002}$ | 0.9965 ± 0.0006 | 1.000 ± 0.010 |

R_K の観測にアノマリーを発見



$$R_K = \frac{\text{Br}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\text{Br}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}$$

$$R_K = 0.745^{+0.090}_{-0.074} (\text{stat}) \pm 0.036 (\text{syst}).$$

LHCb, PRL 113 (2014) 151601

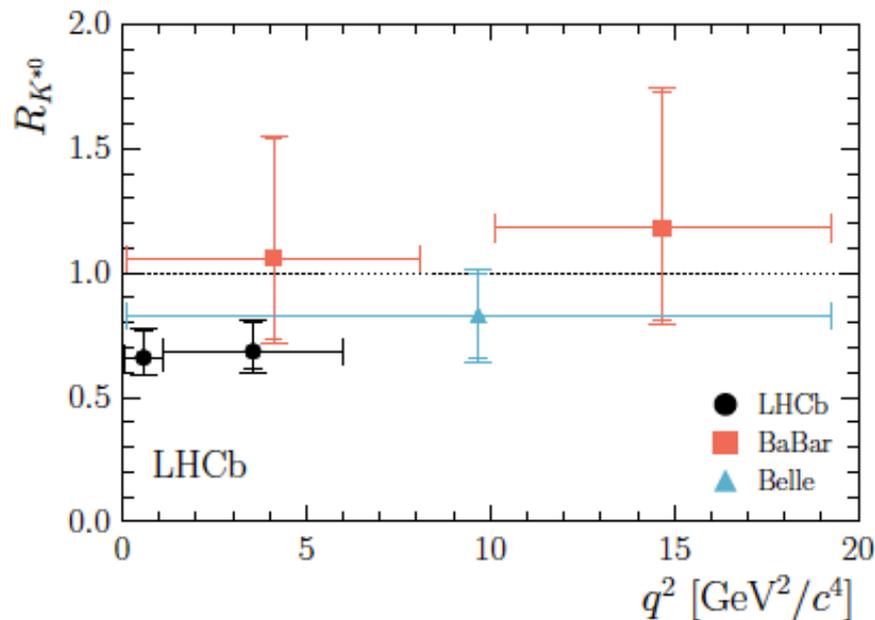
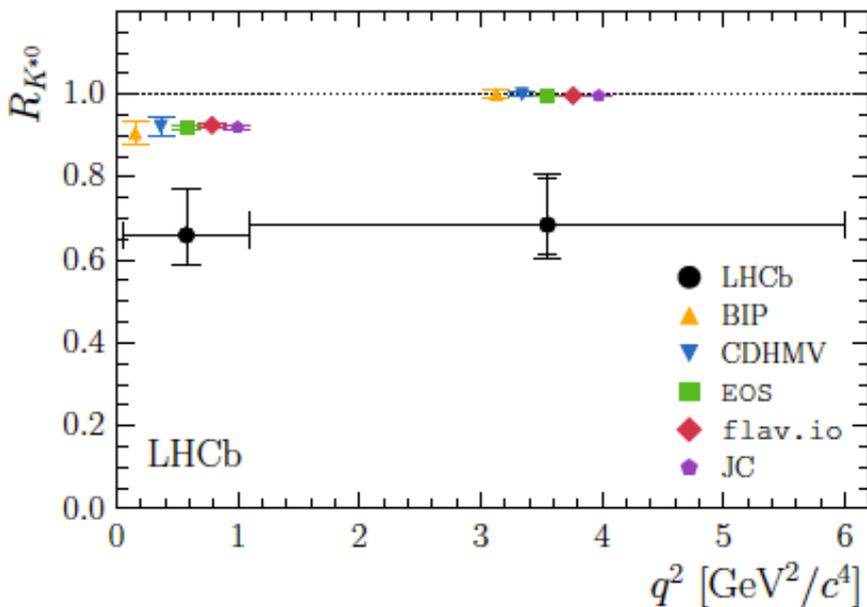
✓ $1 \text{ GeV}^2 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2$ の領域でSMからの予言からズレ

~2.6 σ level

2.B崩壊レビュー

R_{K^*} の観測でもアノマリーを発見

LHCb, JHEP 1708 (2017) 055



| | low- q^2 | central- q^2 |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| $R_{K^{*0}}$ | $0.66 \pm_{-0.07}^{+0.11} \pm 0.03$ | $0.69 \pm_{-0.07}^{+0.11} \pm 0.05$ |
| 95.4% CL | [0.52, 0.89] | [0.53, 0.94] |
| 99.7% CL | [0.45, 1.04] | [0.46, 1.10] |

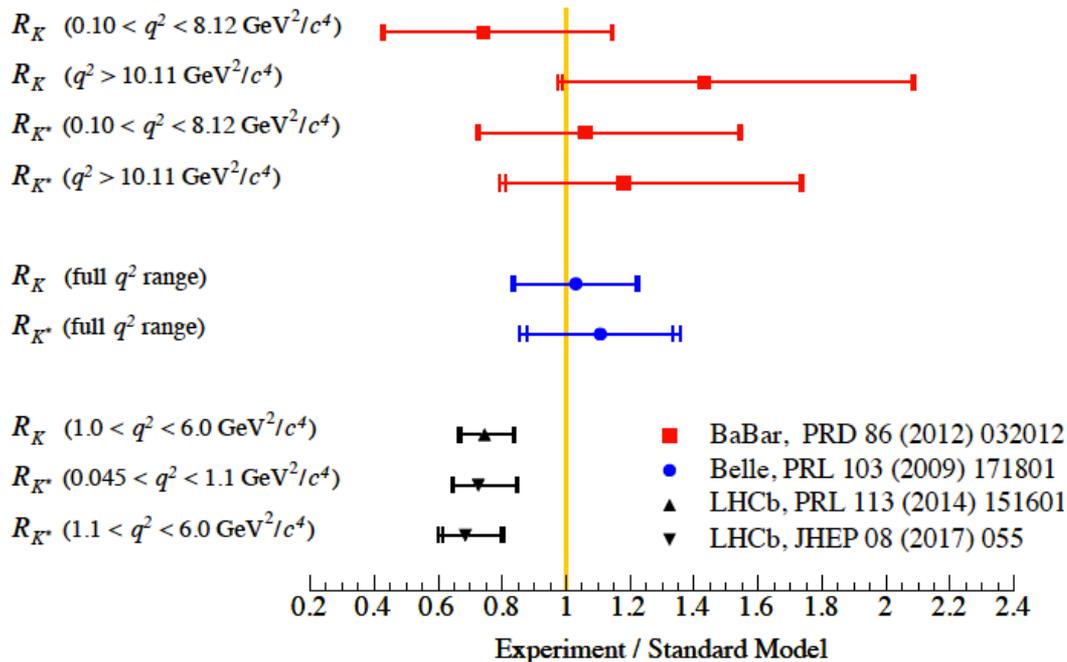
Deviation: **2.1-2.3 σ** **2.4-2.5 σ**

SMの予言にズレ
(二つの q^2 の領域で)

2.B崩壊レビュー

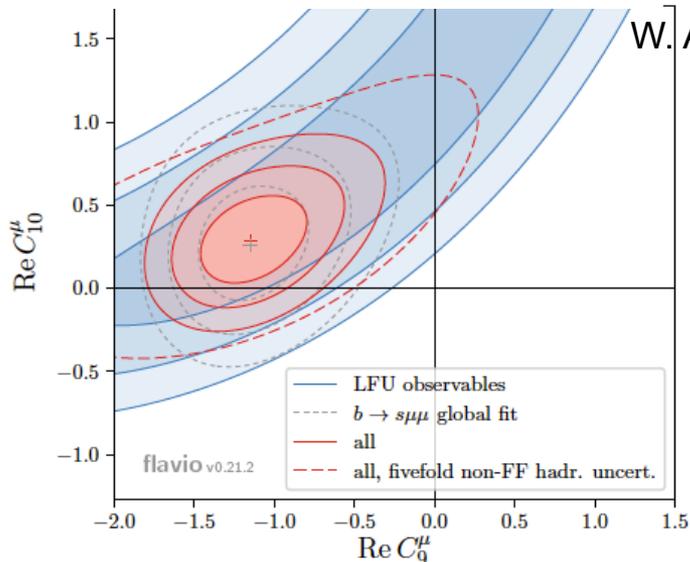
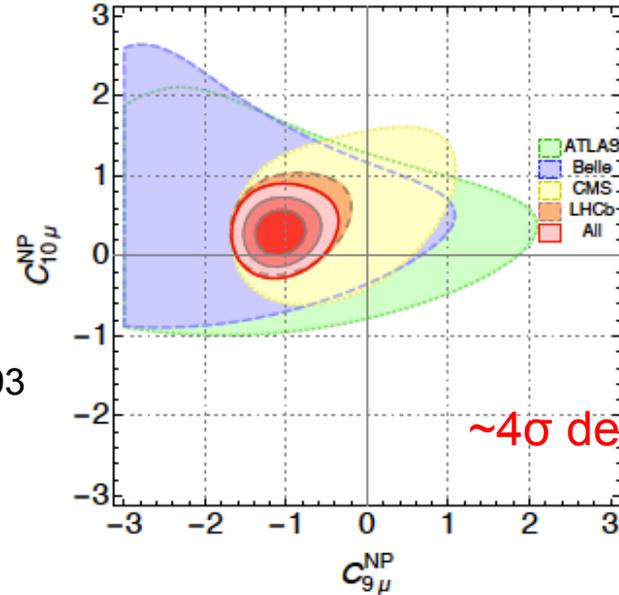
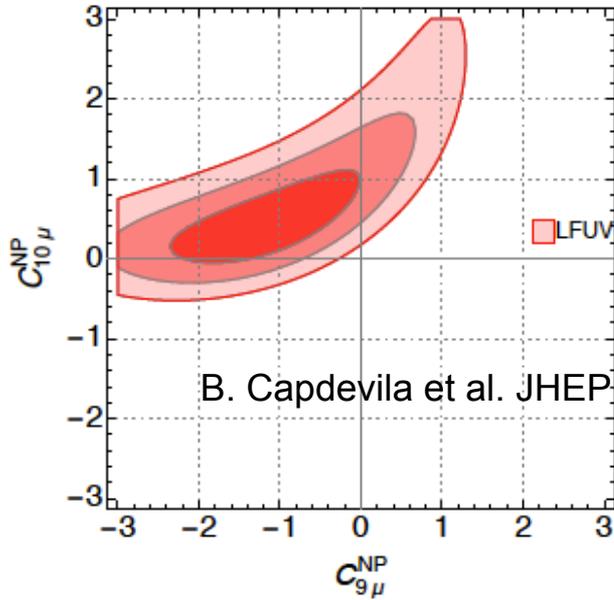
Summary of experimental results for LFU test in $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$

| Experiment (year) | H_s type | q^2 range [GeV^2/c^4] | Value | Ref. |
|-------------------|------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------|
| Belle (2009) | K | 0.0 – kin. endpoint | $1.03 \pm 0.19 \pm 0.06$ | Belle, PRL 103 (2009) 171801 |
| Belle (2009) | K^* | 0.0 – kin. endpoint | $0.83 \pm 0.17 \pm 0.08$ | |
| BaBar (2012) | K | 0.10 – 8.12 | $0.74^{+0.40}_{-0.31} \pm 0.06$ | BaBar, PRD 86 (2012) 032012 |
| BaBar (2012) | K | > 10.11 | $1.43^{+0.65}_{-0.44} \pm 0.12$ | |
| BaBar (2012) | K^* | 0.10 – 8.12 | $1.06^{+0.48}_{-0.33} \pm 0.08$ | |
| BaBar (2012) | K^* | > 10.11 | $1.18^{+0.55}_{-0.37} \pm 0.11$ | LHCb, PRL 113 (2014) 151601 |
| LHCb (2014) | K^+ | 1.0 – 6.0 | $0.745^{+0.090}_{-0.074} \pm 0.036$ | |
| LHCb (2017) | K^{*0} | 0.045 – 1.1 | $0.66^{+0.11}_{-0.03} \pm 0.05$ | |
| LHCb (2017) | K^{*0} | 1.1 – 6.0 | $0.69^{+0.11}_{-0.07} \pm 0.05$ | LHCb, JHEP 08 (2017) 055 |



2.B崩壊レビュー

Global fit for $b \rightarrow s l^+ l^-$ observables assuming NP



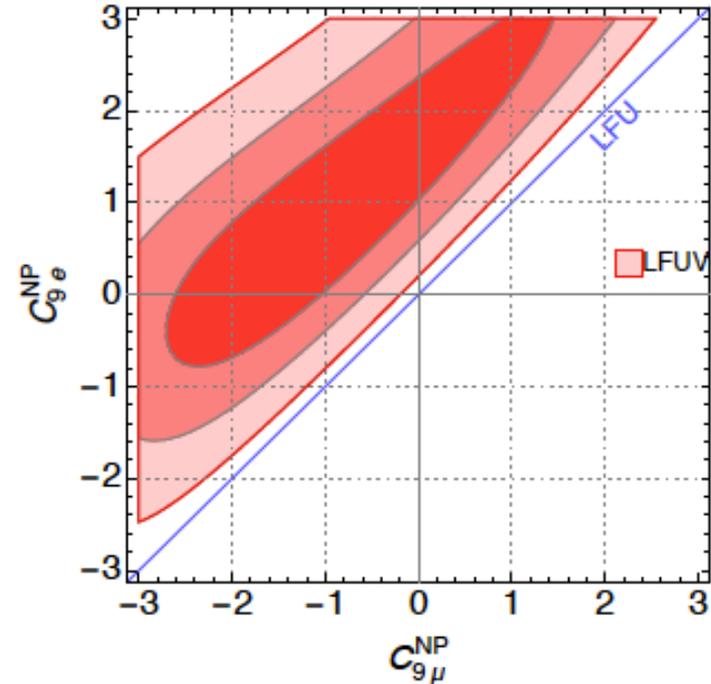
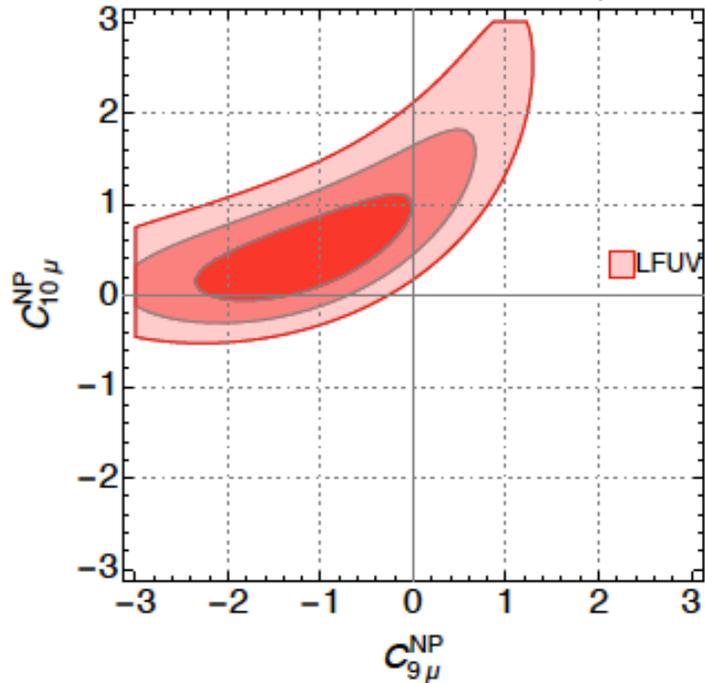
$$C_9 = C_9^{SM} + C_9^{NP}, \quad C_{10} = C_{10}^{SM} + C_{10}^{NP} \quad (\text{for muon})$$

- ✓ $C_9^{NP}(l=\mu) \sim -1$ can fit the data
- ✓ Non-zero $C_{10}^{NP}(l=\mu)$ helps fitting
- ✓ $C_9^{NP}(l=\mu) \sim -C_{10}^{NP}(l=\mu)$ looks good

2.B崩壊レビュー

Global fit for $b \rightarrow sl^+l^-$: only LFUV (μ vs e)

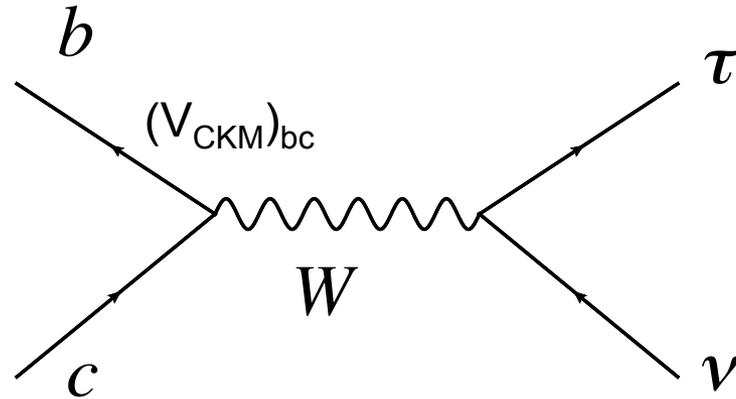
B. Capdevila et al. JHEP 01 (2018) 093



❖ LFUV アノマリーだけなら e の $C_{9,10}$ の値をズラすシナリオも可

$b \rightarrow cl\nu$ 過程とフレーバーアナノマリー

SMではツリーレベルの寄与

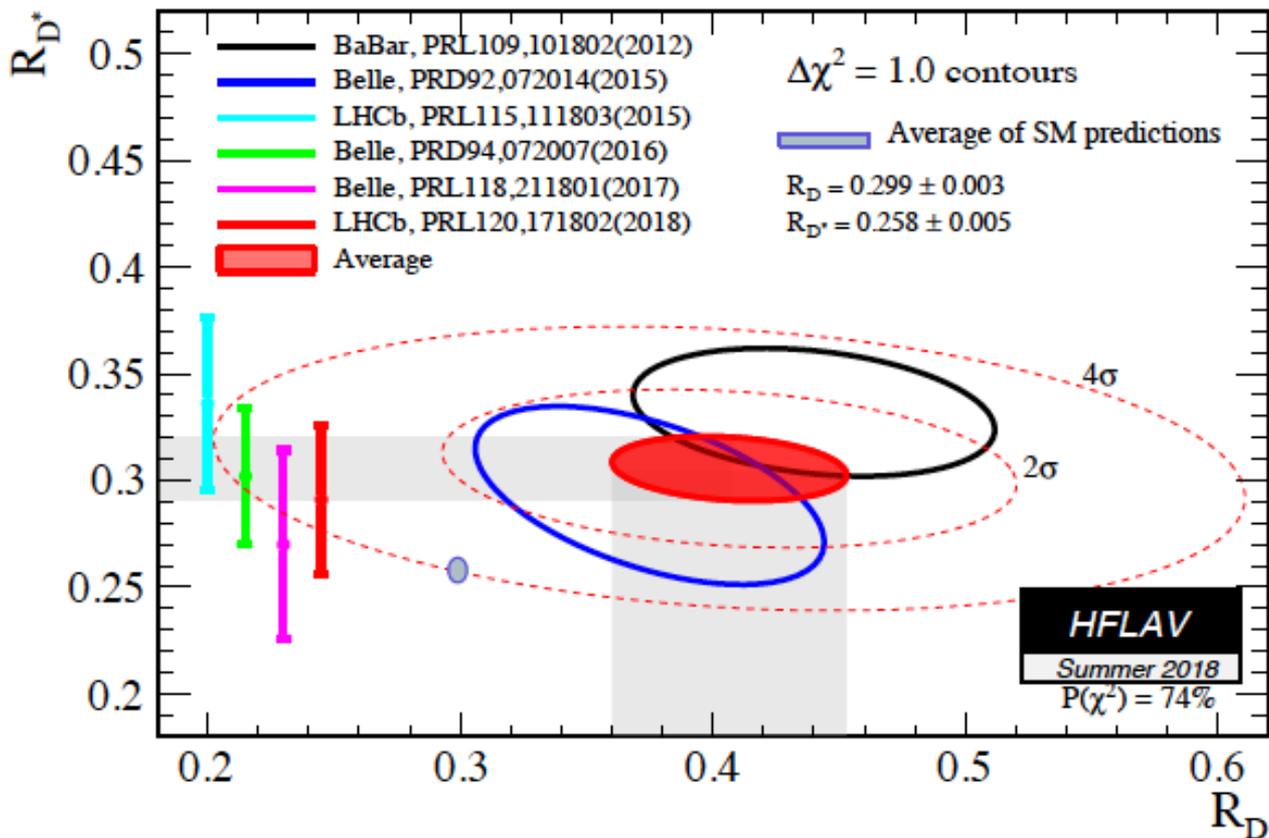


$R_{K^{(*)}}$ 同様分岐比の比を定義

$$R_{D(D^*)} = \frac{Br(B \rightarrow D(D^*)\tau\nu)}{Br(B \rightarrow D(D^*)l\nu)} \quad (l=e,\mu)$$

- ハドロンからの不定性の抑制
- レプトンフレーバーのuniversalityのテスト

$b \rightarrow cl\nu$ 過程とフレーバーアノマリー



SMの予言から $\sim 4\sigma$ のズレ

1. **イントロダクション**
2. **B崩壊レビュー**
3. **新物理への示唆**
4. **まとめ**

3. 新物理への示唆

The $b \rightarrow sl^+l^-/b \rightarrow clv$ のアノマリーは新物理を示唆か？

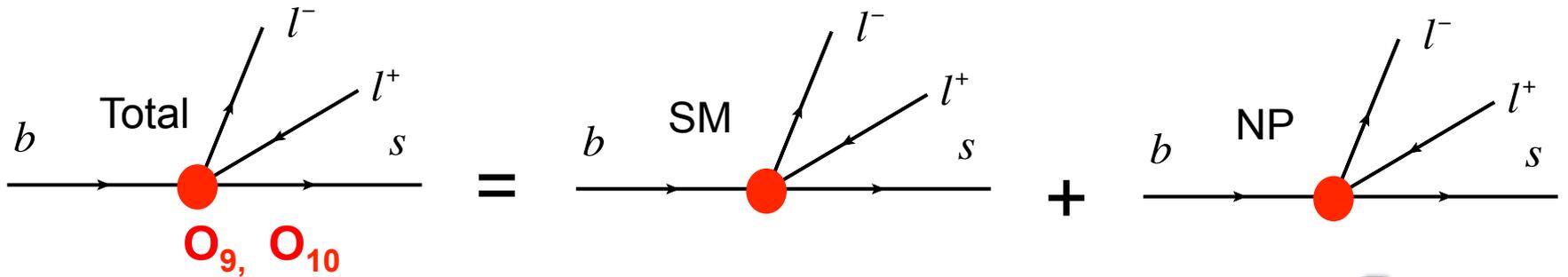
ここでは $b \rightarrow sl^+l^-$ 過程に着目して新物理の効果を議論

- 新物理の効果で C_9 と C_{10} Wilson係数の値が変わる
- 係数値のズレは lepton flavor non-universal
 - ⌈ P'_5 アノマリーからミューオンに関する係数が変わるとgood
 - ⌈ $C_9^{\mu NP} \sim -1$ ($C_9^{\mu NP} = -C_{10}^{\mu NP}$) が良いfitを与える
- 新粒子はフレーバーに依存してレプトンとクォークに結合
- どんなモデルがあり得るか？

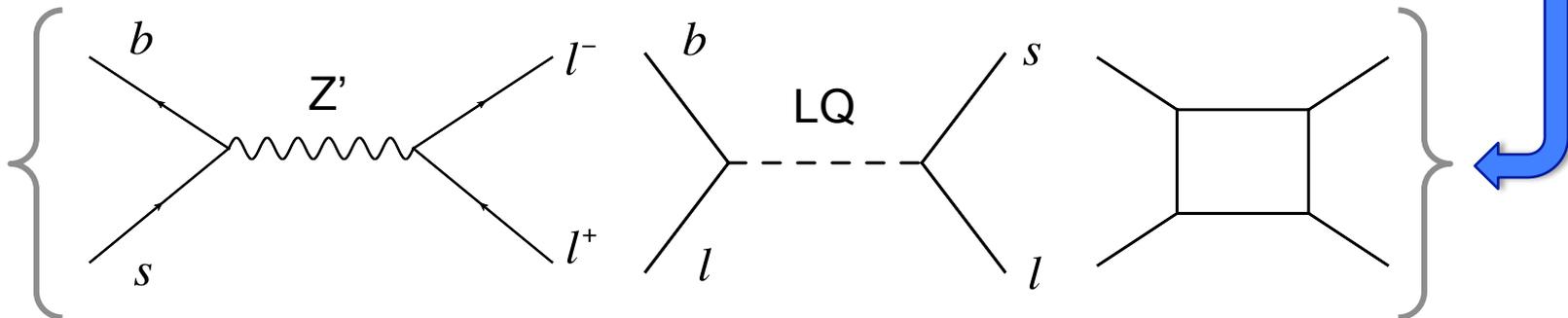
3. 新物理への示唆

新物理による $b \rightarrow s l^+ l^-$ アノマリーの説明

➡ 新物理の効果による C_9 と C_{10} の値のシフト



$$C_{9,10} = C_{9,10}^{SM} + C_{9,10}^{NP}$$



3. 新物理への示唆

新物理模型の候補(一部抜粋)

■ Z' ボソン模型(新しい中性ゲージボソン)

- ✓ Z' ボソン交換過程による有効相互作用
- ✓ 拡張ゲージ対称性

■ Leptoquark (LQ)を含む模型

- ✓ スカラーand/orベクトル LQが可能
- ✓ LQ交換過程が有効相互作用を生成
- ✓ LQのYukawa相互作用はレプトン・クォークのフレーバー依存したものが可

■ ループ補正による模型

- ✓ 新しいフェルミオン・スカラーのループ効果
- ✓ フレーバーの破れはYukawa結合から

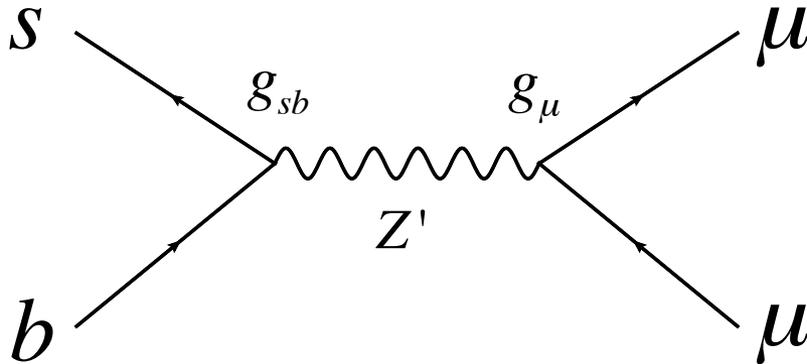
他にもいろいろな模型の可能性がある(混合Higgs、pati-salam模型等)

ここではごく一部を紹介

3. 新物理への示唆

■ Z'ボソンを含んだ模型の可能性

Z' 交換過程により有効作用が生成される



$$C_9^{\mu(Z')} \approx \frac{\pi}{\sqrt{2} V_{tb} V_{ts}^* \alpha G_F} \frac{g_{sb} g_{\mu}}{m_{Z'}^2}$$

✓ Z'とクォークの結合は**b→s**のフレーバーの変化を含むべき

- SMクォークはフレーバーに依存したU(1)Xチャージを持つ
- SMクォークとExtraクォークの混合
- ループレベルでの生成
- Etc.

相互作用の生成方法:

✓ レプトンフレーバーの **non-universality**

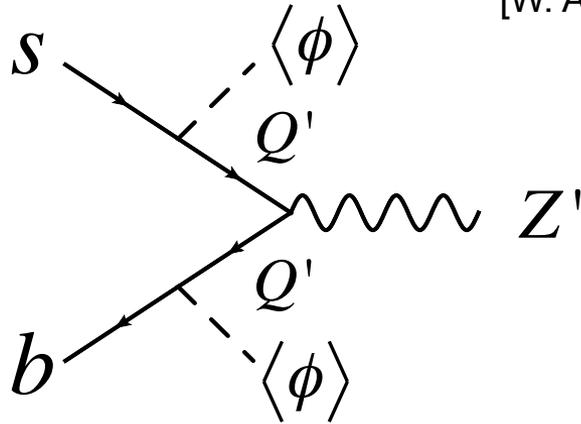
- $U(1)_{\mu-\tau}$ (-like) なゲージ対称性が見える

● これらのシナリオに基づいた模型を紹介する

3. 新物理への示唆

➤ $U(1)_{\mu-\tau}$ (-like) 対称性 + quark vector-like-quark mixing

[W. Altmannshofer, S. Gori, M. Pospelov, I. Yavin, PRD 89, 095033 (2014)]



- ✓ Q' : VLQs with extra $U(1)$ charge
- ✓ Φ : 新スカラー場

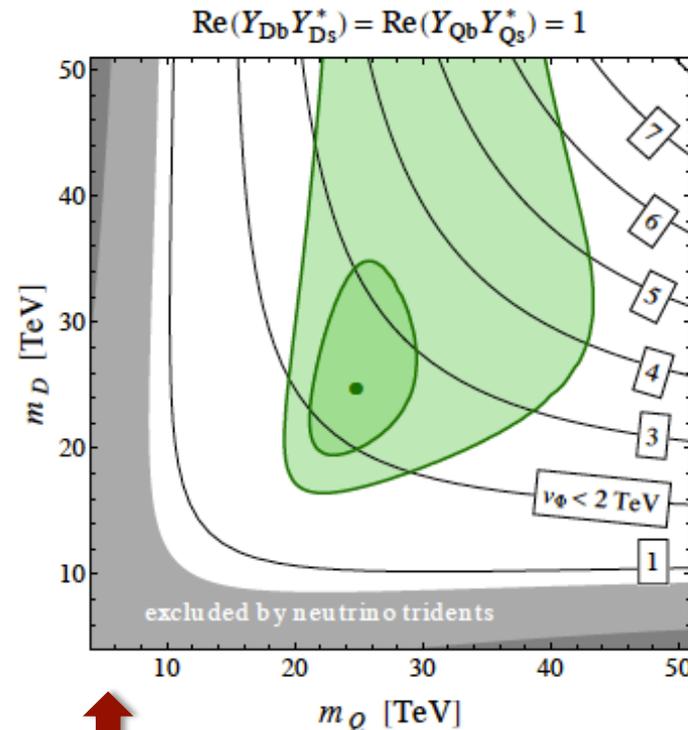
- ✓ クォークフレーバーの破れ: mixing effect
- ✓ Z' とレプトンの相互作用は μ と τ のみ

VLQs

$$\begin{aligned}
 Q_L &= (\mathbf{3}, \mathbf{2})_{+1/6, +1}, & \tilde{Q}_R &= (\mathbf{3}, \mathbf{2})_{+1/6, +1}, \\
 \tilde{D}_L &= (\mathbf{3}, \mathbf{1})_{-1/3, -1}, & D_R &= (\mathbf{3}, \mathbf{1})_{-1/3, -1}, \\
 \tilde{U}_L &= (\mathbf{3}, \mathbf{1})_{+2/3, -1}, & U_R &= (\mathbf{3}, \mathbf{1})_{+2/3, -1},
 \end{aligned}$$

Yukawa terms for mixing

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{\text{mix}} &= \Phi \tilde{D}_R (Y_{Qb} b_L + Y_{Qs} s_L + Y_{Qd} d_L) \\
 &+ \Phi \tilde{U}_R (Y_{Qt} t_L + Y_{Qc} c_L + Y_{Qu} u_L) \\
 &+ \Phi^\dagger \tilde{U}_L (Y_{Ut} t_R + Y_{Uc} c_R + Y_{Uu} u_R) \\
 &+ \Phi^\dagger \tilde{D}_L (Y_{Db} b_R + Y_{Ds} s_R + Y_{Dd} d_R) + \text{h.c.}
 \end{aligned}$$

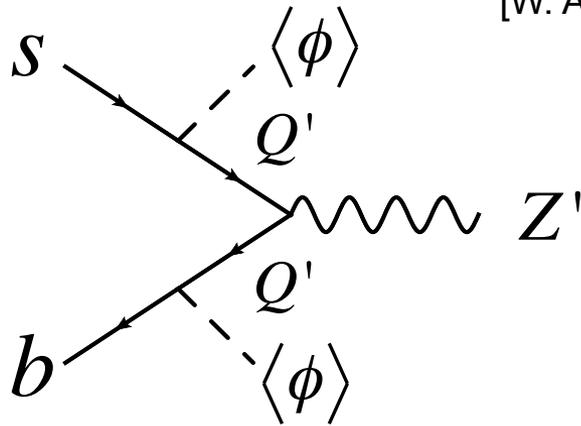


B_s mixing constraint is imposed

3. 新物理への示唆

➤ $U(1)_{\mu-\tau}$ (-like) 対称性 + quark vector-like-quark mixing

[W. Altmannshofer, S. Gori, M. Pospelov, I. Yavin, PRD 89, 095033 (2014)]



- ✓ Q' : VLQs with extra $U(1)$ charge
- ✓ Φ : 新スカラー場

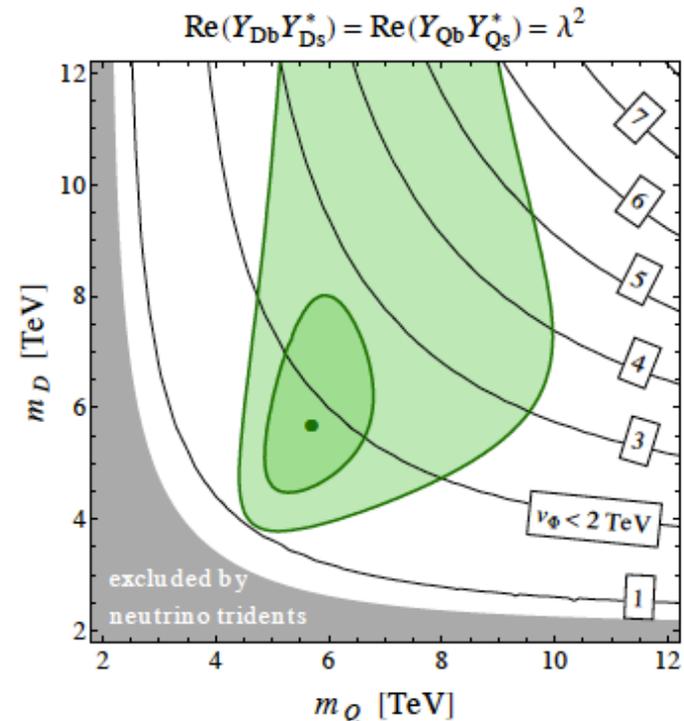
- ✓ クォークフレーバーの破れ: mixing effect
- ✓ Z' とレプトンの相互作用は μ と τ のみ

VLQs

$$\begin{aligned}
 Q_L &= (\mathbf{3}, \mathbf{2})_{+1/6, +1}, & \tilde{Q}_R &= (\mathbf{3}, \mathbf{2})_{+1/6, +1}, \\
 \tilde{D}_L &= (\mathbf{3}, \mathbf{1})_{-1/3, -1}, & D_R &= (\mathbf{3}, \mathbf{1})_{-1/3, -1}, \\
 \tilde{U}_L &= (\mathbf{3}, \mathbf{1})_{+2/3, -1}, & U_R &= (\mathbf{3}, \mathbf{1})_{+2/3, -1},
 \end{aligned}$$

Yukawa terms for mixing

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{\text{mix}} &= \Phi \tilde{D}_R (Y_{Qb} b_L + Y_{Qs} s_L + Y_{Qd} d_L) \\
 &+ \Phi \tilde{U}_R (Y_{Qt} t_L + Y_{Qc} c_L + Y_{Qu} u_L) \\
 &+ \Phi^\dagger \tilde{U}_L (Y_{Ut} t_R + Y_{Uc} c_R + Y_{Uu} u_R) \\
 &+ \Phi^\dagger \tilde{D}_L (Y_{Db} b_R + Y_{Ds} s_R + Y_{Dd} d_R) + \text{h.c.}
 \end{aligned}$$



■ B_s mixing constraint is imposed

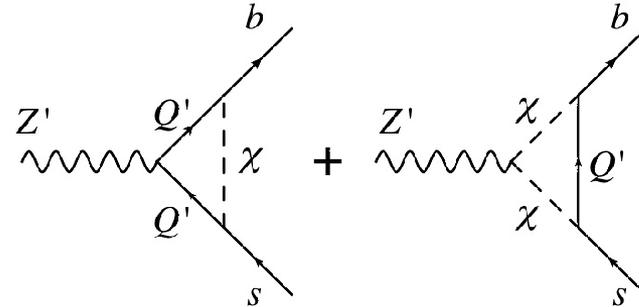
3. 新物理への示唆

➤ $U(1)_{\mu-\tau}$ (-like) Z' ボソンでクォーク相互作用をループレベルで生成

VLQ Scalar

| | Q'_a | χ |
|-------------------|---------------|--------|
| $SU(3)_C$ | 3 | 1 |
| $SU(2)_L$ | 2 | 1 |
| $U(1)_Y$ | $\frac{1}{6}$ | 0 |
| $U(1)_{\mu-\tau}$ | q_x | q_x |

[P. Ko, TN, H. Okada, arXiv: 1702.02699]



Exotic Z_2 odd particles

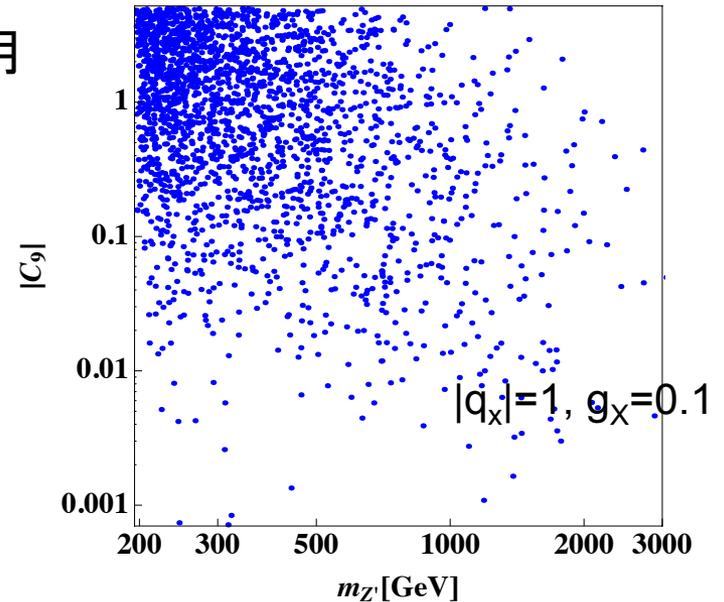
Z' -b-s 相互作用はループで出す

$-L \supset f_{aj} \bar{Q}'_a P_L Q_j \chi + h.c.$: Yukawa相互作用

$$\rightarrow C_9^{\mu(Z')} \approx \frac{\sqrt{2}\pi}{V_{tb} V_{ts}^* \alpha G_F} \frac{q_x g_X^2}{m_{Z'}^2} f_{3a}^* f_{a2} F_{loop}$$

✧ シングレットスカラー χ は DM 候補

➤ DMとBアノマリーを同時に説明



3. 新物理への示唆

■ Leptoquarkを含んだ模型

スカラー・ベクトル leptoquark の候補

- $SU(2)_L$ singlet scalar S_1 : (3, 1, 1/3) [(SU(3), SU(2)_L, U(1)_Y)]

$$-L \supset \left[x_{ij} \bar{Q}_i^c P_L L_j + y_{ij} \bar{u}_i^c P_R e_j \right] S_1 + h.c.$$

- $SU(2)_L$ doublet scalar Φ : (3, 2, 7/6)

$$-L \supset k_{ij} \bar{Q}_i P_R e_j R_2 + g_{ij} \bar{L}_i P_R u_j (i\sigma_2) R_2^* + h.c. \quad R_2 = \begin{pmatrix} \phi_{5/3} \\ \phi_{2/3} \end{pmatrix}$$

- $SU(2)_L$ triplet scalar S_3 : (3, 3, 1/3)

$$-L \supset w_{ij} \bar{Q}_i^c P_L L_j S_3 + h.c. \quad S_3 = \begin{pmatrix} \delta_{1/3} / \sqrt{2} & \delta_{4/3} \\ \delta_{-2/3} & -\delta_{1/3} / \sqrt{2} \end{pmatrix}$$

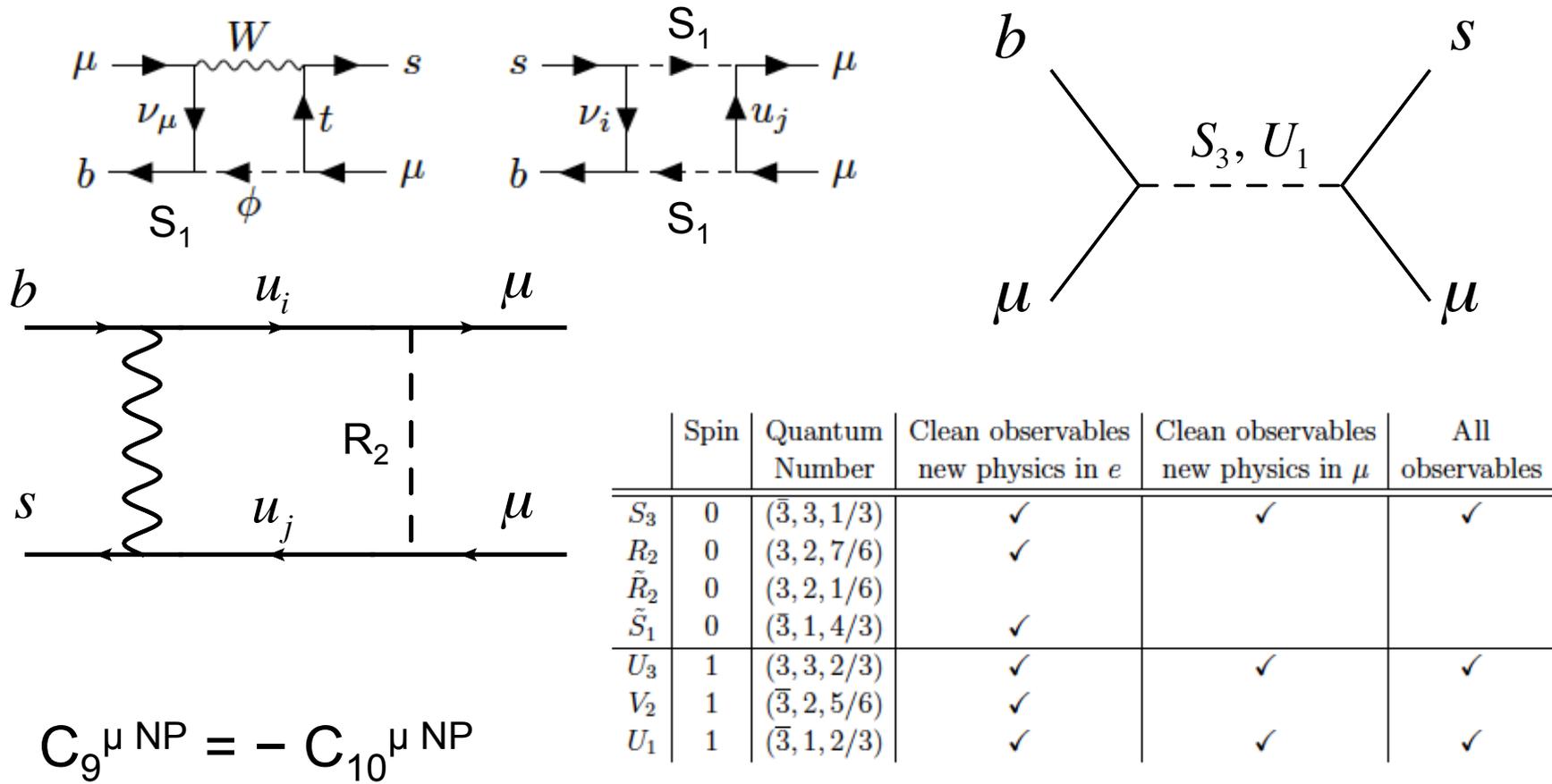
- $SU(2)_L$ singlet vector U_1 : (3, 1, 2/3) [(SU(3), SU(2)_L, U(1)_Y)]

$$-L \supset g_U^{ij} \bar{Q}_i \gamma_\mu L_j U_1^\mu + h.c.$$

3. 新物理への示唆

Models with leptoquarks

有効ハミルトニアン H_{eff} を生成するダイアグラム



Guido D'Amico et al. JHEP 1709 (2017) 010

U_1 VLQ is also good to explain R_D, R_{D^*} anomalies

3. 新物理への示唆

アノマリーを説明する新物理模型は新粒子を含む

- ✓ Z' ボソン(フレーバー依存した相互作用)
- ✓ Leptoquarks
- ✓ Vector like quarks and/or extended Higgs

それら新粒子からの実験への示唆

- ❖ LHCでの直接生成
- ❖ 他のB物理への影響 ($B \rightarrow KI^{+l-}$ 以外に)

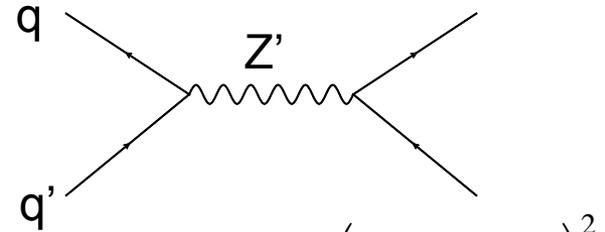
3. 新物理への示唆

■ 新粒子の実験での直接生成

✓ Z' ボソン生成

$$L \supset \left[g_{bs} (\bar{s} \gamma^\mu P_L b + h.c.) + g_\mu \bar{\mu} \gamma^\mu \mu \right] Z'_\mu$$

$$\Rightarrow C_9^{\mu(Z')} \sim -1 \Rightarrow |g_\mu g_{bs}| \sim 0.008 \times \left(\frac{m_{Z'}}{1000 \text{ GeV}} \right)^2$$

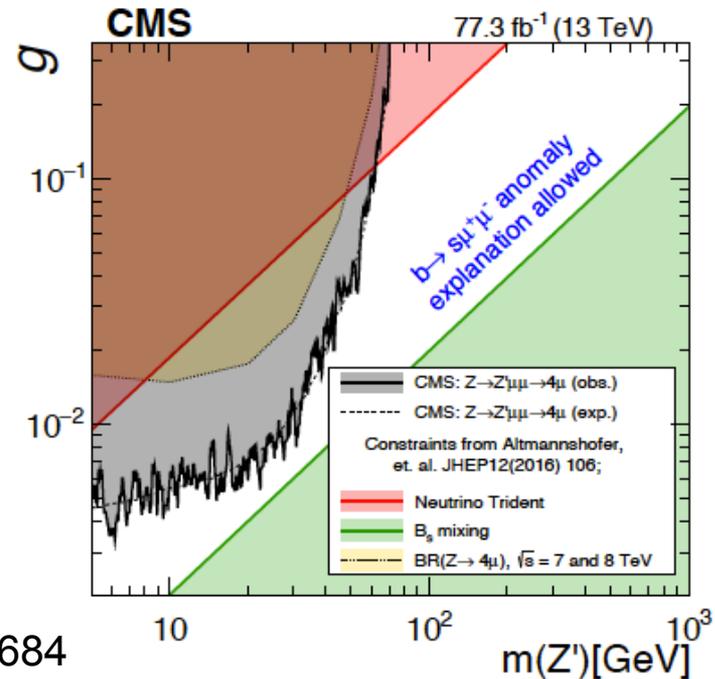
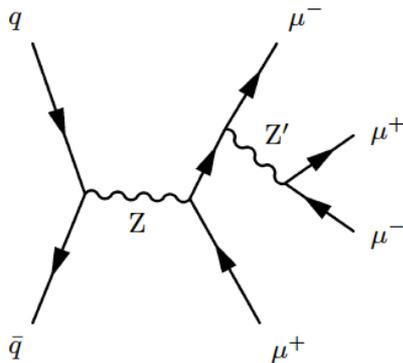


Z' ボソンへのLHCからの制限

(13 TeV)

□ ミューオンと結合する Z' の探索

✓ 4 muon signal



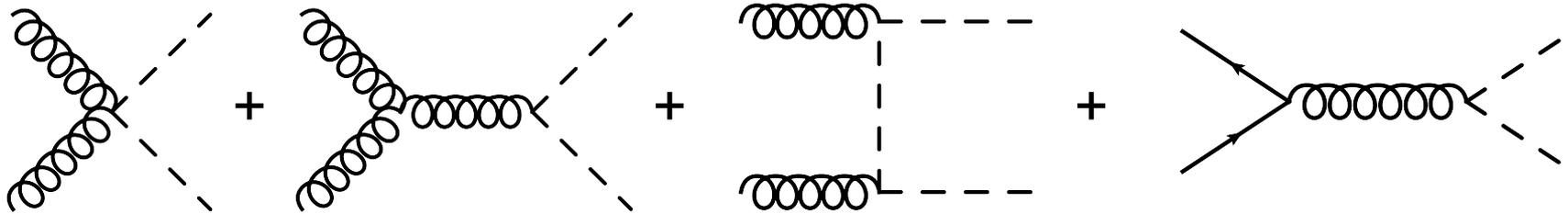
CMS, 1808.03684

3. 新物理への示唆

■ 新粒子の実験での直接生成

✓ LHCでのLQ生成

LQ は QCD 過程により生成されうる



生成断面積も小さい

➤ $\sigma_{pp \rightarrow LQLQ} \sim \text{few} \times 10 \text{ fb for } m_{LQ} = 1 \text{ TeV}$

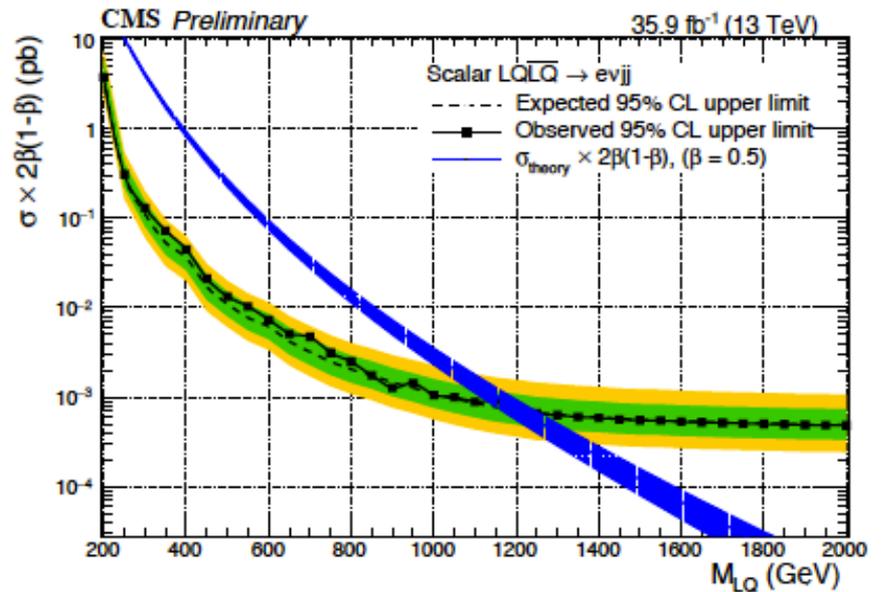
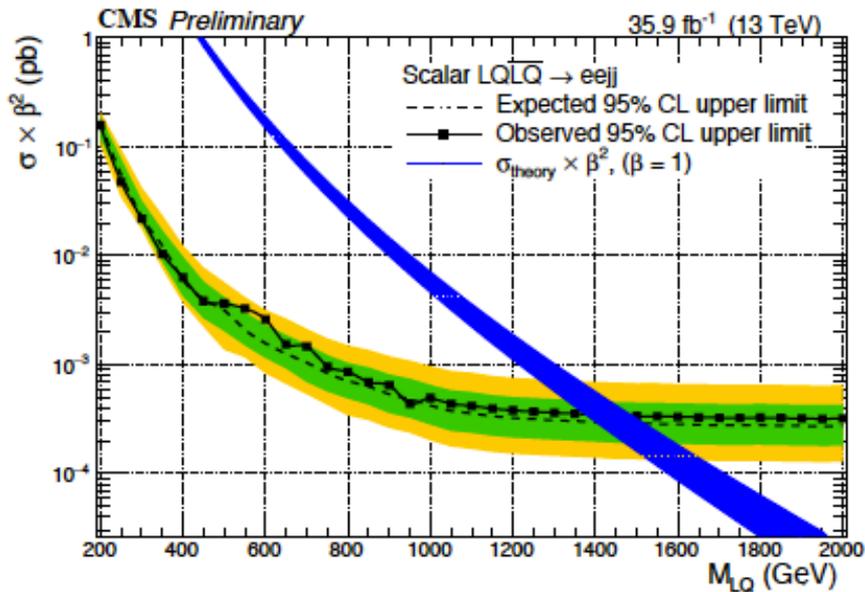
❖ LQはレプトン+クォークに崩壊

❖ 崩壊比を調べることで相互作用の構造が調べられる

3. 新物理への示唆

■ 新粒子の実験での直接生成

✓ LHCでのLQ生成



CMS-EXO-17-009

- charged leptons + jets シグナルの探索
- LQ の質量に対する制限 $m_{LQ} > 1.2$ TeV

3. 新物理への示唆

■ 新物理からの他のBの崩壊への影響

✓ $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$

この過程に寄与する有効演算子: $(\bar{s} \gamma^\mu P_{L(R)} b) (\bar{l} \gamma_\mu \gamma^5 l)$

➡ C_{10}, C_{10}' の値の変化に対応

$$BR(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) \approx \left| 1 - 0.24 C_{10}^{\mu(BSM)} + 0.23 C_{10}'^{\mu(BSM)} \right| BR(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{SM}$$

$$\left(\begin{array}{l} BR(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{SM} \approx (3.65 \pm 0.23) \times 10^{-9} \\ BR(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{exp}} \approx (3.0 \pm 0.6) \times 10^{-9} \end{array} \right)$$

[LHCb, arXiv : 1703.05747]

Ex) $C_9^{\mu(BSM)} = -C_{10}^{\mu(BSM)} = -1$ ($C_{LL}^{\mu(BSM)} = -1$)

➡ $2.6 \times 10^{-9} \leq BR(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) \leq 2.9 \times 10^{-9}$

精密な測定により標準模型からのズレが見えるかも

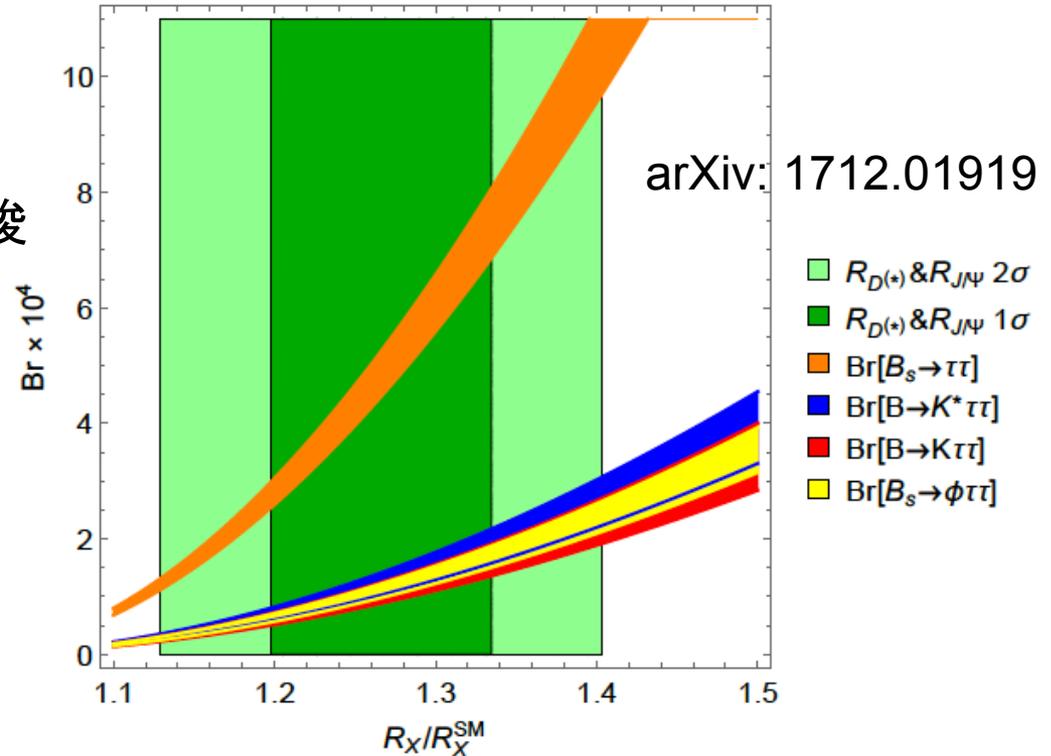
3. 新物理への示唆

■ 新物理からの他のBの崩壊への影響

✓ $B \rightarrow K l^+ l'^-$

$R_{D^{(*)}}$ を説明するシナリオからの示唆

τ モードが大きくなる



レプトンフレーバーを破る過程に対するBelle IIの感度

| | | | |
|--|---|---|---------|
| $\text{Br}(B^+ \rightarrow K^+ \tau^\pm e^\mp) \cdot 10^6$ | — | — | < 2.1 |
| $\text{Br}(B^+ \rightarrow K^+ \tau^\pm \mu^\mp) \cdot 10^6$ | — | — | < 3.3 |
| $\text{Br}(B^0 \rightarrow \tau^\pm e^\mp) \cdot 10^5$ | — | — | < 1.6 |
| $\text{Br}(B^0 \rightarrow \tau^\pm \mu^\mp) \cdot 10^5$ | — | — | < 1.3 |

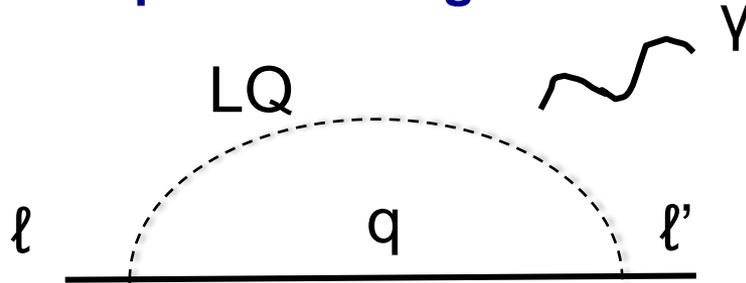
まとめ

- LHCbが結果を出し、Belle IIが動きだす今、B物理がおもしろい
- 実際標準模型からのズレ(アノマリー)もいくつか検出されている
- 今後の実験での確認が期待される
- もしアノマリーが本物なら他の新物理現象の発見も期待される

Appendix

LFV and muon g-2 from SU(2) doublet leptoquark

❖ $\ell \rightarrow \ell' \gamma$ and muon g-2



: diagram for LFV and muon g-2

$$L_{eff} = \frac{e}{2} \bar{\ell}_j \sigma_{\mu\nu} [(c_L)_{ji} P_L + (c_R)_{ji} P_R] \ell_i F^{\mu\nu}$$

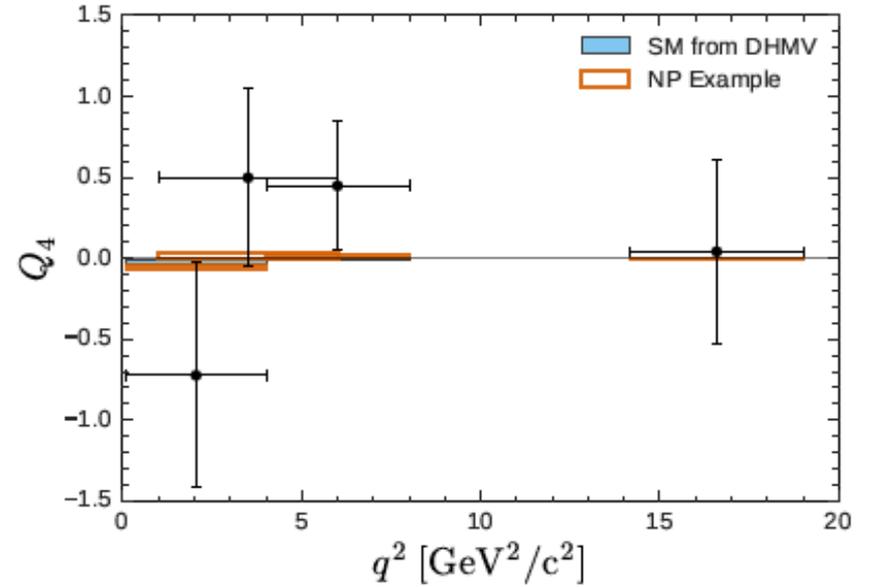
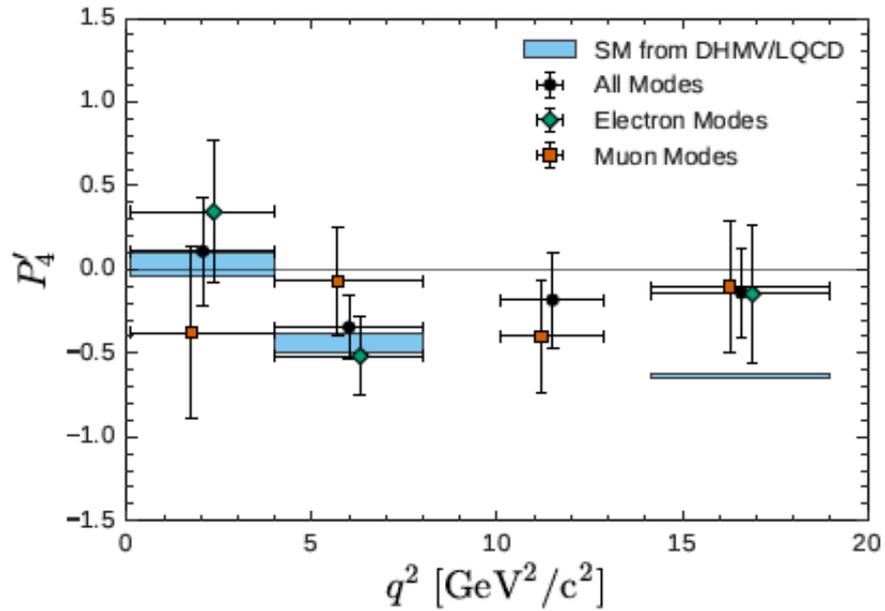
$$(c_R)_{ji} \approx \frac{m_t}{(4\pi)^2} (k^T)_{i3} g_{3j} \int dx dy dz \delta(1-x-y-z) \left(\frac{5}{x m_t^2 + (y+z) m_\Phi^2} - \frac{2(1-x)}{x m_\Phi^2 + (y+z) m_t^2} \right), \quad k \leftrightarrow g \text{ for } C_L$$

Branching fraction and g-2

$$BR(\ell_i \rightarrow \ell_j \gamma) = \frac{48\pi^3 \alpha \eta_i}{G_F^2 m_{\ell_i}^2} (|(c_R)_{ji}|^2 + |(c_L)_{ji}|^2), \quad (\eta_\mu = 1, \eta_\tau \approx 1/5)$$

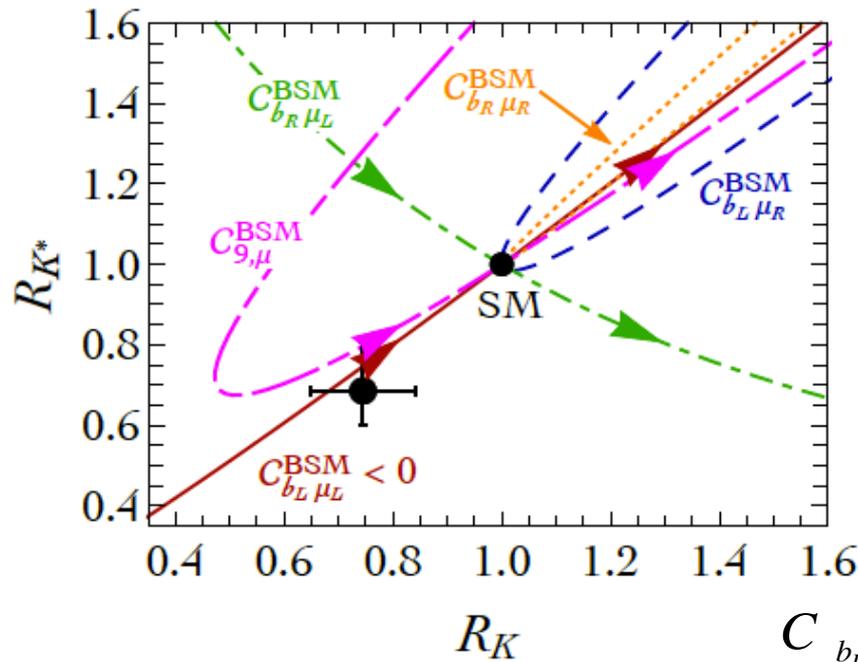
$$\Delta a_\mu \approx -\frac{m_\mu}{2} (c_L + c_R)_{\mu\mu}$$

The other observables

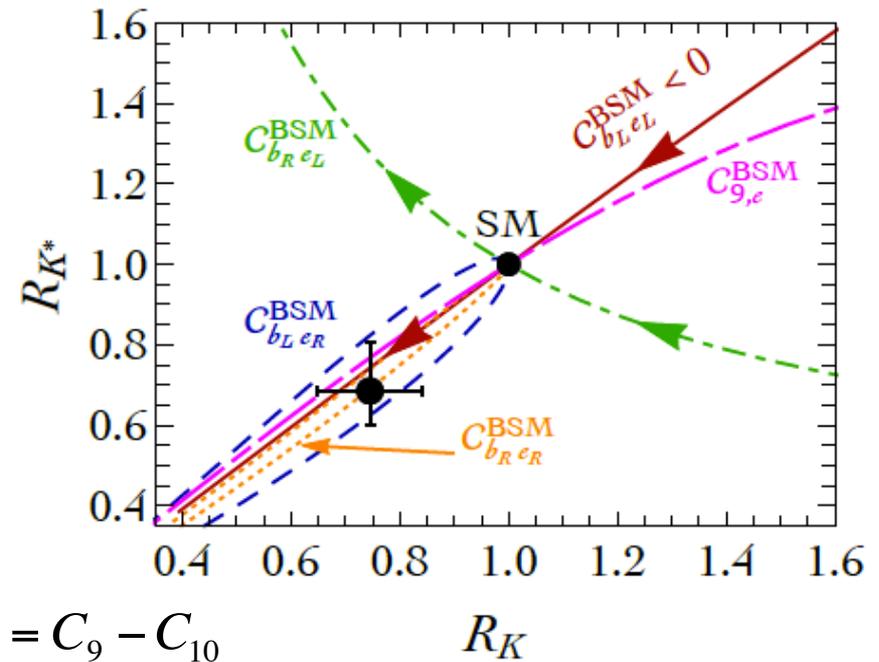


R_K and R_{K^*} : dependence on Wilson coefficients

New physics in μ



New physics in e



$$C_{b_L \mu_L} = C_9 - C_{10}$$

$$C_{b_L \mu_R} = C_9 + C_{10}$$

Guido D' Amico et al. JHEP 1709 (2017) 010

Best fit values of Wilson coefficients

| Coeff. | best fit | 1σ | 2σ | pull |
|-------------------------|----------|----------------|----------------|-------------|
| C_9^μ | -1.56 | [-2.12, -1.10] | [-2.87, -0.71] | 4.1σ |
| C_{10}^μ | +1.20 | [+0.88, +1.57] | [+0.58, +2.00] | 4.2σ |
| C_9^e | +1.54 | [+1.13, +1.98] | [+0.76, +2.48] | 4.3σ |
| C_{10}^e | -1.27 | [-1.65, -0.92] | [-2.08, -0.61] | 4.3σ |
| $C_9^\mu = -C_{10}^\mu$ | -0.63 | [-0.80, -0.47] | [-0.98, -0.32] | 4.2σ |
| $C_9^e = -C_{10}^e$ | +0.76 | [+0.55, +1.00] | [+0.36, +1.27] | 4.3σ |
| $C_9^e = C_{10}^e$ | -1.91 | [-2.30, -1.51] | [-2.71, -1.10] | 3.9σ |
| $C_9^{\prime\mu}$ | -0.05 | [-0.31, +0.21] | [-0.57, +0.46] | 0.2σ |
| $C_{10}^{\prime\mu}$ | +0.03 | [-0.21, +0.27] | [-0.44, +0.51] | 0.1σ |
| $C_9^{\prime e}$ | +0.07 | [-0.21, +0.37] | [-0.49, +0.69] | 0.2σ |
| $C_{10}^{\prime e}$ | -0.04 | [-0.30, +0.21] | [-0.57, +0.45] | 0.2σ |

Best fit values of Wilson coefficients

| 1D Hyp. | All | | | | | LFUV | | | | |
|---|----------|----------------|----------------|--------------------|---------|----------|----------------|----------------|--------------------|---------|
| | Best fit | 1σ | 2σ | Pull _{SM} | p-value | Best fit | 1σ | 2σ | Pull _{SM} | p-value |
| $C_{9\mu}^{\text{NP}}$ | -1.11 | [-1.28, -0.94] | [-1.45, -0.75] | 5.8 | 68 | -1.76 | [-2.36, -1.23] | [-3.04, -0.76] | 3.9 | 69 |
| $C_{9\mu}^{\text{NP}} = -C_{10\mu}^{\text{NP}}$ | -0.62 | [-0.75, -0.49] | [-0.88, -0.37] | 5.3 | 58 | -0.66 | [-0.84, -0.48] | [-1.04, -0.32] | 4.1 | 78 |
| $C_{9\mu}^{\text{NP}} = -C'_{9\mu}$ | -1.01 | [-1.18, -0.84] | [-1.34, -0.65] | 5.4 | 61 | -1.64 | [-2.13, -1.05] | [-2.52, -0.49] | 3.2 | 32 |
| $C_{9\mu}^{\text{NP}} = -3C_{9e}^{\text{NP}}$ | -1.07 | [-1.24, -0.90] | [-1.40, -0.72] | 5.8 | 70 | -1.35 | [-1.82, -0.95] | [-2.38, -0.59] | 4.0 | 72 |

| 2D Hyp. | All | | | LFUV | | |
|---|----------------|--------------------|---------|----------------|--------------------|---------|
| | Best fit | Pull _{SM} | p-value | Best fit | Pull _{SM} | p-value |
| $(C_{9\mu}^{\text{NP}}, C_{10\mu}^{\text{NP}})$ | (-1.01, 0.29) | 5.7 | 72 | (-1.30, 0.36) | 3.7 | 75 |
| $(C_{9\mu}^{\text{NP}}, C'_7)$ | (-1.13, 0.01) | 5.5 | 69 | (-1.85, -0.04) | 3.6 | 66 |
| $(C_{9\mu}^{\text{NP}}, C_{9'\mu})$ | (-1.15, 0.41) | 5.6 | 71 | (-1.99, 0.93) | 3.7 | 72 |
| $(C_{9\mu}^{\text{NP}}, C_{10'\mu})$ | (-1.22, -0.22) | 5.7 | 72 | (-2.22, -0.41) | 3.9 | 85 |
| $(C_{9\mu}^{\text{NP}}, C_{9e}^{\text{NP}})$ | (-1.00, 0.42) | 5.5 | 68 | (-1.36, 0.46) | 3.5 | 65 |
| Hyp. 1 | (-1.16, 0.38) | 5.7 | 73 | (-1.68, 0.60) | 3.8 | 78 |
| Hyp. 2 | (-1.15, 0.01) | 5.0 | 57 | (-2.16, 0.41) | 3.0 | 37 |
| Hyp. 3 | (-0.67, -0.10) | 5.0 | 57 | (0.61, 2.48) | 3.7 | 73 |
| Hyp. 4 | (-0.70, 0.28) | 5.0 | 57 | (-0.74, 0.43) | 3.7 | 72 |

Other model approach

➤ Flavor dependent U(1) model: $U(1)_{\mu-\tau-a(B1+B2-2B3)}$

[A. Crivellin, G. D'Ambrosio, J. Heeck, PRD 91, 075006 (2015)]

$$\left\{ Q_L^{1,2}, u_R^{1,2}, d_R^{1,2} \right\} : Q_X = -\frac{a}{3}, \quad \left\{ Q_L^3, u_R^3, d_R^3 \right\} : Q_X = \frac{2a}{3}$$

$$\left\{ L_L^2, e_R^2, \nu_R^2 \right\} : Q_X = 1, \quad \left\{ L_L^3, e_R^3, \nu_R^3 \right\} : Q_X = -1$$

$$\Phi_2 : Q_X = -\frac{a}{3}$$

✓ 2HDM with the extra U(1)

✓ Extension of $U(1)_{\mu-\tau}$

✓ Φ_2 for getting CKM matrix

Quark Yukawa couplings :

$$-L_Y = \bar{Q}_f \left(\xi_{fi}^u \tilde{\Phi}_1 + Y_{fi}^u \tilde{\Phi}_2 \right) u_i + \bar{Q}_f \left(\xi_{fi}^d \Phi_1 + Y_{fi}^d \Phi_2 \right) d_i + h.c.$$

There are other constructions

Ex) see Hyun-min's talk

Flavor violating quark coupling with CKM matrix

$$g' \bar{d}_i \gamma^\mu P_L d_j Z'_\mu (V_{CKM}^* Q V_{CKM})_{ij} \quad \rightarrow \quad C_9^{\mu(Z')} \approx \frac{-ag_X^2}{\sqrt{2}m_{Z'}^2} \frac{\pi}{\alpha G_F} \approx -\left(\frac{a}{1/3}\right) \left(\frac{3 TeV}{m_{Z'} / g_X}\right)^2$$

$$Q = \text{diag}\{-a/3, -a/3, 2a/3\}$$

- ❖ $C_9 \sim -1$ BSM contribution can be obtained with TeV scale Z'
- ❖ Z' contribution to other Wilson coefficients is small
- ❖ Flavor violation in Yukawa coupling sector

Models with loop induced effective operator

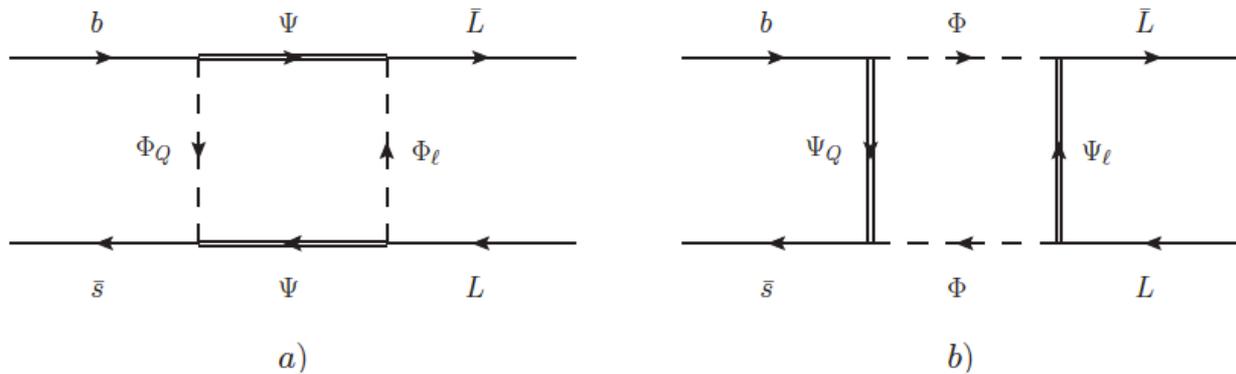
[P. Arnan et al, JHEP 1704, 043 (2017)]

- ✓ Adding some VLQs Ψ and exotic scalars Φ

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^a) = \Gamma_i^Q \bar{Q}_i P_R \Psi \Phi_Q + \Gamma_i^L \bar{L}_i P_R \Psi \Phi_\ell + \text{h.c.}$$

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^b) = \Gamma_i^Q \bar{Q}_i P_R \Psi_Q \Phi + \Gamma_i^L \bar{L}_i P_R \Psi_\ell \Phi + \text{h.c.}$$

- ✓ Box diagrams induce relevant operator for $b \rightarrow sll$



$$\begin{aligned} C_9^{\text{box}, a) &= -C_{10}^{\text{box}, a) = \mathcal{N} \frac{\Gamma_s \Gamma_b^* |\Gamma_\mu|^2}{32\pi\alpha_{\text{EM}} m_\Psi^2} (\chi\eta F(x_Q, x_\ell) + 2\chi^M \eta^M G(x_Q, x_\ell)), \\ C_9^{\text{box}, b) &= -C_{10}^{\text{box}, b) = -\mathcal{N} \frac{\Gamma_s \Gamma_b^* |\Gamma_\mu|^2}{32\pi\alpha_{\text{EM}} m_\Phi^2} (\chi\eta - \chi^M \eta^M) F(y_Q, y_\ell), \end{aligned}$$

- ❖ $O(1)$ Yukawa coupling is required to fit R_K, R_{K^*}
- ❖ $B \rightarrow K \nu \nu$ is also affected: constraint should be imposed

■ Implications from NP: Other rare B decay processes

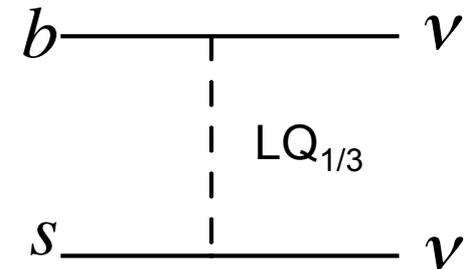
✓ $B^+ \rightarrow K^+ \nu \nu$

Some leptoquarks contribute to the process

Ex) SU(2) singlet and triplet leptoquarks

$$BR(B^+ \rightarrow K^+ \nu \nu) \approx \frac{1}{3} \left(\sum_l |1 - r_l|^2 \right) BR(B^+ \rightarrow K^+ \nu \nu)_{SM}$$

$$|r_l| \sim 400 \times \frac{TeV^2}{2m_s^2} y_{3l} y_{2l} \left[\frac{TeV^2}{4m_\Delta^2} w_{3l} w_{2l} \right] \quad \text{For singlet [triplet]}$$



Upper limit by experiment and SM prediction

$$BR(B^+ \rightarrow K^+ \nu \nu) < 1.6 \times 10^{-5}, \quad BR(B^+ \rightarrow K^+ \nu \nu)_{SM} \approx 5 \times 10^{-6}$$

- ❖ Roughly we have $|1 - r_l| < 3$
- ❖ Triplet case is less significant since $|w_{32} w_{22}| \sim 0.003 \times (m_\Delta / TeV)^2$ for R_K, R_{K^*}
- ❖ Stringent constraint for singlet LQ model

 ~20% change from SM