

Flavor Anomaly の 最新結果

中村 克朗 (KEK)

2018年 4月 2日

新テラスケール研究会

アウトライン

- Flavor Anomaly 概観
- B Anomalyが大きな注目を集めている
- B中間子 FCNC 崩壊
- B中間子 (semi-)tauonic 崩壊
- これらの最新結果を、
Belle II実験でのFlavor Anomaly精密測定の展望
を交えながら紹介

Flavor Anomaly 概観

- B-factory (Belle, Babar), LHCbをはじめとする様々な実験でFlavor物理の測定が行われている
- すでに、幾つかの $B/\mu/\tau$ に関わる測定結果でSMからのtensionを観測 → Flavor Anomaly
 - 新物理解明への鍵
- 特に近年は、Lepton Flavor Universality (LFU) Testが注目を集める
 - レプトンフレーバーの対称性のチェック
 - $R_{K^{(*)}}, R(D^{(*)})$
- 今回はFlavor Anomaly測定に関わる最近の結果をまとめました
 - Moriond2018ではLHCbからFlavor Anomalyのアップデートはありませんでした

様々な Flavor Anomaly

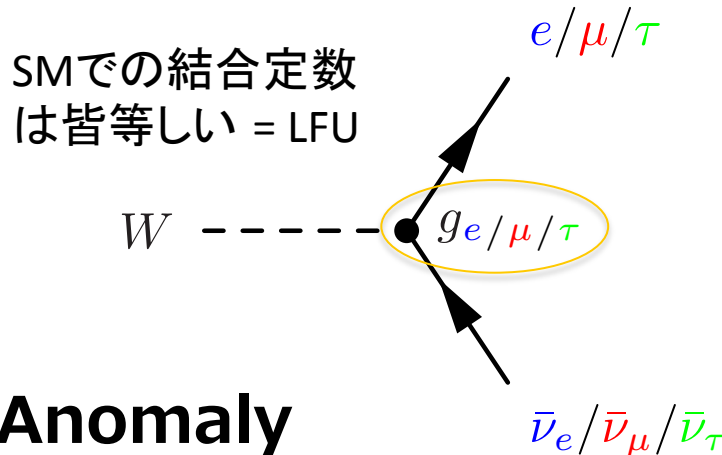
LEP: Phys.Rep.532(2013)119 [arXiv:1302.3415]

■ Lepton Flavor Universality in gauge coupling

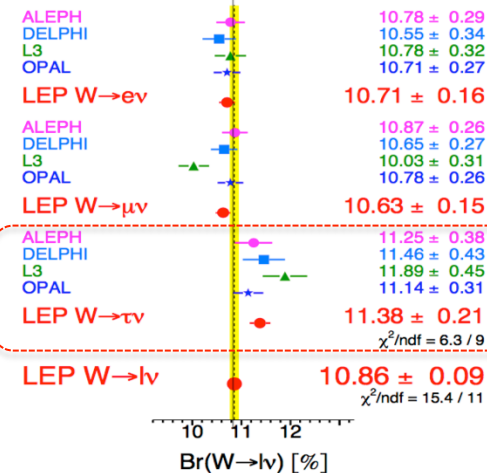
$$\mathcal{B}(W \rightarrow \mu\bar{\nu}_\mu) / \mathcal{B}(W \rightarrow e\bar{\nu}_e) = 0.993 \pm 0.019,$$

$$2\mathcal{B}(W \rightarrow \tau\bar{\nu}_\tau) / (\mathcal{B}(W \rightarrow e\bar{\nu}_e) + \mathcal{B}(W \rightarrow \mu\bar{\nu}_\mu)) = \underline{1.066 \pm 0.025}$$

– Wから $\tau\nu$ への崩壊分岐比に、他の世代への分岐比とのズレ(約 2.6σ)



W Leptonic Branching Ratios



■ Lepton Anomaly

– Muon $g-2$ BNL E821: PRL 92 161802 (2014)

■ 3.3σ のSMからのズレ

– 陽子の電荷半径 r_p : $p-e$ と $p-\mu$ とのスペクトロスコープから測定

■ e の結果と μ の結果とで 5.0σ のズレ Nature 466, 213 (2010)

Flavor Anomaly in B-meson

以降では B Anomaly に注目して紹介

- B中間子 FCNC崩壊
- B中間子 (semi-)tauonic崩壊

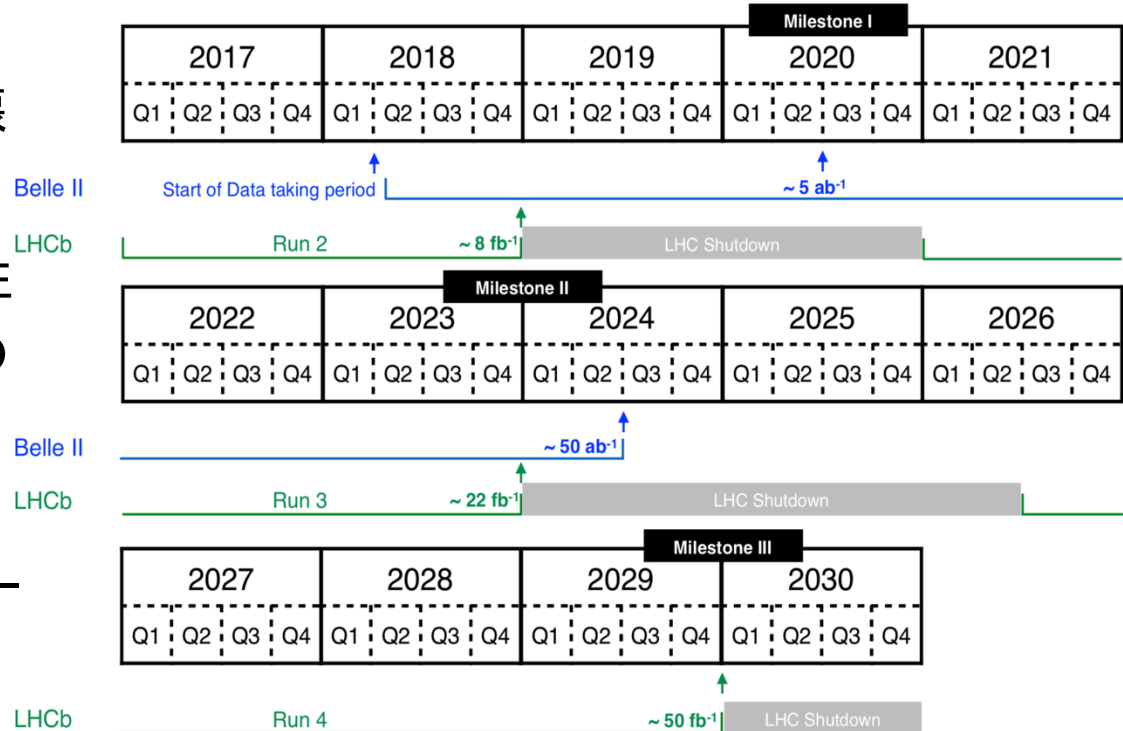
第3世代: 最も重い世代

- 大きな新物理寄与の可能性
- 世代を区別する相互作用の探索

B Anomalyの最新結果

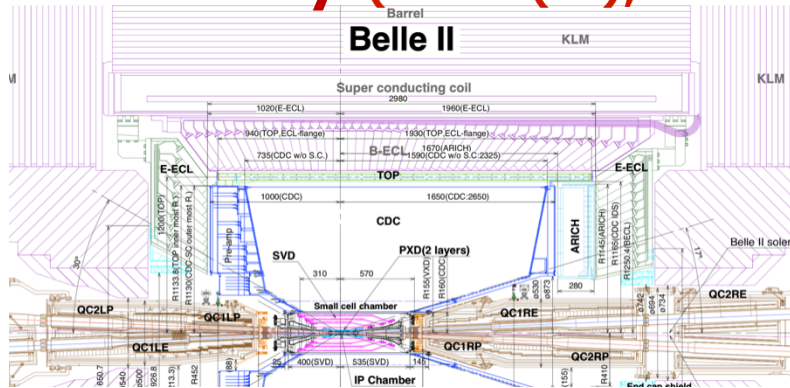
- Belle, BABAR, LHCb run1データを解析し尽くしつつある
- LHCb 13TeVの結果、Belle II 実験開始が待たれる状況!

Belle II実験、LHCb実験でのデータ収集量の展望



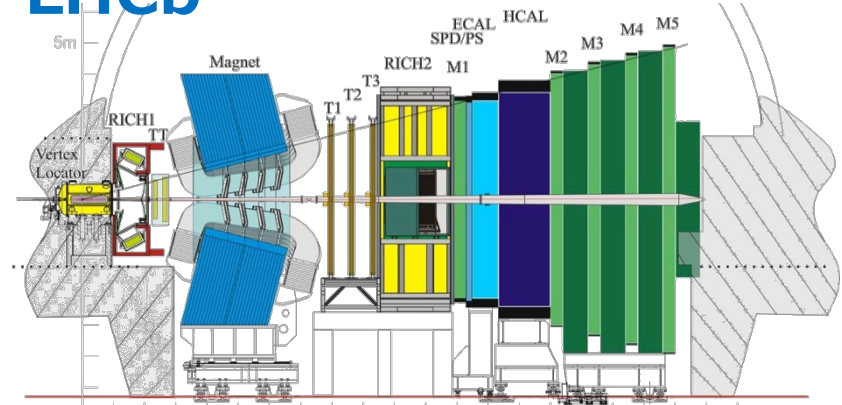
B-factory, LHCbでのB測定

B-factory (Belle (II), Babar)



- $e+e^- \rightarrow Y(4S) \rightarrow BB$: 非常にクリーンなイベント
- タグ側のBを再構成することにより、信号側のBの運動量・フレーバーを同定
- 欠損質量、検出器の残留信号を使ったニュートリノ生成事象の解析

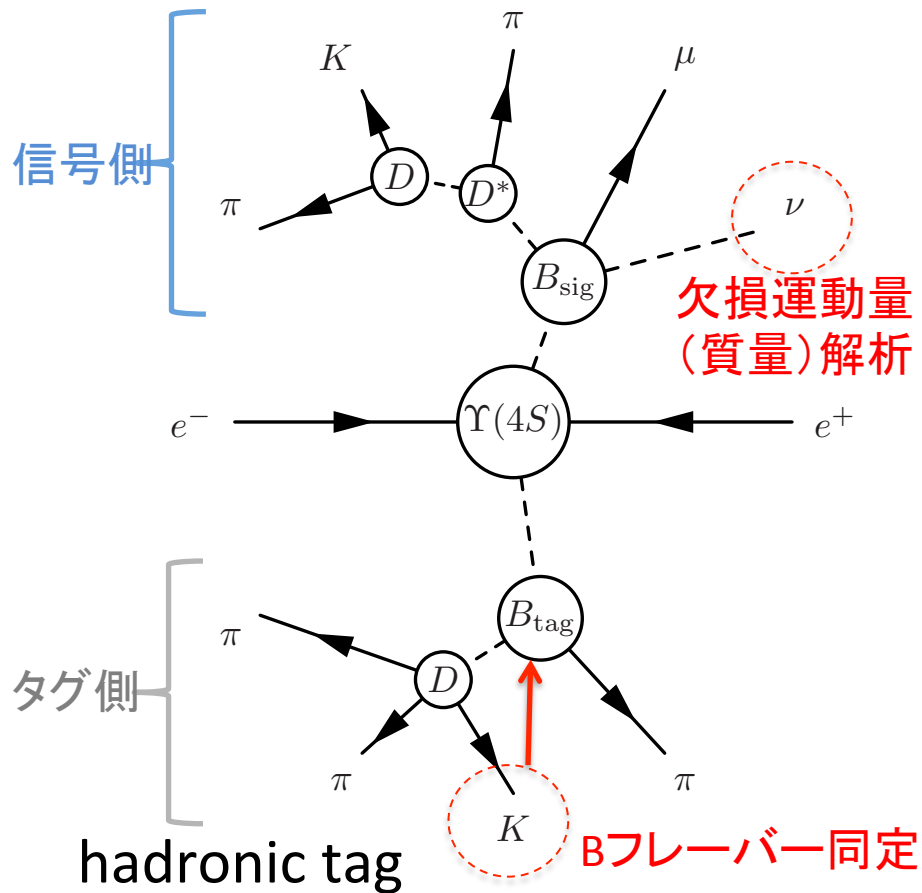
LHCb



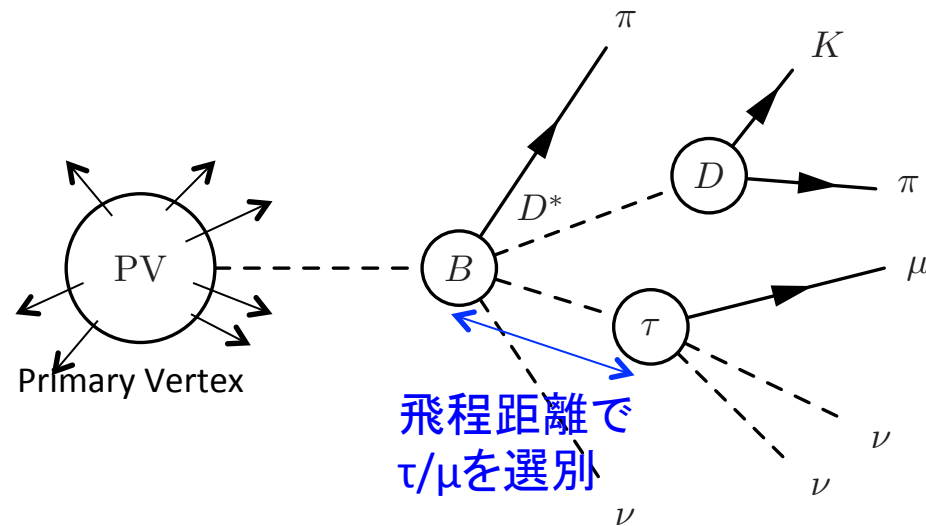
- 大量かつ様々な種類のB中間子生成 (B_d, B_s, B_c)
- 大きなLorentz boost(飛行距離)を利用した backgroundの除去

B-factory, LHCbでのB測定

B-factory (Belle (II), Babar)



LHCb



Flavor Anomaly in B中間子 FCNC 崩壊

B FCNC 崩壊 ($b \rightarrow sl^+l^-$, $b \rightarrow dl^+l^-$)

■ Flavor Changing Neutral Current (FCNC)

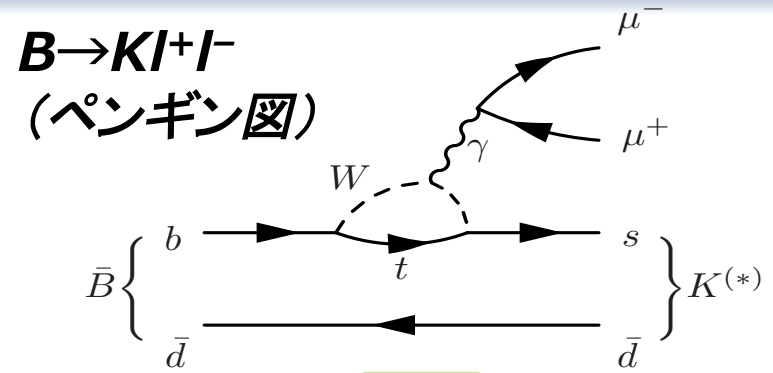
- 標準模型ではループ過程
- GIM機構により強く抑制
- → 新物理の効果を捉えやすい

■ B中間子 FCNC崩壊の例

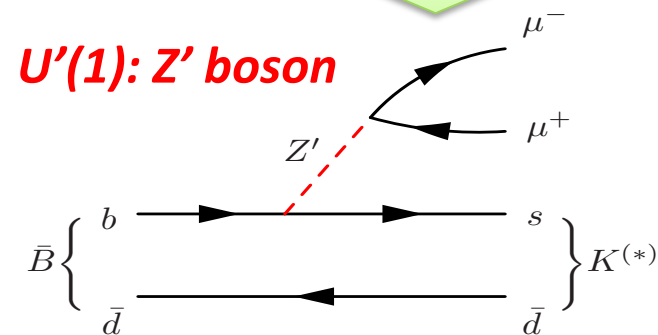
- $B \rightarrow K^{(*)}l^+l^-$
- $B_s \rightarrow \Phi l^+l^-$, $\Lambda_b \rightarrow \Lambda l^+l^-$
- $B_{d/s} \rightarrow l^+l^-$
- inclusive $B \rightarrow X_s l^+l^-$ (今回は触れません)
 - 小さい理論的不定性
 - クリーンなB-factoryで測定可能

■ 注目すべき測定量

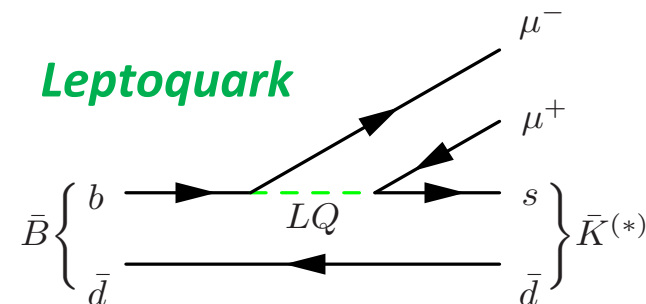
1. 微分分岐比: dBR/dq^2
2. 崩壊角度分布: P'_5 A_{FB}
3. Lepton Flavor Universality: R_K R_{K^*}



新物理



Leptoquark

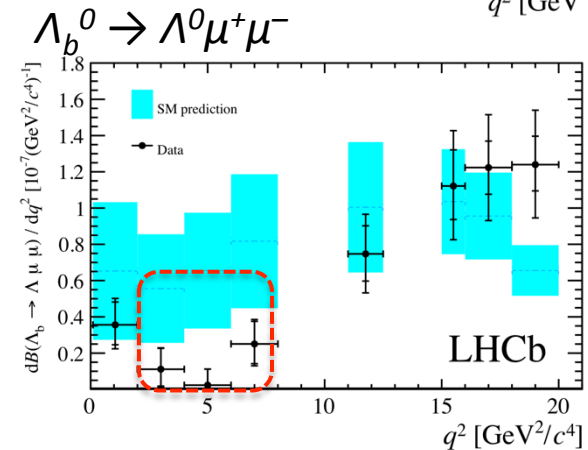
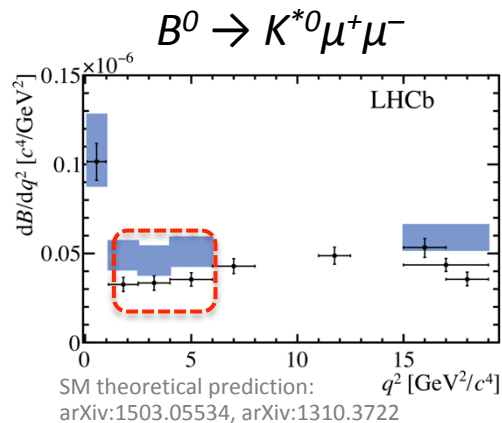
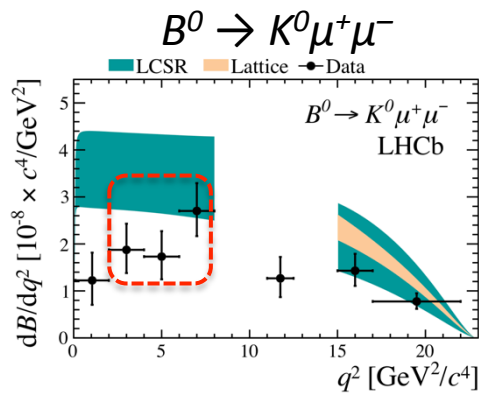
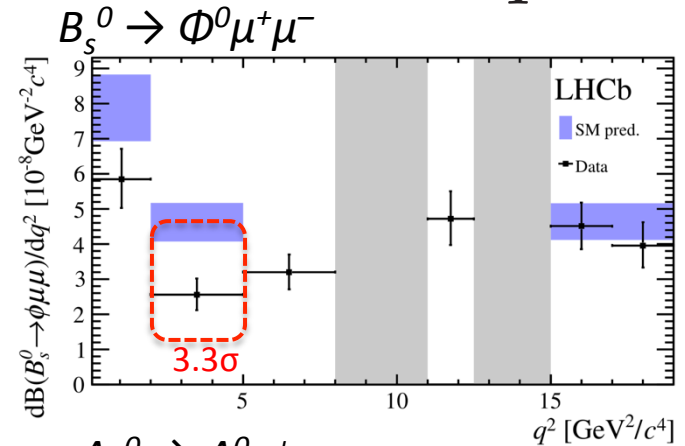
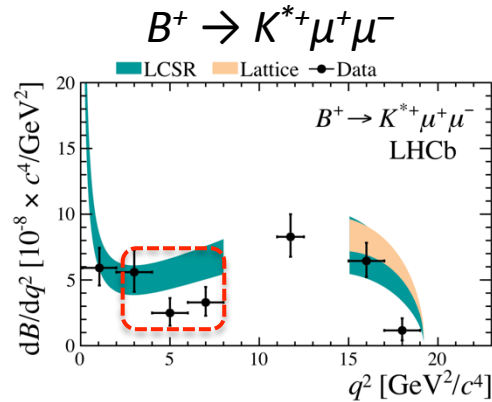
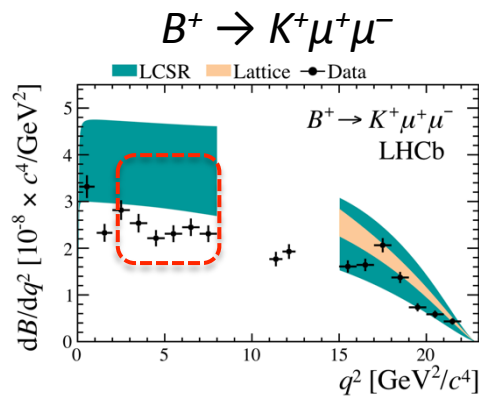


$b \rightarrow sl^+l^-$ 微分分岐比

arXiv:1403.8044, arXiv:1606.0473
 LHCb(2015) arXiv:1506.08777
 LHCb(2015) arXiv:1503.07138

- 崩壊幅の q^2 分布 q^2 : レプトン対 l^+l^- の不変質量
- 低い q^2 ($\sim 5 \text{ GeV}^2/c^4$)で系統的なSMからのズレ

$$\frac{dBR}{dq^2}(q^2)$$



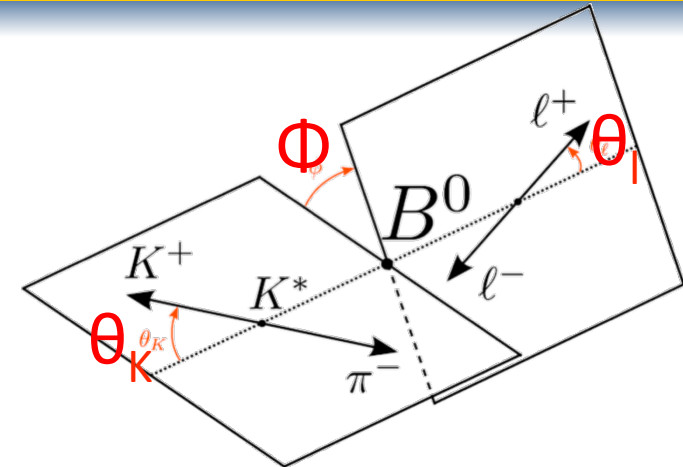
Belle, Babar実験でも統計誤差は大きいがconsistent

$B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ 崩壊角度分布

LHCb(2015): LHCb-CONF-2015-002
 Belle(2016): arXiv:1604.04042
 CMS(2015): CMS_PAS_BPH_15_008
 ATLAS(2017): ATLAS-CONF-2017-023

角度分布の全成分表示

$$\frac{1}{d\Gamma/dq^2} \frac{d^4\Gamma}{d\cos\theta_\ell d\cos\theta_K d\phi dq^2} = \frac{9}{32\pi} \left[\frac{3}{4}(1 - F_L) \sin^2 \theta_K + F_L \cos^2 \theta_K \right. \\
 + \frac{1}{4}(1 - F_L) \sin^2 \theta_K \cos 2\theta_\ell \\
 - F_L \cos^2 \theta_K \cos 2\theta_\ell + S_3 \sin^2 \theta_K \sin^2 \theta_\ell \cos 2\phi \\
 + S_4 \sin 2\theta_K \sin 2\theta_\ell \cos \phi + S_5 \sin 2\theta_K \sin \theta_\ell \cos \phi \\
 + S_6 \sin^2 \theta_K \cos \theta_\ell + S_7 \sin 2\theta_K \sin \theta_\ell \sin \phi \\
 \left. + S_8 \sin 2\theta_K \sin 2\theta_\ell \sin \phi + S_9 \sin^2 \theta_K \sin^2 \theta_\ell \sin 2\phi \right],$$

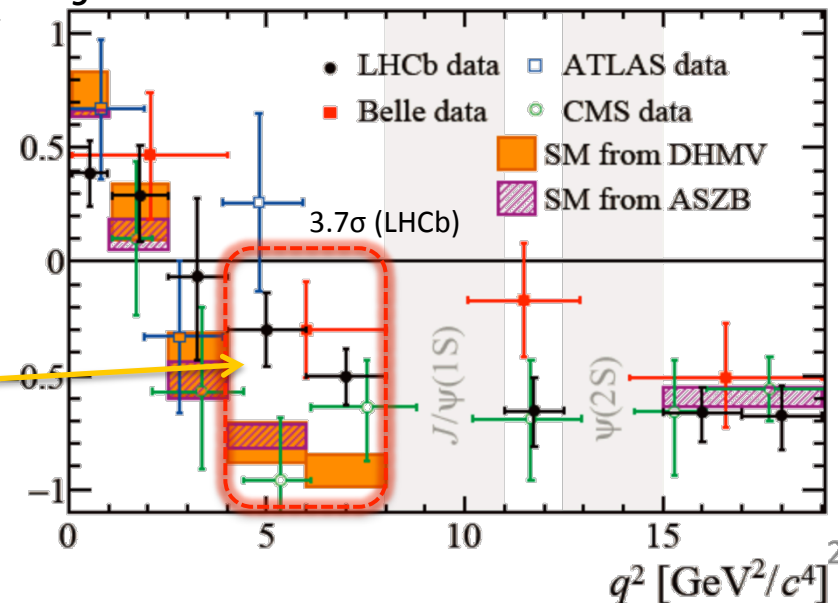


Optimized observable

$$P'_{i=4,5,6,8} = \frac{S_{j=4,5,7,8}}{\sqrt{F_L(1 - F_L)}}, \quad P'_5$$

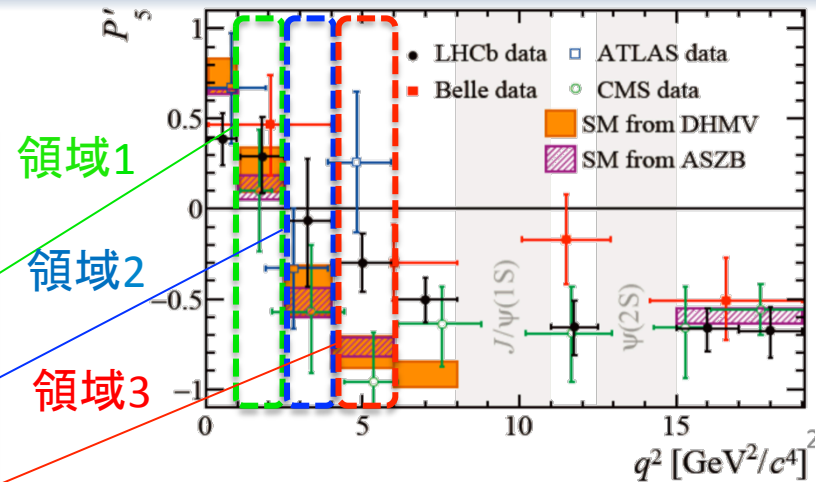
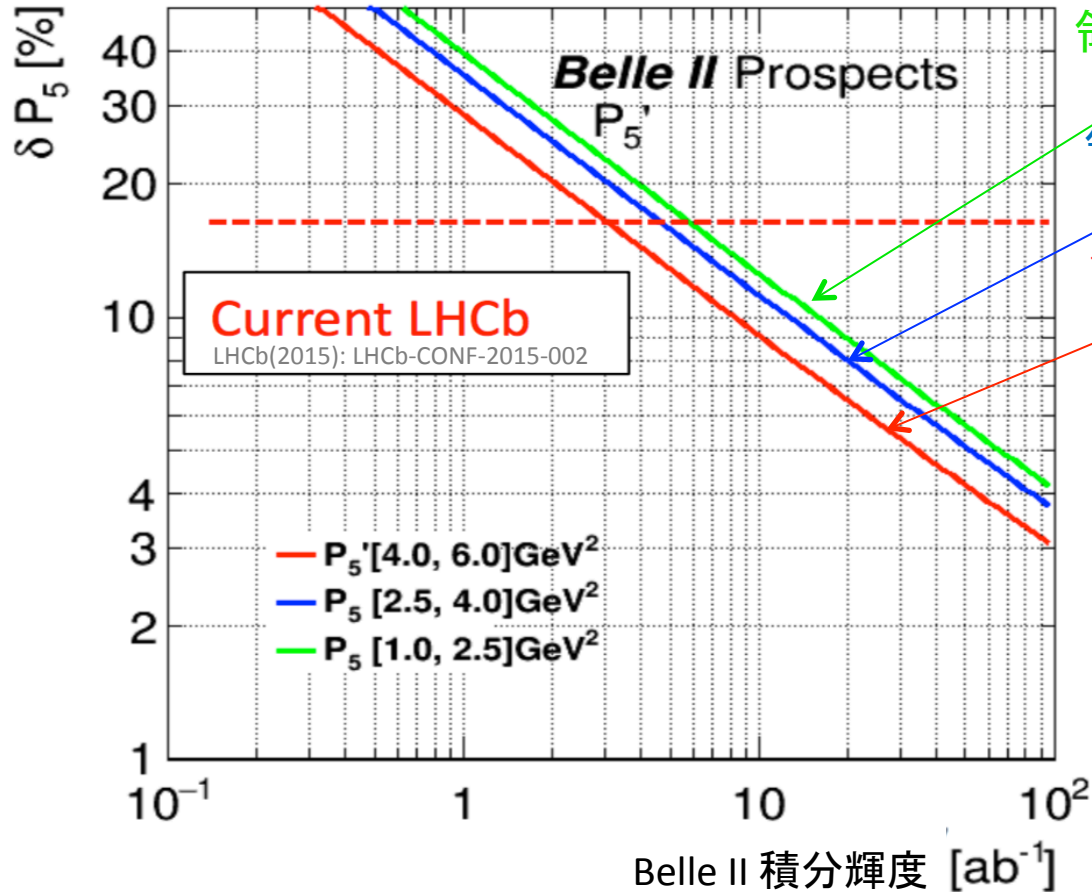
- $F_L S_i$: form factor依存→不定性大
- P'_i : Leading orderでform factorの不定性をキャンセル
- P'_5 : 3.7σ tension from SM ($4 < q^2 < 8 \text{ GeV}^2/c^4$) in LHCb
 - Belle, ATLASも同様の結果を示唆
 - CMSでの測定はSMに一致。ただし統計誤差は大きめ

P'_5 の測定結果



P_5' 測定 @ Belle II 実験

Belle II で予想される P_5' 測定誤差



- ほぼ統計量で測定誤差が決まる
- 3 ab⁻¹(~2020)でLHCb(2015)に到達
- 50 ab⁻¹で誤差0.04: LHCb 22fb⁻¹とほぼ同等の感度

Lepton Universality Test : $R_{K^{(*)}}$

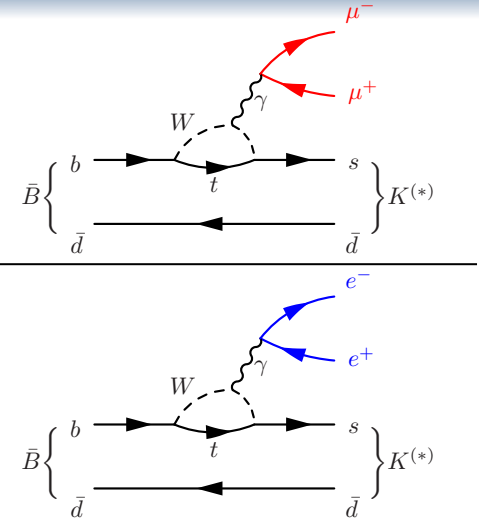
Babar(2009): PRL 103 (2009) 171801

Belle(2012): PRD 86 (2012) 032012

LHCb(2014): PRL 113 (2014) 151601

LHCb(2017): JHEP08(2017)055 [arXiv:1705.05802]

$$R_{K^{(*)}} = \frac{\text{BR}(B \rightarrow K^{(*)} \mu\mu)}{\text{BR}(B \rightarrow K^{(*)} ee)} = \frac{\text{Diagram 1}}{\text{Diagram 2}}$$



■ Lepton Universalityの精密測定に最適

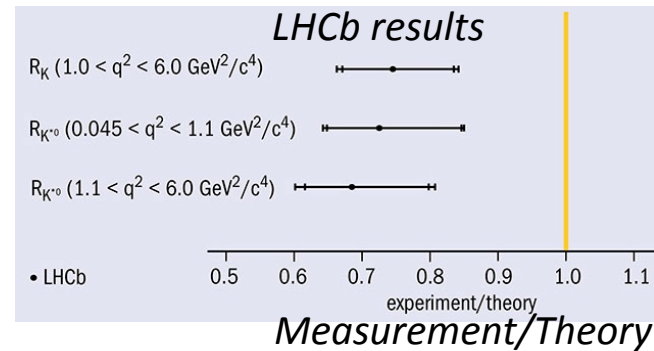
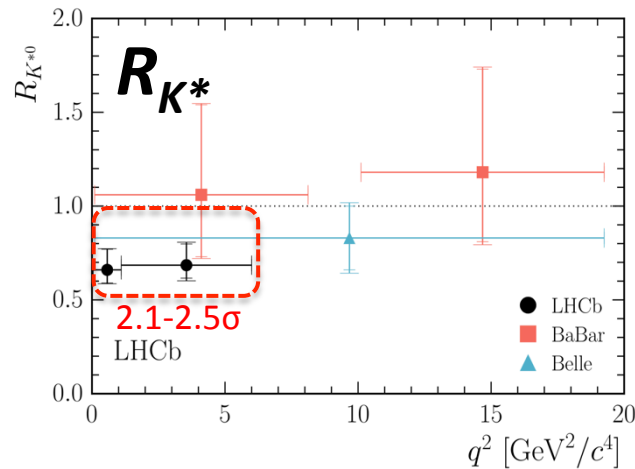
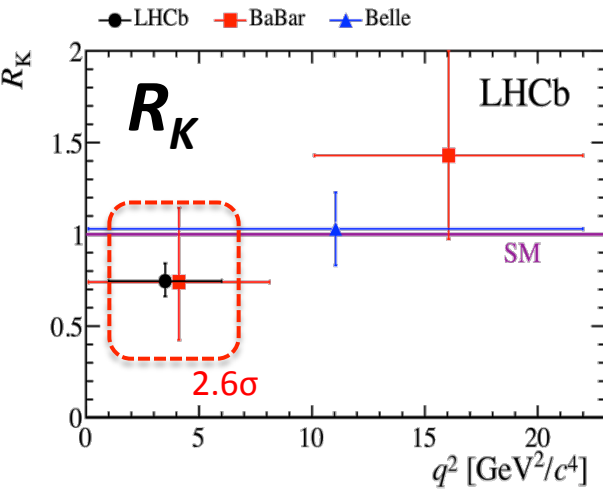
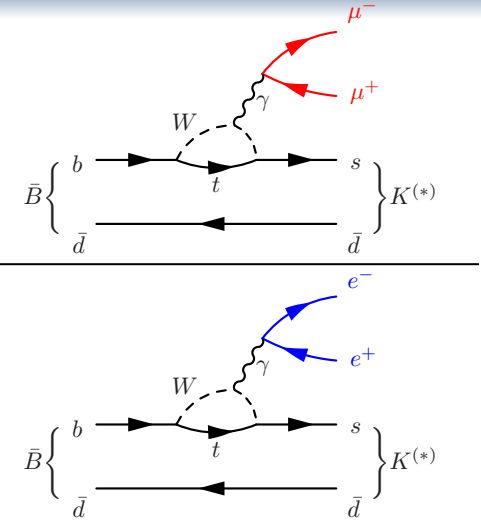
- 測定での様々な系統誤差をキャンセル
- 理論計算でのハドロン化による不定性をキャンセル
 - 残る理論的不定性は1-2%程度のQED補正 arXiv:1605.07633

■ SMでは $R_{K^{(*)}} \sim 1$ ($q^2 \gg m_\mu^2$): eと μ の対称性

Lepton Universality Test : $R_{K^{(*)}}$

Babar(2009): PRL 103 (2009) 171801
 Belle(2012): PRD 86 (2012) 032012
 LHCb(2014): PRL 113 (2014) 151601
 LHCb(2017): JHEP08(2017)055 [arXiv:1705.05802]

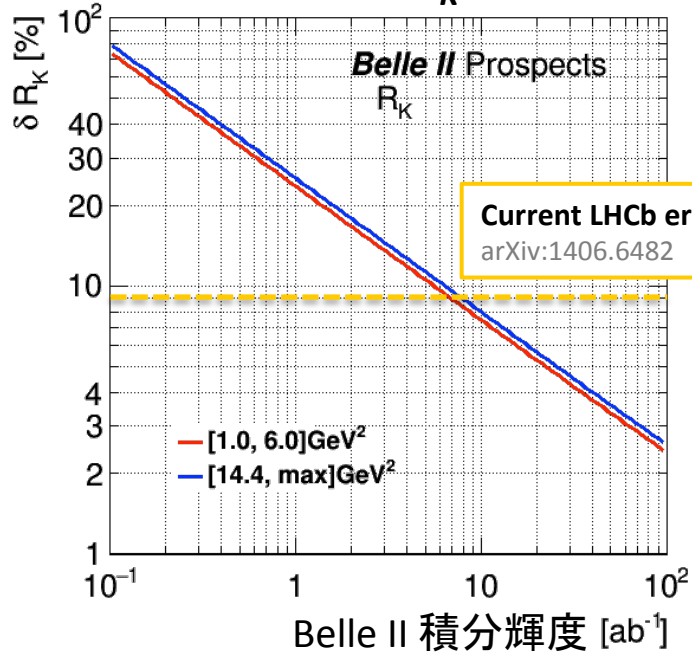
$$R_{K^{(*)}} = \frac{\text{BR}(B \rightarrow K^{(*)} \mu\mu)}{\text{BR}(B \rightarrow K^{(*)} ee)} = \frac{\text{BR}(B \rightarrow K^{(*)} \mu\mu)}{\text{BR}(B \rightarrow K^{(*)} ee)}$$



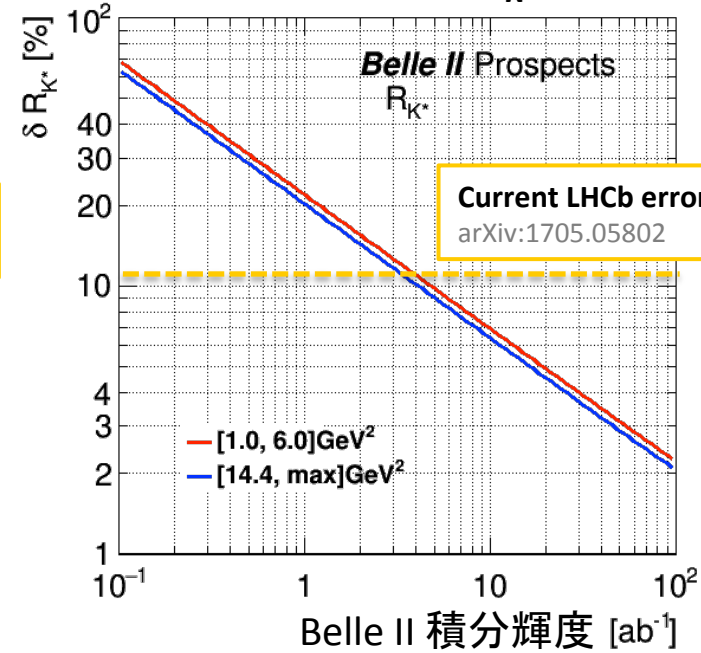
CERN Courier Mar. 23 (2018)

$R_{K(*)}$ @ Belle II実験

Belle IIで予想される R_K 測定誤差



Belle IIで予想される R_{K^*} 測定誤差

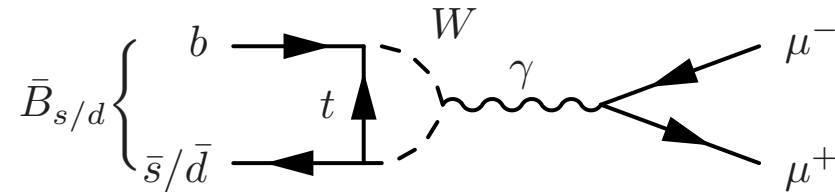


- 10ab^{-1} (2021)でSMからのズレを確認できる可能性
- 50ab^{-1} で約3%の誤差で測定が可能
- Belle II実験での強み
 - 主要な系統誤差はlepton ID $\sim 0.4\%$ なので、 50ab^{-1} でも統計誤差が主要な誤差
 - high q^2 で測定可能(LHCbでは難しい)
 - R_{K^*} が測定可能(LHCbでは難しい)

$B_s \rightarrow l^+ l^- , B \rightarrow l^+ l^-$

LHCb(2017): arXiv:1703.05747

- FCNC ($b \rightarrow s l^+ l^- , b \rightarrow d l^+ l^-$)による抑制
- 加えて、helicity suppressionによる抑制
- また理論的不定性が非常に少ない
- 新物理探索に理想的なチャンネル
- $\mu^+ \mu^-$ チャンネル：LHCでの測定が統計的に圧倒的有利



SM予想値: PRL 112 (2014) 101801

$$B(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.65 \pm 0.23) \times 10^{-9}$$

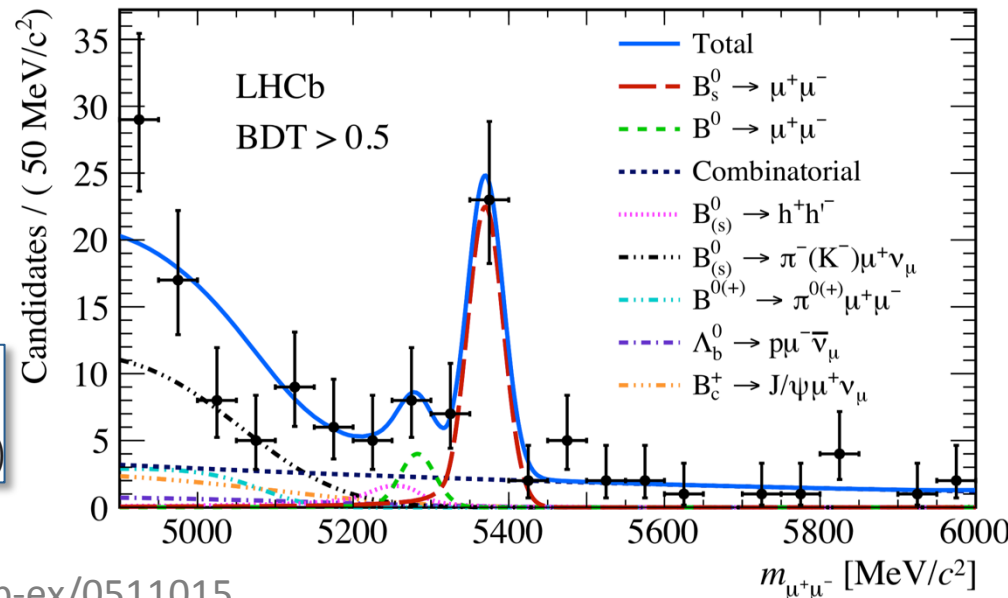
$$B(B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (1.06 \pm 0.09) \times 10^{-10}$$

LHCb測定値: 7.8 σ significance!

$$\text{BR}(B_s \rightarrow \mu\mu) = (3.0 \pm 0.6_{-0.2}^{+0.3}) \times 10^{-9}$$

$$\text{BR}(B \rightarrow \mu\mu) < 3.4 \times 10^{-10} \quad (95\% \text{C.L.})$$

現状ではSMと一致

c.f. $\text{BR}(B \rightarrow \tau^+ \tau^-) < 4.1 \times 10^{-3}$: Babar(2006) arXiv:hep-ex/0511015困難なのは信号と $b \rightarrow W^+ c (\rightarrow W^+ s)$ による $B \rightarrow K_L \mu \mu \nu \nu$ 等との区別

Flavor Anomaly in B中間子 (semi-)tauonic 崩壊

B (semi-)tauonic 崩壊

■ (Semi-)tauonic崩壊 : Weak charged current

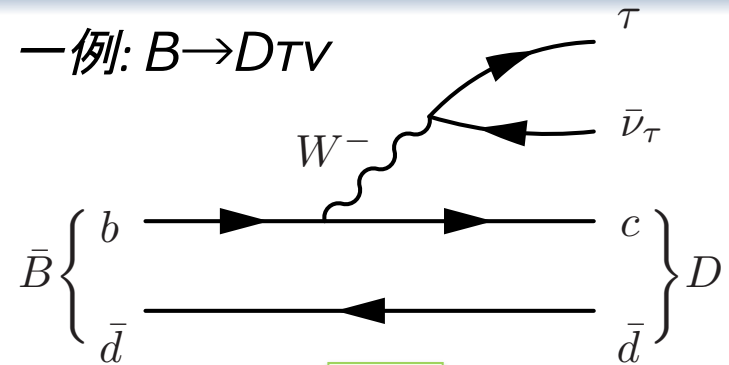
- SMではtree過程: BR大きい
- b/τ とともに第3世代: 大きな質量
 - EWSBスケール \rightarrow Higgs機構の理解
- 世代を選ぶ相互作用に有感
 - e.g. Leptoquark

■ (semi-)tauonic崩壊の例

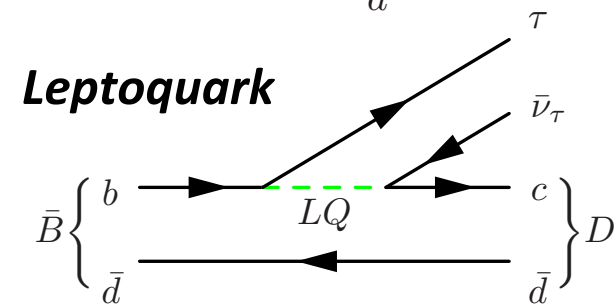
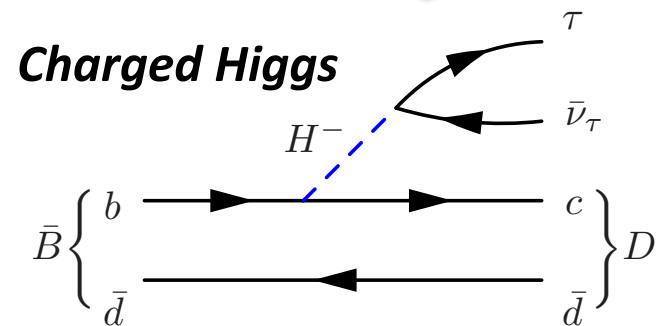
- $B \rightarrow D^{(*)}TV$, $B_c \rightarrow J/\psi TV$
- $B \rightarrow TV$

■ 注目すべき測定量

1. Lepton Flavor Universality: $R(D^*)$, $R(D)$
2. τ 偏極度: $P_\tau(D^*)$
 - τ のhadronic崩壊により測定可能
 - right-handed current
3. その他、 q^2 分布 (ν の不変質量分布) や D^* 偏極度も新物理の特定に重要

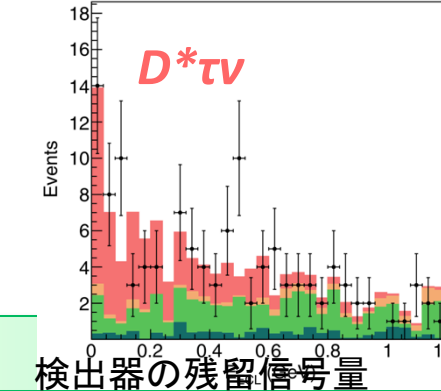
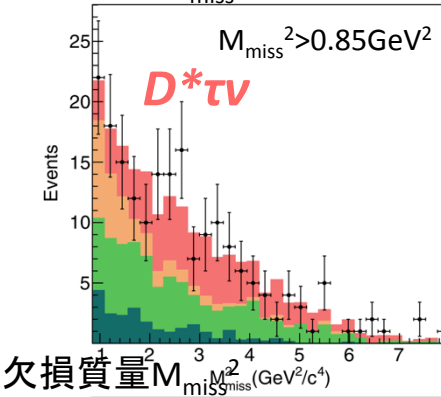
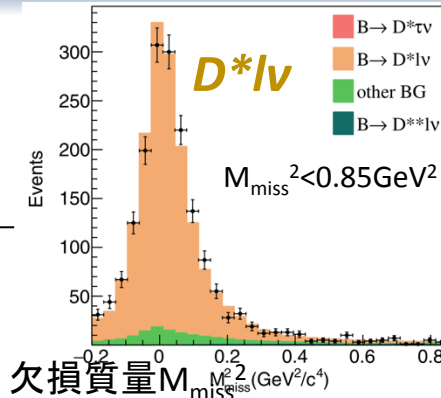
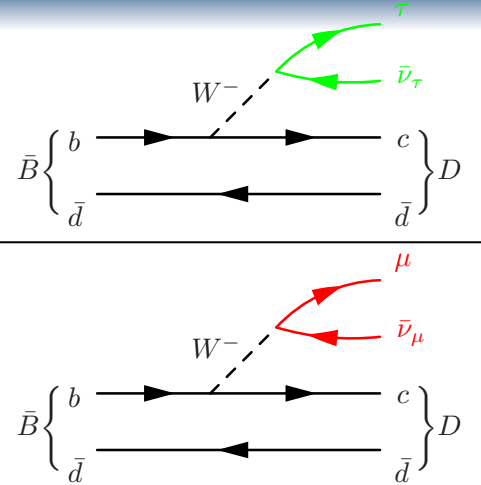


新物理



Lepton Flavor Universality Test : $R(D^{(*)})$

$$\mathcal{R}(D^{(*)}) = \frac{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \tau^- \bar{\nu}_\tau)}{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \ell^- \bar{\nu}_\ell)} \quad (\ell = e, \mu)$$



■ $R(D^{(*)})$: Lepton Flavor Universalityの精密測定

- 実験測定・理論計算の両面で多くの系統誤差をキャンセル
- 特に $\tau \rightarrow l\nu\nu$ を選べば、荷電粒子だけの終状態は変わらない

■ 理論予言はクリーン

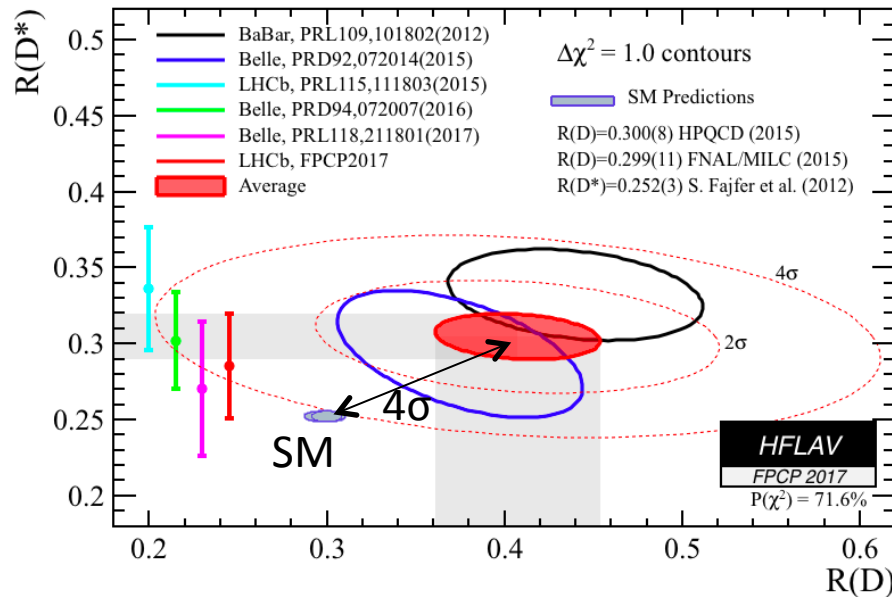
- Form factor: 実験的に $B \rightarrow D^{(*)} l\nu$ で良く測定できる
arXiv1707.09509
- QED補正 ~3-5%程度 arXiv:1803.05881

■ 通常B-factoryでは、tag側Bを完全に再構成して、欠損質量分布から背景事象を除去。残留信号量分布から $B \rightarrow D^{(*)} l\nu$ 信号量を計測 PRD92,072014(2015)

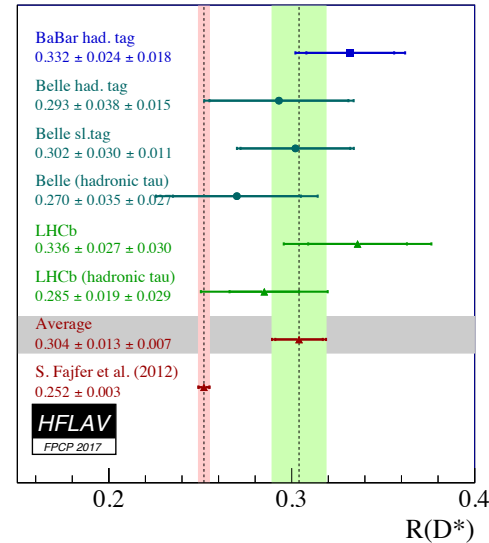
Lepton Flavor Universality Test : $R(D^{(*)})$

HFLAV (FPCP2017)

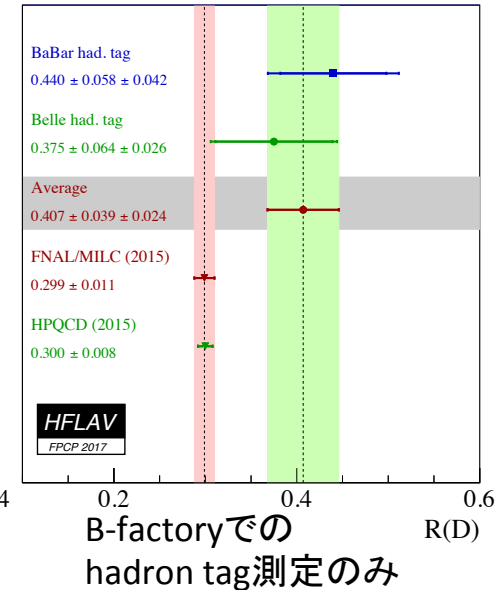
$R(D^{*})-R(D)$



World $R(D^{*})$ ave.



World $R(D)$ ave.



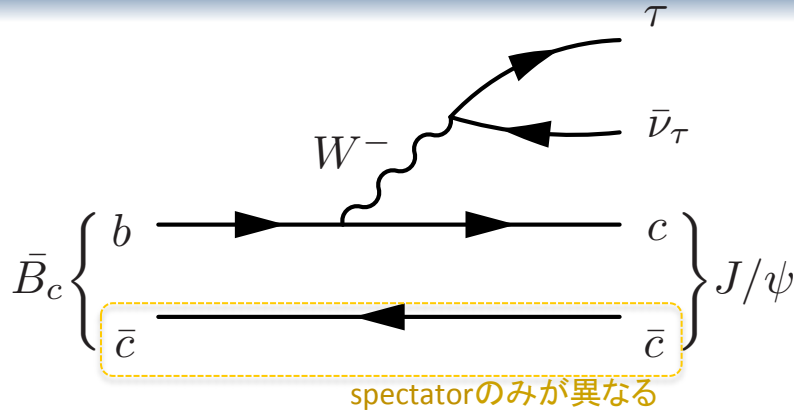
■ $R(D^{*})-R(D)$ を併せて、SMから4 σ のズレ

■ $R(D)$ のさらなる測定

- LHCb: Bの崩壊点が決まらない難しさ
- B-factory: Semi-leptonic tagでの $B \rightarrow D^* \mu \nu$ 信号に対する背景事象($B \rightarrow D^* \mu \nu$ など)の多さ

$R(J/\psi)$

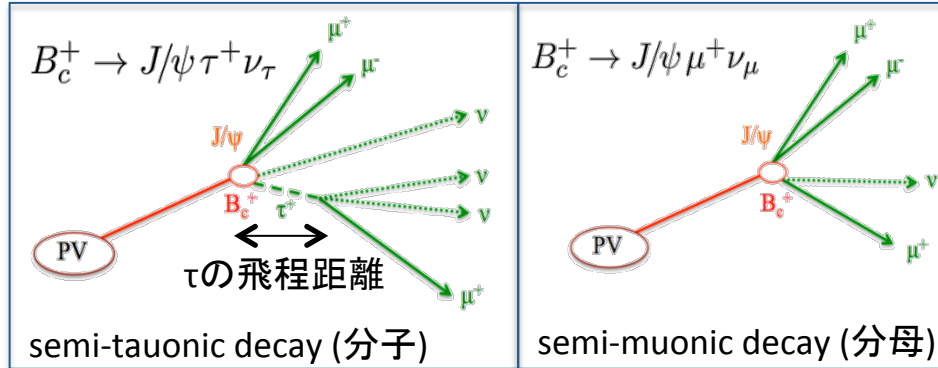
LHCb(2017): arXiv:1711.05623



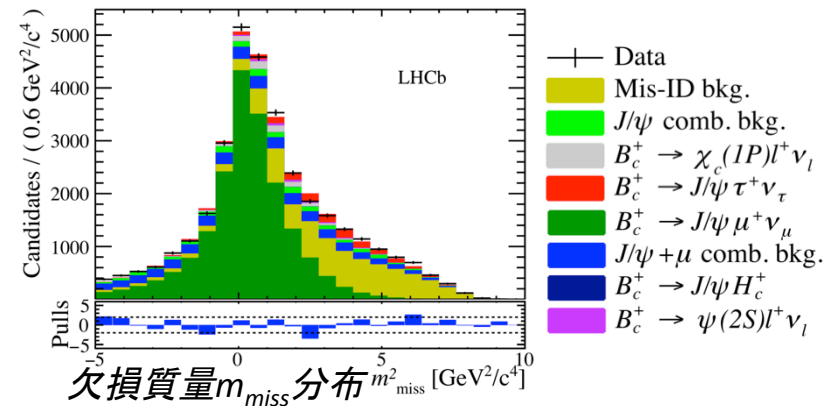
$$\mathcal{R}(J/\psi) = \frac{\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi \tau^+ \nu_\tau)}{\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi \mu^+ \nu_\mu)}$$

- $\mathcal{R}(J/\psi)_{\text{SM}} = 0.25\text{-}0.28$
 - 誤差はform factorのパラメータによる
- B-factoryのenergyでは B_c を生成できない

B_c の崩壊点(= J/ψ vertex)から μ 飛跡までの距離により、 τ/μ を区別



欠損質量 m_{miss} , B_c 崩壊時間, (q^2 , E_μ^*)を同時フィット



- $\mathcal{R}(J/\psi) = 0.71 \pm 0.17(\text{stat}) \pm 0.18(\text{syst})$
 - SMから約 2σ 大きい
 - 系統誤差は主に、form factorとMC統計量

τ 偏極度 $P_\tau(D^*)$

Belle(2016): PRL 118 211801[arXiv:1612.00529]

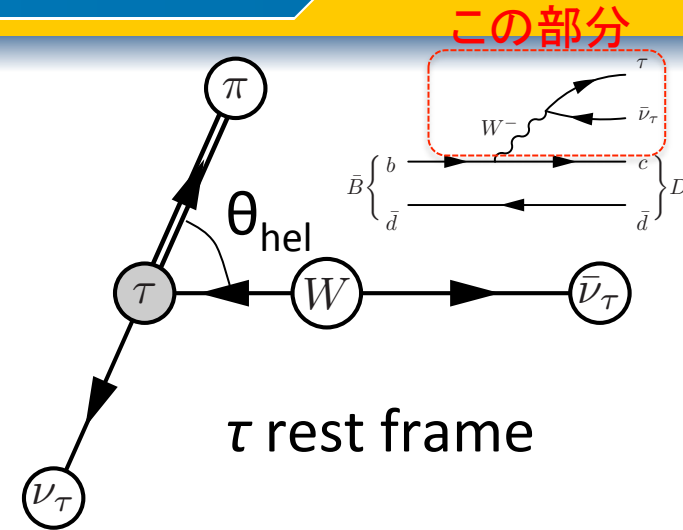
■ $P_\tau(D^*)$: τ 崩壊からの中間子の角度非対称度を測定

定義:
$$\frac{1}{\Gamma(D^{(*)})} \frac{d\Gamma(D^{(*)})}{d\cos\theta_{\text{hel}}} = \frac{1}{2} \left[1 + \alpha P_\tau(D^{(*)}) \cos\theta_{\text{hel}} \right]$$

$\tau \rightarrow \pi\nu$: $\alpha=1.0$, $\tau \rightarrow \rho\nu$: $\alpha=0.449$

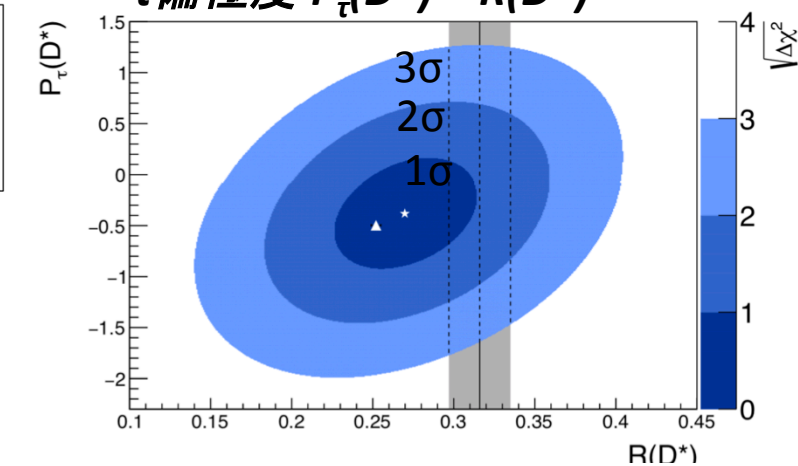
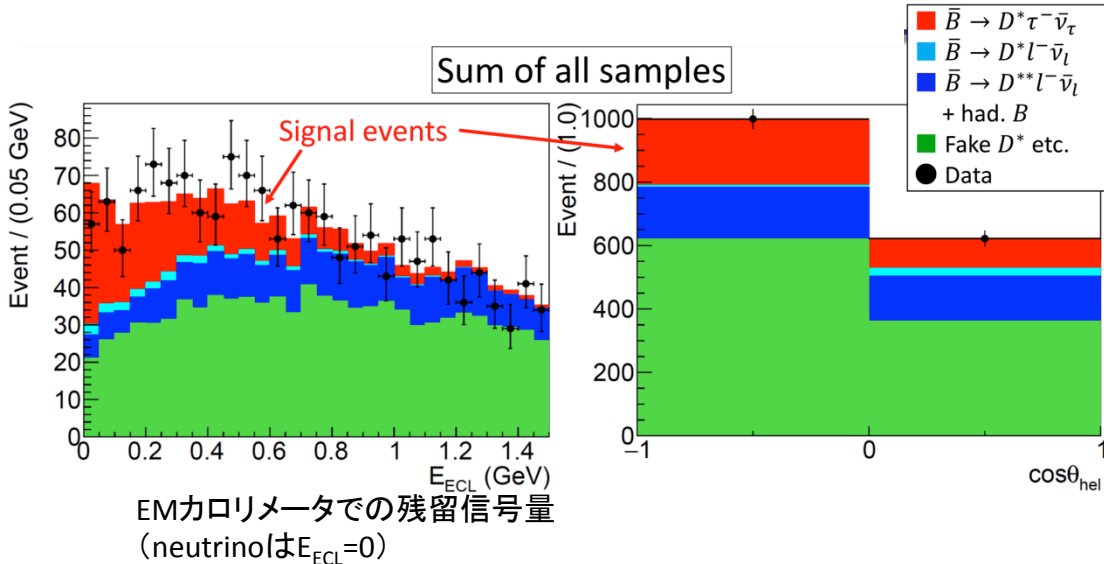
測定量:

$$P_\tau(D^*) = \frac{2 N_{\text{sig}}(\cos\theta_{\text{hel}} > 0) - N_{\text{sig}}(\cos\theta_{\text{hel}} < 0)}{\alpha N_{\text{sig}}(\cos\theta_{\text{hel}} > 0) + N_{\text{sig}}(\cos\theta_{\text{hel}} < 0)}$$



τ rest frame

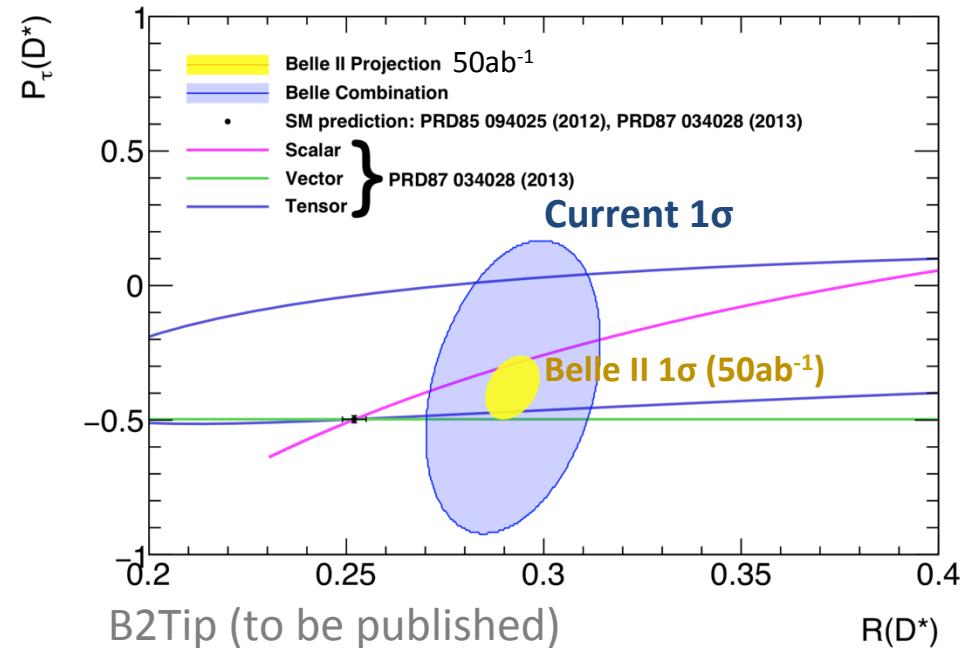
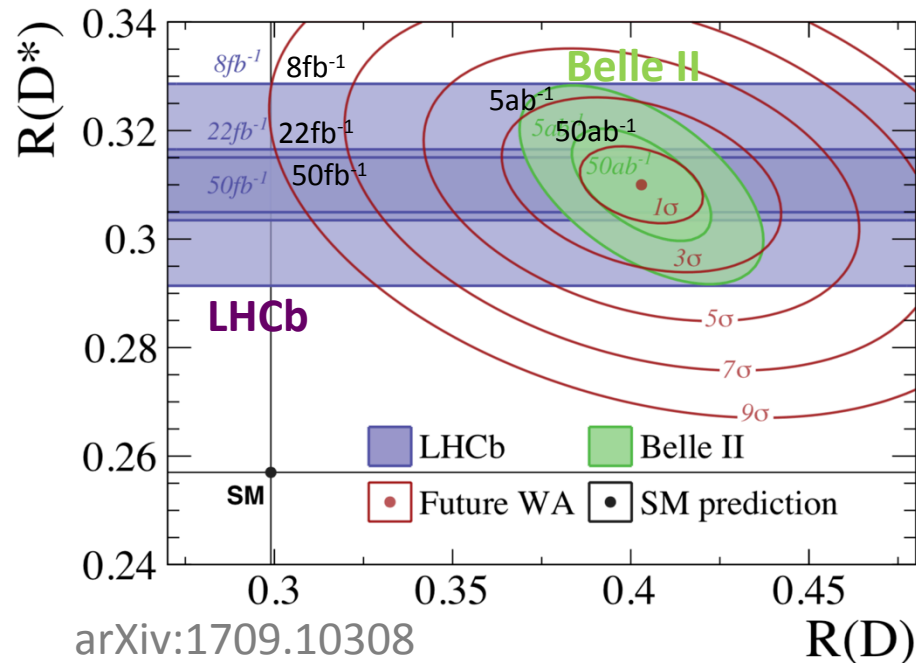
τ 偏極度 $P_\tau(D^*) - R(D^*)$



$$P_\tau(D^*) = -0.38 \pm 0.51(\text{stat})^{+0.21}_{-0.16}(\text{syst}),$$

誤差は大きいのが初の測定

$R(D^{(*)}), P_T$ 測定 @ Belle II実験



- Belle II実験 $5ab^{-1}$ (2020)だけでもSMからのズレを確実にできるかもしれない
- LHCbは現状では $22fb^{-1}$ 以上でほぼ系統誤差がメイン
- 統計が上がったときには、 τ 偏極度・ D^* 偏極度・ q^2 分布などの測定が新物理識別に重要 [arXiv:1212.1878](https://arxiv.org/abs/1212.1878)

$B \rightarrow TV$

Belle(2013): arXiv:1208.4678

■ B leptonic崩壊

- Helicity suppressionによる抑制
- 終状態はレプトンのみ: 理論的不定性は $f_B, |V_{ub}|$ からが主要
- → 新物理探索に理想的

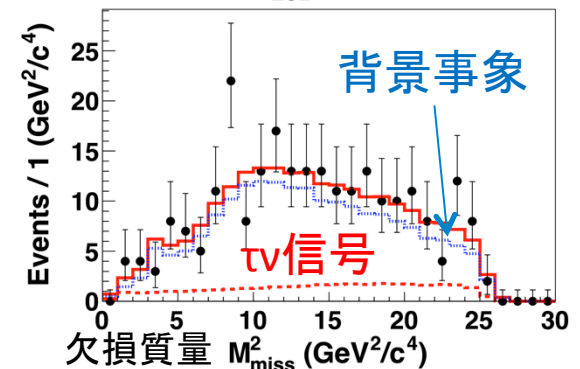
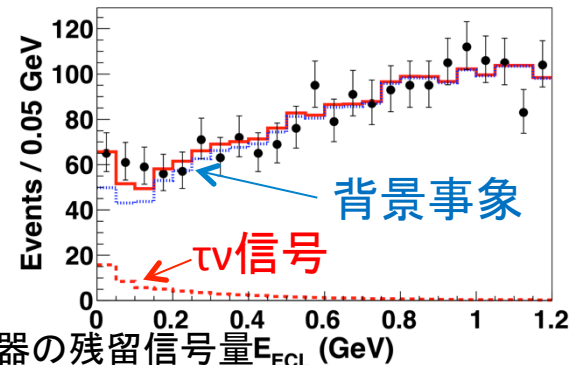
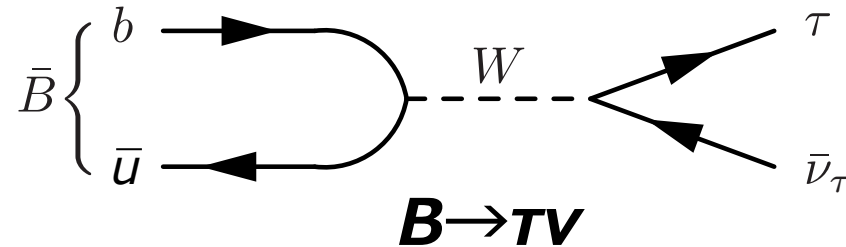
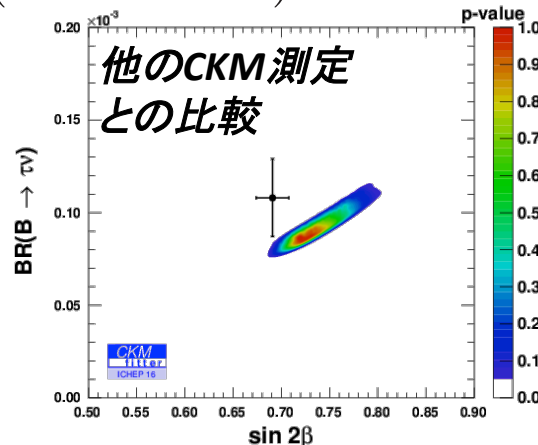
$$\text{BR}(B \rightarrow \tau\nu_\tau)_{\text{SM}} = (8.45 \pm 0.70) \times 10^{-4}$$

$$\text{BR}(B \rightarrow \mu\nu_\mu)_{\text{SM}} = (3.80 \pm 0.31) \times 10^{-7}$$

■ $B \rightarrow TV$ PDG2017, CKM fitter(ICHEP16)

$$\text{BR}(B \rightarrow \tau\nu_\tau)_{\text{exp}} = (1.09 \pm 0.24) \times 10^{-4}$$

- Belle, Babarの測定
- SMと一致



$B \rightarrow \mu \nu$

Belle(2017): arXiv:1712.04123

■ B leptonic崩壊

- Helicity suppressionによる抑制
- 終状態はレプトンのみ: 理論的不定性は $f_B, |V_{ub}|$ からが主要
- \rightarrow 新物理探索に理想的

$$\text{BR}(B \rightarrow \tau \nu_\tau)_{\text{SM}} = (8.45 \pm 0.70) \times 10^{-4}$$

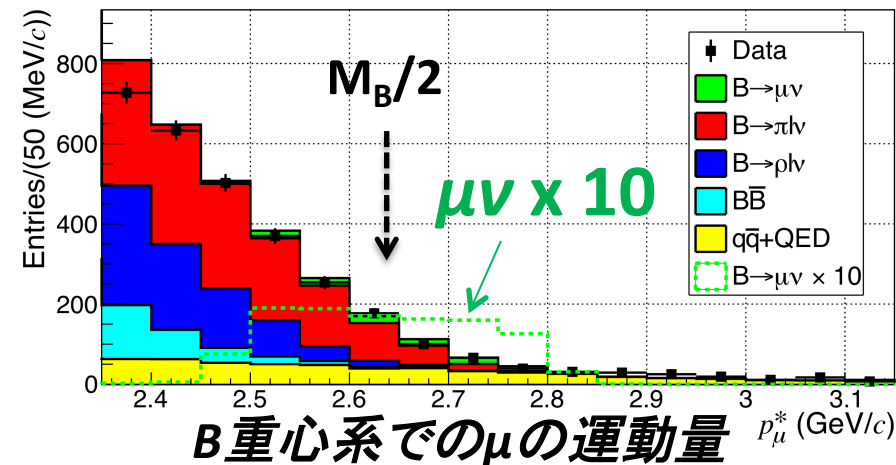
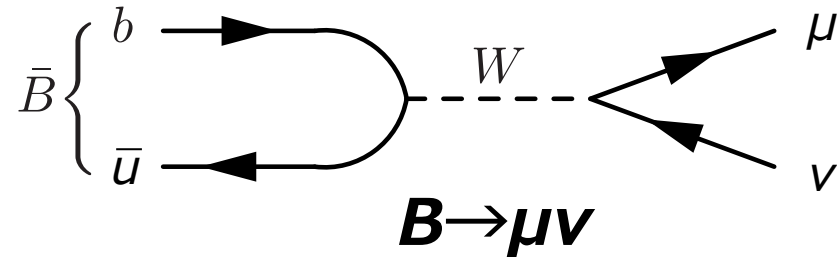
$$\text{BR}(B \rightarrow \mu \nu_\mu)_{\text{SM}} = (3.80 \pm 0.31) \times 10^{-7}$$

■ $B \rightarrow \mu \nu$ *new result*

- Belle実験からuntagging解析での結果
- ペア側Bを再構成し、残った μ の運動量(信号B重心系)で $M_B/2$ ピークを探索
- 2.4σ significance で 信号領域のexcessを確認

$$\text{BR}(B^- \rightarrow \mu \bar{\nu}_\mu) = (6.46 \pm 2.22(\text{stat}) \pm 1.60(\text{syst})) \times 10^{-7}$$

初のnon-zeroなBR測定値!



$B \rightarrow TV, B \rightarrow \mu V$

arXiv:1608.05207

■ 注目すべき測定量

$$R_{ps} = \frac{\tau_{B^0} \text{BR}(B^- \rightarrow \tau \bar{\nu}_\tau)}{\tau_{B^-} \text{BR}(\bar{B}^0 \rightarrow \pi^+ \mu \bar{\nu}_\mu)}$$

$$R_{pl} = \frac{\text{BR}(B^- \rightarrow \tau \bar{\nu}_\tau)}{\text{BR}(B^- \rightarrow \mu \bar{\nu}_\mu)}$$

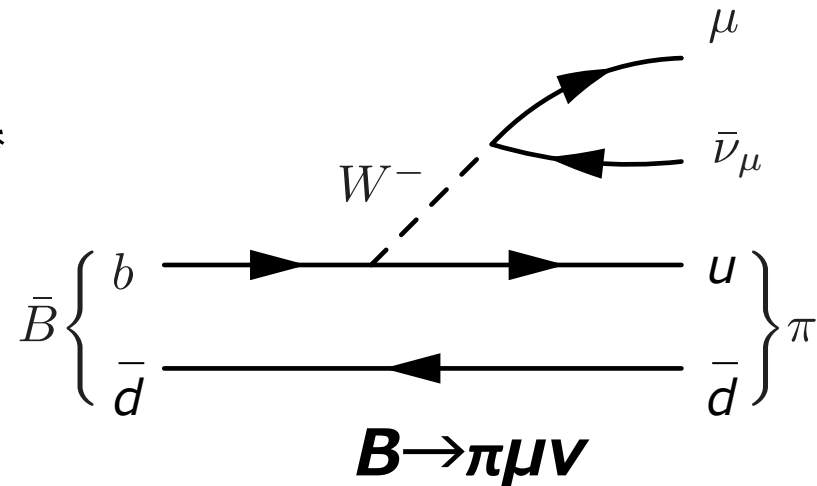
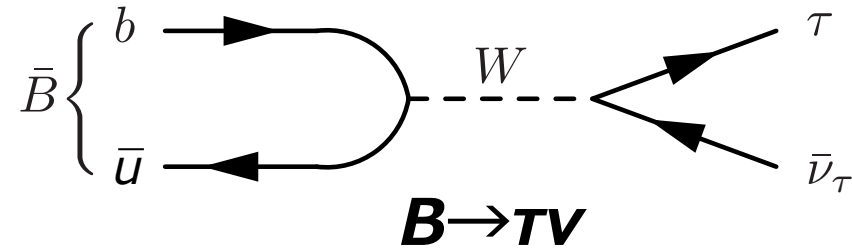
- 不定性の大きい $f_B, |V_{ub}|$ をキャンセル
- leptonic崩壊分岐比はlepton質量のみで決定

$$R_{ps}(\text{SM}) = 0.539 \pm 0.043$$

$$R_{pl}(\text{SM}) = \frac{m_\tau^2 (1 - m_\tau^2/m_B^2)^2}{m_\mu^2 (1 - m_\mu^2/m_B^2)^2} = 222.37$$

■ $R_{ps}(\text{exp}) = 0.73 \pm 0.14$

- 現状ではSMと一致



(おそらく) 詳細は次の渡辺さんのトークで

Belle II 実験での精密検証に期待!

まとめ

- これまでにも様々なFlavor Universality測定が行われてきたが、近年はB Anomalyが特に注目
 - 幾つかのB崩壊チャンネルでSMからのTensionが報告
- B Anomalyと新物理との関係を解明するため、Belle II実験とLHCb実験の相補的協力が必要となる
 - Belle II実験の開始と、LHCb実験Run2の結果が待たれる
- Belle II実験の予定
 - phase-2運転(崩壊点検出器無し) : 今年3月~7月
 - ・ 4月にビーム初衝突予定 (インターネット中継予定)
 - phase-3運転(フルセットアップ) : 2019年2月~

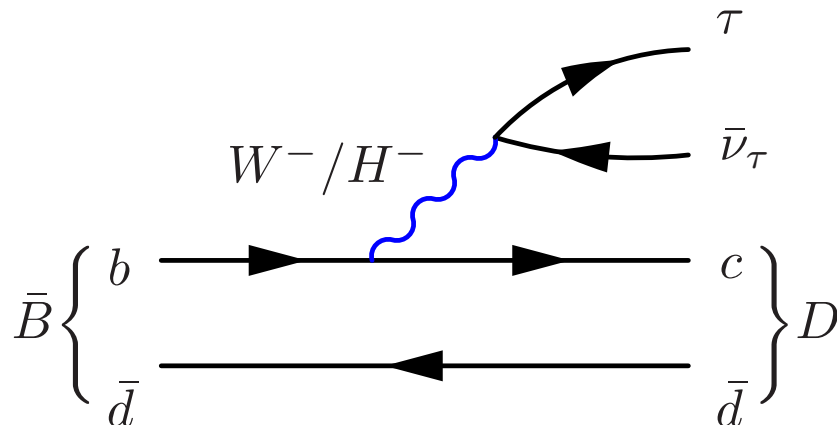
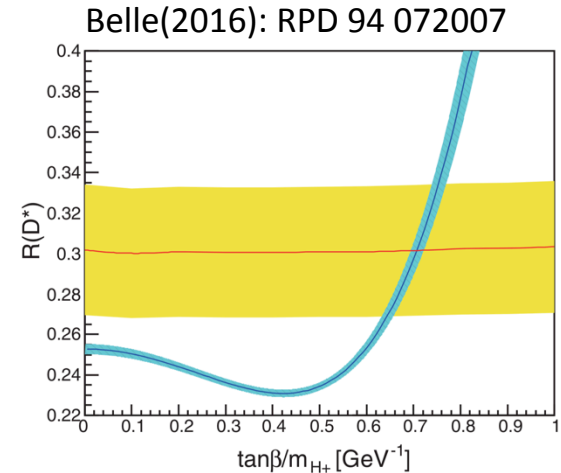
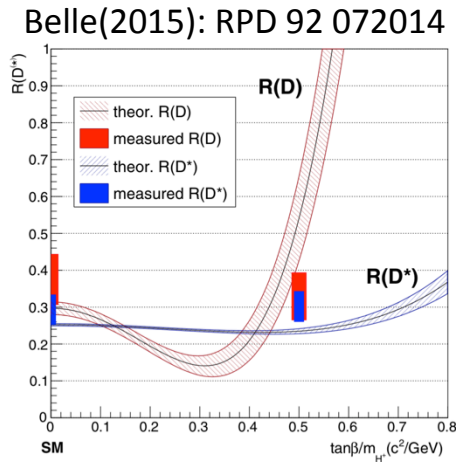
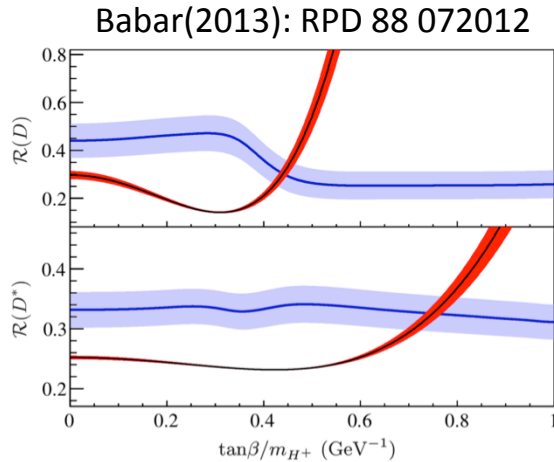


**Belle II実験の活躍を
乞うご期待下さい！**

New Physics Test

2HDM type-II

$$\mathcal{R}(D^{(*)})_{2\text{HDM}} = \mathcal{R}(D^{(*)})_{\text{SM}} + A_{D^{(*)}} \frac{\tan^2 \beta}{m_{H^+}^2} + B_{D^{(*)}} \frac{\tan^4 \beta}{m_{H^+}^4}.$$

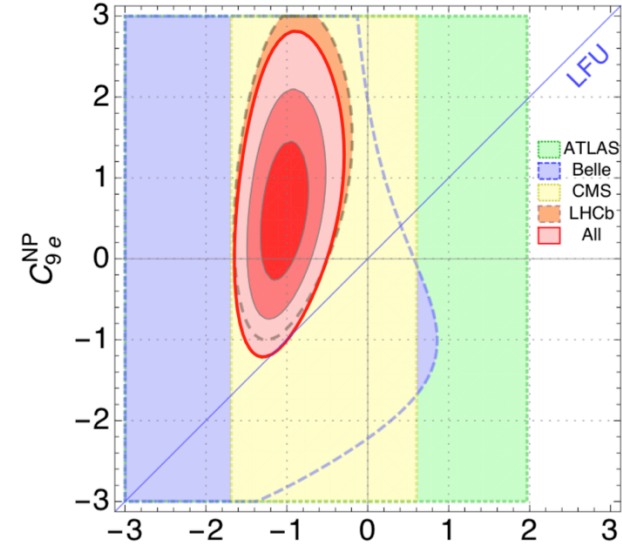
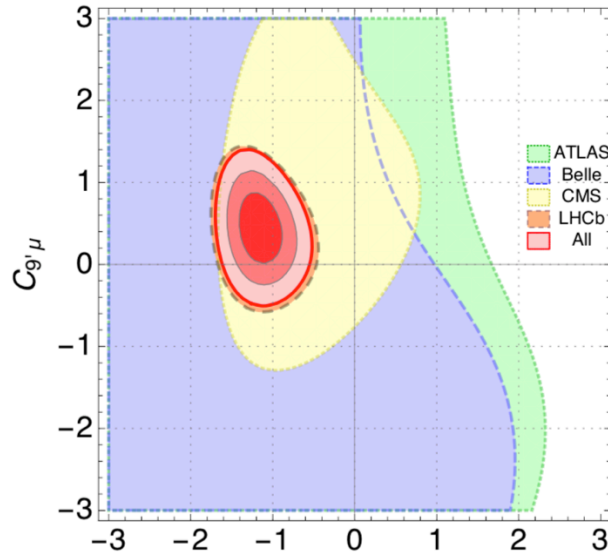
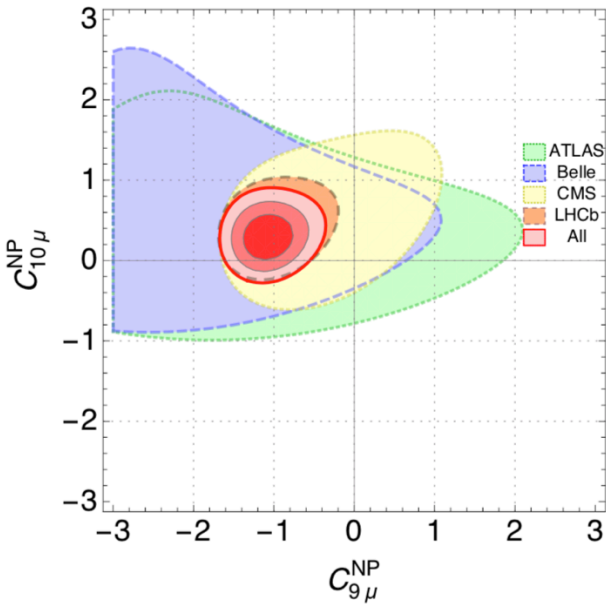


2HDM type-II での説明は難しそう

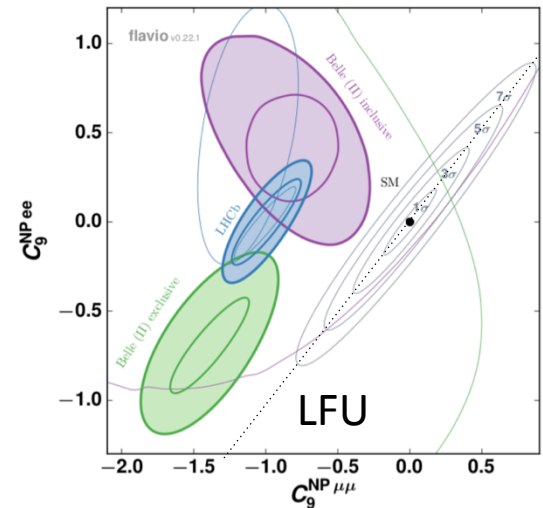
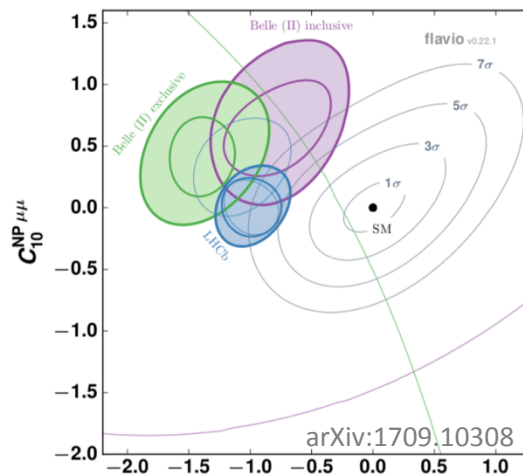
Leptoquark?

Global Fit to Effective Field Theory

arXiv:1704.05340 (see also arXiv:1704.0535, arXiv:1704.05446)



- Effective Field T
 - C_7, C_9, C_{10}



新テラスケール研究会

(a) $C_9^{NP\mu\mu}$ versus $C_{10}^{NP\mu\mu}$

(b) $C_9^{NP\mu\mu}$ versus C_{9ee}^{NP}

- (Moriond2018から) LHCでの第三世代での
Leptoquark探索
 - CMS-PAS-EXO-17-029