

Belle II実験における $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu_\ell$ 崩壊の レプトン普遍性の検証

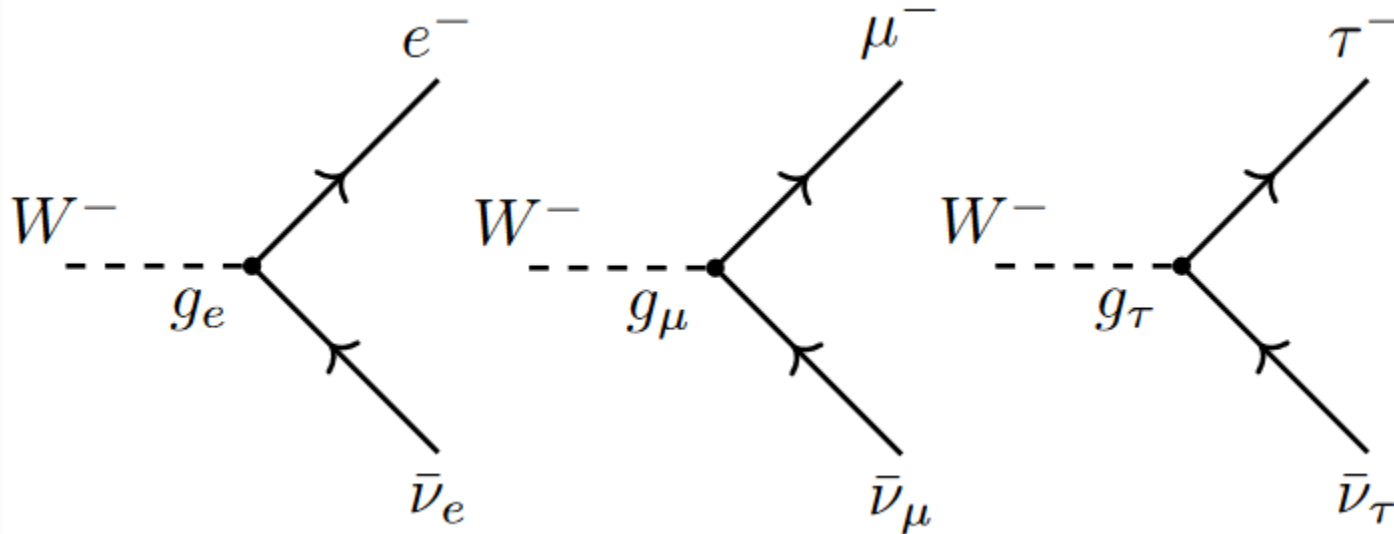
松岡広大（名古屋大KMI）

2018年11月1日



レプトンフレーバー普遍性

- 標準理論では、電弱相互作用において、レプトンとゲージボゾンの結合はレプトンのフレーバーに依らない
 - 分岐比の違いは質量の違いによる（ヘリシティ抑制・位相空間）



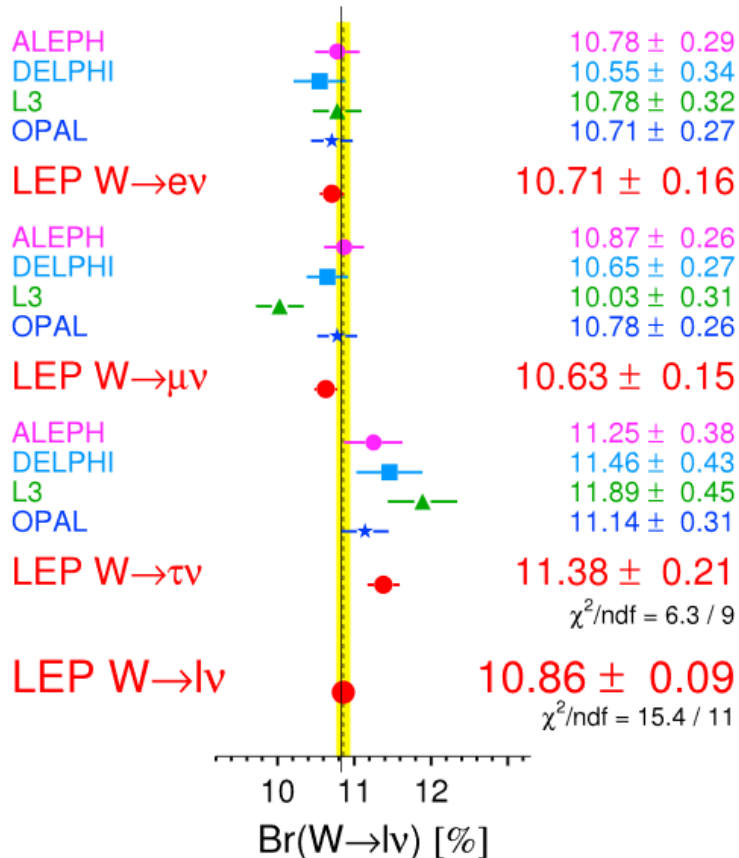
$$g_e = g_\mu = g_\tau$$

W/Zボソンの崩壊

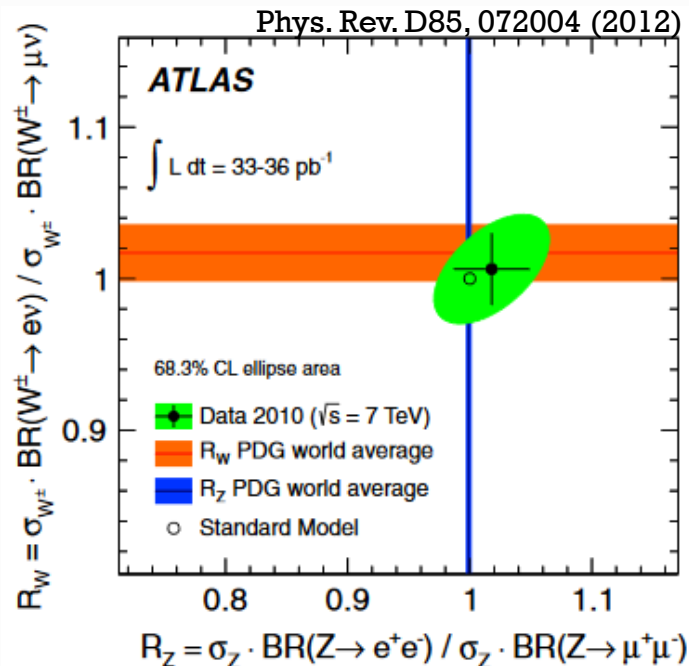
$$\frac{\Gamma_{\mu\mu}}{\Gamma_{ee}} = \frac{B(Z \rightarrow \mu^+\mu^-)}{B(Z \rightarrow e^+e^-)} = 1.0009 \pm 0.0028,$$

$$\frac{\Gamma_{\tau\tau}}{\Gamma_{ee}} = \frac{B(Z \rightarrow \tau^+\tau^-)}{B(Z \rightarrow e^+e^-)} = 1.0019 \pm 0.0032$$

Phys. Rep. 427 (2006) 257



Phys. Rep. 532 (2013) 119



CDF
J. Phys. G34, 2457 (2007)

DØ
Chin. Phys. C, 38, 090001 (2014)

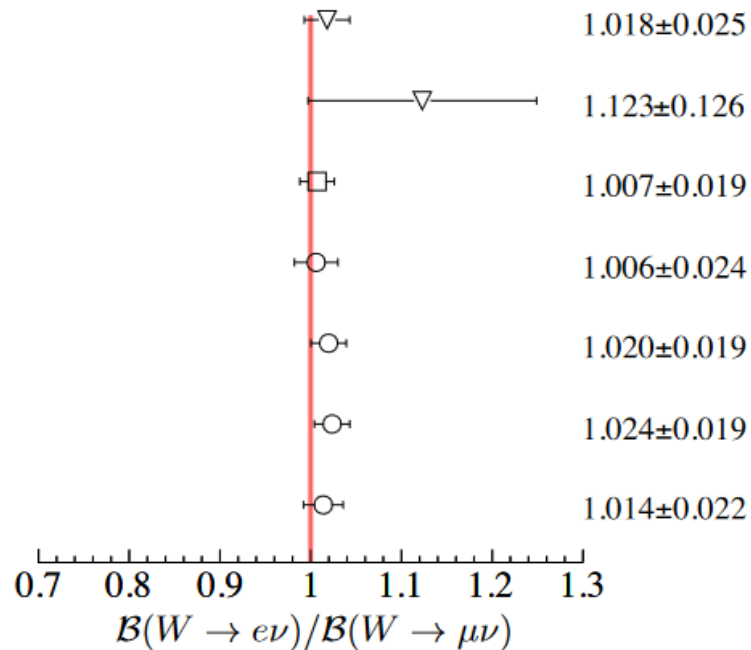
LEP (Combined)
Phys. Rept. 532, 119-244 (2013)

ATLAS
Phys. Rev. D85, 072004 (2012)

LHCb W

LHCb W⁺

LHCb W⁻



JHEP 10 (2016) 030

レプトンの崩壊

$$\Gamma(\lambda \rightarrow \nu_\lambda \rho \bar{\nu}_\rho(\gamma)) = \frac{B(\lambda \rightarrow \nu_\lambda \rho \bar{\nu}_\rho)}{\tau_\lambda} = \frac{G_\lambda G_\rho m_\lambda^5}{192\pi^3} f\left(\frac{m_\rho^2}{m_\lambda^2}\right) R_W^\lambda R_\gamma^\lambda$$

$$G_\rho = \frac{g_\rho^2}{4\sqrt{2}M_W^2}, \quad f(x) = 1 - 8x + 8x^3 - x^4 - 12x^2 \ln x$$

$$R_W^\lambda = 1 + \frac{3}{5} \frac{m_\lambda^2}{M_W^2}, \quad R_\gamma^\lambda = 1 + \frac{\alpha(m_\lambda)}{2\pi} \left(\frac{25}{4} - \pi^2 \right).$$

Lepton universality(2)

早坂さんのスライド

- $\mu \rightarrow e \nu \nu, \tau \rightarrow \mu \nu \nu, \tau \rightarrow e \nu \nu$ の分岐比から

$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right) = 1.0010 \pm 0.0015, \quad \left(\frac{g_\tau}{g_e}\right) = 1.0029 \pm 0.0015, \quad \left(\frac{g_\mu}{g_e}\right) = 1.0019 \pm 0.0014.$$

- もしくは $\tau \rightarrow \pi \nu, \tau \rightarrow K \nu$ の分岐比から

$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)^2 = \frac{B(\tau \rightarrow h \nu_\tau)}{B(h \rightarrow \mu \bar{\nu}_\mu)} \frac{2m_h m_\mu^2 \tau_h}{(1 + \delta R_{\tau/h}) m_\tau^3 \tau_\tau} \left(\frac{1 - m_\mu^2/m_h^2}{1 - m_h^2/m_\tau^2}\right)^2$$

$$\delta R_{\tau/\pi} = (0.16 \pm 0.12)\%$$

$$\delta R_{\tau/K} = (0.90 \pm 0.22)\%$$

$$\left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)_\pi = 0.9961 \pm 0.0027 \quad \left(\frac{g_\tau}{g_\mu}\right)_K = 0.9860 \pm 0.0070$$

どこまで 1 に近づけるか？

軽い中間子の崩壊

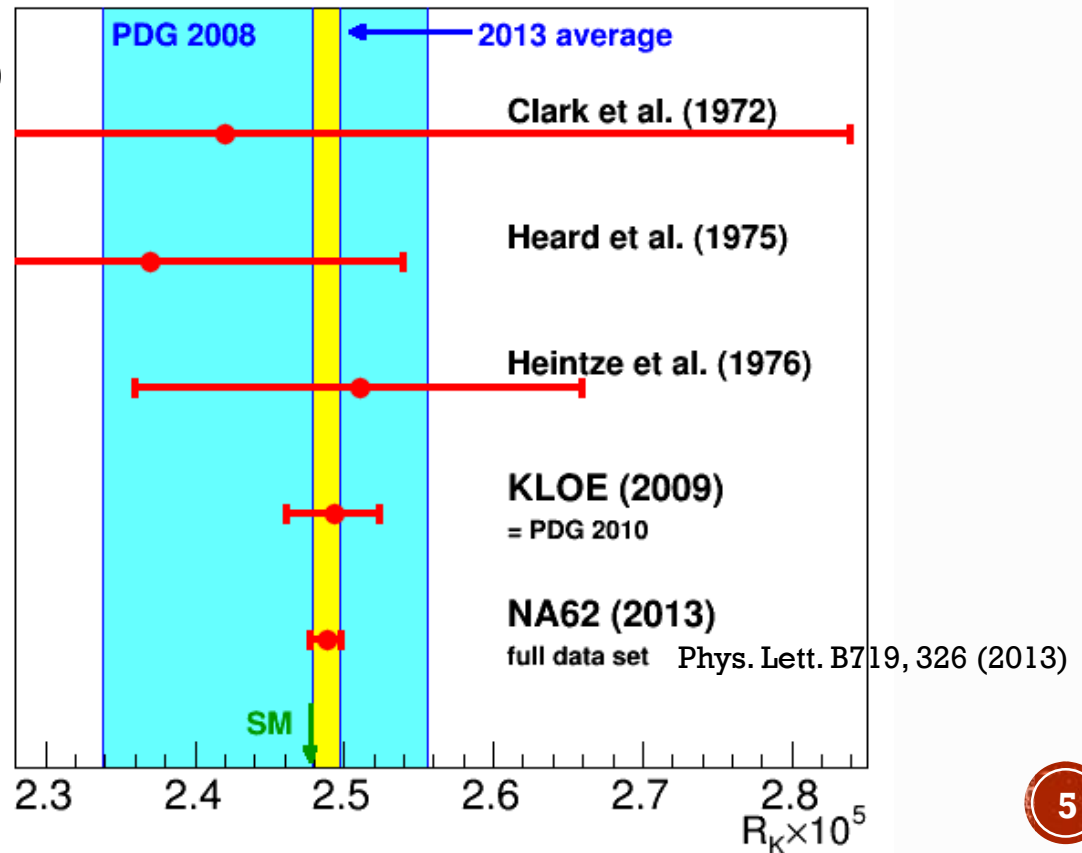
PIENU実験 Phys. Rev. Lett. 115, 071801 (2015)

$$R_{e/\mu} = \Gamma(\pi \rightarrow e\nu(\gamma))/\Gamma(\pi \rightarrow \mu\nu(\gamma))$$

$$R_{e/\mu}^{\text{exp}} = (1.2344 \pm 0.0023(\text{stat}) \pm 0.0019(\text{syst})) \times 10^{-4}$$

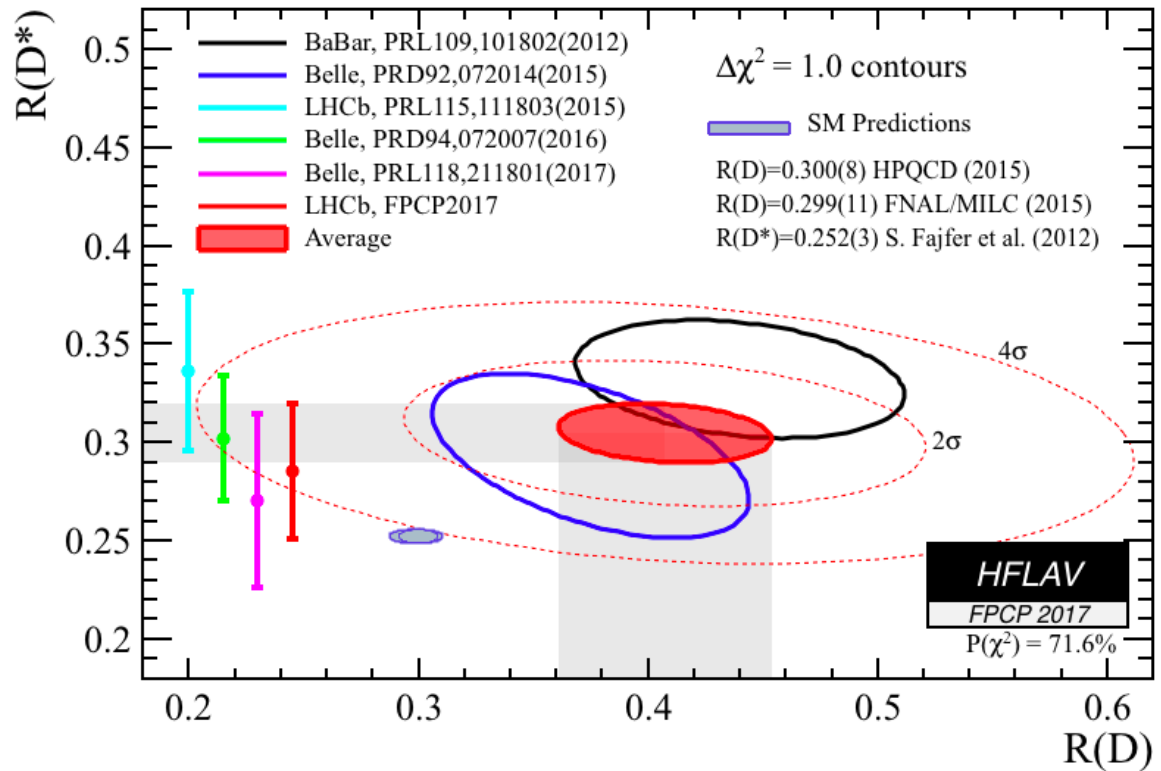
$$R_{e/\mu}^{\text{SM}} = (1.2352 \pm 0.0002) \times 10^{-4}$$

$$R_K = \Gamma(K \rightarrow e\nu)/\Gamma(K \rightarrow \mu\nu)$$

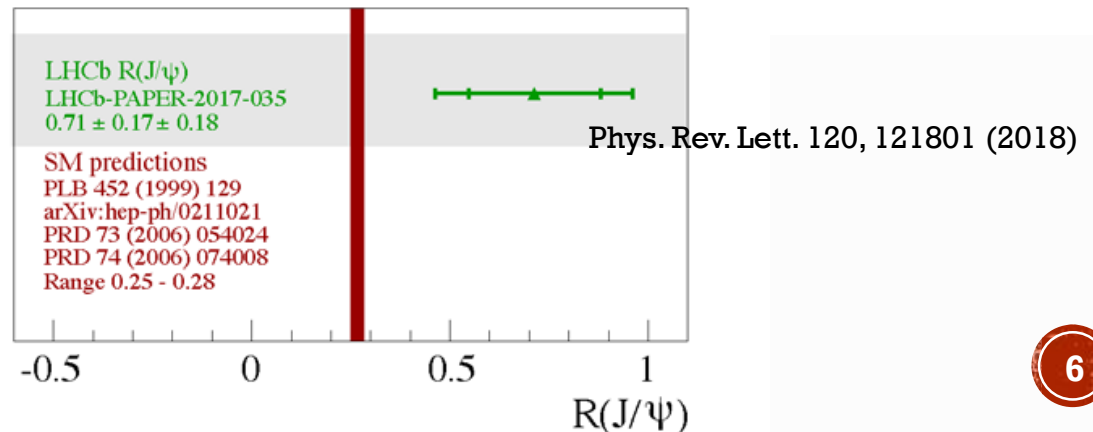


B中間子のツリー崩壊 ($b \rightarrow c\ell\nu$)

$$R(D^{(*)}) = \frac{\Gamma(B \rightarrow D^{(*)}\tau\nu)}{\Gamma(B \rightarrow D^{(*)}\ell\nu)}$$

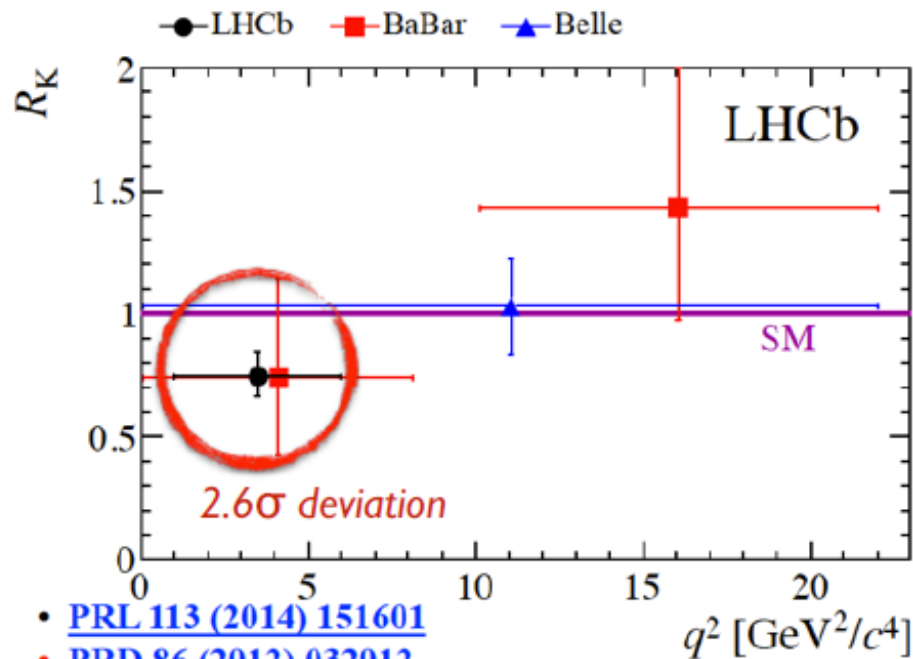


$$R(J/\Psi) = \frac{\Gamma(B_c \rightarrow J/\Psi\tau\nu)}{\Gamma(B_c \rightarrow J/\Psi\mu\nu)}$$

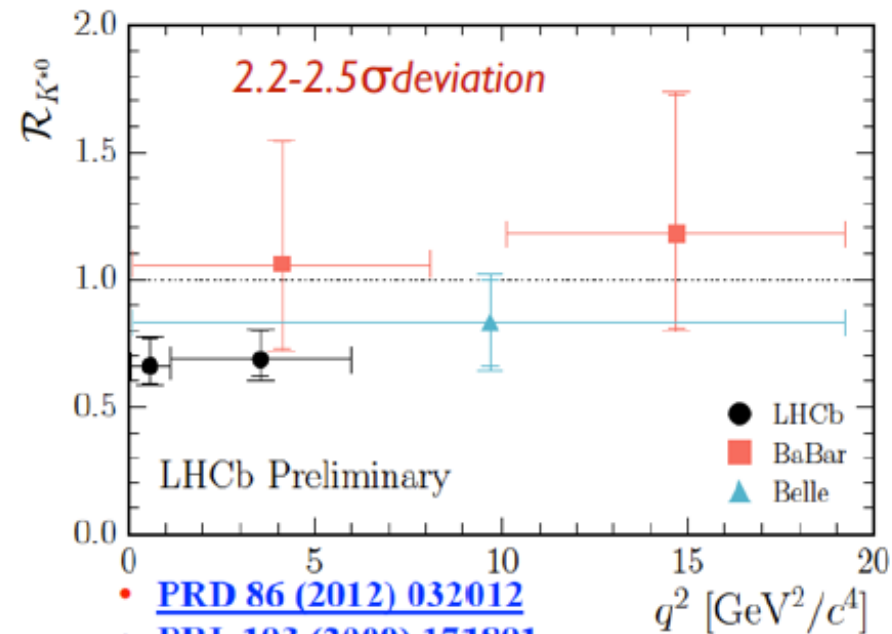


B 中間子のペンギン崩壊 ($b \rightarrow s\ell\ell$)

$$R(K^{(*)}) = \Gamma(B \rightarrow K^{(*)}\mu\mu)/\Gamma(B \rightarrow K^{(*)}ee)$$



- [PRL 113 \(2014\) 151601](#)
- [PRD 86 \(2012\) 032012](#)
- [PRL 103 \(2009\) 171801](#)

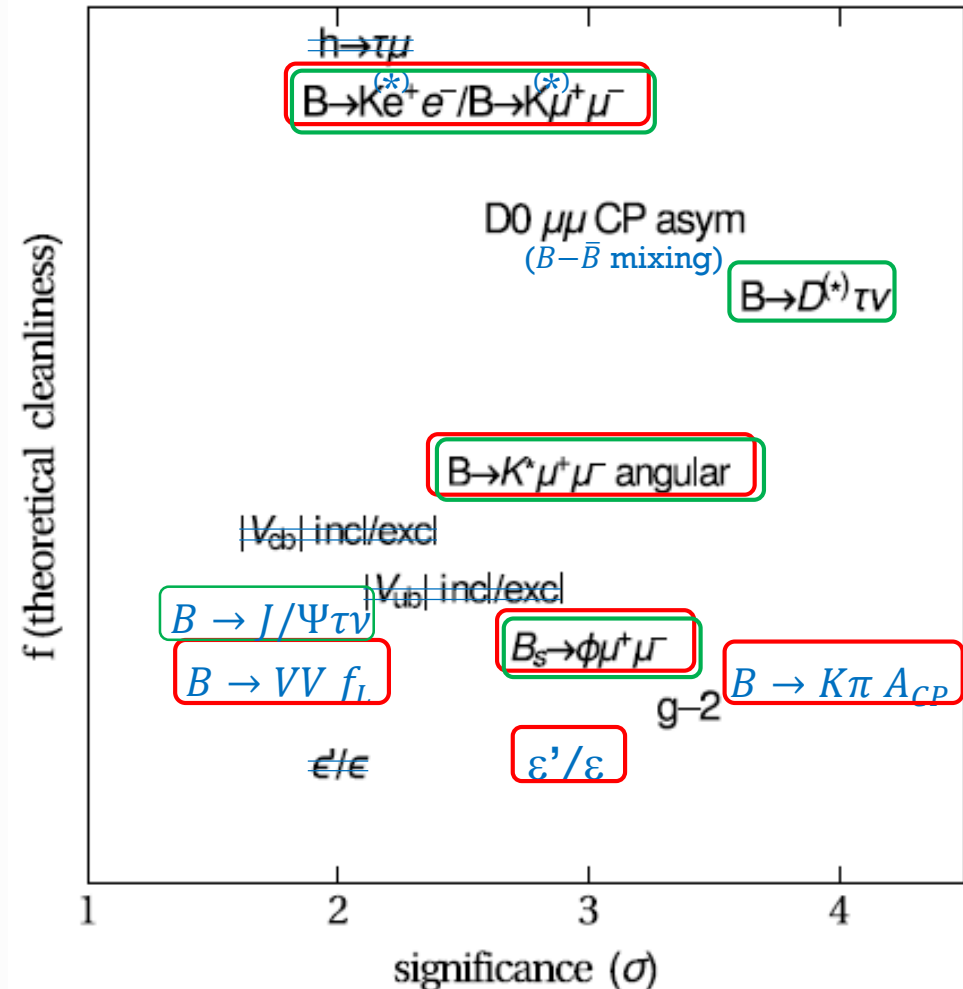


- [PRD 86 \(2012\) 032012](#)
- [PRL 103 \(2009\) 171801](#)

フレーバー物理における新物理の兆候？

- 標準理論の理解が足りない？
 - 特に低エネルギーQCD
- 測定エラー？
- 新物理の兆候？
 - 電弱ペンギン
 - レプトンフレーバー普遍性

Z. Ligeti (2017) + 追記

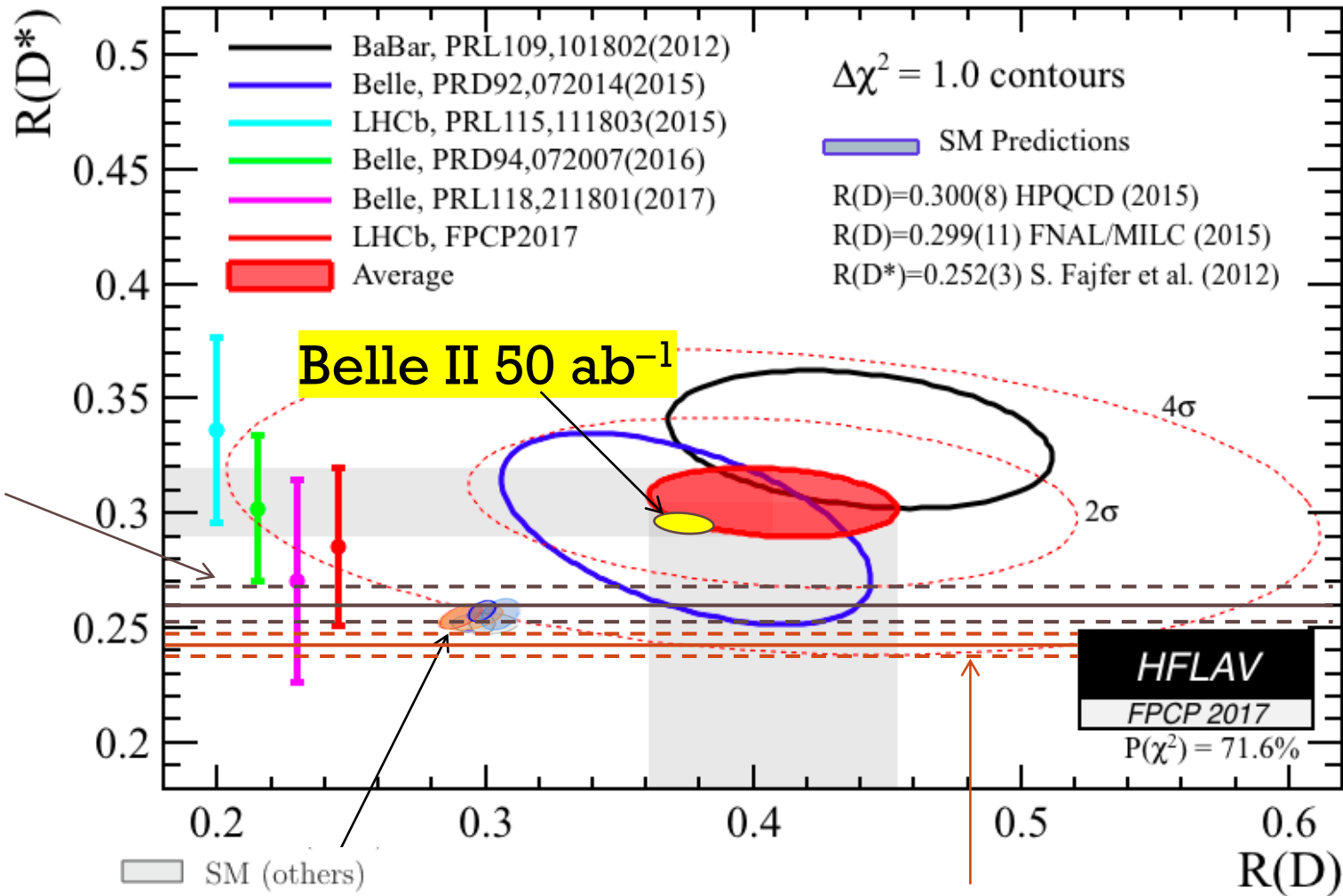


本当にズレているのか、Belle IIで決着を付ける

$$R(D^{(*)}) = \mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)}\tau\nu) / \mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)}\ell\nu)$$

Prediction based on BGL

arXiv:1707.09509



Prediction based on CLN

arXiv:1702.01521

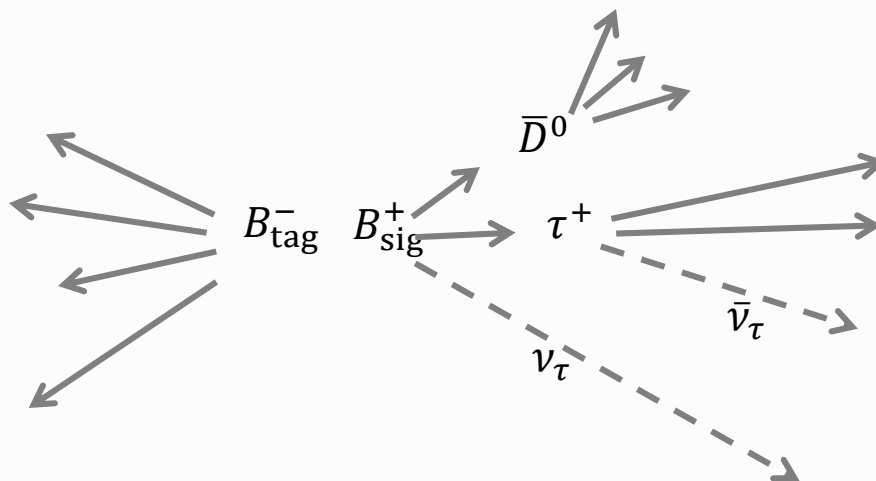
$B \rightarrow D^{(*)}\tau\nu$ の再構成

- 複数のニュートリノを伴うため再構成が難しい
 - 背景事象削減のため、信号の崩壊をする B_{sig} とは別の B_{tag} も再構成して、 B_{sig} の電荷、フレーバー、運動量に制限をかける
 - Efficiencyが非常に悪いので大統計が必要

B_{tag} の再構成

1. ハドロニック ($\epsilon_{\text{sig}} \approx 0.2\%$ 、低背景事象)
2. セミレプトニック ($\epsilon_{\text{sig}} \approx 0.5\%$)
3. インクルーシブ ($\epsilon_{\text{sig}} \approx \text{数}\%$ 、高背景事象)

Belle IIでの最初のターゲット



B_{sig} の選別

- $D^{(*)}$ が1つ
- τ からの荷電粒子1つ
 1. τ のレプトニック崩壊
 2. τ のハドロニック崩壊

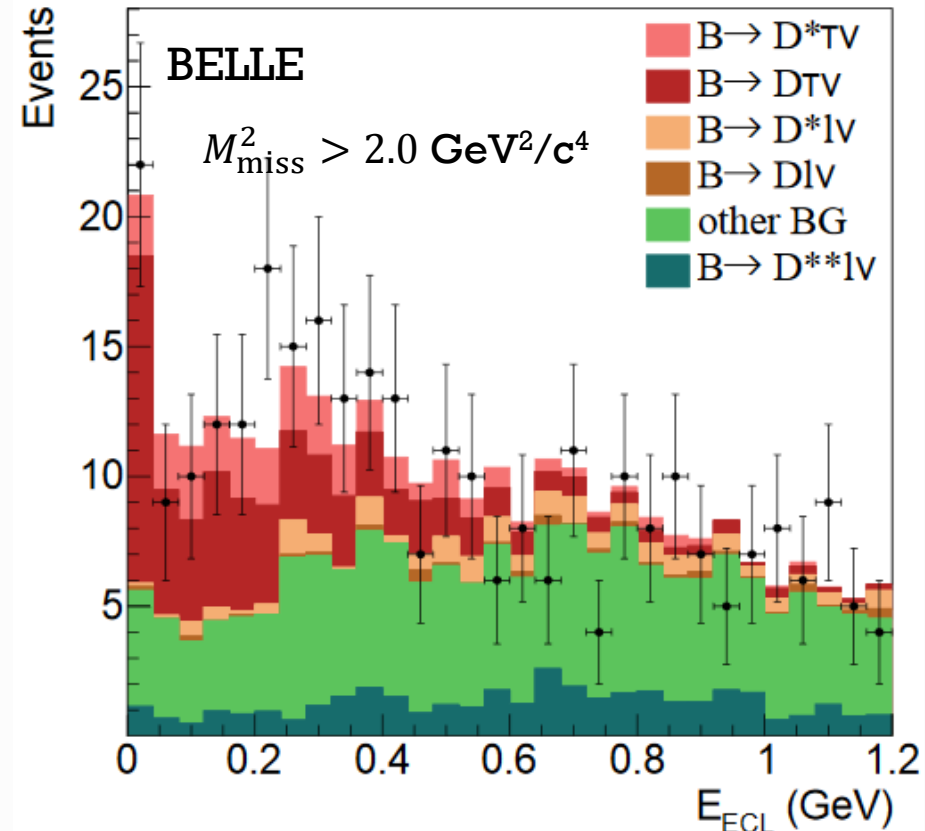
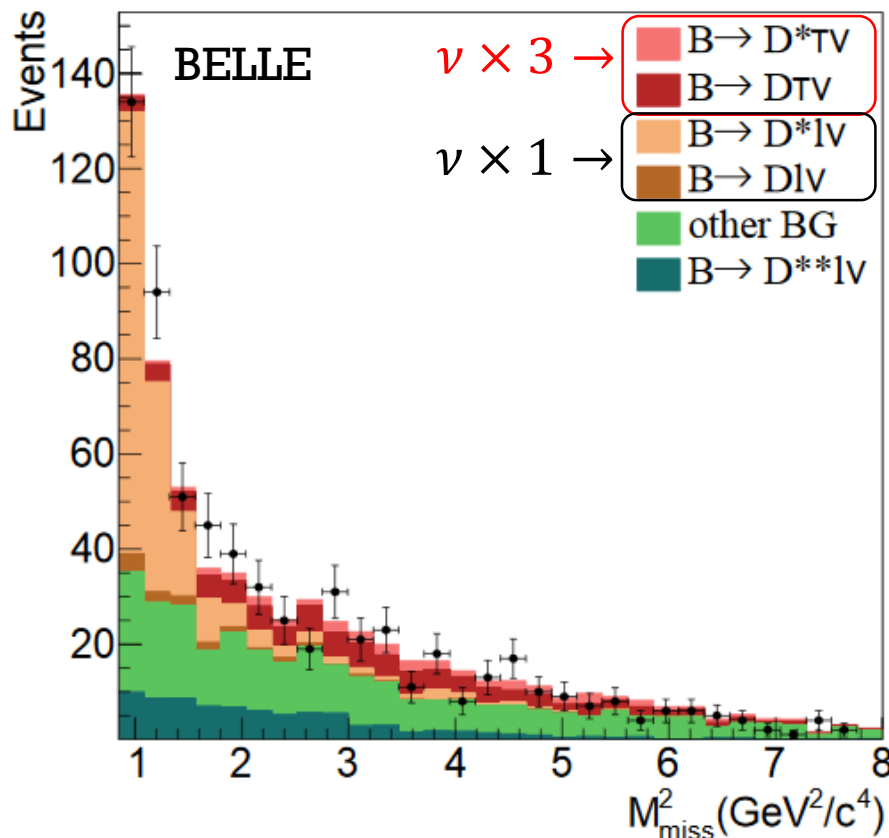
信号/背景事象の分離

$$M_{\text{miss}}^2 = |p_{e^+e^-} - p_{\text{tag}} - p_{\text{sig}}^{\text{detected}}|$$

(4元運動量保存)

E_{ECL} : 再構成に使われなかった
ECLエネルギーの余り

$B \rightarrow D^{(*)}\tau\nu$ の $D^+\ell^-$ サンプル (ハドロニックタグ)



Belle IIでの課題

$$D^{**} \rightarrow D^{(*)}\pi(\pi), D^{(*)}\eta, D^{(*)}\rho$$

$$m(D^{**}) - m(D^{*}) \approx 400 \text{ MeV}$$

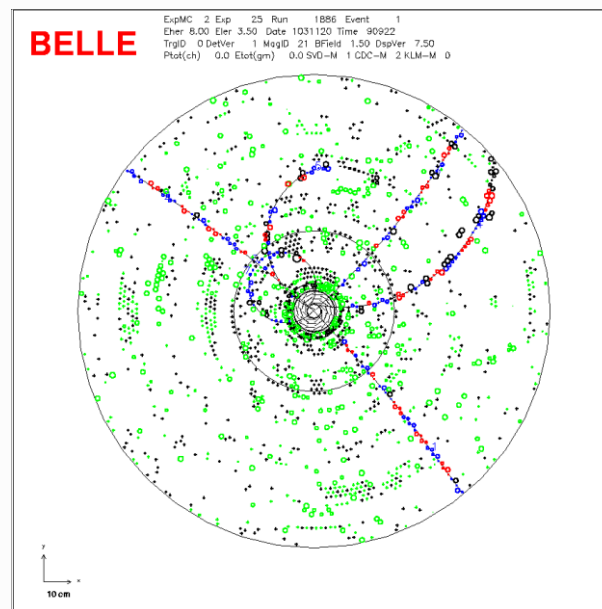
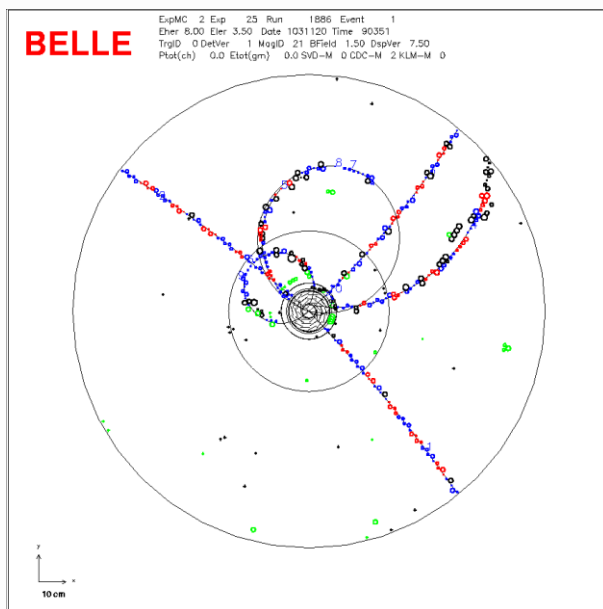
Mode	BF (%)	Mode	BF (%)
$D^{*0} \rightarrow D^0\pi^0$	64.7	$D^{*+} \rightarrow D^0\pi^+$	67.7
$D^{*0} \rightarrow D^0\gamma$	35.3	$D^{*+} \rightarrow D^+\pi^0$	30.7

$$m(D^{*}) - m(D) \approx 140 \text{ MeV}$$

- 加速器ビームバックグラウンドが多いと
 - 低運動量荷電粒子のトラッキング効率の低下
 - γ の検出効率・エネルギー分解能の低下



D^{} 背景事象の増加**



新物理発見の（個人的な）シナリオ

- 2020年($\sim 1 \text{ ab}^{-1}$) Belle IIで最初の $R(D^*)$ 測定結果
- 2021年($\sim 5 \text{ ab}^{-1}$) $R(D^{(*)})$ のズレが確定
...ツリーでレプトン普遍性の破れ
- 2023年($\sim 20 \text{ ab}^{-1}$) $b \rightarrow s\tau\tau$ の発見
...ペンギンでもレプトン普遍性の破れ

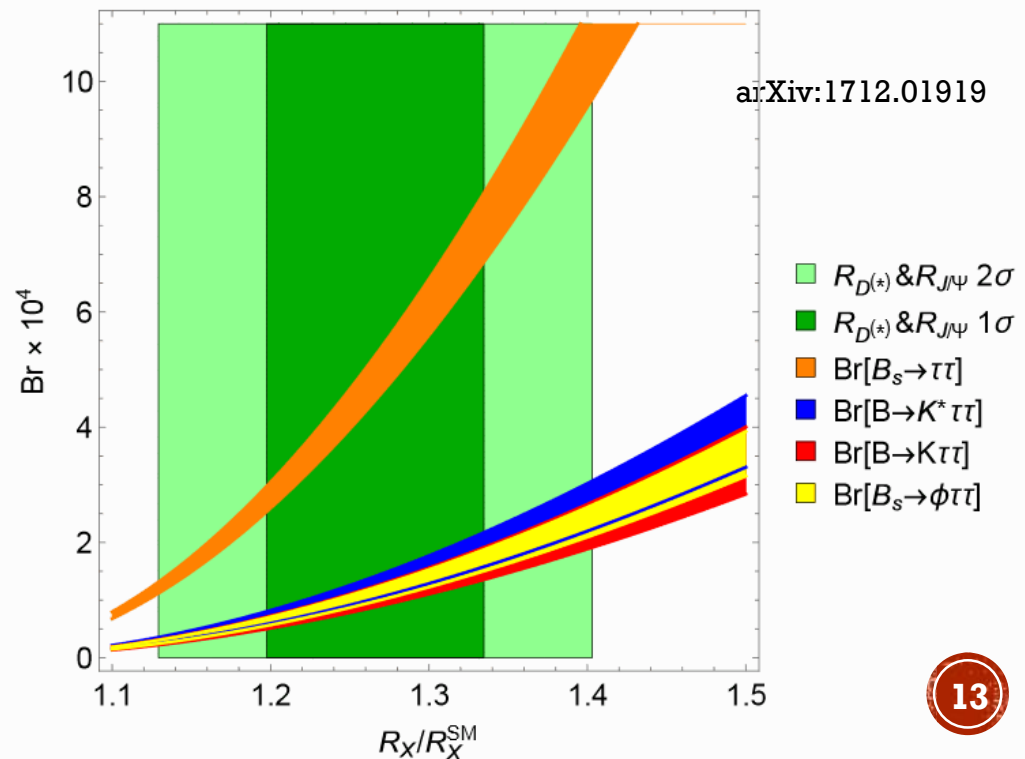
- 2025年($\sim 50 \text{ ab}^{-1}$)

$$R_{\text{pl}} = \frac{\Gamma(B \rightarrow \tau \nu)}{\Gamma(B \rightarrow \mu \nu)} \text{でダメ押し}$$

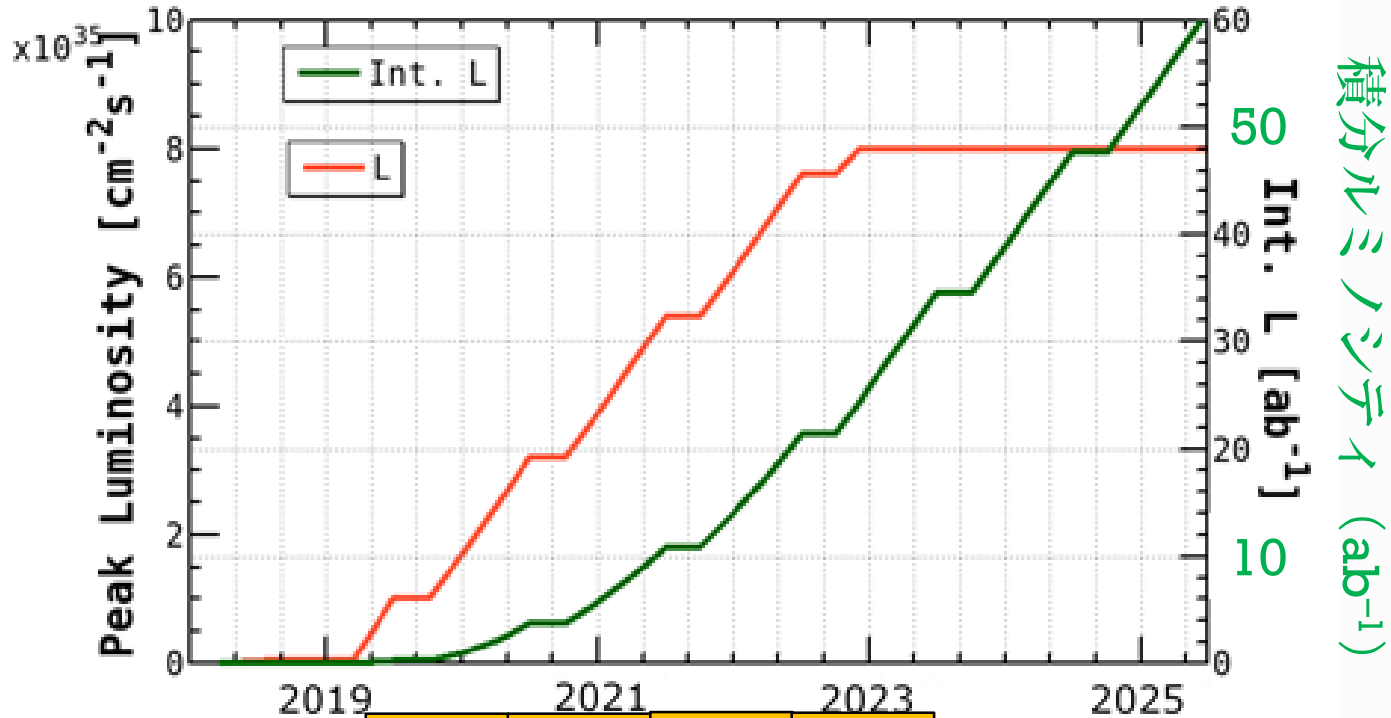
$$\mathcal{B}(B^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu) = \frac{G_F^2 m_B m_\mu^2}{8\pi} \left(1 - \frac{m_\mu^2}{m_B^2}\right)^2 f_B^2 |V_{ub}|^2 \tau_B$$

$P_\tau(D^*)$ の測定

...新物理の描像を明らかに



展望



$R(D^*)$ 最初の結果

$R(D^{(*)})$ の決着

$b \rightarrow s\tau\tau$ の探索

$R_{\text{pl}} = \frac{\Gamma(B \rightarrow \tau\nu)}{\Gamma(B \rightarrow \mu\nu)}$ の測定

$P_\tau(D^*)$ の測定