

# Belle IIでの稀崩壊の物理

松岡 広大 (名古屋大学 KMI)



2017年11月1日

# クイズ1

それぞれどちらの崩壊が稀でしょう？

•  $\Upsilon(4S) \rightarrow B^0 \bar{B}^0$        $\Upsilon(4S) \rightarrow e^+ e^-$

強い相互作用

電磁相互作用

•  $H \rightarrow ee$      $H \rightarrow \mu\mu$      $H \rightarrow \tau\tau$        $\Gamma \propto m_\ell^2$

結合定数

位相空間

•  $B^0 \rightarrow D^- e^+ \nu_e$      $B^0 \rightarrow D^- \tau^+ \nu_\tau$        $\frac{d\Gamma}{dq^2} \propto q^2 \left(1 - \frac{m_\ell^2}{q^2}\right)^2$

•  $\pi^+ \rightarrow e^+ \nu_e$      $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$       Helicity-suppressed • 位相空間

$$\Gamma = G_F^2 |V_{ud}|^2 f_\pi^2 m_\ell^2 M_\pi \frac{1}{8\pi} \left(1 - \frac{m_\ell^2}{M_\pi^2}\right)^2$$

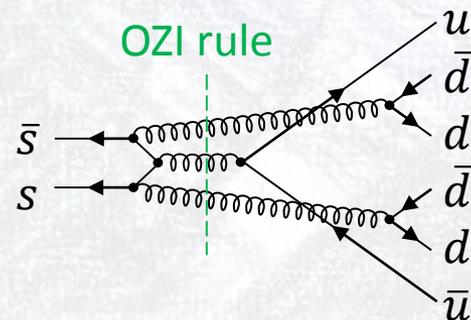
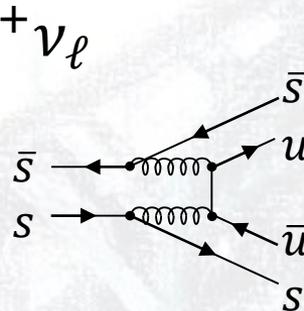
•  $B^0 \rightarrow \underline{D}^- \ell^+ \nu_\ell$      $B^0 \rightarrow \underline{D}^{*-} \ell^+ \nu_\ell$

擬スカラー

ベクター

スピン自由度

•  $\phi \rightarrow K^+ K^-$      $\phi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$



# クイズ2

それぞれどちらの崩壊が稀でしょう？

- $\bar{D}^0 \rightarrow K^- \pi^+$      $\bar{D}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$      $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ 

$(\sin^2 \theta_c / \cos^2 \theta_c)^2$   
doubly Cabibbo-suppressed    Cabibbo-favored

- $B^0 \rightarrow \bar{D}^0 \pi^0$      $B^0 \rightarrow D^- \pi^+$ 

$(1/N_c)^2$   
Color-suppressed    Color-allowed

- $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$      $K^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ 

GIM機構

# GIM機構

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, s_L, d_R, u_R, s_R$$

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix}_L = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}_L$$

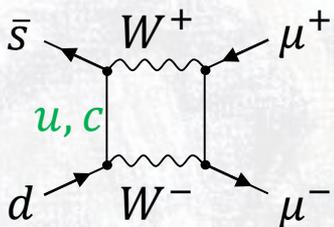
$$\rightarrow J_1^{\text{NC}} \sim \bar{u}'u' - \bar{d}'d' = \bar{u}u - \bar{d}d \cos^2 \theta_c - \bar{s}s \sin^2 \theta_c - (\bar{d}s + \bar{s}d) \cos \theta_c \sin \theta_c$$

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}_L, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}_L, d_R, u_R, s_R$$

$$\rightarrow J_2^{\text{NC}} \sim \bar{c}'c' - \bar{s}'s' = \bar{c}c - \bar{s}s \cos^2 \theta_c - \bar{d}d \sin^2 \theta_c + (\bar{s}d + \bar{d}s) \cos \theta_c \sin \theta_c$$

$$\underline{J_1^{\text{NC}} + J_2^{\text{NC}} \sim \bar{u}u + \bar{c}c - \bar{d}d - \bar{s}s}$$

フレーバーを変える中性カレント (Flavor Changing Neutral Current; FCNC) はない



ループ積分からくる関数

$$\mathcal{M} \propto [F(m_u) - F(m_c)] \sin \theta_c \cos \theta_c$$

ループでも抑制される

GIM (理論)  
 $\Delta m_K$  (測定)



$c$ クォークの予言  
 $m_c$  質量の上限

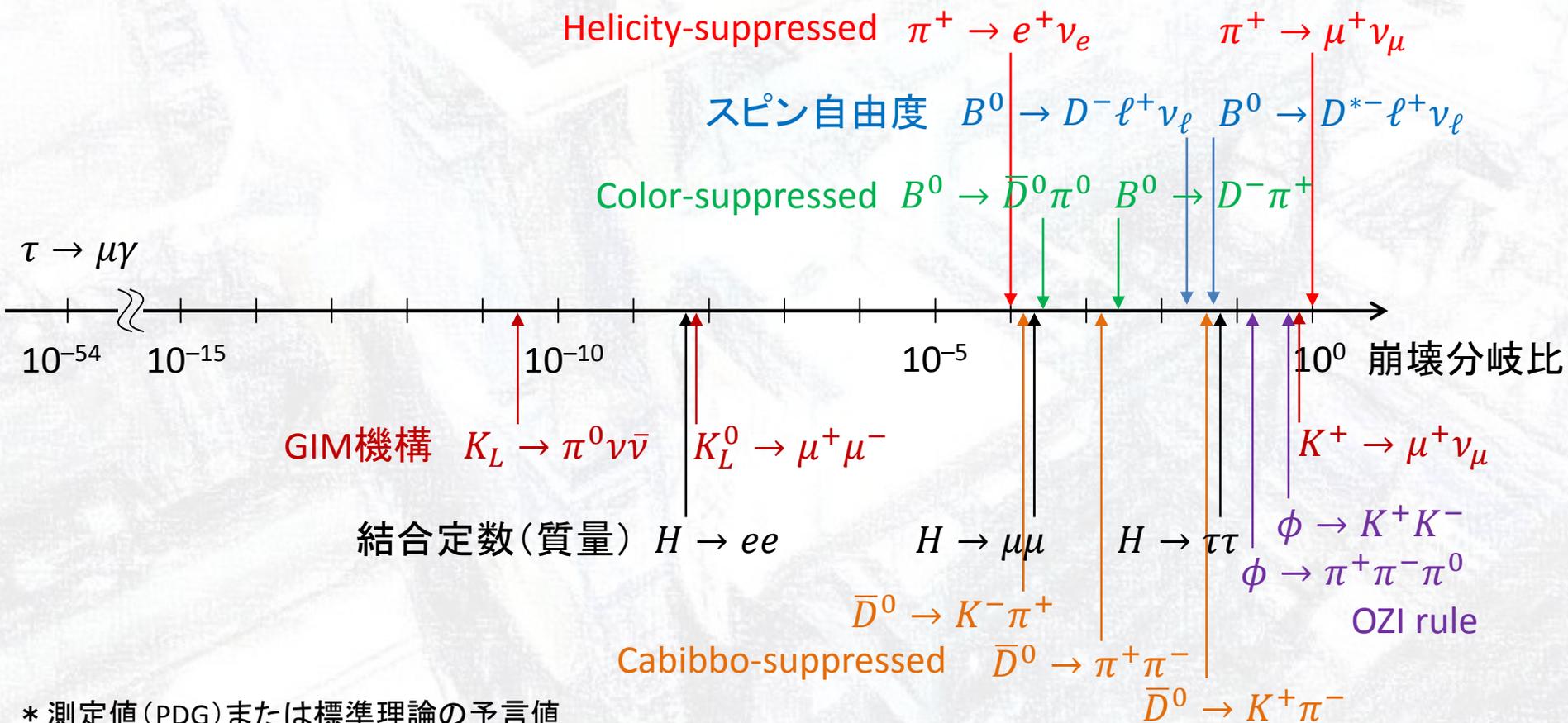


$J/\psi$ の発見

「(標準理論で)あるはずが、ない」「(新物理が)ありそうで、ない」  
 というのも重要な示唆

# 稀な崩壊？

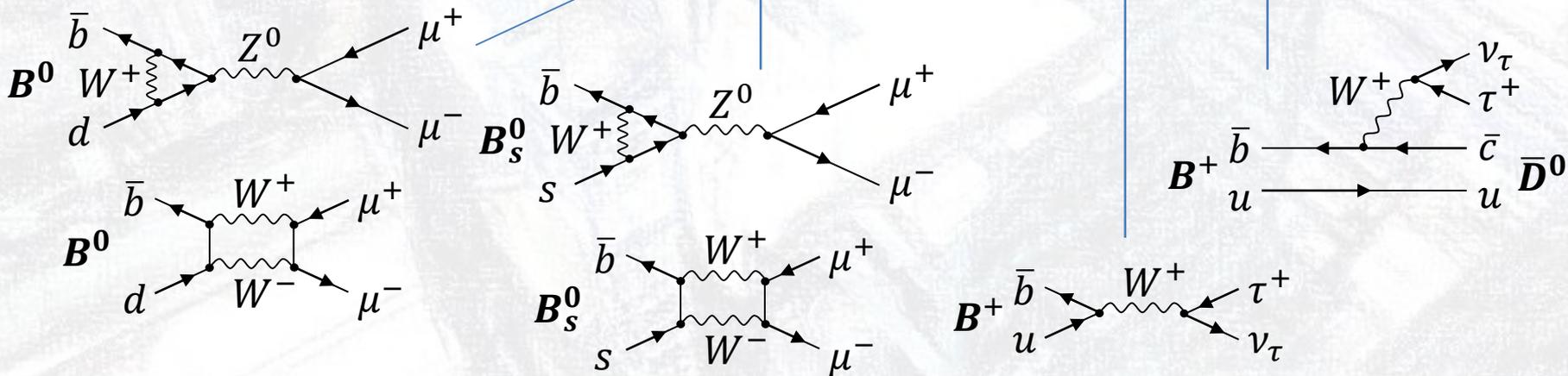
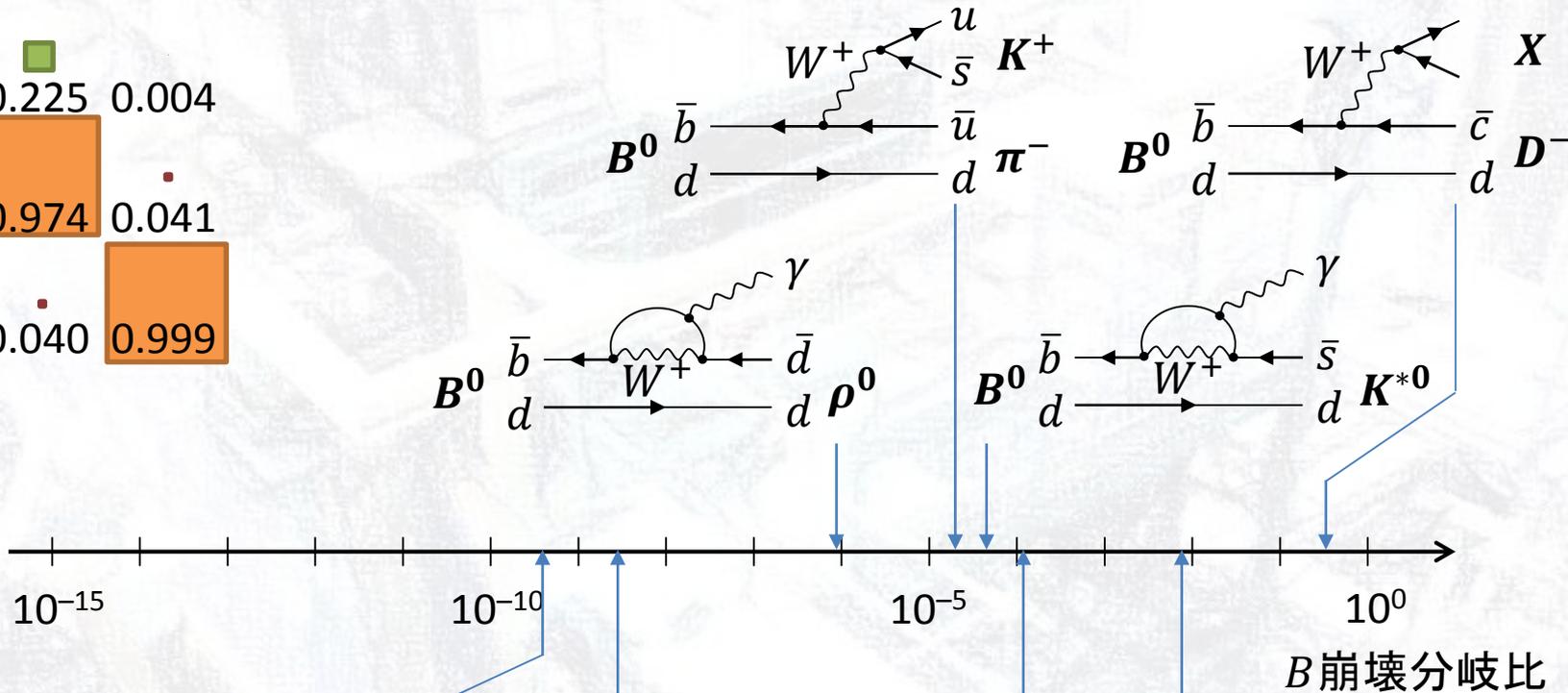
- 稀なものには理由がある。
- 定義は人による。
  - PDGによると、Bの崩壊では  $b \rightarrow c$  遷移以外は全部稀崩壊

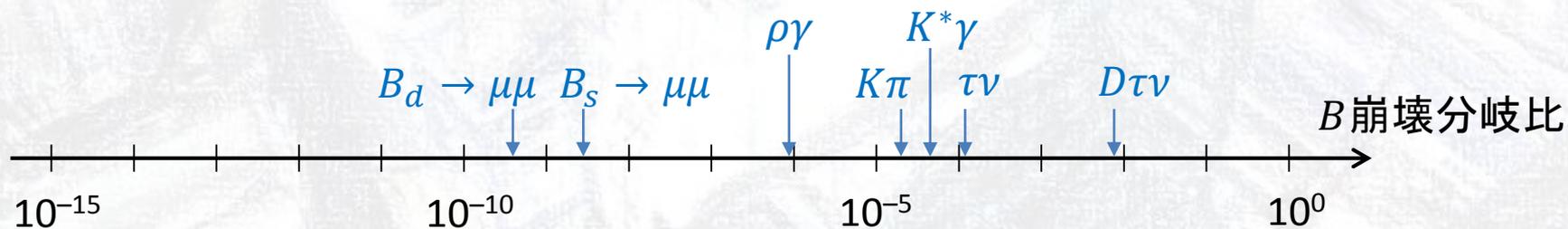
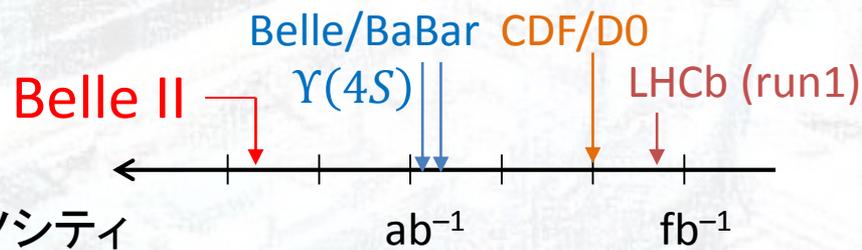
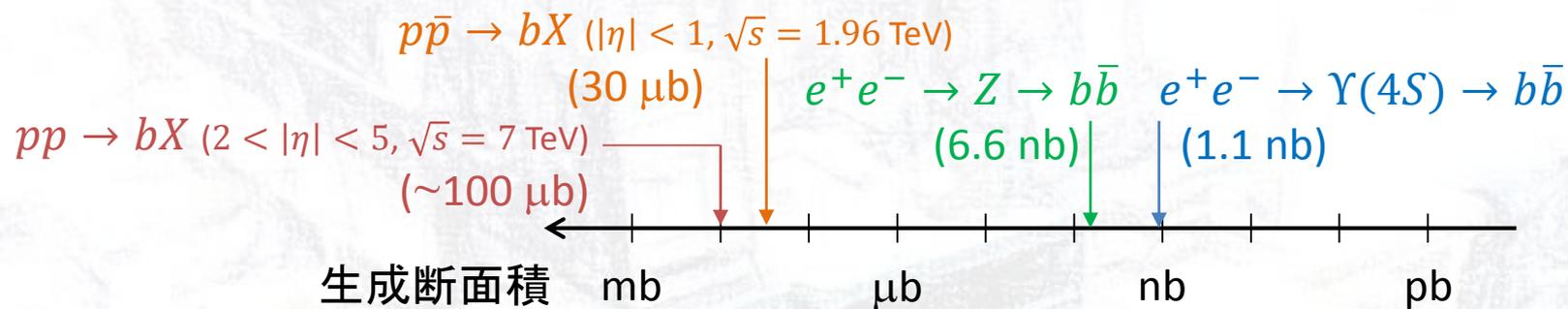


# CKM行列

	d	s	b
u	0.974	0.225	0.004
c	0.225	0.974	0.041
t	0.009	0.040	0.999

# Bの稀崩壊

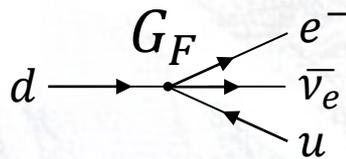




$$[\text{信号数}] = [b\text{生成事象数}] \times [B\text{崩壊分岐比}] \times [\text{検出効率}]$$

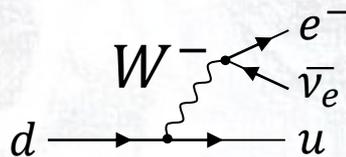
# おさらい

- フェルミ理論 (1934年) ← 標準理論の近似
  - $E \ll M_W$ における有効場の理論 (高エネルギーでは破綻)



$$\mathcal{M}_{\text{Fermi}} = \langle p | J_\mu^h | n \rangle \frac{G_F}{\sqrt{2}} \langle \bar{\nu}_e e^- | J^{\mu\ell} | 0 \rangle$$

$$\boxed{\frac{G_F}{\sqrt{2}} = \frac{g^2}{8M_W^2}}$$



$$\mathcal{M}_{\text{SM}} = \langle p | J_\mu^h | n \rangle \frac{g^2}{8} \frac{1}{q^2 - M_W^2} \left( g^{\mu\nu} - \frac{q^\mu q^\nu}{M_W^2} \right) \langle \bar{\nu}_e e^- | J_\nu^\ell | 0 \rangle$$

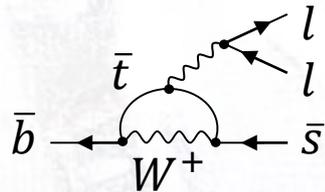
- 標準理論 ← より高尚な理論 (新物理) の近似であるはず
  - $E \ll M_{\text{NP}}$ における有効場の理論 (高エネルギーでは破綻)
  - 有効場の理論 = 現代版フェルミ理論

より高いエネルギースケールの物理現象を見て、  
標準理論が破綻するか調べる。

そのためには、標準理論をより精度良く理解することも重要。

# Flavor Changing Neutral Current (FCNC)

- 標準理論ではツリーレベルでは起こらない。しかも強く抑制される。



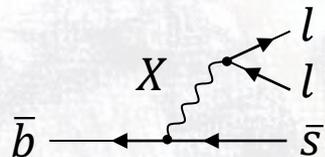
GIM機構による抑制 (CKM行列のユニタリティ)

$$F(m_u)V_{us}^*V_{ub} + F(m_c)V_{cs}^*V_{cb} + F(m_t)V_{ts}^*V_{tb} \approx [F(m_t) - F(0)]V_{ts}^*V_{tb}$$

ループによる抑制

$$\mathcal{M} \propto e^2 \frac{g^2}{(4\pi)^2} \frac{1}{M_W^2} V_{ts}^* V_{tb}$$

CKMによる抑制



$$\mathcal{M} \propto \frac{c_{\text{NP}}^2}{\Lambda_{\text{NP}}^2}$$

- 崩壊率を大きくまたは小さくする
- 新しいCP非対称性
- 終状態の角度分布を変える

測定すべき物理量

新物理の寄与が標準理論と同程度とすると、

$$\Lambda_{\text{NP}} = c_{\text{NP}} \frac{4\pi}{eg} M_W \sqrt{\frac{1}{V_{ts}^* V_{tb}}} = O(10 \text{ TeV})$$

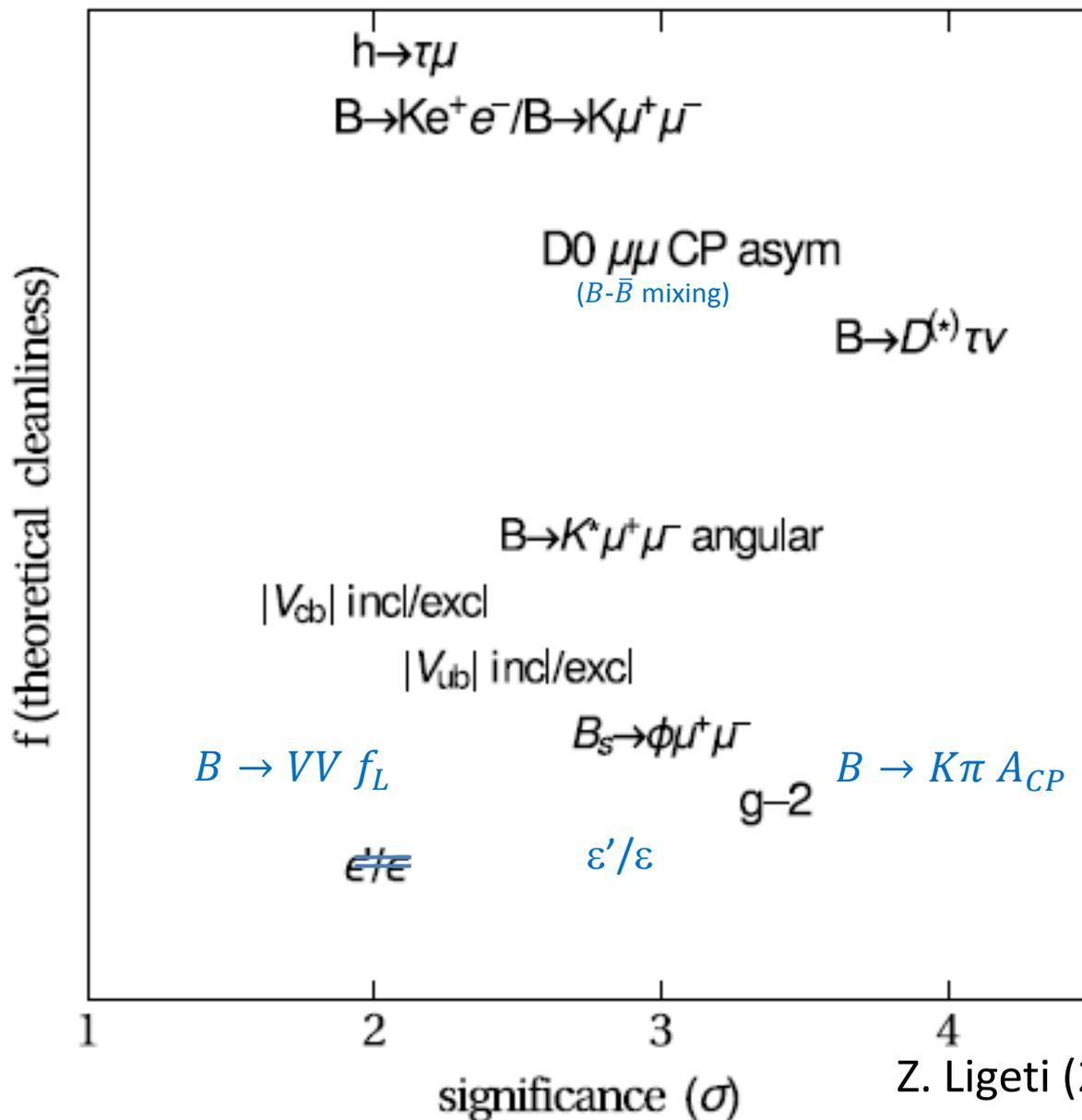
( $c_{\text{NP}} \sim 1$ )

高エネルギーの物理  
に感度が高い



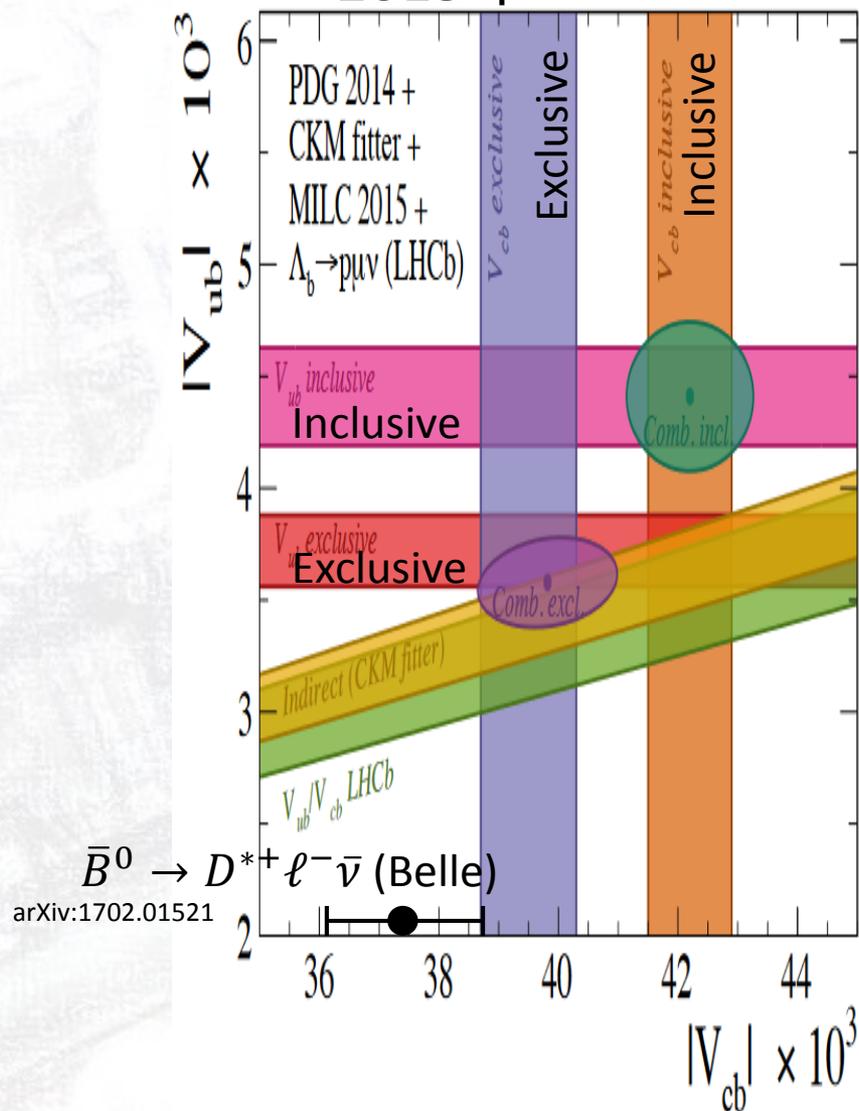
**Belle II 実験が高エネルギー分野の行く末を決める！**

# フレーバー物理における新物理の兆候？

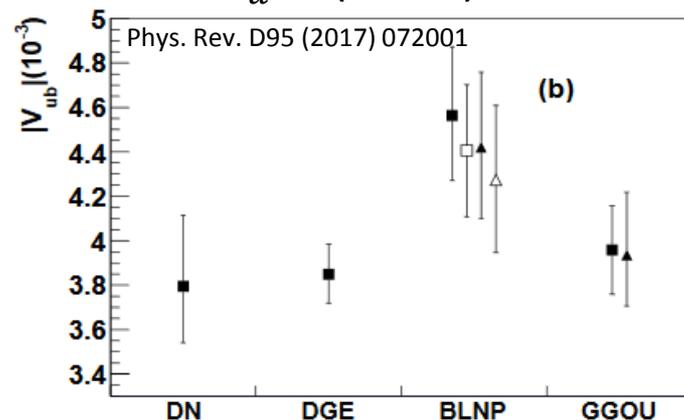


# $|V_{ub}|, |V_{cb}|$ exclusive/inclusive puzzle

2015年



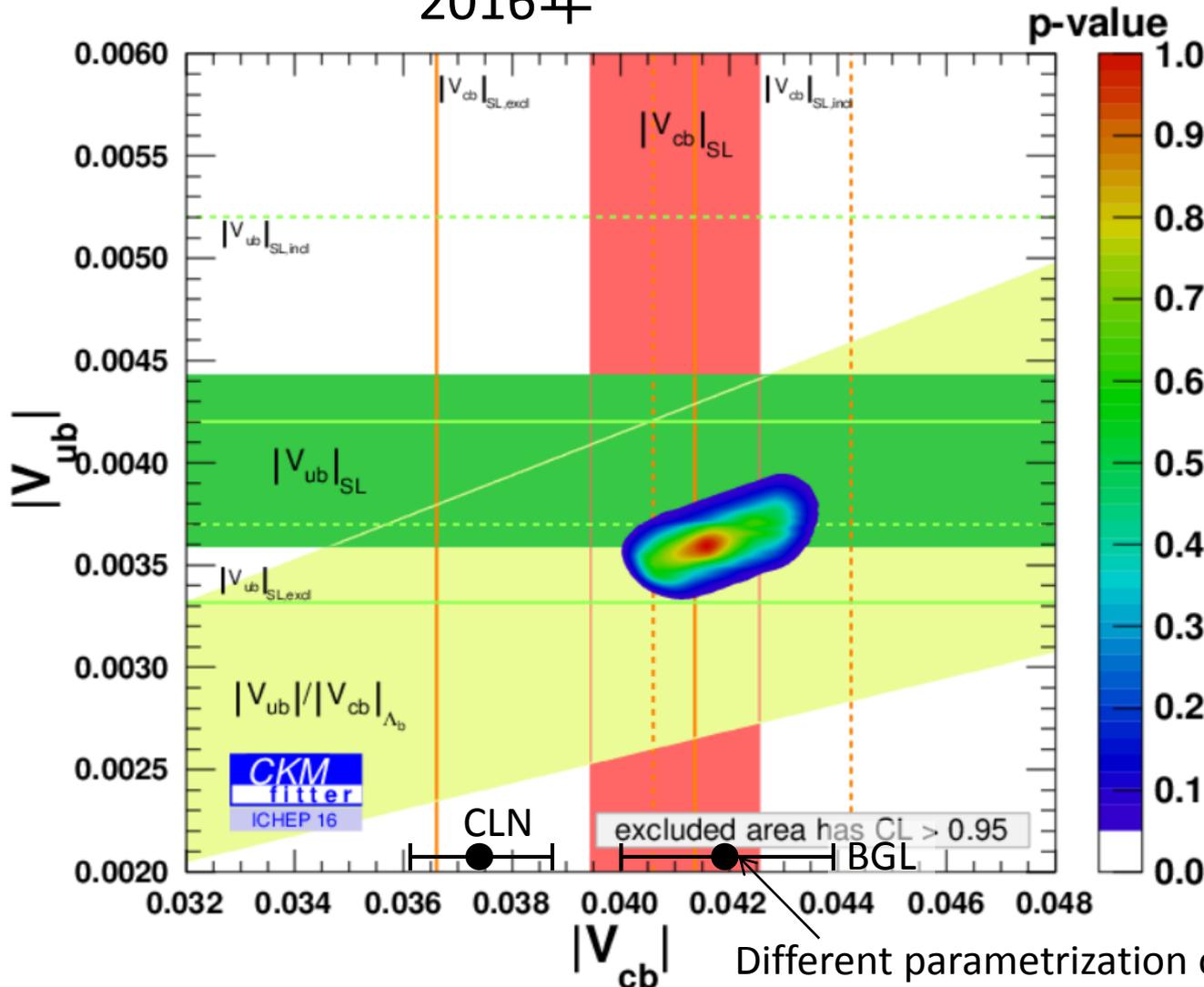
$B \rightarrow X_u e \nu$  (BaBar)



部分(全)崩壊幅を予想するための  
Heavy quark expansionに基づくQCD計算

# $|V_{ub}|, |V_{cb}|$ exclusive/inclusive puzzle

2016年



## 教訓

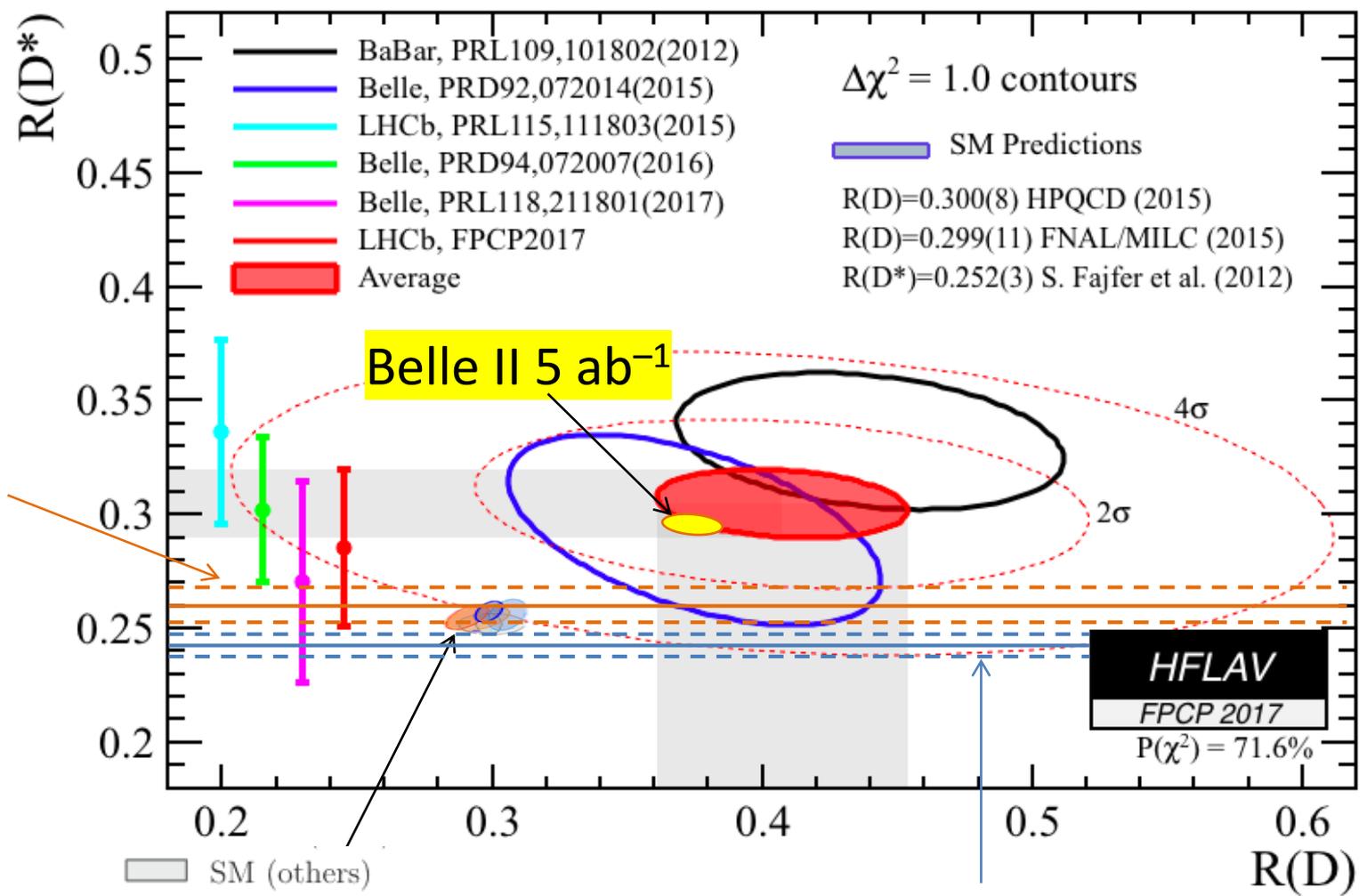
- 一般的には  
[データ]
- ↔ [検出器応答] [理論]
- “Unfolding”も重要  
[検出器応答]<sup>-1</sup> [データ]
- ↔ [理論]
- [検出器応答]は実験外の人にはわからない

Phys Lett B 771 (2017) 359

Different parametrization of the hadronic form factor  
(No assumption from heavy quark symmetry)

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

Prediction based on BGL  
arXiv:1707.09509



- SM (others)
- SM  $L_{w=1}+SR$
- SM NoL+SR
- SM th: $L_{w\geq 1}+SR$
- SM  $L_{w>1}+SR$

Prediction based on CLN  
arXiv:1702.01521

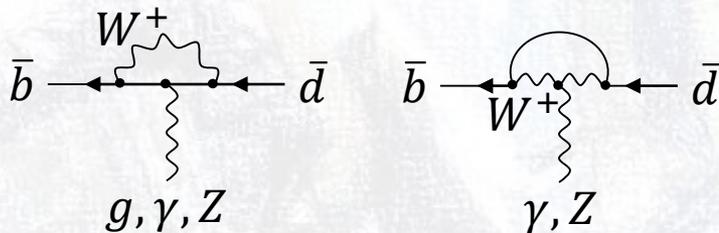
# Flavor anomalies

- 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？

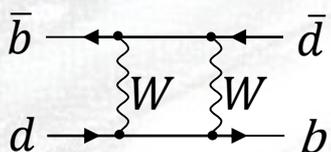
Z. Ligeti (2017) + 追記

## Flavor-Changing Neutral Current

Penguin ダイアグラム

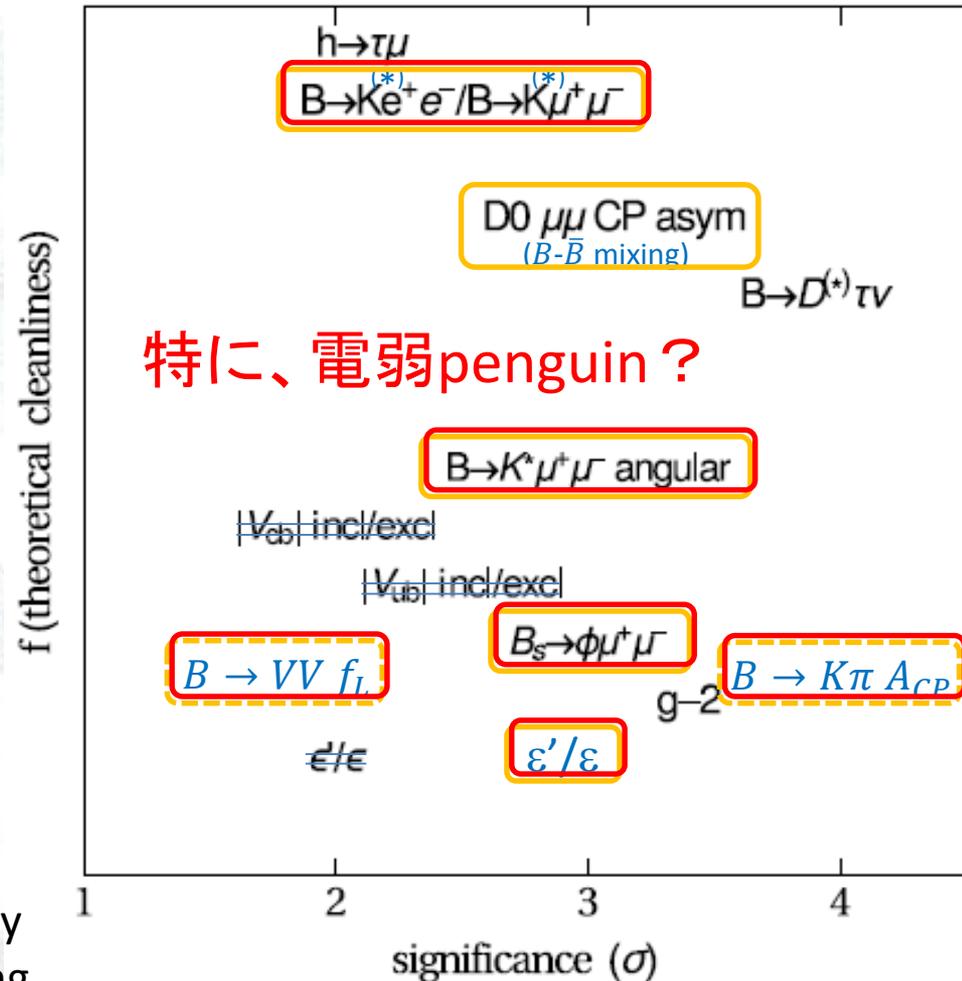


Box ダイアグラム

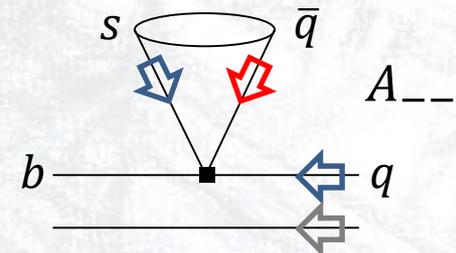
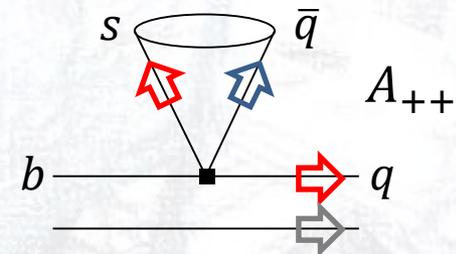
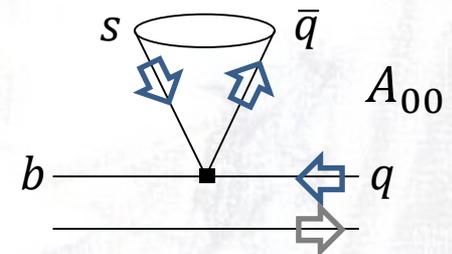
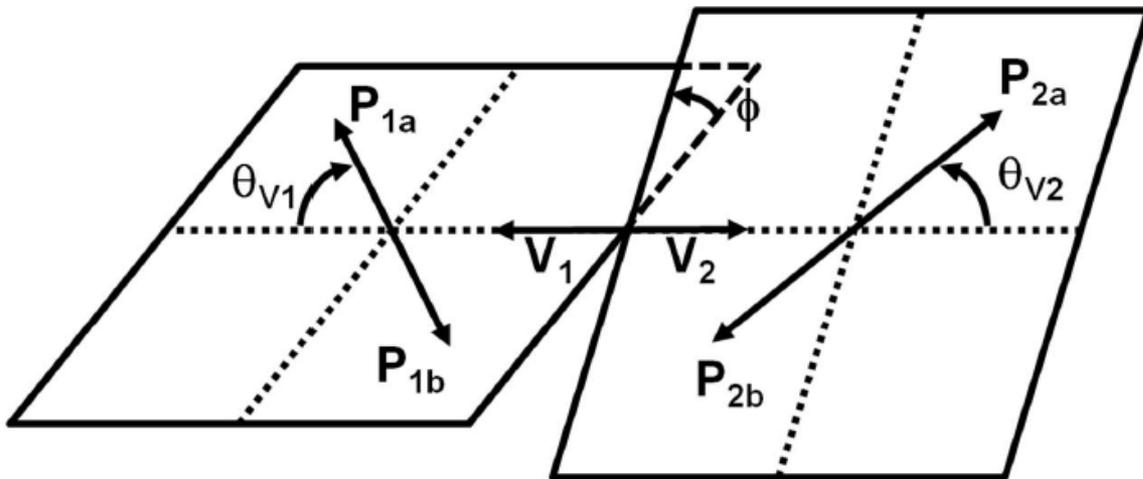


$\Delta B = 1$ : Rare decay

$\Delta B = 2$ :  $B$ - $\bar{B}$  mixing



# $B \rightarrow VV$



各ヘリシティ状態への振幅比  $A_{00}:A_{--}:A_{++} = 1:\frac{m_V}{m_B}:\left(\frac{m_V}{m_B}\right)^2$

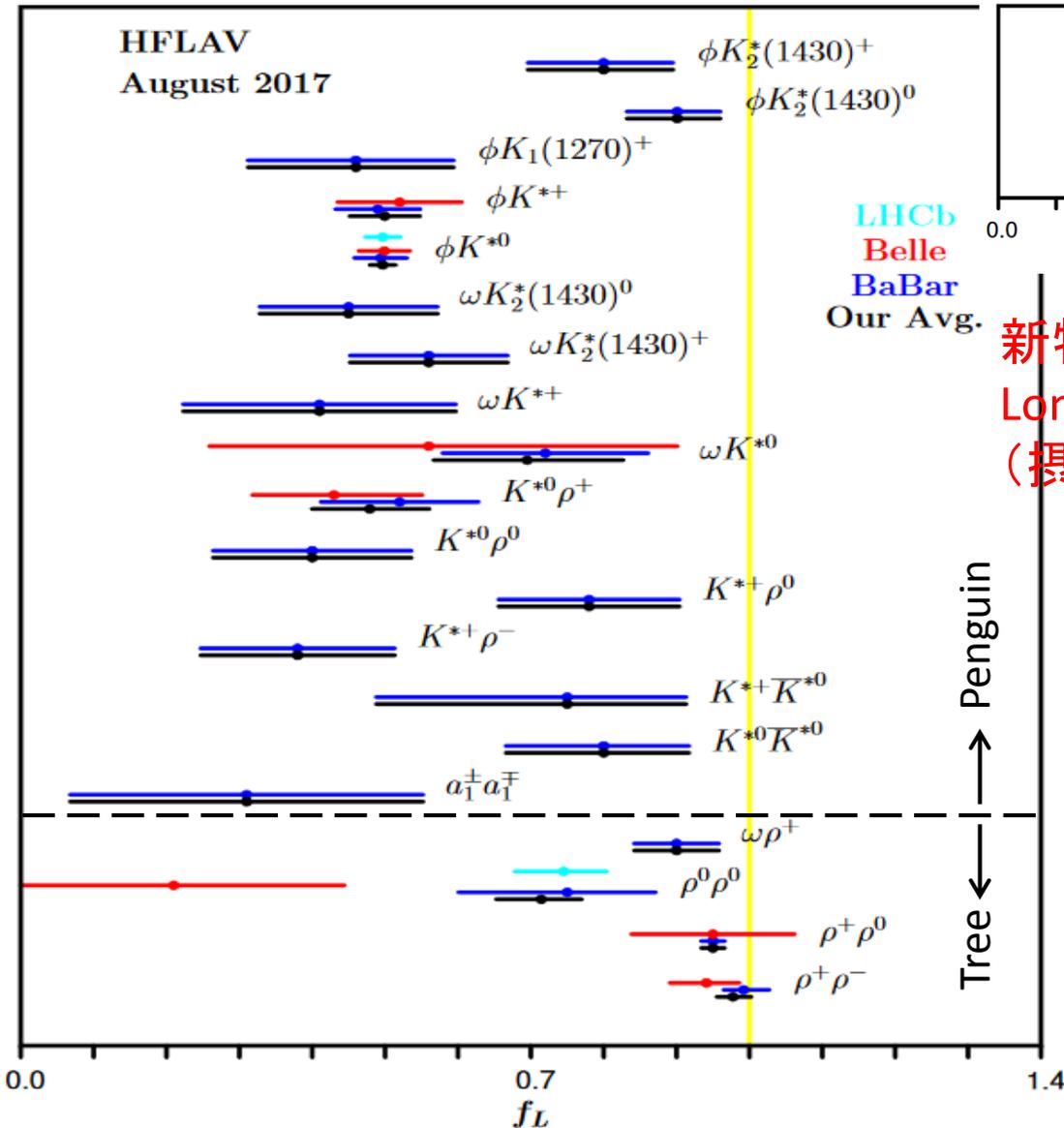
$A_{00}$ への崩壊率  $f_L = \frac{|A_{00}|^2}{|A_{00}|^2+|A_{++}|^2+|A_{--}|^2} \approx 1 - \left(\frac{m_V}{m_B}\right)^2 \approx 1$

ベクトル粒子の崩壊角度分布からヘリシティを測定する:

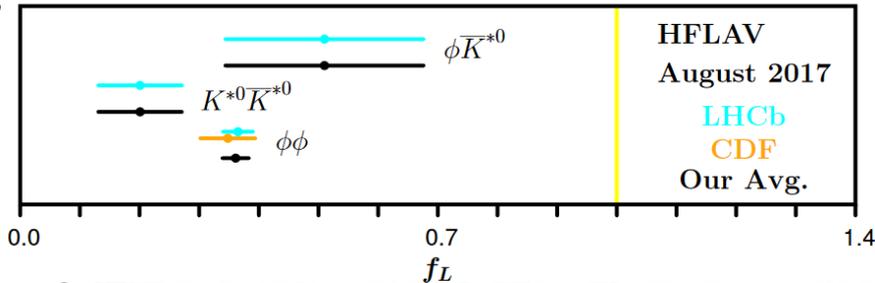
$$\frac{d^2\Gamma}{d\cos\theta_{V_1} d\cos\theta_{V_2}} \propto (1 - f_L) \sin^2\theta_{V_1} \sin^2\theta_{V_2} + f_L \cos^2\theta_{V_1} \cos^2\theta_{V_2}$$

# $B \rightarrow VV$ puzzle (?)

Longitudinal Polarization Fraction in Charmless  $B$  Decays



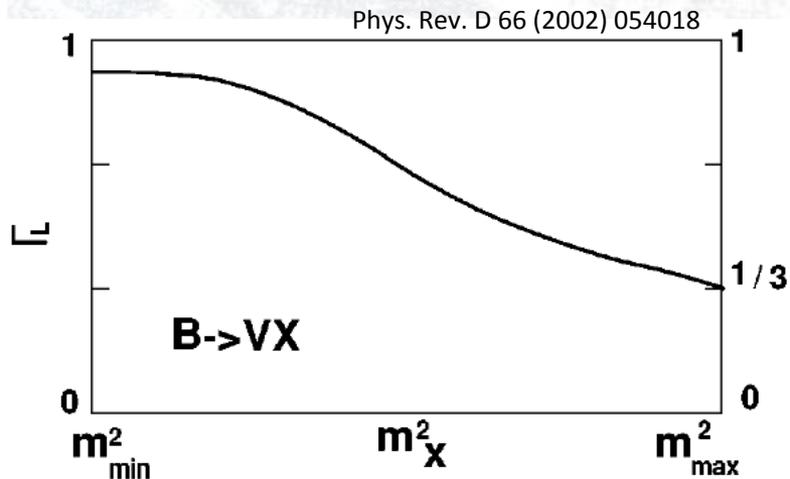
Longitudinal Polarization Fraction in Charmless  $B_s$  Decays



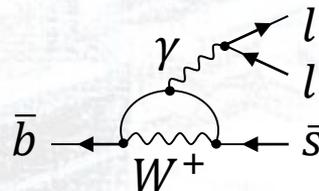
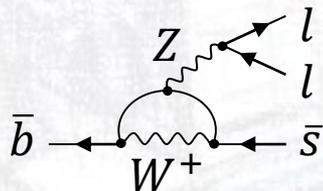
新物理?

Long-Distance Final-State Interaction?  
(摂動QCD計算の検証)

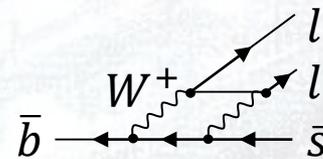
...まだまだ統計が必要



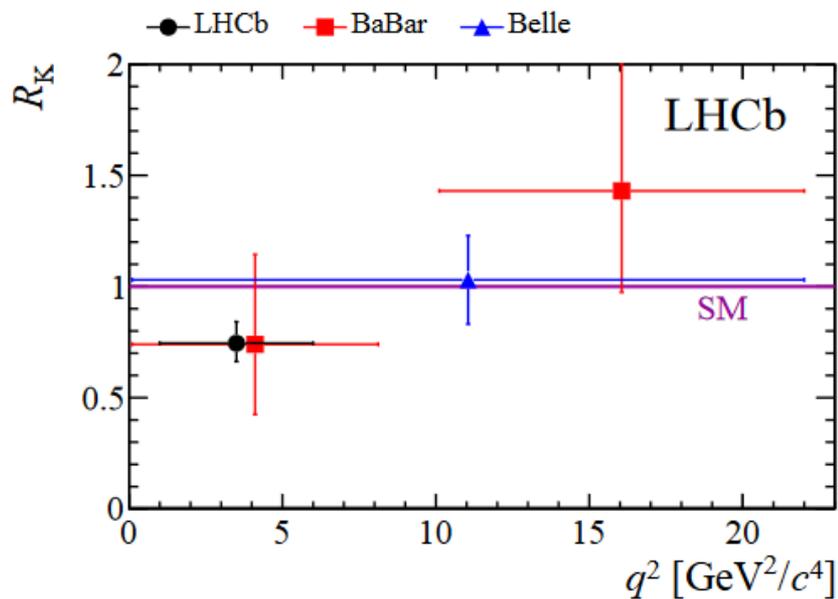
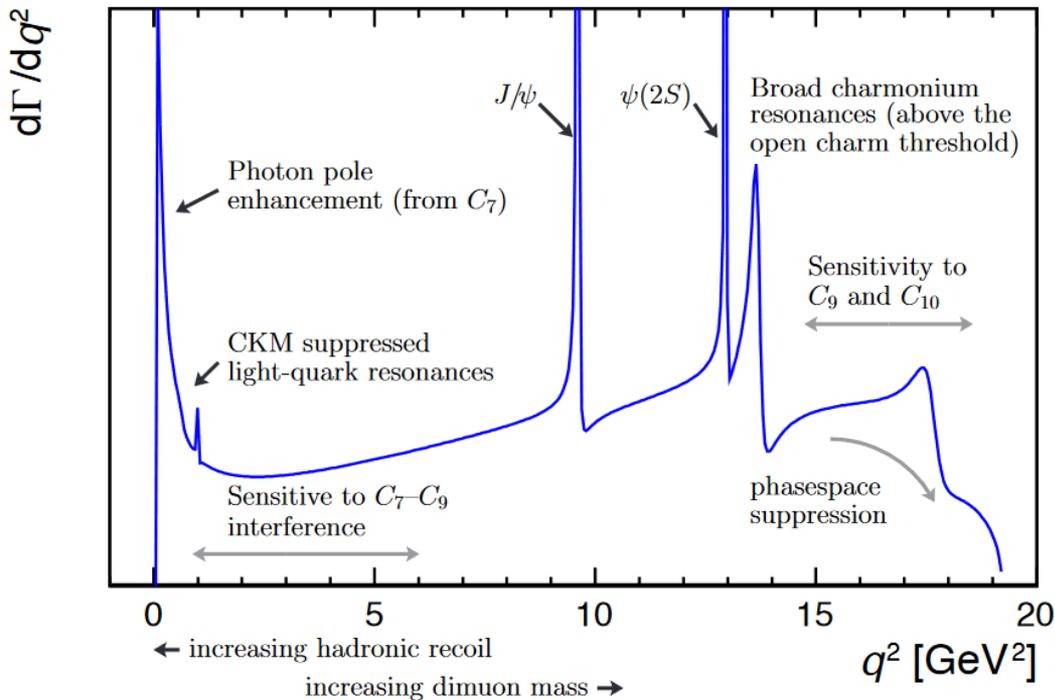
# $B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$



$$\mathcal{M} = \frac{G_F \alpha_{EM}}{\sqrt{2}\pi} V_{ts}^* V_{tb} \left[ C_9^{\text{eff}} \langle K^* | \bar{s} \gamma_\mu P_L b | B \rangle - 2 \frac{m_b}{q^2} C_7^{\text{eff}} \langle K^* | \bar{s} i \sigma_{\mu\nu} q^\nu P_R b | B \rangle \right] (\bar{\ell} \gamma^\mu \ell) + C_{10} \langle K^* | \bar{s} \gamma_\mu P_L b | B \rangle (\bar{\ell} \gamma^\mu \gamma_5 \ell)$$

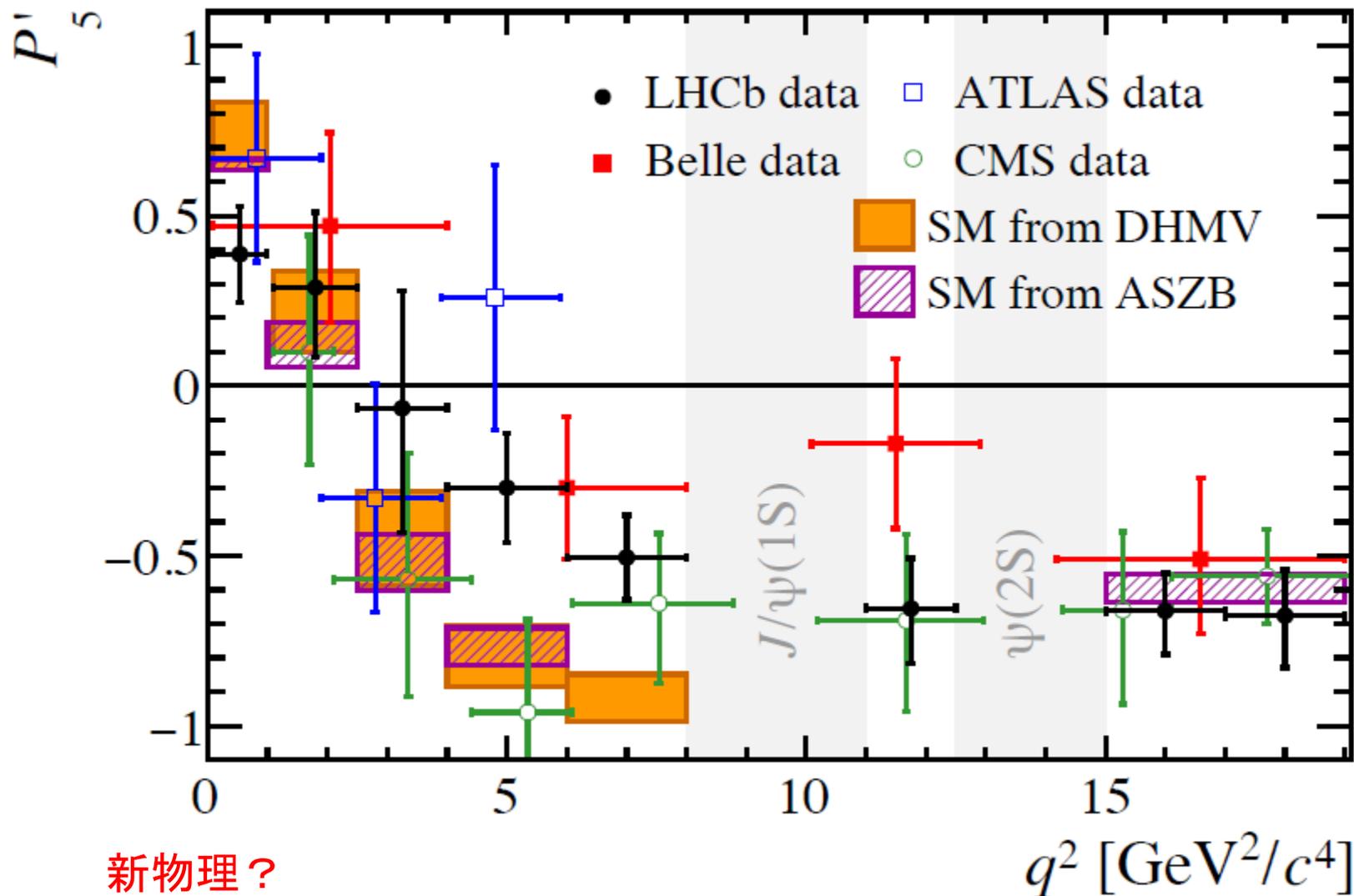


arXiv:1606.00916



$$B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-$$

J. Prisciandaro (FPCP2017)



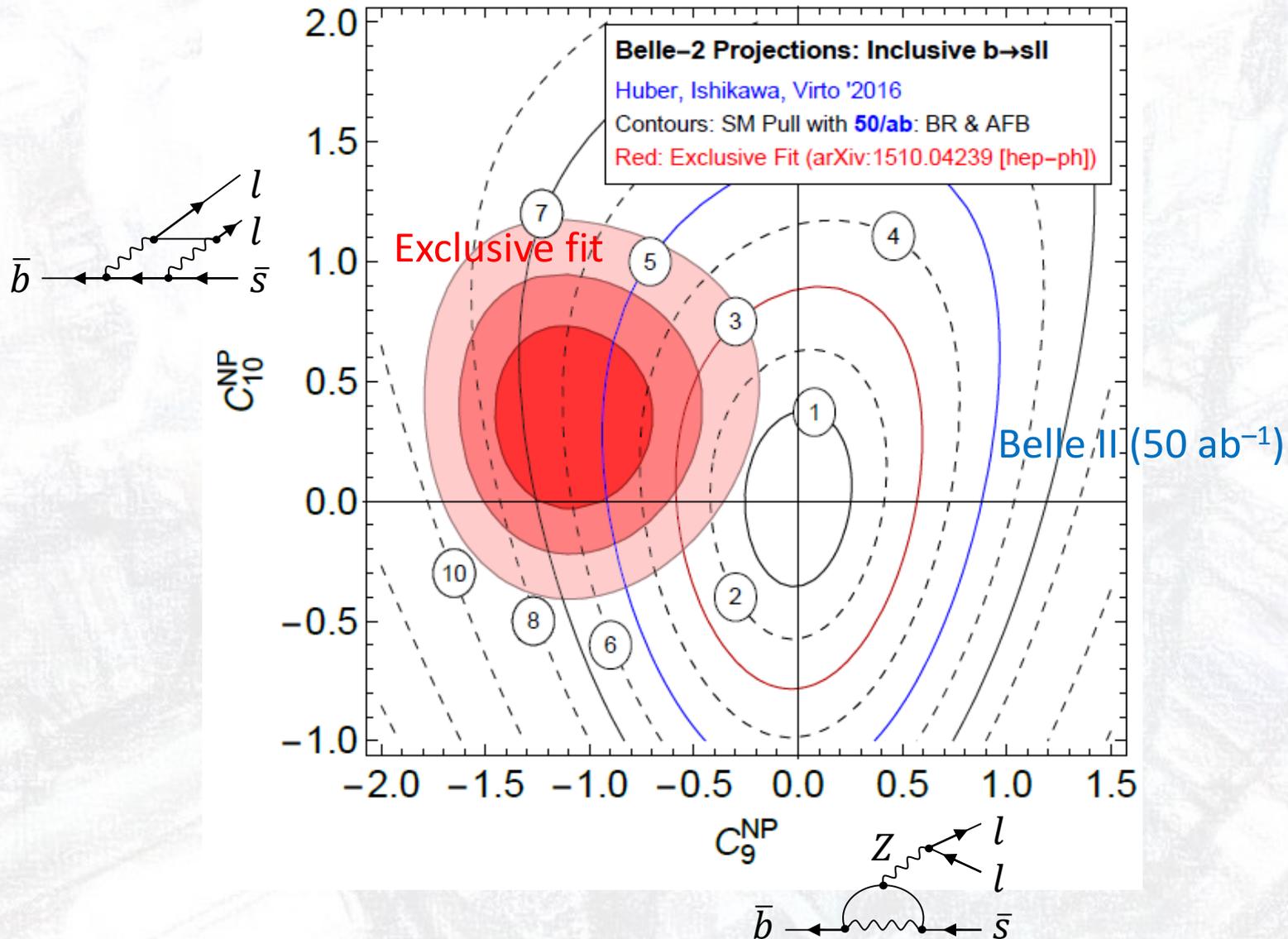
新物理？

理論計算の誤差？

 $c\bar{c}$  loop？

# Exclusive global fit / $B \rightarrow X_S \ell^+ \ell^-$

$$B \rightarrow K^* \ell^+ \ell^-, B \rightarrow \mu^+ \mu^-, B \rightarrow K^* \gamma$$



# LHCb vs. Belle II

- LHCb (陽子・陽子衝突)

- 圧倒的な統計 (信号事象も背景事象も)
- 崩壊点を再構成できるモードで強い  
(背景事象が一気に落ちる)

$$B_{d,s} \rightarrow \mu^+ \mu^- \quad B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^- \quad \dots$$

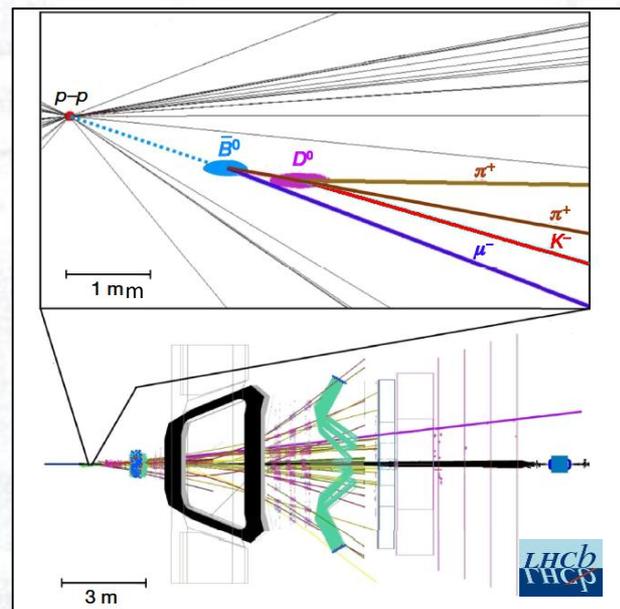
- Belle II (電子・陽電子衝突)

- 衝突エネルギーが既知
- クリーンな環境
- 衝突点周り全立体角90%近くを検出器が覆う
- 中性粒子・ニュートリノを含む、  
あるいは inclusive 崩壊で強い

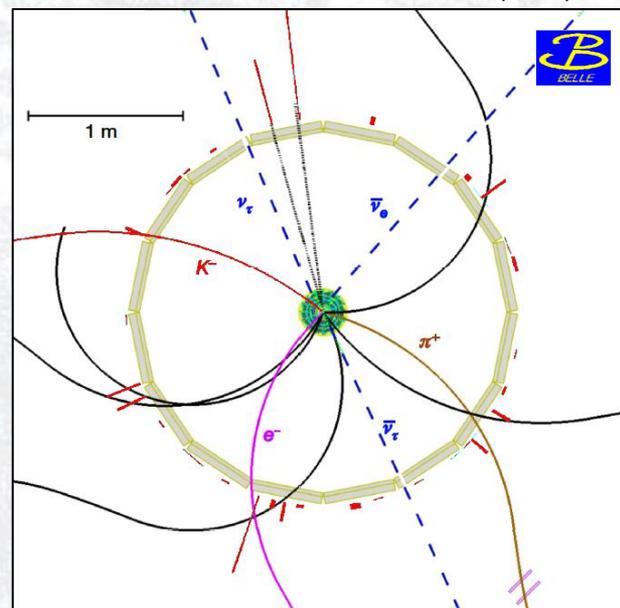
$$B \rightarrow \pi^0 \pi^0 \quad B \rightarrow K_S \pi^0 \quad B \rightarrow K^* \gamma \quad \dots$$

$$B \rightarrow \tau \nu \quad B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu \quad B \rightarrow K^{(*)} \nu \nu \quad \dots$$

$$B \rightarrow X_S \gamma \quad B \rightarrow X_S \ell \ell \quad \dots$$

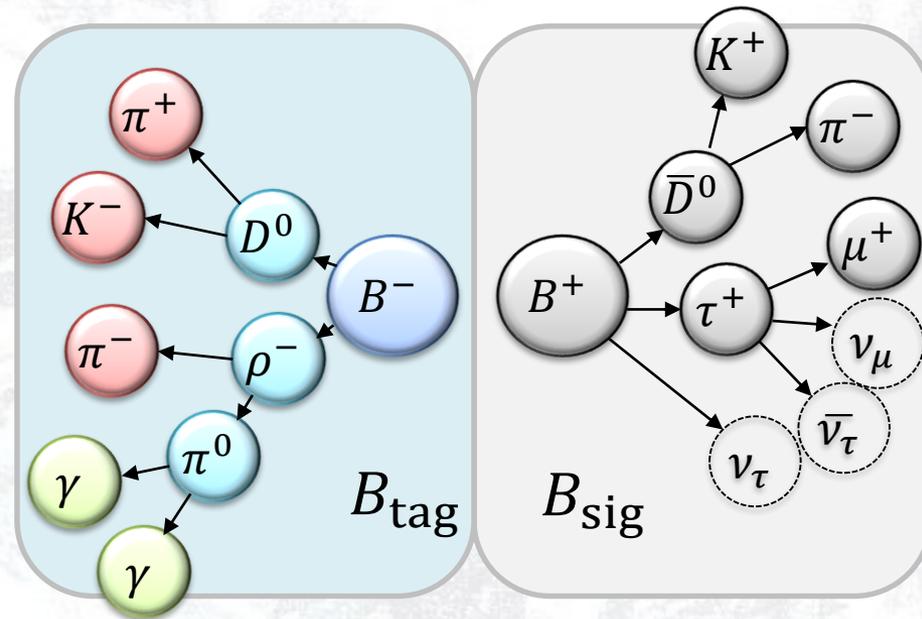


Nature 546 (2017) 227



# Hadronic tagging

- ハドロンに崩壊した  $B_{\text{tag}}$  を、終状態の粒子をすべて捕まえて完全再構成する
- 1000以上のハドロニック崩壊チェーンから集める
  - $B \rightarrow D^{(*)} + (n\pi, \rho, a_1, D_s^{(*)}, K)$
  - $B \rightarrow J/\psi K + n\pi$  など
- $B$  の各分岐比: 0.1~2% (合計: ~10%)



- 効率 (分岐比  $\times$  選別効率) : 0.3% 未満 (Belle)

## 大統計のBファクトリーでこそなせる技

- 特典:  $B_{\text{sig}}$  の電荷、フレーバー、運動量がわかる  
→ 信号 / 背景事象の強力な分離

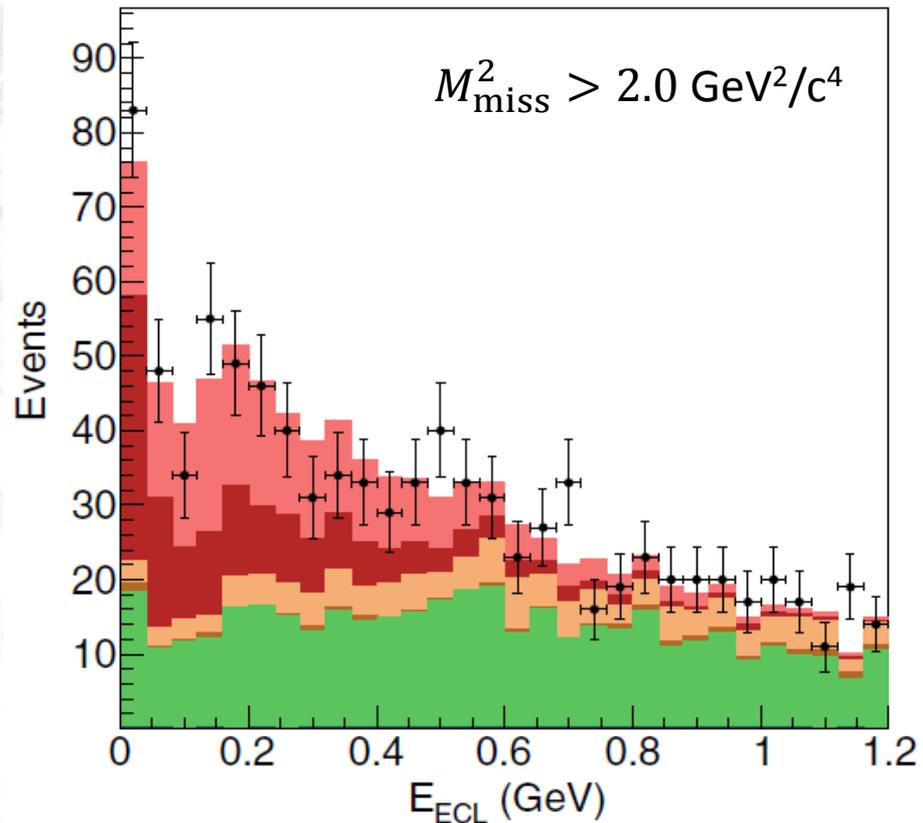
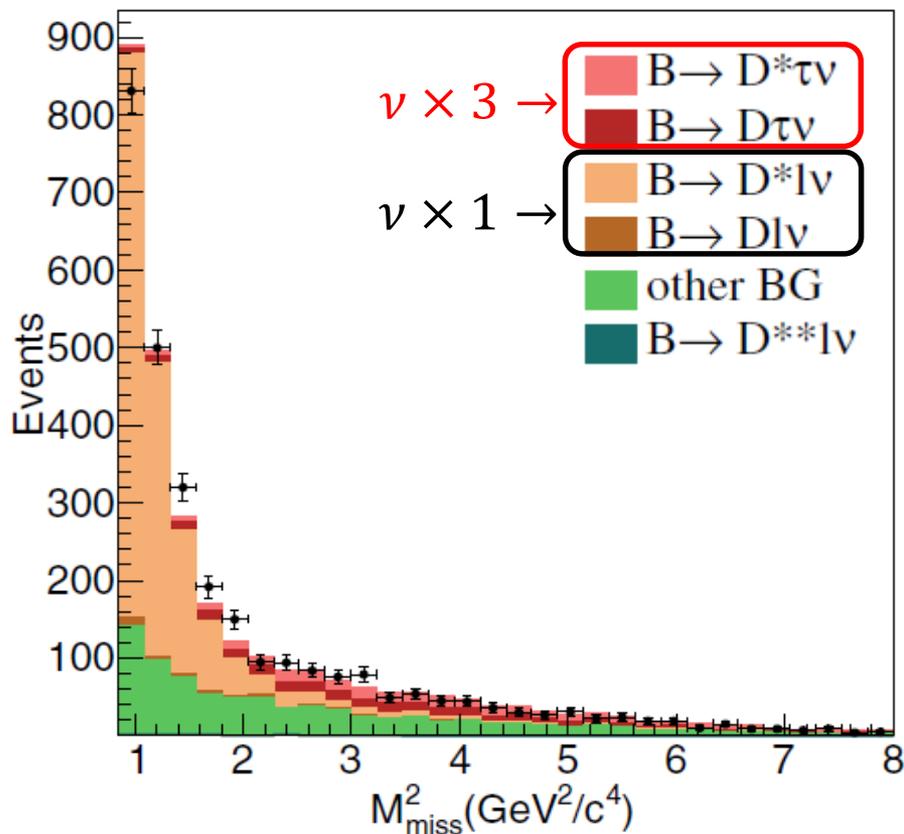
$E_{\text{ECL}}$ : 再構成に使われなかったECLエネルギーの余り

$$M_{\text{miss}}^2 = |p_{e^+e^-} - p_{\text{tag}} - p_{\text{sig}}^{\text{detected}}| \quad (4\text{元運動量保存})$$

# Hadronic tagging

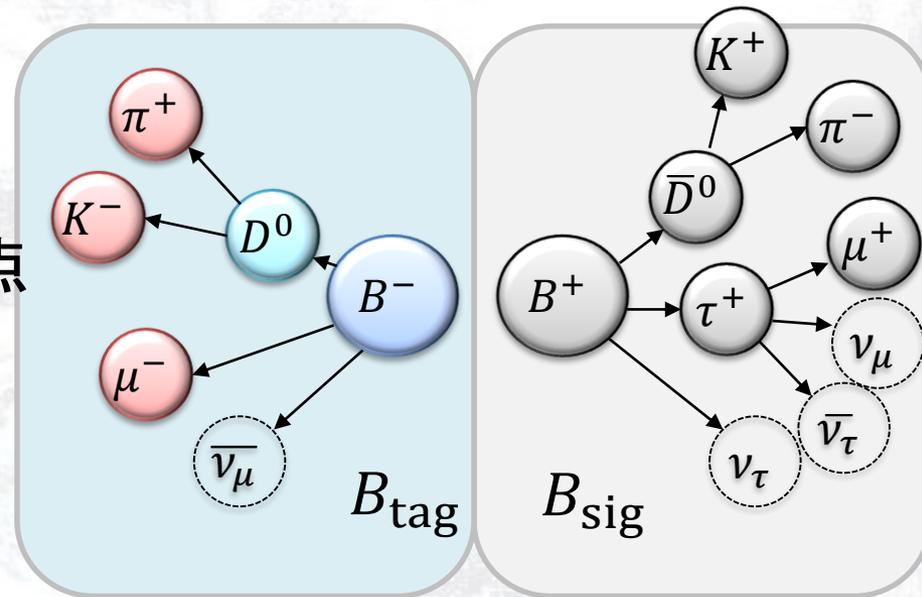
$B \rightarrow D^{(*)}\tau\nu$  の  $D^0\ell^-$  サンプル

Phys. Rev. D 92 (2015) 072014

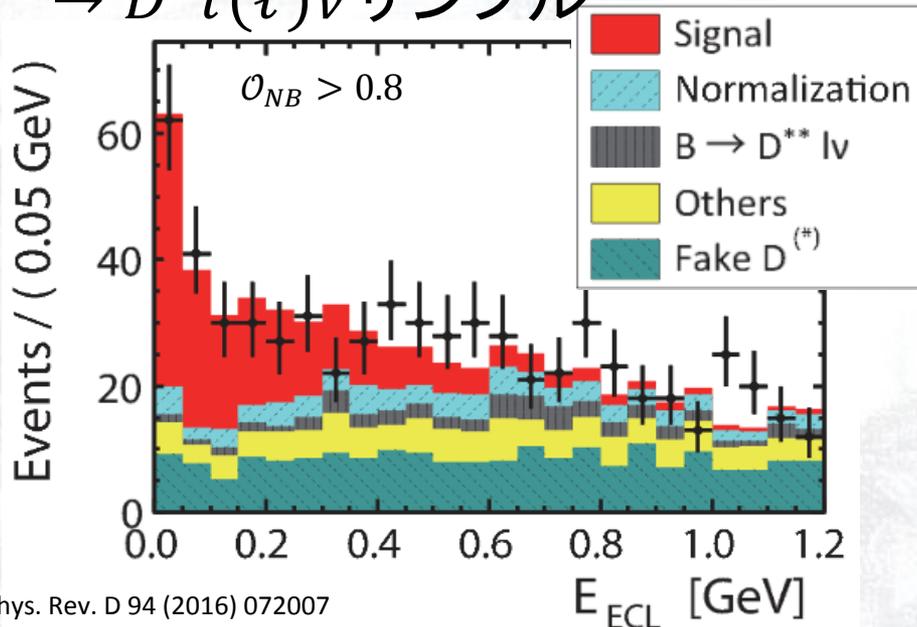


# Semi-leptonic tagging

- $B \rightarrow D^{(*)} \ell \nu X$  ( $\ell = e, \mu$ ) を使う
  - $B$  の分岐比合計:  $\sim 15\%$
- 信号と背景事象の分離が難点
- 効率 (分岐比  $\times$  選別効率) : 1% 未満 (Belle)



$B^0 \rightarrow D^* \tau(\ell) \nu$  サンプル



信号もバックグラウンドもハドロニックタグのときと同程度  
各々独立なサンプルなので、  
統計が2倍に

# Inclusive tagging

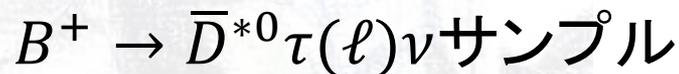
- $B_{\text{sig}}$  から再構成する
- $B_{\text{sig}}$  が正しく再構成されたならば残った粒子を集めると  $B_{\text{tag}}$  になるはず

$$- M_{\text{tag}} = \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - |\vec{p}_{\text{tag}}|^2}$$

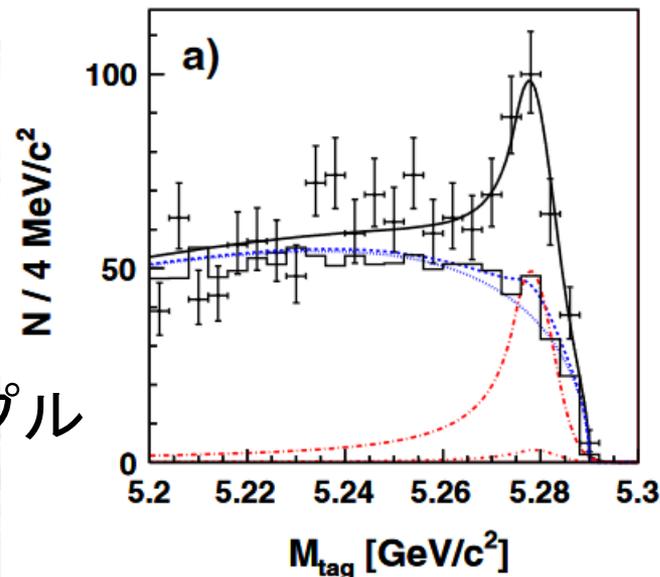
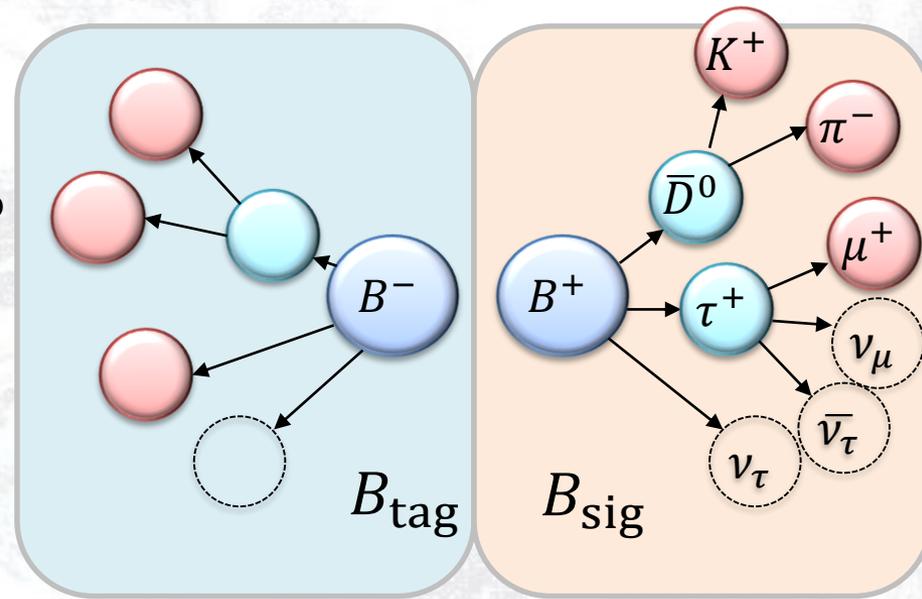
$$- \Delta E_{\text{tag}} = E_{\text{tag}} - E_{\text{beam}}$$

( $B_{\text{tag}}$  が何に崩壊したかは見ない)

- 効率: 数% (Belle)
- 背景事象も大幅に増える



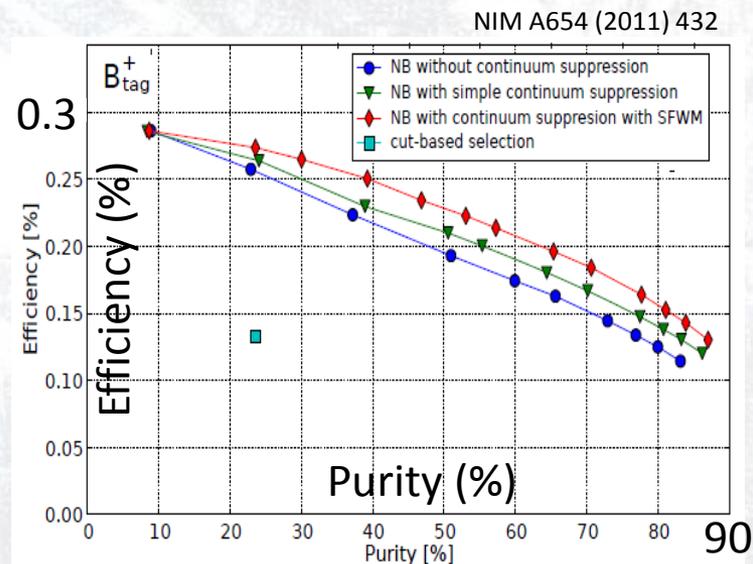
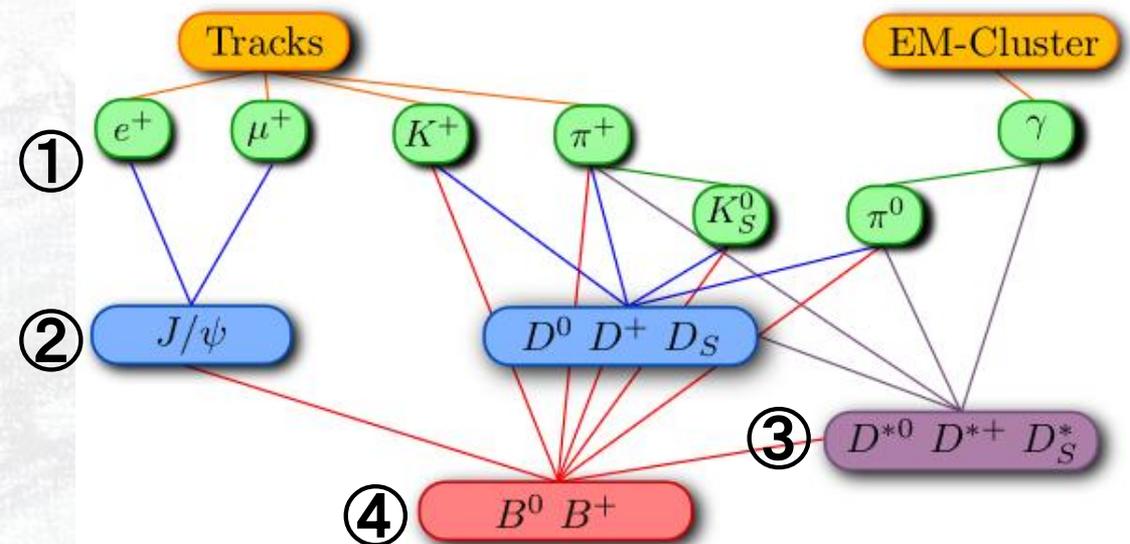
Phys. Rev. D 82 (2010) 072005





# “Full Reconstruction” (Hadronic tagging)

- Hierarchical NeuroBayes-based algorithm (Neural network)
  - あらかじめ、MC( $B\bar{B}, B^+B^-, \text{continuum}$ )を使ってNeuroBayesを学習させる。
  - あらゆる崩壊チェーンについて、様々なインプット(検出器の応答)に対して信号の確率を各段階(①~④)で計算し、最後にもっともらしい $B_{\text{tag}}$ 中間子の候補を選び出す。
    - ただし、真に全ての組み合わせを考えると計算に要する時間が途方もなくなるので、適宜ゆるいカットをかける。

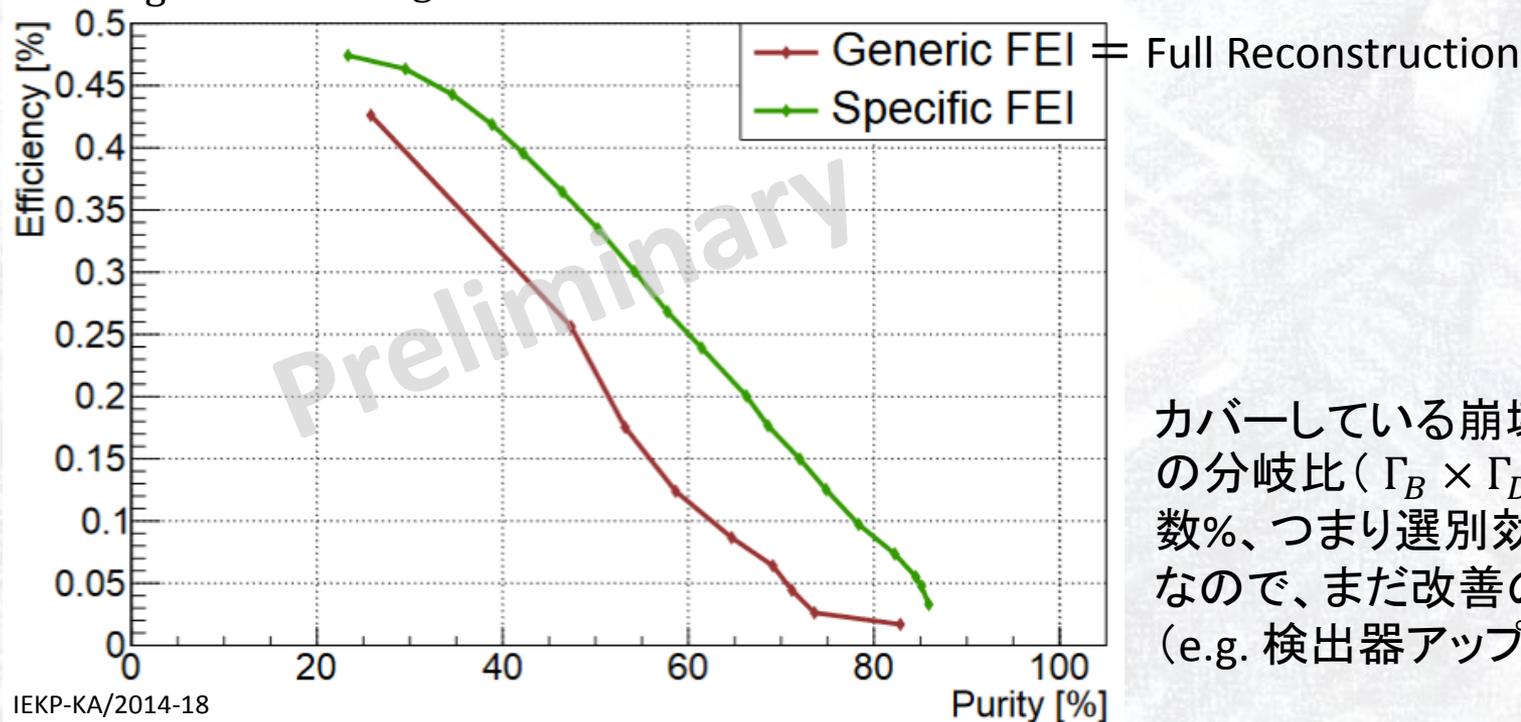




# FEI (Full Event Interpretation)

- 基本的には Full Reconstruction と同じ
- $B_{\text{sig}}$  の解析モードごとに学習 / 適用する。
  - $B_{\text{tag}}$  ではなく  $\Upsilon(4S)$  を再構成
- Hadronic tagging と Semi-leptonic tagging をまとめて扱う

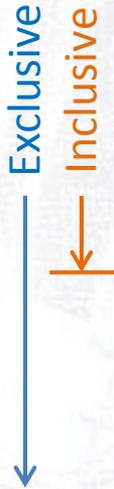
$B_{\text{sig}}^{\pm} \rightarrow \tau\nu / B_{\text{tag}} \rightarrow \text{Semi-leptonic (no beam bkgd)}$



カバーしている崩壊チャンネルの分岐比 ( $\Gamma_B \times \Gamma_D$ ) の合計は数%、つまり選別効率が10%程なので、まだ改善の余地あり？ (e.g. 検出器アップグレード)

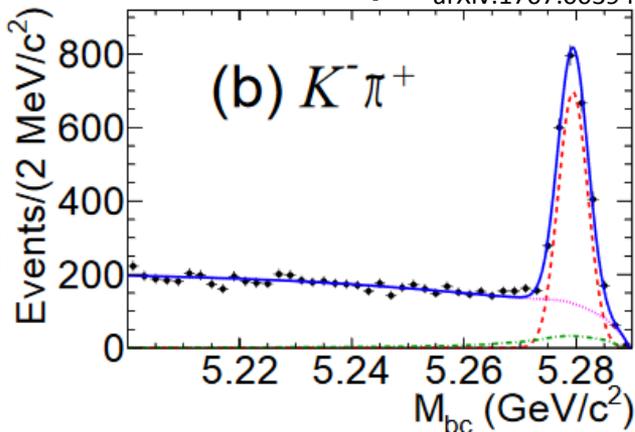
# $B_{\text{sig}}$ の再構成 ( $B \rightarrow X_{s(d)}\gamma$ )

- **Exclusive** ( $B \rightarrow K^*\gamma, B \rightarrow \rho\gamma, \dots$ )
  - 崩壊チャンネルをひとつ決めて、それを再構成
- **Semi-inclusive** (sum of exclusive)
  - できるだけたくさんの崩壊チャンネルを足し合わせる
  - $X = K\pi + K\pi\pi + K\pi\pi\pi + \pi\pi + KKK + \dots$
- **Inclusive** ( $B \rightarrow X_{s+d}\gamma$ )
  - $\gamma$ のエネルギーだけ測定
  - $X$ が何かはIDしない



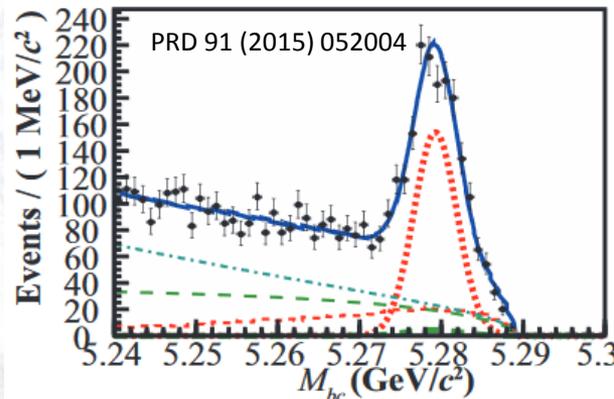
理論精度?  
背景事象大

$B^0 \rightarrow K^{*0}\gamma$



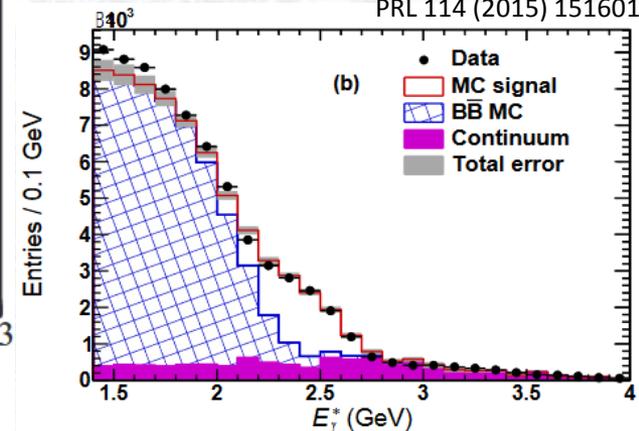
$B \rightarrow X_s\gamma$

Sum of exclusive

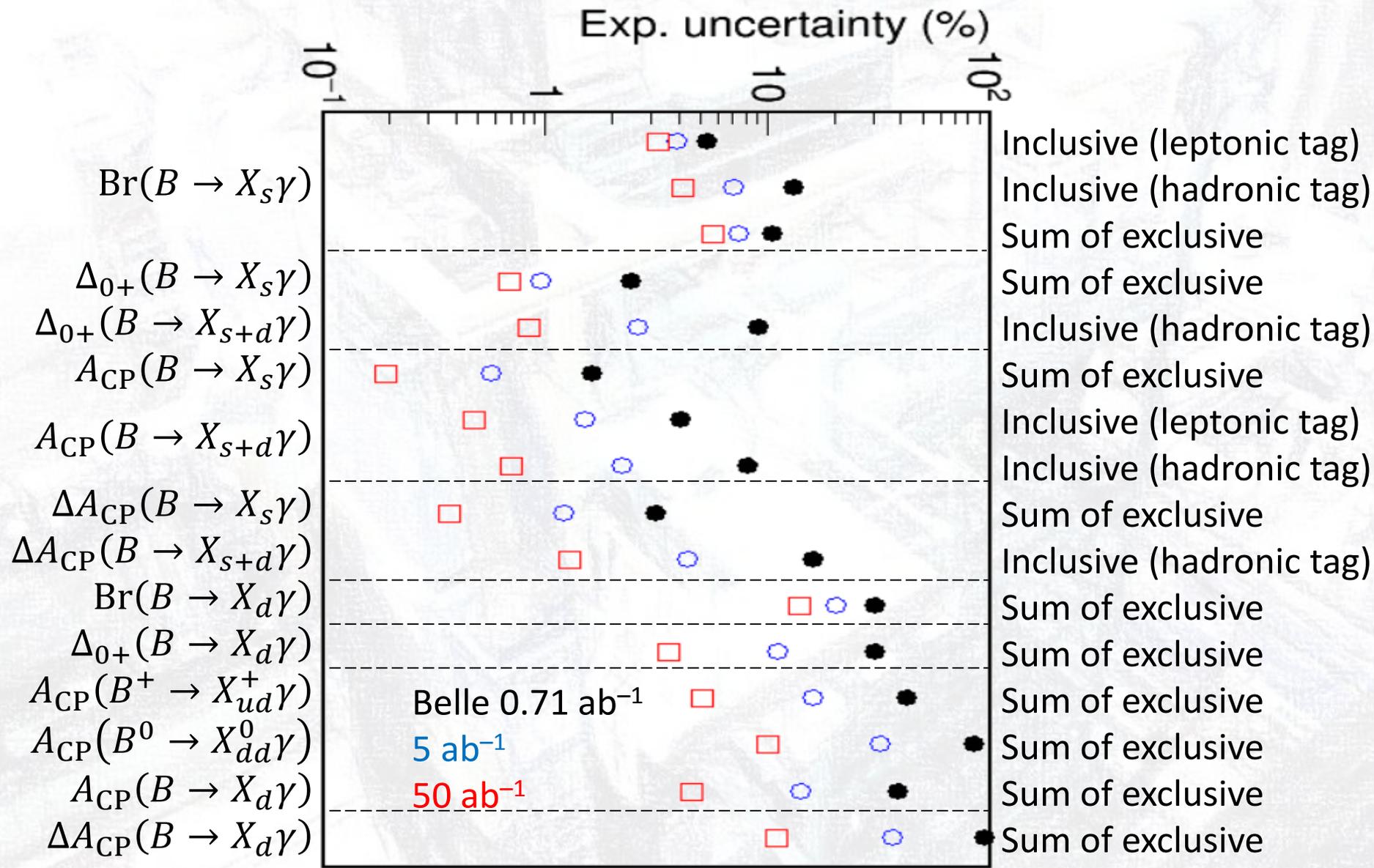


(g)  $1.2 < M_{X_s} < 1.3$  ( $\text{GeV}/c^2$ )

$B \rightarrow X_{s+d}\gamma$



# Belle II sensitivity





宇宙論

標準理論の輪郭をクリアに認識し、  
様々な物理現象の関連性を明らかにして、  
新物理の輪郭を推定する。

素粒子論

物性

数学

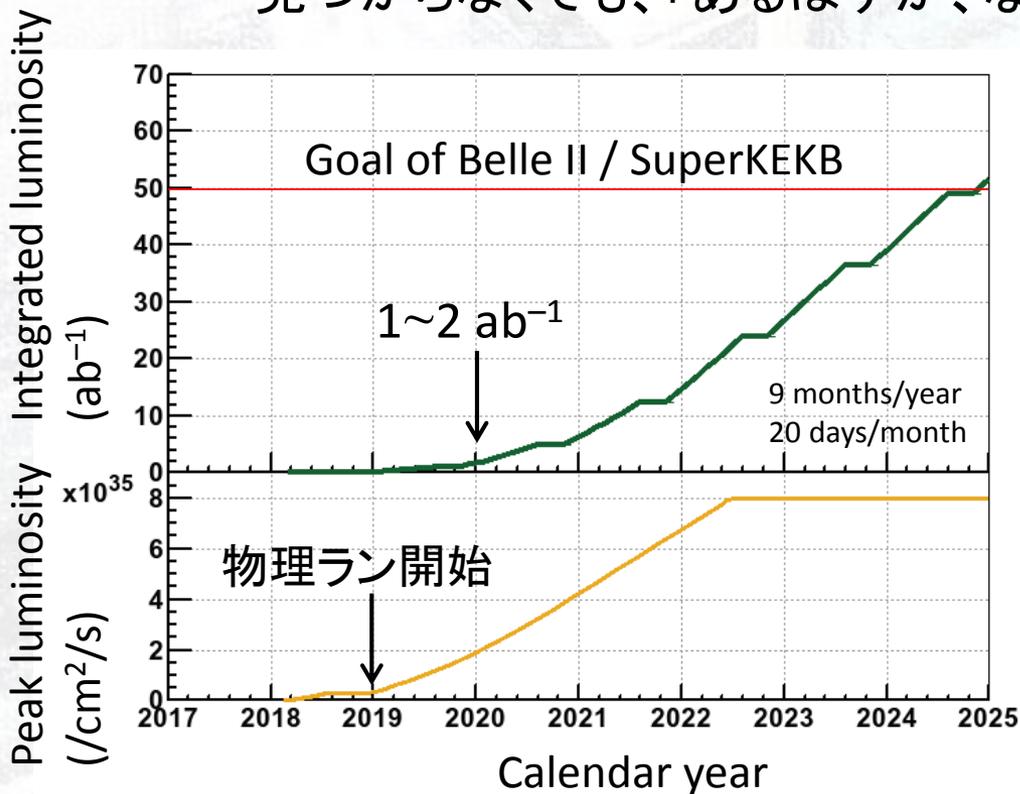
# まとめ

- Belle II 実験 (~2024年, 50  $\text{ab}^{-1}$ ) が目指す物理

## 1. 標準理論の精密な理解

## 2. (それに基づいて) 新物理の発見

- できなくても、標準理論がどのエネルギースケールまで有効か探る
- 見つからなくても、「あるはずが、ない」「ありそうで、ない」も重要な示唆



Belle II で何が出るか、でないか・・・  
10年後、学生の皆さんの研究針路を占う