

# B稀崩壊過程

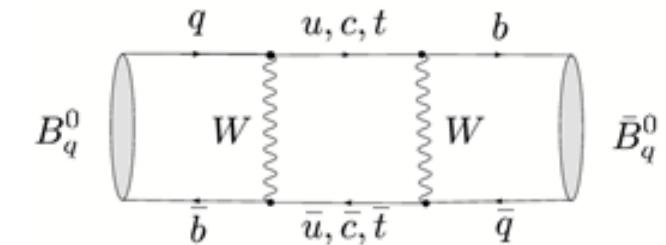
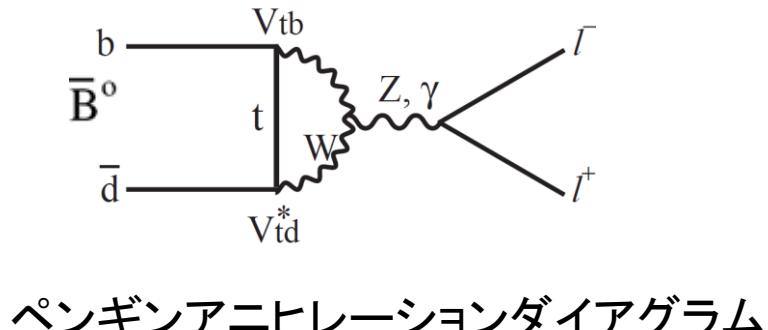
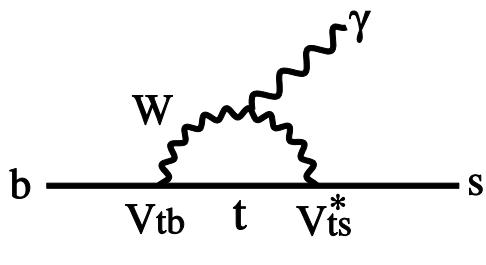
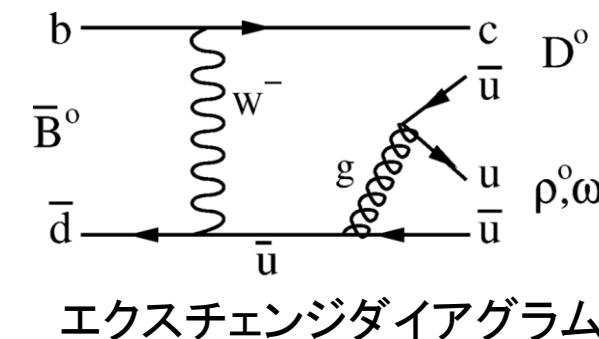
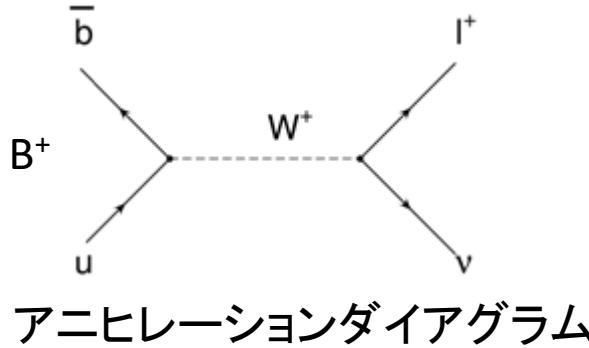
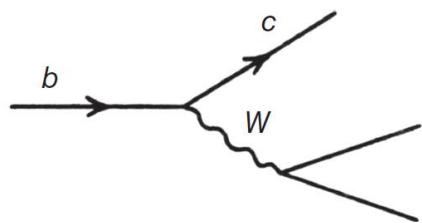
石川明正

(KEK)

# Introduction

# B中間子崩壊のダイアグラム

- 色々なダイアグラムがある
  - 多様な方法で新物理を探索する事が出来る
  - 稀崩壊？



# B中間子稀崩壊とは？

- 個人、立場、時代等によって定義が異なる
- 私が学生の頃(2000年頃)は  $b \rightarrow c$  ツリー崩壊以外は稀崩壊だった
  - $B(b \rightarrow c) \sim 99\%$
- LHCb (2012年頃)が  $b \rightarrow s$  ペンギン崩壊である  $B \rightarrow K^{(*)} \mu \mu$  を1000イベント以上測定出来るようになった
  - LHCbのある人「もはや  $b \rightarrow s$  は稀崩壊では無い」
  - ある人(でも LHCb は  $b \rightarrow s \nu \bar{\nu}$  を測定する事できないよね…)
- このトークの定義
  - B中間子稀崩壊は  $b \rightarrow c$  ツリー崩壊以外

昨年の綿貫氏のスライド



Rare B decayとは何か

- 「稀崩壊」過程
  - 崩壊分岐比が小さいという意味ではない
  - $BR(B^+ \rightarrow \eta l^+ \nu_l) = (3.9 \pm 0.5) \times 10^{-5}$  は rare じゃない
  - $BR(B^+ \rightarrow K^{*+} \gamma) = (3.92 \pm 0.22) \times 10^{-5}$  は rare である
- 何らかの 対称性 や 量子数保存則 のために 強いて抑制される過程 をそう呼ぶ:
  - 例え...
  - フレーバー対称性(GIM機構) → **FCNC** を抑制
  - 角運動量保存則 → **Pure leptonic** を抑制
  - レプトンフレーバー保存則 → **LFV** の禁止



実は **LFV** もニュートリノ振動を考慮すれば可能  
そういう意味ではこれも「抑制」と言える  
他にも我々のやり知らない抜け道があるかも？

2024/12/2

S. Watanuki @Flavor Workshop 2024

# なぜB中間子稀崩壊を研究するか？

- 現在の素粒子物理の最大の目的は標準模型を超える物理(新物理)を発見する事
  - 理想を言えば Big picture に関わりそうな新物理だとうれしい
    - バリオジェネシス(鎌田さん、淺賀さん、村さん)、暗黒物質(金道さん)、大統一、フレーバー混合…
  - 唯一の標準模型を超える物理
    - ニュートリノ振動 → 右巻きニュートリノがどこかにいる？(淺賀さん、石徹白さん、小松さん)
- B中間子の稀崩壊は新物理に敏感だと思われている
  - どのような崩壊が？

# どんな崩壊が新物理に敏感？(1)

- 標準模型で抑制

- B中間子の崩壊はツリーレベルでもCKM抑制されている

- B :  $V_{cb} = \mathcal{O}(\lambda^2)$      $\lambda = 0.22453 \pm 0.00044$
- K :  $V_{us} = \mathcal{O}(\lambda)$
- D :  $V_{cs} = \mathcal{O}(1)$
- top :  $V_{tb} = \mathcal{O}(1)$

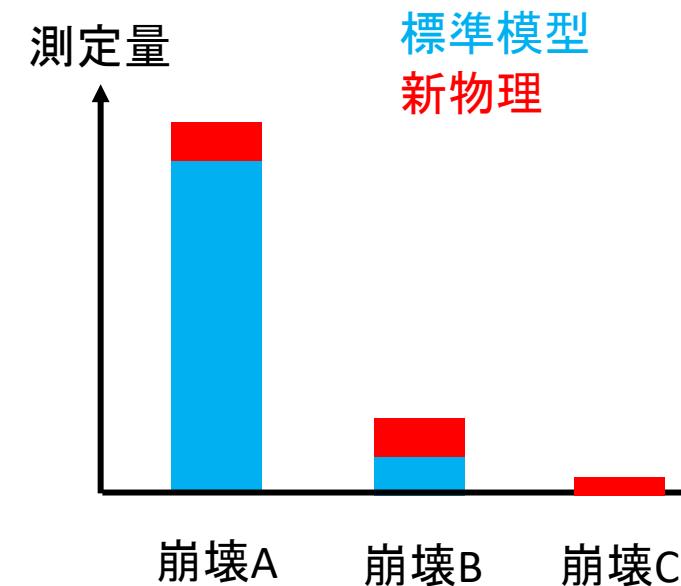
ツリー崩壊に新物理が関わらないのであれば、  
稀崩壊が見やすくなる

- Flavor changing neutral current (FCNC) 崩壊はループダイアグラムでしか起こらずループ抑制

- $b \rightarrow s, b \rightarrow d$
- ループファクター :  $1/(4\pi)^2$ , おおざっぱに  $1/100$

- 禁止過程

- Lepton Flavor Violating decays  $B \rightarrow K\tau\mu$



$$\begin{aligned}
 V_{\text{CKM}} &= \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)
 \end{aligned}$$

# どんな崩壊が新物理に敏感？(1)

- 標準模型で抑制

- B中間子の崩壊はツリーレベルでもCKM抑制されている

- B :  $V_{cb} = \mathcal{O}(\lambda^2)$      $\lambda = 0.22453 \pm 0.00044$
- K :  $V_{us} = \mathcal{O}(\lambda)$
- D :  $V_{cs} = \mathcal{O}(1)$
- top :  $V_{tb} = \mathcal{O}(1)$

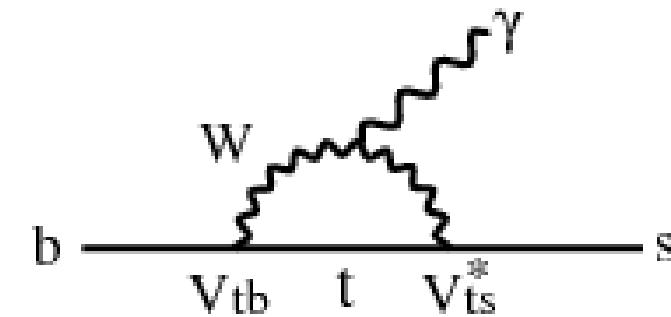
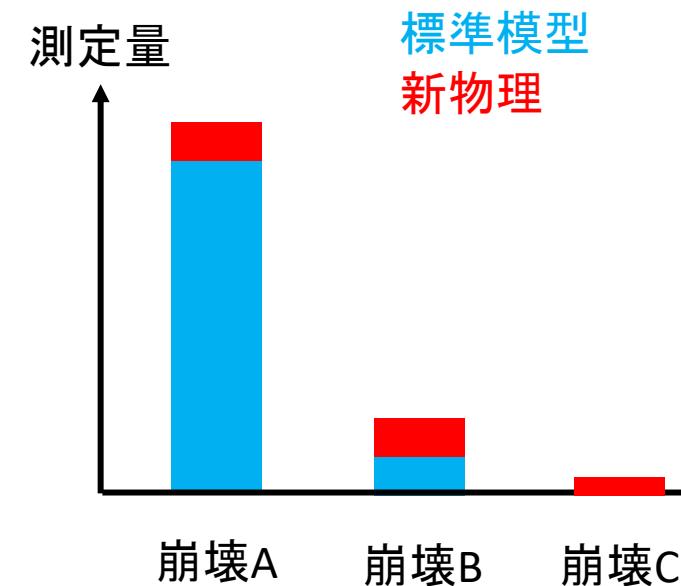
- ツリー崩壊に新物理が関わらないのであれば、稀崩壊が見やすくなる

- Flavor changing neutral current (FCNC) 崩壊はループダイアグラムでしか起こらずループ抑制

- $b \rightarrow s, b \rightarrow d$
- ループファクター :  $1/(4\pi)^2$ , おおざっぱに  $1/100$

- 禁止過程

- Lepton Flavor Violating decays  $B \rightarrow K\tau\mu$



# どんな崩壊が新物理に敏感？(1)

- 標準模型で抑制

- B中間子の崩壊はツリーレベルでもCKM抑制されている

- B :  $V_{cb} = \mathcal{O}(\lambda^2)$      $\lambda = 0.22453 \pm 0.00044$
- K :  $V_{us} = \mathcal{O}(\lambda)$
- D :  $V_{cs} = \mathcal{O}(1)$
- top :  $V_{tb} = \mathcal{O}(1)$

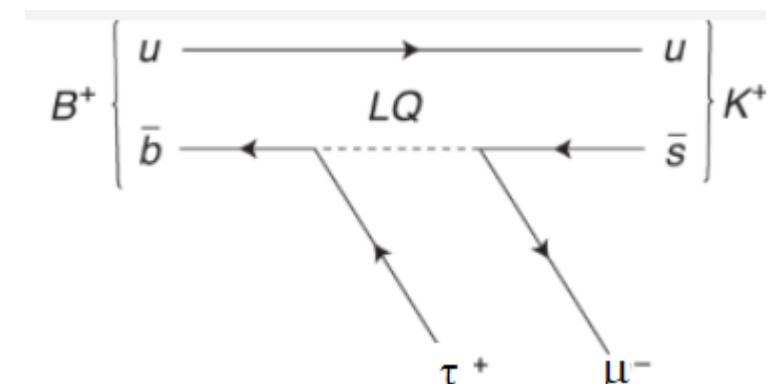
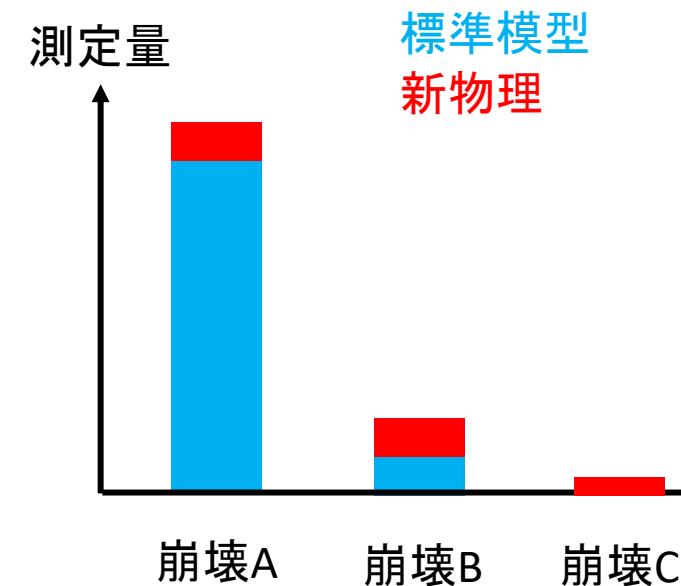
- ツリー崩壊に新物理が関わらないのであれば、稀崩壊が見やすくなる

- Flavor changing neutral current (FCNC) 崩壊はループダイアグラムでしか起こらずループ抑制

- $b \rightarrow s, b \rightarrow d$
- ループファクター :  $1/(4\pi)^2$ , おおざっぱに  $1/100$

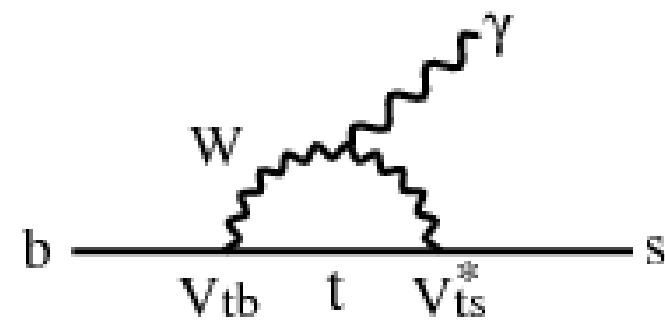
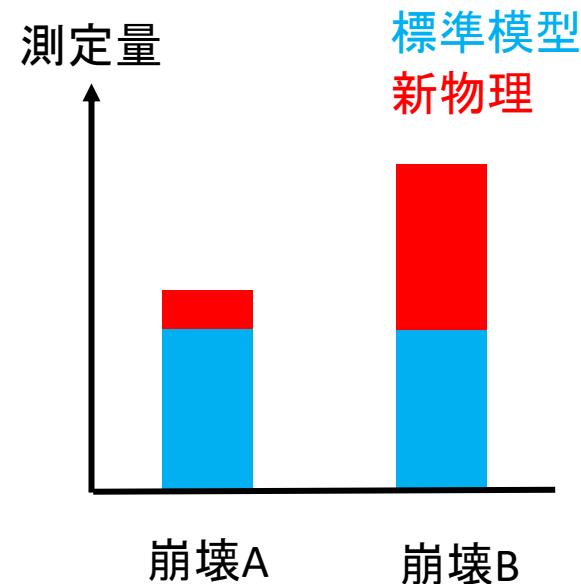
- 禁止過程

- Lepton Flavor Violating decays  $B \rightarrow K\tau\mu$



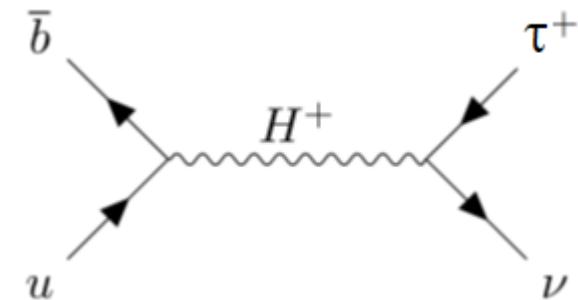
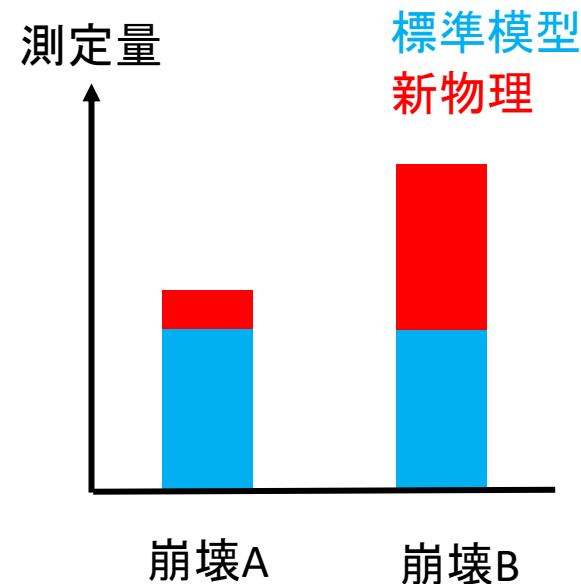
# どんな崩壊が新物理に敏感？(2)

- 新物理の振幅が大きい
  - ループダイアグラム
    - ループの中には重い粒子が回りやすい
    - SMだと  $m_q/m_W$  の関数なので top が支配的
  - $\tau$  を含む崩壊( $v_\tau$  も)
    - 重い粒子に結合しやすい新物理に敏感
      - ヒッグスの結合は質量に比例
      - 特に 2HDM type-II は  $b, \tau$  で  $\tan\beta$  enhancement
    - 第3世代粒子は特別？
      - Top は電弱スケールの質量→電弱対称性の破れに関連する新物理？
  - ヘリシティー抑制
    - $W$  の代わりに荷電 Higgs が飛ぶとヘリシティー抑制がない場合がある



# どんな崩壊が新物理に敏感？(2)

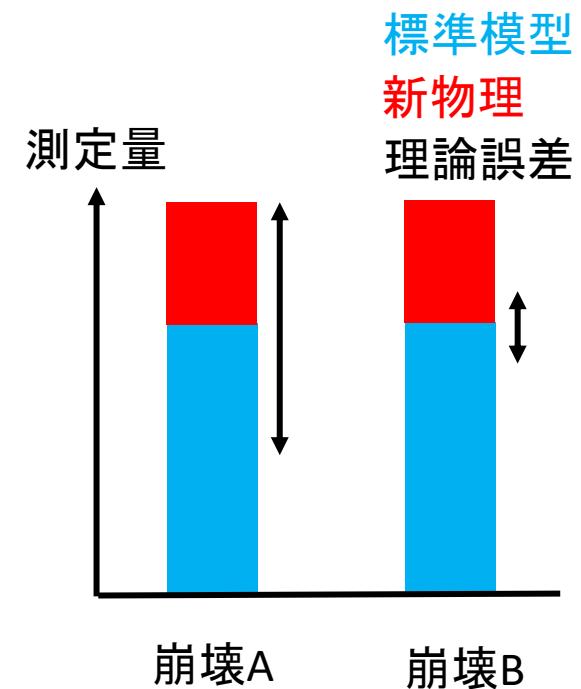
- 新物理の振幅が大きい
  - ループダイアグラム
    - ループの中には重い粒子が回りやすい
    - SMだと  $m_q/m_W$  の関数なので top が支配的
  - $\tau$  を含む崩壊( $\nu_\tau$  も)
    - 重い粒子に結合しやすい新物理に敏感
      - ヒッグスの結合は質量に比例
      - 特に 2HDM type-II は  $b, \tau$  で  $\tan\beta$  enhancement
    - 第3世代粒子は特別？
      - Top は電弱スケールの質量→電弱対称性の破れに関連する新物理？
  - ヘリシティー抑制
    - $W$  の代わりに荷電 Higgs が飛ぶとヘリシティー抑制がない場合がある



# どんな崩壊が新物理に敏感？(3)

- 理論予言がクリーン(理論誤差が小さい)

- 対称性などに守られている、もしくは禁止過程
    - CKM matrix のユニタリ性 → ユニタリートライアングルの測定,  
 $A_{CP}(b \rightarrow (s+d)\gamma)$
    - Lepton Flavor Universality/Violation →  $R_{K^{(*)}} / B \rightarrow K e \mu$
  - 比や差を取ることにより理論誤差をキャンセル
    - $BF(B \rightarrow D^* \tau \nu) / BF(B \rightarrow D^* \mu \nu)$
    - $\Delta A_{CP}(b \rightarrow s \gamma)$
  - 一般に終状態に color を持たない粒子 lepton や光子がいる崩壊
    - Lattice QCD にとって重いB中間子は大変ですが、最近の進展により精密な予言が可能になった(金児さん)
      - $B \rightarrow D^* \tau \nu$
      - $B \rightarrow K^* \gamma, K^* l^+ l^-$ ,  $K^* \nu \bar{\nu}$
      - $B \rightarrow l^+ l^-$ ,  $\nu \bar{\nu}$ ( $\nu \bar{\nu}$ ),  $l^+ \nu$
  - Inclusive 崩壊
    - 現象論でのQCD理論計算が比較的精密(高浦さん)  $m_b >> \Lambda_{QCD}$
    - $B \rightarrow X_s \gamma, B \rightarrow X_d \gamma, B \rightarrow X_s l^+ l^-$



# 物理の前に

- 直接的 CP Violation
  - 小林益川理論を超える CPV を探索したい
- B tagging
  - 複数のニュートリノを含む B 中間子崩壊の探索

# CPVの種類

CPVは量子力学的な干渉の効果により起こる

- 時間に依存したCPV (Baeさん)

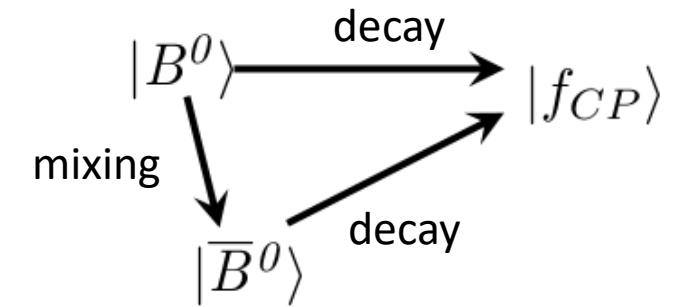
- B中間子が終状態  $f$  に崩壊する確率と  $\bar{B}$  中間子が終状態  $f$  に崩壊する確率の時間依存性が異なる

- 時間積分すると確率が同じになる場合がある : sine term

$$P(B \rightarrow f)(t) \neq P(\bar{B} \rightarrow f)(t)$$

- Mixing+decay と decay の干渉を見る

- Mixing が必要なので中性  $B^0$  中間子でしか起こらない



- 直接的CPV

- B中間子が終状態  $f$  に崩壊する確率と  $\bar{B}$  中間子が終状態  $f_{bar}$  に崩壊する確率が異なる

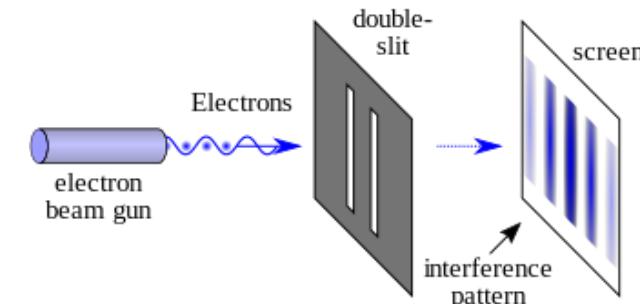
$$P(B \rightarrow f) \neq P(\bar{B} \rightarrow \bar{f})$$

- Decay に複数の amplitude が関与しその干渉を見る

- 中性  $B^0$  中間子でも荷電  $B^+$  中間子でも起こる

# 直接的CPVはどうして起こる？

- CPVは複数の振幅の量子的干渉によって起こる
  - 波の干渉と同じ
  - 2つ以上の経路があり、CPVの種(弱位相差と強位相差)がある
  - 量子効果から新物理を探索する



1つのダイアグラム  
CPV起こらない

$$|A|^2 = \left| \begin{array}{c} b \\ \bar{d} \end{array} \xrightarrow{\text{V}_{ub}} \begin{array}{c} d \\ u \\ u \\ \bar{d} \end{array} \right|^2$$

強位相差 異なるダイアグラム  
粒子と反粒子で符号が同じ

2つのダイアグラム  
CPV起こる

$$|A|^2 = \left| \begin{array}{c} b \\ \bar{d} \end{array} \xrightarrow{\text{V}_{ub}} \begin{array}{c} d \\ u \\ u \\ \bar{d} \end{array} + \begin{array}{c} b \\ \bar{d} \end{array} \xrightarrow{\text{V}_{td}} \begin{array}{c} d \\ \bar{u} \\ u \\ \bar{d} \end{array} \right|^2$$

弱位相差 ●と●  
粒子と反粒子で符号が異なる

# 振幅と直接的CPVの計算

粒子の振幅

$$A = A_1 + A_2$$

$\phi$  : 粒子と反粒子で符号が変わる弱位相  
 $\delta$  : 粒子と反粒子で符号が変わらない強位相

$$A_1 = |A_1|e^{i\phi_1}e^{i\delta_1}$$

$$|A|^2 = |A_1|^2 + 2|A_1||A_2|e^{i(\phi_1+\phi_2)}e^{i(\delta_1+\delta_2)} + |A_2|^2$$

$$A_2 = |A_2|e^{i\phi_2}e^{i\delta_2}$$

反粒子の振幅

$$\bar{A} = \bar{A}_1 + \bar{A}_2$$

$$\bar{A}_1 = |A_1|e^{-i\phi_1}e^{i\delta_1} \quad |\bar{A}|^2 = |A_1|^2 + 2|A_1||A_2|e^{-i(\phi_1+\phi_2)}e^{i(\delta_1+\delta_2)} + |A_2|^2$$

$$\bar{A}_2 = |A_2|e^{-i\phi_2}e^{i\delta_2}$$

直接的CPVは振幅の2乗の差に比例

$$|A|^2 - |\bar{A}|^2 = -4|A_1||A_2|\sin(\phi_1 - \phi_2)\sin(\delta_1 - \delta_2)$$

振幅が2つ以上ある

$$|A_1| \neq 0$$

弱位相の差がある

$$|A_2| \neq 0$$

の時に直接的 CPV が起こる

強位相の差がある

$$\phi_1 - \phi_2 \neq 0$$

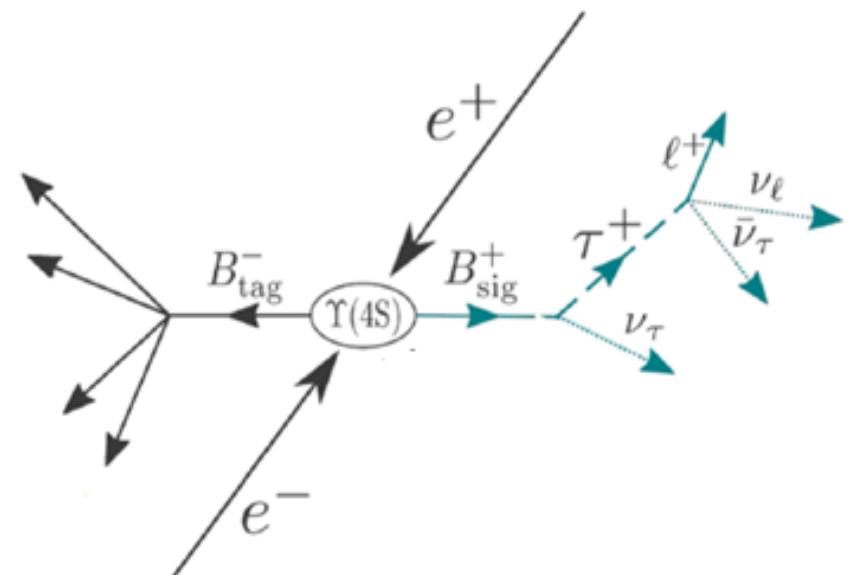
$$\delta_1 - \delta_2 \neq 0$$

実際には系統誤差のキャンセルのために崩壊分岐比のアシンメトリーを取る

$$A_{CP} = \frac{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow \bar{f}) - \mathcal{B}(B \rightarrow f)}{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow \bar{f}) + \mathcal{B}(B \rightarrow f)}$$

# B tagging

- シグナルB中間子の終状態に複数のニュートリノが存在する崩壊では運動学的制限が少ないため、シグナルを同定しにくい
- Belle II では  $\Upsilon(4S) \rightarrow BB$  のように、B中間子が生成されるときは必ずペアで、他の粒子がないことをりようし、もう一つのB中間子をタグする
  - ハドロニックタグ
    - Mode :  $B \rightarrow D\pi, B \rightarrow DsD$  etc
    - Pros :  $B_{tag}$  の運動量測定から、 $B_{sig}$  の静止系に行ける
    - Cons : 個々のハドロニック崩壊の分岐比が小さい
    - Efficiency  $\sim 0.3\%$
  - セミレプトニックタグ
    - Mode :  $B \rightarrow D(*)l\nu$
    - Pros :  $B \rightarrow D(*)l\nu$  の崩壊分岐比が大きい
    - Cons : 運動学的制限が弱い
    - Efficiency  $\sim 1\%$
  - 感度はだいたい同程度



# 新物理模型

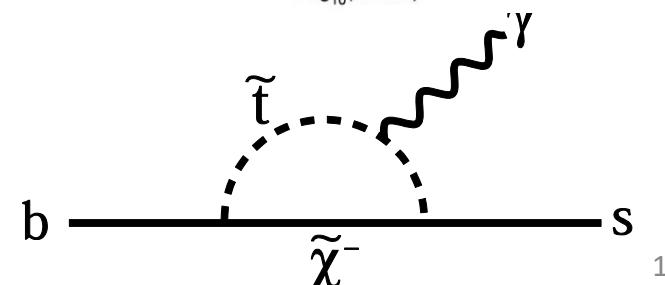
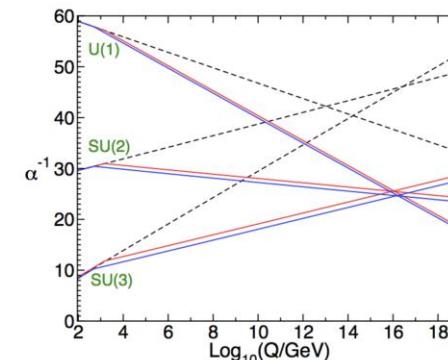
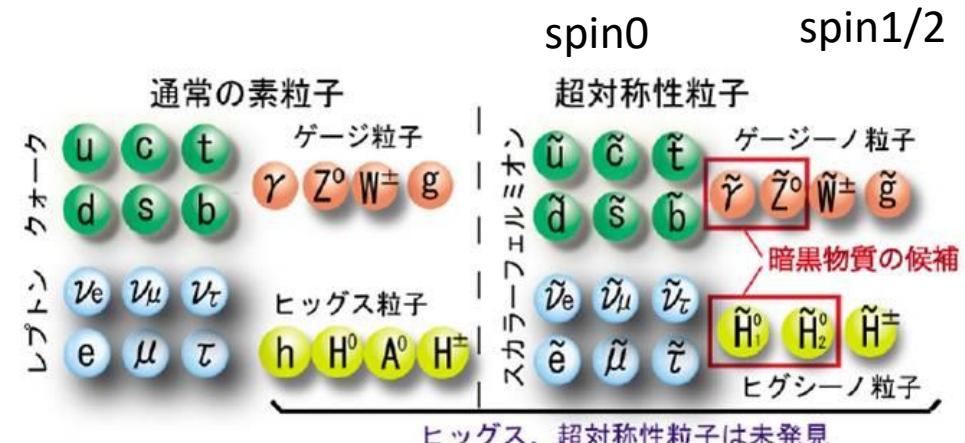
- 模型の話は理論屋さんにお願いした方が良いのですが…
- どのような新物理がB中間子崩壊に効くか
  - 超対称性
  - 拡張 Higgs 模型
  - Leptoquark
  - Sterile neutrino
  - .....

細かい話は飛ばして単純化しています  
もっと知りたければ理論屋さんに聞こう！

間違っていたら訂正してください→理論屋さん

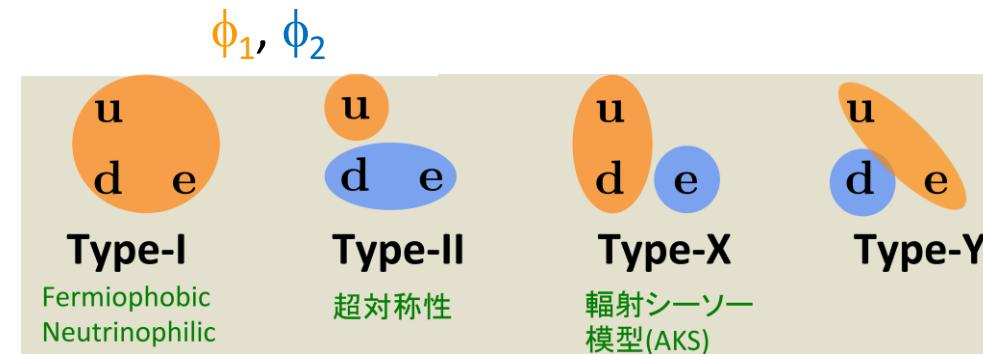
# 新物理の候補 SUSY → 岡田さん

- 超対称性理論(SUpper Symmetry:SUSY)
  - 標準模型の粒子とスピンが $1/2$ 異なる超対称性粒子が存在
    - 粒子の数が2倍！
    - Higgs の質量の発散を抑えることができる
    - $Z$ より重いが軽い Higgs を予言  $\rightarrow 125\text{GeV}$  ! Okada, Yamaguchi, Yanagida
    - ゲージ結合の統一が起こる
  - 超対称性粒子は見つかっていないので、標準模型粒子より重い。
  - 超対称性粒子は必ずペアで生成されないといけない
    - Bの物理だと loop に入る(重くて on-shell で作れない)
    - 一番軽いSUSY粒子は暗黒物質候補で安定
  - 多くのCP位相やフレーバーを破る自由度がある
    - Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM)は124 parameter あり、36個の flavor violating parameter と 43個の CPV parameter を持つ。



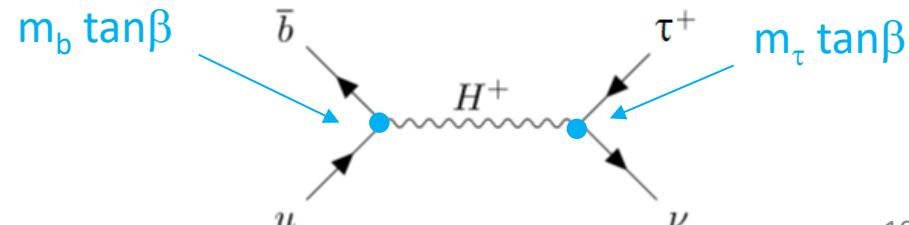
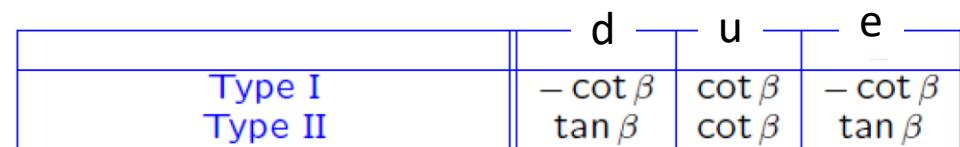
# 新物理の候補 拡張ヒッグス模型 → 村さん

- ヒッグスセクター
  - 標準模型では物理的なヒッグス粒子は1つしかない
    - Higgs doublet が1つ(自由度4つ、3つはweak bosonの縦波になる)
  - 新物理模型ではヒッグスセクターが拡張される場合が多い
- Two Higgs Doublet Model (2HDM)
  - Doublet が2つある ( $\phi_1, \phi_2$ ) 自由度8つ
  - 物理的なヒッグス粒子は 5つある :  $h, H, A, H^+, H^-$ 
    - $h$ は SM like Higgs 125GeV
    - そのほかの4つは縮退  $h$ より重い  $m_A$
  - 二つの Higgs doublet の真空期待値の比を  $\tan \beta$
  - 両方の Doublet が fermion に結合しない
    - B中間子に重要なのは type-II
      - $\tan \beta > 3$  from LEP
    - $b$ と $\tau$ で結合が大きくなる



$$v_1^2 + v_2^2 = v^2 \simeq (246 \text{ GeV})^2$$

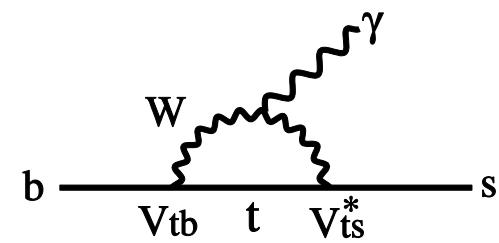
$$\tan \beta = \frac{v_2}{v_1}$$



# B中間子稀崩壊での新物理探索

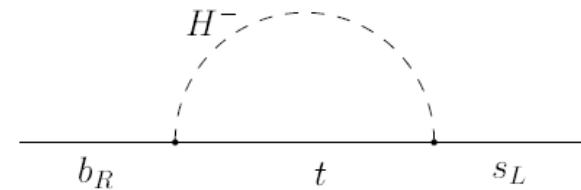
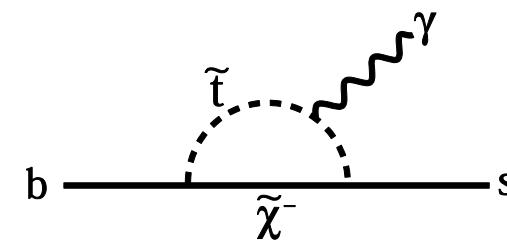
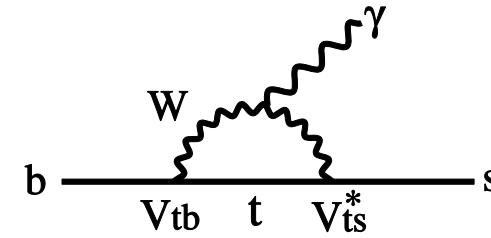
- 崩壊モードが多いので、私の趣味(新物理が関わりそうな)で以下の説明をします
  - $b \rightarrow s\gamma$
  - $b \rightarrow s l^+ l^- (l=e, \mu)$
  - $b \rightarrow s \nu \nu$
  - $B \rightarrow \tau \nu$
- 他にも重要なモードはあります

$b \rightarrow s\gamma$



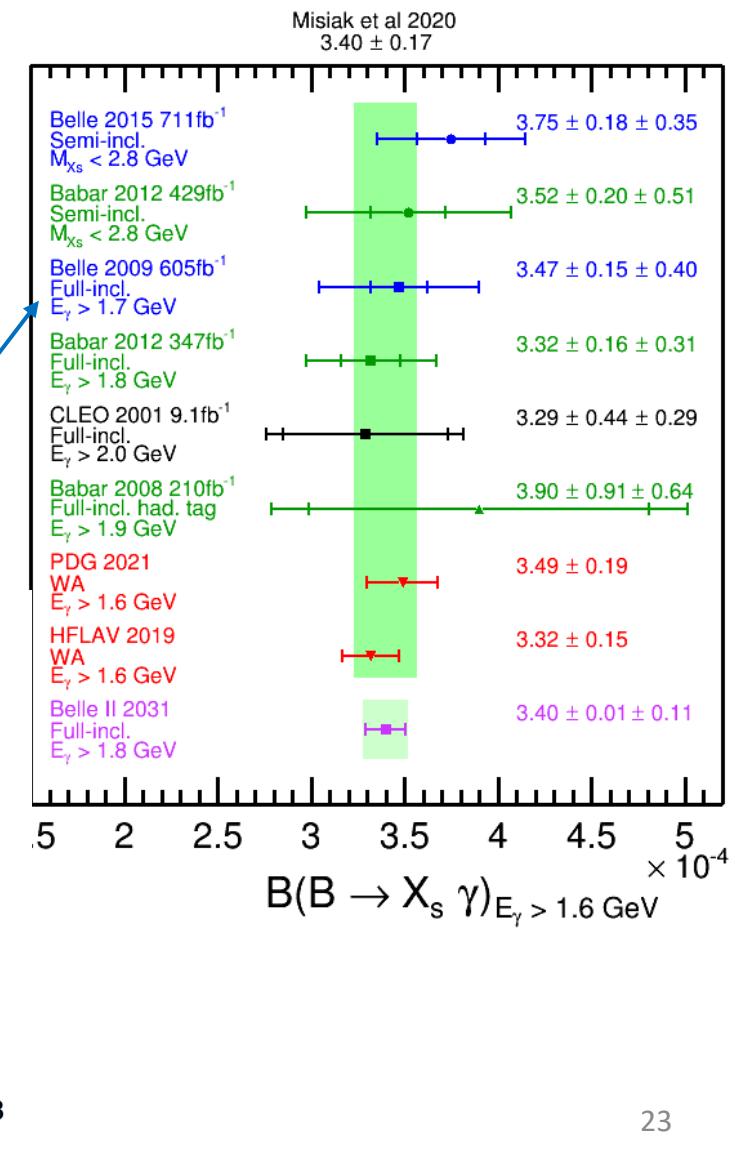
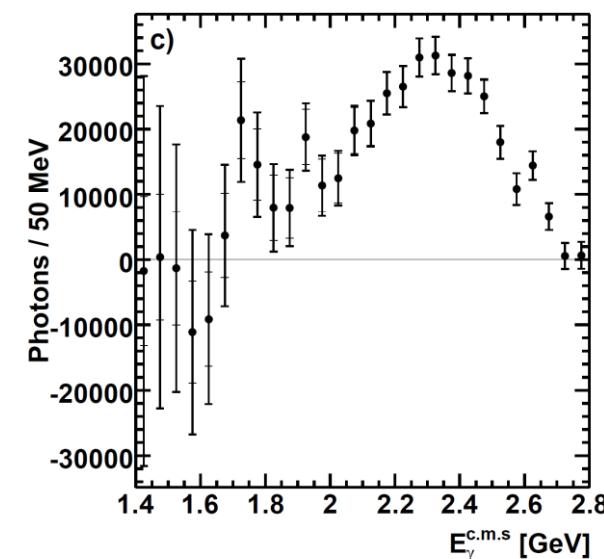
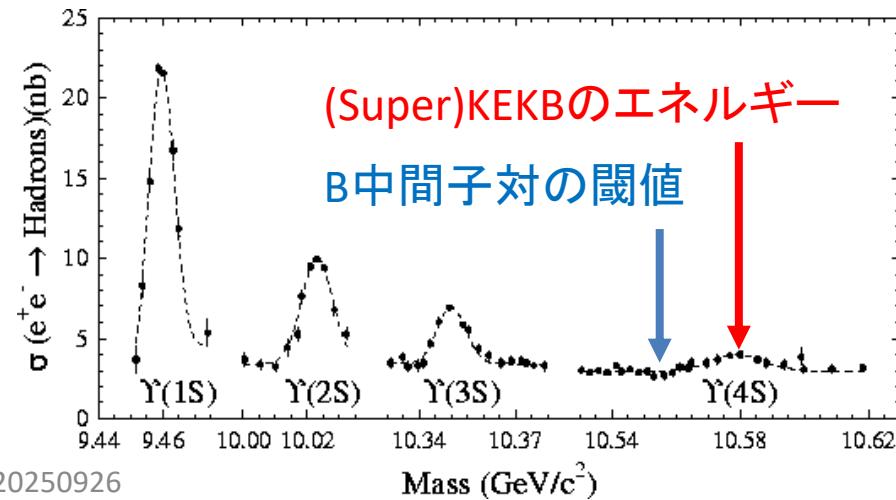
# $b \rightarrow s\gamma$ による新物理探索

- Loop の中に SUSY particle, charged Higgs,  $W_R$ などの未知の粒子が周る可能性
- 以下の測定量が New Physics に sensitive
  - 崩壊分岐比
  - CP の破れ
  - Photon の偏極
- Hadron Collider では難しい
  - Photon BG が多い
    - しかし  $K^+\pi^-\gamma$  ぐらいだったら出来る
    - 重要な inclusive 解析は出来ない



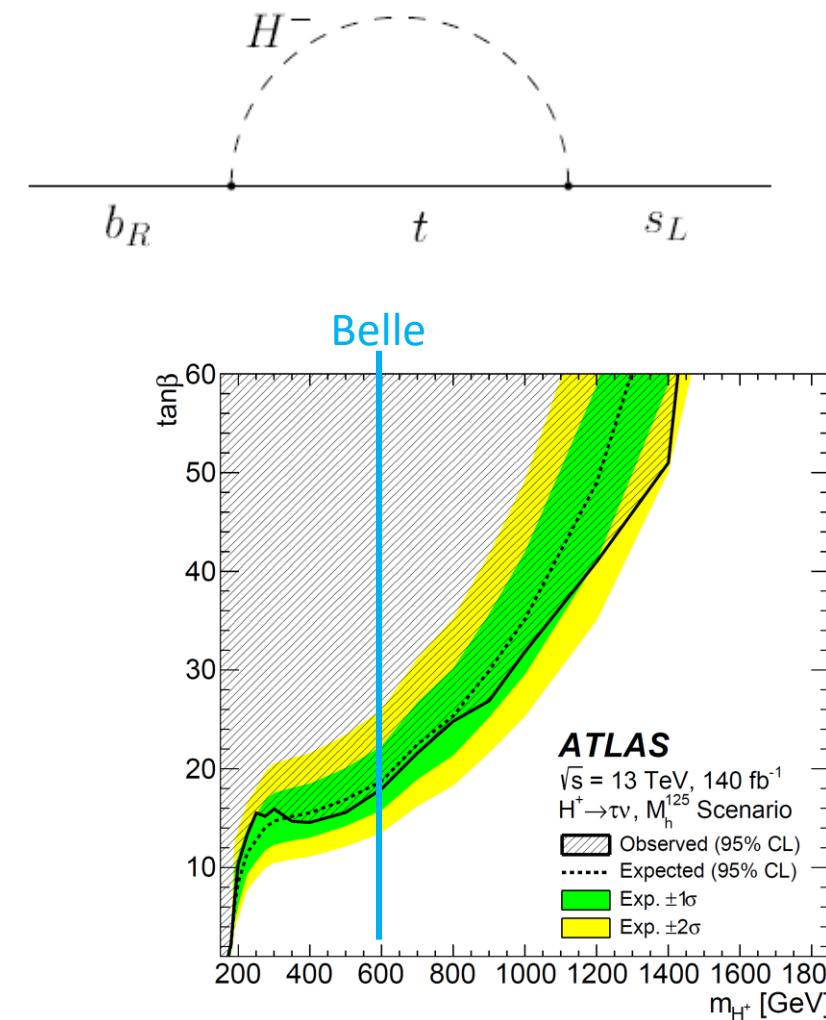
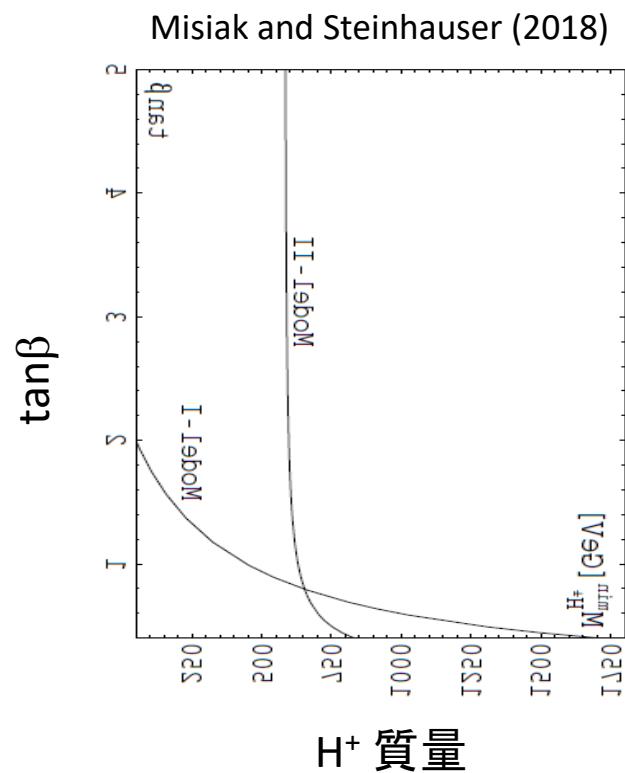
# 現在の $B \rightarrow X_s \gamma$ 崩壊分岐比測定

- Inclusive decay  $B \rightarrow X_s \gamma$  の崩壊分岐比は new physics に敏感
  - Exp PDG WA :  $(3.49 \pm 0.19) \times 10^{-4}$
  - Theory :  $(3.40 \pm 0.17) \times 10^{-4}$
  - Exclusive は QCD の不定性が大きいため予言能力はあまりない
- 測定は hard な photon 1つを探す
  - $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}\gamma$  background は off-resonance data で subtract
  - BB background は  $\pi^0(\eta) \rightarrow \gamma\gamma$  が主。data driven で subtract
  - $b \rightarrow d$  は理論を仮定し subtract



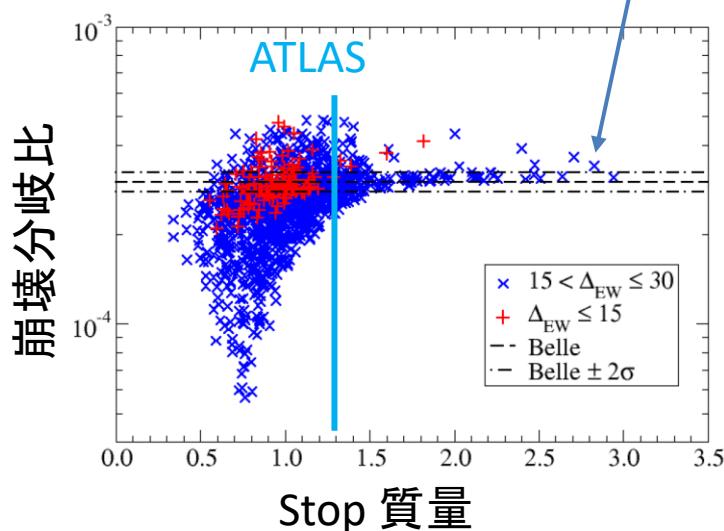
# 崩壊分岐比から2HDMへの制限

- 現在の新物理への制限
  - Two Higgs Doublet 模型 type-II の荷電ヒッグスト
    - 標準模型では Higgs Doublet は1つ
  - Belle :  $M_H > 600\text{GeV}$

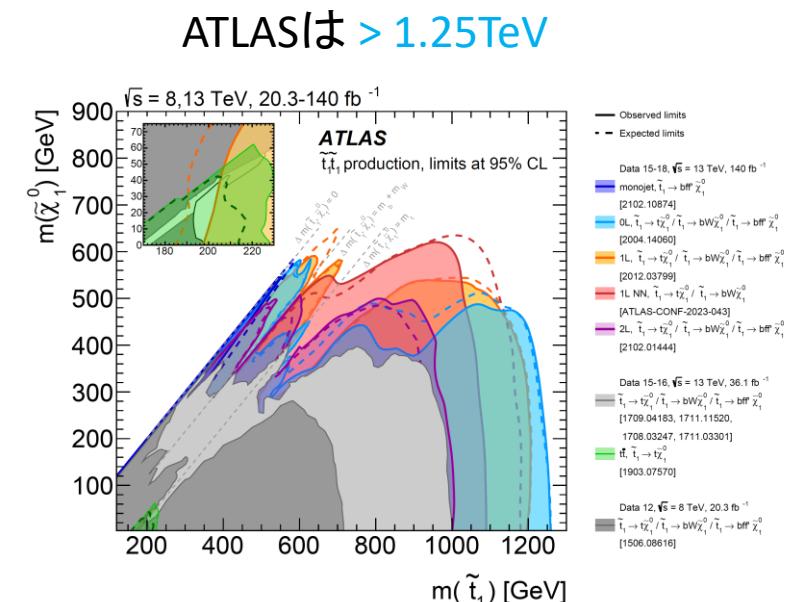
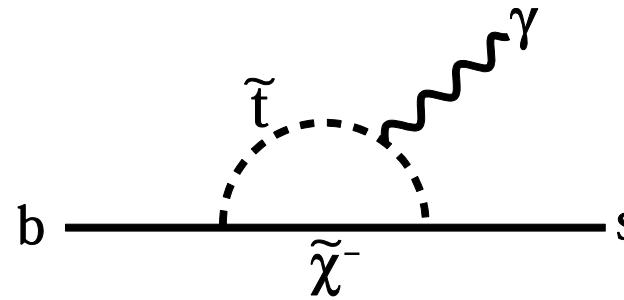


# 崩壊分岐比からSUSYへの制限

- 現在の新物理への制限
  - SUSYでの top superpartner (stop)
    - LHC > 1.4TeV
  - パラメータスペースに寄るが、**2.8TeV stop** も排除
- Belle : パラメータスペース依存が強い
  - 他の新物理が効いていたら全く排除領域は変わり得る
- ATLAS : パラメータスペース依存が少ない
  - Decay mode 依存がある



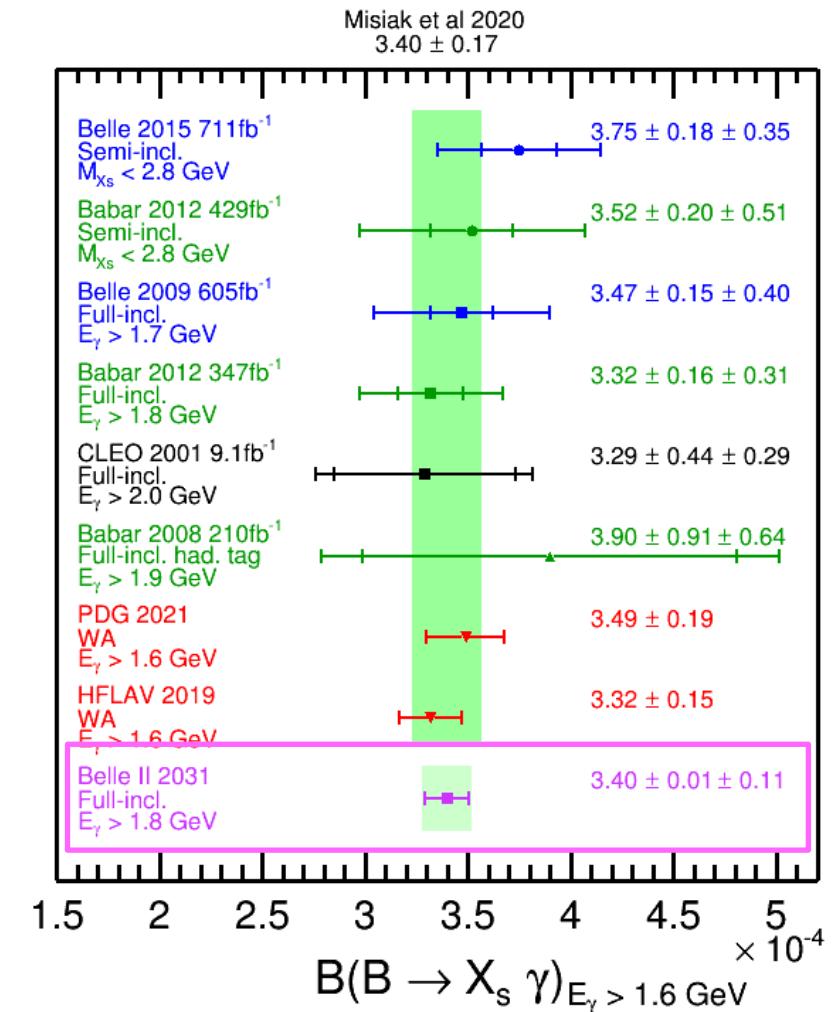
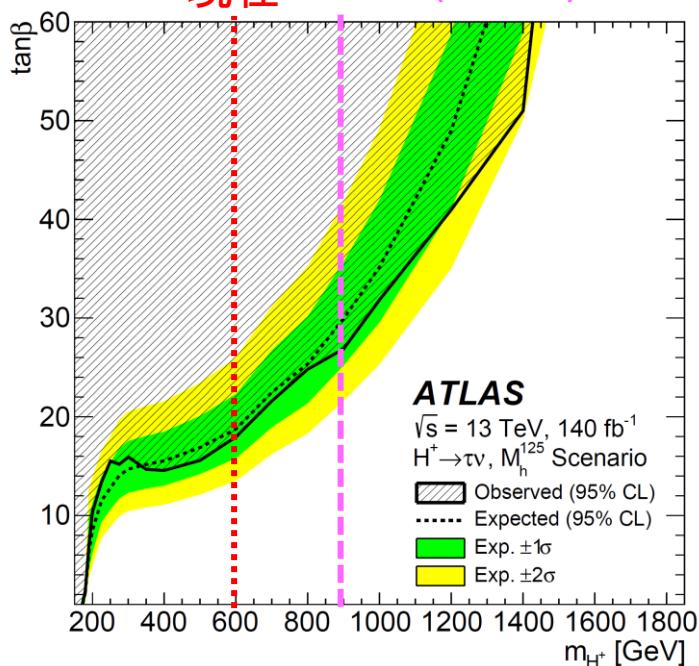
20250926



25

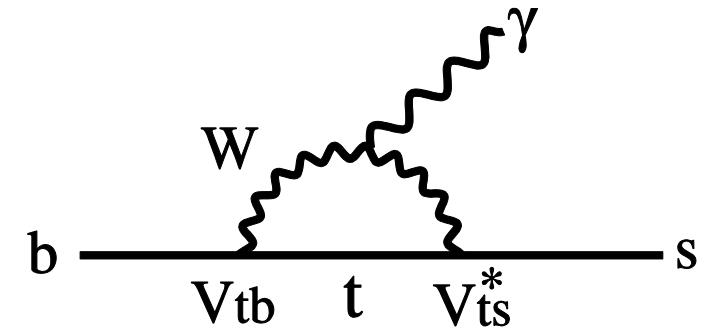
# 将来の崩壊分岐比測定

- 測定精度の改善
  - 系統誤差が支配的だが Belle II の大量のデータを用いて削減
  - 実験WA 5% → Belle II 3% (WA 2.6%)
  - 理論 5% → 3.5%
- 2HDMでの荷電ヒッグス
  - $M_H > 900\text{GeV}$



# $B \rightarrow X_s \gamma$ でのCPV

- 基本的にはPenguin diagramしかないので干渉が起きない
  - ただし penguin だが photon じゃなく gluon を放出して spectator に吸収させ、spectator から photon を出す diagram はある
- $V_{ts}$  はほぼ real。
  - 弱位相は  $O(\lambda^4)$  で抑制
- 直接的 CPV  $A_{CP}$  はほぼ 0 である。



$$\begin{aligned}
 V_{CKM} &= \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)
 \end{aligned}$$

# $B \rightarrow X_s \gamma$ での CPV

- $A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma)$  は新物理の CPV に敏感だが、すでに理論誤差が主要

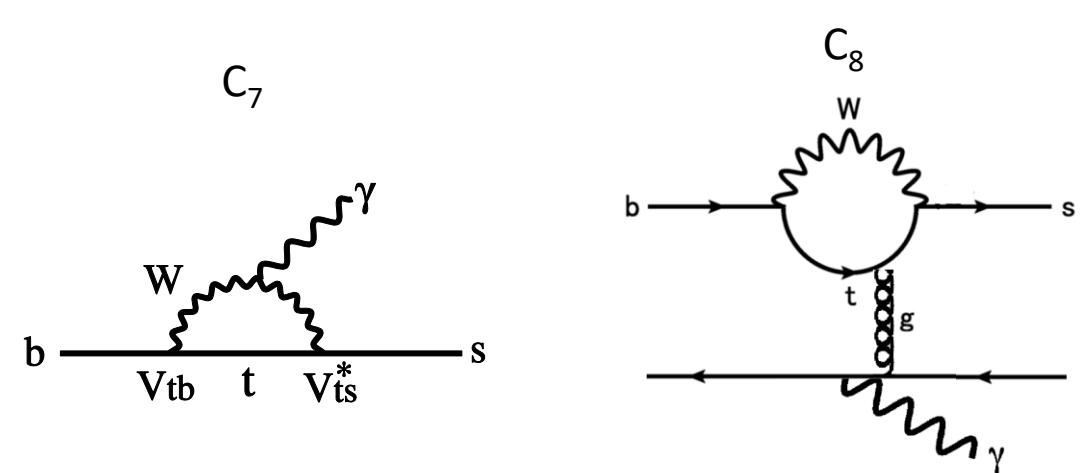
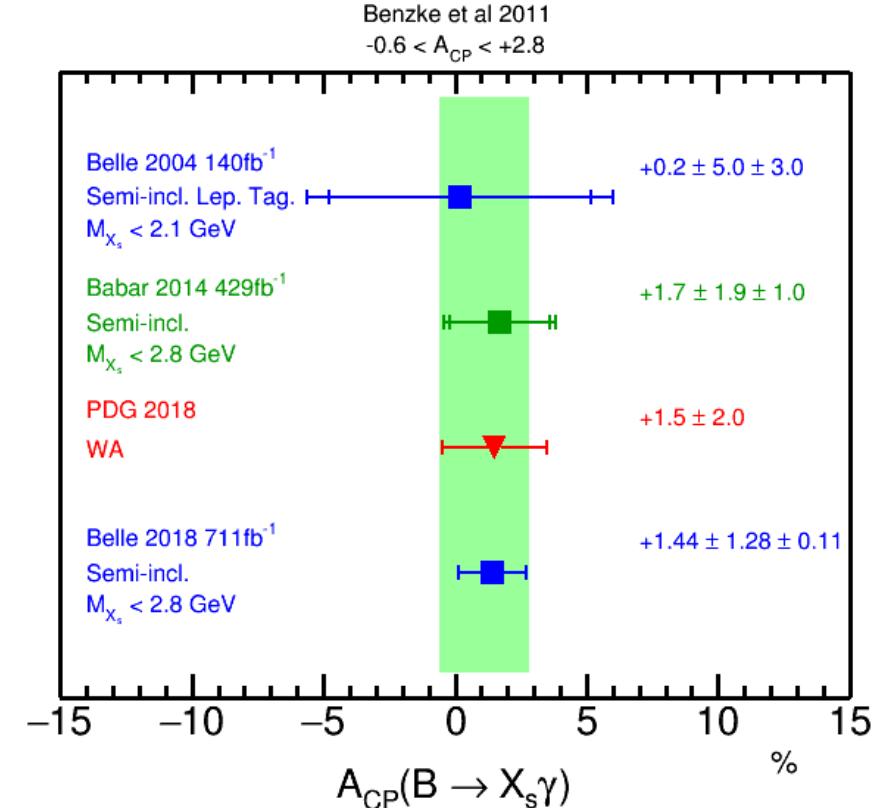
$$A_{CP} = \frac{\Gamma(\bar{B} \rightarrow \bar{X}_s \gamma) - \Gamma(B \rightarrow X_s \gamma)}{\Gamma(\bar{B} \rightarrow \bar{X}_s \gamma) + \Gamma(B \rightarrow X_s \gamma)}$$

- 新たな変数  $\Delta A_{CP}$  は SM で null test になり、 $A_{CP}$  より新物理に敏感  
( $b \rightarrow s$  gluon の利用)

- Spectator に gluon が吸収され、spectator から photon を放出
- 電荷が u quark か d quark で異なるので  $B^+$  と  $B^0$  で  $A_{CP}$  の値が異なる

$$\begin{aligned} \Delta A_{CP} &= A_{CP}(B^+ \rightarrow X_s^+ \gamma) - A_{CP}(B^0 \rightarrow X_s^0 \gamma) \\ &= 4\pi^2 \alpha_s \frac{\tilde{\Lambda}_{78}}{m_b} \text{Im} \left( \frac{C_8}{C_7} \right), \\ &\approx 0.12 \left( \frac{\tilde{\Lambda}_{78}}{100 \text{ MeV}} \right) \text{Im} \left( \frac{C_8}{C_7} \right), \end{aligned}$$

M. Benzke, S. J. Lee, M. Neubert, G. Paz, JHEP 08 (2010) 099



# $\Delta A_{CP}$ ( $B \rightarrow X_s \gamma$ ) の測定

- 2018年にBelleで初めての測定を行った
  - $B \rightarrow s$ だけを捕まえたい( $b \rightarrow d$ が背景事象)ので Sum-of-exclusive 法を使った
    - 38個の  $X_s$  の exclusive mode を再構成

$$\Delta A_{CP} = [+3.69 \pm 2.65(\text{stat.}) \pm 0.76(\text{syst.})]\%$$

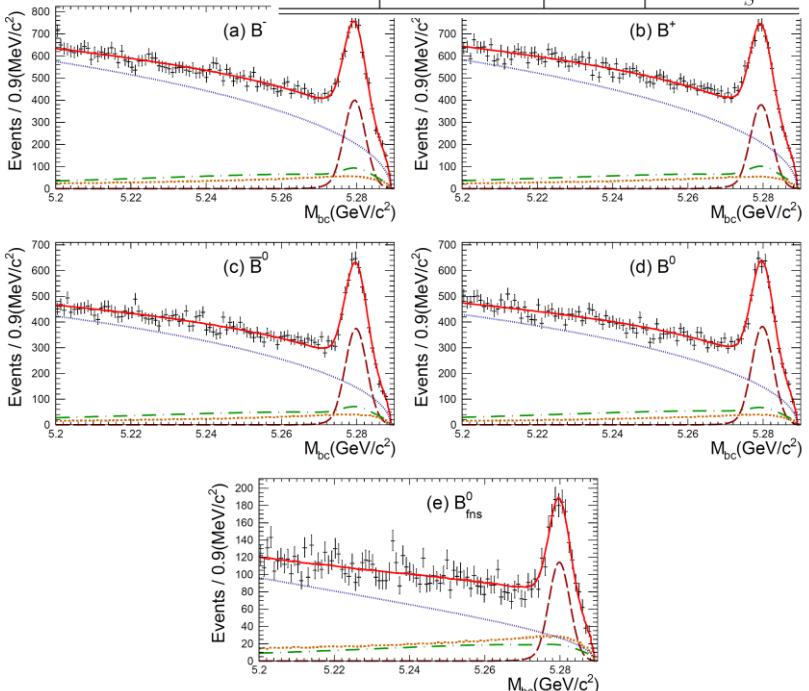
Watanuki, Ishikawa et al, PRD 99, 032012 (2019)

- 系統誤差は reducible → Belle II でさらなる改善が可能 0.3%

Observables	Belle $0.71 \text{ ab}^{-1}$	Belle II $5 \text{ ab}^{-1}$	Belle II $50 \text{ ab}^{-1}$
$\Delta A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma)_{\text{sum-of-ex}}$	2.7%	0.98%	0.30%

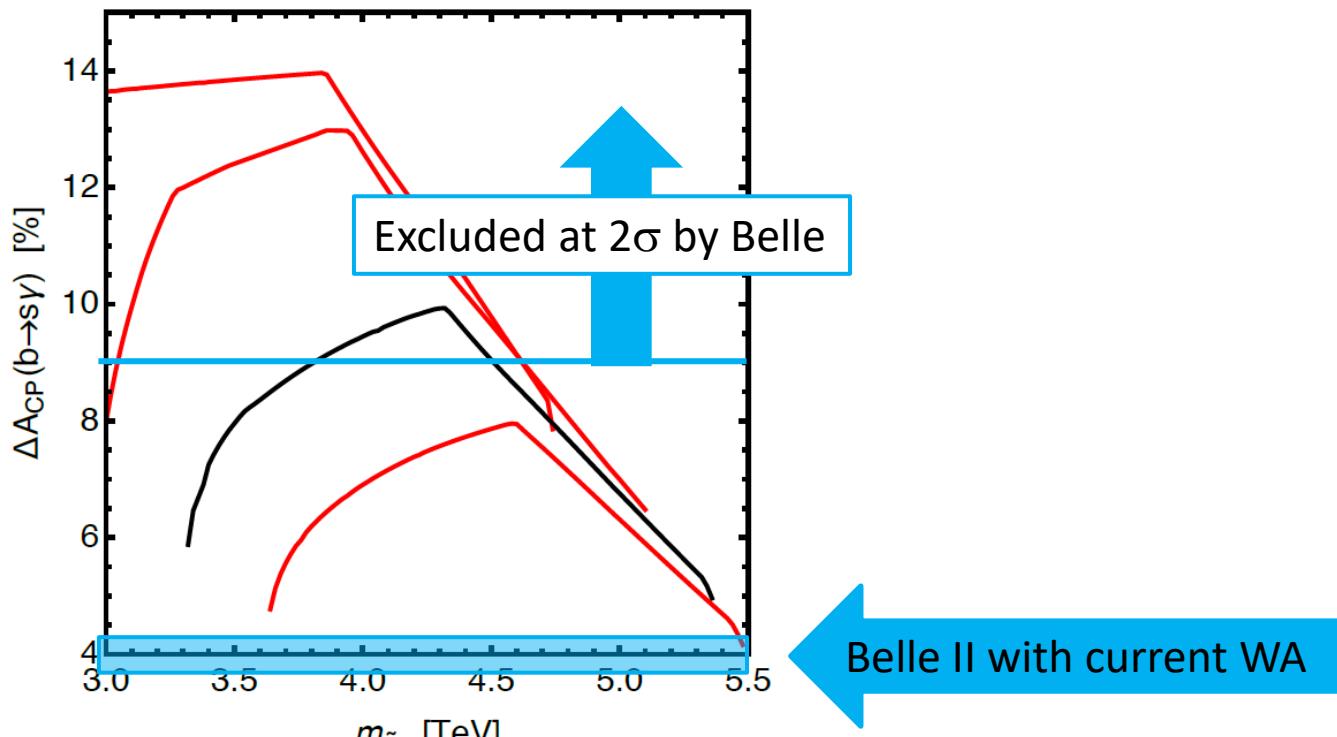
Belle II Physics book 1808.10567

Mode ID	Final state	Mode ID	Final state
1	$K^+ \pi^-$	20	$K_S^0 \pi^+ \pi^0 \pi^0$
2	$K_S^0 \pi^+$	21	$K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$
3	$K^+ \pi^0$	22*	$K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$
4*	$K_S^0 \pi^0$	23	$K^+ \eta$
5	$K^+ \pi^+ \pi^-$	24*	$K_S^0 \eta$
6*	$K_S^0 \pi^+ \pi^-$	25	$K^+ \eta \pi^-$
7	$K^+ \pi^- \pi^0$	26	$K_S^0 \eta \pi^+$
8	$K_S^0 \pi^+ \pi^0$	27	$K^+ \eta \pi^0$
9	$K^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$	28*	$K_S^0 \eta \pi^0$
10	$K_S^0 \pi^+ \pi^+ \pi^-$	29	$K^+ \eta \pi^+ \pi^-$
11	$K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$	30*	$K_S^0 \eta \pi^+ \pi^-$
12*	$K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^0$	31	$K^+ \eta \pi^- \pi^0$
13	$K^+ \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$	32	$K_S^0 \eta \pi^+ \pi^0$
14*	$K_S^0 \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$	33	$K^+ K^+ K^-$
15	$K^+ \pi^+ \pi^- \pi^- \pi^0$	34*	$K^+ K^- K_S^0$
16	$K_S^0 \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$	35	$K^+ K^+ K^- \pi^-$
17	$K^+ \pi^0 \pi^0$	36	$K^+ K^- K_S^0 \pi^+$
18*	$K_S^0 \pi^0 \pi^0$	37	$K^+ K^+ K^- \pi^0$
19	$K^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$	38*	$K^+ K^- K_S^0 \pi^0$



# $\Delta A_{CP}(B \rightarrow X_s \gamma)$ とSUSYへの制限

- SUSYのパラメータースペースへの制限
    - Squark mass 4.5TeVまで
    - あくまで SUSY で CP phase がある模型
    - Gluino mediated EWP which explains  $\varepsilon'/\varepsilon$  from CPV trilinear couplings
- 現在この模型は $\varepsilon'/\varepsilon$ で排除されているが



# $\Delta A_{CP}$ と電弱バリオジェネシス

- General 2HDM (no  $Z_2$  symmetry) だと additional な湯川結合  $\rho$ 。自己結合は自由に取れる

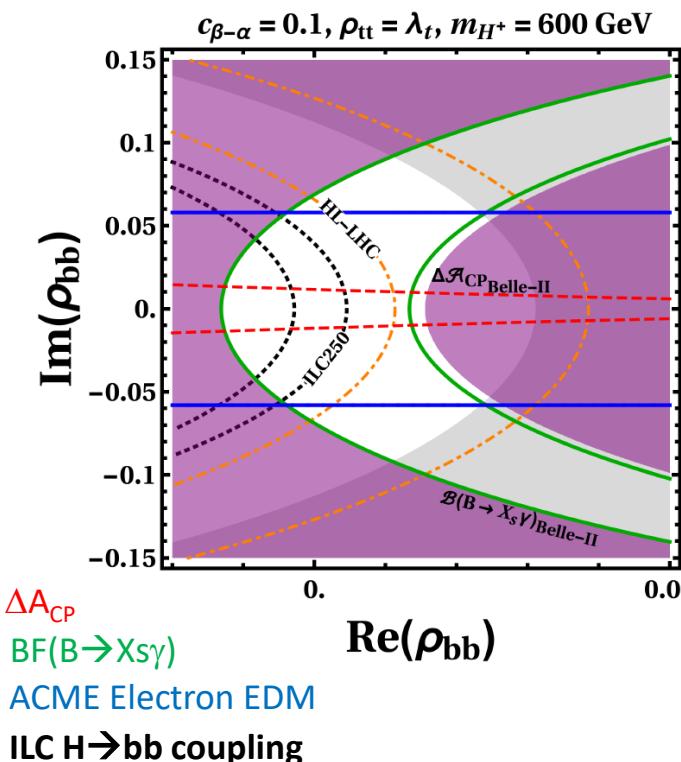
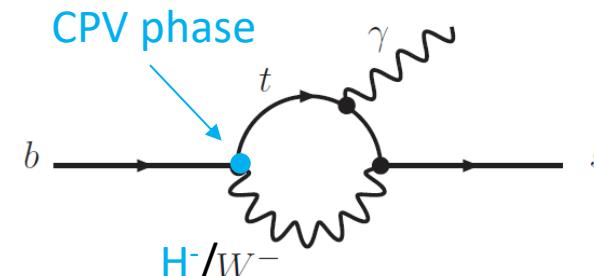
$$y_{hij}^f = \frac{\lambda_i^f}{\sqrt{2}} \delta_{ij} s_{\beta-\alpha} + \frac{\rho_{ij}^f}{\sqrt{2}} c_{\beta-\alpha},$$

$$y_{Hij}^f = \frac{\lambda_i^f}{\sqrt{2}} \delta_{ij} c_{\beta-\alpha} - \frac{\rho_{ij}^f}{\sqrt{2}} s_{\beta-\alpha},$$

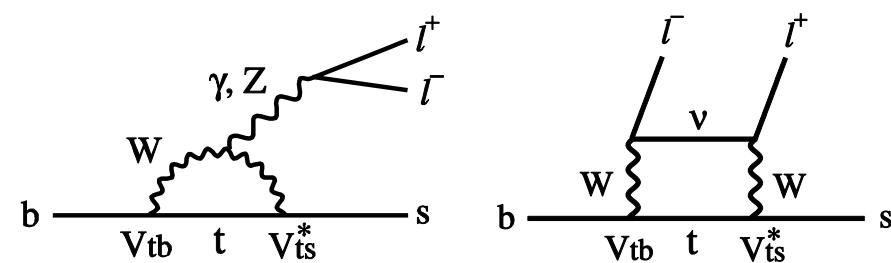
$$y_{Aij}^f = \mp \frac{i \rho_{ij}^f}{\sqrt{2}},$$

- $\rho$ に複素位相があれば CPV の種になり、電弱バリオジェネシスを条件の一つを満たす
- $\Delta A_{CP}$  は  $\rho_{bb}$  の位相に敏感である。

- ILC の  $H \rightarrow bb$  coupling と ACME/JIRA の electron EDM と合わせて  $\rho_{bb}$  を調べることができる
  - Belle  $\Delta A_{CP}$ , ACME/CNS EDM :  $\text{Im}(\rho_{bb})$
  - Belle BF :  $|\rho_{bb} + x|$
  - ILC :  $|\rho_{bb}|$



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



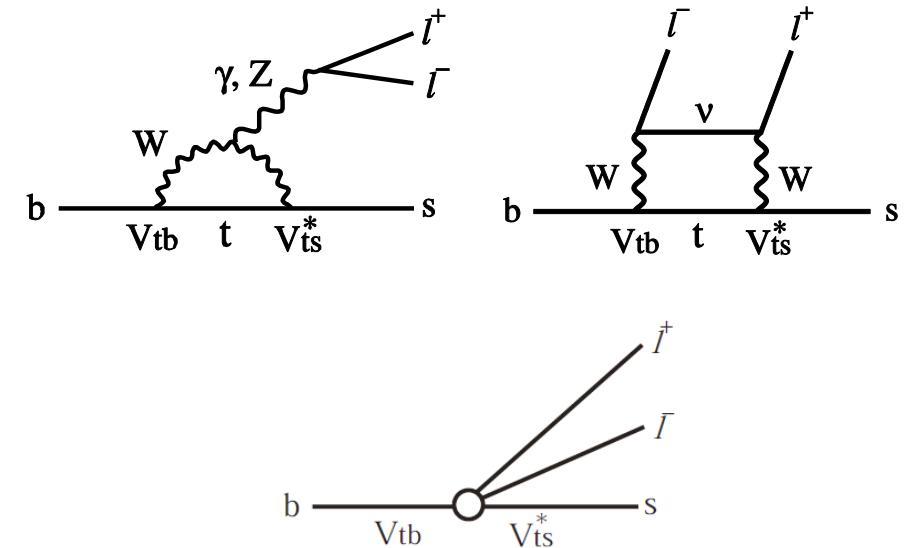
# 有効場理論 for $b \rightarrow s l + l^-$

- $b \rightarrow s l l$  では3つの Wilson 系数がある

- $C_7 : b \rightarrow s \gamma$
- $C_9 : b \rightarrow s l l$  with vector current
- $C_{10} : b \rightarrow s l l$  with axial vector current
- 新物理は WC を変える

- もし新物理があれば

- 標準模型の値からずれる
  - $C_7^{\text{SM}} \sim -0.3$
  - $C_9^{\text{SM}} \sim 4$
  - $C_{10}^{\text{SM}} \sim -4$
- 新しいオペレーターが出てくる
  - スカラー係数が出てくる ( $C_s$  and  $C_p$ )
  - 右巻カウンター係数が出てくる ( $C'_i$ )
  - 虚数の係数が出てくる  $\text{Im}(C_i)$



$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \sum_{i=1}^{10} C_i(\mu) \mathcal{O}_i(\mu)$$

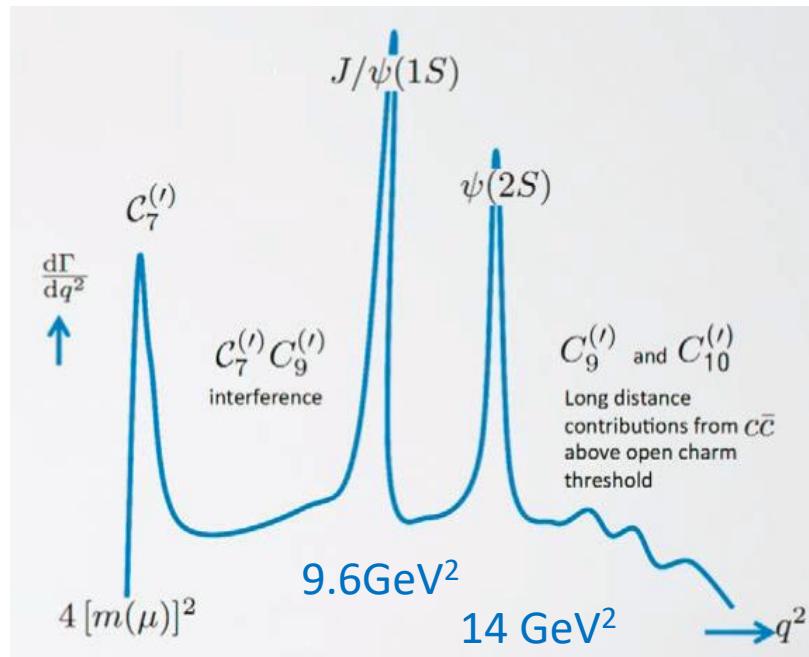
$$\mathcal{O}_7 = \frac{e}{16\pi^2} m_b (\bar{s} \sigma^{\mu\nu} P_R b) F_{\mu\nu},$$

$$\mathcal{O}_9 = \frac{e^2}{16\pi^2} (\bar{s} \gamma^\mu P_L b) (\bar{\ell} \gamma_\mu \ell),$$

$$\mathcal{O}_{10} = \frac{e^2}{16\pi^2} (\bar{s} \gamma^\mu P_L b) (\bar{\ell} \gamma_\mu \gamma_5 \ell)$$

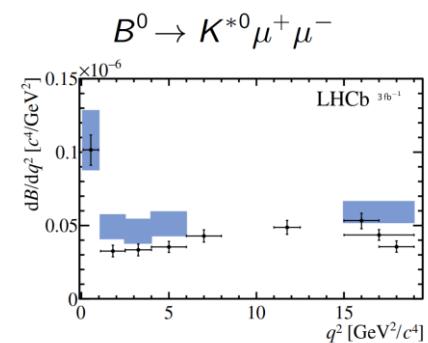
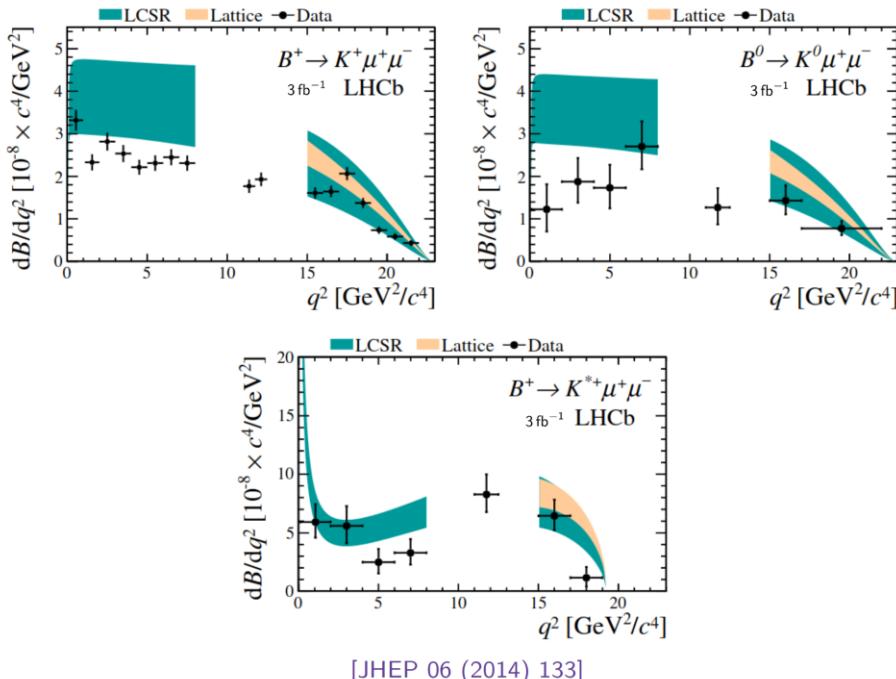
# $q^2$ distribution for $b \rightarrow s l + l^-$

- $q^2$  : dilepton の不変質量の2乗
- $C_7$  は low  $q^2$ 
  - photon pole  $1/q^2$
- $B \rightarrow J/\psi(l+l^-) K^*$  (tree level process) が干渉を起こす  $b \rightarrow s l + l^-$ 
  - この $q^2$ 領域は一般的に排除する
  - $\psi(2S)$ より上の charmonium は幅が広く lepton への崩壊が抑制されてるので干渉が大きい
- $C_9$  (V) と  $C_{10}$  (A) の影響は $q^2$ 全体
- Vector ( $C_7, C_9$ ) と Axial vector ( $C_{10}$ ) の干渉が  $A_{FB}$ (lepton の前後非対称性)を作る

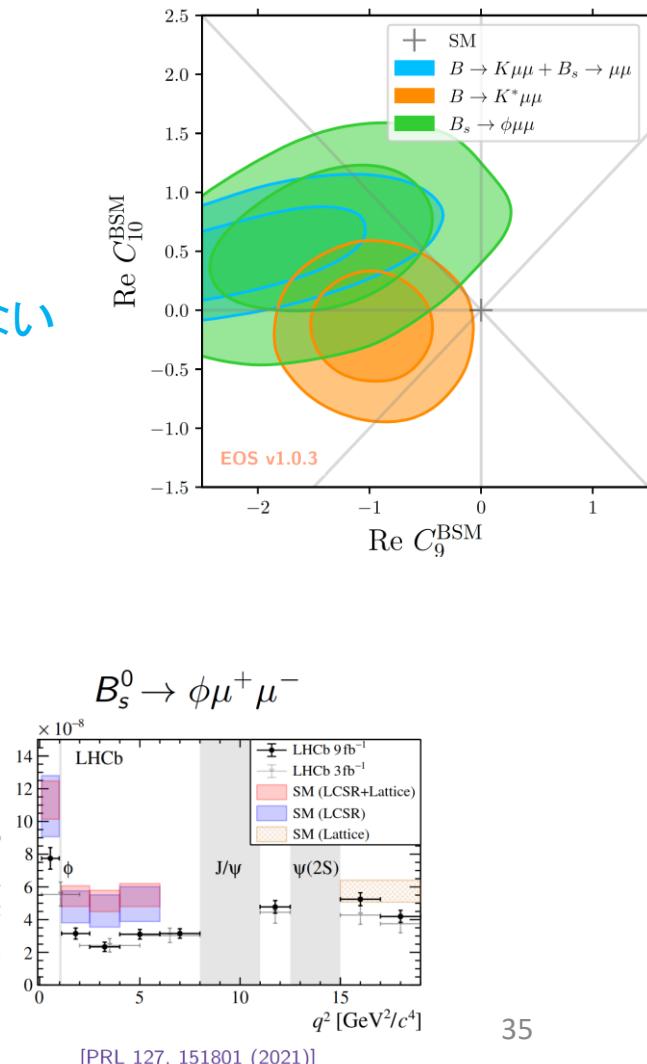


# Exclusive $b \rightarrow s l^+ l^-$ でのアノマリー@LHCb

- 複数のモードで BF の  $q^2$  依存性がSM予言より小さく出ている
  - 単純な combination をとると  $5\sigma$ 以上のアノマリー
  - $C_9$  にズレ  $C_9^{\text{NP}} \sim -1$  (25%)
- 新物理か？それとも理論予言 (form factor) を間違えている
  - Lattice QCD の人に聞くと  $B \rightarrow K$  form factor は solid
  - Inclusive  $b \rightarrow s l^+ l^-$  BF の測定は FF の影響がないため重要かつ Belle II でしかできない

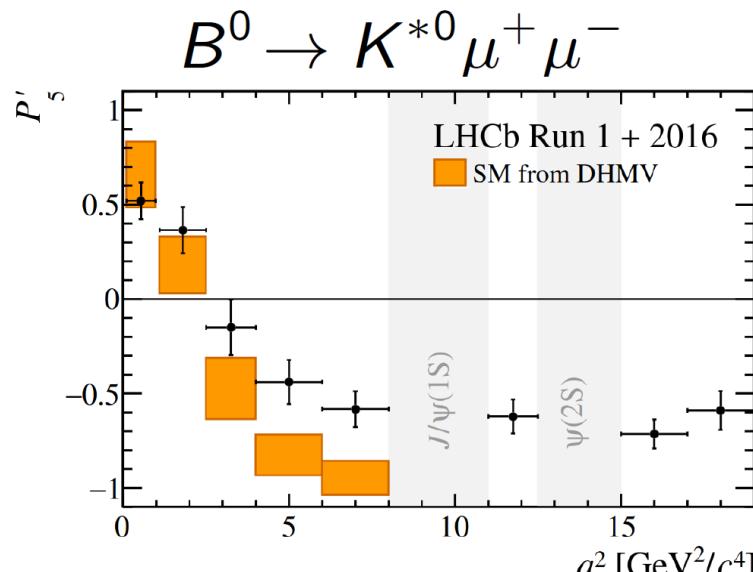


[JHEP 11 (2016) 047][JHEP 04 (2017) 142]



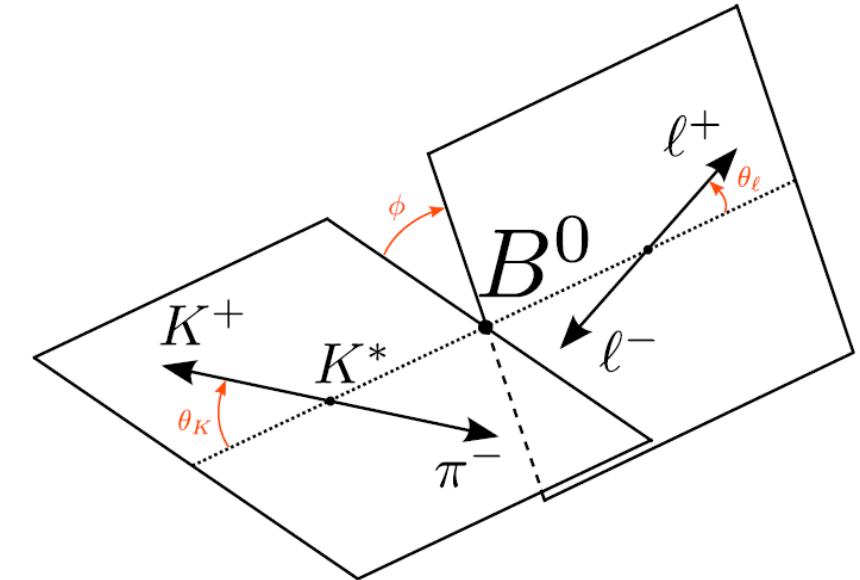
# $P_5'$ のアノマリー

- 角分布の係数
- $q^2=[4,8]\text{GeV}^2$ にSM予言からのズレが見える
  - $C_9$ のズレ
  - 新物理?
  - QCD effect? Charm loop?

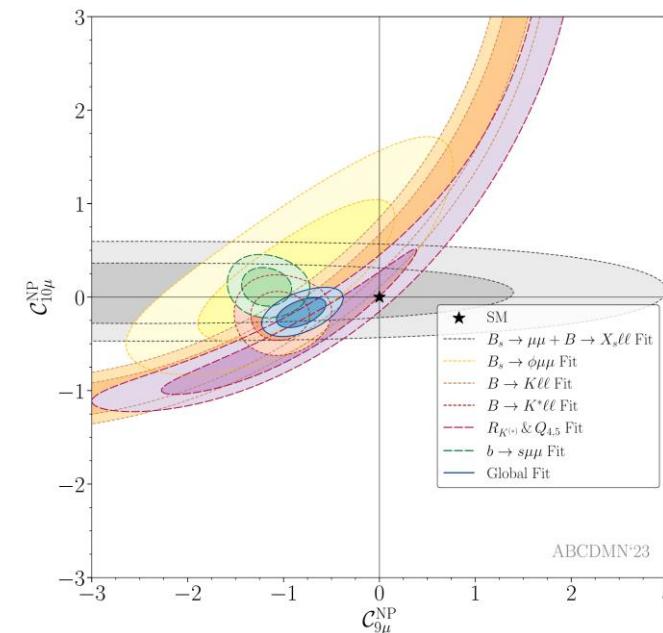


[PRL 125, 011802 (2020)]

20250926



Alguero et al., 2304.07330



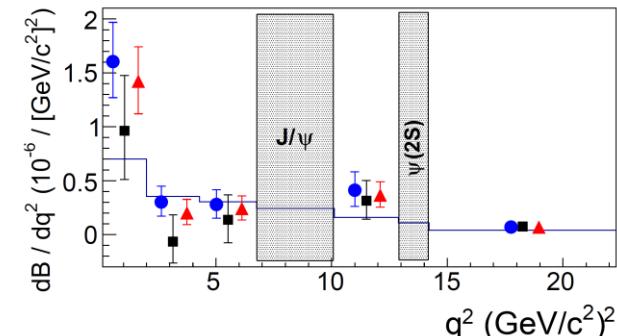
36

# Inclusive $b \rightarrow s l^+ l^-$ BF/ $q^2$ distribution

- Inclusive BF は理論誤差が小さい
  - Belle IIでしか出来ない
  - 測定は大変

$$\frac{d\Gamma(b \rightarrow s \ell^+ \ell^-)}{d\hat{s}} = \left(\frac{\alpha_{em}}{4\pi}\right)^2 \frac{G_F^2 m_b^5 |V_{ts}^* V_{tb}|^2}{48\pi^3} (1-\hat{s})^2 \times \left[ (1+2\hat{s}) \left( |C_9^{\text{eff}}|^2 + |C_{10}^{\text{eff}}|^2 \right) + 4 \left( 1 + \frac{2}{\hat{s}} \right) |C_7^{\text{eff}}|^2 + 12 \text{Re}(C_7^{\text{eff}} C_9^{\text{eff}*}) \right]$$

- 過去には Babar/Belle が  $400/140 \text{fb}^{-1}$  で測定
  - Whole  $q^2$  でも誤差は大きい ~20%
- Belle II では  $q^2$  binning にもよるが  $15 \text{ab}^{-1}$  ぐらいで系統誤差 dominant になる



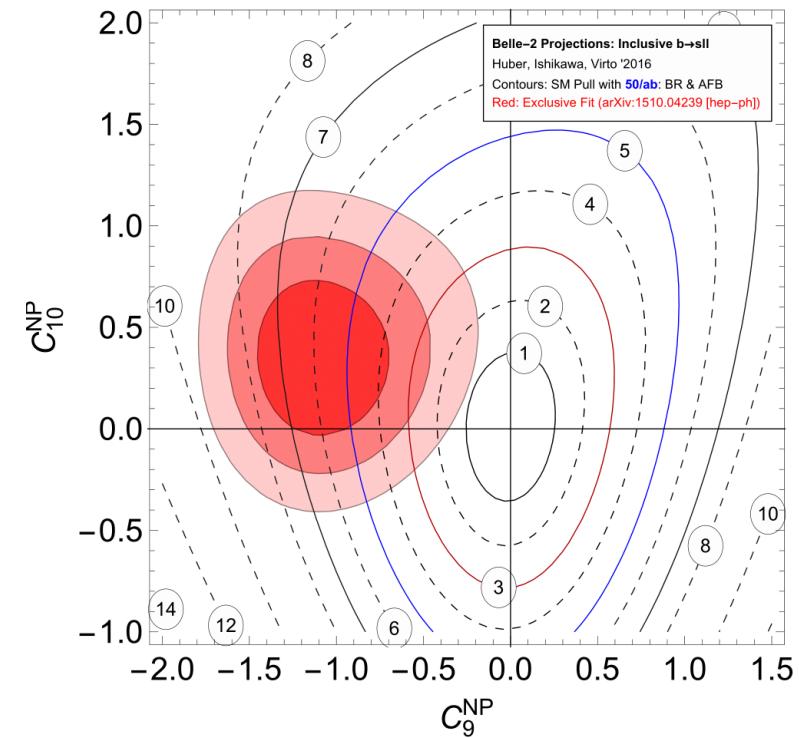
$\Gamma(s \ell^+ \ell^-)/\Gamma_{\text{total}}$

Test for  $\Delta B = 1$  weak neutral current.

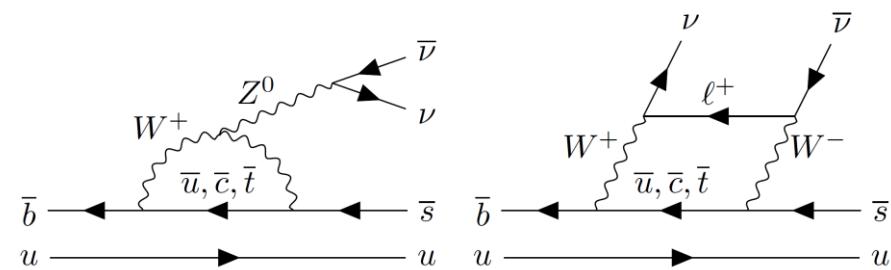
VALUE (units $10^{-6}$ )	DOCUMENT ID	TECN
<b>5.8 ± 1.3 OUR AVERAGE</b>	Error includes scale factor of 1.8.	
$6.73^{+0.70}_{-0.64}{}^{+0.60}_{-0.56}$	1 LEES	14D BABR
$4.11 \pm 0.83 {}^{+0.85}_{-0.81}$	2 IWASAKI	05 BELL

# Inclusive BFと $A_{FB}$ によるWCへの制限

- WCへの制限
  - 赤が exclusive WA
  - 線が inclusive で  $50\text{ab}^{-1}$  を仮定
    - exclusive が間違っていたらそれを指摘できる
    - Exclusive がっていたらそれをサポートする



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



# B → Kνν

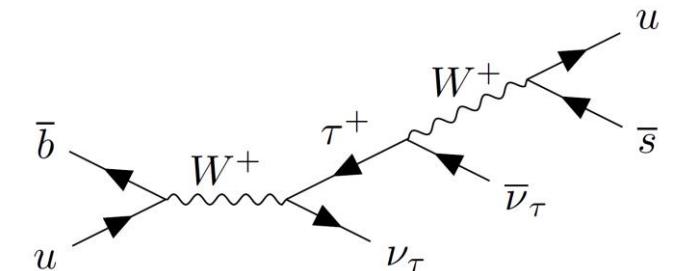
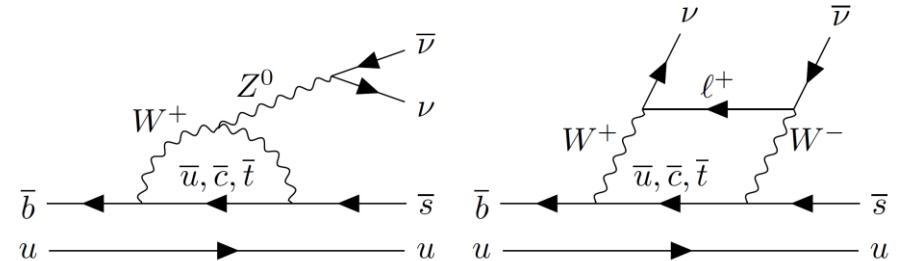
- $B \rightarrow K l^+ l^-$  の lepton を  $\nu$  に変えた崩壊
  - とてもクリーン
  - Photon と結合しない
  - J/psi とも結合しない
  - Form factorは lattice QCD で計算可能

$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}) = (5.58 \pm 0.37) \times 10^{-6}$$

Long distance contribution

$$(0.61 \pm 0.06) \times 10^{-6}$$

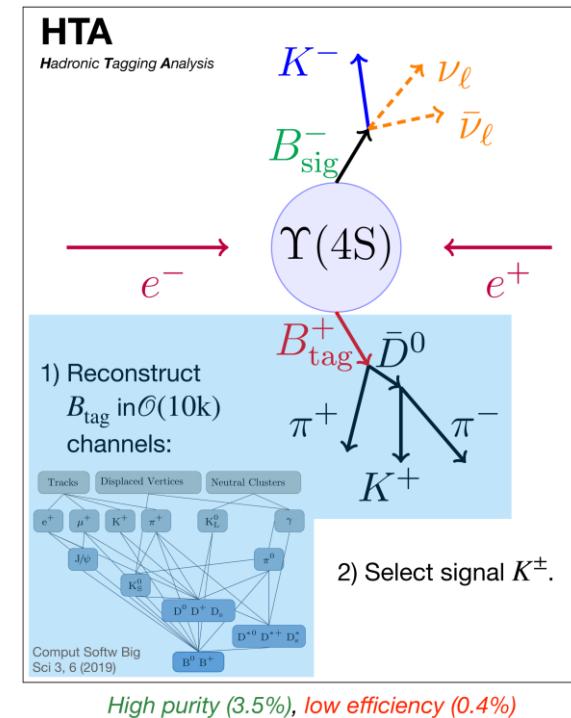
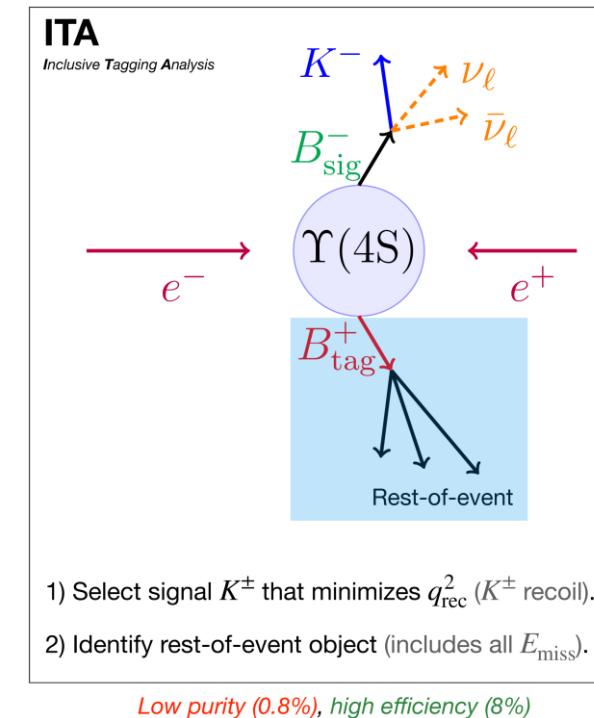
- $B \rightarrow s l^+ l^-$  での  $C_9$  のズレと同じアノマリーが見えるか？
- ニュートリノじゃなくて暗黒物質が飛ぶ可能性も
- 現状 Belle II でしか探索出来ない



Long distance contribution

# B → Kvv 解析

- 2つのB tagging方法
  - Inclusive tagging analysis (ITA)
    - Signal K 以外を RoE として tagging 解析
  - Hadronic tagging analysis (HTA)
    - Rest of Event (RoE) は  $B_{\text{sig}}$  と  $B_{\text{tag}}$  以外



# B $\rightarrow$ Kvv 結果

ITA

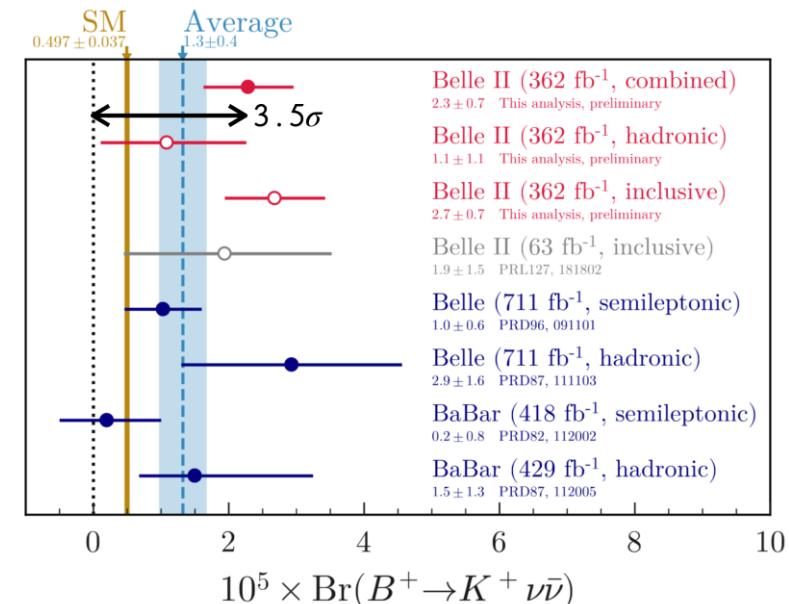
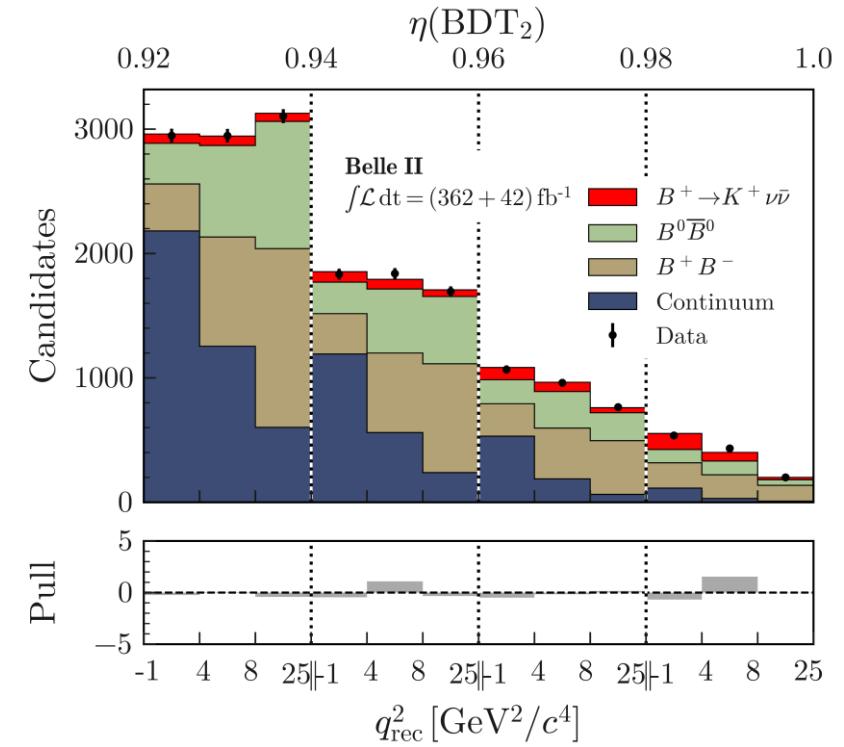
- $\mathcal{B} = [2.7 \pm 0.5 \pm 0.5] \times 10^{-5}$
- Significance of the excess  $3.5\sigma$
- $2.9\sigma$  deviation from SM
- **3.5 $\sigma$  の証拠**
  - 2.7 $\sigma$  標準模型予言からズレている

$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}) = [2.3 \pm 0.5(\text{stat})^{+0.5}_{-0.4}(\text{syst})] \times 10^{-5}$$

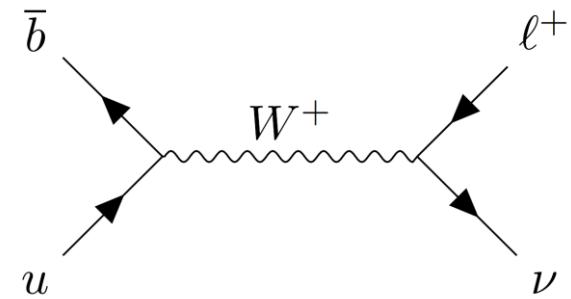
- Leptoquark?
- Dark matter?
- 本当であれば a few ab $^{-1}$  で発見できる

HTA

- $\mathcal{B} = [1.1^{+0.9+0.8}_{-0.8-0.5}] \times 10^{-5}$
- Significance of the excess  $1.1\sigma$
- $0.6\sigma$  deviation from SM



$B \rightarrow \tau \nu$



# 標準模型でのB中間子レプトニック崩壊

- 標準模型において  $B^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell$  崩壊は消滅ダイアグラムで起こり、崩壊分岐比は以下のようにかける

$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \ell^+ \nu_\ell) = \frac{G_F^2}{8\pi} m_B m_\ell^2 \left(1 - \frac{m_\ell^2}{m_B^2}\right)^2 f_B^2 |V_{ub}|^2 \tau_B$$

ヘルシティー抑制  
 $\tau > \mu > e$

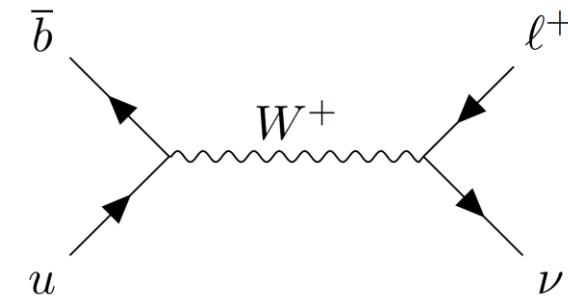
崩壊定数による抑制  
 Lattice QCD で高精度で計算  
 $f_B = 190.0 \pm 1.3 \text{ MeV (HPQCD)}$

CKM行列要素からの抑制  
 $|V_{ub}| \sim 4 \times 10^{-3}$

- $B \rightarrow \tau \nu$  の場合

$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \tau^+ \nu)_\text{SM} = (0.75 \pm 0.05) \times 10^{-4}$$

稀崩壊であり新物理(2HDM type-II, LQ)に敏感である  
 未発見、 $1\text{ab}^{-1}$ 以下で発見可能

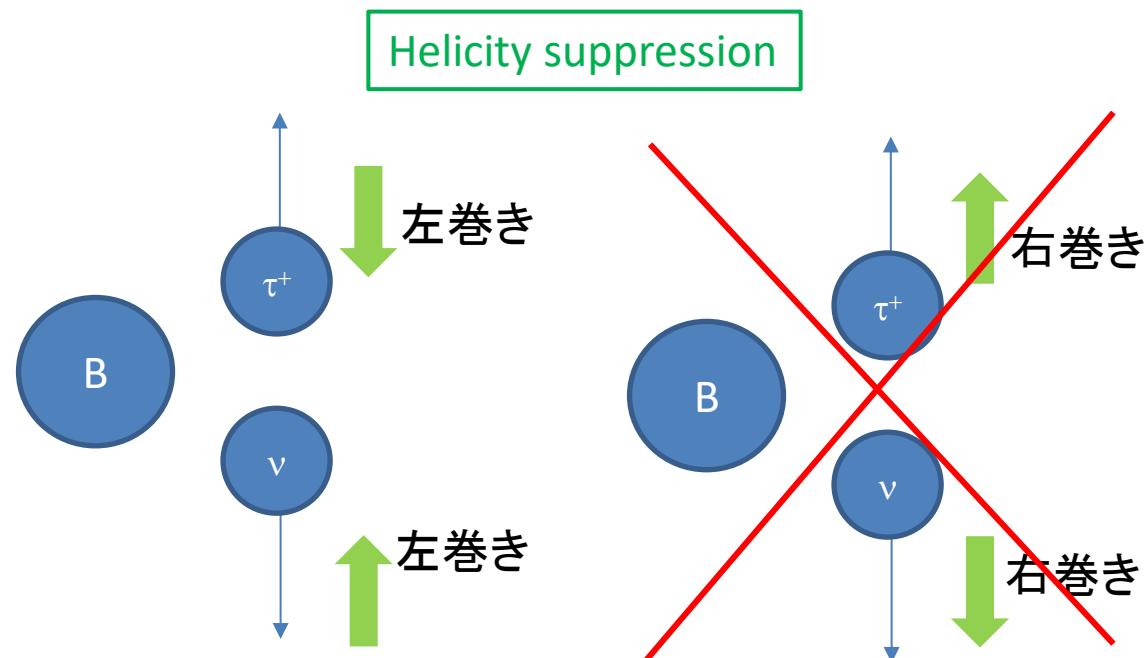
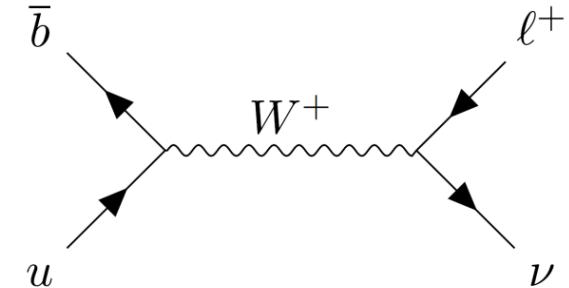


$$|V_{ub}| = (3.42 \pm 0.12) \times 10^{-3}$$

Exclusive  $b \rightarrow u l \bar{\nu}_l$

# ヘリシティー抑制

- 弱い相互作用では粒子は左巻き、反粒子は右巻きに結合する
  - $\nu$ は左巻きしか無い
  - $\tau^+$ は反粒子
- $B^+$ は spin 0
  - $\tau^+\nu$ の両方が左巻き
  - $\tau^+\nu$ の両方が右巻き
  - $\nu$ は左巻きしか無いので、 $\tau^+$ は spin flip して左巻きになる
- 標準模型 amplitude が抑制



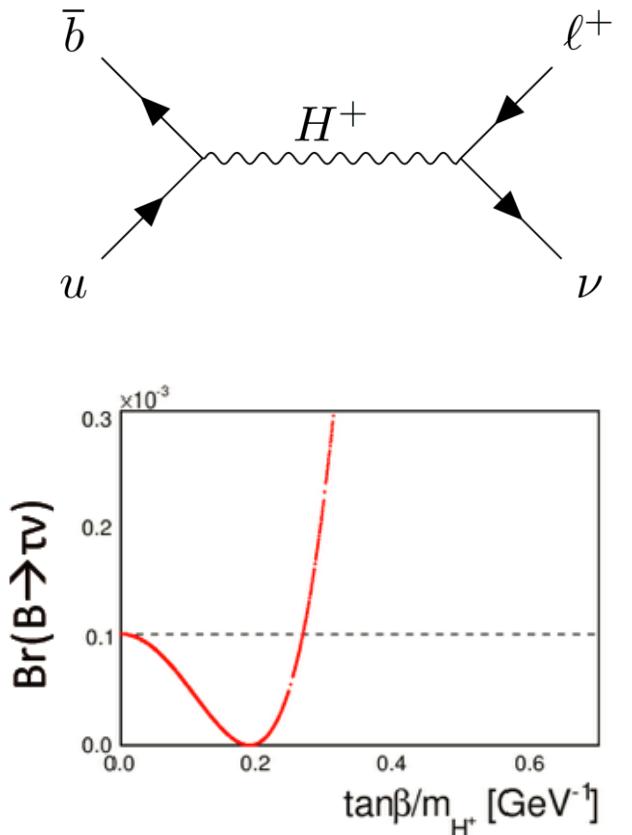
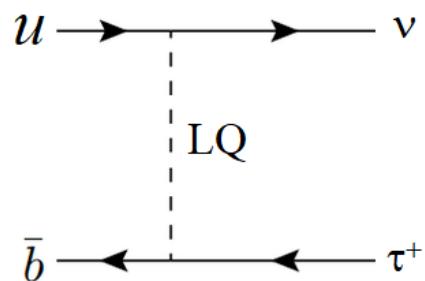
# 新物理でのB中間子レプトニック崩壊

- Two Higgs Doublet Model (2HDM) type-II の場合荷電ヒッグスが飛ぶ
  - Helicity suppression なし
  - 結合は lepton mass に比例
  - 2HDM の崩壊分岐比は  $\tan\beta/m_H$  に寄る
  - レプトンの種類によらない (Lepton Flavor Universality)

$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \ell^+ \nu)_{\text{2HDM}} = \mathcal{B}(B^+ \rightarrow \ell^+ \nu)_{\text{SM}} \times r_H$$

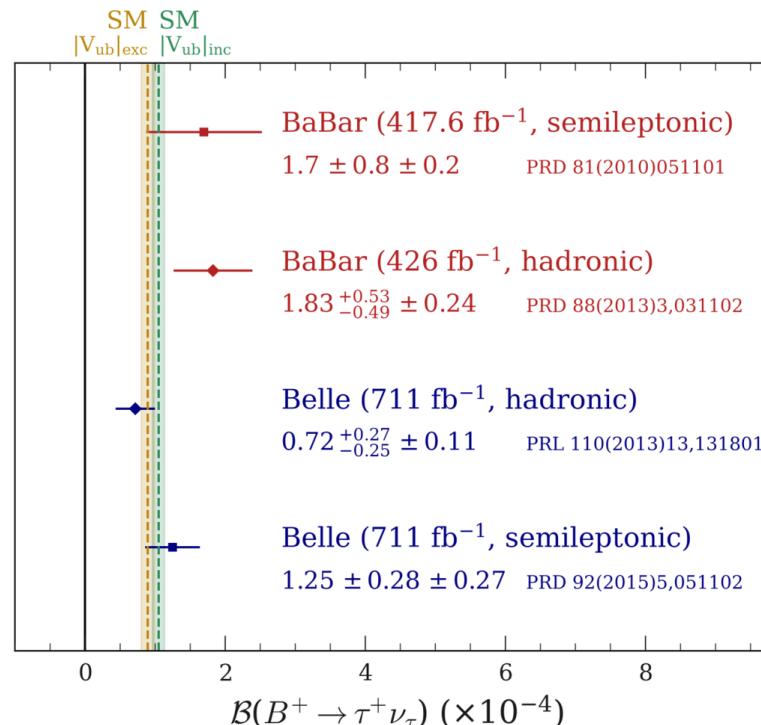
$$r_H = \left( 1 - \frac{m_B^2}{m_H^2} \tan^2 \beta \right)^2$$

- Leptoquark が飛ぶ可能性
  - レプトンの種類による (LFU violation)
  - R(D\*) のアノマリーと関連するかもしれない



# $B \rightarrow \tau \nu$ 崩壊の現状

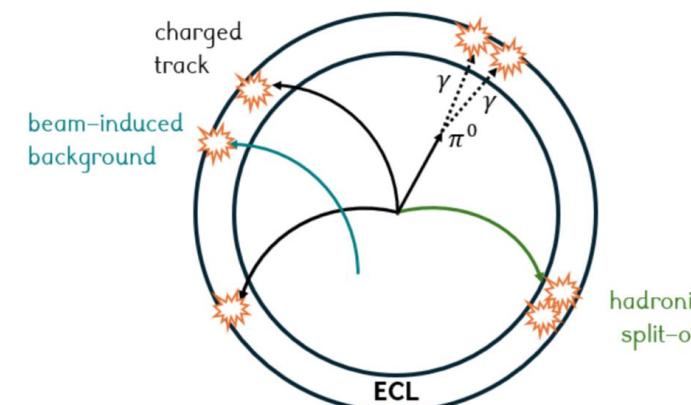
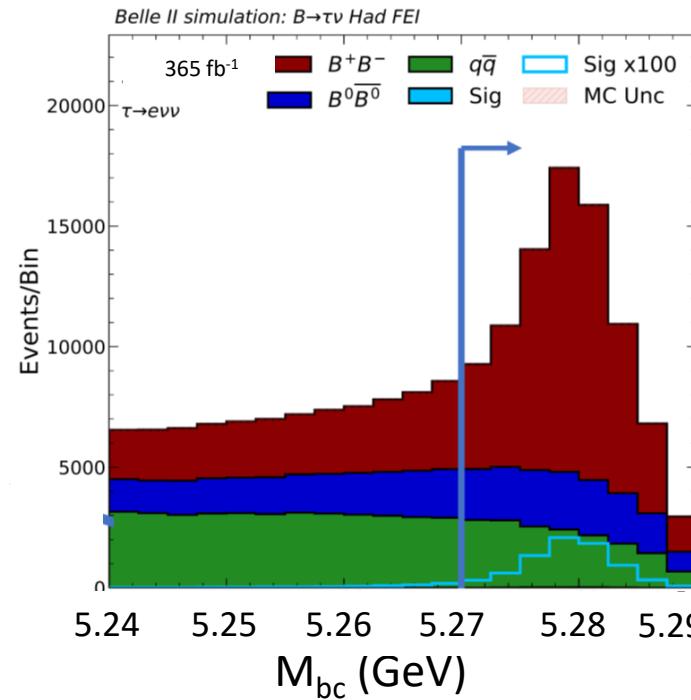
- **Belle 実験と BaBar 実験**により探索
  - $3\sigma$  の証拠はあるが、 $5\sigma$  で発見されていない
$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \tau^+ \nu)_{\text{PDG}} = (1.09 \pm 0.24) \times 10^{-4}$$
  - 終状態に複数のニュートリノがあるため LHCb 実験では非常に困難
- まずは **Belle II 実験での発見** することが重要



# ハドロニックタグ解析

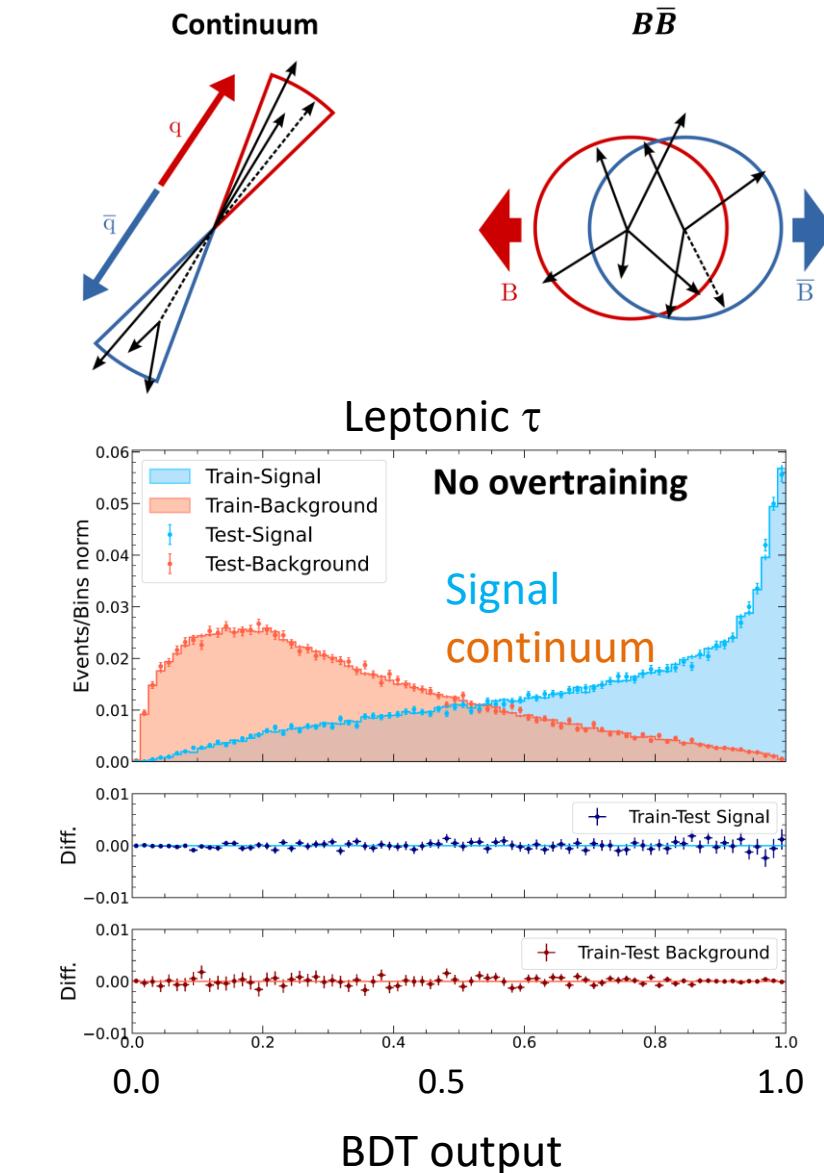
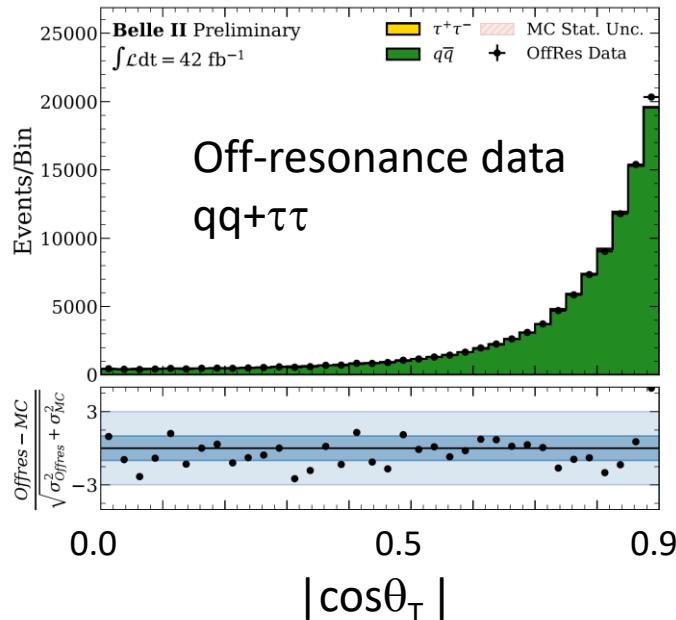
- Belle II 実験 run1 (2019-2022) の 365fb<sup>-1</sup>を用いた
  - $387 \times 10^6$  の  $\Upsilon(4S)$  が含まれる
- 正しく  $B_{\text{tag}}$  が再構成されていることを要求する
 
$$M_{bc} > 5.27 \text{ GeV}$$

$$-0.15 < \Delta E < 0.10 \text{ GeV}$$
- $B_{\text{sig}}$  の再構成
  - track に momentum と PID cut をかけて, e,  $\mu$ ,  $\pi$  を識別
  - ECL cluster から  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  を再構成し、 $\rho^+ \rightarrow \pi^+\pi^0$  候補を再構成
- 余分な track や cluster が無い事を要求
  - $\pi^0$  や  $K_s$  候補がない事を要求
  - Hadronic split-off や beam-induced background の除去



# 背景事象の抑制

- 最も大きな背景事象は continuum  $e^+e^- \rightarrow qq$  事象
- イベント形状の違いを用いて抑制
  - Hadronic  $\tau$  ( $\pi + \rho$ )と leptonic  $\tau$  ( $e + \mu$ )のために、2つのBDTを準備
    - Powerful な変数  $|\cos\theta_T|$  :  $B_{\text{sig}}$  と  $B_{\text{tag}}$  の2つの thrust 軸の角度の cosine



# ハドロニックタグの結果

- 余分なエネルギー  $E_{\text{extra}}$  と missing energy の2D分布で4つのモードを simultaneous fit

- Signal yield  $94 \pm 31$
- $3.0\sigma$  の証拠

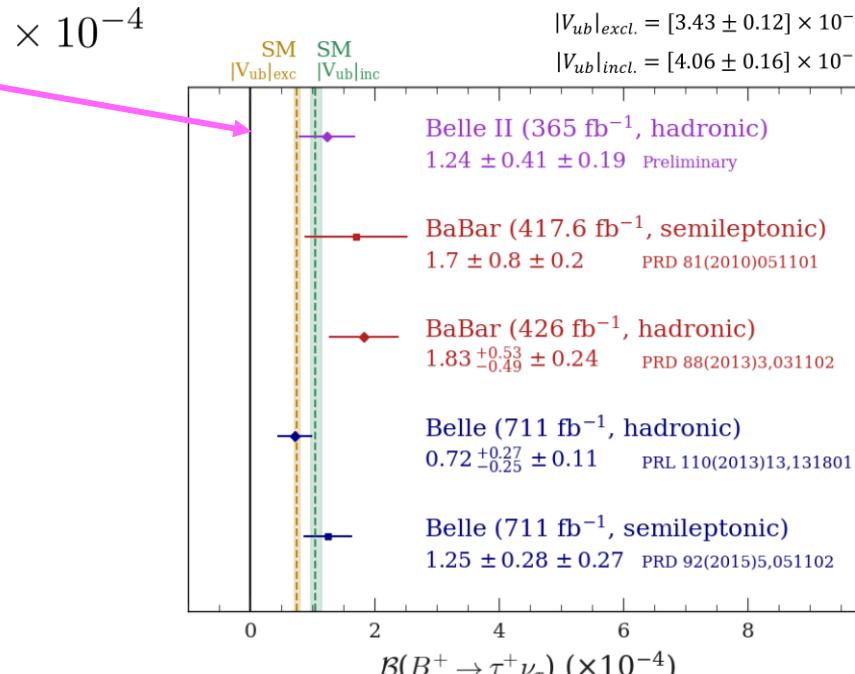
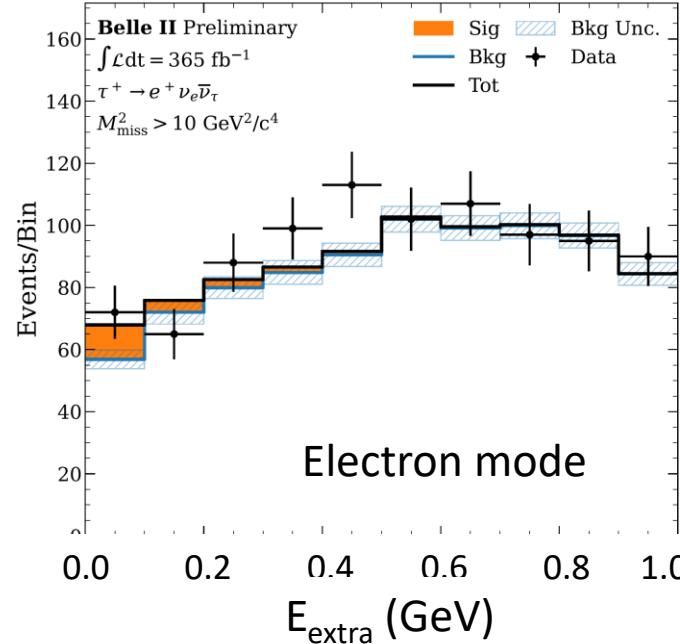
- 崩壊分岐比

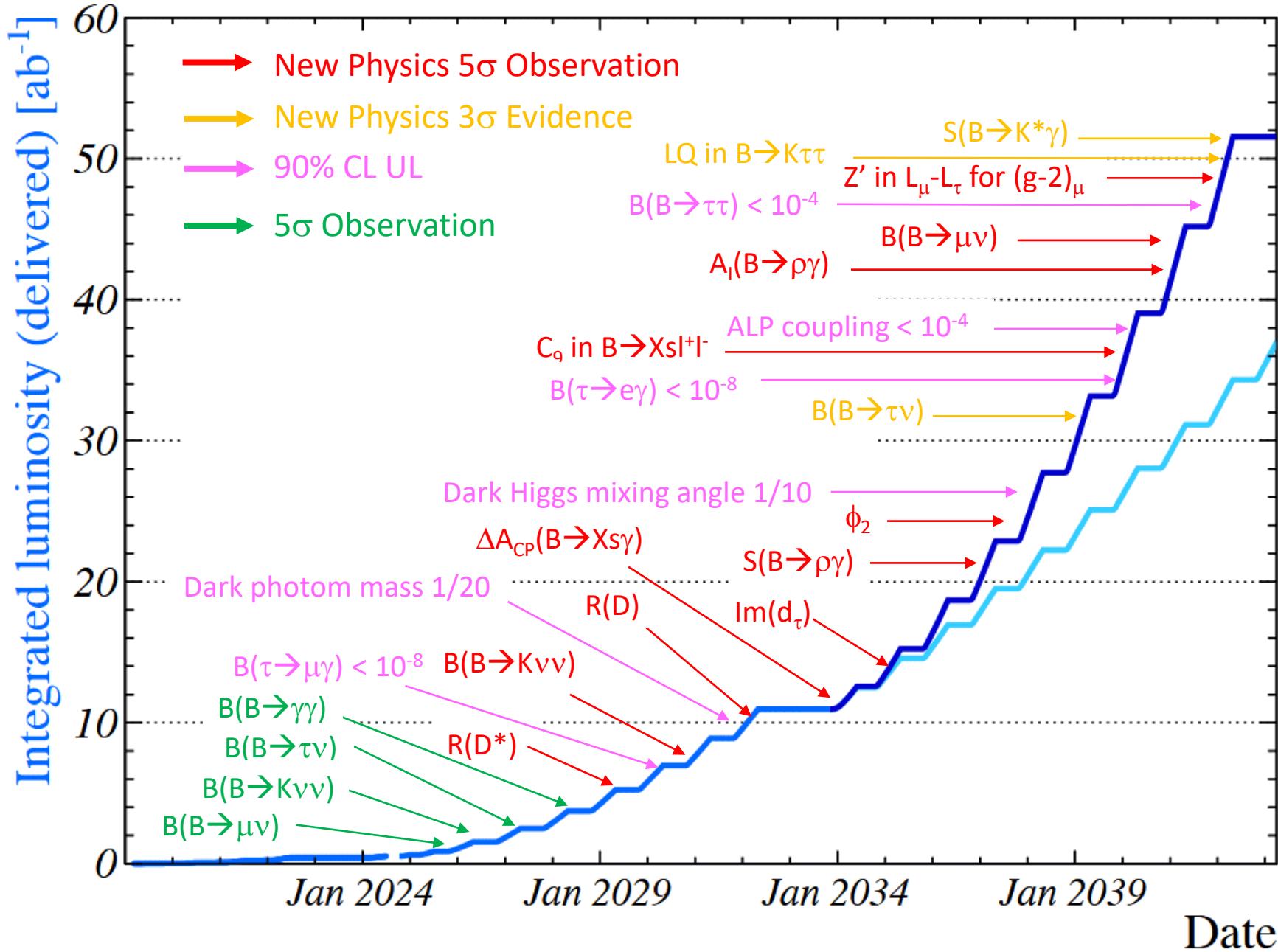
$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \tau^+ \nu) = (1.24 \pm 0.41(\text{stat.}) \pm 0.19(\text{syst.})) \times 10^{-4}$$

- 先行研究の結果と標準模型の予言とも consistent

- 主な系統誤差

- 背景事象 MC の統計
- PDFの calibration
- 崩壊分岐比のdataとMCの違い





# 観測量と新物理の知見

	質量起源 の理解	新たな基本 法則の理解	新物理のフレー バー構造の理解	新たな力の性質の理解					新たな階層の 発見	暗黒物質の理解
測定量	発見 新たなヒッグス粒子の 超対称性の理解	論に従う 新物理が小林益川理	論に従わない 新物理が小林益川理	第5の力の発見	弱い力の拡張	右巻き結合を持つ力の 発見	レプトンとクオーカを つなぐ力の発見	はない 現在の素粒子が複合 粒子で本当の素粒子で 見	ターペロープの発 見	
$S_{CP}(B \rightarrow \eta' K^0)$	★	★	★	★	★	★	★★	×	?	×
$S_{CP}(B \rightarrow K^{*0} \gamma)$	★★★	★★★	★★★	★	★	★	★★	★	★★★	×
$S_{CP}(B \rightarrow \rho \rho)$	×	×	×	★	★★★	★★★	?	?	?	×
$I_{K\pi}$	×	★	×	★	★★★	★★★	?	×	?	×
$R(D^{(*)}\tau\nu)$	★★	×	×	×	×	×	★	★★★	★	★
$R_{K(*)}$	×	×	×	×	★★	★★	×	★★★	★★	×
$B(B \rightarrow X s l^+ l^-)$	×	×	★★★	×	★★	★★	×	★★★	★★	×
$B(B \rightarrow X s \gamma)$	★★★	★★★	★★★	★★	★	×	★	★	★★★	×
$\Delta A_{CP}(B \rightarrow X s \gamma)$	★★★	★★★	×	★	★	★	★★	★	★	×
$B(\tau \rightarrow \mu \gamma)$	★	★★★	★	★	★	★	×	★	★★★	?
$B(\tau \rightarrow \mu \mu \mu)$	★	×	×	★★★	★★★	★★★	×	×	★★★	?
暗黒光子	★	×	?	×	★	★	×	×	×	★★★

# まとめ

- B中間子の稀崩壊は新物理に敏感である
  - $b \rightarrow s$
  - $B \rightarrow \tau \nu$
  - カバーしていない重要なモードもたくさんある
- 来年度ぐらいにBelle のルミノシティを追い越すので、フレーバー物理の最前線に立てる
- 様々な測定量の相関から新物理を同定する

# backup