Belle II B物理 -Rare decay-

佐藤 瑶 (KEK)

Flavor Physics Workshop 2021

自己紹介＋目標

佐藤 瑶 さとう よう

- KEK 博士研究員 (2021.4~) : Belle II
- 東北大学 博士課程 (2018.4~2021.3) : Belle II
- 東北大学 修士課程 (2016.4~2018.3) : ILC

本講義の目標

- (実験の)修士過程の学生向けに、B中間子の稀崩壊の意義について説明する
  - 自分が学生の時に躓きやすかった箇所を丁寧に。逆に詳細は省きます。
  - なるべく消化不良なく進めるよう試みます。質問があればいつでも止めてください。
  - 研究テーマを決めようと思ったときに参考にしてもらえれば幸いです。

目次

- B中間子の稀崩壊について

  稀崩壊とは？なぜ新物理に敏感？B中間子の稀崩壊の特徴は？

- 観測量について

  何を測る？どう測る？測っているものの意味は？

- Belle II での具体的な研究テーマの紹介
  - $B \to K\pi$
  - $b \to s\ell^+\ell^-$
  - $b \to s\nu\bar{\nu}$

目次

- B中間子の稀崩壊について

  稀崩壊とは？なぜ新物理に敏感？B中間子の稀崩壊の特徴は？

- 観測量について

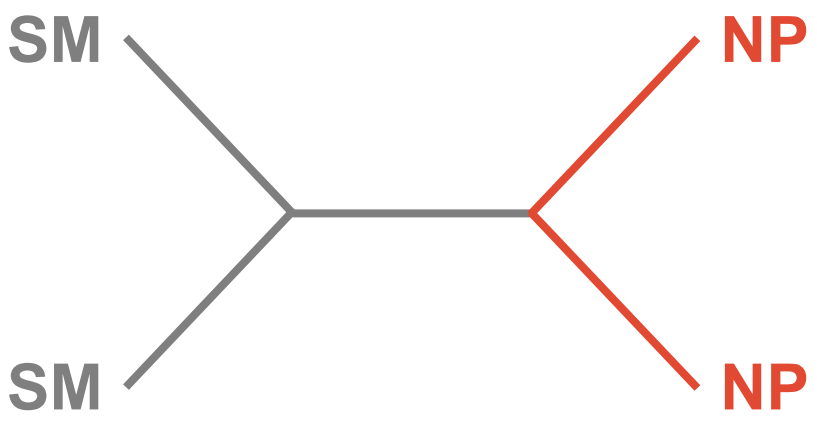
  何を測る？どう測る？測っているものの意味は？

- Belle II での具体的な研究テーマの紹介
  - $B \to K\pi$
  - $b \to s\ell^+\ell^-$
  - $b \to s\nu\bar{\nu}$

新物理探索の手法

直接探索

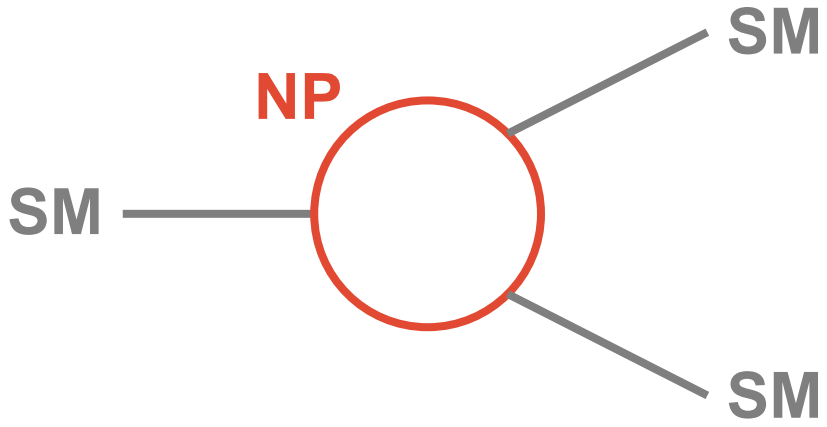
@Energy frontier (ATLAS, CMS, ILC, …)



- 新しい粒子を直接生成、観測する
- 高い衝突エネルギーが鍵

間接探索

@Intensity frontier (Belle II, KOTO, g-2, …)



- 標準模型の粒子間に現れる新物理の寄与を探す
- 高い測定精度(→事象数)が鍵

どの過程が新物理に感度がある？

◻ 新物理が現れやすい過程

- (誰も知らない...)
- **標準模型では抑制**されているが、一般には抑制されなくて良い過程
- 重い粒子にcoupleする？ループに現れる？

◻ 新物理があったら見えやすい過程

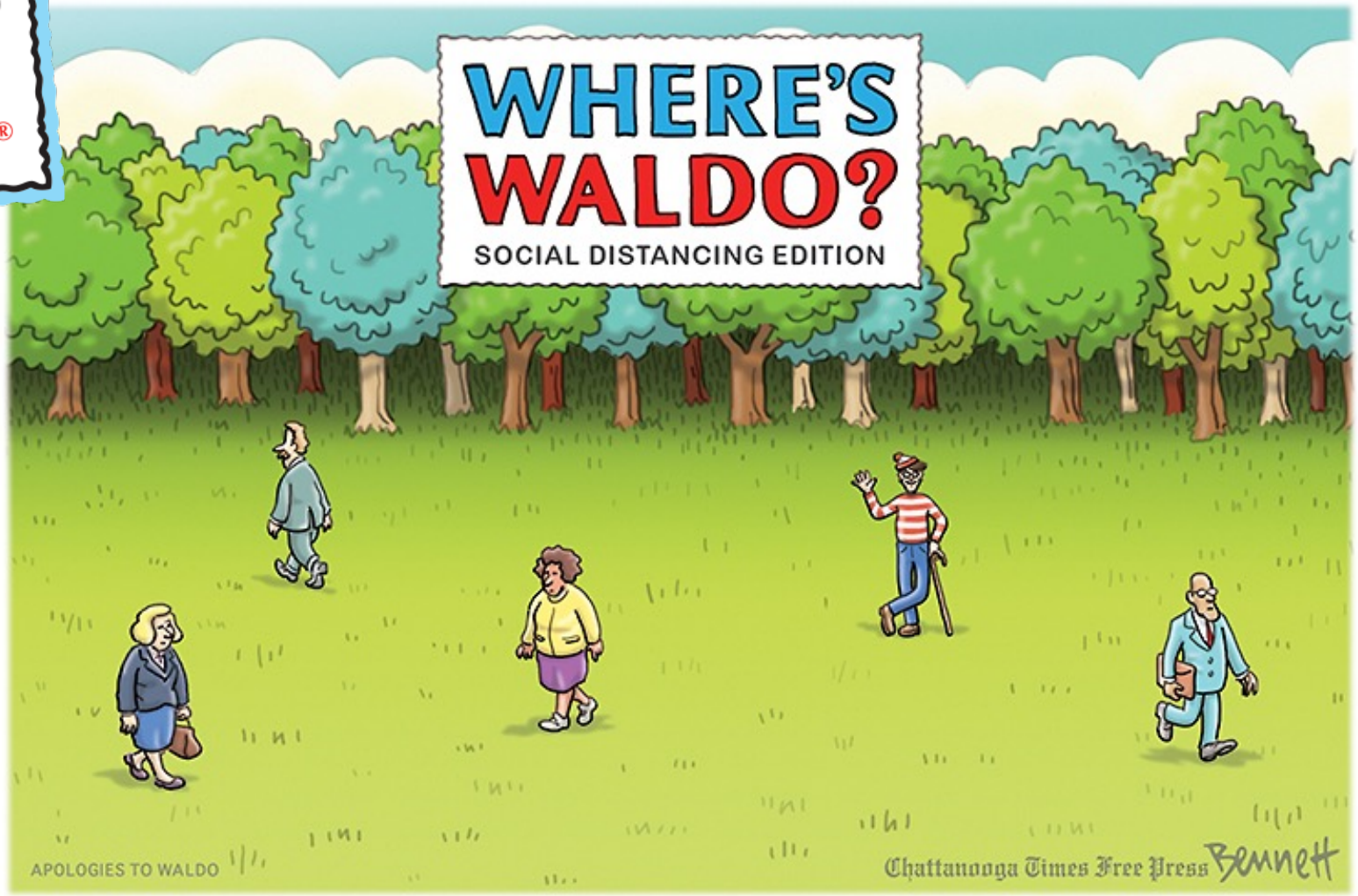
- **標準模型の寄与**が小さい
- 実験の誤差、理論的な不定性が小さい

WHERE'S ~~WALLY~~?®

New Physics

WHERE'S ~~WALLY~~?®

New Physics



風刺画：コロナ禍のウォーリーを探せ

https://www.timesfreepress.com/cartoons/2020/mar/17/much-easier/4269/

どの過程が新物理に感度がある？

稀崩壊過程：標準模型では抑制（禁止）されている過程

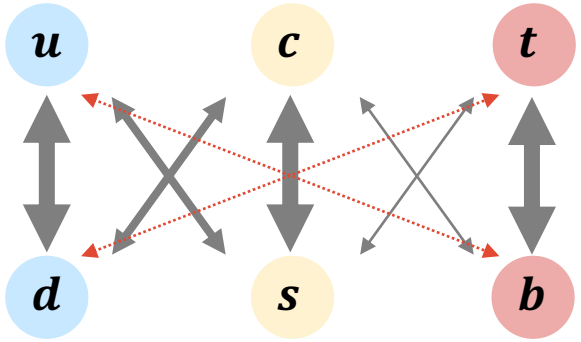
- Flavor Changing Neutral Current : クォークについてはループ抑制＋CKM抑制 (次ページ)
- ループ抑制：ループを持つと1/100程度抑制される$\left(\sim\frac{1}{16\pi^2}\right)$
- CKM抑制：世代を跨ぐクォークの遷移は抑制される
- ヘリシティー抑制：弱い相互作用は左巻きとしか結合しない
- レプトンフレーバーの破れ：標準模型では禁止

Flavor Changing Neutral Current

標準模型では、$W^{\pm}$を介した弱い相互作用でのみクォークのフレーバーが変わる

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} 1 & \lambda & \lambda^3 \\ \lambda & 1 & \lambda^2 \\ \lambda^3 & \lambda^2 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\lambda \sim 0.226$$



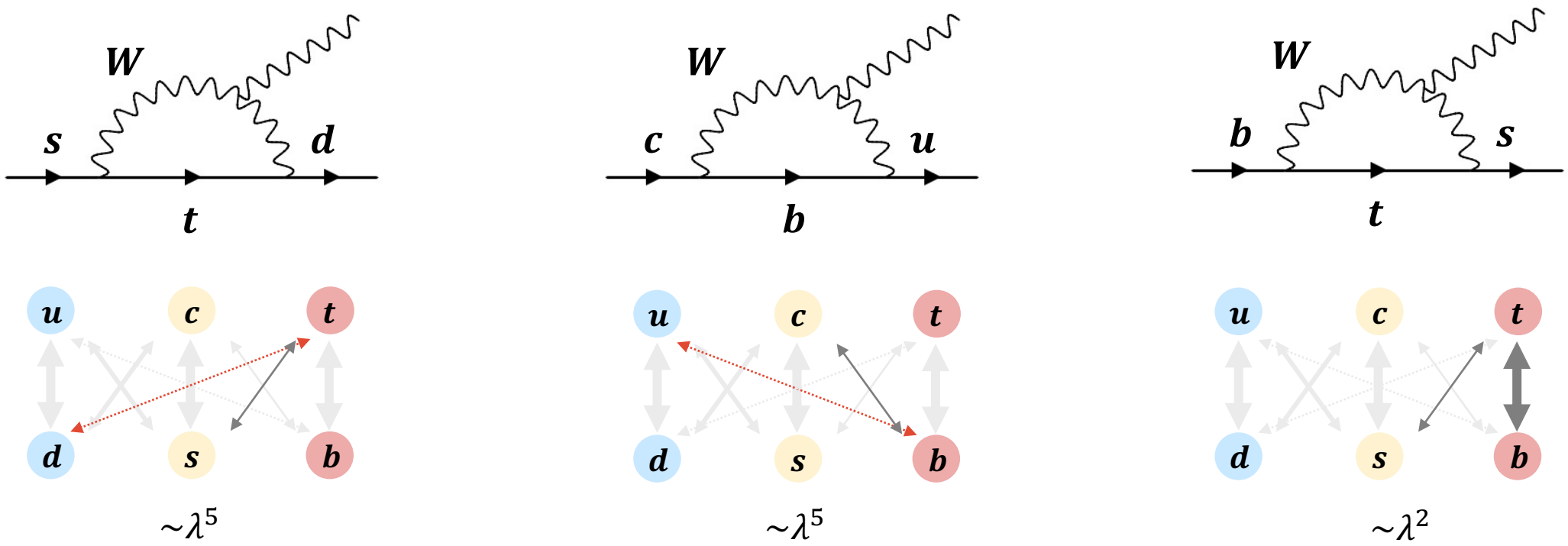
- 質量の基底状態と弱い相互作用の基底状態が異なるので、基底を変換する行列がかかる。
- Zの場合、up-typeはup-typeと、down-typeはdown-typeと相互作用してキャンセル。

→ **Tree-levelでのFlavor Changing Neutral Current (FCNC) は禁止**

Flavor Changing Neutral Current

標準模型でもLoopを介することでFCNCが生じるが、抑制されている

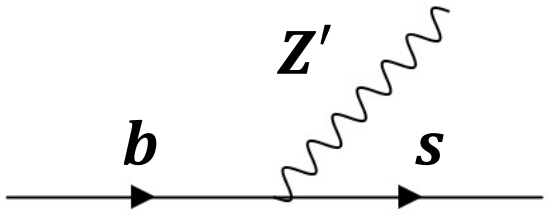
- Loopを介するため抑制される
- 世代を跨ぐのでCKMでも抑制される（よく見るとbの場合は...?）



FCNCで探索する新物理

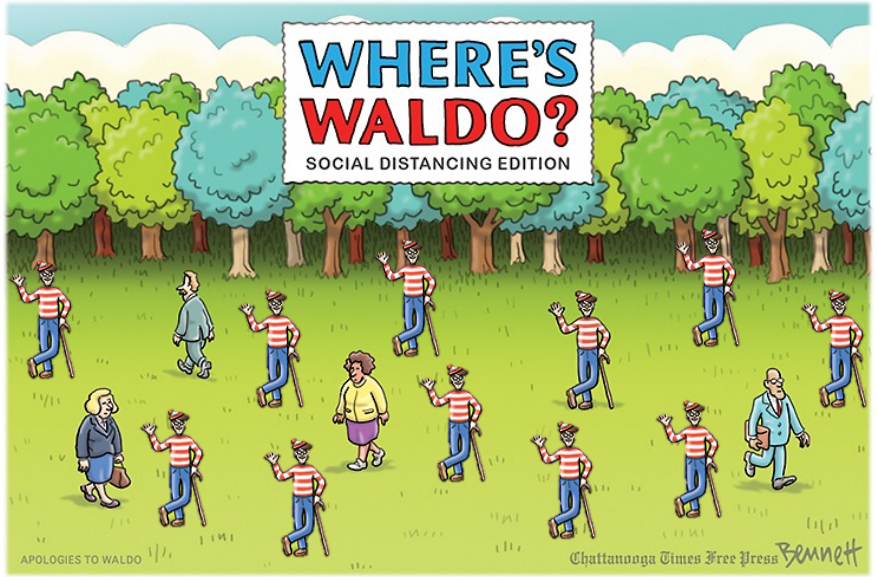
◻ フレーバーを変える中性ゲージボソン Z'

- 新しい$U(1)$ゲージ対称性を加える
- ループ抑制を受けない
- 結合定数の大きさはCKMとは違って良い



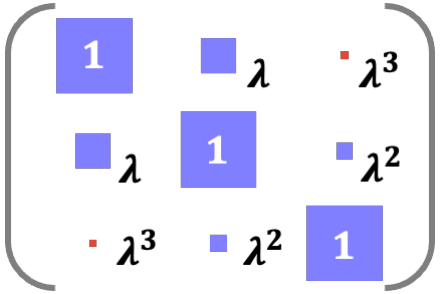
◻ レプトンにおけるFCNC

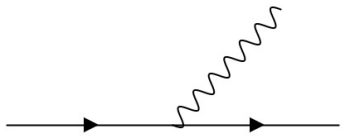
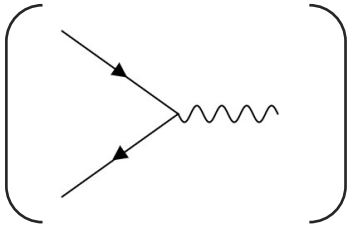
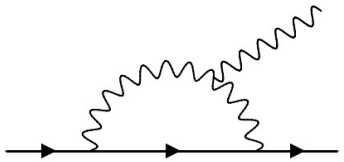
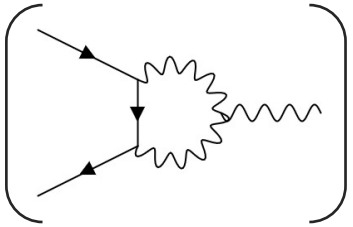
- $\mu \to e\gamma, \tau \to \ell\gamma, \tau \to \ell\ell\ell$ = レプトンフレーバーの破れ
- 標準模型では禁止されているので発見できれば新物理
- (ニュートリノ質量を考慮すると可能)



B中間子の稀崩壊

b-クォークの遷移に着目して分類



	ダイアグラム	CKM要素
$b \to c$	Tree  	$\lvert V_{cb}\rvert \sim O(\lambda^2)$
$b \to u$		$\lvert V_{ub}\rvert \sim O(\lambda^3)$
$b \to s$	Loop  	$\lvert V_{tb}V_{ts}^*\rvert \sim O(\lambda^2)$
$b \to d$		$\lvert V_{tb}V_{td}^*\rvert \sim O(\lambda^3)$

B中間子の稀崩壊は
- $b \to c$以外全て
- Tree以外

の、二つの言い方。

いずれにせよ
標準模型では抑制され
新物理に敏感
という文脈で使う。

B中間子の稀崩壊

CKM要素による抑制があまり強くなく、豊富な測定モードが実験的に測定可能

- Belle, BaBar で多くの稀崩壊過程が観測されている
- 崩壊分岐比 $\mathcal{B}$~10^{-5}-10^{-7}くらいまで見つかっている(N_B~10^9 at Belle)

→ まだ新物理は発見されてない。新物理の寄与は標準模型より小さい？

Belle II ではより高精度での測定、未発見の稀崩壊を使って新物理探索

- 1%-levelの精度で測定できれば、新物理の寄与が10%くらいあれば見つかるはず
  - 理論的な不定性が小さい観測量を使うのが重要
  - いくつかのモードでは新物理の寄与らしきものが…?
- より強く抑制されている過程については、標準模型以上の寄与があるかも

目次

- B中間子の稀崩壊について

  稀崩壊とは？なぜ新物理に敏感？B中間子の稀崩壊の特徴は？

- 観測量について

  何を測る？どう測る？測っているものの意味は？

- Belle II での具体的な研究テーマの紹介
  - $B \to K\pi$
  - $b \to s\ell^+\ell^-$
  - $b \to s\nu\bar{\nu}$

観測量の種類

- 崩壊分岐比：$\mathcal{B}(B \to f) = \frac{\Gamma(B\to f)}{\Gamma_{\text{total}}}$, (実験的には $\mathcal{B}(B \to f) = \frac{N(B\to f)}{N_{\text{total}}}$)
  - 基本的な観測量。非常にRareな崩壊で重要。
  - しかし、理論予言の不定性が大きい場合は精密測定に不向き

- 崩壊分岐比の比や差をとる観測量
  - CP対称性の破れ：Bと$\bar{B}$を比較. $A_{CP} = \frac{B(\bar{B}\to\bar{f})-B(B\to f)}{B(\bar{B}\to\bar{f})+B(B\to f)}$
  - 前後非対称度：角度分布を比較. $A_{FB} = \frac{B(B\to f|\cos\theta>0)-B(B\to f|\cos\theta<0)}{B(B\to f|\cos\theta>0)+B(B\to f|\cos\theta<0)}$
  - レプトン普遍性：レプトンの種類での比較. $R = \frac{B(B\to\tau+X)}{B(B\to\ell+X)}$, $R = \frac{B(B\to\mu+X)}{B(B\to e+X)}$

→ 共通する理論予言の不定性や系統誤差をキャンセル → **精密測定で重要**

実験でどう測るか

崩壊分岐比を実験的に測るときは、$\mathcal{B}(B \to f) = \frac{N(B \to f)}{N_{\mathrm{total}}}$ という関係を使う

- 観測したい終状態fに崩壊したB中間子の数, $N(B \to f)$
  - 「実験で測定される数, N_{exp}」÷「測定効率, ε」
- 全体のB中間子の数, N_{total}
  - Belle II実験の場合、$B\bar{B}$対で生成されるので、$2 \times N_{B\bar{B}}$

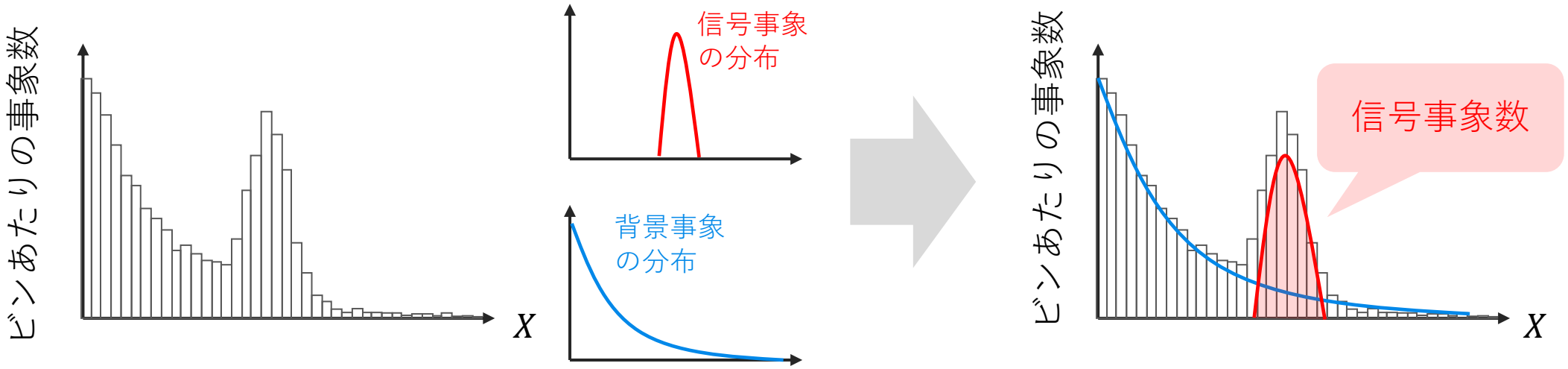
を測定する

(他の観測量の場合は、Bのフレーバー(Bか$\bar{B}$か)、角度分布、レプトンの種類、等々を使って場合分けする)

実験でどう測るか

- Belle II検出器で測定された長寿命粒子を組み合わせて、B中間子の候補を再構成する

- 信号事象(正しい候補)と背景事象(間違った候補)を分離して事象数を数える
  - ひとつひとつの事象が正しいかどうかは判別できない
  - 信号事象と背景事象が異なる分布に従うような変数を使って統計的に解析する
    （不変質量、エネルギー運動量保存則、など）

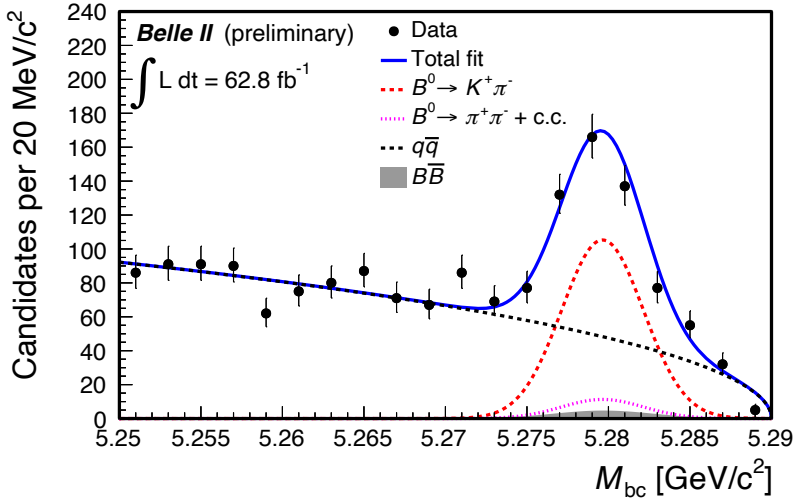


Belle II 実験でどう測るか

□ $M_{\mathrm{bc}} \equiv \sqrt{s/4 - |p_B^*|^2}$

$\sqrt{s}$：重心系エネルギー(10.58 GeV)

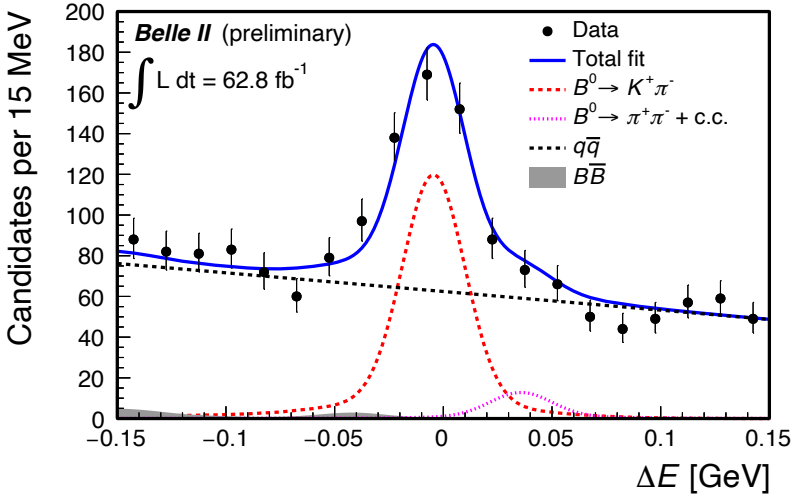
p_B^*：$\Upsilon(4S)$の静止系でのB中間子の運動量(~300MeV)



- ビームのエネルギー($\sqrt{s}/2$)を使って計算する不変質量
  (= beam-(energy-)constraint mass)
- 実質、運動量の大きさを使っている。幅は$\sqrt{s}/2$側で決まる。
- 信号事象は$M_{\mathrm{bc}} = 5.28\ \mathrm{GeV}(= M_B)$にピークを持つ
  (背景事象の一部も同じ位置にピーク？)

□ $\Delta E \equiv E_B^* - \sqrt{s}/2$

E_B^*：$\Upsilon(4S)$の静止系でのB中間子のエネルギー(~5.29 GeV)



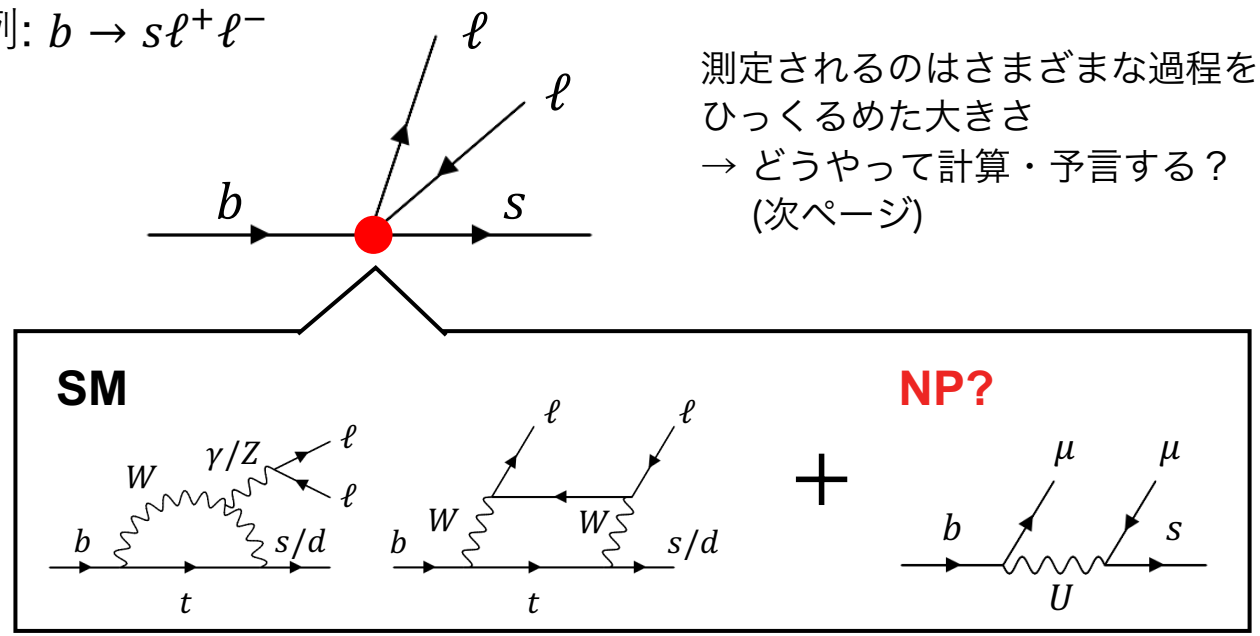
- ビームのエネルギー($\sqrt{s}/2$)と、B中間子のエネルギーの差
- 実質、エネルギーの大きさを使っている。
  幅は主にE_B^*側で決まる。
- 信号事象は$\Delta E = 0\ \mathrm{GeV}$にピークを持つ
  (背景事象の一部は少し離れた位置にピーク？)

観測量の物理的意味

◻ 崩壊分岐比

- ∝ 結合の大きさ＝絶対値
  - ダイアグラムに現れる粒子の質量、エネルギースケール等の情報を含む

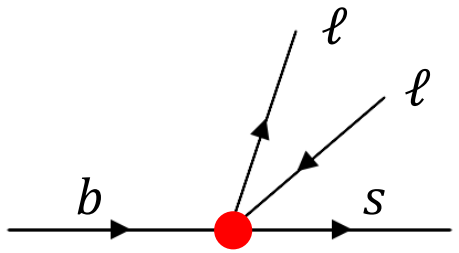
例: $b \to s\ell^+\ell^-$



測定されるのはさまざまな過程をひっくるめた大きさ
→ どうやって計算・予言する？
(次ページ)

◻ 角度分布などの運動学的な情報

- 結合の構造
  - Scalar? Vector? Axial-vector?
- CP非対称な結合が見れる場合も

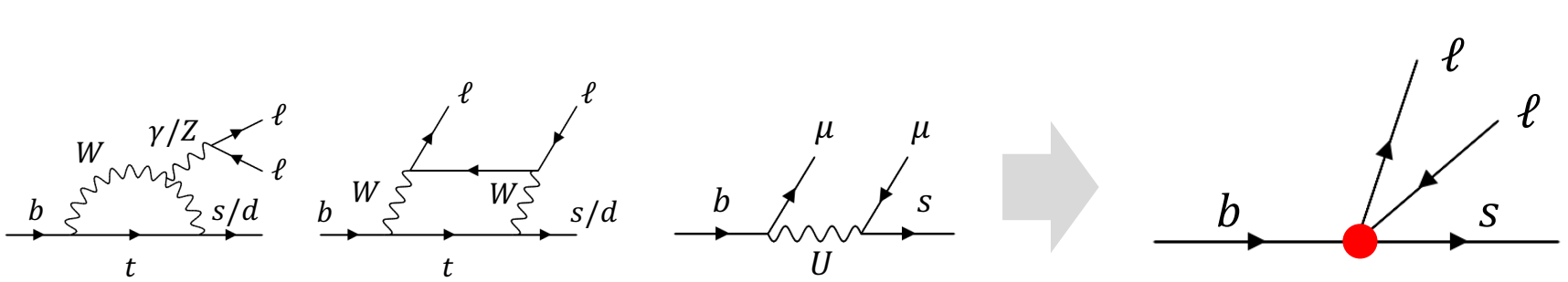


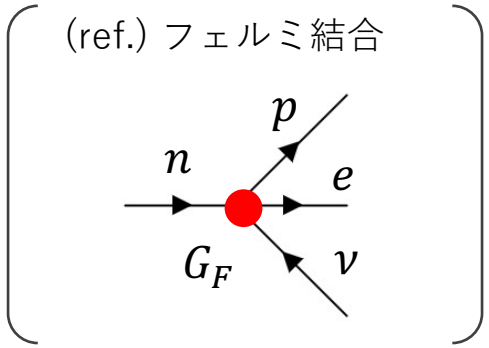
- レプトンの角度分布はスピン情報を持つ
- クォークはハドロン化するので、直接スピンを見ることはできない (e.g. さらに崩壊を使って推定)

(少し脱線)有効ハミルトニアン

- FCNCの過程は幅広いスケールの寄与が関係している
  [QCD (~400 MeV)] – [b-クォーク (~4 GeV)] – [W, t-クォーク + 新物理? (>100 GeV)]

- 重い粒子は積分して結合定数に、軽い粒子はオペレータとして、ハミルトニアンを書き表す





- オペレータは複数あるので、それぞれ係数 (**Wilson係数**)が書ける
  - $b \to s\ell^+\ell^-$の場合、標準模型ではO_7, O_9, O_{10}というオペレータが寄与
  - 対応するWilson係数C_7, C_9, C_{10}を実験で求めて、理論と比較する。
  - もし新物理があれば、、
    Wilson係数の値が変わる？虚数成分が出てくる？別のオペレータが入る？

$$\mathcal{H}_{\rm eff}^{\rm SM} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}}\left[V_{tb}V_{ts}^*\sum_{i=1}^{10}C_i\mathcal{O}_i + V_{ub}V_{us}^*\sum_{i=1}^{2}C_i(\mathcal{O}_i - \mathcal{O}_i^u)\right]$$

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

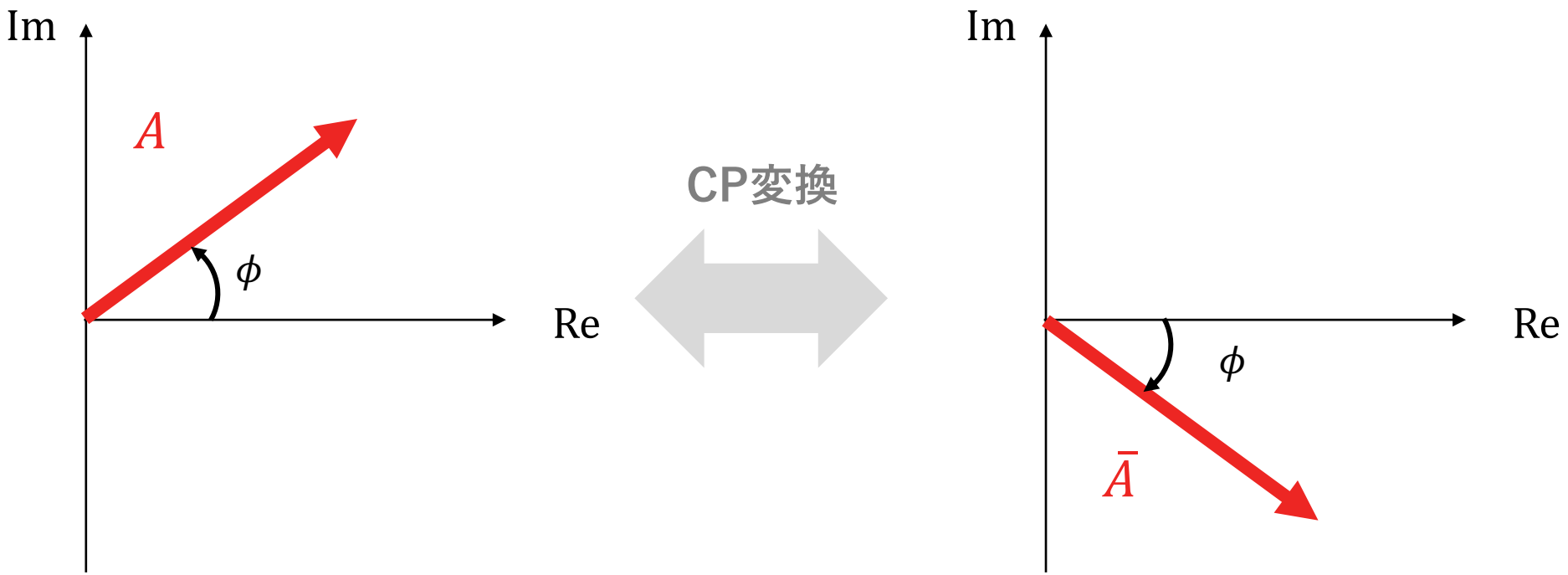
$$\mathcal{O}_9 = \frac{e}{16\pi^2}m_b(\bar{s}_L\gamma_\mu b_L)\sum_\ell(\bar{\ell}\gamma^\mu\ell),$$

$$\mathcal{O}_{10} = \frac{e}{16\pi^2}m_b(\bar{s}_L\gamma_\mu b_L)\sum_\ell(\bar{\ell}\gamma^\mu\gamma_5\ell).$$

観測量の物理的意味

- CP対称性の破れ：崩壊過程におけるCP破れ＝直接CP対称性の破れ
  - $|A(B \to f)| \neq |\bar{A}(\bar{B} \to \bar{f})|$ を見つけたい
  - $A = a\, e^{i\phi}$で、$A \to \bar{A} = a\, e^{-i\phi}$と変換する場合、$|A| = |\bar{A}|$ になってしまう。

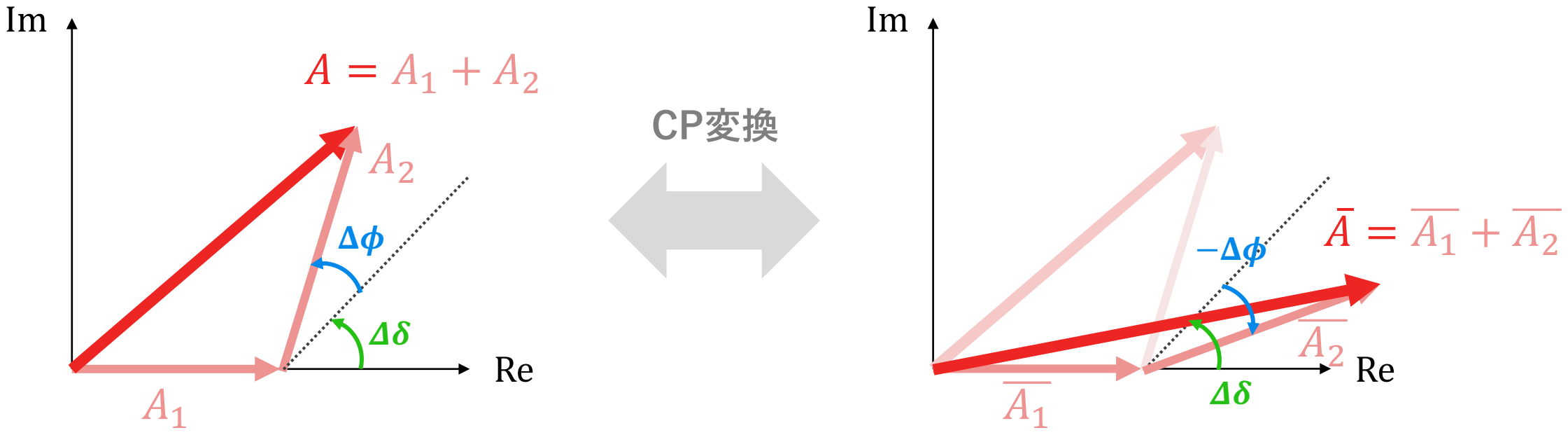
→ **どういう時に直接CP非対称度が生じる？**



直接CP対称性の破れの条件

- 二つ以上の過程がある：$A = A_1 + A_2$. $A_1 = a_1 \exp(i\phi_1 + i\delta_1)$, $A_2 = a_2 \exp(i\phi_2 + i\delta_2)$
- 異なる弱位相を持つ：$\Delta\phi\ (\equiv \phi_2 - \phi_1) \neq 0, \pi$
- 異なる強位相を持つ：$\Delta\delta\ (\equiv \delta_2 - \delta_1) \neq 0, \pi$

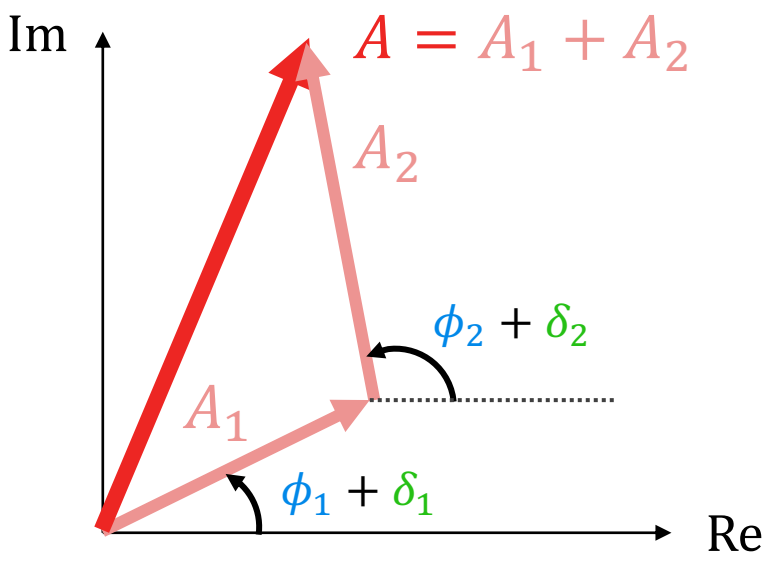
弱位相：CP変換で符号が**変わる**もの。標準模型では弱い相互作用で生じる
強位相：CP変換で符号が**変わらない**もの。主に強い相互作用で生じる。$\mathcal{L}$ が実でも現れる。計算が困難)



直接CP対称性の破れの条件

- 二つ以上の過程がある：$A = A_1 + A_2$. $A_1 = a_1 \exp(i\phi_1 + i\delta_1)$, $A_2 = a_2 \exp(i\phi_2 + i\delta_2)$
- 異なる弱位相を持つ：$\Delta\phi\ (\equiv \phi_2 - \phi_1) \neq 0, \pi$
- 異なる強位相を持つ：$\Delta\delta\ (\equiv \delta_2 - \delta_1) \neq 0, \pi$

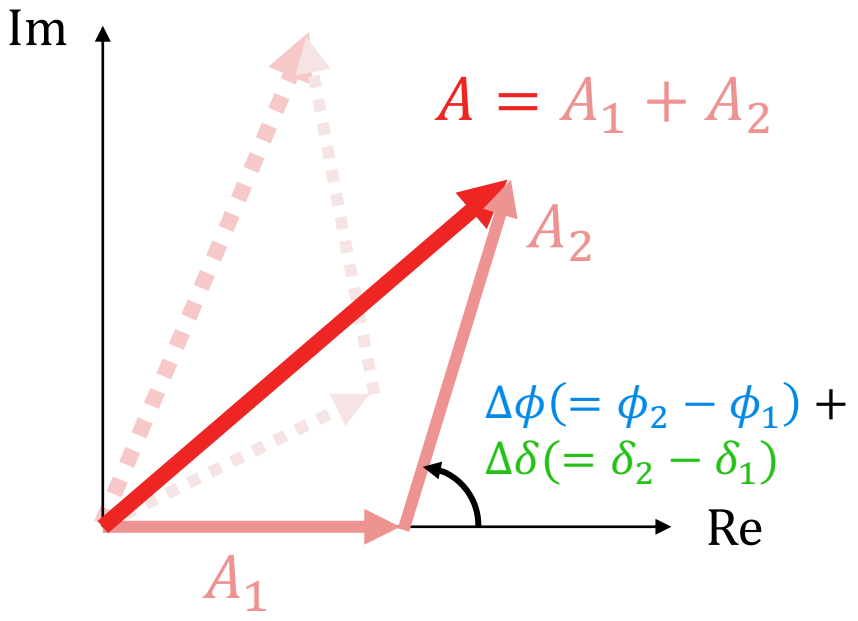
弱位相：CP変換で符号が**変わる**もの。標準模型では弱い相互作用で生じる
強位相：CP変換で符号が**変わらない**もの。主に強い相互作用で生じる。$\mathcal{L}$ が実でも現れる。計算が困難）



直接CP対称性の破れの条件

- 二つ以上の過程がある：$A = A_1 + A_2$. $A_1 = a_1 \exp(i\phi_1 + i\delta_1)$, $A_2 = a_2 \exp(i\phi_2 + i\delta_2)$
- 異なる弱位相を持つ：$\Delta\phi\ (\equiv \phi_2 - \phi_1) \neq 0, \pi$
- 異なる強位相を持つ：$\Delta\delta\ (\equiv \delta_2 - \delta_1) \neq 0, \pi$

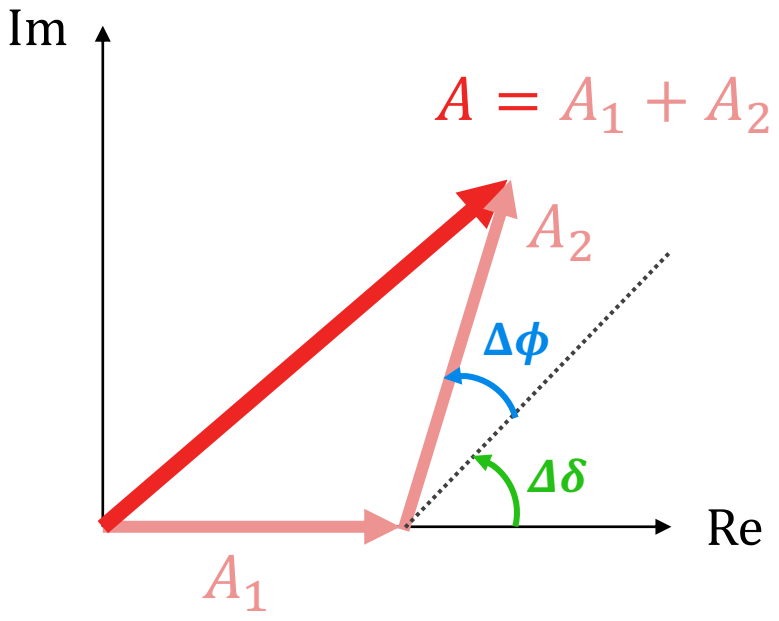
弱位相：CP変換で符号が**変わる**もの。標準模型では弱い相互作用で生じる
強位相：CP変換で符号が**変わらない**もの。主に強い相互作用で生じる。$\mathcal{L}$ が実でも現れる。計算が困難）



直接CP対称性の破れの条件

- 二つ以上の過程がある：$A = A_1 + A_2$. $A_1 = a_1 \exp(i\phi_1 + i\delta_1)$, $A_2 = a_2 \exp(i\phi_2 + i\delta_2)$
- 異なる弱位相を持つ：$\Delta\phi\ (\equiv \phi_2 - \phi_1) \neq 0, \pi$
- 異なる強位相を持つ：$\Delta\delta\ (\equiv \delta_2 - \delta_1) \neq 0, \pi$

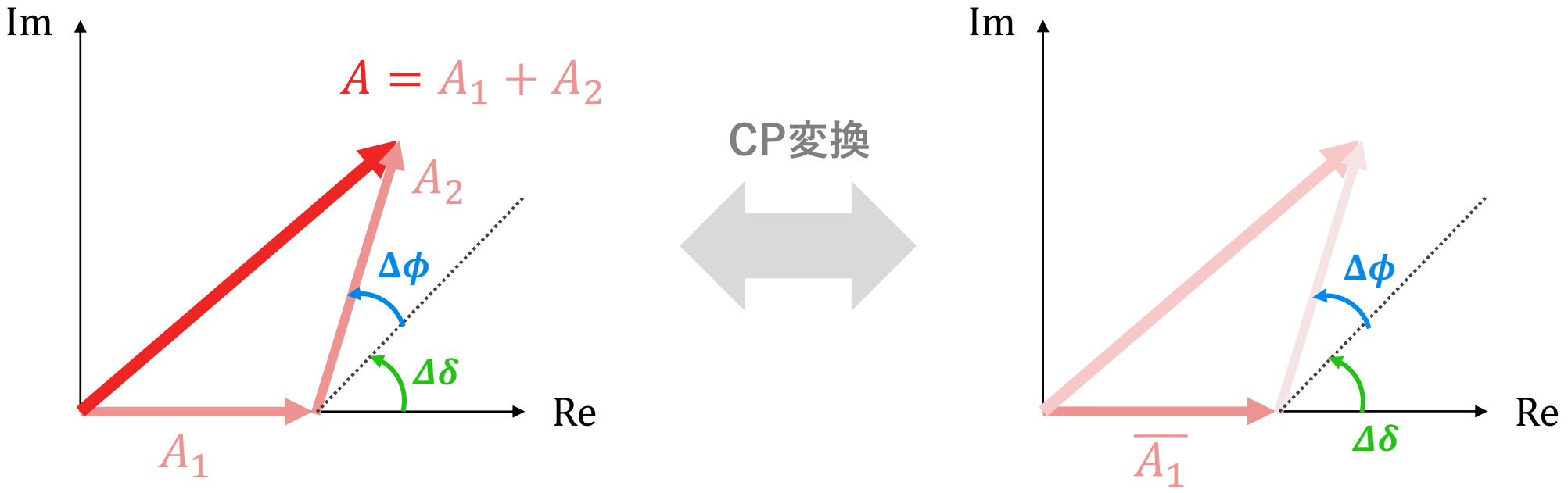
弱位相：CP変換で符号が**変わる**もの。標準模型では弱い相互作用で生じる
強位相：CP変換で符号が**変わらない**もの。主に強い相互作用で生じる。$\mathcal{L}$ が実でも現れる。計算が困難)



直接CP対称性の破れの条件

- 二つ以上の過程がある：$A = A_1 + A_2$. $A_1 = a_1 \exp(i\phi_1 + i\delta_1)$, $A_2 = a_2 \exp(i\phi_2 + i\delta_2)$
- 異なる弱位相を持つ：$\Delta\phi\ (\equiv \phi_2 - \phi_1) \neq 0, \pi$
- 異なる強位相を持つ：$\Delta\delta\ (\equiv \delta_2 - \delta_1) \neq 0, \pi$

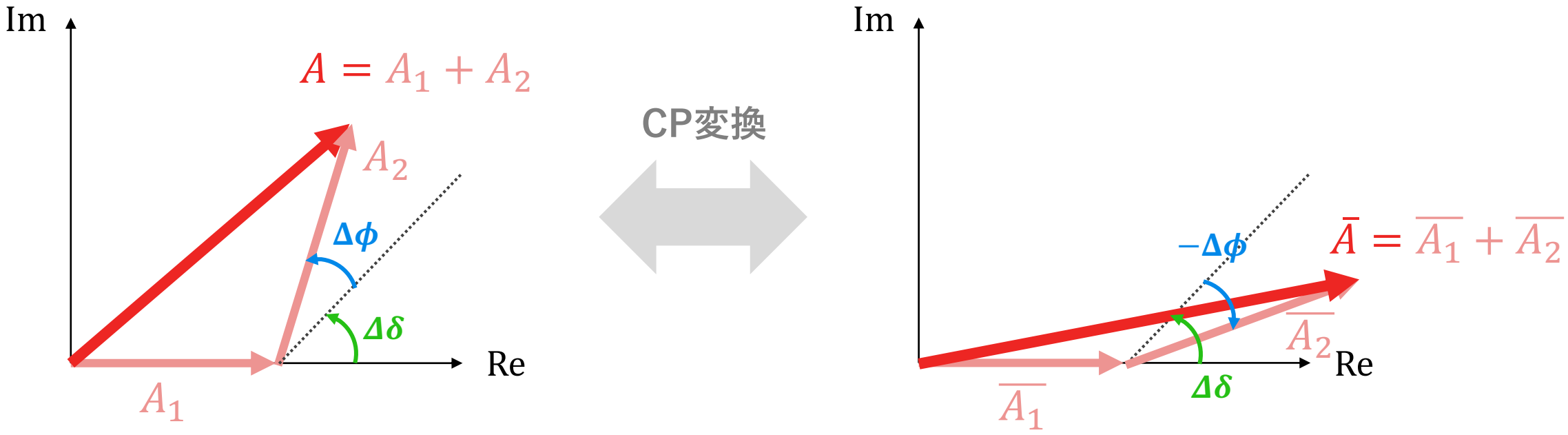
弱位相：CP変換で符号が**変わる**もの。標準模型では弱い相互作用で生じる
強位相：CP変換で符号が**変わらない**もの。主に強い相互作用で生じる。$\mathcal{L}$ が実でも現れる。計算が困難)



直接CP対称性の破れの条件

- 二つ以上の過程がある：$A = A_1 + A_2$. $A_1 = a_1 \exp(i\phi_1 + i\delta_1)$, $A_2 = a_2 \exp(i\phi_2 + i\delta_2)$
- 異なる弱位相を持つ：$\Delta\phi\ (\equiv \phi_2 - \phi_1) \neq 0, \pi$
- 異なる強位相を持つ：$\Delta\delta\ (\equiv \delta_2 - \delta_1) \neq 0, \pi$

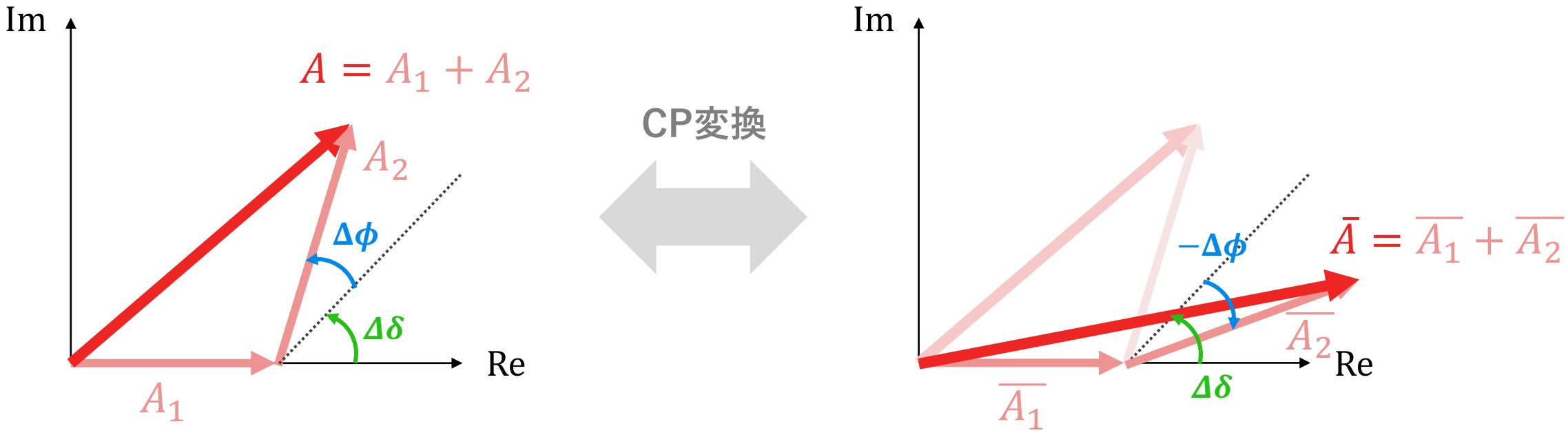
弱位相：CP変換で符号が**変わる**もの。標準模型では弱い相互作用で生じる
強位相：CP変換で符号が**変わらない**もの。主に強い相互作用で生じる。$\mathcal{L}$ が実でも現れる。計算が困難）



直接CP対称性の破れの条件

- 二つ以上の過程がある：$A = A_1 + A_2$. $A_1 = a_1 \exp(i\phi_1 + i\delta_1)$, $A_2 = a_2 \exp(i\phi_2 + i\delta_2)$
- 異なる弱位相を持つ：$\Delta\phi\ (\equiv \phi_2 - \phi_1) \neq 0, \pi$
- 異なる強位相を持つ：$\Delta\delta\ (\equiv \delta_2 - \delta_1) \neq 0, \pi$

弱位相：CP変換で符号が**変わる**もの。標準模型では弱い相互作用で生じる
強位相：CP変換で符号が**変わらない**もの。主に強い相互作用で生じる。$\mathcal{L}$ が実でも現れる。計算が困難）



目次

- B中間子の稀崩壊について

  稀崩壊とは？なぜ新物理に敏感？B中間子の稀崩壊の特徴は？

- 観測量について

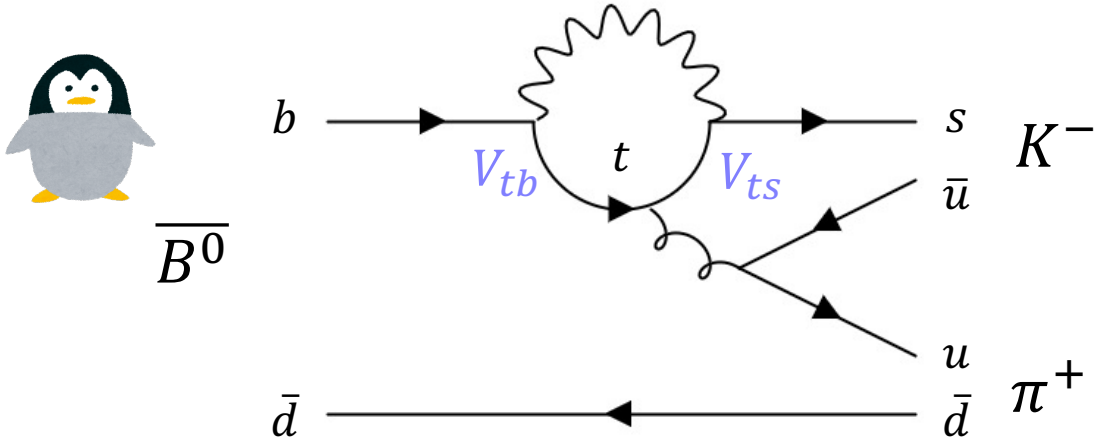
  何を測る？どう測る？測っているものの意味は？

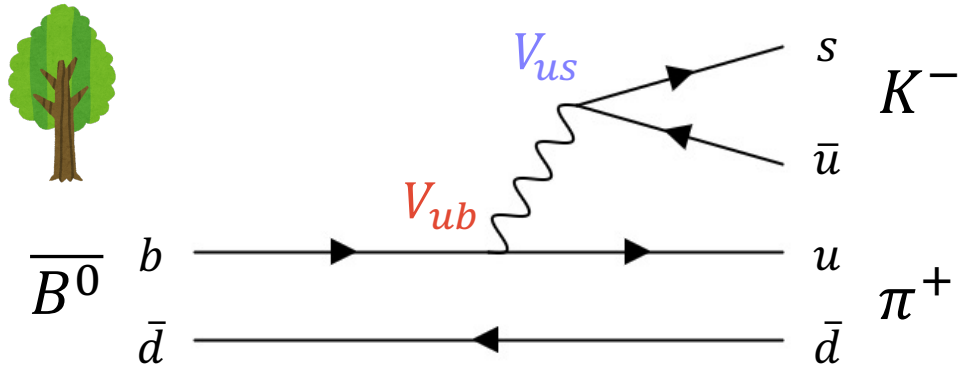
- Belle II での具体的な研究テーマの紹介
  - $B \to K\pi$
  - $b \to s\ell^+\ell^-$
  - $b \to s\nu\bar{\nu}$

$B \to K\pi$ の直接CP非対称性

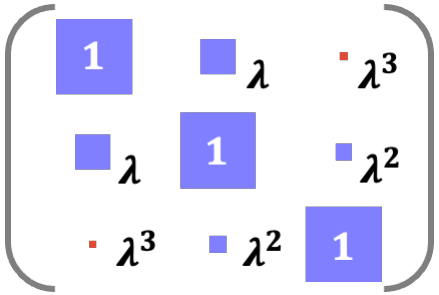
- 主なダイアグラムはPenguinとTree (一部のみ、後述)

(例) $\overline{B^0} \to K^-\pi^+$





- ちょうど同程度の大きさ。Penguinの方が大きい(Tree/Penguin)
  (Penguin : $|V_{tb}V_{ts}^*| \sim O(\lambda^2)$ x ループ抑制(~1/100), Tree : $|V_{ub}V_{us}^*| \sim O(\lambda^4)$)
- V_{ub}は複素位相を持つ(弱位相). 異なるダイアグラムなので強位相が同じと限らない



→ 直接CP非対称性を測定するのに最適な過程

$B \to K\pi$ の直接CP非対称性

- 実際に直接CP非対称性が測定されている！

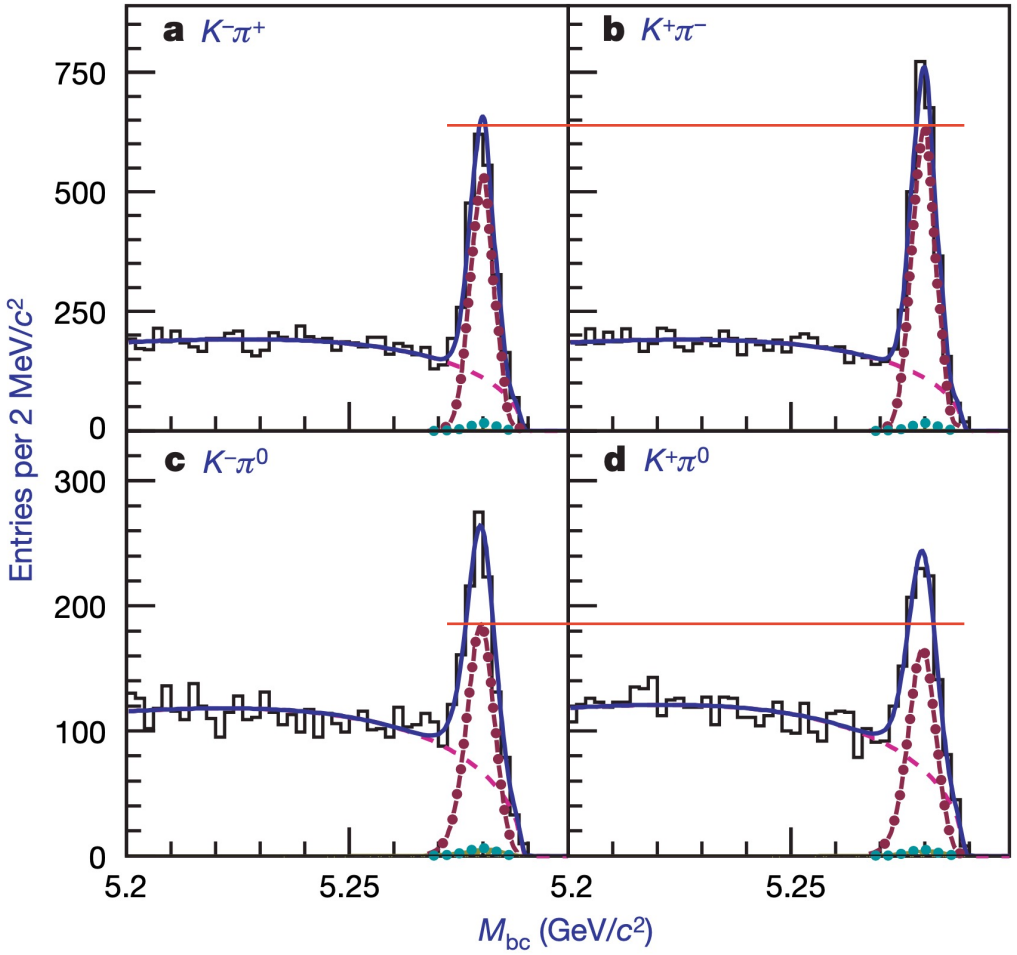
（世界平均）

$$A_{CP}(B^0 \to K^+\pi^-) = -0.083 \pm 0.004$$
$$A_{CP}(B^+ \to K^+\pi^0) = +0.037 \pm 0.021$$

- 強位相の計算が困難なので、予言が難しい
- B^0とB^+はどちらも$\bar{b}$-クォークを含む.
  → 同じ値を取るはず？ $\Delta A_{K\pi} = 0$?

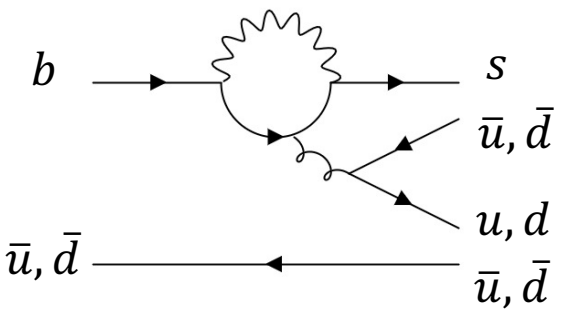
$$\Delta A_{K\pi} \equiv A_{CP}^{K^+\pi^-} - A_{CP}^{K^+\pi^0} = -0.120 \pm 0.02$$

→ 明らかに0からずれている



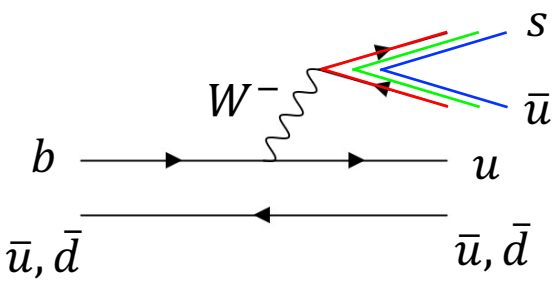
$B \to K\pi$に寄与するダイアグラム

Penguin



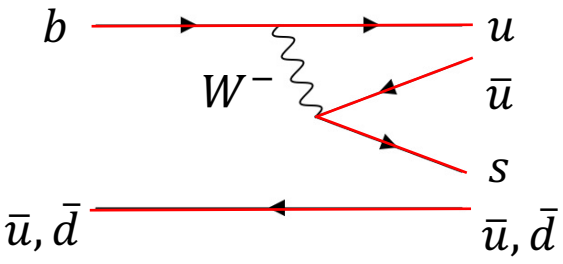
$K^+\pi^0, K^+\pi^-, K^0\pi^+, K^0\pi^0$

Tree



$K^+\pi^0, K^+\pi^-$

Color-suppressed

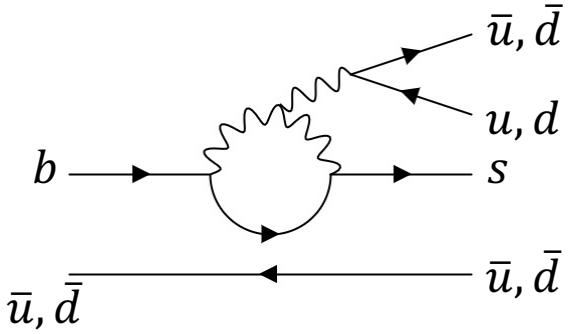


$K^+\pi^0, K^0\pi^0$

- 元のカラーと同じである必要がある

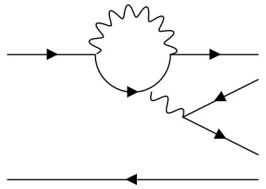
→ Treeの1/3

EW-Penguin



$K^+\pi^0, K^0\pi^0$

- 強い相互作用の$(1/100)^2$
- **Color-suppressed EW penguin** は全部可能



$B \to K\pi$に寄与するダイアグラム

- $K^+\pi^-$ P + T + $P_{EW,C}$
- $K^+\pi^0$ P + T + C + P_{EW} + $P_{EW,C}$
- $K^0\pi^+$ P + $P_{EW,C}$
- $K^0\pi^0$ P + C + P_{EW} + $P_{EW,C}$

$\Delta A_{K\pi} \equiv A_{CP}^{K^+\pi^-} - A_{CP}^{K^+\pi^0} \neq 0$

$\to$ C + P_{EW}の影響？

4つ全て使うことでキャンセルする

□ Isospin sum-rule,

$$I_{K\pi} = A_{CP}^{K^+\pi^-} + A_{CP}^{K^0\pi^+}\frac{\Gamma(K^0\pi^+)}{\Gamma(K^+\pi^-)} - A_{CP}^{K^+\pi^0}\frac{2\Gamma(K^+\pi^0)}{\Gamma(K^+\pi^-)} - A_{CP}^{K^0\pi^0}\frac{2\Gamma(K^0\pi^0)}{\Gamma(K^+\pi^-)}$$

- 標準模型では、$I_{K\pi} = 0$と予言される。もしずれていれば、新物理の証拠！
- 世界平均は、$I_{K\pi} = -0.14 \pm 0.11$. 誤差の範囲内で合っている。
- $B^0 \to K^0\pi^0$が測定精度を制限している。Belle II での実験が重要！

Belle II における$B \to K\pi$の研究

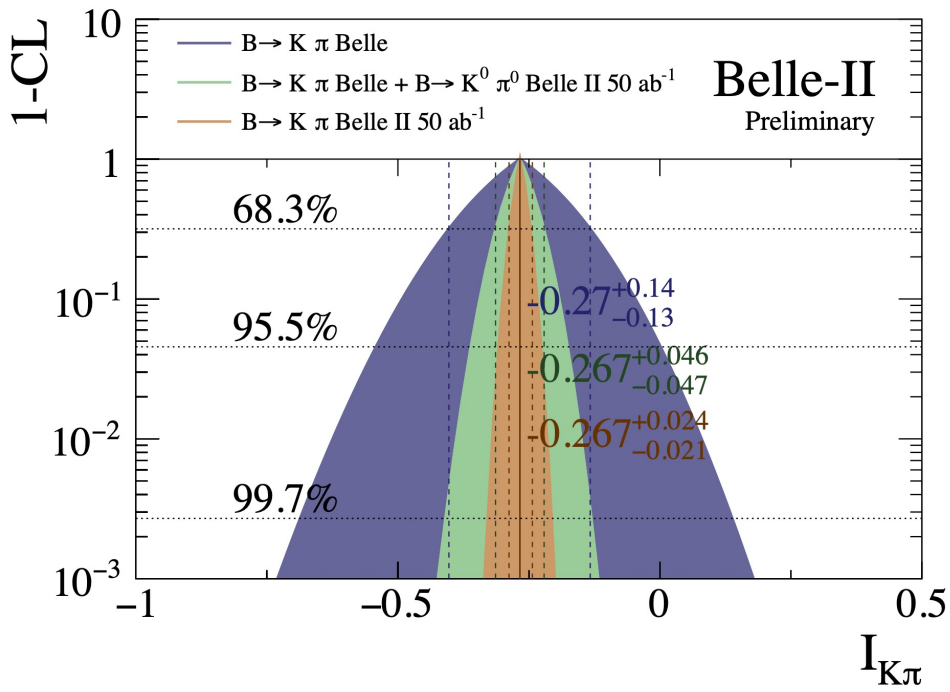
Isospin sum-rule の誤差 @ Belle 実験 Phys.Rev.D 87 (2013) 3, 031103

$$I_{K\pi} = A_{CP}^{K^+\pi^-} + A_{CP}^{K^0\pi^+}\frac{\Gamma(K^0\pi^+)}{\Gamma(K^+\pi^-)} - A_{CP}^{K^+\pi^0}\frac{2\Gamma(K^+\pi^0)}{\Gamma(K^+\pi^-)} - A_{CP}^{K^0\pi^0}\frac{2\Gamma(K^0\pi^0)}{\Gamma(K^+\pi^-)}$$

15% | 2% | 2% | 4% | 2% | 6% | 14% | 8%

- Belleでの測定結果：$I_{K\pi} = -0.27 \pm 0.132 \pm 0.060.$
  - $B^0 \to K^0\pi^0$が誤差の主な要因、特に$A_{CP}^{K^0\pi^0}$.
  - Belle IIでの$B^0 \to K^0\pi^0$だけupdateすると誤差5%（他のモードと同程度になる）
  - 他の測定も合わせると2.5%の精度まで到達

→ **中心値が変わらなければ新物理発見？**

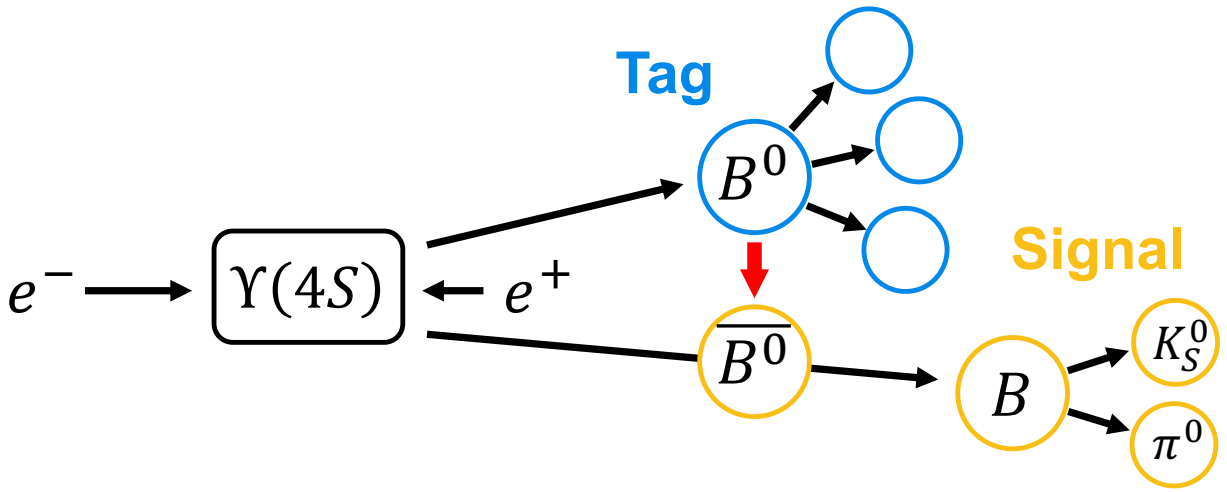


Belle II における$B \to K\pi$の研究

Belle IIでの最初の$B \to K\pi$の結果 arXiv:2106.03766 ($K^+\pi^-, K_S^0\pi^0$), arXiv:2105.04111 ($K^+\pi^0$), arXiv:2104.14871 ($K_S^0\pi^0$)

- $B^0 \to K_S^0\pi^0$ の直接CP対称性の破れ
  - $K_S^0\pi^0$の崩壊からはB中間子のフレーバーがわからない！
    ($K^+\pi^-, K^+\pi^0$はK中間子、$K_S^0\pi^+$はπ中間子の電荷から同定できる)

→ **$B\bar{B}$対の反対側のB中間子からフレーバーを同定**



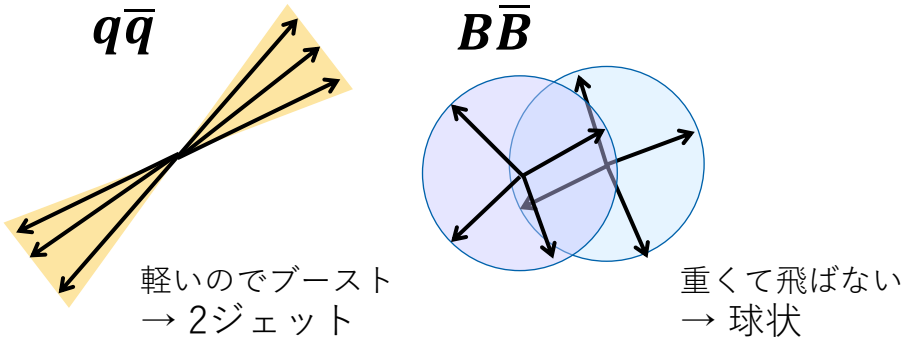
$B \to K_S^0\pi^0$に崩壊する側(Signal)とは反対側のB中間子(Tag)の崩壊を測定.
(e.g.) $B^0 \to D^{*-}\mu^+\nu_\mu$: μ^+ならB^0だとわかる

→ **Tagが崩壊した時のSignalのフレーバーをできる！**

Belle II における$B \to K\pi$の研究

解析手法

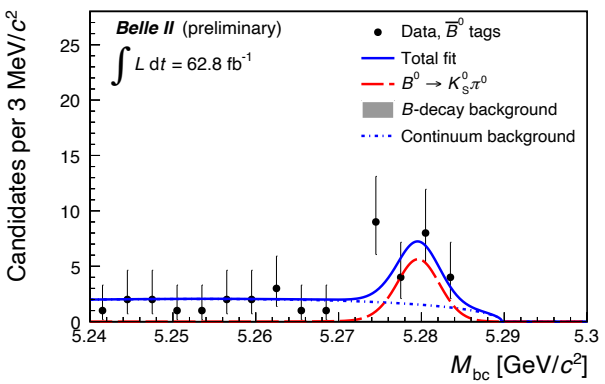
- K_S^0を$\pi^+\pi^-$から再構成, π^0を$\gamma\gamma$から再構成. → 組み合わせてB中間子を再構成
- 背景事象の抑制
  - $B\bar{B}$由来の背景事象(e.g. $B^+ \to K_S^0\pi^0\pi^+$だけどπ^+をmiss.) → $\Delta E, M_{\mathrm{bc}}$の形の違いで区別
  - $e^+e^- \to q\bar{q}$事象 ($q = u, d, s, c$) → イベント形状の違いから区別

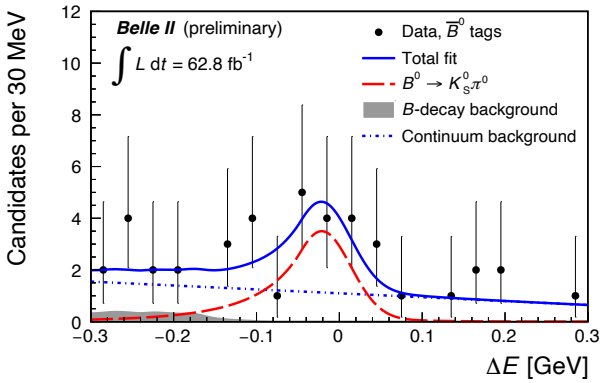


- Tag側のB中間子のフレーバーで事象を二つに分けて、
  それぞれについて事象数を測定
  → **$A_{CP}^{K^0\pi^0}$を計算**
  - フレーバー同定を間違う確率、$B^0 \to \overline{B^0}$に遷移する確率、
    の補正が入る

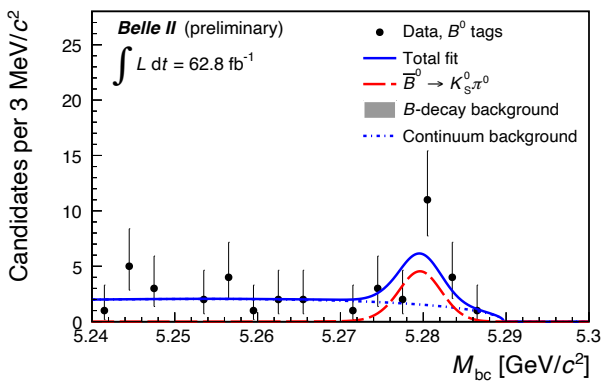
Belle II における$B \to K\pi$の研究

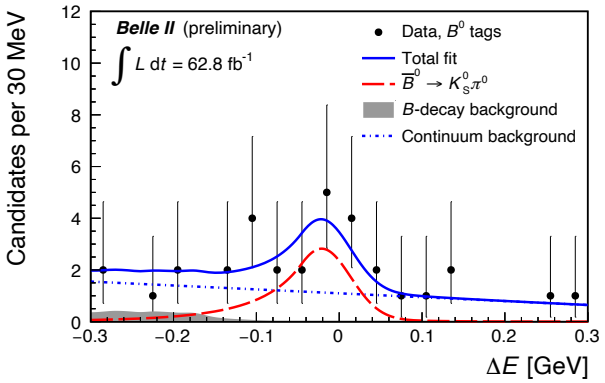
$B^0 \to K_S^0\pi^0$





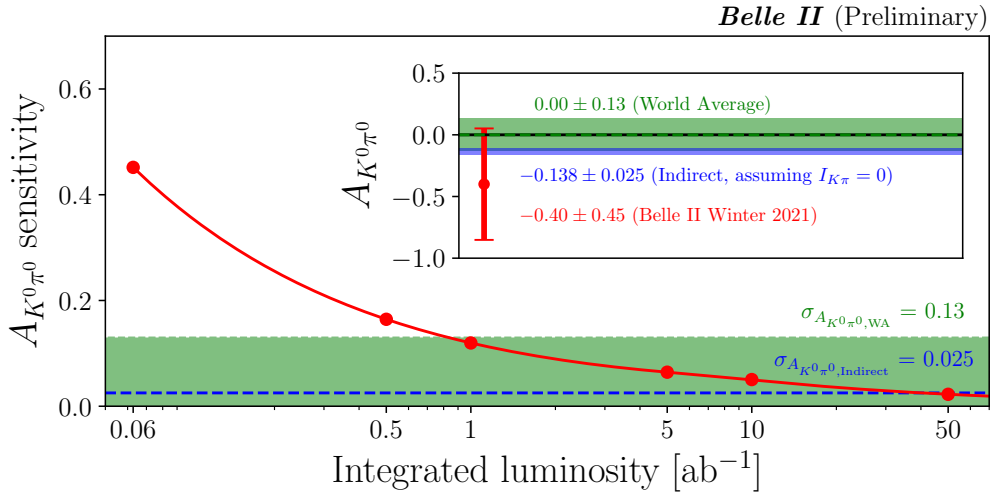
$\overline{B^0} \to K_S^0\pi^0$





$$A_{CP}^{K^0\pi^0} = -0.40^{+0.46}_{-0.44}(\text{stat}) \pm 0.04(\text{syst})$$ (ref. 世界平均 $A_{CP}^{K^0\pi^0} = 0.00 \pm 0.13$)

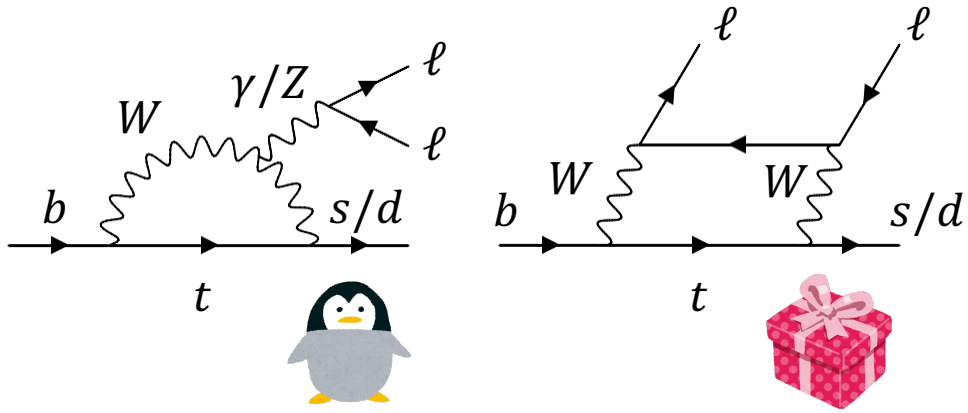
- 積分ルミノシティ：62.8 fb^{-1} (=$B^0\overline{B^0}$：33.9M), 信号事象の数：45^{+9}_{-8}.
- 1 ab^{-1}で現在の世界平均と同程度、
  50 ab-1で2.5%レベル
  (= $I_{K\pi} = 0$ を仮定して他の結果から求まる精度と同じ)



$B \to K^{(*)}\ell^+\ell^-$

- 主なダイアグラム：Penguin と Box.
  - $|V_{tb}V_{ts}^*| \sim O(\lambda^2)$ x ループ抑制(~1/100) x 電磁相互作用2回分 α^2

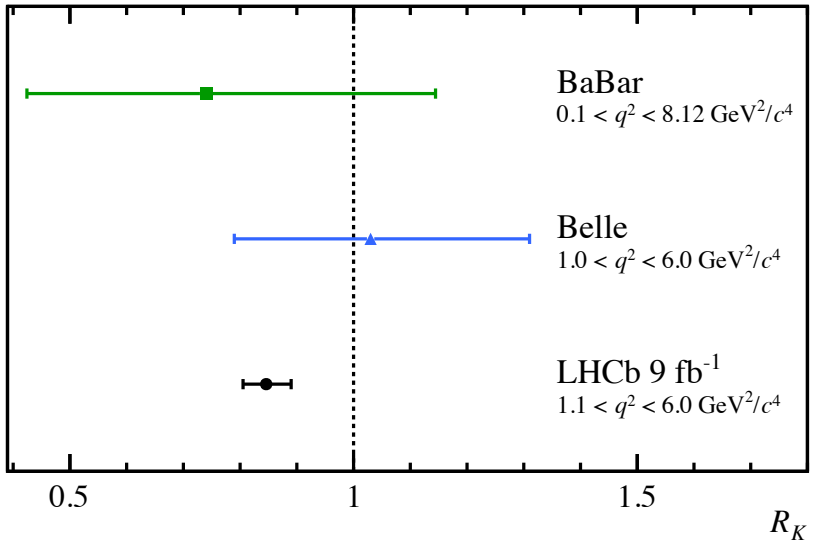
  → **強く抑制されている, $\mathcal{B} \sim 10^{-6}$**



- レプトンが二つある(e, μは直接測定可能)
  - 理論予言がクリーン。実験的にもクリーン。角度分布の情報が重要。

レプトン普遍性の破れのEvidence

$$R_{K^+} = \frac{\mathcal{B}(B \to K^+\mu^+\mu^-)}{\mathcal{B}(B \to K^+e^+e^-)}$$

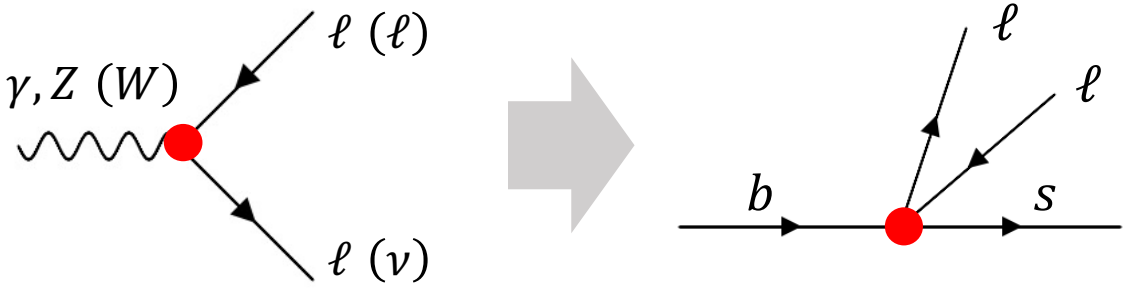


arXiv:2103.11769

$B \to K^{(*)}\ell^+\ell^-$

標準模型では、レプトンの性質は普遍的

- ゲージ粒子との結合定数はe, μ, τで変わらない
- 違いは質量(=ヒッグスとの結合)だけ
- (異なる世代のレプトンとは結合しない)



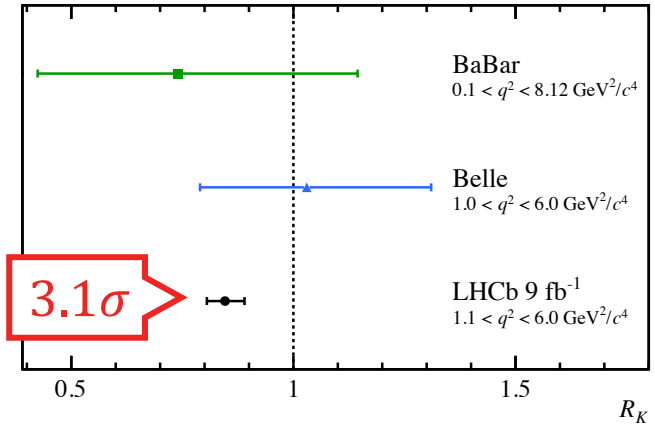
→ $b \to s\ell^+\ell^-$でも同様にレプトンについて普遍的なはず！

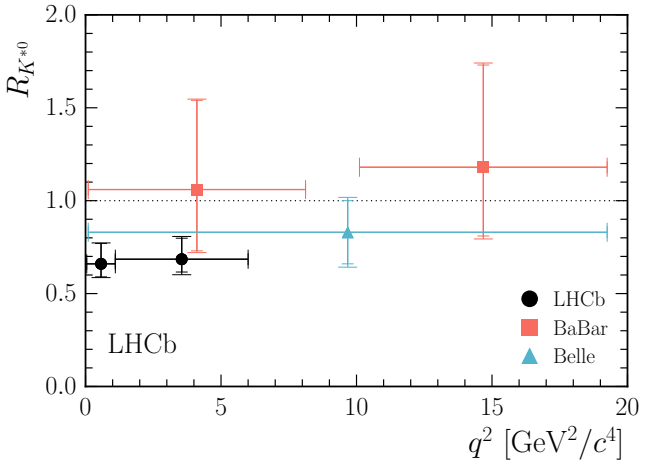
崩壊分岐比の電子とミューオンの比

$$R_{K^{(*)}} = \frac{\mathcal{B}(B \to K^{(*)}\mu^+\mu^-)}{\mathcal{B}(B \to K^{(*)}e^+e^-)}$$

- 標準模型の予言は$R_{K^{(*)}} = 1.00 \pm 0.01$ (!)
- LHCbの結果
  $R_{K^+} = 0.846^{+0.042}_{-0.039}{}^{+0.013}_{-0.012}$, $R_{K^{*0}} = 0.66^{+0.11}_{-0.07} \pm 0.03$

3.1σ

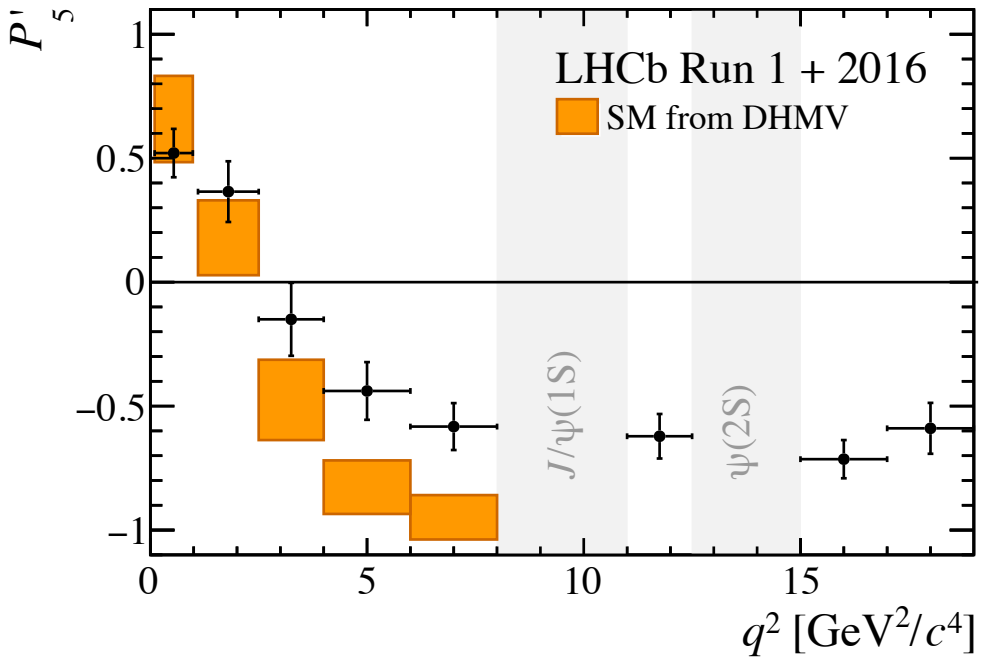




$b \to s\ell^+\ell^-$についての他の測定

それだけではなく、、、

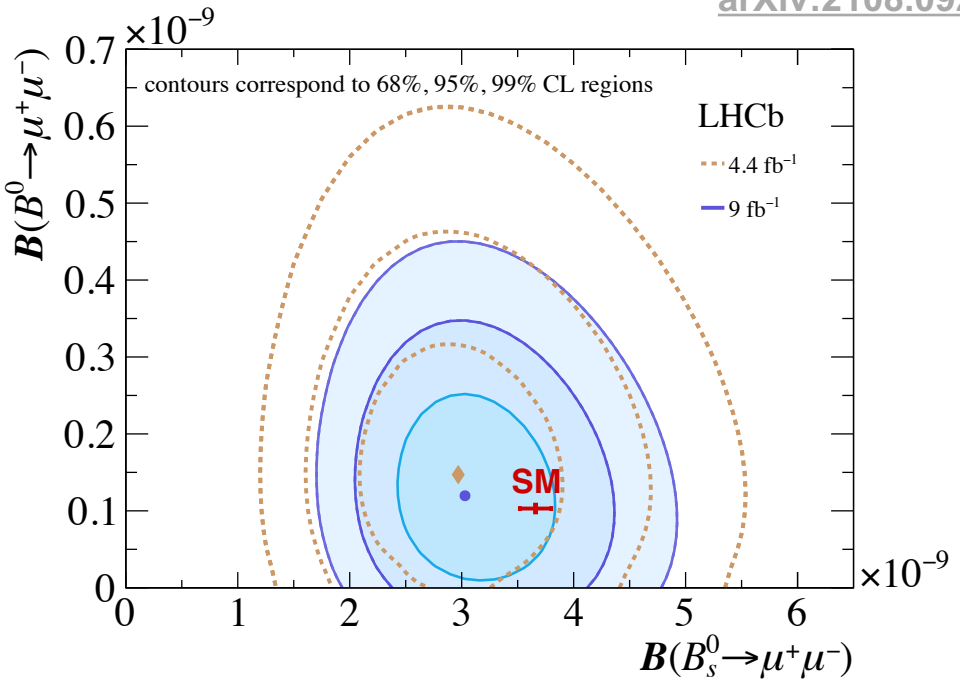
Phys. Rev. Lett. 125 (2020) 011802



$B^0 \to K^{*0}\mu^+\mu^-$の角度分布

- P'_5 : 2.5σ $(4.0 < q^2 < 6.0)$, 2.9σ $(6.0 < q^2 < 8.0)$ LHCb
  2.6σ $(4.0 < q^2 < 8.0)$ Belle
- (他の角度分布と一貫した傾向)

arXiv:2108.09283

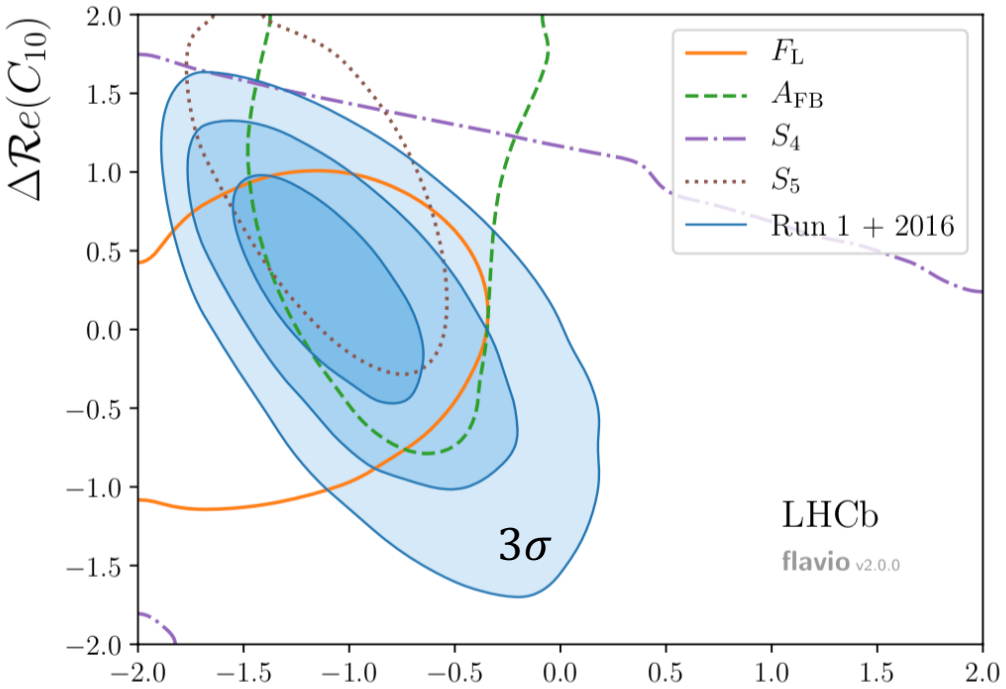


$B^0_{(s)} \to \mu^+\mu^-$の崩壊分岐比

- クォークレベルでは同じものを見ている
- Helicity suppressされるのでさらにrare
- こちらは標準模型と合っていそう

Wilson係数に直すとどうなるか

https://indico.cern.ch/event/868254/



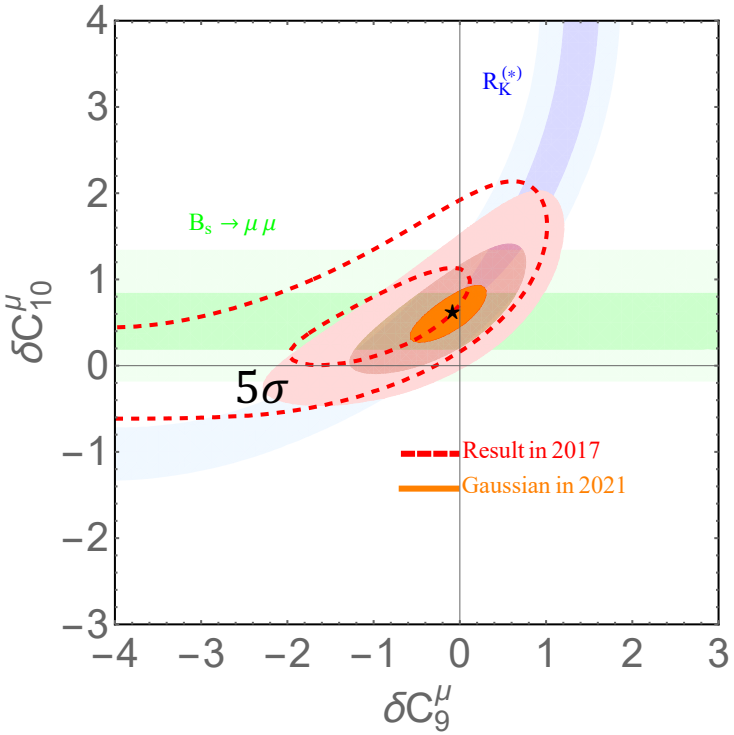
$\Delta\mathcal{R}e(C_9) = \mathrm{Re}(C_9 - C_9^{SM})$

$B^0 \to K^{*0}\mu^+\mu^-$ の角度分布からの制限

$C_9^{SM} \sim +4$
$C_{10}^{SM} \sim -4$

- 各観測量からの制限が重なっている
- SMからのズレは$< 3\sigma$

Phys.Rev.D 104 (2021) 3, 035029



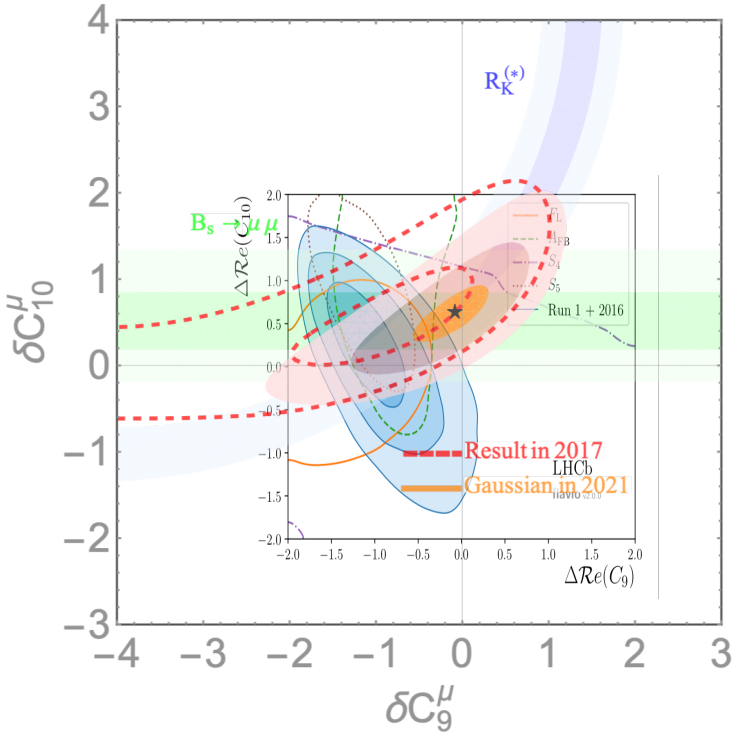
$R_{K^{(*)}}$ と $\mathcal{B}(B_s^0 \to \mu^+\mu^-)$ からの制限

- 理論的不定性の小さい観測量
- SMからのズレは$\sim 5.0\sigma$

Wilson係数に直すとどうなるか

https://indico.cern.ch/event/868254/

Phys.Rev.D 104 (2021) 3, 035029



$B^0 \to K^{*0}\mu^+\mu^-$ の角度分布からの制限

- 各観測量からの制限が重なっている
- SMからのズレは$< 3\sigma$

$R_{K^{(*)}}$と$\mathcal{B}(B_s^0 \to \mu^+\mu^-)$ からの制限

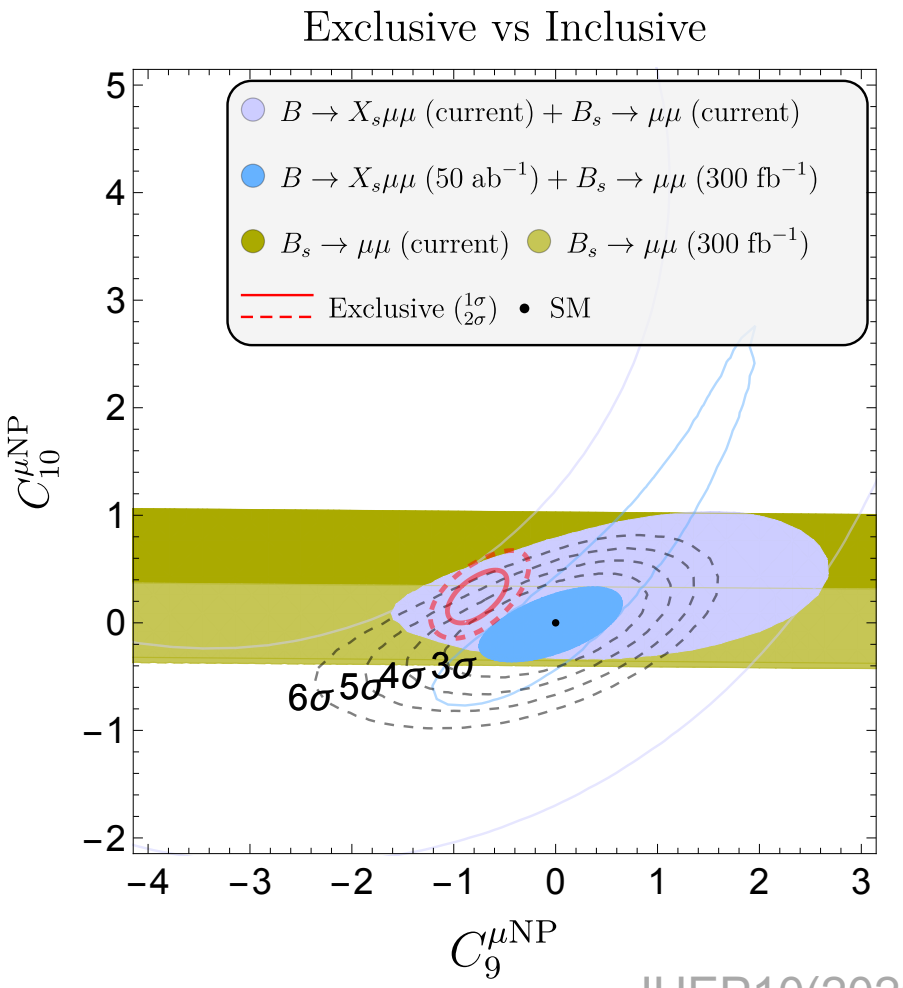
- 理論的不定性の小さい観測量
- SMからのズレは$\sim 5.0\sigma$

Belle IIにおける$b \to s\ell^+\ell^-$の研究

- 電子モードもミューオンモードと同程度の精度で測れる
  - LHCbの角度分布の結果は今のところミューオンのみ
- **Inclusive な解析が可能,**
  $B \to X_s\ell^+\ell^-$ (X_s : s-クォークを含むハドロン)
  - 理論的不定性の小さいクリーンな観測量が得られる
  - 多くの終状態を足し合わせる(or X_sを反跳として測定)
    → クリーンな実験環境＋ K_S^0, π^0の再構成効率が重要！

Exclusive ($B \to K^{(*)}\ell^+\ell^-$)だけでSMから$5\sigma$程度のずれが見えている

→ Inclusive ($B \to X_s\ell^+\ell^-, B_s \to \ell^+\ell^-$)で、
Exclusiveの結果とSMを5σで区別できる

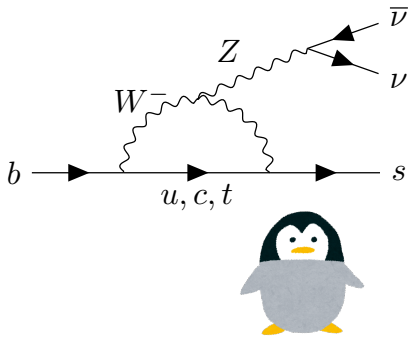


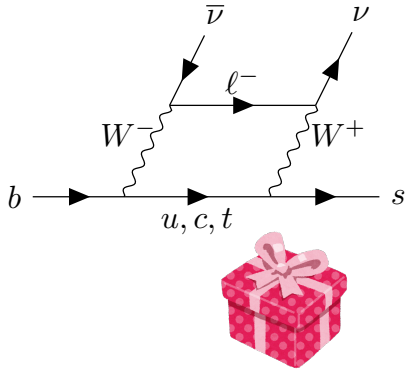
JHEP10(2020)088

$B \to K^{(*)}\nu\bar{\nu}$

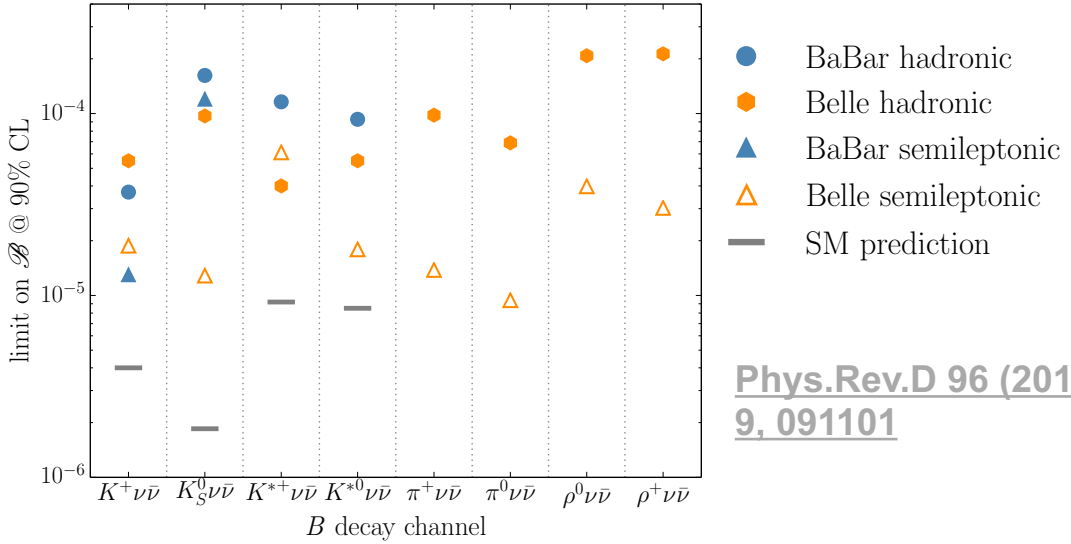
- 主なダイアグラム：Penguin と Box.
  - $|V_{tb}V_{ts}^*| \sim O(\lambda^2)$ x ループ抑制(~1/100)
    x 電磁相互作用2回分 α^2

  → **強く抑制されている, $\mathcal{B} \sim 10^{-6}$**





- 実験的にはまだ発見されていない
  - ニュートリノを二つ含むため実験的に大変
  - $b \to s\ell^+\ell^-$のアノマリーを説明する新物理では、
    標準模型の数倍高い崩壊分岐比を予言する場合も。
    (e.g. Phys.Rev.D 102 (2020) 115015)



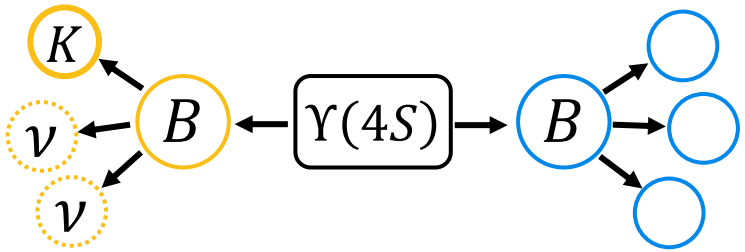
Phys.Rev.D 96 (2017) 9, 091101

- **Belle II : $B \to K^{(*)}\nu\bar{\nu}$ を発見できる唯一の実験**
  - 標準模型の予言通りなら数ab^{-1}で発見

Analysis method : Inclusive tag

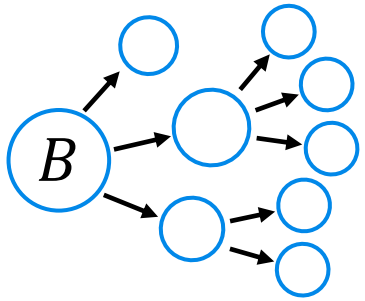
Only kaon can be reconstructed in the signal side.

=> Use the information of the accompanying B-meson.

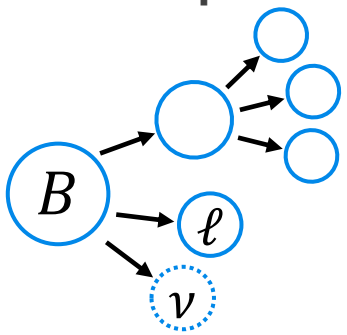


- Hadronic and Semi-leptonic tag.
  - Reconstruct B-meson with specific decay mode.
    => High purity & Low efficiency
  - Multivariate tagging algorithm (FEI) outperforms Belle predecessor. Comput.Softw.Big Sci. 3 (2019) 1, 6
- Inclusive tag
  - No explicit reconstruction of B-meson.
    => Low purity & High efficiency
  - ***First measurement with inclusive tagging at Belle II.***
    arXiv:2104.12624

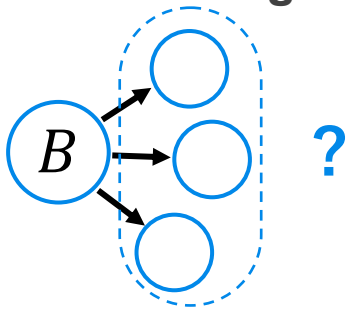
Hadronic tag



Semi-leptonic tag

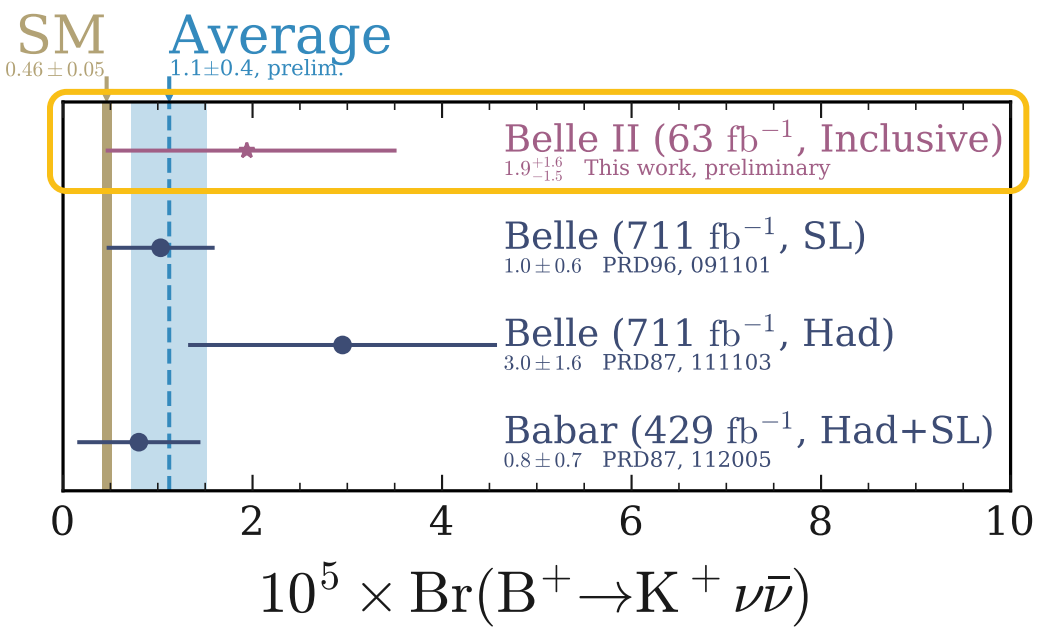


Inclusive tag



Comparison to previous measurements

- When converted to the same luminosity, the inclusive tag measurement outperforms ..
  - Semi-leptonic tag by 10-20%.
  - Hadronic tag by a factor of 3.5.

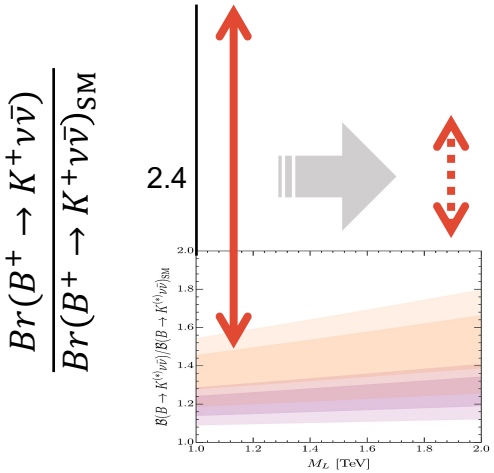


- The preliminary average is

$$Br(B^+ \to K^+\nu\bar{\nu}) = [1.1 \pm 0.4]\times 10^{-5}$$

$$\Rightarrow \frac{Br(B^+ \to K^+\nu\bar{\nu})}{Br(B^+ \to K^+\nu\bar{\nu})_{\mathrm{SM}}} = 2.4 \pm 0.9$$

  - Consistent with SM and expectation in the leptoquark model.



Expected sensitivity is 10% level @ Belle II 50 ab^{-1}

Phys.Rev.D 102 (2020) 115015

まとめ

◻ B中間子の稀崩壊過程

- 標準模型で抑制されている稀崩壊過程は、新物理の寄与を探索するのに重要
- B中間子の稀崩壊は、比較的大きな崩壊分岐比を持ち、豊富な過程を測定可能
- Belle II ではより精密な測定、未発見の過程の探索が重要

◻ 観測量

- ある分布の統計解析で抽出した信号数から、崩壊分岐比を計算する
- 精密測定には、崩壊分岐比の比をとった観測量が有効
  (CP対称性の破れ、前後非対称度、レプトン普遍性、等々)

◻ Belle II における研究

- $B \to K\pi$: 直接CP対称性の破れに関わるアノマリーを検証($A_{CP}(K^0\pi^0)$)
- $b \to s\ell^+\ell^-$: Exclusive-mode (ミューオン)で~5σのtension. Inclusiveでの解析＋電子についての解析
- $B \to K^{(*)}\nu\bar{\nu}$: Belle IIで発見可能。$b \to s\ell^+\ell^-$のアノマリーを予言する理論の検証