Rare B decays

中尾幹彦 (KEK 素核研)

mikihiko.nakao@kek.jp

2018.11.1
フレーバー物理
ワークショップ *2018*
カブリ *IPMU*

アウトライン

- **Rare decay の区分には非常に多くの物理トピックが含まれるが、それらを網羅することはせずに、rare decay を測る意義を少し丁寧に説明することを試みます**
- **これからどんな測定が可能かも簡単に紹介するので、これから解析のテーマを決めようという人へのヒントになればうれしいです**

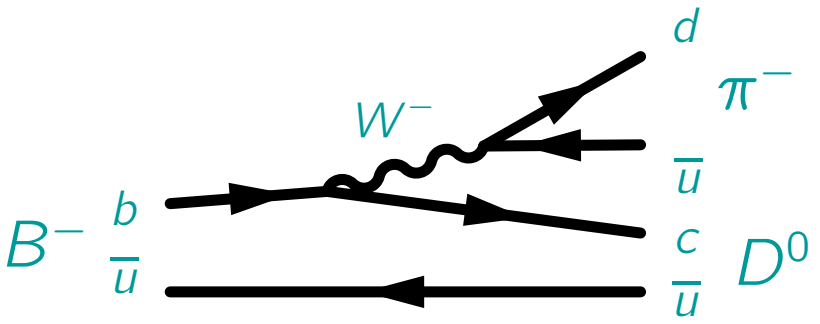
前提知識

- **クォークの弱い相互作用** (CKM 行列要素とクォーク遷移)
- **主な中間子 (**π、ρ、ϕ、K、D、B**…) のスピン、クォーク構成など**
- **ファインマン図** (実験屋レベル)
- **解析の基本** (M_{bc}、ΔE など、理論屋 (?) レベル)

まずは rare decay の定義から

Rare Decay でないもの (ツリー)

- **CKM によるクォーク遷移:** $b \to c \to s \to u$ (重いものから軽いものへ)



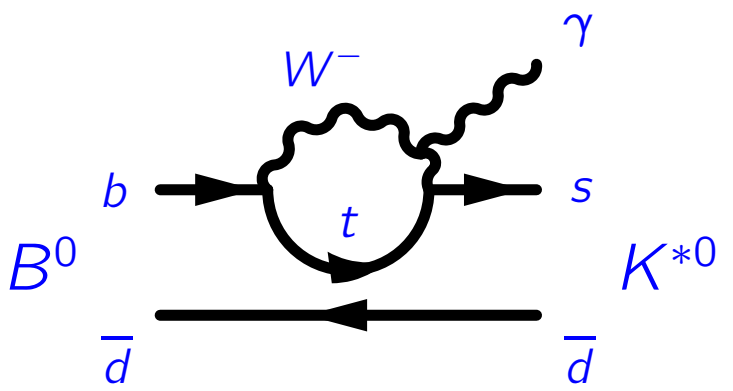
  - 例: $B^- \to D^0\pi^-$ $B^0 \to D^+\ell^-\overline{\nu}$ $B^0 \to J/\psi K_S$

- **CKM が小さいだけでは rare とは言わない:** $b \to u$, $c \to d$
  - 例: $B^0 \to \pi^+\ell^-\overline{\nu}$ $B^+ \to \tau^+\nu$

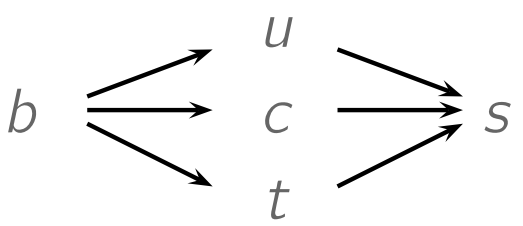
- **これ以外のものはすべて rare (?)**
  - CKM (SM) では $s \to d$、$c \to u$、$b \to s$、$b \to d$ の直接遷移は起きない

Rare Decay なもの (ペンギン)

- $b \to s$ **遷移を** $b \to t \to s$ **の 2 段階遷移で実現** (一瞬より重いものへ)
  - 摂動展開の次の項に相当



- **実際には** $b \to (u,\ c,\ t) \to s$



$$|V^*_{ub}V_{us} + V^*_{cb}V_{cs} + V^*_{tb}V_{ts}|^2 = 0(?)$$

- **CKM だけだと打ち消し合うがクォーク質量差のおかげで non-zero**
  - 結局ほぼ $|V^*_{tb}V_{ts}|^2$ だけが効いてくる

Rare Decay が Rare な理由

- **K 中間子のペンギン崩壊は本当に rare**
  - $s \to t \to d$ なので $|V_{ts}^* V_{td}|^2 = (0.04 \times 0.0087)^2 \sim 10^{-7}$ ととても小さい
  - $K_L \to \pi^0 \nu\overline{\nu}$ の分岐比は 3×10^{-11}
  - これほどまで分岐比が小さいとまず測れないとあきらめそうなものだが、J-PARC KOTO 実験によりもうすぐ測定できそうなところまできている

- **D 中間子のペンギン崩壊はさらに rare**
  - $c \to b \to s$ なので $|V_{ts}^* V_{td}|^2 = (0.04 \times 0.0035)^2 \sim 10^{-8}$ とさらに小さい
  - b-クォークの質量が t-クォークより 1 桁以上軽い
  - これだけ分岐比が小さいと、別の高次補正の過程の寄与の方が大きくなって、ペンギン崩壊はどんなにがんばっても見えない
  - 例: $D^0 \to \phi\gamma$ は $D^0 \to \phi\rho^0$ (これは抑制されない) の ρ^0 が仮想的に生成されて結局質量 0 の光子になる寄与が大きい (Belle で測定されている)

B 中間子の Rare Decay

- B **中間子のペンギン崩壊はあまり rare でない**
  - $b \to t \to s$ なので $|V^{*}_{tb}V_{ts}|^2 = (1 \times 0.04)^2 \sim 10^{-3}$ とそれほど小さくない
  - これにハドロニック崩壊では α_S^2、輻射崩壊では α が掛かる
  - だから $b \to u$ の $|V_{ub}|^2 \sim 10^{-5}$ と同じくらい
  - 分岐比では $b \to s$ も $b \to u$ も 10^{-5} くらいから、$b \to d$ だと 10^{-7}
- B **ファクトリーの** 10^9 **個の** B **イベントでちょうど測れる程度**
  - Rare decay が数多く測定されていて、まったく rare な感じはない

Heavy FLavor AVeraging group (HFLAV) - May 2018
B^0 Branching Fractions (decays with strange mesons part 1) ($\times 10^{-6}$) - UL at 90% CL
Preliminary　Updated results not included in PDG Live as of Dec. 31, 2017

RPP#	Mode	PDG2017 Avg.	BABAR	Belle	CLEO	CDF	LHCb	Our Avg.
257	$K^+\pi^-$	19.6 ± 0.5	$19.1 \pm 0.6 \pm 0.6$	$20.0 \pm 0.34 \pm 0.60$	$18.0^{+2.3+1.2}_{-2.1-0.9}$			$19.57^{+0.53}_{-0.52}$
258	$K^0\pi^0$	9.9 ± 0.5	$10.1 \pm 0.6 \pm 0.4$	$9.68 \pm 0.46 \pm 0.50$	$12.8^{+4.0+1.7}_{-3.3-1.4}$			9.93 ± 0.49
259	$\eta' K^0$	66 ± 4	$68.5 \pm 2.2 \pm 3.1$	$58.9^{+3.6}_{-3.5} \pm 4.3$	$89^{+18}_{-16} \pm 9$			66.1 ± 3.1
260	$\eta' K^{*0}$	2.8 ± 0.6	$3.1^{+0.9}_{-0.8} \pm 0.3$	$2.6 \pm 0.7 \pm 0.2$	$7.8^{+7.7}_{-5.7}$			$2.8^{+0.6}_{-0.5}$
261	$\eta' K_0^*(1430)^0$	6.3 ± 1.6	$6.3 \pm 1.3 \pm 0.9$					6.3 ± 1.6
262	$\eta' K_2^*(1430)^0$	13.7 ± 3.2	$13.7^{+3.0}_{-1.9} \pm 1.2$					$13.7^{+3.2}_{-2.2}$
263	ηK^0	$1.23^{+0.27}_{-0.24}$	$1.15^{+0.43}_{-0.38} \pm 0.09$	$1.27^{+0.33}_{-0.29} \pm 0.08$	$0.0^{+3.0}_{-0.0}$			$1.23^{+0.27}_{-0.24}$
264	ηK^{*0}	15.9 ± 1.0	$16.5 \pm 1.1 \pm 0.8$	$15.2 \pm 1.2 \pm 1.0$	$13.8^{+5.5}_{-4.6} \pm 1.6$			15.9 ± 1.0
265	$\eta K_0^*(1430)^0$	11.0 ± 2.2	$11.0 \pm 1.6 \pm 1.5$					11.0 ± 2.2
266	$\eta K_2^*(1430)^0$	9.6 ± 2.1	$9.6 \pm 1.8 \pm 1.1$					9.6 ± 2.1
267	ωK^0	4.8 ± 0.4	$5.4 \pm 0.8 \pm 0.3$	$4.5 \pm 0.4 \pm 0.3$	$10.0^{+5.4}_{-4.2} \pm 1.4$			4.8 ± 0.4
268	$a_0(980)^0 K^0$ †	< 7.8	< 7.8					< 7.8
269	$b_1^0 K^0$ †	< 7.8	< 7.8					< 7.8
270	$a_0(980)^- K^+$ †	< 1.9	< 1.9					< 1.9
271	$b_1^- K^+$ †	7.4 ± 1.4	$7.4 \pm 1.0 \pm 1.0$					7.4 ± 1.4
272	$b_1^0 K^{*0}$ †	< 8.0	< 8.0					< 8.0
273	$b_1^- K^{*+}$ †	< 5.0	< 5.0					< 5.0
274	$a_0(1450)^- K^+$ †	< 3.1	< 3.1					< 3.1
275	$K_S X^0$(Familon) †	< 53			< 53			< 53
276	ωK^{*0}	2.0 ± 0.5	$2.2 \pm 0.6 \pm 0.2$	$1.8 \pm 0.7^{+0.3}_{-0.2}$				2.0 ± 0.5
277	$\omega(K\pi)_0^{*0}$	18.4 ± 2.5	$18.4^{+1.8}_{-1.7}$					$18.4^{+1.8}_{-1.7}$
278	$\omega K_0^*(1430)^0$	16.0 ± 3.4	$16.0 \pm 1.6 \pm 3.0$					16.0 ± 3.4
279	$\omega K_2^*(1430)^0$	10.1 ± 2.3	$10.1 \pm 2.0 \pm 1.1$					10.1 ± 2.3
280	$\omega K^+\pi^-$ (NR) [1]	5.1 ± 1.0		$5.1 \pm 0.7 \pm 0.7$				5.1 ± 1.0
281	$K^+\pi^-\pi^0$	37.8 ± 3.2	$38.5 \pm 1.0 \pm 3.9$	$36.6^{+4.2}_{-4.3} \pm 3.0$				37.8 ± 3.2
282	$\rho^- K^+$	7.0 ± 0.9	$6.6 \pm 0.5 \pm 0.8$	$15.1^{+3.4+2.4}_{-3.3-2.6}$				7.0 ± 0.9
283	$\rho(1450)^- K^+$	2.4 ± 1.2	$2.4 \pm 1.0 \pm 0.6$					2.4 ± 1.2
284	$\rho(1700)^- K^+$	0.6 ± 0.7	$0.6 \pm 0.6 \pm 0.4$					0.6 ± 0.7
285	$K^+\pi^-\pi^0$ (NR)	2.8 ± 0.6	$2.8 \pm 0.5 \pm 0.4$	< 9.4				2.8 ± 0.6
286	$(K\pi)_0^{*+}\pi^-$	34 ± 5	$34.2 \pm 2.4 \pm 4.1$					34.2 ± 4.8
287	$(K\pi)_0^{*+}\pi^0$	8.6 ± 1.7	$8.6^{+1.1}_{-1.3}$					$8.6^{+1.1}_{-1.3}$

Results for LHCb are relative BFs converted to absolute BFs.
CLEO upper limits that have been greatly superseded are not shown.
† In this product of BFs, all daughter BFs not shown are set to 100%.
[1] $0.755 < M(K\pi) < 1.250$ GeV/c^2.

Heavy FLavor AVeraging group (HFLAV) - May 2018
B^0 Branching Fractions (decays with strange mesons part 2) ($\times 10^{-6}$) - UL at 90% CL
Preliminary　Updated results not included in PDG Live as of Dec. 31, 2017

RPP#	Mode	PDG2017 Avg.	BABAR	Belle	CLEO	CDF	LHCb	Our Avg.
288	$K_2^*(1430)^0\pi^0$	< 4.0	< 4.0					< 4.0
289	$K^*(1680)^0\pi^0$	< 7.5	< 7.5					< 7.5
290	$K_x^{*0}\pi^0$ [2]	6.1 ± 1.6		$6.1^{+1.6+0.5}_{-1.5-0.6}$				$6.1^{+1.7}_{-1.6}$
291	$K^0\pi^+\pi^-$	52.0 ± 2.4	$50.2 \pm 1.5 \pm 1.8$	$47.5 \pm 2.4 \pm 3.7$	$50^{+10}_{-9} \pm 7$		$48.8^{+3.2}_{-2.8}$ §	49.4 ± 1.7
292	$K^0\pi^+\pi^-$ (NR)	$14.7^{+4.0}_{-2.6}$	$11.1^{+2.5}_{-1.0} \pm 0.9$	$19.9 \pm 2.5^{+1.7}_{-2.0}$				14.7 ± 2.0
293	$\rho^0 K^0$	4.7 ± 0.6	$4.4 \pm 0.7 \pm 0.3$	$6.1 \pm 1.0^{+1.1}_{-1.2}$				4.7 ± 0.7
294	$K^{*+}\pi^-$	8.4 ± 0.8	8.2 ± 0.9 [3]	$8.4 \pm 1.1^{+1.0}_{-0.9}$	$16^{+6}_{-5} \pm 2$			8.4 ± 0.8
295	$K_0^*(1430)^+\pi^-$	33 ± 7	$29.9^{+2.3}_{-1.7} \pm 3.6$	$49.7 \pm 3.8^{+6.8}_{-8.2}$				$33.5^{+3.9}_{-3.8}$
296	$K_x^{*+}\pi^-$ [2]	5.1 ± 1.6		$5.1^{+1.5+0.6}_{-1.5-0.7}$				$5.1^{+1.6}_{-1.7}$
297	$K^*(1410)^+\pi^-$ †	< 3.8		< 3.8				< 3.8
298	$f_0(980)K^0$ †	7.0 ± 0.9	$6.9 \pm 0.8 \pm 0.6$	$7.6 \pm 1.7^{+0.9}_{-1.3}$				7.0 ± 0.9
299	$f_2(1270)^0 K^0$	$2.7^{+1.3}_{-1.2}$	$2.7^{+1.0}_{-0.8} \pm 0.9$	< 2.5 †				$2.7^{+1.3}_{-1.2}$
300	$f_x(1300)^0 K^0$	1.8 ± 0.7	$1.81^{+0.55}_{-0.45} \pm 0.48$					$1.81^{+0.73}_{-0.66}$
301	$K^{*0}\pi^0$	3.3 ± 0.6	$3.3 \pm 0.5 \pm 0.4$	< 3.5				3.3 ± 0.6
302	$K_2^*(1430)^+\pi^-$	< 6	< 16.2	< 6.3				< 6.3
303	$K^*(1680)^+\pi^-$	< 10	< 25	< 10.1				< 10.1
304	$K^+\pi^-\pi^+\pi^-$	< 230	< 230 [4]					< 230 [4]
305	$\rho^0 K^+\pi^-$	2.8 ± 0.7		$2.8 \pm 0.5 \pm 0.5$ [2]				2.8 ± 0.7
306	$f_0(980)K^+\pi^-$	$1.4^{+0.5}_{-0.6}$		$1.4 \pm 0.4^{+0.3}_{-0.4}$ [2]				$1.4^{+0.5}_{-0.6}$
307	$K^+\pi^-\pi^+\pi^-$ (NR)	< 2.1			< 2.1			< 2.1
308	$K^{*0}\pi^+\pi^-$	55 ± 5	$54.5 \pm 2.9 \pm 4.3$					54.5 ± 5.2
309	$K^{*0}\rho^0$	3.9 ± 1.3	$5.1 \pm 0.6^{+0.6}_{-0.8}$	$2.1^{+0.8+0.9}_{-0.7-0.5}$				3.9 ± 0.8
310	$f_0(980)K^{*0}$ †	$3.9^{+2.1}_{-1.8}$	$5.7 \pm 0.6 \pm 0.4$	$1.4^{+0.6+0.6}_{-0.5-0.4}$				3.9 ± 0.5
311	$K_1(1270)^+\pi^-$	< 30	17^{+6}_{-25}					17^{+6}_{-25}
312	$K_1(1400)^+\pi^-$	< 27	16^{+8}_{-24}					16^{+8}_{-24}
313	$a_1^- K^+$	16 ± 4	$16.3 \pm 2.9 \pm 2.3$					16.3 ± 3.7
314	$K^{*+}\rho^-$	10.3 ± 2.6	$10.3 \pm 2.3 \pm 1.3$					10.3 ± 2.6
315	$K_0(1430)^+\rho^-$	28 ± 12	$28 \pm 10 \pm 6$					28 ± 11
316	$K_1(1400)^0\rho^0$	< 3000	$28 \pm 10 \pm 6$ [5]					28 ± 11
317	$K_0^*(1430)^0\rho^0$	27 ± 6	$27 \pm 4 \pm 4$					27 ± 5
318	$K_0^*(1430)^0 f_0(980)$	2.7 ± 0.9	$2.7 \pm 0.7 \pm 0.6$					2.7 ± 0.9
319	$K_2^*(1430)^0 f_0(980)$	8.6 ± 2.0	$8.6 \pm 1.7 \pm 1.0$					8.6 ± 2.0
320	K^+K^-	0.078 ± 0.015	< 0.5	$0.10 \pm 0.08 \pm 0.04$		$0.23 \pm 0.10 \pm 0.10$	$0.0780 \pm 0.0127 \pm 0.0084$	0.0803 ± 0.0147
321	$K^0\overline{K}^0$	1.21 ± 0.16	$1.08 \pm 0.28 \pm 0.11$	$1.26 \pm 0.19 \pm 0.05$				1.21 ± 0.16
322	$K^0 K^-\pi^+$	6.5 ± 0.8	$6.4 \pm 1.0 \pm 0.6$	< 18			6.07 ± 0.84 [1]	6.18 ± 0.68
323	$K^{*\mp}K^\pm$						< 0.4	< 0.4
324	$K^{*0}\overline{K}^0$ ‡	< 0.96	< 1.9				< 0.96	< 0.96
325	$K^+K^-\pi^0$	2.2 ± 0.6		$2.17 \pm 0.60 \pm 0.24$				2.17 ± 0.65
326	$K_S K_S \pi^0$	< 0.9	< 0.9					< 0.9
327	$K_S K_S \eta$	< 1.0	< 1.0					< 1.0
328	$K_S K_S \eta'$	< 2.0	< 2.0					< 2.0
329	$K^+K^-K^0$	24.9 ± 3.1	$26.5 \pm 0.9 \pm 0.8$	$28.3 \pm 3.3 \pm 4.0$			27.3 ± 1.9 [1]	26.8 ± 1.0
330	ϕK^0	7.3 ± 0.7	$7.1 \pm 0.6^{+0.4}_{-0.3}$	$9.0^{+2.2}_{-1.8} \pm 0.7$	$5.4^{+3.7}_{-2.7} \pm 0.7$			$7.3^{+0.7}_{-0.6}$
331	$f_0(980)K^0$ †	$7.0^{+3.5}_{-3.0}$	$7.0^{+2.6}_{-1.8} \pm 2.4$					$7.0^{+3.5}_{-3.0}$

Results for CDF and LHCb are relative BFs converted to absolute BFs.
CLEO upper limits that have been greatly superseded are not shown.
† In this product of BFs, all daughter BFs not shown are set to 100%.　‡ Includes two distinct decay processes: $\mathcal{B}(B^0 \to f) + \mathcal{B}(B^0 \to \bar{f})$.
§ Obtained from a fit to the ratios of BFs measured by LHCb (Ref. [?]) and to the averages of the BFs in their numerators, as measured by other experiments (RPP 322 and 329).
[1] Obtained from a fit to the ratios of BFs measured by LHCb (Ref. [?]) and to the averages of the BFs therein, as measured by other experiments (excluding the present line).
[2] $0.75 < M(K\pi) < 1.20$ GeV/c^2. [3] Average of BABAR results from $B^0 \to K^+\pi^-\pi^0$ [?] and $B^0 \to K^0\pi^+\pi^-$ [?].
[4] Result from DELPHI. Cited in the BABARcolumn to avoid adding a column to the table.
[5] Result from ARGUS. Cited in the BABARcolumn to avoid adding a column to the table.

Heavy FLavor AVeraging group (HFLAV) - May 2018
B^0 Branching Fractions (decays with strange mesons part 3) ($\times 10^{-6}$) - UL at 90% CL
Preliminary　Updated results not included in PDG Live as of Dec. 31, 2017

RPP#	Mode	PDG2017 Avg.	BABAR	Belle	CLEO	CDF	LHCb	Our Avg.
332	$f_0(1500)K^0$ †	13^{+7}_{-5}	$13.3^{+5.8}_{-4.4} \pm 3.2$					$13.3^{+6.6}_{-5.4}$
333	$f_2'(1525)K^0$	$0.3^{+0.5}_{-0.4}$	$0.29^{+0.27}_{-0.18} \pm 0.36$					$0.29^{+0.45}_{-0.40}$
334	$f_0(1710)K^0$ †	4.4 ± 0.9	$4.4 \pm 0.7 \pm 0.5$					4.4 ± 0.9
335	$K^0K^+K^-$ (NR)	33 ± 10	$33 \pm 5 \pm 9$					33 ± 10
336	$K_S K_S K_S$	6.0 ± 0.5	$6.19 \pm 0.48 \pm 0.19$	$4.2^{+1.6}_{-1.3} \pm 0.8$				6.04 ± 0.50
337	$f_0(980)K_S$ †	2.7 ± 1.8	$2.7^{+1.3}_{-1.2} \pm 1.3$ †					2.7 ± 1.8
338	$f_0(1710)K_S$ †	$0.50^{+0.50}_{-0.26}$	$0.50^{+0.46}_{-0.24} \pm 0.11$ †					$0.50^{+0.47}_{-0.26}$
339	$f_0(2010)K_S$ †	0.5 ± 0.6	$0.54^{+0.21}_{-0.20} \pm 0.52$ †					0.54 ± 0.56
340	$K_S K_S K_S$ (NR)	13.3 ± 3.1	$13.3^{+2.2}_{-2.3} \pm 2.2$					$13.3^{+3.1}_{-3.2}$
341	$K_S K_S K_L$	< 16	< 16 [2]					< 16 [2]
342	$K^{*0}K^+K^-$	27.5 ± 2.6	$27.5 \pm 1.3 \pm 2.2$					27.5 ± 2.6
343	ϕK^{*0}	10.0 ± 0.5	$9.7 \pm 0.5 \pm 0.6$	$10.4 \pm 0.5 \pm 0.6$	$11.5^{+4.5+1.8}_{-3.7-1.7}$			$10.1^{+0.6}_{-0.5}$
344	$K^+\pi^-\pi^+K^-$ (NR)	< 71.7		< 71.7 [3]				< 71.7 [3]
345	$K^{*0}\pi^+K^-$	4.5 ± 1.3	$4.6 \pm 1.1 \pm 0.8$	< 13.9 [3]				4.6 ± 1.4
346	$K^{*0}\overline{K}^{*0}$	0.8 ± 0.5	$1.28^{+0.35}_{-0.30} \pm 0.11$	$0.26^{+0.33+0.10}_{-0.29-0.08}$				0.81 ± 0.23
347	$K^+\pi^-K^+\pi^-$ (NR)	< 6.0		< 6.0 [3]				< 6.0 [3]
348	$K^{*0}K^+\pi^-$	< 2.2	< 2.2	< 7.6 [3]				< 2.2
349	$K^{*0}K^{*0}$	< 0.2	< 0.41	< 0.2				< 0.2
350	$K^{*+}K^{*-}$	< 2.0	< 2.0					< 2.0
351	$K_1^*(1400)^0\phi$	< 5000	< 5000 ‡					< 5000 ‡
352	$(K\pi)_0^{*0}\phi$	4.3 ± 0.4	$4.3 \pm 0.4 \pm 0.4$	$4.3 \pm 0.4 \pm 0.4$				4.3 ± 0.4
353	$(K\pi)_0^{*0}\phi$	< 1.7	< 1.7 [4]					< 1.7 [4]
354	$K_0^*(1430)^0\pi^+K^-$	< 31.8		< 31.8 [3]				< 31.8 [3]
355	$K_0^*(1430)^0\overline{K}^{*0}$	< 3.3		< 3.3				< 3.3
356	$K_0^*(1430)^0\overline{K}_0^*(1430)^0$	< 8.4		< 8.4				< 8.4
357	$\phi K_0^*(1430)^0$	3.9 ± 0.8	$3.9 \pm 0.5 \pm 0.6$	$4.3 \pm 0.4 \pm 0.4$				4.2 ± 0.5
358	$K_0^*(1430)^0 K^{*0}$	< 1.7		< 1.7				< 1.7
359	$K_0^*(1430)^0 K_0^*(1430)^0$	< 4.7		< 4.7				< 4.7
360	$\phi K^*(1680)^0$	< 3.5	< 3.5					< 3.5
361	$\phi K_3^*(1780)^0$	< 2.7	< 2.7					< 2.7
362	$\phi K_4^*(2045)^0$	< 15.3	< 15.3					< 15.3
363	$\rho^0 K_2^*(1430)^0$	< 1100	< 1100 ‡					< 1100 ‡
364	$\phi K_2^*(1430)^0$	6.8 ± 0.9	$7.5 \pm 0.9 \pm 0.5$	$5.5^{+0.9}_{-0.7} \pm 1.0$				6.8 ± 0.8
365	$\phi\phi K^0$ §	4.5 ± 0.9	$4.5 \pm 0.8 \pm 0.3$					4.5 ± 0.9
366	$\eta'\eta' K^0$	< 31	< 31					< 31

† In this product of BFs, all daughter BFs not shown are set to 100%. ‡ Result from ARGUS. Cited in the BABAR column to avoid adding a column to the table.
§ $M_{\phi\phi} < 2.85$ GeV/c^2.
[2] $0.75 < M(K\pi) < 1.20$ GeV/c^2. [3] $0.70 < M(K\pi) < 1.70$ GeV/c^2.
[4] $1.60 < M(K\pi) < 2.15$ GeV/c^2.

K や D では “rare” decay を発見するだけで「大発見」の可能性があるが、B ではそういうわけにはいかない

典型的な崩壊モード

- $b \to s$ **ペンギンの例:** $B^0 \to K^+\pi^-$
  - ツリーの寄与もある ($|V_{us}|$ で抑制)
  - 分岐比は 2×10^{-5} くらい

- $b \to u$ **ツリーの例:** $B^0 \to \rho^-\rho^+$
  - ペンギンの寄与もある ($b \to d$ なので小さい)
  - 分岐比は 3×10^{-5} くらい
    ($B \to \pi^+\pi^-$ は 0.5×10^{-5} と小さい)

- $b \to d$ **ペンギンの例:** $B^0 \to K^0\overline{K}^0$
  - 消滅ダイアグラムの寄与もある
  - 分岐比は 1×10^{-6} くらい

HFLAV のリスト

Heavy FLavor AVeraging group (HFLAV) - May 2018

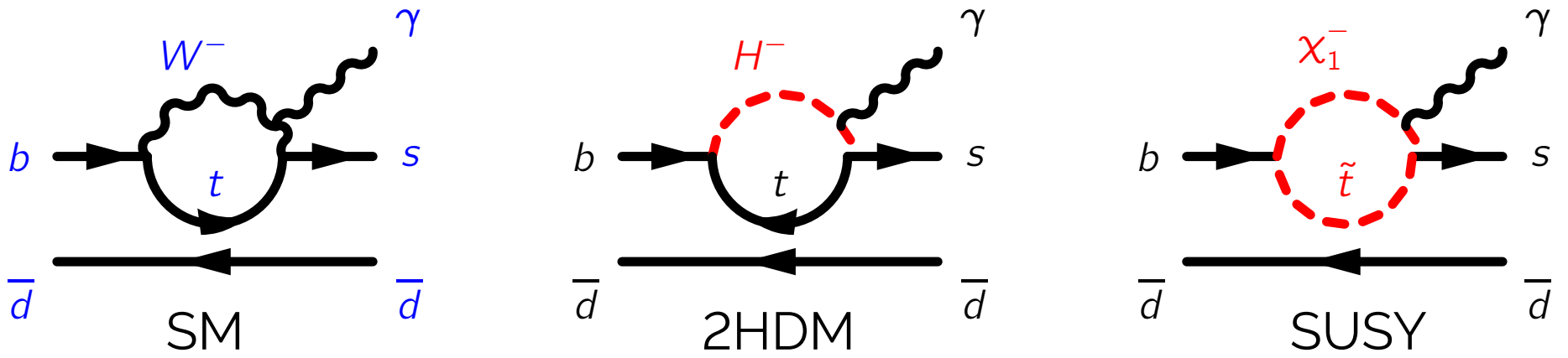
B^0 Branching Fractions (decays with strange mesons part 1) ($\times 10^{-6}$) - UL at 90% CL

Preliminary Updated results not included in PDG Live as of Dec. 31, 2017

RPP#	Mode	PDG2017 Avg.	*BABAR*	Belle	CLEO	CDF	LHCb	Our Avg.
257	$K^+\pi^-$	19.6 ± 0.5	$19.1 \pm 0.6 \pm 0.6$	$20.0 \pm 0.34 \pm 0.60$	$18.0^{+2.3+1.2}_{-2.1-0.9}$			$19.57^{+0.53}_{-0.52}$
258	$K^0\pi^0$	9.9 ± 0.5	$10.1 \pm 0.6 \pm 0.4$	$9.68 \pm 0.46 \pm 0.50$	$12.8^{+4.0+1.7}_{-3.3-1.4}$			9.93 ± 0.49
259	$\eta' K^0$	66 ± 4	$68.5 \pm 2.2 \pm 3.1$	$58.9^{+3.6}_{-3.5} \pm 4.3$	$89^{+18}_{-16} \pm 9$			66.1 ± 3.1
260	$\eta' K^{*0}$	2.8 ± 0.6	$3.1^{+0.9}_{-0.8} \pm 0.3$	$2.6 \pm 0.7 \pm 0.2$	$7.8^{+7.7}_{-5.7}$			$2.8^{+0.6}_{-0.5}$
261	$\eta' K_0^*(1430)^0$	6.3 ± 1.6	$6.3 \pm 1.3 \pm 0.9$					6.3 ± 1.6
262	$\eta' K_2^*(1430)^0$	13.7 ± 3.2	$13.7^{+3.0}_{-1.9} \pm 1.2$					$13.7^{+3.2}_{-2.2}$
263	ηK^0	$1.23^{+0.27}_{-0.24}$	$1.15^{+0.43}_{-0.38} \pm 0.09$	$1.27^{+0.33}_{-0.29} \pm 0.08$	$0.0^{+3.0}_{-0.0}$			$1.23^{+0.27}_{-0.24}$
264	ηK^{*0}	15.9 ± 1.0	$16.5 \pm 1.1 \pm 0.8$	$15.2 \pm 1.2 \pm 1.0$	$13.8^{+5.5}_{-4.6} \pm 1.6$			15.9 ± 1.0
265	$\eta K_0^*(1430)^0$	11.0 ± 2.2	$11.0 \pm 1.6 \pm 1.5$					11.0 ± 2.2
266	$\eta K_2^*(1430)^0$	9.6 ± 2.1	$9.6 \pm 1.8 \pm 1.1$					9.6 ± 2.1
267	ωK^0	4.8 ± 0.4	$5.4 \pm 0.8 \pm 0.3$	$4.5 \pm 0.4 \pm 0.3$	$10.0^{+5.4}_{-4.2} \pm 1.4$			4.8 ± 0.4
268	$a_0(980)^0 K^0$ †	< 7.8	< 7.8					< 7.8
269	$b_1^0 K^0$ †	< 7.8	< 7.8					< 7.8
270	$a_0(980)^- K^+$ †	< 1.9	< 1.9					< 1.9
271	$b_1^- K^+$ †	7.4 ± 1.4	$7.4 \pm 1.0 \pm 1.0$					7.4 ± 1.4
272	$b_1^0 K^{*0}$ †	< 8.0	< 8.0					< 8.0
273	$b_1^- K^{*+}$ †	< 5.0	< 5.0					< 5.0
274	$a_0(1450)^- K^+$ †	< 3.1	< 3.1					< 3.1
275	$K_S X^0(\text{Familon})$ †	< 53			< 53			< 53
276	ωK^{*0}	2.0 ± 0.5	$2.2 \pm 0.6 \pm 0.2$	$1.8 \pm 0.7^{+0.3}_{-0.2}$				2.0 ± 0.5
277	$\omega(K\pi)_0^{*0}$	18.4 ± 2.5	$18.4^{+1.8}_{-1.7}$					$18.4^{+1.8}_{-1.7}$
278	$\omega K_0^*(1430)^0$	16.0 ± 3.4	$16.0 \pm 1.6 \pm 3.0$					16.0 ± 3.4
279	$\omega K_2^*(1430)^0$	10.1 ± 2.3	$10.1 \pm 2.0 \pm 1.1$					10.1 ± 2.3
280	$\omega K^+\pi^-$ (NR) [1]	5.1 ± 1.0		$5.1 \pm 0.7 \pm 0.7$				5.1 ± 1.0
281	$K^+\pi^-\pi^0$	37.8 ± 3.2	$38.5 \pm 1.0 \pm 3.9$	$36.6^{+4.2}_{-4.3} \pm 3.0$				37.8 ± 3.2
282	$\rho^- K^+$	7.0 ± 0.9	$6.6 \pm 0.5 \pm 0.8$	$15.1^{+3.4+2.4}_{-3.3-2.6}$				7.0 ± 0.9
283	$\rho(1450)^- K^+$	2.4 ± 1.2	$2.4 \pm 1.0 \pm 0.6$					2.4 ± 1.2
284	$\rho(1700)^- K^+$	0.6 ± 0.7	$0.6 \pm 0.6 \pm 0.4$					0.6 ± 0.7
285	$K^+\pi^-\pi^0$ (NR)	2.8 ± 0.6	$2.8 \pm 0.5 \pm 0.4$	< 9.4				2.8 ± 0.6
286	$(K\pi)_0^{*+}\pi^-$	34 ± 5	$34.2 \pm 2.4 \pm 4.1$					34.2 ± 4.8
287	$(K\pi)_0^{*+}\pi^0$	8.6 ± 1.7	$8.6^{+1.1}_{-1.3}$					$8.6^{+1.1}_{-1.3}$

Rare decay の意義

Rare Decay と新物理



- ループ中の仮想粒子は元の b クォークより遥かに重い:
  $m_t + m_W = 250\ \mathbf{GeV} = 50 \times m_b$
- Charged Higgs (H^+) や SUSY は LHC で見つかっておらずさらに重い (数 TeV 以上?)
- 重い粒子ほど寄与は小さいが、数 TeV でもたかだか一桁違うだけ
- SM は $V_{tb}^* V_{ts}$ で抑制されているのに対して新物理の結合定数は不明

新物理が SM と同程度の寄与? (Belle を始めた頃の希望的観測)

新物理が Belle II で測定できる位の寄与? (今の希望)

SM からのずれを見るには SM が「ずれ」の大きさよりも良い精度でわかっていないといけない

分岐比測定

- **B 物理の最初のステップは分岐比の測定**
- **分岐比は崩壊部分幅を崩壊全幅で割ったもの**

  $$\mathcal{B}(B \to f) = \Gamma(B \to f)/\Gamma_{\mathrm{tot}}$$

- **崩壊全幅は寿命の逆数** $\Gamma_{\mathrm{tot}} = 1/\tau_B$
- **分岐比の測定はほぼシグナル事象を数えるだけ (簡単!)**

  $$\mathcal{B}(B \to f) = N(B \to f)/(\epsilon \cdot N_B)$$

- **しかも初めてシグナル事象を見つかれば新発見 (PDG に名前が載る)**
- **崩壊部分幅は原理的には理論計算可能** $\Gamma(B \to f) = |\langle B|\mathcal{H}|f\rangle|^2$
  - クォークレベルでは弱い相互作用と CKM で計算可能
  - ハドロンだと低エネルギー QCD が発散して摂動計算できない
    (brown muck(茶色い馬糞?) と呼ばれる)

それでもさまざまな工夫で測定結果を有効活用する

大雑把な計算方法

(実験屋が実際に手を動かす(せる)わけではないが、理論の論文を読むのに知っているとよい)

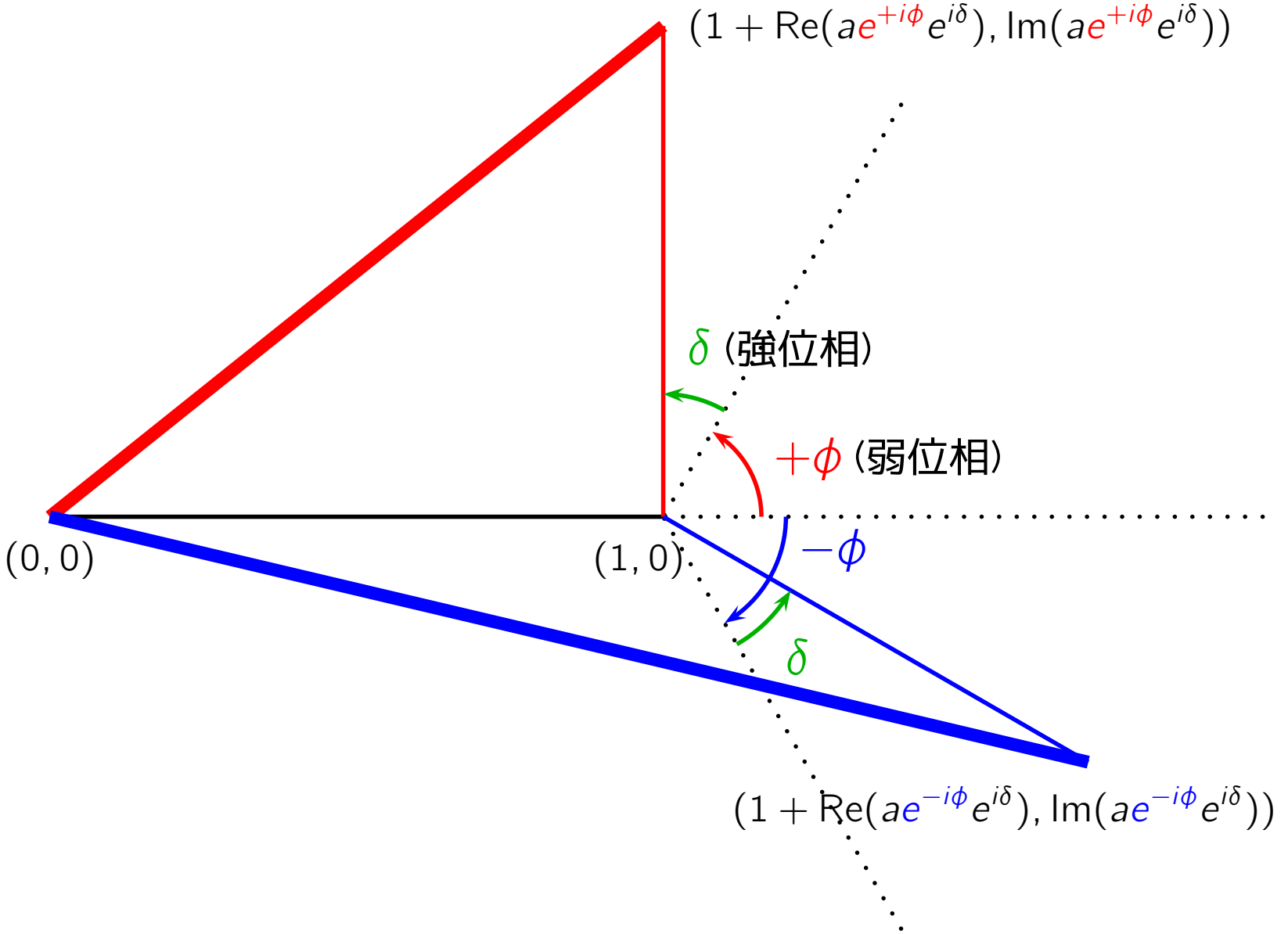
- **計算できる部分とできない部分とに分ける**
- **計算できる部分 — short distance**
  - ファクトリゼーション(カレントの積)
  - オペレータ展開(ウィルソン係数)
- **計算できない部分 — long distance**
  - 中間子の波動関数・形状因子(form factor)
  - Light Cone Sum Rule などの手法があるが、30% 程度の誤差がつく
  - Lattice QCD? — 運動量の大きな B 中間子の二体崩壊には向かない

    それを承知の上で、Lattice QCD で精度良い理論計算が未来の希望
- **なんとかして組み合わせる**

分岐比以外の測定量

- **さまざまな比を取ることにより、計算できないことを補う**
- **直接 CP 非対称性 (A_{CP})**
  - $\Gamma(B \to f)$ と $\Gamma(\overline{B} \to \overline{f})$ の比と同義
  - SM では例えばツリーとペンギンの干渉
  - 新物理が入ると想定外の A_{CP} の可能性
- **アイソスピン非対称性 (A_I)**
  - $\Gamma(B^+ \to f^+)$ と $\Gamma(B^0 \to f^0)$ の比と同義
  - 通常はあまり関与しない「スペクテーター」クォークの想定外の寄与など
- **角分布、偏極、さまざまな比**
  - 角分布や偏極は計算しやすい
  - 角分布が意味を持つのは 3 体以上への崩壊
  - 偏極はベクトル 2 個への崩壊、ベクトルを含む 3 体への崩壊など
- **時間依存 CP 非対称性**

直接 CP 非対称性



2 つ振幅が寄与、CP 変換で複素平面上での和の絶対値が異なる

直接 CP 非対称性

- $P \to f \neq \overline{P} \to \overline{f}$ を直接 CP 非対称性と呼ぶ

$$\overline{\Gamma}_f - \Gamma_f = \left||A_1|e^{-i\phi_1+i\delta_1} + |A_2|e^{-i\phi_2+i\delta_2}\right|^2 - \left||A_1|e^{+i\phi_1+i\delta_1} + |A_2|e^{+i\phi_2+i\delta_2}\right|^2$$

$$= |A_1||A_2|\left[e^{i(-\phi_1+\phi_2+\delta_1-\delta_2)} + e^{i(\phi_1-\phi_2-\delta_1+\delta_2)} - e^{i(+\phi_1-\phi_2+\delta_1-\delta_2)} - e^{i(-\phi_1+\phi_2-\delta_1+\delta_2)}\right]$$

$$= -|A_1||A_2|\left[(e^{i\Delta\phi} - e^{-i\Delta\phi})(e^{i\Delta\delta} - e^{-i\Delta\delta})\right] = -4|A_1||A_2|\sin\Delta\phi\sin\Delta\delta$$

- 崩壊幅の直接 CP 非対称性の生じる条件は
  - 2 つの振幅が存在 (ツリーとペンギン)
  - 弱位相差 $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2 \neq 0$ かつ $\Delta\phi \neq \pi$ (ツリーとペンギンで異なる)
  - 強位相差 $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2 \neq 0$ かつ $\Delta\delta \neq \pi$ (計算できない…)

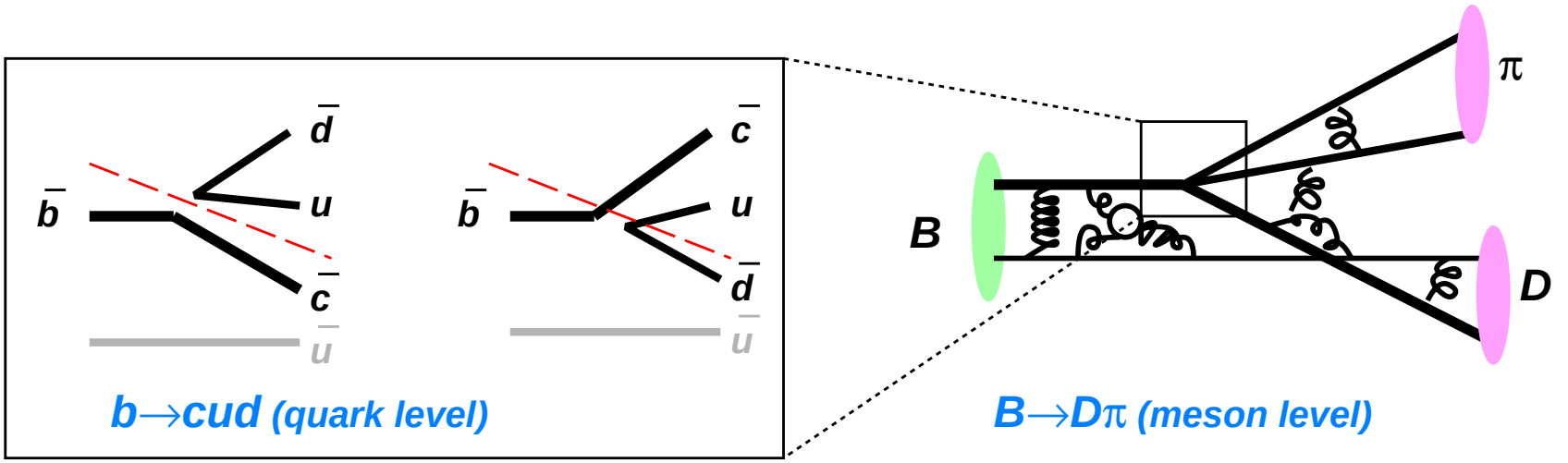
- 測定量 A_{CP}

$$\frac{\overline{\Gamma}_f - \Gamma_f}{\overline{\Gamma}_f + \Gamma_f} = \frac{N(\overline{P} \to \overline{f}) - N(P \to f)}{N(\overline{P} \to \overline{f}) + N(P \to f)} = \frac{-4|A_1||A_2|\sin\Delta\phi\sin\Delta\delta}{|A_1|^2 + |A_2|^2 + 4|A_1||A_2|\cos\Delta\phi\cos\Delta\delta}$$

ファクトリゼーション

ファクトリゼーション

- 弱い相互作用の部分はカレントの積で計算したい
- 本当はカレント積ではない場合も近似としてのカレント積とする
- 例えば、$B \to \pi\pi$ の場合、2 種類のツリーダイアグラムに相当するカレント積の線型結合で実効ハミルトニアンが記述できるはず



$$H = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V^*_{cb} V_{ud} \left[C_1 (\bar{b}c)_{V-A} (\bar{u}d)_{V-A} + C_2 (\bar{b}d)_{V-A} (\bar{u}c)_{V-A} \right]$$

(C_i はウィルソン係数と呼ばれる)

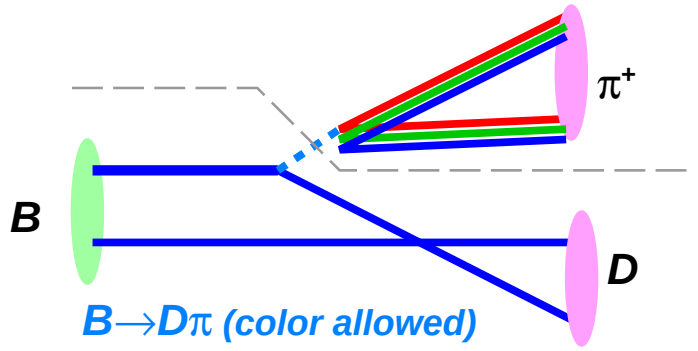
次元 6

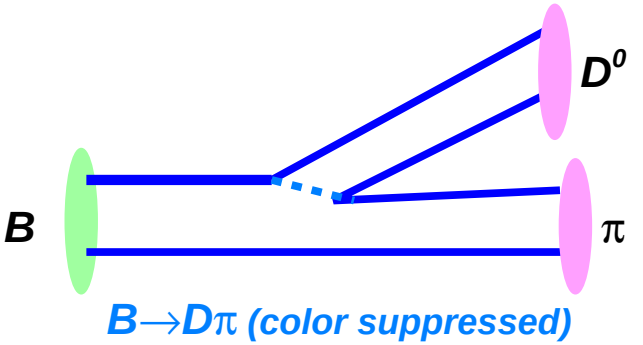
$$H = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V^*_{cb} V_{ud} \left[C_1 (\bar{b}c)_{V-A} (\bar{u}d)_{V-A} + C_2 (\bar{b}d)_{V-A} (\bar{u}c)_{V-A} \right]$$

- フェルミオンの 4 点相互作用で、質量次元 6 乗のオペレータ
  - $G_F = \frac{\sqrt{2}}{8} \frac{g^2}{M_W^2}$ は 質量次元 (-2) 乗
- あとから出てくる他の B 中間子崩壊のオペレーターはどれも次元 6 オペレータ

ファクトリゼーションの活用例

- カラー制約のあるなし 2 種類のダイアグラムとすると考えやすい
  T(ツリー) と C(カラー抑制)





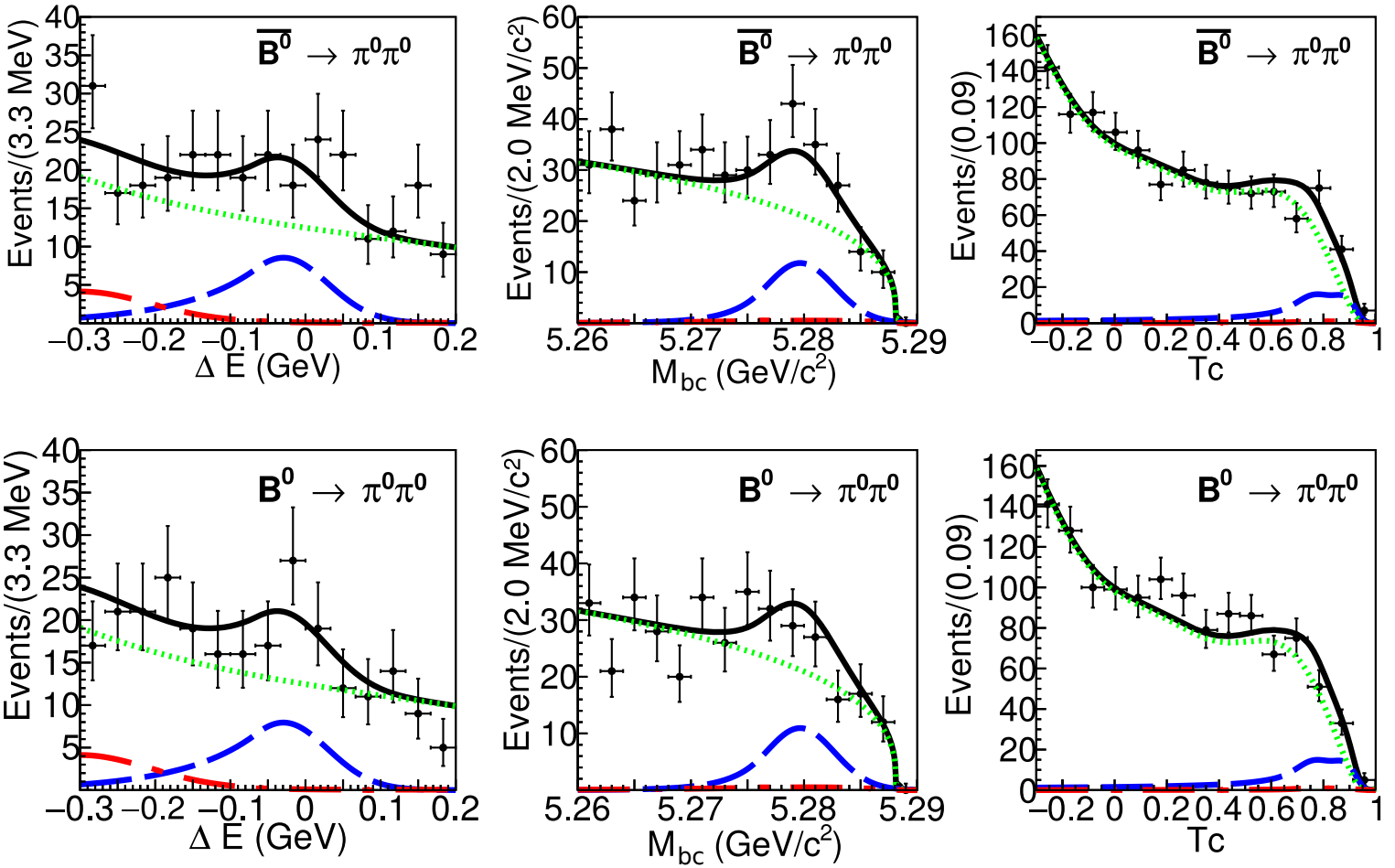
- $B \to \pi\pi$ には 3 種類の電荷の組合せが考えられる
- CKM は同じで (π^0, π^-) の違いは小さい (アイソスピン対称性)
  計算できない部分は共通だと考える
- カラー制約の有無で 3 倍のダイアグラム $\Rightarrow$ 分岐比で 3^2=9 倍違う
- 関与するダイアグラム

$B^- \to \pi^0\pi^-$	$(u\bar{u} + d\bar{u})$	T + C
$\overline{B}^0 \to \pi^+\pi^-$	$(u\bar{d} + d\bar{u})$	T only
$\overline{B}^0 \to \pi^0\pi^0$	$(u\bar{u} + d\bar{d})$	C only

$B^0 \to \pi^0\pi^0$ パズル

- $B \to \pi^+\pi^-$ と $B \to \pi^+\pi^0$ は分岐比 5×10^{-6} 程度で精度よく測定されていている
  - $B \to \pi^0\pi^0$ はカラー抑制により 0.5×10^{-6} 程度の分岐比が期待される
- **測定された分岐比は 1×10^{-6} より大きい**
- 理論計算
  - $B \to \pi^+\pi^-$ との比で良いので精度が良いはず
  - ペンギンの寄与、高次補正
  - SM では 1×10^{-6} より大きな分岐比にすることは難しい…
  - 新物理?
- $B \to \rho^0\rho^0$?
  - $B \to \rho^+\rho^-$ と $B \to \rho^+\rho^0$ の分岐比が 2×10^{-5} に対して $B \to \rho^0\rho^0$ の分岐比は 1×10^{-6}

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



- **Belle 全データの結果:**
  $\mathcal{B} = (1.31 \pm 0.19 \pm 0.19) \times 10^{-6}$, $A_{CP} = 0.14 \pm 0.36 \pm 0.10$
- **SM より分岐比が大きい (誤差も大きい)**
- **Belle II でのより高統計の測定が望まれる**

ハドロニックペンギンのウィルソン計数

- ツリーでの

$$H = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V^*_{cb} V_{ud} \left[C_1 (\overline{b}c)_{V-A} (\overline{u}d)_{V-A} + C_2 (\overline{b}d)_{V-A} (\overline{u}c)_{V-A} \right]$$

  に加えて、グルーオンペンギンでは 4 つのオペレータとウィルソン係数が追加される

$$H = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_{i=1}^{6} V^*_{qb} V_{q'q''} C_i O_i$$

- これはオペレータ展開の最低次の項を並べたもので、(数少ない例外を除いて計算はできないが) さらに高次の項 ($O_{ij}, O_{ijk}, \ldots$) へと展開できる
- ハドロニック崩壊では (最低次でも) この方法では計算や実験との比較が難しい
- 実際にはダイアグラムの比較によって定量的に異なる崩壊モード間の関係を計算することが行われる

実験屋にはダイアグラムで分類する方が楽

B 中間子のハドロニック崩壊モード

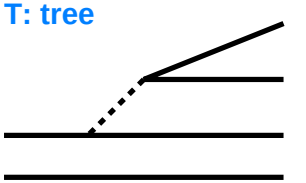
B^0 崩壊

V_{cb}	$b \to c$ tree	$B^0 \to D^- \pi^+, D^- K^+, D^- D^+, D^- D_s^+$
	$b \to c$ color sup.	$B^0 \to J/\psi K^0, J/\psi \pi^0, B^0 \to \overline{D^0} K^0, \overline{D^0} \pi^0$
V_{ub}	$b \to u$ tree	$B^0 \to \pi^- \pi^+, \pi^- K^+, \pi^- D^+, \pi^- D_s^+$
	$b \to u$ color sup.	$B^0 \to \pi^0 \pi^0, \pi^0 K^0, D^0 K^0, D^0 \pi^0$
V_{ts}	$b \to s$ penguin	$B^0 \to \pi^0 K^0, \pi^- K^+, K^0 \phi, D^- D_s^+, J/\psi K^0$
V_{td}	$b \to d$ penguin	$B^0 \to \pi^0 \pi^0, \pi^- \pi^+, K^0 \overline{K^0}, D^+ D^-, J/\psi \pi^0$

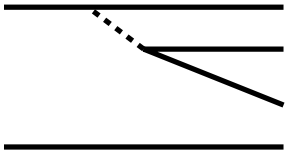
B^- 崩壊

V_{cb}	$b \to c$ tree	$B^- \to D^0 \pi^-, D^0 K^-, D^0 D^-, D^0 D_s^-$
	$b \to c$ color sup.	$B^- \to J/\psi K^-, J/\psi \pi^-, B^- \to \overline{D^0} K^-, \overline{D^0} \pi^-$
V_{ub}	$b \to u$ tree	$B^- \to \pi^0 \pi^-, \pi^0 K^-, \pi^0 D^-, \pi^0 D_s^-$
	$b \to u$ color sup.	$B^- \to \pi^- \pi^0, pi^0 K^-, D^0 K^-, D^0 \pi^-$
V_{ts}	$b \to s$ penguin	$B^- \to \pi^0 K^-, K^0 \pi^-, \phi K^-, D^0 D_s^-, J/\psi K^-$
V_{td}	$b \to d$ penguin	$B^- \to \pi^0 \pi^-, K^0 K^-, D^0 D^-, J/\psi \pi^-$

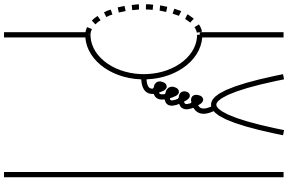
T: tree



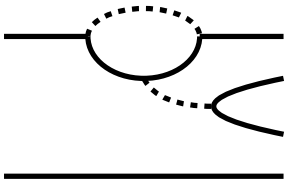
C: color suppressed



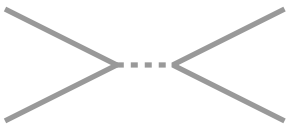
P: (strong) penguin



PE: EW penguin

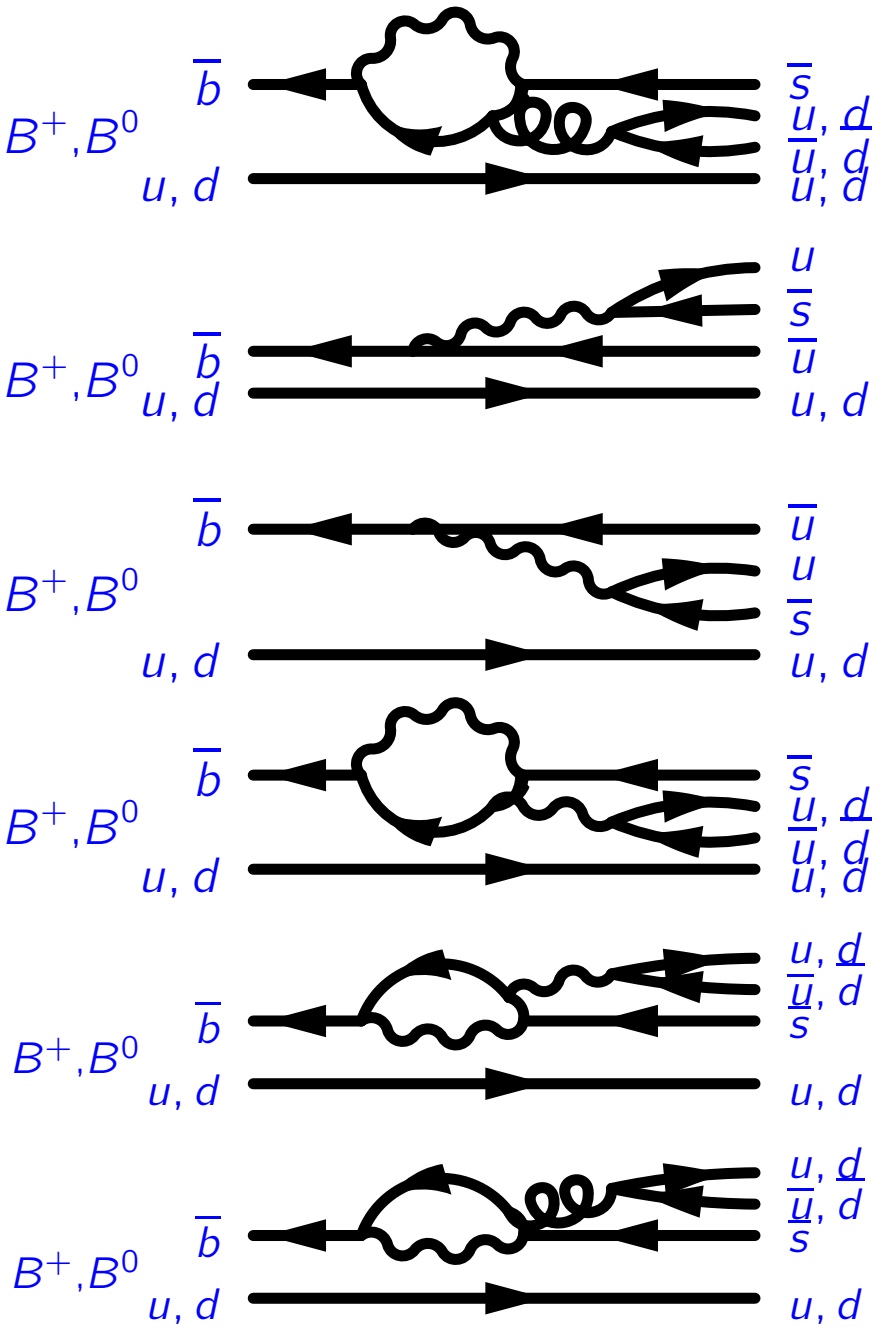


A: annihilation



E: exchange

$B \to K\pi$



Penguin

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

Tree

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

Color-suppressed

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

EW-Penguin

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

External EW-Penguin

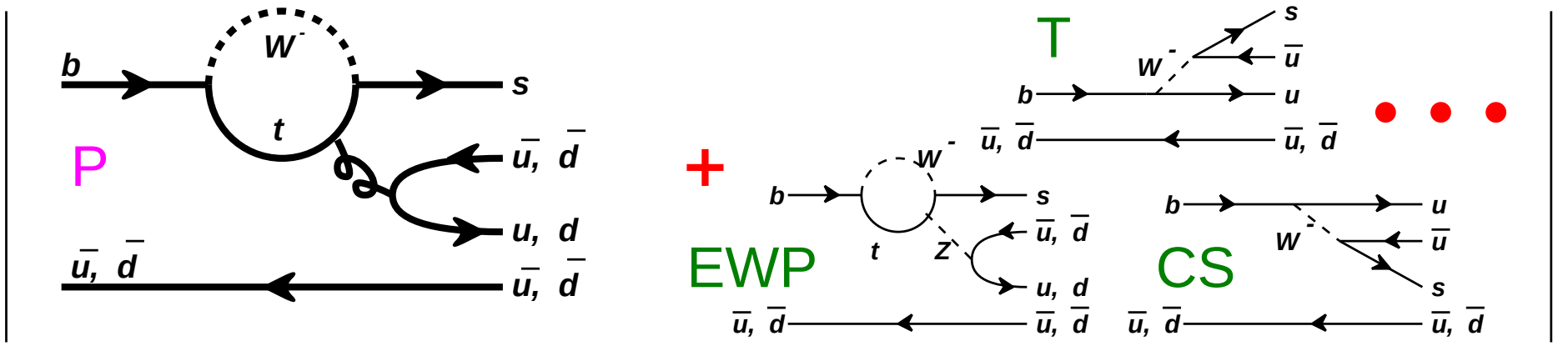
$K^+\pi^0$, $K^0\pi^0$

External Penguin

(not allowed, π^0 is $(u\overline{u}-d\overline{d})/\sqrt{2}$)

$B \to K\pi$

b→s penguin (dominant) + sub-dominant diagrams (e.g. Cabibbo suppressed b→u tree)



- **P が主なのでほぼ同じ分岐比**

  $\Gamma(K^+\pi^-) \sim \Gamma(K^0\pi^+) \sim 2\times\Gamma(K^+\pi^0) \sim 2\times\Gamma(K^0\pi^0)$

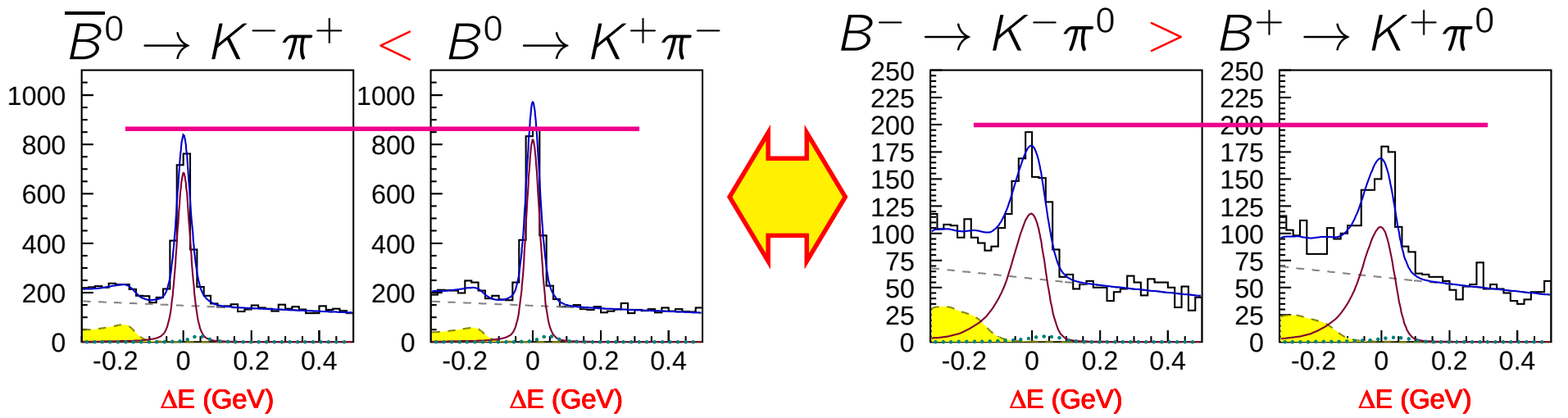
  (2× は π^0 が $(u\bar{u} - d\bar{d})/\sqrt{2}$ だから)

- **T があるので、直接 CP 非対称性:**
  - $K^+\pi^0, K^+\pi^-$

- **崩壊幅の比で理論不定性を減らす**

$$R_c = 2\times\frac{\Gamma(K^+\pi^0)}{\Gamma(K^0\pi^+)}, \quad R_n = \frac{1}{2}\times\frac{\Gamma(K^+\pi^-)}{\Gamma(K^0\pi^0)}, \quad R = \frac{\Gamma(K^+\pi^-)}{\Gamma(K^0\pi^+)}$$

$K\pi$ パズル



- **P+T が主だと思うと単純な予想では** $A_{CP}(K^+\pi^-) \sim A_{CP}(K^+\pi^0)$
- 他のダイアグラムは SM では小さいはず
- 新物理 (?) — 影響がありそうなのは EW-penguin

$K\pi$ パズル

- **アイソスピン和則 — アイソスピンからの破れを探す**

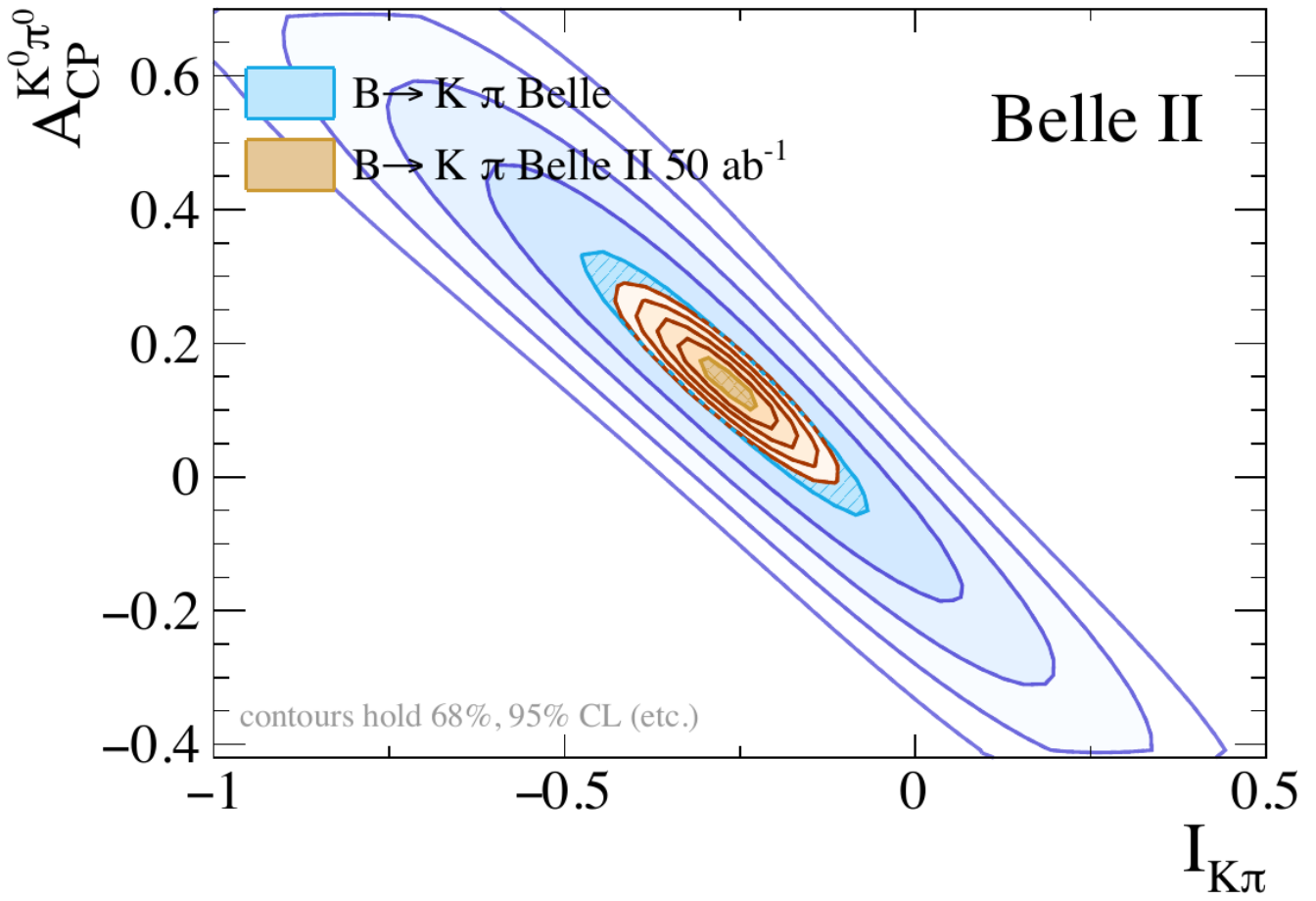
$$A_{CP} \times \Gamma(K^+\pi^-) + A_{CP} \times \Gamma(K^0\pi^+) = 2A_{CP} \times \Gamma(K^+\pi^0) + 2A_{CP} \times \Gamma(K^0\pi^0)$$

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

$\Leftrightarrow (-14 \pm 11)\%$ (W.A.)

- **ほかに手掛かりがないと先に進めない行き詰まり状態…**

$B \to K^0\pi^0$ とアイソスピン和則



- 特に $B^0 \to K^0\pi^0$ の A_{cp} を時間依存 CPV で測る必要
- アイソスピン和則が成りたつかどうかは Belle II で答えが出そう
- これだけでは $K\pi$ パズルの答えになる気はしない…

他のハドロニック崩壊

- ハドロニックペンギンでも他にまだまだおもしろい崩壊モードがたくさんある
- $b \to s$ のベクトル・ベクトルの終状態の偏極が longitudinal でない理由が謎
- $B \to KK\pi$ 3 体崩壊での CP 非対称性の解明
- η、η' を含むモードでまだ測定できていないモードがある

K_L の ϵ'/ϵ のように後から理論が良くなることに期待

輻射・電弱崩壊

輻射・電弱崩壊

- **輻射崩壊 ($b \to s\gamma$) と電弱崩壊 ($b \to s\ell^+\ell^-$) では実効ハミルトニアンのオペレータが 10 個に増える**

$$H = \frac{G_F}{\sqrt{2}} \sum_{i=1}^{10} V^*_{qb} V_{q'q''} C_i O_i$$

- **輻射・電弱崩壊のオペレータおよびウィルソン係数**

  C_7 magnetic penguin operator $[\frac{e}{8\pi^2} m_b \bar{s}_i \sigma^{\mu\nu}(1+\gamma_5) b_i F_{\mu\nu}]$

  (大きさは $b \to s\gamma$ で決定、符号は $b \to s\ell^+\ell^-$ で)

  C_9 vector electroweak operator $[(\bar{b}s)_{V-A}(\bar{\ell}\ell)_V]$

  C_{10} axial-vector electroweak operator $[(\bar{b}s)_{V-A}(\bar{\ell}\ell)_A]$

- **例: 前後非対称性 (A_{FB}) とウィルソン係数**

$$A_{FB}(q^2) = -C_{10}^{\text{eff}} \xi(q^2) \left[Re(C_9^{\text{eff}}) F_1 + \frac{1}{q^2} C_7^{\text{eff}} F_2 \right]$$

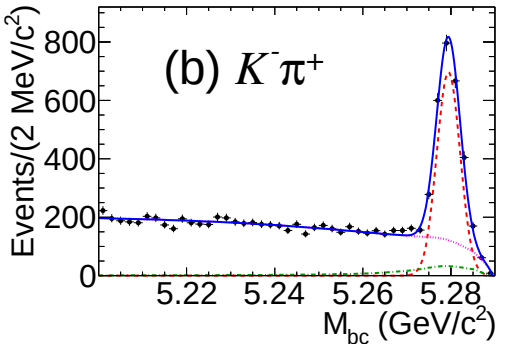
  (eff とついているのは NLL で計算できる高次効果の寄与も含んでいるため)

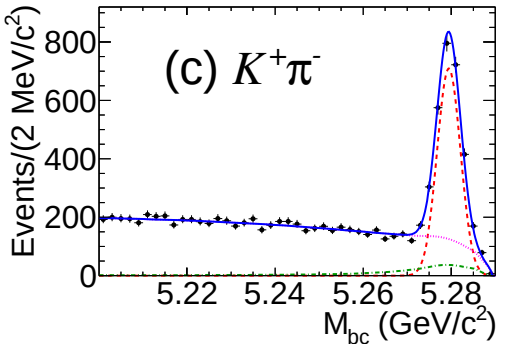
- **新物理の効果が見つかれば、どのタイプのオペレータかもわかる**
  (新物理にしかないオペレーターも加わる)

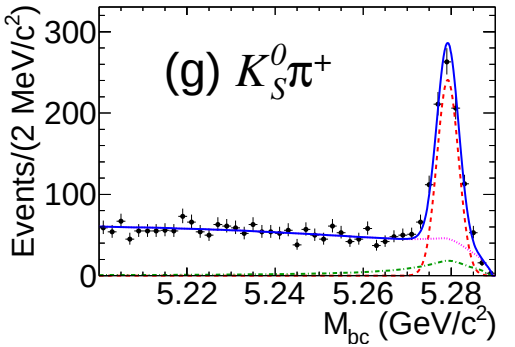
インクルーシブとエクスクルーシブ

- **エクスクルーシブ解析**
  - 終状態の粒子をすべて再構成する
  - 運動学変数 (m_{bc}, ΔE) や中間状態の不変質量を使用
  - 運動学制約により、信号とバックグラウンドの区別が明らか
  - 終状態の brown muck を計算しないといけないので理論と比較ができないケースが多い
- **インクルーシブ解析**
  - 終状態の特徴的な粒子だけを同定する
  - クォークレベルの計算により近い
  - 本当のインクルーシブ測定ができているのは $b \to s\gamma$、$b \to c\ell\nu$、$b \to u\ell\nu$
  - エクスクルーシブを足し合わせて、残りは外挿して $b \to s\ell^+\ell^-$ も測定

$B \to K^*\gamma$

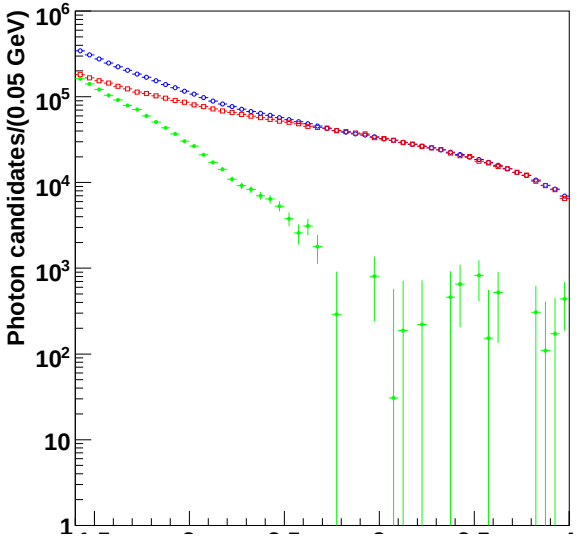


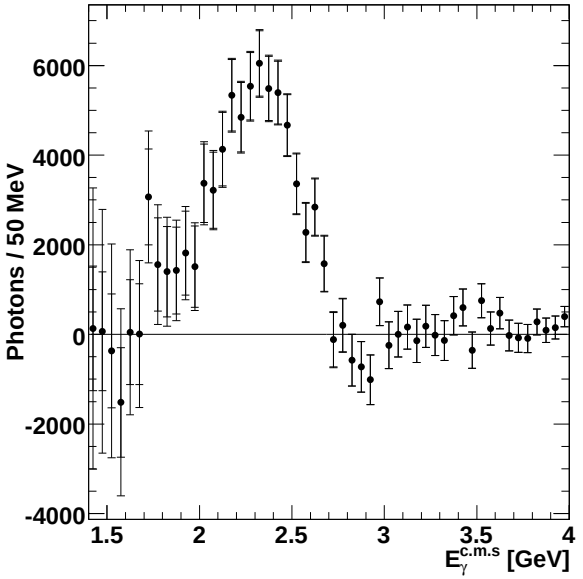




- **Rare decay とは思えないくらいきれいに測定できる**
- **分岐比の誤差は非常に小さい (4%位、系統誤差の方が大きい)**
  - それに対して理論の誤差は 20–30% ある
  - 分岐比だけでは 10% 以下の新物理寄与の探索には使えない
- **分岐比の比の理論誤差は小さい — CP 非対称性、アイソスピン非対称性**
  - アイソスピン非対称性の測定はすでに理論誤差レベルに到達
  - CP 非対称性は極小なので、実験誤差をまだ減らせる

インクルーシブ $B \to X_s\gamma$





- $b \to s\gamma$ **は二体崩壊で** $E_\gamma \sim m_b/2$
  - s クォークのハドロン化により X_s はさまざまな質量を持つ（E_γ が広がる）
  - （B でなく）$\Upsilon(4S)$ 重心系で測る分さらに広がる
- **光子スペクトルのインクルーシブ測定**
  ⇒ 膨大なバックグラウンドを差引く
  $e^+e^- \to q\bar{q}$ **continuum (off-resonance),**
  $B \to \pi^0 X, \eta X$ **（別途測定）, 残りは MC**
- **Total** $\mathcal{B}$ **— スペクトルを積分**
  E_γ **カットを 1.7 GeV まで下げる [Belle 657M** $B\bar{B}$**]**

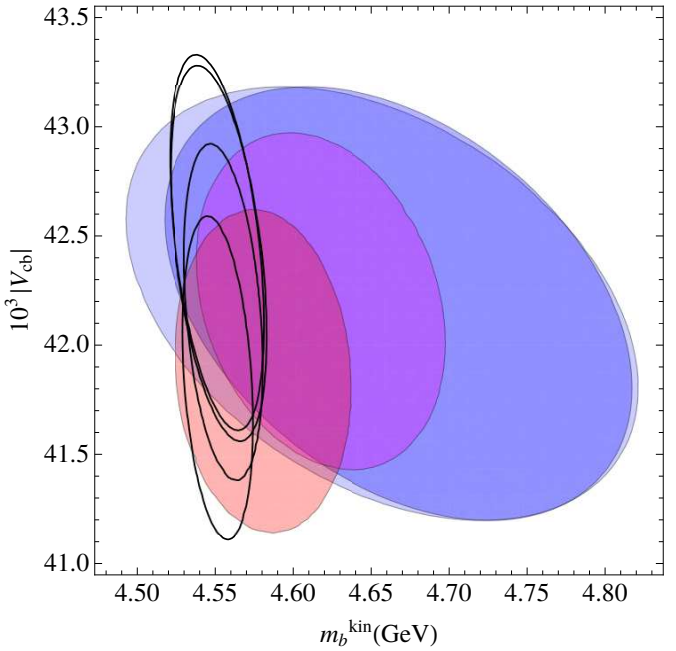
$$\mathcal{B}(B \to X_s\gamma) = (3.31 \pm 0.19 \pm 0.37 \pm 0.01) \times 10^{-4}$$

W.A.: $\mathcal{B}_{\rm WA} = (3.27 \pm 0.14) \times 10^{-4}$

（$E_\gamma > 1.6$ **GeV に外挿**）

理論との比較・新物理への制限

- $B \to X_s\gamma$ の最低次ファインマン図は $|C_7|^2$ に相当
- 高次補正が精度よく計算されている
  Next-to-next-to-leading order (NNLO) — とてつもなく大変な計算
  $\mathcal{B}_{\rm SM}(B \to X_s\gamma) = (3.36 \pm 0.23) \times 10^{-4}$
- 荷電ヒッグスボソンへの制限: $m(H^+) > 500$ GeV
  SUSY など他の新物理にも強い制限をつけている



- E_γ スペクトルの計算は $\Lambda_{\rm QCD}/m_b$ 展開
- フィットから m_b を求めることができる
- V_{cb} 測定のためのレプトン・スペクトルも併用して m_b を正確に求められる
- ただしこの m_b は特定の QCD スキームで、他のスキームの m_b と比較してはいけない

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

- $B \to K\ell^+\ell^-$ と $B \to K^*\ell^+\ell^-$ は rare decay の注目株
  - $b \to s\ell^+\ell^-$ 遷移はさまざまな新物理の寄与の可能性
  - 理論計算がかなり信頼できる
  - 3 体崩壊なのでさまざまな角分布を測れる
  - 測定が比較的容易 (高い効率、低いバックグラウンド)
- LHCb に有利?
  - $B^0 \to K^{*0}\mu^+\mu^-$, $K^{*0} \to K^+\pi^-$ は LHCb で高効率で測れる
  - 2001 年に Belle が $B \to K\ell^+\ell^-$ を初測定してから長いこと SM とコンシステントだったが、最近 LHCb がさまざまな anomaly を報告している
- 角分布

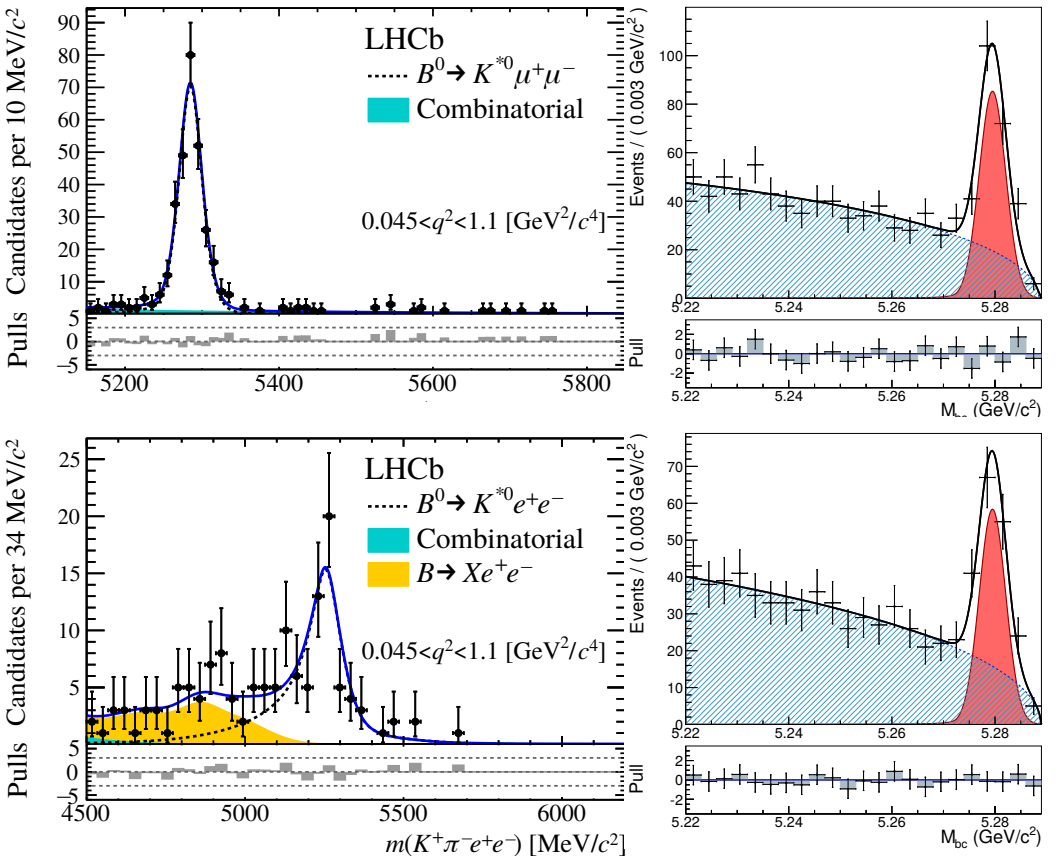
$$\frac{1}{d\Gamma/dq^2}\frac{d^4\Gamma}{d\cos\theta_l\, d\cos\theta_K\, d\phi\, dq^2} = \frac{9}{32\pi}\Big[\frac{3}{4}(1-F_L)\sin^2\theta_K + F_L\cos^2\theta_K + \frac{1}{4}(1-F_L)\sin^2\theta_K\cos 2\theta_\ell - F_L\cos^2\theta_K\cos 2\theta_\ell + S_3\sin^2\theta_K\sin^2\theta_\ell\cos 2\phi + S_4\sin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

R_{K^*} — レプトン普遍性の破れ?

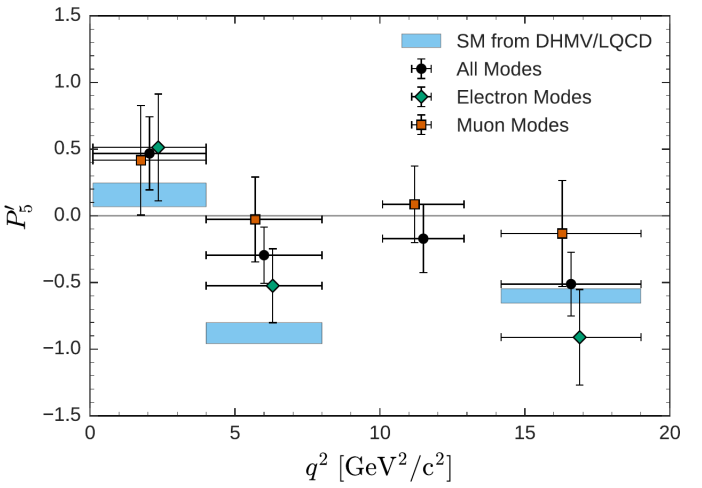
- 最近の LHCb の測定:

$$R(K^{*0}) = \frac{\mathcal{B}(B \to K^{*0}\mu^+\mu^-)}{\mathcal{B}(B \to K^{*0}e^+e^-)} = \begin{array}{ll} 0.066\,^{+0.11}_{-0.07} \pm 0.03 & (q^2 \in [0.045, 1.1]\ \mathrm{GeV}^2) \\ 0.069\,^{+0.11}_{-0.07} \pm 0.05 & (q^2 \in [1.1, 6.0]\ \mathrm{GeV}^2) \end{array}$$

- 2σ くらいのずれだが、注目を集めている (Belle ではずれてない?)



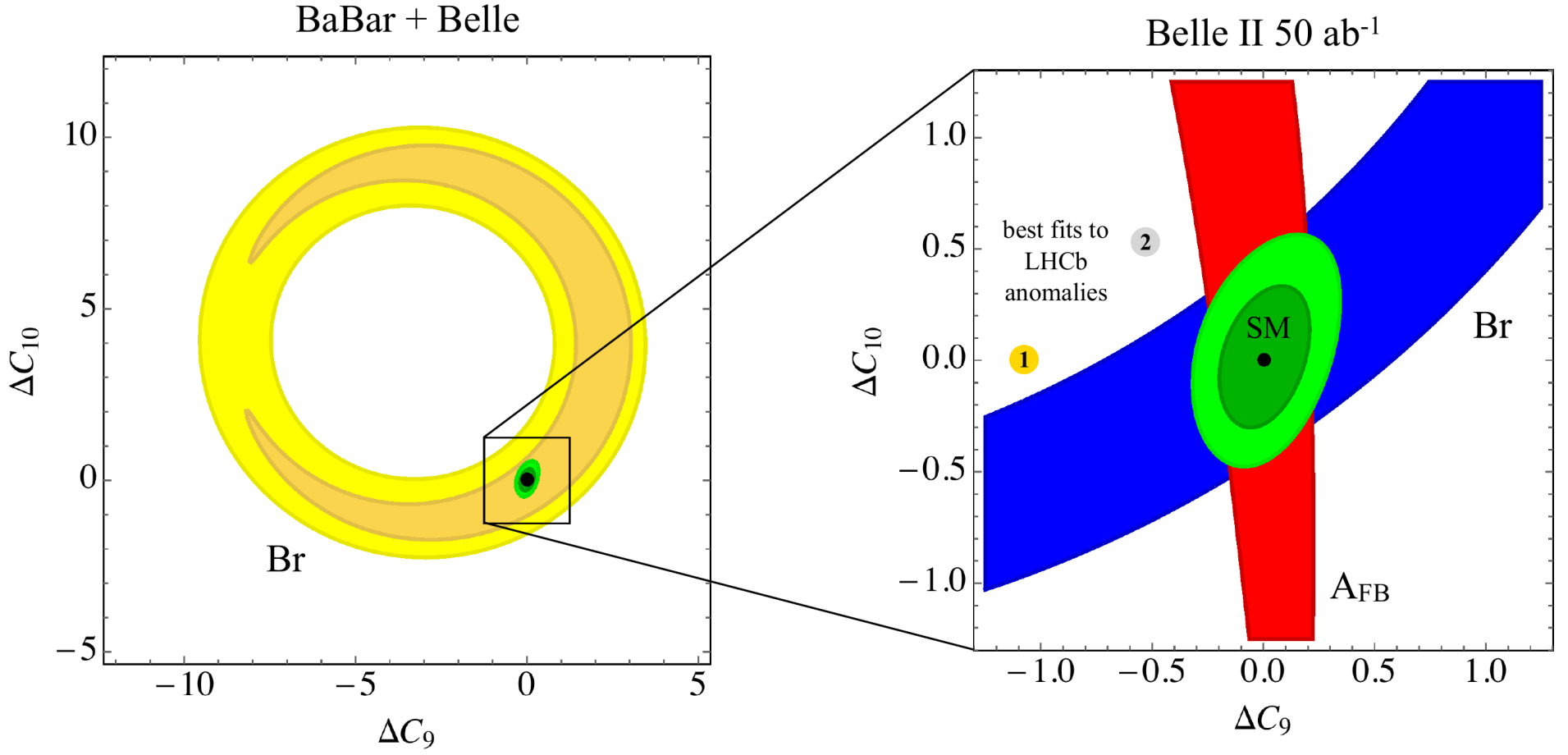
- 角分布の係数 $P_5'(\mu\mu)$ も LHCb でアノマリー
- P_5' にもレプトン普遍性の破れ?



$B \to X_s \ell^+ \ell^-$

- **インクルーシブに $B \to X_s \ell^+ \ell^-$ が測定できればウィルソン係数に強い制限がかけられる**
- **$\ell^+ \ell^-$ をインクルーシブに測ることは難しい**
  - $b \to c \ell^- \overline{\nu}$, $c \to \ell^+ s \nu$ のバックグラウンドが厳しい
  - Full Event Interpretation (FEI) の手法ではどうか?
- **$\sum K n(\pi) \ell^+ \ell^-$ を測る**
  - $K \ell^+ \ell^-$ と $K^* \ell^+ \ell^-$ 以外の寄与も測定されている (unpublished)
  - 含まれないモードの寄与を見積るのが難しい
  - Belle の全データでの分岐比はまだ測られていない (前後非対称性 A_{FB} のみ)

C_9 と C_{10}



- 現在でもでもインクルーシブ $B \to X_s \ell^+ \ell^-$ 分岐比と前後非対称性 (A_{FB}) はトリビアルでない制限をつけている
- Belle II では SM と P_5' アノマリーの時のウィルソン係数を識別可能

他の輻射・電弱崩壊

- **輻射・電弱ペンギンでも他にまだまだおもしろい測定がたくさんある**
- $b \to s\gamma$、$b \to s\ell^+\ell^-$ **の** A_{CP}
- $B \to \rho\gamma$ **(分岐比、**A_{CP}**、アイソスピン非対称性)**
- **インクルーシブ** $b \to d\gamma$
- $b \to (s+d)\gamma$ **の** A_{CP}
- $B \to K^*\gamma$ **の時間依存 CP 非対称性**
- $B \to K\pi\pi\gamma$ **から光子偏極の測定**
- $B \to \pi\ell^+\ell^-$

まだ測れてないもの

もっと Rare な Decay

- ニュートリノが含まれるもの
  - $B^0 \to \nu\bar{\nu}$、$B \to K\nu\bar{\nu}$、$B^0 \to \tau^+\tau^-$、$B^0 \to K\tau^+\tau^-$、…
    (測定が難しい…)
- ツリー・ペンギンで不可で、消滅・交換ダイアグラムが必要なもの
  - $B^0 \to \mu^+\mu^-$、$B^0 \to \gamma\gamma$、$B^+ \to D^+\pi^0$、$B^0 \to \phi\phi$、$B^0 \to K^+K^-$、…
- 高次のダイアグラムが必要なもの
  - $B \to K\gamma\gamma$、$B \to Ke^+e^-e^+e^-$、…
- SM では禁止されているもの
  - $B \to Ke\mu$、$B^- \to D^+\ell^-\ell^-$、$B^0 \to \Lambda_c^+ e^-$、…
    (レプトンフレーバー、レプトン数、バリオン数、…)
- **測定できれば新物理の可能性大** (一部のものは Belle II 圏内)
- **豊かな想像力があればここにないものもまだたくさん思いつくはず**

交換・消滅ダイアグラム

- B 中間子内の 2 つのクォークが相互作用をする確率は低い
  - クォークが単独で壊れる方が早い
  - 交換・消滅ダイアグラムで測定されているものは $B \to \tau\nu$ と $B \to K^+K^-$ (と $B_s \to \mu^+\mu^-$ だけ
  - $B \to \mu\nu$ は 2σ 位の信号が見えているので、Belle II の初期に測定されるかも
- $B \to K^+K^-$
  - 分岐比は 8×10^{-8} で Belle の到達範囲以下だが、LHCb で測定されている
  - 交換ダイアグラム、消滅ペンギン、終状態散乱など

まとめ

まとめ

- B の Rare decay は 10^{-5} ~ 10^{-7} くらいの分岐比で、Belle 以前ではほとんど測定されていなかったが、Belle でだいぶ測定してしまった
- 今のところ新物理の決定的な証拠は見つかっていないが、それらしきヒントはいくつかあって、これをつきとめるのが Belle II でのメインテーマです
- 新物理に関係あるなしに関わらず、重要な測定がたくさん残されています
- みなさんの活躍の場がたくさんあります