

# **B**ファクトリーで探る標準模型を越える物理

中尾幹彦 (KEK 素核研)

mikihiko.nakao@kek.jp

*2020.2.16-19*

*26th ICEPP Symposium*

# 目次



## ● 議義 1

- B の物理の歴史
- B ファクトリーでの新物理の探し方
- SuperKEKB と Belle II

## ● 議義 2

- 弱い相互作用と CKM 行列
- ツリーダイヤグラム
- B 物理の解析手法

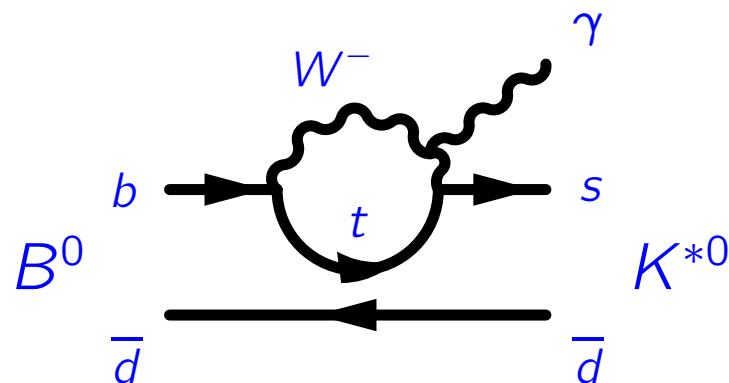
## ● 議義 3

- ループダイヤグラム
- ユニタリティ三角形
- 現状と近未来

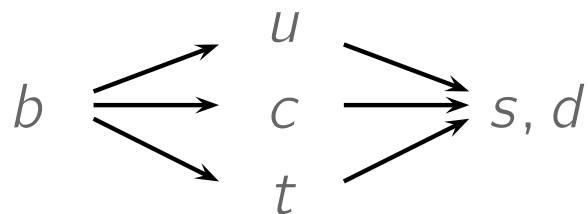
# ループダイヤグラム

# $b \rightarrow s$ ペンギン

- $b \rightarrow s$  や  $b \rightarrow d$  の遷移は  $b \rightarrow t \rightarrow s, d$  の **2 段階で実現**
- 直接遷移は標準模型では起きない
- 摂動展開の次の項に相当



- 実際にはすべてのクォークを経由  $b \rightarrow (u, c, t) \rightarrow s, d$



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

$$|V_{ub}^* V_{ud} + V_{cb}^* V_{cd} + V_{tb}^* V_{td}|^2 = 0(?)$$

- 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  $|V_{tb}^* V_{ts}|^2$ 、 $|V_{tb}^* V_{td}|^2$  だけが効いてくる
- **ループに新物理が寄与する可能性がある** (分岐比、 $A_{CP}$ )

# ● Belle が始まる前は B のペンギン崩壊はほとんど測られておらず、理論の精度があまりなくても新物理の大きな効果があればすぐに見つけれられるだろうと淡い期待をいただいていた

# ● そして非常にたくさんの方の b → s 崩壊モードを発見してきたが...

Heavy Flavor Averaging group (HFLAV) - May 2018  
B<sup>0</sup> Branching Fractions (decays with strange mesons part 1) (×10<sup>-6</sup>) - UL at 90% CL  
Preliminary Updated results not included in PDG Live as of Dec. 31, 2017

RPP#	Mode	PD2017 Avg.	BaBar	Belle	CLEO	CDF	LHCb	Our Avg.
257	K <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	19.6 ± 0.5	19.1 ± 0.6 ± 0.6	20.0 ± 0.34 ± 0.60	18.0 <sup>+2.1+1.2</sup> <sub>-1.1-1.2</sub>			19.27 <sup>+0.22</sup>
258	K <sup>0</sup> π <sup>0</sup>	9.9 ± 0.5	10.1 ± 0.6 ± 0.4	9.68 ± 0.46 ± 0.50	12.8 <sup>+1.7+1.7</sup> <sub>-1.3-1.4</sub>			9.93 ± 0.49
259	π <sup>+</sup> K <sup>0</sup>	66 ± 4	68.5 ± 2.2 ± 2.1	58.9 ± 3.6 ± 4.3	80 <sup>+18+9</sup> <sub>-15-9</sub>			66.1 ± 2.1
260	π <sup>0</sup> K <sup>0</sup>	28 ± 0.6	31.0 ± 0.3	2.6 ± 0.7 ± 0.2				28 ± 0.6
261	π <sup>+</sup> K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup>	6.3 ± 1.6	6.3 ± 1.3 ± 0.9					6.3 ± 1.6
262	π <sup>0</sup> K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup>	15.7 ± 3.2	13.7 <sup>+3.1+1.2</sup> <sub>-3.1-1.2</sub>					15.7 ± 3.2
263	K <sup>0</sup> π <sup>+</sup>	1.23 <sup>+0.27</sup> <sub>-0.24</sub>	1.15 <sup>+0.18</sup> <sub>-0.24 ± 0.09</sub>	1.27 <sup>+0.33</sup> <sub>-0.29 ± 0.08</sub>	0.7 <sup>+0.3</sup> <sub>-0.0</sub>			1.23 ± 0.24
264	π <sup>0</sup> K <sup>0</sup>	15.9 ± 1.0	16.5 ± 1.1 ± 0.8	15.2 ± 1.2 ± 1.0	13.8 <sup>+5.0</sup> <sub>-4.6 ± 1.6</sub>			15.9 ± 1.0
265	π <sup>0</sup> K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup>	11.0 ± 2.2	11.0 ± 1.6 ± 1.1					11.0 ± 2.2
266	π <sup>0</sup> K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup>	9.6 ± 2.1	9.6 ± 1.8 ± 1.5					9.6 ± 2.1
267	K <sup>0</sup> π <sup>0</sup>	4.8 ± 0.4	5.4 ± 0.8 ± 0.3	4.5 ± 0.4 ± 0.3	10.6 <sup>+5.4</sup> <sub>-4.1 ± 1.4</sub>			4.8 ± 0.4
268	π <sup>0</sup> (980)K <sup>0</sup> †	< 7.8	< 7.8	< 7.8				< 7.8
269	π <sup>0</sup> (980)K <sup>+</sup> †	< 1.9	< 1.9	< 1.9				< 1.9
270	π <sup>+</sup> K <sup>+</sup> †	7.4 ± 1.4	7.4 ± 1.0 ± 1.0					7.4 ± 1.4
271	π <sup>0</sup> K <sup>+</sup> †	< 8.0	< 8.0	< 8.0				< 8.0
272	π <sup>0</sup> (980)K <sup>+</sup> †	< 5.0	< 5.0	< 5.0				< 5.0
273	π <sup>+</sup> (1450)K <sup>+</sup> †	< 3.1	< 3.1	< 3.1	< 5.3			< 3.1
274	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> π <sup>0</sup> (Feshbach)†	< 5.3						< 5.3
275	π <sup>0</sup> K <sup>0</sup>	2.0 ± 0.5	2.2 ± 0.6 ± 0.2	3.8 ± 0.7 ± 0.3				2.0 ± 0.5
276	π <sup>+</sup> (K <sup>0</sup> ) <sup>0</sup>	18.4 ± 2.5	18.4 ± 1.8					18.4 ± 2.5
277	π <sup>0</sup> (K <sup>0</sup> ) <sup>0</sup>	16.0 ± 3.4	16.0 ± 1.6 ± 3.0					16.0 ± 3.4
278	π <sup>0</sup> (K <sup>0</sup> ) <sup>0</sup>	10.1 ± 2.3	10.1 ± 2.0 ± 1.1					10.1 ± 2.3
279	π <sup>0</sup> (K <sup>0</sup> ) <sup>0</sup>	5.1 ± 1.0		5.1 ± 0.7 ± 0.7				5.1 ± 1.0
280	π <sup>+</sup> K <sup>+</sup> † (NR)	37.8 ± 3.2	38.5 ± 1.0 ± 3.9	36.6 <sup>+4.2</sup> <sub>-4.5 ± 3.0</sub>				37.8 ± 3.2
281	π <sup>0</sup> K <sup>+</sup> †	7.0 ± 0.9	6.6 ± 0.5 ± 0.8	15.1 <sup>+12.4</sup> <sub>-3.3-2.6</sub>				7.0 ± 0.9
282	π <sup>+</sup> (1430)K <sup>+</sup> †	2.4 ± 1.2	2.4 ± 1.0 ± 0.6					2.4 ± 1.2
283	π <sup>0</sup> (1700)K <sup>+</sup> †	0.6 ± 0.7	0.6 ± 0.6 ± 0.4					0.6 ± 0.7
284	K <sup>+</sup> π <sup>+</sup> π <sup>0</sup> (NR)	2.8 ± 0.6	2.8 ± 0.5 ± 0.4	< 9.4				2.8 ± 0.6
285	K <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>0</sup>	34 ± 5	34.2 ± 2.4 ± 4.1					34 ± 5
286	(K <sup>0</sup> ) <sub>s</sub> π <sup>0</sup>	8.6 ± 1.7	8.6 ± 1.1					8.6 ± 1.7

Results for LHCb are relative BF's converted to absolute BF's.  
CLEO upper limits that have been grossly superseded are not shown.  
† In this product of BF's, all daughter BF's not shown are set to 100%.  
‡ 0.755 < M(Kπ) < 1.250 GeV/c<sup>2</sup>.

Heavy Flavor Averaging group (HFLAV) - May 2018  
B<sup>0</sup> Branching Fractions (decays with strange mesons part 2) (×10<sup>-6</sup>) - UL at 90% CL  
Preliminary Updated results not included in PDG Live as of Dec. 31, 2017

RPP#	Mode	PD2017 Avg.	BaBar	Belle	CLEO	CDF	LHCb	Our Avg.
384	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>0</sup>	< 4.0	< 4.0					< 4.0
389	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	6.1 ± 1.6	6.1 ± 1.6					6.1 ± 1.6
390	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	10.0 ± 2.4	10.2 ± 1.3 ± 1.8	49.2 ± 2.9 ± 2.7				10.0 ± 2.4
391	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup> (NR)	14.7 ± 2.6	11.1 <sup>+2.7</sup> <sub>-2.6 ± 0.5</sub>	81 ± 1.1 <sup>+1.7</sup> <sub>-1.7</sub>	50 <sup>+10</sup> ± 7			14.7 ± 2.6
393	π <sup>0</sup> K <sup>0</sup>	4.7 ± 0.6	4.4 ± 0.7 ± 0.5	61 ± 1.1 <sup>+1.2</sup> <sub>-1.2</sub>				4.7 ± 0.6
394	K <sup>+</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	84 ± 0.6	82 ± 0.9 ± 5	84 ± 1.1 ± 1.6	16 <sup>+8</sup> ± 5			84 ± 0.6
395	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>-</sup>	35 ± 7	29 <sup>+12</sup> <sub>-13 ± 3.6</sub>	46.7 ± 3.3 ± 1.4				35 ± 7
396	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	3.1 ± 1.6	3.1 ± 1.6	5.1 ± 1.6 ± 0.6				3.1 ± 1.6
397	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	< 3.6	< 3.6	< 3.6				< 3.6
398	π <sup>0</sup> (980)K <sup>0</sup> †	7.0 ± 0.9	6.9 ± 0.8 ± 0.6	7.6 ± 1.1 ± 1.3				7.0 ± 0.9
399	π <sup>0</sup> (1700)K <sup>0</sup> †	2.7 ± 1.2	2.7 ± 1.2 ± 0.9	1.4 ± 0.6 ± 0.6				2.7 ± 1.2
400	π <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>0</sup>	1.8 ± 0.7	1.8 ± 0.7 ± 0.48	< 3.3 <sup>‡</sup>				1.8 ± 0.7
401	π <sup>0</sup> π <sup>0</sup>	3.3 ± 0.6	3.3 ± 0.6 ± 0.4	< 3.3				3.3 ± 0.6
402	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	< 8.0	< 8.0	< 8.0				< 8.0
403	K <sup>+</sup> (1600) <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	< 10	< 10	< 10.1				< 10
404	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	2.8 ± 0.7	2.8 ± 0.7 ± 0.5	2.8 ± 0.8 ± 0.5 ± 2				2.8 ± 0.7
405	π <sup>0</sup> (980)π <sup>0</sup>	14.7 ± 0.6	14.7 ± 0.6	14.7 ± 0.6 ± 0.2				14.7 ± 0.6
406	K <sup>+</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup> (NR)	< 3.1	84.5 ± 2.9 ± 4.3		< 3.1			< 3.1
407	K <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup> (NR)	< 3.1	3.9 ± 1.3	5.1 ± 0.6 ± 2.6	2.1 ± 0.2 ± 0.2			< 3.1
408	K <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	39 ± 5	5.0 ± 0.6 ± 0.4	14.0 ± 0.9 ± 0.6				39 ± 5
409	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	< 90	17 ± 8					< 90
410	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	< 37	16 ± 7					< 37
411	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	10 ± 4	10.3 ± 2.0 ± 2.3					10 ± 4
412	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	10.3 ± 2.6	10.3 ± 2.0 ± 1.3					10.3 ± 2.6
413	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	16.0 ± 3.4	16.0 ± 3.4					16.0 ± 3.4
414	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	10.1 ± 2.3	10.1 ± 2.3					10.1 ± 2.3
415	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	5.1 ± 1.0		5.1 ± 0.7 ± 0.7				5.1 ± 1.0
416	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>0</sup> π <sup>0</sup>	2.7 ± 0.9	2.7 ± 0.9 ± 0.6					2.7 ± 0.9
417	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>0</sup> π <sup>0</sup>	16.6 ± 2.9	8.0 ± 2.1 ± 1.0	8.0 ± 2.0				16.6 ± 2.9
418	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	0.878 ± 0.033	< 0.3	0.10 ± 0.08 ± 0.04	0.23 ± 0.10 ± 0.10	0.0780 ± 0.0127 ± 0.0084	0.0603 ± 0.0147	0.878 ± 0.033
419	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	1.31 ± 0.18	1.08 ± 0.28 ± 0.11	1.30 ± 0.18 ± 0.08				1.31 ± 0.18
420	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	4.3 ± 0.8	6.4 ± 1.0 ± 0.8	< 18				4.3 ± 0.8
421	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	0.6 ± 0.7	< 0.9	< 0.9				0.6 ± 0.7
422	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	2.8 ± 0.6	< 1.0	< 1.0				2.8 ± 0.6
423	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	34.2 ± 4.8		34.2 ± 4.8				34.2 ± 4.8
424	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	8.6 ± 1.1		8.6 ± 1.1				8.6 ± 1.1
425	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	7.3 ± 0.7	7.1 ± 0.6 ± 2.3	30.3 ± 2.3 ± 4.0				7.3 ± 0.7
426	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	7.0 ± 1.0	7.0 ± 1.0 ± 0.4	9.0 ± 1.2 ± 0.7	5.4 ± 2.2 ± 0.7			7.0 ± 1.0
427	π <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	7.0 ± 1.0	7.0 ± 1.0 ± 0.4	9.0 ± 1.2 ± 0.7	5.4 ± 2.2 ± 0.7			7.0 ± 1.0

Results for CDF and LHCb are relative BF's converted to absolute BF's.  
CLEO upper limits that have been greatly superseded are not shown.  
† In this product of BF's, all daughter BF's not shown are set to 100%.  
‡ Includes two distinct decay processes: B(B<sup>0</sup> → f) + B(B<sup>0</sup> → f) → f.  
§ Obtained from a fit to the ratios of BF's measured by LHCb (Ref. [7]) and to the averages of the BF's in their numerators, as measured by other experiments (RPP 322 and 329).  
¶ Obtained from a fit to the ratios of BF's measured by LHCb (Ref. [7]) and to the averages of the BF's therein, as measured by other experiments (excluding the present line).  
‡ 0.75 < M(Kπ) < 1.20 GeV/c<sup>2</sup>.  
§ Average of BaBar results from B<sup>0</sup> → K<sup>+</sup>π<sup>-</sup>π<sup>0</sup> [?] and B<sup>0</sup> → K<sup>0</sup>π<sup>+</sup>π<sup>-</sup> [?].  
¶ Result from DELPHI. Cited in the BaBar column to avoid adding a column to the table.  
‡ Result from ARGUS. Cited in the BaBar column to avoid adding a column to the table.

Heavy Flavor Averaging group (HFLAV) - May 2018  
B<sup>0</sup> Branching Fractions (decays with strange mesons part 3) (×10<sup>-6</sup>) - UL at 90% CL  
Preliminary Updated results not included in PDG Live as of Dec. 31, 2017

RPP#	Mode	PD2017 Avg.	BaBar	Belle	CLEO	CDF	LHCb	Our Avg.
332	f <sub>0</sub> (1500)K <sup>0</sup> †	13 <sup>‡</sup>	13.3 <sup>‡</sup> ± 3.2					13.3 ± 3.2
333	f <sub>2</sub> (1525)K <sup>0</sup> †	0.3 ± 0.4	0.29 ± 0.11 ± 0.26					0.29 ± 0.40
334	f <sub>0</sub> (1710)K <sup>0</sup> †	4.4 ± 0.9	4.4 ± 0.7 ± 0.5					4.4 ± 0.9
335	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> K <sup>+</sup> K <sup>-</sup> (NR)	14.7 ± 2.0	15.0 ± 2.1 ± 0.9					14.7 ± 2.0
336	K <sub>s</sub> π <sub>s</sub> K <sub>s</sub>	6.0 ± 0.5	6.19 ± 0.48 ± 0.19	4.2 <sup>+1.6</sup> <sub>-1.3 ± 0.8</sub>				6.0 ± 0.50
337	f <sub>0</sub> (980)K <sub>s</sub> <sup>0</sup> †	2.7 ± 1.8	2.7 ± 1.8 ± 1.1 <sup>†</sup>					2.7 ± 1.8
338	f <sub>0</sub> (1710)K <sub>s</sub> <sup>0</sup> †	0.50 ± 0.50	0.50 ± 0.21 ± 0.11 <sup>†</sup>					0.50 ± 0.47
339	f <sub>0</sub> (1710)K <sub>s</sub> <sup>0</sup> †	0.5 ± 0.6	0.54 <sup>+0.22</sup> <sub>-0.22 ± 0.52</sub>					0.54 ± 0.56
340	K <sub>s</sub> π <sub>s</sub> K <sub>s</sub> (NR)	13.3 ± 3.1	13.3 ± 3.1					13.3 ± 3.1
341	K <sub>s</sub> π <sub>s</sub> K <sub>s</sub>	< 16	< 16					< 16
342	K <sup>0</sup> K <sup>+</sup> K <sup>-</sup>	27.5 ± 2.6	27.5 ± 1.1 ± 2.2					27.5 ± 2.6
343	π <sup>0</sup> K <sup>0</sup>	10.0 ± 0.5	9.7 ± 0.5 ± 0.6	10.4 ± 0.5 ± 0.6	11.5 <sup>+4.5+1.8</sup> <sub>-3.7-1.7</sub>			10.1 ± 0.6
344	K <sup>+</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup> K <sup>-</sup> (NR)	< 71.7	< 71.7					< 71.7
345	K <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup> K <sup>0</sup>	4.6 ± 1.3	< 13.8					4.6 ± 1.4
346	K <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup> K <sup>0</sup>	0.8 ± 0.5	1.28 ± 0.35 ± 0.11	0.26 ± 0.33 ± 0.10				0.81 ± 0.23
347	K <sup>+</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup> K <sup>-</sup> (NR)	< 6.0	< 6.0	< 6.0				< 6.0
348	K <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup> K <sup>0</sup>	< 2.2	< 2.2	< 2.2				< 2.2
349	K <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup> K <sup>0</sup>	< 0.2	< 0.41	< 0.2				< 0.2
350	K <sup>+</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup> K <sup>+</sup>	< 2.0	< 2.0	< 2.0				< 2.0
351	K <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	< 5000	< 5000					< 5000
352	(K <sub>s</sub> ) <sub>s</sub> <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	4.3 ± 0.4	4.3 ± 0.4 ± 0.4	4.3 ± 0.4 ± 0.4				4.3 ± 0.4
353	(K <sub>s</sub> ) <sub>s</sub> <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	< 1.7	< 1.7	< 1.7				< 1.7
354	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	< 31.8	< 31.8					< 31.8
355	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	< 3.3	< 3.3					< 3.3
356	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	< 8.4	< 8.4					< 8.4
357	π <sup>0</sup> K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup>	3.9 ± 0.8	3.9 ± 0.5 ± 0.6	4.3 ± 0.4 ± 0.4				4.2 ± 0.5
358	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	< 1.7	< 1.7					< 1.7
359	K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup> π <sup>+</sup> π <sup>-</sup>	< 4.7	< 4.7					< 4.7
360	π <sup>0</sup> K <sup>+</sup> (1680) <sup>0</sup>	< 3.5	< 3.5					< 3.5
361	π <sup>0</sup> K <sup>+</sup> (1780) <sup>0</sup>	< 2.7	< 2.7					< 2.7
362	π <sup>0</sup> K <sup>+</sup> (1680) <sup>0</sup>	< 15.3	< 15.3					< 15.3
363	π <sup>0</sup> K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup>	< 1100	< 1100					< 1100
364	π <sup>0</sup> K <sub>s</sub> <sup>0</sup> (1430) <sup>0</sup>	6.8 ±						

# 直接 CP 非対称性

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

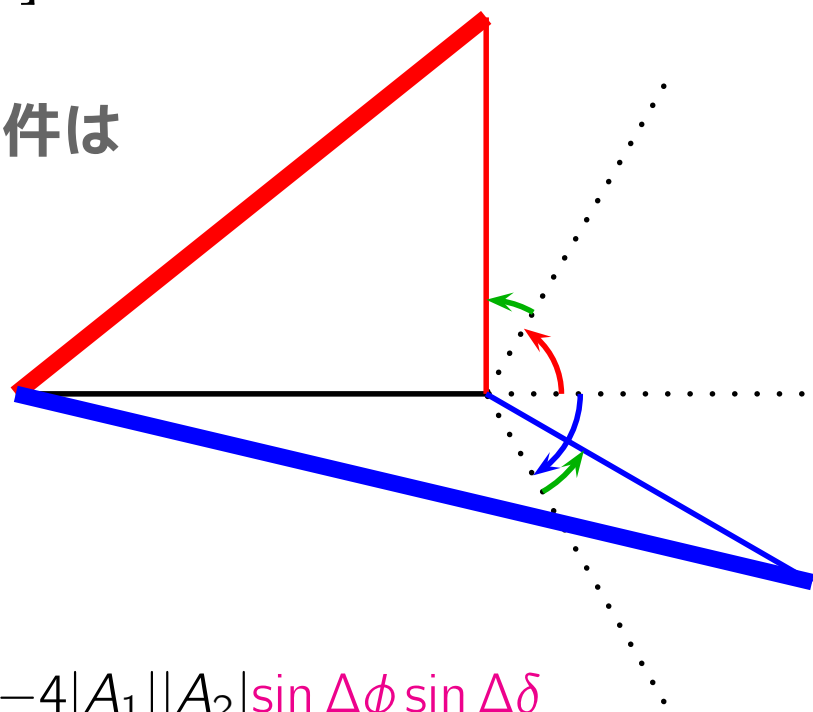
$$\begin{aligned} \bar{\Gamma}_f - \Gamma_f &= \left| |A_1|e^{-i\phi_1+i\delta_1} + |A_2|e^{-i\phi_2+i\delta_2} \right|^2 - \left| |A_1|e^{+i\phi_1+i\delta_1} + |A_2|e^{+i\phi_2+i\delta_2} \right|^2 \\ &= |A_1||A_2| \left[ e^{i(-\phi_1+\phi_2+\delta_1-\delta_2)} + e^{i(\phi_1-\phi_2-\delta_1+\delta_2)} - e^{i(+\phi_1-\phi_2+\delta_1-\delta_2)} - e^{i(-\phi_1+\phi_2-\delta_1+\delta_2)} \right] \\ &= -|A_1||A_2| \left[ (e^{+i\Delta\phi} - e^{-i\Delta\phi})(e^{+i\Delta\delta} - e^{-i\Delta\delta}) \right] = -4|A_1||A_2| \sin \Delta\phi \sin \Delta\delta \end{aligned}$$

- 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  $\Delta\phi \neq \pi$
- 強位相差  $\Delta\delta = \delta_1 - \delta_2 \neq 0$  かつ  $\Delta\delta \neq \pi$

- 測定量  $A_{CP}$

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



## さらに実効ハミルトニアン

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

- ハドロニックペンギン: 4つのオペレータとウィルソン係数を追加

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

- 輻射ペンギン ( $b \rightarrow s\gamma$ ): さらに2つ追加

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

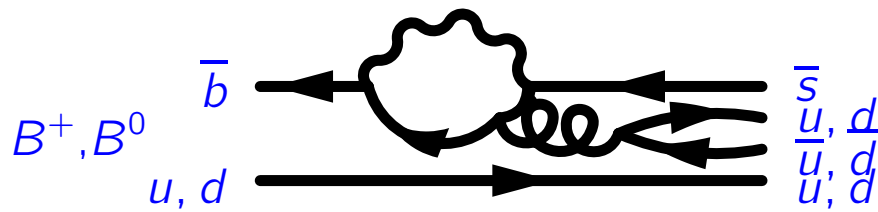
$C_8$  chromomagnetic operator

- 電弱ペンギン ( $b \rightarrow sl^+l^-$ ): さらに2つ追加

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

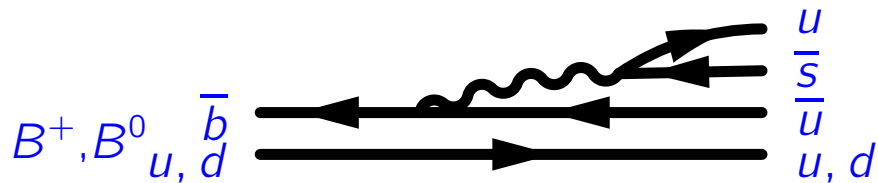
$C_{10}$  axial-vector electroweak operator  $\left[ (\bar{b}s)_{V-A} (\bar{\ell}\ell)_A \right]$

ハドロニック崩壊の場合はオペレーターで分類するよりもダイアグラムで分類する方が直感的…例えば  $B \rightarrow K\pi$  の場合



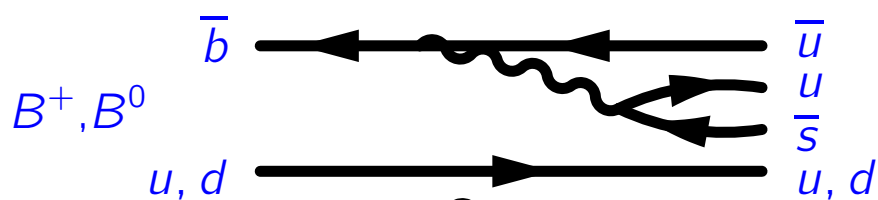
### Penguin

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



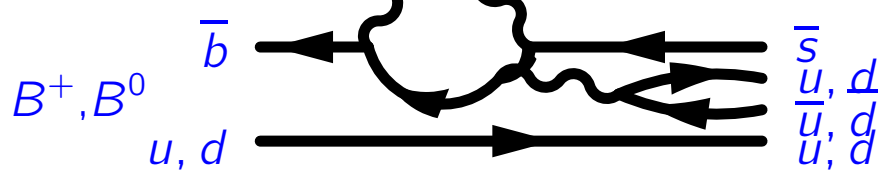
### Tree

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



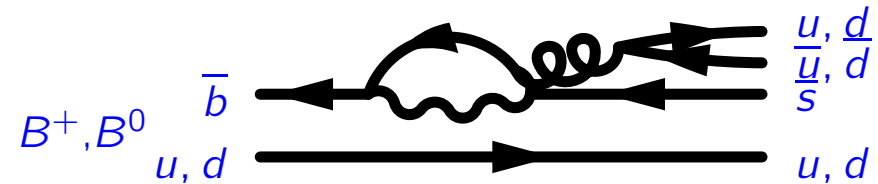
### Color-suppressed

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



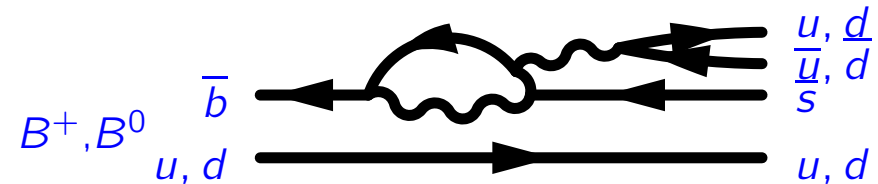
### EW-Penguin

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



### External Penguin

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



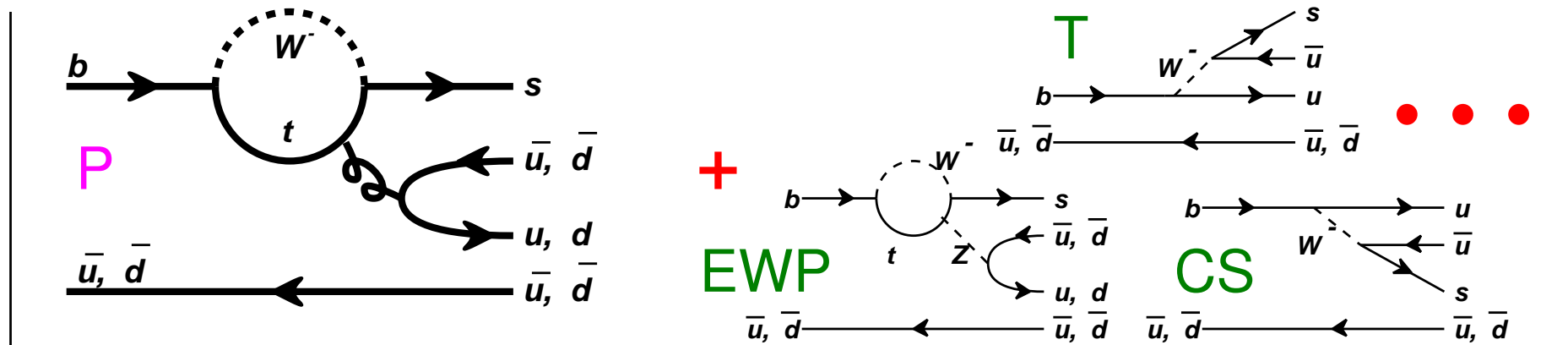
### External EW-Penguin

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



# $B \rightarrow K\pi$

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



● **P が主なのでどの組合せでもほぼ同じ分岐比**

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

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

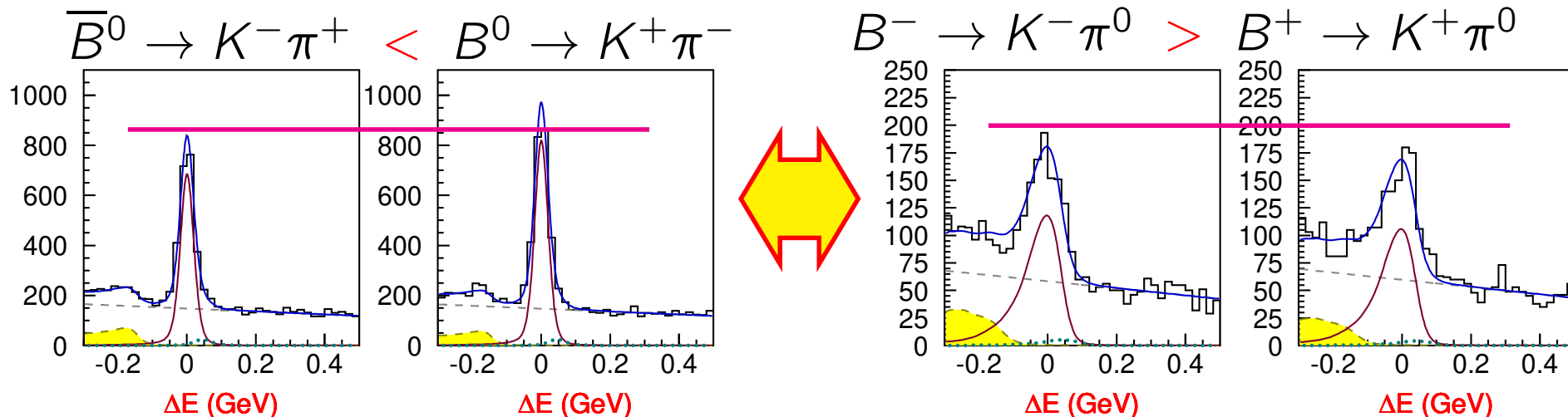
● **Tがあるので、直接 CP 非対称性:**

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

● **崩壊幅の比で理論不定性を減らす**

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

# Kπ パズル



● **P+T が主だと思えば単純な予想では**  $A_{CP}(K^+\pi^-) \sim A_{CP}(K^+\pi^0)$

● **符号が逆なのはなぜ?**

● 他のダイアグラムの影響? でも SM では小さいはず

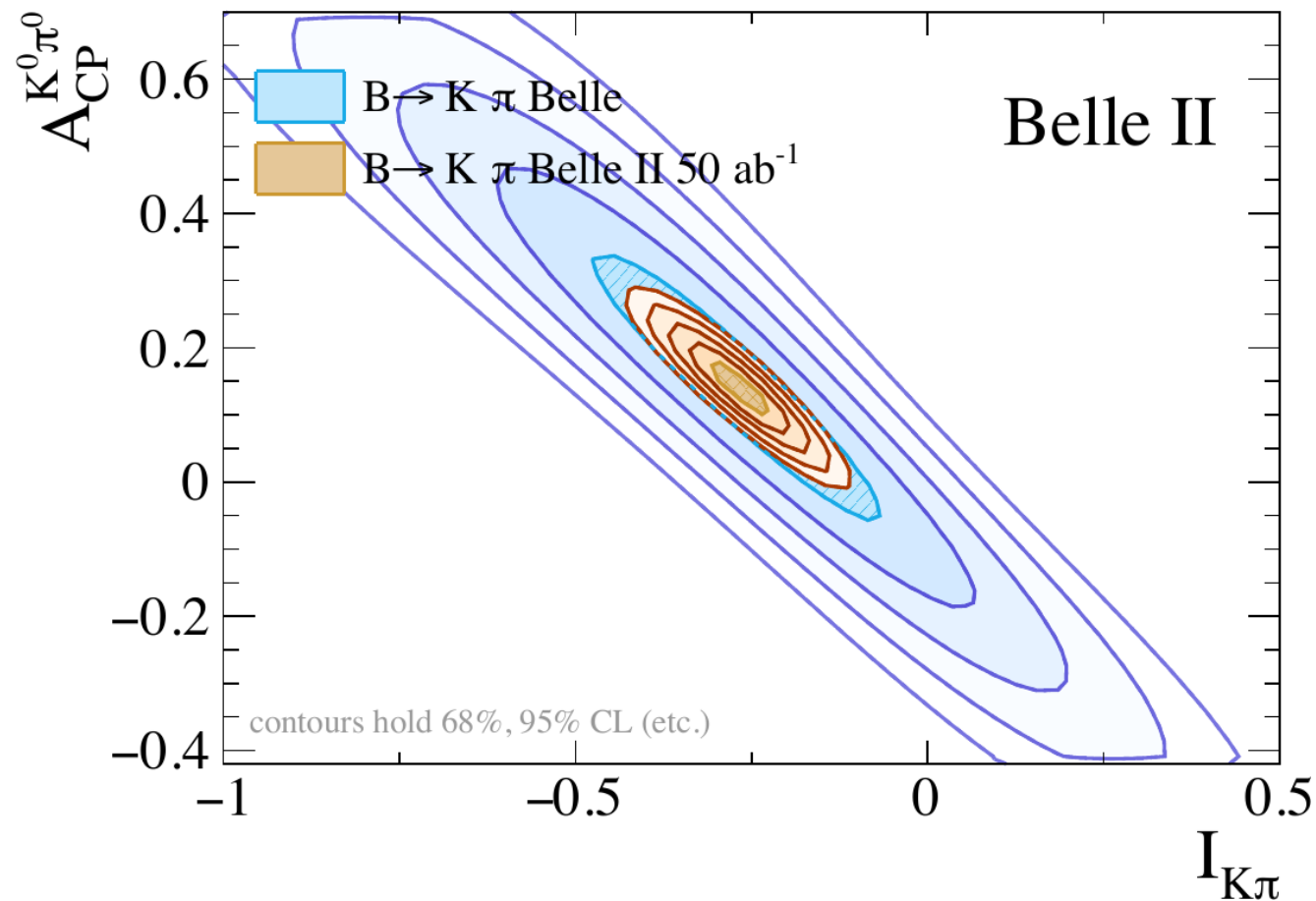
● 新物理 (?) — 影響がありそうなのは EW-penguin

● **他の手掛り — アイソスピン和則?**

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

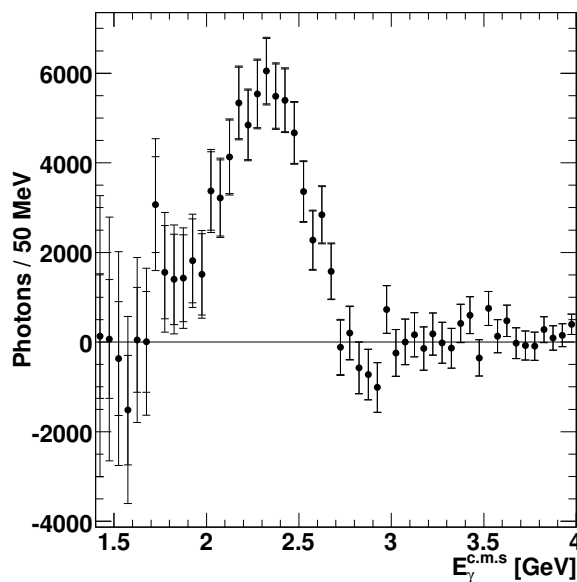
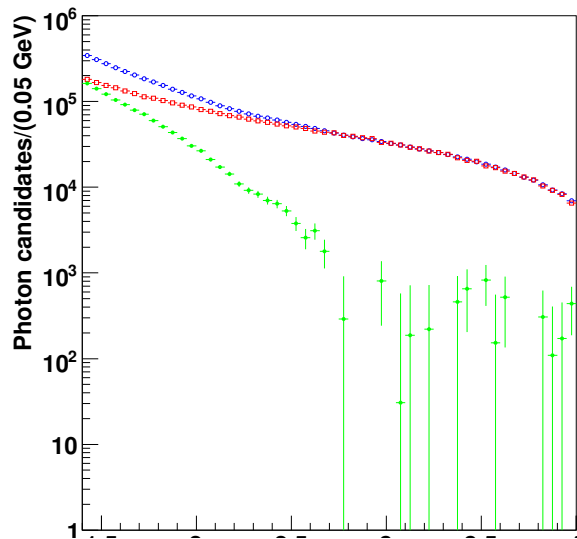
$$I_{K\pi} = A_{CP}(K^+\pi^-) + \frac{A_{CP} \times \Gamma(K^0\pi^+)}{\Gamma(K^+\pi^-)} - \frac{A_{CP} \times \Gamma(K^+\pi^0)}{\Gamma(K^+\pi^-)} - \frac{A_{CP} \times \Gamma(K^0\pi^0)}{\Gamma(K^+\pi^-)} = 0 (?)$$

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

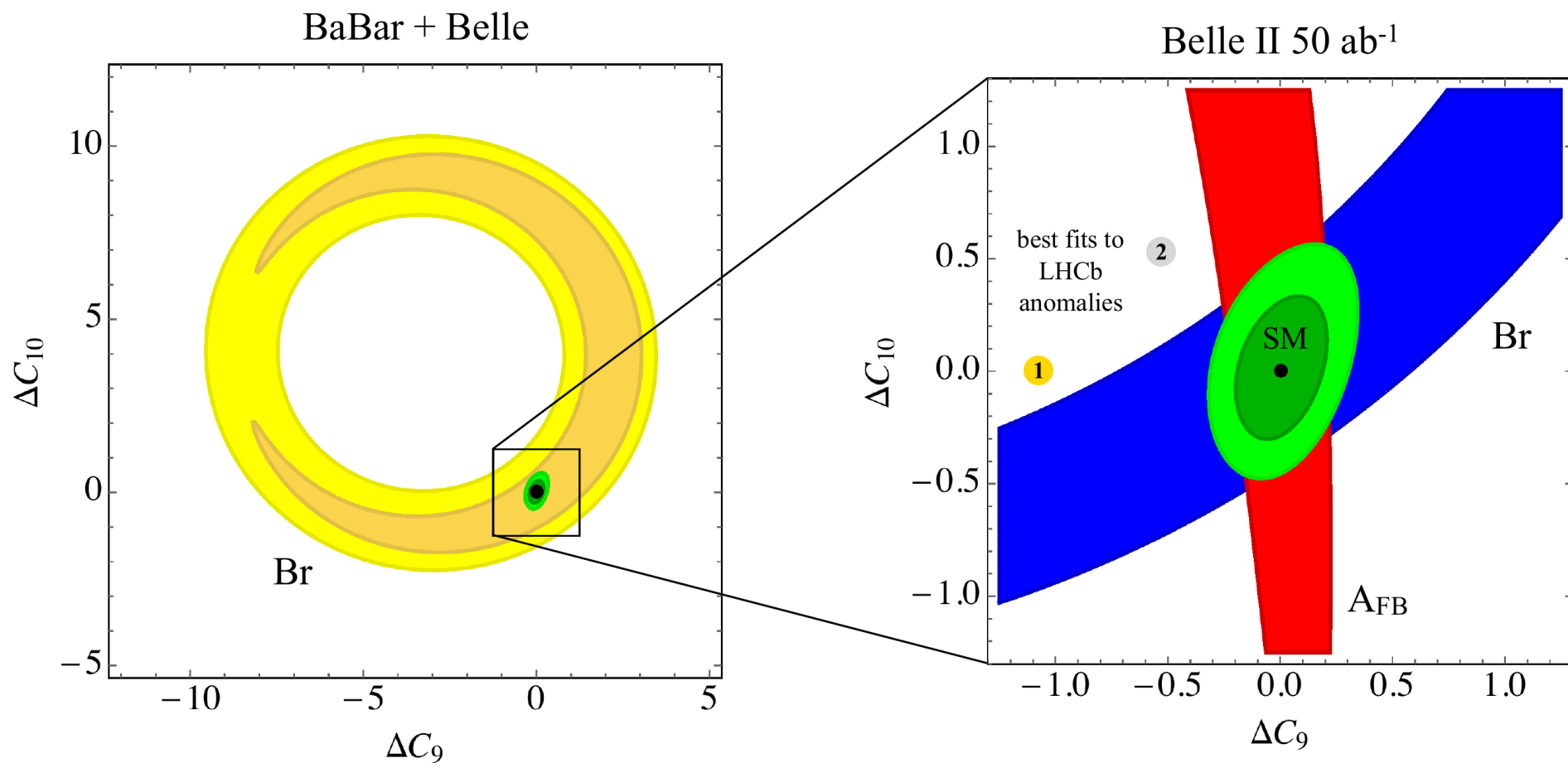


- Belle II で  $B^0 \rightarrow K^0 \pi^0$  の  $A_{CP}$  を時間依存 CPV で測る
  - アイソスピン和則が成りたつかどうかは Belle II で答えが出そう
  - これだけでは  $K\pi$  パズルの答えになる気はしない…
- $K_L$  の  $\epsilon'/\epsilon$  のように後から理論不定性が減ることにも期待

# 輻射ペンギンと電弱ペンギン



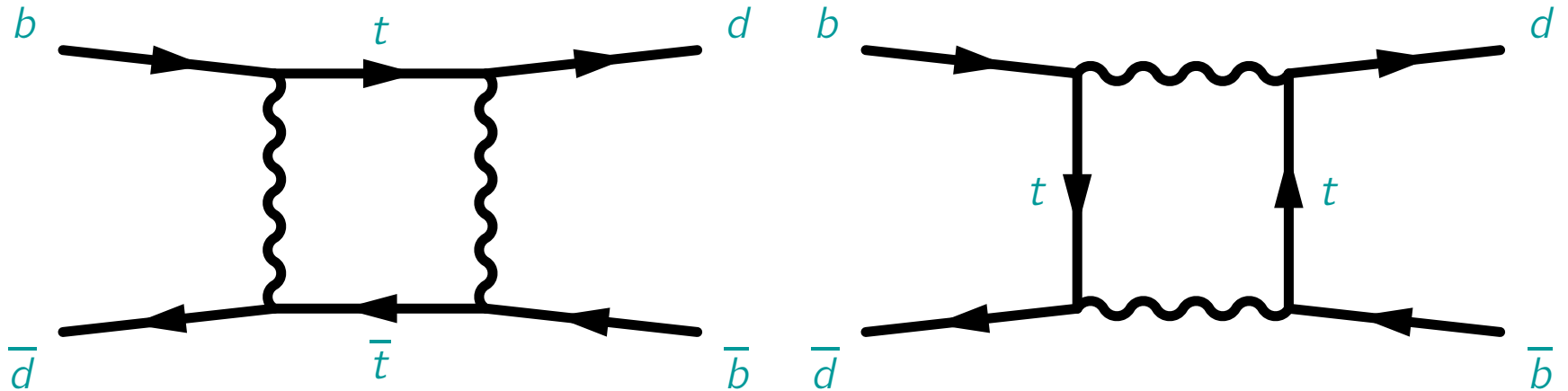
- $b \rightarrow s\gamma$  は  $|C_7|$  に感度
  - インクルーシブ  $B \rightarrow X_s\gamma$  の分岐比測定
  - 光子スペクトルのインクルーシブ測定
  - 膨大なバックグラウンドを差引く
  - $E_\gamma$  スペクトルは  $V_{cb}$  と  $V_{ub}$  の OPE にも使用
- $b \rightarrow sl^+l^-$  は  $C_7$ 、 $C_9$ 、 $C_{10}$  に感度
  - インクルーシブ  $B \rightarrow X_sl^+l^-$  の分岐比
  - $B \rightarrow K^*l^+l^-$  の前後非対称性
  - 他の角分布
- 理論計算精度が良く、新物理に強い制限
  - 多彩な測定量がある (今回はカバーしません)
- グローバルフィットからウィルソン係数



- 現在でもでもインクルーシブ  $B \rightarrow X_s l^+ l^-$  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
- 現在値のままならば Belle II で新物理を「発見」できる

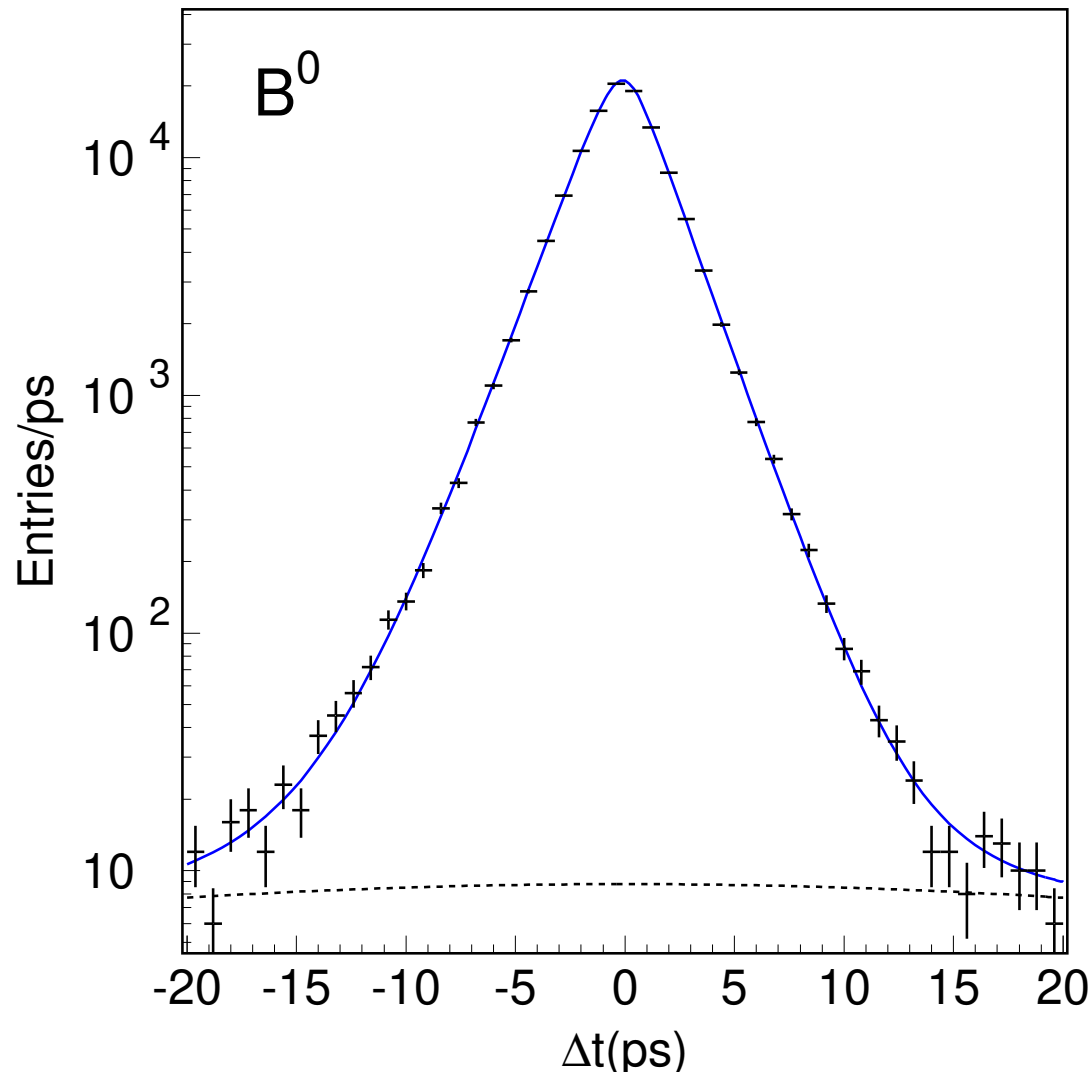
# ユニタリティ三角形

## B 中間子混合



- フレーバー変換中性流により混合が起きる
- 質量、崩壊幅の異なる2つのCPの固有状態を作る (差:  $\Delta m$ 、 $\Delta\Gamma$ )
  - 2つのCP固有状態への分岐比はどちらも小さいので  $\Delta\Gamma$  は小さい
- トップクォークが非常に重いため、質量差 (B 中間子混合) は大
  - 小林益川行列要素  $\Delta m \sim (V_{tb}^* V_{td})^2 \sim \lambda^6$
  - 絶対値の2乗でないので **複素位相が残る**

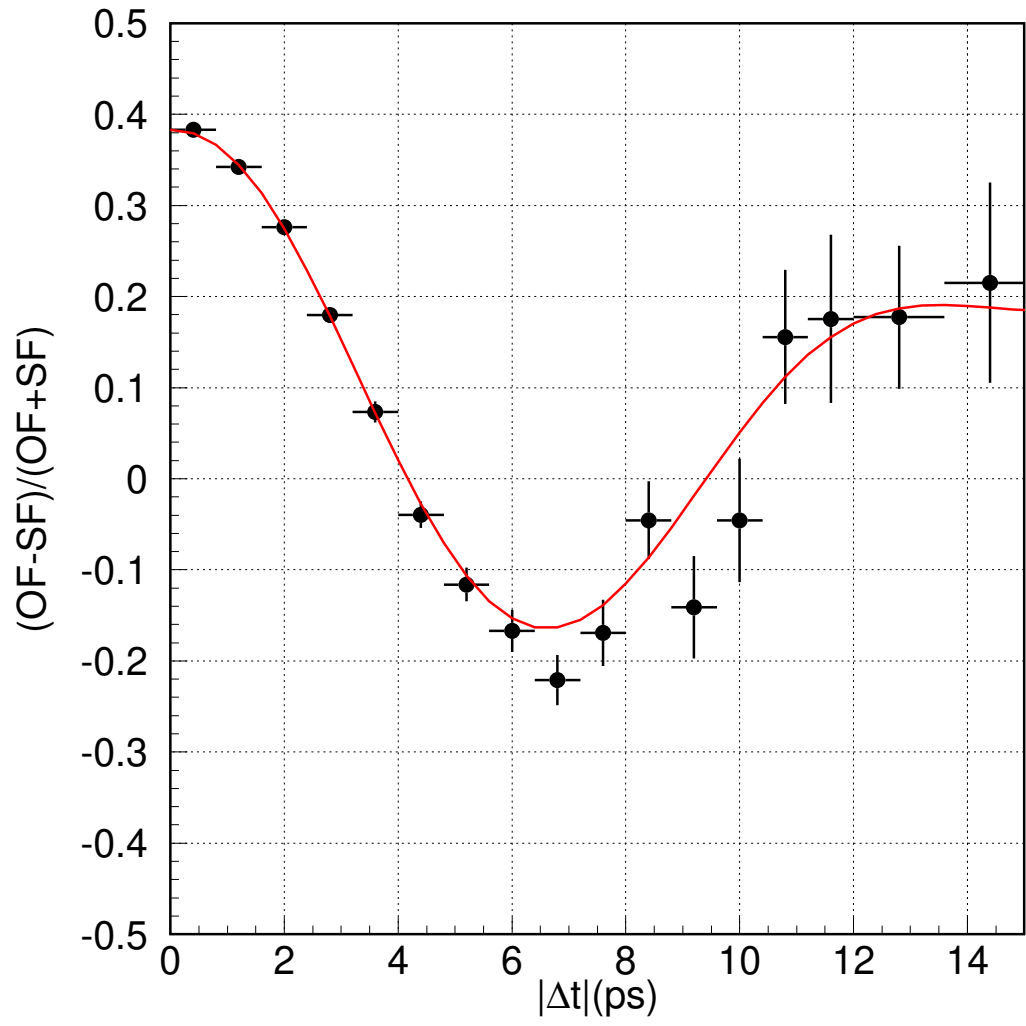
# B 中間子の寿命



- $V_{cb}$  が小さいため  $\Gamma$  が小さく寿命が長い
- $\tau_{B^0} = 1.530 \pm 0.009$  ps  
 $\tau_{B^+} = 1.638 \pm 0.011$  ps  
(2007 年の世界平均)
- 左右対称なのは、2つの  $B$  崩壊の時間差を見ているため (どちらが先かは定義できない)
- 本来の  $e^{-|\Gamma\Delta t|}$  の分布が検出器の分解能によって少しなまっている



# 混合 × 寿命



- セミレプトニック崩壊など  
フレーバー固有状態への崩壊
- フレーバー非対称性

$$A_f(t) = \frac{N(\text{OF}) - N(\text{SF})}{N(\text{OF}) + N(\text{SF})}$$

(opposite flavor – same flavor)  
完全に  $\cos(\Delta m \Delta t)$  ではないのは  
検出器が完全でないため

世界平均 (2007)  
 $\Delta m = 0.507 \pm 0.005 \text{ ps}^{-1}$   
 $x_d = 0.776 \pm 0.008$

# 混合 → 崩壊 → CP非保存

フレーバー固有状態  $P^0$  と  $\bar{P}^0$  のシュレーディンガー方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} P^0(t) \\ \bar{P}^0(t) \end{pmatrix} = H \begin{pmatrix} P^0(t) \\ \bar{P}^0(t) \end{pmatrix}, \quad H = \begin{pmatrix} m_{11} - \frac{i}{2}\Gamma_{11} & m_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12} \\ m_{21} - \frac{i}{2}\Gamma_{21} & m_{22} - \frac{i}{2}\Gamma_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{11} - \frac{i}{2}\Gamma_{11} & m_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12} \\ m_{12}^* - \frac{i}{2}\Gamma_{12}^* & m_{11} - \frac{i}{2}\Gamma_{11} \end{pmatrix}$$

(一般的な場合) (CPT は保存)

対角化した解  $P_1 = pP^0 + q\bar{P}^0$ ,  $P_2 = pP^0 - q\bar{P}^0$  [  $\left(\frac{q}{p}\right)^2 = \frac{m_{12}^* - \frac{i}{2}\Gamma_{12}^*}{m_{12} - \frac{i}{2}\Gamma_{12}}$  ]

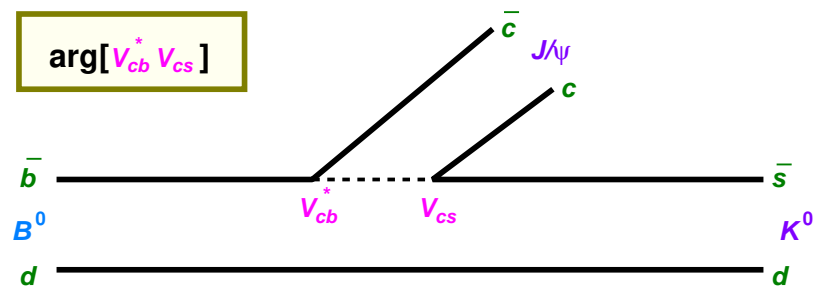
時間発展  $P_{1,2}(t)$ 、**CP固有状態**  $f \leftarrow$  崩壊  $A_f = A(P^0 \rightarrow f)$ ,  $\bar{A}_f = A(\bar{P}^0 \rightarrow f)$   
 (簡単のため  $|p/q| = 1$  (CPT) かつ  $|A_f| = |\bar{A}_f|$ 、また  $\Delta\Gamma = 0$ )

$$\Gamma(P^0(t) \rightarrow f) \propto 2|A_f|^2 e^{-\Gamma t} \left[ 1 + \text{Re}\left(\frac{q}{p} \frac{\bar{A}_f}{A_f} (i \sin \Delta m t)\right) \right] = 2|A_f|^2 e^{-\Gamma t} (1 + \sin 2\phi \sin \Delta m t)$$

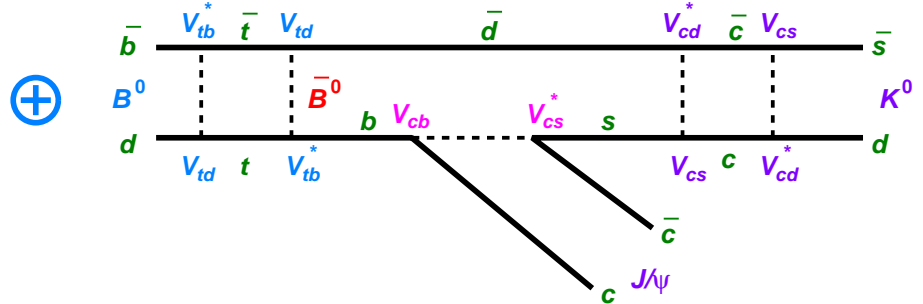
$$\Gamma(\bar{P}^0(t) \rightarrow f) \propto 2|A_f|^2 e^{-\Gamma t} \left[ 1 + \text{Re}\left(\frac{p}{q} \frac{A_f}{\bar{A}_f} (i \sin \Delta m t)\right) \right] = 2|A_f|^2 e^{-\Gamma t} (1 - \sin 2\phi \sin \Delta m t)$$

# $B^0 \rightarrow \text{混合} \rightarrow J/\psi K_S \sim \text{崩壊}$

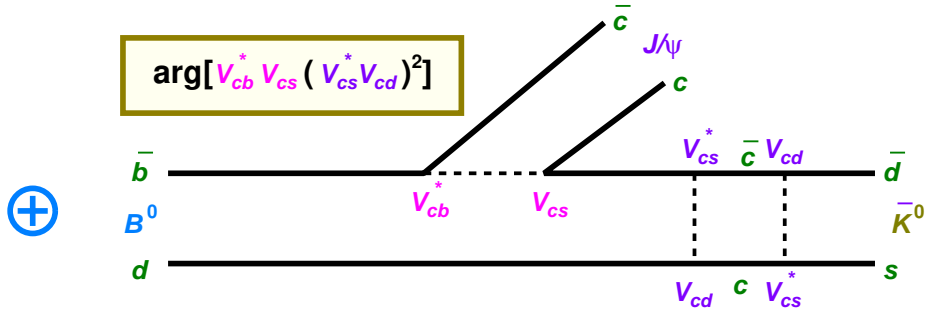
$$\arg[V_{cb}^* V_{cs}]$$



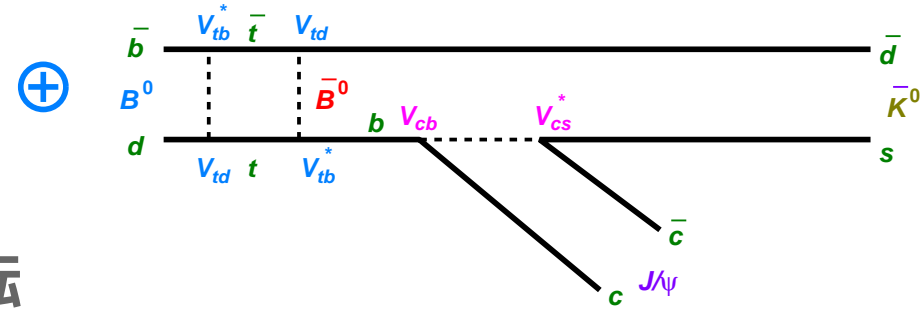
$$\arg[(V_{cb} V_{cs}^*)(V_{tb}^* V_{td} V_{cd}^* V_{cs})^2] = \arg[(V_{cb}^* V_{cs})^{-1} (V_{tb}^* V_{td} V_{cd}^* V_{cs})^2]$$



$$\arg[V_{cb}^* V_{cs} (V_{cs}^* V_{cd})^2]$$



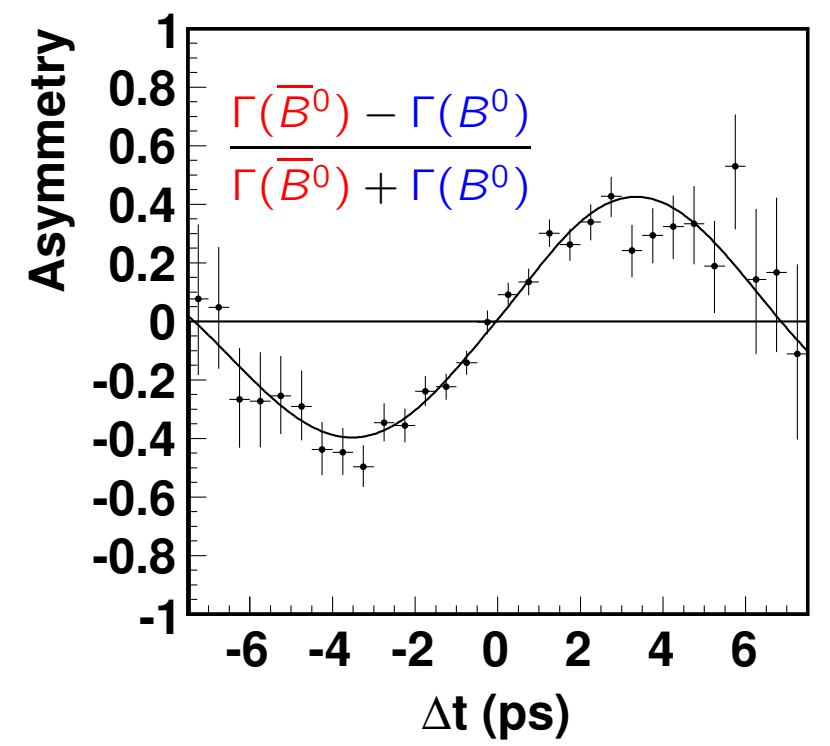
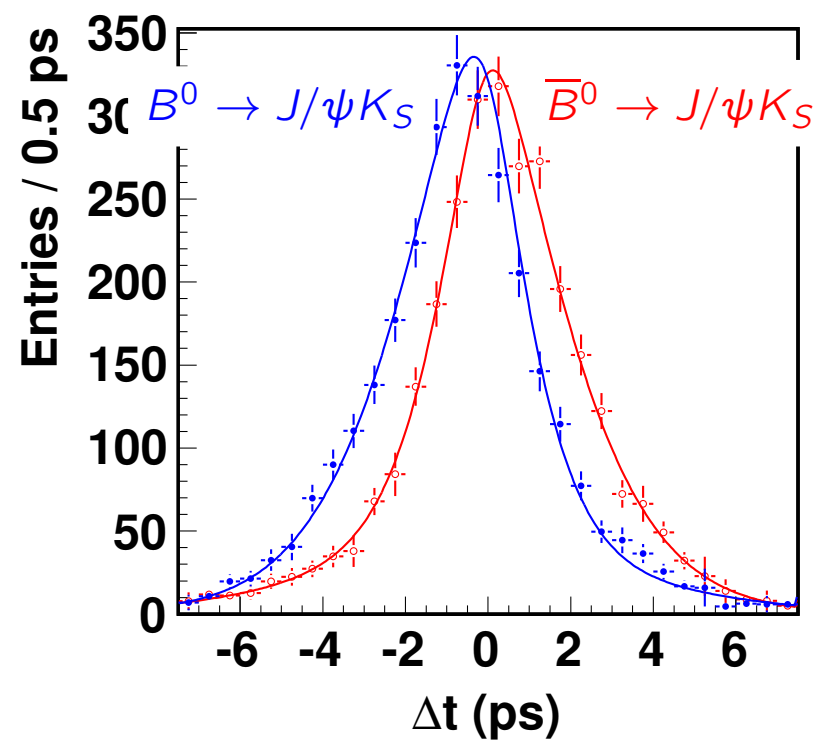
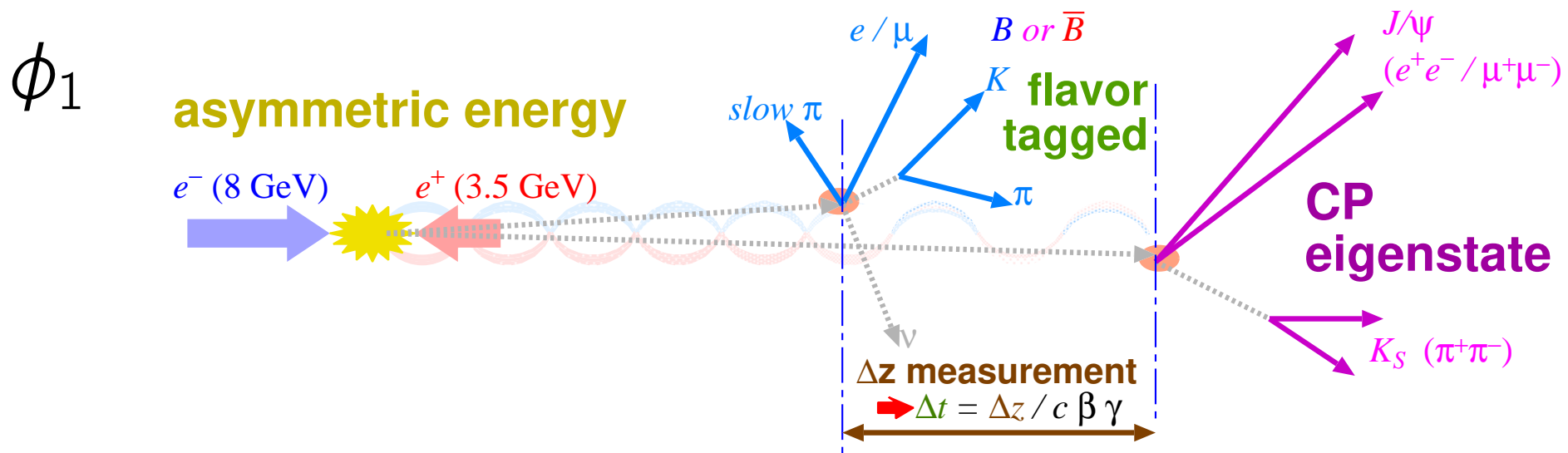
$$\arg[(V_{cb} V_{cs}^*)(V_{tb}^* V_{td})^2] = \arg[(V_{cb}^* V_{cs})^{-1} (V_{tb}^* V_{td} V_{cd}^* V_{cs})^2 (V_{cs}^* V_{cd})^2]$$



●  $\bar{B}^0$  の場合はすべての位相が逆転

- ここで  $A_f = A(B^0 \rightarrow J/\psi K^0)$  なので、 $\arg(\bar{A}_f/A_f) = \arg(V_{cb} V_{cs}^*)$
- $B^0$  混合と  $K^0$  混合の両方から  $\arg(q/p) = \arg(V_{tb}^* V_{td} V_{cd}^* V_{cs})$

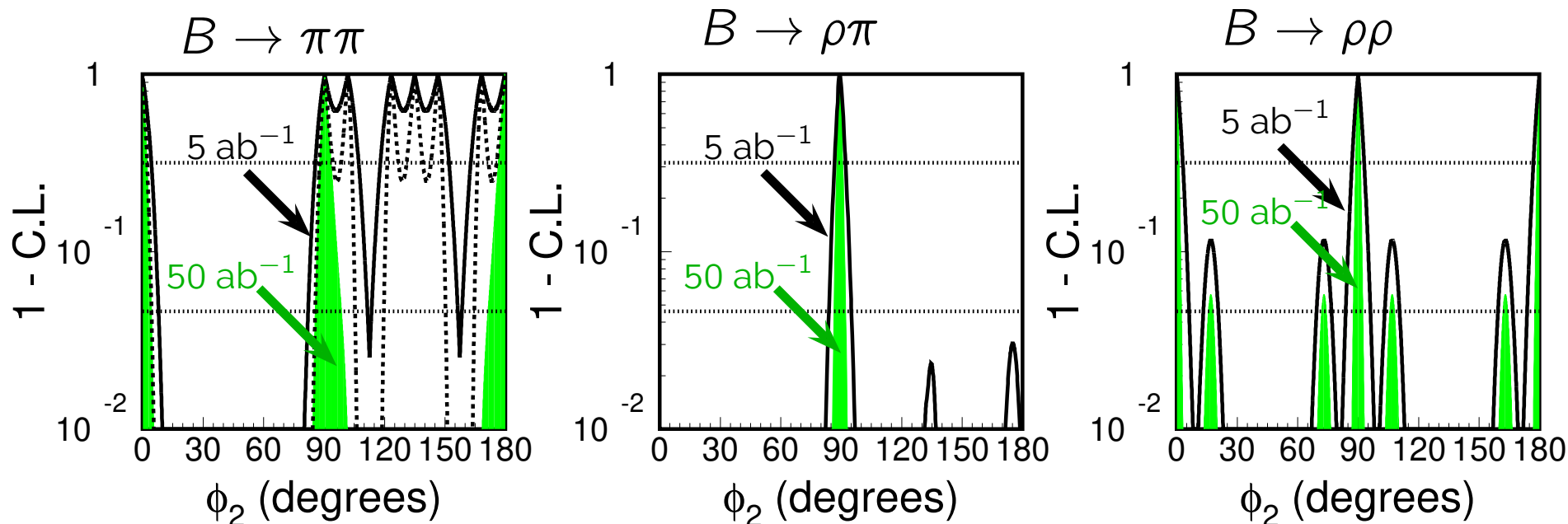
● 従って  $\phi = \arg(V_{cb} V_{cs}^* V_{tb}^* V_{td} V_{cd}^* V_{cs}) = -\arg\left(\frac{V_{cb}^* V_{cd}}{V_{tb}^* V_{td}}\right) = \phi_1$



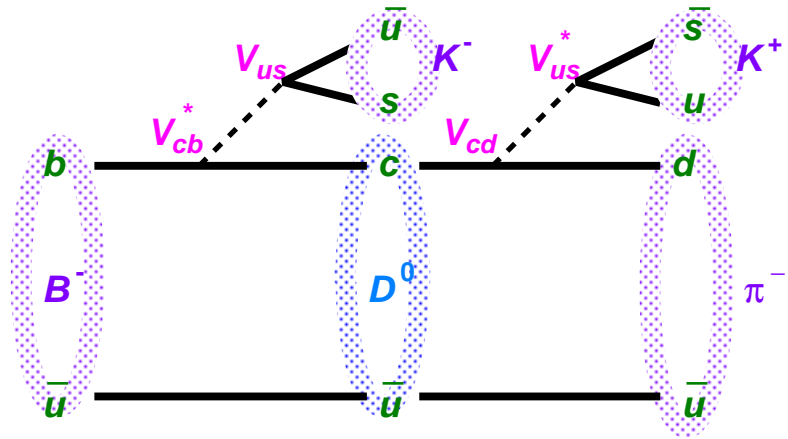
世界平均 (全ての崩壊モード):  $\sin 2\phi_1 = 0.699 \pm 0.017$ 、 $\phi_1 = (22.2 \pm 0.7)^\circ$   
 Belle II でさらに誤差を半分にする

# $\phi_2$

- ツリーとペンギンの異なる複素位相の寄与から  $\phi_2$  を導き出す
  - **アイソスピン解析:**  $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ 、 $B^0 \rightarrow \pi^0\pi^0$ 、 $B^\pm \rightarrow \pi^\pm\pi^0$  の分岐比・ $A_{CP}$  の関係を利用 ( $B \rightarrow \rho\rho$  についても同様)
  - **ダリツ解析:**  $B^0 \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$  のダリツ平面から  $\rho^+\pi^-$ 、 $\rho^-\pi^+$ 、 $\rho^0\pi^0$  の複素振幅 (分岐比と位相) を測定
- $B \rightarrow \rho\pi$  だけで決まりそうだが組み合わせることでさらに精度向上

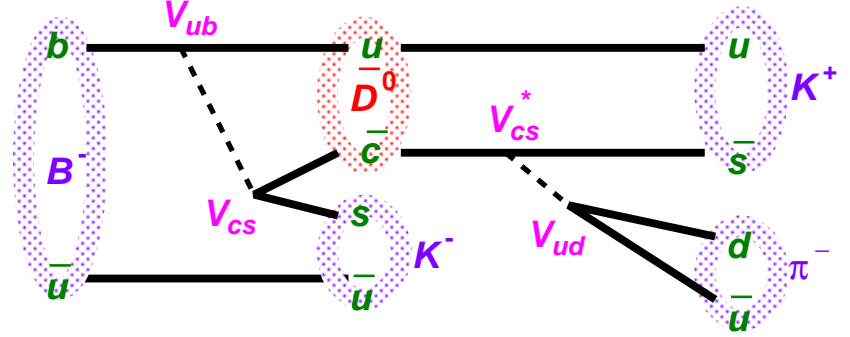
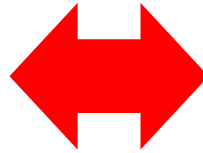


$$B^- \rightarrow [K^+ \pi^-]_D K^- \quad (\text{ADS})$$



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

(doubly Cabibbo suppressed,  $\lambda^5$ )



$$B^- \rightarrow D^0 (\rightarrow K^+ \pi^-) K^-$$

( $\lambda^3$ , color suppressed,  $V_{ub}$ )

$$\text{分岐比の比 } R = \frac{[K^+ \pi^-]_D K^- + [K^- \pi^+]_D K^+}{[K^- \pi^+]_D K^- + [K^+ \pi^-]_D K^+}$$

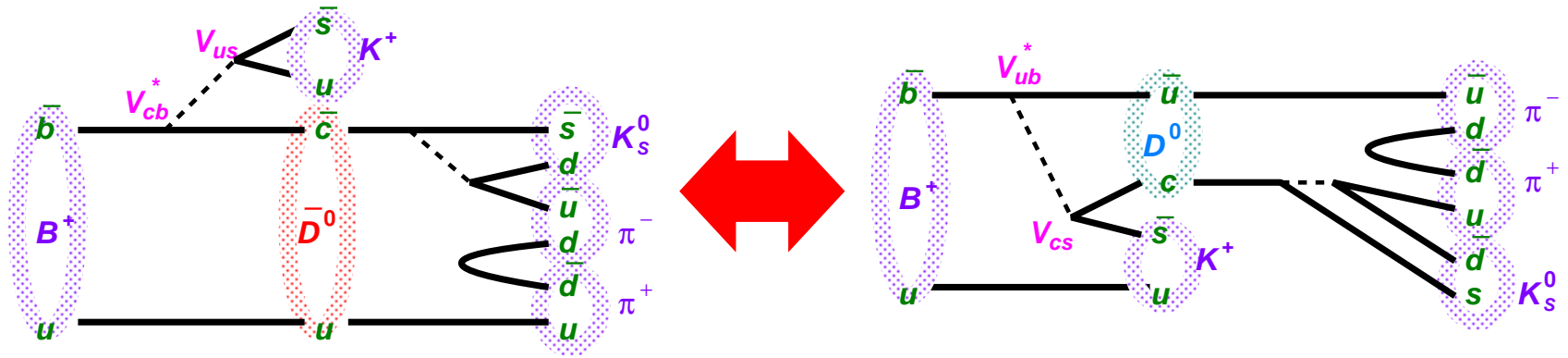
$$\text{非対称性 } A = \frac{[K^+ \pi^-]_D K^- - [K^- \pi^+]_D K^+}{[K^+ \pi^-]_D K^- + [K^- \pi^+]_D K^+},$$

$$R = r_B^2 + r_D^2 + 2r_B r_D \cos(\delta_B + \delta_D) \cos \phi_3$$

$$A = \frac{2r_B r_D \sin(\delta_B + \delta_D) \sin \phi_3}{R}$$

$\phi_3$ 、振幅比  $r_D/r_B$ 、強位相差  $\delta_B + \delta_D$  の 3 不定量に対して測定は 2 つ

$$B^- \rightarrow [K_S \pi^+ \pi^-]_D K^- \text{ (GGSZ)}$$



- ダリツプロット上で振幅比  $\propto r \sim 0.1$  ( $\gg |r|^2 \sim 0.01$ )
- 多数の共鳴状態があり、強位相差が高統計の  $D$  崩壊のダリツプロットから求められる

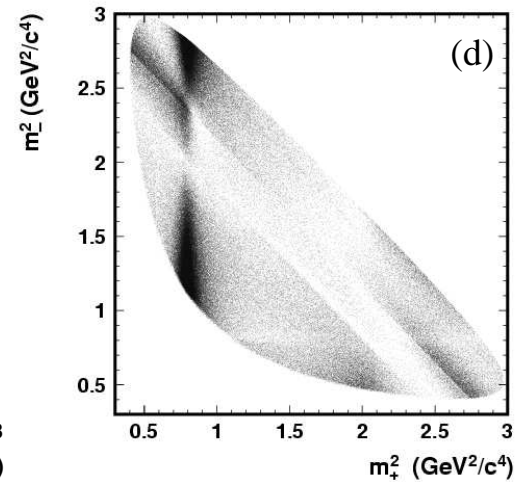
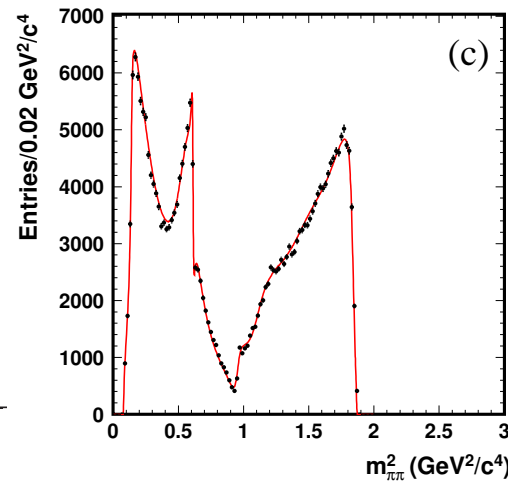
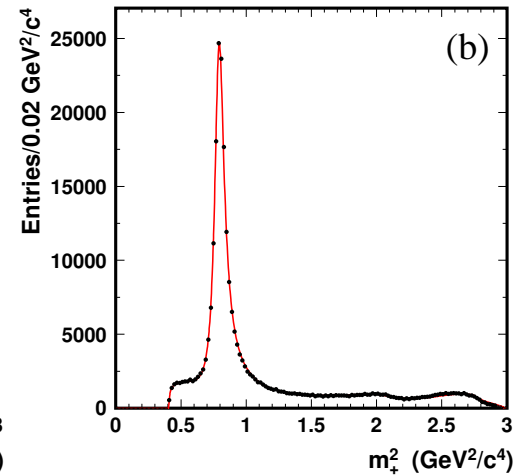
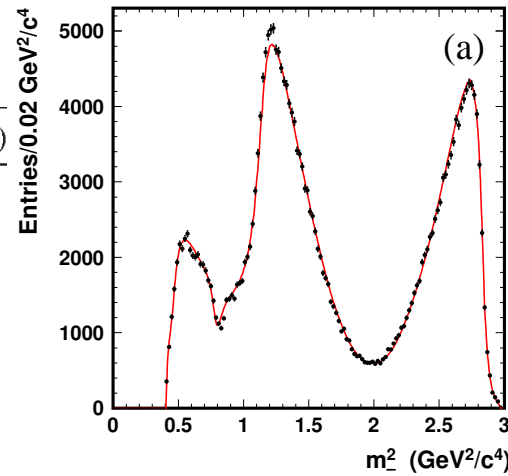
$$P^+ = |A + r_B e^{i(\delta_B + \phi_3)} \bar{A}|^2 = \left| \text{[Diagram 1]} + r_B e^{i(\delta_B + \phi_3)} \text{[Diagram 2]} \right|^2$$

$$= |P| + r_B^2 |\bar{P}| + 2 \sqrt{P \bar{P}} (x_+ \cos \delta_D + y_+ \sin \delta_D)$$

ここで  $x_{\pm} = r_B \cos(\delta_B \pm \phi_3)$ ,  $y_{\pm} = r_B \sin(\delta_B \pm \phi_3)$

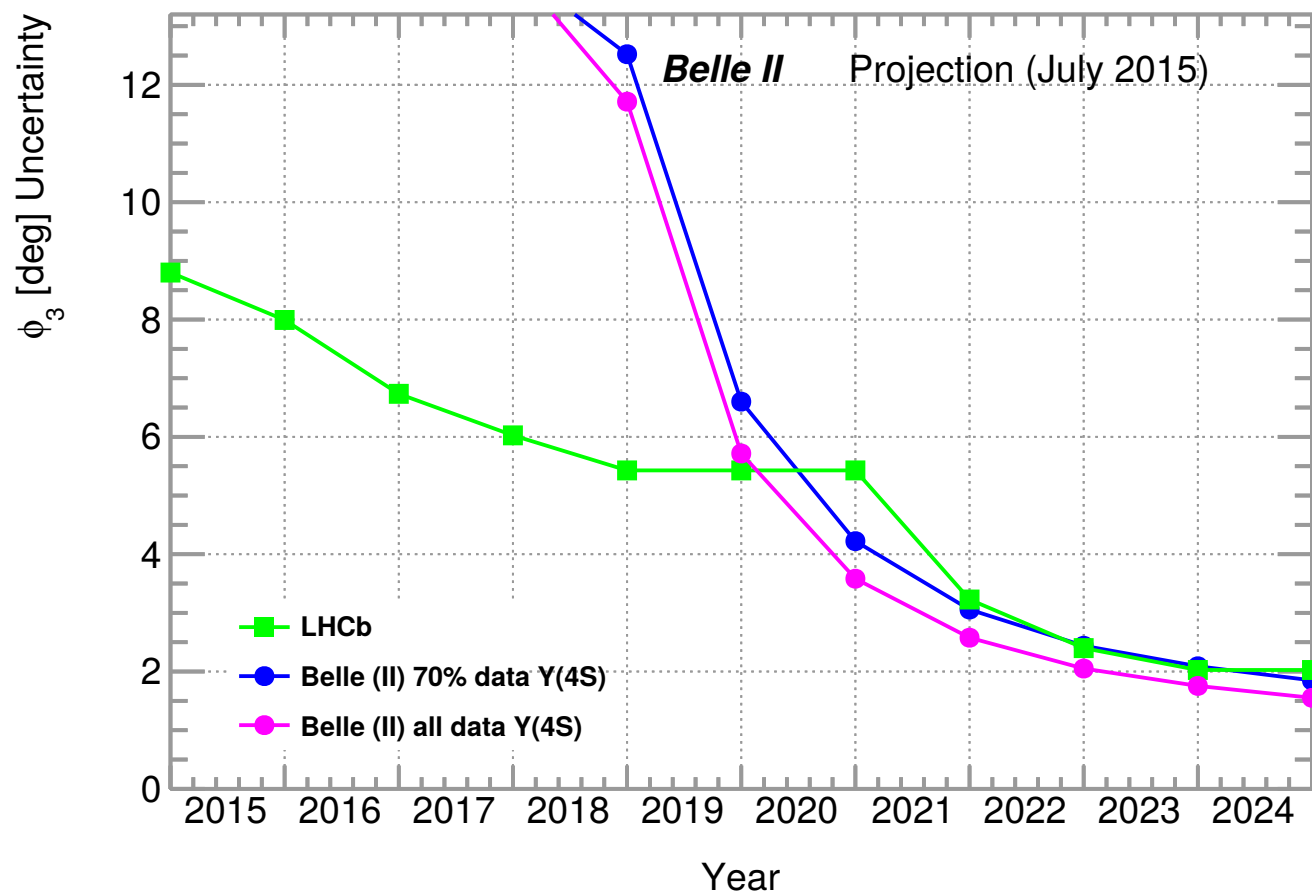
# ダリツプロットと $\phi_3$

Intermediate state	Amplitude	Phase ( $^\circ$ )	Fit fraction (%)
$K_S \sigma_1$	$1.56 \pm 0.06$	$214 \pm 3$	$11.0 \pm 0.7$
$K_S \rho^0$	1.0 (fixed)	0 (fixed)	$21.2 \pm 0.5$
$K_S \omega$	$0.0343 \pm 0.0008$	$112.0 \pm 1.3$	$0.526 \pm 0.014$
$K_S f_0(980)$	$0.385 \pm 0.006$	$207.3 \pm 2.3$	$4.72 \pm 0.05$
$K_S \sigma_2$	$0.20 \pm 0.02$	$212 \pm 12$	$0.54 \pm 0.10$
$K_S f_2(1270)$	$1.44 \pm 0.04$	$342.9 \pm 1.7$	$1.82 \pm 0.05$
$K_S f_0(1370)$	$1.56 \pm 0.12$	$110 \pm 4$	$1.9 \pm 0.3$
$K_S \rho^0(1450)$	$0.49 \pm 0.08$	$64 \pm 11$	$0.11 \pm 0.04$
$K^*(892)^+ \pi^-$	$1.638 \pm 0.010$	$133.2 \pm 0.4$	$62.9 \pm 0.8$
$K^*(892)^- \pi^+$	$0.149 \pm 0.004$	$325.4 \pm 1.3$	$0.526 \pm 0.016$
$K^*(1410)^+ \pi^-$	$0.65 \pm 0.05$	$120 \pm 4$	$0.49 \pm 0.07$
$K^*(1410)^- \pi^+$	$0.42 \pm 0.04$	$253 \pm 5$	$0.21 \pm 0.03$
$K_0^*(1430)^+ \pi^-$	$2.21 \pm 0.04$	$358.9 \pm 1.1$	$7.93 \pm 0.09$
$K_0^*(1430)^- \pi^+$	$0.36 \pm 0.03$	$87 \pm 4$	$0.22 \pm 0.04$
$K_2^*(1430)^+ \pi^-$	$0.89 \pm 0.03$	$314.8 \pm 1.1$	$1.40 \pm 0.06$
$K_2^*(1430)^- \pi^+$	$0.23 \pm 0.02$	$275 \pm 6$	$0.093 \pm 0.014$
$K^*(1680)^+ \pi^-$	$0.88 \pm 0.27$	$82 \pm 17$	$0.06 \pm 0.04$
$K^*(1680)^- \pi^+$	$2.1 \pm 0.2$	$130 \pm 6$	$0.30 \pm 0.07$
Nonresonant	$2.7 \pm 0.3$	$160 \pm 5$	$5.0 \pm 1.0$

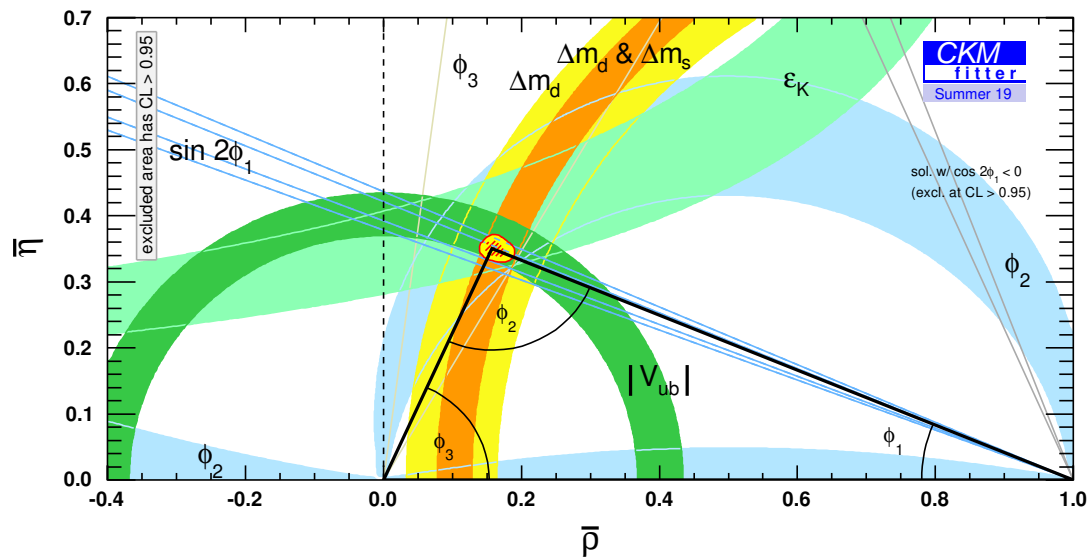


- 強い位相の宝庫!
- 含まれる中間状態を仮定するか、CLEO-c / BES III の  $\psi(3770) \rightarrow DD$  で位相を直接測定
- これまででベストの  $\phi_3$  測定方法



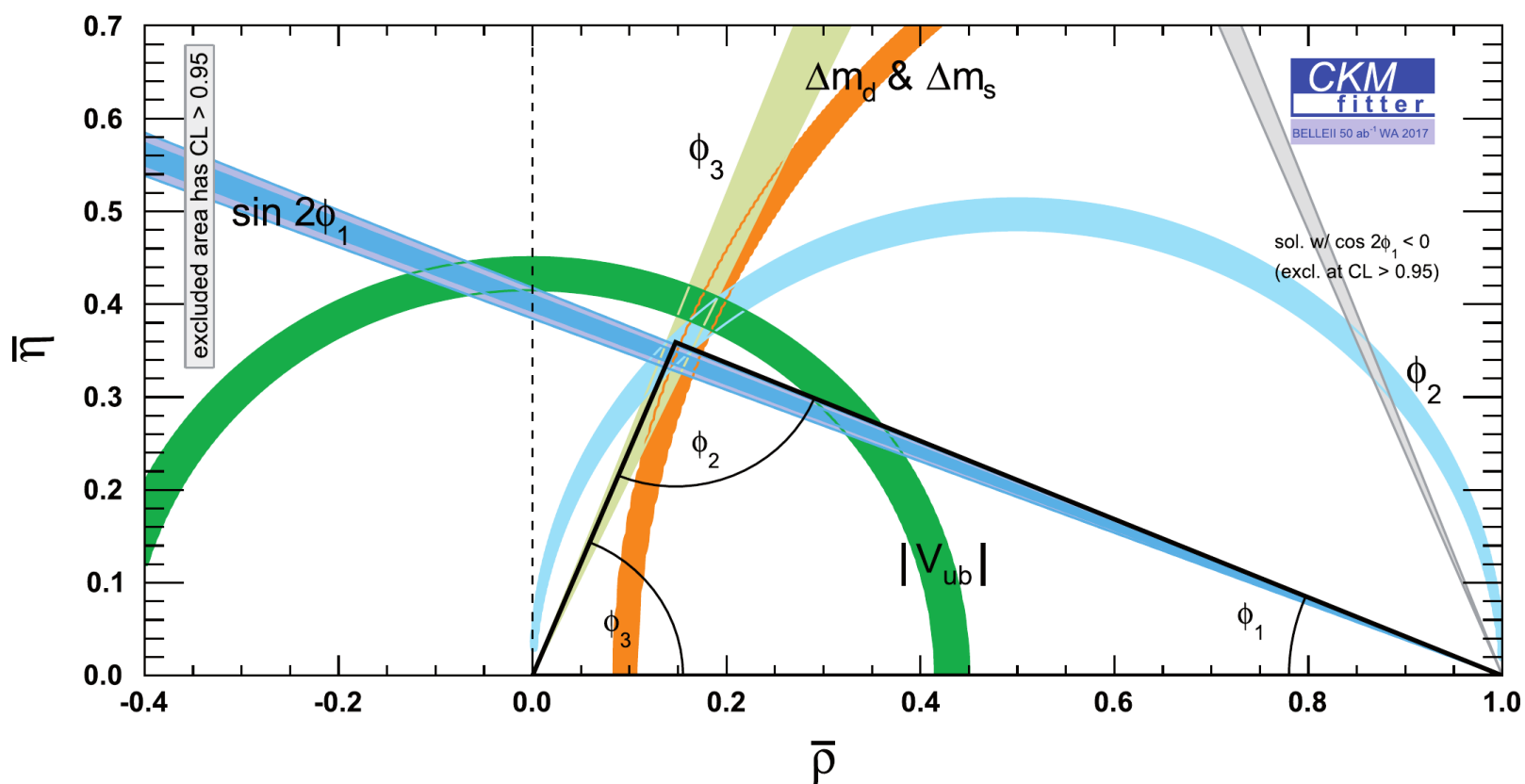


- $\phi_3$  測定にはループが含まれないので新物理の影響を受けない
- 荷電粒子だけで再構成できるので、LHCbの方が有利
- Belle II もいい勝負は出来る
- $2^\circ$  以下の精度に到達

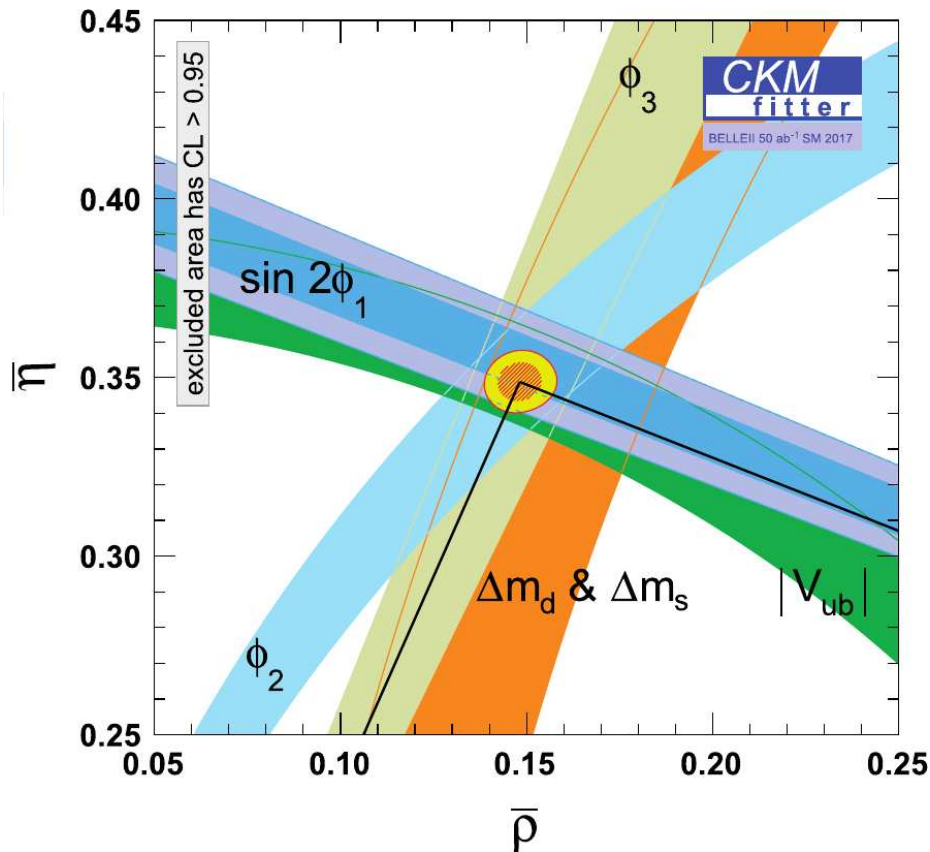


現在

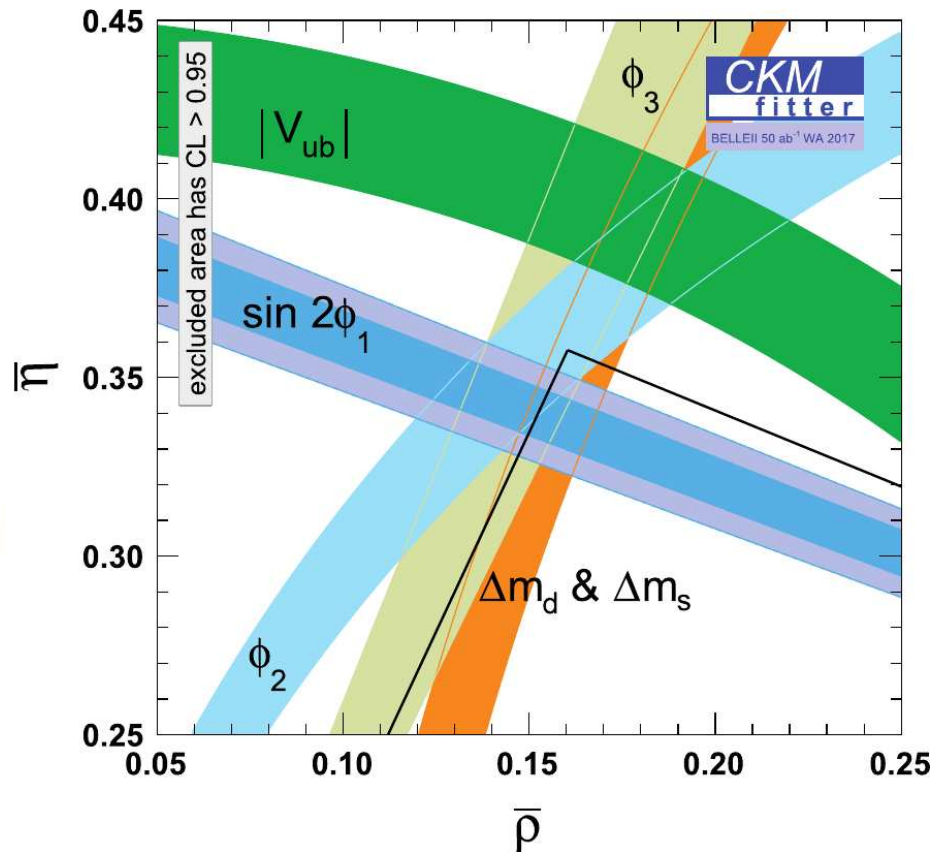
50  $\text{ab}^{-1}$  予定



ずれがない場合



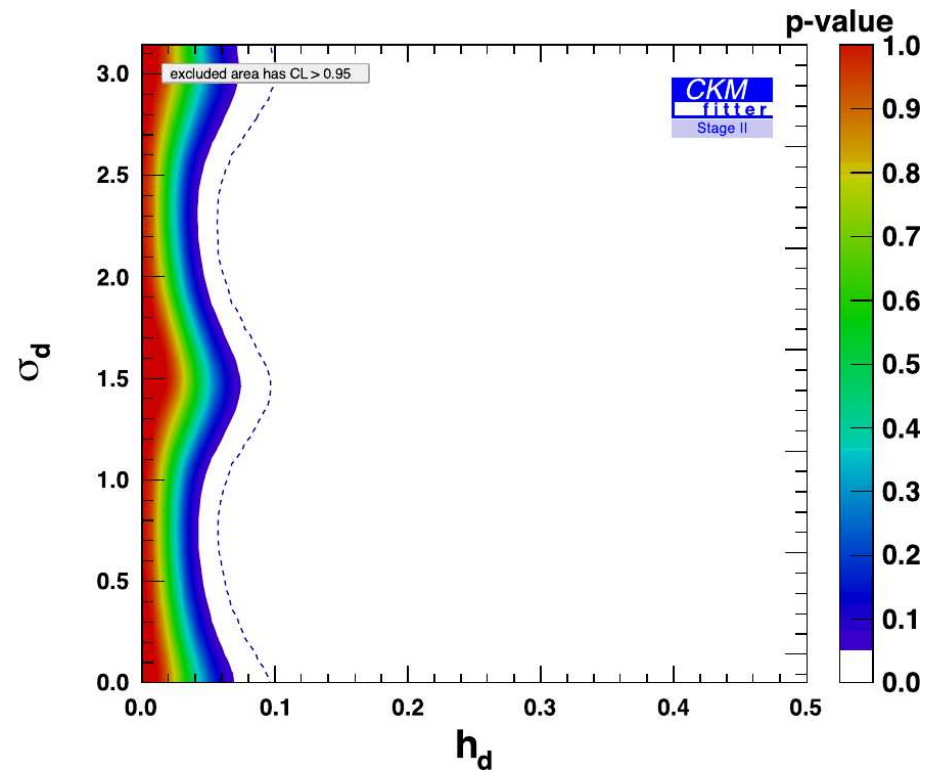
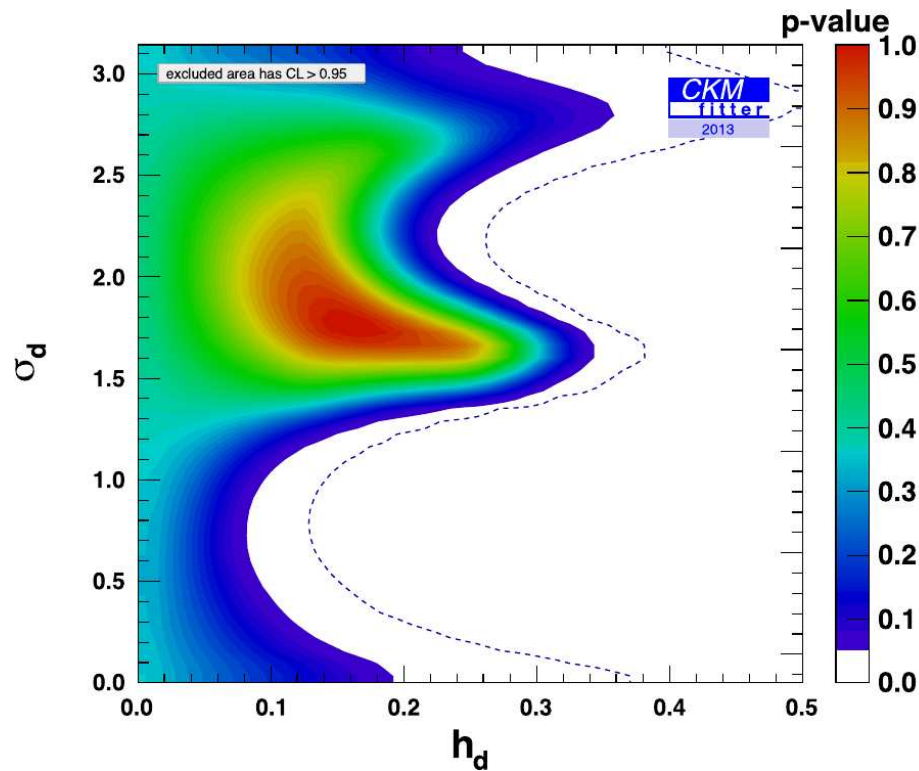
現状のずれがそのまま



もし現状程度のずれがあれば、ツリーだけ ( $V_{ub}$  と  $\phi_3$ ) で決まる三角形とループだけ ( $\phi_1$  と  $\phi_2$ ) で決まる三角形の差がはっきり見える

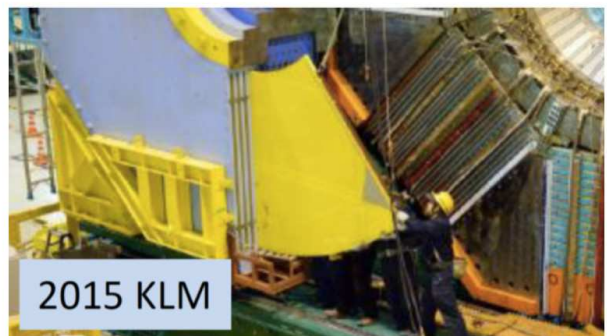
- 新物理が B 中間子混合に寄与しているとしてパラメタ化

$$M_{12} = M_{12}^{\text{SM}} \times (1 + h_d e^{2i\sigma_d}), \quad h = \frac{|C_{bd}^{\text{NP}}|^2}{|V_{tb}^* V_{td}|^2} \left( \frac{4.5 \text{ TeV}}{\Lambda_{\text{NP}}} \right)^2$$



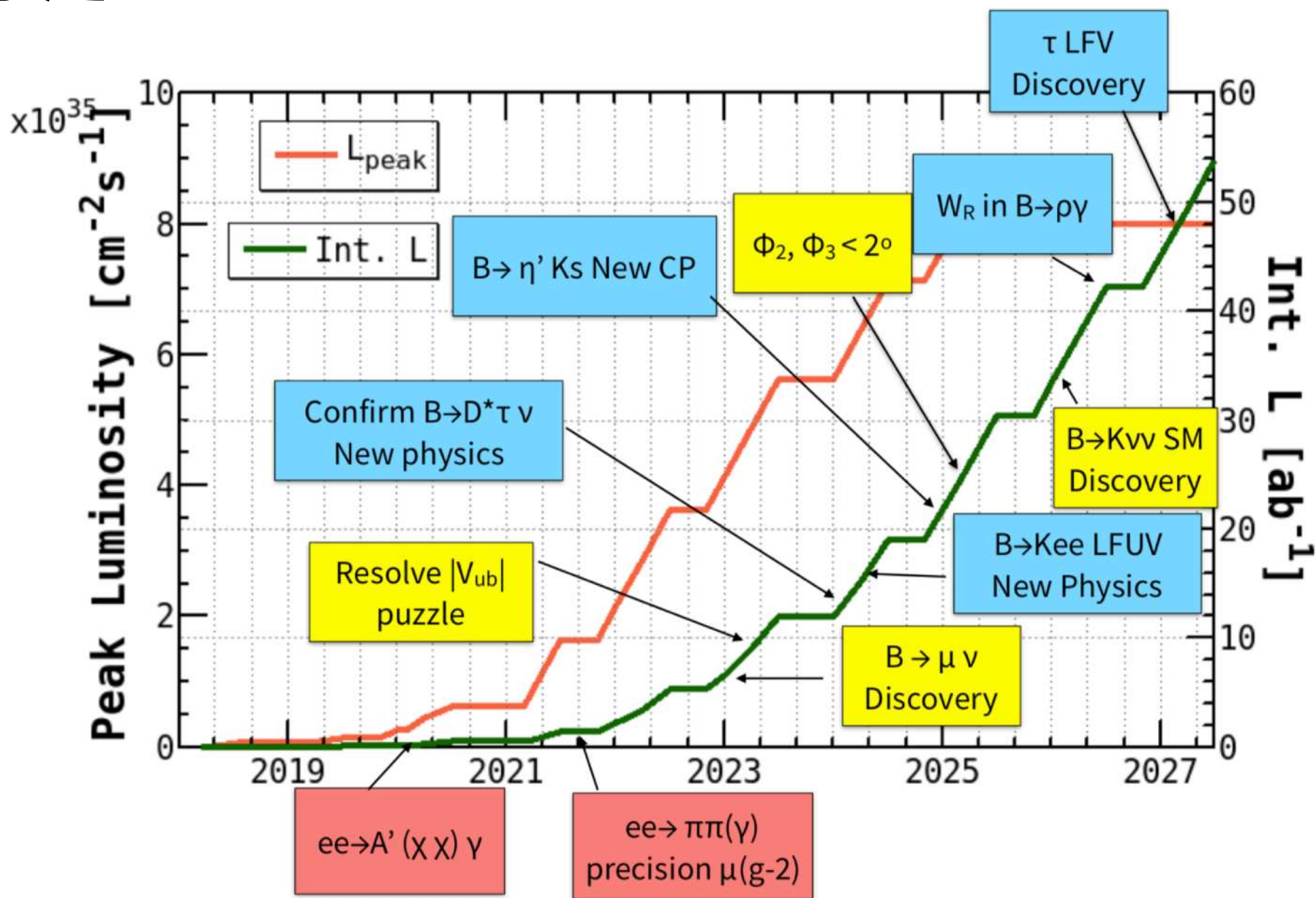
- MFV な新物理でループなら 1.4 TeV、ツリーなら 17 TeV まで感度 ( $C_{bd} = 1$  ならばループで 200 TeV、ツリーで 2000 TeV まで感度)

# 現状と近未来



- **Phase I** (2016年2月-6月) 検出器なし
- **Phase II** (2018年4月-7月) VXDなしの運転
- **Phase III** (2019年4月-) 全検出器での本運転

# 予定



# LHCb と Belle II

## LHCb が得意なもの (Belle II には難しい)

- 大量の  $B$  と  $B_s$  と  $D$  と  $D_s$  の生成
- $B_s$  の時間依存 CPV (Belle II には速すぎ)
- 荷電粒子だけのモード (ただし  $K_S$  はやや苦手)
- 特にミュオン (トリガしやすい、ブーストされるため低い運動量まで OK)

## Belle II の得意とするもの (LHCb には難しい)

- 光子、 $\pi^0$ 、 $\eta$  を終状態に含むモード
- ニュートリノを含むモード、特に  $\tau$  を含むもの
- インクルーシブなモード

## どちらでも出来るもの (?) (LHCb アップグレードでデータが増えるから…)

- $B \rightarrow J/\psi K_S$  や  $B \rightarrow \phi K_S$  の CPV

LHCb で出来ないと思っけていても統計量を武器に結果が出る場合があり油断大敵



Observables	Exp. theor. accuracy	Exp. experim. uncertainty	Facility (2025)
UT angles and sides			
$\phi_1$ [°]	***	0.4	Belle II
$\phi_2$ [°]	**	1.0	Belle II
$\phi_3$ [°]	***	1.0	LHCb/Belle II
$ V_{cb} $ incl.	***	1%	Belle II
$ V_{cb} $ excl.	***	1.5%	Belle II
$ V_{ub} $ incl.	**	3%	Belle II
$ V_{ub} $ excl.	**	2%	Belle II/LHCb
CP violation			
$S(B \rightarrow \phi K^0)$	***	0.02	Belle II
$S(B \rightarrow \eta' K^0)$	***	0.01	Belle II
$\mathcal{A}(B \rightarrow K^0 \pi^0)$ [ $10^{-2}$ ]	***	4	Belle II
$\mathcal{A}(B \rightarrow K^+ \pi^-)$ [ $10^{-2}$ ]	***	0.20	LHCb/Belle II
(Semi-)leptonic			
$\mathcal{B}(B \rightarrow \tau \nu)$ [ $10^{-6}$ ]	**	3%	Belle II
$\mathcal{B}(B \rightarrow \mu \nu)$ [ $10^{-6}$ ]	**	7%	Belle II
$R(B \rightarrow D \tau \nu)$	***	3%	Belle II
$R(B \rightarrow D^* \tau \nu)$	***	2%	Belle II/LHCb
Radiative and EW penguins			
$\mathcal{B}(B \rightarrow X_s \gamma)$	**	4%	Belle II
$A_{CP}(B \rightarrow X_{s,d} \gamma)$ [ $10^{-2}$ ]	***	0.005	Belle II
$S(B \rightarrow K_S^0 \pi^0 \gamma)$	***	0.03	Belle II
$S(B \rightarrow \rho \gamma)$	**	0.07	Belle II
$\mathcal{B}(B_s \rightarrow \gamma \gamma)$ [ $10^{-6}$ ]	**	0.3	Belle II
$\mathcal{B}(B \rightarrow K^* \nu \bar{\nu})$ [ $10^{-6}$ ]	***	15%	Belle II
$R(B \rightarrow K^* \ell \ell)$	***	0.03	Belle II/LHCb

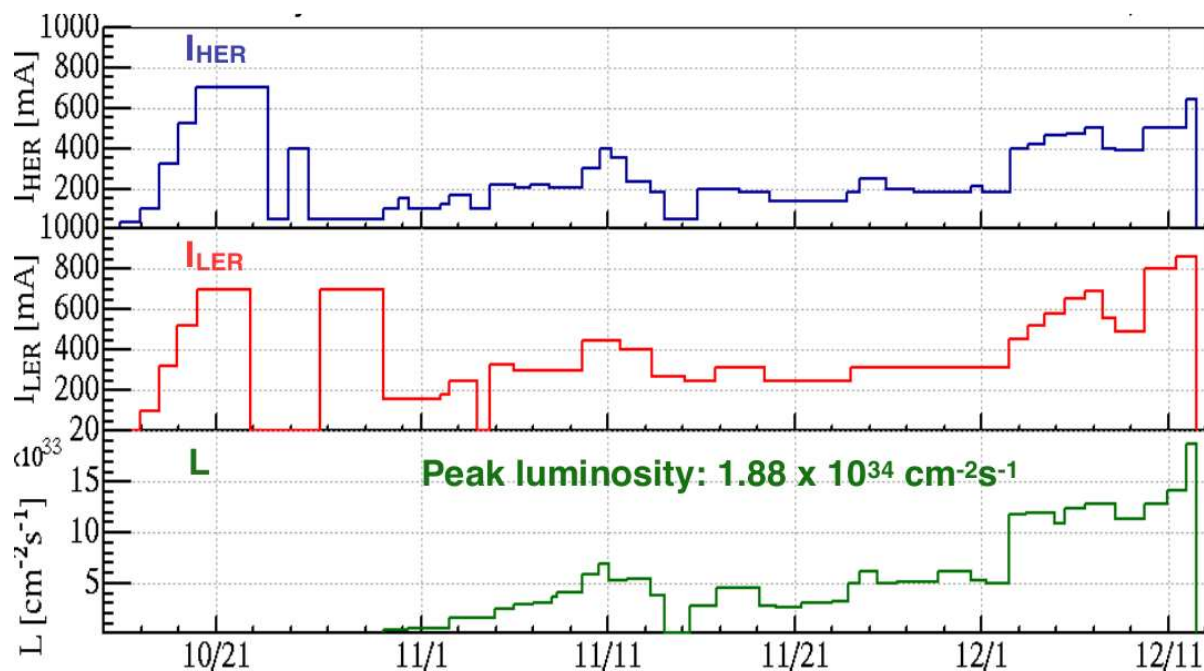
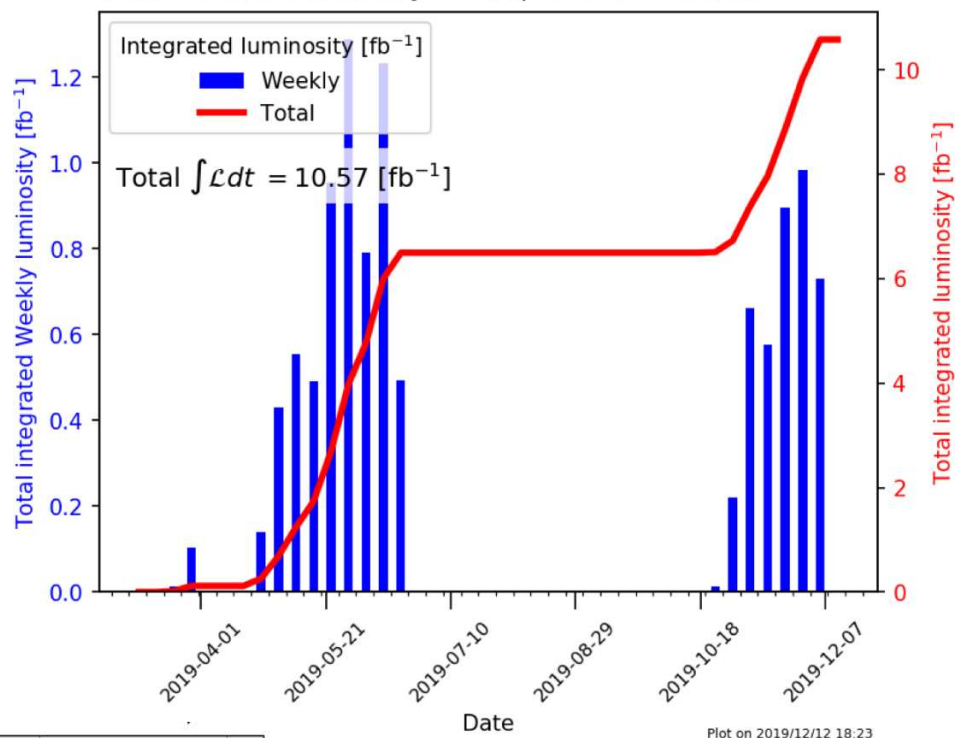
# 現状

## ● 2019年のラン

- 昼間は加速器スタディ  
夜間にデータ収集
- ピークルミノシティ  
 $1.2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- 積分  $10.57 \text{ fb}^{-1}$

Belle II Online luminosity

Exp: 7-8-10 - All runs



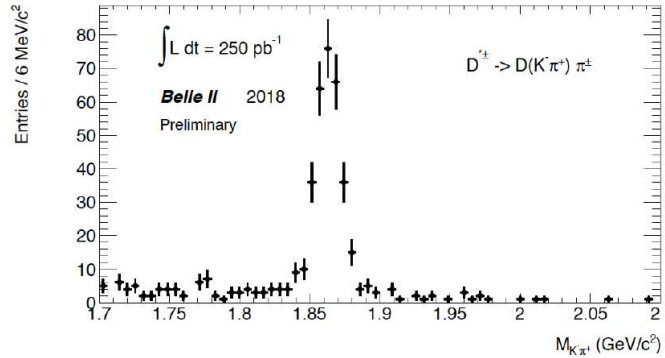
検出器オフでのピークは  
 $1.88 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

$\beta_y^* = 1\text{mm}$  で KEKB より低い電流で KEKB の記録に近づく

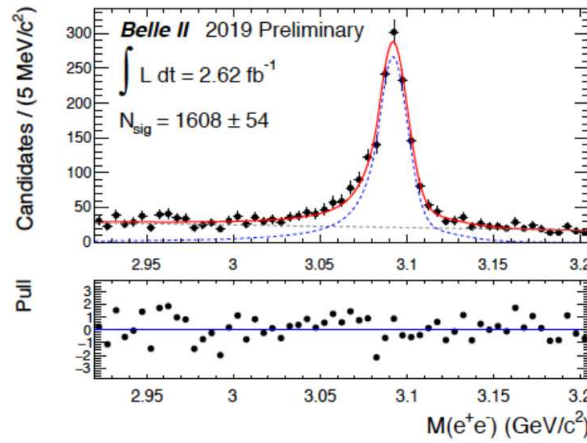
# 2019 夏・ハイライト1

## ● 荷電粒子の測定・粒子識別

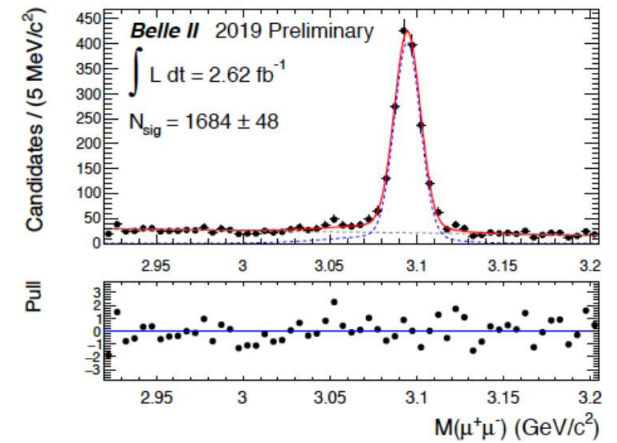
$$D^{*+} \rightarrow D^0(K^-\pi^+)\pi^+$$



$$J/\psi \rightarrow e^+e^-$$

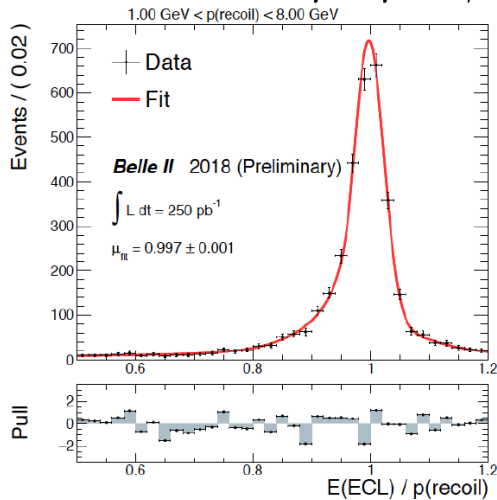


$$J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$$

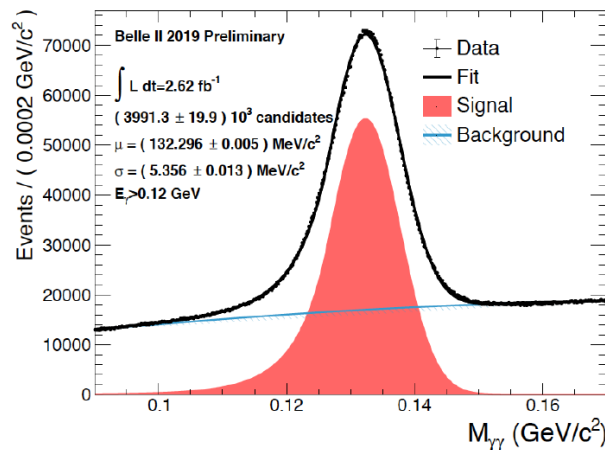


## ● 光子の測定

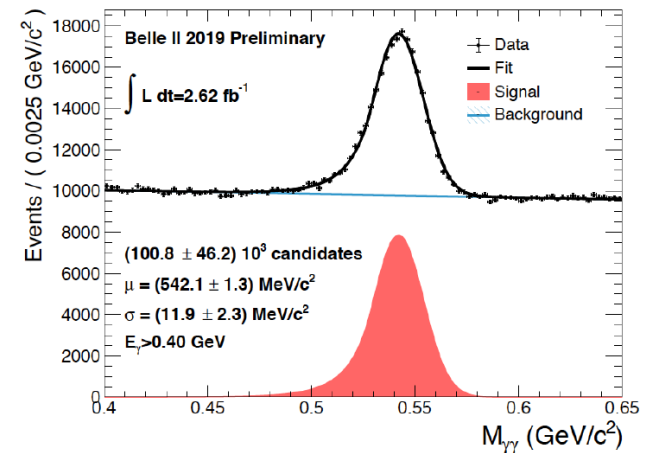
$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-\gamma$$



$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$$

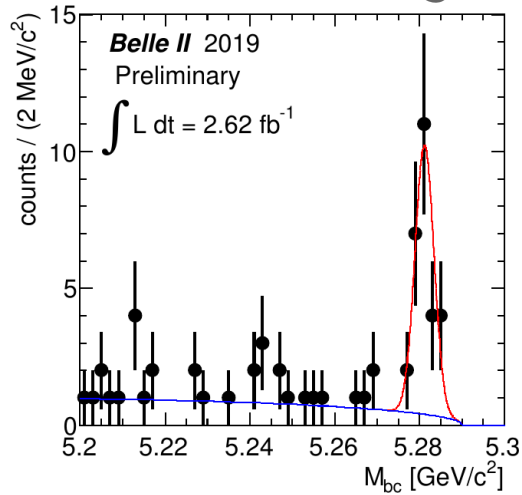


$$\eta \rightarrow \gamma\gamma$$

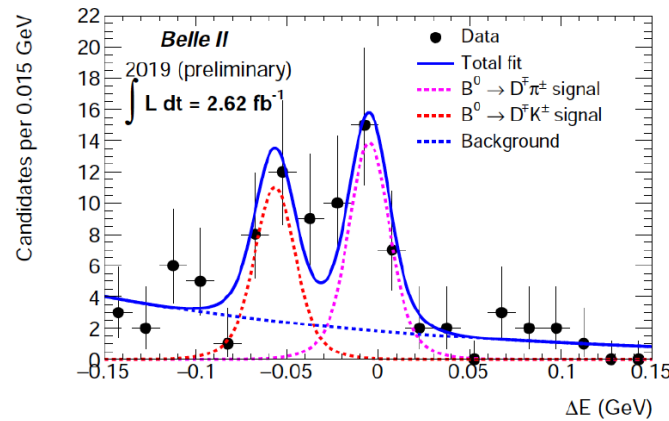


# 2019 夏・ハイライト 2

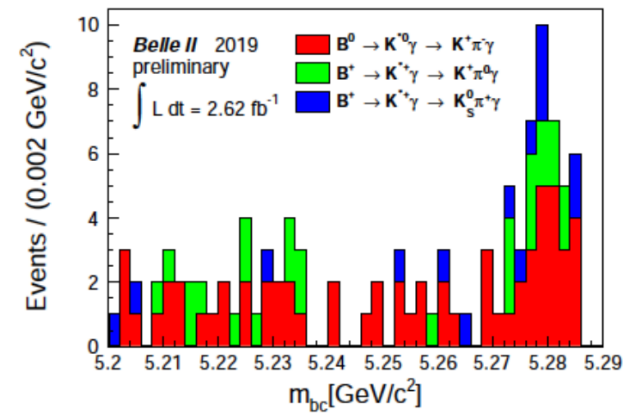
## ● $B \rightarrow J/\psi K_S^0$



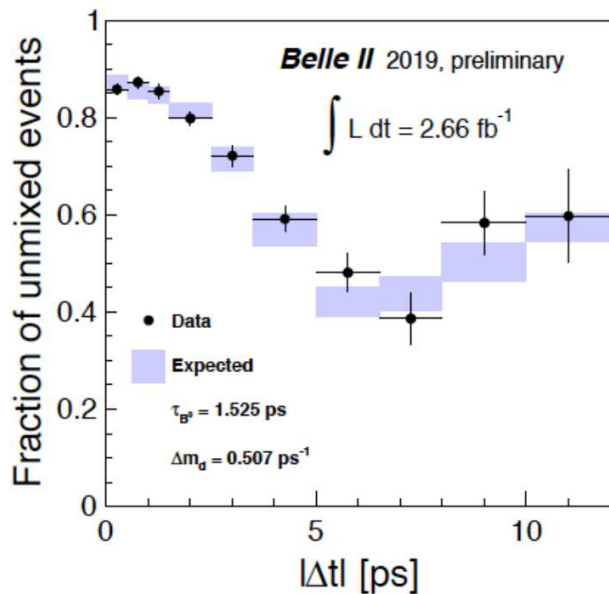
## ● $B \rightarrow DK$



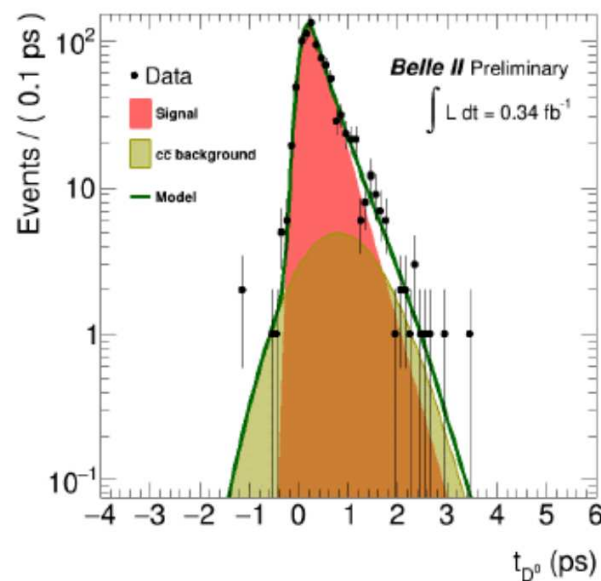
## ● $B \rightarrow K^* \gamma$



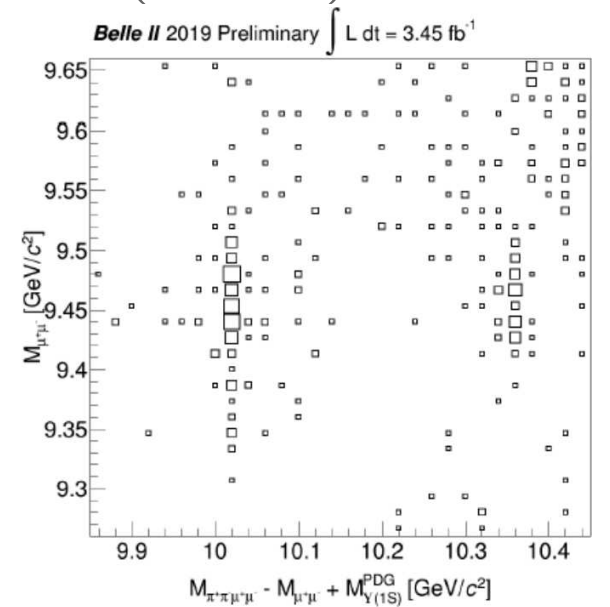
## ● $B$ -mixing



## ● $D^0$ lifetime

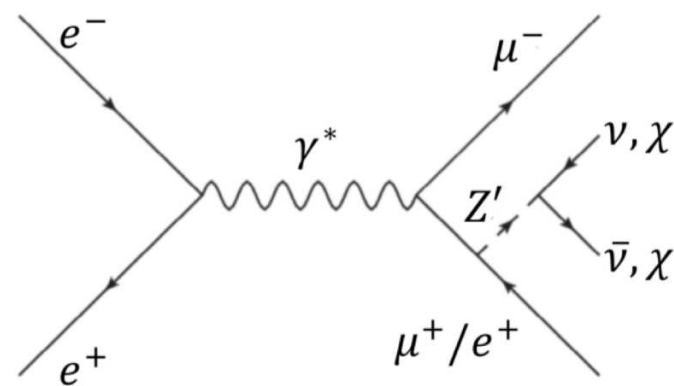


## ● $\Upsilon(2S, 3S)$ (ISR)



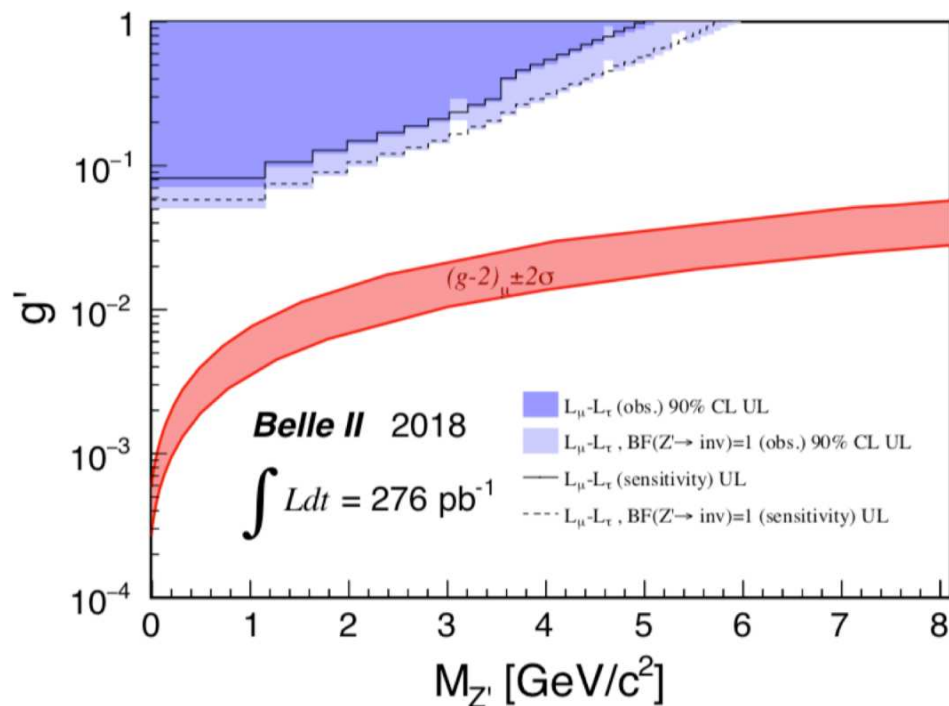
# Belle II 最初の物理論文

- ダーク  $Z' \rightarrow$ invisible への測定はまだない
- Belle ではこの事象はトリガできなかった
- Phase II データを使用
- arxiv:1912.11276 (PRL へ投稿中)



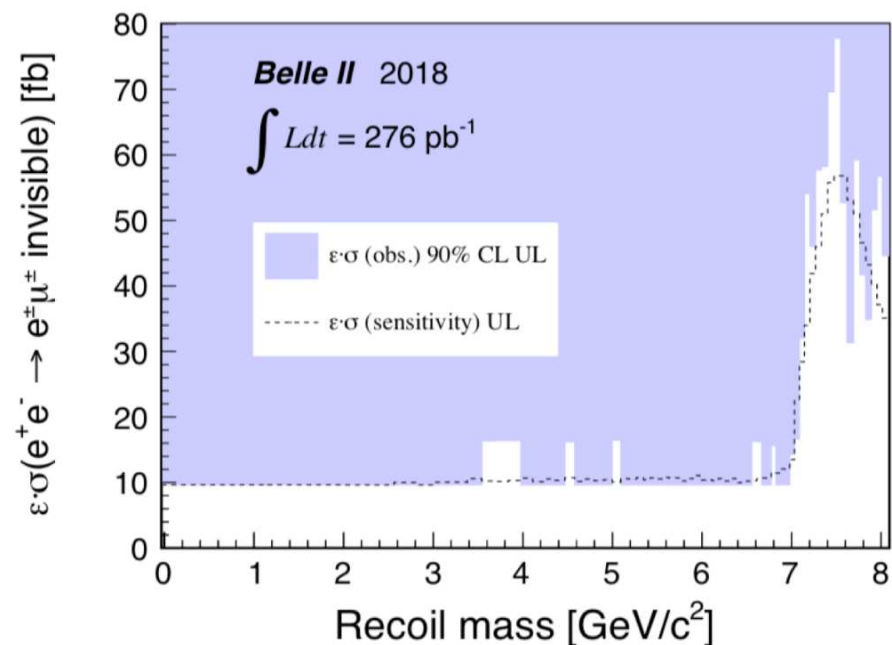
$$e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- + \text{inv.}$$

Limit on  $Z'\mu\mu$  coupling for  $Br(Z' \rightarrow \text{inv}) = 1$



$$e^+e^- \rightarrow \mu^\pm e^\mp + \text{inv.}$$

Limit on efficiency times cross section



# 近未来の予定

- **2020 年夏までに  $150 \text{ fb}^{-1}$**

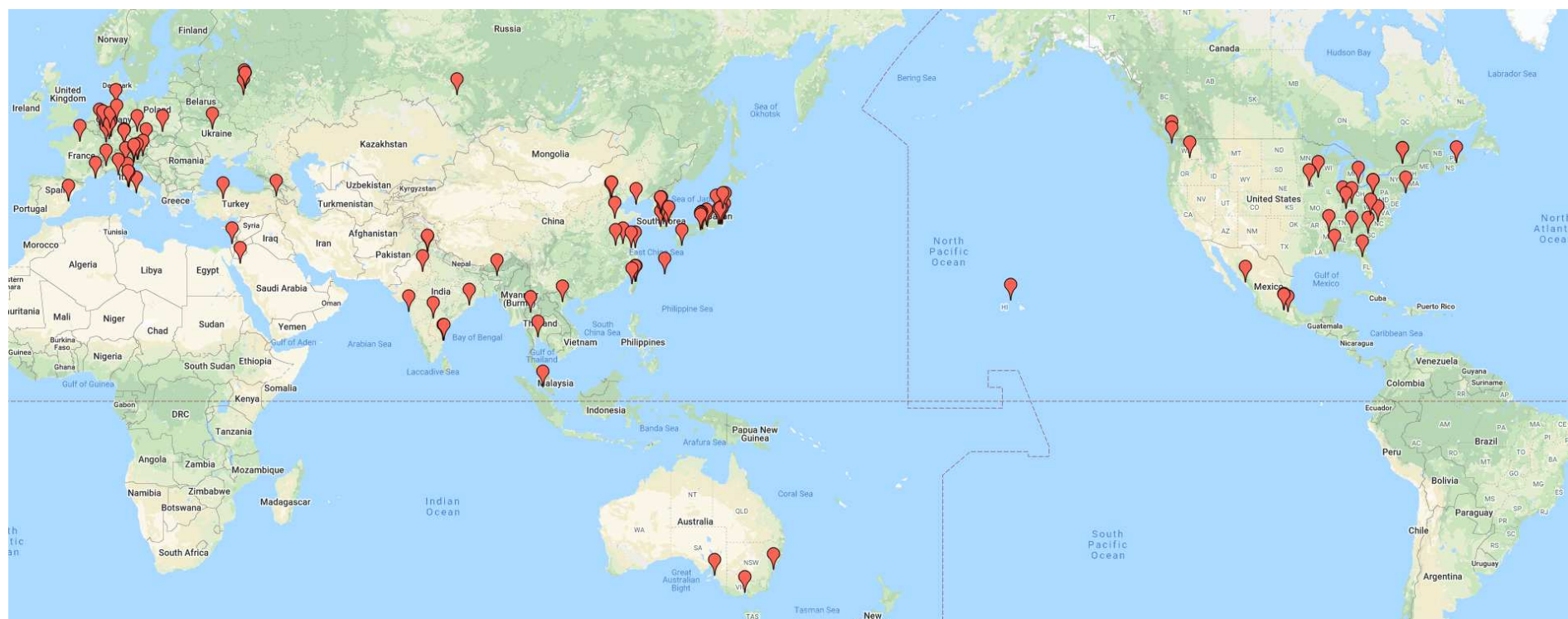
- Belle よりはまだだいぶ少ないが、検出器向上などもあるので、ようやく意味のある物理結果を出せる

- **2020 年度末までに  $500 \text{ fb}^{-1}$**

- Belle、BaBar とようやく対等なデータセット
- Belle + Belle II のデータセットの解析

- **2021 年度以降**

- PXD の再インストール (現在センサーが半分しか入っていない)
- TOP の改修 (PMT の放射線耐性)
- DAQ のアップグレード
- Belle のデータを大きく引き離し、新しいフレーバー物理の時代に



# 講義 3 — 終