

# Belle/Belle II

谷口七重(KEK IPNS)

# 自己紹介

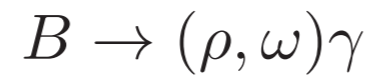


修士～D1

京都からつくばに引っ越し



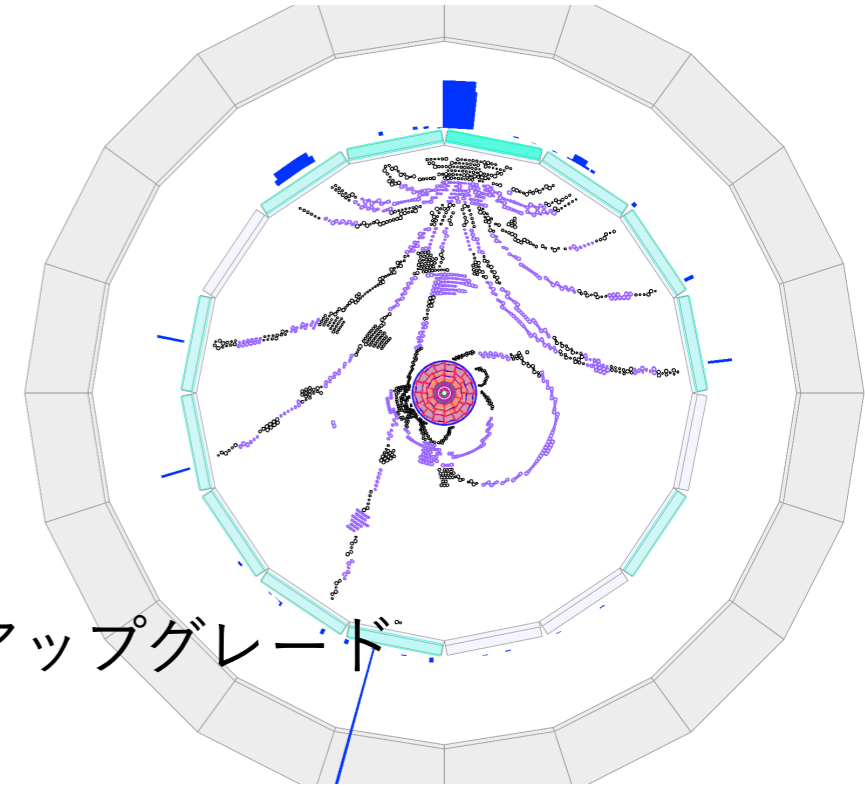
D2 ～ ; Bの輻射稀崩壊の解析



京大に来るのは公聴会以来です



2009 ～ ; 中央飛跡検出器のR&D-建設-運転-アップグレード



KEK WPI (2021 - )

次世代加速器実験のためのエレキのR&D

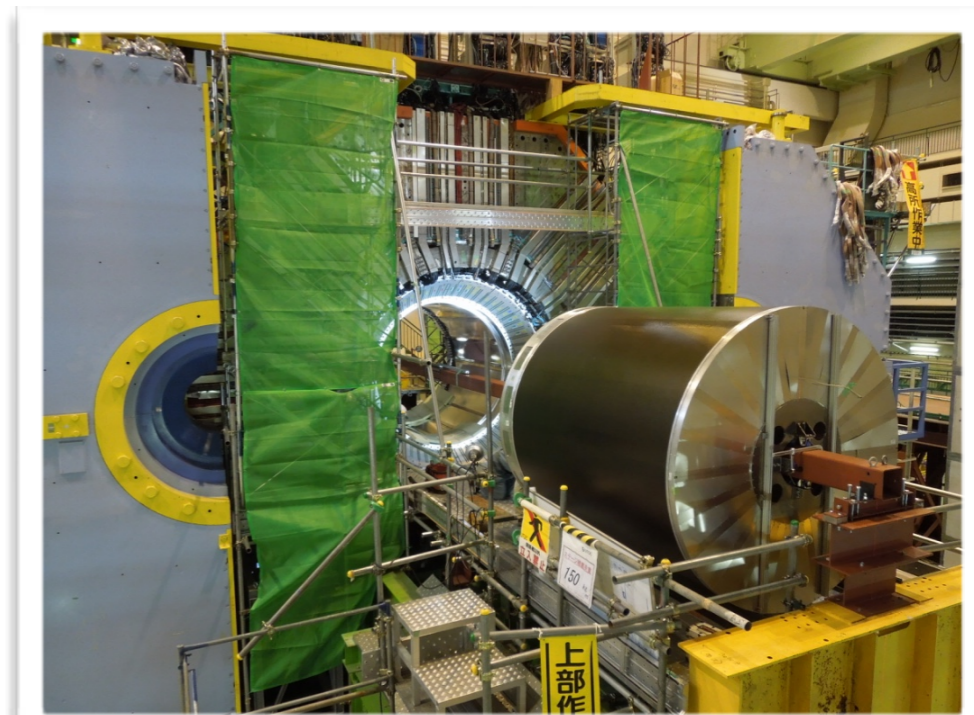
放射線耐性や高レート耐性

2015 - 高エネ物理学研究者会議 将来計画委員会

3期連続なので、そろそろお役御免の頃合いです

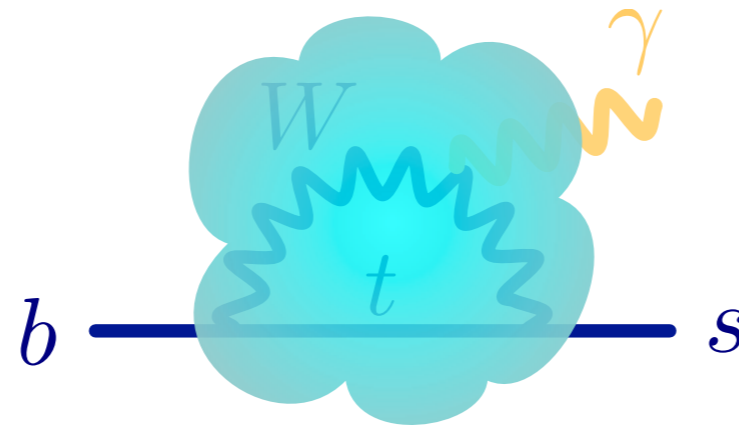
研究会への参加やアンケートに回答ありがとうございます!!

学会中(9月10日)にシンポジウムがあります。

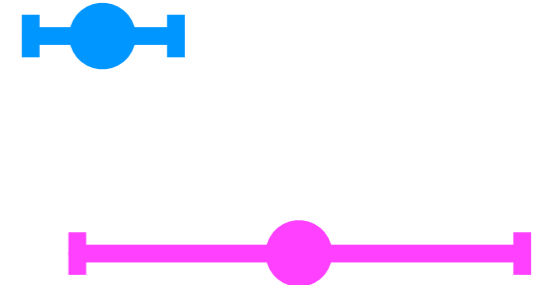


# フレーバー物理

u	c	t
d	s	b
e	$\mu$	$\tau$
$V_e$	$V_\mu$	$V_\tau$

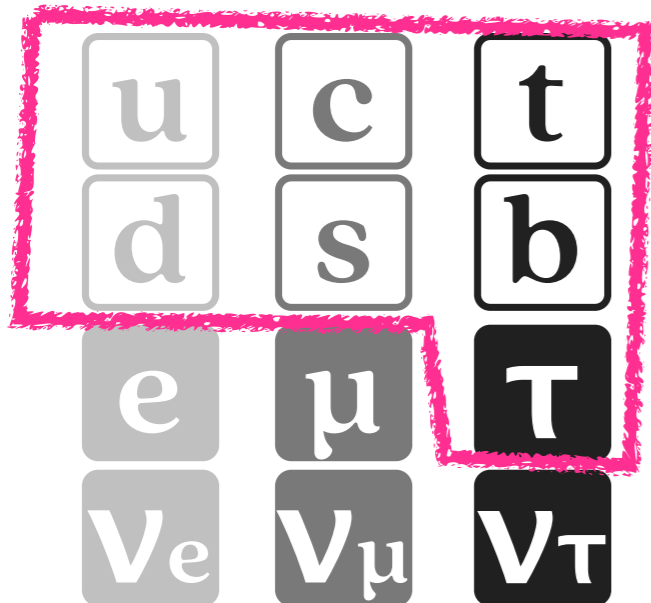


標準理論の予言

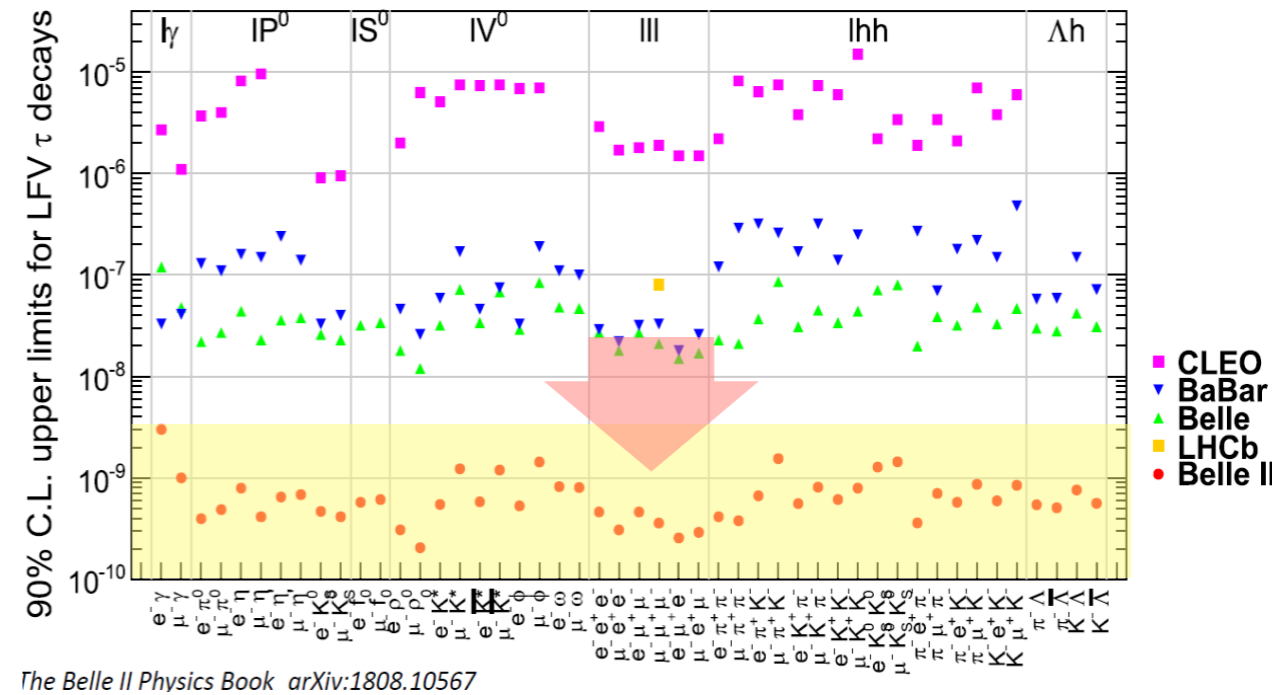


- クォークとレプトンの種類のことをフレーバーと呼んでいる 🍦
- クォーク(レプトン)間の遷移が起こる事象を使って間接的に新物理の(=標準理論にはない)寄与を探索する
- フレーバー物理、間接探索  $\Leftrightarrow$  直接探索(高いエネルギーでの衝突実験で新粒子を直接作る)
- 標準理論からのずれを調べる
  - 標準理論の予言能力が高いからできる

# Bの物理



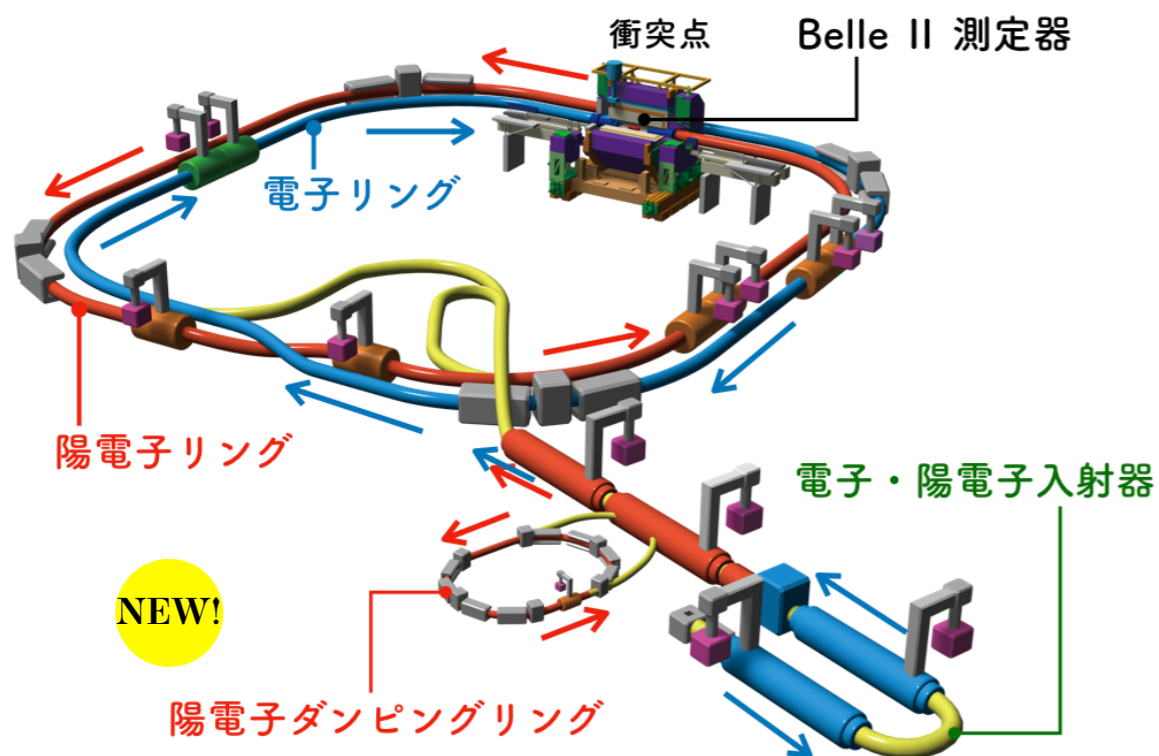
今日は  $\tau$  の話はありませんが、SuperKEKBは  $\tau$ -factoryでもある。  
 Tau LFV searches。Belle II でしかできない。あらゆるモードをリードしている。



- すべてのクォークが登場する
- 新物理(新粒子)とそれぞれのクォークがどのような結合をするのか調べられる
- CP非保存の鍵となる第三世代のクォークを含む



KEK, つくば市



	KEKB	SuperKEKB
電子/陽電子	8.0/3.5 GeV	7.0/4.0 GeV
衝突点ビームサイズ (垂直方向 $\beta$ 関数)	~6mm	~0.3mm
ビーム電流	1.4/1.7A	2.6/3.6A
ルミノシティ ( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$2.1 \times 10^{34}$	$80 \times 10^{34}$

- 衝突点のビームを絞って高いルミノシティを目指す
- ビーム安定化のためにエネルギーを変更  
→非対称度が小さくなったが許容範囲



# BelleとBelle II 実験



高トリガーレート・高バックグラウンド環境下で  
Belle以上の性能を目指す

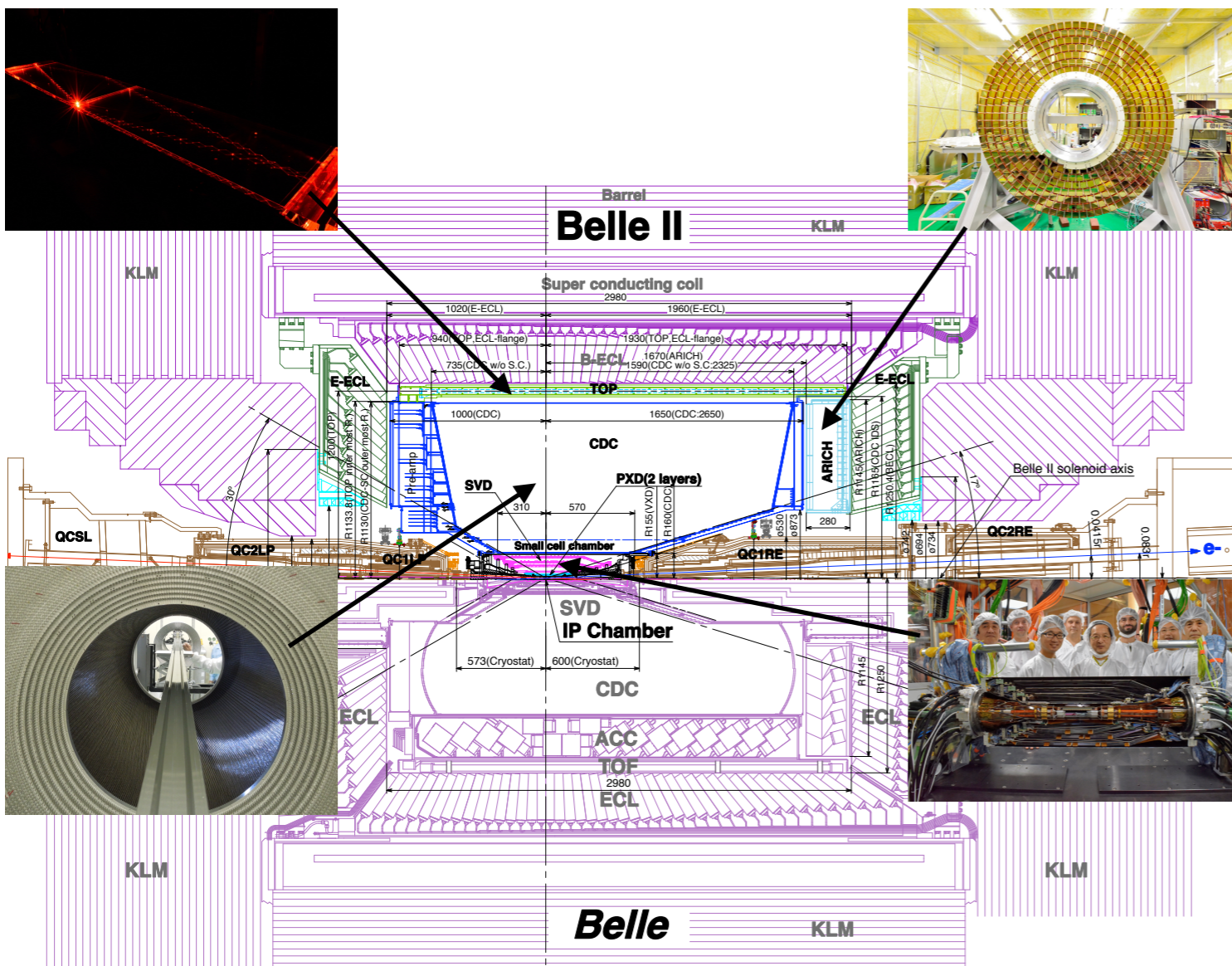
すべての検出器・システムを  
アップグレード

バックグラウンド耐性の強化：細分化、  
高時間分解能

トリガーレート (500Hz → 最大30kHz)  
読み出しのパイプライン化

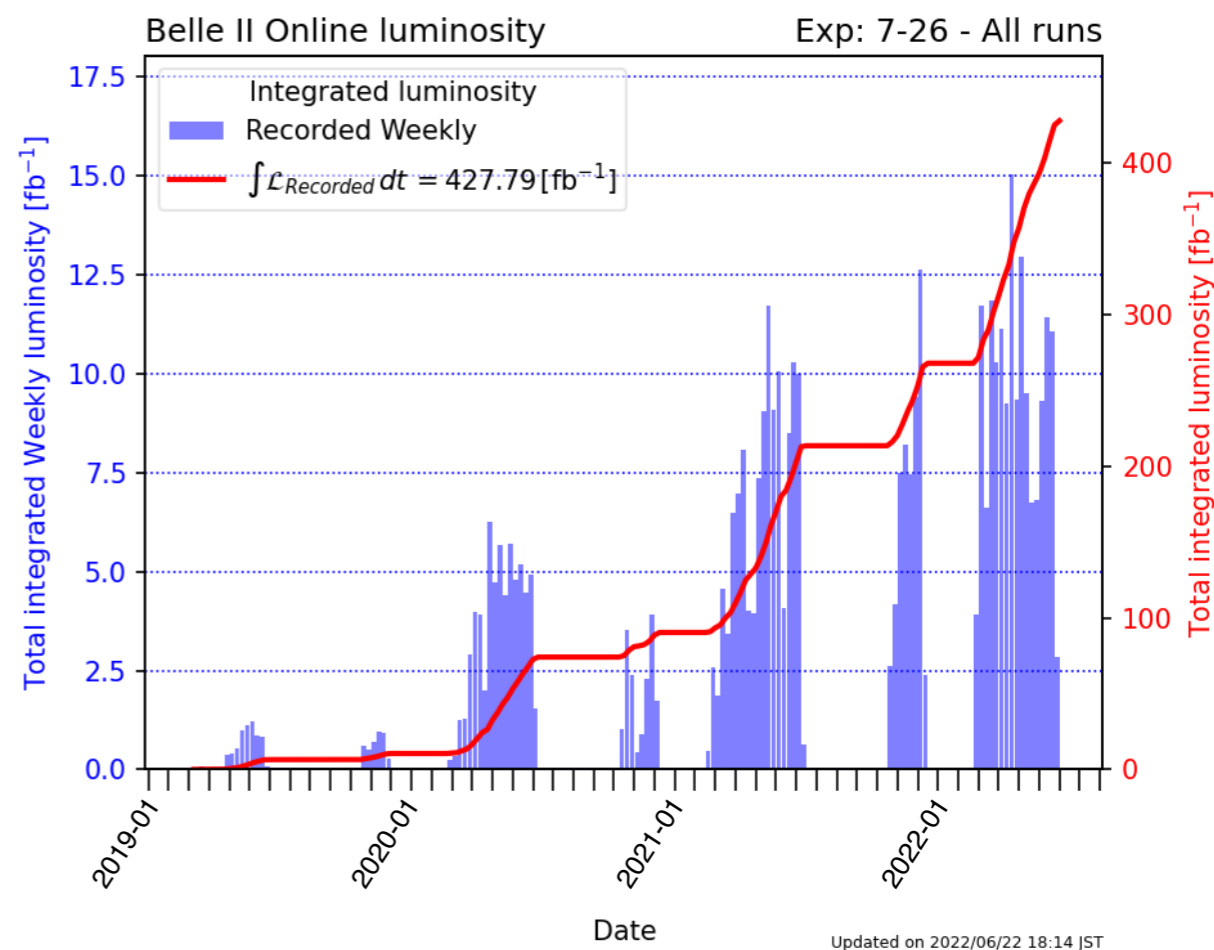
崩壊点検出器の強化

荷電粒子識別の強化



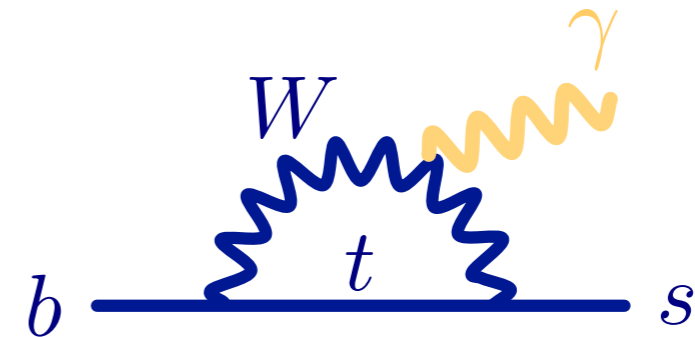
# 最近のハイライト

- 2019年から物理ラン開始
- 2020年にKEKBのルミノシティ ( $2 \times 10^{34}$ ) を更新。世界記録ホルダーに
- 2022年に  $4.7 \times 10^{34}$  に到達(世界新)
- 2022夏までの蓄積データ **424 /fb**
  - Babarがもつデータ量に並んだ
  - Belle-1の半分くらい
- 2023年秋まで長期シャットダウン
  - ビームパイプ、コリメータ、ピクセル検出器などなど



# KEKB/Belle → SuperKEKB/Belle II

- Belle(1999-2010)の目的：小林益川理論の実証( $\sim 1/ab$ )
- Belle II(2018 - )の目的：新物理の探索( $\sim 50/ab$ )
  - B, Bs, D,  $\tau$  粒子での量子効果による新物理探索
  - 軽い新粒子探索
  - 標準模型測定
  - ハドロン物理



Wボゾンもトップクォークもbクォークより重たい  
量子効果による短時間の生成  
重たい新粒子にも結合可能

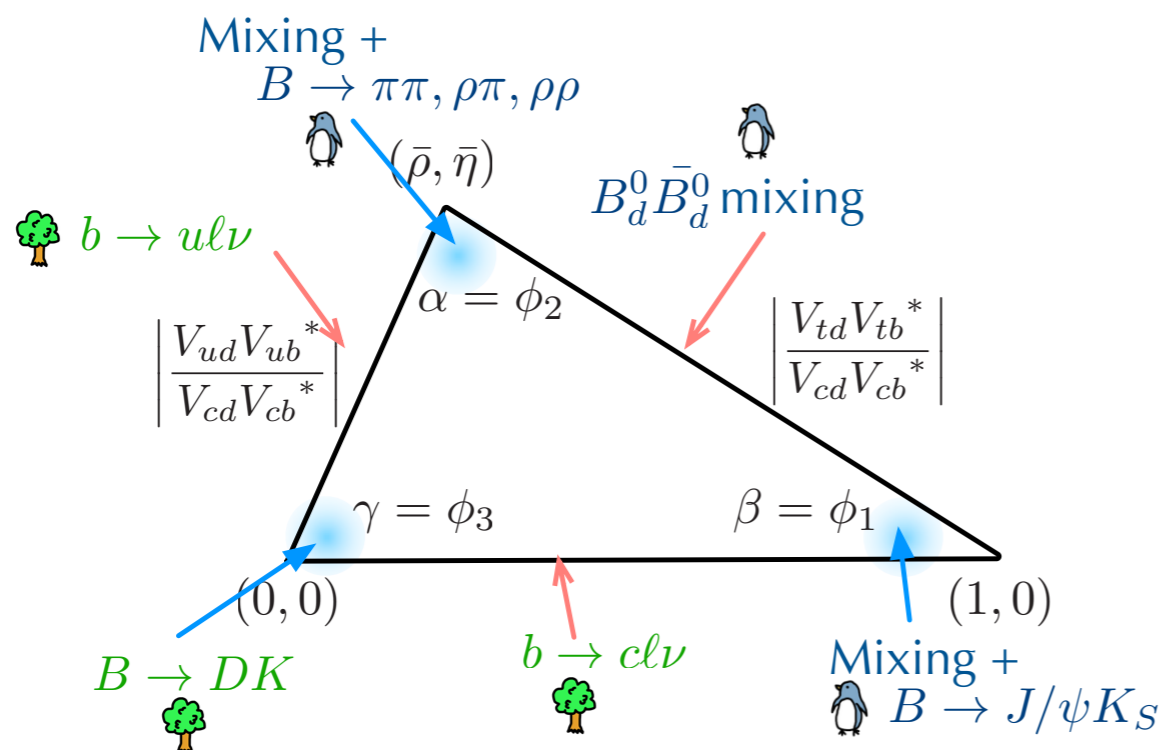
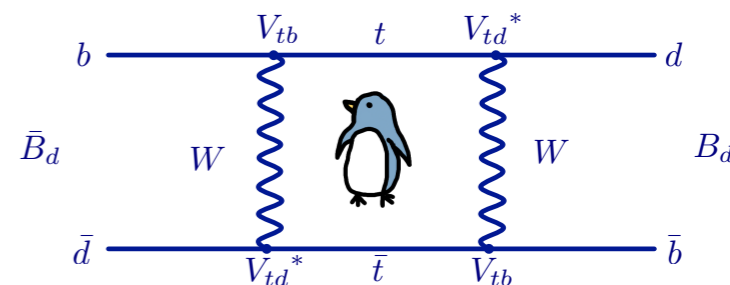
今日はBelle IIのICHEP2022の結果を中心に



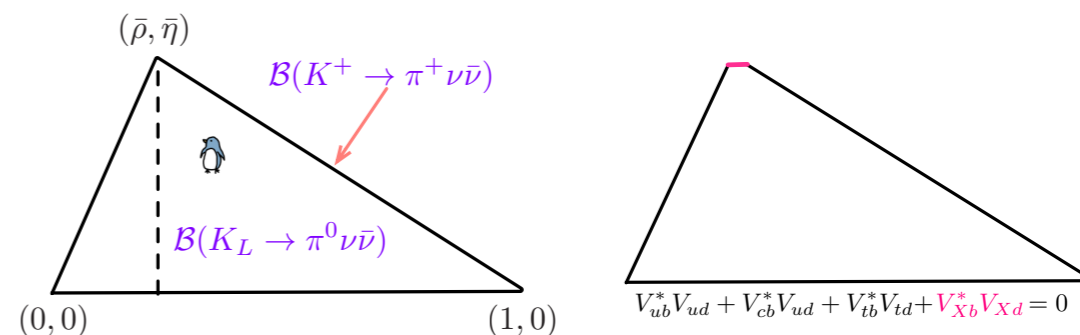
# Mixingの中の物理

# Mixingの中の新物理探索

- Belle II 実験はユニタリティ三角形の辺と角の6つの測定量を精度よく測定できる
  - 角：CP非保存の測定
  - 辺：崩壊分岐比もしくははMixingの周波数の測定
- 三角形をツリーとループ過程で比較
  - 新物理の寄与はループに現れる
- ユニタリティ三角形がツリーとループで異なれば新物理の寄与は明らか



K中間子(第二世代)との違い? 実は三角形じゃない?



# Φ<sub>1</sub>の測定

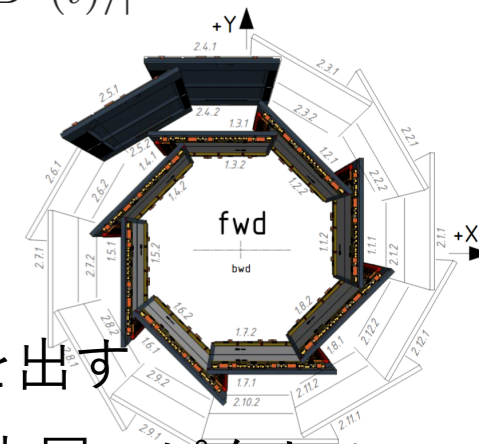
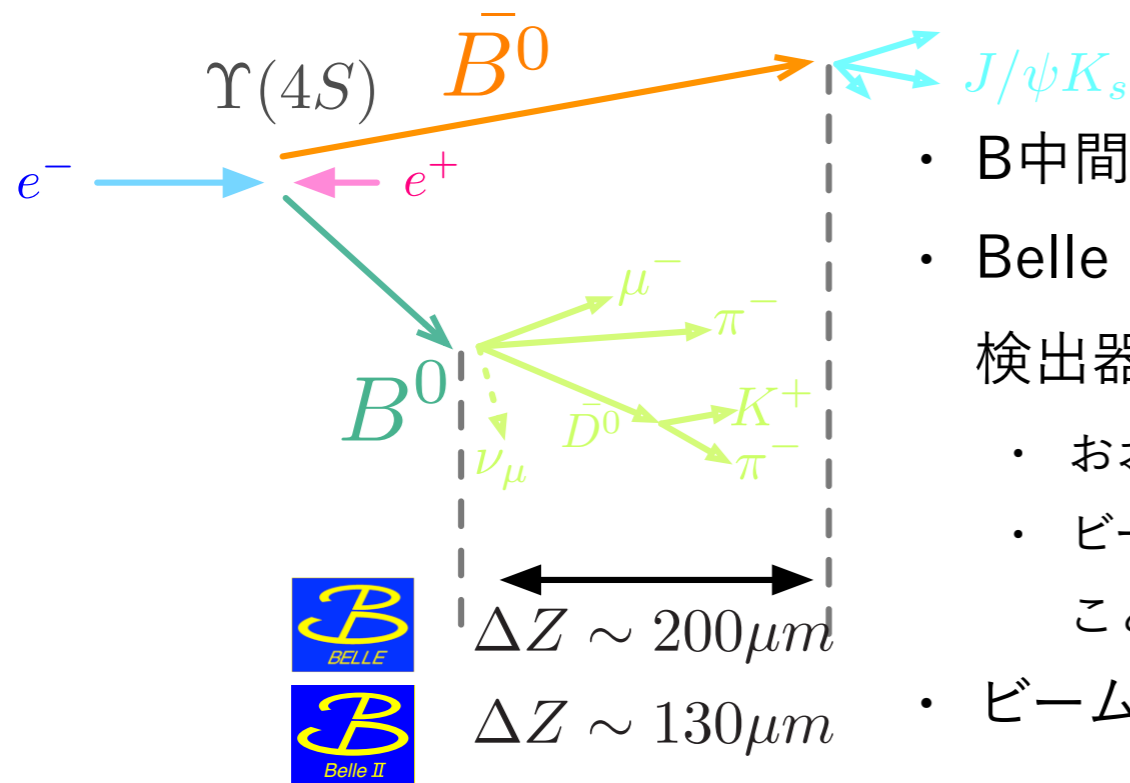
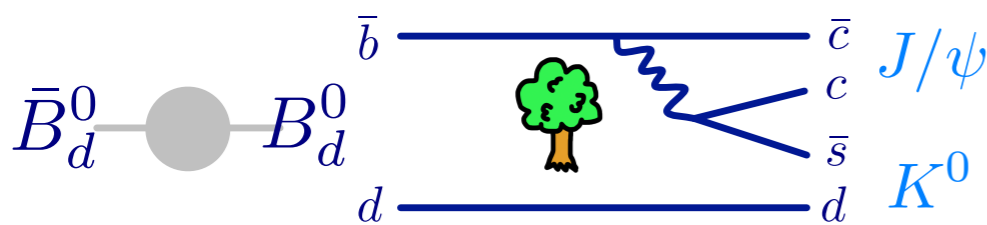
- ダイレクトな崩壊と混合を経た崩壊の干渉でCPが破れる
- CP非対称度が時間によって振動。振幅 ~ sin2Φ<sub>1</sub>

$b \rightarrow c\bar{c}s$  tree

$$|B^0(t)\rangle = e^{-\frac{\Gamma t}{2}} \left[ \cos\left(\frac{\Delta m t}{2}\right) |B^0\rangle + e^{i(\frac{\pi}{2} - 2\phi_1)} \sin\left(\frac{\Delta m t}{2}\right) |\bar{B}^0\rangle \right]$$

$$Asymmetry(t) = \frac{|\langle J/\psi K_s^0 | \bar{B}^0(t) \rangle|^2 - |\langle J/\psi K_s^0 | B^0(t) \rangle|^2}{|\langle J/\psi K_s^0 | \bar{B}^0(t) \rangle|^2 + |\langle J/\psi K_s^0 | B^0(t) \rangle|^2}$$

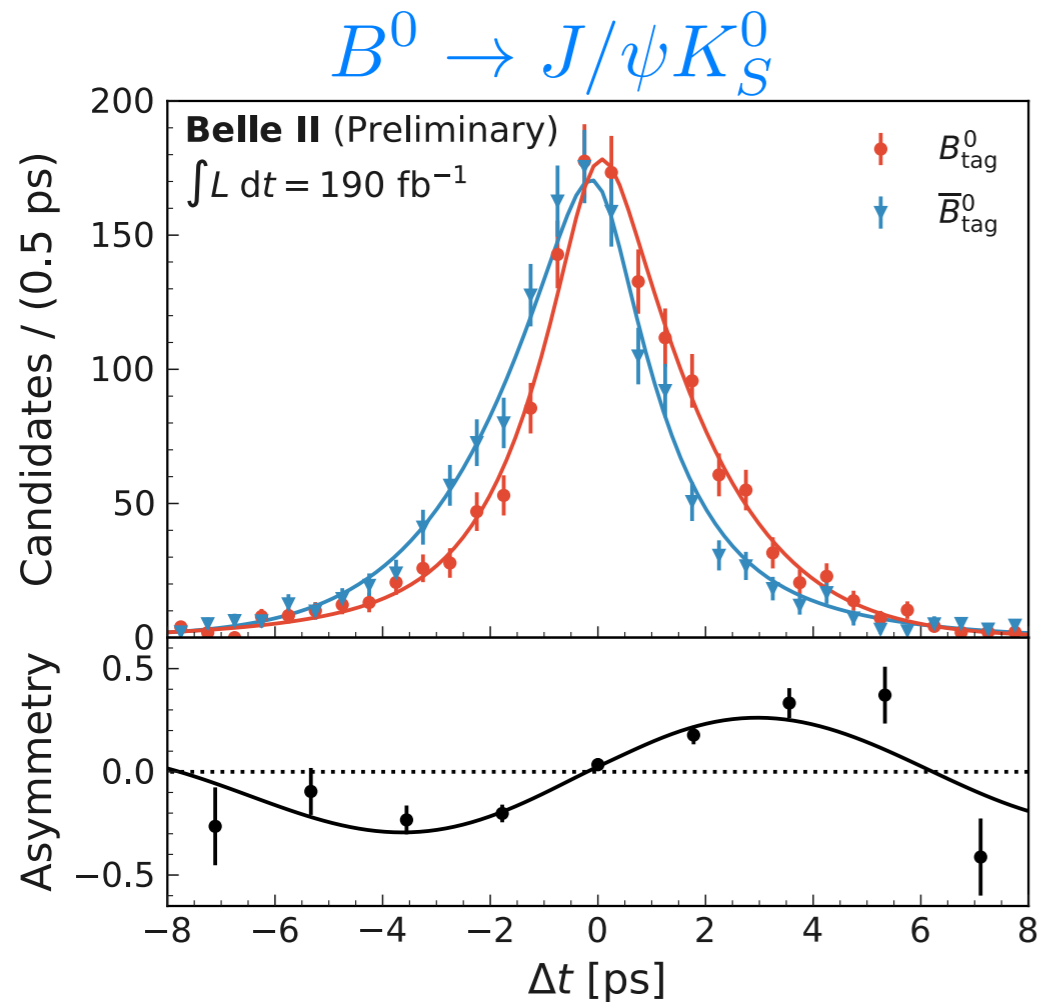
$$= \sin 2\phi_1 \sin \Delta m t$$



- B中間子の崩壊点の位置の差から崩壊時間差を出す
- Belle II ではboost factorは小さくなったが最内層のピクセル検出器のおかげで位置分解能が向上している
  - おおよそ2倍よくなっている
  - ビームパイプの径が小さくなって、検出器がより内側に配置されていることも効いている
- ビームサイズが小さくなったことも崩壊点位置測定には有利に



# Belle II : $\sin 2\phi_1$ の測定



- Belleの結果と consistent
- Belleと比べてデータ量が1/4なので、統計エラー2倍は妥当
- 系統誤差は同等。boost factorが小さくなった分を検出器の性能が良くなったことでカバー
- 今後データが増えれば、系統誤差も改善が見込める
- control sampleの統計誤差が dominant

$$\sin 2\phi_1 = 0.720 \pm 0.062(\text{stat}) \pm 0.016(\text{syst})$$

$$\sin 2\phi_1 = 0.670 \pm 0.029 \pm 0.013$$

Belle  $J/\psi K_S$  (771/fb)

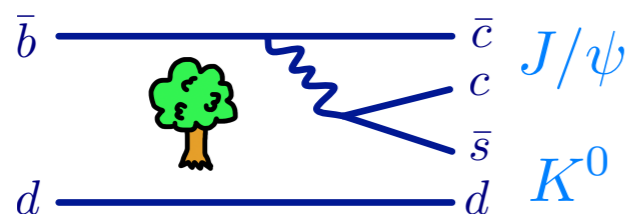
# sin2phi1 loop

- 標準模型では、CP非対称度はツリー崩壊の  $B \rightarrow J/\psi K^0$  とほぼ同じ  $\sim \sin 2\Phi_1$
- ループに新粒子が回って、それがCP非保存の結合を持っているとずれが生じる

$$\sin(2\beta^{\text{eff}}) \equiv \sin(2\phi_1^{\text{eff}})$$

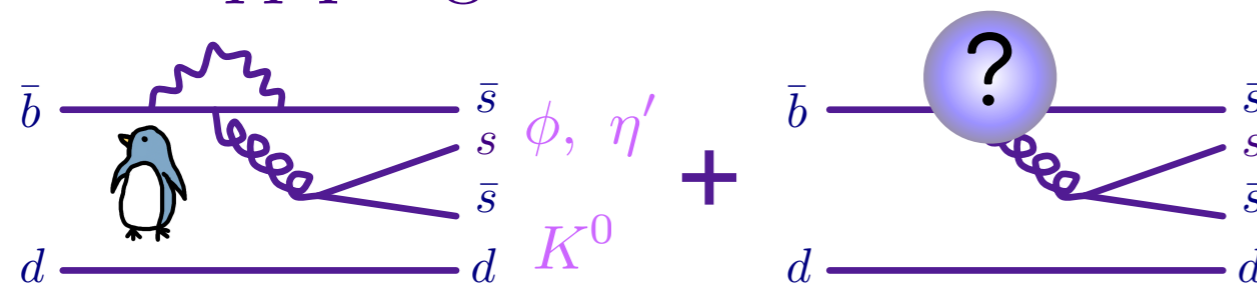
**HFLAV**  
Moriond 2021  
PRELIMINARY

$b \rightarrow c\bar{c}s$  tree

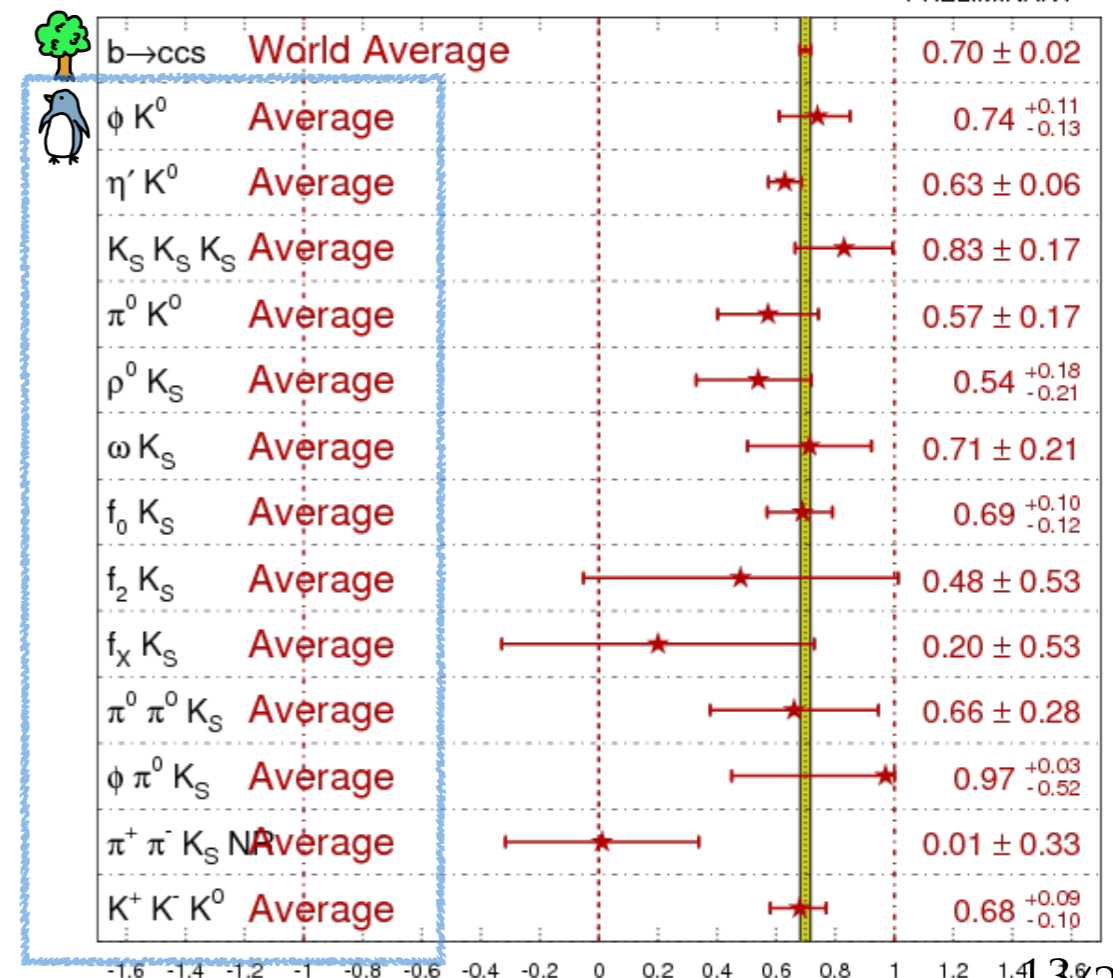


ツリー崩壊が支配的~新物理が寄与しない  
精度良く測定できるので標準模型の値として、よいリファレンスになる

$b \rightarrow s\bar{q}q$  penguin

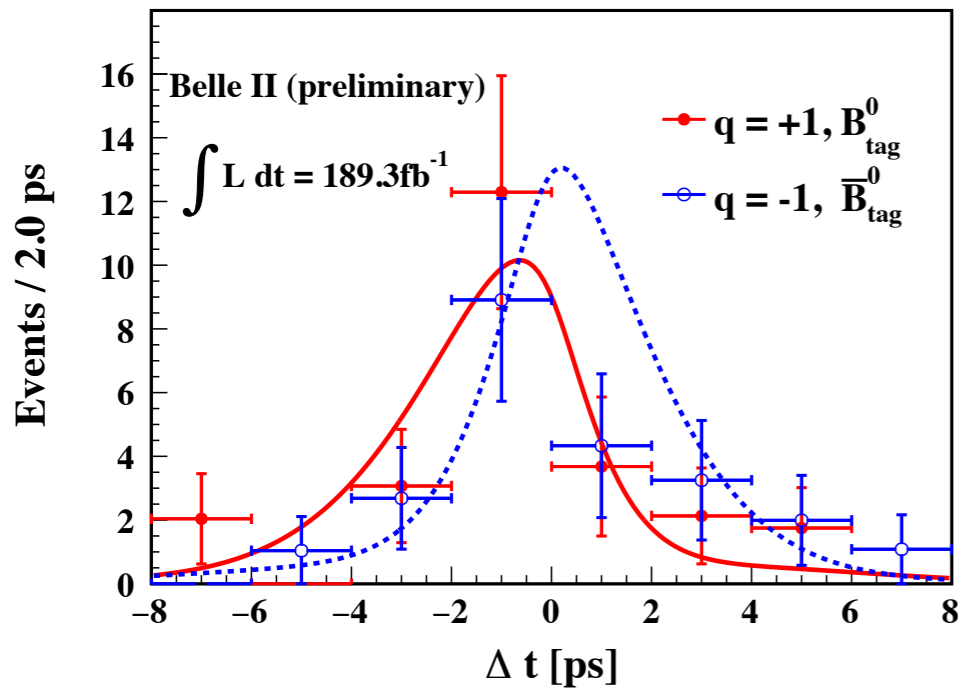
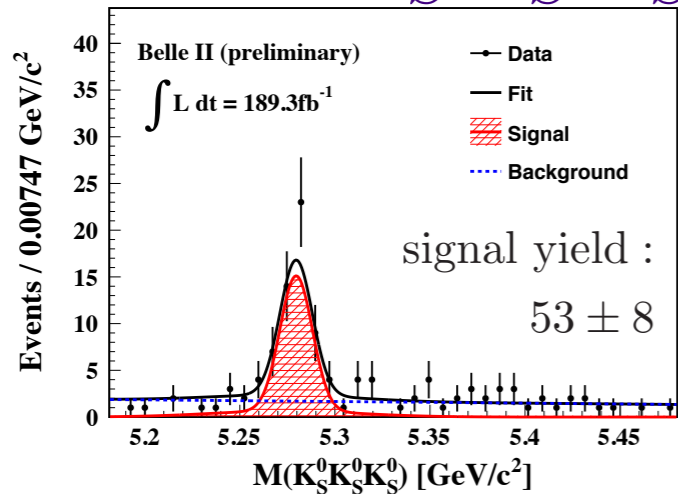


ズレが確定すれば新物理の証拠となるだけでなく  
新物理によるCP非保存が見えたことになる





# Belle II : $\sin 2\phi_1$ の測定



$$\sin 2\phi_1 = -1.86_{-0.46}^{+0.91} \pm 0.09$$

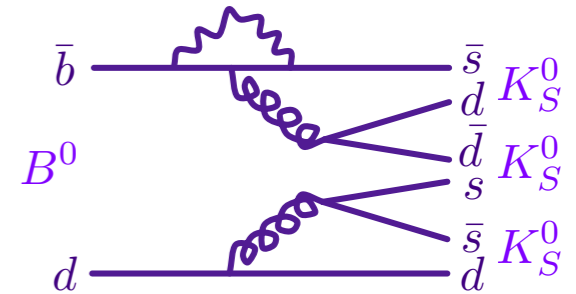
$$(\mathcal{A} = -0.22_{-0.27}^{+0.30} \pm 0.04)$$

$$\sin 2\phi_1 = -0.71 \pm 0.23 \pm 0.05$$

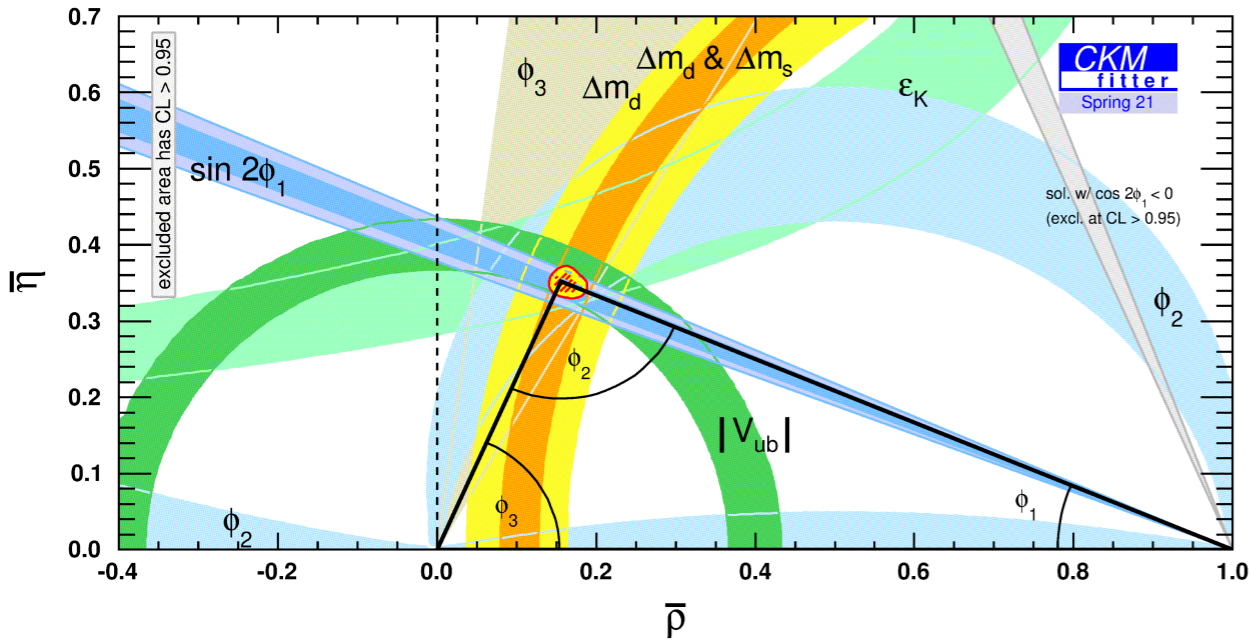
$$(\mathcal{A} = +0.12 \pm 0.16 \pm 0.05)$$



Belle 771/fb

- ループで分岐比が抑制  $\sim 5 \times 10^{-6}$
- 3つのK<sub>S</sub>( $\rightarrow \pi^+ \pi^-$ )を再構成
  - $c\tau = 2.7 \text{ cm}$  崩壊点が衝突点から離れている
  - 崩壊点検出器がカバーする領域が大きくなったため、崩壊点検出器内にヒットを持つK<sub>S</sub>が増えた+ピクセル検出器によって位置分解能向上
  - 使えるイベントの割合が増えた( $\Delta t$ をよく測定できるイベントが増えた)
- 主な系統誤差は、今後統計が増えれば改善できる見込み
  - フレーバータグ：校正に使ったデータが少ない
    - 片側のBの終状態のレプトンやK中間子などの電荷からBか反Bかを推定



# Belle II prospect



  $\phi_3, V_{ub}$   
  $\sin 2\phi_1, \phi_2, \Delta m$

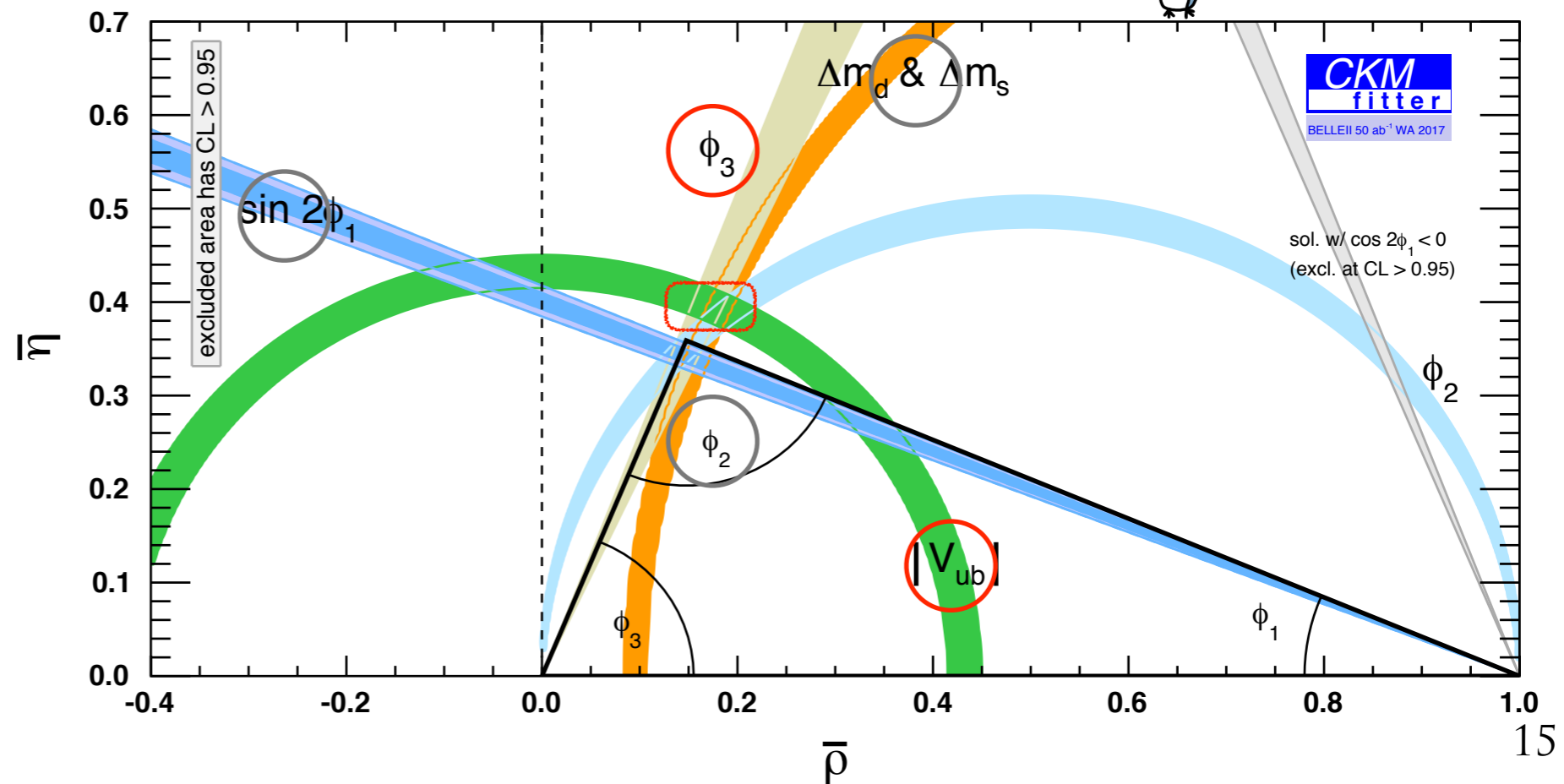
2017年の世界平均を用いて

Belle II 50/abに外挿

すべての角を~1度の誤差で測定

すべての辺を1-2%の誤差で測定

現在と同程度のずれがあれば  
 ツリーのみで決まる三角形と  
 ループのみで決まる三角形の  
 違いがはっきり見える



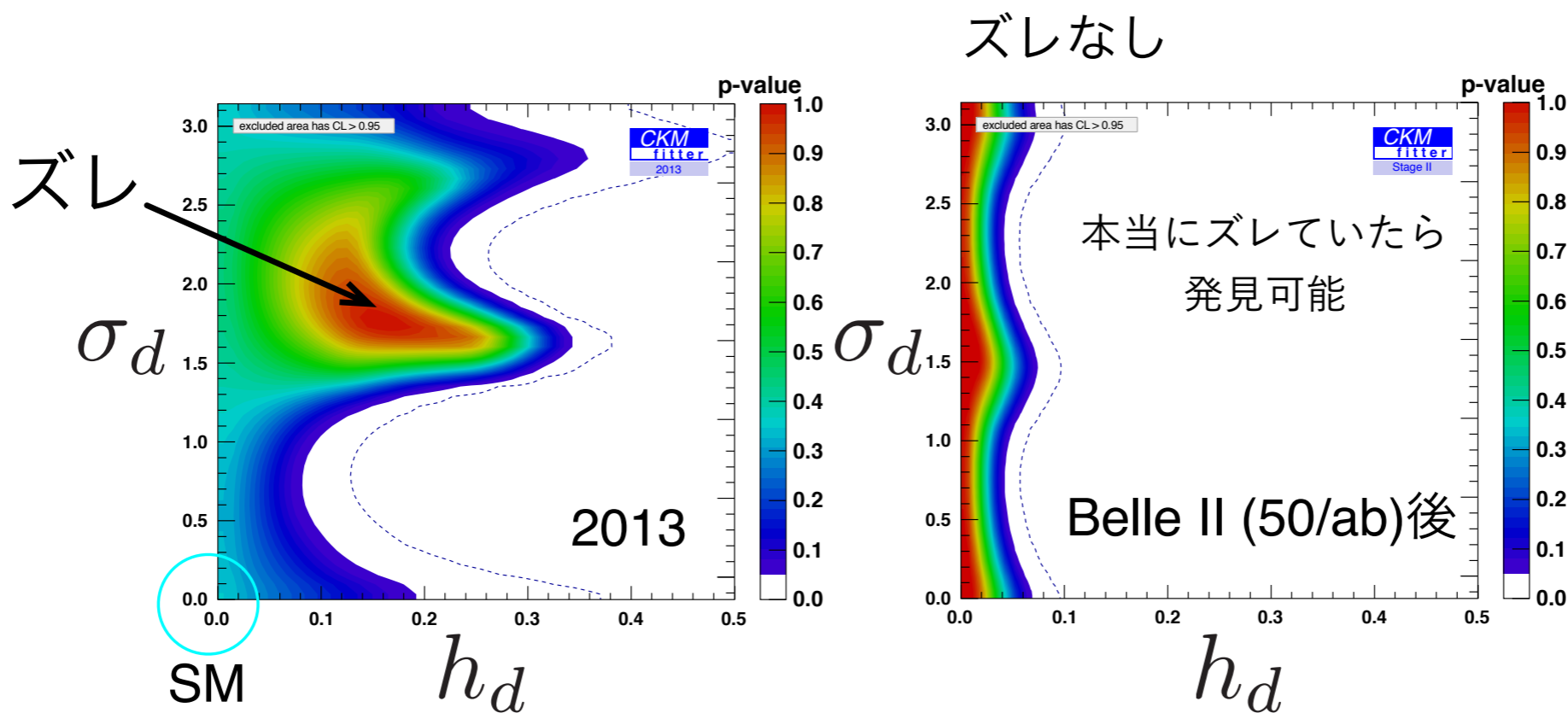
# Mixingの中の新物理探索

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

mixing amplitude

$$M_{12} = (M_{12})_{\text{SM}} \times \left(1 + \underbrace{h_d e^{2i\sigma_d}}_{\text{SMからのずれ}}\right)$$

$$h \simeq \frac{|C_{bd}^{\text{NP}}|^2}{|V_{tb}^* V_{td}|^2} \left(\frac{4.5 \text{ TeV}}{\Lambda_{\text{NP}}}\right)^2$$



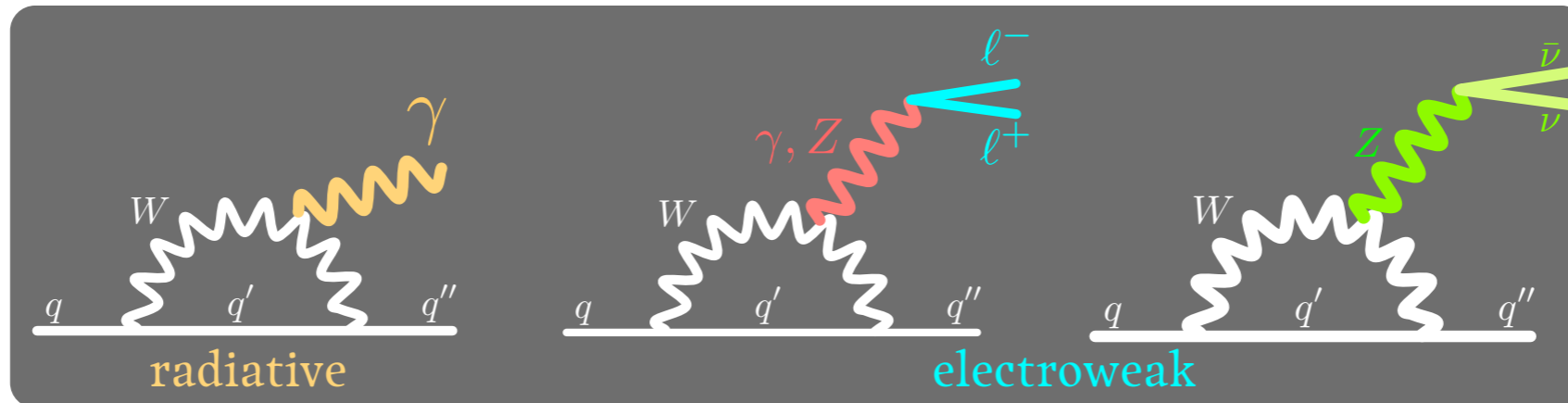
結合がCKM-likeな新粒子に対してはO(1)-O(10)TeVのものに感度あり。

結合が1の場合は、O(100)-O(1000)TeVまで感度あり。



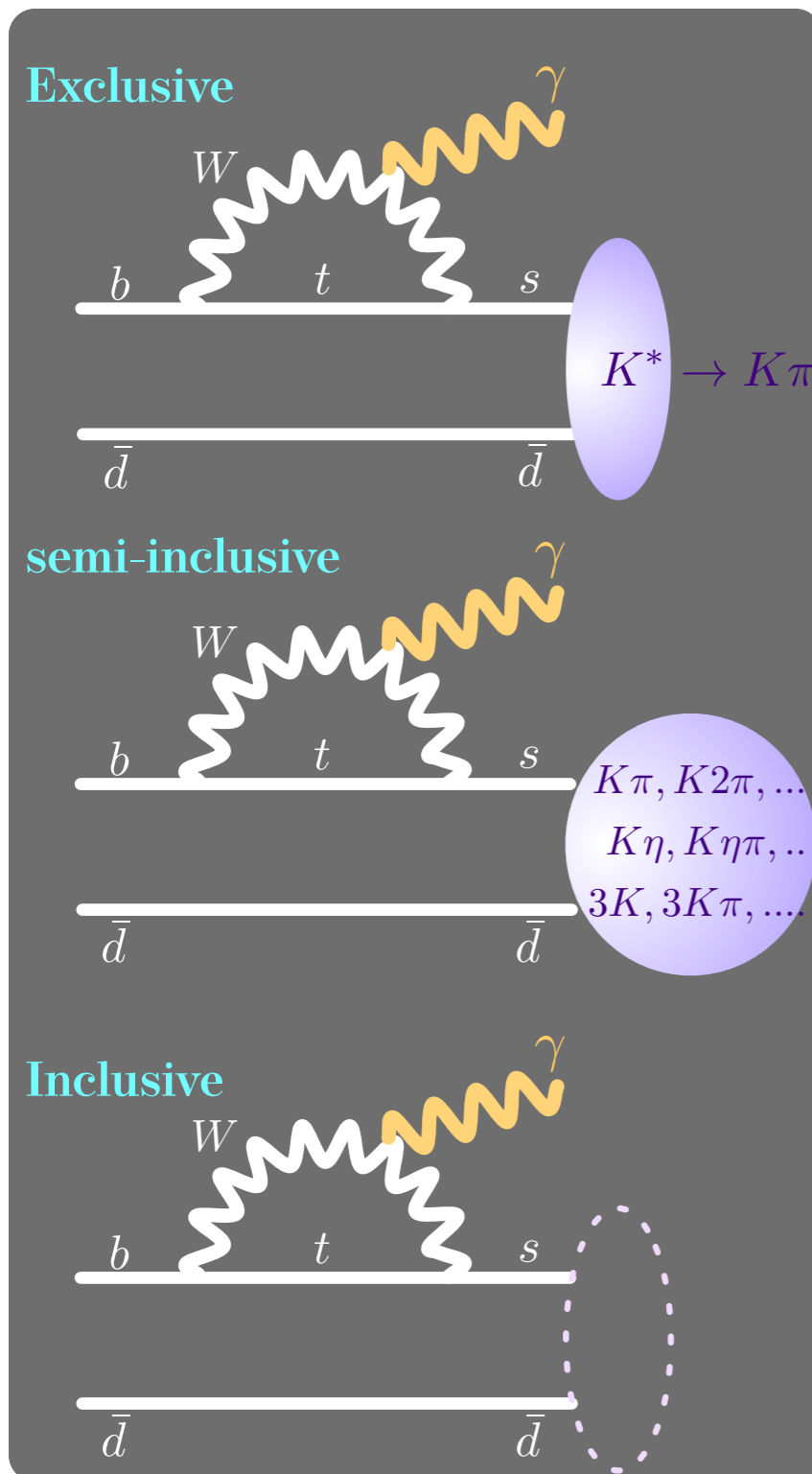
EWP

# radiative and electroweak penguin



- 興味があるのは、 $b \rightarrow s(d)$ への遷移
  - 標準理論ではループの寄与が支配的なのでループに結合する新物理の探索に強い
  - 新物理の寄与がある場合、観測量が標準模型の予想からずれる
  - 終状態にphotonやレプトンを含むので、理論計算の不定性が比較的小さい
  - 観測量として崩壊分岐比は、ハドロン化(e.g.  $B \rightarrow K^*$ )の理論予想値の不定性が大きく新物理探索にはあまり感度がない
    - 比をとるなどして、共通の系統誤差をキャンセルする工夫。非対称度の測定。
  - Inclusiveな測定をすれば、クォークレベルのダイアグラムと対応づけが可能。だが実験的には難しい。。

# radiative and electroweak penguin



終状態を  
ばっちり特定

可能な終状態を  
できるだけ多く再構成  
(exclusiveの和)

photon以外は  
見ない!!

バックグラウンド除去  
能力が高い  
高精度な解析ができる

理論の予言値の精度が  
良くない

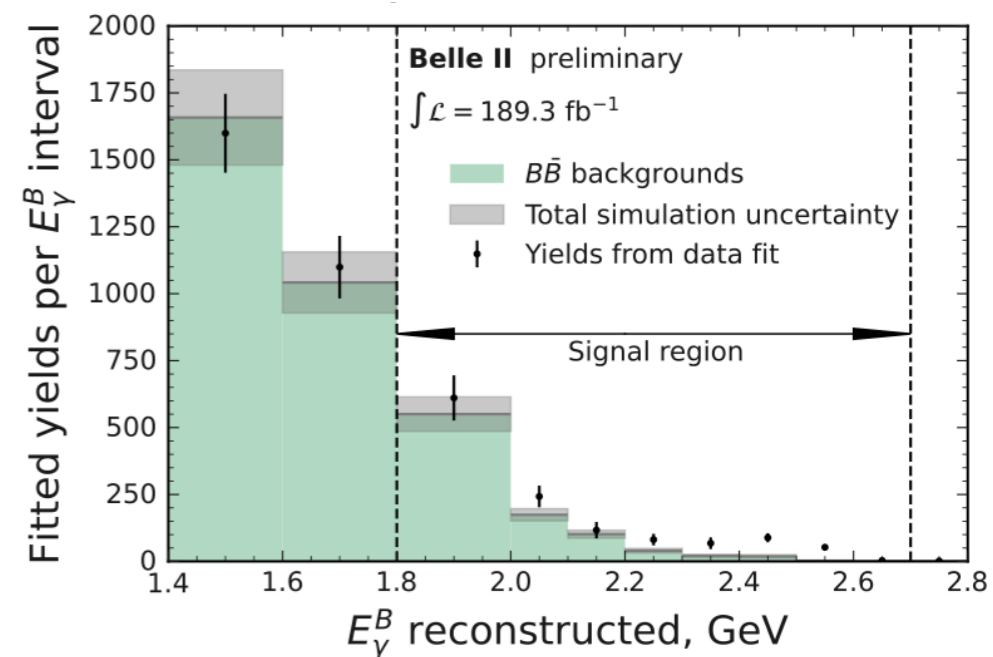
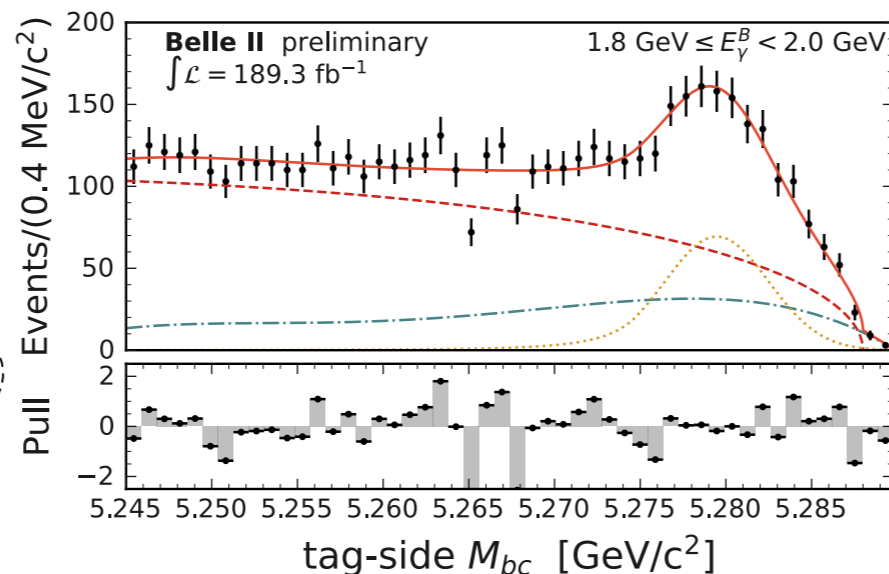
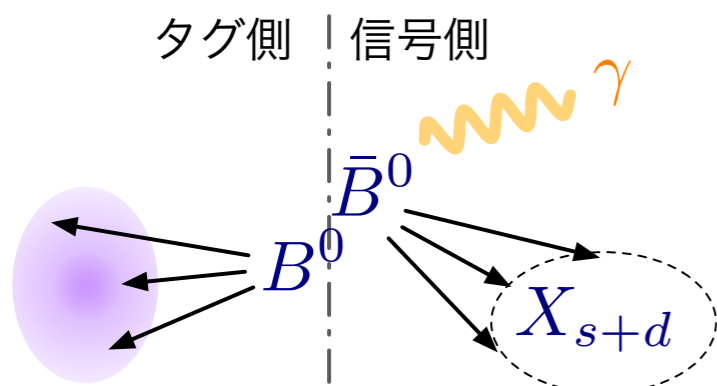
チャレンジ in 実験

チャレンジ in 理論

バックグラウンドが多い  
系統誤差の評価が大変

理論的にクリーン  
予言値の精度がいい

# B → X<sub>s</sub> γ の測定



## • Hadronic-tag

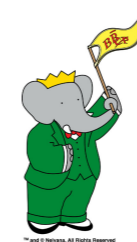
- B(tag) → DXを完全に再構成
- バックグラウンド除去能力が高いが  
信号の検出効率も小さい

$E_\gamma^B$ threshold (GeV)	$\mathcal{B}(B \rightarrow X_s \gamma) (10^{-4})$
1.8	$3.54 \pm 0.78$ (stat.) $\pm 0.83$ (syst.)
2.0	$3.06 \pm 0.56$ (stat.) $\pm 0.47$ (syst.)

## • Leptonic-tag

- B → D(\*)  $\ell \nu$  の高運動量レプトンを  
要求
- レプトン ( $\ell = e, \mu$ ) の電荷からフレー  
バー (Bか反Bか) を決定

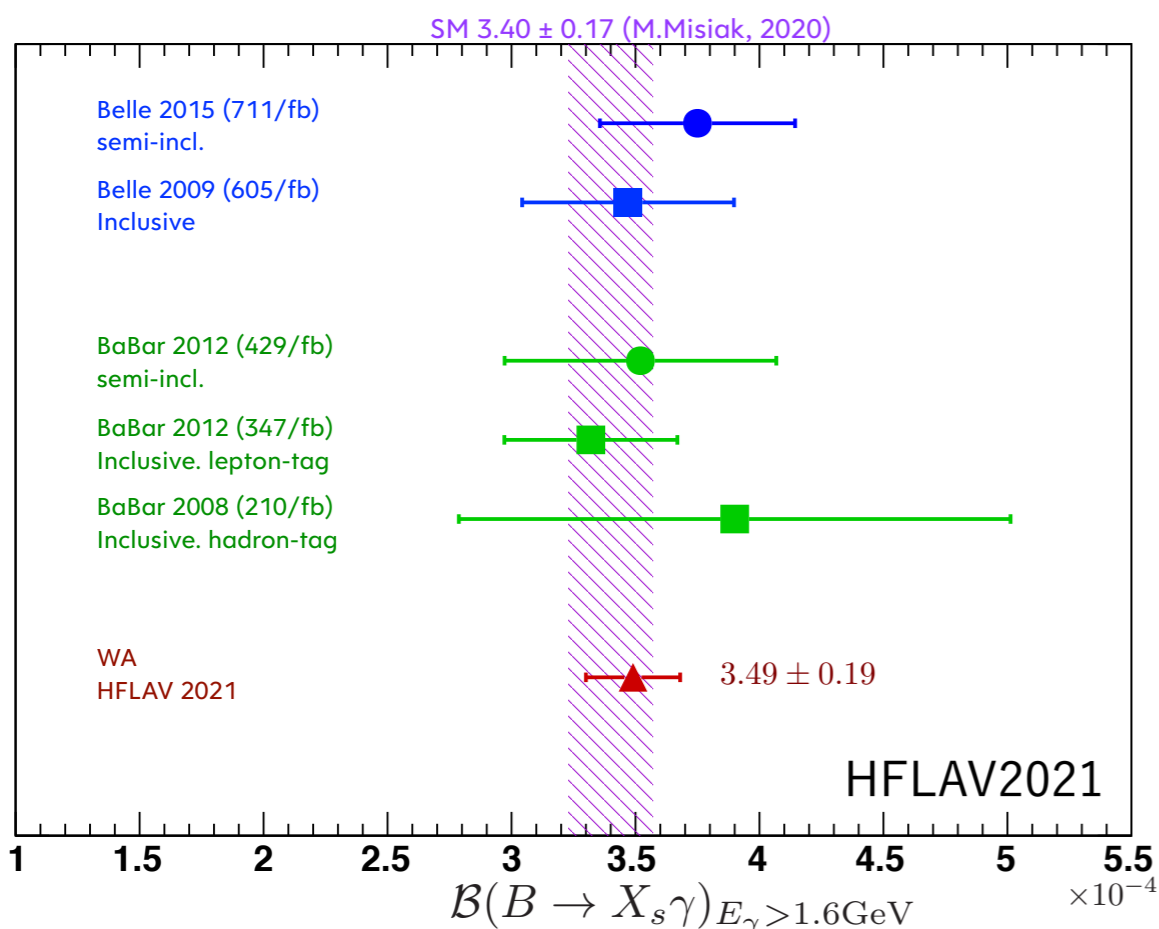
BaBarの同程度の統計を用いた結果と同様の結果。



$$(3.66 \pm 0.85 \pm 0.60) \times 10^{-4}$$

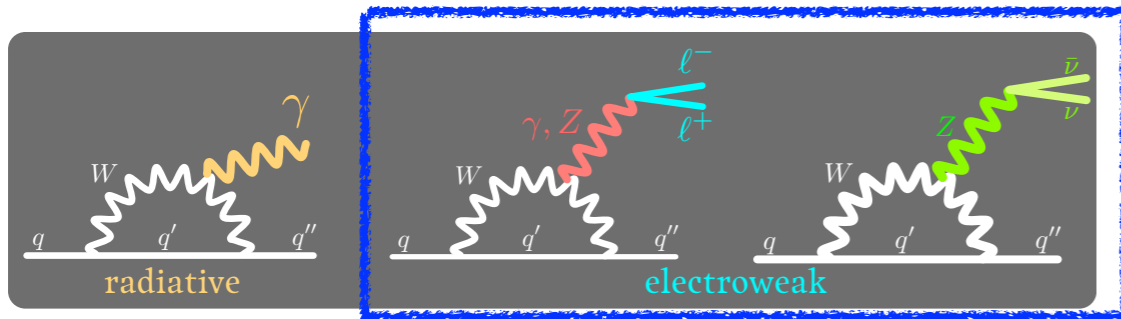
$$E_\gamma^B > 1.9 \text{ GeV} (210/\text{fb})$$

# $B \rightarrow X_s \gamma$ の測定



- 標準模型の予想と一致
- 理論と実験の誤差が同程度
  - ~5%
- 実験はすでに系統誤差がメイン
  - Belle II では誤差~3%程度にできる見込み
    - lepton-tagの解析で主な系統誤差は中性ハドロンフェイク

# radiative and electroweak penguin



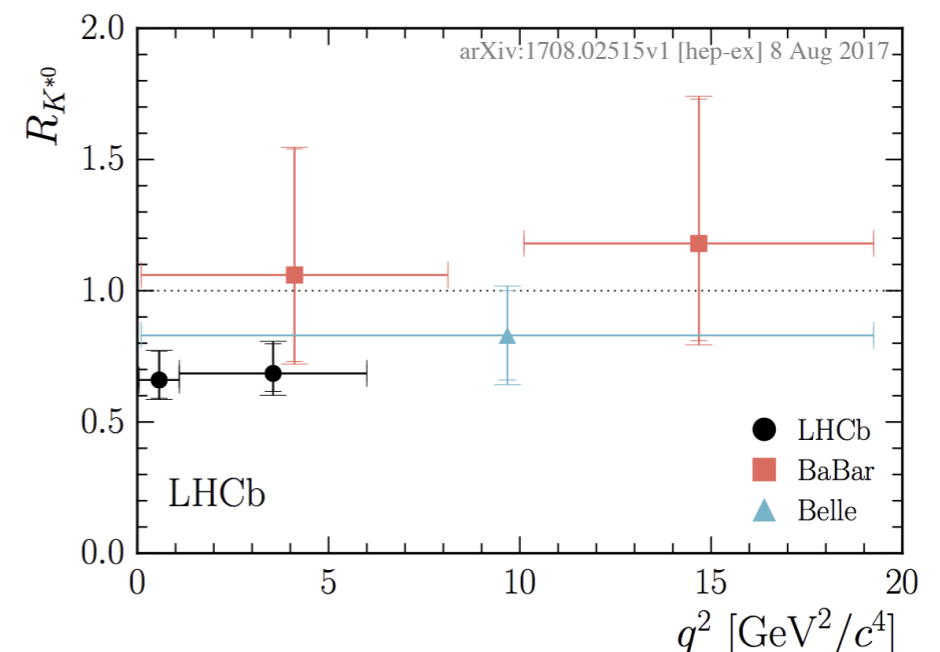
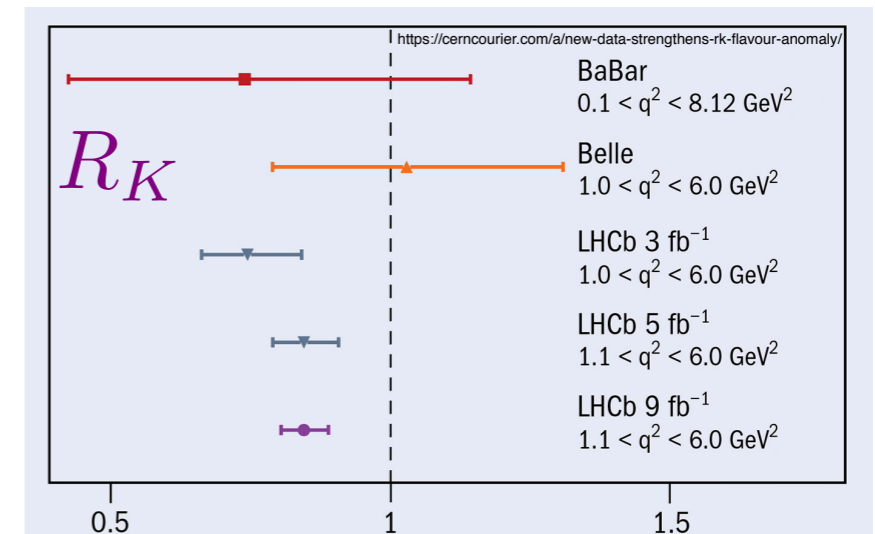
電子モードとミュオンモードの崩壊分岐比の比

$$R_{K^{(*)}} = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow K^{(*)} \mu\mu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow K^{(*)} ee)}$$

標準模型ではR=1 (レプトンの性質は普遍的)

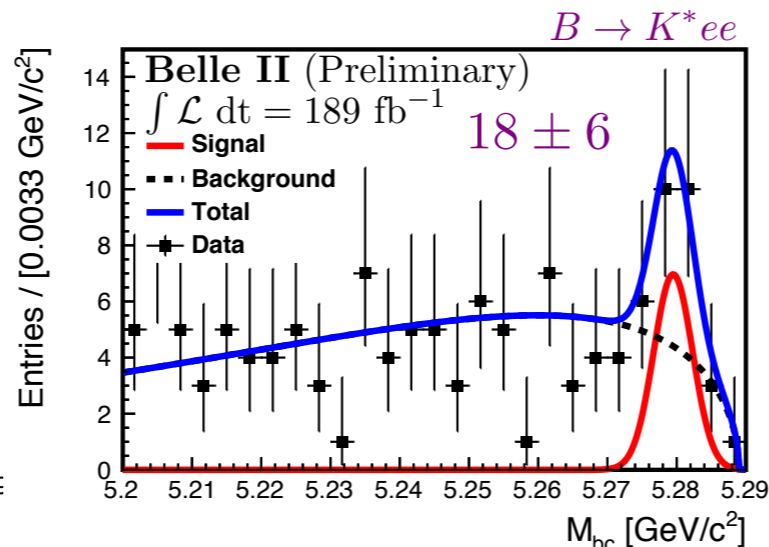
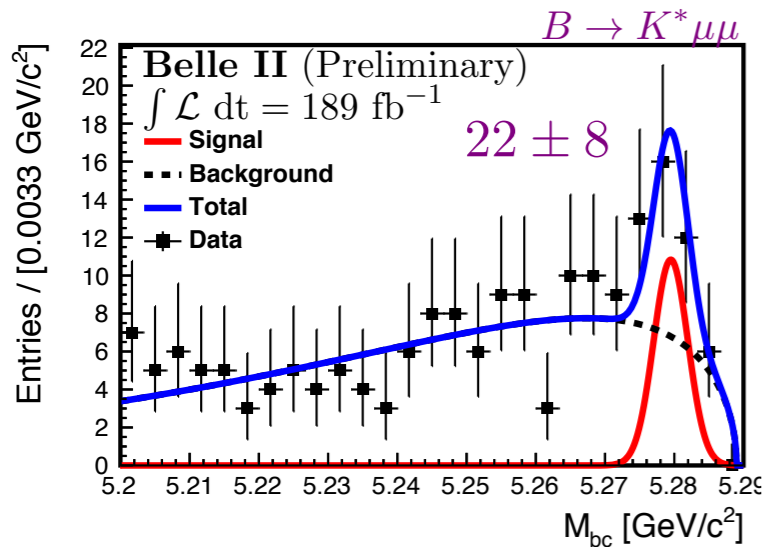
LHCbの結果ではR=1からズレ

- $b \rightarrow s \gamma$  より分岐比が2桁小さい  $\text{Br} \sim 10^{-6}$ 
  - (豆:  $K^{(*)} \ell \ell$  は  $B \rightarrow J/\psi K_s$  など TCPV と終状態がにているので、そのためにデザインされた Belle1/2 での検出効率は高い)
- $s \ell \ell$ : 荷電レプトンは直接測定できる → 実験的にもクリーン。Belle II では inclusive な解析も可能。
- $K^{(*)} \nu \nu$ : 実験的に未発見。  $s \ell \ell$  にくらべてさらに理論的にクリーン。終状態にニュートリノが2つあるので実験的には難しい。Belle II はこのモードを発見できる唯一の実験 (a few  $\text{ab}^{-1}$  at SM)



# radiative and electroweak penguin

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



$$\mathcal{B}(B \rightarrow K^* \mu \mu) = (1.19 \pm 0.31_{-0.07}^{+0.08}) \times 10^{-6}$$

$$\mathcal{B}(B \rightarrow K^* e e) = (1.42 \pm 0.48 \pm 0.09) \times 10^{-6}$$

R(K\*)の測定の準備ということで、  
分岐比を測定した

50/abでも統計誤差dominant

	Belle	Belle II	Belle II
	0.71 ab <sup>-1</sup>	5 ab <sup>-1</sup>	50 ab <sup>-1</sup>
$R(K^{(*)})$	~ 30%	~ 10%	~ 4%

## $B \rightarrow K \nu \nu$ 探索

新しい解析のアプローチ: inclusive tag

片側のB中間子を再構成しない (!!)

信号側の荷電K中間子のみ特定(高運動量,PID)

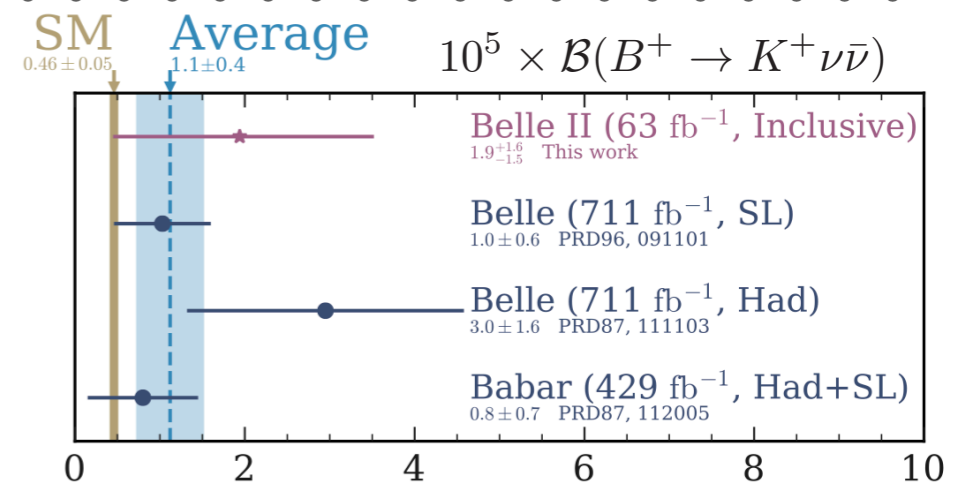
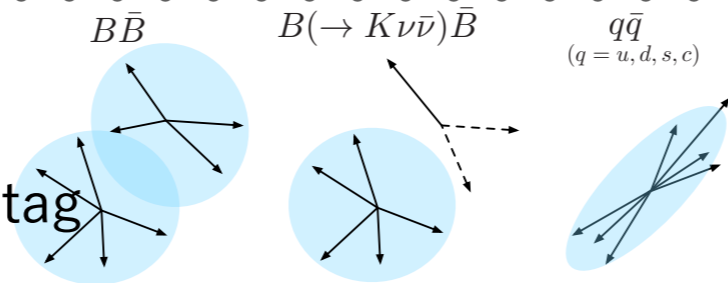
+ その残りとして扱う

機械学習を取り入れた手法を用いた

semi-leptonic tag:  $\epsilon = O(0.1)\%$  Belle

hadronic tag:  $\epsilon = O(0.01)\%$  BaBar

inclusive tag:  $\epsilon = O(1)\%$  Belle II



上限値(Belle II 63/fb)

$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu}) < 4.1 \times 10^{-5} \text{ (90\% CL)}$$

Belle 711/fb Hadron-tagと同じくらいの精度

Belle II で発見可能。50/abで分岐比の誤差は10%程度

charm life time



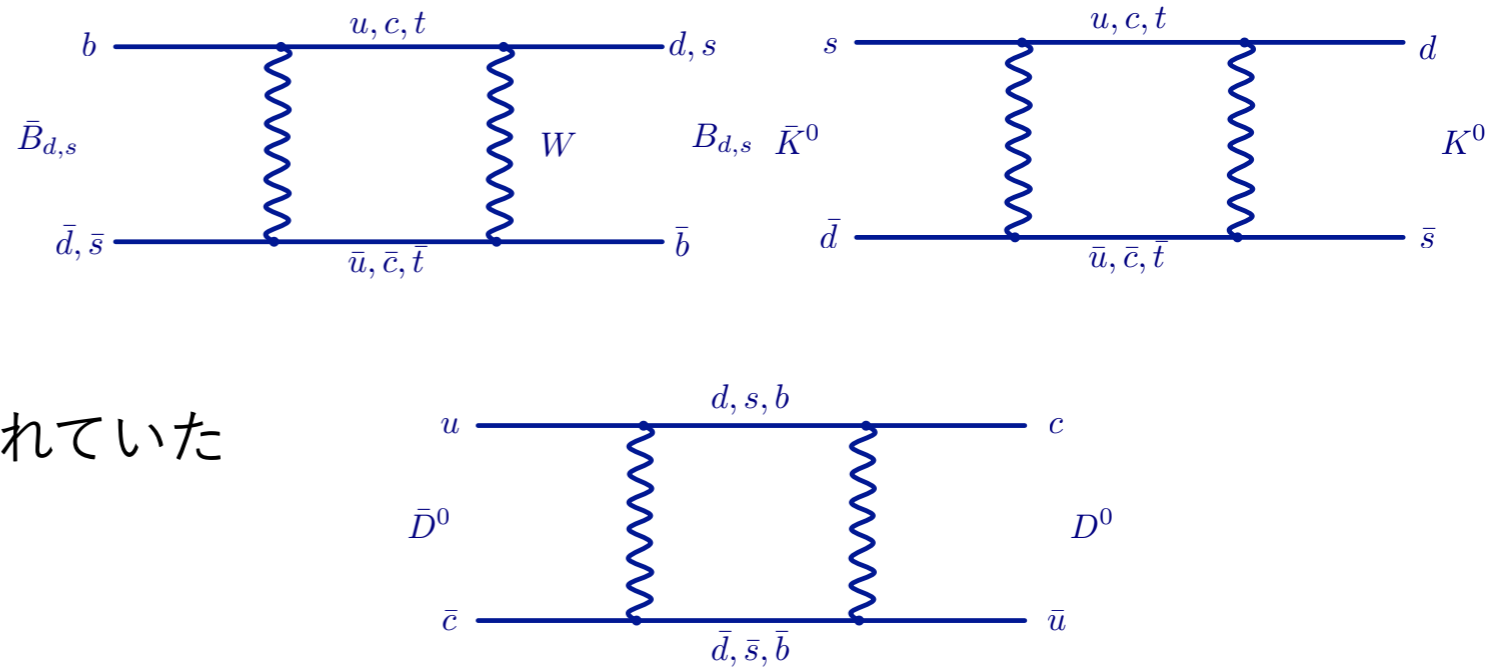
# charm life time

- 中間子混合

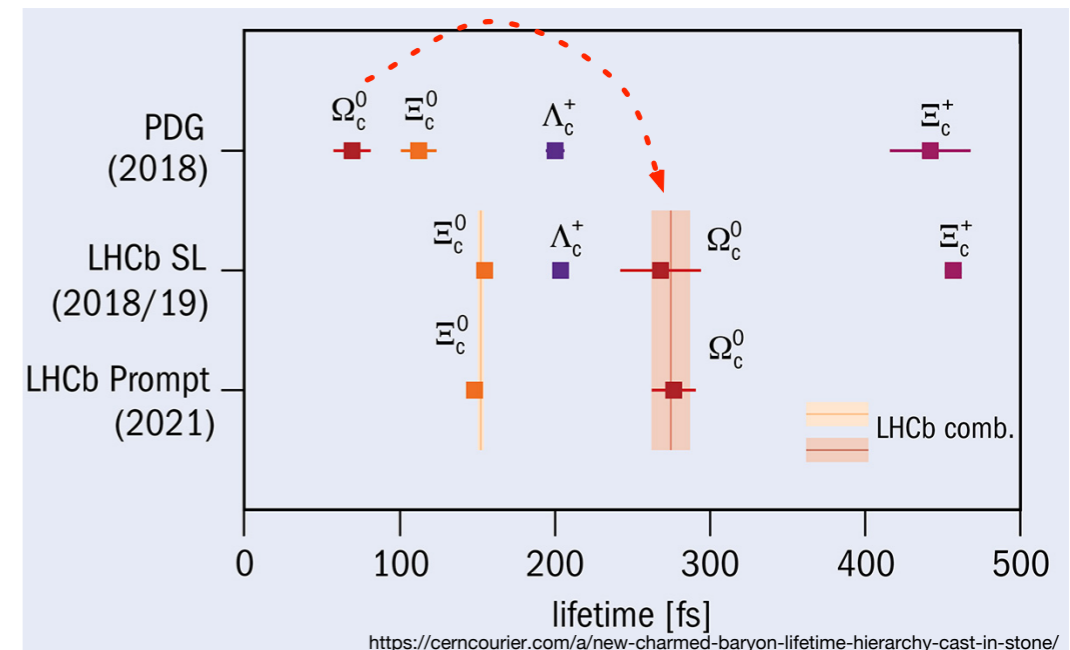
- K中間子 60年以上前
- $B_d$  1987年 ARGUS
- $B_s$  2006年CDF/D0
- $D^0$  : mixingもCPも小さいと予想されていた

- $D^0$ 中間子

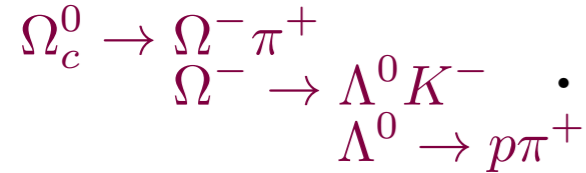
- アップタイプクォーク(cu)
- 2007年にBelle/Babarが初めて混合を測定
- 2019年にLHCbがCPの破れを発見()
  - 標準理論では $D^0$ 混合には第三世代クォークの寄与が非常に小さく、第二世代のみ寄与するためCPの破れもとても小さい → 大きなCPの破れが観測された場合、新物理のクリアな証拠!!
- 混合とCPの破れの観測により注目度UP
- 寿命はFOCUS実験(2002)以来更新されていない
  - $c \tau$  :  $K_S(2.7\text{cm})$ ,  $K_L(15\text{m})$ ,  $D^0(120\mu\text{m})$ ,  $B_{d/s}(460\mu\text{m})$



最近のLHCbによる測定では順番が入れ替わった

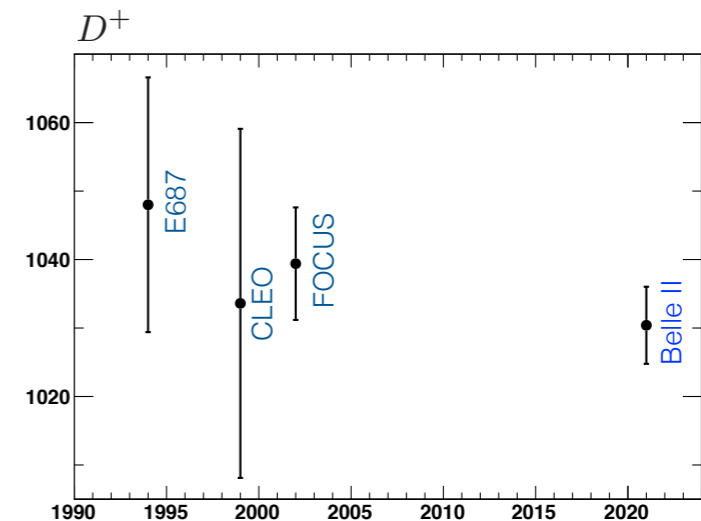
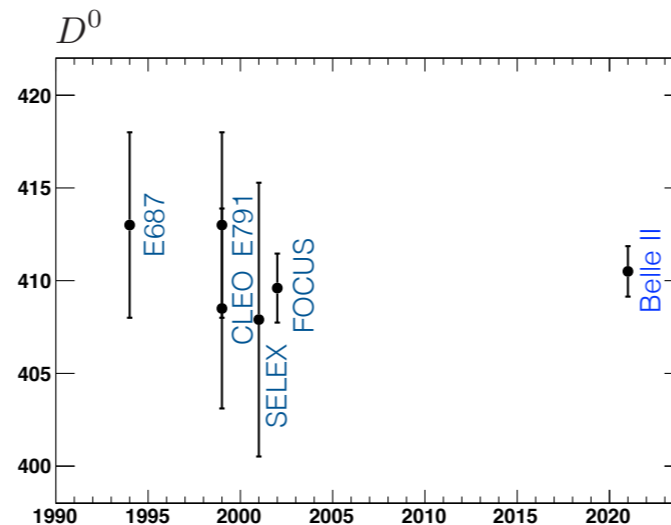
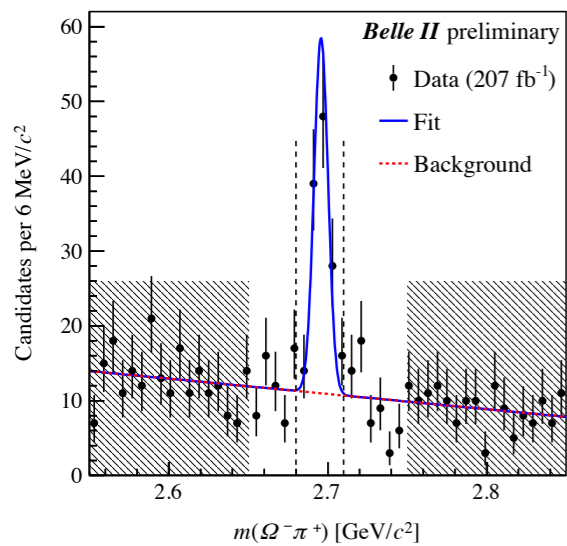



# charm life time

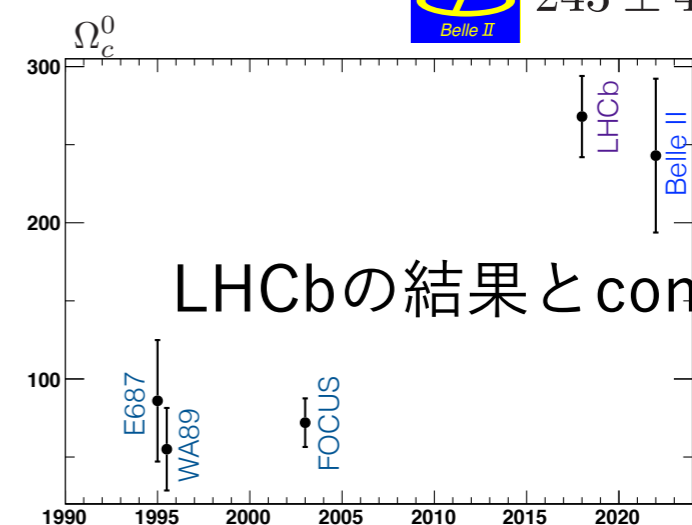
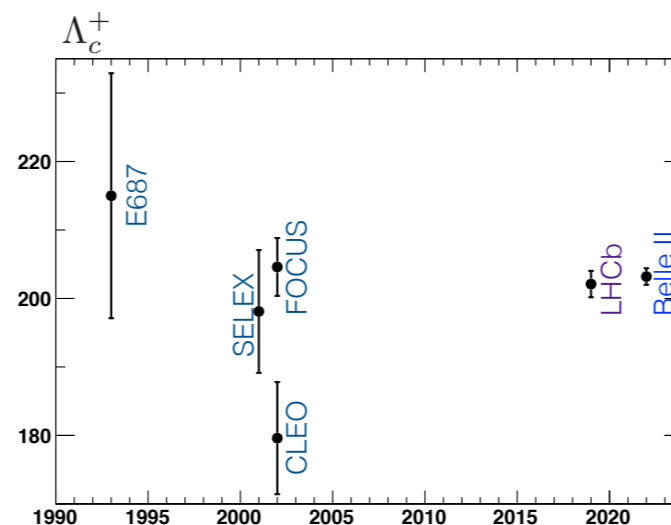
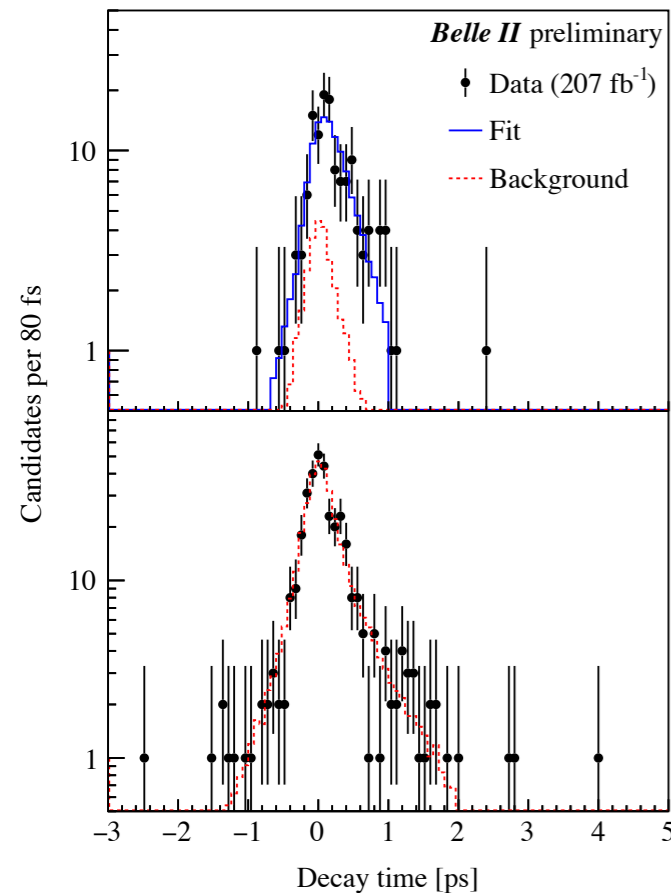


崩壊点検出器の位置分解能向上と検出器の精密なアラインメントのおかげで、チャームの寿命を精度良く測定できる

• eeコライダーのクリーンな環境でイベントの選別や再構成によるバイアスが少ない




 $243 \pm 48 \pm 11$  (fs)



LHCbの結果と consistent

Monday, 29 August 2022

09:00 - 20:00

Practice

09:00 (企画講演) Belle II実験による未知粒子の直接探索が解き明かす新物理の世界 1h0'

Speaker: 伊藤慎太郎

Material: [Slides](#) 

10:00 (企画講演) Belle II実験によるCP非保存の精密測定が解き明かす新物理の世界 1h0'

Speaker: 佐藤瑤

11:00 contingency/break 2h0'

13:00 Belle II 実験におけるハドロニックタグを用いた $R(D^{(*)})$ 測定 30'

Speakers: 児島一輝, Kazuki Kojima (Nagoya University)

Material: [Slides](#)  [document](#) 

13:30 Belle II 実験における $B_0 \rightarrow \eta' K_S$ 崩壊過程でのTime-dependent CP Violation測定 30'

Speaker: 裴漢郁

Material: [Slides](#) 

14:00 Belle II実験における $B_0 \rightarrow K_S \pi^0 \gamma$ 過程の時間依存CP非対称度の測定手法の開発 30'

Speaker: 植松祐真

14:30 Belle II実験における $B_0 \rightarrow K_S^0 K_S^0 K_S^0$ 過程の時間に依存するCP非対称度の測定 30'


Speaker: 谷川輝

Material: [Slides](#) 

15:00 contingency/break 1h30'

16:30 Belle II 実験における $B_0 \rightarrow \rho^+ \rho^-$ の解析のための事象選別と最適化 30'

Speaker: 中沢遊

Material: [Slides](#) 

17:00 BelleII実験における $B_0 \rightarrow \rho^+ \rho^-$ の崩壊分岐比と縦偏極率の測定結果 30'

Speaker: 大久保亮吾

Material: [Slides](#) 

# まとめ

- Belle では、標準理論の検証。Belle II では圧倒的な統計量をもって標準理論を超える新物理探索を目的にしている
- SuperKEKBは現在世界唯一の稼働中電子陽電子衝突型Bファクトリー
- Belle II 検出器の性能アップと新しい解析手法によって、実験初期ながらも成果を出し始めた
- 現在長期シャットダウン中。2023年の運転再開でルミノシティ  $10^{35}$  の大台を達成すべく、一丸となって取り組んでいる
- みなさんの関心=応援。我々の励みになります！

次のページに1枚宣伝があります。

# FPWS2022

## 目的

本ワークショップでは、B, charm, tau などのフレーバー物理を中心により広域なテーマも取り扱い、**大学院生と若手研究者が、理論と実験の両方に関して基礎から最先端の研究までを俯瞰的に学び、理解を深めることを目指しています。**理論や実験の第一線で活躍されている研究者の方々による修士課程学生向けの講義（素粒子物理学入門、測定器・加速器、Belle II実験、関連する物理の理論・実験）と、学生や若手研究者を中心とした口頭・ポスター発表を予定しています。参加者投票によるBest Talk/Poster賞の選出も予定しています。講義内容、参加登録の準備が出来次第、改めてご案内いたします。様々な分野からのご参加、発表を歓迎致します。

July 19 2022, Keisuke Yoshihara

## 現地開催の詳細

場所：ニュー八景園（静岡県伊豆の国市）  
開催日時：11月7日（月）－11月10日（木）

参加費：

- 宿泊費（3泊4日朝夕食付）：30000円（学生）、34500円（研究員またはスタッフ）
- 昼飯代：1650円×2日分
- エクスカーション参加費：2000円（参加者のみ）

原則部屋は5,6名の相部屋になります。（限りがありますが個室対応も可）  
予算に限りがありますが、旅費の補助が必要な場合はご相談ください。

発表申込/参加登録締切：9月22日

その他詳細な情報は随時追加いたします。



July 19 2022, Keisuke Yoshihara

4

## 一般講演とポスターセッション

- 本ワークショップでは一般講演（15または20分の予定）の発表申込を受け付けます。ここ数年、コロナ禍で制限されていた対面発表をする貴重な機会です。自分の研究に興味をもってもらい、貴重な意見交換の場としてください。
- 発表希望者が多数の場合はポスターセッションも開催いたします。
- Best talk/poster賞も企画しますので、積極的な発表申込をよろしくお願いします。

July 19 2022, Keisuke Yoshihara

## Excursion



<https://www.panoramapark.co.jp/>

研究者間の交流を促進するためのエクスカーションも予定しています。

July 19 2022, Keisuke Yoshihara

8