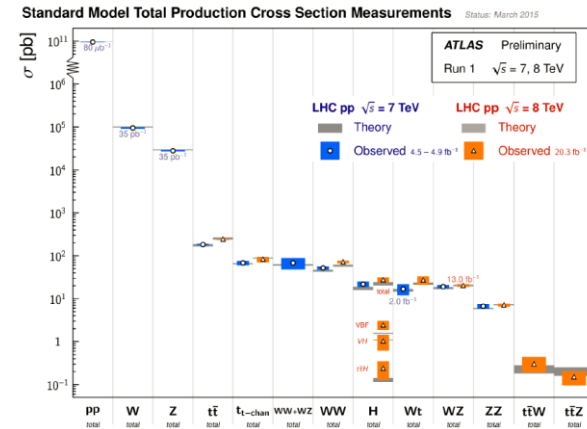
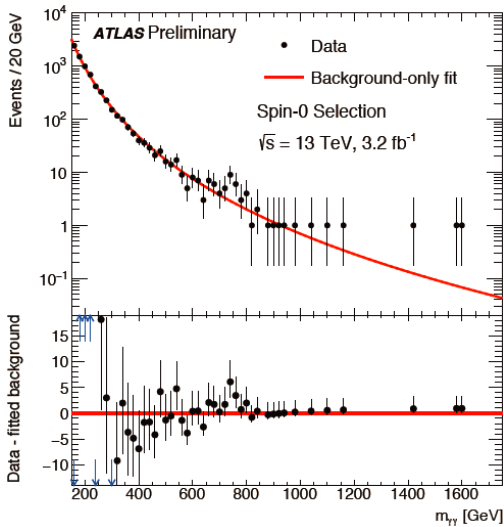




Belle II の物理

石川明正
(東北大学)

フレーバー物理の意義

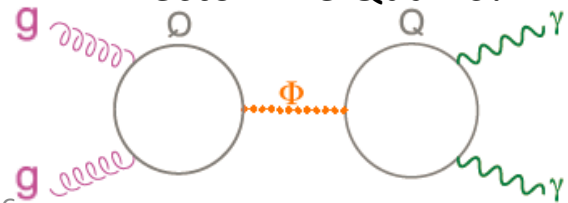


LHCで
新物理発見

Yes
新物理の
フレーバー
構造の測定

No
精密測定・
禁止過程から
新物理探索

Scalar Particle and
Vector Like Quarks?

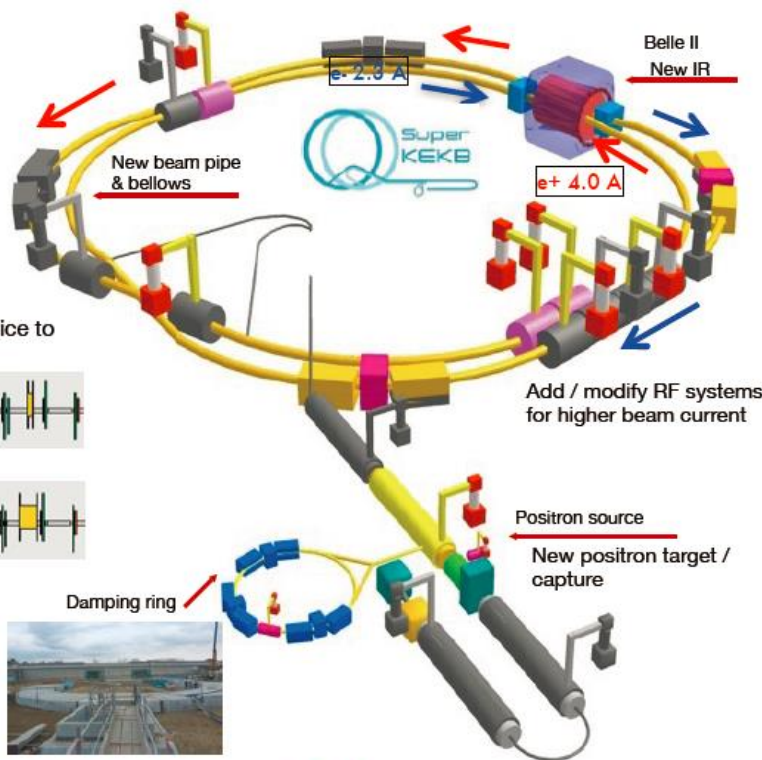
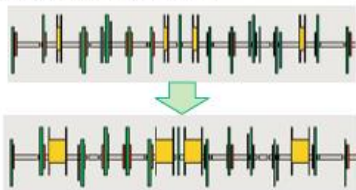


SuperKEKB 加速器

- KEKB加速器の**40倍**のルミノシティー
 - Nano-beam scheme **x20**, beam current **x2**
- 非対称エネルギー **7GeV x 4GeV** ← Y(4S) resonance 上
 - 時間依存 CPV を測定するために、B中間子を Z 方向に boost
 - boost factor は KEKB より小さくなった



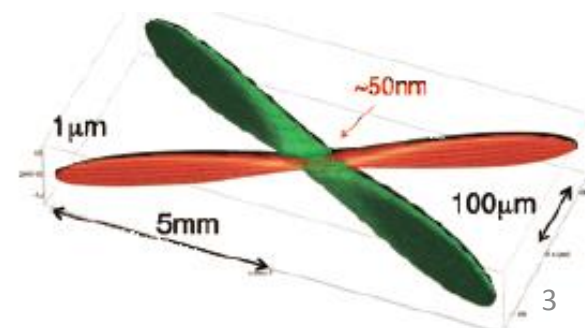
Redesign the magnetic lattice to reduce the emittance



New superconducting / final focusing quads



Low emittance



$$L=8 \cdot 10^{35} \text{ s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$$

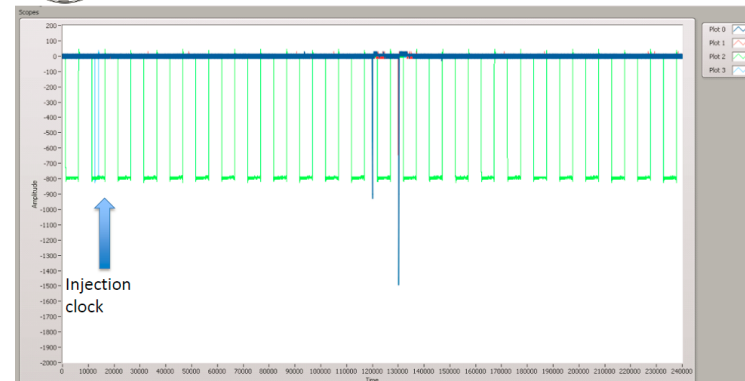
SuperKEKBでビーム周回

- 2016/2/8 Low Energy Ring (LER) に最初のビーム入射
- 2016/2/9 LERのビームが周回
- 2016/2/10 LER RF cavity の電源on
 - シンクロトン放射によるエネルギー損失を補償
- 2016/2/22 High Energy Ring (HER)にビーム入射
- 2016/2/24 HERのビームが周回した
- 2016/2/24 HER RF cavity の電源on

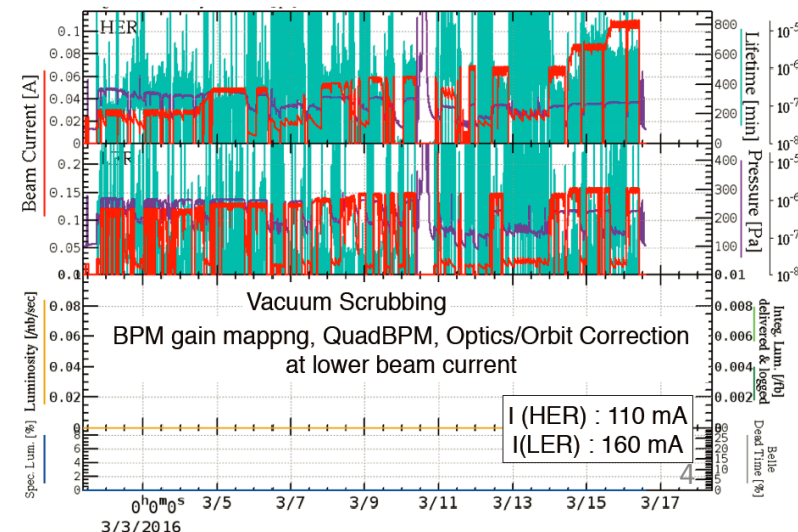
- 現在真空を改善するために大電流で長時間運転をしている



CLAWS sees two signals separated by about 10 microseconds (blue pulses)

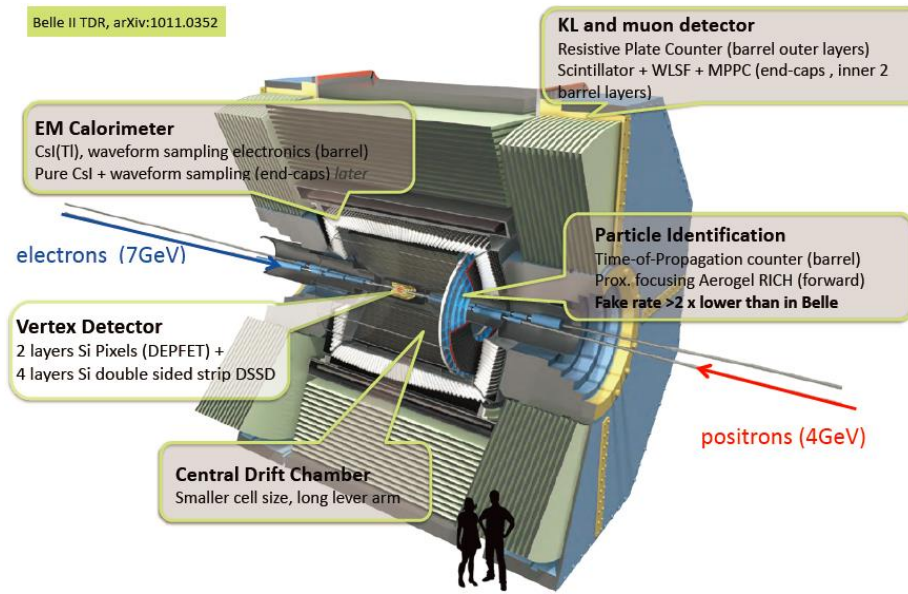


The green pulses are the revolution clock. Injection rate is still 1 Hz



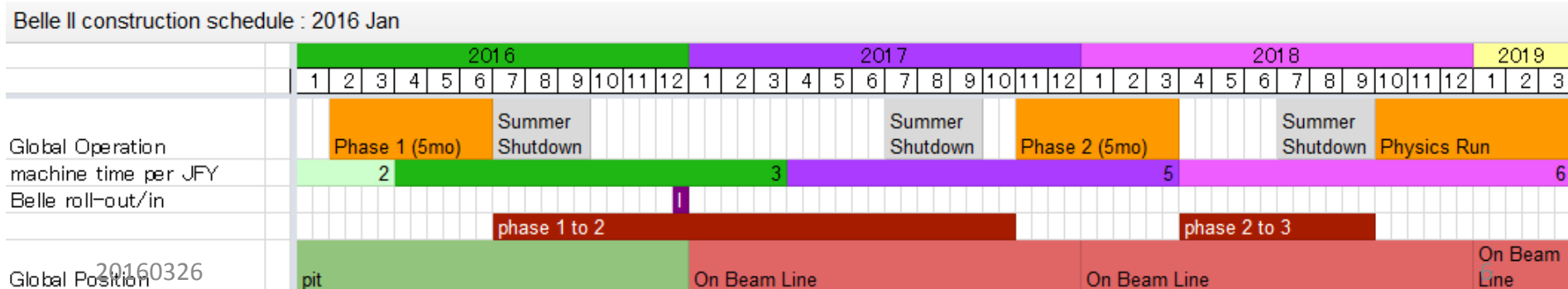
Belle II 検出器

- 10-20倍のバックグラウンドでも Belle 検出器以上の性能を維持
 - Barrel/Forward Endcap Kaon ID の大幅な向上
 - $B \rightarrow K^* \gamma$ VS $B \rightarrow \rho \gamma$
 - 崩壊点検出器の内層はIPに近く、外層は大きく
 - Vertex resolution の向上、long lived Ks を使った vertexing efficiency の向上
 - LHCbで苦手な π^0 , K^0 も再構成可能、電子のIDも可能
- (ほぼ) **すべてのB中間子崩壊を記録する**
 - 逆側のBを再構成する事により、 $B^0 \rightarrow \text{nothing}$ できさえも探索可能
 - Effective flavor tagging efficiency >30% (LHCb ~3%)



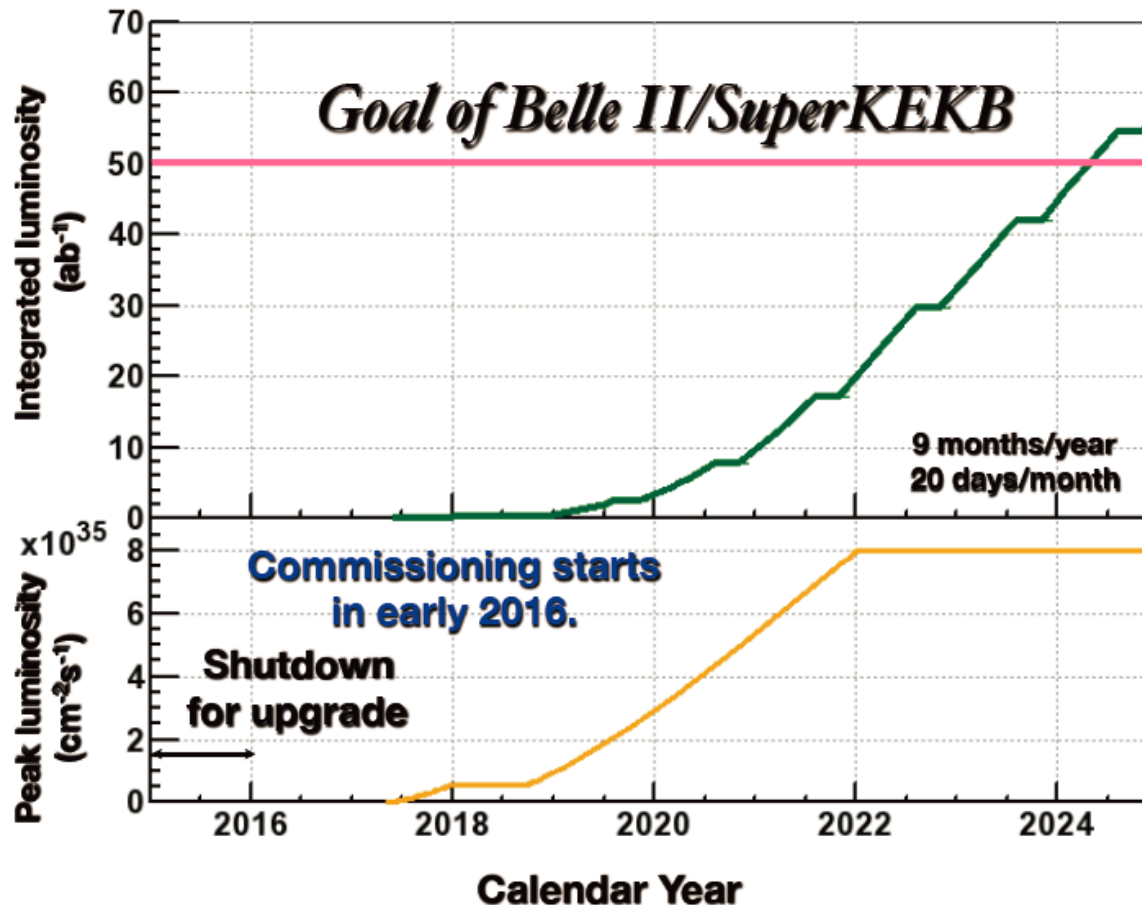
Schedule

- 2016年2月～6月 Phase1 Beast II Detector
- 2017年11月～2018年3月 Phase2 BelleII w/o VTX
 - On Y(nS) $n < 4$
 - ハドロン物理、Dark Photon Search
- 2018年10月～ Phase3 Belle II w/ VTX
 - On Y(4S)
- ただし、Phase2でバックグラウンドがVTX検出器を入れるのに十分小さければ、すぐに Phase3 に移行する事を考えている



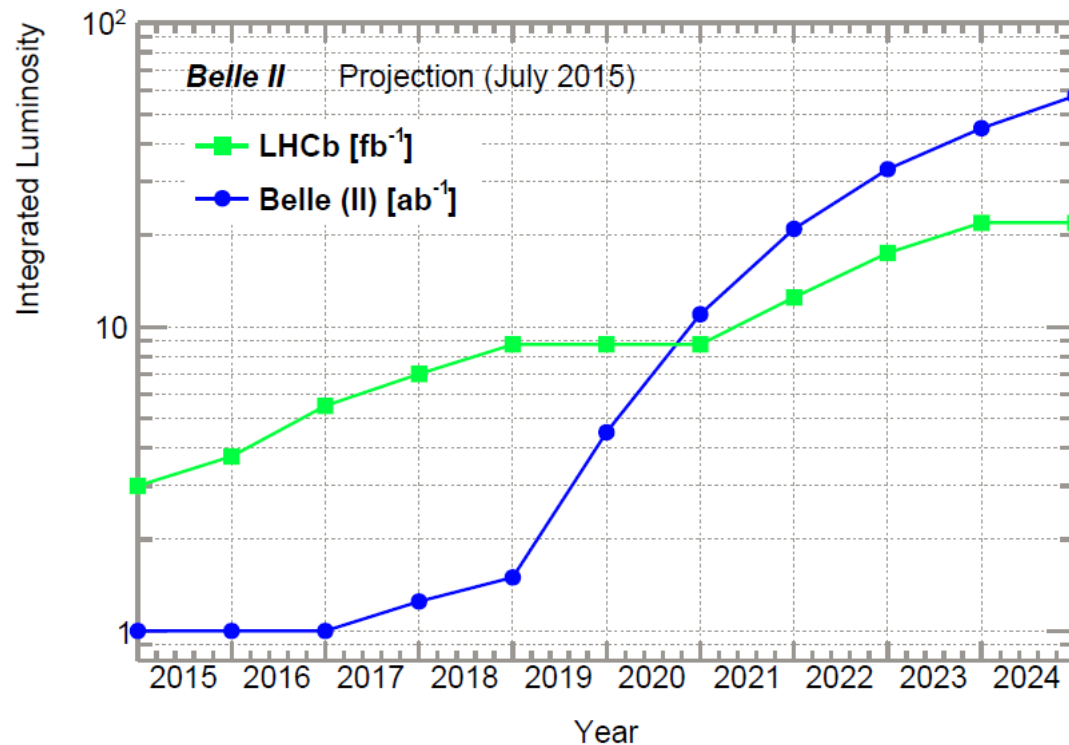
Integrated Luminosity

- 2024年に 50ab^{-1} (Belle の50倍)
 - 5×10^{10} BB pairs, 4.5×10^{10} $\tau^+\tau^-$ pairs



LHCb と比較する際

- Belle II 2024年に 50ab^{-1}
- LHCb 2024年に 22fb^{-1}



Belle II での物理

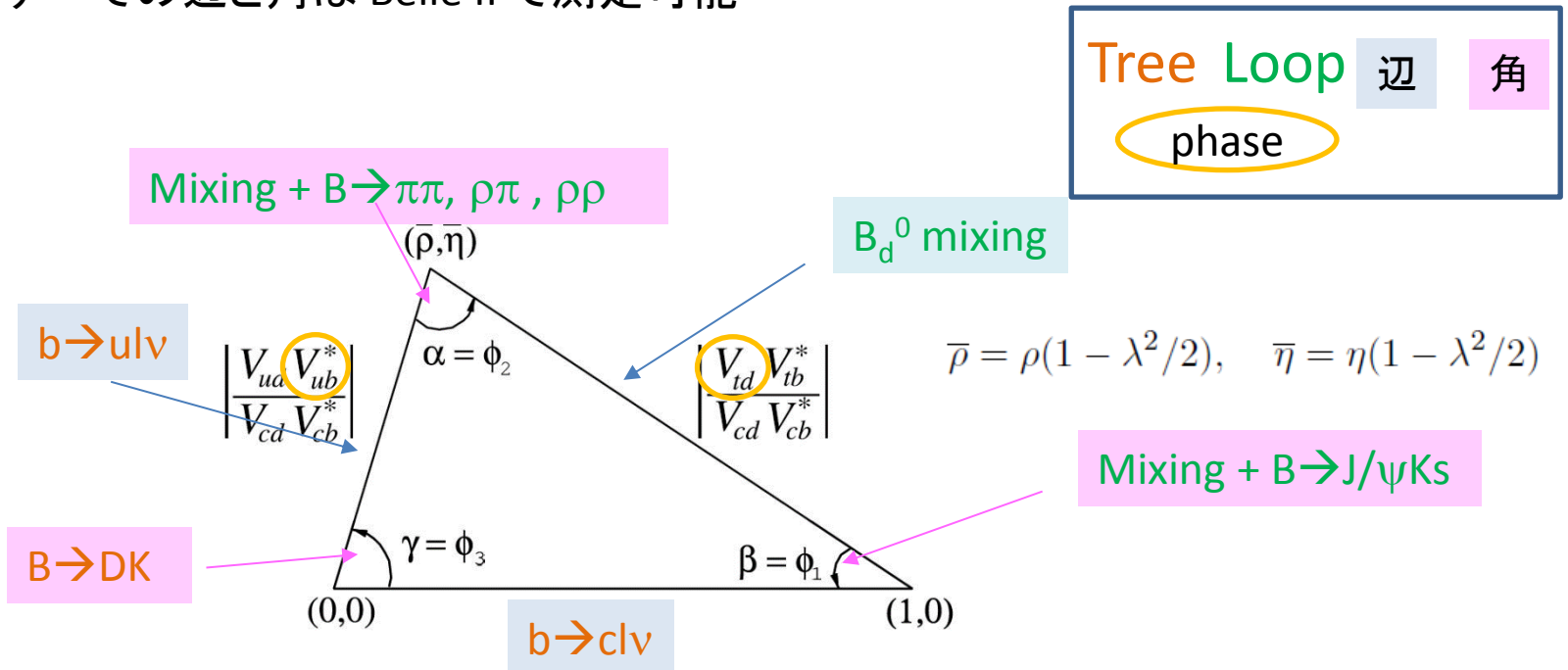
- Unitarity Triangle の精密測定
 - $\Delta B=2$ loop B^0 - B^0 bar mixing での新物理探索
- Penguin 崩壊の精密測定
 - $\Delta B=1$ loop での新物理探索
 - $b \rightarrow sqq$ 崩壊での TCPV
 - $b \rightarrow s\gamma, sl^{+\pm}, sv\nu, d\gamma, dl^{+\pm}$ の精密測定
- τ を終状態に持つ B の崩壊
 - Tree過程
 - $B \rightarrow \tau\nu, D^{(*)}\tau\nu$
- Charm の精密測定
 - D^0 - D^0 bar Mixing, CPV
- τ のLFV崩壊
- Dark Photon
- Radiative Return
- 他にも色々
 - $ee \rightarrow \mu\mu$ での A_{FB}
 - エキゾチックハドロン
 - ハドロンスペクトロスコピー

Unitarity Triangle

- CKM matrix のかけ算して d 行 b 列をとると複素平面に三角形が書ける

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

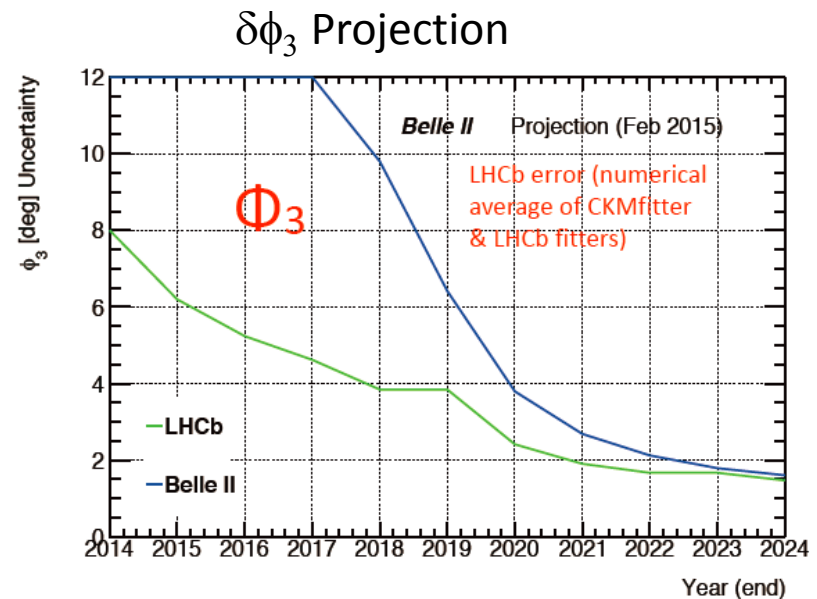
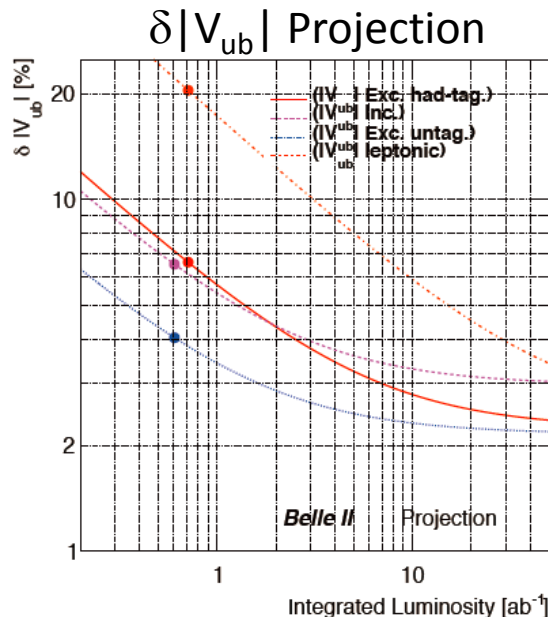
- Tree と Penguin が作る Triangle が一致しなければ、新物理の発見
 - すべての辺と角は Belle II で測定可能



辺と角の測定

- $\Delta m_d \rightarrow |V_{td}|$ の誤差は lattice が dominate
- ϕ_1, ϕ_3 は理論的に clean なので実験で決まる

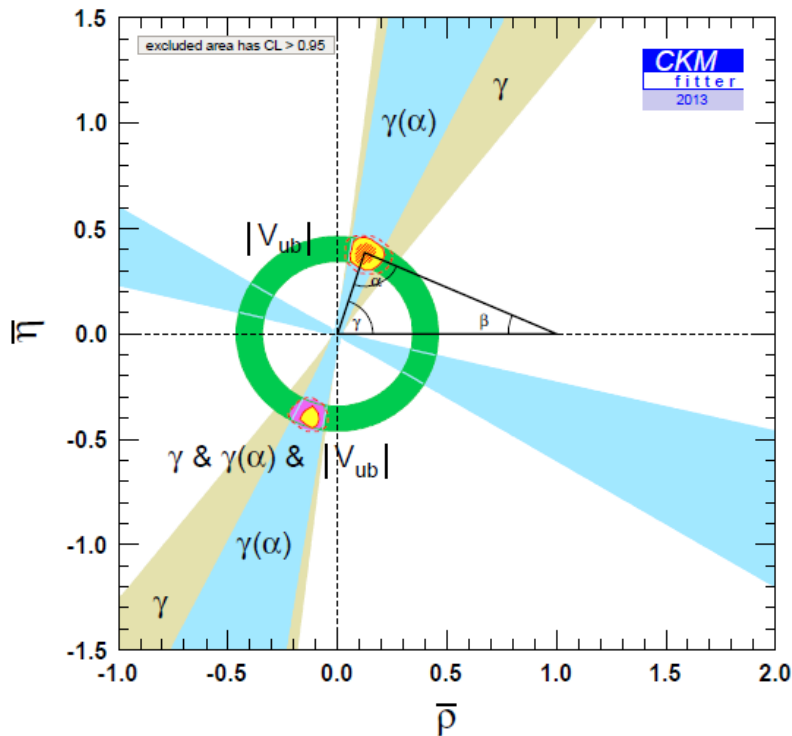
		Observables	Belle (2014)	Belle II 5 ab ⁻¹ 50 ab ⁻¹	
UT angles	$\beta = \phi_1$	$\sin 2\beta$	$0.667 \pm 0.023 \pm 0.012(1.4^\circ)$	0.7°	0.4°
	$\alpha = \phi_2$	$\alpha [^\circ]$	85 ± 4 (Belle+BaBar)	2	1
	$\gamma = \phi_3$	$\gamma [^\circ] (B \rightarrow D^{(*)}K^{(*)})$	68 ± 14	6	1.5
UT sides		$ V_{cb} $ incl.	$41.6 \cdot 10^{-3}(1 \pm 2.4\%)$	1.2%	
		$ V_{cb} $ excl.	$37.5 \cdot 10^{-3}(1 \pm 3.0\%_{\text{ex.}} \pm 2.7\%_{\text{th.}})$	1.8%	1.4%
		$ V_{ub} $ incl.	$4.47 \cdot 10^{-3}(1 \pm 6.0\%_{\text{ex.}} \pm 2.5\%_{\text{th.}})$	3.4%	3.0%
		$ V_{ub} $ excl. (had. tag.)	$3.52 \cdot 10^{-3}(1 \pm 10.8\%)$	4.7%	2.4%



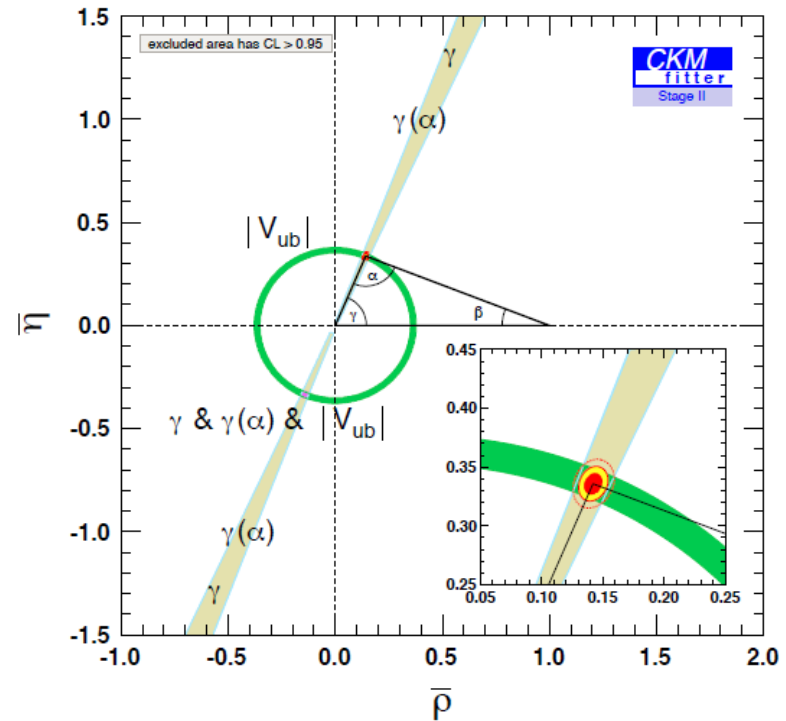
UT (ϕ_3 and $|V_{ub}|$ only)

- Loop ($\phi_1, \phi_2, \Delta m_d$) の測定は現在でも比較的良い精度
- Tree ($\phi_3, |V_{ub}|$) の測定が特に重要
 - $|V_{ub}|$ の誤差を 1/3、 ϕ_3 の誤差を 1/8 に出来る

2013



~2025



B^0 - B^0 bar Mixing の中の新物理

$$M_{12}^{d,s} = (M_{12}^{d,s})_{\text{SM}} \times (1 + h_{d,s} e^{2i\sigma_{d,s}})$$

- $\phi_1, \phi_2, \Delta m_d, a^{\text{SL}}_d$
- Treeでの新物理は無視できると仮定
- 現在 $O(0.1)$ の新物理は許されているが、10年後には棄却できる
 - $h_d < 0.07$ @95%CL

$$\frac{C_{ij}^2}{\Lambda^2} (\bar{q}_{i,L} \gamma^\mu q_{j,L})^2$$

$$h \simeq 1.5 \frac{|C_{ij}|^2}{|\lambda_{ij}^t|^2} \frac{(4\pi)^2}{G_F \Lambda^2} \simeq \frac{|C_{ij}|^2}{|\lambda_{ij}^t|^2} \left(\frac{4.5 \text{ TeV}}{\Lambda} \right)^2$$

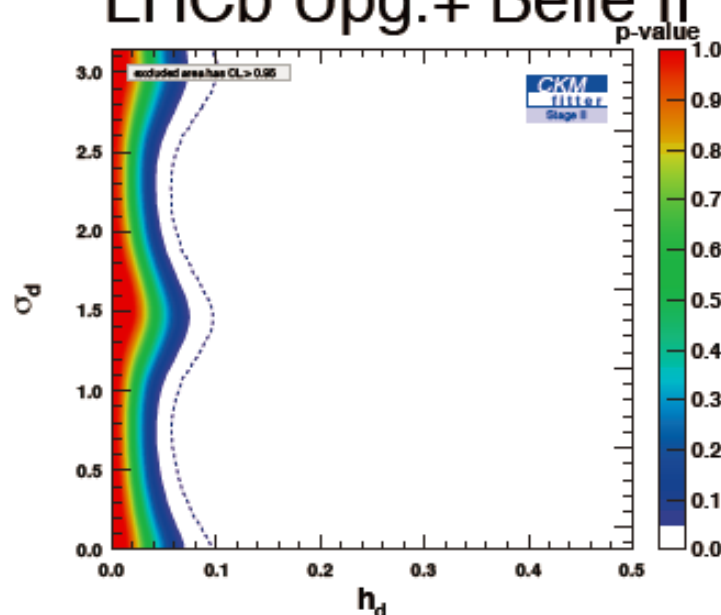
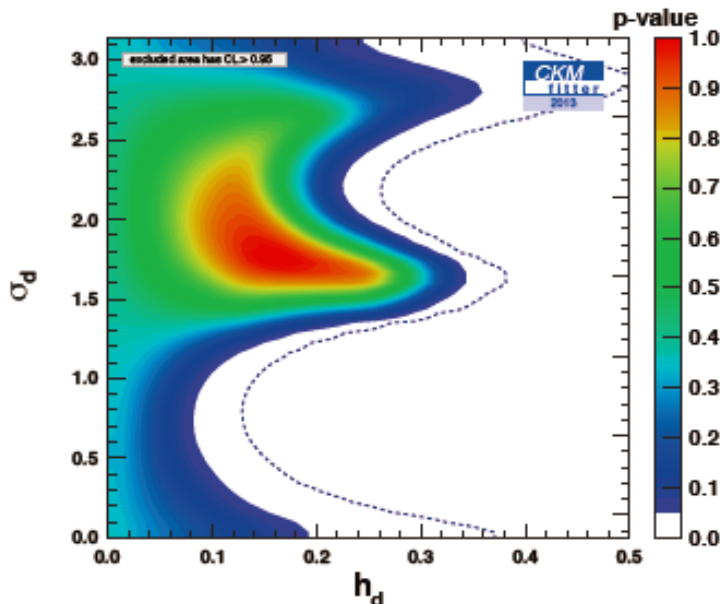
$$\sigma = \arg(C_{ij} \lambda_{ij}^{t*}),$$

Couplings	NP loop order	Scales (in TeV) probed by	
		B_d mixing	B_s mixing
$ C_{ij} = V_{ti} V_{tj}^* $ (CKM-like)	tree level	17	19
	one loop	1.4	1.5
$ C_{ij} = 1$ (no hierarchy)	tree level	2×10^3	5×10^2
	one loop	2×10^2	40

~2025

LHCb Upg.+ Belle II

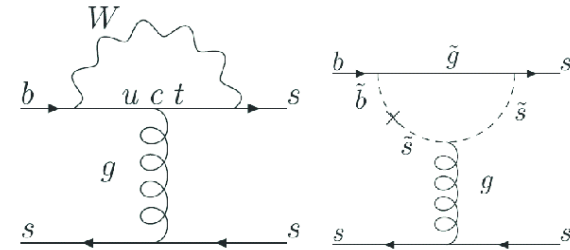
2013



Penguin 崩壞

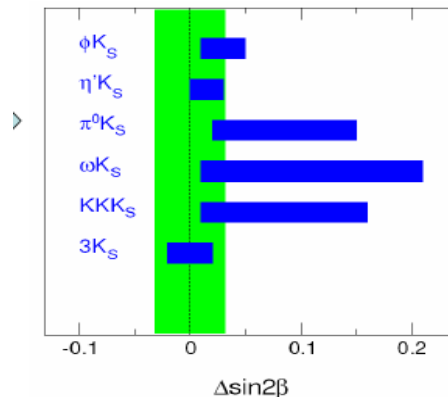
$b \rightarrow sq\bar{q}$ 崩壊での時間に依存したCPV

- $b \rightarrow s$ の QCD penguin
 - SMでは時間に依存したCPV (TCPV) $\sin 2\phi_1^{\text{eff}}$ は $B \rightarrow J/\psi K^0$ で測定された $\sin 2\phi_1$ とほぼ同じ
 - $\sin 2\phi_1$ からずれたら新物理の発見



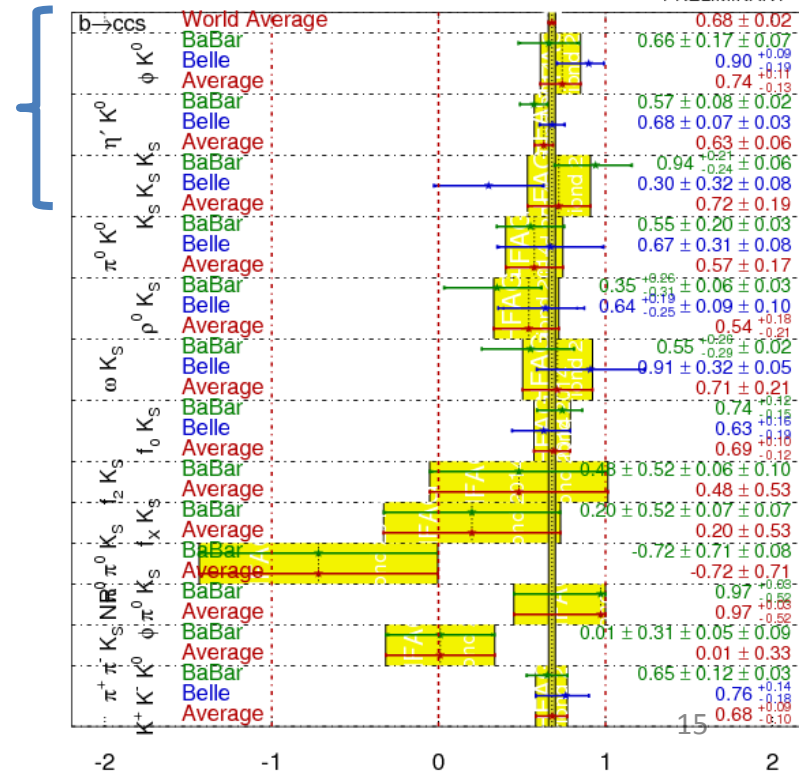
- Decay modes
 - $B \rightarrow \phi K_S$
 - $B \rightarrow \eta' K_S$
 - $B \rightarrow K_S K_S K_S$
 - $\sim 2\%$ の理論誤差

some of recent QCDF estimates
 $\sin 2\beta^{\text{eff}} - \sin 2\beta$



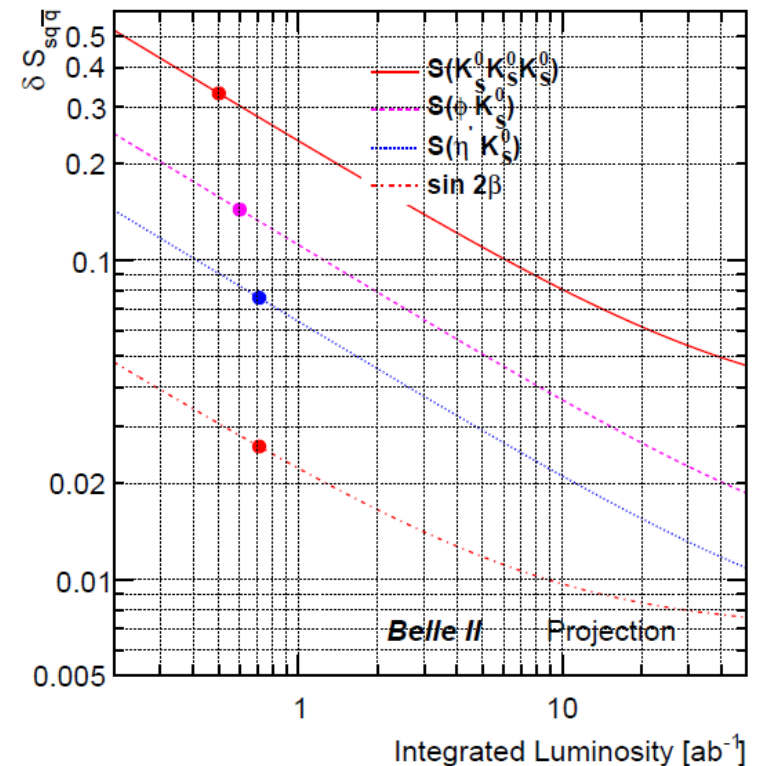
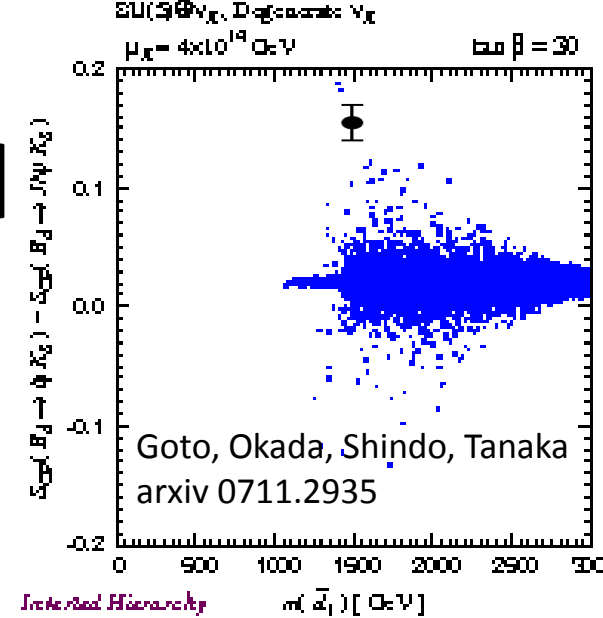
- 現在の測定は大きな誤差の範囲で $B \rightarrow J/\psi K^0$ と一致

$$\sin(2\beta^{\text{eff}}) \equiv \sin(2\phi_1^{\text{eff}}) \quad \text{HFAG Moriond 2014 PRELIMINARY}$$



TCPV in $b \rightarrow sq\bar{q}$ @ Belle II

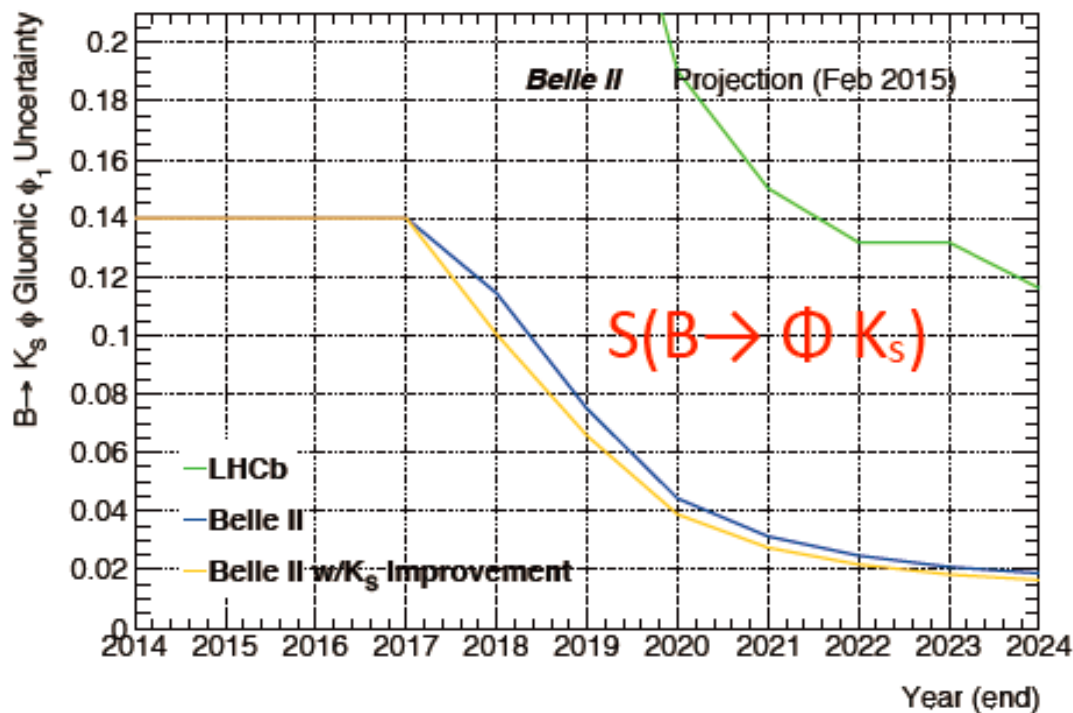
- 誤差は統計で決まっているので大体7倍改善
- 理論誤差 ~ 0.02 と同程度
 - $B \rightarrow K_S K_S K_S$ 以外
- 新物理模型に強い制限
 - SU(5) SUSY GUT + degenerate ν_R



Mode	5 ab^{-1}		50 ab^{-1}	
	$\sigma(\mathcal{S})$	$\sigma(\mathcal{A})$	$\sigma(\mathcal{S})$	$\sigma(\mathcal{A})$
$\eta' K^0$	0.028	0.020	0.011	0.009
ϕK_S^0	0.053	0.070	0.018	0.023
$K_S K_S K_S$	0.101	0.064	0.033	0.021

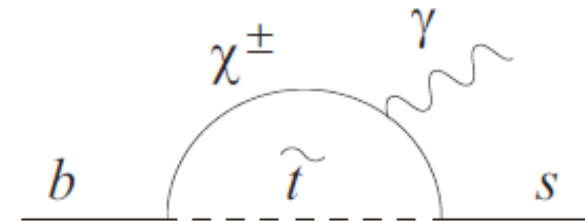
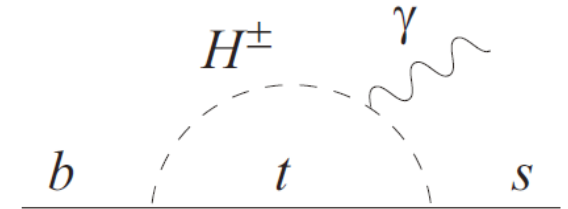
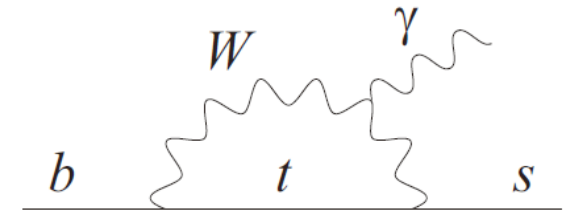
$B \rightarrow \phi K_s$ LHCbとの比較

- LHCb は K_s を再構成するのが不得手
 - K_s が tracking detector の外で崩壊する事が多々ある
 - $\phi \rightarrow K^+ K^-$ は opening angle が小さいから vertex を測定しにくい
 - Effective flavor tagging efficiency が Belle の 1/10ぐらい



BF($B \rightarrow X_s \gamma$)

- 標準模型では top-W loop
- 2HDM type-II では charged Higgs-top loop が可能
 - 標準模型 amp. に対して constructive
 - ほとんど $\tan \beta$ に寄らない。
- SUSY だと chargino-stop loop が可能
 - Constructive か destructive かは SUSY の parameter 領域による

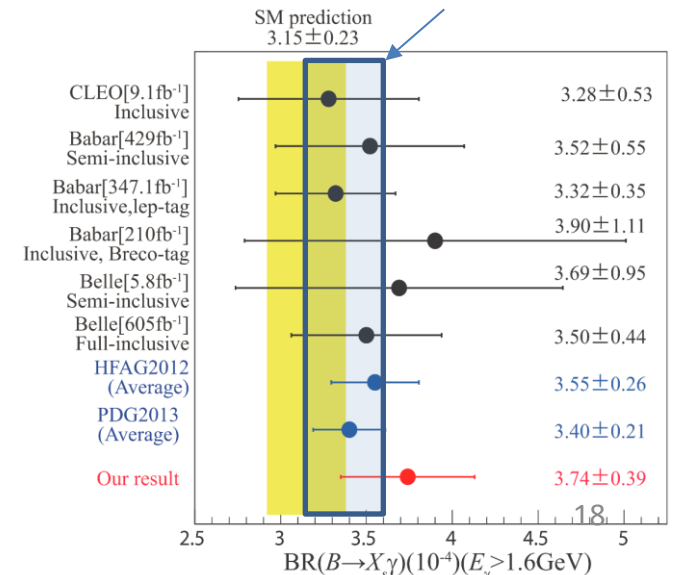


- Belle, Babar, CLEO によって精密に測定されており、理論の予言と一致している

$$\mathcal{B}_{s\gamma}^{\text{exp}} = (3.43 \pm 0.21 \pm 0.07) \times 10^{-4}$$

$$\mathcal{B}_{s\gamma}^{\text{SM}} = (3.36 \pm 0.23) \times 10^{-4}$$

Misiak et al



Limit on 2HDM type-II

- 現在の実験の World Average と理論
予言は両方とも 7% 程度の誤差

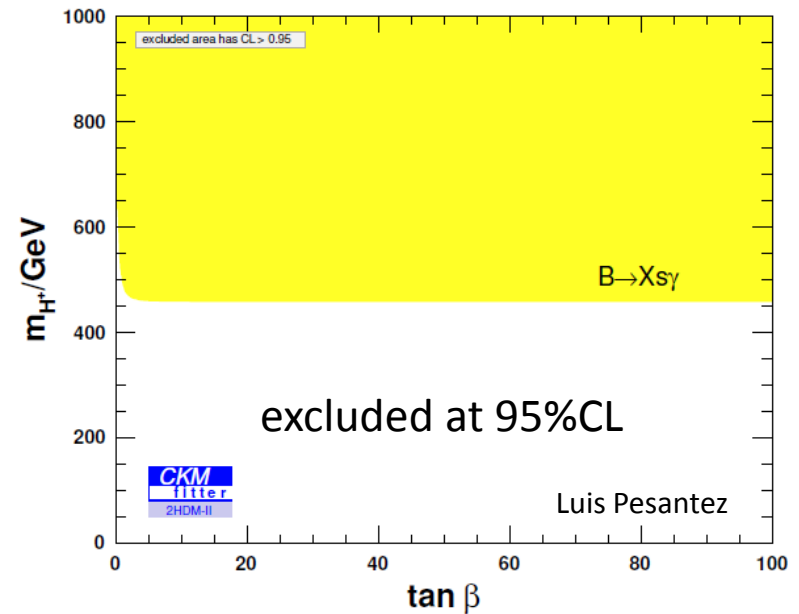
$$\mathcal{B}_{s\gamma}^{\text{exp}} = (3.43 \pm 0.21 \pm 0.07) \times 10^{-4}$$

$$\mathcal{B}_{s\gamma}^{\text{SM}} = (3.36 \pm 0.23) \times 10^{-4}$$

for $E_0 = 1.6 \text{ GeV}$

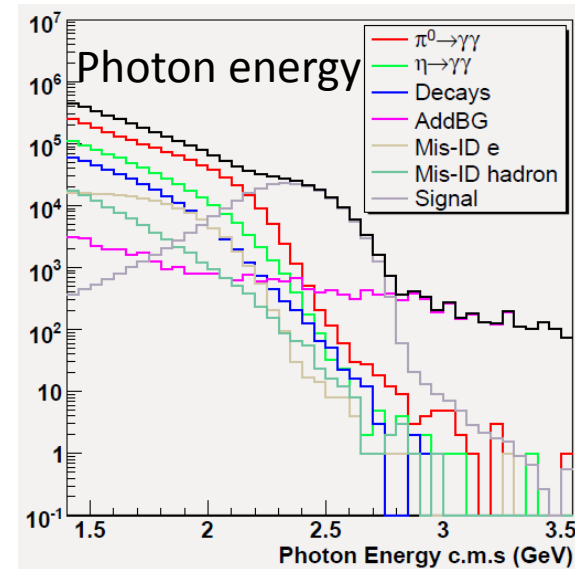
- 2HDMでのCharged Higgs の質量に
対して強い制限を与える

$$M_{H\pm} > 480 \text{ GeV}$$



BF($B \rightarrow X_s \gamma$) @ Belle II

- 最も誤差を抑える方法は **photon しか見ない解析**
- 将来的な誤差
 - 実験は系統誤差が支配的だが $E_\gamma > 1.9\text{GeV}$ であれば4%以下まで押さえられる
 - 理論と比較するために $E_\gamma > 1.6\text{ GeV}$ に外挿しなくてはならないが、その誤差は 1% 以下
 - 新物理は photon spectrum を変えない
 - 理論は4%まで減らせる
 - Misiak Group の人によると



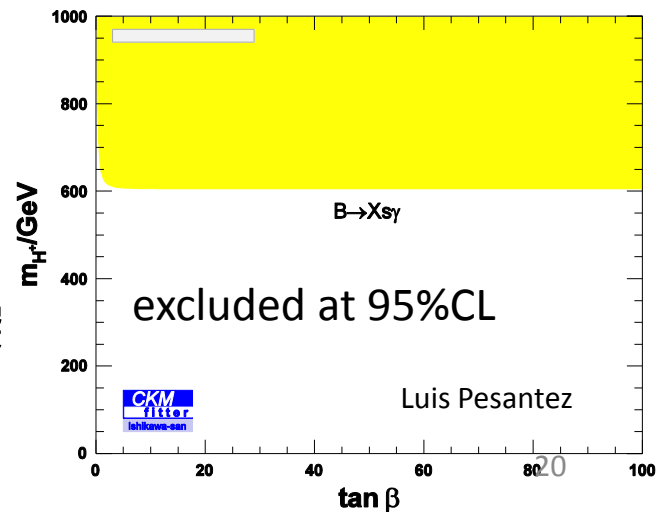
Belle results

	BF($B \rightarrow X_s \gamma$) (10^{-4})			
$E_{\gamma\text{-Low}}^B$ [GeV]	1.70	1.80	1.90	2.00
Value	3.45	3.30	3.21	3.02
\pm statistical	0.15	0.13	0.11	0.10
\pm systematic	0.40	0.23	0.16	0.11

- 仮に実験と理論の中心値が同じであれば

$$M_{H^+} > 600\text{GeV}$$

- LHCでは制限が難しい moderate $\tan\beta \sim 7$ 付近を探索できる



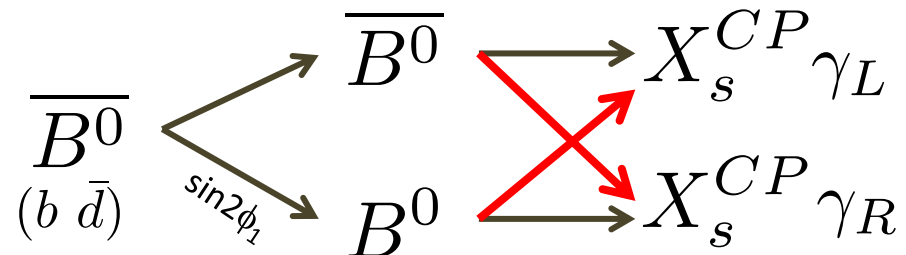
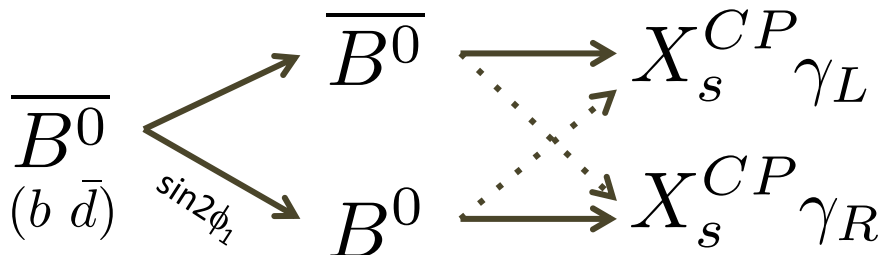
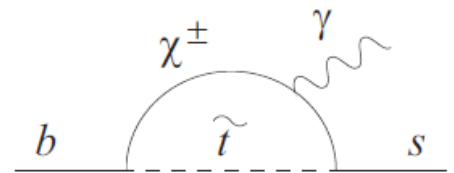
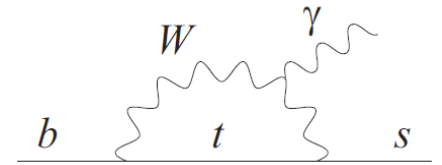
Photon Polarization in $b \rightarrow s \gamma$

- SMでは光子は左巻き
 - 右巻きは $O(m_s/m_b)$ で抑制
- 右巻きカレントを持つ新物理があったら光子の偏極を変える
 - LRSM, SUSY etc.
- 4つの光子の偏極測定方法
 - TCPV in $B \rightarrow f_{CP} \gamma$
 - A_{UD} in $B \rightarrow K_1(K\pi\pi)\gamma$
 - Very low q^2 analysis in $B \rightarrow K^* e e$
 - Photon conversion
 - Opening angle が小さいのでものすごく薄く軽い detector が必要

TCPV in $B^0 \rightarrow K_s \pi^0 \gamma$

- 右巻光子があり、Hadronic system が CP の eigenstate だと、干渉が起こり **大きな時間依存 CPV** が起こる

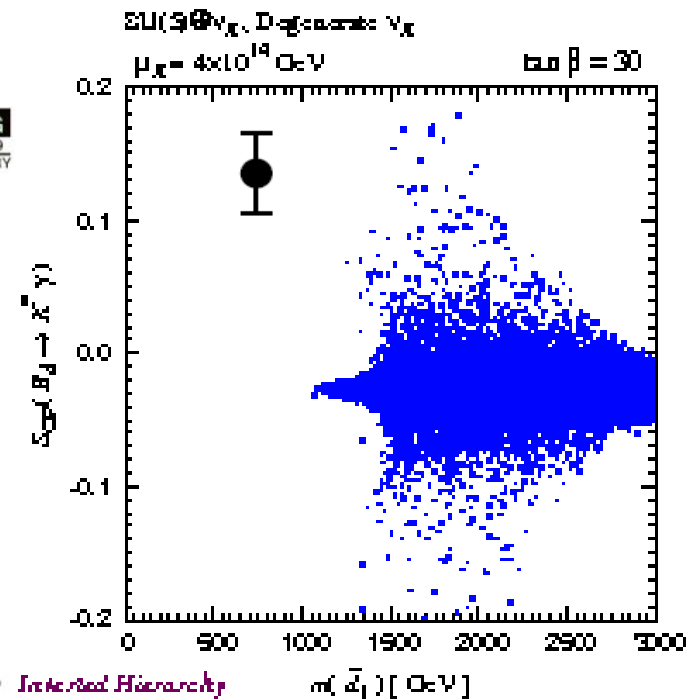
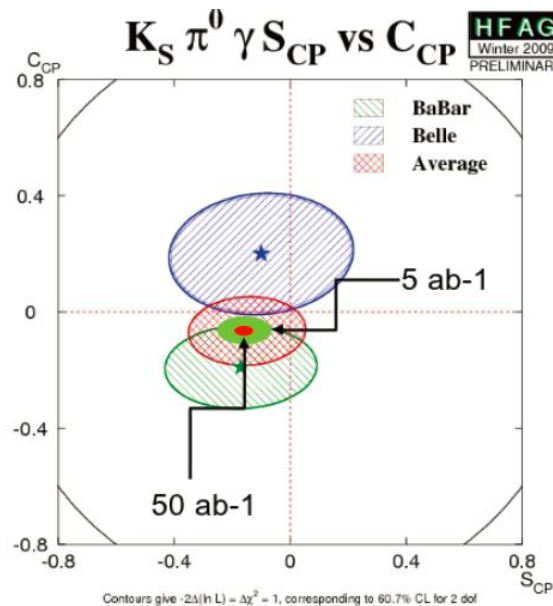
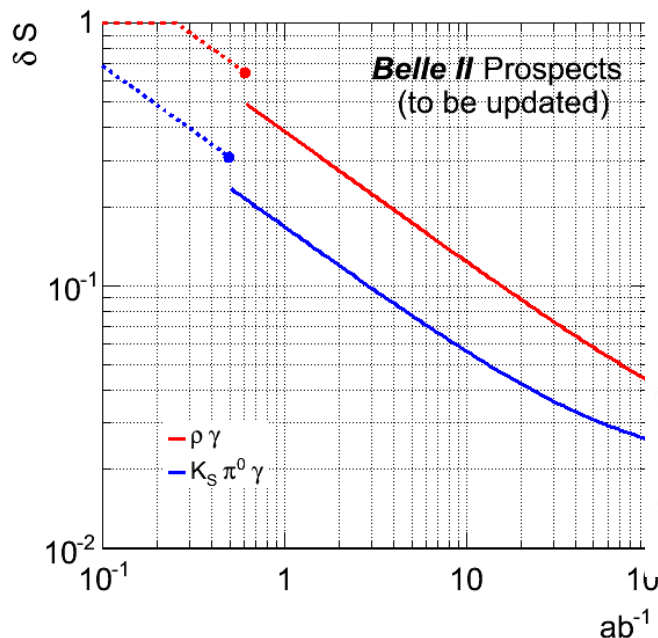
標準模型 $|S_{CP}| \approx \frac{2m_s}{m_b} \sin 2\phi_1 \sim \text{a few \%}$



TCPV in $B^0 \rightarrow K_S \pi^0 \gamma$ at Belle II

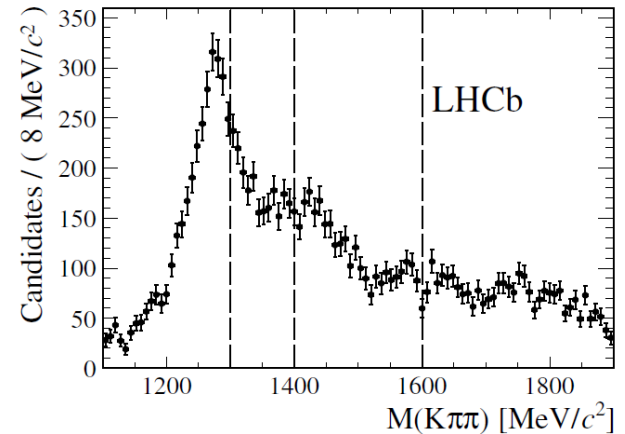
- 理論誤差 ~ 0.03 と同程度で測定
- 新物理模型に強い制限
 - SU(5) SUSY GUT + degenerate ν_R

Mode	5 ab^{-1}	50 ab^{-1}
$K_S \pi^0 \gamma$	0.11	0.03
$\rho^0 \gamma$	0.23	0.06



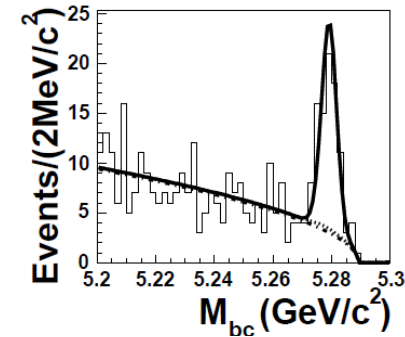
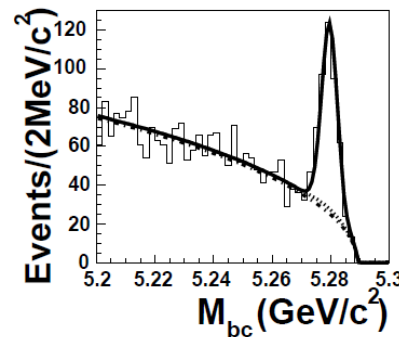
$B \rightarrow K\pi\pi\gamma$: Towards A_{UD}

- LHCb $3\text{fb}^{-1}@7\text{TeV}+8\text{TeV}$
 - 14000 $B^+ \rightarrow K^+\pi^-\pi^+\gamma$
 - for $M_{K\pi\pi} < 1.9\text{GeV}$

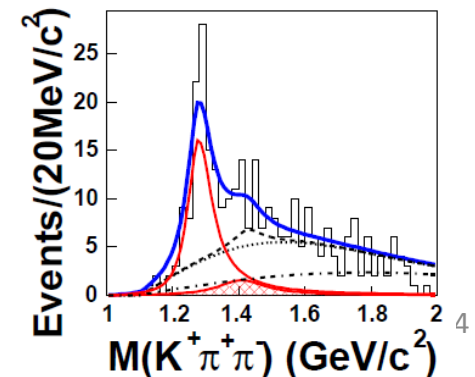


[Heyoung Yang, et al., PRL 94, 091601\(2005\)](#)

- Belle 140fb^{-1}
 - 318 $B^+ \rightarrow K^+\pi^-\pi^+\gamma$
 - 68 $B^0 \rightarrow K^0\pi^-\pi^+\gamma$
 - for $M_{K\pi\pi} < 2.0\text{GeV}$



K1(1270) enriched sample
 $0.6 \text{ GeV}/c^2 < M_{\pi\pi} < 0.9 \text{ GeV}/c^2$



A_{UD} の大きさ

- π^0 を含むモードは A_{UD} が大きい
- 三つの経路があるので、Dalitz平面上での干渉が大きい

$$\begin{array}{l}
 K_{\text{res}}^+ \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} K^{*+}\pi^0 \\ K^{*0}\pi^+ \\ \rho^+K^0 \end{array} \right\} \rightarrow K^0\pi^+\pi^0 \\
 \\
 K_{\text{res}}^0 \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} K^{*+}\pi^- \\ K^{*0}\pi^0 \\ \rho^-K^+ \end{array} \right\} \rightarrow K^+\pi^-\pi^0 \\
 \\
 \left\{ \begin{array}{l} K^{*0}\pi^+ \\ \rho^0K^+ \end{array} \right\} \rightarrow K^+\pi^+\pi^- \quad \leftarrow \text{LHCb} \\
 \\
 \left\{ \begin{array}{l} K^{*+}\pi^- \\ \rho^0K^0 \end{array} \right\} \rightarrow K^0\pi^+\pi^-
 \end{array}
 \quad \left. \vphantom{\begin{array}{l} K_{\text{res}}^+ \\ K_{\text{res}}^0 \\ \left\{ \begin{array}{l} K^{*0}\pi^+ \\ \rho^0K^+ \end{array} \right\} \rightarrow K^+\pi^+\pi^- \\ \left\{ \begin{array}{l} K^{*+}\pi^- \\ \rho^0K^0 \end{array} \right\} \rightarrow K^0\pi^+\pi^- \end{array} \right\} \text{ Belle II}$$

$$\mathcal{A}_{\text{up-down}} \left(\begin{array}{l} B^+ \rightarrow (K^0\pi^+\pi^0)_{K_1(1400)}\gamma \\ B^0 \rightarrow (K^+\pi^-\pi^0)_{K_1(1400)}\gamma \end{array} \right) = (0.33 \pm 0.05)\lambda_\gamma$$

$$\mathcal{A}_{\text{up-down}} \left(\begin{array}{l} B^+ \rightarrow (K^+\pi^-\pi^+)_{K_1(1400)}\gamma \\ B^0 \rightarrow (K^0\pi^+\pi^-)_{K_1(1400)}\gamma \end{array} \right) \approx 0.07\lambda_\gamma$$

- $K_1(1400)$ だと π^0 を含むモードの A_{UD} の大きさは含まないモードの4.7倍 \rightarrow 22倍の統計に匹敵

単純な A_{UD} への感度の比較

- Belle では $K^0\pi\pi$ と $K\pi\pi^0$ が同じぐらいの数測定出来る
- π^0 モードが22倍の統計パワーを持つ事を考慮に入れる
 - $\delta N_s/N_s=765$ for Belle II
 - $\delta N_s/N_s=403$ for LHCb

現在[event] 2024年[event]	$K^+\pi^-\pi^+\gamma$	$K^0\pi^-\pi^+\gamma$	$K^+\pi^-\pi^0\gamma *22$	合計
LHCb	13876 ± 153 280000 ± 683	-- --	-- --	13876 ± 153 280000 ± 683
Belle II	318 ± 22 114000 ± 420	68 ± 10 24000 ± 189	$\sim 1496 \pm 42$ 528000 ± 800	1882 ± 46 666000 ± 870

- 実際には resonance の分離や、up event と down event の cross-feed の効果も考慮に入れなくてははいけない

Isospin Violation in $B \rightarrow \rho \gamma$

- Δ_ρ Isospin Violation が理論の予言より大きい？

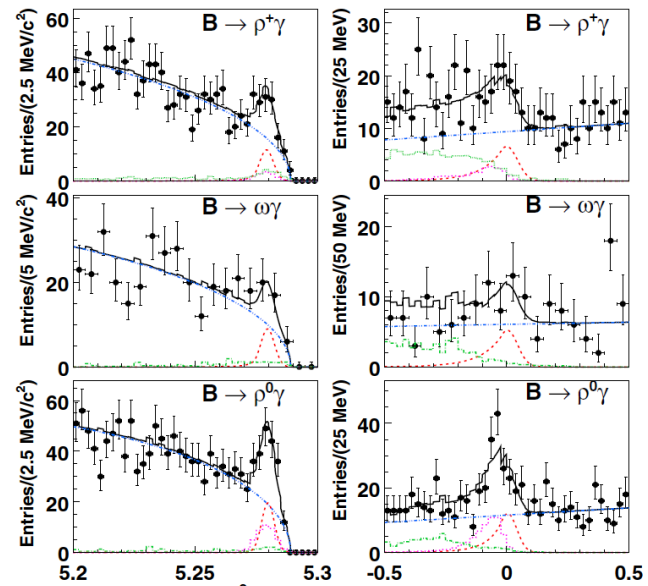
$$\Delta_\rho = \frac{\Gamma(B^- \rightarrow \rho^- \gamma)}{2\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow \rho^0 \gamma)} - 1$$

– $\sim 2.5\sigma$ deviation

- 現在の系統誤差は以下が主だが Belle IIでは減らせる

- シグナルとBGの shape
- Peaking BG

- 多分 B^+/B^0 production ratio f_{+}/f_{00} が主要な誤差となる

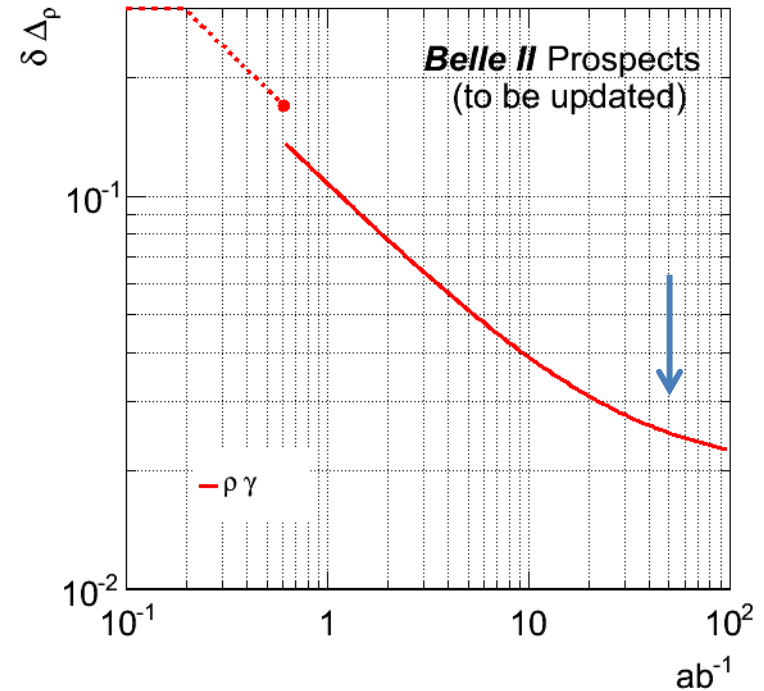


prediction	Δ_ρ [%]
Ali Lunghi	$+4^{+14}_{-7}$ %
Lyon Zwicky	-10 ± 6 %
Ball Jones Zwicky	-5.4 ± 3.9 % if $\phi_3 = 60\text{deg}$
Beneke, Feldmann, Seidel	-4.6 ± 7 %

measurement	Δ_ρ
Babar 423fb^{-1}	$-0.43^{+0.25}_{-0.22} \pm 0.10$
Belle 605fb^{-1}	$-0.48^{+0.21+0.08}_{-0.19-0.09}$
Average	$-0.46^{+0.17}_{-0.16}$ ²⁷

Prospects of $\delta\Delta_\rho$

- もし中央値 -0.46 がそのままであれば, **isospin violation in $B \rightarrow \rho\gamma$ を $\sim 1.4\text{ab}^{-1}$ で発見可能**
 - 実験誤差 ~ 0.09 .
- **新物理の発見には $\sim 3\text{ab}^{-1}$ 必要**
 - 実験誤差 ~ 0.06 .
 - 理論予言 $(-5 \pm 5)\%$
 - 実験初期に何か言える
- 50ab^{-1} ためると実験誤差は
 - $\delta\Delta_\rho \sim 0.024$



prediction	Δ_ρ [%]
Ali Lunghi	$+4^{+14}_{-7}\%$
Lyon Zwicky	$-10 \pm 6\%$
Ball Jones Zwicky	$-5.4 \pm 3.9\%$ if $\phi_3 = 60\text{deg}$
Beneke, Feldmann, Seidel	$-4.6 \pm 7\%$

$R_K, R_{K^*},$ and R_{Xs}

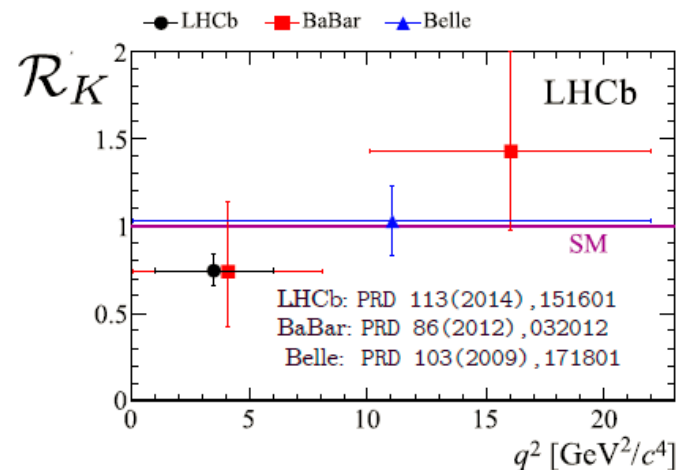
- LHCb

$$R_K = 0.745_{-0.074}^{+0.090} \pm 0.036$$

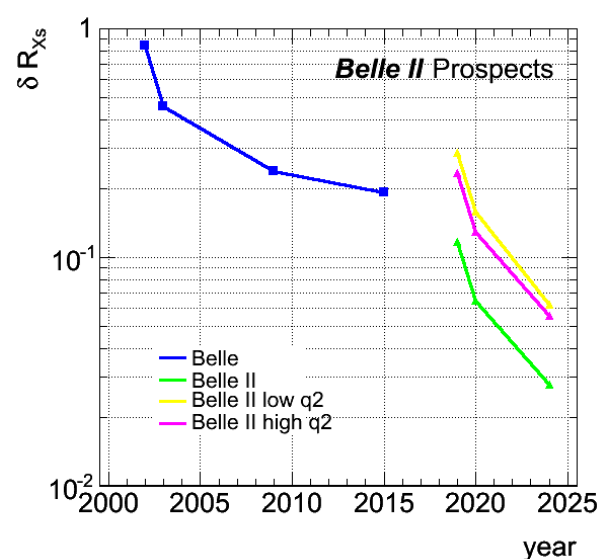
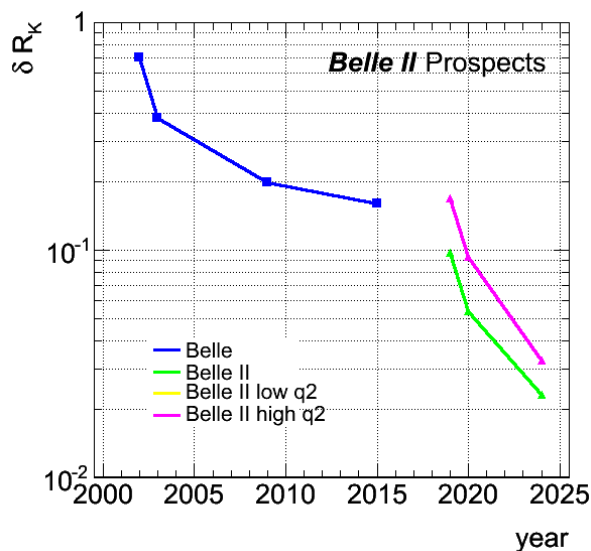
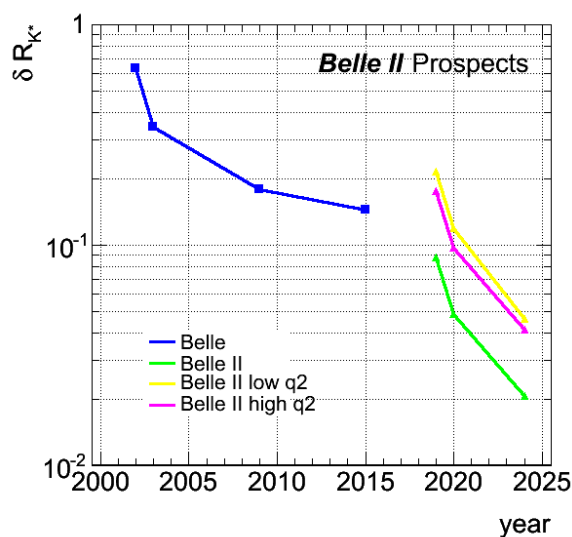
- 電子モードはそれほど得意じゃない
- High q^2 は無理

- Belle II

- 電子モードとミュオンモードの効率は同程度
- Low and high q^2 両方可能

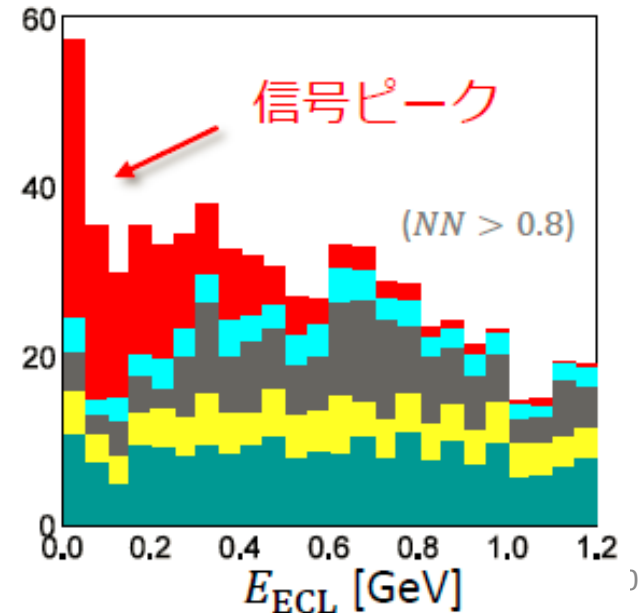
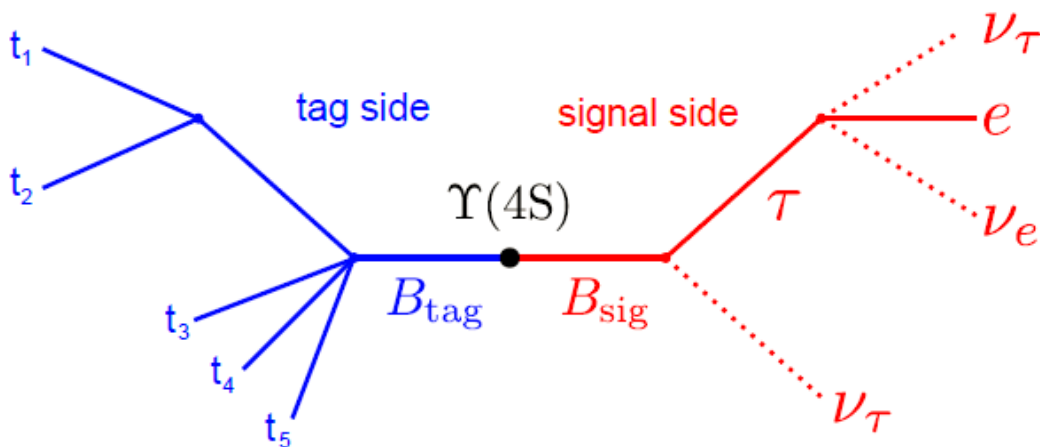


Phys. Rev. Lett. 113, 151601 (2014)



Full Reconstruction

- 終状態に複数の ν を含むモード
 - Bの質量を測定出来ないため単純には再構成できない
- Full reconstruction tagging を使う
 - 逆側のB(tag side)を再構成する。
 - 残りの粒子が signal event から来ている事を要求
 - カロリーメータに余分なエネルギーが無い



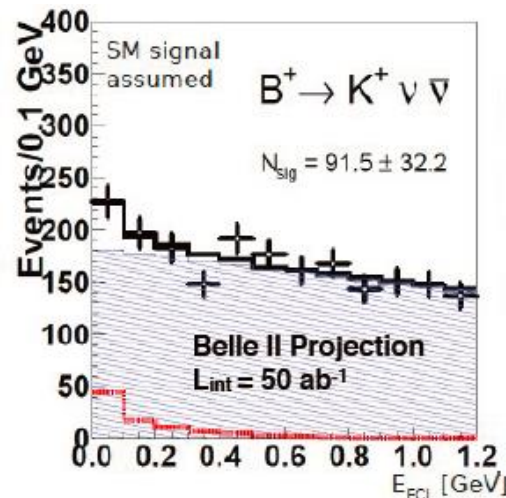
$B \rightarrow K^{(*)} \nu \bar{\nu}$

- $B \rightarrow K^* \mu \mu$ と違い Charm loop の影響は無い。
- 理論の予言は clean $\sim 11\%$

$$\begin{aligned} \text{BR}(B^+ \rightarrow K^+ \nu \bar{\nu})_{\text{SM}} &= (3.98 \pm 0.43 \pm 0.19) \times 10^{-6}, & \text{誤差はFFとparametric} \\ \text{BR}(B^0 \rightarrow K^{*0} \nu \bar{\nu})_{\text{SM}} &= (9.19 \pm 0.86 \pm 0.50) \times 10^{-6}, \\ F_L^{\text{SM}} &= 0.47 \pm 0.03, \end{aligned}$$

Buras et al 1409.4557

- Belle からの外挿
 - 90 ± 30 event
 - 3σ ?



N_{sig} at Belle II $\sim 90 \pm 30$
based on Belle 2013
(hadronic tag only)

Full Reconstruction の改善

- 崩壊チャンネルを約1500から約5000に増やし、BDTでtuningした。
- Tag side efficiency が約3倍になった
- Semileptonic Tagging も使える
 - $B \rightarrow D^* l \nu$
- $B^0 \rightarrow K_s \nu \nu$ もcombine できる

Belle II で $B \rightarrow K^{(*)} \nu \nu$ は発見できる
>5 σ 以上(誤差20%以下)で測定出来る

10th BPAC P.Goldenzweig

Preliminary

Belle II

B^+ (hadronic) 0.78 %

B^0 (hadronic) 0.59 %

Belle I

• (using B2BII)

B^+ (hadronic) 0.39 %

B^0 (hadronic) 0.28 %

Full Reconstruction

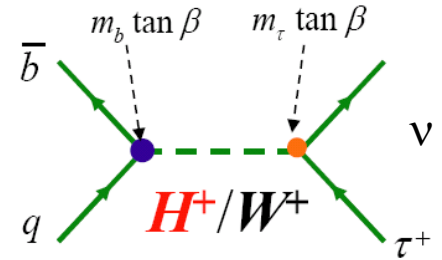
B^+ (hadronic) 0.28 %

B^0 (hadronic) 0.19 %

• T. Keck @fixed purity

τ を終状態に持つB崩壊

$B \rightarrow \tau \nu$ and $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$



- $B \rightarrow \tau \nu$

- SM は m_τ で helicity suppress

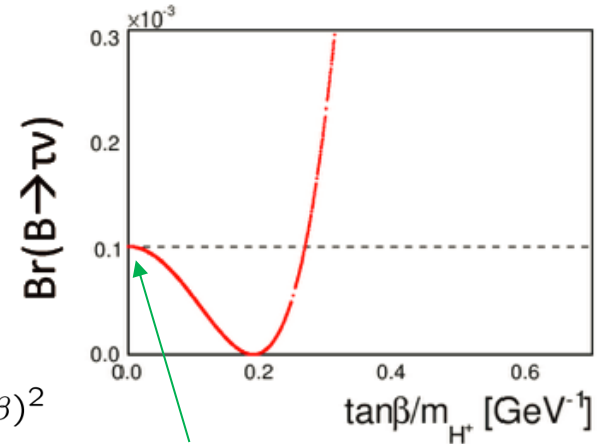
$$\mathcal{B}(B \rightarrow \ell \nu) = \frac{G_F^2 m_B}{8\pi} m_\ell^2 \left(1 - \frac{m_\ell^2}{m_B^2}\right)^2 f_B^2 |V_{ub}|^2 \tau_B$$

- b も τ も重いので **Charged Higgs に敏感** In Type-II 2HDM

$$\mathcal{B}(B \rightarrow \tau \nu) = \mathcal{B}(B \rightarrow \tau \nu)_{SM} \times r_H$$

- Factor r_H は lepton flavor に寄らない
 - Charged Higgs との coupling も m_τ に比例
 - $B \rightarrow \mu \nu$ も重要

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

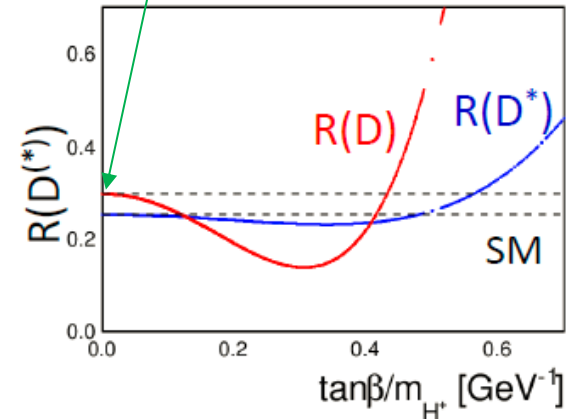
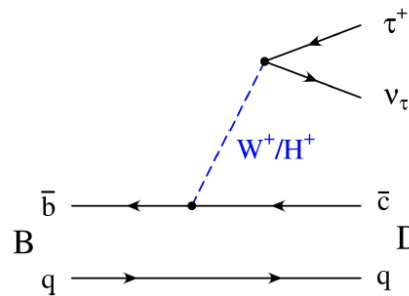


- $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$

- 同様に charged Higgs に敏感

$$R(D) = \frac{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow D \tau^- \bar{\nu}_\tau)}{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow D \ell^- \bar{\nu}_\ell)}$$

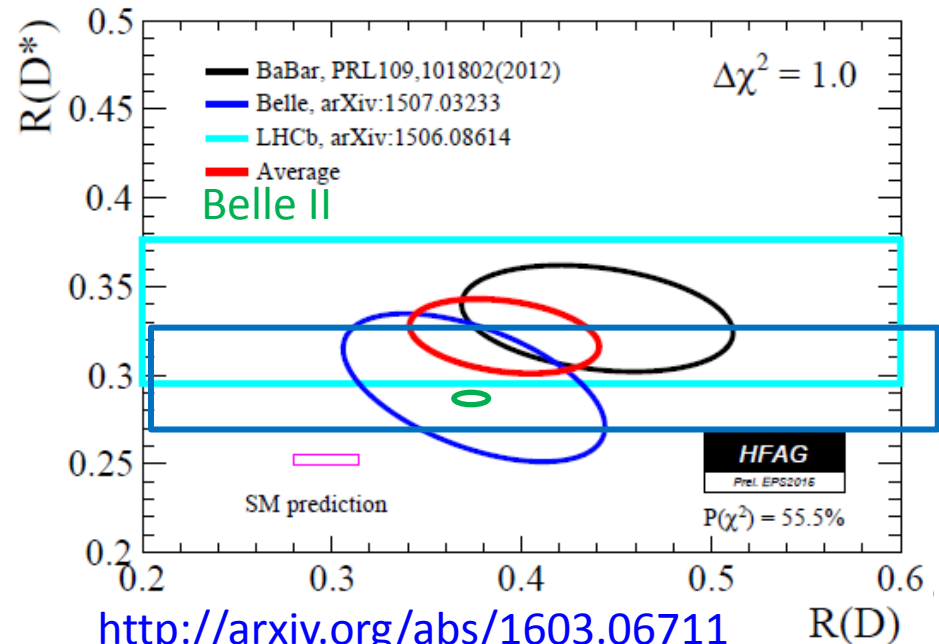
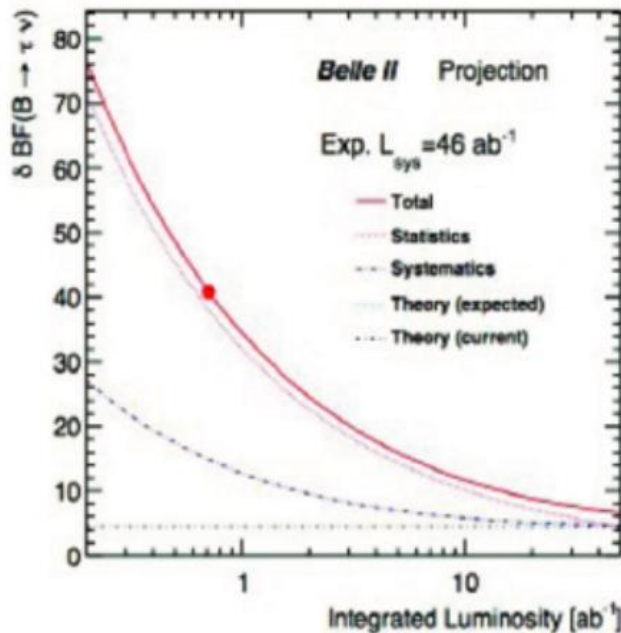
$$R(D^*) = \frac{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow D^* \tau^- \bar{\nu}_\tau)}{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow D^* \ell^- \bar{\nu}_\ell)}$$



$B \rightarrow \tau \nu$ and $B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu$ @ Belle II

	Statistical	Systematic (reducible, irreducible)	Total Exp
$B(B \rightarrow \tau \nu)$ (had. tagged)			
711 fb ⁻¹	38.0	(14.2, 4.4)	40.8
5 ab ⁻¹	14.4	(5.4, 4.4)	15.8
50 ab ⁻¹	4.6	(1.6, 4.4)	6.4
$B(B \rightarrow \tau \nu)$ (semileptonic tagged)			
711 fb ⁻¹	24.8	(18, ^{+6.0} _{-9.6})	^{+31.2} _{-32.2}
5 ab ⁻¹	8.6	(6.2, ^{+6.0} _{-9.6})	^{+12.2} _{-14.4}
50 ab ⁻¹	2.8	(2.0, ^{+6.0} _{-9.6})	^{+6.8} _{-10.2}

	Statistical	Systematic (reducible, irreducible)	Total Exp
$R(D)$			
423 fb ⁻¹	13.1	(9.1, 3.1)	16.2
5 ab ⁻¹	3.8	(2.6, 3.1)	5.6
50 ab ⁻¹	1.2	(0.8, 3.1)	3.4
$R(D^*)$			
423 fb ⁻¹	7.1	(5.2, 1.9)	9.0
5 ab ⁻¹	2.1	(1.5, 1.9)	3.2
50 ab ⁻¹	0.7	(0.5, 1.9)	2.1



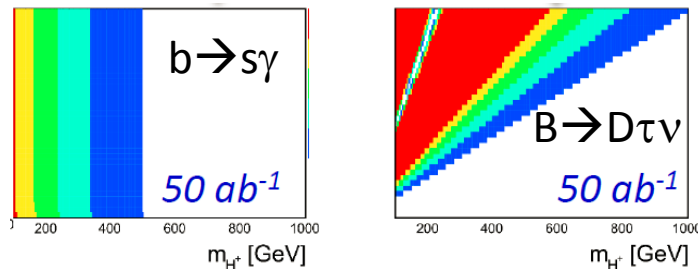
Combined Limit on 2HDM type-II

- Charged Higgs に敏感な以下を combine し、 m_H VS $\tan\beta$ に制限

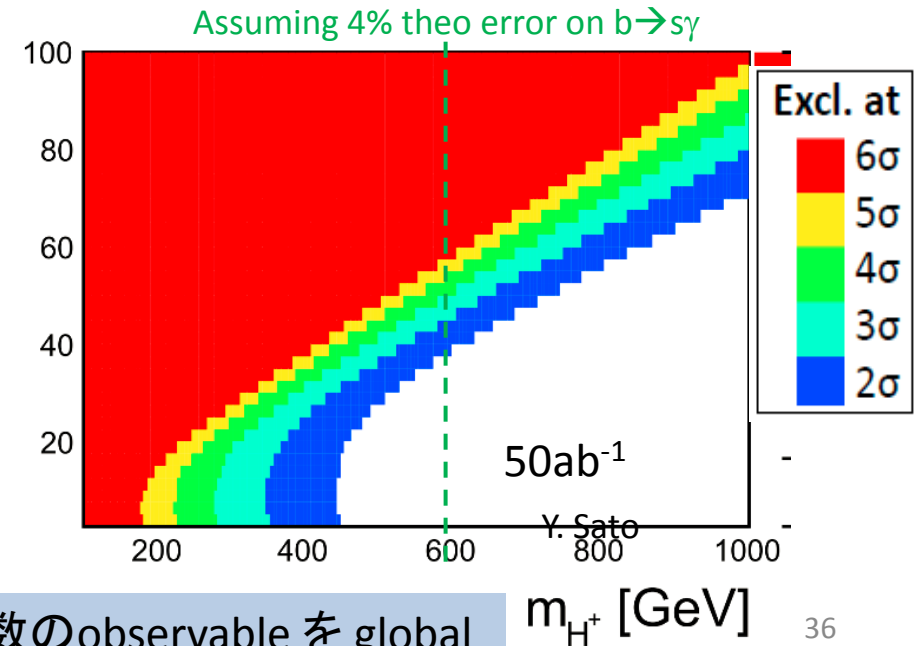
- $b \rightarrow s\gamma$
 - 理論誤差は将来改善
- $B \rightarrow \tau\nu$
 - 理論誤差は将来改善
- $B \rightarrow D^{(*)}\tau\nu$

	Exp.			Th.
	Now	5 ab^{-1}	50 ab^{-1}	Now
$B \rightarrow \tau\nu$	25%	10%	3%	-7+14%
$B \rightarrow D\tau\nu$	30%	11%	4%	4%
$B \rightarrow D^*\tau\nu$	19%	7%	2%	2%
$B \rightarrow X_s\gamma$	7%	5%	4%	7%

- SM consistent を仮定



$\tan\beta$

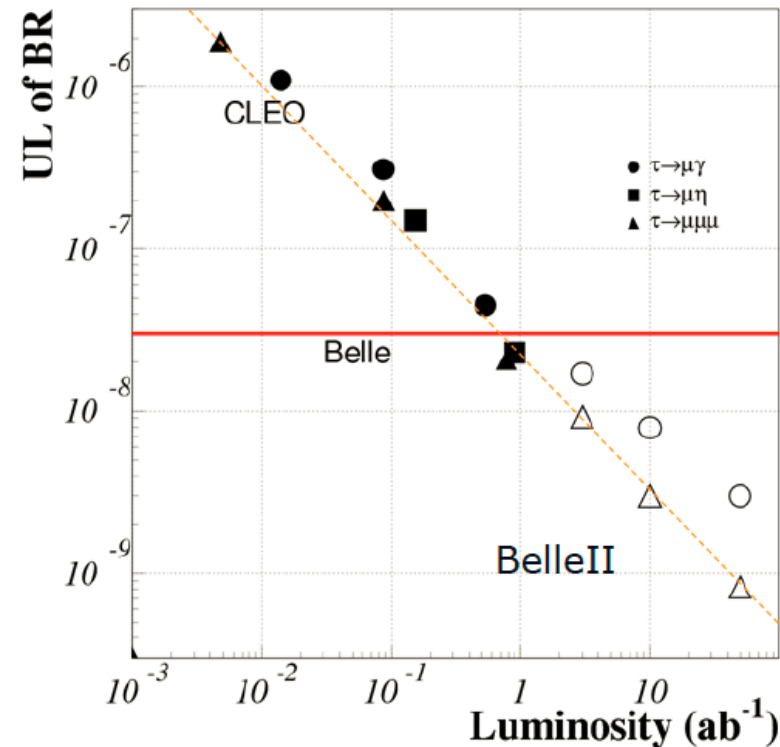


Belle II では理論屋と協力して多数のobservable を global fit して新物理に制限をかける事を遂行中です。

τ LFV

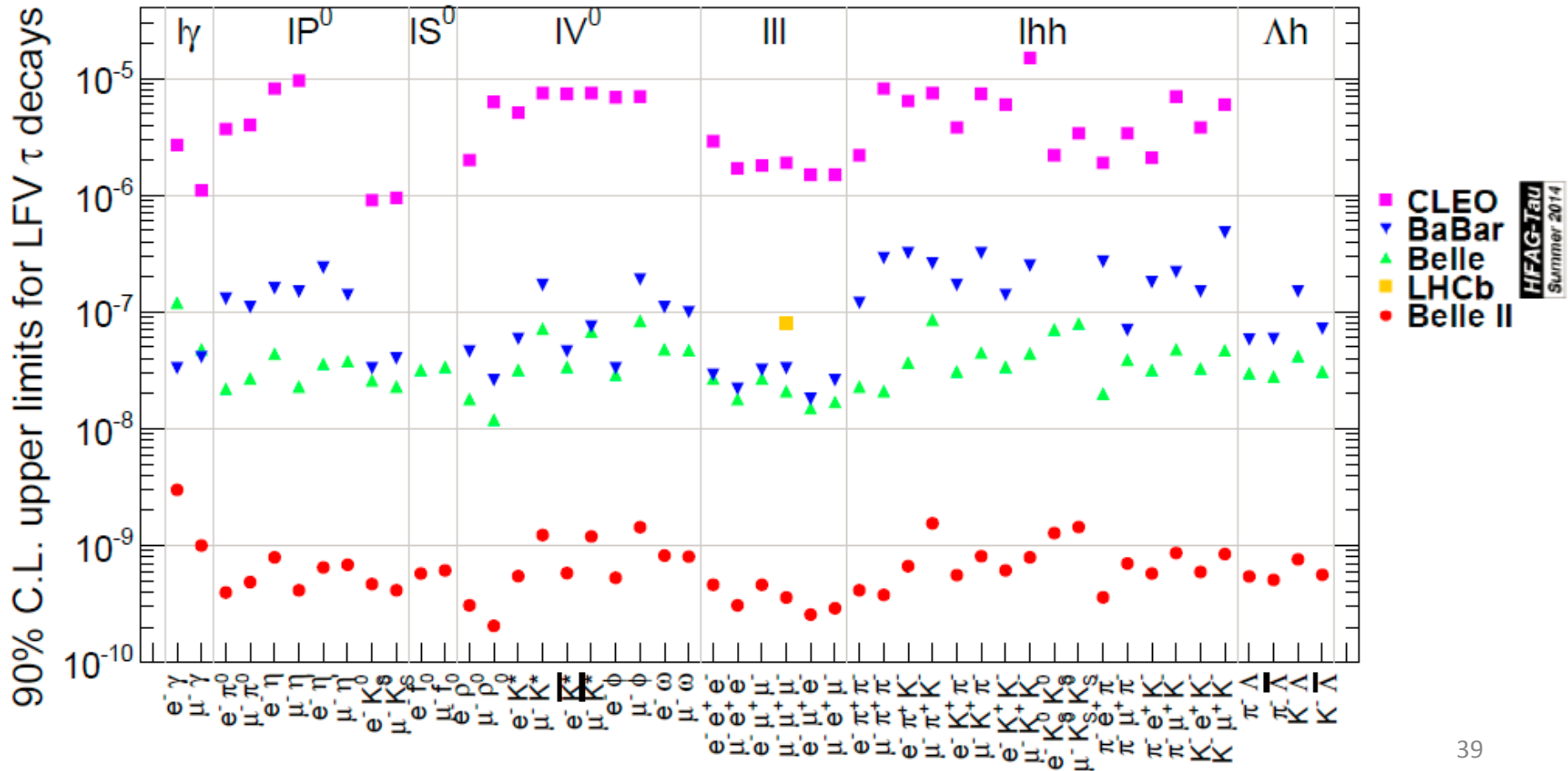
τ のLFV崩壊

- SuperKEKB は τ -Factory
 - $4.5 \times 10^{10} \tau^+ \tau^-$
- τ のLFV崩壊が発見されたら新物理
- $B(\tau \rightarrow \mu \gamma) < 2 \times 10^{-9}$
 - バックグラウンドをすでに被ってる
- $B(\tau \rightarrow \mu \mu \mu) < O(10^{-10})$
 - バックグラウンドフリー



LFV τ 崩壊のまとめ

- 48崩壊モード



その他

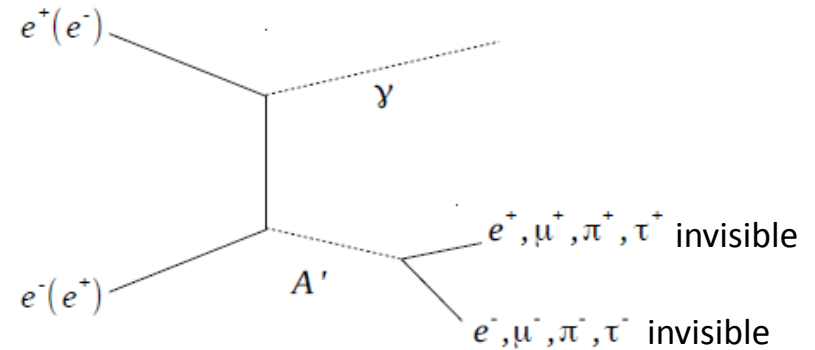
- Dark Photon
- Radiative Return

Single Photon Trigger

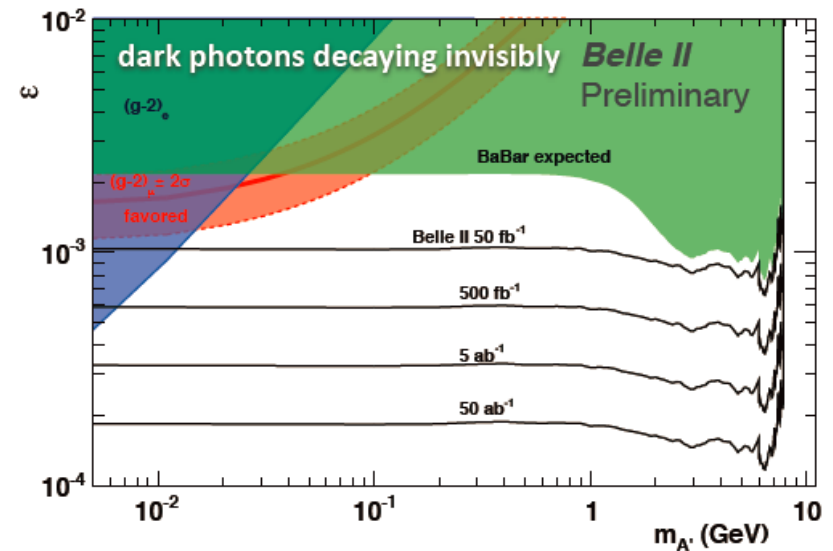
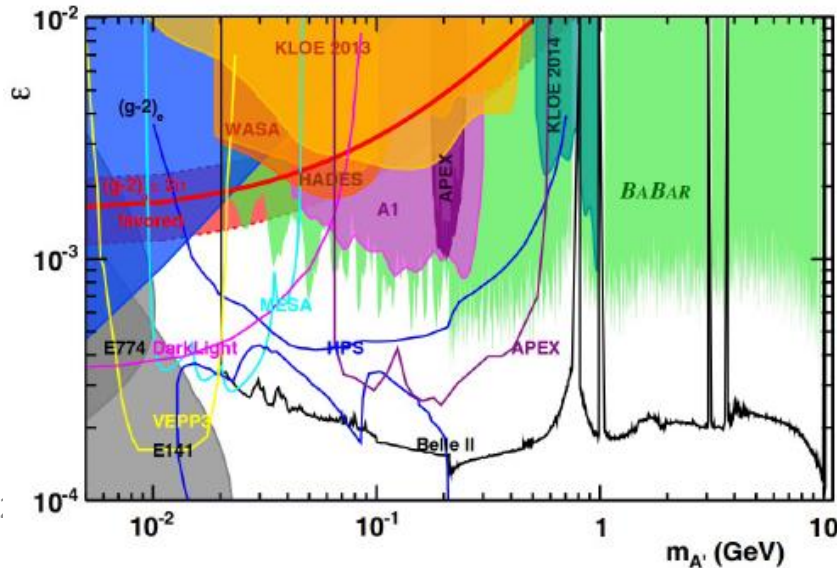
- Belle では single photon trigger が無かった
 - DAQ の思想がBabarより古かったので、レートが高い single photon trigger は入れられなかった
- Belle II では single photon trigger が入った事により以下の物理が可能
 - Dark Photon
 - Radiative Return $e^+e^- \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-$ etc
 - → Hadronic Vacuum Polarization for muon g-2

Dark Photon探索

- Extra U(1) Model
 - Dark photon A'
 - 暗黒物質候補
 - photon と kinetic mixing
 - $\varepsilon^2 = \alpha/\alpha_{EM}$
 - Babar より一桁改善



$$e^+e^- \rightarrow \gamma A' \rightarrow \gamma e^+e^-, \gamma \mu^+\mu^-, \text{ prompt}$$



Muon g-2

- BNLでの実験は理論と $>3\sigma$ のずれ
- 実験も理論予言も改善しなくてはならない
 - 実験 Fermilab, J-PARC
 - 理論 **HVP** \rightarrow radiative return から計算, LBLS \rightarrow lattice

$$a_{\mu}^{\text{SM}} \equiv \left(\frac{g-2}{2} \right)_{\mu} = a_{\mu}^{\text{QED}} + a_{\mu}^{\text{had,LO}} + a_{\mu}^{\text{had,NLO}} + a_{\mu}^{\text{weak}} \quad [\text{units in } 10^{-10}]$$

$\sigma^{\text{Exp}} = 6.3$

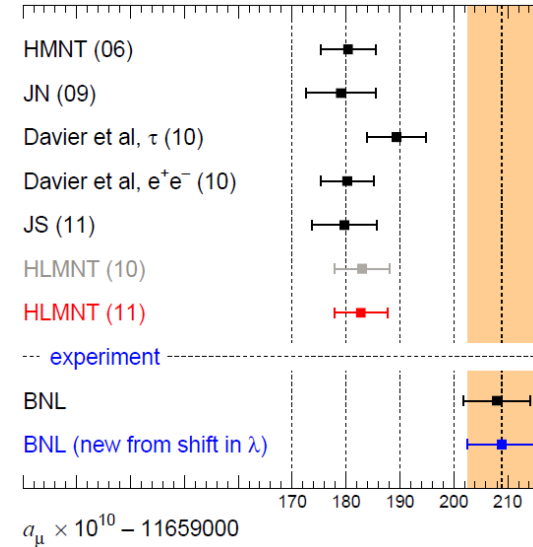
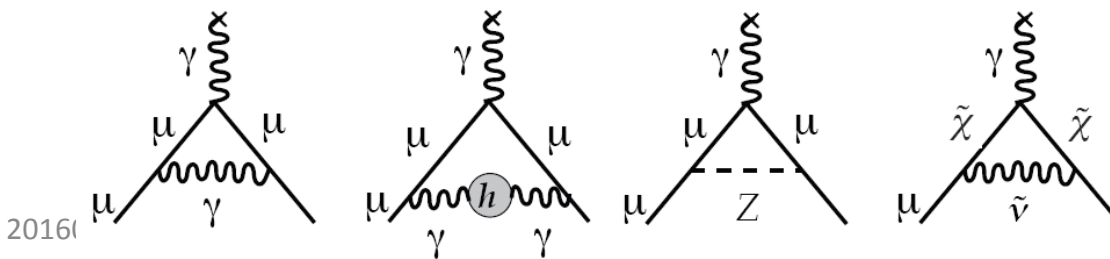
$\sigma_{\text{QED}}^{\text{SM}} \approx 0.02$

$\sigma_{\text{had,LO}}^{\text{SM}} \approx 4$

$\sigma_{\text{had,NLO}}^{\text{SM}} \approx \sigma_{\text{had,LBLS}}^{\text{SM}} \approx 3$

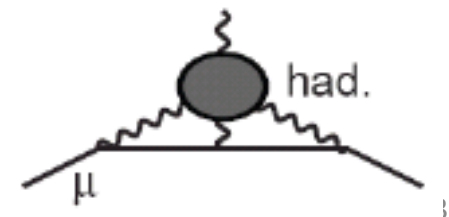
$\sigma_{\text{weak}}^{\text{SM}} \approx 0.2$

QED
Hadronic
Weak
SUSY... ?



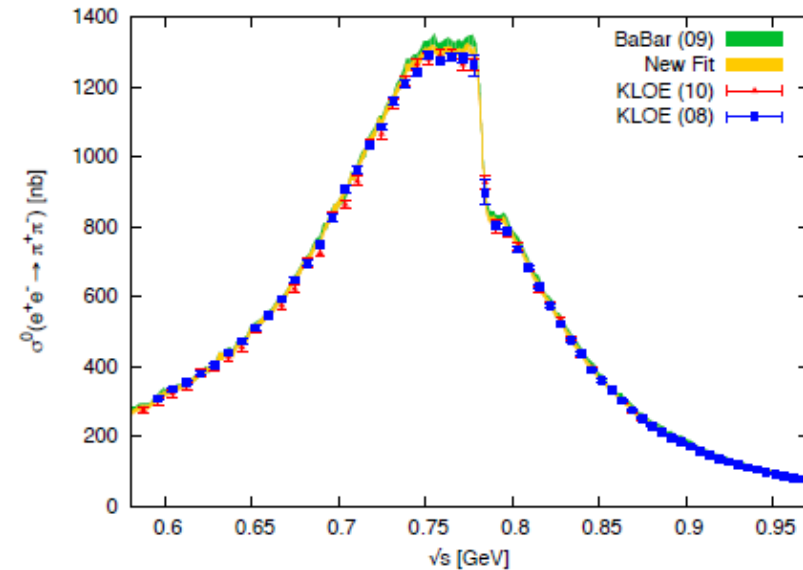
Hagiwara et al,
J. Phys. G 38 (2011) 085003

Light by light scattering



Radiative Return

- Muon $g-2$ で一番重要なのは $\pi^+\pi^-$
- 方法
 1. Energy Scan $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-$
 2. Radiative Return $e^+e^- \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma$
 - Luminosity の誤差は共通化できる
- **KLOE** と **Babar** で ρ peak はずれ
 - 誤差は systematic dominant, ρ 付近で 0.5%
 - Luminosity 0.34%
 - Pion-ID 0.24%
- Belle II では Babar と同程度の精度で測定可能。
- **KLOE** と **Babar** のずれを解決する。



まとめ

- 2018年にBelle II 実験は $\Upsilon(4S)$ 上で実験を開始し、2024年までに 50ab^{-1} のデータを取得する
- B, charm, τ から新物理を探索する
- 他にも Dark Photon, Hadronic Vacuum Polarization などの興味深い物理がある。
- ご期待ください。
 - LHC 13TeV の結果を踏まえた、新物理でのフレーバー測定量の予言があると嬉しいです。

backup

CKM Matrix and UT

- Unitarity から

$$V_{\text{CKM}}^\dagger V_{\text{CKM}} = \mathbb{1}$$

- この d 行 b 列を取ると

$$V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$$

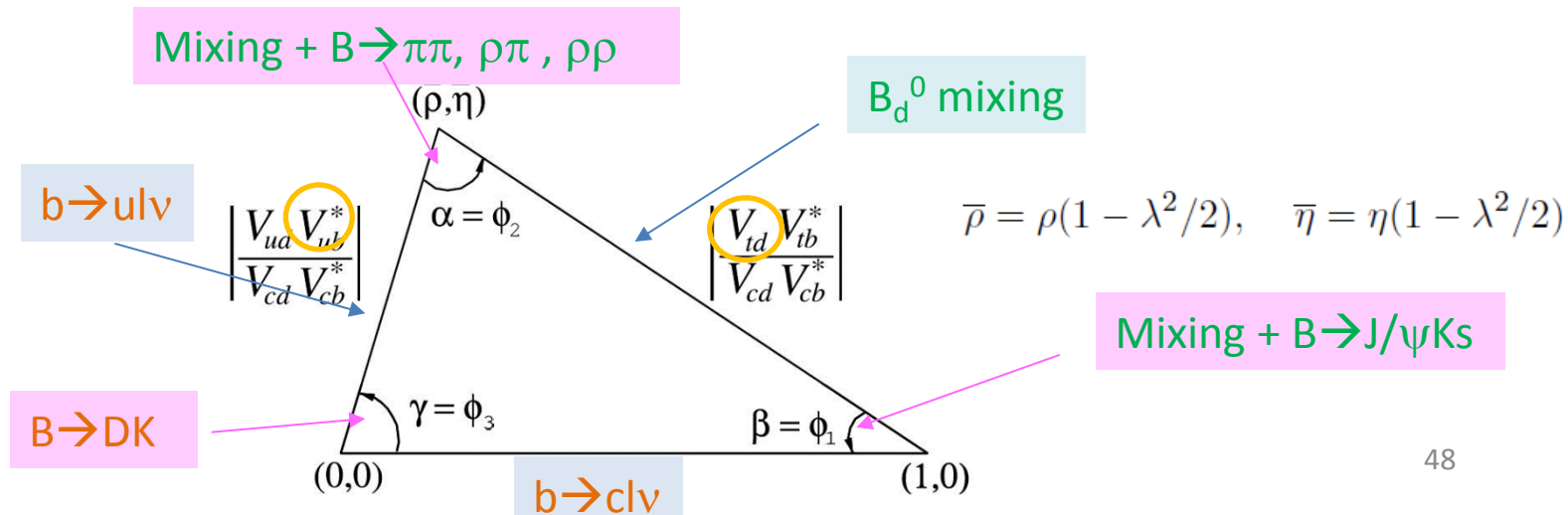
- 複素平面に閉じた三角形を描く (UT)

- B 中間子を用いると三角形の 角 と 辺 の6つをすべて測定可能

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

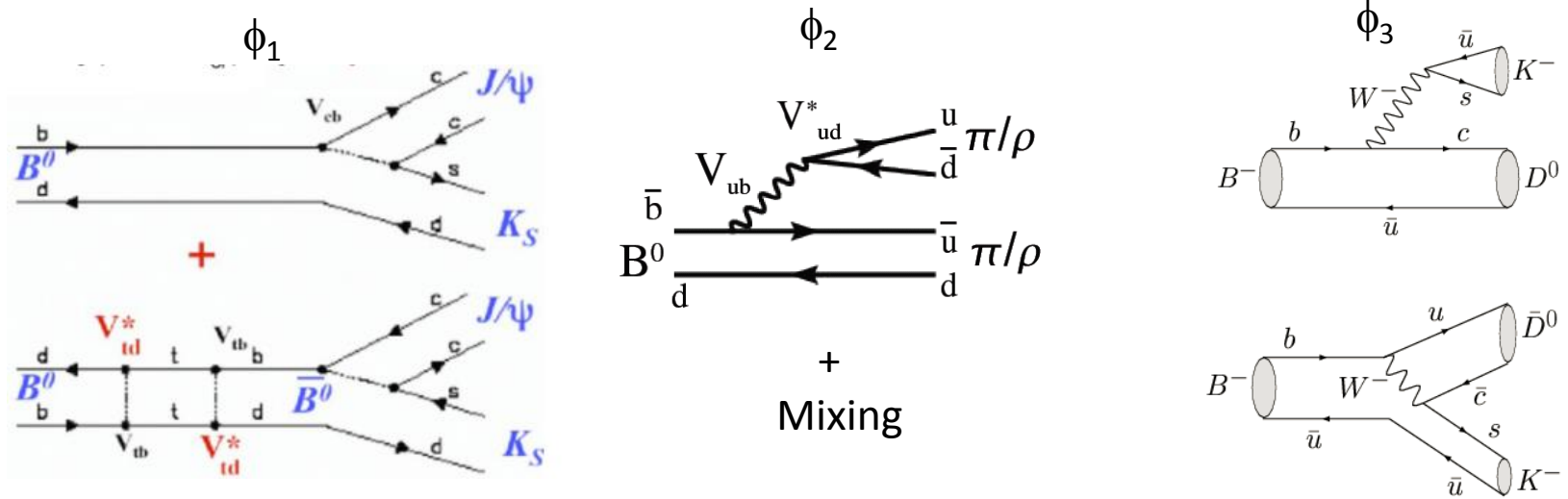
位相を持つ

新物理が入ってこない Tree 過程が作る頂点 $(\rho^{\text{tree}}, \eta^{\text{tree}})$ と、新物理に敏感な Loop 過程が作る頂点 $(\rho^{\text{loop}}, \eta^{\text{loop}})$ が異なったら **新物理の発見**



角の測定

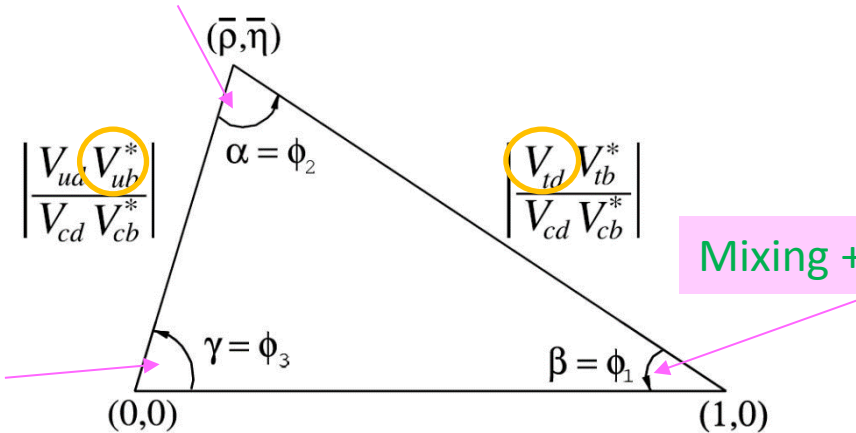
- CPV の測定



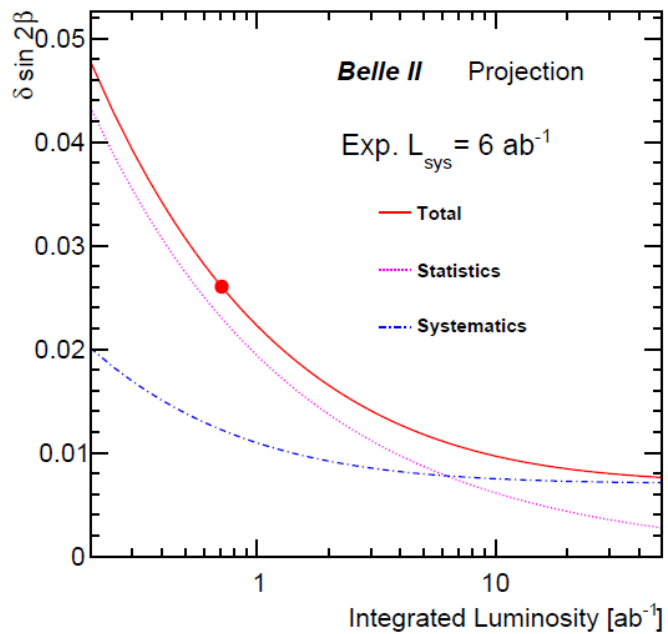
Mixing + $B \rightarrow \pi\pi, \rho\pi, \rho\rho$

Mixing + $B \rightarrow J/\psi K_S$

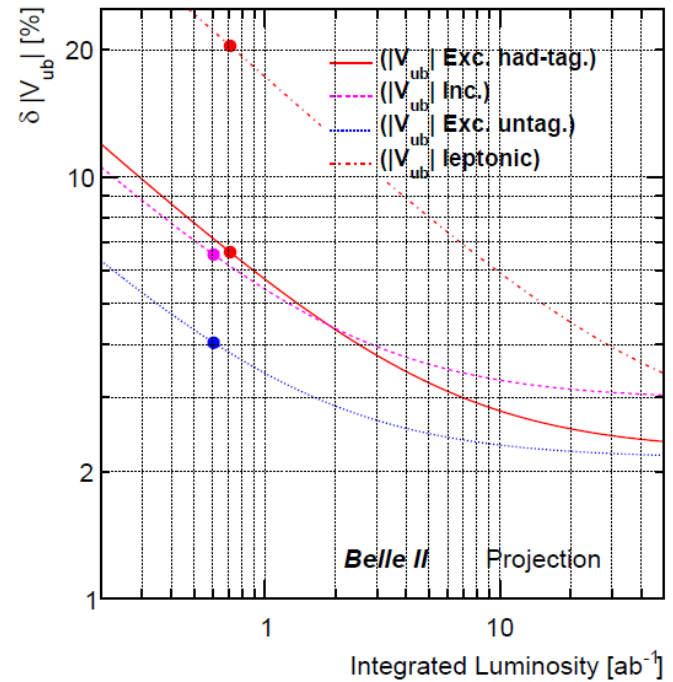
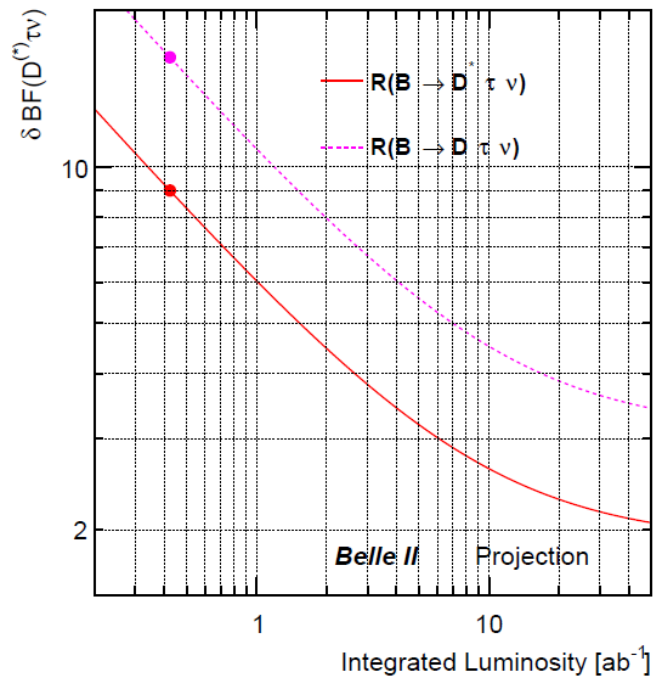
$B \rightarrow DK$



角の測定



$|V_{cb}|, |V_{ub}|$ の測定



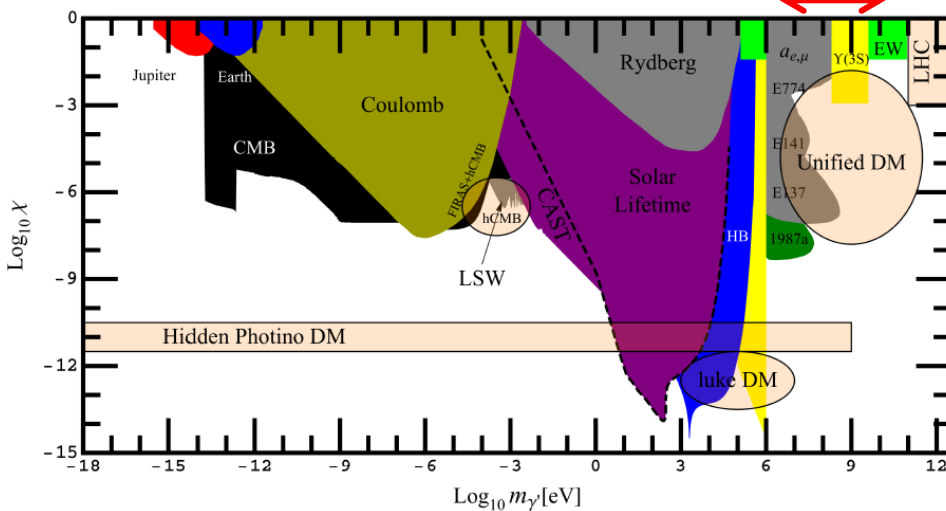
Flavor Observable のまとめ

Observables	Belle	Belle II		\mathcal{L}_s
	(2014)	5 ab ⁻¹	50 ab ⁻¹	
$\sin 2\beta$	$0.667 \pm 0.023 \pm 0.012$	± 0.012	± 0.008	6
α		$\pm 2^\circ$	$\pm 1^\circ$	
γ	$\pm 14^\circ$	$\pm 6^\circ$	$\pm 1.5^\circ$	
$S(B \rightarrow \phi K^0)$	$0.90^{+0.09}_{-0.19}$	± 0.053	± 0.018	>50
$S(B \rightarrow \eta' K^0)$	$0.68 \pm 0.07 \pm 0.03$	± 0.028	± 0.011	>50
$S(B \rightarrow K_S^0 K_S^0 K_S^0)$	$0.30 \pm 0.32 \pm 0.08$	± 0.100	± 0.033	44
$ V_{cb} $ incl.	$\pm 2.4\%$	$\pm 1.0\%$		< 1
$ V_{cb} $ excl.	$\pm 3.6\%$	$\pm 1.8\%$	$\pm 1.4\%$	< 1
$ V_{ub} $ incl.	$\pm 6.5\%$	$\pm 3.4\%$	$\pm 3.0\%$	2
$ V_{ub} $ excl. (had. tag.)	$\pm 10.8\%$	$\pm 4.7\%$	$\pm 2.4\%$	20
$ V_{ub} $ excl. (untag.)	$\pm 9.4\%$	$\pm 4.2\%$	$\pm 2.2\%$	3
$\mathcal{B}(B \rightarrow \tau\nu)$ [10 ⁻⁶]	96 ± 26	$\pm 10\%$	$\pm 5\%$	46
$\mathcal{B}(B \rightarrow \mu\nu)$ [10 ⁻⁶]	< 1.7	5σ	$\gg 5\sigma$	>50
$R(B \rightarrow D\tau\nu)$	$\pm 16.5\%$	$\pm 5.6\%$	$\pm 3.4\%$	4
$R(B \rightarrow D^*\tau\nu)$	$\pm 9.0\%$	$\pm 3.2\%$	$\pm 2.1\%$	3
$\mathcal{B}(B \rightarrow K^{*+}\nu\bar{\nu})$ [10 ⁻⁶]	< 40		$\pm 30\%$	>50
$\mathcal{B}(B \rightarrow K^+\nu\bar{\nu})$ [10 ⁻⁶]	< 55		$\pm 30\%$	>50
$\mathcal{B}(B \rightarrow X_s\gamma)$ [10 ⁻⁶]	$\pm 13\%$	$\pm 7\%$	$\pm 6\%$	< 1
$A_{CP}(B \rightarrow X_s\gamma)$		± 0.01	± 0.005	8
$S(B \rightarrow K_S^0\pi^0\gamma)$	$-0.10 \pm 0.31 \pm 0.07$	± 0.11	± 0.035	> 50
$S(B \rightarrow \rho\gamma)$	$-0.83 \pm 0.65 \pm 0.18$	± 0.23	± 0.07	> 50
$C_7/C_9 (B \rightarrow X_s\ell\ell)$	$\sim 20\%$	10%	5%	
$\mathcal{B}(B_s \rightarrow \gamma\gamma)$ [10 ⁻⁶]	< 8.7	± 0.3		
$\mathcal{B}(B_s \rightarrow \tau^+\tau^-)$ [10 ⁻³]		< 2		

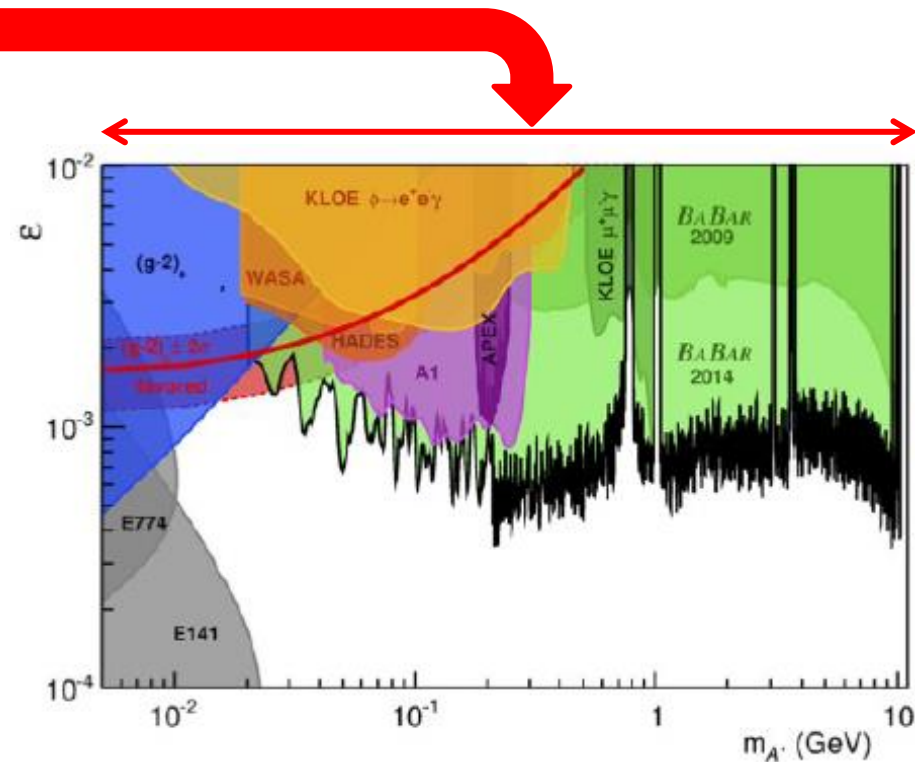
Observables	Belle	Belle II		\mathcal{L}_s
	(2014)	5 ab ⁻¹	50 ab ⁻¹	
$\mathcal{B}(D_s \rightarrow \mu\nu)$	$5.31 \times 10^{-3} (1 \pm 0.053 \pm 0.038)$	$\pm 2.9\%$	$\pm (0.9\%-1.3\%)$	> 50
$\mathcal{B}(D_s \rightarrow \tau\nu)$	$5.70 \times 10^{-3} (1 \pm 0.037 \pm 0.054)$	$\pm (3.5\%-4.3\%)$	$\pm (2.3\%-3.6\%)$	3-5
y_{CP} [10 ⁻²]	$1.11 \pm 0.22 \pm 0.11$	$\pm (0.11-0.13)$	$\pm (0.05-0.08)$	5-8
A_Γ [10 ⁻²]	$-0.03 \pm 0.20 \pm 0.08$	± 0.10	$\pm (0.03-0.05)$	7 - 9
$A_{CP}^{K^+K^-}$ [10 ⁻²]	$-0.32 \pm 0.21 \pm 0.09$	± 0.11	± 0.06	15
$A_{CP}^{\pi^+\pi^-}$ [10 ⁻²]	$0.55 \pm 0.36 \pm 0.09$	± 0.17	± 0.06	> 50
$A_{CP}^{\phi\gamma}$ [10 ⁻²]	± 5.6	± 2.5	± 0.8	> 50
$x^{K_S\pi^+\pi^-}$ [10 ⁻²]	$0.56 \pm 0.19 \pm \begin{smallmatrix} 0.07 \\ 0.13 \end{smallmatrix}$	± 0.14	± 0.11	3
$y^{K_S\pi^+\pi^-}$ [10 ⁻²]	$0.30 \pm 0.15 \pm \begin{smallmatrix} 0.05 \\ 0.08 \end{smallmatrix}$	± 0.08	± 0.05	15
$ q/p ^{K_S\pi^+\pi^-}$	$0.90 \pm \begin{smallmatrix} 0.16 \\ 0.15 \end{smallmatrix} \pm \begin{smallmatrix} 0.08 \\ 0.06 \end{smallmatrix}$	± 0.10	± 0.07	5-6
$\phi^{K_S\pi^+\pi^-}$ [°]	$-6 \pm 11 \pm \begin{smallmatrix} 4 \\ 5 \end{smallmatrix}$	± 6	± 4	10
$A_{CP}^{\pi^0\pi^0}$ [10 ⁻²]	$-0.03 \pm 0.64 \pm 0.10$	± 0.29	± 0.09	> 50
$A_{CP}^{K_S^0\pi^0}$ [10 ⁻²]	$-0.10 \pm 0.16 \pm 0.09$	± 0.08	± 0.03	> 50
$Br(D^0 \rightarrow \gamma\gamma)$ [10 ⁻⁶]	< 1.5	$\pm 30\%$	$\pm 25\%$	2
$\tau \rightarrow \mu\gamma$ [10 ⁻⁹]		< 45	< 14.7	< 4.7
$\tau \rightarrow e\gamma$ [10 ⁻⁹]		< 120	< 39	< 12
$\tau \rightarrow \mu\mu\mu$ [10 ⁻⁹]		< 21.0	< 3.0	< 0.3

Dark Photon 現在の制限

- $A' = \gamma'$
- $\varepsilon = \chi$



Arxiv:1002.0329



Babar, Phys. Rev. Lett. 113, 201801 (2014)