



TOHOKU  
UNIVERSITY

# Belle実験における $B \rightarrow K^* \gamma$ 崩壊の崩壊分岐比及び アイソスピン、 $CP$ 非対称性の測定

---

東北大理

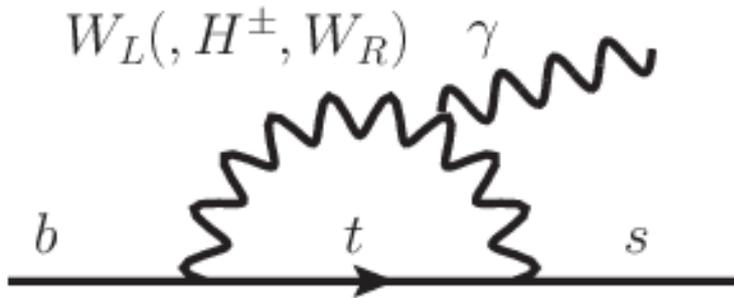
堀口朋裕、石川明正、山本均、  
他 Belle Collaboration

## • $b \rightarrow s\gamma$ 遷移

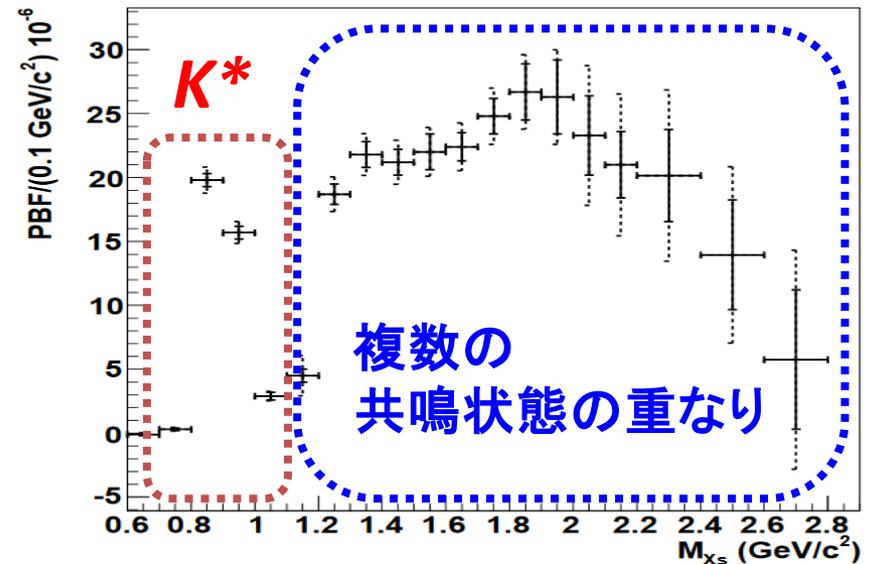
- 標準模型ではツリーレベルの崩壊は禁止。最低1ループの崩壊
- ループ中に新物理の寄与がある場合、観測量が標準模型の予言からズれる可能性がある⇒ 新物理に感度あり

## • 信号事象, $B \rightarrow K^*(892)\gamma$

- $b \rightarrow s\gamma$  崩壊の約10%
- 他の共鳴状態と分離が可能



$b \rightarrow s\gamma$  のファイマン図



$b \rightarrow s\gamma$  の  $M(X_s)$  分布

Ph.D thesis written by T. Saito.

[http://epx.phys.tohoku.ac.jp/~saito/Belle/dthesis\\_saito.pdf](http://epx.phys.tohoku.ac.jp/~saito/Belle/dthesis_saito.pdf)

$X_s$ : ストレンジネス1のハドロンの総称

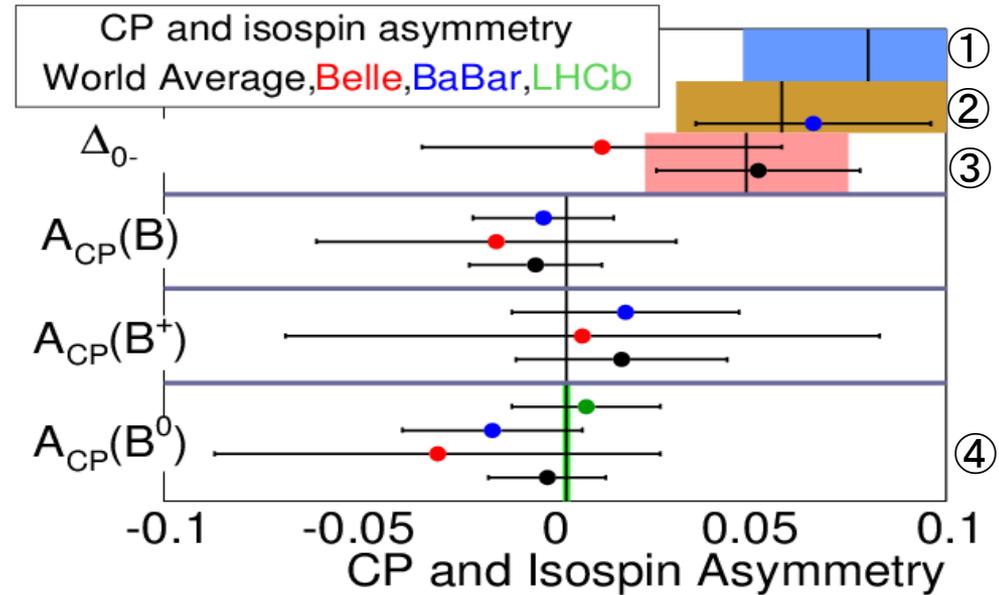
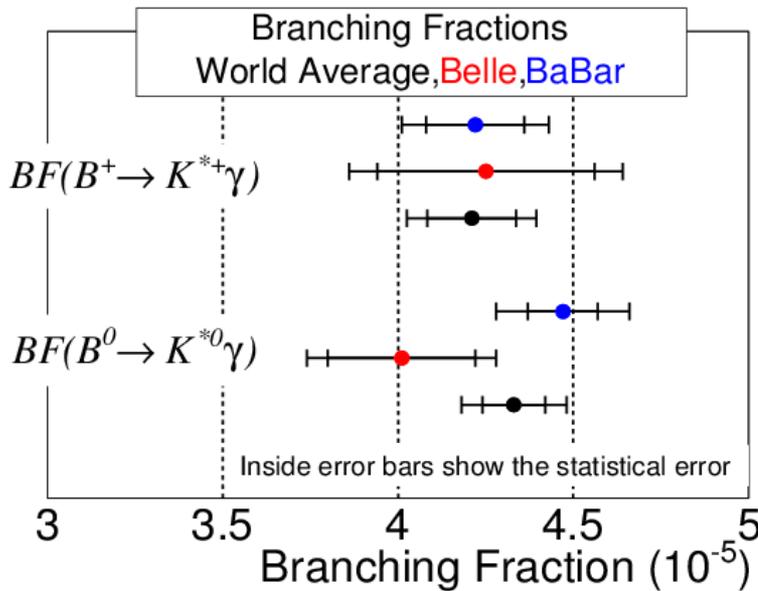
# 観測量

- 崩壊分岐比(BF)
- アイソスピン非対称性( $\Delta_{0-}$ )
- CP非対称性( $A_{CP}$ )
- $B^+$ と $B^0$ のCP非対称性の差( $\Delta A_{CP}$ )

$$\Delta_{0-} = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \gamma) - \Gamma(B^- \rightarrow K^{*-} \gamma)}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \gamma) + \Gamma(B^- \rightarrow K^{*-} \gamma)}$$

$$A_{CP} = \frac{\Gamma(\bar{B} \rightarrow \bar{K}^* \gamma) - \Gamma(B \rightarrow K^* \gamma)}{\Gamma(\bar{B} \rightarrow \bar{K}^* \gamma) + \Gamma(B \rightarrow K^* \gamma)}$$

$$\Delta A_{CP} = A_{CP}^{B^-} - A_{CP}^{\bar{B}^0}$$



上図の色ついている領域は理論の予言

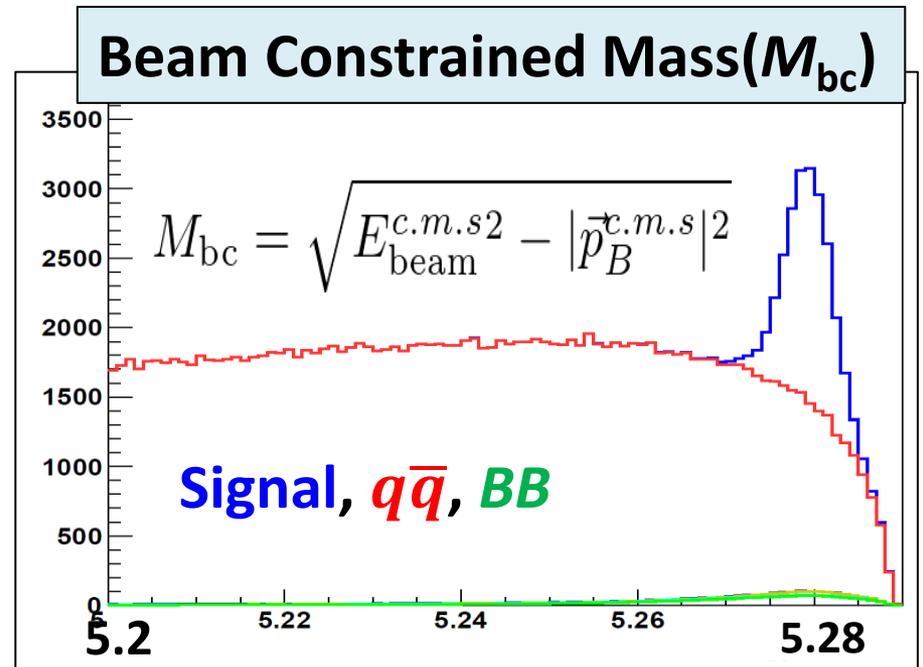
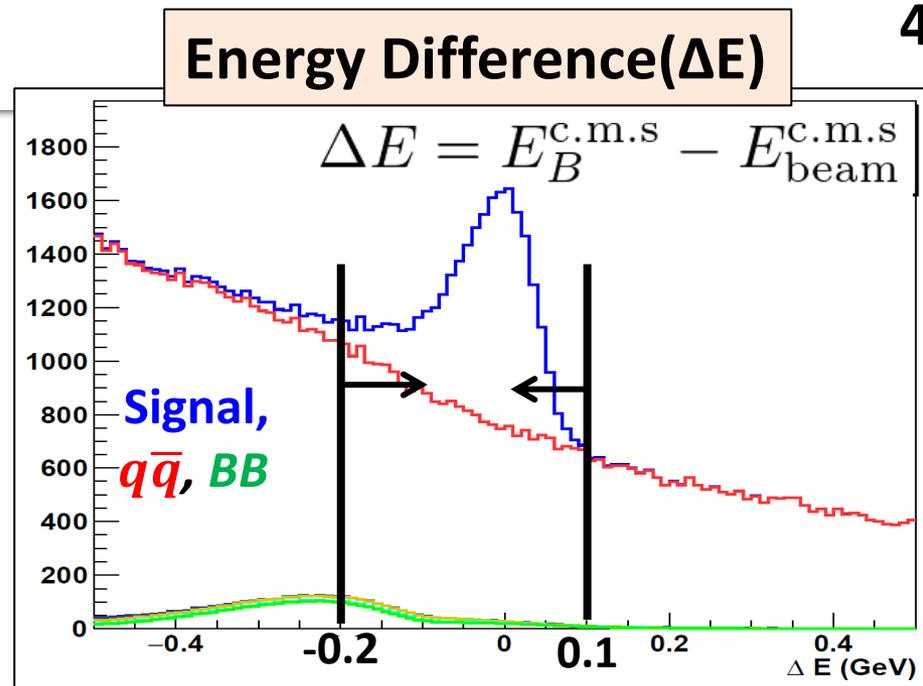
- ① Phys.Lett. B539 (2002) 227-234, ② Theor. Phys. 46, 895 (2006),
- ③ & ④ PRD 88, 094004 (2013)

**Belle** (nBB:  $85 \times 10^6$ ), **BaBar** (nBB:  $383 \times 10^6$ ), **LHCb** ( $1\text{fb}^{-1}$ )で測定

→  **$772 \times 10^6$ のB中間子対を使って精度向上を目指す**

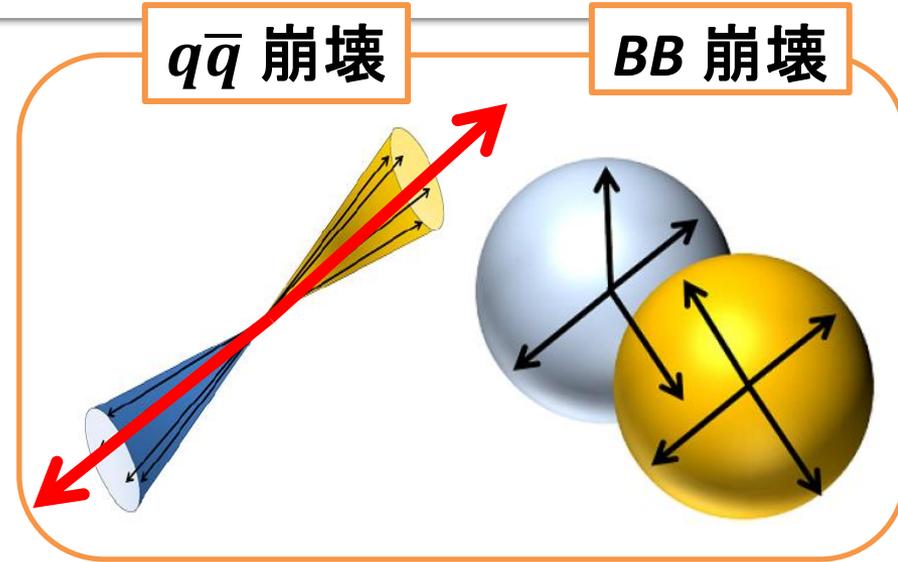
# 再構成

- 4種類の信号事象を再構成
  - $B^0 \rightarrow K_S \pi^0 \gamma, K^+ \pi^- \gamma$
  - $B^+ \rightarrow K_S \pi^+ \gamma, K^+ \pi^0 \gamma$
- 粒子の選択
  - 孤立した高エネルギー光子
    - $E_\gamma > 1.8 \text{ GeV}$
  - $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ の再構成
    - $|M_{\pi^0}^{\text{PDG}} - M_{\gamma\gamma}| < 10 \text{ MeV}/c^2$
  - $K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$ の再構成
    - 最近接点を使った崩壊点補正
    - $|M_{K_S}^{\text{PDG}} - M_{\pi\pi}| < 10 \text{ MeV}/c^2$
  - 荷電粒子
    - K/ $\pi$  識別
- 運動学変数( $M_{bc}$ と $\Delta E$ )を定義

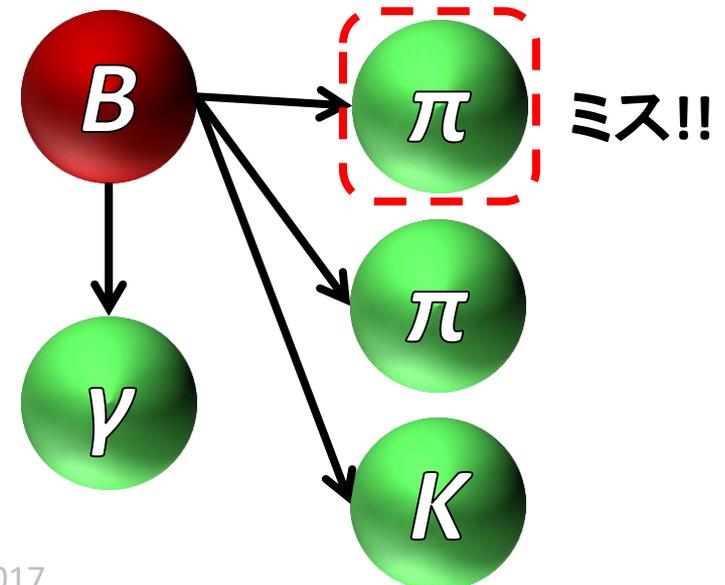


# 背景事象の抑制

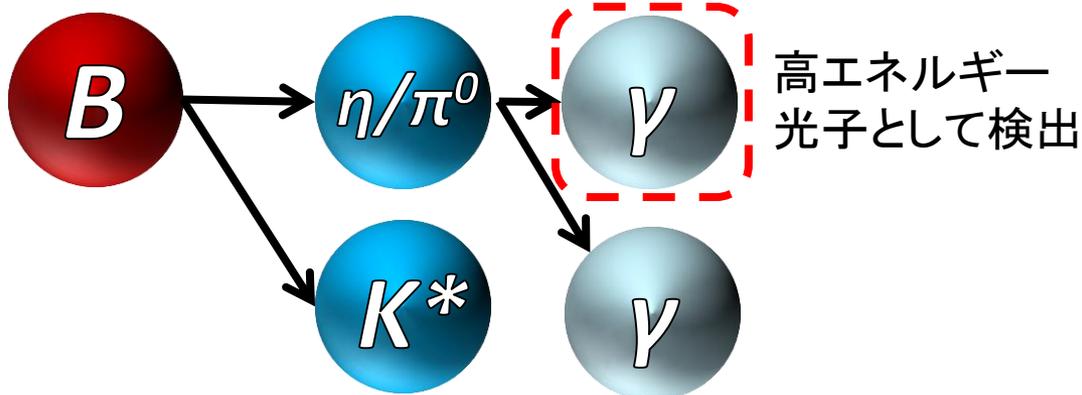
- $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$  ( $q = u, d, c, s$ )
  - 信号数の2倍程度(再構成後)
  - イベント形状をによる選別
  - **83%** の信号事象を残して、**89%** の背景事象抑制
- $B$ 由来の背景事象
  - $M_{bc}$ にピークを作る
  - 信号数の7% 程度



$Xs\gamma$  事象: 信号の5~6%



rare B事象: 信号の2~3%



# 信号抽出方法

## Unbinned Maximum Likelihood で $M_{bc}$ をフィット

### • 方針:

Self flavor tagging 可能な崩壊を、 $B$ と $\bar{B}$ の崩壊とで分けて考え、7種類の $M_{bc}$ 分布を同時フィット

- 6種類:  $K^+\pi^-\gamma$ ,  $K^-\pi^+\gamma$ ,  $K_S\pi^+\gamma$ ,  $K_S\pi^-\gamma$ ,  $K^+\pi^0\gamma$ ,  $K^-\pi^0\gamma$
- 1種類:  $K_S\pi^0\gamma$  (自信で $B^0\bar{B}^0$ の区別はできない)

### • 利点

– 観測量を同時に決定

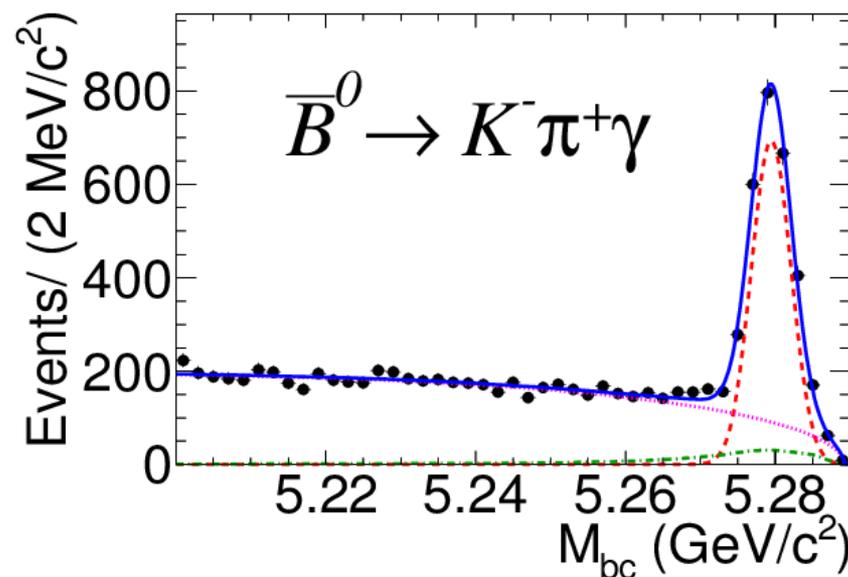
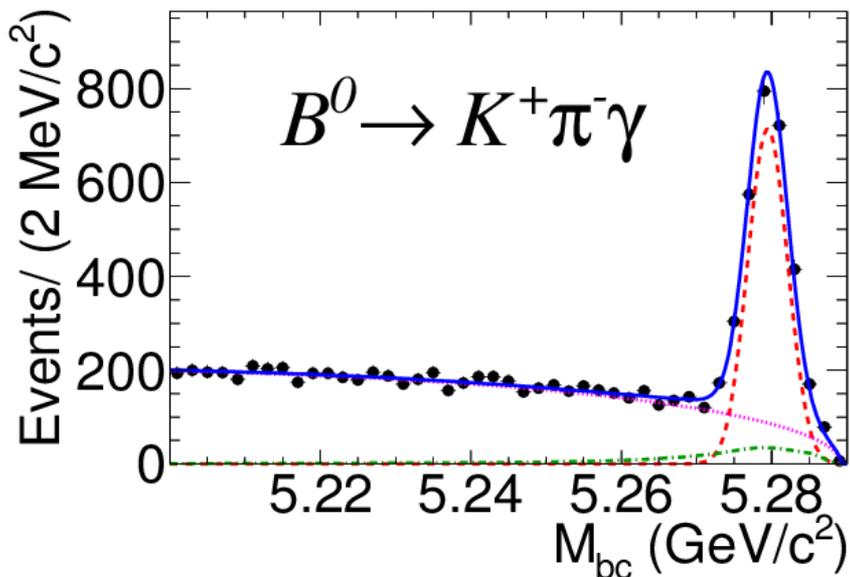
- $BF(B^0 \rightarrow K^{*0}\gamma)$ ,  $BF(B^+ \rightarrow K^{*+}\gamma)$ ,  $\Delta_{0-}$ ,  $A_{CP}(B^0 \rightarrow K^{*0}\gamma)$ ,  
 $A_{CP}(B^+ \rightarrow K^{*+}\gamma)$ ,  $\Delta A_{CP}$

– フィットにつく系統誤差を抑えられ、Numerical calculation に比べ、複雑な誤差伝搬の計算が必要ない

# フィット結果

$B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \gamma, \bar{B}^0 \rightarrow K^- \pi^+ \gamma$  の  $M_{bc}$  分布

Total, 信号(Gaussian),  $q\bar{q}$  (ARGUS),  
BB(ARGUS+ Bifurcated Gaussian)



| 崩壊過程                               | $N(\bar{B})$ | $N(B)$ | 合計                   |
|------------------------------------|--------------|--------|----------------------|
| $B^0 \rightarrow K_s \pi^0 \gamma$ | —            | —      | $349 \pm 23 \pm 6$   |
| $B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$ | 2294         | 2361   | $4650 \pm 82 \pm 51$ |
| $B^+ \rightarrow K_s \pi^- \gamma$ | 756          | 717    | $1473 \pm 46 \pm 15$ |
| $B^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \gamma$ | 569          | 575    | $1144 \pm 46 \pm 22$ |

# 系統誤差

$A_{CP}$ と $\Delta A_{CP}$ の測定は統計誤差が支配的なので省略

8

| (%)             | BF( $K^*0\gamma$ ) | BF( $K^*+\gamma$ ) | $\Delta_{0-}$ |
|-----------------|--------------------|--------------------|---------------|
| MC stat.        | 0.13               | 0.19               | 0.11          |
| Bの生成数           | 1.37               | 1.37               | —             |
| 光子              | 2.00               | 2.00               | —             |
| Tracking        | 0.70               | 0.80               | 0.05          |
| K/ $\pi$ ID     | 1.57               | 0.81               | 0.38          |
| Ks              | 0.05               | 0.39               | 0.17          |
| $\pi^0$         | 0.09               | 0.42               | 0.17          |
| その他のselection   | 0.75               | 0.77               | 0.19          |
| $f_{+-}/f_{00}$ | 1.20               | 1.20               | 1.20          |
| Fitter bias     | 0.17               | 0.18               | 0.08          |
| Fit param.      | 1.15               | 1.01               | 0.21          |
| <b>Total</b>    | <b>3.50</b>        | <b>3.27</b>        | <b>1.28</b>   |

$$f_{+-}/f_{00} = \frac{\Gamma(\Upsilon(4S) \rightarrow B^+ B^-)}{\Gamma(\Upsilon(4S) \rightarrow B^0 \bar{B}^0)} \quad (\text{値はPDGより})$$

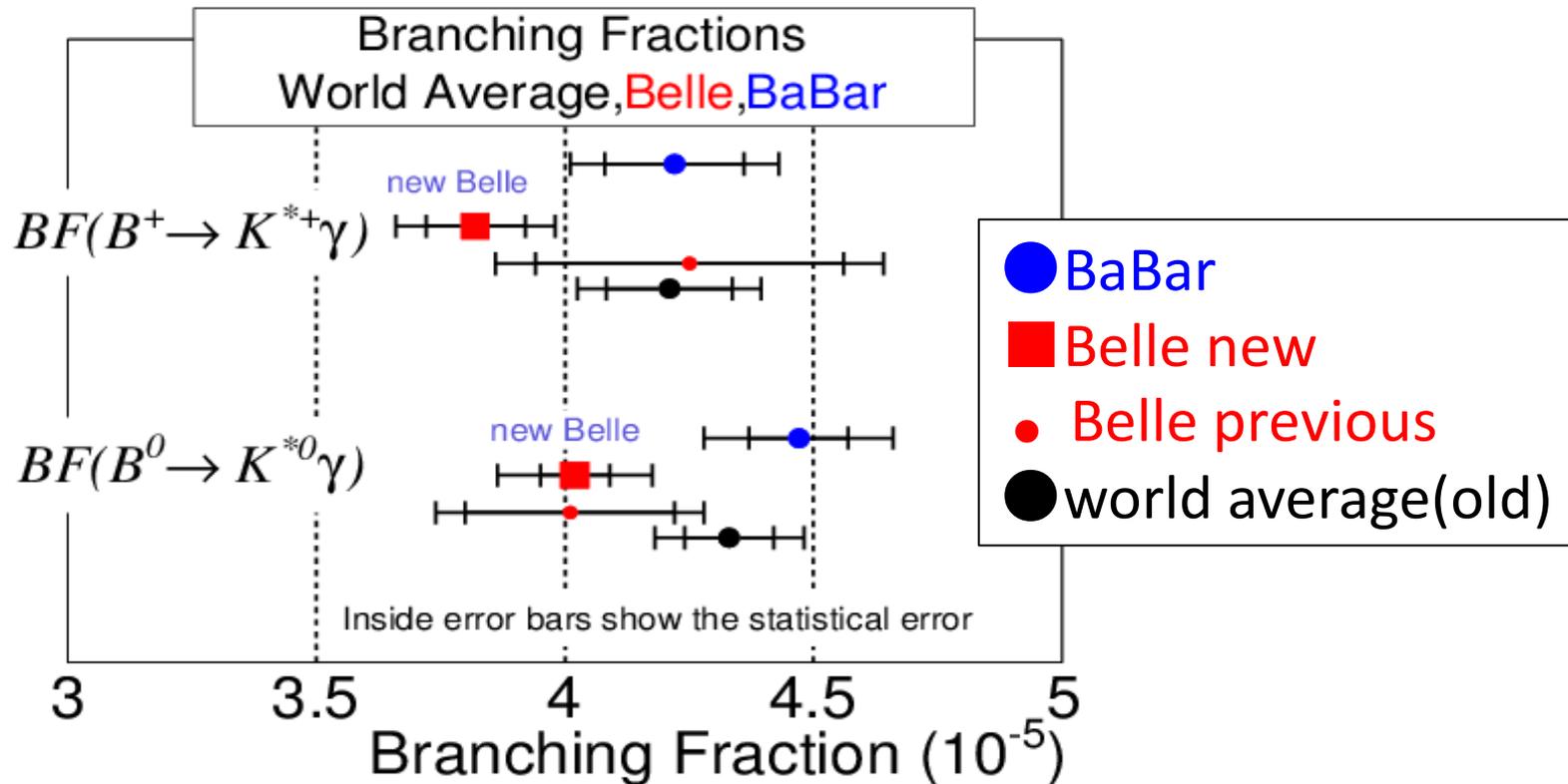
# 結果(崩壊分岐比)

## 世界一の精度を更新

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma) = (4.02 \pm 0.07 \pm 0.14) \times 10^{-5}$$

$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^{*+} \gamma) = (3.82 \pm 0.10 \pm 0.13) \times 10^{-5}$$

系統誤差が支配的



Belleの前結果と $1\sigma$ 以内、BaBarの結果と $1.5\sigma$ 以内で一致

# 結果(非対称度)

## 全観測量で世界一の精度を更新

$$\Delta_{0-} = (+6.2 \pm 1.5 \pm 0.5 \pm 1.2(f_{+-}/f_{00}))\%$$

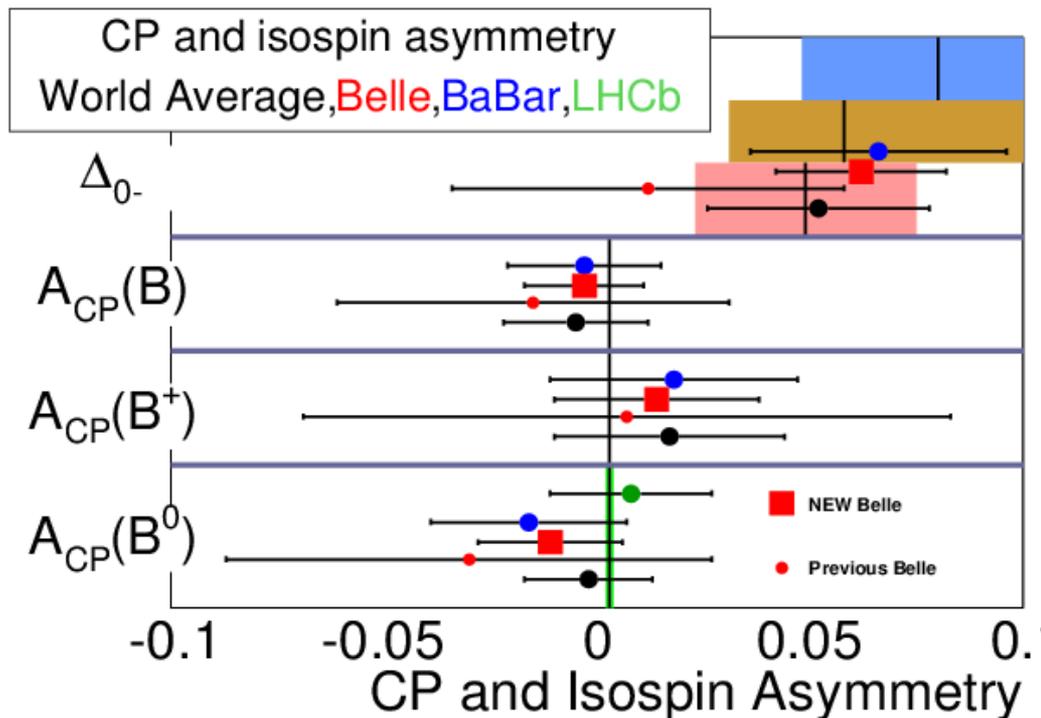
$$A_{CP}(B^0 \rightarrow K^{*0}\gamma) = (-1.1 \pm 1.7 \pm 0.2)\%$$

$$A_{CP}(B^+ \rightarrow K^{*+}\gamma) = (+1.4 \pm 2.4 \pm 0.3)\%$$

$$A_{CP}(B \rightarrow K^*\gamma) = (+0.3 \pm 1.4 \pm 0.2)\%$$

$$\Delta A_{CP} = (+2.5 \pm 2.9 \pm 0.3)\%$$

- 全観測量で標準模型の  
予言と無矛盾
- **アイソスピン破れの兆候を  
世界で初めて観測(3.1 $\sigma$ )**



# まとめ

- Belle 実験の全データ( $772 \times 10^6 B\bar{B}$ )を用いて  $B \rightarrow K^*\gamma$  の測定をした。

全ての測定で  
世界最高精度

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0}\gamma) = (4.02 \pm 0.07 \pm 0.14) \times 10^{-5}$$

$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^{*+}\gamma) = (3.82 \pm 0.10 \pm 0.13) \times 10^{-5}$$

$$\Delta_{0-} = (+6.2 \pm 1.5 \pm 0.5 \pm 1.2(f_{+-}/f_{00}))\%$$

$$A_{CP}(B^0 \rightarrow K^{*0}\gamma) = (-1.1 \pm 1.7 \pm 0.2)\%$$

$$A_{CP}(B^+ \rightarrow K^{*+}\gamma) = (+1.4 \pm 2.4 \pm 0.3)\%$$

$$A_{CP}(B \rightarrow K^*\gamma) = (+0.3 \pm 1.4 \pm 0.2)\%$$

$$\Delta A_{CP} = (+2.5 \pm 2.9 \pm 0.3)\%$$

- アイソスピン破れの兆候を世界で初めて観測した( $3.1\sigma$ )。
- 標準模型を越える物理に制限を付けることができる。
- Belle II で更なる精度向上が期待される。

# Backup slide

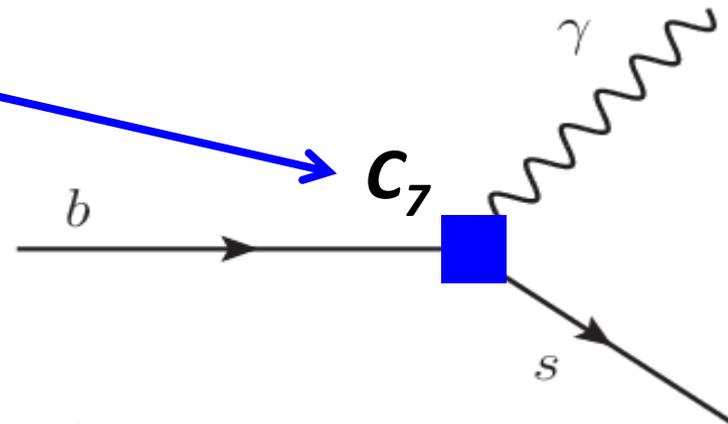
# Operator Product Expansion

- 有効ハミルトニアンをWilson係数( $C_i$ )と実効オペレータ( $O_i$ )を使って書き表す。
  - 量子効果を1つのvertexに押し込め、Wilson係数で表現

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} \sum_i \lambda_{\text{CKM}} C_i(\mu, M) O_i(\mu)$$

電磁ペンギン崩壊オペレータの係数

$$O_7 = \frac{e}{16\pi^2} m_b (\bar{s}_L \sigma^{\mu\nu} b_R) F_{\mu\nu}$$



- $C_7$  は標準模型では実数
- 新物理の効果がある場合、 $C_7$  にズレが見られる
- 理論計算の精度
  - Inclusive( $b \rightarrow s\gamma$  全て): ハドロン化の影響小  
⇒ 崩壊分岐比、比の観測量が新物理に感度
  - Exclusive( $B \rightarrow K^*\gamma, B \rightarrow K_1\gamma$  など): ハドロン化の不定性大  
⇒ 比を計算して不定性をキャンセルできるので新物理に感度

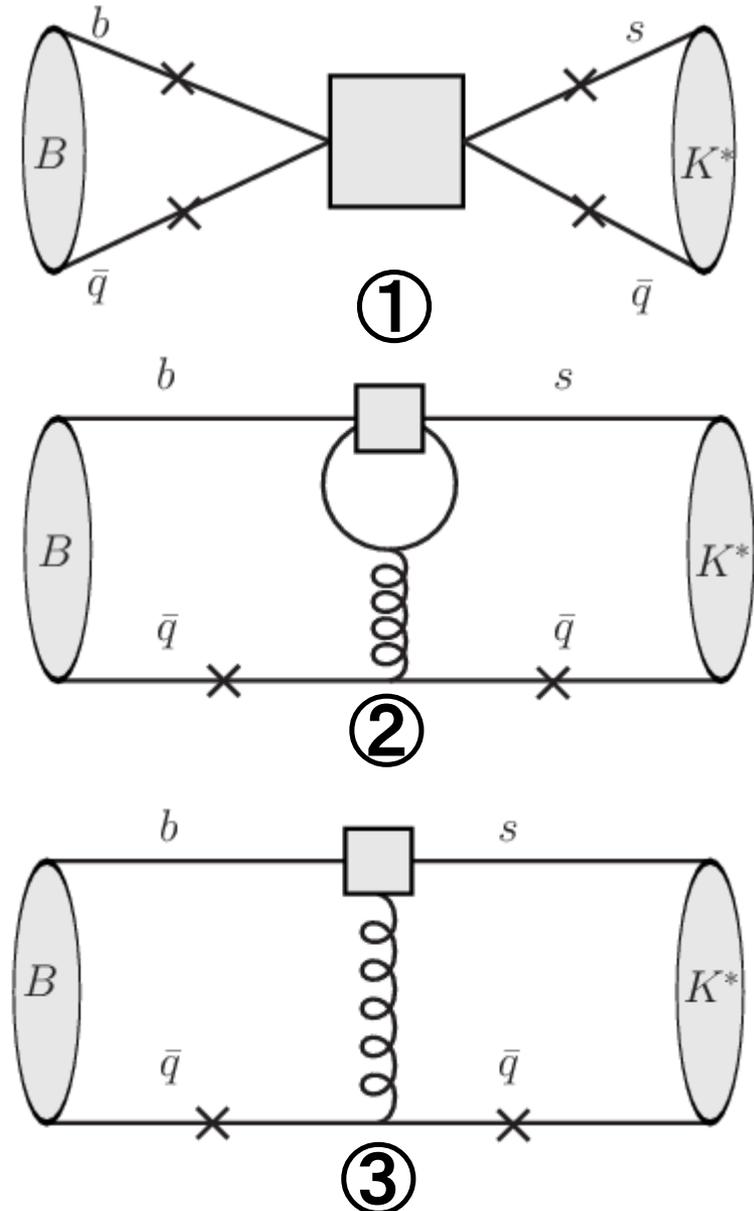
# Isospin violation

Annihilation or spectator particle with photon emission events arise isospin violation. By charge difference between “u” and “d” quark, non-zero isospin value is evaluated.

$$\Delta_{0-} = \text{Re}(b_d - b_u)$$

$$b_q = \frac{12\pi^2 f_B Q_q}{m_b T_1^{B \rightarrow K^*} a_7^c} \left( \frac{f_{K^*}^\perp}{m_b} K_1 + \frac{f_{K^*} m_{K^*}}{6\lambda_B m_B} K_2 \right)$$

- ① Annihilation diagram
- ② Charm penguin effect
- ③ Chromo-magnetic dipole operator

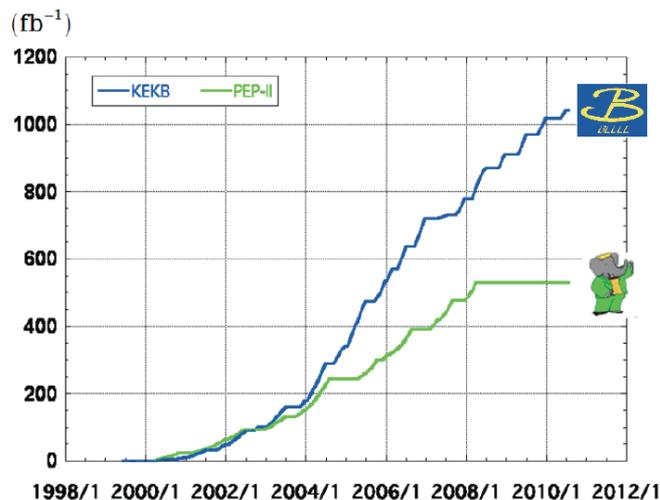


# Belle実験(加速器)

## ○KEKB加速器(1999-2010)

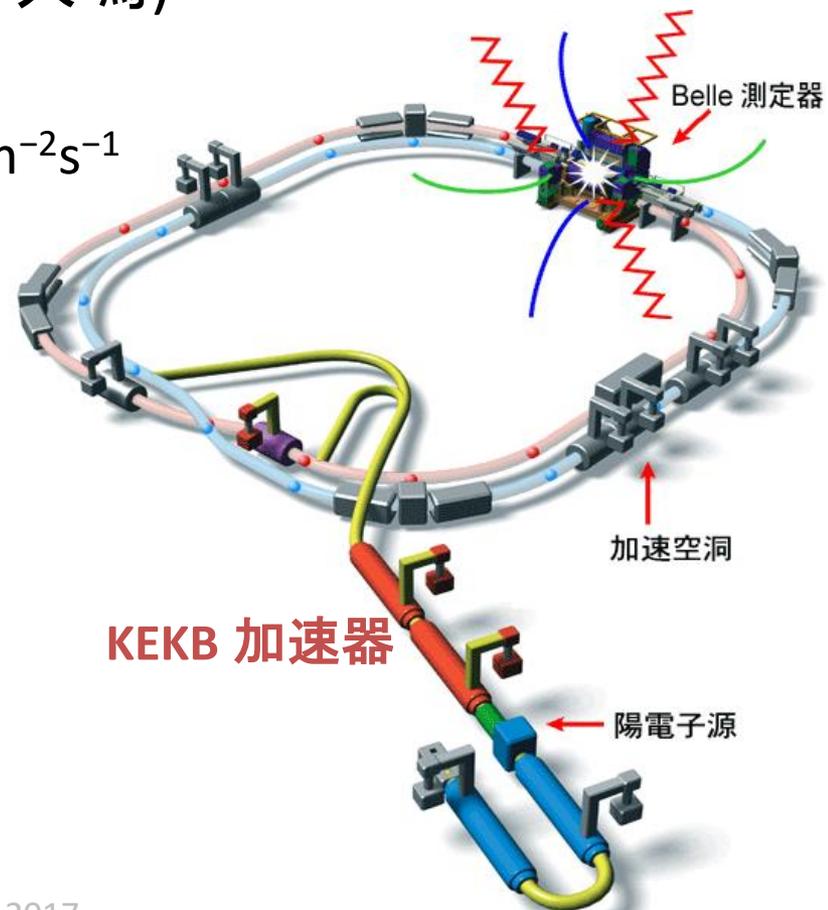
- 茨城県つくば市にある周長3kmの円形加速器
- 電子(8GeV)、陽電子(3.5GeV)の衝突
- 主要運転は **10.58 GeV (Y(4S) 共鳴)**
- 世界最高輝度の運転
  - 瞬間ルミノシティ:  $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
  - 積分ルミノシティ:  $1040 \text{ fb}^{-1}$

### Integrated luminosity of B factories



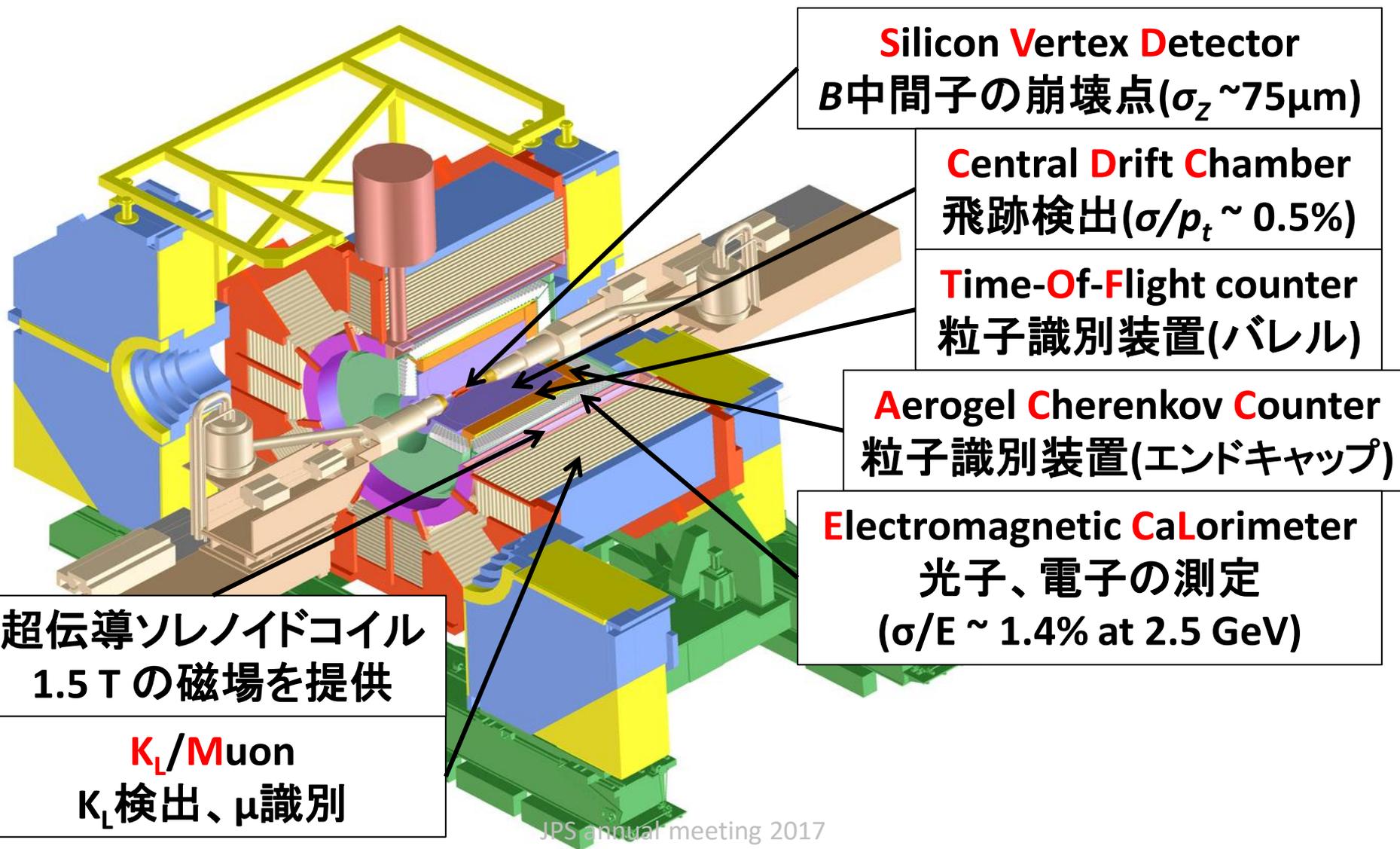
**> 1 ab<sup>-1</sup>**  
**On resonance:**  
 Y(5S): 121 fb<sup>-1</sup>  
 Y(4S): 711 fb<sup>-1</sup>  
 Y(3S): 3 fb<sup>-1</sup>  
 Y(2S): 25 fb<sup>-1</sup>  
 Y(1S): 6 fb<sup>-1</sup>  
**Off reson./scan:**  
 ~ 100 fb<sup>-1</sup>

**~ 550 fb<sup>-1</sup>**  
**On resonance:**  
 Y(4S): 433 fb<sup>-1</sup>  
 Y(3S): 30 fb<sup>-1</sup>  
 Y(2S): 14 fb<sup>-1</sup>  
**Off resonance:**  
 ~ 54 fb<sup>-1</sup>



# Belle実験(測定器)

○高い粒子識別能力と運動量測定精度を持つ複合型検出器



# MCサンプル生成

## ● 生成する信号事象

- $Y(4S) \rightarrow BB, B \rightarrow K^*(892)\gamma$
- 世界平均の崩壊分岐比
- Belle 実験200回分を生成

### 崩壊分岐比( $10^{-5}$ )

$$B^0 \rightarrow K^{*0}\gamma \quad 4.33$$

$$B^+ \rightarrow K^{*+}\gamma \quad 4.21$$

## ● 想定する背景事象

- Continuum background ( $e^+e^- \rightarrow qq$ )
- Generic  $B$  decay ( $b \rightarrow cW$ )
- Rare  $B$  decay ( $b \rightarrow u/s/d$  遷移)
  - $B \rightarrow K^*\eta, K^*\pi, K\pi$  等
- $X_s\gamma$  decay ( $b \rightarrow s\gamma : M_{X_s} > 1.15 \text{ GeV}/c^2$ )
  - $K^*\gamma$  と  $K\pi\pi\gamma$  を除いた  $b \rightarrow s\gamma$  崩壊
- $B \rightarrow K\pi\pi\gamma$  decay
  - 信号領域にピークを作る背景事象を詳細に見積もる

### $B \rightarrow K\pi\pi\gamma$ 崩壊( $10^{-6}$ )

$$B \rightarrow K_1(1270)\gamma \quad 14.5$$

$$B \rightarrow K_1(1400)\gamma \quad 4.1$$

$$B \rightarrow K^*(1410)\gamma \quad 11.0$$

$$B \rightarrow K^*_2(1430)\gamma \quad 1.2$$

$$B \rightarrow K^*(1680)\gamma \quad 15.9$$

○ は Peaking background

# 高エネルギー光子の再構成

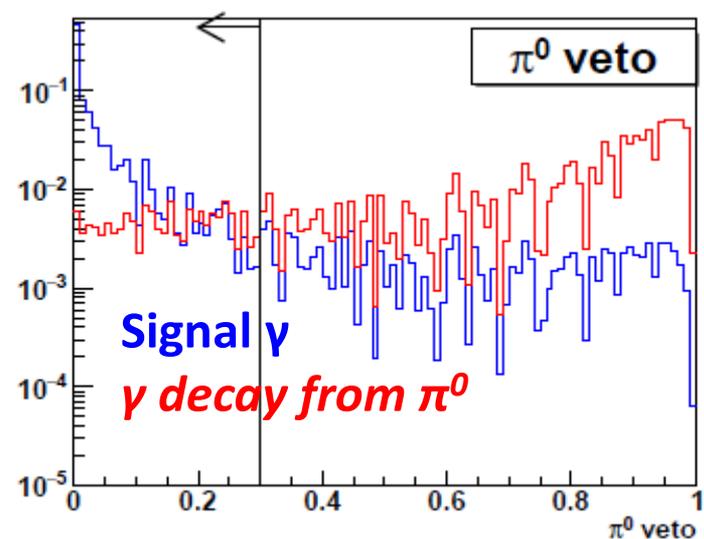
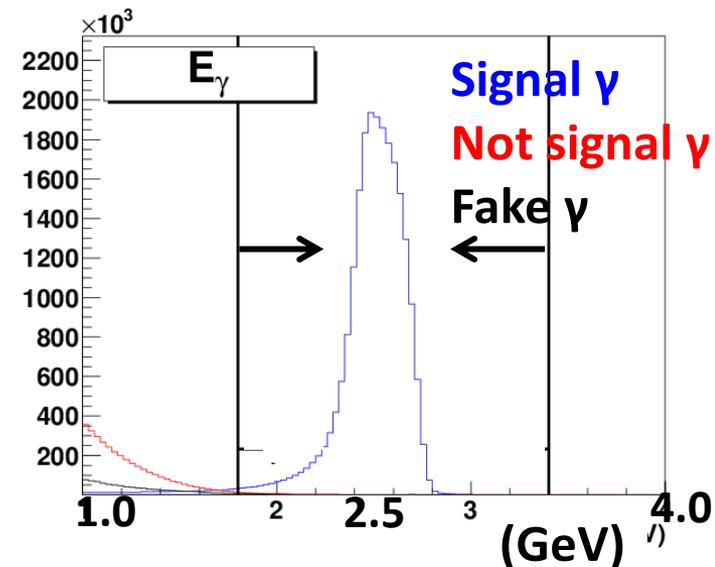
$b \rightarrow s\gamma$ 崩壊で最も特徴的な信号  
高エネルギーで孤立したECLクラスターを選ぶ

## ● クラスターへの要求

- $1.8 < E_\gamma < 3.4$  GeV (重心系)
- クラスターの広がり
- ビーム軸に対する光子の角度 (バレルのみ)

## ● $\pi^0/\eta$ veto

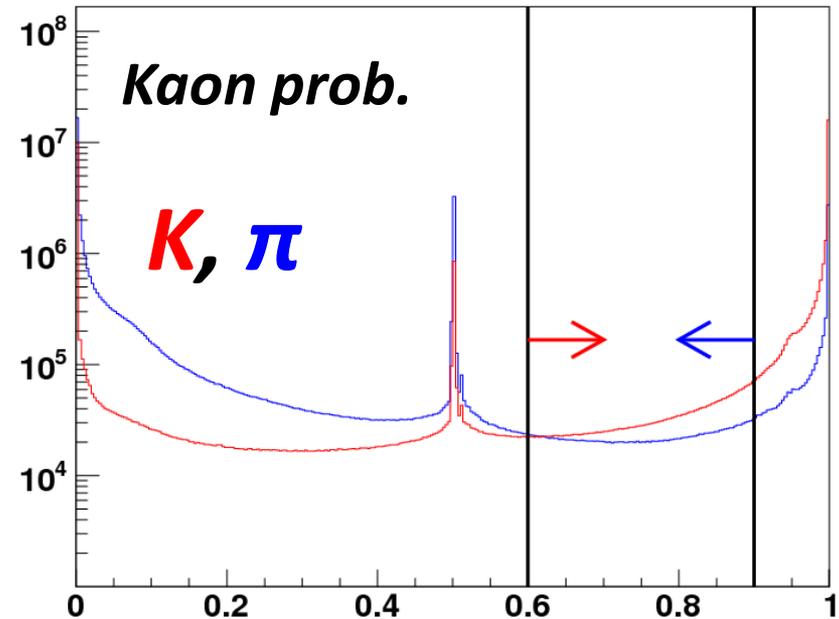
- $\pi^0(\eta)$ から崩壊した高い運動量をもつ光子の除去
- イベント中の光子を組み合わせ、尤度を計算
  - $m_{\gamma\gamma}$ : 2光子の不変質量
  - $\pi^0(\eta) \rightarrow \gamma_{\text{high}}\gamma_{\text{low}}$  崩壊の $\gamma_{\text{low}}$ の運動量



# 粒子の再構成

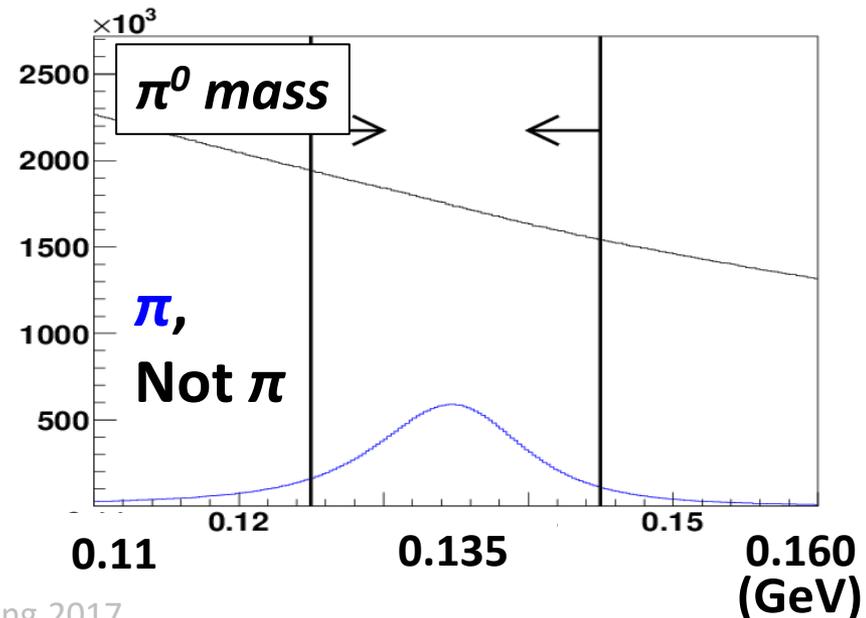
## ● 荷電粒子( $K^\pm, \pi^\pm$ )の選択

- インパクトパラメータ
- $p > 0.1 \text{ GeV}/c$
- $K/\pi$  粒子識別
  - Likelihood による識別: ACC, TOF, CDC のヒット情報
  - 誤識別率( $\pi$ ) 8.5%



## ● $\pi^0 (\rightarrow \gamma\gamma)$ の再構成

- $|M_{\pi^0}^{\text{PDG}} - M(\gamma\gamma)| < 10 \text{ MeV}/c^2$
- $\cos\vartheta_{\gamma\gamma} > 0.5$
- $E_\gamma > 50 \text{ MeV}$
- $p > 0.5 \text{ GeV}/c$

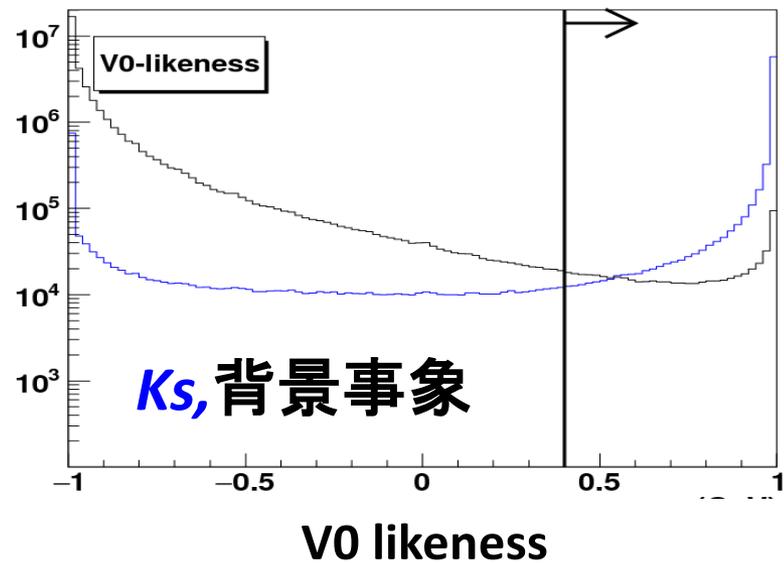
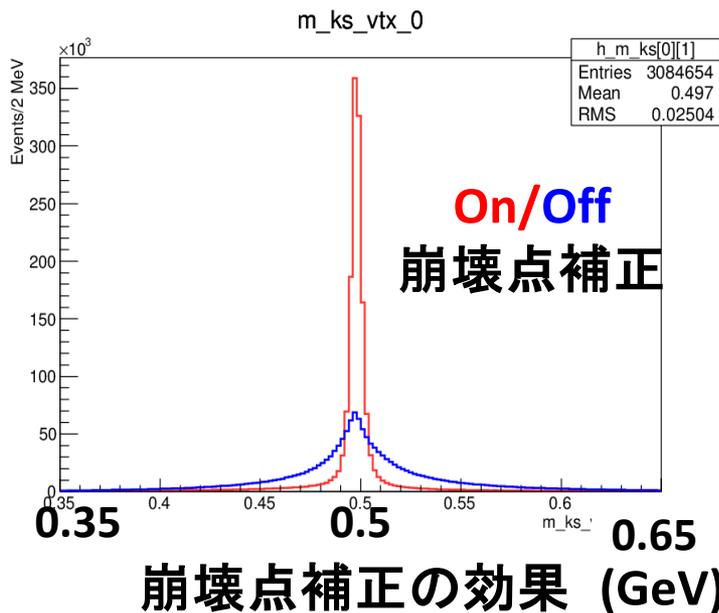


# $K_S$ の再構成

- 再構成モード  $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$
- 崩壊点の再計算
  - 荷電トラック2本の最近接点を計算し、 $K_S$ の崩壊点として4元運動量を再計算
- $K_S$ の質量
  - $|M_{K_S} - M_{\pi\pi}| < 10 \text{ MeV}/c^2$

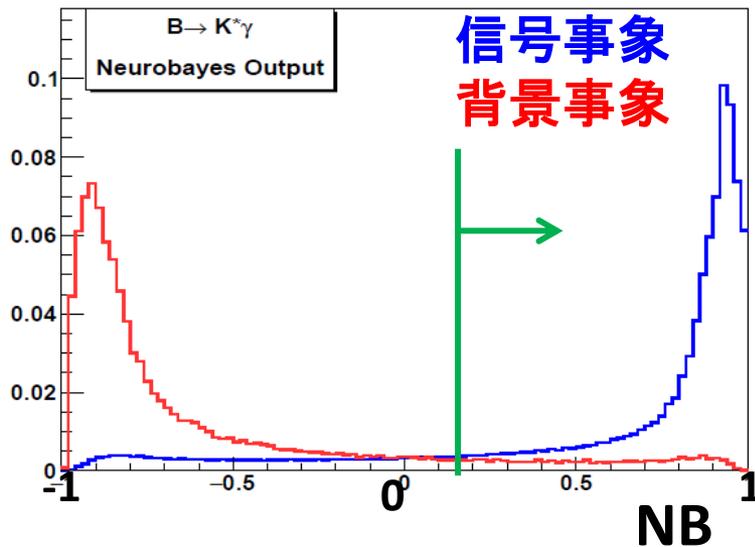
## ● 背景事象の除去

- ニューラルネットワークを用いた多変数解析
  - V0-particle likeness (13変数)
    - 2本の荷電粒子に崩壊する粒子
    - 運動量、角度分布、飛行距離等
  - $\Lambda$  likeness (7変数)
    - proton を仮定したトラックと $\pi$ を仮定したトラックの不変質量、 $\pi$ の運動量等

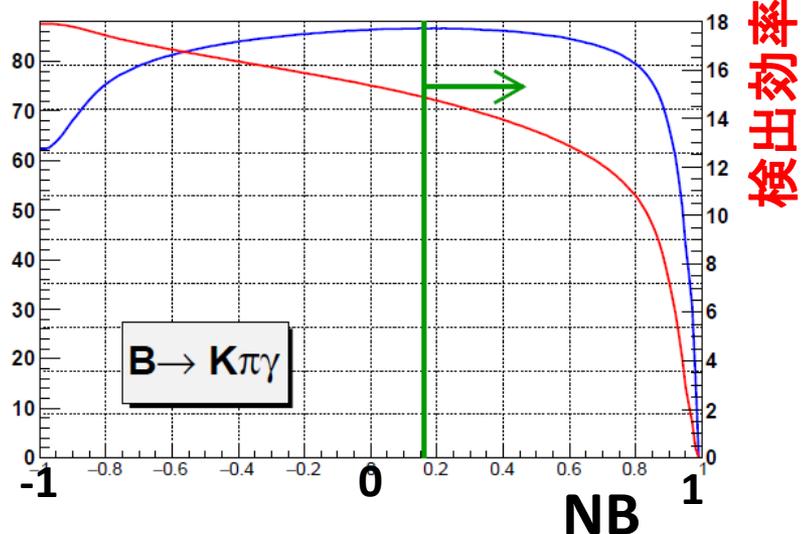


# 背景事象抑制

- ニューラルネットワーク(NB)を使って多変数解析
- 信号有意度が最大になるように、出力(NB)を決定



有意度



**83%** の信号事象を残して、**89%** の背景事象抑制に成功  
(先行研究ではLikelihoodにより**73%**の信号を残し**90%**の背景事象の抑制)

qq 背景事象除去後、

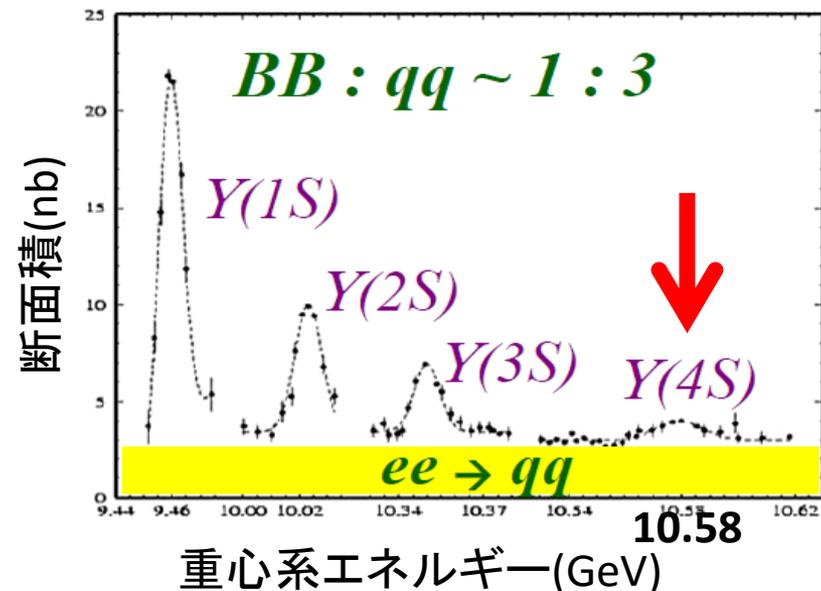
1事象にB候補が1つであることを乱数を用いて要求

# 背景事象の除去と扱い方針

## ● $qq$ 背景事象

- $B$ 生成事象の約3倍の断面積
- 信号数の2倍程度(再構成後)
- イベント形状によって選別可能
- 有意度を最大化するように選別

$$\text{有意度} = \frac{N_{\text{sig.}}}{\sqrt{N_{\text{sig.}} + N_{\text{bkg.}}}}$$



## ● $B$ 由来の崩壊事象

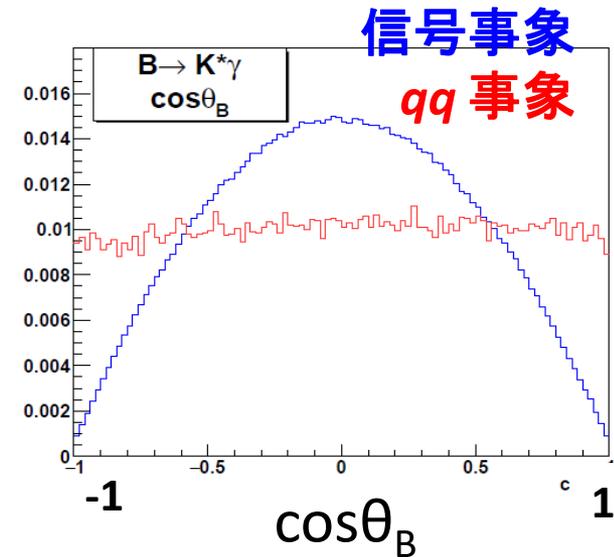
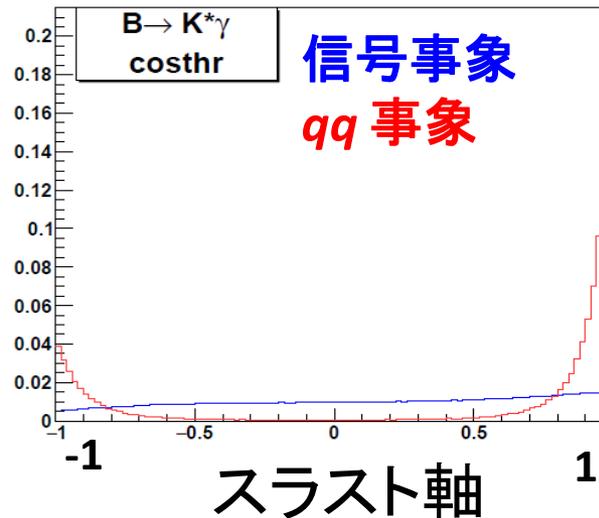
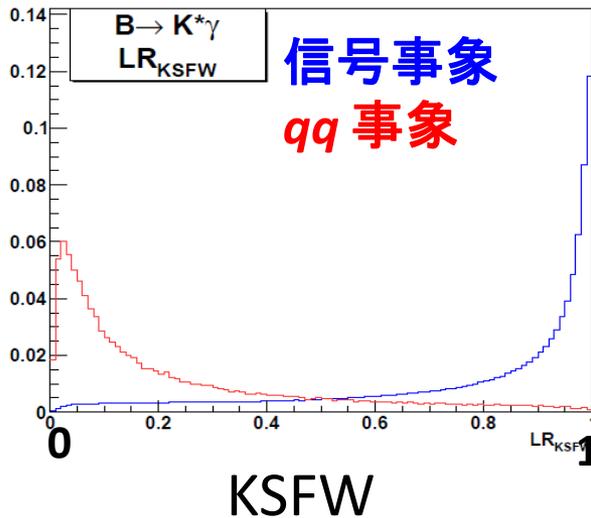
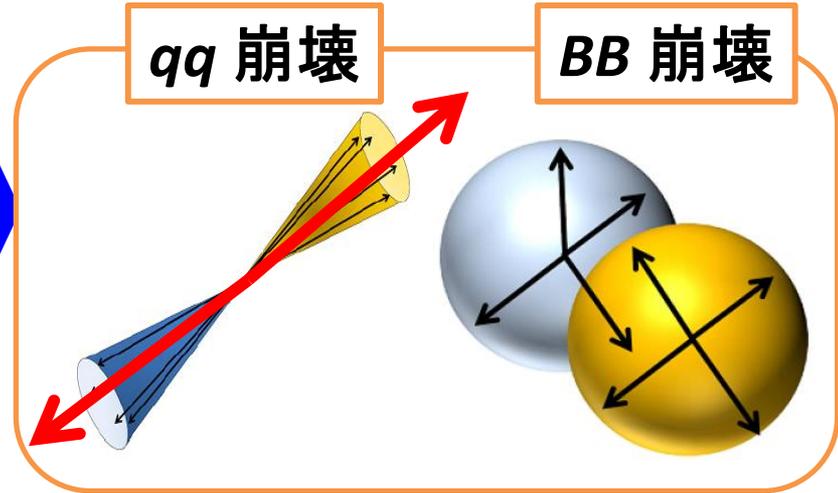
- 信号数の7%程度の混入
- $M_{bc}$ にピークを作る

| $B \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$ | 信号      | $qq$              | $B$ 由来全て          | 検出効率   | 有意度   |
|----------------------------------|---------|-------------------|-------------------|--------|-------|
| 生成時                              | 21599.9 | $2.3 \times 10^9$ | $7.6 \times 10^8$ | 100%   | -     |
| 再構成                              | 7457.2  | 33597.2           | 822.5             | 34.61% | 36.44 |
| $\pi^0/\eta$ veto                | 6852.4  | 13207.0           | 697.3             | 31.8%  | 47.56 |

# 多変数解析による $qq$ 背景事象抑制

## 選別に有効なパラメータ(9種類)

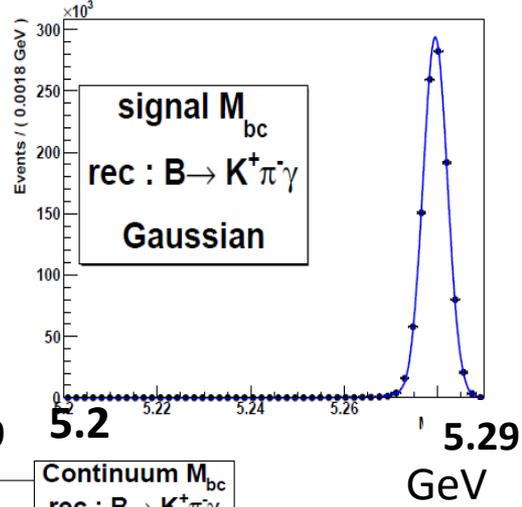
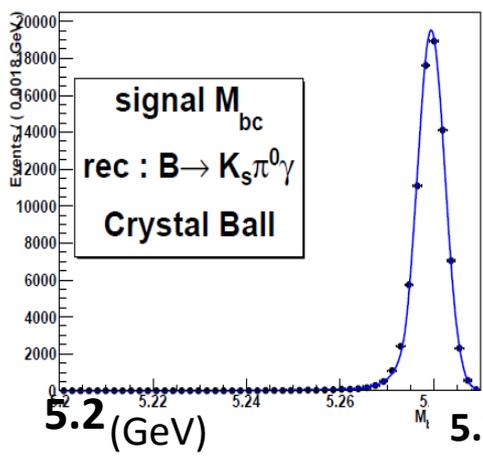
- ルジャンドル多項式を用いたイベント形状 (KSFW)
- $\cos\theta_{\text{thrust}}$  (スラスト軸)
- Sphericity (5種類)
- $\cos\theta_B$  (重心系での  $B$  崩壊角)
- フレーバータグパラメータ,  $qr$



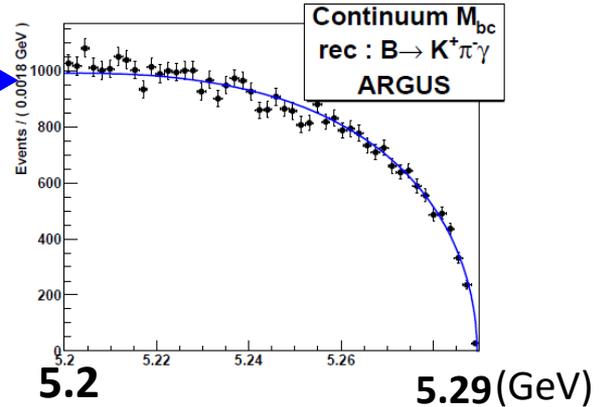
# PDFの決定

## ● 信号事象 $\longrightarrow$

- $\pi^0$ を含む崩壊:  
Crystal Ball
- $\pi^0$ を含まない崩壊:  
Gaussian



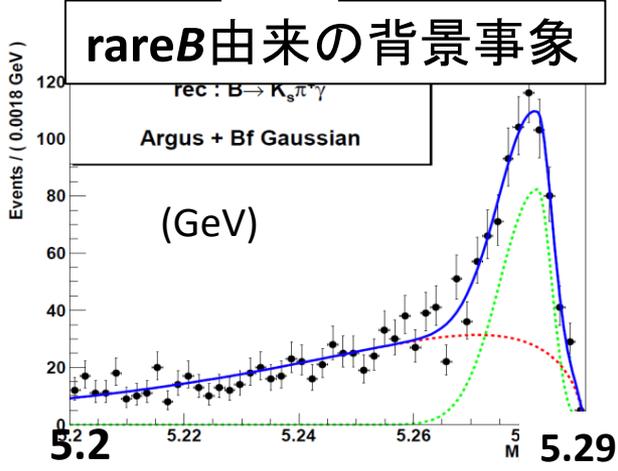
## ● qq 背景事象: ARGUS関数 $\longrightarrow$



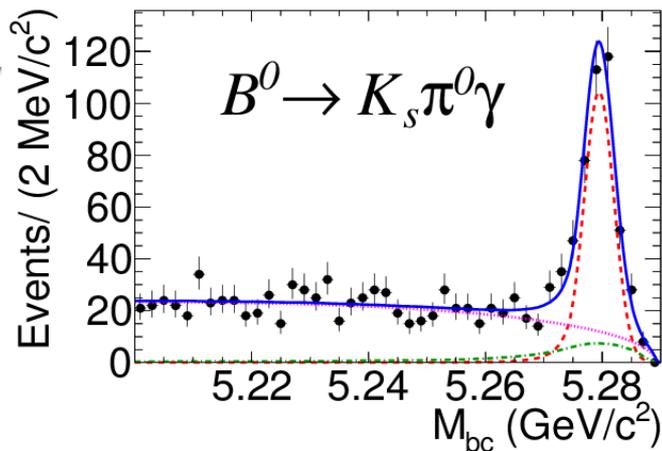
## ● B由来の背景事象 (信号に対するイベント数)

- Generic B decay (0.1%) : ARGUS
- Rare B decay (2.3%)
- $X_s \gamma$  decay (4.9%)
- Cross-feeds (0.9%)
- Combinatorial (0.4%)

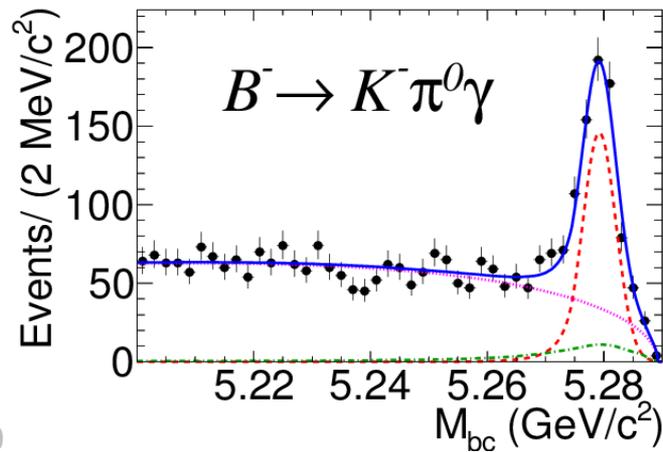
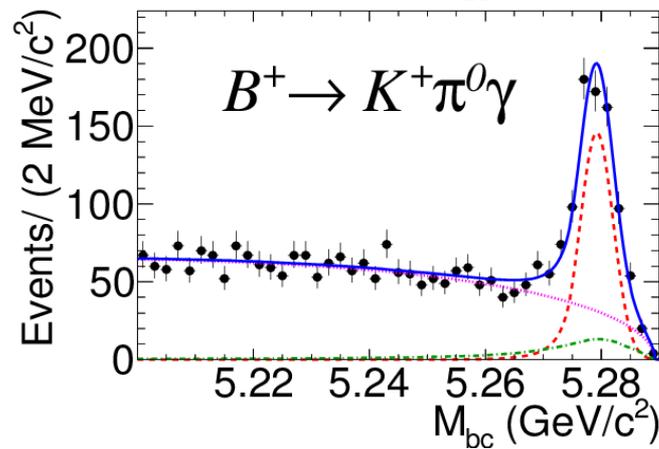
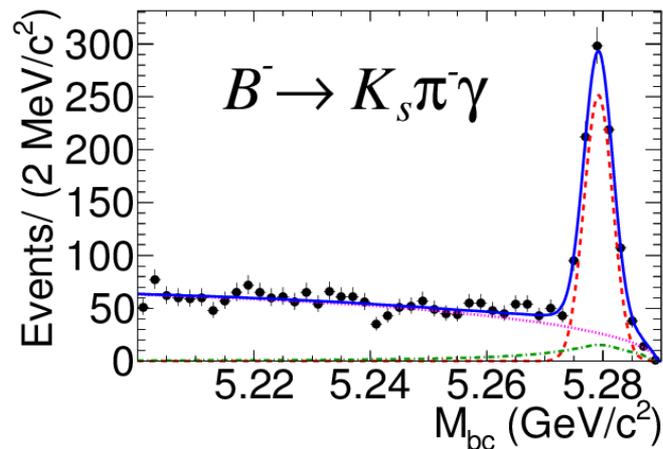
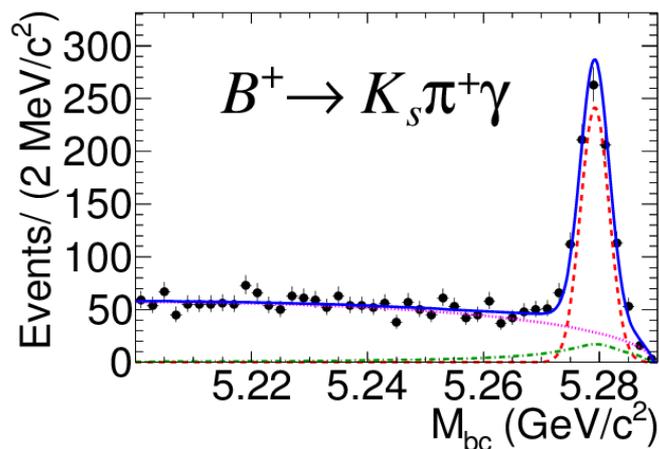
**ARGUS + Bifurcated Gaussian**



# フィット結果



Total, 信号,  $q\bar{q}$ ,  $BB$



# 系統誤差 (崩壊分岐比)

| (%)               | $K_S\pi^0\gamma$ | $K+\pi-\gamma$ | $K_S\pi+\gamma$ | $K+\pi^0\gamma$ | $K^*0\gamma$ | $K^*+\gamma$ |
|-------------------|------------------|----------------|-----------------|-----------------|--------------|--------------|
| MC stat.          | 0.37             | 0.14           | 0.24            | 0.29            | 0.13         | 0.19         |
| Bの生成数             | 1.37             | 1.37           | 1.37            | 1.37            | 1.37         | 1.37         |
| 光子                | 2.00             | 2.00           | 2.00            | 2.00            | 2.00         | 2.00         |
| Tracking          | 0.70             | 0.70           | 1.05            | 0.35            | 0.70         | 0.80         |
| K/ $\pi$ ID       | —                | 1.65           | 0.80            | 0.84            | 1.58         | 0.81         |
| Ks                | 0.59             | —              | 0.59            | —               | 0.05         | 0.39         |
| $\pi^0$           | 1.27             | —              | —               | 1.27            | 0.09         | 0.42         |
| M( $K\pi$ )       | 0.31             | 0.31           | 0.31            | 0.31            | 0.31         | 0.31         |
| qq sup.           | 0.56             | 0.56           | 0.56            | 0.56            | 0.56         | 0.56         |
| $\Delta E$ window | 1.16             | 0.34           | 0.07            | 1.19            | 0.40         | 0.43         |
| $f_{+-}/f_{00}$   | 1.20             | 1.20           | 1.20            | 1.20            | 1.20         | 1.20         |
| Fit bias          | 2.35             | 0.19           | 0.66            | 1.31            | 0.17         | 0.18         |
| Fit param.        | 1.78             | 1.13           | 0.95            | 1.85            | 1.15         | 1.01         |
| <b>Total</b>      | <b>4.51</b>      | <b>3.52</b>    | <b>3.35</b>     | <b>4.10</b>     | <b>3.50</b>  | <b>3.26</b>  |

# 系統誤差 ( $A_{CP}$ , $\Delta A_{CP}$ , $\Delta_{0-}$ )

$A_{CP}$

| (%)             | $K^*0\gamma$ | $K_S\pi^+\gamma$ | $K^+\pi^0\gamma$ | $K^*+\gamma$ | $K^*\gamma$ | $\Delta A_{CP}$ | $\Delta_{0-}$ |
|-----------------|--------------|------------------|------------------|--------------|-------------|-----------------|---------------|
| MC stat.        | /            | /                | /                | /            | /           | /               | 0.11          |
| tracking        | /            | /                | /                | /            | /           | /               | 0.05          |
| K/ $\pi$ ID     | /            | /                | /                | /            | /           | /               | 0.38          |
| $K_S$           | /            | /                | /                | /            | /           | /               | 0.17          |
| $\pi^0$         | /            | /                | /                | /            | /           | /               | 0.17          |
| Charge asym.    | 0.19         | 0.37             | 0.32             | 0.26         | 0.15        | 0.161           | 0.00          |
| Life time       | /            | /                | /                | /            | /           | /               | 0.19          |
| $f_{+-}/f_{00}$ | /            | /                | /                | /            | /           | /               | 1.20          |
| Fit bias        | 0.07         | 0.12             | 0.16             | 0.09         | 0.08        | 0.12            | 0.08          |
| Fit param.      | 0.09         | 0.09             | 0.16             | 0.09         | 0.08        | 0.29            | 0.21          |
| <b>Total</b>    | <b>0.22</b>  | <b>0.40</b>      | <b>0.39</b>      | <b>0.29</b>  | <b>0.19</b> | <b>0.35</b>     | <b>1.28</b>   |

# Likelihood の定義

$$\begin{aligned}
 -\ln \mathcal{L} = & - \sum_i \ln \mathcal{L}_i^{K_s \pi^0 \gamma}(BF^N) && \text{添え字の } \mathbf{N}, \mathbf{C} \text{ は } \mathbf{B}^0, \mathbf{B}^+ \text{ の崩壊} \\
 & && \text{を表す} \\
 & - \sum_i \ln \mathcal{L}_i^{K^+ \pi^- \gamma}(BF^N, A_{CP}^N) - \sum_i \ln \mathcal{L}_i^{K^- \pi^+ \gamma}(BF^N, A_{CP}^N) \\
 & - \sum_i \ln \mathcal{L}_i^{K_s \pi^+ \gamma}(BF^C, A_{CP}^C) - \sum_i \ln \mathcal{L}_i^{K_s \pi^- \gamma}(BF^C, A_{CP}^C) \\
 & - \sum_i \ln \mathcal{L}_i^{K^+ \pi^0 \gamma}(BF^C, A_{CP}^C) - \sum_i \ln \mathcal{L}_i^{K^- \pi^0 \gamma}(BF^C, A_{CP}^C)
 \end{aligned}$$

## 6種類のパラメータを決定

$BF(B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma), BF(B^+ \rightarrow K^{*+} \gamma),$

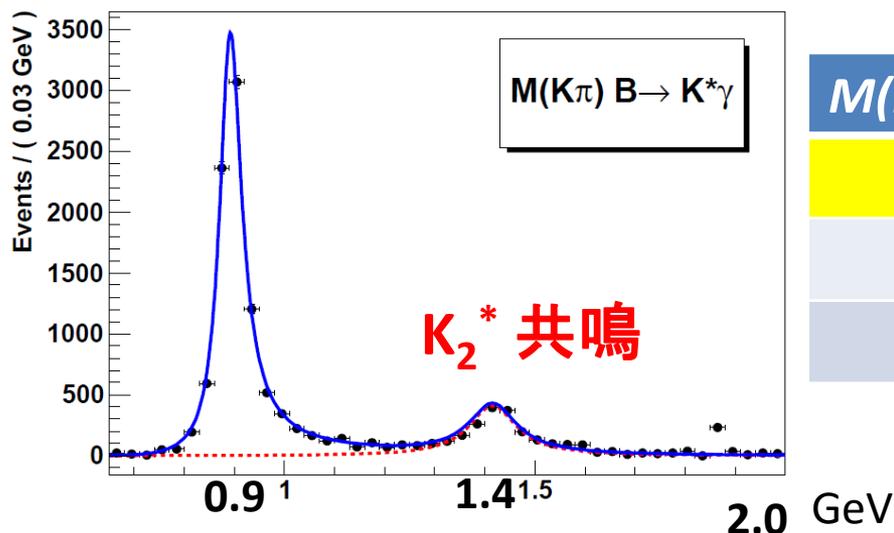
$A_{CP}(B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma), A_{CP}(B^+ \rightarrow K^{*+} \gamma), \Delta_{0-}, \Delta A_{CP}$

- $M(K\pi)$  30 MeV/c<sup>2</sup> ごとに  $M_{bc}$  のフィットし、 $M(K\pi)$  分布を作成
- P-wave Breit-Wigner 関数で  $M(K\pi)$  分布を  $K^*(892)$  と  $K_2^*(1430)$  に対してフィットし、 $B \rightarrow K\pi\gamma$  の寄与を見積もる

## P-wave Breit-Wigner の Amplitude

$$\mathcal{M}_{\text{BW}}(M_{K\pi}, M_{K\gamma}) = F_B F_{K^*} \frac{M_{K\gamma}^2 - M_{\pi\gamma}^2 + (M_B^2 - M_\gamma^2)(M_\pi^2 - M_K^2)}{M_{K^*}^2 - M_{K\pi} - iM_{K^*}\Gamma_{K\pi}}$$

$\Gamma_{K\pi}$ : 不変質量依存の崩壊幅



| $M(K\pi)$ window | 信号数           | 背景数        |
|------------------|---------------|------------|
| 75 MeV           | 7692.7 ± 80.9 | 8.4 ± 0.2  |
| 80 MeV           | 7816.6 ± 82.2 | 9.1 ± 0.2  |
| 90 MeV           | 8026.5 ± 84.4 | 10.4 ± 0.3 |

0.11% を系統誤差とする

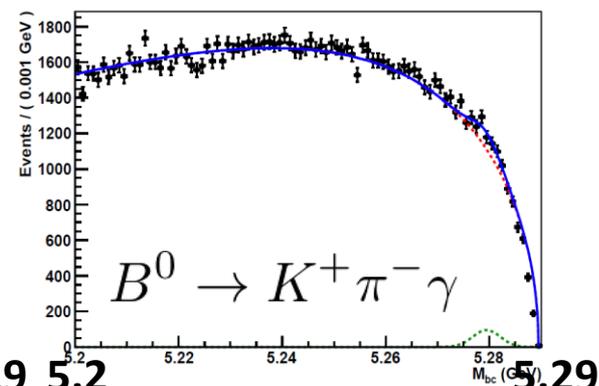
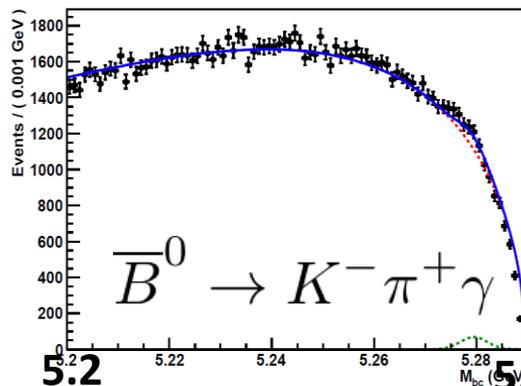
# 正負電荷の検出器の反応の違い

## 荷電粒子の検出効率は電荷によって異なる

- $qq$ 事象が支配的な領域の  $M_{bc}$  分布をフィットして決定
  - $-0.5 < \Delta E < 0.5$  GeV,  $|M(K\pi) - M(K^*)| < 75$  MeV/ $c^2$ ,  
**NB(ニューラルネット出力) < 0**
  - ピークを持つ要素は 0.5%程度 → ガウシアン で決定
  - Continuum 成分は ARGUS で決定
- **結果**

### Asymmetryの定義

$$A = \frac{N(B) - N(\bar{B})}{N(B) + N(\bar{B})}$$



### 崩壊モード

### Asymmetry (%)

$$B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \gamma / B^0 \rightarrow K^- \pi^+ \gamma \quad 0.32 \pm 0.19 \pm 0.02$$

$$B^+ \rightarrow K_s^+ \pi^0 \gamma / B^- \rightarrow K_s^- \pi^0 \gamma \quad -0.34 \pm 0.37 \pm 0.02$$

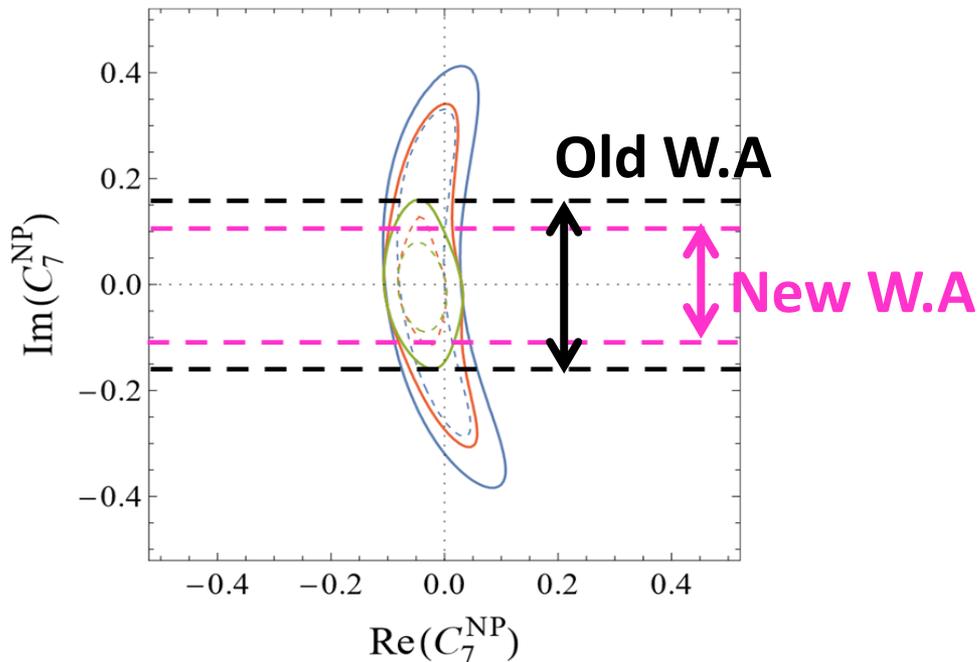
$$B^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \gamma / B^- \rightarrow K^- \pi^0 \gamma \quad 0.87 \pm 0.33 \pm 0.03$$

# 結果考察(CP非対称性の測定)

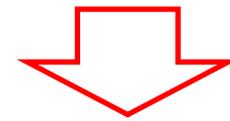
## $B \rightarrow K^* \gamma$ のCP非対称性は $C_7$ の虚数項に感度

$$A_{CP}(B^0 \rightarrow K^* \gamma) \sim [0.003 - 0.45 \text{Im}C_7(m_b)] \frac{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma)_{SM}}{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma)}$$

Altmannshofer, W. & Straub, D.M.  
Eur. Phys. J. C (2015) 75: 382



$$|\text{Im}(C_7)| < 0.16 (95\% \text{C.L.})$$



$$|\text{Im}(C_7)| < 0.11 (95\% \text{C.L.})$$

新物理に強い制限をかけられる

### 実数項と虚数項の $C_7$ への制限

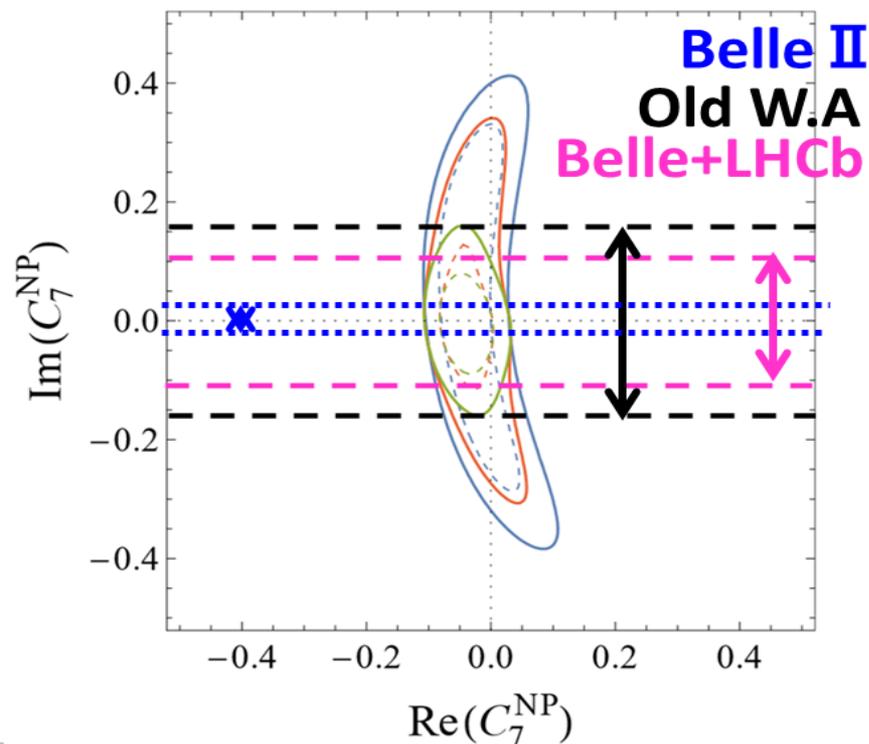
青:  $A_{CP}(B \rightarrow K^* \gamma)$ の結果含まない

赤:  $A_{CP}(B \rightarrow K^* \gamma)$ の結果含む。50%の理論の不定性

緑:  $A_{CP}(B \rightarrow K^* \gamma)$ の結果含む。25%の理論の不定性

# Belle II における測定精度

- 2018年から運転開始予定
- 積分ルミノシティ: 50倍
- 崩壊分岐比(系統誤差改善が狙い)
  - Belleの測定で系統誤差が支配的
  - $\Delta E$ の要求を厳しくすることで、 $B$ 由来の背景事象を減らす。
  - 粒子識別効率の改善
- $CP$ 非対称性,  $\Delta A_{CP}$   
(統計誤差改善が狙い)
  - $\sim 0.3\%$ 以下の測定精度
- アイソスピン非対称性  
(統計、系統誤差両方改善)
  - $\sim 0.2\%$ の統計誤差
  - $f_+/f_{00}$ の測定も向上見込み



# $f_{+-}/f_{00}$

- **The ratio of BFs btw  $Y(4S) \rightarrow B^0 B^0$  and  $B^+ B^-$** 
  - assuming 100% of the branching fraction of  $Y(4S) \rightarrow BB$
- **Calculation of the reconstructed events with signal ( $N_s$ ) and double ( $N_d$ ) tag method**

$$N_s = 2N_{B\bar{B}} f_{00} \epsilon_s \mathcal{B}(B^0 \rightarrow D^{*+} \ell^- \nu)$$

$$N_d = N_{B\bar{B}} f_{00} \epsilon_d [\mathcal{B}(B^0 \rightarrow D^{*+} \ell^- \nu)]^2$$

$$f_{00} = \frac{\epsilon_d / \epsilon_s^2 N_s^2}{4N_d N_{B\bar{B}}}$$

$$f_{+-}/f_{00} = 1.058 \pm 0.024$$

- Dominated uncertainty is statistical uncertainty however it is comparable to total systematic uncertainty.
- Major systematic source is number of B mesons ( $n_{BB}$ ).
- $n_{BB}$  uncertainty comes from the cross section measurement of the decay of  $ee \rightarrow \mu\mu$ .
- This parameter will be improved in Belle II .

- We consider about the CP and isospin asymmetries which have peaking backgrounds.

| 崩壊                                       | $\Delta_{0-}$    | $A_{CP}$         |
|--|------------------|------------------|
| $B \rightarrow Xs\gamma$                 | $-0.01 \pm 0.06$ | $0.015 \pm 0.02$ |
| <u><math>B \rightarrow Xs\eta</math></u> | $0 \pm 0.20$     | $-0.13 \pm 0.05$ |
| $B \rightarrow K^*\eta$                  | -                | $0.19 \pm 0.05$  |
| $B \rightarrow K^*\pi^0$                 | -                | $-0.15 \pm 0.13$ |

# 誤識別率( $w$ )の見積もり

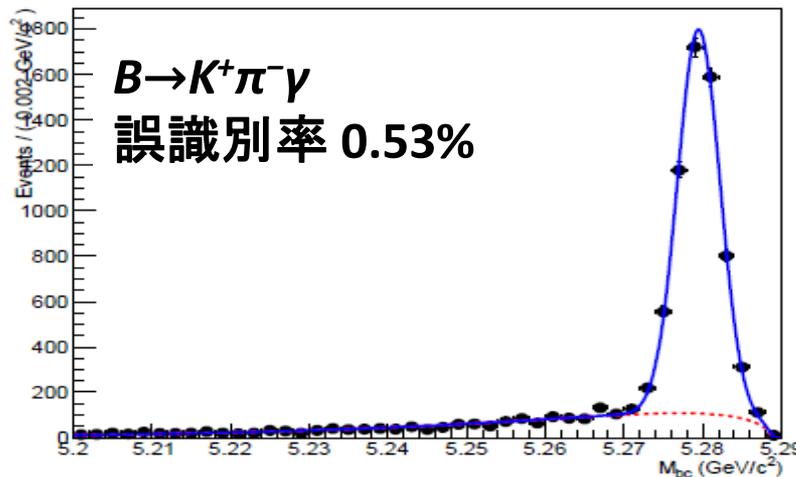
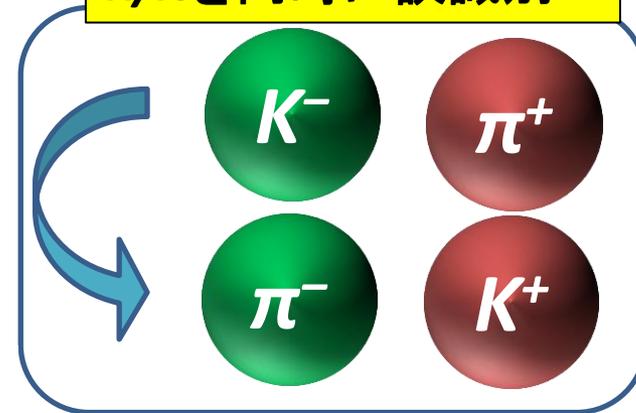
## CP非対称性の測定に影響する誤識別の寄与

$$A_{CP} = \frac{1}{1 - 2w} \frac{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow \bar{K}^* \gamma) - \mathcal{B}(B \rightarrow K^* \gamma)}{\mathcal{B}(\bar{B} \rightarrow \bar{K}^* \gamma) + \mathcal{B}(B \rightarrow K^* \gamma)}$$

$w$ : 誤識別率

- Double Miss ID イベント
  - $K^\pm \pi^\mp$ を同時に誤識別
- $M_{bc}$  分布のピークを抽出し非対称度を計算
  - ピークPDF: ガウシアン
  - 背景事象: ARGUS関数

K/ $\pi$ を同時に誤識別



# その他の系統誤差

- **B中間子数 (1.37%)**
  - Off-resonance の運転との比較をして計算。  $(771.581 \pm 10.566) \times 10^6$
- **光子の検出効率(2.0%)**
  - Radiative Bhabha event ( $e^+e^- \rightarrow e^+e^- \gamma$ ) と missing 4-vector の比を計算
- **K/ $\pi$  識別 (1.65% at  $B \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$ )**
  - $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+$ ,  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$  を再構成し、PIDの選別前後の信号数を比較して評価する。 $\pi_s^+$ によって  $D^0$  か anti- $D^0$  か決定できる。
  - 運動量と  $K\pi$  の数に依存するので崩壊過程ごとに評価
- **$\pi^0$  検出効率(1.27%)**
  - $\varepsilon = N(\eta \rightarrow 3\pi^0)/N(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$  と定義し、MCと実データの比を計算して評価する。ただし  $N(\eta \rightarrow \gamma\gamma)/N(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)$  はMCとデータで等しいと仮定。
- **Fitter の不定性**
  - フィット関数を持つ不定性: ToyMC から決定
  - 固定したパラメータの不定性: Control sample や別実験の測定結果から不定性を求める
- **物理定数(PDGより)**
  - life time ratio  $\tau(B^+)/\tau(B^0) = 1.076 \pm 0.004$
  - $\Upsilon(4S)$  の崩壊分岐比 ( $f_{+-}/f_{00}$ ) =  $1.058 \pm 0.024$