

**“Measurement of Branching Fractions as well as  
Isospin and  $CP$  Asymmetries in  $B \rightarrow K^* \gamma$  Decays  
at the Belle Experiment”**

**『Belle 実験における  $B \rightarrow K^* \gamma$  崩壊を用いた  
崩壊分岐比及びアイソスピン、 $CP$ 非対称性の測定』**

**素粒子実験研究室**

**堀口朋裕**

**(2017/1/26 公聴会)**

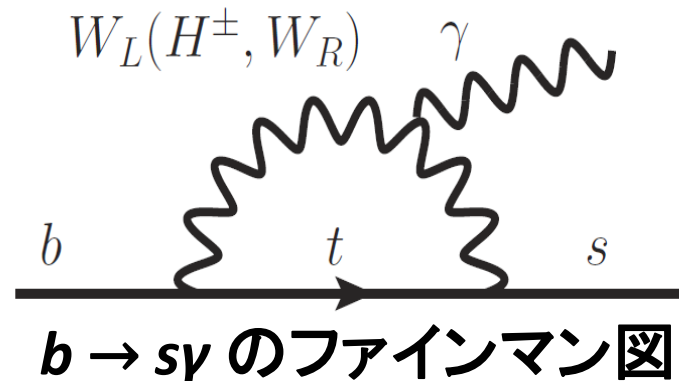
# Radiative Penguin Decay

## 新物理探索の現状

LHC 13 TeV の運転で兆候なし。 $O(1)$  TeVより高い領域に期待  
 ⇒ **間接測定**による探索が重要

### ● $b \rightarrow s\gamma$ 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(FCNC: Flavor Changing Neutral Current)
- ループ中に新物理の寄与がある場合、 $CP$ 非対称性などの観測が標準模型の予言からズれる ⇒ 新物理に感度
- 理論的に高精度の予言が可能なので新物理探索に有用



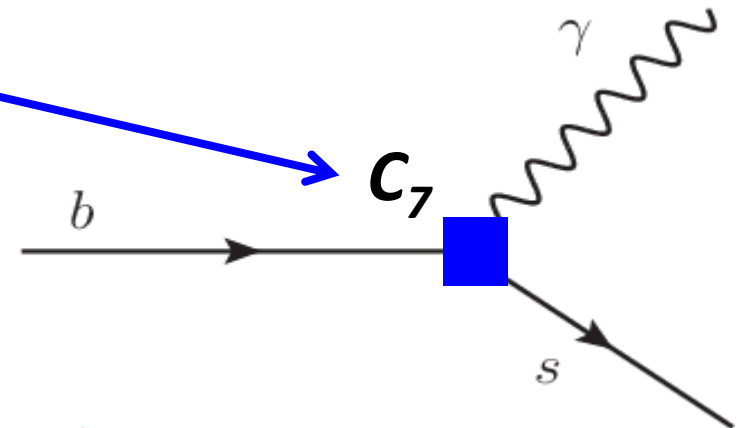
# Operator Product Expansion

- 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

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



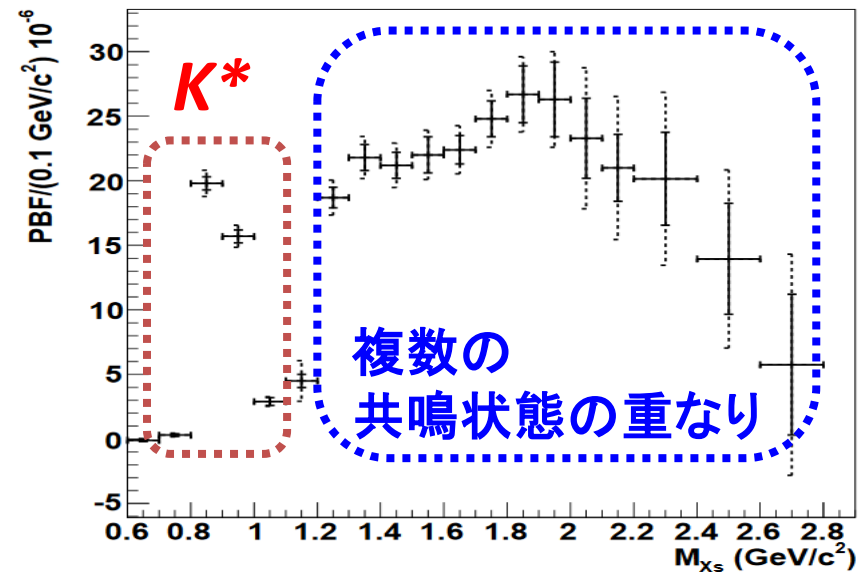
- $C_7$  は標準模型では実数
- 新物理の効果がある場合、 $C_7$  にズレが見られる
- 理論計算の精度
  - Inclusive( $b \rightarrow s\gamma$  全て): ハドロン化の影響小  
⇒ 崩壊分岐比、比の観測量が新物理に感度
  - Exclusive( $B \rightarrow K^*\gamma, B \rightarrow K_1\gamma$  など): ハドロン化の不定性大  
⇒ 比を計算して不定性をキャンセルできるので新物理に感度

# 信号事象: $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ 崩壊

## ● 特徴

- $b \rightarrow s\gamma$  の崩壊の中で崩壊分岐比が大きい(全体の10%)
- 他の共鳴状態からの分離が可能
  - 他の共鳴状態から離れている
  - 狭い崩壊幅
  - 2体崩壊
- ハドロン化の理論計算精度が悪い
  - 崩壊分岐比の予言精度が悪い
  - 崩壊分岐比の比を計算することで不定性を打ち消す
    - CP非対称性
    - アイソスピン非対称性

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



# 本研究での観測量

- 崩壊分岐比( $\mathcal{B}$ )  $\mathcal{B}(B \rightarrow K^* \gamma) = \frac{\Gamma(B \rightarrow K^* \gamma)}{\Gamma_{\text{total}}}$
- $CP$  非対称性( $A_{CP}$ )

– Strong-weak phase に寄与する新物理(NP)

## 導出

SMの  $B \rightarrow K^* \gamma$  は  $CP$  phase は小さく、崩壊モードの干渉もない

$$\mathcal{A}(B \rightarrow K^* \gamma) = A_{\text{SM}} e^{i\delta_{\text{SM}}} + A_{\text{NP}} e^{i(\theta_{\text{NP}}^{\text{CP}} + \delta_{\text{NP}})}$$

$$A_{CP} \propto |\mathcal{A}(B \rightarrow K^* \gamma)|^2 - |\mathcal{A}(\bar{B} \rightarrow \bar{K}^* \gamma)|^2 = -4|A_{\text{SM}} A_{\text{NP}}| \sin \theta_{\text{NP}}^{\text{CP}} \sin(\delta_{\text{SM}} - \delta_{\text{NP}})$$

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

$w$ : 誤識別率

# 本研究での観測量

## ● アイソスピン 非対称性( $\Delta_{0-}$ )

– Spectator particle, 対消滅事象

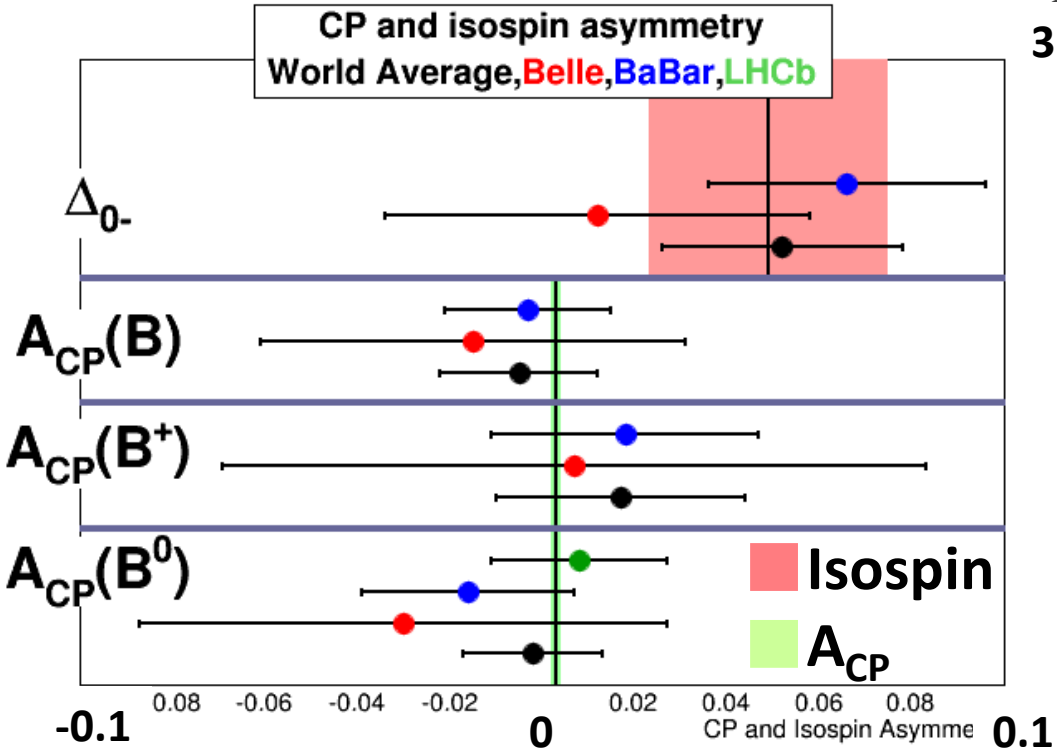
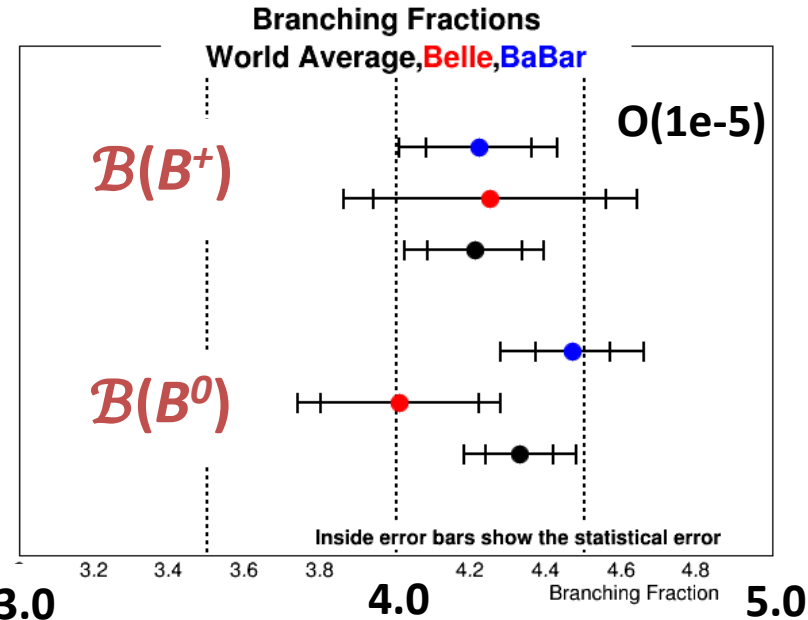
$$\Delta_{0-} = \frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \gamma) - \Gamma(B^- \rightarrow K^{*-} \gamma)}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \gamma) + \Gamma(B^- \rightarrow K^{*-} \gamma)} = \frac{(\tau_{B^+}/\tau_{B^0}) \mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow \bar{K}^{*0} \gamma) - \mathcal{B}(B^-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

## ● 中性、荷電 $B$ 中間子の $CP$ 非対称性の差( $\Delta A_{CP}$ )

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

# 観測量(これまでの測定)

- 世界平均はほぼ BaBarの精度で決定
  - Belle  $85 \times 10^6$  BB
  - BaBar  $383 \times 10^6$  BB
- Belleの全データ( $772 \times 10^6$ BB)を使って精度向上を目指す



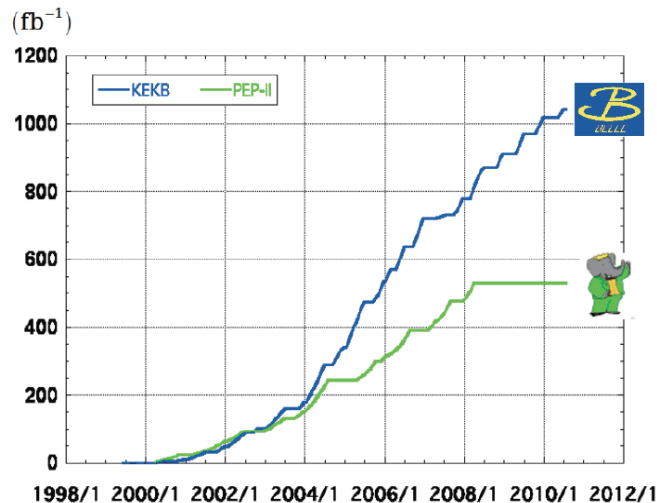
- 崩壊分岐比は系統誤差が支配的
- 比の測定は統計誤差が支配的
- $B^0$ 崩壊のCP非対称性はLHCbでも測定

# Belle実験(加速器)

## ○KEKB加速器(1999-2010)

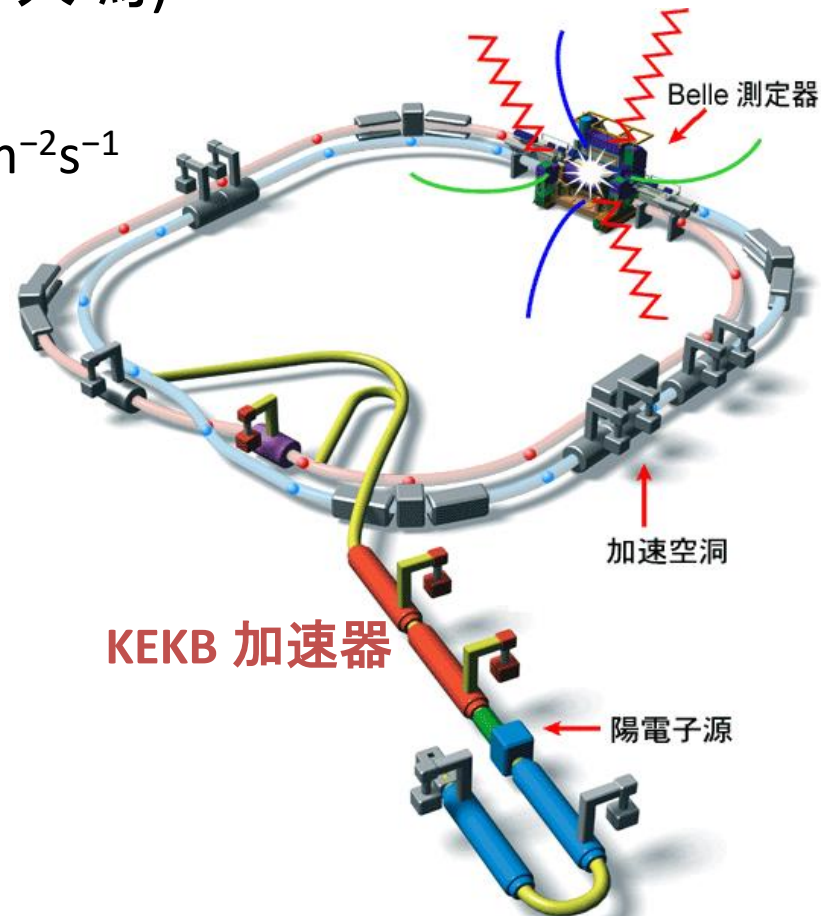
- 茨城県つくば市にある周長3kmの円形加速器
- 電子(8GeV)、陽電子(3.5GeV)の衝突
- 主要運転は **10.58 GeV (Y(4S) 共鳴)**
- 世界最高輝度の運転
  - 瞬間ルミノシティ:  $2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
  - 積分ルミノシティ:  $1040 \text{ fb}^{-1}$

### 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>

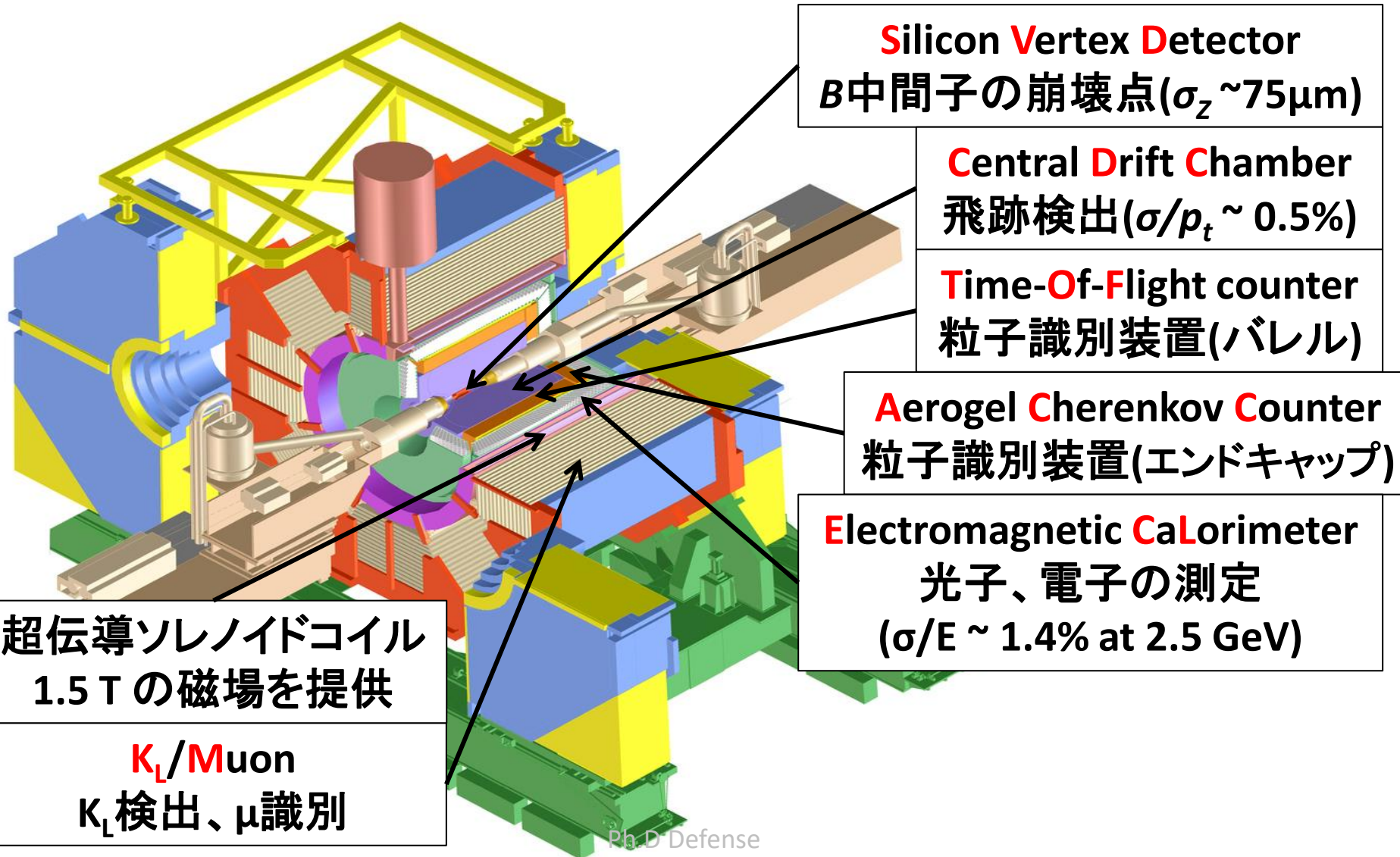
**~ 550 fb<sup>-1</sup>**  
**On resonance:**  
 Y(4S): 433 fb<sup>-1</sup>  
 Y(3S): 30 fb<sup>-1</sup>  
 Y(2S): 14 fb<sup>-1</sup>  
**Off resonance:**  
 ~ 54 fb<sup>-1</sup>





# 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



## ● ブラインド解析手法

- 恣意的な解析にならないように、高統計のMonte Carlo(MC)シミュレーションでカット値を決定してから実データ解析
- 信号事象の検出効率と背景事象の量と分布を見積もる

## ● 解析手順

1. MCシミュレーションサンプルを生成
2.  $B$ 中間子の再構成
  - 構成粒子を個別に再構成して組み合わせる
3. 背景事象抑制
  - 信号有意度を高くするため背景事象を除去する
4. 信号抽出
  - $M_{bc}$ 分布をフィットして信号数を得る
5. 実データを使った解析

# 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

# 再構成

- 4つの崩壊モード
  - $K_S\pi^0\gamma, K^+\pi^-\gamma, K_S\pi^+\gamma, K^+\pi^0\gamma$
- 高エネルギー光子の選択
- 粒子の検出
- $B$ 中間子の再構成

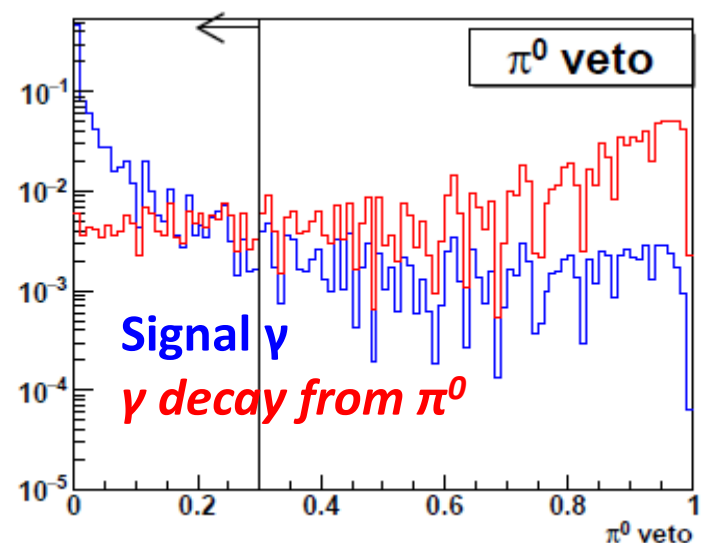
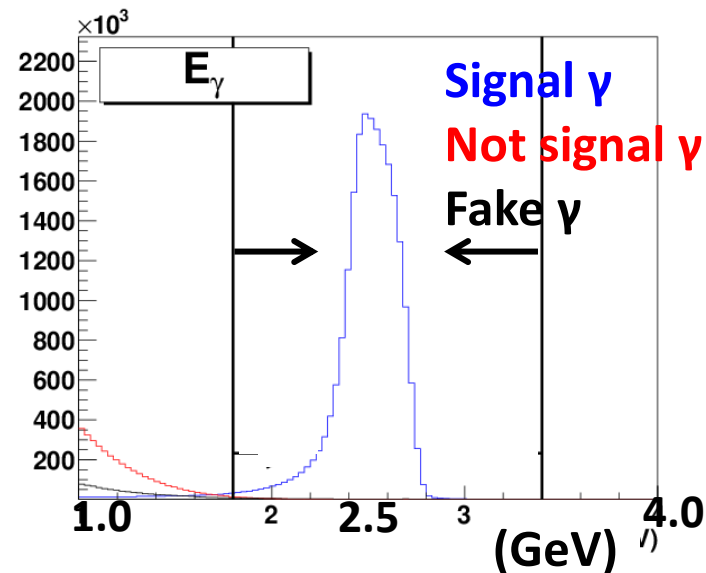
## $b \rightarrow s\gamma$ 崩壊で最も特徴的な信号 高エネルギーで孤立したECLクラスターを選ぶ

### ● 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

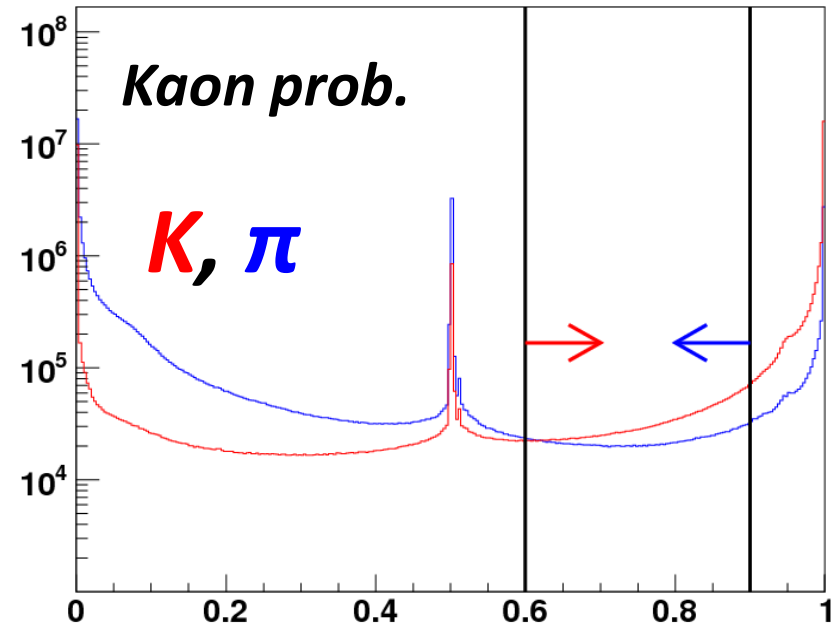
- $\pi^0(\eta)$ から崩壊した高い運動量をもつ光子の除去
- イベント中の光子を組み合わせ、尤度を計算
  - $m_{\gamma\gamma}$ : 2光子の不変質量
  - $\pi^0(\eta) \rightarrow \gamma_{\text{high}}\gamma_{\text{low}}$  崩壊の $\gamma_{\text{low}}$ の運動量



# 粒子の再構成

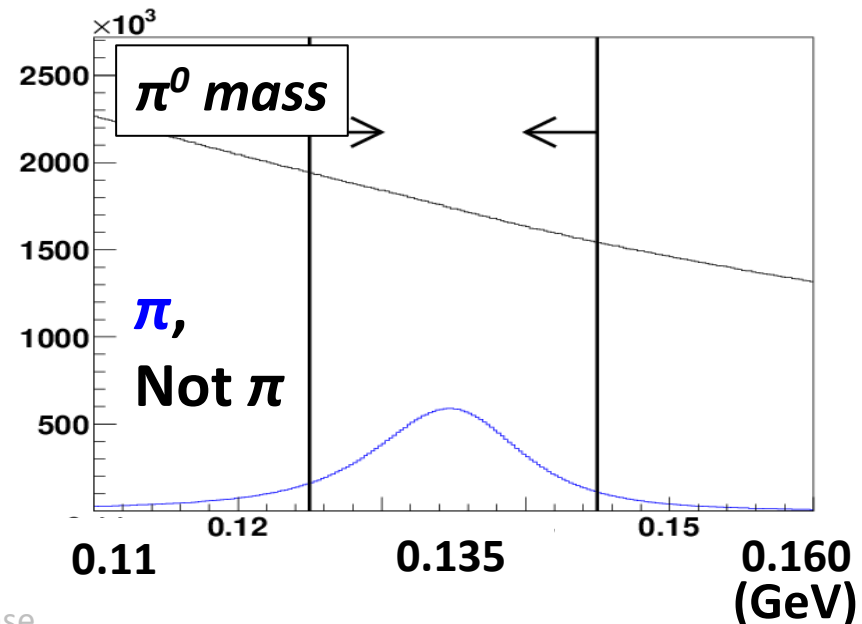
## ● 荷電粒子( $K^\pm, \pi^\pm$ )の選択

- 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%



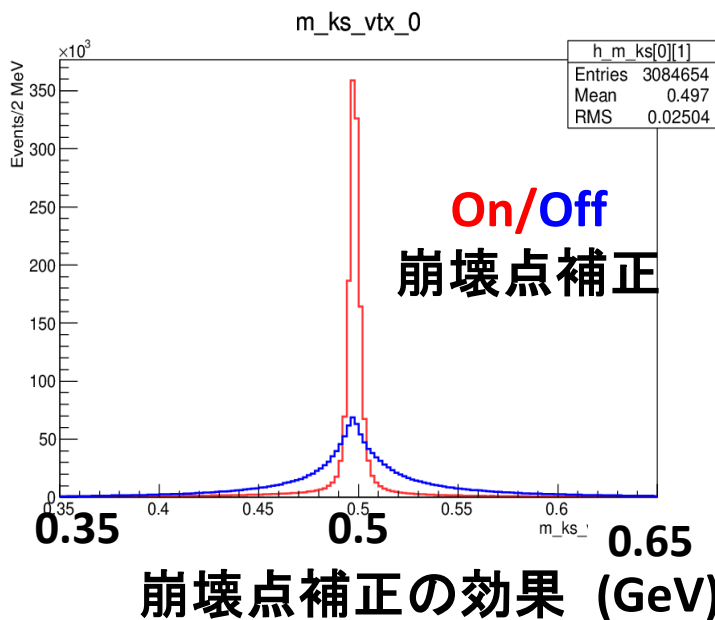
## ● $\pi^0 (\rightarrow \gamma\gamma)$ の再構成

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



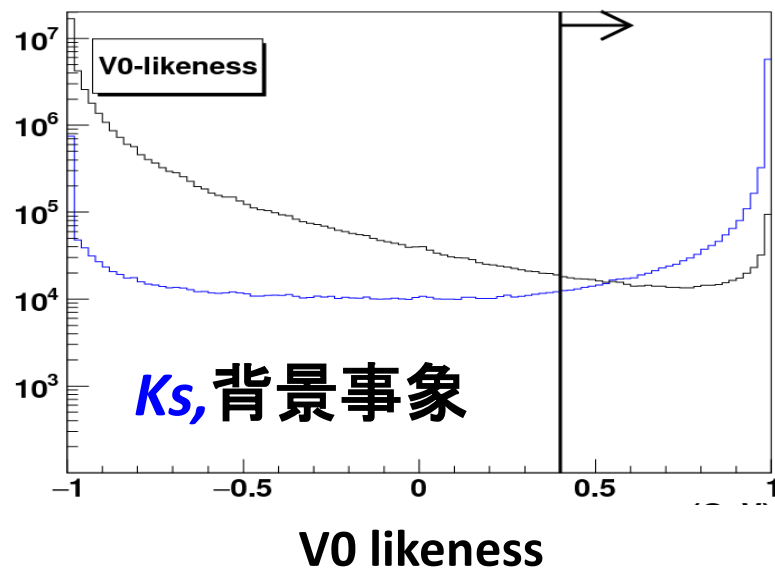
# $K_S$ の再構成

- 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

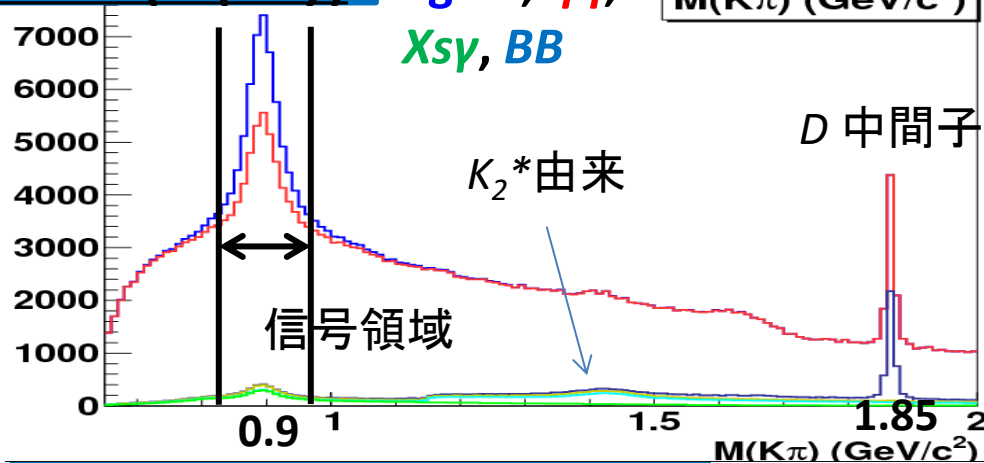


# B中間子の再構成

## K $\pi$ Mass ( $M(K\pi)$ )

Signal,  $qq$ ,  
 $Xsy$ ,  $BB$

$B \rightarrow K^* \gamma$   
 $M(K\pi)$  ( $\text{GeV}/c^2$ )



## 信号領域

$$|M(K\pi) - M(K^*)| < 75 \text{ MeV}/c^2$$

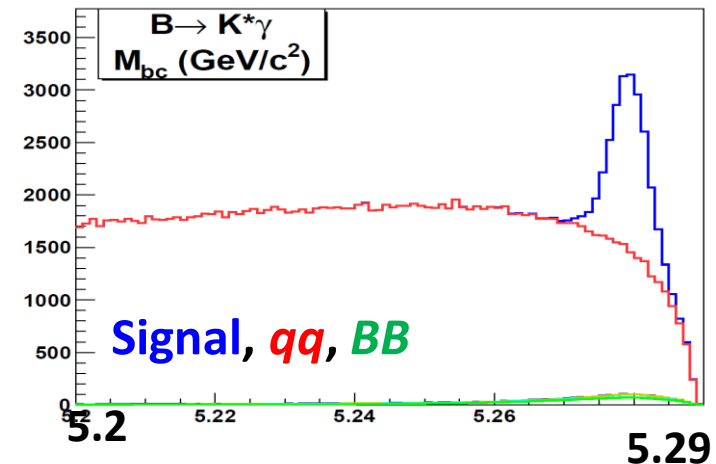
## Beam Constrained Mass

$$M_{bc} = \sqrt{E_{beam}^{c.m.s2} - |\vec{p}_B^{c.m.s}|^2}$$

$E_{beam}$ : ビームエネルギー

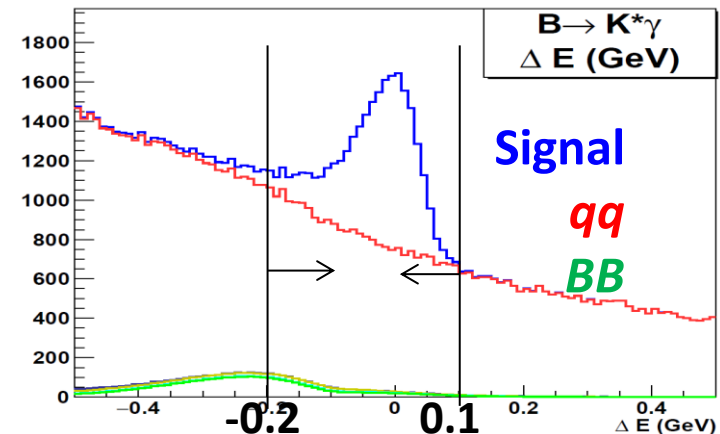
$p_B$ : 再構成したB中間子の運動量

B中間子の質量(5.279 GeV)にピーク



## Energy Difference

$$\Delta E = E_{beam}^{c.m.s} - E_B \text{ (0にピーク)}$$





# 背景事象の抑制

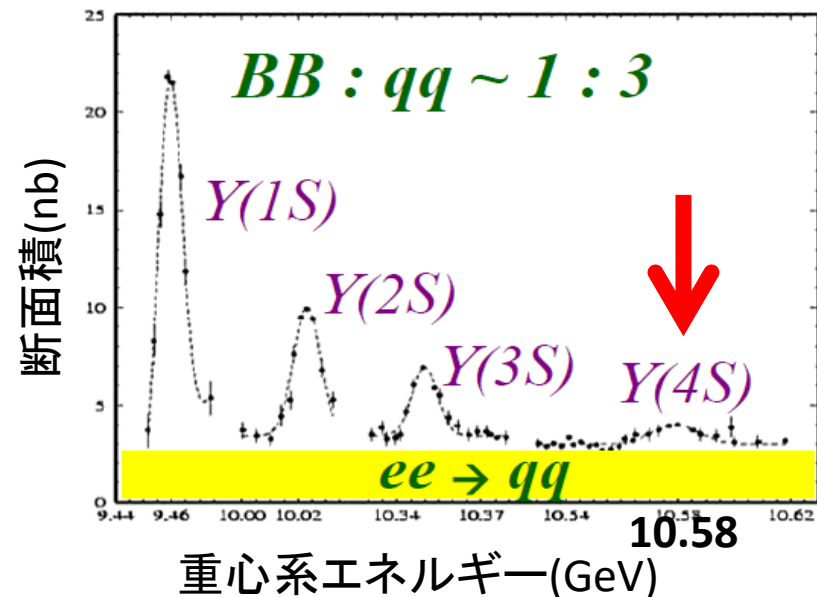
- $qq$  背景事象
- $B$ 候補の選択
- $BB$  背景事象

# 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
- 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

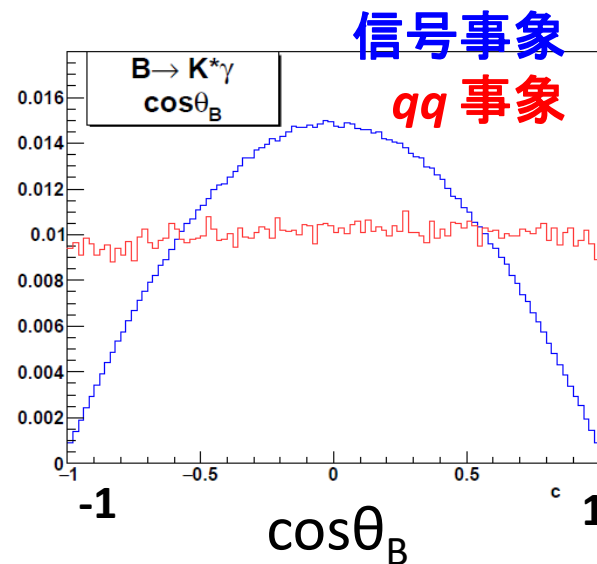
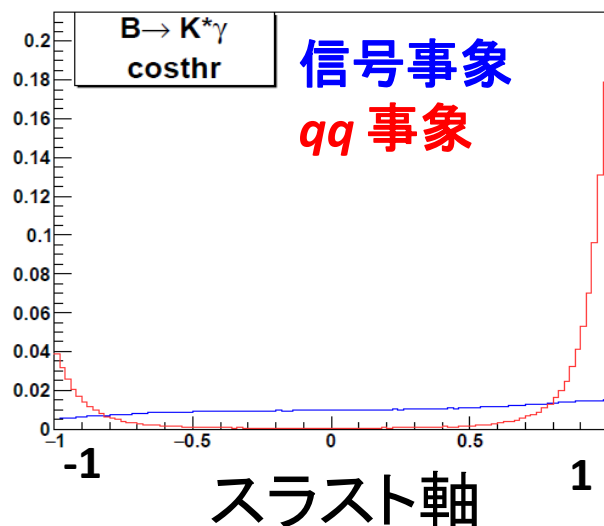
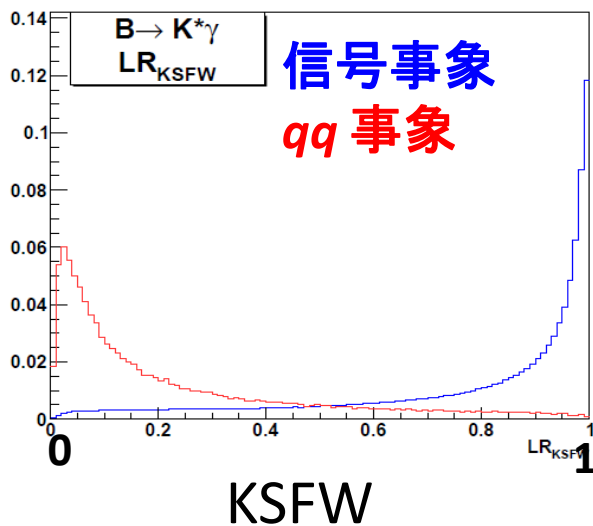
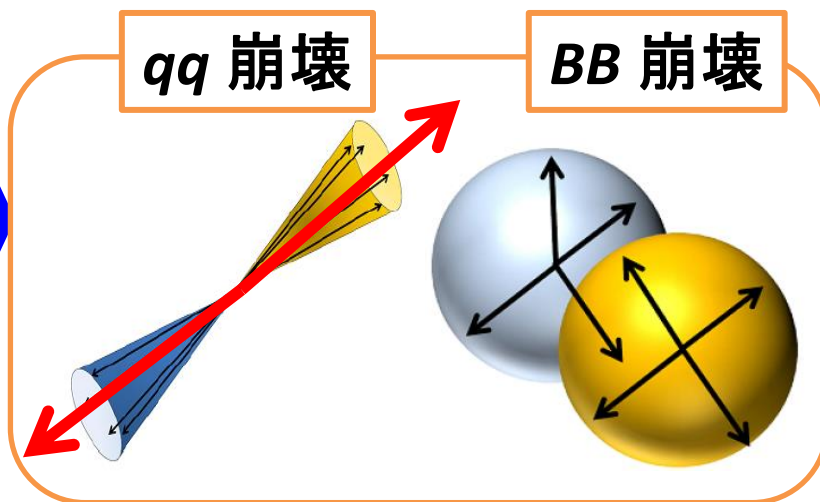
- 信号数の7%程度の混入
- $M_{bc}$ にピークを作る

| $B \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$ | 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

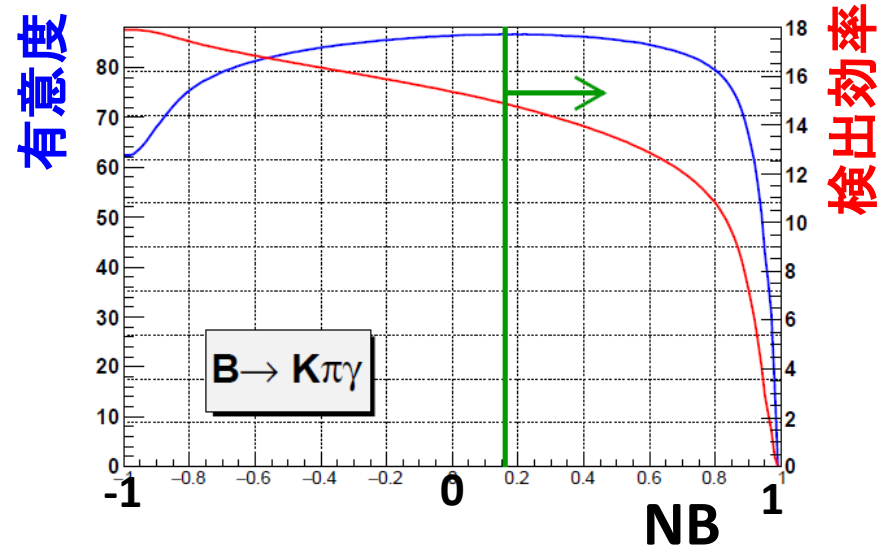
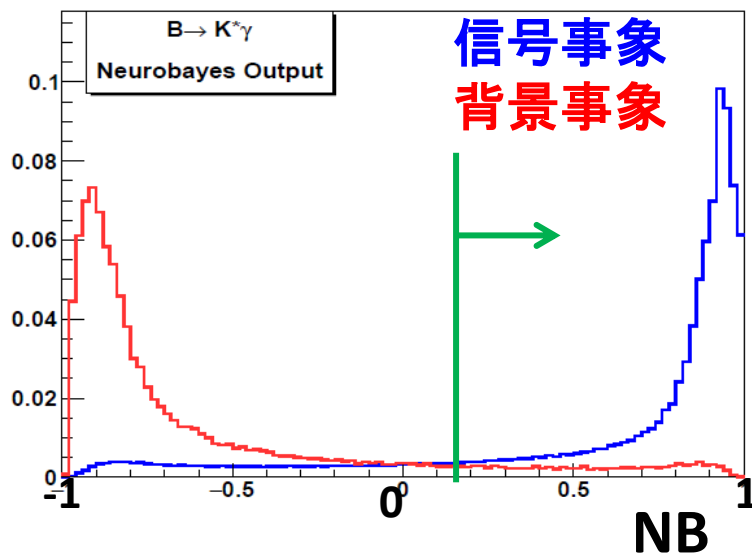
## 選別に有効なパラメータ(9種類)

- 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,  $qr$



# qq背景事象抑制の結果

- 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



| Decay              | $K_s \pi^0 \gamma$ | $K^+ \pi^- \gamma$ | $K_s \pi^+ \gamma$ | $K^+ \pi^0 \gamma$ |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| qq bkg reject. (%) | 89.1%              | 89.3%              | 88.0%              | 89.2%              |
| signal keep (%)    | 84.6%              | 83.4%              | 83.1%              | 84.0%              |

崩壊過程ごとの qq 事象抑制結果

**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)

# B崩壊の背景事象

## $M_{bc}$ にピークを持つ背景事象の把握

- RareB 由来(信号の2.3%)
  - 高エネルギー $\gamma$ と $\pi^0/\eta$ の由来 $\gamma$ の事象の誤識別
  - 主要素(70~80%程度):  $B \rightarrow K^* \eta$ ,  $B \rightarrow K^* \pi^0$
- $X_s \gamma$  由来 (信号の5%)
  - $\pi$  1つ分の検出ミス
  - 約80%が $B \rightarrow K \pi \pi \gamma$ 由来
- 複数信号候補があるイベントに対して  
single candidate の要求
  - 無作為に抽出

# 信号事象と背景事象のB候補数

$B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$  のB候補数の表

|                   | 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             | 31.80% | 47.56 |
| qq 抑制             | 5712.9  | 1412.0            | 534.2             | 26.51% | 65.28 |
| Single cand.      | 5340.2  | 1292.2            | 464               | 24.78% | 63.39 |

信号事象数が75%を占める信号事象が支配的な崩壊過程

# 信号抽出

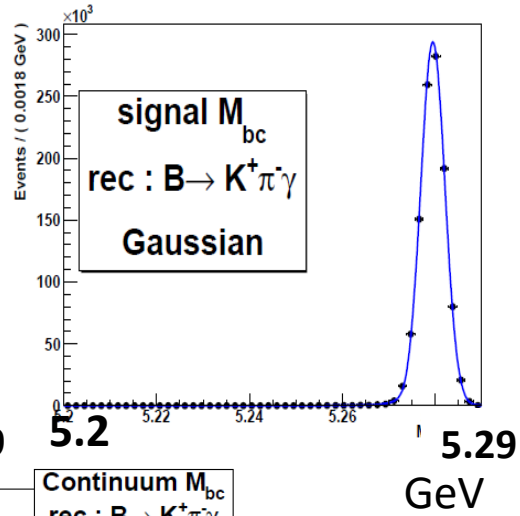
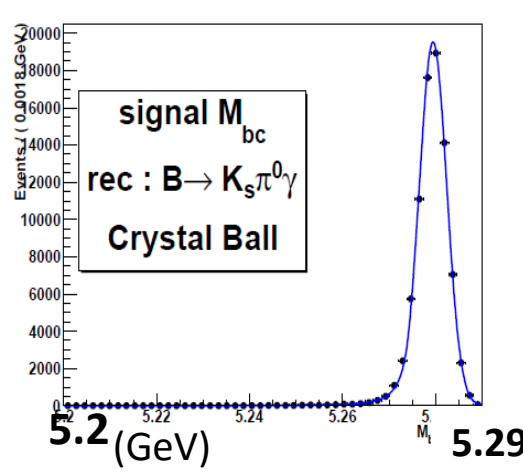
$M_{bc}$ 分布をフィットして信号抽出

– Unbinned Maximum Likelihood

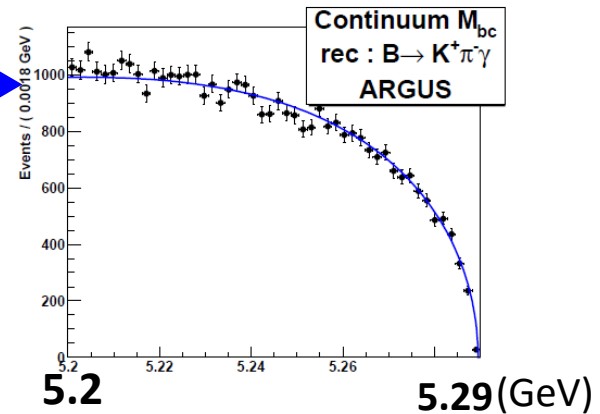
# PDFの決定

## ● 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

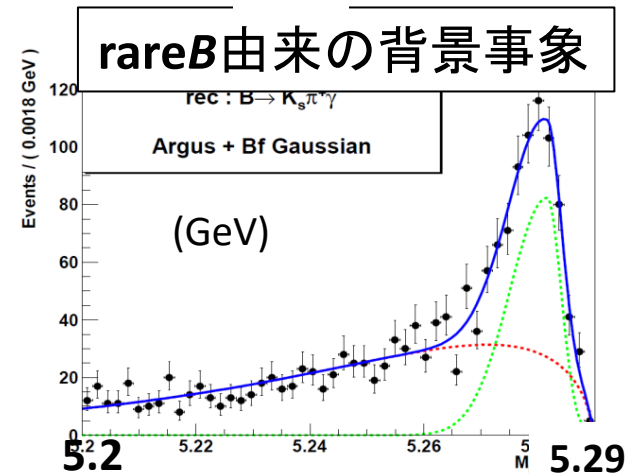
Rare B decay (2.3%)

$X_s \gamma$  decay (4.9%)

Cross-feeds (0.9%)

Combinatorial (0.4%)

ARGUS +  
Bifurcated Gaussian





# Likelihood の定義

## ● 7つの $M_{bc}$ 分布を同時にフィット

- 崩壊分岐比(BF)とCP非対称性( $A_{CP}$ )を変数としてLikelihoodを定義
- 観測量を同時に決定

### 利点

Numerical calculation に比べ系統誤差の計算を簡単にし、極小化ができる。

### 6種類のパラメータを決定

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

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

$$\Delta_{0-}, \Delta A_{CP}$$

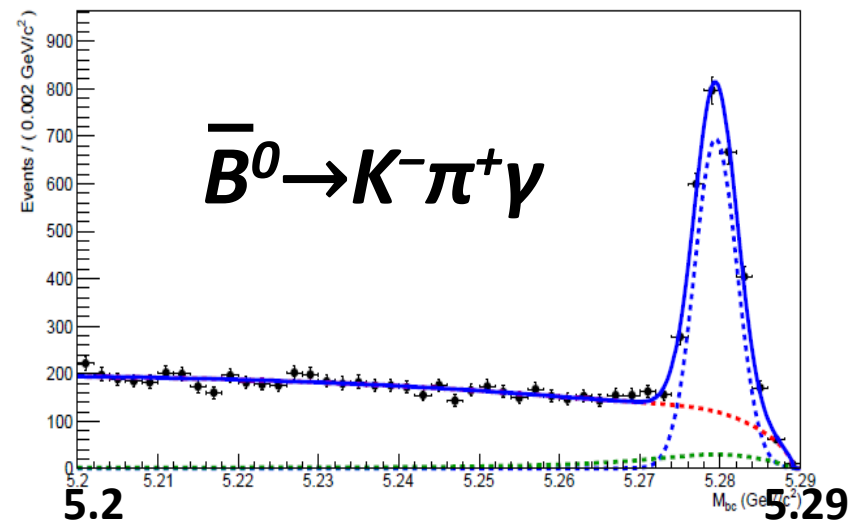
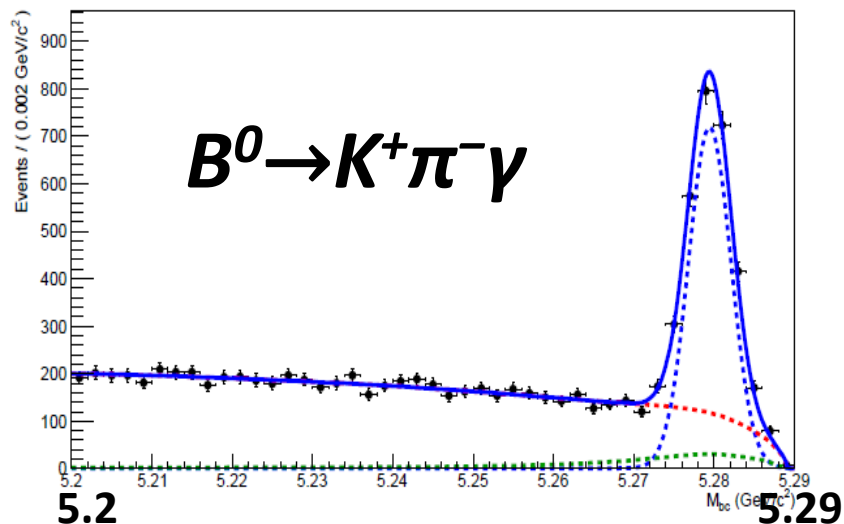
$$\begin{aligned}
 -\ln \mathcal{L} = & - \sum_i \ln \mathcal{L}_i^{K_s \pi^0 \gamma}(BF^N) && \text{添え字の } N, C \text{ は } B^0, B^+ \text{ の崩壊を表す} \\
 & - \sum_i \ln \mathcal{L}_i^{K^+ \pi^- \gamma}(BF^N, A_{CP}^N) - \sum_i \ln \mathcal{L}_i^{K^- \pi^+ \gamma}(BF^N, A_{CP}^N) \\
 & - \sum_i \ln \mathcal{L}_i^{K_s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

# 実データの解析

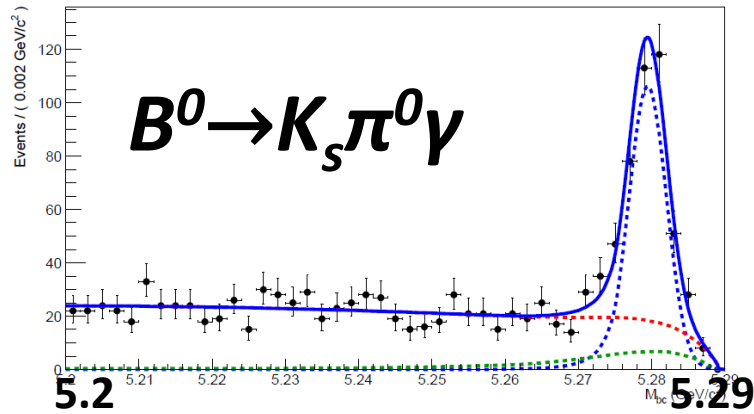
# フィット結果

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

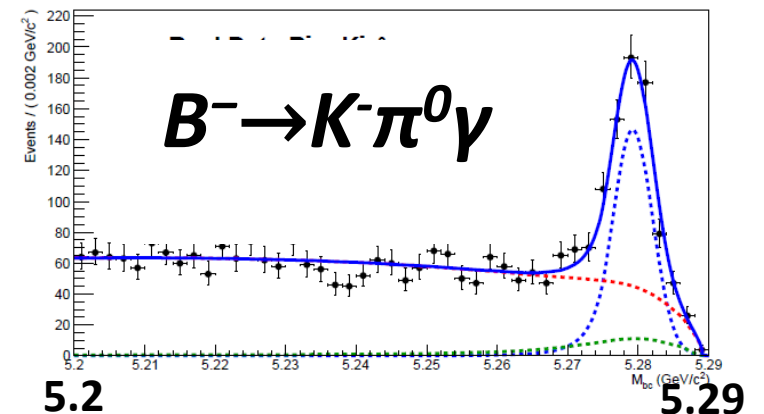
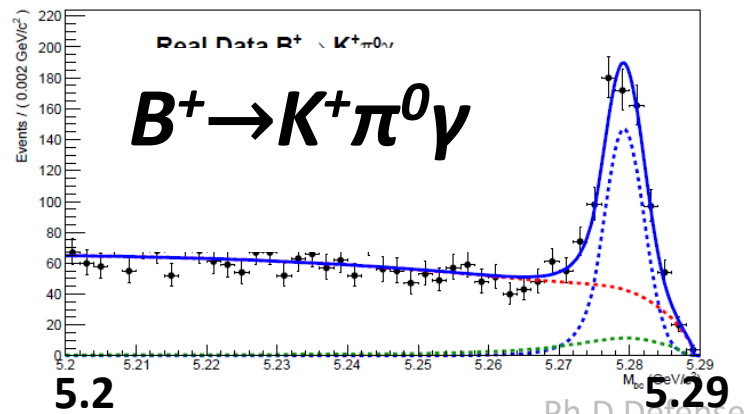
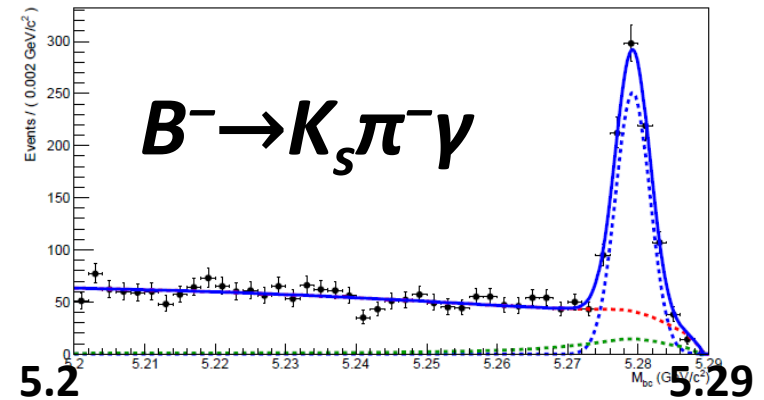
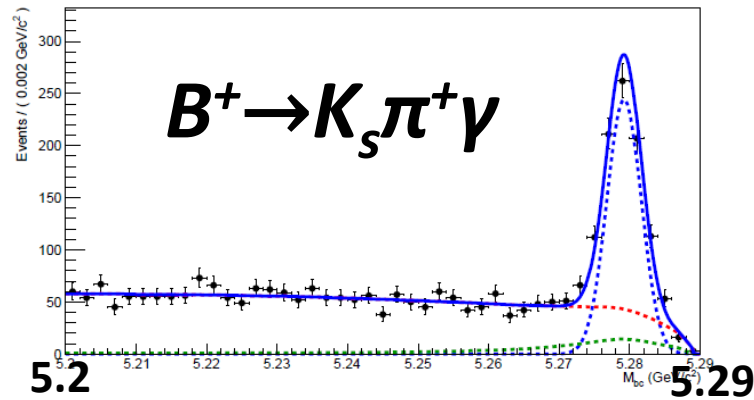
信号事象,  $qq$  事象  
 $B$  由来の背景事象



| 崩壊過程                               | $N(\bar{B})$ | $N(B)$ | 合計                         |
|------------------------------------|--------------|--------|----------------------------|
| $B^0 \rightarrow K_s \pi^0 \gamma$ |              |        | $352.5 \pm 23.2 \pm 11.5$  |
| $B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$ | 2385.9       | 2294.9 | $4681.3 \pm 81.9 \pm 74.2$ |
| $B^+ \rightarrow K_s \pi^- \gamma$ | 724.5        | 757.1  | $1481.6 \pm 45.9 \pm 24.6$ |
| $B^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \gamma$ | 580.1        | 565.6  | $1145.7 \pm 45.4 \pm 37.9$ |



信号事象,  $qq$ 事象,  
B由来の背景事象



# 検出効率の補正と 系統誤差の見積もり

実データと MC の違いを理解するための検証研究

検出効率比" $R_{\text{eff}}$ "を用いて評価。

$R_{\text{eff}}$ の1からのずれを補正、誤差を系統誤差とする。

$$R_{\text{eff}} = \frac{\text{efficiency}^{\text{data}}}{\text{efficiency}^{\text{MC}}}$$

|   |                 |               |
|---|-----------------|---------------|
|   | MC の統計          | 0.14 - 0.36 % |
|   | $B$ 中間子の数       | 1.370 %       |
|   | 高エネルギー光子        | 2.000 %       |
|   | トラック            | 0.350/track % |
|   | K/ $\pi$ ID     | 1.650 %       |
| ○ | $K_S$           | 0.920%        |
|   | $\pi^0$         | 1.270 %       |
| ○ | $M(K\pi)$       | 0.110 %       |
| ○ | $qq$ 事象抑制の補正    | 0.560 %       |
| ○ | 電荷依存の検出効率の補正    | 0.1 - 0.2 %   |
|   | $f_{+-}/f_{00}$ | 1.200 %       |
| ○ | Fitter の不定性     | 0.6 - 2.4 %   |
| ○ | Fit パラメータの不定性   | 0 - 2 %       |

○ 自分で求めたもの

# $K_s$ の再構成

31

- $K_s$  の質量分布を  $\cos\vartheta$  (lab),  $p_t$ , 飛行距離で分割
  - トラッキング効率が保証されている、飛行距離の第1 bin (IPに最も近い領域) を使って規格化

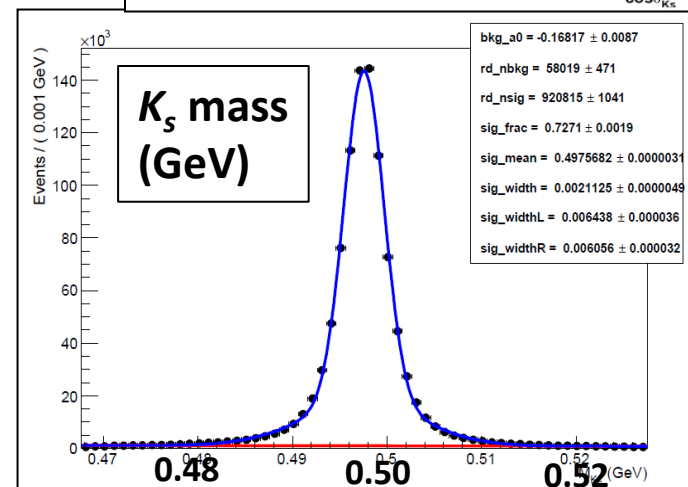
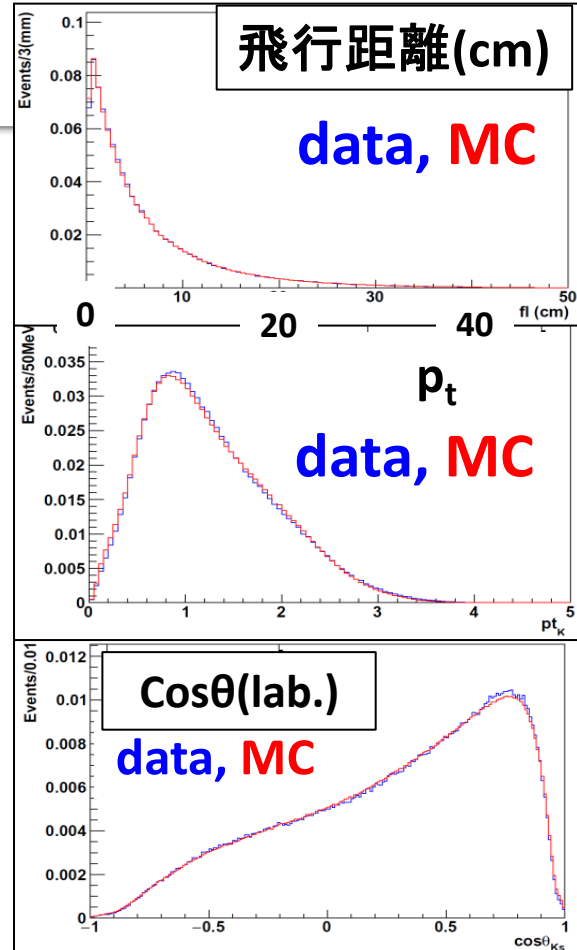
## Efficiency の定義

$$\epsilon_{ijk} = \frac{N_{ijk}}{N_{1jk}} \quad R_{ijk}^{\text{eff}} = \frac{\epsilon_{ijk}^{\text{data}}}{\epsilon_{ijk}^{\text{MC}}}$$

$$i : fl, j : \cos \theta_{K_s}, k : p_t$$

- $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi^+$ ,  $D^0 \rightarrow K_s \pi^+ \pi^-$  を再構成
  - $D^{*+}$  と  $D^0$  の質量差を要求し高純度の  $K_s$  を抽出
  - 信号抽出
    - 信号: Double Gaussian,
    - 背景事象: 1<sup>st</sup> order Chebyshev

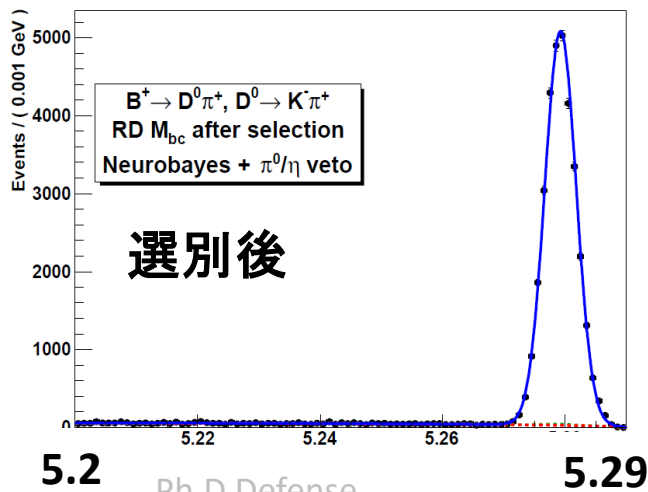
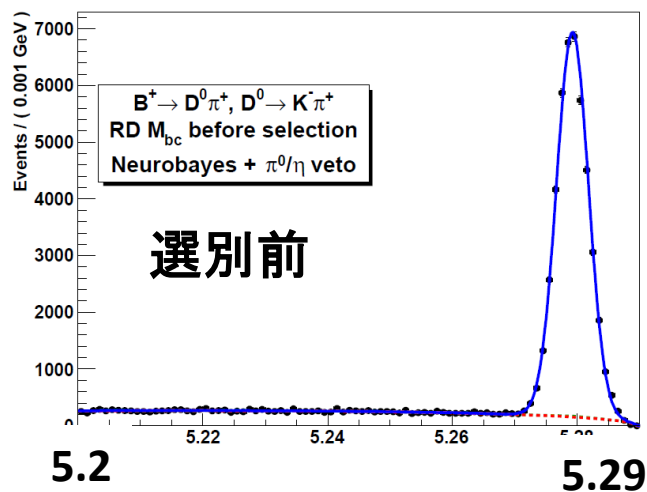
結果:  $R_{\text{eff}} = (100.08 \pm 0.92) \%$



# qq事象抑制と $\pi^0/\eta$ veto

- $B^+ \rightarrow D^0 \pi^+_f$ ,  $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$  /  $B^0 \rightarrow D^- \pi^+_f$ ,  $D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-$  を再構成
  - $\pi^+_f$  を高エネルギー光子、D中間子を  $K^*$  と仮定
  - $\pi^+_f$  の質量を0として  $\mathcal{L}^{\pi^0}$ ,  $\mathcal{L}^\eta$  を計算
  - $|M_D^{\text{rec.}} - M_D^{\text{PDG}}| < 10 \text{ MeV}$ ,  $|\Delta E| < 20 \text{ MeV}$  を要求
- qq事象選別と  $\pi^0/\eta$  veto 前後の  $M_{bc}$  をフィットし、 $R_{\text{eff}}$  を計算
  - $B \rightarrow D\pi$  event : Gaussian
  - qq事象: ARGUS
  - B由来の背景事象 : Gaussian (Fix)

$$R_{\text{eff}} = \frac{N_{\text{after}}^{\text{RD}} / N_{\text{before}}^{\text{RD}}}{N_{\text{after}}^{\text{MC}} / N_{\text{before}}^{\text{MC}}}$$



**$R = 97.53 \pm 0.56 \%$**   
**2.47% の補正と**  
**0.56% の系統誤差**

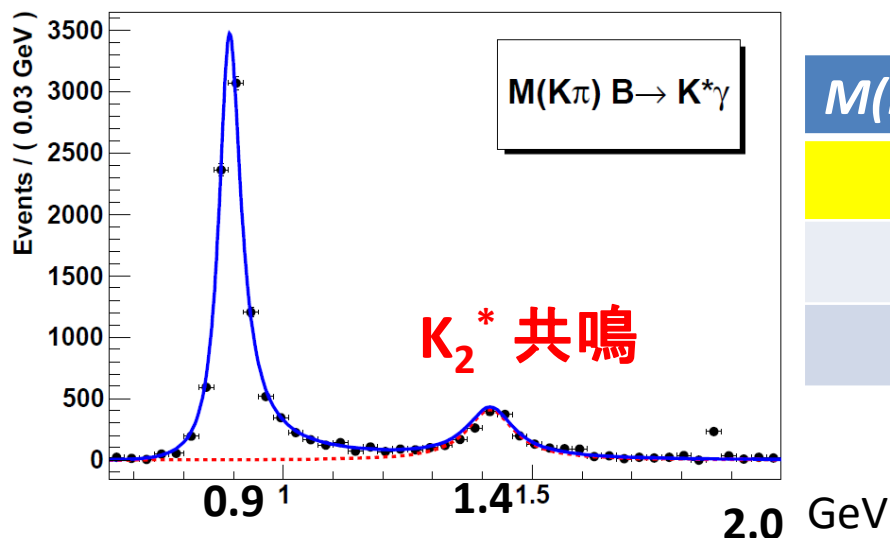


- $M(K\pi)$  30 MeV/ $c^2$  ごとに  $M_{bc}$  のフィットし、 $M(K\pi)$  分布を作成
- P-wave Breit-Wigner 関数で  $M(K\pi)$  分布を  $K^*(892)$  と  $K_2^*(1430)$  に対してフィットし、 $B \rightarrow K\pi\gamma$  の寄与を見積もる

## 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           | $7692.7 \pm 80.9$ | $8.4 \pm 0.2$  |
| 80 MeV           | $7816.6 \pm 82.2$ | $9.1 \pm 0.2$  |
| 90 MeV           | $8026.5 \pm 84.4$ | $10.4 \pm 0.3$ |

0.11% を系統誤差とする

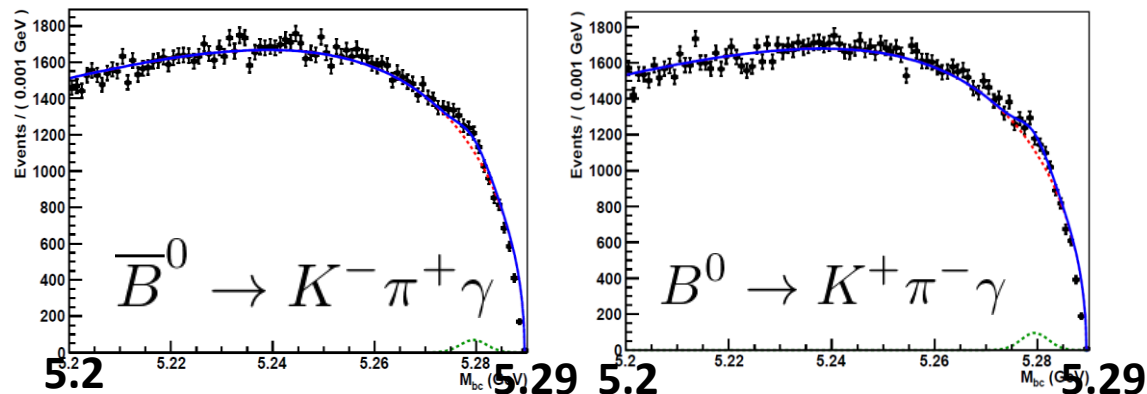
# 正負電荷の検出器の反応の違い

## 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
  - $-0.5 < \Delta E < 0.5 \text{ GeV}$ ,  $|M(K\pi) - M(K^*)| < 75 \text{ MeV}/c^2$ ,  
**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 (%)

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

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

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

# 系統誤差のまとめ(崩壊分岐比)

| (%)             | $BF(K_s\pi^0\gamma)$ | $BF(K+\pi-\gamma)$ | $BF(K_s\pi+\gamma)$ | $BF(K+\pi^0\gamma)$ | $BF(K^*+\gamma)$ | $BF(K^*0\gamma)$ |
|-----------------|----------------------|--------------------|---------------------|---------------------|------------------|------------------|
| MC stat.        | 0.358                | 0.133              | 0.239               | 0.285               | 0.185            | 0.127            |
| Bの生成数           | 1.370                | 1.370              | 1.370               | 1.370               | 1.370            | 1.370            |
| $\gamma$        | 2.000                | 2.000              | 2.000               | 2.000               | 2.000            | 2.000            |
| tracking        | 0.700                | 0.700              | 1.050               | 0.350               | 0.347            | 0.645            |
| K/ $\pi$ ID     | -                    | 1.650              | 0.800               | 0.840               | 0.820            | 1.568            |
| Ks              | 0.920                | -                  | 0.920               | -                   | 0.747            | 0.075            |
| $\pi^0$         | 1.270                | -                  | -                   | 1.270               | 0.424            | 0.089            |
| M(K $\pi$ )     | 0.110                | 0.110              | 0.110               | 0.110               | 0.110            | 0.110            |
| qq sup.         | 0.560                | 0.560              | 0.560               | 0.560               | 0.560            | 0.560            |
| Charge asym.    | -                    | 0.095              | 0.180               | 0.157               | 0.130            | 0.088            |
| $f_{+-}/f_{00}$ | 1.200                | 1.200              | 1.200               | 1.200               | 1.200            | 1.200            |
| Fit bias        | 2.353                | 0.193              | 0.663               | 1.309               | 0.182            | 0.165            |
| Fit param.      | 1.902                | 0.999              | 0.877               | 2.774               | 0.846            | 0.954            |
| Total           | 4.454                | 3.452              | 3.317               | 4.427               | 3.158            | 3.390            |

# 系統誤差のまとめ( $A_{CP}$ , $\Delta_{0+}$ , $\Delta A_{CP}$ )

| (%)                                  | $A_{CP}$<br>( $K^*0\gamma$ ) | $A_{CP}$<br>( $K_S\pi^+\gamma$ ) | $A_{CP}$<br>( $K^+\pi^0\gamma$ ) | $A_{CP}$<br>( $K^*+\gamma$ ) | $A_{CP}$<br>( $K^*\gamma$ ) | $\Delta_{0-}$ | $\Delta A_{CP}$ |
|--------------------------------------|------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|---------------|-----------------|
| MC stat.                             | -                            | -                                | -                                | -                            | -                           | 0.112         | -               |
| tracking                             | -                            | -                                | -                                | -                            | -                           | 0.148         | -               |
| K/ $\pi$ ID                          | -                            | -                                | -                                | -                            | -                           | 0.372         | -               |
| Ks                                   | -                            | -                                | -                                | -                            | -                           | 0.334         | -               |
| $\pi^0$                              | -                            | -                                | -                                | -                            | -                           | 0.167         | -               |
| Charge asym.                         | 0.095                        | 0.184                            | 0.159                            | 0.131                        | 0.076                       | 0.078         | 0.161           |
| <i>Life time</i>                     | -                            | -                                | -                                | -                            | -                           | 0.185         | -               |
| <i>f<sub>+-</sub>/f<sub>00</sub></i> | -                            | -                                | -                                | -                            | -                           | 1.200         | -               |
| Fit bias                             | 0.070                        | 0.116                            | 0.164                            | 0.092                        | 0.082                       | 0.083         | 0.115           |
| Fit param.                           | 0.027                        | 0.033                            | 0.146                            | 0.056                        | 0.034                       | 0.122         | 0.047           |
| Total                                | 0.121                        | 0.220                            | 0.271                            | 0.170                        | 0.117                       | 1.347         | 0.204           |

# 測定結果の考察

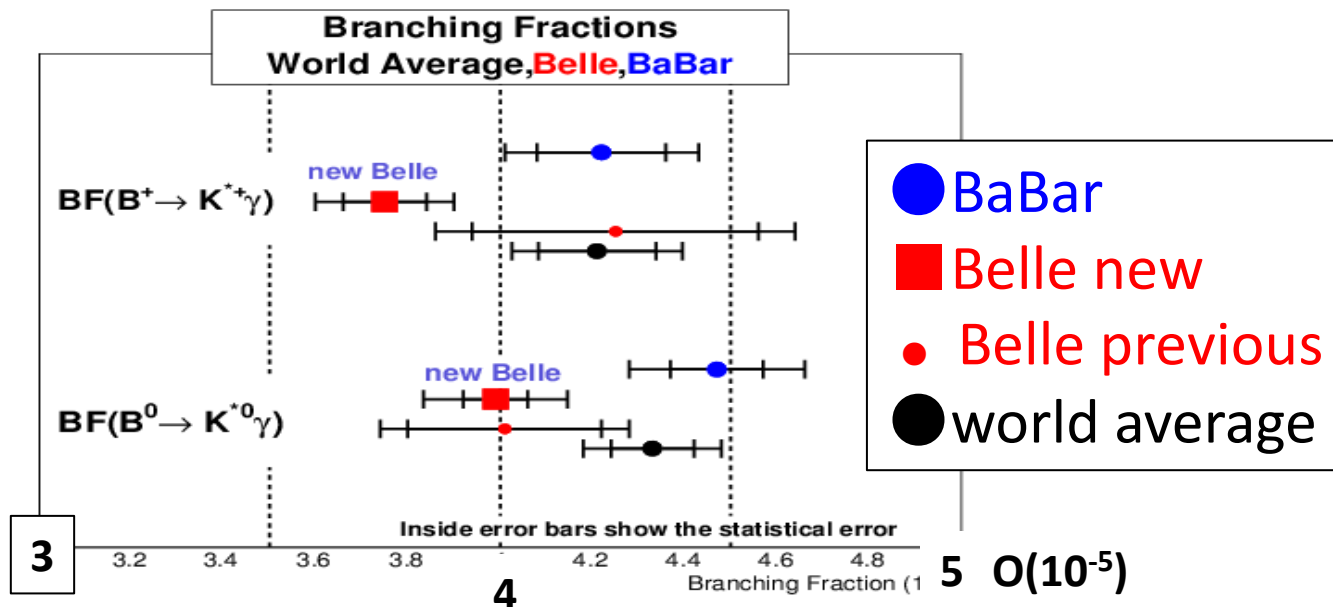
# 結果の考察(崩壊分岐比)

## 世界一の精度を更新

$$B(B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma) = (3.99 \pm 0.07 \pm 0.14) \times 10^{-5}$$

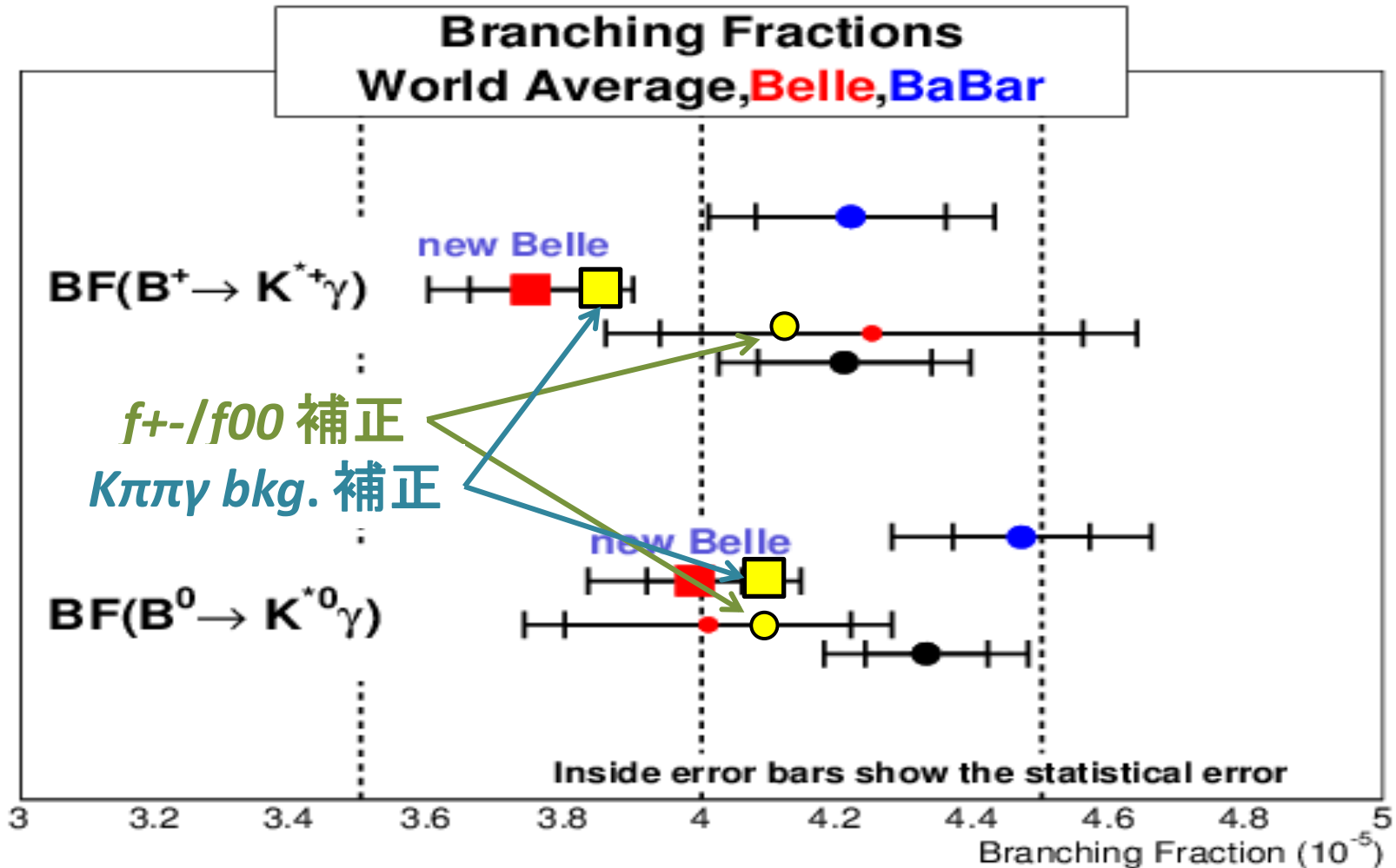
$$B(B^+ \rightarrow K^{*+} \gamma) = (3.75 \pm 0.09 \pm 0.12) \times 10^{-5}$$

系統誤差が支配的



## ● 崩壊分岐比の検証

- $B \rightarrow X_s \gamma$  ( $M_{X_s} < 1.15$  GeV) の崩壊分岐比は  $(3.99 \times 0.08(\text{stat.})) \times 10^{-5}$
- Belleの前結果の $f_{+-}/f_{00}$ を補正して比較
- $B \rightarrow K\pi\pi\gamma$  背景事象の検討
  - 個別に生成した $B \rightarrow K\pi\pi\gamma$  sampleを使わない時の結果



Belle の前回の結果:  $1\sigma$ 以内( $B^0$ )、 $1.5\sigma$ ( $B^+$ )以内で一致  
 世界平均:  $1.6\sigma$ ( $B^0$ )以内で $1.9\sigma$ 以内( $B^+$ )で一致

# 結果の考察(非対称性の測定)

## 全ての観測量で世界一の精度を更新

$$A_{CP}(B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma) = -0.013 \pm 0.017 \pm 0.001,$$

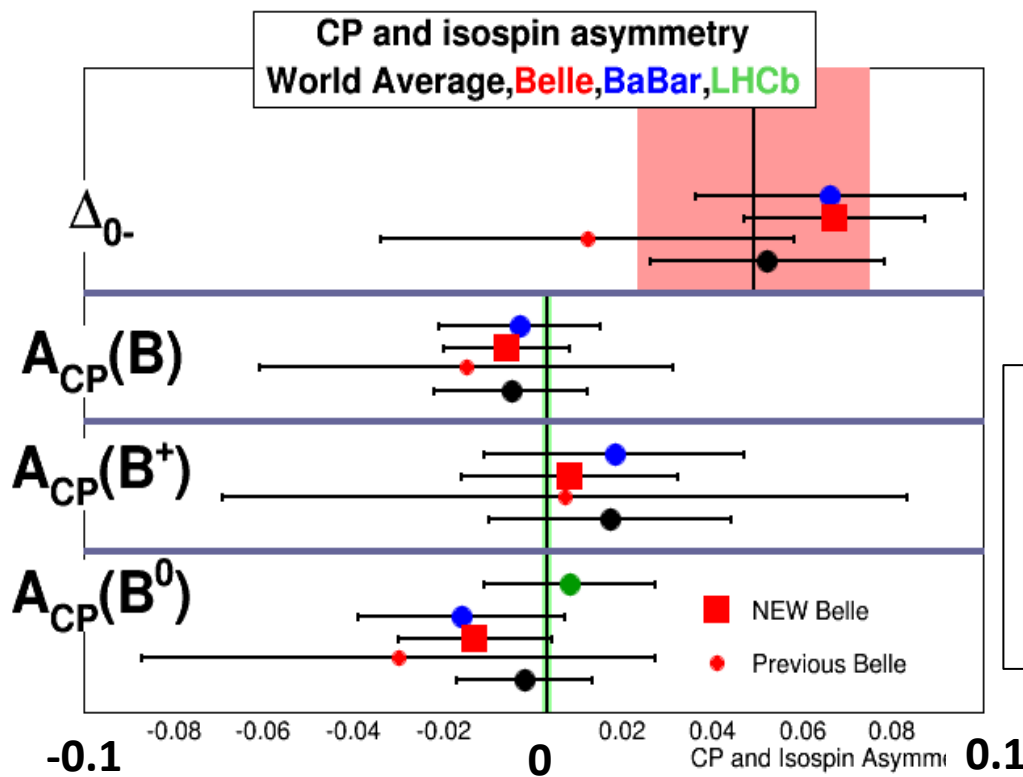
$$A_{CP}(B^+ \rightarrow K^{*+} \gamma) = 0.008 \pm 0.024 \pm 0.002,$$

$$A_{CP}(B \rightarrow K^* \gamma) = -0.006 \pm 0.014 \pm 0.001,$$

$$\Delta_{0-} = 0.067 \pm 0.015 \pm 0.013$$

$$\Delta A_{CP} = 0.021 \pm 0.029 \pm 0.002$$

統計誤差が支配的



● LHCb ● BaBar

■ Belle new

● Belle previous

● world average

- $A_{CP}$ ,  $\Delta_{0-}$ ,  $\Delta A_{CP}$ の全てで標準模型の予言、世界平均と無矛盾
- **アイソスピン破れの兆候(3.4 $\sigma$ )**を世界で初めて観測

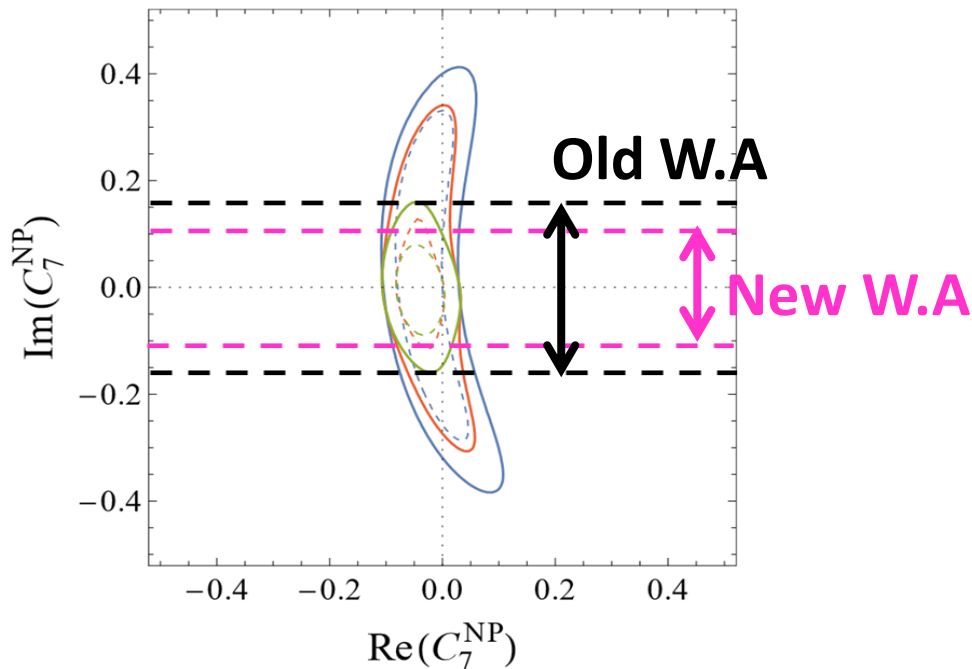


# 結果考察(CP非対称性の測定)

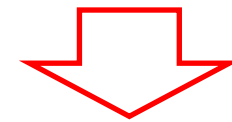
## $B \rightarrow K^* \gamma$ のCP非対称性は $C_7$ の虚数項に感度

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

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

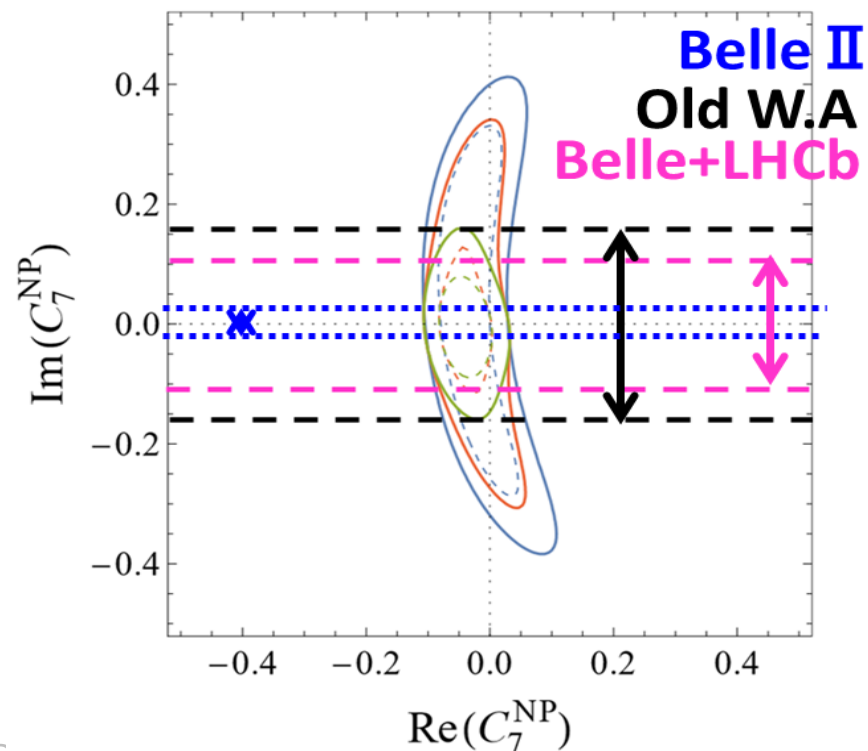
青:  $A_{CP}(B \rightarrow K^* \gamma)$ の結果含まない

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



# まとめ

- Belle実験の全データ( $772 \times 10^6$  BB対)を使って  $B \rightarrow K^* \gamma$  の崩壊分岐比、アイソスピン、CP非対称性、CP非対称性の電荷の違いを測定

$$\begin{aligned}
 \mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma) &= (3.99 \pm 0.07 \pm 0.14) \times 10^{-5}, \\
 \mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^{*+} \gamma) &= (3.75 \pm 0.09 \pm 0.12) \times 10^{-5}, \\
 A_{CP}(B^0 \rightarrow K^{*0} \gamma) &= -0.013 \pm 0.017 \pm 0.001, \\
 A_{CP}(B^+ \rightarrow K^{*+} \gamma) &= 0.008 \pm 0.024 \pm 0.002, \\
 A_{CP}(B \rightarrow K^* \gamma) &= -0.006 \pm 0.014 \pm 0.001, \\
 \Delta_{0-} &= 0.067 \pm 0.015 \pm 0.013 \\
 \Delta A_{CP} &= 0.021 \pm 0.029 \pm 0.002
 \end{aligned}$$

- 全測定で標準模型の予言と無矛盾で、**世界最高精度**を達成
- 崩壊分岐比は世界平均と $2.0\sigma$ 以内で一致
- $A_{CP}$ ,  $\Delta_{0-}$ ,  $\Delta A_{CP}$  は世界平均と $1.0\sigma$ 以内で一致
- **世界で初めて**アイソスピン破れの兆候を観測( $3.4\sigma$ )
- **世界で初めて**  $B \rightarrow K^* \gamma$  の  $\Delta A_{CP}$  を測定