

Belle II 実験におけるペンギン過程 $B \rightarrow K\pi\gamma$ のシミュレーション研究

2018年2月10日 第9回B2JAM
東北大学 M2
太田恭平



目次

・導入

- 輻射ペンギン過程($b \rightarrow s\gamma$)
- 信号事象: $B \rightarrow K\pi\gamma$
- 観測量

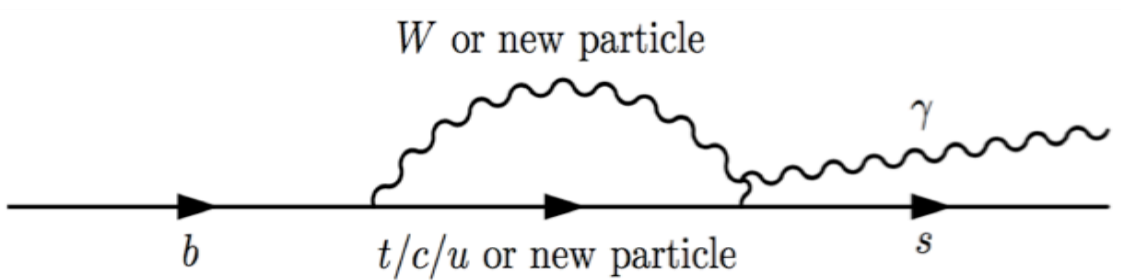
・研究内容

- $B \rightarrow K\pi\gamma$ の再構成
- フィッティング
- 結果

・まとめ

輻射ペンギン過程($b \rightarrow s \gamma$)

標準模型では、ツリーレベルのFCNC(Flavor Changing Neutral Current)は抑制され、ダイアグラムはループを含む。そのため、標準模型の効果が相対的に小さく、FCNCは新物理に感度がある。 $b \rightarrow s \gamma$ はFCNCの1つ。



$b \rightarrow s \gamma$ のファイマンダイアグラム。ループ中に新物理の寄与があると、観測値が標準模型の理論予測からズレル

クォークレベル

$b \rightarrow s \gamma$

ハドロンレベル

$B \rightarrow X_s \gamma$

(実際に観測可能な事象。

X_s はsクォークを含むハドロン系)

$X_s \rightarrow K\pi$ の事象が、本研究のターゲット

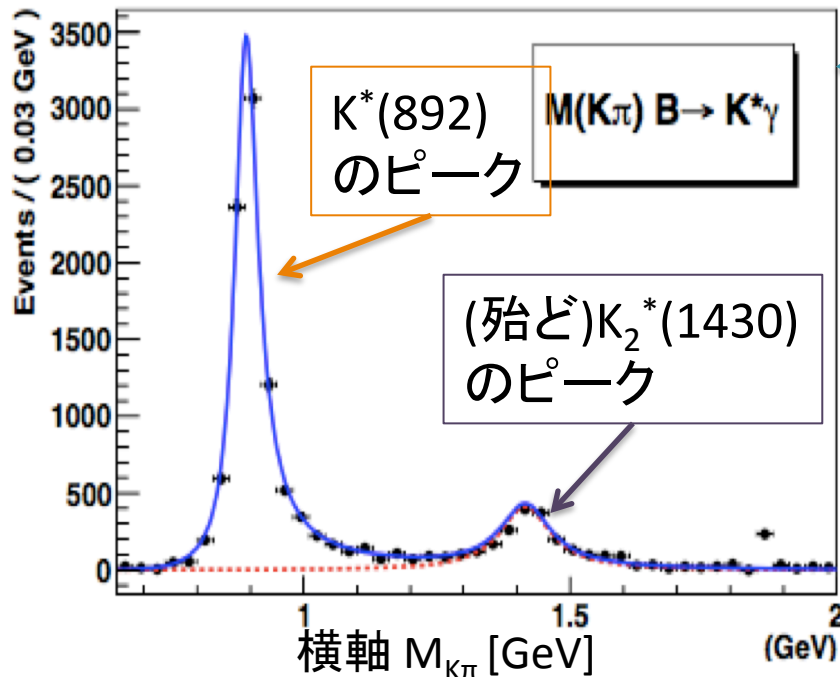
信号事象： $B \rightarrow K\pi\gamma$

本研究で信号事象として抽出したいのは、 $B \rightarrow K\pi\gamma$ 。

$B \rightarrow K\pi\gamma$ は、 $b \rightarrow s\gamma$ のハドロン過程の中でもクリーンな事象。

・モチベーション

B 中間子が $K\pi\gamma$ に崩壊するモードを包括的に測定し、それらの共鳴状態(レゾナンス)を分離して評価すること。



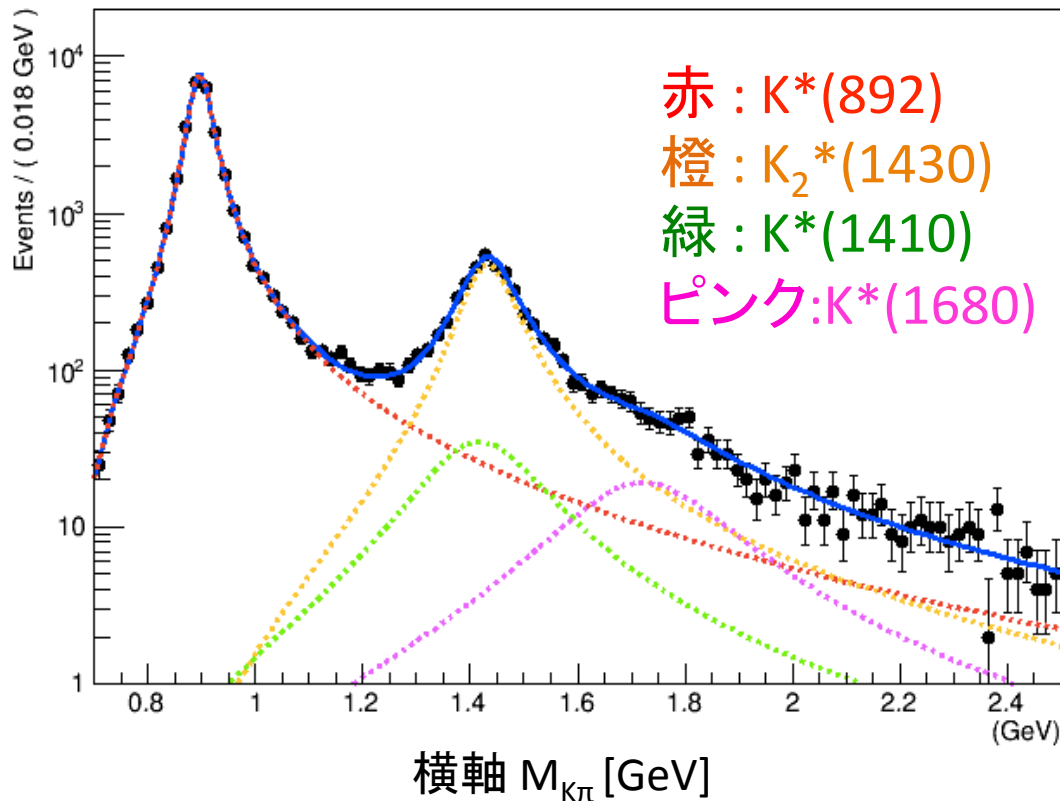
Belleの全データから作成された $M_{K\pi}$ 分布
($M_{K\pi}$: K と π の2体系の不変質量)

$B \rightarrow K\pi\gamma$ では、 $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ や $B \rightarrow K_2^*(1430)\gamma$ が支配的で、これまでも測定がなされてきた。しかし、現在のところ標準模型と一致。

信号事象： $B \rightarrow K\pi\gamma$

一方、 $K^*(892)$ と $K_2^*(1430)$ が支配的であるため、**その他のレゾナンス**がはっきりと観測されていない(比較的緩い上限が求められているのみ)。

そうした未発見のレゾナンス、例えば、 $K^*(1410)$ や $K^*(1680)$ のモードにおいても新物理の効果が大きく現れる可能性がある。



toyMCで作成した $M_{K\pi}$ 分布。
 崩壊分岐比は、Condition1(後述)を仮定。
 対数表示。

観測量

○想定したレゾナンス

$$K_X : K^*(892), K_2^*(1430), K^*(1410), K^*(1680)$$

・観測量1：崩壊分岐比

$$BF(B \rightarrow K_X \gamma) = \Gamma(B \rightarrow K_X \gamma) / \Gamma_{total}$$

Hadronizationの不定性があるため、理論の誤差が大きく、
新物理への感度は高くない。

・観測量2：直接的CP対称性の破れ

$$A_{CP} = \frac{\Gamma_{\bar{B} \rightarrow \bar{K}_X \gamma} - \Gamma_{B \rightarrow K_X \gamma}}{\Gamma_{\bar{B} \rightarrow \bar{K}_X \gamma} + \Gamma_{B \rightarrow K_X \gamma}}$$

崩壊分岐比の比を取ることで、Hadronizationの不定性が
キャンセルされるので、新物理に感度が高い。

- ・観測量3：中性、荷電B中間子の直接的CP対称性の破れの差

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

- ・観測量4：アイソスピン対称性の破れ

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

標準模型においても非対称性がある。

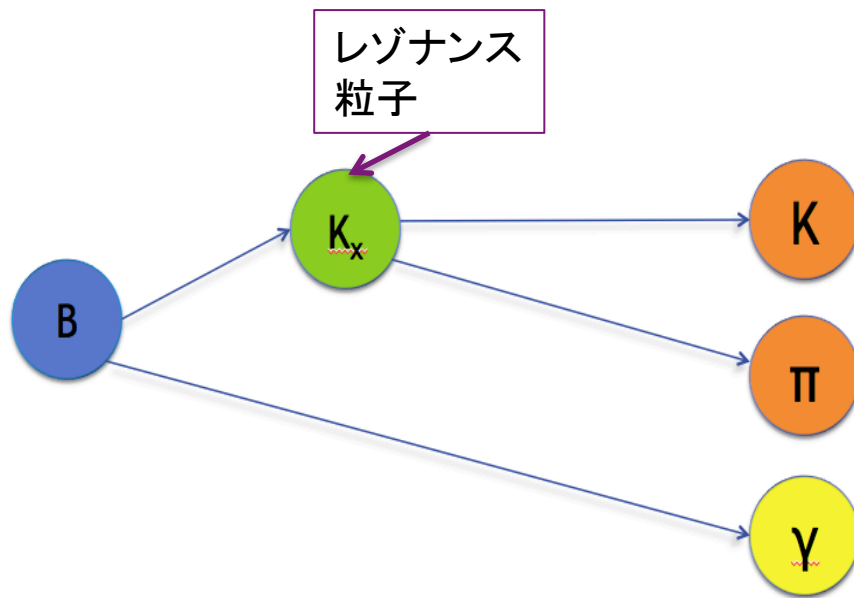
新物理の効果によって、標準模型の予測からずれていく可能性がある。

$B \rightarrow K\pi\gamma$ の再構成

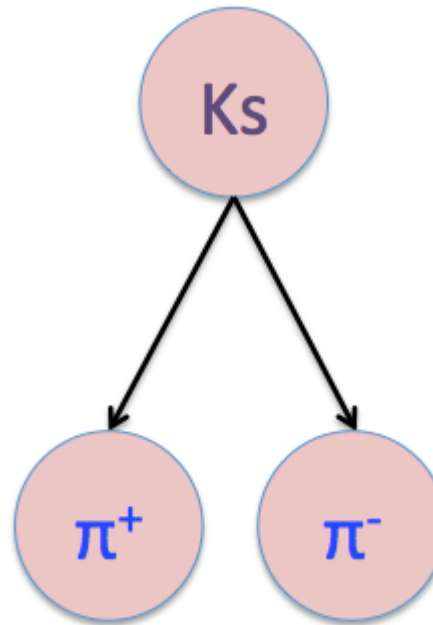
3つのモードを再構成。

$$B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$$

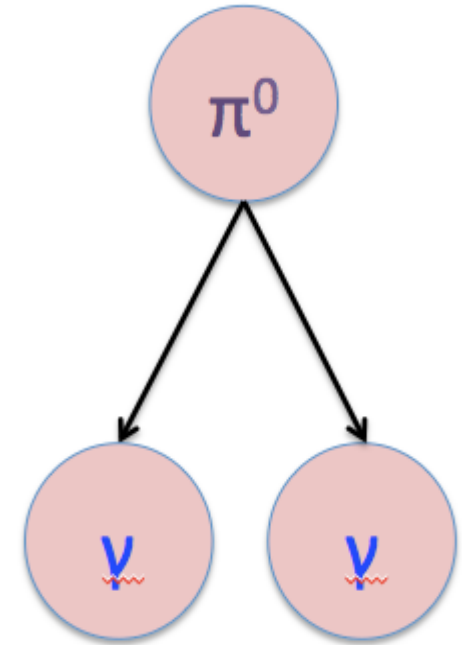
$$B^+ \rightarrow K_s \pi^+ \gamma, K^+ \pi^0 \gamma$$



K_s → π⁺π⁻の再構成

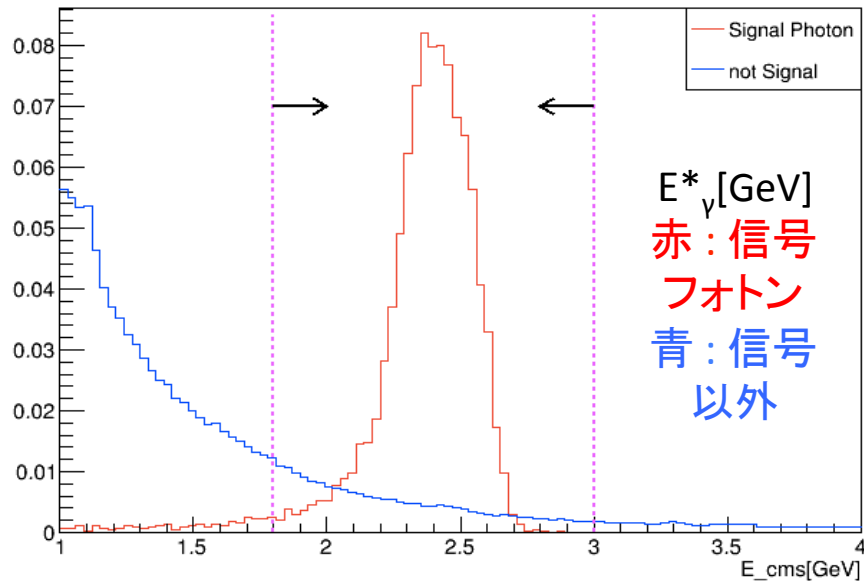


π⁰ → 2γの再構成



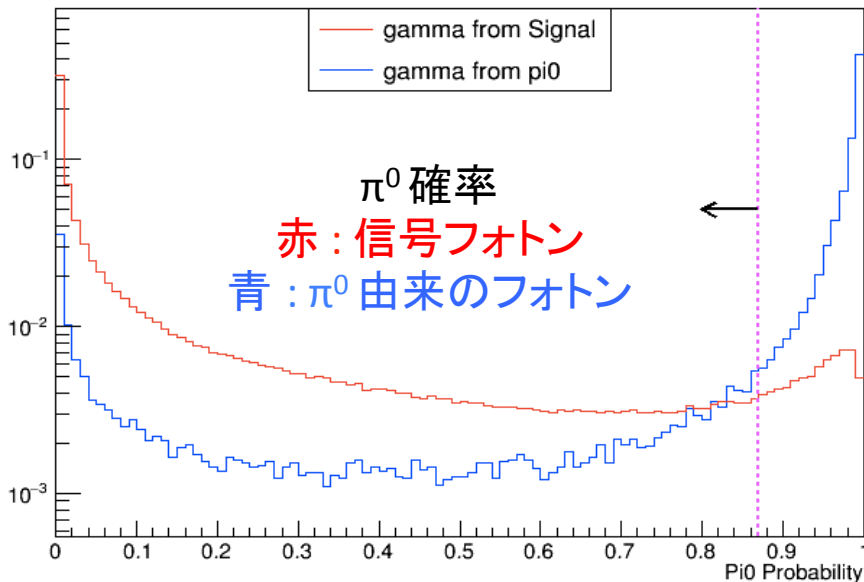
再構成(フォトン選別)

CMS gamma energy



フォトンの重心系エネルギーのカット。
 $b \rightarrow s\gamma$ は二体崩壊なので、
信号フォトンと比較的エネルギーが高い。
 $1.8\text{GeV} < E^* < 3.0\text{GeV}$

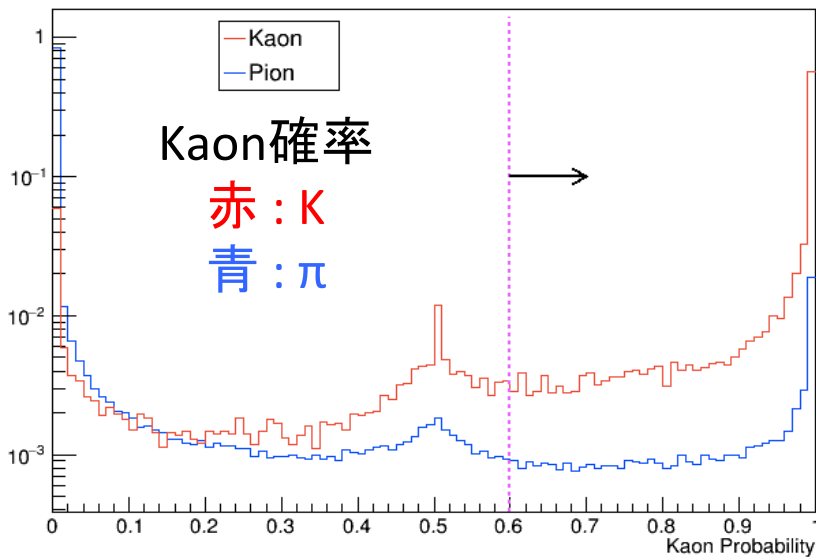
Pi0 Veto



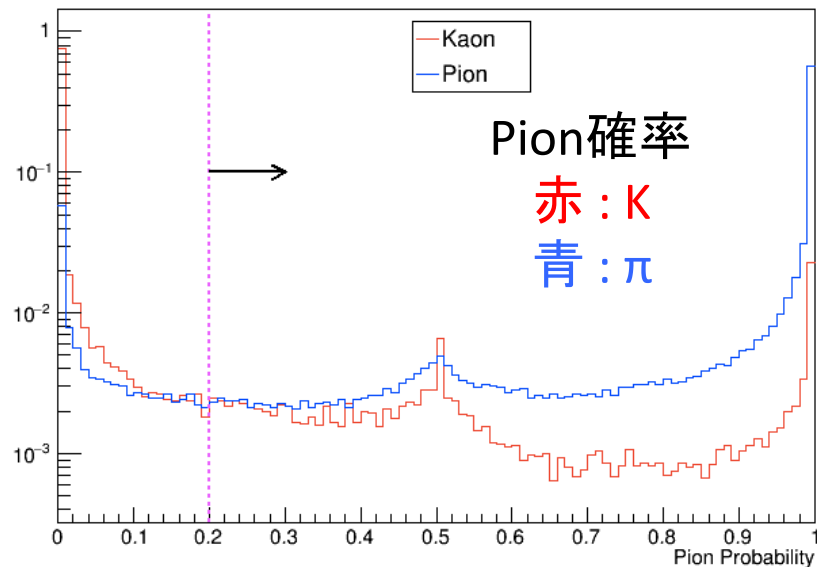
π^0 確率(フォトン候補が π^0 由来のフォトンである確率)によるカット。
 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$ 由来の高エネルギーフォトンによるバックグラウンドが多いので、それを軽減することが目的。
 π^0 確率は多変量解析で導出する。
同様のことを η についても行う。

再構成(荷電K/ π 選別)

Kaon Probability



Pion Probability



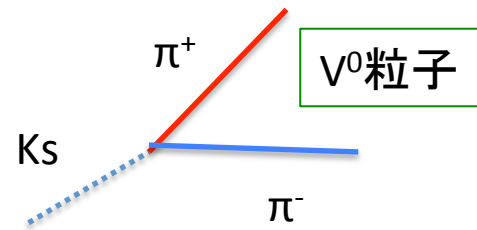
・粒子識別情報の取得について

- CDC
 - エネルギー損失(dE/dx)の違いを利用
- TOP
 - チェレンコフ光を用いてバレル部の粒子識別
- ARICH
 - チェレンコフ光を用いてエンドキャップ部の粒子識別

CDC, ARICH, TOPのそれぞれの尤度から、トータルの尤度を求め、尤度比として、Kaon確率、Pion確率を導出していく。

再構成(K_S 選別)

NisKsFinder(BelleからImport)による K_S 選別。
 NisKsFinderは、多変量解析によって、「 V^0 粒子である確率」と「 Λ 粒子ではない確率」を求め、 K_S の背景事象を減らすツール。

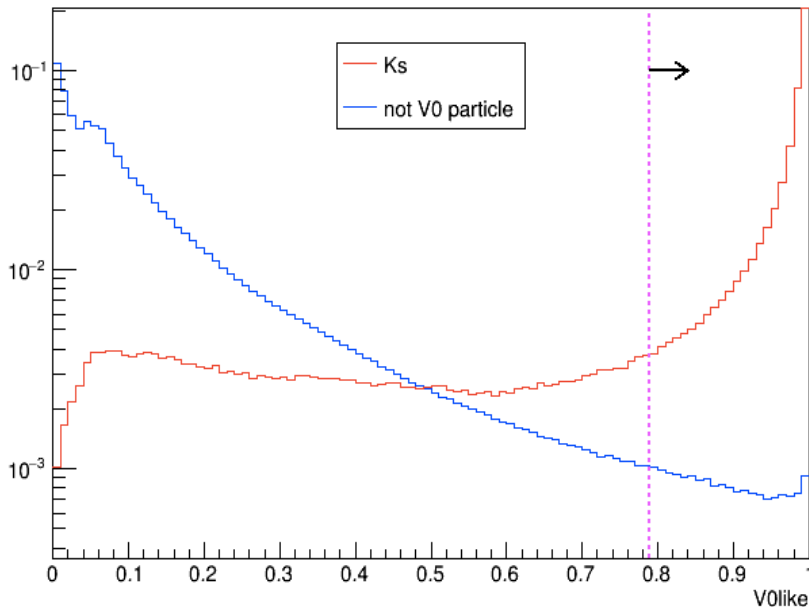


V^0 粒子である確率

赤 : K_S

青 : non- V^0

V0like

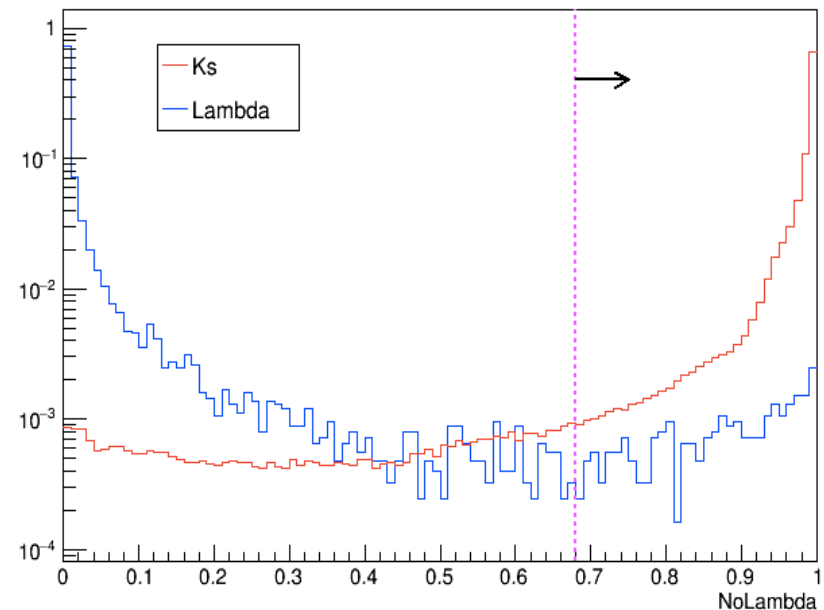


Λ 粒子ではない確率

赤 : K_S

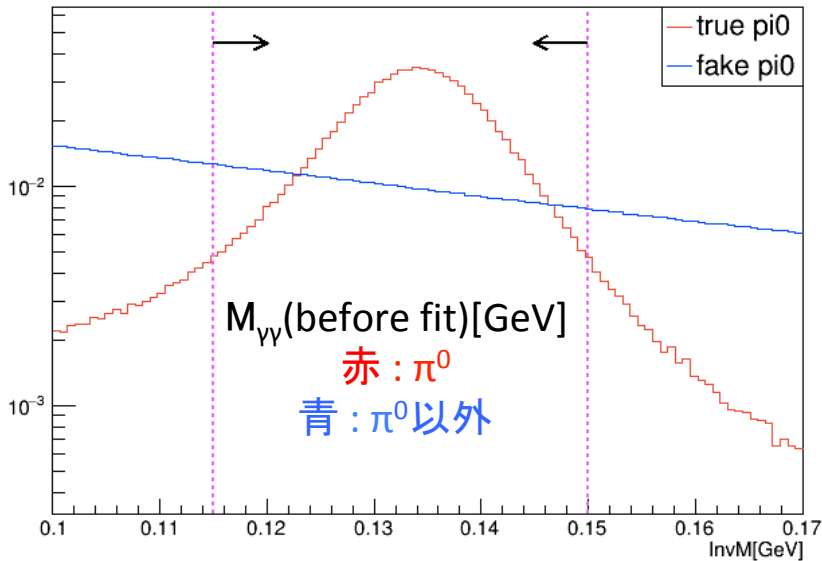
青 : Λ

NoLambda



再構成(π^0 選別)

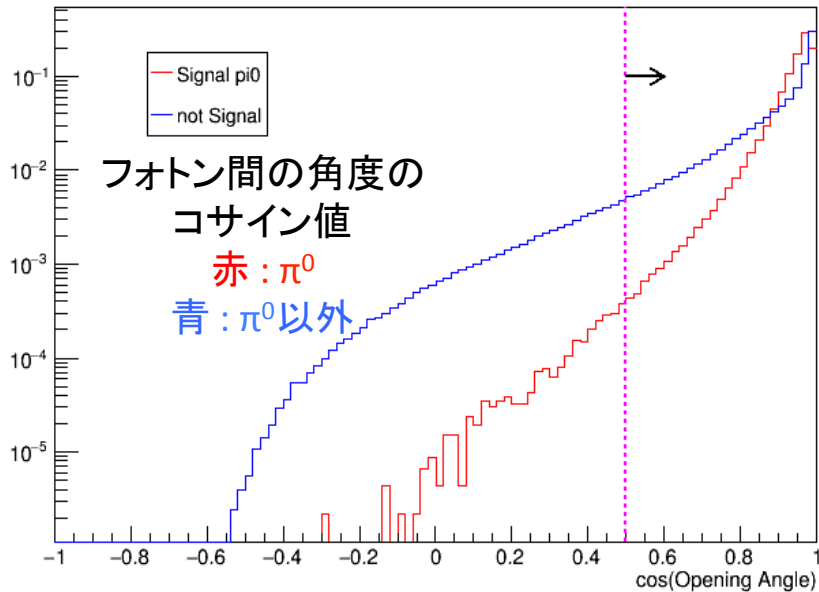
Invariant Mass(before fit)



$M_{\gamma\gamma}$ (before fit)[GeV]

赤 : π^0
青 : π^0 以外

Opening Angle



光子間の角度の
コサイン値

赤 : π^0
青 : π^0 以外

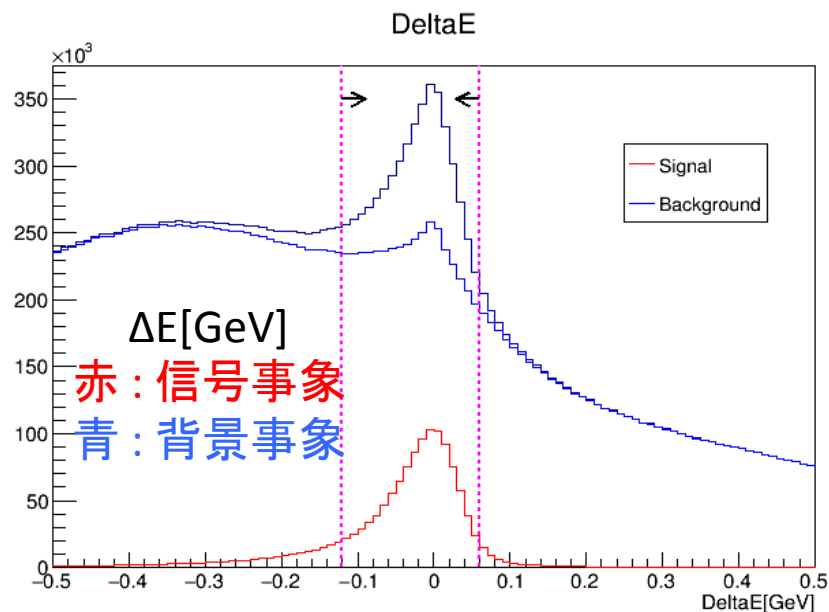
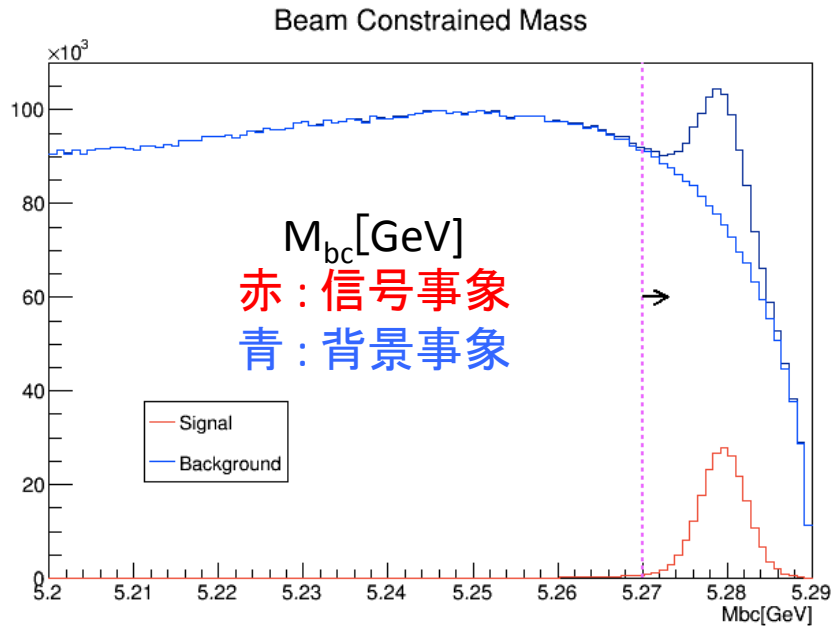
π^0 のnominal mass(135MeV)付近にピークがある。
更に、 π^0 mass constrained fitを適用して運動量を計算し直す。

π^0 はブーストしているので、 γ 間の角度は小さい。

ブースト



再構成(B中間子)



E_{CMS} : 重心系エネルギー
(実験の初期条件)

p_{CMS}^B : Bの重心系運動量(測定量)

E_{CMS}^B : Bの重心系エネルギー(測定量)

$$M_{bc} = \sqrt{\left(\frac{1}{2}E_{CMS}\right)^2 - |p_{CMS}^B|^2}$$

運動量保存→Bの質量にピーク

$$\Delta E = E_{CMS}^B - \frac{1}{2}E_{CMS}$$

エネルギー保存→0にピーク

$M_{bc} > 5.2\text{GeV}$, $-0.12\text{GeV} < \Delta E < 0.06\text{GeV}$
のB中間子候補を選別。

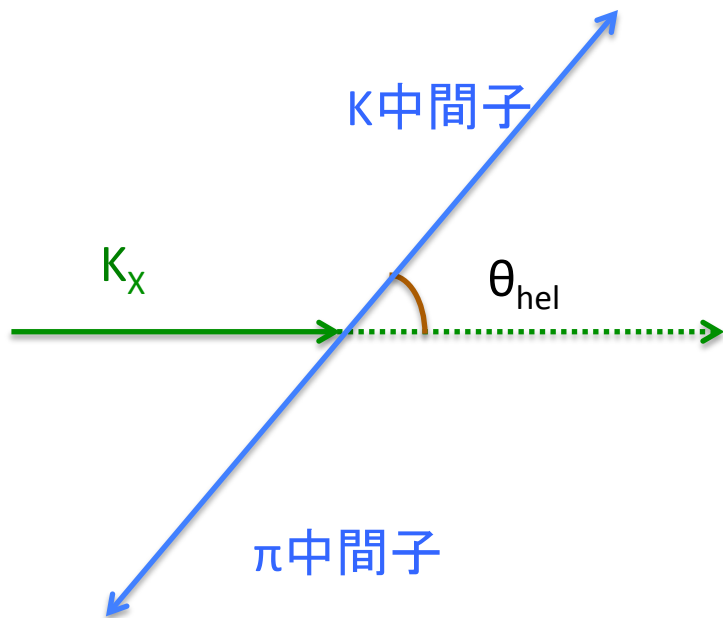
フィッティング

目的: 4つの K_x レゾナンス($K^*(892)$, $K_2^*(1430)$, $K^*(1410)$, $K^*(1680)$)を分離して評価すること。

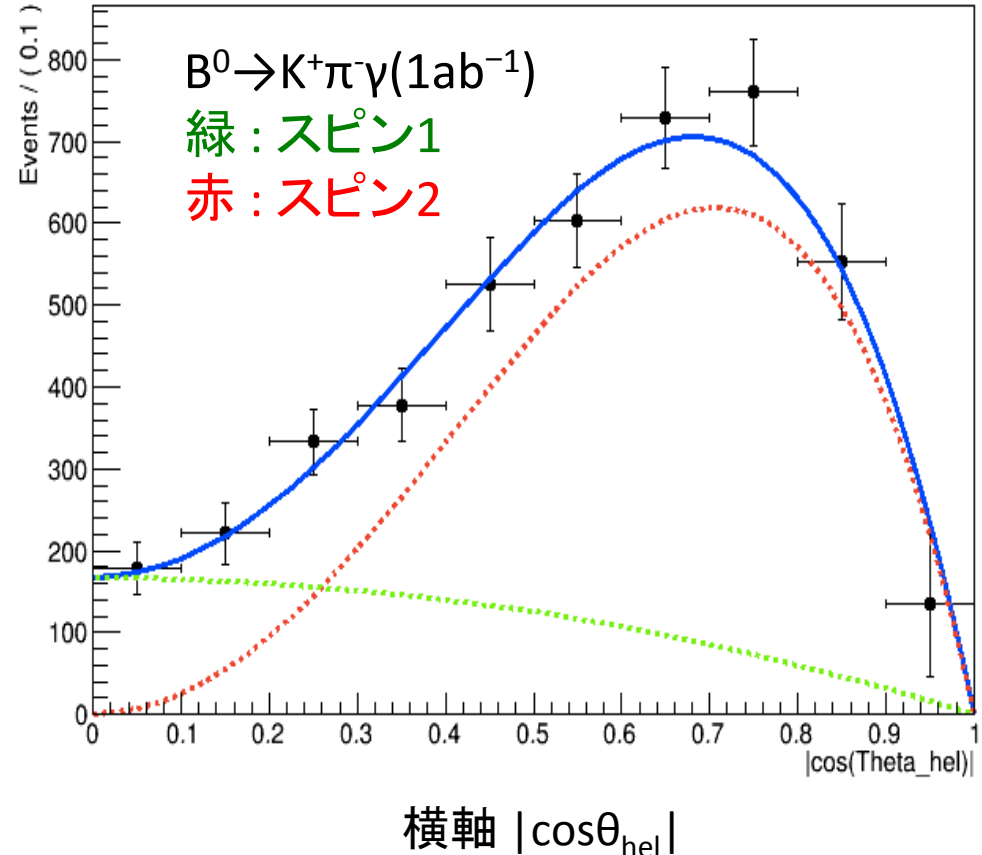
ヘリシティ角

ヘリシティ角 θ_{hel} を K_X の静止系における K_X の運動量方向に対する K 中間子の崩壊角とする。その分布は K_X のスピンのによって異なるので、 K_X のスピン成分を分離できる→想定した中で唯一のスピン2である $K_2^*(1430)$ を分離できる。

K_X (レゾナンス粒子)の静止系



矢印の方向は運動量方向



フィッティングの概要

目的: 4つの K_X レゾナンス($K^*(892)$, $K_2^*(1430)$, $K^*(1410)$, $K^*(1680)$)を分離して評価すること。

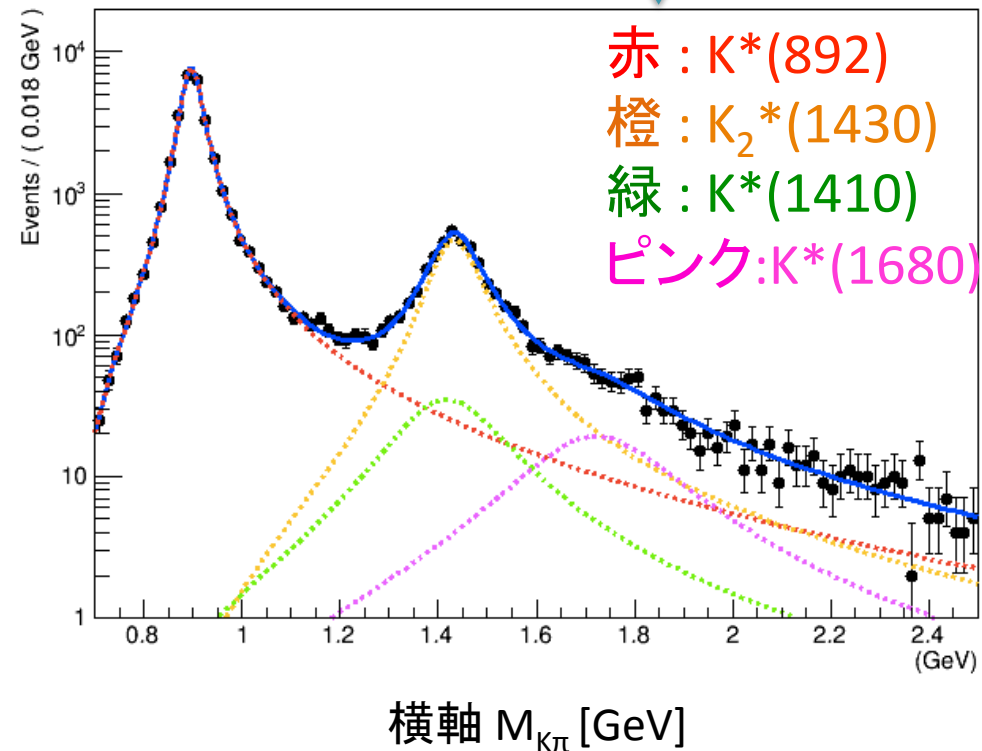
$K_2^*(1430)$ と $K^*(1410)$ は質量が近いため、 $M_{K\pi}$ のフィッティングによる分離は殆ど不可能。
→ヘリシティ角分布を利用する

toyMCで作成した $M_{K\pi}$ 分布。崩壊分岐比は、Condition1(後述)を仮定。

Step1: M_{bc} をヘリシティ角と $M_{K\pi}$ のビンごとにフィッティング
→ヘリシティ角分布と $M_{K\pi}$ 分布を生成

Step2: ヘリシティ角分布をフィッティング
→ $K_2^*(1430)$ を分離

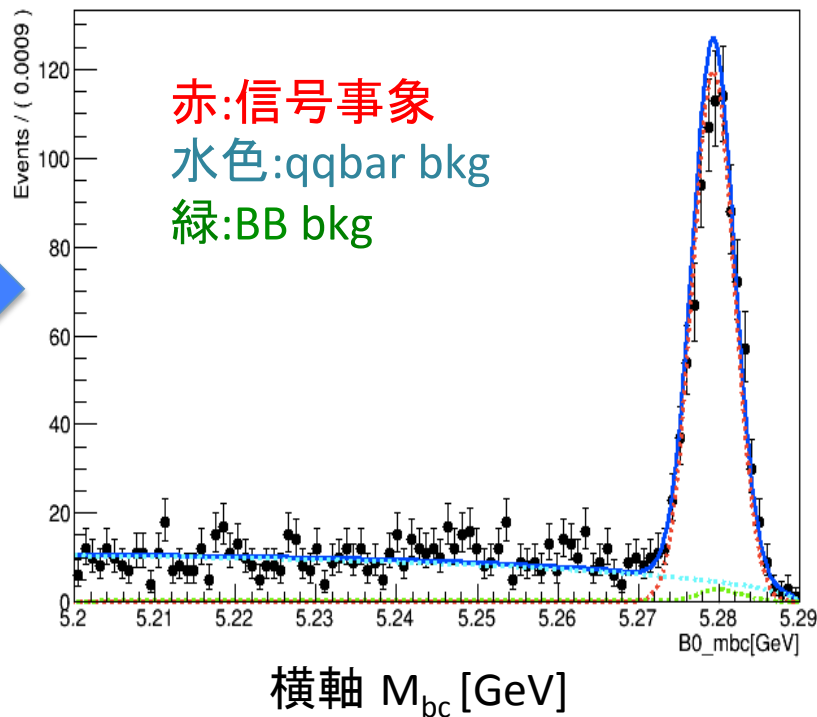
Step3: $M_{K\pi}$ 分布をフィッティング
→他のレゾナンスを分離



M_{bc} フィッティング

M_{bc} 分布は大きく分けて、信号事象、 $qq\bar{b}$ bkg、 $B\bar{B}$ bkgの3つの要素で構成されている。

$0.934\text{GeV} < M_{K\pi} < 0.964\text{GeV} (B^0 \rightarrow K^+\pi^-\gamma)$
 M_{bc} フィッティングの様子



信号事象を抽出し、
 ヘリシティ角分布と
 $M_{K\pi}$ 分布を生成。

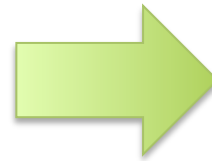
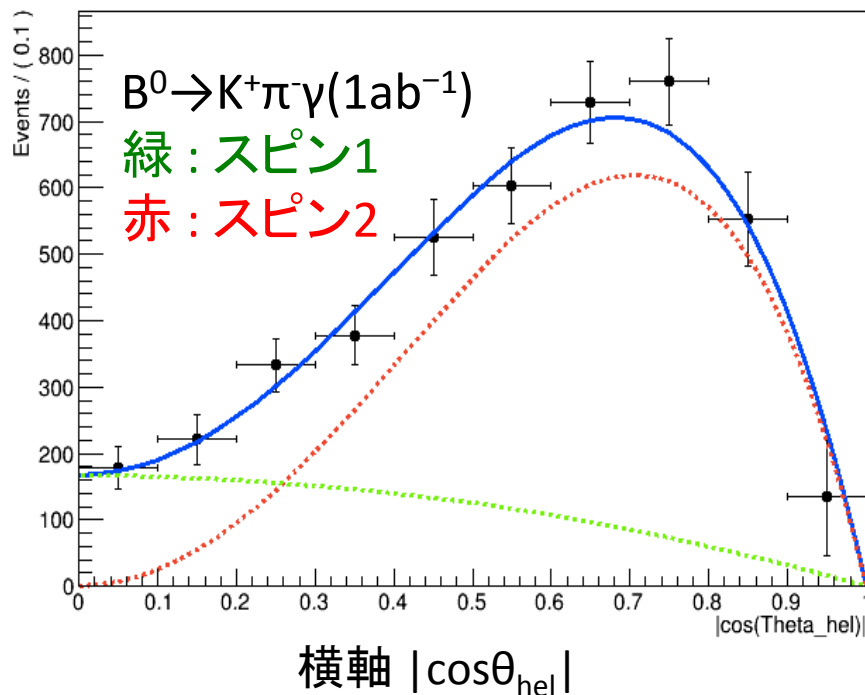
ヘリシティ角分布フィッティング

1.3GeV < $M_{K\pi}$ < 1.6GeVの範囲(K_2^* が支配的な領域)におけるヘリシティ角分布をフィッティング。

スピンごとのヘリシティ角分布

$$H(\cos\theta_h) \propto |d_{1,0}^1(\theta)|^2 \propto 1 - \cos^2\theta_h \quad (\text{Spin1})$$

$$H(\cos\theta_h) \propto |d_{1,0}^2(\theta)|^2 \propto \cos^2\theta_h - \cos^4\theta_h \quad (\text{Spin2})$$

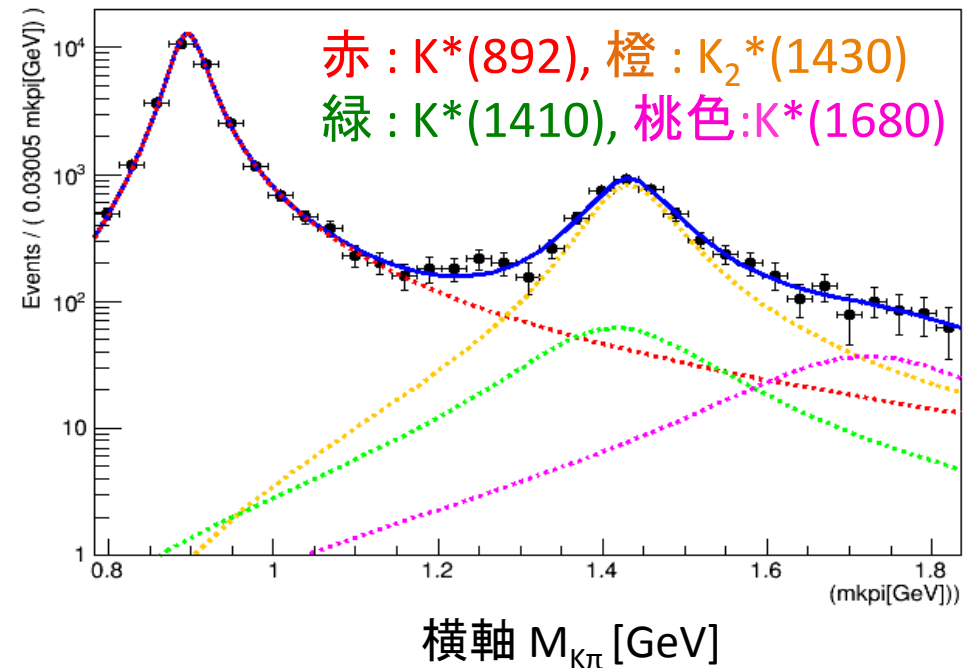
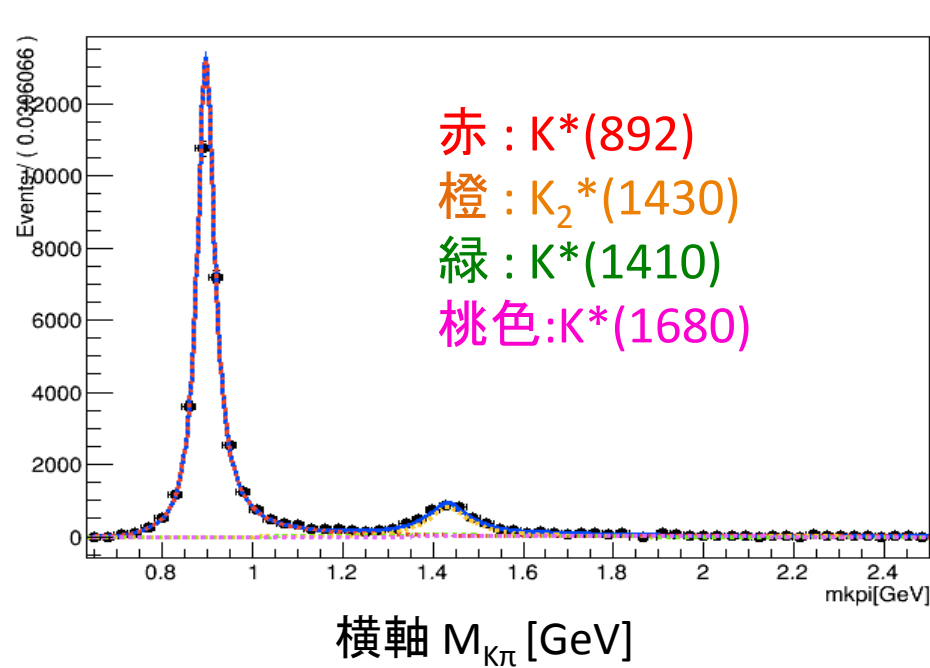


$B \rightarrow K_2^* \gamma$ の測定

この情報から $M_{K\pi}$ 分布における K_2^* の寄与を固定する。

$M_{K\pi}$ フィットティング

ヘリシティ角分布から K_2^* の寄与を固定した上で、残ったスピン1成分を $M_{K\pi}$ フィットで分離。



$B \rightarrow K^*(892)\gamma$, $B \rightarrow K^*(1410)\gamma$, $B \rightarrow K^*(1680)\gamma$ の測定

今回は、ポアソン分布でイベント数が変動するtoyMC サンプルに対して、この一連のフィッティングを1000 実験分行って、観測量の統計誤差を求めた。

解析の条件

統計は、 0.711ab^{-1} , 1ab^{-1} , 5ab^{-1} , 10ab^{-1} , 25ab^{-1} , 50ab^{-1} を想定。
 0.711ab^{-1} は、Belleの全データ(BBbarペア)と同じ統計量。
 50ab^{-1} は、Belle II で想定されている全統計量。

崩壊分岐比は、今回の発表では、Condition1を仮定する。
 Condition1では、アイソスピン非対称性が、 $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ の Belle と BaBar の平均(約6.3%)となるように設定。

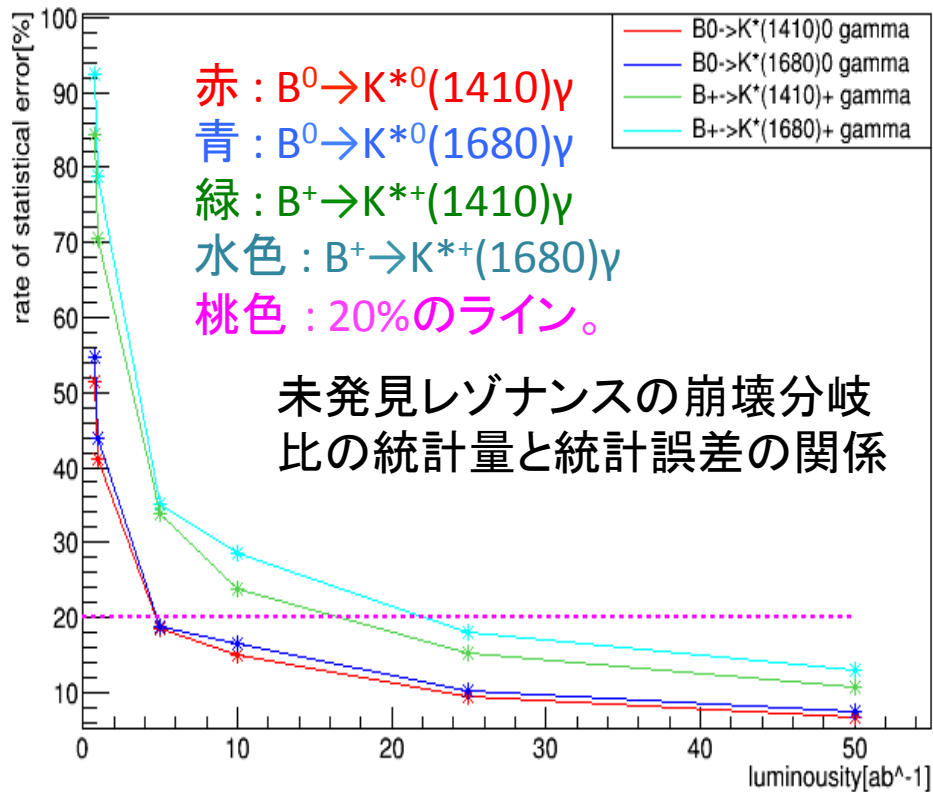
崩壊分岐比の仮定

mixed mode	$K^*(892)\gamma$	$K_2^*(1430)\gamma$	$K^*(1410)\gamma$	$K^*(1680)\gamma$
Condition 1	3.96×10^{-5}	1.24×10^{-5}	1.28×10^{-5}	0.17×10^{-5}

charged mode	$K^*(892)\gamma$	$K_2^*(1430)\gamma$	$K^*(1410)\gamma$	$K^*(1680)\gamma$
Condition1	3.75×10^{-5}	1.18×10^{-5}	1.21×10^{-5}	0.16×10^{-5}

結果

崩壊分岐比の結果(Condition 1)



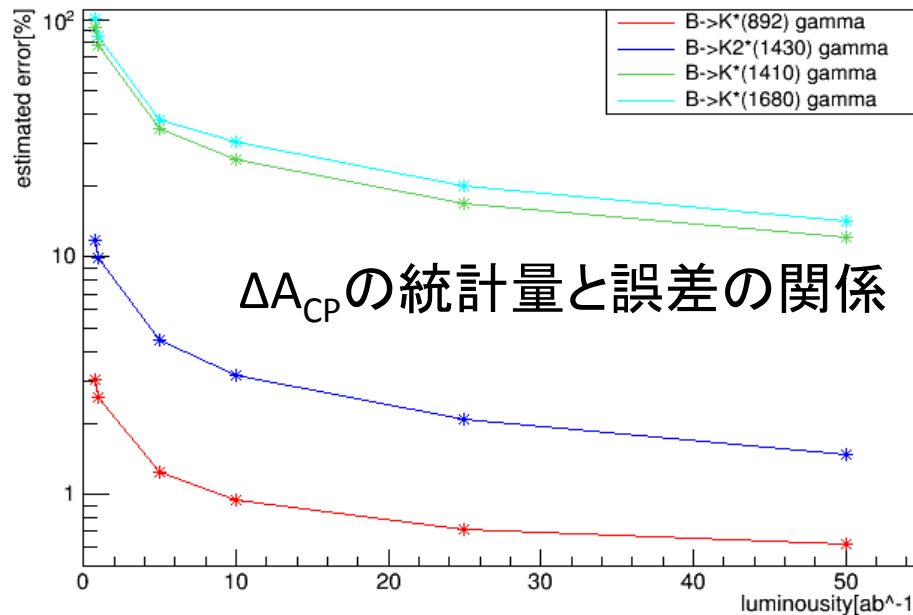
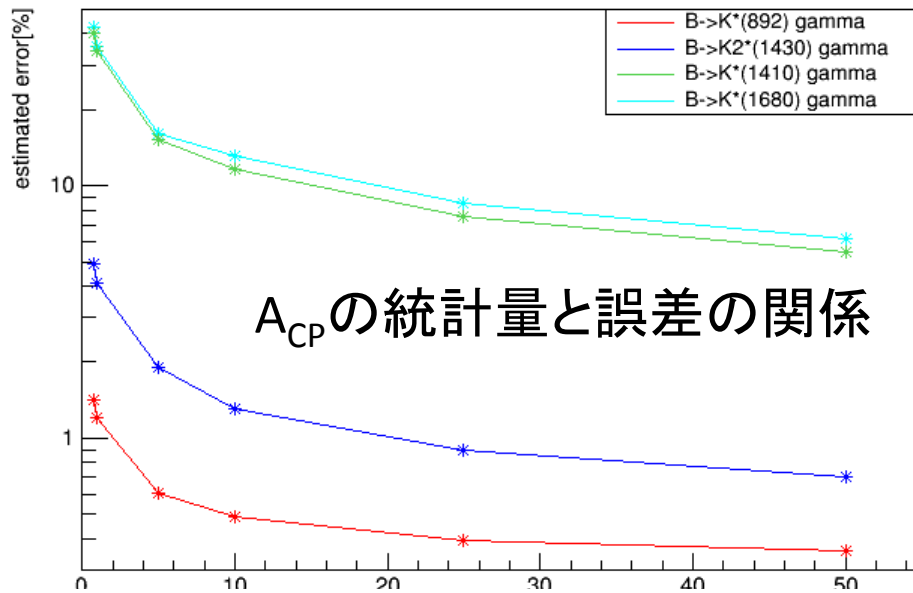
横軸: 積分ミノシティ [ab^{-1}]
 縦軸: 崩壊分岐比に対する統計誤差の割合

未発見のモードについて、中性B中間子のモードなら $5ab^{-1}$ 程度で、荷電B中間子のモードなら $25ab^{-1}$ 程度で、20%の統計誤差を達成できる。

また、 $50ab^{-1}$ なら10%程度の統計誤差で測定可能。

未発見のモードは、系統誤差に対して統計誤差が支配的だと推測されるので、想定した崩壊分岐比であれば、「発見」の基準となる20%を上回る精度で測定できる見積もりとなる。

直接的CP対称性の破れの結果(Condition 1)



系統誤差として、Belleの
 $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ の系統誤差を仮定した
時の、統計量と誤差の関係。

横軸: 積分ルミノシティ[ab⁻¹]
縦軸: 崩壊分岐比に対する
誤差の割合

赤: $B \rightarrow K^*(892)\gamma$

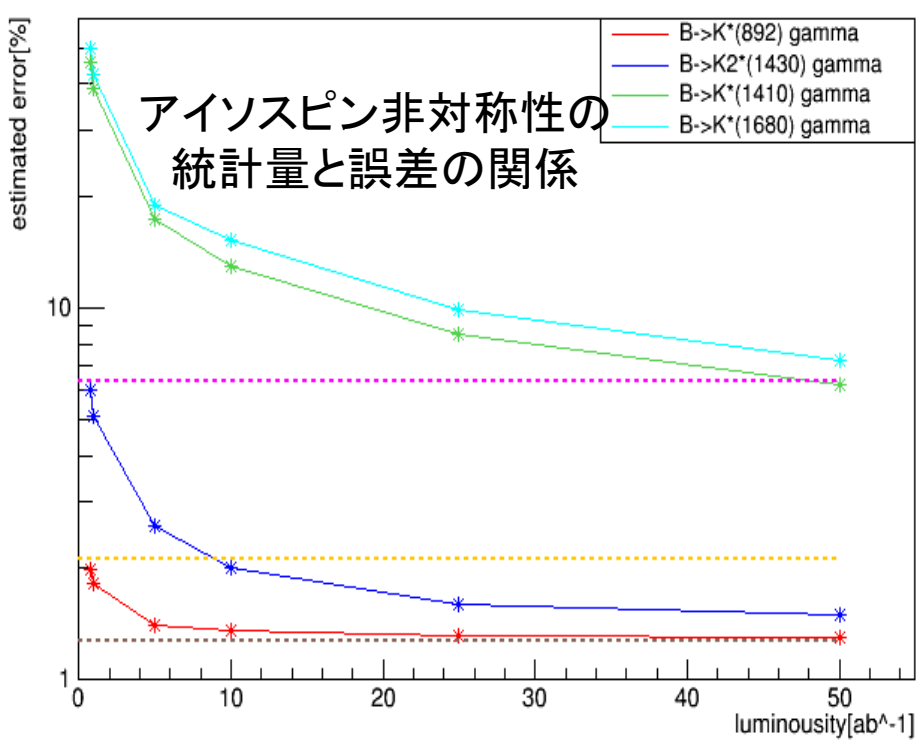
青: $B \rightarrow K_2^*(1430)\gamma$

緑: $B \rightarrow K^*(1410)\gamma$

水色: $B \rightarrow K^*(1680)\gamma$

$B \rightarrow K^*(892)\gamma$ は、50ab⁻¹なら
 $A_{CP}, \Delta A_{CP}$ は0.5%程度で測定
できる見積もりとなる。
 $B \rightarrow K_2^*(1430)\gamma$ は、50ab⁻¹なら
 A_{CP} は0.7%, ΔA_{CP} は1.5%程度
で測定できる見積もりとなる。

アイソスピン対称性の破れの結果(Condition 1)



系統誤差として、Belleの $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ の系統誤差を仮定した時の、統計量と誤差の関係。

- 赤 : $B \rightarrow K^*(892)\gamma$
- 青 : $B \rightarrow K_2^*(1430)\gamma$
- 緑 : $B \rightarrow K^*(1410)\gamma$
- 水色 : $B \rightarrow K^*(1680)\gamma$
- 桃色 : 1σ のライン
- 黄色 : 3σ のライン
- 茶色 : 5σ のライン

横軸: 積分ルミノシティ [ab^{-1}]
縦軸: 崩壊分岐比に対する誤差の割合

$B \rightarrow K^*(892)\gamma$ のアイソスピン非対称性は、 5σ に迫る測定が可能。
 $B \rightarrow K_2^*(1430)\gamma$ のアイソスピン非対称性は、 $10ab^{-1}$ なら 3σ 程度で測定できる。
また、 $B \rightarrow K^*(1410)\gamma$ と $B \rightarrow K^*(1680)\gamma$ は、 $50ab^{-1}$ なら 1σ 程度で測定できることが見積もられた。
※Belle IIで系統誤差が改善できるので、 $K^*(892)$ はもちろん、 $K_2^*(1430)$ も 5σ 以上で測定できる可能性がある(ただし、6.3%はあくまで $K^*(892)$ の測定値)。

まとめ

- Belle II 実験において、 $K^*(892)$, $K_2^*(1430)$, $K^*(1410)$, $K^*(1680)$ の4つのレゾナンスを想定し、信号事象として、 $B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$, $B^+ \rightarrow K_s^+ \pi^+ \gamma$, $B^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \gamma$ を再構成した。
- M_{bc} をフィットして信号事象を抽出し、ヘリシティ角分布と $M_{K\pi}$ 分布をフィットして、レゾナンスの分離を行った。
- Condition1で仮定した崩壊分岐比であれば、 $B \rightarrow K^*(1410) \gamma$, $B \rightarrow K^*(1680) \gamma$ の 50 ab^{-1} における統計誤差は10%程度だった。
- Belleの $B \rightarrow K^*(892) \gamma$ の系統誤差とアイソスピン非対称性を仮定した場合、 $B \rightarrow K_2^*(1430) \gamma$ は 10 ab^{-1} 程度でアイソスピン非対称性を 3σ で測定できる。

Back up

qqbar背景事象抑制 イベント形状の特徴

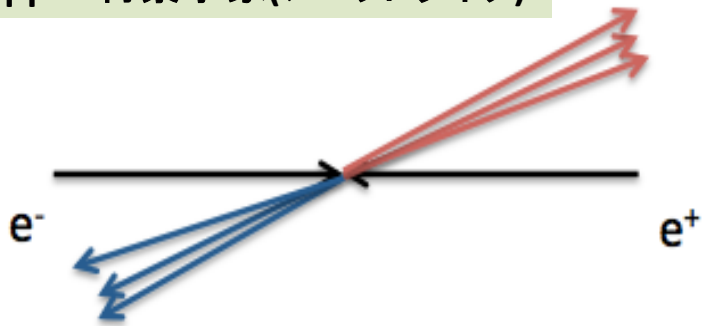
$e^+e^- \rightarrow qq\bar{q}$ の崩壊分岐比は、 $e^+e^- \rightarrow BB\bar{q}$ の3倍程度ある。

$\rightarrow e^+e^- \rightarrow qq\bar{q}$ は、大きな背景事象となる。

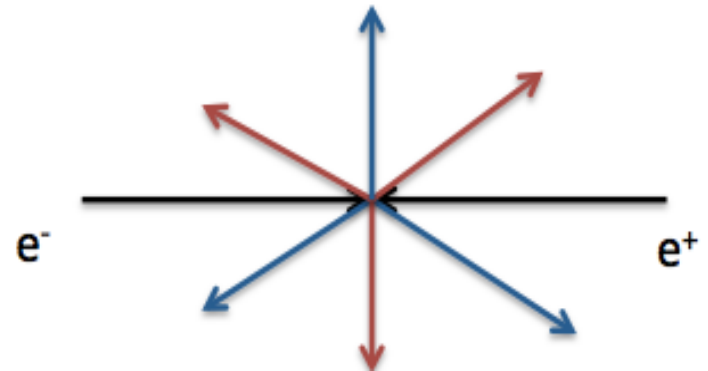
u、d、s、cの質量は、重心エネルギー(10.58GeV)に対して小さいため、 $e^+e^- \rightarrow qq\bar{q}$ は大きな運動量を持ち、**ジェットとして観測**される。

対して、B中間子は重心系においてほぼ静止した状態で生成されるため、**崩壊粒子は全方向に均一に分布**する。

qqbar背景事象(ジェットライク)



BBbar事象(球形)



イベント形状を特徴化する変数を使えば、これらのイベントをある程度分別できる。

qqbar背景事象抑制 インプット変数

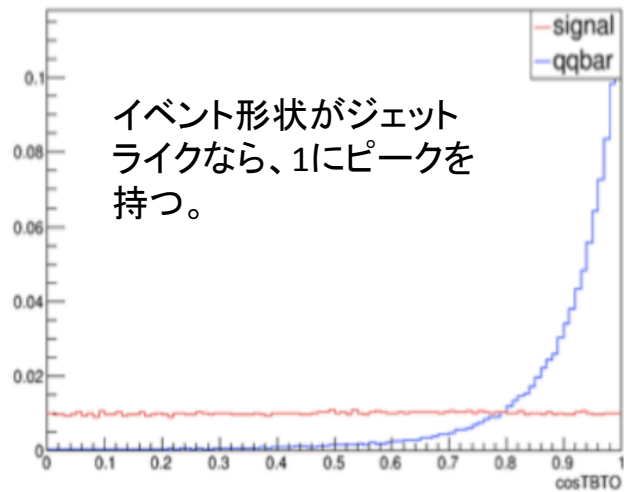
qqbar背景事象の除去のために、マシン・ラーニング・プログラムの一
種であるFastBDTを用いて多変量解析を行った。

その時インプットする変数として、以下のものを使用した。

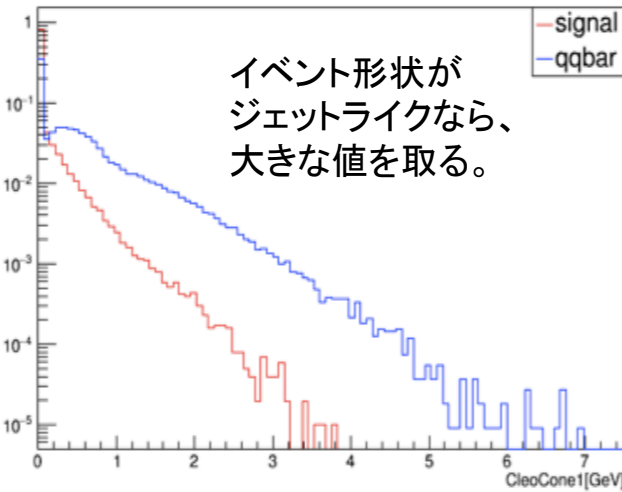
・インプット変数

$\cos\theta_B$, $\text{Thrust}_{\text{ROE}}$, $|\cos\theta_{\text{Thrust}}|$, $|\cos\theta_z|$, KSF moments(14種 + Pt +
mm2), CleoCones(1~9), sphericity variables, flavor tagging quality

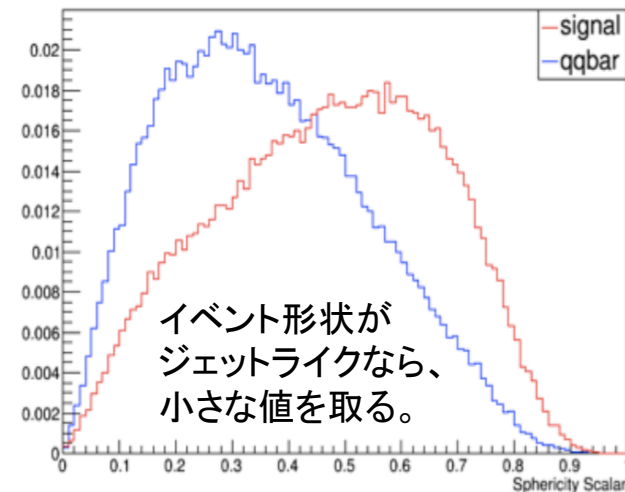
$|\cos\theta_{\text{Thrust}}|$
赤 : 信号事象
青 : qqbar
cosTBTO



CleoCone1
赤 : 信号事象
青 : qqbar
CleoCone1



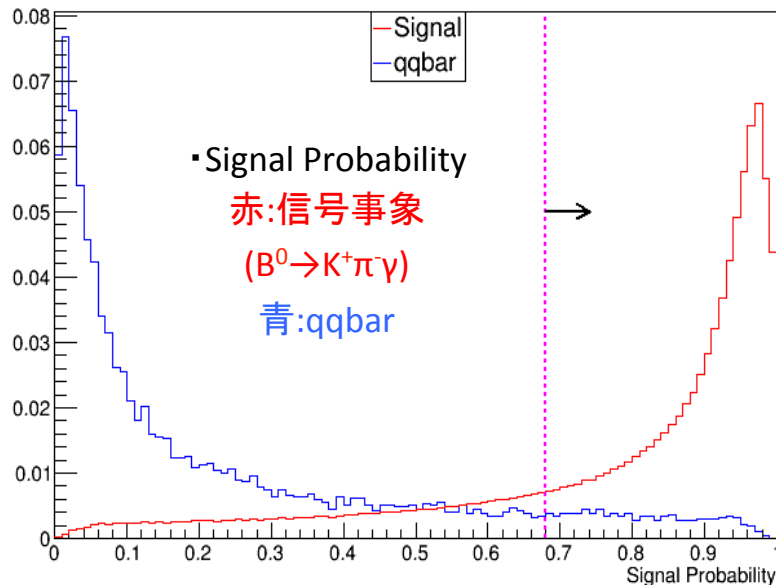
Sphericity Scalar
赤 : 信号事象
青 : qqbar
Sphericity Scalar



qqbar背景事象抑制 結果

$q\bar{q}$ 背景事象抑制	$B^0 \rightarrow K^+\pi^-\gamma$	$B^+ \rightarrow K_s\pi^+\gamma$	$B^+ \rightarrow K^+\pi^0\gamma$
カット値	0.68	0.66	0.75
信号保持率	75.9%	74.1%	66.9%
$q\bar{q}$ 背景事象 除去率	90.2%	89.7%	93.8%

QQ suppression



カット値は、Significanceが最大化するように決定(統計誤差の割合を最小化)。

$$Significance = \frac{N_{sig}}{\sqrt{N_{sig} + N_{bg}}}$$

N_{sig} は信号のイベント数、
 N_{bg} は背景事象のイベント数。

解析の条件

・仮定した崩壊分岐比

(1)中性Bモード

$K^*(892)\gamma$ はBelleの全データの結果から仮定。 $K_2^*(1430)\gamma$ はPDGから仮定。

Condition1 : $K^*(1410)\gamma$ と $K^*(1680)\gamma$ は、参考文献[16]の $B \rightarrow X_s \gamma$ に対する割合から決定。

Belleのfully inclusive methodの結果(2016)を $B \rightarrow X_s \gamma$ の崩壊分岐比と仮定。

Condition2 : $K^*(1410)\gamma$ と $K^*(1680)\gamma$ の値を0と設定→upper limit(Confidence level 90%)を求める。

Condition3 : $K^*(1410)\gamma$ はCondition1と同じ。 $K^*(1680)\gamma$ は $K_2^*(1430)\gamma$ と同じ値を仮定。

PDGのupper limitが大きいため、 $K^*(1680)\gamma$ が予想のオーダーよりも大きい場合を想定。

mixed mode	$K^*(892)\gamma$	$K_2^*(1430)\gamma$	$K^*(1410)\gamma$	$K^*(1680)\gamma$
Condition 1	3.96×10^{-5}	1.24×10^{-5}	1.28×10^{-5}	1.70×10^{-6}
Condition 2	3.96×10^{-5}	1.24×10^{-5}	0	0
Condition 3	3.96×10^{-5}	1.24×10^{-5}	1.28×10^{-5}	1.24×10^{-5}

解析の条件

(2) 荷電Bモード

仮定した中性モードに対して、アイソスピン非対称性がBelle と BaBar の平均(約6.3%)となるように設定。

※CP非対称性とアイソスピン非対称性はCondition1のみ求めた(Condition2は上限値を求めるための条件で、Condition3は理論や実験の結果から見てやや非現実的な条件のため)。

charged mode	$K^*(892)\gamma$	$K_2^*(1430)\gamma$	$K^*(1410)\gamma$	$K^*(1680)\gamma$
Condition1	3.75×10^{-5}	1.18×10^{-5}	1.21×10^{-5}	1.61×10^{-6}
Condition2	3.75×10^{-5}	1.18×10^{-5}	0	0
Condition3	3.75×10^{-5}	1.18×10^{-5}	1.21×10^{-5}	1.18×10^{-5}

・想定した統計

$0.711\text{ab}^{-1}, 1\text{ab}^{-1}, 5\text{ab}^{-1}, 10\text{ab}^{-1}, 25\text{ab}^{-1}, 50\text{ab}^{-1}$

0.711ab^{-1} は、Belleの全データ(BBbarペア)と同じ統計量。

50ab^{-1} は、Belle II の想定されている全統計量。

未発見レゾナンスの理論予測

崩壊分岐比の理論予測値

モード \ 文献	[16]	[17]
$B \rightarrow K^*(1410)\gamma$	$(1.14 \pm 0.18) \times 10^{-5}$	$(2.9 \sim 4.2) \times 10^{-5}$
$B \rightarrow K^*(1680)\gamma$	$(0.15 \pm 0.04) \times 10^{-5}$	$(0.4 \sim 0.6) \times 10^{-5}$

$B \rightarrow X_s \gamma$ の崩壊分岐比に対する崩壊分岐比の割合

モード \ 文献	[16]	[17]	[18]
$B \rightarrow K^*(1410)\gamma$	4.1 ± 0.6	$7.2 \sim 10.6$	0.8 ± 0.4
$B \rightarrow K^*(1680)\gamma$	0.5 ± 0.2	$1.1 \sim 1.5$	0.7 ± 0.3

Belleのfully inclusive methodによる結果(2016)

$$\mathcal{B}_{S\gamma} = (3.12 \pm 0.10(\text{stat.}) \pm 0.19(\text{sys.}) \pm 0.08(\text{model}) \pm 0.04(\text{extrap.})) \times 10^{-4}$$

に対して、文献[16]の値からCondition1の $K^*(1410)$ と $K^*(1680)$ の分岐比は仮定。

崩壊分岐比の結果(Condition2)

Condition2 (中性Bモード)	$BF(B^0 \rightarrow K^{*0}(892)\gamma)$	$BF(B^0 \rightarrow K_2^{*0}(1430)\gamma)$	$BF(B^0 \rightarrow K^{*0}(1410)\gamma)$	$BF(B^0 \rightarrow K^{*0}(1680)\gamma)$
$0.711ab^{-1}$	1.77%	5.53%	$< 7.74 \times 10^{-6}$	$< 1.15 \times 10^{-6}$
$5ab^{-1}$	0.66%	2.05%	$< 2.86 \times 10^{-6}$	$< 4.07 \times 10^{-7}$
$50ab^{-1}$	0.24%	0.69%	$< 1.12 \times 10^{-6}$	$< 1.72 \times 10^{-7}$

Condition2 (荷電Bモード)	$BF(B^+ \rightarrow K^{*+}(892)\gamma)$	$BF(B^+ \rightarrow K_2^{*+}(1430)\gamma)$	$BF(B^+ \rightarrow K^{*+}(1410)\gamma)$	$BF(B^+ \rightarrow K^{*+}(1680)\gamma)$
$0.711ab^{-1}$	2.54%	9.69%	$< 1.20 \times 10^{-5}$	$< 1.96 \times 10^{-6}$
$5ab^{-1}$	1.00%	3.99%	$< 4.86 \times 10^{-5}$	$< 7.19 \times 10^{-7}$
$50ab^{-1}$	0.32%	1.20%	$< 1.58 \times 10^{-6}$	$< 2.74 \times 10^{-7}$

Condition2の $50ab^{-1}$ の $B \rightarrow K^*(1410)\gamma$ と $B \rightarrow K^*(1680)\gamma$ の上限値では、Condition1で仮定した崩壊分岐比より1オーダー分ほど小さく、崩壊分岐比が予想より小さく測定が難しい場合においても、厳しい制限をつけられることが見積もられた。

$B \rightarrow K^*(892)\gamma$ と $B \rightarrow K_2^*(1430)\gamma$ の結果は、Condition1とほぼ変わらなかった。

崩壊分岐比の結果(Condition3)

Condition3 (中性Bモード)	$BF(B^0 \rightarrow K^{*0}(892)\gamma)$	$BF(B^0 \rightarrow K_2^{*0}(1430)\gamma)$	$BF(B^0 \rightarrow K^{*0}(1410)\gamma)$	$BF(B^0 \rightarrow K^{*0}(1680)\gamma)$
$0.711ab^{-1}$	1.77%	6.09%	54.07%	10.01%
$5ab^{-1}$	0.66%	2.26%	19.59%	3.49%
$50ab^{-1}$	0.24%	0.76%	7.10%	1.32%

Condition3 (荷電Bモード)	$BF(B^+ \rightarrow K^{*+}(892)\gamma)$	$BF(B^+ \rightarrow K_2^{*+}(1430)\gamma)$	$BF(B^+ \rightarrow K^{*+}(1410)\gamma)$	$BF(B^+ \rightarrow K^{*+}(1680)\gamma)$
$0.711ab^{-1}$	2.54%	10.58%	87.80%	17.38%
$5ab^{-1}$	1.00%	4.35%	35.16%	6.52%
$50ab^{-1}$	0.32%	1.30%	11.12%	2.32%

Condition3の $50ab^{-1}$ の $B \rightarrow K^*(1680)\gamma$ は、Belleの $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ と同程度の統計誤差となっており、実際に $B \rightarrow K^*(1680)\gamma$ の崩壊分岐比がCondition3程度のオーダーであれば、Belleの $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ の測定と同程度の新物理探索を行うことが期待できる。他のレゾナンスの結果は、Condition1とほぼ変わらなかった。

Cut-flow table($B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$)

$B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$ (lower mass)	信号事象数	$q\bar{q}$ 背景事象数	$B\bar{B}$ 背景事象数	検出効率 [%]	Significance
生成イベント数	36425	3.7×10^9	1.1×10^9	48.44	0.52
再構成イベント数	11131	39757	560	14.80	49.07
π^0/η veto	10200	11390	462	13.56	68.69
$q\bar{q}$ 背景事象抑制	7747	1041	288	10.30	81.32
Best Candidate Selection	7636	1011	258	10.15	80.92

表1 $M_{K\pi} < 1.1\text{GeV}$ の $B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$ における各カットごとの信号, $q\bar{q}$, $B\bar{B}$ 事象のイベント数と検出効率と Significance。統計量は 1ab^{-1} を想定。

$B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$ (higher mass)	信号事象数	$q\bar{q}$ 背景事象数	$B\bar{B}$ 背景事象数	検出効率 [%]	Significance
生成イベント数	36425	3.7×10^9	1.1×10^9	48.44	0.52
再構成イベント数	2458	56913	1460	3.27	9.96
π^0/η veto	2241	16248	888	2.98	16.10
$q\bar{q}$ 背景事象抑制	1694	1403	545	2.25	28.06
Best Candidate Selection	1662	1352	501	2.21	28.04

表2 $1.1\text{GeV} < M_{K\pi} < 2.5\text{GeV}$ の $B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$ における各カットごとの信号, $q\bar{q}$, $B\bar{B}$ 事象のイベント数と検出効率と Significance。統計量は 1ab^{-1} を想定。

Cut-flow table($B^+ \rightarrow K_s \pi^+ \gamma$)

$B^+ \rightarrow K_s \pi^+ \gamma$ (lower mass)	信号事象数	$q\bar{q}$ 背景事象数	$B\bar{B}$ 背景事象数	検出効率 [%]	Significance
生成イベント数	38224	3.7×10^9	1.1×10^9	47.79	0.55
再構成イベント数	2610	9111	196	3.26	23.91
π^0/η veto	2401	2657	161	3.00	33.24
$q\bar{q}$ 背景事象抑制	1782	250	90	2.23	38.68
Best Candidate Selection	1729	242	82	2.16	38.15

表1 $M_{K\pi} < 1.1\text{GeV}$ の $B^+ \rightarrow K_s \pi^+ \gamma$ における各カットごとの信号, $q\bar{q}$, $B\bar{B}$ 事象のイベント数と検出効率と Significance。統計量は $1ab^{-1}$ を想定。

$B^+ \rightarrow K_s \pi^+ \gamma$ (higher mass)	信号事象数	$q\bar{q}$ 背景事象数	$B\bar{B}$ 背景事象数	検出効率 [%]	Significance
生成イベント数	38224	3.7×10^9	1.1×10^9	47.79	0.55
再構成イベント数	591	11941	368	0.74	5.21
π^0/η veto	542	3591	247	0.68	8.19
$q\bar{q}$ 背景事象抑制	399	359	160	0.50	13.17
Best Candidate Selection	385	343	132	0.48	13.12

表2 $1.1\text{GeV} < M_{K\pi} < 2.5\text{GeV}$ の $B^+ \rightarrow K_s \pi^+ \gamma$ における各カットごとの信号, $q\bar{q}$, $B\bar{B}$ 事象のイベント数と検出効率と Significance。統計量は $1ab^{-1}$ を想定。

Cut-flow table($B^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \gamma$)

$B^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \gamma$ (lower mass)	信号事象数	$q\bar{q}$ 背景事象数	$B\bar{B}$ 背景事象数	検出効率 [%]	Significance
生成イベント数	19093	3.7×10^9	1.1×10^9	23.87	0.28
再構成イベント数	3722	33304	743	4.65	19.15
π^0/η veto	3381	9368	623	4.23	29.24
$q\bar{q}$ 背景事象抑制	2266	418	300	2.83	41.48
Best Candidate Selection	2222	398	224	2.78	41.67

表5 $M_{K\pi} < 1.1\text{GeV}$ の $B^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \gamma$ における各カットごとの信号, $q\bar{q}$, $B\bar{B}$ 事象のイベント数と検出効率と Significance。統計量は 1ab^{-1} を想定。

$B^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \gamma$ (higher mass)	信号事象数	$q\bar{q}$ 背景事象数	$B\bar{B}$ 背景事象数	検出効率 [%]	Significance
生成イベント数	19093	3.7×10^9	1.1×10^9	23.87	0.28
再構成イベント数	896	28756	715	1.12	5.14
π^0/η veto	810	8288	484	1.01	8.28
$q\bar{q}$ 背景事象抑制	543	583	224	0.68	14.77
Best Candidate Selection	530	565	196	0.66	14.75

表6 $1.1\text{GeV} < M_{K\pi} < 2.5\text{GeV}$ の $B^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \gamma$ における各カットごとの信号, $q\bar{q}$, $B\bar{B}$ 事象のイベント数と検出効率と Significance。統計量は 1ab^{-1} を想定。

レゾナンスの性質

中性モード	$BF(B^0 \rightarrow K^{*0}(892)\gamma)$	$BF(B^0 \rightarrow K_2^{*0}(1430)\gamma)$	$BF(B^0 \rightarrow K^{*0}(1410)\gamma)$	$BF(B^0 \rightarrow K^{*0}(1680)\gamma)$
Condition1	3.96×10^{-5}	1.24×10^{-5}	1.28×10^{-5}	0.17×10^{-5}
Condition2	3.96×10^{-5}	1.24×10^{-5}	0.00	0.00
Condition3	3.96×10^{-5}	1.24×10^{-5}	1.28×10^{-5}	1.24×10^{-5}

荷電モード	$BF(B^+ \rightarrow K^{*+}(892)\gamma)$	$BF(B^+ \rightarrow K_2^{*+}(1430)\gamma)$	$BF(B^+ \rightarrow K^{*+}(1410)\gamma)$	$BF(B^+ \rightarrow K^{*+}(1680)\gamma)$
Condition1	3.75×10^{-5}	1.18×10^{-5}	1.21×10^{-5}	0.16×10^{-5}
Condition2	3.75×10^{-5}	1.18×10^{-5}	0.00	0.00
Condition3	3.75×10^{-5}	1.18×10^{-5}	1.21×10^{-5}	1.18×10^{-5}

K_X	$n^{2s+1}\ell_J$	J^P	I	$K\pi$ への崩壊確率
$K^*(892)$	1^3S_1	1^-	$1/2$	$\sim 100\%$
$K_2^*(1430)$	1^3P_2	2^+	$1/2$	$49.9 \pm 1.2\%$
$K^*(1410)$	2^3S_1	1^-	$1/2$	$6.6 \pm 1.3\%$
$K^*(1680)$	1^3D_1	1^-	$1/2$	$38.7 \pm 2.5\%$

レゾナンスの性質

K_X	質量 [MeV]	崩壊幅 [MeV]
$K^{*0}(892)$	895.81 ± 0.19	47.4 ± 0.6
$K^{*+}(892)$	891.66 ± 0.26	50.8 ± 0.9
$K_2^{*0}(1430)$	1432.4 ± 1.3	109 ± 5
$K_2^{*+}(1430)$	1425.6 ± 1.5	98.5 ± 2.7
$K^*(1410)$	1414 ± 15	232 ± 21
$K^*(1680)$	1717 ± 27	322 ± 110

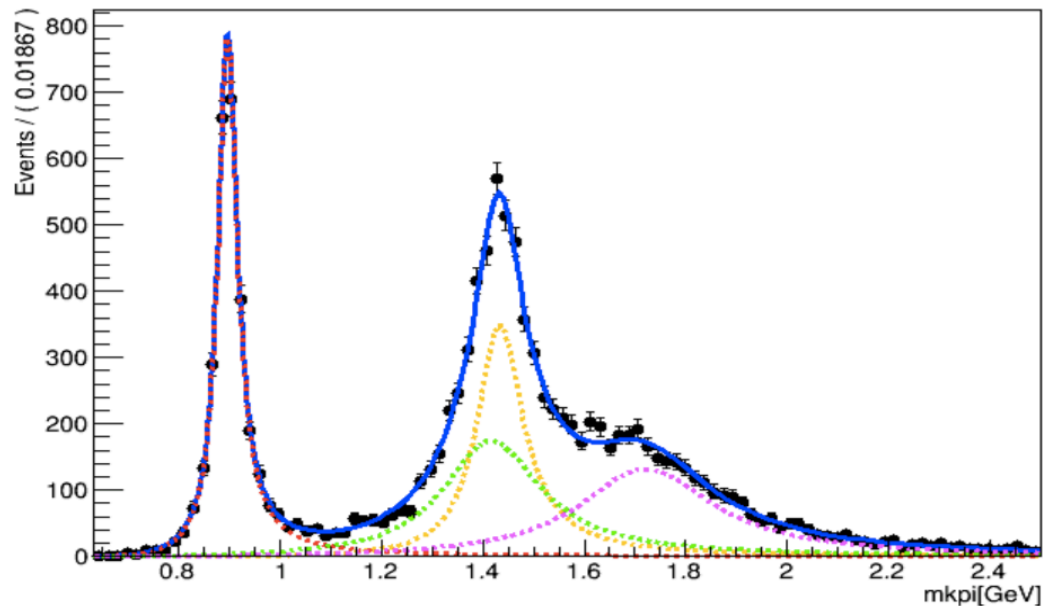
赤 : $K^*(892)$

橙 : $K_2^*(1430)$

緑 : $K^*(1410)$

ピンク : $K^*(1680)$

全てのレゾナンスの
 $K\pi\gamma$ への分岐比が同じ
だった場合。
toyMCで作成。



Belleの系統誤差

Syst. source	$K_s\pi^0\gamma$	$K^+\pi^-\gamma$	$K_s\pi^+\gamma$	$K^+\pi^0\gamma$	$K^{*0}\gamma$	$K^{*+}\gamma$	Δ_{0-}
MC stat. $K_s\pi^0\gamma$	0.360	-	-	-	0.024	-	0.012
MC stat. $K^+\pi^-\gamma$	-	0.135	-	-	0.126	-	0.063
MC stat. $K_s\pi^+\gamma$	-	-	0.242	-	-	0.159	0.079
MC stat. $K^+\pi^0\gamma$	-	-	-	0.284	-	0.097	0.048
n_{BB}	1.370	1.370	1.370	1.370	1.370	1.370	-
Photon	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000	-
Tracking	0.700	0.700	1.050	0.350	0.693	0.794	0.050
K/π ID	-	1.650	0.800	0.840	1.575	0.807	0.382
π^0	1.562	-	-	1.562	0.105	0.535	0.214
K_s	0.172	-	0.172	-	0.011	0.113	0.051
$M(K\pi)$	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	0.310	-
$\pi^0\eta$ veto + qq supp.	0.560	0.560	0.560	0.560	0.560	0.560	-
charge asym. $K^+\pi^-\gamma$	-	0.005	-	-	0.005	-	0.003
charge asym. $K_s\pi^+\gamma$	-	-	0.005	-	-	0.007	0.003
charge asym. $K^+\pi^0\gamma$	-	-	-	0.001	-	0.000	0.000
ΔE window	1.095	0.030	0.029	1.135	0.102	0.408	0.153
life-time	-	-	-	-	-	-	0.185
f_{+-}/f_{00}	1.236	1.234	1.152	1.168	1.235	1.167	1.162
number of generic BB decay	0.028	0.015	0.025	0.007	0.016	0.009	0.003
number of rareB	0.129	0.533	0.478	0.490	0.507	0.482	0.012
number of $X_s\gamma$	0.204	0.154	0.242	0.243	0.157	0.241	0.042
number of combinatorial bkg.	0.124	0.020	0.054	0.121	0.027	0.076	0.024
number of cross-feeds bkg.	0.177	0.167	0.208	0.232	0.168	0.215	0.023
number of $K^{*0}\eta$	0.041	0.063	0.003	0.002	0.062	0.002	0.030
number of $K^{*+}\eta$	0.001	0.002	0.075	0.063	0.002	0.071	0.034
number of $K^*\pi^0$	0.003	0.003	0.101	0.092	0.003	0.097	0.047
number of $K_1(1270)\gamma$	0.483	0.339	0.449	0.476	0.349	0.458	0.054
number of $K_1(1400)\gamma$	0.239	0.207	0.208	0.232	0.210	0.215	0.003
number of $K^*(1410)\gamma$	0.059	0.052	0.055	0.061	0.052	0.057	0.002
number of $K_2^*(1430)\gamma$	1.424	0.938	0.762	0.834	0.970	0.774	0.097
number of $K^*(1680)\gamma$	0.181	0.127	0.158	0.192	0.131	0.169	0.019
A_{CP} from $B \rightarrow X_s\gamma$	0.010	0.003	0.026	0.017	0.004	0.024	0.014
A_{CP} from $B \rightarrow K^*\eta$	0.002	0.001	0.001	0.003	0.001	0.002	0.000
A_{CP} from $B \rightarrow K^*\pi^0$	0.001	0.000	0.008	0.004	0.000	0.004	0.002
A_{CP} from other rareB	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Δ_{0-} from $B \rightarrow X_s\gamma$	0.183	0.016	0.123	0.013	0.027	0.074	0.023
M_{bc} mean with π^0	0.017	-	-	0.027	0.001	0.010	0.005
M_{bc} mean without π^0	-	0.011	0.018	-	0.010	0.011	0.000
qq ARGUS m_0	0.102	0.115	0.096	0.185	0.114	0.132	0.009
Signal $cb \alpha K_s\pi^0\gamma$	0.742	-	-	-	0.038	-	0.020
Signal $cb \alpha K^+\pi^0\gamma$	-	-	-	1.034	-	0.199	0.099
Signal $cb n K_s\pi^0\gamma$	3.783	-	-	-	0.003	-	0.001
Signal $cb n K^+\pi^0\gamma$	-	-	-	1.097	-	0.014	0.007
Fitter bias	2.353	0.193	0.663	1.309	0.165	0.182	0.083
Total	5.917	3.534	3.334	4.208	3.506	3.282	1.287

n_{BB} はoff-resonance(qqbarなど)との差で導くが、offとonのスケールングファクターの不定性が大きい。

Photonは、missing photonの割合による不定性。

f_{+-}/f_{00} は次のスライド。

f_{+-}/f_{00}

$$\Delta_{0+} = [+6.2 \pm 1.5(\text{stat}) \pm 0.6(\text{syst}) \pm 1.2(f_{+-}/f_{00})]\%$$

$$BF(\Upsilon(4S) \rightarrow B^+B^-)/BF(\Upsilon(4S) \rightarrow B^0\bar{B}^0)(= f_{+-}/f_{00})$$

Bの崩壊で支配的な $B \rightarrow D^{*+}\ell\nu$ を再構成して、タギングを行う。
 f_{+-} は $f_{+-}=1-f_{00}$ より求める。

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

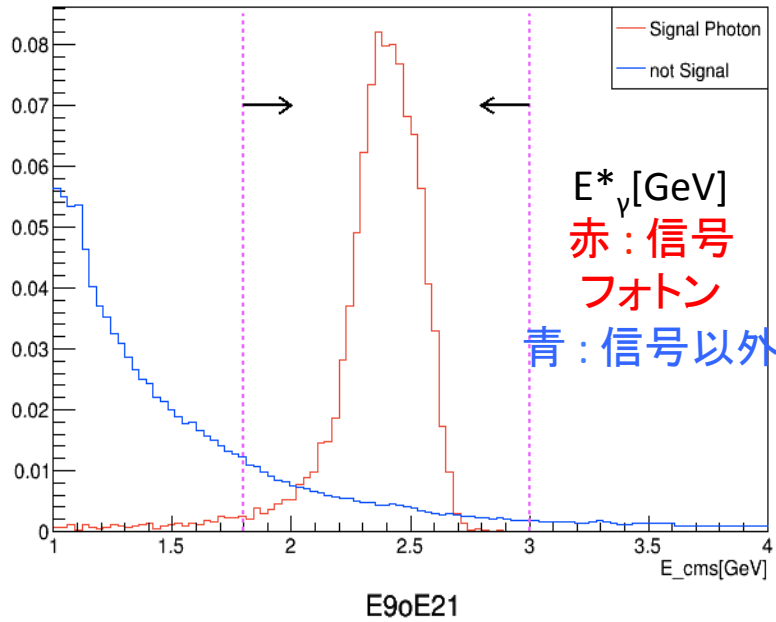
ε_d は $B \rightarrow D^{*+}\ell\nu$ の検出効率。

Belleの系統誤差

Syst. source	$A_{CP}^{K^+\pi^-\gamma}$	$A_{CP}^{K^*\pi^-\gamma}$	$A_{CP}^{K_s\pi^+\gamma}$	$A_{CP}^{K^+\pi^0\gamma}$	$A_{CP}^{K^{*+}\gamma}$	$A_{CP}^{comb.}$	ΔA_{CP}
MC stat. $K_s\pi^0\gamma$	-	-	-	-	-	-	-
MC stat. $K^+\pi^-\gamma$	-	-	-	-	-	-	-
MC stat. $K_s\pi^+\gamma$	-	-	-	-	-	-	-
MC stat. $K^+\pi^0\gamma$	-	-	-	-	-	-	-
n_{BB}	-	-	-	-	-	-	-
Photon	-	-	-	-	-	-	-
Tracking	0.001	0.001	-	-	0.008	0.004	0.007
K/π ID	0.003	0.003	-	-	0.004	0.004	0.000
π^0	0.000	0.000	-	-	0.006	0.004	0.006
K_s	0.000	0.000	-	-	0.002	0.001	0.002
$M(K\pi)$	-	-	-	-	-	-	-
$\pi^0\eta$ veto + qq supp.	-	-	-	-	-	-	-
charge asym. $K^+\pi^-\gamma$	0.404	0.404	-	-	-	0.261	0.404
charge asym. $K_s\pi^+\gamma$	-	-	0.412	-	0.254	0.090	0.254
charge asym. $K^+\pi^0\gamma$	-	-	-	0.040	0.015	0.005	0.015
ΔE window	-	-	-	-	-	-	-
life time	-	-	-	-	-	-	-
f_{+-}/f_{00}	-	-	-	-	-	-	-
number of generic BB decay	0.001	0.001	0.013	0.008	0.003	0.002	0.002
number of rareB	0.002	0.002	0.010	0.004	0.008	0.002	0.010
number of $X_s\gamma$	0.004	0.004	0.004	0.056	0.025	0.011	0.021
number of combinatorial bkg.	0.005	0.005	0.010	0.026	0.016	0.009	0.011
number of cross-feeds bkg.	0.019	0.019	0.023	0.029	0.002	0.012	0.021
number of $K^{*0}\eta$	0.012	0.012	0.001	0.001	0.001	0.009	0.011
number of $K^{*+}\eta$	0.000	0.000	0.017	0.015	0.016	0.005	0.016
number of $K^{*}\pi^0$	0.000	0.000	0.009	0.010	0.009	0.004	0.009
number of $K_1(1270)\gamma$	0.006	0.006	0.030	0.011	0.023	0.011	0.017
number of $K_1(1400)\gamma$	0.007	0.007	0.023	0.002	0.015	0.010	0.008
number of $K^*(1410)\gamma$	0.001	0.001	0.003	0.000	0.002	0.002	0.001
number of $K_2^*(1430)\gamma$	0.038	0.038	0.068	0.019	0.042	0.041	0.003
number of $K^*(1680)\gamma$	0.003	0.003	0.010	0.006	0.008	0.004	0.005
A_{CP} from $B \rightarrow X_s\gamma$	0.087	0.087	0.051	0.111	0.075	0.083	0.012
A_{CP} from $B \rightarrow K^*\eta$	0.042	0.042	0.047	0.041	0.045	0.043	0.003
A_{CP} from $B \rightarrow K^*\pi^0$	0.002	0.002	0.055	0.053	0.054	0.020	0.053
A_{CP} from other rareB	0.006	0.006	0.001	0.003	0.003	0.006	0.007
Δ_{0-} from $B \rightarrow X_s\gamma$	0.002	0.002	0.002	0.003	0.001	0.001	0.001
M_{bc} mean with π^0	0.000	0.000	-	0.013	0.002	0.001	0.002
M_{bc} mean without π^0	0.002	0.002	0.011	-	0.001	0.001	0.003
qq ARGUS m_0	0.001	0.001	0.011	0.011	0.005	0.002	0.004
Signal $cb \propto K_s\pi^0\gamma$	0.003	0.003	-	-	-	0.000	0.007
Signal $cb \propto K^+\pi^0\gamma$	-	-	-	0.106	0.016	0.006	0.016
Signal $cb \propto K_s\pi^0\gamma$	0.000	0.000	-	-	-	0.000	0.000
Signal $cb \propto K^+\pi^0\gamma$	-	-	-	0.074	0.001	0.000	0.001
Fitter bias	0.070	0.070	0.116	0.164	0.092	0.082	0.115
total	0.424	0.424	0.445	0.261	0.297	0.308	0.496

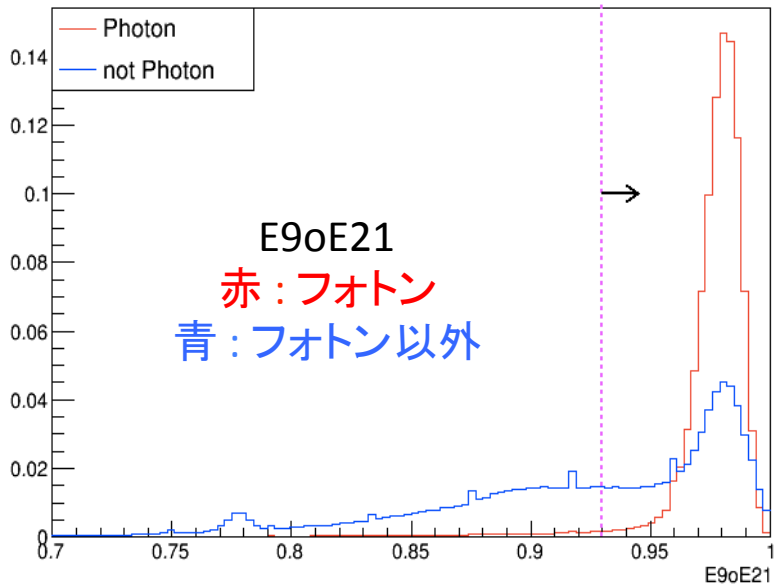
A_{CP} はfitter biasが大きい。

CMS gamma energy



重心エネルギーのカット。
 $b \rightarrow s\gamma$ は二体崩壊なので、
信号フォトンと比較的エネルギー
が高い。

E9oE21



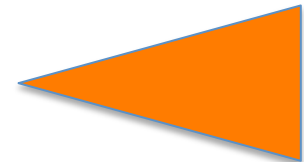
シャワー変数によるカット。
電磁シャワーは、ハドロンシャワーよりも
シャワー形状がシャープなので、シャワー
形状を表現する変数が選別に効果的。
フォトン事象では、左図のE9oE21(シャ
ワーの広がり表現)は1に近くなりやす
い。

シャワーの概観

フォトン



ハドロン



Best Candidate Selection

B中間子を再構成をした時に、同じイベント内に複数のB中間子候補が再構成された場合、その中から最も信号事象らしい候補を選ぶことを Best Candidate Selection と呼ぶ。

本研究では、 $|\Delta E|$ が最も小さいB中間子候補をBest Candidateとし、そのイベントの最終的なB中間子候補とした。

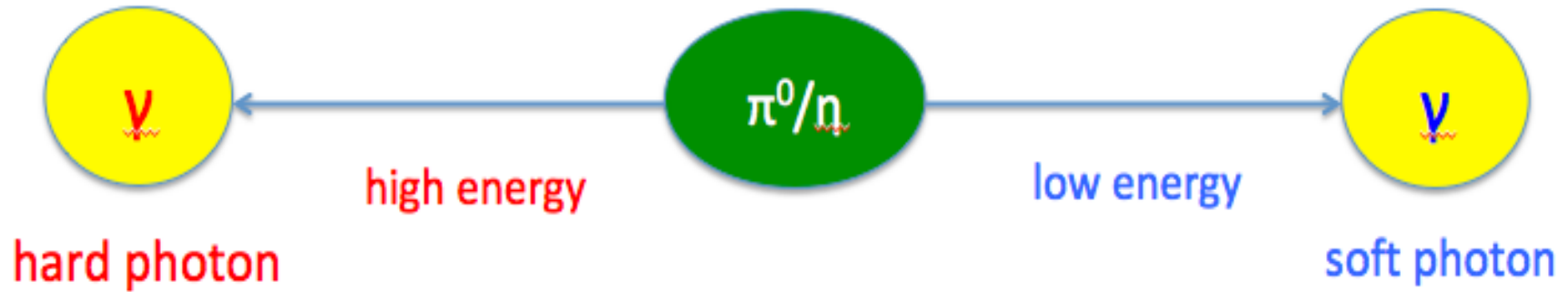


複数のB中間子候補

$|\Delta E_1| < |\Delta E_2| < |\Delta E_3| < |\Delta E_4|$ の時、 B_1 を Best Candidate に決定

π^0/η veto

概要

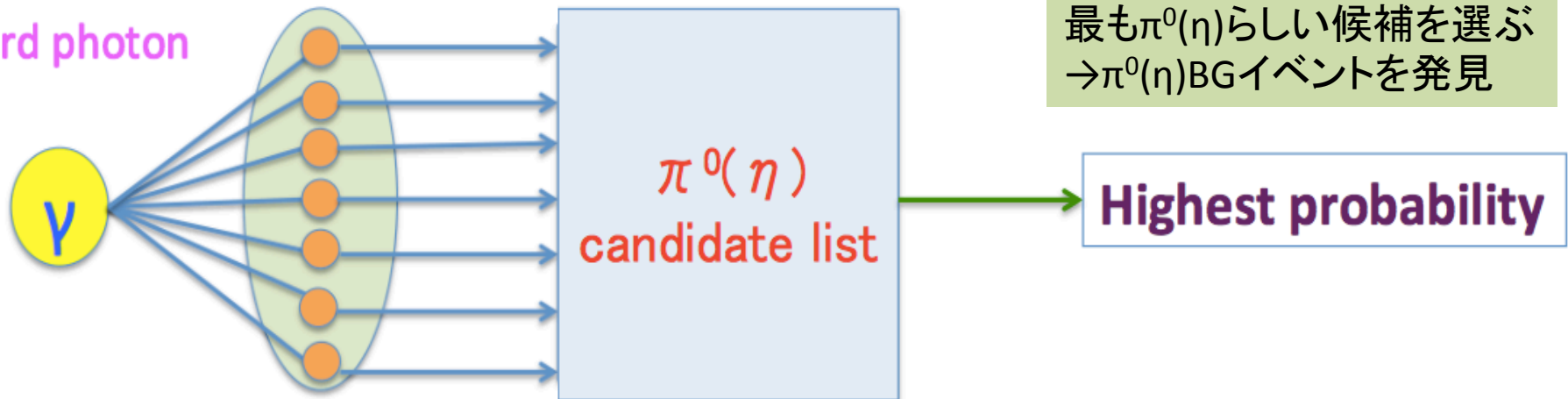


$\pi^0/\eta \rightarrow 2\gamma$ において生成される高エネルギーの光子が、 $B \rightarrow X_s \gamma$ のバックグラウンドになり得る。

hard photonとsoft photonを
組み合わせて、 π^0/η 候補を
作っていく。

soft photon list

hard photon



π^0/η veto

ハードフォトンとソフトフォトンの定義

ハードフォトン(π^0/η 共通) : 重心系エネルギー $> 1.4\text{GeV}$

π^0/η ソフトフォトン : 実験室系エネルギー $> 20/30\text{MeV}$ (前方エンドキャップのみ
25/35MeV) かつ energy dependent clusterTiming cut

clusterTiming : $T_{\text{rec}} - T_{\text{trigger}}$ [ns].

T_{rec} : ECLで再構成された時間

T_{trigger} : トリガー時間

clusterTiming分布[ns] ↓

赤 : 信号事象, 青 : π^0 bkg (フォトンのみ),

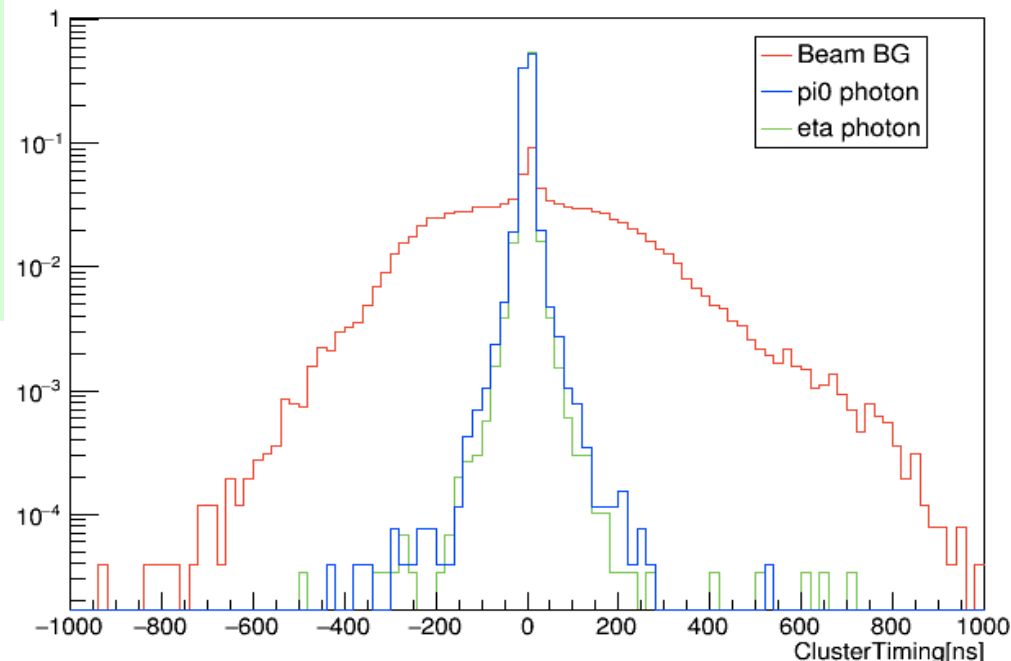
緑 : η bkg (フォトンのみ)

ClusterTiming

他のバンチ由来のビームバックグラウンドのイベントは、clusterTimingが大きくなりがちなので、ビームバックグラウンドを減らすための有効なカットになる。

※「energy dependent clusterTiming cut」

時間分解能はエネルギー依存するので、エネルギーごとに異なるカットを用いる。



π^0/η veto インプット変数

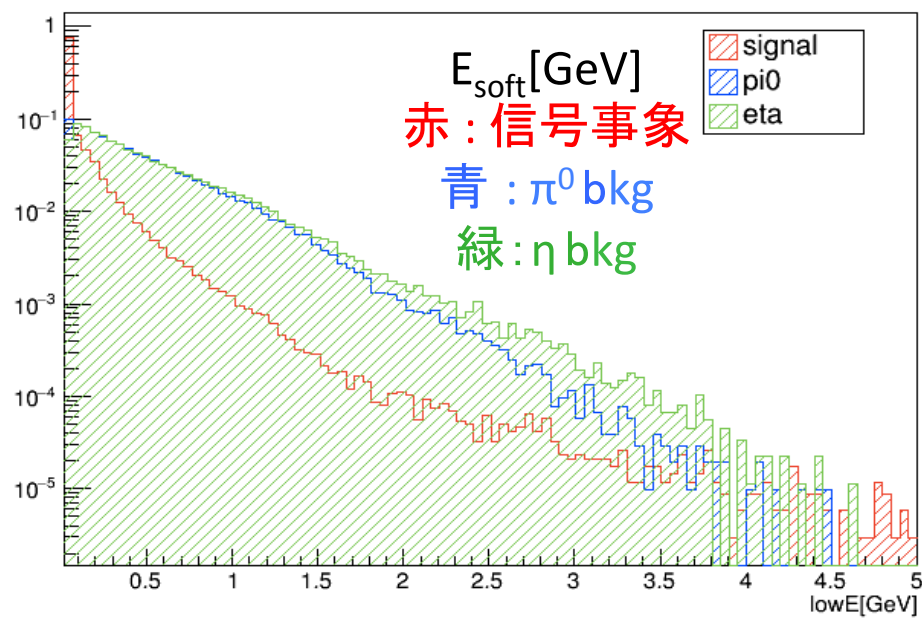
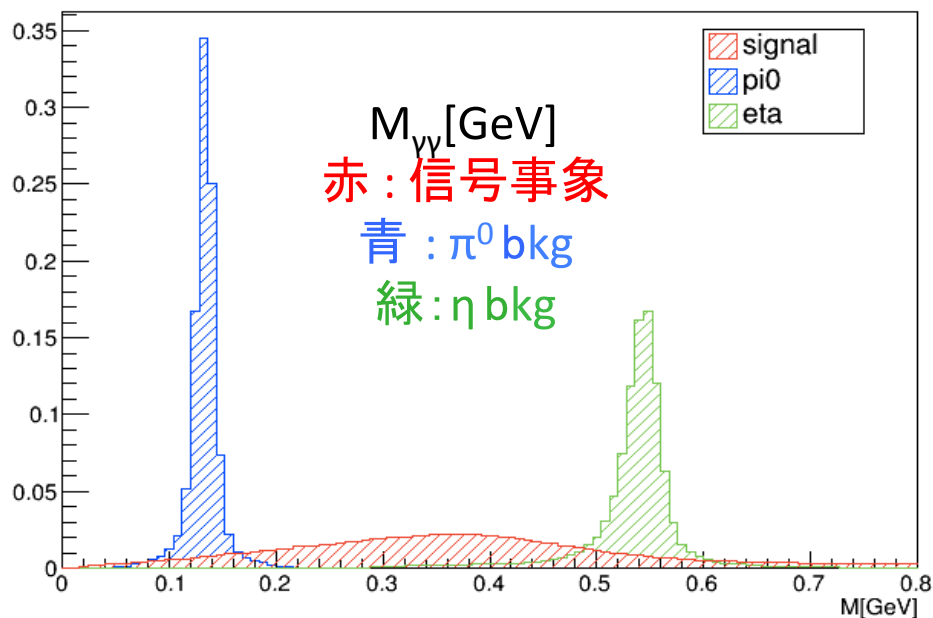
今回、 π^0/η vetoの除去のために、FastBDTを用いて多変量解析を行った。
その時インプットする変数として、以下のものを使用した。

・インプット変数

$M_{\gamma\gamma}$, ソフトフォトンのエネルギー、ソフトフォトンの崩壊角、ソフトフォトンのシャワー変数(ZernikeMVA)、ソフトフォトンのトラッキング変数(minC2Hdist)

mass

soft photon energy



π^0/η veto 結果

π^0 veto Performance	Belle I π^0 veto	this π^0 veto
信号事象保持率	75%	75%
π^0 bkg 除去率	80%	88%

多変量解析を用いたことが、パフォーマンスの向上に繋がったと考えられる。

η veto Performance	this η veto
信号事象保持率	75%
η bkg 除去率	79%

