

Belle II 実験における $B \rightarrow K\pi\gamma$ の解析

B2J analysis meeting
Oct 13(Fri)

東北大学 M2
太田恭平



1. $b \rightarrow s \gamma$

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ため、標準模型の効果が相対的に小さく、新物理に感度がある。

クォークレベル

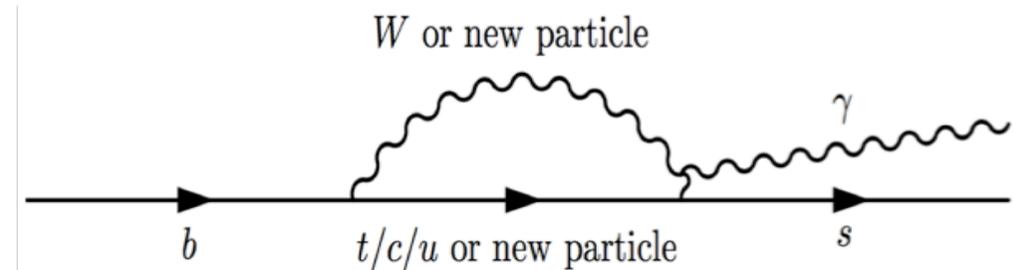
$b \rightarrow s \gamma$

ハドロンレベル

$B \rightarrow X_s \gamma$

(実際に観測可能な事象)

このうち、 X_s が $K\pi$ に壊れる事象が $B \rightarrow K\pi\gamma$ 。具体的な X_s として、 $K^*(892)$ 、 $K_2^*(1430)$ 、 $K^*(1410)$ 、 $K^*(1680)$ などがある。



2. 研究テーマ

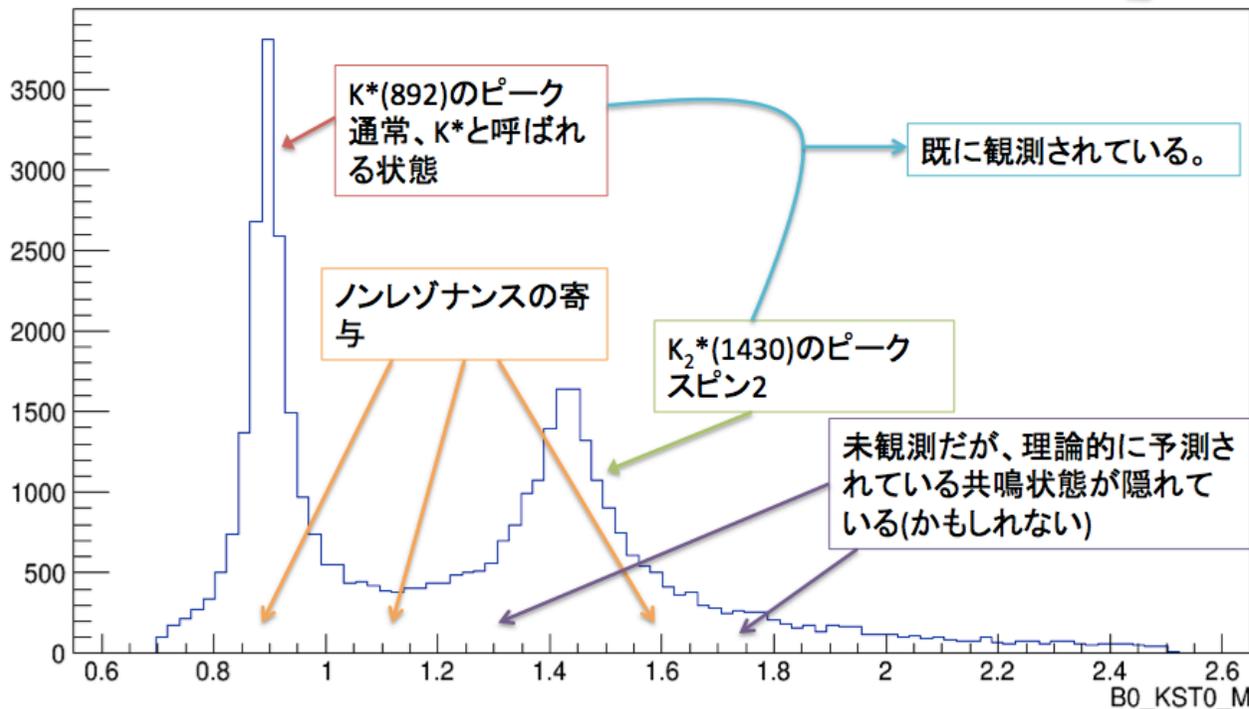
本研究でシグナルとして抽出したいのは、 $B \rightarrow K\pi\gamma$

モチベーションは以下の3つ。

- 1) 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
- 2) 直接的CP対称性の破れの測定
- 3) アイソスピン非対称性の測定

$M(K\pi)$ 分布の特徴が見えやすいように、やや分岐比を調整したヒストグラム

※ $B \rightarrow K\pi\gamma$ に壊れるKaonic resonanceのみについて



$M(K\pi)$ のヒストグラム
($M(K\pi)$: 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
であるため、その他の
共鳴状態がはっきりと
観測されていない。

3. 再構成

・シグナル事象

$B \rightarrow K^*(892)\gamma \rightarrow K\pi\gamma$

$B \rightarrow K_2^*(1430)\gamma \rightarrow K\pi\gamma$

$B \rightarrow K^*(1410)\gamma \rightarrow K\pi\gamma$

$B \rightarrow K(1680)\gamma \rightarrow K\pi\gamma$

※ $K_s\pi^0\gamma$ は統計誤差が大きい
ため、本研究では扱わない。

1.15GeV<M(Kpi)<1.9GeVの範囲で、
シグニフィカンスが最大になるように
カット条件を決めて再構成した。

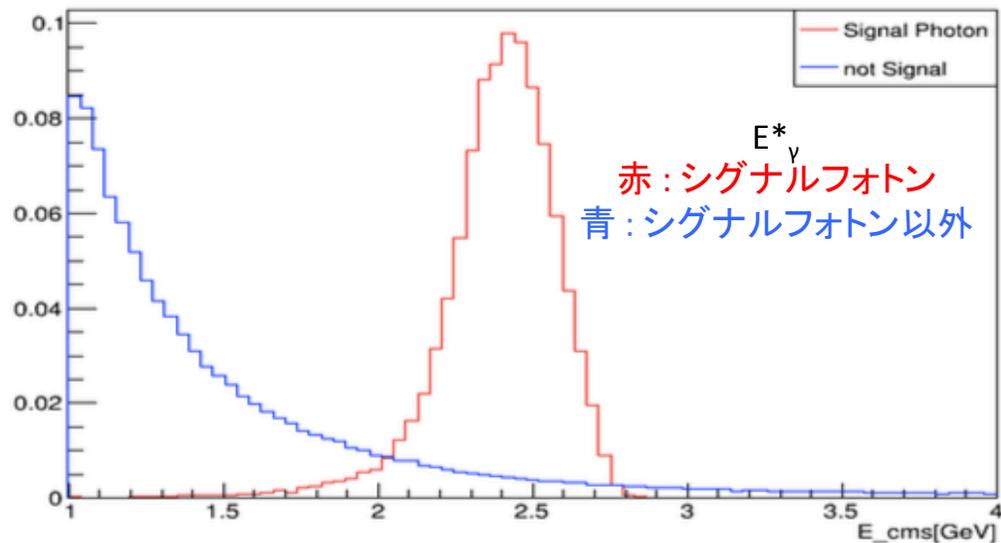
$$Significance = \frac{N_{sig}}{\sqrt{N_{sig} + N_{bg}}}$$

本研究における X_s の質量、崩壊幅、崩壊分岐比の仮定。

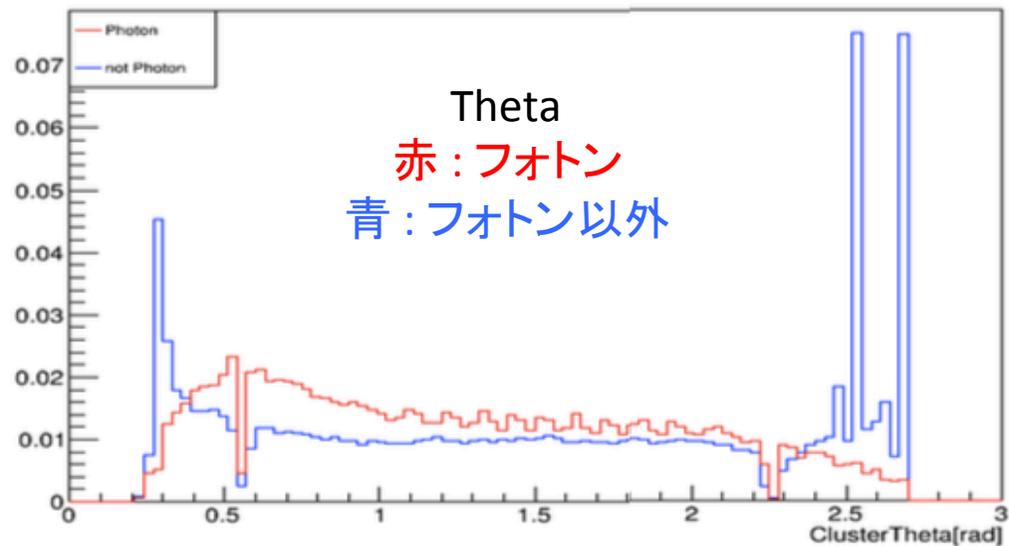
X_s	質量	崩壊幅	$BF(B \rightarrow X_s\gamma)$	$BF(B^0 \rightarrow K^+\pi^-\gamma)$	$BF(B^+ \rightarrow K_s\pi^+\gamma)$	$BF(B^+ \rightarrow K^+\pi^0\gamma)$
$K^{*0}(892)$	0.896 GeV	0.0474 GeV	4.33×10^{-5}	2.83×10^{-5}	-	-
$K^{*+}(892)$	0.892 GeV	0.0508 GeV	4.21×10^{-5}	-	1.38×10^{-5}	1.38×10^{-5}
$K_2^{*0}(1430)$	1.43 GeV	0.109 GeV	1.24×10^{-5}	4.16×10^{-6}	-	-
$K_2^{*+}(1430)$	1.43 GeV	0.0985 GeV	1.4×10^{-5}	-	2.34×10^{-6}	2.34×10^{-6}
$K^{*0}(1410)$	1.41 GeV	0.232 GeV	1.28×10^{-5}	5.98×10^{-7}	-	-
$K^{*+}(1410)$	1.41 GeV	0.232 GeV	1.28×10^{-5}	-	2.99×10^{-7}	2.99×10^{-7}
$K^{*0}(1680)$	1.72 GeV	0.320 GeV	1.70×10^{-6}	4.39×10^{-8}	-	-
$K^{*+}(1680)$	1.72 GeV	0.320 GeV	1.70×10^{-6}	-	2.20×10^{-8}	2.20×10^{-8}

3.1 フォトン選別

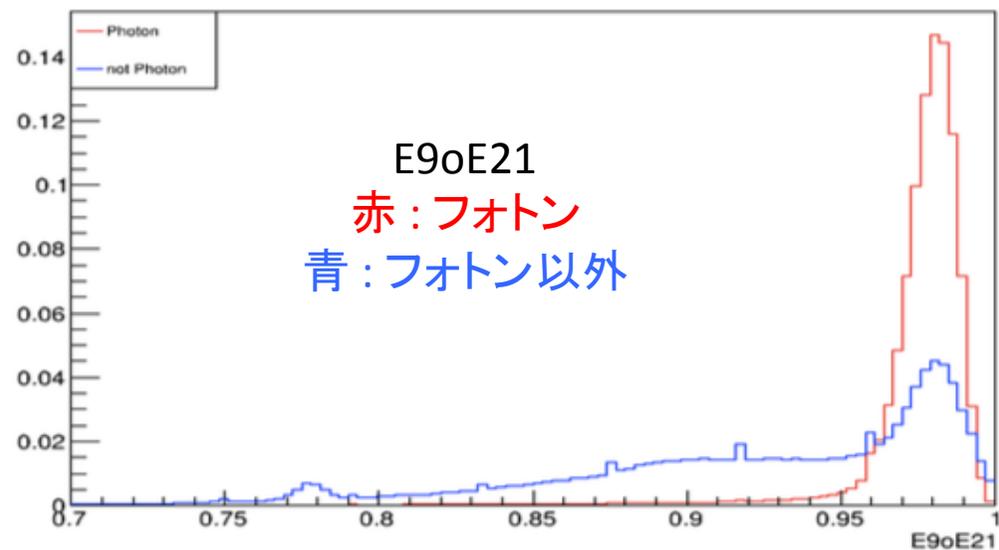
CMS gamma energy



ClusterTheta



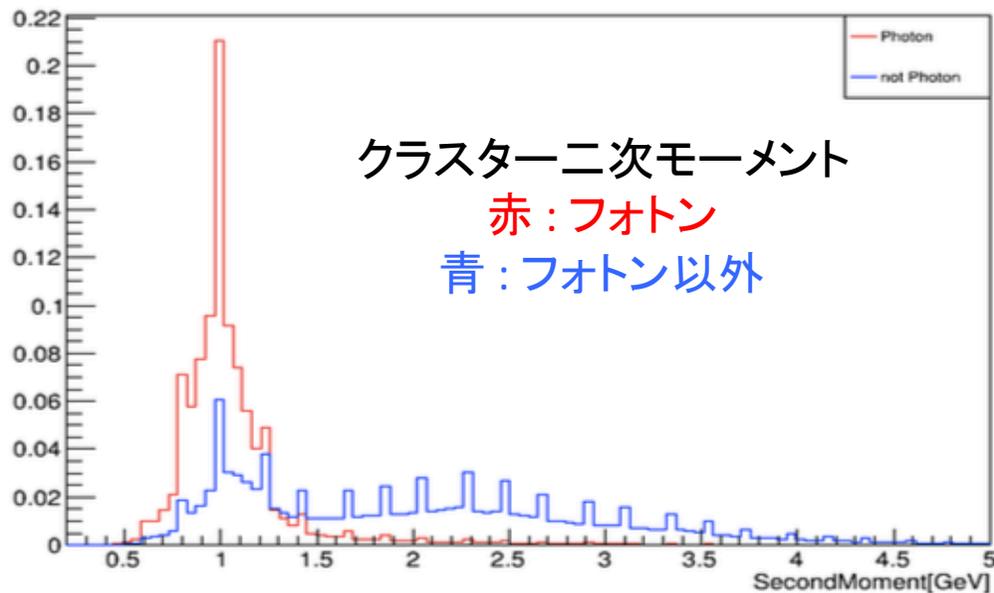
E9oE21



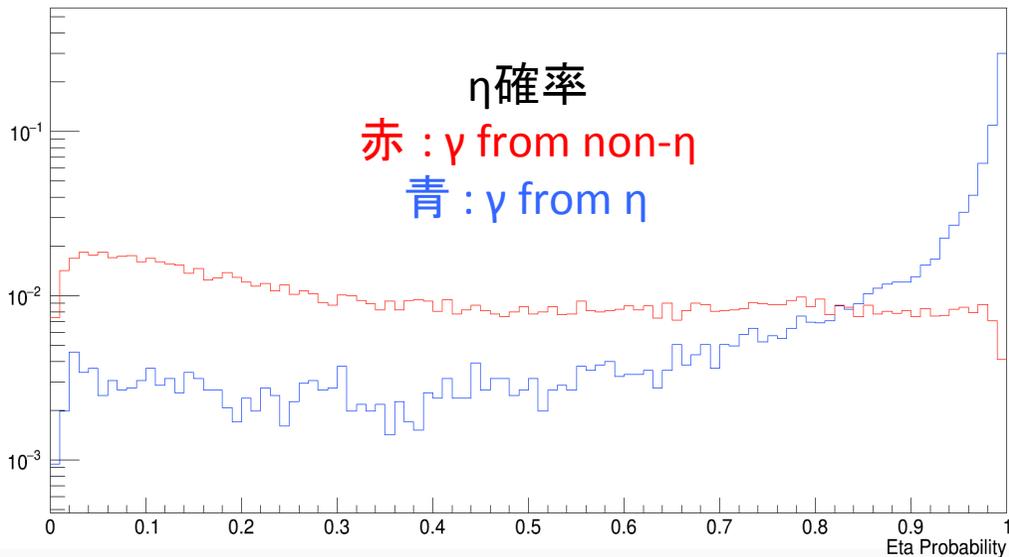
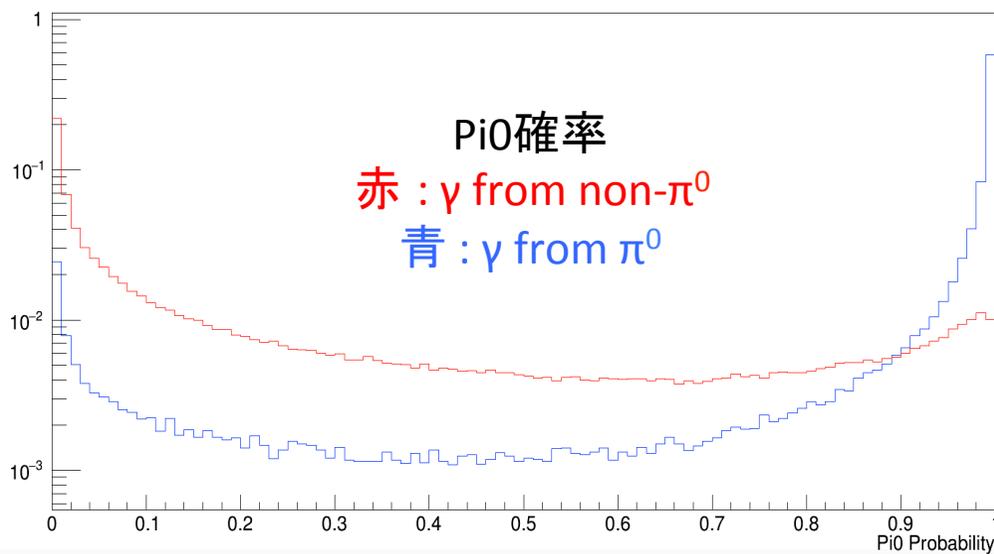
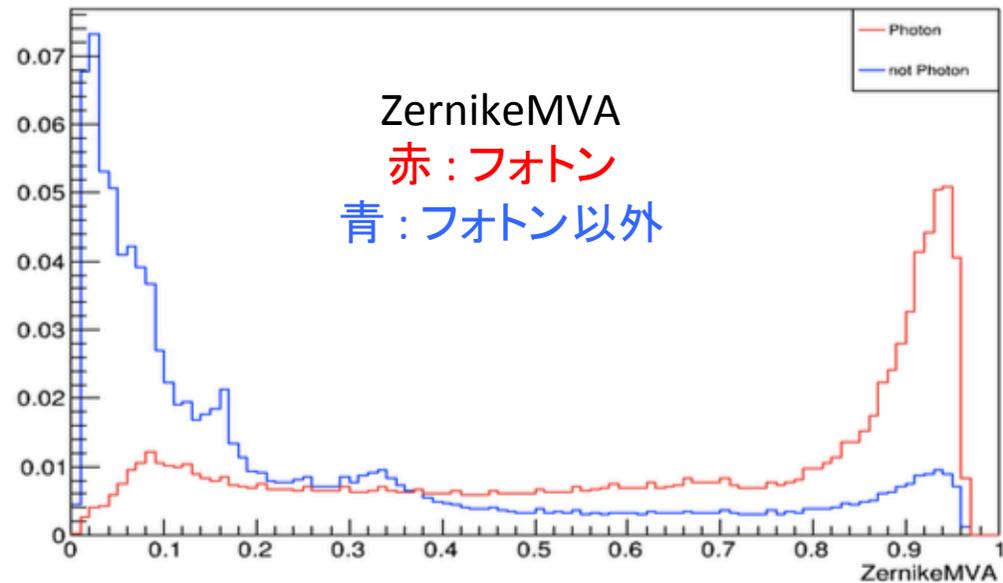
重心エネルギーのカット、
 崩壊角のカット(バレルのみ)、
 シャワー変数によるカット。
 更に、pi0eta vetoも適用する。

フォトン選別

SecondMoment

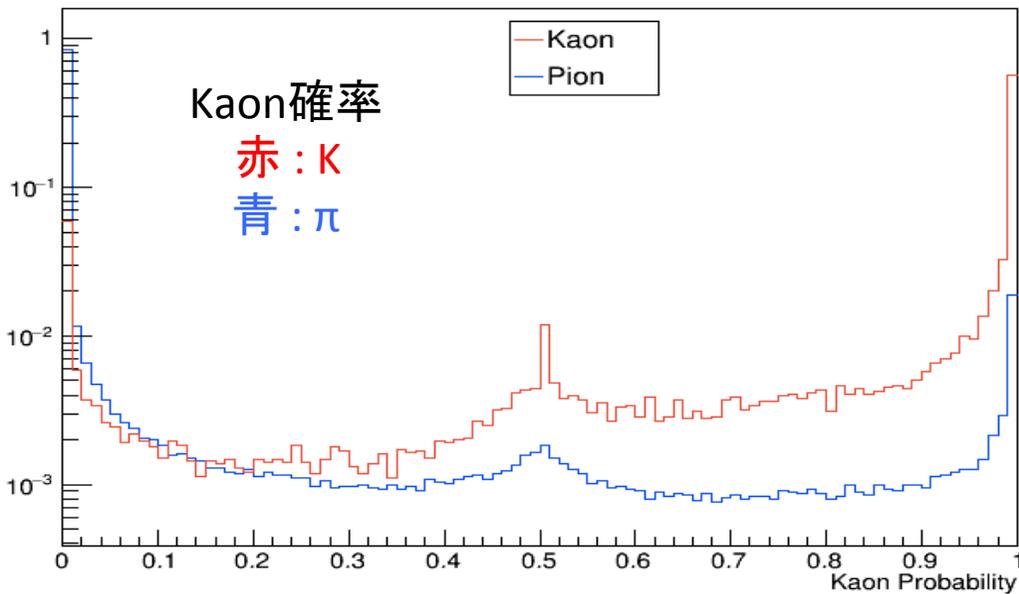


ZernikeMVA

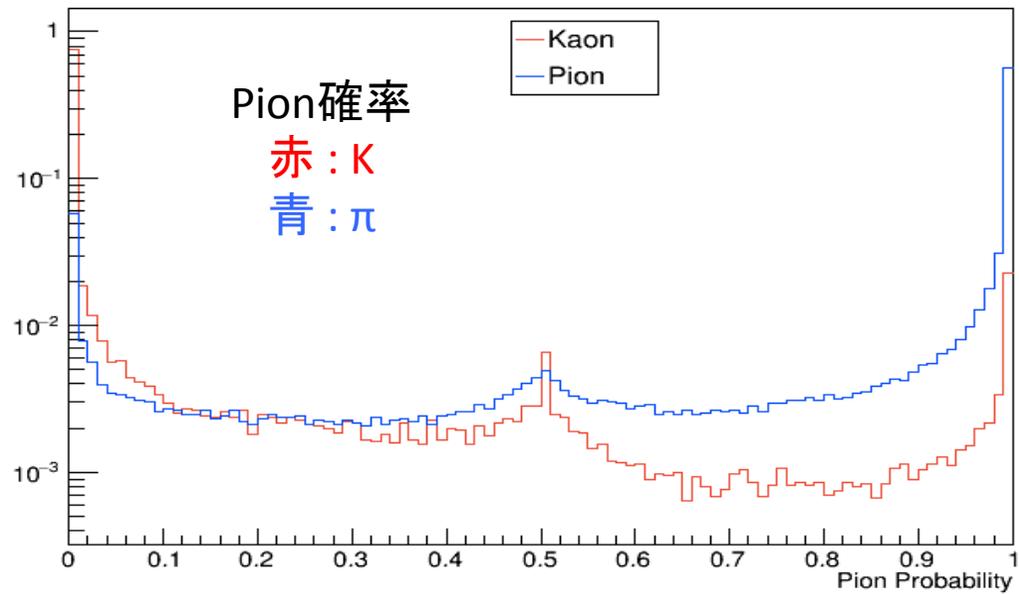


3.2 荷電K/ π 選別

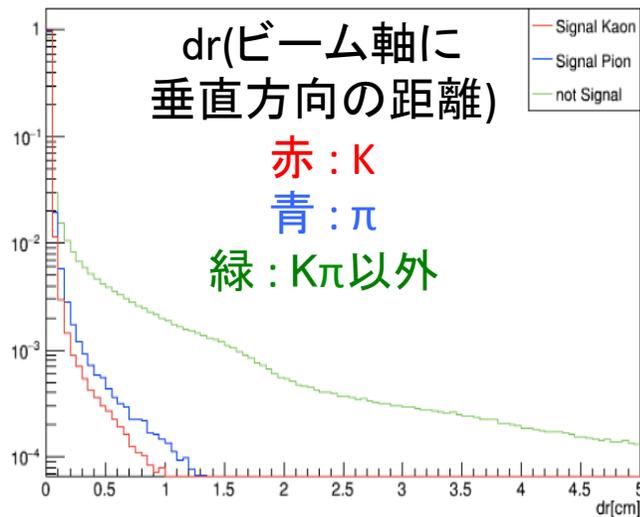
Kaon Probability



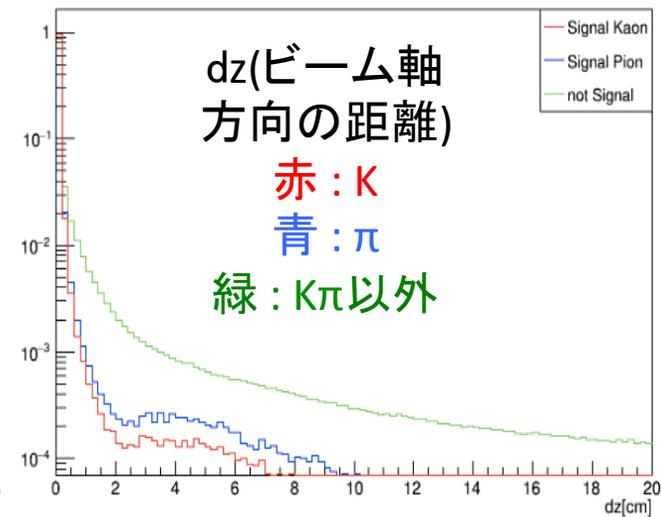
Pion Probability



impact parameter dr



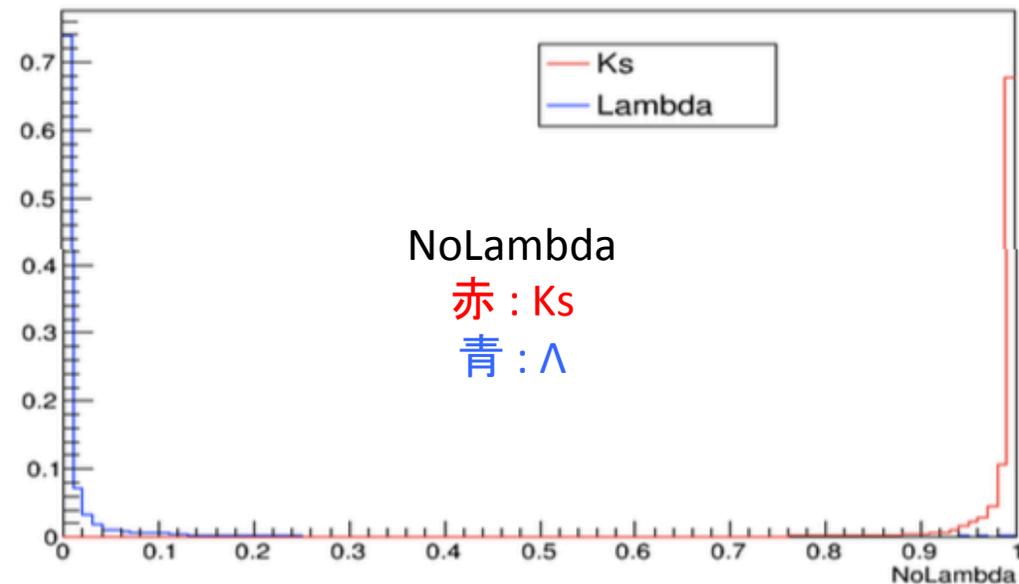
impact parameter dz



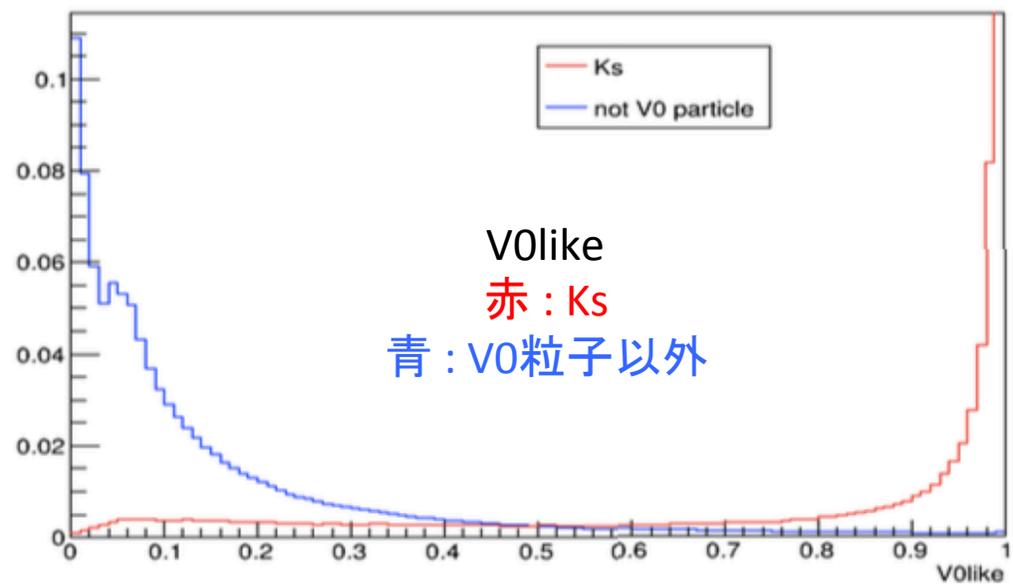
PIDカット。
Impact Parameterカット。
重心系運動量カット。
トラッキングクオリティのカット。

3.3 K_s 選別

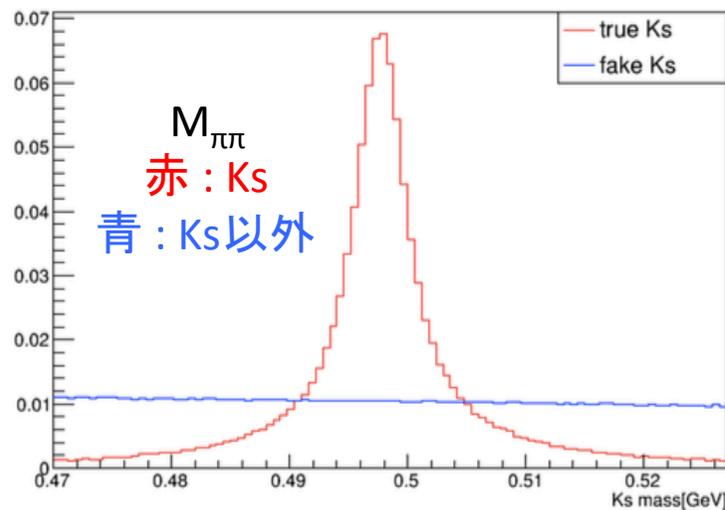
NoLambda



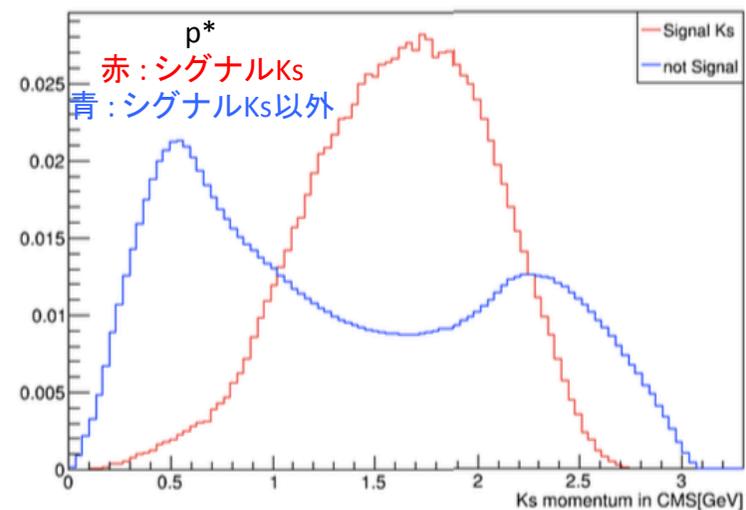
V0like



Ks mass



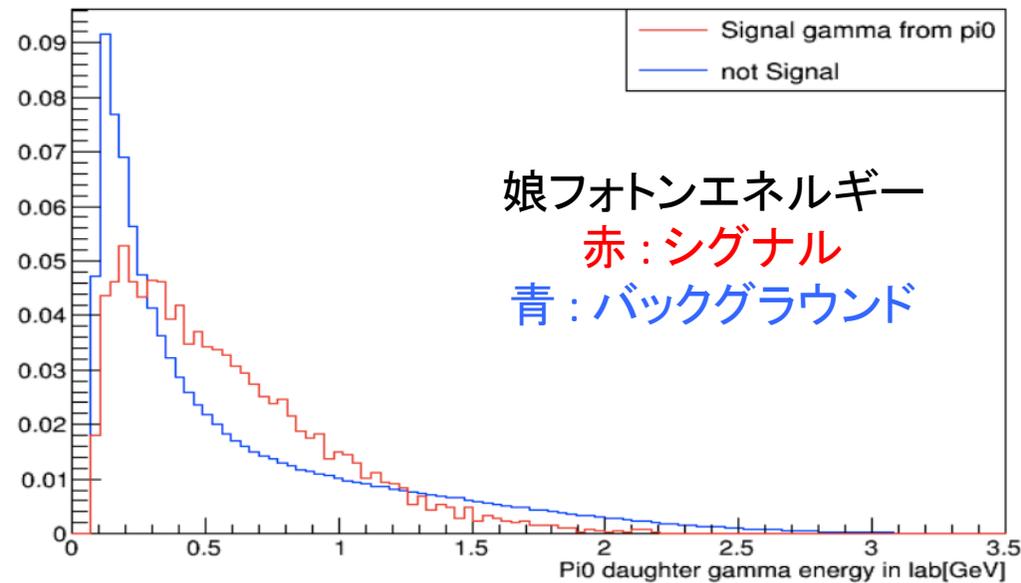
Ks momentum in CMS



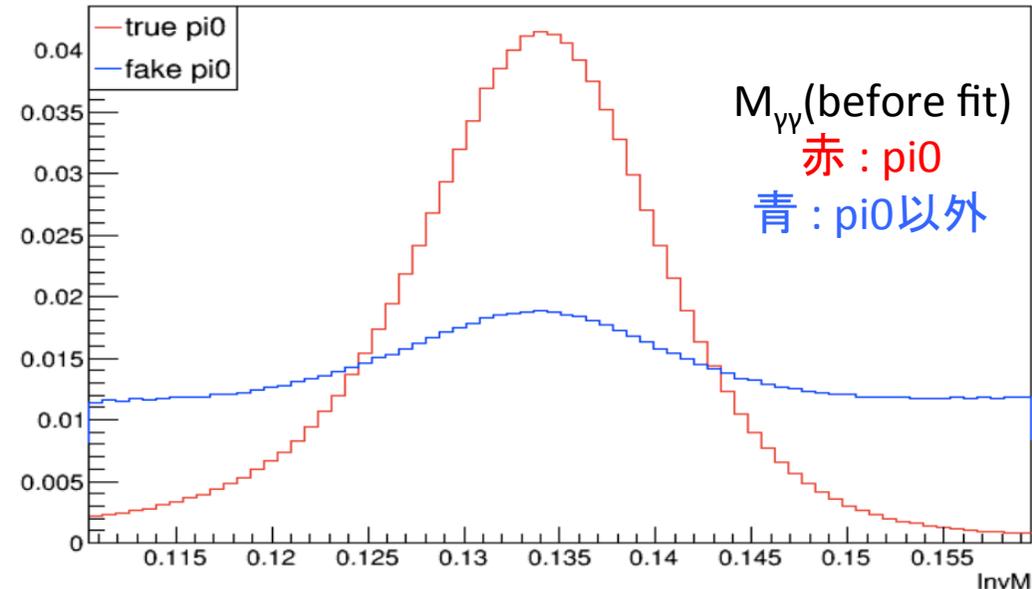
NisKsFinder(Belle I から Importしたもの)を適用。
 $M_{\pi\pi}$ カット。
 重心系運動量カット。
 フライト距離カット。

3.4 π^0 選別

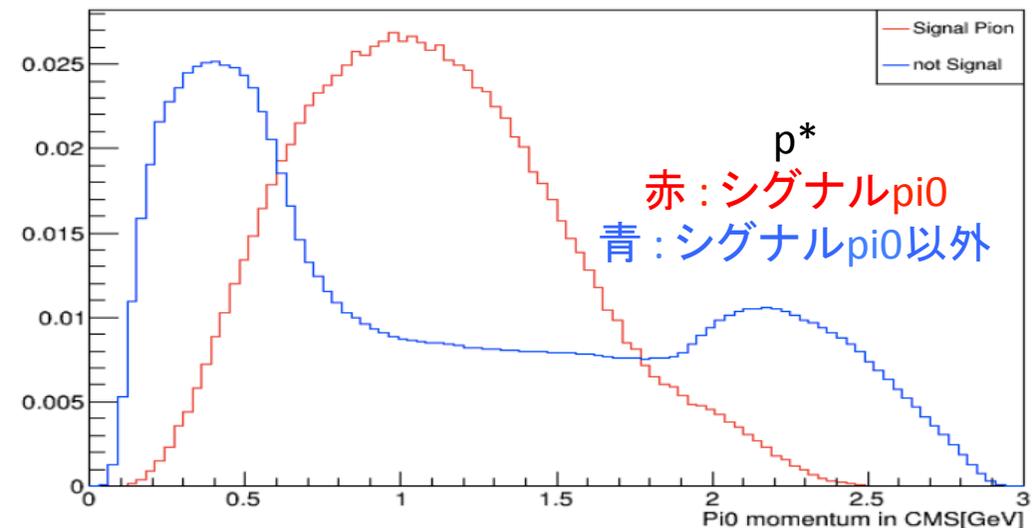
Pi0 daughter gamma energy in lab



Invariant Mass(before fit)



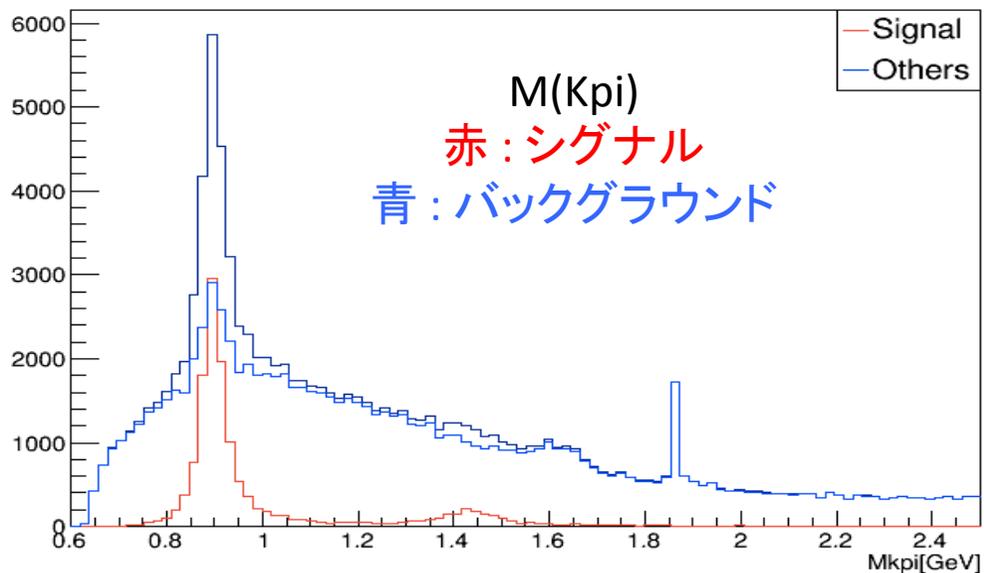
Pi0 momentum in CMS



娘光子のエネルギーカット。
 $M_{\gamma\gamma}$ カット。
重心系運動量カット。
mass constrained fitを適用。

3.5 K π 系選別/B中間子の再構成

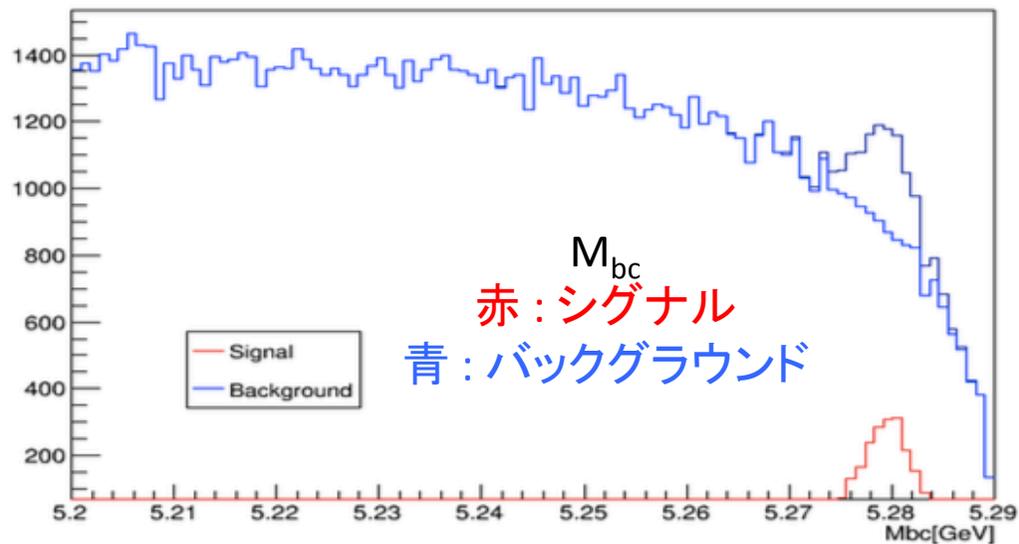
Mkpi



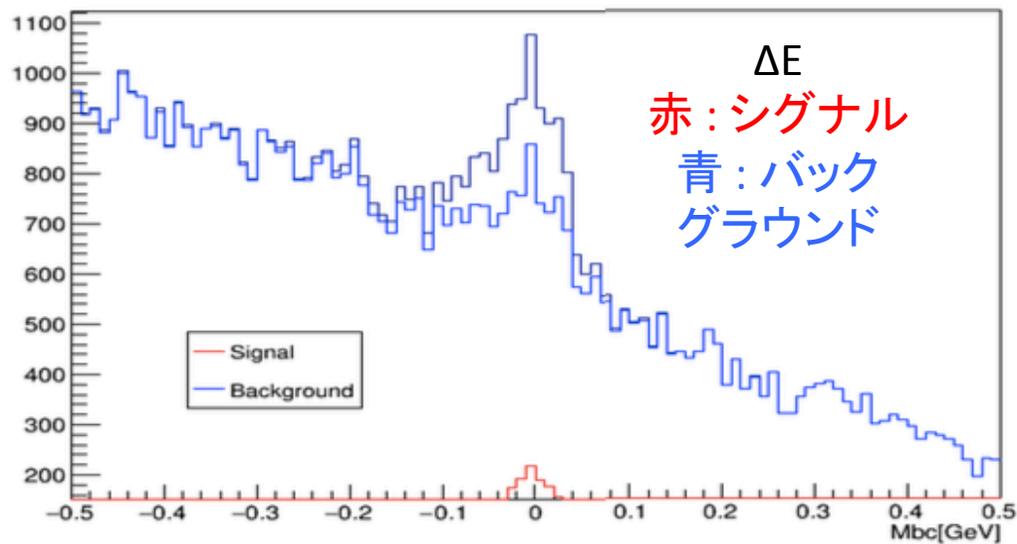
$B^0 \rightarrow K^+\pi^-\gamma$ 、 $B^+ \rightarrow K_s^0\pi^+\gamma$ 、 $B^+ \rightarrow K^+\pi^0\gamma$ でそれぞれ異なるD vetoを適用。また、 $B^0 \rightarrow K^+\pi^-\gamma$ のみ vertex fitを行なった。M(Kpi)<2.5GeVまでを本研究では扱う。

M_{bc} は5.2GeV以上で、3つのモードで共通。 ΔE はBest Candidate Selectionでも使う ($B^0 \rightarrow K^+\pi^-\gamma$ 、 $B^+ \rightarrow K_s^0\pi^+\gamma$ 、 $B^+ \rightarrow K^+\pi^0\gamma$ でそれぞれで $|\Delta E|$ が一番小さい候補を採用)。

Beam Constrained Mass



DeltaE



対象粒子	カット条件	
フォトン	$1.8 \text{ GeV} < E^* < 3.0 \text{ GeV}$	Energy cut
	$33^\circ < \theta_\gamma < 128^\circ$ (バレル ECL のみ)	Barrel only
	$E_{9/21} > 0.93$	
	ZernikeMVA > 0.525	Shower variables
	クラスター二次モーメント $< 1.5 \text{ GeV}$	
	π^0 Probability < 0.87	π^0/η veto
	η Probability < 0.95	
荷電 K 中間子	$0.2 \text{ GeV} < p^* < 2.5 \text{ GeV}$	Momentum cut
	Kaon Probability > 0.6	
	Proton Probability < 1	PID cut
	$dr < 0.1 \text{ cm}$	Impact parameter cut
	$dz < 0.6 \text{ cm}$	
	χ^2 Probability > 0.001	Tracking quality cut
荷電 π 中間子	$0.3 \text{ GeV} < p^* < 2.4 \text{ GeV}$	Momentum cut
	Pion Probability > 0.2	
	Electron Probability < 1	PID cut
	$dr < 0.1 \text{ cm}$	Impact parameter cut
	$dz < 0.6 \text{ cm}$	
	χ^2 Probability > 0.001	Tracking quality cut
$K\pi$ 系	$M_{K\pi} < 2.5 \text{ GeV}$ D^0 veto ($1.835 \text{ GeV} < M_{K\pi} < 1.895 \text{ GeV}$ の範囲を除去)	D veto
B 中間子	$5.2 \text{ GeV} < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}$ $-0.12 \text{ GeV} < \Delta E < 0.06 \text{ GeV}$	

対象粒子	カット条件	
フォトン	$1.8 \text{ GeV} < E^* < 3.0 \text{ GeV}$	Energy cut
	$33^\circ < \theta_\gamma < 128^\circ$ (バレル ECL のみ)	Barrel only
	$E_{9/21} > 0.92$	
	ZernikeMVA > 0.52	Shower variables
	クラスター二次モーメント $< 1.5 \text{ GeV}$	
	π^0 Probability < 0.87	π^0/η veto
	η Probability < 0.96	
K_s	$0.3 \text{ GeV} < p^* < 2.6 \text{ GeV}$	Momentum cut
	$ m_{K_s}^{PDG} - m_{\pi^+\pi^-} < 0.019 \text{ GeV}$	
	DistZ $< 17 \text{ cm}$	
	Flight length $> 0.12 \text{ cm}$	Ks precut
	dphi $< 0.165 \text{ rad}$	
	V0like > 0.8	NisKs
	NoLambda > 0.68	
荷電 π 中間子	$0.3 \text{ GeV} < p^* < 2.3 \text{ GeV}$	Momentum cut
	Pion Probability > 0.4	PID cut
	Electron Probability < 1	
	$dr < 0.08 \text{ cm}$	Impact parameter cut
	$dz < 0.8 \text{ cm}$	
	χ^2 Probability > 0.001	Tracking quality cut
$K\pi$ 系	$M_{K\pi} < 2.5 \text{ GeV}$	
	D^+ veto ($1.84 \text{ GeV} < M_{K\pi} < 1.9 \text{ GeV}$ の範囲を除去)	D veto
B 中間子	$5.2 \text{ GeV} < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}$	
	$-0.1 \text{ GeV} < \Delta E < 0.06 \text{ GeV}$	

対象粒子	カット条件	
フォトン	$1.8 \text{ GeV} < E^* < 3.0 \text{ GeV}$	Energy cut
	$33^\circ < \theta_\gamma < 128^\circ$ (パレル ECL のみ)	Barrel only
	$E_{9/21} > 0.92$	
	ZernikeMVA > 0.51	Shower variables
	クラスター二次モーメント < 1.6 GeV	
	π^0 Probability < 0.85	π^0/η veto
	η Probability < 0.97	
荷電 K 中間子	$0.2 \text{ GeV} < p^* < 2.4 \text{ GeV}$	Momentum cut
	Kaon Probability > 0.7	PID cut
	Proton Probability < 1	
	$dr < 0.15 \text{ cm}$	Impact parameter cut
	$dz < 0.5 \text{ cm}$	
	χ^2 Probability > 0.001	Tracking quality cut
π^0	$0.5 \text{ GeV} < p^* < 2.3 \text{ GeV}$	Momentum cut
	$\cos \theta_{\gamma\gamma} > 0.81$	
	$0.12 \text{ GeV} < M(\text{before fit}) < 0.15 \text{ GeV}$	mass cut
	$ m_{\pi^0}^{PDG} - m_{\gamma\gamma} < 0.010 \text{ GeV}$	daughter γ energy cut
	$E_\gamma > 0.05 \text{ GeV}$ (π^0 の娘粒子 2γ 双方について)	
$K\pi$ 系	$M_{K\pi} < 2.5 \text{ GeV}$	
	D^+ veto ($1.805 \text{ GeV} < M_{K\pi} < 1.910 \text{ GeV}$ の範囲を除去)	D veto
B 中間子	$5.2 \text{ GeV} < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}$	
	$-0.15 \text{ GeV} < \Delta E < 0.07 \text{ GeV}$	

M(K π)<2.5GeVにおける検出効率

B ⁰ → K ⁺ π γ	K*(892)	K ₂ * (1430)	K*(1410)	K*(1680)
Efficiency(%)	17.14±0.02	7.36±0.01	1.16± 0.00	5.57±0.01

※ K*(892)については、もう少し統計誤差を減らしたい。

B ⁺ → K _s π γ	K*(892)	K ₂ * (1430)	K*(1410)	K*(1680)
Efficiency(%)	3.98±0.01	1.49±0.00	0.25± 0.00	1.22±0.00

B ⁺ → K ⁺ π ⁰ γ	K*(892)	K ₂ * (1430)	K*(1410)	K*(1680)
Efficiency(%)	4.97±0.01	2.03±0.00	0.36± 0.00	1.61±0.00

(a) BGx0 サンプル。崩壊シミュレーションの生成数は 1,666,417 個。

カット	efficiency (%)	purity (%)	V0like 閾値	NoLambda 閾値
プレカットのみ	58.98	15.98	–	–
goodKs	36.33	93.76	–	–
goodNis	45.15	93.76	0.569	0.863
94% purity	44.96	94.00	0.598	0.856

(b) BGx1 サンプル。崩壊シミュレーションの生成数は 1,666,859 個。

カット	efficiency (%)	purity (%)	V0like 閾値	NoLambda 閾値
プレカットのみ	46.46	11.23	–	–
goodKs	26.12	87.12	–	–
goodNis	34.83	87.12	0.379	0.822
94% purity	31.46	94.00	0.668	0.855

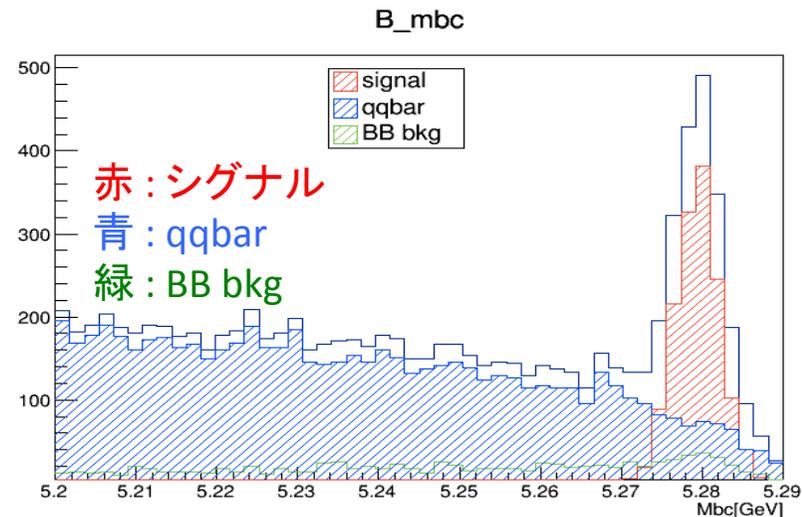
B⁺ → K_s π γ の検出効率が低い理由は、はっきりとわかっていないが、NisKsの研究において、ビームバックグラウンドでKsの検出効率が落ちることは示されている。

“猪塚昌大
「修士論文 Belle II 実験のためのKs
検出の研究」”より引用

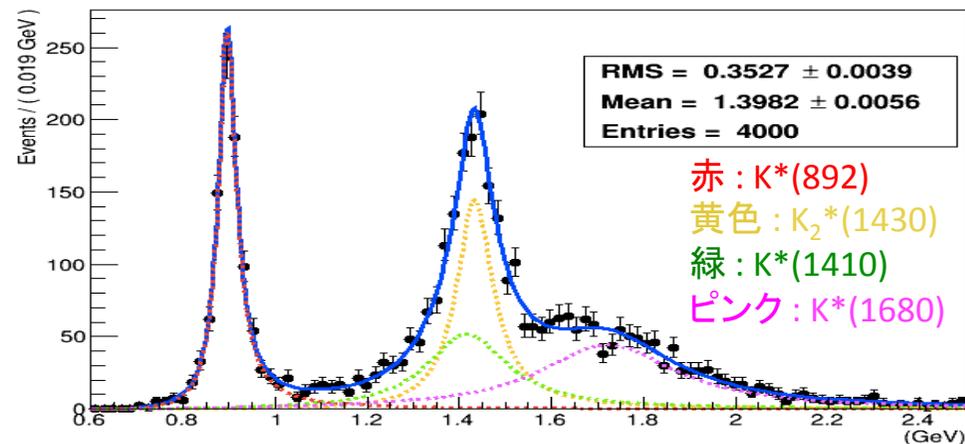
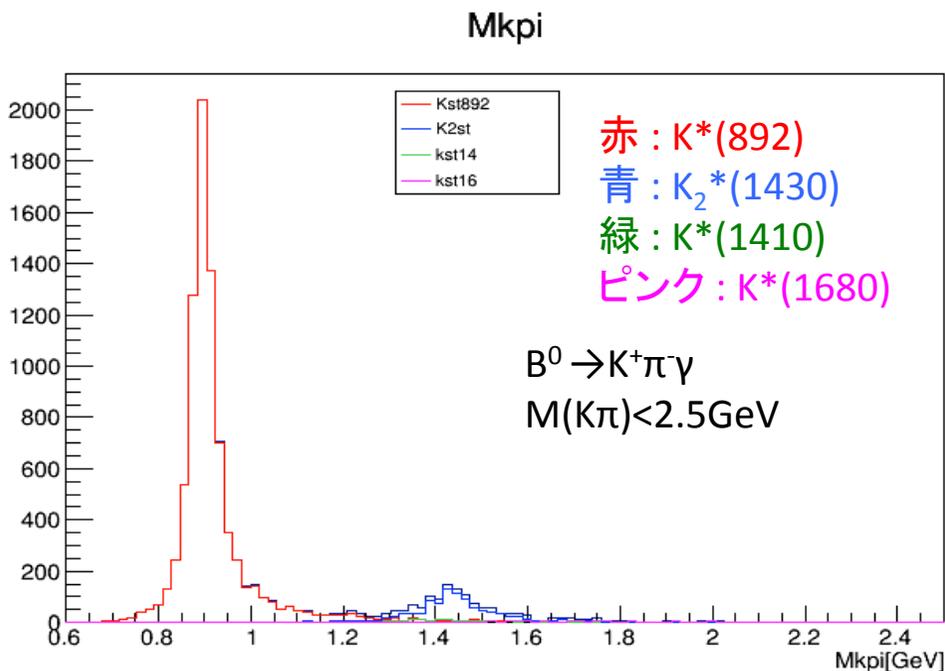
4. シグナル抽出の流れ

(1) $M(K\pi)$ の範囲ごとに M_{bc} をフィットして、シグナルの yield を求める。

(2) 検出効率で補正して、シグナルのみ ($B \rightarrow K\pi\gamma$) の $M(K\pi)$ 分布を作成する。



M_{bc} ヒストグラムの例
($B^0 \rightarrow K^+\pi^-\gamma$: $1.15 < M(K\pi) < 1.9$ GeV)



BF($B \rightarrow K\pi\gamma$) が各レゾナンスで等しいとき、上図のような分布になる(toy MCで作成)

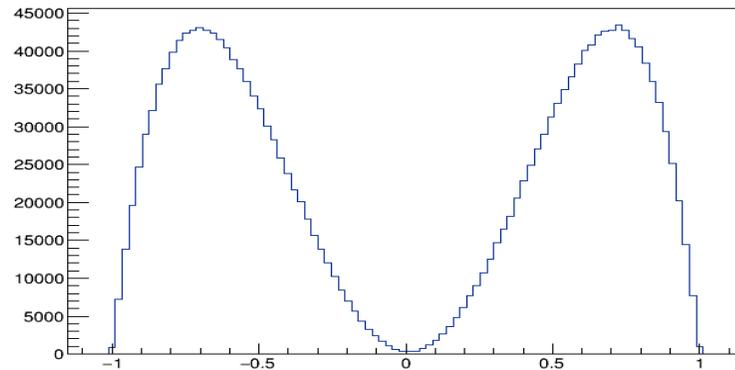
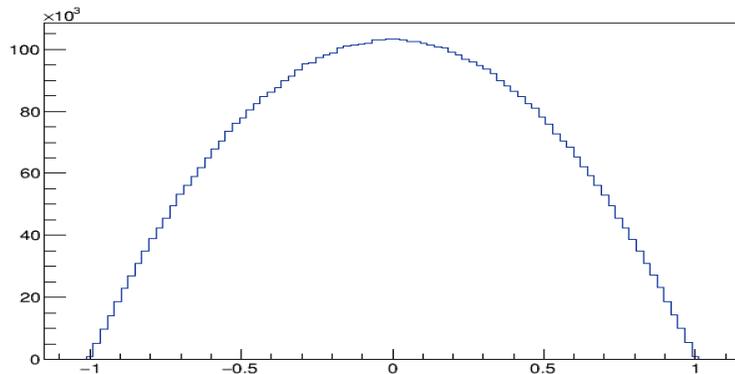
シグナル抽出の流れ

※ヘリシティ角分布: レゾナンス粒子の静止系におけるレゾナンス粒子の運動量方向とK中間子の運動量方向の間の角度のcos値。

ヘリシティ角分布はレゾナンスのスピンのごと異なるので、異なるスピン成分のレゾナンスの分離のために有用な変数。

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

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



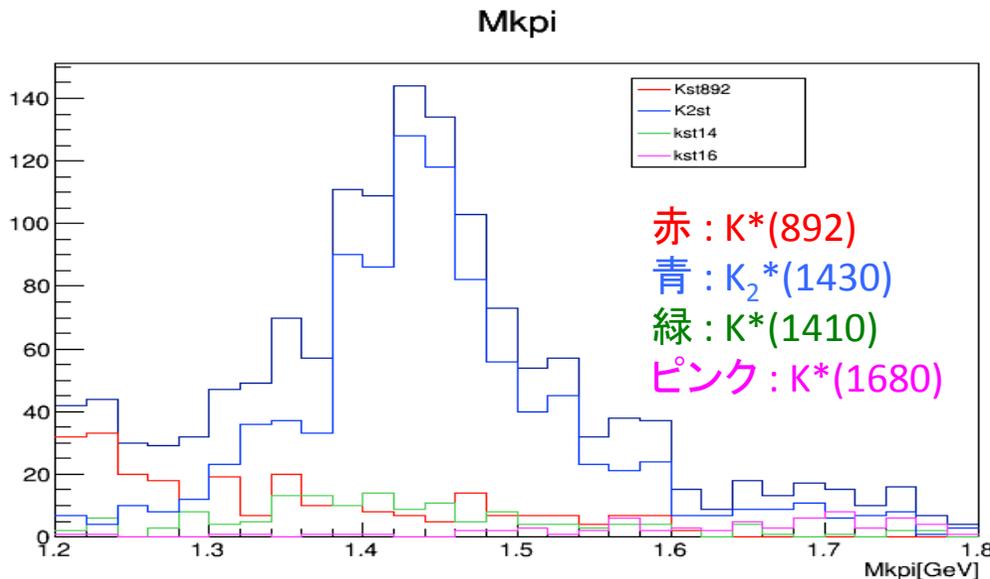
MCLレベルのヘリシティ角分布。左図がスピン1。右図がスピン2。

シグナル抽出の流れ

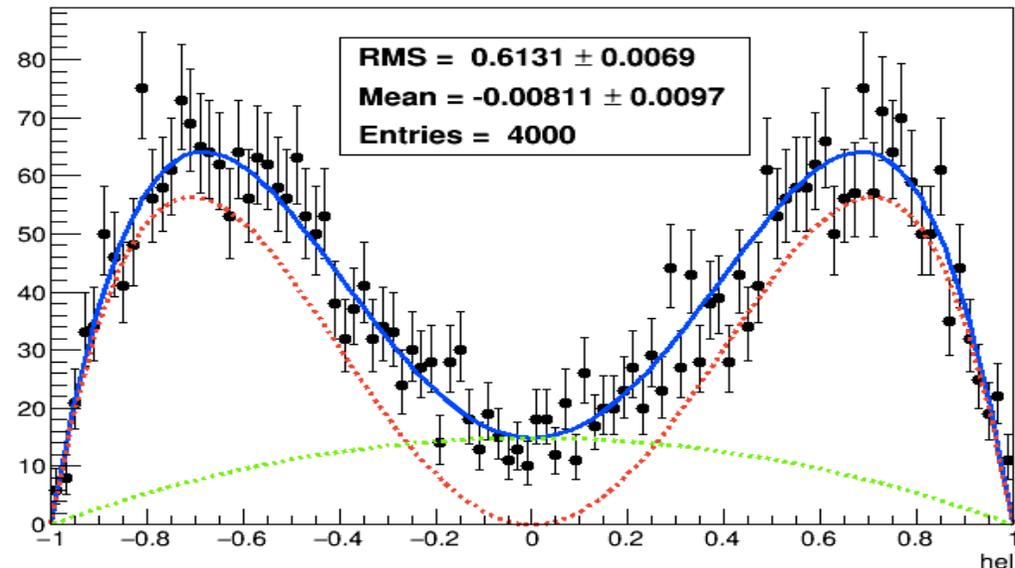
(3) $M(K\pi)$ の範囲ごとに分けて、かつそのそれぞれの範囲においてヘリシティ角分布を0.1ずつに分けて、 M_{bc} をフィットしてyieldを求める。検出効率で補正して、 $M(K\pi)$ の各範囲におけるヘリシティ角分布を作成する。

(4) ヘリシティ角分布をフィットして、スピン1成分とスピン2成分を分離。

(5) (4)の結果から、 K_2^* の $M(K\pi)$ 分布をある程度固定(詳細は未定)する。その上で、 $M(K\pi)$ 分布をフィットして、それぞれのレゾナンスのyieldを求める。



$B^0 \rightarrow K^+\pi^-\gamma$
 $1.2\text{GeV} < M(K\pi) < 1.8\text{GeV}$



スピン2:スピン1=3:1とした時の
 分布(toyMCで作成)

5. 今後

- ・シグナル抽出の方法の決定。 M_{bc} 、 $M(K\pi)$ 、ヘリシティ角分布それぞれについて。
- ・各観測量の誤差の見積もり。