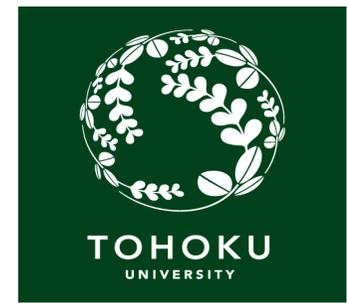


# Belle II 実験における $B \rightarrow K\pi\gamma$ の 解析

B2J analysis meeting  
July 28(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、ファイマンダイアグラムはループを含むため、新物理に感度がある。

クォークレベル

$b \rightarrow s \gamma$

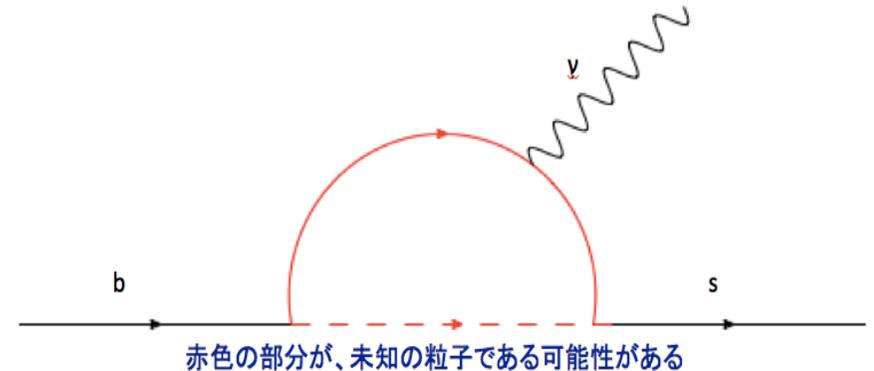
ハドロンレベル

$B \rightarrow X_s \gamma$

(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。

今回の発表では、この事象のバックグラウンド(以降BGと記す)について主眼を置く。



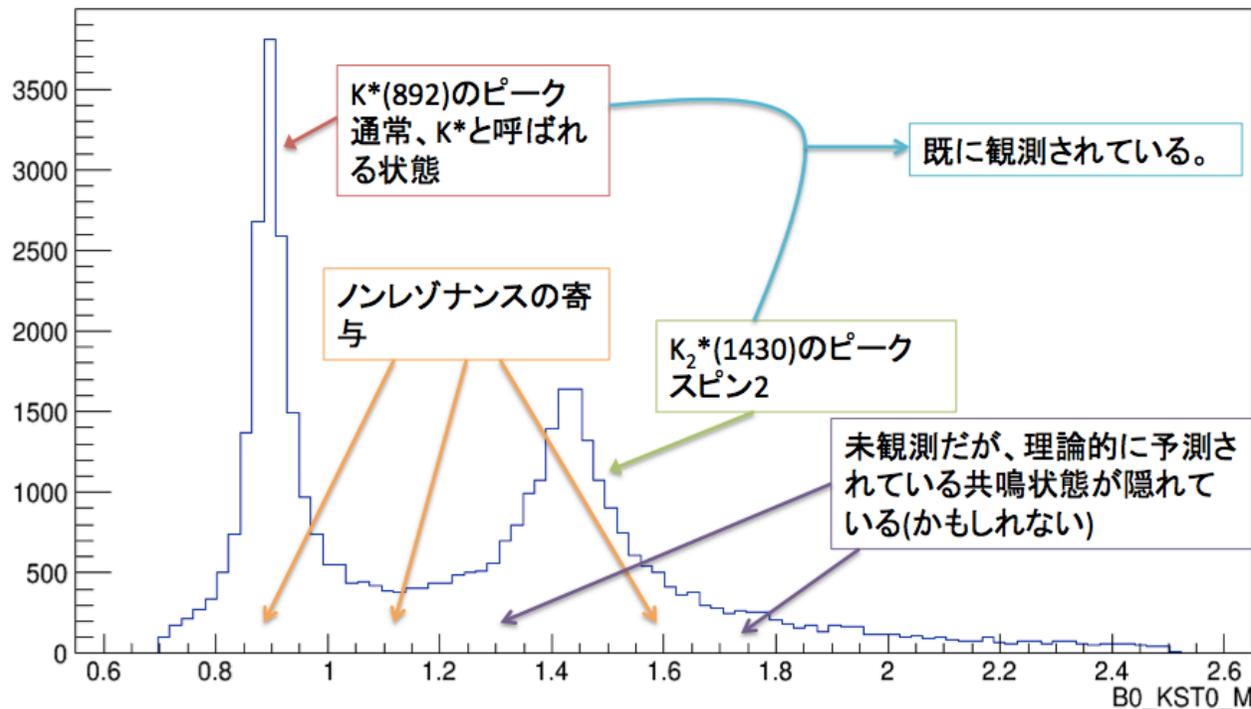
## 2. 研究テーマ

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)や非共鳴状態(ノンレゾナンス)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

※ $B \rightarrow K\pi\gamma$ 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 $\pi$ の2体系の不変質量)

$B \rightarrow K\pi\gamma$ のモードでは、  
 $B \rightarrow K^*(892)\gamma$  や  
 $B \rightarrow K_2^*(1430)\gamma$  が支配的  
であるため、その他の  
共鳴状態や非共鳴状態  
やはっきりと観測されて  
いない。

### 3. B中間子の再構成

以下の5つのモードについて再構成を行なった。

$$B^0 \rightarrow K^*(892)^0 \gamma \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$$

$$B^0 \rightarrow K_2^*(1430)^0 \gamma \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$$

$$B^0 \rightarrow K^*(1410)^0 \gamma \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$$

$$B^0 \rightarrow K^*(1680)^0 \gamma \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$$

$$B^0 \rightarrow K^+ \pi^- \gamma (\text{ノンレゾナンス})$$

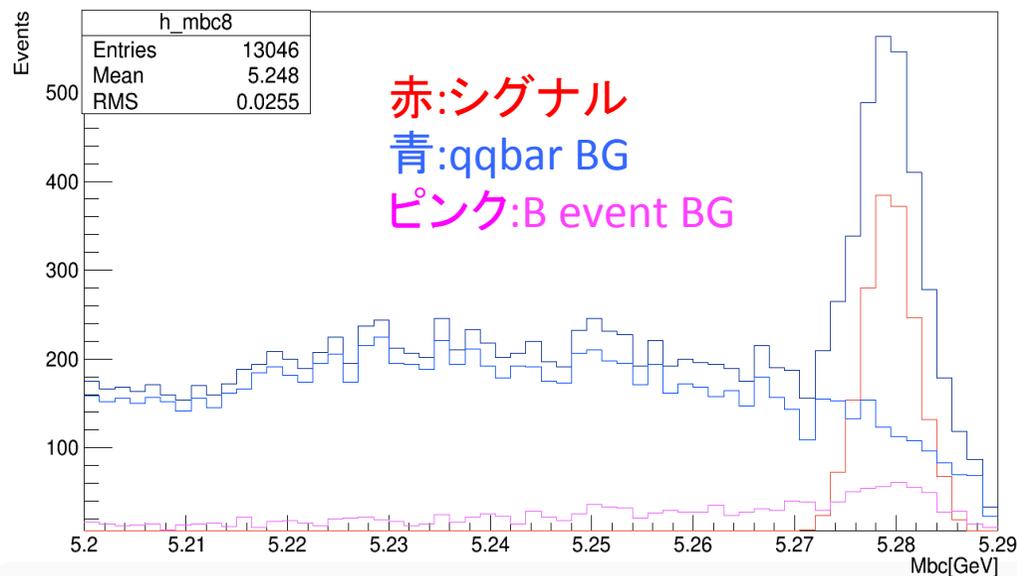
$$M_{bc} = \sqrt{(E_{beam})^2 - |\vec{p}_B^*|^2}$$

$$\vec{p}_B^* = \vec{p}_{K^*}^* + \frac{\vec{p}_\gamma^*}{|\vec{p}_\gamma^*|} \times (E_{beam} - E_{K^*})$$

1.15GeV < M(Kπ) < 2.0GeVにおけるM<sub>bc</sub>分布

※ノンレゾナンスの仮定

M(Kπ)分布	一様分布 (1.1GeV < M < 3.3GeV)
ヘリシティ 角分布	spin1 type (1-cos <sup>2</sup> θ)
崩壊比	2.6 × 10 <sup>-6</sup>



sample size : 800[1/fb] (MC6の全データ)

$$Efficiency = \frac{N_{sig}}{N_{gen}}$$

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

4

$0.8\text{GeV} < M_{K\pi} < 1.15\text{GeV}$	K*(892)	$K_2^*$ (1430)	K*(1410)	K*(1680)	Non-resonance
Efficiency(%)	20.46±0.04	0.204±0.005	1.16± 0.011	0.273±0.005	0.543±0.007
Significance	65.89	0.356	0.219	0.038	0.444

※K\*(892) が極めて支配的。

$1.15\text{GeV} < M_{K\pi} < 2.0\text{GeV}$	K*(892)	$K_2^*$ (1430)	K*(1410)	K*(1680)	Non-resonance
Efficiency(%)	1.09±0.03	21.75±0.04	22.52± 0.04	19.87±0.03	9.23±0.03
Significance	6.15	19.92	2.75	1.80	4.78

※高いM(Kπ)のレゾナンスが支配的だが、ブランチが小さいK\*(1410) and K\*(1680) はあまり目立たない。

$2.0\text{GeV} < M_{K\pi} < 2.5\text{GeV}$	K*(892)	$K_2^*$ (1430)	K*(1410)	K*(1680)	Non-resonance
Efficiency(%)	0	0.508±0.007	0.762± 0.009	2.65±0.02	4.91±0.02
Significance	0	1.07	0.177	0.447	4.49

※目立って見えるレゾナンスはなくなる。

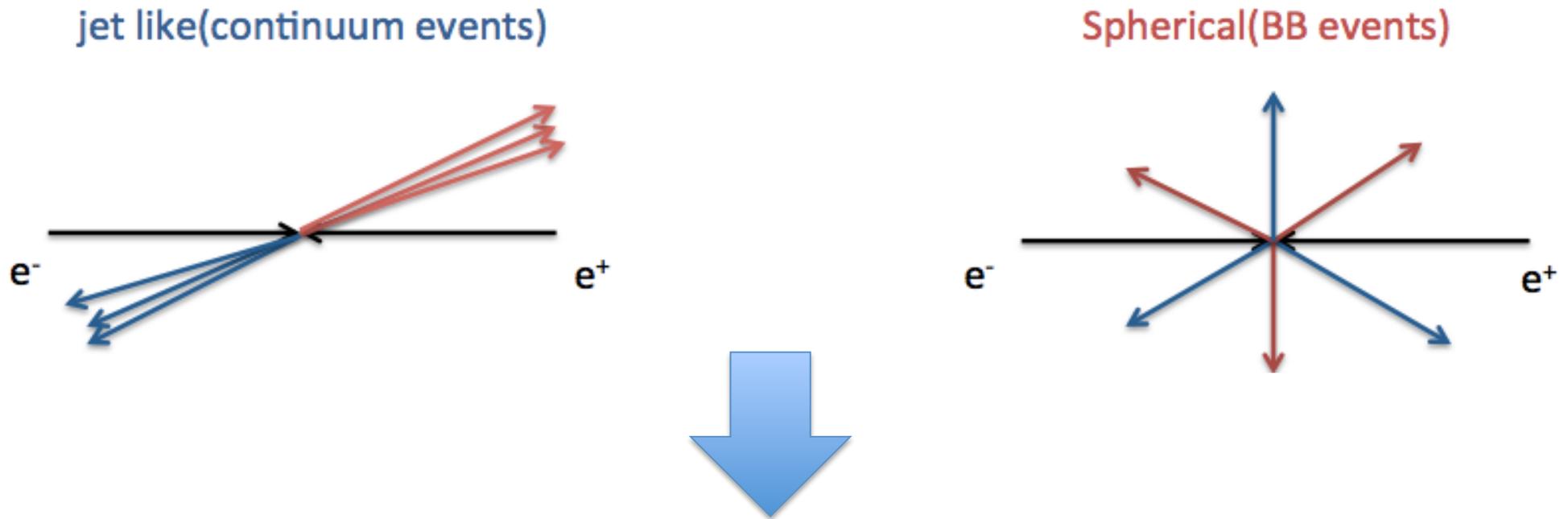
今後、これからお話しする最新のqqbar suppressionと $\pi^0/\eta$  vetoのカットを最適化して適用して、改めて結果を出す予定。

## 4. Continuum background suppression

### 4.1 イベント形状の特徴

重心エネルギー(10.58GeV)に対して、 $u$ 、 $d$ 、 $s$ 、 $c$ の質量は小さいため、 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$  ( $q=u, d, s, c$ )のイベント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。



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。

## 4.2 FastBDT

今回、qqbar BGの除去のために、FastBDTと呼ばれる多変数解析を用いた。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

Thrust<sub>ROE</sub>,  $\cos\theta_B$ ,  $|\cos\theta_{Thrust}|$ ,  $|\cos\theta_z|$ , KSW moments(14種 + Et + mm2),  
 CleoCones(1~9), sphericity scalar,  $|\cos\theta_s|$

Thrust<sub>ROE</sub>: ROE(Rest Of Event)のスラストの大きさ

$\theta_B$ : B候補のpolar angle(重心系)

$\theta_{Thrust}$ : B候補のスラスト軸とROEのスラスト軸の間の角度

$\theta_z$ : B候補のスラスト軸とビーム軸の間の角度

Et: ビーム軸に垂直な方向のB候補の娘粒子とROEの運動量の合計

mm2: missing massの二乗

$\theta_s$ : B候補のsphericity軸とROEのsphericity軸の間の角度

※basf2のデフォルトでは、 $R_2$  (Reduced Fox-Wolfram moment)とThrust<sub>B</sub> (B候補のスラストの大きさ)が含まれているが、 $M(K\pi)$ との相関が比較的大きいので外した。

※CleoConesは、ROEの粒子のみで計算したものをを使用した。

## 4.3 トレーニングで使用したサンプル

- BGx1 シグナルサンプル  $1.15 \times 10^5$  events

(release-00-08-00で作ったものを使用)

- $B^0 \rightarrow K^*(892)^0 \gamma \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$

- $B^0 \rightarrow K_2^*(1430)^0 \gamma \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$

- $B^0 \rightarrow K^*(1410)^0 \gamma \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$

- $B^0 \rightarrow K^*(1680)^0 \gamma \rightarrow K^+ \pi^- \gamma$

- BGx1 BGサンプル  $1.03 \times 10^5$  events

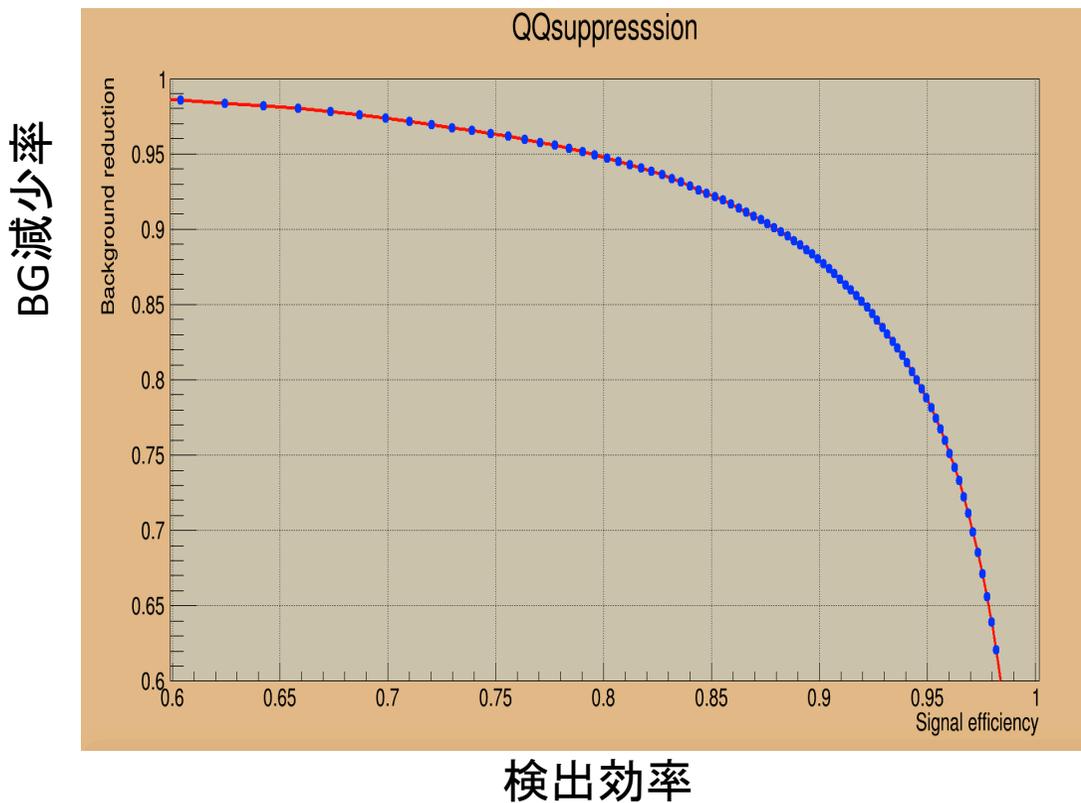
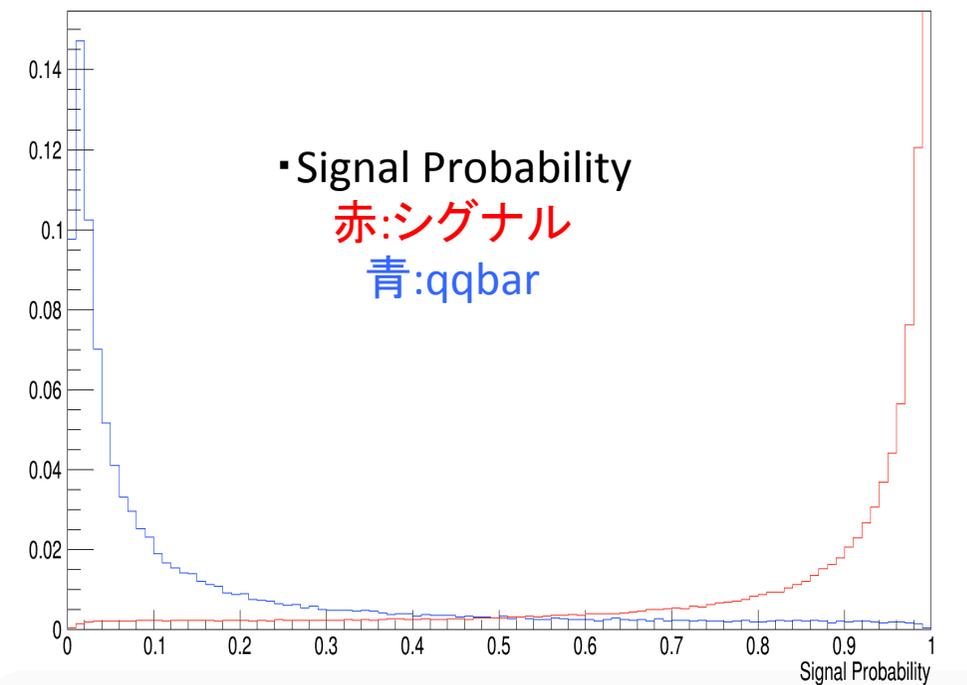
- MC8のgeneric qqbar

イベント内に $\Upsilon(4S)$ を含むか、含まないかでトレーニング。

Signal Probabilityをアウトプットする。

# 4.4 結果

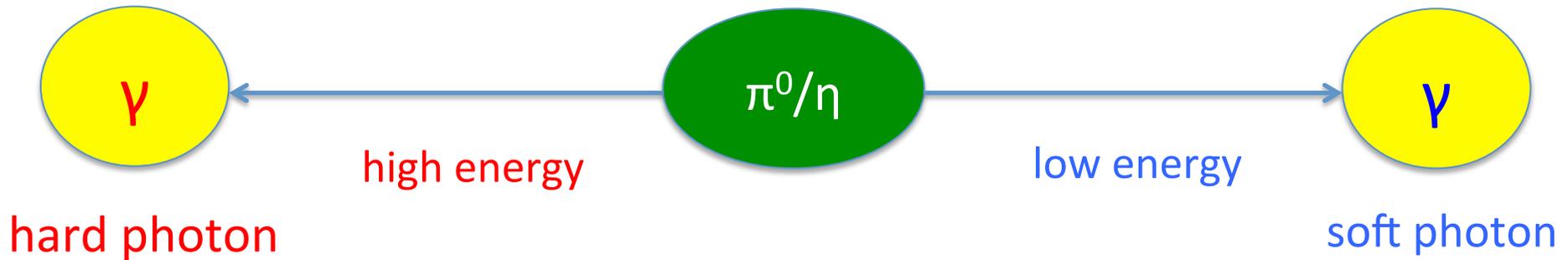
Performance comparsion	Belle I での $B^0 \rightarrow K^*(892)\gamma \rightarrow K+\pi-\gamma$ study の結果 (Belle note 1437)	今回の結果
Signal efficiency	83.4%	83.4%
BG reduction	89.3%	93.3%





# 5. $\pi^0/\eta$ veto

## 5.1 Belle I 実験における $\pi^0/\eta$ veto



$\pi^0/\eta \rightarrow 2\gamma$ 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。

Belle I での  $\pi^0/\eta$  veto では、 $\pi^0/\eta$  の不変質量と soft photon の実験室系エネルギーの二次元確率密度関数を使っている。

更に、soft photon の polar angle の範囲で場合分けして、確率密度関数を分類して使っている (Belle Note 665)。

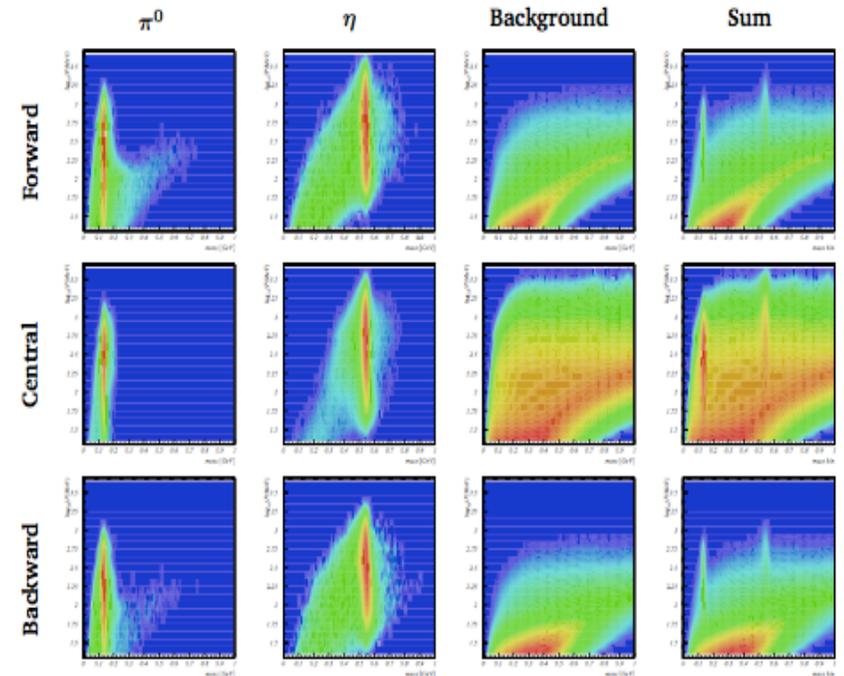
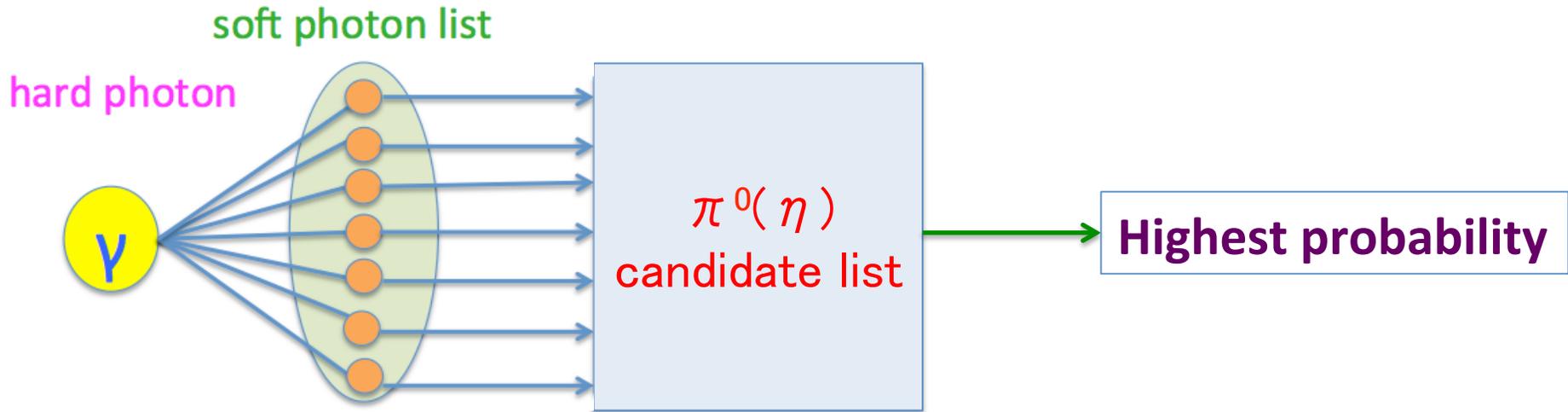


Figure 2: From left to right, MC probability densities in the  $\log_{10}(E_{\gamma\gamma}/\text{MeV})$  versus  $m_{\gamma\gamma}$  plane for true  $\pi^0$ ,  $\eta$ , random combinations and the sum, for three calorimeter zones.

横軸が  $M_{\gamma\gamma}$ 、縦軸が  $\log_{10}(E_{\text{soft}}/\text{MeV})$

## 5.2 $\pi^0/\eta$ vetoにおける留意点

$\pi^0/\eta$  vetoでは、1つのhard photonに対して、全てのsoft photonを組み合わせて、 $\pi^0(\eta)$ 候補リストを作成し、その中で最も $\pi^0(\eta)$ 確率の高い候補の確率値を採用するため、BGイベントを見つけることができる。



一方で、シグナルイベントをBGイベントと間違える可能性を減らすためには、soft photonを少なくし、たまたまnominal massに近い組み合わせができる可能性を減らす必要がある。soft photon listには、本物のフォトン以外のイベントも含まれるため、それらを取り除く操作をするのが効果的と考えられる。

## 5.3 Belle II 実験における $\pi^0/\eta$ veto

今回、FastBDTを用いて、Belle II のための  $\pi^0/\eta$  veto を作成した。

・インプット変数

$M_{\gamma\gamma}$ ,  $E_{\text{soft}}$ ,  $\theta_{\text{soft}}$ ,  $Z_{\text{mva}}$ ,  $\text{minC2Hdist}$

( $M_{\gamma\gamma}$  と  $E_{\text{soft}}$  が極めて効果的)

$M_{\gamma\gamma}$  :  $\pi^0/\eta$  候補の不変質量

$E_{\text{soft}}$  : soft photon の実験室系エネルギー

$\theta_{\text{soft}}$  : soft photon の polar angle

$Z_{\text{mva}}$  : soft photon の cluster Zernike MVA (Zernike moments という、シャワー形状を表現する変数を使って計算される MVA output)

$\text{minC2Hdist}$  : soft photon のクラスターの位置と helix との距離 (全ての helix の中で、その距離が一番近いものを採用)

## 5.4 hard photonとsoft photonの定義

hard photon : 重心系エネルギー  $> 1.5\text{GeV}$  かつ 必ず光子

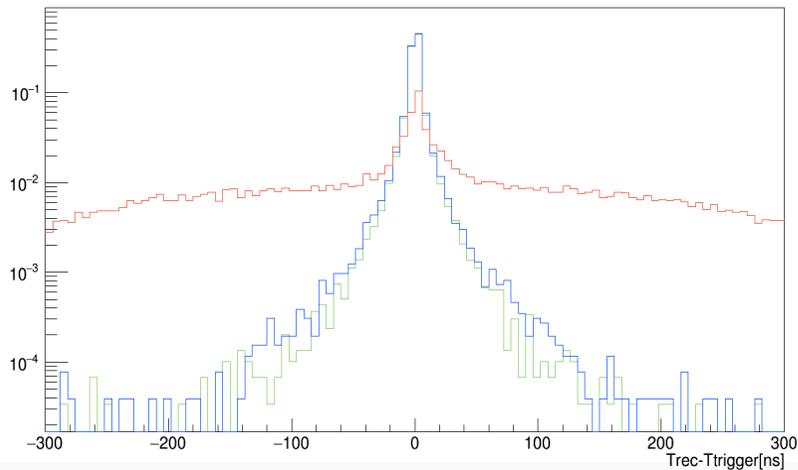
soft photon : 実験室系エネルギー  $> 20\text{MeV}$  かつ clusterTiming cut

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

$T_{\text{rec}}$  : 再構成された時間

$T_{\text{trigger}}$  : トリガー時間

他のバンチ由来のBeam BGのイベントは、clusterTimingが大きくなりがちなので、有効なカットになる。



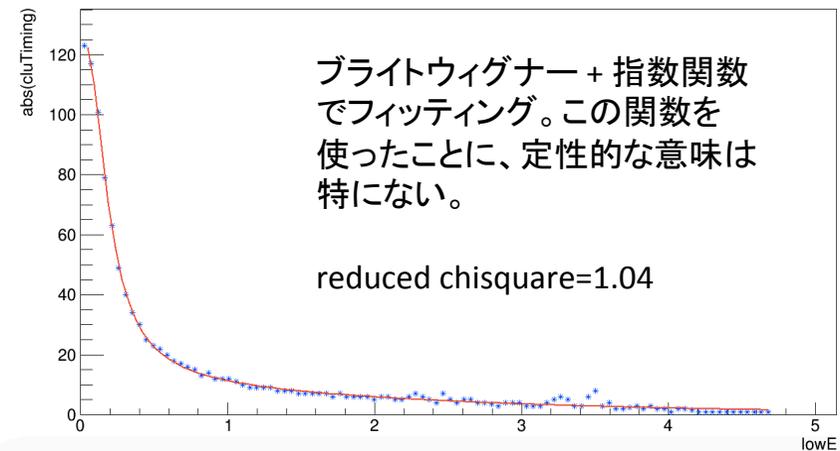
赤 : シグナル

青 :  $\pi^0$  BG (光子のみ)

緑 :  $\eta$  BG (光子のみ)

※ $\eta$ 由来のsoft photonの方がややエネルギーが大きいため、分解能が $\pi^0$ より少し良くなる。

Graph



※「clusterTiming cut」

clusterTimingとエネルギーの関係式をフィッティングで求め、エネルギーごとに異なるclusterTimingのカットをかけた。

## 5.5 トレーニングで使用したサンプル

・BGx1  $B \rightarrow X_s \gamma$  サンプル

$\pi^0$  veto :  $2.01 \times 10^5$  events       $\eta$  veto :  $2.64 \times 10^5$  events

(release-00-08-00で作ったものを使用)

- $B \rightarrow X_{su} \gamma$

- $B \rightarrow X_{sd} \gamma$

hard photonが $B \rightarrow X_s \gamma$  由来であるもの

・BGx1  $\pi^0/\eta$  サンプル

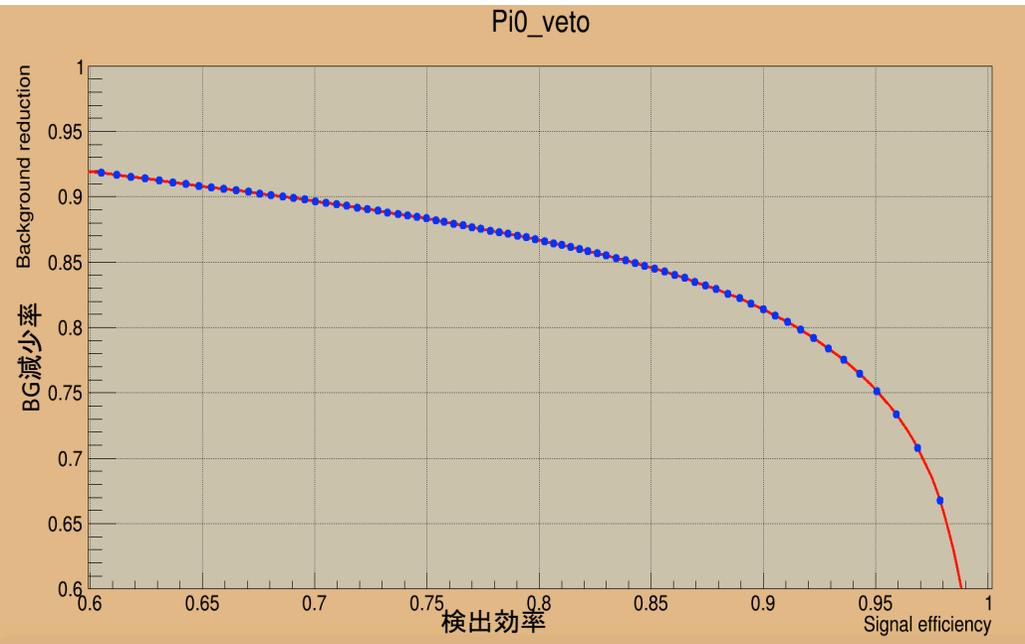
$\pi^0$  veto :  $1.03 \times 10^5$  events       $\eta$  veto :  $8.76 \times 10^4$  events

-MC8のgeneric sample

正しく $\pi^0(\eta) \rightarrow 2\gamma$ 再構成されたもの(MCマッチングで確認)

$\pi^0(\eta)$  Probabilityをアウトプットする。

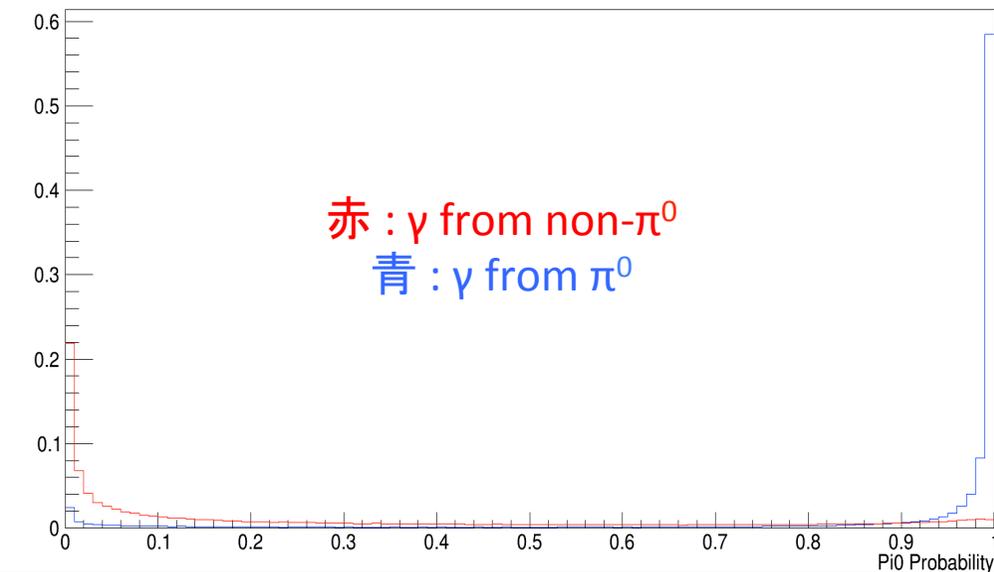
# 5.6 結果



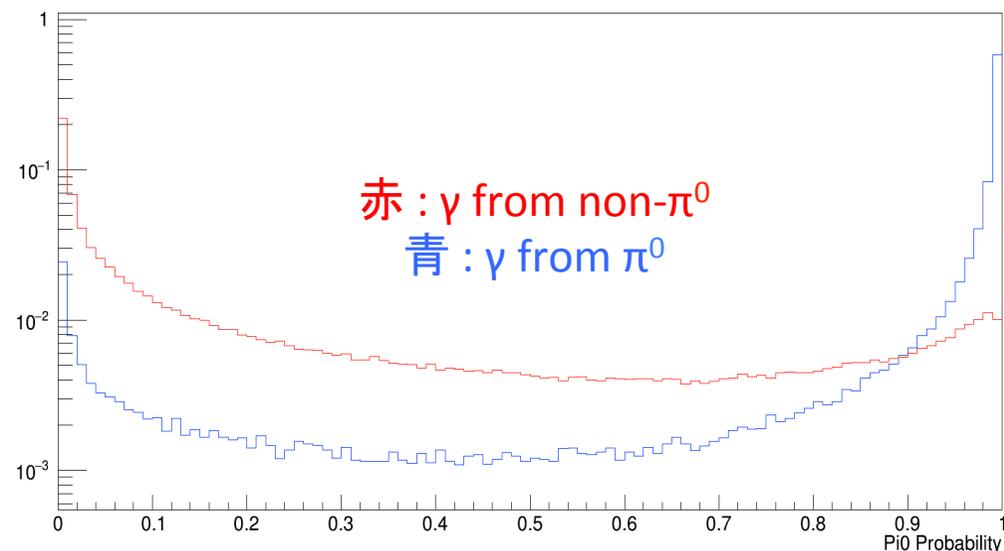
Performance comparison	Belle I $\pi^0$ veto (Belle Note 665)	今回の結果
Signal efficiency	75%	75%
$\pi^0$ BG reduction	80%	88%

Beam BGが増加するBelle IIにおいて、Belle Iを上回る結果を得られた。

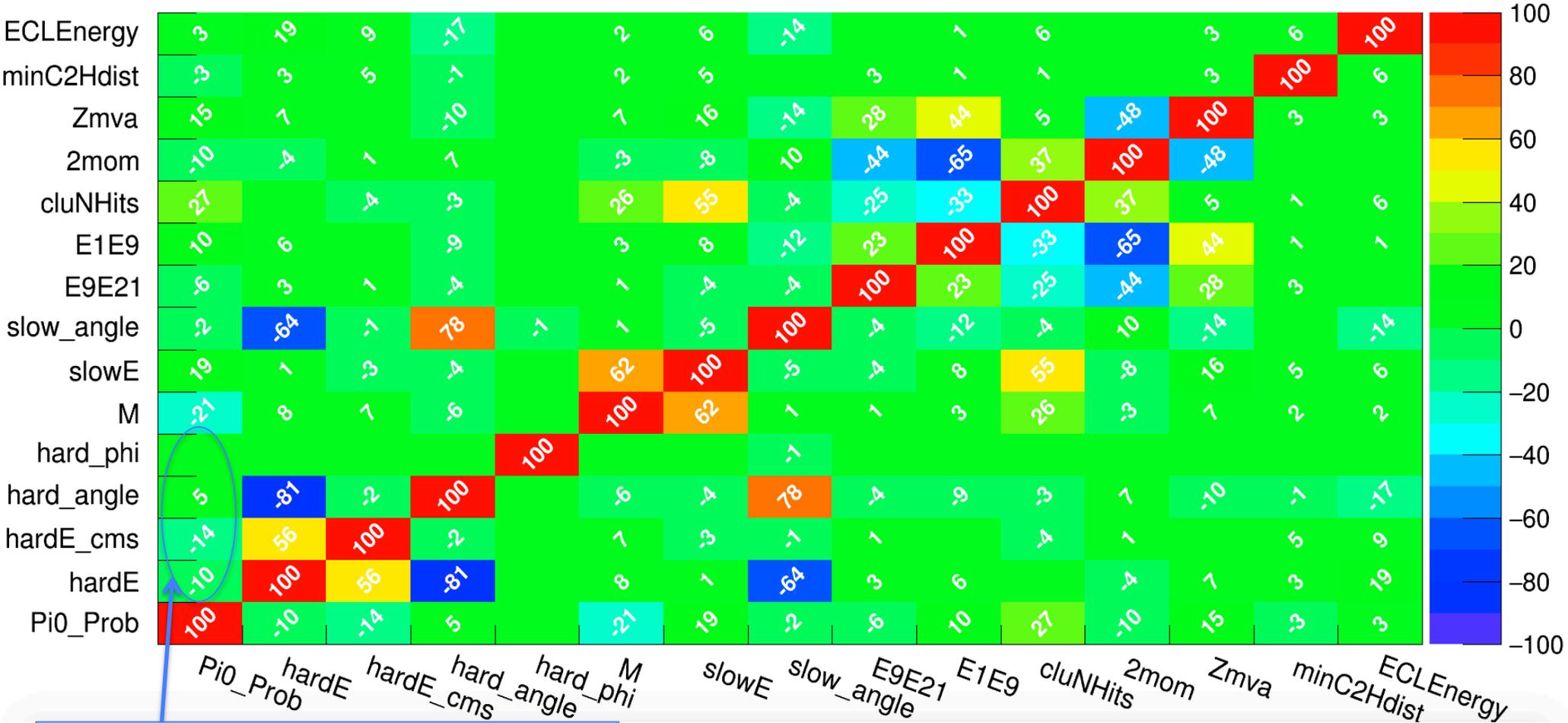
$\pi^0$  probability



$\pi^0$  probability(log scale)

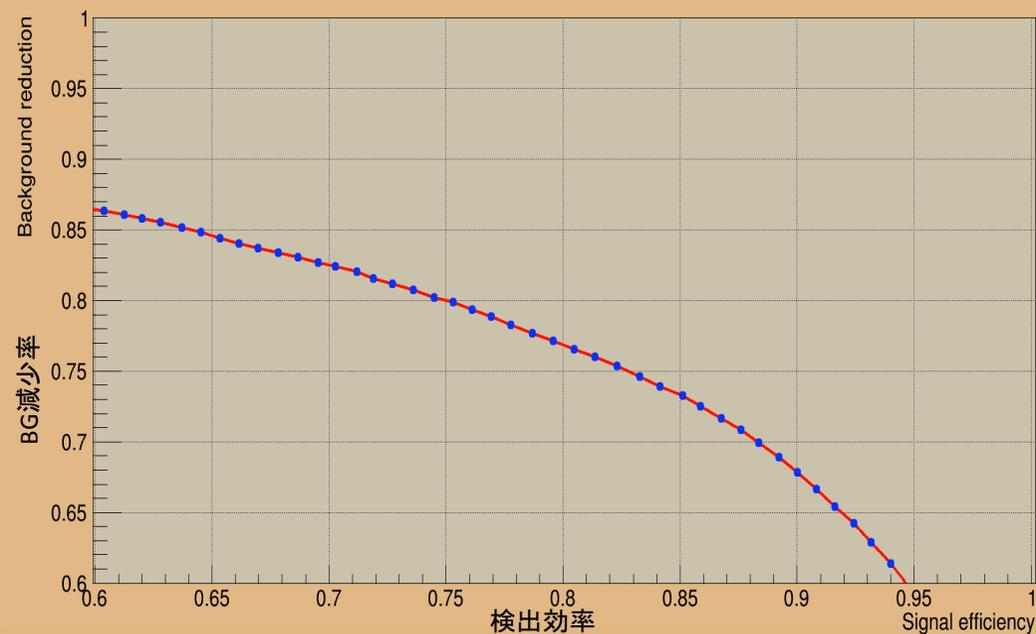


# Correlation Matrix of B→X<sub>s</sub>γ events for π<sup>0</sup> veto



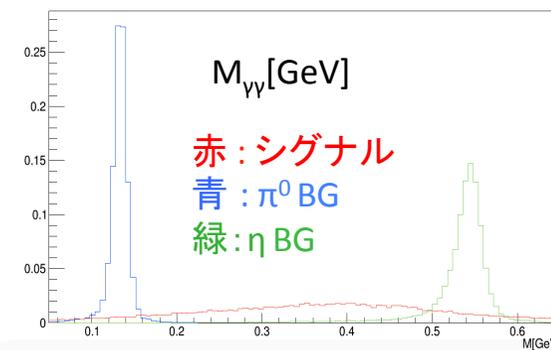
• π<sup>0</sup> probabilityとhard photonの相関  
 重心系エネルギー : -14  
 実験室系エネルギー : -10  
 Polar angle : 5  
 Phi angle : 0

hard photonのエネルギーと弱い相関を持ってしまっている。入力変数を変えても解消しなかった。

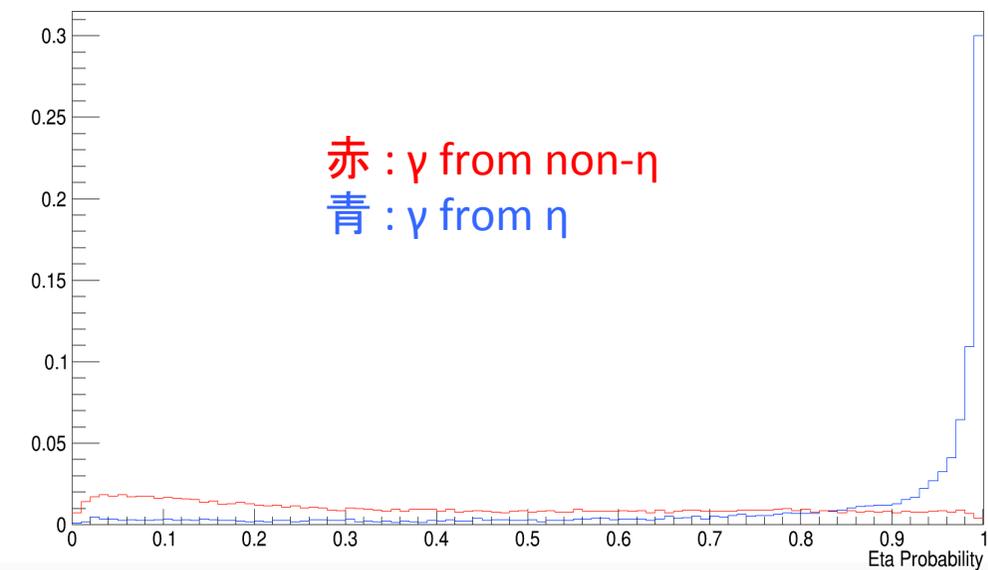


Performance	今回の結果
Signal efficiency	75%
$\eta$ BG reduction	80%

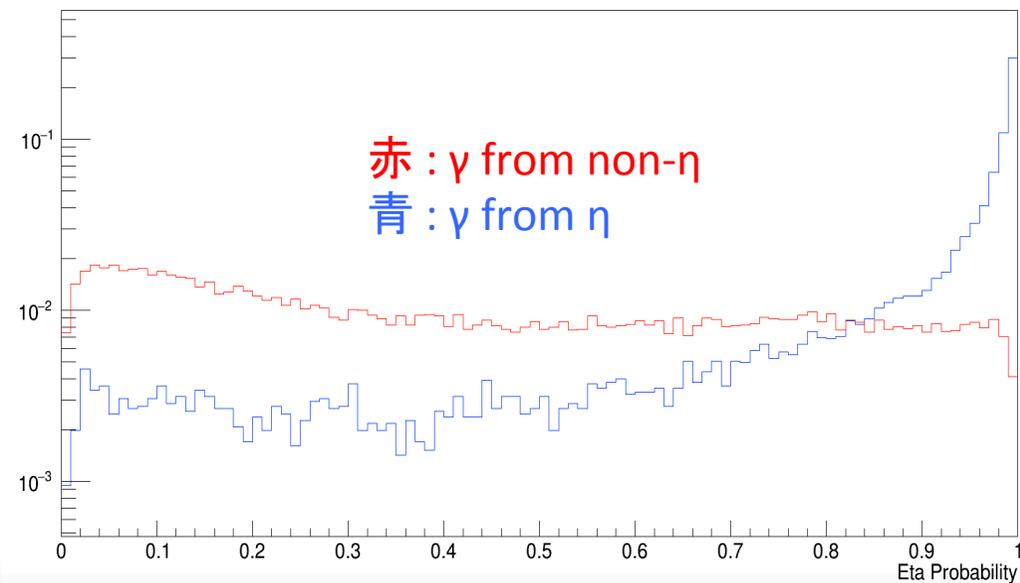
$\eta$ の方が不変質量分布の幅が広い  
ためか、 $\pi^0$ よりも  
パフォーマンスは  
落ちる。



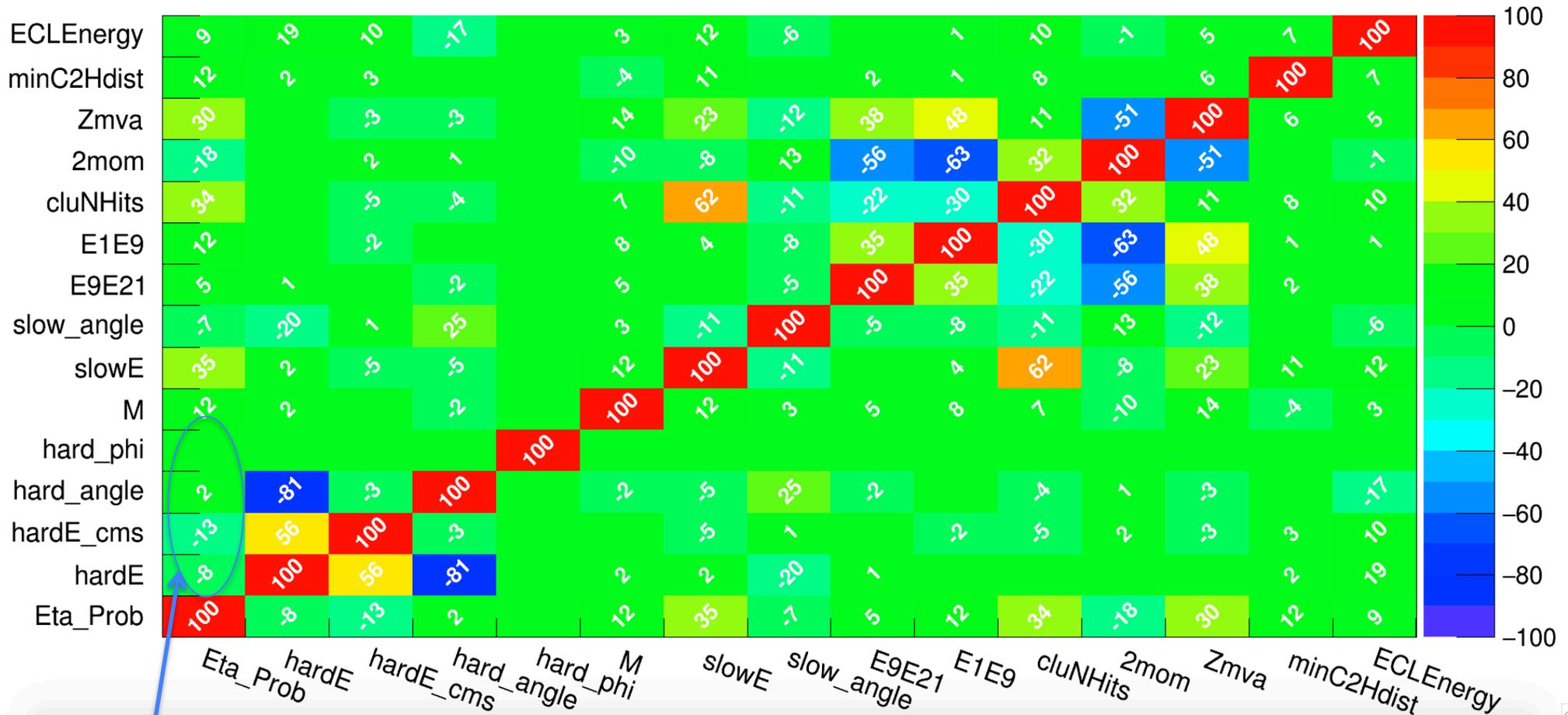
$\eta$  probability



$\eta$  probability(log scale)



# Correlation Matrix of $B \rightarrow K\pi\gamma$ events for $\eta$ veto



- $\eta$  probabilityとhard photonの相関  
 重心系エネルギー : -13  
 実験室系エネルギー : -8  
 Polar angle : 2  
 Phi angle : 0

$\eta$ においても $\pi^0$ と同様に、hard photonのエネルギーと弱い相関を持ってしまっている。

# 5.7 hard photonとの相関について

前述のように、最も $\pi^0(\eta)$ 確率の高いイベントの確率値を採用しているため、 $\pi^0/\eta$  BGイベントの相関関係からも影響を受ける。

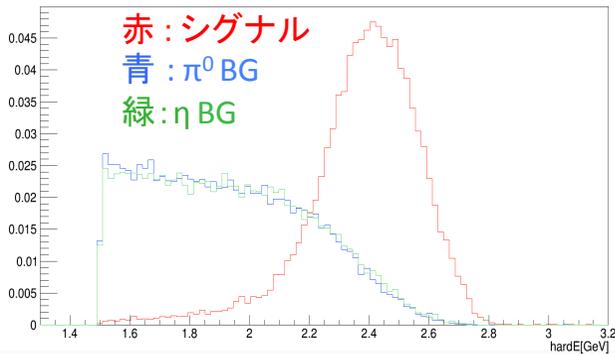
・ $\pi^0$  イベントの  $\pi^0$  probabilityとhard photonの相関

重心系エネルギー : -7

実験室系エネルギー : -4

Polar angle : 3

Phi angle : 0



$\pi^0, \eta$ のhard photonのエネルギーは、 $B \rightarrow X_s \gamma$ に比べれば低エネルギーという特徴があり、直接見ていなくても、他の変数を見ている内に、知らず知らずの内に少し学習してしまっているようである。

$\pi^0(\eta)$  候補の中から、ランダムで $\pi^0(\eta)$  候補を選んで確率値を採用すると、相関は小さくなる(ただし、これは非実用的)。

・シグナルイベントの  $\pi^0$  probabilityとhard photonの相関

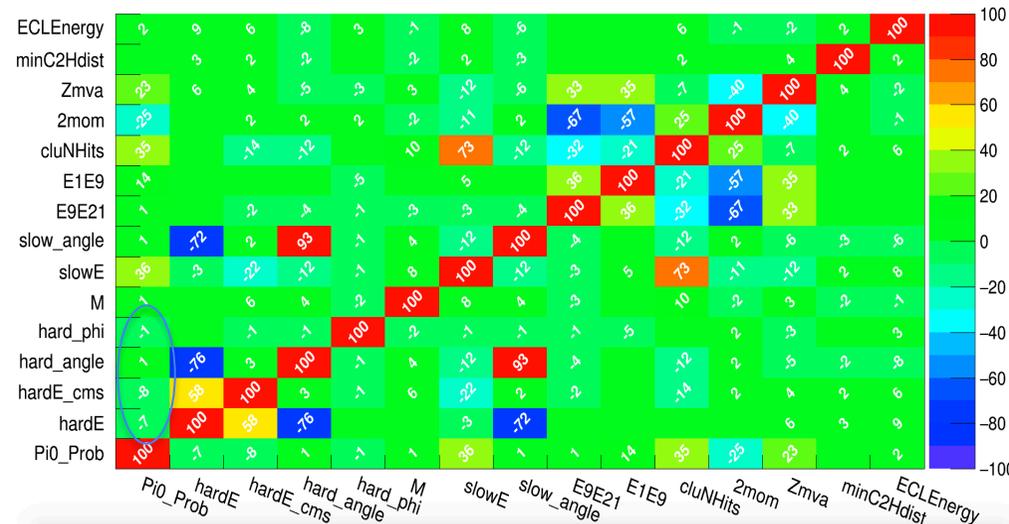
重心系エネルギー : -4

実験室系エネルギー : -4

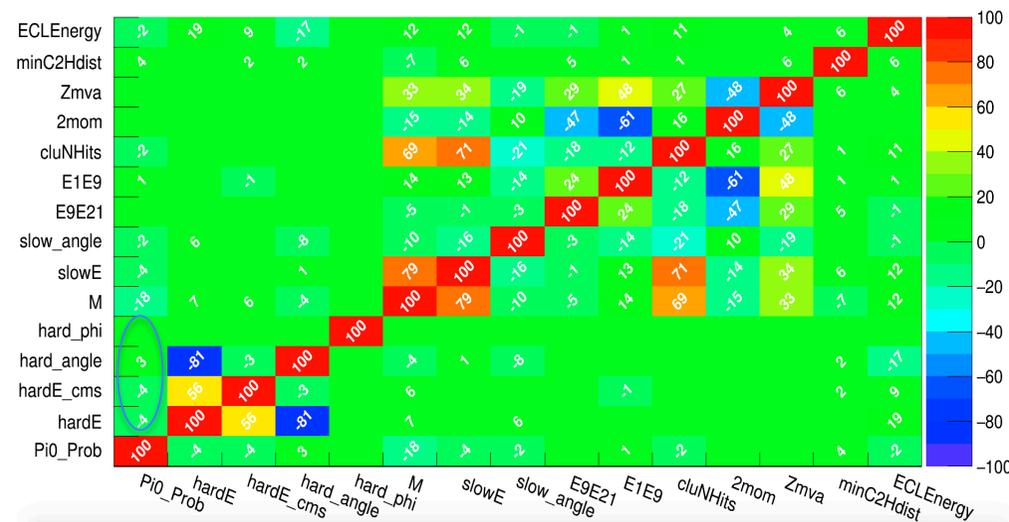
Polar angle : 3

Phi angle : 0

Correlation Matrix (signal)



Correlation Matrix (background)



## 6. 今後

- シグナル抽出のための解析手法を最適化。
- 検出効率、BGの見積もり。
- ヘリシティ角分布を用いて、それぞれのレゾナンス、ノンレゾナンスを分離する。
  - $\propto \cos^2\theta_{\text{hel}} - \cos^4\theta_{\text{hel}}$  (スピン2)
  - $\propto 1 - \cos^2\theta_{\text{hel}}$  (スピン1)
- 荷電B中間子のモードの解析。

Back up

# カット条件

## ▪K選別

$KID > 0.6$  and  $chiProb > 0.001$  and  $dr < 0.2\text{cm}$  and  $dz < 4\text{cm}$  and  $PrID < 1$  and  $P_{cms} > 100\text{MeV}$

## ▪ $\pi$ 選別

$PiID > 0.3$  and  $chiProb > 0.001$  and  $dr < 0.2\text{cm}$  and  $dz < 4\text{cm}$  and  $EID < 0.8$  and  $P_{cms} > 100\text{MeV}$

chiProb:confidence level of vertex fitting

KID:Kaon probability(=1 - pion probability)

PiID:pion probability(=1 - Kaon probability)

PrID:proton probability

EID:electron probability

- $\gamma$  選別

$2.0 \text{ GeV} < E_\gamma^* < 2.8 \text{ GeV}$  and  $E_{9/25} > 0.94$  and  $33^\circ < \theta_\gamma < 128^\circ$  (barrel)

※  $E_\gamma^*$  : 重心系エネルギー

- $K\pi$  system selection

$\text{chiProb} > 0.001$  and D meson veto

- Signal window

$5.272 \text{ GeV} < M_{bc} < 5.286 \text{ GeV}$

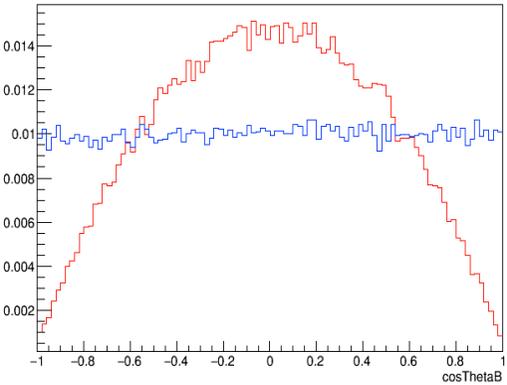
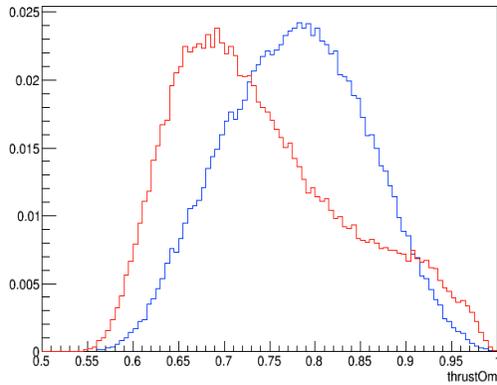
$-0.12 \text{ GeV} < \Delta E < 0.07 \text{ GeV}$

- Best Candidate Selection

$|\Delta E|$  が一番小さいイベントを選ぶ。

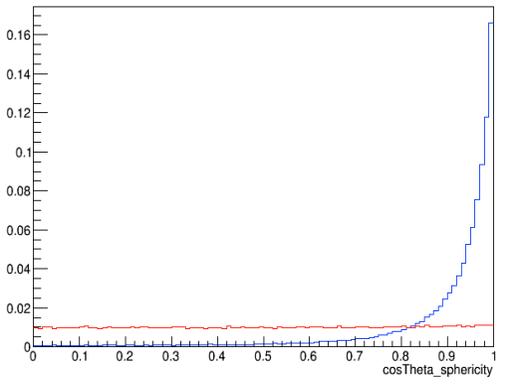
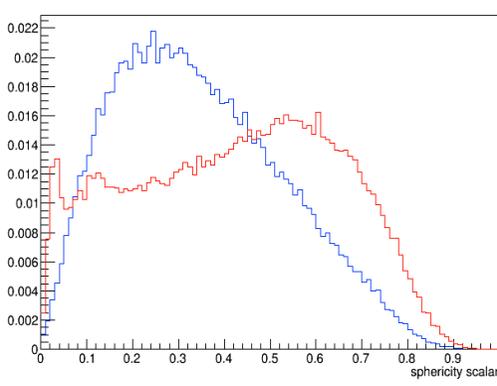
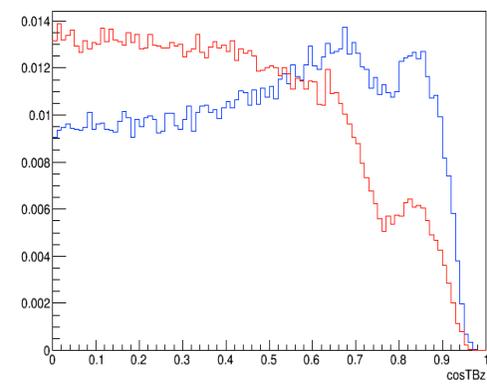
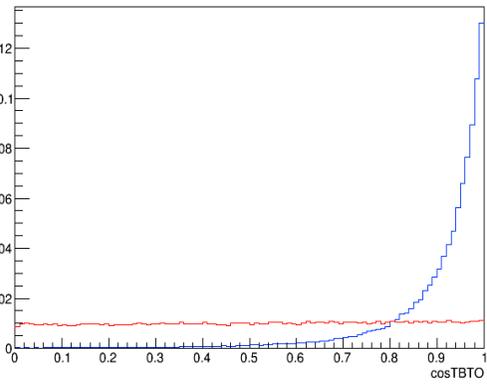
# qqbar BG suppression variables

赤 : シグナル  
青 : qqbar BG



Thrust<sub>ROE</sub>

cosθ<sub>B</sub>

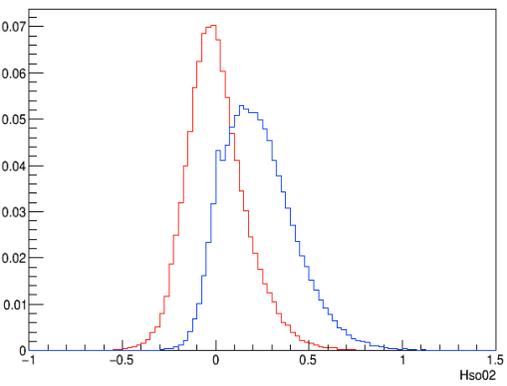
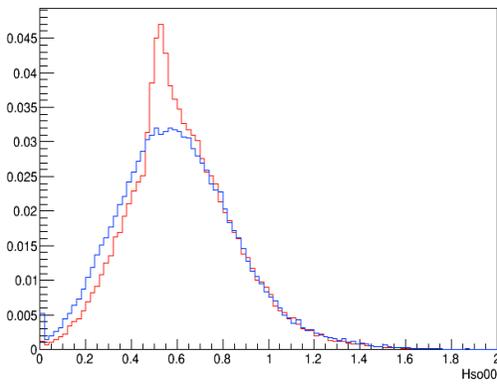
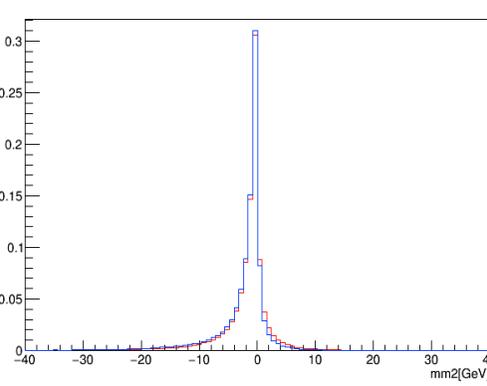
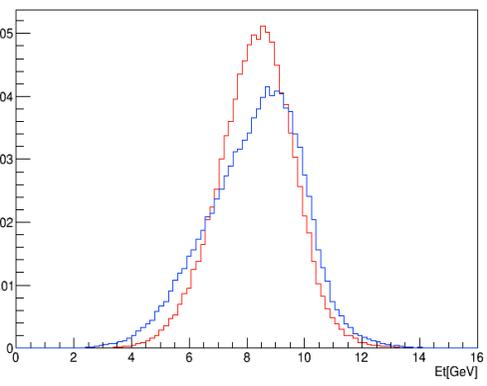


|cosθ<sub>Thrust</sub>|

|cosθ<sub>z</sub>|

sphericity scalar

|cosθ<sub>s</sub>|

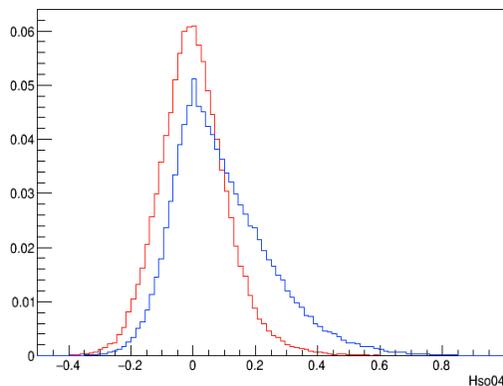


E<sub>t</sub>

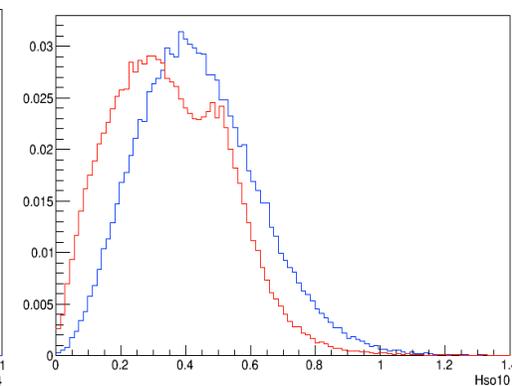
mm<sup>2</sup>

Hso00

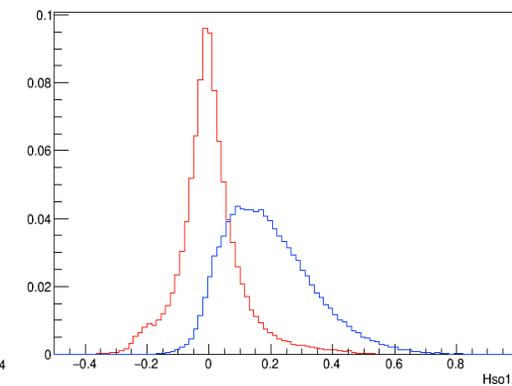
Hso02



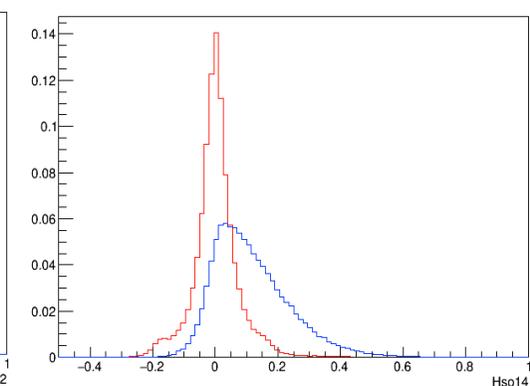
Hso04



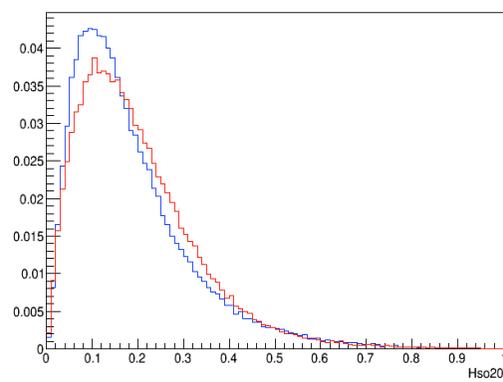
Hso10



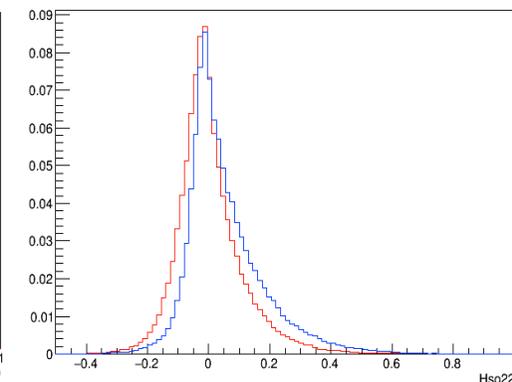
Hso12



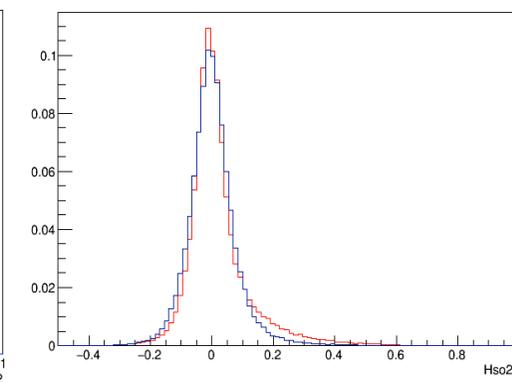
Hso14



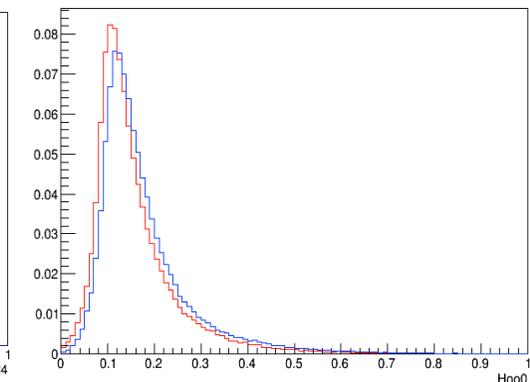
Hso20



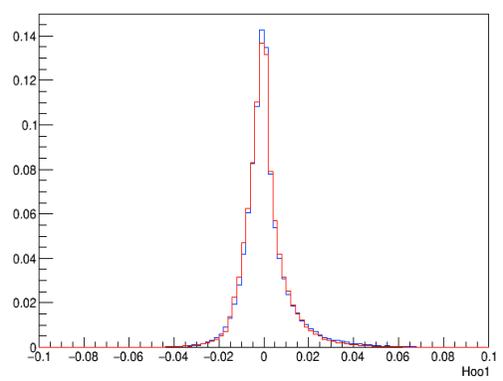
Hso22



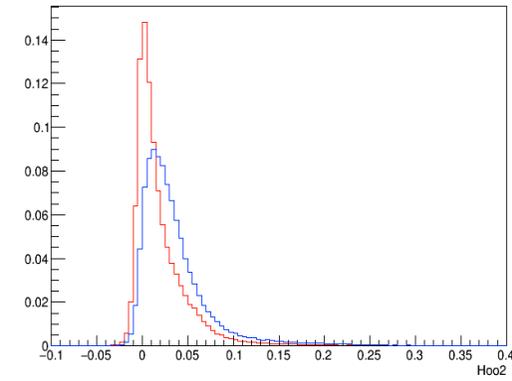
Hso24



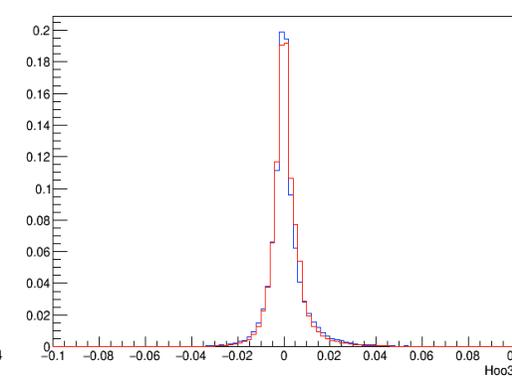
Hoo0



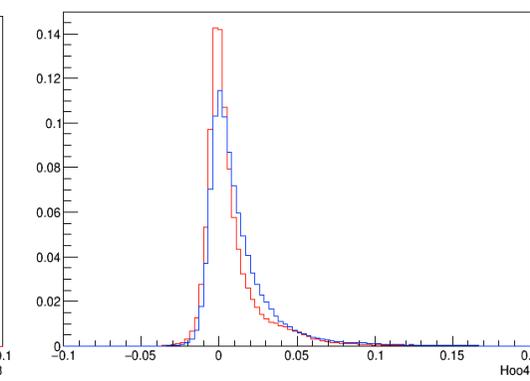
Hoo1



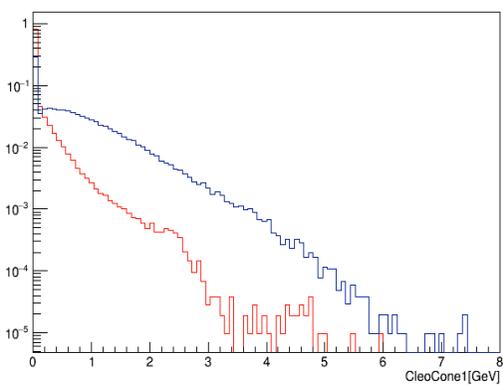
Hoo2



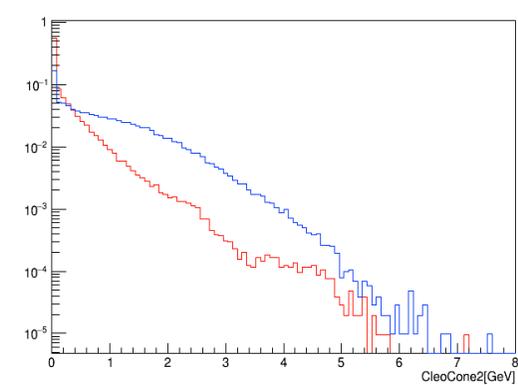
Hoo3



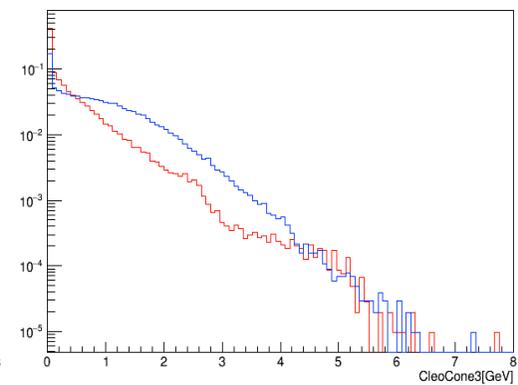
Hoo4



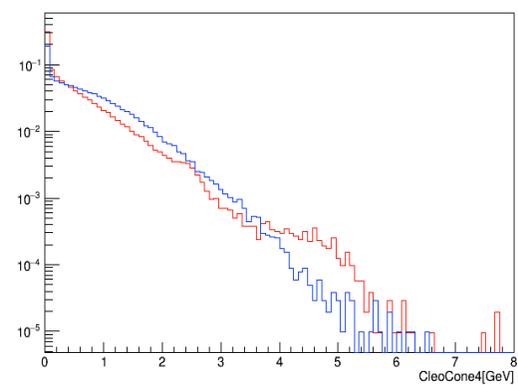
CleoCone1



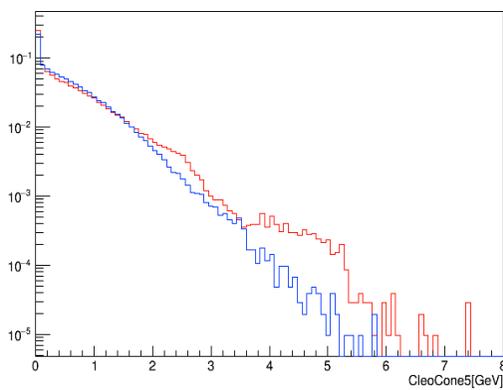
CleoCone2



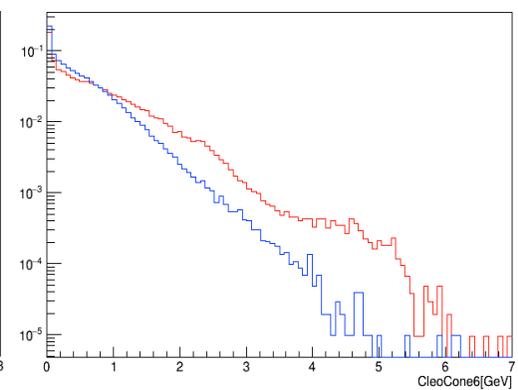
CleoCone3



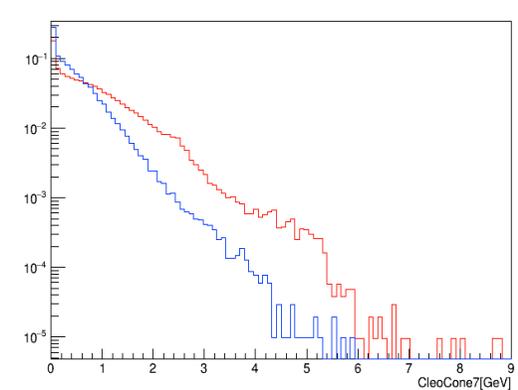
CleoCone4



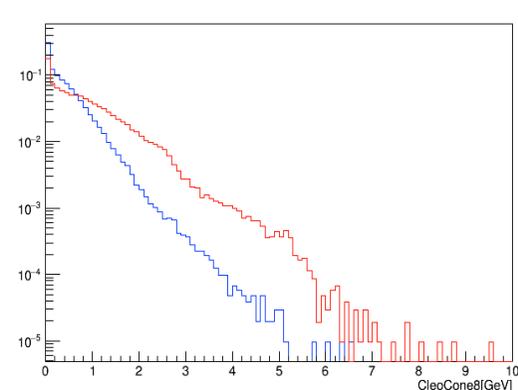
CleoCone5



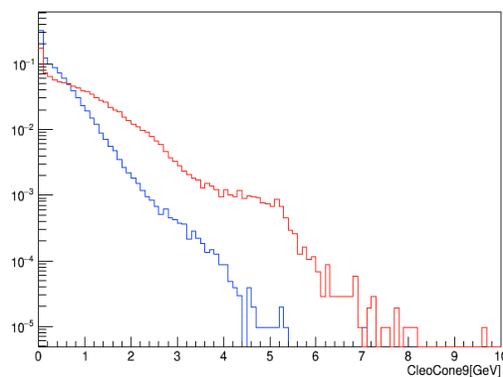
CleoCone6



CleoCone7



CleoCone8



CleoCone9

※log scaleで表示

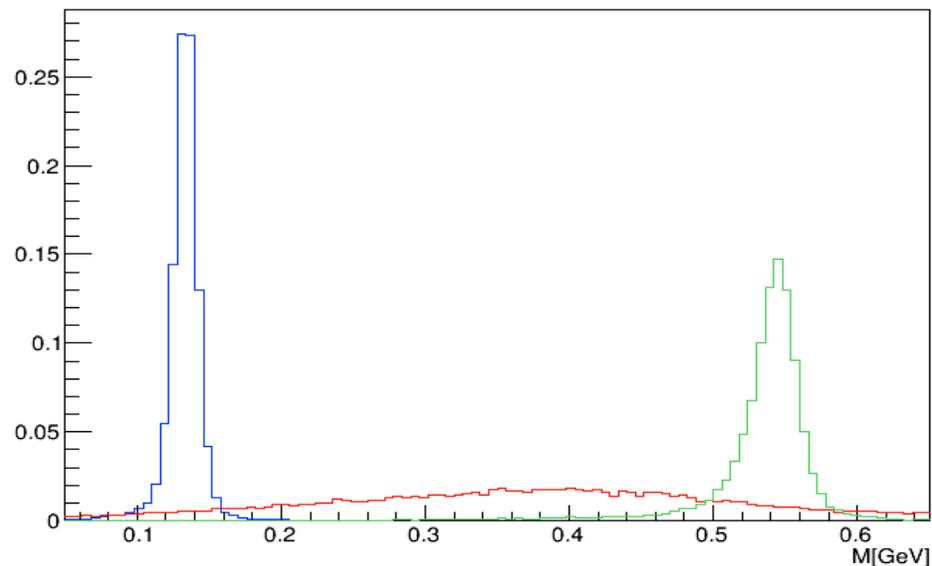
# $\pi^0/\eta$ veto variables

赤 : シグナル

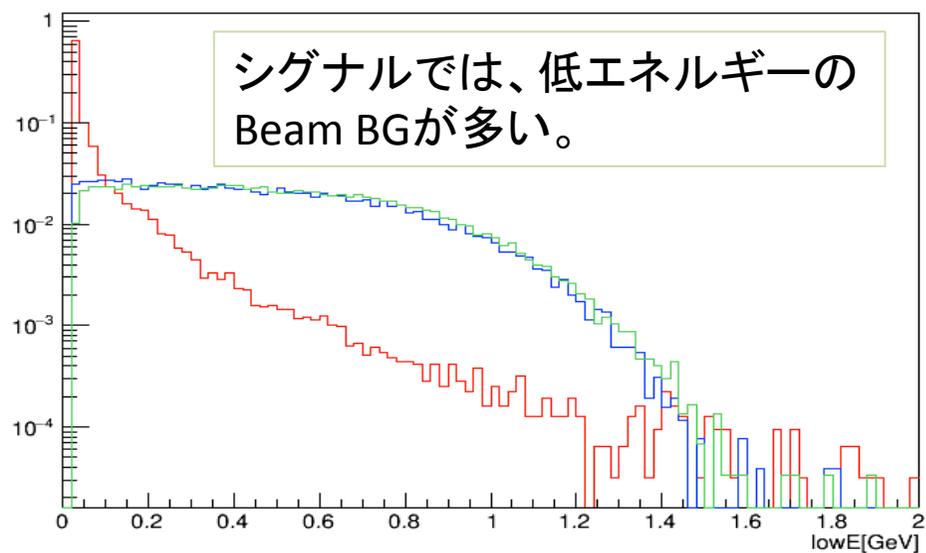
青 :  $\pi^0$  BG

緑 :  $\eta$  BG

$M_{\gamma\gamma}$  [GeV]



soft photon energy [GeV]



soft photon polar angle [rad]

