

時間依存CP非保存測定に向けた  
 $B \rightarrow K_S \eta \gamma$  崩壊過程再構成の最適化



○中野浩至、  
石川明正、住澤一高<sup>A</sup>、山本均、  
他 Belle collaboration

東北大理、高工研<sup>A</sup>

2012年9月11日



本研究はJSPS科研費23・3221  
の助成を受けたものです。

# 今回発表する内容

$B^0 \rightarrow K_s \eta \gamma$  解析

1 動機や現状の紹介

2 モンテカルロデータを用いた、再構成とセレクションの決定。

シグナルをいかに増やすか

3 バックグラウンド源の特定と、いかに減らすか

ここまで

$N_{\text{Sig}} / \sqrt{N_{\text{Sig}} + N_{\text{BG}}}$  をなるべく大きく!

研究対象に似たイベントの実験データを用いて、解析プログラムの動作確認。

実験データから時間依存CP非保存の測定。

今回の内容

# 本研究の動機

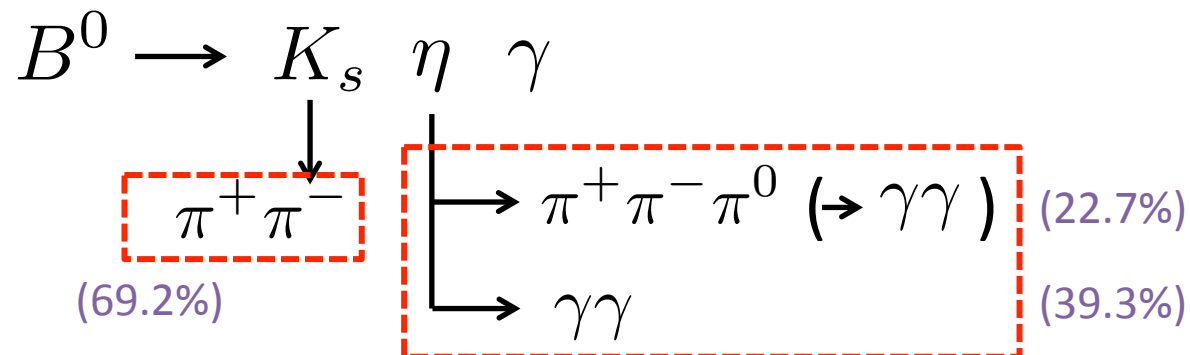
	標準模型	標準模型 + 右巻きカレントをもつ新物理
<p>B, 反B の崩壊の干渉の有無</p> <p>                     → : 標準模型                      - - - → : 標準模型(抑制)                      → : 新物理の寄与                 </p>		
$\frac{N_{\bar{B} \rightarrow f}(t) - N_{B \rightarrow f}(t)}{N_{\bar{B} \rightarrow f}(t) + N_{B \rightarrow f}(t)} = \mathcal{S} \cdot \sin(\Delta mt)$	$\sim 2 \frac{m_s}{m_b} \sin(2\phi_1) \sin(\Delta mt)$ <p>arXiv:hep-ph/9704272v1</p>	<p>標準模型より大きくなる可能性がある！</p>

この S を測定したい

- もし時間依存CP非保存が見られた場合、新物理の兆候をとらえた事になる！
- 終状態として、Ks η γ を用いる。

# 現在どこまで測定されているか

再構成に使う崩壊

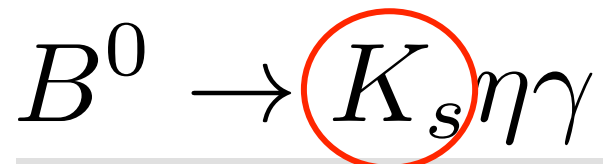


各実験での状況

- **BaBar 実験**
  - $s$  の測定値は全データを用いて  $-0.18^{+0.49}_{-0.46} \pm 0.12$
  - 統計誤差が支配的。
- **LHCb 実験**
  - pp衝突のため、 $\pi^0$ ,  $\eta$  由来の  $\gamma$  測定が困難。
- **Belle 実験**
  - BBペアのデータは  $770 \times 10^6$  と BaBar ( $470 \times 10^6$ ) の 1.6 倍の統計。
  - まだ1度も  $s$  の測定は行われていない。今回が初！

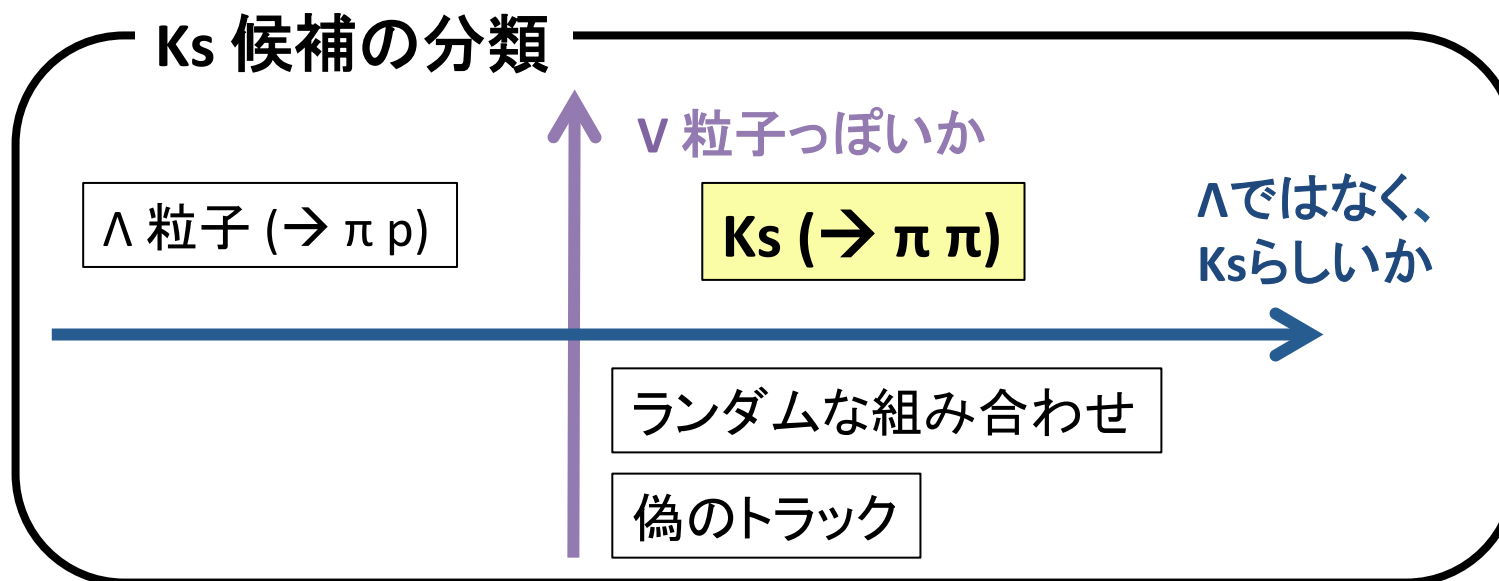
シグナルをどうやって増やすか

## Ks の再構成方法の改良



Ks を  $\pi^+ \pi^-$  から再構成する部分のセレクションを従来の方法からニューラルネット (NN) を用いた新しい方法に改良した。

中野、石川、住澤



「V粒子っぽさ」と「ΛではなくKsらしいか」という2つの出力を NN で得て、Ks の選別を行う。

# 判別に使った変数

## これまでの判別に使われていた測定値

- $K_s$  候補の運動量
- 磁場と垂直な面内での、衝突点と  $\pi$  候補の軌道の距離の小さいほう
- $K_s$  候補の位置ベクトルと運動量ベクトルのなす角
- 2つの  $\pi$  候補の軌道の磁場方向の距離
- $K_s$  候補の飛んだ距離

シグナルだと0。

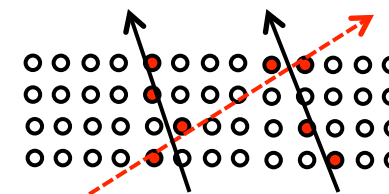


多くの BG は 0 (衝突点から出る)

## 新しく追加した測定値

- 磁場と垂直な面内での、衝突点と  $\pi$  候補の軌道の距離の大きいほう
- $K_s$  候補の運動量(lab系)と  $\pi$  候補の運動量( $K_s$ 系)のなす角
- 飛跡検出器の hit 数
- $\pi / p$  識別の結果
- $\Lambda$  を組んだときの質量
- $\pi$  候補の運動量(lab系)の大きさ
- $\pi$  候補の運動量(lab系)の向き

偽トラックなら少ない。



$\Lambda$  なら、片方が  $p$  である。

V 粒子っぽい

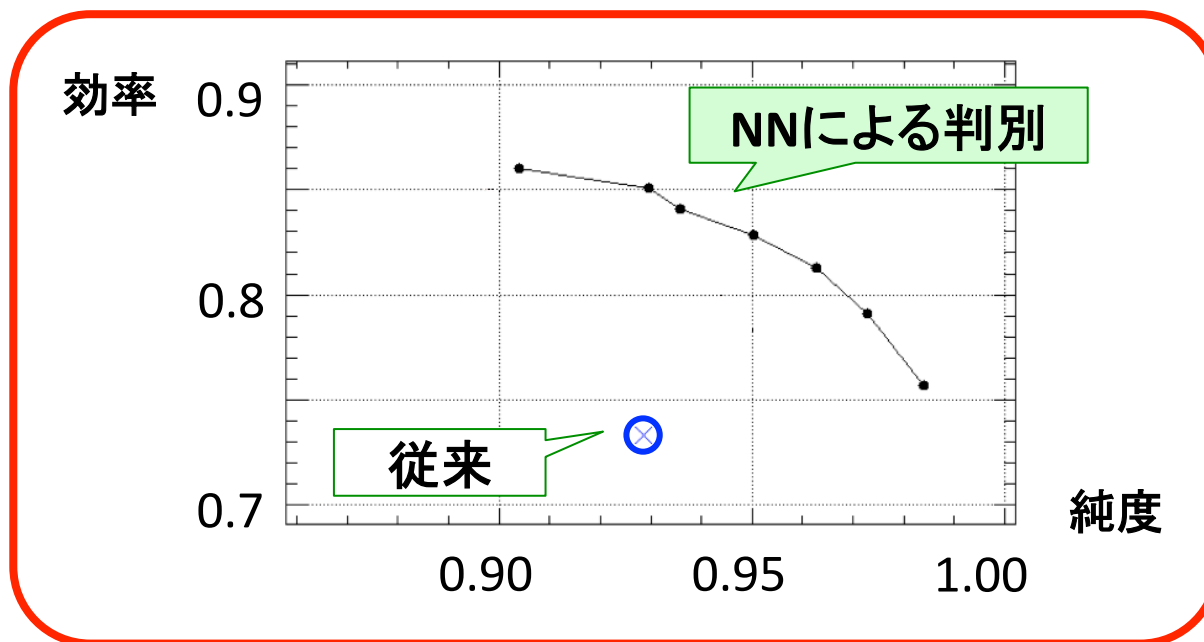
$\Lambda$  ではなく、 $K_s$ らしい

これらの分布の違いから、本物の  $K_s$  とバックグラウンドの区別を行った

## どの程度向上したか

モンテカルロの結果を、純度 - 効率プロットで比較

- 純度 : (本物) / (本物 + 偽物)
- 効率 : カットによって減少するシグナルの割合
- 右上にいく程良い。



同程度の純度の場合、1.15 倍多く拾えるようになった！



バックグラウンドをどうやって減らすか

# バックグラウンドを減らす方法

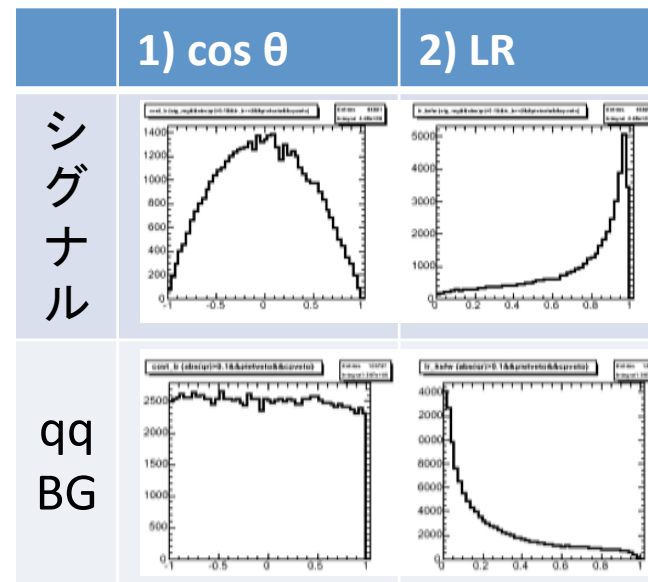
本解析で行ったバックグラウンド除去は大きく4つ

- 1** qq バックグラウンド除去
  - 軽いクォーク対がBB対の3倍の量生成されるのでこれを落とした。
- 2**  $\eta, \pi^0 \rightarrow \gamma$   $\gamma$  由来の  $\gamma$  の除去
  - $K_s \eta \gamma$  の  $\gamma$  候補の主な BG となるため。
- 3** 既知の CP 非保存の除去
  - 標準模型で抑制される時間依存の CP 非保存の探索を行うため。
- 4**  $B \rightarrow K_s \pi^0 \gamma$  の除去
  - 上の3つの除去後にも多く入ってくるため。

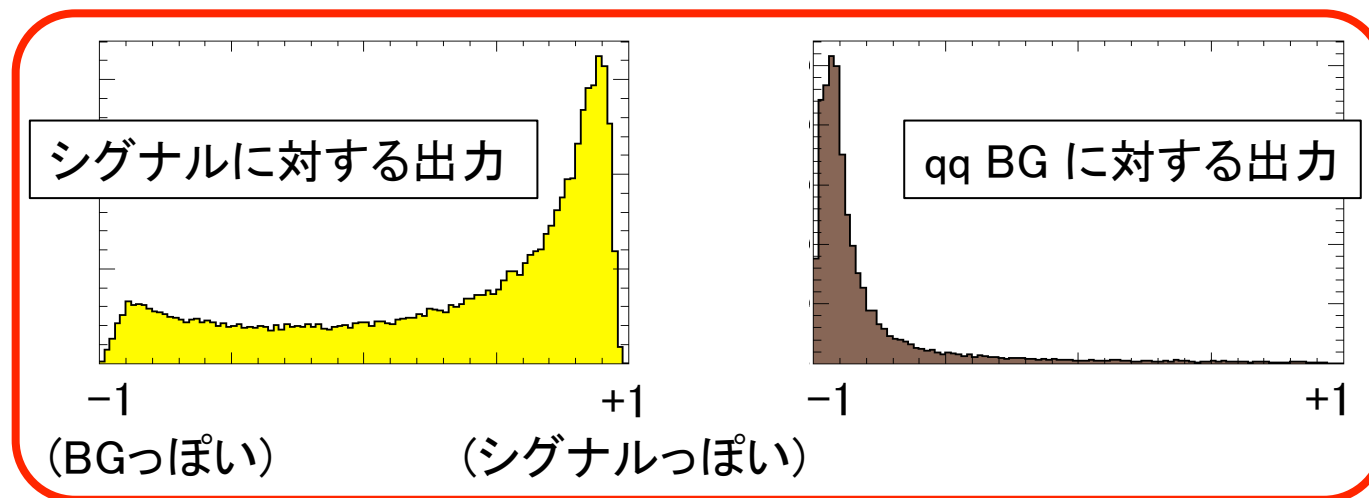
# 1 ニューラルネットを用いた qq BG のカット

計10の変数をニューラルネット (NN) に使用

- 1) ビーム方向に対する B 中間子の運動量の向きの  $\cos$
- 2) ルジャンドル関数を基にしたイベント形状の情報 →
- 3) sphericity
- 4) aplanarity
- 5) シグナル側と逆側の 1st sphericity axis のなす角の  $\cos$
- 6) シグナル側と逆側の 2nd sphericity axis のなす角の  $\cos$
- 7) シグナル側と逆側の 3rd sphericity axis のなす角の  $\cos$
- 8) シグナル側と逆側の thrust vector のなす角の  $\cos$
- 9) イベント全体の thrust
- 10) タグ側の thrust



NN の出力結果 →



シグナルと qq BG が良く分離できている

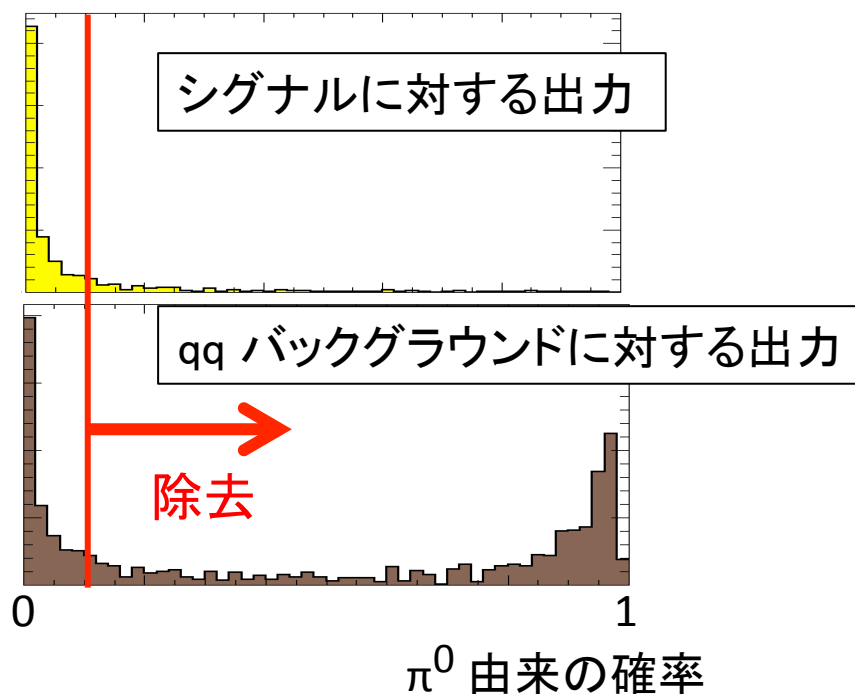
## 2 $\pi^0$ , $\eta$ 由来の $\gamma$ のカット

### 除去の方法

- $\gamma$  候補に対して、イベント内から  $\pi^0, \eta$  を組めるもっともらしい相手  $\gamma$  を探し、MCの分布に基づき、 $\pi^0, \eta$  由来である確率を計算する。
- $\pi^0$  由来の確率、 $\eta$  由来の確率の高いものを除去する。

### 計算結果

( $\pi^0$  について)



シグナルをほとんど落とす事なく、バックグラウンドを落とせる

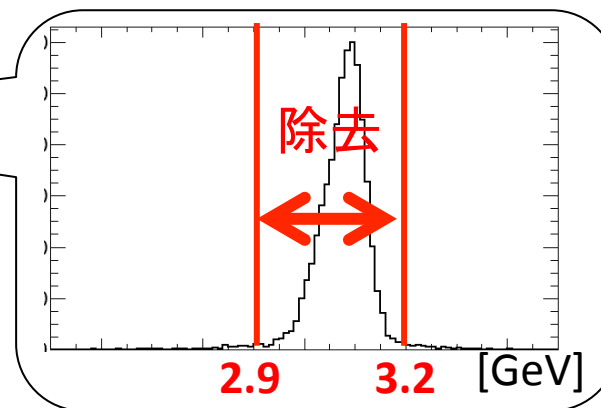
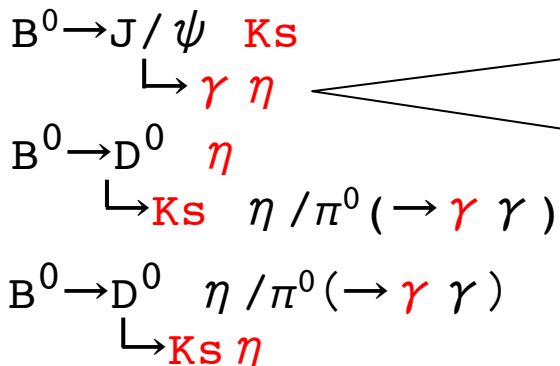
### 3 既知の CP 破れを持つバックグラウンド

$K_S, \eta, \gamma$  のうち、2つの候補を組んで粒子になるものはその質量付近を除去

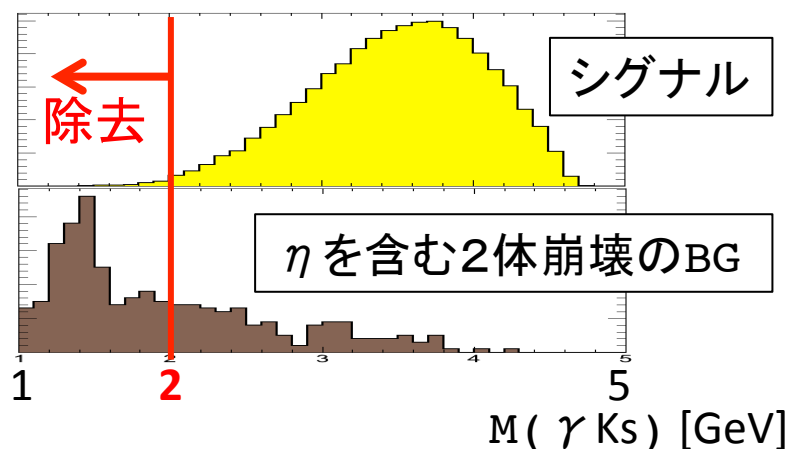
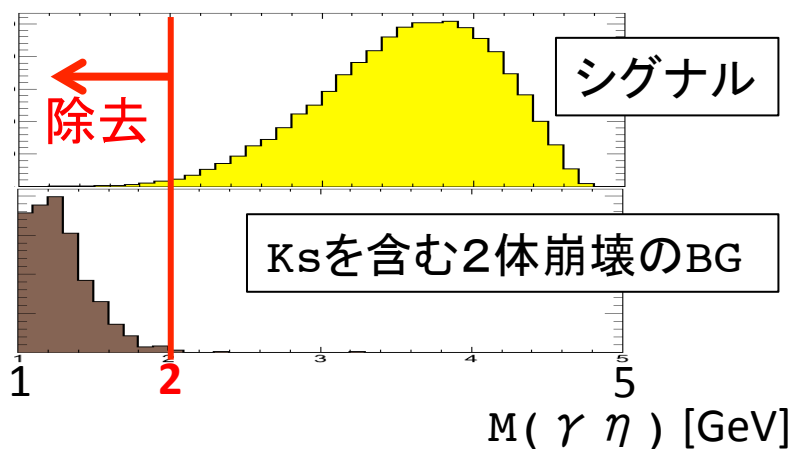
$$M(\gamma \eta) = M_{J/\psi}$$

$$M(\gamma K_S) = M_D$$

$$M(K_S \eta) = M_D$$



$\gamma \eta, \gamma K_S$  で組んだときの質量が小さな部分を除去



CP を持つバックグラウンドが十分小さくなった(シグナルの7%に相当)。  
 → (統計誤差) >> (この BG による系統誤差)

## 4 $B \rightarrow K_s \pi^0 \gamma$ の除去

$B \rightarrow K_s \pi^0 \gamma$  を組めた場合、そのイベントを除去

$B \rightarrow K_s \pi^0 \gamma$  の条件

$\pi^0$  の質量

$$120 < M < 150 \text{ [MeV]}$$

$\gamma$  のエネルギー

$$1.6 < E \text{ (CM系)} < 3.4 \text{ [GeV]}$$

$\Delta E$

$$-0.20 < \Delta E < 0.10 \text{ [GeV]}$$

$$\Delta E \equiv E_B - E_{\text{beam}}$$

beam-energy を用いた B の質量

$$5.27 < M_{bc} \text{ [GeV]}$$

$$M_{bc} \equiv \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - p_B^2}$$

	組めなかった	組めた
シグナル	72.1	1.0
$B \rightarrow K_s \pi^0 \gamma$ BG	16.6	22.6
その他の BB BG	35.9	4.8

除去

$B \rightarrow K_s \pi^0 \gamma$  を狙って落とすことができる

## セレクション最適化と結果

# セレクション条件の最適化

## セレクションの最適化を行った

- 「qq BG 除去に使う NN の出力」と「セレクション条件」に対して行った。
  - 次のページで紹介 (NN は省略)
  - Significance を最大にするようにした。
- $\eta$  の崩壊モード、Bの崩壊位置測定の可否によって、3グループに分類。
  - $\eta \rightarrow \gamma \gamma$  で  $K_S$  によってBの崩壊位置を測定できる
  - $\eta \rightarrow \gamma \gamma$  で  $K_S$  によってBの崩壊位置を測定できない
  - $\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$  で  $\eta$  によってBの崩壊位置を測定できる



# セレクション条件の内容

$\eta \rightarrow \gamma\gamma$   $K_s$  で崩壊位置を測定可  
測定不可

$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$   $\eta$  で崩壊位置を測定可

最適化の対象

$\pi^+ \pi^- \rightarrow K_s$

**Ks の質量**  $480 < M < 516,$   
 $480 < M < 516$  [MeV]  
**NN の出力**  $V$  粒子らしさ  $> -0.1, +0.4$   
 $\Lambda$  でなく  $K_s$  か  $> -0.8, -0.9$

$\gamma\gamma \rightarrow \eta$

**$\gamma$  のエネルギー**  $E$  (lab系)  $> 200,$   
 $200$  [MeV]  
 **$\gamma \gamma$  のなす角**  $\cos\theta > 0.2,$   
 $0.3$   
 **$\eta$  の質量**  $515 < M < 567,$   
 $516 < M < 576$  [MeV]

$\pi^+ \pi^- \rightarrow K_s$

**Ks の質量**  $480 < M < 516$  [MeV]  
**NN の出力**  $V$  粒子らしさ  $> -0.1$   
 $\Lambda$  でなく  $K_s$  か  $> -0.7$

$\pi^+ \pi^- \pi^0 \rightarrow \eta$

**$\eta$  の質量**  $538 < M < 555$  [MeV]

$\gamma\gamma \rightarrow \pi^0$

**$\gamma$  のエネルギー**  $E$  (lab系)  $> 50$  [MeV]  
 **$\gamma \gamma$  のなす角**  $\cos\theta > 0.3$   
 **$\pi$  の質量**  $120 < M < 150$  [MeV]

$K_s \eta \gamma \rightarrow B^0$

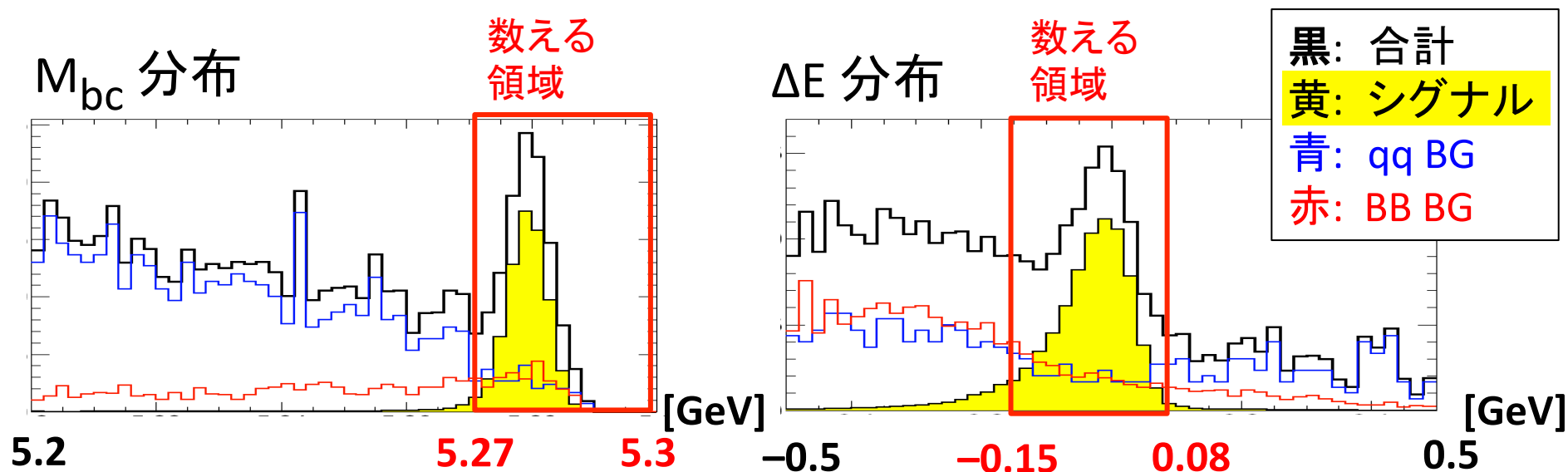
**$\gamma$  のエネルギー**  $1.6 < E$  (CM系)  $< 3.4$  [GeV]  
 **$\Delta E$**   $-0.15 < \Delta E < 0.08$  [GeV]  
**beam-energy を用いた  $B$  の質量**  $5.27 < M_{bc}$  [GeV]

$$\Delta E \equiv E_B - E_{\text{beam}}$$

$$M_{bc} \equiv \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - p_B^2}$$

# カットによるシグナル、バックグラウンドの変化

	シグナル	qq BG	BB BG	significance
セレクションのみ(最適化前)	162.1	8252.3	746.9	1.7
qq BG 用カット追加	104.1	156.7	215.6	4.8
$\pi^0 \eta$ 用カット追加	86.4	78.7	134.0	5.0
CP BG 用カット追加	73.1	41.0	79.9	5.3
$B \rightarrow K_s \pi^0 \gamma$ カット追加	72.1	37.0	52.5	5.7
最適化後	<b>70.5</b>	<b>24.3</b>	<b>24.8</b>	<b>6.5</b>

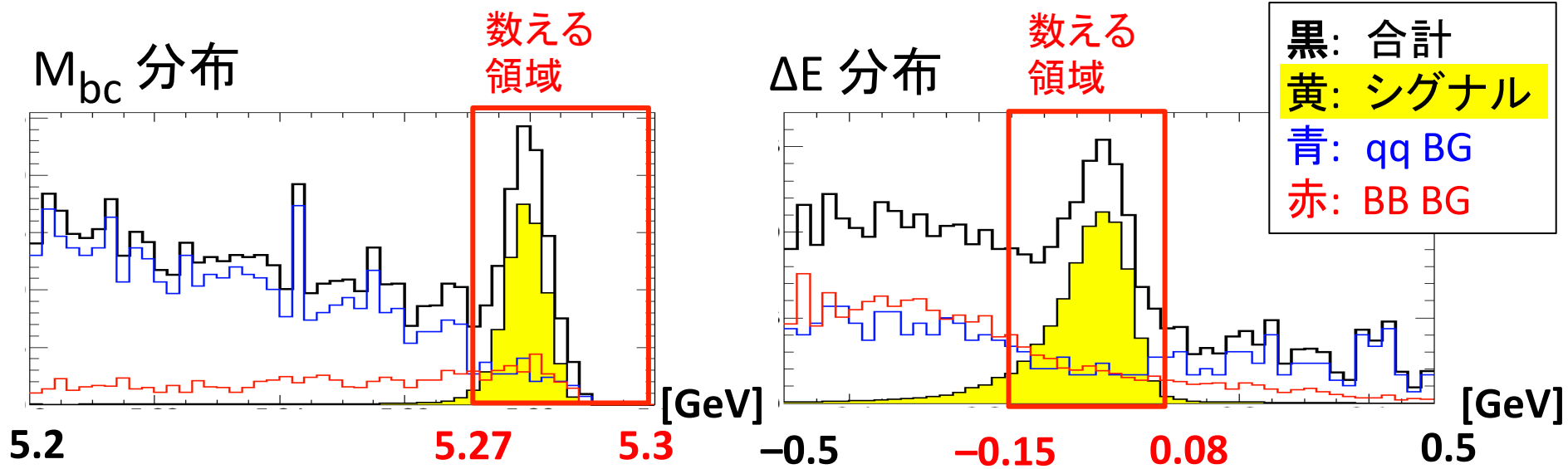


# カットによるシグナル、バックグラウンドの変化

	シグナル	qq BG	BB BG	significance
セレクションのみ(最適化前)	162.1	8252.3	746.9	1.7
qq BG カット追加	78.7	41.0	79.9	5.0
BB BG カット追加	75.1	37.0	52.5	5.3
$B \rightarrow K_s \pi \gamma$ カット追加	72.1	37.0	52.5	5.7
最適化後	<b>70.5</b>	<b>24.3</b>	<b>24.8</b>	<b>6.5</b>

Significance は合計で **6.5** !  
(BaBar と同統計量を仮定すると 5.1)

BaBar の 4.0 より、十分大きな値 !



## まとめ

- $B \rightarrow K_S \eta \gamma$  の時間依存の CP 破れを探索中。
  - 標準模型では抑制されている。
  - CP 破れの観測ができれば、**新物理**の影響。
- モンテカルロシミュレーションを用いて、セレクションの最適化を行った。
  - ニューラルネットを用いた  $K_S$  再構成の手法を導入。
  - バックグラウンド源を特定し、取り除く方法を決定。
  - Significance は **6.5** と、BaBar の解析の 4.0 よりも大きく精度のよい測定結果が期待できる。

# Back up

# ニューラルネットの概要

トレーニングサンプルの入力

シグナル  
バックグラウンド

“preprocessing”

ニューラルネットが計算しやすいように、  
分布の形状を変化させる。

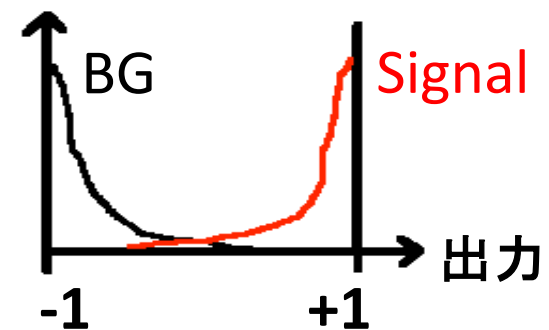
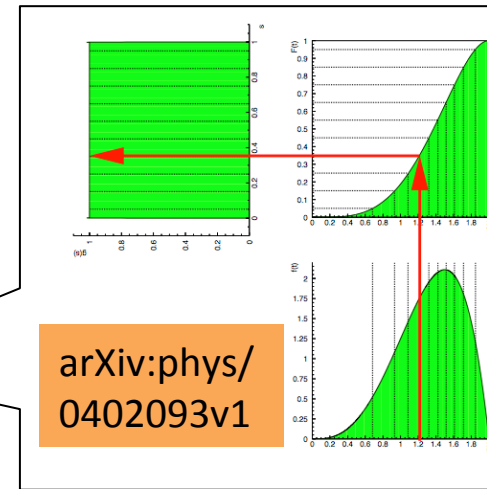
“iteration”

例えば関数のフィットで  $\chi^2$  が最小になるまで繰り返し計算をするように、  
最適な判断ができるようになるまで評価関数を用意する計算を繰り返す。

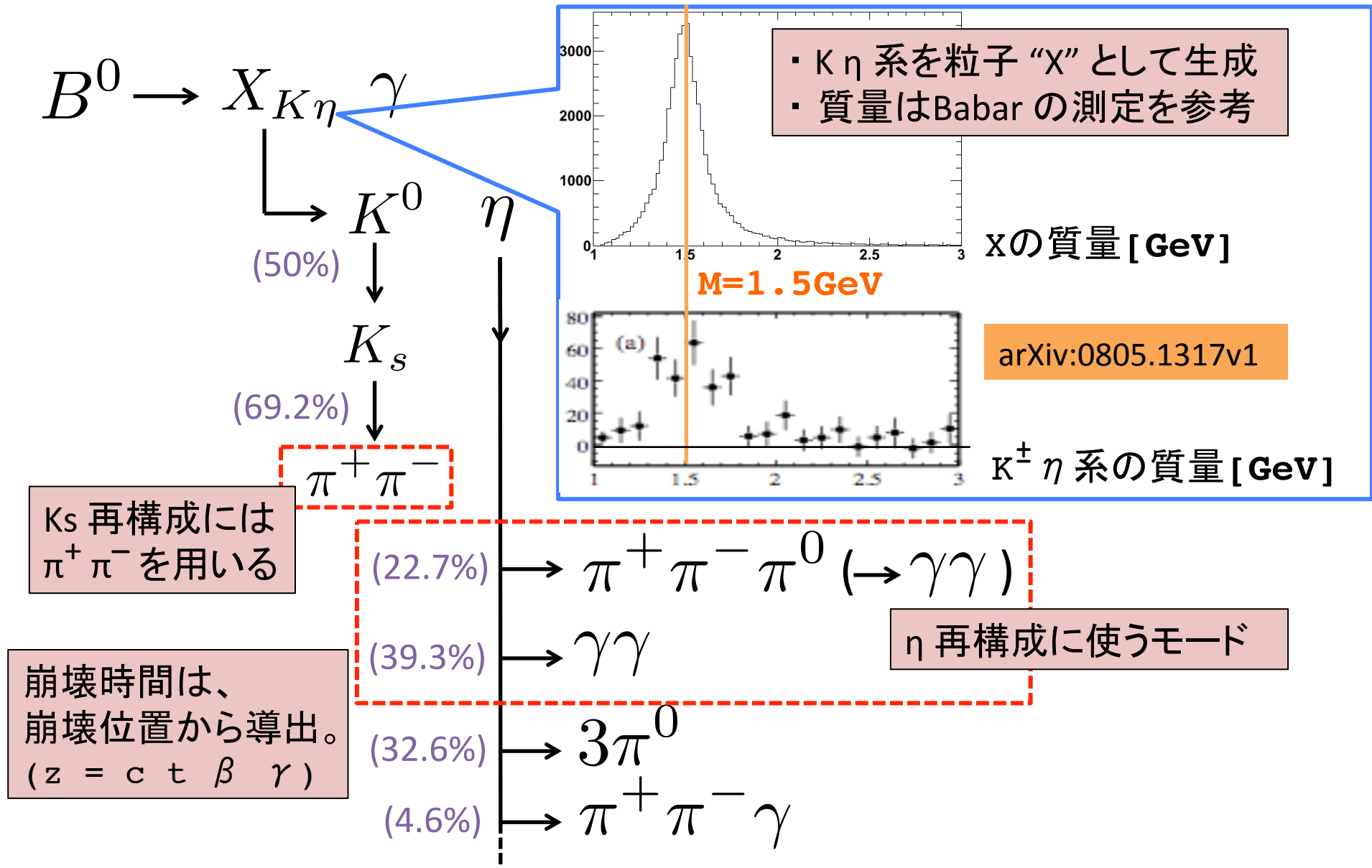
評価関数の決定

データ

シグナルかどうかを評価



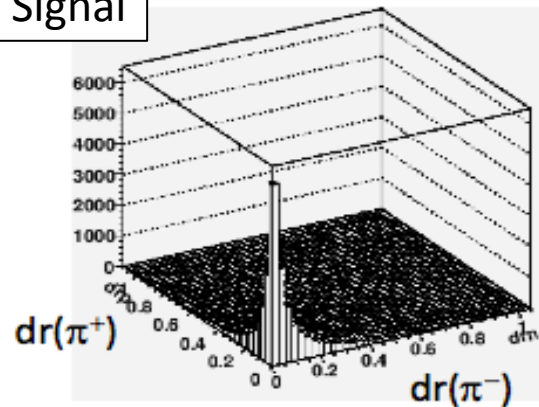
# モンテカルロによるシグナル生成と再構成



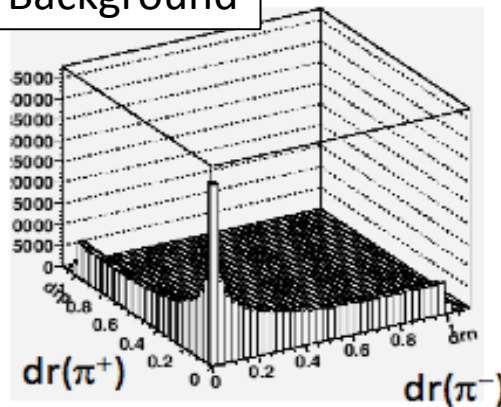
磁場と垂直な面内での、衝突点と $\pi$ 候補の軌道の距離  
 $K_s$ 候補の運動量(lab系)と $\pi$ 候補の運動量( $K_s$ 系)のなす角

$dr_{high}$ : longer distance between IP and helix

Signal



Background

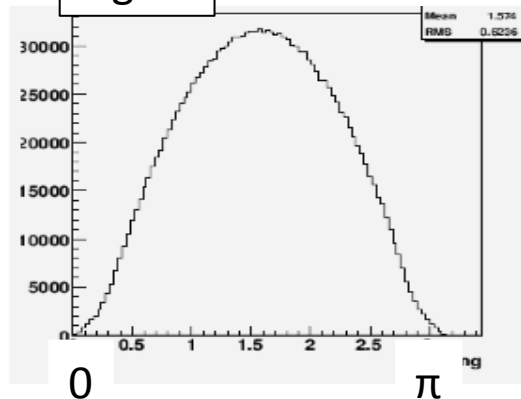


require  $fl > 1\text{cm}$

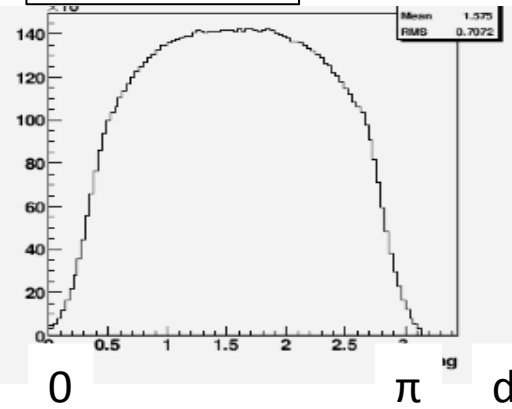
Using both “dr” is good for high fl events.

$dec\_ang$ : angle between  $p_{K_s}$  (lab frame) and  $p_{\pi}$  ( $K_s$  frame)

Signal



Background



“dec\_ang” distributions are different.



# 飛跡検出器の hit 数

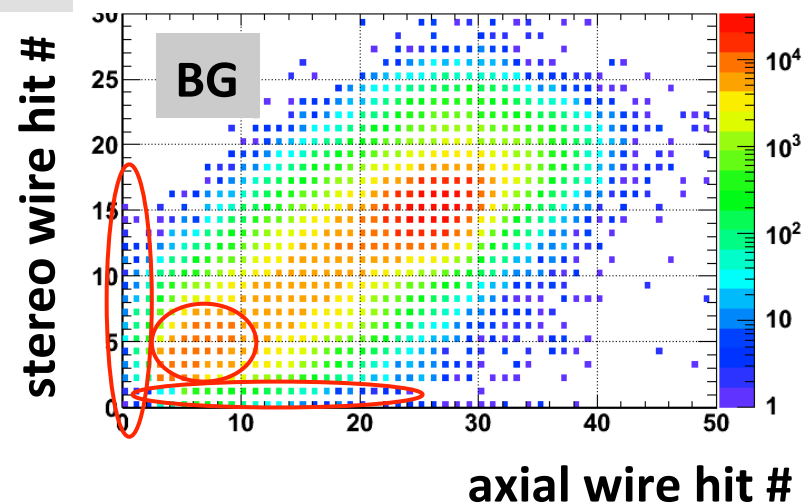
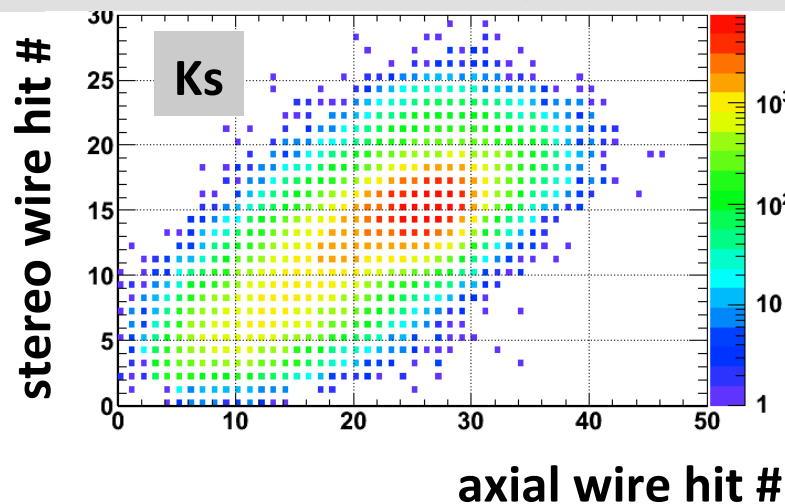
SVD information affects low fl event selection which is important for TDCPV analysis.

Positive child

	Ks (fl<2cm)	w/ SVD hits	w/o SVD hits		BG (fl<2cm)	w/ SVD hits	w/o SVD hits
Negative child	w/ SVD hits	90.7 %	3.3 %	↔	w/ SVD hits	84.0 %	6.6 %
	w/o SVD hits	3.2 %	2.8 %		w/o SVD hits	6.3 %	3.1 %

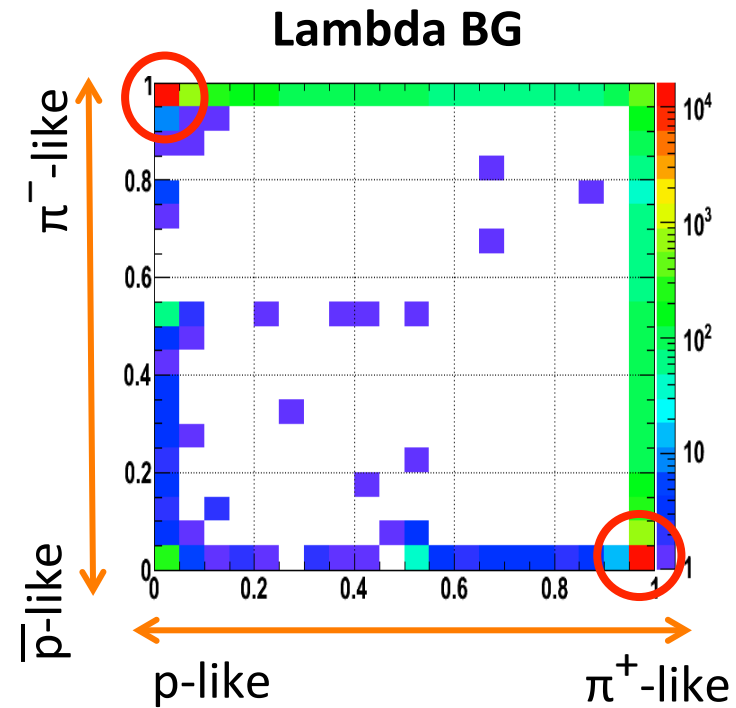
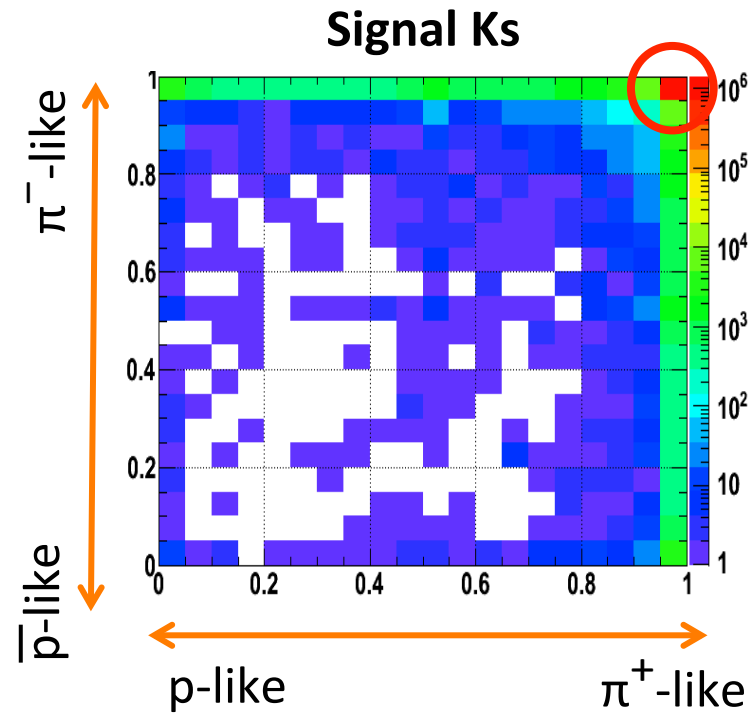
One child is a ghost track

CDC hit information also improve Ks selection.



# $\pi / p$ 識別の結果

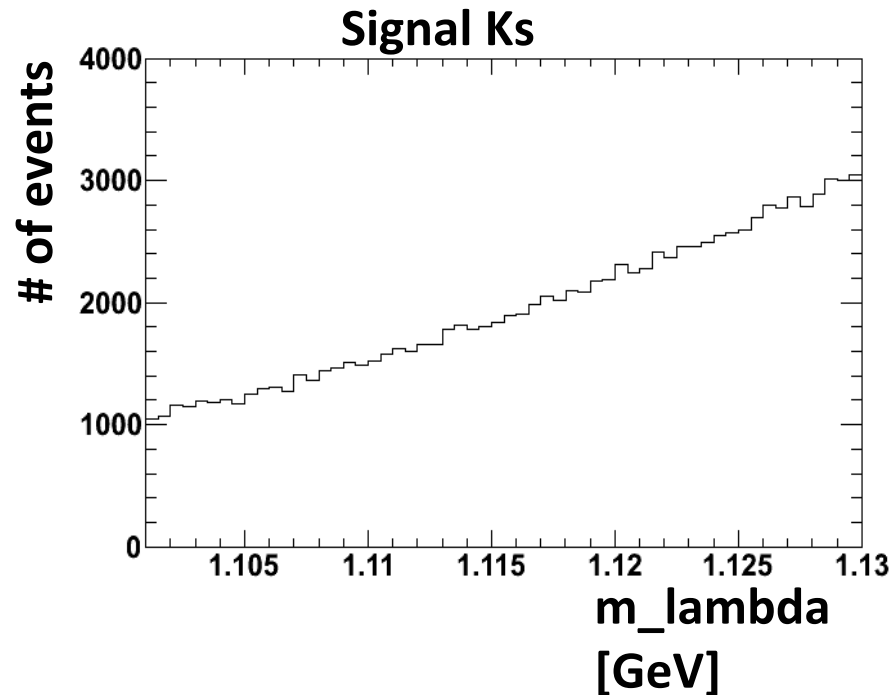
Distributions of  $\text{atc\_pid}(\pi, p)$  value of positive/negative child were shown below.



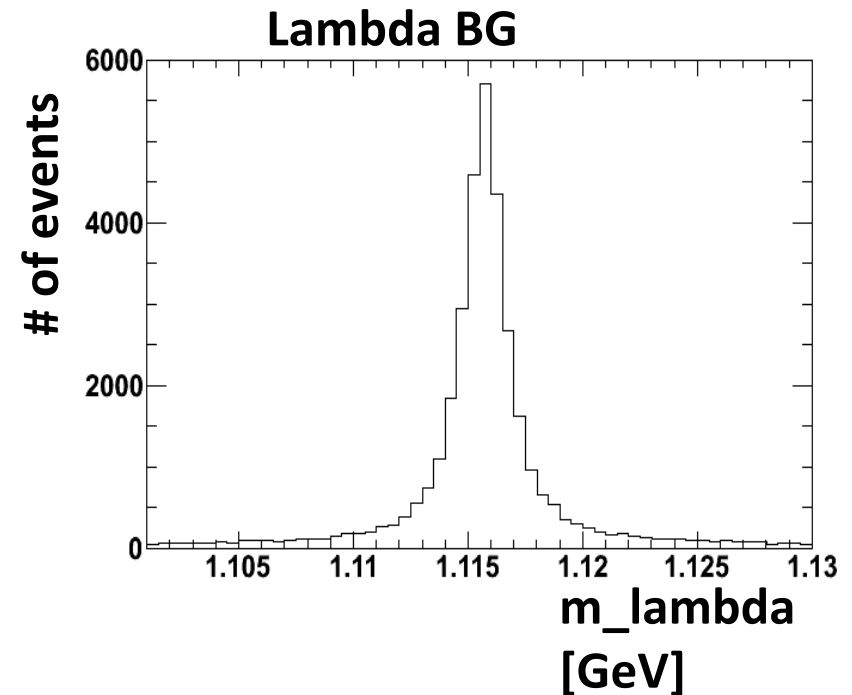
# Λ を組んだときの質量

Distributions of “m\_lambda” were shown below.

If the pair of  $\pi^+ \pi^-$  candidate of kind=1 (Ks) are also in the list of kind=2, 3 (Lambda), “lambda mass” is obtained.



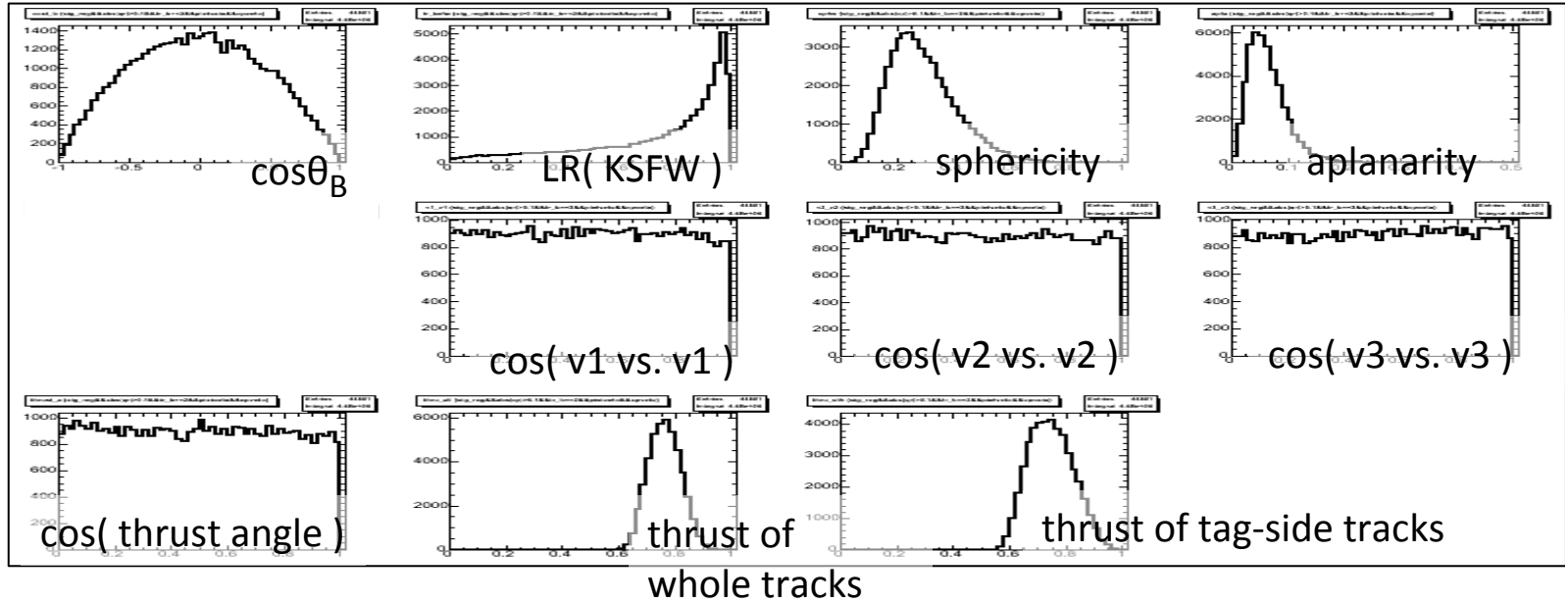
92% of events are not reconstructed as Lambda. (i.e. m\_lambda is set to 0)  
The distribution does not have a peak.



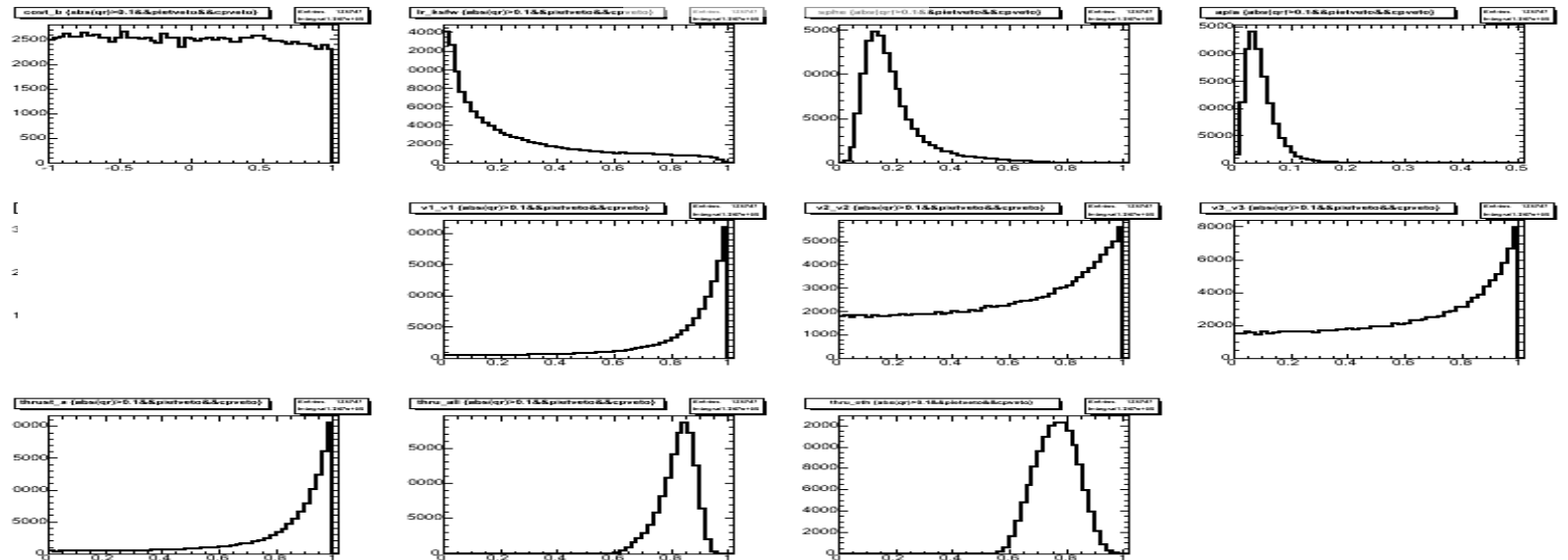
92% of events have m\_lambda.  
(i.e. m\_lambda  $\neq$  0)  
The distribution has a peak at 1.116 GeV.

# qq BG cut 用の NN 入力

Signal



qq BG





## 最適化前のセレクション条件

$$\eta \rightarrow \gamma\gamma$$

$$\eta \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0$$

$$\pi^+ \pi^- \rightarrow K_s$$

**Ks の質量**  $490 < M < 506$  [MeV]  
**NN の出力** V粒子らしさ  $> +0.5$   
 $\Lambda$  でなく Ks か  $> -0.4$

$$\gamma\gamma \rightarrow \eta$$

**$\gamma$  のエネルギー**  $E$  (lab系)  $> 100$  [MeV]  
 **$\eta$  の質量**  $515 < M < 570$  [MeV]  
 **$\gamma\gamma$  のなす角** ----

$$\pi^+ \pi^- \pi^0 \rightarrow \eta$$

**$\eta$  の質量**  $532 < M < 562$  [MeV]

$$\gamma\gamma \rightarrow \pi^0$$

**$\gamma$  のエネルギー**  $E$  (lab系)  $> 50$  [MeV]  
 **$\gamma\gamma$  のなす角**  $\cos\theta > 0.4$   
 **$\pi$  の質量**  $123 < M < 143$  [MeV]