



TOHOKU
UNIVERSITY



Belle II 実験のための K_S 検出の研究

猪塚昌大

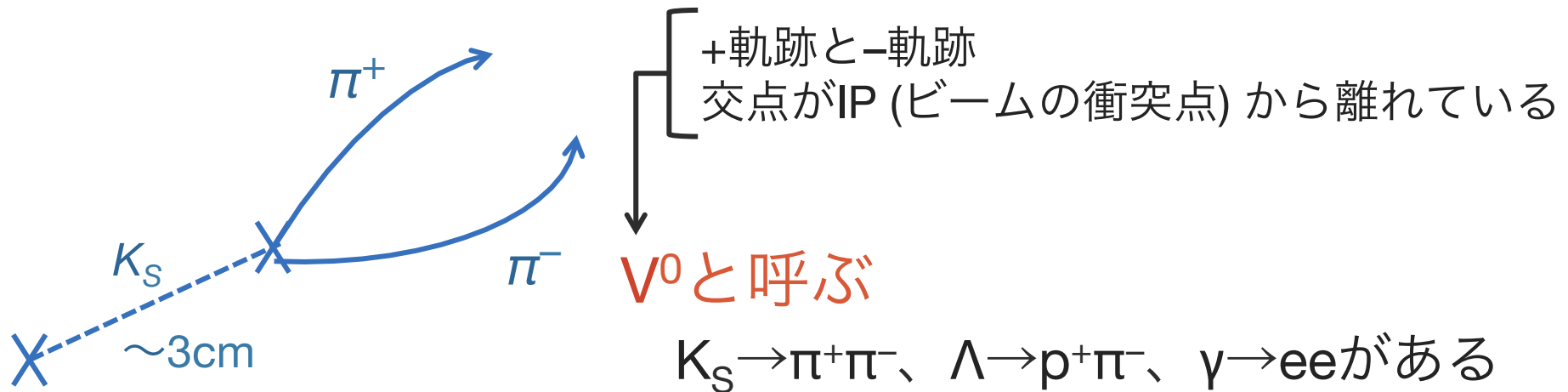
2017年1月30日

修士論文

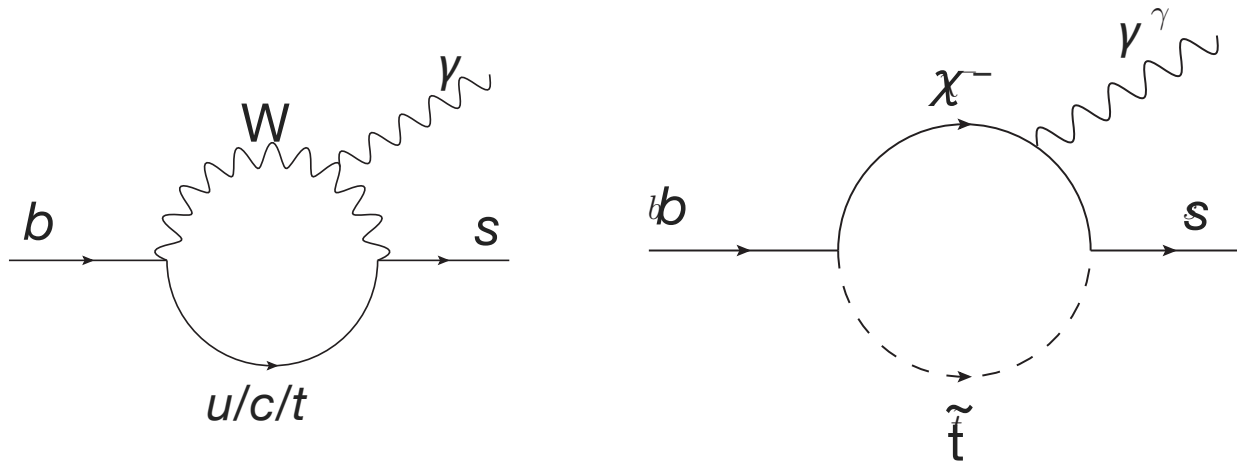
- K_S 中間子とBの物理
- Belle II 実験
- V0finderによる K_S vertexing
- 多変量解析による K_S 選別
- $B \rightarrow K_S \pi^+ \gamma$ の再構成
- まとめ

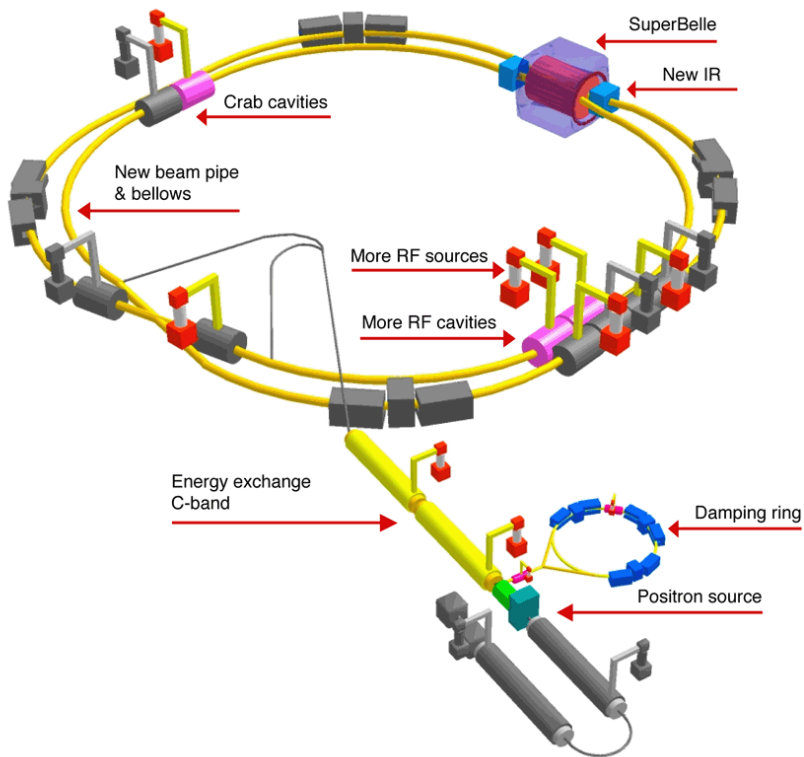
- K_S : s クォークを含む最も軽い中性ハドロン→弱い相互作用で崩壊し、寿命が長い ($c\tau = 2.68 \text{ cm}$)
- K_S は $\pi^+\pi^-$ に崩壊する (分岐比 69.2%)

→クリーンな再構成が可能



- B, D中間子の再構成
 - $B^0 \rightarrow D^+ \pi^-$, $D^+ \rightarrow K_S \pi^+$ など
- 新物理探索
 - $B \rightarrow K_S \pi^0 \gamma$ や $B \rightarrow \phi K_S$ ($b \rightarrow s$ 遷移)

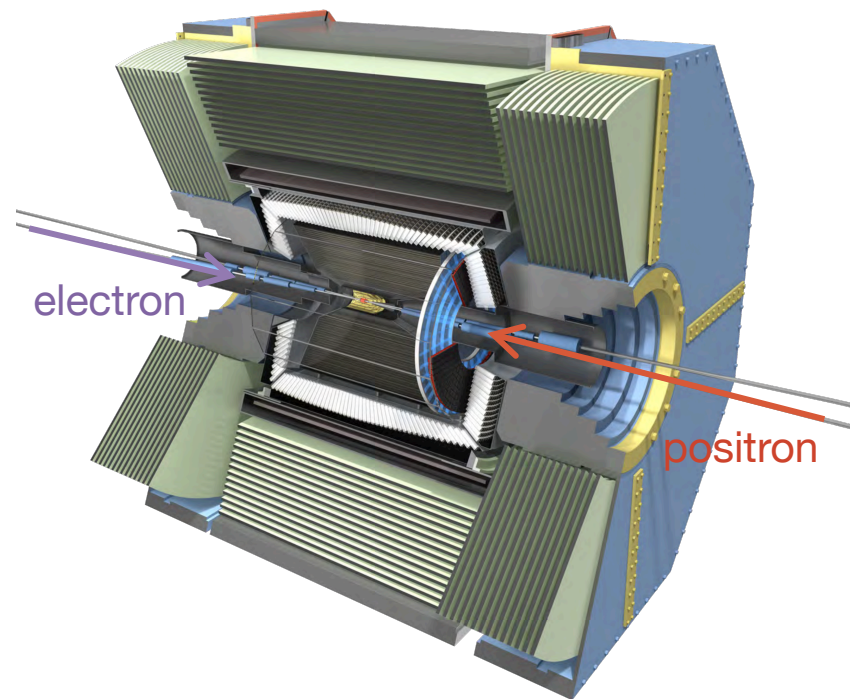




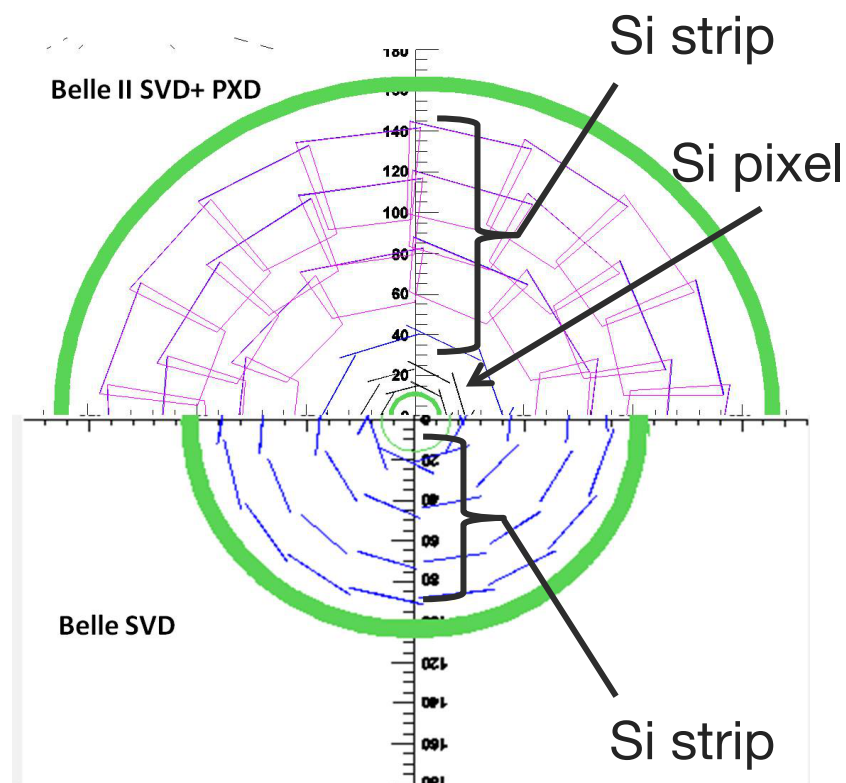
- 7 GeVの電子と4 GeVの陽電子を衝突させ、 B 中間子対を生成
- Belleの40倍のルミノシティで大量の統計を得る
 - バンチ数を増やし電流を上げる
 - ビームサイズを縮小 (ナノビーム)

● 検出器のアップグレード

- データレートに対応
- 位置分解能が向上



Belle II 検出器



- 崩壊点測定器 (VXD) と中央ドリフトチェンバー (CDC) で軌跡を検出

- アクセプタンス 立体角 4π の91% (lab系)

- 運動量は磁場中の曲率で測定される

$$p_t = \frac{qB\rho}{\alpha} \text{ [GeV/c]}, \quad \alpha = 333.56$$

q [e], B [T], ρ [cm]

- 粒子識別

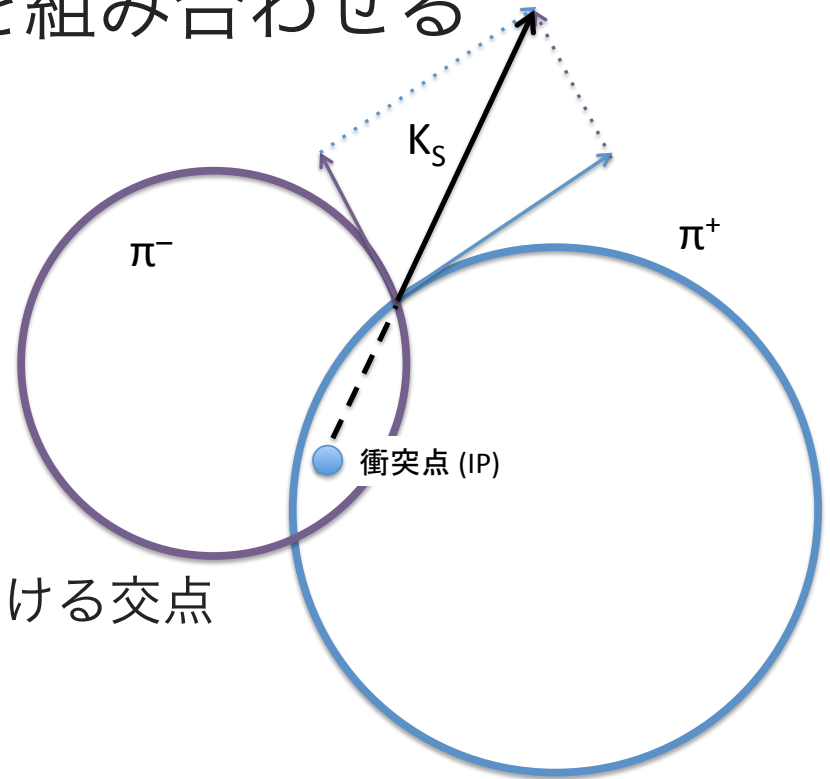
- CDCの dE/dx

- チェレンコフ検出器

- TOPカウンター (バレル部分)
- A-RICH (前方エンドキャップ)

- 1イベント中の2つの軌跡を組み合わせる

- 正電荷と負電荷で1対



- 崩壊点位置の計算

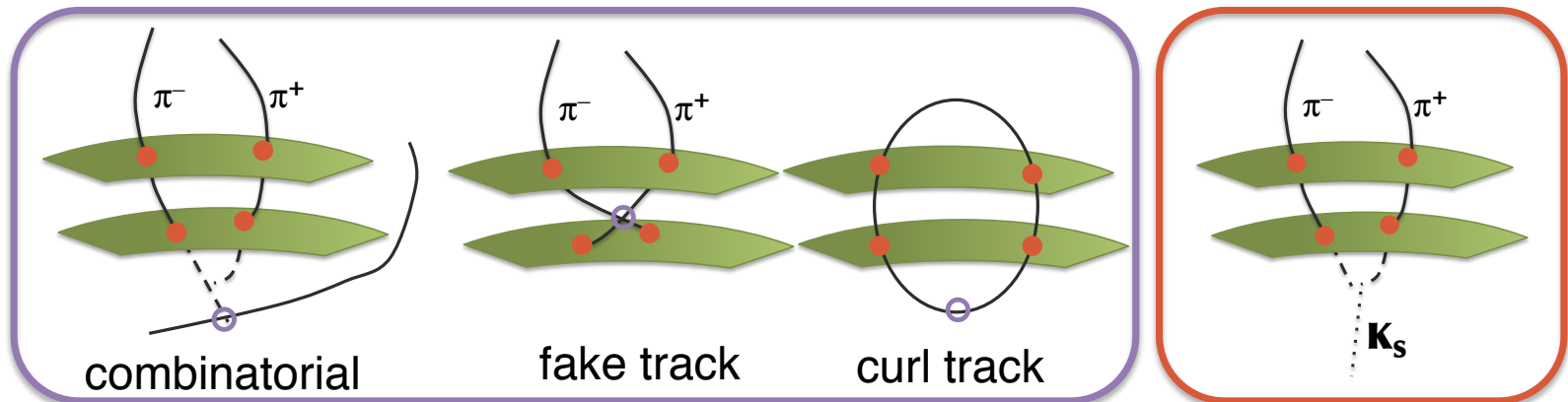
- xy平面 (ビーム軸に垂直な面) における交点
もしくは最近接点

- Kinematics fit

- 2軌跡が1点を通るという制約をつけて崩壊点と運動量を再計算
- K_S 4元運動量 $p^\mu = \Sigma p_i^\mu$

● non- V^0 BGの種類

- combinatorial
 - 軌跡の少なくとも一方が K_S 起源でない
- curl track
 - 低運動量の1つの軌跡→静止した K_S に見える
- fake track
 - 軌跡の少なくとも一方がフェイク



goodKs

- Belleで標準的に用いられている選別方法
 - 閾値カットによる

momentum [GeV/c]	MinD0 [cm]	Dphi [rad]	DistZ [cm]	F1 [cm]
$p < 0.5$	> 0.05	< 0.3	< 0.8	—
$0.5 \leq p \leq 1.5$	> 0.03	< 0.1	< 1.8	> 0.08
$1.5 < p$	> 0.02	< 0.03	< 2.4	> 0.22

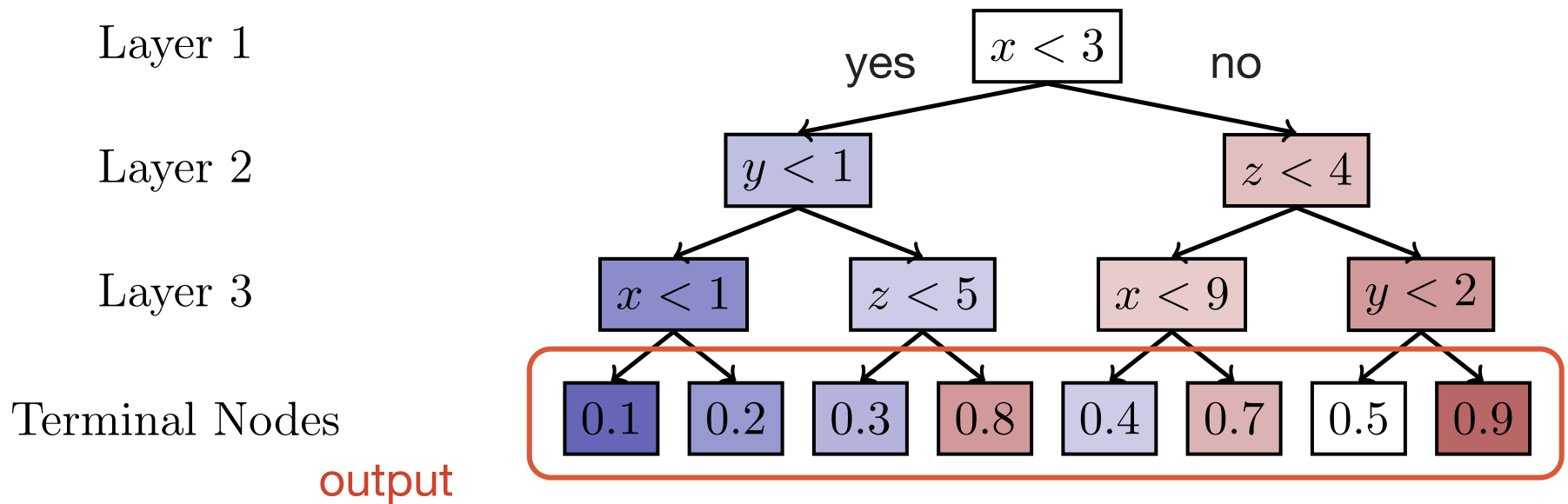
変数はあとで説明する

NisKsFinder

- この研究：機械学習による多変量解析

Decision Tree (DT)

- SignalサンプルとBGサンプルのoutput分布がより乖離するようにカットパラメーターとカット値を最適化 (学習)
 - 選び間違い確率 (gini index) を最も減らすカットを選ぶことに相当



Boosted Decision Tree (BDT)

- 学習サンプルの各イベントに重みをつけ、重みを変えてDTを多数作り、それぞれで計算されるoutputの重み付け平均を得る
- →サンプルの統計的揺らぎによる誤差を抑制

FastBDT

- BDTを発展・高速化したもの

NisKsFinder

- Belle version
 - NeuroBayes (ニューラルネット)
- Belle II version
 - FastBDTを使用：この研究
 - inputパラメーターはBelle versionとほぼ同じ

- B事象と continuum を実際の頻度で起こしたもの
- フルシミュレーション (実際のデータのフォーマット)
- 実際の3D磁場マップを使用
- ビームバックグラウンド
 - Radiative Bhabha
 - Touschek 散乱
 - ビームガス散乱
 - BGx0 = なし、BGx1 = あり
- 1fb⁻¹相当

生成事象	イベント数/fb ⁻¹ (x 100)
中性BB	5346
荷電BB	5654
uubar	16050
ddbar	4010
ccbar	3830
ssbar	13290

● K_S サンプル

- 2つの軌跡がたしかに K_S から来ていたもの
- MCマッチング (この研究で改良) によって確認
- 9.82×10^5 イベント

● non- V^0 BG

- 2つの軌跡が V^0 (K_S , Λ , γ) 由来でないもの
- 5.12×10^6 イベント (シグナルの5倍)
- NisKsFinder output = "V0like"

● V^0 BG

- 2つの軌跡が Λ 由来であるもの
- 2.27×10^4 イベント
- NisKsFinder output = "NoLambda"

- V0like (non- V^0 BG rejection)

- DistZ
- FI
- Dphi
- MinD0
- MaxD0
- Mom
- DecayAngle
- VXDPoitive
- VXDNegative
- CDCAxialPositive
- CDCAxialNegative
- CDCStereoPositive
- CDCStereoNegative

- 13変数を使って計算

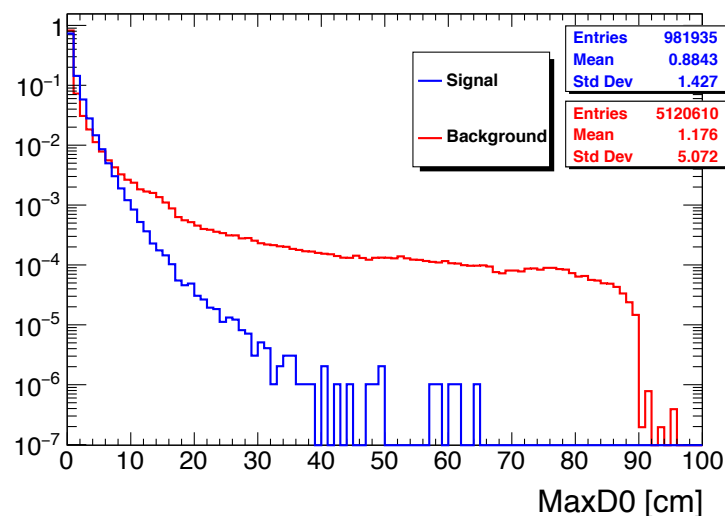
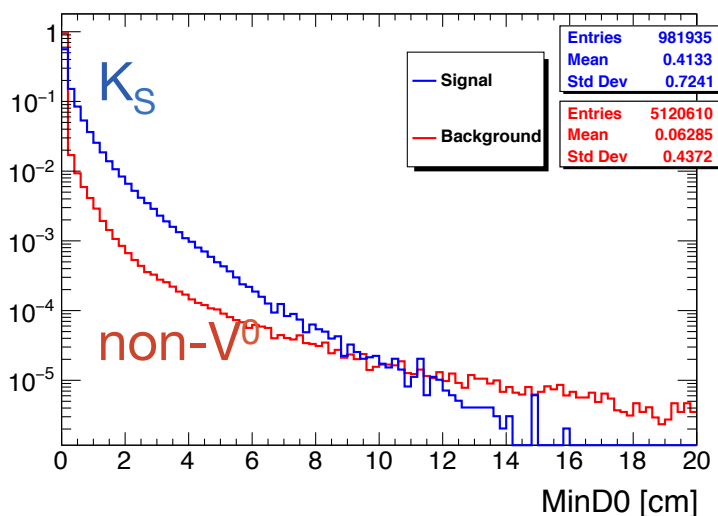
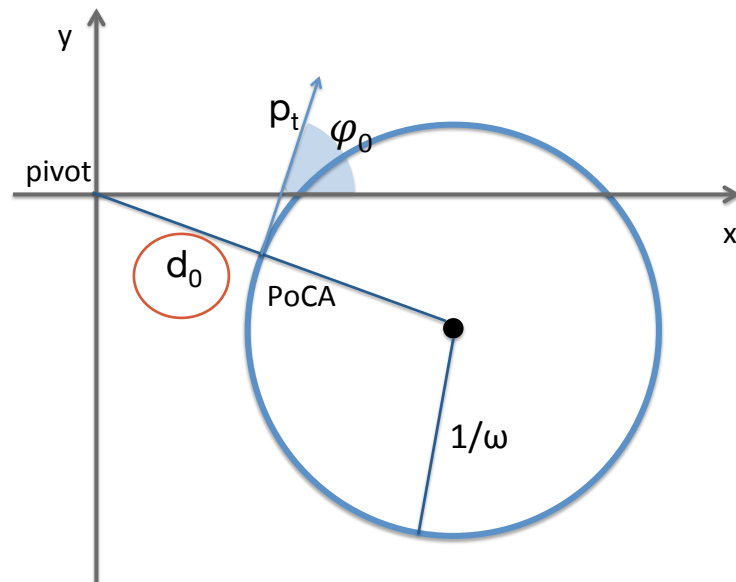
- NoLambda (V^0 BG rejection)

- PrPildPositive
- PrPrIdNegative
- LambdaMass
- MomPositive
- MomNetative
- SinThetaPositive
- SinThetaNegative

- 7変数を使って計算

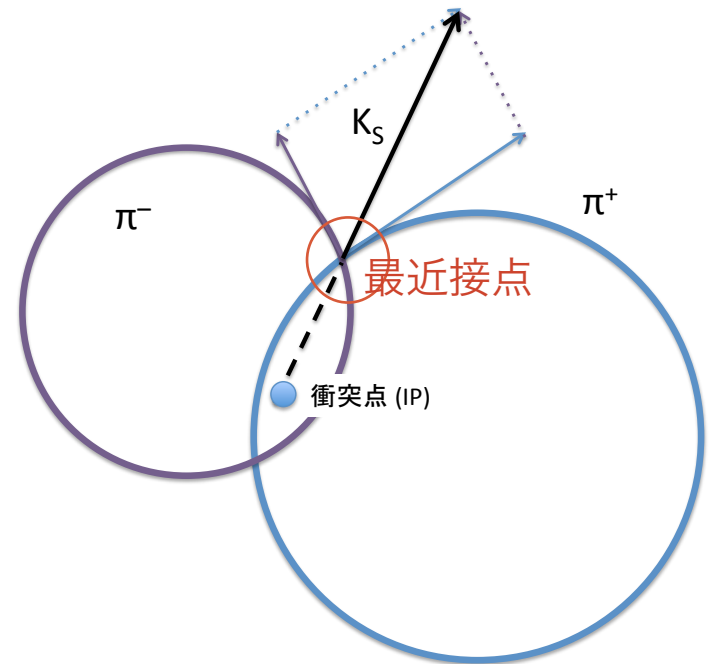
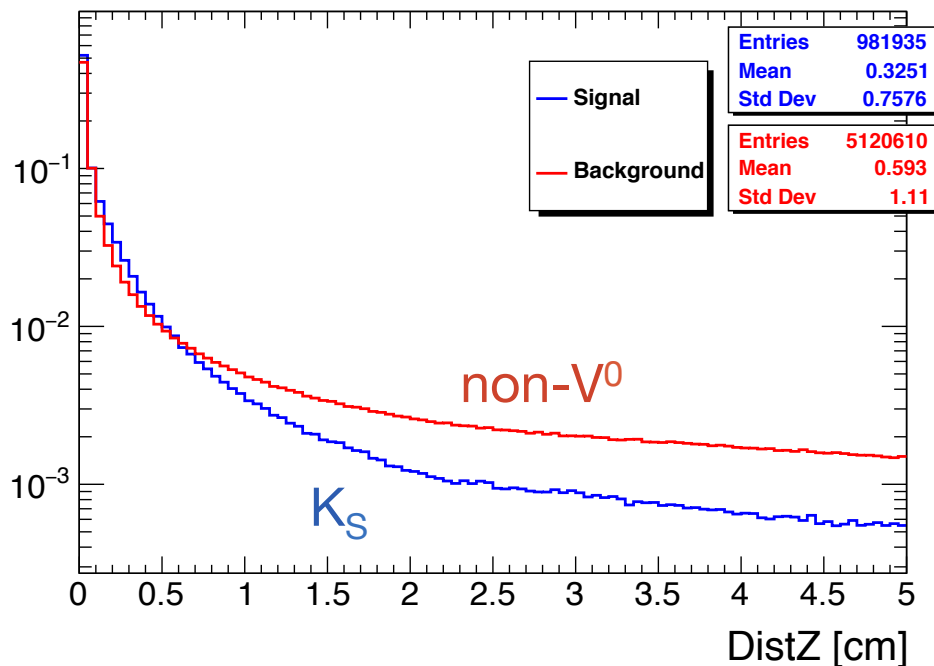
D0 xy平面で見たIPから軌跡までの距離

- IPで生成する軌跡では ~ 0
- $\text{MinD0} = 2$ 軌跡のD0の小さい方
- $\text{MaxD0} = 2$ 軌跡のD0の大きい方

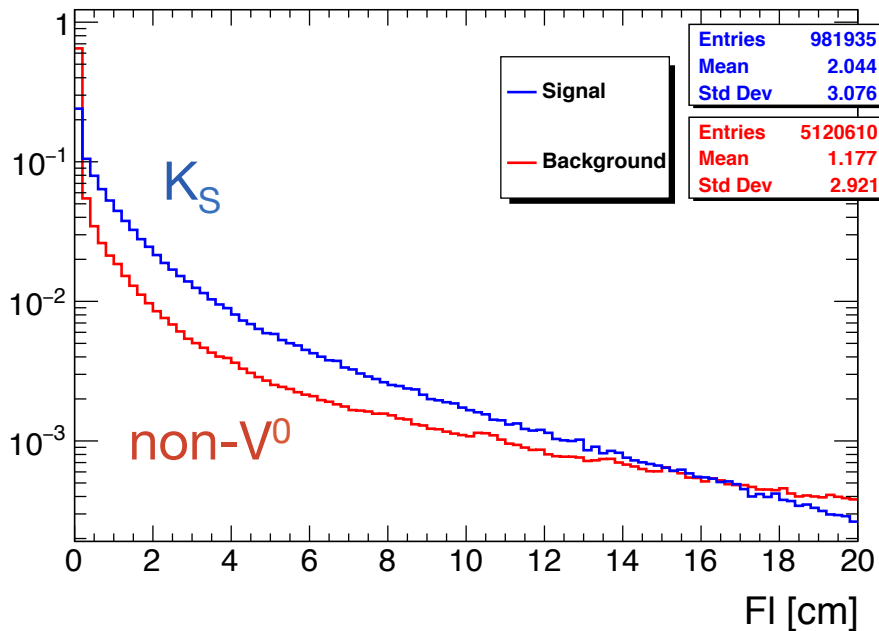


DistZ xy平面で見た2円の交点
(or 最近接点) 間の3次元距離

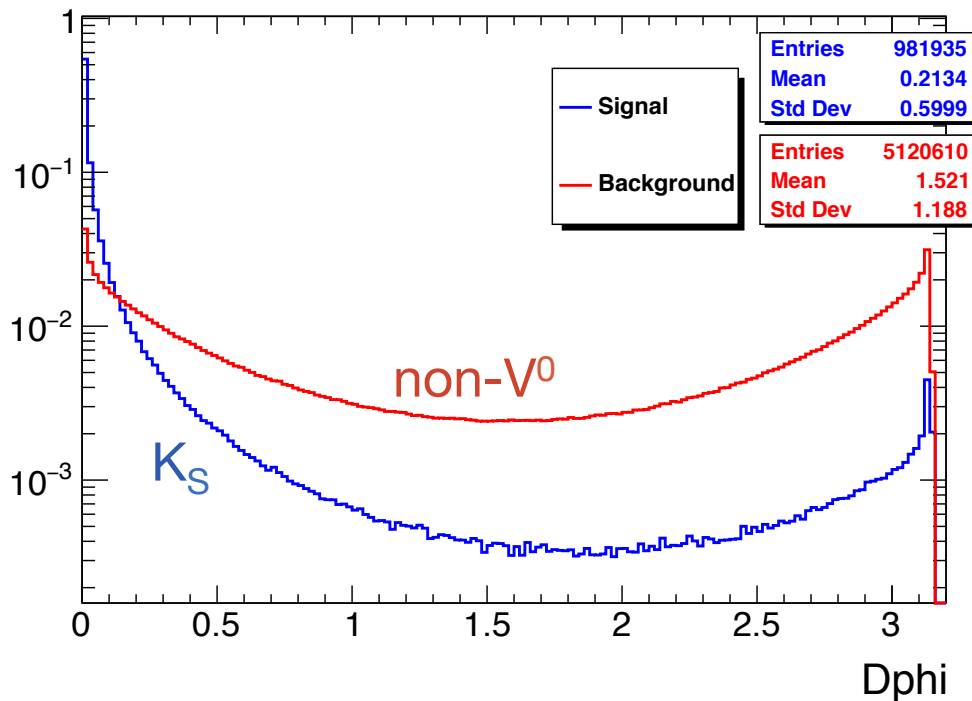
- 1点から生成するシグナルでは ~ 0



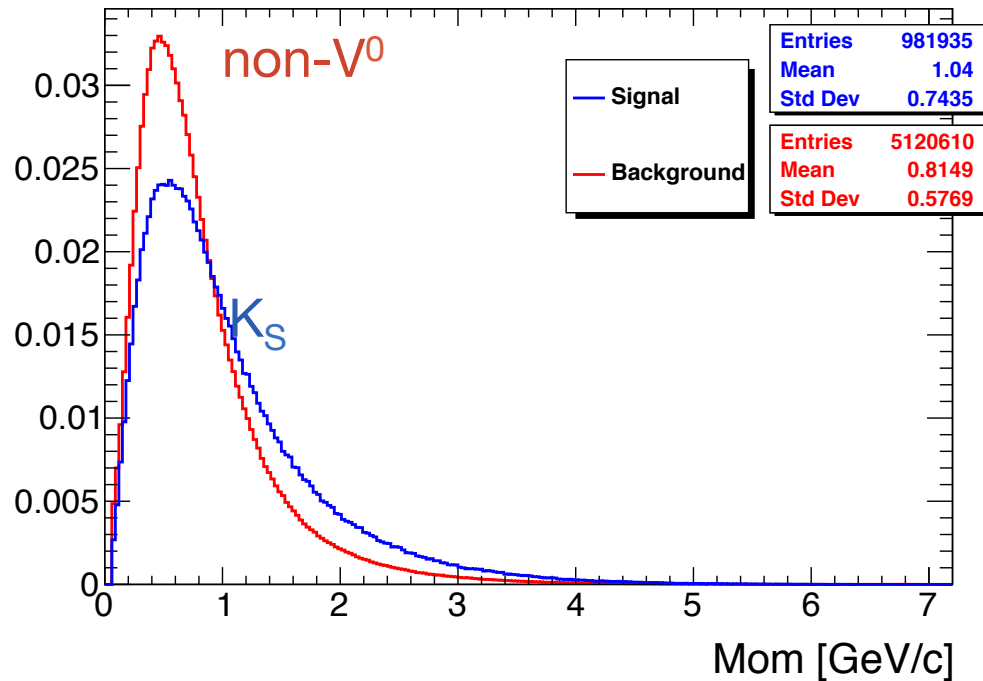
- **fl** (flight length) ビーム直交面での崩壊点までの距離
 - K_S は寿命が長いため分布が広い



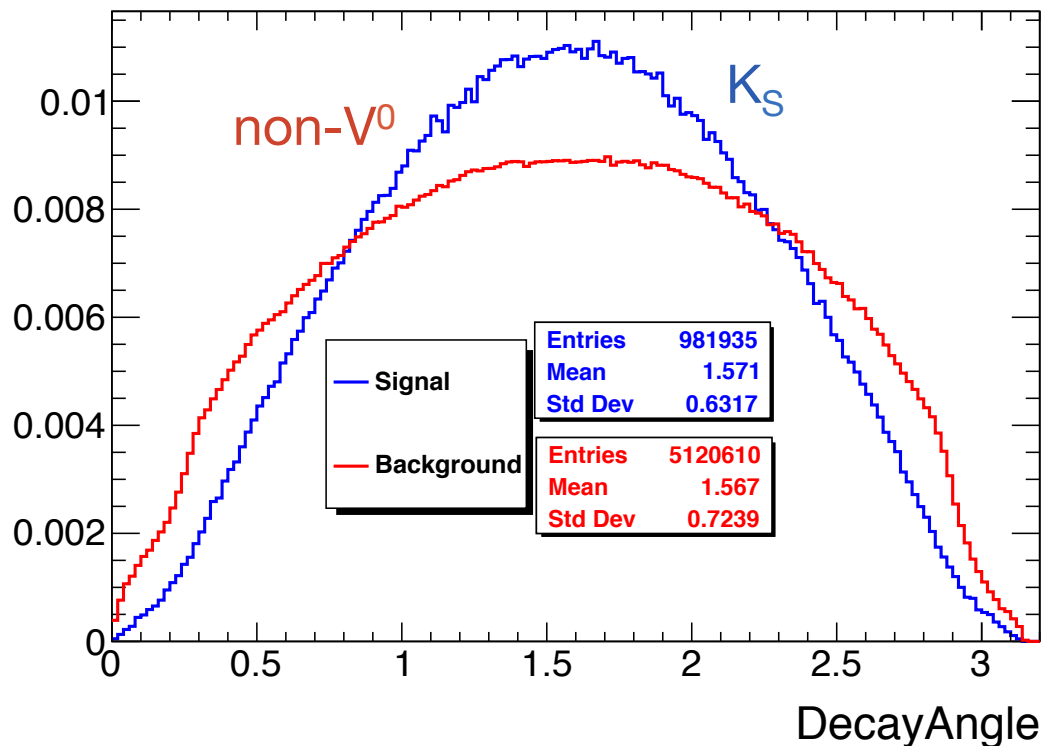
- **Dphi** K_S の運動量方向と崩壊点ベクトルとの間の角
 - K_S の多くは崩壊点から見た生成点がほぼIPと同じ→dphi \sim 0



● Mom K_S の運動量

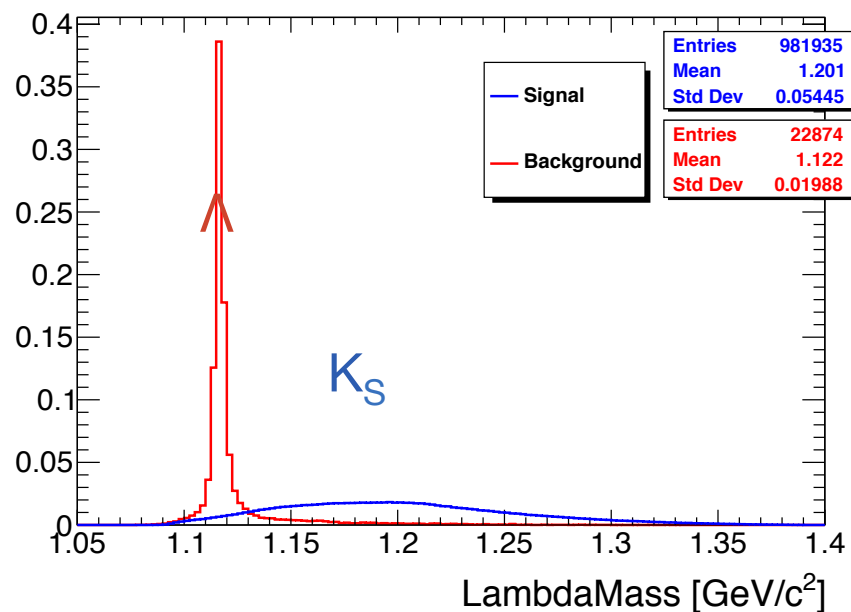


- **DecayAngle** K_S の運動量方向と、 K_S 系での π^+ の運動量方向との間の角
 - K_S はスカラーなのでcosineに対して均一分布をする



● LambdaMass

- 2軌跡の片方にproton質量を仮定して $\Lambda \rightarrow p\pi$ として不変質量を計算
- nominal $1.116 \text{ GeV}/c^2$ に近い値を採用
- Λ はnominal値でピーク

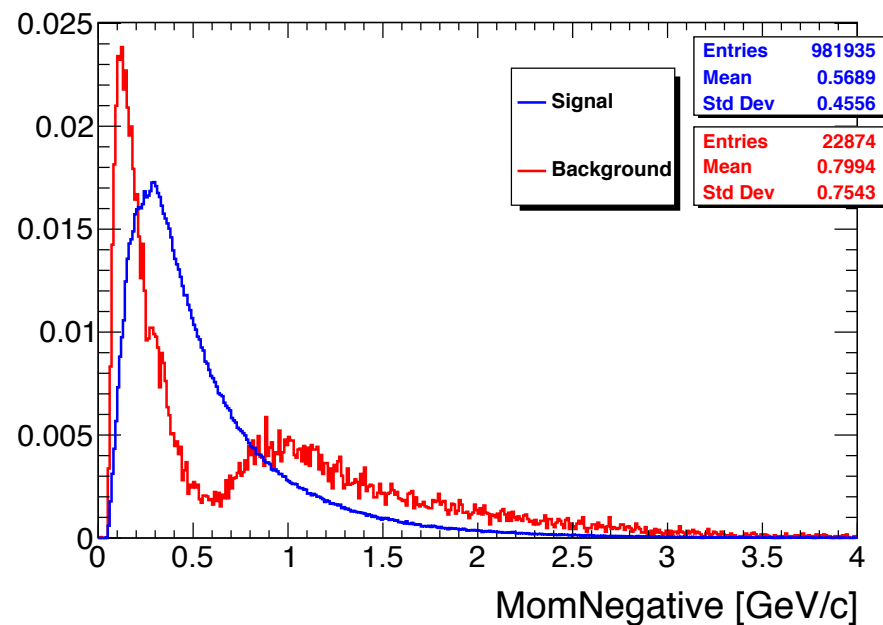
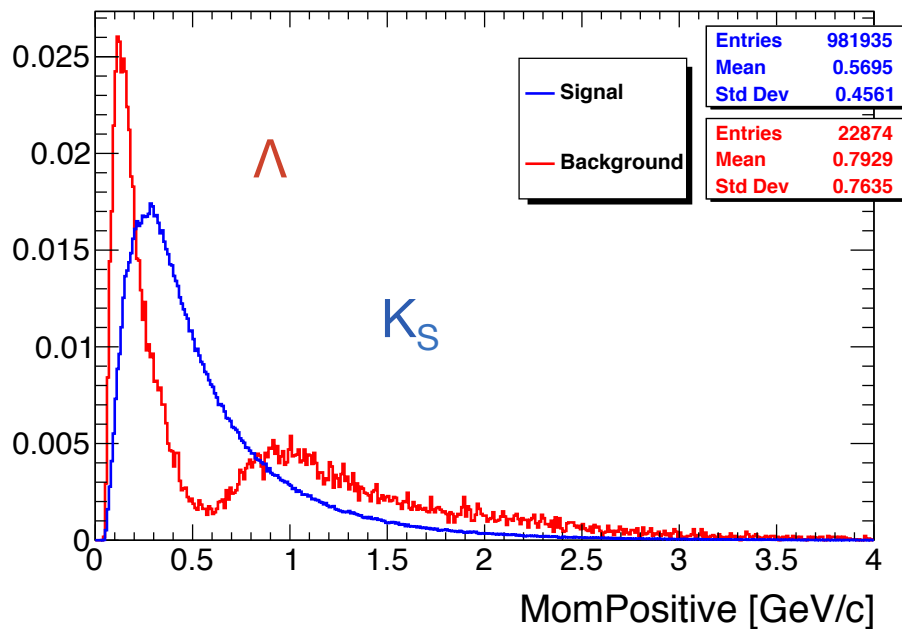


- MomPositive

- +軌跡の運動量

- MomNegative

- -軌跡の運動量

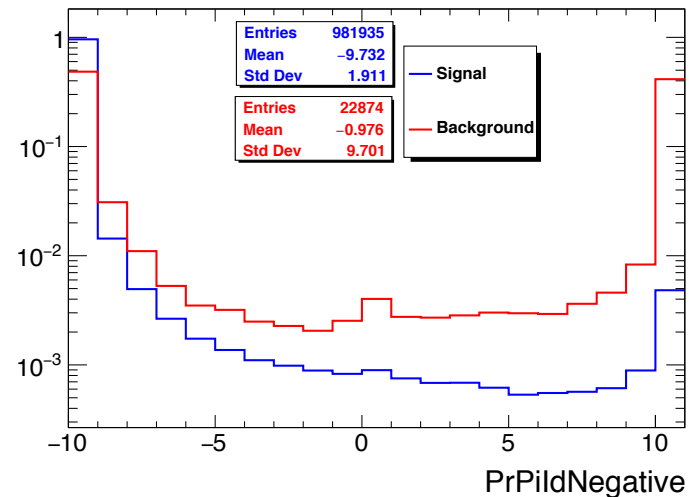
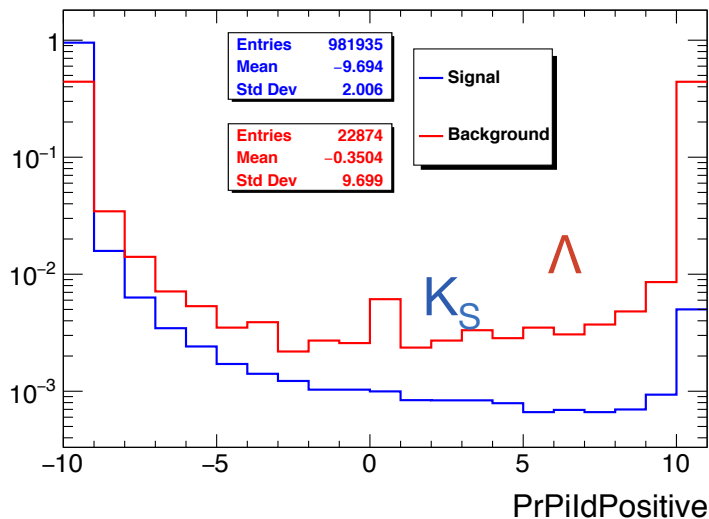


● PrPildPositive

- +軌跡のproton ID
- π に対する尤度比として得られる
- Λ では片方がproton

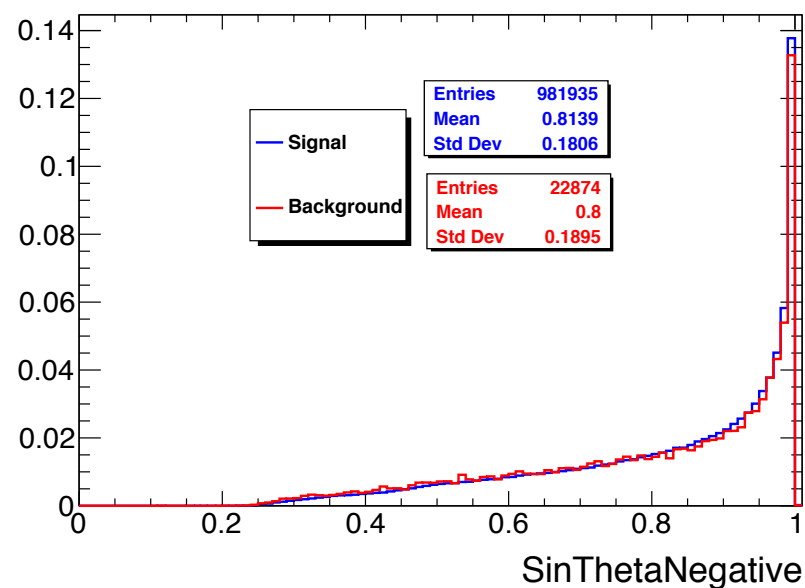
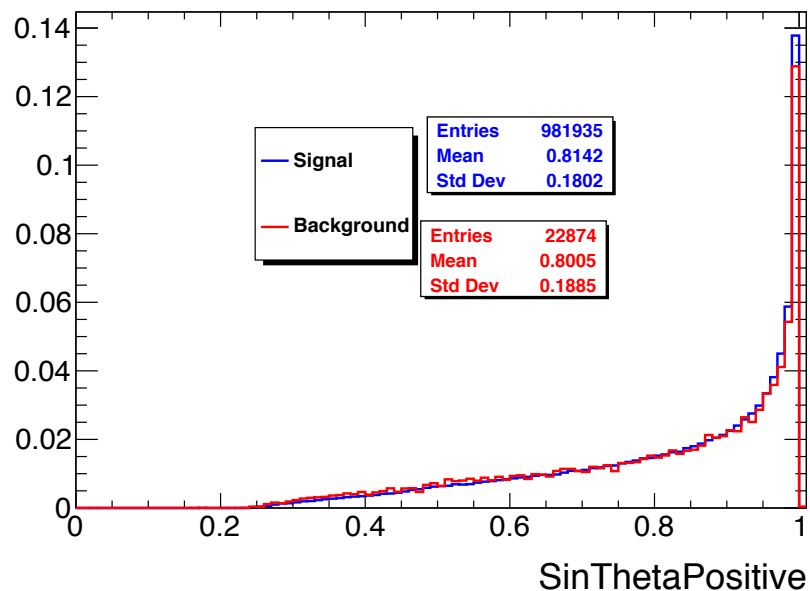
● PrPildNegative

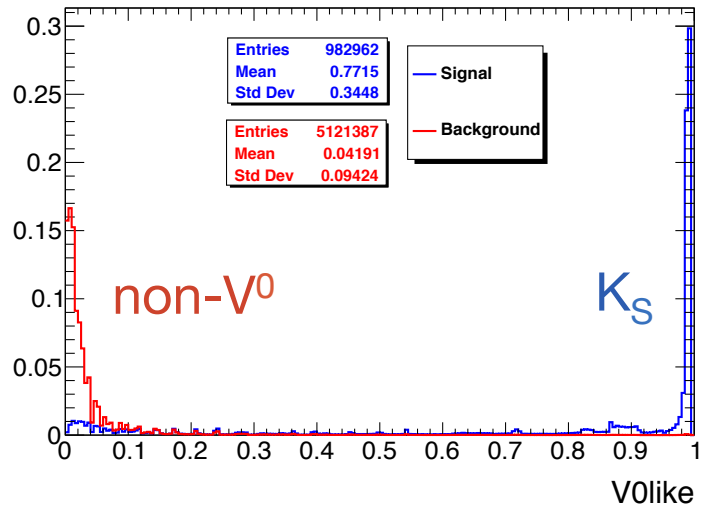
- -軌跡のproton ID



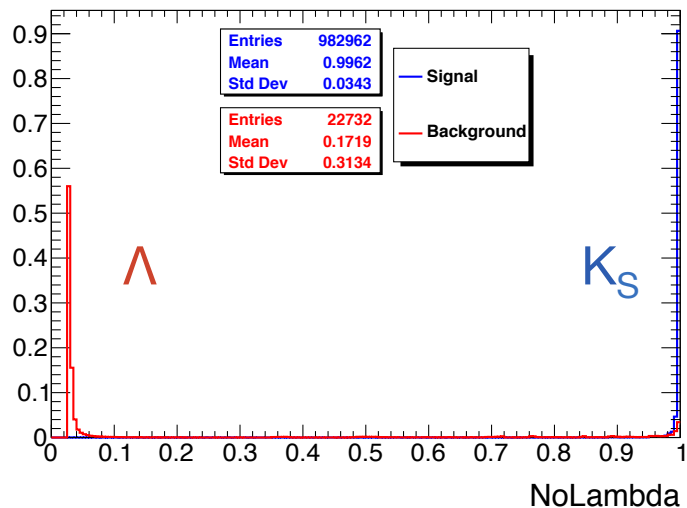
● $\sin\theta$: 軌跡のpolar angle

- Belle1では若干の分布の差があったがここでは見られなかった





- 挙げてきた変数 (13+7) から、 V^0 likeとNoLambdaを計算
- 2つの多変量解析によって non- V^0 とLambdaが効率よく分離できる



purity vs efficiency plot

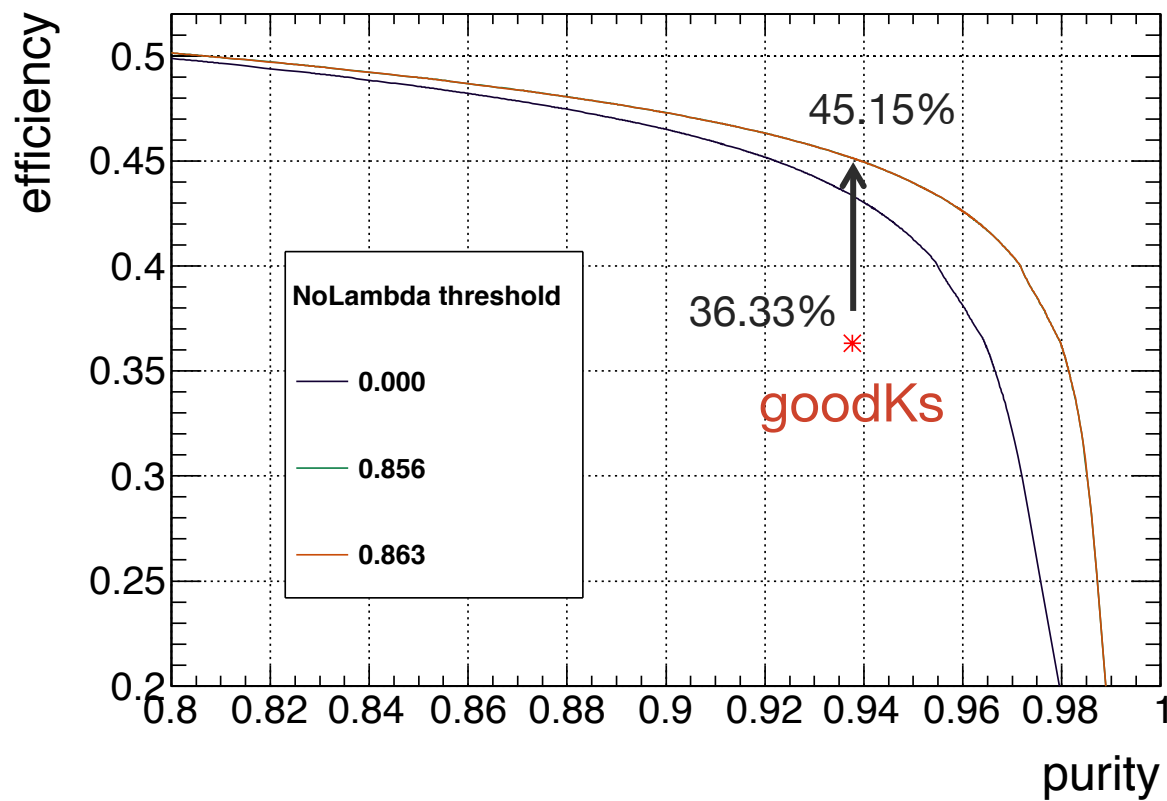
NoLambda閾値を下の3つの値に固定して、V0like閾値を変化させてプロット

- NoLambdaを使わない場合

- NoLambda閾値=0とし、V0like閾値を変化させてpurity vs efficiencyをプロット (黒い線)

- NoLambda閾値を次のように決めた場合

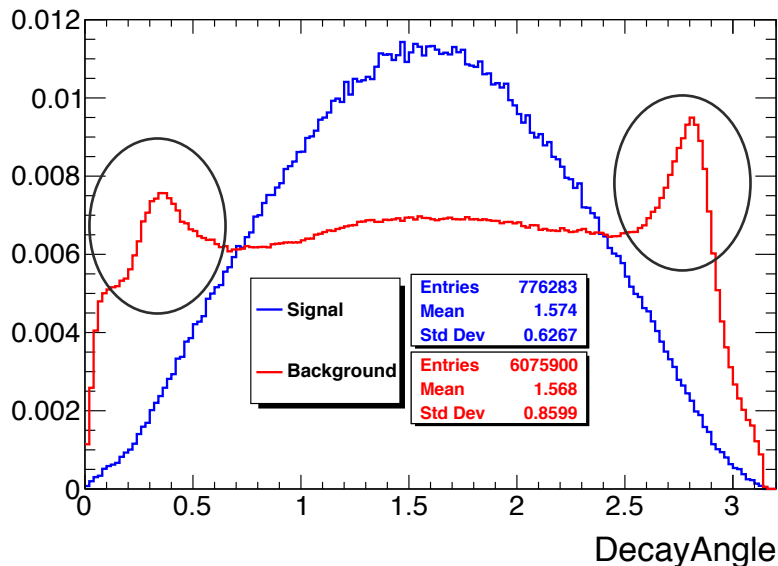
- NoLambda閾値を変化させて、上のようにプロットしたとき、purity=94%でefficiencyが最大になるNoLambda閾値。"94%"は旧NisKsFinder (Belle) の標準閾値でのpurity (緑の線)
- 94%の代わりに、goodKs (標準閾値)をBelle IIデータに適用したときのpurity (93.76%) を使った場合 (橙の線)



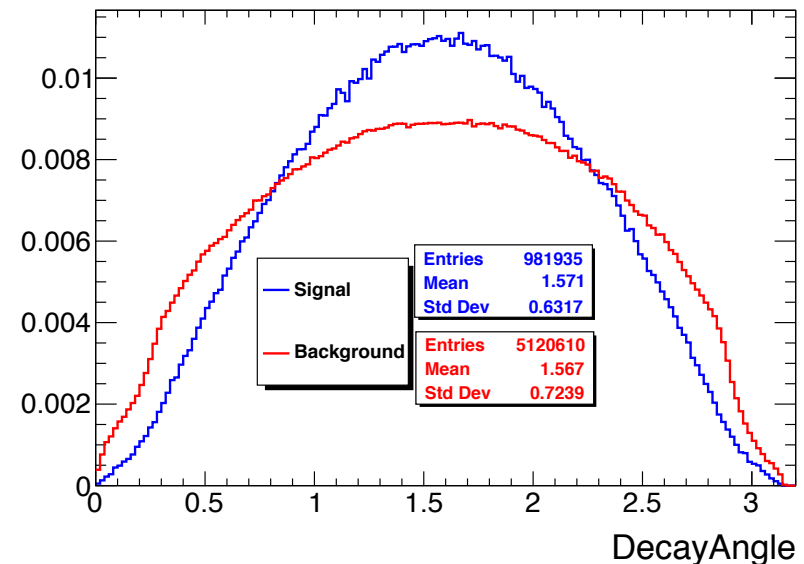
- goodKsの1.24倍のefficiencyでK_Sが得られた

- BGx1では検出効率の低下によって選別パフォーマンスも悪化すると考えられる

BGx1

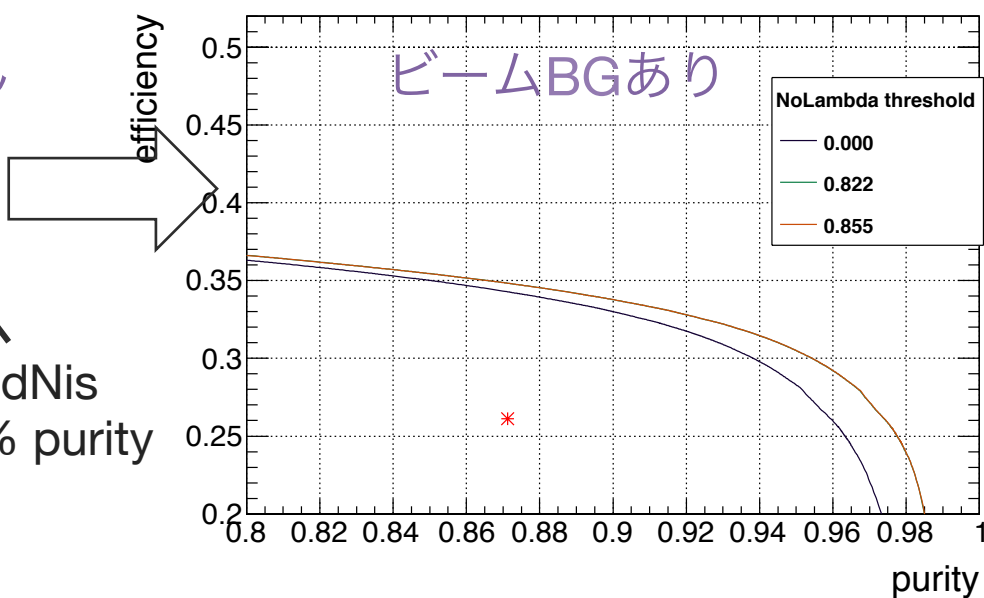
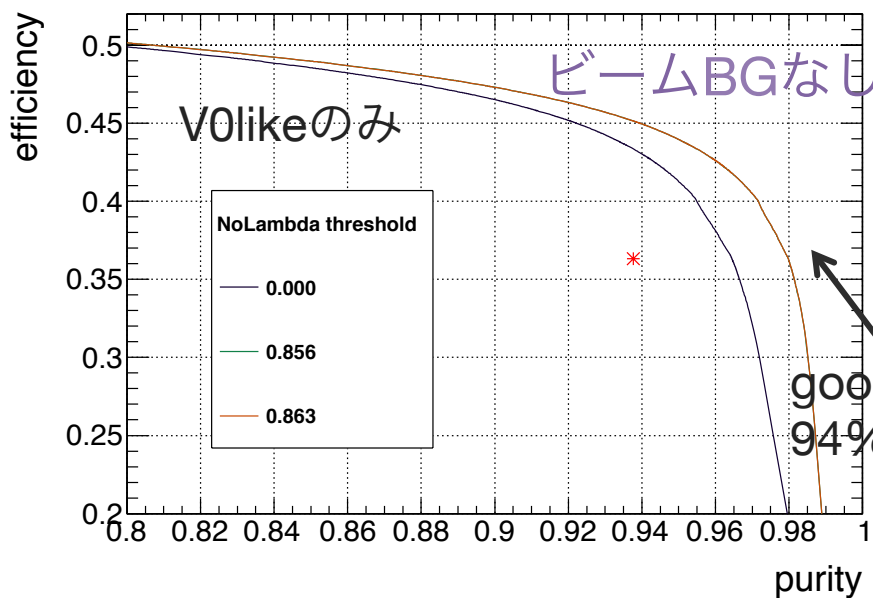


BGx0



- ビームBGによって K_S のefficiencyが低下する

purity 94% : 44.96% → 31.46% (緑の線)



- Belleで使われているV0finderとNisKsFinderを導入したことで、BGx0レベルではBelleと同程度の K_S efficiencyが期待できる
- Belleとの比較、あるいはBGx0とBGx1との比較を行うために、Belleと同等の条件で $B^+ \rightarrow K_S \pi^+ \gamma$ を再構成した。

- $B \rightarrow K^{*\pm}\gamma$ に対するefficiencyを比較
- BGx0はBelleと同じ程度のefficiencyを達成
- BGx1は2割近く低い値となった
- Belleの20倍のレベルで生じるビームBGがtrackingと選別効率を悪くしている

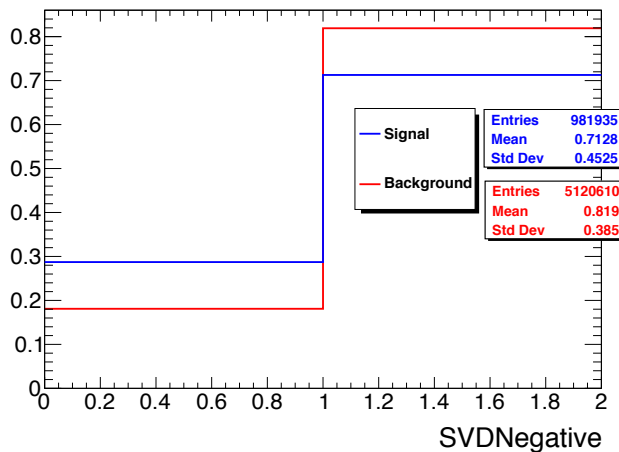
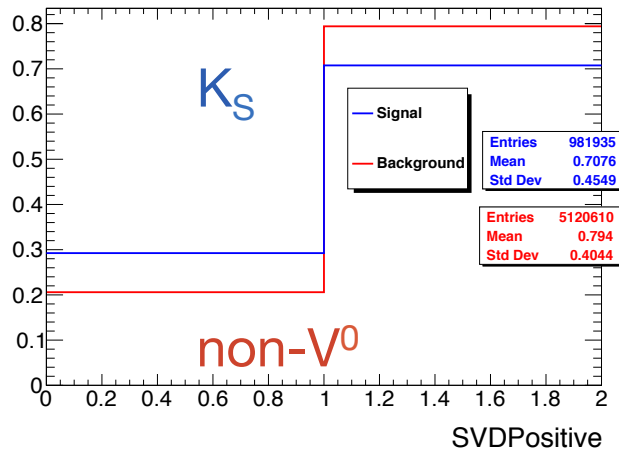
Belle [Horiguchi 2016] でのefficiency = 7.96%

サンプル	$B \rightarrow K^{*\pm}\gamma$ 生成数	(内 $B \rightarrow K_S\pi^{\pm}\gamma$)	再構成シグナル数	efficiency (%)
BGx0	1,884,877	600,280	146,961	7.796
BGx1	1,885,077	601,064	116,649	6.188

- Belle II実験においてV0finderとNisKsFinder (FastBDT) を使った $K_S \rightarrow \pi^+\pi^-$ 再構成を実装した
- K_S のpurity 94%でBelleの標準であった K_S Finder goodKsより1.24倍のefficiencyを達成 (ビームBGなしの場合)
- Belleにおいて、V0finderとNisKsFinder (NeuroBayes) を使ったときとほぼ同じefficiencyとなった (ビームBGなしの場合)
- Belle IIの高いビームBGによって K_S のefficiencyが30.0%低下することが判明

● SVDPositive(π^+)/ SVDNegative(π^-)

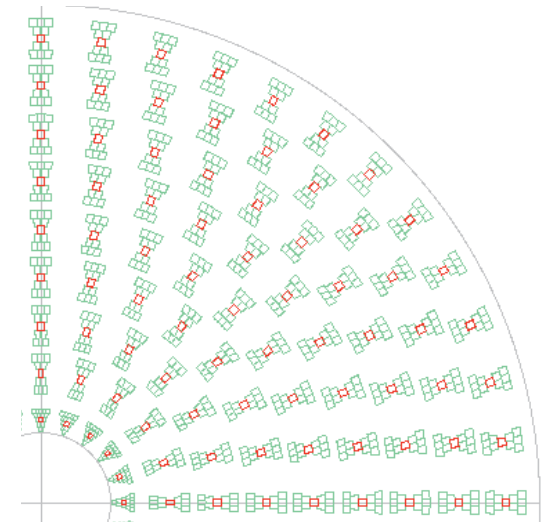
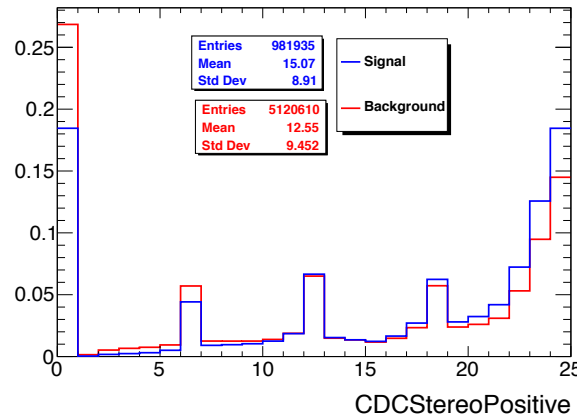
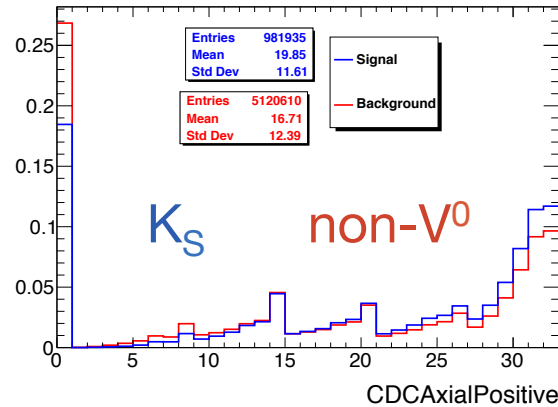
- π^+/π^- がVXDにヒットをもてば1, もたなければ0
- K_S はVXDの外で崩壊する確率がより高い



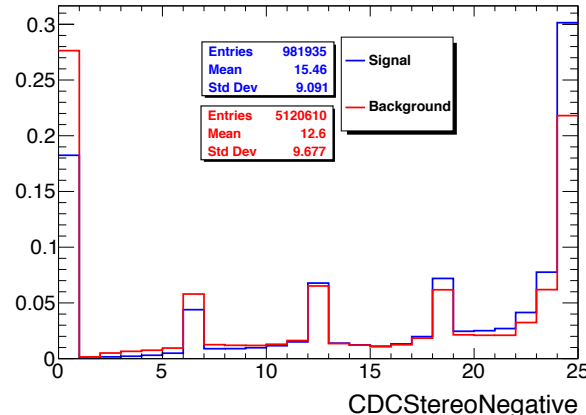
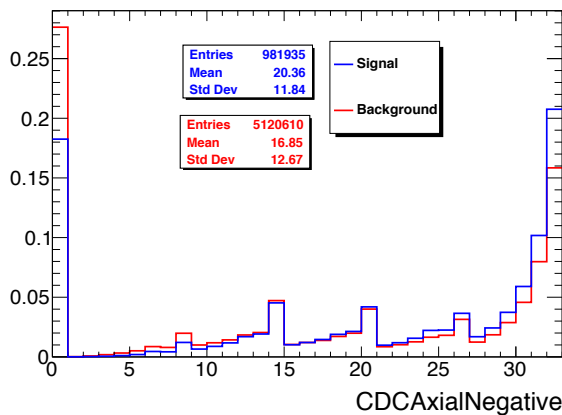
π⁺/π⁻のCDCへのヒット数

● axialレイヤー

● stereoレイヤー



CDCは各スーパーレイヤーに6層のレイヤーをもつ

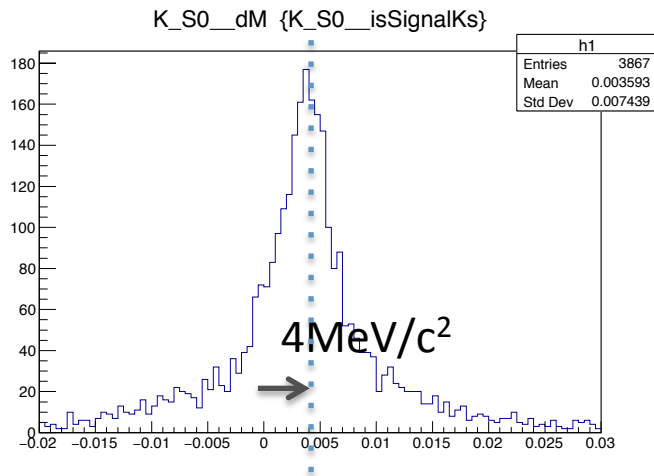


V0finderによる問題

本研究で用いているV0finderに K_S 質量の計算が高くずれるバグがあった

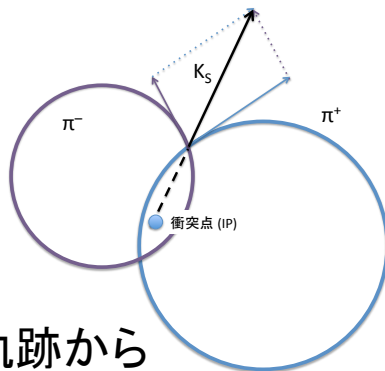
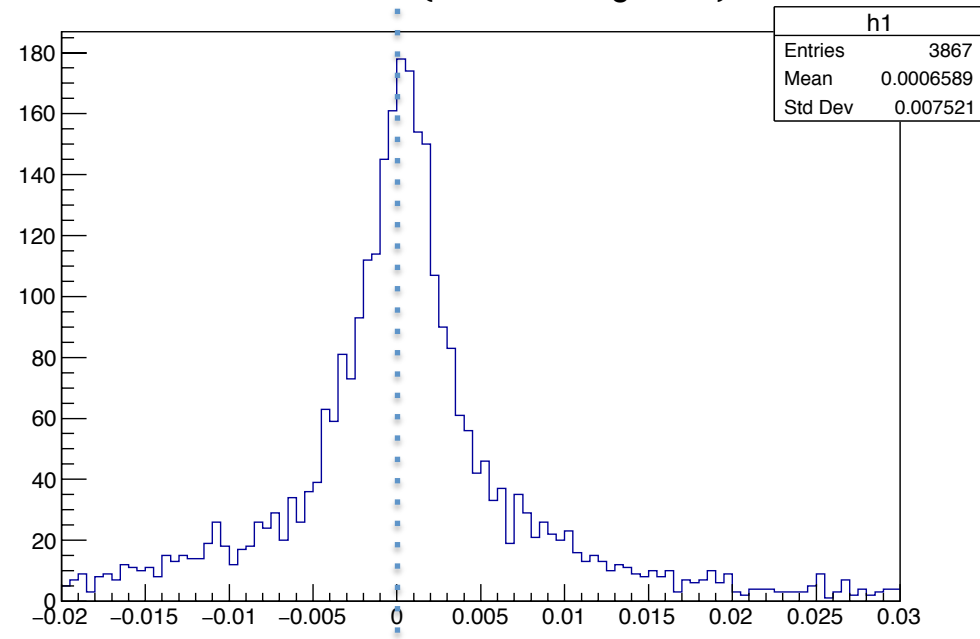
K_S のefficiencyと多変量解析に影響

1/25(水)夕方に発見



今日になって修正できた (磁場の取得方法が原因)

K_S0_dM {K_S0_isSignalKs}



V0finderは荷電軌跡から
中性 V 粒子を再構成するツール
KEKの住澤さんがBelleのV0finderを移植

- 結果が大きく変わる
- 再評価が必要