



TOHOKU
UNIVERSITY

$B \rightarrow X_s \gamma$ の崩壊分岐比 と非対称度の測定

齋藤 智之 (東北大学)

2012/11/06 B workshop @ 花巻

目次

1、イントロダクション

- ・ $b \rightarrow s \gamma$ 遷移とは
- ・ 解析手法

2、MCによる解析 □

- ・ シグナル再構成
- ・ バックグラウンドの除去
- ・ 統計エラーの見積もり

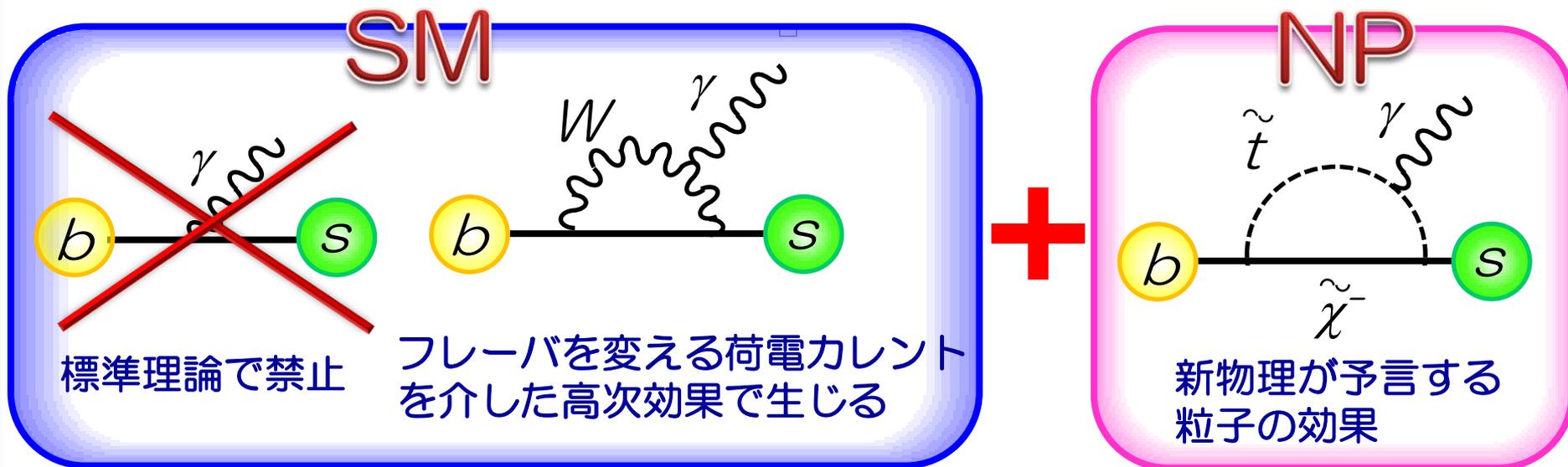
イントロダクション

$b \rightarrow s \gamma$ 遷移

- 標準理論：ツリーレベル禁止 (Flavor Changing Neutral Current)
1ループのペンギンダイアグラムで起こる

→ ループを回る重い新粒子 ($H^\pm, \tilde{\chi}^\pm, \tilde{t}$ 等) への感度大

- 膨大な γ の背景事象 → LHCbでは難しい測定



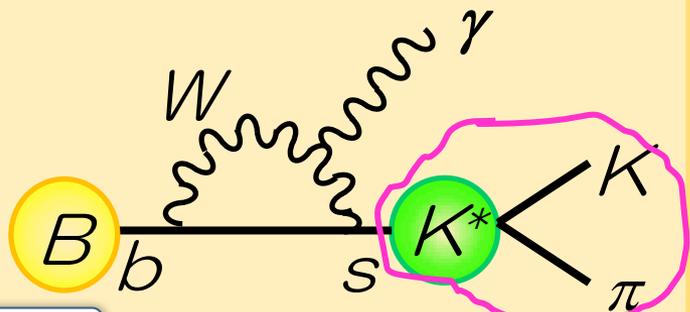
崩壊分岐比と非対称度を測定し標準理論からのずれを検証

崩壊分岐比測定手法

$b \rightarrow s\gamma$ の崩壊分岐比測定

排他的

Exclusive 崩壊測定
崩壊モードを特定して観測



特徴

- 理論的に厳しい
form factorの不定性大で
理論誤差大 \rightarrow 新物理の感度低
- 実験的には比較的易しい

理論エラー大

崩壊分岐比測定手法

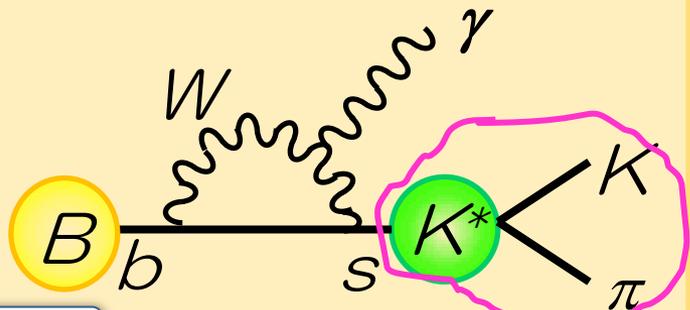
$b \rightarrow s\gamma$ の崩壊分岐比測定

排他的

包括的

Exclusive 崩壊測定

崩壊モードを特定して観測



特徴

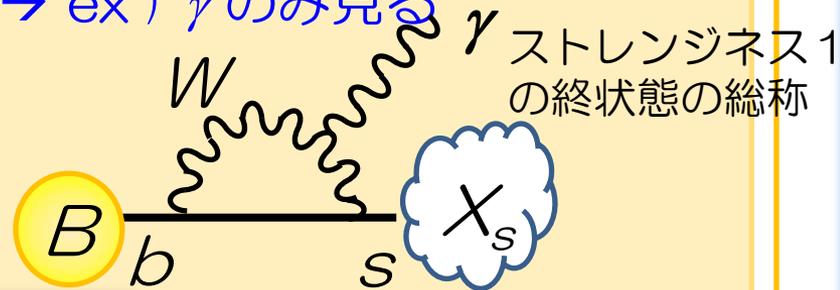
- 理論的に厳しい
form factorの不定性大で
理論誤差大 → **新物理の感度低**
- 実験的には比較的易しい

理論エラー大

Inclusive 崩壊測定

多くの終状態をまとめて観測

→ ex) γ のみ見る



特徴

- ハドロン化の不定性関係
ないので理論の誤差小
→ **新物理に感度大**
- 実験的に大変

ストレンジネス1
の終状態の総称

新物理探索には**Inclusive(包括的)測定**が有用

Inclusive崩壊測定

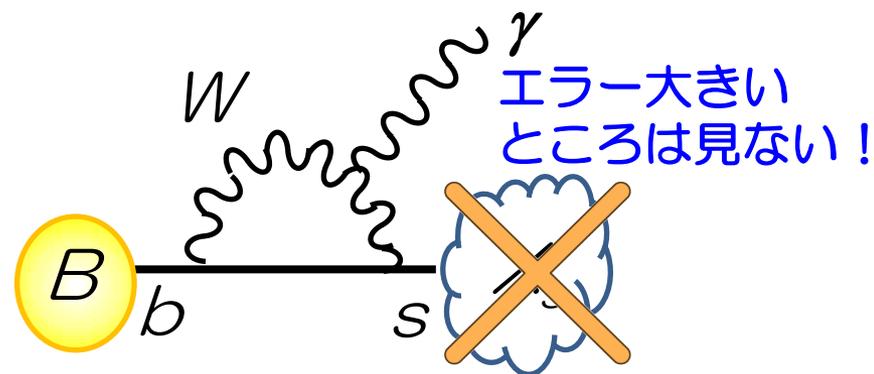
X_s が何に崩壊するか(ハドロン化)がエラー大きい!

→ 対策の違いで2つの解析手法

Full-inclusive 再構成

(γ のエネルギーのみ測定)

- 理論の不定性非常に小さい
- バックグラウンドの除去大変
- 検出器、バックグラウンドの精密な理解必須



Inclusive崩壊測定

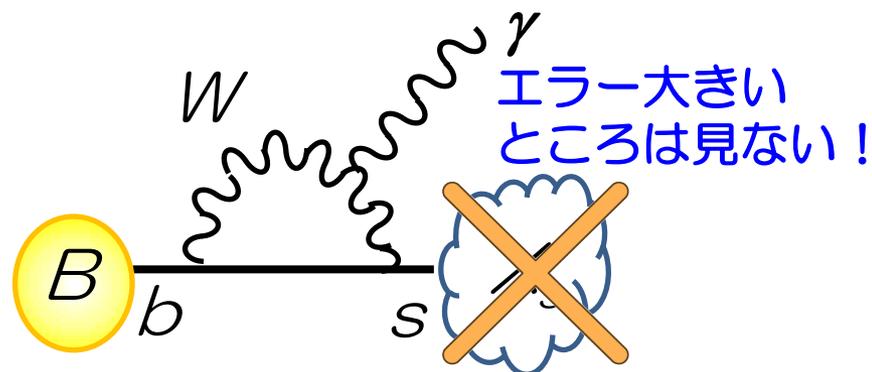
X_s が何に崩壊するか(ハドロン化)がエラー大きい!

→ 対策の違いで2つの解析手法

Full-inclusive 再構成

(γ のエネルギーのみ測定)

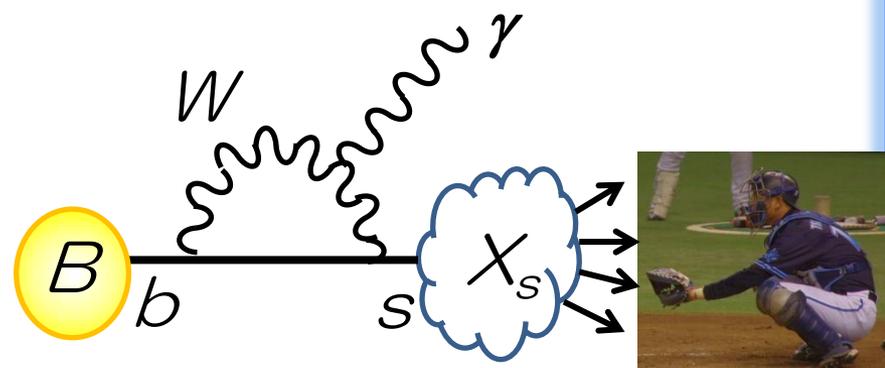
- ・理論の不定性非常に小さい
- ・バックグラウンドの除去大変
- ・検出器、バックグラウンドの精密な理解必須



Semi-inclusive再構成

(X_s を複数の崩壊モードから再構成)

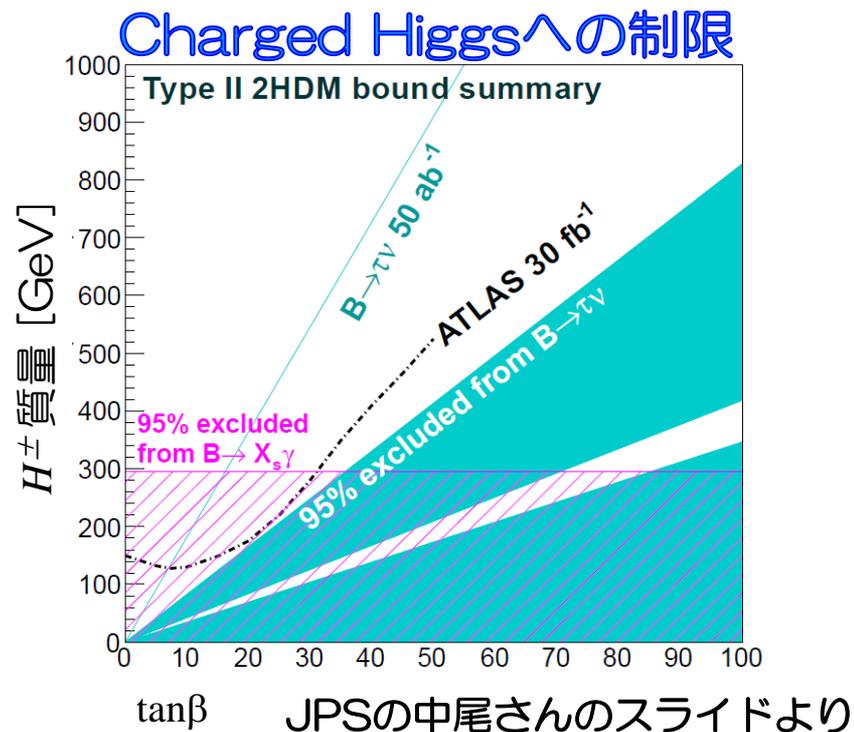
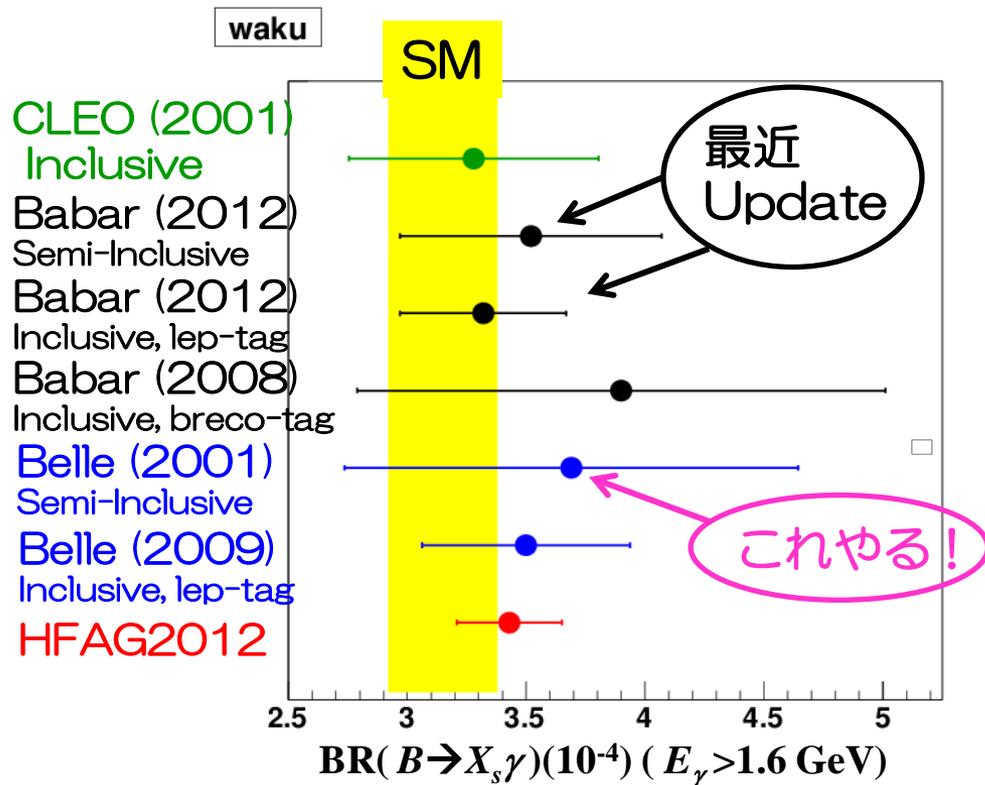
- ・理論の不定性小さい
- ・実際にBを再構成しているのでバックグラウンド抑制可



どんなモードも全部取る!

= X_s が何に崩壊してようが関係ない

$B \rightarrow X_s \gamma$ 崩壊分岐比の現状



HFAG 2012 : $BR = (3.43 \pm 0.22) \times 10^{-4}$ ($E_\gamma > 1.6$ GeV)

SM(NNLO) : $BR = (3.15 \pm 0.23) \times 10^{-4}$ ($E_\gamma > 1.6$ GeV)

Semi-Inclusive手法で $BR(B \rightarrow X_s \gamma)$ を測定する

Semi-inclusive法による シグナル再構成

X_s の終状態

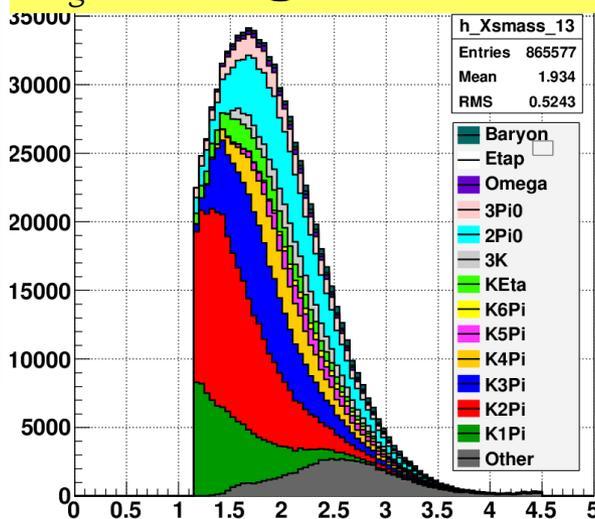
● X_s にどんな終状態が含まれているか？

→ MC(Pythia)でチェック

	割合(%)
$K\pi$	11.7
$K2\pi$	24.7
$K3\pi$	15.3
$K4\pi$	7.2
$K5\pi$	2.7
$K6\pi$	0.9
$K\eta$	4.3
$3K$	3.5
$2\pi^0$	13.7
$3\pi^0$	4.8
ω	1.1
η'	0.7
Baryon	1.1
Other	8.3

π^0 は1つまで

X_s の質量 (generator level)



できれば全て再構成したい!

(=ハドロン化の系統誤差最小)

しかし...

- 粒子数多モード ($K5\pi$ 等)
- π^0 や η を複数含むモード

→ efficiency低いかつ

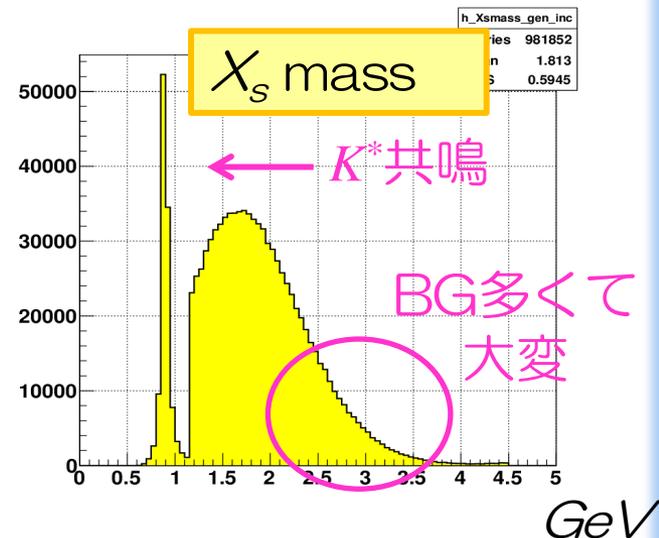
BGが多くて測定困難

どこまで再構成できるかはやってみなければわからない

Semi-Inclusive手法のポイント

X_s の質量領域について

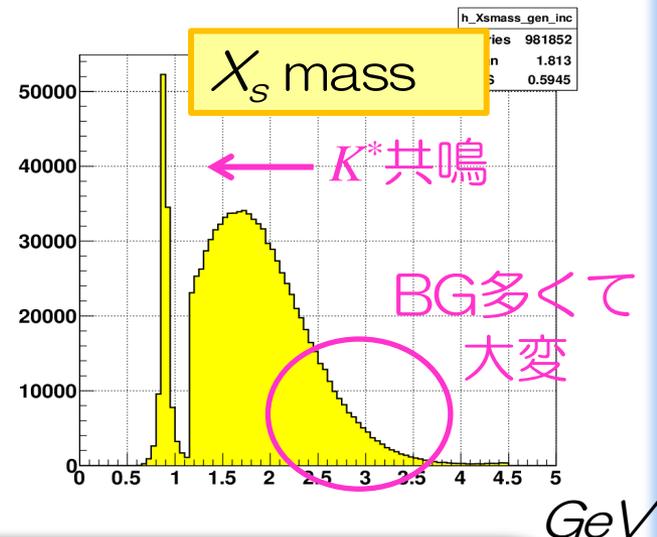
- M_{X_s} の低い領域は K^* 共鳴
- M_{X_s} の高い領域 → 2.8GeV位が限界
 - ▶ 多体崩壊しやすい → 再構成効率低
 - ▶ 低エネルギーの γ BG大 □



Semi-Inclusive手法のポイント

X_s の質量領域について

- M_{X_s} の低い領域は K^* 共鳴
- M_{X_s} の高い領域 → 2.8GeV位が限界
 - ▶ 多体崩壊しやすい → 再構成効率低
 - ▶ 低エネルギーの γ BG大 □



Key Point : いかに系統誤差を抑えるかが勝負

- 📌 X_s のハドロン化の誤差
- 📌 再構成していないモードの割合の誤差
 - ▶ ▶ ▶ より多くの X_s の終状態を再構成することが重要
 - ▶ ▶ ▶ より高い X_s の質量領域を理解が重要

Semi-inclusive法によるイベント再構成

- たくさんの $B \rightarrow X_s \gamma$ の終状態を再構成
- 現在までに**35の終状態**を再構成
(以前のBelleの解析から19モード追加)

$X_s \rightarrow K\pi, K_s\pi, K\pi^0, K_s\pi^0$	(K π)
$K\pi\pi, K_s\pi\pi, K\pi\pi^0, K_s\pi\pi^0$	(K2 π)
$K\pi\pi\pi, K_s\pi\pi\pi, K\pi\pi\pi^0, K_s\pi\pi\pi^0$	(K3 π)
$K\pi\pi\pi\pi, K_s\pi\pi\pi\pi, K\pi\pi\pi\pi^0, K_s\pi\pi\pi\pi^0$	(K4 π)
$KKK, KKK_s, KK_sK_s, KKK\pi, KKK_s\pi, KKK\pi^0, KKK_s\pi^0, KK_sK_s\pi, KK_sK_s\pi^0$	} (3K, 3K π)
$K\eta, K_s\eta, K\eta\pi, K_s\eta\pi, K\eta2\pi, K_s\eta2\pi$	
$K\pi^0\pi^0, K_s\pi^0\pi^0, K\pi\pi^0\pi^0, K_s\pi\pi^0\pi^0$	(K2 π^0 , K $\pi2\pi^0$)

X_s の終状態の73%をカバー (K* γ 含む)

シグナル領域

●シグナル領域： M_{bc} と ΔE で定義

$$5.27 < M_{bc}, \quad -0.15 < \Delta E < 0.08$$

$$M_{bc} \equiv \sqrt{(E_{beam}^*/c^2)^2 - (|\vec{p}_B^*|/c)^2} : B \text{ の不変質量に対応}$$

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

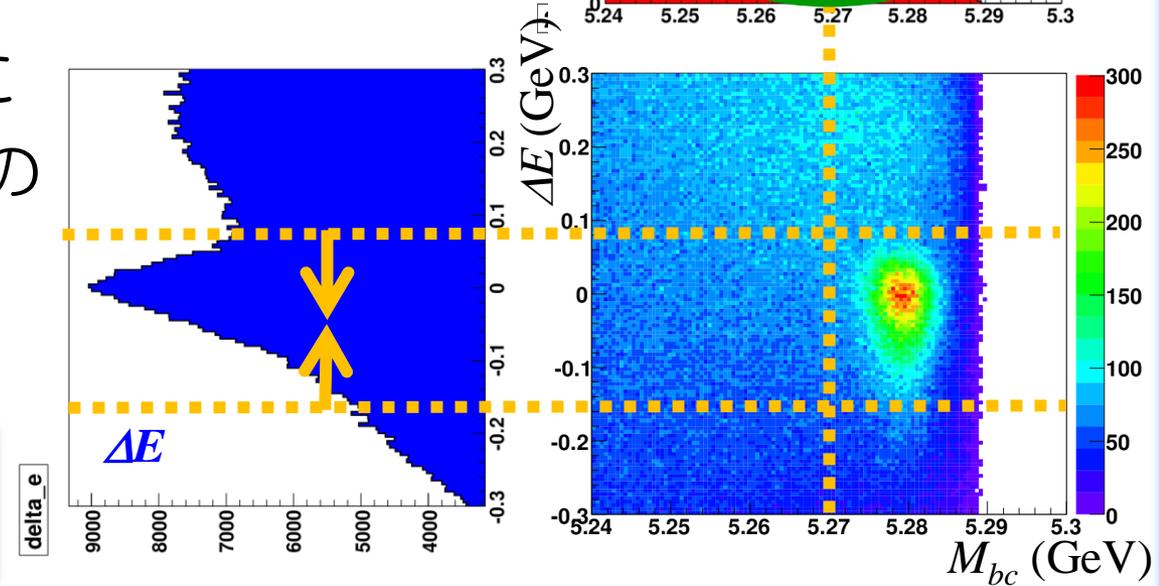
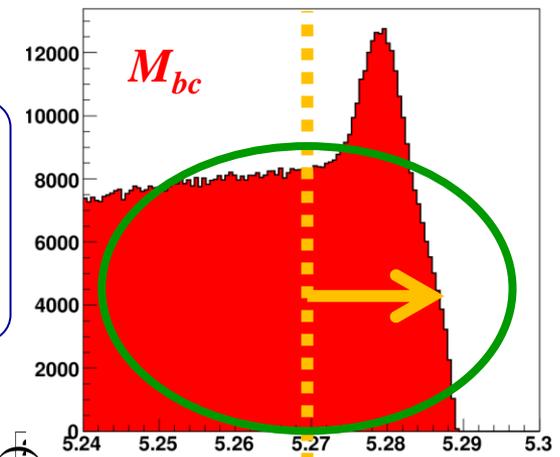
$$\Delta E \equiv E_{X_s}^* + E_\gamma^* - E_{beam}^* \quad B \text{ の } E \text{ の和と } E_{beam} \text{ の差}$$

- ▶ 最終的には M_{bc} で評価
- ▶ シグナルピークの下に多くのcross-feed (他のシグナルの混入)

→ 3.7 候補/イベント

シグナル候補の正しい選択が重要

シグナルだけ見た図



シグナルの最適候補選択

この B は $K\pi\gamma$? $K\pi\pi\gamma$?

以前の方法： X_s の崩壊点の情報や ΔE の分布を用いて選別。

⇒ **問題点**：崩壊点のない粒子や π^0 のあるなしでbiasがかかる。

新しく試した手法

● ΔE で評価

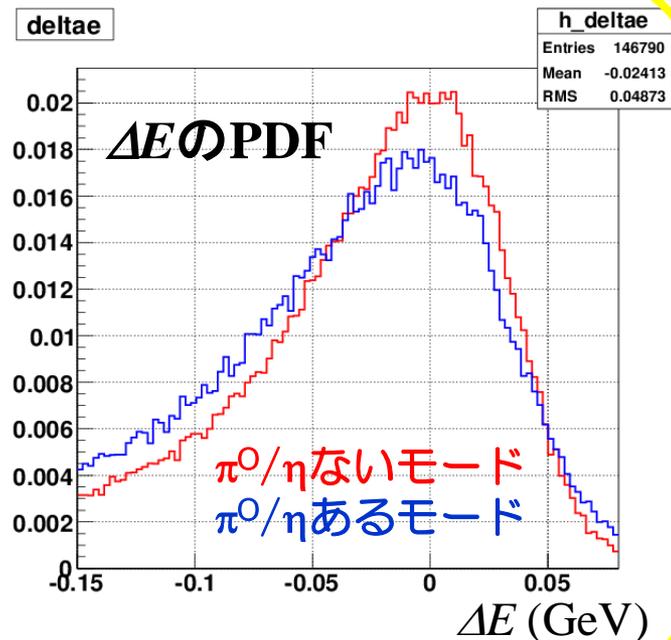
→ 0に近ければシグナルらしい

・ ΔE の分布は非対称

▶▶▶ **Likelihoodが最大の候補**
を選択

● 選択範囲：

$$5.24 < M_{bc}, \quad -0.15 < \Delta E < 0.08$$



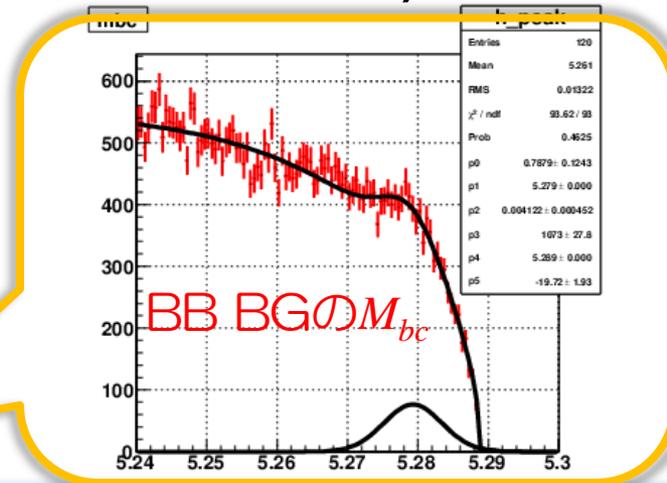
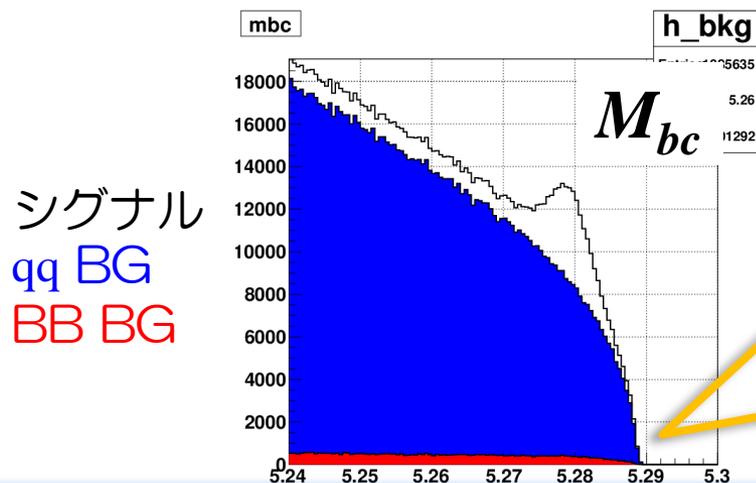
本手法で以前の問題点を改善かつ同等の結果が得られた。

バックグラウンドの除去

バックグラウンド

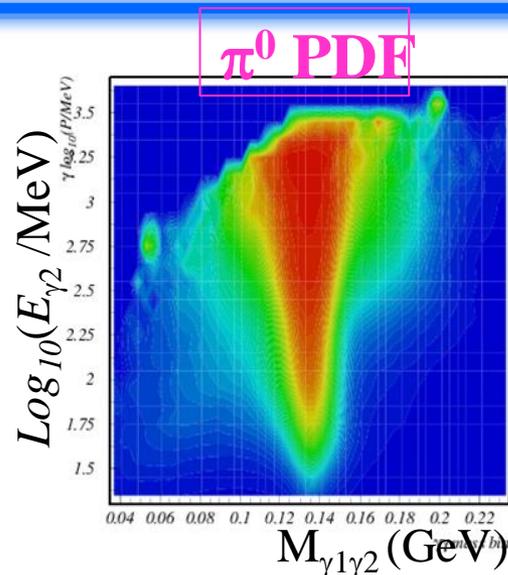
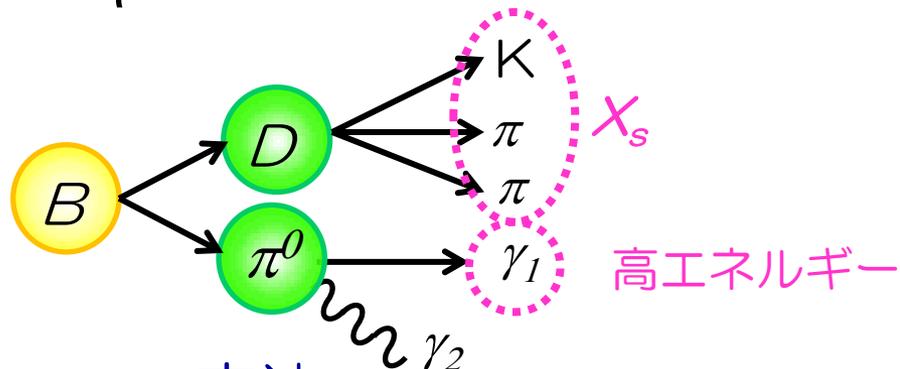
● バックグラウンドは2種類

- ▶ qq BG : 軽いクォーク(udcs)のジェットイベント
 - ・ 最大のBG
 - ・ イベントの形の違いに注目して除去
- ▶ Peaking BG : シグナル領域にピークをもつイベント
 - ・ 最後に M_{bc} をフィットする際にシグナルと間違える
→ 系統誤差となる
 - ・ B からの崩壊イベント ($B \rightarrow D\pi^0$ 、 $B \rightarrow D\rho$ 等)



Peaking BG抑制： π^0 / η Veto

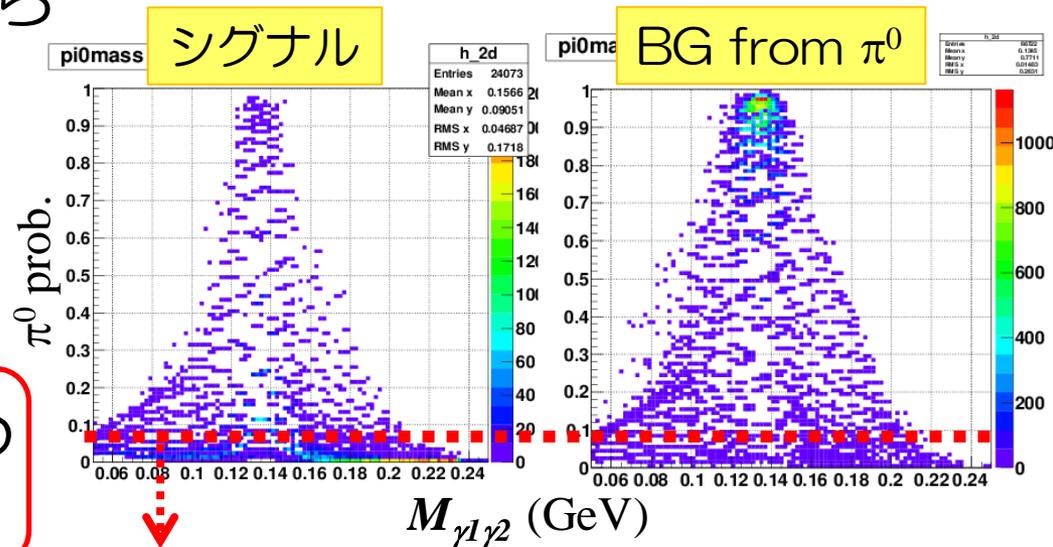
- π^0 や η からのBGがたくさん混入



▶ π^0 / η veto方法

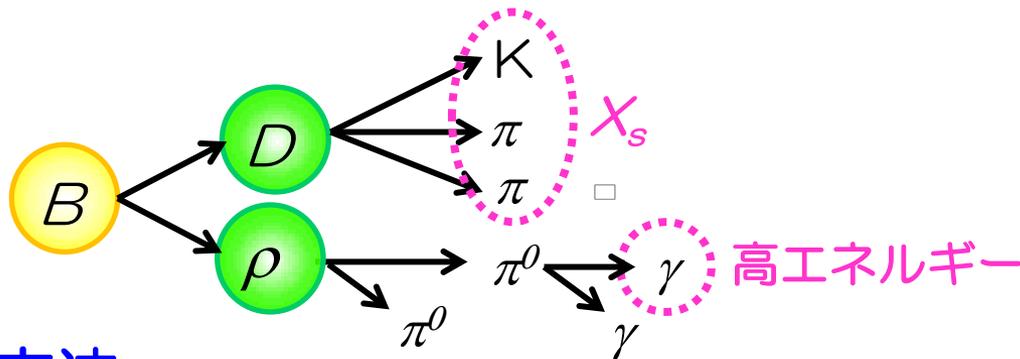
- ① $M_{\gamma_1 \gamma_2}$ と E_{γ_2} により π^0 からのBG PDFを得る。
- ② γ の候補毎に π^0 からの γ である確率を計算
- ③ π^0 prob. < 0.05 を選択

シグナルを72%保持しつつ
 π^0 からのBGを98%削減



Peaking BG抑制：D veto 1/2

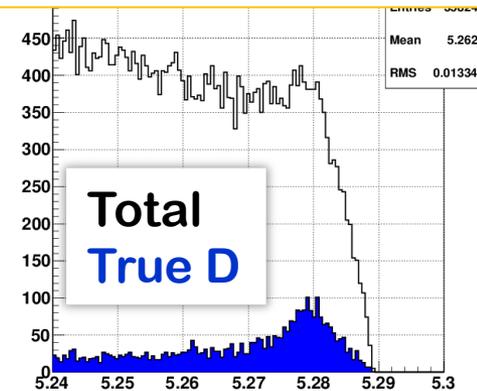
- DからのBGがたくさん混入。
 - ▶ 主に $B \rightarrow D\rho$ (BRが 10^3 倍以上)
 - ・ 幅の広い ρ の質量でのvetoは困難



D vetoの方法

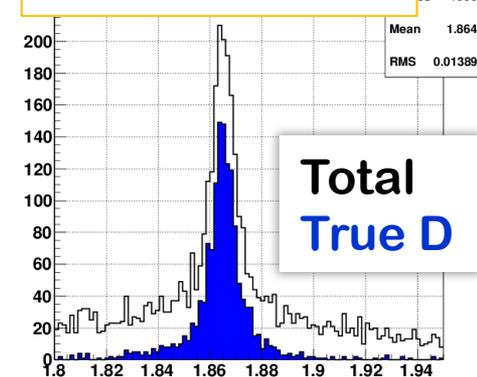
- ① X_s を再構成した粒子の組み合わせで無理矢理 Dを組み
- ② Dの質量に最も近い組み合わせを選ぶ。
- ③ Dの質量でveto

BBバックグラウンド M_{bc}



ピークはD起源

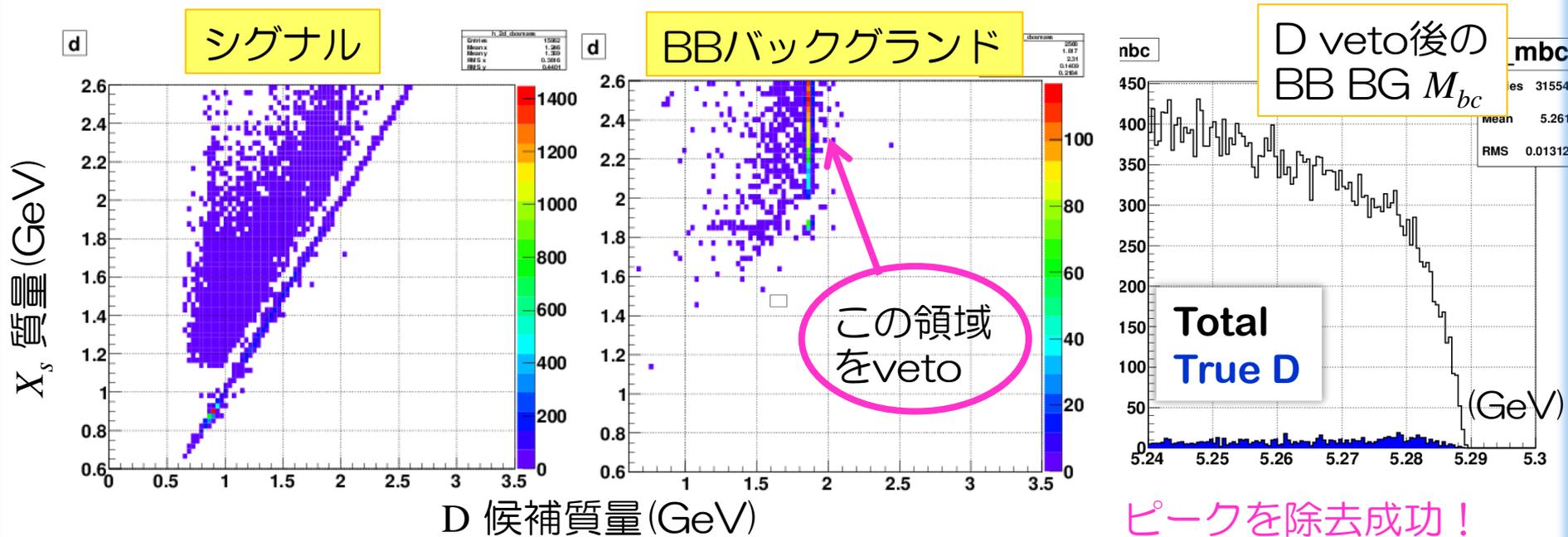
組んだ D の質量 d_{tr}



これは効果的だ！

Peaking BG抑制：D veto 2/2

- 再構成したD候補の質量を使ってVeto。

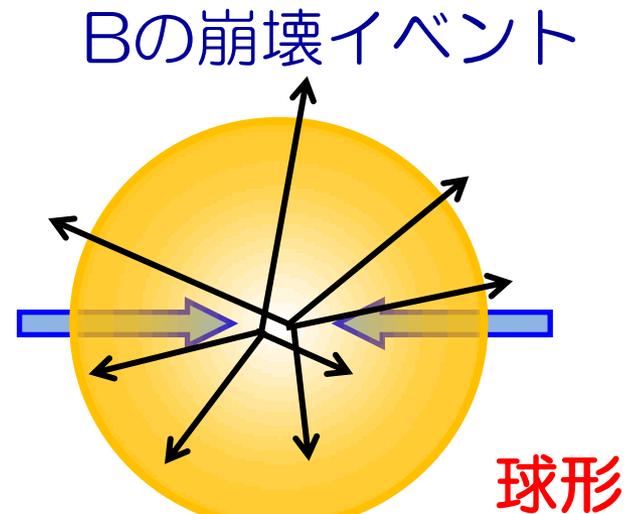
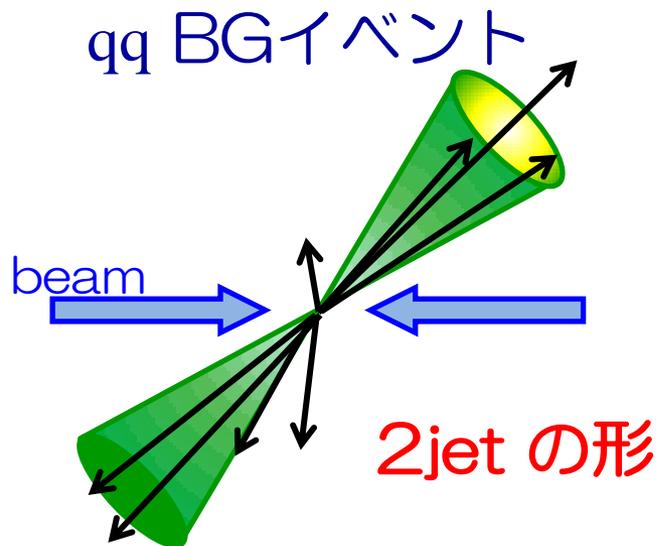


$M_{X_s} > 2.0$ GeVで1830-1900 MeV (7σ) をveto

- ▶ シグナルを97%保持しつつ、DからのBGを23%に低減
- ▶ M_{bc} のピークをほぼ除去できた

qq バックグラウンドの抑制

- 最も大きなBG源は軽いクォークのジェット (qq BG)
 - ▶ イベントの形を利用して抑制

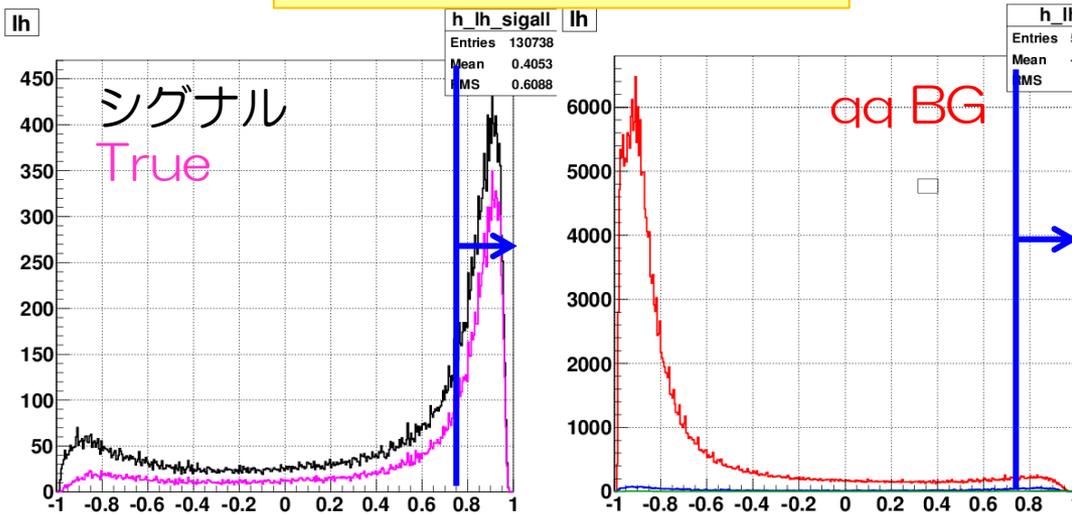


“イベント形状の変数 (Sphericity, Thrust等) 11個
+ フレーバタグの変数 = 合計12変数”
を使ってニューラルネットにより最適なSig-BG分離変数を計算

qq バックグラウンドの抑制

- ニューラルネットの出力を使ってqq BGを抑制

ニューラルネットの出力



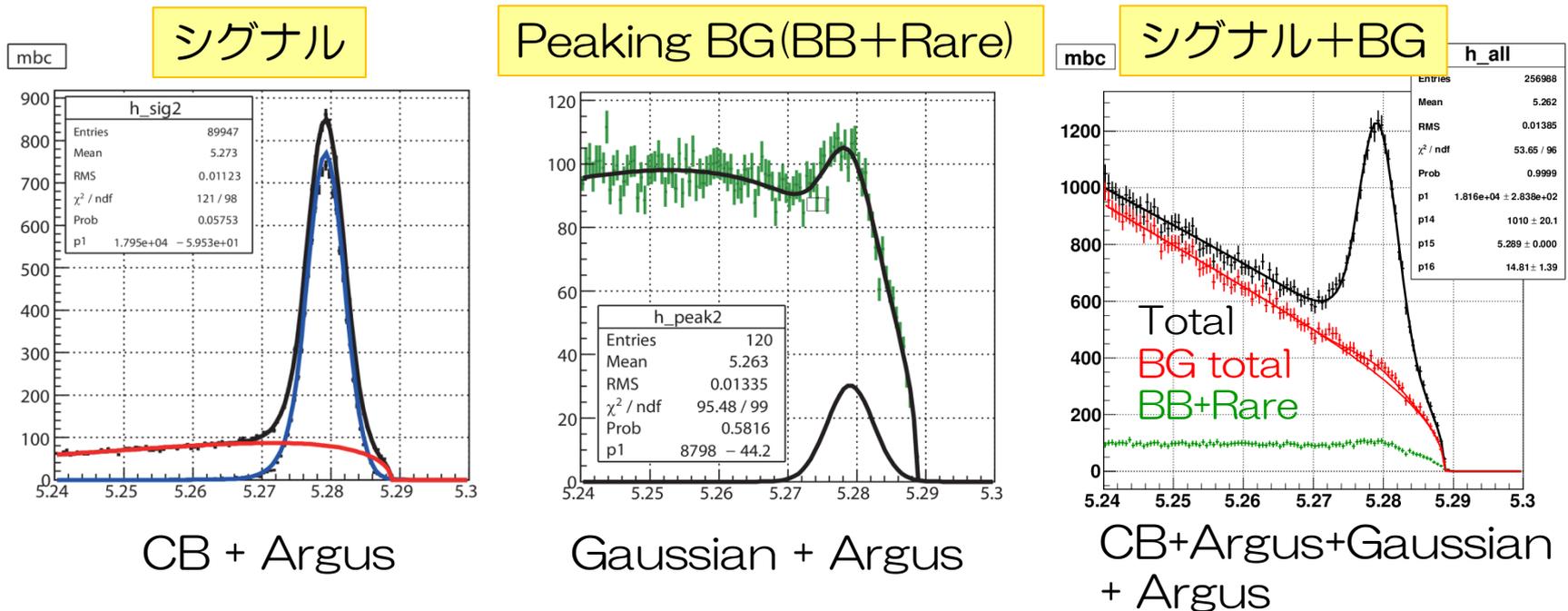
シグナル領域のイベント数

	カット前	カット後	
シグナル(total)	26668	12931	(48%)
シグナル(true)	16020	9481	(59%)
シグナル (cross-feed)	10648	3449	(32%)
qq BG	348638	10597	(3%)
BB BG	17692	3483	(20%)
Rare BG	1292	427	(33%)
Total B.G.	367622	14507	(4%)
S(true)/B.G.	0.0436	0.6536	
Significance	25.8636	61.2174	

Significanceでカットを最適化(本来は系統誤差で最適化すべき)
 → シグナルを59%保持し、qq BGを3%に低減

M_{bc} のフィット

- M_{bc} をフィットしてシグナル数を得る。



▶ 統計エラー 1.6%程度 (最終結果ではない)

まとめと予定

Belle実験のデータを用いて $B \rightarrow X_s \gamma$ の測定を行っている。

● まとめ

- ▶ $B \rightarrow X_s \gamma$ の崩壊分岐比と非対称度は新物理に感度高い
- ▶ Semi-inclusive再構成法を用いて測定
- ▶ 35の X_s の終状態を再構成
- ▶ ΔE のLikelihoodを用いたBの最適候補選択
- ▶ Peaking BG とqq BGの抑制
- ▶ M_{bc} のfitをしてイベント数を評価

● 予定

- ▶ 再構成するシグナルモードの再考
- ▶ 解析の最適化

Back up

Belle 実験

目的：B中間子を大量に生成し、崩壊過程を観測して標準理論を検証

- ▶ 1周3km、地下11mのトンネル
- ▶ 電子 8GeV
- ▶ 陽電子 3.5GeV
- ▶ 1600×10^5 (回/s)交差
→ 1秒当たり20のBBペアを生成
- ▶ 衝突点でビームは $\sim 100\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ に収束
- ▶ 最終積分ルミノシティ： $\sim 1000 \text{ fb}^{-1}$



現在アップグレードに向けて改良中。2015年開始予定。

Belle 検出器

高い運動量測定精度 & 優れた粒子識別を持つ汎用大型検出器

▶ 崩壊点検出器

- 半導体崩壊点検出器

▶ 飛跡検出器

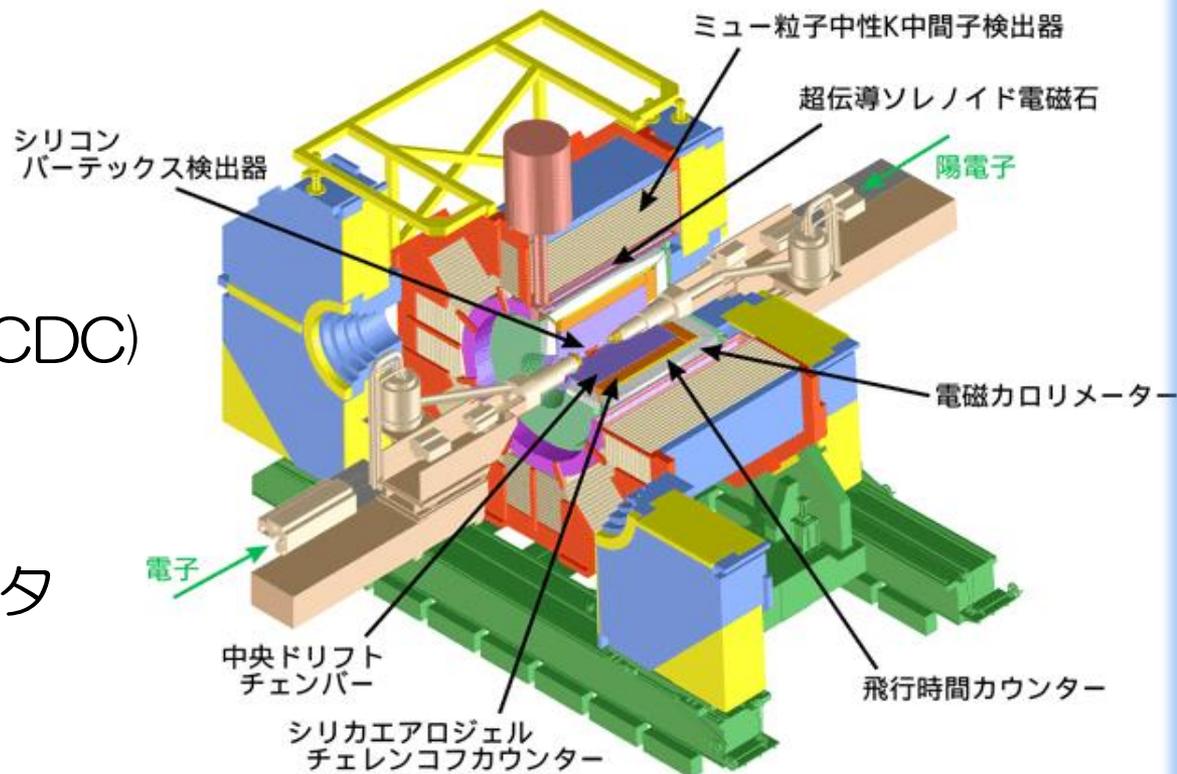
- ドリフトチェンバー(CDC)
- 半導体崩壊点検出器

▶ カロリメータ

- CsI電磁カロリメータ

▶ 粒子識別

- K/π 分離 : CDC(dE/dx), チェレンコフカウンタ, 飛行時間測定器
- 電子/ γ 線 識別 : CDCとCsIカロリメータで測定した E/p
- K_L/μ 識別 : 鉄とRPCの積層

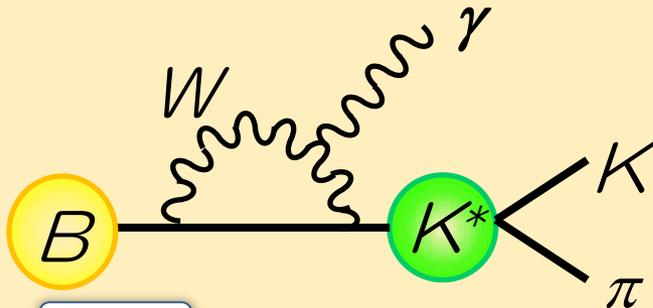


$b \rightarrow s\gamma$ の崩壊分岐比測定

$b \rightarrow s\gamma$ の崩壊分岐比測定

exclusive 崩壊測定

崩壊モードを特定して観測

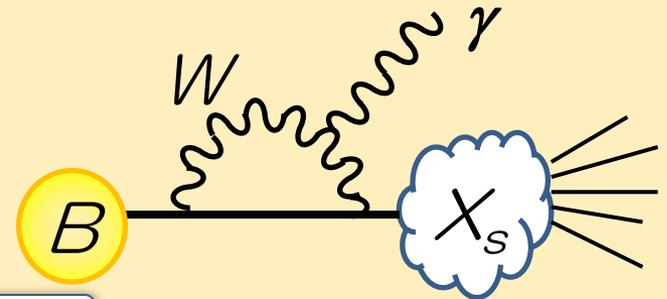


特徴

- ・理論的に厳しい
form factorの不定性大で
理論誤差大
→新物理への感度低
- ・実験的には比較的易しい

Inclusive 崩壊測定

終状態の一部の粒子を観測



特徴

- ・理論の誤差小
→新物理に感度大
- ・実験的に大変

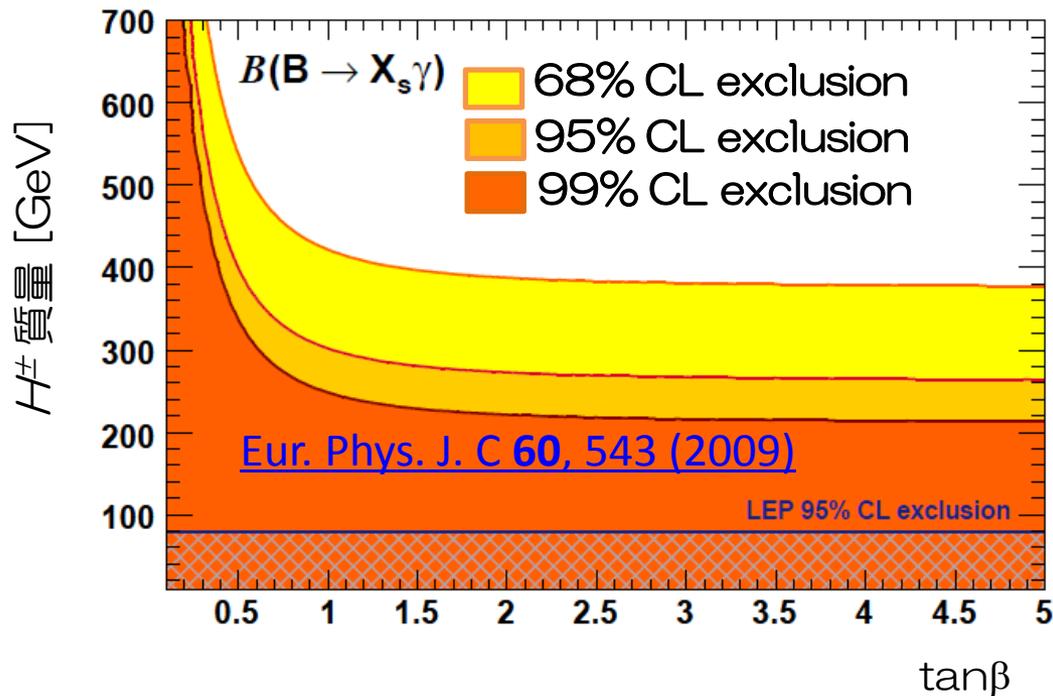
* X_s : ストレンジネスを1つ含む粒子の総称

$B \rightarrow X_s \gamma$ 崩壊分岐比

Mode	\mathcal{B}	E_{\min}	$\mathcal{B}(E_\gamma > E_{\min})$	$\mathcal{B}^{\text{cnv}}(E_\gamma > 1.6)$
CLEO Inc. [2]	$321 \pm 43 \pm 27_{-10}^{+18}$	2.0	$306 \pm 41 \pm 26$	$328 \pm 44 \pm 28 \pm 6$
Belle Semi.[3]	$336 \pm 53 \pm 42_{-54}^{+50}$	2.24	—	$369 \pm 58 \pm 46 \pm 60$
Belle Inc.[4]	—	1.7	$345 \pm 15 \pm 40$	$350 \pm 15 \pm 41 \pm 1$
BABAR Semi.[5]	—	1.9	$329 \pm 19 \pm 48$	$352 \pm 20 \pm 51 \pm 4$
BABAR Inc. [6]	—	1.8	$321 \pm 15 \pm 29 \pm 8$	$332 \pm 16 \pm 31 \pm 2$
BABAR Full [7]	$391 \pm 91 \pm 64$	1.9	$366 \pm 85 \pm 60$	$390 \pm 91 \pm 64 \pm 4$
Average				$343 \pm 21 \pm 7$

$B \rightarrow X_s \gamma$ 崩壊分岐比

Charged Higgsへの制限



$b \rightarrow s\gamma$ inclusive 崩壊分岐比測定

$$\Gamma(b \rightarrow s\gamma) = \frac{G_F^2 \alpha_{em} m_b^5 |V_{ts}^* V_{tb}|^2}{32\pi^3} |C_7^{\text{eff}}|^2$$

Effective Hamiltonian of inclusive radiative B decay

$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \sum_{i=1}^{10} C_i(\mu) O_i(\mu)$$

C_i : Wilson coefficient

$O_{1,2}$: current current operator

O_{3-6} : QCD penguin operator

$O_{7,8}$: electro- and chromo operator

$O_{9,10}$: semi-leptonic operator

$B \rightarrow X_s \gamma$ の非対称度

- Direct CPの破れ : \bar{B} と B の振幅幅の違い

$$A_{CP} = \frac{\Gamma(B \rightarrow X_s \gamma) - \bar{\Gamma}(\bar{B} \rightarrow X_s \gamma)}{\Gamma(B \rightarrow X_s \gamma) + \bar{\Gamma}(\bar{B} \rightarrow X_s \gamma)}$$

- ▶ 比なので理論的・実験的誤差がキャンセル(exclusiveでも新物理に感度あり)
- ▶ 標準理論では $\sim 0.5\%$ の破れ

- アイソスピンの破れ : B^0 と B^+ の崩壊幅の違い

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

- ▶ 標準理論では $+5\sim 10\%$ の破れ

	Belle	Babar
A_{CP}	$0.002 \pm 0.050 \pm 0.030$ (140 fb ⁻¹)	$-0.011 \pm 0.030 \pm 0.014$ (350fb ⁻¹)
Δ_{0+}	未測定	$-0.006 \pm 0.058 \pm 0.009 \pm 0.024$ (350fb ⁻¹)

シグナルMC ($B \rightarrow X_s \gamma$)

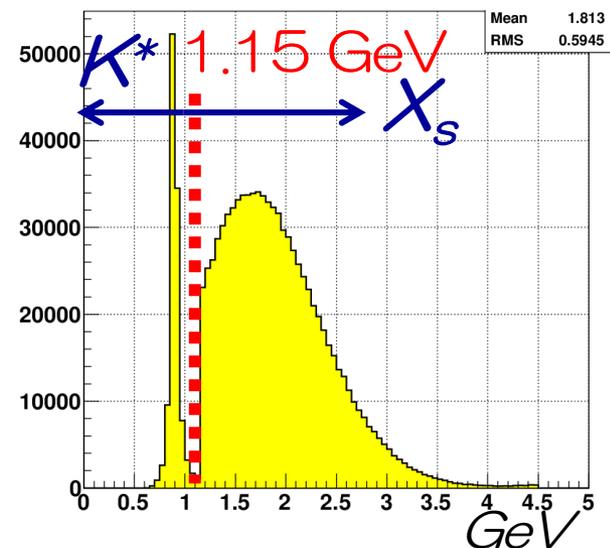
MCで $B \rightarrow X_s \gamma$ のイベントをどのように作るか？

- 1.15 GeV以下はほぼ K^* 共鳴イベント
- 1.15 GeV以上の X_s の質量分布の計算は理解不十分
 - ▶ X_s はPythiaでハドロン化
 - ▶ 質量分布はKagan-Neubert modelで生成

1.15 GeV以下は $K^* \gamma$ のイベント
(resonance)
MC作成 以上は inclusive $b \rightarrow s \gamma$

$$\bullet X_s \gamma : K^* \gamma = 32 \times 10^{-5} : 4 \times 10^{-5}$$

X_s mass (generator level)



粒子選別

BGの多い π^0 , η が
厳しめのカット

● Bからの γ 選別

- $33^\circ < \theta_\gamma < 128^\circ$
(バレル領域)
- $1.8 < E_\gamma^* < 3.4 \text{ GeV}$
- シャワーの形

● K^\pm, π^\pm 選別

- 衝突点付近からきている
- 粒子識別
- $p^{CM} > 100 \text{ MeV}$

● K_s 選別

- ニューラルネット選別
- $488 < M_{K_s} < 508 \text{ MeV}$

● π^0 選別

- $E_\gamma > 50 \text{ MeV}$
- $123 < M_{\pi^0} < 143 \text{ MeV}$
- $\cos\theta_{\gamma\gamma} > 0.4$
- $p^{CM} > 100 \text{ MeV}$

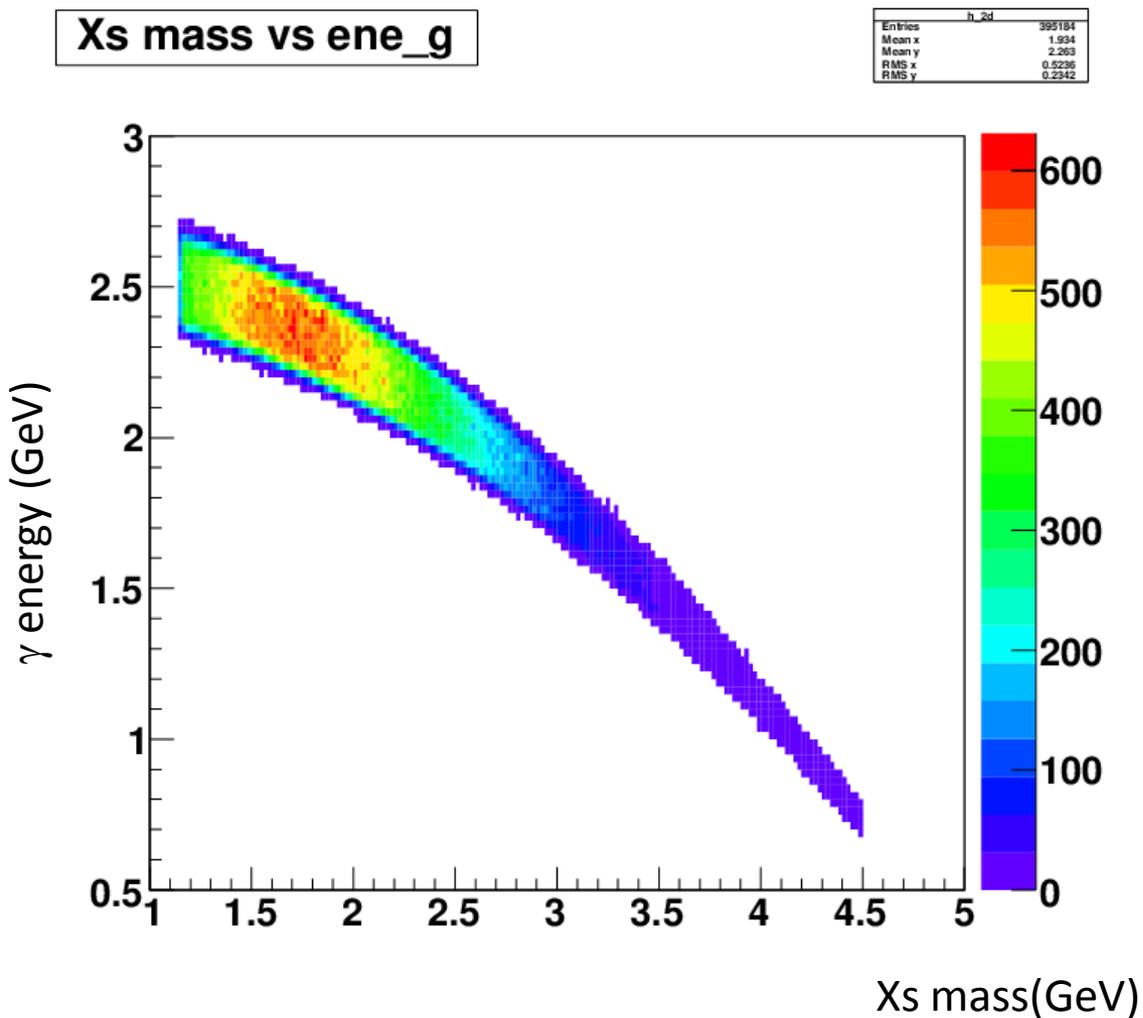
- $\left[\begin{array}{l} p^{CM}_{slow} > 0.25 \text{ GeV}, \\ p^{CM}_{fast} > 0.40 \text{ GeV} \end{array} \right]$ ($2\pi^0$ モードのみ)

● $\eta (\rightarrow \gamma\gamma)$ 選別

- $E_\gamma > 50 \text{ MeV}$
- $515 < M_\eta < 570 \text{ GeV}$
- $|\cos\theta_{hel}| < 0.8$
- $p^{CM} > 0.5 \text{ GeV}$

“高エネルギー γ ” と “ $K^\pm, \pi^\pm, K_s, \pi^0, \eta$ からの X_s ” を組んでBを再構成

X_s mass vs γ energy



X_s の崩壊

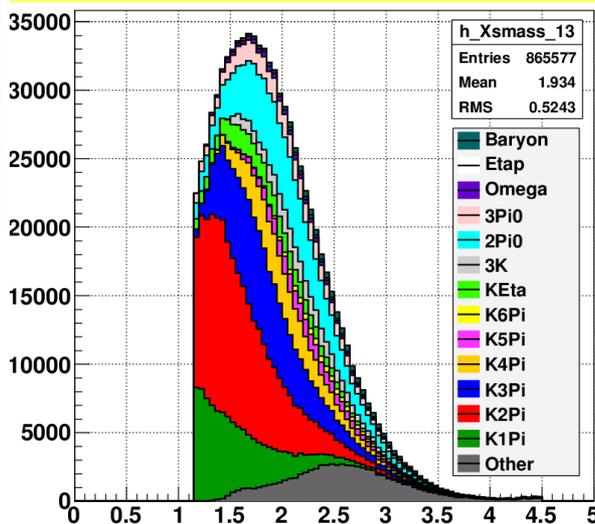
- X_s はハドロン化 → どんな崩壊モードにしているかチェック

	割合(%)
KPI	11.7
K2Pi	24.7
K3Pi	15.3
K4Pi	7.2
K5Pi	2.7
K6Pi	0.9
KEta	4.3
3K	3.5
2Pi0	13.7
3Pi0	4.8
Omega	1.1
EtaP	0.7
Baryon	1.1
Other	8.3

再構成済み

π^0 は1つまで

X_s の質量 (generator level)



できれば全て再構成したい!
 (=ハドロン化の系統誤差最小)
 しかし...

- ・ 粒子数多モード
 - ・ π^0 や η を複数含むモード
- BGが多くて測定難

find Ks

● K_s を選ぶための4つの要求

- ▶ π^+ と π^- の飛跡が衝突点付近からきていない(dr)
- ▶ K_s の運動量の向きが衝突点方向($d\phi$)
- ▶ π^+ と π^- の飛跡が共通の1点(= K_s の崩壊点)からきている(z_dist)
- ▶ K_s がある程度走っている(fl)

Momentum(GeV)	dr(cm)	$d\phi$ (rad)	z_dist(cm)	fl(cm)
< 0.5	> 0.05	< 0.3	< 0.8	-
0.5-1.5	> 0.03	< 0.1	< 1.8	> 0.08
1.5 <	> 0.02	< 0.03	< 2.4	> 0.22

シグナル

	$K\pi$	$K2\pi$	$K3\pi$	$K4\pi$	$3K$	$3K\pi$	$K\eta$	$K\eta\pi$	$K\eta2\pi$	$K2\pi^0$	$K\pi2\pi^0$	TOTAL
Total	10344 12.5%	7352 9.4%	3967 8.2%	1898 8.5%	302 11.3%	332 10.1%	304 8.5%	316 11.7%	221 14.5%	387 5.9%	725 6.9%	26148 10.0%
TRUE	9373 11.3%	4530 5.8%	1052 2.2%	189 0.8%	196 7.4%	81 2.5%	202 5.7%	96 3.6%	22 1.4%	107 1.6%	74 0.7%	15922 6.1%
cross-feed	601 5.8%	2069 28.1%	2174 54.8%	1420 74.8%	99 32.8%	229 68.9%	95 31.3%	206 65.3%	183 82.6%	241 62.2%	585 80.7%	7902 30.2%
self cross-feed	370 3.6%	753 10.2%	741 18.7%	289 15.2%	7 2.2%	22 6.7%	7 2.4%	13 4.2%	16 7.4%	40 10.3%	66 9.1%	2324 8.9%
Purity	90.6%	61.6%	26.5%	10.0%	65.0%	24.4%	66.3%	30.4%	9.9%	27.5%	10.3%	60.9%

シグナル

Xs mass(GeV)	0.6-0.7	0.7-0.8	0.8-0.9	0.9-1.0	1.0-1.1	1.1-1.2	1.2-1.3	1.3-1.4	1.4-1.5	1.5-1.6	1.6-1.7	1.7-1.8	1.8-1.9	1.9-2.0	2.0-2.1	2.1-2.2	2.2-2.3	2.3-2.4	2.4-2.5	2.5-2.6	TOTAL
Gen	131	1823	32058	21811	2523	11580	24534	27214	29716	31425	32186	32010	30603	28955	26642	23795	21170	18195	15252	12629	424252
TRUE	14	164	2913	2089	247	717	1332	1291	1245	1108	1039	859	732	625	457	356	262	197	146	107	15900
Reco	27	226	3033	2235	443	1017	1737	1796	1884	1867	1884	1778	1682	1626	1296	1075	882	717	532	412	26149
Eff(True/Gen)	0.11	0.09	0.09	0.10	0.10	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04
Eff(Reco/Gen)	0.21	0.12	0.09	0.10	0.18	0.09	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03	0.06