Precision Measurements of Radiative B Meson decay $\boldsymbol{B \to X_s \gamma}$ with a Semi-inclusive Reconstruction Method

準包括的再構成法を用いた $\boldsymbol{B \to X_s \gamma}$ の精密測定

齋藤 智之(素粒子実験)

2014/01/30　博士論文審査会

目次

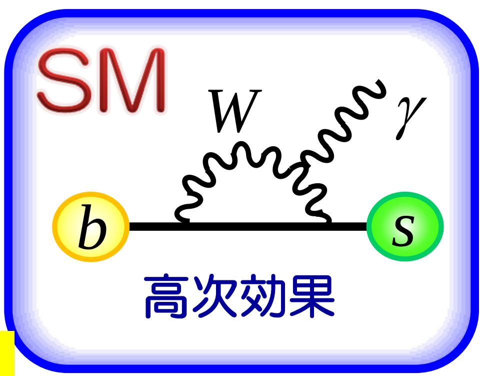
1, $B \to X_s\gamma$と測定手法
2, Belle 実験
3, MCサンプル作成
4, 信号再構成
5, 背景事象除去
6, 信号抽出手法
7, 系統誤差
8, 140 fb^{-1}のデータを用いた解析
9, 全データを用いた解析と結果
10, 結論

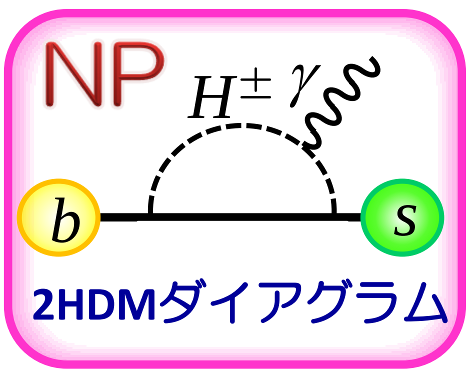
$b \to s\gamma$ 遷移

- LHCでの新物理の直接測定で何の兆候も見えない。
  → 間接測定がますます重要。

$b \to s\gamma$ 遷移

- 標準理論ではツリーレベルが禁止(Flavor Changing Neutral Current)で、ループダイアグラムで生じる。
- 新物理が予言する重い新粒子がループ中に現れることが期待。
- 理論計算が精度よくでき新物理探索に有用。



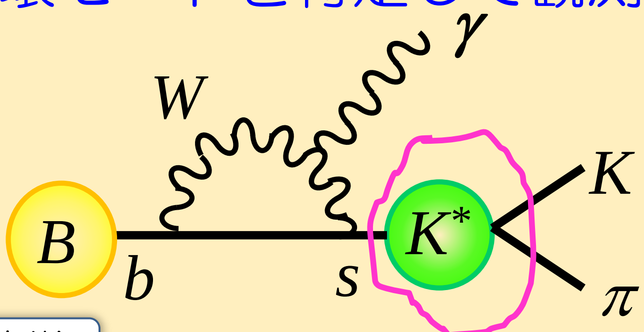


崩壊分岐比測定手法(Inclusive崩壊)

$b \to s\gamma$ 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

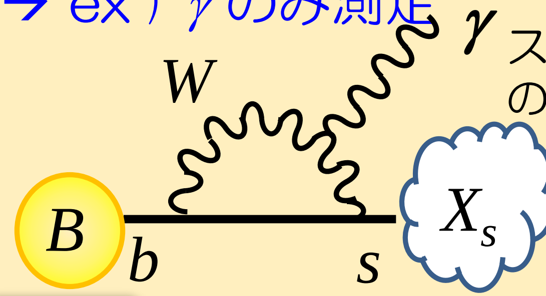
理論エラー大

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

Inclusive 崩壊測定

多くの終状態をまとめて観測
→ ex）γのみ測定

ストレンジネス１の終状態の総称



特徴

- 実験的に大変
- 崩壊モデルの不定性を抑制可能で理論の誤差小
→新物理に感度高

新物理探索には **Inclusive測定** が有用

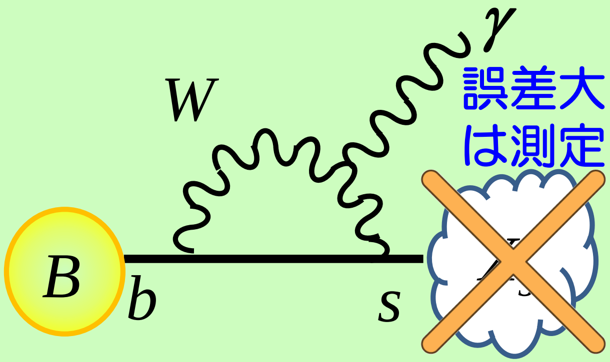
崩壊分岐比測定手法(Semi-inclusive手法)

- Inclusive法ではX_sの崩壊モデルの不定性を抑制するための対策によって手法が2つある。

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
- 背景事象の除去が困難
- 検出器、背景事象の精密な理解必須

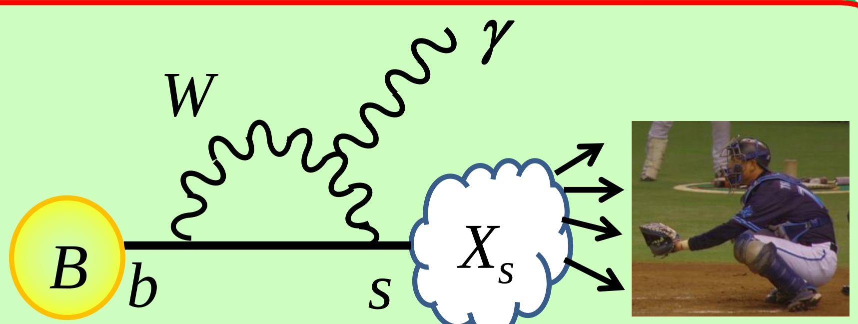


誤差大きいところは測定しない

Semi-inclusive再構成

(X_sを多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を再構成するので背景事象の抑制可

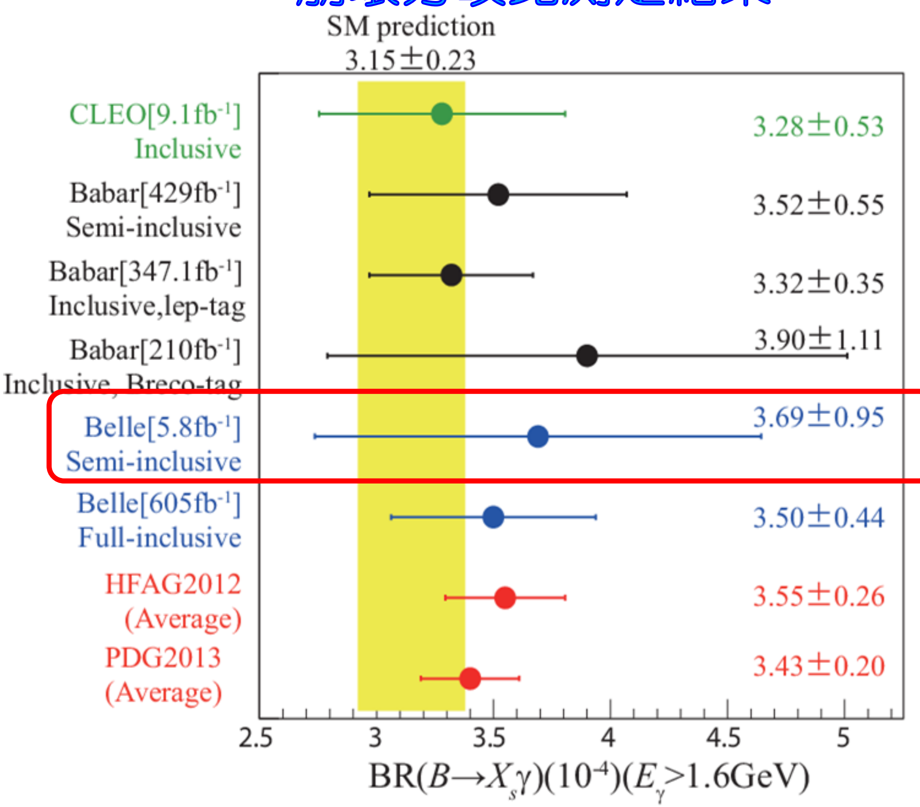


どんなモードも全て測定

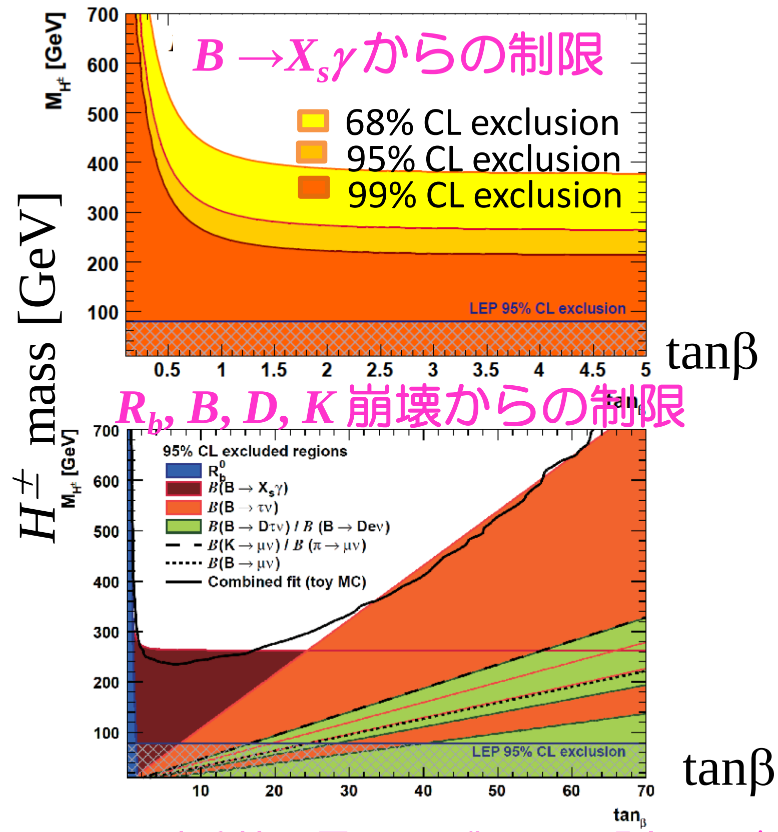
= X_sが何に崩壊してようが関係ない

$B \to X_s\gamma$ 崩壊分岐比の現状

崩壊分岐比測定結果



荷電ヒッグスへの制限(2HDM)

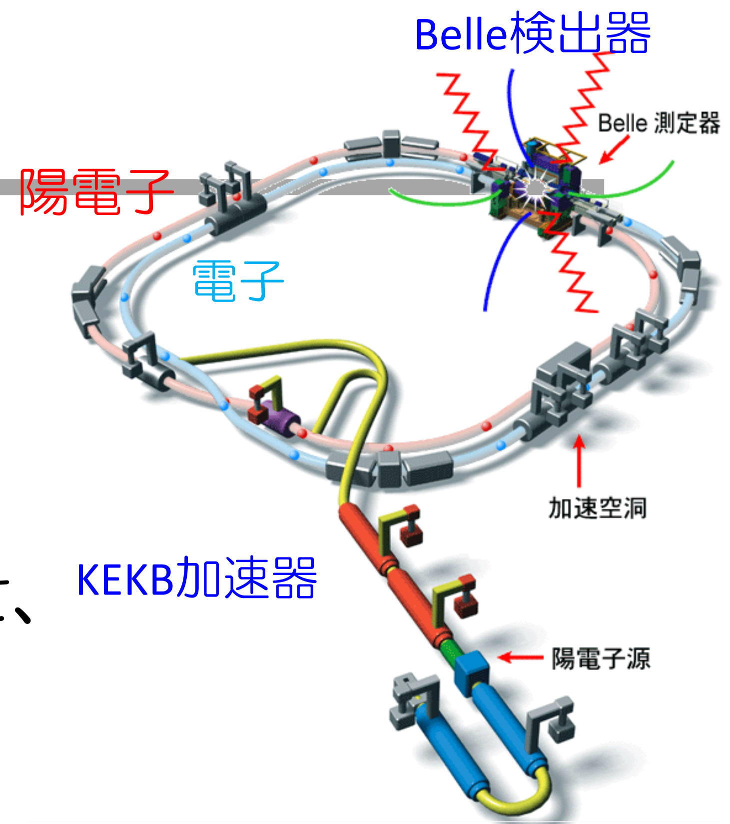


- 誤差の範囲で標準理論と一致。--> 新物理モデルに強い制限
- さらに精度を上げた測定をし、新物理を検証する。
- Belle実験でSemi-inclusive手法を用いた研究を行う。

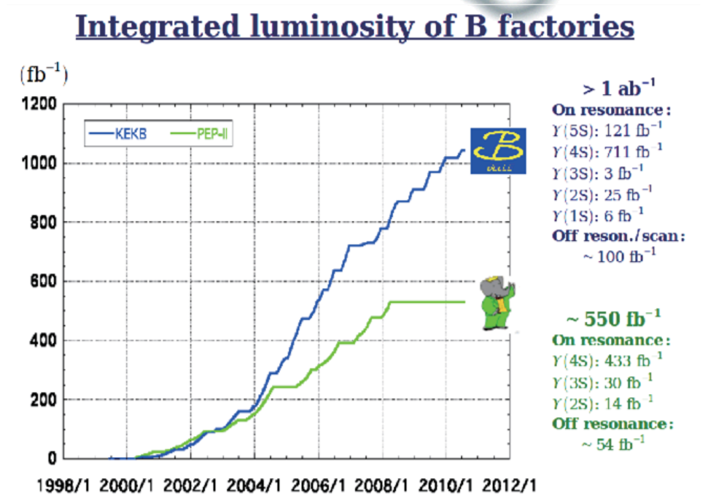
Belle実験

Belle 実験

目的：*B* 中間子を大量に生成し、崩壊過程を精密観測



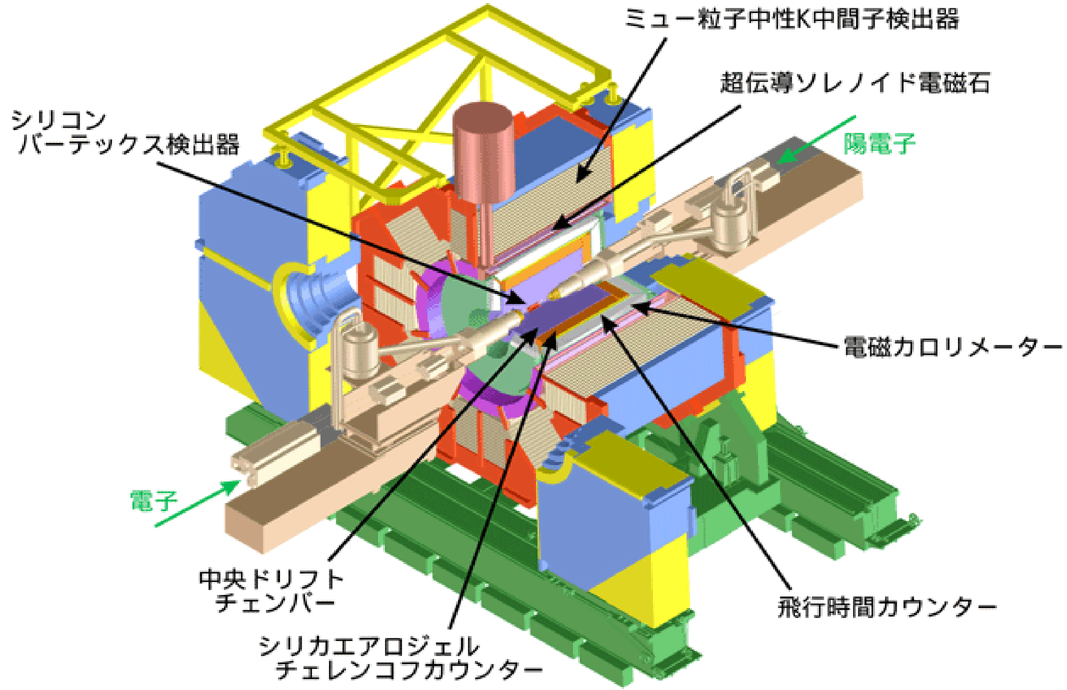
- 電子 8GeV、陽電子 3.5GeVを衝突させ、Υ(4S)共鳴で$B\bar{B}$ペアを生成。
- ピークルミノシティ：$2.1\times10^{34}\mathrm{cm^{-2}s^{-1}}$
- 最終積分ルミノシティ：～1000 $\mathrm{fb^{-1}}$
(本解析では**Υ(4S)の711 $\mathrm{fb^{-1}}$**を使用。)
- 1999年6月～2010年6月データ取得
- 現在も最終データを用いた解析が行われている。



Belle 検出器

特徴：高い運動量測定精度 & 優れた粒子識別

- **崩壊点検出器**($\sigma \sim 75\ \mu m$)
  - 半導体崩壊点検出器
- **飛跡検出器**($\sigma / p_t \sim 0.5\ \%$)
  - 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**($\sigma / E \sim 1.6\ \%$)
  - CsI電磁カロリーメータ

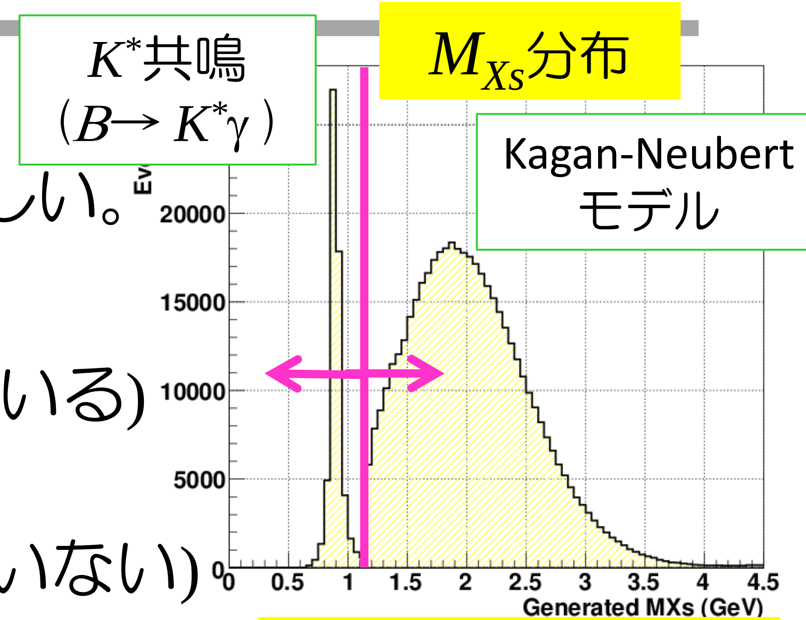


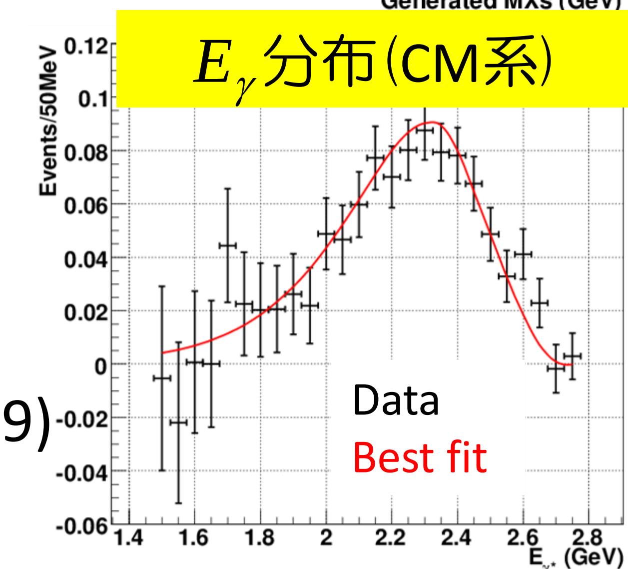
- **粒子識別**
  - $K^{\pm}/\pi^{\pm}$ 識別：CDC(dE/dx), チェレンコフカウンタ, 飛行時間測定器
    -> 88 %のK 識別、8.5 %のπ の誤識別
  - 電子 識別：CDCとCsIカロリメータで測定したE/p 等 -> 92 %の識別
  - K_L/μ 識別：最外層の鉄とRPCを積層した検出器 -> 90 %のμ識別

MC サンプル作成

$B \to X_s\gamma$ のMCサンプル(M_{Xs}分布)

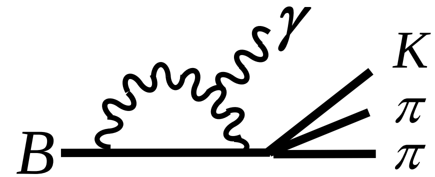
- γのエネルギーと X_s の質量分布はフェルミ運動等の影響で理解が難しい。
  - ▸ M_{Xs} < 1.15 GeV/c^2
    … K^* 共鳴支配的(よく理解されている)
  - ▸ M_{Xs} > 1.15 GeV/c^2
    … 様々な終状態(よく理解されていない)
  - M_{Xs}分布の形
    - Kagan-Neubertモデルを使用
      - next-to-leading order
      - 2つの入力変数(m_b、 μ_π^2)
    - Belleの以前の結果(Full inclusive, 2009)とBest fitを使用



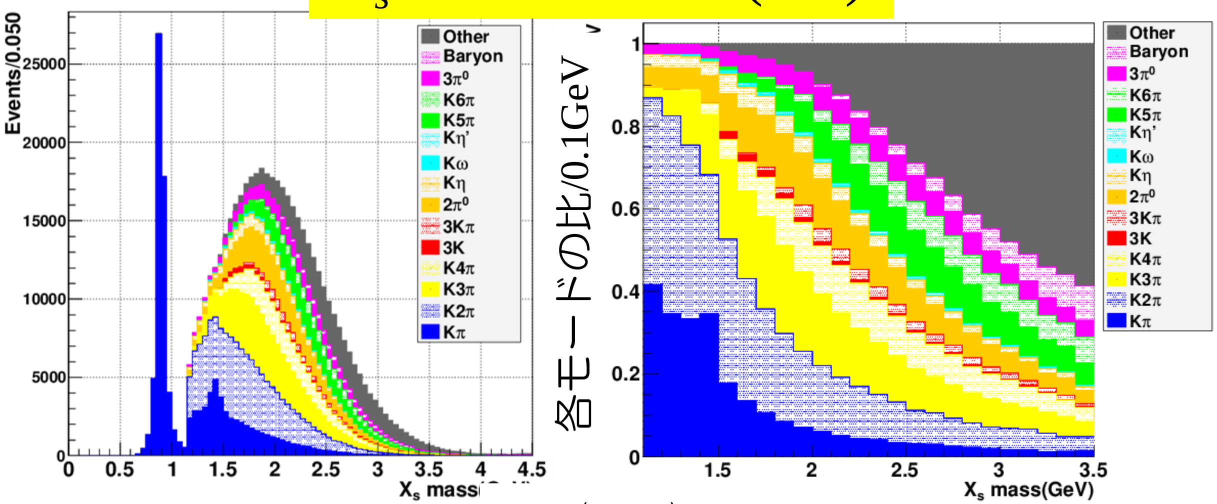


$B \to X_s\, \gamma$ MCサンプル(ハドロン化モデル)

- $B \to X_s\, \gamma$の終状態：クォークのまま出てこれないため、ハドロンを形成(ハドロン化)
  - Pythiaで生成



X_s終状態の内訳(MC)



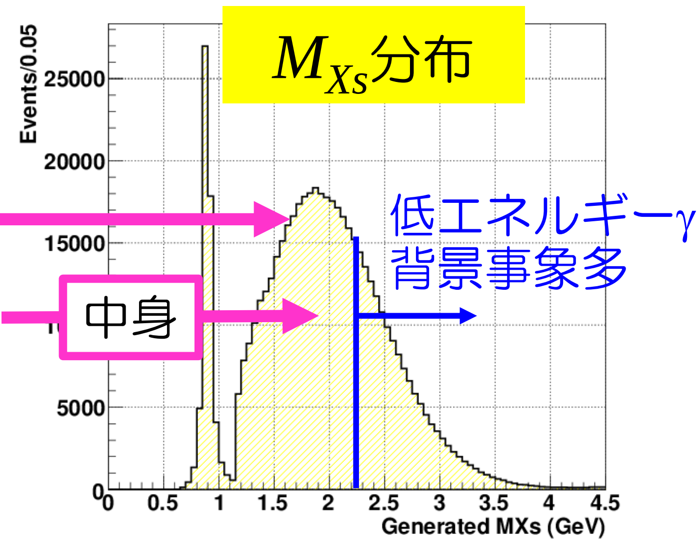
M_{Xs}(GeV)

X_s終状態内訳(%)(MC)	
$K_{(s)}\pi$	15.1
$K_{(s)}2\pi$	11.6
$K_{(s)}3\pi$	9.0
$K_{(s)}4\pi$	5.1
$K_{(s)}2\pi^0(\pi,2\pi)$	5.9
$K_{(s)}\eta\,(\pi,\,2\pi)\;(\eta\text{–>}\gamma\gamma)$	2.2
$3K$	1.3
$K\omega(\omega\text{–>}\pi^0\gamma)$	0.7
$K\eta'(\eta'\text{->}\rho^0\gamma)$	0.5
バリオン	1.6
K_Lモード	27.2
その他	19.8

- 最終結果はハドロン化モデルに依存するため、実データを用いた較正が必要。

本研究のポイント

- **本研究の特徴**
  - ▸統計量は十分(生成数：5×10^{5}事象)
  - ▸系統誤差が支配的：X_sの崩壊モデル
    - – M_{Xs}分布モデルの誤差　形
    - – X_s崩壊のハドロン化モデルの誤差



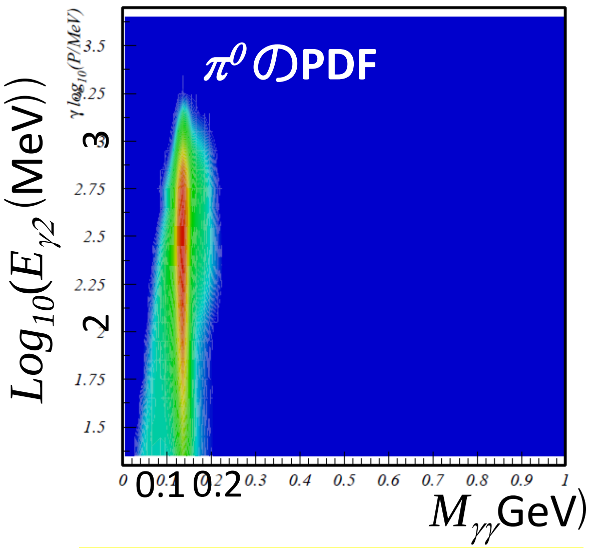
系統誤差抑制のためには、

- MCのモデルをデータを使い較正し誤差の抑制が必要
- 信号数少＆背景事象多の高M_{Xs}領域で高いSignificanceを得ることが重要

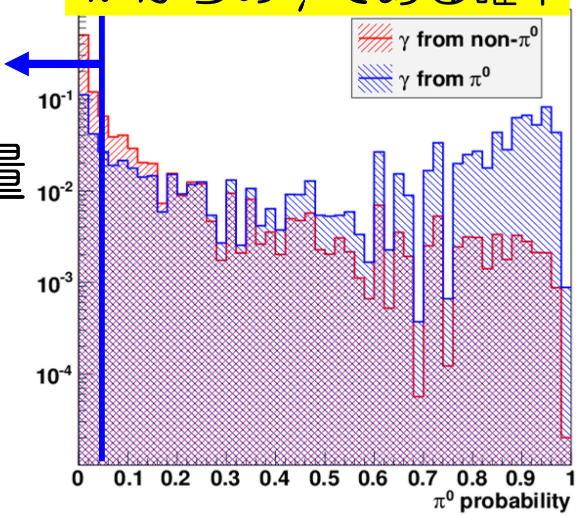
信号再構成

粒子選択(高エネルギー γ)

- γ 信号の選択
  - 高エネルギー γ は特徴的信号
  - $1.8 < E_\gamma < 3.4$ GeV (CM系)
  - バレル領域のみ（33<θ<132°）
  - シャワーの形
  - ***π^0/η veto***
    - 主な背景事象$\pi^0(\eta)$からの γを排除
    - 2次元PDFで$\pi^0(\eta)$からの γ である確率を定義
      - 信号候補 γ_1とその他の γ_2を組んだ質量
      - γ_2 のエネルギー
    - 75 %の信号を保持し、π^0からの γ 背景事象を20 %に低減



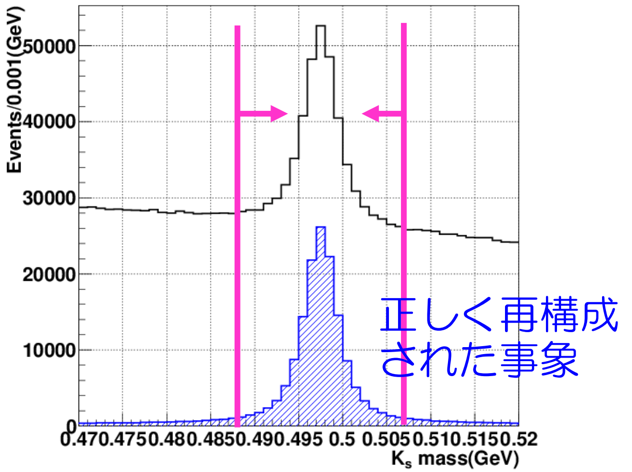
π^0 からの γ である確率



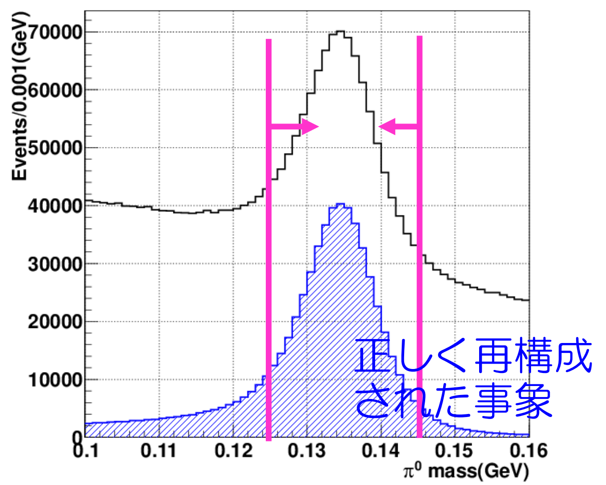
粒子選択 ($K^{\pm}$, $\pi^{\pm}$, K_S, π^0, η)

- **荷電粒子($K^{\pm}$, $\pi^{\pm}$)選択**
  - 衝突点(IP)起源
  - p > 0.1 GeV/c
  - K/π 識別
- **K_s (-->$\pi^+\pi^-$)再構成**
  - 多変数解析(ニューラルネットワーク)
    - K_sの崩壊点とIPの距離、2つの飛跡の間の距離、 等
    - 効率：87 %
  - $|M(\pi^+\pi^-) - M(K_s)| < 10$ MeV/c^2
- **π^0, η (--> $\gamma\gamma$)再構成**
  - $E_\gamma^{\pi0(\eta)} > 50$ (100) MeV
  - 125(515) < $M_{\gamma\gamma}^{\pi0(\eta)}$ < 145 (570) MeV/c^2
  - π^0: $\cos\theta_{\gamma\gamma} > 0.4$, η: $\cos\theta_{hel} < 0.8$

K_s 質量



π^0 質量



X_s 再構成 (Semi-inclusive 法)

- **Semi-inclusive 法**： X_s をK , K_s, π, π^0, η 用いて再構成

▸ 理想は全ての終状態を再構成。しかし、
 - 分岐比小
 - 再構成効率小
 - 背景事象多
により困難。

▸ 38 終状態を再構成
 - X_sの終状態の56 %をカバー。
 - K_Sを含むモードと同数の K_L モードを含めると69 % 。

再構成した終状態				
$K\pi$	$K\pi$	$K_s\pi$	$K\pi^0$	$K_s\pi^0$
$K2\pi$	$K\pi\pi$	$K_s\pi\pi$	$K\pi\pi^0$	$K_s\pi\pi^0$
$K3\pi$	$K\pi\pi\pi$	$K_s\pi\pi\pi$	$K\pi\pi\pi^0$	$K_s\pi\pi\pi^0$
$K4\pi$	$K\pi\pi\pi\pi$	$K_s\pi\pi\pi\pi$	$K\pi\pi\pi\pi^0$	$K_s\pi\pi\pi\pi^0$
$3K$	KKK	KKK_s		
	$KKK\pi$	$KKK_s\pi$	$KKK\pi^0$	$KKK_s\pi^0$
$K\eta$	$K\eta$	$K_s\eta$	$K\eta\pi$	$K_s\eta\pi$
	$K\eta\pi^0$	$K_s\eta\pi^0$	$K\eta2\pi$	$K_s\eta2\pi$
	$K\eta\pi\pi^0$	$K_s\eta\pi\pi^0$		
$2\pi^0$	$K\pi^0\pi^0$	$K_s\pi^0\pi^0$	$K\pi\pi^0\pi^0$	$K_s\pi\pi^0\pi^0$
	$K\pi\pi\pi^0\pi^0$	$K_s\pi\pi\pi^0\pi^0$		

B 中間子再構成

- B 中間子を γ と X_s から再構成
  - 2つの独立の変数で選択

Beam Constrained Mass(M_{bc})

$$M_{bc} \equiv \sqrt{(E^*_{beam}/c^2)^2 - (|\vec{p}^*_B|/c)^2}$$

- ビームエネルギーとBの運動量で得たBの質量
- $M_{bc} > 5.24$ GeV/c^2

Energy Difference(ΔE)

$$\Delta E \equiv E^*_B - E^*_{Beam}$$

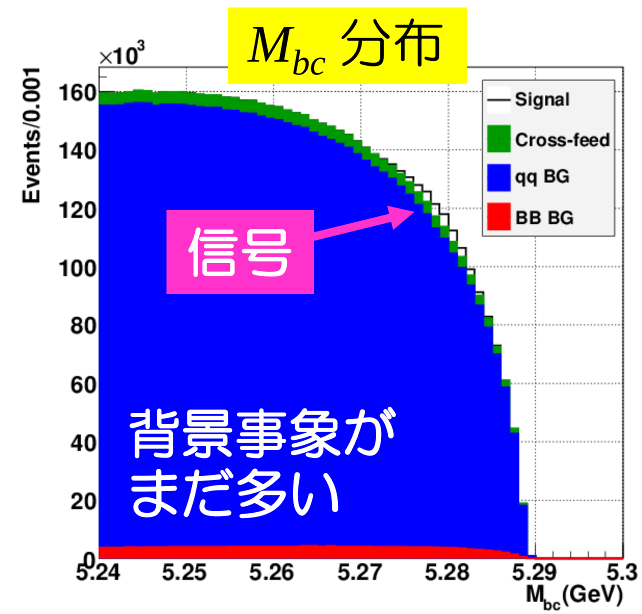
- ビームとBのエネルギー差
- $-0.15 < \Delta E < 0.08$ GeV
- $-0.10 < \Delta E < 0.05$ GeV ($2\pi^0$, $\eta\pi^0$)

- 最終的にはM_{bc}で信号を抽出
- 強力な背景事象の除去が必要

再構成後の事象数

(M_{bc}>5.27 GeV, M_{X_s}<2.8 GeV)

	Event selection
Signal	30356
Cross-feed	90940
$q\bar{q}$ BG	2545069
$B\bar{B}$ BG	231770
Significance	17.8



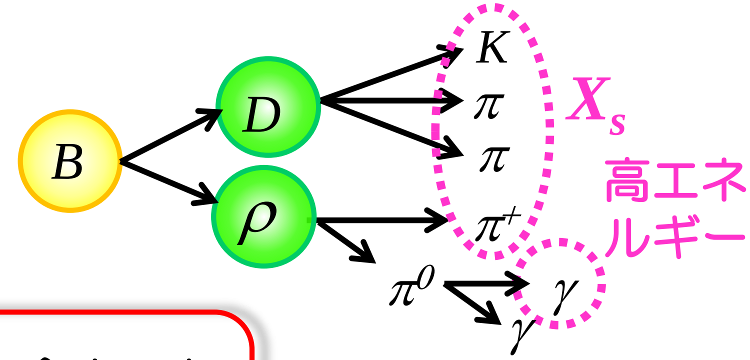
背景事象の除去法

主な背景事象

- B 中間子がD中間子にいく崩壊
- $e^+e^-\to qq$事象

D 中間子崩壊由来の背景事象抑制：D veto

- **D 中間子($+\pi^0$)を含む崩壊からの背景事象が多く混入。**
  - 主に$B \to D\rho$ (分岐比が10^2倍以上)
  - 信号領域にピークを作るため、信号と間違える。

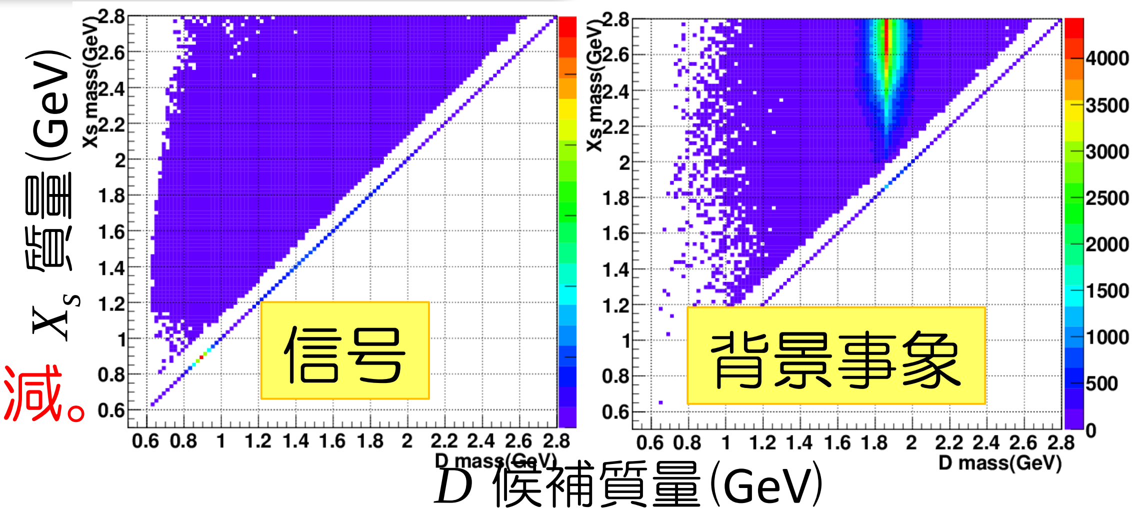


D veto

X_sの再構成に使用した粒子を組み合わせ、Dの質量に近い事象を排除。

- M_{X_S}>2.0 GeVでDの質量(1835-1895MeV)を除去。

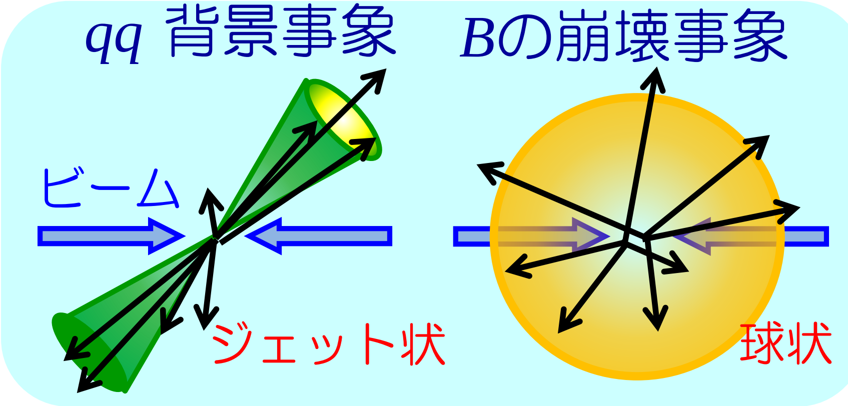
→ 信号を90%保持し、D の背景事象を23%に低減。



qq 背景事象の抑制(多変数解析)

● **最大の背景事象は軽いクォークjet事象 ($e^+e^- \to qq$ ($q=u, d, c, s$))**

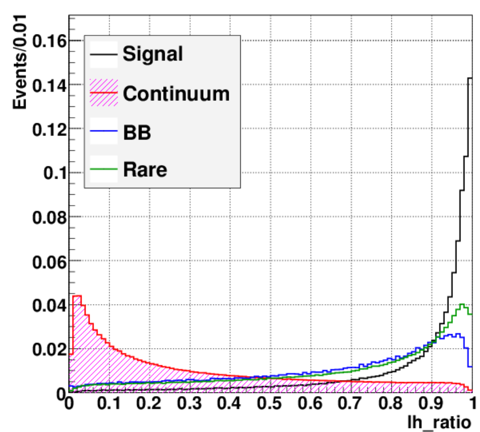
- ニューラルネット(NeuroBayes)による多変数解析
  --> 入力変数の相関を考慮し、分離能力を最適化。



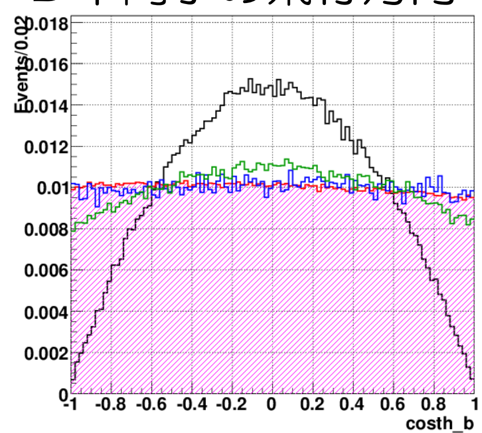
入力変数：12個(主にイベント形状)

- Fisher discriminant (ルジャンドル多項式を用いて評価したイベント形状変数)
- B中間子の飛行方向
- Thrust
- Sphericity
- Aplanarity
- 逆側のBのフレーバー情報
- ΔEのLikelihood

Fisher discriminant



B 中間子の飛行方向



qq 背景事象の抑制(トレーニングとカットの最適化)

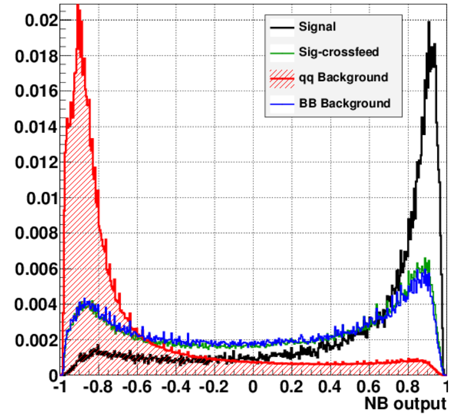
- **ニューラルネットのトレーニング**
  - 系統誤差抑制のためには高M_{Xs}領域でのSignificanceの向上が必要。

  --> 2.2<M_{Xs}<2.8 GeV/c²の事象のみでトレーニングを行い、出力をこの領域で最適化。
- **カットの最適化**
  - 系統誤差抑制のため

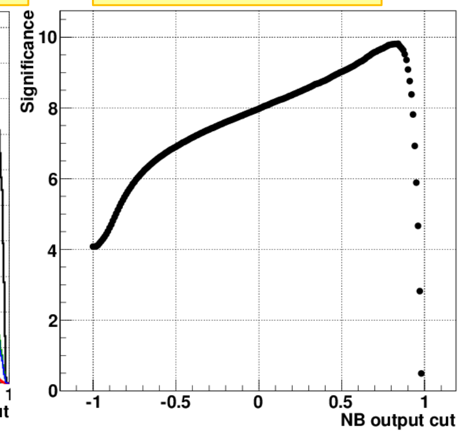
  2.2<M_{Xs}<2.8 GeV/c² でのSignificanceで最適化。

  --> 信号を52 %保持し、qq 背景事象を 2 %に低減。

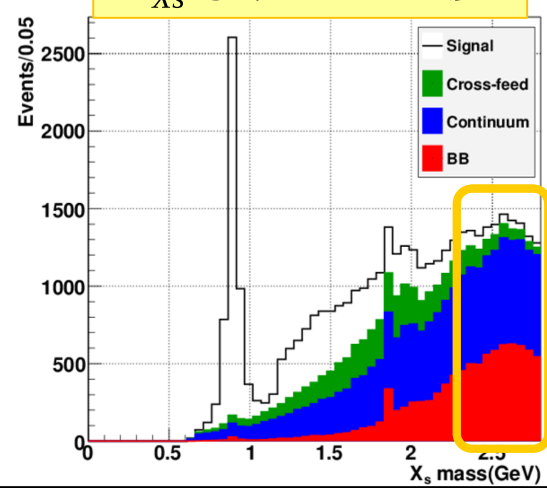
ニューラルネットの出力



カット値とSignificance



M_{Xs}分布(カット後)



2.2<M_{Xs}<2.8
測定が困難な領域

B 中間子の最適候補選択と背景事象除去結果

● B 中間子の最適候補選択(Cross-feed 背景事象の抑制)

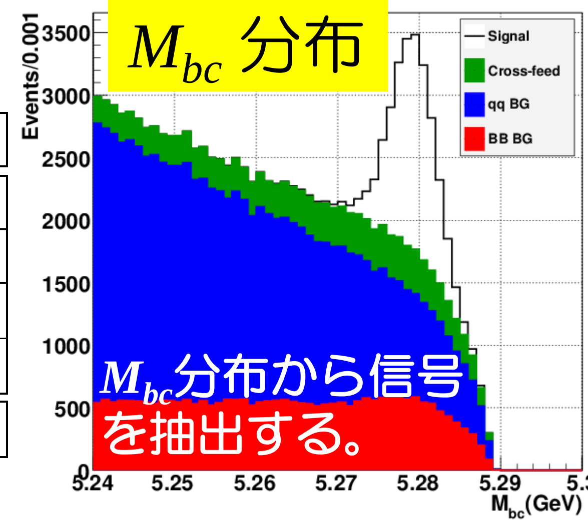
- 38 終状態を同時に再構成しているため、1イベント当たり多くの B 中間子候補(Cross-feed)が存在。
- ニューラルネット出力が最も1に近い事象を選択
  --> 信号を85%保持し、Cross-feedを42%に低減。

● 背景事象除去結果

- Significanceが18→58に向上。(2<M_{Xs}<2.8 GeV/c^2 : 4→10)

背景事象除去後の事象数(M_{bc}>5.27 GeV, M_{Xs}<2.8 GeV)

	Event selection	D veto	$q\bar{q}$ suppression	BCS
Signal	30356	27137	14068	11824
Cross-feed	90940	64938	13096	5563
$q\bar{q}$ BG	2545069	1837720	42195	15226
$B\bar{B}$ BG	231770	118749	20023	8976
Significance	17.8	19.0	47.1	58.0

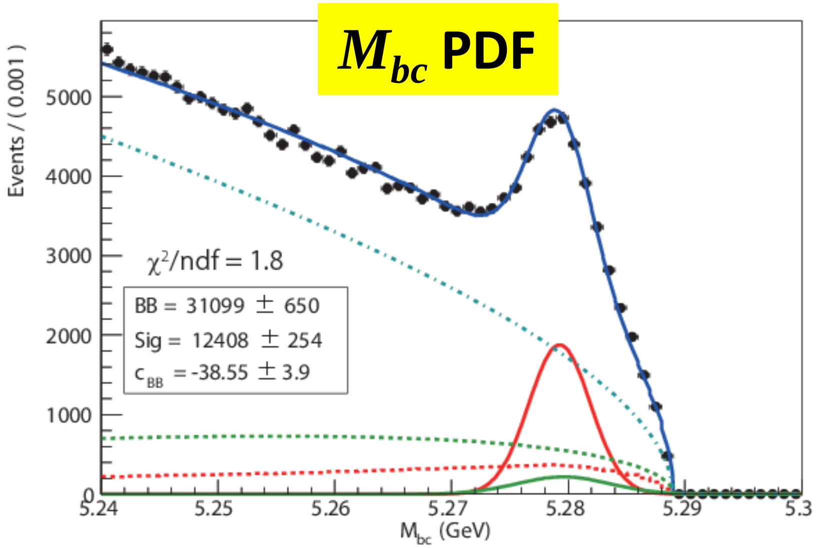


信号抽出方法

信号抽出方法

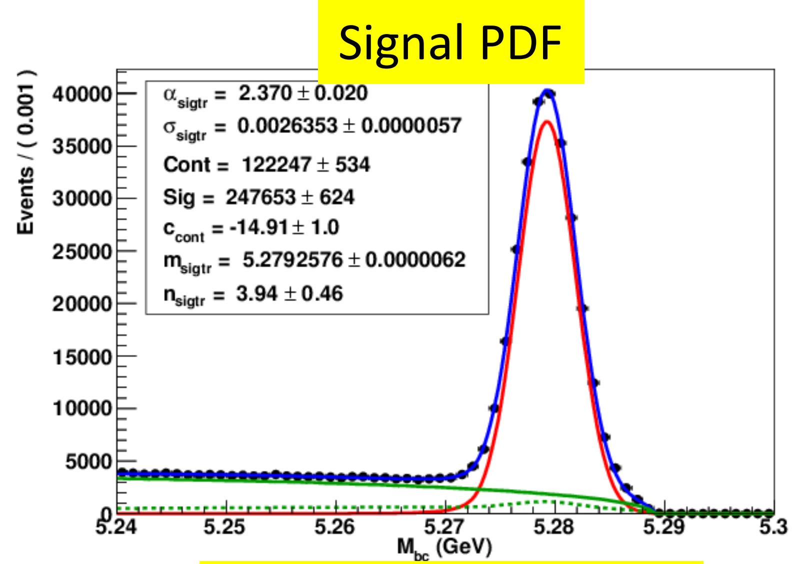
- M_{bc}分布をフィットして信号を抽出
  - M_{Xs}<2.8 GeV/c² (M_{Xs}>2.8 GeV/c²は信号数小、BG多で厳しい)
  - Unbinned Maximum Likelihood Fit
  - **5つのPDFを組み合わせる。**
    - Signal PDF(赤実線)
    - Signal Cross-feed PDF : 信号事象からの背景事象(赤点線)
    - Peaking BG PDF : 信号領域にピークを持つ背景事象(緑実線)
    - Non-peaking BG PDF : ピークを持たないB 崩壊からの背景事象 (緑点線)
    - qq 背景事象 PDF(水色)
  - PDFはできる限りデータをもとに作成。

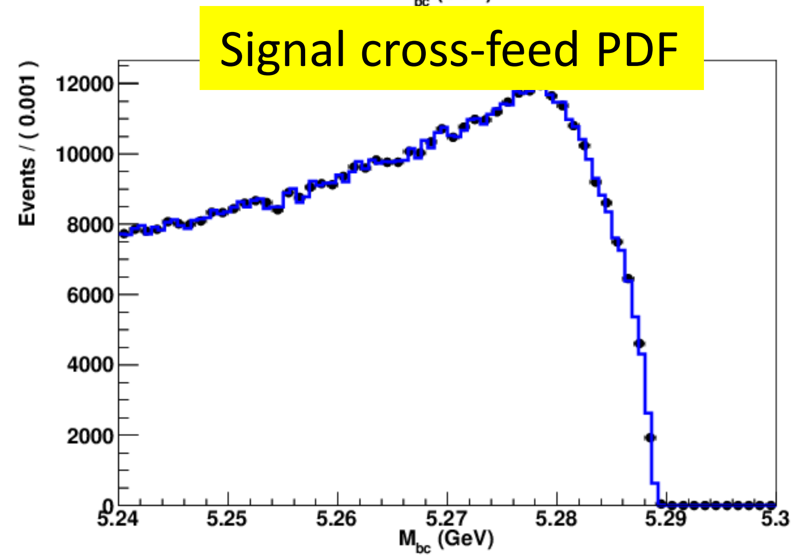
次ページから各PDFを説明する。



SignalとCross-feedのPDF

- **Signal PDF**
  - $B \to D\pi$のデータから得る。
  - Crystal Ball 関数
  - ただし下側のテイルはMCで補正。
  - 信号抽出の際は形は固定し、数を動かす。
- **Signal cross-feed PDF**
  - ヒストグラムPDF
  - 形はMCで固定。
  - 数は信号数と比例させて、動かす。

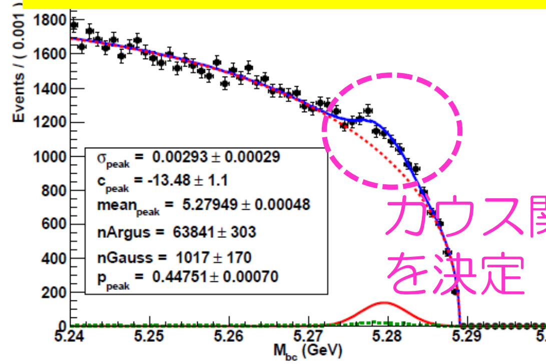




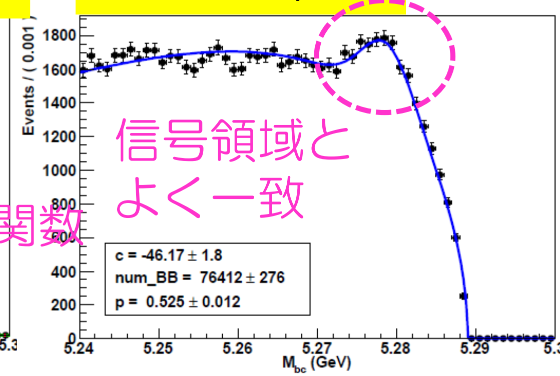
Peaking, Non-peaking, qq BG PDF

- **Peaking BG PDF**
  - ガウス関数
  - π^0/η vetoで排除されたデータを用いて数と形を固定。

anti- π^0/η veto領域(Data)



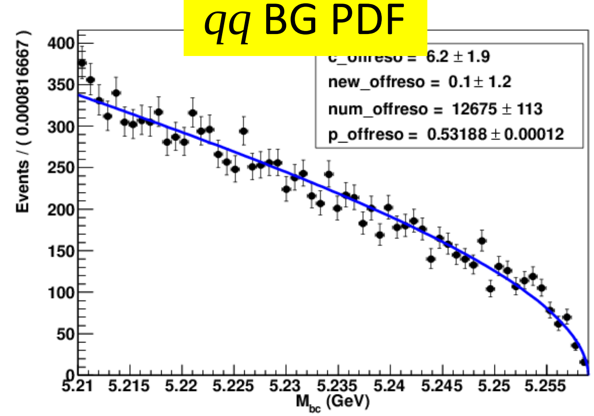
信号領域(MC)



- **Non-peaking BG PDF**
  - Argus関数
  - 形と数いずれも動かす。

- ***qq* BG PDF**
  - 傾きパラメータを修正したArgus関数
  - Υ(4S)共鳴から60MeV下のデータで形と数を固定。

qq BG PDF



系統誤差

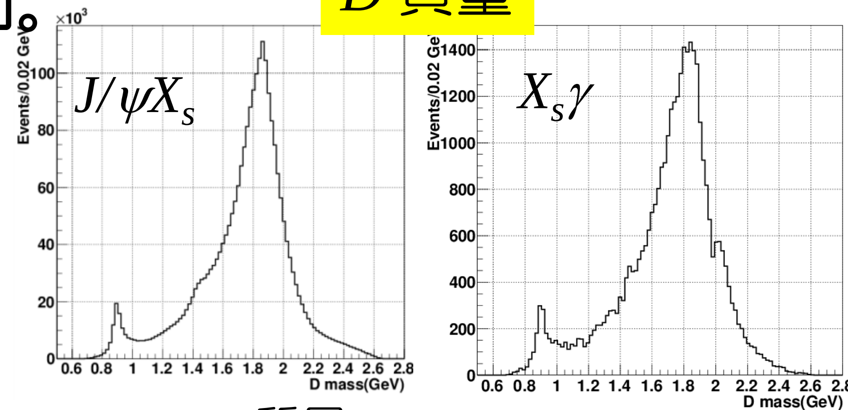
●データで信号領域を測定する前に系統誤差を見積もる。

- 背景事象除去の系統誤差
  - D veto
  - qq 背景事象除去
- M_{Xs}分布の形の系統誤差

D vetoの系統誤差

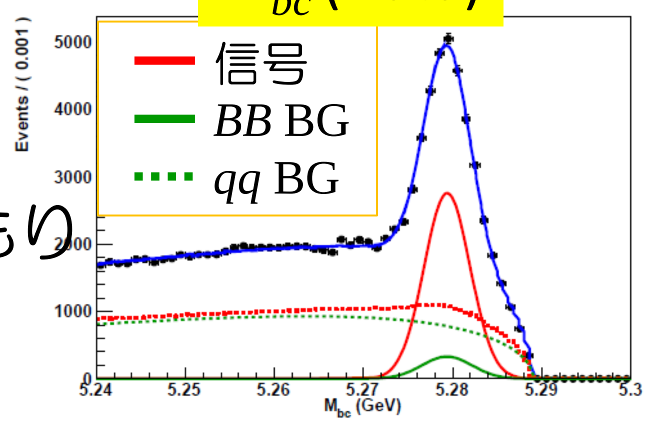
- **D vetoの系統誤差はコントロールサンプル**
  $B \to J/\psi X_s$, $J/\psi \to ll$ ($l=e, \mu$) で評価。
  - J/ψ からのレプトン1つをγ、他方を X_s の子供のπとみなす。
  - $J/\psi X_s$ は信号と同じように Dの質量領域に幅の広いピークを持つ。

D 質量



D 質量(GeV) (M_{Xs}>2.0 GeV)

M_{bc} (Data)



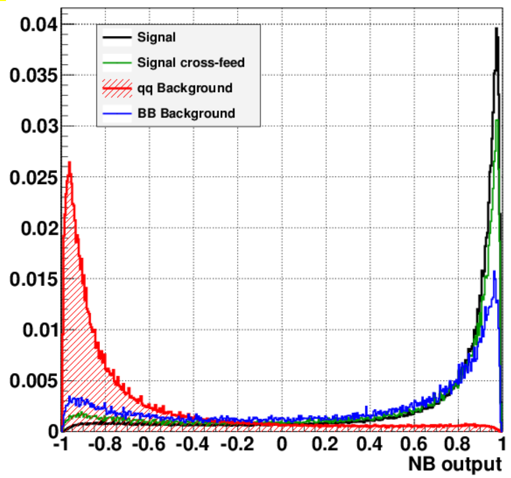
- コントロールサンプルでMCとデータの差を見積もり系統誤差を0.61%とする。

	効率
MC	91.5 %
DATA	91.0 %
Syst.	0.61 %

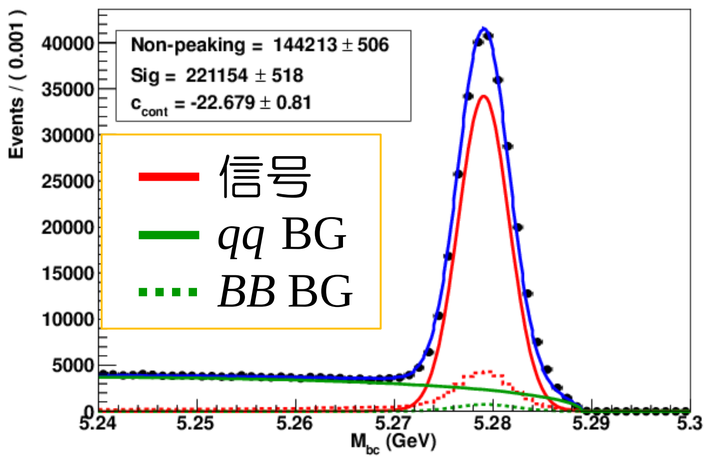
qq 背景事象抑制の系統誤差

- **qq 背景事象抑制の系統誤差はコントロールサンプル $B \to D\pi$ で評価。**
  - クリーンかつ十分な量のサンプル。
  - Bからのπを信号の γ、Dを X_s とみなす。

ニューラルネットの出力



M_{bc} (Data)



	効率
MC	91.2 %
DATA	88.4 %
Syst.	3.0 %

- コントロールサンプルでMCとデータの効率差から 3.0 %の系統誤差とする。

M_{Xs} 分布の形の系統誤差

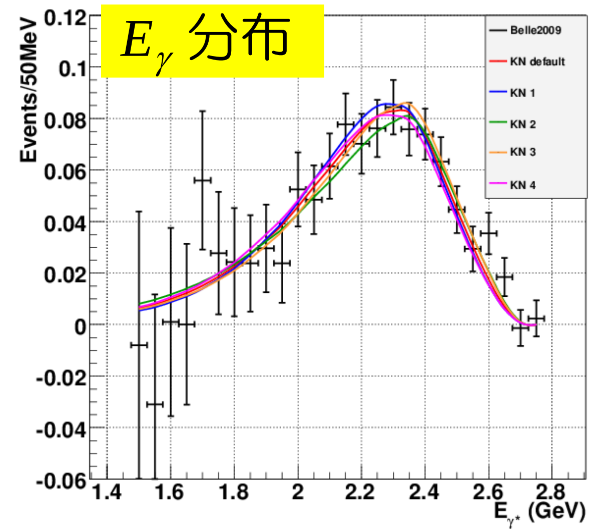
- MCのM_{Xs}分布(>1.15GeV)の形はKagan-Neubertモデルで生成。
  - Belle (Full-inclusive, 2009) の結果とBest fitのパラメータを使用。
    --> これらを動かして結果の差を系統誤差とする。

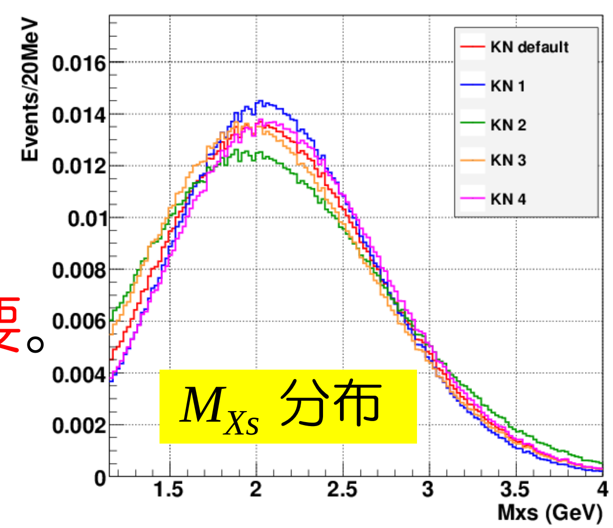
    系統誤差 : (+3.3 -8.0) %

  - 結果は分布の形に敏感。
  - 避けるためには形の情報を使わず、

M_{Xs}を細かく区切った信号数の評価が必要。

→ データを使って検討する。





ここまでの系統誤差まとめ

Source		
Number of $B\overline{B}$		$\pm$ 1.37
Detector response	γ detection	$\pm$ 2.00
	X_s particles$(K, K_s, \pi, \pi^0, \eta)$ reconstruction	$\pm$ 1.29
	K/π separation	$\pm$ 1.79
Background rejection	π^0 veto	$\pm$ 0.30
	η veto	$\pm$ 0.60
	D veto	$\pm$ 0.61
	$q\bar{q}$ suppression	$\pm$ 3.04
	Best candidate selection	$\pm$ 1.16
M_{bc} PDF	Signal PDF	
	Signal Cross-feed PDF	
	Peaking Background PDF	
	Non-peaking part from $q\bar{q}$ background	
Signal modeling	M_{X_s} shape	+3.26 -7.96
	Hadronization	
	$K^* - X_s$ transition	
	Extrapolation to $E_\gamma^* > 1.6$ GeV	
Total		

信号領域のデータ
を用いて評価

最大の誤差
やはりこれを
抑制すべき

信号領域のデータ
を用いて評価

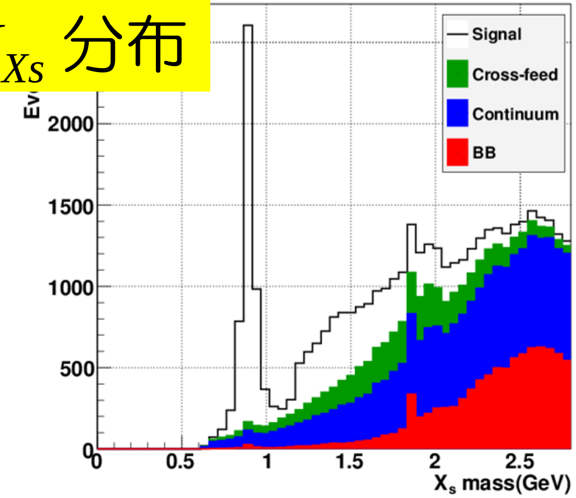
140 fb^{-1}のデータ解析

140 fb^{-1}(全データの1/5)は以前のCPの研究ですでに解析済み。

- MCのハドロン化モデルの較正が可能か検証
- 2つの崩壊分岐比算出法による結果を比較する。
  - M_{Xs}領域全体(M_{Xs}<2.8 GeV/c^2)で評価
  - M_{Xs}を0.1 GeV/c^{2}刻みに評価

    ← M_{Xs}分布の大きな系統誤差対策

M_{Xs} 分布



ハドロン化モデルの較正

- データとMCの各崩壊モードを比をチェックし、較正する。
  - MCの$K\pi$、 $K2\pi$の比が大きくずれている。
  - Pythiaのハドロン化モデルのパラメータを調節し較正。
  - 較正結果：χ^2 = 185 → 22へ改善。較正は成功！

各終状態の比(%)

較正

データとの差
比の誤差

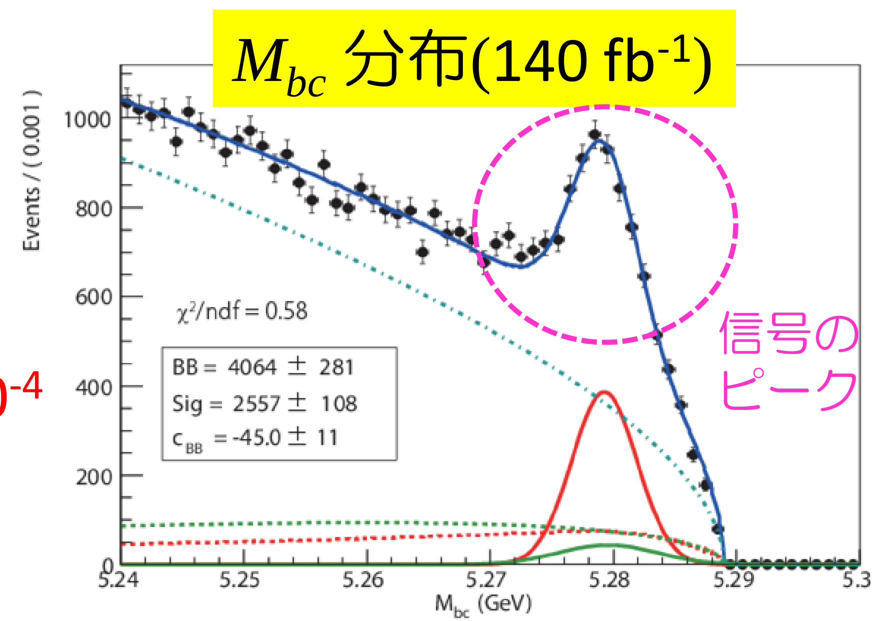
	Fraction in Data	Fraction in MC before calibration	Fraction in MC after calibration
$K\pi$ without π^0	5.06±0.89	11.7 (+7.5)	4.76 (-0.3)
$K\pi$ with π^0	2.53±0.44	6.16 (+8.2)	2.44 (+0.5)
$K2\pi$ without π^0	17.4±1.37	13.6 (-2.8)	14.7 (-2.0)
$K2\pi$ with π^0	31.6±2.47	16.0 (-6.3)	22.4 (-3.7)
$K3\pi$ without π^0	7.00±1.62	5.66 (-0.8)	5.98 (-0.6)
$K3\pi$ with π^0	15.2±4.01	15.5 (+0.1)	21.5 (+1.6)
$K4\pi$	11.6±3.80	10.5 (-0.3)	9.36 (-0.6)
$K2\pi^0$ with at most two π	2.91±9.70	7.72 (+0.5)	7.72 (+0.5)
$K\eta$ with at most two π	4.68±1.59	4.84 (+0.1)	4.90 (+0.1)
$3K$ with at most oneπ	1.93±0.61	2.63 (-0.7)	1.76 (-1.3)

崩壊分岐比算出手法：M_{Xs}領域全体で評価

- M_{Xs}領域全体で評価：M_{Xs}<2.8 GeV/c^{2}の事象をまとめてフィットし、崩壊分岐比を算出。
  - 信号数：2557±107
  - BR$(B \to X_s \gamma)$ = (信号数)/(B中間子の数×再構成効率)
    = (3.69±0.16)×10^{-4} (M_{Xs}<2.8 GeV、統計誤差)
  - 一般的に、 BR$(B \to X_s \gamma)$は E_γ>1.6 GeV の値で議論されるので外挿する。

→ BR$(B \to X_s \gamma)$=(3.93±0.17)×10^{-4}
(E_γ>1.6 GeV)

- 世界平均と+1.2σで一致。

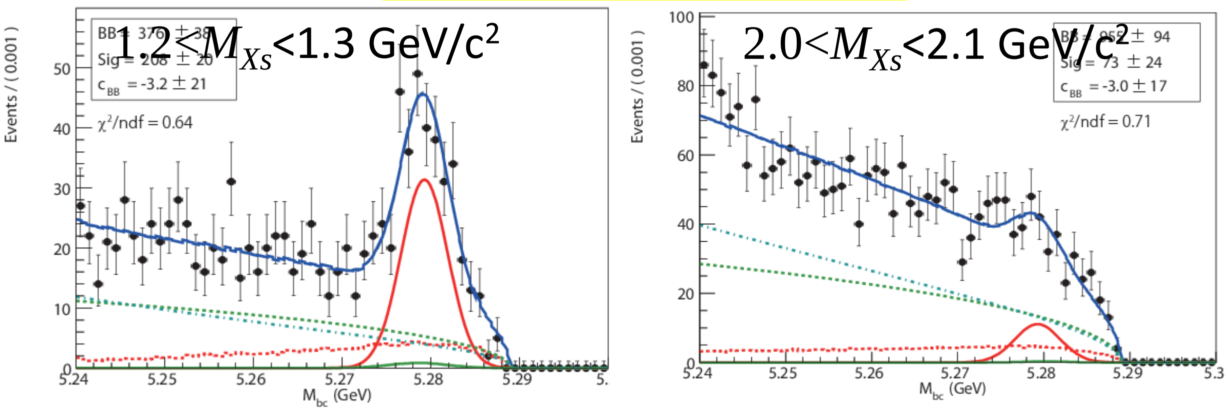


崩壊分岐比算出手法：M_{Xs}ビン毎に評価

● M_{Xs}ビン毎に評価: M_{Xs}で0.1 GeV刻みに分岐比を算出し、合計して全体の崩壊分岐比を得る。

→ M_{Xs}の形の誤差を避けることができる。

M_{bc} 分布(140 fb^{-1})



M_{X_s} bin(GeV/c^2)	$\mathcal{BR}(10^{-6})$
0.6-0.7	-0.1±0.2
0.7-0.8	-0.2±0.3
0.8-0.9	21.4±1.2
0.9-1.0	17.9±1.0
1.0-1.1	3.4±0.5
1.1-1.2	5.9±0.8
1.2-1.3	18.5±1.8
1.3-1.4	21.5±1.8
1.4-1.5	21.2±1.8
1.5-1.6	19.5±2.7
1.6-1.7	18.5±2.9
1.7-1.8	17.6±4.0
1.8-1.9	26.2±4.5
1.9-2.0	20.3±5.5
2.0-2.1	20.2±6.6
2.1-2.2	26.9±6.9
2.2-2.4	31.4±14
2.4-2.6	50.8±20
2.6-2.8	-41.0±26
Total	300±38

- BR$(B \rightarrow X_s \gamma)$ = (3.00±0.38)×10^{-4}
  (M_{Xs}<2.8 GeV、統計誤差)
- BR$(B \rightarrow X_s \gamma)$ = (3.20±0.40)×10^{-4}
  (E_γ>1.6 GeV)
- 世界平均と−0.7σで一致

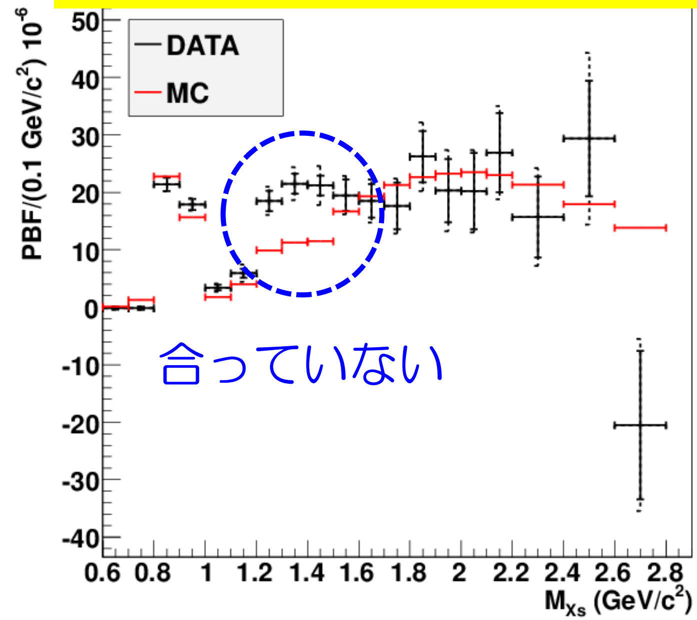
2つの算出手法の比較

- **2つの手法の比較**
  - M_{Xs}領域全体で評価：$(3.93 \pm 0.17) \times 10^{-4}$
  - M_{Xs}ビン毎に評価　：$(3.20 \pm 0.40) \times 10^{-4}$

差は大きい

これらの手法の違いはMCのM_{Xs}分布の形の情報を使うか否か。

データとMCのM_{Xs}分布比較



- データとMCのM_{Xs}分布の形の比較
  - $1.2 < M_{Xs} < 1.5$ GeV/c²で大きなずれ
  - M_{Xs}分布をMCで再現するのは困難

→ M_{Xs}ビン毎の評価を採用

全データ解析

- ハドロン化モデルの較正
- 崩壊分岐比の算出
- 系統誤差の評価
- 最終結果と議論

ハドロン化モデルの較正(1/3)

- **データとMCの各崩壊モードを比をチェックし、較正する。**
  - MCの$K\pi$、$K2\pi$の比が大きくずれている。
  - Pythiaのハドロン化モデルのパラメータを調節し較正。
  - 較正結果：$\chi^2 = 831 \rightarrow 52$
  - ずれが大きい終状態も見られる。

各終状態の比(%)	Full Data (1.15< M_{X_s} <2.8)	Default MC	Calibrated MC
$K\pi$ without π^0	4.20±0.25	10.3 (+17)	4.61 (+1.2)
$K\pi$ with π^0	2.10±0.13	5.42 (+19)	2.38 (+1.6)
$K2\pi$ without π^0	14.5±0.52	12.9 (-3.1)	15.7 (+2.4)
$K2\pi$ with π^0	24.0±0.74	15.2 (-12)	24.0 (-0.0)
$K3\pi$ without π^0	8.34±0.75	5.90 (-3.3)	4.58 (-5.0)
$K3\pi$ with π^0	16.1±1.76	15.7 (-0.2)	19.2 (+1.8)
$K4\pi$	11.1±2.80	12.3 (+0.4)	10.2 (-0.3)
$K2\pi^0$ with at most two π	14.4±3.47	14.4 (-0.0)	11.6 (-0.8)
$K\eta$ with at most two π	3.18±0.77	4.92 (+2.3)	5.35 (+2.8)
$3K$ with at most oneπ	2.00±0.30	2.98 (-3.3)	2.31 (-1.0)

較正

データとの差
比の誤差

ハドロン化モデルの較正(2/3)

- 各M_{Xs}領域でMCのハドロン化モデルをデータと比較
  - 多くの終状態で2σを超える差がある.

  → Pythiaのパラメータによる 微調整は困難。

  - 2つ目の較正を適用

各終状態の比(%)

$1.15< M_{X_s} <1.5$ GeV/c^2			$1.5< M_{X_s} <2.0$ GeV/c^2		
Mode	Data	MC	Mode	Data	MC
1	9.51±1.42	14.5 (+6.4)	1	2.39±0.35	2.91 (+1.5)
2	5.32±0.31	7.50 (+7.1)	2	1.19±0.18	1.49 (+1.7)
3	25.7±0.82	21.6 (-5.0)	3	13.6±0.76	15.0 (+1.9)
4	44.8±1.51	36.5 (-5.5)	4	19.7±1.06	22.0 (+2.2)
5	0.91±0.52	0.95 (+0.1)	5	11.3±0.94	6.58 (-5.0)
6	8.06±2.17	14.9 (+3.1)	6	21.7±2.39	23.7 (+0.8)
7	0.30±0.50	0.52 (+0.5)	7	8.80±2.70	12.2 (-1.2)
8	2.52±2.52	2.51 (+0.0)	8	14.7±2.08	8.20 (-3.1)
9	1.71±0.43	0.93 (-1.8)	9	5.00±1.27	5.78 (+0.6)
10	0.00±0.00	0.01 (+0.0)	10	1.64±0.24	1.29 (-1.5)

$2.0< M_{X_s} <2.4$ GeV/c^2			$2.4< M_{X_s} <2.8$ GeV/c^2		
Mode	Data	MC	Mode	Data	MC
1	1.21±0.64	1.15 (-0.1)	1	0.46±0.65	0.90 (+0.7)
2	0.60±0.32	0.60 (+0.0)	2	0.23±0.32	0.49 (+0.8)
3	7.06±1.37	9.64 (+1.9)	3	3.84±2.15	8.20 (+2.0)
4	8.93±2.63	13.9 (+1.9)	4	8.49±4.03	11.8 (+0.8)
5	12.1±2.53	8.33 (-1.5)	5	12.7±5.20	8.18 (-0.9)
6	16.1±5.65	22.6 (+1.1)	6	3.27±12.8	21.2 (+1.4)
7	28.0±9.10	16.5 (-1.3)	7	3.10±26.7	20.4 (-0.7)
8	15.5±15.5	18.5 (+0.4)	8	53.1±28.7	20.2 (-1.2)
9	6.82±3.69	6.16 (-0.2)	9	10.6±8.19	5.89 (-0.6)
10	3.61±1.10	1.42 (-2.0)	10	4.13±2.84	1.04 (-1.1)

直接較正

- 直接較正
  - MCの各終状態の比を直接調整しハドロン化モデルを較正する。
  - 較正には以下のScale factorを使用。

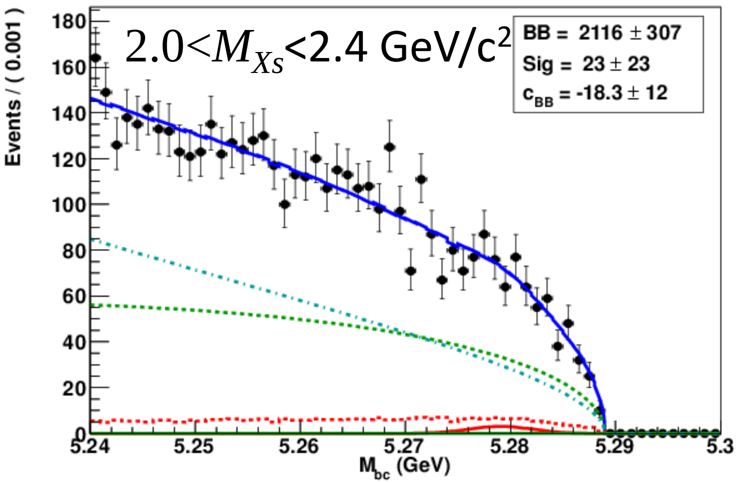
Mode	Scale factors (Data/MC)			
	1.15<MXs<1.5	1.5<MXs<2.0	2.0<MXs<2.4	2.4<MXs<2.8
$K\pi$ w/o π^0	0.66 ± 0.10	0.82 ± 0.12	1.05 ± 0.56	0.51 ± 0.72
$K\pi$ w/ π^0	0.71 ± 0.04	0.80 ± 0.12	1.00 ± 0.53	0.47 ± 0.65
$K2\pi$ w/o π^0	1.19 ± 0.04	0.91 ± 0.05	0.73 ± 0.14	0.47 ± 0.26
$K2\pi$ w/ π^0	1.23 ± 0.04	0.90 ± 0.05	0.64 ± 0.19	0.72 ± 0.34
$K3\pi$ w/o π^0	0.96 ± 0.55	1.72 ± 0.14	1.45 ± 0.30	1.55 ± 0.64
$K3\pi$ w/ π^0	0.54 ± 0.15	0.92 ± 0.10	0.71 ± 0.25	0.15 ± 0.6
$K4\pi$	0.58 ± 0.96	0.72 ± 0.22	1.70 ± 0.55	0.15 ± 1.3
$K2\pi^0$	1.00 ± 1.00	1.79 ± 0.25	0.84 ± 0.84	2.63 ± 14.2
$K\eta$	1.84 ± 0.46	0.87 ± 0.22	1.11 ± 0.60	1.80 ± 1.39
3K	0.00 ± 0.00	1.27 ± 0.19	2.54 ± 0.77	3.97 ± 2.73

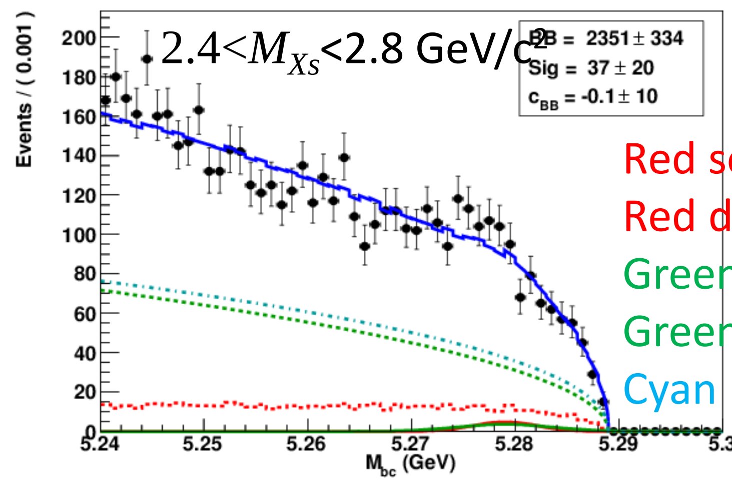
  - M_{Xs}>2.0 GeVでの$K2\pi^0$(π, 2π) の比の誤差が大きい。

$2\pi^0$モードの較正

● データから得た$K2\pi^0(\pi, 2\pi)$モードの比の精度をチェック。

M_{bc} of $K2\pi^0(\pi, 2\pi)$ modes





Red solid : Signal
Red dashed : Cross feed
Green solid : Peaking BG
Green dashed : BB BG
Cyan : qq BG

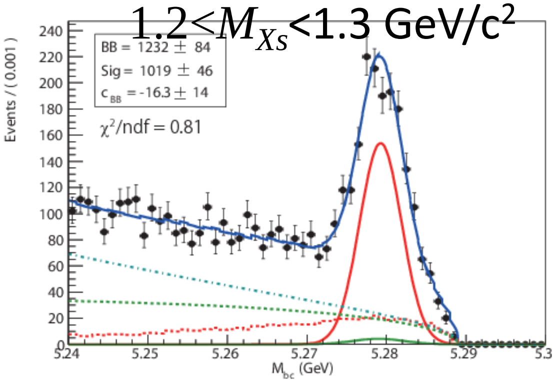
- M_{Xs}>2.0 GeVで$2\pi^0$ モードの信号測定は困難。
  → 較正に使うべきではない。
- M_{Xs}>2.0 GeVで$2\pi^0$ モードの比はMCを信じる。
- 系統誤差の評価では +100%-50% 比を変化させる。

崩壊分岐比

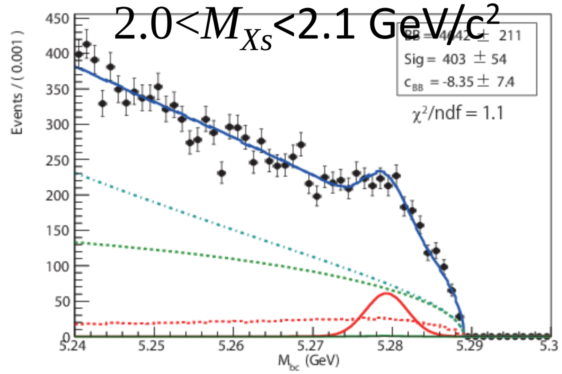
- M_{Xs}の各ビンをフィットし、信号数と較正後のMCより得た再構成効率から、崩壊分岐比を算出。

M_{bc} 分布(全データ)

$1.2<M_{Xs}<1.3$ GeV/c^2



$2.0<M_{Xs}<2.1$ GeV/c^2



- 統計誤差はM_{Xs} >2.2 GeVが支配的。
- $BR(B \to X_s\gamma)$ = (3.51±0.17)×10^{-4}
  (M_{Xs}<2.8 GeV/c^2、統計誤差のみ)

M_{Xs}の各ビンの分岐比

M_{X_s} bin(GeV/c^2)	$\mathcal{BR}(10^{-6})$
0.6-0.7	-0.1±0.1
0.7-0.8	0.3±0.1
0.8-0.9	19.8±0.5
0.9-1.0	15.7±0.5
1.0-1.1	2.9±0.3
1.1-1.2	4.8±0.5
1.2-1.3	18.7±0.8
1.3-1.4	21.8±1.0
1.4-1.5	21.2±1.0
1.5-1.6	22.0±1.4
1.6-1.7	22.4±1.1
1.7-1.8	24.8±1.4
1.8-1.9	26.7±2.2
1.9-2.0	26.3±2.9
2.0-2.1	23.3±3.1
2.1-2.2	21.0±2.6
2.2-2.4	40.3±7.2
2.4-2.6	27.9±8.6
2.6-2.8	11.5±11
Total	351±17

X_s の崩壊モデル系統誤差

残りの系統誤差を見積もる。

- ハドロン化モデル
  - 各モードの比を±1σ、またはデータの比に合わせたときの結果の差を系統誤差とする。
  - 系統誤差：6.7 %
- 再構成していないモードの影響
  - 再構成しているモード：76.4 % (1.15<M_{Xs}<2.8 GeV/c^2)
  - ハドロン化モデルがデータから大きくずれない範囲でPythiaのパラメータを動かし、そのときの結果のずれを系統誤差とする。
  - 系統誤差：1.6 %

$B \to X_s\gamma$ の崩壊分岐比測定結果

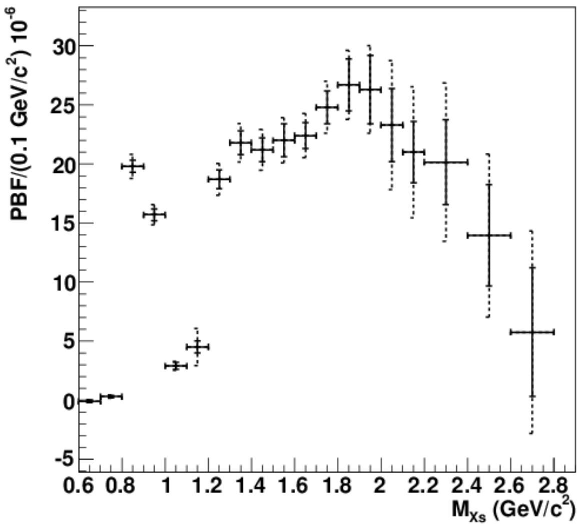
- 系統誤差も含めた最終結果を算出。
  - 系統誤差はハドロン化モデルが支配的。
  - $BR(B \to X_s\gamma)$ = (3.51±0.17±0.33)×10^{-4} (M_{Xs}<2.8 GeV/c^2)
  - E_γ> 1.6 GeVへの外挿。

    $BR(B \to X_s\gamma)$ = (3.74±0.18±0.35)×10^{-4} (E_γ> 1.6 GeV)

系統誤差の内訳

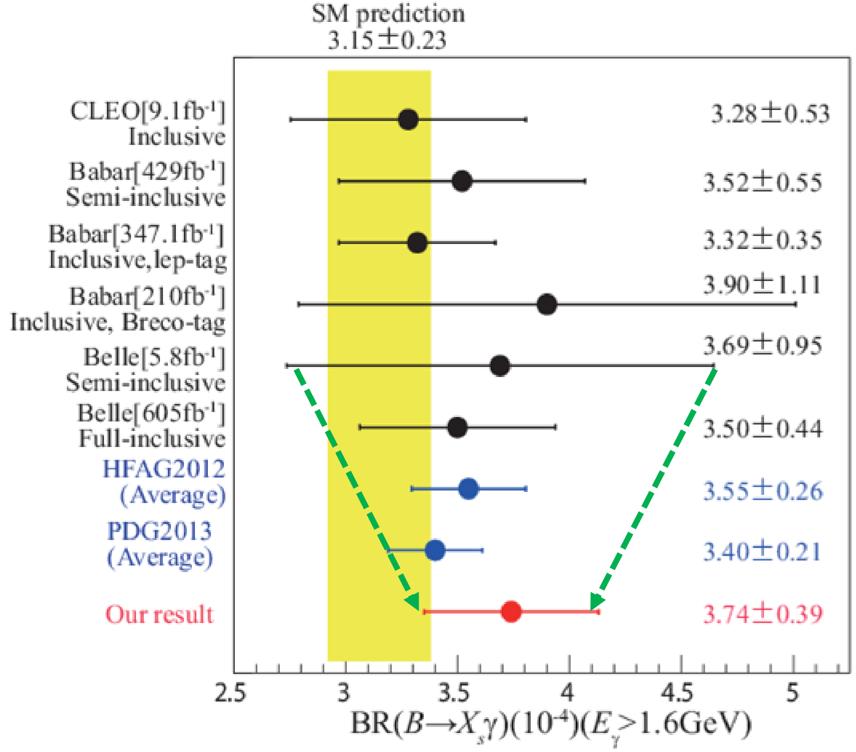
Source	Systematic uncertainty (%)
$B\overline{B}$ counting	1.37
Detector response	2.98
Background rejection	3.38
M_{bc} PDF	5.06
Hadronization model	6.66
Missing mode	1.59
Total	9.3

各M_{Xs}ビンでの崩壊分岐比

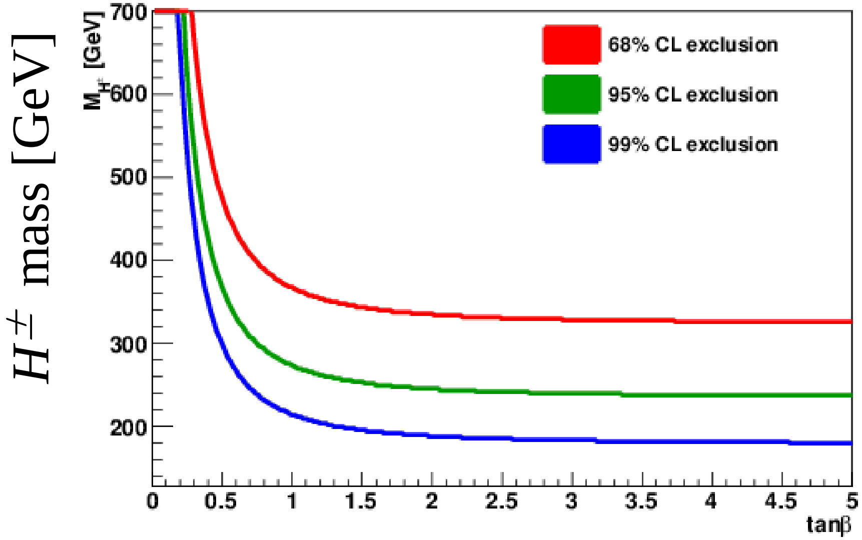


測定結果の考察

各測定結果やSMの予言との比較



本結果の2HDMへの制限



- 世界平均($(3.55\pm0.26)\times10^{-4}$)とは0.4σで一致。
- 標準理論の予言($(3.15\pm0.23)\times10^{-4}$)とは1.3 σで一致。
- 本結果単独で2HDMで$M_{H\pm}$>238 GeV/c^2(95%CL)の制限を与える。

結論

- Belle実験の全データ711fb^{-1} (7.72億BBペア)を用いて、準包括的再構成法を用いた $\boldsymbol{B \to X_s \gamma}$ の崩壊分岐比測定を行った。
  - $BR(B \to X_s\gamma)$ = (3.74±0.18±0.35)×10^{-4} (E_γ> 1.6 GeV)
- 世界平均とは0.4σで一致。
- 標準理論の予言とは1.3 σで一致。
- 本結果は2HDMで$M_{H\pm}$>238 GeV/c^2(95%CL)の制限を与える。