
準包括的再構成法を用いた $B \rightarrow X_s \gamma$ の崩壊分岐比の測定

齋藤 智之 (東北大理)



石川明正、山本均、
他 Belle collaboration



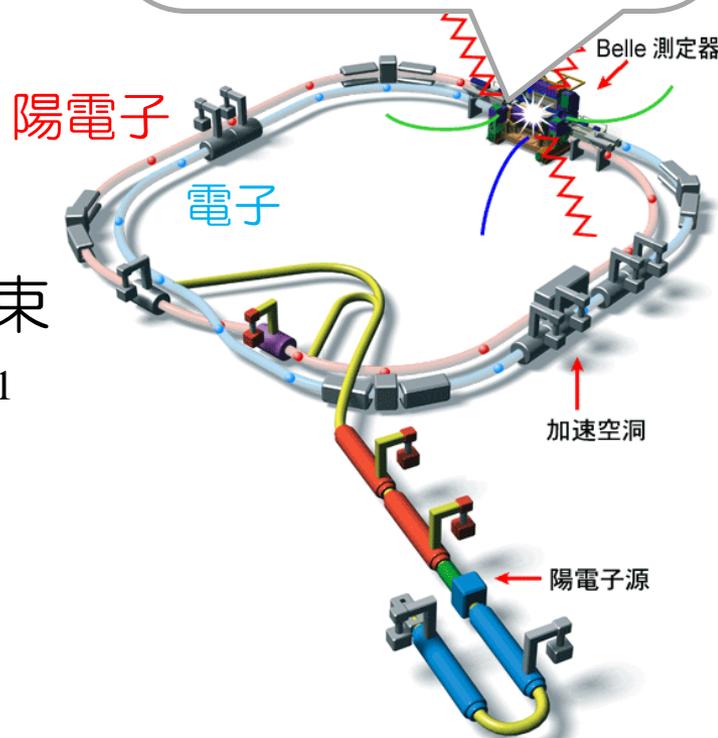
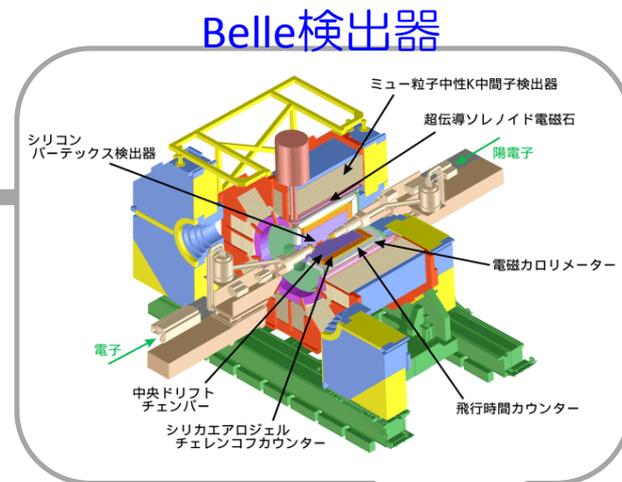
2013/09/21 日本物理学会2013年秋季大会 @ 高知大学

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
- ▶ 1秒当たり20の BB ペアを生成
- ▶ 衝突点でビームは $\sim 100\mu\text{m} \times 3\mu\text{m}$ に収束
- ▶ ピークルミノシティ： $2.1 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
- ▶ 最終積分ルミノシティ： $\sim 1000 \text{fb}^{-1}$
- ▶ Belle II に向けてアップグレード中。
2016年物理ラン開始予定。

現在も最終データを用いて精力的に解析中



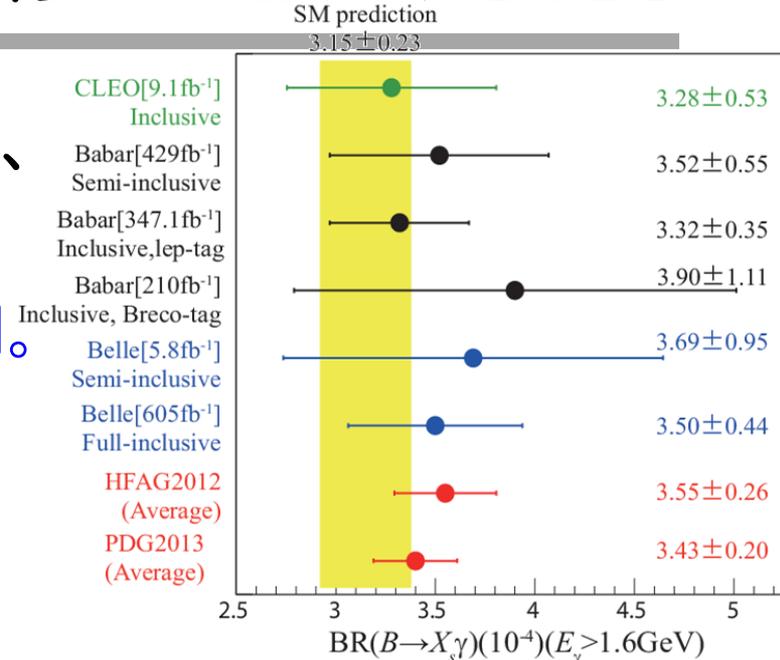
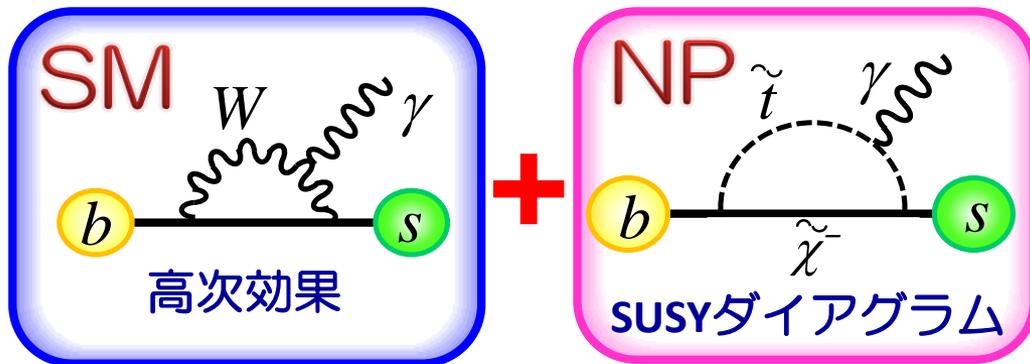
KEKB加速器

$b \rightarrow s\gamma$ 遷移

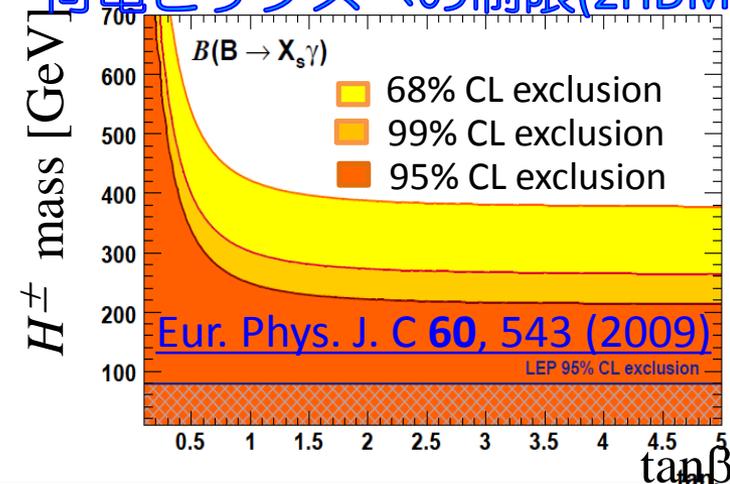
崩壊分岐比測定結果

- ▶ 標準理論ではツリーレベルが禁止で、ループダイアグラムで起こる。
- ▶ ループを回る重い新粒子探索に有用。
- ▶ 膨大な γ 背景事象により、LHCbでは難しい解析。
- ▶ 誤差の範囲でSMと一致。

--> 新物理モデルに強い制限



荷電ヒッグスへの制限(2HDM)



$B \rightarrow X_s \gamma$ の再構成：準包括的再構成法

● $B \rightarrow X_s \gamma$ 信号 = 高エネルギー γ + ストレンジネス1の終状態(X_s)

● 準包括的再構成法：多くの X_s の崩壊を再構成し、 γ とともに B を再構成。

▶ ハドロン化の理論的不定性を抑えることが可能。

▶ B を再構成することで、背景事象を抑えることが可能。

▶ 本研究では、41の終状態を再構成
= 全体の69.0% (K_L モードも含む)

X_s の内訳(%)(MC)	
$K\pi$	8.3
$K2\pi$	15.0
$K3\pi$	11.0
$K4\pi$	5.8
$K5\pi$	4.7
$K\eta(\pi, 2\pi)$	3.5
$2\pi^0(\pi, 2\pi)$	7.1
$3K$	0.9
$3K\pi$	1.6
バリオン	1.3
K_L モード	27.0
その他	20.3

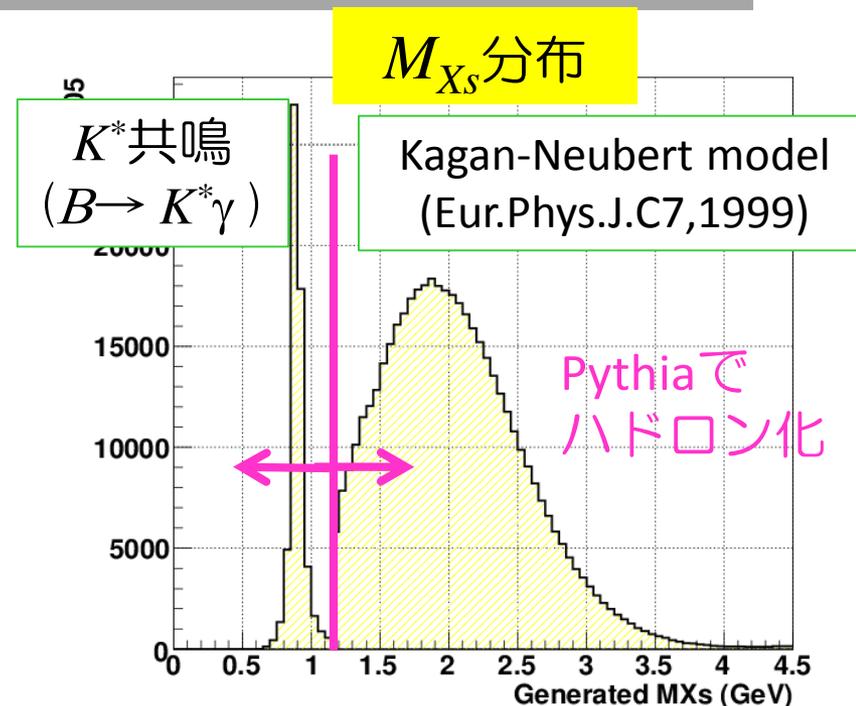
信号再構成まで以前のJPS(2012/03)で報告済み

本解析のポイント

- 統計は十分(5.4×10^5 事象)で
系統誤差が支配的。

支配的な系統誤差： X_s のモデル

- ▶ M_{X_s} 分布モデルの誤差
- ▶ X_s のハドロン化モデルの誤差



- 📌 データからモデルを理解をするために背景事象を十分に抑制することが必要(特に高 M_{X_s} 領域)
- 📌 系統誤差の算出手法の確立が必要

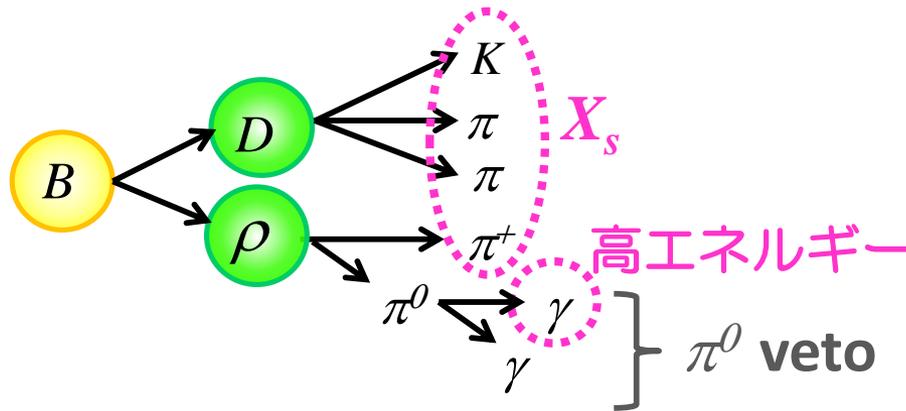
--> 本発表ではこれらの研究結果を報告する。

背景事象の除去

- ▶ D 崩壊由来の背景事象抑制
- ▶ qq 背景事象の抑制

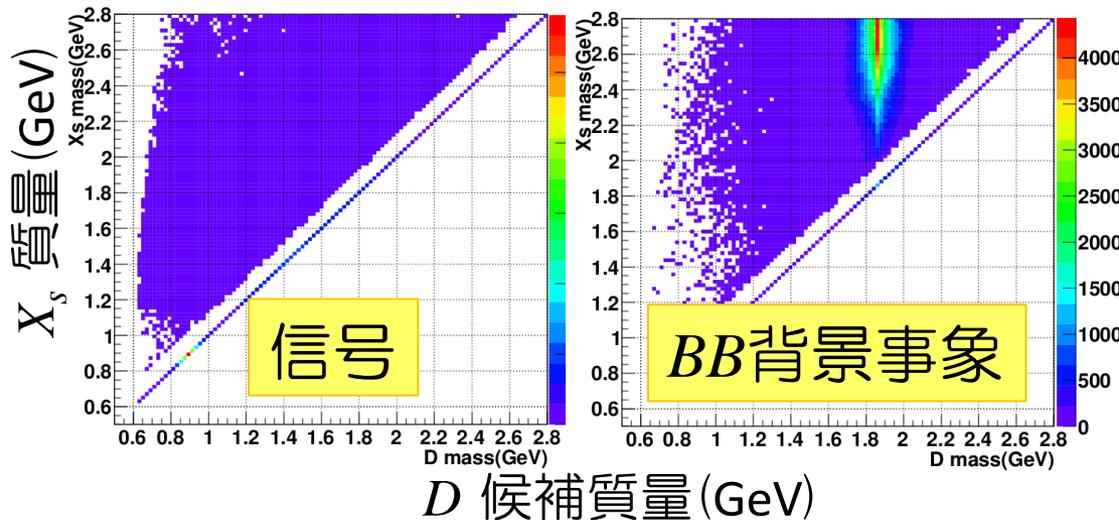
D 崩壊由来の背景事象抑制：D veto

- $D(+\pi^0)$ を含む崩壊からの背景事象が多く混入。
 - ▶ 主に $B \rightarrow D\rho$ (分岐比が 10^2 倍以上)。



D veto

X_s の再構成に使用した
粒子でDの質量の組む。
--> D質量で除去。

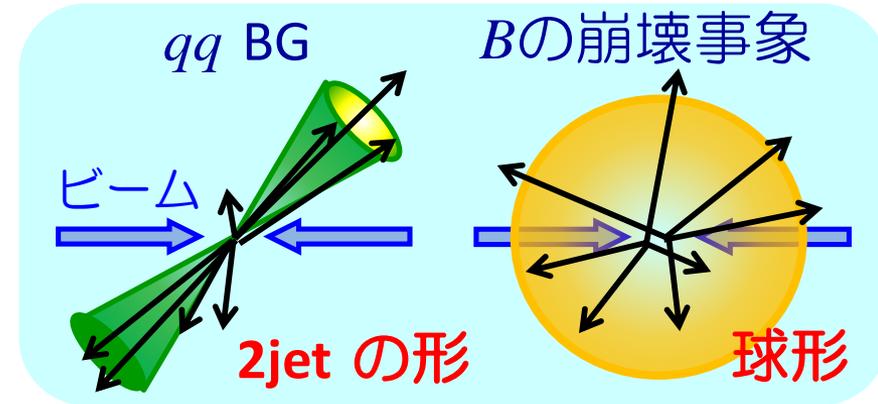


- ▶ $M_{X_s} > 2.0$ GeVでDの質量 (1835-1895MeV)を除去。
--> 信号を97%保持し、
DからのBGを23%に低減。

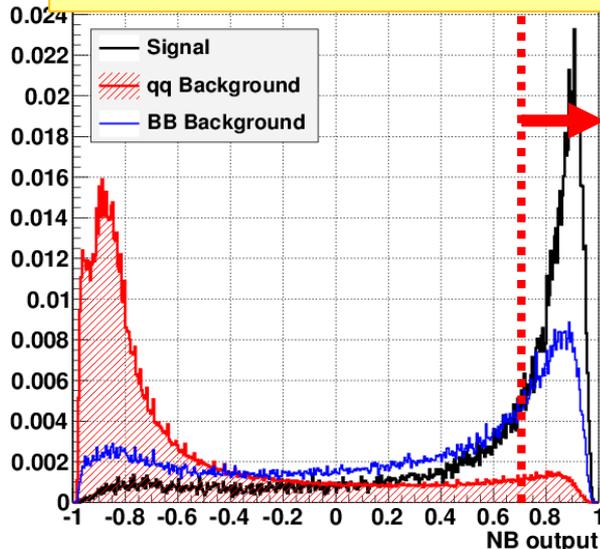
qq 背景事象の抑制

- 最大のBG源は軽いクォークjet事象 (qq BG)。

- ▶ イベント形状で抑制。
- ▶ ニューラルネット (NeuroBayes) により最適な背景事象分離変数を計算。



ニューラルネットの出力



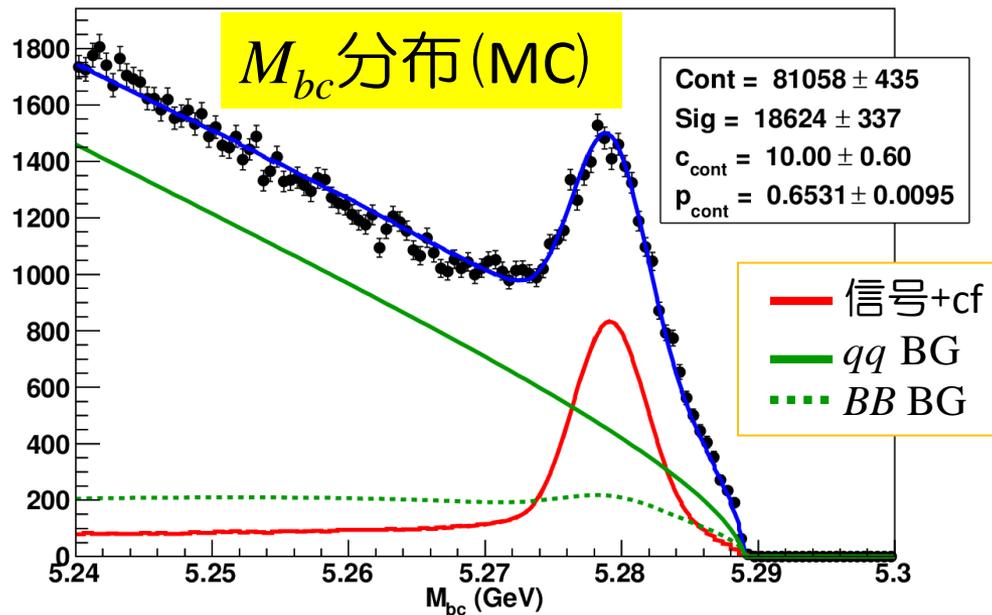
系統誤差抑制のため

- ▶ 高 M_{X_S} 領域のSignificanceで最適化。
--> 信号を60%保持し、 qq BGを4%に低減。

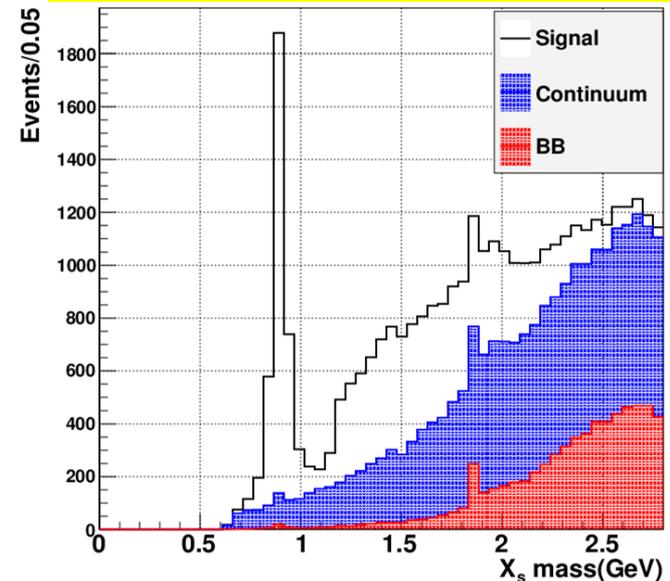
信号抽出方法

- M_{bc} 分布を評価してシグナル数を得る。

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



M_{X_s} 分布 ($M_{bc} > 5.27$ GeV)



- ▶ 統計誤差1.8%程度が期待できる。

$M_{X_s} > 2$ GeVでも
 Significance=9 以上確保

系統誤差

特に系統誤差算出手法の確立が必要な

- ▶ 背景事象除去
- ▶ X_s のモデル

について報告する。

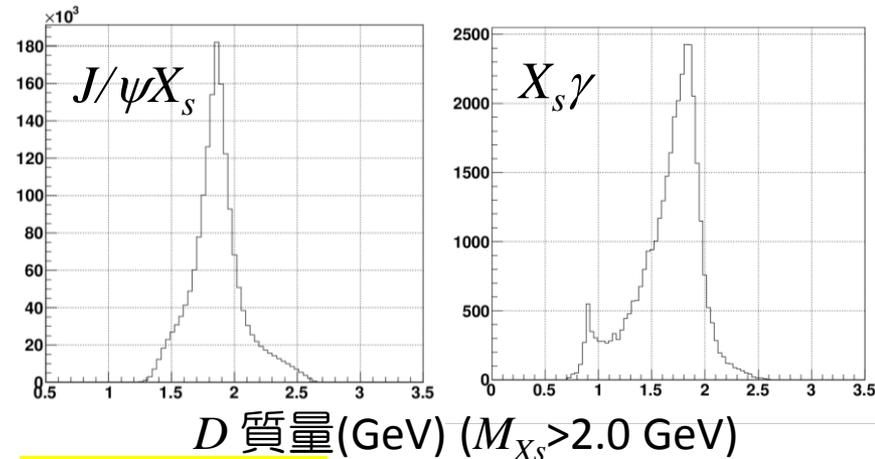
D vetoの系統誤差

● D vetoの系統誤差は $B \rightarrow J/\psi X_s, J/\psi \rightarrow ll (l=e, \mu)$ で見積もる。

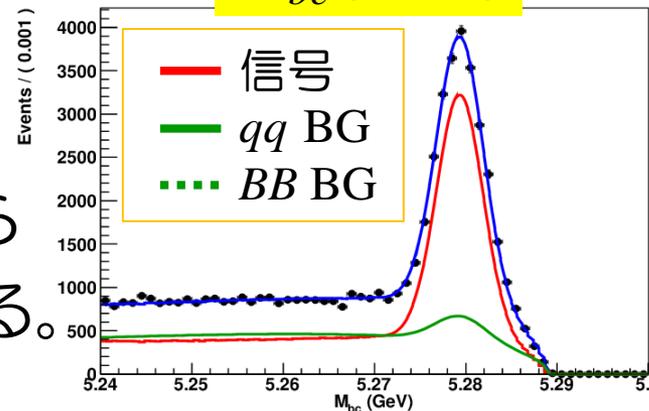
▶ J/ψ からのレプトン1つを γ 、
他方を X_s の子供の π とみなす。

▶ $J/\psi X_s$ 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。

▶ ▶ ▶ MCとデータの差から
1.84%の系統誤差とする。



M_{bc} (Data)



	効率
MC	92.07 %
DATA	90.38 %
Syst.	1.84 %

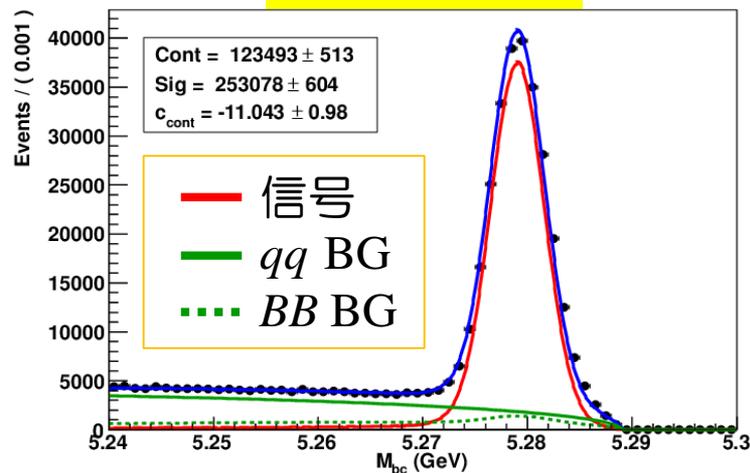
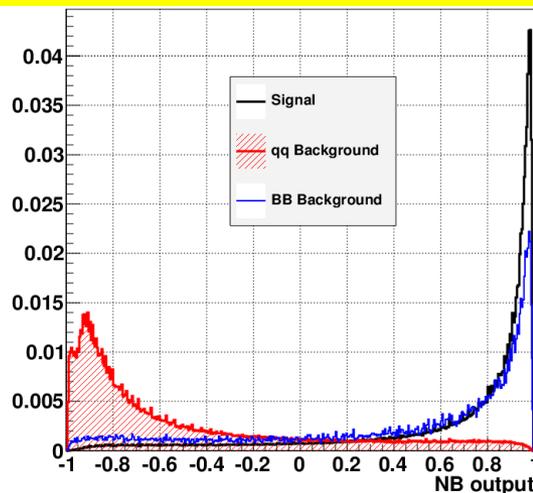
qq 背景事象 抑制の系統誤差

● qq BG抑制の系統誤差はコントロールサンプル $B \rightarrow D\pi$ を用いる。

- ▶ 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	89.38 %
DATA	87.54 %
Syst.	2.06 %

▶ ▶ ▶ MCとデータの効率差から**2.06%の系統誤差**とする

M_{X_S} 分布の形の系統誤差

● M_{X_S} 分布(>1.15GeV) の形は Kagan-Neubert モデル(Eur.Phys.J.C7:5-27,1999)で生成。

▶ Belle (完全包括的, 2009) の結果をよく再現。

▶ 2つのパラメータ

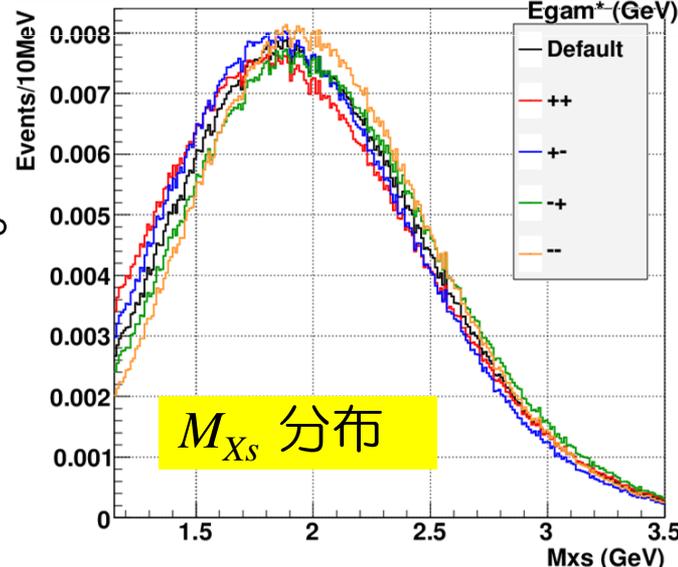
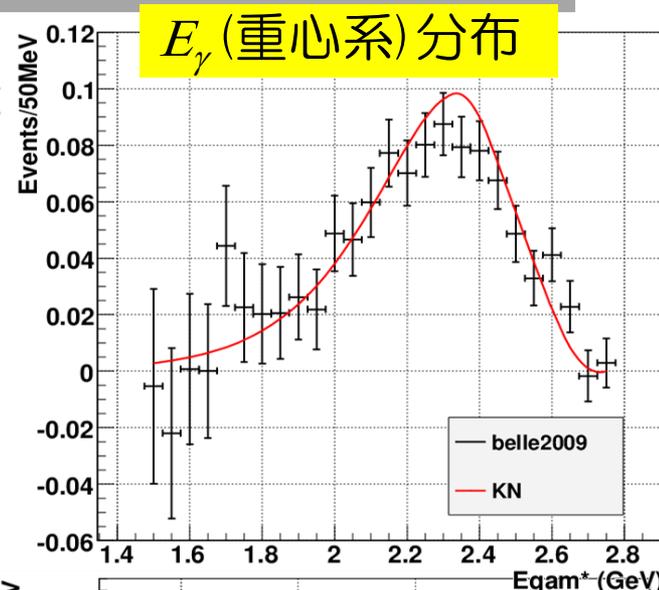
- $m_b = (4.574 \pm 0.032) \text{ GeV}$

- $\mu_\pi^2 = (0.459 \pm 0.037) \text{ GeV}^2$

→ これらを動かして系統誤差とする。



系統誤差 : (+3.83 -1.46) %



X_s の崩壊モデルの系統誤差

- 信号再構成効率 ϵ は X_s の終状態に依存。
 - > MCのハドロニ化モデルにデータを用いた校正が必要。
- ▶ 再構成しているモード(69.0%)
 - データを用いて各モードでMCを校正。
- ▶ 再構成していないモード(31.0%)
 - 校正したMCを用いて、Pythiaのfragmentationのパラメータを動かして割合を変動させ系統誤差とする。
 - 最も影響のあるパラメータはfragmentation中にスピン1の軽いメソン(u, d)を作る確率
- ▶▶▶ これらの系統誤差はデータを使って評価する。

誤差まとめ

統計誤差		1.81 %
BB の数		1.37 %
各粒子の再構成効率、PIDの効率		3.51 %
背景事象除去	π^0/η veto	0.67 %
	D veto	1.84 %
	qq BG	2.06 %
M_{bc} PDF		データで算出
X_s のモデル	M_{X_s} 分布の形	+3.83-1.46 %
	ハドロン化	データで算出
	再構成していない X_s	データで算出

▶▶▶ 次はデータで崩壊分岐比を評価する。

まとめと予定

● まとめ

- ▶ 準包括的再構成法を用いた $B \rightarrow X_s \gamma$ の測定を行っている。
- ▶ 背景事象の抑制に成功し、統計誤差は1.8%程度が期待できる。
- ▶ 系統誤差の研究を行い、誤差の算出と手法の確立を行った。

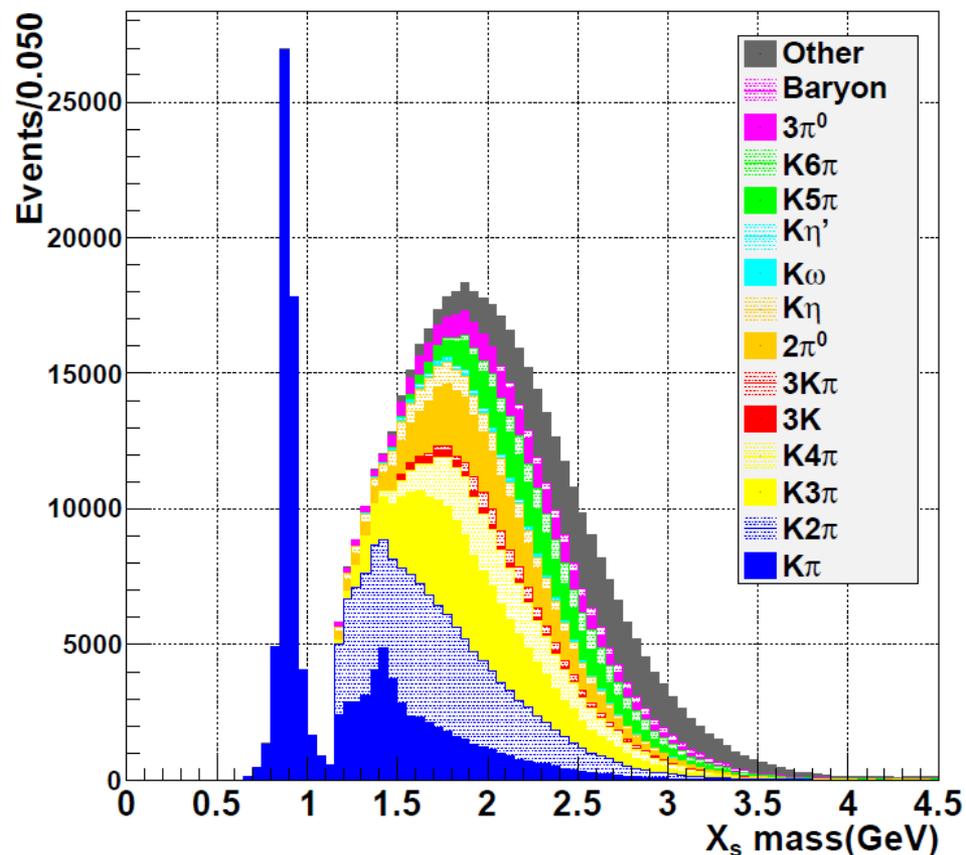
● 予定

- ▶ データを用いてMCを較正し、ハドロン化の系統誤差を求めらる。
- ▶ 崩壊分岐比の結果を出す。

バックアップ

X_s decay in event generator

X_s mass (generator information)



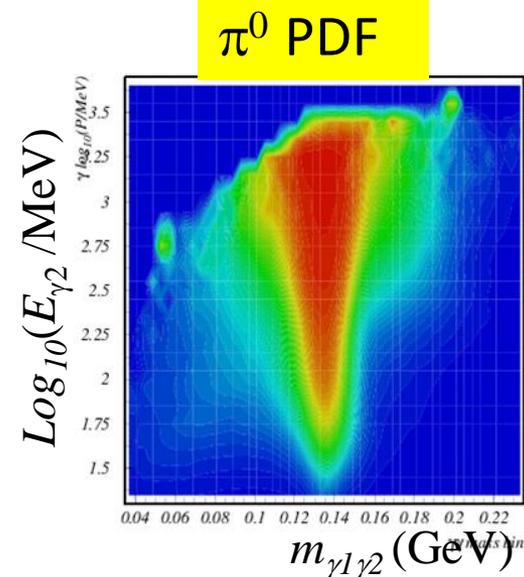
$\pi^0(\eta)$ 由来の背景事象抑制： π^0/η veto

● 特徴的な信号は高エネルギー γ

- ▶ 背景事象は $\pi^0(\eta) \rightarrow \gamma\gamma$ 由来が主
- ▶ 他の γ 候補(γ_2)と組んだときの
 - 不変質量 $m_{\gamma_1\gamma_2}$
 - E_{γ_2}

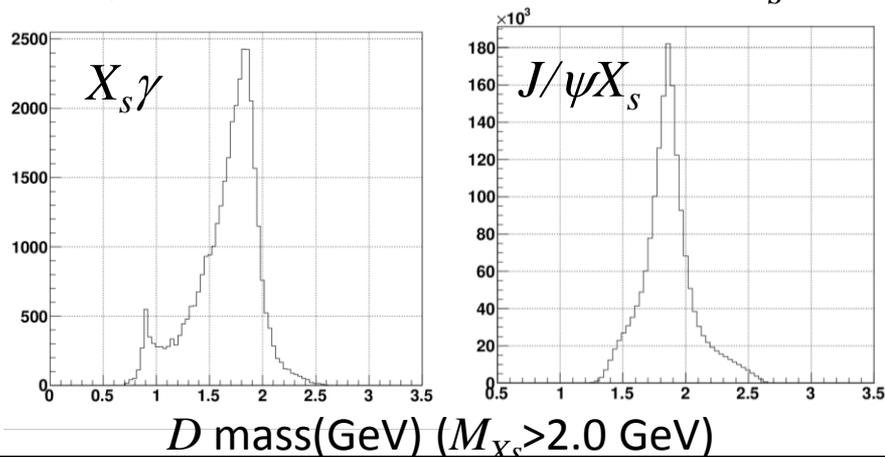
で定義した $\pi^0(\eta)$ の確率で抑制

--> 信号を75%保持し、 π^0 を背景事象を20%に低減



Systematics on D veto

- In D veto for peaking BG, D candidates are reconstructed by reconstructed X_s children and are vetoed by the mass in $M_{X_s} > 2.0$ GeV.
- In syst. study, $B \rightarrow J/\psi X_s$, $J/\psi \rightarrow ll$ ($l=e, \mu$) is used and a lepton from J/ψ is added to X_s child to measure $M_{X_s} > 2.0$ GeV.
 - ▶ In X_s^\pm , an opposite charged lepton is treated as π^\pm in X_s children and another lepton is treated as hard γ .
 - ▶ In X_s^0 , a higher energy lepton is treated as hard γ and another lepton is treated as π^\pm in X_s children.



D mass distribution of $J/\psi X_s$ around nominal D mass is similar to that of $X_s \gamma$.

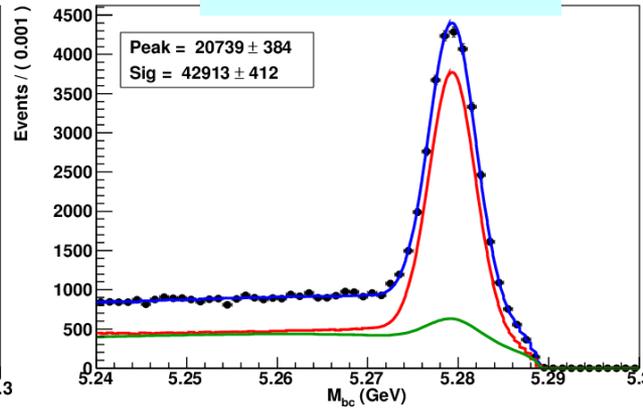
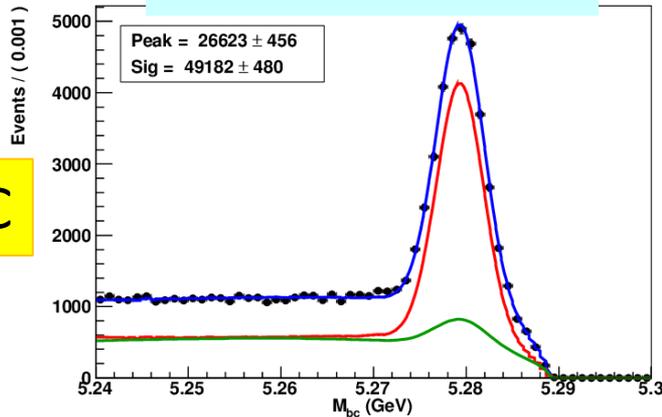
Systematics on D veto

- Efficiency on D veto is evaluated by using control sample $B \rightarrow X_s J/\psi$.

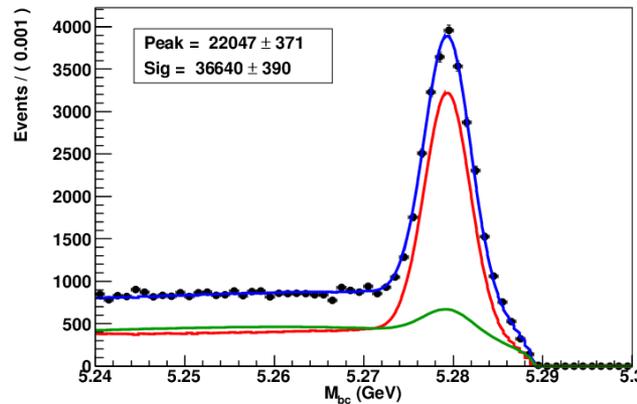
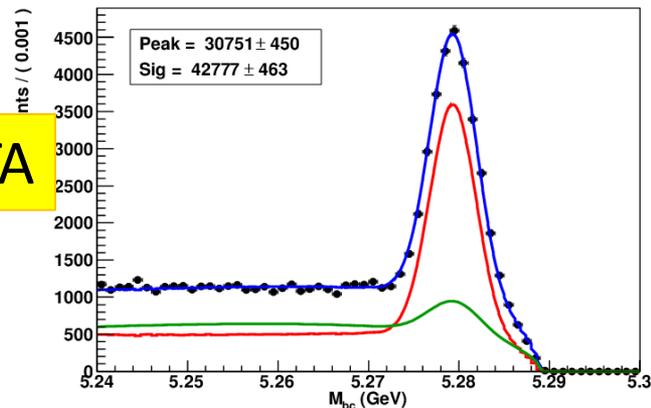
Without D veto

With D veto

MC



DATA



	Efficiency
MC	92.07 %
DATA	90.38 %
Syst.	1.84 %

Systematics on qq suppression

- Control sample $B \rightarrow D\pi$ is used to estimate the systematic error on qq suppression.

Reconstruction

- ▶ π from B is treated as γ .
- ▶ Only final states which D decays are reconstructed (22 modes of 41 X_s modes).
- ▶ Difference on selection
 - $\gamma (\pi)$: no $E_{\mathcal{G}}/E_{25}$ cut, π^0/η veto
 - $X_s (D)$: no D veto, $1850 < M_D < 1880$ MeV

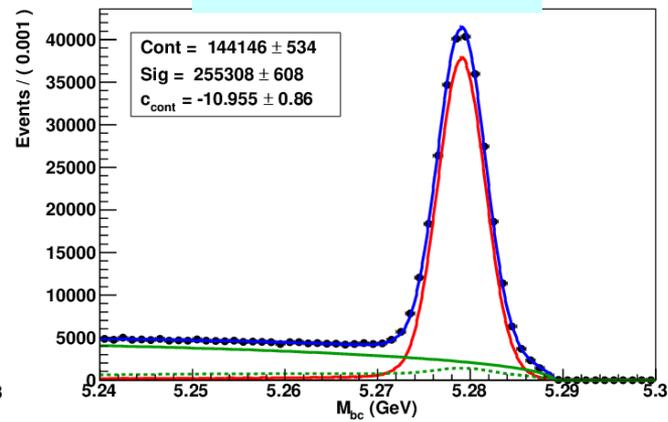
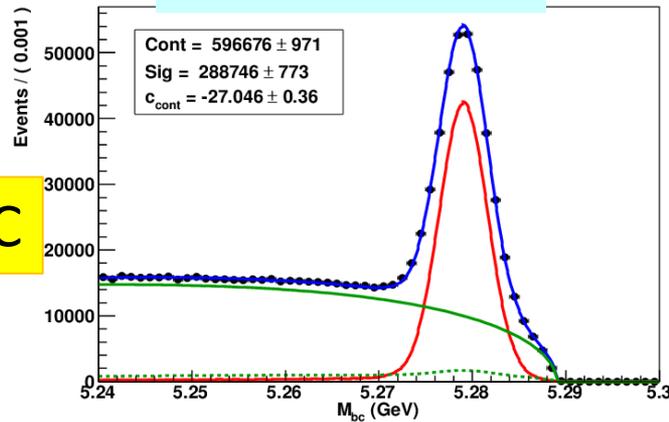
Systematics on qq suppression

- Efficiencies on qq suppression are evaluated by using a control sample $B \rightarrow D\pi$.

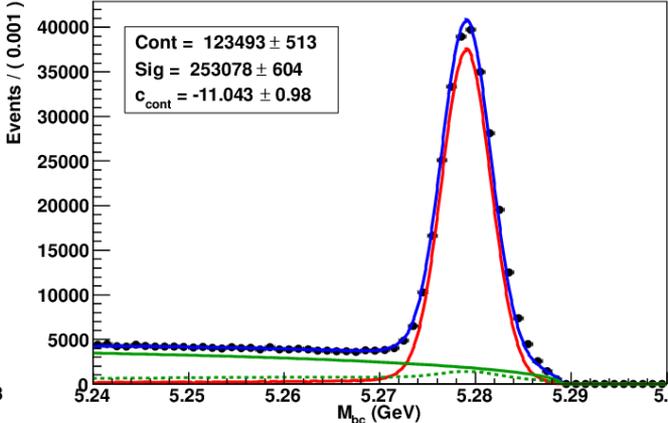
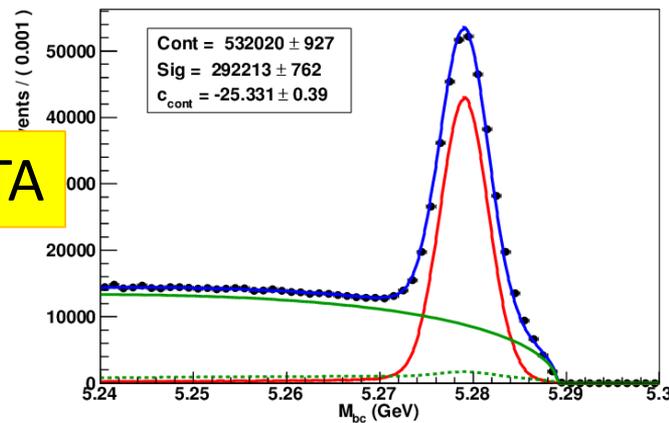
Before qqsup

After qqsup

MC



DATA



	Efficiency
MC	89.38 %
DATA	87.54 %
Syst.	2.06 %

Systematics on PDF for M_{bc}

- Systematics on signal, cross-feed and BB PDF are evaluated because the shape parameters are fixed in M_{bc} fit.

Signal and Cross-feed PDF

- ▶ PDF obtained from $B \rightarrow D\pi$ data.
- ▶ The fixed shape parameters are fluctuated by the statistical error to extract signal yield, whose width is taken as the syst.

BB background PDF

- ▶ PDF can be calibrated by data with anti- π^0/η veto.
→ Study is ongoing.

Detector response

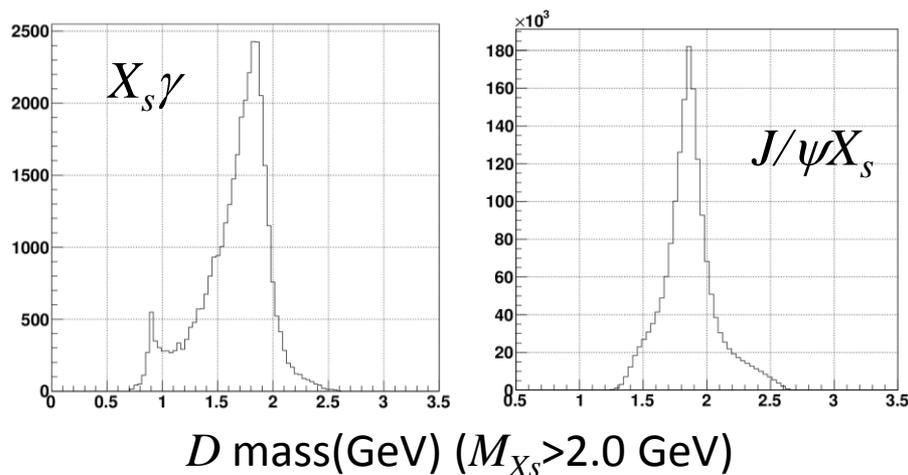
	Reference	Method
PID	PID joint web page	Program on the PID page
γ detection	BN711	
Charged track	BN1165	Data/MC = $(99.9 \pm 0.32)\%$ per track
$\pi^0(p > 200\text{MeV})$	BN645	Data/MC = $(92.4 \pm 1.42)\%$ per π^0
$\eta(p > 200\text{MeV})$	BN645	Data/MC = $(104 \pm 2.00)\%$ per η
Slow π^0 ($p < 200\text{MeV}$)	BN1176	[SVD1]:Data/MC = $(105 \pm 5.87)\%$ per π^0 [SVD2]:Data/MC = $(102 \pm 2.41)\%$ per π^0
Slow η ($p < 200\text{MeV}$)	BN1176	Same as slow π^0
K_s	BN1207	[SVD1]:Data/MC = $(99.0 \pm 1.03)\%$ per K_s [SVD2]:Data/MC = $(98.1 \pm 0.49)\%$ per K_s

FindKs, not nisKsfinder

- ▶ Each systematic is calculated every final state and finally combined using the weight.

Systematics on D veto

- In D veto for peaking BG, D candidates are reconstructed by X_s children and are vetoed by the mass in $M_{X_s} > 2.0$ GeV.
- In syst. study, $B \rightarrow J/\psi X_s$, $J/\psi \rightarrow ll$ ($l=e, \mu$) is used and a lepton from J/ψ is treated as X_s child to measure $M_{X_s} > 2.0$ GeV.
 - ▶ In X_s^\pm , an opposite charged lepton is treated as π^\pm in X_s child and another lepton is treated as hard γ .
 - ▶ In X_s^0 , a higher energy lepton is treated as hard γ and another lepton is treated as π^\pm in X_s child.
 - ▶ Lepton selection
 - $p_{\mu(e)} > 0.80(0.40)\text{GeV}$,
 - $\mu(e)\text{ID} > 0.97(0.80)$
 - ▶ Di-lepton mass cut
 - $3.05(3.02) < M_{\mu\mu(ee)} < 3.12\text{GeV}$



$B \rightarrow X_s \gamma$ branching ratio

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				$343 \pm 21 \pm 7$

$b \rightarrow s \gamma$

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

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

$B \rightarrow X_s \gamma$ asymmetries

- **Direct CPV** : Amplitude difference and between B and B

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

- ▶ Theoretical and experimental error are canceled. (Exclusive is also sensitive to NP)
- ▶ SM = $\sim 0.5\%$

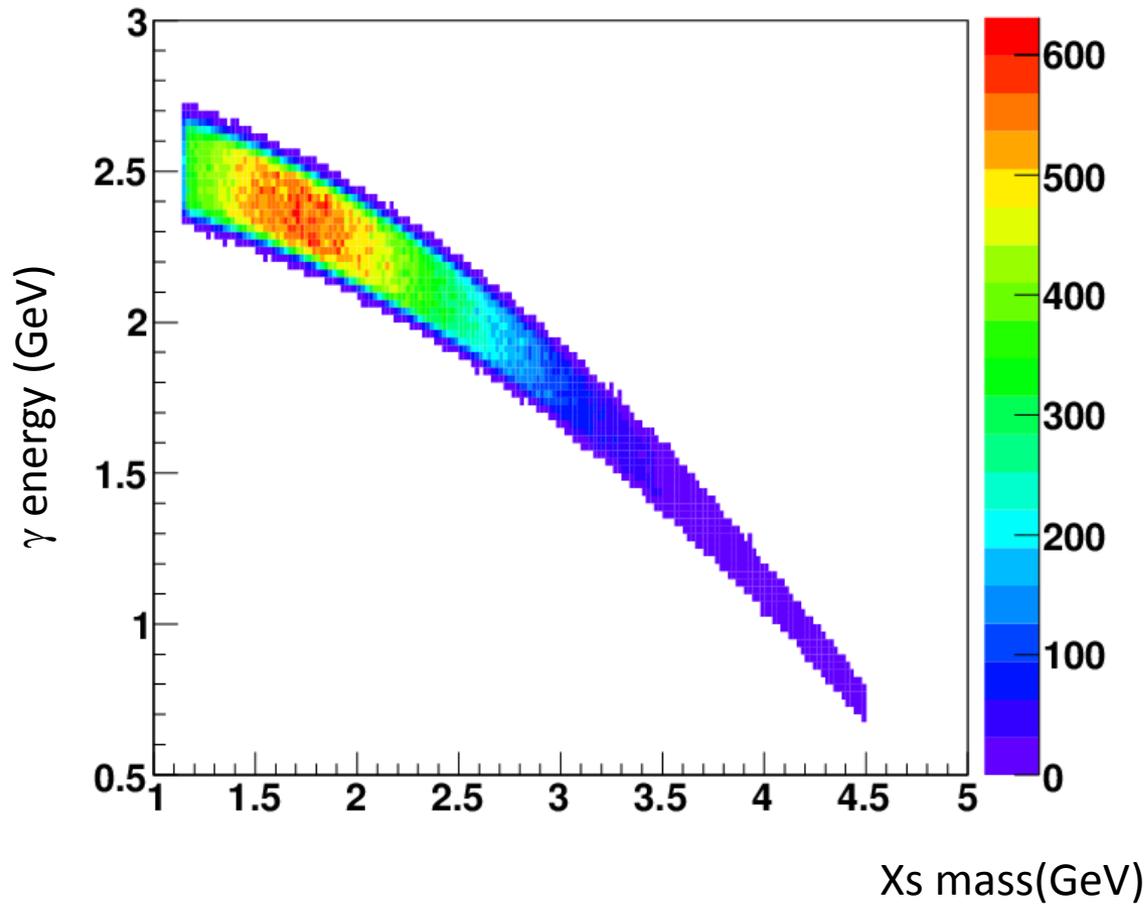
- **Isospin violation** : Amplitude difference and between B and B

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

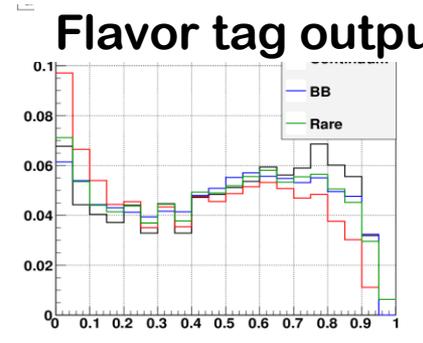
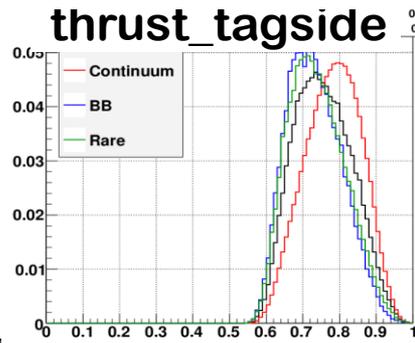
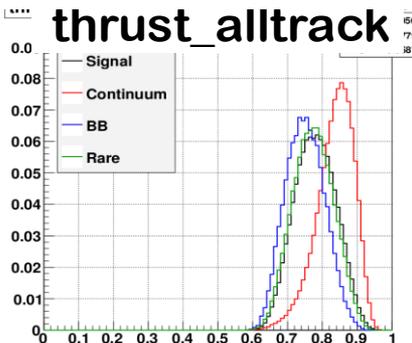
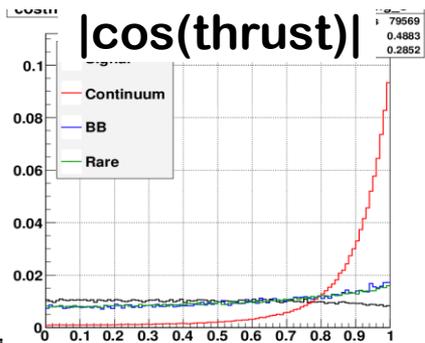
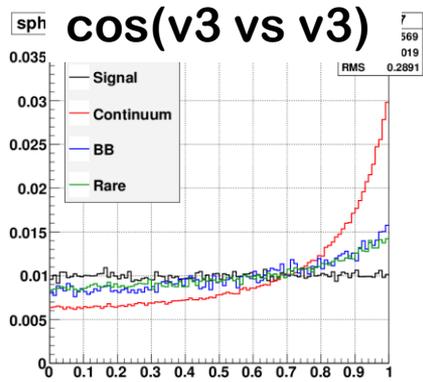
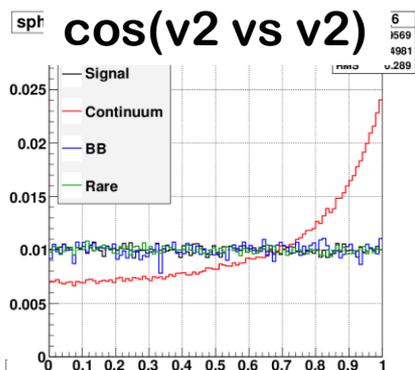
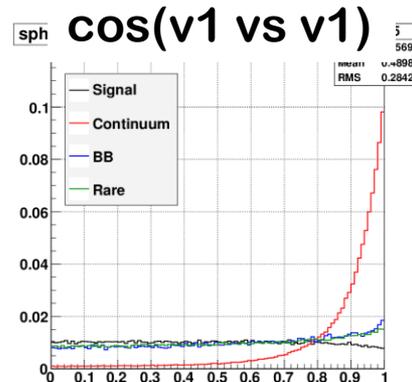
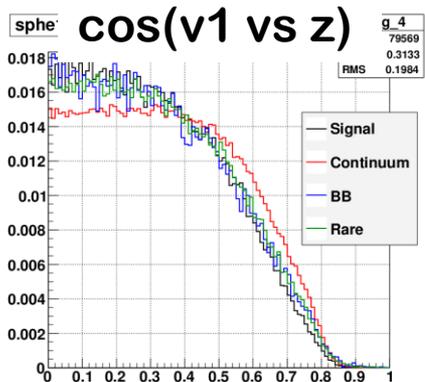
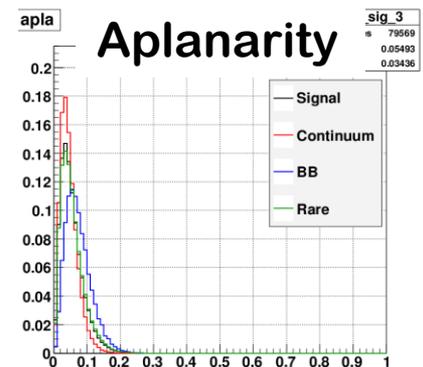
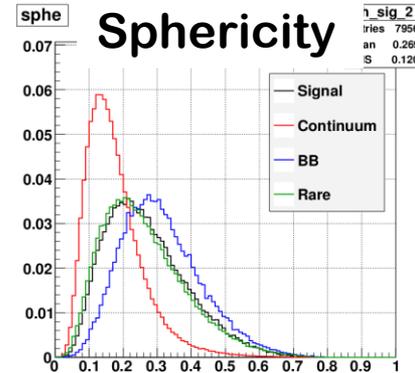
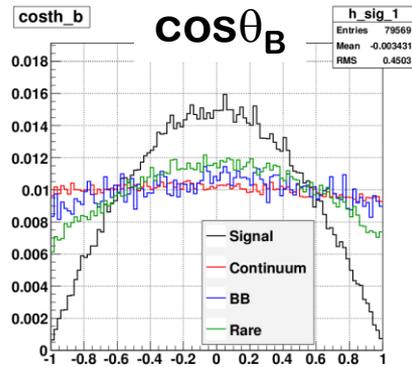
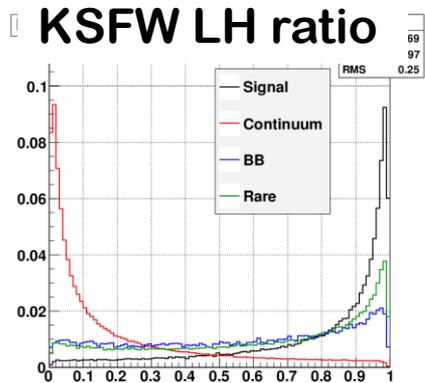
- ▶ SM = $+5 \sim 10\%$

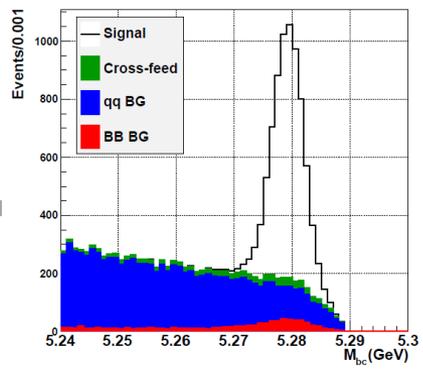
	Belle	Babar
A_{CP}	$0.002 \pm 0.050 \pm 0.030$ (140 fb ⁻¹)	$-0.011 \pm 0.030 \pm 0.014$ (350fb ⁻¹)
Δ_{0+}	No	$-0.006 \pm 0.058 \pm 0.009 \pm 0.024$ (350fb ⁻¹)

X_s mass vs γ energy

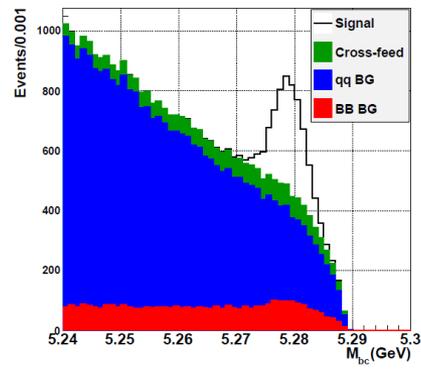


qq BG suppression : Input variables

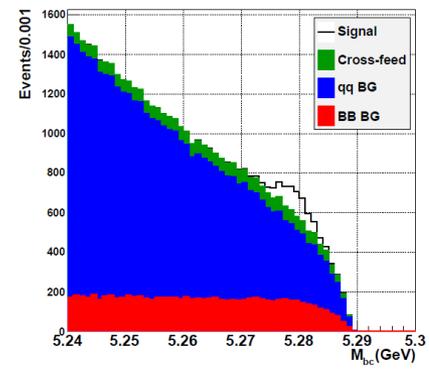




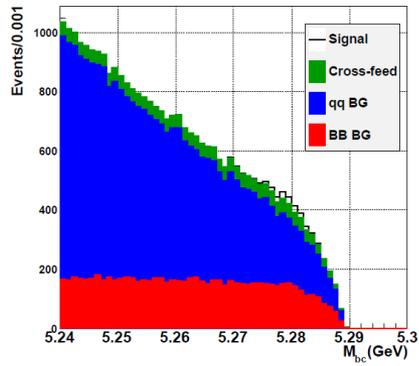
(a) $K\pi$



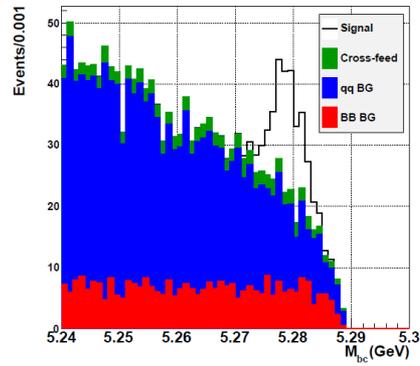
(b) $K2\pi$



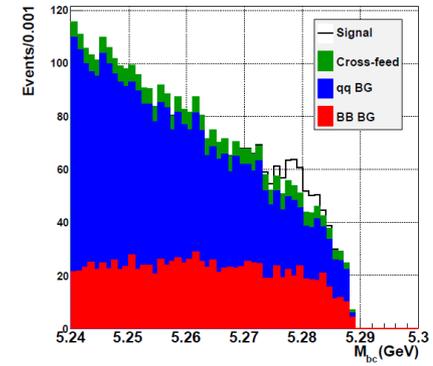
(c) $K3\pi$



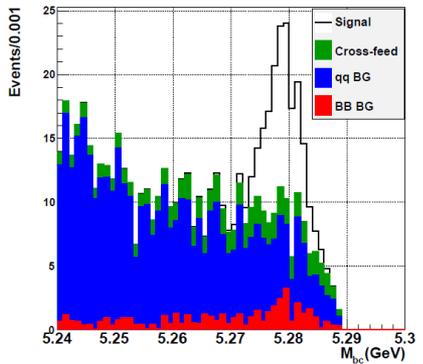
(d) $K4\pi$



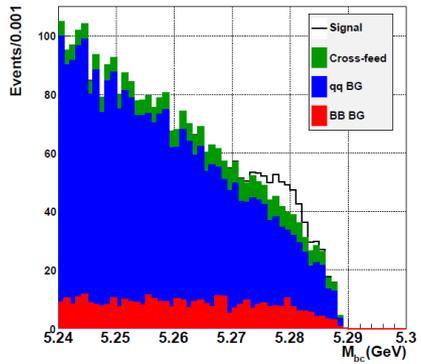
(e) $3K$



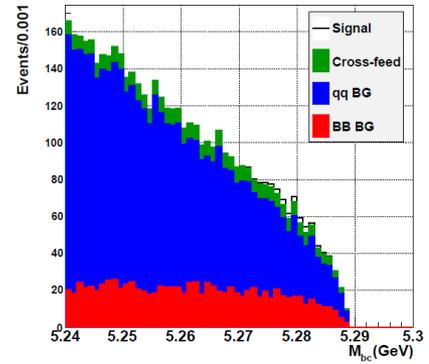
(f) $3K\pi$



(g) $K\eta$



(h) $K\eta\pi$



(i) $K\eta2\pi$