



TOHOKU
UNIVERSITY

$B \rightarrow X_s \gamma$ 崩壊を用いた新物理探索 @ Belle

齋藤 智之
(東北大学)

2012/2/22 ICEPPシンポジウム @ 白馬

もくじ

- インTRODクシヨン
 - ▶ Belle実験
 - ▶ $b \rightarrow s \gamma$ 過程
 - ▶ $B \rightarrow X_s \gamma$ の解析
- シグナルMCを用いた解析
 - ▶ シグナルMC
 - ▶ Best candidate selectionとその評価
 - ▶ X_s の質量のカット
- まとめと今後の予定

イントロダクション

KEK航空写真

筑波山

~1km

1,531,286m²
=東京ドーム33個分

KEKB

~1.5km

LINAC

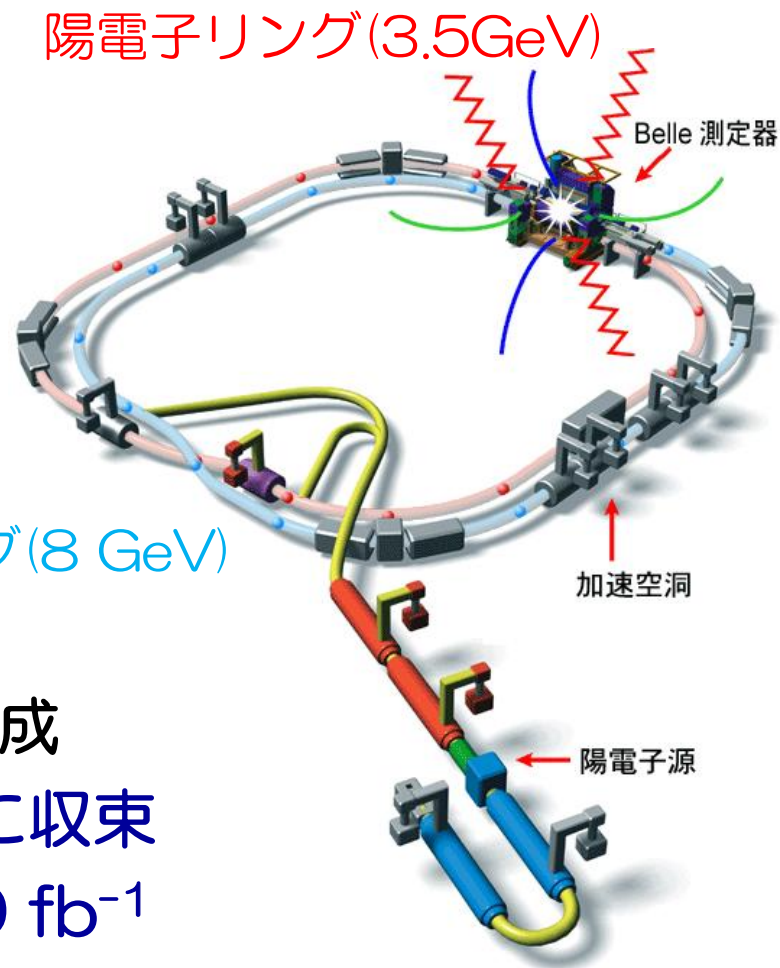
KEK 敷地

20111207

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

特徴：高い運動量測定精度 & 優れた粒子識別

▶ 崩壊点検出器

- 半導体崩壊点検出器

▶ 飛跡検出器

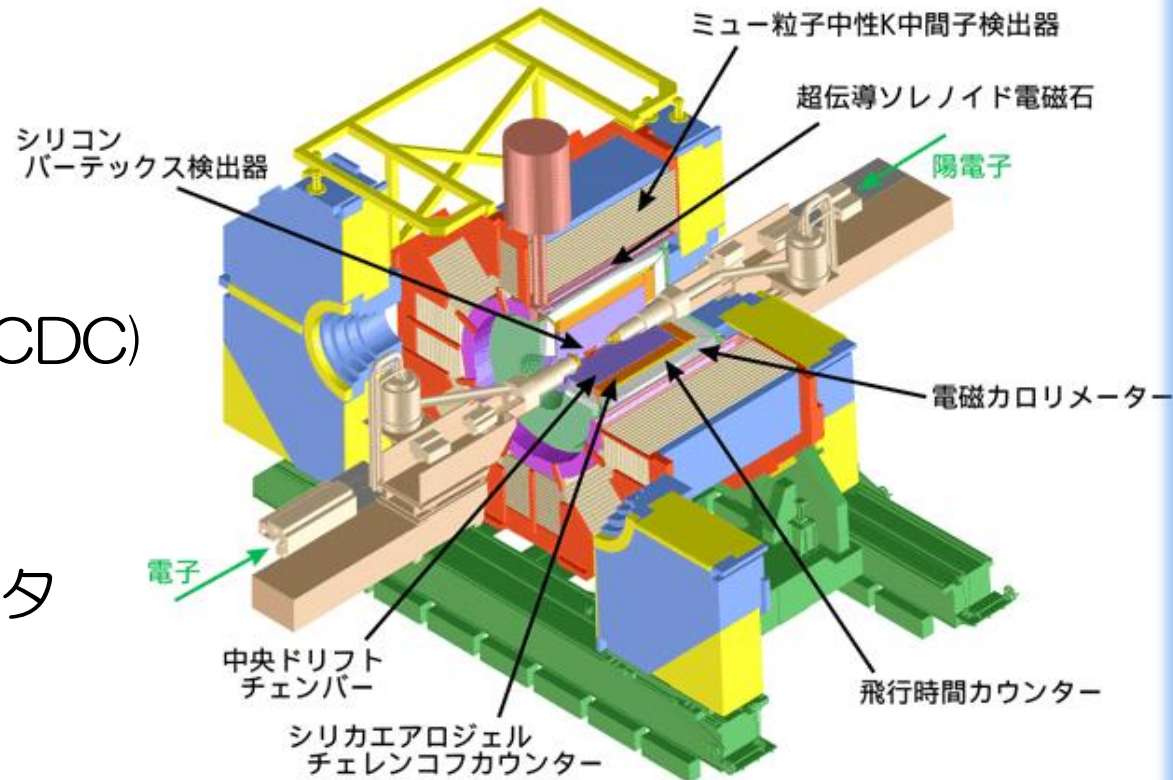
- ドリフトチェンバー(CDC)
- 半導体崩壊点検出器

▶ 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

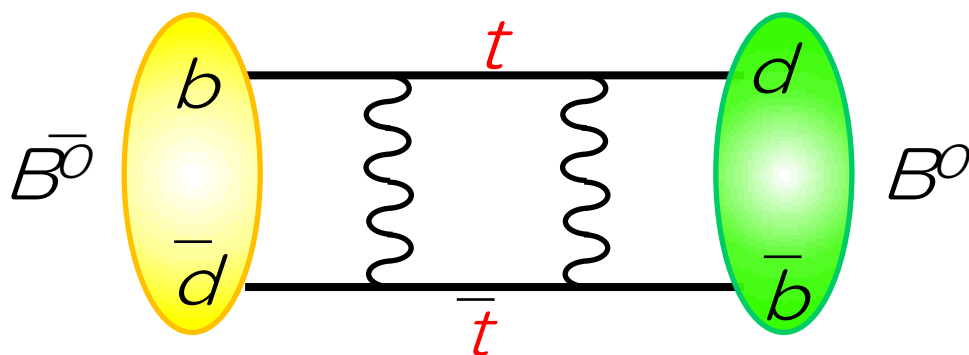


なぜBを見るのか？

新物理が知りたい → ループダイアグラムを調べろ！

(重い粒子の影響が見える)

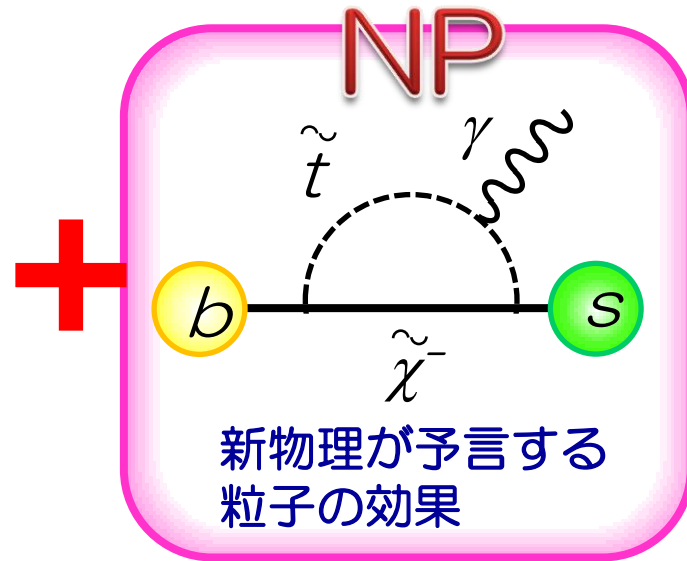
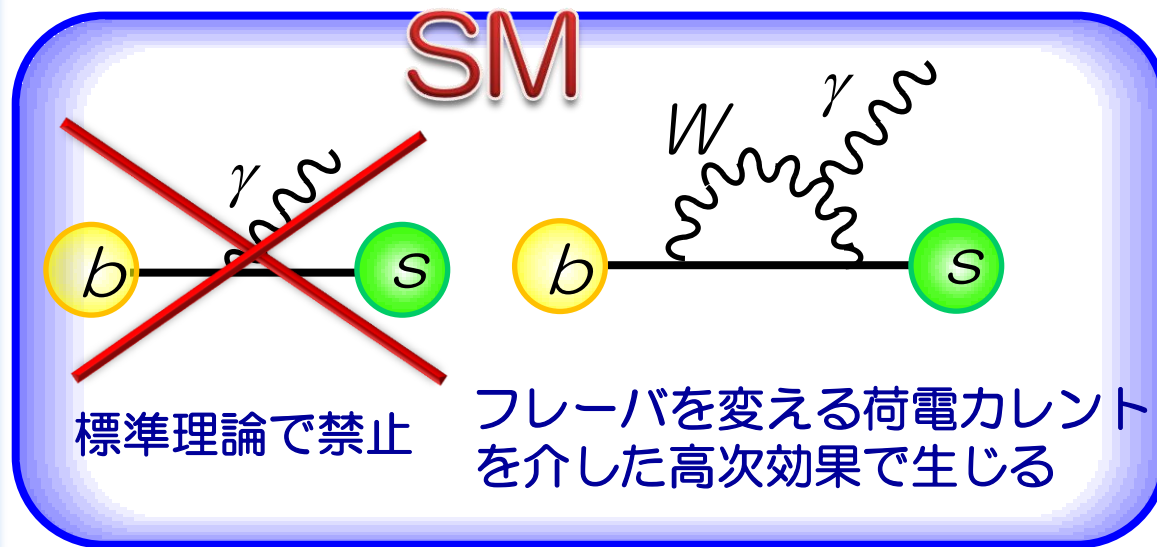
(例) B^0 mixingが大きいこと(@ARGUS1987)から、
topがかなり重いことが予言された。



B中間子はツリーダイアグラムが小さく(ループダイアグラムの寄与大)、重いので新物理に感度高い。

$b \rightarrow s \gamma$ 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への感度大
- 膨大な γ バックグラウンド → LHCbでは難しい測定



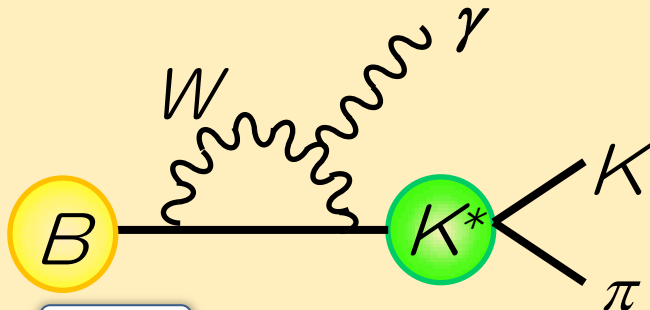
崩壊分岐比と非対称度を測定し標準理論からのずれを検証

$b \rightarrow s\gamma$ 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

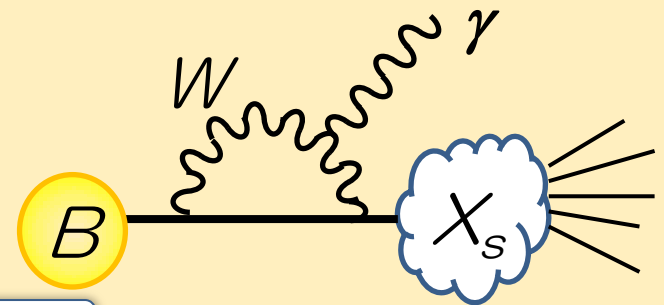


特徴

- ・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

$b \rightarrow s \gamma$ の崩壊分岐比測定

$b \rightarrow s \gamma$ の崩壊分岐比測定

$B \rightarrow K^* \gamma$ etc

$B \rightarrow X_s \gamma$

exclusive 崩壊測定
終状態の全ての粒子を観測

Inclusive 崩壊測定
終状態の一部の粒子を観測

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

$B \rightarrow X_s \gamma$ 崩壊分岐比

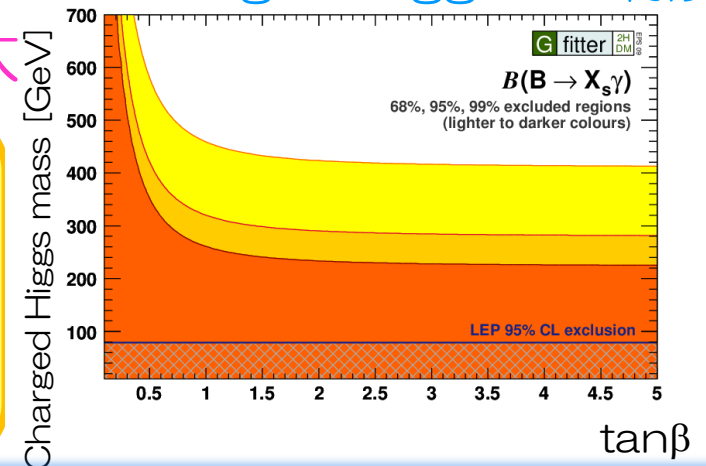
Semi-inclusive再構成法を用いた $B \rightarrow X_s \gamma$ の崩壊分岐比測定

	Belle	Babar
崩壊分岐比 [10^{-4}]	$3.36 \pm 0.53 \pm 0.42^{+0.50}_{-0.54}$	$3.27 \pm 0.18^{+0.55 +0.04}_{-0.40 -0.09}$
測定条件	$X_s < 2.1 \text{ GeV}, 6 \text{ fb}^{-1}$	$X_s < 2.8 \text{ GeV}, 82 \text{ fb}^{-1}$

Full-inclusive含む

- 世界平均. $:(3.60 \pm 0.23) \times 10^{-4}$ [PDG10]
 $(3.55 \pm 0.24 \pm 0.09) \times 10^{-4}$ [HFAG10]
- 理論予言値 $:(3.15 \pm 0.23) \times 10^{-4}$

Charged Higgsへの制限



理論と測定で中心値ずれているが誤差大

- ▶ Belleでのアップデート必須
- ▶ Belleの全データ(711 fb^{-1})使えば統計100倍
- ▶ 系統誤差が支配的な解析になる

$B \rightarrow X_s \gamma$ 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)

研究の目的

Belleの全データ(711 fb⁻¹)でSemi-inclusive再構成法を用い、 $B \rightarrow X_s \gamma$ を測定

新物理に感度がある観測量

崩壊分岐比
CPの破れ、アイソスピンの破れ

Key Point : いかに系統誤差を抑えるかが勝負

- より**多くの X_s の終状態**を再構成することが重要
 - ▶▶▶ ハドロン化の系統誤差を抑える
- より**高い X_s の質量領域の理解**が重要
 - ▶▶▶ X_s の質量分布の外挿の系統誤差を抑える

研究の目的

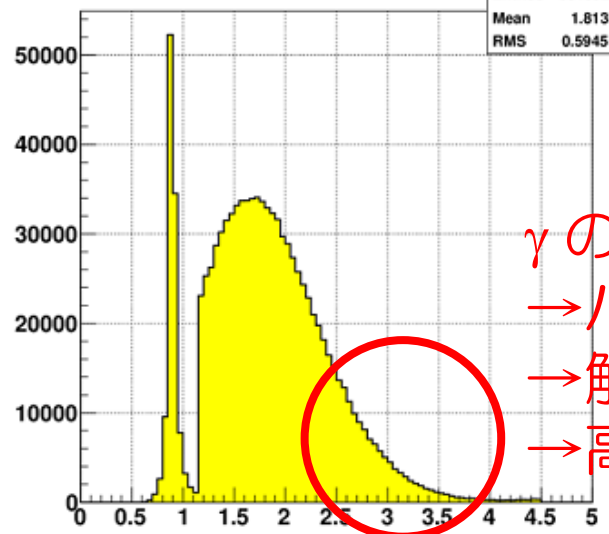
Belleの全データ
を用い、 $B \rightarrow$

新物理に感度が

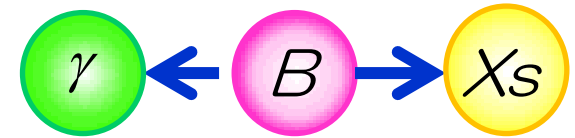
Key Po

- より多くの
▶▶▶ MCのハ
▶▶▶ MCのハの系統誤差を抑える
- より高い X_s の質量領域の理解が重要
▶▶▶ X_s の質量分布の外挿の系統誤差を抑える

□ X_s mass (generator level)



2体崩壊



γ の低エネルギー領域
→バックグラウンド大
→解析難
→高い質量領域は外挿する

シグナルMCの解析

シグナルMC ($B \rightarrow X_s \gamma$)

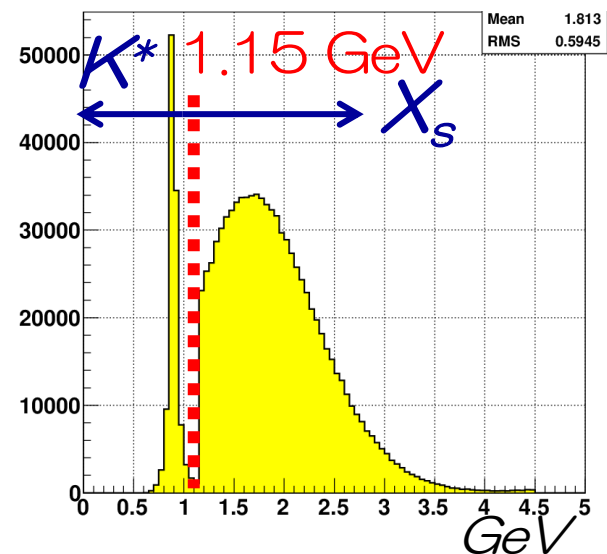
MCで $B \rightarrow X_s \gamma$ のイベントをどのように作るか？

- 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)



X_s の崩壊

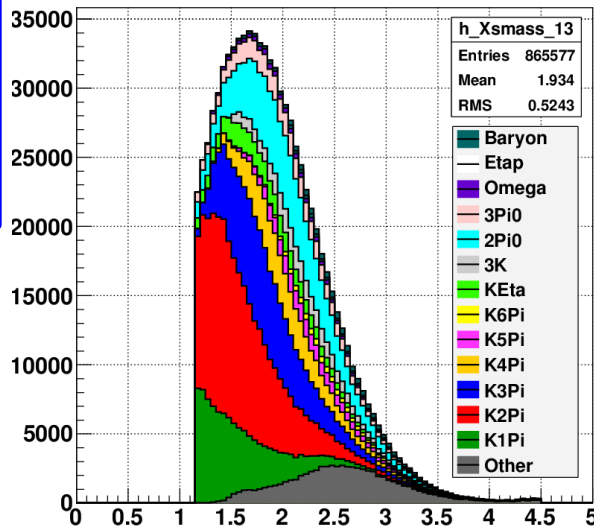
- X_s はハドロン化 → どんな崩壊モードにしているかチェック

	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

$K\pi \sim K4\pi$ 、 $3K$ 、 $K\eta$ 、 $K2\pi^0$ などを再構成済み

→ X_s の終状態の約82%をカバー

イベント再構成

- 現在までに35の $B \rightarrow X_s \gamma$ の終状態を再構成

$$X_s \rightarrow K\pi, K_s\pi, K\pi^0, K_s\pi^0 \quad (K\pi)$$

$$K\pi\pi, K_s\pi\pi, K\pi\pi^0, K_s\pi\pi^0 \quad (K2\pi)$$

$$K\pi\pi\pi, K_s\pi\pi\pi, K\pi\pi\pi^0, K_s\pi\pi\pi^0 \quad (K3\pi)$$

$$K\pi\pi\pi\pi, K_s\pi\pi\pi\pi, K\pi\pi\pi\pi^0, K_s\pi\pi\pi\pi^0 \quad (K4\pi)$$

$$\left. \begin{array}{l} KKK, KKK_s, KK_sK_s, KKK\pi, KKK_s\pi, \\ KKK\pi^0, KKK_s\pi^0, KK_sK_s\pi, KK_sK_s\pi^0 \end{array} \right\} (3K, 3K\pi)$$

$$K\eta, K_s\eta, K\eta\pi, K_s\eta\pi, K\eta2\pi, K_s\eta2\pi \quad (K\eta, K\eta\pi, K\eta2\pi)$$

$$K\pi^0\pi^0, K_s\pi^0\pi^0, K\pi\pi^0\pi^0, K_s\pi\pi^0\pi^0 \quad (K2\pi^0, K2\pi\pi^0)$$

追加

- ▶ 以前のBelleの解析では16の終状態、 $K\pi \sim K4\pi$ を再構成していた → 19の終状態を追加

粒子選別

B の再構成に K^\pm 、 π^\pm 、 K_s 、 π^0 、 γ 、 η が欲しい

● 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

- ・ find K_s
- ・ $488 < M_{K_s} < 508 \text{ MeV}$

BGの多い π^0 、 η が
厳しめのカット

● π^0 選別

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

● B からの γ 選別

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

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

- ・ $515 < M_\eta < 570 \text{ GeV}$
- ・ $\cos\theta_{\text{hel}} < 0.8$
- ・ $p^{CM} > 0.5 \text{ GeV}$

シグナル領域

●シグナル領域： M_{bc} と ΔE で定義

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

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

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

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

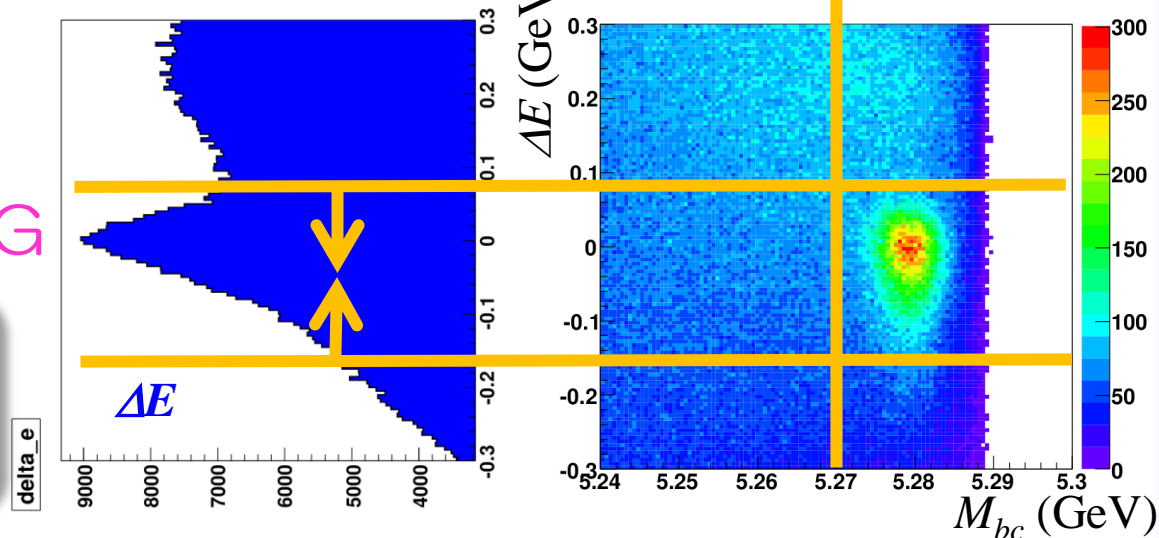
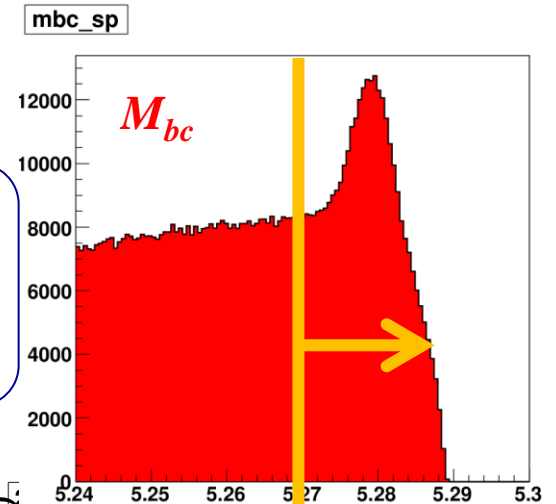
▶ ΔE がピークが広い

→ γ の影響

▶ ピークのテイルが大

→ combinatorialなBG

1イベントにBの候補
が複数残っている



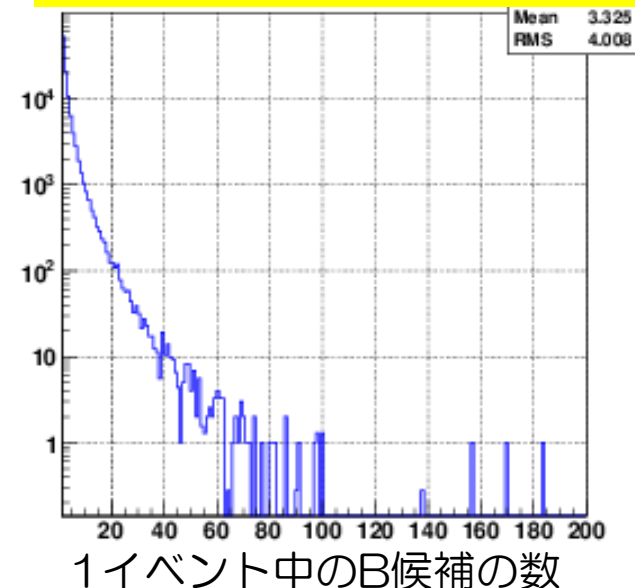
1イベント中のB候補

● Bの複数候補の数をチェック

- ▶ 粒子数が多いモード($X_s \rightarrow K4\pi$ 等)はかなり多い(もう一つのBからの π を拾っている)
- ▶ π^0 や η ($\rightarrow \gamma\gamma$)のあるモードも多い
(combinatorialバックグラウンド)
- ▶ 1イベント平均: 4.0

正しいBの候補(組み合わせ)を選択できるかが重要

1イベント中のB候補の数



Bの最適候補の選択

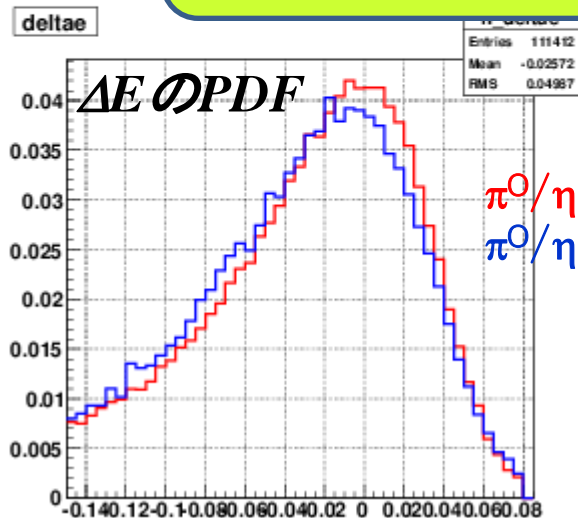
● 最適候補選択 ; Best candidate selection (BCS)

[選択範囲 : $5.24 < M_{bc}$, $-0.15 < \Delta E < 0.08$]

▶▶▶ 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 (γ のせい)

▶▶▶ Likelihoodにして最大のものを選択



ΔE (GeV)

Likelihood に使うPDF

→ π^0 または η があるモードは別
(テイルが大きいので)

イベント再構成の評価

BCS後の再構成効率・Purity・cross-feed(他シグナルの混入)

	$K\pi$	$K2\pi$	$K3\pi$	$K4\pi$	$3K$	$3K\pi$	$K\eta$	$K\eta\pi$	$K\eta2\pi$	$K2\pi^0$	$K\pi2\pi^0$
# of total	30352 18.6%	22630 14.0%	12833 12.9%	8312 18.0%	794 13.8%	786 11.2%	915 12.2%	645 10.0%	754 11.7%	1349 9.6%	3139 14.4%
# of true	28189 17.2%	15414 9.6%	3786 3.8%	841 1.8%	678 11.7%	353 5.0%	669 8.9%	208 3.2%	121 1.9%	332 2.4%	267 1.2%
# of cross-feed	1110 3.7%	4691 20.7%	6236 48.6%	5988 72.0%	98 12.3%	350 44.5%	232 25.4%	395 61.2%	504 66.8%	815 60.4%	2432 77.5%
Purity	92.9%	68.1%	29.5%	10.1%	85.4%	44.9%	73.1%	32.2%	16.0%	24.6%	8.5%

再構成効率とPurityを保持しつつ、cross-feedを抑えたい

再構成効率
(再構成/生成したイベント数)

Cross-feedの割合
(cross-feed/再構成したイベント数)

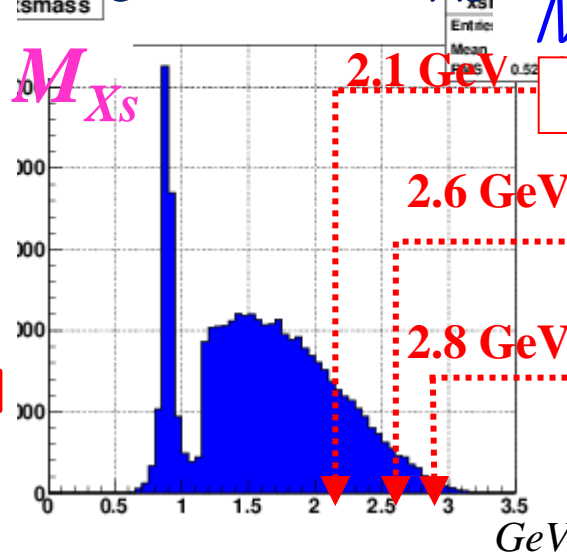
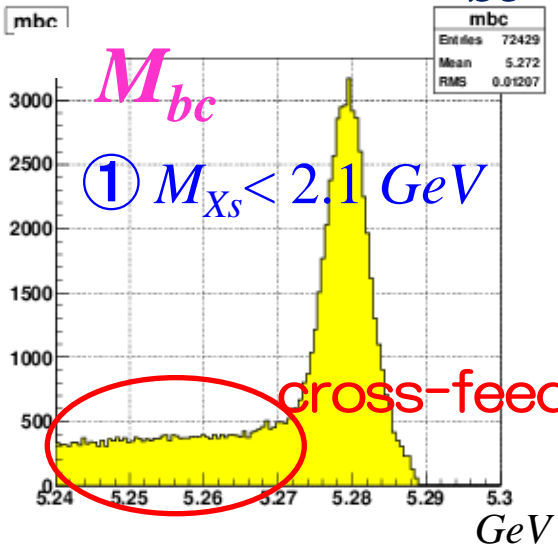
- 粒子数が大、 π^0/η が複数あるモード

→ cross-feed大きい
purity 低い

- 全体の再構成効率 = 15.3 %

BCS後の M_{bc} と X_s 質量

● BCS後の M_{bc} と X_s の質量(M_{X_s})分布

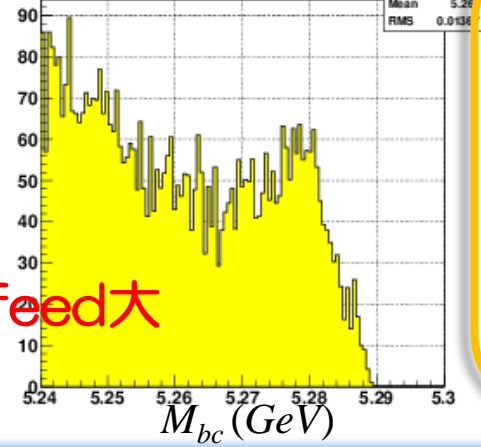
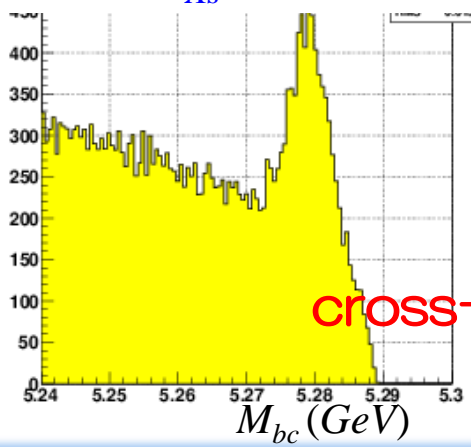


M_{X_s} の大きな領域を理解したい

- ① 前のBelleの解析のカット
- ② 目標のカット (可能なら2.8GeV)
- ③ Babar のカット (しかし 2.6~2.8GeV にはシグナルなし)

② $2.1 < M_{X_s} < 2.6 \text{ GeV}$

③ $2.6 < M_{X_s} < 2.8 \text{ GeV}$



M_{X_s} のカット値を上げると
cross-feed増(BGも)

$M_{X_s} < 2.6 \text{ GeV}$ が妥当(?)

↓

BG study後に決定

まとめと予定

● 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あり
- ▶ Semi-inclusive 再構成法を用いて $B \rightarrow X_s \gamma$ を測定
- ▶ 35の X_s の終状態を再構成
- ▶ Best candidate selection
- ▶ 再構成効率とcross-feedの割合、purityを算出

● 予定

- ▶ バックグラウンドの研究
- ▶ イベント選択の最適化



Back up

$b \rightarrow s\gamma$ 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

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

SVD

▶4層のシリコンストリップ検出器

- ▶ $17^\circ < \theta < 150^\circ$
- ▶ ストリップのピッチ: $75\mu\text{m}$ (p側)、 $50\mu\text{m}$ (n側)
- ▶

CDC

● ワイヤー

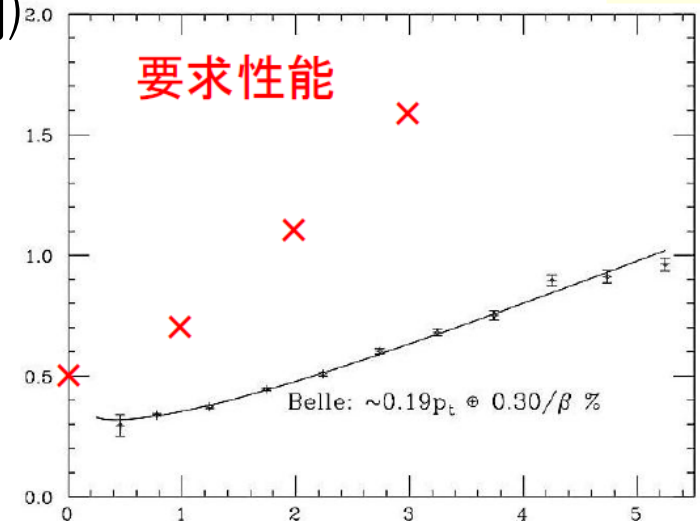
- ▶ フィールドワイヤー：アルミニウム(直径120 μm)が
- ▶ センスワイヤー：金メッキしたタングステン(直径30 μm)
- ▶ 16 \times 17mm²のセル

● ガス

- ▶ He : C₂H₆ = 1 : 1 (多重散乱抑制)

● 性能 (CDC+SVD)

- ▶ $\sim 0.19 \text{ pt} \oplus \frac{0.30}{\beta} \%$



ECL

CsI(T1)シンチレータ

- ▶ 低エネルギーから高分解能 (π^0 の効率良い同定)
- ▶ 発光波長565nmと長く、光量も大
- ▶ 減衰時間が長い(1 μ m) ← Belle2で問題
- ▶ CsI結晶を約9000本使用

γ 再構成

$$\frac{\sigma_E}{E} (\%) = \sqrt{\left(\frac{0.066}{E}\right)^2 + \left(\frac{0.81}{\sqrt[4]{E}}\right)^2 + 1.34^2} \quad (E \text{ in GeV})$$

▶ γ のエネルギー

- 1、Seed crystalの決定 (local max > 10MeV)
- 2、Seed crystalの周り5 \times 5のセルの情報記憶

▶ γ の運動量

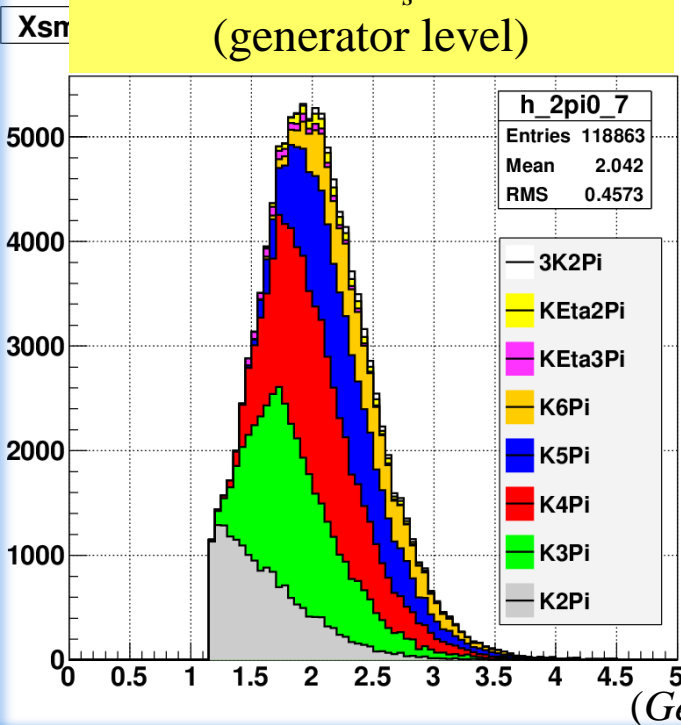
エネルギーの重心をとり、方向は衝突点からきていることを仮定して計算

2 π^0 モード

● 2 π^0 を含むモードの再構成を行う

- ▶ X_s の終状態の13.7%
- ▶ γ のBGが多くあり再構成効率が低く、理解が難しい
- ▶ 以前のBelleの解析では行っていないがBabarではやっている

2 π^0 モードの X_s 質量分布
(generator level)



	イベント数	割合
K2Pi	18238	15.3%
K3Pi	29462	24.8%
K4Pi	32946	27.7%
K5Pi	22452	18.9%
K6Pi	11935	10.0%
KEta2Pi	1244	1.0%
KEta3Pi	1542	1.3%
3K2Pi	1014	0.9%
Sum	118833	

} ~40%

K4 π の2 π^0 モードは理解困難

K2 π とK3 π の2 π^0 モードに挑戦