



TOHOKU
UNIVERSITY

準包括的再構成法を用いた $B \rightarrow X_s l^+ l^-$ 崩壊 におけるレプトン前後非対称度の測定

佐藤 優太郎, 石川明正, 山本 均

and Belle Collaboration

東北大学理

2013/03/27

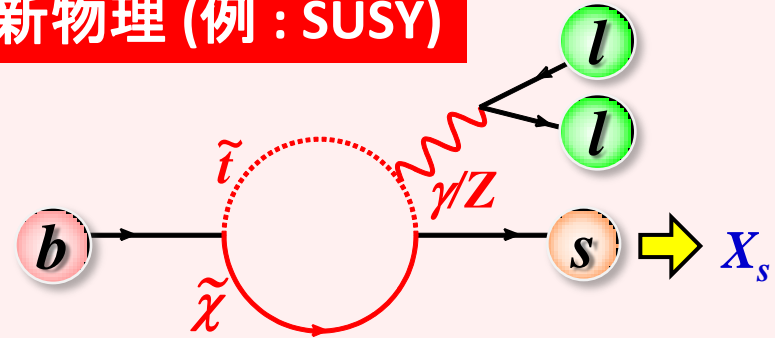
JPS @ 広島大学

$b \rightarrow s l^+ l^-$ 遷移

$b \rightarrow s l^+ l^-$ 遷移

- 標準理論において、tree level では禁止。
- ループで新粒子が回る可能性あり。
→ 新物理に感度がある。
- 測定量が豊富。
 - 崩壊分岐比
 - アイソスピン非対称度(A_L)
 - K^* の偏極度(F_L)
 - レプトン前後非対称度(A_{FB})

新物理 (例: SUSY)



* X_s : ストレンジネス1の
終状態の総称

解析手法

- 排他的再構成法
 - X_s の特定のモード $K^{(*)}$ から再構成。
- 準包括的再構成法
 - X_s を複数のモードから再構成。
 - 理論的不定性が小さい。

この組み合わせは
今回の測定が世界初!

レプトン前後非対称度 A_{FB}

レプトン前後非対称度 (A_{FB})

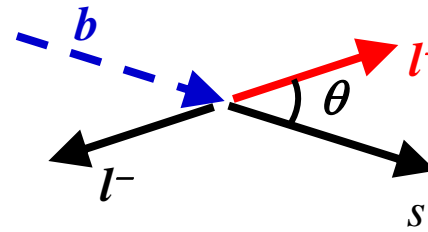
$$A_{FB} \equiv \frac{N(\cos \theta > 0) - N(\cos \theta < 0)}{N(\cos \theta > 0) + N(\cos \theta < 0)}$$

$$\propto -\text{Re} \left[\left(2C_7^{\text{eff}} + \frac{q^2}{m_b^2} C_9^{\text{eff}} \right) C_{10}^* \right]$$

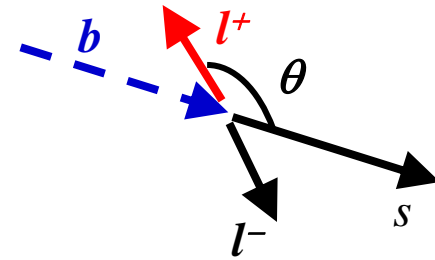
low q^2 で寄与

high q^2 で寄与

Forward event



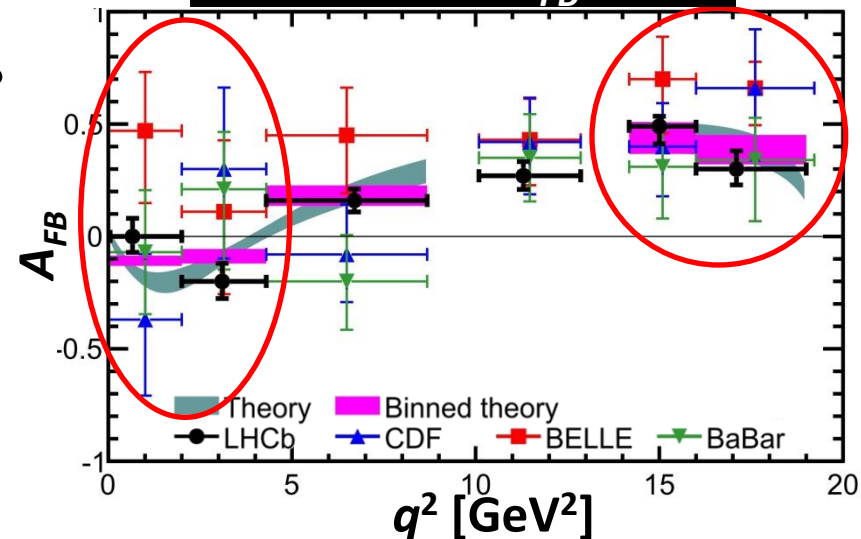
Backward event



@ レプトン対の静止系

- q^2 : レプトン対の不変質量の2乗
- C_i^{eff} : QCD 補正を加えた Wilson 係数。
- Wilson 係数(C_7, C_9, C_{10}) に感度がある。

$K^* l^+ l^-$ による A_{FB} 測定



解析手順

1. 事象再構成

- A_{FB} の測定には20の終状態を使用。

$$l^+l^- = e^+e^- \text{ or } \mu^+\mu^-$$

$$X_s = K^\pm/K_S + \text{最大4つの}\pi (\pi^0 \text{は1つまで})$$

$$[K]: K, K_S$$

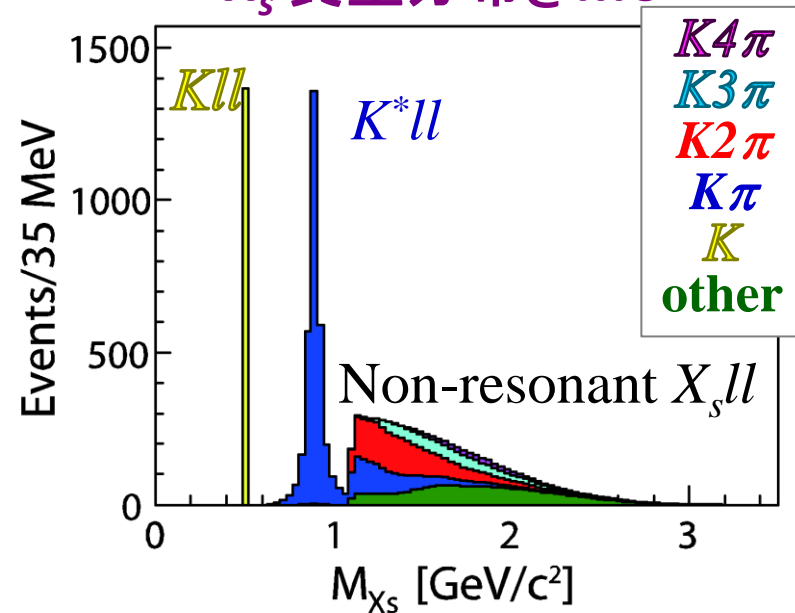
$$[K\pi]: K\pi, K_S\pi, K\pi^0, K_S\pi^0$$

$$[K2\pi]: K2\pi, K_S2\pi, K\pi\pi^0, K_S\pi\pi^0$$

$$[K3\pi]: K3\pi, K_S3\pi, K2\pi\pi^0, K_S2\pi\pi^0$$

$$[K4\pi]: K4\pi, K_S4\pi, K3\pi\pi^0, K_S3\pi\pi^0$$

X_s 質量分布@MC

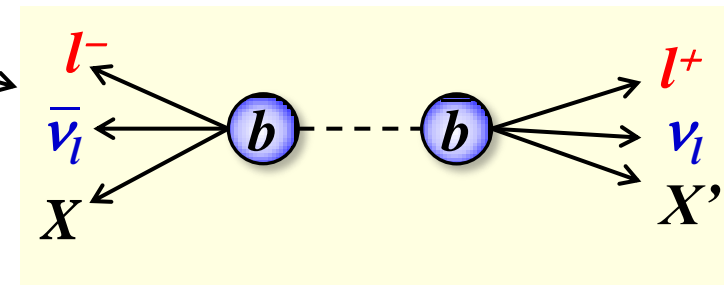


2. ニューラルネットワークを用いた背景事象の分離

- Semi-leptonic 崩壊事象
- qq 事象

3. ピーキング背景事象の見積もり

- チャーモニウム事象
- Double miss-PID
- Swapped miss-PID



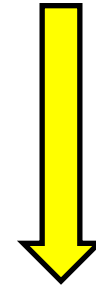
前回のJPSで発表

(@京都産業大学, 11aSK-05)

解析手順

1. 事象再構成
2. ニューラルネットワークを用いた背景事象の分離
3. ピーキング背景事象の見積もり
4. q^2 のビン分け
5. 再構成効率の q^2 - $\cos\theta$ 依存性の補正 (correction function)
6. M_{bc} 分布フィットによる A_{FB} 測定
7. 系統誤差

今回の発表



データ

- Belle で取得した全 $Y(4S)$ データ 711fb^{-1} を使用

q^2 binning

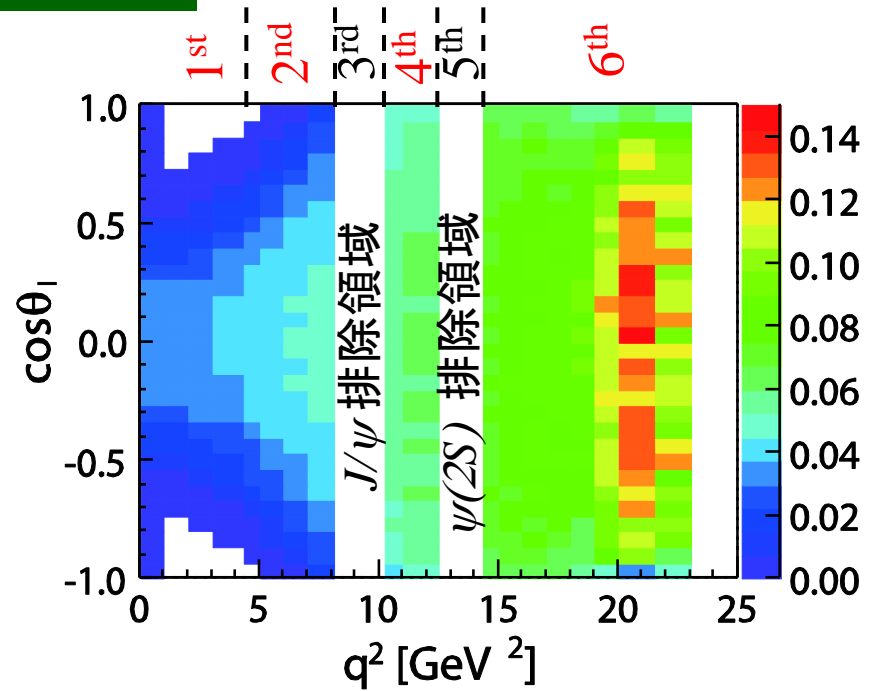
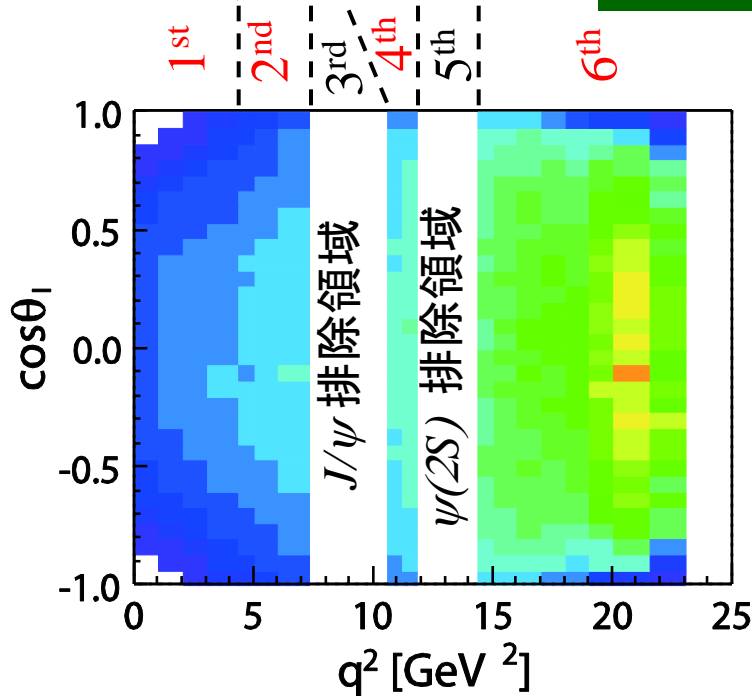
- q^2 (レプトン対の不変質量の2乗) を6つのビンに分ける。
 - 3rd & 5th q^2 bin は J/ψ と $\psi(2S)$ の排除領域に対応。

(4.3 GeV²)

$X_s e^+e^-$

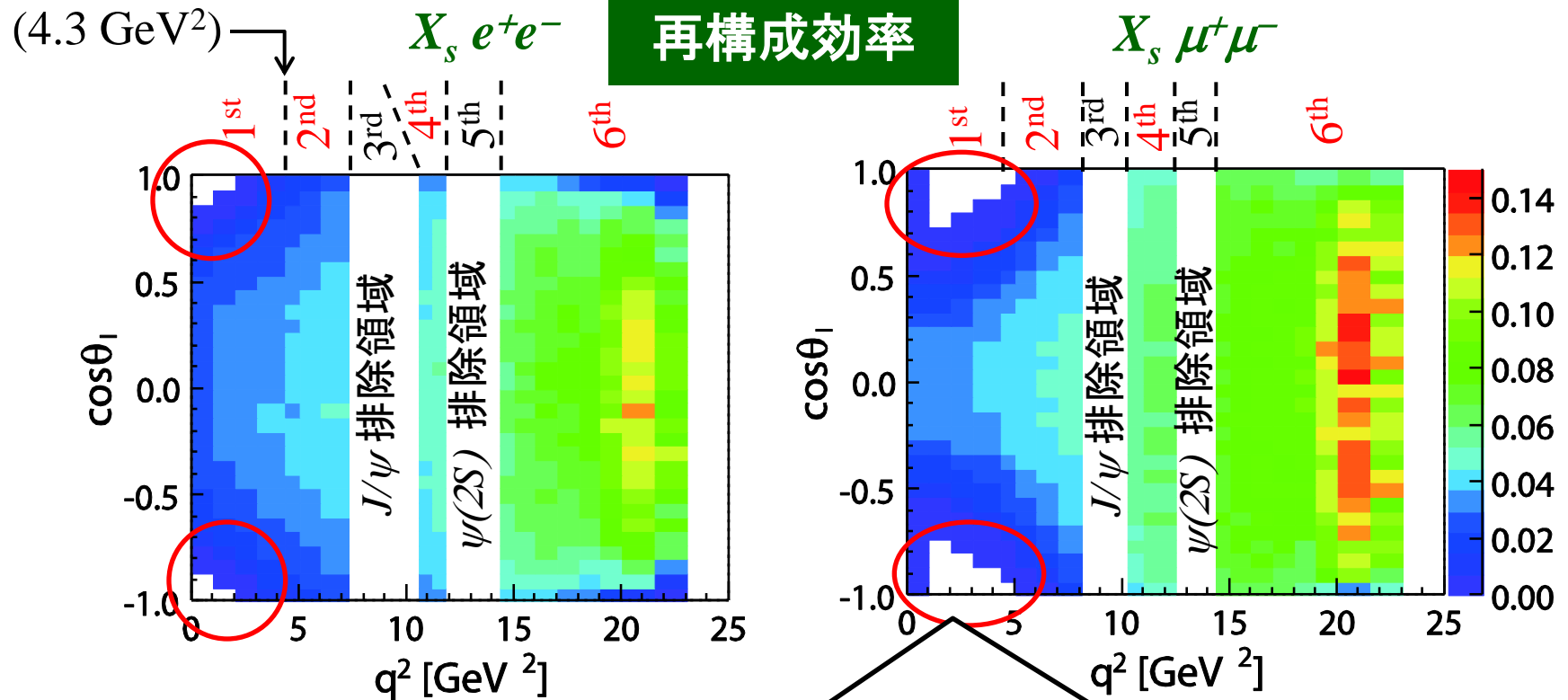
再構成効率

$X_s \mu^+\mu^-$



Correction Function

- 再構成効率の q^2 - $\cos\theta$ 依存性によって、観測される A_{FB}^{raw} は真の値 A_{FB} からずれてしまう。



q^2 が小さく、 $|\cos\theta| \sim 1$ の領域は、
レプトンの運動量の条件で再構成効率が落ちる。

$$(p_e^{lab} > 0.40 \text{ GeV}, p_\mu^{lab} > 0.80 \text{ GeV})$$

→ A_{FB}^{raw} を真の A_{FB} に変換する **Correction function** を q^2 bin ごとに用意する。

Correction function ~作り方~

- Wilson係数を標準理論の値から変化させ、信号事象のMCを生成して、 A_{FB} と A_{FB}^{raw} の間の関係を求める。

Wilson 係数の値を変化させた範囲

$$\begin{aligned} & [A_7] + A_7^{SM}, -A_7^{SM} \\ & [A_9, A_{10}] -200\% \sim +200\% \end{aligned}$$

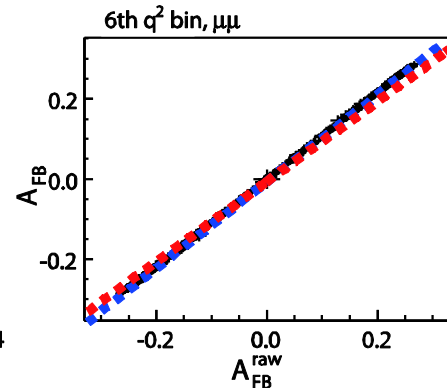
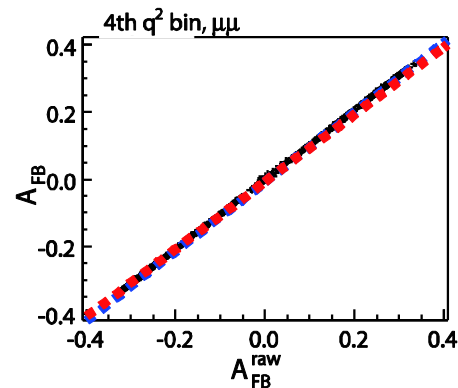
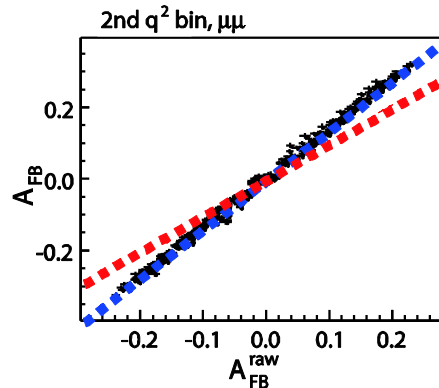
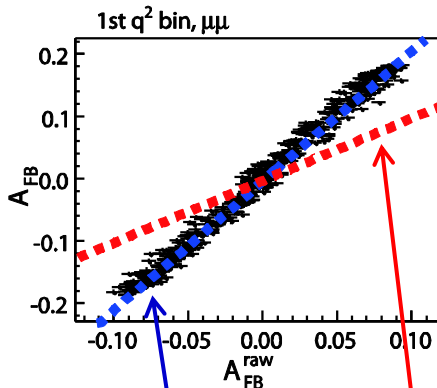
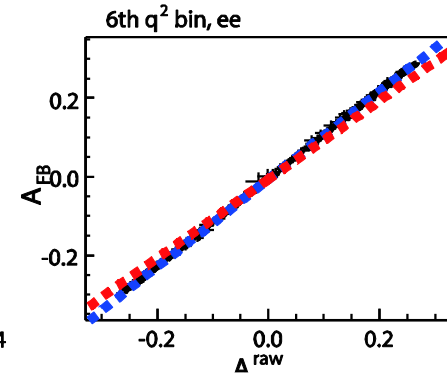
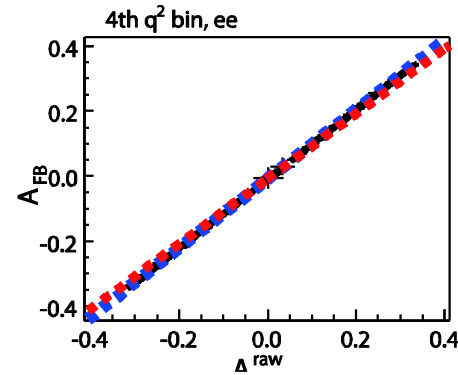
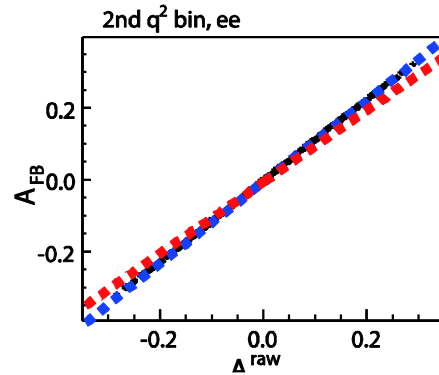
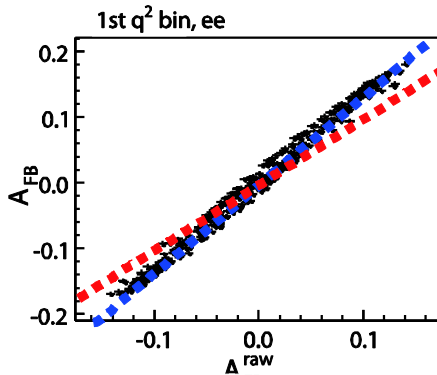
(A_i は C_i の leading term)

1st q^2 bin

2nd q^2 bin

4th q^2 bin

6th q^2 bin



フィット線 理想線 ($A_{FB} = A_{FB}^{raw}$)

$X_s e^+ e^-$

$X_s \mu^+ \mu^-$

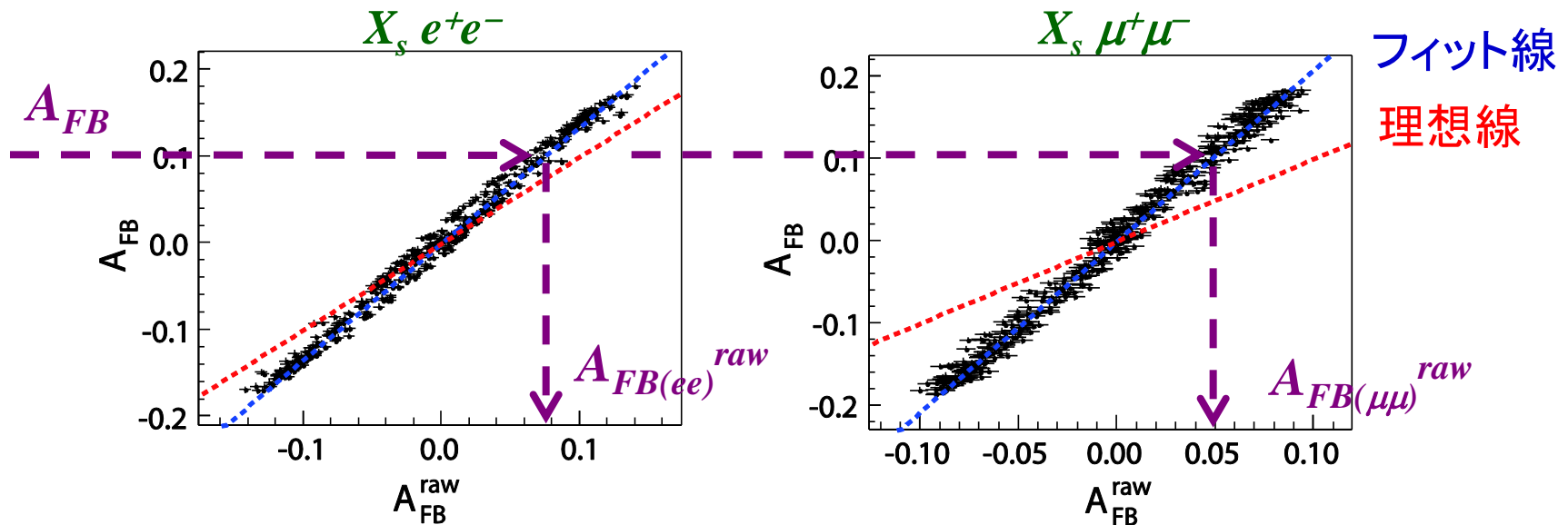
A_{FB} 測定

方針

- Extended unbinned maximum likelihood fit で4つの M_{bc} 分布を同時フィット。
 - Forward/backward event を同時にフィットして直接 A_{FB} を求める。
 - Correction function を用いて
 - $X_s e^+e^-$ と $X_s \mu^+\mu^-$ も同時にフィット。
 - $A_{FB}(X_s e^+e^-) = A_{FB}(X_s \mu^+\mu^-)$ を仮定。

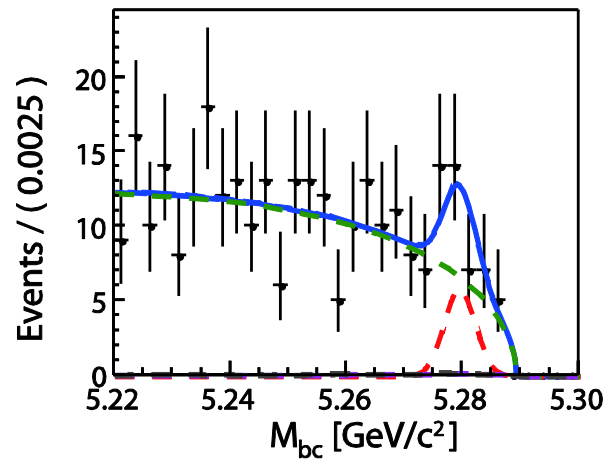
$$\begin{bmatrix} N_{(ee)} \\ A_{FB(ee)}^{raw} \\ N_{(\mu\mu)} \\ A_{FB(\mu\mu)}^{raw} \end{bmatrix} \rightarrow A_{FB}$$

correction function (1st q^2 bin)

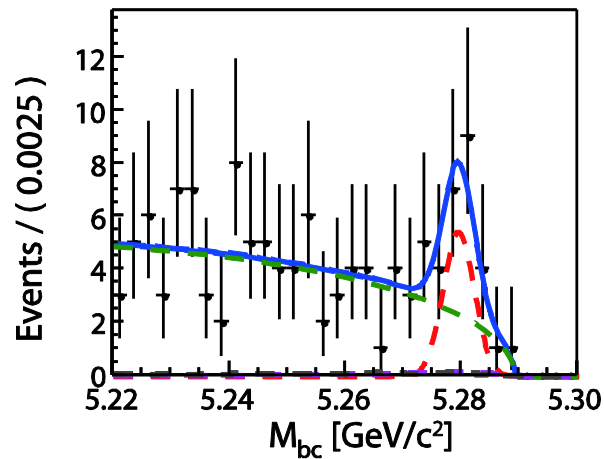


フィット結果 (2nd q^2 bin)

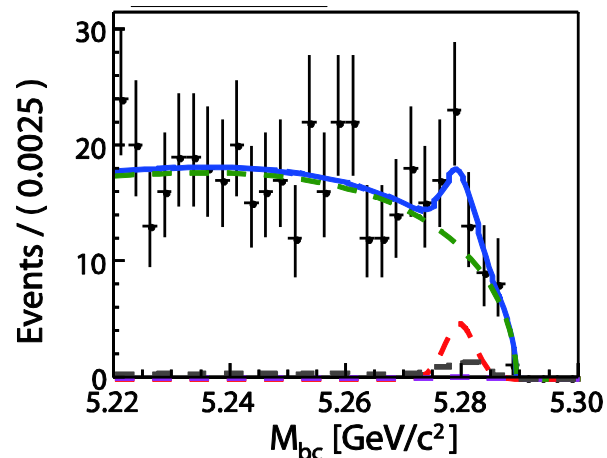
$X_s e^+e^-$, Forward



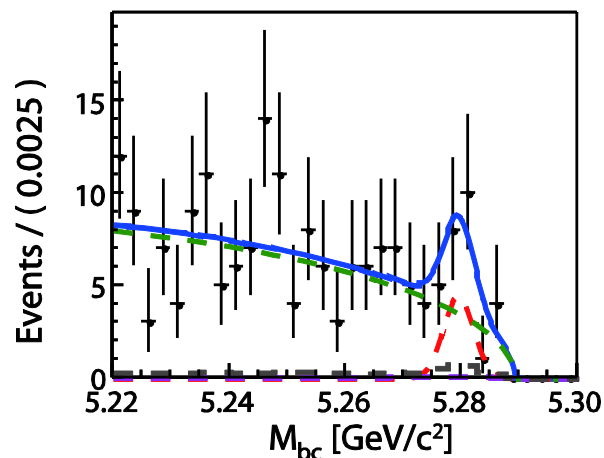
$X_s e^+e^-$, Backward



$X_s \mu^+\mu^-$, Forward



$X_s \mu^+\mu^-$, Backward



Total

信号事象(Gaussian)

Cross-feed(histogram-PDF)

背景事象(ARGUS)

ピーキング背景事象

(histogram-PDF)

結果

$$N_{\text{sig}}(ee) = 30.1 \pm 9.2 \text{ (stat)}$$

$$N_{\text{sig}}(\mu\mu) = 23.9 \pm 10.5 \text{ (stat)}$$

$$A_{FB} = 0.04 \pm 0.31 \text{ (stat)}$$

$$\pm 0.05 \text{ (syst)}$$

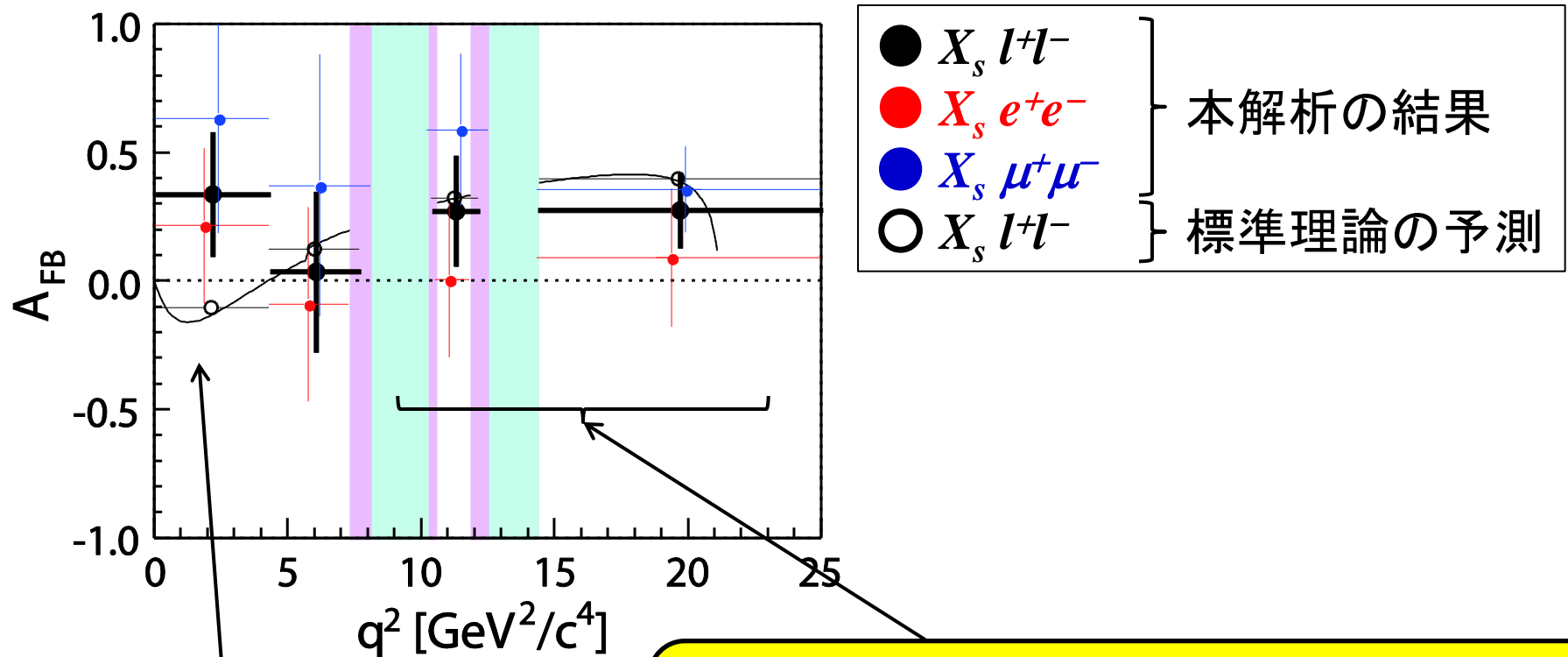
	Sources	σ_{AFB}				
		1st q^2 bin	2nd q^2 bin	4th q^2 bin	6th q^2 bin	
Fit parameterization	Signal shape and Self cross-feed	0.002	0.002	0.002	0.002	
	Peaking background	0.003	0.050	0.004	0.001	
Signal modeling	Reconstruction and PID efficiency	0.000	0.000	0.000	0.000	
	Fermi motion	0.002	0.001	0.004	0.004	
	b -quark mass	0.002	0.001	0.003	0.000	
	X_s - K^* transition	0.001	0.001	0.002	0.003	
	Hadronization	0.001	0.000	0.001	0.000	
	Fraction of $[K/K^*/X_s]\ell^+\ell^-$	0.001	0.001	0.002	0.003	
	Correction function	Sign flipped SM A_7	0.015	0.001	0.000	0.001
		Width of the correction function	0.012	0.004	0.006	0.003
Total		0.020	0.050	0.009	0.007	

→ 系統誤差は統計誤差に比べて、十分小さい。

- フィットの際に固定したパラメータを動かして、見積もる。
- ピーキング背景事象の見積もりの誤差で事象数を変化させる。
 - チャーモニウム事象に関しては±100%で変化させる。
- 信号事象のMCを生成するときの入力パラメータを変化。
- Correction function 由来の誤差。

* 標準理論で存在するオペレータのみを仮定。

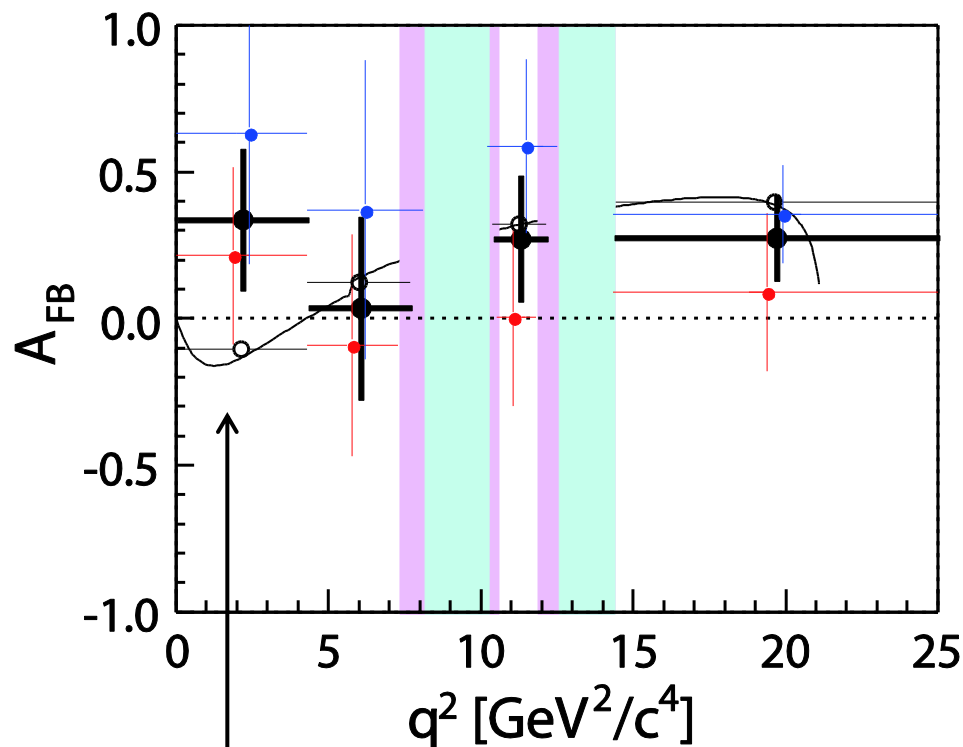
議論 ~標準理論の予言との比較~



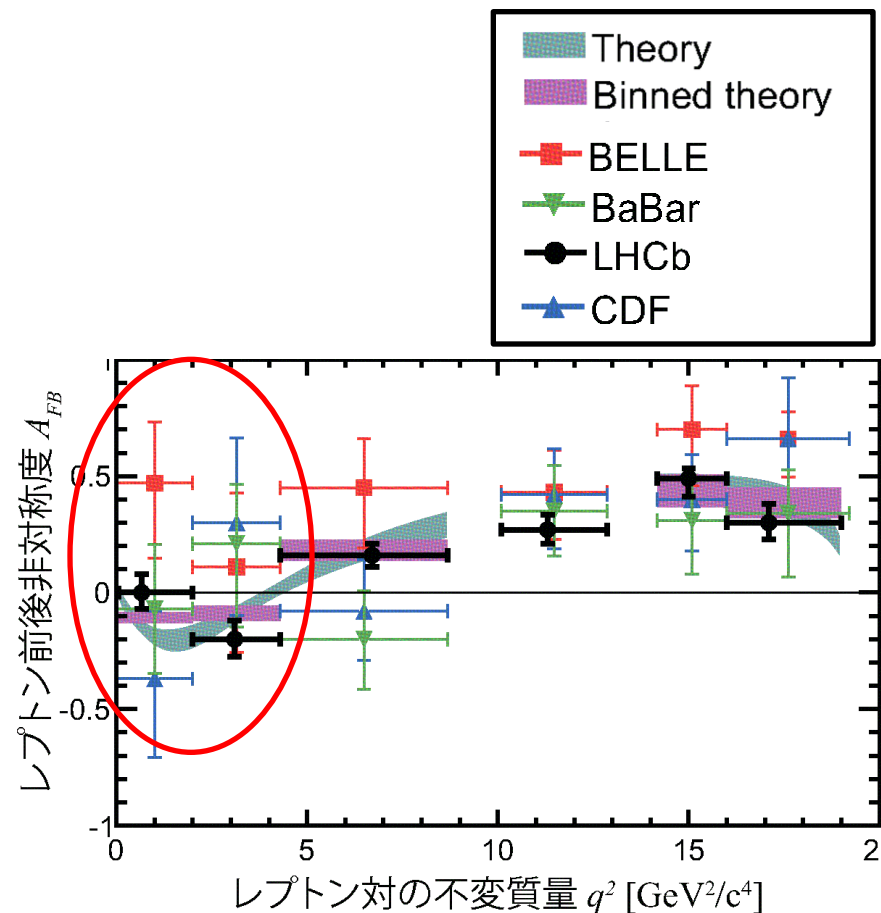
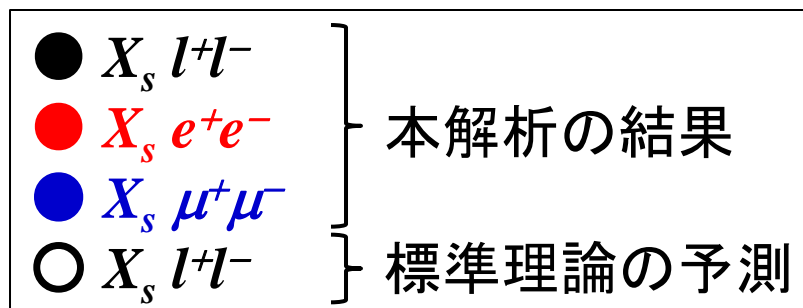
q^2 が大きい領域(4th and 6th bin)において、
2.3 σ (97.9% C.L.) で $C_{10} * C_9$ の項が
正であることを棄却。

q^2 が小さい領域(1st bin)において、
標準理論の予言と1.8 σ (6.6% C.L.) で一致。

議論 ~ $B \rightarrow K^* l^+ l^-$ を用いた結果との比較 ~



q^2 が小さい領域(1st bin)において、
LHCb の結果と 1.7σ (8.6% C.L.)
で一致。



結論

- Belle 実験で取得した 711 fb^{-1} (=7.72 億 $B\bar{B}$ ペア) のデータを用いて、準包括的再構成法により $B \rightarrow X_s l^+ l^-$ 崩壊におけるレプトン前後非対称度 A_{FB} を世界で初めて測定した。

$$A_{FB}(q^2 < 4.3 \text{ GeV}^2/c^4) = 0.34 \pm 0.24(\text{stat}) \pm 0.02(\text{syst})$$

$$A_{FB}(4.3 \text{ GeV}^2/c^4 < q^2 < J/\psi \text{ veto region}) = 0.04 \pm 0.31(\text{stat}) \pm 0.05(\text{syst})$$

$$A_{FB}(q^2 \text{ between } J/\psi \text{ and } \psi(2S) \text{ veto regions}) = 0.28 \pm 0.21(\text{stat}) \pm 0.01(\text{syst})$$

$$A_{FB}(q^2 \text{ above } \psi(2S) \text{ veto region}) = 0.28 \pm 0.15(\text{stat}) \pm 0.01(\text{syst})$$

- q^2 が小さい領域(1st bin)において、標準理論の予言と 1.8σ (6.6% C.L.) で一致。
- q^2 が大きい領域(4th and 6th bin)において、 2.3σ (97.9% C.L.) で $C_{10} * C_9$ の項が正であることを棄却。
- この結果は標準理論を越える物理を制限するのに使うことができる。
- Wilson 係数を決定する際には、重要な役割を果たすことが期待される。



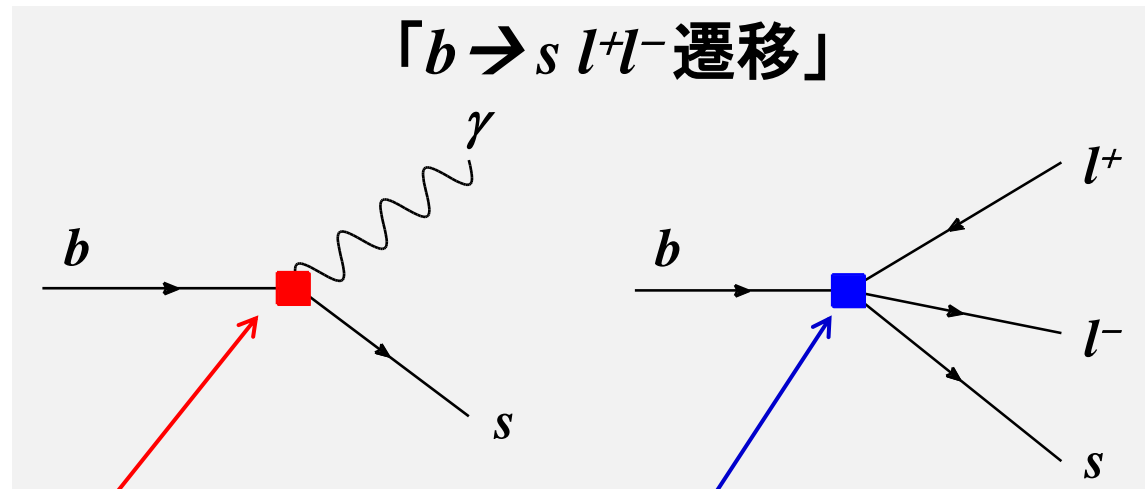
Backup Slides

Operator Product Expansion / Wilson 係数

- ハミルトニアンを Wilson 係数と実効オペレータを使って、書き表す。

$$H \sim \sum_i C_i O_i$$

- 重い粒子(W, Z, t, \dots) を1つのバーテックスに押し込める。
- 標準理論において、 $b \rightarrow s l^+ l^-$ 遷移は3つのWilson係数に感度がある。



C_7 : magnetic ペンギンオペレータ

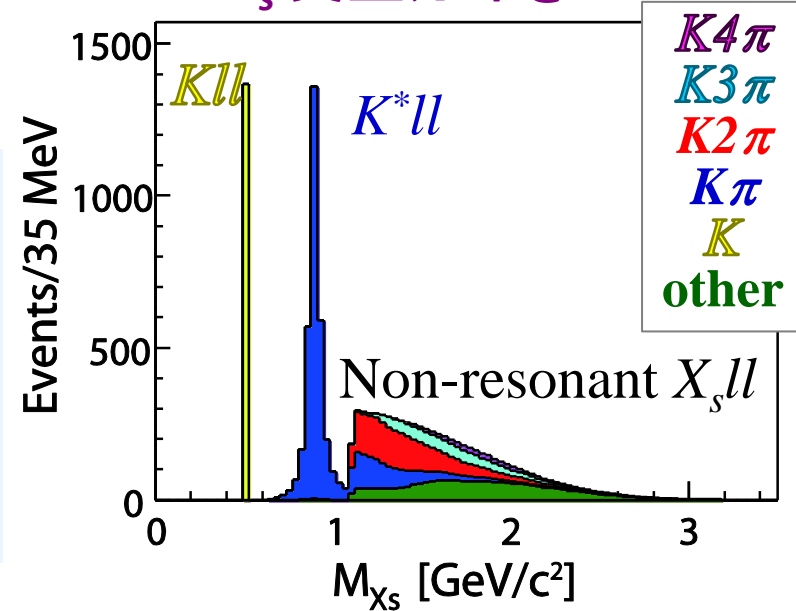
C_9 : vector 電弱オペレータ

C_{10} : axial-vector 電弱オペレータ

- Wilson 係数は標準理論において精度よく計算されており、新物理はその「ずれ」、もしくは「新たなオペレータ」として観測される。

解析で用いるモード

X_s 質量分布@MC



- $X_s l^+l^-$ を36の終状態から再構成する。

$$l^+l^- = e^+e^- \text{ or } \mu^+\mu^-$$

$X_s = K^\pm/K_S +$ 最大4つの π (π^0 は1つまで)

[K]: K , K_S

[$K\pi$]: $K\pi$, $K_S\pi$, $K\pi^0$, $K_S\pi^0$

[$K2\pi$]: $K2\pi$, $K_S2\pi$, $K\pi\pi^0$, $K_S\pi\pi^0$

[$K3\pi$]: $K3\pi$, $K_S3\pi$, $K2\pi\pi^0$, $K_S2\pi\pi^0$

[$K4\pi$]: $K4\pi$, $K_S4\pi$, $K3\pi\pi^0$, $K_S3\pi\pi^0$

- A_{FB} の測定には20の終状態を使用。

- B 中間子のフレーバーが識別できない終状態は使用しない。

- フレーバーは X_s or K の電荷から識別。

- 終状態[$K4\pi$] は再構成できる数が少ないため、使用しない。

- 終状態間の混じり(Cross-feed)を抑制するため、

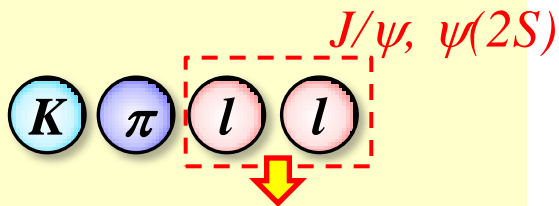
A_{FB} の測定に使用しない終状態も再構成する。

→ 20の終状態で、 X_s の崩壊のうち、50% をカバー。(K_L も含めると、59%。)

信号領域にピークをつくる背景事象

- 3つのピーキング背景事象がある。
 - ピーキング背景事象はできる限りデータをもとに評価した。

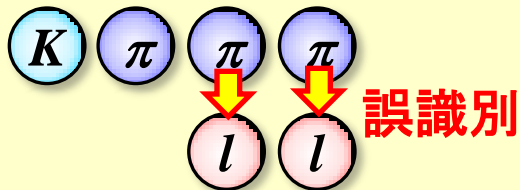
1. チャーモニウム事象



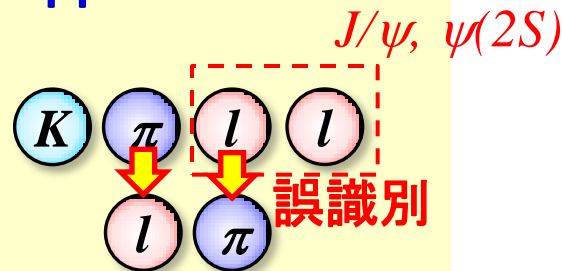
チャーモニウム除去の条件を逃れる。

M_{bc} の形はMC から、
数は X_s J/ψ データから求める。

2. Double miss-PID



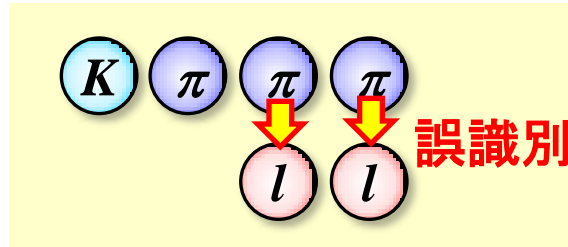
3. Swapped miss-PID



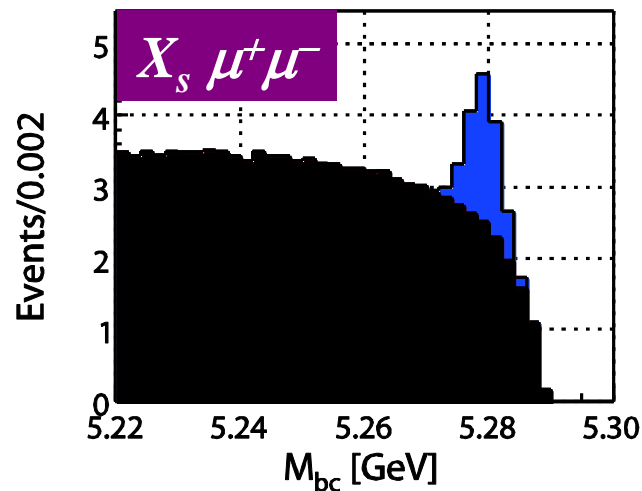
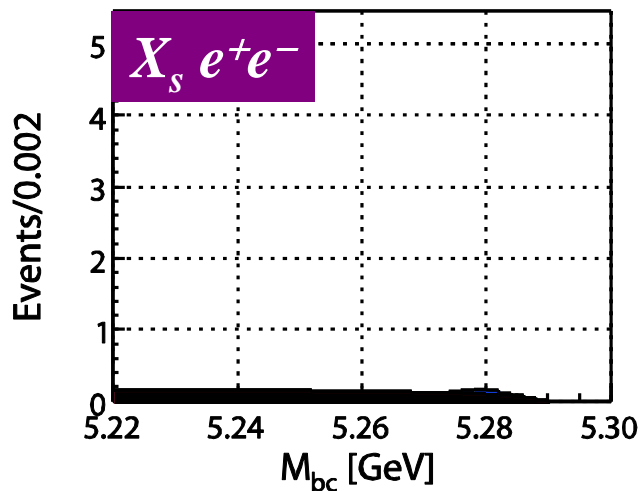
誤識別する確率を用いて、
データから直接見積もる (→ 次ページ)。

Double miss-PID 事象の見積もり

- ピーキング背景事象の原因となる事象を選択する。
 - Double miss-PID : レプトン候補に関する要求を反転。

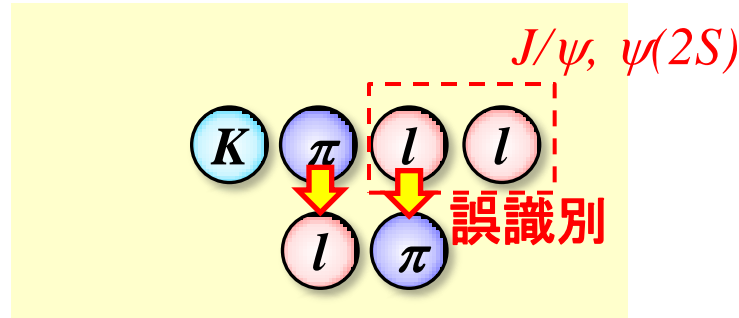


- π をレプトンと誤識別する確率(f_l) で重みづけをして、実際にピーキング背景事象となる事象数を求める。 $w = f_{e^+} \cdot f_{e^-}$
- MC を用いて見積もり方法が正しいことを確認したのち、データを用いて、見積もりを行った。



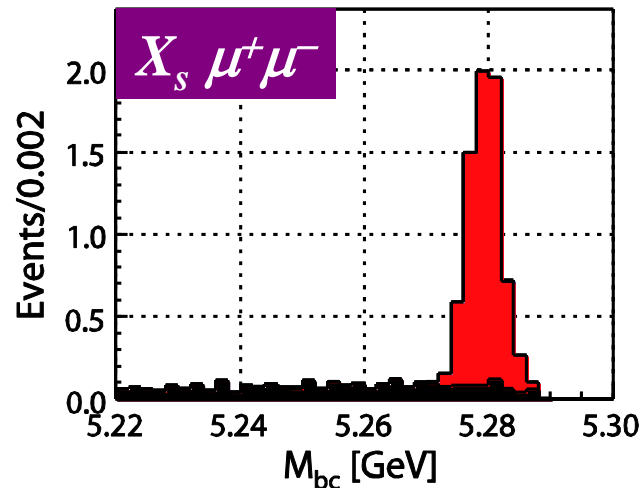
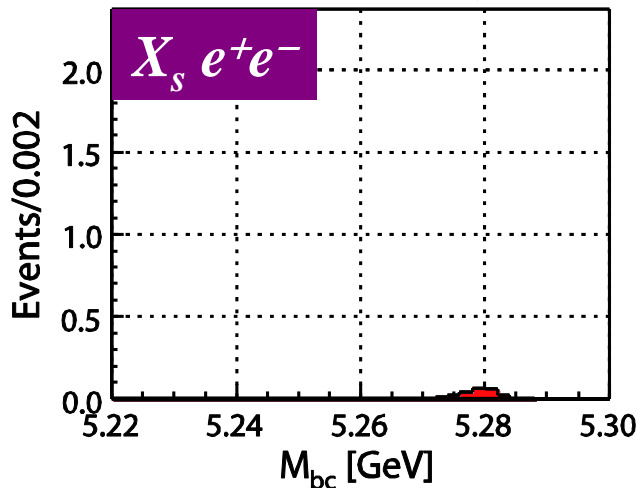
Swapped miss-PID 事象の見積もり

- ピーキング背景事象の原因となる事象を選択する。
 - Swapped miss-PID : チャーモニウム事象除去の条件を反転。



- π をレプトンと誤識別する確率 (f_l) と粒子識別の効率 (ϵ_l, ϵ_π) で重みづけをして、実際にピーキング背景事象となる事象数を求める。
- MC を用いて、見積もり方法が正しいことを確認したのち、データを用いて、見積もりを行った。

$$w = \frac{f_l}{\epsilon_\pi} \cdot \frac{(1 - \epsilon_l)}{\epsilon_l}$$

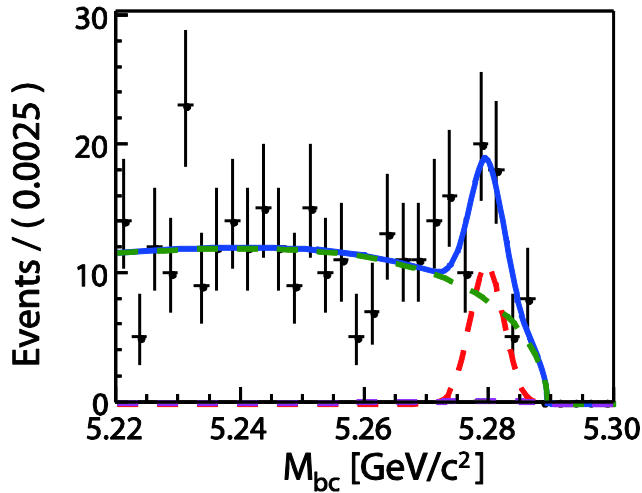


PDF

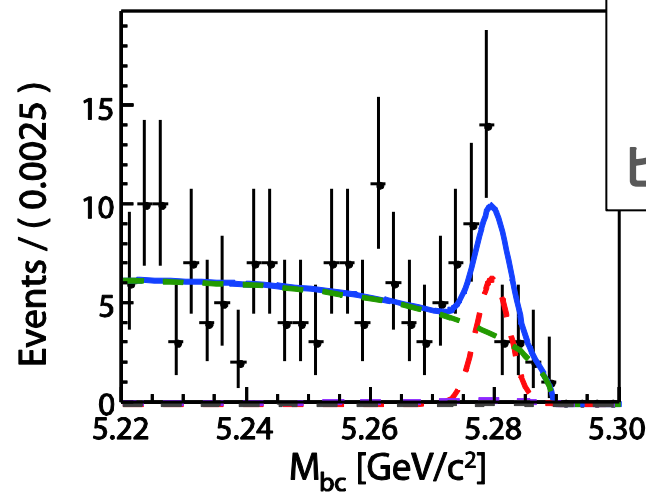
- 信号事象 : ガウス分布
 - 形は $X_s J/\psi$ データを用いて決定。
- Cross-feed : MC から求めた histogram-PDF
 - 事象数は信号事象数に比例
- 背景事象 : ARGUS 関数
- ピーキング背景事象 : histogram-PDF
 - チャーモニウム事象
 - Double miss-PID
 - Swapped miss-PID

フィット結果 (1st q^2 bin)

$X_s e^+e^-, Forward$

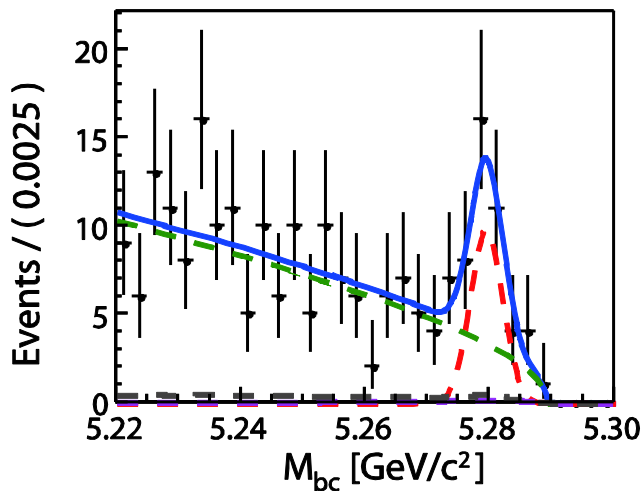


$X_s e^+e^-, Backward$

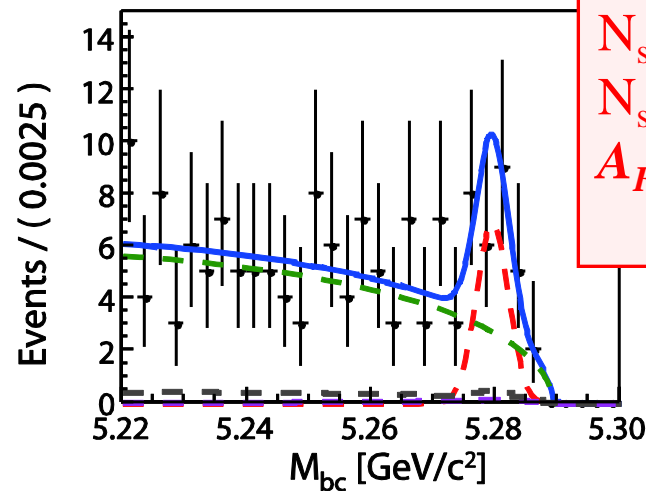


Total
 信号事象
 Cross-feed
 背景事象
 ピーキング背景事象

$X_s \mu^+\mu^-, Forward$



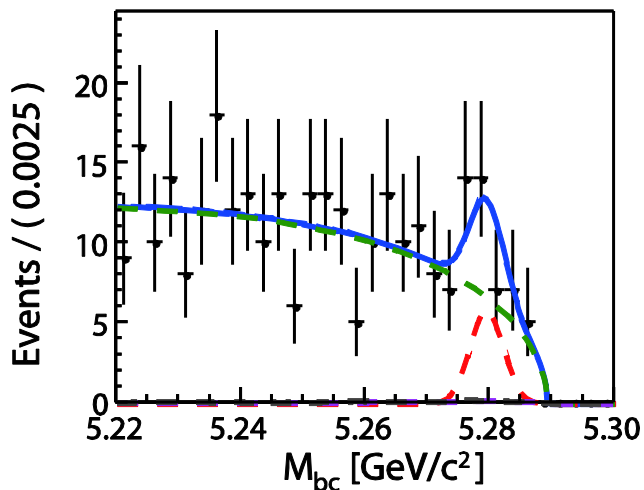
$X_s \mu^+\mu^-, Backward$



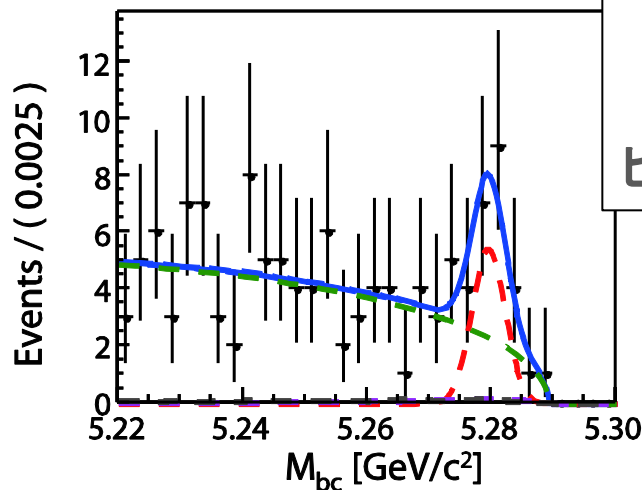
$N_{\text{sig}}(ee) = 45.7 \pm 10.9$ (stat)
 $N_{\text{sig}}(\mu\mu) = 43.4 \pm 9.2$ (stat)
 $A_{FB} = 0.34 \pm 0.24$ (stat)
 ± 0.02 (syst)

フィット結果 (2nd q^2 bin)

$X_s e^+e^-$, Forward

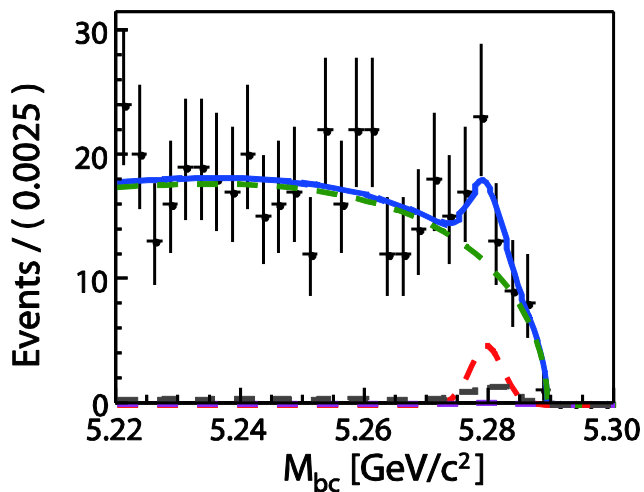


$X_s e^+e^-$, Backward

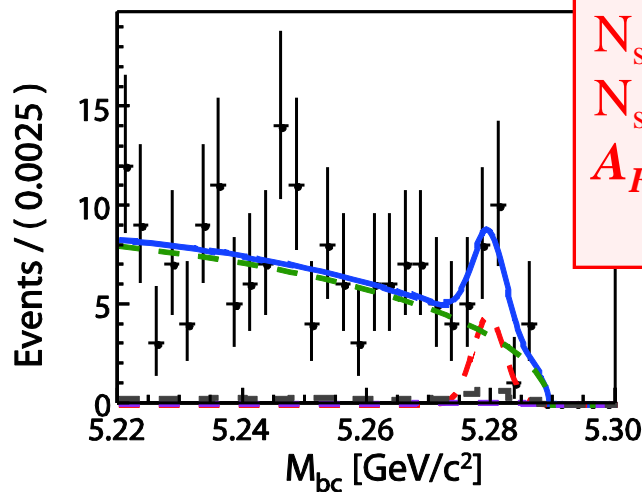


Total
 信号事象
 Cross-feed
 背景事象
 ピーキング背景事象

$X_s \mu^+\mu^-$, Forward



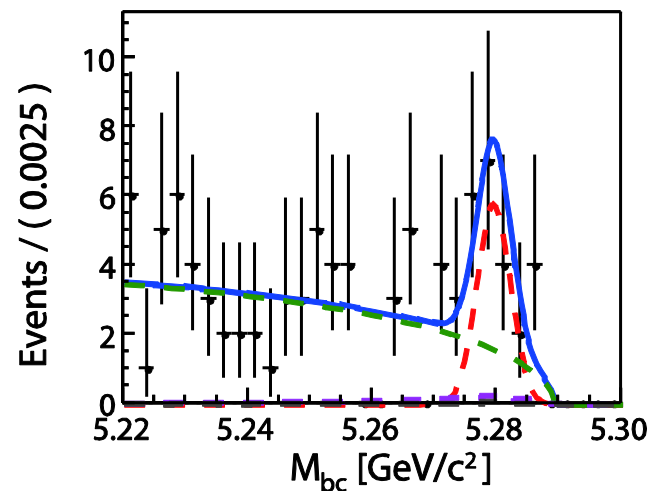
$X_s \mu^+\mu^-$, Backward



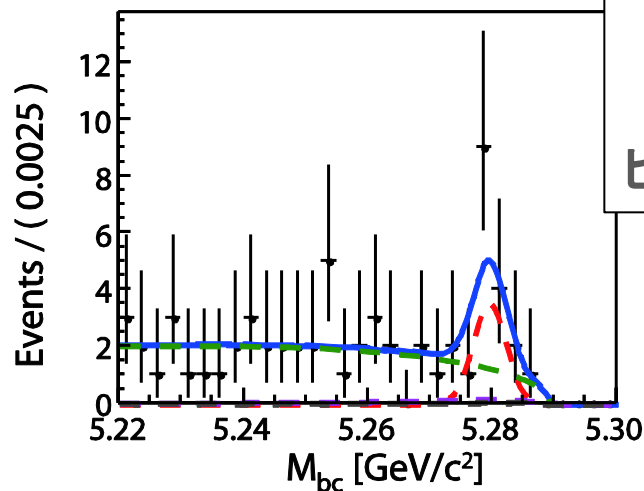
$N_{\text{sig}}(ee) = 30.1 \pm 9.2$ (stat)
 $N_{\text{sig}}(\mu\mu) = 23.9 \pm 10.5$ (stat)
 $A_{FB} = 0.04 \pm 0.31$ (stat)
 ± 0.05 (syst)

フィット結果 (4th q^2 bin)

$X_s e^+e^-$, Forward

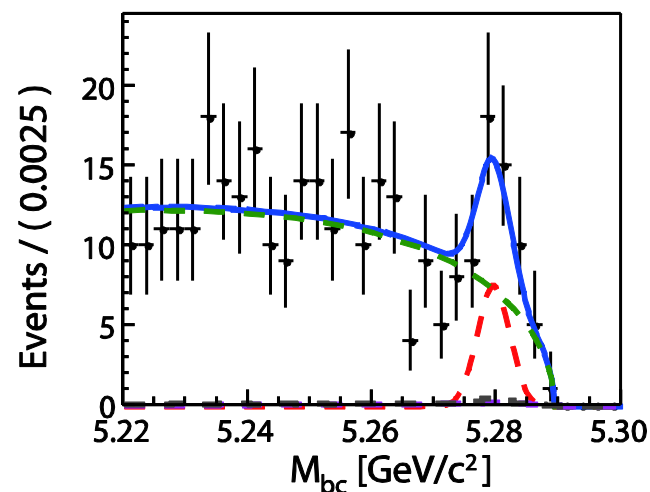


$X_s e^+e^-$, Backward

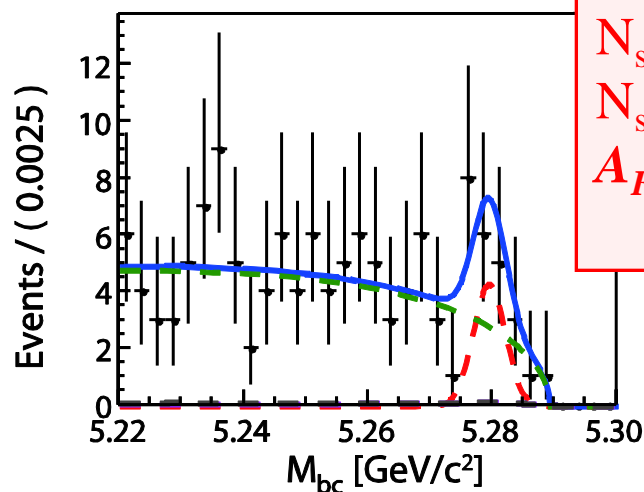


Total
 信号事象
 Cross-feed
 背景事象
 ピーキング背景事象

$X_s \mu^+\mu^-$, Forward



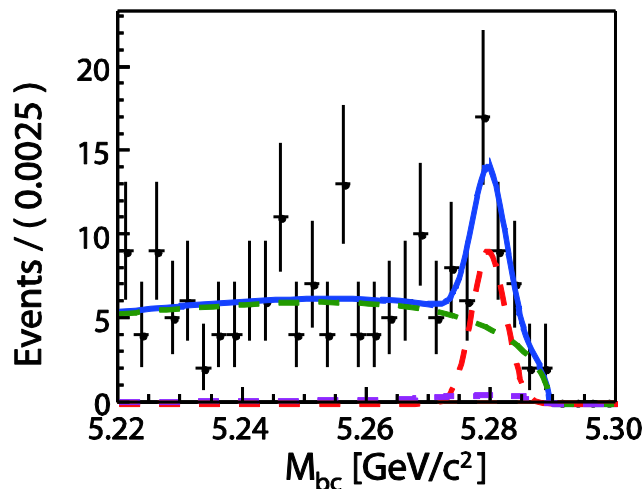
$X_s \mu^+\mu^-$, Backward



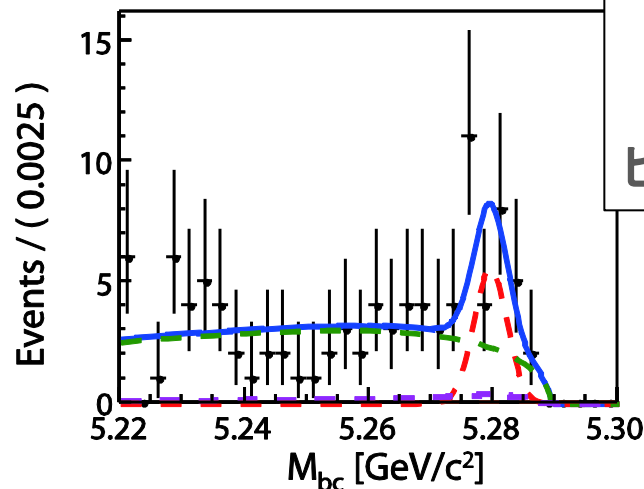
$N_{\text{sig}}(ee) = 25.0 \pm 7.0$ (stat)
 $N_{\text{sig}}(\mu\mu) = 30.7 \pm 9.9$ (stat)
 $A_{FB} = 0.28 \pm 0.21$ (stat)
 ± 0.01 (syst)

フィット結果 (6th q^2 bin)

$X_s e^+e^-$, Forward

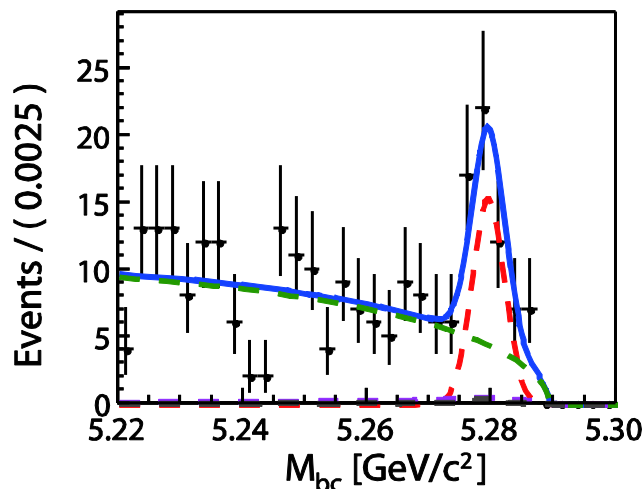


$X_s e^+e^-$, Backward

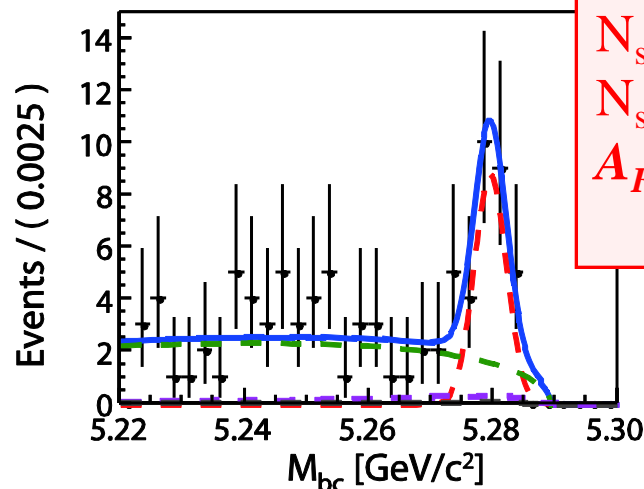


Total
 信号事象
 Cross-feed
 背景事象
 ピーキング背景事象

$X_s \mu^+\mu^-$, Forward



$X_s \mu^+\mu^-$, Backward



$N_{\text{sig}}(ee) = 39.2 \pm 9.6$ (stat)
 $N_{\text{sig}}(\mu\mu) = 62.9 \pm 10.4$ (stat)
 $A_{FB} = 0.28 \pm 0.15$ (stat)
 ± 0.01 (syst)

$A_{FB}(B^\pm \rightarrow K^\pm l^+ l^-)$

	Results of $A_{FB}(B^\pm \rightarrow K^\pm l^+ l^-)$
1 st q^2 bin	$-0.05 \pm 0.24(\text{stat})$
2 nd q^2 bin	$-0.01 \pm 0.29(\text{stat})$
4 th q^2 bin	$-0.35 \pm 0.38(\text{stat})$
6 th q^2 bin	$0.12 \pm 0.18(\text{stat})$

Signal yields

bin	total ($s \rightarrow e^+e^-$)	$B \rightarrow Ke^+e^-$	$B \rightarrow K^*e^+e^-$	$B \rightarrow$ non-resonant $X_s e^+e^-$
1st q^2	45.7 ± 10.9	26.0 ± 5.4	12.2 ± 5.1	14.1 ± 6.3
2nd q^2	30.1 ± 9.2	10.9 ± 3.7	15.3 ± 5.5	-0.6 ± 3.8
4th q^2	25.0 ± 7.0	7.1 ± 2.9	5.7 ± 3.2	10.9 ± 4.0
6th q^2	39.2 ± 9.6	24.6 ± 5.7	14.7 ± 5.0	4.4 ± 2.1
Total	139.9 ± 18.6	68.6 ± 9.2	47.9 ± 9.6	28.8 ± 8.6
bin	total($s \rightarrow \mu^+\mu^-$)	$B \rightarrow K\mu^+\mu^-$	$B \rightarrow K^*\mu^+\mu^-$	$B \rightarrow$ non-resonant $X_s\mu^+\mu^-$
1st q^2	43.4 ± 9.2	20.1 ± 4.7	11.7 ± 4.4	13.0 ± 5.4
2nd q^2	23.9 ± 10.5	11.8 ± 3.6	10.5 ± 4.6	11.4 ± 7.4
4th q^2	30.7 ± 9.9	Not converged	13.1 ± 5.0	4.7 ± 5.2
6th q^2	62.9 ± 10.4	26.7 ± 6.0	27.3 ± 6.4	3.7 ± 2.8
Total	160.8 ± 20.0	58.6 ± 8.4	62.6 ± 10.3	32.8 ± 10.9
bin	total($s \rightarrow \ell^+\ell^-$)	$B \rightarrow K\ell^+\ell^-$	$B \rightarrow K^*\ell^+\ell^-$	$B \rightarrow$ non-resonant $X_s\ell^+\ell^-$
1st q^2	89.4 ± 14.3	46.1 ± 7.2	23.9 ± 6.7	27.1 ± 8.3
2nd q^2	54.1 ± 13.6	22.7 ± 5.2	25.8 ± 7.2	10.8 ± 8.3
4th q^2	55.7 ± 12.1	7.1 ± 2.9	18.8 ± 5.9	15.6 ± 6.6
6th q^2	102.2 ± 13.9	51.3 ± 8.3	42.0 ± 8.1	8.1 ± 3.5
Total	300.7 ± 27.3	127.2 ± 12.4	110.5 ± 14.1	61.6 ± 13.9