



TOHOKU
UNIVERSITY

$b \rightarrow s l^+ l^-$ 遷移における レプトン前後非対称性の測定

東北大

佐藤 優太郎

B workshop @ 磐梯熱海

目次

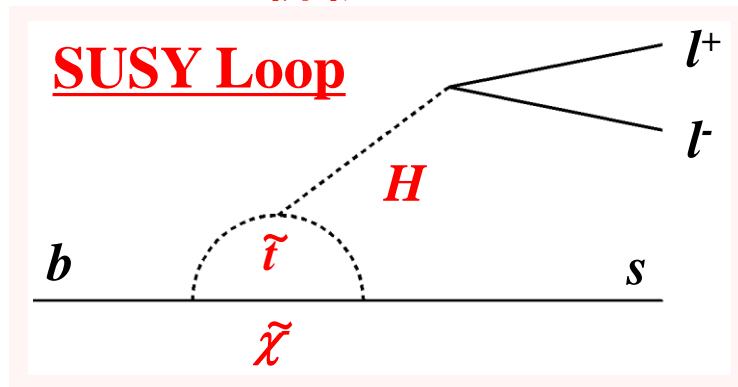
- イントロ
 - $b \rightarrow s$ 遷移
 - Wilson係数
 - Semi-inclusive アプローチ
 - レプトン前後非対称性
 - 現在の測定結果
- 解析
 - シグナルMC
 - M_{bc} and ΔE 分布
 - Best Candidate Selection
 - B.G. study
- まとめ・プラン

$b \rightarrow s$ 遷移

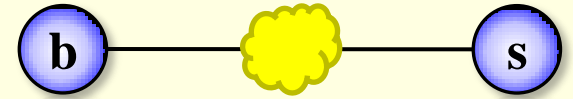
$b \rightarrow s$ 遷移

- 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。

新物理

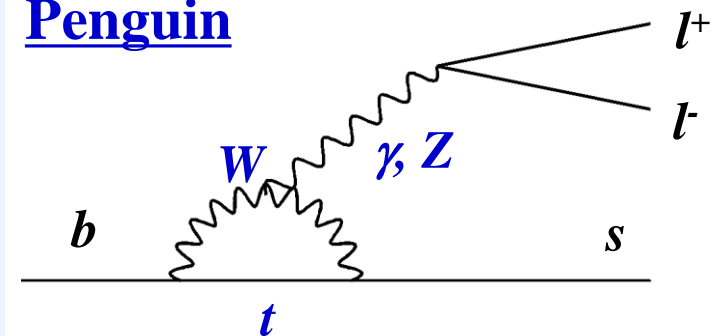


Flavor Changing Neutral Current

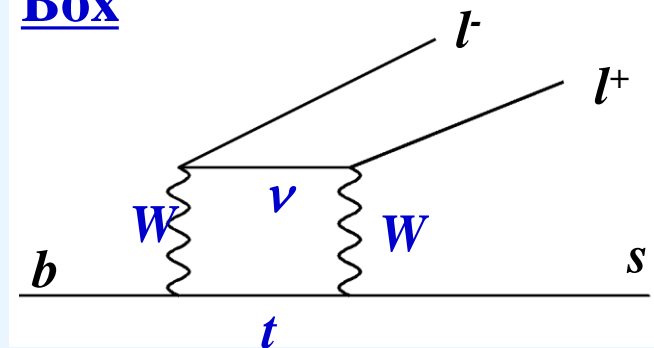


標準理論

Penguin



Box



$b \rightarrow s l^+ l^-$ 遷移

- Penguin or Box diagrams
- 稀崩壊 (崩壊分岐比 $\sim 10^{-6}$)
- 低B.G.

($b \rightarrow s \gamma$ については次のトーク[斉藤]で)

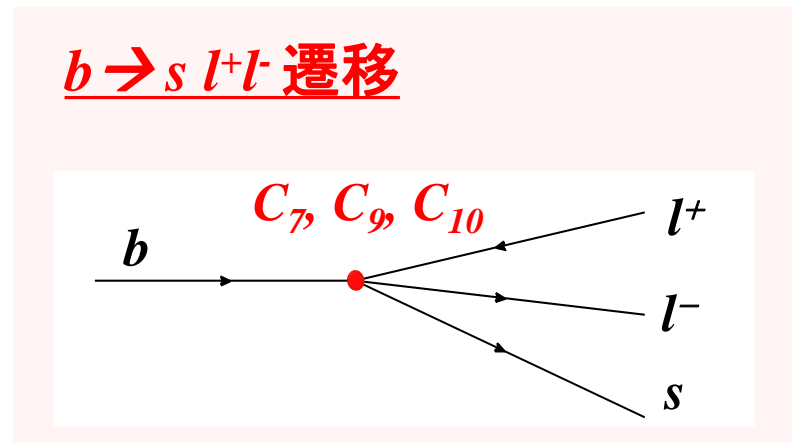
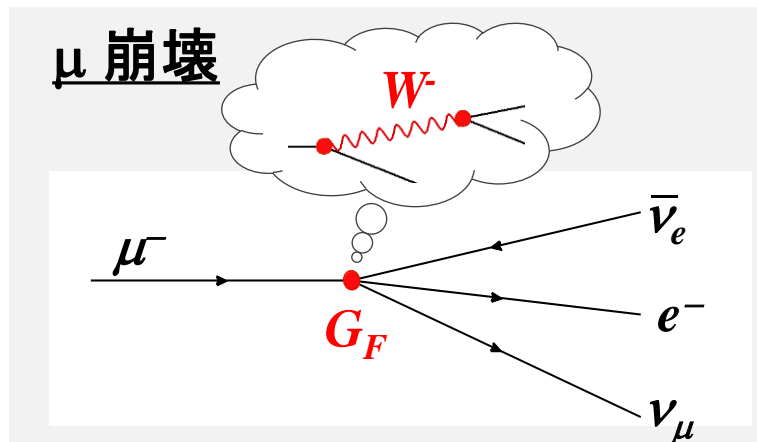
Wilson 係数

Operator Product Expansion

- ハミルトニアンをオペレータ(O_i) とWilson 係数(C_i) 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。
(例) 低エネルギーで、 μ 崩壊がフェルミ結合定数を用いて表す。



- $b \rightarrow s l^+ l^-$ 遷移は3つのWilson 係数(C_7, C_9, C_{10}) に感度がある。
- Wilson 係数は標準理論では精度よく計算されており、新物理はそのずれとして観測される。

Semi-inclusive アプローチ

解析手法として、3つの方法(アプローチ)がある。

Exclusive : $B \rightarrow a + b + c$

- 終状態のすべての粒子を観測して解析する。
 - $B \rightarrow K^* l^+ l^-, B \rightarrow K l^+ l^-$

Inclusive : $B \rightarrow a + X$

- 終状態の一部の粒子(a)のみを観測し、解析する。
 - 2個のレプトンのみを観測して $b \rightarrow s l^+ l^-$ 崩壊を解析することは、semi-leptonic B 崩壊 (Br~20%) があるため、難しい。

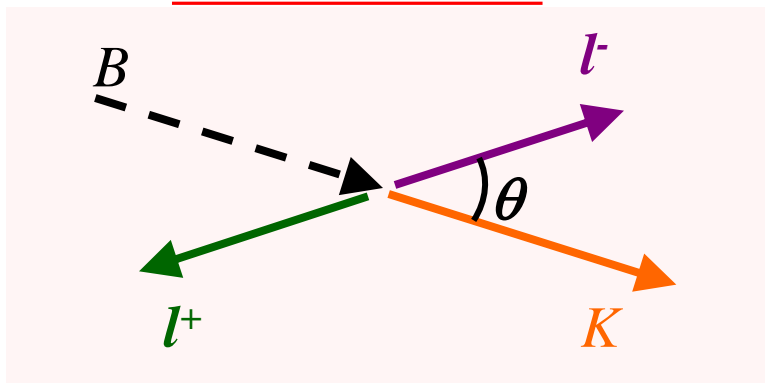
Semi-inclusive

- Exclusive の足し合わせ。
 - $B \rightarrow X_s l^+ l^-$ ($X_s = K, K\pi, K2\pi, \dots\dots$)
- Inclusive に対して、B.G. 分離に有効な変数($M_{bc}, \Delta E$) が使える。
- Exclusive に対して、ハドロン化による不定性が少ない。

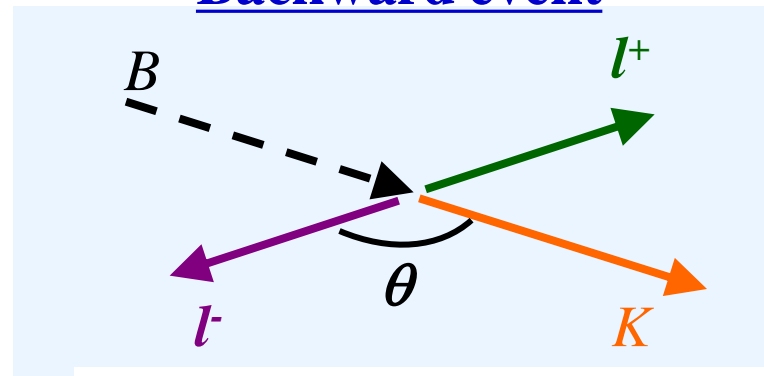
レプトン前後非対称性(A_{FB})

- $\cos\theta$: レプトン対の静止系において、 B (B^0 or B^+) と l の間の角。

Forward event



Backward event

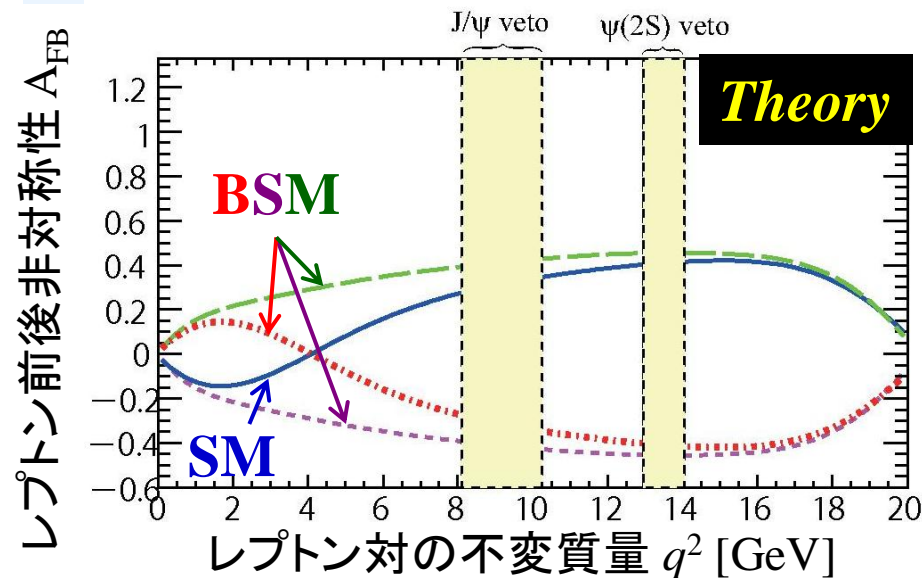


レプトン前後非対称性

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

$$\propto \text{Re} \left[\left(2C_7^{eff} + \hat{s}C_9^{eff} \right) C_{10}^* \right]$$

$$\left(\hat{s} = \frac{q^2}{m_b^2} \right)$$



$b \rightarrow s l^+ l^-$ 遷移のレプトン前後非対称性をSemi-inclusiveアプローチで測定することで標準理論の検証(=新物理の探索)を行う。

$b \rightarrow s l^+ l^-$ の測定変数とその状況

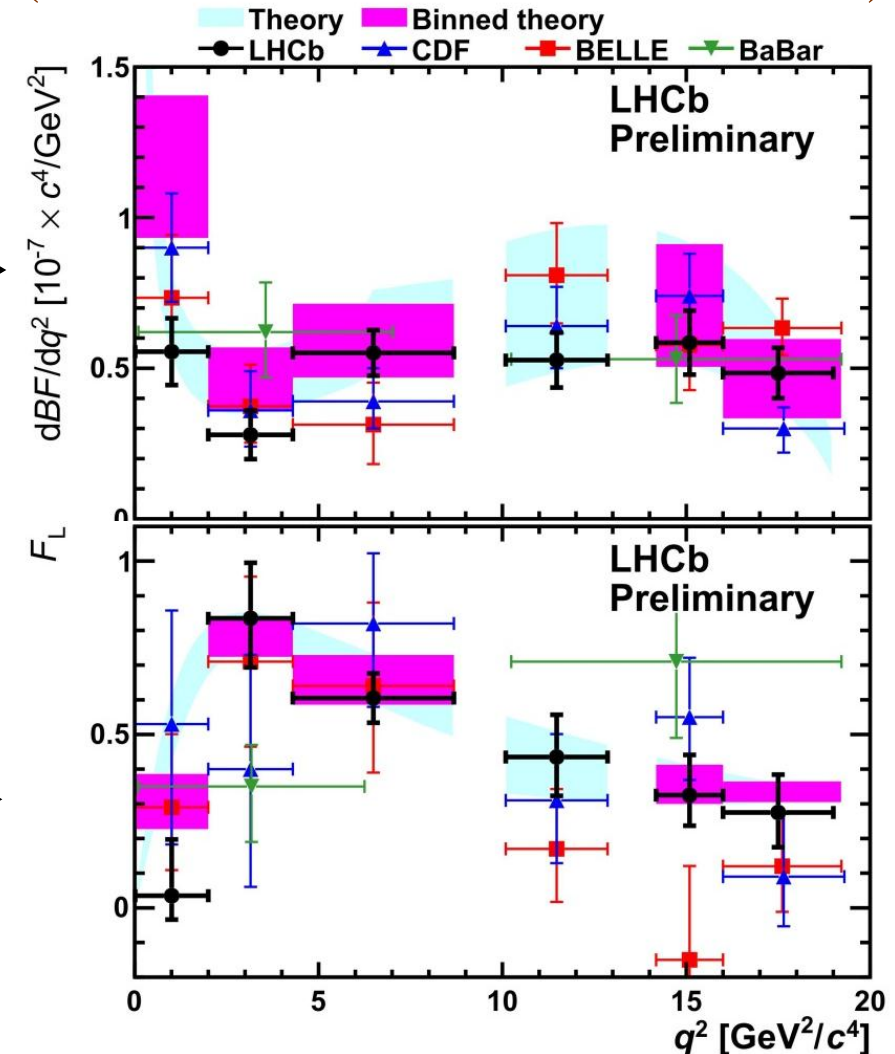
Exclusive : $B \rightarrow K^* l^+ l^-$

- 崩壊分岐比
 - アイソスピン非対称性(A_I)
 - K^* の偏極度(F_L)
 - レプトン前後非対称性(A_{FB})
- └──────────────────┬──────────────────┘
└──────────────────┘ 次ページ

Semi-inclusive

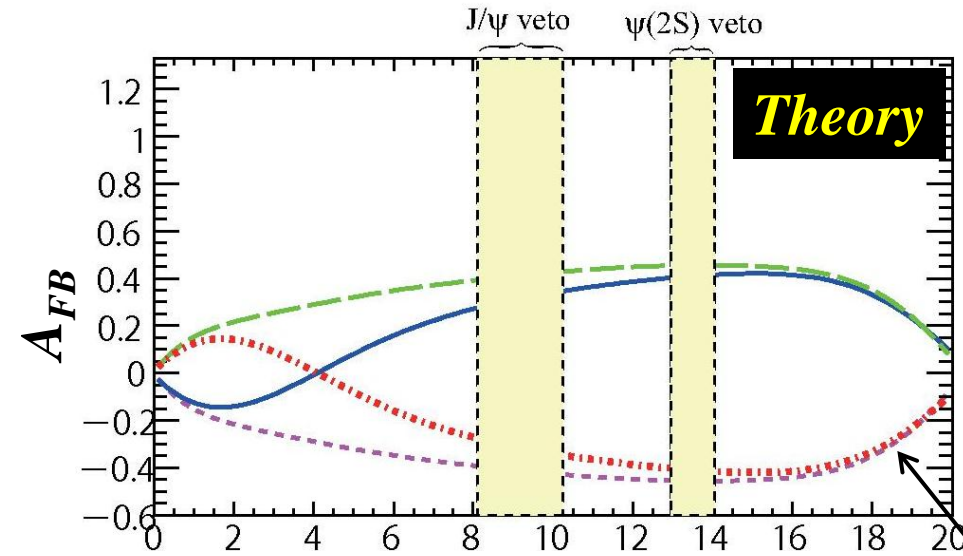
- 崩壊分岐比のみ
測定されている(by 中山さん)

LHCb の結果 (@LHCb-CONF-2011-03) ($B \rightarrow K^* l l$ のexclusive アプローチ)



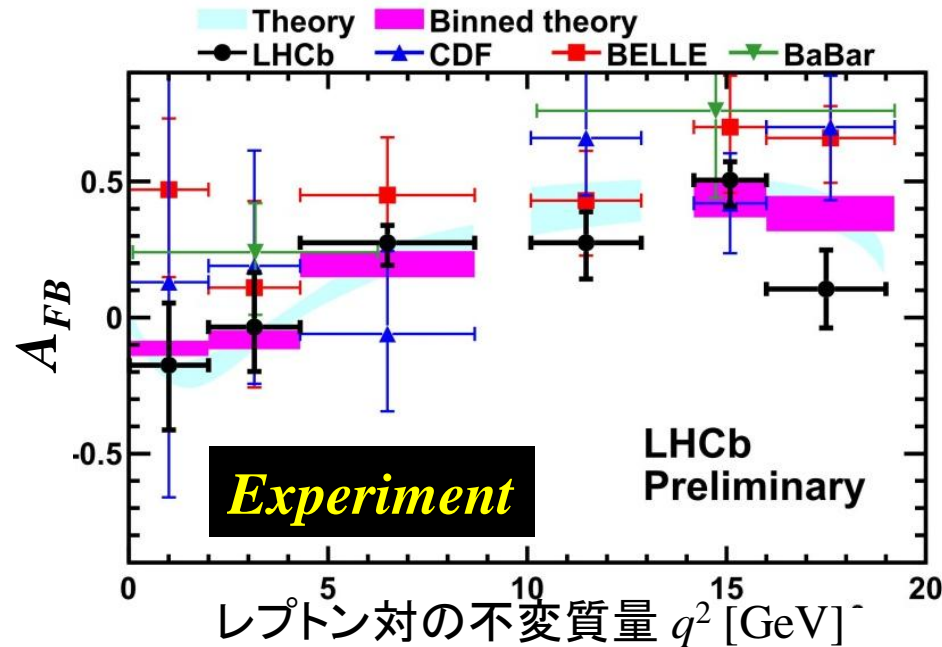
Signal yields = 302.3 ± 20.1 (309 pb^{-1})

現在の A_{FB} の測定状況



$$A_{FB} \propto \text{Re} \left[\left(2C_7^{eff} + \hat{s}C_9^{eff} \right) C_{10}^* \right]$$

SM

Flipped C_7 Flipped C_9C_{10} ✕Flipped C_7 and C_9C_{10} ✕

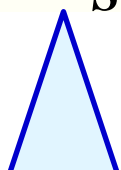
紫線と赤線は既に除外されている。
 C_7 の符号が分かっていない。
 $\rightarrow q^2$ の小さい範囲での A_{FB} の
 分布によって判断できる。

解析

再構成するモード

- 合計36 モードを足し合わせて、semi-inclusive 解析を行う。

$$B \rightarrow X_S \quad l^+ l^-$$



レプトン対 : ee or $\mu\mu$

18 終状態

[1 つの $K(K^\pm$ or $K_S)$] + [最大4 つまでの π (π^0 は最大1 つ)]

$$\left[\begin{array}{l} 1 \text{ body} : K, \quad K_S \\ 2 \text{ body} : K\pi, \quad K_S\pi, \quad K\pi^0, \quad K_S\pi^0 \\ 3 \text{ body} : K2\pi, \quad K_S2\pi, \quad K\pi\pi^0, \quad K_S\pi\pi^0 \\ 4 \text{ body} : K3\pi, \quad K_S3\pi, \quad K2\pi\pi^0, \quad K_S2\pi\pi^0 \\ 5 \text{ body} : K4\pi, \quad K_S4\pi, \quad K3\pi\pi^0, \quad K_S3\pi\pi^0 \end{array} \right.$$

Signal MC 生成

3つのMCサンプルを測定されている崩壊分岐比に合わせて、混ぜて、生成している。

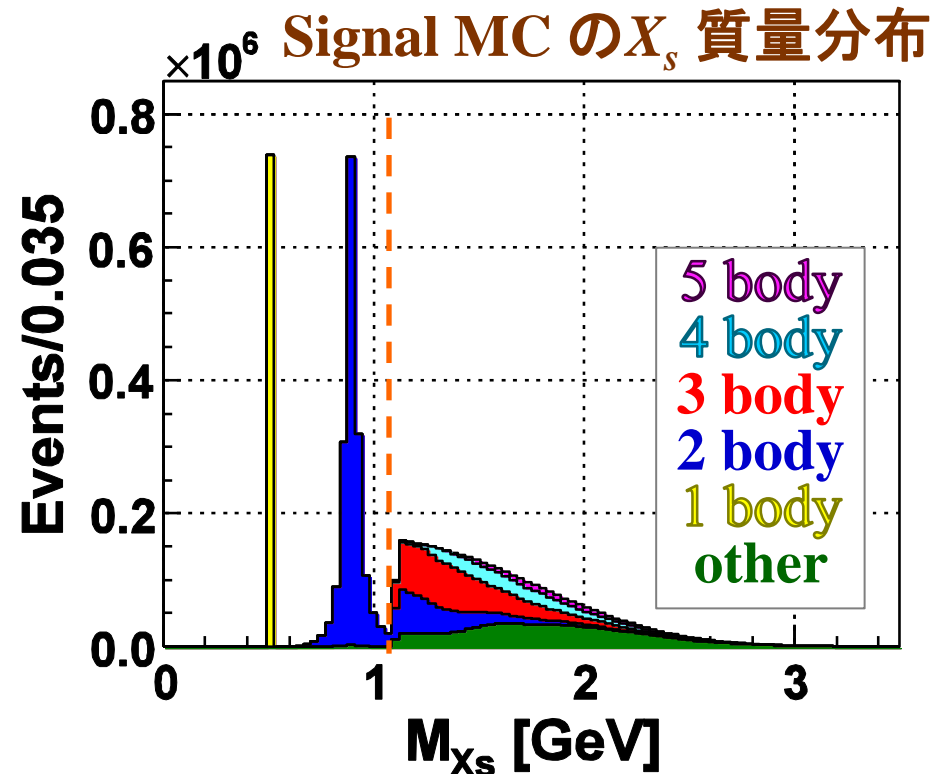
1. $B \rightarrow K l^+ l^-$: 12.3%
2. $B \rightarrow K^* l^+ l^-$: 29.5%
3. $B \rightarrow \text{non resonant } X_s l^+ l^-$: 58.2%

崩壊分岐比@HFAG2010

- $\text{Br} [B \rightarrow K l^+ l^-] : 0.45 \times 10^{-6}$
- $\text{Br} [B \rightarrow K^* l^+ l^-] : 1.08 \times 10^{-6}$
- $\text{Br} [B \rightarrow s l^+ l^- \text{ (total)}] : 3.66 \times 10^{-6}$

- X_s / K^* 遷移値 : 1.1 GeV
- 合計約600万イベント生成。

X_s の崩壊のうち、62.0% をカバー。
(K_L も含めると、82.4%)



粒子選択

中山さん(Semi-inclusive, $X_s l^+l^-$ 崩壊分岐比測定)を参考にしている。
(B.G. study の後で最適化を行う予定)

荷電粒子

- $|dr| < 1.0$ cm
- $|dz| < 5.0$ cm

e^\pm

- $p^{lab} > 0.4$ GeV
- e -ID > 0.8

μ^\pm

- $p^{lab} > 0.8$ GeV
- μ -ID > 0.97
 - e^\pm 候補ではないこと。

K^\pm

- K -ID(K/π) > 0.6
 - e^\pm, μ^\pm 候補ではないこと。

π^\pm

- e^\pm, μ^\pm, K^\pm 候補ではないこと。

K_s

- Find K_s クラスのgood K_s を要求。

π^0

- $E_{\gamma}^{lab} > 50$ MeV
- $E_{\pi^0}^{lab} > 400$ MeV
- $|M(\gamma\gamma) - M(\pi^0)| < 10$ MeV

イベント選択

レプトン対が生成されるB.G.イベントを除去 チャーモニウムからのB.G.の抑制

- $-0.40 \text{ GeV} < M(ee(\gamma)) - M(J/\psi) < 0.15 \text{ GeV}$
- $-0.25 \text{ GeV} < M(\mu\mu) - M(J/\psi) < 0.10 \text{ GeV}$
- $-0.25 \text{ GeV} < M(ee(\gamma)) - M(\psi(2S)) < 0.10 \text{ GeV}$
- $-0.15 \text{ GeV} < M(\mu\mu) - M(\psi(2S)) < 0.10 \text{ GeV}$

γ conversion / π^0 dalitz 崩壊の抑制

- $M(l^+l^-) > 0.2 \text{ GeV}$

レプトン対の z 方向の最小距離

- $|\Delta z_{l^+l^-}| < 150 \text{ } \mu\text{m}$

X_s l^+l^- vertex cut

- $\chi^2_{\text{vtx}} / \text{NDF} < 10.0$

X_s 質量

- $M_{X_s} < 2.0 \text{ GeV}$

$$\begin{aligned} \text{Br}[J/\psi \rightarrow l^+l^-] &\sim 5.9\% \\ \text{Br}[\psi(2S) \rightarrow l^+l^-] &\sim 0.8\% \\ \text{Br}[\pi^0 \rightarrow e^+e^- \gamma] &\sim 1.2\% \\ \text{Br}[B \rightarrow l\nu_l X] &\sim 11.0\% \end{aligned}$$

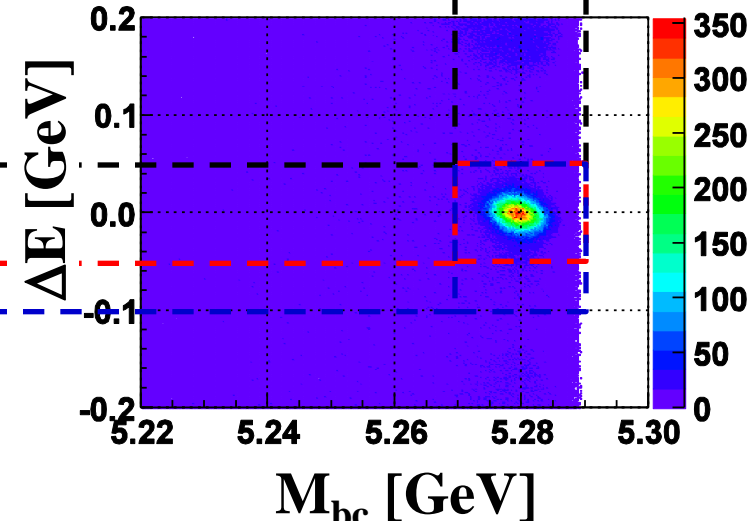
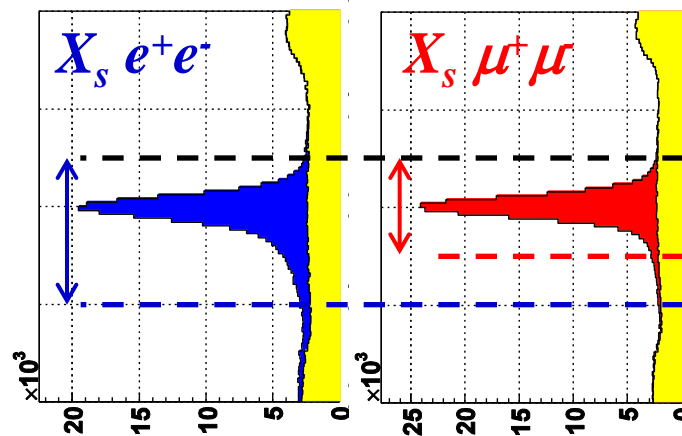
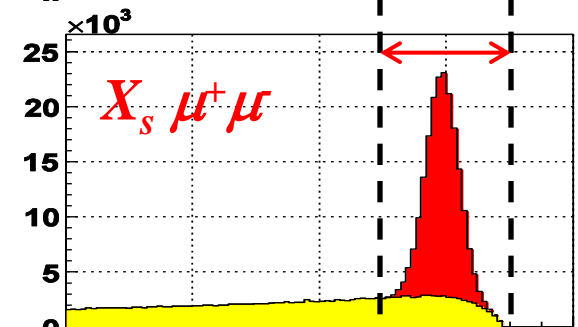
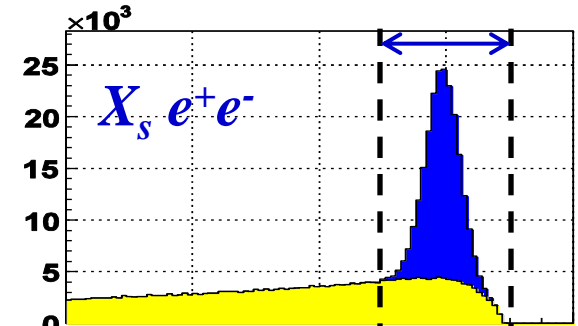
Signal box window

- $5.27 \text{ GeV} < M_{bc} < 5.29 \text{ GeV}$
- $-0.10 \text{ GeV} < \Delta E < 0.05 \text{ GeV}$ for $X_s e^+e^-$
- $-0.05 \text{ GeV} < \Delta E < 0.05 \text{ GeV}$ for $X_s \mu^+\mu^-$

M_{bc} と ΔE 分布 @ signal MC

- イベント選択後の M_{bc} , ΔE 分布を示す。
 - $X_s \mu^+ \mu^-$ にくらべて、
 $X_s e^+ e^-$ の ΔE はテールが大きい。

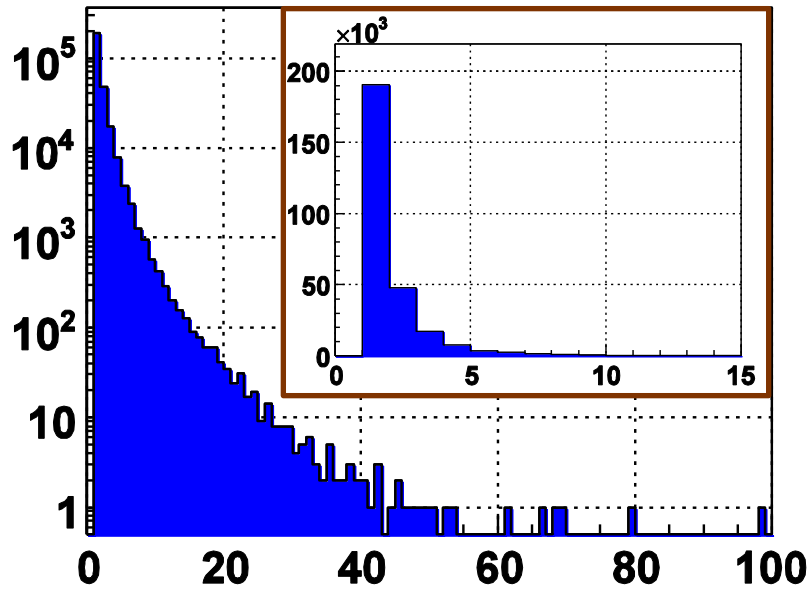
	$X_s e^+ e^-$	$X_s \mu^+ \mu^-$
Efficiency	5.6%	5.3%
Purity	65.7%	74.4%



※ Efficiency の分母は生成した全イベント数。

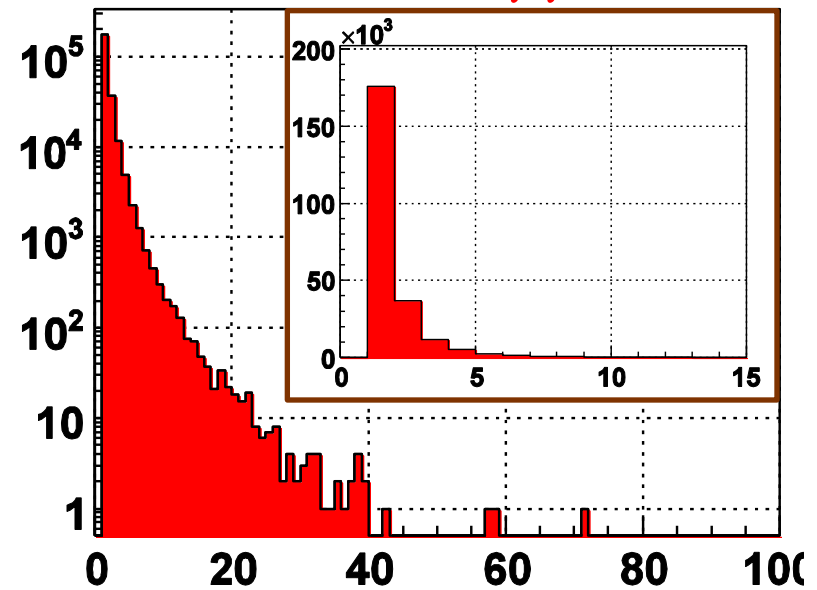
1 イベント当たりの B の候補数

$B \rightarrow X_s ee$



平均 : 1.64 個

$B \rightarrow X_s \mu\mu$



平均 : 1.48 個

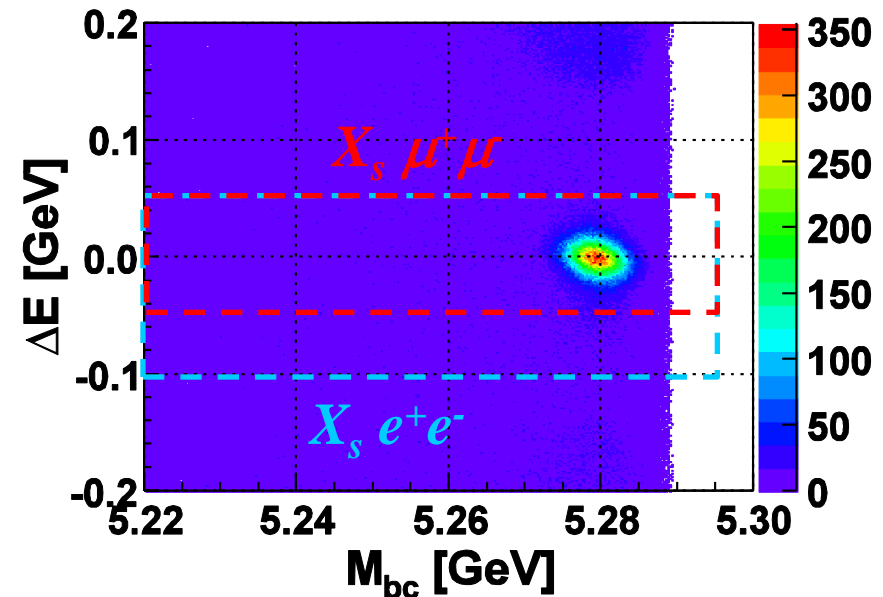
- ほとんどのイベントで B の候補数は5 以下。
 → 1 つのイベントに複数の B の候補がある場合、もっとも本物らしい B の候補を1 つ選択する(**Best Candidate Selection**)。

Best Candidate Selection

効率の良いBest Candidate Selection の方法を探した。

Best Candidate Selection する時の領域

- $5.22 \text{ GeV} < M_{bc} < 5.30 \text{ GeV}$
- $-0.10 \text{ GeV} < \Delta E < +0.05 \text{ GeV}$
(for $X_s e^+e^-$)
- $-0.05 \text{ GeV} < \Delta E < +0.05 \text{ GeV}$
(for $X_s \mu^+\mu^-$)

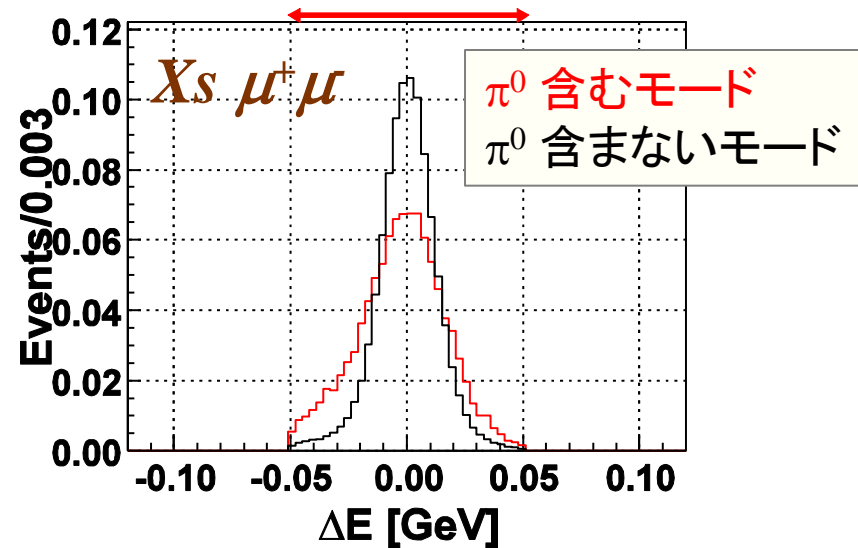
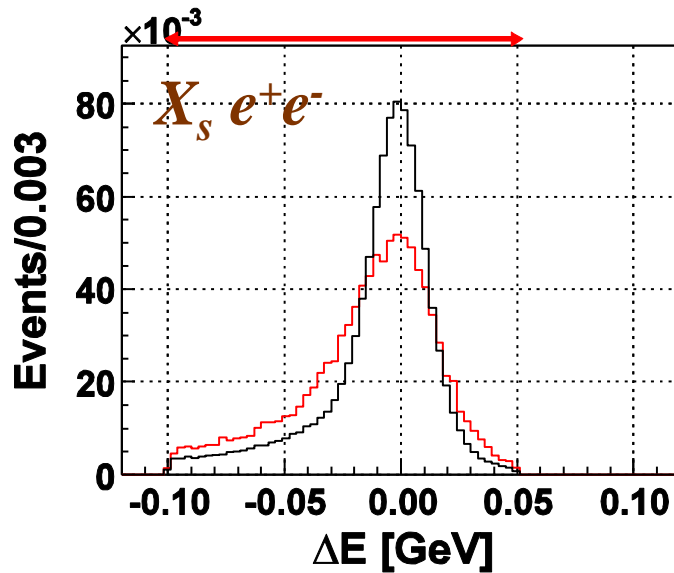


Best Candidate Selection の方法

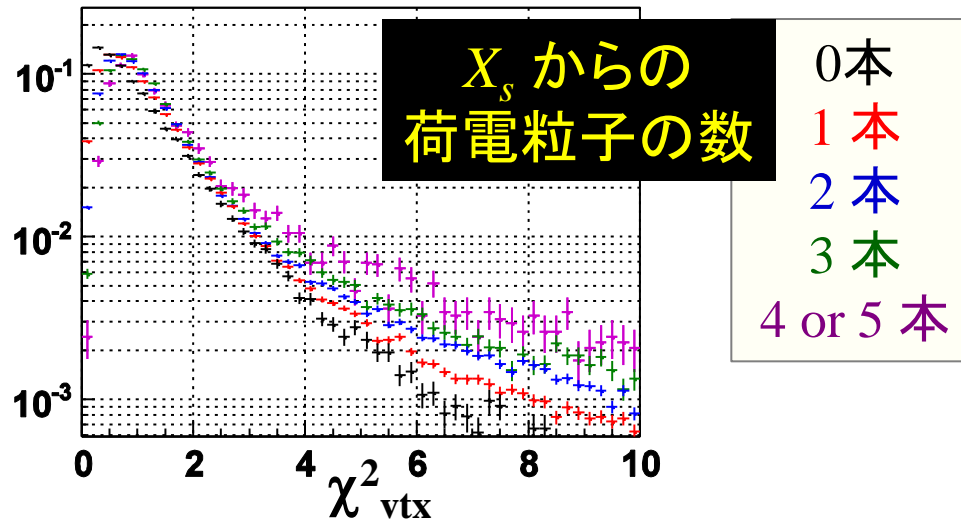
- Likelihood の積で、最も大きい値を持つイベントを選択
 - ΔE
 - $X_s l^+l^-$ の vertex fit の χ_{vtx}^2

PDF for Best Candidate Selection

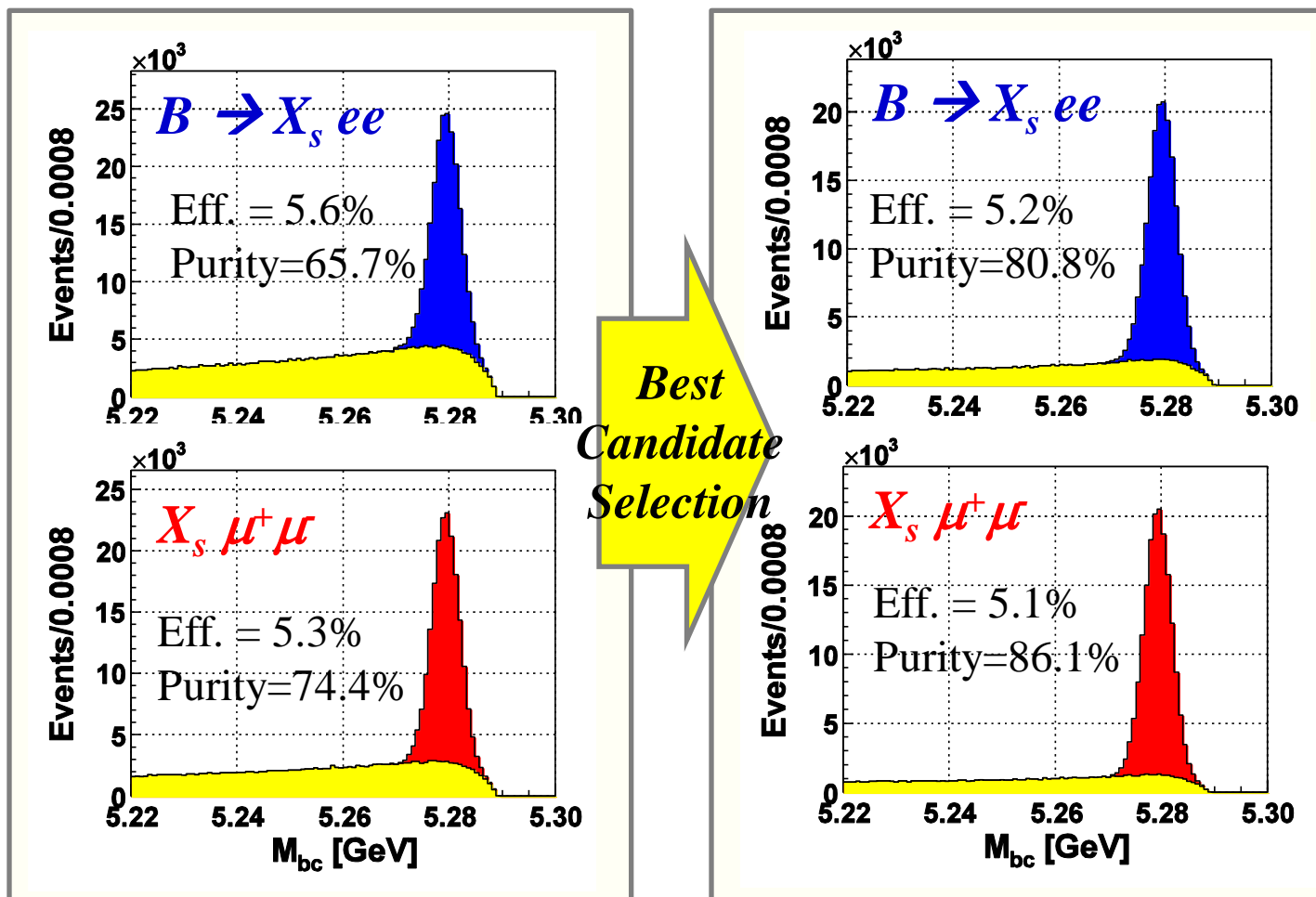
- ΔE は4つのカテゴリーに分けて、PDFを作成。



- χ_{vtx}^2 は5つのカテゴリーに分けて、PDFを作成。



Best Candidate Selection 前後の M_{bc} 分布



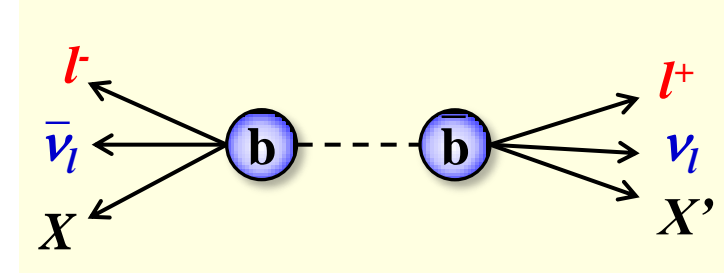
Best
Candidate
Selection

→ 正しく再構成されたイベントを(93.0/94.6) % 保持しつつ、
正しく再構成されなかったイベントを(57.7/55.6) % 低減。

B.G. 抑制

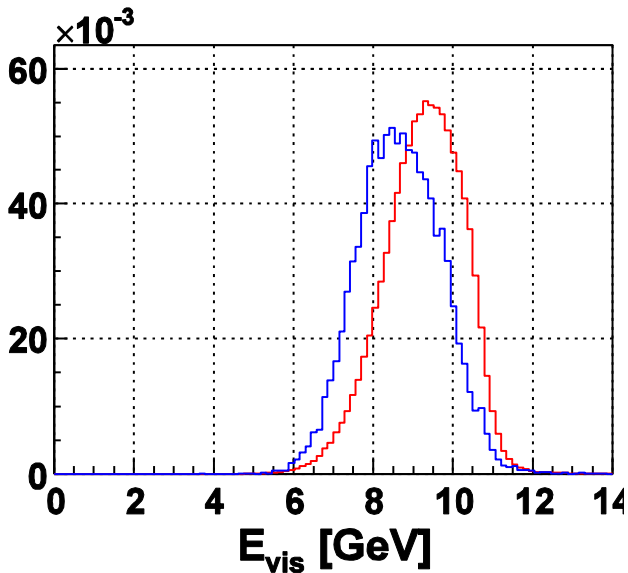
Semi-leptonic B 崩壊 からのB.G.を抑制するための、変数を用意した。

- 2つのニュートリノ(missing tracks)が生成されることを利用。



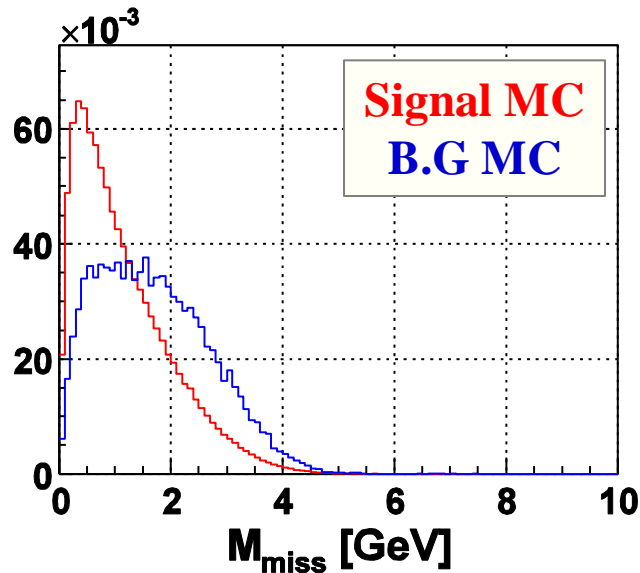
イベント中で
観測されたエネルギーの和

$$E_{\text{vis}} = \sum_i E_i$$



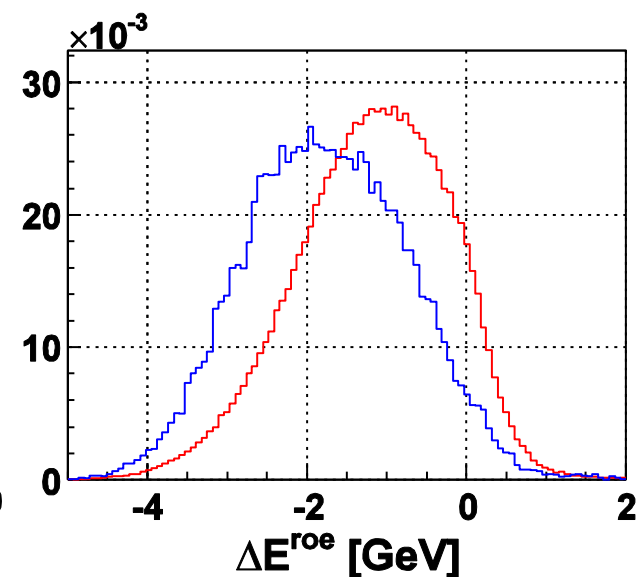
消失質量

$$M_{\text{miss}} = \sqrt{(2E_{\text{beam}} - \sum E_i)^2 - |\sum \vec{p}_i|^2}$$



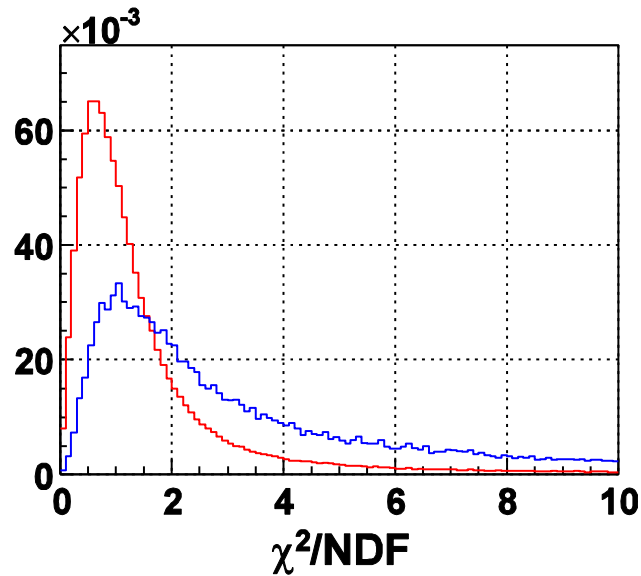
B の再構成に使われていない粒子のエネルギー和

$$\Delta E^{\text{ROE}} = E_{\text{ROE}} - E_{\text{beam}}$$

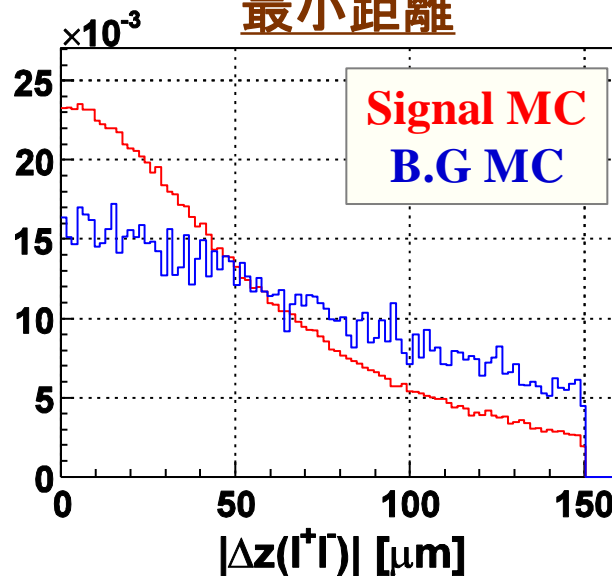


B.G. 抑制

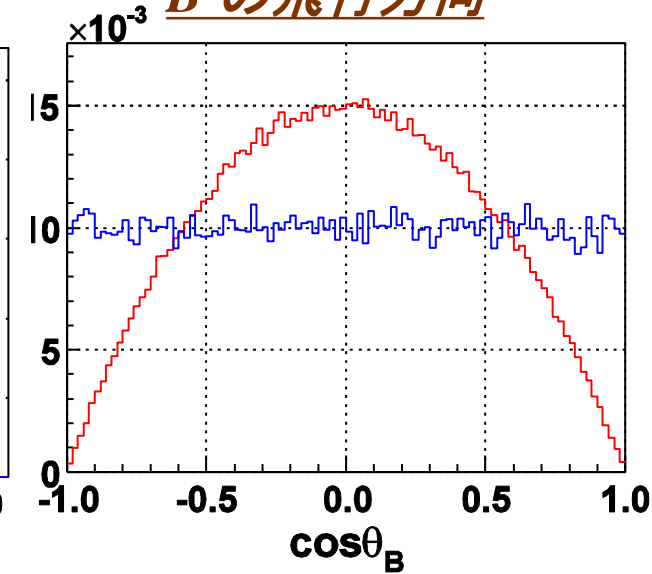
$X_s l^+l^-$ の vertex fit の χ^2



レプトン対の z 方向の
最小距離



B の飛行方向



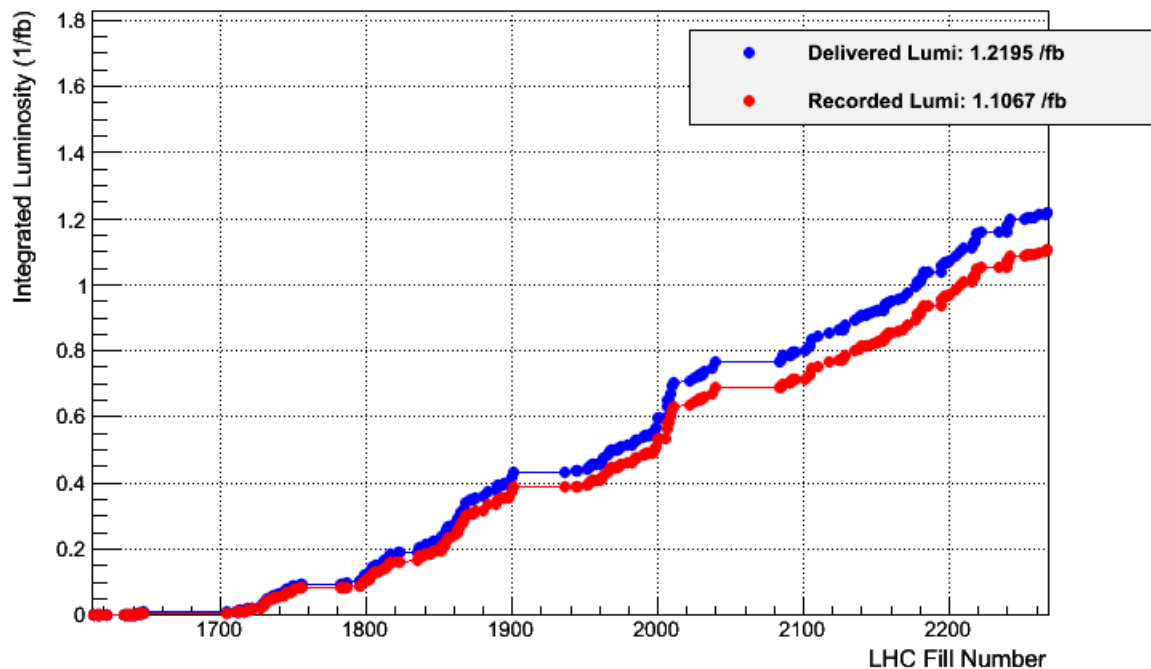
- Continuum B.G. ($ee \rightarrow qq$, $q=u,d,s,c$) などの他のB.G. も抑制する必要がある。
- これらの変数を組み合わせて、効果的にB.G. を抑制していく。
 - ニューラルネットワークを使う予定。

まとめ・プラン

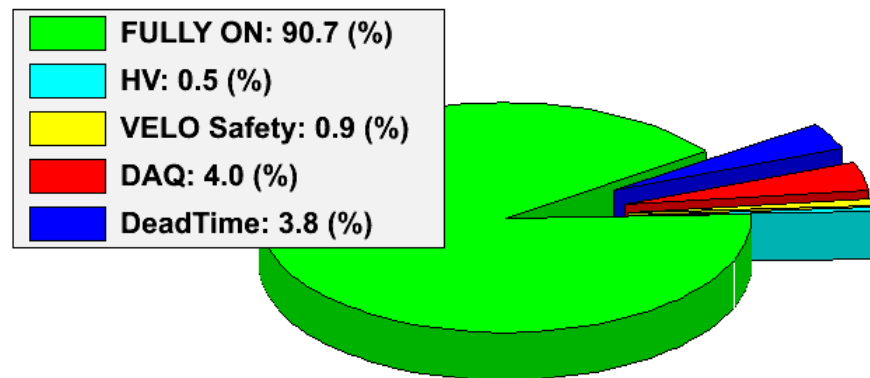
- $b \rightarrow s l^+ l^-$ 遷移は新物理(C_7, C_9, C_{10})に感度をもつ。
- $b \rightarrow s l^+ l^-$ におけるレプトン前後非対称性をsemi-inclusiveアプローチで測定し、標準理論の検証(=新物理の探索)を行っている。

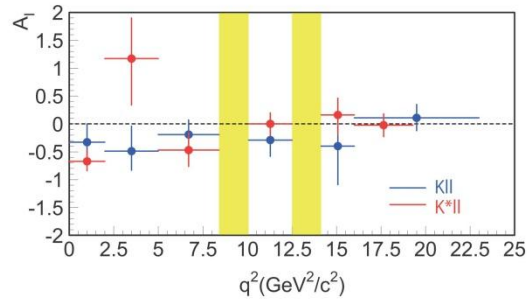
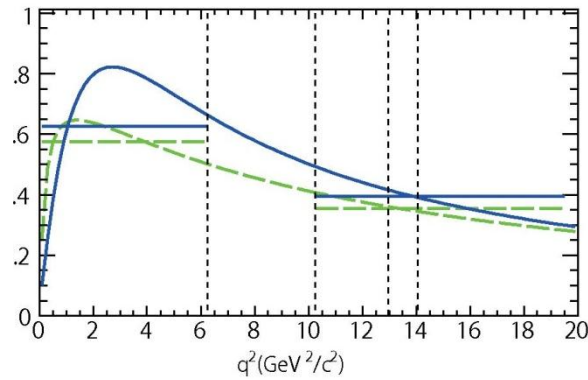
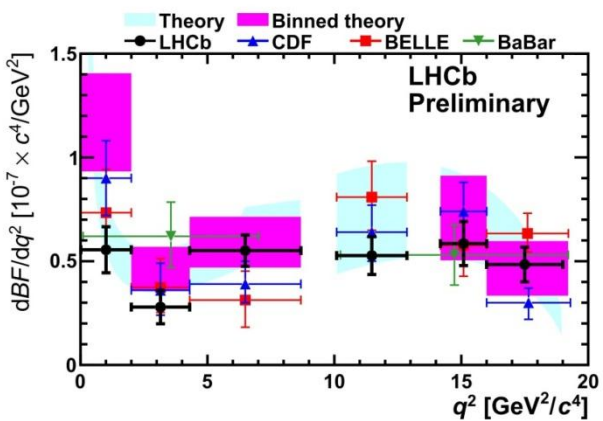
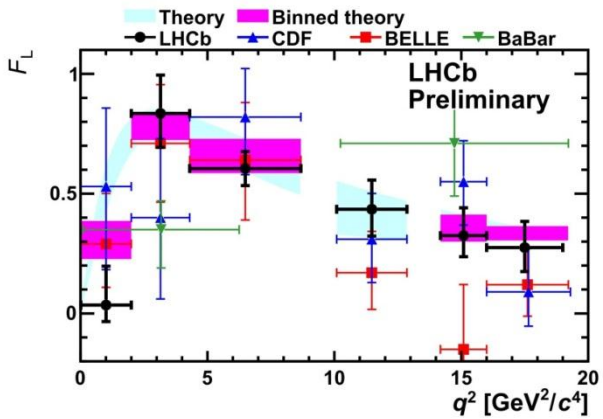
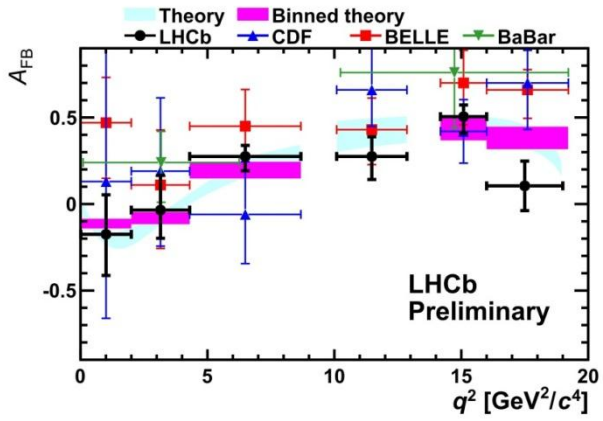
- 全て(36)のモードを再構成して、Best Candidate Selectionを行った。
 - Likelihoodの積で、最も大きい値を持つイベントを選択
 - ΔE
 - $X_s l^+ l^-$ のvertex fitの χ_{vtx}^2
- B.G.を抑制するための変数を用意した。
 - ニューラルネットワークを用いて、効率良くB.G.を抑制していく。

LHCb Integrated Luminosity at 3.5 TeV in 2011



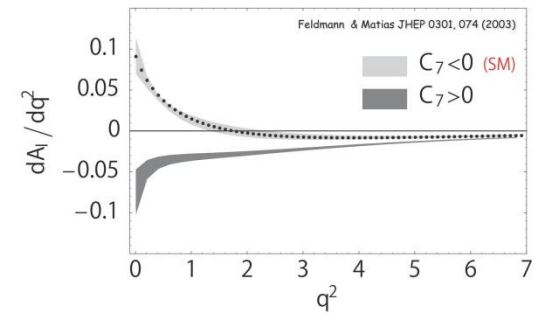
Integrated LHCb Efficiency breakdown in 2011





(a) Belle の実験結果。

SM
flipped C_7



(b) 理論値。

Wilson Coefficient

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

$$O_1 = (\bar{s}_L \gamma_\mu T^a c_L) (\bar{c}_L \gamma^\mu T^a b_L),$$

$$O_2 = (\bar{s}_L \gamma_\mu c_L) (\bar{c}_L \gamma^\mu b_L),$$

$$O_3 = (\bar{s}_L \gamma_\mu b_L) \sum_q (\bar{q} \gamma^\mu q),$$

$$O_4 = (\bar{s}_L \gamma_\mu T^a b_L) \sum_q (\bar{q} \gamma^\mu T^a q),$$

$$O_5 = (\bar{s}_L \gamma_{\mu_1} \gamma_{\mu_2} \gamma_{\mu_3} b_L) \sum_q (\bar{q} \gamma^{\mu_1} \gamma^{\mu_2} \gamma^{\mu_3} q),$$

$$O_6 = (\bar{s}_L \gamma_{\mu_1} \gamma_{\mu_2} \gamma_{\mu_3} T^a b_L) \sum_q (\bar{q} \gamma^{\mu_1} \gamma^{\mu_2} \gamma^{\mu_3} T^a q),$$

$$O_7 = \frac{e}{g_s^2} m_b (\bar{s}_L \sigma^{\mu\nu} b_R) F_{\mu\nu},$$

$$O_8 = \frac{1}{g_s} m_b (\bar{s}_L \sigma^{\mu\nu} T^a b_R) G_{\mu\nu}^a,$$

$$O_9 = \frac{e^2}{g_s^2} (\bar{s}_L \gamma_\mu b_L) \sum_\ell (\bar{\ell} \gamma^\mu \ell),$$

$$O_{10} = \frac{e^2}{g_s^2} (\bar{s}_L \gamma_\mu b_L) \sum_\ell (\bar{\ell} \gamma^\mu \gamma_5 \ell),$$

χ^2 distribution

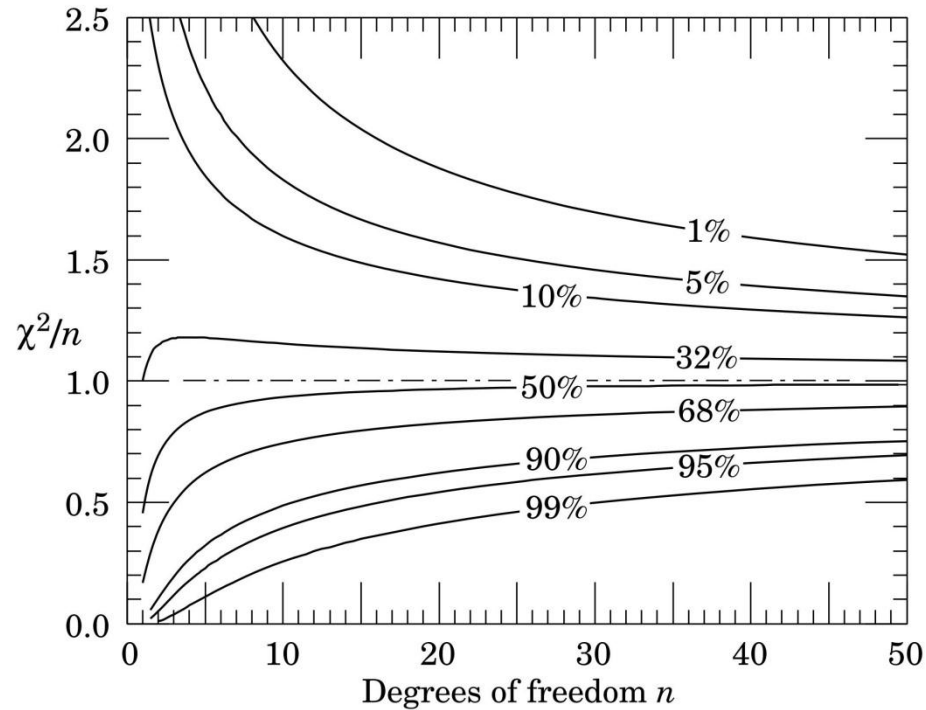


Figure 32.2: The ‘reduced’ χ^2 , equal to χ^2/n , for n degrees of freedom. The curves show as a function of n the χ^2/n that corresponds to a given p -value.

	$X_s e^+e^-$	$X_s \mu^+\mu^-$		$X_s e^+e^-$	$X_s \mu^+\mu^-$
Efficiency	5.6% (7.5%)	5.3% (6.5%)	Efficiency	5.2% (5.9%)	5.1% (5.6%)
Purity	65.7% (88.3%)	74.4% (91.0%)	Purity	80.8% (93.0%)	86.1% (94.8%)