

Belle II 実験 189 fb^{-1} データにおける ハドロニックタグを用いた $R(D^*)$ 測定の系統誤差推定

名大理^A, 名大KMIB^B, 名大YLC^C, KEK素核研^D

児島 一輝^A, 飯嶋 徹^{A,B,D}, 周 啓東^{B,C}, 松岡 広大^{A,D},

古賀 太一郎^D, 中村 克朗^D, 原 康二^D

他 Belle II Collaboration

レプトンフレーバー普遍性

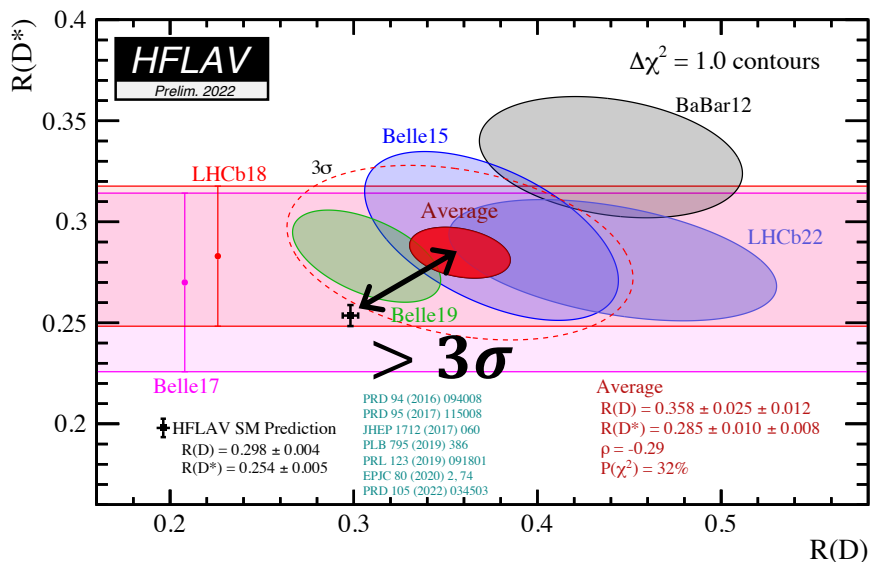
標準模型ではレプトンとゲージ粒子の結合定数 g_ℓ ($\ell = e, \mu, \tau$)はフレーバーによらない。

→ W/Z ボソンや K/π 崩壊, τ/μ 崩壊で無矛盾な結果が確認されている。

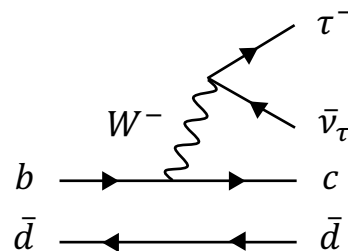
(A. Pich, [Prog. Part. Nucl. Phys. 75 \(2014\) 41–85](#); ATLAS Collaboration, [Nature Physics 17 \(2021\) 813–818](#))

B 中間子のセミレプトニック崩壊ではBaBar, Belle, LHCb実験における測定の世界平均が $> 3\sigma$ の有意度で標準模型から予想される理論値からの乖離を示している。 [arXiv:2210.10751](#)

HFLAV “Average of $R(D)$ and $R(D^*)$ for End of 2022”



$$R(D^{(*)}) = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)}\tau\nu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)}\ell\nu)}, \quad (\ell = e \text{ or } \mu)$$



レプトンフレーバー普遍性

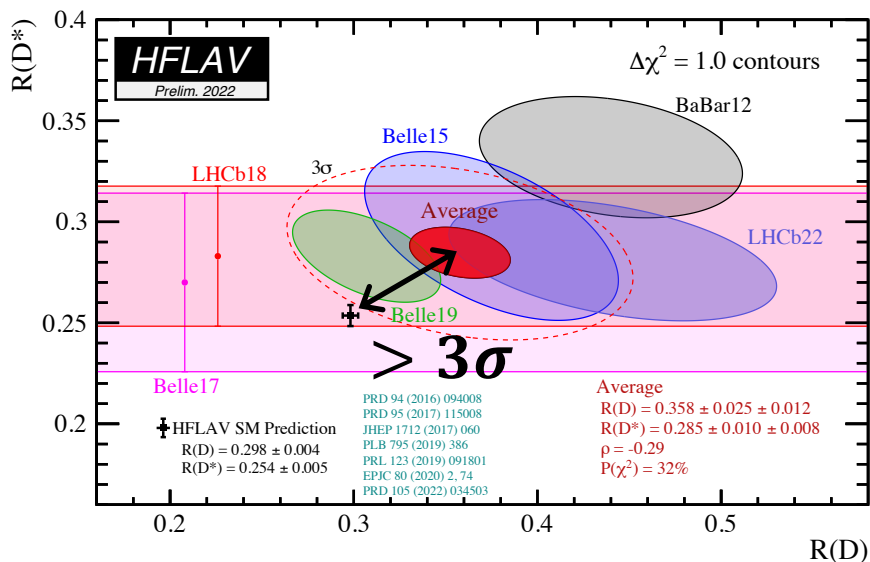
標準模型ではレプトンとゲージ粒子の結合定数 g_ℓ ($\ell = e, \mu, \tau$)はフレーバーによらない。

→ W/Z ボソンや K/π 崩壊, τ/μ 崩壊で無矛盾な結果が確認されている。

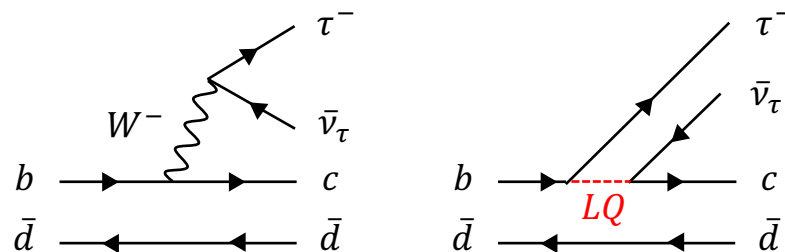
(A. Pich, [Prog. Part. Nucl. Phys. 75 \(2014\) 41–85](#); ATLAS Collaboration, [Nature Physics 17 \(2021\) 813–818](#))

B 中間子のセミレプトニック崩壊ではBaBar, Belle, LHCb実験における測定の世界平均が $> 3\sigma$ の有意度で標準模型から予想される理論値からの乖離を示している。 [arXiv:2210.10751](#)

HFLAV “Average of $R(D)$ and $R(D^*)$ for End of 2022”



$$R(D^{(*)}) = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)}\tau\nu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D^{(*)}\ell\nu)}, \quad (\ell = e \text{ or } \mu)$$



新物理の兆候の可能性
独立した測定による検証が必要！

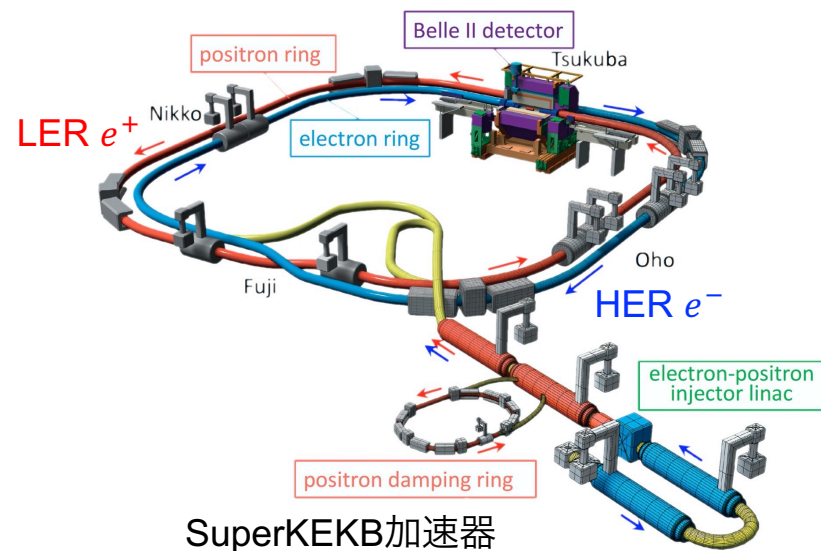
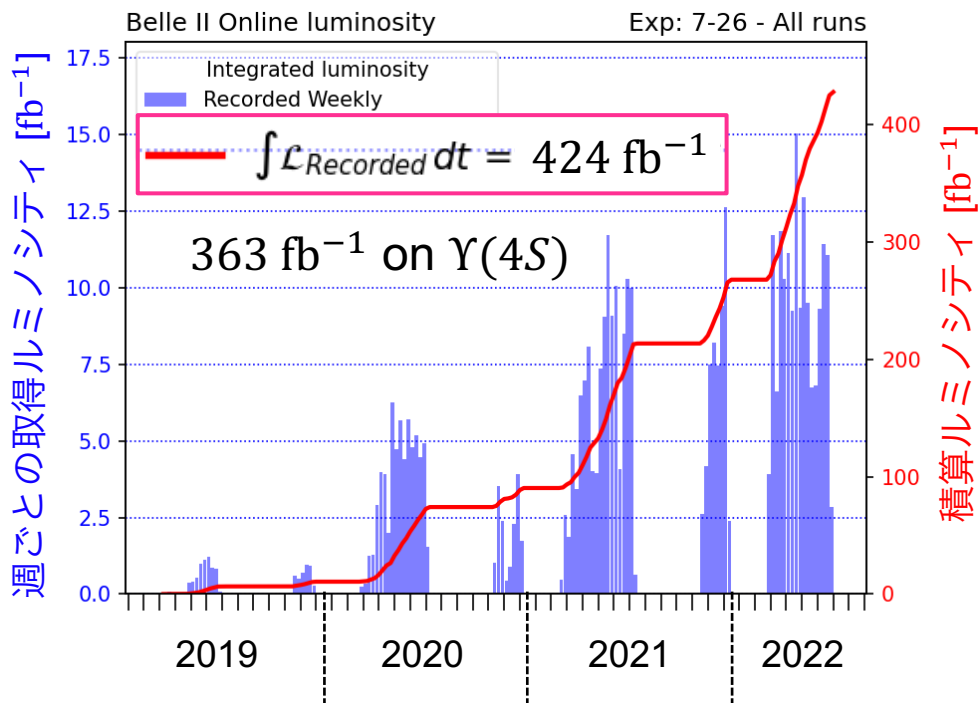
SuperKEKB/Belle II 実験

重心系エネルギー $\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$ の電子陽電子衝突実験

世界最高ルミノシティでの衝突データ収集を実現

$$4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

(KEKBの最高ルミノシティ: $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)



$$\sigma(b\bar{b}) \sim 1.1 \text{ nb}, \sigma(q\bar{q}) \sim 3.7 \text{ nb} \quad (q = u, d, s, c)$$

at $\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$

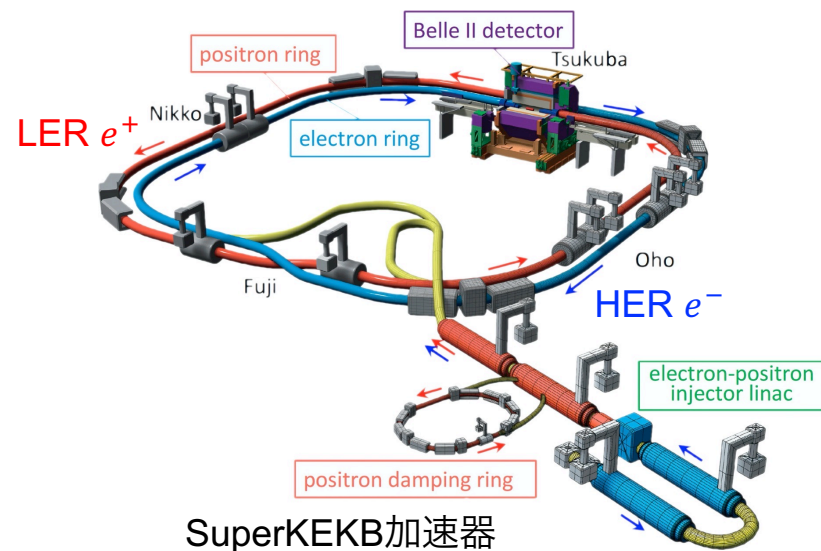
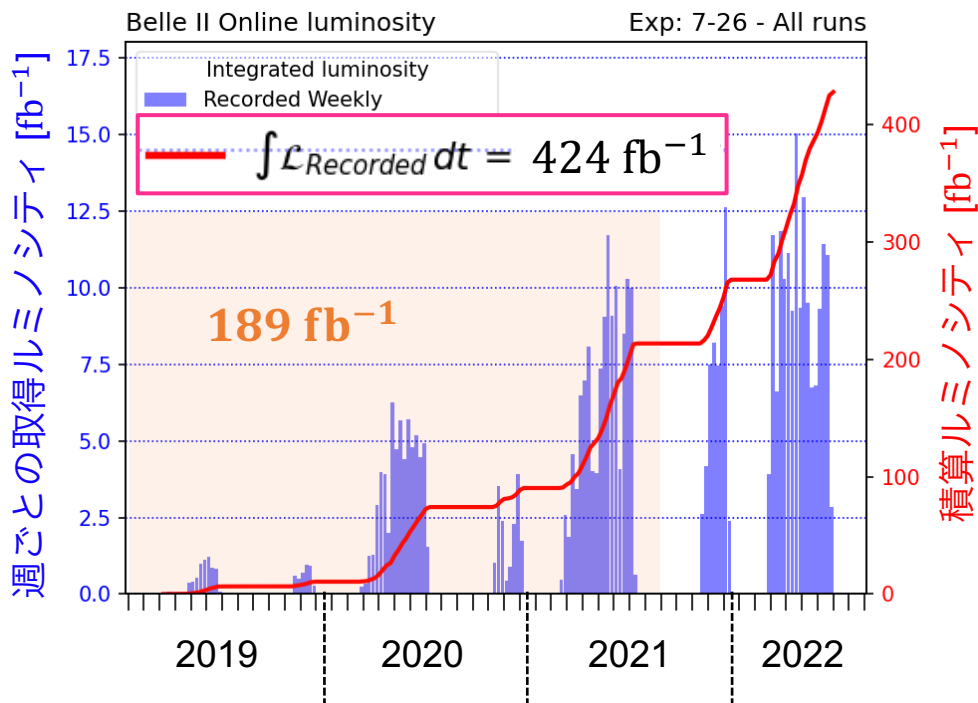
SuperKEKB/Belle II 実験

重心系エネルギー $\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$ の電子陽電子衝突実験.

世界最高루미ノシティでの衝突データ収集を実現

$$4.7 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

(KEKBの最高루미ノシティ: $2.1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)



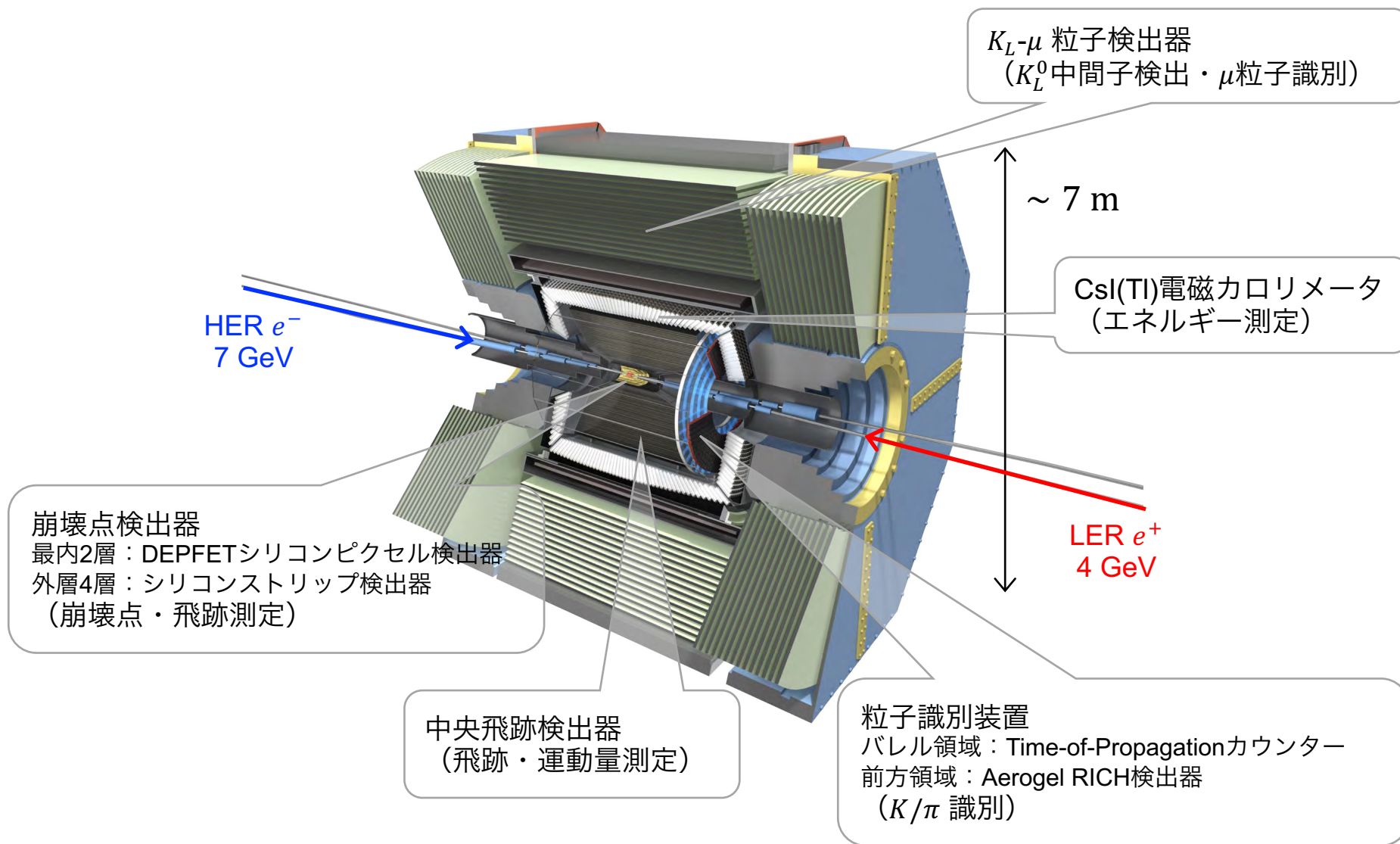
$$\sigma(b\bar{b}) \sim 1.1 \text{ nb}, \sigma(q\bar{q}) \sim 3.7 \text{ nb} \quad (q = u, d, s, c)$$

at $\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$

2021年夏までに取得した 189 fb^{-1} のデータを使用した $R(D^*)$ 測定を目指す

Belle II 検出器

電子陽電子衝突点に置かれた7つの検出器群からなる汎用粒子測定器。



本研究における $\bar{B} \rightarrow D^* \tau^- \bar{\nu}_\tau$ 崩壊の解析

ハドロニックタグ手法と τ 粒子がレプトニック崩壊するモードを使用した解析を行う。

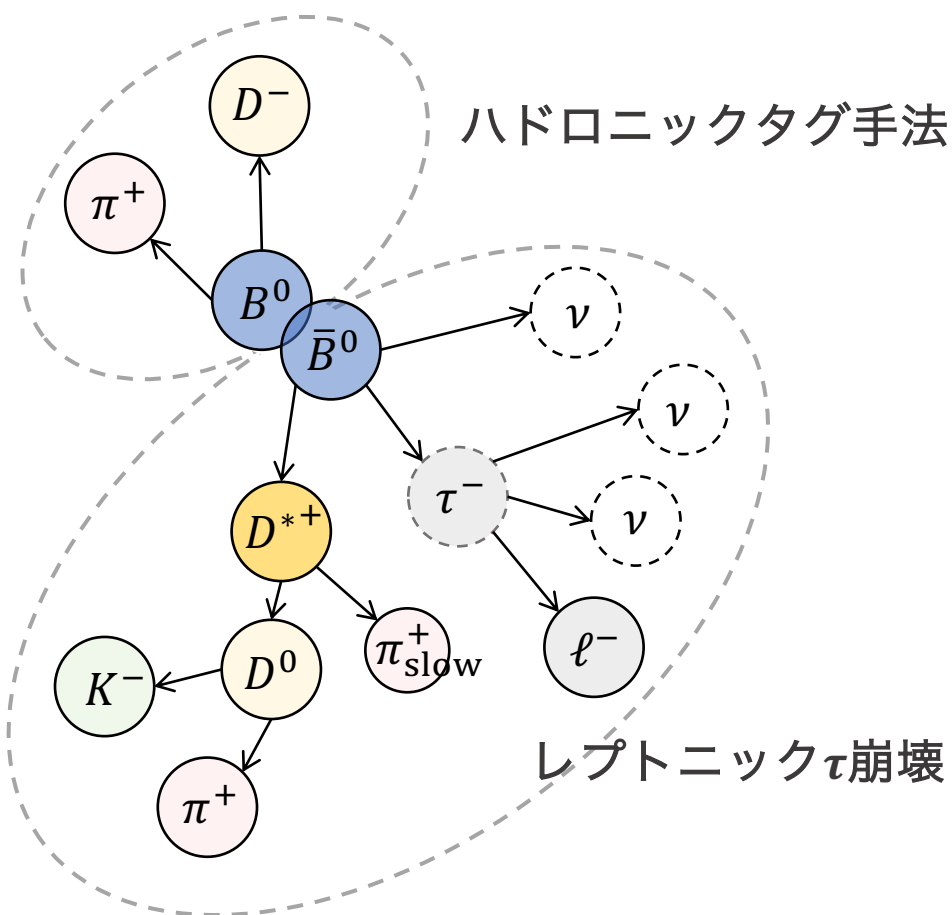
→ $R(D^*)$ 測定の基本モードとなる $\bar{B} \rightarrow D^* \ell^- \bar{\nu}_\ell$ と共通の荷電レプトン選別条件により実験的な再構成効率に関する系統誤差の削減が可能。

BaBar実験 426 fb^{-1}
Phys. Rev. D **88**, 072012 (2013)

$$R(D^*) = 0.332 \pm 0.024 \pm 0.018$$

Belle実験 711 fb^{-1}
Phys. Rev. D **92**, 072014 (2015)

$$R(D^*) = 0.293 \pm 0.038 \pm 0.015$$



1. 背景事象の増加を許容しつつ再構成領域を拡大

- タグ側の B 中間子の選別条件
- γ の再構成エネルギーの下限

2. 再構成後の選別条件最適化により感度向上を図る

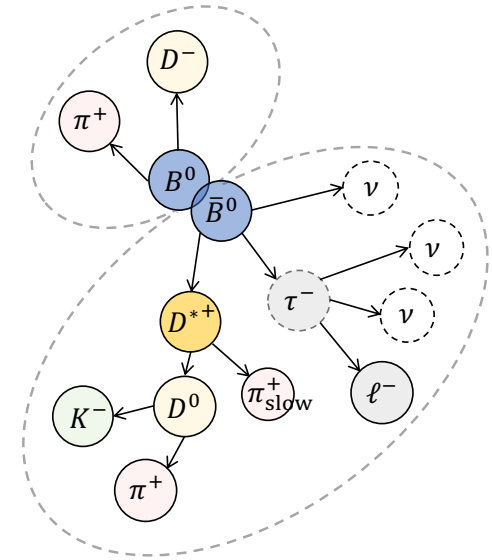
本講演ではBelle II実験の解析手法と系統誤差の一部について見積もり結果を報告する

ハドロニックタグ手法

B 中間子の片方をFull Event Interpretation (FEI) を用いてハドロニック崩壊で再構成し同定。

片方の B 中間子のすべての終状態粒子を再構成可能
→ B 中間子対の運動量が分かる！

τ 粒子の崩壊で複数のニュートリノを含む
信号側の再構成で力学的制約に有用

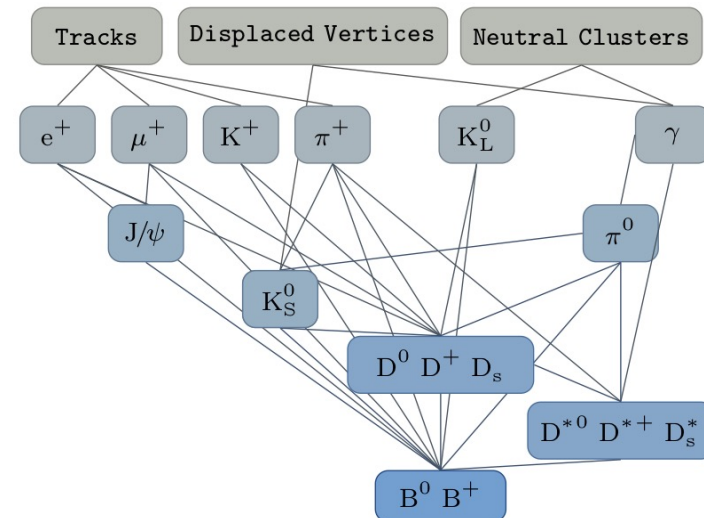


Full Event Interpretation (FEI) [Comp. and Soft. For Big Sci. 3, 6 \(2019\)](#)

- FastBDTを用いた B 中間子再構成の多変量解析アルゴリズム
- B 中間子崩壊チャンネル: 100以上
- B 中間子終状態: $\mathcal{O}(10,000)$

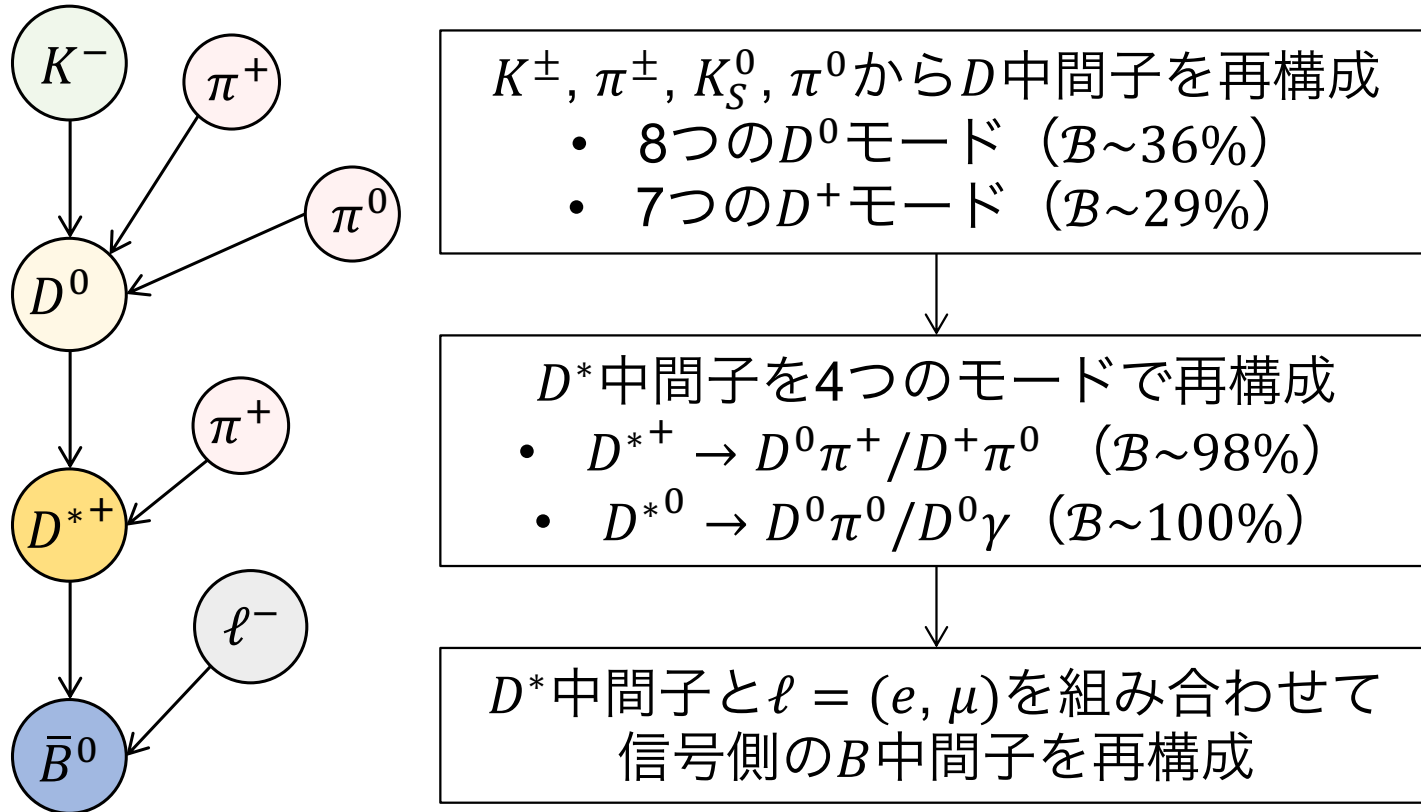
B^0 : 0.27%, B^+ : 0.35%の B 中間子タグ効率

[arXiv:2008.06096](#)



信号事象の再構成

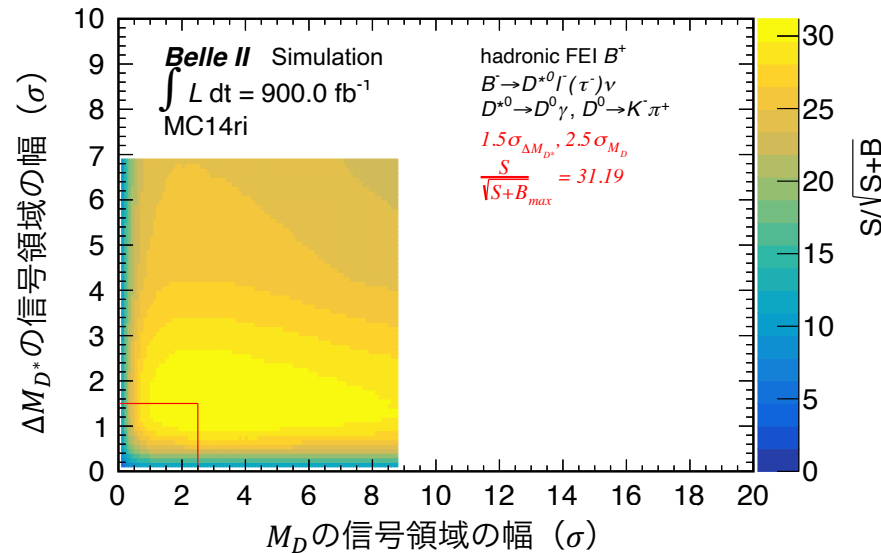
信号モード $\bar{B} \rightarrow D^* \tau^- \bar{\nu}_\tau$ と基準モード $\bar{B} \rightarrow D^* \ell^- \bar{\nu}_\ell$ を同一の選別条件で再構成する。



信号事象選別条件の最適化

背景事象数 N_{bkg} に対する信号事象数 N_{sig} の統計的有意度 Figure of merit $N_{\text{sig}}/\sqrt{N_{\text{sig}} + N_{\text{bkg}}}$ を最大化するように再構成の選別条件を最適化.

- 信号事象のpurityに準じた選別条件を課すために D^* 中間子と D 中間子の崩壊モードの31の組み合わせごとに $\Delta M_{D^*}(=M_{D^*} - M_D)$, M_D の選別条件で $S/\sqrt{S+B}$ をスキャンしてを最適化



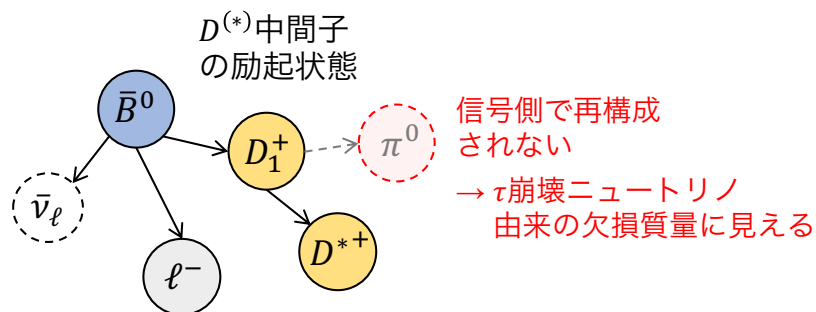
- γ 候補の選別条件としてシャワー形状の多変量解析の出力などを追加して背景事象を削減

Belle II実験のシミュレーションを用いた研究からBelle実験^[2]に近づけた選別条件よりも信号モード $\bar{B} \rightarrow D^* \tau^- \bar{\nu}_\tau$ が豊富な領域で**35%の $S/\sqrt{S+B}$ の改善**を確認
(欠損質量 $M_{\text{miss}}^2 > 0.5 \text{ (GeV}/c^2)^2$ 領域)

[2] Phys. Rev. D **92**, 072014 (2015)

主要な背景事象と予想される事象数の割合

1. 正しく再構成された D^* 候補 (真の D^* 候補) を含む背景事象

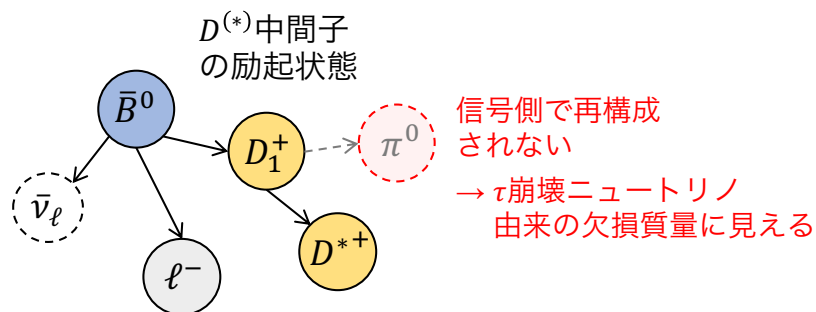


再構成に使われなかった
trackや π^0 が存在しないことを要求

| MCで予想される 再構成事象割合 | 信号モード $\bar{B} \rightarrow D^* \tau^- \bar{\nu}_\tau$ ($R(D^*)_{SM} = 0.254$) | 基準モード $\bar{B} \rightarrow D^* \ell^- \bar{\nu}_\ell$ | 真の D^* 候補を 含む背景事象 | 偽 D^* 候補を含む 背景事象 |
|---------------------|---|--|------------------------|-----------------------|
| 中性 B 中間子 | 2.7% | 65.5% | 12.5% | 19.2% |
| 荷電 B 中間子 | 1.7% | 34.7% | 5.9% | 57.8% |

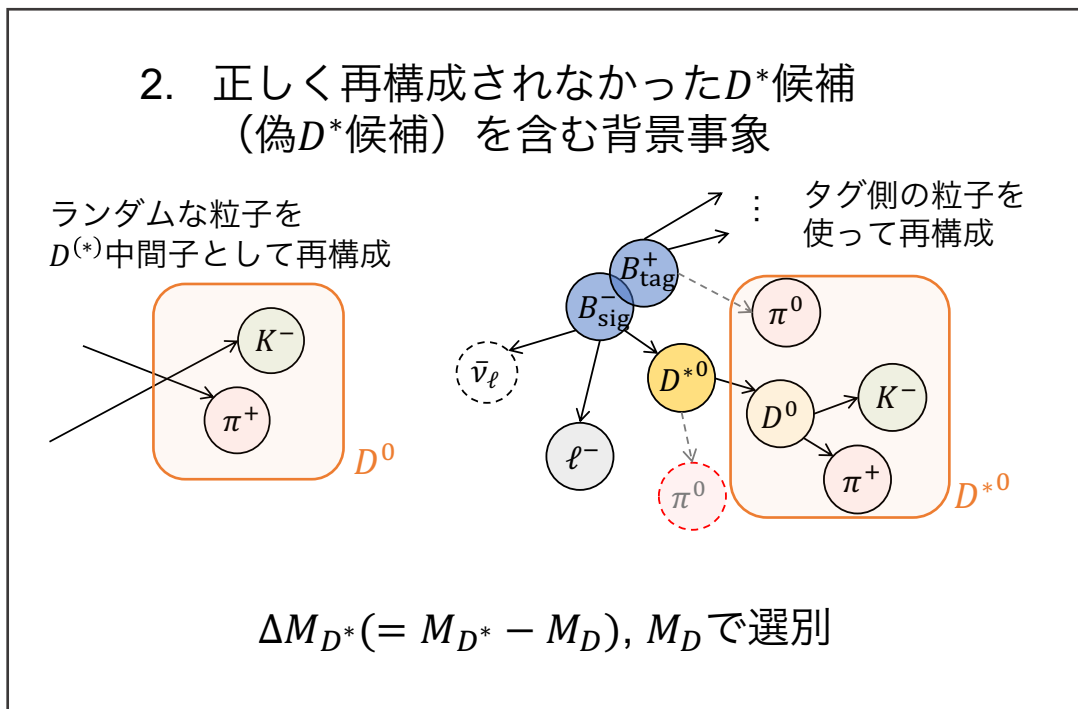
主要な背景事象と予想される事象数の割合

1. 正しく再構成された D^* 候補 (真の D^* 候補) を含む背景事象



再構成に使われなかった track や π^0 が存在しないことを要求

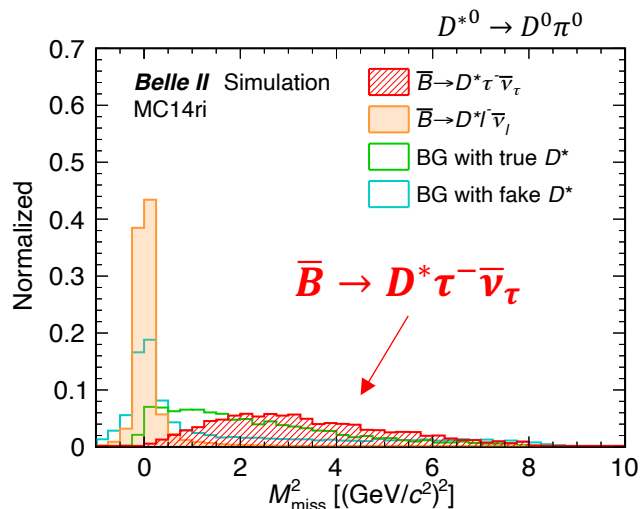
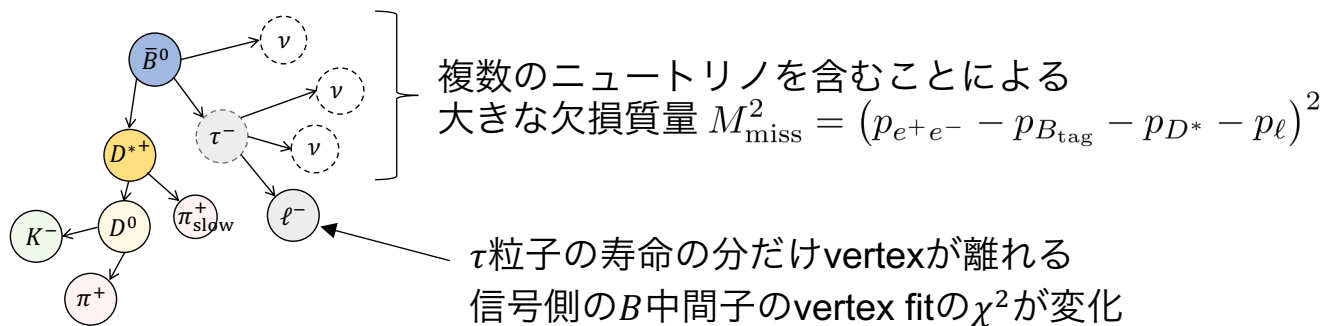
2. 正しく再構成されなかった D^* 候補 (偽 D^* 候補) を含む背景事象



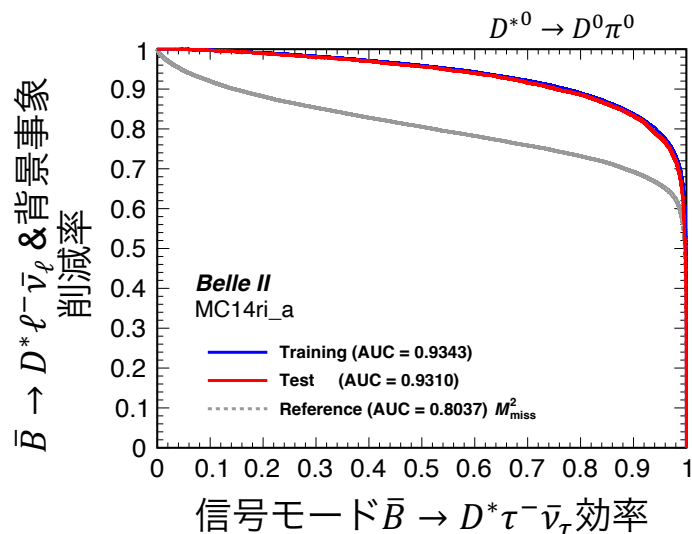
| MCで予想される再構成事象割合 | 信号モード $\bar{B} \rightarrow D^* \tau^- \bar{\nu}_\tau$ ($R(D^*)_{SM} = 0.254$) | 基準モード $\bar{B} \rightarrow D^* \ell^- \bar{\nu}_\ell$ | 真の D^* 候補を含む背景事象 | 偽 D^* 候補を含む背景事象 |
|-----------------|---|--|--------------------|-------------------|
| 中性 B 中間子 | 2.7% | 65.5% | 12.5% | 19.2% |
| 荷電 B 中間子 | 1.7% | 34.7% | 5.9% | 57.8% |

信号モード事象選別のためのFastBDT開発

信号モード $\bar{B} \rightarrow D^* \tau^- \bar{\nu}_\tau$ を基準モード $\bar{B} \rightarrow D^* \ell^- \bar{\nu}_\ell$ や背景事象からの弁別を強化するため D^* 中間子の4つの崩壊モードごとにそれぞれFastBDTを開発した



計12の入力変数
による
トレーニング

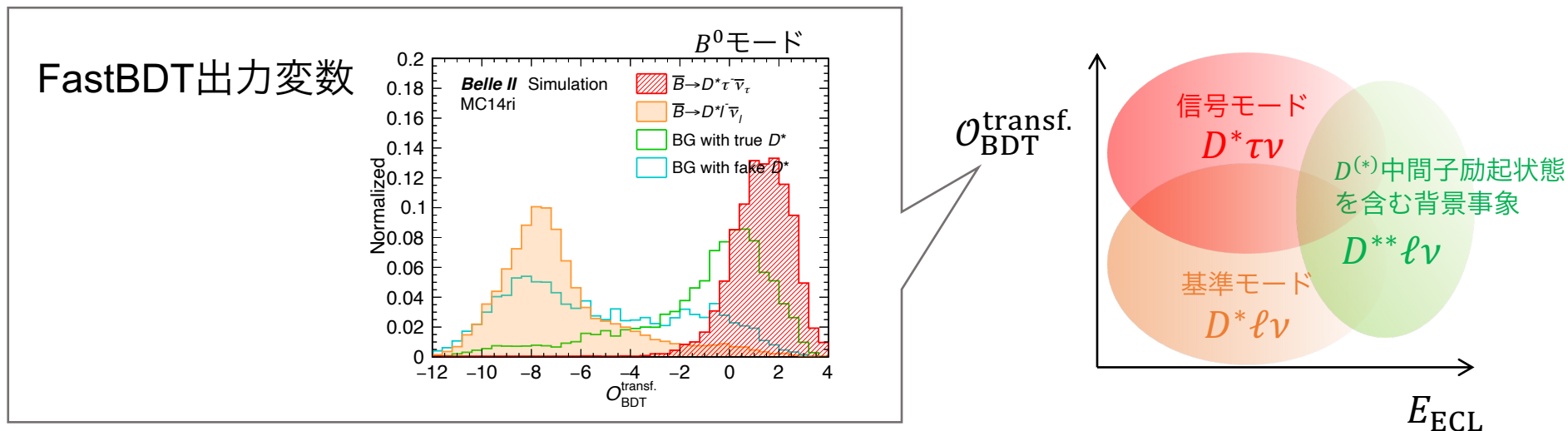


すべての D^* 崩壊モードで M_{miss}^2 のみでの弁別能力を超える出力のFastBDTを開発

$S/\sqrt{S+B}$ の最大値は D^* 崩壊モードに依存して ~30-130% 程度向上

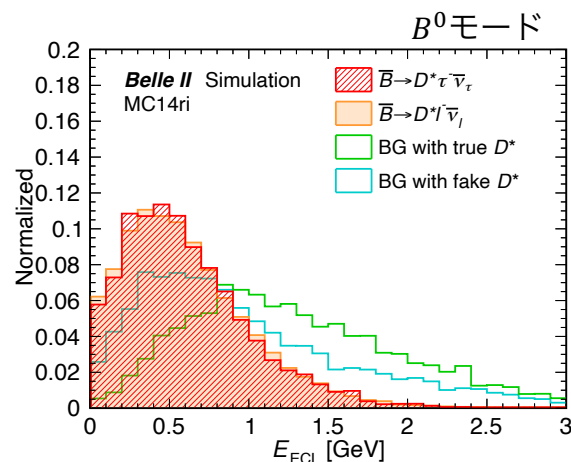
$R(D^*)$ 測定解析手法

信号モード $\bar{B} \rightarrow D^* \tau^- \bar{\nu}_\tau$ と基準モード $\bar{B} \rightarrow D^* \ell^- \bar{\nu}_\ell$ の収量を2次元フィットで同時に決定して $R(D^*)$ を測定する



再構成で使用されなかった
電磁カロリメータのエネルギー和

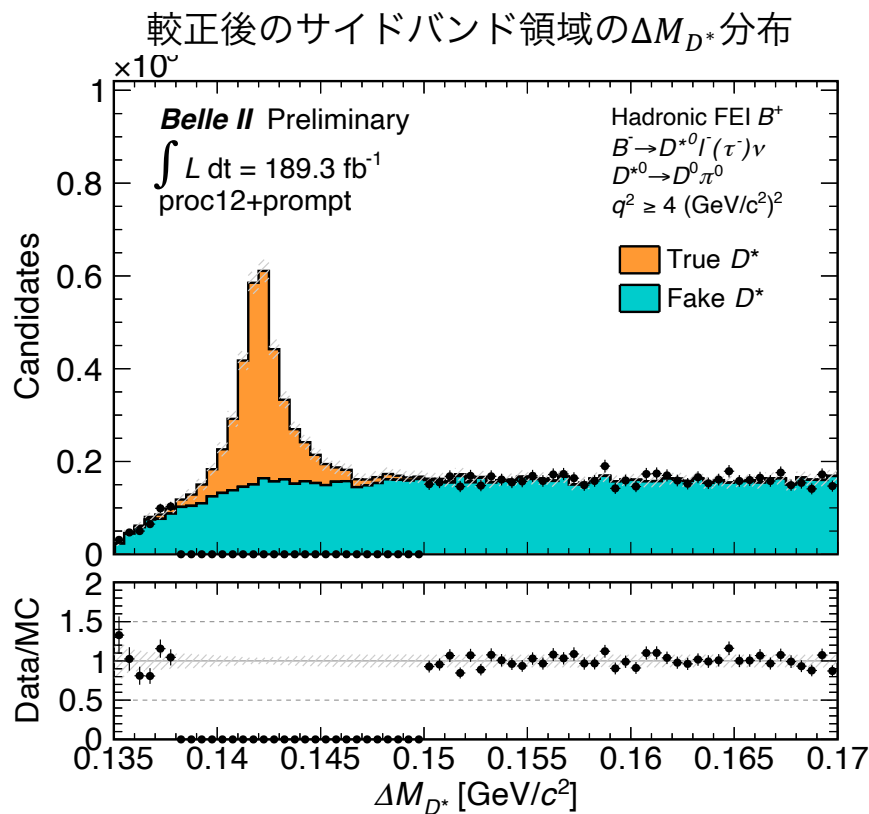
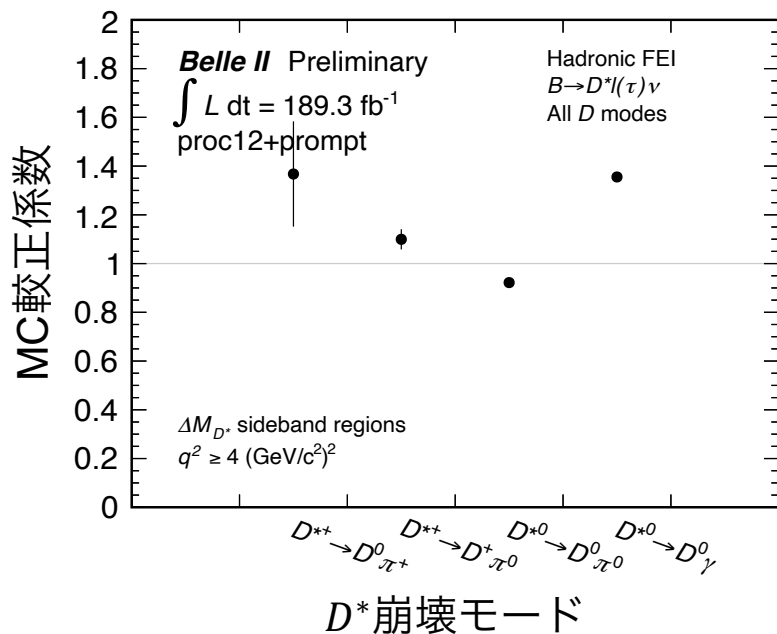
- B 中間子の崩壊に由来する π^0 や γ
- ハドロン粒子と電磁カロリメータの相互作用によるsplit-offシャワーなどが含まれる



偽 D^* 候補を含む背景事象の制御

偽 D^* 候補は最大の背景事象であるため精度良く見積もることが重要.

→ 偽 D^* 候補を多く含む $\Delta M_{D^*}(= M_{D^*} - M_D)$ サイドバンド領域を利用し, 閾値関数または Chebychev関数を ΔM_{D^*} 分布にフィットすることでMCの偽 D^* 候補の収量を較正する.



この較正により最大の背景事象の収量を精度良く制限

フィット手法

以下の候補に分類した2次元のヒストグラムPDFをMCで作成し、4つの D^* 中間子崩壊モードで同時フィットを行う。

信号モード $\bar{B} \rightarrow D^* \tau^- \bar{\nu}_\tau$

基準モード $\bar{B} \rightarrow D^* \ell^- \bar{\nu}_\ell$

$\bar{B} \rightarrow D^{**} \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 背景事象

真の D^* 候補を含む背景事象

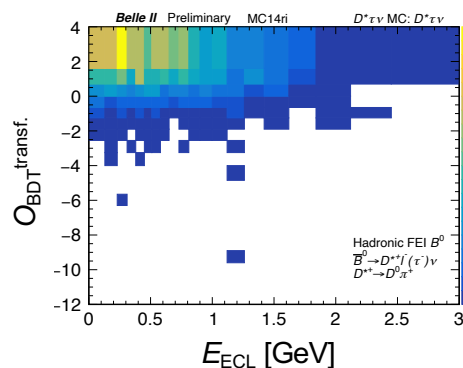
ハドロニック B 崩壊背景事象

$B^0 \leftrightarrow B^\pm$ タグ間違い背景事象

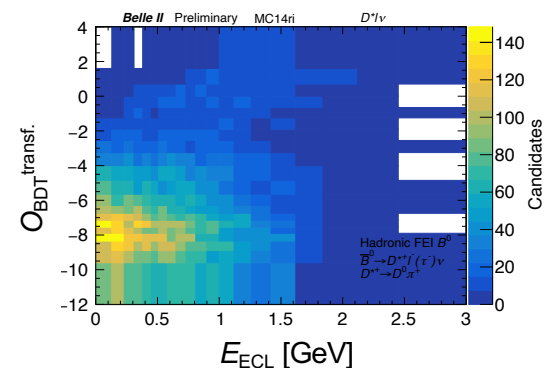
$q\bar{q}$ 背景事象 ($q = u, d, s, c$)

偽 D^* 候補を含む背景事象

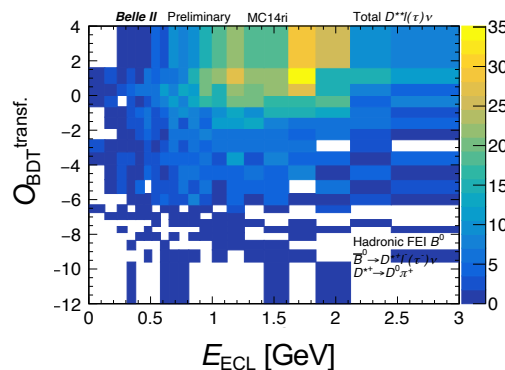
信号モード $\bar{B} \rightarrow D^* \tau^- \bar{\nu}_\tau$



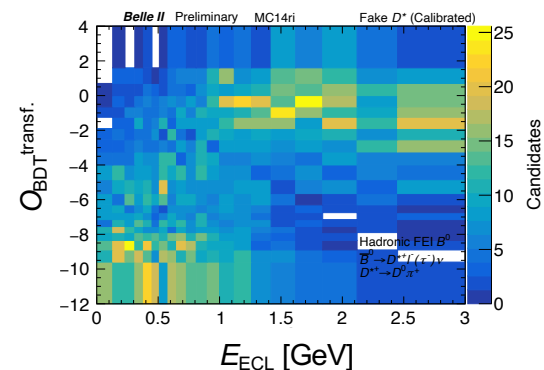
基準モード $\bar{B} \rightarrow D^* \ell^- \bar{\nu}_\ell$



$\bar{B} \rightarrow D^{**} \ell^- \bar{\nu}_\ell$ 背景事象



偽 D^* 候補を含む背景事象



フィット手法

以下の候補に分類した2次元のヒストグラムPDFをMCで作成し、4つの D^* 中間子崩壊モードで同時フィットを行う。

収量をフィットで決定 $\rightarrow R(D^*)$

共通の $R(D^*)$ と $D^{*(*)}\ell\nu$ の収量 (計9変数) をフィット
 信号・基準モードの再構成効率8変数はMCで制限しフィット

信号モード $\bar{B} \rightarrow D^*\tau^-\bar{\nu}_\tau$

基準モード $\bar{B} \rightarrow D^*\ell^-\bar{\nu}_\ell$

$\bar{B} \rightarrow D^{**}\ell^-\bar{\nu}_\ell$ 背景事象

真の D^* 候補を含む背景事象

ハドロニック B 崩壊背景事象

$B^0 \leftrightarrow B^\pm$ タグ間違い背景事象

$q\bar{q}$ 背景事象 ($q = u, d, s, c$)

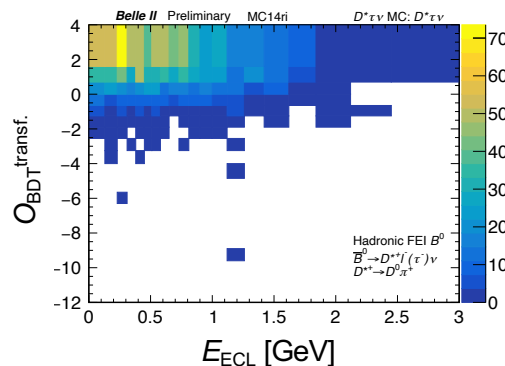
偽 D^* 候補を含む背景事象

収量をサイドバンド領域で制限

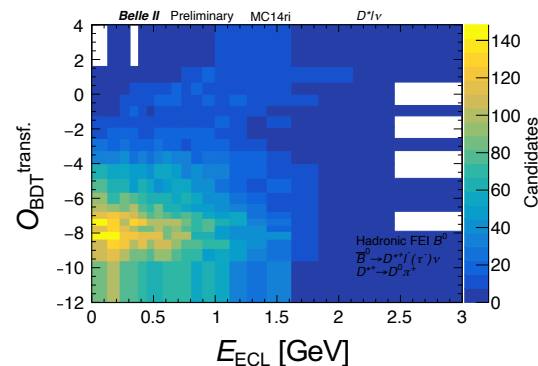
計4変数をフィット

収量をMCで決定

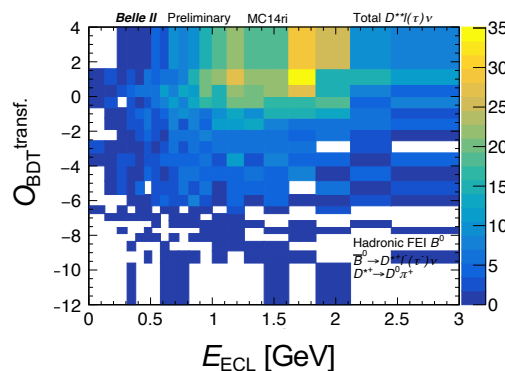
信号モード $\bar{B} \rightarrow D^*\tau^-\bar{\nu}_\tau$



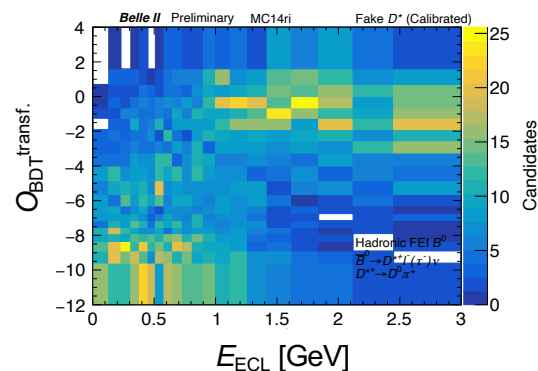
基準モード $\bar{B} \rightarrow D^*\ell^-\bar{\nu}_\ell$



$\bar{B} \rightarrow D^{**}\ell^-\bar{\nu}_\ell$ 背景事象

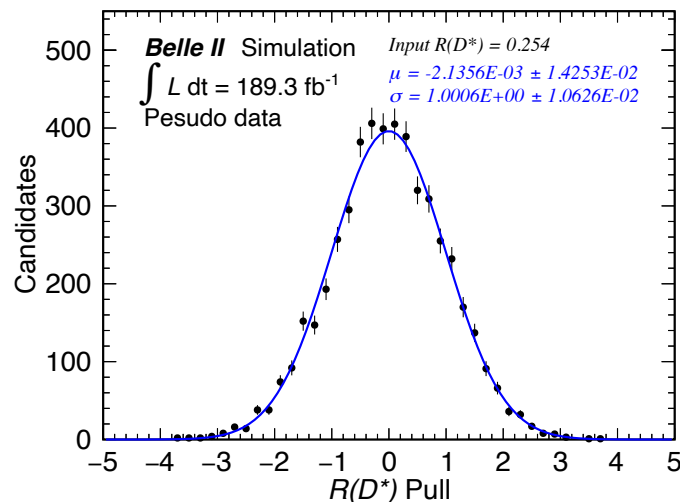
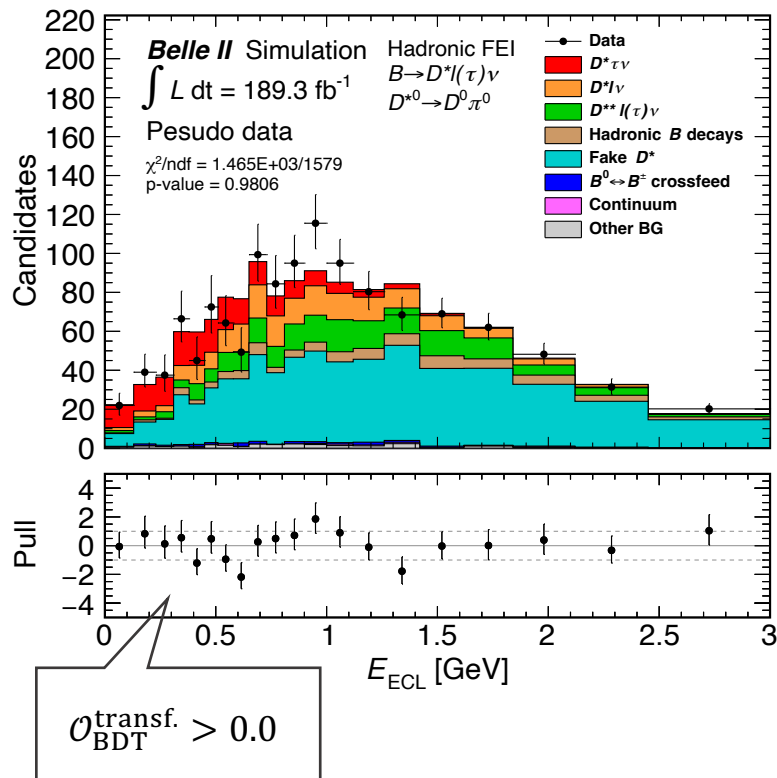


偽 D^* 候補を含む背景事象



疑似データを用いたフィット手法の確認

ヒストグラムPDFをもとに 189 fb^{-1} の疑似データを乱数生成して5,000回分の疑似実験を実施。
 疑似データへの入力値： $R(D^*)_{\text{SM}} = 0.254$ （標準模型の理論値）



$$\mu = -0.002 \pm 0.014$$

$$\sigma = 1.000 \pm 0.011$$

$\mu = 0, \sigma = 1$ に無矛盾

線形性についてもAsimovフィットの手法^[3]で確かめ
フィット手法が期待通りに動作することを確認

[3] Eur.Phys.J.C71:1554,2011

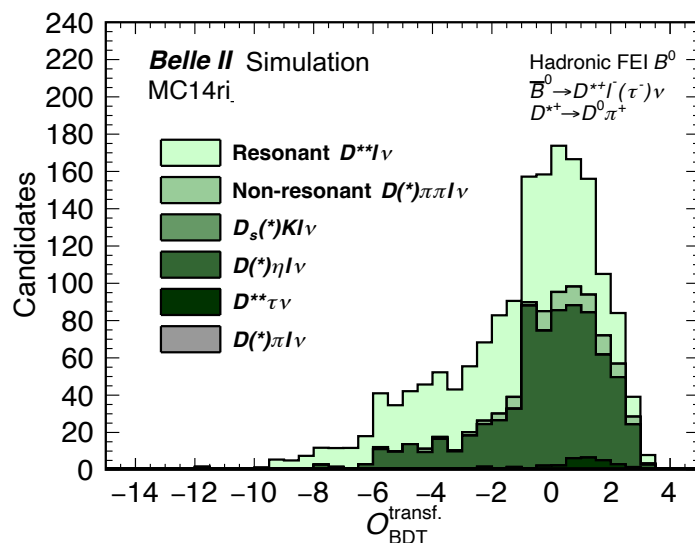
系統誤差の評価

主要な系統誤差の要因の1つとして真の D^* 候補を含む $\bar{B} \rightarrow D^{**} \ell^- \bar{\nu}_\ell / D^* \pi(\pi) \ell^- \bar{\nu}_\ell$ を評価した。

分岐比の中心値を
採用してPDFを構成

$$\begin{array}{ll} B(\bar{B}^0 \rightarrow D_1^+ \ell^- \bar{\nu}_\ell) & (6.2 \pm 1.0) \times 10^{-3} \\ B(\bar{B}^0 \rightarrow D_0^{*+} \ell^- \bar{\nu}_\ell) & (3.90 \pm 0.70) \times 10^{-3} \\ B(\bar{B}^0 \rightarrow D \pi \pi \ell^- \bar{\nu}_\ell) & (0.58 \pm 0.82) \times 10^{-3} \\ \vdots & \vdots \end{array}$$

- ① 各崩壊モードの分岐比の不定性 (計30モード)
- ② 未測定 of セミレプトニック B 崩壊モードの分岐比
- ③ 共鳴状態を作らない $\bar{B} \rightarrow D^* \pi \pi \ell^- \bar{\nu}_\ell$ のモデリング (計6モード)



これらの不定性によるPDF形状の変化により
フィットで変動する $R(D^*)$ の大きさを系統誤差として見積もった。

| 主要な系統誤差要因 | Belle II実験 | Belle実験 [2] |
|----------------------|----------------|----------------------------|
| $D^{**} \ell \nu$ 成分 | +4.6% -3.9% | 3.0% |
| 再構成効率の不定性 | 評価中 | B^0 : 2.5%, B^+ : 1.2% |
| Form factor | | 1.5% |
| フィットPDF形状 | | 1.3% |

また, ハドロニック B 崩壊背景事象の崩壊分岐比に関する系統誤差が $+0.7\%$ / -0.3% と見積もられている。

[2] Phys. Rev. D **92**, 072014 (2015)

結論と今後の展望

$R(D^*)$ の実験値は標準模型の予想から 3σ を超える乖離を示す。
→ 新物理によるレプトンフレーバー普遍性の破れの兆候の可能性。

SuperKEKB/Belle II実験の 189 fb^{-1} のデータを用いて $R(D^*)$ 測定を行い検証する。

- ハドロニックタグ手法とレプトニック τ 崩壊を用いた解析手法を構築。
選別条件最適化で $M_{\text{miss}}^2 > 0.5 \text{ (GeV}/c^2)^2$ 領域において **35%の $S/\sqrt{S+B}$ の改善**。
- フィット手法が期待通りに動作することを確認。
- 主要な系統誤差の1つである $D^{**}\ell\nu$ 成分に由来する誤差は ${}_{-3.9\%}^{+4.6\%}$ と見積もった。
- 2022年中の結果公表を目指して統計誤差と系統誤差の評価が現在進行中。

SuperKEKB/Belle II実験は2022年夏までに $\sqrt{s} = 10.58 \text{ GeV}$ における 363 fb^{-1} のデータを含む 424 fb^{-1} のデータを取得。

→ 363 fb^{-1} のデータを使用した $R(D^{(*)})$ 解析や q^2 依存性測定も予定。