

Belle II実験における $B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-$ の 崩壊分岐比と縦偏極率の測定

名古屋大学

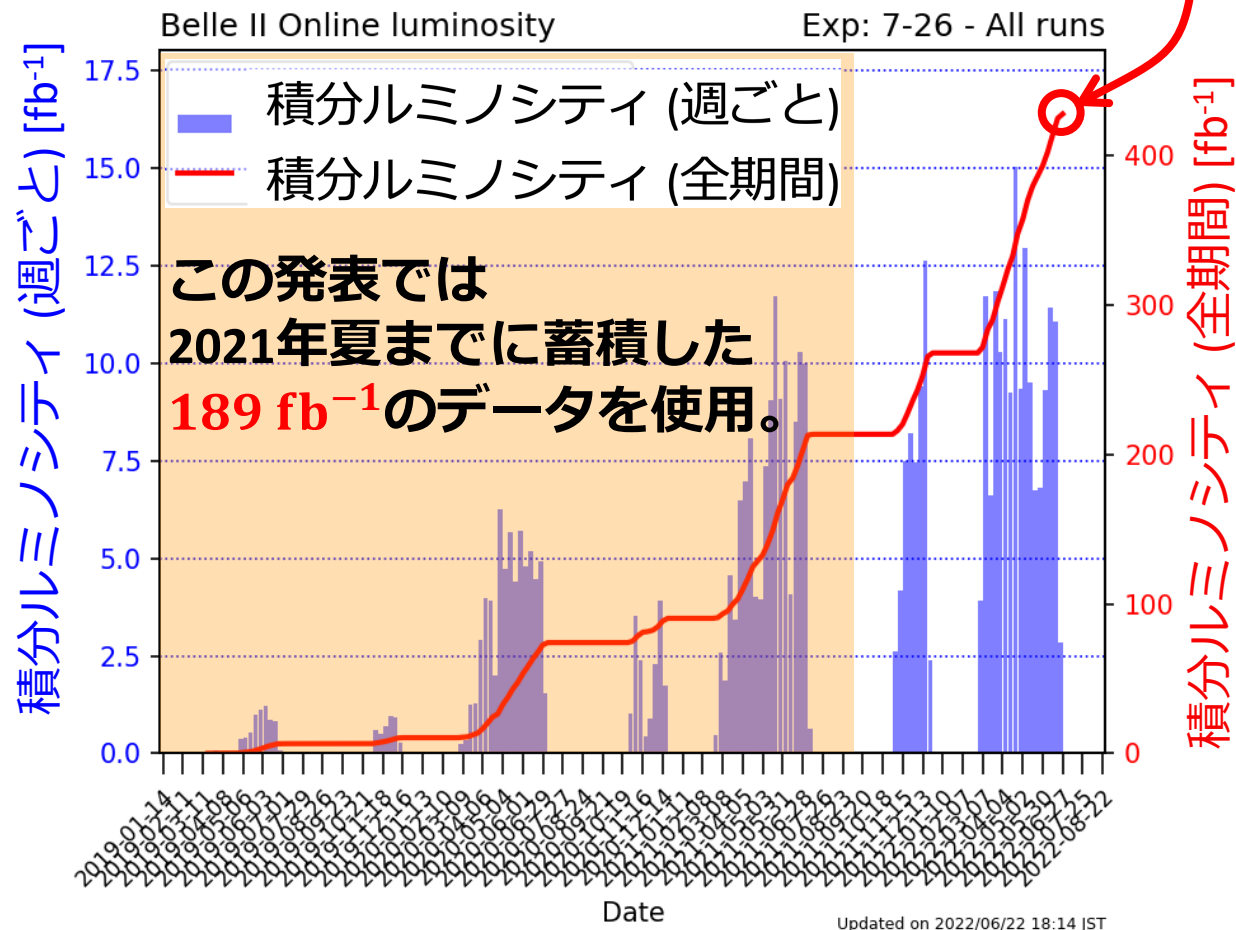
大久保亮吾

Belle II 実験

- 重心系エネルギー10.58 GeVの電子・陽電子衝突型加速器実験。
- 世界最高ルミノシティにより、最終的には前身のBelle実験の50倍の統計を蓄積。

**→ B中間子の大量生成による
B中間子崩壊の精密測定から、
新物理を探る**

これまでに**424 fb⁻¹**の
ルミノシティを蓄積。



CKM行列の精密測定

CKM行列の精密測定

- ユニタリー三角形
 - 小林益川模型のユニタリー性を複素平面上で表現したもの
- ユニタリー性
 $V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$ の精密検証

→B中間子混合に寄与する新物理現象を探索。

ϕ_2 測定

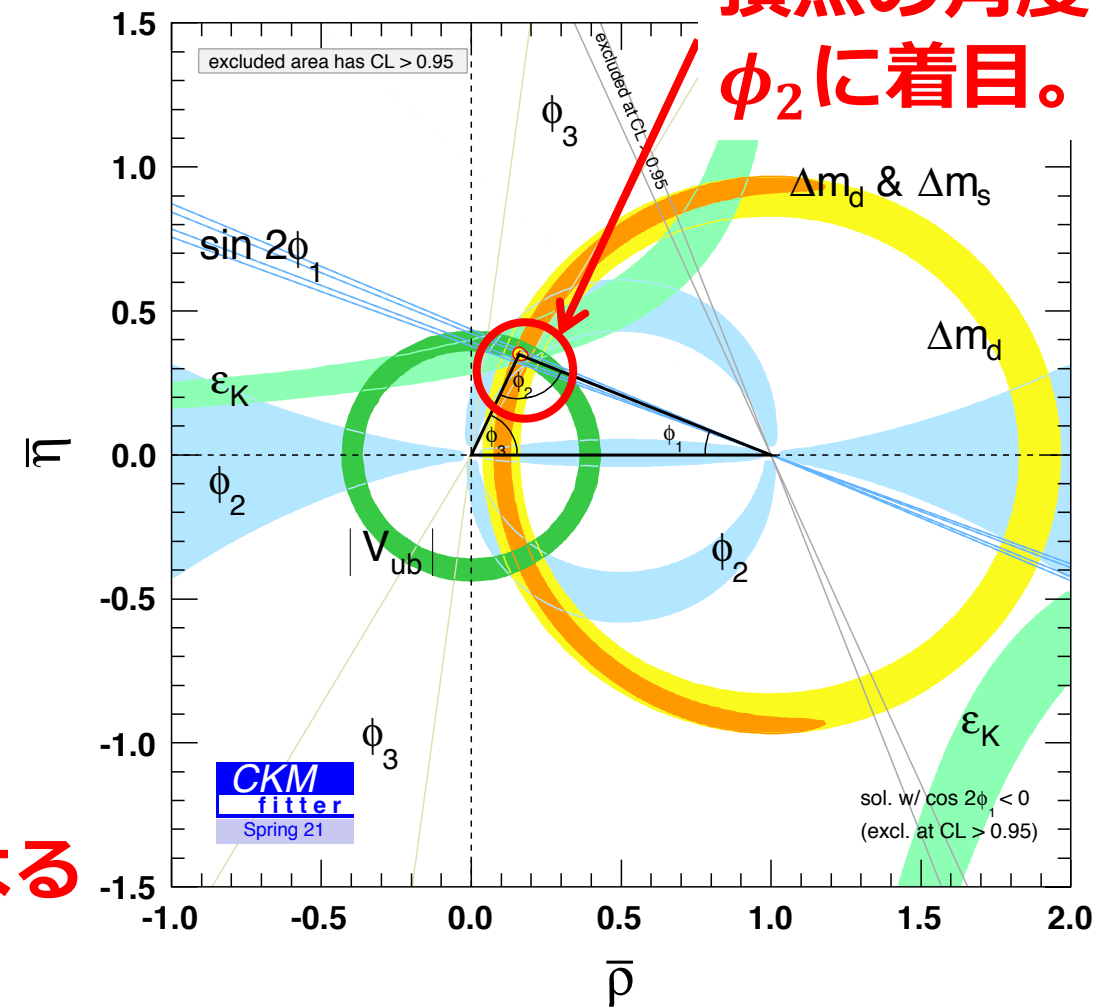
- 測定には $B \rightarrow \rho\rho$ や $B \rightarrow \pi\pi$ が必要。
- π^0 を2つ含む $\pi^0\pi^0, \rho^+\rho^-$ のようなモードは、クリーンなBelle II実験でしか測定できない。

→CKM行列精密測定には、Belle II実験による ϕ_2 測定が不可欠。

最新のCKM行列の測定結果

(CKMfitter Group (J. Charles *et al.*), Eur. Phys. J. C41, 1-131 (2005) [hep-ph/0406184], updated results and plots available at: <http://ckmfitter.in2p3.fr>)

頂点の角度
 ϕ_2 に着目。



φ₂の測定

φ₂ 測定

$$\phi_2 = \arg \left(\frac{-V_{td}V_{tb}^*}{V_{ud}V_{ub}^*} \right)$$

$b \rightarrow u$ tree + $B\bar{B}$ mixing → 時間依存CP対称性の破れ

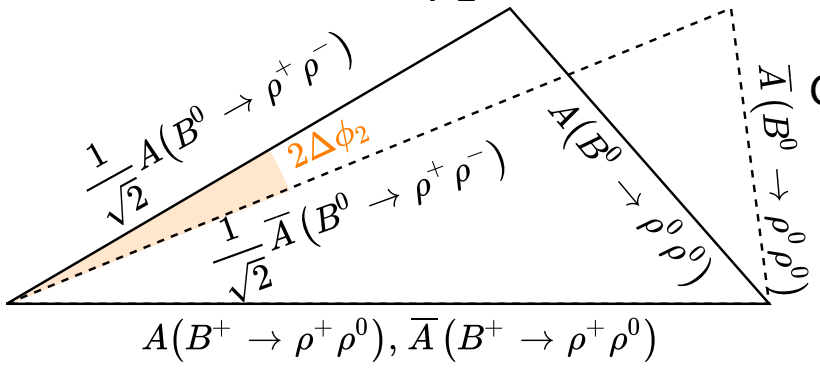
$$\frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-) - \Gamma(B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-)}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-) + \Gamma(B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-)} = A \cos \Delta m_d \Delta t + S \sin \Delta m_d \Delta t$$

ペンギン崩壊がなければ、 $A = 0, S = \sin 2\phi_2$ 。

ペンギン崩壊の干渉で、 $A \neq 0, S = \sin(2\phi_2 + 2\Delta\phi_2)$

アイソスピン解析

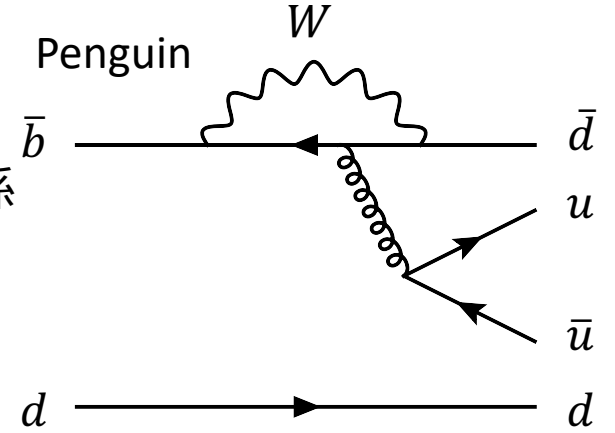
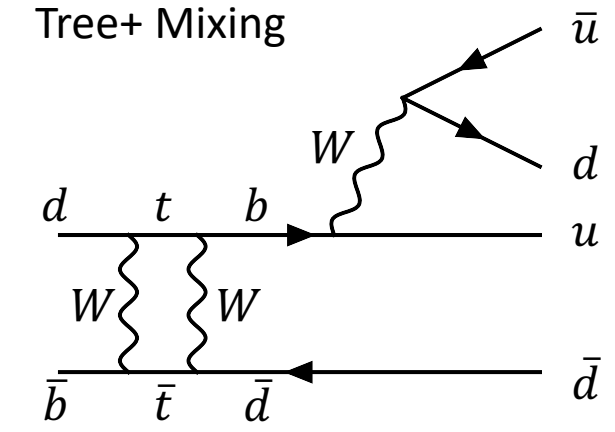
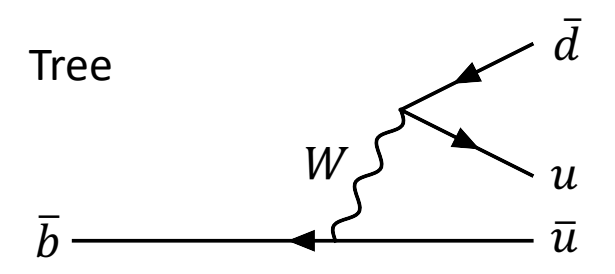
$B^+ \rightarrow \rho^+ \rho^0$ (ツリーが支配的)、 $B^0 \rightarrow \rho^0 \rho^0$ (ペンギン崩壊が支配的)、
を使って、 $\Delta\phi_2$ の効果を見積もる。



Gronau and London $B \rightarrow \rho\rho$ における振幅の関係

$$\frac{1}{\sqrt{2}}A(B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-) - A(B^0 \rightarrow \rho^0 \rho^0) = A(B^+ \rightarrow \rho^+ \rho^0)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\bar{A}(B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-) - \bar{A}(B^0 \rightarrow \rho^0 \rho^0) = \bar{A}(B^+ \rightarrow \rho^+ \rho^0)$$



Belle II 実験における $B \rightarrow \rho\rho$ 解析

$$B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-$$

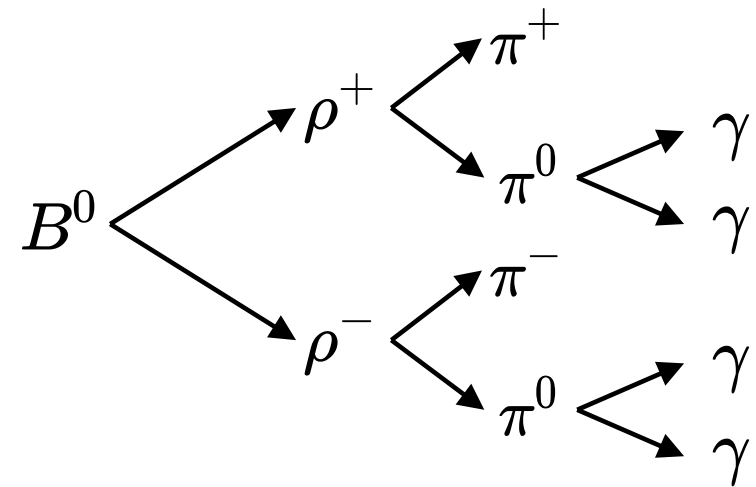
- ρ^\pm が π^0 に崩壊するので、Belle II でのみ解析できる。
- ①崩壊分岐比(アイソスピン解析のため)と縦偏極率($P \rightarrow VV$ 崩壊なので、CP-Even な縦偏極とCP-Even+CP-Oddな横偏極を区別)、
②時間依存CP非対称度(ϕ_2 の決定のため)を測定して、
Belle II 実験として ϕ_2 を決定することを目指す
この発表では①崩壊分岐比と縦偏極率の結果について発表する。

解析の流れ

- イベント選別条件の決定
- フィッティング
- 系統誤差の評価

イベント選別条件の最適化

B中間子を2つの π^0 と π^\pm から再構成する。
機械学習で $q\bar{q}$ 背景事象や γ の背景事象を削減し、
差分進化で選別に使うすべての変数に対して
最適な閾値を導く。



新しい機械学習の出力をもとに選別条件を最適化
→選別性能の向上

機械学習モデル生成

$e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$ 事象の抑制

γ の背景事象となるビームバックグラウンドや
ハドロニックなイベントを抑制

差分進化法

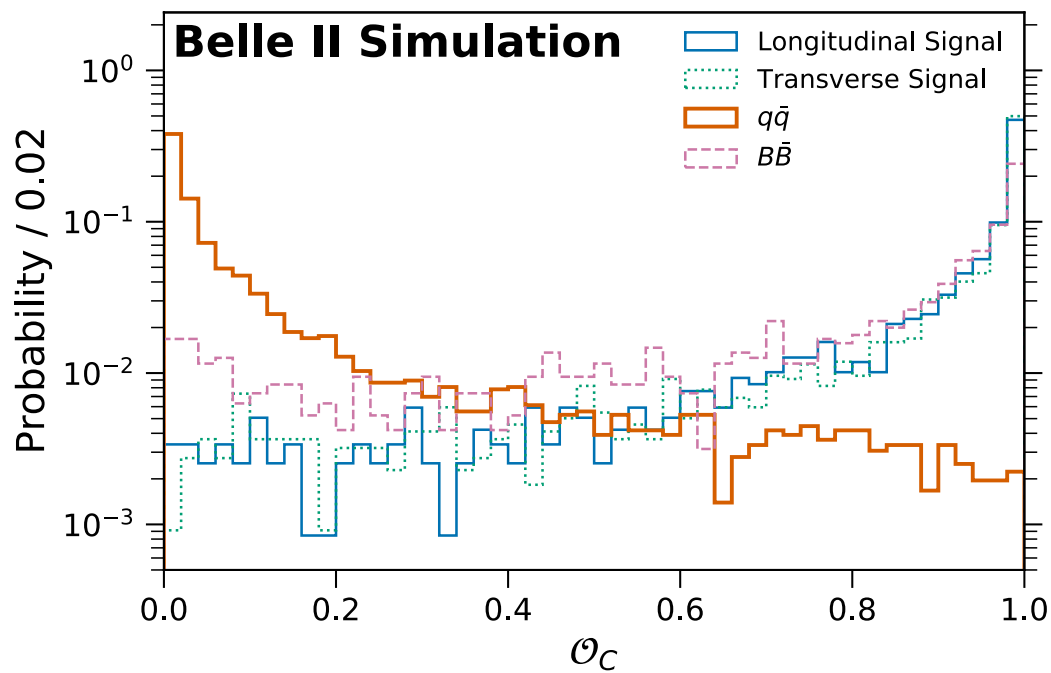
多次元関数に対して適用可能な最適化手法。複数の
イベント選別条件(エネルギー、角度、機械学習
出力など全16項目)をすべて同時最適化

最適化した条件で機械学習のトレーニングデータを選別
→選別後に残った背景事象に対して集中的に学習

機械学習によるバックグラウンドの削減

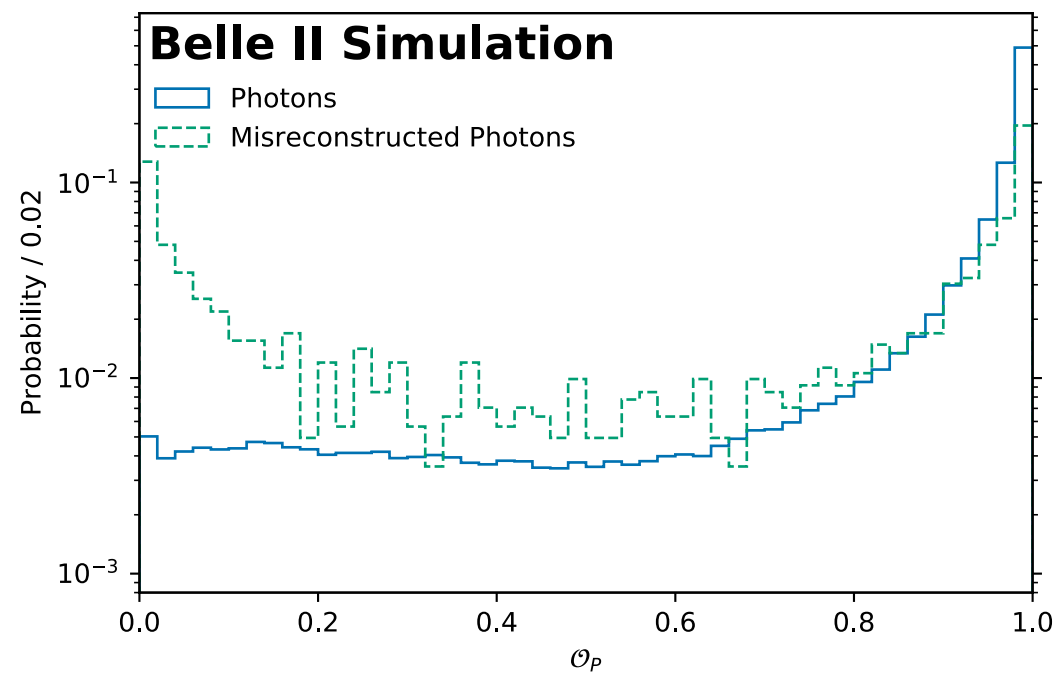
qq背景事象抑制MVA

運動量分布の形状や、衝突点からの距離などを組み合わせてqqを識別



光子背景事象削減MVA

光子のエネルギーやシャワーの形状を組み合わせ、ビームバックグラウンドやハドロニックバックグラウンドを削減



最適化したセレクションの性能

Belle II Simulation

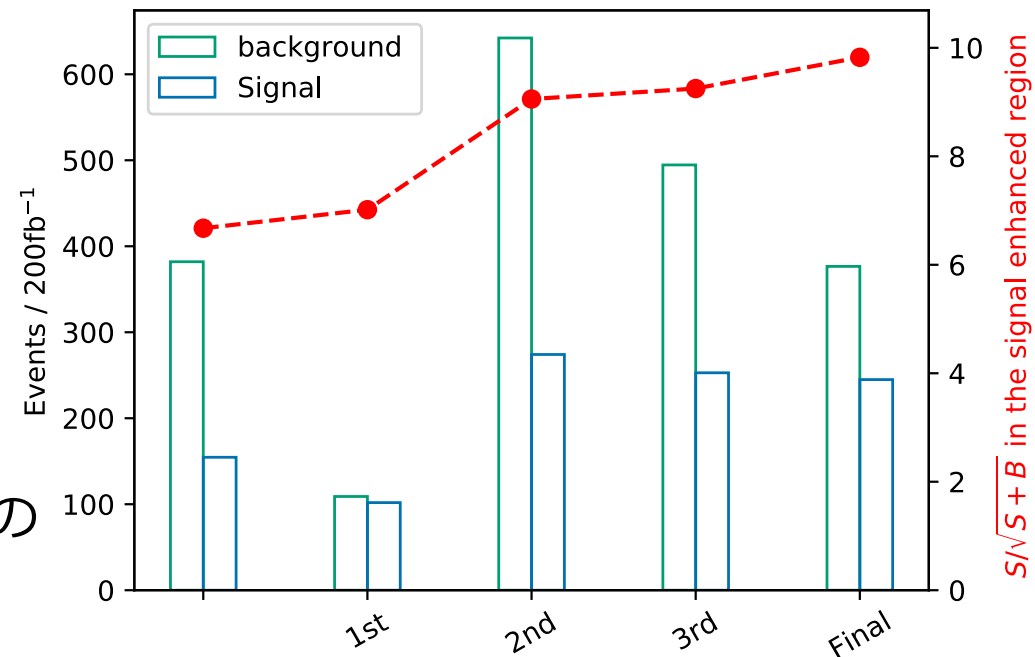
差分進化と機械学習を組み合わせることで性能向上。

$$\text{FoM} : \frac{S}{\sqrt{S+B}}$$

(S:信号事象数、 B:背景事象数)

Self crossfeed: $\rho^+\rho^-$ event の一部を間違えて再構成したもの

Peaking: $\rho^+\rho^-$ event と同じ $\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ を持つ崩壊モード



	信号 (縦偏極)	信号 (横偏極)	Self crossfeed (縦偏極)	Self crossfeed (横偏極)	BB	qq	peaking	FoM
再構成	807.4	13.5	1745	6.9	16142.6	82122.3	841.1	2.6
事象選別 (機械学習をのぞく)	652.7	11.9	549.6	2.9	3444.9	23930	215.4	4
qq抑制機械学習	353.1	6.5	219.7	1.3	1028.3	615.1	102	8
光子選別機械学習	331.8	6.1	149.1	0.7	654.9	479.7	77.1	8.8
1事象選択	314.9	6	91.7	0.5	539.4	449.1	68.3	8.9

フィット手法

フィットパラメータ

目的の物理量

- ① 崩壊分岐比 (Br) ② 縦偏極率 (f_L)

バックグラウンド数

- ① $q\bar{q}$ ($q = udsc$) ② $B\bar{B}$ ③ Peaking backgroundの数

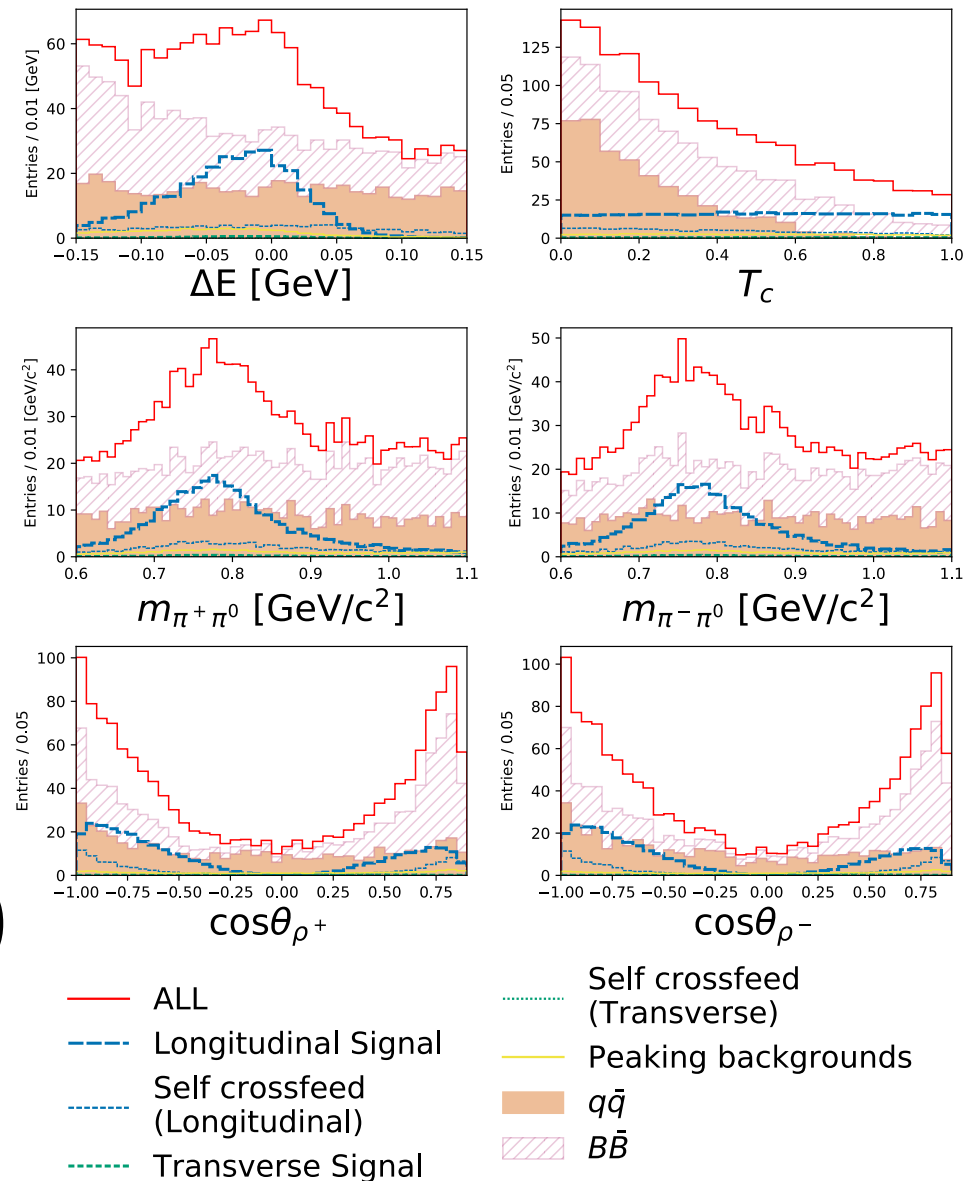
フィット変数 (全6変数)

- ΔE : 再構成したエネルギーとビームエネルギーの差
- $m_{\pi^{\pm}\pi^0}$: ρ^{\pm} の不変質量
- T_C : $q\bar{q}$ 抑制のための機械学習モデルの出力をフィットしやすい形に変換したもの
- $\cos\theta_{\rho^{\pm}}$: ρ^{\pm} 静止系での B^0 と π^{\pm} の角度差 \rightarrow 偏極状態

$$\frac{1}{\Gamma} \frac{d^2\Gamma}{d\cos\theta_{\rho^+} d\cos\theta_{\rho^-}} = \frac{9}{4} \left(\underbrace{f_L \cos^2\theta_{\rho^+} \cos^2\theta_{\rho^-}}_{\text{縦偏極}} + \underbrace{(1-f_L) \frac{1}{4} \sin^2\theta_{\rho^+} \sin^2\theta_{\rho^-}}_{\text{横偏極}} \right)$$

※ M_{bc} は ΔE と相関を持ち、フィットのバイアスの原因となるのでフィットには使用しない。

Belle II Simulation ($\int L dt = 200.0 \text{ fb}^{-1}$)



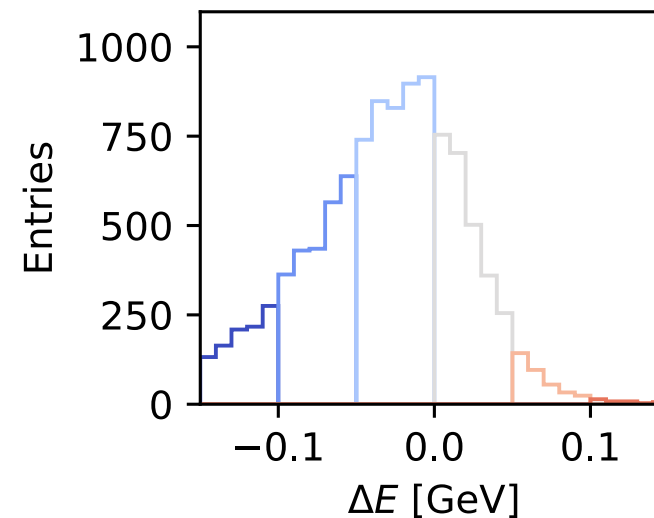
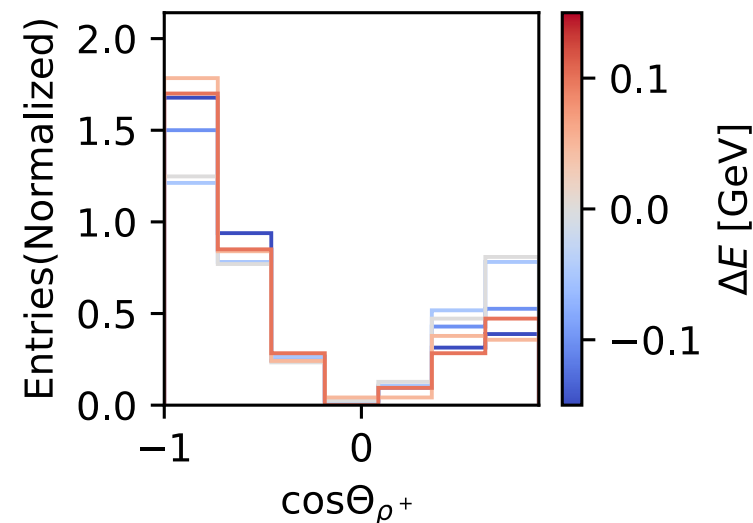
フィット変数の相関

最大の相関は、 **$\cos \Theta_{\rho^\pm}$ と ΔE の相関。**
 ΔE の値によって $\cos \Theta_{\rho^\pm}$ の形状が変化。
 ($\cos \Theta_{\rho^\pm}$ は π^0 の運動量と強く相関するのが原因。)

→データを ΔE で6分割し、 ΔE の値に応じて異なる $\cos \Theta_{\rho^\pm}$ のフィット関数を用いてフィットする。

縦偏極信号の ΔE と $\cos \Theta_{\rho^+}$

Belle II Simulation



モデリング

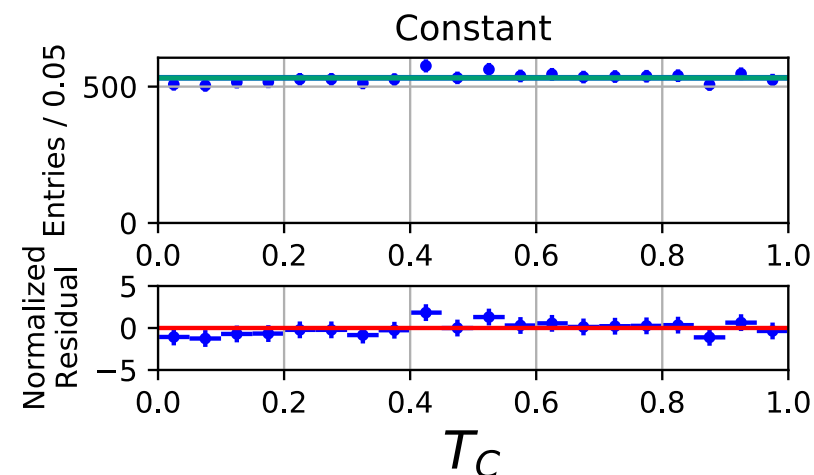
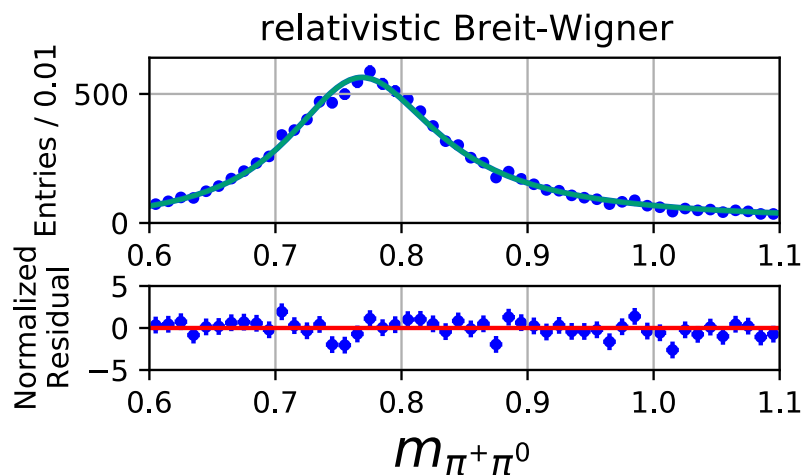
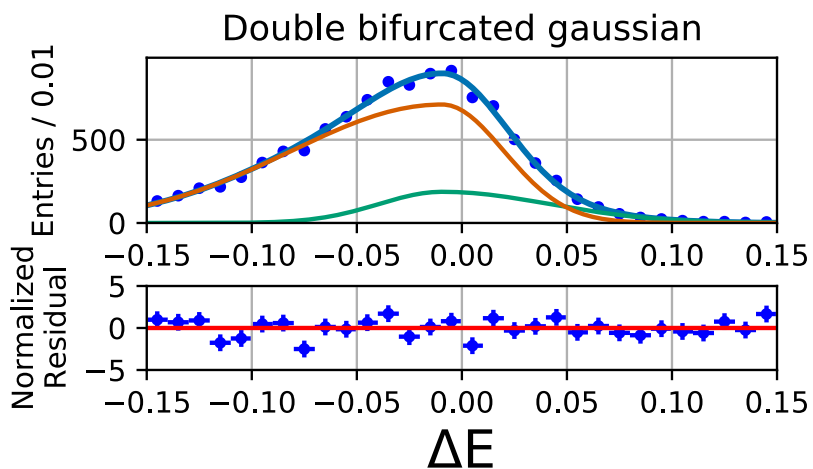
縦偏極信号のモデリング

- ΔE : Bifurcated Gaussian (左右で σ の異なるガウシアン)を2つ足し合わせる
- $m_{\pi^{\pm}\pi^0}$: Relativistic Breit Wigner
- T_C : 定数
- $\cos \theta_{\rho^{\pm}}$: ヒストグラムPDF (ΔE との相関を考慮)

他成分も同様にモデリングした。

Belle II Simulation

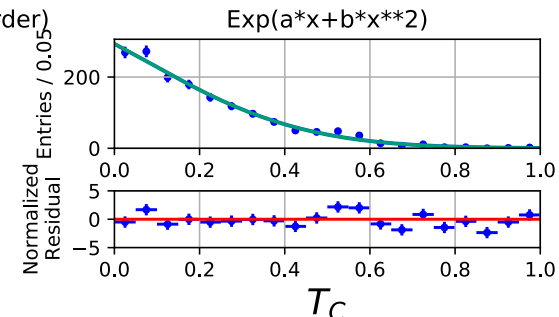
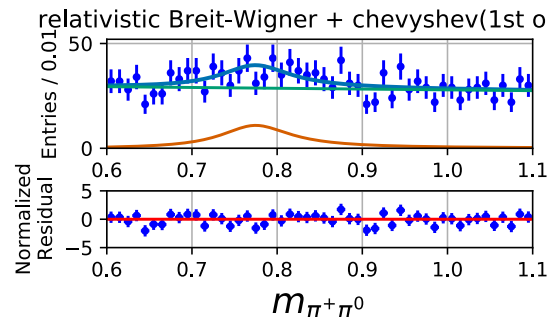
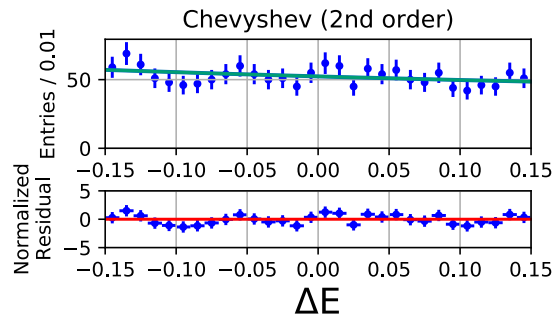
縦偏極信号のモデリング



全成分のモデリング

Belle II Simulation

$q\bar{q}$ のモデリング



ΔE との相関を考慮

	Longitudinal signal	Self-crossfeed (Longitudinal signal)	Transverse signal	Self-crossfeed (Transverse signal)	BB	qq
ΔE	Bifurcated Gaussian ×2	Bifurcated Gaussian ×1	Bifurcated Gaussian ×2	Bifurcated Gaussian ×1	2次式	2次式
$m_{\pi^{\pm}\pi^0}$	Breit-Wigner	Breit-Wigner +一次式	Breit-Wigner	Breit-Wigner +一次式	Breit-Wigner +一次式	Breit-Wigner +一次式
T_C	定数	1次式	1次式	1次式	exp(ax+bx^2)	1次式
$\cos\theta_{\rho^{\pm}}$	テンプレート	テンプレート	テンプレート	テンプレート	テンプレート	テンプレート

関数を用いてそれぞれの成分を表現した。

$\cos\Theta_{\rho^\pm}$ のモデリングのData-MCの一致度の評価

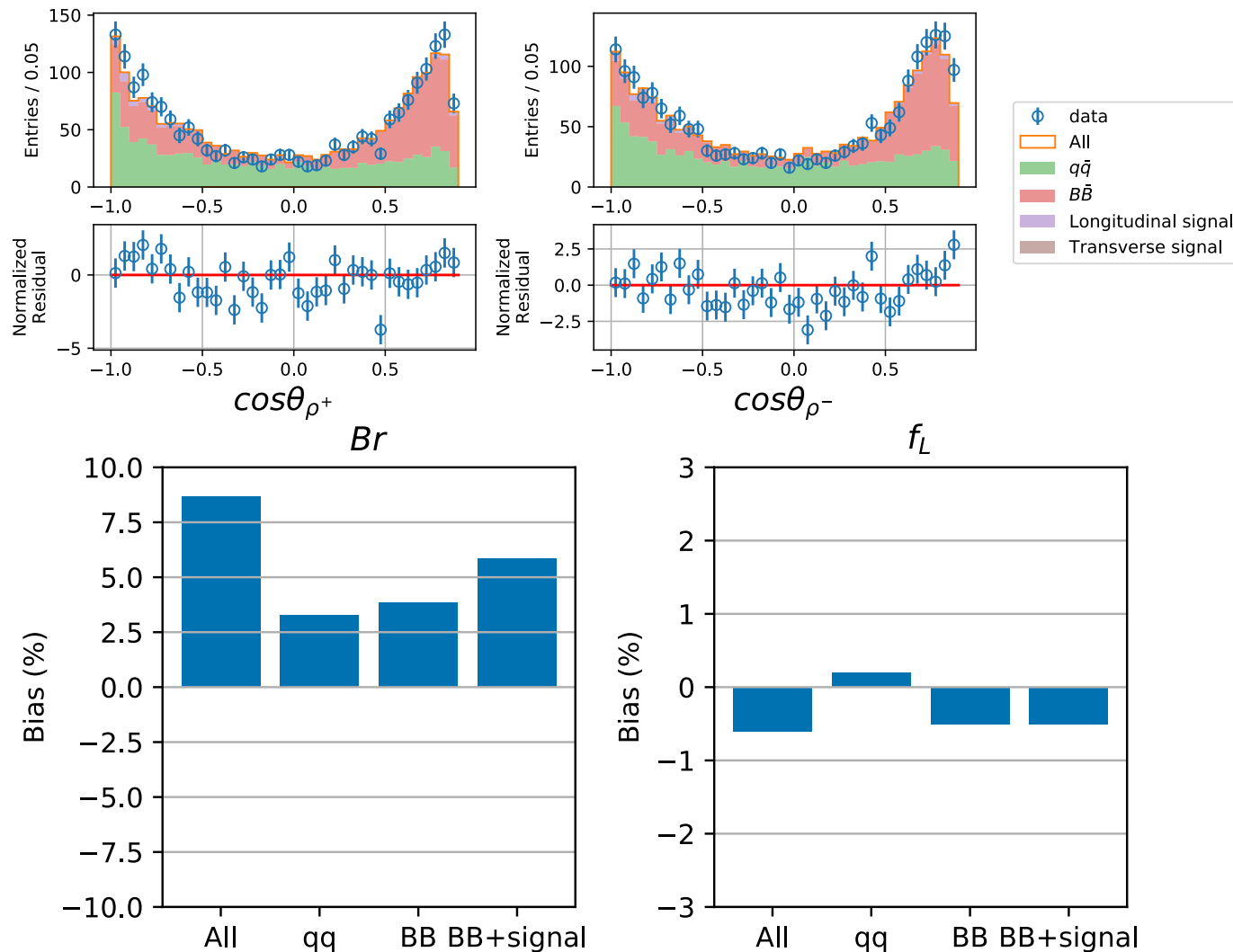
$\cos\Theta_H$: ρ^\pm 静止系での B^0 と π^\pm の角度差 \rightarrow 偏極状態を見分ける

サイドバンド領域 ($5.26 < M_{bc} < 5.274$ GeV) で $\cos\Theta_{\rho^\pm}$ の評価を行う。

系統誤差の評価方法

それぞれの成分 ($q\bar{q}$, $B\bar{B}$, signal) を Data-MC の比で重み付けをして擬似データを生成し、重み付けしていない PDF でフィットし、 Br や f_L に生じるバイアスを計算する。

Belle II (Preliminary) $\int L dt = 189 \text{ fb}^{-1}$



データとシミュレーションの違いを理解した。 $B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-$ の信号領域の解析へ進む

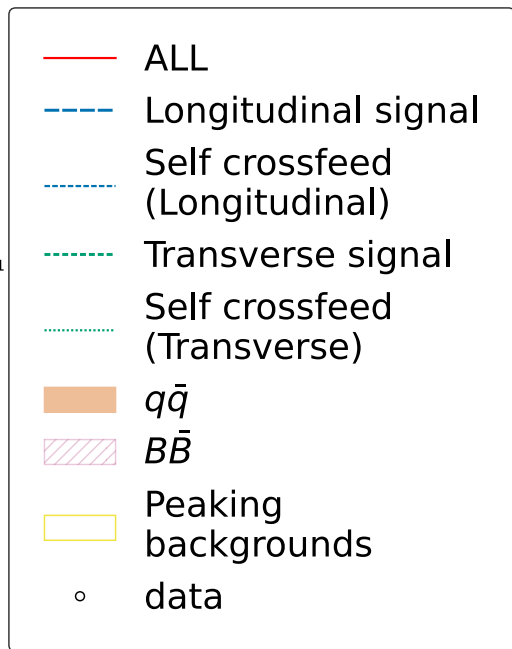
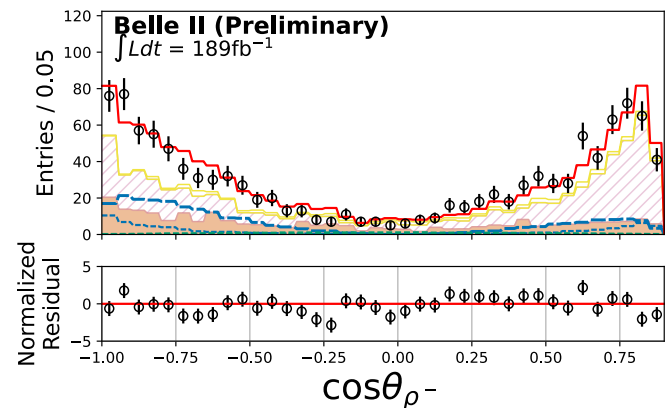
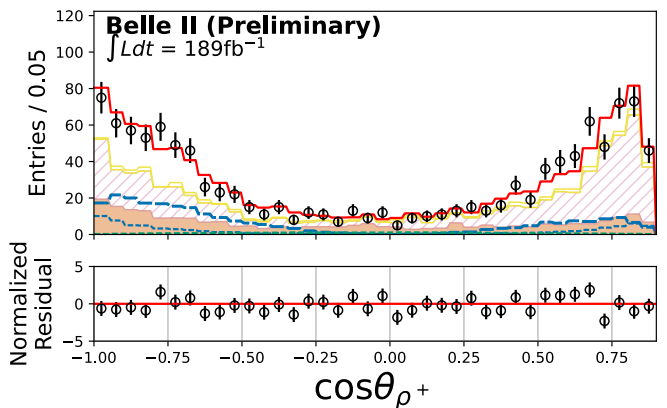
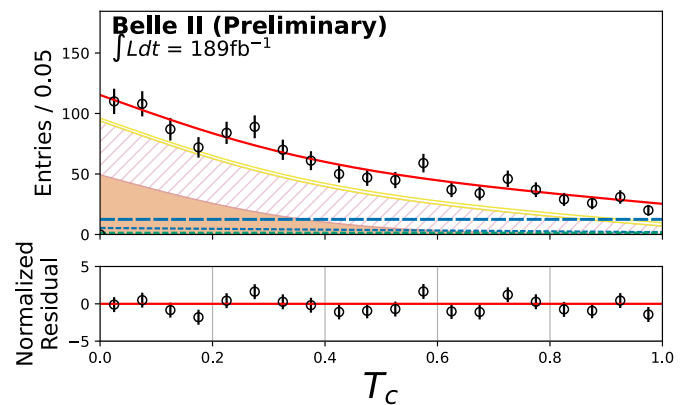
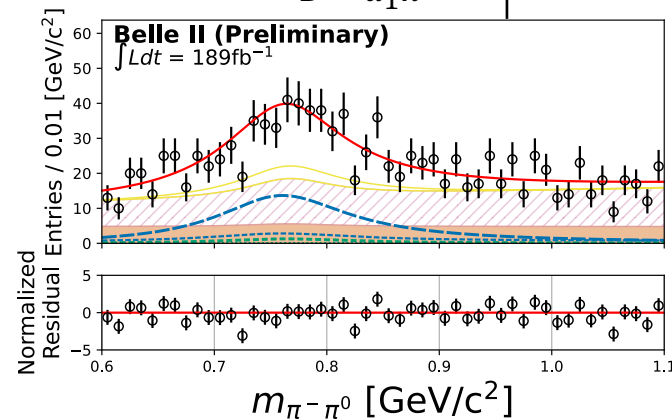
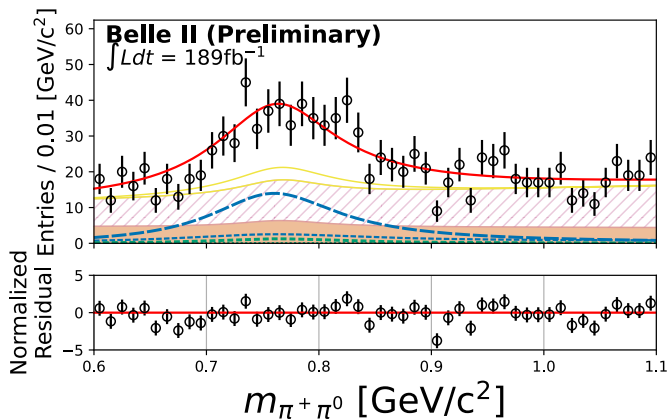
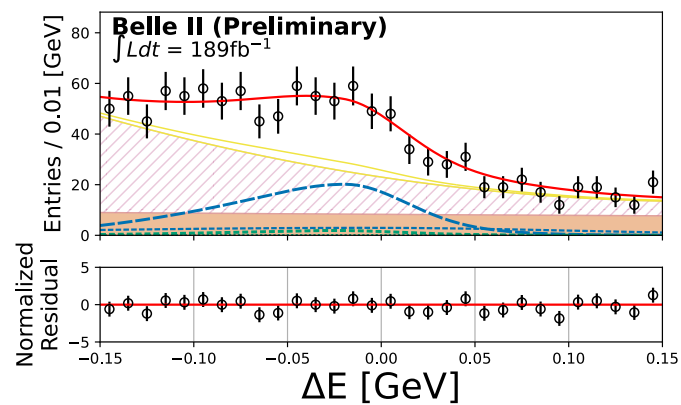
データへのフィット結果

信号領域に残った1142イベントを使用。

$$N_{long}: 235^{+24}_{-23}$$

$$N_{trans}: 21^{+19}_{-17}$$

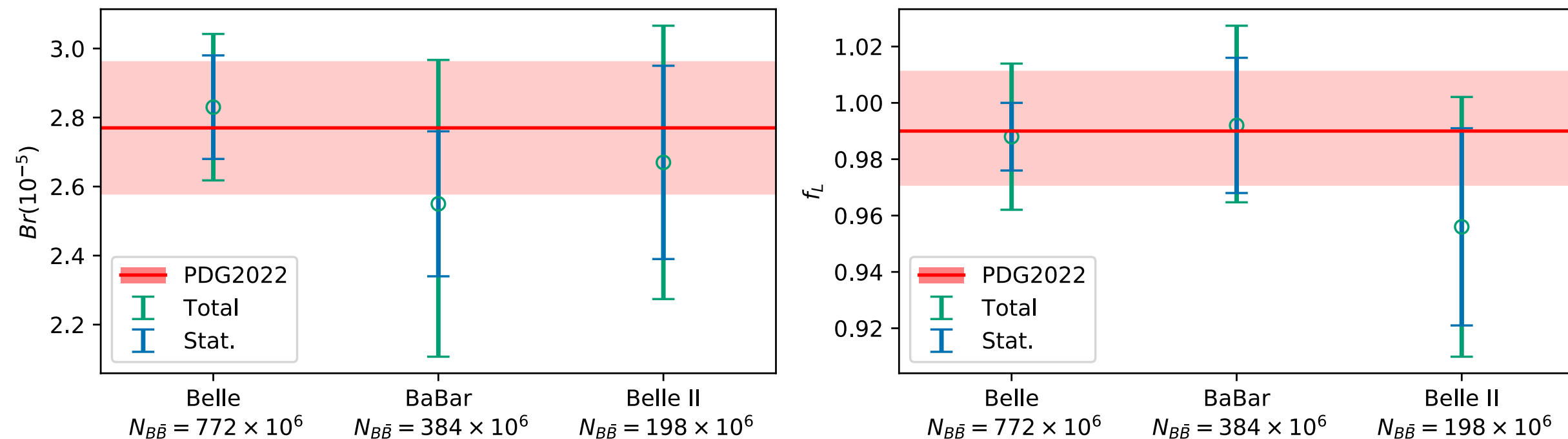
	フィット結果
Br	$(2.67 \pm 0.28) \times 10^{-5}$
f_L	0.956 ± 0.035
N_{qq}	249 ± 30
N_{BB}	514^{+39}_{-38}
$N_{B^0 \rightarrow \rho^+ \pi^- \pi^0}$	139^{+63}_{-60}
$N_{B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0}$	-99^{+33}_{-31}
$N_{B^0 \rightarrow a_1^0 \pi^0}$	-8^{+19}_{-17}



測定結果

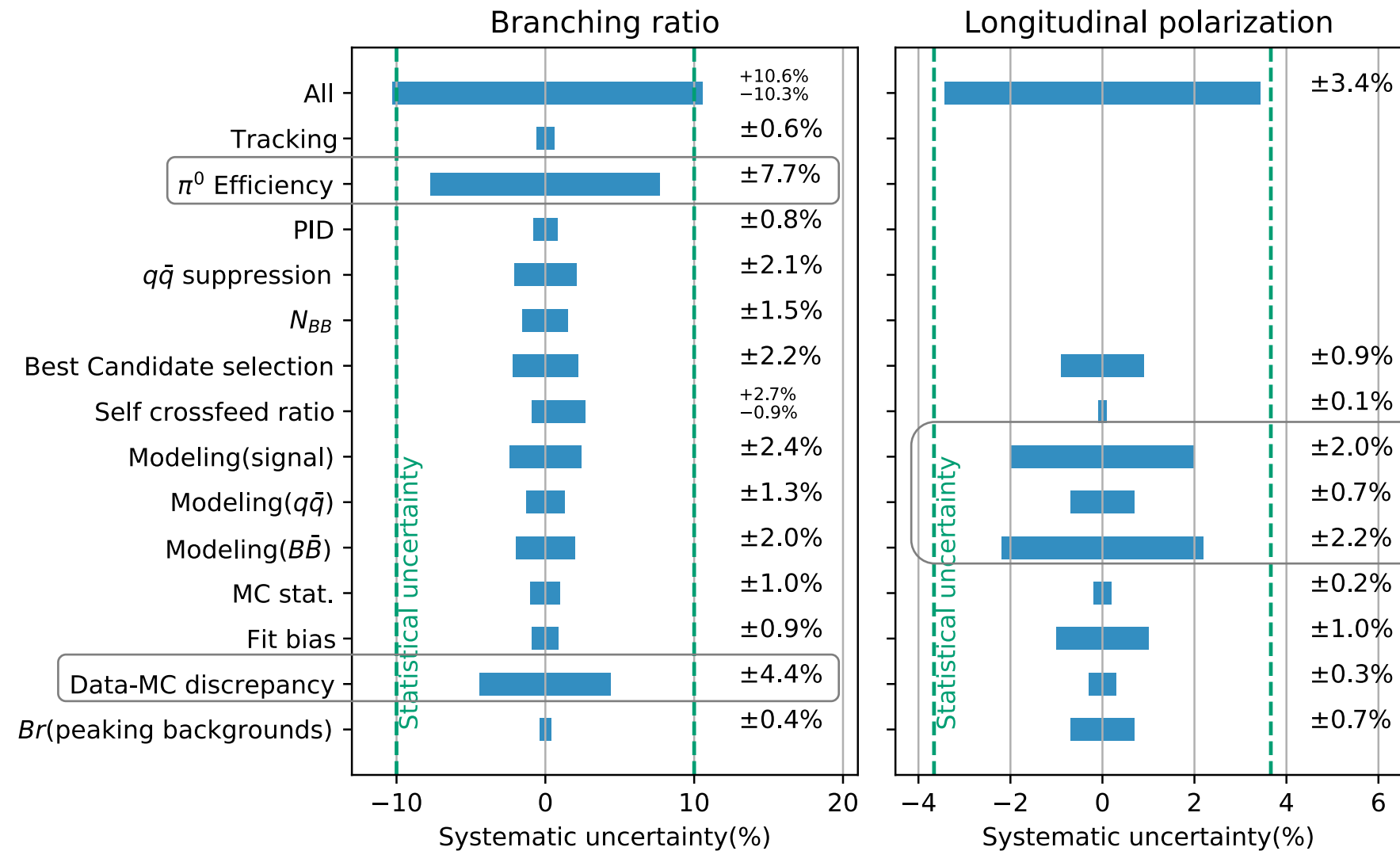
$$Br = (2.67 \pm 0.28 \text{ (Stat.)} \pm 0.28 \text{ (Syst.)}) \times 10^{-5}$$

$$f_L = 0.956 \pm 0.035 \text{ (Stat.)} \pm 0.033 \text{ (Syst.)}$$



PDG2022の値と誤差の範囲で一致。崩壊分岐比に関して、統計誤差と系統誤差の合計でBaBar実験の結果と同程度

系統誤差



主要な系統誤差

崩壊分岐比

- π^0 の検出効率
評価に使った崩壊モードの分岐比の測定精度が原因

- Data-MCの違い
 $\cos\Theta_{\rho^\pm}$ のモデリング

縦偏極率

- PDFのモデリングの不定性
モデリングの不定性評価に使用した崩壊モードの統計数

統計誤差と同程度の系統誤差に抑えられている。主要な系統誤差は将来的には削減可能。

まとめ

- CKM行列の精密測定は新物理探索において強力であり、Belle II 実験で $B \rightarrow \rho\rho$ を用いた ϕ_2 の測定を目指す。

- $B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-$ の測定を行い、以下の結果を得た

$$Br = (2.67 \pm 0.28 \text{ (Stat.)} \pm 0.28 \text{ (Syst.)}) \times 10^{-5}$$

$$f_L = 0.956 \pm 0.035 \text{ (Stat.)} \pm 0.033 \text{ (Syst.)}$$

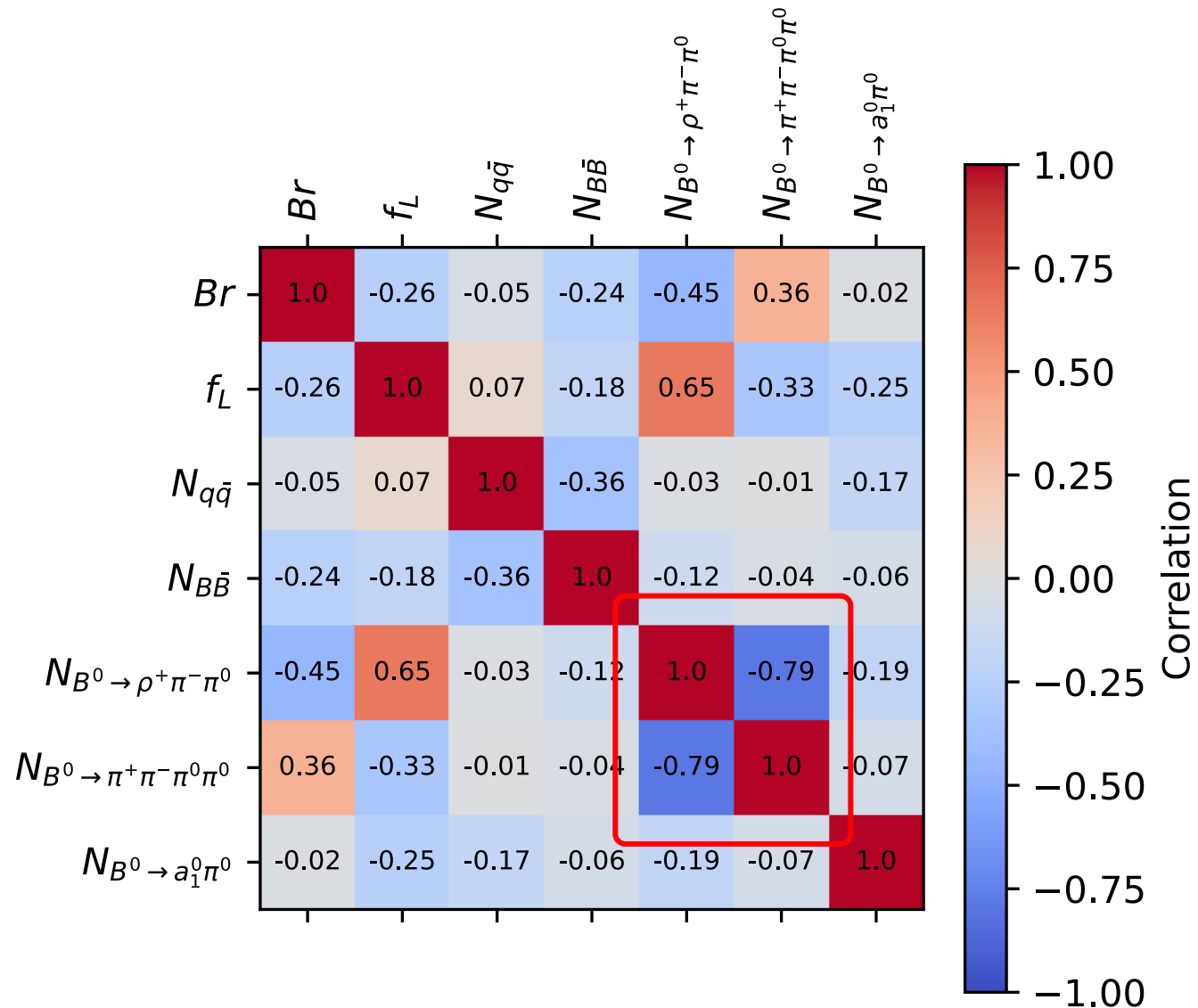
Belle II 実験において、 $B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-$ の崩壊分岐比、縦偏極率測定を完成させた。今後、時間依存CP非対称度を測定し、Belle II 実験としての ϕ_2 測定を行う。

フィットパラメータの相関

$B^0 \rightarrow \rho^+ \pi^- \pi^0$ と $N_{B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0}$ や、 $q\bar{q}, B\bar{B}$ は、比較的フィット変数の分布が近いことで、識別が難しい。

しかし、崩壊分岐比・縦偏極率は相関の影響をそこまで受けていない。

	フィット結果
Br	$(2.67 \pm 0.28) \times 10^{-5}$
f_L	0.956 ± 0.035
N_{qq}	249 ± 30
N_{BB}	514^{+39}_{-38}
$N_{B^0 \rightarrow \rho^+ \pi^- \pi^0}$	139^{+63}_{-60}
$N_{B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0}$	-99^{+33}_{-31}
$N_{B^0 \rightarrow a_1^0 \pi^0}$	-8^{+19}_{-17}



Peaking Background

TABLE II: Summary of efficiencies and branching fraction (BF) of peaking background

	Efficiency	BF (PDG)	BF (DECAY_BELLE2.DEC)
$B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$	0.42%	$< 3.1 \times 10^{-3}$	1.0×10^{-5}
$B^0 \rightarrow a_1^0 \pi^0$	1.40%	$< 1.1 \times 10^{-3}$	1.0×10^{-6}
$B^0 \rightarrow a_1^\pm \pi^\mp$	0.22%	$(2.6 \pm 0.5) \times 10^{-5}$	2.6×10^{-5}
$B^0 \rightarrow \rho^\pm \pi^\mp \pi^0$	1.16%	-	1.0×10^{-5}
$B^0 \rightarrow K^*(892)^\pm \rho^\mp$	0.28%	$(1.03 \pm 0.26) \times 10^{-5}$	1.03×10^{-5}
$B^0 \rightarrow K_0^{*\pm}(1430) \rho^\mp$	0.13%	$(2.8 \pm 1.2) \times 10^{-5}$	2.8×10^{-5}

$2\pi^\pm 2\pi^0$ Final states
(Same as signal)

$1\pi^\pm 2\pi^0 + 1K^\mp$
Final states
→ Can be background
due to mis-ID of $K\pi$

Number of the peaking background in the fit

Measured → Fixed, Systematics will
be calculated by changing $Br \pm 1\sigma$

Not Measured → Floated in our fit

Expected number of the
peaking background (200fb^{-1})

$$B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0 : 6.3$$

$$B^0 \rightarrow a_1^0 \pi^0 : 2.2$$

$$B^0 \rightarrow a_1^+ \pi^- : 5.6$$

$$B^0 \rightarrow \rho^+ \pi^- \pi^0 : 18.9$$

$$B^0 \rightarrow K^{*+} \rho^- : 9.0$$

$$B^0 \rightarrow K_0^{*+} \rho^- : 9.1$$

Expected number of
the signal events

$$N_{long} : 268.1$$

$$N_{trans} : 5.4$$

データとシミュレーションの比較

Target and decay mode

CSMVA: $B^0 \rightarrow D^{*-} (\rightarrow \bar{D}^0 (\rightarrow K^+ \pi^-) \pi^-) \pi^+$

π^0 efficiency: $D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0$ and $D^0 \rightarrow D^- \pi^+$
including PhotonMVA

Shift of ΔE and m_ρ : $B^- \rightarrow D^0 (\rightarrow K^- \pi^+ \pi^0) \rho^-$

Angular mismodelings ($\cos\theta_\rho$): $B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-$ sideband region

Selection

Same as for $B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-$

Binary K-ID > 0.6

$1.835 \text{ GeV} < M_{D^0} < 1.895 \text{ GeV}$

$1.855 \text{ GeV} < M_{D^\pm} < 1.885 \text{ GeV}$

φ₂の測定

φ₂ 測定

$b \rightarrow u$ tree + $B\bar{B}$ mixing → 時間依存CP対称性の破れ

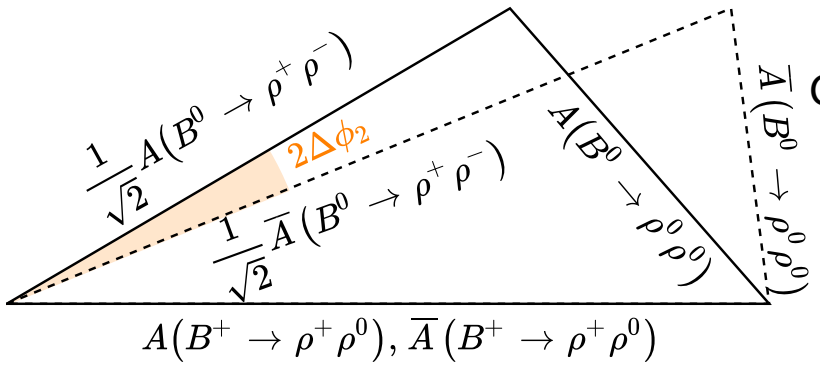
$$\frac{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-) - \Gamma(B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-)}{\Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-) + \Gamma(B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-)} = C \cos \Delta m_d \Delta t - S \sin \Delta m_d \Delta t$$

ペンギン崩壊がなければ、 $S = \sin 2\phi_2$ だが、ペンギン崩壊の存在により、

$$C \neq 0, S = \sin(2\phi_2 + 2\Delta\phi_2)$$

アイソスピン解析

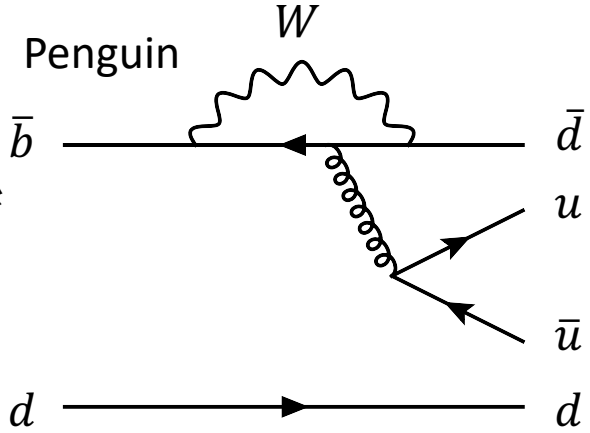
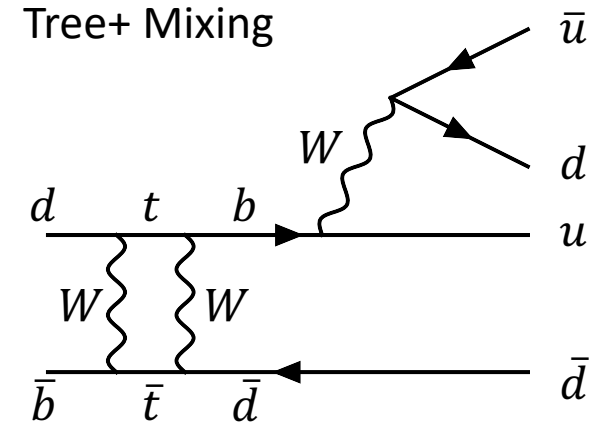
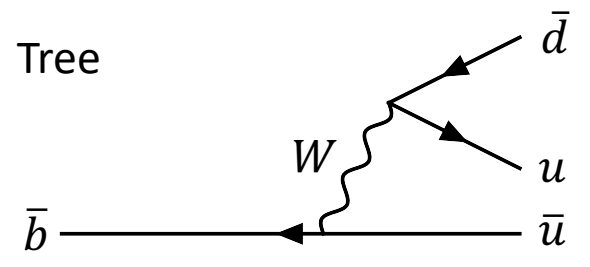
$B^+ \rightarrow \rho^+ \rho^0$ (ツリーが支配的)、 $B^0 \rightarrow \rho^0 \rho^0$ (ペンギン崩壊が支配的)、を使って、 $\Delta\phi_2$ の効果を見積もる。



Gronau and London $B \rightarrow \rho\rho$ における振幅の関係

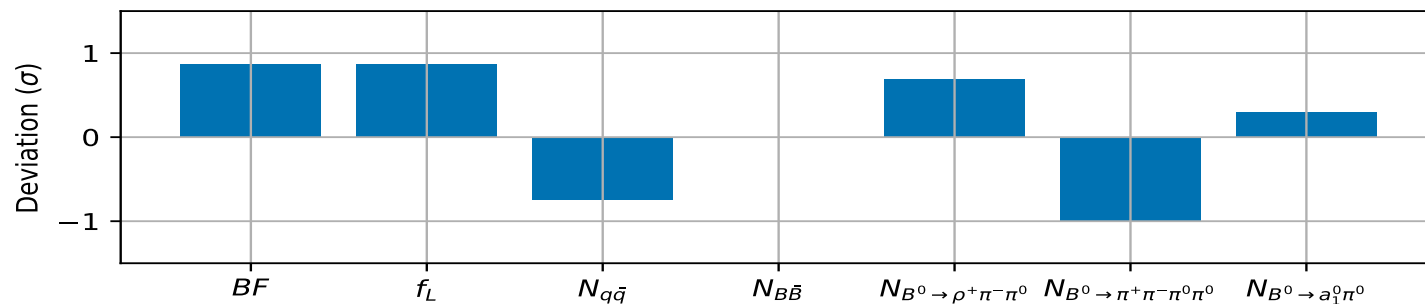
$$\frac{1}{\sqrt{2}}A(B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-) - A(B^0 \rightarrow \rho^0 \rho^0) = A(B^+ \rightarrow \rho^+ \rho^0)$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\bar{A}(B^0 \rightarrow \rho^+ \rho^-) - \bar{A}(B^0 \rightarrow \rho^0 \rho^0) = \bar{A}(B^+ \rightarrow \rho^+ \rho^0)$$



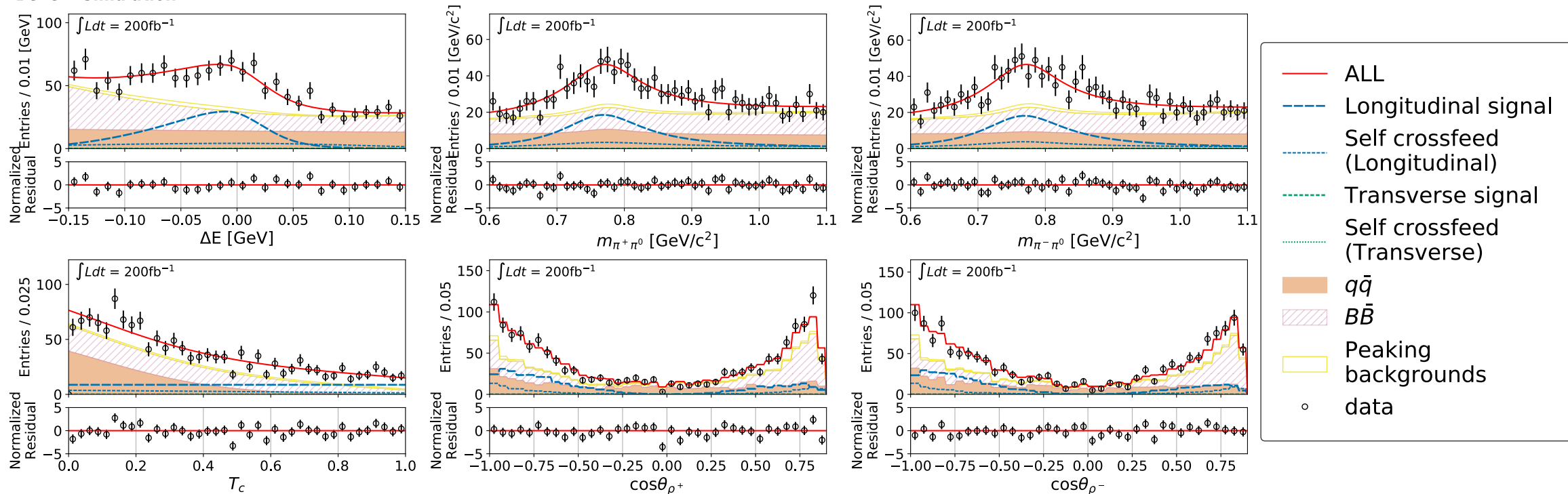
シミュレーションに対するフィット結果

Geant 4 で生成したシミュレーション
データにフィットして
得られた結果が入力とよく一致する



フィット結果と入力とのずれ。モデリングに使用した
シミュレーションデータの一部に対してフィットしたため、deviationが小さい。

Belle II Simulation



フィット手法の検証

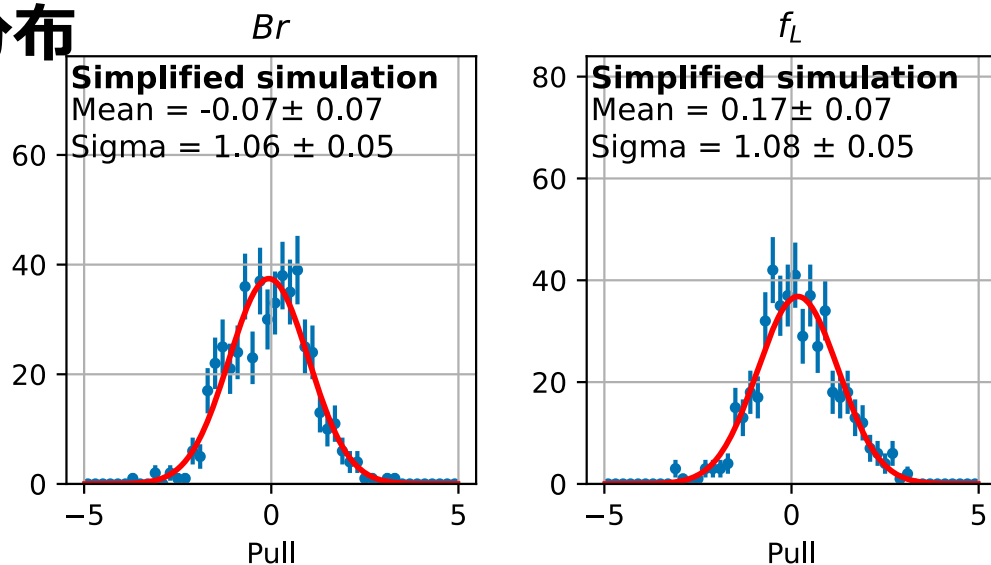
検証方法

1. モデル化したPDFから擬似データを生成
2. フィットを実行し、元の値との比較を行う

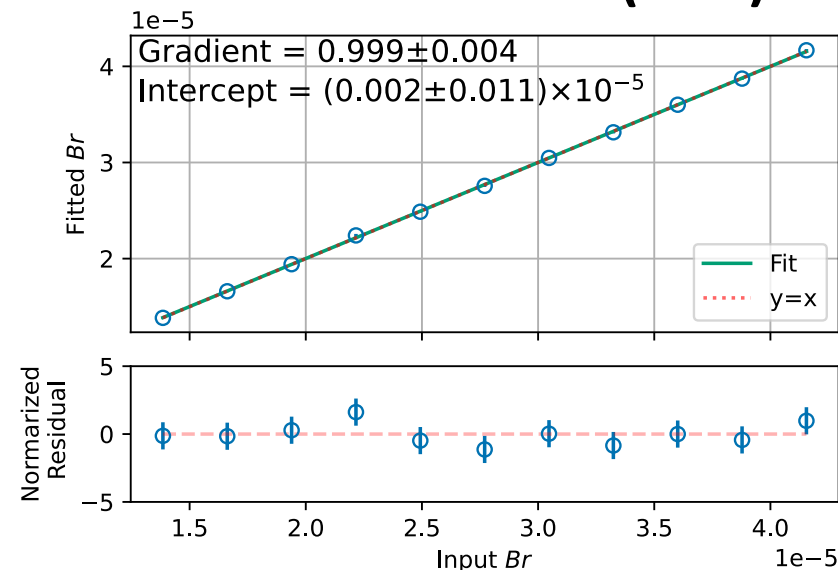
$$\text{PULL} = \frac{\text{フィットによって得られた値} - \text{真の値}}{\text{フィットによって得られた誤差}} \quad \text{を評価。}$$

バイアスは統計誤差と比較して十分に小さい。
このバイアスは系統誤差として計上。

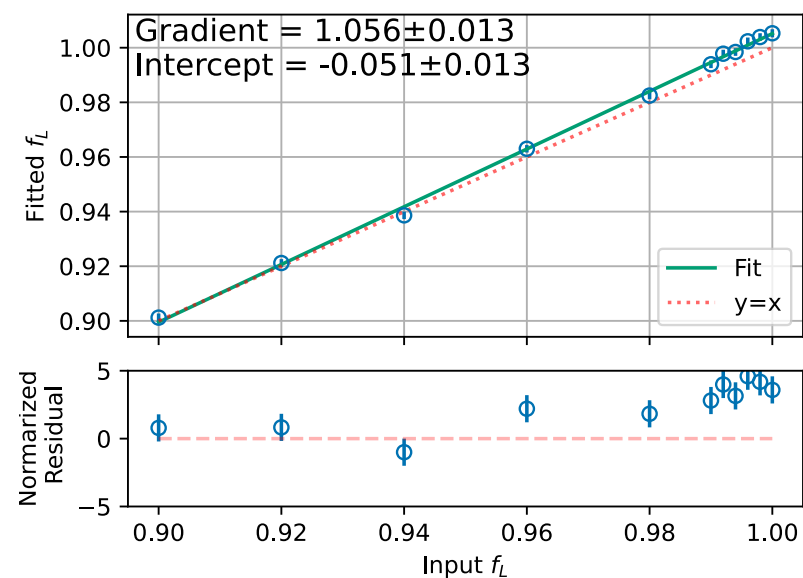
PULL分布



Simplified simulation 線形性(Br)



Simplified simulation 線形性(f_L)



フィット手法の特性を理解したのでDataとシミュレーションの比較へ進む

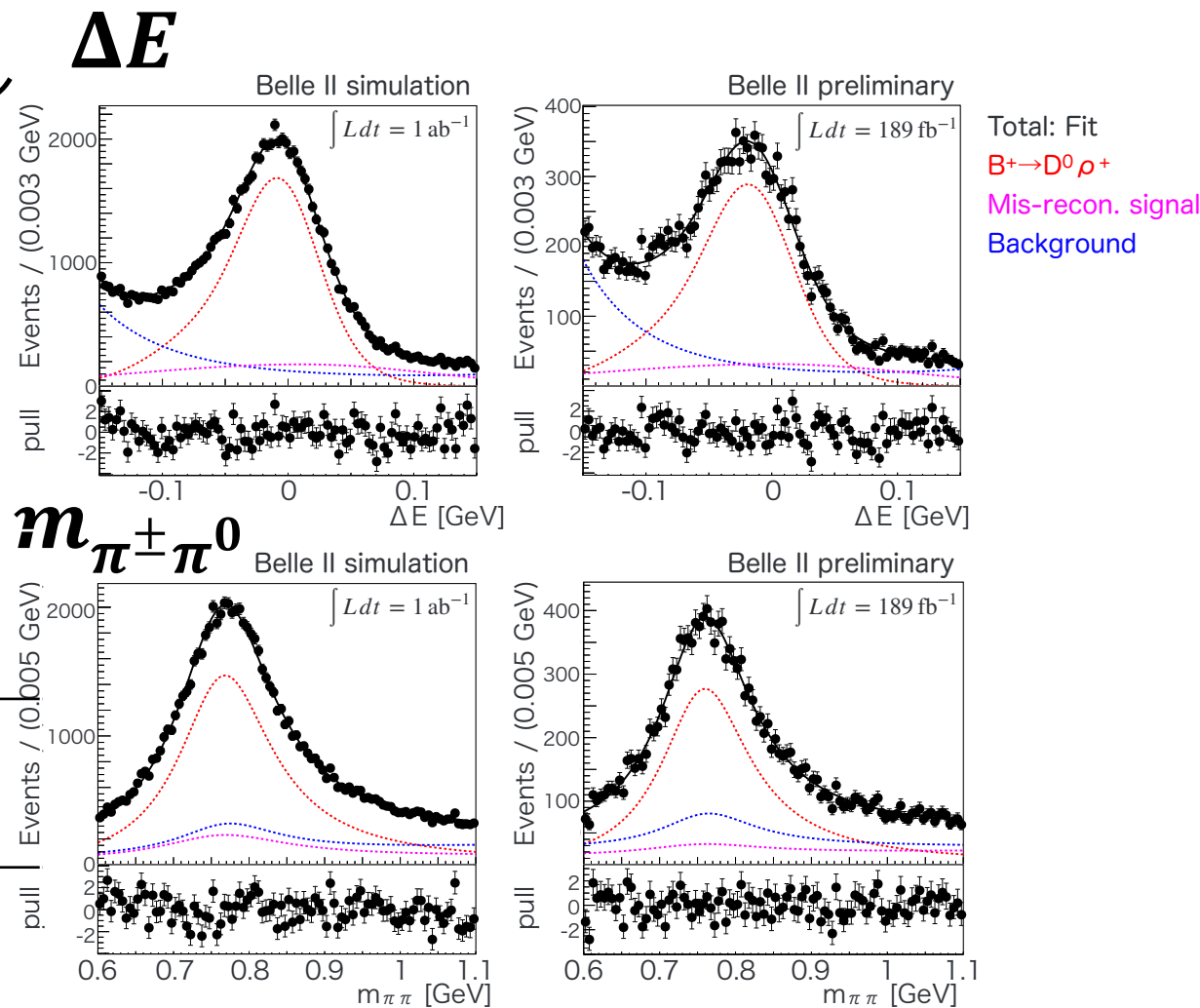
フィットモデルの検証と補正

光子のエネルギー測定値のシミュレーションとのずれにより、 ΔE や $m_{\pi^{\pm}\pi^0}$ がずれる。
 $B^- \rightarrow D^0(\rightarrow K^- \pi^+ \pi^0) \rho^-$ を用い、ずれを評価した

(ΔE : 再構成したエネルギー - ビームエネルギー
 m_{ρ} : ρ^{\pm} の不変質量)

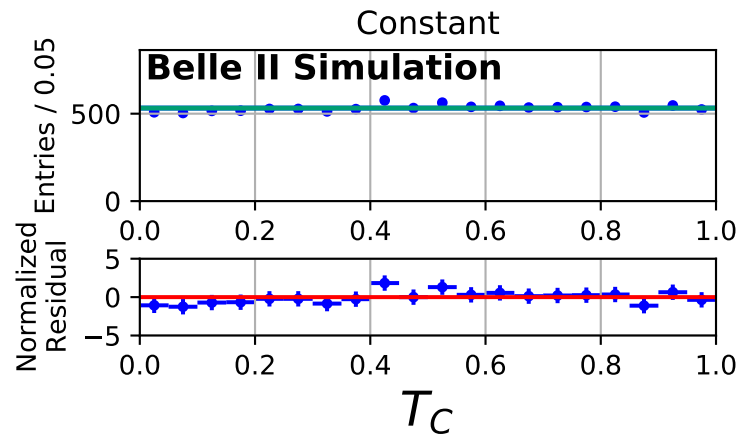
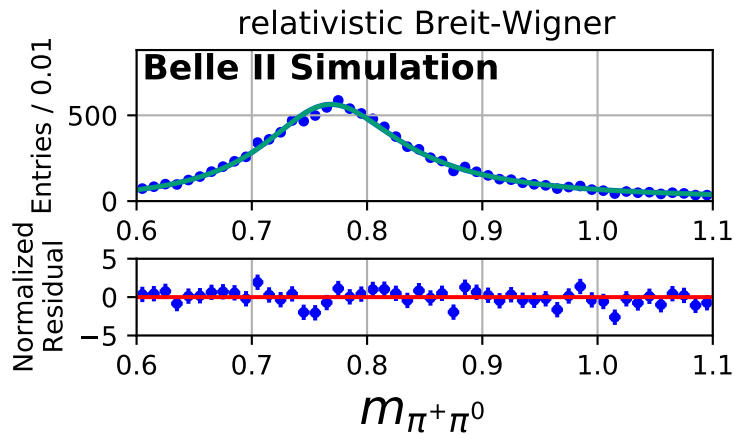
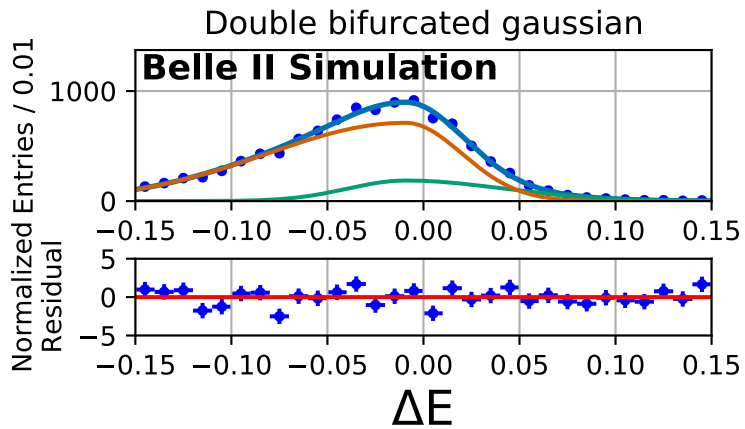
	ピーク位置のずれ	ピークの幅の Data-MC 比
ΔE	$(-10.1 \pm 1.3) \text{ MeV}$	1.08 ± 0.04
$m_{\pi^{\pm}\pi^0}$	$(-8.4 \pm 1.2) \text{ MeV}$	0.94 ± 0.03

ずれの大きさ \rightarrow フィットに使用するPDFに反映
 ずれの統計誤差 \rightarrow 系統誤差に反映



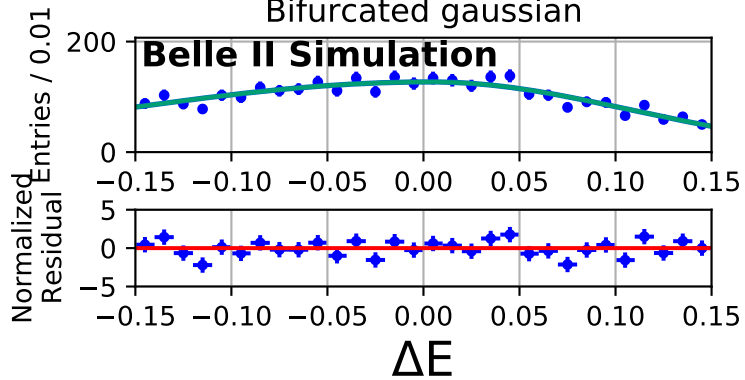
MODELING

Longitudinal Signal

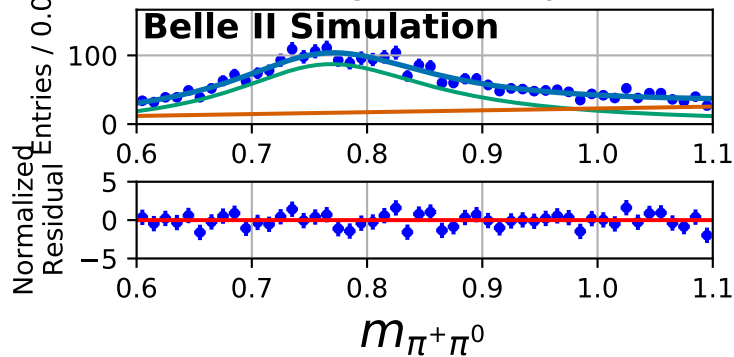


Self crossfeed
(Longitudinal)

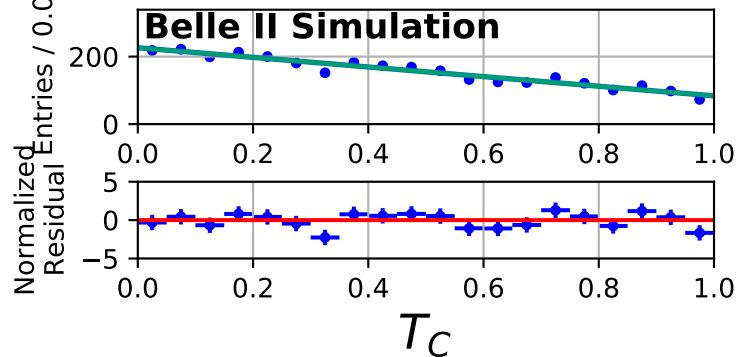
Bifurcated gaussian



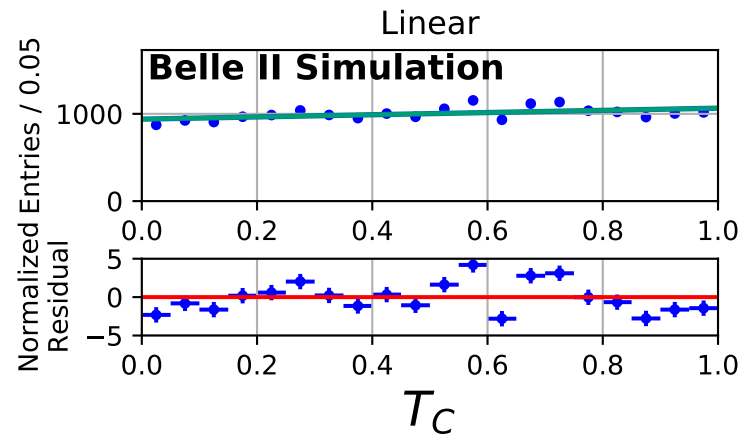
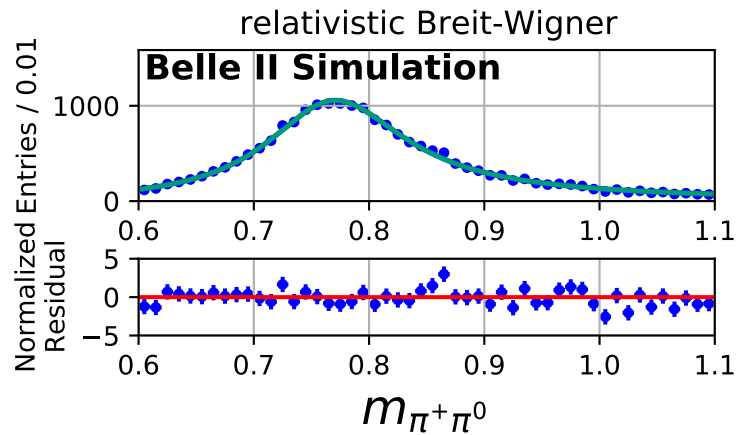
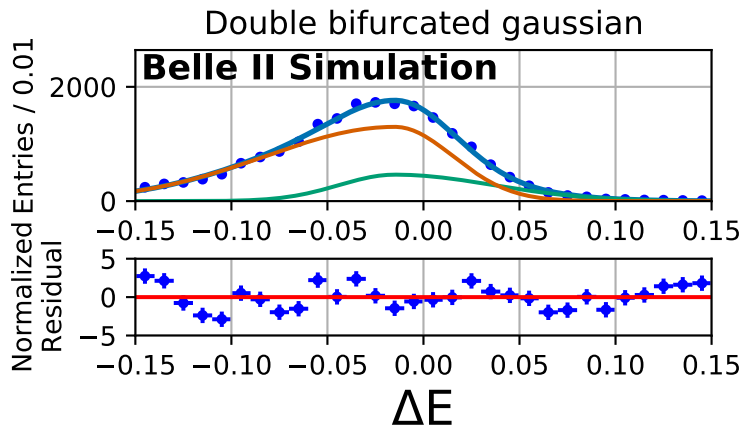
relativistic Breit-Wigner + chevyshev(1st order)



Linear

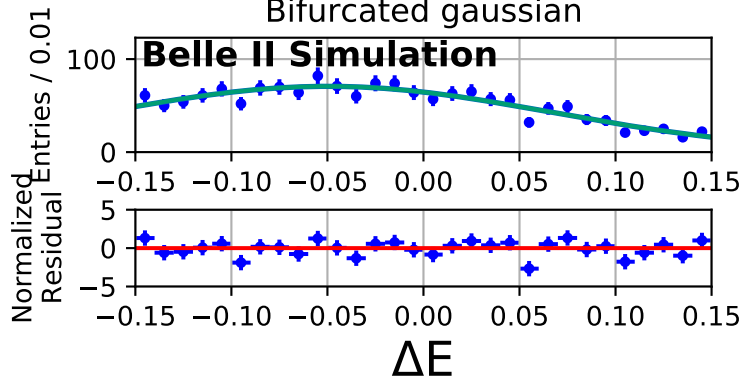


Transverse Signal

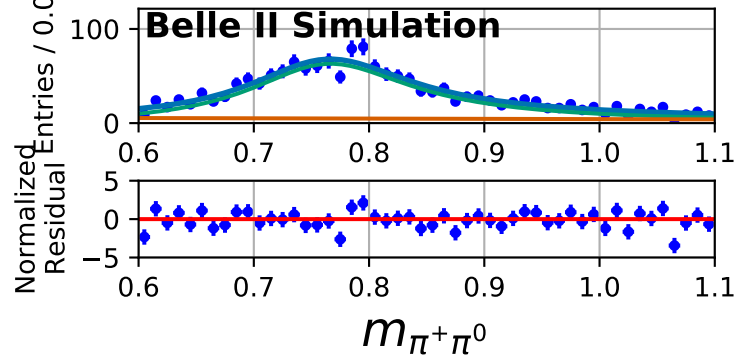


Self crossfeed
(Transverse)

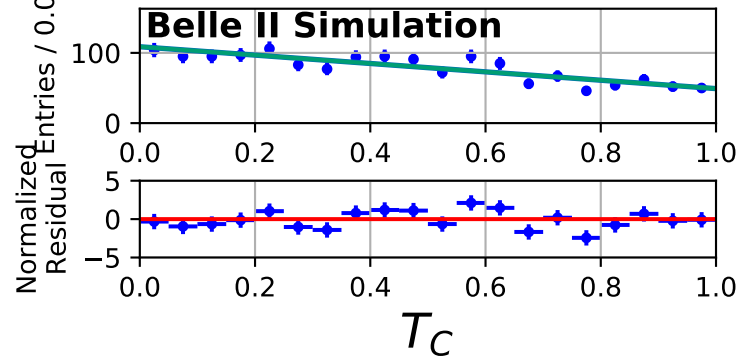
Bifurcated gaussian

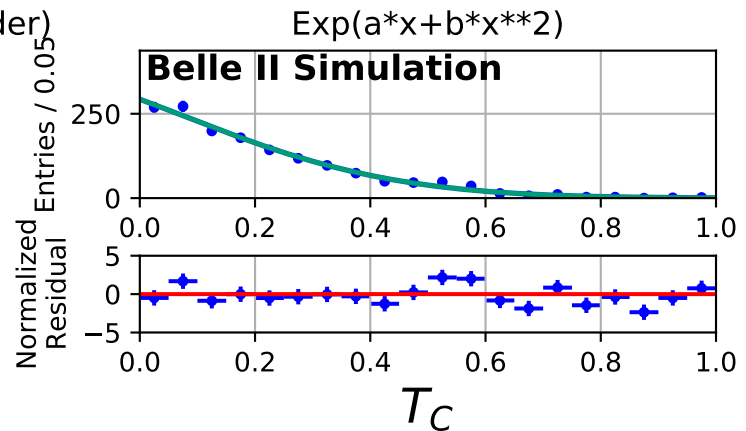
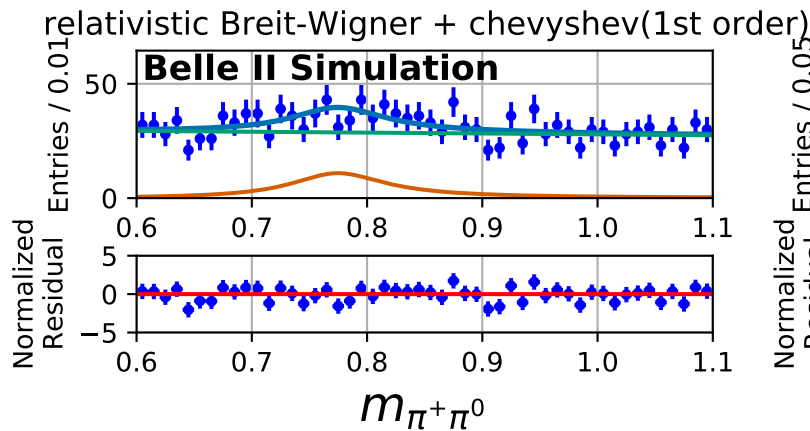
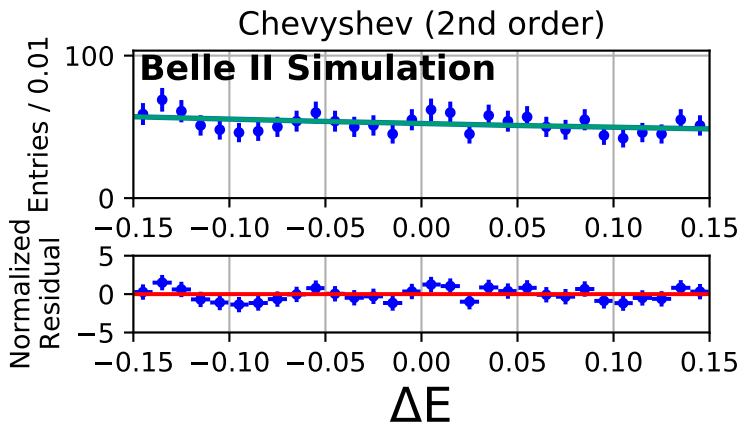


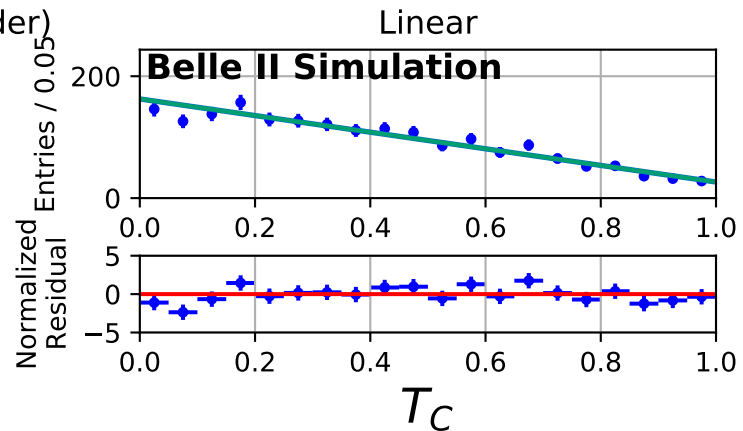
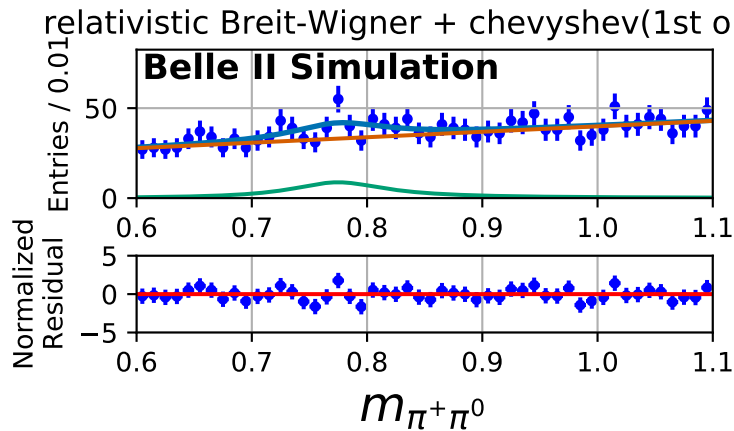
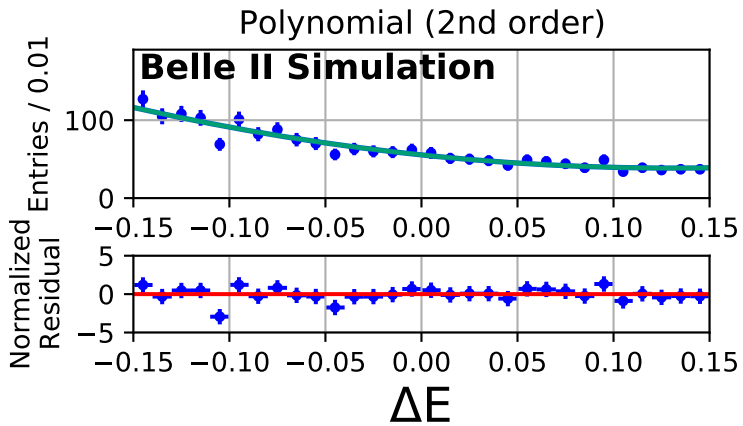
relativistic Breit-Wigner + chevyshev(1st order)



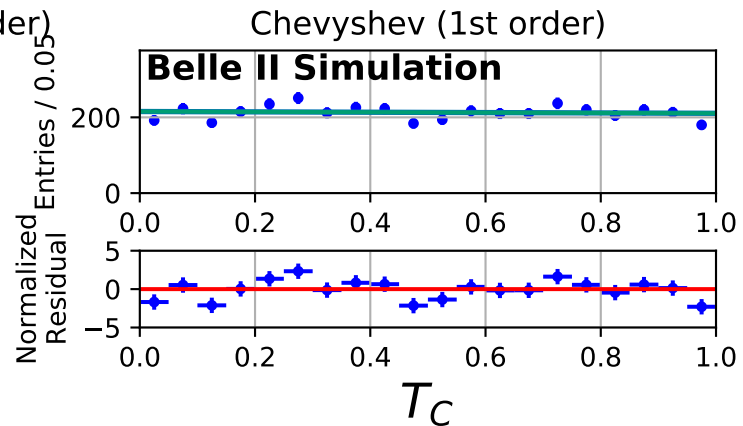
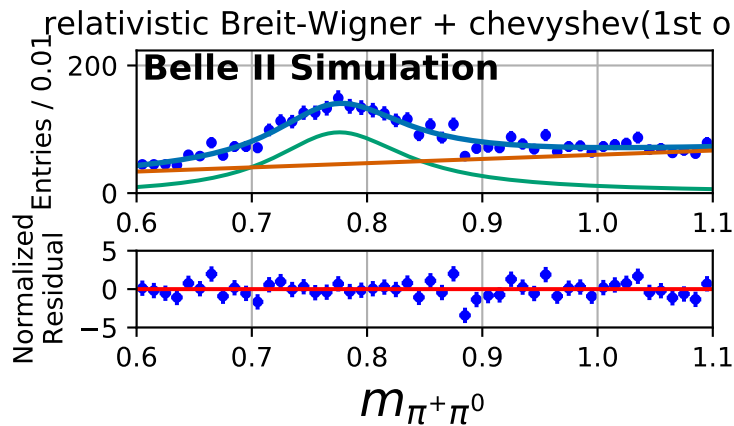
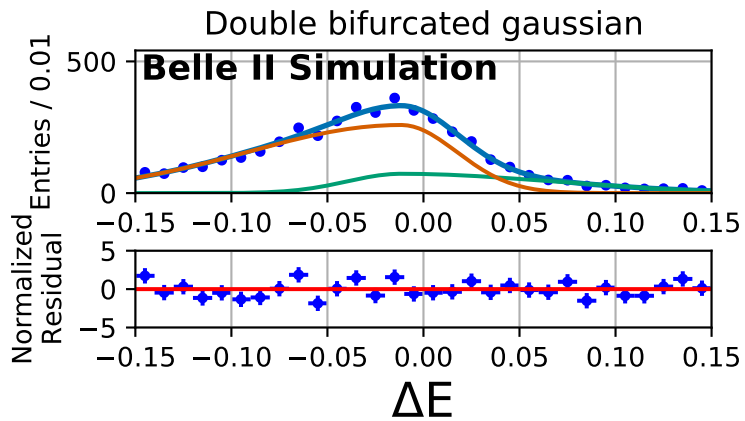
Linear



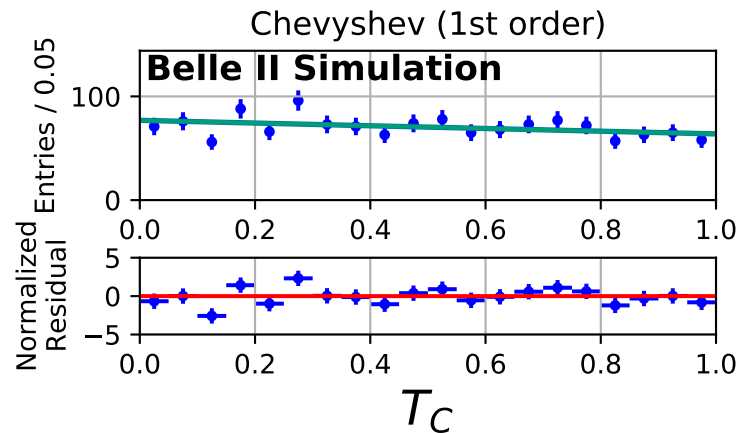
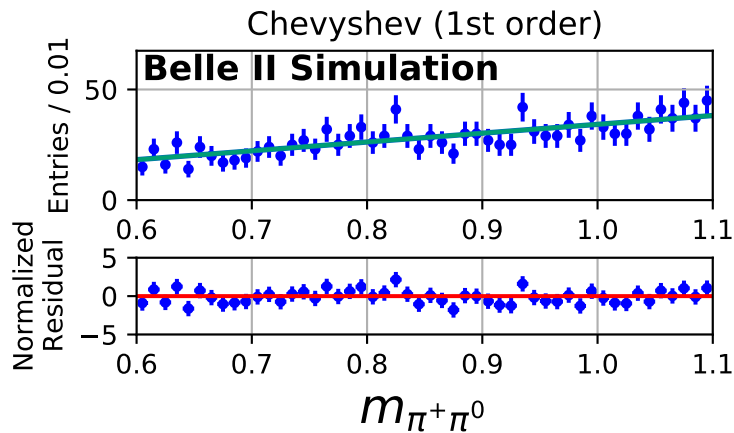
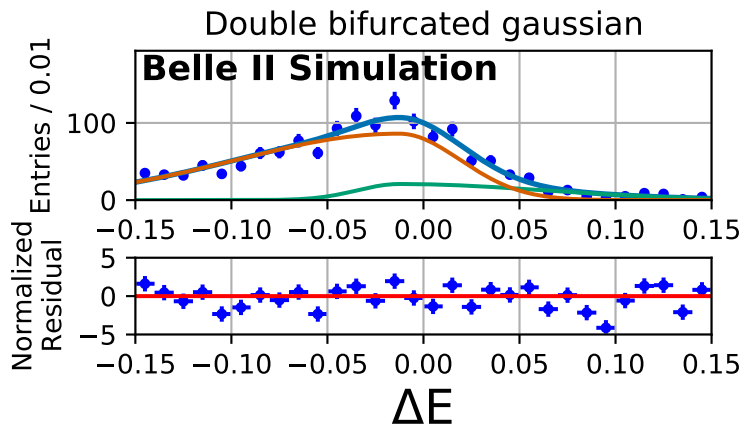
$q\bar{q}$ 

$B\bar{B}$ 

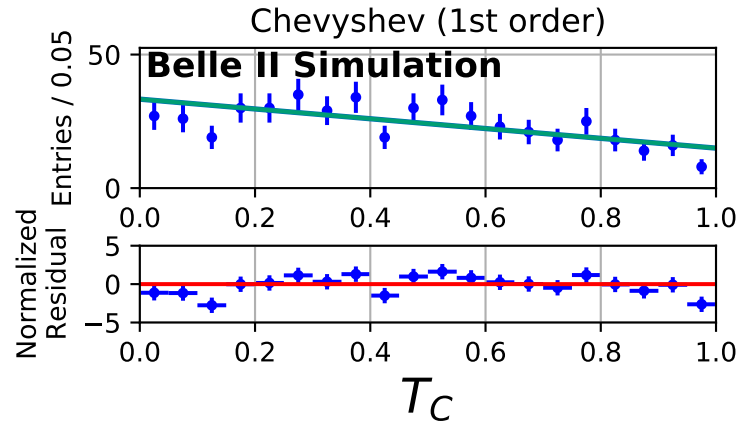
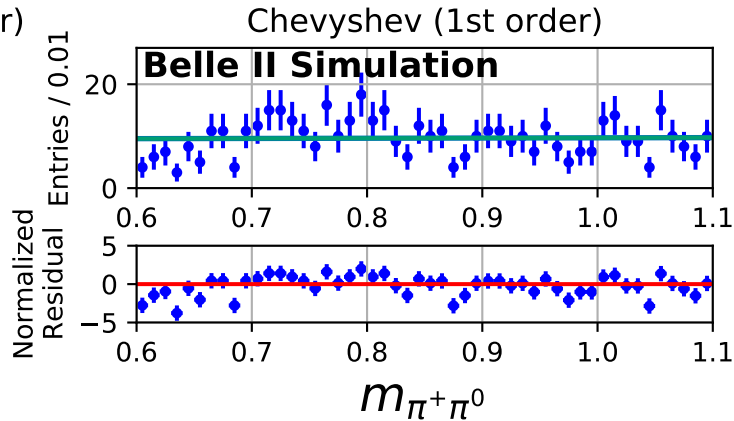
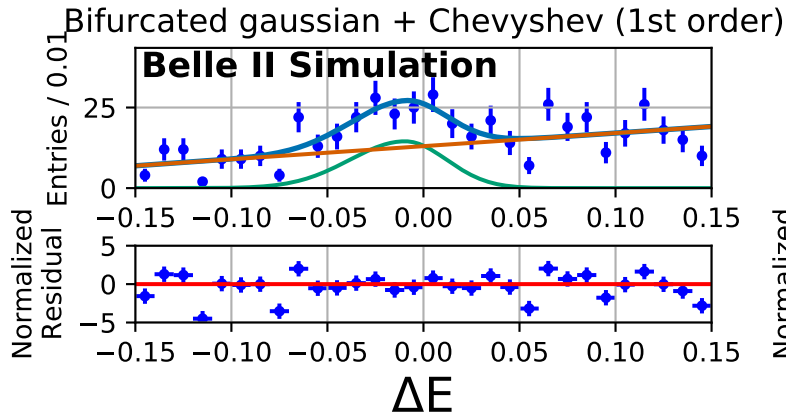
$$B^0 \rightarrow \rho^+ \pi^- \pi^0$$



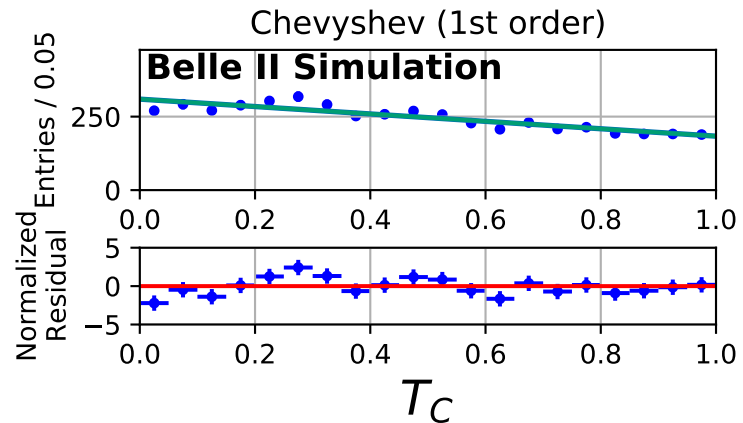
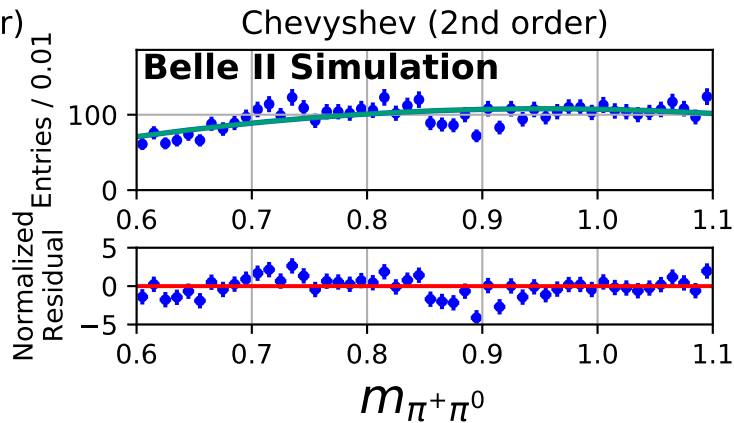
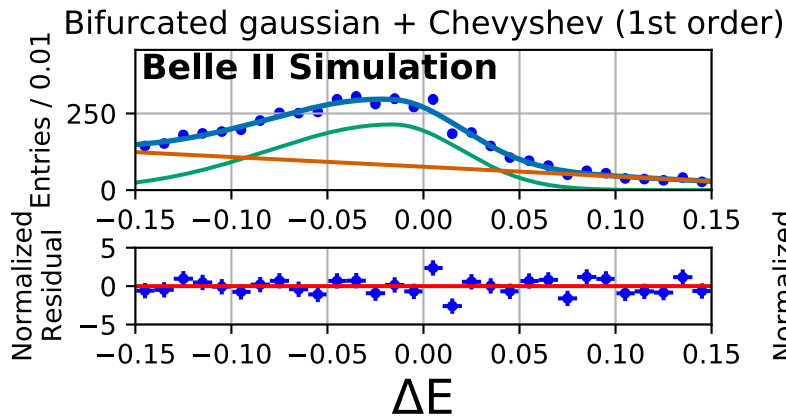
$$B^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$$



$$B^0 \rightarrow a_1^+ \pi^-$$

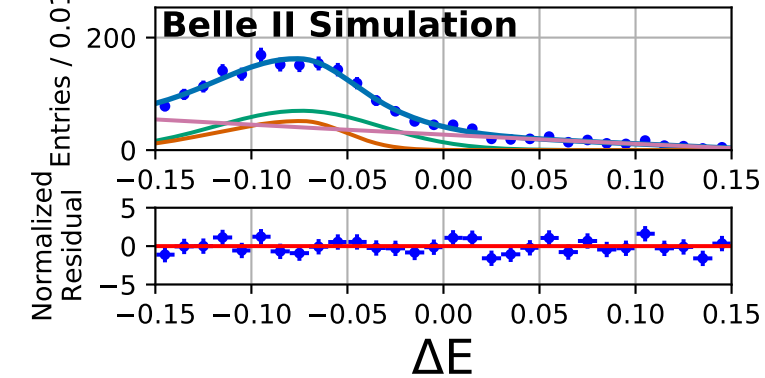


$$B^0 \rightarrow a_1^0 \pi^0$$

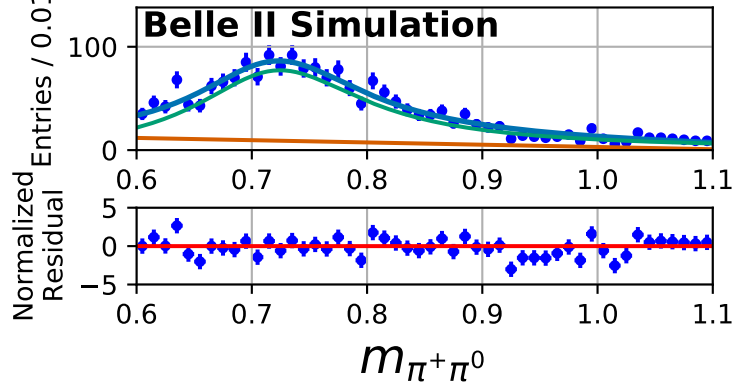




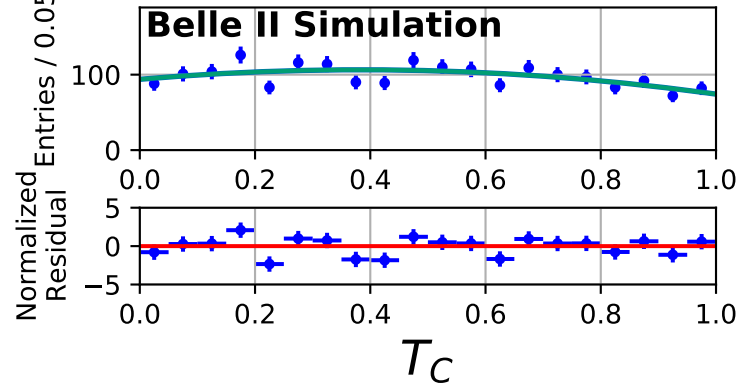
Double bifurcated gaussian + Chevyshev (2nd order)

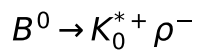


Relativistic Breit-Wigner + chevyshev(1st order)

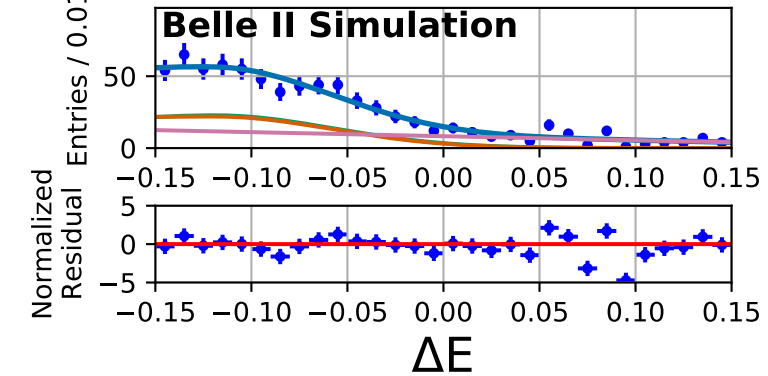


Chevyshev (2nd order)

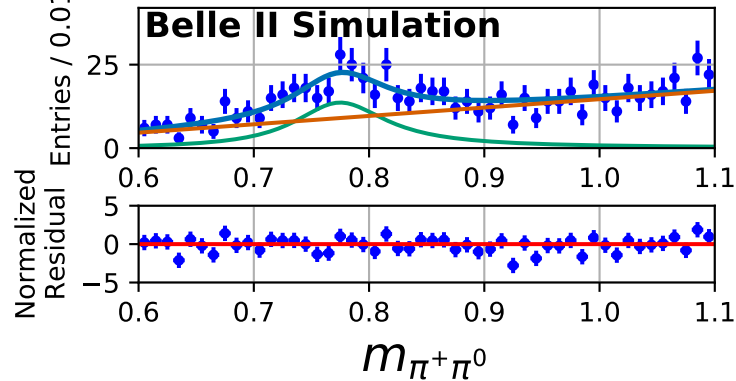




Double bifurcated gaussian + Chevyshev (2nd order)



Relativistic Breit-Wigner + chevyshev(1st order)



Chevyshev (2nd order)

