ILCにおけるトップクォーク電弱結合の研究

ILC 夏の合宿 2017

佐藤 瑶

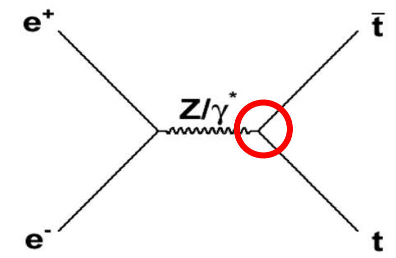
東北大学 素粒子実験グループ

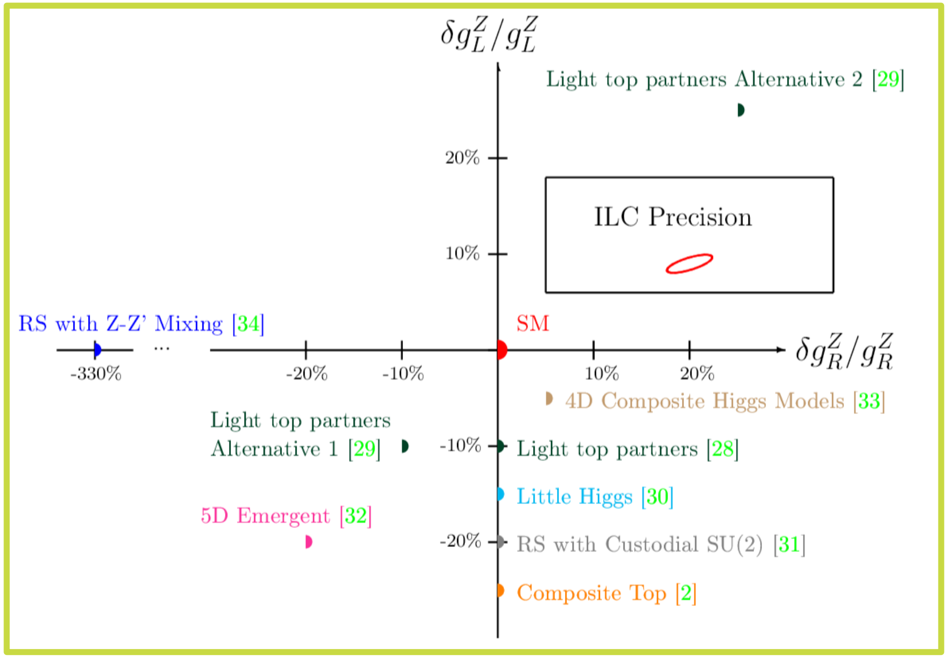
トップクォーク電弱結合について

- トップクォークは標準模型で最も質量の大きい素粒子であり、その質量は電弱スケールにある。電弱対称性破れに強く関連している可能性がある。

トップ電弱結合は新物理を探るための重要な手掛かりのひとつ

$$\mathcal{L}_{\mathrm{int}} = \sum_{v=\gamma,Z} g^{v} \left[V_{l}^{v} \bar{t} \gamma^{l} (F_{1V}^{v} + F_{1A}^{v} \gamma_5) t + \frac{i}{2m_t} \partial_{\nu} V_{l} \bar{t} \sigma^{l\nu} (F_{2V}^{v} + F_{2A}^{v} \gamma_5) t \right]$$





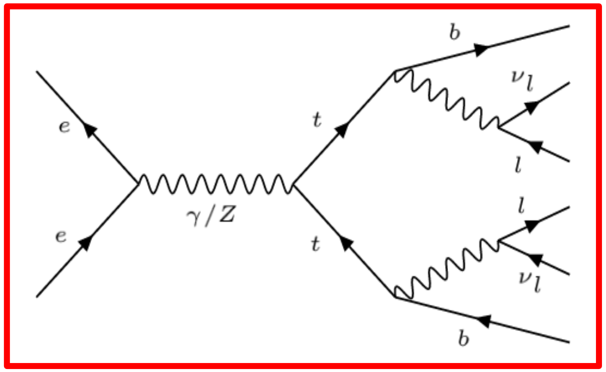
複合モデルなどの新物理模型では、Z粒子とトップクォークの結合定数 g_L^Z, g_R^Z $(= F_{1V}^Z \mp F_{1A}^Z)$が標準模型から10%程度ずれると予言される

→ILCによって模型の同定が期待される

トップクォーク対生成の di-leptonic 状態

トップクォーク対生成の終状態は以下の3つ:

- Fully-hadronic state $\left(e^+e^- \to t\bar{t} \to b\bar{b}q\bar{q}q\bar{q}\right)$ 46.2 %
- Semi-leptonic state $\left(e^+e^- \to t\bar{t} \to b\bar{b}q\bar{q}l\nu\right)$ 43.5%
- **Di-leptonic state $\left(e^+e^- \to t\bar{t} \to b\bar{b}l\nu l\nu\right)$ 10.3%**



Advantage

- 崩壊粒子の角度情報から ttZ/g vertex についての豊富な情報が得られる

→ 形状因子、結合定数に対しより高い感度を持つ

Difficulty

- 二つのニュートリノを含む → トップクォークの再構成が困難

現実的な状況での再構成手法の開発を行っている

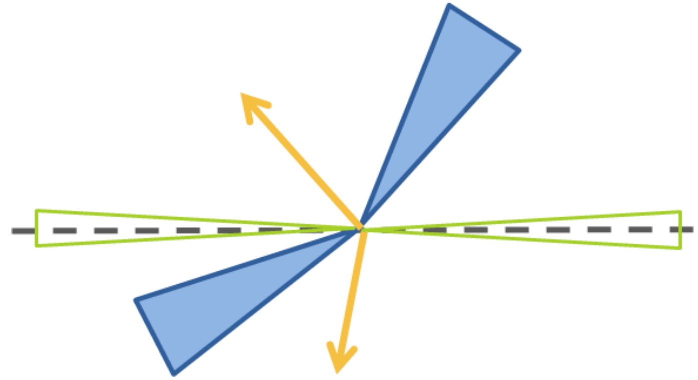
研究のセットアップ

Situation	On / Off
ILD検出器フルシミュレーション	On
ハドロン化の効果	On
トップクォークからのgluon 放出	On
ISR/BS	On
γγ→hadrons 事象	On
背景事象	Off (ongoing)

サンプル	Di-muonic state $e^+e^- \rightarrow b\bar{b}\mu^+\nu\mu^-\bar{\nu}$
$\sqrt{s}$	500 GeV
ビーム偏極 (P_{e^-}, P_{e^+})	(-0.8, +0.3) "Left" / (+0.8, -0.3) "Right"
積分ルミノシティ	500 fb^{-1} (50/50 between Left and Right)
イベント生成	Whizard
検出器シミュレーション	ILD_01_v05 (DBD ver.)

トップクォークの再構成過程

- W粒子から崩壊した**レプトン**を特定する
  - 孤立しているレプトンを選択
  - 粒子数２＆電荷が反対を要求
- **γγ → hadrons** 事象のカット
  - 他の粒子から離れていて、ビーム軸に近い粒子をカット
  - kt algorithm (cf. the Semi-leptonic analysis, R = 1.5)を用いる
- **b-jet** の再構成
  - LCFI Plus (Durham algorithm) を使用
  - Vertex の数などから “b-jet らしさ” が得られる
- **トップクォークの力学的再構成**

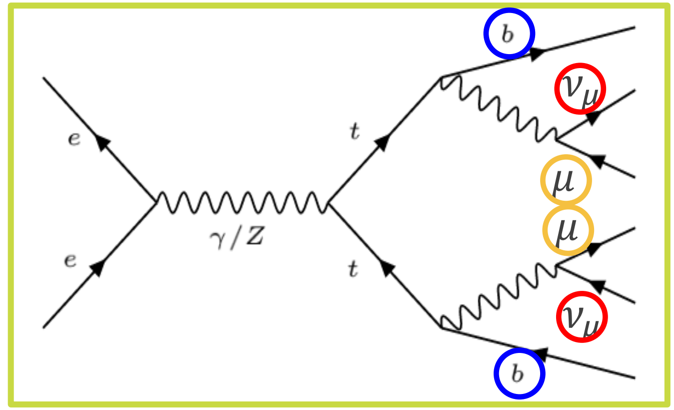


力学的再構成

$e^+e^- \to t\bar{t} \to b\bar{b}\mu^+\nu\mu^-\bar{\nu}$

Measurable
- muon's : $E_{\mu^+}, \theta_{\mu^+}, \phi_{\mu^+}, E_{\mu^-}, \theta_{\mu^-}, \phi_{\mu^-}$
- b-jet's : $E_{b1}, \theta_{b1}, \phi_{b1}, E_{b2}, \theta_{b2}, \phi_{b2}$

Missing
- neutrino's : $E_{\nu}, \theta_{\nu}, \phi_{\nu}, E_{\bar{\nu}}, \theta_{\bar{\nu}}, \phi_{\bar{\nu}}$
- **=> 6個の未知数**



力学的制限を課して未知数を同定する;

- 始状態の制限 : $\left(\sqrt{s}, \vec{P}_{\text{init.}}\right) = \left(500, \vec{0}\right)$
- 質量の制限 : $m_t, m_{\bar{t}}, m_{W^+}, m_{W^-}$

=> 8個の制限 (8 > 6)

比較的求めるのが難しい E_{b1} と E_{b2} は再構成には用いない

→ b-jetの組み合わせを選択するために用いる

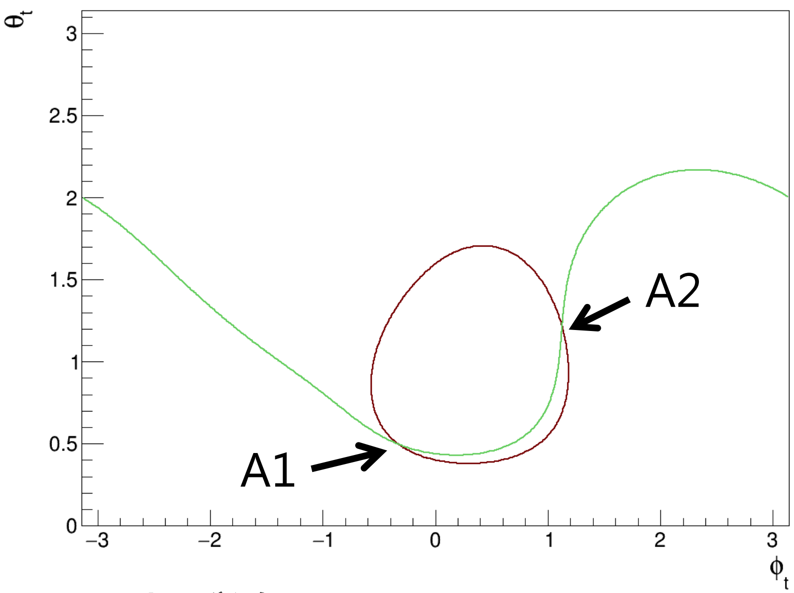
力学的再構成

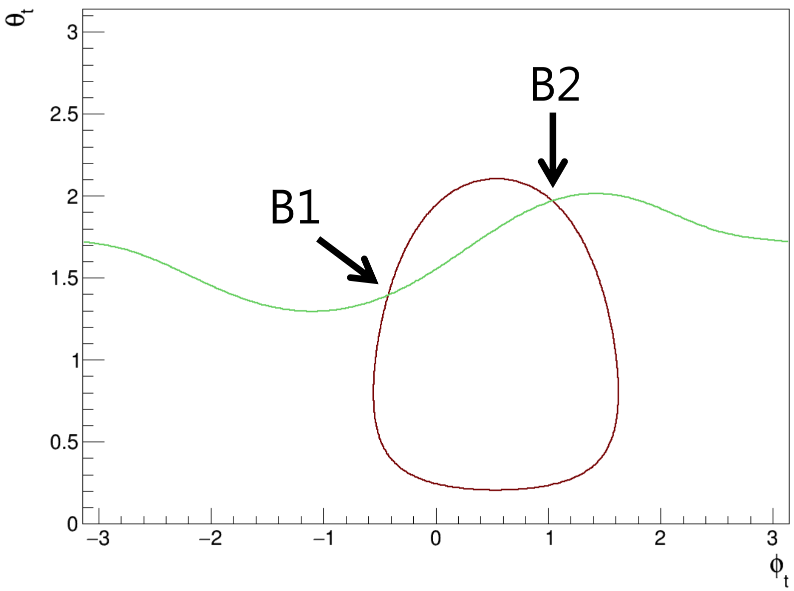
以下の方程式を解くことでトップクォークの方向を決定する

$$E_{\mu^\pm}^{W^\pm \text{ rest frame}}(\theta_t, \phi_t) = m_{W^\pm}/2 \text{ (Red : } \mu^+\text{, Green : } \mu^-\text{)}$$

assignment A (correct), $b1 = b,\ b2 = \bar{b}$

assignment B (wrong), $b1 = \bar{b},\ b2 = b$





方程式が線形でないため、イベントあたり4つ程度の解が存在する

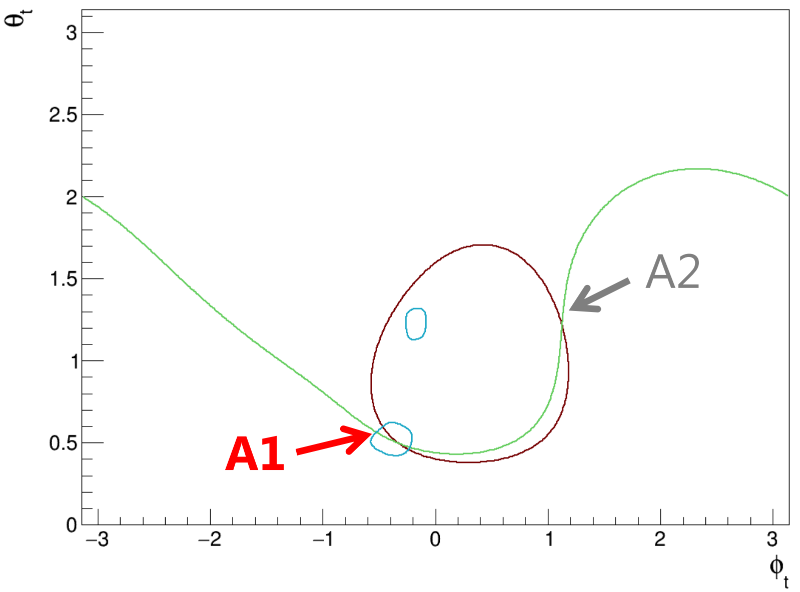
この中から最適解を選択するため E_{b1} と E_{b2}を用いる

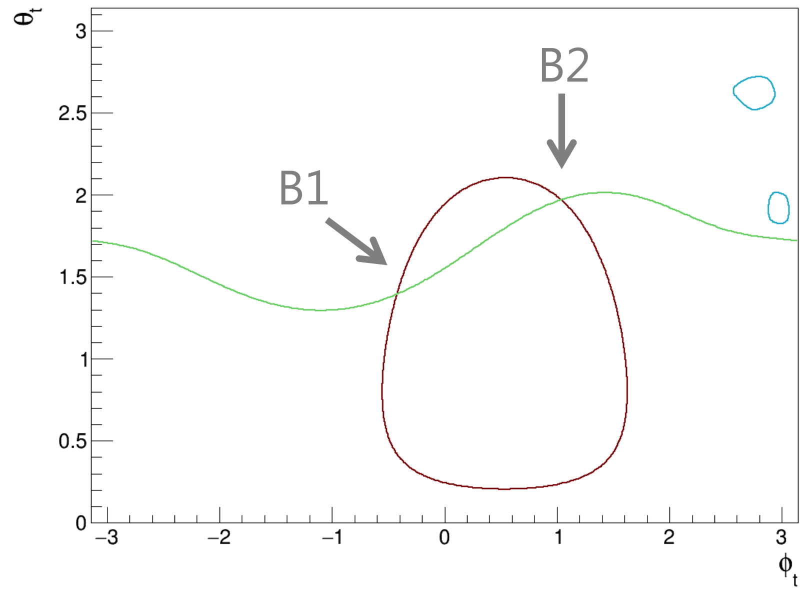
力学的再構成

力学的制限によって得られる値と、b-jet の再構成で得られた値を比較

$$\chi_b^2(\theta_t,\phi_t) \equiv \left(\frac{E_b(\theta_t,\phi_t)-E_b^{\mathrm{meas.}}}{\sigma\left[E_b^{\mathrm{meas.}}\right]}\right)^2 + \left(\frac{E_{\bar{b}}(\theta_t,\phi_t)-E_{\bar{b}}^{\mathrm{meas.}}}{\sigma\left[E_{\bar{b}}^{\mathrm{meas.}}\right]}\right)^2 = 2\ (\text{Blue})$$

assignment A (correct), $b1 = b,\ \ b2 = \bar{b}$ **assignment B** (wrong), $b1 = \bar{b},\ \ b2 = b$





4つの候補のうち**A1**が最も小さいχ_b^2 を持つ → **A1**を最適解として選択！

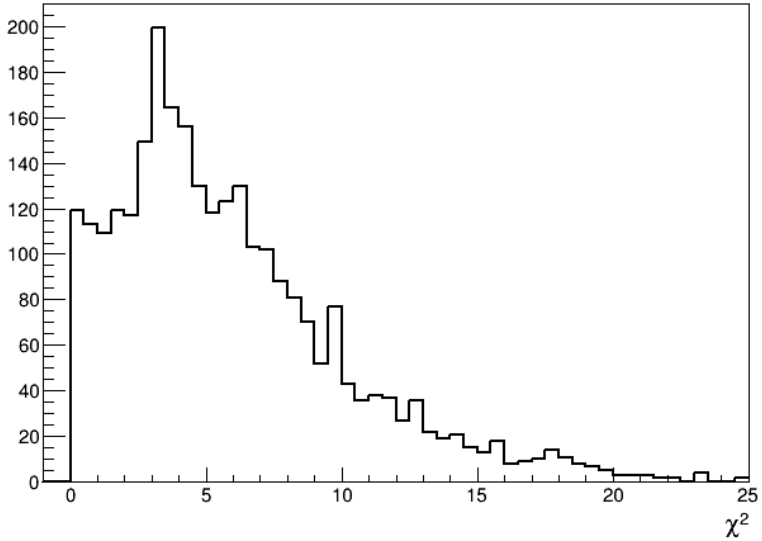
力学的再構成

実験的にはχ^2_{tot} を最小化することで再構成を行う;

$$\chi^2_{tot}(\theta_t, \phi_t) = \chi^2_\mu(\theta_t, \phi_t) + \chi^2_b(\theta_t, \phi_t)$$

where $\chi^2_\mu(\theta_t, \phi_t) \equiv \left(\frac{E_{\mu^+}^{(W^+ \text{ rest frame})}(\theta_t, \phi_t) - m_{W^+}/2}{\sigma\left[E_{\mu^+}^{(W^+ \text{ rest frame})}\right]} \right)^2 + \left(\frac{E_{\mu^-}^{(W^- \text{ rest frame})}(\theta_t, \phi_t) - m_{W^-}/2}{\sigma\left[E_{\mu^-}^{(W^- \text{ rest frame})}\right]} \right)^2$

χ^2_μ が (θ_t, ϕ_t) を決定するのには支配的($\sigma\left[E_\mu^{(W \text{ rest frame})}\right] \ll \sigma[E_b]$のため)



χ^2_{tot} distribution

再構成の精度による事象選択

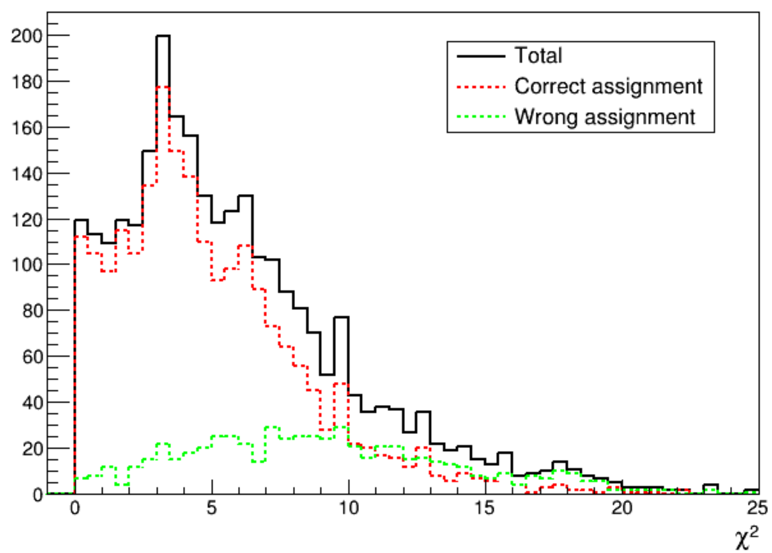
b-jet の組み合わせを間違えてしまうイベントが全体の22%程度

（理由）b-jetの再構成によるエネルギー測定値が真値から離れている

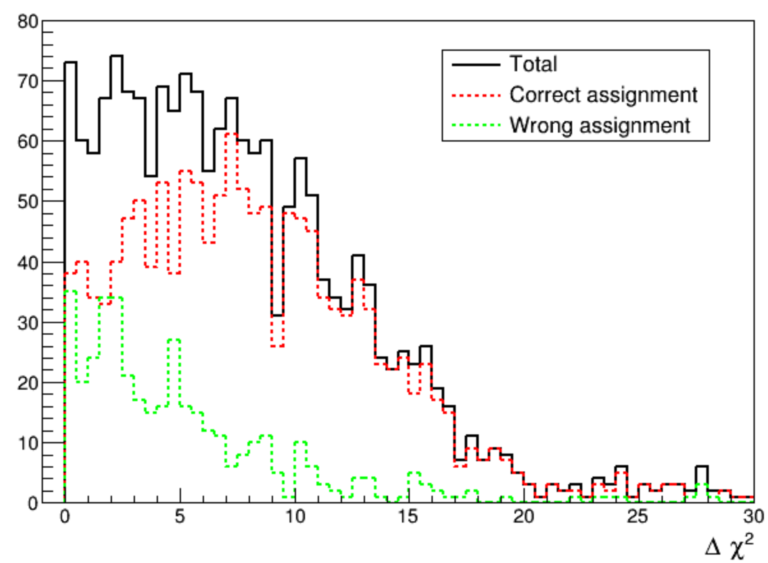
ISRによって初期状態の制限の精度が低くなる　等

再構成の精度が高い事象を選択（χ^2_{tot}の値などを使用）

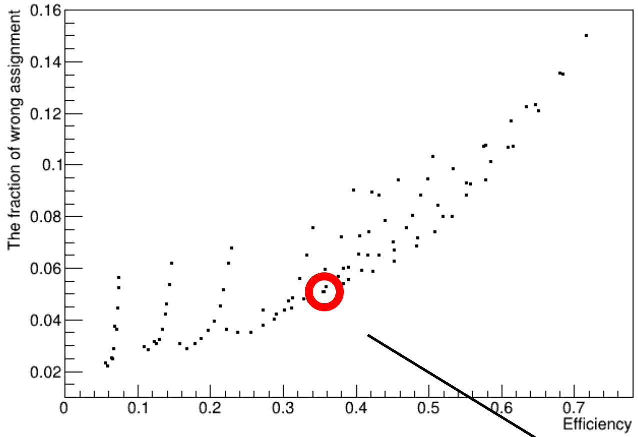
χ^2_{tot} (as mentioned)



$\Delta\chi^2_{tot} = \left|\chi^2_{tot,\mathrm{assignment\,A}} - \chi^2_{tot,\mathrm{assignment\,B}}\right|$

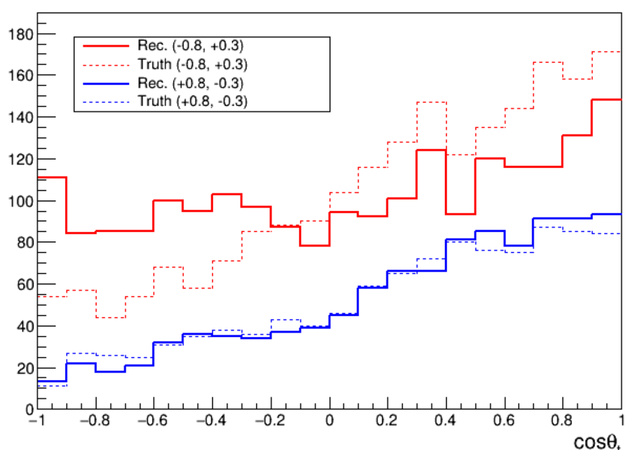


再構成の精度による事象選択



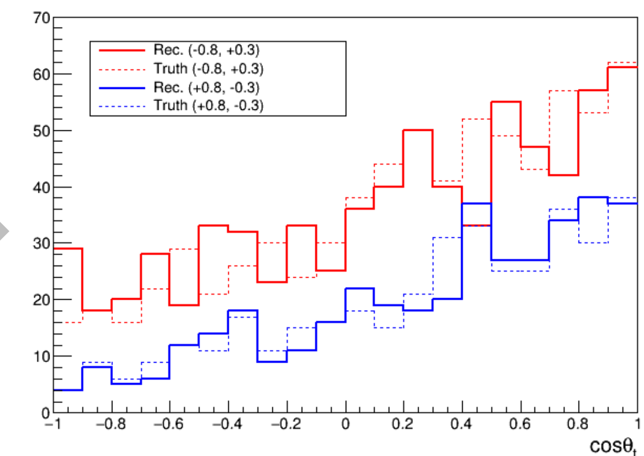
Efficiency vs. F_{wrong}

Quality cutの値を変化させて、組間違いの比率と検出効率の変化を調べる



F_{wrong} = 22 %, efficiency = 77 %

Quality cut

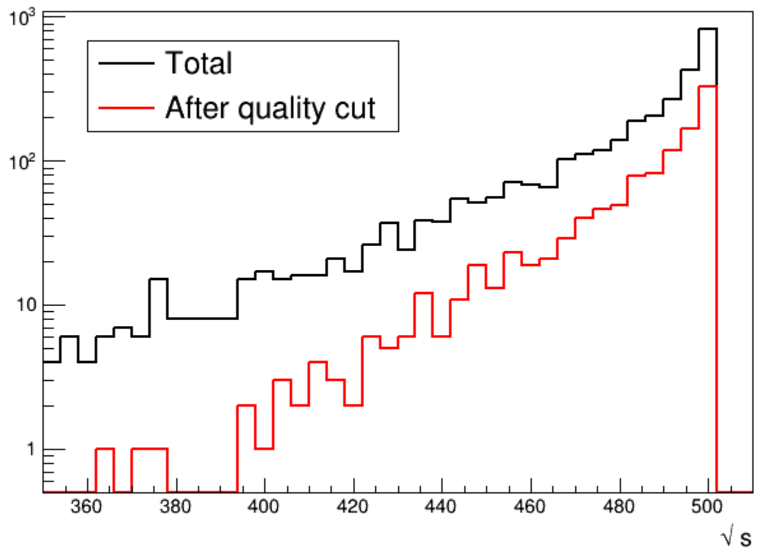


F_{wrong} = 5.0 %, efficiency = 28 %

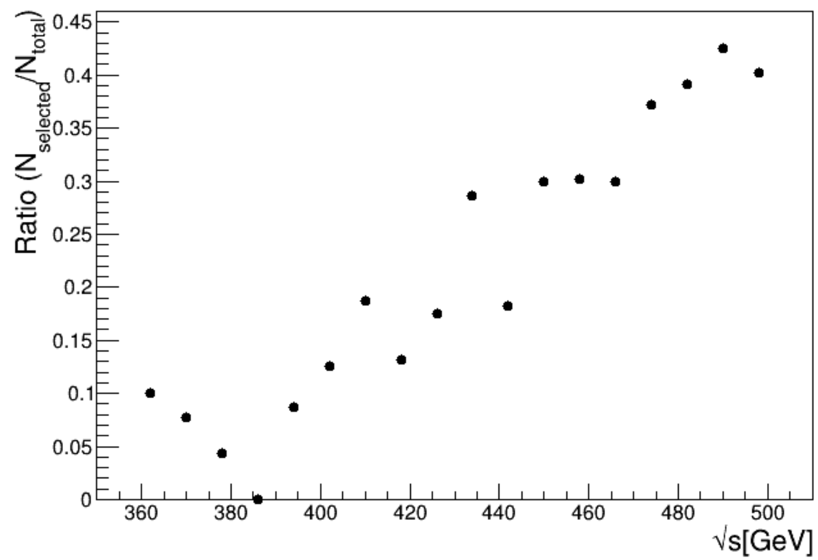
ISRによる$\sqrt{s}$ への影響

力学的再構成のために始状態の制限を課している

→ ISRによって低い$\sqrt{s}$ のイベントは再構成の精度が低い



Luminosity spectrum
Black : Total events, Red : After quality cut



Ratio of luminosity spectrum (Red/Black)

Quality cut によってイベント数を抑制できるが、まだtail が残る

ISRによる$\sqrt{s}$ への影響

ビーム軸に光子が放出されるとしてフィットを行う

$$e^+e^- \to b\bar{b}\mu^+\nu\mu^-\bar{\nu} + \gamma_{\mathrm{ISR}}$$

→ 新たにパラメータを導入, K

- $|K| = E_\gamma/250$, hence $\sqrt{s} = 500 * \sqrt{1-|K|}$
- γ が$e^-(e^+)$ から放出されれば、 K は正の値 (負の値).

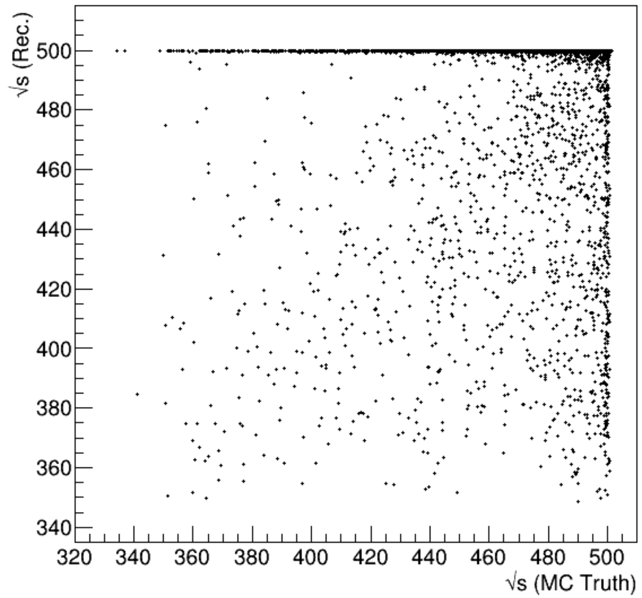
$\chi^2_{tot}{}'(\theta_t, \phi_t, K)$ を最小化する;

$\chi^2_{tot}{}'(\theta_t, \phi_t, K) = \chi^2_{tot}(\theta_t, \phi_t, K) - 2\log \mathrm{PDF}_K(K)$

→ Truth と再構成の値に相関無し

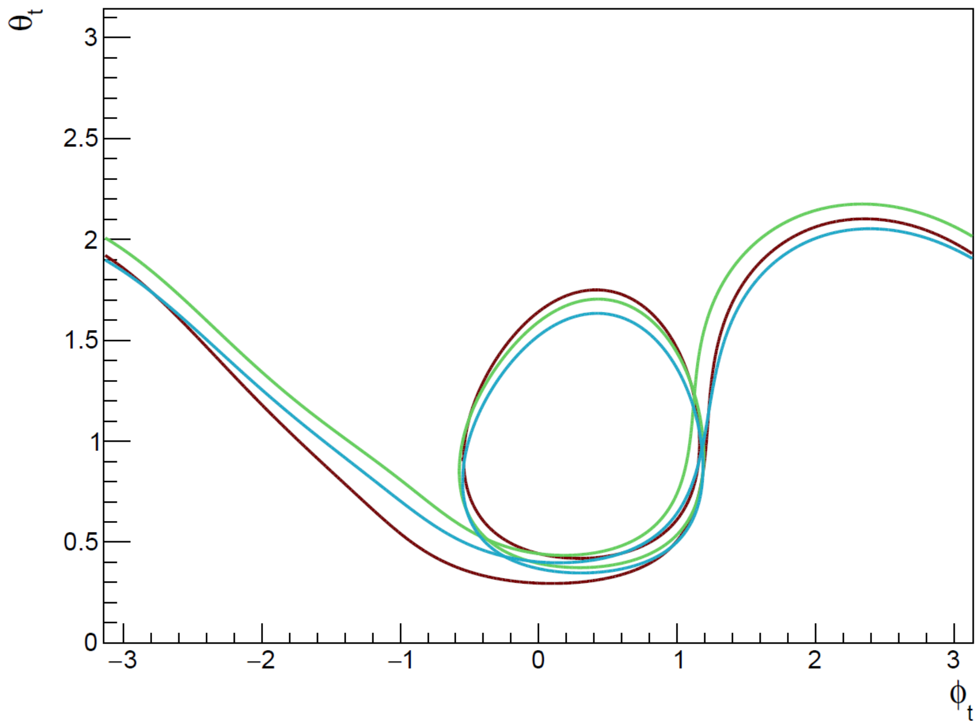
→ 制限が十分でない

現在、$K = 0$ に固定 (i.e. use $\chi^2_{tot}(\theta_t, \phi_t)$)



$\sqrt{s}$ (MC Truth vs. Rec.)

ISRによる$\sqrt{s}$ への影響



Solution of $E_\mu(\phi_t, \theta_t; K) = m_W/2$

$K = -0.1$

$K = 0$

$K = +0.1$

Kを変化させても解がある

→ (ϕ_t, θ_t, K) では解が無数に存在する

→ $\chi_b^2(\phi_t, \theta_t, K)$ では選択するだけの精度が無い(？)

ヘリシティ角の計算

力学的再構成によってニュートリノを含む全粒子の4元運動量が求まる

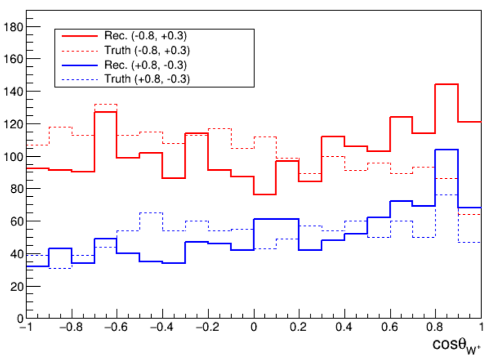
トップクォークの偏極の情報を持ちうる以下の9つのヘリシティ角を計算

$$\theta_t, \theta_{W^+}^{t\ \mathrm{frame}}, \phi_{W^+}^{t\ \mathrm{frame}}, \theta_{\mu^+}^{W^+\ \mathrm{frame}}, \phi_{\mu^+}^{W^+\ frame}, \theta_{W^-}^{\bar{t}\ frame}, \phi_{W^-}^{\bar{t}\ frame}, \theta_{\mu^-}^{W^-frame}, \phi_{\mu^-}^{W^-frame}$$

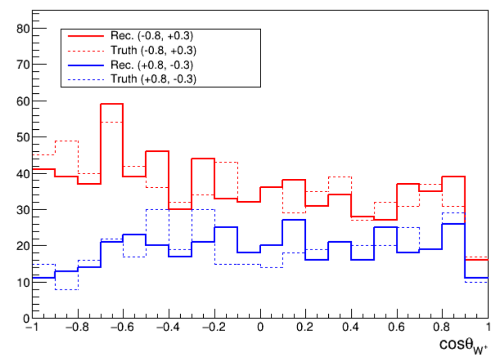
(G. L. Kane, G. A. Ladinsky, C.-P. Yuan, Phys.Rev. D45 (1992) 124-141)

eg)

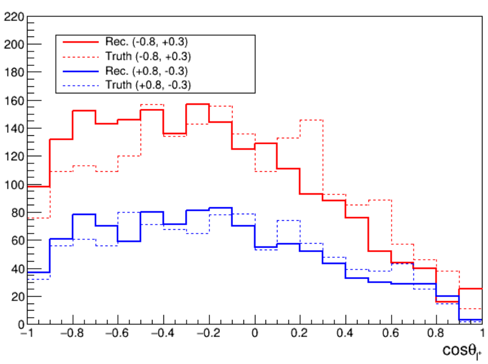
$\cos\theta_{W^+}^{t\ \mathrm{frame}}$

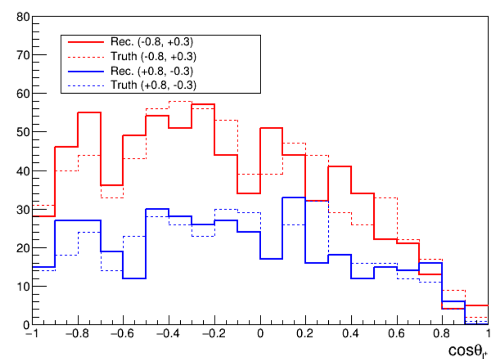


Quality cut



$\cos\theta_{\mu^+}^{W^+\ \mathrm{frame}}$





Matrix Element 法による解析

ヘリシティ角と全断面積から、形状因子の測定を行う。

Matrix element 法

$$-2\log L(F)\left(=\chi^2(F)\right) = -2\left(\sum_{e=1}^{N_{\text{event}}} \log|M|^2(\Phi_e, F) - N(F)\right)$$

$|M|^2$: the full matrix element, Φ_e : the 9 helicity angles, F : the form factors,
$N(F)$: the expected number of events.

$\chi^2(F)$ を最小化する → その過程で次の変数が自動的に導入される;

$$\omega_i(\Phi_e) = \frac{1}{|M|^2(\Phi_e)} \frac{\partial |M|^2(\Phi_e)}{\partial F_i}\bigg|_{F\text{ at SM}}, \qquad \Omega_i = \frac{1}{N}\frac{\partial N}{\partial F_i}\bigg|_{F\text{ at SM}}$$

測定結果は $\omega_i(\Phi_e)$ と Ω_i で記述できる

- $\delta F_i\ (= F_{\text{fit}} - F_{\text{SM}}) \simeq \frac{<\omega_i - \Omega_i>}{<(\omega_i - \Omega_i)^2>}$
- covariance matrix, V_{ij} ;

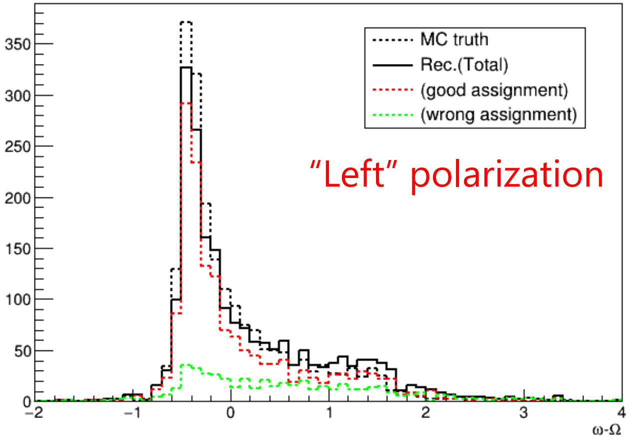
$$V_{ij}^{-1} = N_{\text{event}} < (\omega_i - \Omega_i)(\omega_j - \Omega_j) >$$

形状因子の測定精度：CP保存

$\delta\tilde{F}_{1V}^{\gamma}$ の測定 (その他のパラメータはSMに固定)

Before the quality cut (total efficiency 77%)

$$\delta\tilde{F}_{1V}^{\gamma} = 0.0223 \pm 0.0066,\ \chi^2_{\rm test} = 11.4 \Leftrightarrow 0.07\%\ \mathrm{CL}$$



The histogram of $\omega - \Omega$ for $\delta\tilde{F}_{1V}^{\gamma}$
(before quality cut)

組間違いのイベントの$\omega - \Omega$ 分布(Green)

- 大きいほうにシフト→バイアスの原因
- 広がりが大きい→精度をover estimate

* $\chi^2_{\rm test} = \sum \delta F_i V_{ij}^{-1} \delta F_j$: the chi-square test

形状因子の測定精度：CP保存

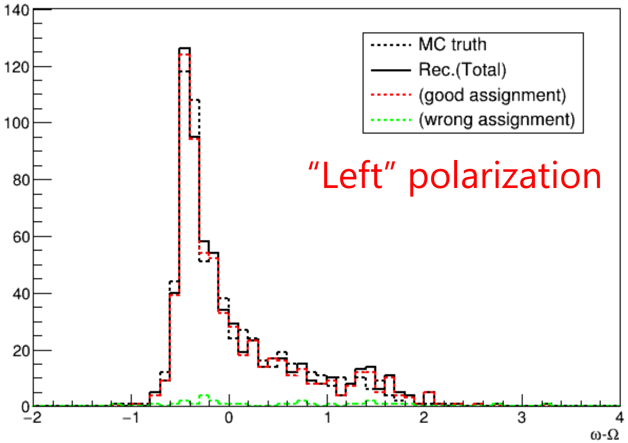
$\delta\tilde{F}_{1V}^{\gamma}$ の測定 (その他のパラメータはSMに固定)

Before the quality cut (total efficiency 77%)

$$\delta\tilde{F}_{1V}^{\gamma} = 0.0223 \pm 0.0066,\ \ \chi^2_{\mathrm{test}} = 11.4 \Leftrightarrow 0.07\%\ \mathrm{CL}$$

After the quality cut (total efficiency 28%)

$$\delta\tilde{F}_{1V}^{\gamma} = 0.0075 \pm 0.0115,\ \ \chi^2_{\mathrm{test}} = 0.43 \Leftrightarrow 51\%\ \mathrm{CL}$$



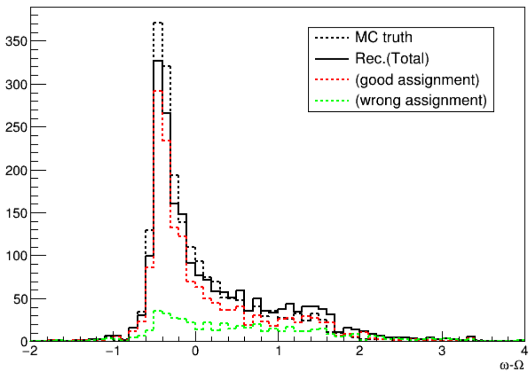
The histogram of $\omega - \Omega$ for $\delta\tilde{F}_{1V}^{\gamma}$
(after quality cut)

再構成とMC truthの分布が一致
→ バイアスが消えた
→ 統計エラーは大きくなる

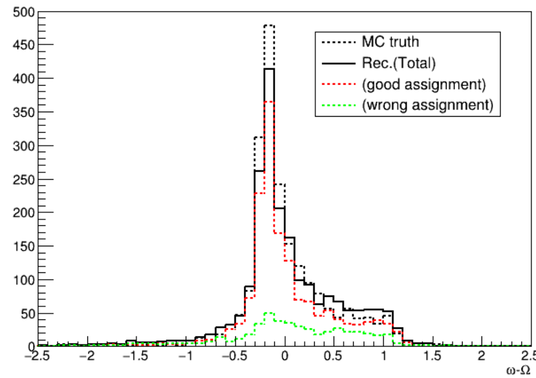
$\omega - \Omega$ 分布 (bef. the quality cut)

"Left" polarization

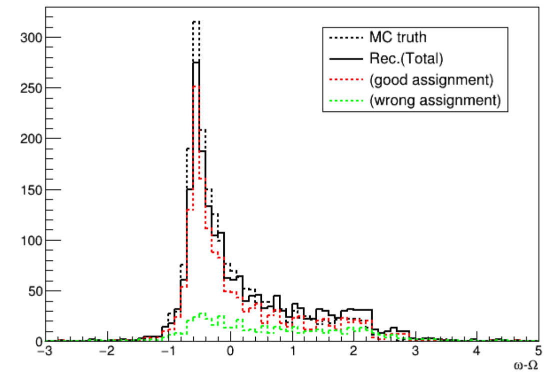
$\left(\delta\tilde{F}^{\gamma}_{1V}\right)$



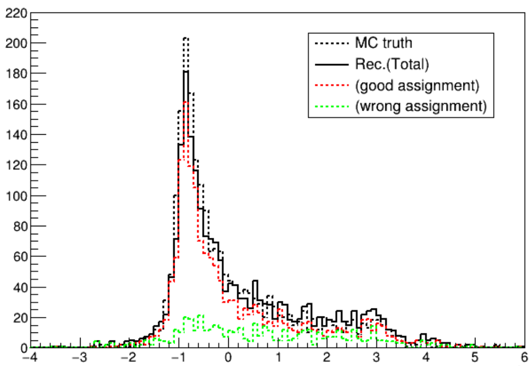
$\left(\delta\tilde{F}^{Z}_{1V}\right)$



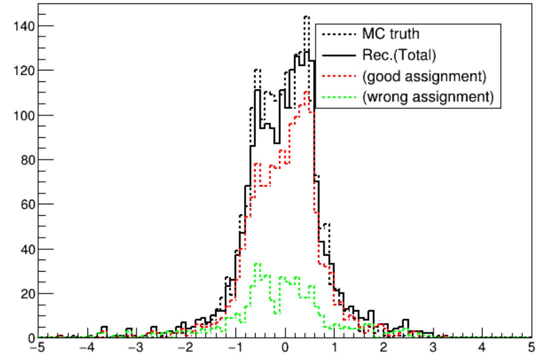
$\left(\delta\tilde{F}^{\gamma}_{1A}\right)$



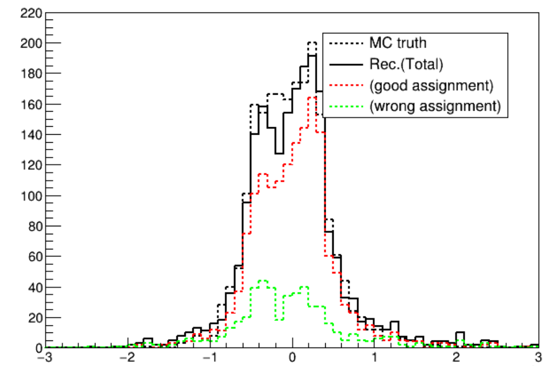
$\left(\delta\tilde{F}^{Z}_{1A}\right)$



$\left(\delta\tilde{F}^{\gamma}_{2V}\right)$



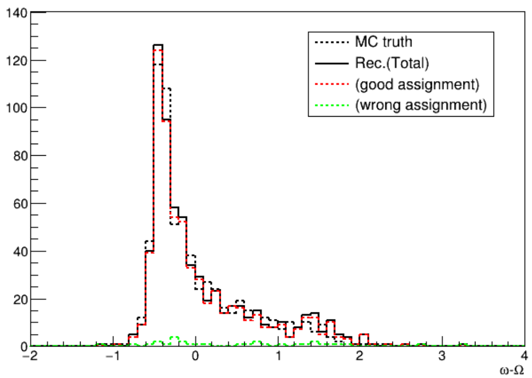
$\left(\delta\tilde{F}^{Z}_{2V}\right)$



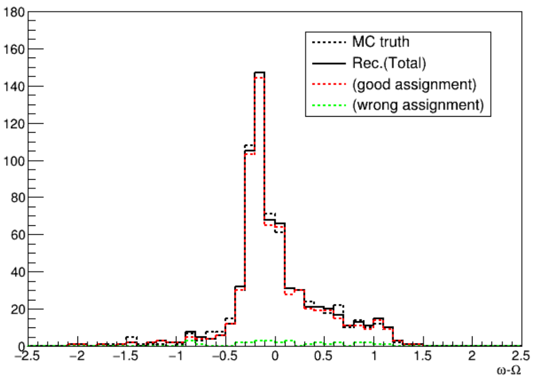
$\omega - \Omega$ 分布 (aft. the quality cut)

"Left" polarization

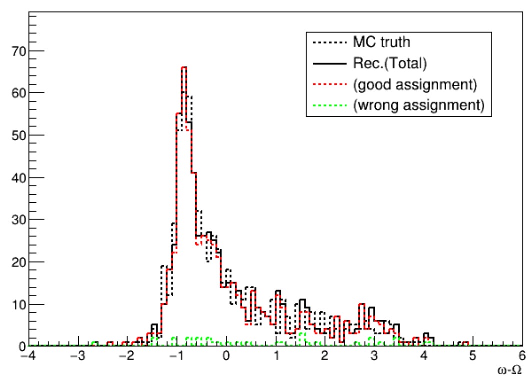
$(\delta \tilde{F}_{1V}^{\gamma})$



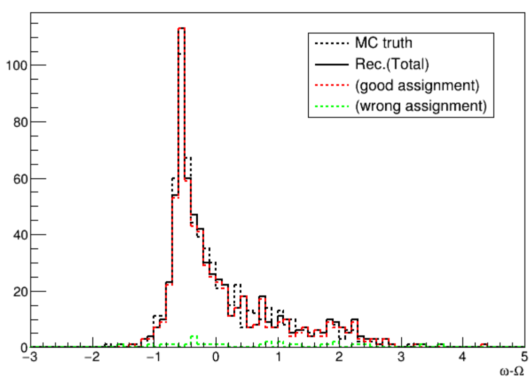
$(\delta \tilde{F}_{1V}^{Z})$



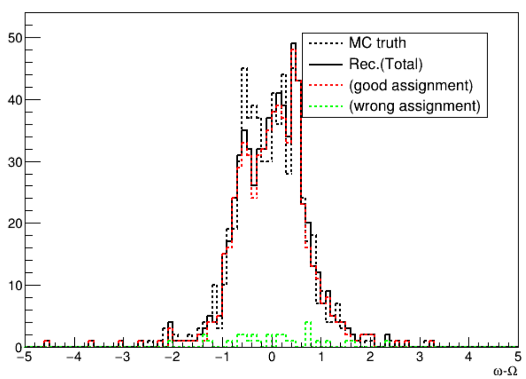
$(\delta \tilde{F}_{1A}^{\gamma})$



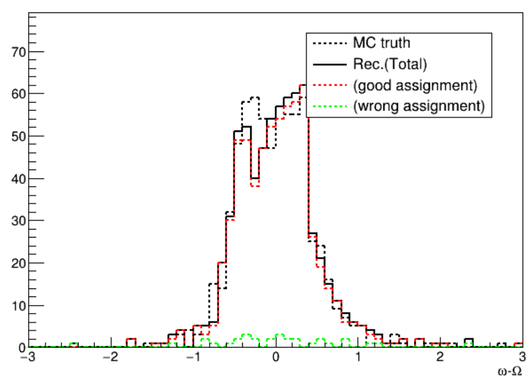
$(\delta \tilde{F}_{1A}^{Z})$



$(\delta \tilde{F}_{2V}^{\gamma})$



$(\delta \tilde{F}_{2V}^{Z})$



形状因子の測定精度：CP保存

6つのCP保存の形状因子の同時測定

Before quality cut (total efficiency 77%)

$$\begin{bmatrix} \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{1V}^{\gamma} & +0.0188 \pm 0.0089 \\ \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{1V}^{Z} & +0.0293 \pm 0.0161 \\ \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{1A}^{\gamma} & +0.0280 \pm 0.0133 \\ \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{1A}^{Z} & +0.2250 \pm 0.0202 \\ \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{2V}^{\gamma} & -0.0246 \pm 0.0260 \\ \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{2V}^{Z} & +0.1448 \pm 0.0435 \end{bmatrix}$$

$$\chi^2_{\text{test}} = 166 \Leftrightarrow \sim 0\%\ \text{CL}$$

After quality cut (total efficiency 28%)

$$\begin{bmatrix} \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{1V}^{\gamma} & +0.0088 \pm 0.0154 \\ \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{1V}^{Z} & +0.0339 \pm 0.0270 \\ \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{1A}^{\gamma} & +0.0233 \pm 0.0221 \\ \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{1A}^{Z} & +0.0704 \pm 0.0340 \\ \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{2V}^{\gamma} & +0.0788 \pm 0.0461 \\ \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{2V}^{Z} & +0.1244 \pm 0.0762 \end{bmatrix}$$

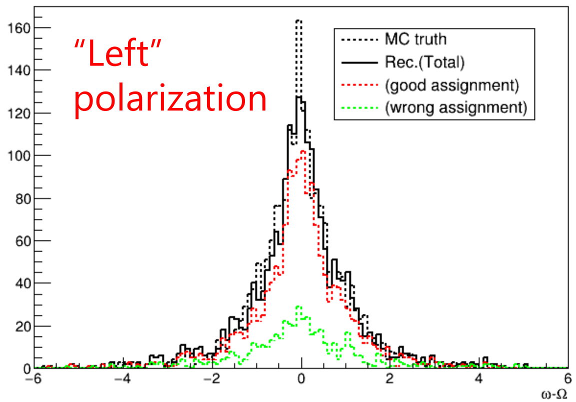
$$\chi^2_{\text{test}} = 10.0 \Leftrightarrow 12.5\%\ \text{CL}$$

形状因子の測定精度：CP非保存

$Re\delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma}$ の測定 (その他のパラメータはSMに固定)

Before the quality cut (total efficiency 77%)

$$Re\delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma} = -0.0172 \pm 0.0185,\ \ \chi^2_{\mathrm{test}} = 0.87 \Leftrightarrow 35\%\ \mathrm{CL}$$



The histogram of $\omega - \Omega$ for $Re\delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma}$ (before quality cut)

組間違いのイベントの$\omega - \Omega$ 分布(Green)

- 0 にピークを持つ

  → バイアスに対する明らかな効果を持たない

  (→ χ^2_{test} はミスリーディング)

  → 新物理の効果を薄めてしまう可能性あり

  （Non 0の持つサンプルでの検証が必要）

形状因子の測定精度：CP非保存

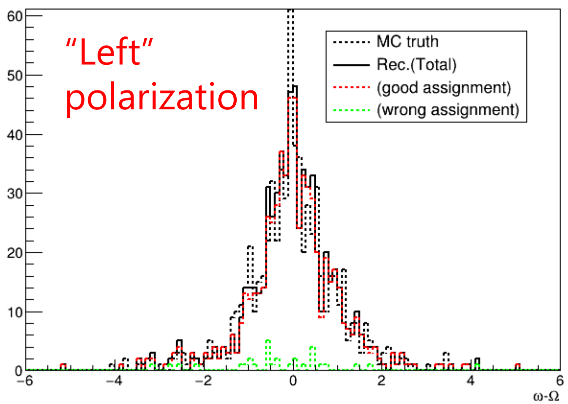
$Re\delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma}$ の測定 (その他のパラメータはSMに固定)

Before the quality cut (total efficiency 77%)

$$Re\delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma} = -0.0172 \pm 0.0185, \quad \chi_{\text{test}}^2 = 0.87 \Leftrightarrow 35\%\ \text{CL}$$

After the quality cut ($\chi_{tot}^2 < 5$ & $\Delta\chi_{tot}^2 > 6$, total efficiency 28%)

$$Re\delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma} = -0.0052 \pm 0.0287, \quad \chi_{\text{test}}^2 = 0.034 \Leftrightarrow 85\%\ \text{CL}$$



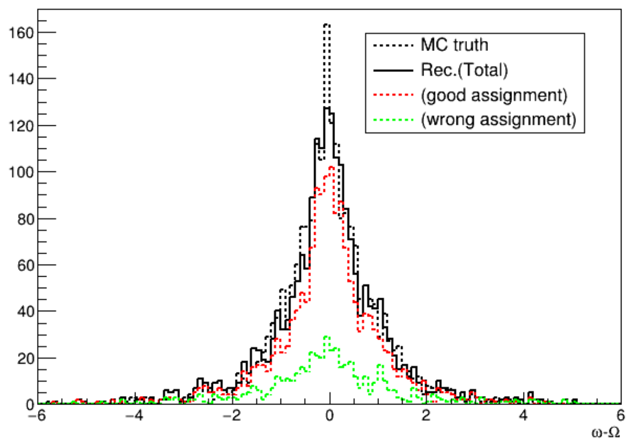
The histogram of $\omega - \Omega$ for $Re\delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma}$ (after quality cut)

再構成とMC truthの分布が一致
（Greenの分布が消えた）

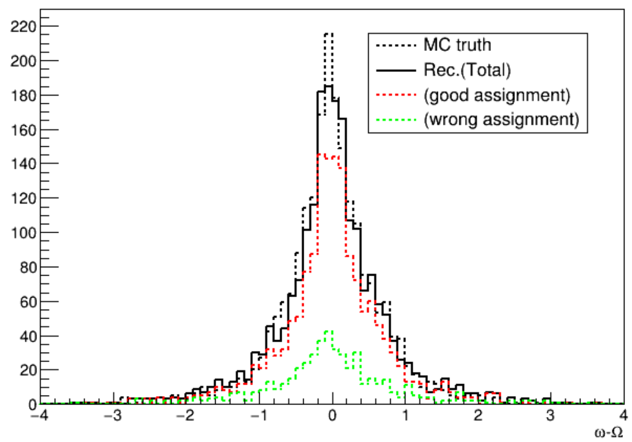
$\omega-\Omega$ 分布 (bef. the quality cut)

"Left" polarization

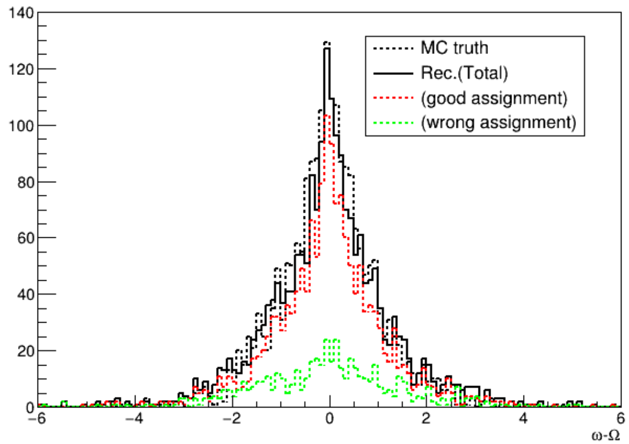
$\left(Re\delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma}\right)$



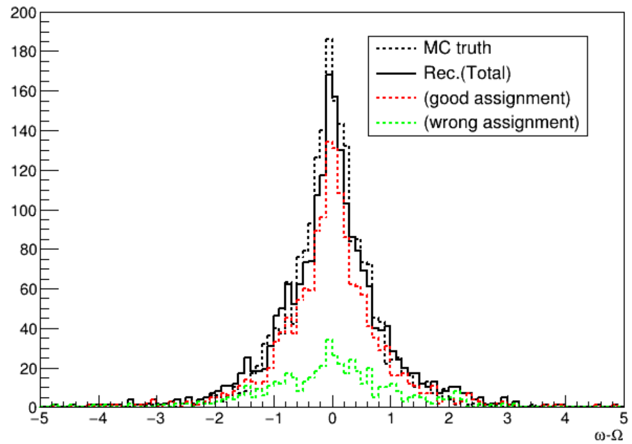
$\left(Re\delta\tilde{F}_{2A}^{Z}\right)$



$\left(Im\delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma}\right)$



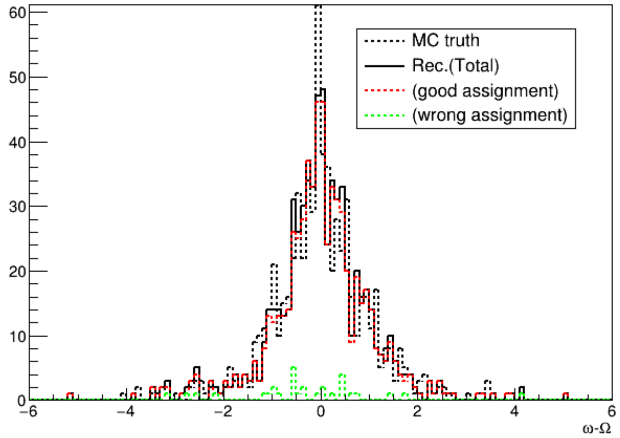
$\left(Im\delta\tilde{F}_{2A}^{Z}\right)$



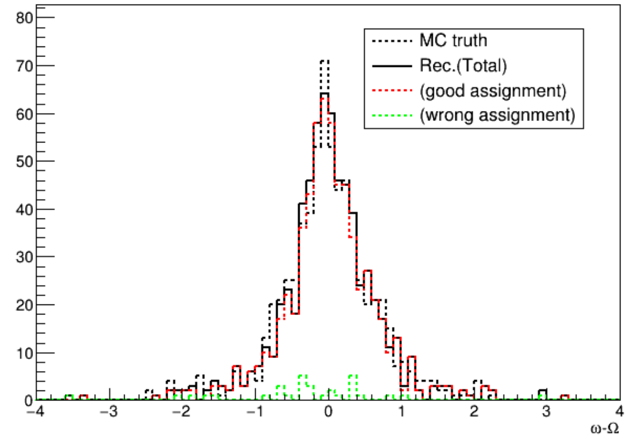
$\omega - \Omega$ 分布 (aft. the quality cut)

"Left" polarization

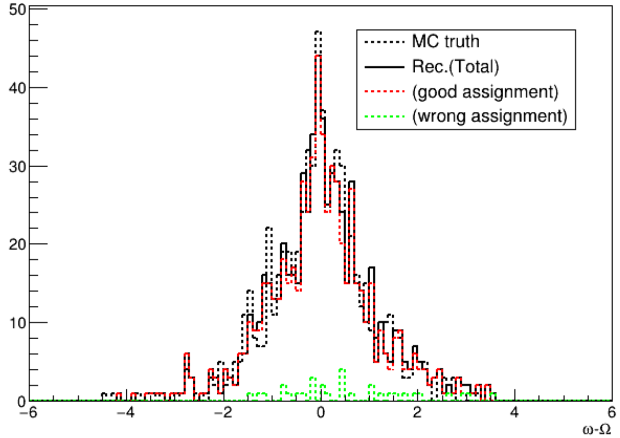
$\left(Re\delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma}\right)$



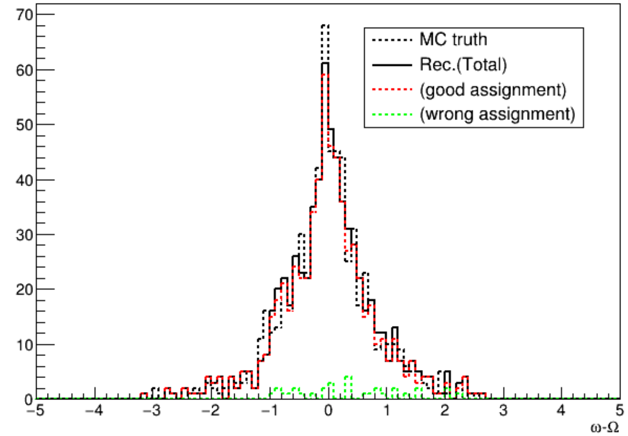
$\left(Re\delta\tilde{F}_{2A}^{Z}\right)$



$\left(Im\delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma}\right)$



$\left(Im\delta\tilde{F}_{2A}^{Z}\right)$



形状因子の測定精度：CP非保存

4つのCP非保存の形状因子の同時測定

Before quality cut (total efficiency 77%)

$$\begin{bmatrix} \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma} & -0.0196 \pm 0.0185 \\ \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{2A}^{Z} & +0.0307 \pm 0.0357 \\ \mathcal{I}m\ \delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma} & -0.0324 \pm 0.0177 \\ \mathcal{I}m\ \delta\tilde{F}_{2A}^{Z} & +0.0111 \pm 0.0239 \end{bmatrix}$$

$$\chi^2_{\mathrm{test}} = 5.0 \Leftrightarrow 29\%\ \mathrm{CL}$$

After quality cut ($\chi^2_{tot} < 5$ & $\Delta\chi^2_{tot} > 6$, total efficiency 28%)

$$\begin{bmatrix} \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma} & -0.0022 \pm 0.0287 \\ \mathcal{R}e\ \delta\tilde{F}_{2A}^{Z} & +0.0423 \pm 0.0567 \\ \mathcal{I}m\ \delta\tilde{F}_{2A}^{\gamma} & -0.0026 \pm 0.0300 \\ \mathcal{I}m\ \delta\tilde{F}_{2A}^{Z} & +0.0148 \pm 0.0419 \end{bmatrix}$$

$$\chi^2_{\mathrm{test}} = 0.64 \Leftrightarrow 96\%\ \mathrm{CL}$$

まとめ

- **Di-leptonic 終状態を用いた解析では、多くの角度情報を再構成できるため、形状因子に対して高い感度が得られる**
- **力学的制限によるトップクォークの再構成**
  - Quality cut によってb-jet の組間違いのイベントを抑制し、角度分布を正しく再構成することが可能である
- **Matrix element 法による形状因子の測定**
  - CP保存 : Quality cut によってバイアスが消滅
  - CP非保存 : 組間違いのイベントはバイアスに対して明らかな効果を持たない（Non 0のCPV効果を持つサンプルで検証が必要）。

今後の課題：background study

- $bb\tau\nu\mu\nu \rightarrow bb(\mu\nu\nu)\nu\mu\nu$ の取り扱いを考える

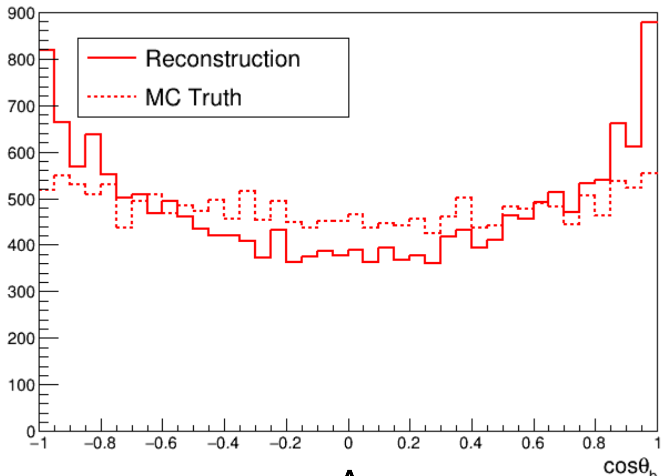
Back up

Suppression of γγ → hadrons & b-jet reconstruction

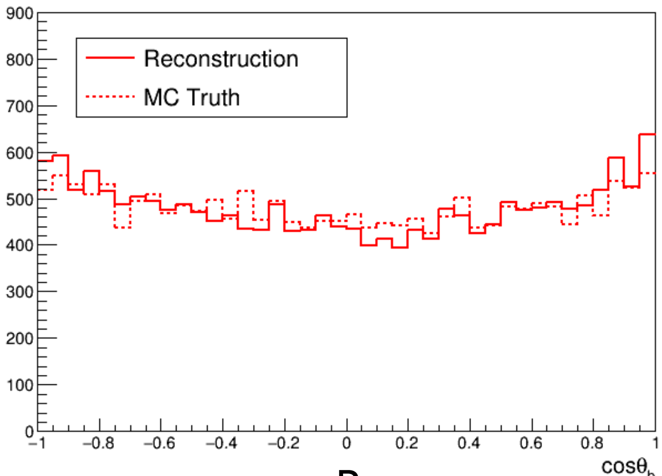
Particles from γγ → hadrons are mostly emitted along the beam direction. The direction of the b-jet is affected by these particles.

Suppress these particles using the kt algorithm (R=1.5).

→ The direction of the b-jet is improved.



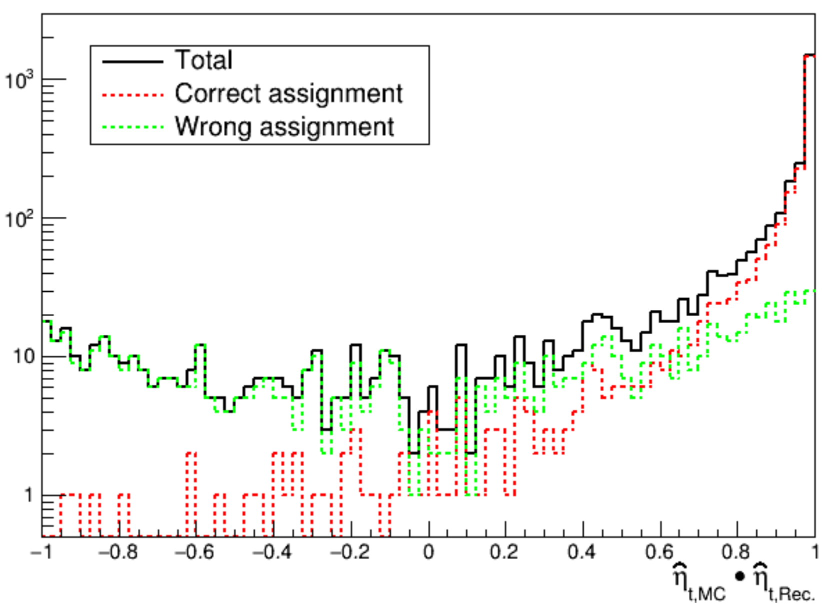
A

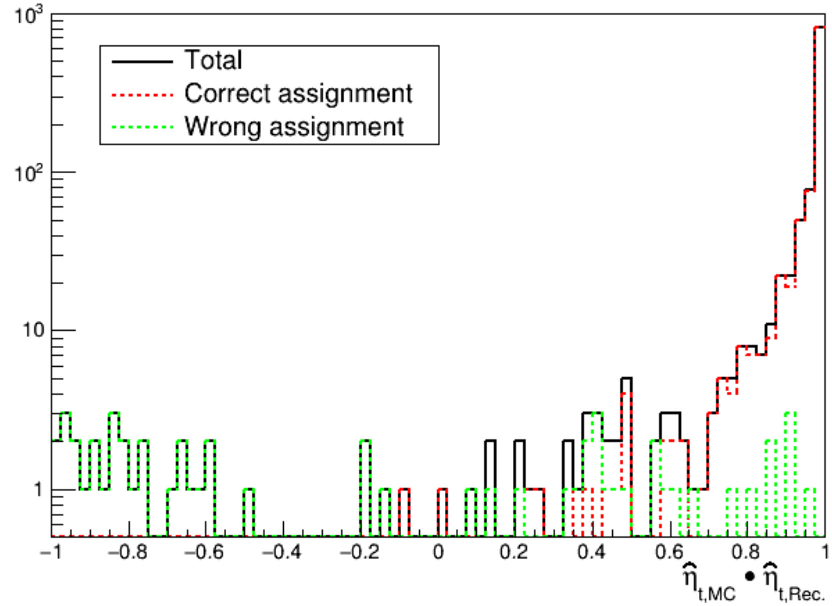


B

The polar angle distribution b-jets. A: without the suppression of γγ →hadrons, B: with the suppression of γγ → hadrons

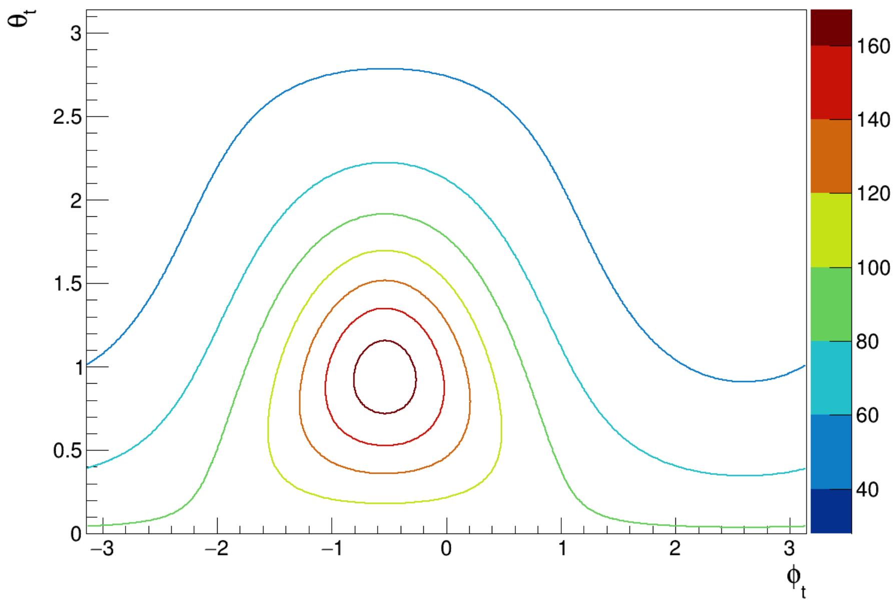
Scalar product, $\hat{\eta}_{t,\mathrm{MC}} \cdot \hat{\eta}_{t,\mathrm{Rec.}}$





Kinematical reconstruction of top

To select the optimal solution, we compare E_b and $E_{\bar{b}}$ between calculated by (θ_t, ϕ_t) and measured by the b-jet reconstruction.



$E_b(\theta_t, \phi_t)$ in the case of assignment A

$$\chi_b^2(\theta_t, \phi_t) = \left(\frac{E_b(\theta_t, \phi_t) - E_b^{\text{meas.}}}{\sigma[E_b^{\text{meas.}}]}\right)^2 + \left(\frac{E_{\bar{b}}(\theta_t, \phi_t) - E_{\bar{b}}^{\text{meas.}}}{\sigma[E_{\bar{b}}^{\text{meas.}}]}\right)^2$$

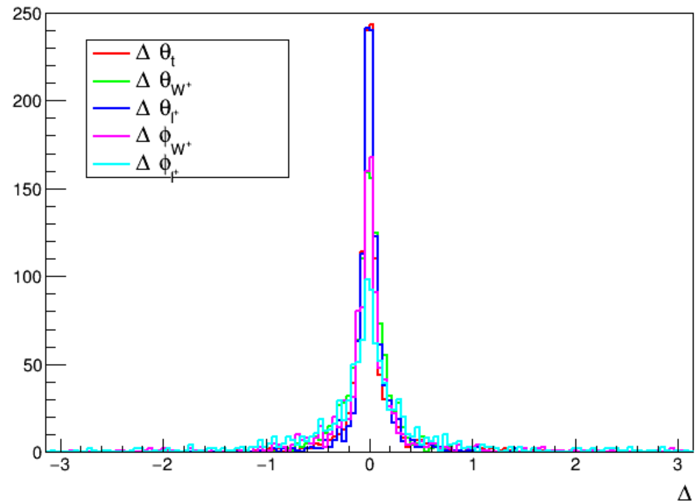
Compute χ_b^2 for each candidate → **Pick one which has the smallest χ_b^2**

$\widetilde{F}_{2V}^{Z}$ fit (The simplest case)

Other ways to reduce the bias

- Convolve the $|M|^2$ with the resolution function of the helicity angles

$$|M|^2 \quad * \qquad\qquad = \; |M|^2_{\mathrm{cov.}}$$



The deviation of each helicity angles

- Use other quantities for the quality cut.

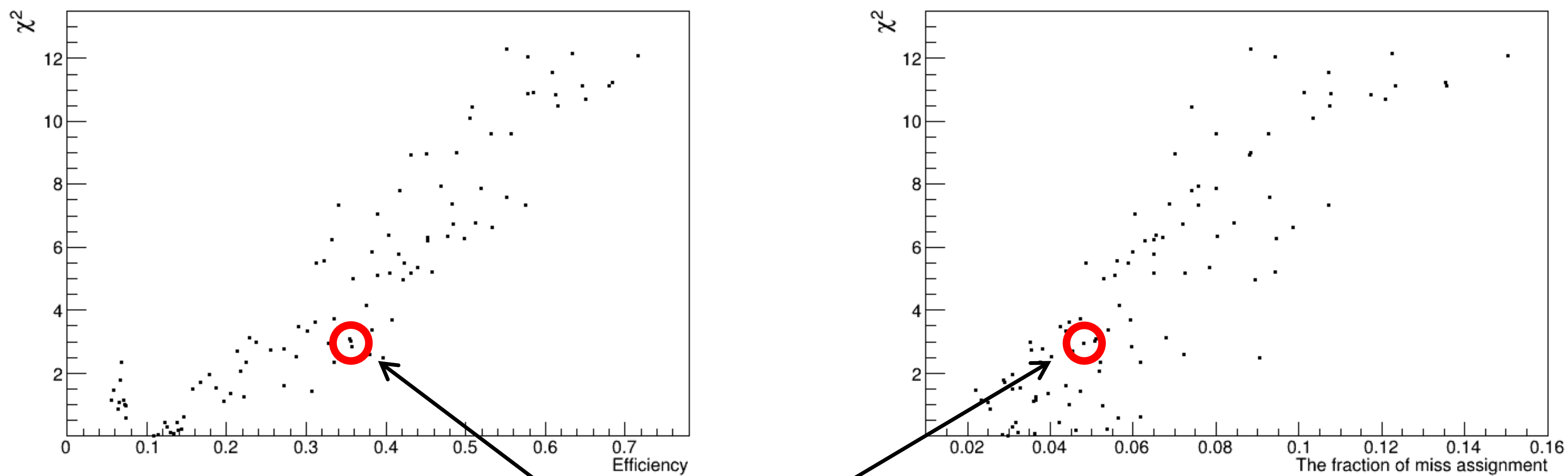
eg) $\left|\chi^2_{tot,\mathrm{caseA1(B1)}} - \chi^2_{tot,\mathrm{caseA2(B2)}}\right|$

$\tilde{F}_{2V}^{Z}$ Fit (The simplest case)

(Fix the other form factors at the SM)

Before quality cut

$\delta\tilde{F}_{2V}^{Z} = 0.117 \pm 0.033,\ \chi^2_{\text{test}} = 12.6$ (confidence level = 0.03%)



χ^2 vs Efficiency

χ^2 vs F_{wrong}

After quality cut ($\chi^2_{tot} < 5$ & $\Delta\chi^2_{tot} > 6$, efficiency 36%)

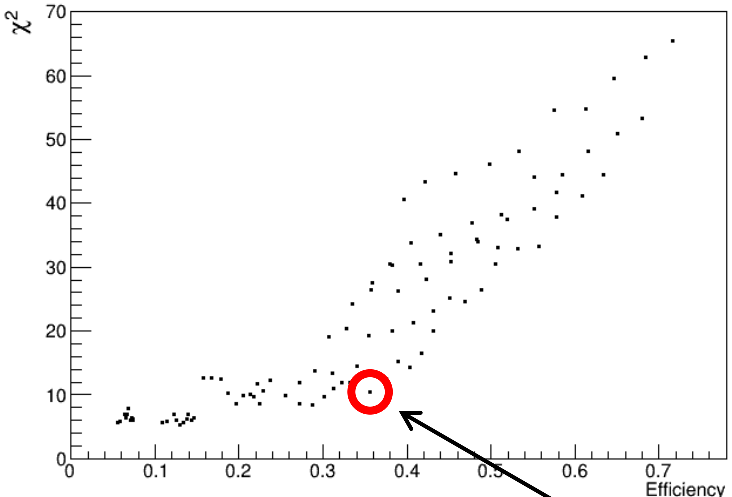
$\delta\tilde{F}_{2V}^{Z} = 0.096 \pm 0.055,\ \chi^2_{\text{test}} = 3.0$ (confidence level = 8.3%)

6 CPC form factors fit

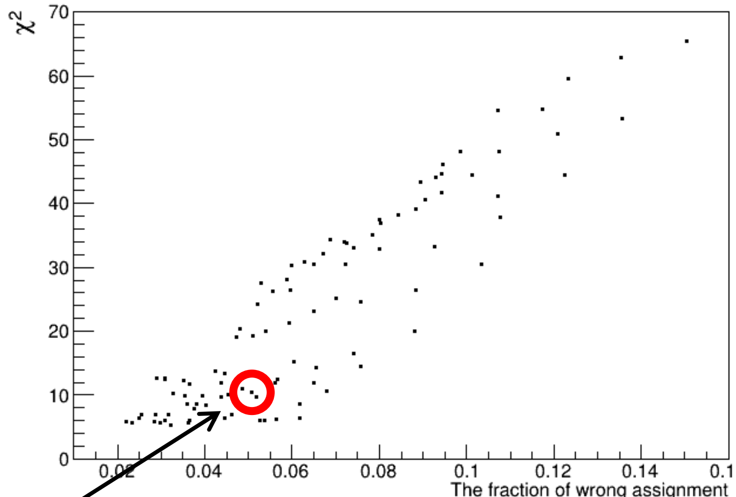
Fit 6 form factors $(\tilde{F}^{\gamma}_{1V}, \tilde{F}^{Z}_{1V}, \tilde{F}^{\gamma}_{1A}, \tilde{F}^{Z}_{1A}, \tilde{F}^{\gamma}_{2V}, \tilde{F}^{Z}_{2V})$

Before quality cut

$< \sigma_F > =$ 0.021, $\chi^2 = 141$ (confidence level ~ 0 %)



χ^2 vs Efficiency



χ^2 vs F_{wrong}

After quality cut ($\chi^2_{tot} < 5$ & $\Delta\chi^2_{tot} > 6$, efficiency 36%)

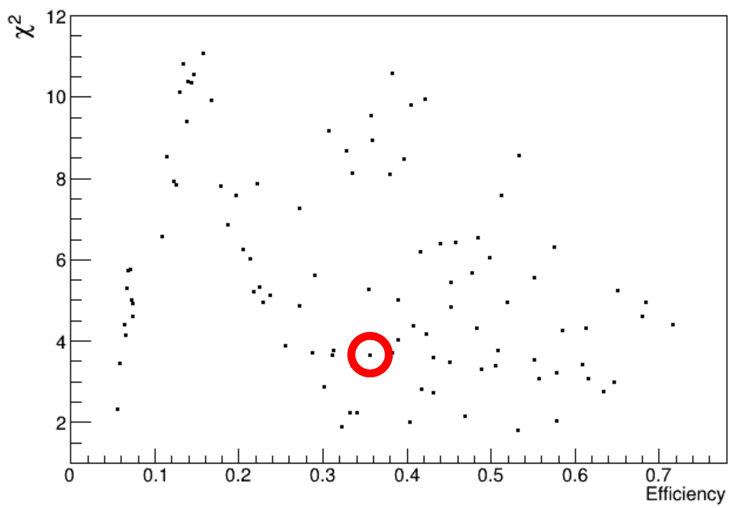
$< \sigma_F > =$ 0.035, $\chi^2 = 10.5$ (confidence level = 11 %)

4 CP Violating Form Factors Fit

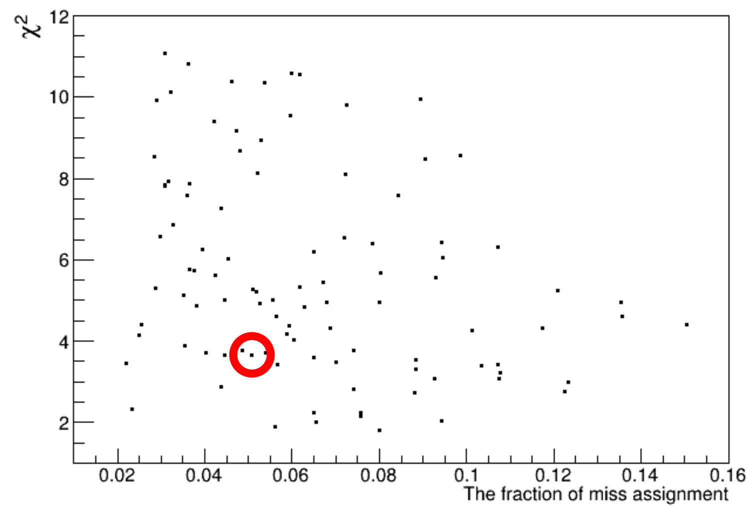
Fit 4 form factors $(Re\tilde{F}_{2A}^{\gamma}, Re\tilde{F}_{2A}^{Z}, Im\tilde{F}_{2A}^{\gamma}, Im\tilde{F}_{2A}^{Z})$

Before quality cut

$< \sigma_F >= 0.026,\ \chi^2 = 8.6$ (confidence level = 7.2 %)



χ^2 vs Efficiency



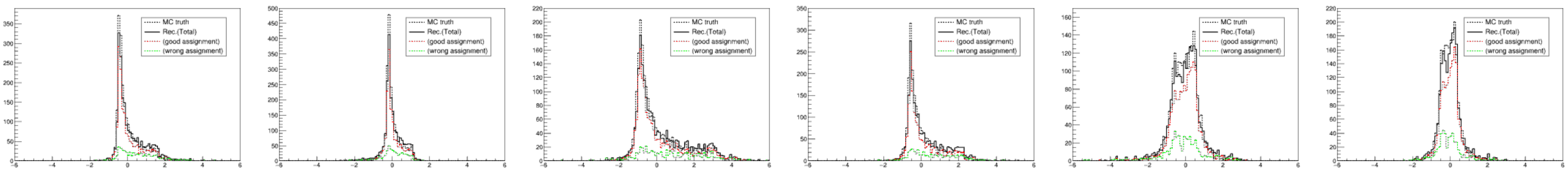
χ^2 vs F_{wrong}

After quality cut ($\chi^2_{tot} < 5$ & $\Delta\chi^2_{tot} > 6$, efficiency 35%)

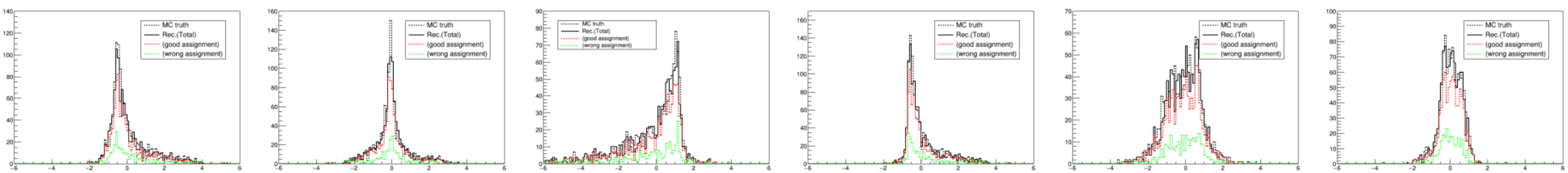
$< \sigma_F >= 0.038, \chi^2 = 3.7$ (confidence level = 45 %)

The distributions of $\omega - \Omega$ (bef. the quality cut)

“Left” polarization

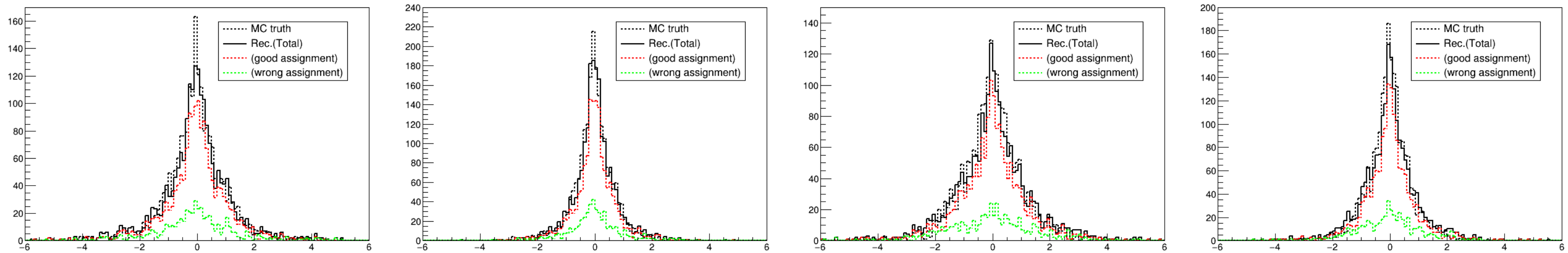


“Right” polarization

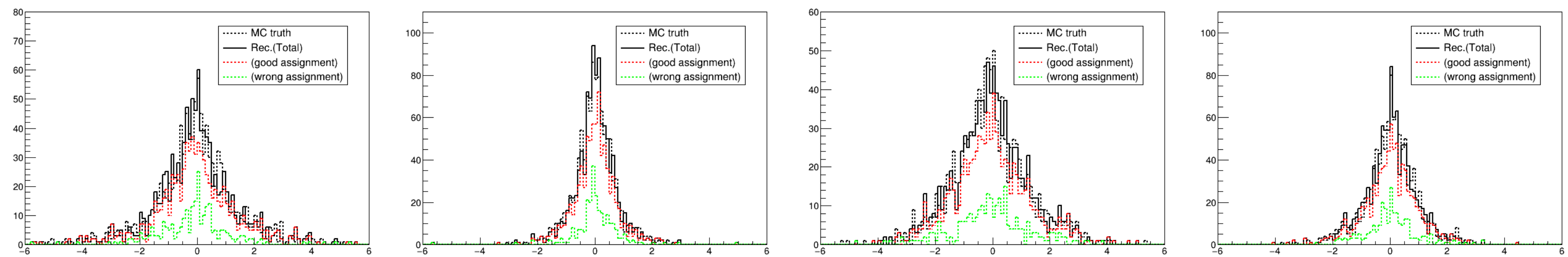


The distributions of $\omega - \Omega$ (bef. the quality cut)

“Left” polarization

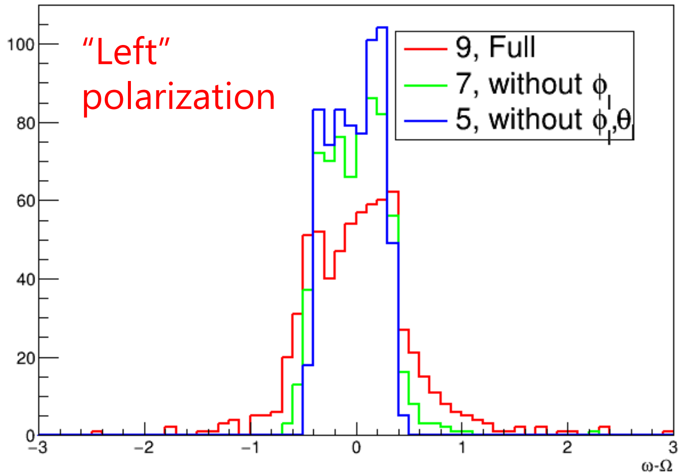


“Right” polarization

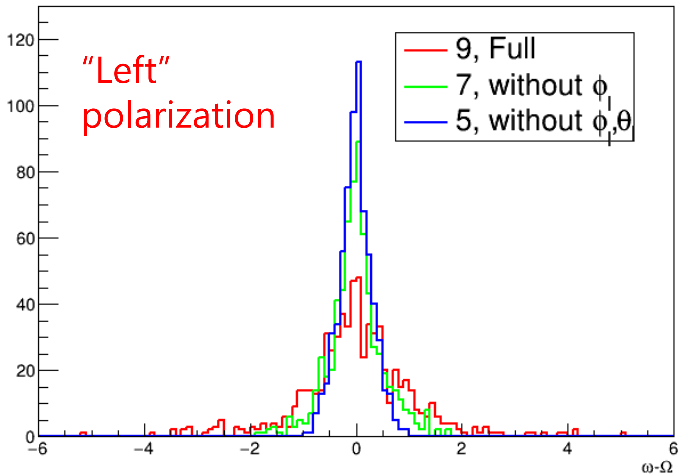


Relation of the helicity angles of $\mu^{\pm}$ and $\omega - \Omega$

$\left(\delta \tilde{F}_{2V}^{\gamma}\right)$



$\left(Re\delta \tilde{F}_{2A}^{\gamma}\right)$



When we don't use the $\phi_{\mu^{\pm}}^{W^{\pm}}$ or $(\phi_{\mu^{\pm}}^{W^{\pm}}, \theta_{\mu^{\pm}}^{W^{\pm}})$, the $\omega - \Omega$ distribution becomes sharper, hence the sensitivity becomes lower.

→ $(\phi_{\mu^{\pm}}^{W^{\pm}}, \theta_{\mu^{\pm}}^{W^{\pm}})$ has a sensitivity to the ttZ/γ.