

---

# ILCの重心系エネルギー500 GeVにおける トッフ対生成のdi-leptonic終状態を用いた Matrix element法によるttZ結合の測定

日本物理学会第72回年次大会

佐藤瑶

Francois Le Diberder<sup>A</sup>, 洪江美<sup>A</sup>, 山本均, 石川明正, 藤井恵介<sup>B</sup>, Junping Tian<sup>C</sup>

東北大理, LAL<sup>A</sup>, 高工研<sup>B</sup>, 東大理<sup>C</sup>

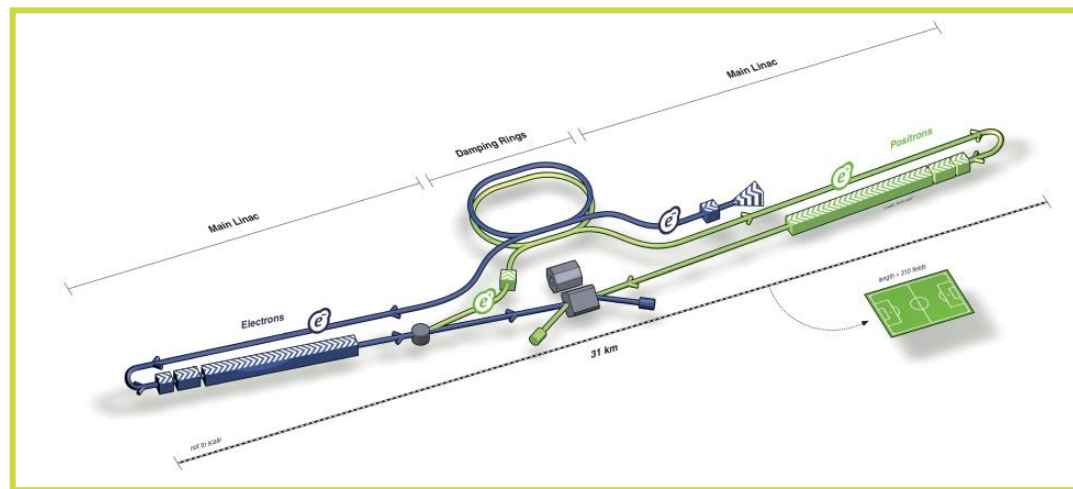
# ILCについて

## ILC : International Linear Collider

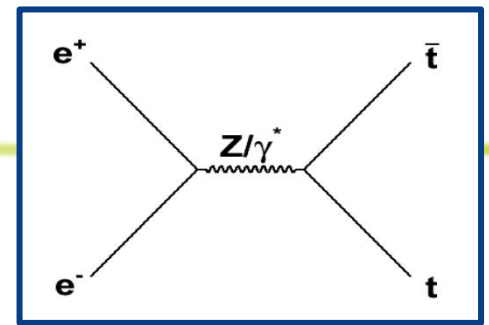
- 電子-陽電子衝突型の線形加速器
- 入射粒子を偏極可能：  
 $(P_{e^-}, P_{e^+}) = (\pm 0.8, \pm 0.3)$
- 全長：31 km  $\rightarrow$  50 km
- 重心系エネルギー：  
250 GeV  $\rightarrow$  350,500 GeV, 1 TeV

### 目的とする物理

- ヒッグス粒子の精密測定
- トップクォークの精密測定
- 新物理の探索



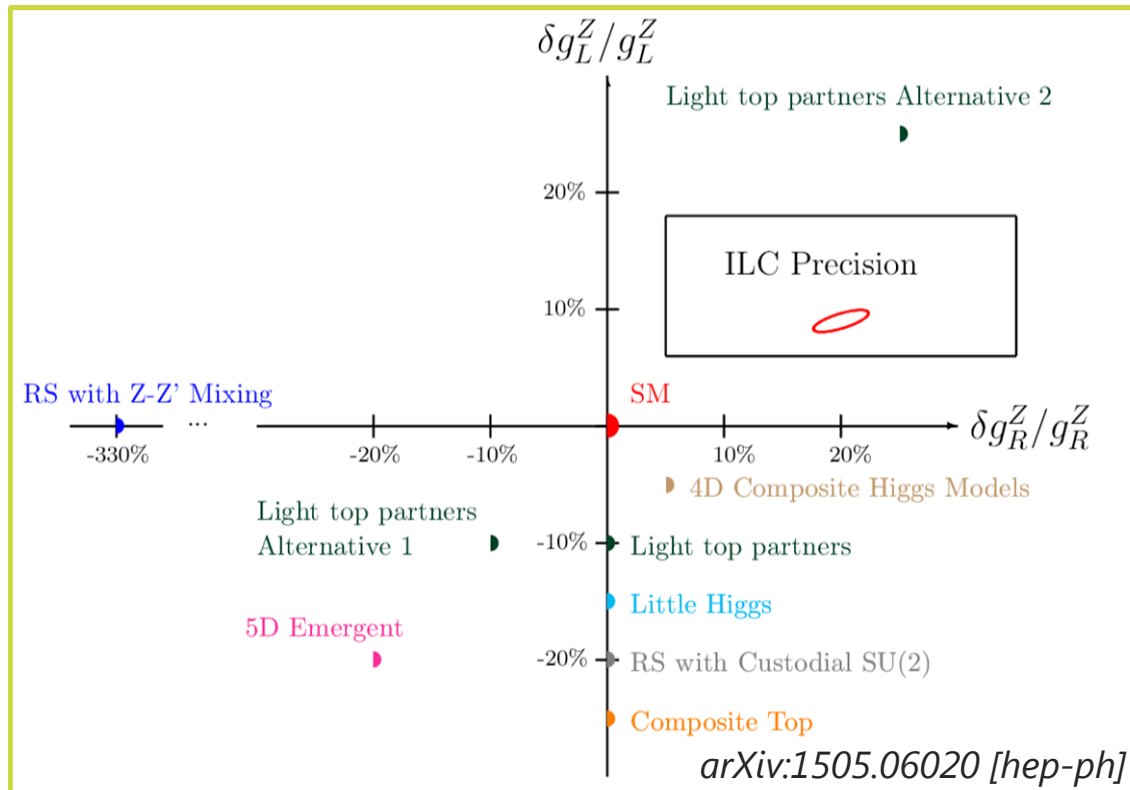
# ILCにおけるttZ 結合の研究



□ トップクォークは新物理を探る重要な手掛かり

複合モデル等ではttZ 結合がSMから10%程度ずれる可能性あり

● ILCではトップ対生成過程を用いる。測定精度は数%レベル程度



# semi-leptonic 終状態を用いた先行研究

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

$$g_L^Z = F_{1V}^Z - F_{1A}^Z, \quad g_R^Z = F_{1V}^Z + F_{1A}^Z$$

- semi-leptonic 終状態 ( $e^+ e^- \rightarrow t\bar{t} \rightarrow b\bar{b}q\bar{q}lv$ ) を用いた先行研究では、  
全断面積・前後非対称度から  $F_{1V}, F_{1A}, F_{2V}, g_L, g_R$  の測定精度を見積もった

$$\sigma_I = 2 \left( \frac{4\pi\alpha^2}{3s} \right) N_c \beta [(1 + 0.5\gamma^{-2})(\mathcal{F}_{1V}^I)^2 + (\beta\mathcal{F}_{1A}^I)^2 + 3\mathcal{F}_{1V}^I\mathcal{F}_{2V}^I] : \text{全断面積} \quad \mathcal{F}_{ij}^L = -F_{ij}^\gamma + \left( \frac{-\frac{1}{2} + s_w^2}{s_w c_w} \right) \left( \frac{s}{s - m_Z^2} \right) F_{ij}^Z$$

$$(A_{FB}^t)_I = \frac{-3\beta\mathcal{F}_{1A}^I(\mathcal{F}_{1V}^I + \mathcal{F}_{2V}^I)}{2[(1 + 0.5\gamma^{-2})(\mathcal{F}_{1V}^I)^2 + (\beta\mathcal{F}_{1A}^I)^2 + 3\mathcal{F}_{1V}^I\mathcal{F}_{2V}^I]} : \text{前後非対称度} \quad \mathcal{F}_{ij}^R = -F_{ij}^\gamma + \left( \frac{s_w^2}{s_w c_w} \right) \left( \frac{s}{s - m_Z^2} \right) F_{ij}^Z,$$

Quantity	$F_{1V}^\gamma$	$F_{1V}^Z$	$F_{1A}^Z$	$F_{2V}^\gamma$	$F_{2V}^Z$	$g_L^\gamma$	$g_R^\gamma$	$g_L^Z$	$g_R^Z$
SM Value at tree level	2/3	0.230	-0.595	0	0	2/3	2/3	0.824	-0.364
Standard deviation	0.002	0.003	0.007	0.001	0.002	0.005	0.005	0.008	0.009
Relative precision [%]	0.3	0.9	1.2	-	-	0.8	0.8	1.0	2.5

arXiv:1505.06020 [hep-ph]

# 本研究の目的

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

- 先行研究は観測量が限られており  $F_{2A}$  には感度がない

$F_{2A}$ : CPを破る因子で標準模型では禁止されている

- トップクォークはハドロン化する前に崩壊するため、崩壊粒子の角度も ttZ/tt $\gamma$ のVertexに対して情報を持つ

トップ対生成のdi-leptonic終状態 ( $e^+ e^- \rightarrow t\bar{t} \rightarrow b\bar{b} l^+ \nu l^- \bar{\nu}$ ) を用い、Vertexの情報を持つ9つの角度を再構成し、より多くの物理量に感度のある研究を行う

$$9\text{つの角度} = (\cos \theta_t, \cos \theta_{W^+}, \phi_{W^+}, \cos \theta_{\mu^+}, \phi_{\mu^+}, \cos \theta_{W^-}, \phi_{W^-}, \cos \theta_{\mu^-}, \phi_{\mu^-})$$

# セットアップ

di-leptonic 終状態を用いた解析はこれまで parton levelのみ

→本終状態を用いた初の full simulation 研究 (イベントのみ)

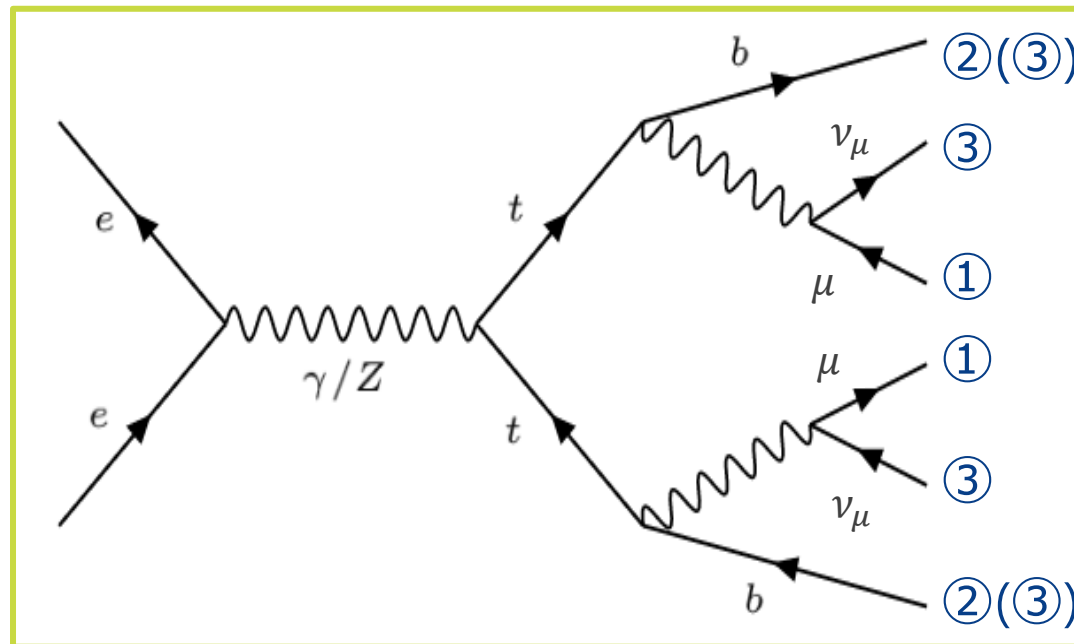
シグナル	トップ対生成, di-muonic 終状態 (SM-LO) $e^+e^- \rightarrow t\bar{t} \rightarrow b\bar{b}\mu^+\nu\mu^-\bar{\nu}$
イベント生成	Whizard
検出器シミュレーション	ILD_01_v05 (DBD ver.)
重心系エネルギー	500 GeV
積分ルミノシティ	500 fb <sup>-1</sup>
偏極 ( $P_{e^-}, P_{e^+}$ )	(-0.8, +0.3) / (+0.8, -0.3)

※ ISR/BS, gluon emission等を含まないサンプルを使用 (現在研究が進行中)

# 再構成手順

- ① 2つのレプトンの測定
- ② 2つのb-jetの測定 ( $E_b$ は方向に比べて精度が低い)
- ③ **力学的再構成 :**

2つのニュートリノと2つのb-jetのエネルギーを求める

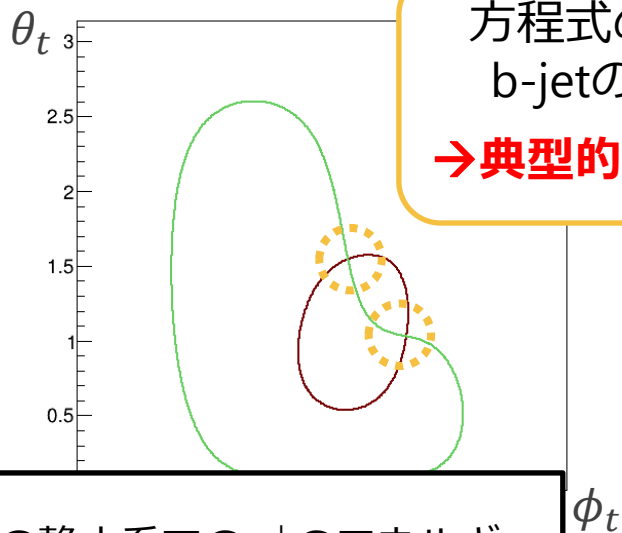


# 力学的再構成について

## 力学的再構成の原理

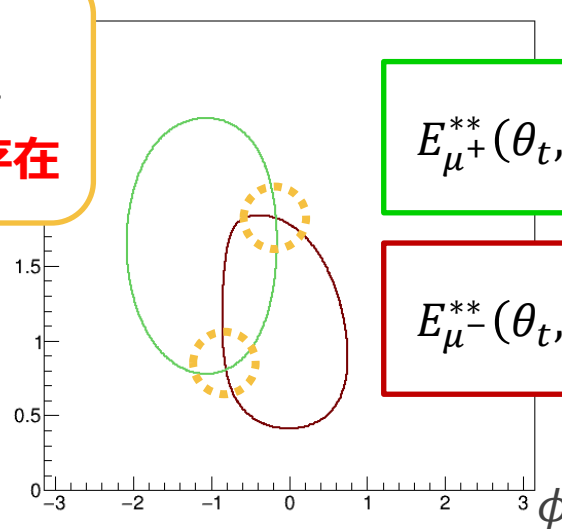
- ① 8つの未知数 ( $\vec{p}_\nu, \vec{p}_{\bar{\nu}}, E_b, E_{\bar{b}}$ ) を8つの力学的制限 ( $E_{CM}, \vec{P}_{init.}, m_t, m_{\bar{t}}, m_{W^+}, m_{W^-}$ ) を課すことで求める

### 正しいb-jetの組み合わせ



方程式の非線形性、  
b-jetの電荷不定性  
→典型的に4つ解が存在

### 間違ったb-jetの組み合わせ



$$E_{\mu^+}^{**}(\theta_t, \phi_t) = \frac{m_{W^+}}{2}$$

$$E_{\mu^-}^{**}(\theta_t, \phi_t) = \frac{m_{W^-}}{2}$$

$E_{\mu^\pm}^{**}$ :  $W^\pm$ の静止系での $\mu^\pm$ のエネルギー  
( $\theta_t, \phi_t$ ): 実験室系でのトップの角度

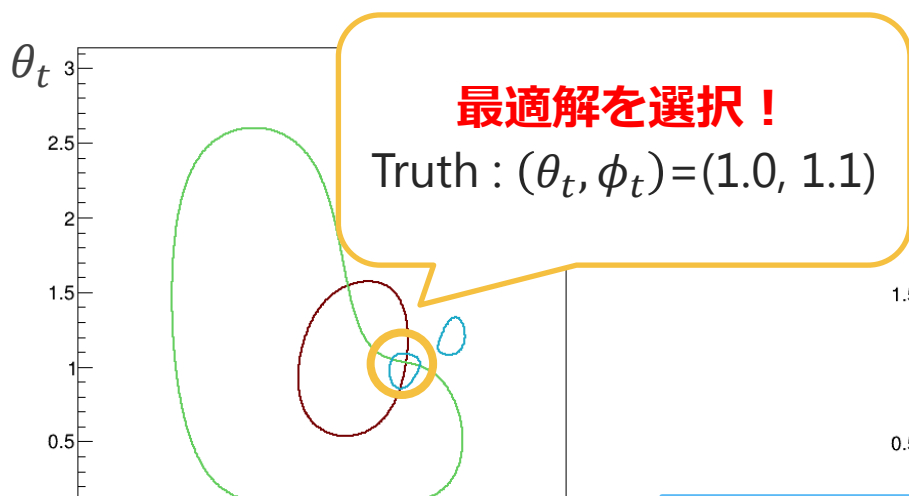


# 力学的再構成について

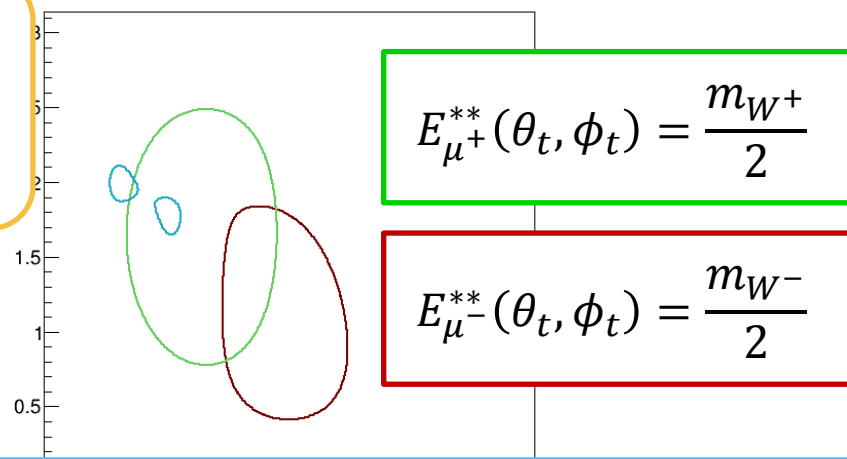
## 力学的再構成の原理

- ① 8つの未知数 ( $\vec{p}_\nu, \vec{p}_{\bar{\nu}}, E_b, E_{\bar{b}}$ ) を8つの力学的制限 ( $E_{CM}, \vec{P}_{init.}, m_t, m_{\bar{t}}, m_{W^+}, m_{W^-}$ ) を課すことで求める
- ②  $E_b, E_{\bar{b}}$  それぞれ再構成値と測定値を比較することで最適解を選択する

### 正しいb-jetの組み合わせ



### 間違ったb-jetの組み合わせ

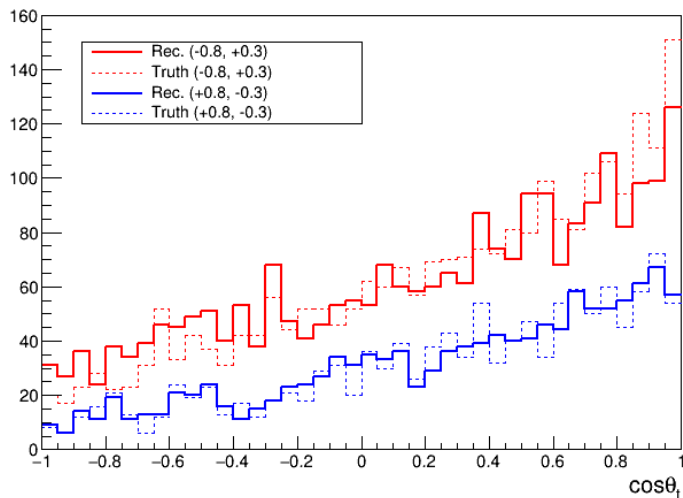


$E_{\mu^\pm}^{**}$ :  $W^\pm$ の静止系での $\mu^\pm$ のエネルギー  
 $(\theta_t, \phi_t)$ : 実験室系でのトップの角度

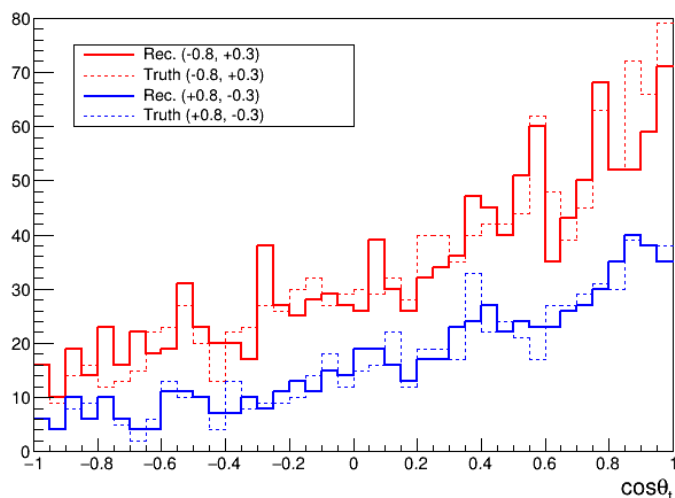
$$\chi_b^2 = \left( \frac{E_b^{meas.} - E_b^{rec.}(\theta_t, \phi_t)}{\sigma[E_b^{meas.}]} \right)^2 + \left( \frac{E_{\bar{b}}^{meas.} - E_{\bar{b}}^{rec.}(\theta_t, \phi_t)}{\sigma[E_{\bar{b}}^{meas.}]} \right)^2 = 20$$

# 再構成の結果 : $\cos \theta_t$ 分布

(Cut 前)



(Cut 後)



トップの極角分布,  $\cos \theta_t$  (= 前後非対称度)

- $(-0.8, +0.3)$ において分布のずれが見られる  
= b-jet の組み間違いによる効果  
→ 力学的再構成の精度 ( $E_{\mu^\pm}^{**}$  や  $\chi_b^2$ ) によって信頼度の低いイベントをCut
- 分布のずれが小さくなることが確かめられた

**b-jetの組み間違い比**     $(-0.8, +0.3)$      $(+0.8, -0.3)$

Cut 前 (efficiency = ~92 %)	<b>8.9 %</b>	<b>6.0 %</b>
Cut 後 (efficiency = ~50 %)	<b>5.5 %</b>	<b>3.0 %</b>

# Matrix element 法による解析

---

## Matrix element 法

理論計算によって得られる $|M|^2$  をPDFとする、最尤推定法に基づく

**実験的に最も効率的な推定手法**

- 得られた全ての観測量を同時に扱うことができる

→ **高い精度での推定が可能**

→ 再構成した**9つの角度**及び**全断面積**を同時に用いて解析を行う

# 解析結果

## $F_{2A}$ を含む10個の形状因子を同時推定

□ 測定精度は典型的に~0.04 程度

Parton level では~0.01 程度

→この差の原因の理解が必要

□ 中心値のずれは、b-jetの組み間違いや  
検出器の効果と考えられる

→適切なカットや検出器効果を $|M|^2$ に

畳み込むことで削減が期待できる

## Preliminary

(efficiency = ~50 %、約2000イベント)

$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{1V}^{\gamma}$	$+0.0046 \pm 0.0125$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{1V}^Z$	$-0.0455 \pm 0.0269$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{1A}^{\gamma}$	$-0.0887 \pm 0.0193$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{1A}^Z$	$+0.0555 \pm 0.0274$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{2V}^{\gamma}$	$-0.0143 \pm 0.0414$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{2V}^Z$	$-0.0757 \pm 0.0679$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{2A}^{\gamma}$	$+0.0011 \pm 0.0237$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{2A}^Z$	$+0.0297 \pm 0.0529$
$\mathcal{I}m \delta \tilde{F}_{2A}^{\gamma}$	$-0.0347 \pm 0.0403$
$\mathcal{I}m \delta \tilde{F}_{2A}^Z$	$+0.0084 \pm 0.0325$

$$F_{1V}^{\tilde{v}} = -(F_{1V}^v + F_{2V}^v), \quad F_{2V}^{\tilde{v}} = F_{2V}^v.$$

$$F_{1A}^{\tilde{v}} = -F_{1A}^v, \quad F_{2A}^{\tilde{v}} = -iF_{2A}^v$$

# まとめと今後

---

トップ対生成 di-leptonic 終状態を用いた ILD full simulation解析によって、より多くの形状因子の同時推定を行い、精度を見積もる

## □ 再構成

- レプトン・b-jetの測定、力学的制限によって**9つの角度**を再構成した

## □ Matrix element 法による解析

- $F_{2A}$ をふくむ10個の形状因子の同時推定を行い、**典型的に~0.04 程度**の測定精度を得た

## □ 今後

- Parton level の結果との差を正しく理解する
- 推定値のずれを小さくするため、適切なカットやPDFの最適化を行う
- 現在無視している効果含めて最終的な精度の見積もりを行い、どのような新物理モデルの同定・排除が可能か検討する

# Back up

---

# Parton level での結果

- 理想的な環境 (Parton level) でのシミュレーション
- トップ対生成のdi-muonic終状態から9つの helicity angle を再構成
- ttZ/tt $\gamma$ 結合に関連した結合因子10個を同時に、1%の精度で測定可能

Statistical uncertainties and correlation with the SM LO as normalization

*Kheim, E.K. Kurihara, Le Diberder: arXiv:1503:04247*

$\text{Re } \delta\tilde{F}_{1V}^\gamma$	$\text{Re } \delta\tilde{F}_{1V}^Z$	$\text{Re } \delta\tilde{F}_{1A}^\gamma$	$\text{Re } \delta\tilde{F}_{1A}^Z$	$\text{Re } \delta\tilde{F}_{2V}^\gamma$	$\text{Re } \delta\tilde{F}_{2V}^Z$	$\text{Re } \delta\tilde{F}_{2A}^\gamma$	$\text{Re } \delta\tilde{F}_{2A}^Z$	$\text{Im } \delta\tilde{F}_{2A}^\gamma$	$\text{Im } \delta\tilde{F}_{2A}^Z$
0.0037	-0.18	-0.09	+0.14	+0.62	-0.15	0	0	0	0
	0.0063	+0.14	-0.06	-0.13	+0.61	0	0	0	0
		0.0053	-0.15	-0.05	+0.09	0	0	0	0
			0.0083	+0.06	-0.04	0	0	0	0
				0.0105	-0.19	0	0	0	0
					0.0169	0	0	0	0
						0.0068	-0.15	0	0
							0.0118	0	0
								0.0069	-0.17
									0.0100

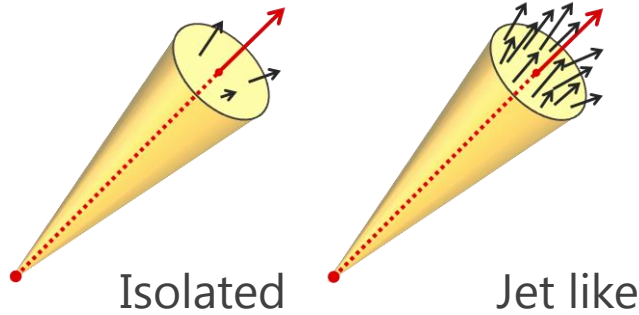
500 GeV&500 fb<sup>-1</sup> Polarization 50/50 between  $\pm 80\%$  and  $\pm 30\%$

Emi Kou (LAL-Orsay)  
LFC 15, Trento,  
7-11 Sep. 2015

→より現実的な状況で、どの程度精度が保たれるか検証が必要

# 孤立レプトンの抽出

## □ 孤立レプトンの抽出



孤立レプトン(Wから直接崩壊した荷電レプトン)の特徴

運動量が大きい & 周りの粒子が少ない

運動量の大きいレプトンを中心にコーンを作り、  
孤立したレプトンを抽出する

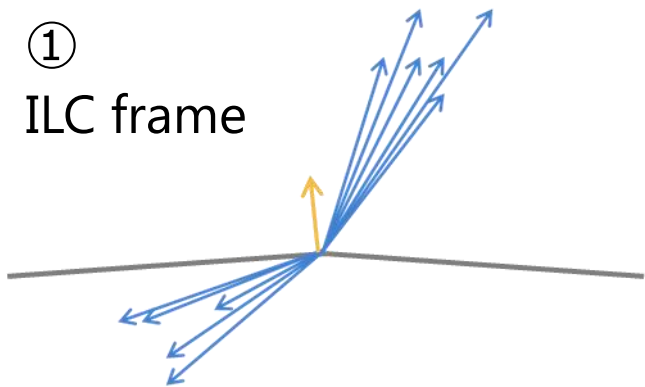
$$P_l > \sim 5 \text{ GeV}, \quad \cos \theta_{cone} = 0.95, \quad \frac{E_l}{E_{cone}} \sim 1$$



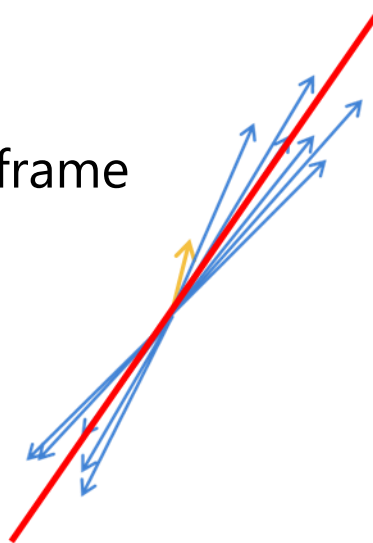
# Thrust axis 法による2b-jetの測定

- ① 孤立レプトンを除く全ての粒子を集める
- ② 集めた粒子の静止系にそれらをブーストしThrust axis を計算する
- ③ Thrust axis に沿う二つのベクトルをILC'系にブーストする  
(ILC'系：電子陽電子の静止系)

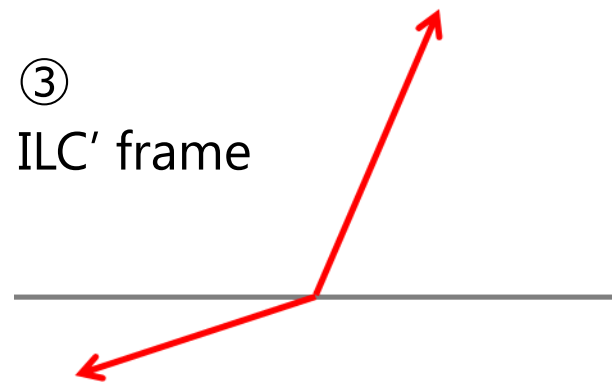
①  
ILC frame



②  
BB frame



③  
ILC' frame



# 力学的再構成に用いるアルゴリズム

## 1. $\chi_\mu^2$ を定義

$$\chi_\mu^2 = \chi_{\mu^+}^2 + \chi_{\mu^-}^2, \quad \chi_{\mu^\pm}^2 = \left( \frac{E_{\mu^\pm}^{**}(\theta_t, \phi_t) - m_{W^\pm}/2}{\sigma[E_{\mu^\pm}^{**}]} \right)^2$$

=>  $W^\pm$ の静止系では $\mu^\pm$ のエネルギーは $m_{W^\pm}/2$ に等しい

## 2. $\chi_b^2$ を定義

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

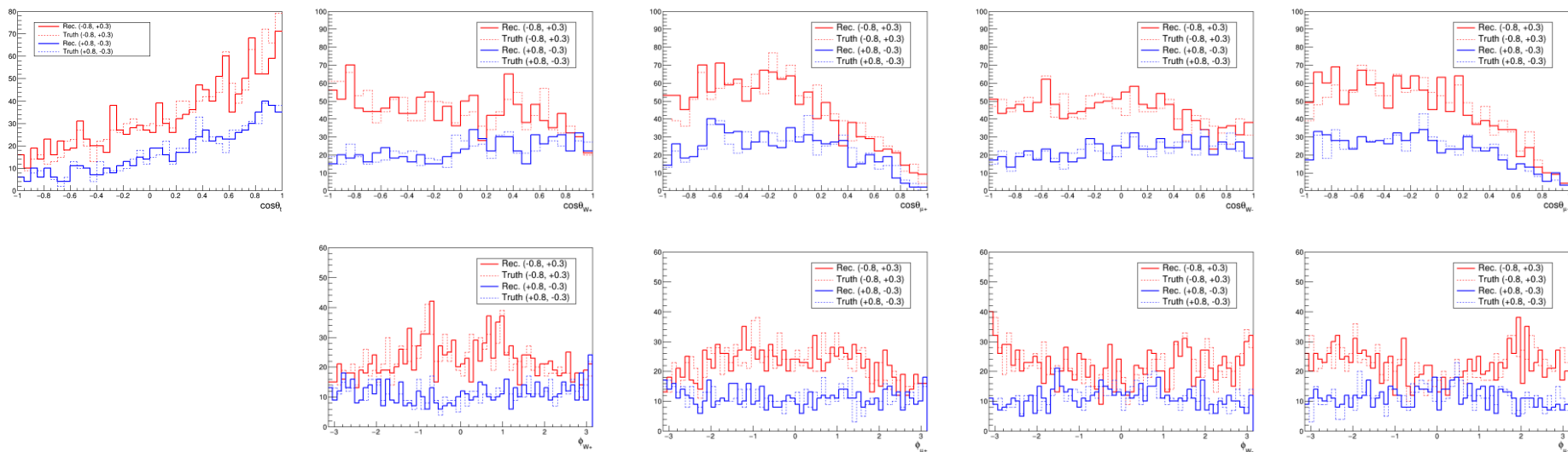
## 3. $\chi_{\text{tot.}}^2 = \chi_\mu^2 + \chi_b^2$ を最小化する

$\chi_{\text{tot.}}^2$ を最小化する $(\theta_t, \phi_t)$ を最適解として選択する

# 再構成の結果(2)

終状態の再構成によって9つの角度が得られる；

$$\cos \theta_t, \cos \theta_{W^+}, \phi_{W^+}, \cos \theta_{\mu^+}, \phi_{\mu^+}, \cos \theta_{W^-}, \phi_{W^-}, \cos \theta_{\mu^-}, \phi_{\mu^-}$$



$(-0.8, +0.3)$  と  $(+0.8, -0.3)$  で異なる分布  $\rightarrow$  トップの偏極の情報を持つ

# 解析の工夫

確率密度関数としてMatrix elementを用いる

$|M|^2$ は形状因子の二次までしか含まないため、2次式で展開可能

$$-\log \mathcal{L}(\alpha) = \sum_{e=1}^N \left( f_e + (f')_e^i \alpha^i + \frac{1}{2} (f'')_e^{ij} \alpha^i \alpha^j \right) - N \left( F + (F')^i \alpha^i + \frac{1}{2} (F'')^{ij} \alpha^i \alpha^j \right)$$

- ① パラメータ依存の無い係数 $F, F', F''$ を**一度だけ**求めればよい
- ② 次の式から推定値と精度が計算できる

$$-\frac{\partial \log \mathcal{L}(\alpha)}{\partial \alpha^i} = 0, \quad V_{ij} = \left( -\frac{\partial^2 \log \mathcal{L}(\alpha)}{\partial \alpha^i \alpha^j} \right)^{-1}$$

**計算コストを大幅に削減し、高精度の測定が可能**

# 解析結果(2) 分散共分散行列

**Preliminary** (efficiency = ~50 %、約2000イベント)

$\mathcal{R}e \delta\tilde{F}_{1V}^\gamma$	$\mathcal{R}e \delta\tilde{F}_{1V}^Z$	$\mathcal{R}e \delta\tilde{F}_{1A}^\gamma$	$\mathcal{R}e \delta\tilde{F}_{1A}^Z$	$\mathcal{R}e \delta\tilde{F}_{2V}^\gamma$	$\mathcal{R}e \delta\tilde{F}_{2V}^Z$	$\mathcal{R}e \delta\tilde{F}_{2A}^\gamma$	$\mathcal{R}e \delta\tilde{F}_{2A}^Z$	$\mathcal{I}m \delta\tilde{F}_{2A}^\gamma$	$\mathcal{I}m \delta\tilde{F}_{2A}^Z$
0.0125	-0.27	-0.01	+0.14	+0.71	-0.23	0	-0.06	+0.08	-0.01
	0.0269	+0.16	0	-0.21	+0.69	+0.01	-0.02	-0.01	+0.05
		0.0193	-0.19	-0.07	+0.14	+0.02	-0.04	-0.03	+0.01
			0.0274	+0.05	0	-0.02	0	+0.04	+0.02
				0.0414	-0.31	0	-0.05	0	+0.02
					0.0679	0	0	-0.01	+0.04
						0.0237	-0.35	+0.03	-0.05
							0.0529	0	0
								0.0403	-0.28
									0.0325

# 解析結果(3) 緩いカット, b-jetの不定性の除去の場合

緩いCut の場合 (efficiency = ~80 %)

(+0.8, -0.3) 8.05% (-0.8, +0.3) 5.53%

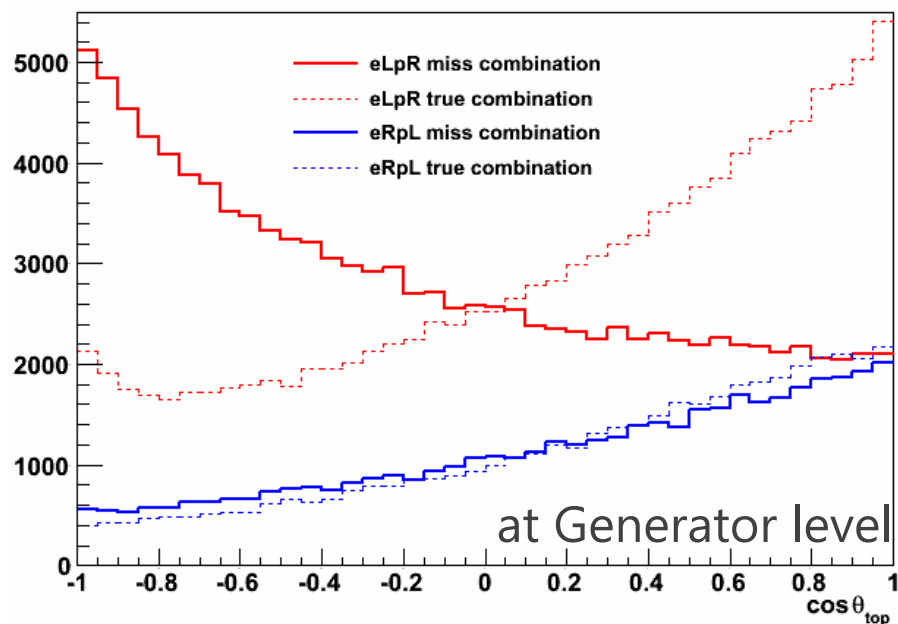
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{1V}^{\gamma}$	$-0.0093 \pm 0.0098$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{1V}^Z$	$-0.0634 \pm 0.0214$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{1A}^{\gamma}$	$-0.1163 \pm 0.0151$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{1A}^Z$	$+0.1066 \pm 0.0217$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{2V}^{\gamma}$	$-0.0293 \pm 0.0322$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{2V}^Z$	$-0.0504 \pm 0.0544$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{2A}^{\gamma}$	$+0.0177 \pm 0.0187$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{2A}^Z$	$-0.0078 \pm 0.0446$
$\mathcal{I}m \delta \tilde{F}_{2A}^{\gamma}$	$-0.0187 \pm 0.0331$
$\mathcal{I}m \delta \tilde{F}_{2A}^Z$	$+0.0025 \pm 0.0258$

緩いCutの場合 (efficiency = ~80 %)

MC Truthを用いてb-jetの不定性を除去

$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{1V}^{\gamma}$	$-0.0276 \pm 0.0105$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{1V}^Z$	$+0.0166 \pm 0.0221$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{1A}^{\gamma}$	$-0.0440 \pm 0.0159$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{1A}^Z$	$-0.0094 \pm 0.0225$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{2V}^{\gamma}$	$-0.1078 \pm 0.0315$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{2V}^Z$	$+0.0634 \pm 0.0588$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{2A}^{\gamma}$	$+0.0121 \pm 0.0177$
$\mathcal{R}e \delta \tilde{F}_{2A}^Z$	$-0.0056 \pm 0.0450$
$\mathcal{I}m \delta \tilde{F}_{2A}^{\gamma}$	$-0.0105 \pm 0.0304$
$\mathcal{I}m \delta \tilde{F}_{2A}^Z$	$-0.0039 \pm 0.0274$

# 組み間違いによって $\cos \theta_t$ がずれる理由



## 組み間違いの場合の $\cos \theta_t$ 分布

赤(-1,+1)/青(+1,-1)

(-1,+1)の場合のみ大きく分布がずれる

## 理由

トップがleft-handedの場合、  
bがトップの進行方向に放出されやすい  
→bの運動量が大きくなり、組み間違える  
ことで方向が大きくずれる