

ILCの対生成閾値領域における トップクォークの生成及び崩壊の 解析手法の開発研究



2019年2月4日 修士論文発表会

素粒子実験研究室

博士課程前期2年 江田優人

目次

2

- 導入
 - トップクォーク
 - ILC(International Linear Collider)
 - 先行研究
- 研究内容
 - シミュレーション
 - toy MCによる解析
 - 結果
 - 先行研究との比較
- まとめ

導入

トップクォーク
ILC(International Linear Collider)
先行研究

トップクォーク

4

- トップクォークは素粒子標準模型の素粒子で最も重く不安定であるため、弱い相互作用でbとWに崩壊する
→大きい崩壊幅を持つ

- トップクォークの質量と崩壊幅

$$m_t = 173.0 \pm 0.4 \text{ GeV}$$

$$\Gamma_t \cong \frac{G_F m_t^3}{8\sqrt{2}\pi} |V_{tb}|^2 \sim 1.4 \text{ GeV} \gg \Lambda_{QCD} (\sim 200 \text{ MeV})$$

- ハドロン化する前に崩壊するため、トップの共鳴状態の摂動による正確な理論計算が可能である
- 対生成閾値領域ではトップの共鳴状態の情報が得られる。

トップクォーク対生成閾値付近の物理

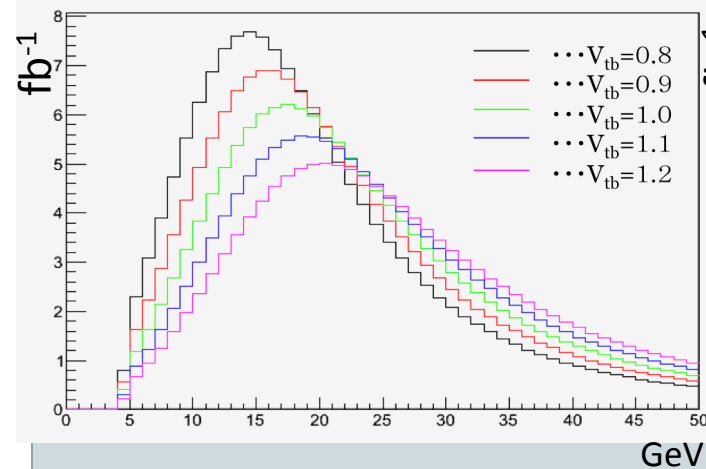
5

$\Gamma_t (\propto |V_{tb}|^2)$ は崩壊する場所を決め、そこでのポテンシャルに応じて運動量が決まる。

$\alpha_s(M_Z)$ はQCDポテンシャルの深さを決める

→ Γ_t と α_s が運動量から求まる

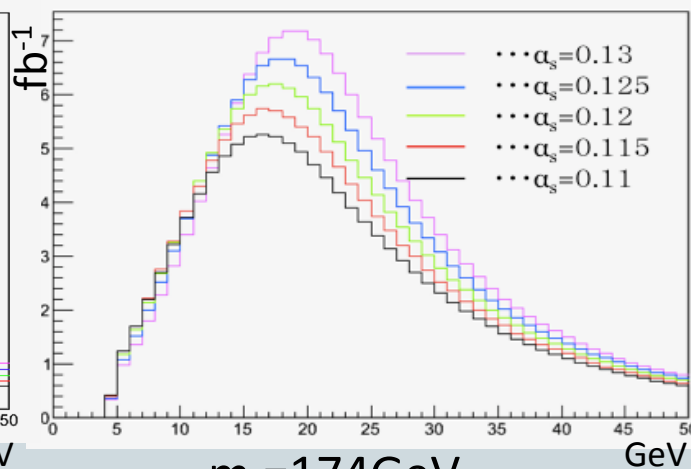
$$V(r) \sim -4\alpha_s/3r$$



$$m_t = 174 \text{ GeV}$$

$$\sqrt{s} = 347 \text{ GeV}$$

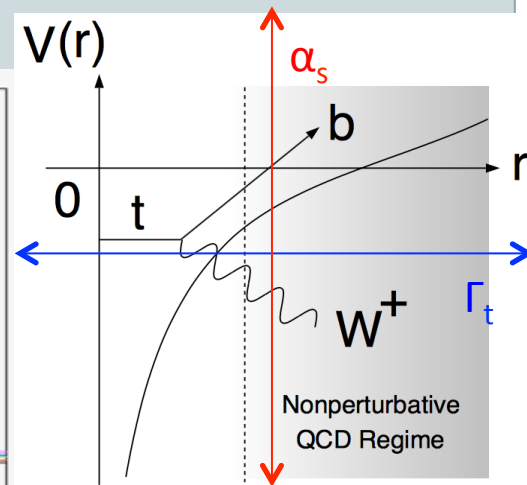
$$\alpha_s = 0.12$$



$$m_t = 174 \text{ GeV}$$

$$\sqrt{s} = 347 \text{ GeV}$$

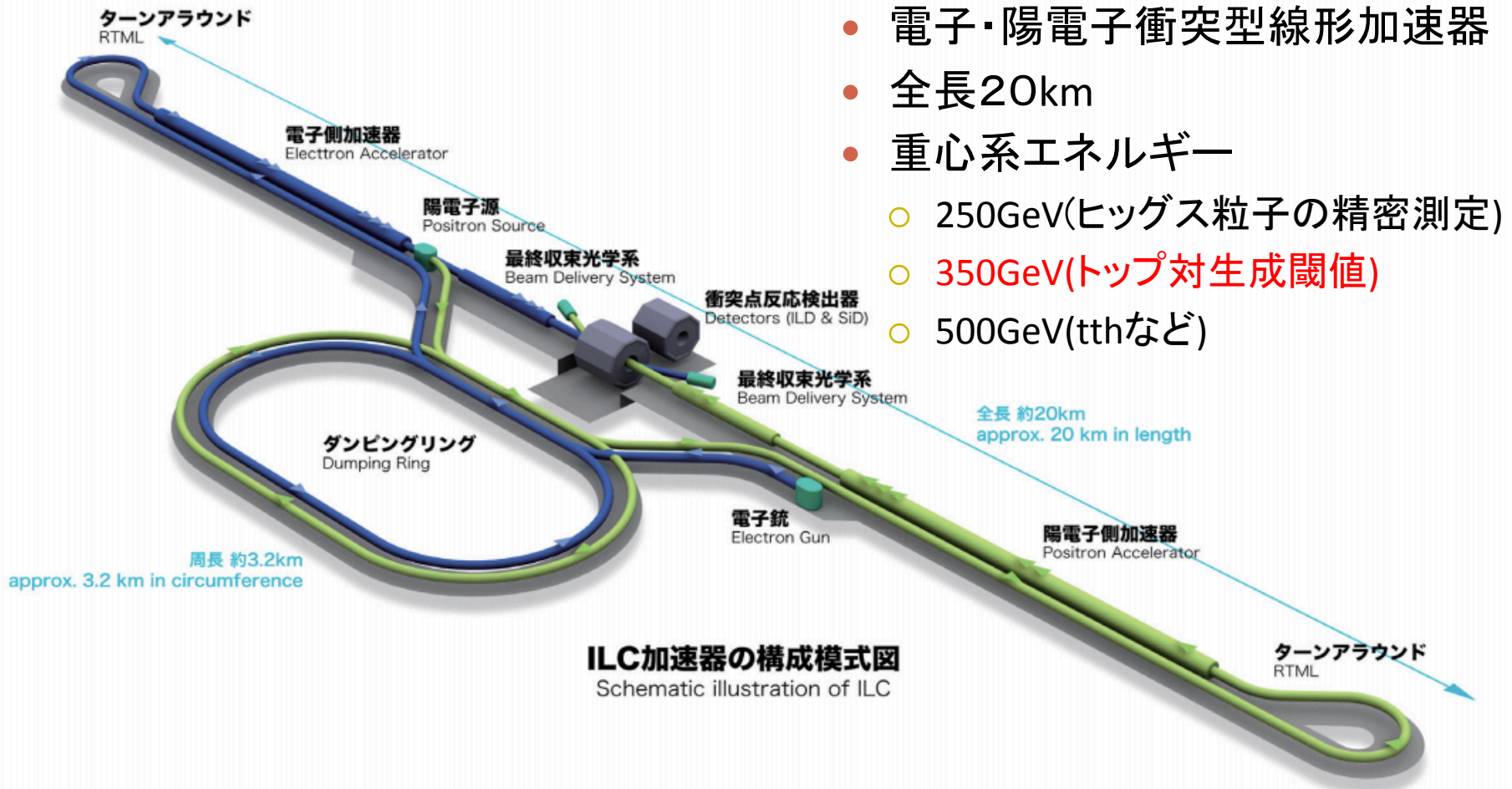
$$V_{tb} = 1.00$$



ILCではどれくらいの精度で求めることができるか、シミュレーションを行なった

ILC(International Linear Collider)

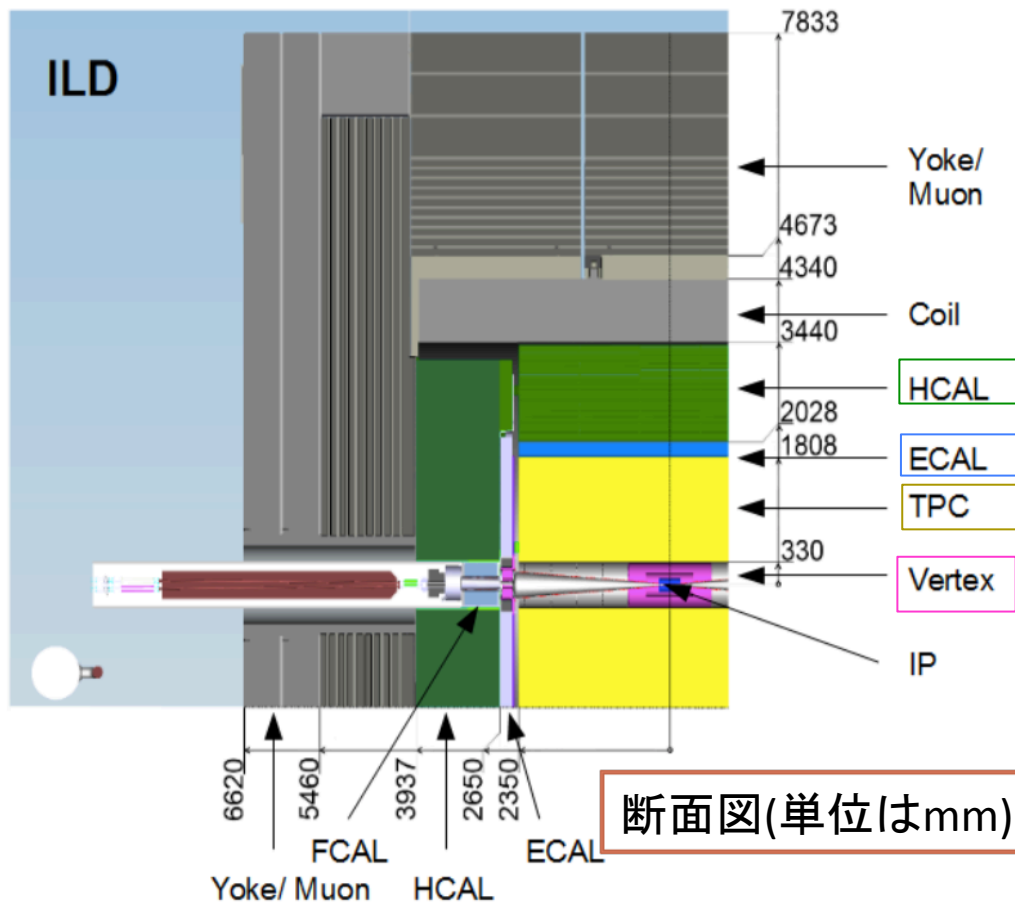
6



- 電子・陽電子衝突型線形加速器
- 全長20km
- 重心系エネルギー
 - 250GeV(ヒッグス粒子の精密測定)
 - 350GeV(トップ対生成閾値)
 - 500GeV(tt \bar{t} など)

ILD検出器

7



主な役割

Vertex(崩壊点検出器)
→クォークフレーバータグ

TPC(飛跡検出器)
→荷電粒子の運動量測定

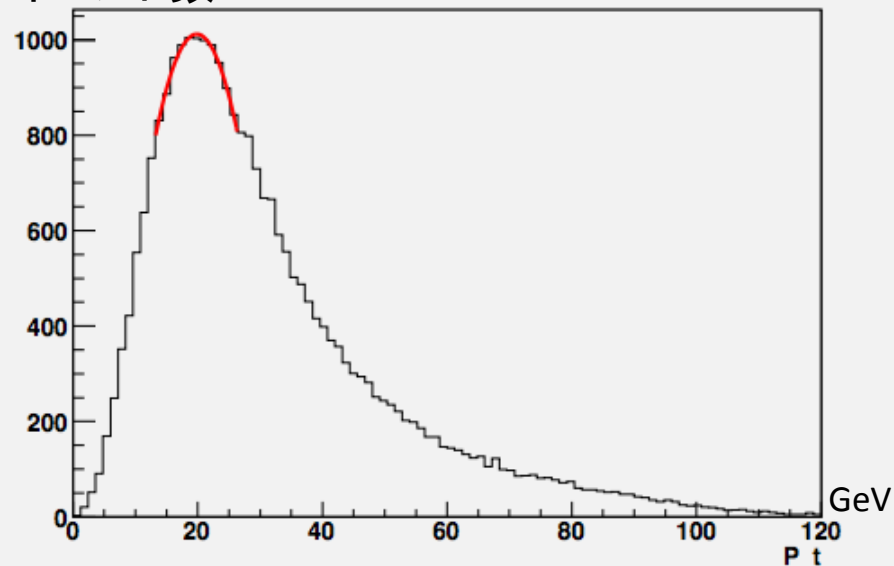
ECAL(電磁カロリメータ)
→光子および電子のエネルギー測定

HCAL(ハドロンカロリメータ)
→中性ハドロンエネルギー測定

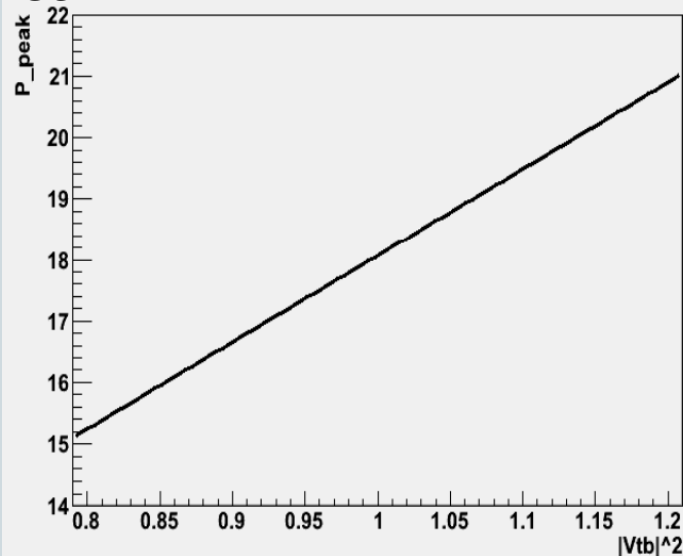
先行研究とその問題点

8

イベント数



GeV



理論計算によるピーク位置と $|V_{tb}|^2$ の関係

再構成した運動量分布とそのピーク

$$P_{peak} = 19.9 \pm 0.243 \text{ GeV} \rightarrow \delta |V_{tb}|^2 = 0.0172$$

問題点

- ・ピーク付近のデータのみ利用している
- ・ピークと $|V_{tb}|^2$ の關係に検出器の影響が含まれていない
- ・ α_s を固定していた

研究内容

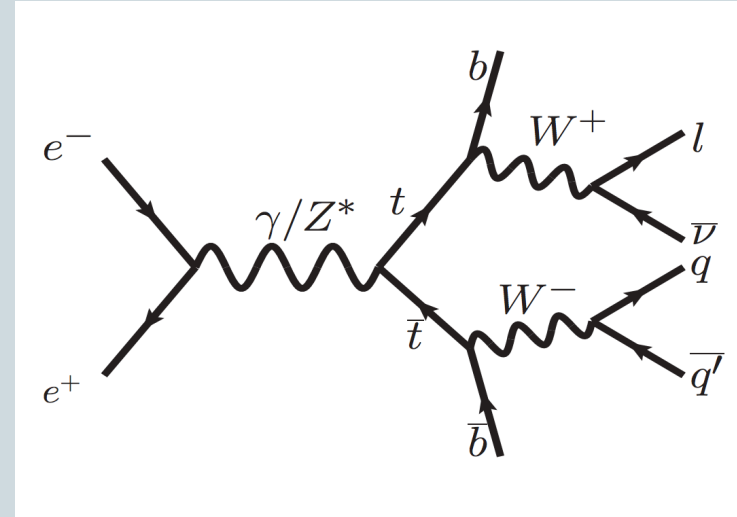
シミュレーション
toy MCによる解析
結果
先行研究との比較

シミュレーション

10

- イベントジェネレーター: Physsim (ビーム効果を含む)

- $m_t=174\text{GeV}$
- $\sqrt{s}=347\text{GeV}$
- $V_{tb}=1.00$ (標準模型のLOでは $\Gamma_t \propto |V_{tb}|^2$)
- $\alpha_s(M_Z)=0.12$
- 電子の偏極: 左巻き100%
- 陽電子の偏極: 右巻き100%
- 4ジェットモード(右図参照)
- 積分ルミノシティ: 200fb^{-1}

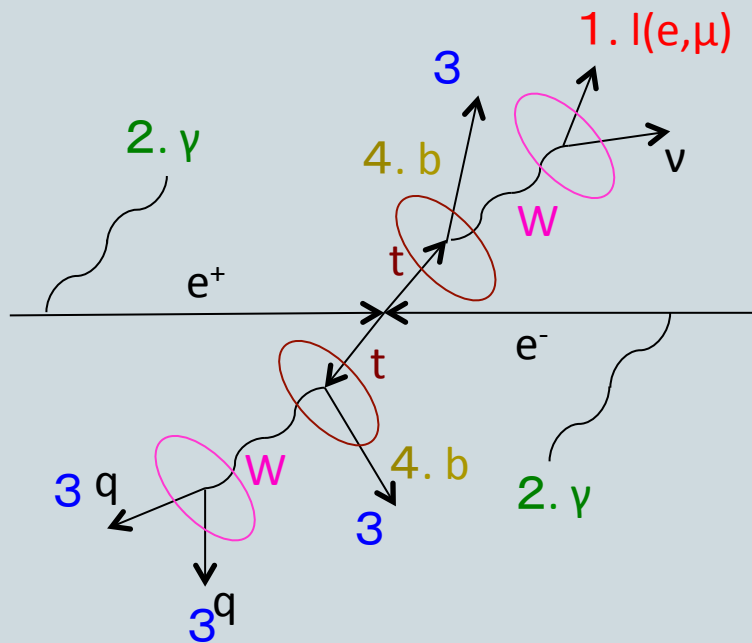


- Mokka(Geant4ベースのILD検出器シミュレーション)

- Marlin(再構成)

再構成の流れ

11



1. 孤立レプトンの抽出
2. ビームバックグラウンド除去
3. ジェットクラスター
4. b クォークタグ
5. W ボソン再構成
6. トップクォーク再構成

トップクォークの再構成($tt \rightarrow bWbW \rightarrow bqqbl\nu$)

12

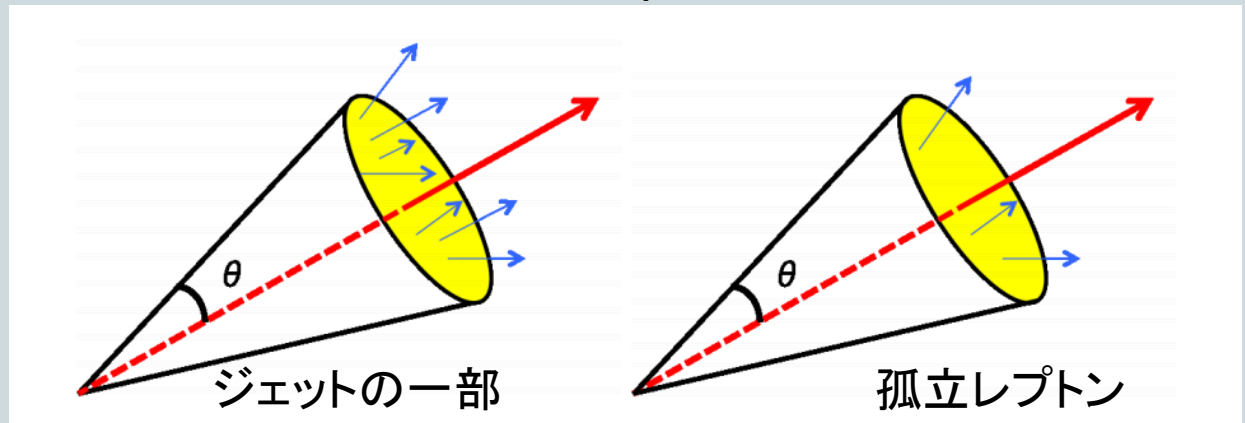
- 孤立レプトンの抽出

(ジェットの一部かWボソン由来かを区別)

$$P_{\text{track}} > 15\text{GeV}$$

$$\text{頂角の}\cos\theta > 0.96$$

$$E_{\text{cone}} < 10\text{GeV}$$



- ビームバックグラウンドの除去

anti-kTアルゴリズムを用いて、粒子の横運動量が 0.6GeV 以上である場合、背景事象とみなし除去する。

トップクォークの再構成

13

- ジェットのクラスター(4-jet)

Y値の最小化

$$Y_{ij} = \frac{2 \min(E_i, E_j)(1 - \cos \theta)}{E_{vis}^2}$$

Y値が最小となる粒子*i,j*を同一の
ジェットに属するとみなし、まとめる。

ジェットが4本になるまでクラスターを
行う。

- bクォークの選別(2つのbジェット)

LCFIPlusというソフトでクォークフレーバータグを行い、bクォークと他のクォークの区別を行う。

Wボソンの再構成

14

- Wボソンの再構成

【孤立レプトン+ニュートリノ】

- ・孤立レプトンの電荷をWボソンの電荷とする

(ニュートリノは検出できないため、損失4元運動量を計算しニュートリノのエネルギーとみなす)

【bでないジェット2本→Wボソン】

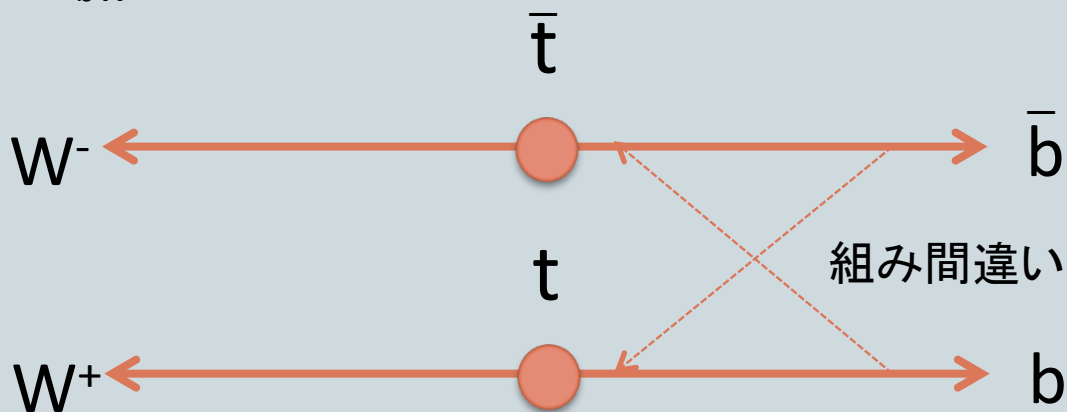
- ・ $l+v$ で再構成したWと逆の電荷とする

トップクォークの再構成

15

- トップクォークの再構成
 - bクォークのチャージがわからない
 - bと \bar{b} が区別できず、組み間違いが起こりやすい

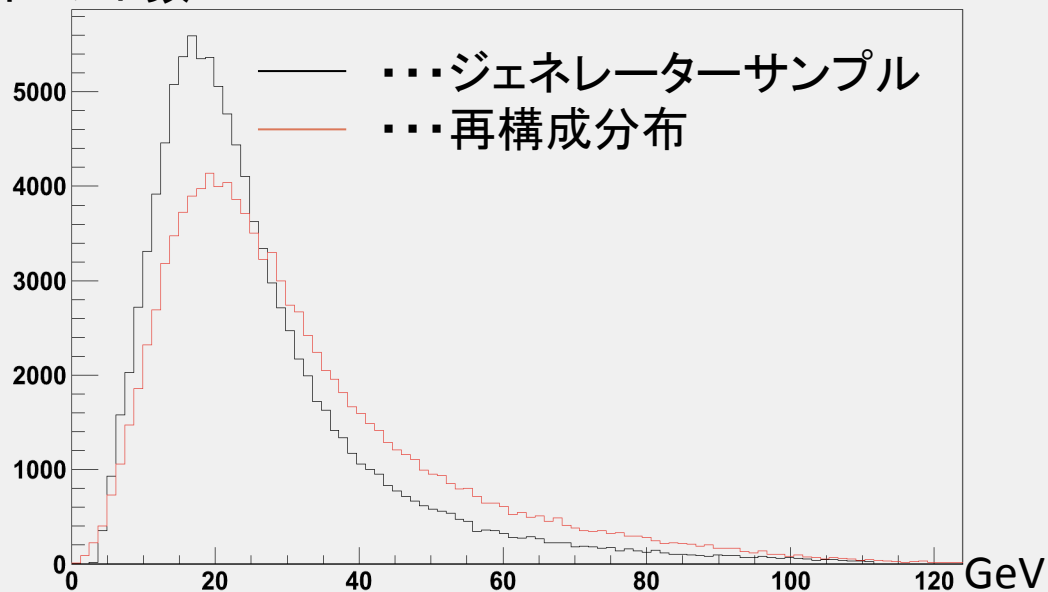
→bとWの組み合わせが2通り存在する。それら両方でbとWの内角(θ_{bW})を計算し、 $\cos\theta_{bW}$ が小さい値をとる組み合わせで再構成する



検出器と再構成による影響

16

イベント数



検出器の測定の性能や再構成の
組み間違いのため分布の形が異なる

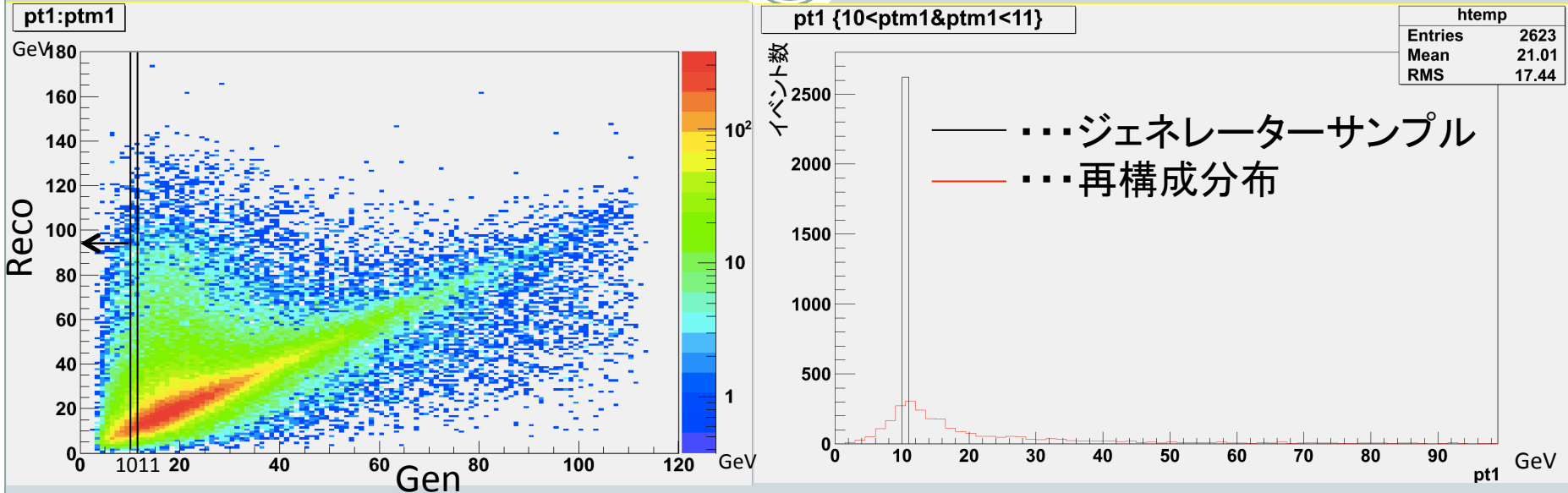
パラメタを変えて再構成分布を
いくつも作りたい

時間やデータ量の観点から難しい

ジェネレーターサンプルから再構成分布への応答関数を作成し、
その応答関数を用いて、再構成運動量分布を作成するための
擬似検出器シミュレーション(toy MC)を行う。

応答関数の例

17



- 検出器フルシミュレーションによって赤い線のように分布する。
- 応答関数を0GeVから200GeVまで1GeVずつ200個作成する。
- パラメタの異なるジェネレーターサンプルを作成し、この200個の応答関数それぞれに対して、ジェネレーターサンプルの同じ領域のエントリー数で振り直し、全て足し合わせる。
- 擬似的な検出器シミュレーションによる再構成分布とみなす。

応答関数における仮定

18

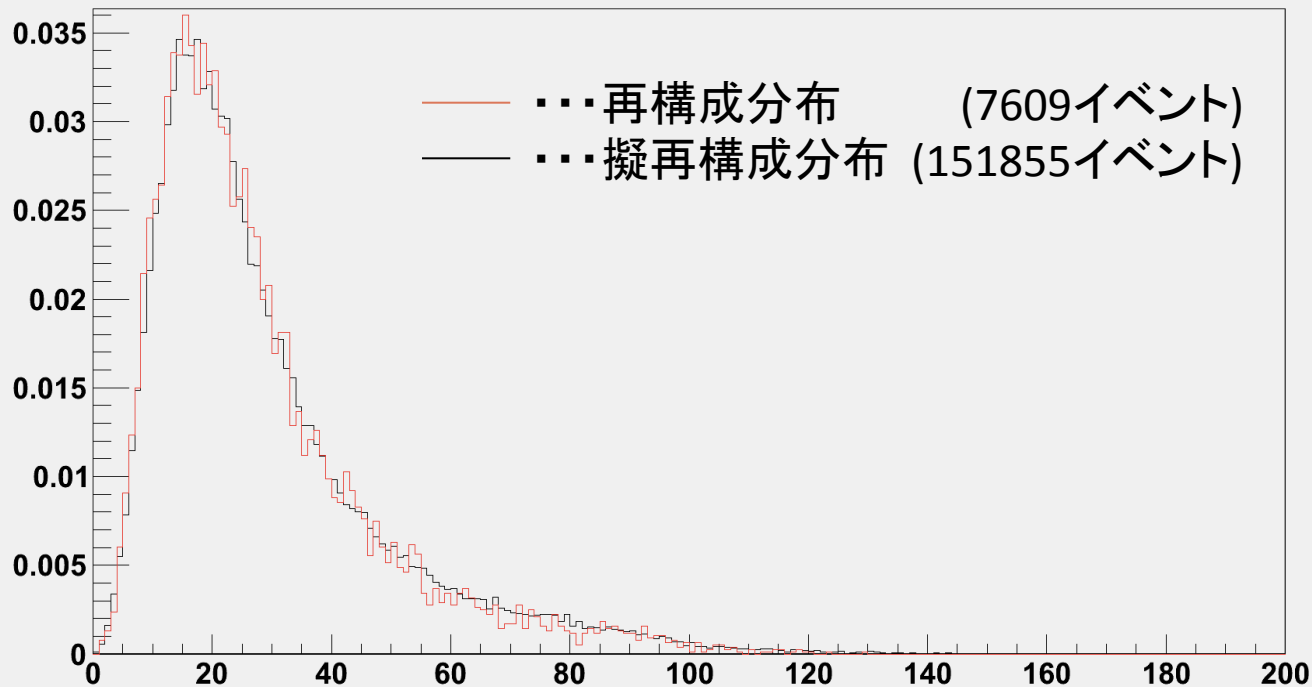
- 応答関数の作成において、 $V_{tb}=1.00$ と $\alpha_s=0.12$ を用いた。
- ただし、それ以外のパラメタでも応答関数が変わらないことを仮定している。

$V_{tb}=0.80$ で検出器フルシミュレーションを行なった再構成分布と、 $V_{tb}=0.80$ に $V_{tb}=1.00$ の応答関数を用いて作成した擬再構成分布を比較した。

再現性

19

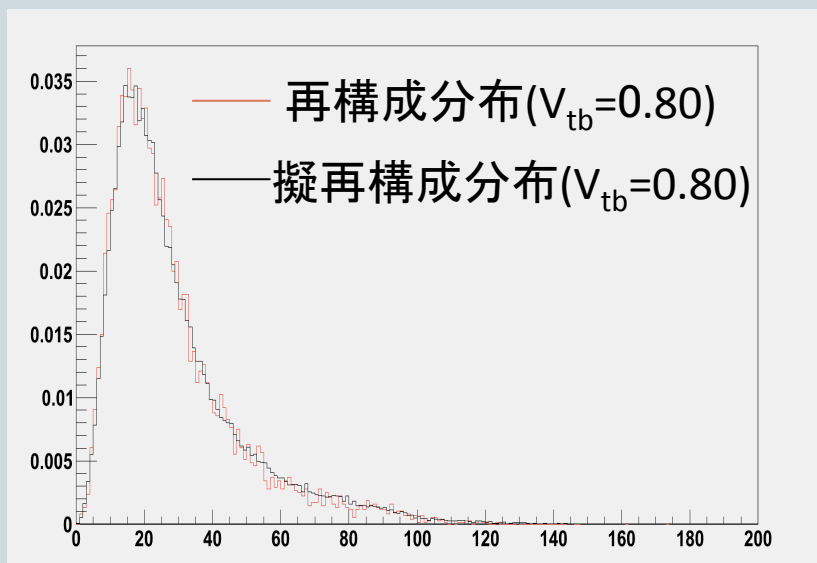
$V_{tb}=0.80$ のジェネレーターサンプルから再構成分布を作成



- 細かいずれの評価を進めた

再構成分布と擬再構成分布の比較

20



$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{200} \frac{\left(y_{Reco}^i - y_{pReco}^i \right)^2}{\left(\sigma_{y_{Reco}^i} \right)^2}$$

i :ビン数

y_{Reco}^i :再構成分布の i 番目のビンの縦軸の値

y_{pReco}^i :擬再構成分布の i 番目のビンの縦軸の値

$\sigma_{y_{Reco}^i}$: y_{Reco}^i のエラー

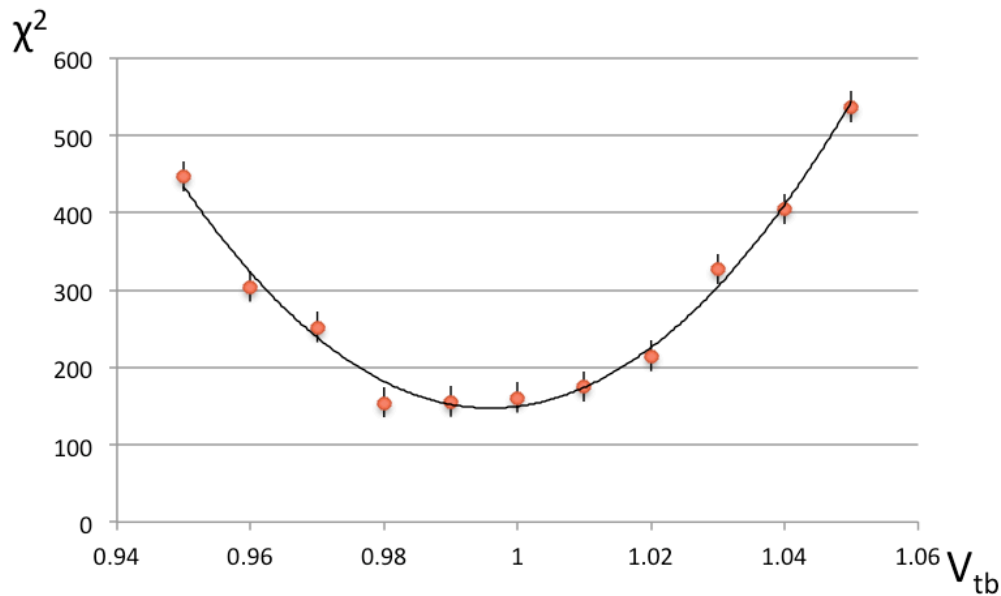
$$\Rightarrow \chi^2 = 2839.8$$

作成した全ての擬再構成分布で χ^2 の計算を行いプロットを作成した。
フィッティングを行い、関数の最小値をとるパラメタを求めた。

Γ_t の測定

21

$\alpha_s=0.12$ (固定) 2次関数でフィッティング



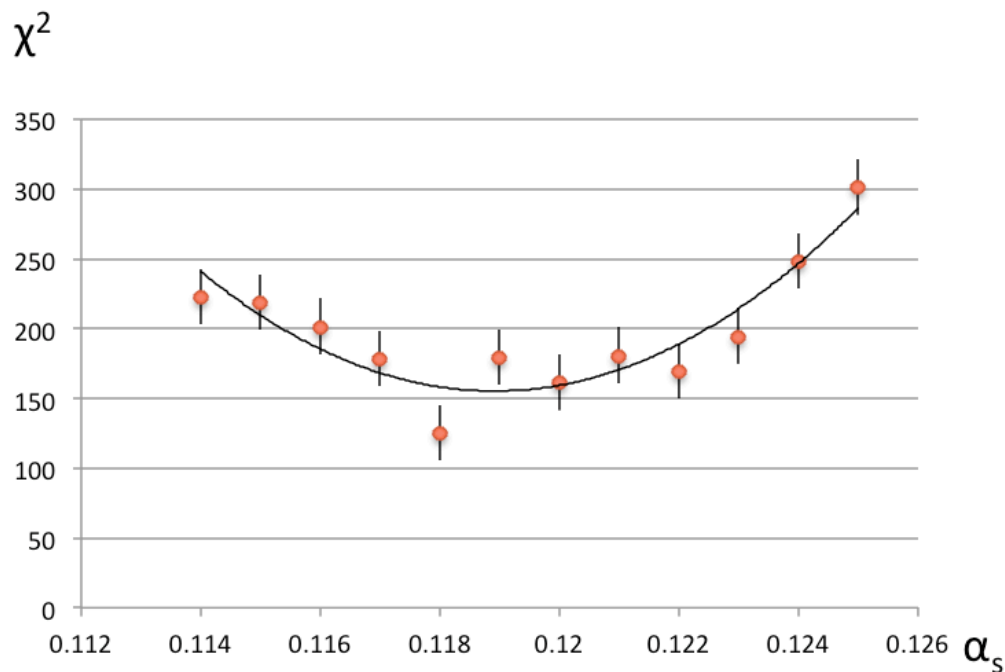
$$V_{tb} = 0.9959 \pm 0.0027$$
$$\rightarrow |V_{tb}|^2 = 0.9918 \pm 0.0054$$

先行研究では
 $\delta |V_{tb}|^2 = 0.017$
であったため、3倍程度
精度が良くなっている。

α_s の測定

22

$V_{tb}=1.00$ (固定) 2次関数でフィッティング



$$\alpha_s = 0.1189 \pm 0.0005$$

例えば、7TeVでの
CMS実験で断面積
測定から

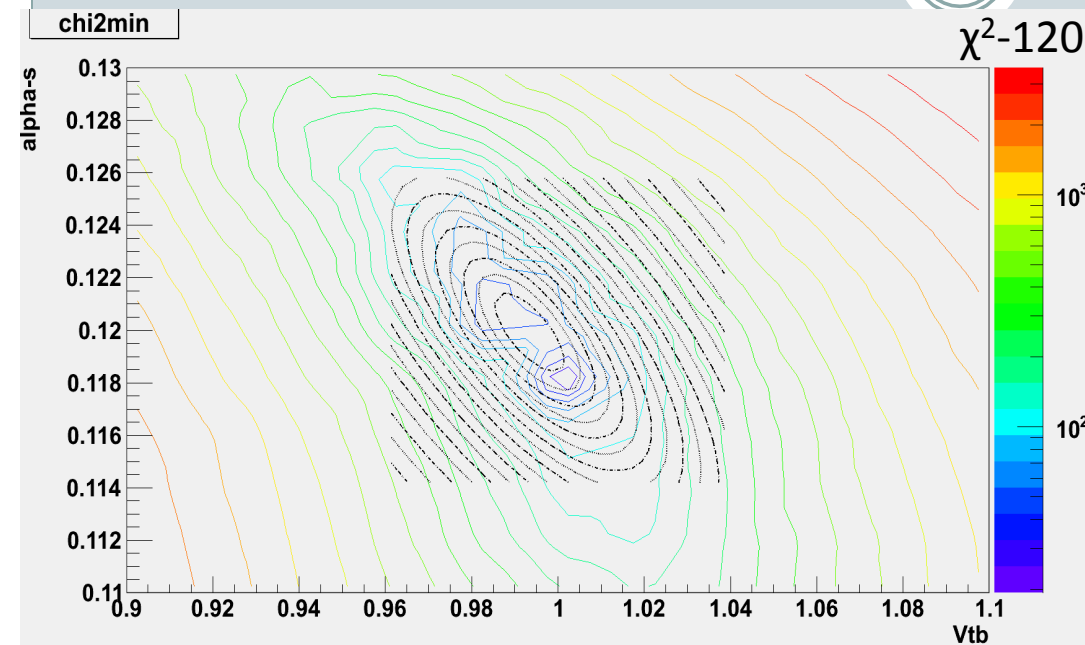
$$\alpha_s(M_Z) = 0.1151^{+0.0028}_{-0.0027}$$

という結果が出て
いる。

5から6倍の精度が
見込める。

Γ_t と α_s の同時測定

23



α_s : 0.110, 0.112, ..., 0.130
 V_{tb} : 0.90, 0.92, ..., 1.10

これらを組み合わせ、121個の擬再構成分布を作成

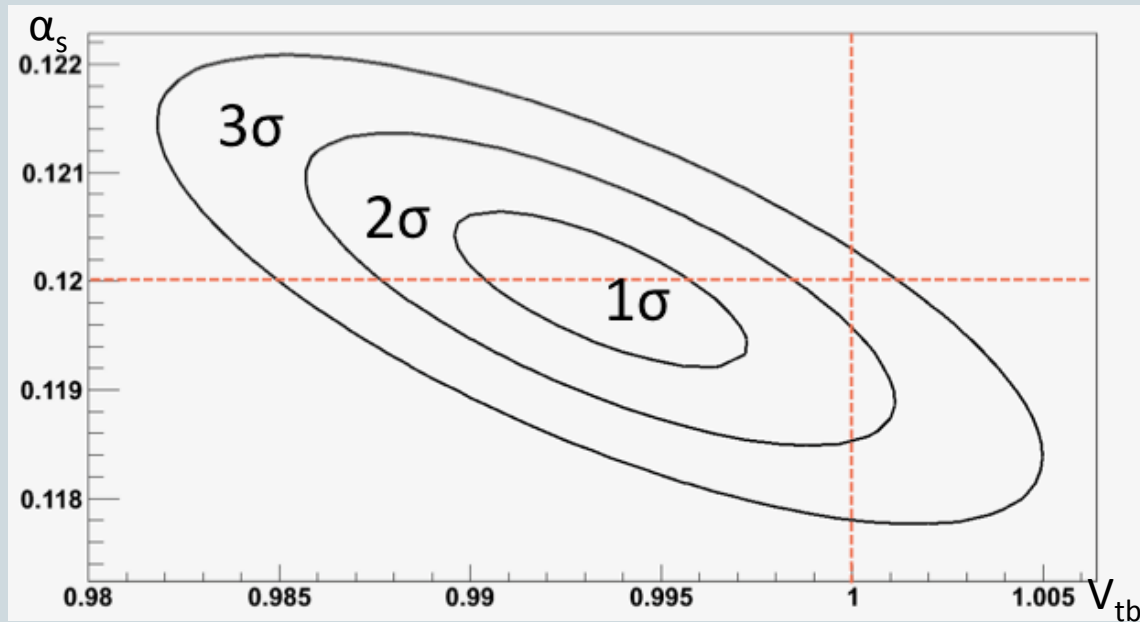
・フィッティング関数: $F(x,y)=ax^2+by^2+cx+dy+exy+f$
 $\partial F(x,y)/\partial x=0$ と $\partial F(x,y)/\partial y=0$ から連立方程式が得られ、それを解くと次の結果を得る。

$$V_{tb}=0.9933$$

$$\alpha_s=0.1199$$

最小値の近傍

24



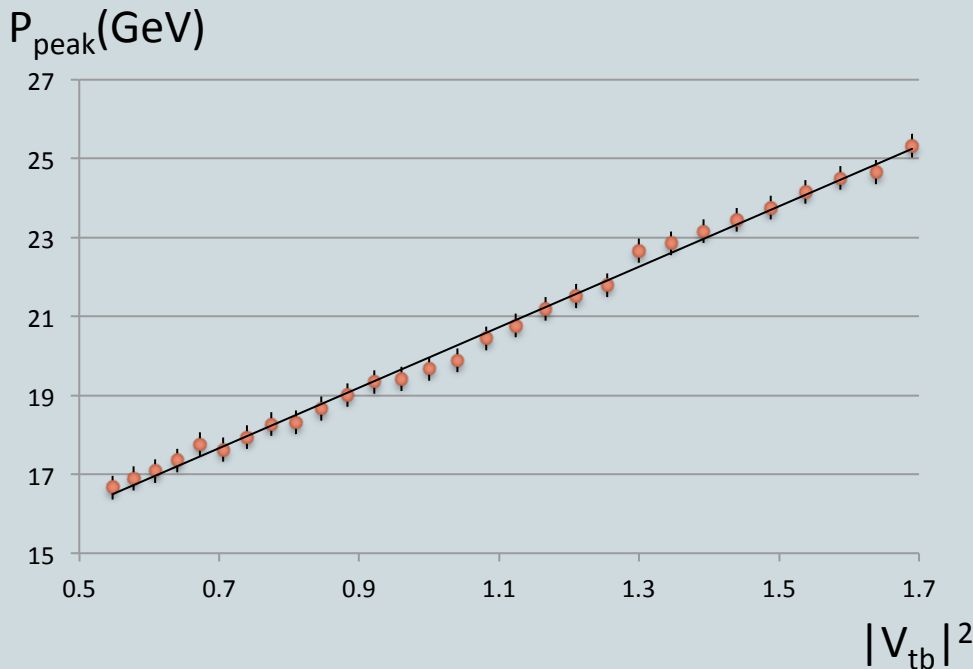
真値: $V_{tb} = 1.00$ & $\alpha_s = 0.12$
最小値から 2.55σ の位置にある

このズレは擬再構成分布の作成において統計数が少ないことが原因だと考えられる

先行研究の改善

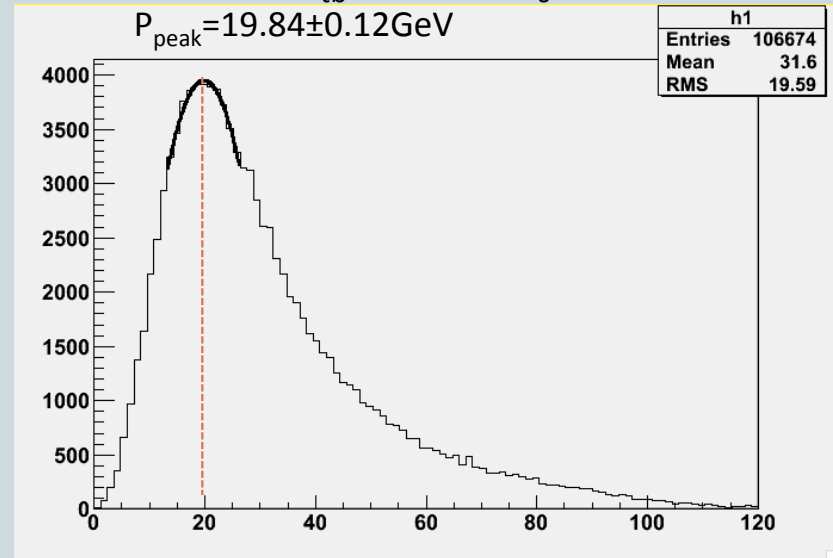
25

- P_{peak} と V_{tb} の関係を調べた ($\alpha_s=0.12$)



擬再構成分布のピーク位置と $|V_{\text{tb}}|^2$ の関係

再構成分布 ($V_{\text{tb}}=1.00$ & $\alpha_s=0.12$)

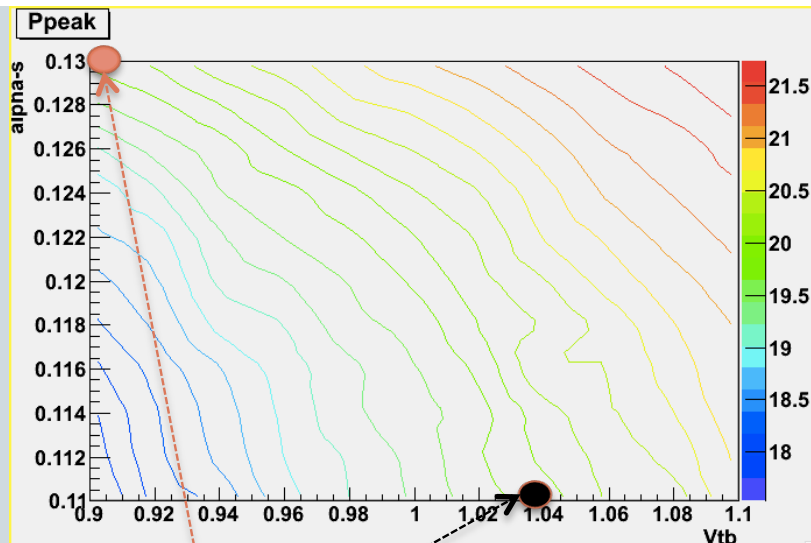


$$|V_{\text{tb}}|^2 = 0.985 \pm 0.015$$

先行研究: $\delta|V_{\text{tb}}|^2 = 0.0172$
誤差はほとんど一致していた。
→傾きには違いが見られない

ピーク位置による同時測定

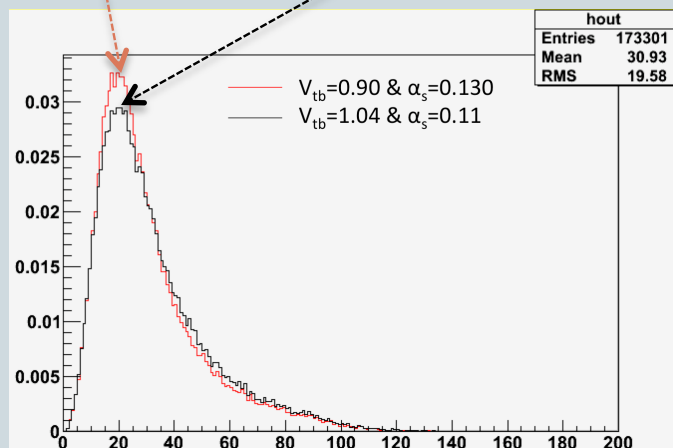
26



擬再構成分布のピーク位置の等高線

→ピーク位置が得られても2次元プロットのどの等高線が正しいかが判明するだけで、ある1点を定めることができない。

同時測定は不可能である。



同時測定を行えるという点で、本研究の解析手法であるテンプレートフィットは運動量測定を用いたトップクォークの精密測定において優れていることがわかった。

まとめ

27

- ILCの重心系エネルギー347GeVでセミレプトニックに崩壊するトップクォーク対生成イベントを、ILDフルシミュレーションを用いて 200fb^{-1} の統計データで作成し、終状態の粒子情報を基に運動量分布を作成した。
- その分布から検出器フルシミュレーションへの応答関数を定義した後に擬再構成分布を作成し、それを用いた崩壊幅(Γ_t)と強い相互作用の結合定数(α_s)の測定手法の開発を行なった。

まとめ

28

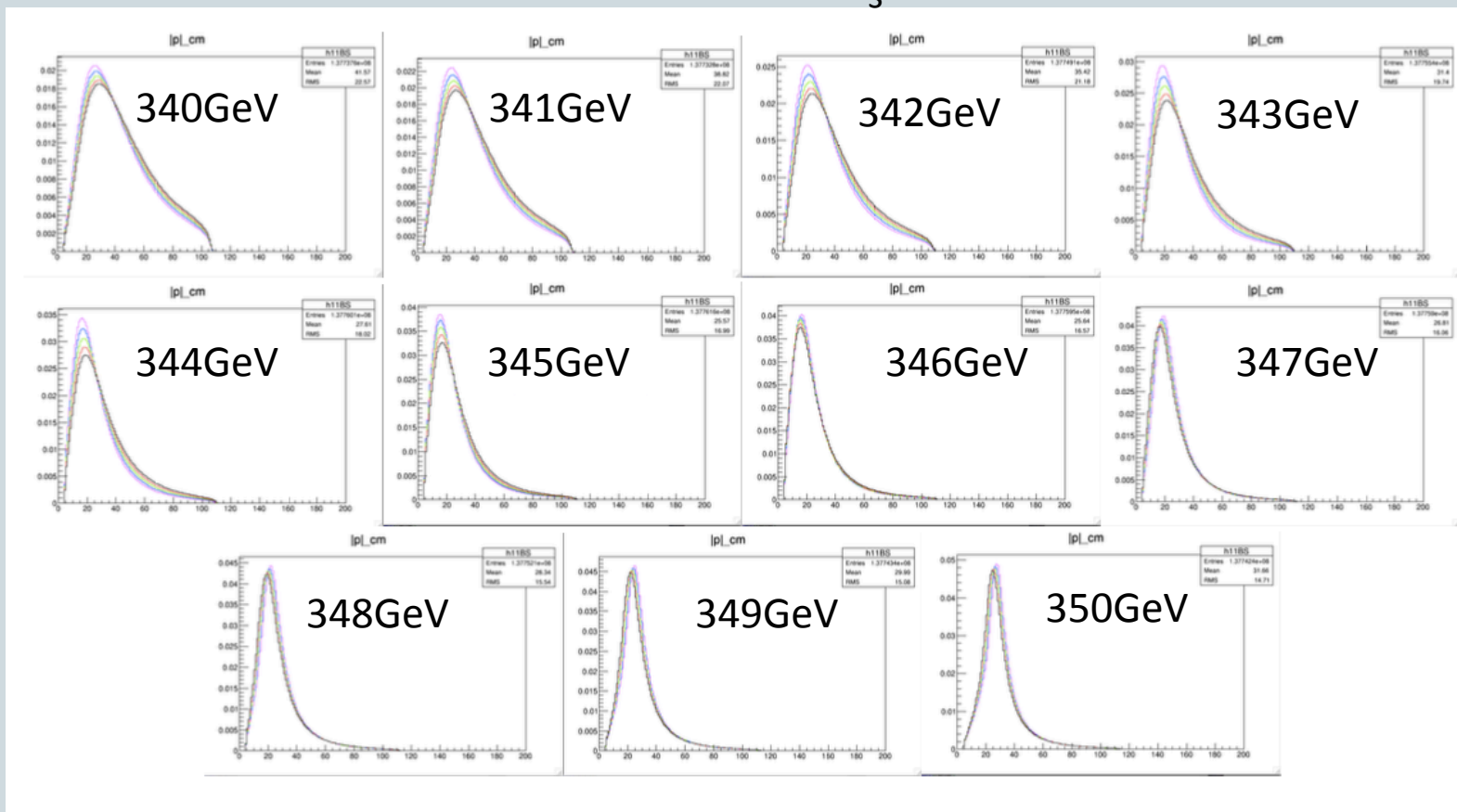
- Γ_t 単独の測定では先行研究の3倍程度の精度で、 α_s 単独の測定ではCMS実験の5倍から6倍の精度で測定できた。加えて、同時測定が可能であることがわかった。
- 運動量分布のピーク位置の測定で、 α_s を既知とし Γ_t を単独で求めることは可能だが、 Γ_t と α_s の同時測定はできない。この点において運動量分布全体の形を使ったテンプレートフィットに優位性があることがわかった。

Back Up

重心系エネルギーの決定

30

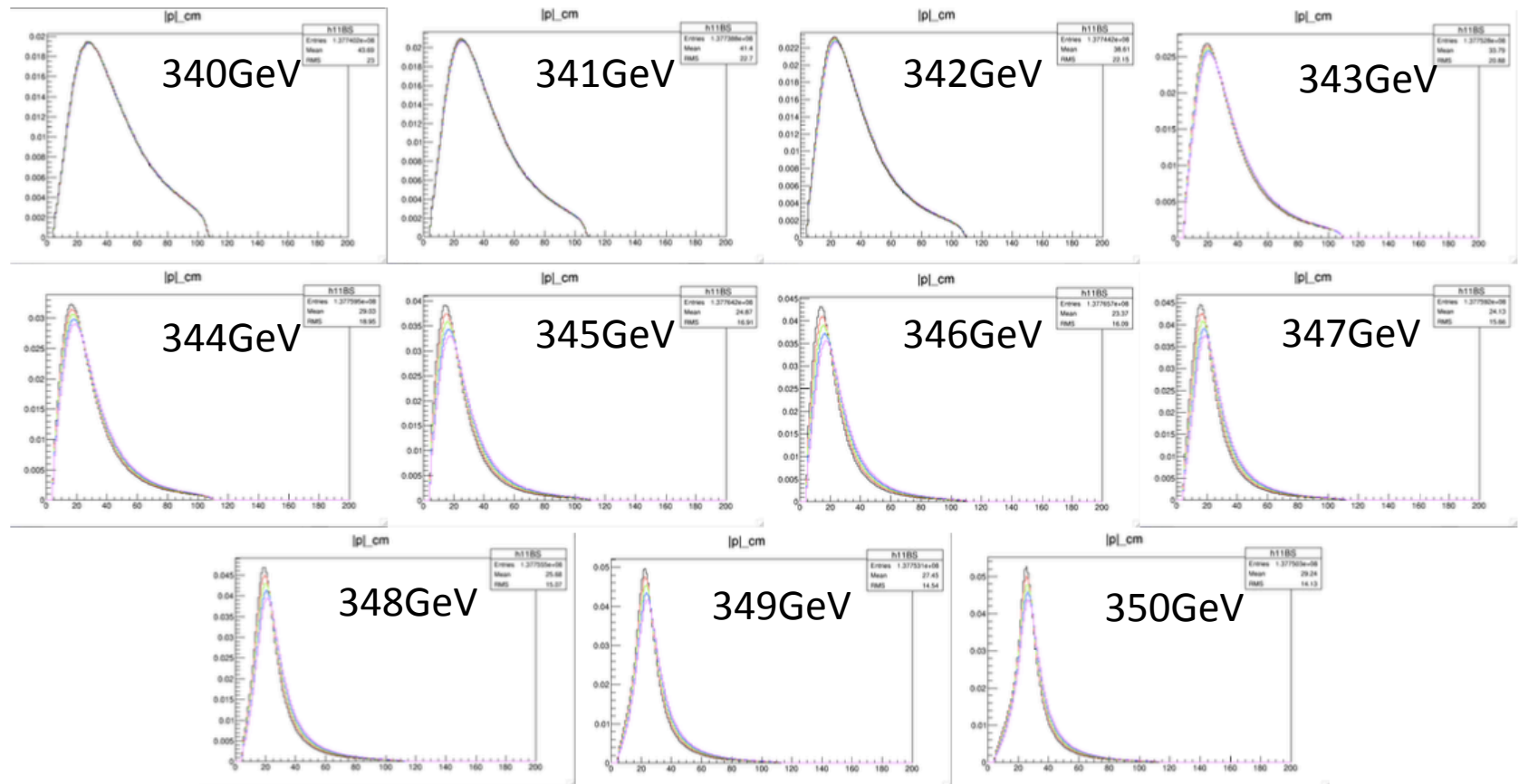
様々な重心系エネルギーで α_s を変えた時の様子



重心エネルギーの決定

31

様々な重心系エネルギーで v_{tb} を変えた時の様子



y_{Reco}^i のエラー

32

- 再構成分布と擬再構成分布の比較において、 χ^2 の計算で用いた y_{Reco}^i のエラーは次のように表される

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{200} \frac{\left(y_{Reco}^i - y_{pReco}^i\right)^2}{\left(\sigma_{y_{Reco}^i}\right)^2}$$

$$\sigma_{y_{Reco}^i} = \sqrt{n_{Reco}^i} \times \frac{1}{Scale\ Factor}$$