

# Vector Boson Fusion過程を用いた ヒッグスのスピンとCPの測定

**ICEPP**

兼田 充

**ATLAS 研究会@東大**

# Outline

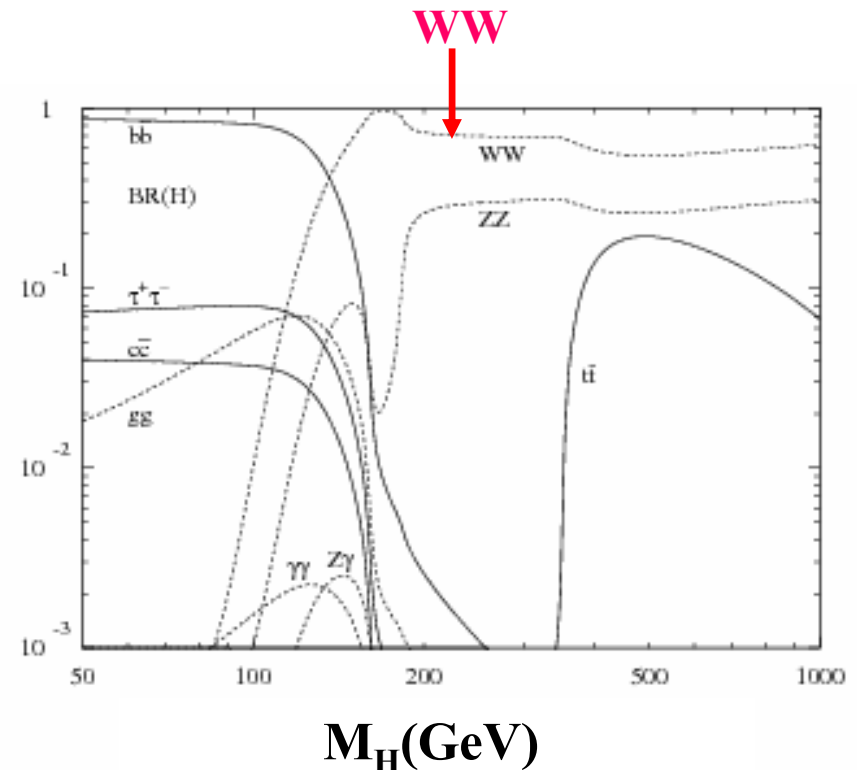
- **Vector Boson Fusion 過程の  
H- $\rightarrow$ WW- $\rightarrow$ lvjj**
- **ヒッグスの崩壊におけるスピンとCPに  
関係するパラメーター**
- **MC Event Generation**
- **イベントセレクション**
- **結果**
- **まとめ**

# Introduction

- LHC-ATLAS実験において、ヒッグス粒子が発見された後、その粒子の性質について調べるのが次の課題である。
- $M_H > 2M_W$ の時、ヒッグスは主に、 $W^+W^-$ または $ZZ$ ペアに崩壊する。  
この崩壊モードの場合、発見は容易である。  
( $L=30\text{fb}^{-1}$  20 $\sigma$ 以上のsignificance)
- ヒッグスのスピンやCPについてのstudyとしては、 **$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$** という崩壊過程におけるものがある。  
**C. P. Buszello *et al.*, hep-ph/012396**  
他にATLASでは**ATL-PHYS-2001-004**に記述がある
- 今回私達は **$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu jj$** という崩壊過程でのヒッグス粒子のスピン、CPの測定について研究した。

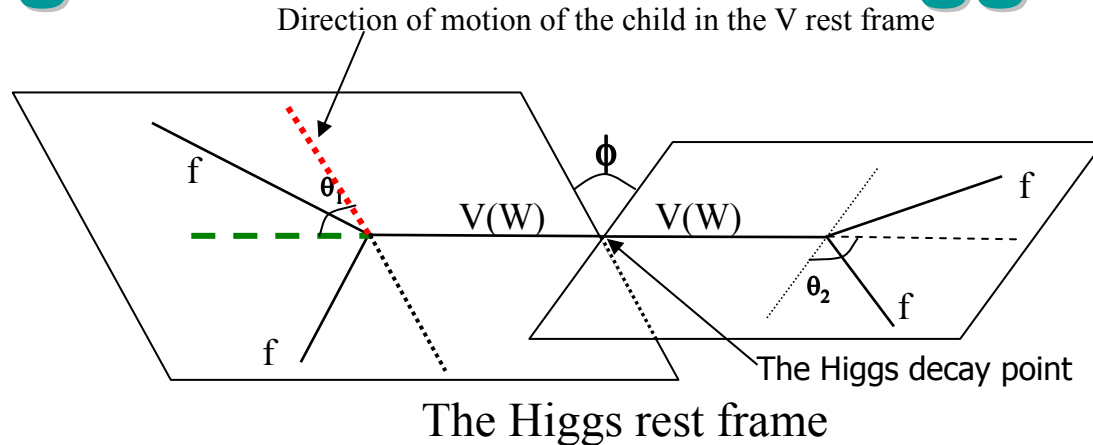
# VBF $H \rightarrow WW \rightarrow \nu jj$

- ヒッグスの質量が140GeV以上でWWへの崩壊が非常に大きい。
- Vector Boson Fusionについてのこれまでの私達の研究を用いることが出来る。
- この崩壊過程ではneutrinoが一つしか存在しないので値を解くことが出来る。従って事象を完全に再構成できるので、 $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ 、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 、 $H \rightarrow \tau\tau$ 、と並ぶ重要なチャンネルである。



$M_H(\text{GeV})$   
ヒッグスの崩壊率

# Parameters Sensitive to Spin- and CP-eigenvalues of the Higgs Decay



- $\phi$ :: ヒッグス粒子の静止系において、二つのW粒子から崩壊したそれぞれ2つのフェルミオンが作る平面の間の角度。
- $\theta$ :: W粒子の静止系におけるフェルミオンの運動量方向と、ヒッグス粒子の静止系におけるW粒子の運動量方向間の角度。

これらの角度はヒッグスのスピンとCPに対してsensitiveである

# The Decay Plane Correlation Function

Ref. Charles A. Nelson, Phys. Rev. D 37,1220(1988)

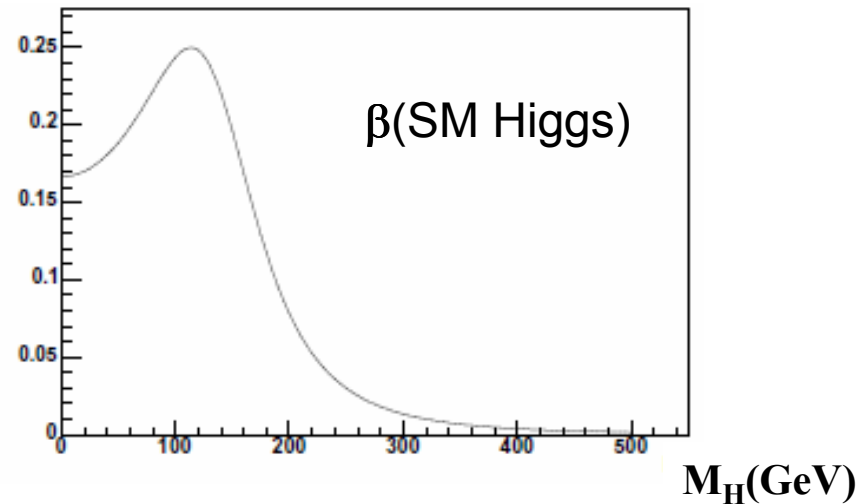
$\phi$ に関しては次のような関数でフィット出来る

$$F(\phi) = C(1 + \alpha \cos\phi + \beta \cos 2\phi)$$

しかし、jetの電荷を知ることは出来ないので次のような関数になる

$$F^*(\phi) = (F(\phi) + F(\pi - \phi))/2 = C(1 + \beta \cos 2\phi)$$

従って、このモードでは $\beta$ のみ測定することが出来る。



# The Polar Angle Distribution

Ref. V.Barger *et al*, Phys. Rev. D 49,79(1994)

- $\theta$ に関しては次のような関数でフィットすることができる:

$$G(\theta) = T \cdot (1 + \cos^2(\theta)) + L \cdot \sin^2(\theta)$$

L : W粒子の振幅のたて成分

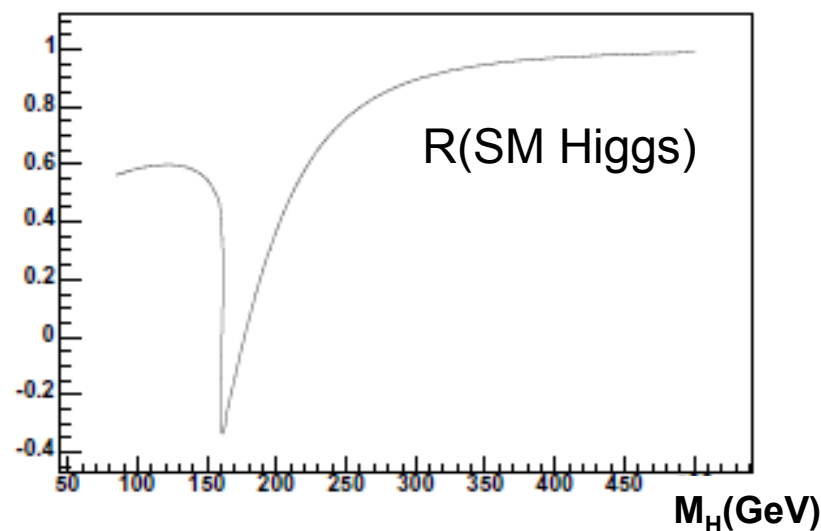
T : W粒子の振幅の横成分

- 新たにRを:

$$R := (L - T) / (L + T)$$

と定義。

これはたて成分と横成分の割合を表す量である。

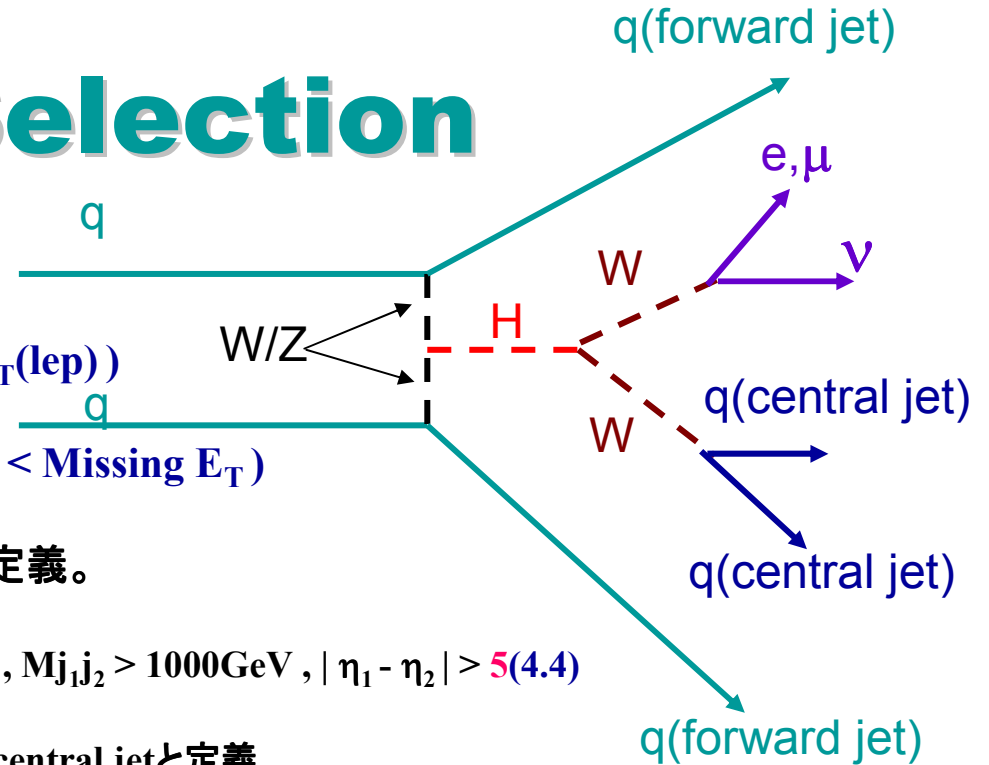


# MC Generations

- **Signal: VBF H  $\rightarrow$  WW  $\rightarrow$  lvjj (l = e,  $\mu$ )**
  - $\sigma^* \text{Br}(H \rightarrow WW) = 351 \text{fb}$  ( $M_H = 130 \text{GeV}$ ) (Pythia)
  - $\sigma^* \text{Br}(H \rightarrow WW) = 539 \text{fb}$  ( $M_H = 140 \text{GeV}$ ) (Pythia)
  - $\sigma^* \text{Br}(H \rightarrow WW) = 693 \text{fb}$  ( $M_H = 150 \text{GeV}$ ) (Pythia)
  - $\sigma^* \text{Br}(H \rightarrow WW) = 842 \text{fb}$  ( $M_H = 160 \text{GeV}$ ) (Pythia)
  - $\sigma^* \text{Br}(H \rightarrow WW) = 836 \text{fb}$  ( $M_H = 170 \text{GeV}$ ) (Pythia)
  - $\sigma^* \text{Br}(H \rightarrow WW) = 527 \text{fb}$  ( $M_H = 200 \text{GeV}$ ) (Pythia)
  - $\sigma^* \text{Br}(H \rightarrow WW) = 370 \text{fb}$  ( $M_H = 250 \text{GeV}$ ) (Pythia)
  - $\sigma^* \text{Br}(H \rightarrow WW) = 277 \text{fb}$  ( $M_H = 300 \text{GeV}$ ) (Pythia)
  - $\sigma^* \text{Br}(H \rightarrow WW) = 151 \text{fb}$  ( $M_H = 400 \text{GeV}$ ) (Pythia)
  - $\sigma^* \text{Br}(H \rightarrow WW) = 89.5 \text{fb}$  ( $M_H = 500 \text{GeV}$ ) (Pythia)
- **Background:**
  - **ttbar  $\sigma = 488 \text{pb}$  (Pythia)**
  - **W+4jets**  
 $\sigma^* \text{Br}(W \rightarrow \text{leptonic decay}) = 134 \text{pb}$   
(AlpGen + Pythia)
- **この研究はFast simulationを用いて行った。**



# Event Selection



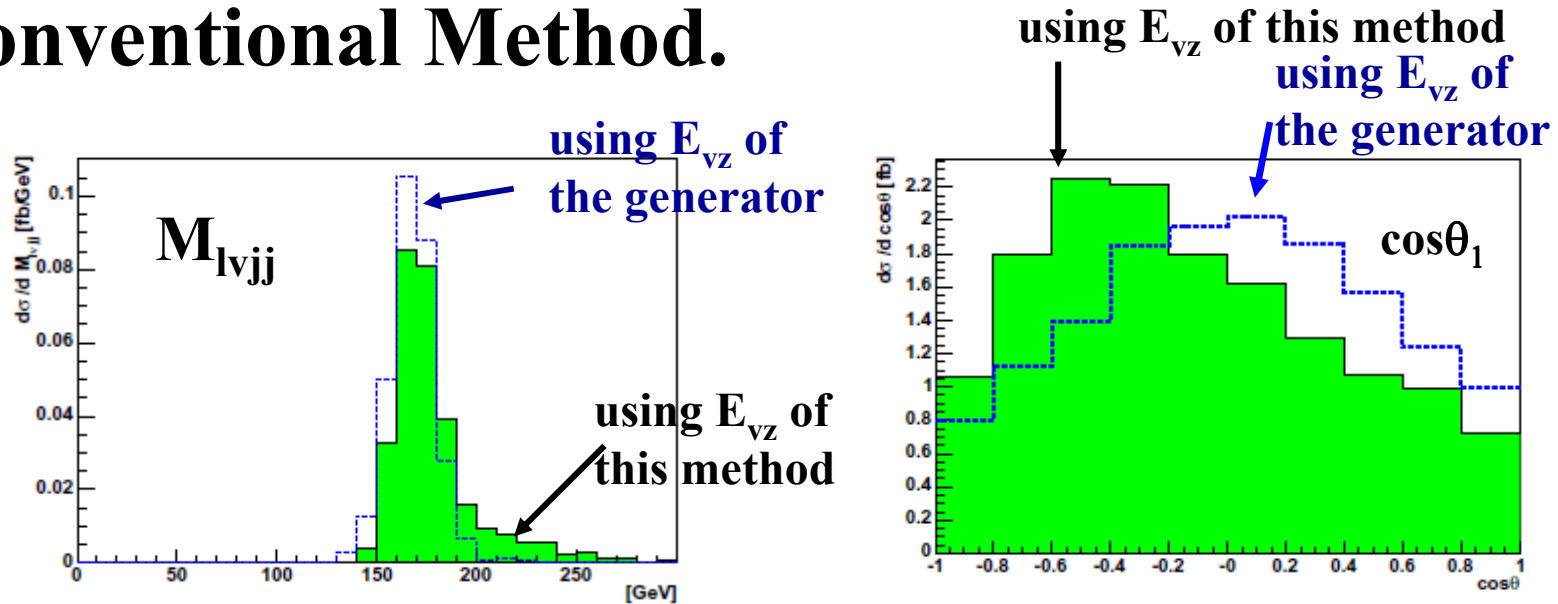
- **MH $\geq$ 160GeV (MH $\leq$ 150GeV)**
- **Lepton, Missing  $E_T$** 
  - **30GeV  $<$   $P_T(\text{lep}) <$  100GeV (30GeV  $<$   $P_T(\text{lep})$ )**
  - **$|\eta| <$  2, Number of leptons = 1**
  - **30GeV  $<$  Missing  $E_T <$  100GeV (30GeV  $<$  Missing  $E_T$ )**
- **Jet Tagging**
  - 各半球でhighest  $P_T$  jetをforward jetと定義。
  - このforward jetに対し
    - **$P_t >$  40GeV ( $P_{t1} >$  40GeV,  $P_{t2} >$  20GeV),  $M_{j1j2} >$  1000GeV,  $|\eta_1 - \eta_2| >$  5(4.4)**
- **W $\rightarrow$ jj (Central jets)**
  - 残ったjetの中から $P_T$ が大きいものから二つをcentral jetと定義。
  - **30GeV  $<$   $P_T <$  100GeV (20GeV  $<$   $P_{T1}$ , 30GeV  $<$   $P_{T2}$ ), **65GeV (20GeV)  $<$   $M_{jj} <$  95GeV****
  - $\eta_{f1} <$   $\eta_{c1}$ ,  $\eta_{c2} <$   $\eta_{f2}$
  - $\Delta R$  between forward jet and central jet  **$>$  2.0 (3.0)**
- **top veto**
  - Number of b-jets = 0 ( B.G.でtopを含むものを落とすためにtopから崩壊するbottom粒子が無いことを要求)
- **Mini jet veto**
  - 二つのforward jetの間の領域に20GeV以上のjetがforward, central jet以外に存在しないことを要求

# Selection (W->lν Reconstruction)

- neutrinoの横方向の運動量はmissing Etとして計れるが、z方向(ビーム軸方向)の運動量 $E_{\nu z}$  直接は計れないので、観測量から決めてやらなければならない。
- Conventionalな方法として $E_{\nu z}$ をmissing Etとleptonの運動量を用いて、ニュートリノとレプトンからWをリコンストラクションした際に $M_{W \rightarrow l\nu} = 80\text{GeV}$ となるように決めるものがある。  
この方法は2次方程式を導くことになるので二つの解 $E_{\nu z1}, E_{\nu z2} (|E_{\nu z1}| > |E_{\nu z2}|)$ が存在する。  
Conventionalな方法では $E_{\nu z2}$ を選んでいる。

# Selection (W->lv Reconstruction)

## Conventional Method.



$M_{lvjj}$  and  $\cos\theta$  using this method (signal only)

$M_{lvjj}$  の分布は高い方にtailがあり,  $\cos\theta_1$  の分布は負の方向に偏ってしまっている。

この方法によって得られた $E_{vz}$  は実際の $E_{vz}$ と大きく違っていて角度分布に影響を及ぼしてしまっている。

# Selection

## (W->lv Reconstruction)

我々が開発した新しい方法

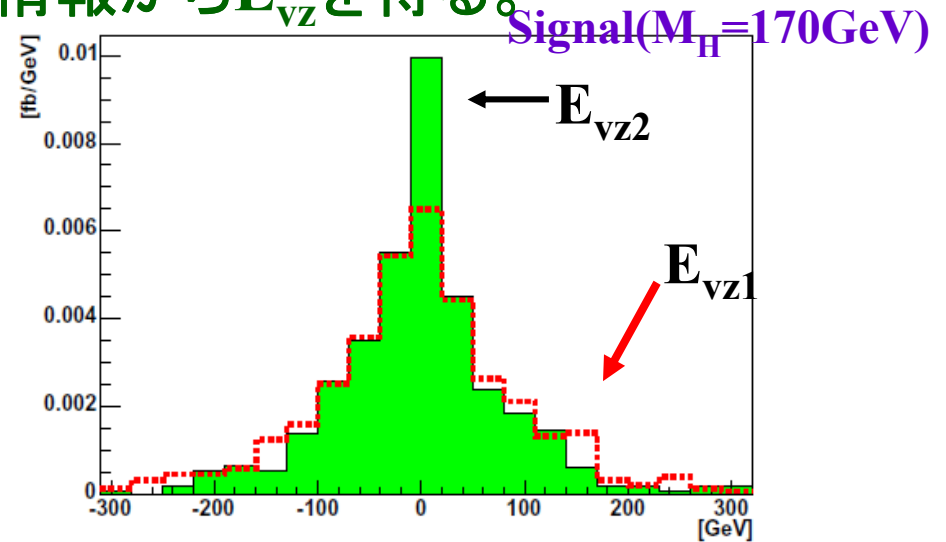
- ヒッグス発見後の測定モードとしてはヒッグスの質量の情報をインプットとして使える。つまり $M_H$ をfixしてmissing  $E_T$ 、leptonの運動量、二つのcentralジェットの情報から $E_{vz}$ を得る。

- Conventional method同様

$E_{vz1}, E_{vz2} (|E_{vz1}| > |E_{vz2}|)$ の  
二つの解があり $E_{vz2}$ を選んだ。

- 二つの方法を比べた結果、  
新しい方法の方がより正しい $E_{vz}$   
を得られるという結果が出た。

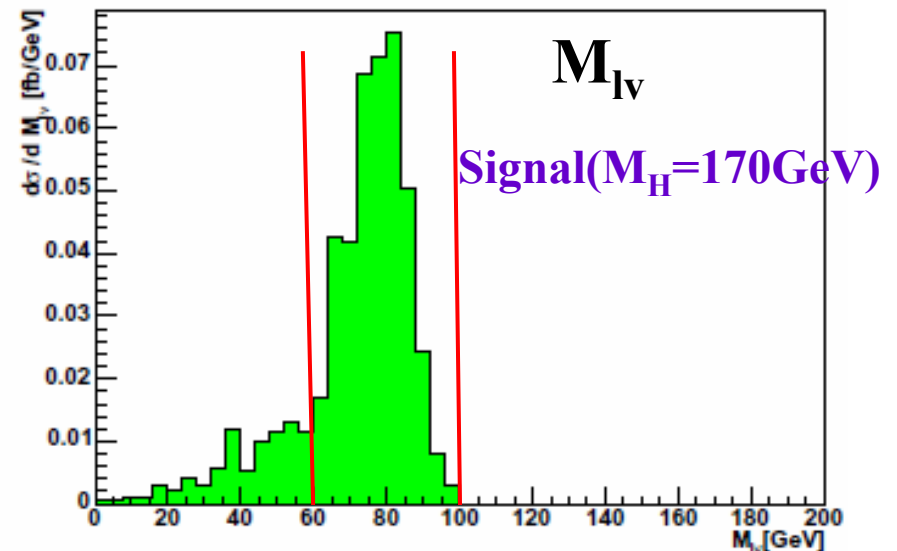
- また、ヒッグスの質量に5GeV程度の不定性があった場合でも、  
角度分布に対する大きな影響は出ないことを確認した。



$E_{vz}(\text{generator}) - E_{vz}(\text{reconstructed})$

# Selection (W->lv Reconstruction)

- この方法により $E_{\nu_Z}$ が得られなかった場合(方程式が解けない場合)そのイベントは除く。
- 得られた $E_{\nu_Z}$ を用いて  
Wをleptonとneutrinoから  
再構成し、その  
質量に対して  
 $60\text{GeV} < M_{lv} < 100\text{GeV}$   
のCutをかける。  
( $M_H \geq 160\text{GeV}$ のみ)



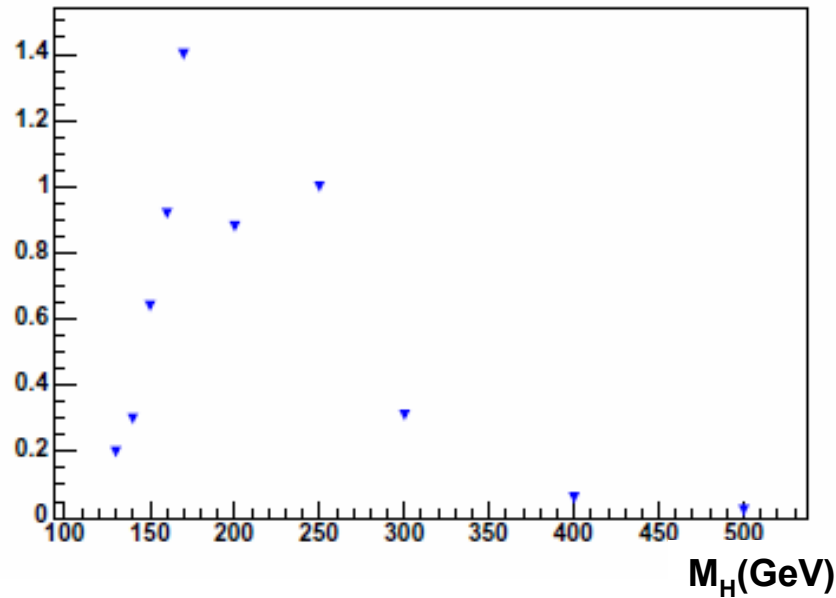
# Event Statistics

Expected cross sections after selections.

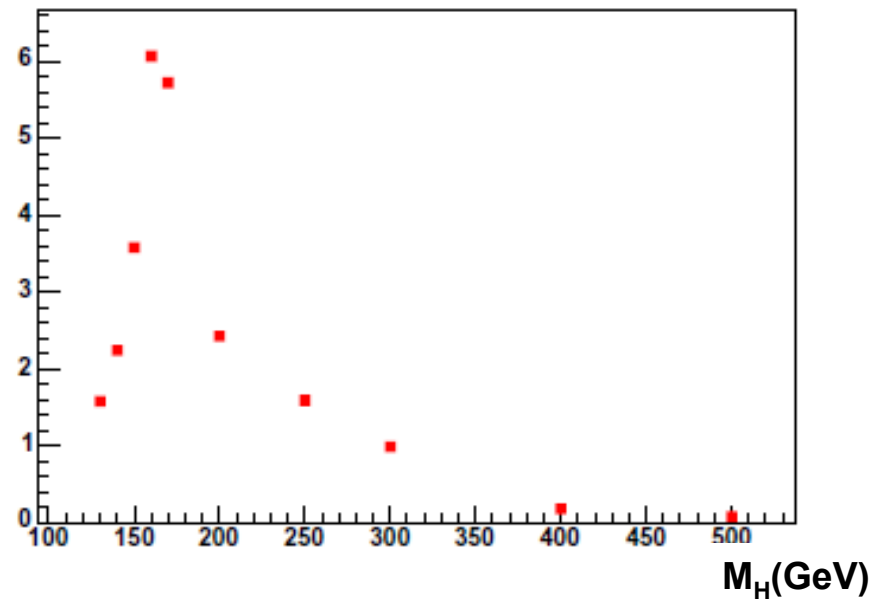
| $M_H(\text{GeV})$ | 130   | 140   | 150   | 160   | 170   |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Signal(fb)        | 0.20  | 0.30  | 0.64  | 0.92  | 1.4   |
| Ttbar(fb)         | 0.010 | 0.010 | 0.010 | <0.01 | 0.029 |
| W+4jets(fb)       | 0.15  | 0.17  | 0.31  | 0.23  | 0.57  |

| $M_H(\text{GeV})$ | 200  | 250  | 300   | 400   | 500   |
|-------------------|------|------|-------|-------|-------|
| Signal(fb)        | 0.88 | 1.0  | 0.31  | 0.061 | 0.024 |
| Ttbar(fb)         | 0.12 | 0.37 | 0.039 | 0.020 | <0.01 |
| W+4jets(fb)       | 1.2  | 3.6  | 0.95  | 1.2   | 0.99  |

# Event Statistics



Expected cross sections after selections.



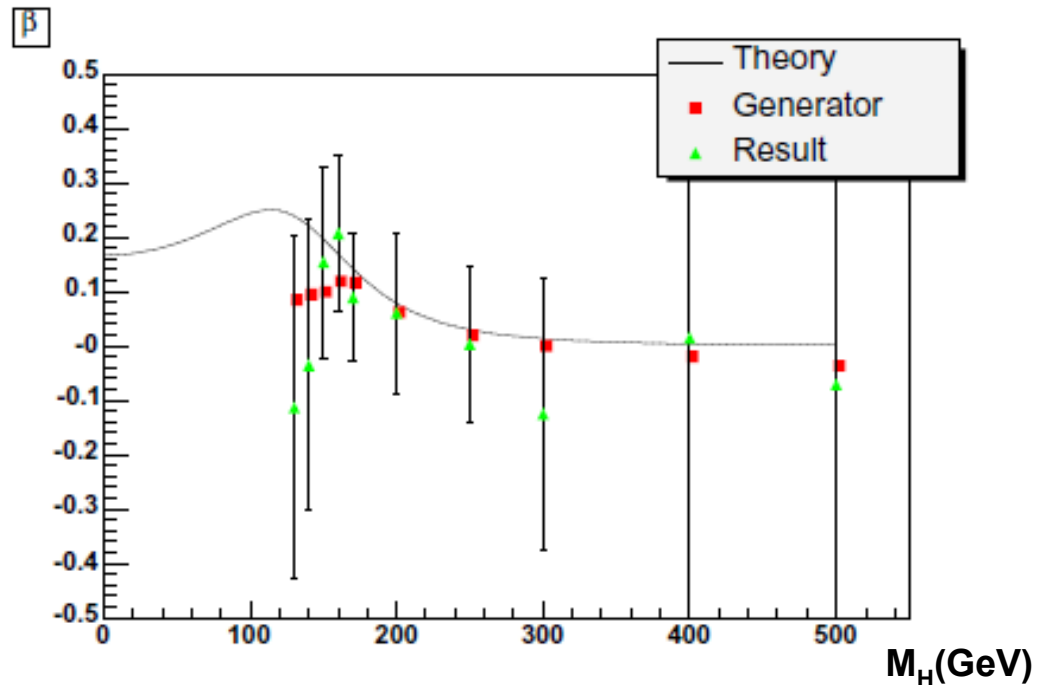
Significance( $S/(B^{1/2})$ ) at  $100\text{fb}^{-1}$ .

# Results ( $\phi$ )

Results of  $\beta$  [ $100\text{fb}^{-1}$ ](signal only and error is statistical only)

|                   |              |                |              |              |               |
|-------------------|--------------|----------------|--------------|--------------|---------------|
| $M_H(\text{GeV})$ | 130          | 140            | 150          | 160          | 170           |
| result            | -0.11+/-0.31 | -0.034+/-0.27  | 0.15+/-0.18  | 0.21+/-0.14  | 0.089+/-0.12  |
| Theory(SM)        | 0.24         | 0.22           | 0.20         | 0.17         | 0.14          |
| $M_H(\text{GeV})$ | 200          | 250            | 300          | 400          | 500           |
| result            | 0.061+/-0.15 | 0.0023+/-0.014 | -0.13+/-0.25 | 0.015+/-0.58 | -0.071+/-0.92 |
| Thory(SM)         | 0.078        | 0.030          | 0.013        | 0.0038       | 0.0015        |

|                |       |
|----------------|-------|
| Spin 1,CP +/-1 | 0     |
| Spin 0,CP -1   | -0.25 |



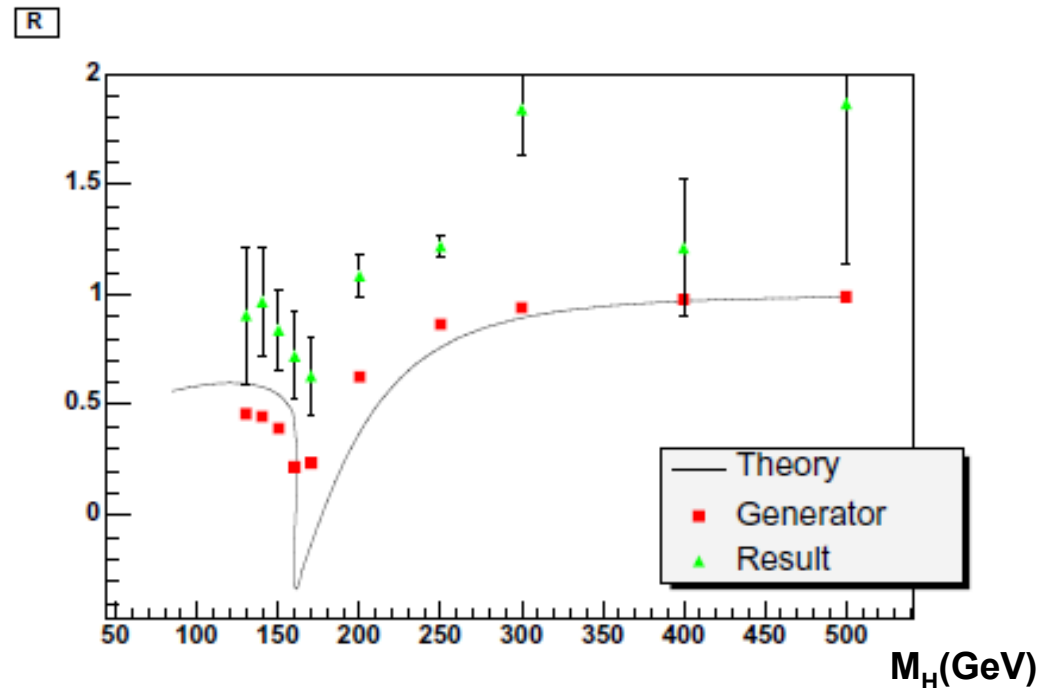


# Results ( $\cos\theta$ )

Results of R [100fb<sup>-1</sup>](signal only and error is statistical only)

|                   |                  |                  |                 |                 |                 |
|-------------------|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $M_H(\text{GeV})$ | 130              | 140              | 150             | 160             | 170             |
| result            | 0.91 $\pm$ 0.31  | 0.97 $\pm$ 0.24  | 0.84 $\pm$ 0.18 | 0.72 $\pm$ 0.20 | 0.63 $\pm$ 0.17 |
| Theory(SM)        | 0.60             | 0.58             | 0.55            | 0.41            | -0.034          |
| $M_H(\text{GeV})$ | 200              | 250              | 300             | 400             | 500             |
| result            | 1.09 $\pm$ 0.099 | 1.22 $\pm$ 0.044 | 1.84 $\pm$ 0.21 | 1.21 $\pm$ 0.31 | 1.87 $\pm$ 0.73 |
| Thory(SM)         | 0.37             | 0.76             | 0.89            | 0.97            | 0.99            |

|                |     |
|----------------|-----|
| Spin 1,CP +/-1 | 0.3 |
| Spin 0,CP -1   | -1  |



2005年10月1日

17

# Summary

- Higgs Mass Constraint Method を考案し、 $H \rightarrow WW \rightarrow \nu jj$ において Conventional Methodより正確な $E_{\nu Z}$ を得ることが出来た。
- LHC-ATLAS実験において、ヒッグスがスピン0の場合、 $H \rightarrow WW \rightarrow \nu jj$  過程を用いて、CPがeven かoddか識別可能。
- 130,140GeVなど、 $M_H$ が小さいところでは難しい

## 今後の課題

- Selectionについてはまだ改良の余地がある。
- tbjのような他のB.G.についても調べてみる必要がある。
- 理論値とのずれについて。
- スピン1やCP oddのヒッグスについての研究。
- **Forward jets** の角度相関もヒッグスのスピン、CPに対してsensitiveな値で、これについても今後研究する。

# Back Up

# Generator Fit

$\cos\theta$

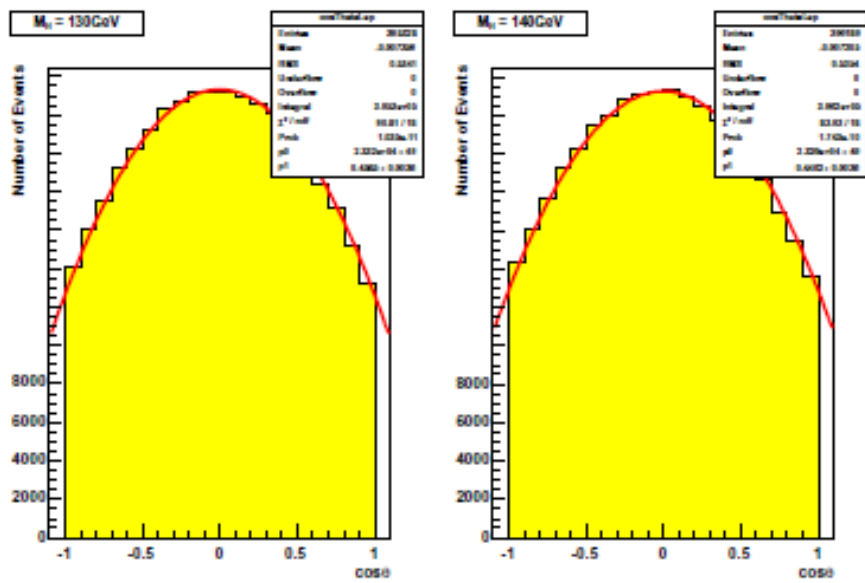


Figure 1: cosTheta1

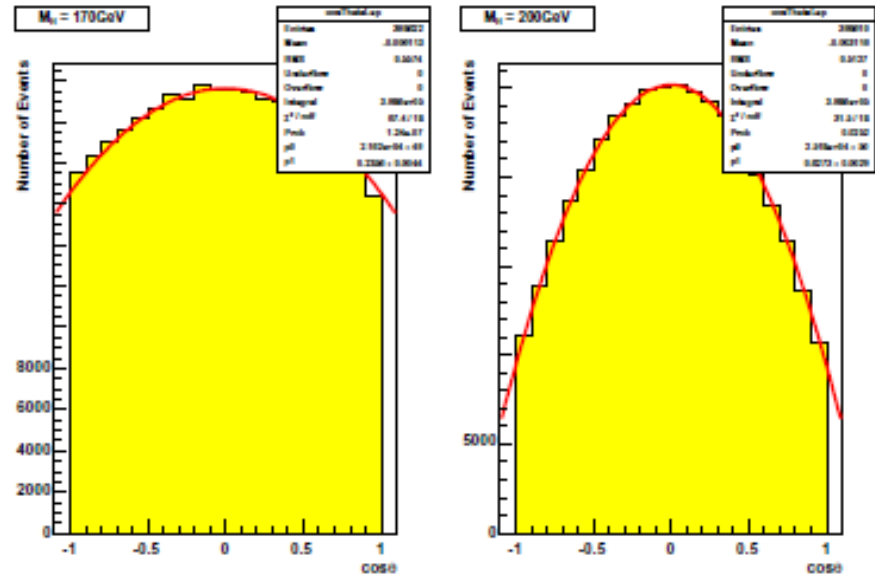
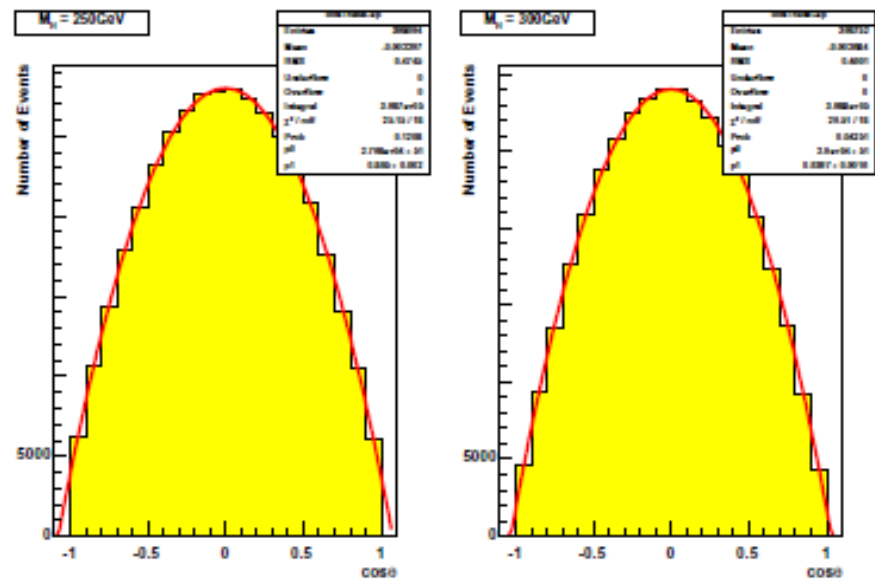
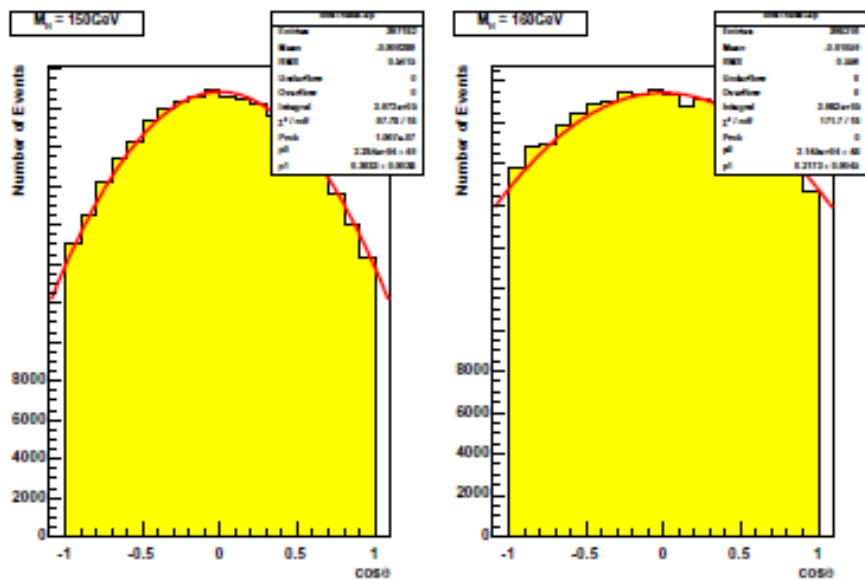
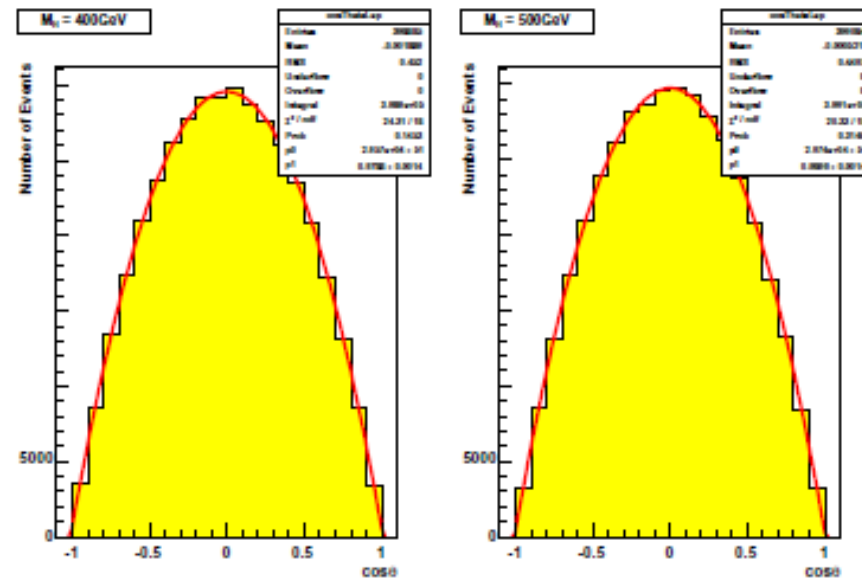


Figure 3: cosTheta3









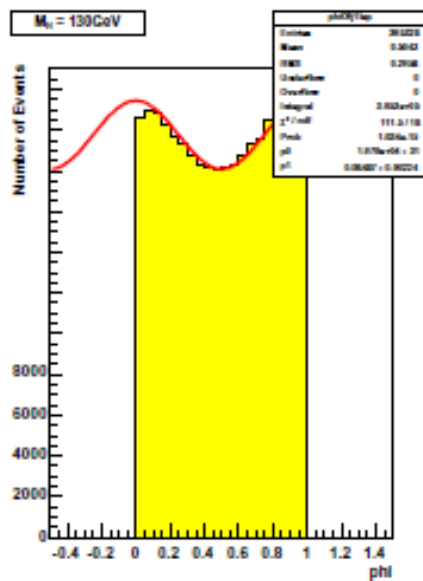


图 6: phi0/phi1

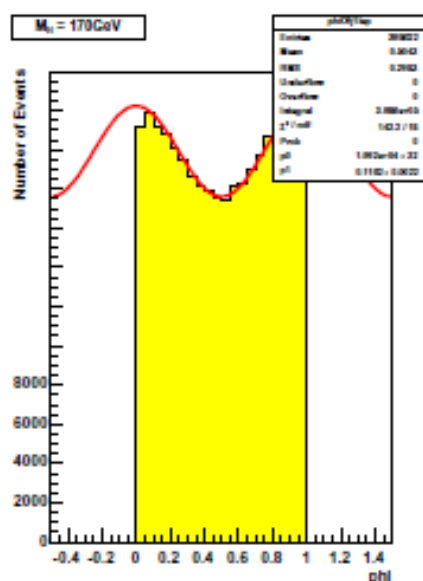
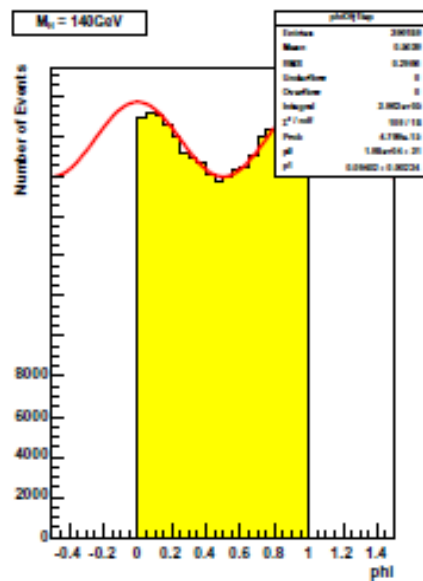
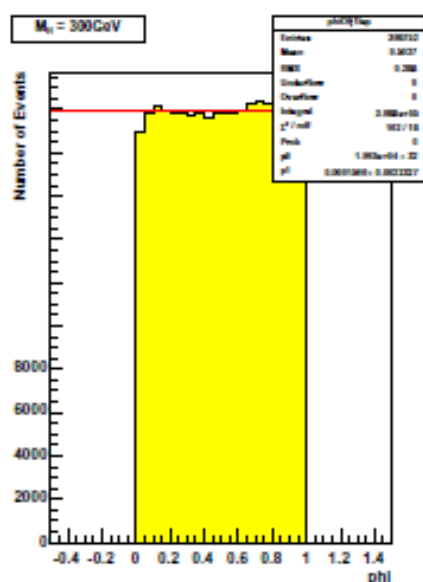
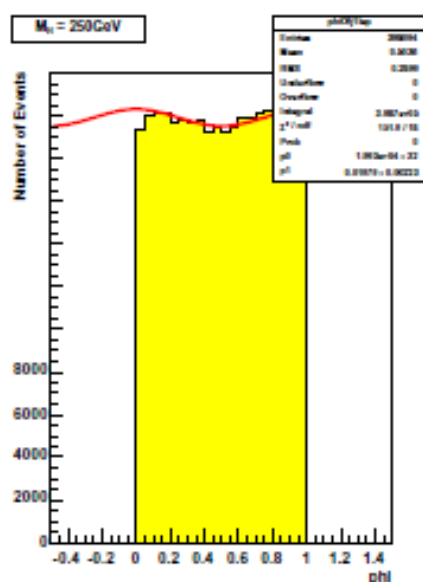
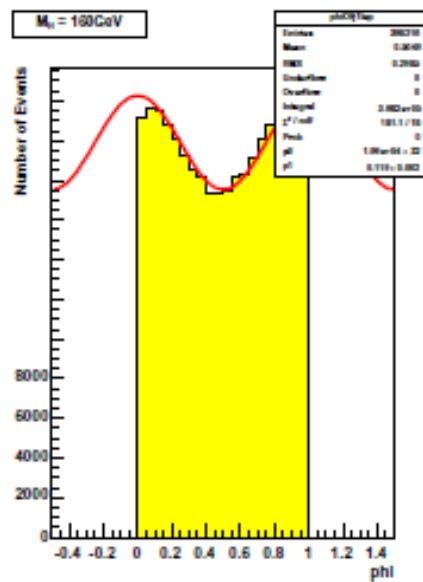
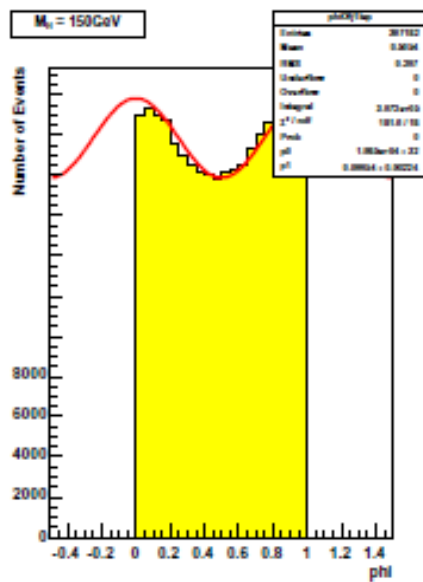
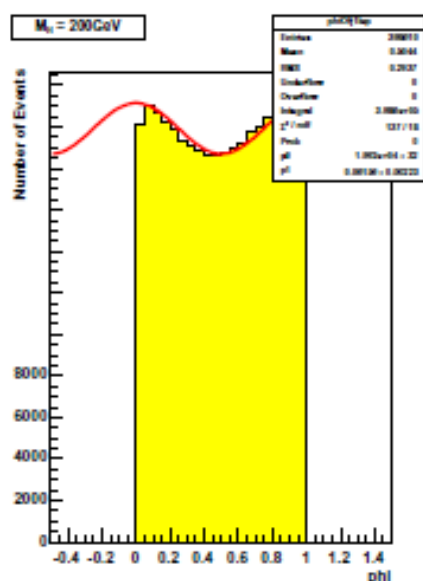
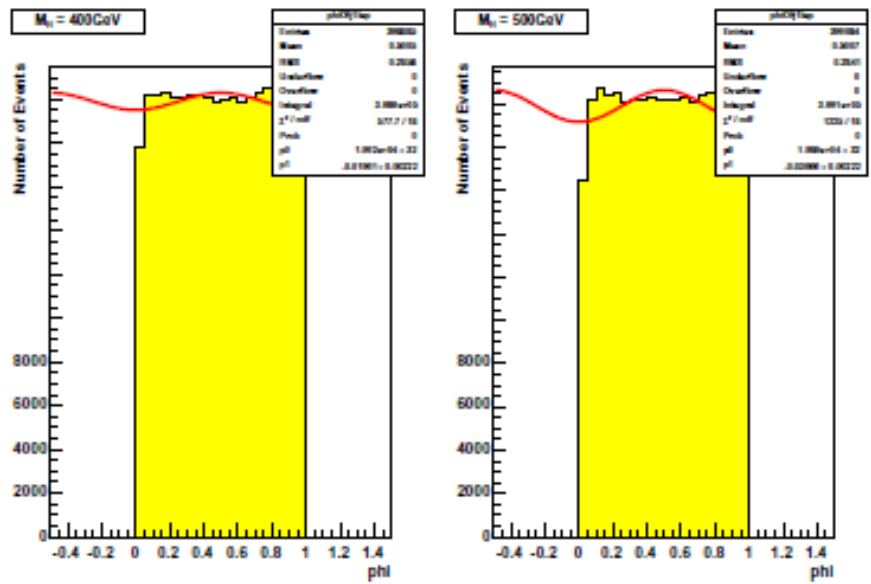


图 8: phi0/phi1





# Result Fit

$\cos\theta$

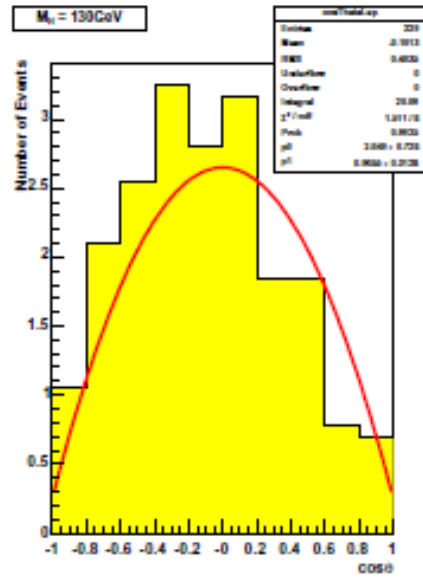


Figure 1:  $\cos\Theta_{1}$

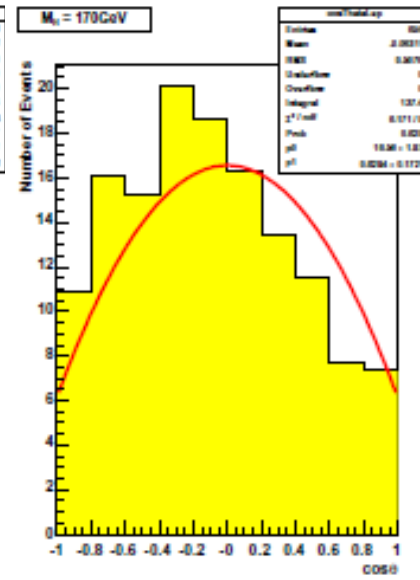
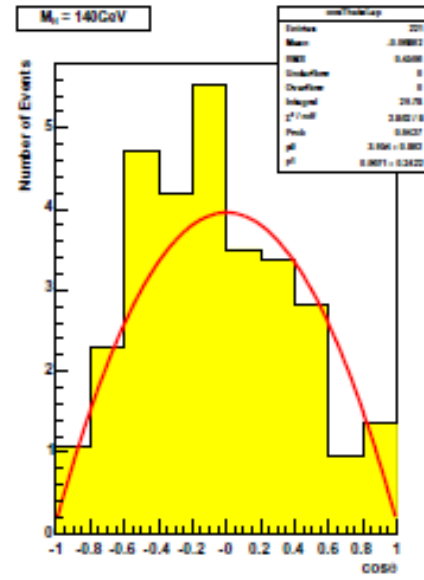
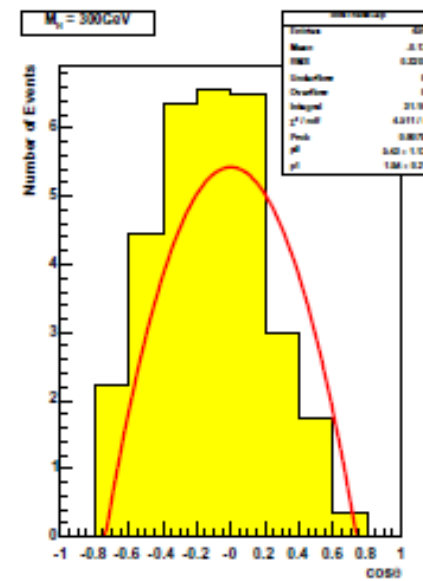
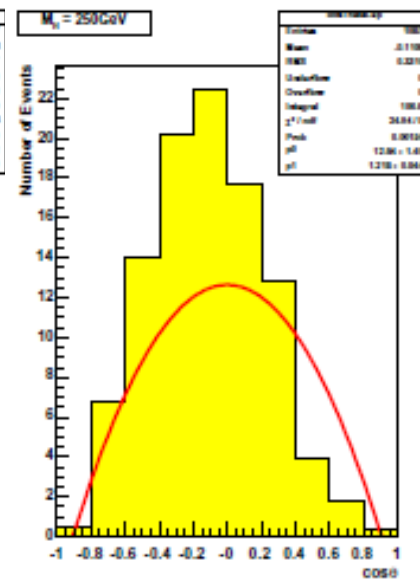
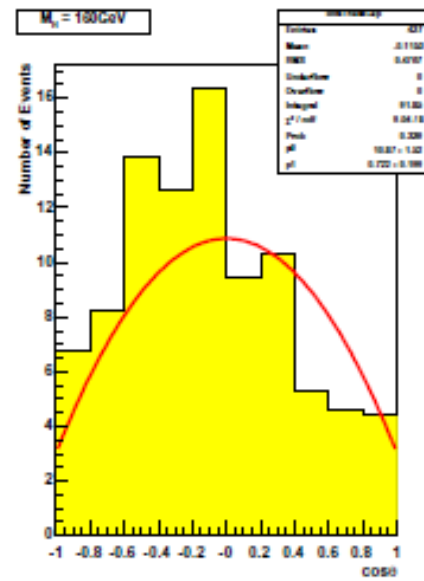
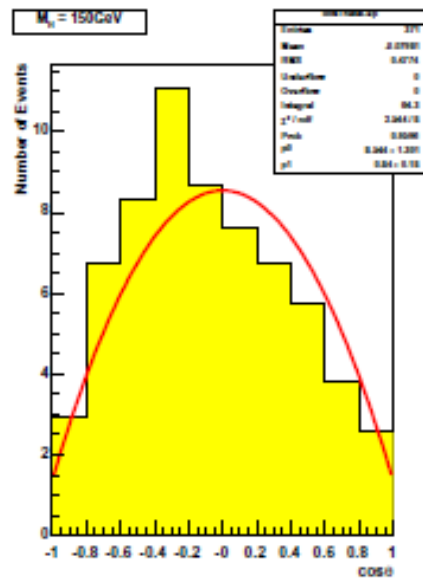
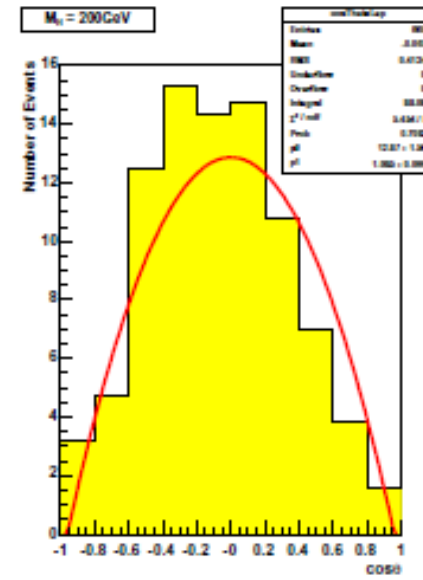
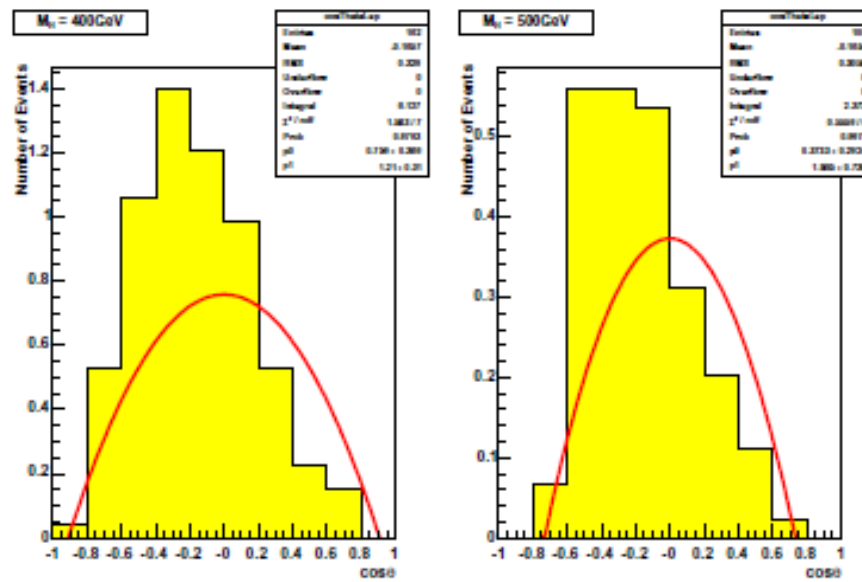
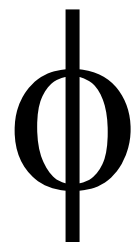


Figure 3:  $\cos\Theta_{1}$







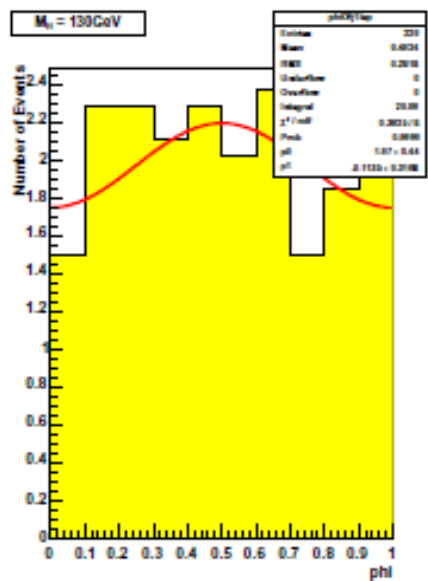


图 6: phiOj1lep1

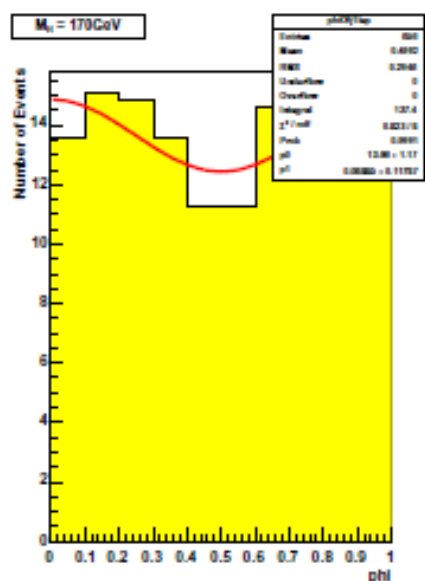
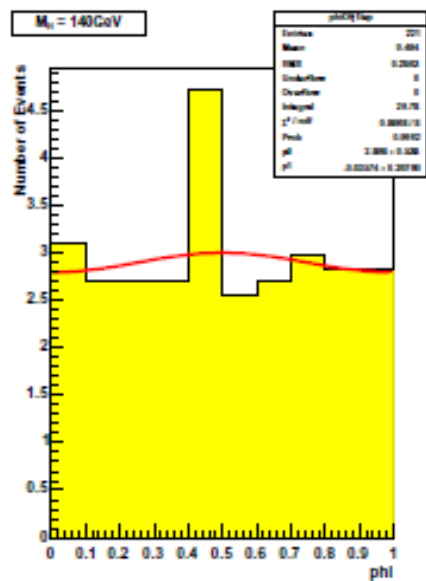
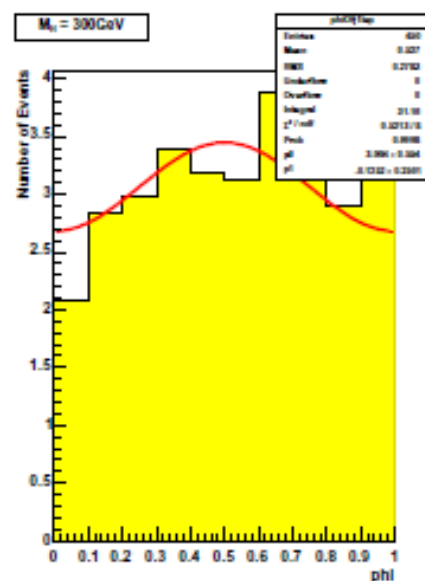
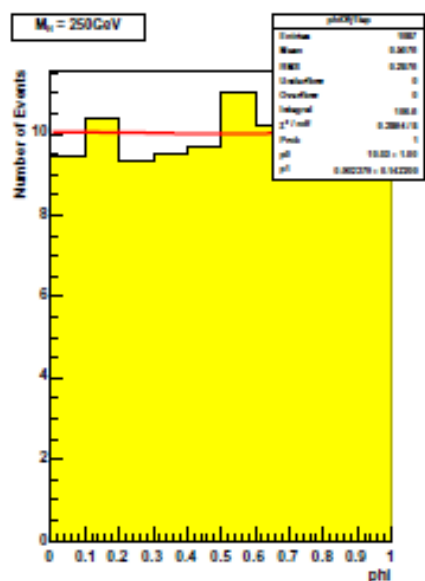
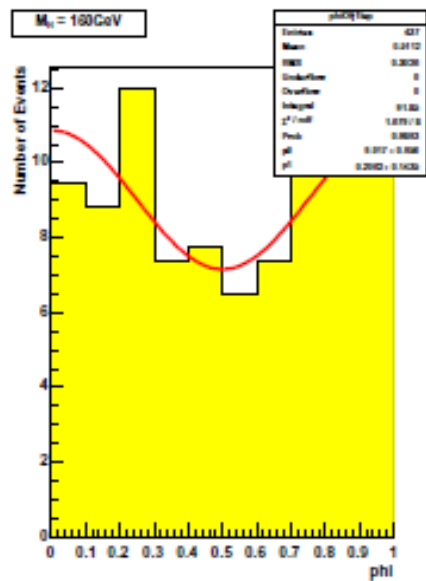
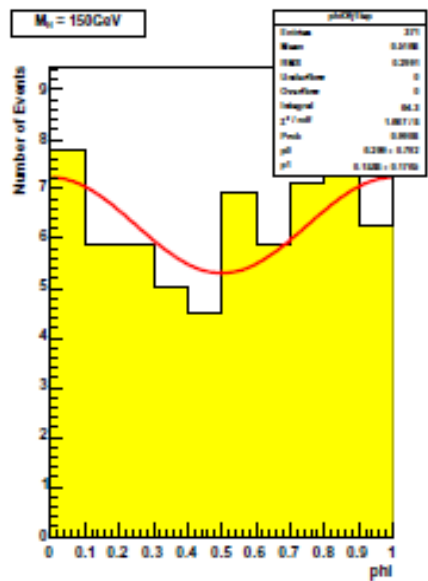
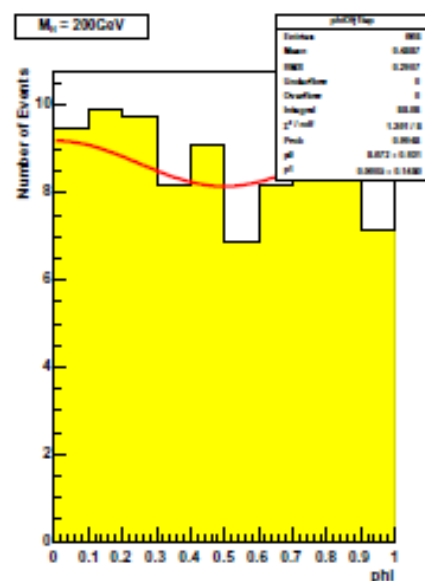
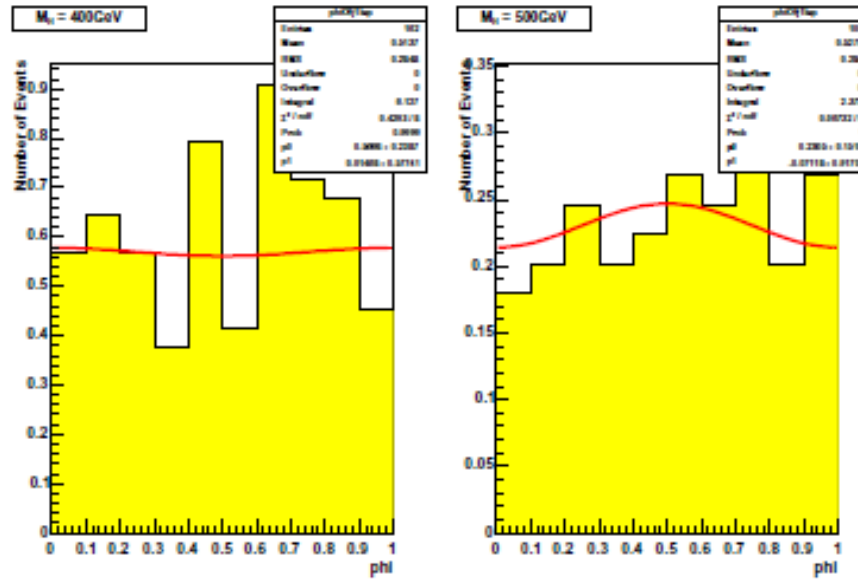


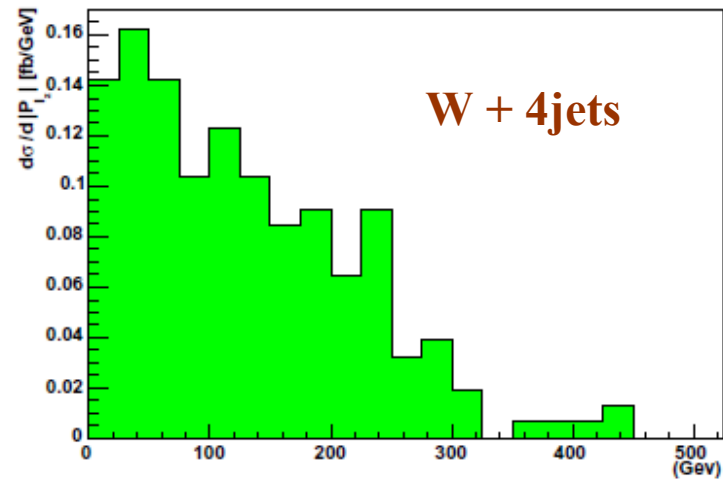
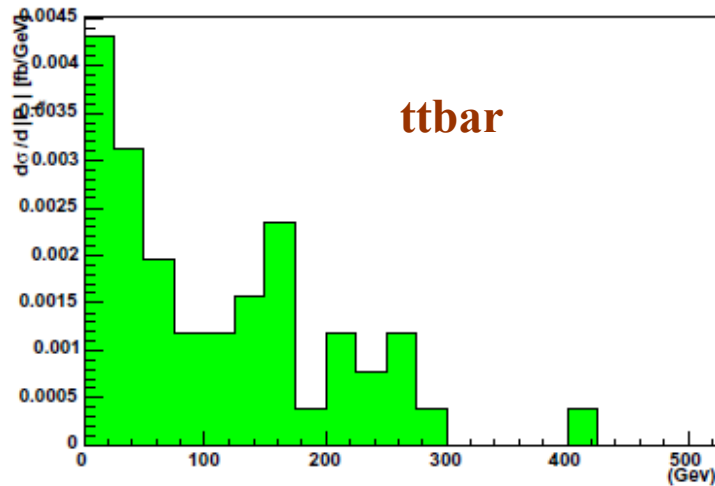
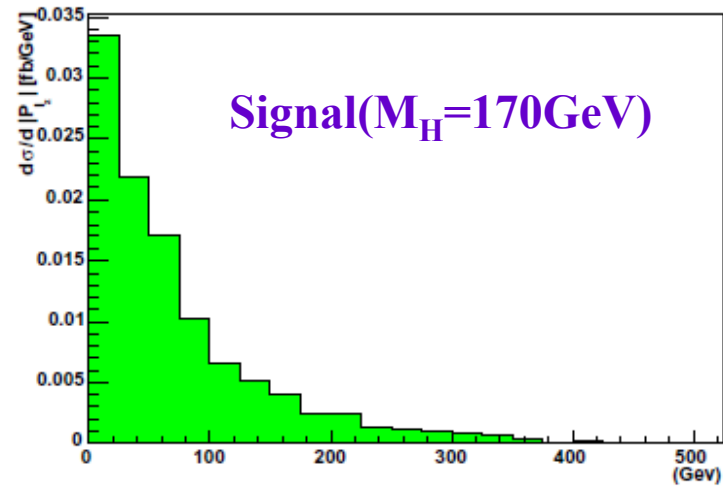
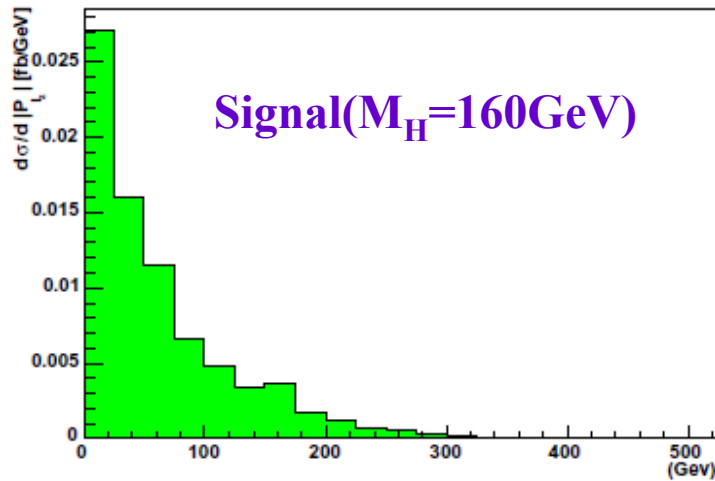
图 8: phiOj1lep3







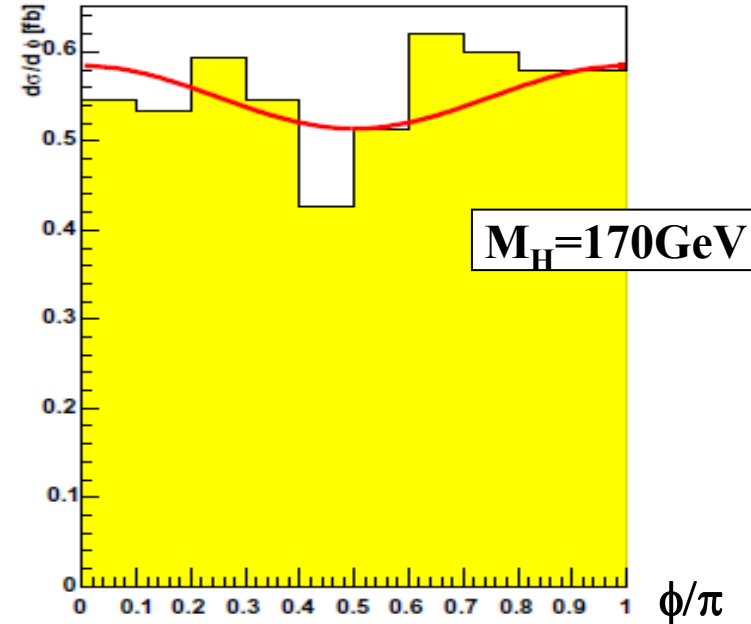
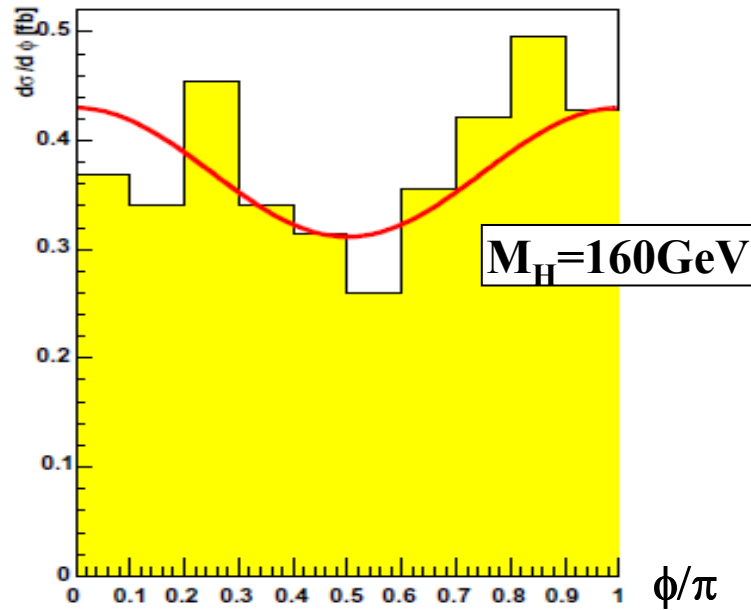
# W->lv Reconstruction



## Distributions of $|P_{1z}|$

# 学会の時の結果

# Results ( $\phi$ )

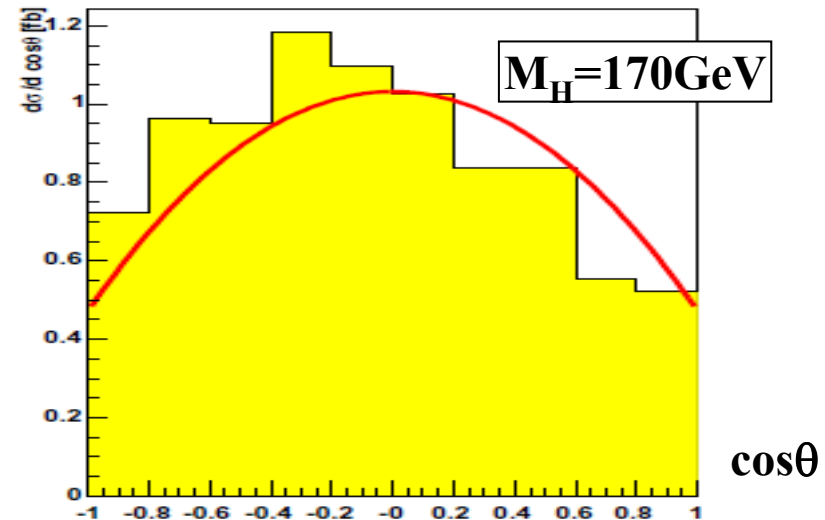
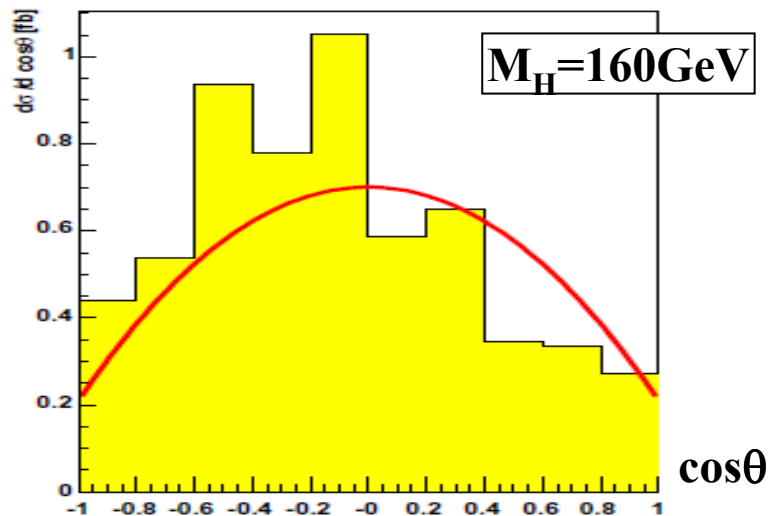


**Fitting function:  $F^*(\phi) = C(1 + \beta \cos 2\phi)$**

**Results of  $\beta$  [ $30\text{fb}^{-1}$ ](signal only and error is statistical only )**

| $M_H$  | Fitting value at $30\text{fb}^{-1}$ | SM   | Spin 1,CP +/-1 | Spin 0,CP -1 |
|--------|-------------------------------------|------|----------------|--------------|
| 160GeV | 0.16+/-0.23                         | 0.17 | 0              | -0.25        |
| 170GeV | 0.06+/-0.19                         | 0.14 | 0              | -0.25        |

# Results ( $\cos\theta$ )



**Fitting function:  $G(\theta) = T \cdot (1 + \cos^2(\theta)) + L \cdot \sin^2(\theta)$**

$$\mathbf{R := (L - T) / (L + T)}$$

**Result of R [ $30\text{fb}^{-1}$ ] (signal only and error is statistical only)**

$$\mathbf{R = 0.70 \pm 0.32 (M_H = 160\text{ GeV})}$$

$$\mathbf{R = 0.54 \pm 0.30 (M_H = 170\text{ GeV})}$$