

# ATLAS実験におけるHiggs粒子の Spin、CPの測定について

神前 純一 (KEK)

LHC が切り拓く新しい素粒子物理学@ICEPP  
2008年3月28日

# Higgsの性質の決定 (Spin、CP)

- “Higgs” を見つけるとは (“Peak” から “Higgs” へ)  
mass → gauge, Yukawa and self-couplings  
charge, color, spin and CP quantum numbers
- どのように崩壊するかを調べる
  - 非常に軽い → fermion または photon への二体
  - 重い → two vector bosons → 4 fermions
  - 非常に重ければ → t-tbar へも
- どのように生成されるかを調べる
  - Vector boson fusion → WW、ZZ への gauge coupling
  - ttH → t-quark への Yukawa coupling

# Spin、CPを測る三つの方法

- Vector boson 対への崩壊の崩壊生成物の角度相関
  - $ZZ \rightarrow 4 \text{ lepton}$
  - $WW \rightarrow (lv)(jj)$
- Vector boson fusion による生成で forward jet の  $\phi$  (azimuthal angle) の相関を調べる (T. Plehn, D. Rainwater, and D. Zeppenfeld Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 051801)
- $t\bar{t}H$  で  $t$ 、 $t$ -bar の運動量相関を調べる。  
終状態の  $t$ 、 $t$ -bar の運動量を再構成することにより scalar/pseudo-scalar を区別できる (John F. Gunion, Xiao-Gang He, Phys.Rev.Lett.76:4468,1996)

# H → VV について

- SM (CP-even):

$$2 \frac{m_W^2}{v} HW_\mu^+ W^{-\mu}, \frac{m_Z^2}{v} HZ_\mu Z^\mu$$

- Tensor Couplings:

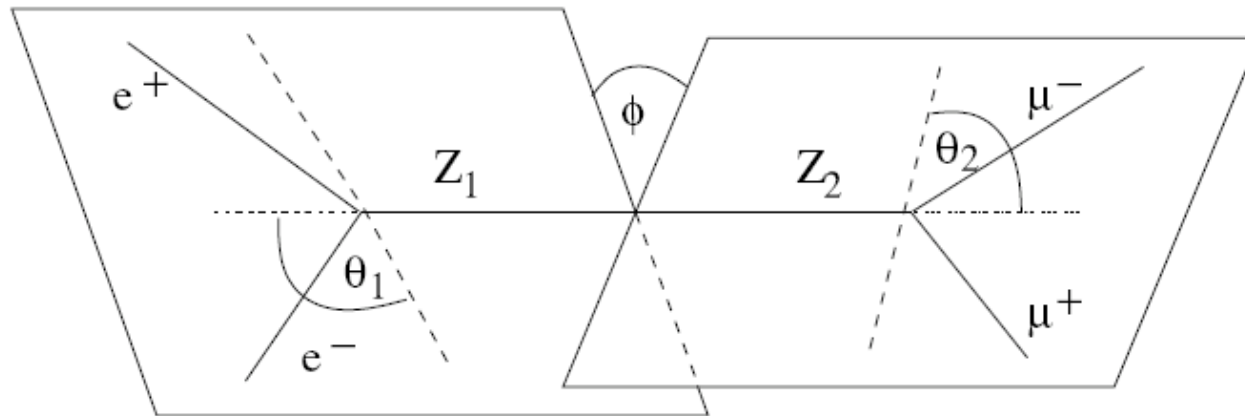
CP-even: 
$$\frac{g_{5e}^{HWW}}{\Lambda_{5e}} HW_{\mu\nu}^+ W^{-\mu\nu}, \frac{g_{5e}^{HZZ}}{2\Lambda_{5e}} HZ_{\mu\nu} Z^{\mu\nu}$$

CP-odd: 
$$\frac{g_{5o}^{HWW}}{\Lambda_{5o}} H\tilde{W}_{\mu\nu}^+ W^{-\mu\nu}, \frac{g_{5o}^{HZZ}}{2\Lambda_{5o}} H\tilde{Z}_{\mu\nu} Z^{\mu\nu}$$

- Vector boson 対への崩壊の崩壊生成物の角度相関を調べる

- ZZ → 4 lepton (e or μ): それぞれの lepton の運動量・電荷が精度良く測定できる
- WW → (lv)(jj): 一部の質量を fix する事により終状態を再構成可能。ただし (jj) は電荷は分からない。gluon fusion では background が大きい → VBF production

# H → VV について



$\phi$ : Higgs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fermionが作る平面の間の角度。

$$F(\phi) = C(1 + \alpha \cos \phi + \beta \cos(2\phi)) \quad (0 < \phi < \pi)$$

ただし、 $W \rightarrow jj$  では charge が分からないので  $\beta$  の情報のみ

$\theta$ : W粒子の静止系における fermion の運動量の方角と、Higgs粒子の静止系におけるW粒子の運動量の方角間の角度。

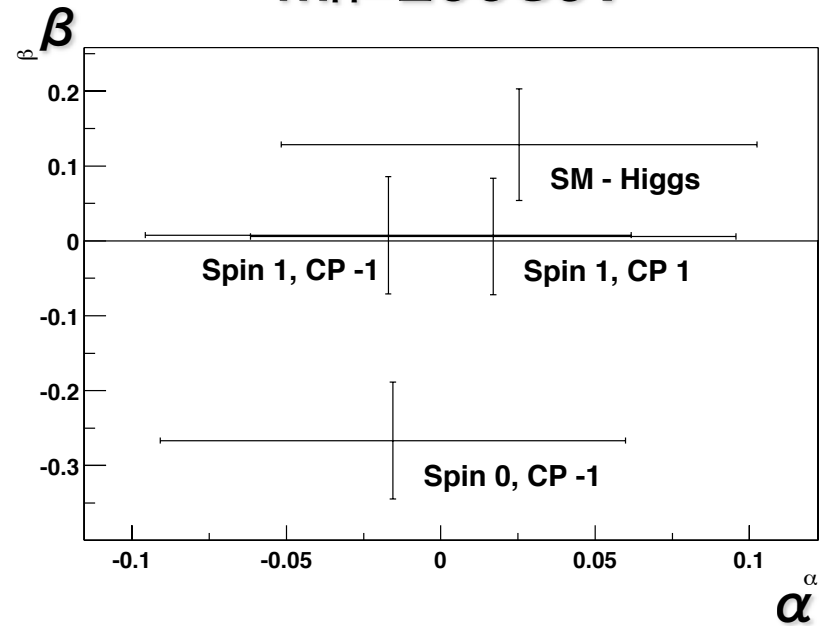
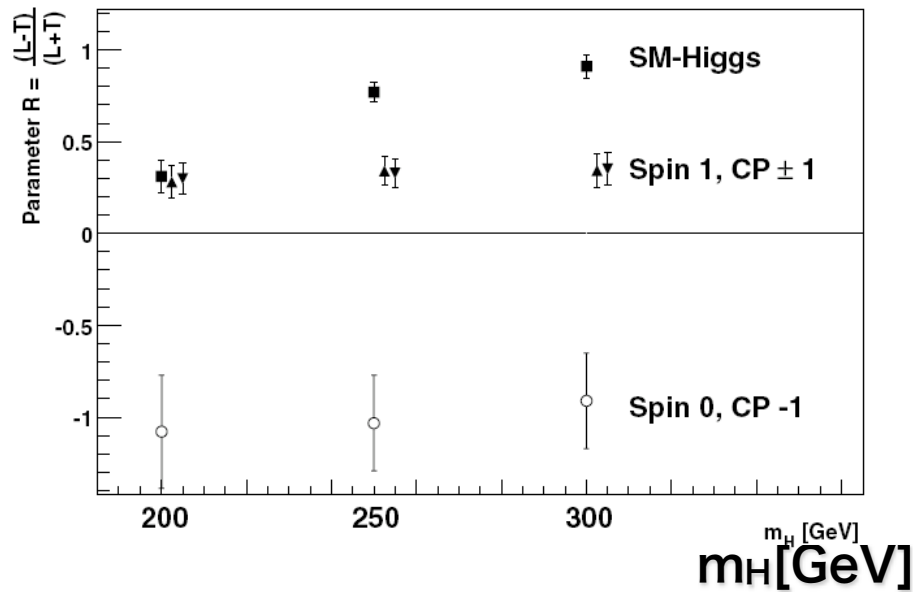
$$G(\theta) = T(1 + \cos^2 \theta) + L \sin^2 \theta \quad (0 < \cos \theta < 1)$$

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

# H → ZZ → 4 leptons

R

$m_H=200\text{GeV}$



- $100\text{fb}^{-1}$  の integrated luminosity で  
Spin 0, CP -1 は広い mass 範囲で区別可能
- \* Narrow width approximation の解析で  $m_H > 2m_Z$

# VBF $H \rightarrow WW \rightarrow (l\nu)(jj)$

- 動機は

- $m_H \approx 160-170\text{GeV}$ では  $\text{Br}(H \rightarrow WW) \approx 100\%$

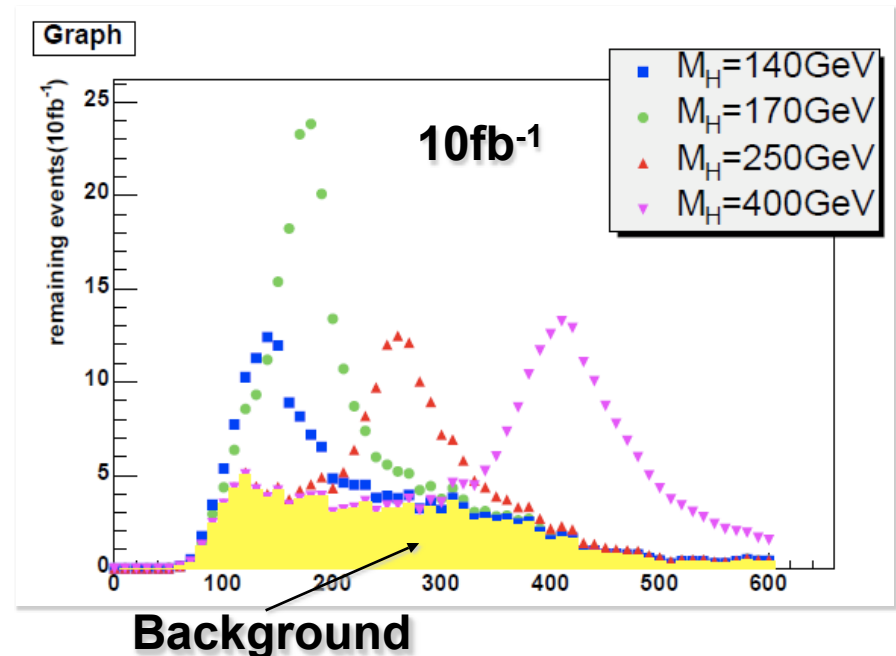
- ZZの場合より低い $m_H$ で情報を得られないか

- $\nu$  z方向の momentum の決定の新しい方法:

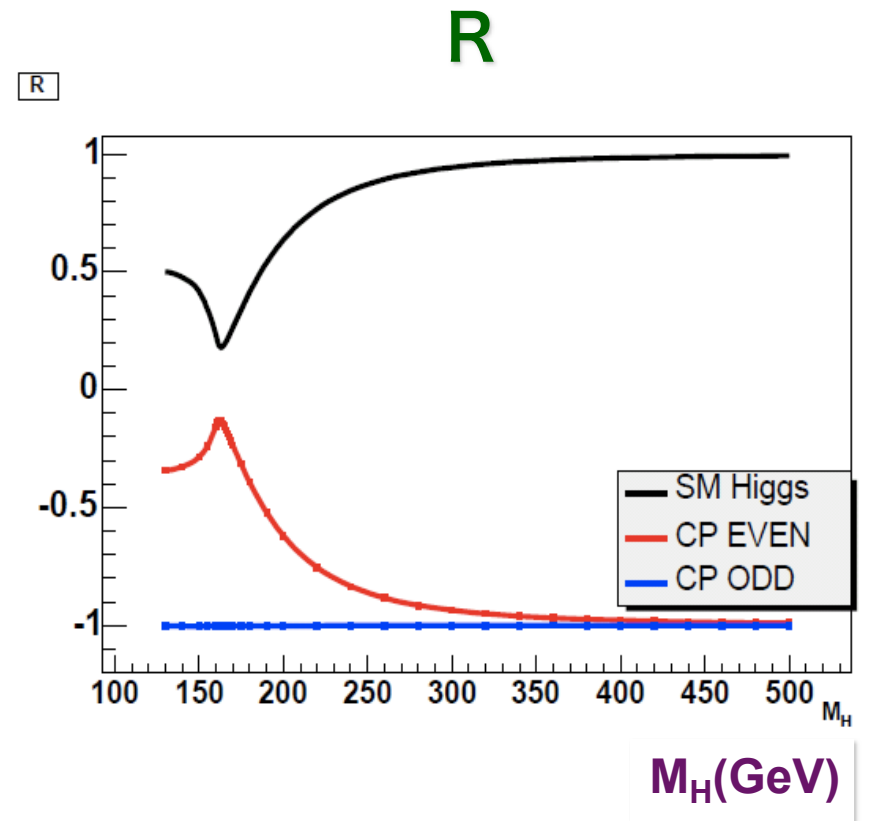
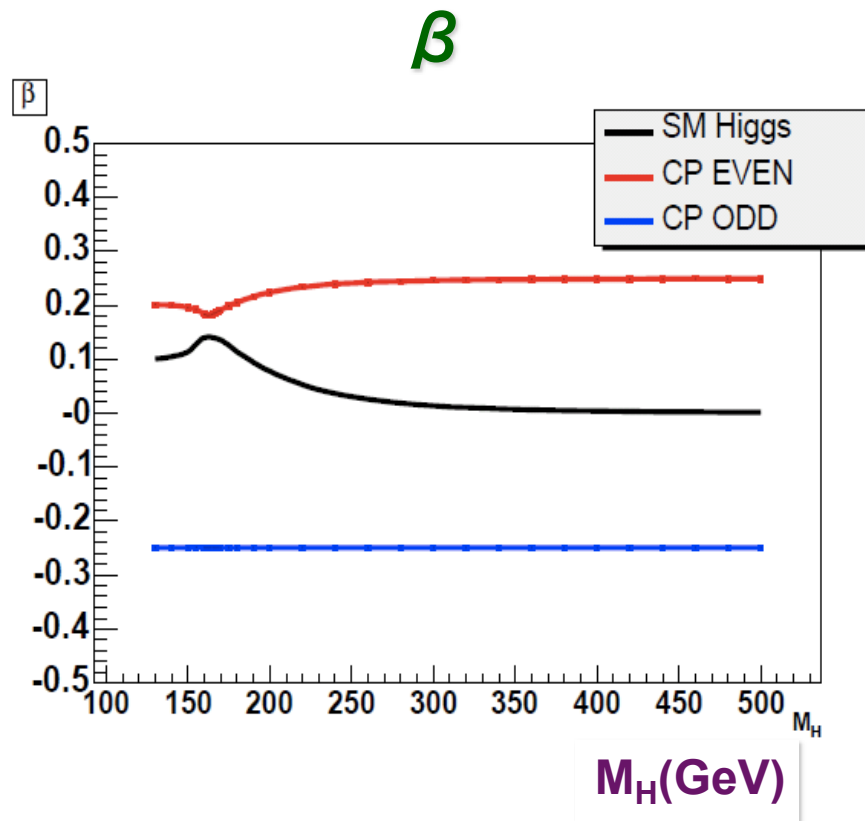
通常は  $(l\nu)$  システムを  $m_W$  にfixする事で解くが  $(l\nu)(jj)$  システムを与えられた  $m_H$  (parameter) に fix する事により解く

- Higgs の mass width の方が小さい

- Fix する  $m_H$  の値を変化させることにより “mass” の測定にもなる。



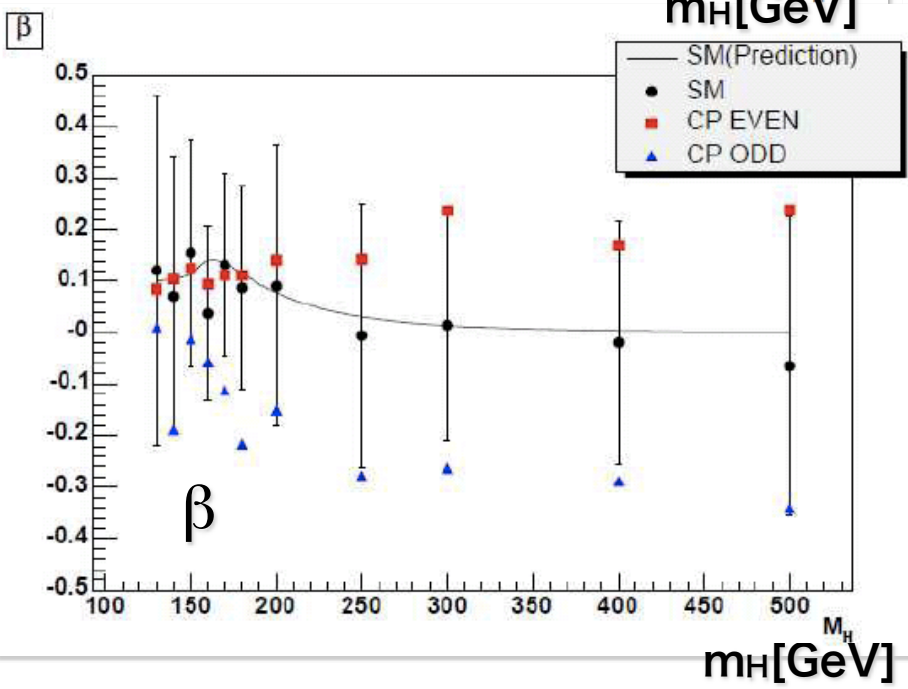
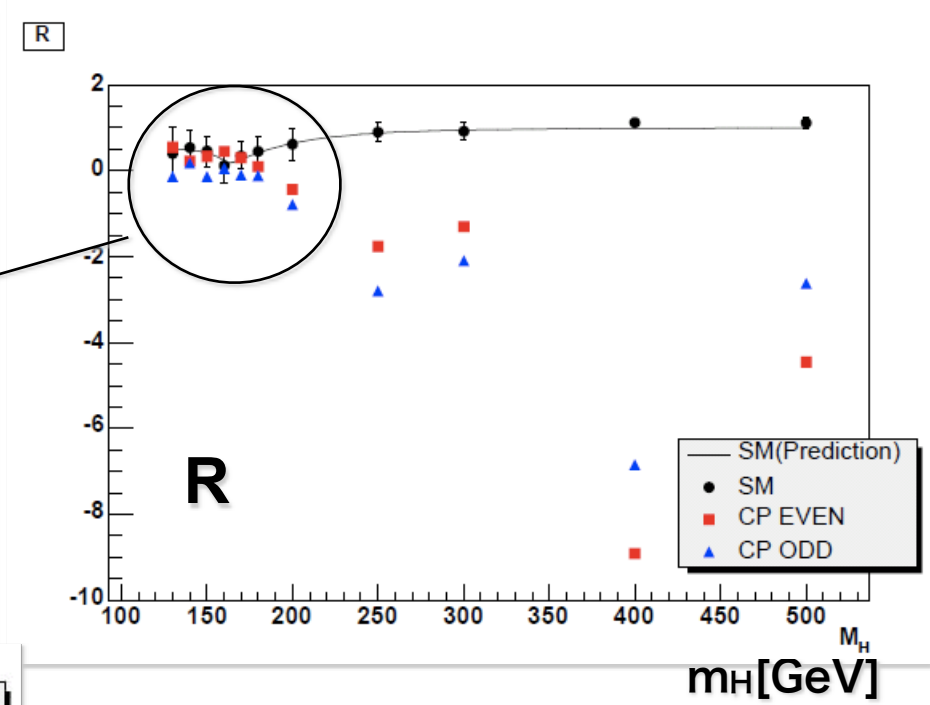
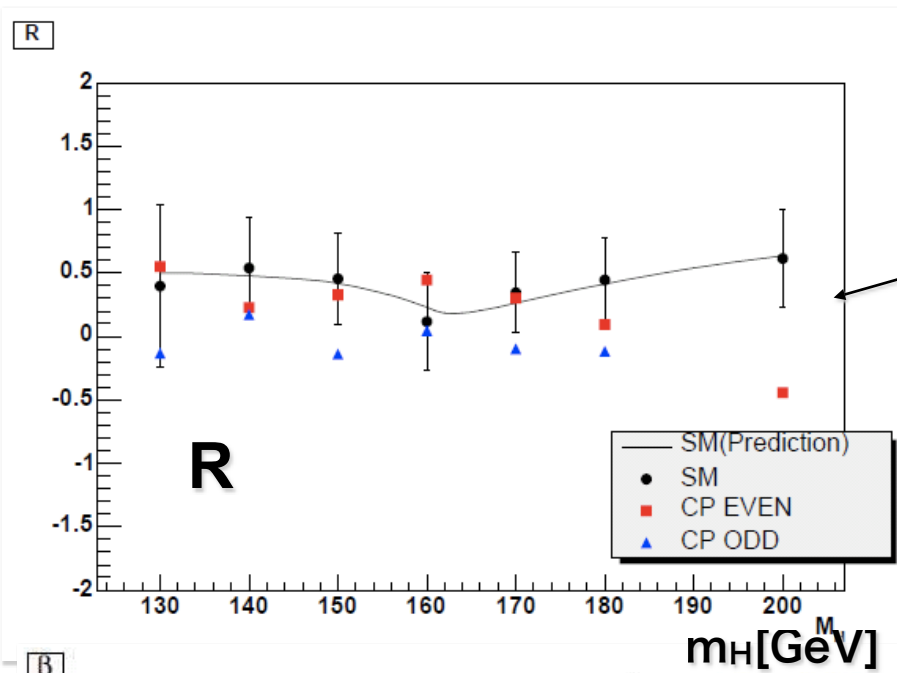
# R と $\beta$ の期待値



R,  $\beta$  の期待値



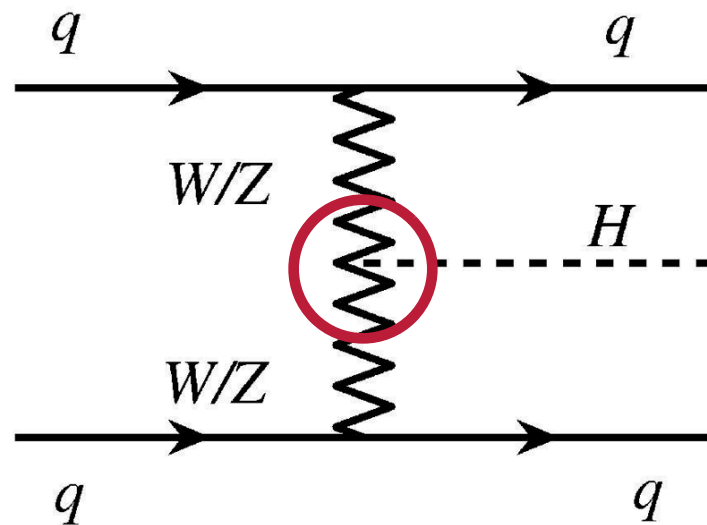
# Results (30fb<sup>-1</sup>)



- $m_H > 200$  GeVでは区別が可能  
ただし、 $m_H < 200$  GeVではやはり  
難しいか、

# VBF H production の forward jet

- SM+同様の tensor couplings を考える



VBF プロセスの解析の二つの forward jet の  $\phi$  (azimuthal angle) に強い correlation がある

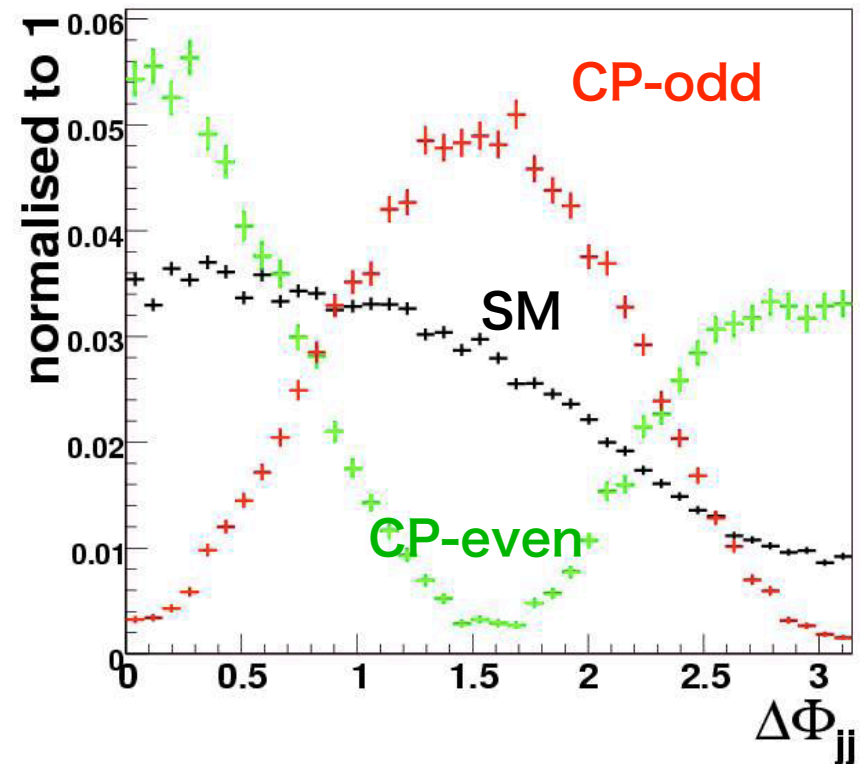
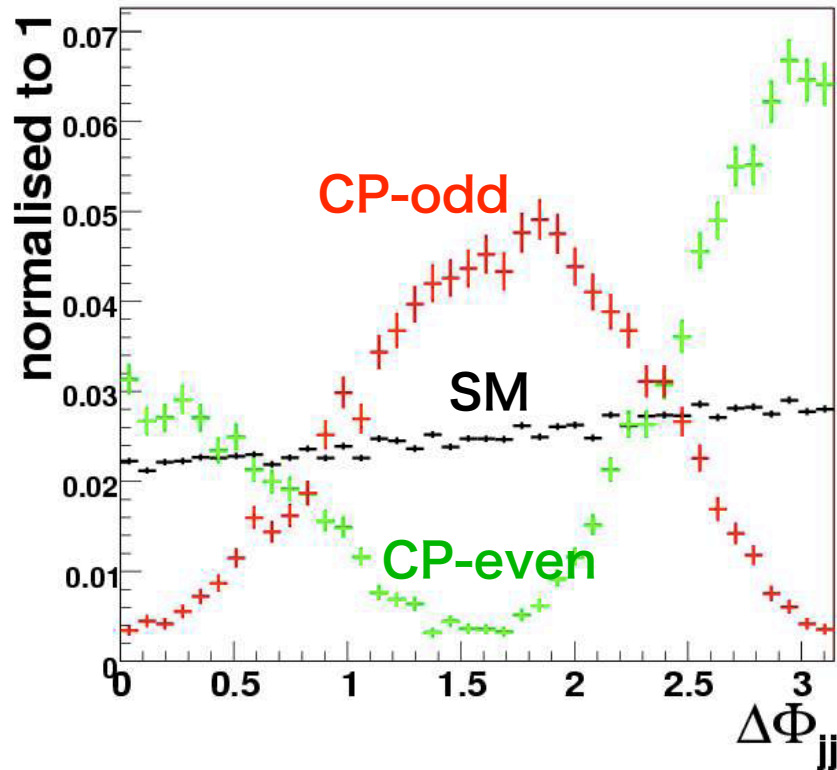
T. Plehn, D. Rainwater, and D. Zeppenfeld Phys. Rev. Lett. 88 (2002) 051801

- Higgs の崩壊モードにあまり影響されない

# VBF H production $\mathcal{O}$ forward jet

H  $\rightarrow$  WW(160GeV)

H  $\rightarrow$   $\tau\tau$ (120GeV)



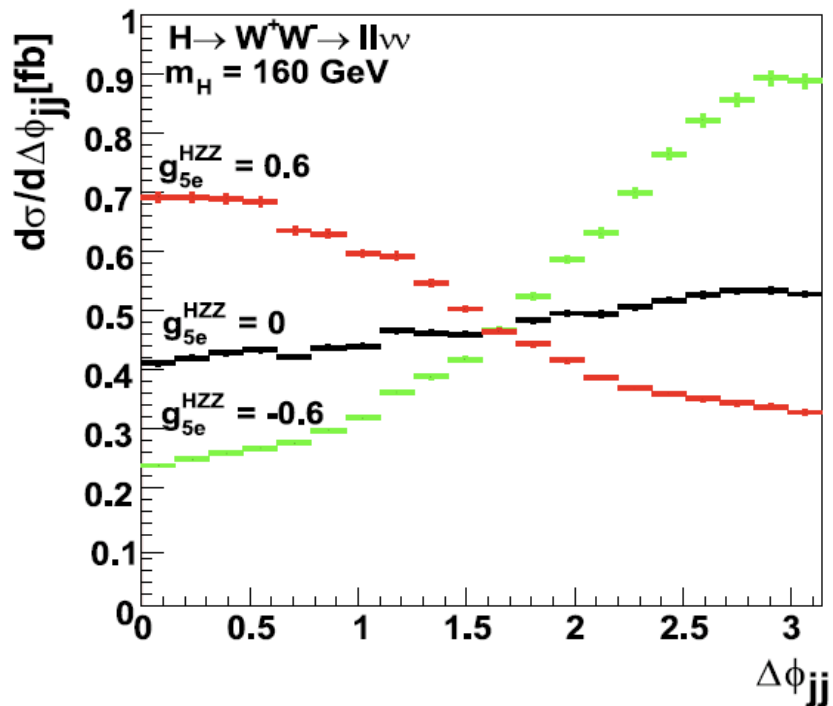
Signal Distributions

# VBF H production の forward jet

- SMからのdeviation

Higgs Decay	Deviation from	
	CP-even	CP-odd
$H \rightarrow WW(10\text{fb}^{-1})$	$5.4\sigma$	$4.6\sigma$
$H \rightarrow \tau\tau(30\text{fb}^{-1})$	$2.5\sigma$	$2.0\sigma$

- Interference により CP-even tensor coupling の効果を調べる



Higgs Decay	$\sigma(g_{5e})$	$\sigma(\text{pull}(g_{5e}))$
$WW(30\text{fb}^{-1})$	0.11	1.00
$\tau\tau(30\text{fb}^{-1})$	0.24	0.97

# ttH の場合

- このプロセスでは質量が軽くベクターボゾン対への崩壊比が小さいような Higgs 粒子について CP の情報を得られる可能性がある:

J.F. Gunion and X.-G. He, “Determining the CP nature of a neutral Higgs boson at the LHC”,

Phys.Rev.Lett.76 (1996) 4468; hep-ph/9602226.

$$\mathcal{L} \equiv \bar{t}(c + id\gamma_5)th \quad |\mathcal{M}|^2 \propto M_Q^2(c^2 - d^2)$$

- 終状態の t、t-bar の運動量を再構成し、それらの運動量の組み合わせで得られるいくつかの変数を比較する。

$$a_1 = \frac{(\vec{p}_t \times \hat{n}) \cdot (\vec{p}_{\bar{t}} \times \hat{n})}{|(\vec{p}_t \times \hat{n}) \cdot (\vec{p}_{\bar{t}} \times \hat{n})|}$$

$$a_2 = \frac{p_t^x p_{\bar{t}}^x}{|p_t^x p_{\bar{t}}^x|}$$

$$b_1 = \frac{(\vec{p}_t \times \hat{n}) \cdot (\vec{p}_{\bar{t}} \times \hat{n})}{p_t^T p_{\bar{t}}^T}$$

$$b_3 = \frac{p_t^x p_{\bar{t}}^x}{p_t^T p_{\bar{t}}^T}$$

$$b_2 = \frac{(\vec{p}_t \times \hat{n}) \cdot (\vec{p}_{\bar{t}} \times \hat{n})}{|\vec{p}_t| |\vec{p}_{\bar{t}}|}$$

$$b_4 = \frac{p_t^z p_{\bar{t}}^z}{|\vec{p}_t| |\vec{p}_{\bar{t}}|}$$

ただし、t、t-bar の運動量の再構成には、効率の悪さ、バックグラウンドの影響、精度等の問題がある。

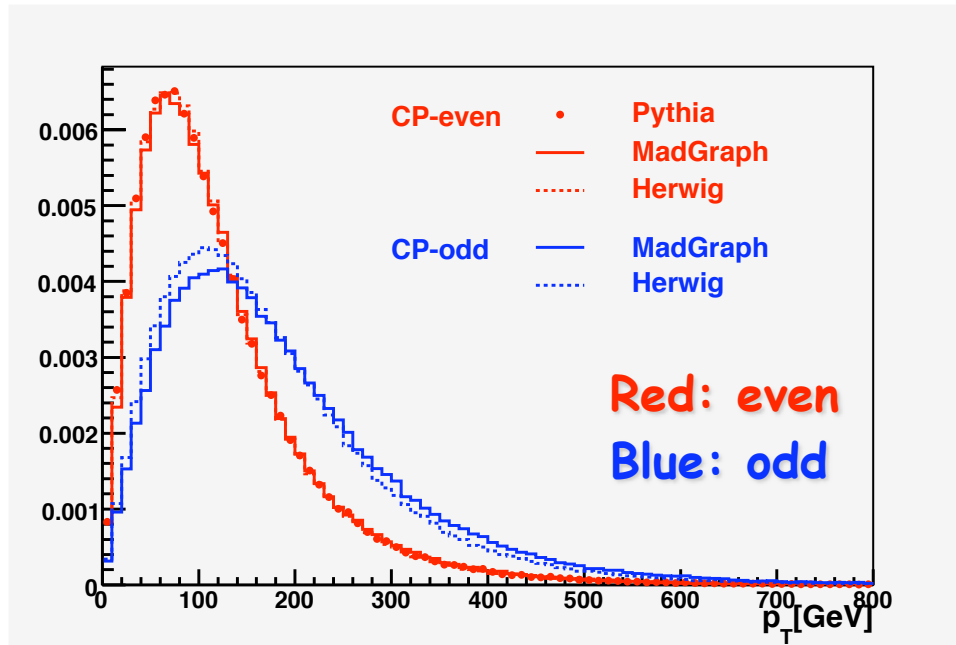
→ t、t-bar ではなく Higgs の運動量に違いがあるか、、、

→ Higgs の運動量の精度の良い測定が可能 → H →  $\gamma\gamma$  崩壊

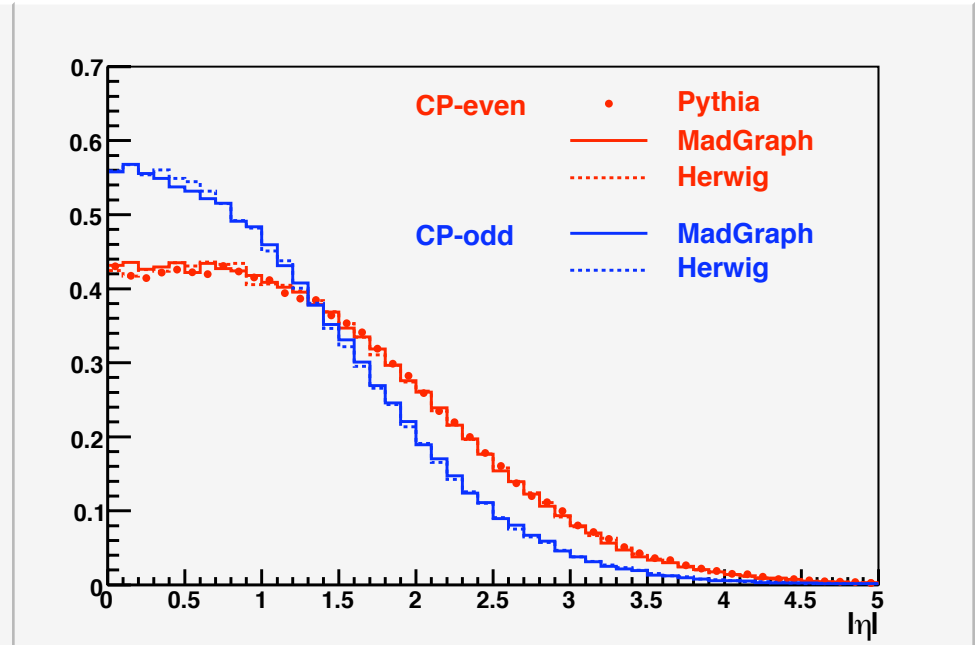
# CP の決定 / 測定

- トップ・クォーク随伴生成で生成された120GeVの質量のHiggs粒子の  $p_T$  及び  $\eta$  をパートン・レベルの情報を用い、いくつかのイベント・ジェネレータで比較してみた。

$p_T$



$|\eta|$



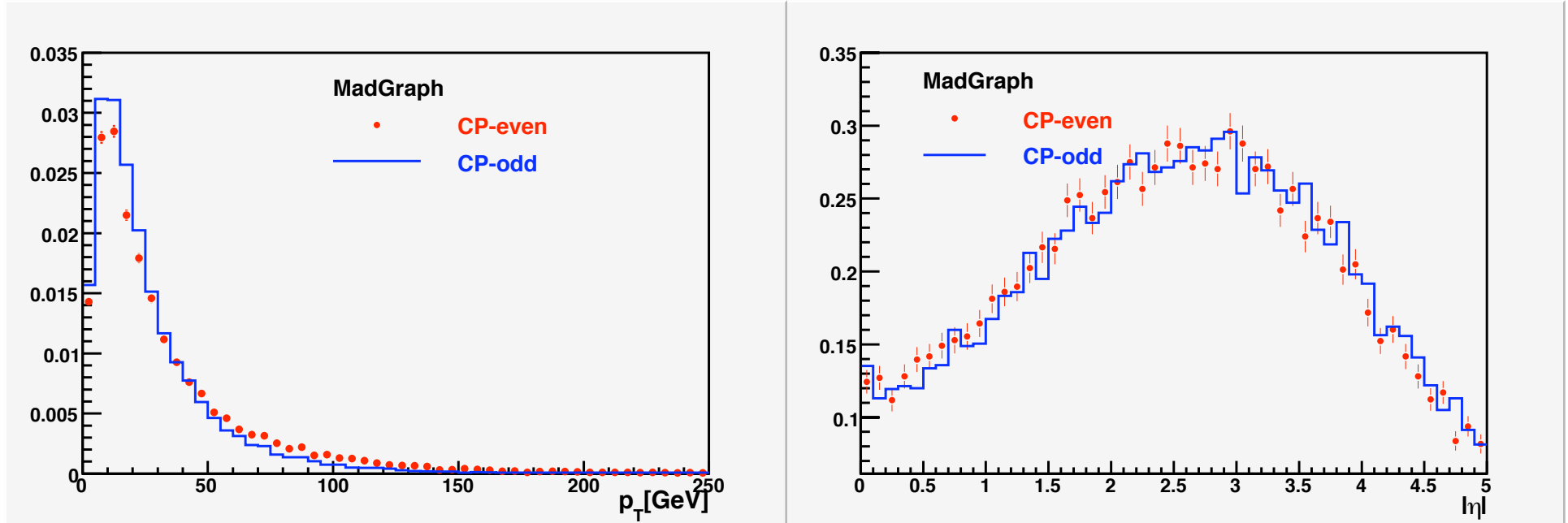
- CP even の場合と、CP-odd の場合であきらかな違いが見られる。

# CP の決定／測定

- 比較のために bbH の場合を見ると、

$p_T$

$|\ln|$



b-quark の質量は t-quark の質量より小さいため CP-even と CP-odd の差による効果が小さい。

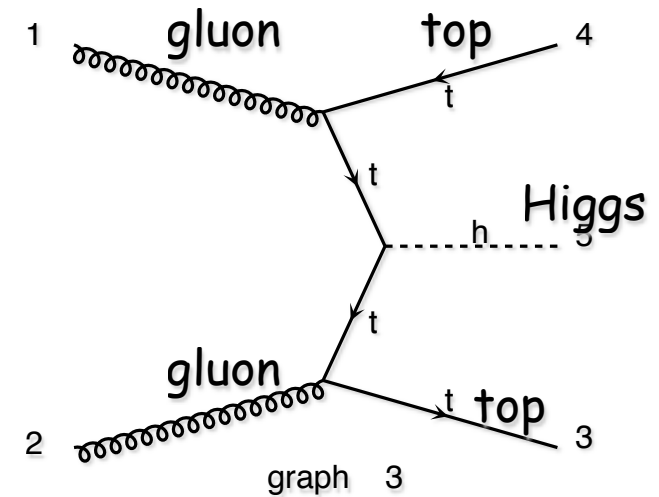
# ttH( $\rightarrow r r$ )プロセスの特徴

- ttH( $\rightarrow bb$ ) に比べて branching ratio は小さいが

- 質量の測定精度が良い

- バックグラウンドが少ない

- 終状態を再構成する際に jet の組み合わせによるバックグラウンドが少ない



→ Higgs粒子の運動量を精度良く決定することができる。

• フェルミオンとの結合により生成される。

• 同じ生成プロセスのHiggs粒子の他の崩壊モード(bb、 $\tau\tau$ )の結果と比をとることにより  $\Gamma_r/\Gamma_b$ 、 $\Gamma_r/\Gamma_\tau$  の良い測定になる

Semi-leptonic: pp  $\rightarrow$  ttH ( $\rightarrow r r$ ), tt  $\rightarrow$  (bW)(bW)  $\rightarrow$  (blv)(bjj)

Hadronic: pp  $\rightarrow$  ttH ( $\rightarrow r r$ ), tt  $\rightarrow$  (bW)(bW)  $\rightarrow$  (bjj)(bjj)



# Event selection

- 期待される断面積 [ $\times 10^{-2}\text{fb}$ ] と signal significance ( $m_H \pm 2\text{GeV}$ )  
Semi-leptonic と hadronic 両モードを合わせた結果

	120GeV	130GeV	140GeV
Higgs	20.4	16.6	11.5
BG total	5.6	4.7	4.1
Poisson Significance with $100\text{fb}^{-1}$	6.0	5.3	4.0
Poisson Significance with $300\text{fb}^{-1}$	10.7	9.5	7.3

# Higgs粒子の $p_T$ 及び $\eta$ の解析

- 分布の形の違いを比較するため、検出されたHiggs粒子の  $p_T$  および  $\eta$  の値がある値よりも大きいイベントと小さいイベントの数の比を求め、CP-evenの場合と CP-odd の場合で比較した。

$p_T$  の場合:  $p_{Tcut} = 150 \text{ GeV}$ ,

$$R(\text{High/Low}) = N(\text{High } p_T) / N(\text{Low } p_T)$$

$\eta$  の場合:  $|\eta|_{cut} = 1.0$ ,

$$R(\text{Cent/Forw}) = N(\text{Central}) / N(\text{Forward})$$

- まずパートンレベルで値を調べる (MadGraph,  $m_H=120\text{GeV}$ ) :

	CP-even	CP-odd	$\Delta R$
$p_T$ : R(High/Low)	0.40	1.18	0.88
$\eta$ : R(Cent/Forw)	0.75	1.13	0.38

# Higgs粒子の $p_T$ 及び $\eta$ の解析

- $p_T$  の解析の結果:

MadGraph、 $m_H=120\text{GeV}$ 、 $p_{T\text{cut}} = 150\text{GeV}$ 、  
(バックグラウンドを含んだ解析)

	CP-even	CP-odd
R(High/Low)	0.48	1.18
$\Delta R(100\text{fb}^{-1})$	0.20	0.45
$\Delta R(300\text{fb}^{-1})$	0.12	0.26

$$R(\text{CP-odd}) - R(\text{CP-even}) \approx 0.7$$

300fb<sup>-1</sup> の積分ルミノシティがあれば “pure” CP-even と -odd のHiggs 粒子を充分区別することが可能

# Higgs粒子の $p_T$ 及び $\eta$ の解析

- $|\eta|$  の解析の結果:

MadGraph、 $m_H = 120$  GeV、 $|\eta|_{\text{cut}} = 1.0$ 、  
(バックグラウンドを含んだ解析)

	CP-even	CP-odd
R(Cent/Forw)	1.00	1.41
$\Delta R(100\text{fb}^{-1})$	0.41	0.54
$\Delta R(300\text{fb}^{-1})$	0.24	0.31

$$R(\text{CP-odd}) - R(\text{CP-even}) \approx 0.4$$

$p_T$  の解析と比較すると期待される significance は小さい

# まとめ

- CPの情報についてはHiggsの質量の広い範囲で vector boson fusion の解析での forward jet の  $\phi$ -correlation を調べるのが非常に有効な方法である。
- Higgsのvector boson 対への崩壊を調べる方法は、質量がある程度重い場合 ( $m_H > 200\text{GeV}$ ) には有効な方法。
- Fermion への coupling を通して調べる際は  $ttH(\rightarrow \gamma\gamma)$  で Higgs の生成運動量を調べるのが unique な方法。終状態の t、t-bar の運動量を再構成せずにHiggs粒子の  $p_T$  及び  $\eta$  の分布を比較することによりHiggs粒子のCP の情報を得ることが出来る。ただし Higgs が非常に軽い場合のみ。
- MSSMも想定してより系統的な研究と新しいアイデアが必要