

# ILC計画における リトルヒッグス・モデルのパラメータに 関する測定精度の評価

東北大理 加藤恵里子

浅野雅樹 浅川恵理 田窪洋介

藤井恵介 松本重貴 山本均

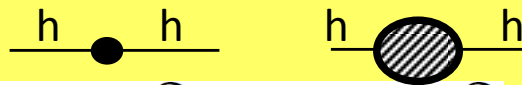
- リトルヒッグス模型
- ILC計画
- 解析
- まとめ

# 小さな階層性問題

新しい物理の現れてくるエネルギースケールは二つ予言されている。

## 1. Fine tuning

ヒッグスの質量



$$m_{Higgs}^2 = m_0^2 + \delta m^2$$

実際に測定される ヒッグスの質量  
裸の質量 補正項

$\Lambda$  : エネルギースケール  $\delta m^2 \approx (0.27\Lambda)^2$

$\Lambda < 1 \text{ TeV}$

## 2. 電弱精密測定の結果 $\Lambda > 10 \text{ TeV}$

➡ 新物理の現れるべきエネルギースケールに矛盾がある。

➡ リトルヒッグス模型が提唱された

# リトルヒッグス 模型

## <リトルヒッグス機構>

グローバル対称性:  $SU(5)$

$f \sim 1 \text{ TeV}$

$SO(5)$

$v \sim \langle h \rangle$

部分群:  $[SU(2)_L \times U(1)_Y]^2$



$SU(2)_L \times U(1)_Y$



$U(1)_Y$

## <ヒッグス質量への寄与>

$$\begin{aligned} & \text{---} \bar{H} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} + \text{---} H \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} + \text{---} \bar{H} \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} = 0 \Lambda^2 \\ & \text{---} H \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} + \text{---} H \text{---} \text{---} \text{---} \text{---} = 0 \Lambda^2 \end{aligned}$$

The diagram shows two equations for the Higgs mass contribution at the one-loop level. The first equation shows three fermion loops: a top quark loop with a top quark (t) and anti-top quark (t-bar) insertion, a top quark loop with a top quark (t) and anti-top quark (t-bar) insertion, and a top quark loop with a top quark (t) and anti-top quark (t-bar) insertion. The second equation shows two gauge boson loops: a loop with W and Z bosons, and a loop with W and Z bosons.

二次発散が1-ループレベルで相殺

小さな階層性問題を回避できる

# リトルヒッグス模型

標準模型粒子

リトルヒッグスパートナー

	Fermions			Bosons	
Quarks	$u$ up	$c$ charm	$t$ top	$\gamma$ photon	Force carriers
	$d$ down	$s$ strange	$b$ bottom	$Z$ Z boson	
Leptons	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	$W$ W boson	
	$e$ electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	$g$ gluon	
	Higgs boson			$T_+$	

$T$ -parity  
↔

	Fermions			Bosons	
Quarks	$u_-$ up	$c_-$ charm	$t_-$ top	$\gamma_H$ photon	Force carriers
	$d_-$ down	$s_-$ strange	$b_-$ bottom	$Z_H$ Z boson	
Leptons	$\nu_{e-}$ electron neutrino	$\nu_{\mu-}$ muon neutrino	$\nu_{\tau-}$ tau neutrino	$W_H$ W boson	
	$e_-$ electron	$\mu_-$ muon	$\tau_-$ tau		
	Triplet Higgs boson			$T_-$	

$A_H$  はダークマター候補

$$m_{A_H} \approx \sqrt{0.2} g' f$$

$$m_{Z_H} \approx g f$$

- 新しい物理の対称性の破れによって重いゲージボソンは質量を獲得
- $A_H Z_H W_H$  の質量は  $f$  に比例している。
- $A_H Z_H W_H$  の質量を精密測定すれば  $f$  を決定できる。

重いゲージボソンの測定は非常に重要！

# ILC計画-International linear collider-

## <電子陽電子衝突型線形加速器>

全長 ~31km

重心系エネルギー: $\sqrt{s}=500\text{GeV}\sim 1\text{TeV}$

積分ルミノシティ(4年間)= $500\text{fb}^{-1}$

電子偏極: 80%以上

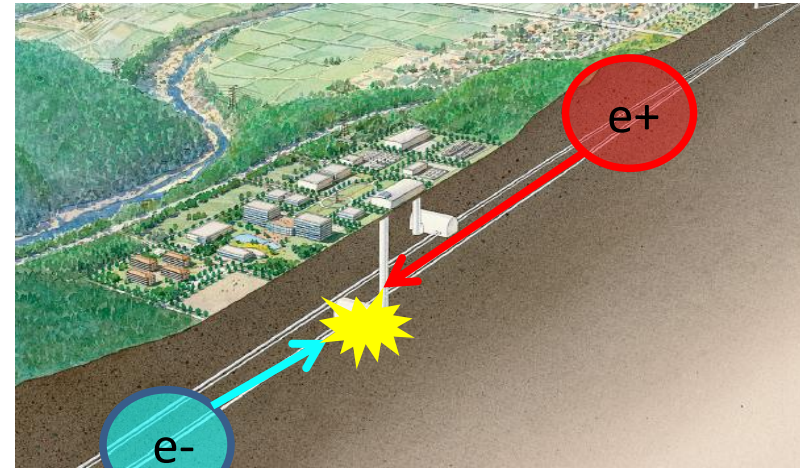
## <測定器>

エネルギー分解能: $\Delta E/E=30\%/ \sqrt{E(\text{GeV})}$

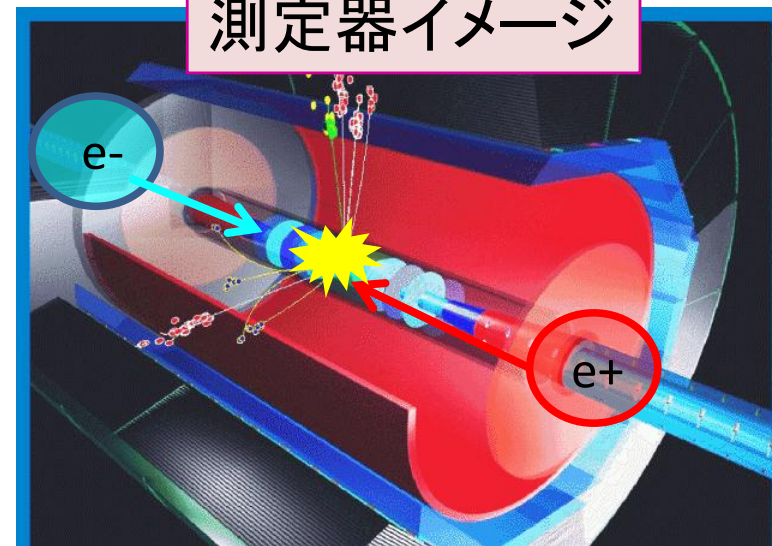
運動量分解能: $\Delta P_t/P_t^2=5 \times 10^{-5}(\text{GeV}/c)^{-1}$

背景事象が少なく  
リトルヒッグス模型の  
新粒子の精密測定可能

加速器イメージ



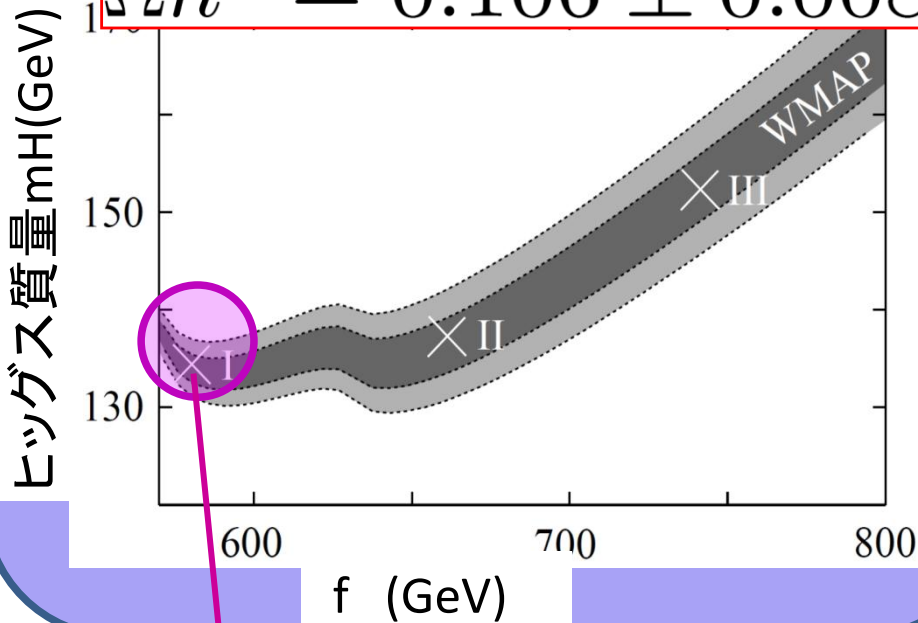
測定器イメージ



# 模型パラメータの選択

<WMAP観測結果による制限>

$$\Omega h^2 = 0.106 \pm 0.008$$



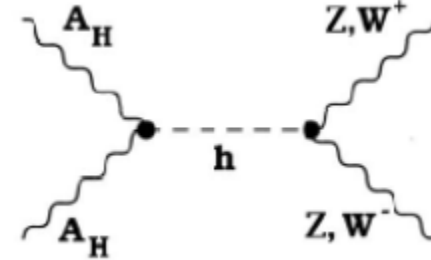
模型パラメータ

f	$m_H$	$m_{A_H}$	$m_{Z_H}$	$m_{W_H}$
580(GeV)	134(GeV)	81.9(GeV)	369(GeV)	368(GeV)

$A_H, Z_H, W_H$  質量は500GeV以下より1TeVで生成可能。

WMAPによる暗黒物質の残存密度の測定結果を用いた

主な対消滅モード

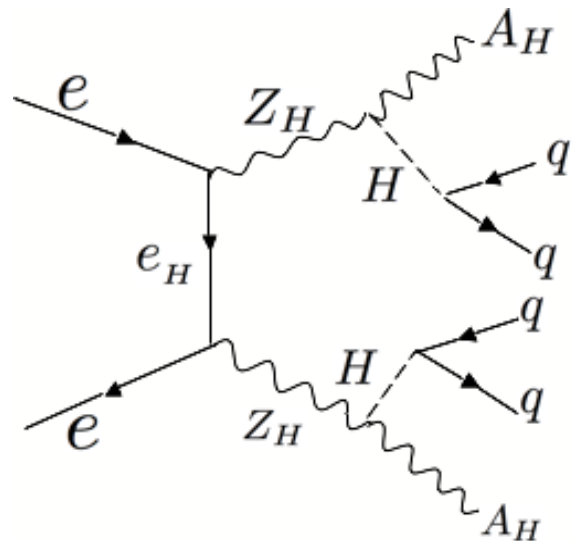


散乱断面積は $m_{A_H}$ と $m_H$ に依存している。

# シミュレーション

## <シミュレーション環境>

ファストシミュレータ  
重心エネルギー:1TeV  
ビーム偏極なし  
積分ルミノシティ:500fb<sup>-1</sup>



## <信号事象>

- $e^+e^- \rightarrow Z_H Z_H (99.52\text{fb})$ 
    - $Z_H \rightarrow A_H H$  (崩壊分岐比100%)
    - $A_H$  は **ダークマター** 候補
    - ヒッグスの崩壊分岐比が  $H \rightarrow bb$  が最も大きい(42%)
- **終状態が4ジェット**の事象を用いた。

## <背景事象(4ジェット)>

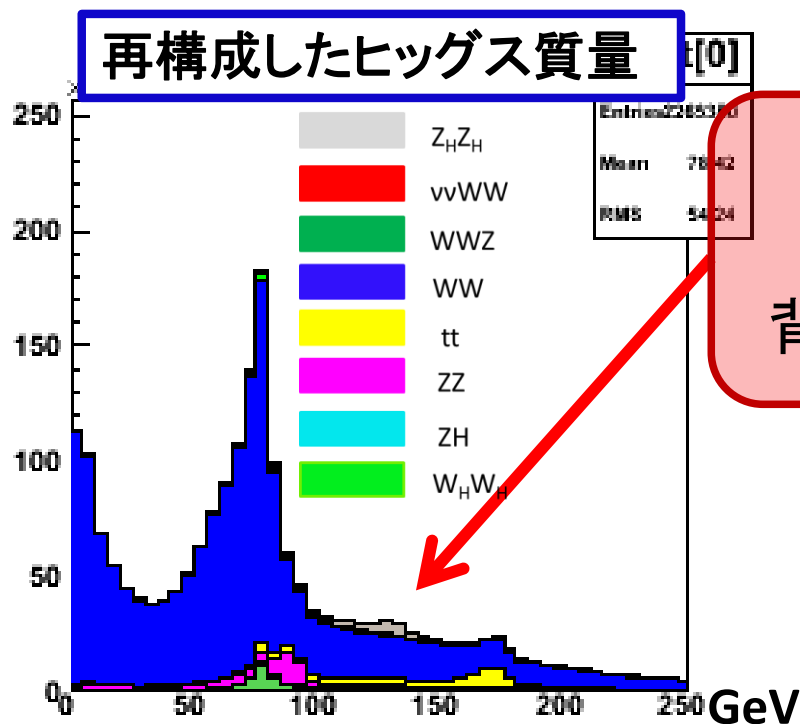
- WW (3069fb)
- tt (192.9fb)
- WWZ (63.86fb)
- $\nu\nu WW$  (14.67fb)
- ZZ (202.2fb)
- ZH (17.98fb)
- $W_H W_H$  (108.6fb)

# 事象の再構成

- 全ての事象を強制的に4ジェットとして再構成
- 下の $\chi^2$ を最小とする組み合わせをとる。

$$\chi_H^2 = \left( \frac{M_{H1} - M_H}{\sigma_{M_H}} \right)^2 + \left( \frac{M_{H2} - M_H}{\sigma_{M_H}} \right)^2$$

$$M_H = 134.0(\text{GeV})$$



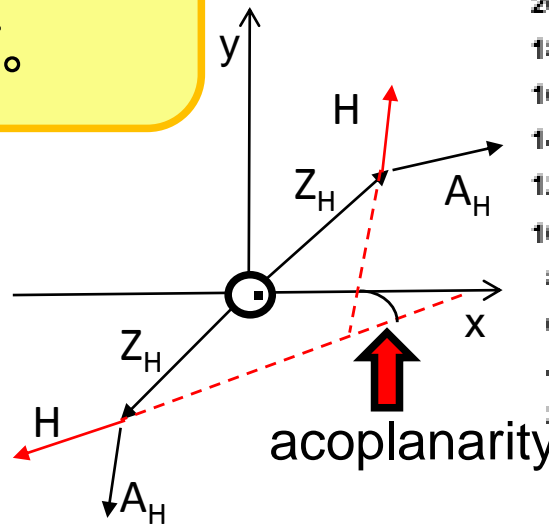
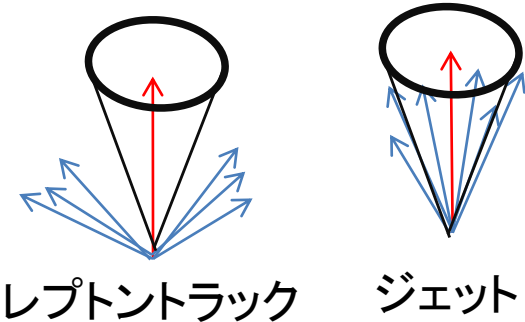
信号が埋もれている

背景事象の除去が必要

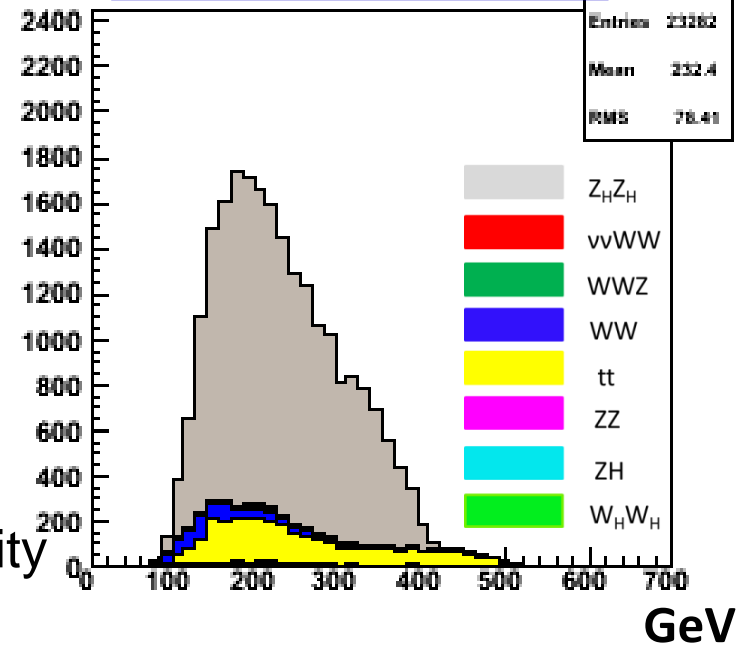


# 背景事象除去

- $\chi^2 < 60$
- レプトントラックの除去
- b-tag ジェット数  $> 1$
- Acoplanarity  $> 20^\circ$



ヒッグスエネルギー



事象数	カット前	カット後
信号事象 (Z <sub>H</sub> Z <sub>H</sub> )	49760	18989
背景事象 (標準模型)	2193232	3217
(リトルヒッグス W <sub>H</sub> W <sub>H</sub> )	54343	87

背景事象を効率よく除去できた。

# $Z_H$ $A_H$ の質量の導出

ヒッグスのエネルギー分布のエッジが  
 $A_H$   $Z_H$ の質量の情報を持つ

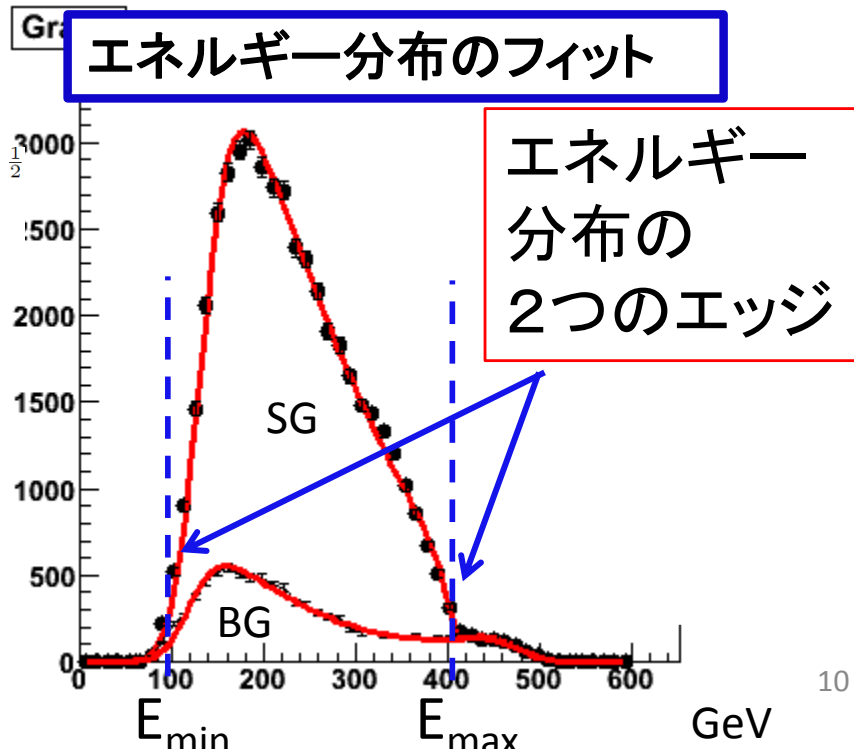
エネルギー分布をフィットして質量を求めた。

## <エッジと質量の関係>

$$m_{Z_H} = \sqrt{s} \left( \frac{(E_+^2 - E_-^2 + m_H^2) \pm \sqrt{(E_+^2 - E_-^2 + m_H^2)^2 - 4E_+^2 m_H^2}}{8E_+^2} \right)$$

$$m_{A_H} = \left( m_H^2 + \left( 1 - \frac{4E_+}{\sqrt{s}} \right) m_{Z_H}^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\left( \begin{array}{l} E_- \equiv \frac{E_{max} - E_{min}}{2} \\ E_+ \equiv \frac{E_{max} + E_{min}}{2} \end{array} \right)$$



# $Z_H$ $A_H$ の2次元質量フィット

## < $A_H Z_H$ の質量解>

二つの質量解が生じる  
一つに絞れるとすると...

$$\begin{cases} A_H : 82.7 \pm 3.5 \text{ GeV (真値 } 81.9 \text{ GeV)} \\ Z_H : 366.1 \pm 4.7 \text{ GeV (真値 } 369.0 \text{ GeV)} \end{cases}$$

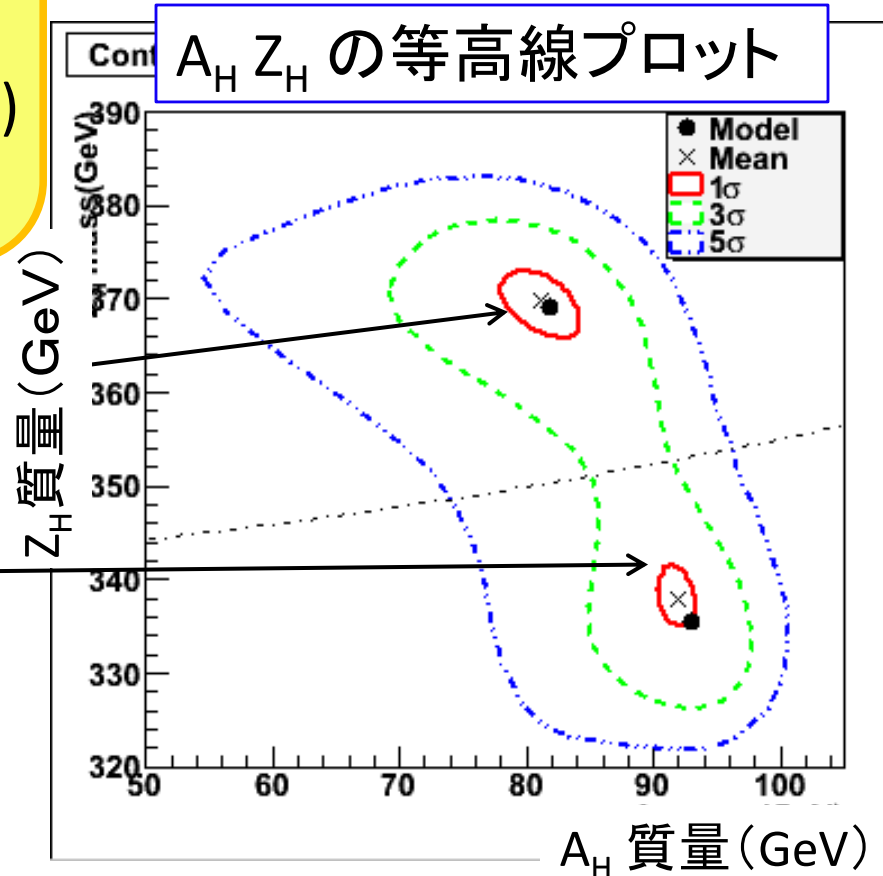
➤ 質量分解能  $A_H$  4.2%  $Z_H$  1.3%



正しい解

偽の解

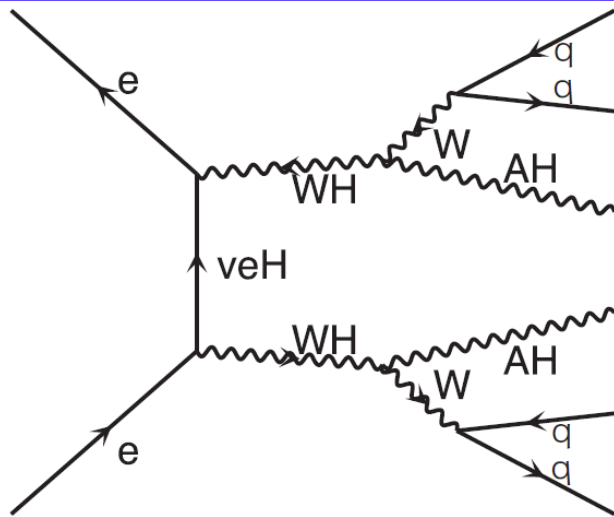
他のモードの結果  
を使えば  
解を絞ることができる。



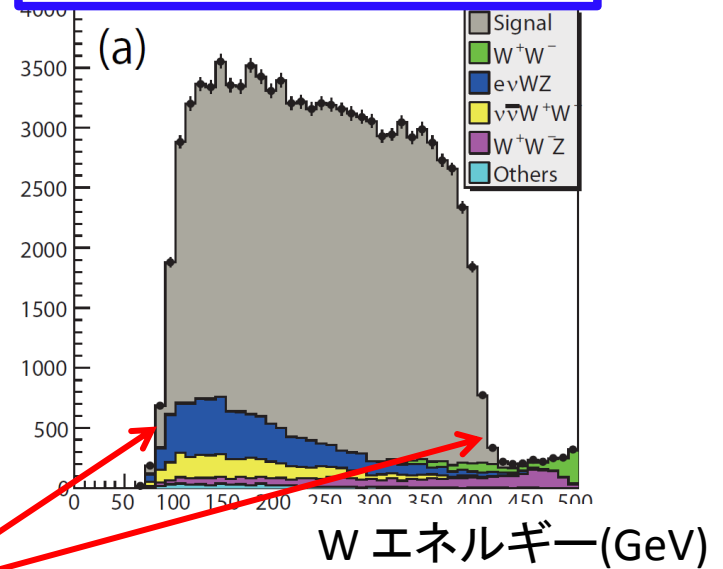
# $e^+e^- \rightarrow W_H W_H$ 過程

質量解を一つに絞るため  $e^+e^- \rightarrow W_H W_H$  モードを使用した。

1TeV :  $e^+e^- \rightarrow W_H W_H$



$W^\pm$  エネルギー分布



$W^\pm$  エネルギー分布から  $A_H W_H$  の質量を決定可能

こちらも質量解が二解生じる。

正しい解

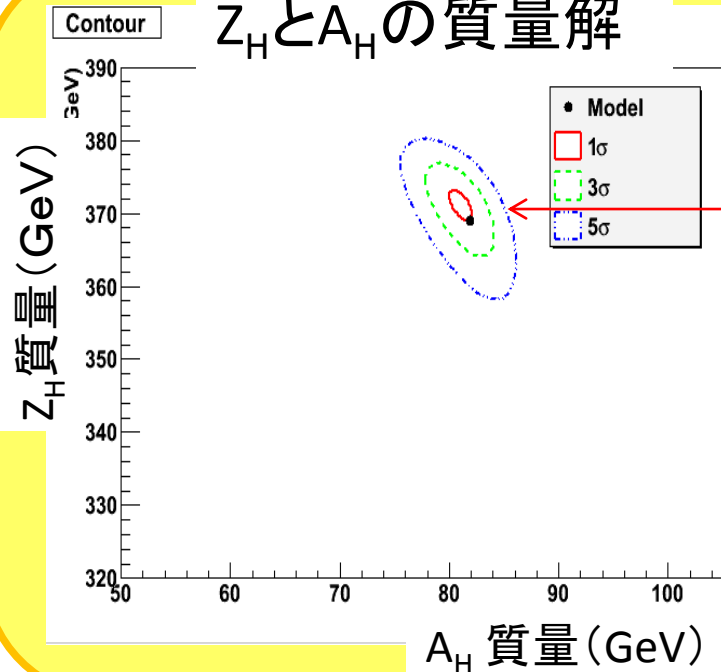
$$m_{A_H} = 81.6 \text{ GeV} , 81.0 \text{ GeV} \quad 1.3\%$$

$$m_{W_H} = 368.3 \text{ GeV} , 218.0 \text{ GeV} \quad 0.2\% \text{ (phys. Rev D79.)}$$

$W_H W_H$  と  $Z_H Z_H$  を用いて解を一つに求めた。

# 同時フィットの結果

$Z_H$ と $A_H$ の質量解



$Z_H Z_H$ と $W_H W_H$ の同時フィットの結果

$A_H$ 質量  $81.1 \pm 1.0$  GeV  
 $Z_H$ 質量  $371.1 \pm 2.0$  GeV

解を一つに絞ることができた

<質量分解能>

$A_H$  : 1.3%

$Z_H$  : 0.56%

$W_H$  : 0.20%

$A_H$ 、 $Z_H$ 、 $W_H$  全て質量分解能が向上した。

# まとめ

リトルヒッグス模型は小さな階層性問題と暗黒物質問題を解決する新物理。

< $v_s=1\text{TeV}$ :  $e^+e^- \rightarrow Z_H Z_H$  解析>

$A_H, Z_H$  質量で隣り合う2つの質量解が得られた。正しい解の選択が必要である。

< $v_s=1\text{TeV}$ :  $e^+e^- \rightarrow Z_H Z_H$  &  $W_H W_H$  同時フィット解析>

$A_H, Z_H$  の質量解一つになる。同時フィットにより全てのパラメータの分解能が向上した。

質量分解能  $A_H$  1.30%  $Z_H$  0.56%  $W_H$  0.20%

真空期待値  $f$  を精度の導出へ