

ILCにおけるリトルヒッグス・モデルの検証に関する シミュレーション研究

- はじめに
- リトルヒッグス模型
- ILC計画
- シミュレーション
- 重心系エネルギー500GeVでの物理
- 重心系エネルギー1TeVでの物理
- 模型パラメータの決定精度
- まとめ

はじめに

素粒子物理学における標準模型は
多くの実験により立証されてきた

しかし、要のヒッグスは未検証
ヒッグスの質量補正 → 新しい物理： $O(1)\text{TeV}$ に存在

一方、
電弱相互作用の精密測定 → 新しい物理： 10TeV 以下にない

新しい物理のエネルギースケールの矛盾を
「リトル・ヒエラルキー問題」
という

その解決のために
「リトルヒッグス」
のシナリオが提唱されている

リトルヒッグス模型

- Littlest Higgs model with T-parity -

<リトルヒッグスパートナー>

標準模型粒子				リトルヒッグスパートナー				
Fermions			Bosons	Fermions			Bosons	
Quarks	u up	c charm	t top	γ photon	Quarks	u_- up	c_- charm	t_- top
	d down	s strange	b bottom	Z Z boson		d_- down	s_- strange	b_- bottom
Leptons	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	Leptons	ν_{e-} electron neutrino	$\nu_{\mu-}$ muon neutrino	$\nu_{\tau-}$ tau neutrino
	e electron	μ muon	τ tau	g gluon		e_- electron	μ_- muon	τ_- tau
	Higgs boson			T_+		Triplet Higgs boson		

T-parity

重いゲージボソンの質量
→新しい物理の
対称性の破れに起因

A_H, Z_H, W_H^\pm の質量を精密測定
→ 真空期待値 f を決定可能 !!

<模型パラメータの典型的な値>

f		m_h		
580(GeV)	134(GeV)			
m_{A_H}	m_{W_H}	m_{Z_H}	m_{ν_H}	m_{e_H}
81.9(GeV)	368(GeV)	369(GeV)	401(GeV)	410(GeV)

(考慮した実験の結果)

W^\pm の質量、ワインバーグ角、
Zのレプトン崩壊の崩壊幅、
暗黒物質の残存密度

(*富山大 松本重貴 氏による)

(A_H :暗黒物質の候補)

A_H, Z_H, W_H^\pm の質量は500GeV以下
ILC実験($\sqrt{s}=500\text{GeV} \sim 1\text{TeV}$)で探索可能

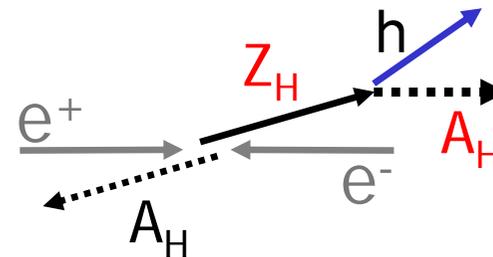
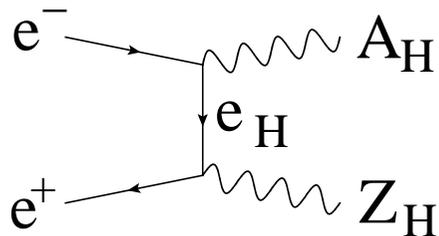
解析の対象

<√s=500GeVでの物理>

$$e^+e^- \rightarrow A_H Z_H$$

- $m_{A_H} + m_{Z_H} < 500\text{GeV}$ (1.91fb)
- $Z_H \rightarrow A_H h$ (崩壊比100%)

hのエネルギー分布
→ A_H と Z_H の質量



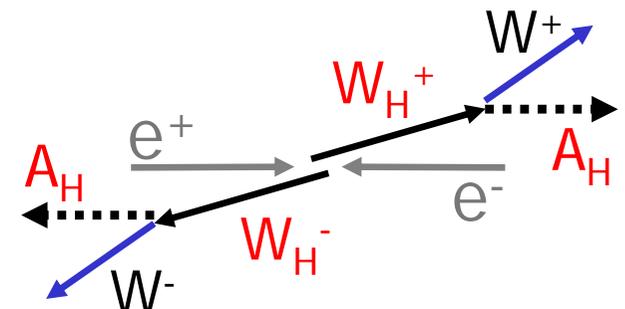
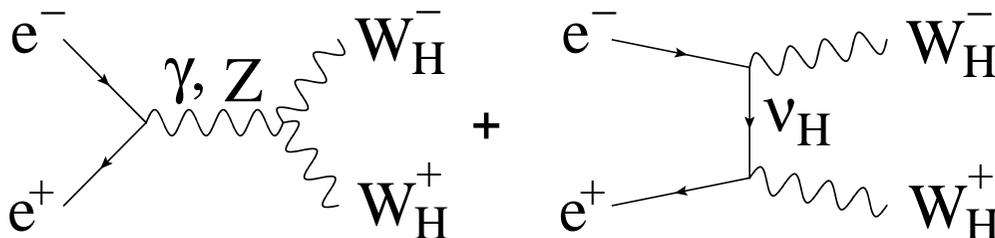
* A_H :暗黒物質の候補

<√s=1TeVでの物理>

$$e^+e^- \rightarrow W_H^+ W_H^-$$

- 反応断面積が非常に大きい(277fb)
- $W_H^\pm \rightarrow A_H W^\pm$ (崩壊比100%)

W^\pm のエネルギー分布
→ A_H と W_H^\pm の質量



ILC計画

- International Linear Collider -

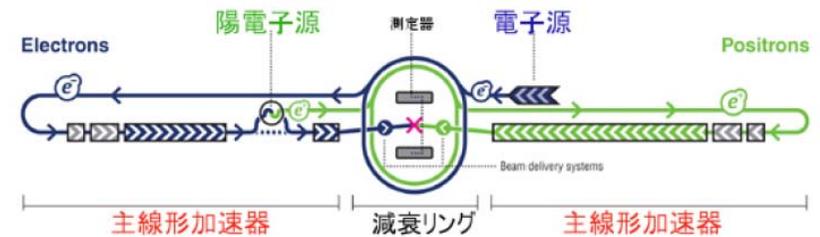
<加速器>

電子・陽電子の衝突

(目標値)

- ・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): 500fb^{-1}
- ・電子の偏極: 最大80%

(加速器の概観)



<測定器>

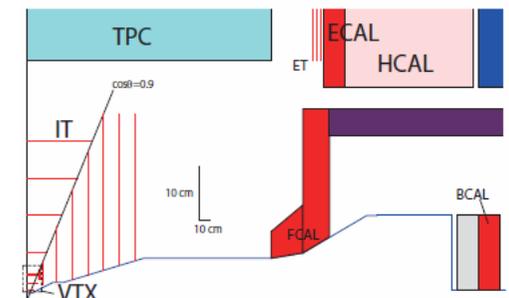
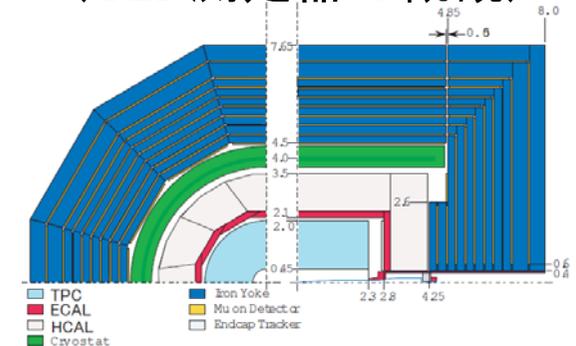
測定器の候補: GLD, LDC, SiD, 4th

ILD (*GLDでシミュレーション)

(目標値)

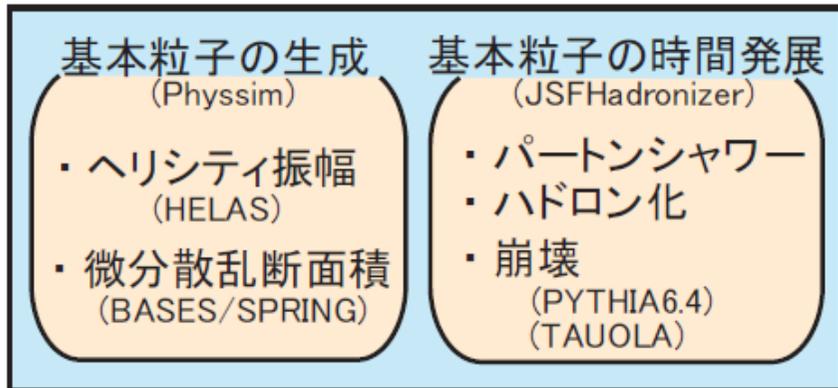
- ・エネルギー分解能: $\Delta E/E = 30\%/\sqrt{E} \text{ (GeV)}$
- ・運動量分解能: $\Delta p_t/p_t^2 = 5 \times 10^{-5} \text{ (GeV/c)}^{-1}$

(GLD測定器の概観)



シミュレーション

1. 物理事象の生成

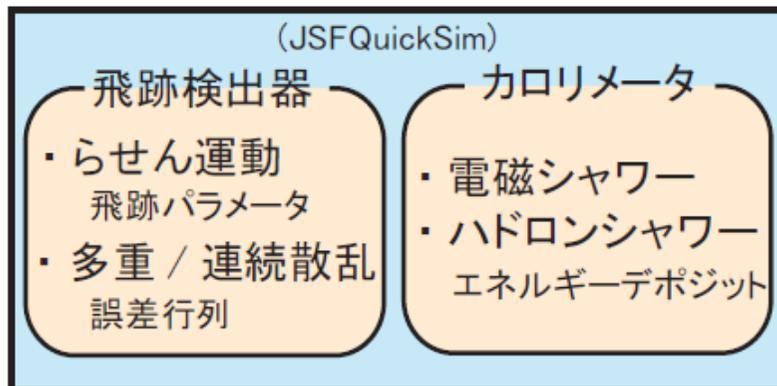


(物理事象の生成における値)

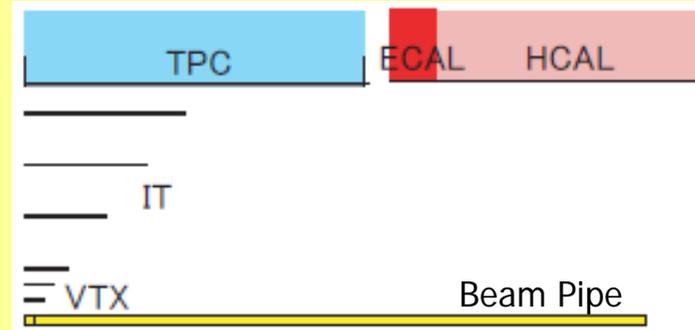
- ・重心系エネルギー : 500GeV, 1TeV
- ・積分ルミノシティ : 500 fb⁻¹
- ・電子の偏極 : -80, 0, +80%

(測定器シミュレーションへ)

2. 測定器シミュレーション



測定器シミュレータ内の概観(衝突点付近)

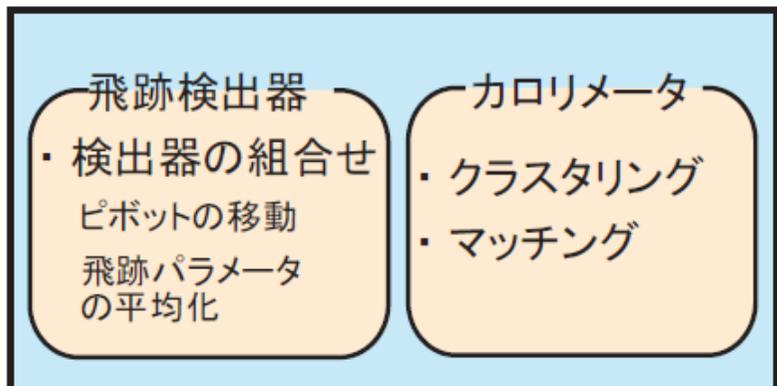


- ・飛跡検出器
VTX, IT, TPC
- ・カロリメータ
ECAL, HCAL

(再構成)

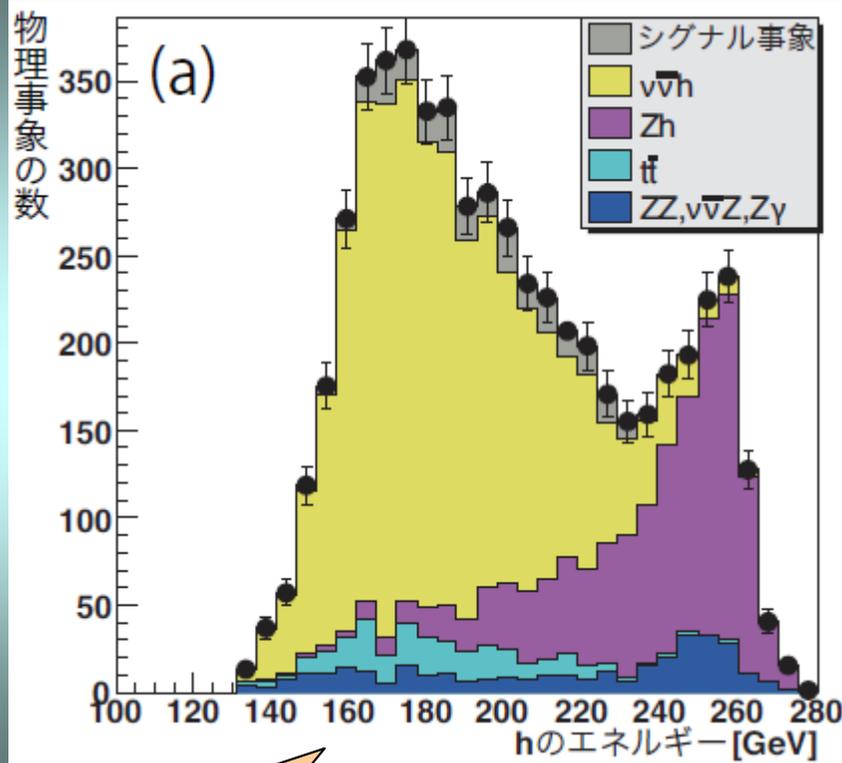
- ・粒子の運動量
- ・粒子のエネルギー

3. 物理事象の再構成

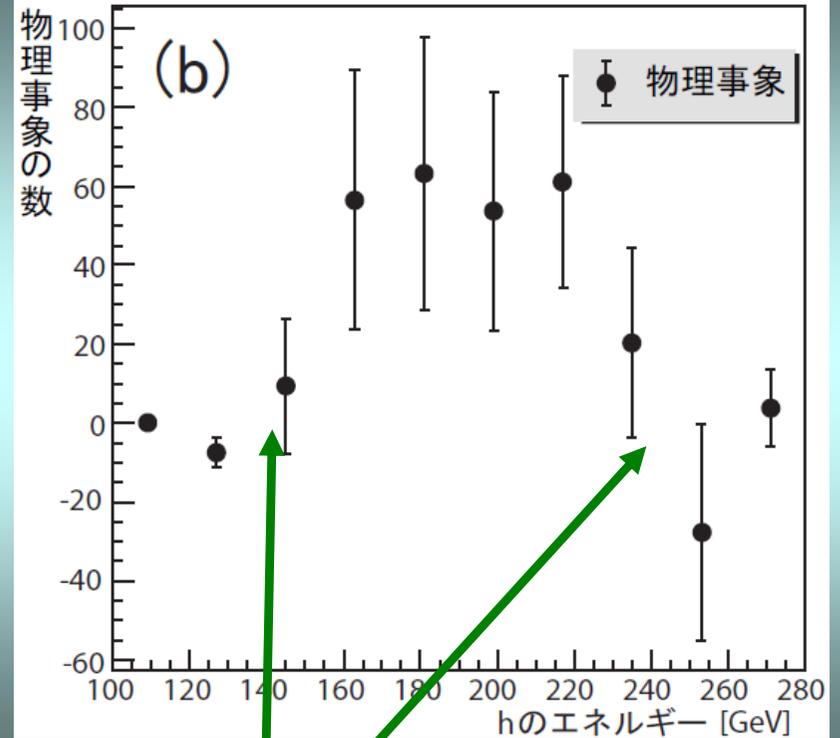
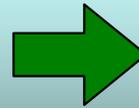


$\sqrt{s}=500\text{GeV}$ での物理: A_H と Z_H の質量

<hのエネルギー分布>



バックグラウンドの除去



(事象の選択)

- ・hの質量
- ・横運動量欠損
- ・bタグ

シグナル事象の
統計の有意性: 3.7σ

シグナル事象を示唆している

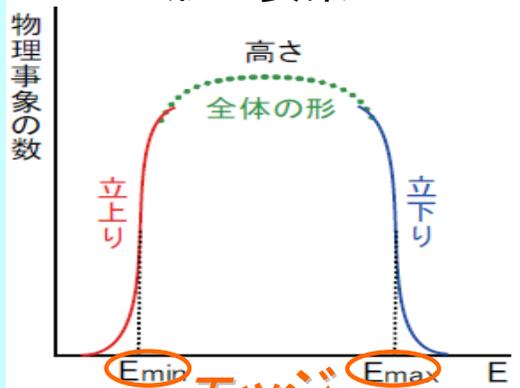
エネルギー分布をフィットして
2つのエッジから質量を求める

*2つのエッジと質量には
依存関係がある

$\sqrt{s}=500\text{GeV}$ での物理: A_H と Z_H の質量

<エネルギー分布のフィット関数>

形の要素



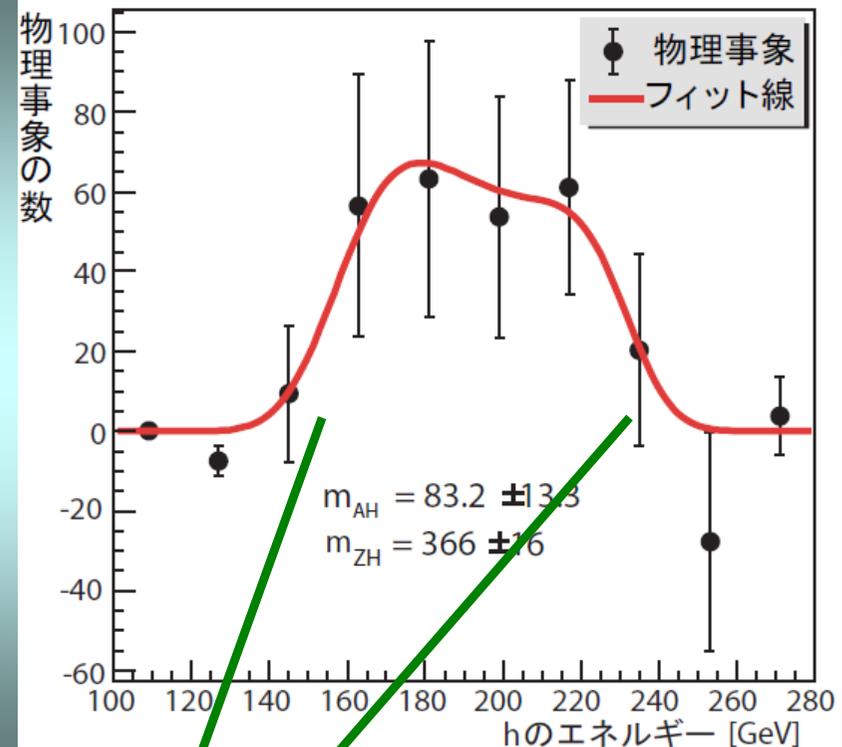
フィット関数

$$\frac{1}{4} c_0 \underbrace{\left\{ 1 + f_{\text{Err}} \left(\frac{E - E_{\min}}{c_1} \right) \right\}}_{\text{左エッジの立上り}} \underbrace{\left\{ 1 - f_{\text{Err}} \left(\frac{E - E_{\max}}{c_2} \right) \right\}}_{\text{右エッジの立下り}} \times \underbrace{\left(1 + c_3 E + c_4 E^2 + c_5 E^3 + c_6 E^4 + c_7 E^5 + c_8 E^6 \right)}_{\text{全体の形}}$$

(誤差関数の定義)

$$f_{\text{Err}}(x) \equiv \int_0^x \frac{2}{\sqrt{\pi}} \exp(-t^2) dt$$

<hのエネルギー分布のフィット>



*2つのエッジと質量には
依存関係がある

<2つのエッジから求まる質量>

<質量の測定精度>

$$m_{A_H} = 83.2 \pm 13.3 \text{ GeV}$$

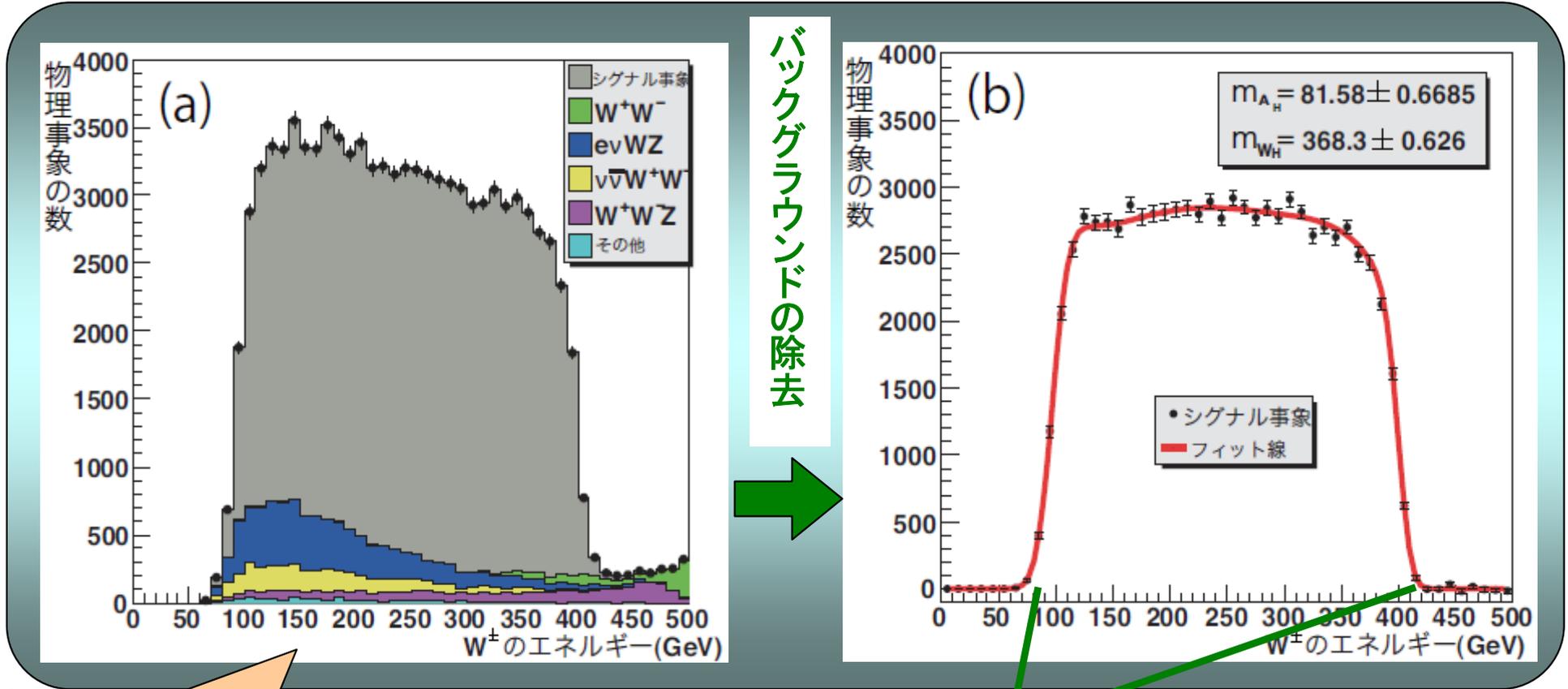
$$m_{Z_H} = 366.0 \pm 16.0 \text{ GeV}$$

16.2%

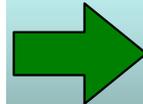
4.3%

$\sqrt{s}=1\text{TeV}$ での物理: A_H と W_H^\pm の質量

< W^\pm のエネルギー分布>



バックグラウンドの除去



(事象の選択)

- ・ W^\pm エネルギー
- ・ W^\pm 質量の χ^2
- ・横運動量欠損

<2つのエッジから求まる質量>

$$m_{A_H} = 81.58 \pm 0.67 \text{ GeV}$$

$$m_{W_H} = 368.3 \pm 0.63 \text{ GeV}$$

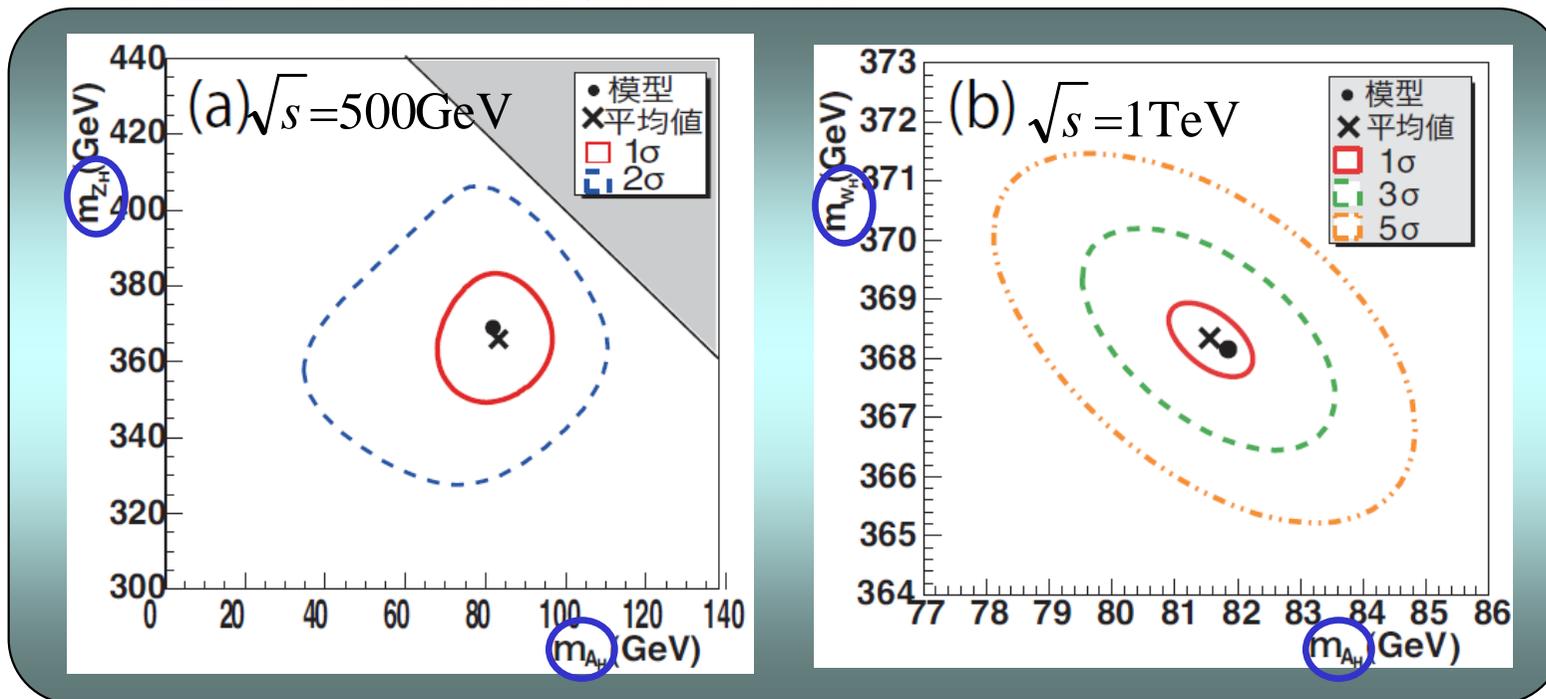
<質量の測定精度>

0.8%
0.2%

A_H と W_H^\pm の質量が**非常に高い精度**で求められた!!

模型のパラメータ f

<質量の測定精度を表す等高線>



$\begin{cases} m_{A_H} \approx \sqrt{0.2} g f \\ m_{Z_H} \approx g f \end{cases} * f \text{ と質量には依存関係がある}$

$\begin{cases} m_{A_H} \approx \sqrt{0.2} g f \\ m_{W_H} \approx g f \end{cases}$

<質量の測定精度から決まる f の値>

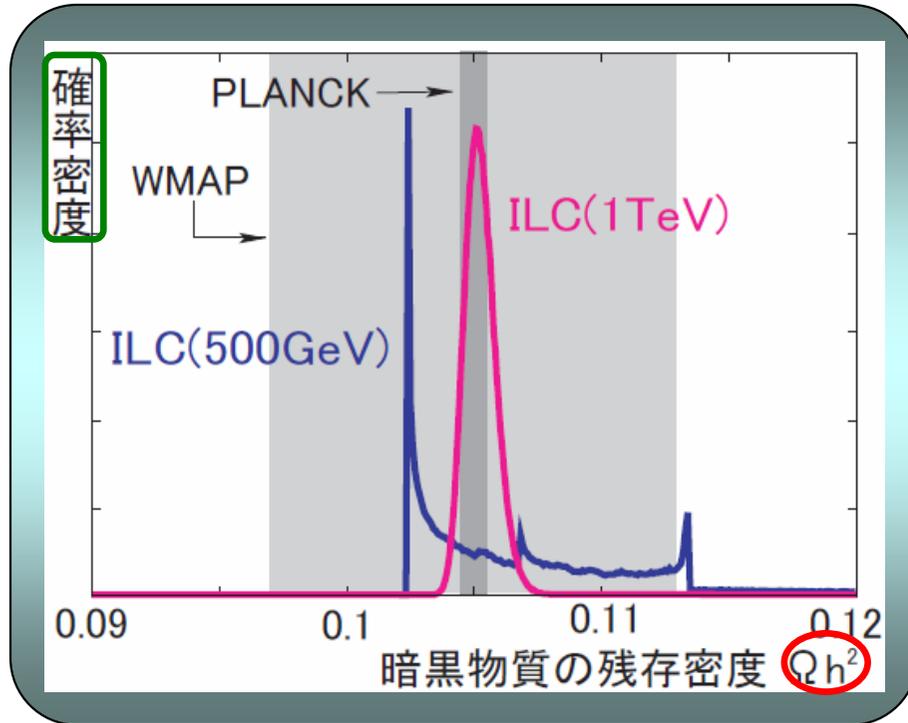
$f = 576.0 \pm 25.0 \text{ GeV} \quad (\sqrt{s} = 500 \text{ GeV})$
 $f = 580.0 \pm 0.69 \text{ GeV} \quad (\sqrt{s} = 1 \text{ TeV})$

< f の決定精度>

$4.3\% \quad (\sqrt{s} = 500 \text{ GeV})$
 $0.1\% \quad (\sqrt{s} = 1 \text{ TeV})$

暗黒物質 (A_H) の残存密度 Ωh^2

< Ωh^2 の確率密度の分布>



(*富山大 松本重貴 氏による)

< Ωh^2 の決定精度>

$$O(10\%) \quad (\sqrt{s} = 500\text{GeV})$$

$$O(1\%) \quad (\sqrt{s} = 1\text{TeV})$$

* Ωh^2 と f には依存関係がある

暗黒物質の残存密度

$$\Omega_{\text{DM}} h^2 = \frac{1.07 \times 10^9 x_f \text{GeV}^{-1}}{\sqrt{g_*} m_{\text{Pl}} \langle \sigma v \rangle}$$

暗黒物質の対消滅断面積

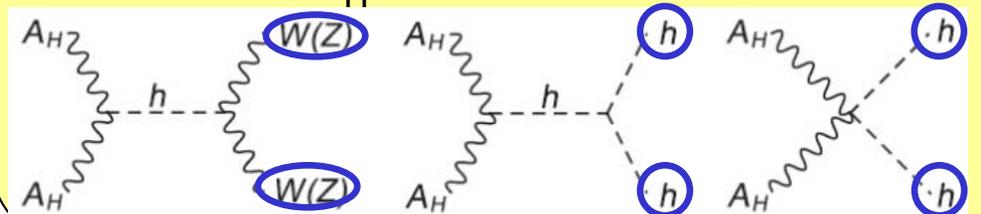
$$\langle \sigma v \rangle = \sigma_{\nu WW} + \sigma_{\nu ZZ} + \sigma_{\nu hh}$$

$$\sigma_{\nu|WW} = \frac{1}{96\pi m_{A_H}^2} \frac{(g^2 v^2 c)^2}{(4m_{A_H}^2 - m_h^2)^2 + m_h^2 \Gamma_h^2} \left(4 \frac{m_{A_H}^4}{m_W^4} - 4 \frac{m_{A_H}^2}{m_W^2} + 3 \right) \sqrt{1 - \frac{m_W^2}{m_{A_H}^2}}$$

$$\sigma_{\nu|ZZ} = \frac{1}{192\pi m_{A_H}^2} \frac{\{(g^2 + g'^2)v^2 c\}^2}{(4m_{A_H}^2 - m_h^2)^2 + m_h^2 \Gamma_h^2} \left(4 \frac{m_{A_H}^4}{m_Z^4} - 4 \frac{m_{A_H}^2}{m_Z^2} + 3 \right) \sqrt{1 - \frac{m_Z^2}{m_{A_H}^2}}$$

$$\sigma_{\nu|hh} = \frac{c^2}{48\pi m_{A_H}^2} \left| 1 + \frac{3m_h^2}{4m_{A_H}^2 - m_h^2 + im_h \Gamma_h} \right|^2 \sqrt{1 - \frac{m_h^2}{m_{A_H}^2}} \quad m_{A_H} \propto f$$

暗黒物質 (A_H) の対消滅ダイアグラム



まとめ

リトルヒッグス模型は
リトル・ヒエラルキー問題と暗黒物質の問題を解決する新しい物理
→ ILC実験におけるシミュレーションで検証

< $\sqrt{s}=500\text{GeV}$ での物理 : $e^+e^- \rightarrow A_H Z_H$ >

- ・シグナル事象の統計の有意性 : 3.7σ
- ・質量の測定精度 : 16.2% (A_H), 4.3% (Z_H)

< $\sqrt{s}=1\text{TeV}$ での物理 : $e^+e^- \rightarrow W_H^+ W_H^-$ >

- ・質量の測定精度 : 0.8% (A_H), 0.2% (W_H^\pm)

<考察>

- ・模型パラメータの決定精度 f : 4.3% ($\sqrt{s}=500\text{GeV}$), 0.1% ($\sqrt{s}=1\text{TeV}$)
- ・暗黒物質の残存密度の決定精度 : $0(10\%)$ ($\sqrt{s}=500\text{GeV}$), $0(1\%)$ ($\sqrt{s}=1\text{TeV}$)

<研究結果>

LOI (Letter Of Intent) に記載

資料

解析の流れ: $e^+e^- \rightarrow A_H Z_H$

(a) シグナル事象の決定

: 終状態「**2ジェット**(bb) + 見えない粒子×2」

(b) バックグラウンド事象の選定

(c) 物理事象の再構成

(d) 物理事象の選択

(e) バックグラウンド事象の除去

(a)

シグナル事象

$$A_H Z_H \rightarrow A_H A_H h$$
$$\rightarrow A_H A_H \boxed{bb} 1.05(\text{fb})$$

<hの崩壊>

- $h \rightarrow bb$ (BR = 55.3%)
- $h \rightarrow W^+W^-$ (BR = 25.6%)
- $h \rightarrow c\bar{c}$ (BR = 6.4%)
- $h \rightarrow \tau\bar{\tau}$ (BR = 3.3%)
- $h \rightarrow ZZ$ (BR = 3.1%)
- $h \rightarrow gg$ (BR = 2.8%)

*反応断面積

崩壊比が1番大きい
&
b-タグが可能

*hの質量が134GeVでの崩壊比

*b-タグ: 崩壊点検出器(VTX)を用いて、
bクォークと他の軽いクォークを
識別する手法

解析の流れ: $e^+e^- \rightarrow A_H Z_H$

- (a) シグナル事象の決定 : 終状態「2ジェット(bb) + 見えない粒子 × 2」
(b) バックグラウンド事象の選定 : 終状態「**2ジェット(bb)**を含む」
(c) 物理事象の再構成
(d) 物理事象の選択
(e) バックグラウンド事象の除去

シグナル事象

$$A_H Z_H \rightarrow A_H A_H h \\ \rightarrow A_H A_H b\bar{b} \quad 1.05(\text{fb})$$

(b)

バックグラウンド事象

γZ	\rightarrow	$\gamma b\bar{b}$	1,200(fb)
tt	\rightarrow	$W^+ W^- b\bar{b}$	496(fb)
$\nu\nu Z$	\rightarrow	$\nu\nu b\bar{b}$	44.3(fb)
$\nu\nu h$	\rightarrow	$\nu\nu b\bar{b}$	34.0(fb)
ZZ	\rightarrow	$\nu\nu b\bar{b}$	25.5(fb)
Zh	\rightarrow	$\nu\nu b\bar{b}$	5.57(fb)

*標準模型において
2ジェットとなる全ての過程を考慮

解析の流れ: $e^+e^- \rightarrow A_H Z_H$

- (a) シグナル事象の決定 : 終状態「2ジェット(bb) + 見えない粒子 × 2」
- (b) バックグラウンド事象の選定 : 終状態「2ジェット(bb)を含む」
- (c) 物理事象の再構成** : **2ジェット**として再構成 → **h**として再構成
- (d) 物理事象の選択
- (e) バックグラウンド事象の除去

シグナル事象

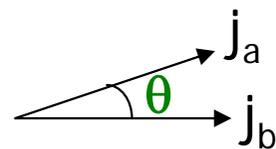
$$A_H Z_H \rightarrow A_H A_H \overset{\text{h}}{\text{bb}} 1.05(\text{fb})$$

バックグラウンド事象

γZ	\rightarrow	$\gamma \overset{\text{bb}}{\text{bb}}$	1,200(fb)
tt	\rightarrow	$W^+ W^- \overset{\text{bb}}{\text{bb}}$	496(fb)
$\nu\nu Z$	\rightarrow	$\nu\nu \overset{\text{bb}}{\text{bb}}$	44.3(fb)
$\nu\nu h$	\rightarrow	$\nu\nu \overset{\text{bb}}{\text{bb}}$	34.0(fb)
ZZ	\rightarrow	$\nu\nu \overset{\text{bb}}{\text{bb}}$	25.5(fb)
Zh	\rightarrow	$\nu\nu \overset{\text{bb}}{\text{bb}}$	5.57(fb)

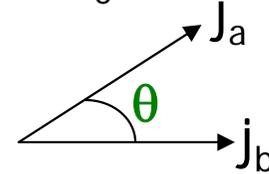
(c) <ジェットの再構成の方法>

($\theta < \theta_0$ の場合)



j_a と j_b : 同じジェット

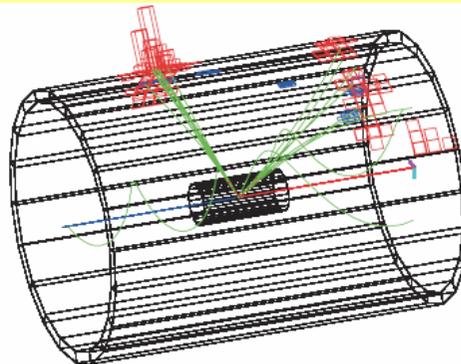
($\theta > \theta_0$ の場合)



j_a と j_b : 異なるジェット

* θ_0 の値を変えれば、nジェットとして再構成可能

<典型的なシグナル事象>



2ジェットとして再構成

解析の流れ: $e^+e^- \rightarrow A_H Z_H$

- (a) シグナル事象の決定 : 終状態「2ジェット(bb) + 見えない粒子×2」
- (b) バックグラウンド事象の選定 : 終状態「2ジェット(bb)を含む」
- (c) 物理事象の再構成 : 2ジェットとして再構成→hとして再構成
- (d) 物理事象の選択 : hの質量 & 横運動量欠損 P_t^{miss} & b-タグ**
- (e) バックグラウンド事象の除去

シグナル事象

$$A_H Z_H \rightarrow A_H A_H h$$

$$\rightarrow A_H A_H b\bar{b} \quad 1.05(\text{fb})$$

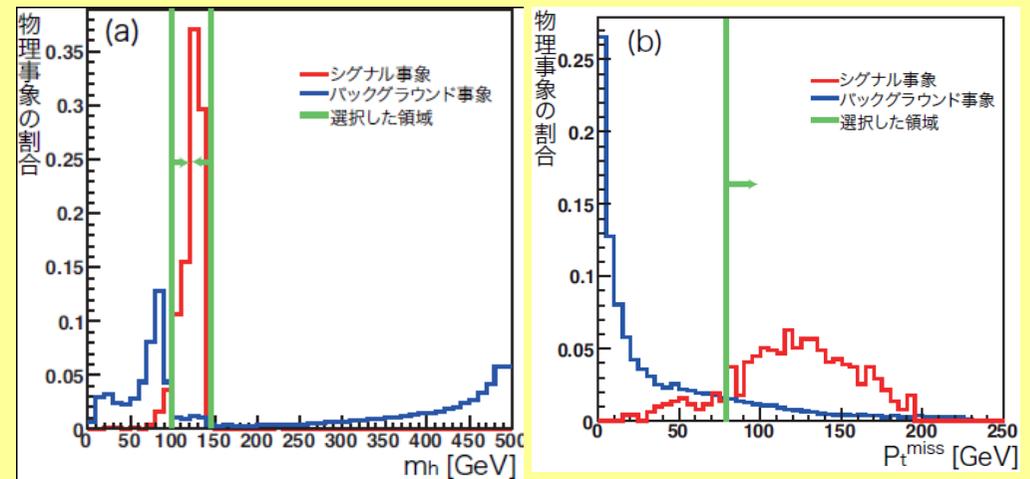
バックグラウンド事象

γZ	\rightarrow	$\gamma b\bar{b}$	1,200(fb)
tt	\rightarrow	$W^+ W^- b\bar{b}$	496(fb)
$\nu\nu Z$	\rightarrow	$\nu\nu b\bar{b}$	44.3(fb)
$\nu\nu h$	\rightarrow	$\nu\nu b\bar{b}$	34.0(fb)
ZZ	\rightarrow	$\nu\nu b\bar{b}$	25.5(fb)
Zh	\rightarrow	$\nu\nu b\bar{b}$	5.57(fb)

(d)

<hの質量の選択>

< P_t^{miss} の選択>



$100(\text{GeV}) < m_h < 140(\text{GeV})$

$P_t^{\text{miss}} > 80(\text{GeV})$

*b-タグの選択では
bクォークが80%残る

解析の流れ: $e^+e^- \rightarrow W_H^+ W_H^-$

(a) シグナル事象の決定 : 終状態「**4ジェット** + 見えない粒子×2」

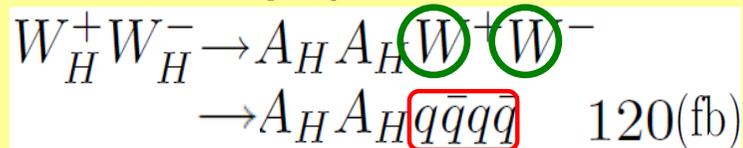
(b) バックグラウンド事象の選定

(c) 物理事象の再構成

(d) 物理事象の選択

(e) バックグラウンド事象の除去

シグナル事象



*反応断面積

<W[±]の崩壊>

ハドロン崩壊: $W \rightarrow q\bar{q}$ (BR = 67.6%)

レプトン崩壊: $W \rightarrow l\nu$ (BR = 32.4%)

↓ W⁺とW⁻の2つについて

- 4ジェット : $q\bar{q}q\bar{q}$
- 2ジェット + 1レプトン : $q\bar{q}l\nu$
- 2レプトン : $l^+\nu l^-\bar{\nu}$

崩壊比が1番大きい
&
検出できないνを含まないので
運動力学から完全に再構成が可能

解析の流れ: $e^+e^- \rightarrow W_H^+ W_H^-$

- (a) シグナル事象の決定 : 終状態「4ジェット + 見えない粒子 × 2」
- (b) バックグラウンド事象の選定 : 終状態「4ジェットを含む」**
- (c) 物理事象の再構成
- (d) 物理事象の選択
- (e) バックグラウンド事象の除去

シグナル事象

$$\begin{aligned}
 W_H^+ W_H^- &\rightarrow A_H A_H W^+ W^- \\
 &\rightarrow A_H A_H q \bar{q} q \bar{q} \quad 120(\text{fb})
 \end{aligned}$$

(b) バックグラウンド事象

$W^+ W^-$	\rightarrow	$q \bar{q} q \bar{q}$	1307(fb)
$e^+ e^- W^+ W^-$	\rightarrow	$e^+ e^- q \bar{q} q \bar{q}$	490(fb)
$\nu_e W Z$	\rightarrow	$\nu_e q \bar{q} q \bar{q}$	24.5(fb)
$Z_H Z_H$	\rightarrow	$A_H A_H q \bar{q} q \bar{q}$	18.8(fb)
$\nu \bar{\nu} W^+ W^-$	\rightarrow	$\nu \bar{\nu} q \bar{q} q \bar{q}$	7.23(fb)
$Z W^+ W^-$	\rightarrow	$\nu \bar{\nu} q \bar{q} q \bar{q}$	5.61(fb)

*リトルヒッグスモデルにおける過程

*標準モデルにおいて
4ジェットとなる全ての過程を考慮

解析の流れ: $e^+e^- \rightarrow W_H^+ W_H^-$

- (a) シグナル事象の決定 : 終状態「4ジェット + 見えない粒子 × 2」
- (b) バックグラウンド事象の選定 : 終状態「4ジェットを含む」
- (c) 物理事象の再構成 : **4ジェット**として再構成 → **2個の W^\pm** として再構成
- (d) 物理事象の選択
- (e) バックグラウンド事象の除去

シグナル事象

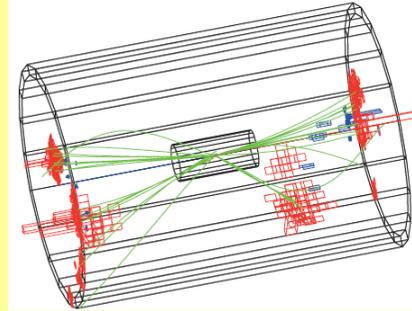
$$W_H^+ W_H^- \rightarrow A_H A_H \textcircled{W^+} \textcircled{W^-}$$

$$\rightarrow A_H A_H \textcircled{q\bar{q}q\bar{q}} \quad 120(\text{fb})$$

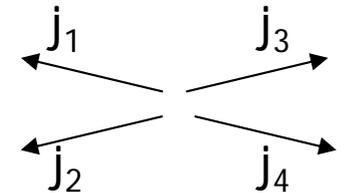
バックグラウンド事象

$W^+ W^-$	\rightarrow	$q\bar{q}q\bar{q}$	1307(fb)
$e^+ e^- W^+ W^-$	\rightarrow	$e^+ e^- q\bar{q}q\bar{q}$	490(fb)
$ev_e W Z$	\rightarrow	$ev_e q\bar{q}q\bar{q}$	24.5(fb)
$Z_H Z_H$	\rightarrow	$A_H A_H q\bar{q}q\bar{q}$	18.8(fb)
$\nu\bar{\nu} W^+ W^-$	\rightarrow	$\nu\bar{\nu} q\bar{q}q\bar{q}$	7.23(fb)
$ZW^+ W^-$	\rightarrow	$\nu\bar{\nu} q\bar{q}q\bar{q}$	5.61(fb)

(c) <典型的なシグナル事象>



4ジェットとして再構成



3通りの組合せ (${}_4C_2 \div 2$)

$$\left\{ \begin{array}{l} W_1^a(j_1 + j_2), W_2^a(j_3 + j_4) \\ W_1^b(j_1 + j_3), W_2^b(j_2 + j_4) \\ W_1^c(j_1 + j_4), W_2^c(j_2 + j_3) \end{array} \right.$$

< W^\pm の再構成における指標>

$$\chi_W^2 \equiv \left(\frac{m_{W_1} - m_W}{\sigma_{m_W}} \right)^2 + \left(\frac{m_{W_2} - m_W}{\sigma_{m_W}} \right)^2$$

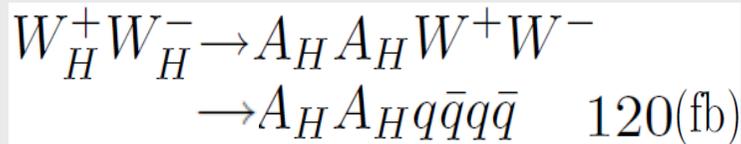
$$m_W = 80.4 \text{ GeV (PDGでの値)}$$

*3通りの組合せの内、
 χ_W^2 の1番小さいものを採用

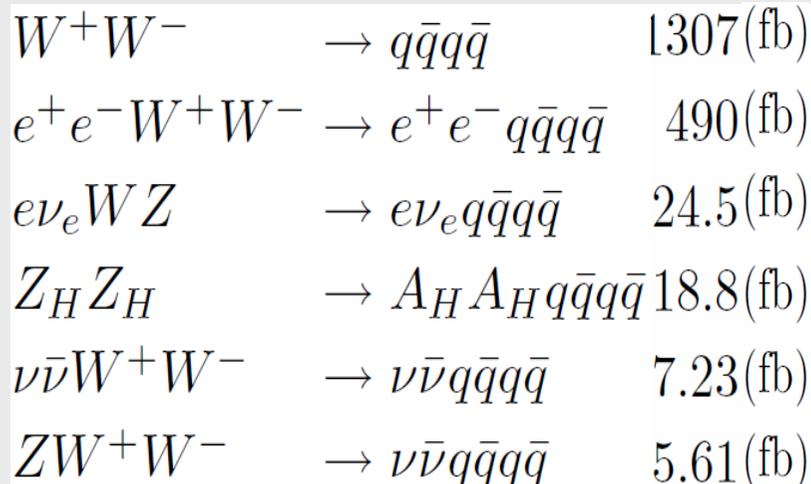
解析の流れ: $e^+e^- \rightarrow W_H^+ W_H^-$

- (a) シグナル事象の決定 : 終状態「4ジェット + 見えない粒子×2」
- (b) バックグラウンド事象の選定 : 終状態「4ジェットを含む」
- (c) 物理事象の再構成 : 4ジェットとして再構成→2個の W^\pm として再構成
- (d) 物理事象の選択 : W^\pm のエネルギー & χ_W^2 & 横運動量欠損 P_t^{miss}
- (e) バックグラウンド事象の除去

シグナル事象

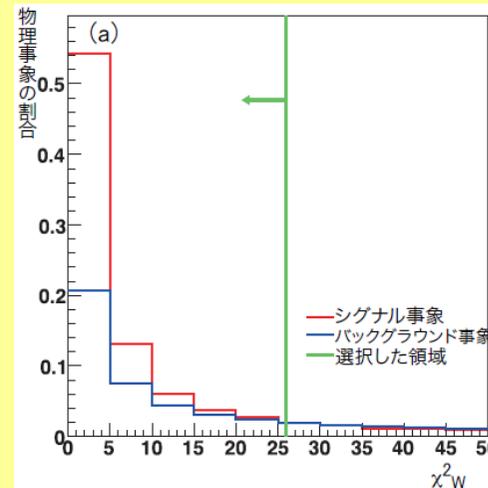


バックグラウンド事象



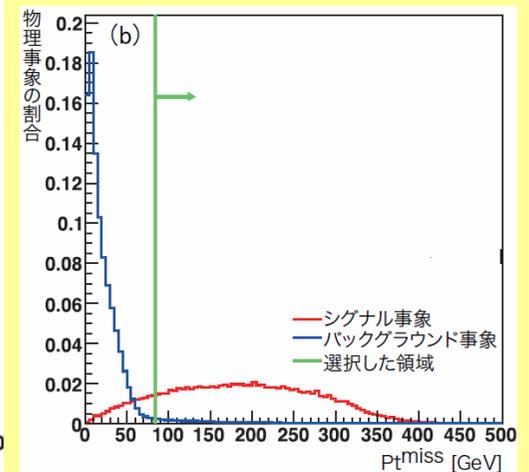
(d)

< χ_W^2 の選択>



$$\chi_W^2 < 26$$

< P_t^{miss} の選択>



$$P_t^{\text{miss}} > 84(\text{GeV})$$

* W^\pm のエネルギーの選択は
 $0(\text{GeV}) < E_W < 500(\text{GeV})$