



TOHOKU
UNIVERSITY

国際リニアコライダーを用いた 荷電ヒッグス粒子の探索

日本物理学会第70回年次大会@早稲田大学早稲田キャンパス

2015年3月23日

新崎ゆう子

石川明正 Jan Strube ^A藤井恵介

^B兼村晋哉 ^C柳生慶 山本均

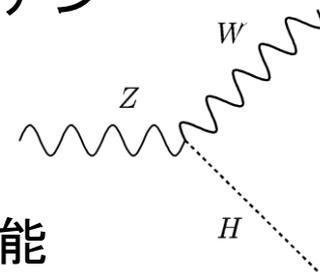
東北大 A:KEK B:富山大 C:国立中央大

導入

研究概要

- 2012年7月、LHCで新粒子発見
 - 翌年、ヒッグス粒子であることが確認された
 - 今後はヒッグスセクターの構造(一重項、二重項、三重項の追加)を決めることが重要となる。
- 複数の拡張ヒッグスモデルにおいて、 $H^\pm W^\mp Z$ 結合が現れる
 - $H^\pm W^\mp Z$ 結合のツリーレベルの有効ラグランジアン

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = gm_W f_{HWV} H^\pm W_\mu^\mp V^\mu$$



- $H^\pm W^\mp Z$ 結合を観測することで、モデルを区別可能
 - 形状因子の上限値として、各モデルに制限を与える
 - 対生成($e^+e^- \rightarrow H^{++}H^{--}$)が不可能な重心系エネルギーの場合でも、 $e^+e^- \rightarrow W^\pm H^\mp$ 過程を用いて荷電ヒッグス粒子を探索することが可能
- この研究では、 W 粒子の反跳質量を測定することで、荷電ヒッグス粒子の探索を行う

解析

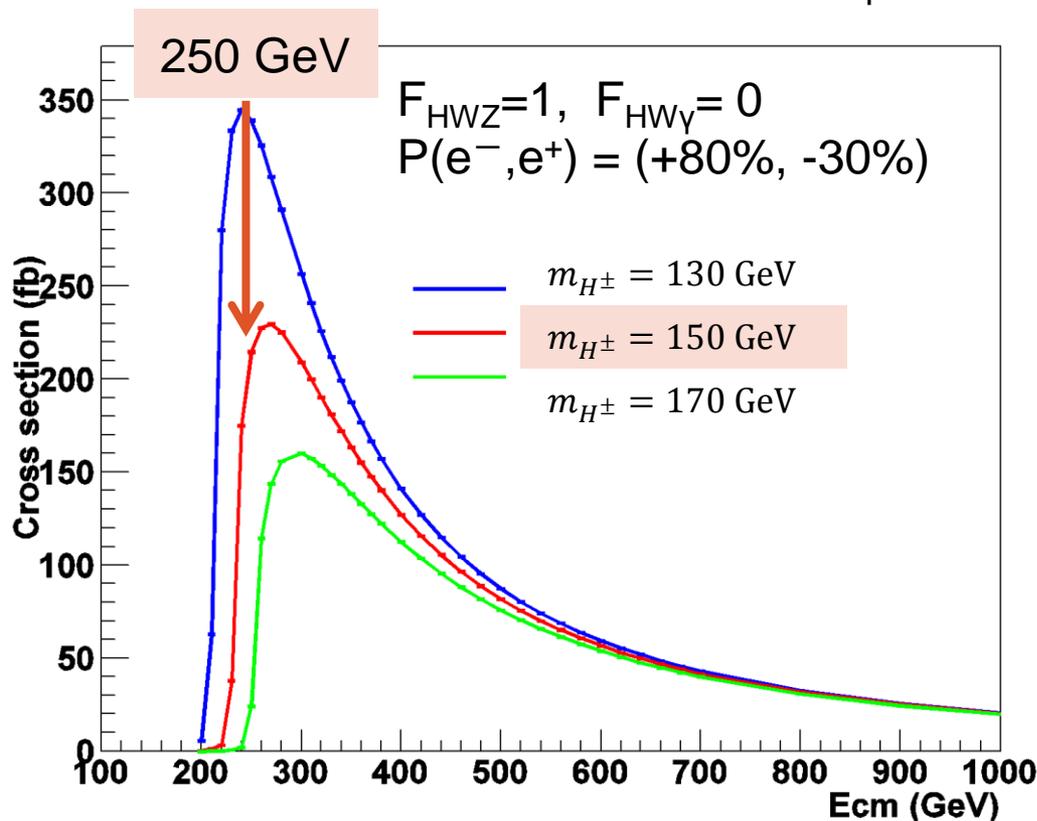
信号事象

信号事象生成の条件

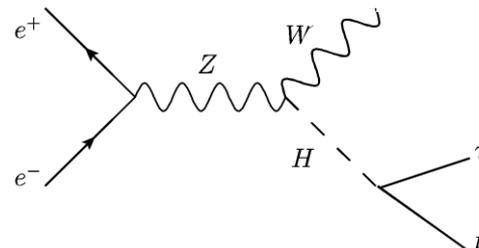
- 事象生成ソフト
- 重心エネルギー
- 荷電ヒッグス粒子質量
- 形状因子

Physsim
 $E_{cm} = 250 \text{ GeV}$
 $m_{H^\pm} = 150 \text{ GeV}/c^2$
 $F_{HWZ} = 1, F_{HW\gamma} = 0$

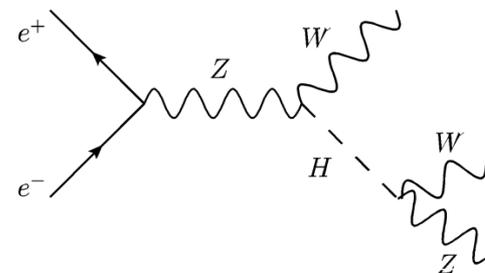
- ★信号事象の生成断面積が大きい
- ★ヒッグス三重項模型の二重荷電ヒッグスの対生成抑制



H → $\tau\nu$ 過程



H → WZ 過程



シミュレーション条件

シミュレーションの条件

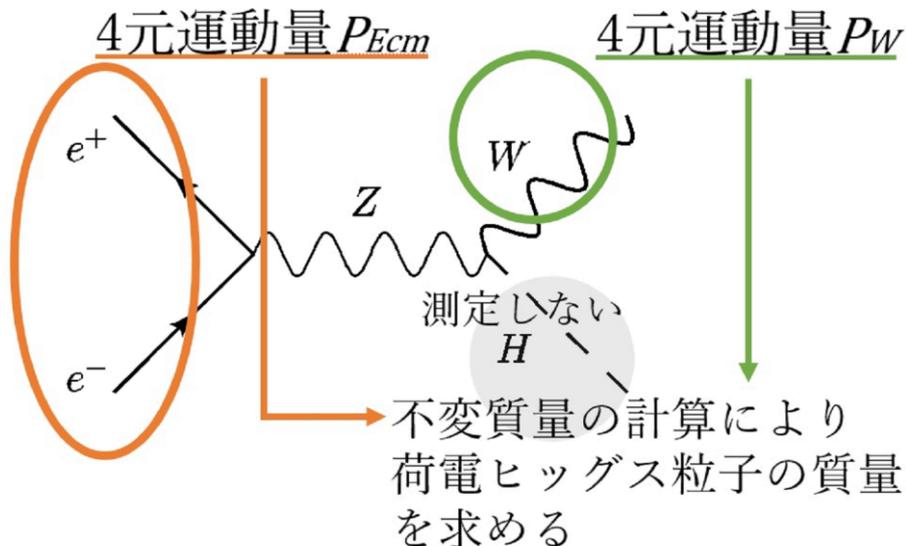
- 検出器シミュレーション ILD_01_v05 (DBD ver.)
- 積分ルミノシティ $L=250 \text{ fb}^{-1}$
- 偏極 $P(e^+, e^-) = (-30\%, +80\%)$ 「右偏極」

	崩壊過程	生成断面積(fb)	事象数(k)	
Sig①	WH (H→ $\tau\nu$)	214	54	
Sig②	WH (H→WZ)	214	54	
SM BG	Di-jet	46200	12000	
	evW → evjj	445	110	W由来の背景事象 を抑制(左偏極時)
	Zee → jjee	300	74	
	WW → jjlv	758(11000)	190(2700)	
	WW → jjjj	600(8700)	150(2200)	
	ZZ → jjll	467	120	事象数が 10分の1以下に
	ZZ → jjjj	402	100	
	ZZWWmix → jjjj	565	140	
Zh → ffh	205	51		

再構成

- W が hadronicに崩壊する際の反跳を見ることで荷電ヒッグス粒子の質量を計算する
- $H \rightarrow \tau\nu$ と $H \rightarrow WZ \rightarrow l\nu\nu$ を見たい \rightarrow 3ジェット再構成を行う
 - Durham algorithmを用いて、3本のジェットになるまで粒子を(強制的に)再構成する
 - 3本のジェットのうち χ^2 が最小になるように2つのジェットから W を再構成する
 - **反跳質量法**により荷電ヒッグス粒子の質量を計算する

ILCのような素粒子-素粒子衝突の実験で可能になる解析手法



$$\chi^2 = \left(\frac{M_j - m_W}{\sigma_W} \right)^2$$

M_j : mass of jet pair

m_W : mass of W (= 80.0 GeV)

σ_W : mass resolution (= 4.8 GeV)

$$m_H^2 = (P_{Ecm} - P_W)^2$$

事象選別

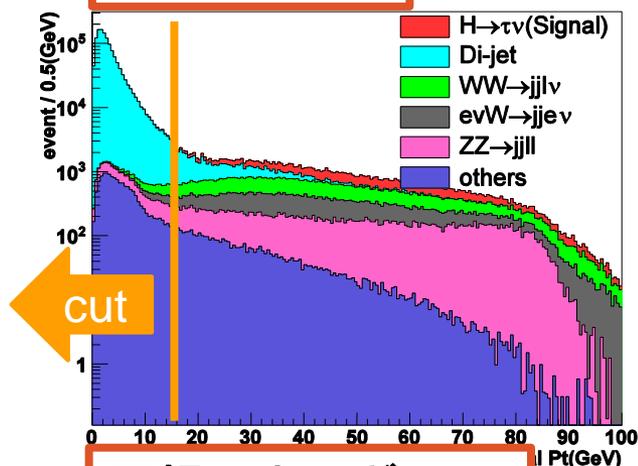
$$S = \frac{N_{sig}}{\sqrt{N_{sig} + N_{bg}}}$$

信号有意度(S)を最大化するように信号事象の選別を行った

▶ ニュートリノを含まない事象を排除

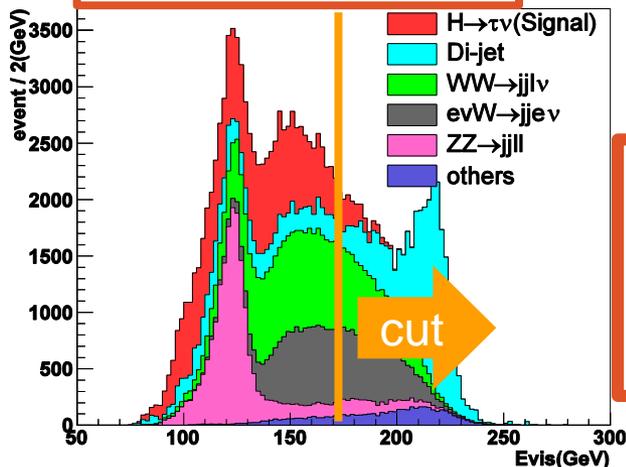
▶ 信号事象と終状態の近い事象を排除

全横運動量



cut

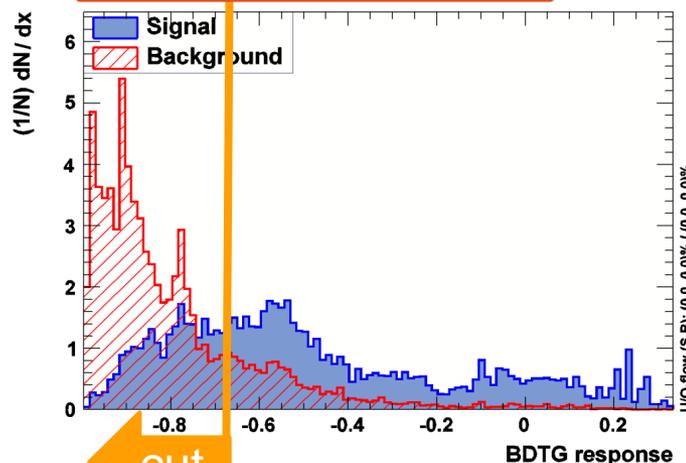
可視エネルギー



cut

その他用いた
カット変数
Wボソン質量
反跳質量
Wボソン生成角

TMVA(BDTG)



cut

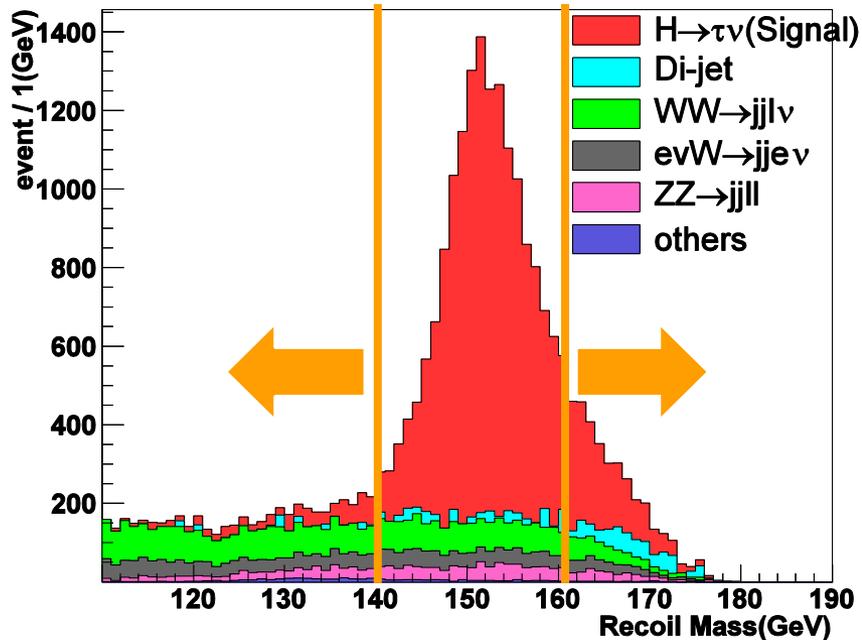
インプット変数

Y3->2	スラスト	nPFO
荷電粒子数	質量欠損	$\frac{\max(E_{PFO})}{E_{3rdjet}}$

▶ TV過程、WZ過程ともにほぼ同様の事象選別を行った

事象選別後の反跳質量分布

H→TV過程



信号事象領域

- 70 < Mw < 90 (GeV)
- 140 < Mrec < 160 (GeV)
- 15 < Pt (GeV)
- 170 < Evis (GeV)
- 0.95 < |cosθ_{Wangle}|
- 0.675 < BDTG

	WH(τν)	Di-jet	evW→evjj	WW→jjlv	ZZ→jjll	others
no cut	53618	11553700	111356	189596	116797	518315
after cut	14276	581	837	1729	863	95

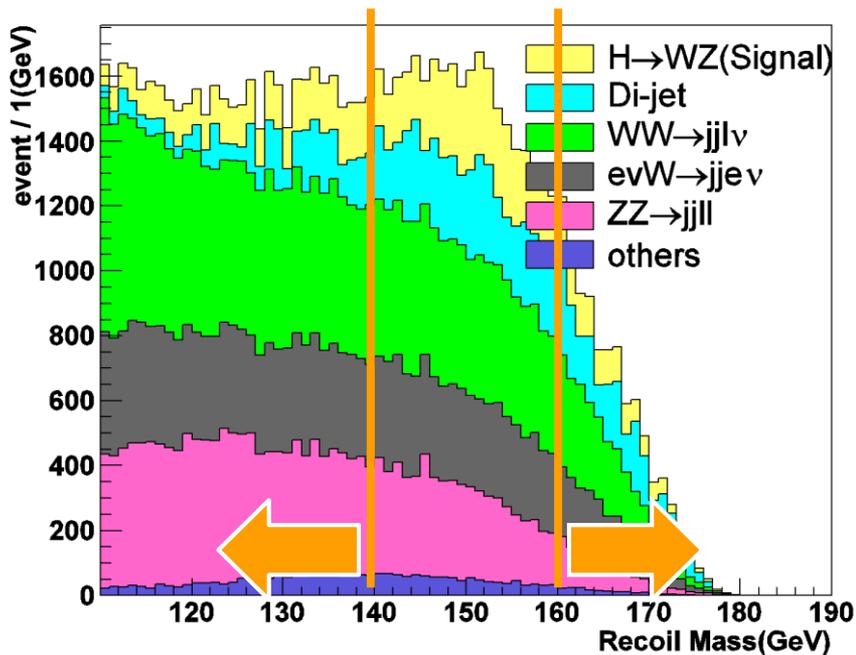
検出効率 $\epsilon = 26.62\%$

信号有意度 $S = 105$

($F_{HWZ}=1$, $F_{HW\gamma}=0$, $BR(H \rightarrow \tau\nu)=100\%$)

$$S = \frac{N_{sig}}{\sqrt{N_{sig} + N_{bg}}}$$

事象選別後の反跳質量分布 H→WZ過程



信号事象領域

- 70 < Mw < 90 (GeV)
- 140 < Mrec < 160 (GeV)
- 15 < Pt (GeV)
- 200 < Evis (GeV)
- 0.95 < |cosθWangle|

	WH(WZ)	Di-jet	evW→evjj	WW→jjlv	ZZ→jjll	others
no cut	53613	11553700	111356	189596	116797	518315
after cut	4768	4792	5835	8697	5438	987

検出効率 $\epsilon = 8.89\%$

信号有意度 $S = 27.29$

($F_{HWZ}=1$, $F_{HW\gamma}=0$, $BR(H \rightarrow WZ)=100\%$)

$$S = \frac{N_{sig}}{\sqrt{N_{sig} + N_{bg}}}$$

生成断面積の上限値

生成断面積の上限値の計算

▶ TV崩壊過程

背景事象数 N_{bg}	4015
信号事象検出効率 ε	0.2662
積分ルミノシティ \mathcal{L}	250 fb ⁻¹

$$\sigma_{95\%}^{UL} = 1.92 \text{ fb} \rightarrow F_{95\%}^{UL} = 0.0974$$
$$(|F_{95\%}^{UL}|^2 = 0.00897)$$

$$F_{HWZ} = 1 \text{ のとき、}$$
$$\sigma = 214 \text{ fb}$$

$$\sigma_{95\%}^{UL} = \frac{N_{95\%}^{UL}}{\varepsilon \cdot \mathcal{L}} = \frac{2\sqrt{\langle N_{bg} \rangle}}{\varepsilon \cdot \mathcal{L}}$$

▶ WZ崩壊過程

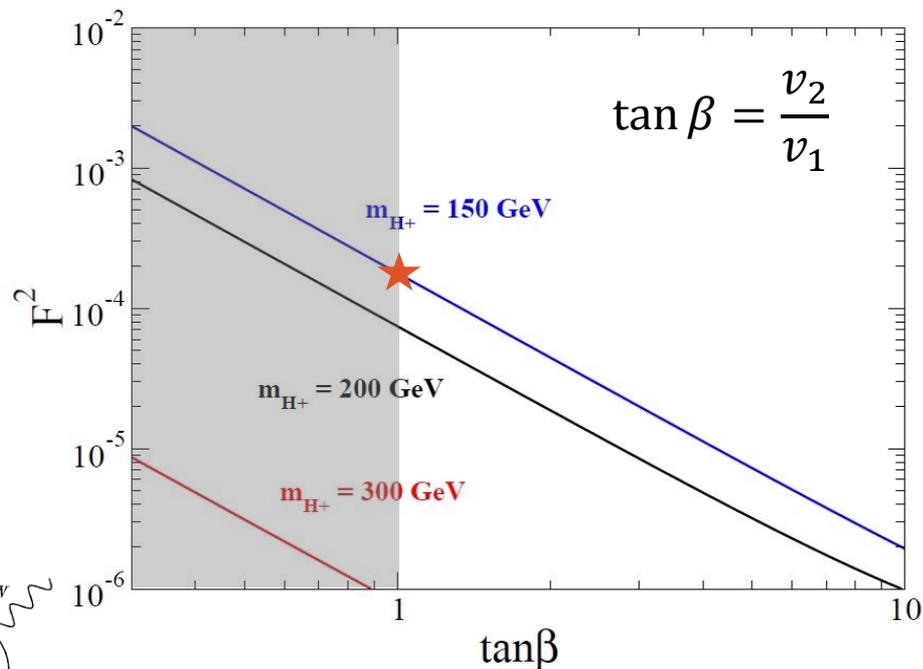
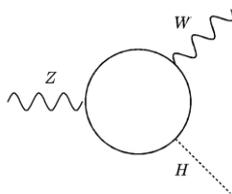
背景事象数 N_{bg}	25749
信号事象検出効率 ε	0.0889
積分ルミノシティ \mathcal{L}	250 fb ⁻¹

$$\sigma_{95\%}^{UL} = 14.4 \text{ fb} \rightarrow F_{95\%}^{UL} = 0.259$$
$$(|F_{95\%}^{UL}|^2 = 0.0673)$$

TV過程の結果と2HDM(タイプX)の比較

- ▶ 2HDMのレプトン特化型タイプXにおける $\tan \beta - F^2$ 図
- ▶ $\tan \beta \lesssim 1$ の領域は、B-Bbar mixing から制限されている (Phys.Rev.D81:035016,2010)
- ▶ 荷電ヒッグス粒子質量 $150 \text{ GeV}/c^2$ のもとでは、 $\tan \beta = 1$ のとき最大で、 $F^2 \sim 2 \times 10^{-4}$

※1ループのため形状因子小



(富山大学兼村准教授から)

TV過程の解析の結果 $|F_{95\%}^{UL}|^2 = 0.00897$
 → 新たに制限を与えることができない

WZ過程の結果と Georgi-Machacekモデルの比較

▶ VEVと形状因子の大きさの関係

$$F^2 = \frac{4v_\Delta^2}{\cos^2\theta_W(v^2 + 4v_\Delta^2)}$$

v SMの真空期待値 ($v = 246$ GeV)

v_Δ 三重項の真空期待値

(Shinya Kanemura, Kei Yagyu, [physical review D 83, 075018\(2011\)](#))

LHC実験の結果により、 $v_\Delta > 70$ GeV
は棄却される。

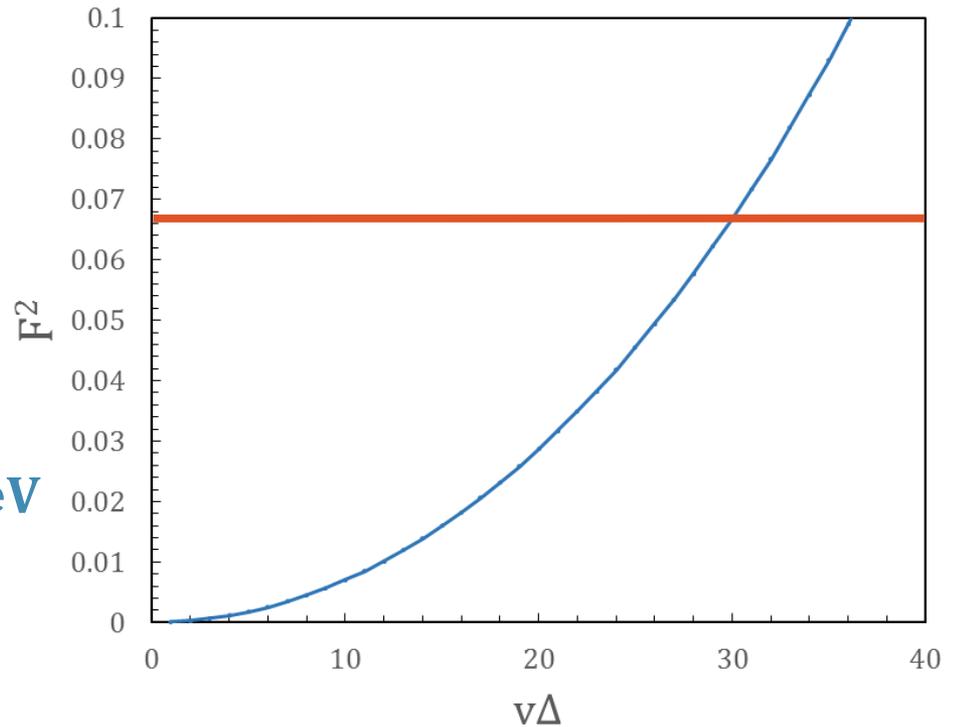
(arXiv:1501.04257)



WZ過程の解析の結果 $|F_{95\%}^{UL}|^2 = 0.0673$

→この解析手法で検出できる可能性がある

(検出できなかったとしても制限を与えることが可能)



まとめ

まとめ

ILC実験の重心エネルギー250 GeVにおける荷電ヒッグス粒子探索の可能性を検証

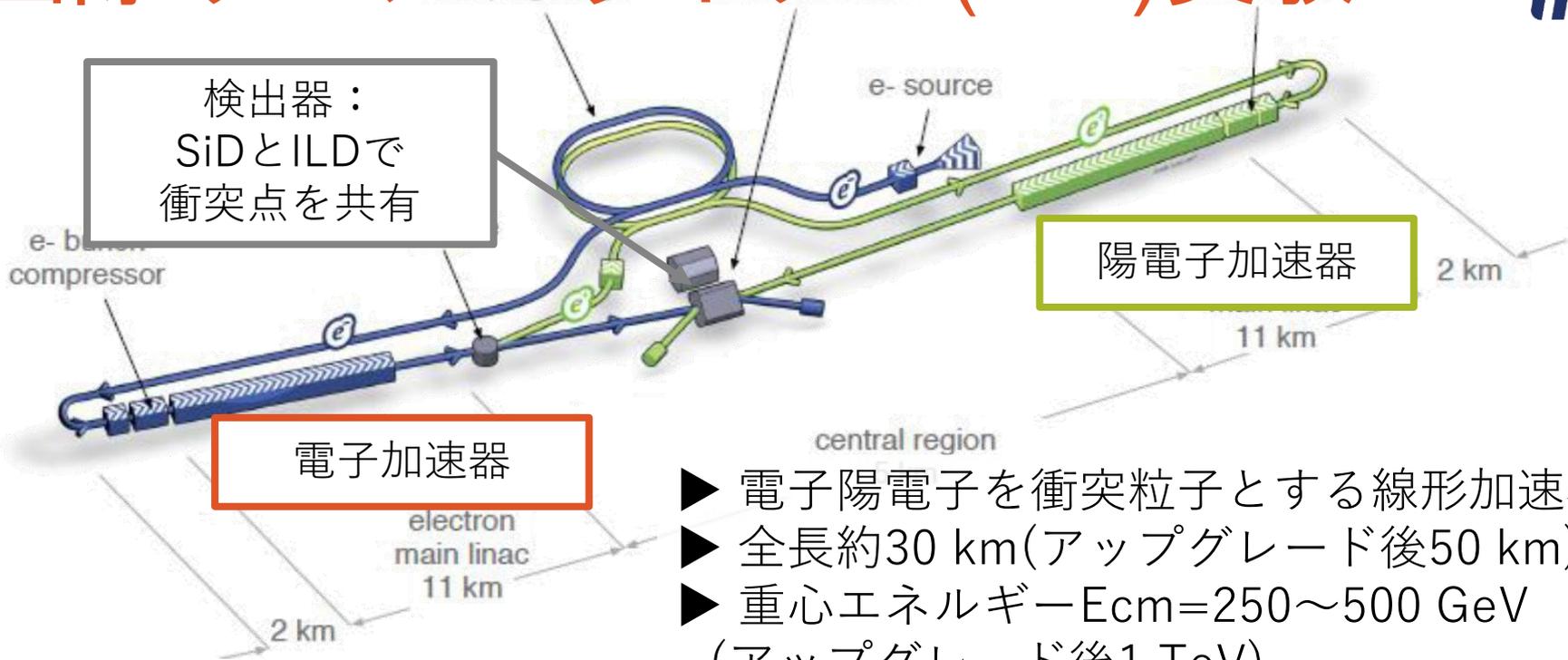
- ▶ 積分ルミノシティ 250 fb⁻¹、右偏極、荷電ヒッグス粒子質量150GeV/c²を想定
- ▶ 荷電ヒッグス粒子がWボソンを伴って生成する事象を反跳質量法により再構成
 - 荷電ヒッグス粒子がTVに崩壊する過程の解析
 $\sigma_{95\%}^{UL} = 1.92 \text{ fb} \rightarrow F_{95\%}^{UL} = 0.0974 (|F_{95\%}^{UL}|^2 = 0.00897)$
→2HDM(タイプX)に対しては新たに制限を与えることはできない
 - 荷電ヒッグス粒子がWZに崩壊する過程の解析
 $\sigma_{95\%}^{UL} = 14.4 \text{ fb} \rightarrow F_{95\%}^{UL} = 0.259 (|F_{95\%}^{UL}|^2 = 0.0673)$
→GM模型の荷電ヒッグス粒子であれば検出可能性あり
検出されなくても、新たに制限を与えることが出来る

今後の研究方針

- ▶ 重心エネルギー250 GeVにおけるWZ過程のより詳細な解析
- ▶ 荷電ヒッグス質量がより大きい場合の解析

Back Up

国際リニアコライダー(ILC)実験



検出器：
SiDとILDで
衝突点を共有

電子加速器

陽電子加速器

- ▶ 電子陽電子を衝突粒子とする線形加速器
- ▶ 全長約30 km(アップグレード後50 km)
- ▶ 重心エネルギー $E_{cm}=250\sim 500$ GeV (アップグレード後1 TeV)
- ▶ 電子陽電子は偏極可能

$P(e^+, e^-) = (-30\%, +80\%)$ 「右偏極」
 $(+30\%, -80\%)$ 「左偏極」

物理ターゲット

- ▶ ヒッグス粒子やトップクォークの精密測定
- ▶ 新物理探索
- 特にカラーを持たない粒子の探索

ILC検出器(ILD)

ハドロンカロリメータ

超電導磁石

電磁カロリメータ

飛跡検出器

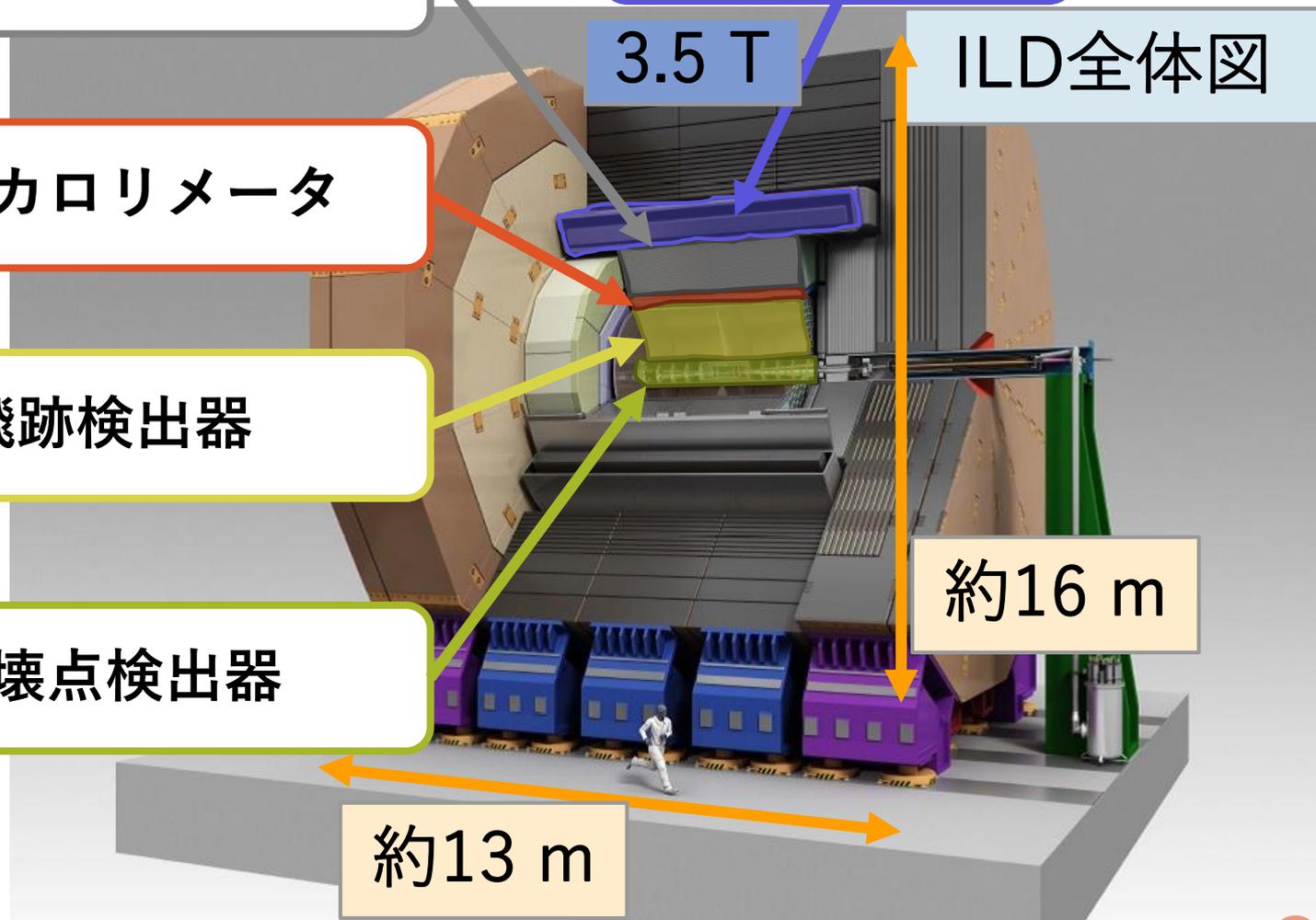
崩壊点検出器

3.5 T

ILD全体図

約16 m

約13 m



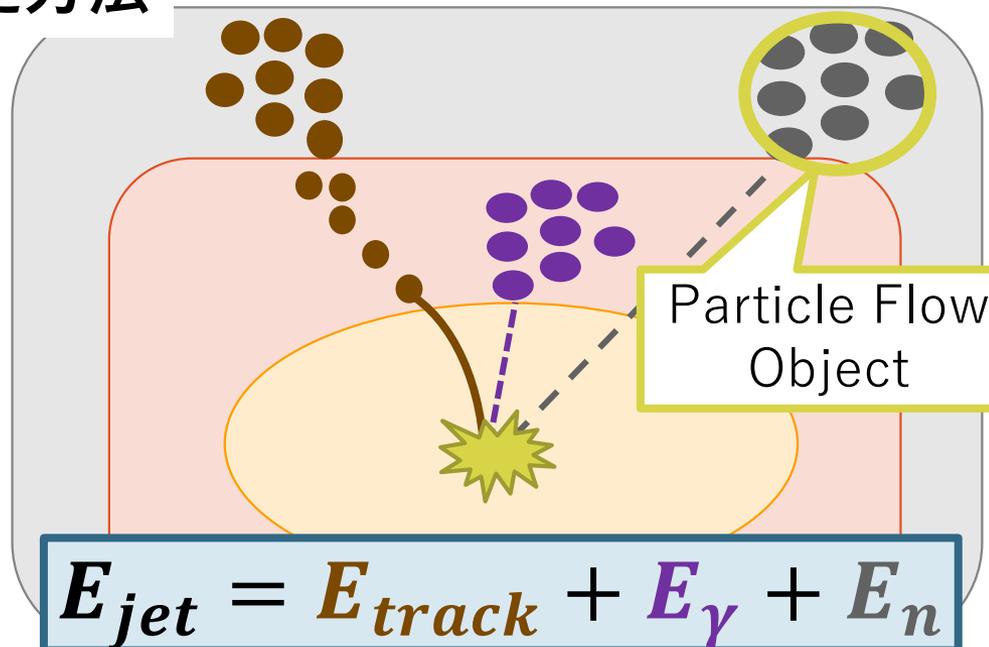
Particle Flow Algorithm (PFA)

PFA : 粒子エネルギーの測定方法

中性ハドロンエネルギー
→ハドロンカロリメータ

光子のエネルギー
→電磁カロリメータ

荷電粒子のエネルギー
→飛跡検出器



★ハドロンカロリメータの寄与を抑える

★粒子のエネルギーを重複なく測定



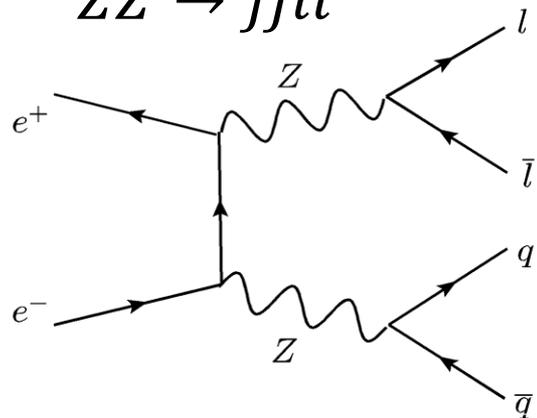
クォークジェットの高分解能で測定可能
→W、Zを識別可能なエネルギー分解能

$$\frac{\sigma}{E_{jet}} = \frac{30\%}{\sqrt{E_{jet}} \text{ (GeV)}}$$

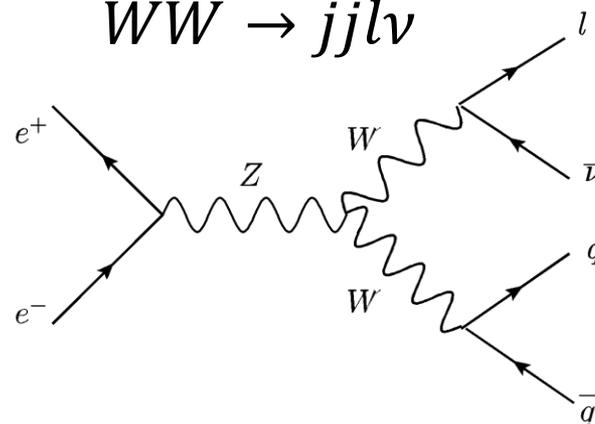
背景事象

終状態が信号事象に近い事象

$$ZZ \rightarrow jjll$$

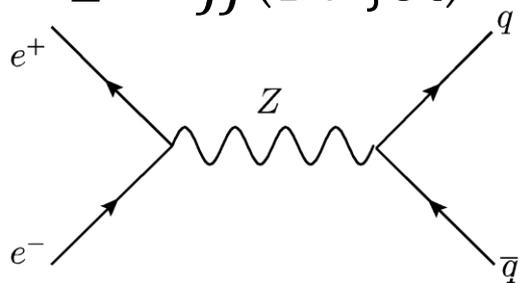


$$WW \rightarrow jjlv$$

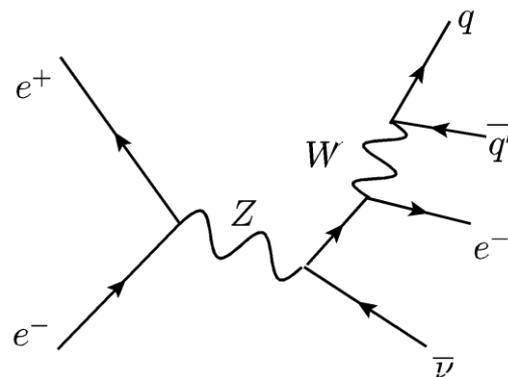


生成断面積が大きい事象

$$Z \rightarrow jj(\text{Di-jet})$$



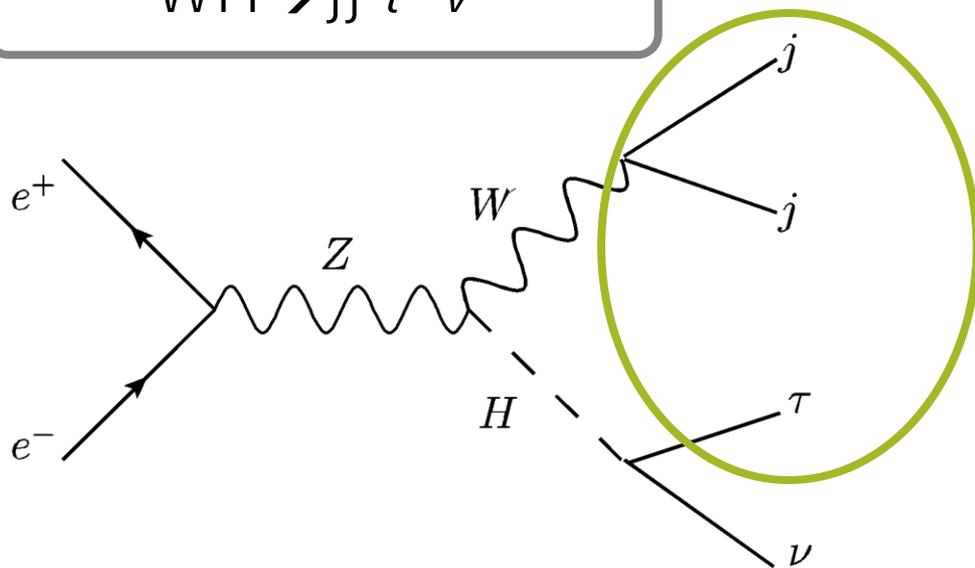
$$e\nu W \rightarrow e\nu jj$$



TV過程の解析

- ▶ $BR(H \rightarrow \tau \nu) = 100\%$ を仮定
- ▶ W が2ジェットに崩壊する事象を再構成する
→反跳質量法により荷電ヒッグス粒子を再構成

$WH \rightarrow jj \tau \nu$



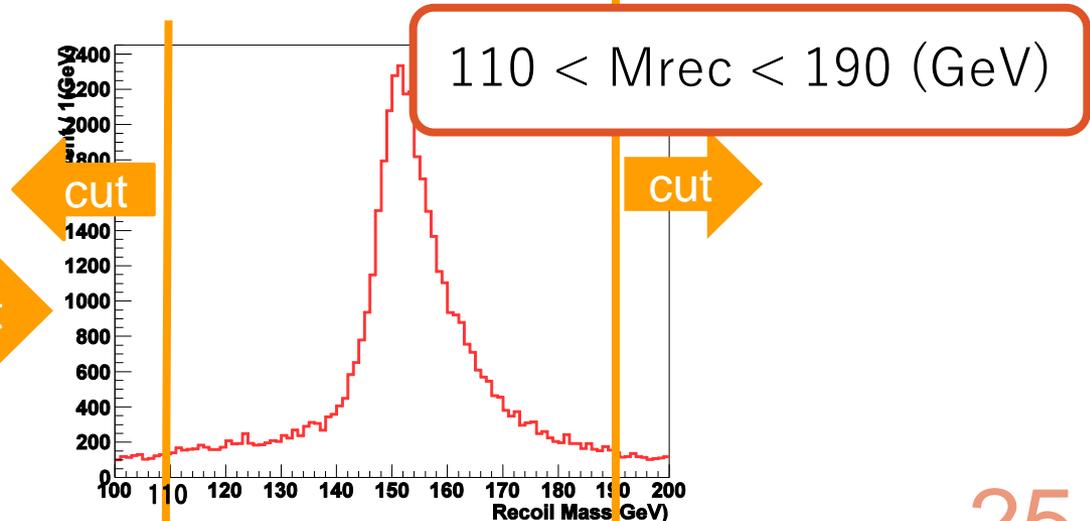
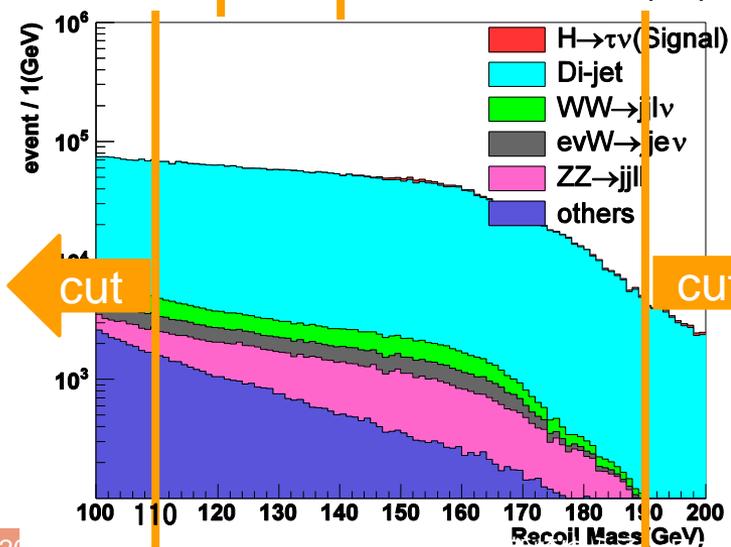
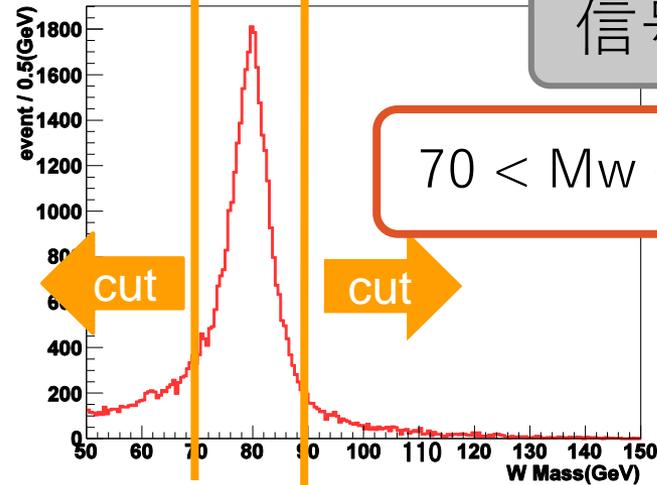
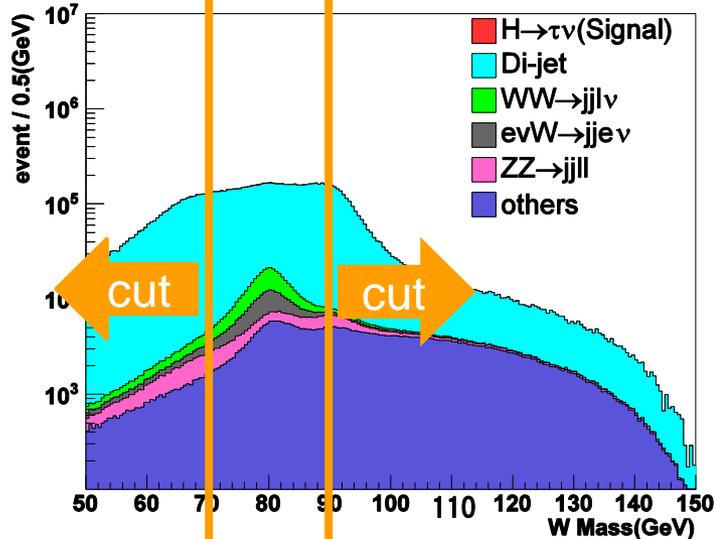
3ジェット再構成



Wボソン再構成

Wボソン質量と反跳質量のカット

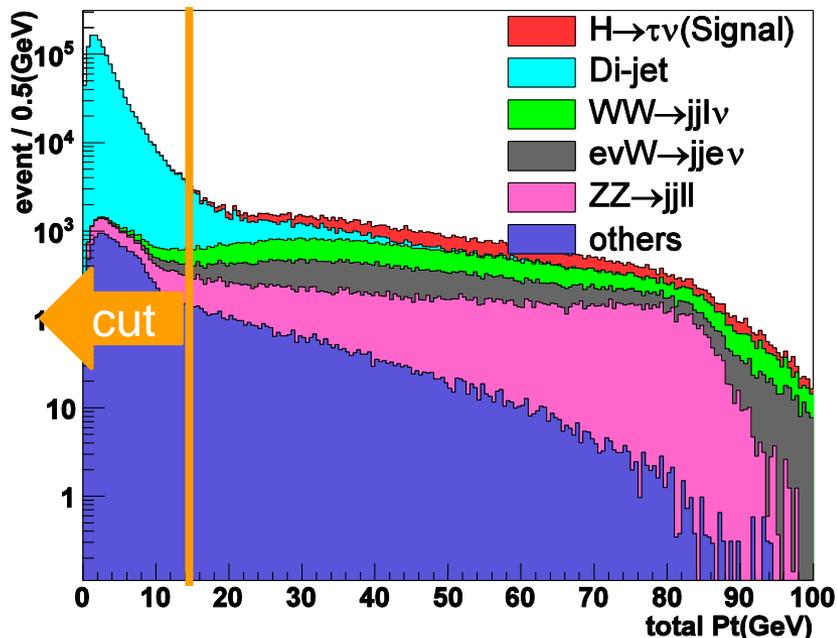
- ▶ 解析の手順2でWボソンとして再構成された粒子の質量
- ▶ 解析の手順3で計算された反跳質量



全横運動量によるカット

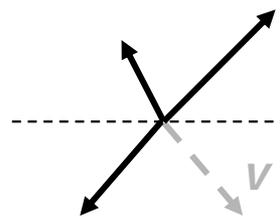
▶ total Pt : 測定された運動量のベクトル和の、ビーム軸に対して垂直な成分の大きさ

15 < total Pt (GeV)



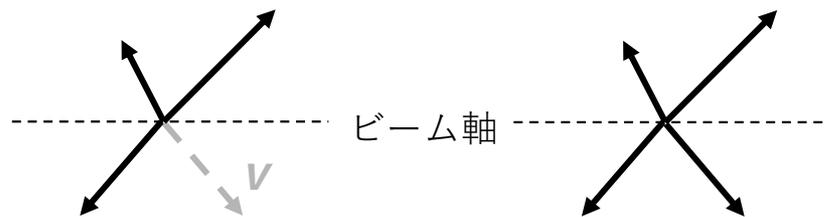
▶ ニュートリノを含まない事象を排除
ZZ → jjjj, Di-jet, WW → jjjj など

ν を含む事象

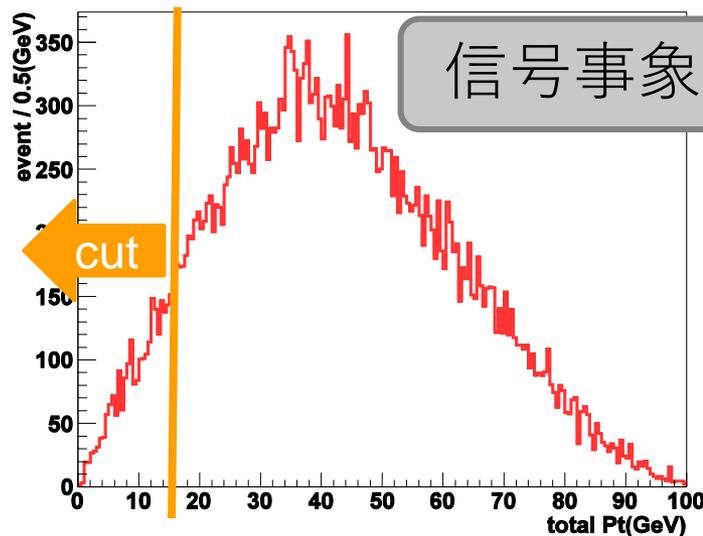


total Pt > 0

ν を含まない事象



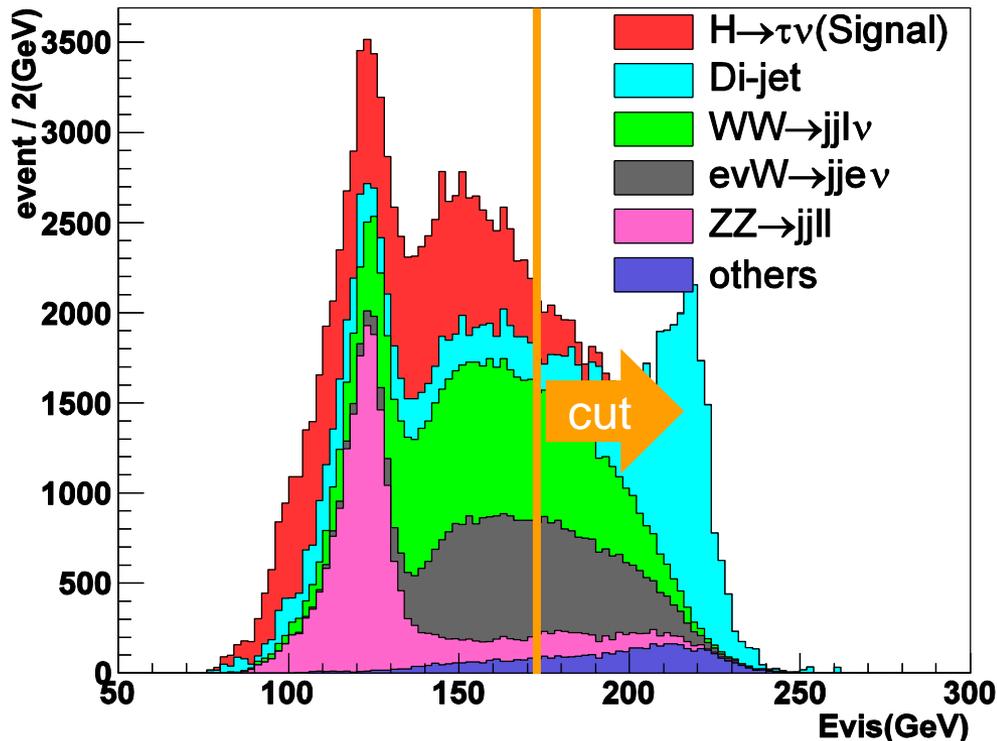
total Pt ~ 0



可視エネルギーによるカット

▶ E_{vis} : 検出器で測定されたエネルギーの総和

$$E_{vis} < 170 \text{ (GeV)}$$



▶ ニュートリノを含まない事象を排除
 $ZZ \rightarrow jjjj$, Di-jet, $WW \rightarrow jjjj$ など

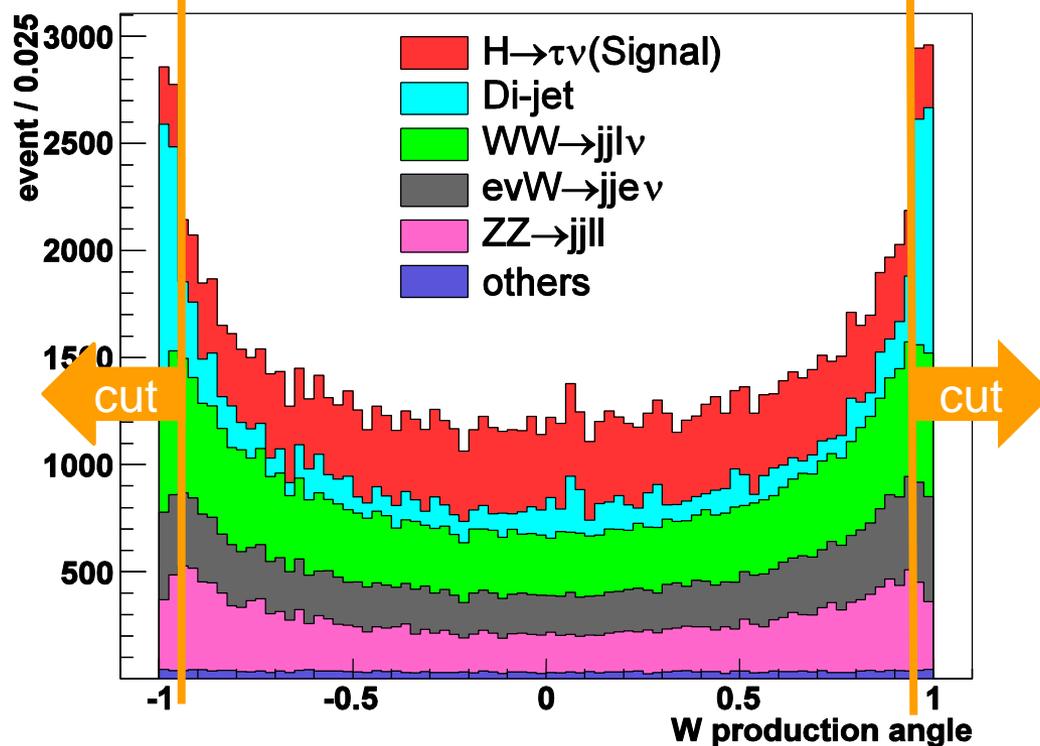
Wボソンの生成角のカット

▶ ビーム軸に対するWボソンの生成角

$$\cos \theta_{Wangle} = \frac{P_3}{|P_W^3|}$$

$$0.95 < |\cos \theta_{Wangle}|$$

$$\vec{P}_W = (P_W^1, P_W^2, P_W^3)$$



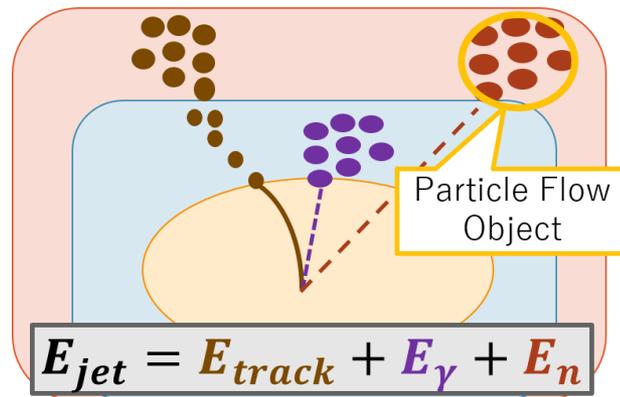
▶ ビーム軸方向にピークを持つ事象の排除
Di-jetなど

BDTG値によるカット

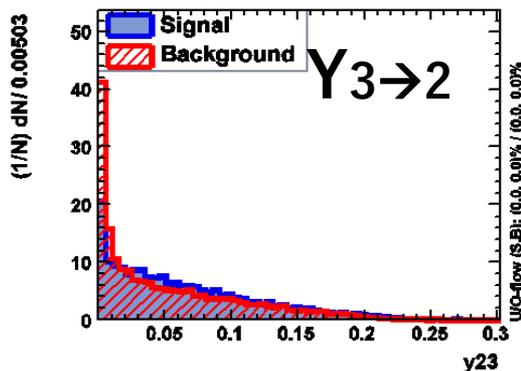
インプット変数

Y3→2 スラスト
 荷電粒子数 質量欠損

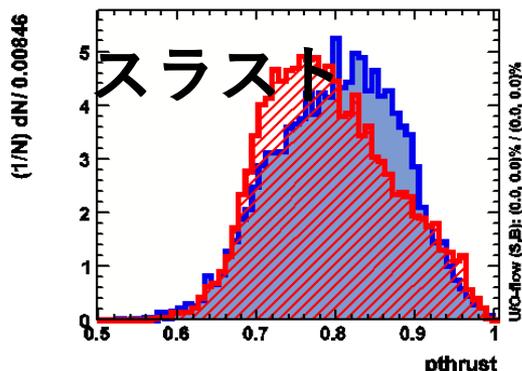
$$\frac{n\text{PFO}}{E_{3\text{rdjet}}}$$



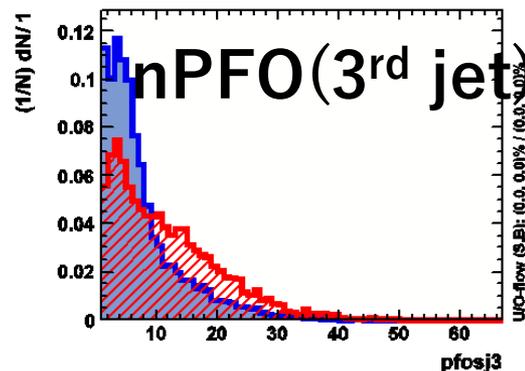
Input variable: y23



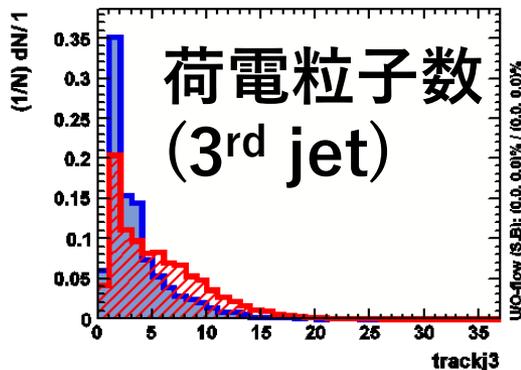
Input variable: pthrust



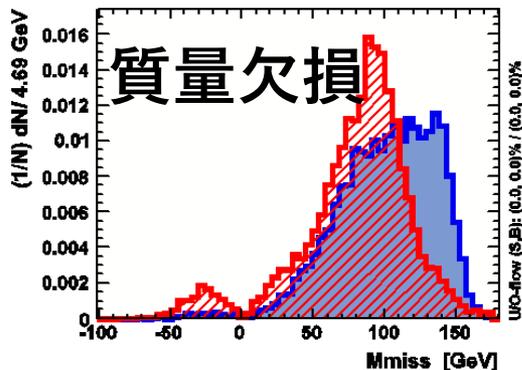
Input variable: pfo3j3



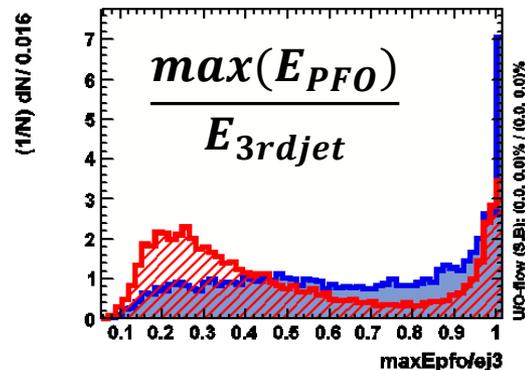
Input variable: trackj3



Input variable: Mmiss



Input variable: maxEpf/ej3



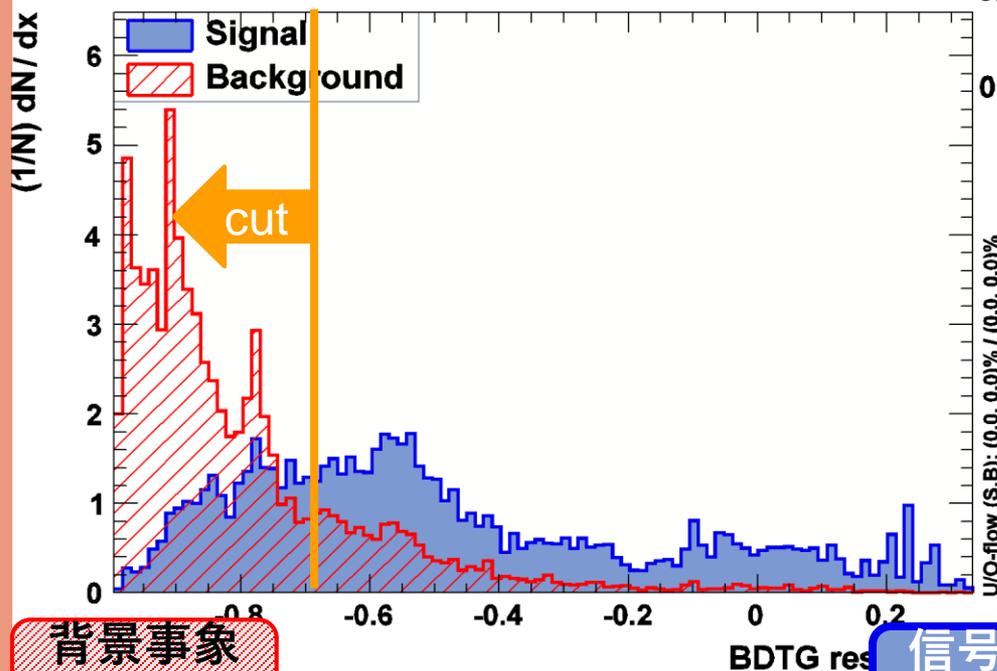
青：信号

赤：背景

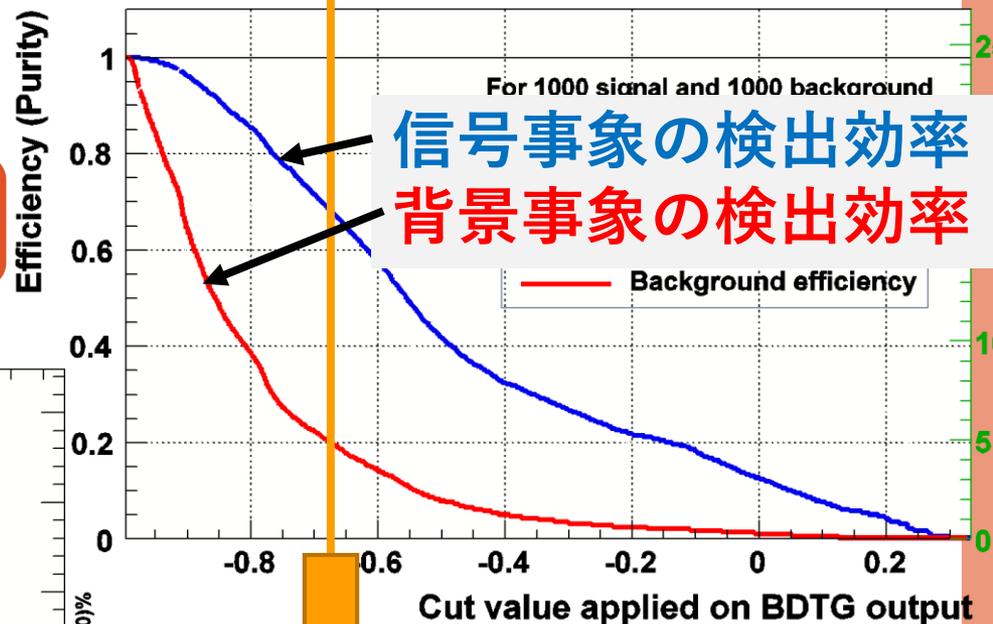
BDTG値によるカット

▶ のちに計算する生成断面積の上限値が最小になるようにカット値を決定

$$-0.675 < \text{BDTG}$$



Cut efficiencies and optimal cut value

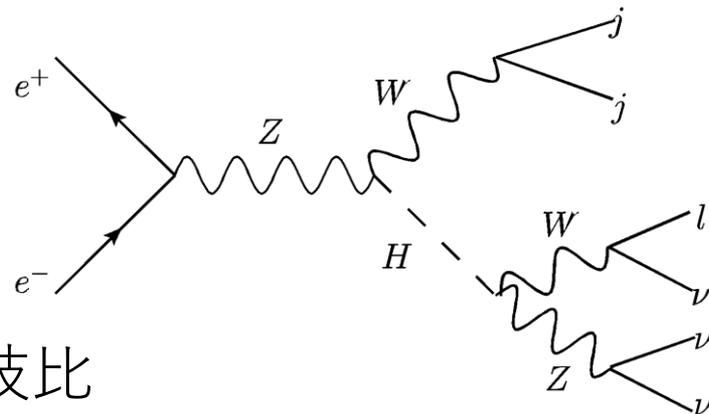


信号事象は7割弱残り、
背景事象は8割減少

WZ過程の解析

$$WH \rightarrow WWZ \rightarrow jjl + 3\nu$$

- ▶ $BR(H \rightarrow WZ) = 100\%$ を仮定
- ▶ $\tau \nu$ 過程の場合と同じ再構成、事象選別を行う



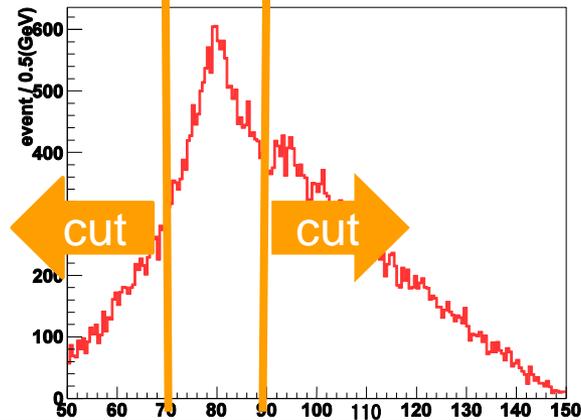
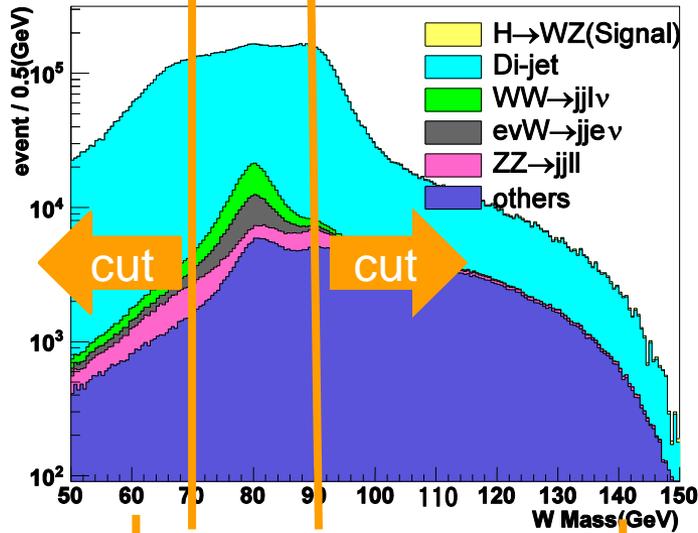
Zボソンの崩壊分岐比

Wボソンの崩壊分岐比	Zボソンの崩壊分岐比		
	ハドロン (~70%)	荷電 レプトン (~10%)	ニュート リノ (~20%)
ハドロン (~70%)	49%	7%	14%
レプトン (~30%)	21%	3%	6%

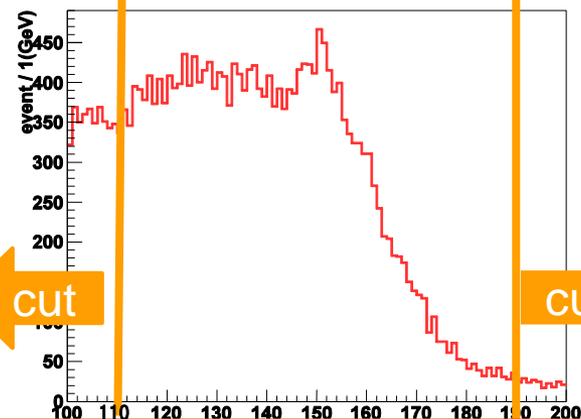
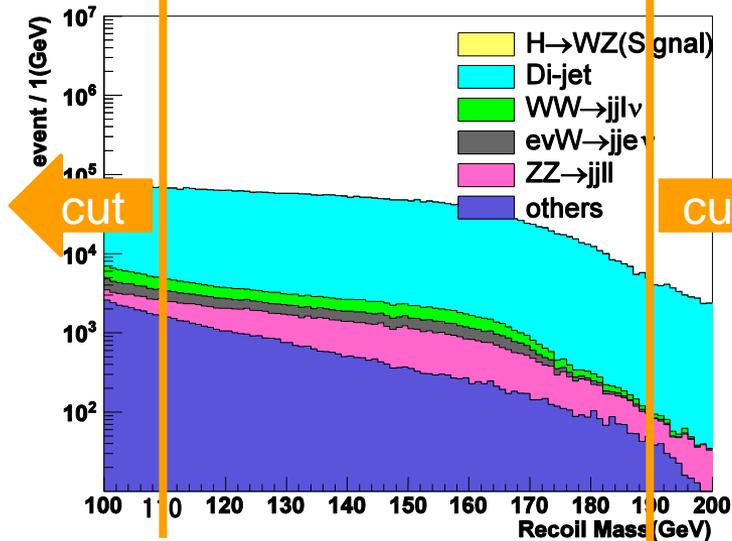
サンプル中

主に得られる事象

Wボソン質量と反跳質量のカット

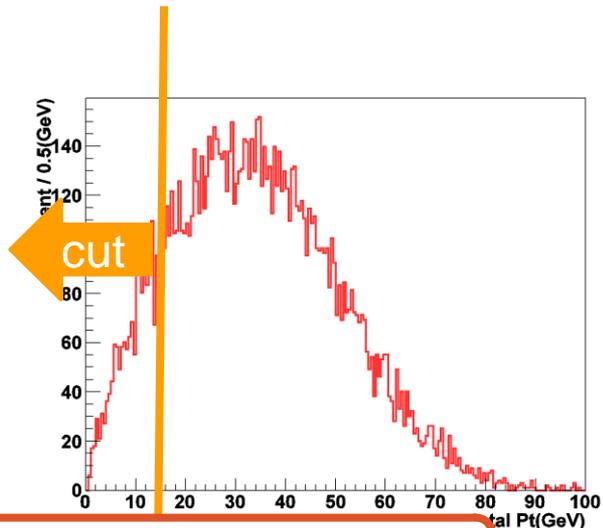
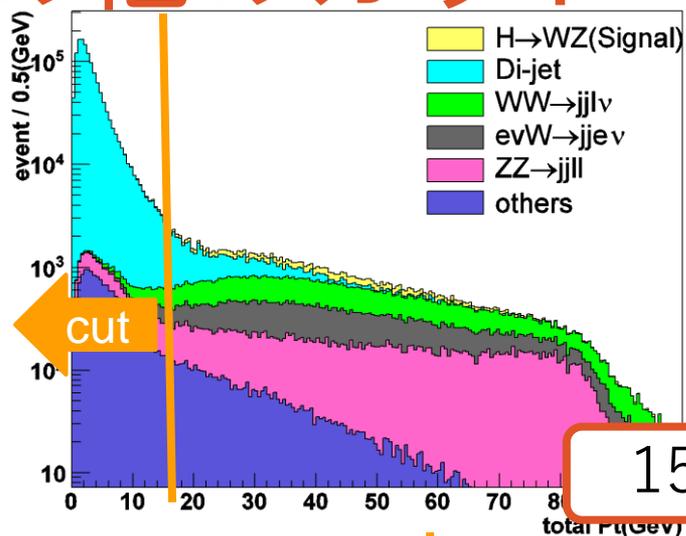


$$70 < M_w < 90 \text{ (GeV)}$$

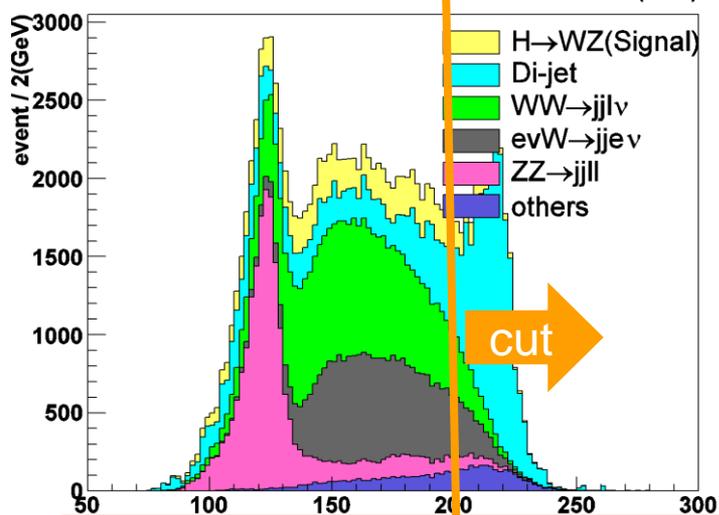


$$110 < M_{rec} < 190 \text{ (GeV)}$$

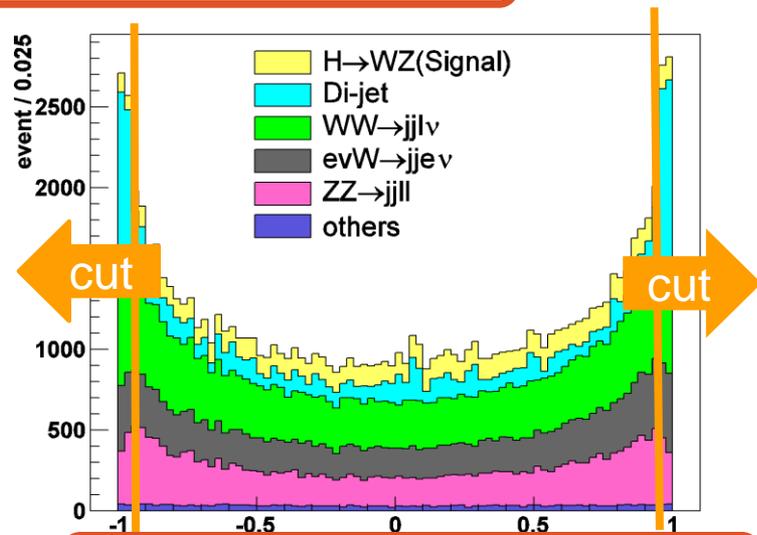
その他のカット



$$15 < \text{total Pt (GeV)}$$



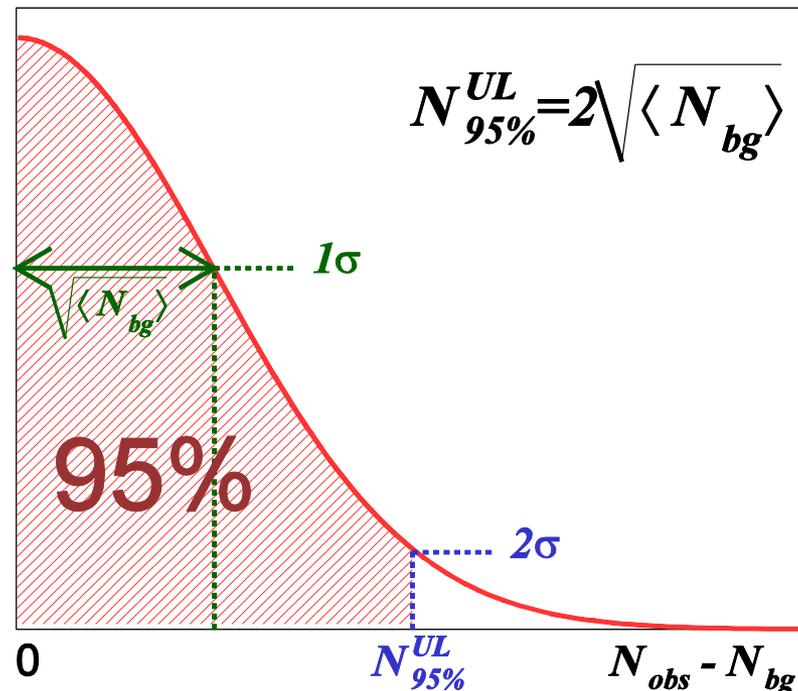
$$E_{\text{vis}} < 200 \text{ (GeV)}$$



$$0.95 < |\cos \theta_{\text{Wangle}}|$$

生成断面積の上限値の計算方法

- ▶ 信号事象に対して生成断面積0 fbの状態を考える
- ▶ 同統計数 N_{obs} の実験を複数回行う
→背景事象は $\langle N_{bg} \rangle$ 中心に分布をつくる
- ▶ N_{bg} 分布がガウス分布になると仮定する
→ $N_{obs} - N_{bg}$ が図のようになる
- ▶ $N_{95\%}^{UL}$ に対して断面積を求める
→95%信頼度生成断面積上限値 $\sigma_{95\%}^{UL}$



$$\sigma_{95\%}^{UL} = \frac{N_{95\%}^{UL}}{\varepsilon \cdot \mathcal{L}} = \frac{2\sqrt{\langle N_{bg} \rangle}}{\varepsilon \cdot \mathcal{L}}$$

2HDMのタイプ

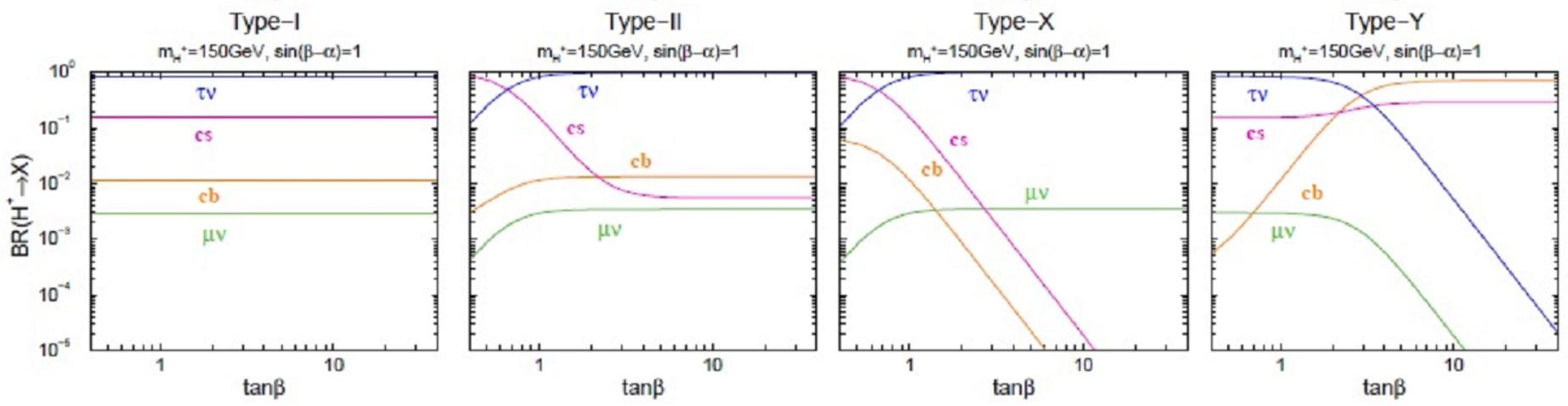
	Φ_1	Φ_2	u_R	d_R	ℓ_R	Q_L, L_L
Type-I	+	-	-	-	-	+
Type-II	+	-	-	+	+	+
Type-X	+	-	-	-	+	+
Type-Y	+	-	-	+	-	+

Table 3.1: Variation in charge assignments of the Z_2 symmetry [38].

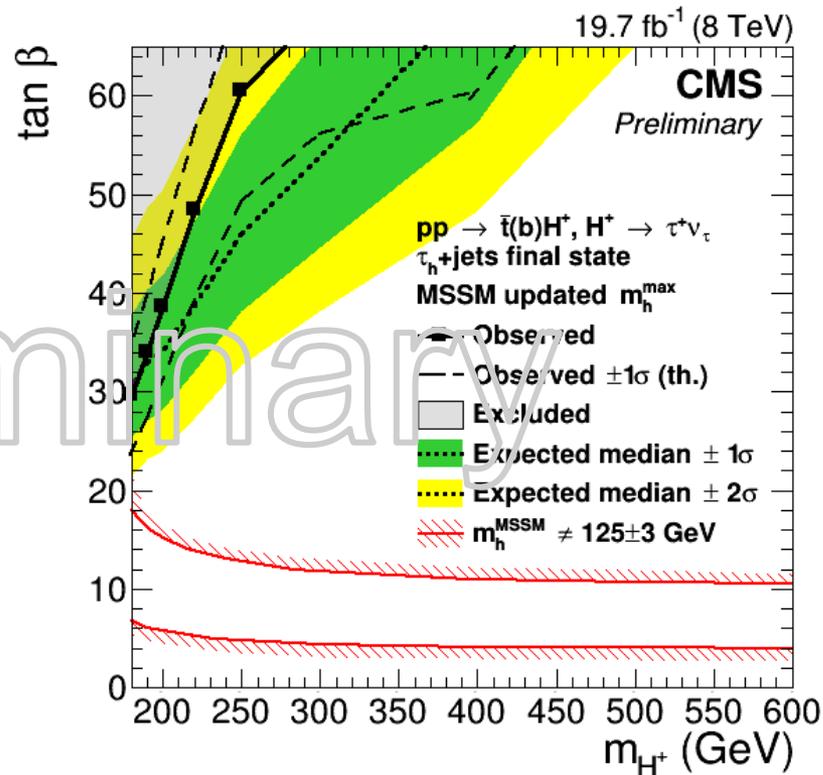
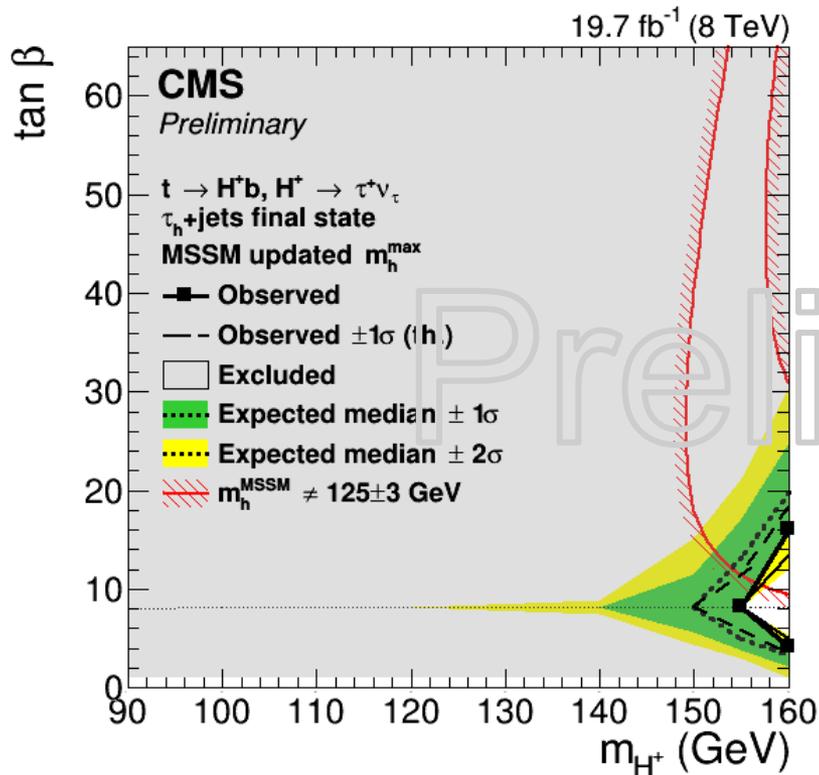
	ξ_h^u	ξ_h^d	ξ_h^d	ξ_H^u	ξ_H^d	ξ_H^ℓ	ξ_A^u	ξ_A^d	ξ_A^ℓ
Type-I	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	$-\cot \beta$	$\cot \beta$	$\cot \beta$
Type-II	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$-\frac{\sin \alpha}{\cos \beta}$	$-\frac{\sin \alpha}{\cos \beta}$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$	$-\cot \beta$	$-\tan \beta$	$-\tan \beta$
Type-X	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$-\frac{\sin \alpha}{\cos \beta}$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$	$-\cot \beta$	$\cot \beta$	$-\tan \beta$
Type-Y	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$-\frac{\sin \alpha}{\cos \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{\cos \alpha}{\cos \beta}$	$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	$-\cot \beta$	$-\tan \beta$	$\cot \beta$

Table 3.2: The mixing factors in Yukawa interactions in Eq. (3.24) [38].

荷電ヒッグス粒子の崩壊分岐比 (2HDM)

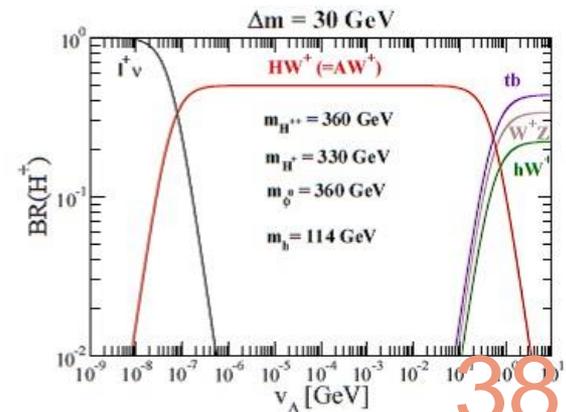
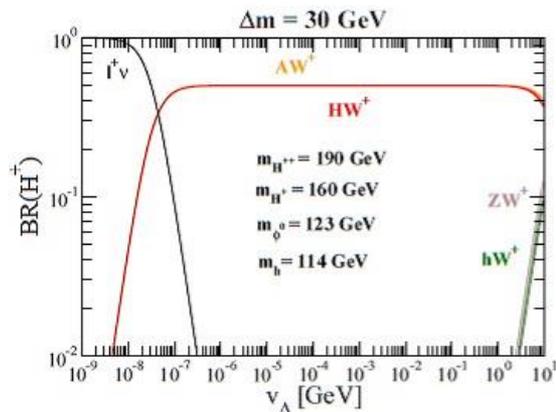
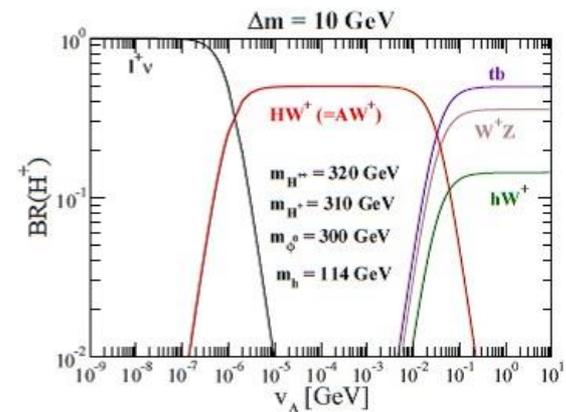
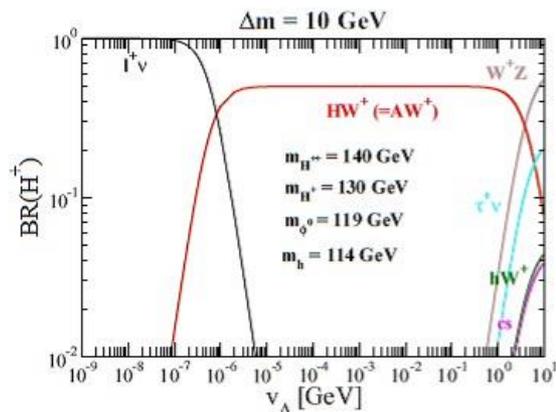
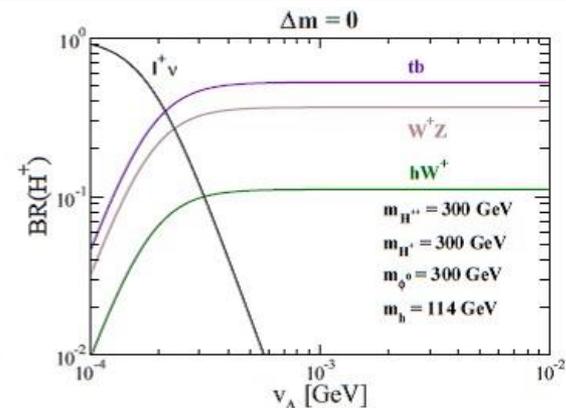
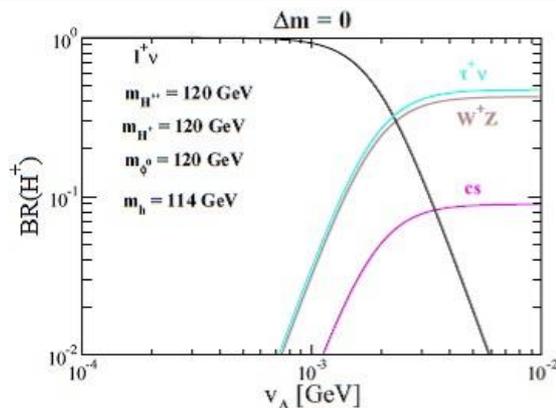


Charged Higgs search at the LHC



- ▶ The CMS experiment searches **MSSM charged Higgs** at m_h^{max} scenario.
- ▶ Charged Higgs mass limited larger than 155 GeV

荷電ヒッグス 粒子の 崩壊分岐比 (HTM)

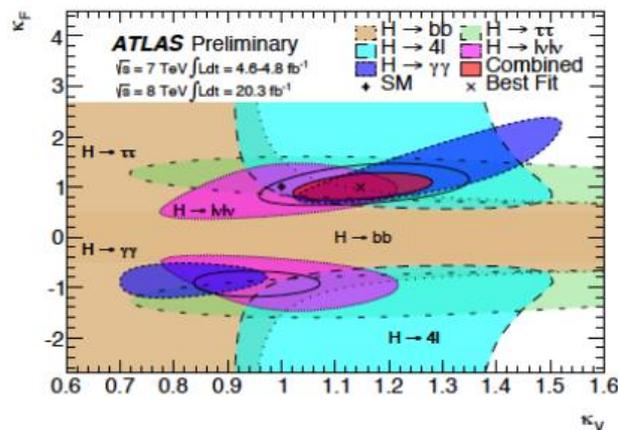
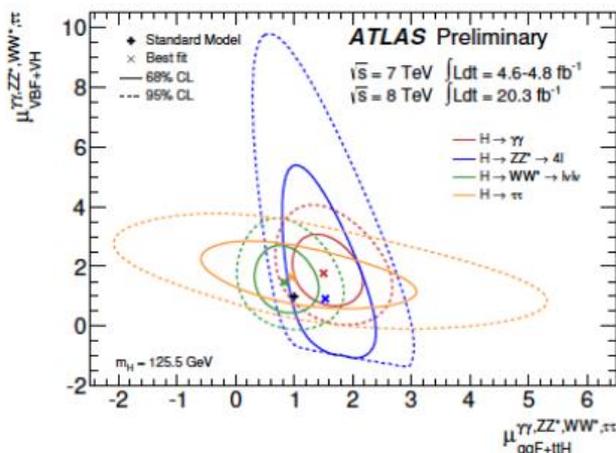
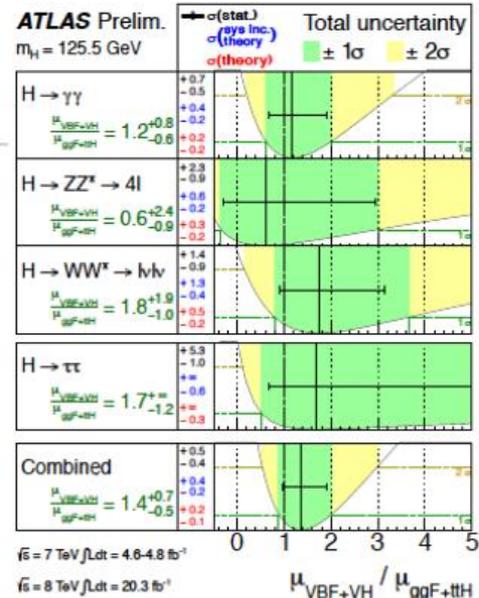


LHC search of GM model ①

ATLAS-CONF-2014-009

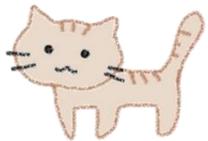
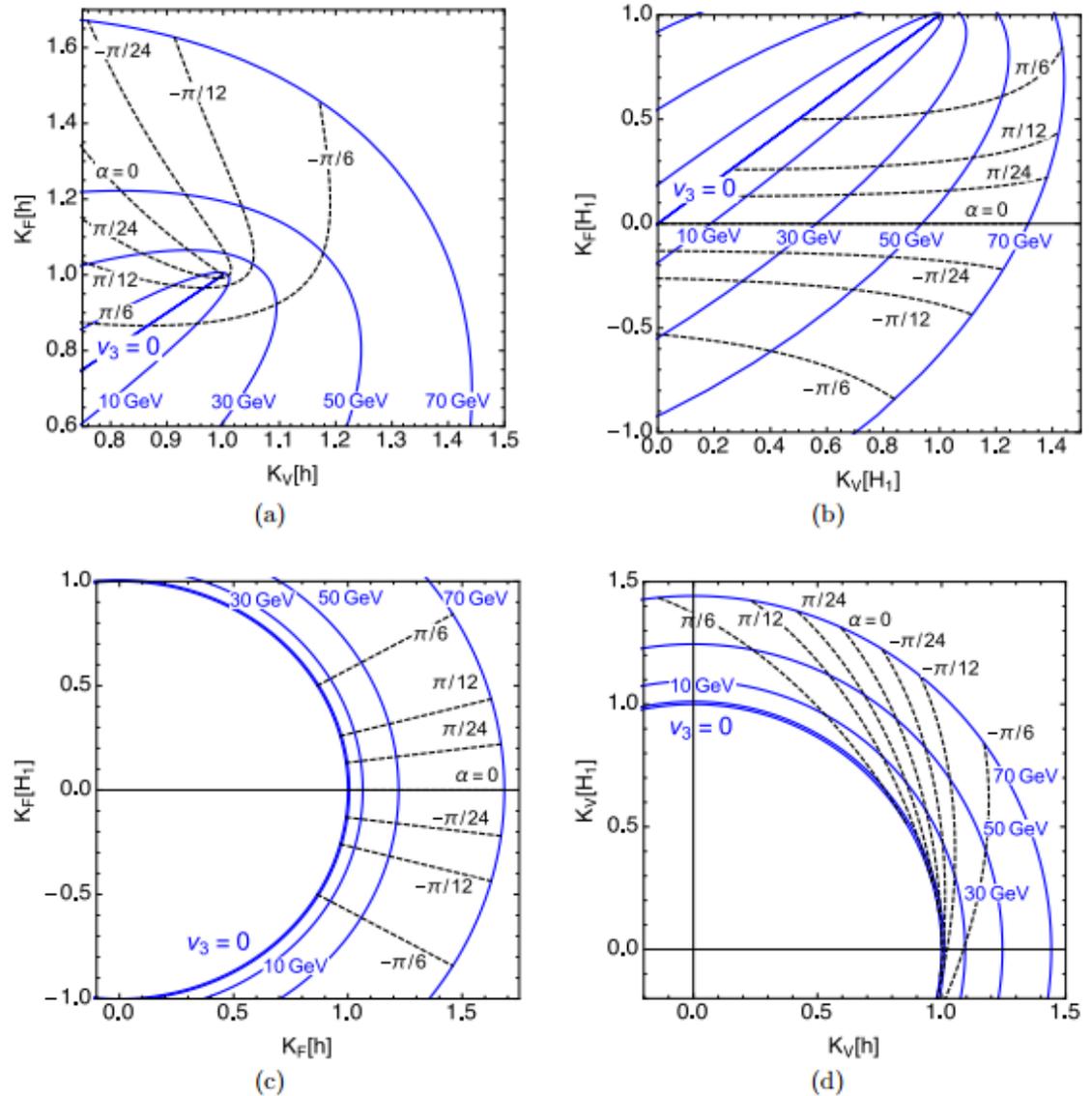
Coupling summary

- Simplest assumption
 - ➔ $\kappa_V = \kappa_W = \kappa_Z$ and $\kappa_F = \kappa_t = \kappa_b = \kappa_\tau = \dots$
- (Other models like different coupling scale btw. leptons and quarks are also tested.)
- Determine the ratio $\mu_{\text{VBF+VH}}/\mu_{\text{ggF+ttH}}$.
- κ_V and κ_F seems compatible with SM.



18

$K_F - K_V$



[arXiv:1501.04257](https://arxiv.org/abs/1501.04257)

FIG. 1: Scaling factors for the two custodial singlets, h and H_1^0 . The blue solid contours are for $v_3 = 0, 10, 30, 50,$ and 70 GeV with varying α . The black dotted curves are for $\alpha = -\pi/6, -\pi/12, -\pi/24, 0, \pi/24, \pi/12,$ and $\pi/6$ with varying β .

今後の展望(WZ過程の解析)

▶ WZ過程のうち $l+3\nu$ 終状態になるのは6%程度
→他の終状態に最適な解析を行うべき

▶ WH→6jを再構成するような解析を行った
→再構成が難しい

- 荷電ヒッグス粒子から生成されるWZは、どちらかがオフシェル
→ χ^2 の最適化が難しい
- 運動量が大きくない
→ジェットの識別が正しく行えない
→W1とW2の識別ができない

▶ 重心エネルギー $E_{cm}=350$ GeV条件下でのシミュレーションによって再構成が容易になると考えられる

