A cluster of stylized cherry blossoms in shades of pink and red, with yellow centers, located in the top-left corner of the slide.

国際リニアコライダーを用いた ヒッグス三重項模型における 荷電ヒッグス粒子の探索

2015年2月2日 修士論文発表会

素粒子実験(加速器)研究室

博士前期課程2年 新崎 ゆう子





はじめに

標準模型

▶ 素粒子間の相互作用を記述する模型

物質粒子				ゲージ粒子
クォーク	u	c	t	g
	d	s	b	Z, W [±]
レプトン	ν _e	ν _μ	ν _τ	γ
	e	μ	τ	H

▶ LHCでヒッグス粒子発見

▶ ニュートリノ質量や暗黒物質など、標準理論では説明できない現象も存在

→ 新しい物理模型の導入が必要
→ ヒッグスセクターが拡張

▶ 拡張ヒッグス模型を導入する際の制限

電弱 ρ パラメータ : 実験値 $1.0008^{+0.0017}_{-0.0007}$

$$\begin{aligned} \rho_{tree} &\equiv \frac{m_W^2}{m_Z^2 \cos^2 \theta_W} \\ &= \frac{\sum_i [|v_i|^2 (T_i(T_i + 1) - Y_i^2) + u_i^2 T_i'(T_i' + 1)]}{2 \sum_i |v_i|^2 Y_i^2} \end{aligned}$$

m_W, m_Z

θ_W

$v_i, (u_i)$

$T_i, (T'_i)$

Y_i

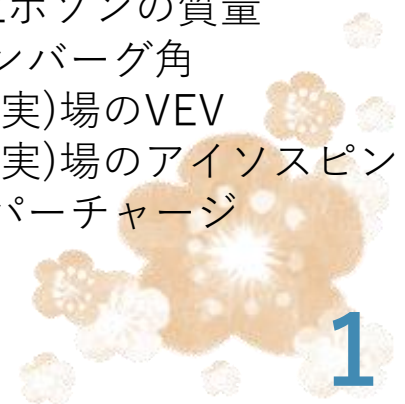
W、Zボソンの質量

ワインバーグ角

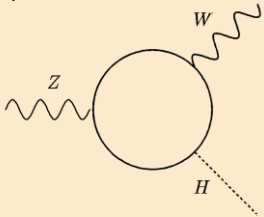
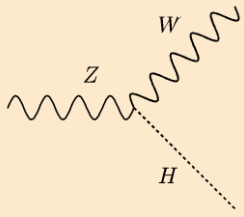
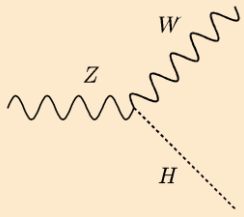
複素(実)場のVEV

複素(実)場のアイソスピン

ハイパーチャージ



拡張ヒッグス模型

	2ヒッグス二重項 2HDM	ヒッグス三重項 HTM	Georgi-Machacek GM
ヒッグス場	Y=1/2のアイソスピン二重項場 ϕ_1, ϕ_2	Y=1/2のアイソスピン二重項場 ϕ Y=1のアイソスピン三重項場 Δ	標準模型ヒッグス二重項場 ϕ Y=1の三重項場 χ Y=0の三重項場 ξ
ρ パラメータ	$\rho = 1$	$\rho = \frac{1 + 2v_{\Delta}^2/v_{\phi}^2}{1 + 4v_{\Delta}^2/v_{\phi}^2}$	$\rho = 1$
HWZの結合	ループを介して結合 	ツリーレベル 	ツリーレベル 
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ★SUSYは、暗黒物質を含むタイプII 2HDM ★レプトン特化型のタイプXでは、荷電ヒッグス粒子はレプトンに結合($H \rightarrow \tau \nu$) 	<ul style="list-style-type: none"> ★ニュートリノ質量を説明 ★二重荷電ヒッグス粒子が現れる ★一重荷電ヒッグス粒子はWZ崩壊の分岐比が大きい場合がある 	<ul style="list-style-type: none"> ★特殊な対称性により、ρパラメータ=1を保つ ★一重荷電ヒッグス粒子は二種類あり、一方はゲージ粒子に、一方は物質粒子に結合

HWV結合のツリーレベルにおける有効ラグランジアン

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

拡張ヒッグス模型

2ヒッグス二重項
2HDM

ヒッグス三重項
HTM

Georgi-Machacek
GM

$Y=1/2$ のアイソスピン二重項
場 ϕ_1, ϕ_2

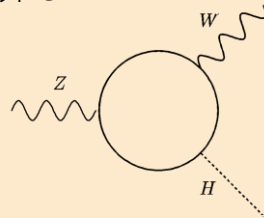
$Y=1/2$ のアイソスピン二重項
場 ϕ

標準模型ヒッグス二重項場
 ϕ

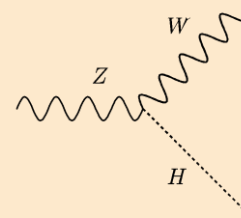
HWZ結合を測定することにより 模型を区別できる

HWZの結合

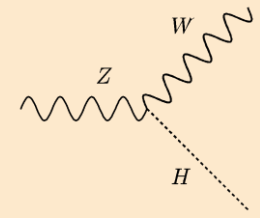
ループを介して
結合



ツリーレベル



ツリーレベル



特徴

- ★SUSYは、暗黒物質を含むタイプII 2HDM
- ★レプトン特化型のタイプXでは、荷電ヒッグス粒子はレプトンに結合($H \rightarrow \tau \nu$)

- ★ニュートリノ質量を説明
- ★二重荷電ヒッグス粒子が現れる
- ★一重荷電ヒッグス粒子はWZ崩壊の分岐比が大きい場合がある

- ★特殊な対称性により、 ρ パラメータ=1を保つ
- ★一重荷電ヒッグス粒子は二種類あり、一方はゲージ粒子に、一方は物質粒子に結合

HWV結合のツリーレベルにおける有効ラグランジアン

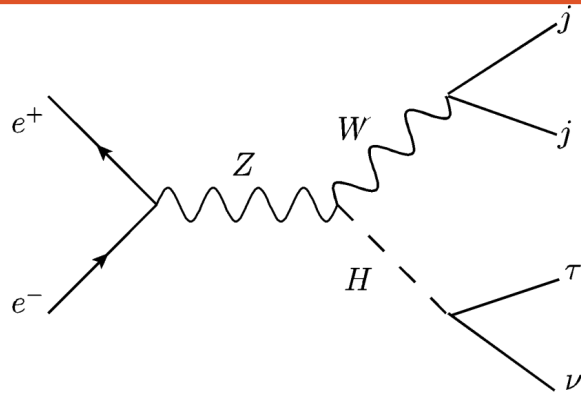
$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = g m_W f_{HWV} H^\pm W_\mu^\mp V^\mu$$

荷電ヒッグス粒子の解析

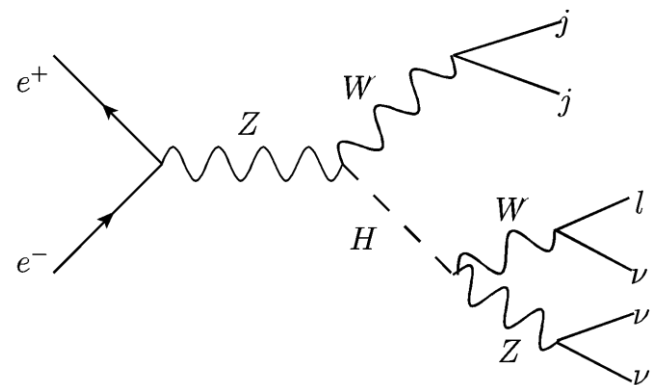
本研究の目的

以下の二つの事象を用いて、生成断面積の上限値を計算

$$WH \rightarrow jj \tau \nu$$



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



→ ILC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

→ HWZ結合を含む模型に対して形状因子の上限を与えられるか検証

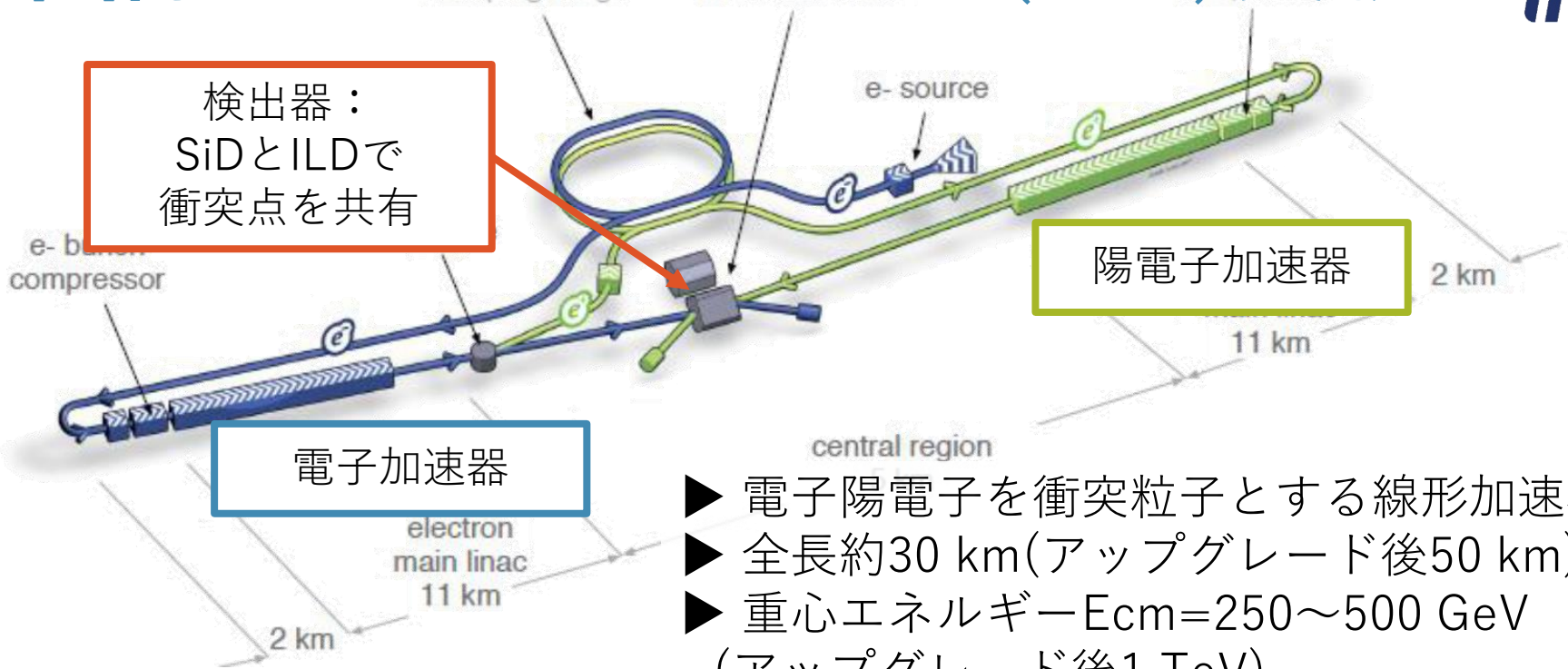
解析の方針

- ▶ 反跳質量法をもちいて荷電ヒッグス粒子を再構成する。
- ▶ Wボソンが2ジェットに崩壊する事象を再構成するよう解析を行う。



ILC実験

国際リニアコライダー(ILC)実験



- ▶ 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

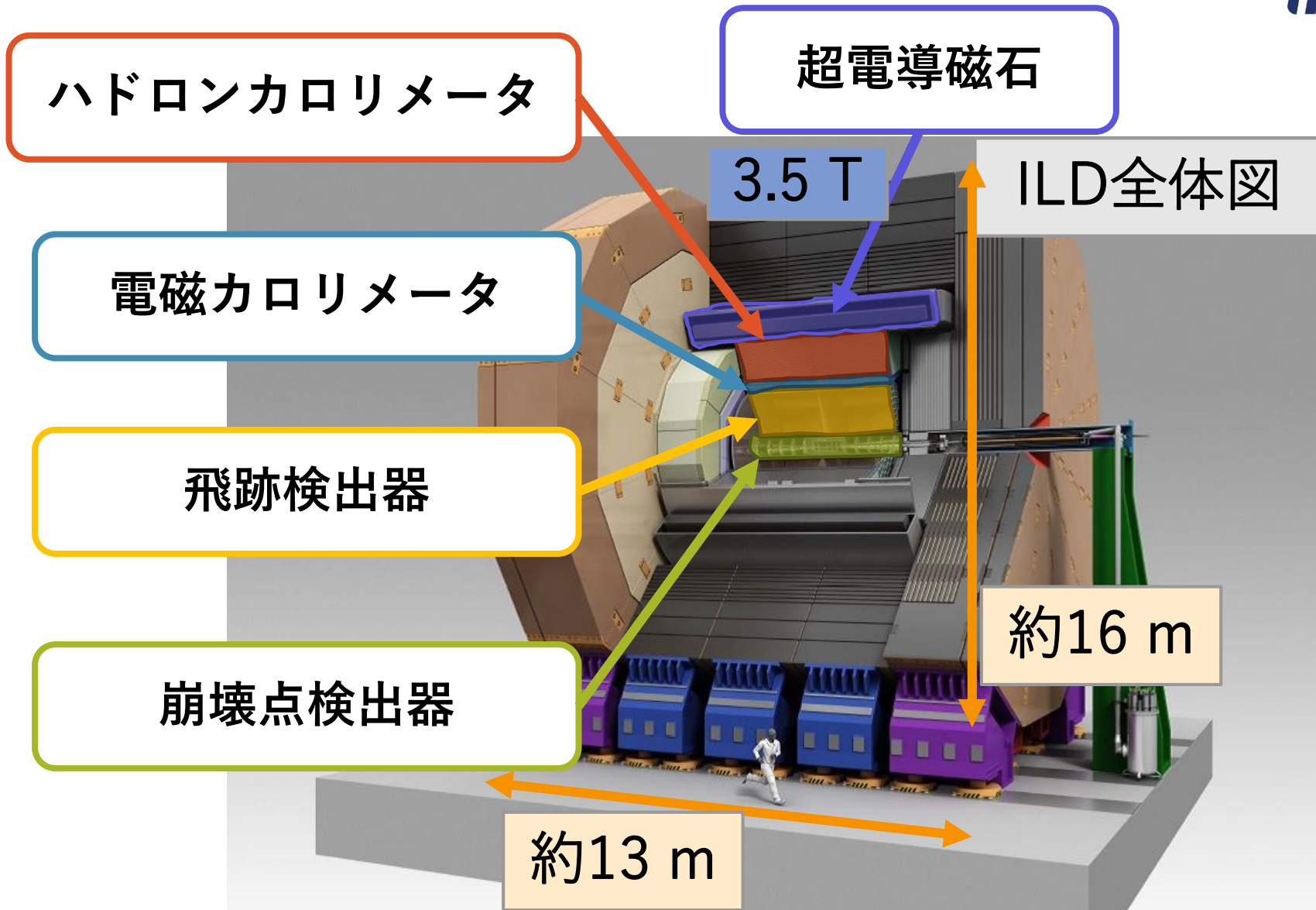
$$P(e^+, e^-) = (-30\%, +80\%) \text{「右偏極」}$$
$$(+30\%, -80\%) \text{「左偏極」}$$

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)



Particle Flow Algorithm (PFA)

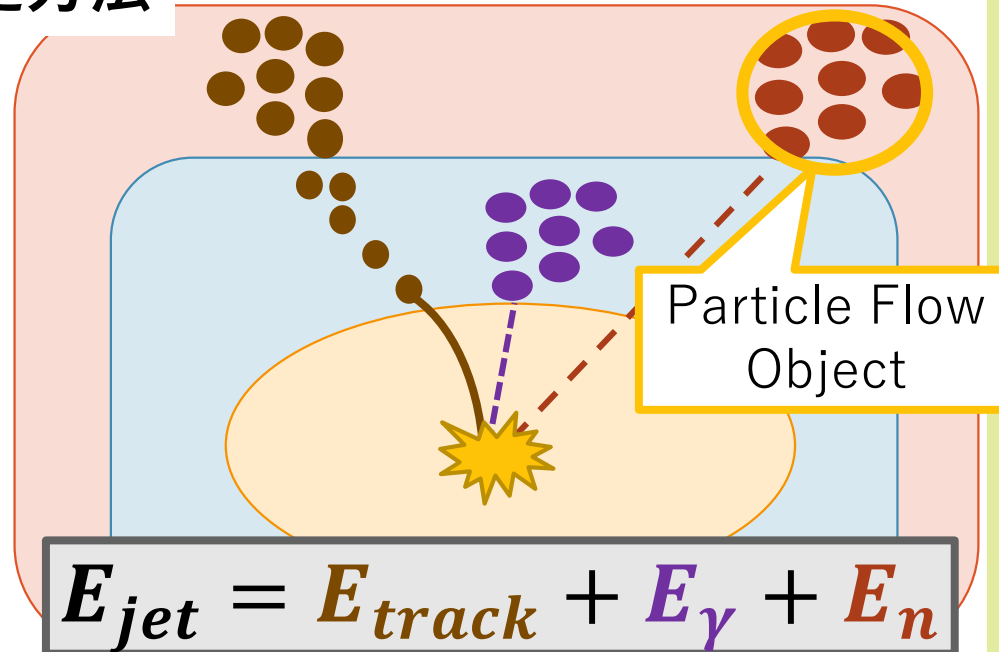


PFA : 粒子エネルギーの測定方法

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エネルギーを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

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



シミュレーション

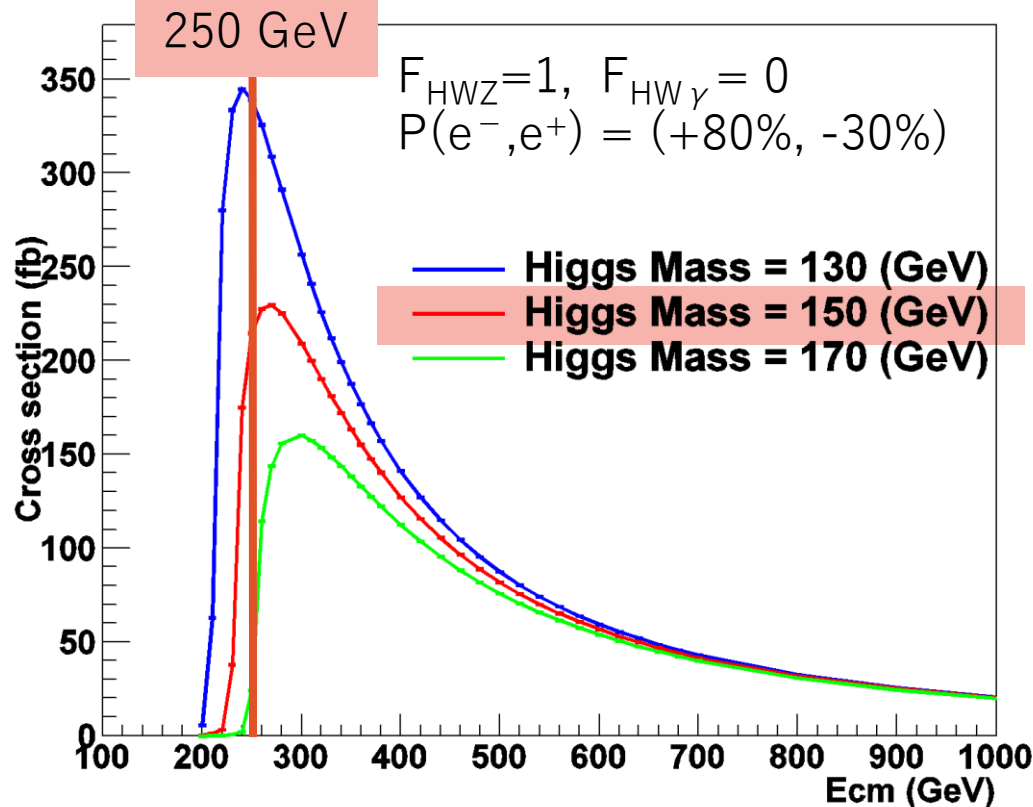
信号事象の生成

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

信号事象生成の条件

- 事象生成ソフト Physsim
- 重心エネルギー $E_{\text{cm}} = 250 \text{ GeV}$
- 荷電ヒッグス粒子質量 $m_{H^\pm} = 150 \text{ GeV}/c^2$
- 形状因子 $F_{HWZ} = 1, F_{HW\gamma} = 0$

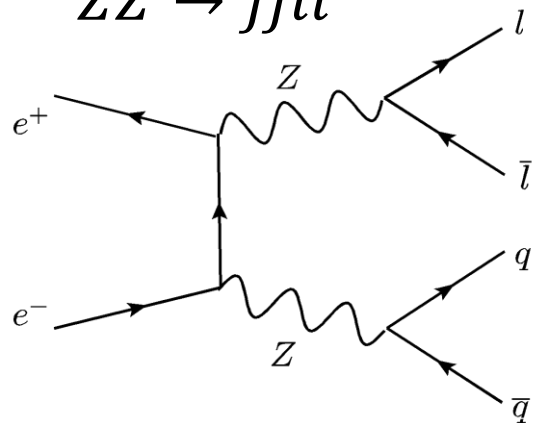
- ★信号事象の生成断面積が大きい
- ★HTM二重荷電ヒッグスの対生成抑制
- ★荷電ヒッグス粒子の対生成が不可能でもWボソンとの随伴生成で荷電ヒッグス粒子の生成が可能



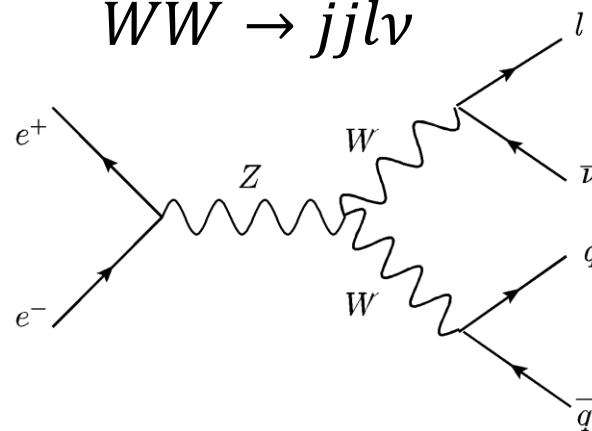
背景事象

終状態が信号事象に近い事象

$$ZZ \rightarrow jjll$$

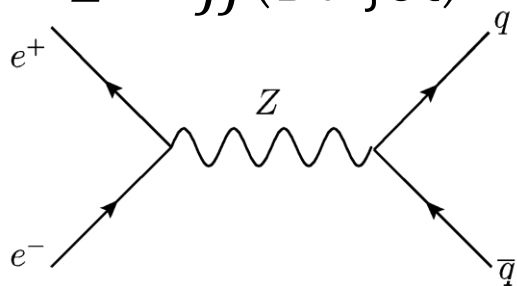


$$WW \rightarrow jjlv$$

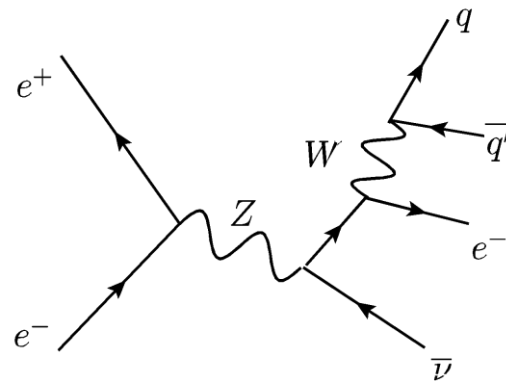


生成断面積が大きい事象

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



$$evW \rightarrow evjj$$



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
- 積分ルミノシティ
- 偏極

ILD_01_v05 (TDR ver.)

$\mathcal{L}=250 \text{ fb}^{-1}$

$P(e^+, e^-) = (-30\%, +80\%)$ 「右偏極」

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

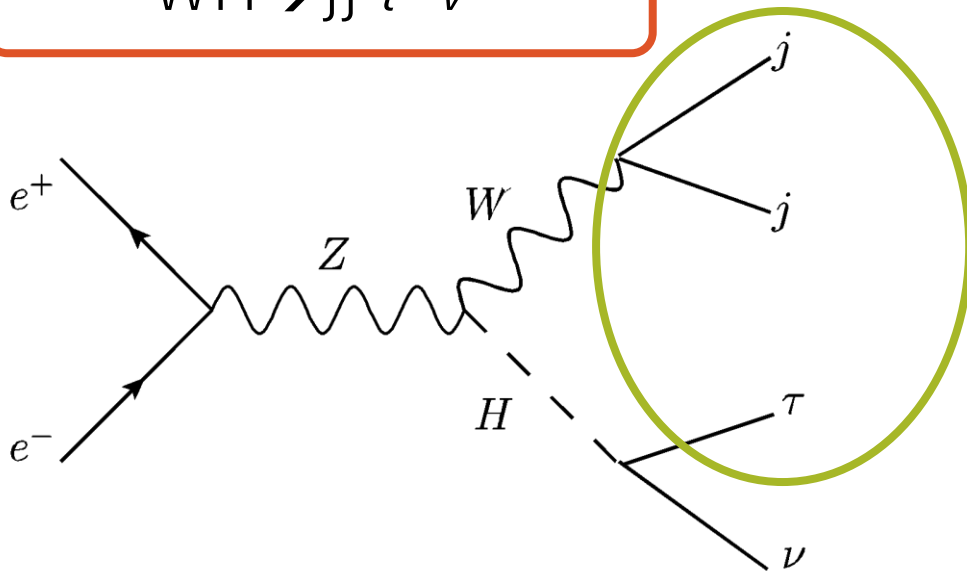


τ v 過程の解析と結果

$\tau \nu$ 過程の解析

- ▶ $\text{BR}(H \rightarrow \tau \nu) = 100\%$ 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



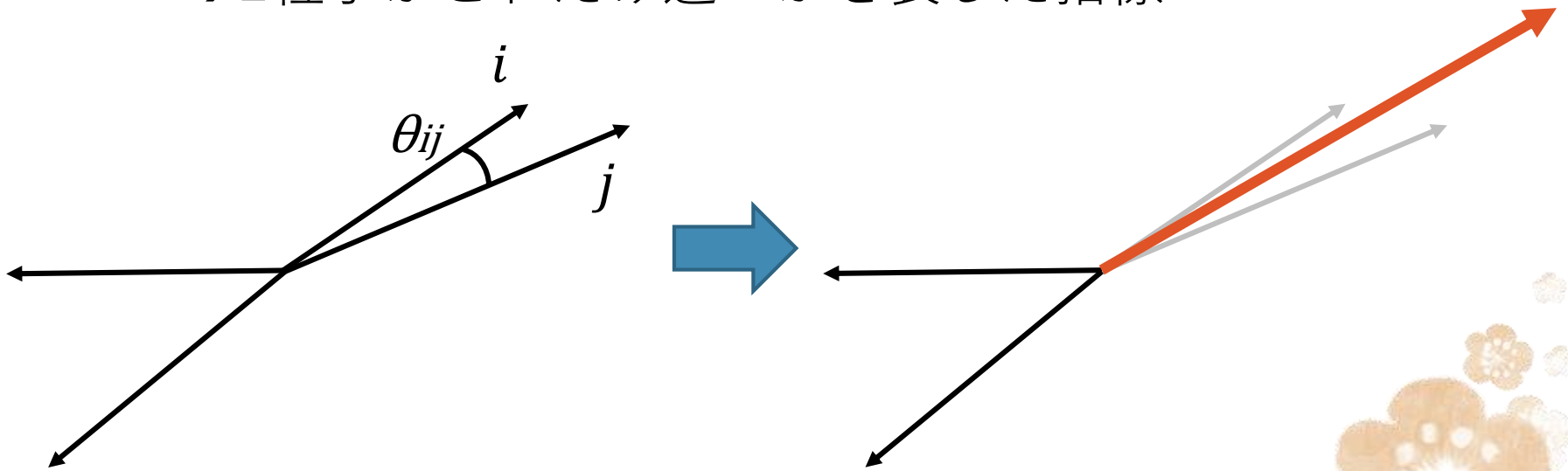
3ジェット再構成

Durhamアルゴリズムを用いて、イベント中の全PFOを強制的に3本のジェットに再構成

$$Y_{ij} = \frac{2\min(E_i, E_j)(1 - \cos \theta_{ij})}{E_{vis}^2}$$

E_i, E_j : 2つのジェットのエネルギー
 θ_{ij} : 2ジェット間の角度
 E_{vis} : 可視エネルギー

→ 2粒子がどれだけ近いかを表した指標



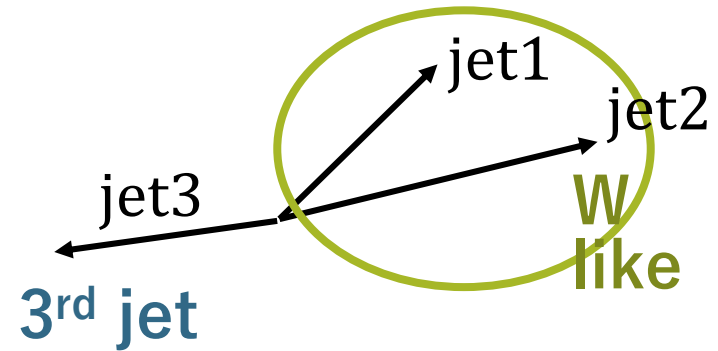
Y_{ij} が最小になるようジェット組み

Wボソン再構成

Wボソンの質量に一番近いジェットを2本選ぶ

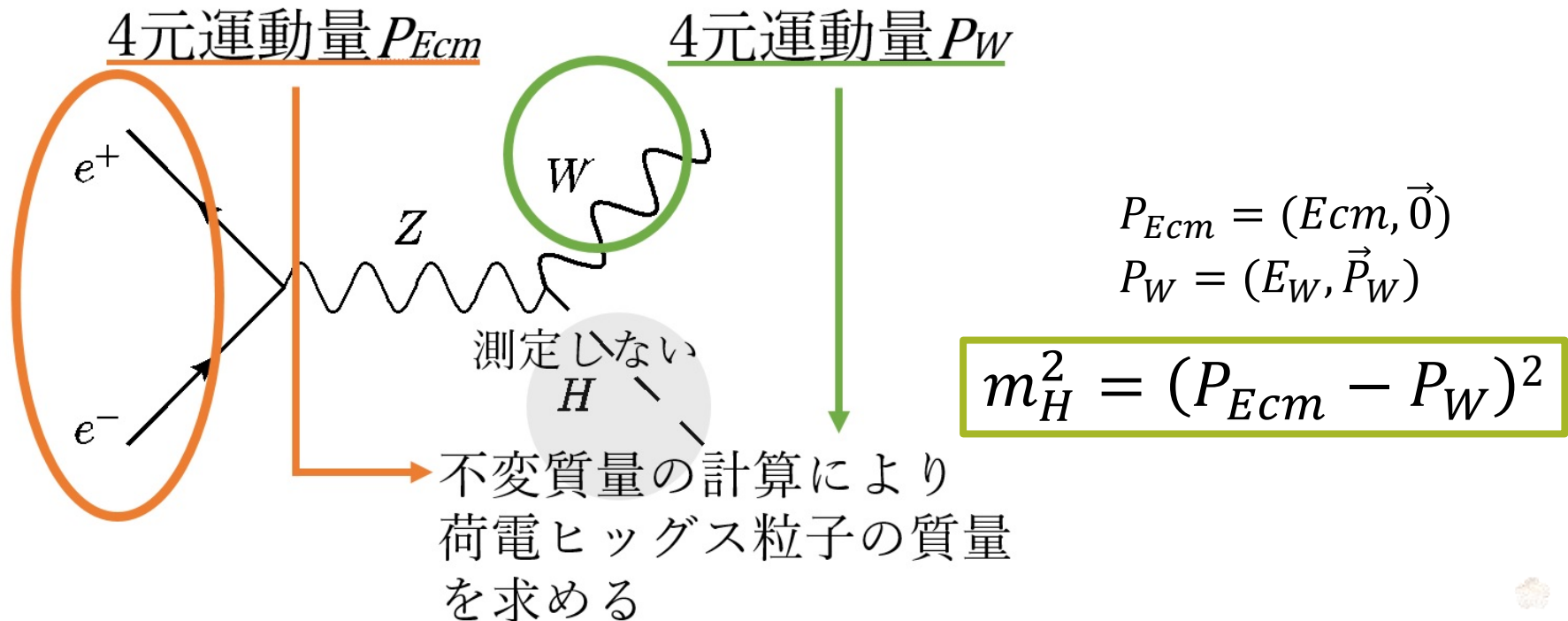
$$\chi^2 = \left(\frac{M_{jetpair} - m_W}{\sigma_W} \right)^2$$

$M_{jetpair}$: ジェットペアの質量
 m_W : Wボソンの質量 (80 GeV)
 σ_W : Wボソンの質量分解能 (=4.8 GeV)



反跳質量法

反跳質量法を用いて荷電ヒッグス粒子の質量を計算



ILCのような素粒子-素粒子衝突の実験で可能になる解析

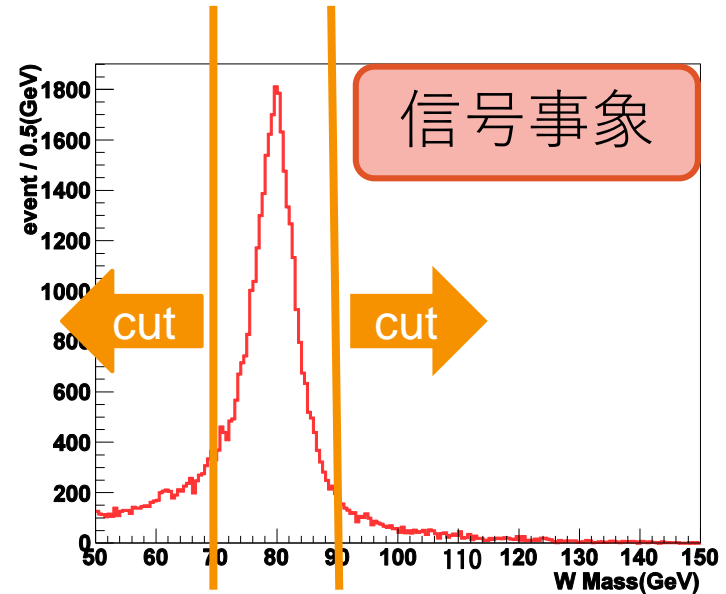
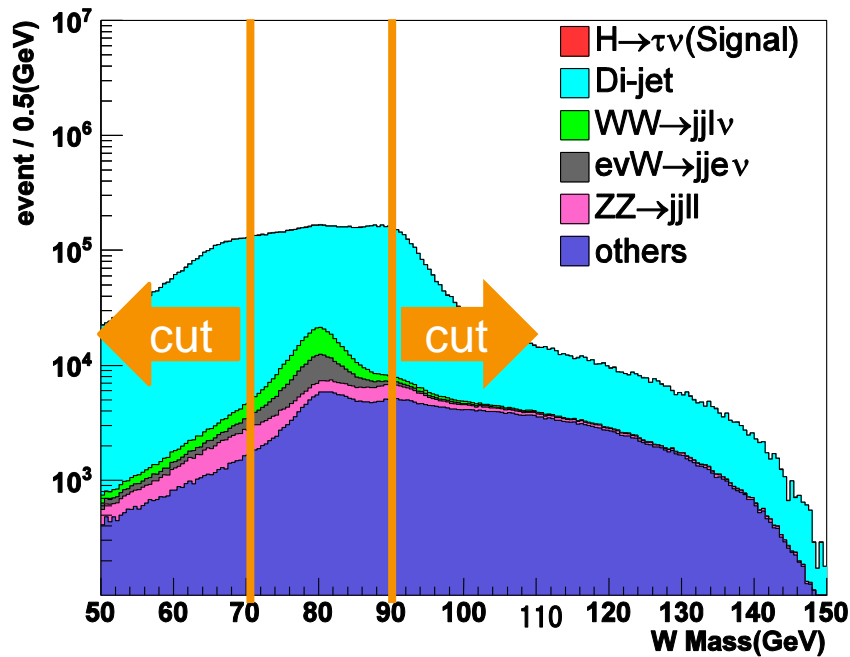
→事象選別を行う

13

Wボソン質量のカット

▶ 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

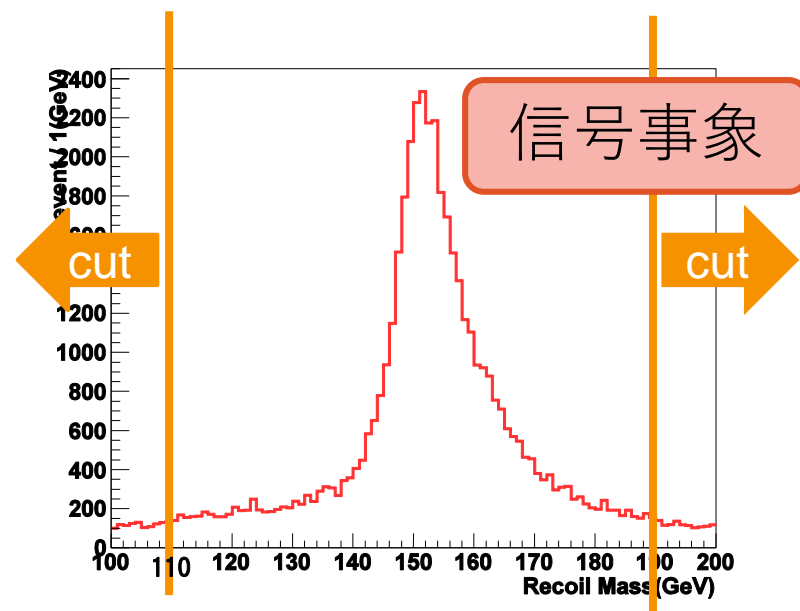
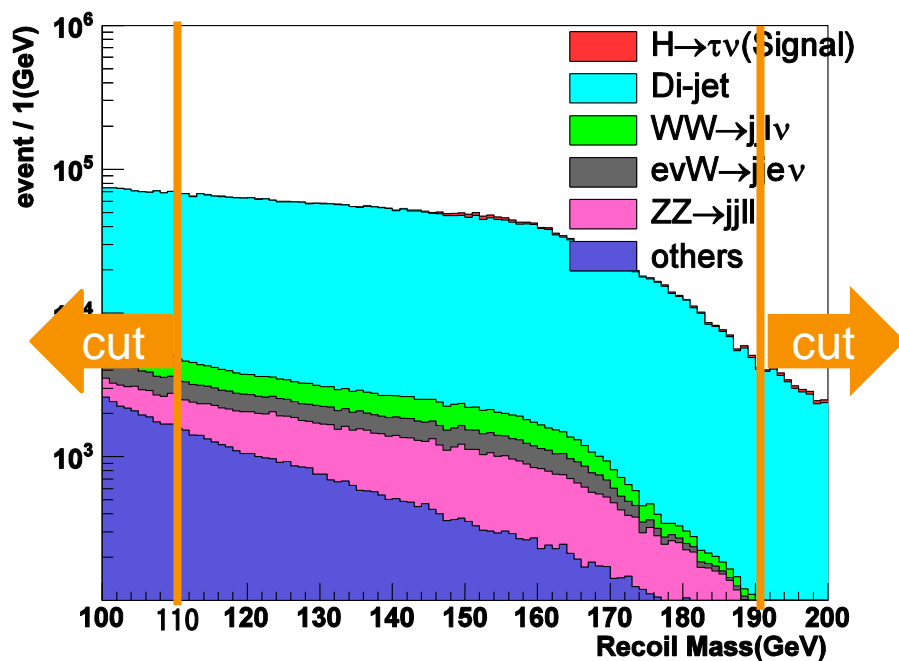
$$70 < M_w < 90 \text{ (GeV)}$$



反跳質量のカット

▶ 解析の手順3で計算された反跳質量

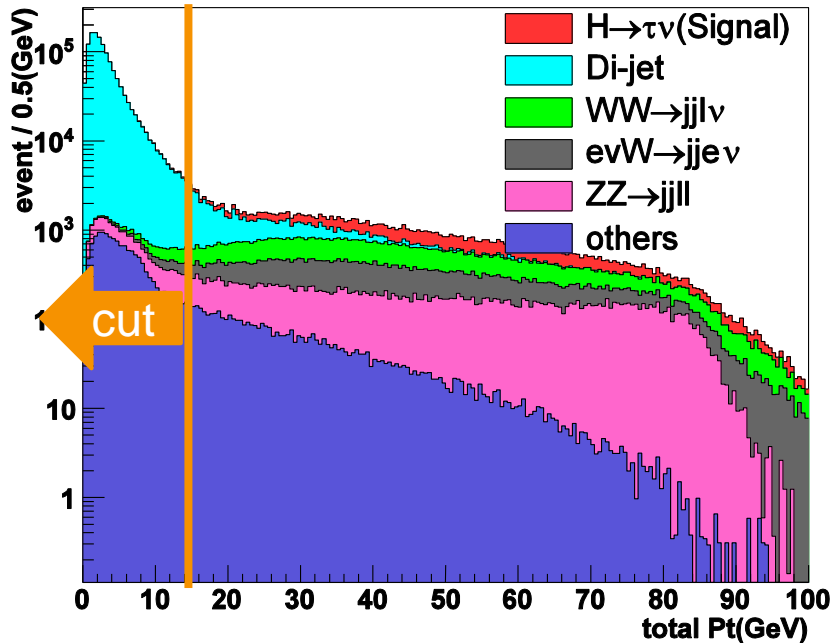
$$110 < M_{\text{rec}} < 190 \text{ (GeV)}$$



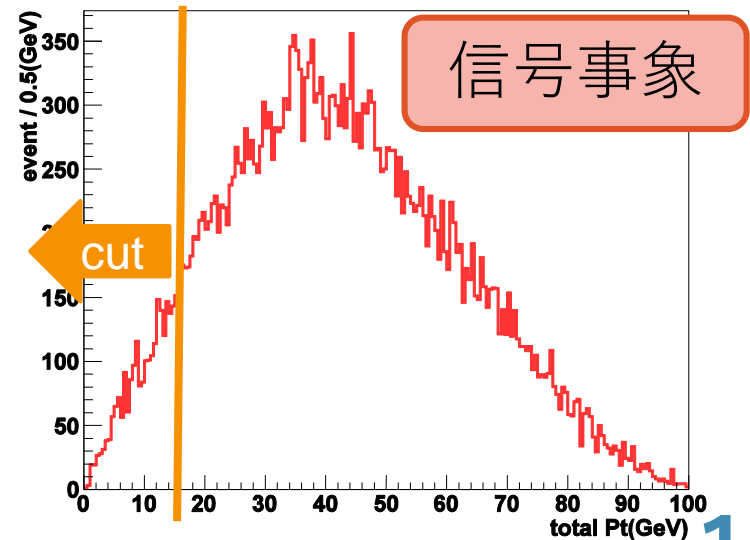
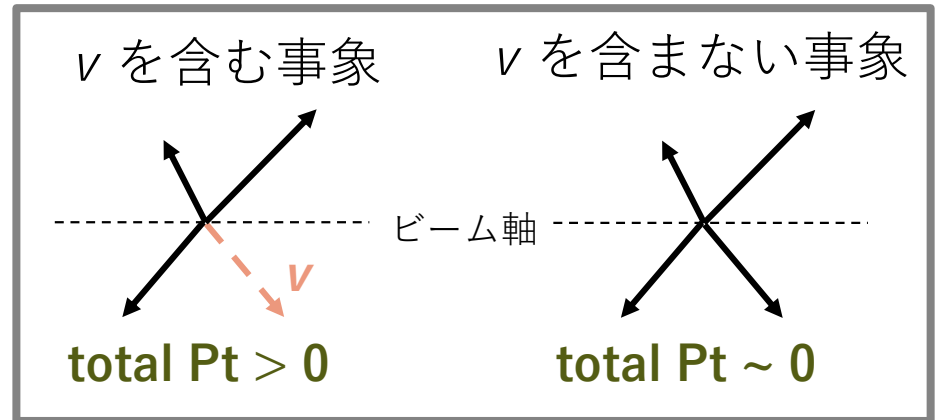
全横運動量によるカット

▶ 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)



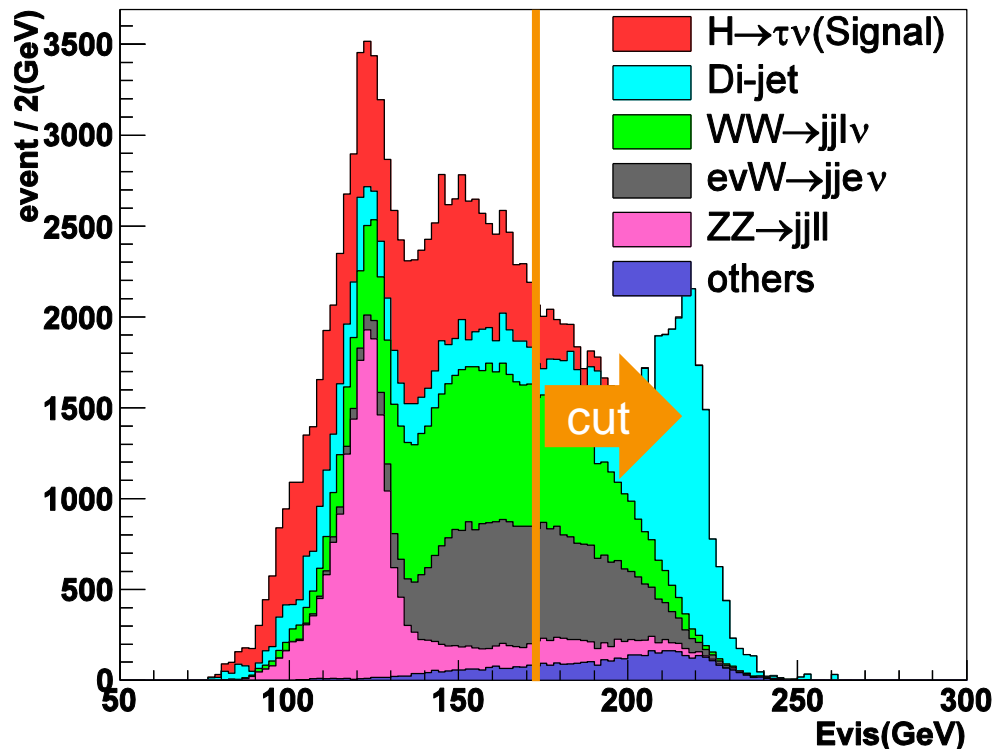
▶ ニュートリノを含まない事象を排除
ZZ → jjjj, Di-jet, WW → jjjj など



可視エネルギーによるカット

▶ Evis : 検出器で測定されたエネルギーの総和

Evis < 170 (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

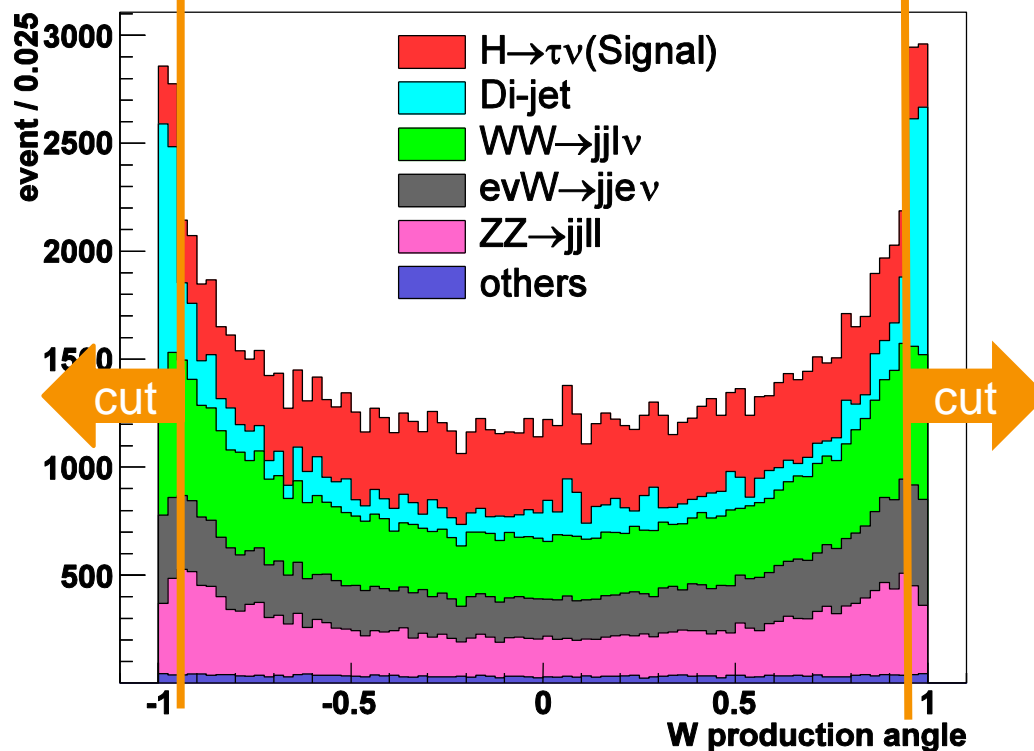
Wボソンの生成角のカット

▶ ビーム軸に対するWボソンの生成角

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

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

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

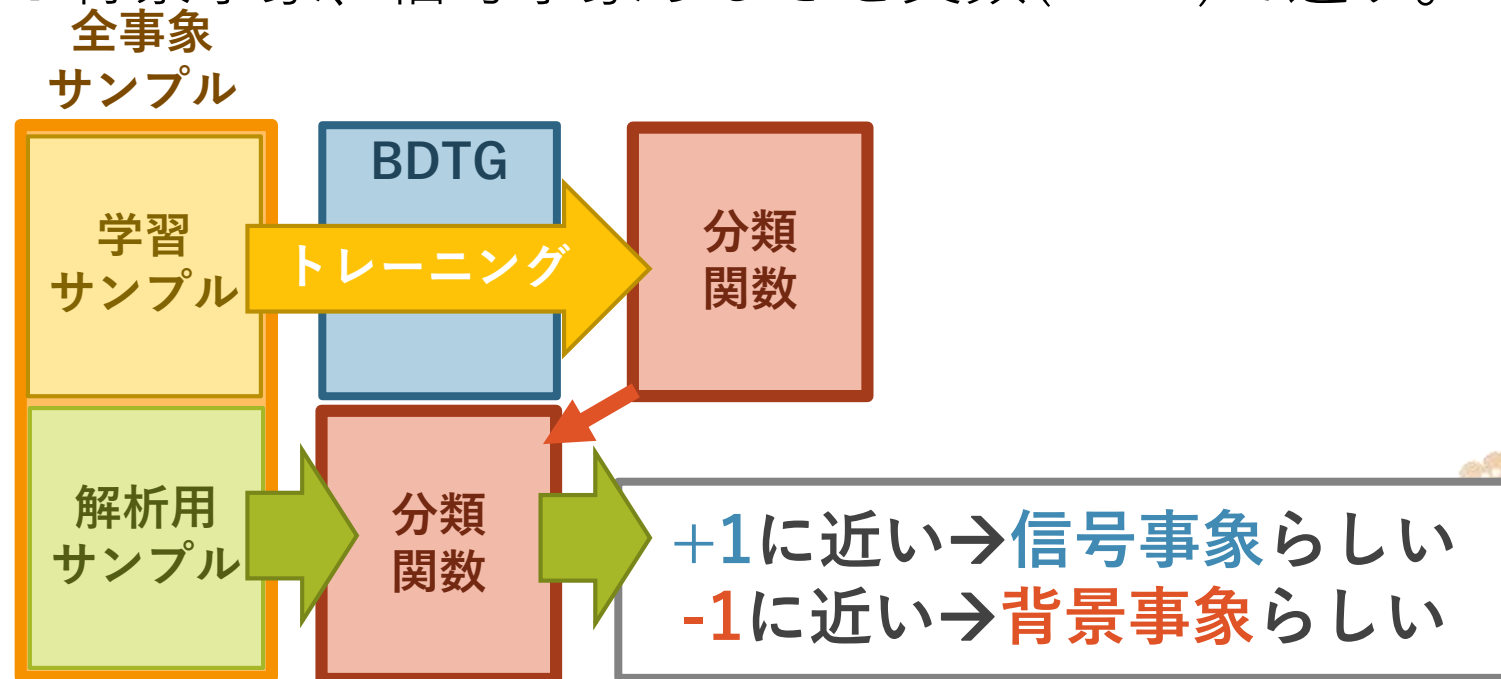


▶ ビーム軸方向にピークを持つ事象の排除
Di-jetなど



BDTG値によるカット

- ▶ BDTG((Gradient) Boosted Decision Tree):
事象サンプルの一部(学習サンプル)を用いて信号事象と背景事象を分類する関数を作る
- ▶ 学習サンプル中の複数の変数に対し信号事象と背景事象が最適に分類される値を決める。
→背景事象、信号事象らしさを実数(-1~1)で返す。

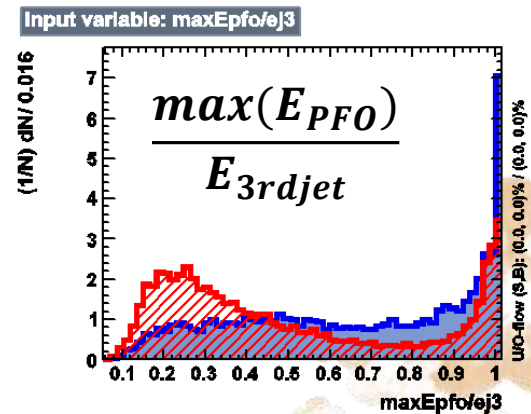
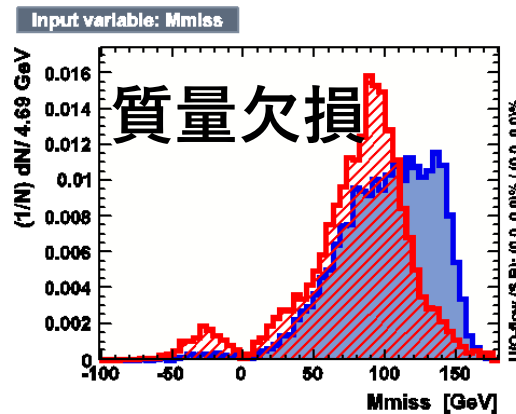
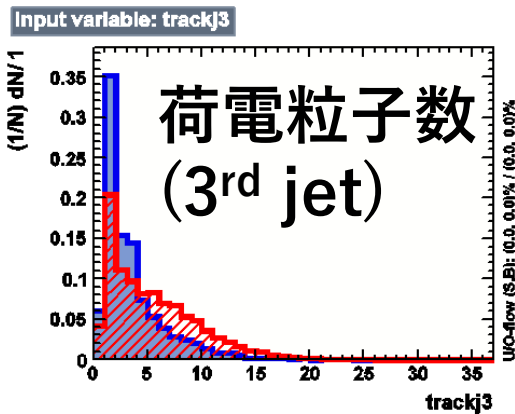
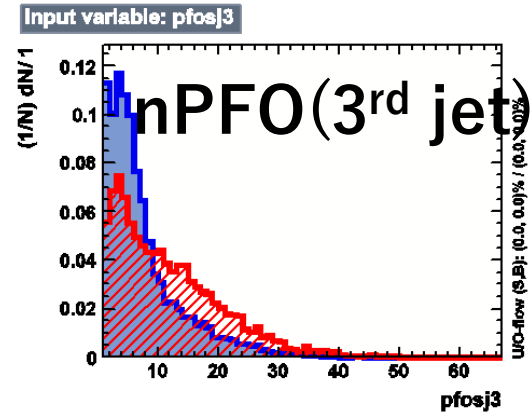
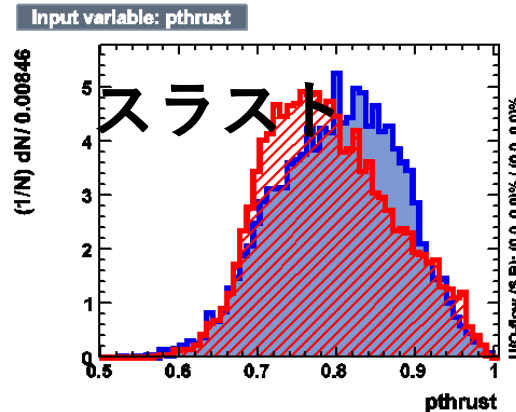
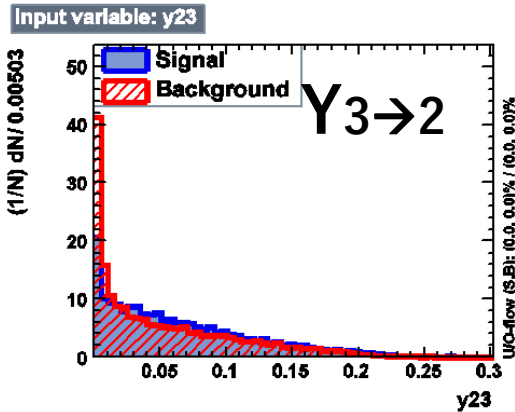
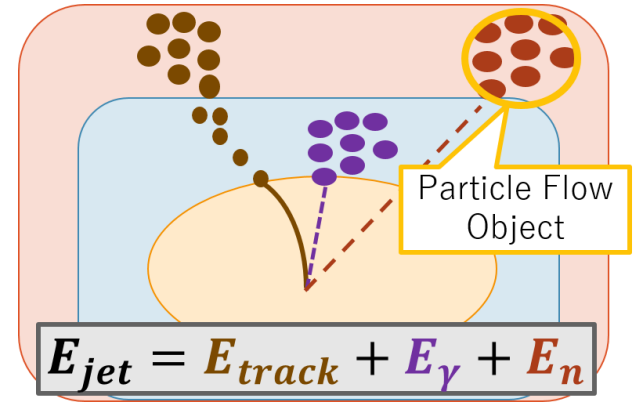


BDTG値によるカット

インプット変数

Y3→2 スラスト
 荷電粒子数 質量欠損

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



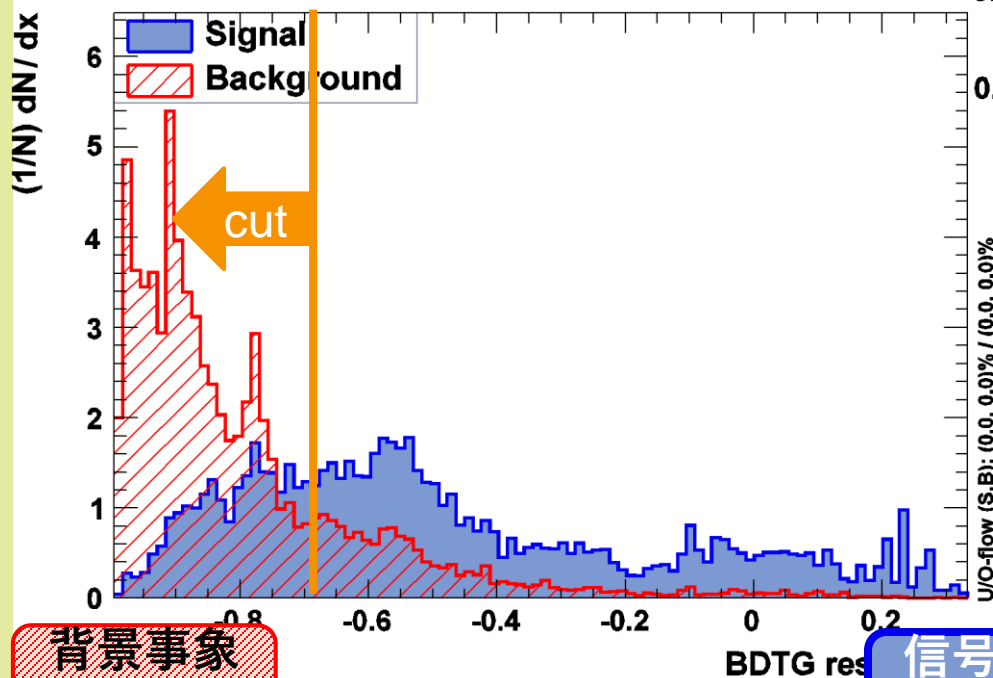
青：信号

赤：背景

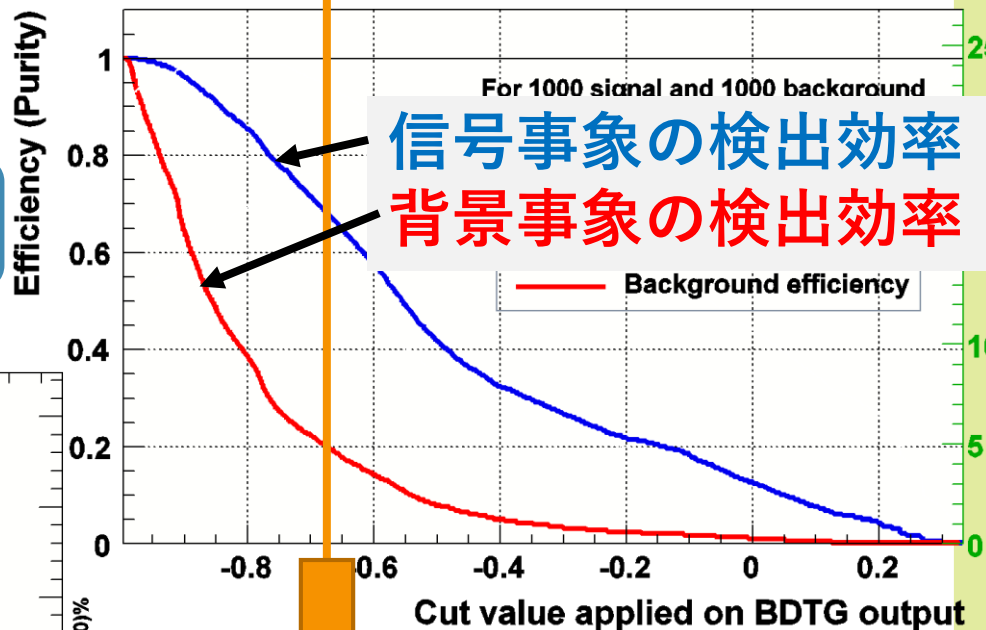
BDTG値によるカット

▶ 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

背景事象
らしさ大

信号事象
らしさ大

カット条件ごとの事象数変化

	WH($\tau \nu$)	Di-jet	$e \nu W \rightarrow e \nu jj$	WW $\rightarrow jjl \nu$	ZZ $\rightarrow jjll$	others
no cut	53618	11553700	111356	189596	116797	518315
mw&mrec	31958	1307060	23795	35671	28561	18920
pt	29624	31281	22005	32323	21021	4873
Evis	27255	9375	11437	21191	18580	1219
Wangle	26177	5421	10423	19408	17205	1147
BDTG	17961	1459	2131	5025	1834	230

選別条件

$70 < M_w < 90$ (GeV)

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

$15 < P_t$ (GeV)

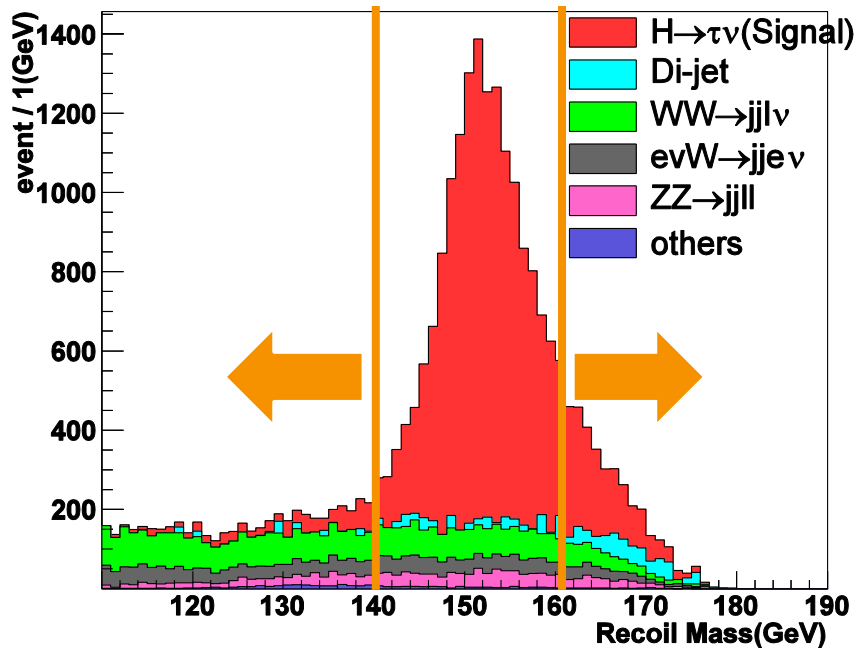
$170 < E_{vis}$ (GeV)

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

$-0.675 < BDTG$



事象選別後の反跳質量分布



信号事象領域

- $70 < M_w < 90$ (GeV)
- $140 < M_{rec} < 160$ (GeV)
- $15 < P_t$ (GeV)
- $170 < E_{vis}$ (GeV)
- $0.95 < |\cos \theta_{Wangle}|$
- $-0.675 < BDTG$

	WH($\tau \nu$)	Di-jet	$e \nu W \rightarrow e \nu jj$	WW $\rightarrow jjl \nu$	ZZ $\rightarrow jjll$	others
no cut	53618	11553700	111356	189596	116797	518315
after cut	14276	581	837	1729	863	95

検出効率 $\varepsilon = 26.62\%$

信号有意度 $S = 105$

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

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

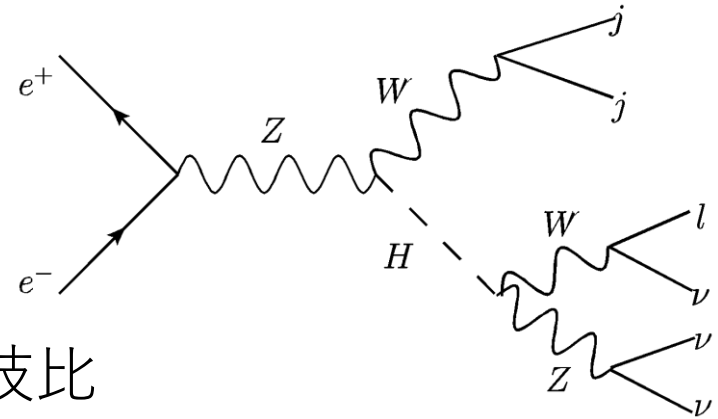


WZ過程の解析と結果

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



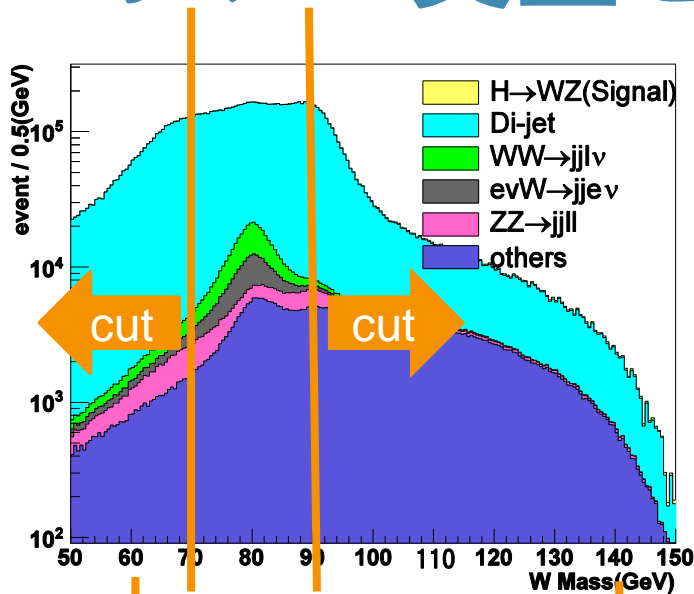
Zボソンの崩壊分岐比

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%

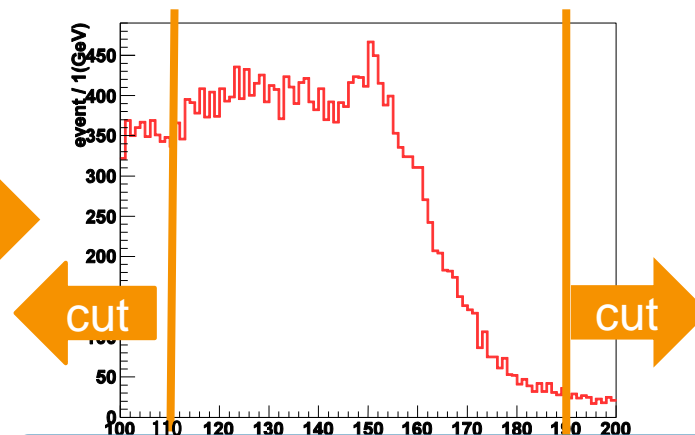
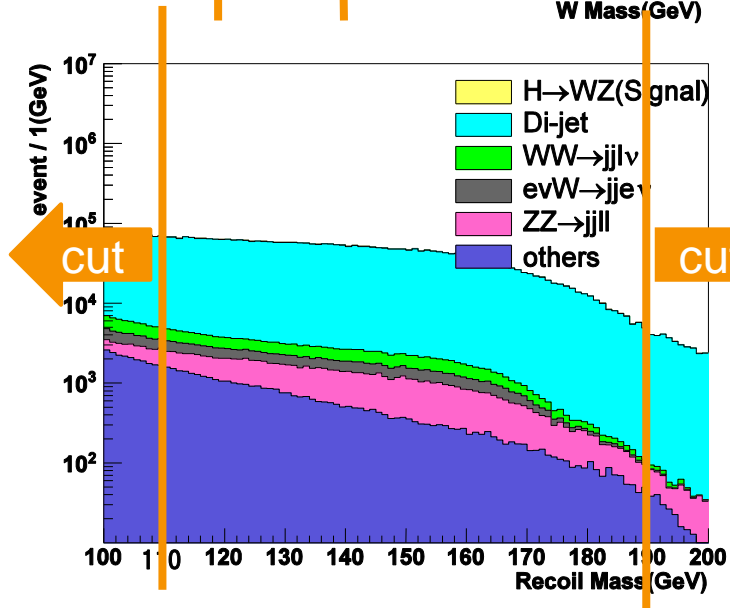
サンプル中

主に得られる事象

Wボソン質量と反跳質量のカット

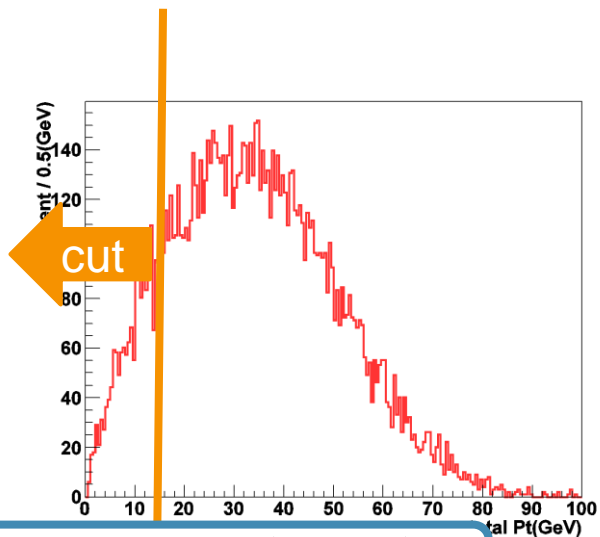
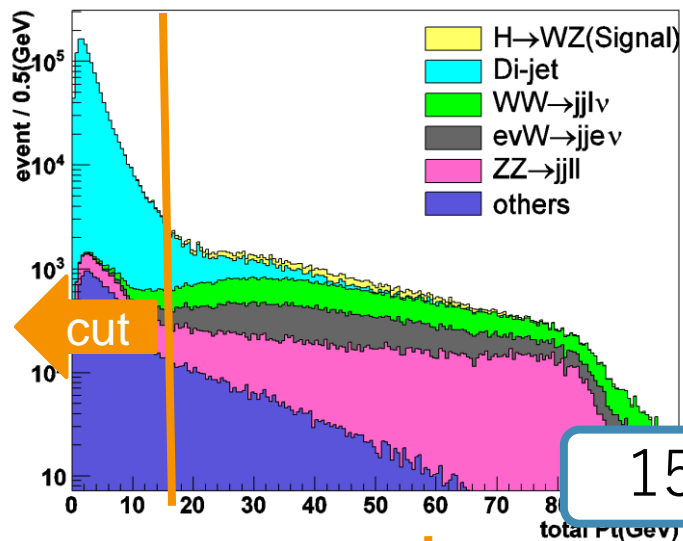


$$70 < M_w < 90 \text{ (GeV)}$$

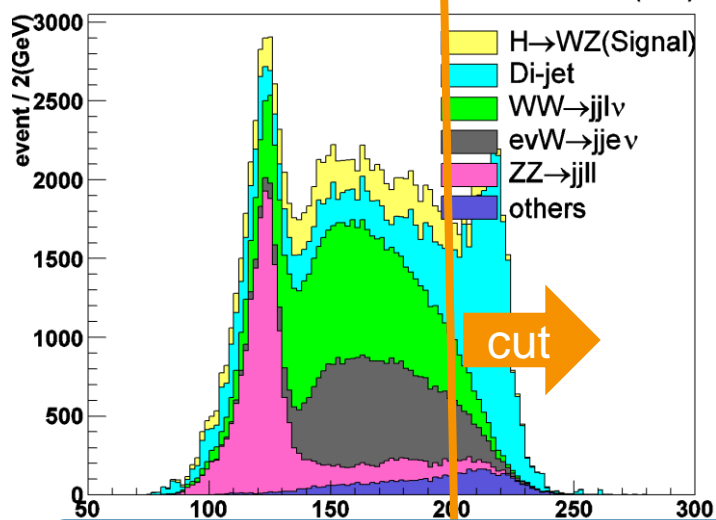


$$110 < M_{rec} < 190 \text{ (GeV)}$$

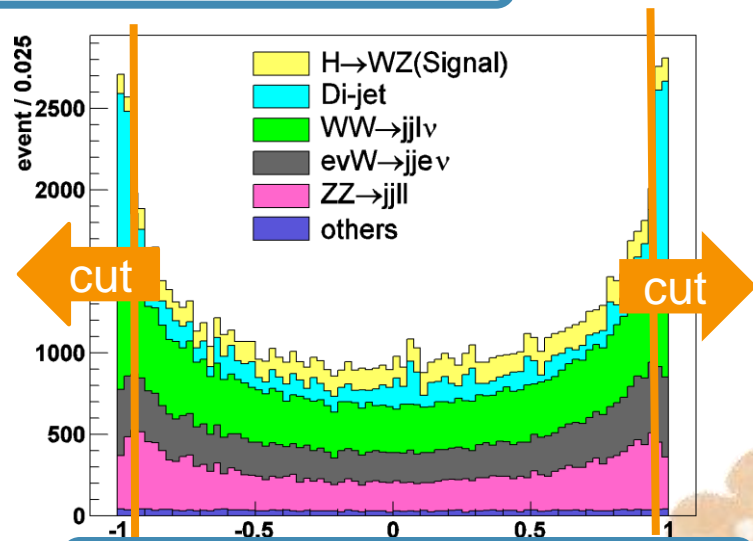
その他のカット



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



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



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

カット条件ごとの事象数変化

	WH(WZ)	Di-jet	$e\nu W \rightarrow e\nu jj$	$WW \rightarrow jjl\nu$	$ZZ \rightarrow jjll$	others
no cut	53613	11553700	111356	189596	116797	518315
mw&mrec	13399	1307060	23795	35671	28561	18920
pt	11575	31281	22005	32323	21021	4873
Evis	10435	14339	19568	30155	20351	2677
Wangle	9938	10048	17827	27496	18853	2511

選別条件

$70 < M_w < 90$ (GeV)

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

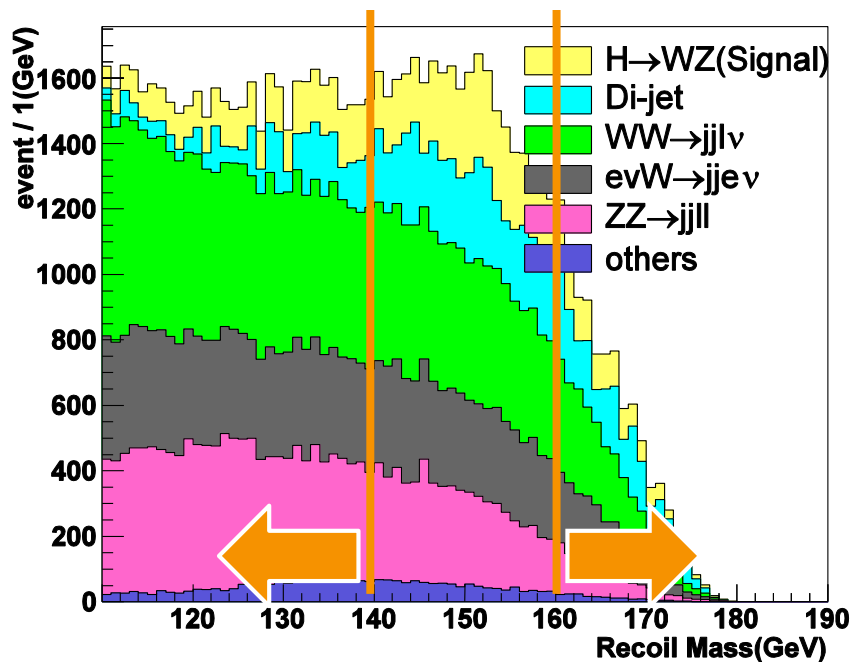
$15 < P_t$ (GeV)

$200 < E_{vis}$ (GeV)

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



事象選別後の反跳質量分布



信号事象領域

$70 < M_w < 90$ (GeV)
 $140 < M_{rec} < 160$ (GeV)
 $15 < P_t$ (GeV)
 $200 < E_{vis}$ (GeV)
 $0.95 < |\cos \theta_{Wangle}|$

	WH(WZ)	Di-jet	$e\nu W \rightarrow e\nu jj$	$WW \rightarrow jjl\nu$	$ZZ \rightarrow jjll$	others
no cut	53613	11553700	111356	189596	116797	518315
after cut	4768	4792	5835	8697	5438	987

検出効率 $\varepsilon = 8.89\%$

信号有意度 $S = 27.29$

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

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

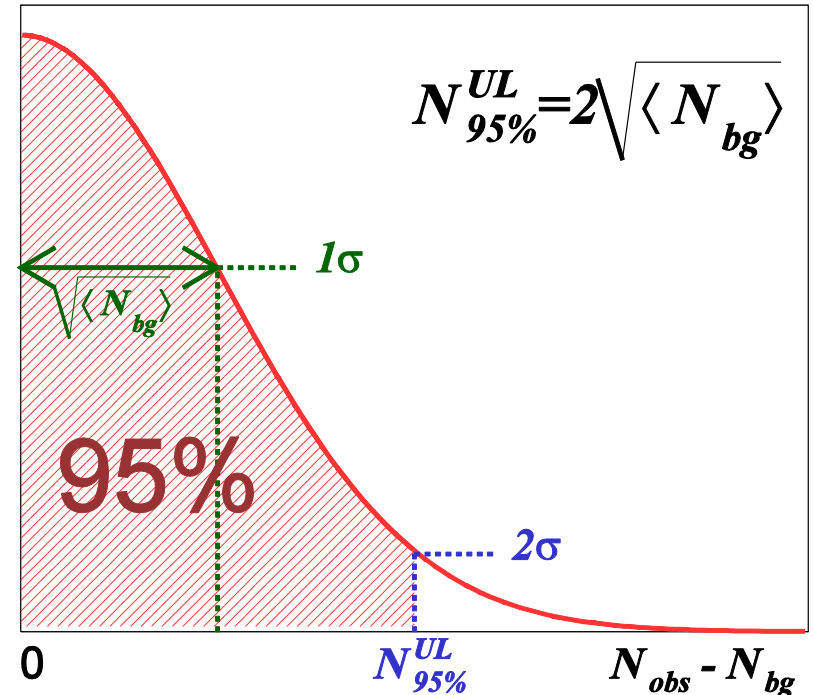
28



生成断面積の上限値

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 $\sigma_{95\%}^{UL}$



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



生成断面積の上限値の計算

▶ $\tau \nu$ 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

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

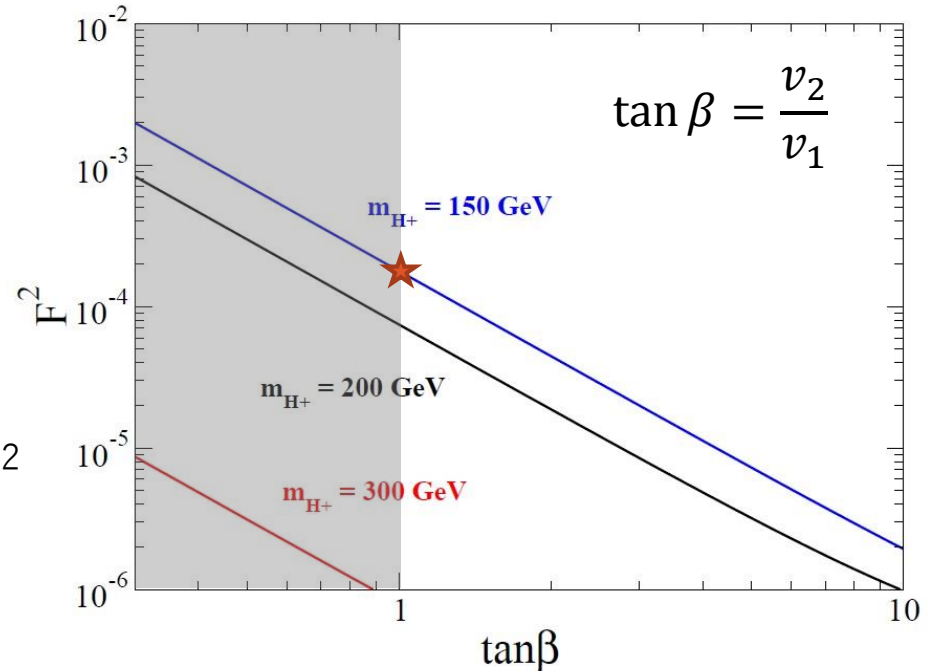




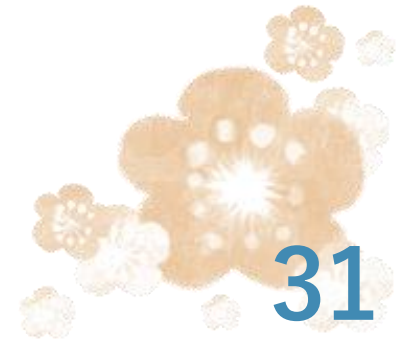
考察

$\tau \nu$ 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)



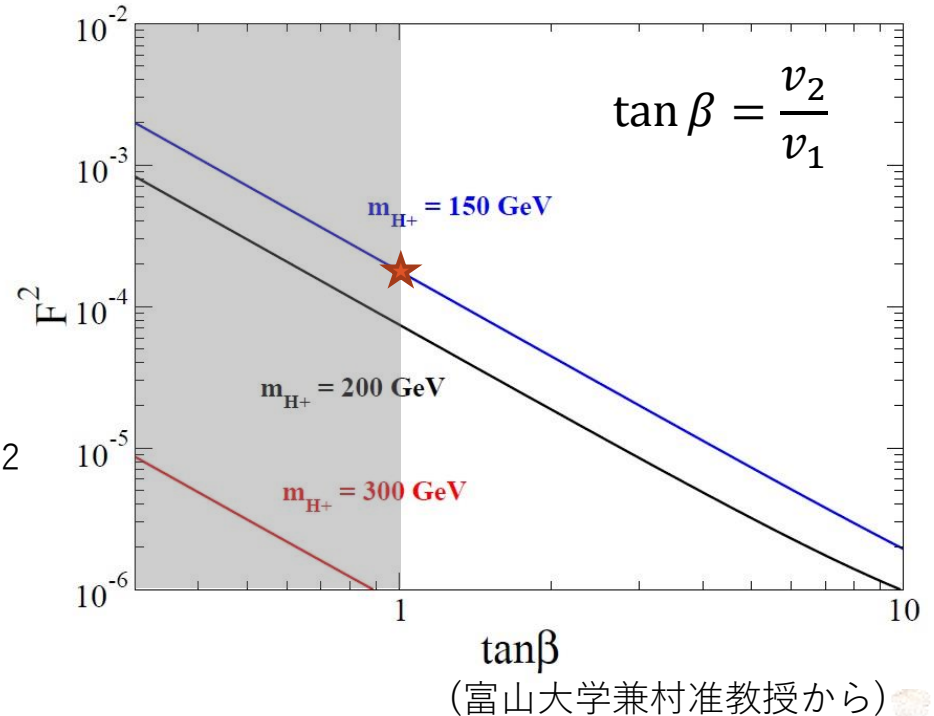
$\tau \nu$ 過程の結果と2HDM(タイプX)の比較

- ▶ 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 GeV/c² 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



$\tau \nu$ 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



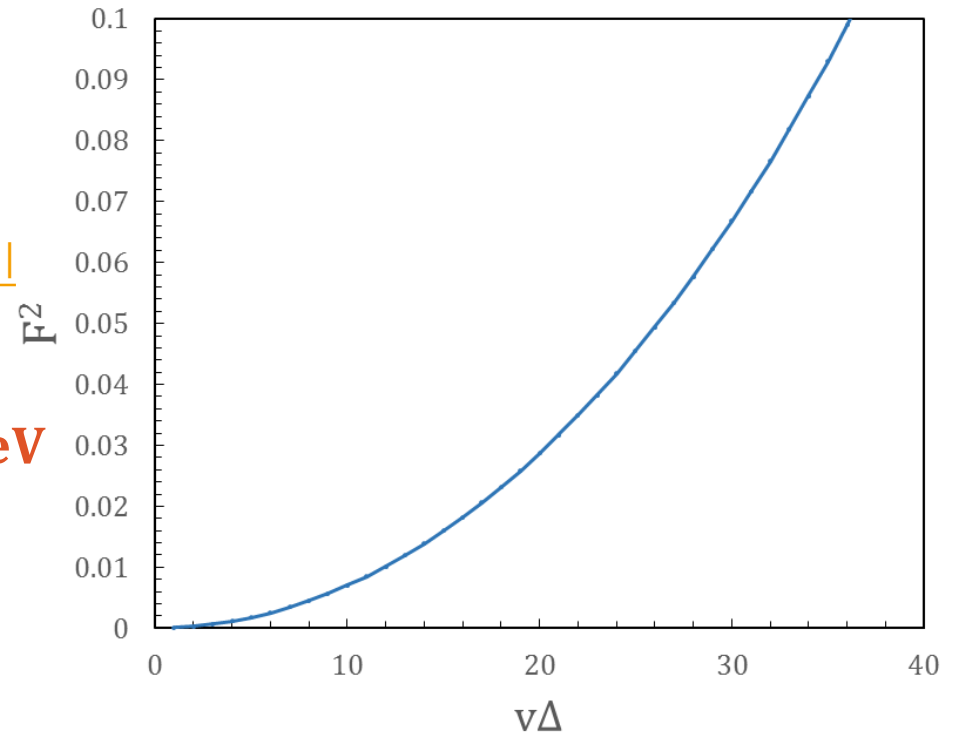
WZ過程の結果とGMモデルの比較

▶ VEVと形状因子の大きさの関係

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

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

LHC実験の結果により、 $v_\Delta > 70 \text{ GeV}$ は棄却される。
(arXiv:1501.04257)



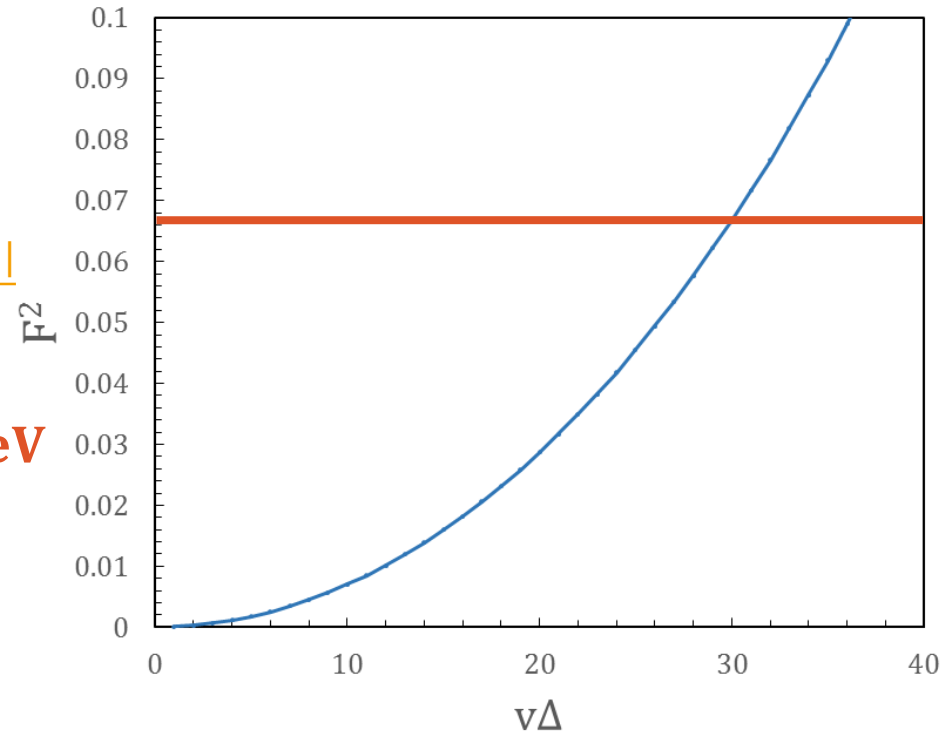
WZ過程の結果とGM模型の比較

▶ VEVと形状因子の大きさの関係

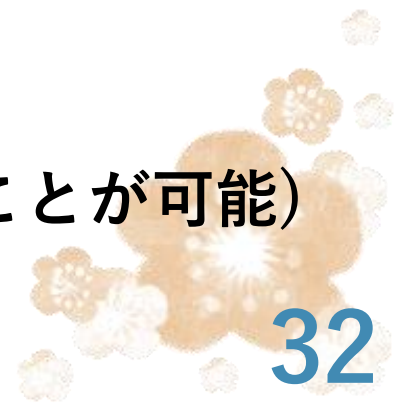
$$F^2 = \frac{4v_{\Delta}^2}{\cos^2\theta_W(v^2 + 4v_{\Delta}^2)}$$

(Shinya Kanemura, Kei Yagyu, physical review D 83, 075018(2011))

LHC実験の結果により、 $v_{\Delta} > 70 \text{ GeV}$ 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 $\tau \nu$ 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





Backup slides