

国際リニアコライダーにおけるヒッグス 粒子の崩壊分岐比測定の研究

素粒子実験 高エネルギー実験グループ

吉田幸平

イントロダクション

- ILC実験&ILD測定器

解析

- 事象再構成
- 背景事象除去
- ヒッグス粒子崩壊分岐比導出

はじめに

標準模型

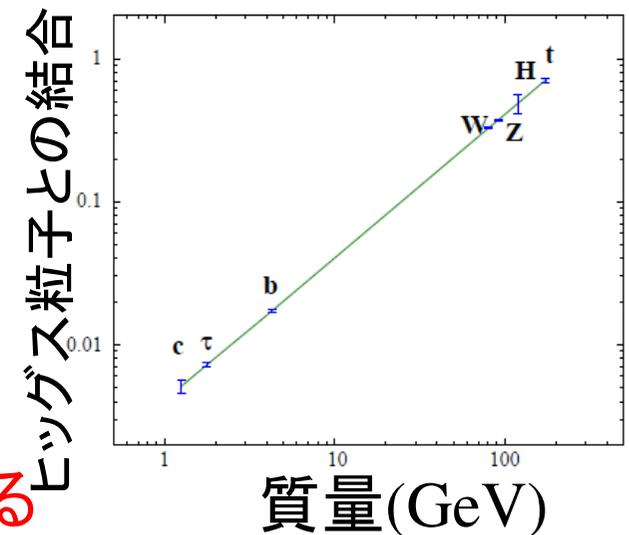
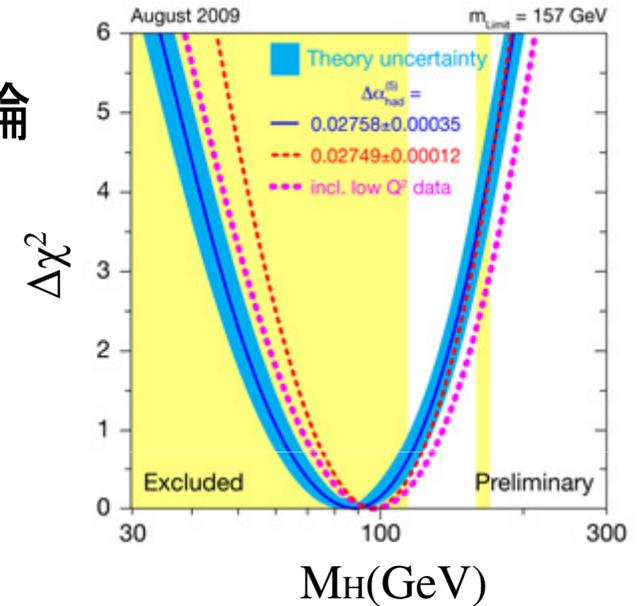
- 素粒子物理学において最も成功している理論
- 唯一ヒッグス粒子が未発見
- 素粒子の質量獲得のメカニズムは未検証

ヒッグス機構

- 標準理論における質量獲得のメカニズム
- ヒッグス粒子との結合が質量に比例
- $BR(H \rightarrow cc)/BR(H \rightarrow bb) = m_c^2/m_b^2$

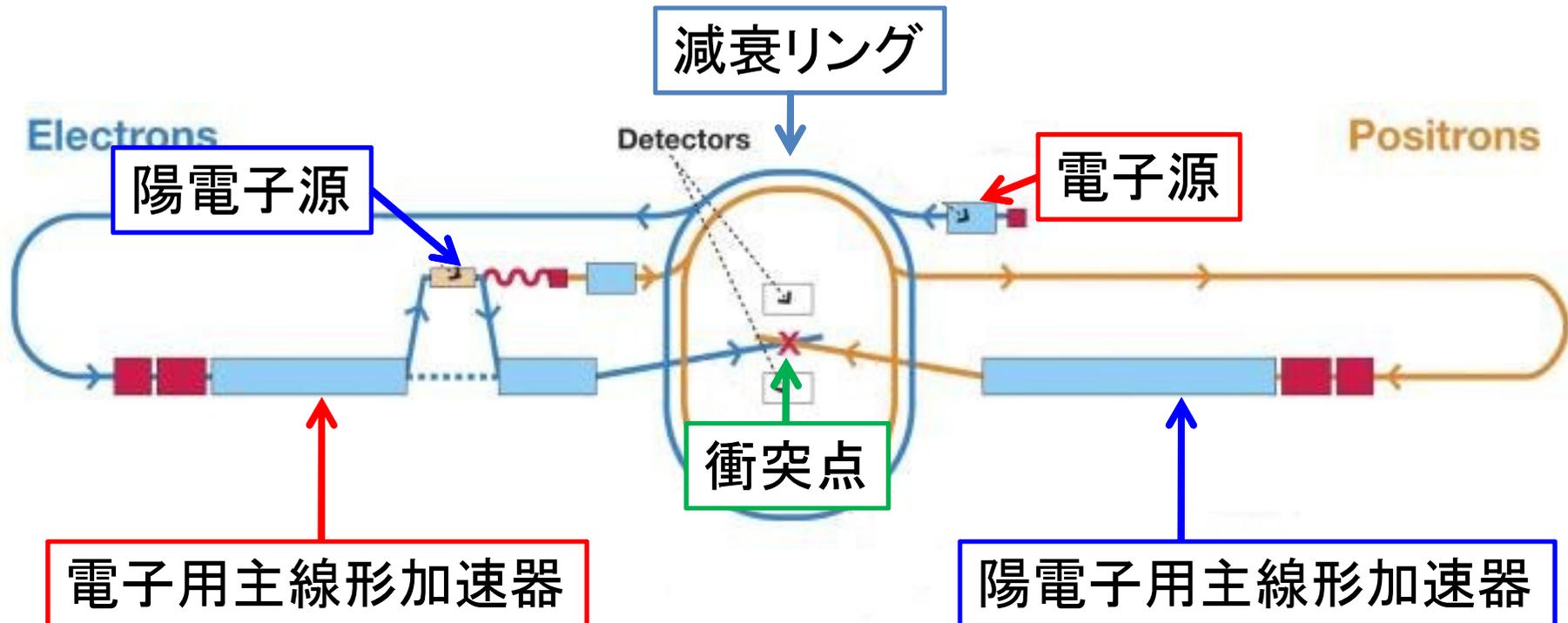
ヒッグス粒子崩壊分岐比測定

- ILCでは $H \rightarrow cc$ を測定することも可能
- 本研究では崩壊分岐比の測定精度を見積もる



加速器

- 電子・陽電子衝突型線形加速器
- 重心系エネルギー: 第一期運転では最大500GeV(後に1TeV)
- 積分ルミノシティ: 500fb^{-1} (4年間)

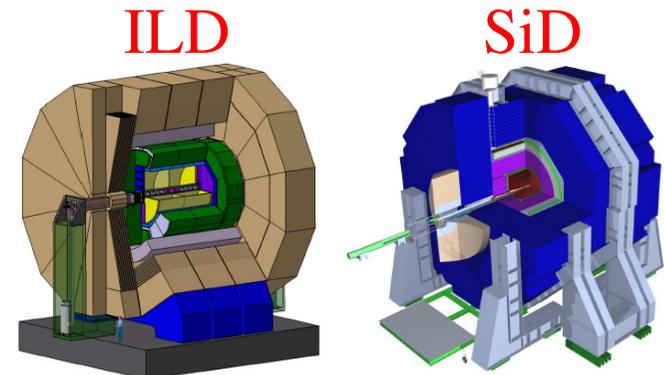




国際リニアコライダー実験

測定器

- 複数ジェット事象の解析が必要
- 要求性能
 - **ジェットエネルギー分解能**: $\sigma_{Ej}/Ej < 3.8\%$ ($E_{CM} \sim 90\text{GeV}$)
 - $W \rightarrow qq, Z \rightarrow qq$ 事象の区別
 - **運動量分解能**: $\Delta pt/pt^2 = 2 \times 10^{-5} (\text{GeV}/c)^{-1}$
 - 高密度なジェット中の荷電トラックを識別
 - **崩壊点分解能**: $\sigma_{r\phi} = 5 \oplus 10/p\beta \sin^{3/2}\theta (\mu\text{m})$
 - フレーバー・タグ(後述)
 - **いずれも今までにない高性能**
- 測定器案: ILD, SiD測定器

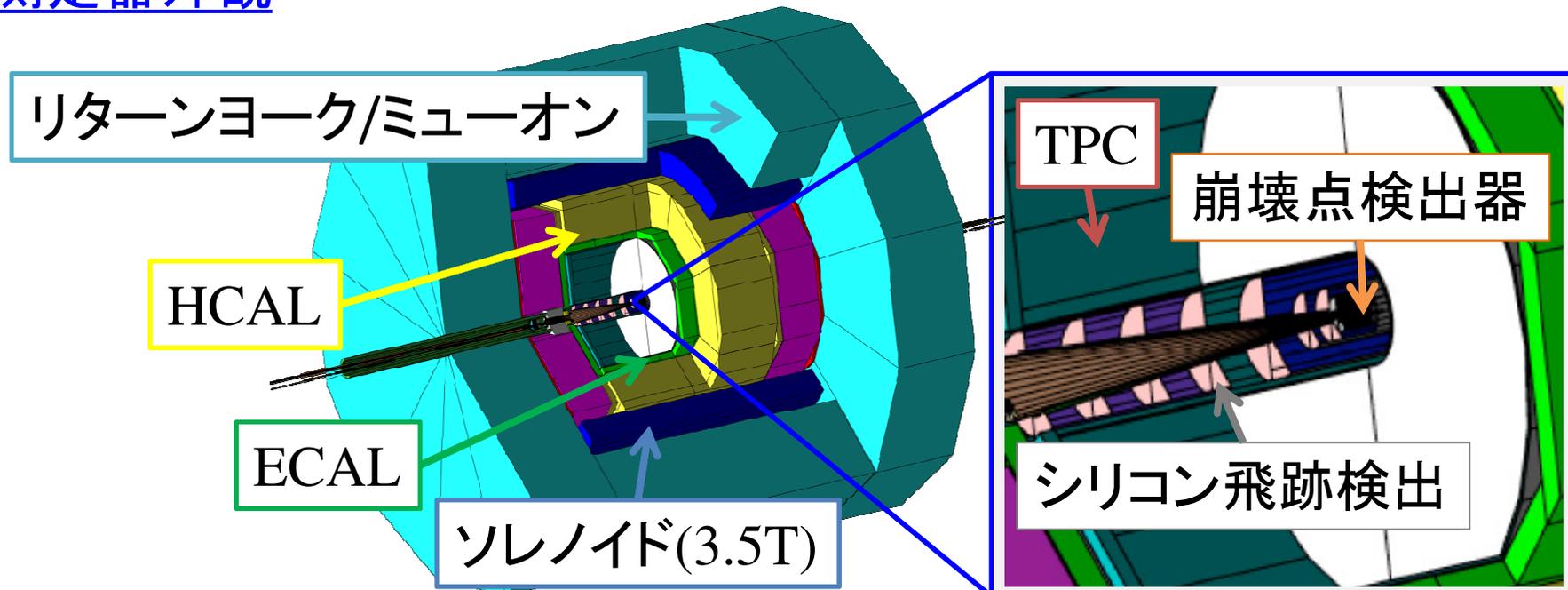


ILD測定器

ILD測定器

- 2007年、GLD(日本)とLDC(ヨーロッパ)が統合され誕生
- PFA、飛跡検出性能、フレーバー・タグに関して最適化済み
 - PFA、フレーバー・タグは次ページ

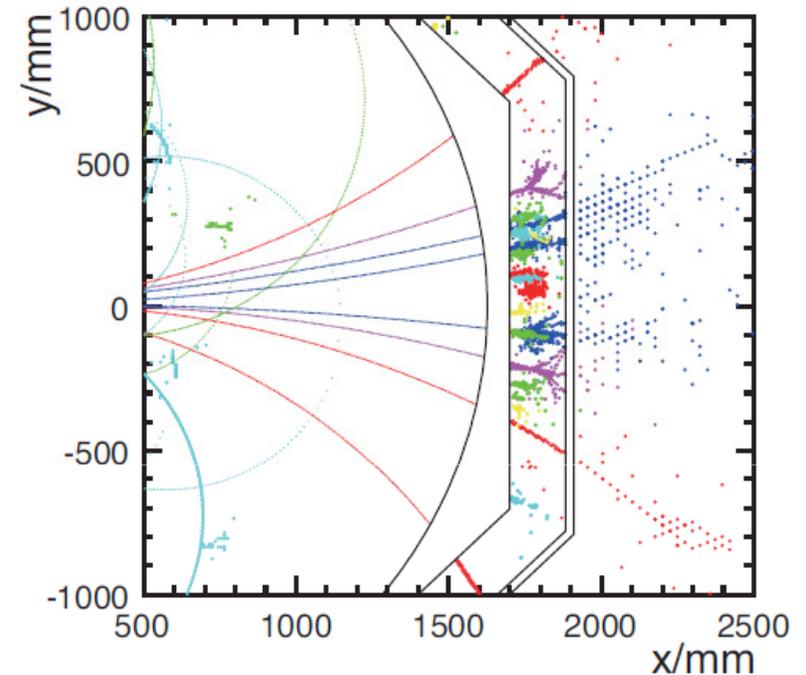
測定器外観



複数ジェット解析に欠かせない技術

PFA(Particle Flow Algorithm)

- ジェット中の粒子を個別に再構成
 - 荷電粒子: 飛跡+CAL内クラスター
 - 光子: ECAL内クラスター
 - 中性ハドロン: HCAL内クラスター
- 要求されるエネルギー分解能を達成



フレーバー・タグ

- ジェットのクォークタイプを同定
- IPから崩壊点までの距離等を用いる
- ニューラルネットで最適化(LCFIVertex)
 - 出力: b-らしさ, c-らしさ, bc-らしさ

	信号	背景
b-らしさ	b	udsc
c-らしさ	c	udsb
bc-らしさ	c	b



ヒッグス粒子崩壊分岐比測定シミュレーション



シミュレーション

条件

- ヒッグス粒子の質量: 120GeV
- 重心系エネルギー: 250GeV
- ルミノシティ: 250fb⁻¹
- ビーム偏極: e⁻(-80%), e⁺(+30%)

ヒッグス粒子崩壊分岐比

bb	65.7%
WW	15.0%
ττ	8.0%
gg	5.5%
cc	3.6%

*M_H=120GeV

シミュレーション

手順

1. 事象生成

- 電子・陽電子衝突後の反応と反応断面積の計算

2. 測定器シミュレーション

- 測定器内での粒子の運動の計算

3. 再構成

- 検出器の信号から起こった事象を構築

4. 解析

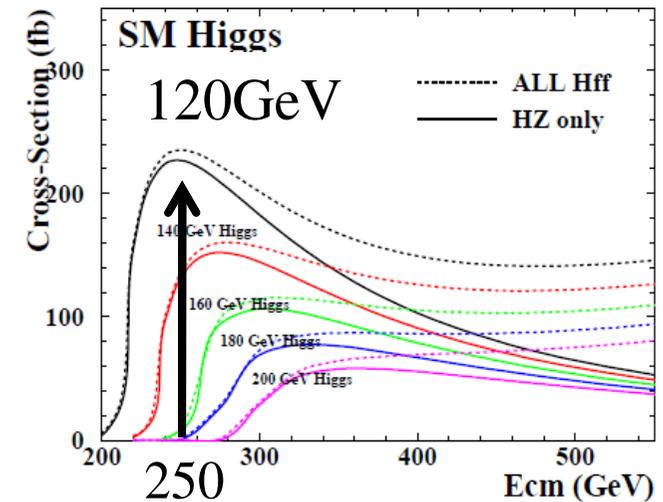
ソフトウェア(ILCSoft)

- 事象生成: Whizard
- 測定器シミュレーション: Mokka
- 再構成: Marlin

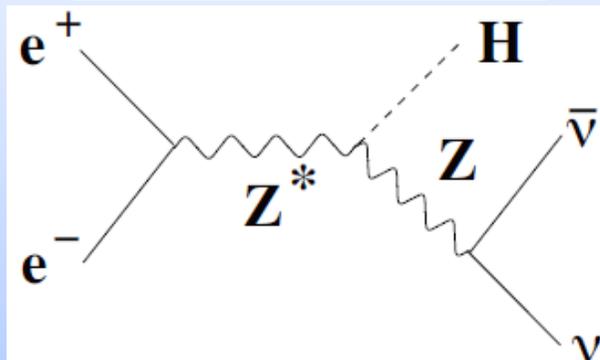
信号事象

ヒッグス粒子生成過程

- 主にHiggsstrahlung($e^+e^- \rightarrow ZH$)
- Zの崩壊過程で3種類に分類

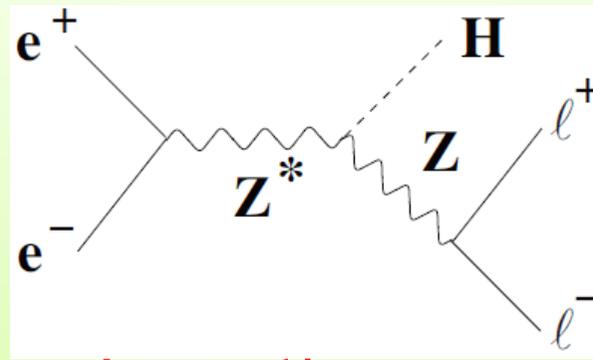


ニュートリノ過程



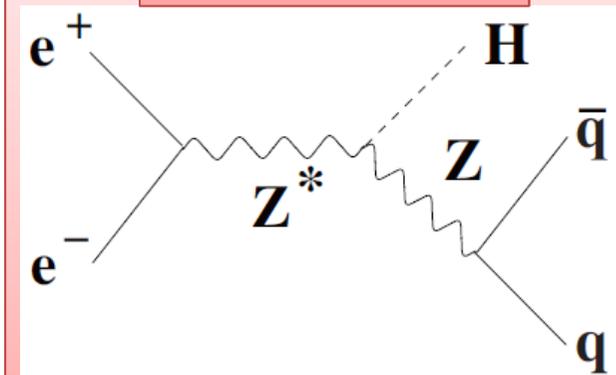
反応断面積: 77.4fb

レプトン過程



反応断面積: 11.1fb(e)
: 10.4fb(μ)

ハドロン過程



反応断面積: 210fb

* $E_{CM}=250\text{GeV}$, $(e^-, e^+) = (-80\%, +30\%)$

背景事象

背景事象

- SMの4f 背景事象を全て考慮した。
- 背景事象の反応断面積は非常に大きい

* 赤は信号事象

ニュートリノ過程

	断面積(fb ⁻¹)
ννH	77.4
ννqq	600
qqqq	16200
νlqq	16500
llqq	1590
νvll	4450
llll	3050

レプトン過程

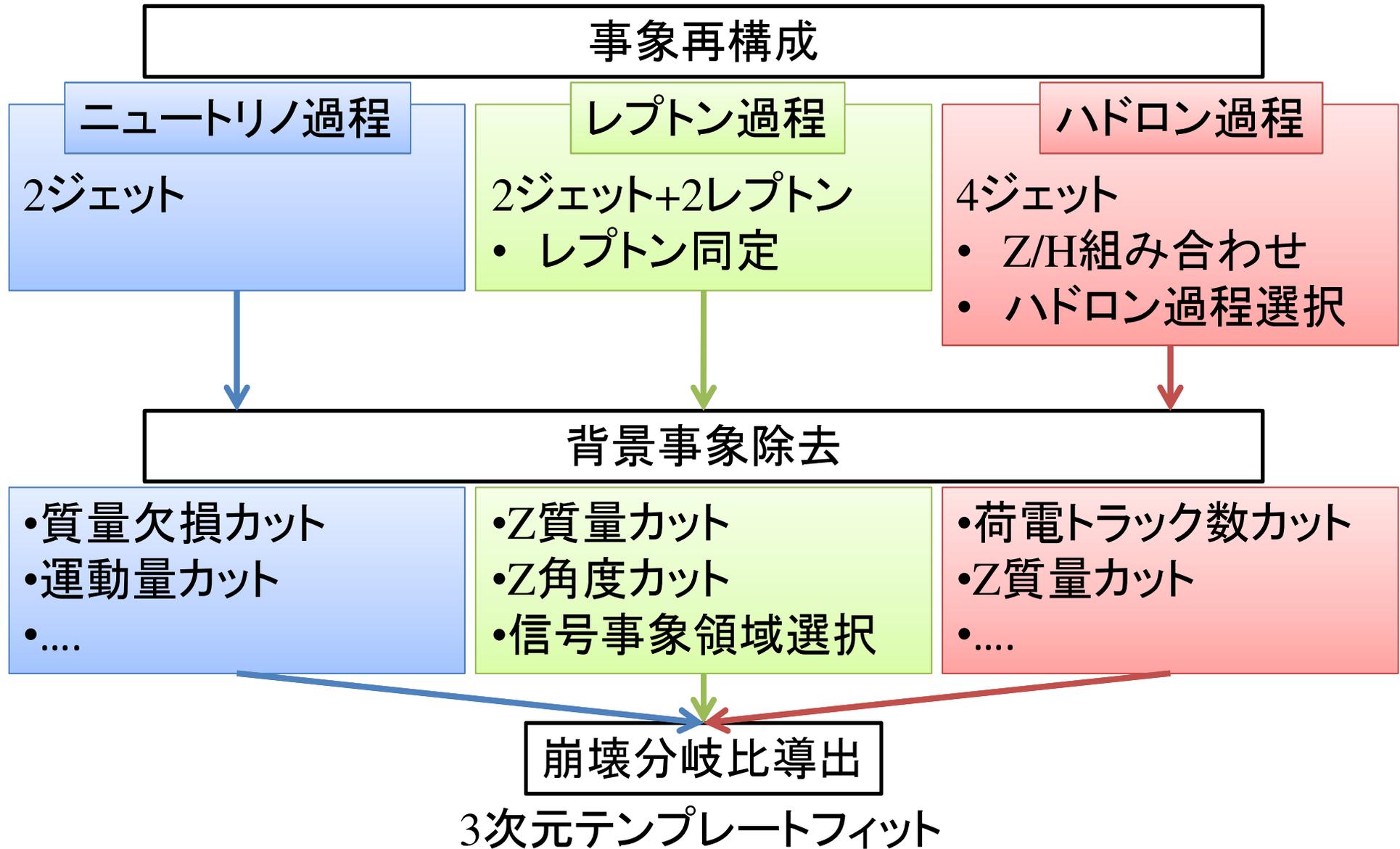
eeH	11.1
μμH	10.4
eeqq	1260
μμqq	168
ττqq	167
νeεqq	5840
νμμqq	5310
νττqq	5300

ハドロン過程

qqH	210
ννqq	600
qqqq	16200
νlqq	16500
llqq	1590
νvll	4450
llll	3050
qq	141000
gg	34000

*E_{CM}=250GeV, (e⁻,e⁺)=(-80%,+30%)

解析手順





事象再構成

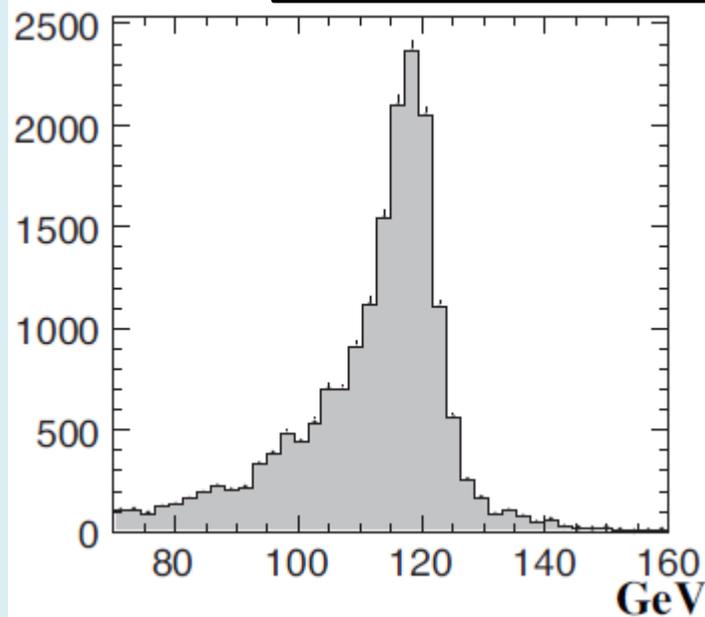


ニュートリノ過程 ($e^+e^- \rightarrow \nu\nu H$)

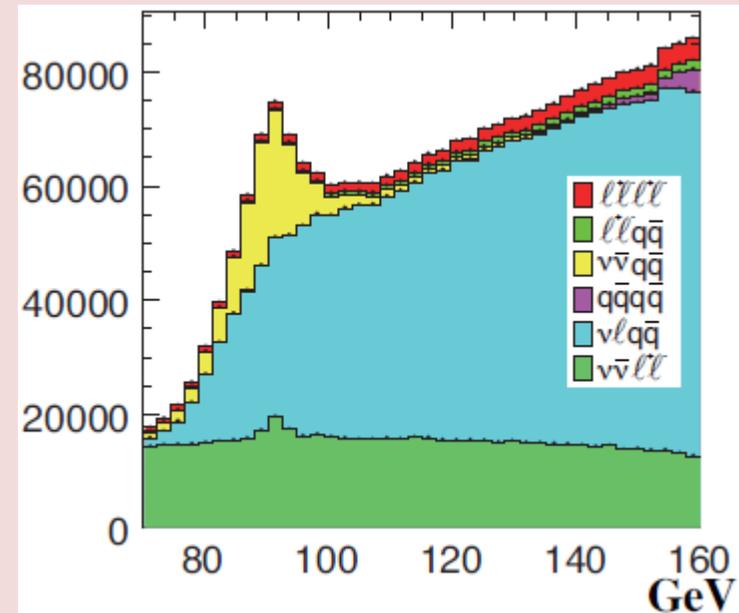
ニュートリノ過程

- 全ての事象を強制的に2ジェットとして再構成
 - Durham アルゴリズム

再構成された2ジェット不変質量分布



信号事象



背景事象

ilc レプトン過程(レプトン同定)

手順

1. 最もエネルギーの高い粒子を選択
2. その粒子との不変質量がZの質量に近い粒子を選択
3. 運動量20GeV以上を要求
4. カロリメータの情報でカット
 - 電子同定: $0.8 < E_{\text{Total}}/P < 1.2$ かつ $E_{\text{ECAL}}/E_{\text{Total}} > 0.9$
 - ミューオン同定: $E_{\text{Total}}/P < 0.25$ (* $E_{\text{Total}} = E_{\text{ECAL}} + E_{\text{HCAL}}$)
5. 2つのレプトン候補の電荷が互いに逆を要求

性能

事象	電子同定			ミューオン同定	
	同定前	同定後	効率	同定後	効率
eeH	2777	1932	69.6%	1	0.02%
$\mu\mu$ H	2601	0	0%	2275	87.5%
$\tau\tau$ H	2592	14	0.53%	14	0.56%

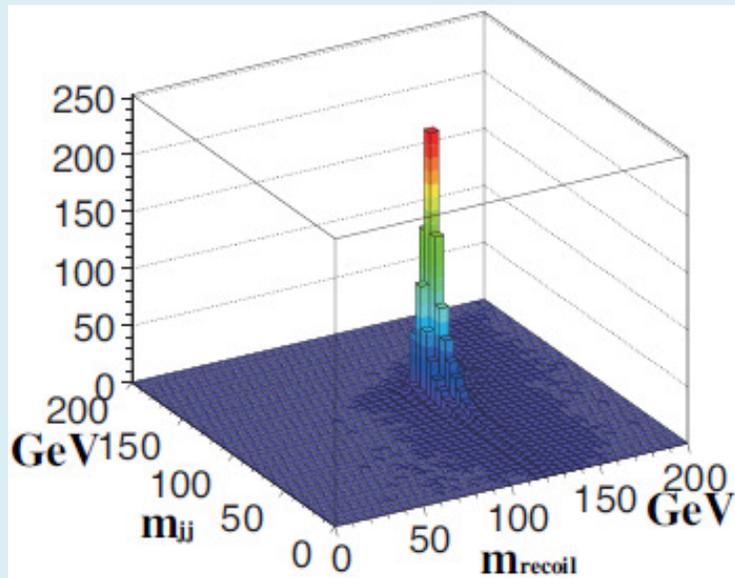


レプトン過程($e^+e^- \rightarrow l^+l^-H$)

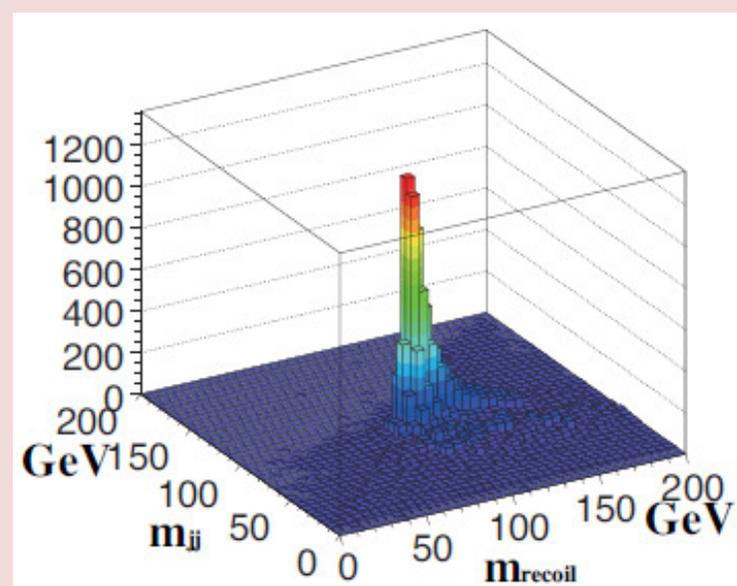
レプトン過程

- 強制的に2ジェット+2レプトンとして再構成

2ジェット質量と2レプトン反跳質量の2次元ヒストグラム(電子チャンネル)



信号事象



背景事象

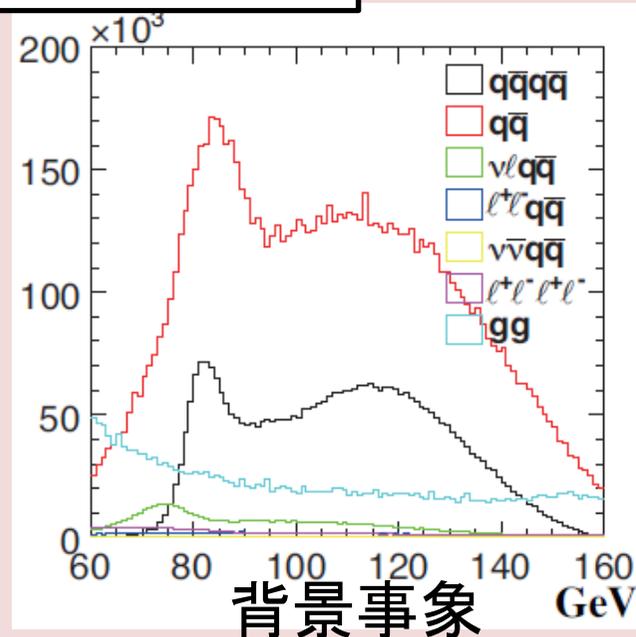
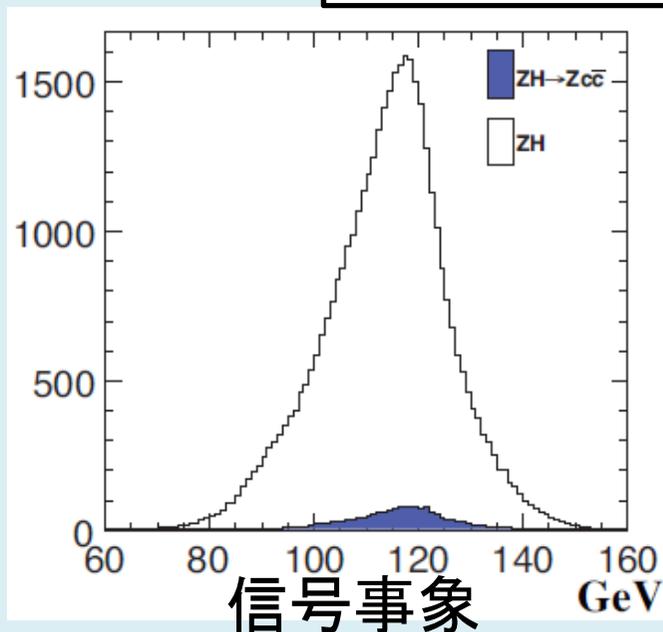


ハドロン過程($e^+e^- \rightarrow qqH$)

ハドロン過程

- 4ジェットとして強制的に再構成
- ヒッグス候補の2ジェットとZ候補の2ジェットに分割
- $e^+e^- \rightarrow ZH$ サンプルからハドロン過程選択
 - 15GeV以上レプトンなし、 $E_{vis} > 170\text{GeV}$

ヒッグス2ジェット不変質量分布





背景事象除去

ニュートリノ過程での背景事象除去

Zボソン選択:

- $80 < \text{質量欠損} < 140 \text{ GeV}$

ヒッグス粒子選択:

- $20 < 2\text{ジェット縦運動量} < 70 \text{ GeV}$, $|2\text{ジェット横運動量}| < 60 \text{ GeV}$
- $100 < 2\text{ジェット不変質量} < 130 \text{ GeV}$

レプトンモード除去:

- 荷電トラック数 > 10

$\nu_\tau \tau q q$ 除去:

- 最大運動量 $< 30 \text{ GeV}$
- 最小2ジェットY値 < 0.02 ,

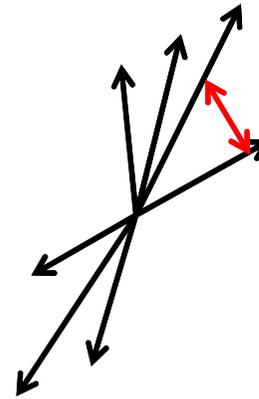
WW, ZZ除去:

- $0.2 < \text{最大2ジェットY値} < 0.8$

Y値とジェット

Y値

- 2粒子間の距離
- ジェット再構成に用いる



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

ジェット再構成

- 基準となる Y_0 値を用いて行う
- $Y < Y_0 \rightarrow$ 同じジェットとみなす

ジェット数と Y_0 値の関係

ジェット数	1	2	3	...
Y_0 値	大			小

最大2ジェットY値

最小2ジェットY値

レプトン過程での背景事象除去

Zボソン選択:

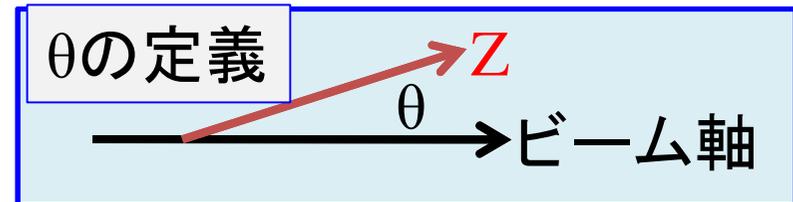
- $70 < e^+e^- \text{質量} < 110 \text{ GeV}$ (電子)
- $80 < \mu^+\mu^- \text{質量} < 100 \text{ GeV}$ (ミューオン)

t-チャンネル除去:

- $|\cos\theta| < 0.8$ (電子, ミューオン)

ヒッグス選択:

- $100 < 2j \text{質量} < 140 \text{ GeV}$ かつ $110 < e^+e^- \text{反跳質量} < 140 \text{ GeV}$ (電子)
- $100 < 2j \text{質量} < 140 \text{ GeV}$ かつ $115 < \mu^+\mu^- \text{反跳質量} < 140 \text{ GeV}$ (ミューオン)



ハドロン過程での背景事象除去

レプトンモード除去:

- 荷電トラック数 >4

qq除去:

- 最大4ジェットY値 >0.067 , スラスト <0.98
- 最大光子エネルギー $<20\text{GeV}$

t-チャンネル除去:

- $|\cos\theta_{\text{スラスト}}| < 0.98$

qqqq除去:

- $105^\circ < \text{ヒッグスジェット角度} < 165^\circ$, $70^\circ < \text{Zジェット角度} < 160^\circ$

ヒッグス粒子選択:

- $110 < \text{ヒッグスジェット質量} < 140\text{GeV}$

Zボソン選択:

- $80 < \text{Zジェット質量} < 110\text{GeV}$

背景事象除去による選択効率

ニュートリノ過程

- $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}cc$: 43.22%, $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}bb$: 44.48%
- 背景事象: 多くても2% ($\nu\nu qq$: 2.23%)

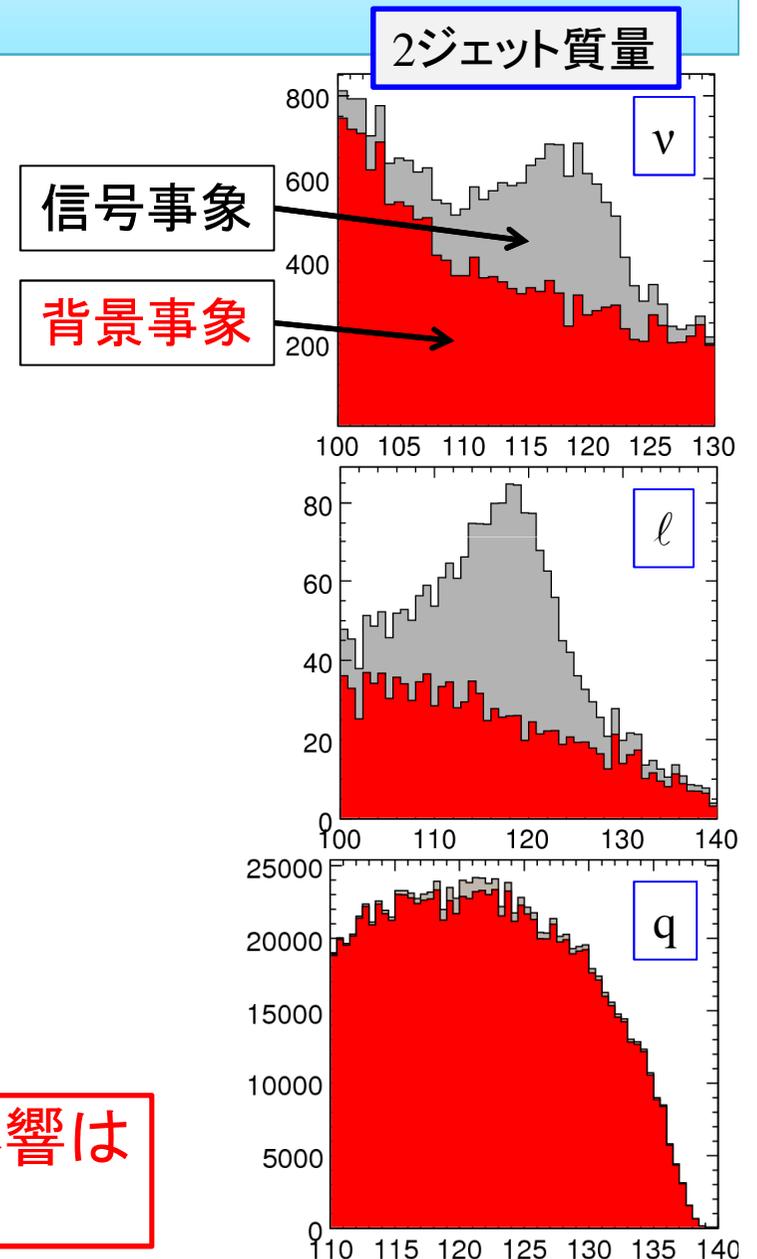
レプトン過程

- $e^+e^- \rightarrow eecc$: 48.62%, $e^+e^- \rightarrow ee bb$: 43.58%
- 背景事象: 1% 未満
- $e^+e^- \rightarrow \mu\mu cc$: 59.97%, $e^+e^- \rightarrow \mu\mu bb$: 54.46%
- 背景事象: 3% 未満

ハドロン過程

- $e^+e^- \rightarrow qqcc$: 52.86%, $e^+e^- \rightarrow qqbb$: 56.02%
- 背景事象: 3% 未満 ($qqqq$: 24.3% を除く)

* テンプレートフィットにより背景事象の影響は抑えられる





崩壞分岐比導出

崩壊分岐比導出

BR(H→cc)/BR(H→bb)の導出

- 以下の式により求める

$$\frac{BR(H \rightarrow cc)}{BR(H \rightarrow bb)} = \frac{r_{cc} / \epsilon_{cc}}{r_{bb} / \epsilon_{bb}}$$

- $\epsilon_{cc}, \epsilon_{bb}$: 背景事象除去による信号事象の選択効率

	ニュートリノ	電子	ミューオン	ハドロン
ϵ_{cc}	0.4322	0.4862	0.5997	0.5286
ϵ_{bb}	0.4448	0.4358	0.5446	0.5602

- r_{cc}, r_{bb} : 背景事象除去後の $e^+e^- \rightarrow Zcc(Zbb) / e^+e^- \rightarrow ZH$

→ r_{cc}, r_{bb} はテンプレートフィット(次ページで説明)により求める

テンプレートフィット

テンプレートフィット

- モンテカルロで高統計のサンプルを作成
- サンプルをそれぞれスケールしてデータに合うようにフィット

ヒッグスジェット対のクォークタイプ同定

- 各ジェットはフレーバー・タグによりb,c,bc-らしさがある
- ヒッグス粒子のジェット対全体のb,c,bc-らしさを計算する

$$X = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 \cdot X_2 + (1 - X_1)(1 - X_2)}$$

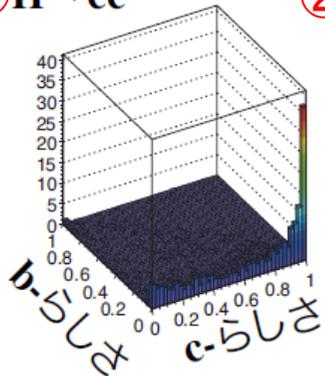
– X_i : i 番目のジェットのb,c,bc-らしさ

テンプレートサンプル

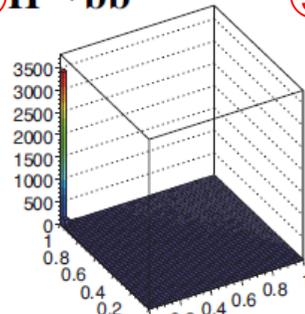
テンプレートサンプル

- 3次元ヒストグラム(ヒッグス粒子のb,c,bc-らしさ)
- サンプル: 1. $H \rightarrow cc$
 2. $H \rightarrow bb$
 3. $H \rightarrow$ その他
 4. SM背景事象
- スケール因子: $r_{cc}, r_{bb}, r_{oth}, r_{bkg}$

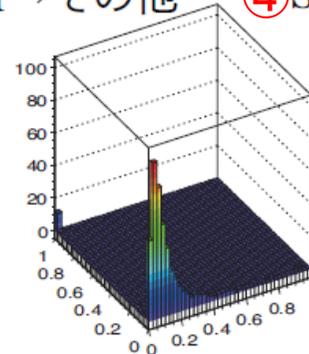
① $H \rightarrow c\bar{c}$



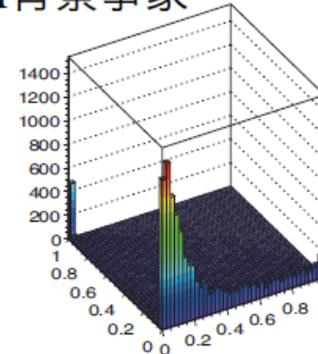
② $H \rightarrow b\bar{b}$



③ $H \rightarrow$ その他



④ SM背景事象

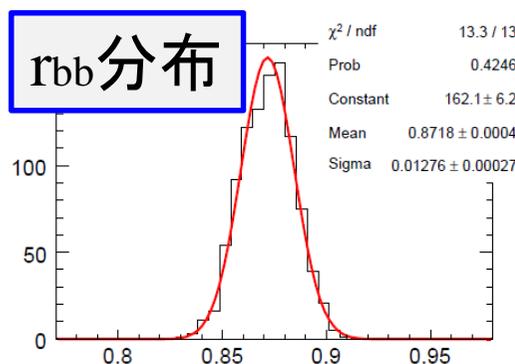
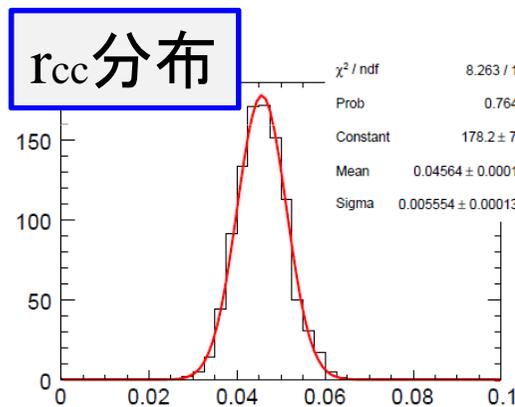


フィット結果

試行実験

- テンプレートサンプル和の各ビンをポアソン分布でふってデータ作成
- テンプレートフィット

→1000回の試行実験で得られた r_{cc}, r_{bb} 分布をガウス分布でフィット



	r_{cc} (真値)	r_{bb} (真値)
ニュートリノ	0.0456 ± 0.0056 (0.046)	0.872 ± 0.013 (0.87)
電子	0.0449 ± 0.0144 (0.044)	0.763 ± 0.022 (0.76)
ミューオン	0.0443 ± 0.0136 (0.044)	0.765 ± 0.021 (0.77)
ハドロン	0.0421 ± 0.005 (0.042)	0.767 ± 0.013 (0.77)

→フィット結果は真値と一致する(各測定誤差も一致した)

最終結果

崩壊分岐比導出

- 得られた r_{cc}, r_{bb} から $BR(H \rightarrow cc)/BR(H \rightarrow bb)$ を求める

	$BR(H \rightarrow cc)/BR(H \rightarrow bb)$	精度
ニュートリノ	0.0539 ± 0.0066	12.26%
電子	0.0527 ± 0.0170	32.19%
ミューオン	0.0526 ± 0.0163	30.91%
ハドロン	0.0581 ± 0.0068	11.71%
結果	0.0555 ± 0.0044	7.92%

- ニュートリノ過程とハドロン過程はレプトン過程より精度が良い

まとめ

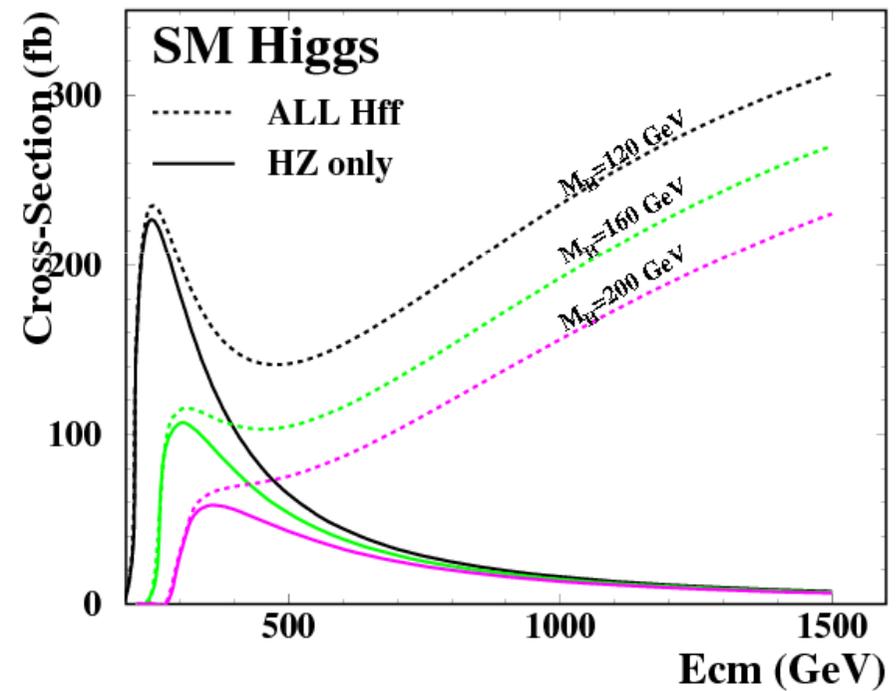
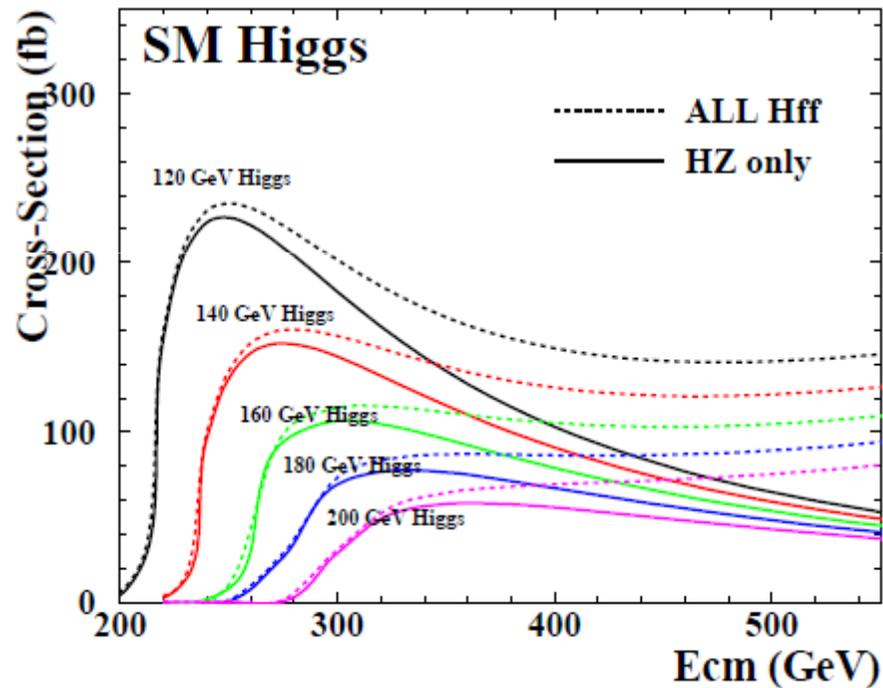
- 質量獲得のメカニズム解明のためにヒッグス機構の検証は重要
- 検証にはヒッグス粒子の崩壊分岐比の測定が不可欠
- ILCからヒッグス粒子の精密測定が可能になる
- シミュレーションによりILD測定器におけるヒッグス粒子の崩壊分岐比の測定を行った
- **重心系エネルギー: 250 GeV、ルミノシティ: 250 fb⁻¹では約8%の精度でBR(H→cc)/BR(H→bb)の測定が可能**

	BR(H→cc)/BR(H→bb)	精度
ニュートリノ	0.0539 ± 0.0066	12.26%
電子	0.0527 ± 0.0170	32.19%
ミューオン	0.0526 ± 0.0163	30.91%
ハドロン	0.0581 ± 0.0068	11.71%
結果	0.0555 ± 0.0044	7.92%



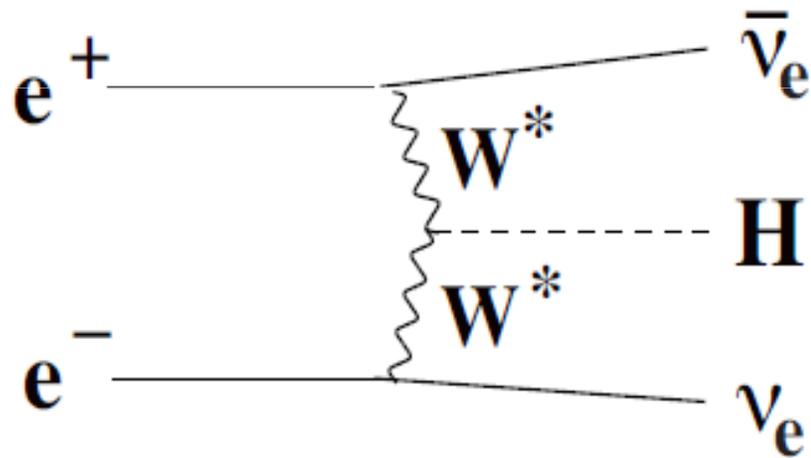
バックアップ

ヒッグス生成断面積

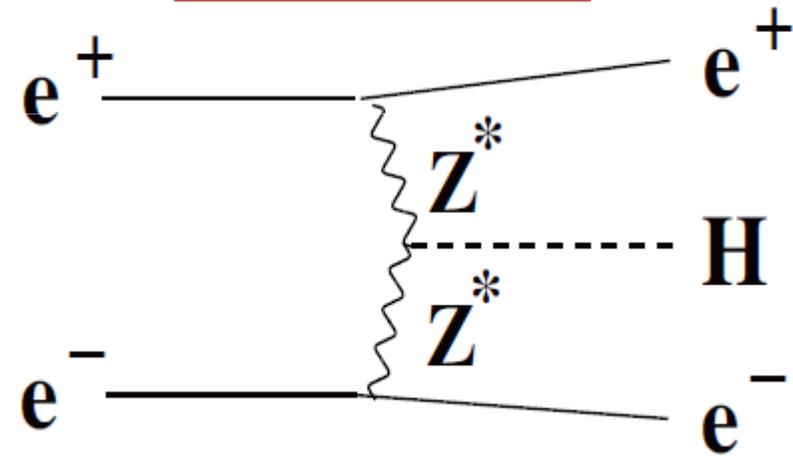


boson-fusion

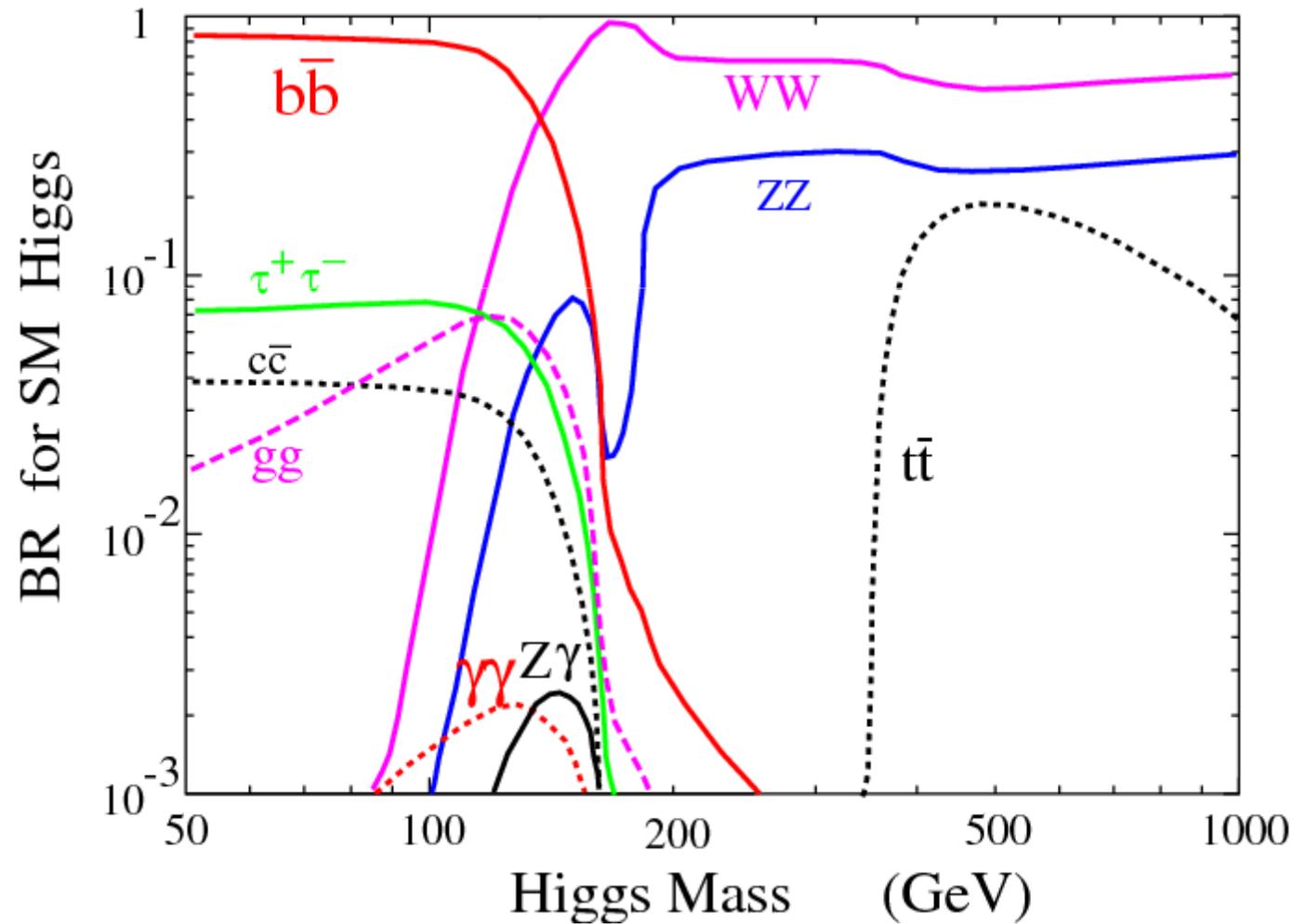
Wboson-fusion



Zboson-fusion



ヒッグス粒子崩壊分岐比





ニュートリノ過程

質量欠損カット

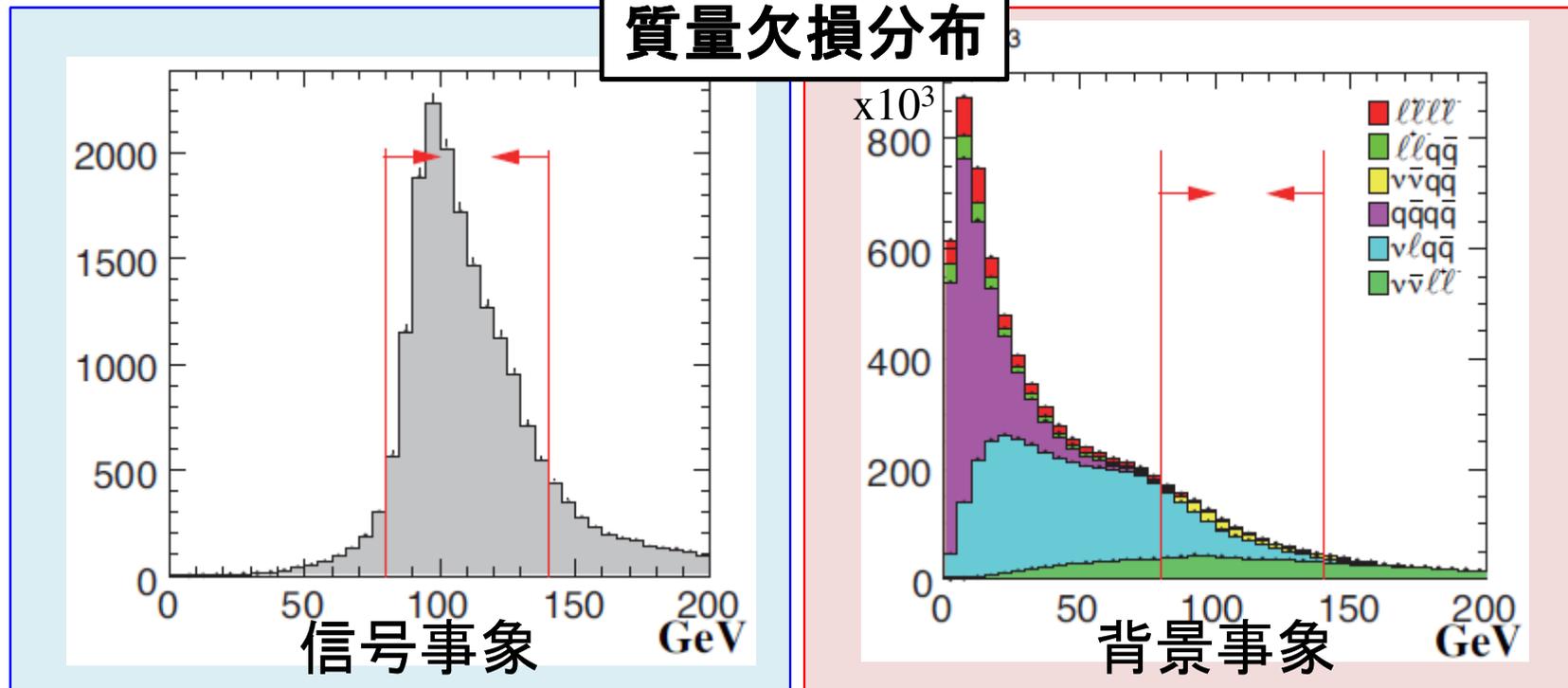
質量欠損

- 信号事象はZがニュートリノペアに崩壊
→ $M_Z(91.2\text{GeV})$ 付近にピークを持つ
- **80 < 質量欠損 < 140 GeV を選択**
→ $llll, llqq, qqqq$ が除去された

質量欠損導出

$$M_{miss} = \sqrt{(E_{CM} - E_{jj})^2 - \vec{P}_{jj}^2}$$

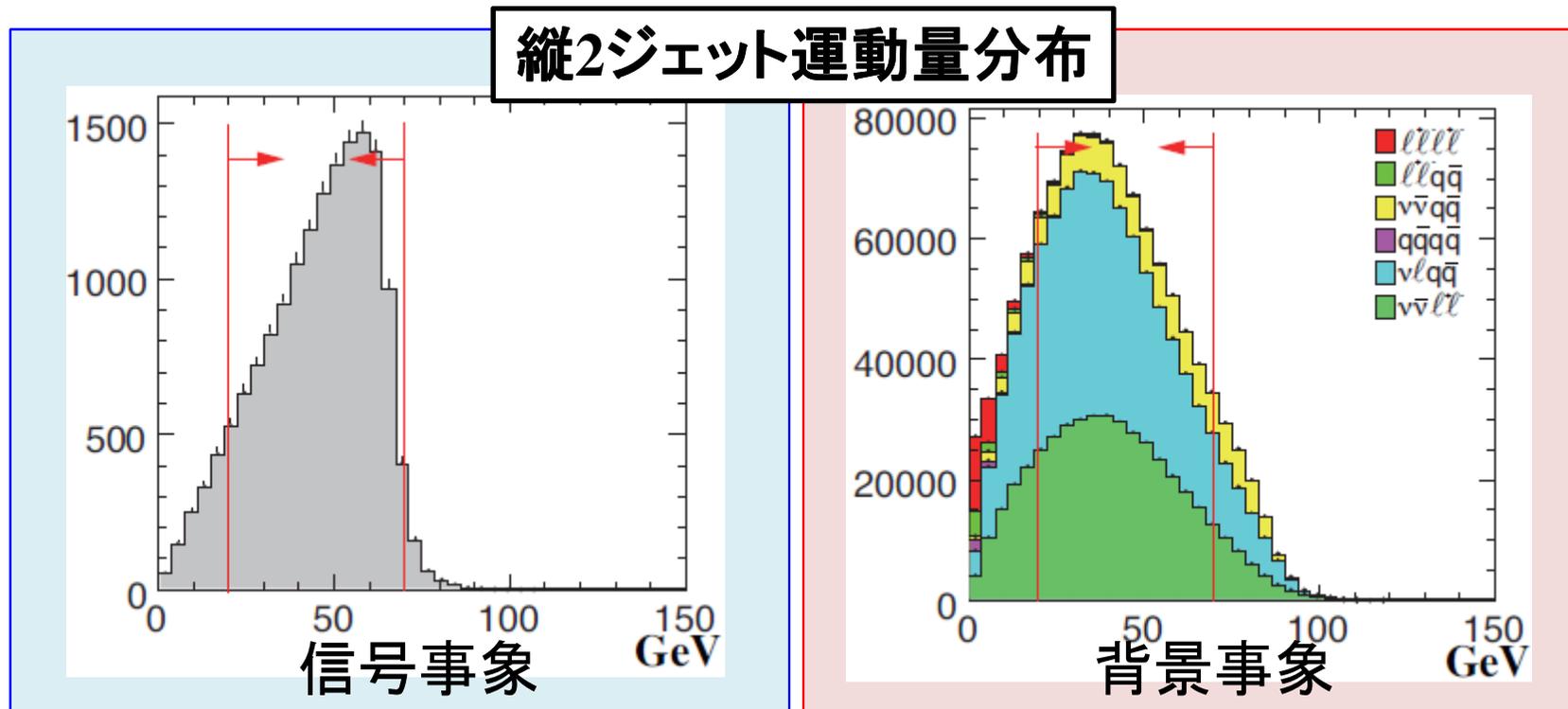
質量欠損分布



縦2ジェット運動量カット

縦2ジェット運動量

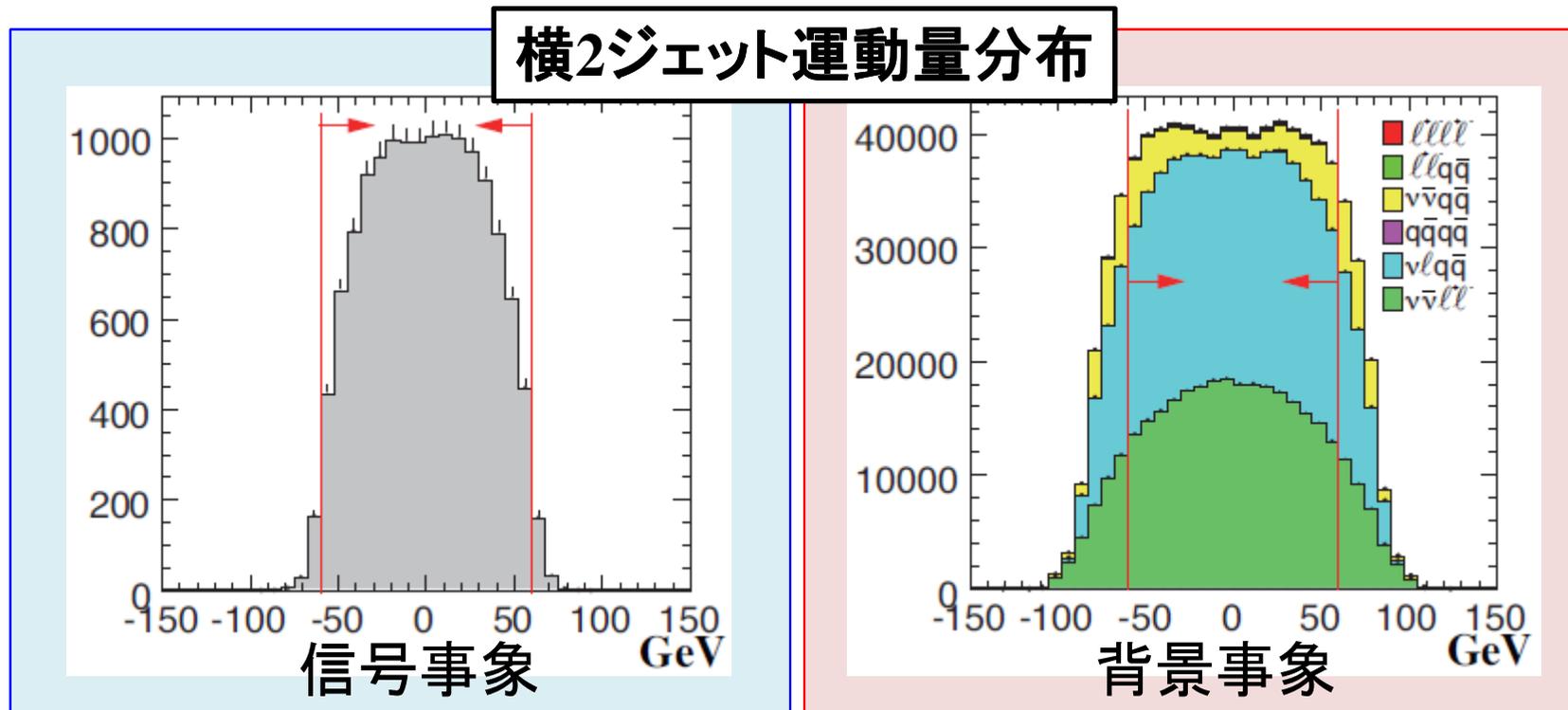
- ヒッグス粒子のスピ $n=0$ → 等方的に分布(ややビーム軸に垂直に多)
- 実験室系での4元運動量保存則から $|P_{H1}| \sim 66\text{ GeV}$
→ 66 GeV にピーク、左になだらかな尾を持つ分布
- **$20 < \text{縦2ジェット運動量} < 70\text{ GeV}$ を選択**



横2ジェット運動量カット

横2ジェット運動量

- ヒッグス粒子のスピ $n=0$ → 等方的に分布(ややビーム軸に垂直に多)
- 実験室系での4元運動量保存則から $|P_{H1}| \sim 66\text{GeV}$
→ 0GeV に多く分布、 $\pm 66\text{GeV}$ まで広がった分布
- **$-60 < \text{横2ジェット運動量} < 60\text{GeV}$ を選択**

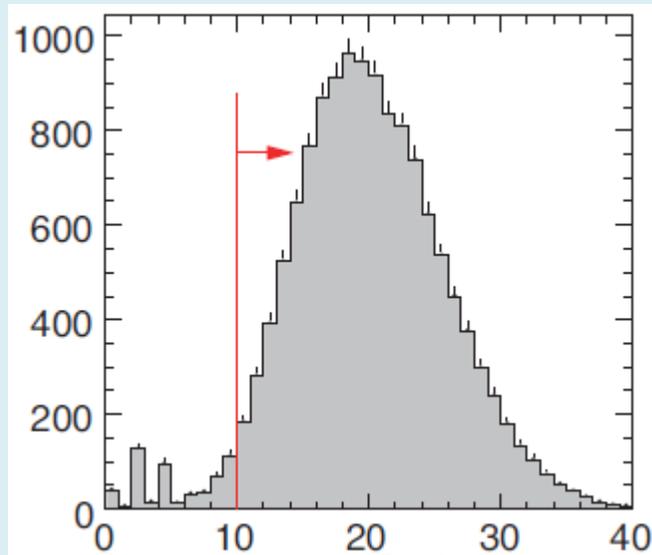


荷電トラック数カット

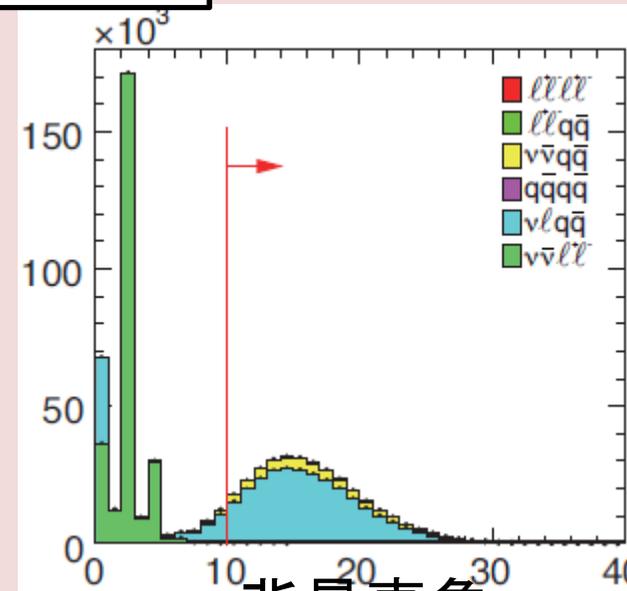
荷電トラック数

- $WW \rightarrow \nu\nu ll$ の除去
- 荷電トラック数=2,4のピークは τ を含む事象
- 荷電トラック数 >10 を選択

荷電トラック数分布



信号事象



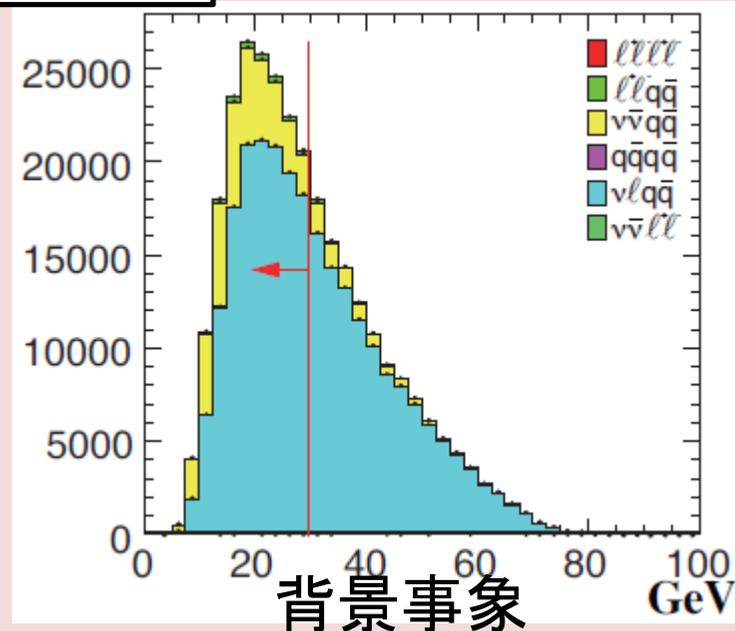
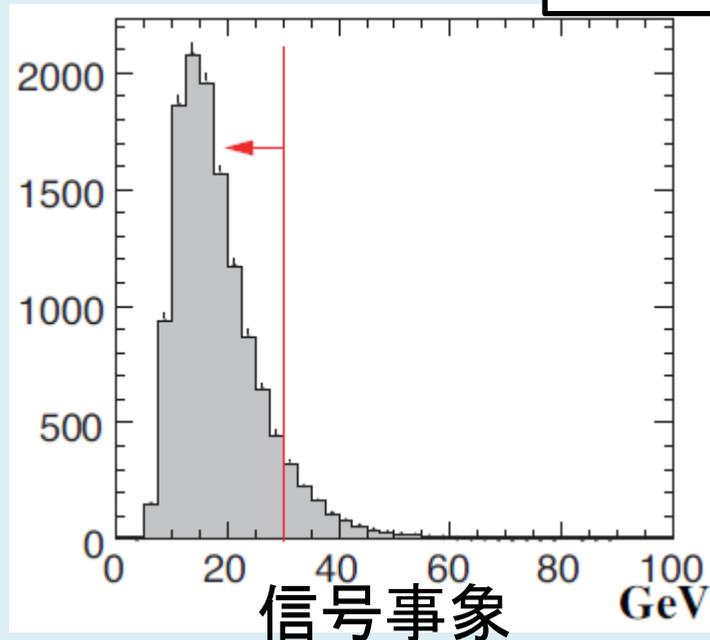
背景事象

最大運動量カット

最大運動量

- $WW \rightarrow \nu\tau qq$ 事象の除去
- τ は再構成が難しく崩壊後の粒子が再構成される
 $\rightarrow \tau$ が崩壊した高い運動量を持つ粒子が再構成される
- **最大運動量 $< 30 \text{ GeV}$ を選択**

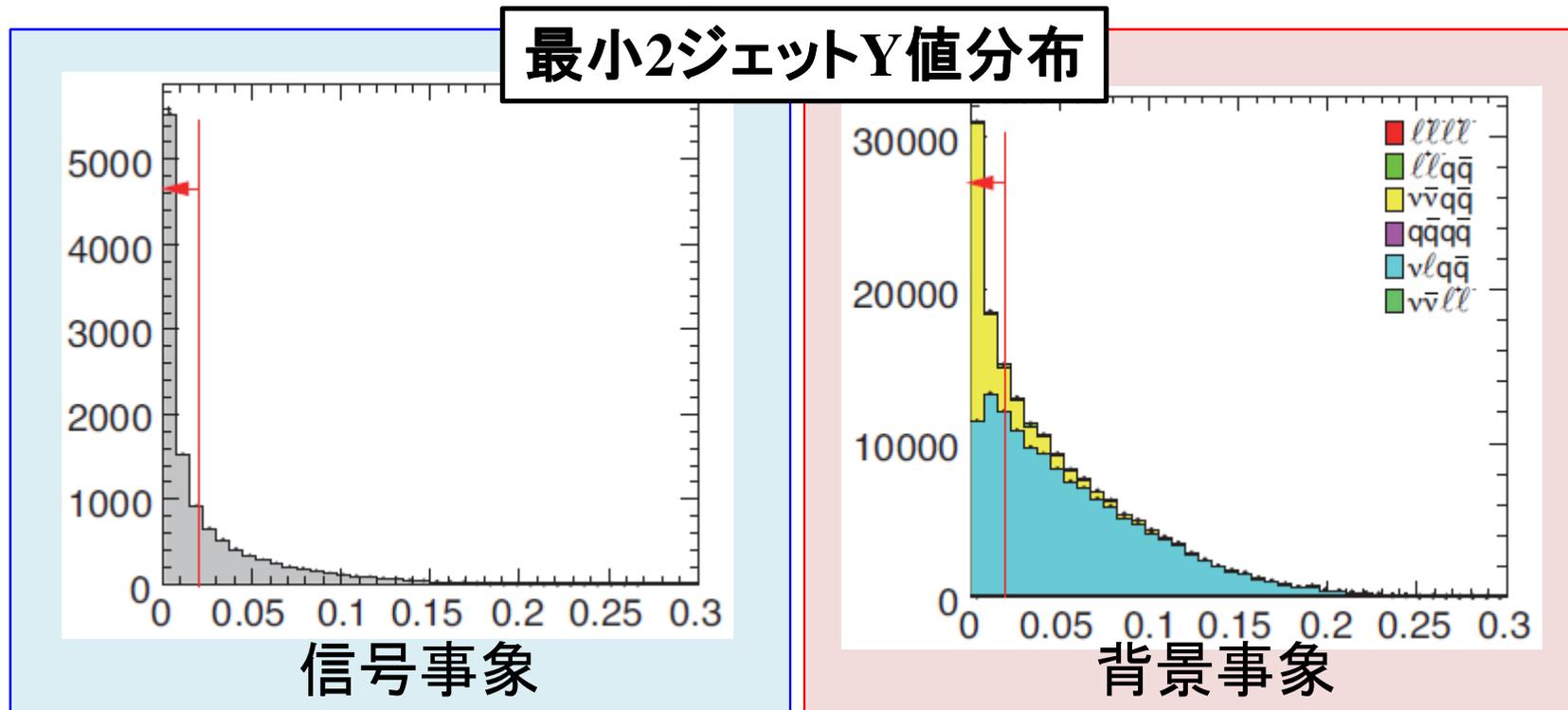
最大運動量分布



最小2ジェットY値カット

最小2ジェットY値

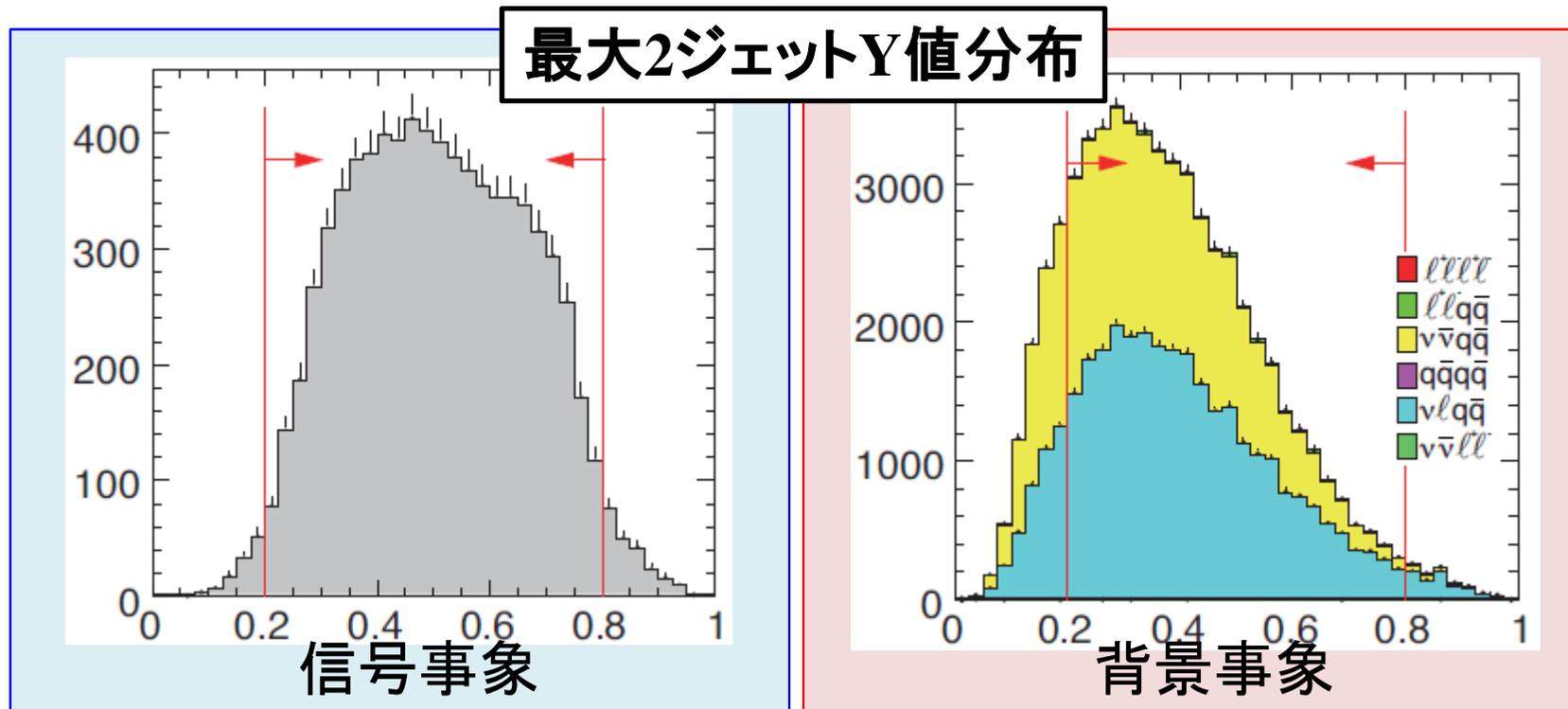
- $WW \rightarrow \nu\tau qq$ 事象の除去
- τ は再構成が難しく3ジェットの事象のように見える
→ 最小2ジェットY値が大きくなる
- 最小2ジェットY値 < 0.02 を選択



最大2ジェットY値カット

最大2ジェットY値

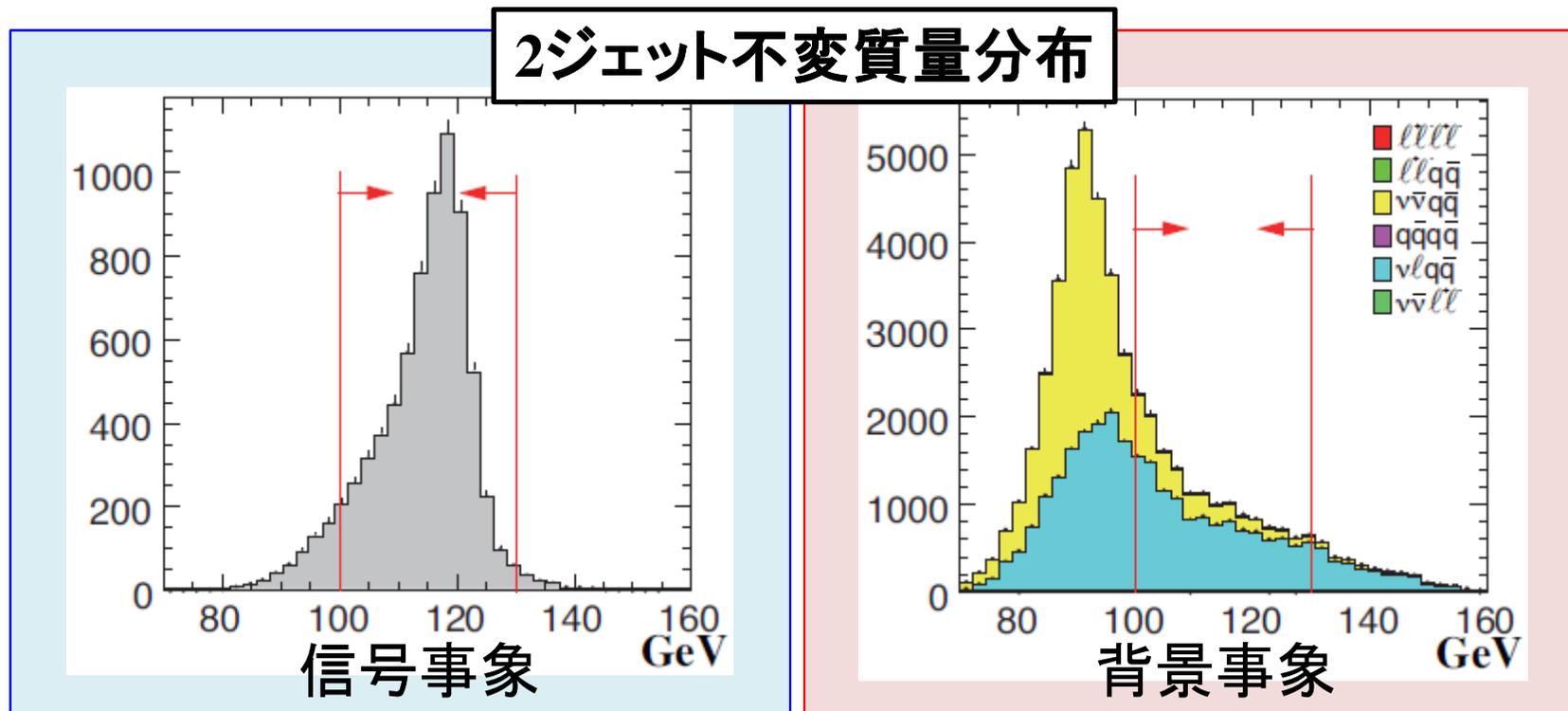
- WW,ZZ \rightarrow vvqq事象除去
- $M_H > M_W, M_Z$ より $\beta_H < \beta_W, \beta_Z \rightarrow$ ジェットの幅が小さい
 \rightarrow 最大2ジェットY値が小さくなる
- **0.2 < 最大2ジェットY値 < 0.8**を選択



信号事象領域選択

信号事象領域

- ヒッグス粒子選択
- $WW, ZZ \rightarrow \nu\nu qq$ 事象除去
- $100 < 2\text{ジェット不変質量} < 130 \text{ GeV}$ を選択



ニュートリノ過程でのイベント数

	カットなし	質量欠損	縦運動量	横運動量	荷電トラック数	最大運動量	最小2ジェットY値	最大2ジェットY値	信号事象領域	選択効率
ZH→ $\nu\nu cc$	707	643	574	561	533	466	333	318	306	43.22%
ZH→ $\nu\nu bb$	13062	11662	10408	10136	9852	9063	6717	6434	5810	44.48%
ZH→ $\nu\nu H$	19360	15637	13900	13501	12768	11674	7711	7384	6672	34.46%
$\nu_e qq$	1460797	80931	67135	61437	25966	5088	961	851	448	0.03%
$\nu_\mu qq$	1327332	92360	75143	61715	52355	10540	2747	2288	888	0.07%
$\nu_\tau qq$	1326061	386690	268190	200443	176370	123045	29135	24979	10131	0.76%
$\nu\nu qq$	149979	124843	85774	49745	43229	35942	26713	21653	3345	2.23%
other	6322758	491711	337822	266326	2677	2001	370	335	226	0.00%

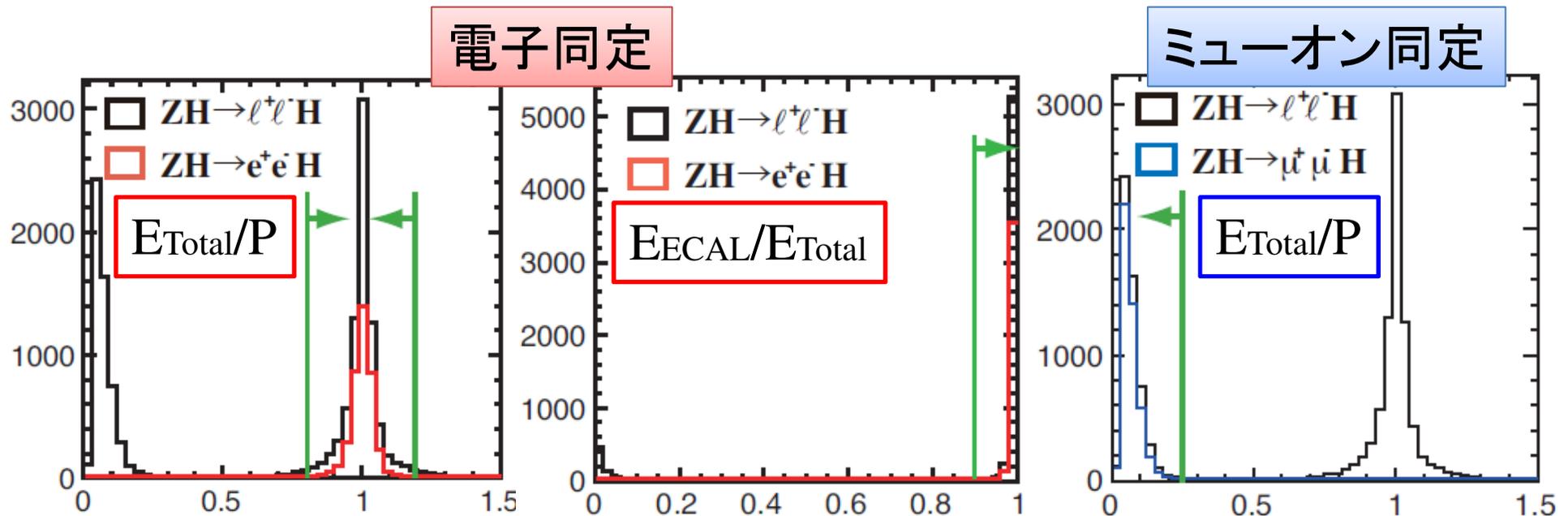


レプトン過程

CALカット(レプトン同定)

主に電子とミュオンを区別

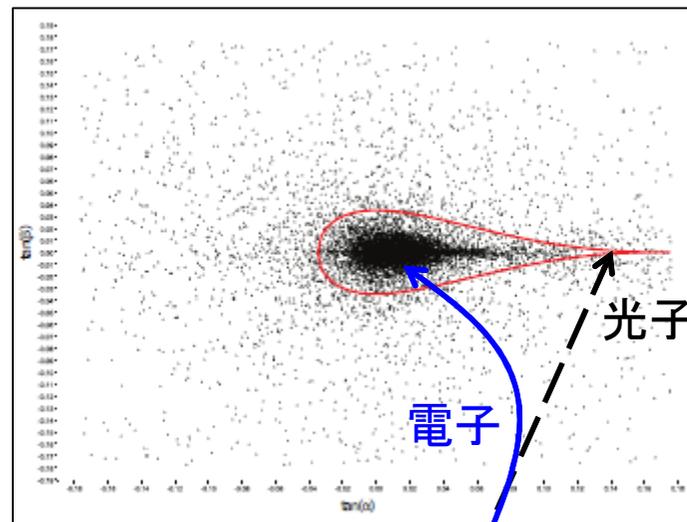
- 数GeVレプトンではE~P
- 電子: ECALでほとんどのエネルギーを落とす(E~P, $E_{ECAL} \sim E_{Total}$)
- ミュオン: CALでほとんどエネルギーを落とさない($E < P$)
- **電子同定**: $0.8 < E_{Total}/P < 1.2$ かつ $E_{ECAL}/E_{Total} > 0.9$
- **ミュオン同定**: $E_{Total}/P < 0.25$ (* $E_{Total} = E_{ECAL} + E_{HCAL}$)



bremsstrahlung γ

bremsstrahlung γ

- 電子(陽電子)は制動放射により光子を放出する → 要補正
- 光子同定条件
 - 電子の方向から2度以内の中性粒子
 - 電子が曲がる方向の中性粒子

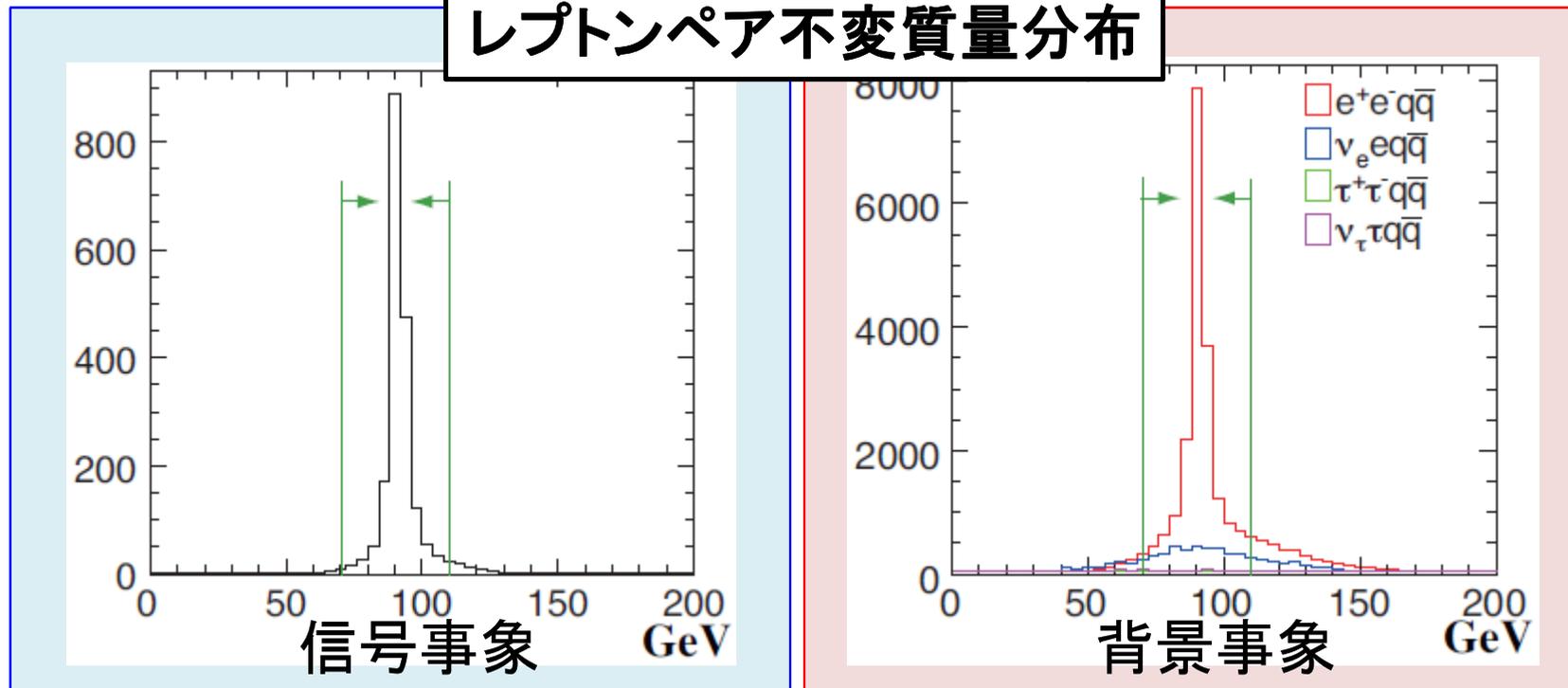


Z質量カット

Z質量

- レプトンペアから質量を計算
- 信号事象はZボソンの質量と等しい
- $70 < \text{レプトンペア不変質量} < 110 \text{ GeV}$ (電子)
- $80 < \text{レプトンペア不変質量} < 100 \text{ GeV}$ (ミューオン)

レプトンペア不変質量分布

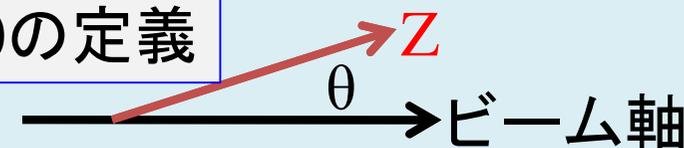


Z角度カット

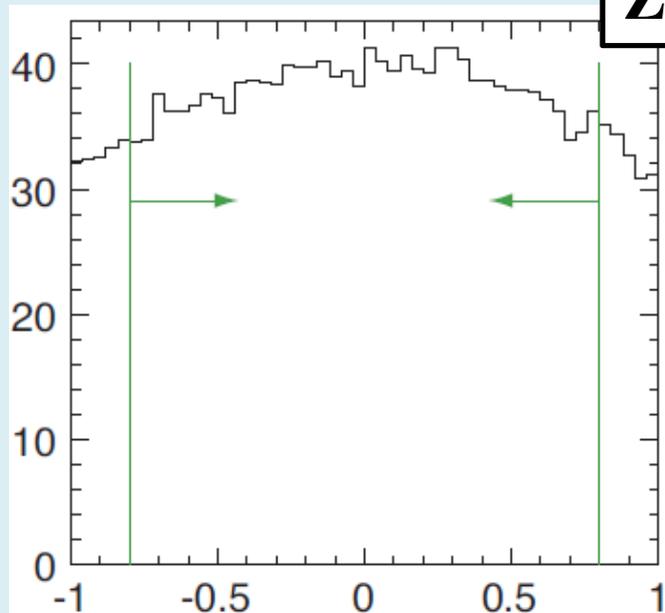
Z角度

- レプトンペアとビーム軸との角度
- ヒッグス粒子のスピ $n=0$ \rightarrow 信号事象はフラットに分布
- 背景事象は主に t -チャンネル $\rightarrow \cos\theta = \pm 1$ にピークを持つ
- $|\cos\theta| < 0.8$ を選択

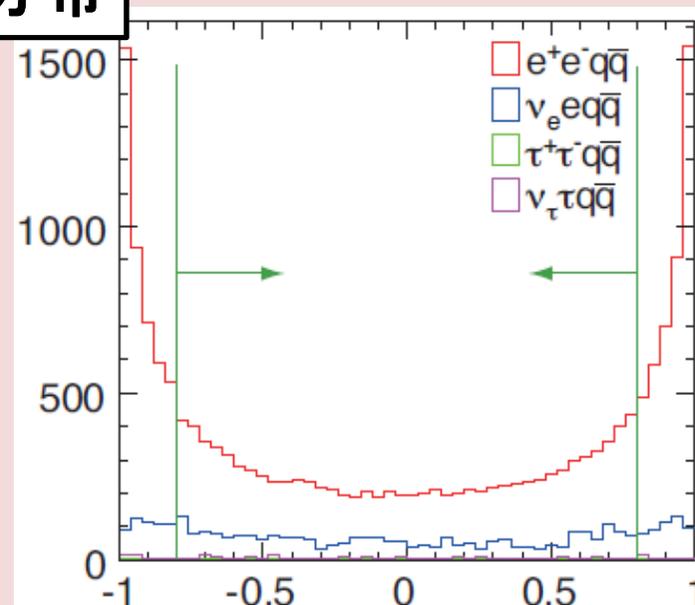
θ の定義



Z角度分布



信号事象



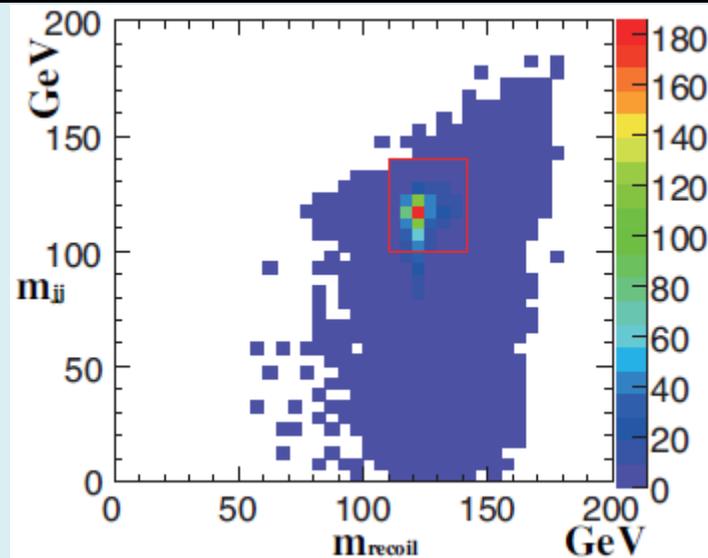
背景事象

信号事象領域選択

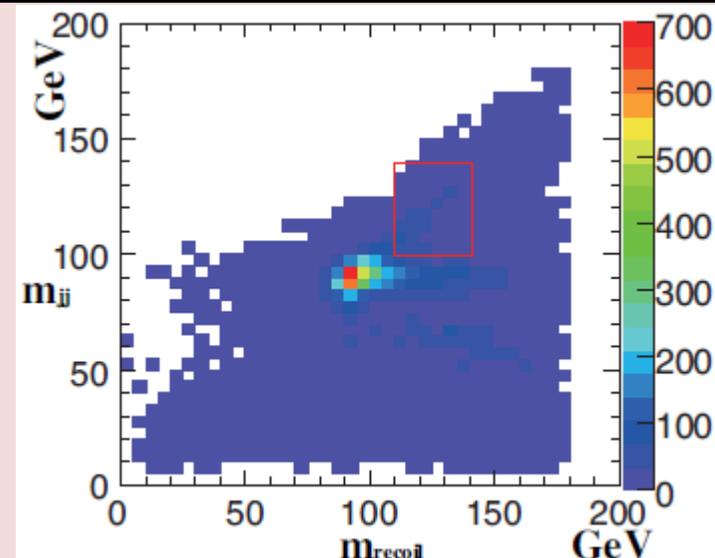
信号事象領域

- $ZZ \rightarrow llqq$ 除去
- $100 < M_{jj} < 140 \text{ GeV}$ かつ $110 < M_{\text{recoil}} < 140 \text{ GeV}$ (電子)
- $100 < M_{jj} < 140 \text{ GeV}$ かつ $115 < M_{\text{recoil}} < 140 \text{ GeV}$ (ミューオン)
- M_{jj} : 2ジェット不変質量、 M_{recoil} : 2レプトン反跳質量

2ジェット質量と2レプトン反跳質量の2次元ヒストグラム(電子チャンネル)



信号事象



背景事象

レプトン過程でのイベント数

電子	カットなし	電子同定	Z質量	Z角度	信号事象領域	選択効率
ZH→e ⁺ e ⁻ cc	100	70	67	55	48	48.62%
ZH→e ⁺ e ⁻ bb	1902	1322	1269	1044	829	43.58%
ZH→e ⁺ e ⁻ H	2777	1930	1854	1526	1085	39.07%
e ⁺ e ⁻ qq	314700	23719	18946	10418	1115	0.35%
ν _e e ⁺ qq	1460797	6248	3564	2499	26	0.00%
τ ⁺ τ ⁻ qq	41694	70	15	11	0	0.00%
ν _τ τ ⁺ qq	1326061	733	318	231	0	0.00%

ミューオン	カットなし	ミューオン同定	Z質量	Z角度	信号事象領域	選択効率
ZH→μ ⁺ μ ⁻ cc	92	80	75	62	55	59.97%
ZH→μ ⁺ μ ⁻ bb	1770	1549	1436	1180	964	54.46%
ZH→μ ⁺ μ ⁻ H	2601	2273	2113	1735	1260	48.46%
μ ⁺ μ ⁻ qq	41929	18239	16109	9933	953	2.27%
ν _μ μ ⁺ qq	1327332	1818	663	436	7	0.00%
τ ⁺ τ ⁻ qq	41694	74	3	2	0	0.00%
ν _τ τ ⁺ qq	1326061	194	27	17	0	0.00%



ハドロン過程

ハドロンジェット再構成

ハドロンジェット分割

- ヒッグス候補の2ジェットとZ候補の2ジェットに分割する
- $d=(M_{ij}-M_H)^2+(M_{kl}-M_Z)^2$

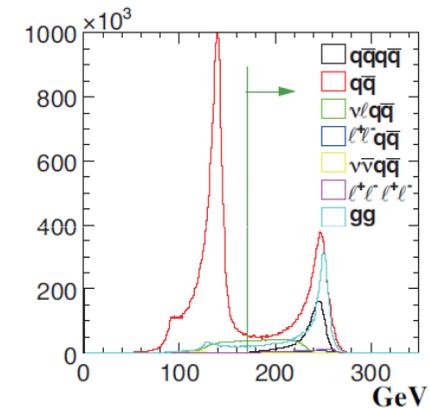
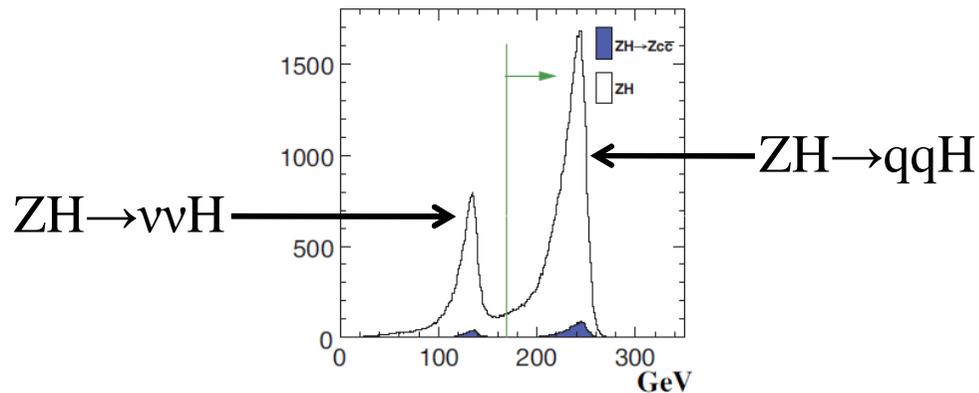
kinematic fit

- 以下の条件を満たすようにkinematic fitする
 - $\sum_i P_i=0$
 - $\sum E=250\text{GeV}$
 - $M_{ij}-M_{kl}=M_H-M_Z$

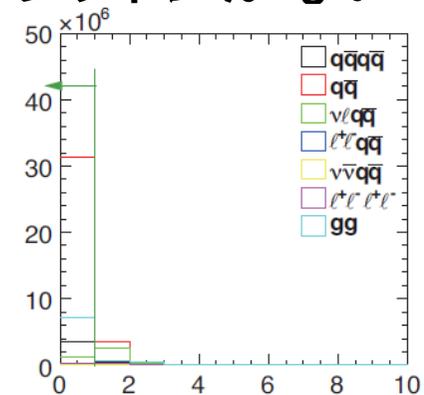
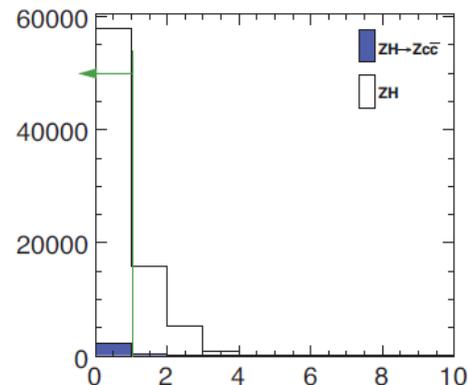
ハドロン過程選択

ハドロン過程選択

- $e^+e^- \rightarrow ZH$ から $Z \rightarrow qq$ 事象を選択する
- **$ZH \rightarrow \nu\nu H$ 除去**: $E_{\text{vis}} > 170 \text{ GeV}$ 以上を選択



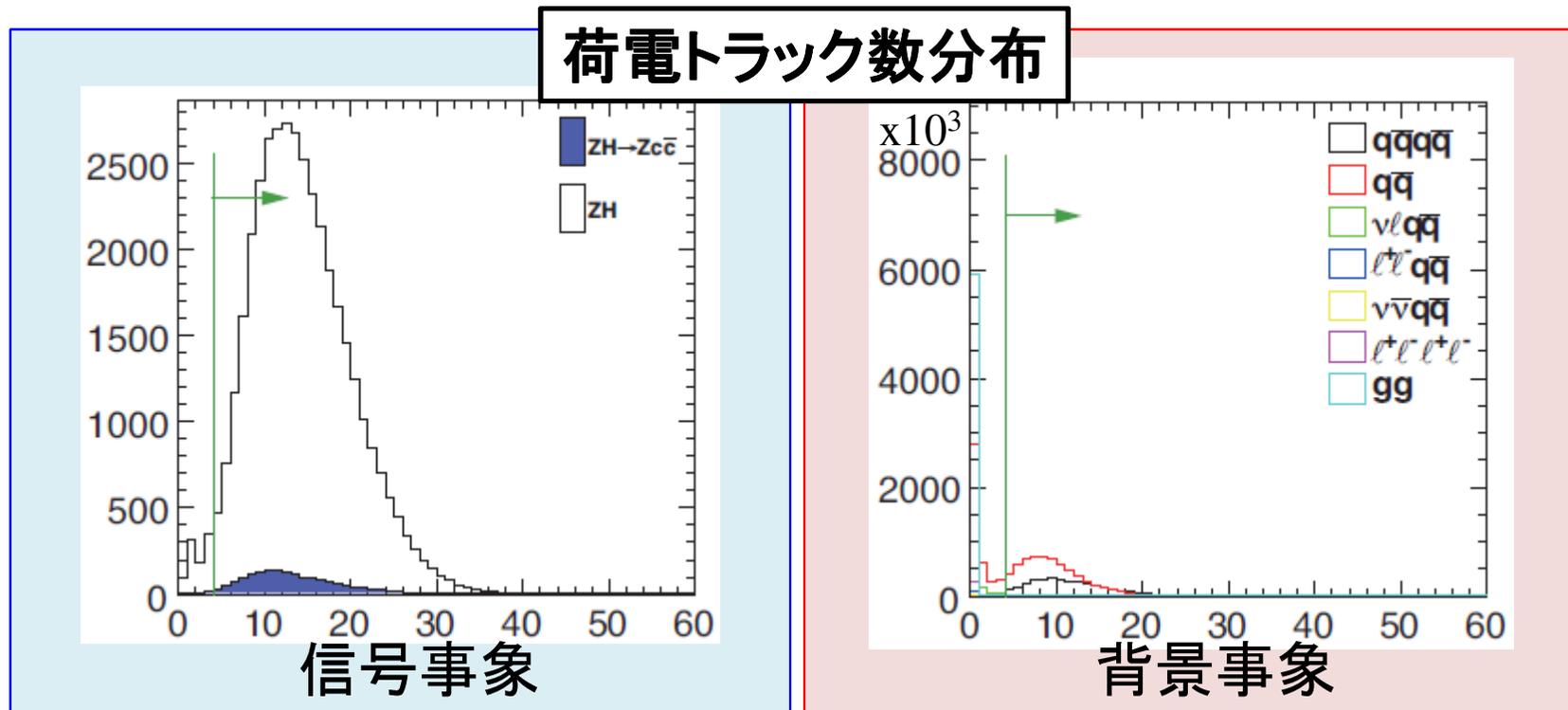
- **$ZH \rightarrow \ell\ell H$ 除去**: 15 GeV 以上の運動量を持つレプトンがない



荷電トラック数カット

荷電トラック数

- レプトンモード除去
- 荷電トラック数 >4 を選択

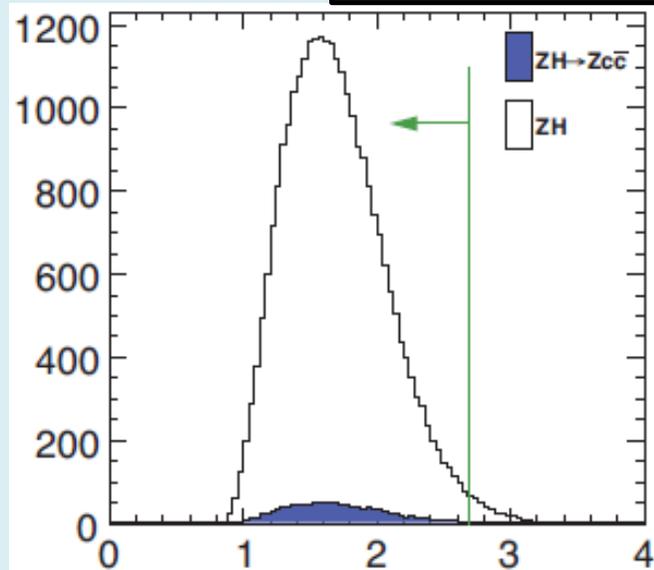


最大4ジェットY値カット

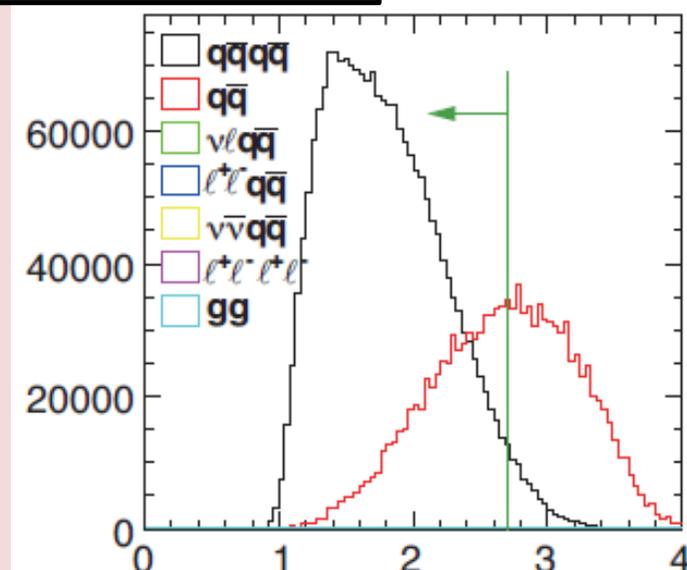
最大4ジェットY値

- 3ジェットと4ジェット再構成のY値の閾値
- qqは信号事象(qqqq)よりも3ジェットのY値が小さい
 – $-\text{Log}Y$ では大きいところに分布
- $-\text{Log}(\text{最大4ジェットY値}) < 2.7$ を選択

最大4ジェットY値分布($-\text{Log}Y$)



信号事象



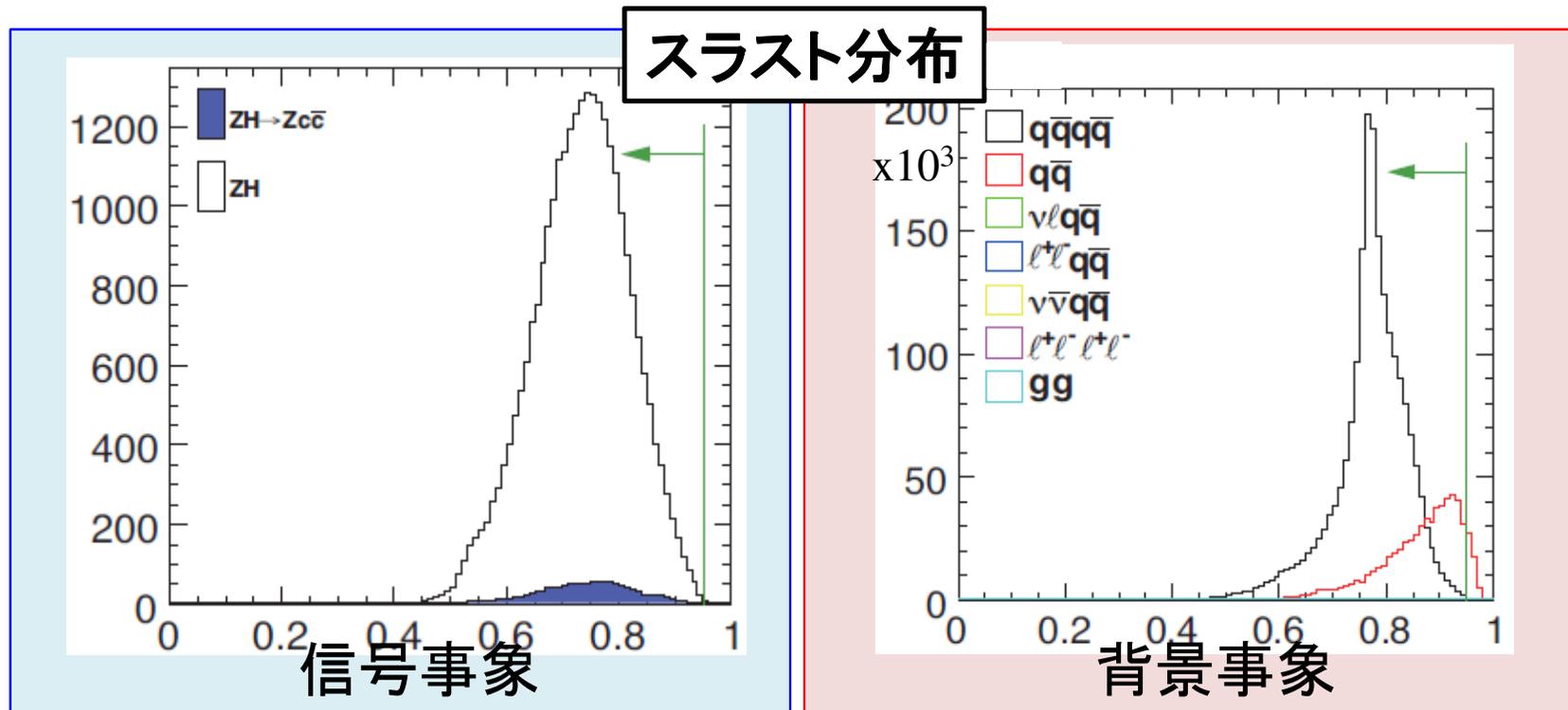
背景事象

スラストカット

スラスト

- qq事象除去
- ジェットが逆方向に出る
→ ジェット方向にnを取るとTが1に近くなる
- **スラスト<0.98を選択**

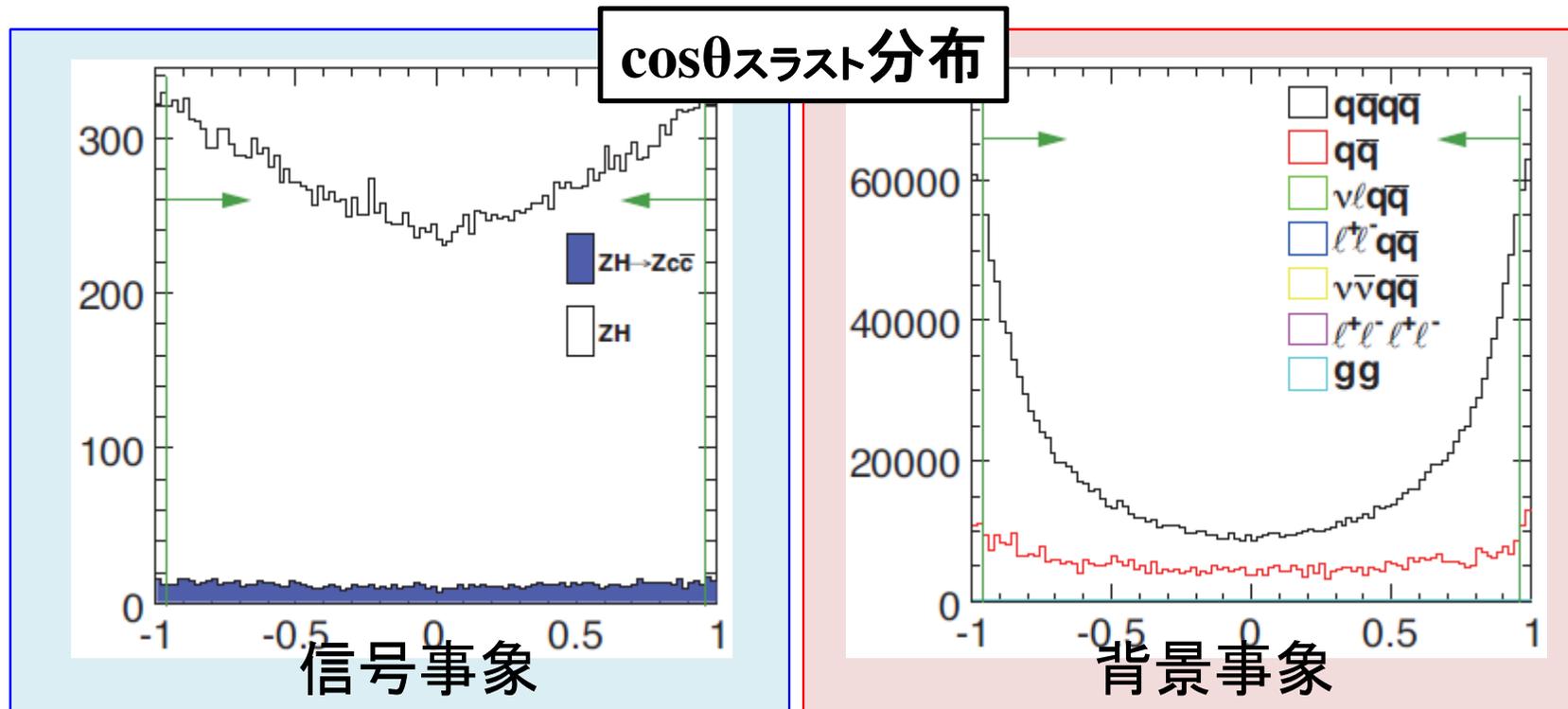
$$T \equiv \max_{\vec{n}} \frac{\sum_i |\vec{P}_i \cdot \vec{n}|}{\sum_i |\vec{P}_i|}$$



cosθスラストカット

cosθスラスト

- スラスト方向とビーム軸との角度
- t-チャンネル除去
- t-チャンネルは前方方向に出やすい → スラストも前方方向
- $-0.98 < \cos\theta_{\text{スラスト}} < 0.98$ を選択

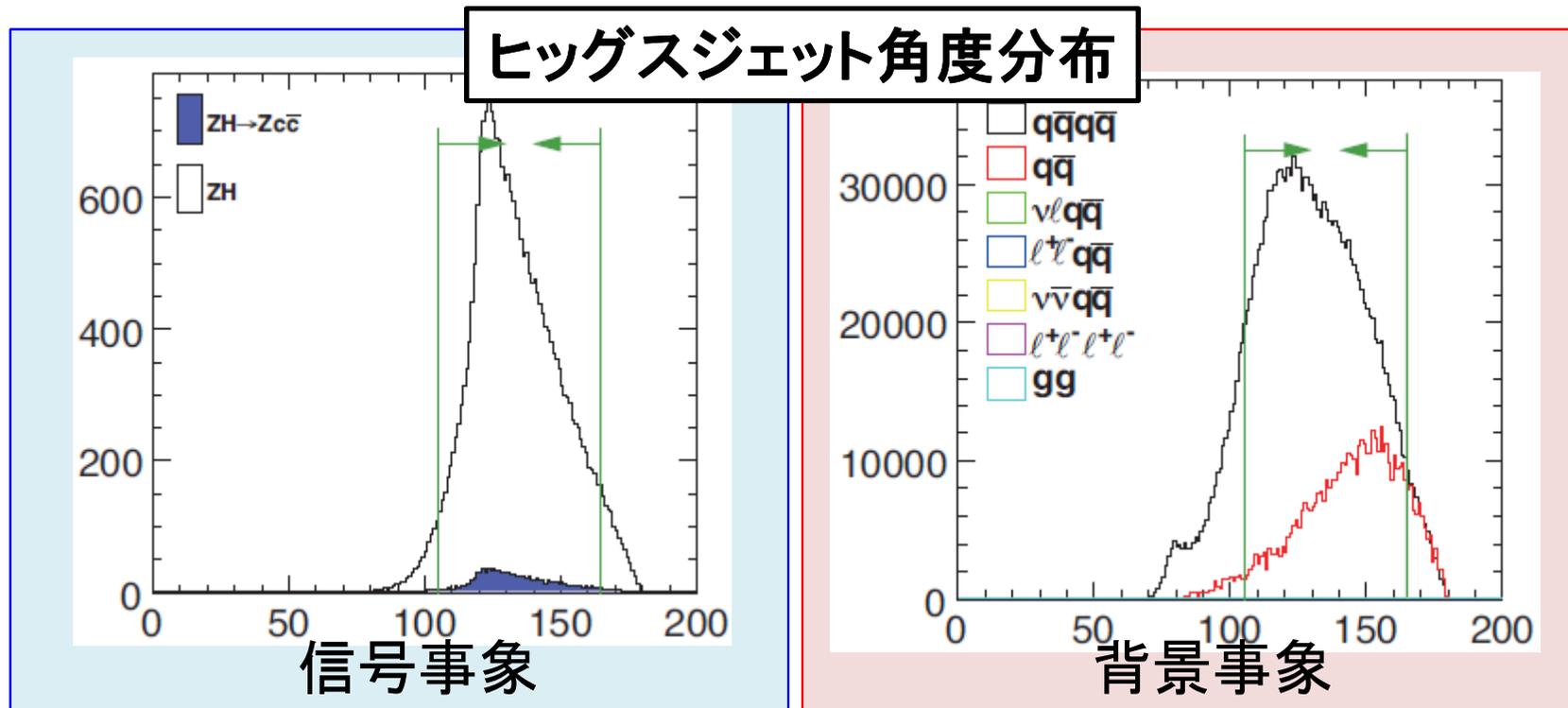




ヒッグスジェット角度カット

ヒッグスジェット角度(θ_H)

- ヒッグス粒子のジェット対間の角度
- $M_H > M_W, M_Z$ より $\beta_H < \beta_W, \beta_Z \rightarrow qq\bar{q}\bar{q}$ 事象はジェットの角度が小さい
- $105^\circ < \theta_H < 165^\circ$ を選択

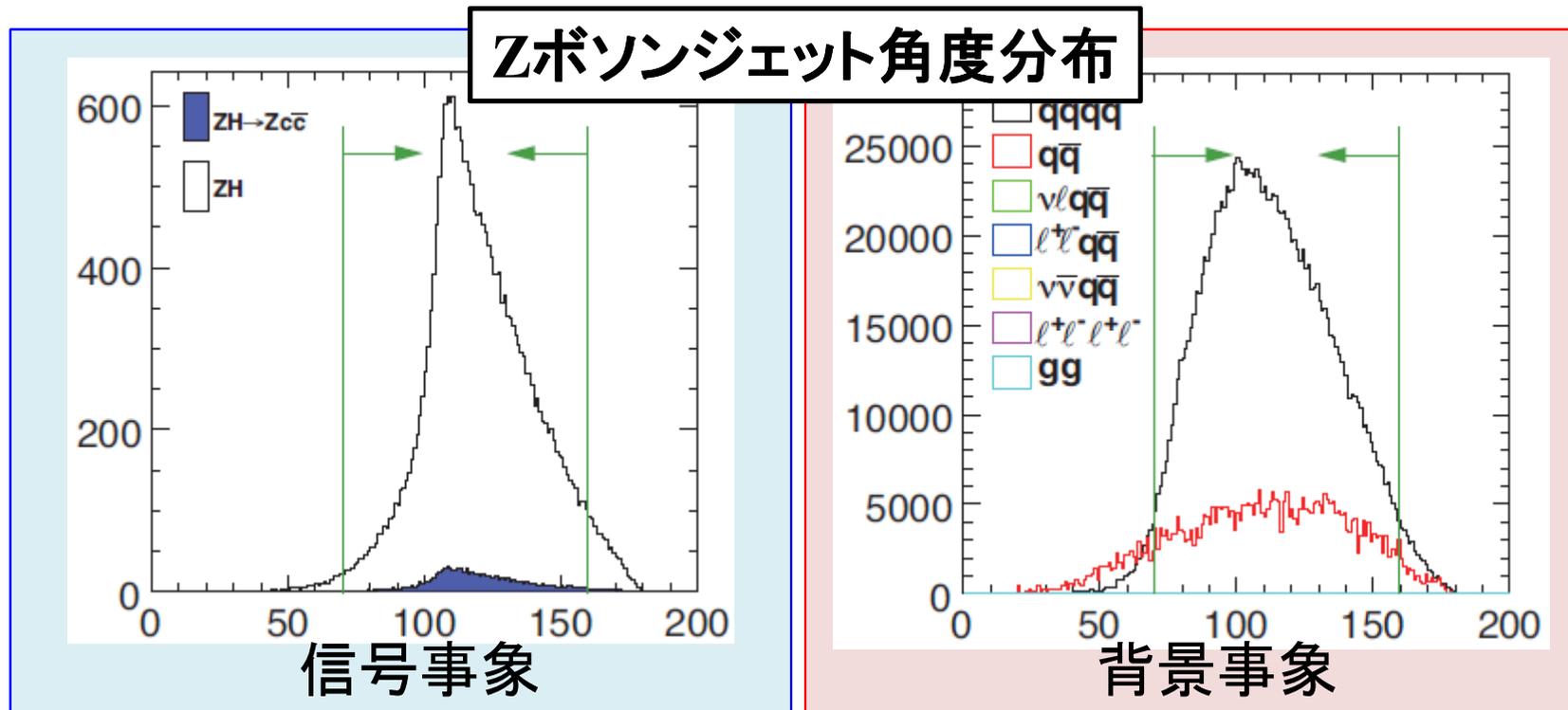




Zボソンジェット角度カット

Zボソンジェット角度(θ_z)

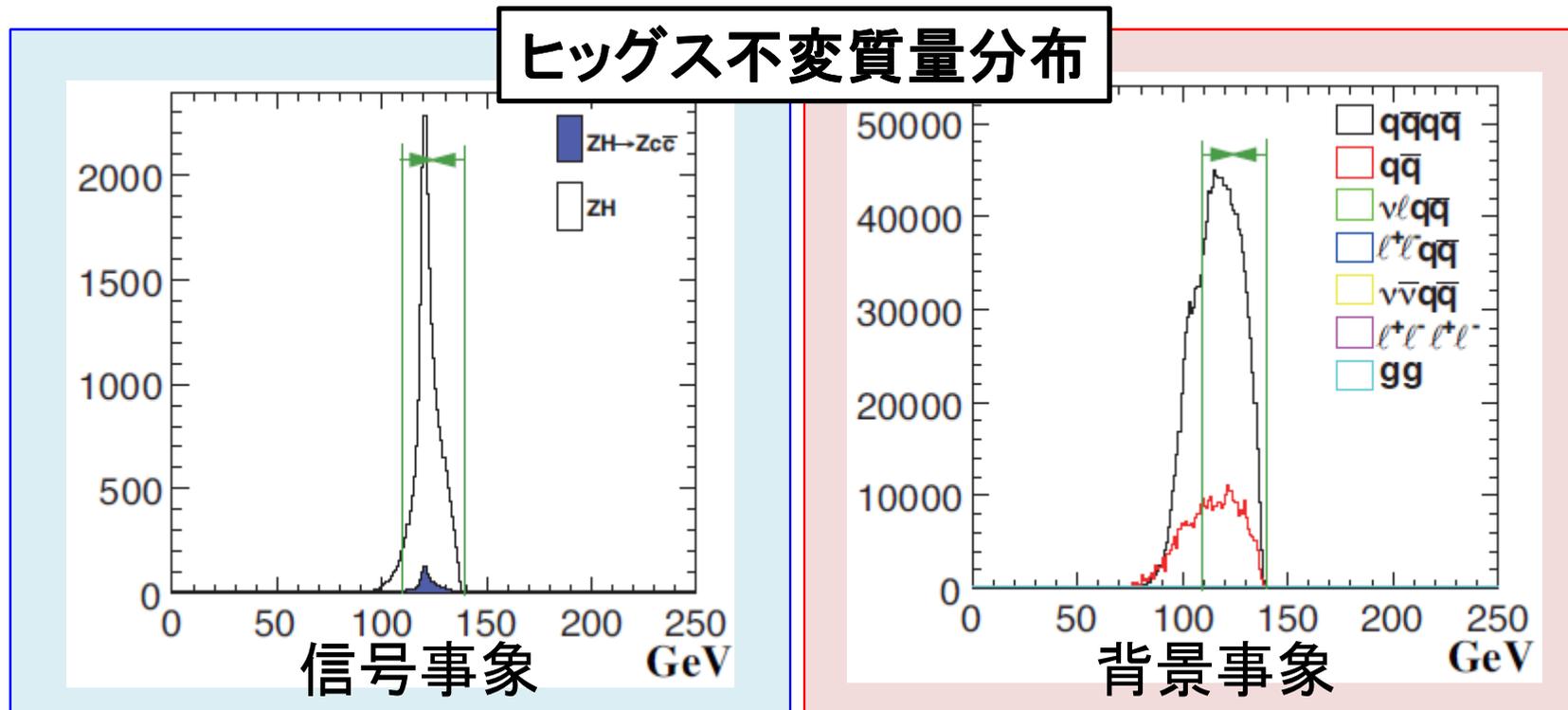
- ヒッグス粒子のジェット対間の角度
- $WW \rightarrow qqqq$ 事象除去
- $M_w < M_z$ より $\beta_w > \beta_z \rightarrow qqqq$ 事象はジェットの角度が小さい
- $70^\circ < \theta_z < 160^\circ$ を選択



ヒッグス不変質量カット

ヒッグス不変質量

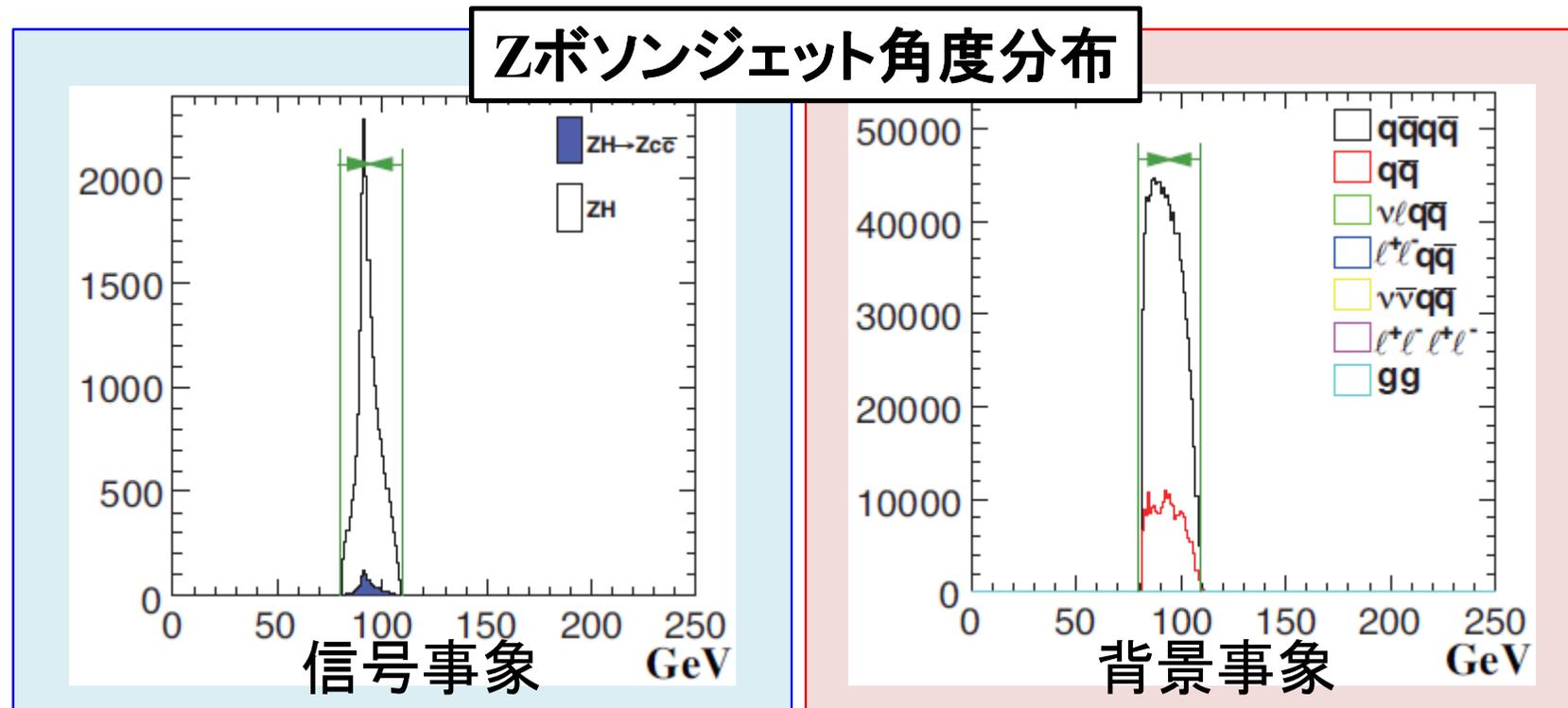
- ヒッグス粒子選択
- 110<ヒッグスジェット不変質量<140GeVを選択



Zボソン不変質量カット

Zボソン不変質量

- Zボソン選択
- $80 < \text{Zボソンジェット不変質量} < 110 \text{ GeV}$ を選択

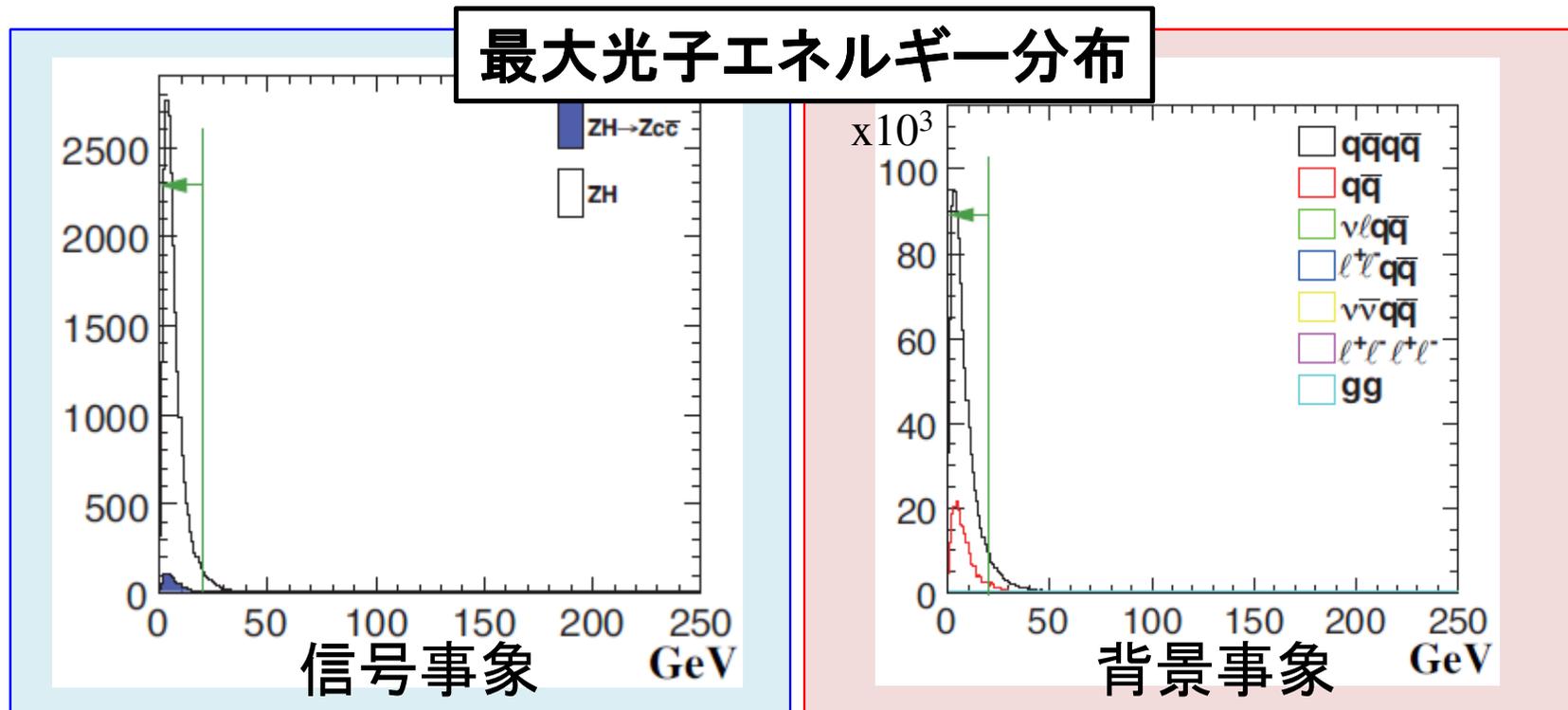




最大光子エネルギーカット

最大光子エネルギー

- qq除去
- ISR光子があるため光子のエネルギーが高い
- 最大光子エネルギー $<20\text{GeV}$ を選択



ハドロン過程でのイベント数

	qqcc	qqbb	qqH	qqqq	qq	vvqq	その他
カットなし	2914	53480	79841	4048390	35353300	149979	13781329
ハドロン	1693	29075	39966	3477480	10196600	43	6854819
荷電トラック	1238	22204	29163	2077300	1238430	5	7324
Y値	1218	21869	28781	2009000	622395	3	4519
スラスト	1217	21858	28768	2008530	571481	3	4491
$\cos\theta$	1157	20831	27415	1766300	525482	2	3907
θ_H	1080	19393	25414	1468630	436393	2	3177
θ_Z	1028	18490	24223	1405720	367672	2	2759
M_H	982	17666	23059	984853	222844	1	1404
M_Z	982	17665	23056	983532	221634	1	1399
光子E	895	16288	21246	844920	191039	1	1035
選択効率	52.86%	56.02%	53.16%	24.3%	1.87%	2.33%	0.02%

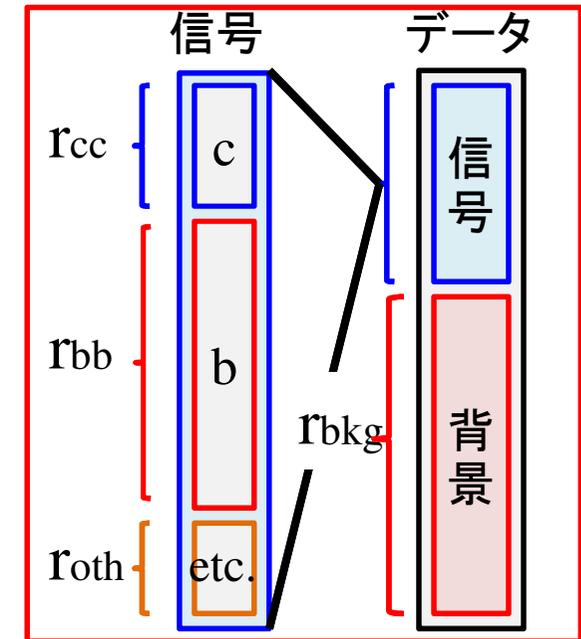


テンプレートフィット

テンプレートフィット

テンプレートフィット

- 3次元テンプレート(b,c,bc-らしさ)
- フィットパラメータ: $r_{cc}, r_{bb}, r_{oth}, r_{bkg}$
 - r_{bkg} は背景事象テンプレートの正規化因子
 - $r_{oth} = 1 - r_{cc} - r_{bb}$
- 以下のL'が最小になるようにフィットする



$$P_{ijk} = \frac{e^{-\mu} \mu^X}{X!}, X = N_{ijk}^{data}, \mu = N_{ijk}^{template}$$

$$N_{ijk}^{template} = \sum_{s=cc,bb,oth} r_s \left(\frac{N^{ZH}}{N^s} \right) N_{ijk}^s + r_{bkg} N_{ijk}^{bkg}$$

$$L = \prod_{ijk} P_{ijk}$$

$$L' = -\log L$$

N_{ijk} : i,j,k番目のビンの事象数

フィットパラメータ

その他のヒッグス解析

トップ湯川結合

トップ湯川結合

- $\Delta g_t^2/g_t^2 = \Delta \sigma_{ttH}/\sigma_{ttH}$
- $E_{CM} = 500 \text{ GeV}$

信号事象

- $e^+e^- \rightarrow ttH: 0.45 \text{ fb}$

背景事象

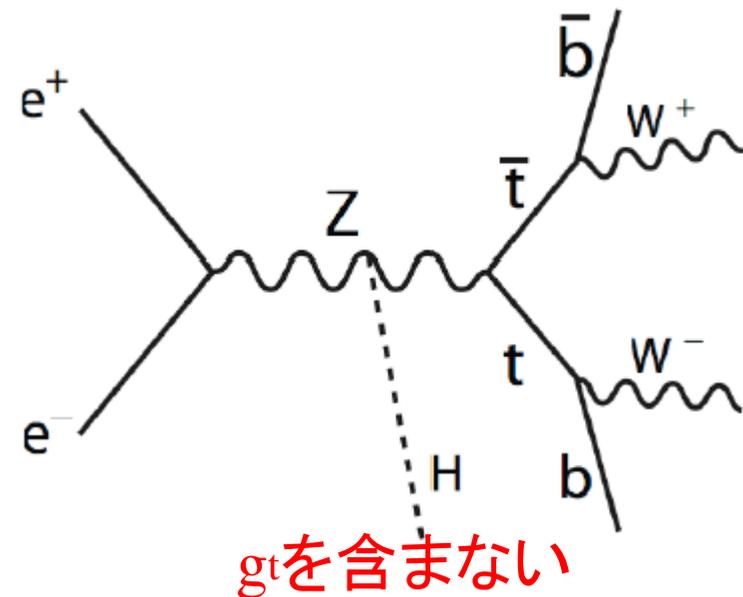
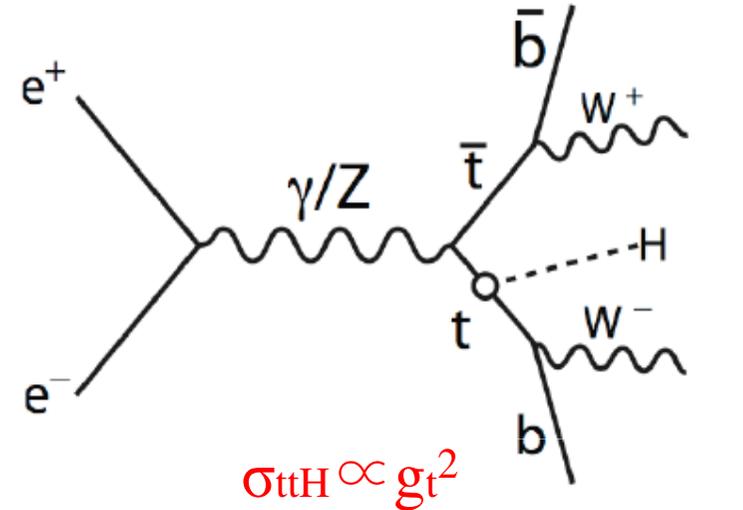
- $ttZ \rightarrow ttbb: 0.2 \text{ fb}$
- $ttg \rightarrow ttbb: 0.7 \text{ fb}$
- $tt: 500 \text{ fb}$
- $qq(\text{not } t): 4 \text{ pb}$
- $WW: 8 \text{ pb}$
- $ZZ: 0.58 \text{ pb}$

事象数が少なく
無視できる

結果 信号有意度: 7.52σ 、測定精度: 6.6%

解析モード

6ジェット+1レプトン
8ジェット



ヒッグス自己結合

ヒッグス自己結合

- λ_{HHH}
- $E_{CM}=500\text{GeV}$
- $L=500\text{fb}^{-1}$

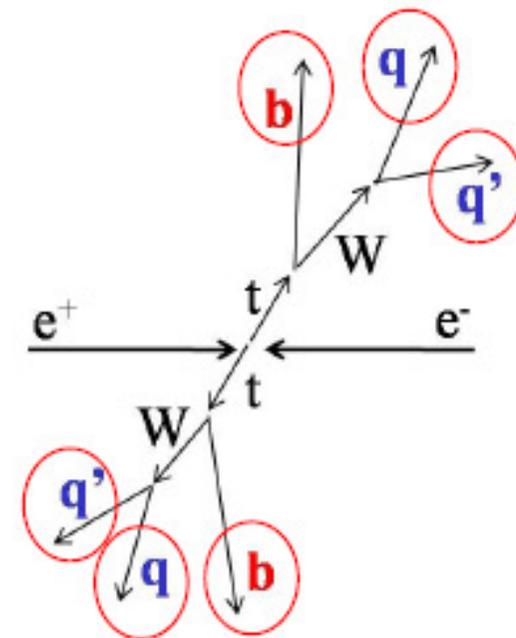
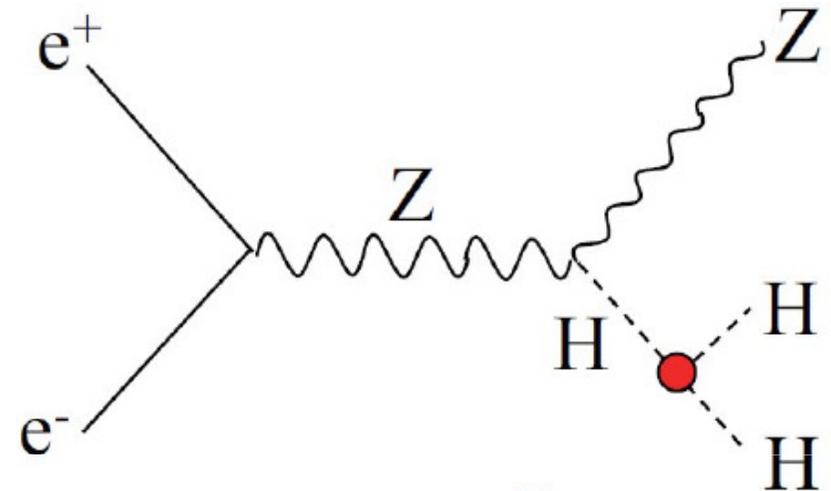
信号事象

- $e^+e^- \rightarrow ZHH \rightarrow qqbbbb : 0.157\text{fb}$

背景事象

- $6f: 412.8\text{fb}$
- $qqqqH: 0.407\text{fb}$
- $ttqq: 1.08\text{fb}$

結果 信号有意度: $1\sim 2\sigma$



SiDの結果

SiD

- 背景事象除去
 - カット
 - ニューラルネット
- 測定精度の見積もり方 (* テンプレートフィットは行わない)

$$\frac{\Delta\sigma_{Hcc}}{\sigma_{Hcc}} = \frac{\sqrt{N_{ZH} + N_{bkg}}}{N_{Hcc}}$$

- 結果
 - ニュートリノ過程: 11.6%
 - ハドロン過程: 8.8%

ヒッグス探索@LHC

