

# 将来の電子陽子衝突LHeC 実験における $H \rightarrow b\bar{b}$ 崩壊結合 定数測定の研究

第24回ICEPPシンポジウム  
東京工業大学 関根 達侑

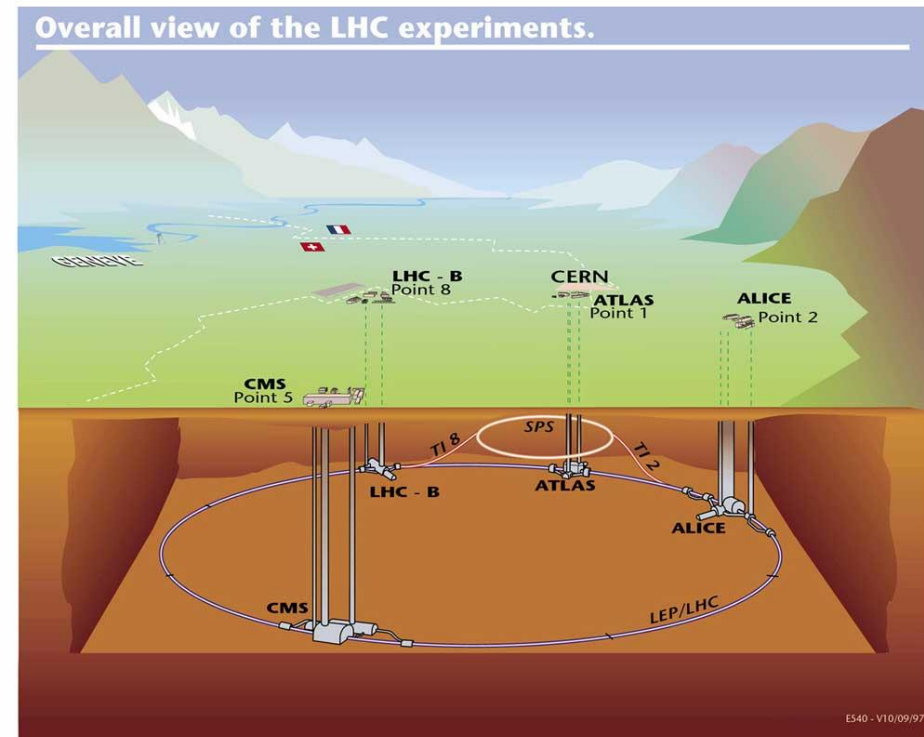
# LHC(Large Hadron Collider)

- スイスのCERN(欧州原子核研究機構)にある陽子陽子衝突型加速器
- 2012年ヒッグス粒子を発見

周長 27 km

陽子エネルギー 7 TeV  
(現在は6.5TeV)

重心系エネルギー 14 TeV  
(現在は13 TeV)

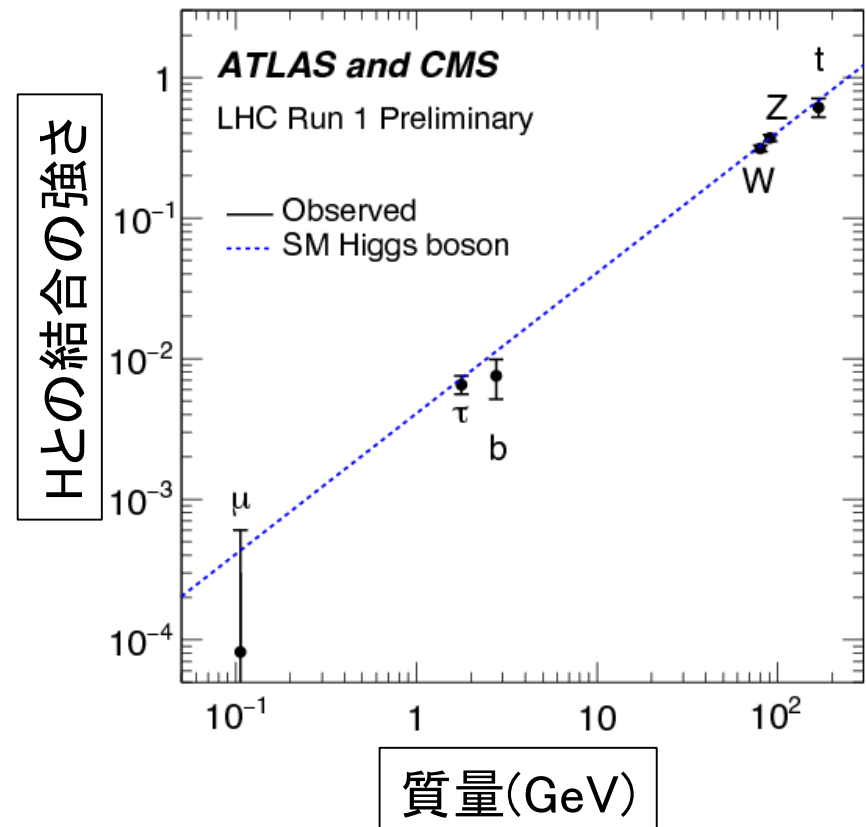


# ヒッグス粒子

- 質量の起源を説明するヒッグス機構によって導入される粒子
- ヒッグスとの結合の強さが粒子の質量に比例

現在のLHCでは、ヒッグスがbクォーク  
 対へ崩壊する $H \rightarrow b\bar{b}$ 事象はQCDバック  
 グラウンドが多く、観測が難しい

→LHeC計画



# LHeC(Large Hadron electron Collider )

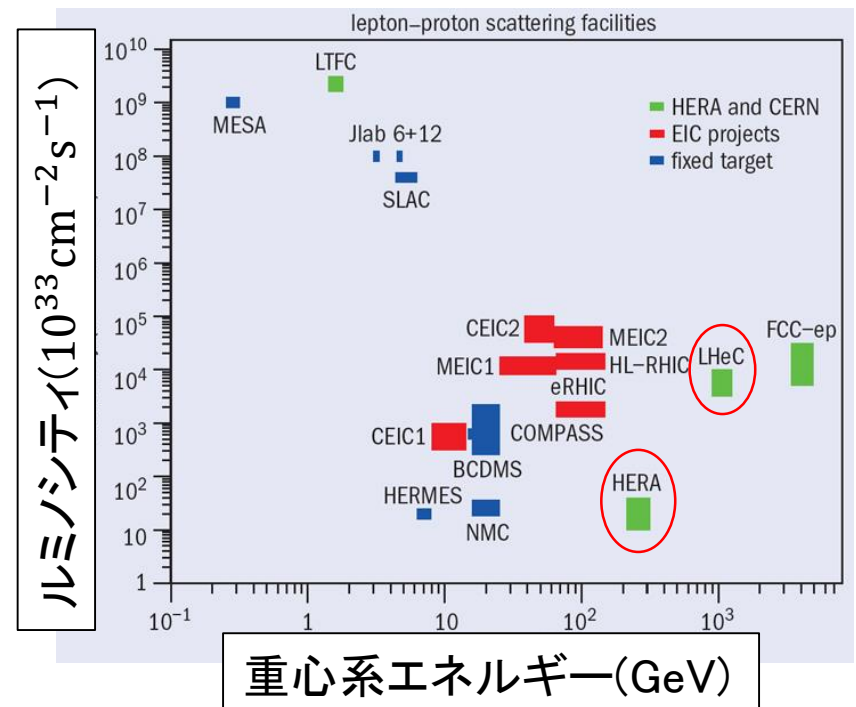
- LHCの近くに電子加速器(ERL)を建設し、電子陽子衝突を行う計画
- LHCで観測が困難なQCDの検証や、陽子内部構造の精密測定が期待されている
- 先行するHERAよりも高いルミノシティと重心系エネルギー
- FCC(Future Circular Collider)におけるFCC-ehも計画

LHeC

電子エネルギー 60 GeV

陽子エネルギー 7 TeV

重心系エネルギー 1.3 TeV



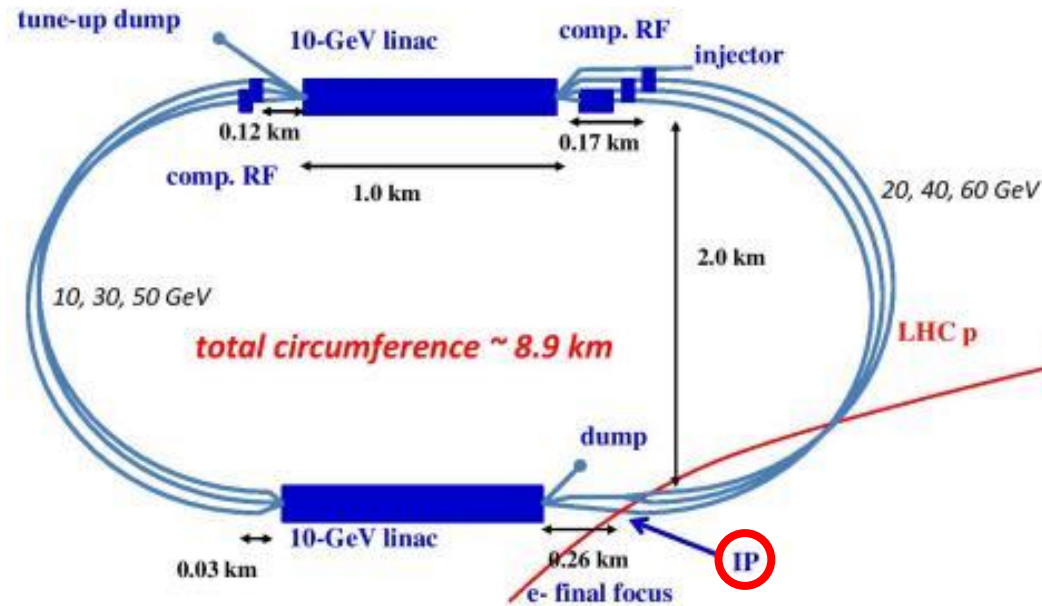
# ERL(Energy Recovery Linac)

電子加速器

線形加速器と円形リング

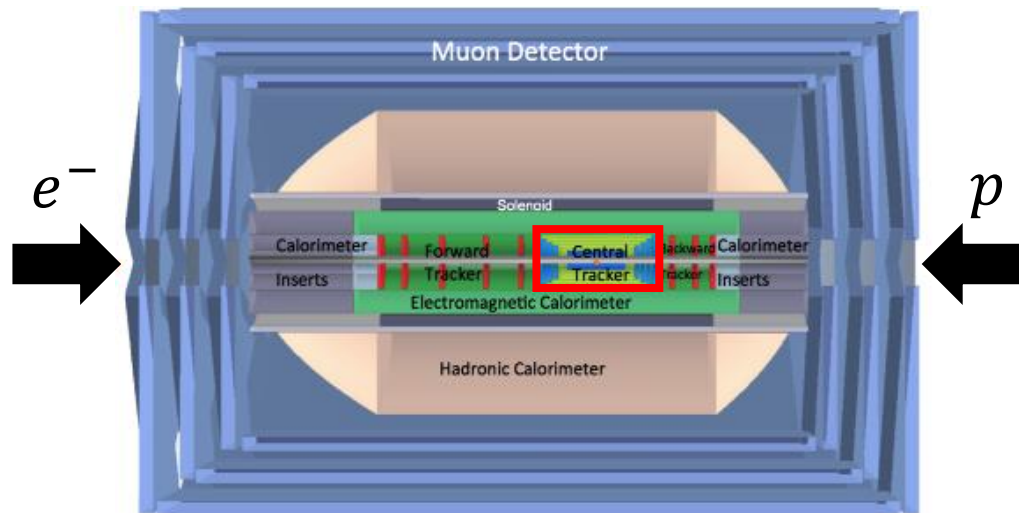
電子を60 GeVまで加速し、  
LHCの陽子ビームと衝突

電子のエネルギーは回収し、  
次の電子加速に再利用



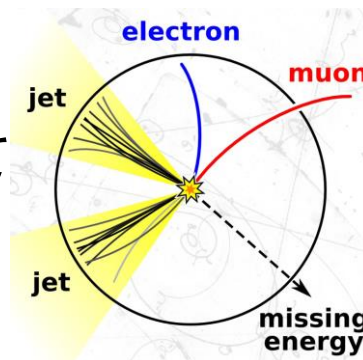
# 検出器

複数の検出器を組み合わせ、粒子を識別



陽子と電子のエネルギーが異なるため、非対称な設計

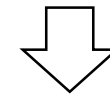
ニュートリノは、missing  $E_T$ として間接的に観測



内側から

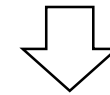
飛跡検出器

荷電粒子の運動量を測定



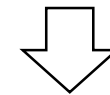
電磁カロリメータ

電子や光子のエネルギーを測定



ハドロンカロリメータ

ハドロンエネルギーを測定

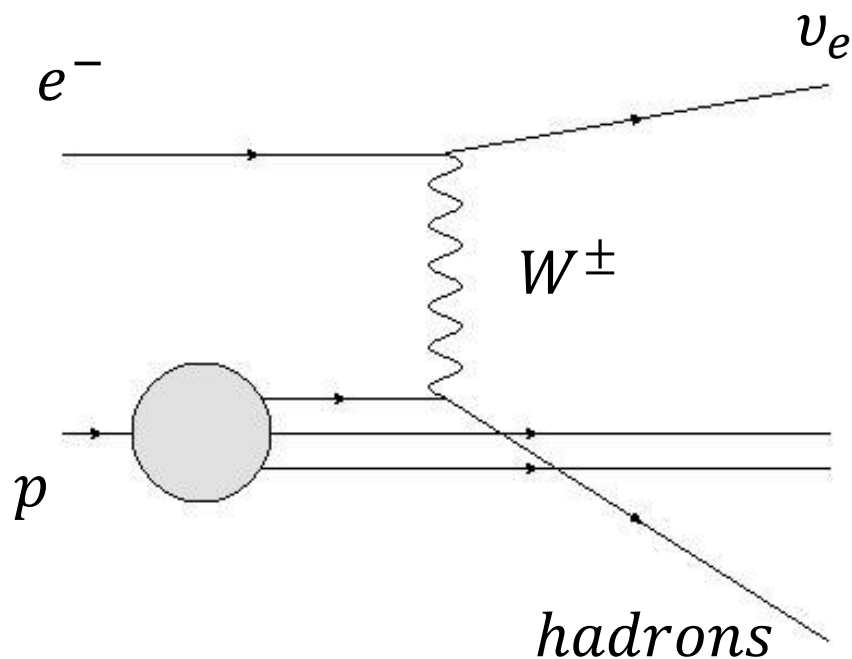


ミュオン検出器

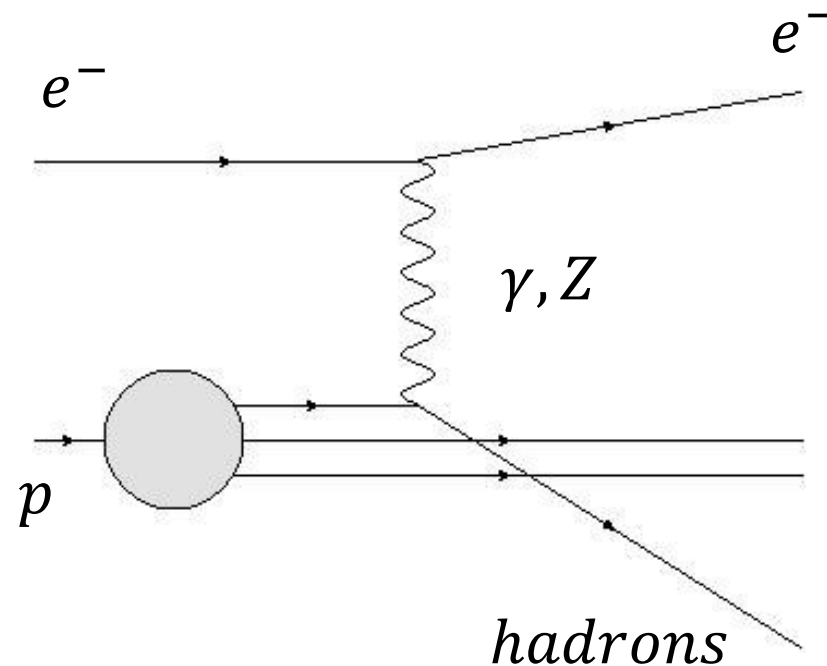
ミュオンの運動量を測定

# LHeCで起こる事象

## CC(荷電カレント)反応



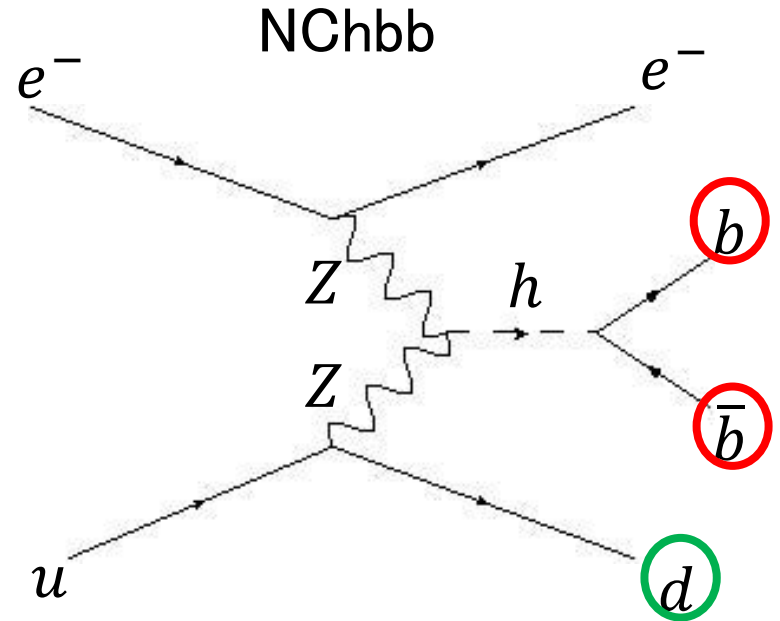
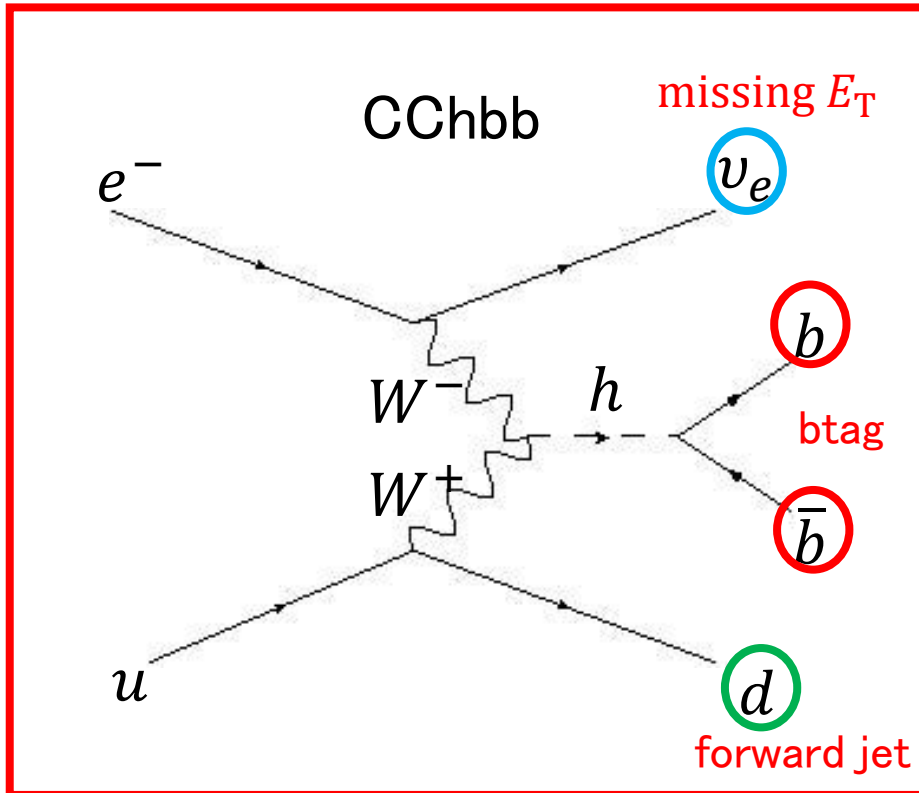
## NC(中性カレント)反応



- LHCに比べてQCDバックグラウンドの少ないクリーンな環境
- LHCで観測の難しい $H \rightarrow b\bar{b}$ 事象を精密測定できる可能性を調べた

# シグナル

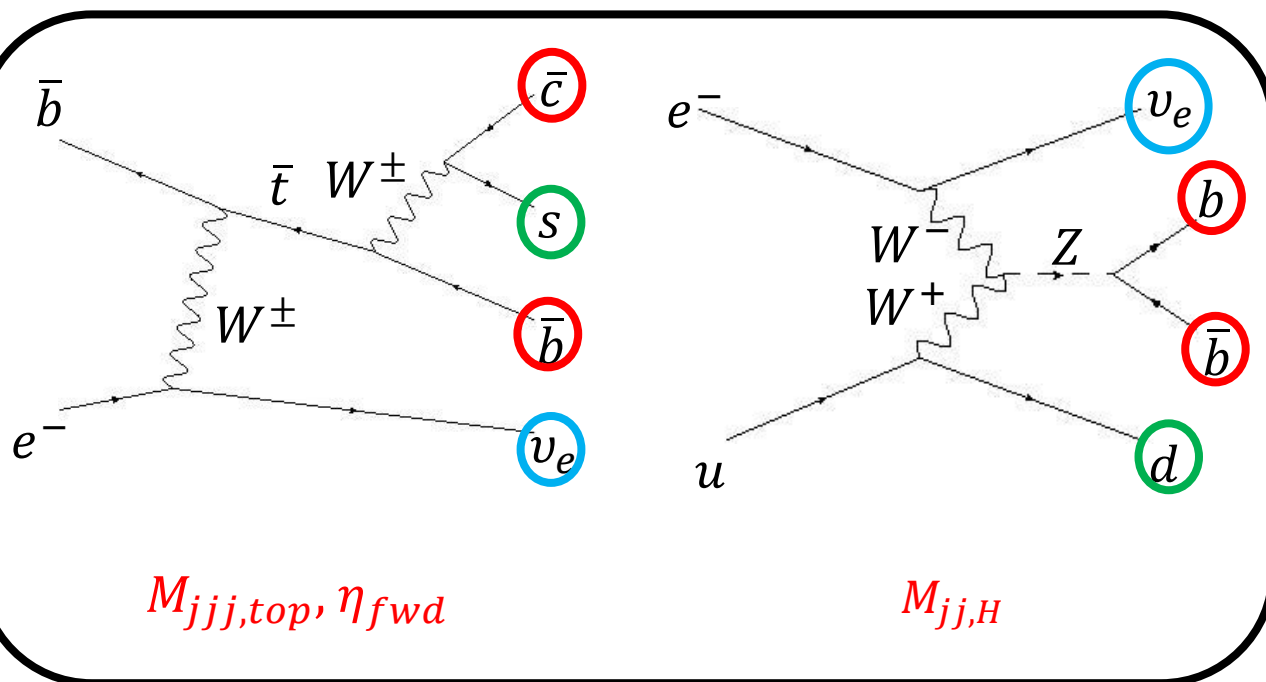
LHeCでの $H \rightarrow bb$ 事象は、CC反応とNC反応があるが、本研究では断面積が大きく、NCバックグラウンドと区別しやすいCC反応をシグナルとした



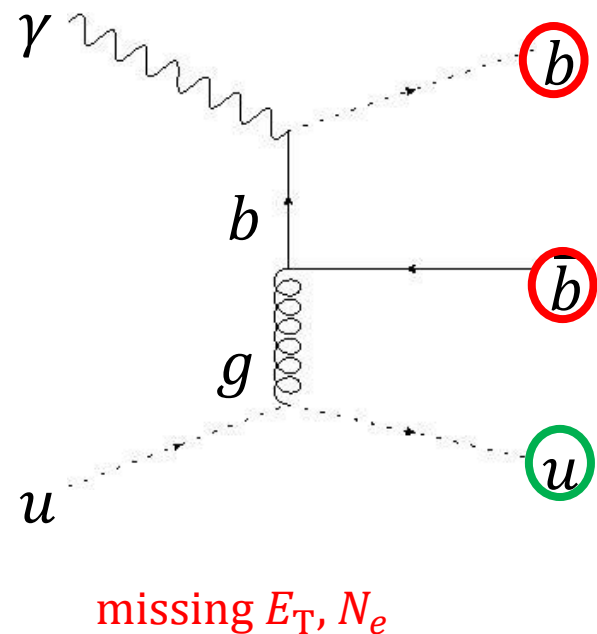


# バックグラウンド

## CCバックグラウンド



## フォトプロダクション



## NCバックグラウンド

$\text{missing } E_T, N_e$

# 研究方法

モンテカルロシミュレーションを用いて、 $1 \text{ ab}^{-1}$ (約10年分)のデータ量を生成し、カットベース(先行研究)及び多変量解析(BDT)で結合定数の測定誤差を見積もった

セットアップ:

陽子エネルギー 7 TeV

電子エネルギー 60 GeV

電子偏極率 -80%

btag効率 75%, cjet miss tag効率 5%, light jet miss tag効率 1%

測定誤差

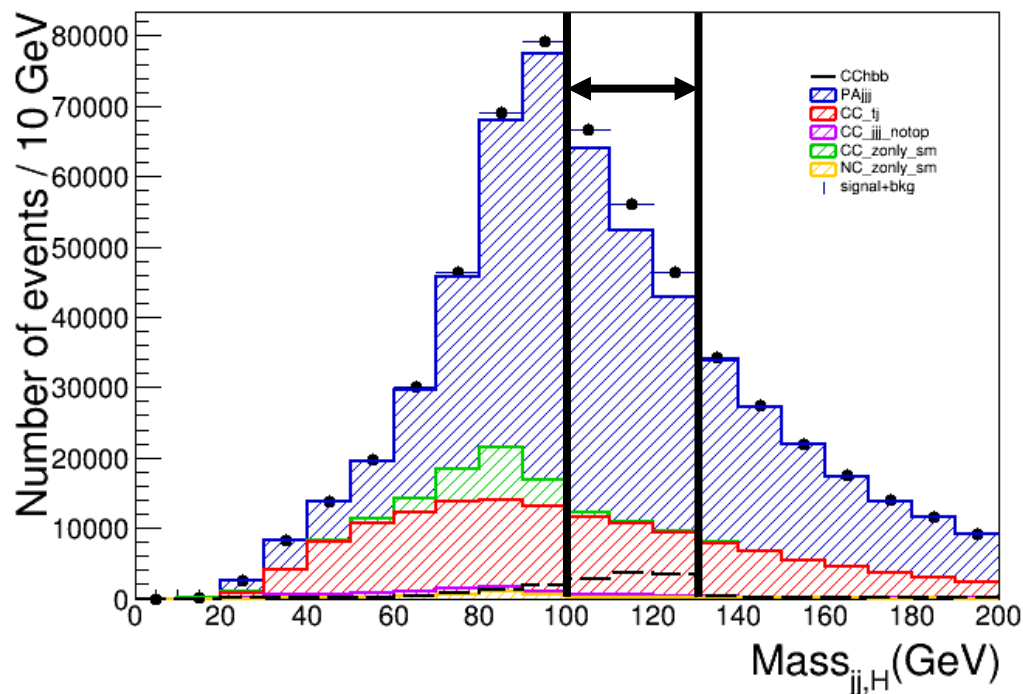
$$\frac{\sigma_g}{g} = \frac{\sqrt{S+B}}{2S} \quad (g: \text{結合定数}, \sigma_g: \text{結合定数誤差})$$

# ヒッグス質量分布(Preselectionのみ)

$$M_{jj,H} = \sqrt{(E_{bjet1} + E_{bjet2})^2 - (|\vec{p}_{bjet1} + \vec{p}_{bjet2}|)^2}$$

Preselection:

- すべてのjetに対して  
 $p_T > 20 \text{ GeV}$   
 $\eta < 4$
- $N_{jet} \geq 3, N_{bjet} \geq 2$
- $N_e = 0$



$$S = 15151 \pm 130, B = 600088 \pm 569, \frac{\sigma g}{g} = \frac{\sqrt{S+B}}{2S} = 0.026$$

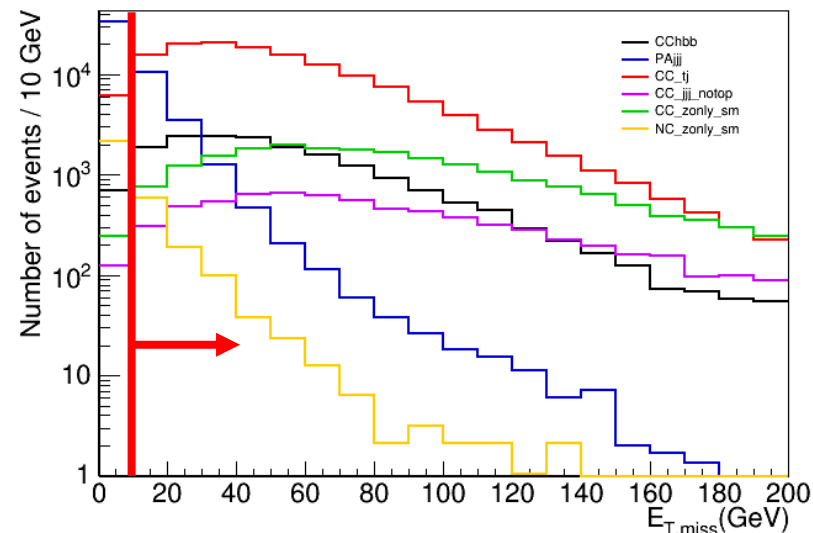
ヒッグス領域(100~130 GeV) 誤差は統計誤差のみ

# カットベースのイベントセレクション

先行研究で用いられた変数に事象選別条件をかけ、シグナル数は保ちながらバックグラウンドを削減した

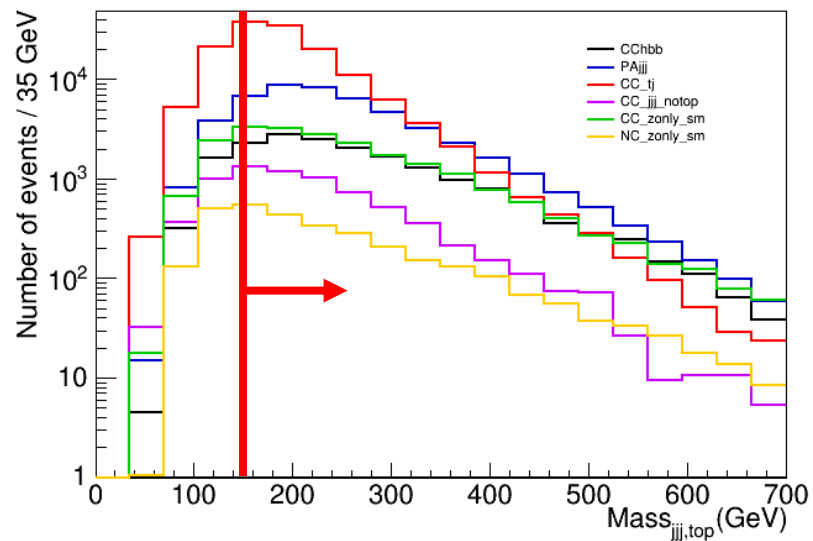
- $E_{miss}^T > 10 \text{ GeV}$

CC反応では、ニュートリノによって高いmissing ETが生じる



- $M_{jjj,top} > 150 \text{ GeV}$

top生成のバックグラウンドを減らす



# ヒッグス質量分布(カットベース)

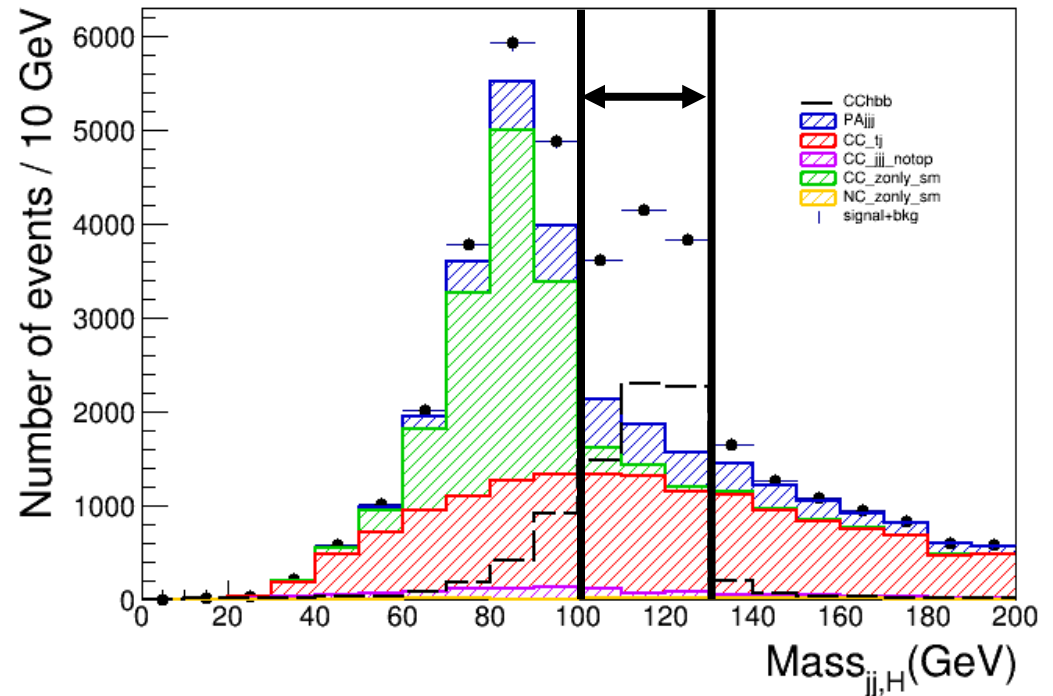
$$M_{jj,H} = \sqrt{(E_{bjet1} + E_{bjet2})^2 - (|\vec{p}_{bjet1} + \vec{p}_{bjet2}|)^2}$$

Preselection:

- すべてのjetに対して  
 $p_T > 20 \text{ GeV}$   
 $\eta < 4$
- $N_{jet} \geq 3, N_{bjet} \geq 2$
- $N_e = 0$

Event selection

- $E_{miss}^T > 10 \text{ GeV}$
- $Q_h^2 > 100 \text{ GeV}$
- $\phi_{bjet} - \phi_{MET} > 0.15 \text{ rad}$
- $\eta_{fwd} > 2$
- $M_{jjj,top} > 150 \text{ GeV}$



$$S = 6032 \pm 82, B = 5564 \pm 70, \frac{\sigma_g}{g} = \frac{\sqrt{S+B}}{2S} = 0.0089$$

誤差は統計誤差のみ

# BDTを用いたイベントセレクション

Preselection:

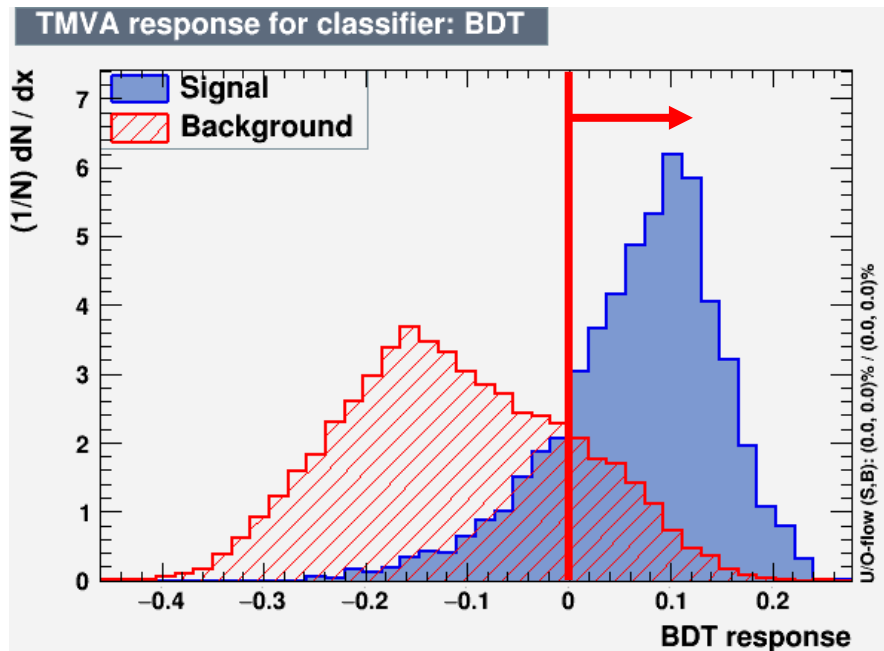
$$p_T > 20 \text{ GeV}, \eta < 4, N_{jet} \geq 3, N_{bjet} \geq 2, N_e = 0, \\ 100 \text{ GeV} < M_{jj,H} < 130 \text{ GeV}$$

入力変数:

$$N_{jet}, N_{bjet}, Q_h^2, y_h, E_{miss}^T, \Delta\phi_{b,MET}, \eta_{fwd}, M_{jj,W}, M_{jjj,t}$$

トレーニング結果

BDT response(シグナルらしさ)



$\frac{\sigma_g}{g}$  は、BDT threshold  
 $\in \{-0.2, -0.15, \dots, 0.15, 0.2\}$   
 のうち、BDT > 0 のとき最小

# ヒッグス質量分布(BDT)

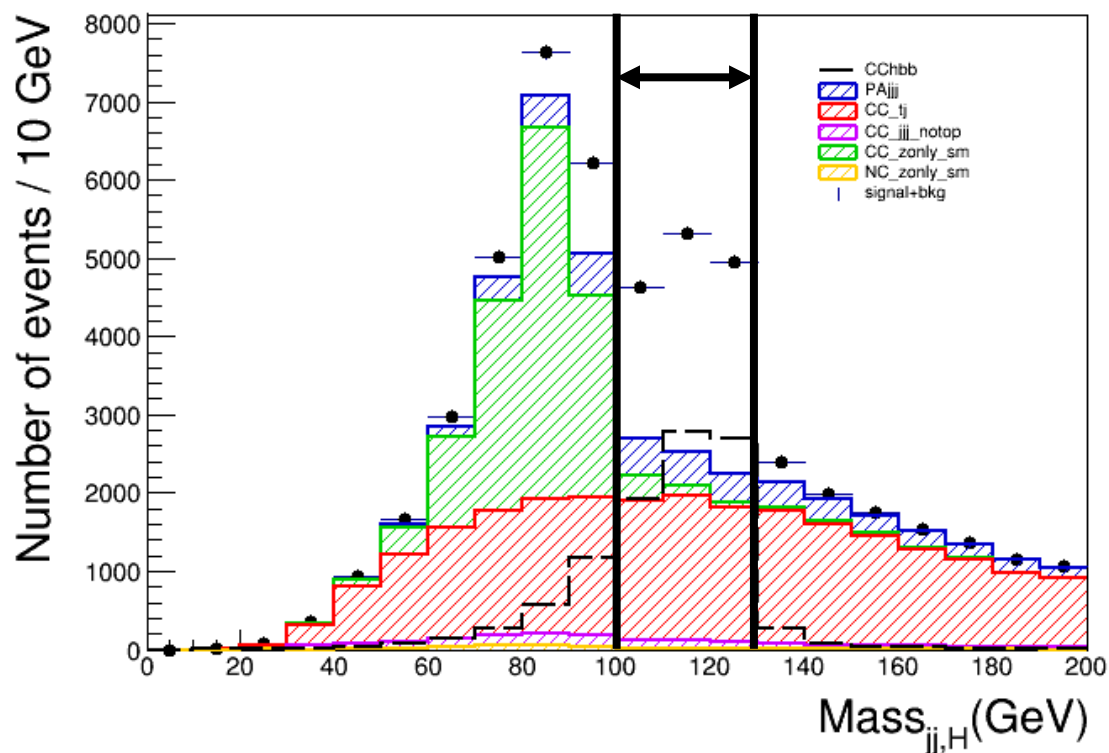
$$M_{jj,H} = \sqrt{(E_{bjet1} + E_{bjet2})^2 - (|\vec{p}_{bjet1} + \vec{p}_{bjet2}|)^2}$$

Preselection:

- すべてのjetに対して  
 $p_T > 20 \text{ GeV}$   
 $\eta < 4$
- $N_{jet} \geq 3, N_{bjet} \geq 2$
- $N_e = 0$

BDT selection

- $BDT > 0$



$$S = 7421 \pm 90.8, B = 7459 \pm 83, \frac{\sigma_g}{g} = 0.0082$$

誤差は統計誤差のみ

# まとめ

- LHeCは、電子加速器を建設し、LHCの陽子ビームと組み合わせることで電子陽子衝突実験を行う将来計画
- LHCに比べ、QCDバックグラウンドが少ないので、Hbb事象などの精密測定ができると期待されている。
- モンテカルロシミュレーションでイベントを作り、カットベースとBDTを用いて、結合定数の測定精度を評価した。
- 統計誤差のみを考慮した場合、カットベースでは0.89%,BDTでは0.82%で結合定数が測定できるという結論を得た。

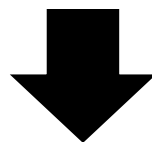


# Back up

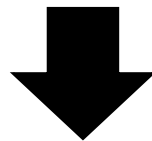
# ヒッグス機構のイメージ



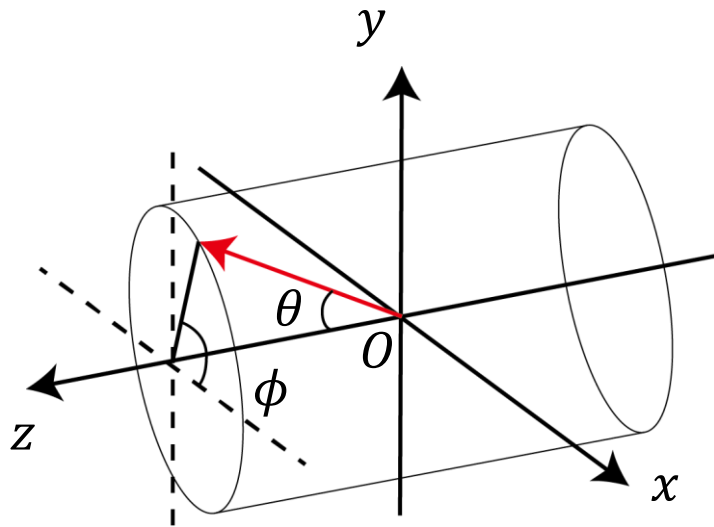
真空はヒッグス場で満たされている。



素粒子(質量0)が現れると、ヒッグス場が相互作用する。



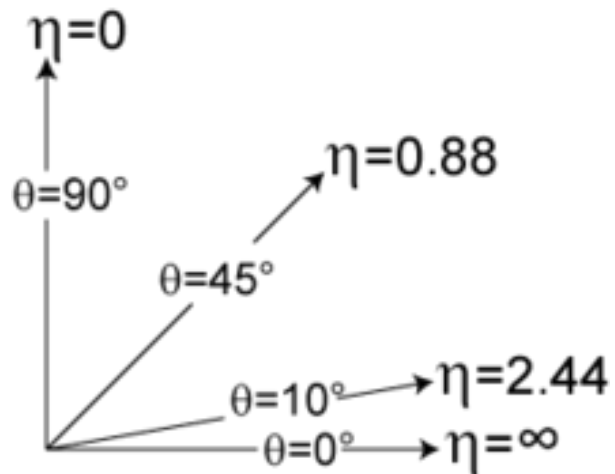
素粒子は動きにくさが生じ、質量を獲得する。



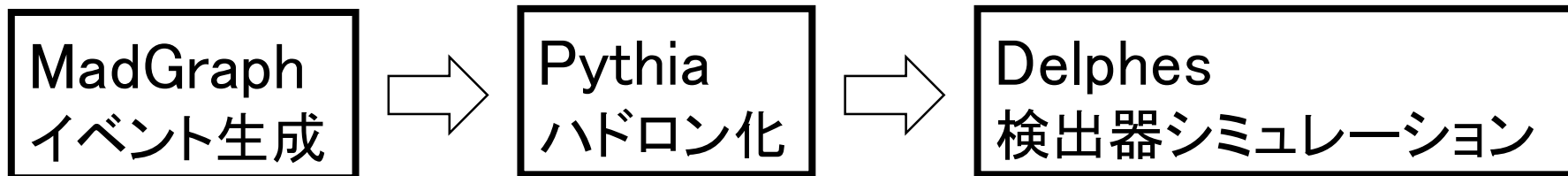
$O$ : 衝突点  
 $Z$ : ビーム軸  
 $\theta$ : 極角  
 $\phi$ : 方位角  
 $p_T = p \sin \theta$

$\eta = -\ln \left( \tan \frac{\theta}{2} \right)$ : 擬ラピディティ

missing  $E_T$   
 ビーム軸に対して垂直な  
 平面内での消失エネルギー



# イベント生成



陽子エネルギー 7 TeV  
電子エネルギー 60 GeV  
電子偏極率 -80%  
btag効率 75%  
cjet miss tag効率 5%  
ljet miss tag効率 1%

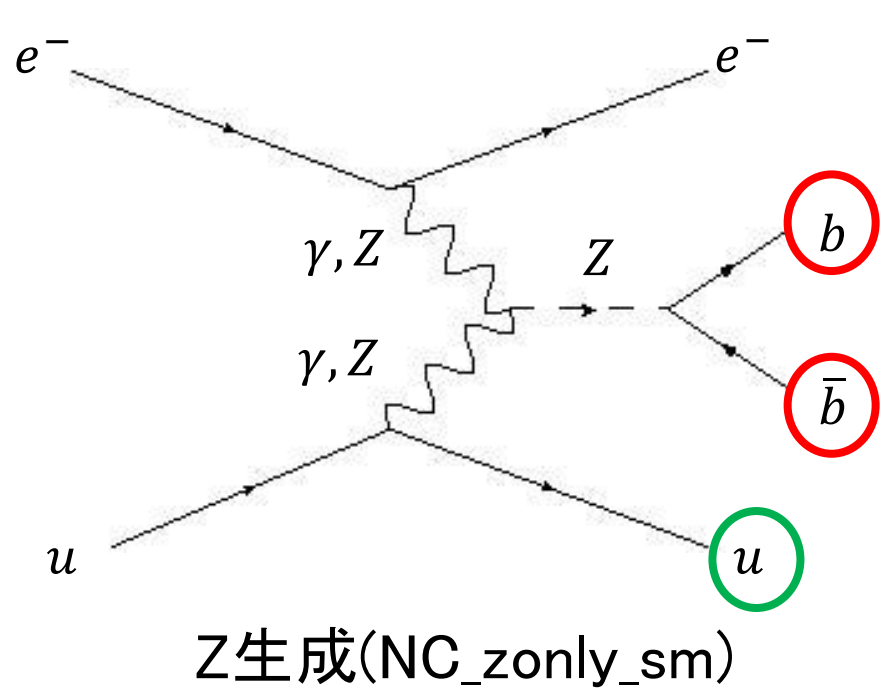
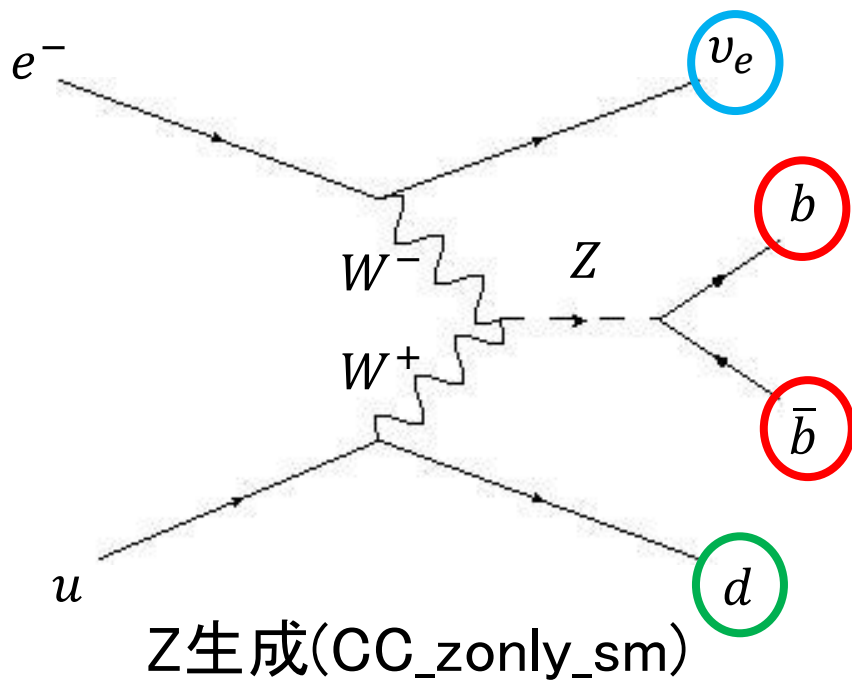
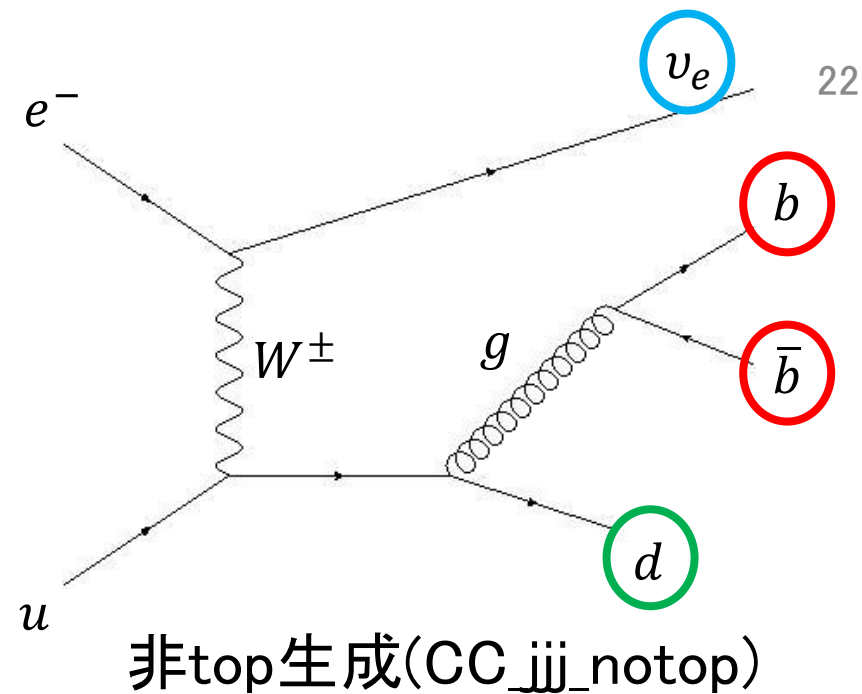
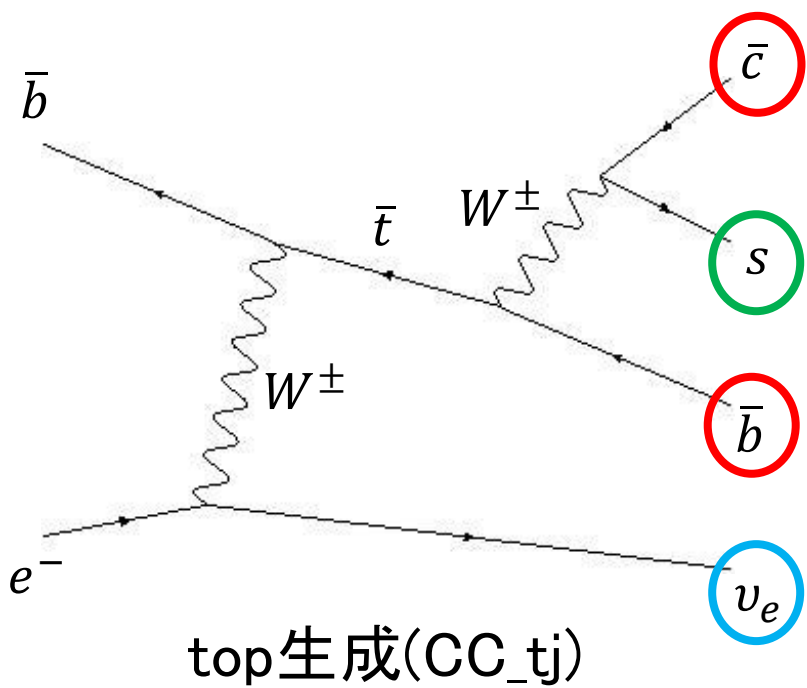
Generator cut:  
すべての $jet$ に対して

- $p_T > 10$  GeV
- $\eta < 5.2$

2-jet massに対するカット

# 各イベントの生成数と断面積

イベント	CChbb	PAjjj	CC_tj	CC_jjj_notop	CC_zonly_s m	NC_zonly_sm
断面積(pb)	0.11113	40.82	1.5426	4.734	0.6588	0.105
期待値 ( $1 \text{ ab}^{-1}$ )	111130.2	4082000	1542600	4734000	658800	105000
生成数	100,000	12,150,000	1,500,000	4,500,000	600,000	100,000
重み	1.111302	3.3596708	1.0284	1.052	1.098	1.05



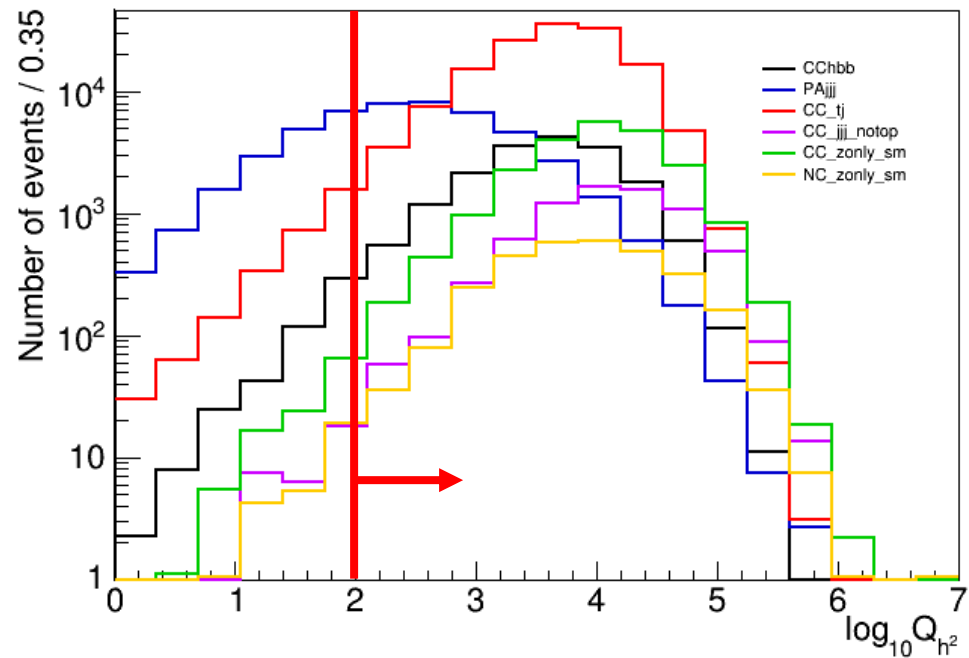
- $$Q_h^2 = \frac{(\sum_{hadron} p_x)^2 + (\sum_{hadron} p_y)^2}{1-y_h} > 100 \text{ GeV}^2$$

$$\left( y_h = \frac{\sum_{hadron} (E - p_z)}{2E_e} \right)$$

ヒッグスのような重粒子生成は、  
運動量移行の大きい領域で起こる

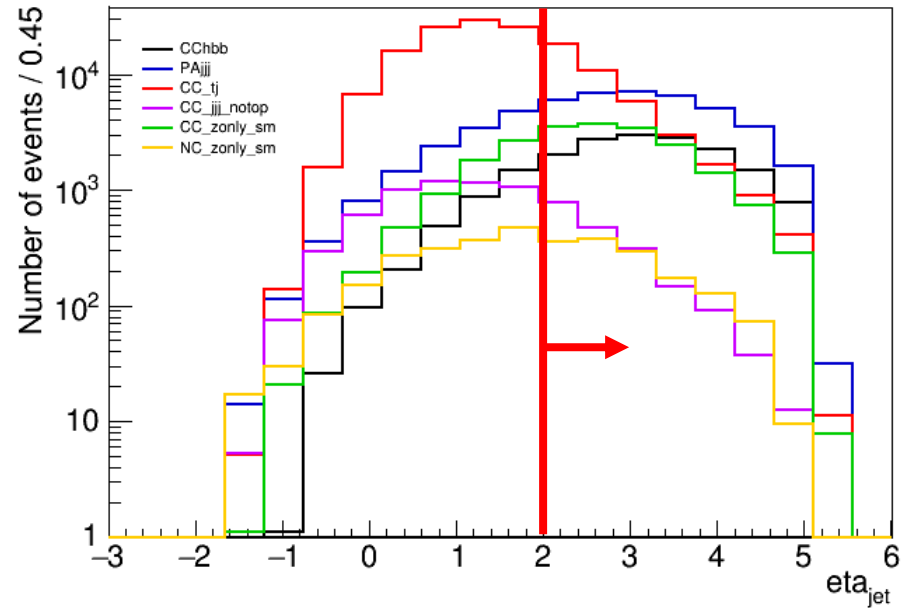
- $$\phi_{bjet} - \phi_{MET} > 0.15 \text{ rad}$$

NC反応ではjetとMissingETが  
近い方向に生じるため



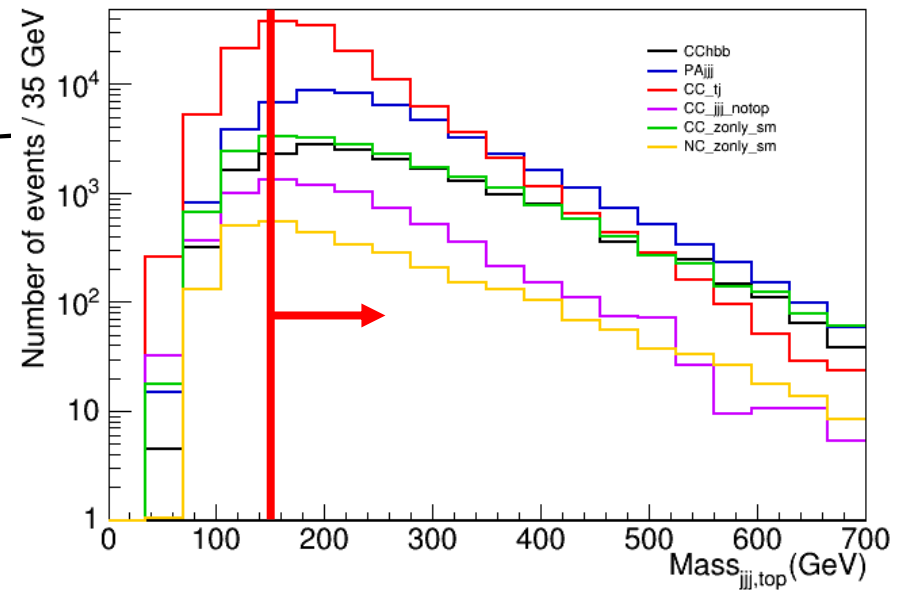
- $\eta_{fwd} > 2$

forward jet(陽子由来のjet)は  
前方に散乱される



- $M_{jjj,top} > 150$  GeV

top生成のバックグラウンドを減らす





# ジェット選別方法

$b_{jet1} \dots b - tag$ されたjetのうち、最も $\eta$ の小さいjet  
 $b_{jet2} \dots b - tag$ されたjetのうち、二番目に $\eta$ の小さいjet  
*forward jet*  $\dots$ 上記を除くjetのうち、最も $\eta$ の小さいjet

Higgs  $\dots b_{jet1} + b_{jet2}$

$W \dots b_{jet1} + forward\ jet$

top  $\dots b_{jet1} + b_{jet2} + forward\ jet$

# 結合定数相対誤差 $\frac{\sigma_g}{g}$

$$\Gamma(H \rightarrow ff) = \frac{N_f g^2 m_f^2 m_H}{32\pi m_W^2} \left(1 - \frac{4m_f^2}{m_H^2}\right)^{\frac{3}{2}}$$

$$\left(f: \text{フェルミオン } g: \text{結合定数 } N_f = \begin{cases} 1 & \text{クォーク} \\ 3 & \text{レプトン} \end{cases}\right)$$

より、 $g^2 \propto \Gamma(H \rightarrow ff) \propto N_S \Rightarrow 2g\sigma_g \propto \sigma_S$

$$\therefore \frac{\sigma_g}{g} \propto \frac{\sigma_S}{2g^2} \propto \frac{\sigma_{S+B}}{2S} = \frac{\sqrt{S+B}}{2S}$$

# BDT(Boosted Decision Tree)

機械学習の一種

決定木を用いて事象選別していき、  
シグナルとバックグラウンドに分類する

トレーニング:

変数を入力すると、BDTが用いる変数  
と閾値を最適化し、シグナルらしさを学習

→トレーニング結果を用いて解析

