

# LHC-ATLAS実験における重心系衝突エネルギー 8 TeVのデータを用いた $H \rightarrow tb$ 崩壊チャンネルで の荷電ヒッグス粒子探索

筑波大学大学院 数理物質科学研究科 物理学専攻  
博士後期課程2年 永田和樹

佐藤構二、金信弘、ATLAS Collaboration

9月18日 2014年秋季大会

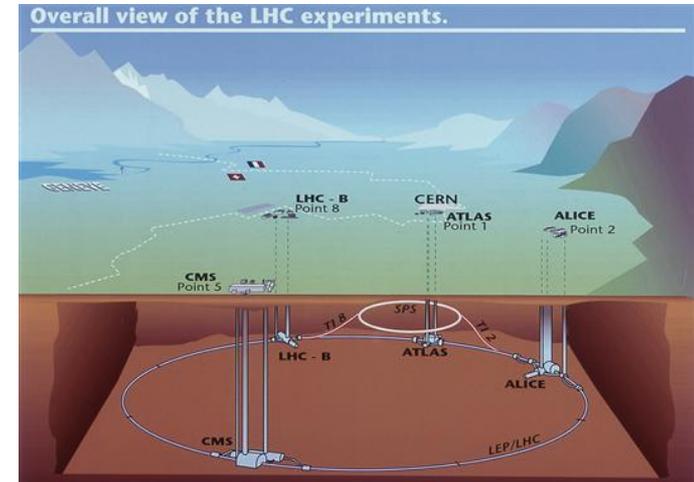
# LHC-ATLAS 実験

- LHC

- ハドロン衝突型加速器
- 円周: ~27 km

運転年度	重心系衝突エネルギー (TeV)	瞬間ピークルミノシティ ( $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )
2010	7	$\sim 2 \times 10^{32}$
2011	7	$\sim 4 \times 10^{33}$
2012	8	$\sim 8 \times 10^{33}$

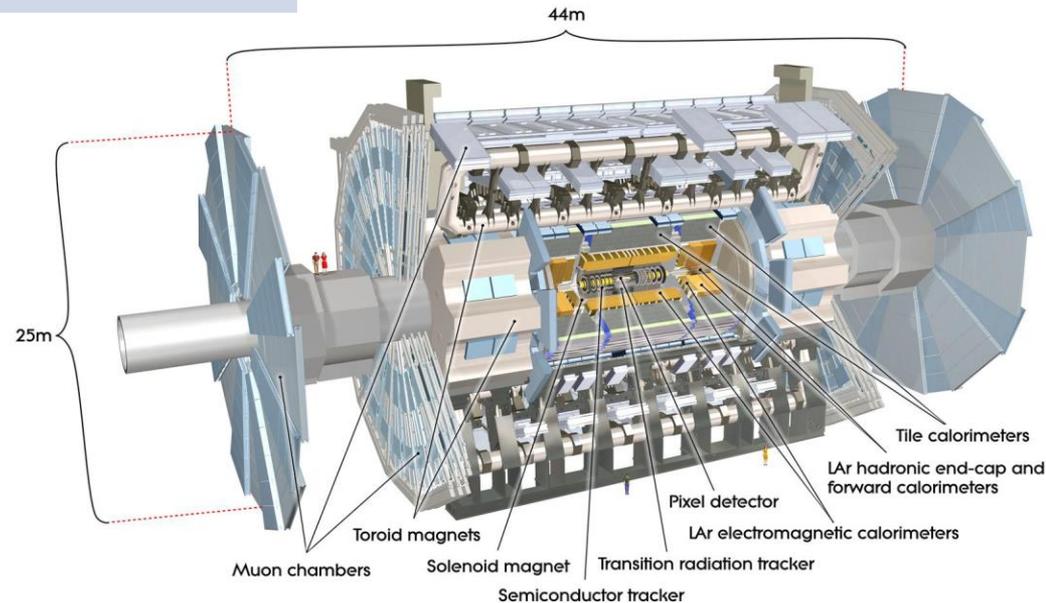
LHCの全体図



ATLAS検出器

- ATLAS 検出器

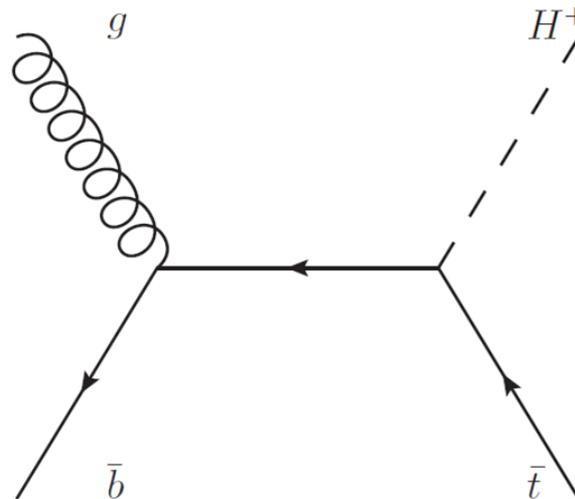
- 内部飛跡検出器
- 電磁カロリメータ
- ハドロンカロリメータ
- ミュオンスペクトロメータ



# 重い荷電ヒッグス粒子探索

- もし、荷電ヒッグス粒子の発見できたら
  - 標準理論を超える物理の存在の証明
    - 例: Minimal Supersymmetric Standard Model (MSSM)
- 重い荷電ヒッグス粒子探索 (180~600 GeV)
- 信号生成過程:  $g\bar{b} \rightarrow \bar{t}H^+ \rightarrow \bar{t}t\bar{b} \rightarrow \bar{b}l^+ \nu b\bar{q}q\bar{b}$
- 重心系衝突エネルギー8 TeV、積分ルミノシティ20.3 fb<sup>-1</sup>のデータを使用

下図: 信号生成過程のファインマンダイアグラム



# 解析の流れ

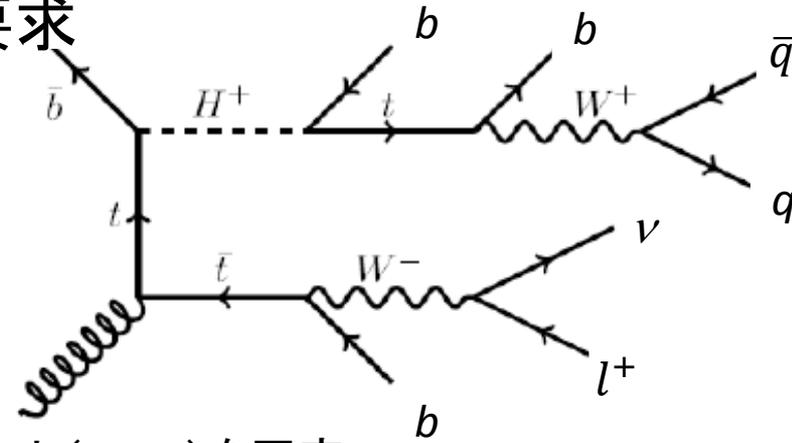
- 事象選別
- 事象の再構成
  - オブジェクトを最尤法を使って荷電ヒッグス粒子の崩壊生成物に割り当てて、崩壊事象を再構成する
- 信号事象と背景事象の分離
  - 再構成された事象の情報を含む変数を入力としてMVA(BDT)を行い、S/Bの分離を最適化する
- 生成断面積に対する制限の設定
  - MVAの結果を用いて荷電ヒッグス粒子の生成断面積に対して制限を設定する

## 今日の話

- 背景事象の見積もりとTagging Rate Functionの導入を重点的に話す
- Blind Analysisを行っている：結果はまだなので、Expected limitを見せる

# 事象選別

図: ハドロニックH<sup>+</sup> 崩壊



- 1つのレプトン、4つ以上のジェットを要求

- 1レプトンリガー

- 電子:  $P_t > 25 \text{ GeV}$ ,  $|\eta| < 2.47$   
( $1.37 < |\eta| < 1.52$  は除外)
- ミューオン:  $P_t > 25 \text{ GeV}$ ,  $|\eta| < 2.5$

- ジェット:  $P_t > 25 \text{ GeV}$ ,  $|\eta| < 2.5$

- b-tag: 70%の確率でbクォーク由来のジェット(b-jet)を同定

- シグナル領域とコントロール領域に分離

- シグナル領域: 信号事象を多く含む → 荷電ヒッグス粒子の探索
- コントロール領域: ほとんど背景事象 → 背景事象の理解、コントロール

表: 事象中のジェット数とb-tag数に対する2つ領域の定義

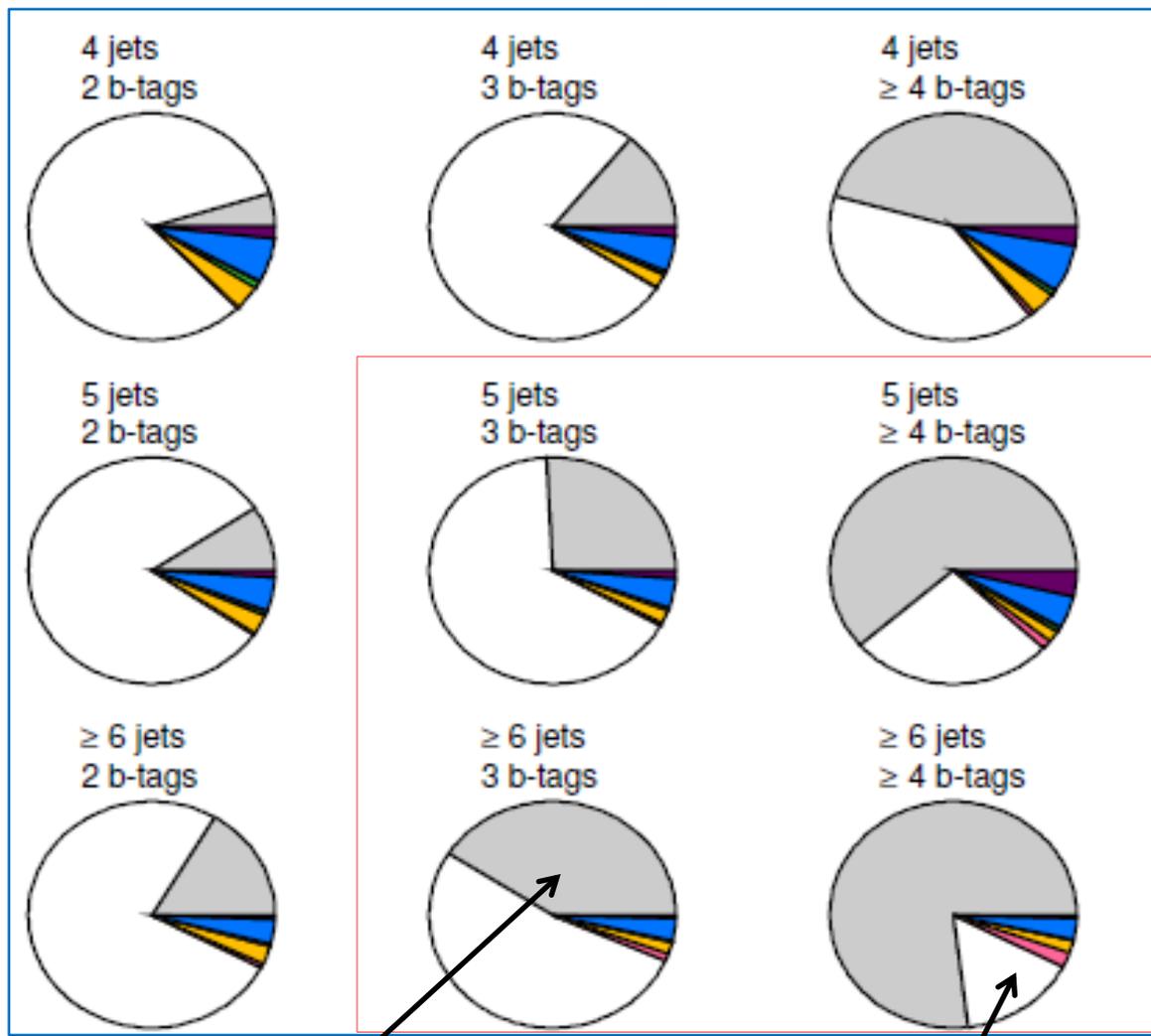
	2b-tags	3b-tags	$\geq 4$ b-tags
4jets	コントロール	コントロール	コントロール
5jets	コントロール	シグナル	シグナル
$\geq 6$ jets	コントロール	シグナル	シグナル

# 背景事象の構成要素

b-tagされたジェット数 →

コントロール領域

↓  
事象中の  
ジェット数



**ATLAS**  
Simulation  
(Muon Channel)

- $t\bar{t}$ +HF jets
- $t\bar{t}$ +light jets
- $t\bar{t}V$
- W+jets
- Z+jets
- Diboson
- Single top
- Misidentified Lepton

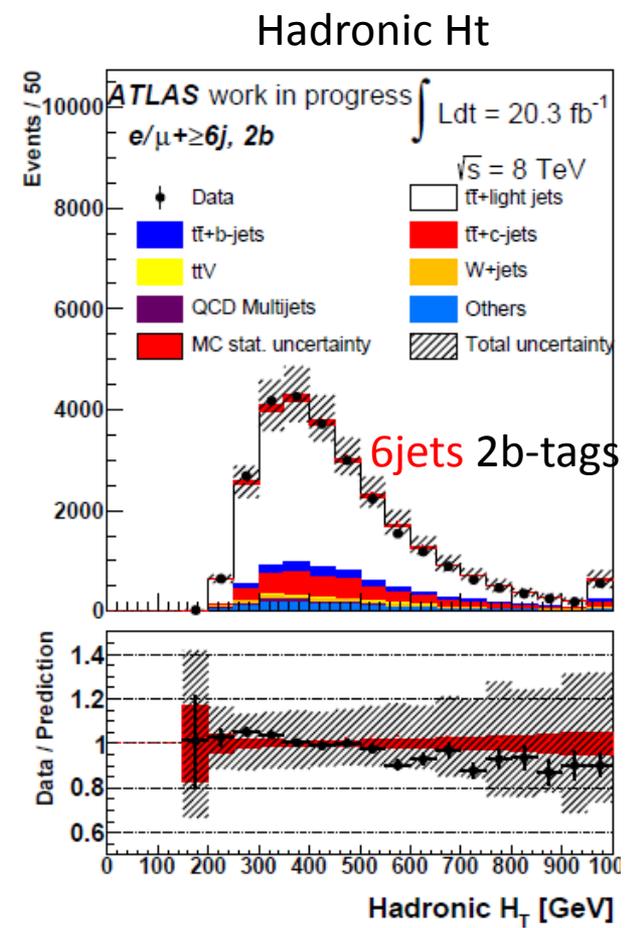
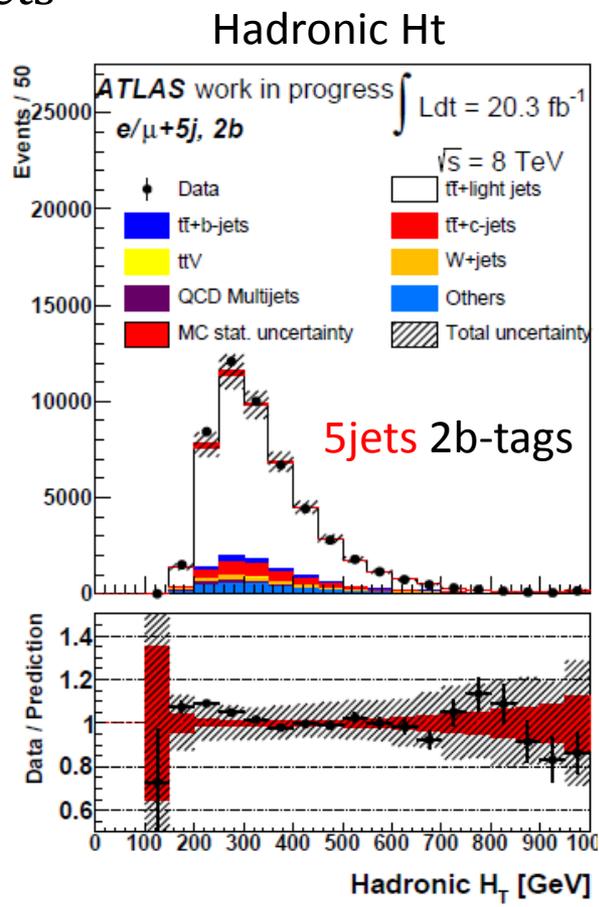
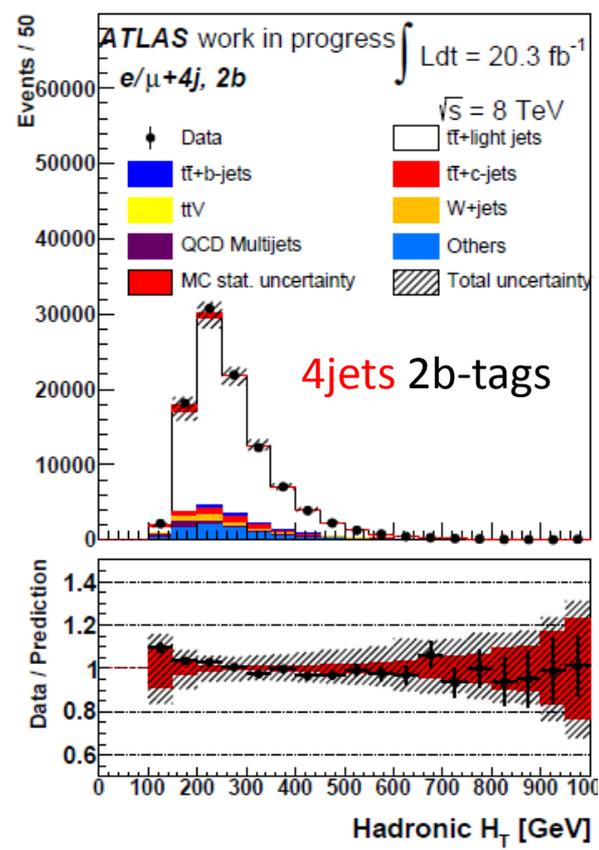
シグナル領域

$Tt\bar{t}$ +Heavy Flavor jets (灰色)と  $t\bar{t}$ +Light Flavor jets (白色)が主な背景事象

# 異なるジェット数の領域でのControl Plots

- コントロール領域においてシミュレーションとデータが一致するか確認

- Hadronic Ht =  $\sum Pt$  of jets  
Hadronic Ht

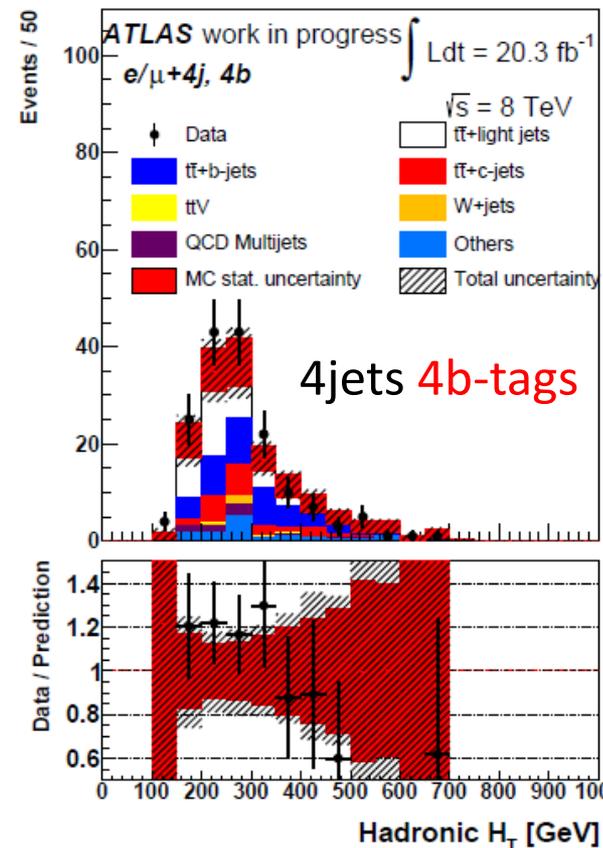
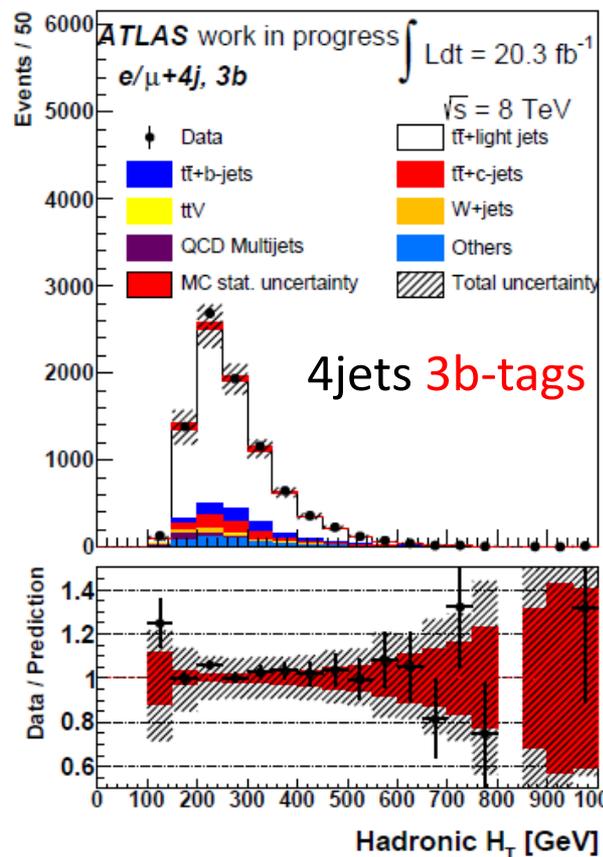
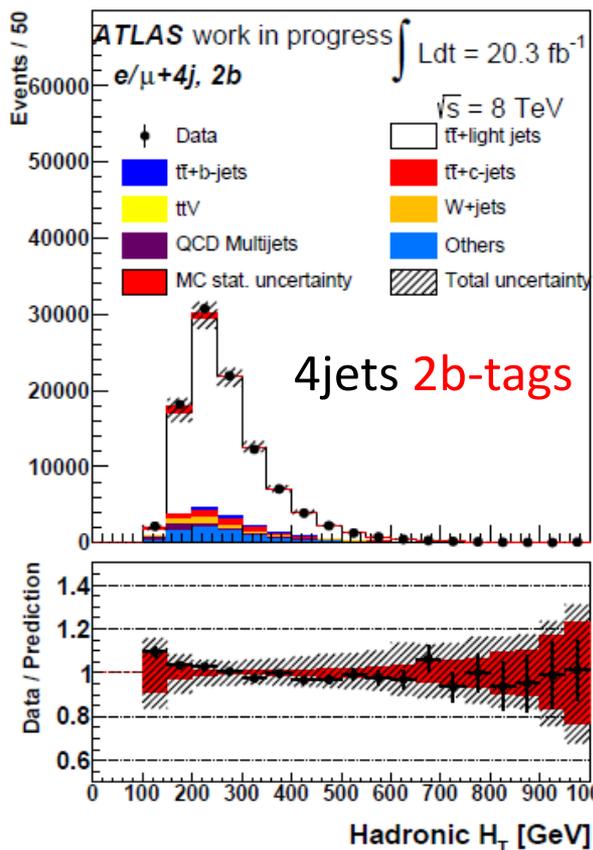


$\bar{t}t$ +light jets(白)  $\bar{t}t$ +b-jets(青)  $\bar{t}t$ +c-jets(赤)  $\bar{t}t$ +W/Z(黄) W+jets(橙) QCD(紫)  
 Others: Z+Jets, diboson,  $\bar{t}tH(bb)$ , single top(水色) データ(黒)

- よりジェットを要求: 統計が減る
- 誤差の範囲内でデータとシミュレーションは一致
- 赤い帯: MC統計誤差
- 斜線: MC統計誤差 + MC系統誤差

# 異なるb-tag数の領域のControl Plots

- コントロール領域においてシミュレーションとデータが一致するか確認

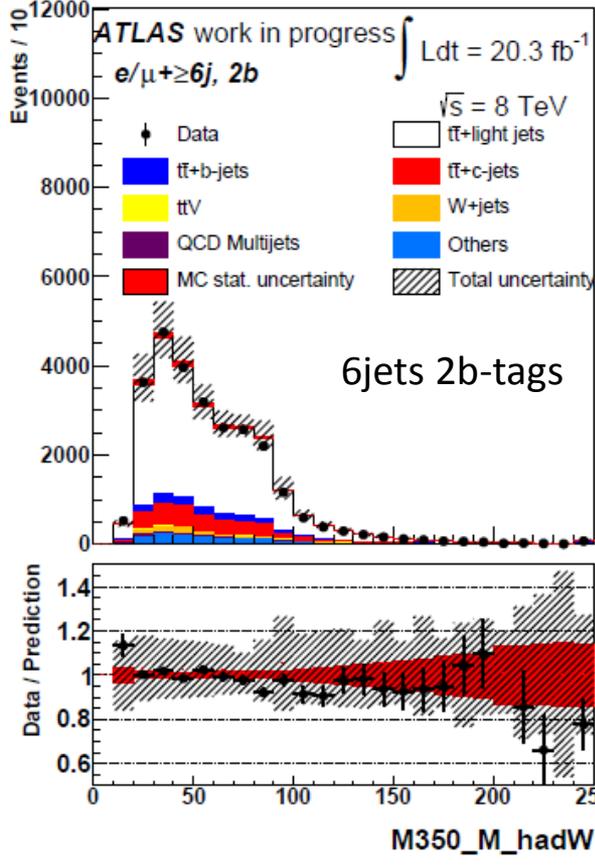
Hadronic H<sub>T</sub>Hadronic H<sub>T</sub>Hadronic H<sub>T</sub>

- よりb-tagを要求: 統計が減る
- 誤差の範囲内でデータとシミュレーションは一致

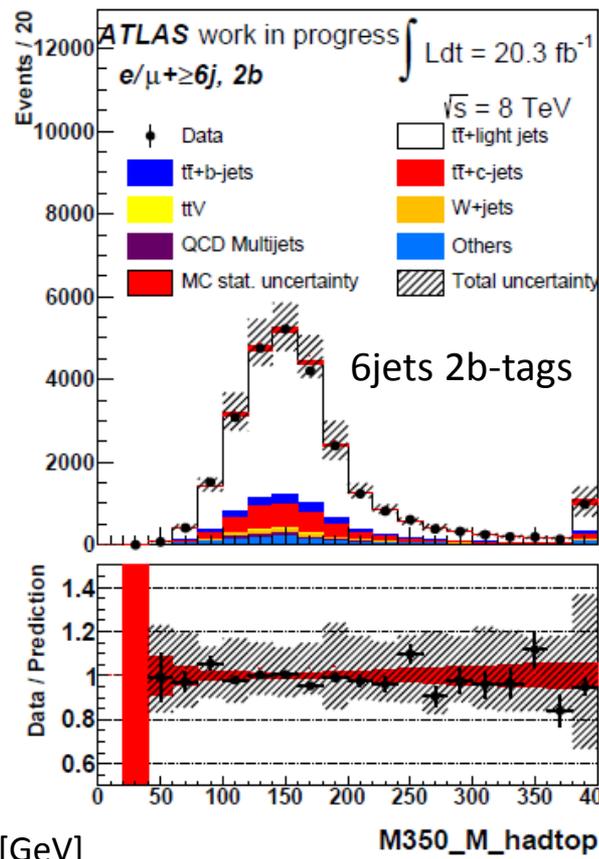
# 崩壊生成物に関するControl Plots

- 最尤法で再構成した事象の崩壊生成物をデータとシミュレーションで比較

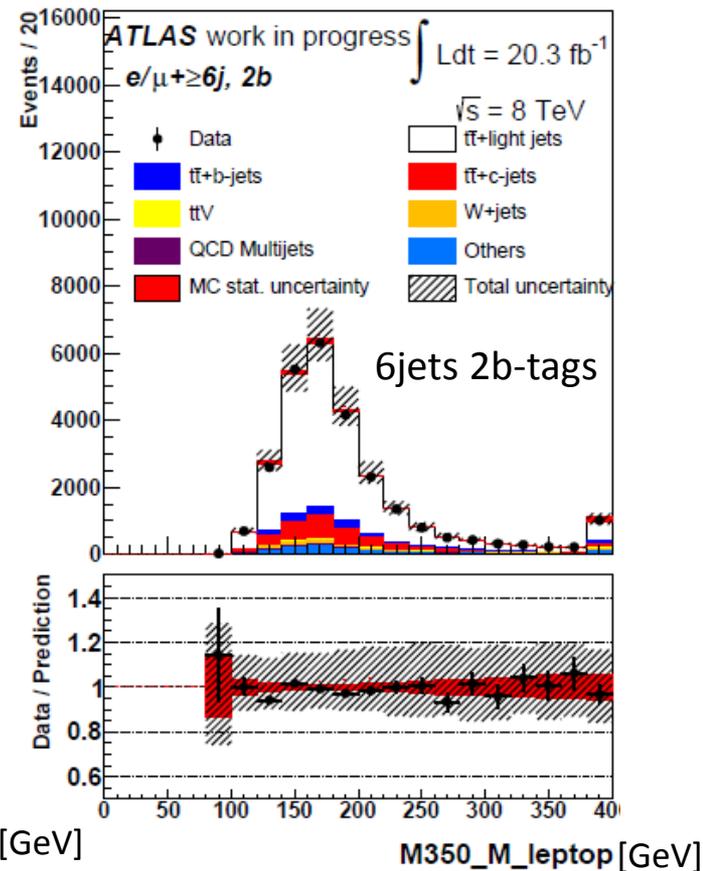
Hadronic W ボソンの  
の不変質量



Hadronic トップクォーク  
の不変質量



Leptonic トップクォーク  
の不変質量



- 誤差の範囲内でデータとシミュレーションは一致

# Tagging Rate Functionの導入

- 今まで: b-tag数のカットを要求すると統計が減る

Direct tag  
(今まで)

MC事象



b-tag アルゴリズム

0b-tag 1b-tag 2b-tags 3b-tags 4b-tags

1事象に対してb-tag数は一意に決まる

TRF  
(新たに導入)

MC事象

Efficiency map

(Pt、eta、真のフレーバー)  
\*別のMCサンプルから導出

P(0btag) P(1btag) P(2btags) P(3btags) P(4btags)

0b-tag

1b-tag

2b-tags

3b-tags

4b-tags

計算した確率の重みをつけて、  
n b-tag事象として扱う  
→実効的な統計量が増える

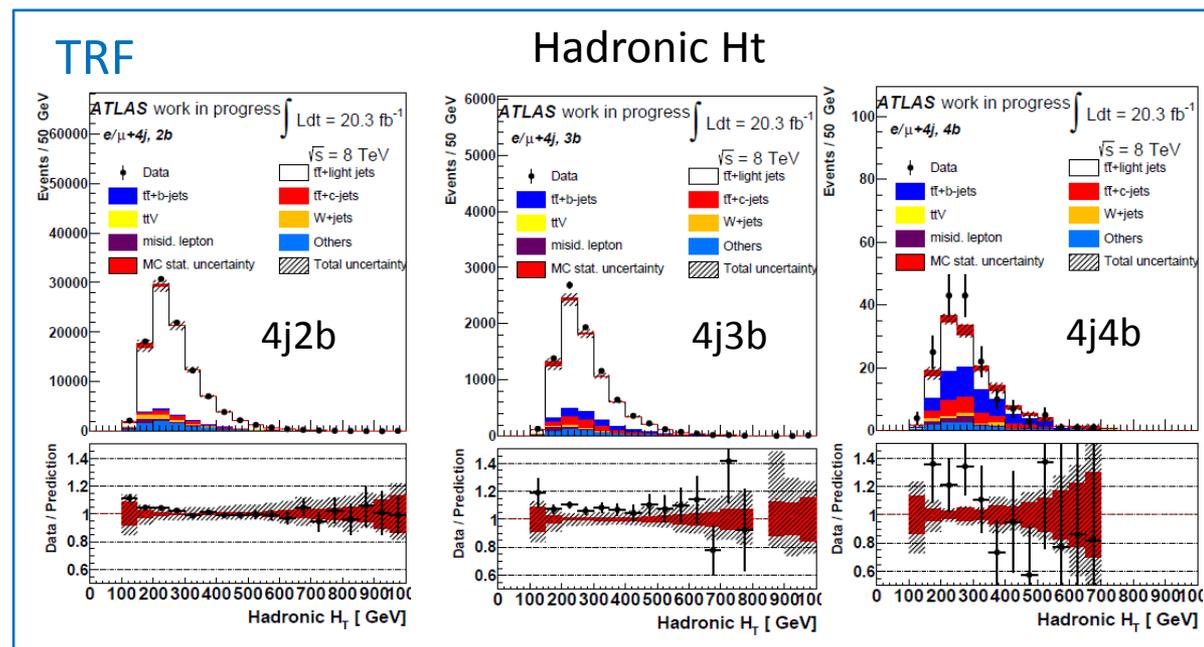
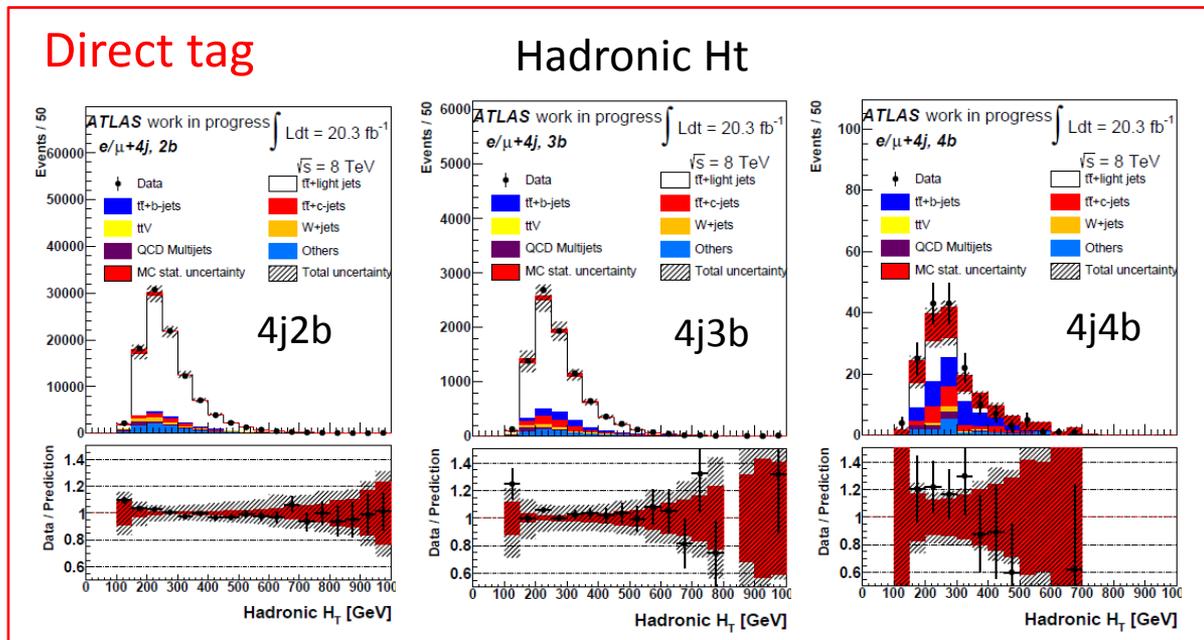
例: 4つb-jetがある事象にb-tag数のカットを要求する場合

	= 1b-tag	= 2b-tags	= 3b-tags	= 4b-tags
Direct tag	8 %	26 %	41 %	24 %
TRF	100 %	100 %	100 %	100 %

残る事象数に  
大きな違い

# TRFとDirect Tagの比較 (Control Plots)

- TRFはDirect tagに比べてバックグラウンドMCの統計誤差を減らす
- 特に4jets 4b-tagsの領域において、統計誤差の影響で不鮮明だった部分が著しく減った



# TRFとDirect tagの比較 (事象数)

表: コントロール領域でのバックグラウンド事象数 ± 統計誤差

	4j2b	4j3b	4j4b
Data (el+mu)	101882	8878	165
Direct tag (el+mu)	100747.6 ± 408.5	8631.7 ± 118.8	144.1 ± 16.2
Drect tag (1-(mc/data))	0.011 ± 0.004	0.028 ± 0.013	0.127 ± 0.098
TRF (el+mu)	99233.6 ± 279.6	8212.2 ± 51.2	142.6 ± 5.5
TRF (1-(mc/data))	0.026 ± 0.003	0.075 ± 0.006	0.136 ± 0.033

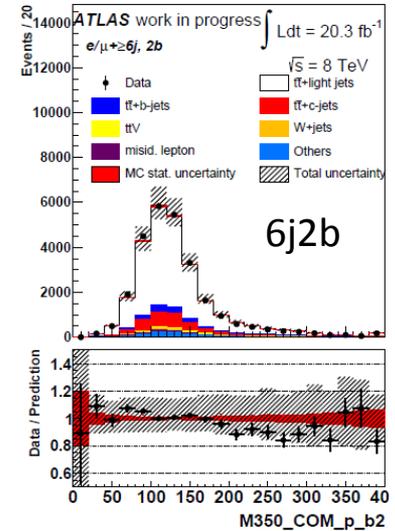
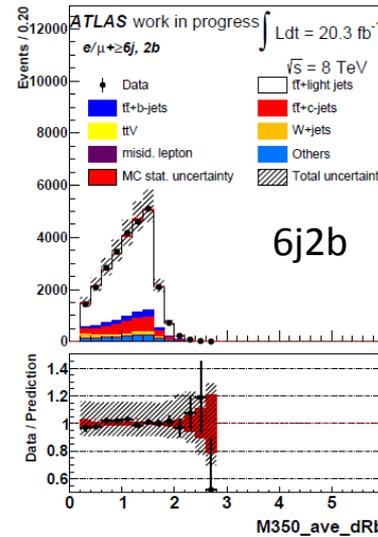
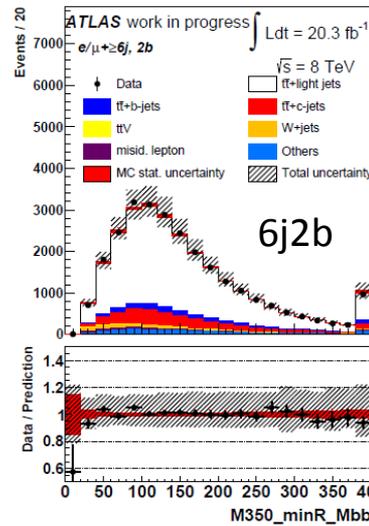
- TRFで見積もった場合、事象数を過小評価
  - 特に4jets 3b-tags領域で大きな違い
- 現在、対策を検討中

# S/B 分離のMVA入力変数のControl Plots

一番近い2つb-jet間で組ん 2つのb-jet間の平均距離  
だ不変質量

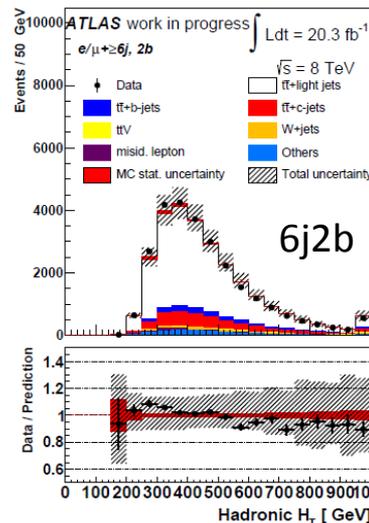
H+の崩壊から出た  
b-jetの運動量

- TRFで見積もったシミュレーションとデータで合っているか確認



- 誤差の範囲内でデータとシミュレーションは一致

ジェットのPtの和

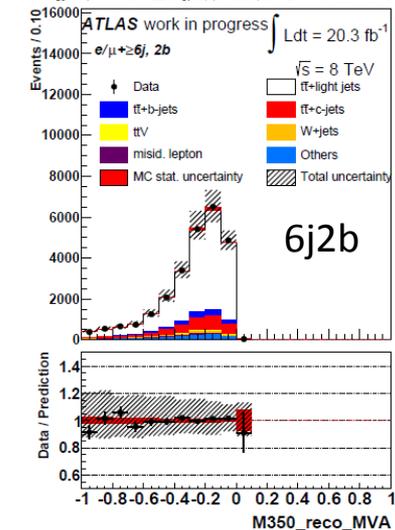
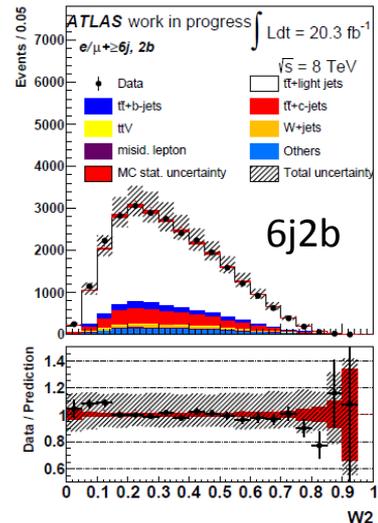


事象の形を示す変数 (Fox-Wolfram second momentum)

事象再構成の時に使った最尤法の出力

- ここから先の解析の流れは大まかに説明

- MVA(BDT)
- Expected Limit



# MVA (BDT)

- Direct tagを使用したサンプルを用いてトレーニング

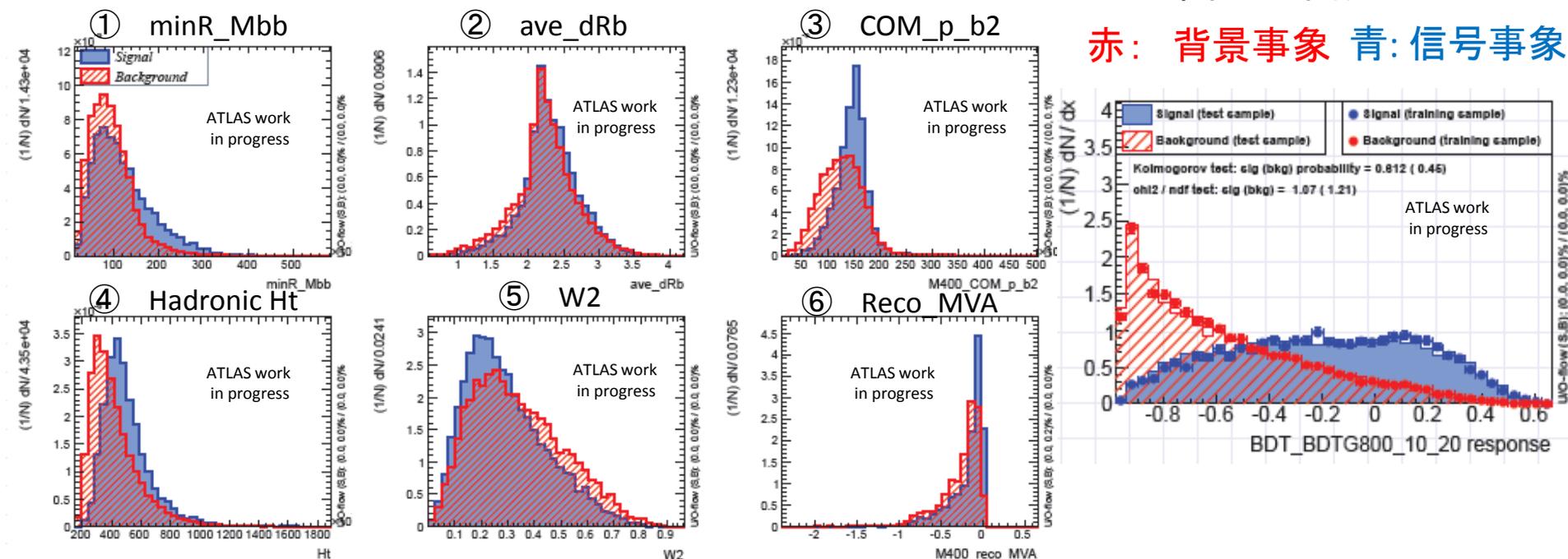
図: シグナル領域におけるBDT入力変数の分布

赤: 背景事象

青: 信号事象

図: BDT出力

赤: 背景事象 青: 信号事象

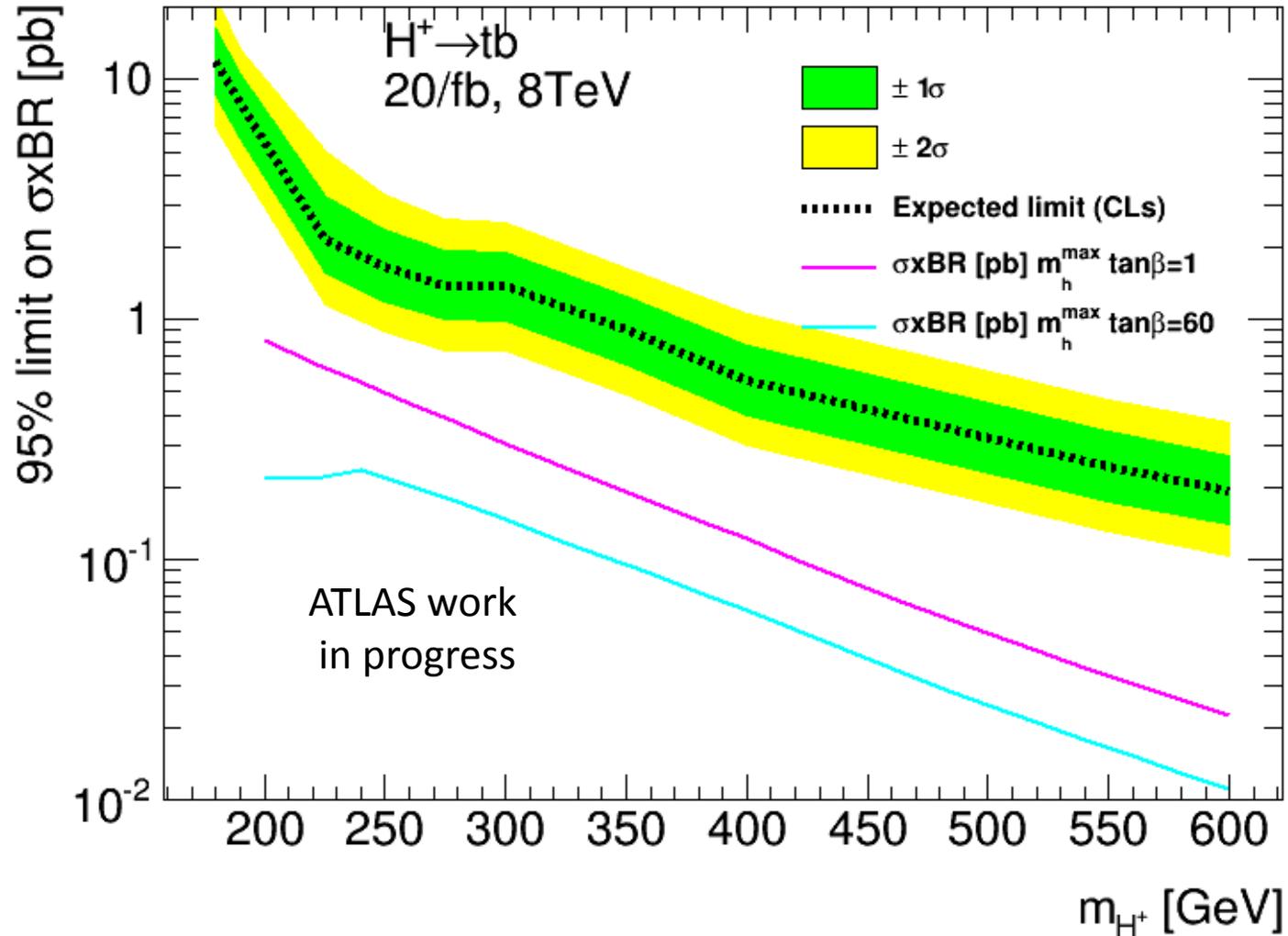


- オーバートレーニングされていない

- TRFで見積もったサンプルに対してトレーニングされたBDTをかける

# Expected Limit

- TRFで見積もった場合の荷電ヒッグス粒子の生成断面積の上限



- Expected limitよりも上の領域が排除

## まとめ

- LHC-ATLAS実験で取得された、重心系衝突エネルギー 8 TeV、積分ルミノシティ $20.3 \text{ fb}^{-1}$ のデータを使って重い荷電ヒッグス粒子探索を行っている
- Direct tagで見積もった場合、コントロール領域においてデータをシミュレーションでよく記述できている
- TRFを導入することで、実効的なMC統計量を増やした
- TRFで見積もった場合の荷電ヒッグス粒子の生成断面積のExpected limitを出した
- 現在、TRFで見積もった場合の事象数の過小評価を解決しようと試みている

Back up

# Systematics error表

Systematic uncertainty	Type	Components
Luminosity	N	1
<b>Physics Objects</b>		
Electron	SN	5
Muon	SN	6
MET	SN	2
Jet vertex fraction	SN	1
Jet energy resolution	SN	1
Jet energy scale	SN	22
Jet reconstruction efficiency	SN	1
<i>b</i> -jet tagging efficiency	SN	6
<i>c</i> -jet tagging efficiency	SN	6
light jet tagging efficiency	SN	12
<b>Background Model</b>		
$\bar{t}\bar{t}$ cross section	N	1
$\bar{t}\bar{t} + V$ cross section	N	1
single top cross section	N	1
<i>W</i> +jets normalisation	N	3
<i>Z</i> +jets normalisation	N	1
<i>W</i> - $p_T$ reweighting	SN	1
<i>Z</i> - $p_T$ reweighting	SN	1
Di-Boson cross section	N	1
Multi-jet normalisation	N	2
Multi-jet shape	SN	4
$\bar{t}\bar{t}$ modeling: parton shower	SN	2
$\bar{t}\bar{t}$ modeling: $p_T$ reweighting	SN	9
$\bar{t}\bar{t}$ + heavy flavour: HF reweighting	SN	2
$\bar{t}\bar{t}$ + heavy flavour: normalisation	N	2
$\bar{t}\bar{t}$ + heavy flavour: generator	SN	5
$\bar{t}\bar{t} + H$ cross section	N	1
<b>Signal Model</b>		
4FS / 5FS	N	1
ISR / FSR	N	1
$H^\pm \rightarrow tb$ generator	N	1

# Signal and Background Modeling

\*Background: common with ttH(bb) group<sup>19</sup>

Background process	Subcomponent	Generator & parton shower	Cross section (in pb)	Normalization
$t\bar{t}$ with at least one lepton $l$		Powheg & Pythia	137.3	top and $t\bar{t}$ Pt reweighting $t\bar{t}$ +HF reweighting
Single top	$t$ -channel (with $l$ )	AcerMC & Pythia	28.4	Theoretical cross section
	$s$ -channel (with $l$ )	Powheg & Pythia	1.8	
	$Wt$ -channel	Powheg & Pythia	22.4	
$W$ + jets	$W(l\nu)$ +jets	AlpGen & Pythia	$3.6 \times 10^4$	$W$ Pt reweighting
	$Wb\bar{b}$ + jets		1.5	
	$Wc\bar{c}$ + jets		4.8	
	$W$ + $c$ + jets		1.7	
$Z$ + jets	$Z/\gamma^*(ll)$ +jets, $m(ll) > 60$ GeV	AlpGen & Pythia	$3.4 \times 10^3$	$Z$ Pt reweighting
	$Z/\gamma^*(ll)b\bar{b}$ +jets, $m(ll) > 30$ GeV		41.3	
	$Z/\gamma^*(ll)c\bar{c}$ +jets, $m(ll) > 30$ GeV		84.8	
Diboson	$WW$	AlpGen & Herwig	29.7	Theoretical cross section
	$ZZ$		1.5	
	$WZ$	Sherpa	2.3	
	$WZ$ (with one $l$ )		6.01	
$t\bar{t} + V$		MadGraph & Pythia	0.44	Theoretical cross section
$t\bar{t}H(m_H = 125$ GeV)	Semilepton	Powheg & Pythia	0.0566	Theoretical cross section
$t\bar{t}H(m_H = 125$ GeV)	Dilepton		0.0136	
Misidentified lepton				Data
$H^+(m_{H^+} = 180 \sim 600$ GeV)	Semilepton	Powheg & Pythia	1.0	Theoretical cross section
$H^+(m_{H^+} = 180 \sim 600$ GeV)	Dilepton		1.0	

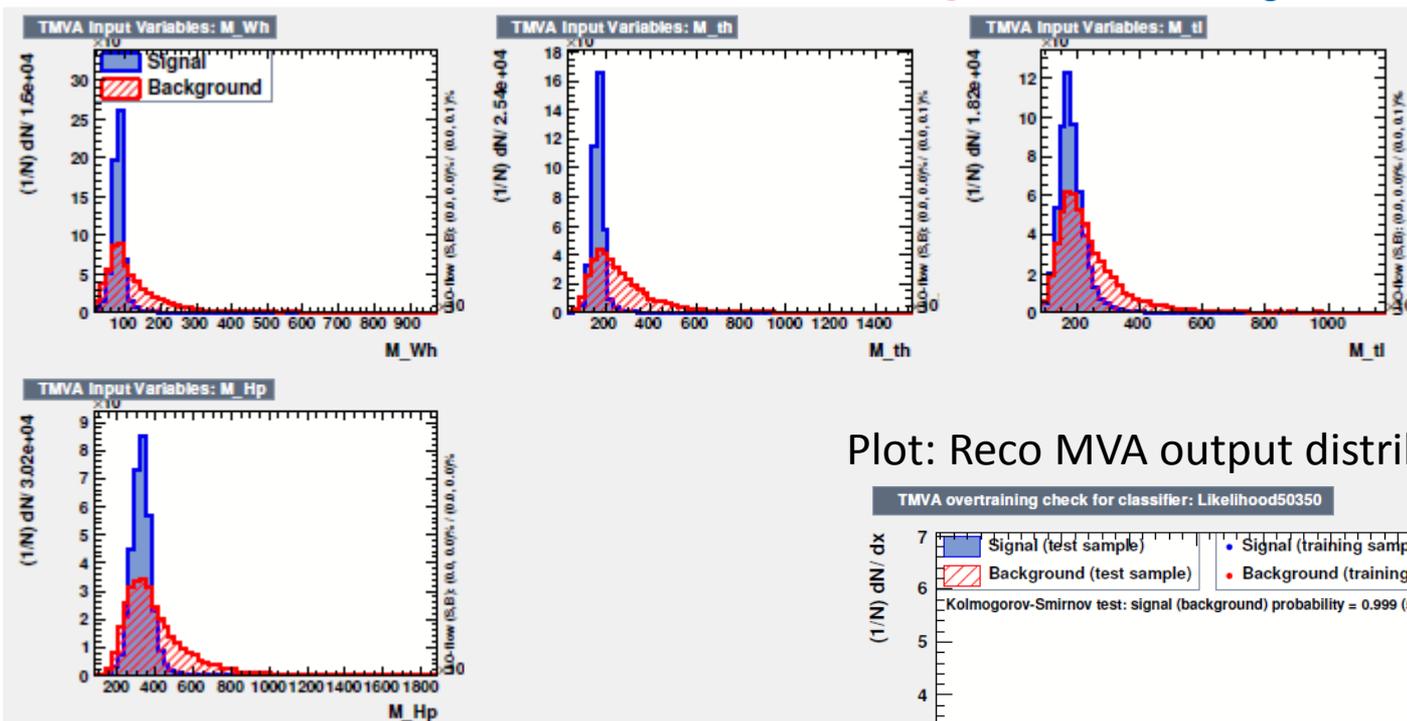
# Event reconstruction ( $H^+$ mass = 350 GeV)

Variable	Definition
$m(W_{\text{had}})$	Reconstructed hadronically decaying $W$ -boson
$m(t_{\text{had}})$	Reconstructed hadronically decaying top quark
$m(t\ell)$	Reconstructed leptonically decaying top quark
$m(H^+)$	Reconstructed $H^+$

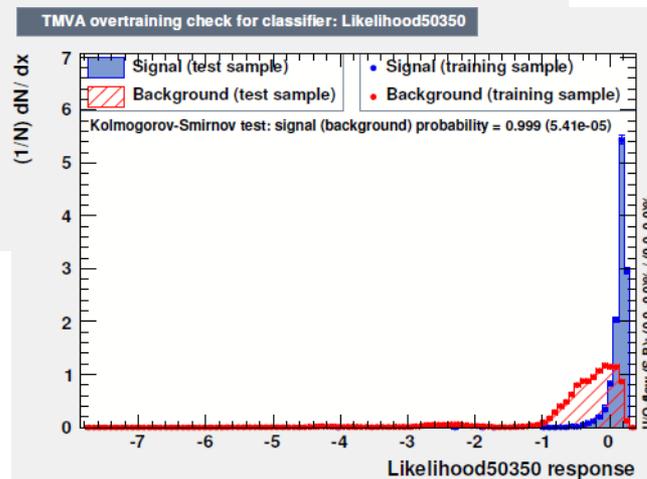
Plots: Reco MVA input variables

Red: background

Blue: signal



Plot: Reco MVA output distribution



# Tagging Rate Functionの導入

- MC事象中に含まれるb-tag数

- Direct tag:

- b-tagアルゴリズムをMC事象中に含まれるジェットに対して適用
- b-tagされたジェット数を数える
- 1事象に対してb-tag数は一意に決まる

- TRF

- あらかじめ、MC サンプルを使ってジェットがb-tag される確率をジェットの Pt、eta、真のフレーバーの関数として、パラメタライズしておく
  - MC事象に対してn b-tagされる確率を計算 (  $n = 0, 1, 2, \dots, \# \text{ jets}$  )
  - 計算した確率の重みをつけて、n b-tag事象として扱う
- 実効的な統計量が増える

例: 4つb-jetがある事象にb-tag数のカットを要求する場合

	>= 1b-tag	>= 2b-tags	>= 3b-tags	= 4b-tags
Direct tag	99 %	92 %	65 %	24 %
TRF	100 %	100 %	100 %	100 %

残る事象数に  
大きな違い

# Fox-Wolfram Moments (H+ analysis)

- Fox-Wolfram moments ,  $W_l (l = 0, 1, 2, \dots)$

- $$W_l = \sum_{i,j=0}^N \frac{|\vec{p}_i| |\vec{p}_j|}{E^2} P_l(\cos \Omega_{ij})$$

$p_{i,j}$  = ジェットの運動量

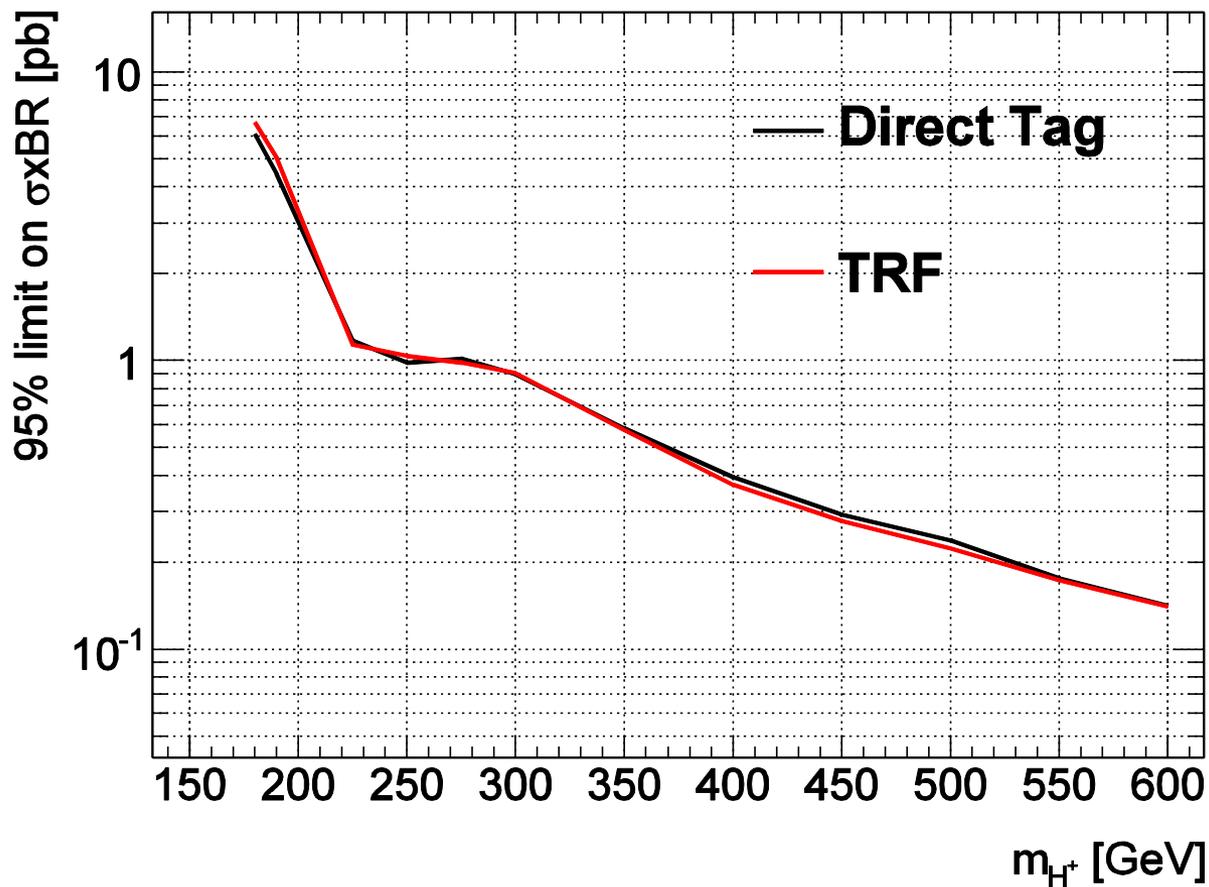
$E$  = イベント中のジェットのエネルギーの和

$P_l(\cos \Omega_{ij})$  = ルジャンドル多項式

$\cos \Omega_{ij} = \cos \theta_i \cos \theta_j + \sin \theta_i \sin \theta_j \cos(\phi_i - \phi_j)$

# Comparison of Limits between Direct Tag and TRF

- Include only statistics uncertainty



# Our Ntuple Production Procedure

Our Ntuple production is as flow:

**Common files  
with ttH(bb) Group**

- Level 1 Ntuple
  - produced with TopRootCore(14-00-20)

---

↓
- Level 2 Ntuple
  - Calculate All event weight (reweight and SF)

↓
- Level3 Ntuple ( $H^+ \rightarrow tb$ )
  - Add variables specific to  $H^+ \rightarrow tb$  analysis
    - Information of event reconstruction MVA
    - variables for S/B separation BDT
  - Information of direct b-tagging and Tagging Rate Function

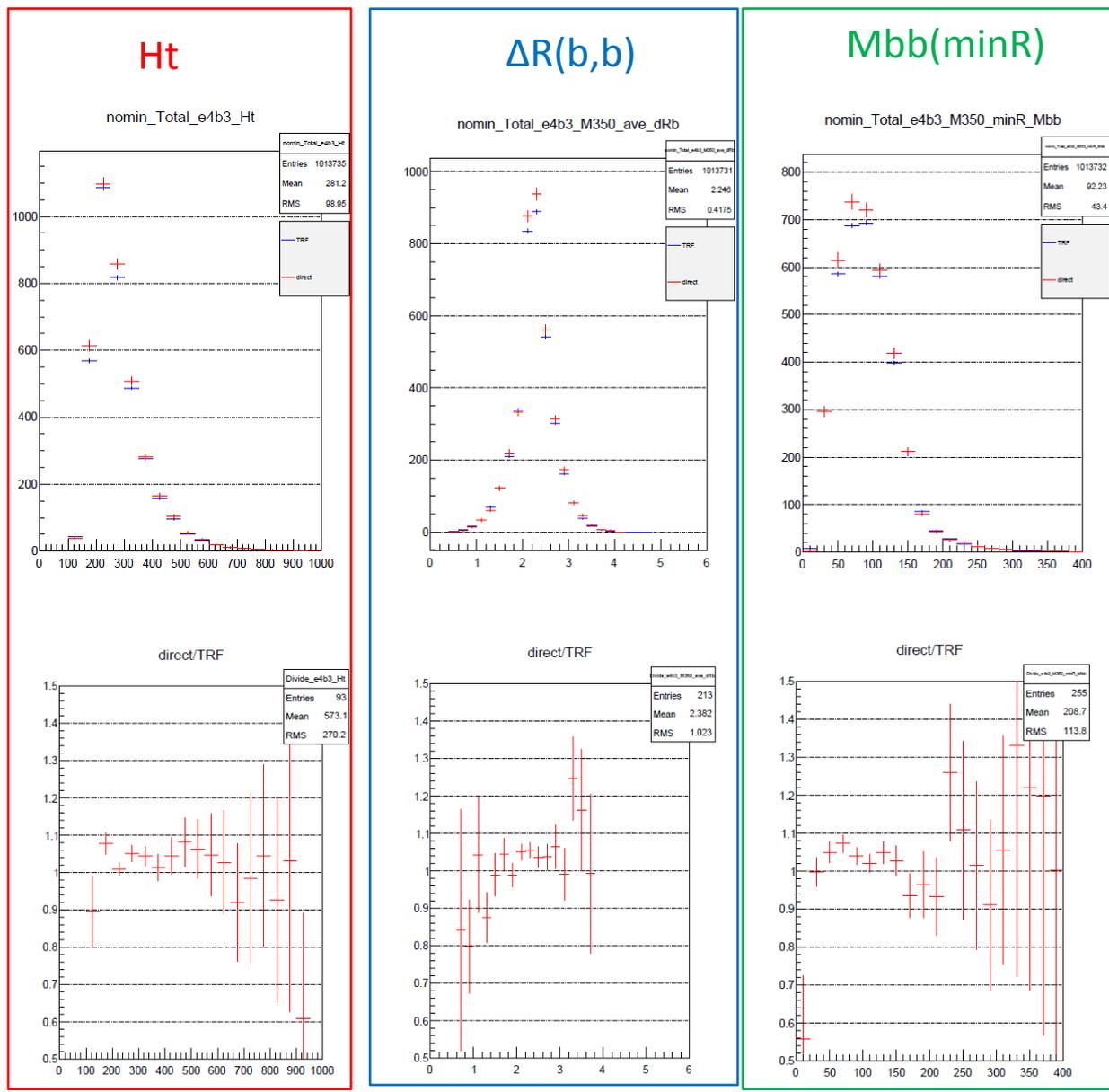
# Comparison of TRF and direct tag for BDT variables without systematics bands, 4jets 3b-tag in electron channel

Upper plots: The distributions for total background samples

Red plots: Direct tag

Blue plots: TRF

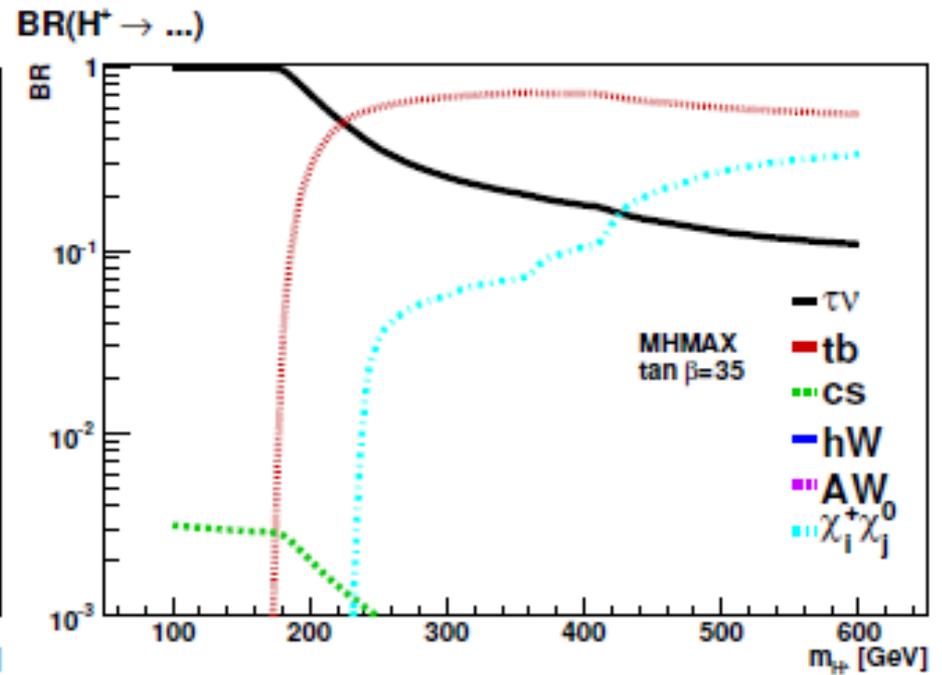
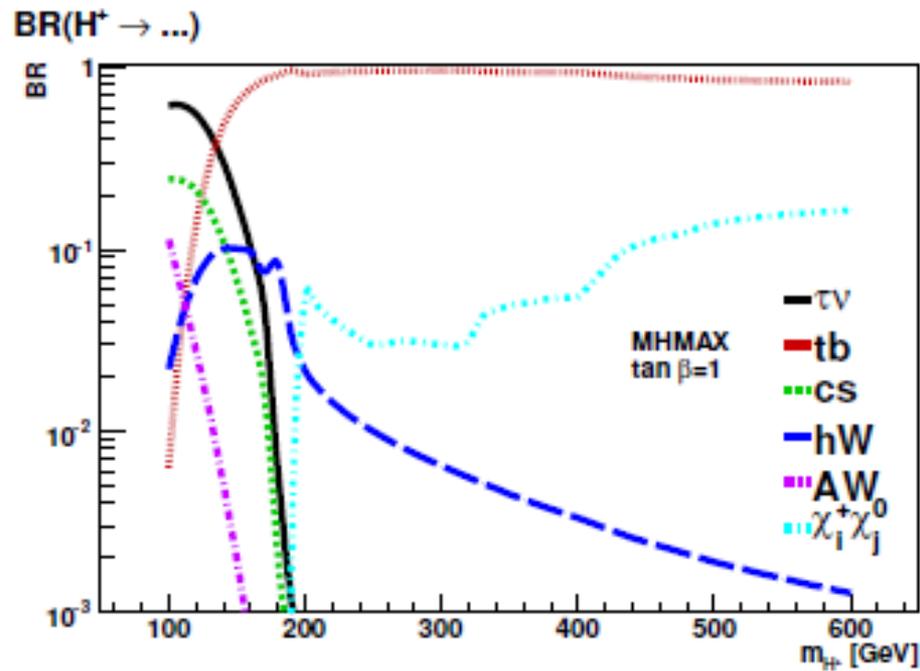
Bottom plots: Ratio plots, The distribution with direct tag is divided by TRF



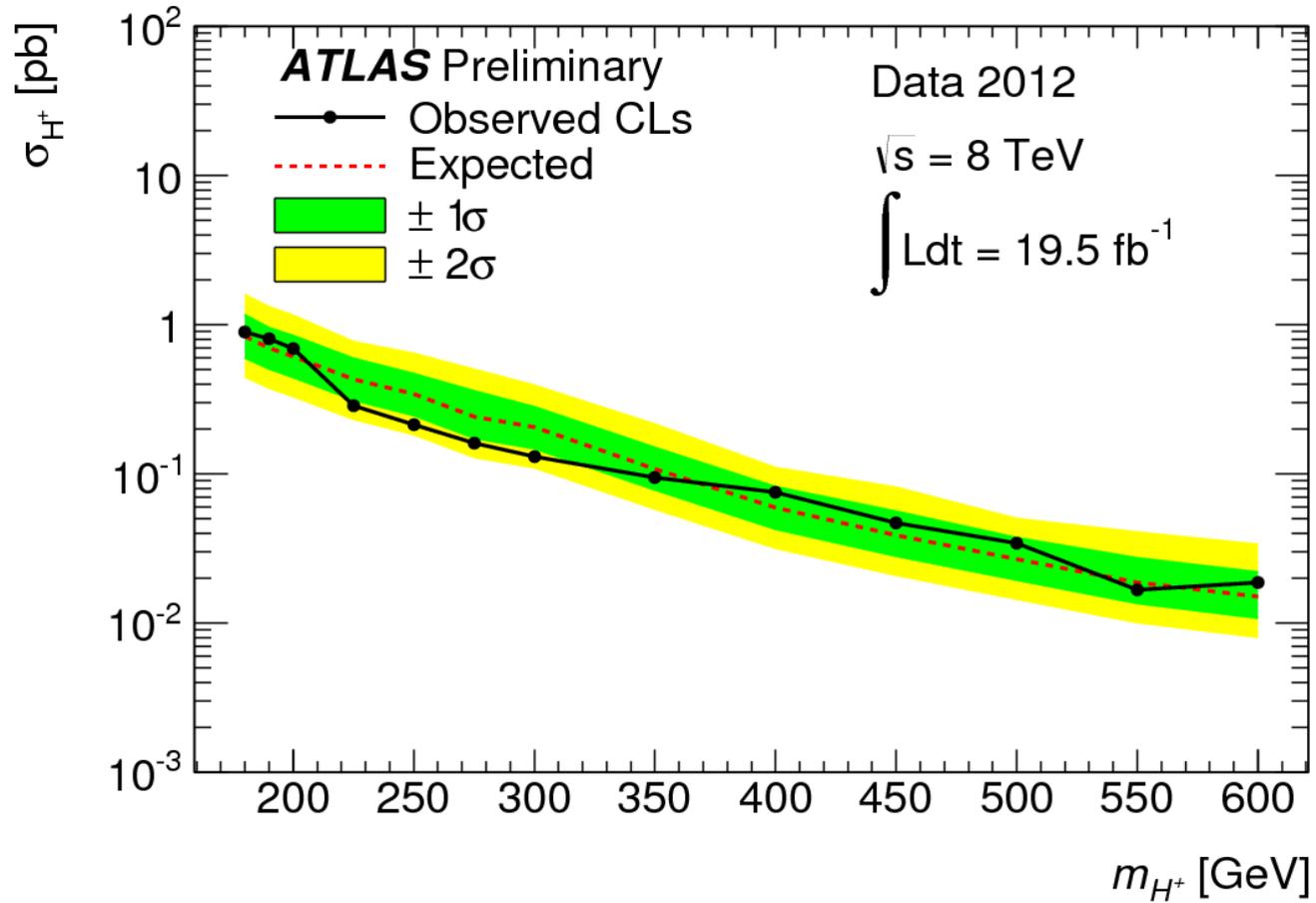
# Analysis Outline

- Event selection
  - Based on standard top group selection: 1 lepton, > 3jets, MET
    - 1lepton trigger:
      - EF e24vhi medium1 or EF e60 medium1
      - EF mu24i tight or EF mu36 tight
    - Electron: Author 1 or 3, Tight,  $P_t > 25$  GeV,  $|\eta| < 2.47$  ( $1.37 < |\eta| < 1.52$  excluded),  $z_0 < 2$ mm,  $p_T$  and  $|\eta|$  dependent tracking isolation (corresponding to 90% signal efficiency)
    - Muon: Combined and Tight,  $P_t > 25$  GeV,  $|\eta| < 2.47$ ,  $z_0 < 2$ mm, Track isolation using  $p_T$  dependent cone,  $\Sigma p_T < 0.05 * p_T$
    - Jets: Anti-kt 0.4, LCW,  $p_t > 25$  GeV,  $|\eta| < 2.5$ , Jet vertex fraction cut:  $|JVF| > 0.5$  for  $p_T < 50$  GeV and  $|\eta| < 2.4$
    - B-tag: MV1, working point= 70% efficiency for b-jets in tt events
    - MET: MET AntiKt4LCTopoJets tightpp
  - Separate signal and control regions
    - Signal region:  $\geq 5$ jets and  $\geq 3$ b-tags
    - Control region:  $= 4$ jets and  $\geq 2$ b-tags,  $\geq 5$ jets and  $= 2$ b-tags
- Event reconstruction
- S/B separation
- Limit setting

# MSSM Branching Ratio



# $H^+ \rightarrow \tau \nu$



# B-tag algorithm

- MV1: multivariate tagging algorithm
  - IP3D: 主要崩壊点に対するtrackの衝突係数
  - SV1: 2次崩壊点
  - JetFitter: CハドロンやBハドロンの崩壊の幾何学的特徴