

LHC-ATLAS実験における 標準模型Higgs粒子の $t\bar{t}H$ 生成過程の探索

- 大川真耶、江成祐二、増渕達也、
田中純一、浅井祥仁
- 東京大学理学系研究科物理学専攻
素粒子物理国際センター(ICEPP)

- 導入
- $ttH, H \rightarrow W^+W^-$ チャンネル
 - 概要
 - 事象選択
 - 背景事象
 - 結果
- まとめ

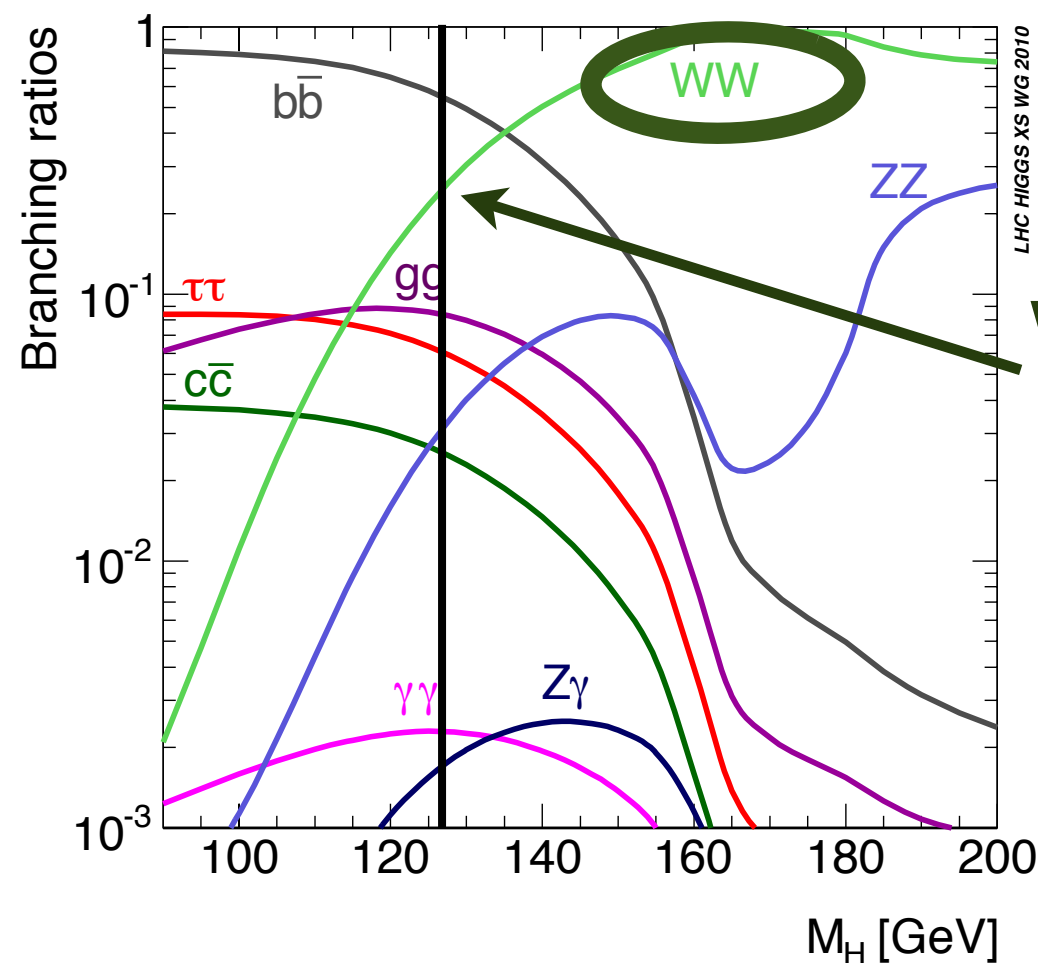
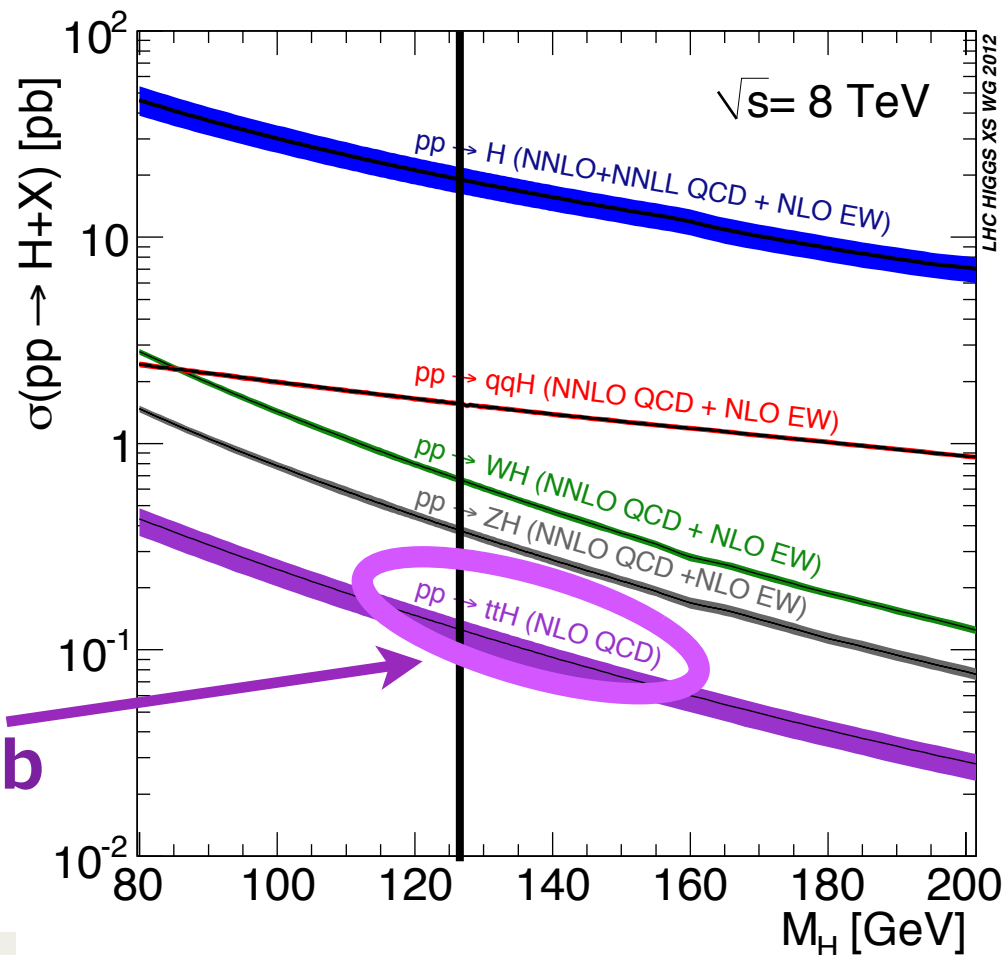
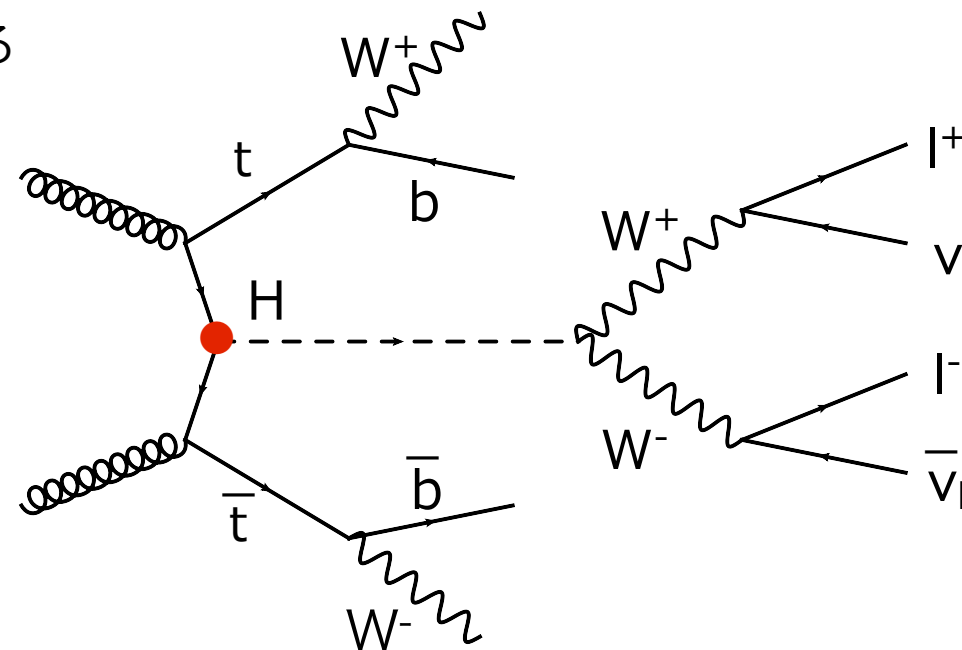
- LHC実験において126GeV程度のヒッグス粒子を発見！
 ➡ 今後はヒッグス粒子の性質解明に焦点が移る

- ttHプロセス

- Top-Yukawa結合定数の直接測定が可能！
- 散乱断面積が小さい

- H->WW崩壊モード

- 崩壊分岐比がH->bbに次いで大きい
- H->bbと比較してQCD背景事象が少ない
- 終状態にニュートリノ（質量再構成が困難） ➡ カット&カウント

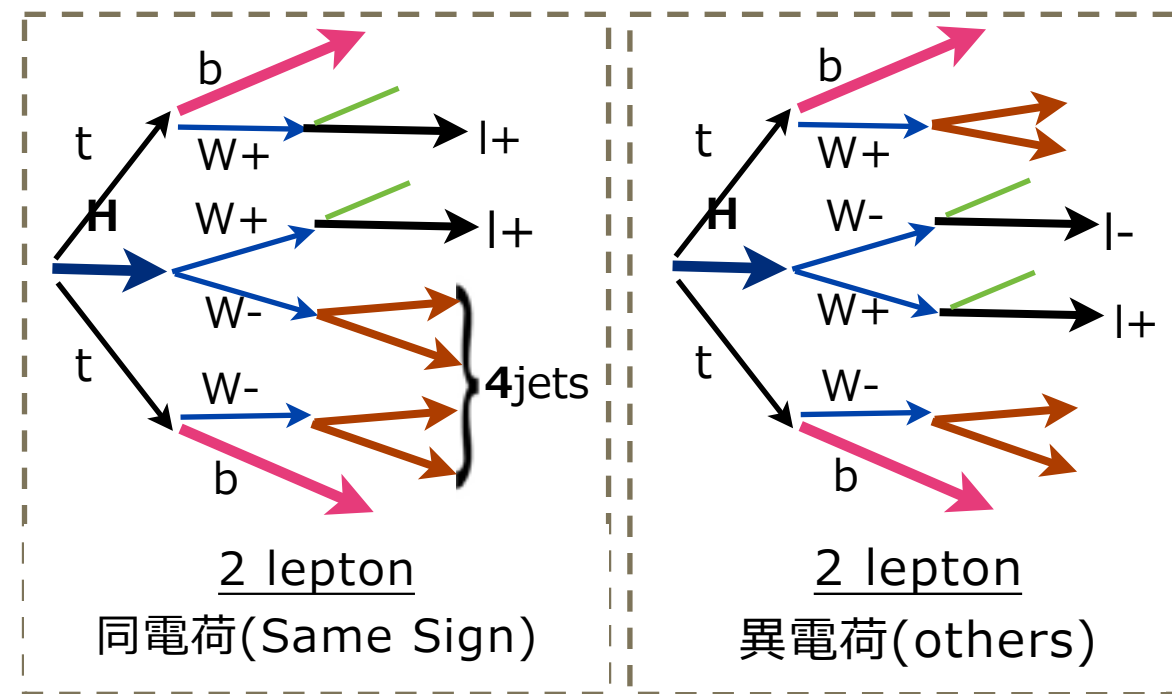
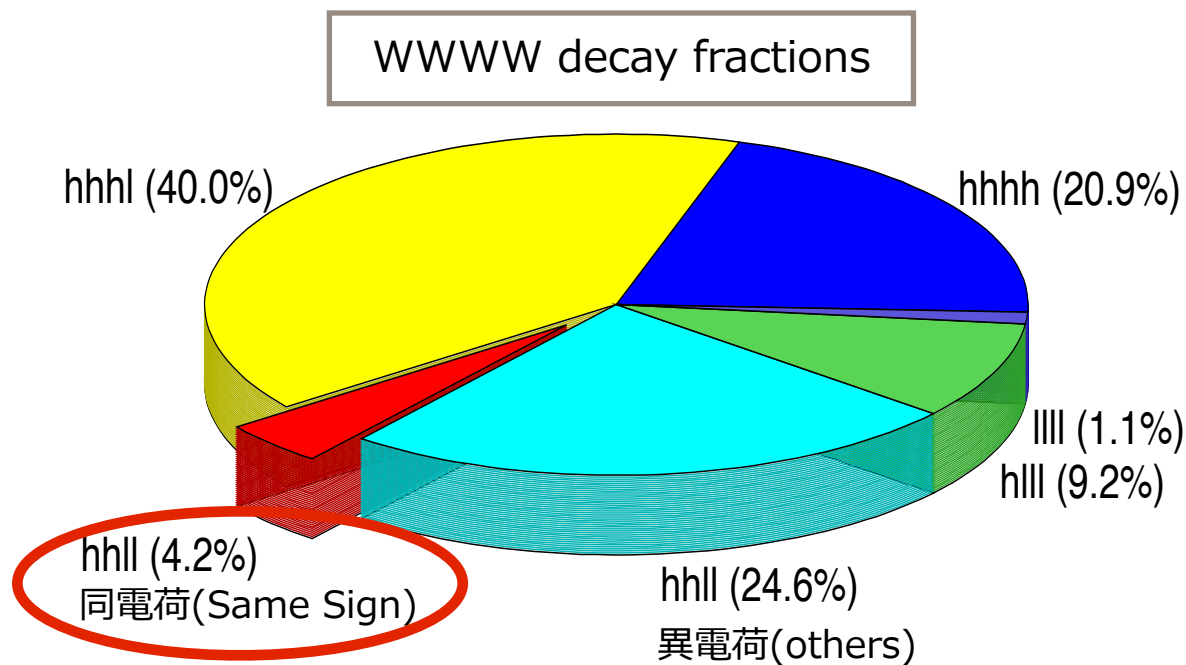


ttH XS
 ~ 0.13pb

WW br
 ~ 0.22

ttH, H → WWチャンネルの概要

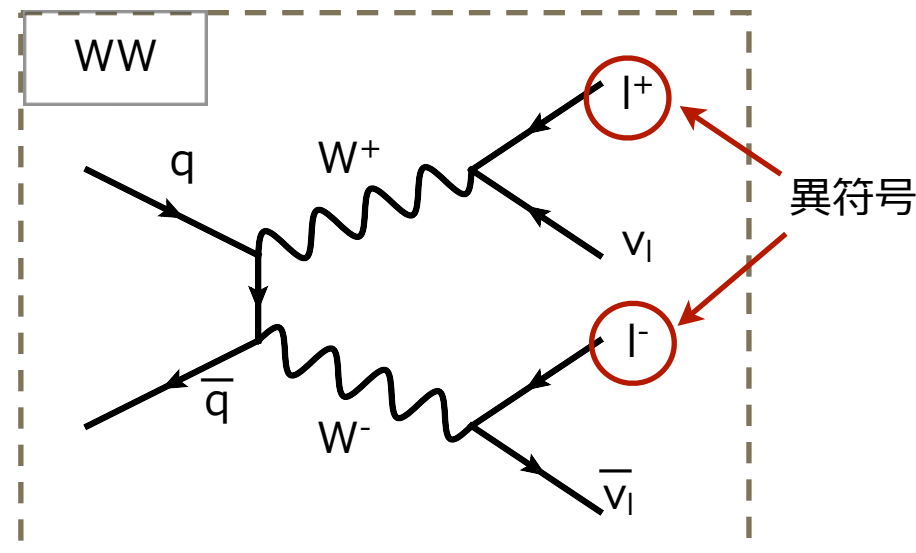
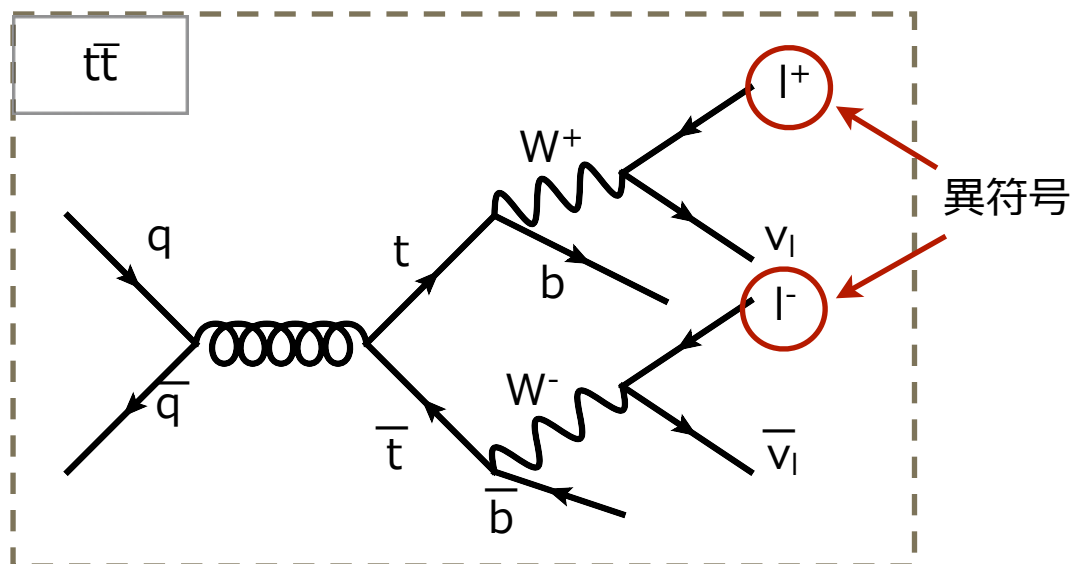
- 2つのtop quarkは100%Wbに崩壊 ($ttH \rightarrow Wb Wb WW$)
- 終状態は4つのWの崩壊に応じて決まる



- 同電荷 (Same Sign) 2 leptonチャンネルを採用 ※今回は $\mu\mu$ チャンネルにフォーカス

✓ トポロジー: 2つのlepton + 2つのb-jetを含む6つのjet

➔ Higgs由来のレプトンを1つ、top由来のレプトンを1つ取ってくるため
質量再構成はできないが背景事象 ($t\bar{t}$, diboson) の大幅な削減が可能



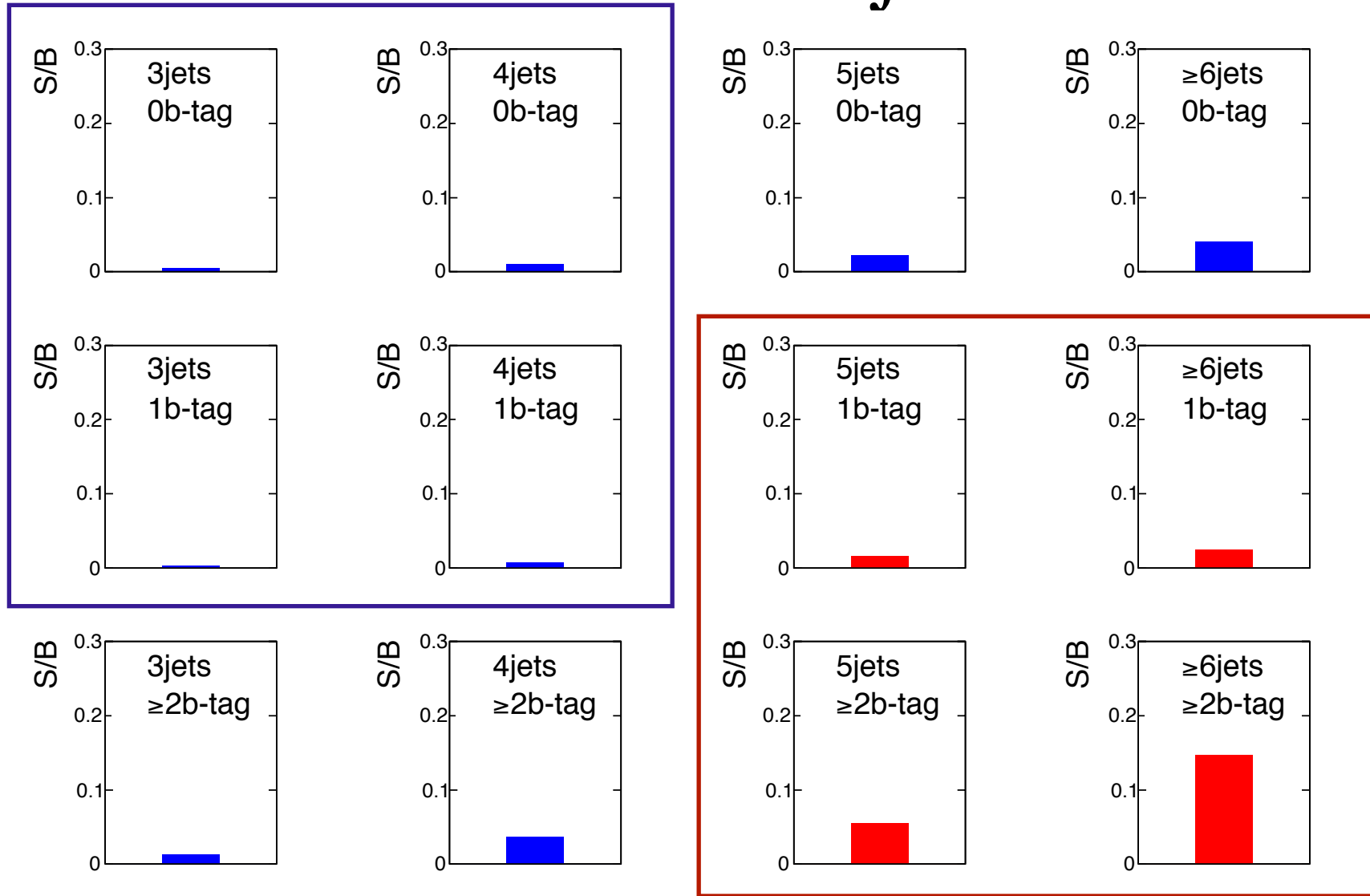
- **トポロジー : 2つのlepton + 2本のb-jetを含む6本のjet**
 - ✓ シングルレプトントリガー (pT>24GeV, isolation)
 - ✓ 2つの**同電荷 (Same Sign)** のHigh-pT (pT>25GeV) レプトン
 - ✓ 3つめのレプトン (pT>25GeV) をveto - $t\bar{t}Z \rightarrow 2b \ 3l \ 2v \ 2j$, $t\bar{t}W \rightarrow 2b \ 3l \ 3v$ 等の背景事象を削減
- **jet/b-tag の数でカテゴリ分け ... Sensitivityの向上**
 - ✓ 5本以上のjet, 1本以上のb-jets - S/Bの良い領域を採用

Number of jets $\rightarrow \int L dt = 20.7 \text{ fb}^{-1}, \sqrt{s} = 8\text{TeV}$

ATLAS Work in Progress

CR
 $\leq 4\text{jets},$
 $\leq 1\text{btag}$

Number of b-tags \downarrow



SR
 $\geq 5\text{jets},$
 $\geq 1\text{btag}$
(Blind)

背景事象

- 3つのカテゴリに分類される

1) true same sign 2 leptons

- $t\bar{t}+V$ ($t\bar{t}W, t\bar{t}Z$) が主 (生成断面積は非常に小さい)
- MCで評価 (irreducible, 基本的な事象選択では落とせない)

2) charge mis-ID背景事象(電荷誤同定)

- 異符号の2つのレプトンのうち一方の電荷が誤同定された事象
- $\mu\mu$ チャンネルでは無視できる (muonの電荷誤同定率 $\sim 0.01\%$)

3) Fake lepton背景事象 ($t\bar{t}$)

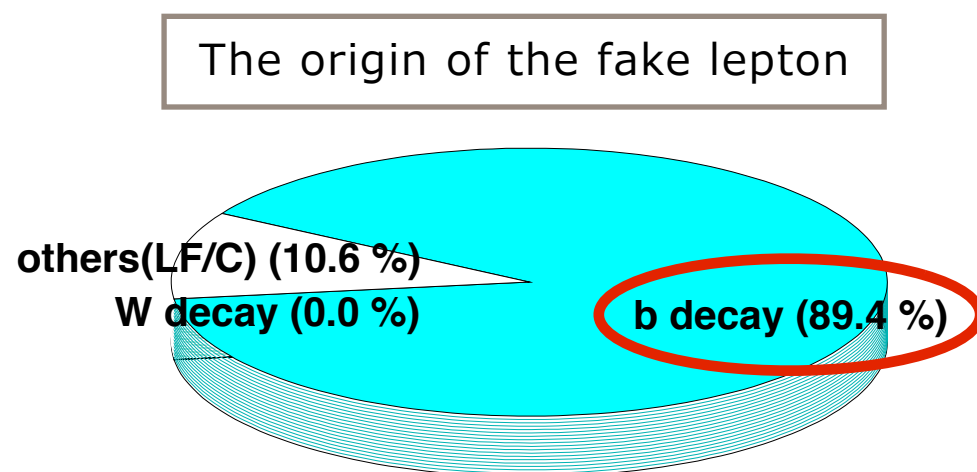
- leptonの誤同定起源の背景事象
- シミュレーションでleptonの誤同定率を測定するのは不定性が大きいため困難

➔ 実データ (**Matrix Method**)を使って見積もりを行う ※詳細は次ページ

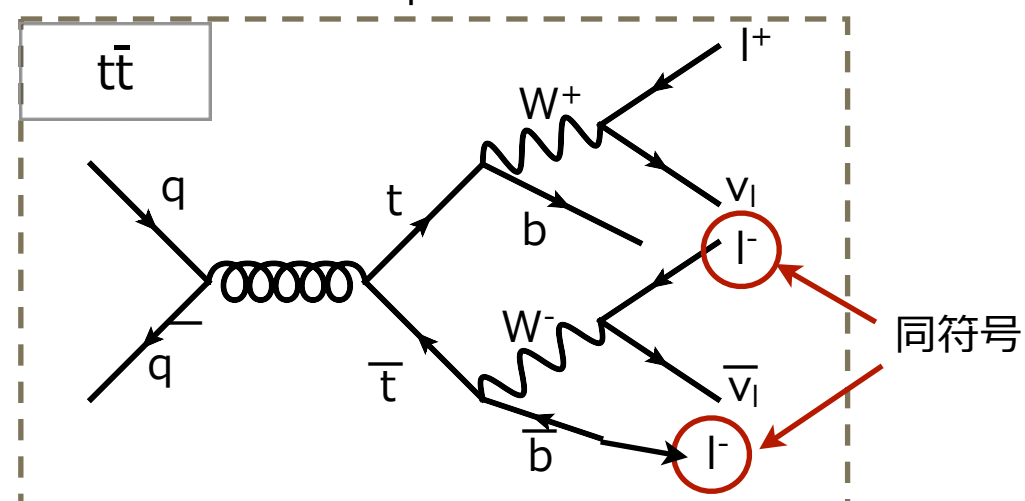
- Fake leptonの起源 : $t\bar{t}$ semi-leptonic b-decay 由来のレプトン

$t\bar{t}$ MCのtruth情報を用いてFake leptonの起源をチェック

fake lepton背景事象
の見積もりが鍵!!



$t\bar{t}$ 由来のfake lepton背景事象の具体例



● Fake lepton背景事象 ... Matrix Method (full data-driven)

- ▶ real lepton likeな"tight lepton"と jet likeな "loose lepton"という2種類のレプトンを定義

Tight : signal requirementを満たすレプトン
 Loose : Tight leptonのisolationを反転させたもの

- ▶ 以下の行列式を使ってSRに残るFake lepton事象の数を見積もる

$$\begin{bmatrix} N_{TT} \\ N_{TL} \\ N_{LT} \\ N_{LL} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \epsilon_{r1}\epsilon_{r2} & \epsilon_{r1}\epsilon_{f2} & \epsilon_{f1}\epsilon_{r2} & \epsilon_{f1}\epsilon_{f2} \\ \epsilon_{r1}(1-\epsilon_{r2}) & \epsilon_{r1}(1-\epsilon_{f2}) & \epsilon_{f1}(1-\epsilon_{r2}) & \epsilon_{f1}(1-\epsilon_{f2}) \\ (1-\epsilon_{r1})\epsilon_{r2} & (1-\epsilon_{r1})\epsilon_{f2} & (1-\epsilon_{f1})\epsilon_{r2} & (1-\epsilon_{f1})\epsilon_{f2} \\ (1-\epsilon_{r1})(1-\epsilon_{r2}) & (1-\epsilon_{r1})(1-\epsilon_{f2}) & (1-\epsilon_{f1})(1-\epsilon_{r2}) & (1-\epsilon_{f1})(1-\epsilon_{f2}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} N_{RR} \\ N_{RF} \\ N_{FR} \\ N_{FF} \end{bmatrix}$$

測定可能量
測定可能量

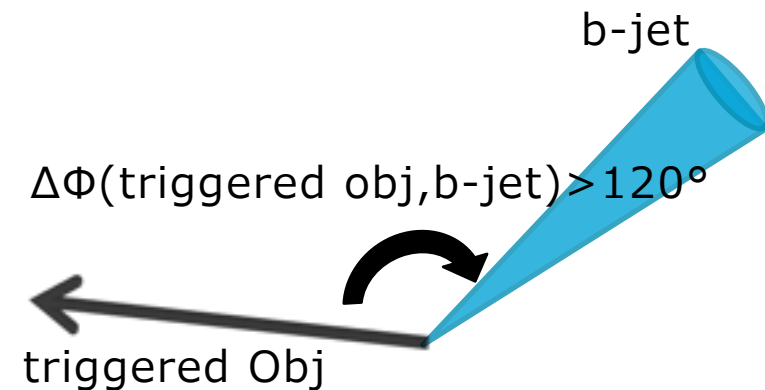
- ▶ ϵ_f : レプトンの誤同定率 (Fake Rate) / ϵ_r : 同定率 (Real Efficiency) ➡青の行列に代入
- ▶ Nの添字のTはtight lepton、Lはloose leptonに対応 (添字はpt order)
 ex. N_{TT} : tight leptonを2つ含む事象の数
- ▶ 赤の行列に青の逆行列をかけることでreal leptonとfake lepton背景事象の数を見積もる
- ▶ $N_{RR}, N_{RF}, N_{FR}, N_{FF}$ はそれぞれreal-real/real-fake/fake-real/fake-fakeイベントの数

Real : W/Zボソン由来の"本物"のレプトン
 Fake : b quarkのleptonic decay由来のレプトン

- ▶ tight-tight regionに残る $N_{RF}+N_{FR}+N_{FF}$ のイベント数を見積もる

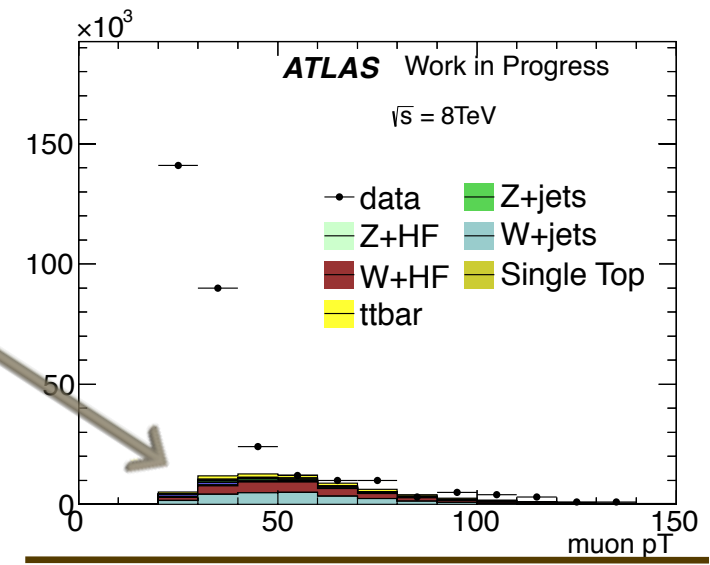
誤同定率 (Fake Rate)

- leptonic b decay 由来のレプトンの誤同定率をデータから見積もる
- $b\bar{b}$ イベントを用いて測定
 - シングルレプトントリガーとマッチするObjectが1つ以上ある
 - triggered objectの逆サイドにb-jetがある
- $b\bar{b}$ イベントの中にあるloose lepton/tight leptonの数を比較

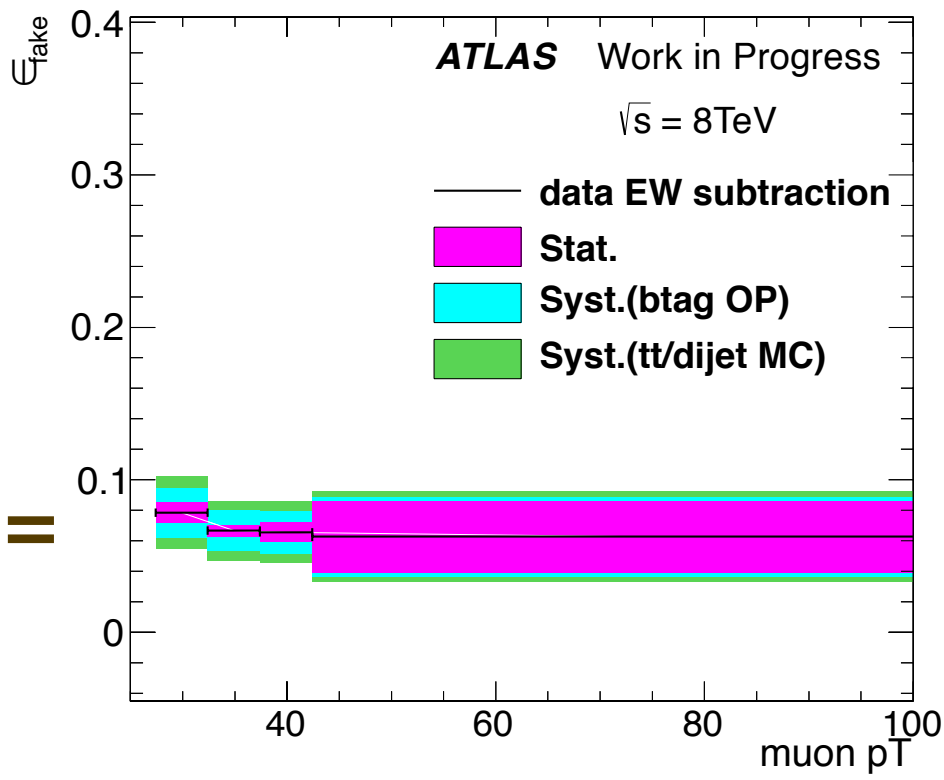
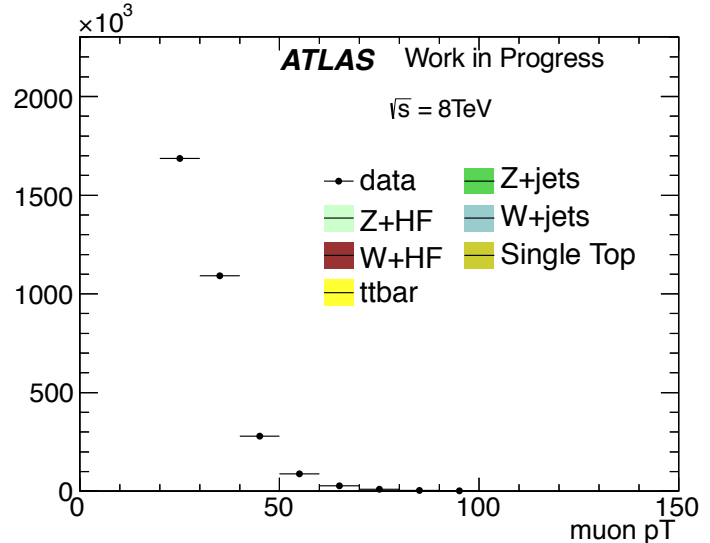


$$\text{Fake Rate} = \frac{N_{\text{tight lepton in } 2 \text{ } b\bar{b} \text{ event}}}{(N_{\text{loose lepton}} + N_{\text{tight lepton}}) \text{ in } b\bar{b} \text{ event}}$$

EW contamination
→ subtract!!



Fake Rate =



Fake Rateの由来の系統誤差 ~29 %

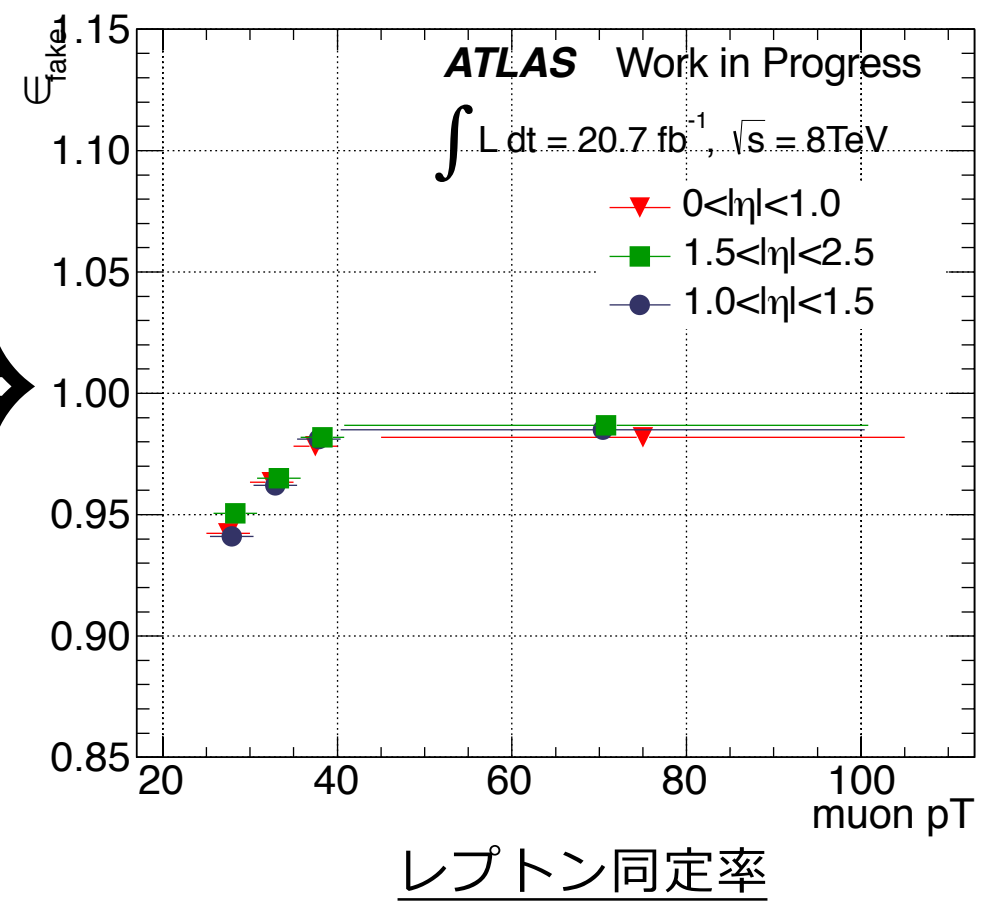
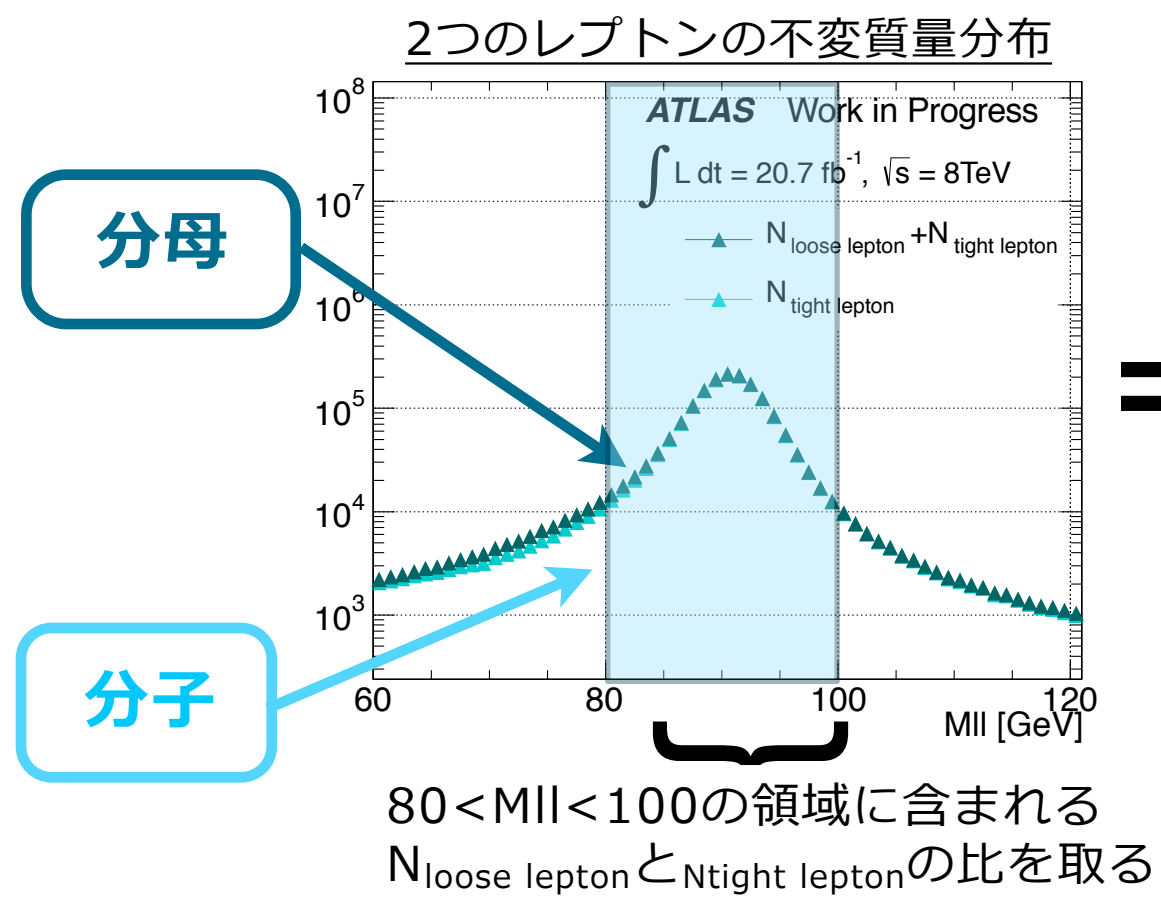
内訳 : 2種類のSource

- ✓ b-tag efficiency ~19 %
- ✓ MC ($t\bar{t}$ vs dijet) ~23 %

同定率 (Real Efficiency)

- Z->ll イベント (high purity lepton sample) からtag and probe 法を用いて測定
 - ✓ tight leptonを1つ選び、これをtagとする
 - ✓ tight leptonと反対の電荷を持つlepton (loose+tight) を探し、これをprobeとする
 - ✓ 2つのレプトンの不変質量が $80 < M_{ll} < 100$ GeVを満たすことを要求

$$\text{Real Efficiency} = \frac{\text{Number of tight lepton}}{\text{(Number of loose lepton + Number of tight lepton)}}$$

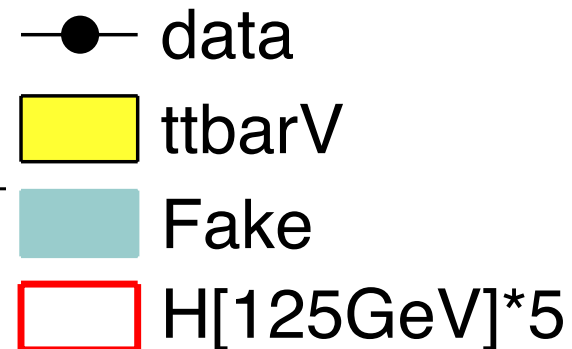


ave:98%

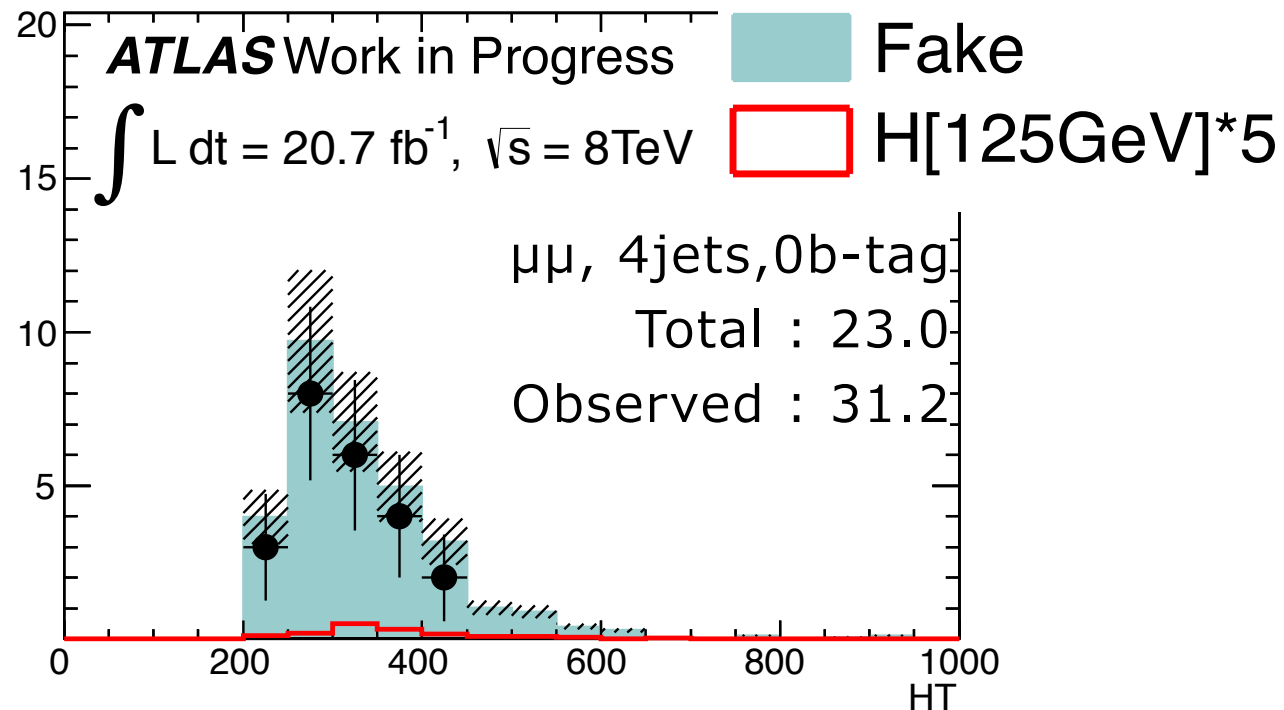
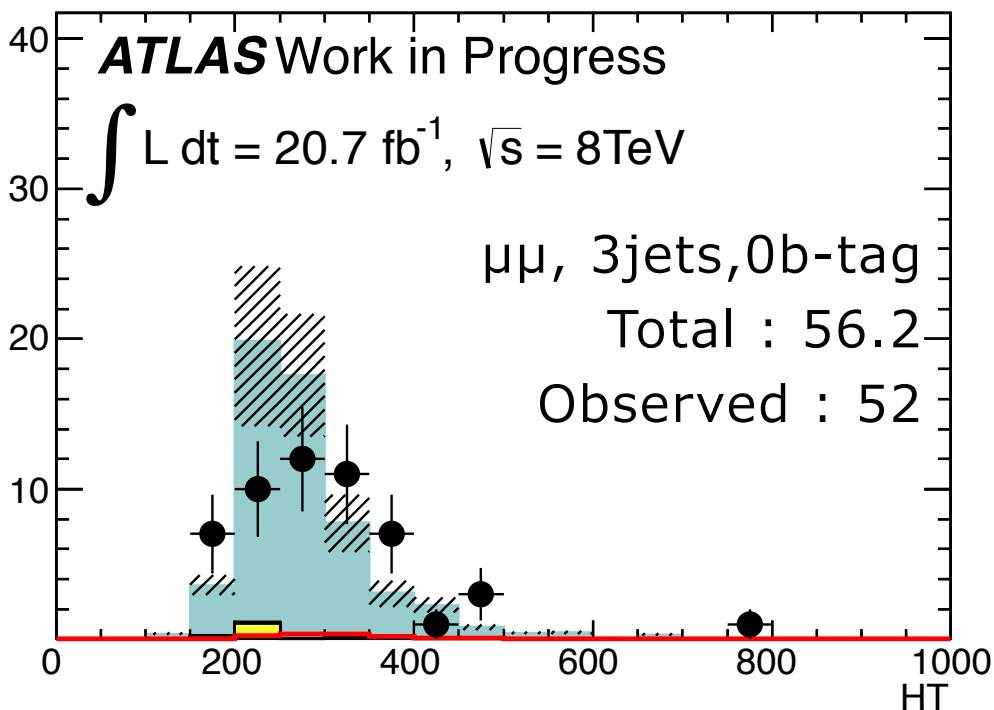
- 測定に使ったのはDataのみ
- Real Efficiency由来の系統誤差 ~ 0.1% (無視できるほど小さい)

結果 | HT分布

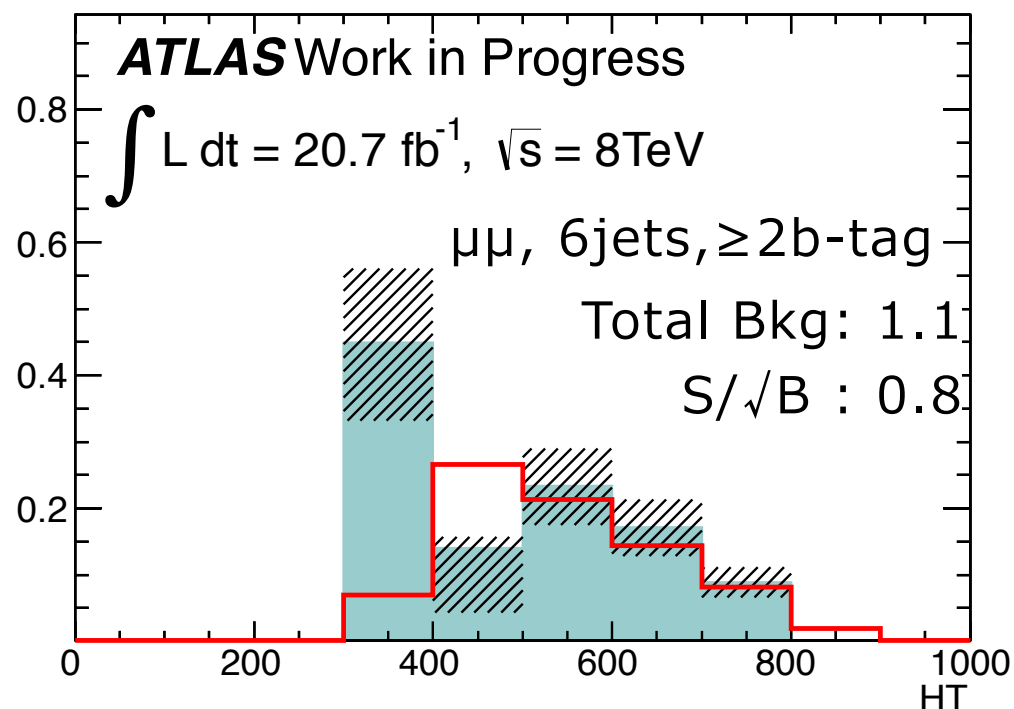
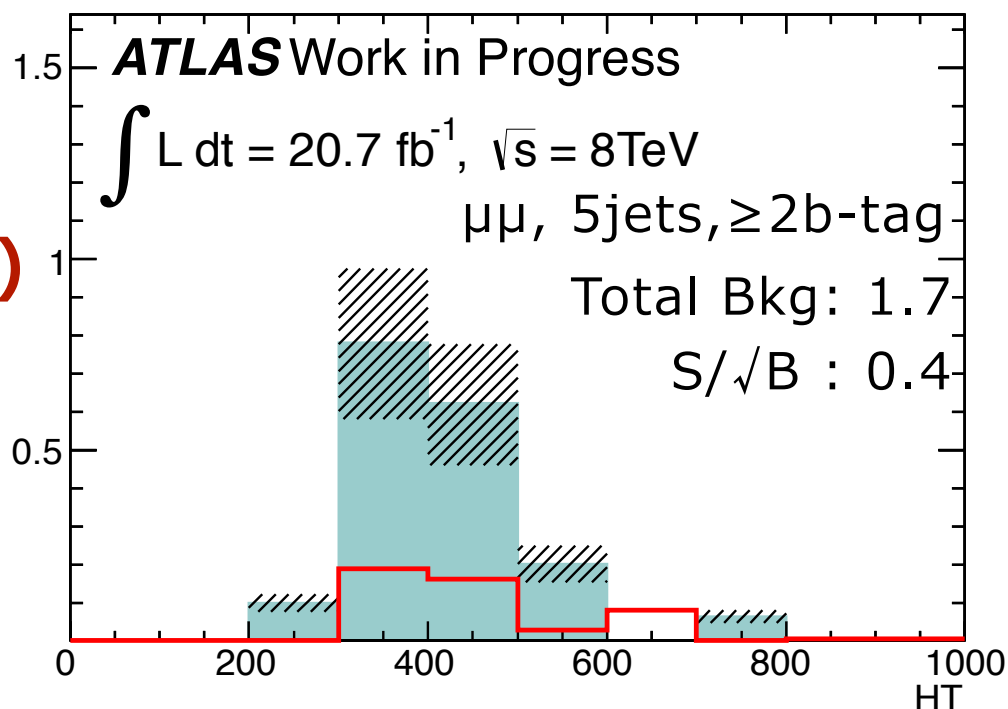
- 事象選択後のHT分布 (HT : the scalar sum of pT of the leptons/jets+ MET)



CR



SR
(Blind)



系統誤差

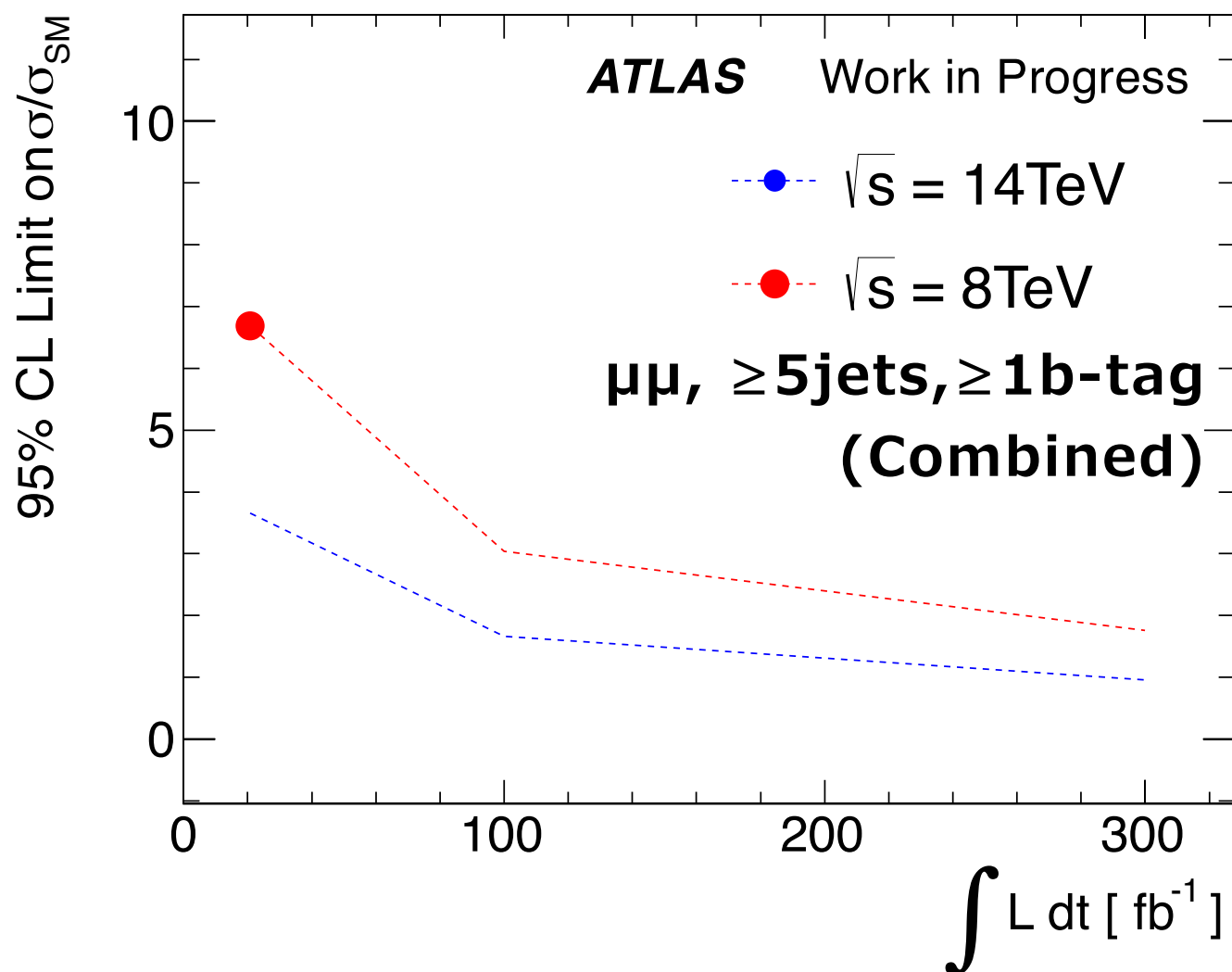
- Jet - energy scale, resolution, b-tagging scale factor
- muon - energy scale, resolution, efficiency
- Luminosity
- Theory - cross section, Scale uncertainty, BR, PDF+ α_s
- Fake Rate - di-jet/ttbar(SR) MC, b-tag efficiency

Systematic	Signal	$t\bar{t}V$	Fake Bkg
Jet Energy Scale	25%	21%	-
b-tag efficiency	19%	16%	-
Muon id efficiency	1%	1%	-
Luminosity	2.8%	2.8%	-
Theory	13%	30%	-
Fake Rate	-	-	29%

- 系統誤差の主な起源
 - Signal
 - ✓ Jet Energy Scale
 - ✓ b-tag scale factor
 - Background
 - ✓ Fake Rate

結果 | expected limit

- 8TeV, 20fb⁻¹ で期待されるLimit (制限) を算出した (counting)
 ➔ **95% CL Limit on $\sigma/\sigma_{SM} \sim 6.7$ @ $m_H = 125\text{GeV}$**



- 100, 300fb⁻¹におけるLimitは20.7fb⁻¹から外挿している
 - ◆ 14TeVにおけるLimitの算出はFakeは全てtt由来であるという仮定の下行った
- e μ チャンネル: signalは $\mu\mu$ チャンネルの約 1.8倍、background 約 2倍
 - ➔ 3つのチャンネル (e μ / $\mu\mu$ /ee) をCombineすればさらなるSensitivityの向上が期待できる
- H- \rightarrow WW- \rightarrow leptons チャンネルをCombine
 - ➔ 300fb⁻¹のデータを用いて3 σ を超える感度でttHプロセスを発見できる見込み

まとめ

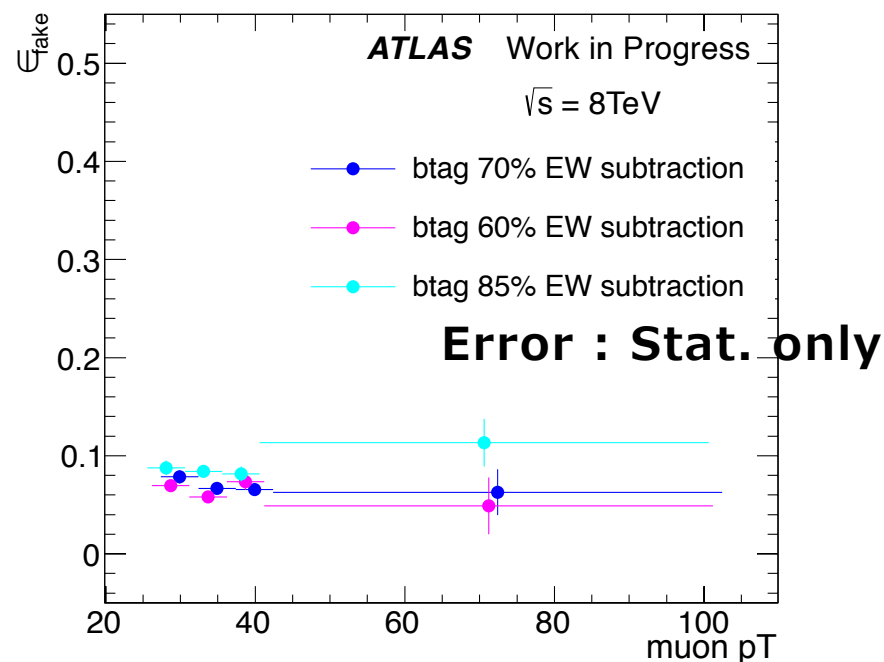
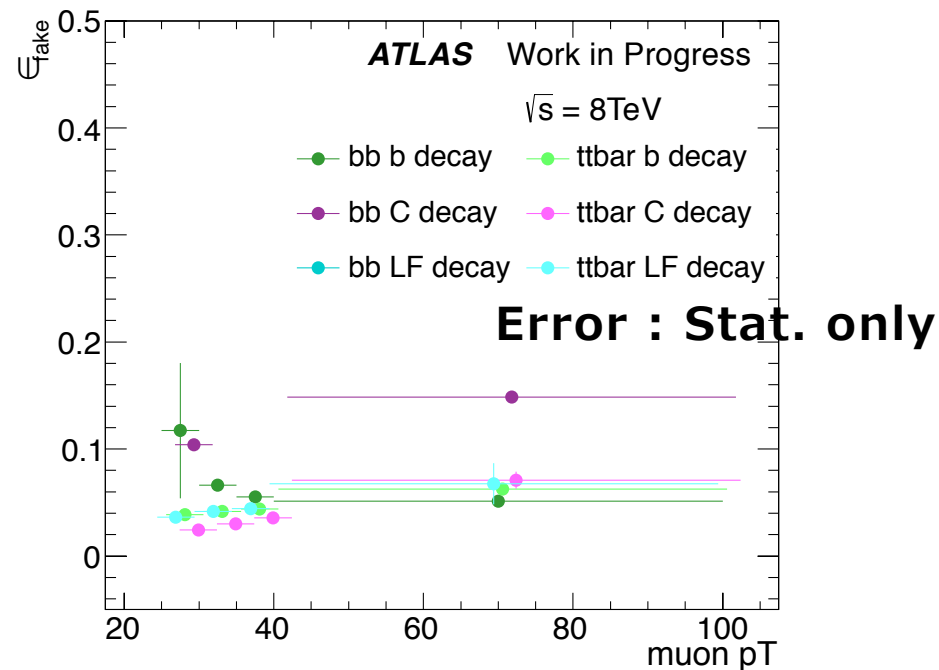
- LHC-ATLAS実験において2012年に取得された重心エネルギー8TeV, 積分ルミノシティ 20fb^{-1} のデータを用いて $ttH, H \rightarrow WW$ モードでのヒッグス探索を行った
- 背景事象が少ない $ttH (H \rightarrow WW)$ Same Sign 2 lepton モードに焦点をあて解析を行った
- $\mu\mu$ チャンネルではFake lepton背景事象が主
 - ➔ データを用いて見積もりを行った
- 事象選択・背景事象の見積もり手法を確立した
- 上限期待値：
95% CL Limit on $\sigma/\sigma_{\text{SM}} \sim 6.7 @ m_H = 125\text{GeV}$
- Combineすれば2021年までに取得予定の 300fb^{-1} のデータを用いて
 $H \rightarrow WW$ モードで ttH プロセスを 3σ を超える感度で発見できる見込み



Backup

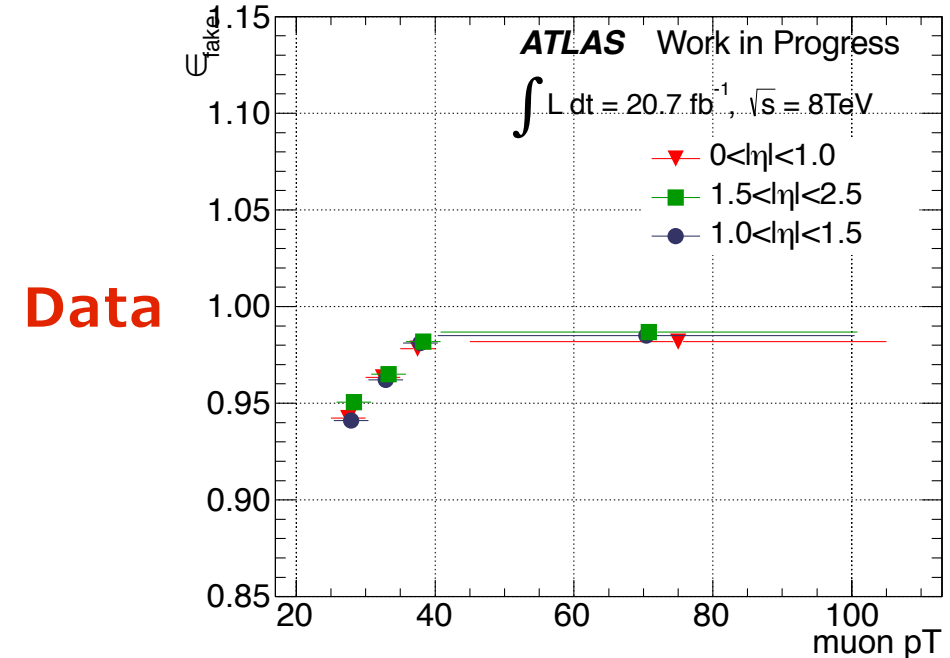
系統誤差 - 誤同定率 (Fake Rate)

- b-tag operating pointごとのFake Rateを測定
 - 実験的な誤差, b/C/LFのcomponentの差
 - dijet MC vs $t\bar{t}$ MC
 - truth informationを用いてvalidationを行った
- ➔ これらの差は系統誤差として最終結果に適用

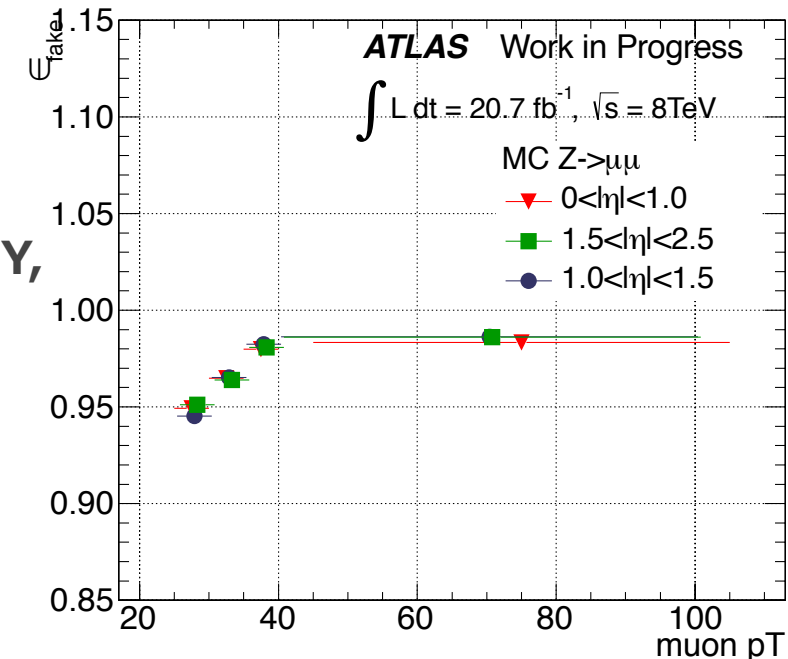


系統誤差 - 同定率 (Real Efficiency)

- Data vs MC ($Z \rightarrow \mu\mu$, $Z \rightarrow \mu\mu$ Drell-Yan)
 - MCサンプルを用いてReal Efficiencyを測定
- ➔ DataとMCの差は非常に小さい (<0.7%)
系統誤差として最終結果に適用しているが、寄与はほとんどない



MC
($Z \rightarrow \mu\mu$ DY,
 $Z \rightarrow \mu\mu$)



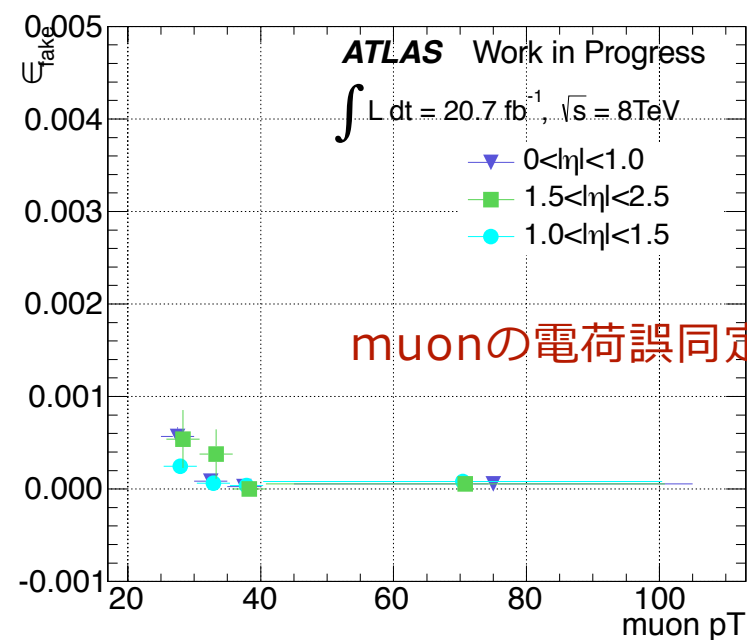
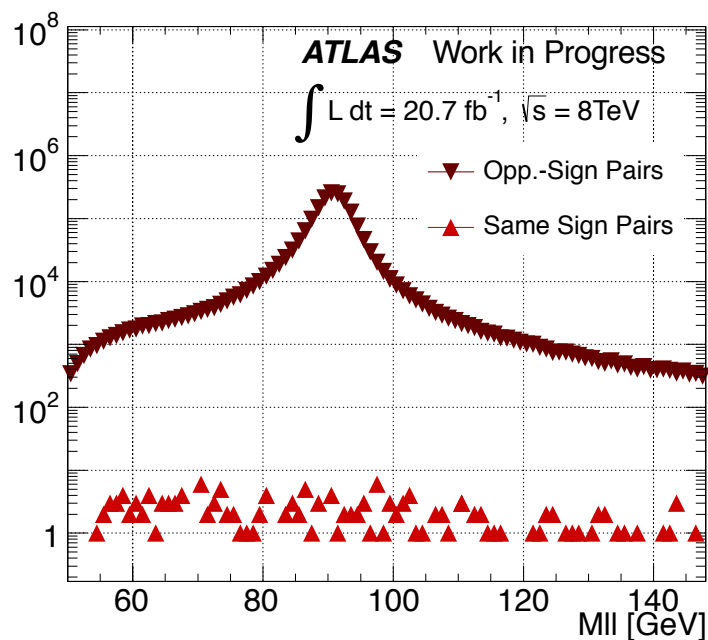
charge mis-ID 背景事象

誤電荷同定率 (charge mis-ID rate)

- 異電荷 (Opposite Sign) / 同電荷 (Same Sign) 2lepton データサンプルを使用
- 同じeta binからきた2つのレプトンを要求し、 $N_{ss}/(N_{os}+2N_{ss})$ でcharge mis-ID rateを求める

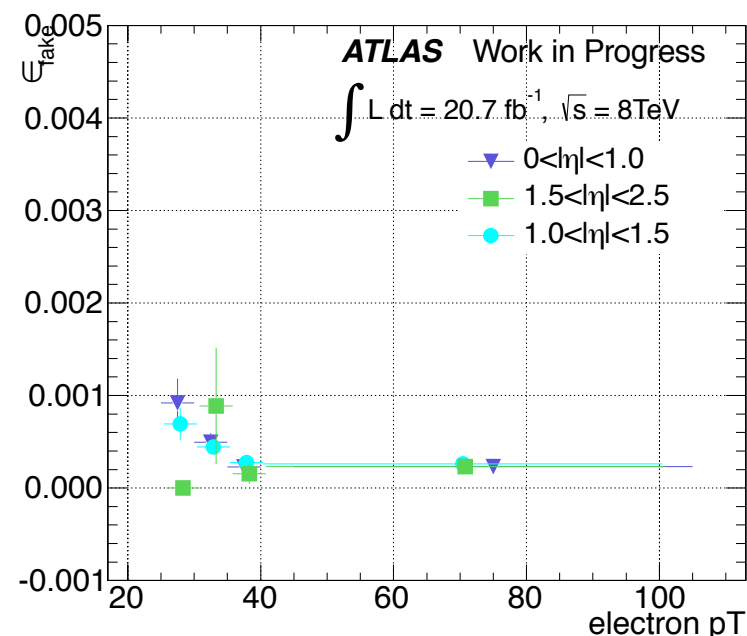
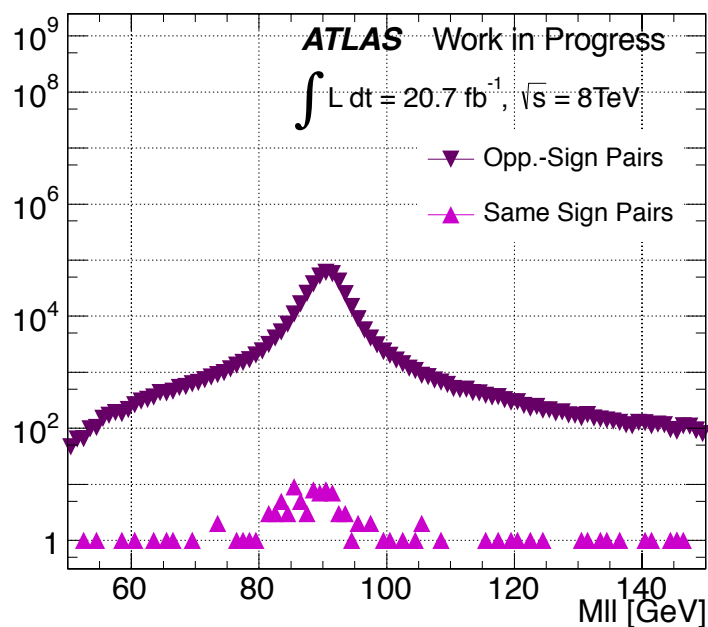
charge mis-ID 背景事象 : muonチャンネルでは無視できる。ee/eμ channelにのみ影響する

muon



muonの電荷誤同定率 < 0.07%

electron

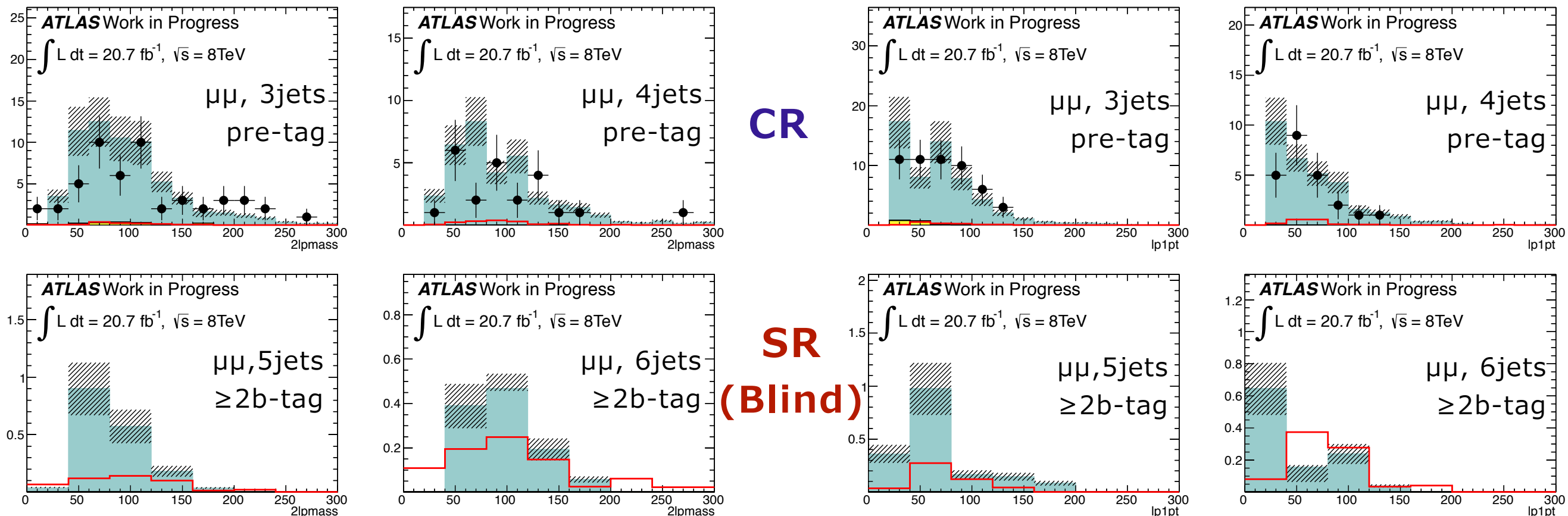


charge mis-ID rate (in %)

2つのレプトンの不変質量分布

結果 | 分布

● 事象選択後のMII分布, leading lepton pt分布



CR

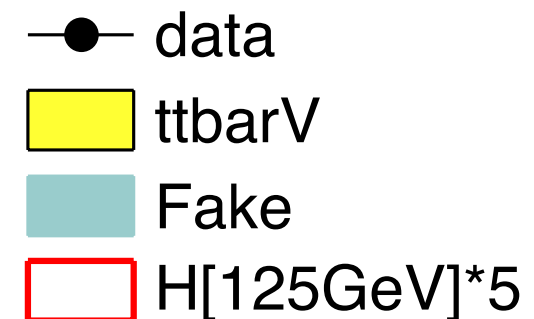
SR
(Blind)

CR

SR
(Blind)

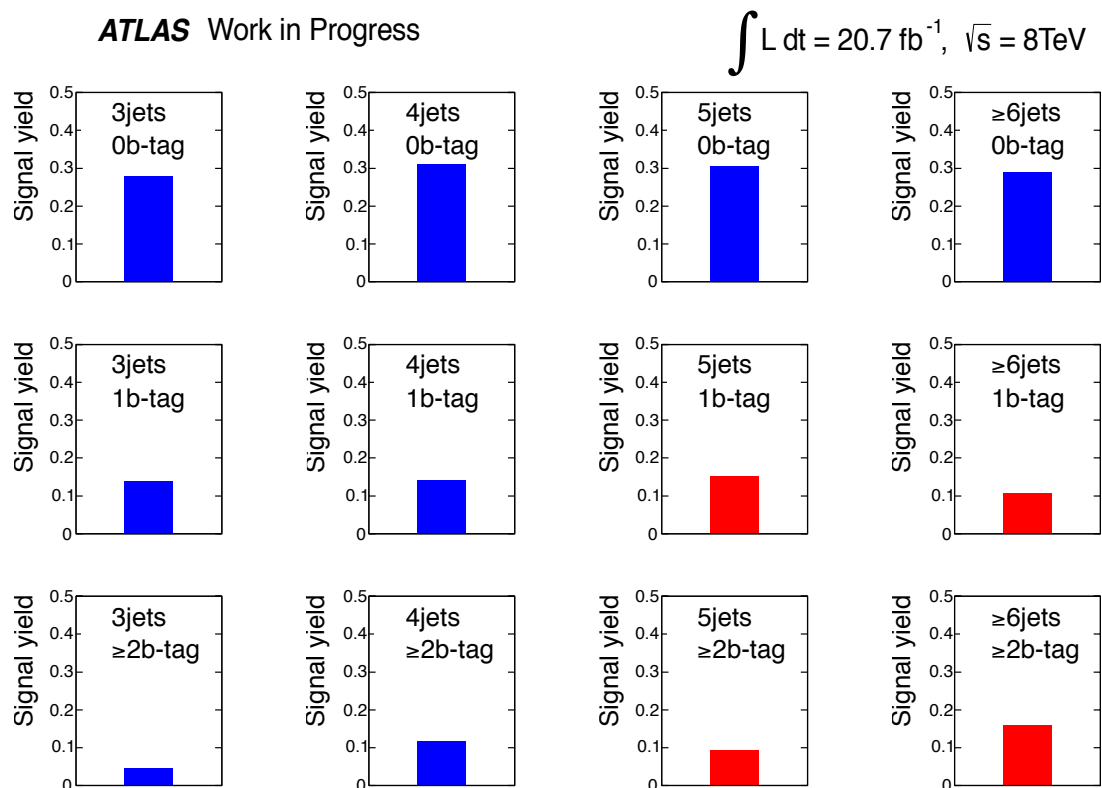
	signal	$t\bar{t}V$	Fakes	Total	Observed
3jets,pre-tag	1.4	1.6	54.7	56.5	52.0
4jets,pre-tag	1.6	0.0	31.2	31.2	23.0

	Signal	$t\bar{t}V$	Fakes	Total	S/\sqrt{B}	S/B
5jets,2b-tag	0.5	0.0	1.7	1.7	0.4	0.3
6jets,2b-tag	0.8	0.0	1.2	1.1	0.8	0.7

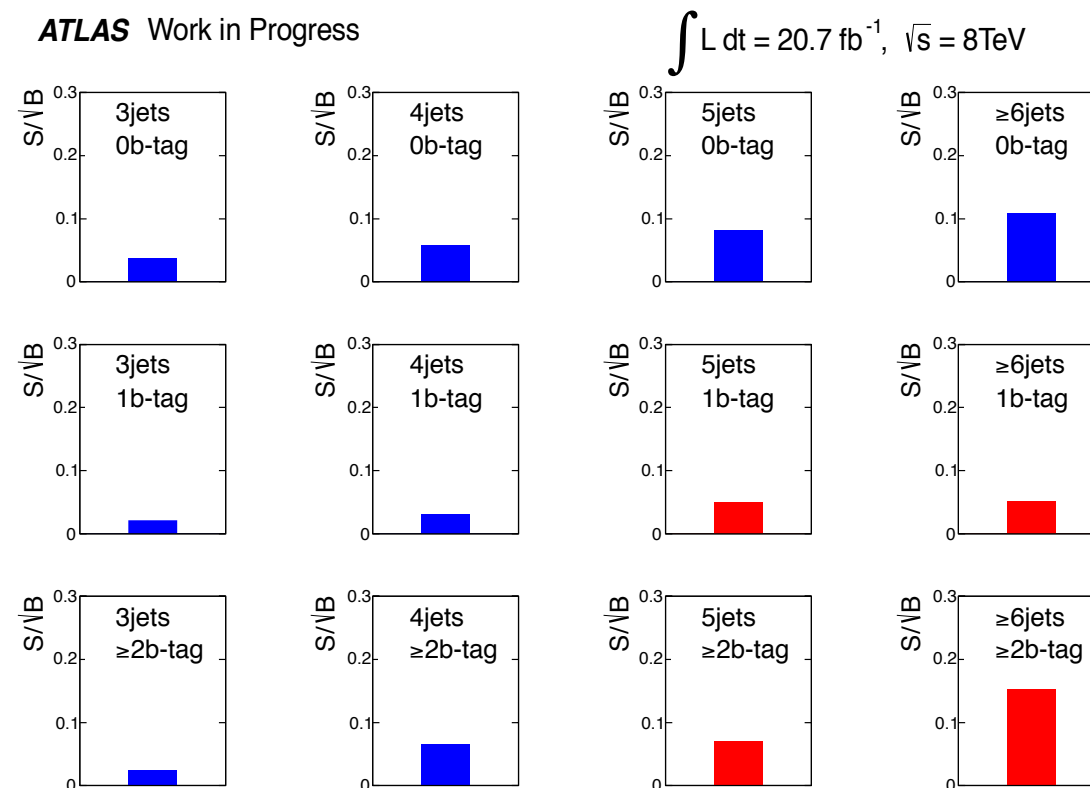


結果 | S/\sqrt{Bkg} , expected limit

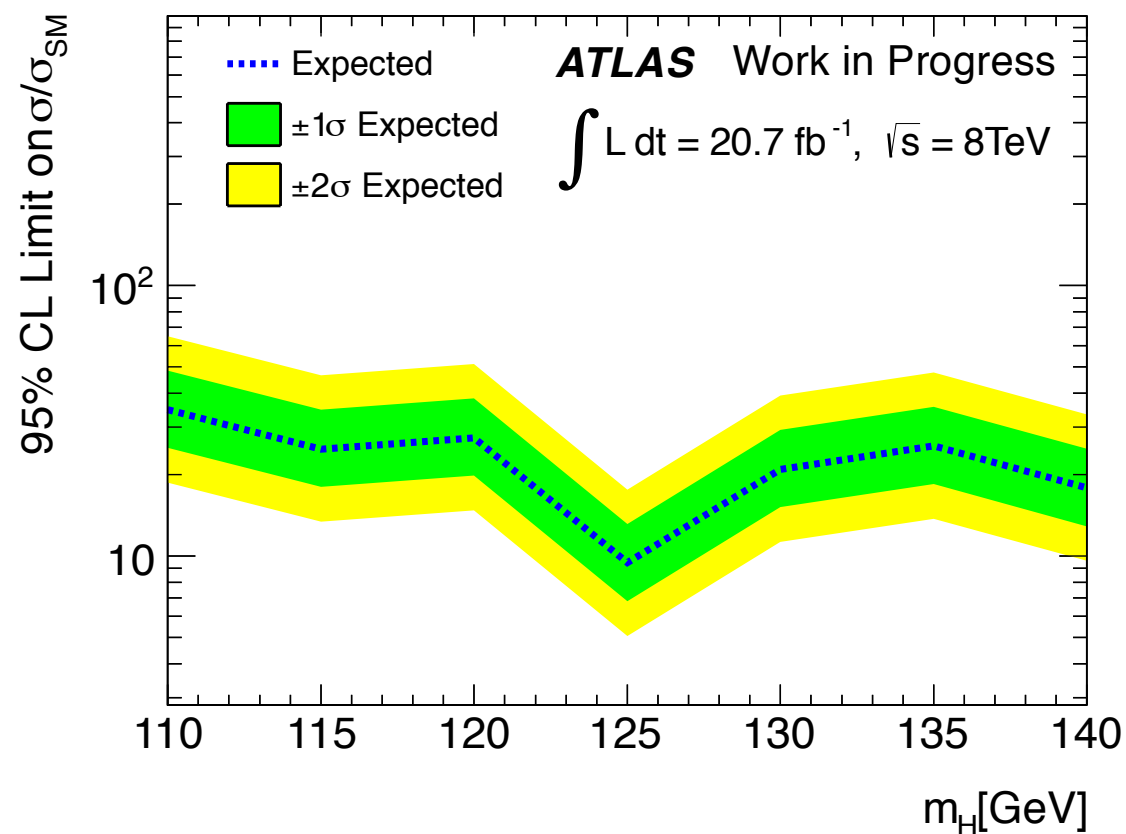
● Expected number of Signal



● S/\sqrt{B}



- 前述の統計誤差を考慮し、8TeV, 20fb-1で期待されるLimitを算出した
- 95% C.L.Limit on σ/σ_{SM}
 $\sim 6.8 @ m_H = 125\text{GeV}$

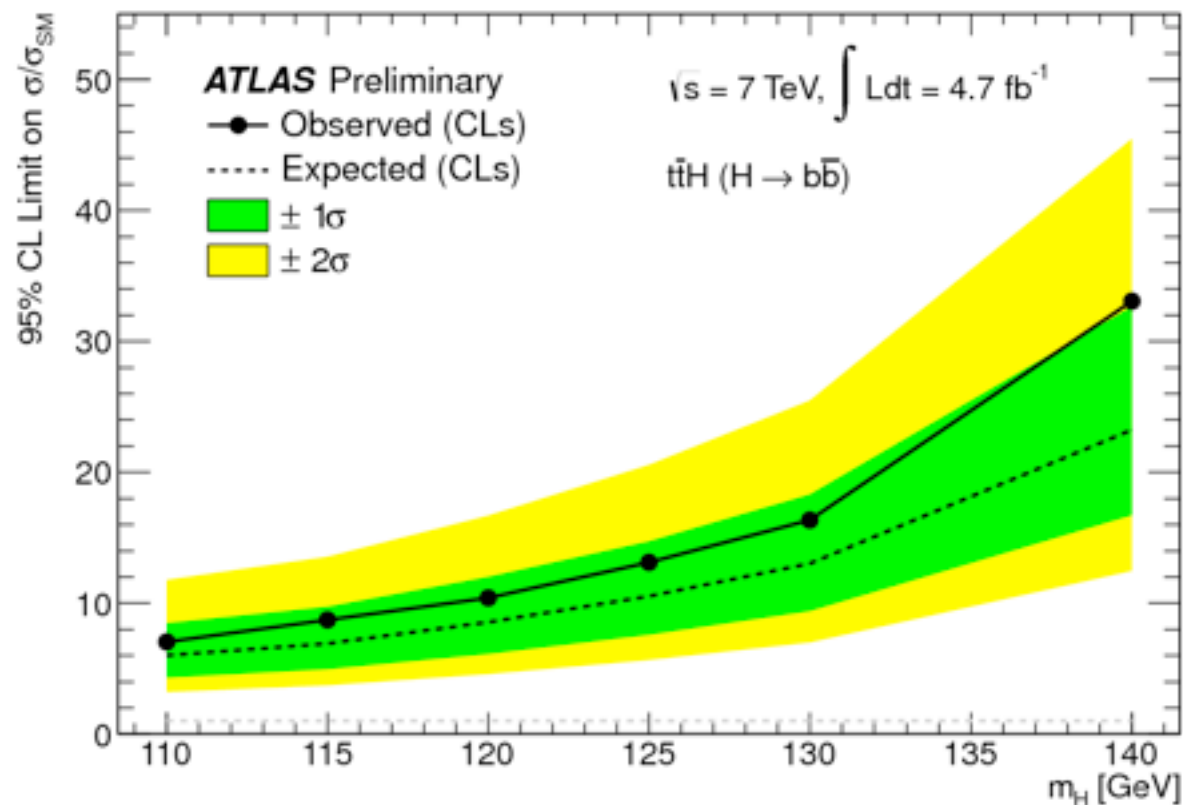


ttH, H → bb/γγ 最新結果

ttH, H → bb 最新結果

- tt → semileptonic に focus している
- jet/b-jet の数によって SR を 9 つのトポロジーに分類し、最終的に combine している
- the primary discriminant variable : M_{bb}
- データは背景事象と無矛盾 (超過なし)

Observed and expected 95% CL upper limits



ttH, H → γγ 最新結果

- tt → leptonic/hadronic 両方を使っている
- leptonic channel では signal mass window (120-130 GeV) で 1 event 観測 (hadronic channel では 0 event)
- Observed (Expected) Limit : 5.3 (6.4)
- データは背景事象と無矛盾 (超過なし)

Observed and expected 95% CL upper limits

