

# ATLAS 実験における ヒッグス粒子対生成の探索

Ryosuke FUCHI (U.Tsukuba)

2016年1月19日  
CiRfSE Workshop



筑波大学  
*University of Tsukuba*



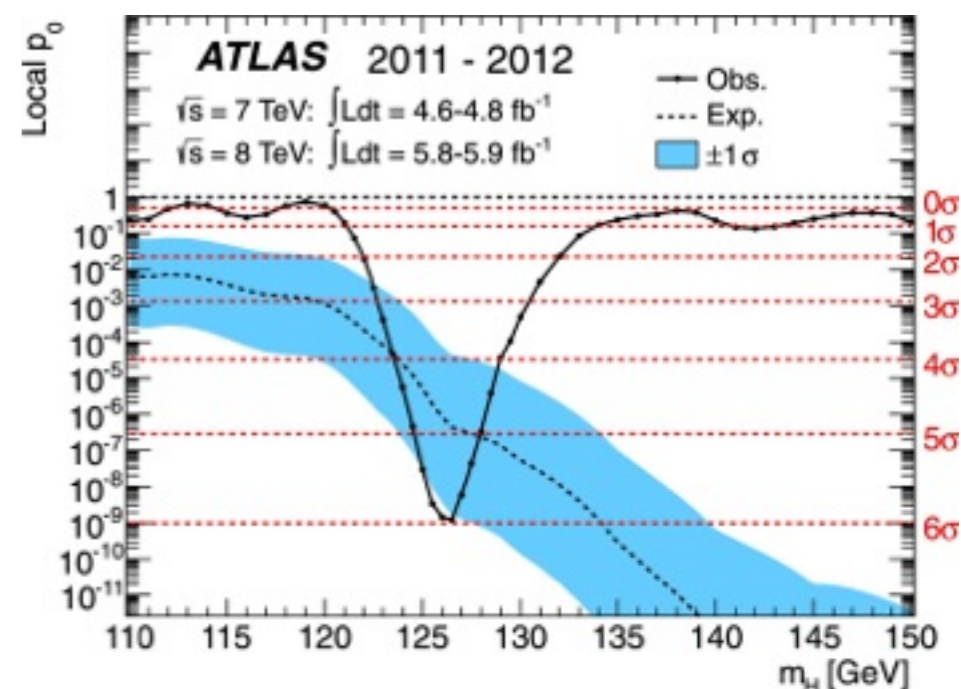
# Outline

---

- 導入
  - ヒッグス粒子の発見、ヒッグス粒子対生成の物理
  - 解析チャンネルの選定
- bbtatau解析
  - 解析の流れ
  - 結果
- 他チャンネルと合わせた結果
- まとめ

# ヒッグスボゾンの発見&測定

- ヒッグス粒子: 質量を与える粒子
- 2012年にATLAS&CMSにより発見!!  
 $H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l, H \rightarrow WW^* \rightarrow e\nu\mu\nu$
- SMヒッグスか検証が大事
- 測定の時代へ

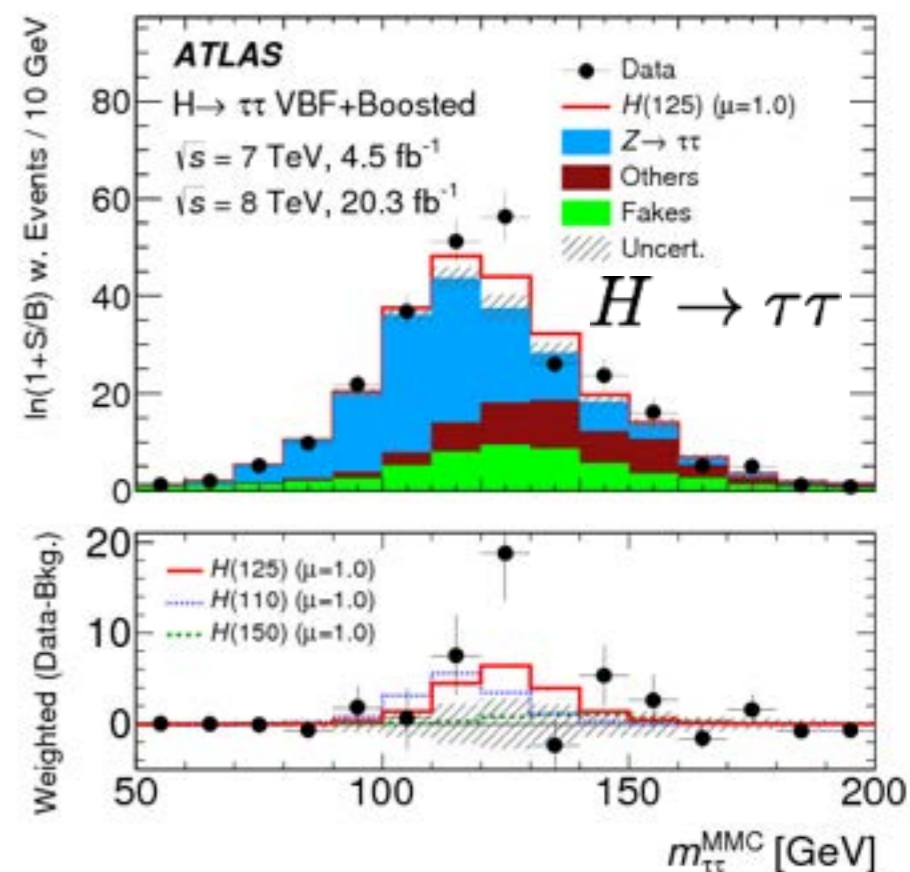


質量  $m_h = 125.36 \pm 0.37(stat) \pm 0.18(syst)$   
 $H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$

信号強度  $\mu = 1.18^{+0.15}_{-0.14}$   
 all channels combined

結合 湯川結合の証拠 ATLAS 4.5 sigma  
 $H \rightarrow \tau\tau$  analysis  $\mu = 1.44^{+0.42}_{-0.37}$

CP測定 棄却(>97.8%):  $J^P = 0^-, 1^+, 1^-, 2^+$   
 $H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l, H \rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$

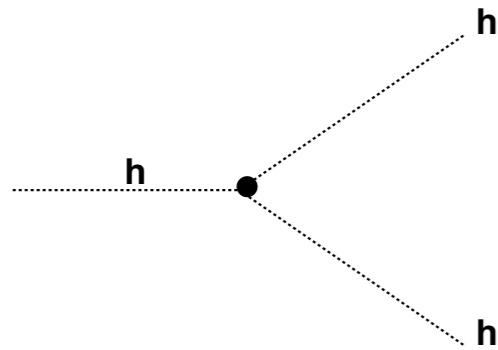


どれもSMと無矛盾!!



# ヒッグスボゾン自己結合

- ヒッグスボゾンの自己結合は最も興味深い課題のひとつ
- Brout-Engler-Higgs (BEH) 機構の直接検証

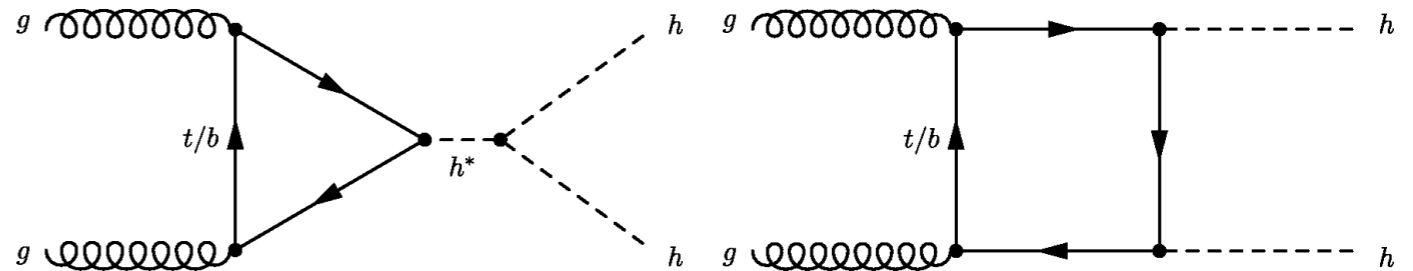


ヒッグスボゾンの3点自己結合

ヒッグスボゾン対生成  
(di-higgs)の探索が最後のカギ！

## SMにおけるdi-higgs生成過程

- $gghh$ 過程が支配的
- 生成断面積  $\sim 10 \text{ fb}$  at  $8\text{TeV}$   
 $\sim 200 \text{ events}$  in  $20.3 \text{ fb}^{-1}$



## 動機

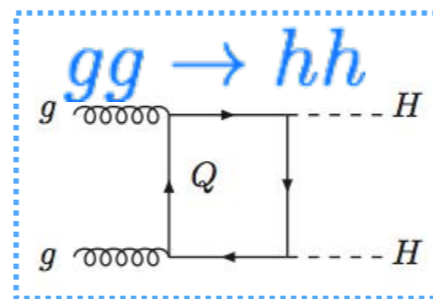
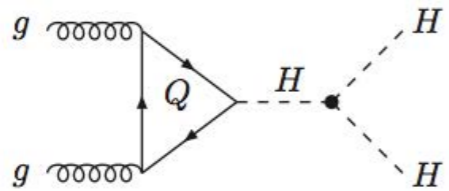
- 現在のデータ量で評価
- 解析手法の確立

# BSMにおけるヒッグスボゾン対生成

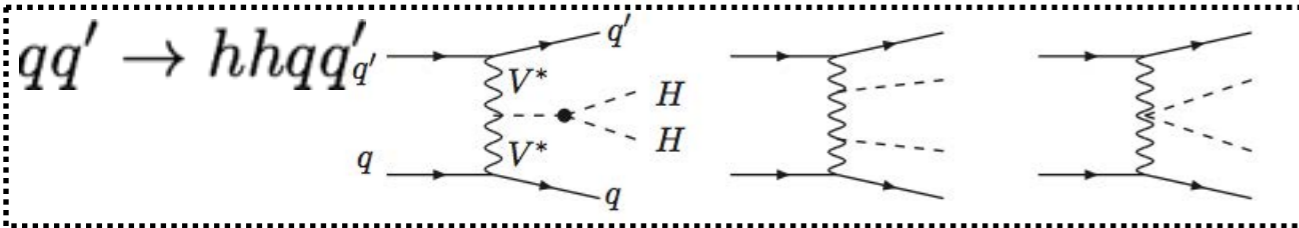
## 標準模型を超える物理(BSM)

- Non-resonant
- ・ 3点結合の結合定数がSMの予測と異なる場合、他のヒッグス対生成過程の**断面積増大**が期待される

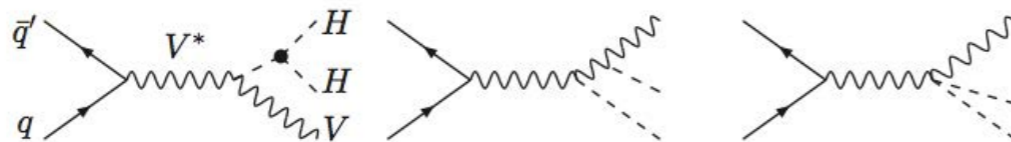
(a)  $gg$  double-Higgs fusion:  $gg \rightarrow HH$



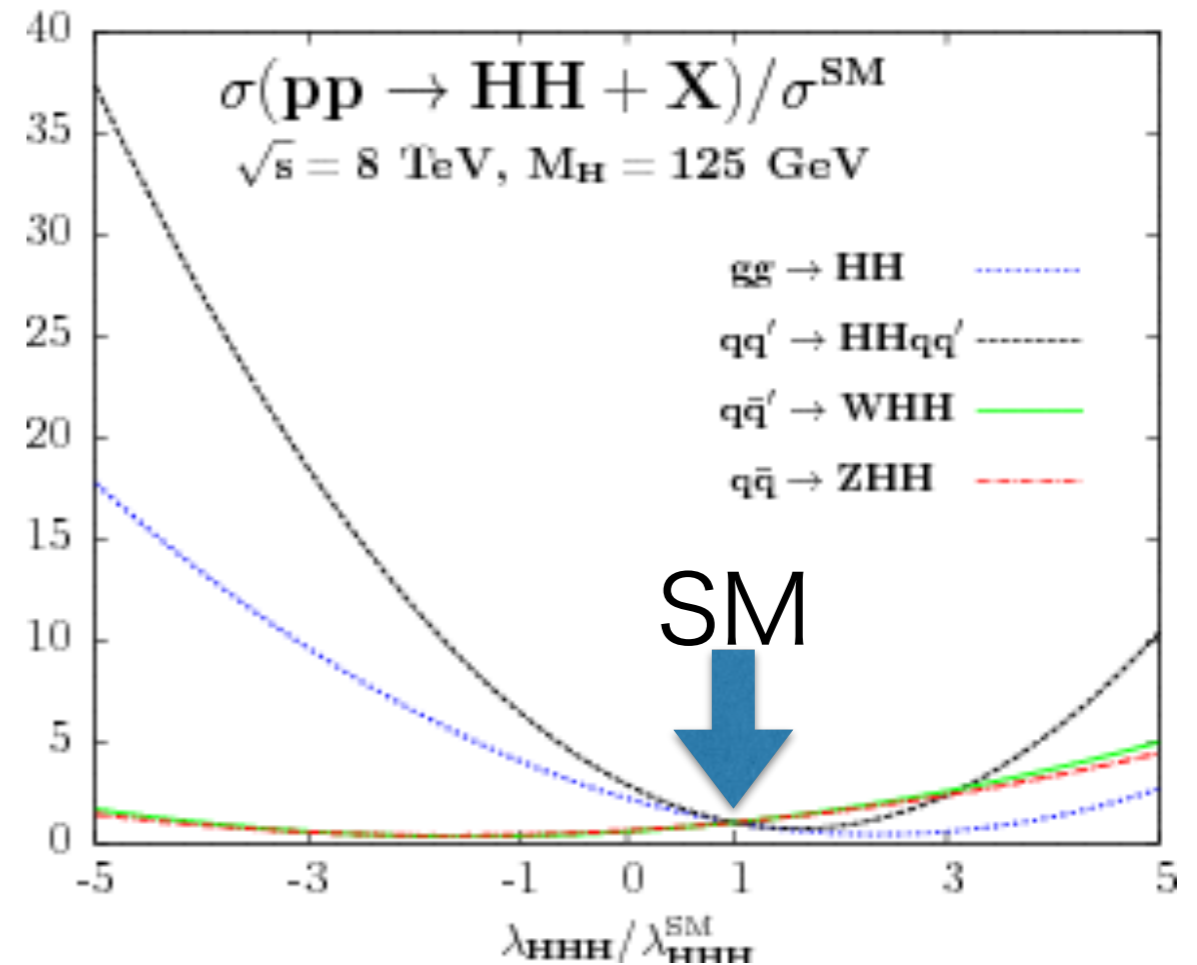
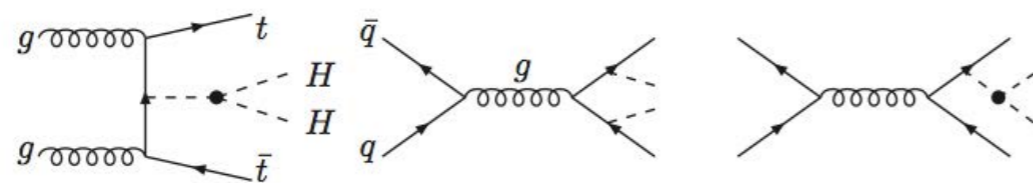
(b)  $WW/ZZ$  double-Higgs fusion:  $qq' \rightarrow HHqq'$



(c) Double Higgs-strahlung:  $q\bar{q}' \rightarrow ZHH/WHH$



(d) Associated production with top-quarks:  $q\bar{q}/gg \rightarrow t\bar{t}HH$



# BSMにおけるヒッグスボゾン対生成

## 標準模型を超える物理(BSM)

- Resonant
  - ・ Two Higgs Doublet Model  
スカラーヒッグス二重項を2つ要求

$$\phi_i = \begin{pmatrix} \phi_i^+ \\ \frac{1}{\sqrt{2}}(v_i + \phi_i + i\chi_i) \end{pmatrix} \quad i = 1, 2$$

5つの場

scalar	h, H
pseudoscalar	A
charged higgs	$H^\pm$

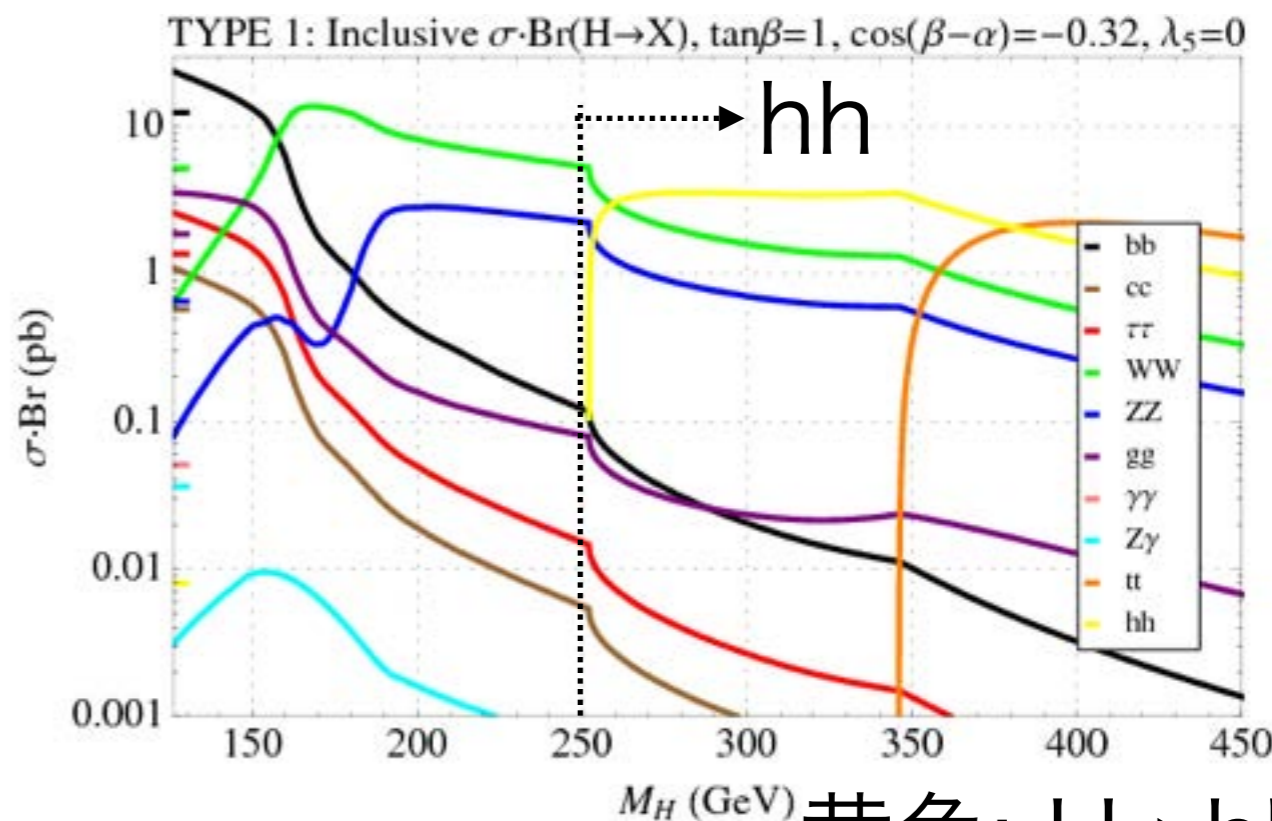
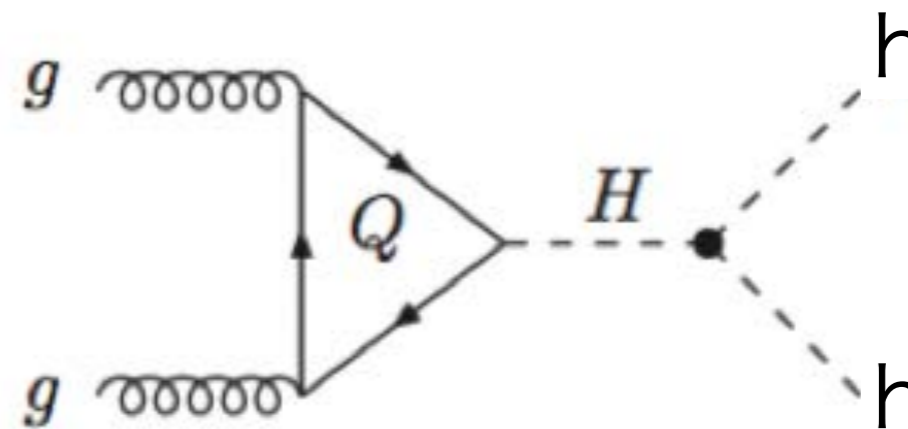
真空期待値の比

$$\tan \beta = \frac{v_2}{v_1}$$

- ・ 断面積x崩壊分岐比 @8TeV

$$\sigma(H) \times Br(H \rightarrow hh) \sim \text{few pb}$$

Run1で感度あり



黄色:  $H \rightarrow hh$



# 探索チャンネル

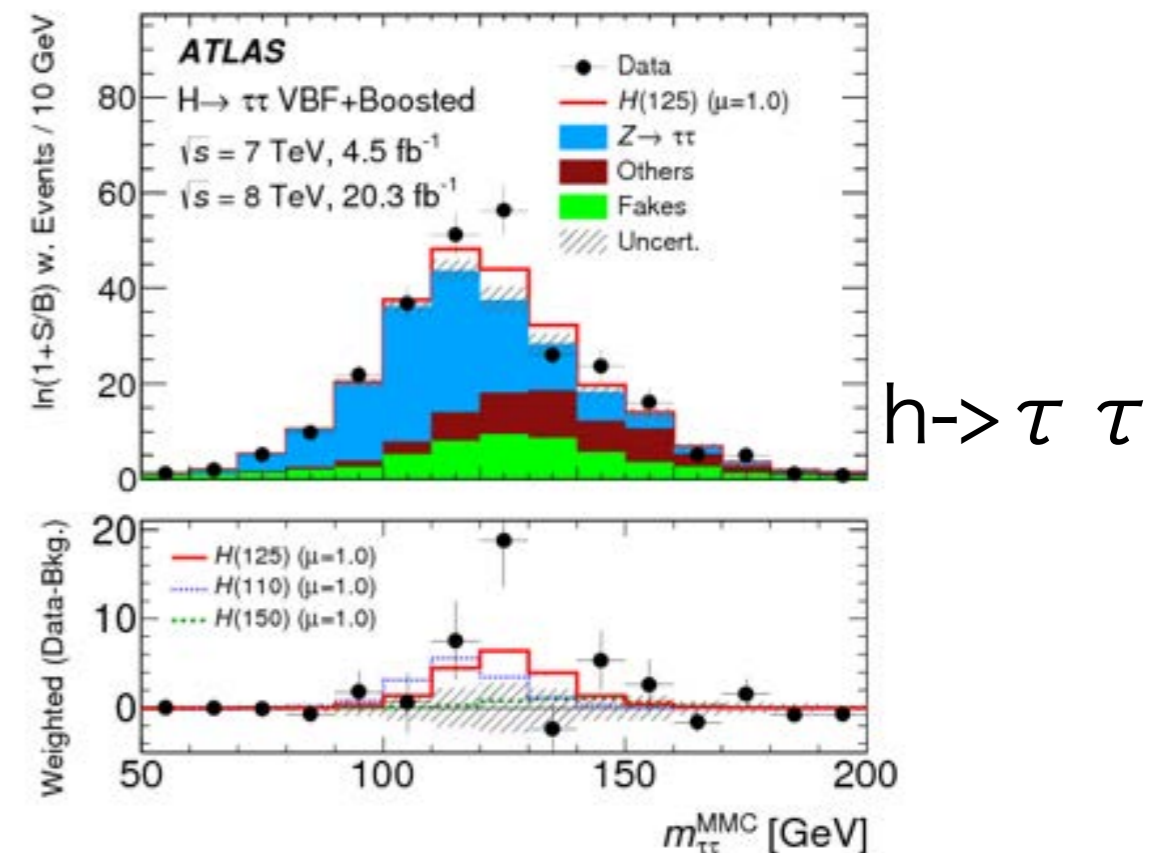
$$hh \rightarrow bb\tau\tau$$

bbyy, bbbbの解析がなされていた  
bbtautauは本研究が**世界初の解析**

	bb	WW	$\tau\tau$	ZZ	$\gamma\gamma$
bb	32	25	<b>7.1</b>	3.1	0.26
WW	-	5	2.8	1.2	0.1
$\tau\tau$	-	-	0.39	0.34	0.029
ZZ	-	-	-	0.076	0.013
$\gamma\gamma$	-	-	-	-	0.000053

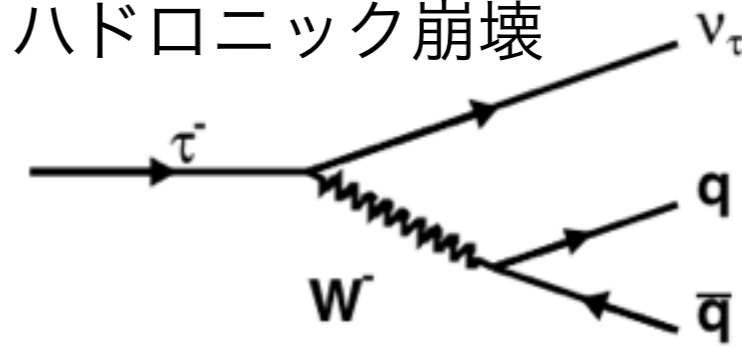
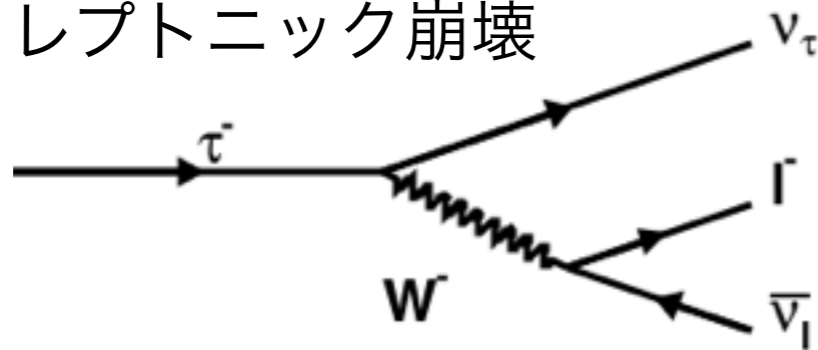
## 利点

- 高い崩壊分岐比: 7.1%
- 不変質量を再構成できる
- クリーンな信号
- トリガーの問題がない



# タウレプトンの崩壊

- $\tau$ レプトンは軽いレプトンまたはハドロンに崩壊できる  
レプトニック崩壊                      ハドロニック崩壊



- $\tau$ レプトン対の崩壊は $\tau$ レプトンの崩壊によって3つに分類される  
di-lepton, semi-lepton and all-hadron
- 本解析では片方のタウレプトンが軽いレプトン(e, mu)に崩壊する  
semi-leptonチャンネルを用いる。 ゴールドデン・チャンネル  
利点

- 高い崩壊分岐比: 46%
- クリーンな信号
- トリガーの問題がない

di-lepton	semi-lepton	all-hadronic
12 %	46 %	42 %

観測する物理オブジェクトは  
2つのボトムクォーク、1つのハドロニックタウ、  
及び1つのレプトン(電子/ミューオン)

$$hh \rightarrow bb\tau_{lep}\tau_{had}$$





# $\tau\tau + 2\text{jet}$ の選別

Event pre-selection

1. single lepton triggerを要求
2. 終状態の物理オブジェクトを要求  
1つのレプトン(= e/ $\mu$ ), 1つのhadronic- $\tau$ , 2つ以上のjet
3. レプトンとhadronic- $\tau$ の逆電荷を要求

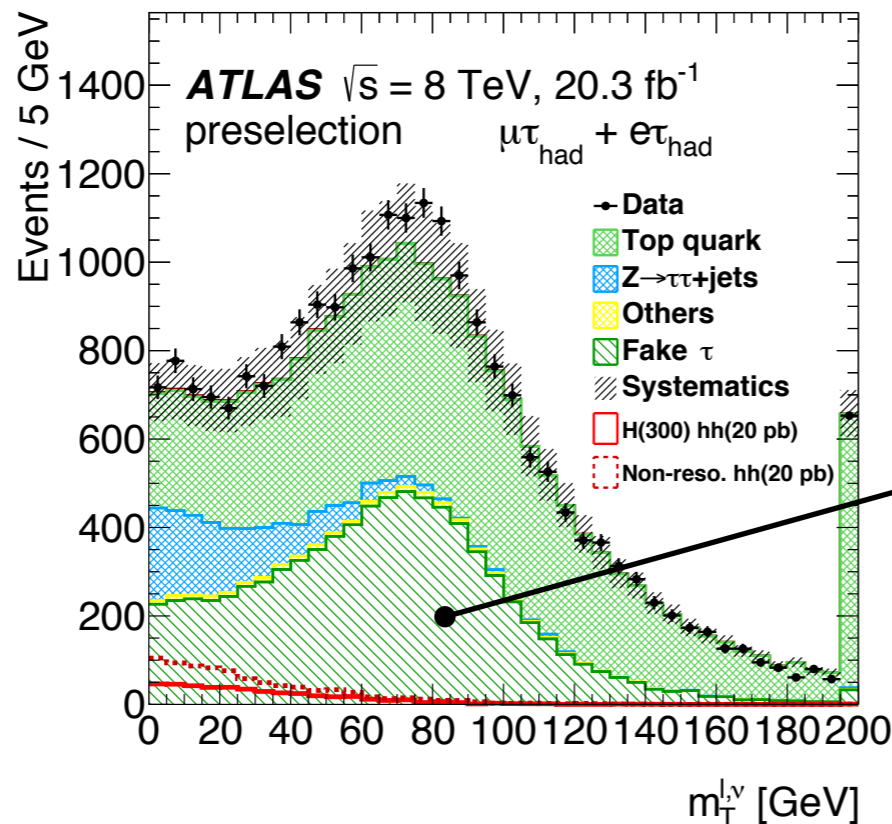
Event selection

4. Z-> $\tau\tau$ 事象を除去するために以下を要求  
2つ以上のレプトン(=e/ $\mu$ )を含む事象を除去 (di-lepton veto)  
このとき用いるレプトンは2.よりもゆるい定義を用いる

Signal Region

leptonとMETの $m_T$

$$m_T = \sqrt{2p_T^\ell E_T^{\text{miss}} (1 - \cos\Delta\phi(\ell, E_T^{\text{miss}}))}$$



pre-selection後の分布  
- dataとモデルがよく合っている

## Fake $\tau$ 背景事象

- ✓ jet  $\rightarrow$  hadronic- $\tau$  に誤同定された事象
- ✓ W+jets, QCD などが含まれる

Limit



# hh->bbautauの選別(例)

- ・ 事象選別を行い背景事象を除去する

Event  
pre-selection

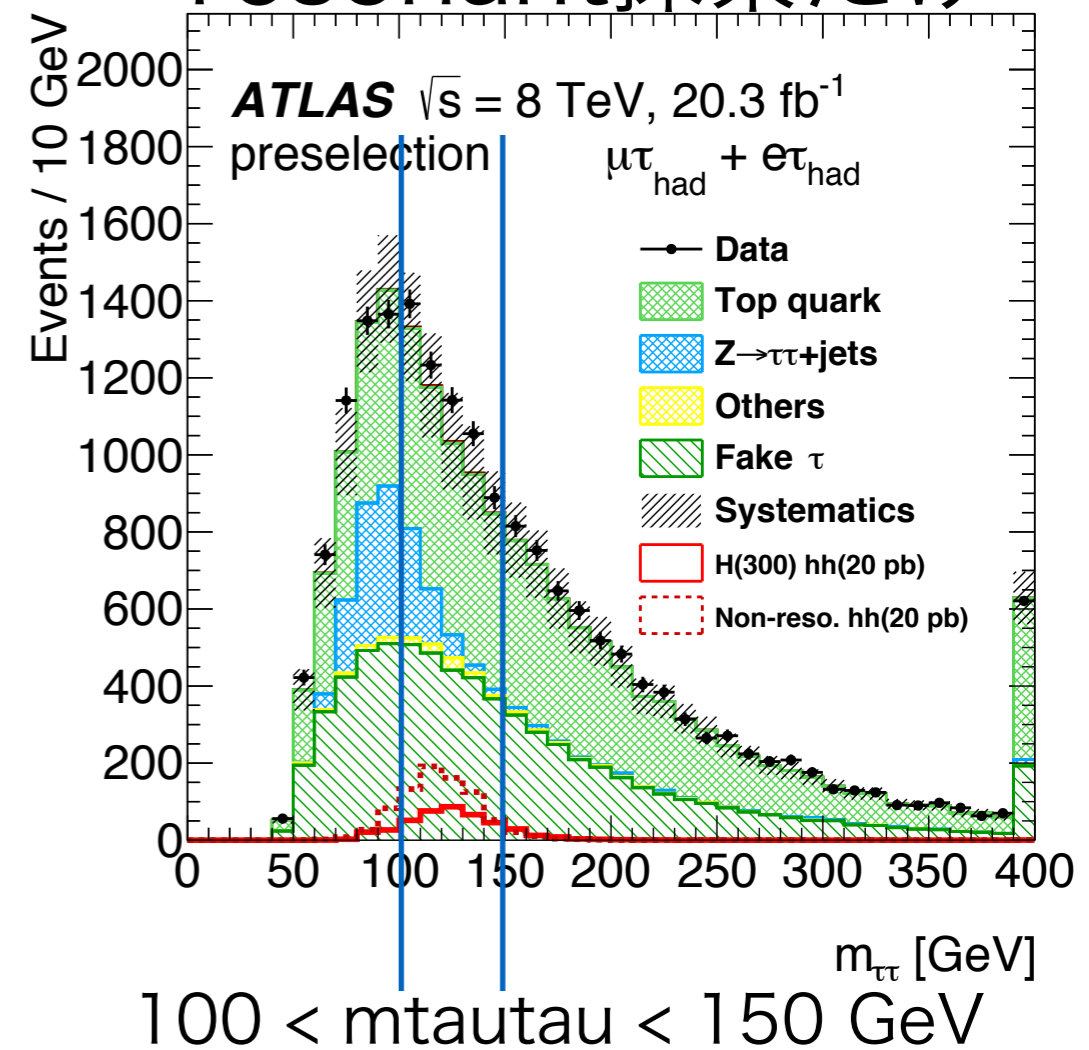
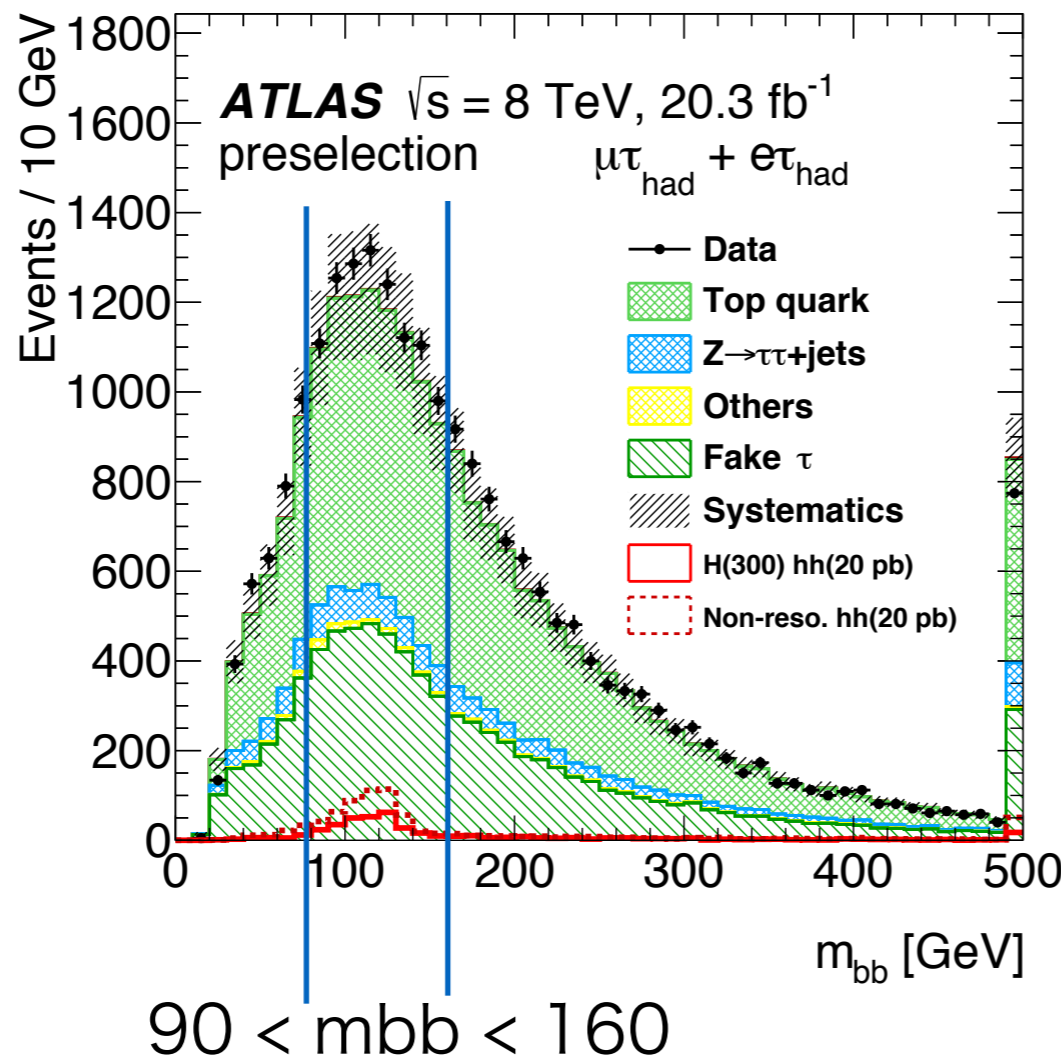
Event  
selection

Signal Region

Limit

ヒッグスボゾン質量

resonant探索だけ



その他の事象選別は今回は省略(バックアップ参照)



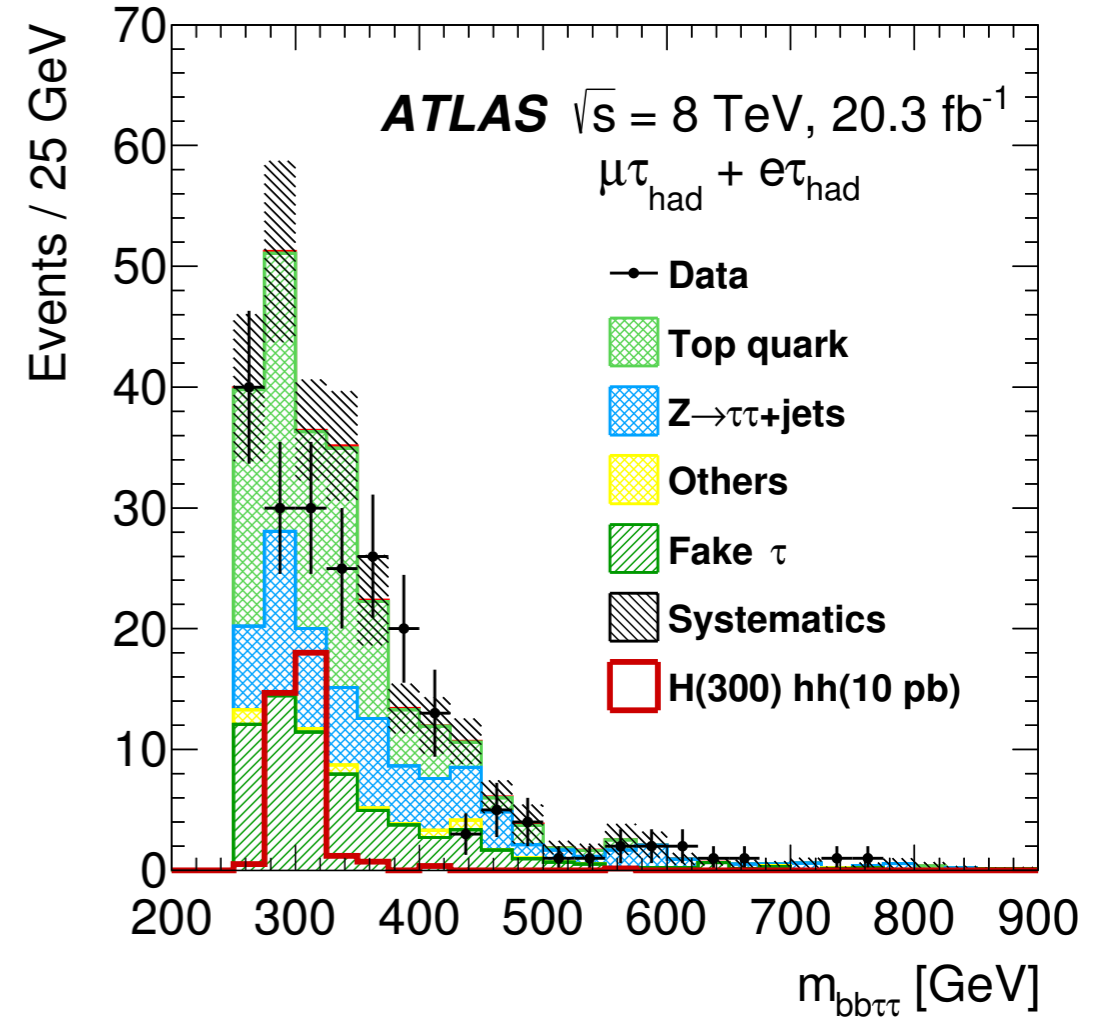
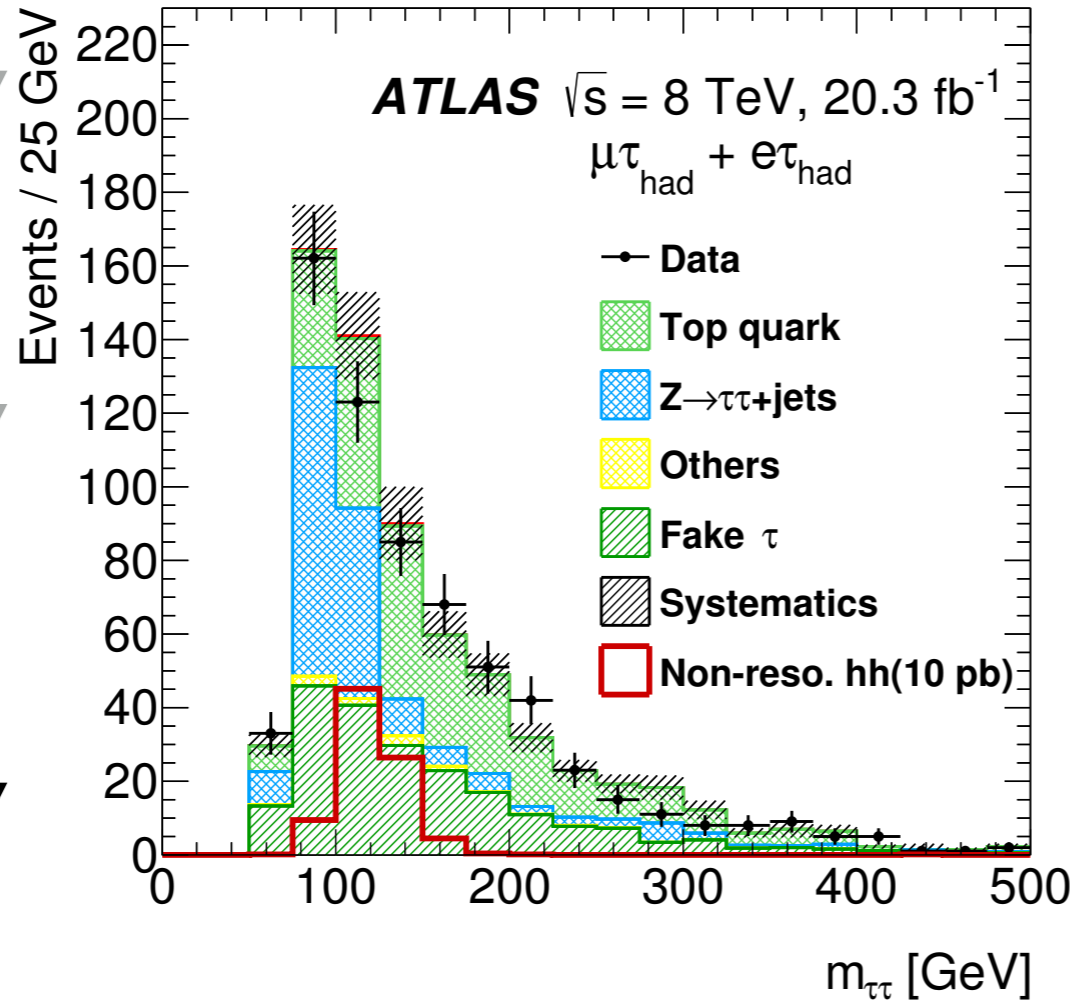
# final discriminant@signal region

Event  
pre-selection

non-resonant探索

resonant探索

Event  
selection



$m(\text{tautau})$

$m(\text{bbtautau})$

Limit



# Limit on bbtatau Analysis

- Exclusion limit

Event pre-selection

## Non-resonant探索

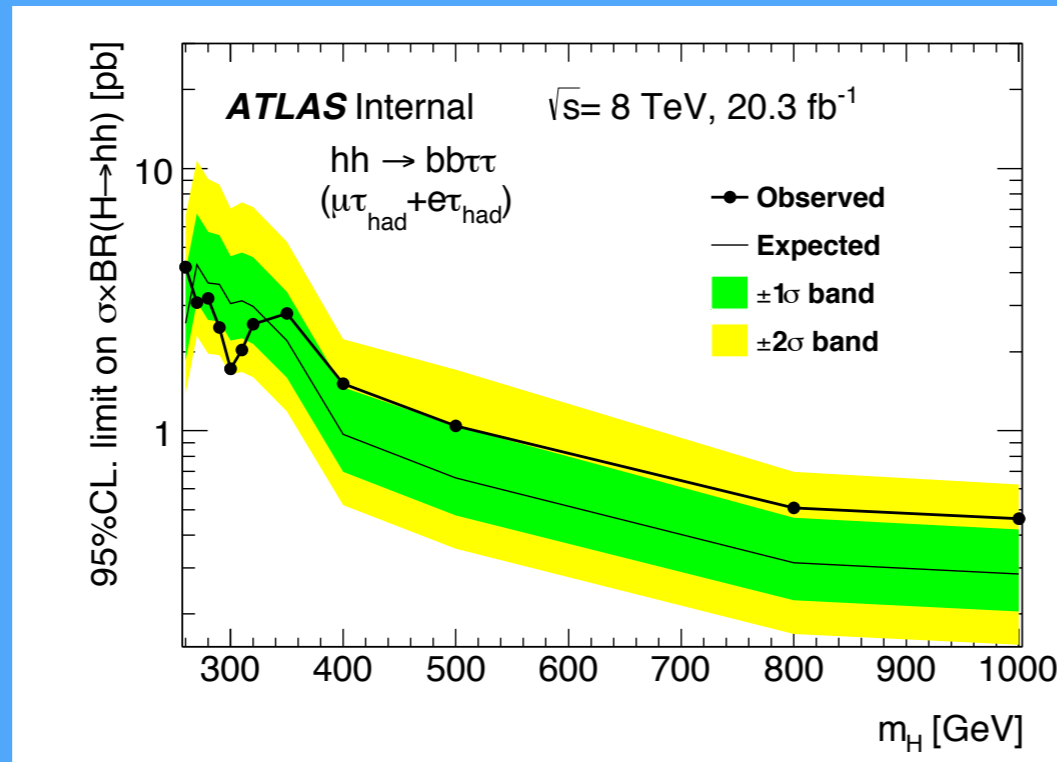
Category	Observed	Expected UL
Combined	1.60 pb	1.31 pb
TwoB	1.40 pb	1.70 pb
OneB	4.47 pb	4.75 pb

- ✓ no excess
- ✓ SM(gghh)の160倍の cross sectionを除外

Event selection

## Resonant探索

Signal Region



- ✓ no excess
- ✓ 以下の断面積を除外  
4.2 pb @260 GeV  
0.46 pb @1000 GeV

Limit



# 他のチャンネルと合わせた結果

## Non-resonant探索

Analysis	$\gamma\gamma bb$	$\gamma\gamma WW^*$	$bb\tau\tau$	$bbbb$	Combined
Upper limit on the cross section [pb]					
Expected	1.0	6.7	1.3	0.62	0.47
Observed	2.2	11	1.6	0.62	0.69
Upper limit on the cross section relative to the SM prediction					
Expected	100	680	130	63	48
Observed	220	1150	160	63	70

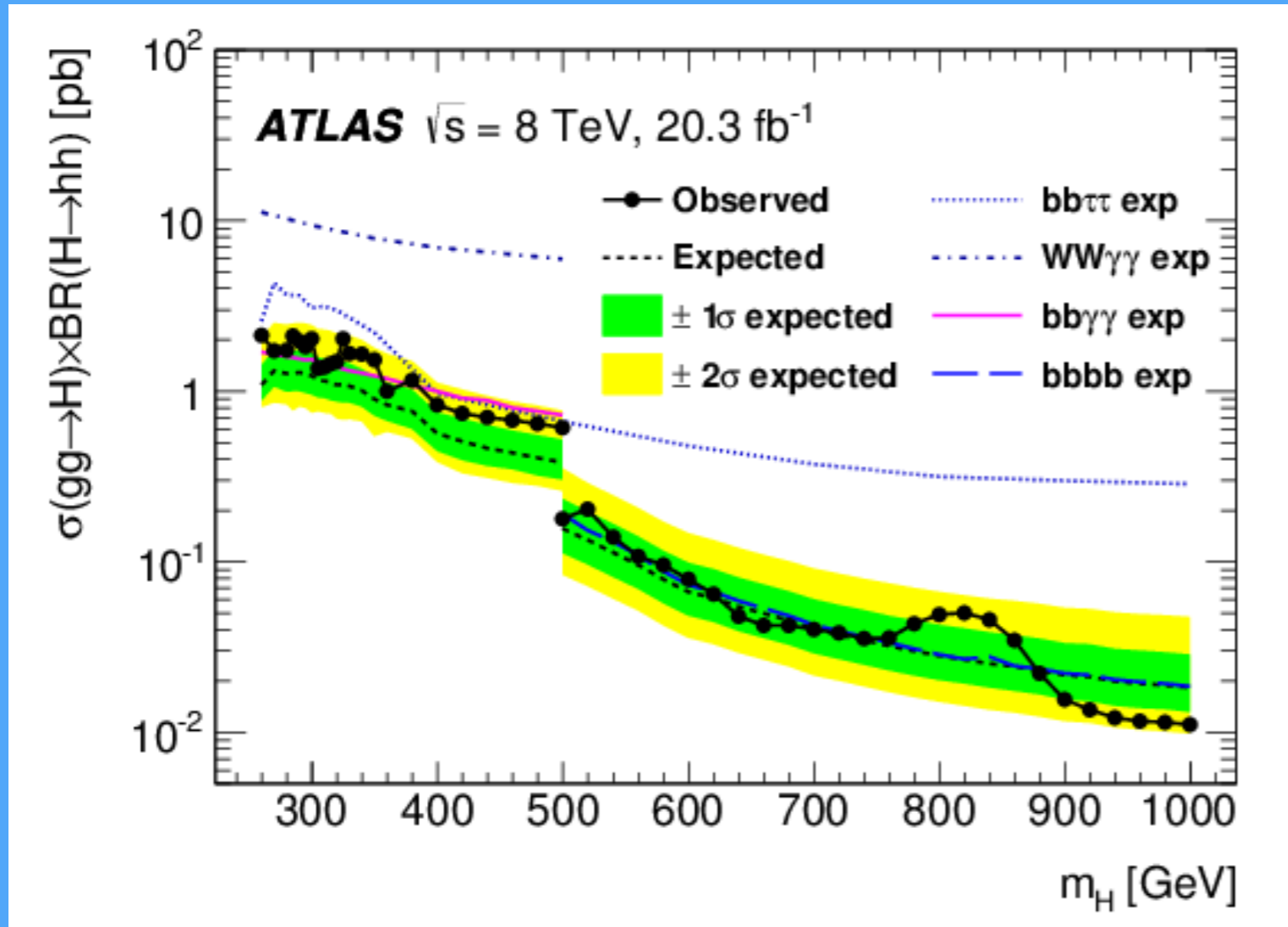
✓ 標準模型の70倍の生成断面積を除外

✓ 解析感度

$bbbb \gg bb\gamma\gamma \sim bb\tau\tau \gg WW\gamma\gamma$

# 他のチャンネルと合わせた結果

## Resonant探索



✓ 以下の断面積を除外  
2.1 pb @ 260 GeV  
0.011 pb @ 1000 GeV

✓ 解析感度

< 400 GeV:  $bb\gamma\gamma$

400 - 500 GeV:  $bb\tau\tau$

> 500 GeV:  $bbbb$



# まとめ

- di-higgsの物理はBEH機構の直接検証において重要
- 様々なBSMにおいて感度がある
- 世界で初めてhh->bbautau channelの解析を行った
- non-resonant探索においてSMで予測されるgghhの生成断面積の160倍を棄却
- resonant探索において4.2 pb (260 GeV) - 0.46 pb (1000 GeV)を棄却
- 他チャンネルとcombineした
  - non-resonant
    - SMの70倍をexclude
    - 2位のbb  $\gamma\gamma$  と肉薄(all-had channelに期待)
  - resonant
    - 2.1 pb (260 GeV) - 0.011 pb (1000 GeV)を棄却
    - 400-500 GeVでbbautauは最高感度