

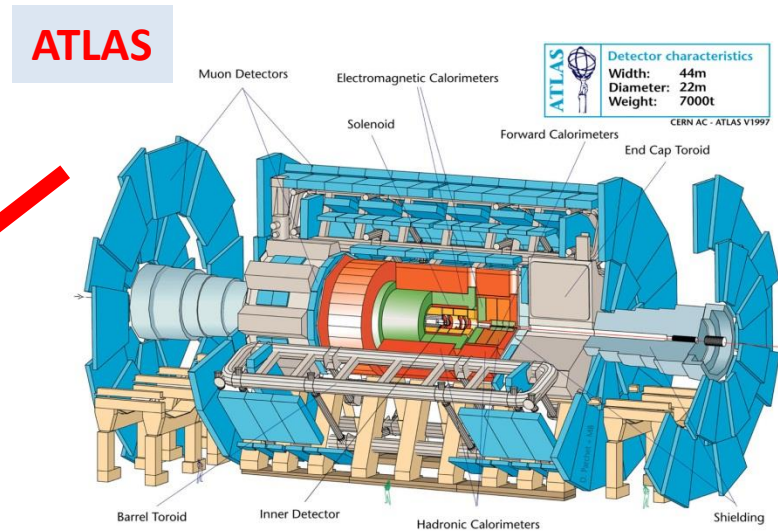


# Physics in LHC

*Koji Nakamura (KEK)  
on behalf of ATLAS collaboration*



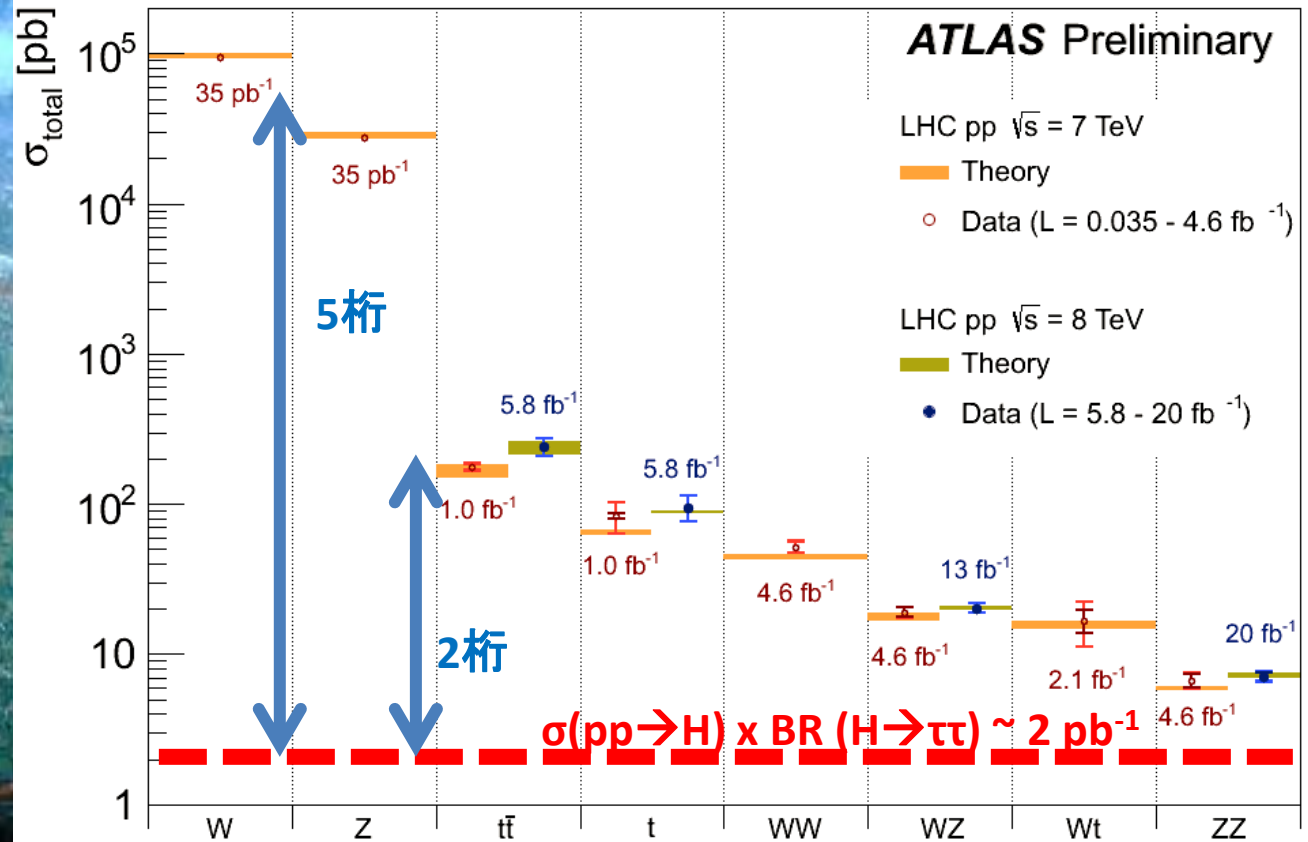
# LHC加速器とATLAS実験



- 2010年3月、 $\sqrt{s}=7\text{TeV}$ で衝突開始
- 2012年から、 $\sqrt{s}=8\text{TeV}$ に増強.
- 3年間、きわめて順調な運転が行われ、2012年11月より2年の運転停止に入った.

# Successful Operation

- 標準理論過程の再発見
- 特性の精密測定
- バックグラウンドの理解



# 新しいボソンの発見

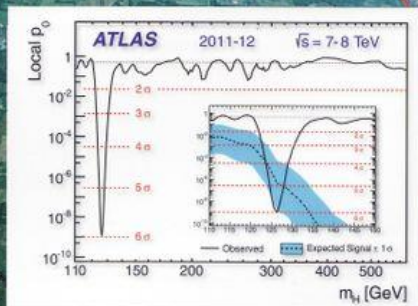
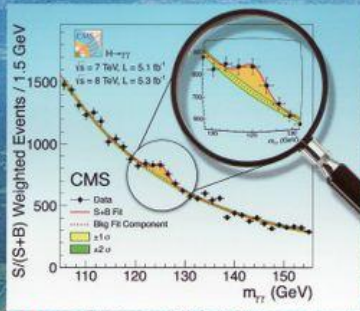
Phys.Lett. B716 (2012) 1-29

“These results provide **conclusive evidence for the discovery of a new particle** with mass  $126.0 \pm 0.4$  (stat)  $\pm 0.4$  (sys) GeV.”

“new particle”とは？

July 4<sup>th</sup> 2012 : 祝賀会(ATLAS Higgs WG)

First observations of a new particle  
in the search for the Standard  
Model Higgs boson at the LHC

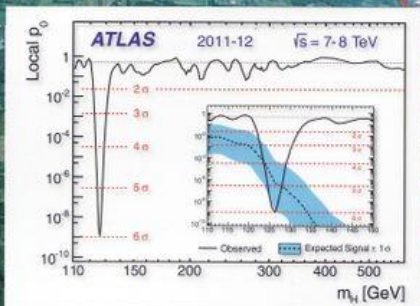
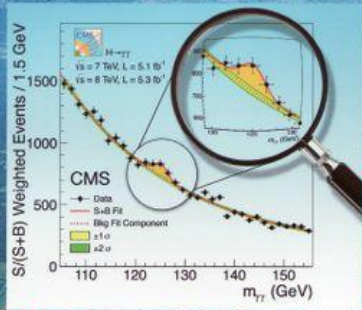


[www.elsevier.com/locate/physletb](http://www.elsevier.com/locate/physletb)

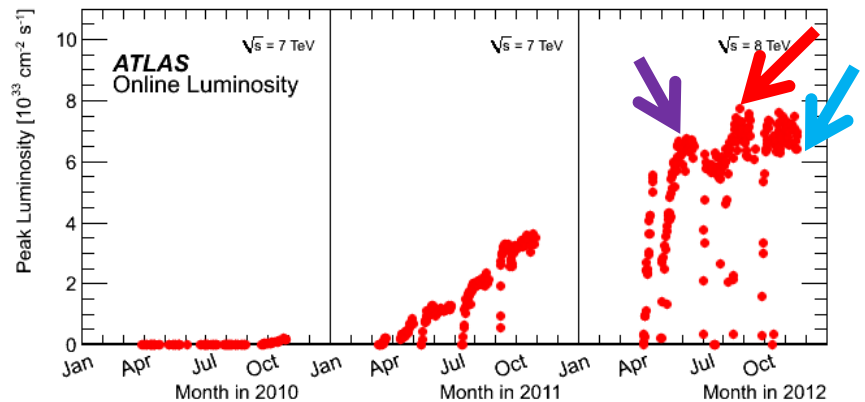
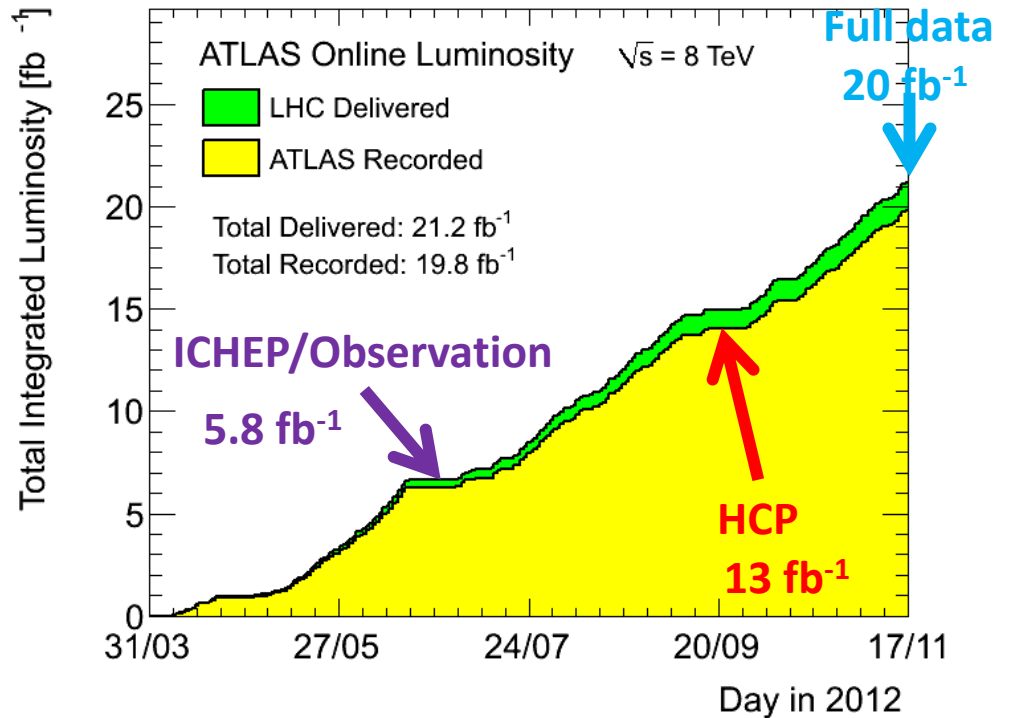


# 発見後

First observations of a new particle  
in the search for the Standard  
Model Higgs boson at the LHC



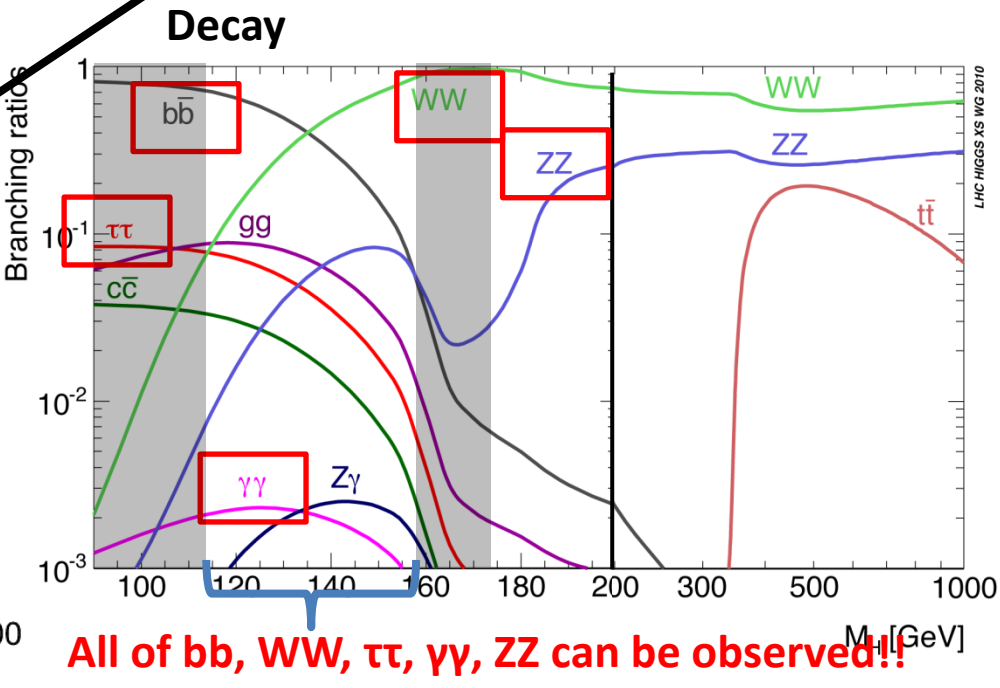
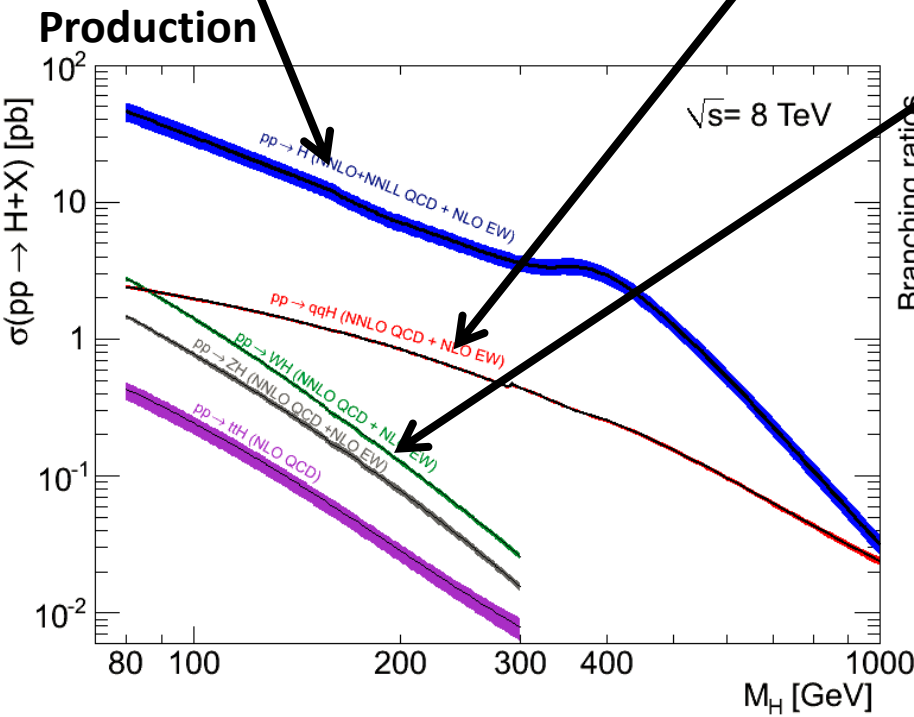
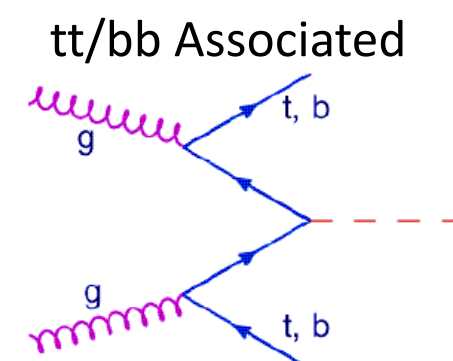
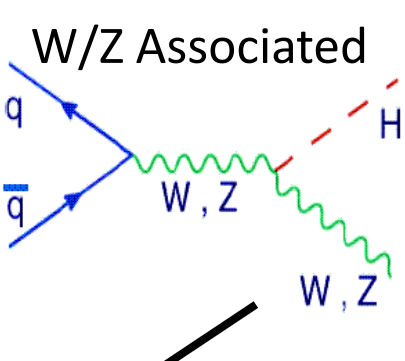
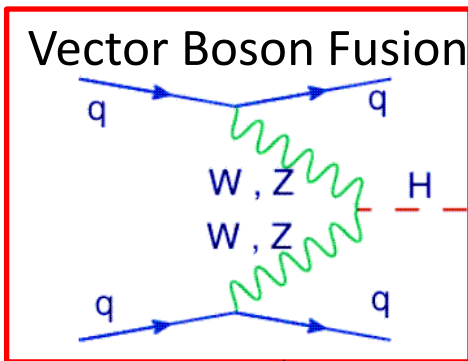
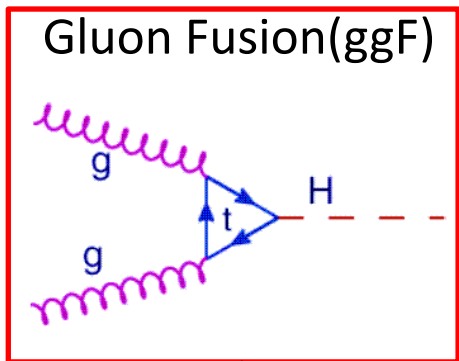
[www.elsevier.com/locate/physletb](http://www.elsevier.com/locate/physletb)



---

# Post observationの結果

# Higgs production and decay @ LHC

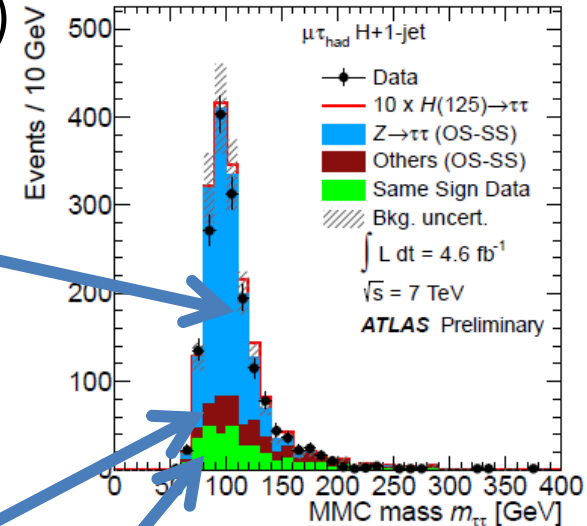
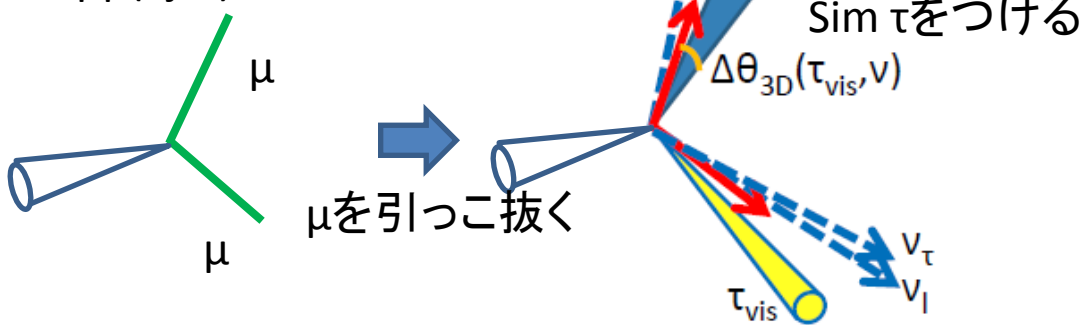


# 解析方法(泥臭さ)

- $H \rightarrow \tau\tau$  だけまだ Full data の結果を公開してない  $\rightarrow$  もう少しお待ちください。
  - $3\sigma$  程度の感度があり、データの詳細な理解が不可欠。
- 2つの異電荷  $\tau$  崩壊を再構成。( + W veto, Top veto )

$Z \rightarrow \tau\tau$  embedding method というもの使用。

$Z \rightarrow \mu\mu(+jet)$  データ



$Z \rightarrow ee/\mu\mu + jets(j \rightarrow \tau)$  : 2 lepton CR で補正

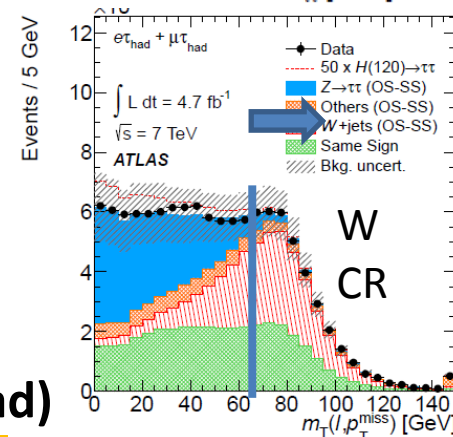
$Z \rightarrow ee/\mu\mu (l \rightarrow \tau)$  :  $Z \rightarrow ll$  event の tag&prob

Top : at least one b-tag CR で補正

di-boson : 小さいので MC

QCD and **W+Jets** – Estimated from Same Sign events (lephad)

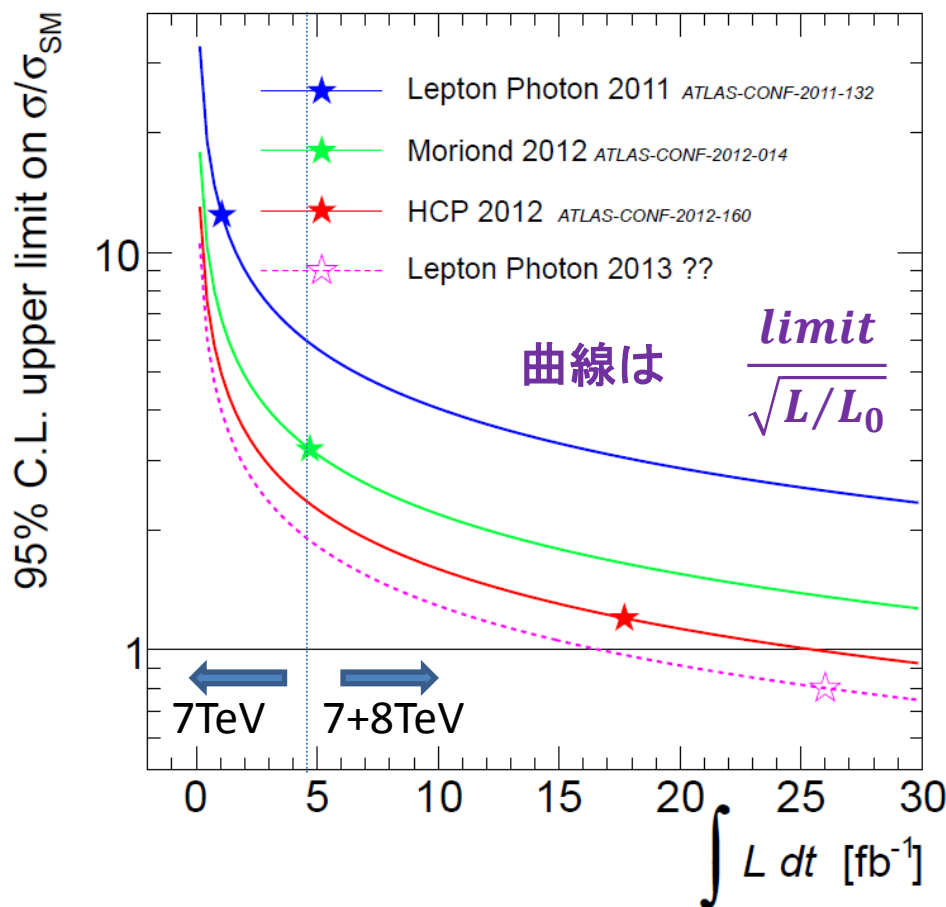
-- Template fit by loose selection (lep-lep, hadhad)





# データの理解とともに...

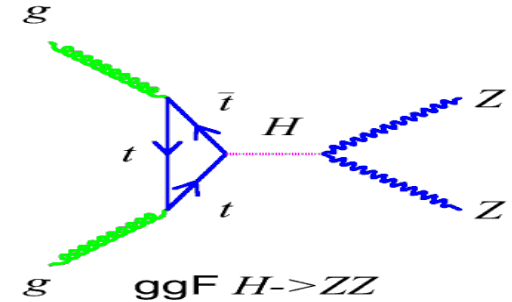
H $\rightarrow$  $\tau\tau$  過去の結果と予測



- 統計誤差だけを考えると...
  - 感度はn倍のdataで $\sqrt{n}$ 倍
- 系統誤差を含めるとこれより悪くなる...
  - どれだけ系統誤差が支配的かによる
- 難しい解析は常に感度が改善
  - 特にまだ感度が足りない解析

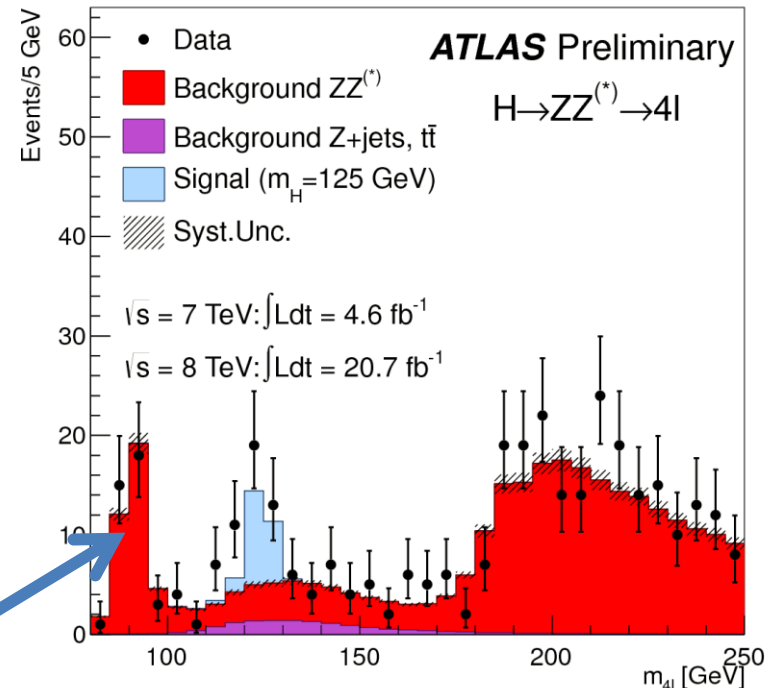
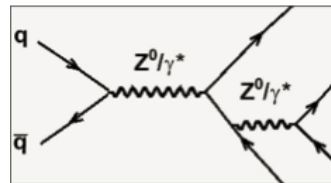
# H → ZZ → 4l

- Select a pair of same-flavour opposite-charge di-leptons.
  - $p_{T1,2,3,4} > 20,15,10,7(6)$  GeV for e( $\mu$ )
- At least one Z candidate have :
  - $m_{thr} < m_{ll} < 120$   $m_{thr}=17.5-50$  (22.5 @125GeV)
  - Isolations and dR(ll) cut
- Categorization :
  - 2 jet with  $\Delta\eta_{jj} > 3.0$ ,  $M_{jj} > 350$  GeV : VBF
  - Additional 1 lepton ( $p_t > 8$  GeV) : VH



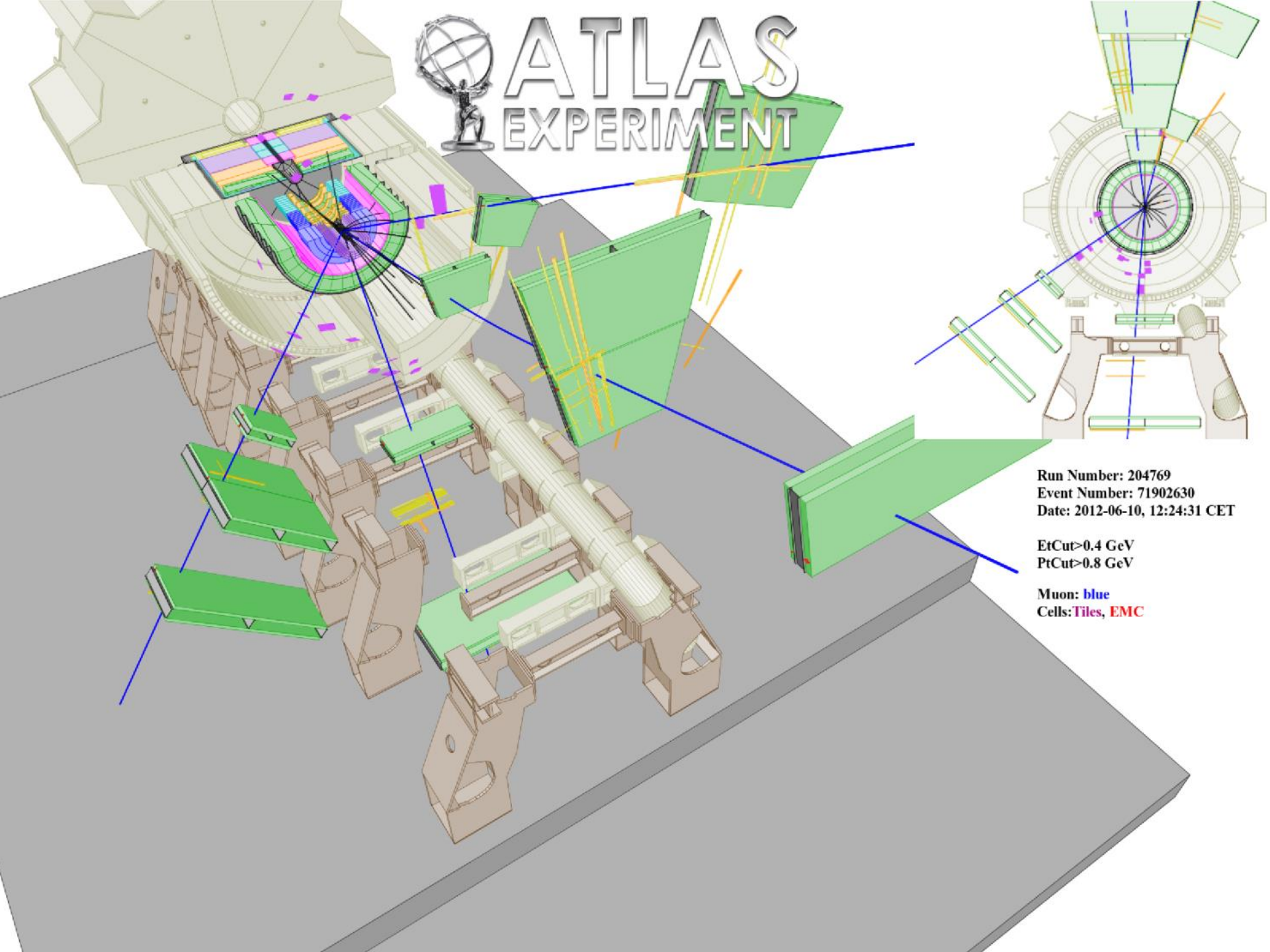
Signal Strength :

$$\mu = 1.7^{+0.5}_{-0.4} @ 124.3 \text{ GeV}$$





# ATLAS EXPERIMENT

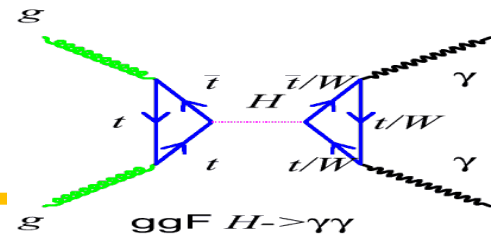


Run Number: 204769  
Event Number: 71902630  
Date: 2012-06-10, 12:24:31 CET

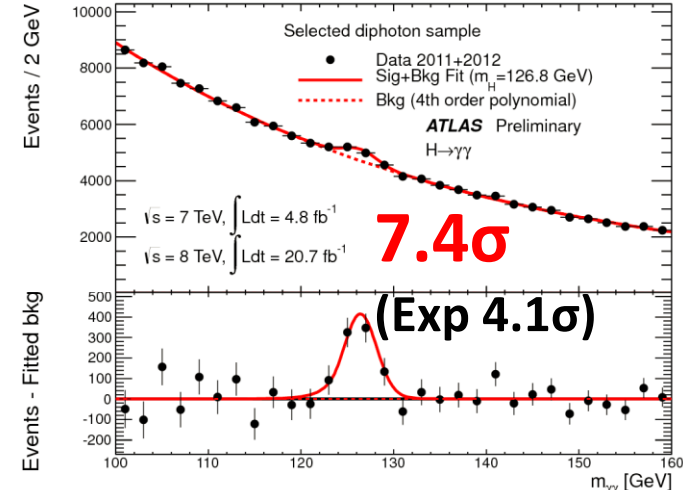
EtCut > 0.4 GeV  
PtCut > 0.8 GeV

Muon: blue  
Cells: Tiles, EMC

# H → γγ

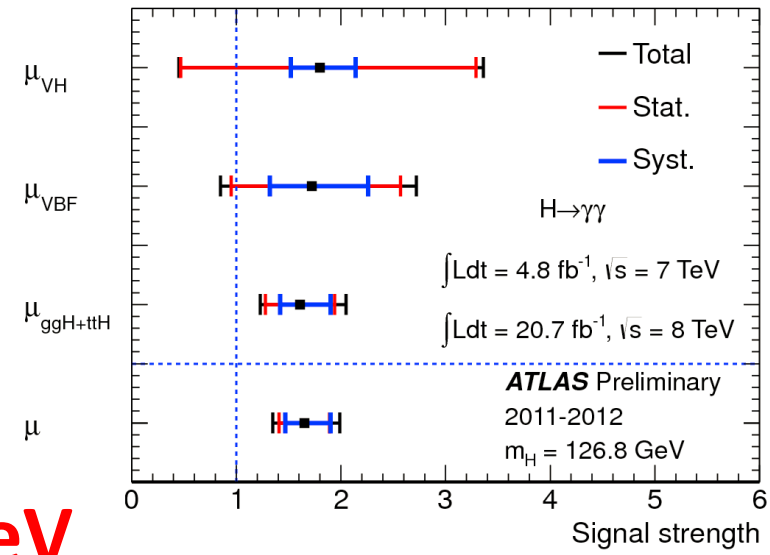


- Select di-photon with MVA id.
  - $p_{T1} > 40\text{GeV}, p_{T2} > 30\text{GeV}$
- Categorizers
  - レプトンを伴う事象 :  $W(l\nu)H, Z(\ell\ell)H$
  - Missing ETを伴う事象 :  $W(l\nu)H, Z(\nu\nu)H$
  - 2 jet ( $m_{jj} < 110\text{GeV}$ ) :  $V(qq)H$
  - 2 jet (high  $m_{jj}$ ) : VBF H
  - 残りを 9 カテゴリ:
    - Converted photon or un-converted
    - Calorimeter transition region.
    - Higgs pt thrust variable.

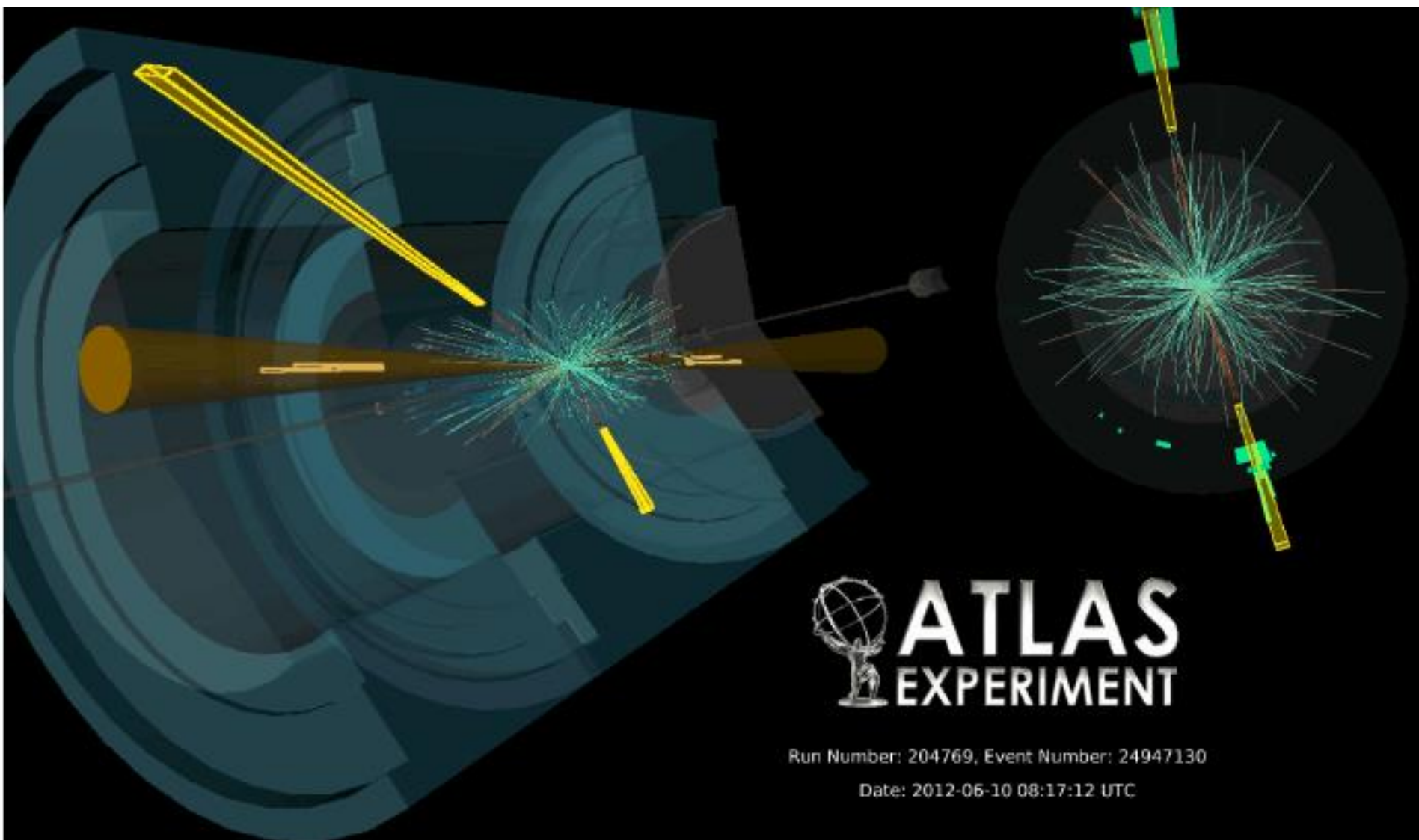


Signal Strength : (SMから2.3σのずれ)

**$\mu = 1.65 + 0.34 - 0.30 @ 126.8\text{GeV}$**

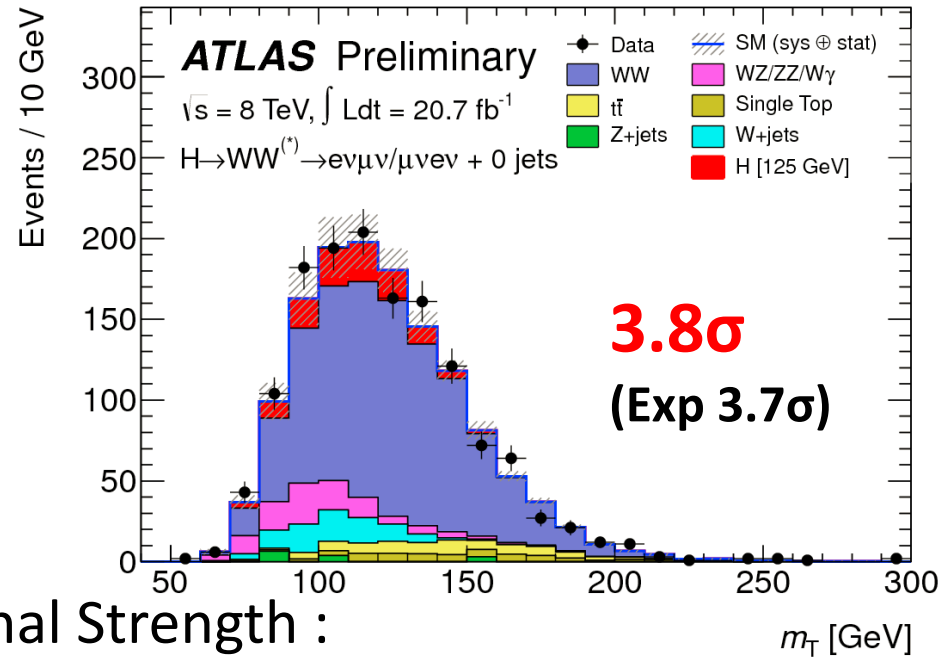
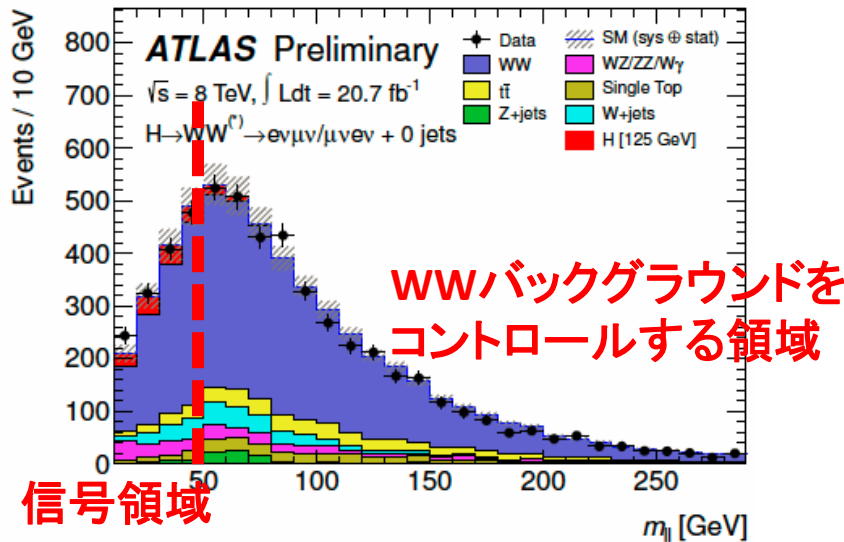
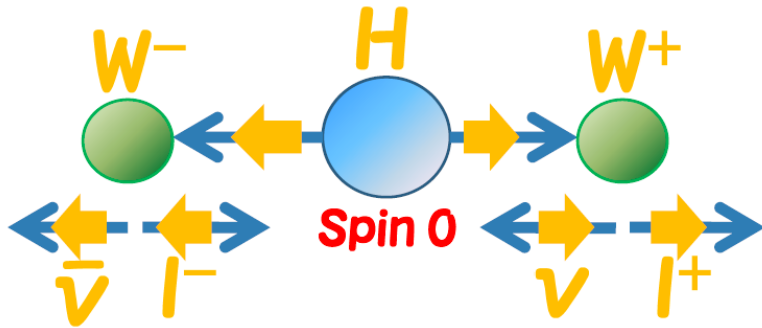
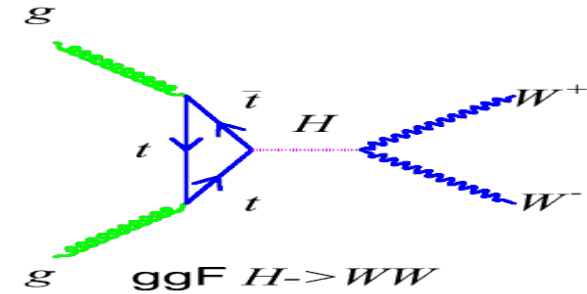


# An event

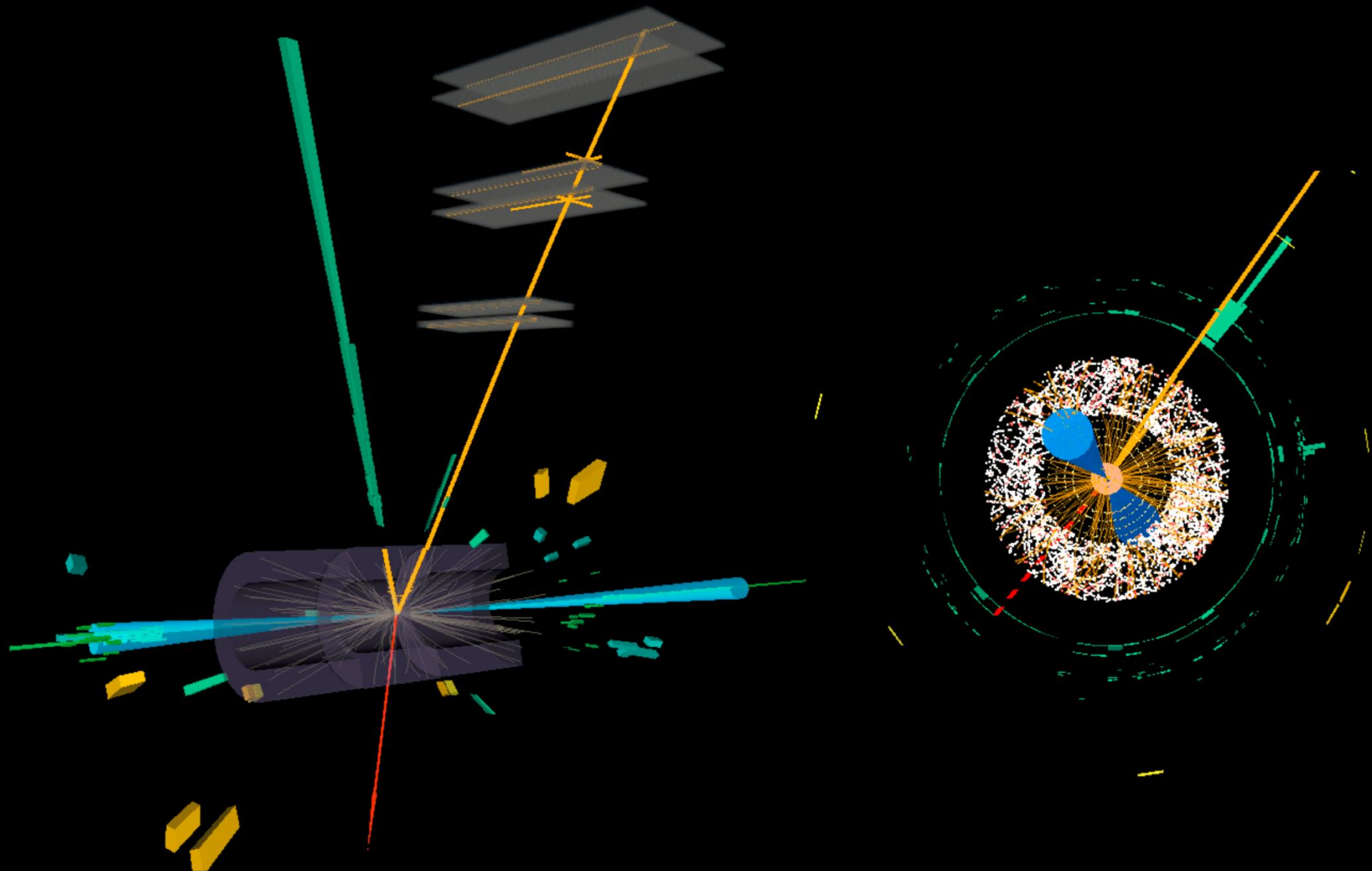


# H → WW → lνlν

- two leptons + Missing ET
- ggF : 0,1 jet with Same flavor leptons

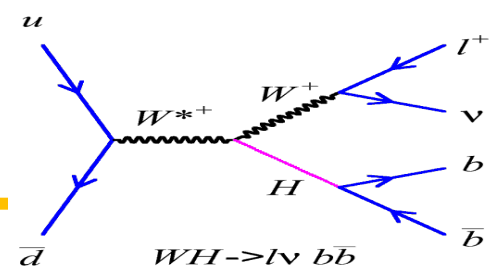


$\mu = 1.01 \pm 0.31 @ 125 \text{ GeV}$

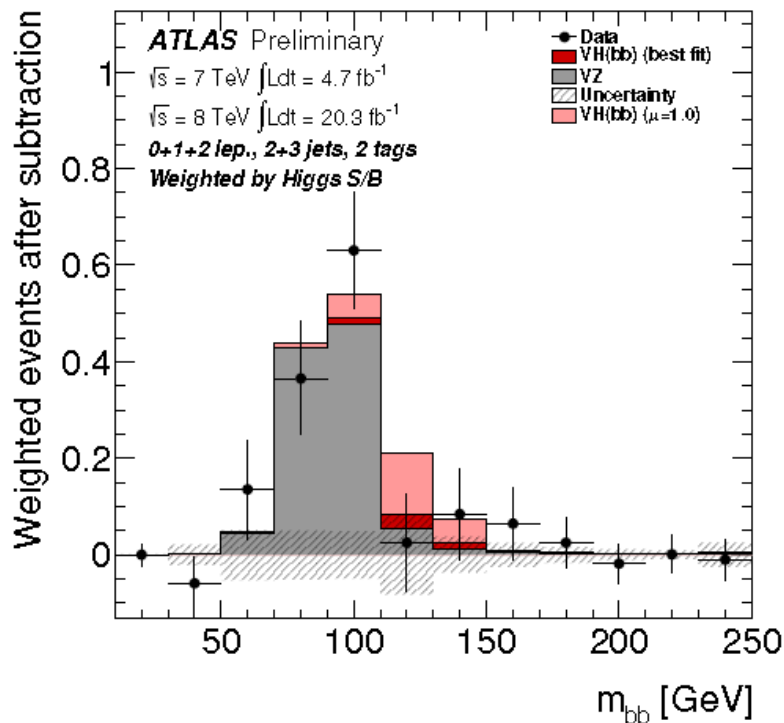
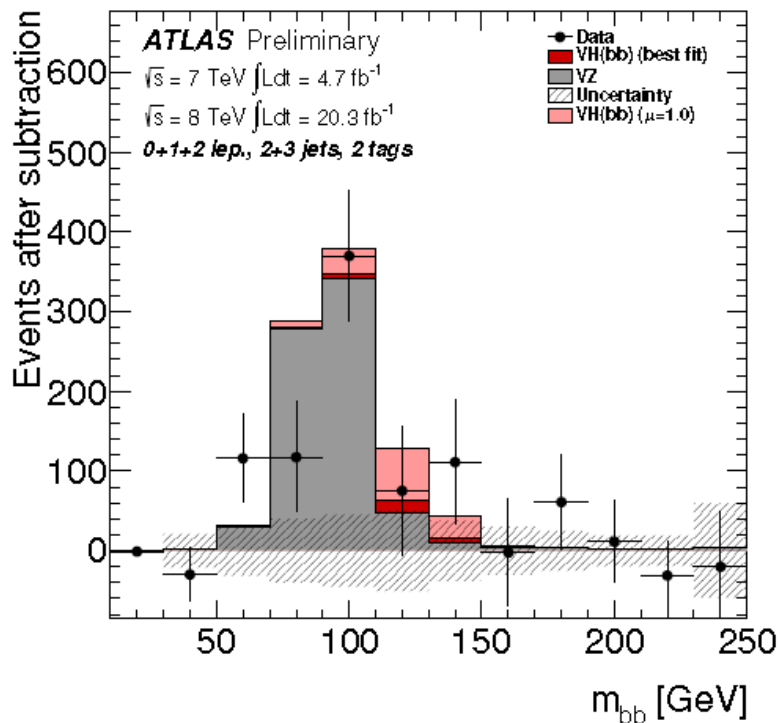


NEW

# VH, H→bb



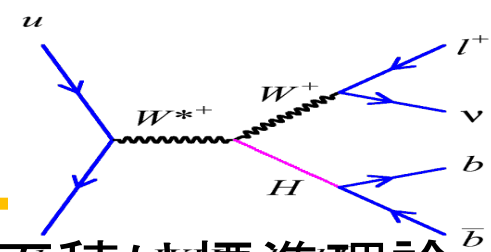
- 3チャンネル :  $WH \rightarrow l\nu b\bar{b}$ ,  $ZH \rightarrow ll b\bar{b}$ ,  $ZH \rightarrow \nu\nu b\bar{b}$
- いずれも、 $W$ +jets,  $Z$ +jets,  $t\bar{t}$ が支配的な背景事象。
- これをコントロールするとdata- $W/Z$ /topはdiboson( $WW/WZ/ZZ$ )が支配的。





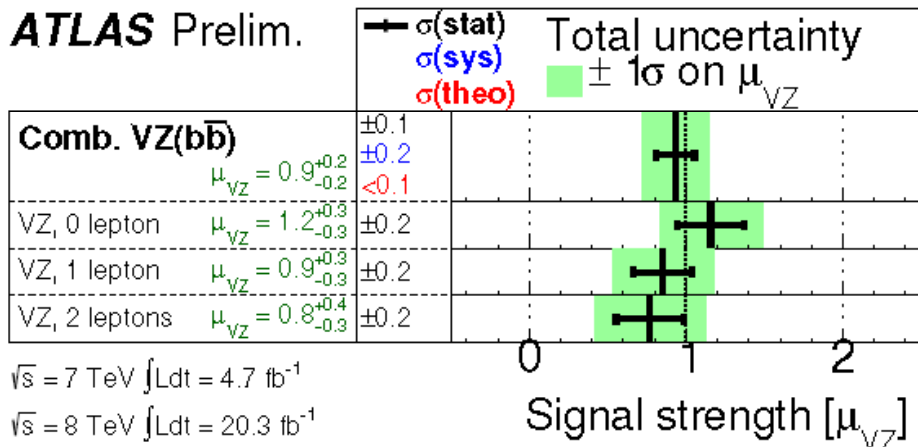
**NEW**

# VH, H->bb



## Di-boson の断面積フィット

ATLAS Prelim.



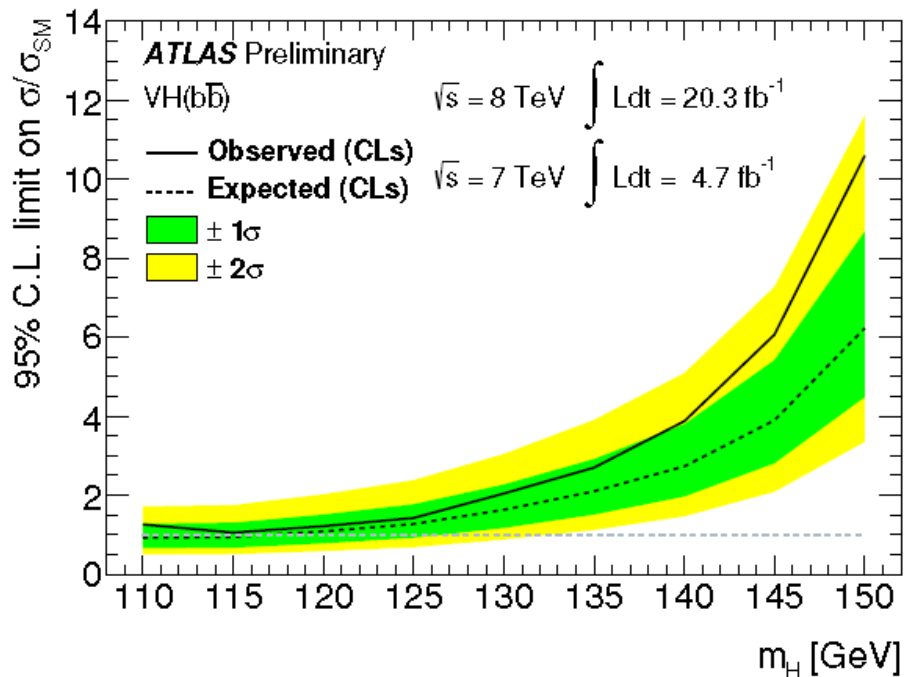
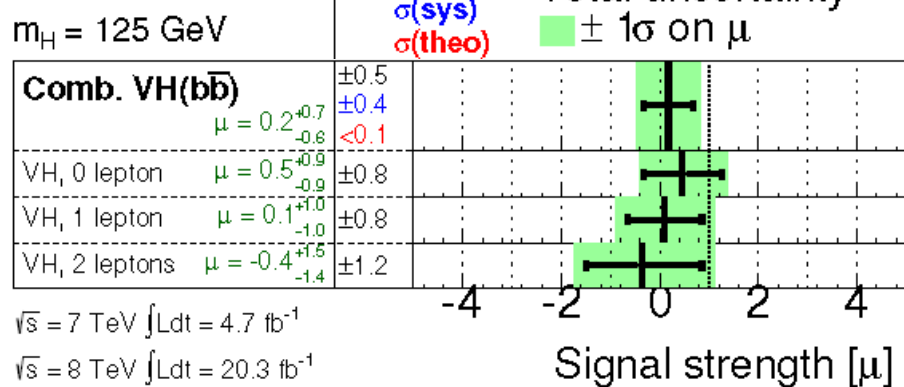
• Diboson の断面積は標準理論通り。

• Higgsのsignal strengthは、  
 $\mu = 0.2 \pm 0.5(\text{stat}) \pm 0.4(\text{sys}) \pm 0.1(\text{theo})$

no signal、標準理論ともにコンシステント

## Higgs の断面積フィット

ATLAS Prelim.



# 発見から測定の時代へ

「ヒッグス粒子探索における新粒子の発見」

Higgs-like particle ??

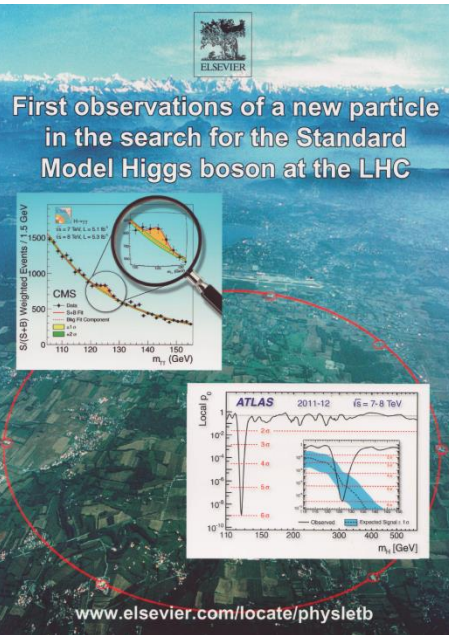
$4.8 \text{ fb}^{-1} @ 7\text{TeV} + 5.8 \text{ fb}^{-1} @ 8\text{TeV}$



新粒子の特性を測定

$4.8 \text{ fb}^{-1} @ 7\text{TeV} + 21 \text{ fb}^{-1} @ 8\text{TeV}$

- 質量の測定
- スピンの測定
- 結合定数の測定 大事！



結合定数を測定することで、「標準理論ヒッグス粒子か？」に答える

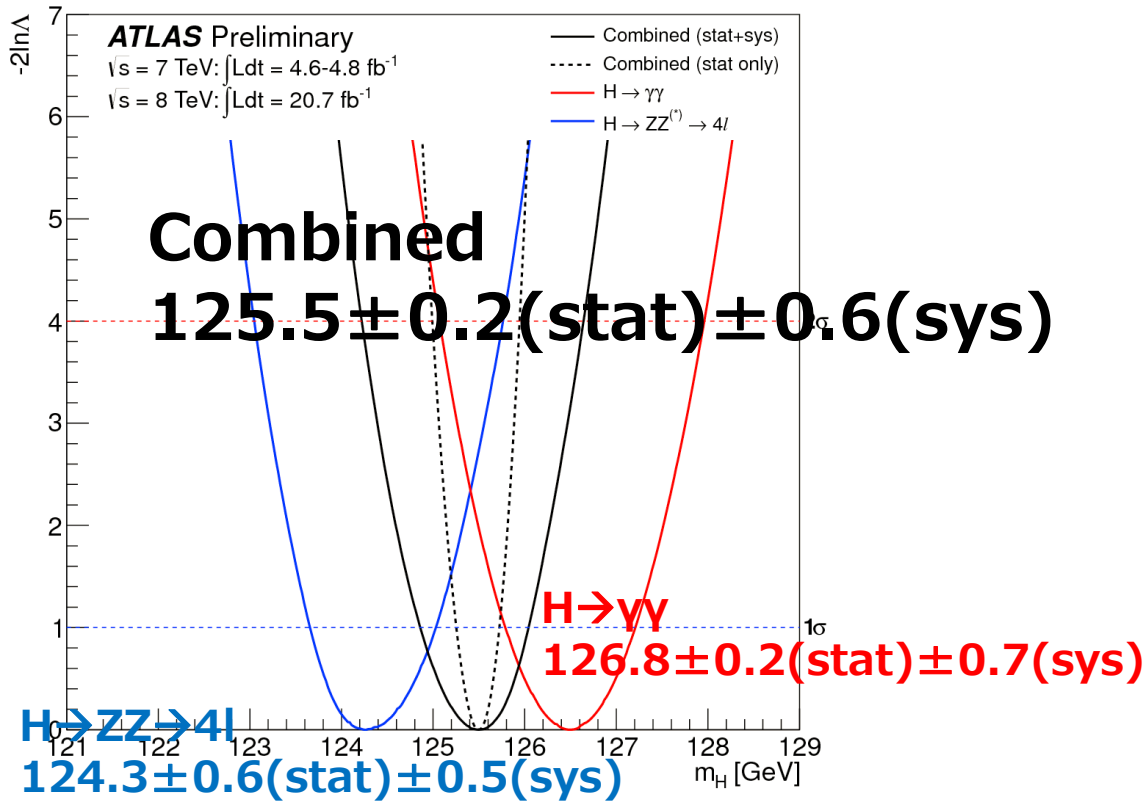
ただし、どこまで測れば、

- 1) ヒッグス粒子と呼べるか？
- 2) 標準理論と言って問題ないか？
- 3) 満足か？ ( $\Delta Y < 10\%$ ?  $5\%$ ?  $0.1\%$ ?)

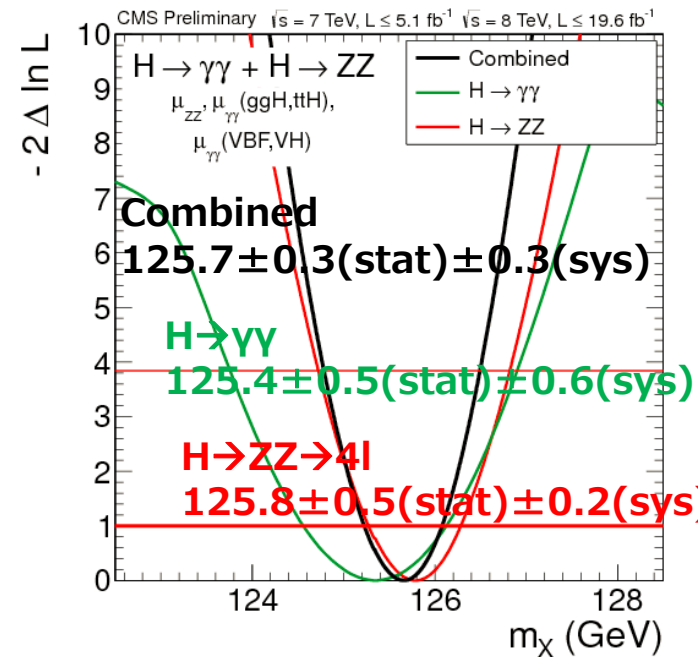
は(少なくとも私には)不明→どこまで測れたか、測れるか？

# 質量測定

- 2つの質量分解能がよいチャンネル  $H \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $H \rightarrow 4l$ 
  - $H \rightarrow \gamma\gamma$ : 系統誤差が支配的 ( $\gamma$  エネルギー分解能)
  - $H \rightarrow 4l$ : 統計誤差が支配的 (将来的に、muon の運動量)
- \* electron と photon の energy scale には相関がある。

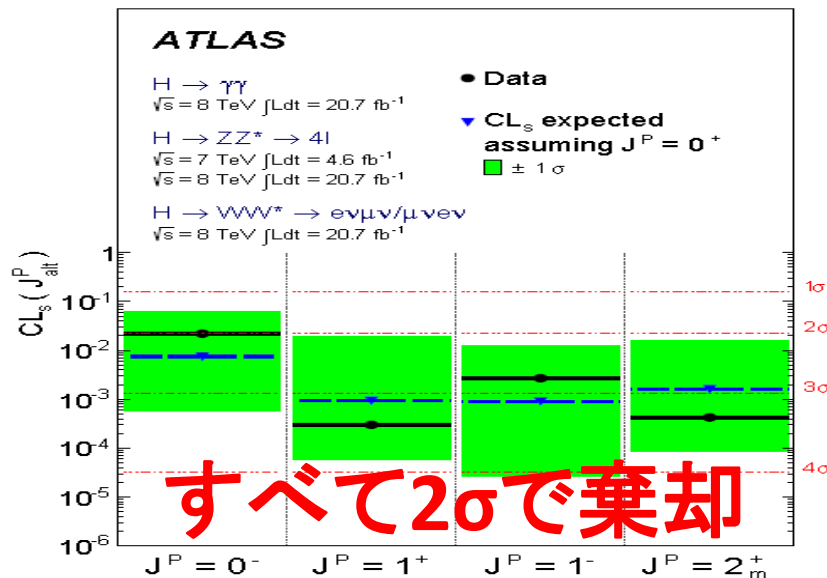
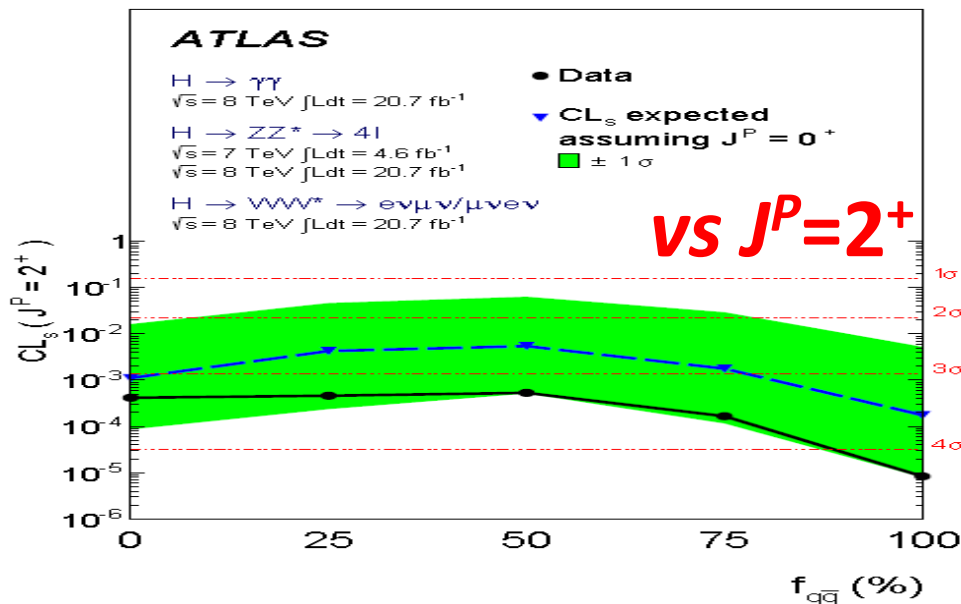
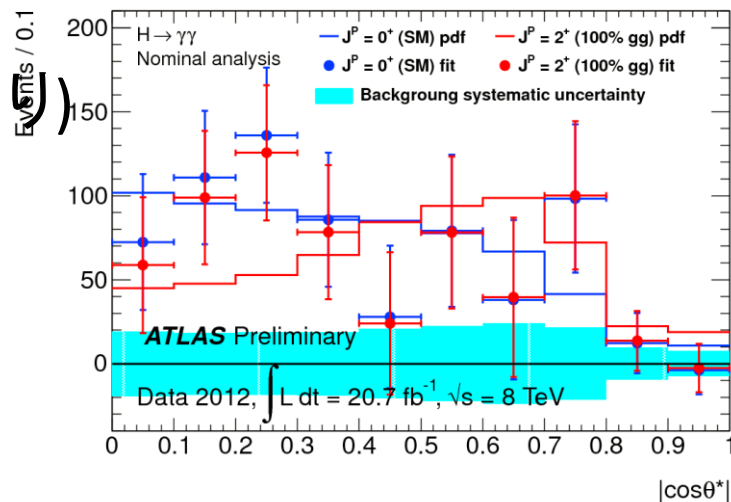


## ちなみにCMSは？



# スピン・パリティ測定

- Higgs 粒子ならスカラー ( $J^P=0^+$ )
- $J^P=1^+, 1^-$  は  $\gamma\gamma$  の発見で否定 (ZZ も感度あり)
- $J^P=0^-, 2^+$  の可能性を考える。
  - vs  $J^P=0^-$  :  $ZZ \rightarrow 4l$  が重要
  - vs  $J^P=2^+$  : シンプルな graviton model
    - $qq/gg \rightarrow H$  の比が不明 ( $\rightarrow$  スキャン)
    - $\gamma\gamma, WW, ZZ$  で解析

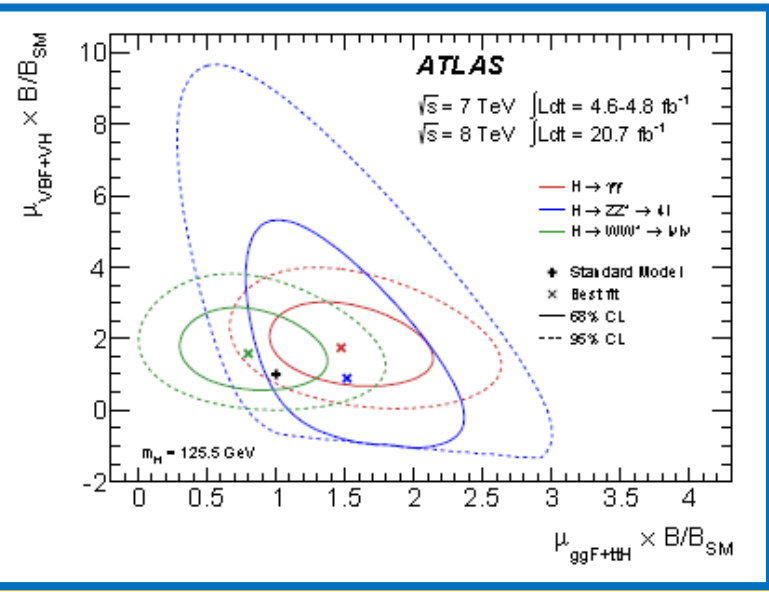
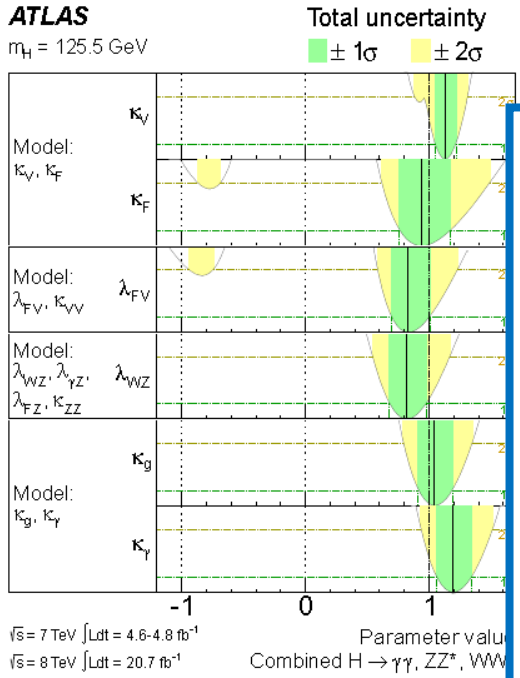


# 結合定数測定

今までの粒子と違って膨大な結合定数を導入する必要がある。  
 → データの解釈が非常に複雑。

生成断面積 x 崩壊分岐比は標準理論と無矛盾  
**HWW, HZZ, H $\circ$ gg, H $\circ$  $\gamma\gamma$  は存在(>3 $\sigma$ )**  
 フェルミオホビック や ボソフェリックではない  
 生成過程は、ggH, VBF Hとも存在(~3 $\sigma$ )

ATLAS $m_H = 125.5$ GeV	$\sigma(\text{stat})$ $\sigma(\text{sys})$ $\sigma(\text{theo})$	Total uncertainty ± 1 $\sigma$ on $\mu$
H $\rightarrow \gamma\gamma$ $\mu = 1.55^{+0.33}_{-0.28}$	$\pm 0.23$ $\pm 0.15$ $\pm 0.15$	
Low $p_{Tt}$ $\mu = 1.6^{+0.5}_{-0.4}$	$\pm 0.3$	
High $p_{Tt}$ $\mu = 1.7^{+0.7}_{-0.6}$	$\pm 0.5$	
2 jet high mass (VBF) $\mu = 1.9^{+0.8}_{-0.6}$	$\pm 0.6$	
VH categories $\mu = 1.3^{+1.2}_{-1.1}$	$\pm 0.9$	
H $\rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ $\mu = 1.43^{+0.40}_{-0.35}$	$\pm 0.33$ $\pm 0.17$ $\pm 0.14$	
VBF+VH-like categories $\mu = 1.2^{+1.6}_{-0.9}$	$+1.8$ $-0.9$	
Other categories $\mu = 1.45^{+0.43}_{-0.36}$	$\pm 0.35$	
H $\rightarrow WW^* \rightarrow l\nu l\nu$ $\mu = 0.99^{+0.31}_{-0.28}$	$\pm 0.21$ $\pm 0.21$ $\pm 0.12$	
0+1 jet $\mu = 0.82^{+0.33}_{-0.32}$	$\pm 0.22$	
2 jet VBF $\mu = 1.4^{+0.7}_{-0.6}$	$\pm 0.5$	
<b>Comb. H <math>\rightarrow \gamma\gamma, ZZ^*, WW^*</math></b> $\mu = 1.33^{+0.21}_{-0.18}$	$\pm 0.14$ $\pm 0.15$ $\pm 0.11$	



---

# 将来の話

# 14TeVに増強したLHC I

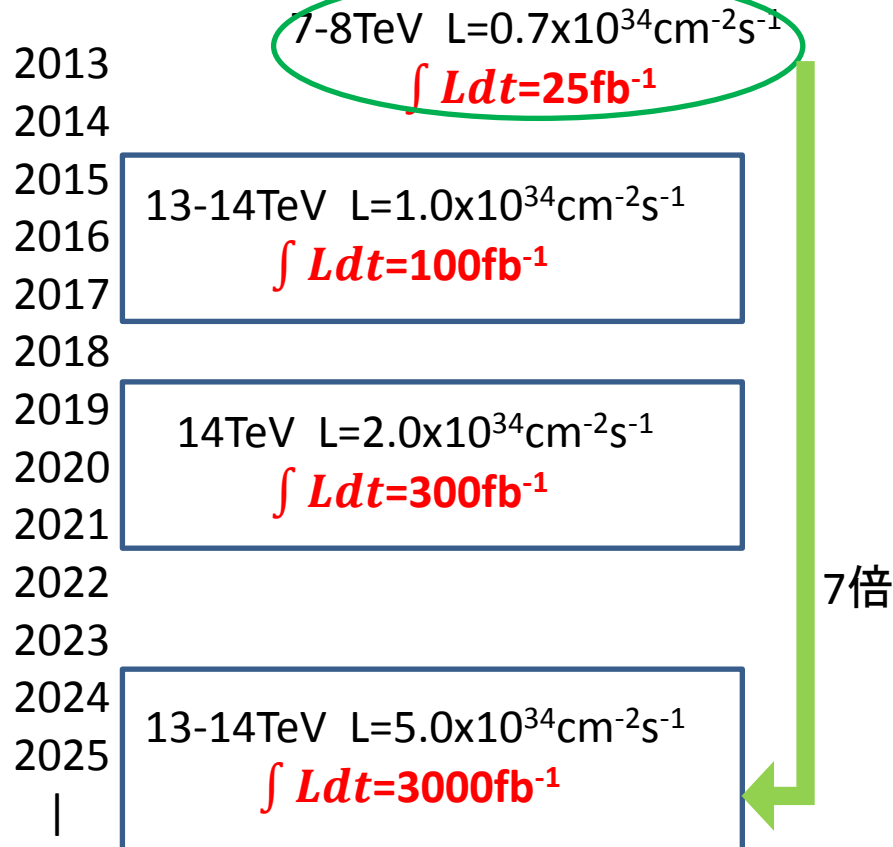
8TeV および 14TeVの生成断面積

[pb]	8TeV	14TeV	
W/Z <sup>*1</sup>	36/3 x10 <sup>3</sup>	61/6 x10 <sup>3</sup>	x1.8
Ttbar <sup>*1</sup>	129	452	x3.5
ggH	20	50	x2.5
WH/ZH	0.7/0.4	1.5/0.9	x2.1
ttH	0.13	0.6	x4.7

\*1 : at least one lepton

- 良い点
  - 生成断面積が大
  - S/Bが改善
- 大変な点
  - Trigger (e.g. lepton trigger 12倍)
    - L1の改善や物理トリガー
  - Pileup : 150-250 衝突/event
    - Trackerの性能 (放射線耐性)

## • 予定



# 14TeVに増強したLHC II

<Trigger> : 数字はthreshold [GeV]

		e	$\mu$	2e	2 $\mu$	e $\mu$	$\tau$	$\tau\mu$	jet
$2 \times 10^{34}$	Level 1	EM28H	MU20	2EM15	2MU11	EM15 MU10	TAU60	TAU15 MU10	J100
	Offline	<b>33</b>	<b>25</b>	<b>2x20</b>	<b>2x13</b>	<b>20,12</b>	<b>150</b>	<b>40,15</b>	<b>250</b>
$3 \times 10^{34}$	Level 1	EM50H	MU20 (eta<1.9)	2EM20	2MU11	EM20 MU10	TAU80	TAU15 MU15	J100
	Offline	<b>60</b>	<b>25</b>	<b>2x25</b>	<b>2x13</b>	<b>25,12</b>	<b>180</b>	<b>40,20</b>	<b>250</b>

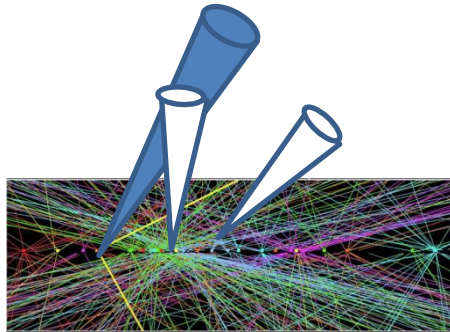
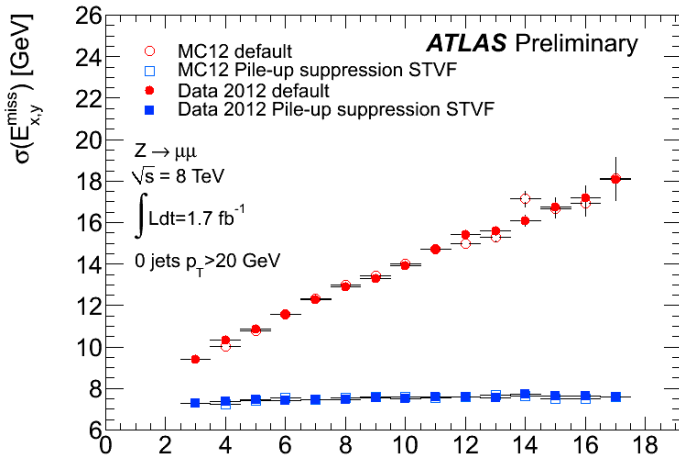
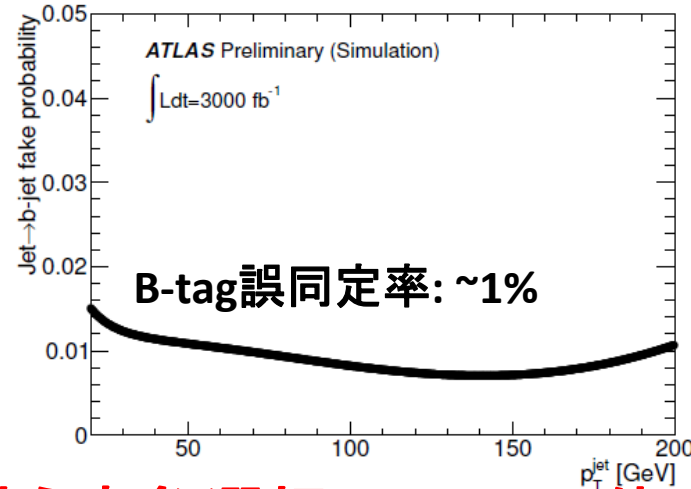
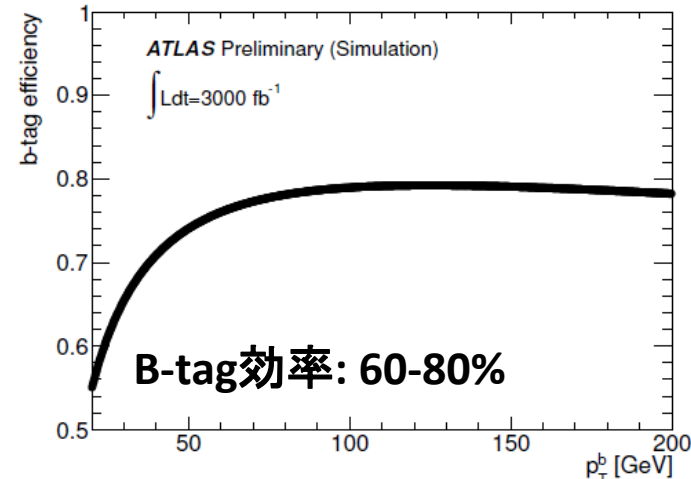
- $3 \times 10^{34}$ でelectron triggerは解析時に60GeVの閾値
  - ちなみにHL-LHCは $5 \times 10^{34}$ の予定。→W/Zの事象もとれない!
- 基本的にL1の問題
  - L1 caloの改良
  - コンバインドトリガー & L1 topological trigger (e.g.  $\Delta\eta$ ,  $\Delta R$  cut)
- FTK & 物理トリガー
  - e.g. b,  $\tau$ の閾値を下げる、VBF 生成過程に特化したトリガー



# 14TeVに増強したLHC III

## <Pileup>

- たとえば、  
140衝突/事象で、b-tag の誤同定率は現在 (0-40衝突/事象)と比べて1.25倍悪くなる。
- 逆に言えば、動く(放射線耐性の高い)シリコン検出器を作ることが大事
- METの分解能もtrackingで補正できる!

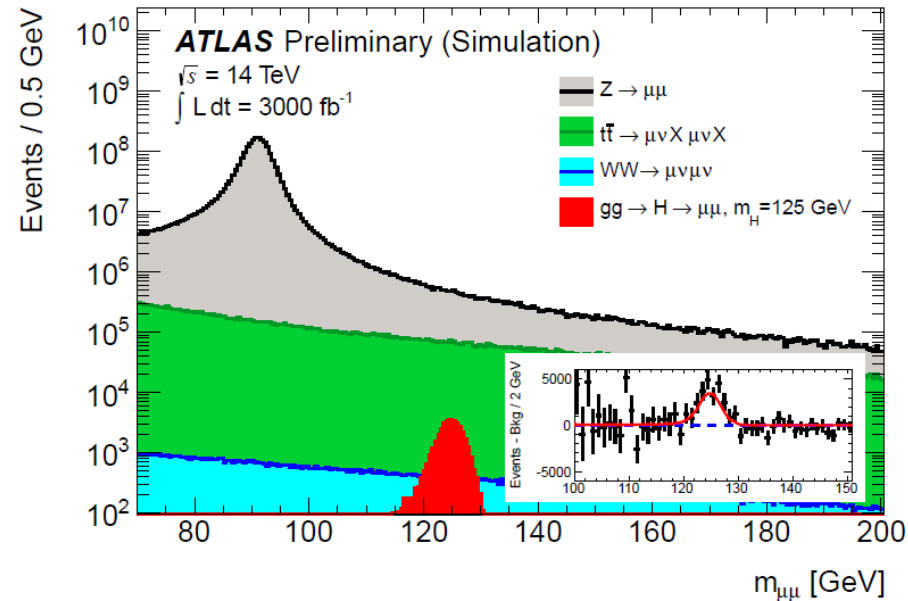
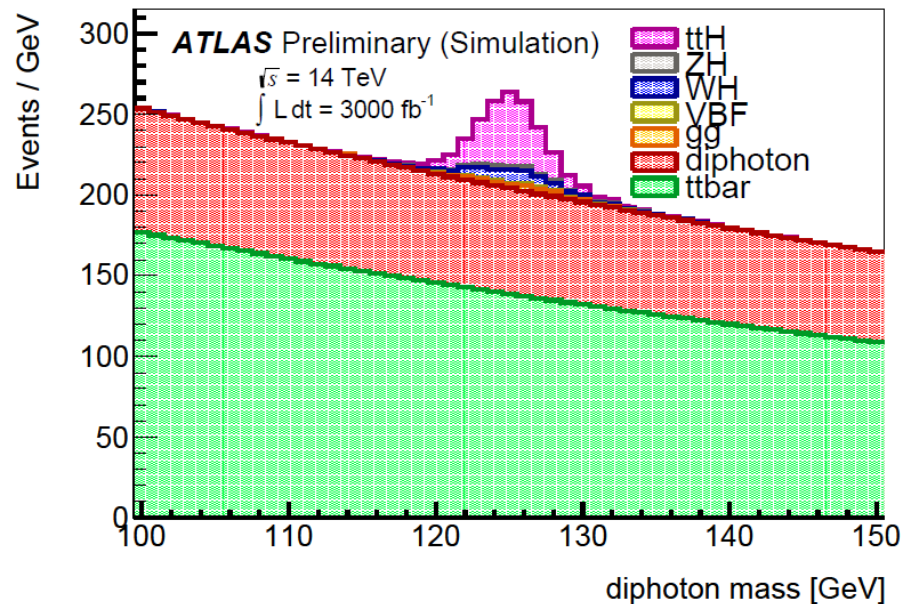


→ これからお見せする結果は、triggerに伴う事象選択、Pileupに伴う性能の低下を考慮

# 結合定数の観測: $Y_t$ と $Y_\mu$

- ttH, H- $\rightarrow$  $\gamma\gamma$ 
  - ttH, H- $\rightarrow$ bb と並んで  $Y_t$  測定に重要
  - 2つの光子と1か2レプトンと複数ジェットを要求。
  - 3000fb $^{-1}$ における  $S/\sqrt{B}$  は約 6 $\sigma$ !

- H- $\rightarrow$  $\mu\mu$ 
  - レプトンとの結合を調べるのに有効な過程の一つ
  - 崩壊分岐比:  $2.2 \times 10^{-4}$
  - 3000fb $^{-1}$ における感度は6 $\sigma$ 以上
  - ttH, H- $\rightarrow$  $\mu\mu$  は30事象 ( $S/B > 1$ )

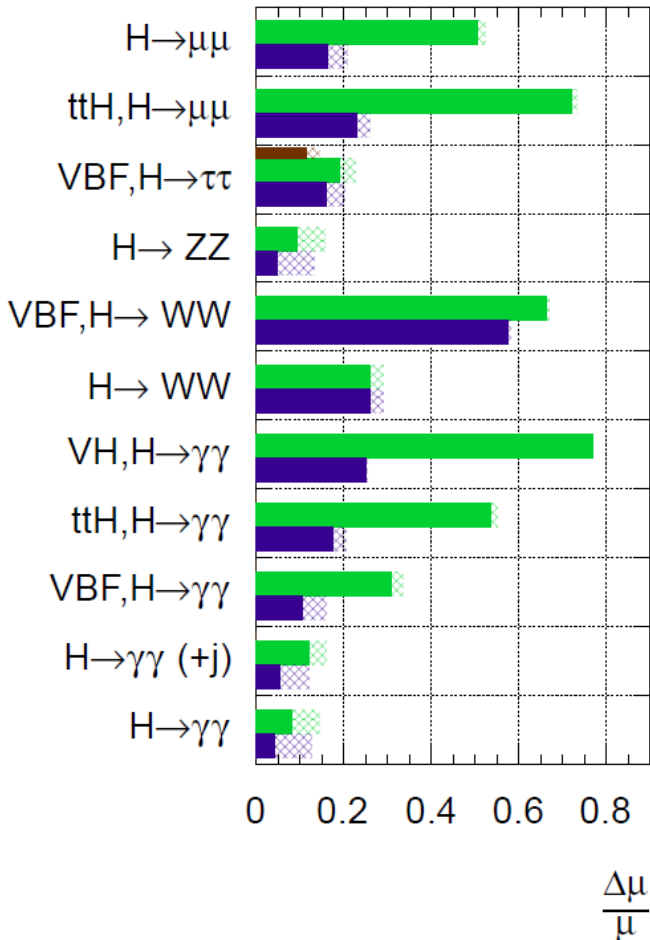


# 300fb<sup>-1</sup>-3000fb<sup>-1</sup>での予想感度

ATLAS Preliminary (Simulation)

$\sqrt{s} = 14$  TeV:  $\int Ldt=300$  fb<sup>-1</sup>;  $\int Ldt=3000$  fb<sup>-1</sup>

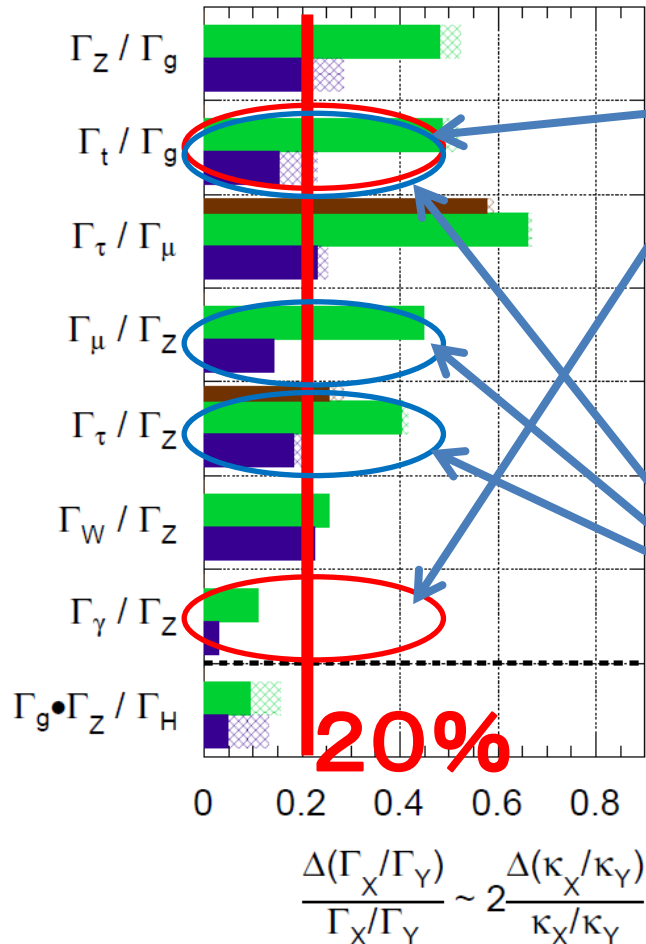
$\int Ldt=300$  fb<sup>-1</sup> extrapolated from 7+8 TeV



ATLAS Preliminary (Simulation)

$\sqrt{s} = 14$  TeV:  $\int Ldt=300$  fb<sup>-1</sup>;  $\int Ldt=3000$  fb<sup>-1</sup>

$\int Ldt=300$  fb<sup>-1</sup> extrapolated from 7+8 TeV

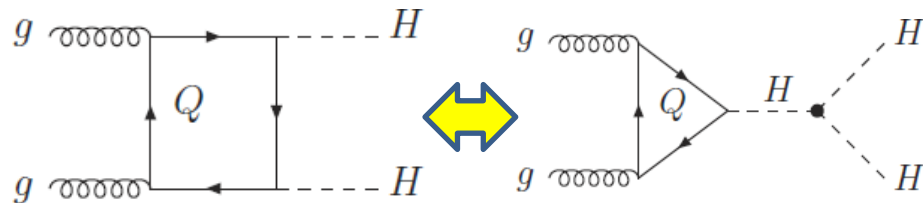


新物理に感度

湯川の測定精度 (@3000fb<sup>-1</sup>)

- $\Upsilon_t \sim 15\%$
- $\Upsilon_\mu \sim 10\%$
- $\Upsilon_\tau \sim 10\%$

# Higgs対生成と自己結合

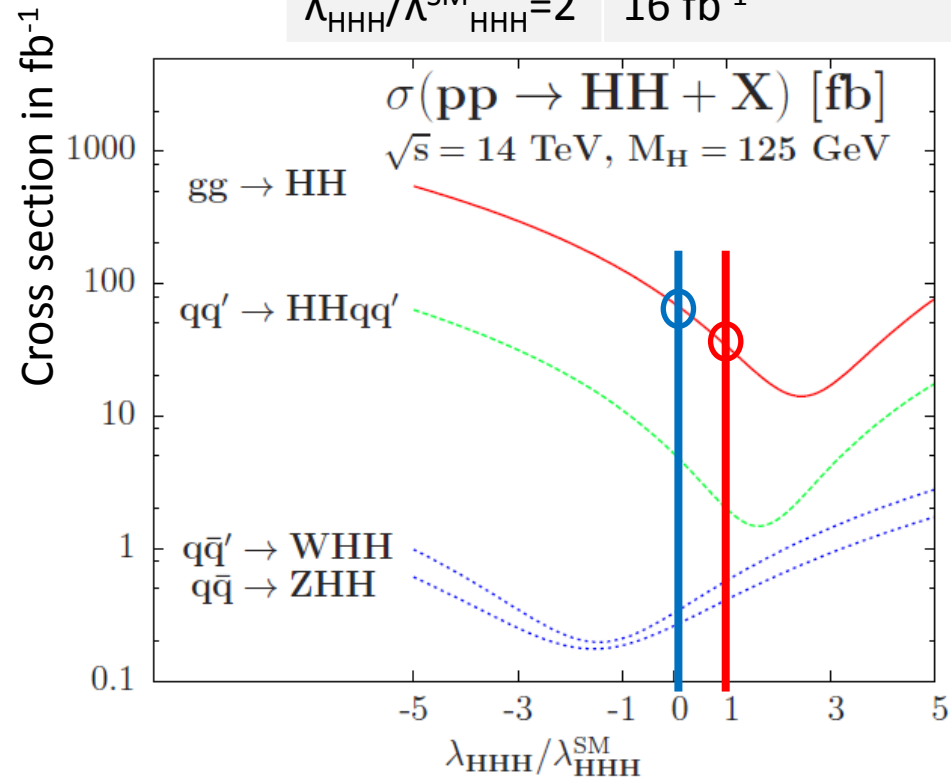


- 14TeVでのヒッグス対生成の断面積は**34fb<sup>-1</sup>**(+α)と非常に小さい。

- 3000fb<sup>-1</sup>で10万事象

- 角度分布で区別して、HHH結合の有無を議論することはLHCではかなり難しい。

	gg->HH σ [fb <sup>-1</sup> ] @ 14TeV
$\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{SM}=1$	34 fb <sup>-1</sup>
$\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{SM}=0$	71 fb <sup>-1</sup>
$\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{SM}=2$	16 fb <sup>-1</sup>



BoxとTriangleの間のinterferenceによってpp→HHの生成断面積が大きく変わる。

$$\sigma(\text{HHH無})/\sigma(\text{HHH有}) \sim 2$$

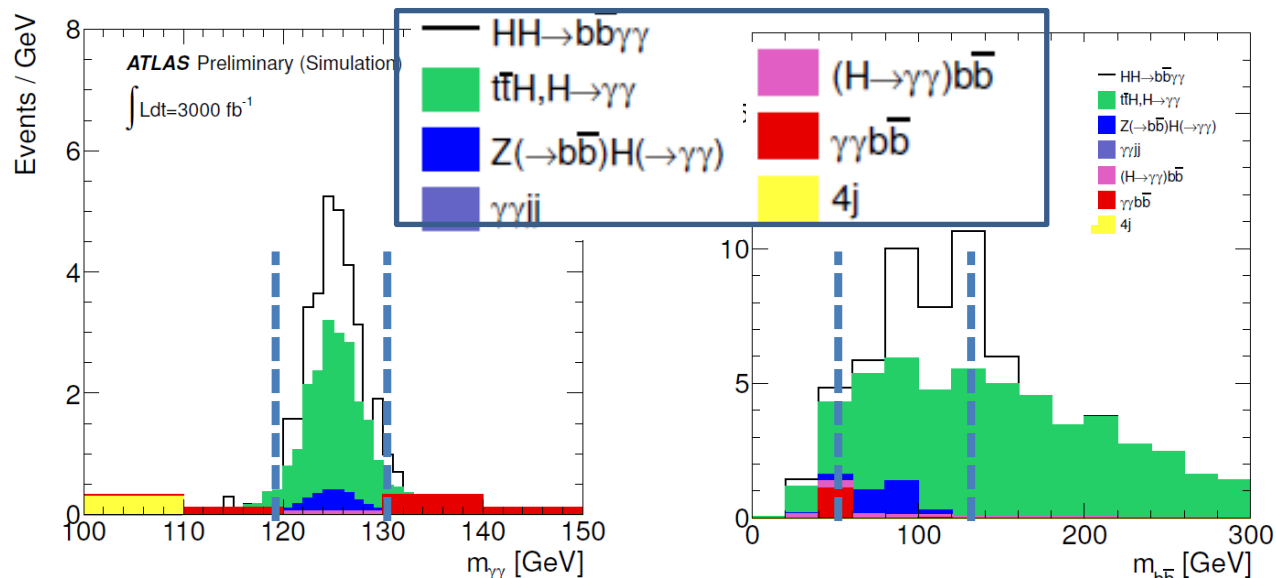
# 一つの例、 $HH \rightarrow bb\gamma\gamma$

- QCD,  $t\bar{t}$  のバックグラウンドが比較的少ないであろうチャンネル。
- カット後の信号数は10事象以上
  - 2つの光子 ( $P_T^\gamma > 25\text{GeV}$ )
  - 2つのb-jet ( $P_T^b > 40/25\text{GeV}$ )
  - $50 < m_{bb} < 130$ ,  $120 < m_{\gamma\gamma} < 130\text{GeV}$

	Expected event in 3000 fb <sup>-1</sup>
$HH \rightarrow bb\gamma\gamma$ ( $\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{\text{SM}}=1$ )	10.7
$HH \rightarrow bb\gamma\gamma$ ( $\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{\text{SM}}=0$ )	17.9
$HH \rightarrow bb\gamma\gamma$ ( $\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{\text{SM}}=2$ )	6.4

## 選択後のバックグラウンド

sample	events expected in 3000 fb <sup>-1</sup>
$\gamma\gamma b\bar{b}$	1.1
$ZH(Z \rightarrow b\bar{b}, H \rightarrow \gamma\gamma)$	2.8 -10?
$b\bar{b}H(H \rightarrow \gamma\gamma)$	0.5
$\gamma\gamma jj$	0.1
$jjjj$	0
$t\bar{t}H(H \rightarrow \gamma\gamma)$	13.6
$t\bar{t}$ ( $\geq 1$ leptonic W decay)	1.1
Total Background	19.2 -26?



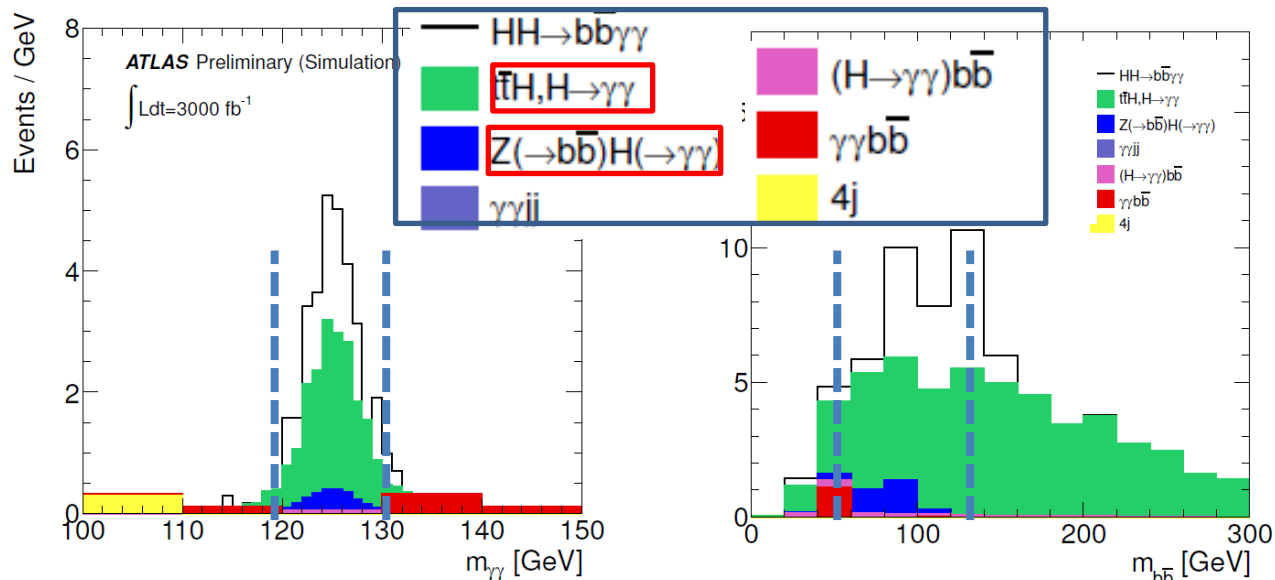
# 一つの例、HH→bbγγ

- このセレクション後バックグラウンドはほぼヒッグス単一生成過程。
- 標準理論ヒッグス対生成を2.1-2.4σで観測→他のチャンネルを加えて3σ?

	Expected event in 3000 fb <sup>-1</sup>
HH→bbγγ ( $\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{SM}=1$ )	10.7
HH→bbγγ ( $\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{SM}=0$ )	17.9
HH→bbγγ ( $\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{SM}=2$ )	6.4

## 選択後のバックグラウンド

sample	events expected in 3000 fb <sup>-1</sup>
$\gamma\gamma b\bar{b}$	1.1
ZH(Z → b $\bar{b}$ , H → γγ)	2.8 -10?
b $\bar{b}$ H(H → γγ)	0.5
γγjj	0.1
jjjj	0
t $\bar{t}$ H(H → γγ)	13.6
tt (≥ 1 leptonic W decay)	1.1
Total Background	19.2 -26?



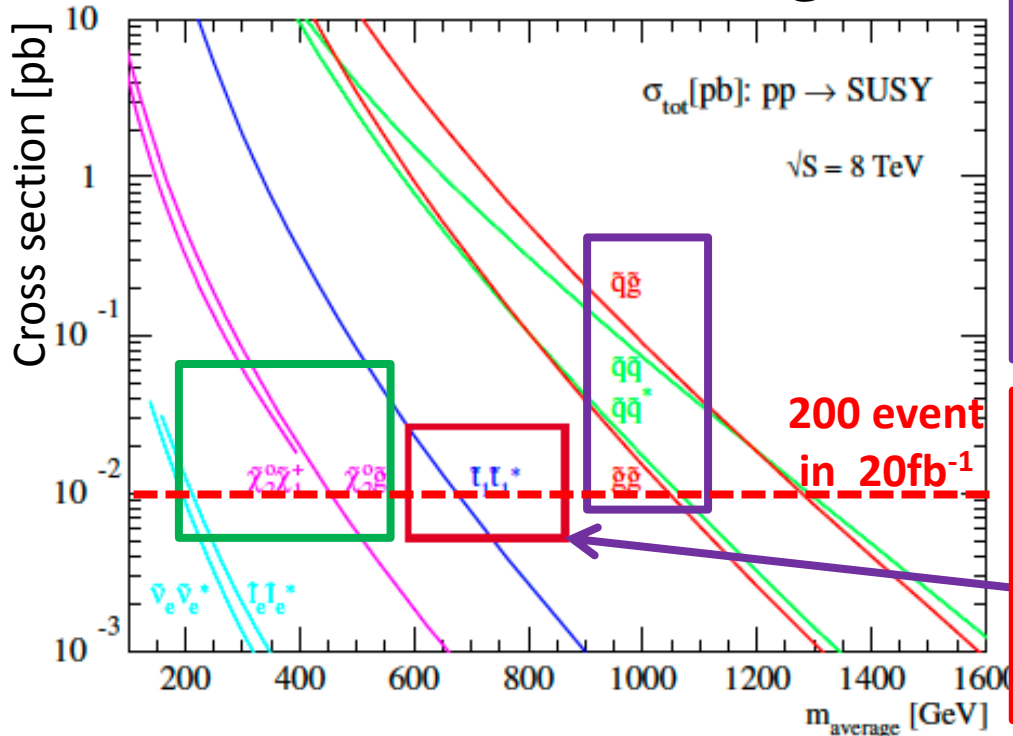
→ 大体30%くらいでσ(HH)が測れる。→  $\lambda_{HHH}/\lambda_{HHH}^{SM}=0$ を棄却(95%CL)

---

時間があれば....  
少しだけBSM(SUSY)

# SUSY search at the LHC

## SUSY search といっても...



Strong production  
(gluino, 1<sup>st</sup> 2<sup>nd</sup> gen.squark)  
 -- 生成断面積大(0.1pb@1TeV)  
 -- 限界はbeam energy で決まる。  
 (14TeVが楽しみ！ → 33TeV?)

Strong production 3<sup>rd</sup> Gen  
(stop)  
 -- 生成断面積小(0.05pb@0.5TeV)  
 -- 軽い可能性がある?

ElectroWeak production  
(gaugino, slepton)

- 生成断面積小(0.01pb @ 400GeV)
- 軽い可能性がある?

## 今後面白い探索

8TeV full data : stop gaugino+slepton

14TeV 最初の一年 : squark gluino

14TeV High Lumi : stop gaugino+slepton

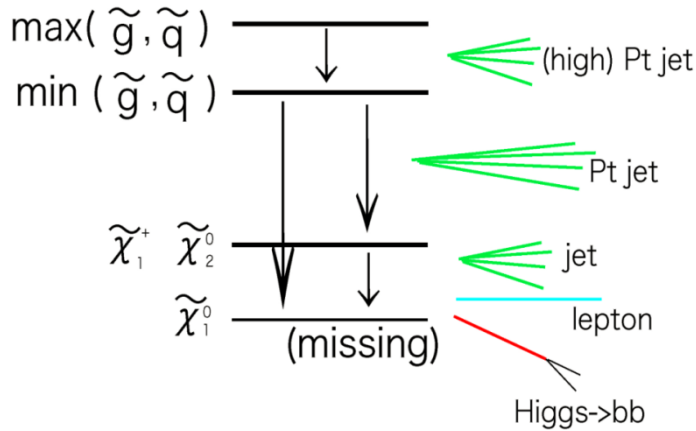


# squark/gluino search

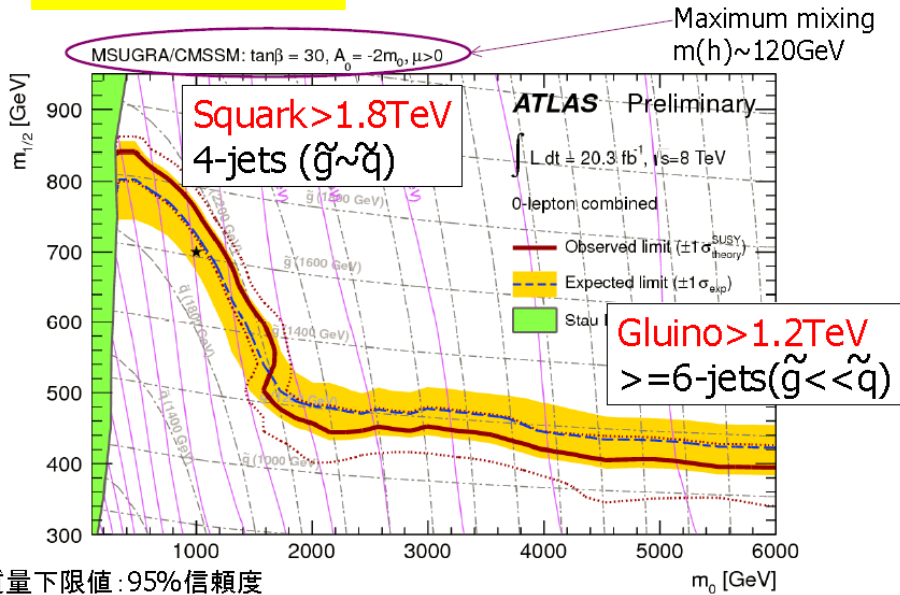
Large MET + multi-jet

-- lepton数で場合分け

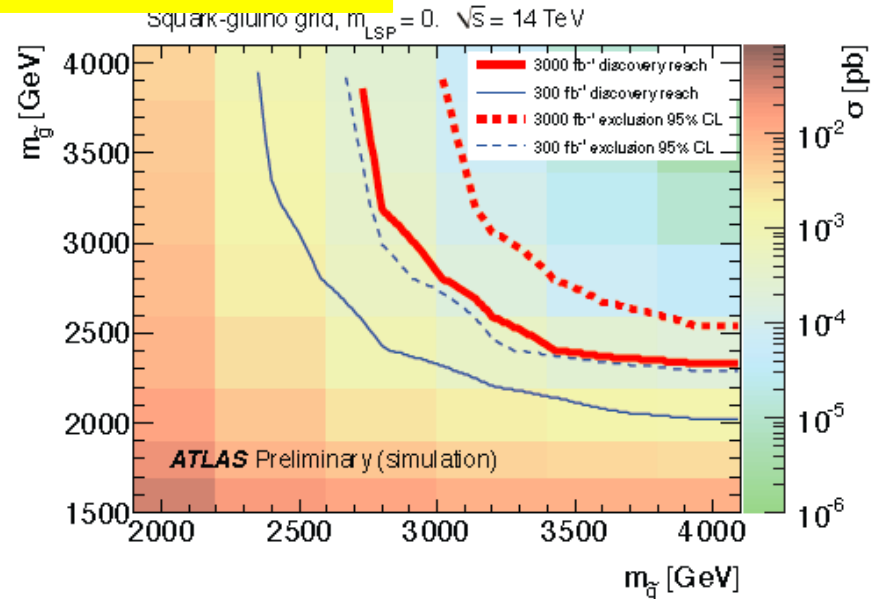
0 lepton, 1 lepton



## 8TeV full data

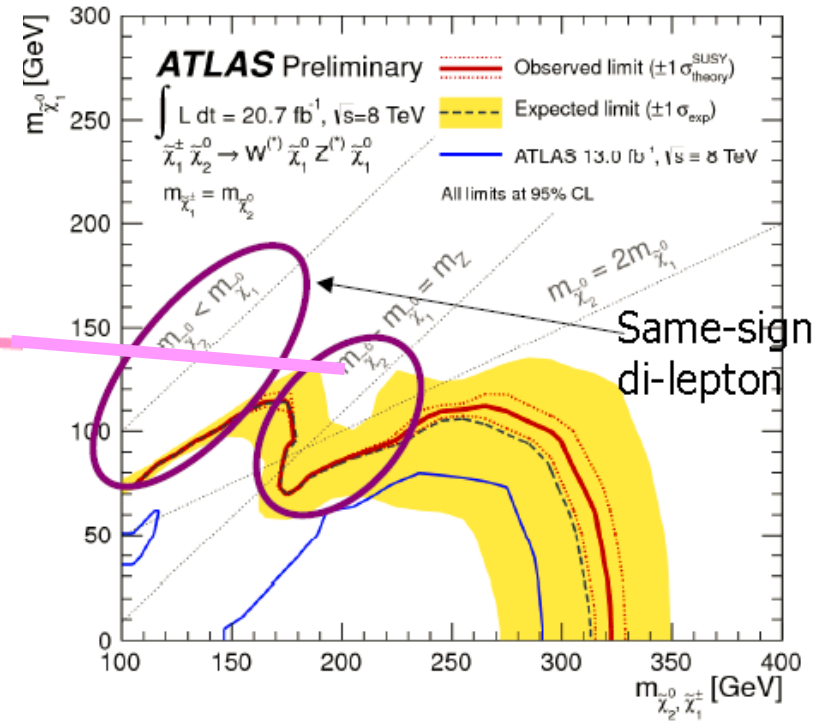
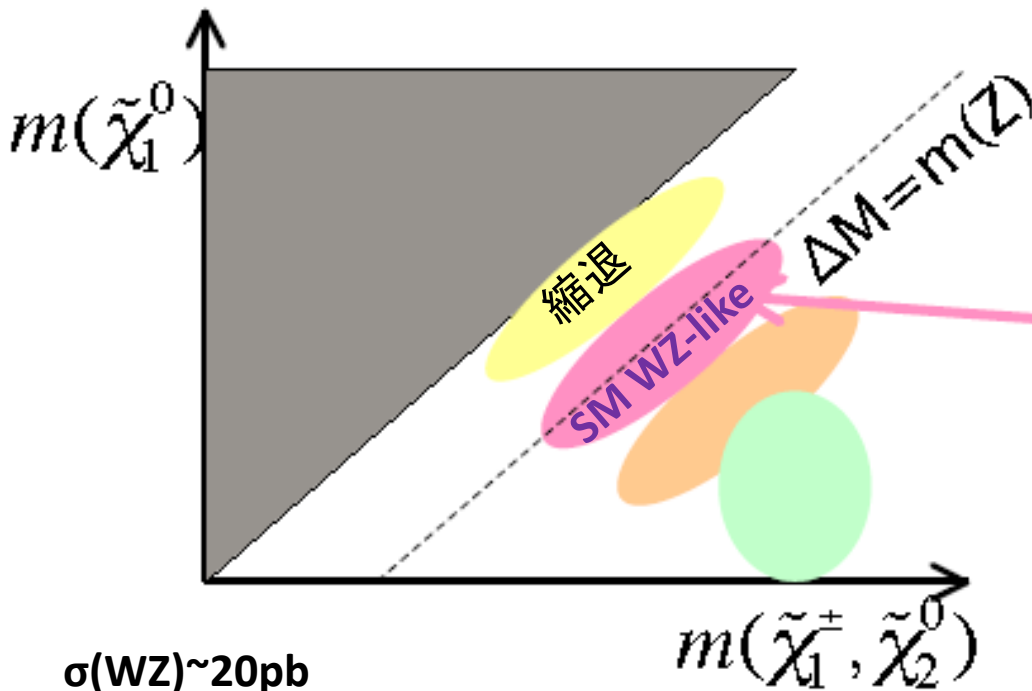
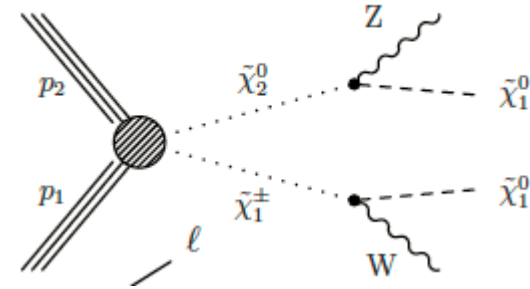


## 14 TeVの予想感度



# EW Gaugino search

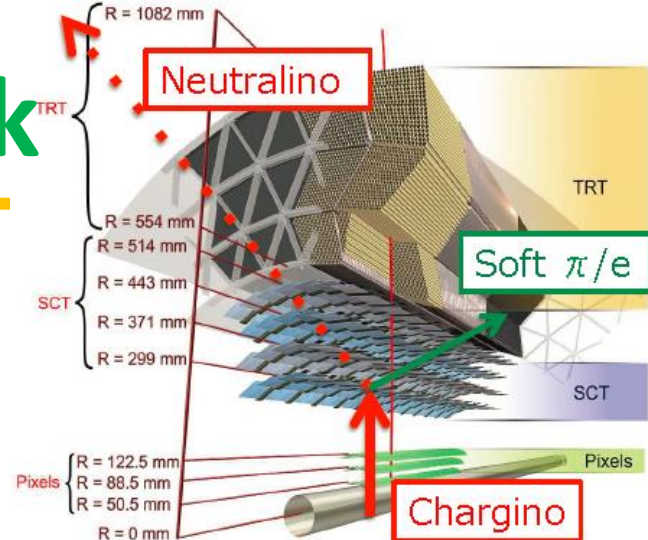
- Direct Gaugino search  
 sqark gluinoが重すぎる場合、  
 軽いEW gauginoが予想される。  
 (Naturalness? Darkmatter?)



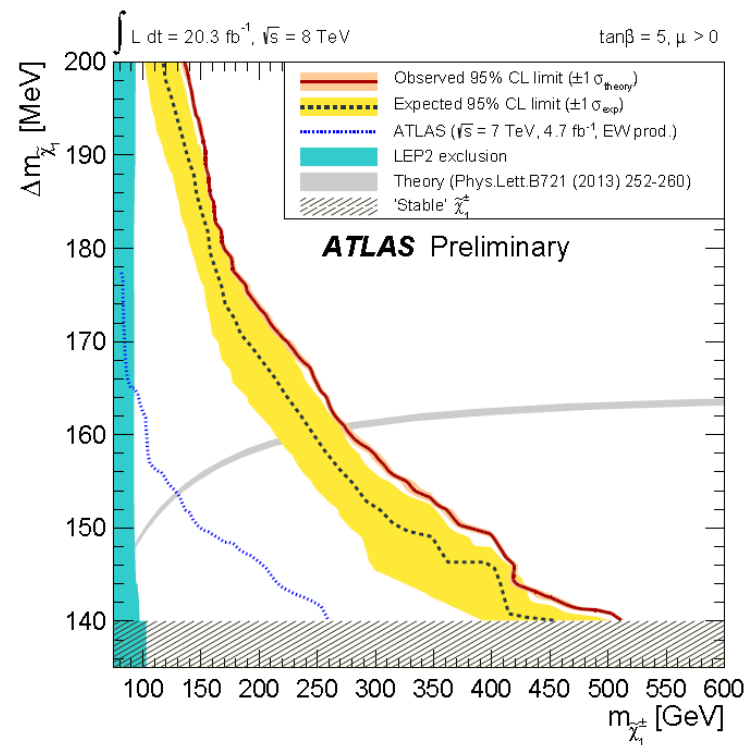
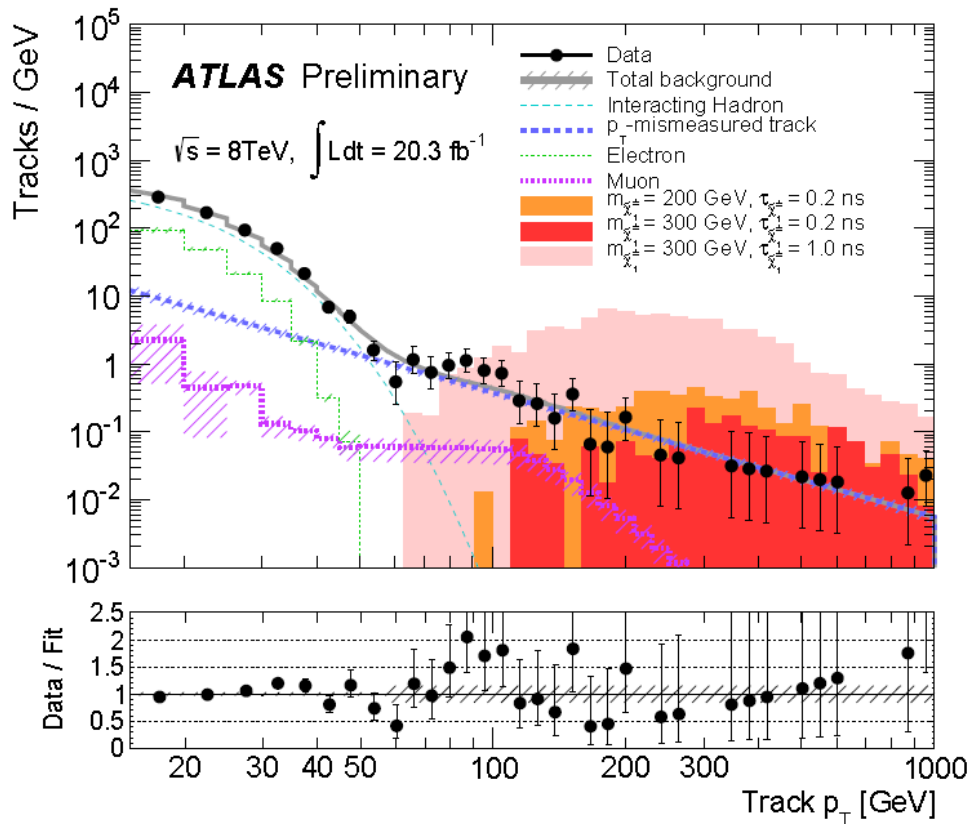
$\sigma(WZ) \sim 20 \text{ pb}$   
 $\sigma(\tilde{\chi}^\pm, \tilde{\chi}^0) \sim 0.5 \text{ pb @ } 200 \text{ GeV}$

**NEW**

# Disappearing track



- $\tilde{\chi}^\pm$  と  $\tilde{\chi}^0$  が縮退しているとき ( $\Delta m_{\tilde{\chi}_1} \sim 160 \text{ MeV}$ )、 $\tilde{\chi}^\pm$  は長生き ( $c\tau \sim \mathcal{O}(1) \text{ cm}$ )
- ATLASの内部の飛跡検出器内で崩壊
- 飛跡が途中で消える



# We observed something in July 2012

---



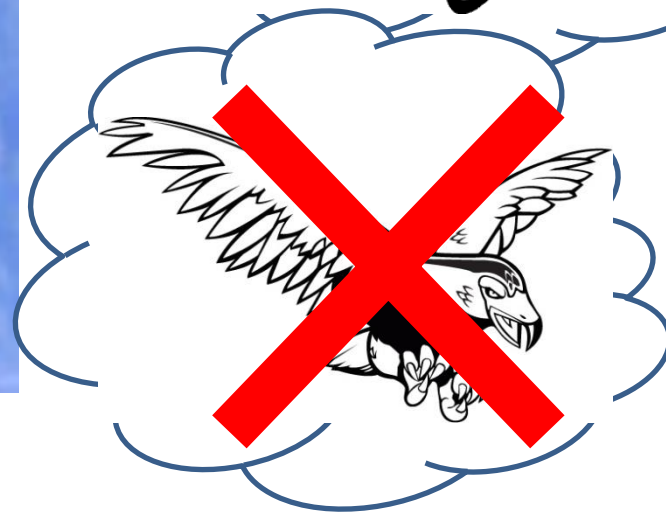
- **Indeed the observation was clear! ( $6\sigma$ )**
- **But still not sure what it is.**

# We observed something in July 2012



- Indeed the observation was clear! (or)
- But still not sure what it is.

# With full dataset in 2012



そして、周りには鳥一匹飛んでない...

# LHC after 2yr shutdown

---



# Open question : next generation exp.



Should we know who is sitting on the plane ?



# おわりに

- 実際にILC計画が動き出す前に、
  - ① LHCで明らかになったこと。
  - ② LHCで今後できること。(これは僕もそんなにクリアではないです。)
  - ③ ILCでなにができるか。
    - ①+②と③の差分を明らかにする必要があるのでは？
    - LHCで②は、この二年が大事。Requestもらえれば数字出します！
- 解析はとても泥臭いものです。
  - 数年でも一緒にLHCの解析やりませんか？

# Backup

---