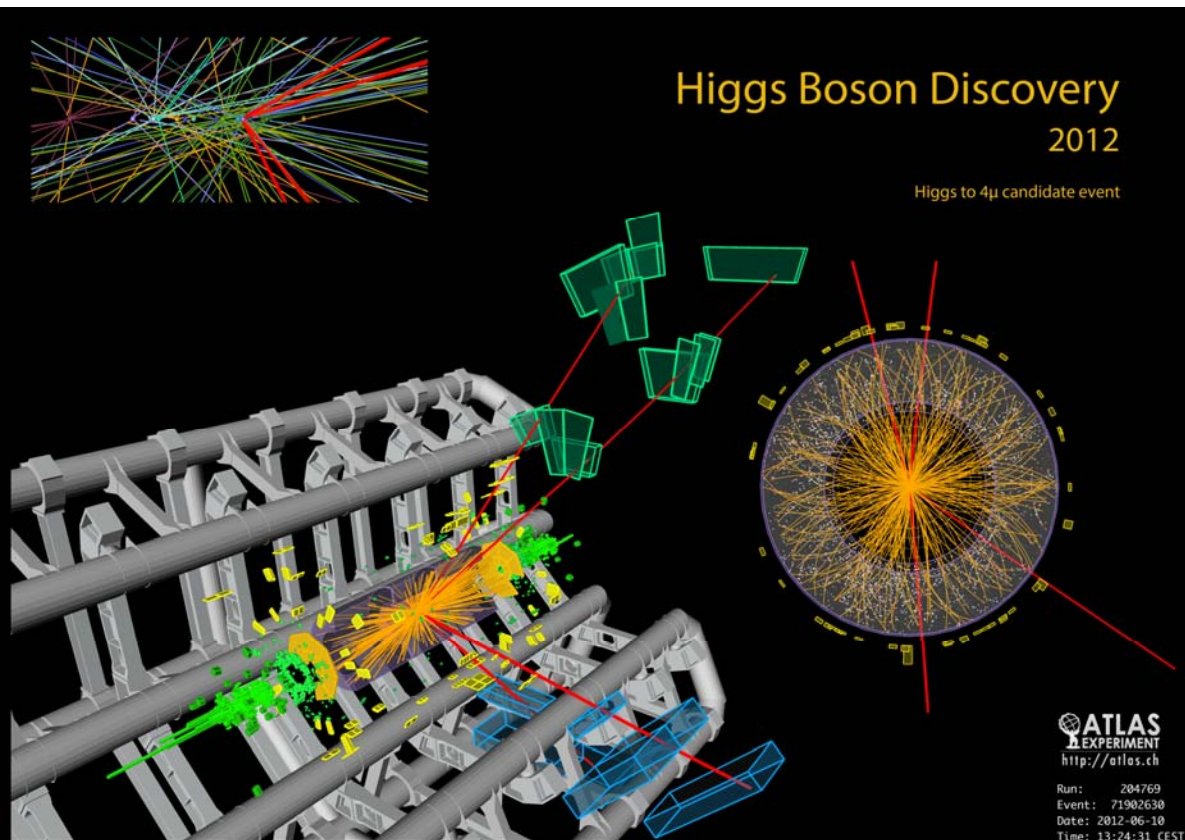


# LHC-ATLAS実験における $H \rightarrow Z^{(*)}Z^{(*)} \rightarrow 4l$ チャンネル を用いたヒッグス粒子の研究



織田勸 (九大理)  
他ATLAS Collaboration  
第119回日本物理学会  
九州支部例会  
2013年11月30日  
久留米工業大学

# LHC-ATLAS実験 九州大学は2012年2月から参加

## • LHC加速器

- 世界最高エネルギーの陽子陽子コライダー
- 重心エネルギー
  - 2011年: 7 TeV
  - 2012年: 8 TeV

## • ATLAS検出器

- 長さ44 m、高さ25 m、重量7000トンの、超大型かつ高精度・高分解能な粒子検出器群

## • RUN1(2009年～2013年)のほぼ全てのデータを用いた。

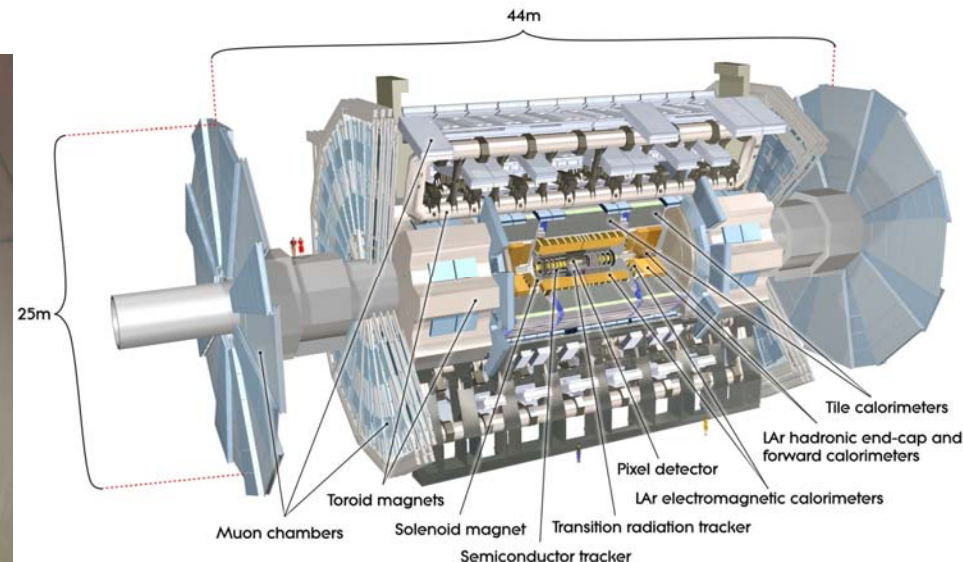
### • 積分ルミノシティ

- 2011年: 4.6 fb<sup>-1</sup>
- 2012年: 20.7 fb<sup>-1</sup>
- 検出器の状態の良い期間のみを用いた。

## • およそ1800兆回の非弾性衝突事象に対応する

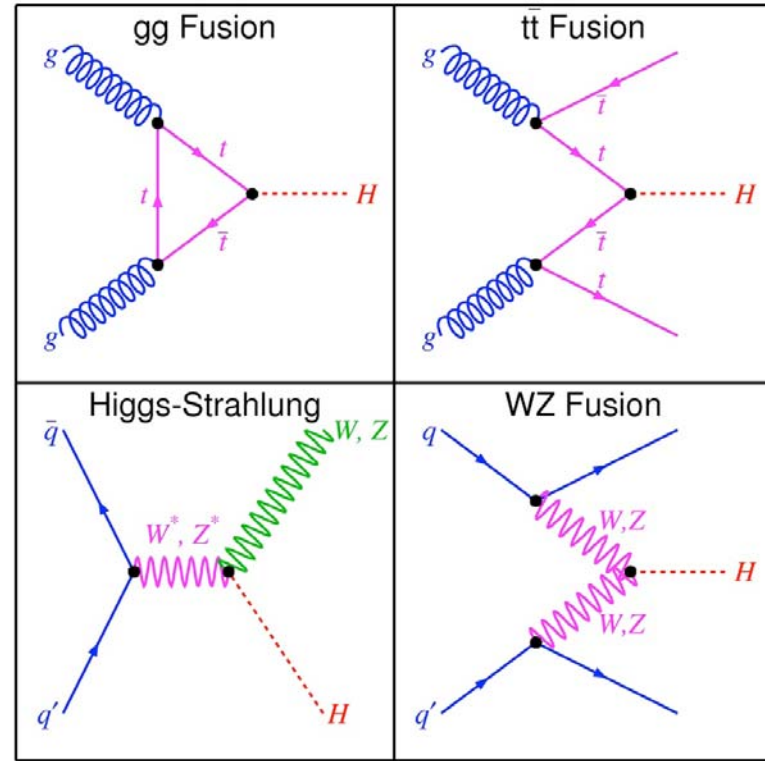


©CERN



# ヒッグス粒子

- 素粒子の標準模型を構成する素粒子で唯一発見されていなかった。
- 標準模型においては、スピン0とパリティ偶の粒子。
- LHCでは主にgluon-gluon fusion過程で生成される。



QUARKS	mass → ≈2.3 MeV/c² charge → 2/3 spin → 1/2	mass → ≈1.275 GeV/c² charge → 2/3 spin → 1/2	mass → ≈173.07 GeV/c² charge → 2/3 spin → 1/2	0 0 1	mass → ≈126 GeV/c²
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs boson
	mass → ≈4.5 MeV/c² charge → -1/3 spin → 1/2	mass → ≈98 MeV/c² charge → -1/3 spin → 1/2	mass → ≈4.18 GeV/c² charge → -1/3 spin → 1/2	0 0 1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
LEPTONS	mass → 0.511 MeV/c² charge → -1 spin → 1/2	mass → 105.7 MeV/c² charge → -1 spin → 1/2	mass → 1.777 GeV/c² charge → -1 spin → 1/2	0 0 1	mass → 91.2 GeV/c²
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson	
	mass → <2.2 eV/c² charge → 0 spin → 1/2	mass → <0.17 MeV/c² charge → 0 spin → 1/2	mass → <10.1 MeV/c² charge → 0 spin → 1/2	mass → 80.4 GeV/c² charge → ±1 spin → 1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	

GAUGE BOSONS

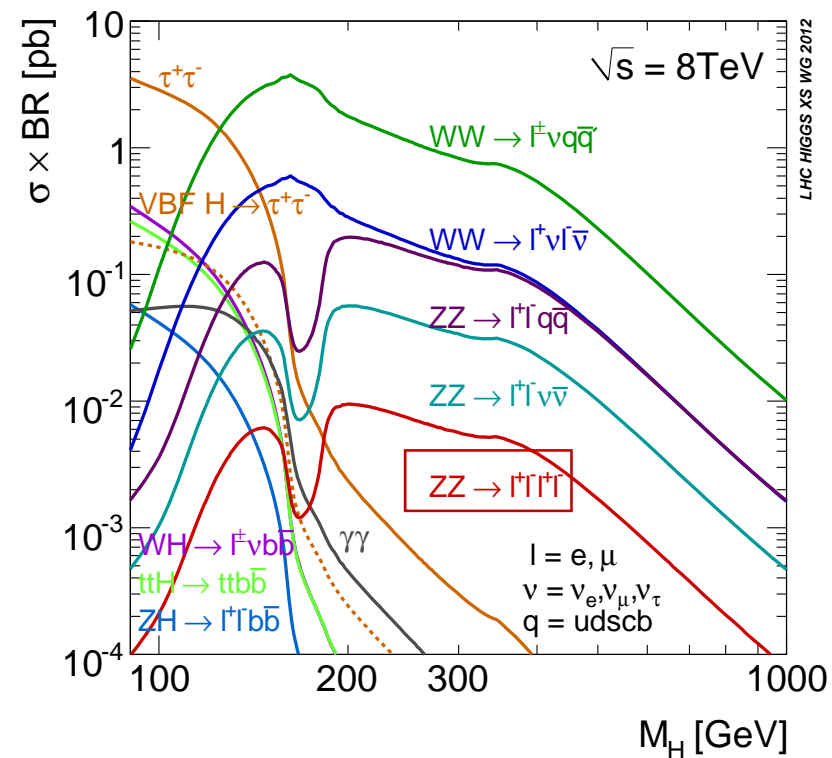
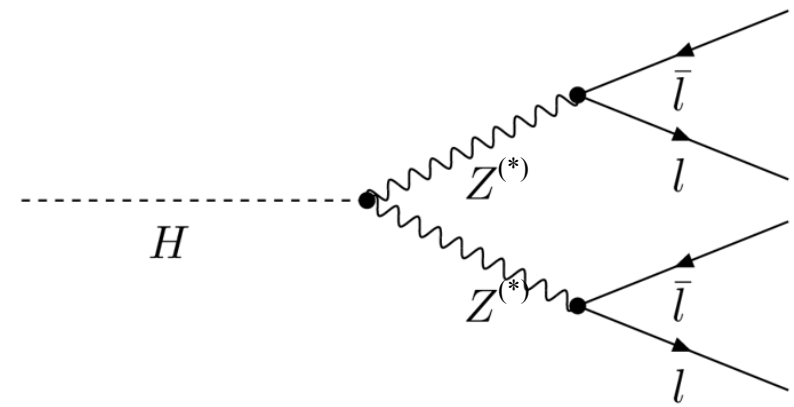
© Wikipedia

質量125 GeVでの生成断面積 [pb]

生成過程	7 TeV	8 TeV
Gluon-gluon fusion	15.32	19.52
Vector boson fusion	1.22	1.58
W associated production	0.57	0.70
Z associated production	0.31	0.39
ttbar associated	0.09	0.13

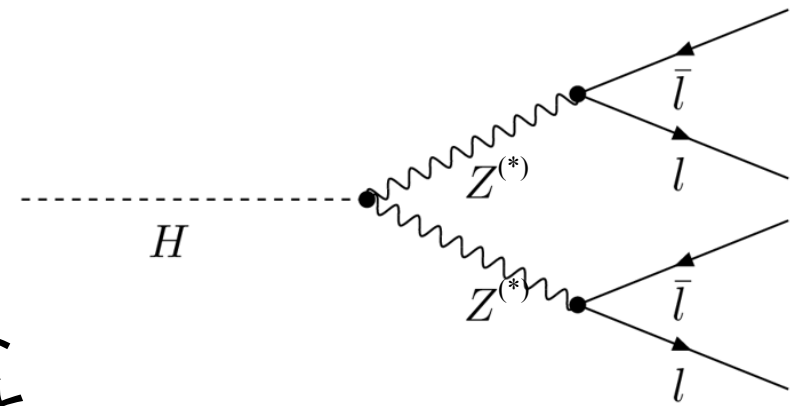
# $H \rightarrow Z^{(*)} Z^{(*)} \rightarrow 4l$ チャンネル

- ヒッグス粒子がZ粒子対に崩壊し、さらに電子対、ミューオン対(=合計4つのレプトン)に崩壊する過程。
  - 終状態の粒子を全てとらえられるため、ヒッグス粒子を完全に再構成できる。
  - とても良い質量分解能
  - 高い信号・バックグラウンド比
  - レプトンの角度分布からスピントパリティを決定し得る。
- ⇒ ゴールデンチャンネルと呼ばれて来た。
- しかし、崩壊分岐比が小さい。
    - 質量125 GeVの標準模型ヒッグス粒子で、 $BR=1.25 \times 10^{-4}$



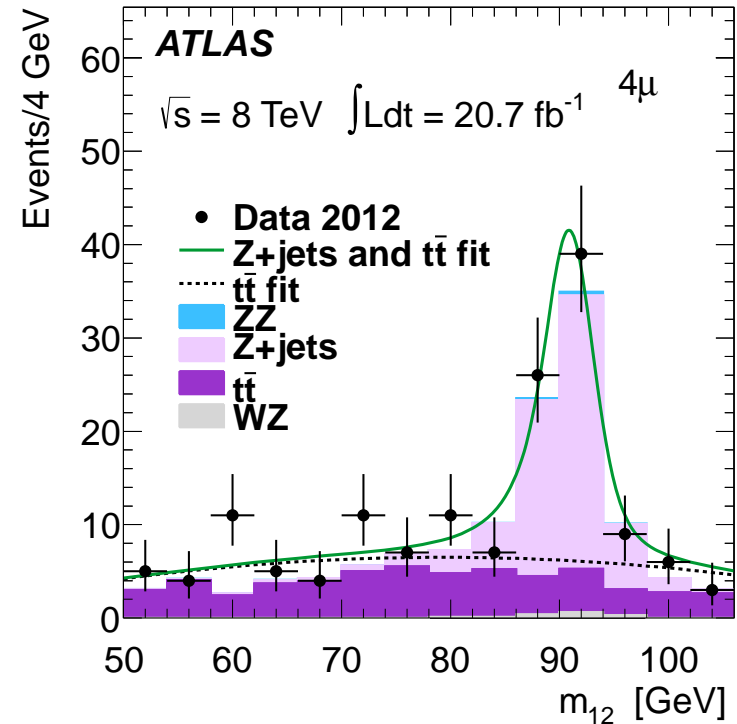
# 事象の選択

- 1レプトンもしくは2レプトンを要求するトリガーが鳴ったこと。
- 電荷の異なる同じフレーバーのレプトン (eか $\mu$ )の対が少なくとも2個あること。
- レプトンの擬ラピディティ( $\eta$ )の閾値:  $|\eta| < 2.47$  (e),  $|\eta| < 2.7$  ( $\mu$ )
- レプトンの横運動量( $p_T$ )の閾値: 20, 15, 10, 7(e)/6( $\mu$ ) GeV
- Z粒子の質量に近い質量を持つレプトン対:  $50 < m_{12} < 106$  GeV
- そうでないレプトン対:  $m_{\min} < m_{34} < 115$  GeV
  - $m_{\min} = 12$  GeV ( $m_{4l} < 140$  GeV),  $m_{\min} = 50$  GeV ( $m_{4l} > 190$  GeV), 2点を結ぶ1次関数
- ジェット起源のレプトンを除くために、衝突点から来ていること (impact parameter significance cut)を要求。
  - $|d_0|/\sigma(d_0) < 6.5$ (e), 3.5( $\mu$ )
- ジェット起源のレプトンを除くために、レプトンの周りに他の粒子が無く、孤立していること(isolation)を要求。
  - $\sum_{\Delta R < 0.2} p_T/p_T < 0.15$  (飛跡検出器),  $\sum_{\Delta R < 0.2} E_T/E_T < 0.3$  (カロリメータ)



# 背景事象

- $Z^{(*)}Z^{(*)}$  di-boson production: irreducible, 減らしにくい
  - シミュレーションを使った。
    - PowHeg ( $qq\bar{q}\bar{q}\rightarrow Z^{(*)}Z^{(*)}$ )と $gg2ZZ$  ( $gg\rightarrow Z^{(*)}Z^{(*)}$ )
  - 生成断面積はMCFMのNLOに基づく。
- Z+jets,  $t\bar{t}$ : reducible, 減らしやすい
  - 低質量領域( $m_{4l} < 2m_Z$ )では $Z^{(*)}Z^{(*)}$ と同程度の量になる。
  - 軽い方のレプトン対のフレーバーによって、成分が違うので、 $ll+ee$ と $ll+\mu\mu$ で別々に評価した。
  - データを使って推定した。
    - 軽い方のレプトン対に対するカットを緩めるか、反転させて、統計量を増やす。
    - バックグラウンドの成分を求める。
    - シミュレーションに基づいて、信号領域へ外挿する。

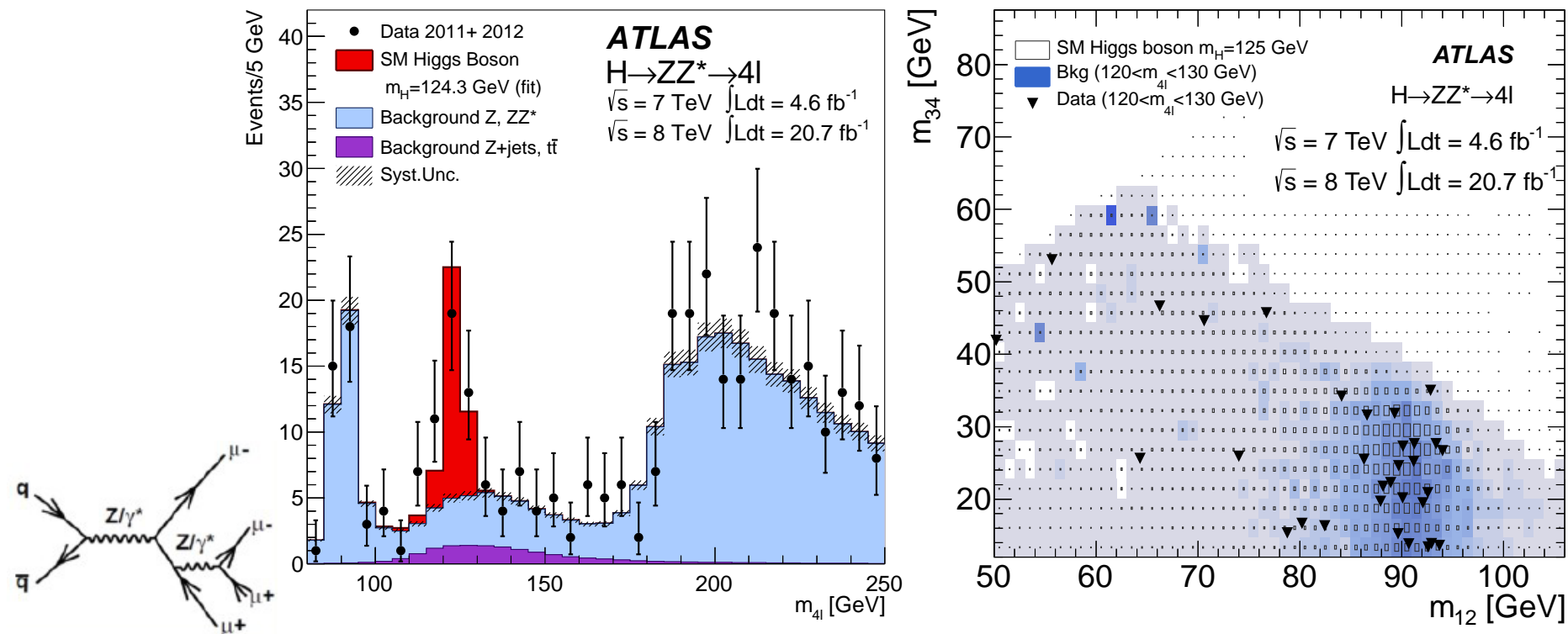


軽い方のレプトン対へのisolationとimpact parameter significanceを要求しない時の、重い方のレプトン対の不変質量( $m_{12}$ )分布。

データと予測される背景事象は良く一致している。

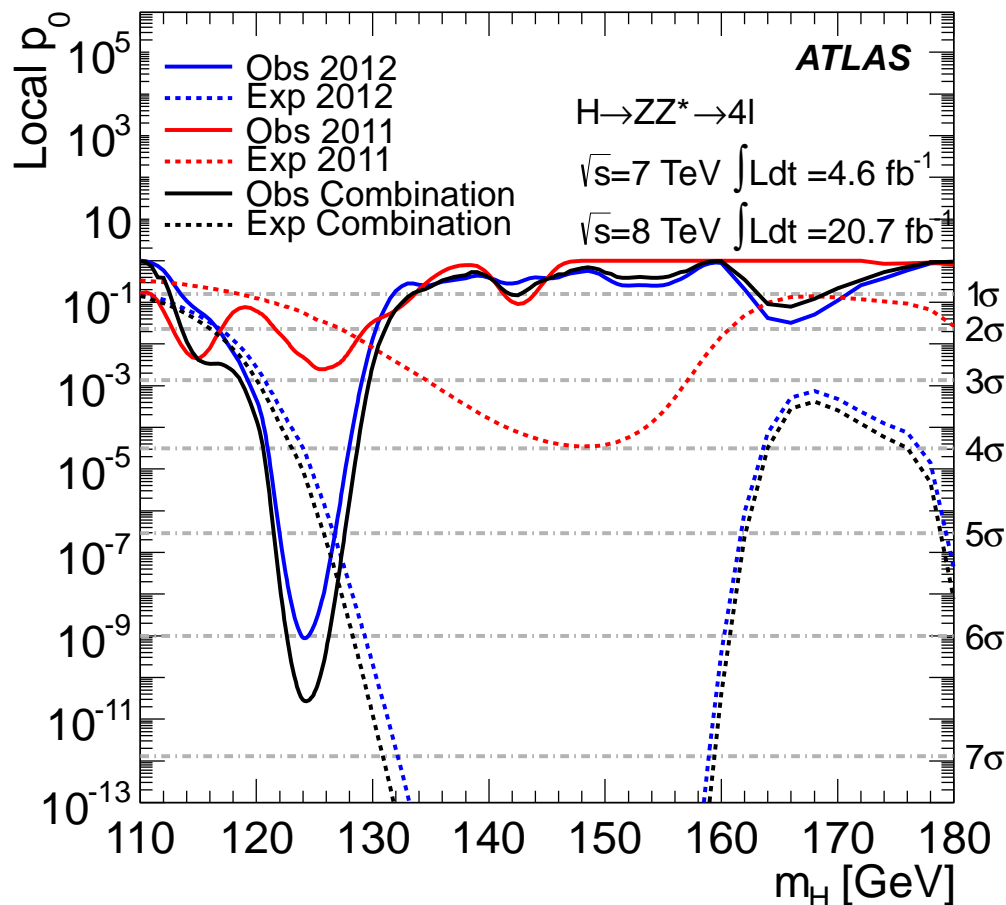
# 不変質量分布

- $120 < m_{4l} < 130$  GeV付近で観測された事象数(=32)は、期待される背景事象数(=11.3)よりも多い。
- 質量125 GeVの標準模型ヒッグス粒子が存在する場合に期待される事象数(=27.2=11.3+15.9)よりもやや多い。
- $120 < m_{4l} < 130$  GeVでの、 $m_{12}$ と $m_{34}$ の分布は、データとシミュレーションの間に大きな違いはない。



# 背景事象に対する超過の有意性

- 背景事象しか無いという仮説は $6.6\sigma$  ( $m_H=124.3$  GeV)で棄却された。
- 標準模型ヒッグス粒子の場合に $4.4\sigma$ が期待される。
- 4レプトンチャンネル単独で、新粒子を $5\sigma$ 以上で確認した。

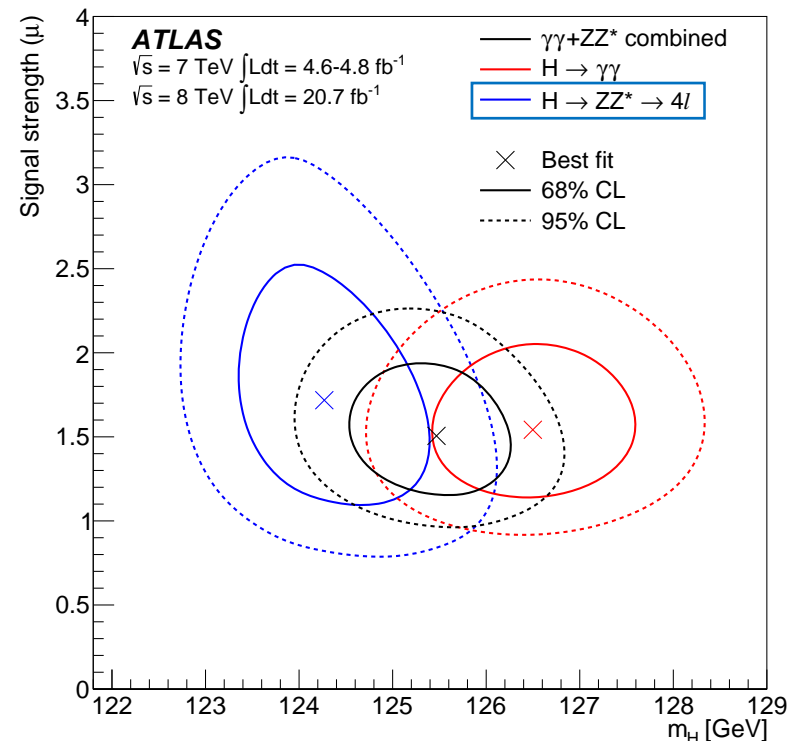
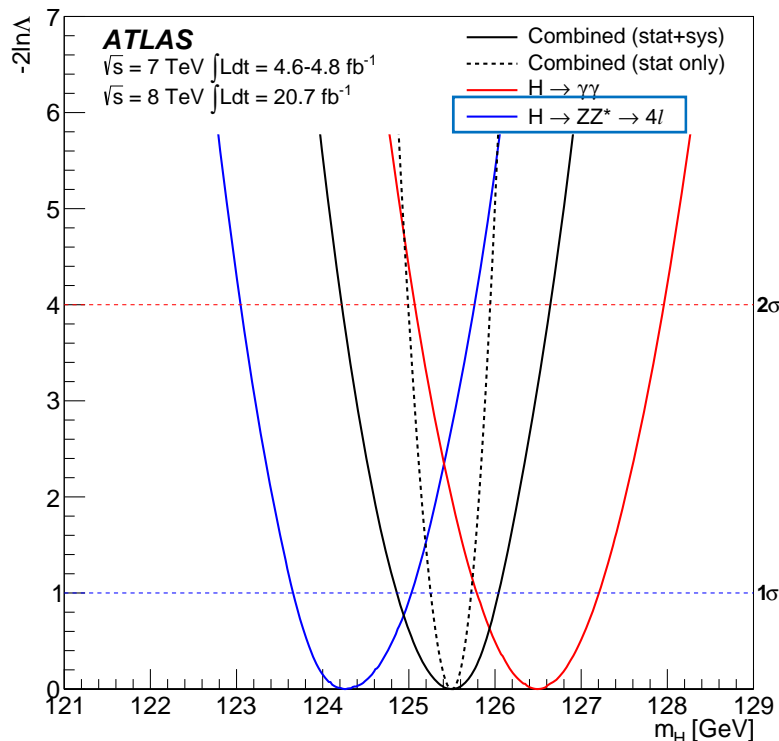




# 質量 $m_H$ と信号の強さ $\mu$

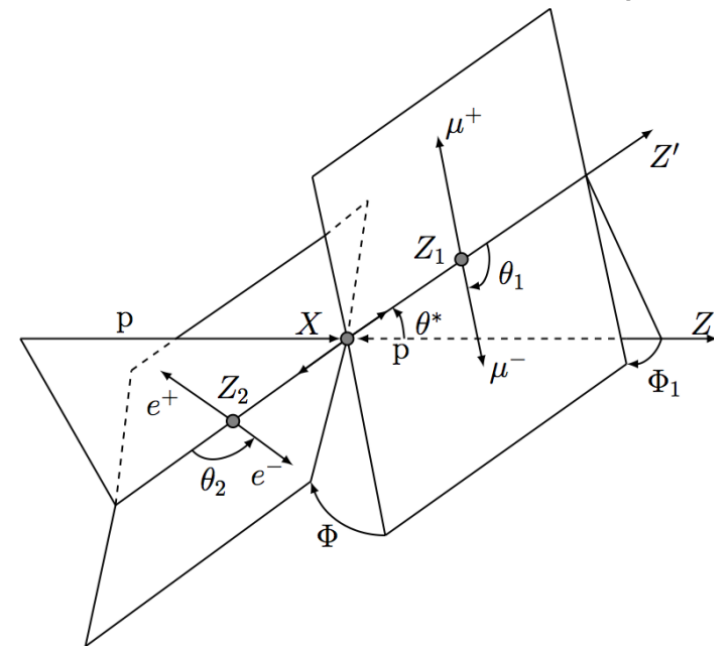
- $m_{4l}$ で1次元フィット  $m_H = 124.3^{+0.6}_{-0.5}(\text{stat})^{+0.5}_{-0.3}(\text{sys}) \text{ GeV}$
- $H \rightarrow \gamma\gamma$ の結果と統合すると、 $m_H = 125.5 \pm 0.2(\text{stat})^{+0.5}_{-0.6}(\text{sys}) \text{ GeV}$
- $\mu=1$ なら標準模型ヒッグス粒子と一致する量の信号がある。
- $\mu=0$ なら背景事象しか無い。
- $m_H=125.5 \text{ GeV}$ で、 $\mu = 1.43^{+0.40}_{-0.35}$

標準模型の予測( $\mu=1$ )  
と同じかやや大きい。

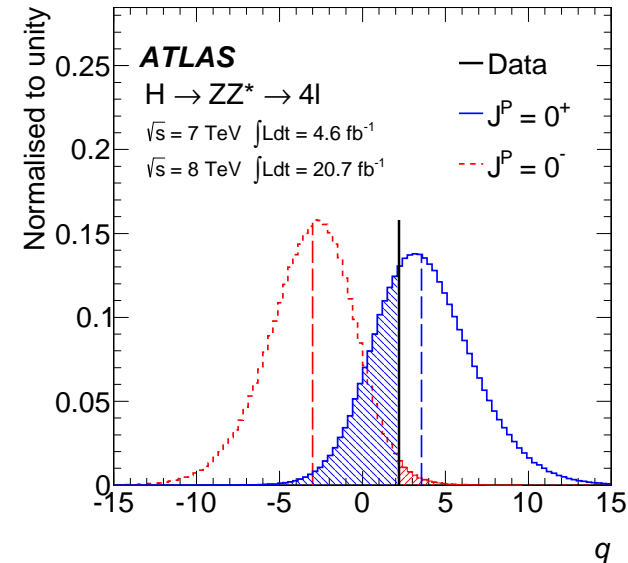
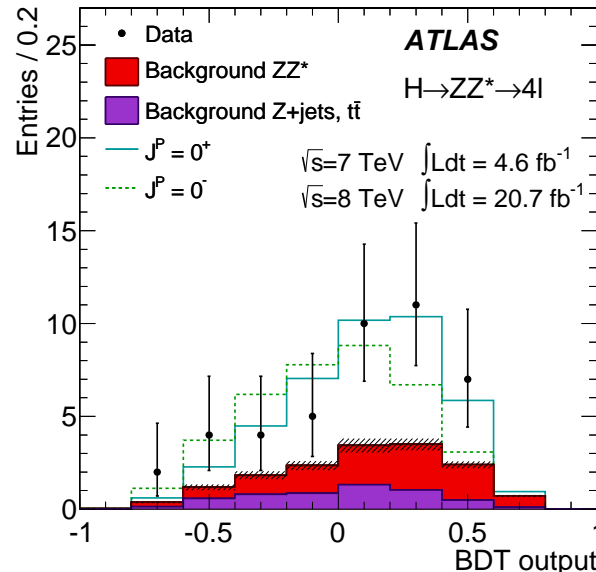
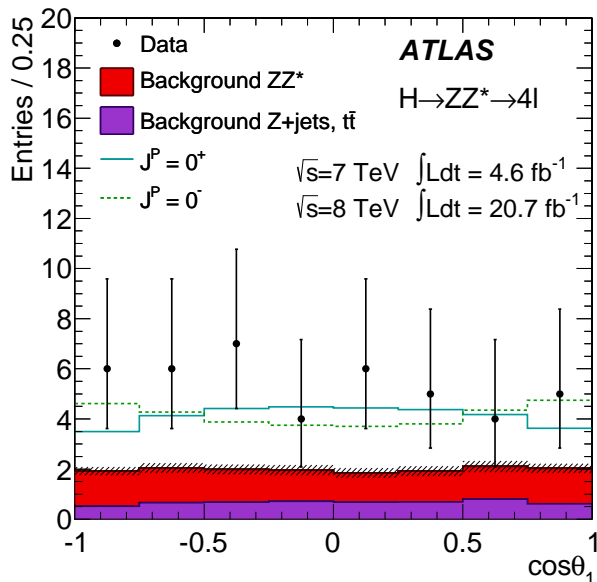


# スピンとパリティ

- Z粒子やレプトンの角度分布とZ粒子の質量分布はスピンとパリティに依存する。
- 多変量解析をすることで情報を最大限に引き出す。
- 標準模型ヒッグス粒子の $J^P=0^+$ に対して、 $J^P=0^-, 1^+, 1^-$ という仮説は97.8%, 99.8%, 94.0%の信頼度で棄却された。



- $\cos\theta_1, \cos\theta_2, \cos\theta^*, \Phi, \Phi_1$
- $m_{12}, m_{34}$



# まとめ

- ヒッグス粒子の性質を、Z粒子対を経て、4つのレプトンに崩壊するチャンネルで調べた。
- 背景事象しか無いという仮説を $6.6\sigma$ で棄却。
- 質量:  $m_H = 124.3^{+0.6}_{-0.5}(\text{stat})^{+0.5}_{-0.3}(\text{sys}) \text{ GeV}$
- 信号の強さ:  $\mu = 1.43^{+0.40}_{-0.35}$ 
  - $m_H = 125.5 \text{ GeV}$
  - 標準模型の予測( $\mu=1$ )と同じかやや大きい。
- 標準模型ヒッグス粒子と同じ $J^P=0^+$ を支持。
- 文献
  - Measurements of Higgs production and couplings in diboson final states with the ATLAS detector at the LHC
    - Physics Letter B 726 (2013), Pages 88-119
    - arXiv:1307.1427 [hep-ex]
  - Evidence for the spin-0 nature of the Higgs boson using ATLAS data
    - Physics Letter B 726 (2013), Pages 120-144
    - arXiv:1307.1432 [hep-ex]

