

# LHC ATLAS 実験 ヒッグス研究の現状 ～2013 年春～

大阪大学大学院 理学研究科

花垣 和則

kazu@champ.hep.sci.osaka-u.ac.jp

2013 年 (平成 25 年) 5 月 8 日

## 1 『ヒッグスらしき』粒子発見

1994 年に正式承認された LHC 計画は、18 年後の 2012 年『ヒッグスらしき』粒子の発見という大きな果実を手にした。その『ヒッグスらしき』粒子の発見の様子については、各崩壊モード毎に、過去の高エネルギーニュースで解説してきた [1]。本稿は、それらの記事が執筆された後のアップデート、2013 年春の現状について報告するものである。特に、発見から性質の測定へ興味が行っている状況を鑑み、幾つかの性質測定に焦点を当てて解説する。大量の測定の中からほんのわずかな結果を拾い上げたものなので、詳細を知りたい方は『ATLAS Higgs』とググっていただきたい [2]。

## 2 データ

表 1: 解析に使ったデータ

崩壊モード	2012 年秋の結果		2013 年春の結果	
$H \rightarrow \gamma\gamma$	7 TeV	$4.8 \text{ fb}^{-1}$	7 TeV	$4.8 \text{ fb}^{-1}$
	8 TeV	$13.0 \text{ fb}^{-1}$	8 TeV	$20.7 \text{ fb}^{-1}$
$H \rightarrow ZZ$	7 TeV	$4.6 \text{ fb}^{-1}$	7 TeV	$4.6 \text{ fb}^{-1}$
	8 TeV	$13.0 \text{ fb}^{-1}$	8 TeV	$20.7 \text{ fb}^{-1}$
$H \rightarrow WW$	7 TeV	$4.6 \text{ fb}^{-1}$	7 TeV	$4.6 \text{ fb}^{-1}$
	8 TeV	$13.0 \text{ fb}^{-1}$	8 TeV	$20.7 \text{ fb}^{-1}$
$H \rightarrow \tau\tau$	7 TeV	$4.6 \text{ fb}^{-1}$	7 TeV	$4.6 \text{ fb}^{-1}$
	8 TeV	$13.0 \text{ fb}^{-1}$	8 TeV	$13.0 \text{ fb}^{-1}$
$H \rightarrow bb$	7 TeV	$4.7 \text{ fb}^{-1}$	7 TeV	$4.7 \text{ fb}^{-1}$
	8 TeV	$13.0 \text{ fb}^{-1}$	8 TeV	$13.0 \text{ fb}^{-1}$

LHC は 2011 年と 2012 年にそれぞれ重心系エネルギー 7 TeV と 8 TeV で陽子陽子衝突を行い、ATLAS グループではそれぞれ約  $5 \text{ fb}^{-1}$ 、 $21 \text{ fb}^{-1}$  のデータを取得した。

公表した結果を得るために使ったデータと崩壊モードを表 1 に示すが、注意していただきたいのは、個々のヒッグス崩壊モードの結果を足しあわせるときに、導出する物理量によって使っている崩壊モードが異なっている点である。以後で結果を説明する際には、どの崩壊モードを使っているか付記する。基本的には、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ 、 $ZZ$ 、 $WW$  についてはこの 2 年間で収集したデータ全てを使っているのに対して、 $H \rightarrow bb$ 、 $\tau\tau$  については 8 TeV のデータ全てを使った結果を ATLAS ではまだ公表していない。

表 1 には載せていないが、 $H \rightarrow \mu\mu$  と  $H \rightarrow Z\gamma$  という崩壊モードの探索も行っている。ただし、現状では感度が低いので、結果を足し上げる時には含めていない。

## 3 信号の強さと結合定数

標準模型の予言する生成断面積×ヒッグス粒子の崩壊分岐比を仮定した場合に得られる信号数に比べて、何倍の信号を得たかという指標を「信号の強さ」( $\mu$ ) と呼ぶ。たとえば、背景事象を引いた後の信号数が標準模型の予言と一致する場合は  $\mu = 1$  であり、予想する背景事象数と得られた事象数が等しい場合は  $\mu = 0$  となる。

表 2: 信号の強さ

崩壊モード	信号の強さ
$H \rightarrow bb$	$-0.4 \pm 1.0$
$H \rightarrow \tau\tau$	$0.8 \pm 0.7$
$H \rightarrow WW$	$1.0 \pm 0.3$
$H \rightarrow \gamma\gamma$	$1.6 \pm 0.3$
$H \rightarrow ZZ$	$1.5 \pm 0.4$

表 1 に示した崩壊モード全てを使って求めた信号の強さを表 2 と図 1 に示す。上記の結果を求めるために、標

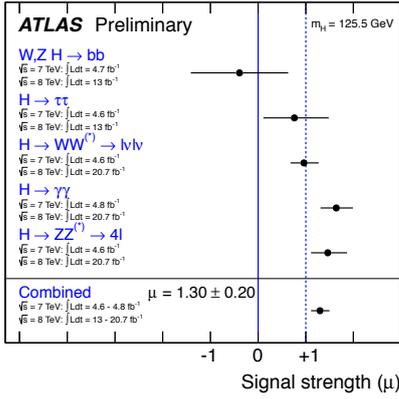


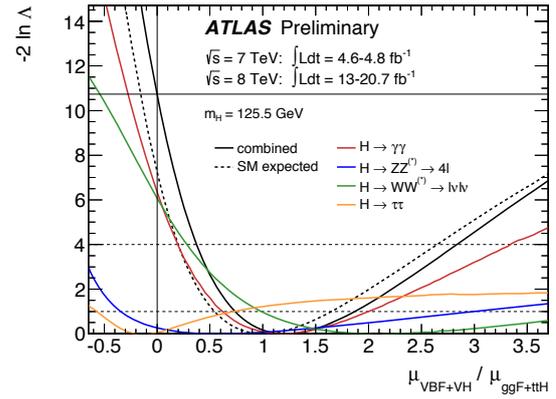
図 1: 信号の強さ

準模型ヒッグスの質量を 125.5 GeV と仮定したが、質量に対する依存性は小さく、質量の仮定を  $\pm 1$  GeV 変えても変動は 4%程度である。

$H \rightarrow \gamma\gamma$  の信号数が多めなのは相変わらずであるが、崩壊モードを足し上げた結果  $\mu = 1.30 \pm 0.13$  (stat.)  $\pm 0.14$  (syst.) は、標準模型の予言と無矛盾である。また、今更という感はあるが、背景事象のみを仮定した場合からのズレの指標である  $p$  値は約  $10\sigma$  に相当する値となっている。ちなみに、CMS では信号の強さを  $\mu = 0.80 \pm 0.14$  と測定している。

上記では、信号の強さを考えるにあたって、生成断面積と崩壊分岐比を独立とはせず、掛け算した値として考えた。それらを標準模型で予言される各生成過程の断面積と崩壊分岐比とに分離すると、図 1 で示した 5 つの信号それぞれにおいて各生成過程の分岐比が異なることから、各生成過程の断面積を求めることができる。ただし、主要な生成過程 4 つそれぞれを独立に扱えるだけの精度が現状ではないので、グルーオン融合過程とトップクォークとの随伴生成過程を一括りにして  $\mu_{ggF+ttH}$  (湯川結合による生成)、ベクトルボソン融合過程とベクトルボソン随伴生成過程を一括りにして  $\mu_{VBF+VH}$  (ゲージ結合による生成) と信号の強さを定義する。このように定義した  $\mu_{ggF+ttH}$  と  $\mu_{VBF+VH}$  の比の測定結果を図 2 に示す。なお、本測定には  $H \rightarrow bb$  を使っていない。その結果は  $\mu_{VBF+VH}/\mu_{ggF+ttH} = 1.2^{+0.7}_{-0.5}$  となった。誤差は大きいながら標準模型の予言値である 1 と無矛盾であり、かつ、 $\mu_{VBF+VH}/\mu_{ggF+ttH} = 0$  に対する  $p$  値は  $3.3\sigma$  に相当する値となり、 $W/Z$  とのゲージ結合による粒子生成の存在を示唆する結果となっている。

次に結合定数測定について述べる。観測する信号数は生成断面積と生成された粒子の崩壊分岐比の積に比例するので、様々な崩壊モードで観測する事象数から、生成と崩壊に寄与した結合定数の積を求めることができる。

図 2:  $\mu_{VBF+VH}/\mu_{ggF+ttH}$  の測定

ただし、個々の値を分離することはできないので、なんらかの仮定を導入することで生成と崩壊への寄与を抽出し、結合定数を求める。以下に使用した仮定を示す。また、実際に見せる値は結合定数そのものではなく、標準模型の予言値に対する比  $\kappa$  である。

- 標準模型粒子のみ存在、かつ崩壊全幅は標準模型の予言値と等しいと仮定。 $W$  と  $Z$  の  $\kappa$  は等しいとして  $\kappa_V = \kappa_W = \kappa_Z$  を測定。またフェルミオンに対する  $\kappa$  は全て等しいとして  $\kappa_F = \kappa_t = \kappa_b = \kappa_\tau = \kappa_g$  を測定。
1. と同じ仮定だが、崩壊全幅に対する制限を除去。 $\kappa_F$  と  $\kappa_V$  の比  $\lambda_{FV} = \kappa_F/\kappa_V$  を測定。
2. と同じ仮定だが、 $\kappa_W = \kappa_Z$  の仮定を除き、 $\lambda_{WZ} = \kappa_W/\kappa_Z$  を測定。
- 標準模型の枠外の粒子の寄与を探索する。標準模型粒子に対する  $\kappa$  は全て 1 とし、崩壊全幅に寄与する標準模型の枠外の粒子からの寄与は小さく無視できるとする。グルーオン融合生成と  $H \rightarrow \gamma\gamma$  崩壊における、新物理の寄与を有効スケールファクター  $\kappa_g$ ,  $\kappa_\gamma$  として、この両者を求める。
- 崩壊全幅に対する制限を除き、観測できない終状態への崩壊比を  $BR_{inv}$  とする。測定する量は、 $\kappa_g$ ,  $\kappa_\gamma$  と  $BR_{inv}$  である。

結果は図 3 に示す。モデル無依存な測定ではなく、かつ個々の仮定同士に強い相関があることに注意が必要だが、すべての結合定数測定結果が標準模型の予言と今のところ無矛盾である。

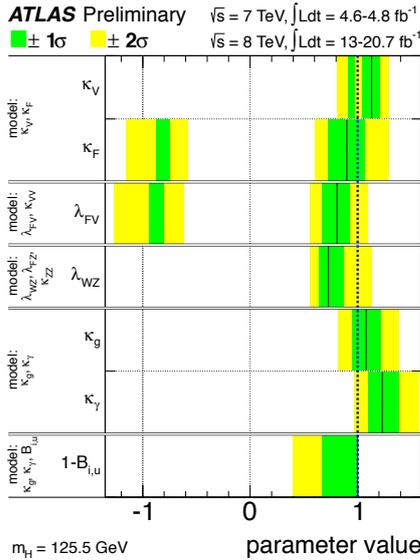


図 3: 結合定数測定。上から順番に本文中の仮定 1. から 5. に対応。

## 4 質量

発見した『ヒッグスらしき』粒子の質量を、 $H \rightarrow \gamma\gamma$  では  $m_H = 126.8 \pm 0.2(\text{stat.}) \pm 0.7(\text{syst.}) \text{ GeV}$ 、 $H \rightarrow ZZ$  では  $m_H = 124.3^{+0.6}_{-0.5}(\text{stat.})^{+0.5}_{-0.3}(\text{syst.}) \text{ GeV}$  と測定した。それぞれの結果を合わせると、 $m_H = 125.5 \pm 0.2(\text{stat.})^{+0.5}_{-0.6}(\text{syst.}) \text{ GeV}$  となった (図 4)。 $H \rightarrow \gamma\gamma$  と

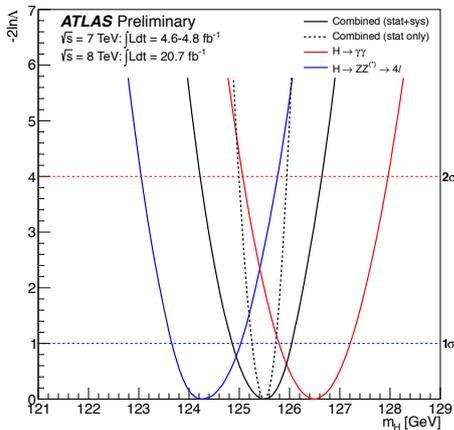


図 4: 質量測定

$H \rightarrow ZZ$  での測定結果にわずかな差があるため、様々なチェックがなされている。たとえば、真の差がゼロにもかかわらず測定している差分以上の差分を見出す確率は 1.5%、あるいは評価方法によっては 8% と見積もっている。

系統誤差には、当然エネルギースケールの不定性が最も効いている。終状態が電子とミュオンの場合、 $Z$  や

$J/\psi$  を使いスケールを決定している。その精度は、 $\gamma\gamma$  で 0.45%、 $4e$  で 0.4%、 $4\mu$  で 0.2%、 $2e2\mu$  で 0.2%、 $2\mu2e$  で 0.1% となっている。 $H \rightarrow ZZ$  の終状態ごとの質量測定結果も図 5 に示しておく。

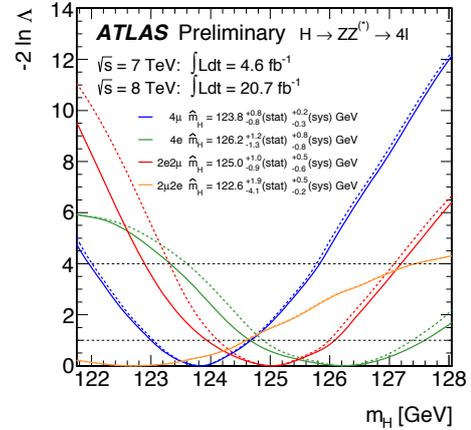


図 5:  $H \rightarrow ZZ$  における質量測定

また、CMS の測定結果は  $m_H = 125.7 \pm 0.3(\text{stat.}) \pm 0.3(\text{syst.}) \text{ GeV}$  で、崩壊モードによる違いは観測されていない。

## 5 スピン

人類は今までにスピン 0 の素粒子の存在を確認していない。それゆえ、『ヒッグスらしき』粒子のスピンの測定は、質量の起源に関するスカラー場に付随した粒子かどうかを判断する上で、非常に重要な意味を持つ。2つの  $\gamma$  という終状態に信号を確認していることから、スピンの測定としては、0 か 2 かに焦点が当てられている。ただし、モデル依存性なしにスピン 2 かどうかを測定するのは困難なため、[3] で提案されたモデルをスピン 2 の粒子を記述するモデルとして採用している。このモデルによると、スピン 2 の粒子の生成過程はグルーオン融合過程が支配的で、それに加えて 4% 程度クォーク・反クォーク対消滅過程が存在する。

スピンを測定するために利用するのは、崩壊粒子の角度分布である。スピン 0 の粒子の崩壊では崩壊粒子は等方的に飛び出す。スピンをもつ粒子の場合は、そのスピンの応じて崩壊粒子の飛来方向に異方向性が生じる。その差を比べるというのが、スピン測定方法の概念である。実験的には、粒子の検出効率が空間的に均一ではないので、その理解が測定の鍵を握る。同様の理由によって、上記 2 つの生成過程の違いによって崩壊粒子の飛来方向などが異なる。よって、グルーオン融合過程とクォーク・反クォーク対消滅過程の比率 ( $\equiv f_{q\bar{q}}$ ) を 0% から 100% ま

で変化させて、各々の仮定に対してスピン測定を行う。また、特に  $H \rightarrow \gamma\gamma$  においては背景事象数が莫大なので、その取り扱いにも注意を要する。なお、スピン測定に用いた崩壊モードは、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ ,  $H \rightarrow ZZ$ , および  $H \rightarrow WW \rightarrow e\mu\nu$  である。

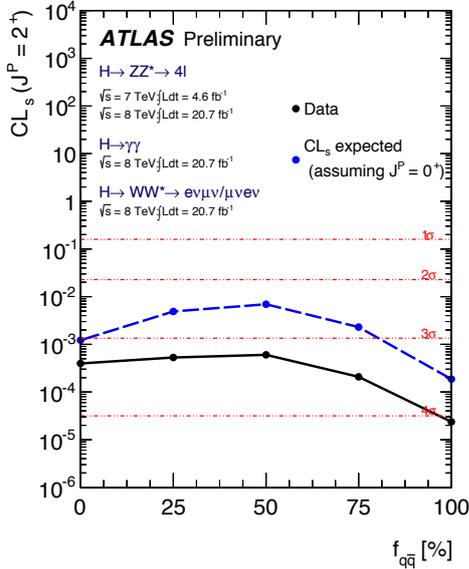


図 6:  $CL_s(J^P = 2^+)$  の  $f_{q\bar{q}}$  に対する依存性。実線に沿った点が実データ。点線に沿った点は  $J^P = 0^+$  の場合の期待値。

スピン 0 という標準模型に対してスピン 2 という仮定をデータがどれだけ嗜好しているかという度合いとして、 $CL_s(J^P = 2^+)$  を

$$CL_s(J^P = 2^+) = \frac{p \text{ 値}(J^P = 2^+)}{1 - p \text{ 値}(J^P = 0^+)}$$

と定義し、その  $CL_s(J^P = 2^+)$  を  $f_{q\bar{q}}$  の関数として描いたのが図 6 である。あらゆる  $f_{q\bar{q}}$  において、 $3\sigma$  以上で  $J^P = 2^+$  を否定し、 $J^P = 0^+$  であることをデータは示唆している。

## 6 『ヒッグス』粒子へ

ATLAS および CMS グループの結果から、CERN は、2012 年に発見した粒子をヒッグス粒子であると事実上発表した。何を確認できればヒッグス粒子と呼ぶのか、その議論は曖昧であるが、スピンが 0 であること、生成および崩壊過程でゲージボソンと結合していること、これらを確認したことがヒッグス粒子への昇格(?)の決め手となった。

ただし、一つ言えるのは、今回発見したヒッグス粒子が標準模型の枠内かどうかは未確認であるということ

ある。間接的にはグルーオン融合生成過程の検証により、フェルミオンとの結合を確認したと言える。しかし、実験屋としてはフェルミオンとの結合を直接検証するために  $\tau\tau$  および  $bb$  という終状態の存在を確認したいし、その結合定数も測定したい。これらの測定により初めて、素粒子に質量を与えるヒッグス場に付随した粒子を発見したと宣言したい。

ゲージ対称性を保つためのカラクリがヒッグス機構であることから、 $W/Z$  とのゲージ結合部分については理論的必然性があるが、フェルミオンとの結合は『模型』として導入されている。それゆえに、湯川結合の直接測定は標準模型を越える新物理探索の最有力手法とも考えられ、2015 年からの実験で  $H \rightarrow \tau\tau$  および  $bb$  の検証に期待がかかる。さらに、トップクォークとの湯川結合の測定として  $ttH$  生成過程の検証も 2015 年以降の最重要テーマとなる。当初は  $ttH(\rightarrow bb)$  は難しいと考えられていたが、最近の研究ではそれなりの感度が得られることもわかってきた。また 2015 年からの 3 年間の運転で  $300 \text{ fb}^{-1}$  のデータを収集できれば  $ttH(\rightarrow \gamma\gamma)$  あたりも見えてくるはずである。

なにはともあれ、数 10 年来の努力が実り『ヒッグス(?)』粒子を発見できたことはめでたい。長年実験推進に尽力されてきた人々に感謝すると同時に、検出器開発・製造、運転、解析あらゆる部分で ATLAS 日本グループの活躍が光っていたことを記して本稿の締めとする。

## 参考文献

- [1] 高エネルギーニュース 31-2, 31-3 (2012)
- [2] <https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/AtlasPublic/HiggsPublicResults>
- [3] Y. Gao et al., “Spin determination of single-produced resonance at hadron colliders”, Phys. Rev. D **81** (2010) 075022.