

LHC実験

スイス・アルプス山脈

世界最高エネルギーでの素粒子研究

$\sqrt{s} \leq 14 \text{ TeV}$ での陽子・陽子衝突

2010年 LHC加速器稼働開始。

2011-12年 物理Run開始。7 - 8 TeV, 25 fb^{-1} のデータ取得。

2012年 LHC加速器のATLAS/CMS両実験がヒッグス粒子を発見。

2015年 エネルギーを13 TeVに増強, 4 fb^{-1} のデータ取得。

2016-18年 13/14 TeV. $\sim 100 \text{ fb}^{-1}$ 。

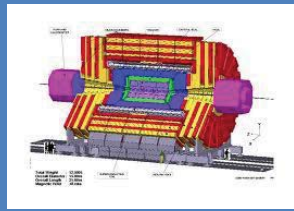
2023年 300 fb^{-1} のデータセット。

203X年 3000 fb^{-1} の大データセット。

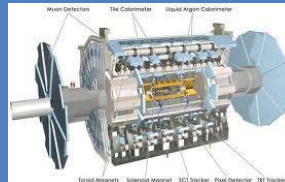


ジュネーブ市街

CMS実験



ATLAS実験



円周27km

陽子を7 TeVまで加速して正面衝突

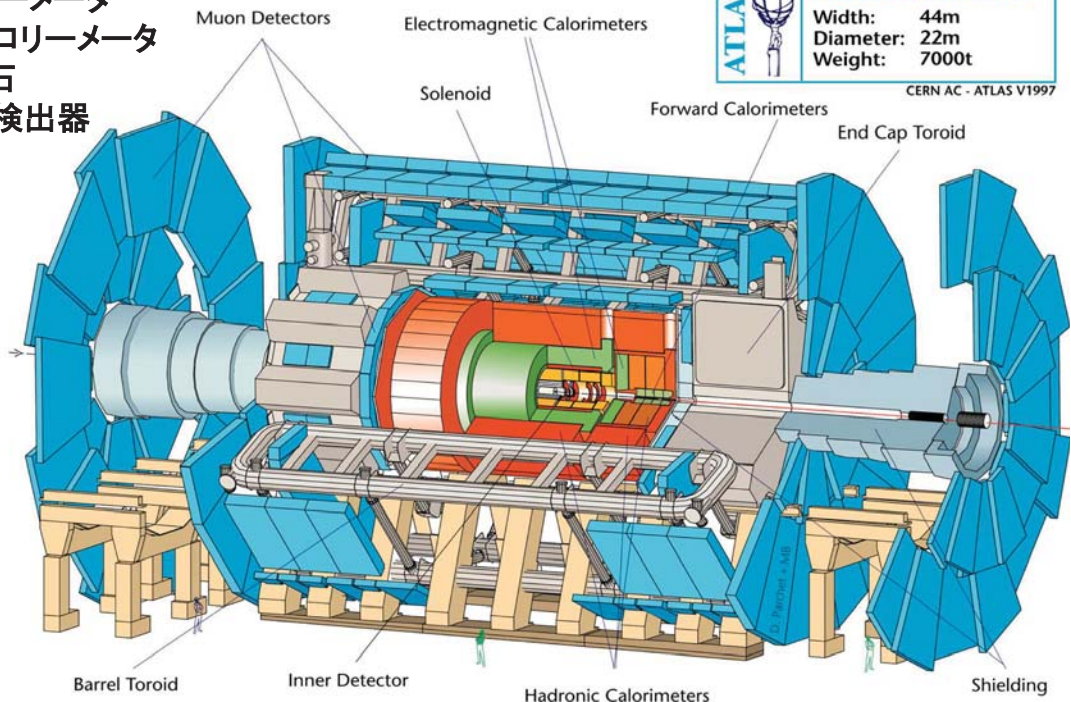
- シリコン検出器
- 飛跡検出器
- ソレノイド磁石
- 電磁カロリメータ
- ハドロンカロリメータ
- トロイド磁石
- ミュオン検出器

ATLAS検出器

総重量 7,000 t

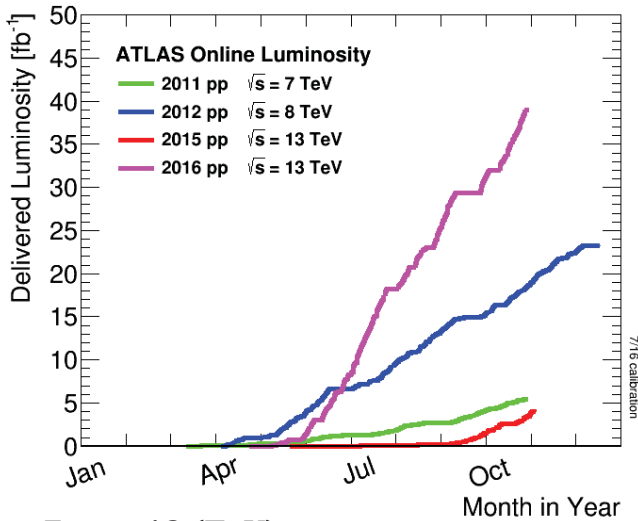
Detector characteristics	
Width:	44m
Diameter:	22m
Weight:	7000t

CERN AC - ATLAS V1997



- 最高エネルギーでの、さまざまな素粒子反応の研究
 - ヒッグス粒子、標準理論、トップクォーク、Bメソン、超対称性、新物理探索、重イオン衝突...

Luminosities in Run 2



Run 1	$E_{CM}(\text{TeV})$	integ lumi [fb ⁻¹]
2011	7	~5
2012	8	~21

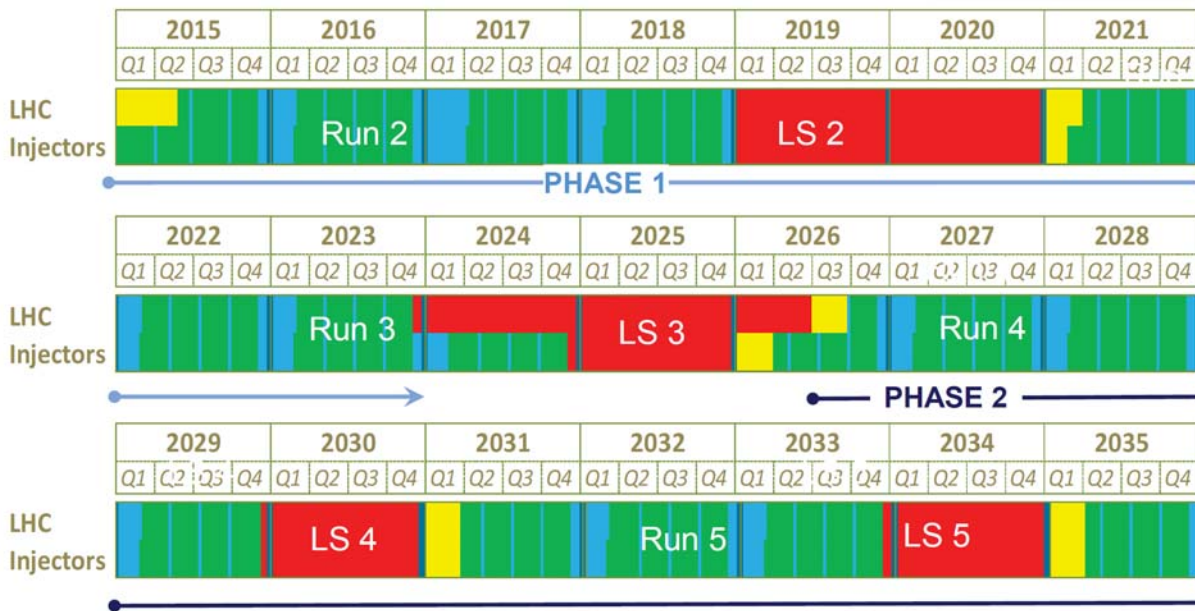
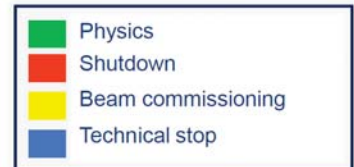
$E_{CM} = 13 \text{ (TeV)}$

いまのところ、2016年夏に~13 fb⁻¹を使ったRun 2データの物理結果が発表されている

Run 2	Peak lumi E34 cm ⁻² s ⁻¹	Days pp physics	Recorded integ lumi [fb ⁻¹]
2015	0.5	56	3.9
2016	1.4	122	36.0
2017	>~1.7	150	40-60
2018	Similar to 2017	152	Similar to 2017

LHC roadmap: according to MTP 2016-2020 V1

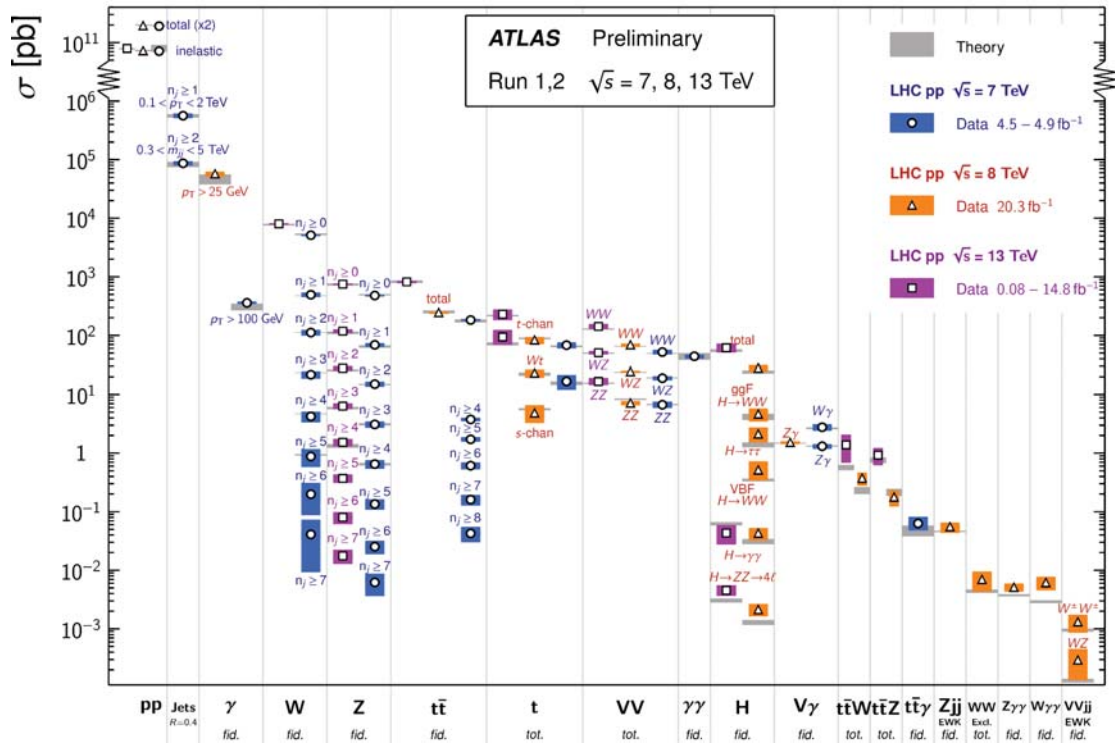
LS2 starting in 2019 => 24 months + 3 months BC
 LS3 LHC: starting in 2024 => 30 months + 3 months BC
 Injectors: in 2025 => 13 months + 3 months BC



標準理論の検証

- さまざまな物理過程の生成断面積の測定結果: 理論予言とよく合っている。

Standard Model Production Cross Section Measurements

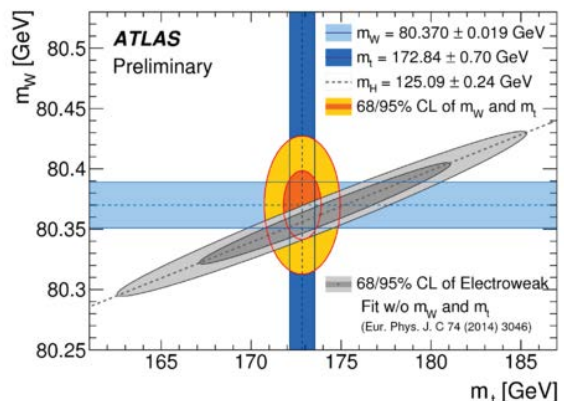
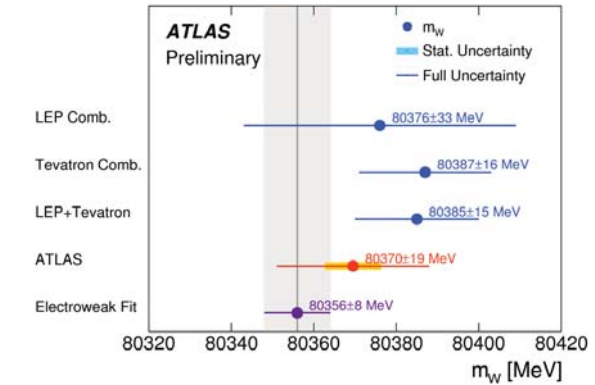
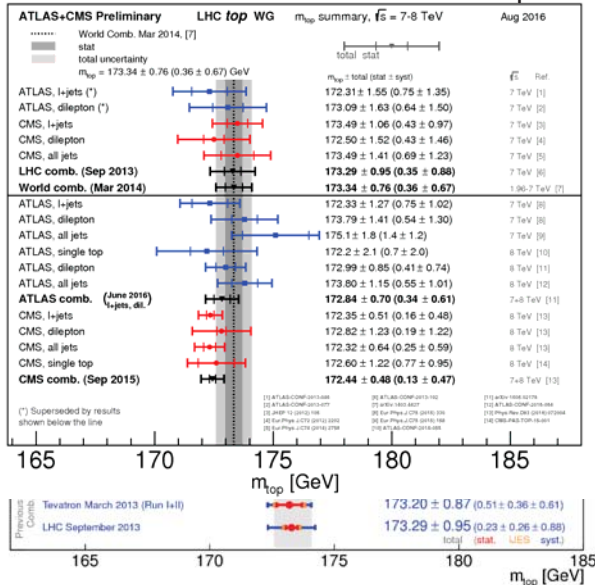


7

LHCではじめてのW質量測定

LHCtopWG

ATLAS-CONF-2016-113



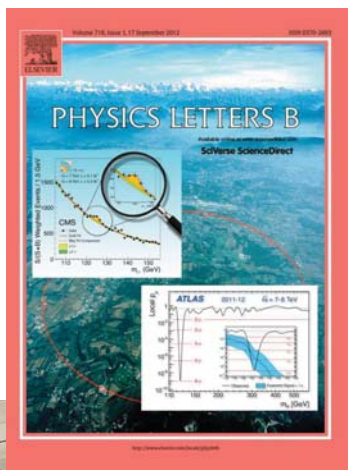
Top質量

いよいよLHCでの測定がTEVATRONの精度より良くなった。

W質量 (ATLAS)

2011年の7 TeVデータを4.6 fb⁻¹使用。
2016年12月に公表。

ヒッグス粒子発見

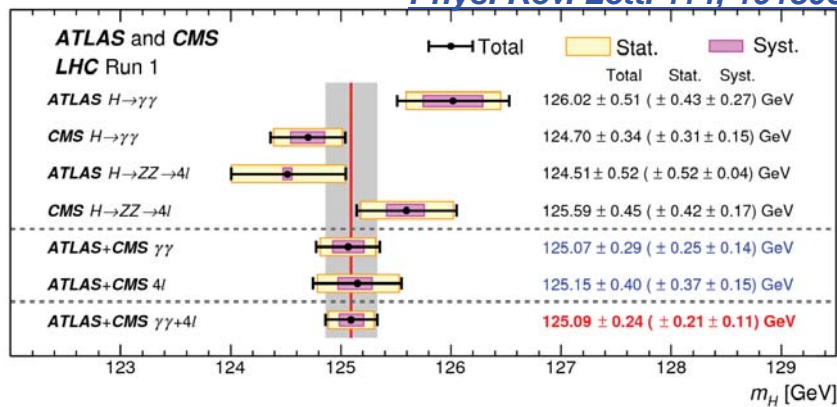


2012年7月4日 LHC加速器の
ATLAS/CMS両実験が発見を報告
2013年 アングラール、ヒッグス
がノーベル物理学賞を受賞

9

ヒッグス粒子の性質

Phys. Rev. Lett. 114, 191803



$$m_h = 125.09 \pm 0.24 \text{ (GeV}/c^2\text{)}$$

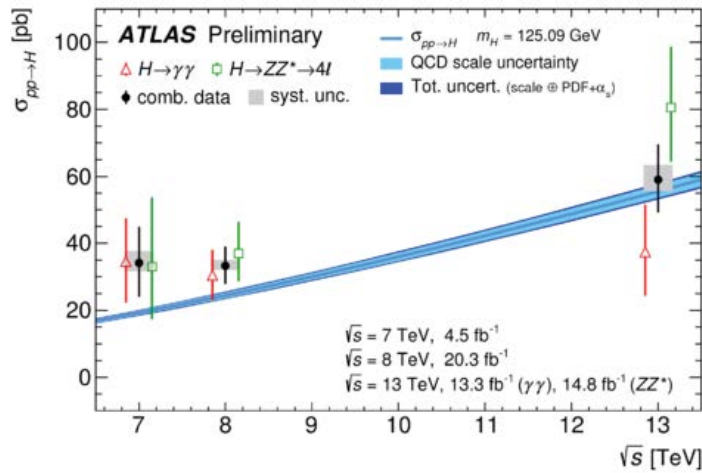
スピン、パリティはSMの予言通りの 0^+ がデータとの一致がよい。

Eur. Phys. J. C75 (2015) 476

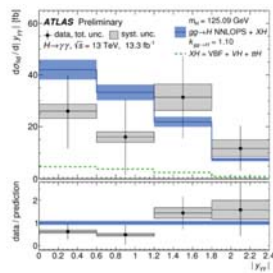
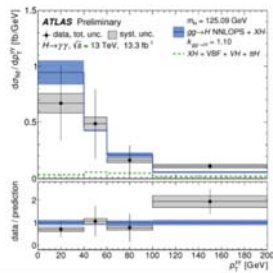
Tested Hypothesis	$P_{\text{exp}, \mu=1}^{\text{alt}}$	$P_{\text{exp}, \mu=\hat{\mu}}^{\text{alt}}$	$P_{\text{obs}}^{\text{SM}}$	$P_{\text{obs}}^{\text{alt}}$	Obs. CL_s (%)
$0^+_{\hat{h}}$	$2.5 \cdot 10^{-2}$	$4.7 \cdot 10^{-3}$	0.85	$7.1 \cdot 10^{-5}$	$4.7 \cdot 10^{-2}$
0^-	$1.8 \cdot 10^{-3}$	$1.3 \cdot 10^{-4}$	0.88	$< 3.1 \cdot 10^{-5}$	$< 2.6 \cdot 10^{-2}$
$2^+(\kappa_q = \kappa_g)$	$4.3 \cdot 10^{-3}$	$2.9 \cdot 10^{-4}$	0.61	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$1.1 \cdot 10^{-2}$
$2^+(\kappa_q = 0; p_T < 300 \text{ GeV})$	$< 3.1 \cdot 10^{-5}$	$< 3.1 \cdot 10^{-5}$	0.52	$< 3.1 \cdot 10^{-5}$	$< 6.5 \cdot 10^{-3}$
$2^+(\kappa_q = 0; p_T < 125 \text{ GeV})$	$3.4 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^{-4}$	0.71	$4.3 \cdot 10^{-5}$	$1.5 \cdot 10^{-2}$
$2^+(\kappa_q = 2\kappa_g; p_T < 300 \text{ GeV})$	$< 3.1 \cdot 10^{-5}$	$< 3.1 \cdot 10^{-5}$	0.28	$< 3.1 \cdot 10^{-5}$	$< 4.3 \cdot 10^{-3}$
$2^+(\kappa_q = 2\kappa_g; p_T < 125 \text{ GeV})$	$7.8 \cdot 10^{-3}$	$1.2 \cdot 10^{-3}$	0.80	$7.3 \cdot 10^{-5}$	$3.7 \cdot 10^{-2}$

10

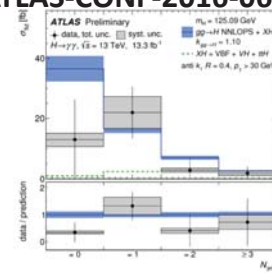
Run 2データでの $H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4l$ 測定



$H \rightarrow \gamma\gamma$ の微分断面積測定



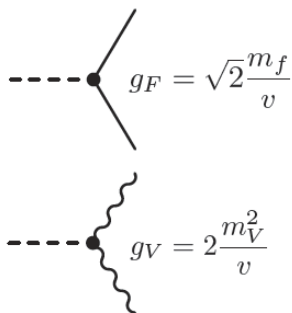
ATLAS-CONF-2016-067



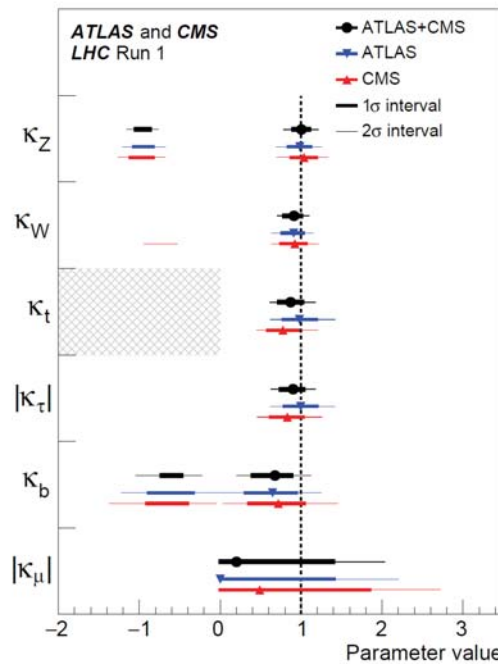
11

結合の測定 (Run 1)

arXiv:1606.02266



- $\kappa = \frac{g_{\text{measured}}}{g_{\text{SM}}}$ と定義して測定結果を κ で示す。
 - 標準理論どおりなら $\kappa = 1$



- いまのところ、標準理論の予言とよく一致しているが、測定誤差が大きい。
- 今後、データを増やして精密測定していく。

12

Run1での信号の有意度

ATLAS、CMS個別

Channel	References for individual publications		Signal strength μ from results in this paper (Section 5.2)		Signal significance $[\sigma]$	
	ATLAS	CMS	ATLAS	CMS	ATLAS	CMS
$H \rightarrow \gamma\gamma$	[92]	[93]	$1.14^{+0.27}_{-0.25}$ (+0.26, -0.24)	$1.11^{+0.25}_{-0.23}$ (+0.23, -0.21)	5.0 (4.6)	5.6 (5.1)
$H \rightarrow ZZ$	[94]	[95]	$1.52^{+0.40}_{-0.34}$ (+0.32, -0.27)	$1.04^{+0.32}_{-0.26}$ (+0.30, -0.25)	7.6 (5.6)	7.0 (6.8)
$H \rightarrow WW$	[96,97]	[98]	$1.22^{+0.23}_{-0.21}$ (+0.21, -0.20)	$0.90^{+0.23}_{-0.21}$ (+0.23, -0.20)	6.8 (5.8)	4.8 (5.6)
$H \rightarrow \tau\tau$	[99]	[100]	$1.41^{+0.40}_{-0.36}$ (+0.37, -0.33)	$0.88^{+0.30}_{-0.28}$ (+0.31, -0.29)	4.4 (3.3)	3.4 (3.7)
$H \rightarrow bb$	[101]	[102]	$0.62^{+0.37}_{-0.37}$ (+0.39, -0.37)	$0.81^{+0.45}_{-0.43}$ (+0.45, -0.43)	1.7 (2.7)	2.0 (2.5)
$H \rightarrow \mu\mu$	[103]	[104]	$-0.6^{+3.6}_{-3.6}$ (+3.6, -3.6)	$0.9^{+3.6}_{-3.5}$ (+3.3, -3.2)		
ttH production	[78, 105, 106]	[108]	$1.9^{+0.8}_{-0.7}$ (+0.7, -0.7)	$2.9^{+1.0}_{-0.9}$ (+0.9, -0.8)	2.7 (1.6)	3.6 (1.3)

3 σ : "兆候が見えた"
5 σ : "発見した"

- メインの生成・崩壊過程の多くはRun 1で発見がすんだ。
- ttH 生成、 $H \rightarrow bb$ はRun2で検証していく。
- LHC Run 2では、一個一個の過程の理解を確立し、精密測定に入っていく。

ATLAS+CMS

arXiv:1606.02266

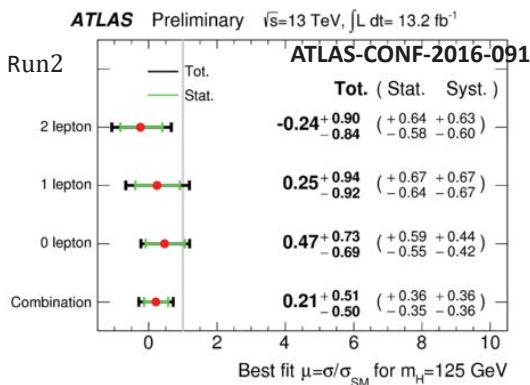
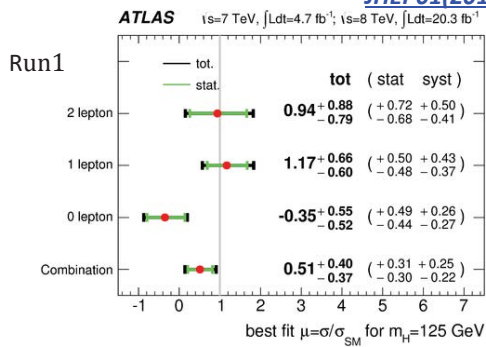
Production process	Measured significance (σ)	Expected significance (σ)
VBF	5.4	4.6
WH	2.4	2.7
ZH	2.3	2.9
VH	3.5	4.2
ttH	4.4	2.0
Decay channel		
$H \rightarrow \tau\tau$	5.5	5.0
$H \rightarrow bb$	2.6	3.7

13

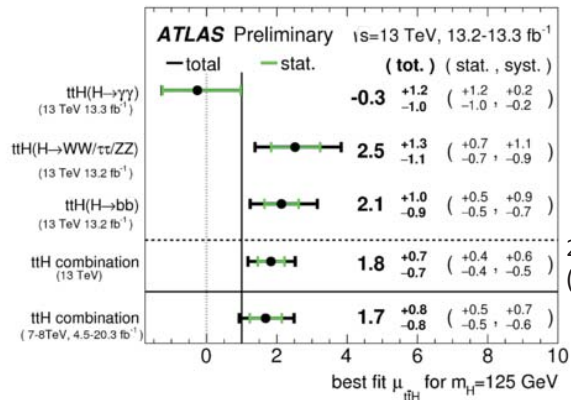
$H \rightarrow b\bar{b}, t\bar{t}H$ の現状

$H \rightarrow b\bar{b}$

JHEP01(2015)069



$t\bar{t}H$



2.8 σ
(1.8 σ exp.)

重い新粒子探索、2015年末の信号について

15

arXiv:1606.03833v1

$\gamma\gamma$ に崩壊する重い新粒子の探索

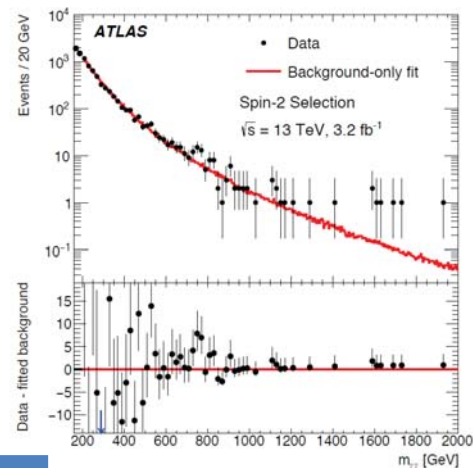
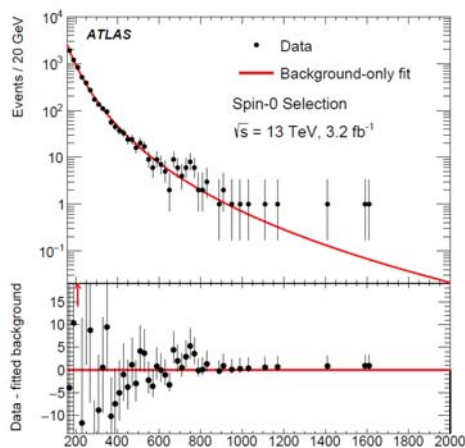
$2\gamma, P_T^1 > 40, P_T^2 > 30.$

2015年末の状況

ATLAS
2015 データ
3.2 fb⁻¹

2通りのカットで解析。

- Spin-2 analysis: $P_T^Y > 55.$ 5655 ev w/ $m > 200.$
- Spin-0 analysis: $P_T^1 > 0.4m_{\gamma\gamma}, P_T^2 > 0.3m_{\gamma\gamma}.$ 2878 ev w/ $m > 200.$



	Spin 0	Spin 2
Mass (GeV)	~750	~770
Local Significance	3.8 σ	3.9 σ
Global Significance	2.1 σ	2.1 σ

CMSでも同じ質量領域でエクセスを観測。

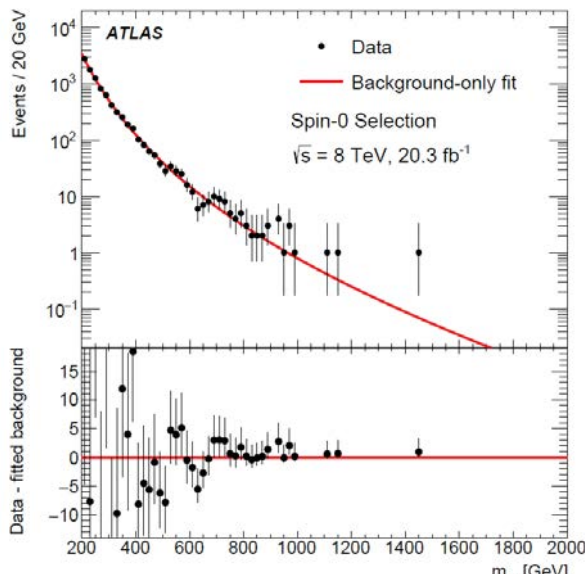
16

$\gamma\gamma$ に崩壊する重い新粒子の探索

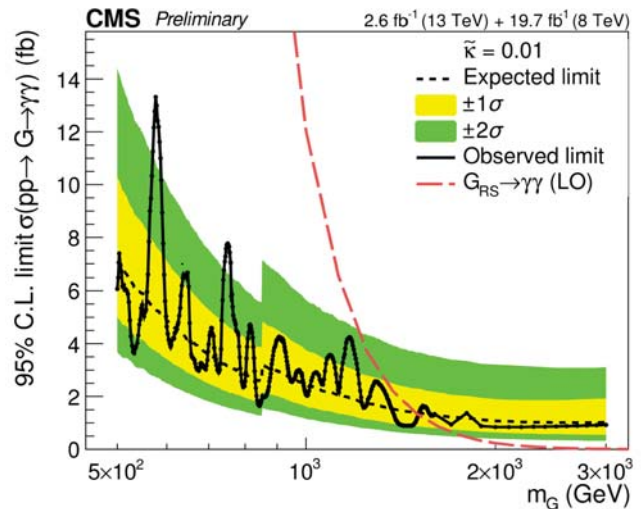
ATLAS RUN 1とCMS

2016年3月の状況

ATLAS 8TeV (2012) data



CMS 8TeV+13 TeV data



	Spin 0	Spin 2
Local Significance	2.1 σ	1.2 σ
Run2のエクセスをスケール	2.7 σ	3.3 σ

8TeVデータを足したことで、2015末より解析感が20-40%上がった。

Local 3.4 σ , global 1.6 σ .

($m = 750 \text{ GeV}$, $\Gamma/m = 1.4 \times 10^{-4}$)

13 TeVデータだけだと、local 2.8-2.9 σ だった

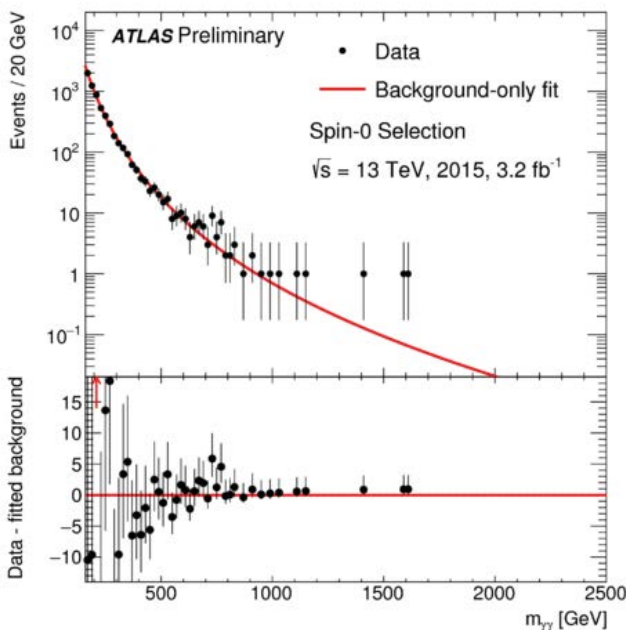
arXiv:1606.03833v1

CMS PAS EXO-16-018 (Mar 2016)

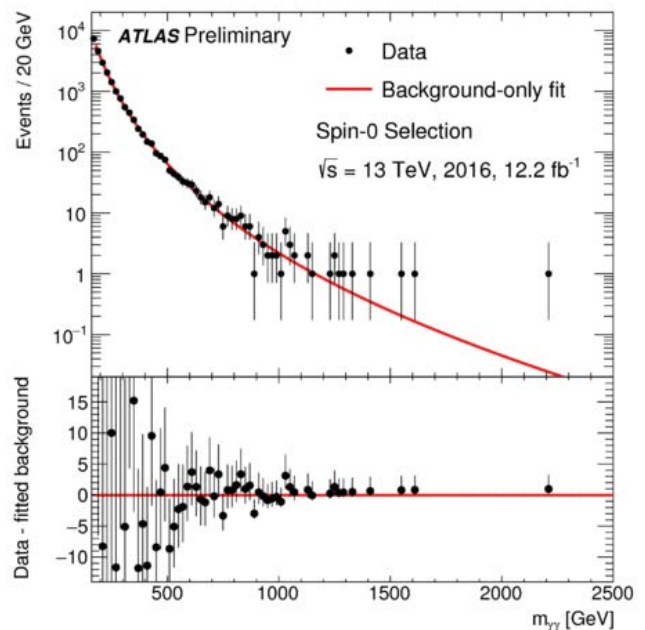
17

2016年夏までのデータも解析した

2015データ



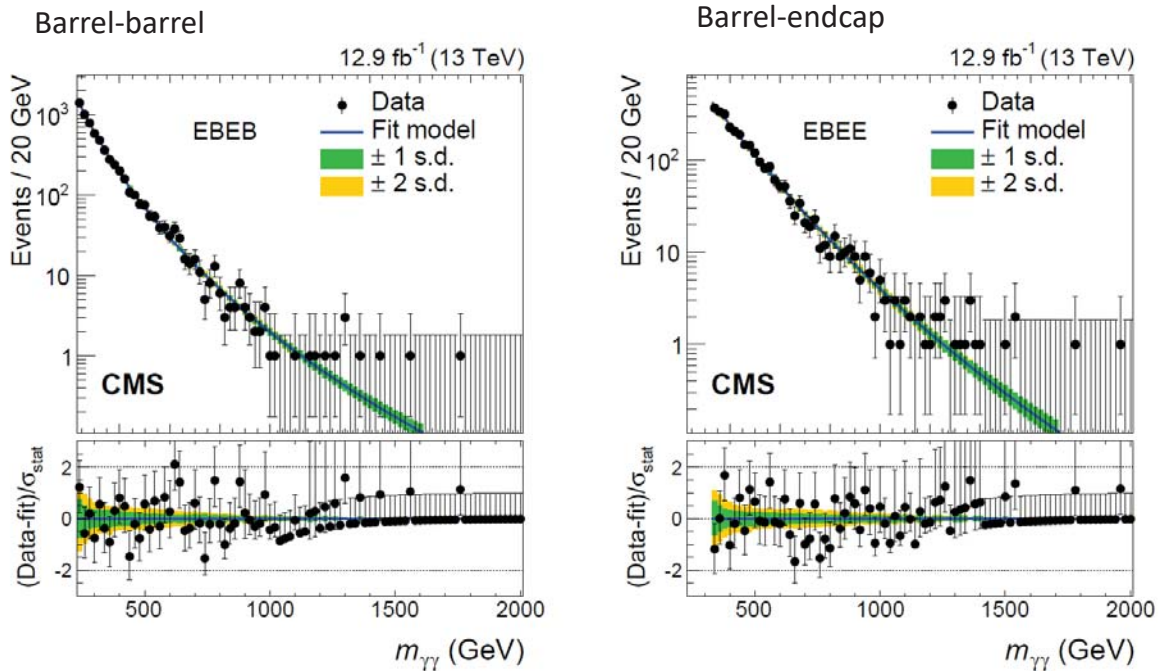
2016データ、データ量4倍



- 2016データには、ピークなし。
- 2015データのピークは統計的な揺らぎが原因か。(CMSも新データには有意なピークはなかった。)

18

CMS、2016年夏までのデータ



19

まとめ

- LHC加速器は重心系エネルギー13 TeVでRun 2実験を行っている。
- LHCでの物理解析では、標準理論を高い精度で検証している：
 - ATLASは2016年にLHCはじめてのW質量測定を発表：
$$M_W = 80370 \pm 19 \text{ MeV}/c^2$$
 - ヒッグス粒子の結合測定は、すでに2016年夏までのRun2データで、Run1終わりの精度に追いついた。精密測定を続行していく。
- 新物理の兆候は見えていない。
 - 今後も引き続き、さまざまなチャンネルで新物理を探しつづける。

20

backup



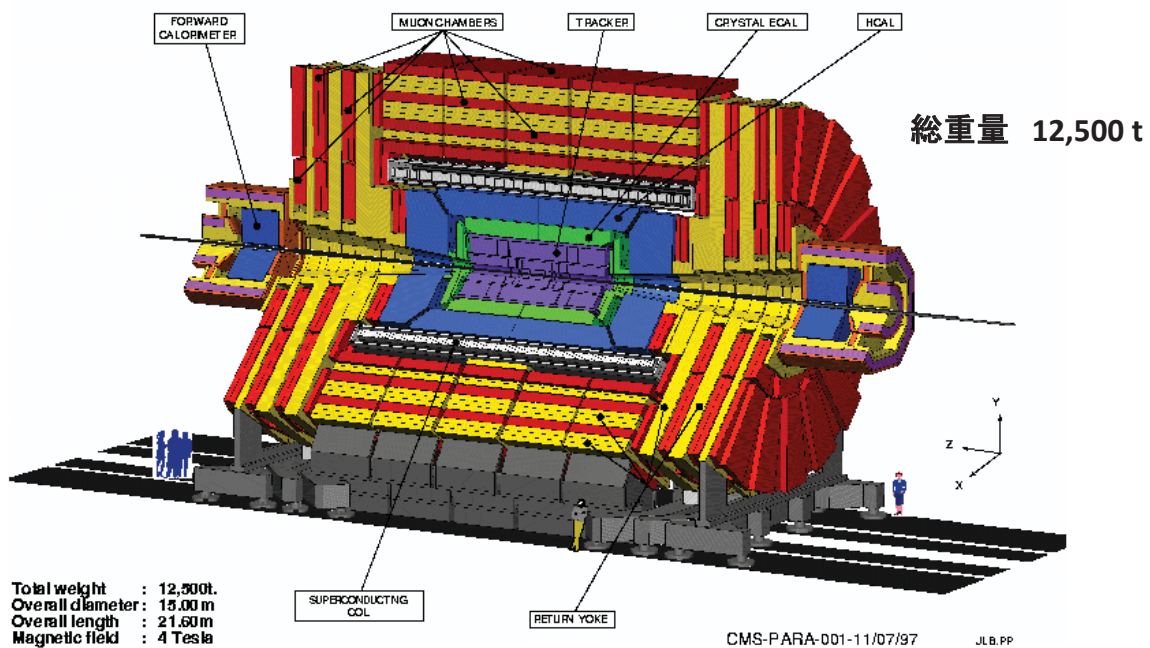
ATLAS実験



CMS検出器

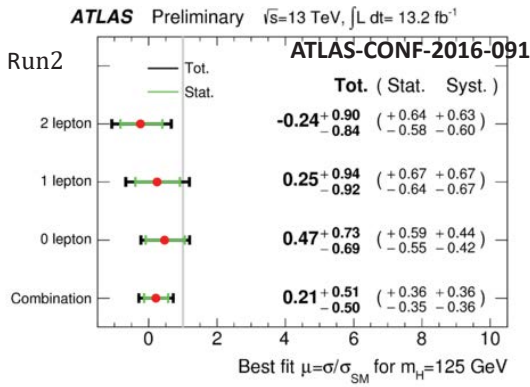
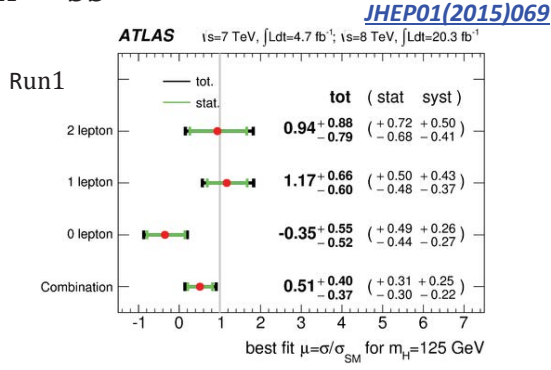
- LHCのもうひとつの高エネルギー素粒子実験

A Compact Solenoidal Detector for LHC



$H \rightarrow b\bar{b}, t\bar{t}H$ の現状

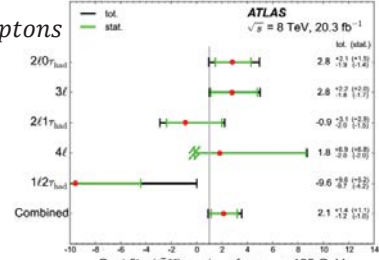
$H \rightarrow b\bar{b}$



Run1
 $H \rightarrow \text{leptons}$

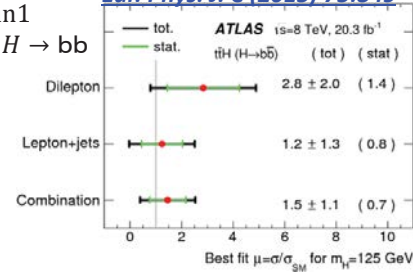
Phys Lett B 749 (2015) 519-541

$t\bar{t}H$



Eur. Phys. J. C (2015) 75:349

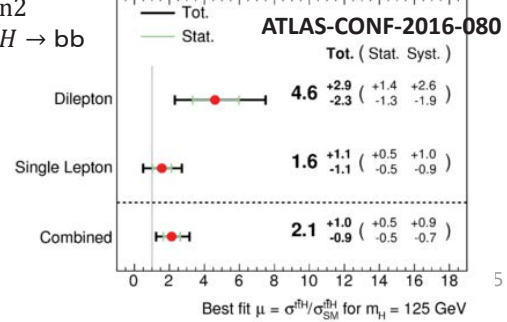
Run1
 $H \rightarrow b\bar{b}$



Run2

$H \rightarrow b\bar{b}$

ATLAS Preliminary $t\bar{t}H (b\bar{b}), \sqrt{s}=13\text{ TeV}, 13.2\text{ fb}^{-1}$



arXiv:1606.03833v1

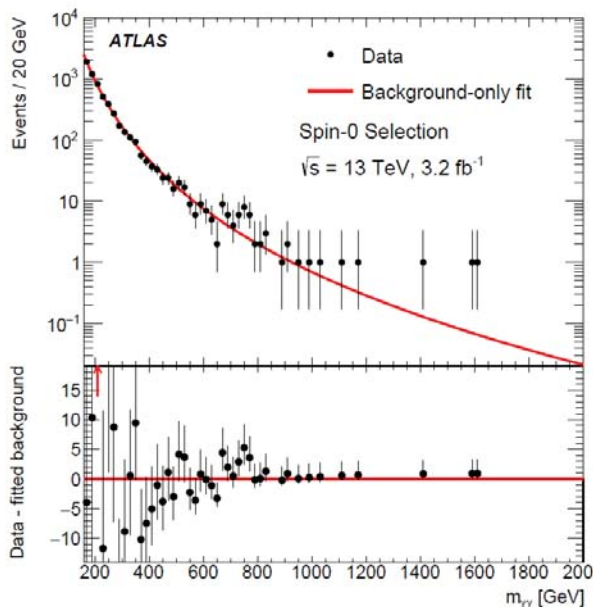
$\gamma\gamma$ に崩壊する重い新粒子の探索

$2\gamma, P_T^1 > 40, P_T^2 > 30.$

2通りのカットで解析。

- Spin-2 analysis: $P_T^Y > 55.$
- Spin-0 analysis: $P_T^1 > 0.4m_{\gamma\gamma}, P_T^2 > 0.3m_{\gamma\gamma}.$

ATLAS
2015 データ
3.2 fb⁻¹



	Spin 0	Spin 2
Mass (GeV)	~750	~770
Local Significance	3.8 σ	3.9 σ
Global Significance	2.1 σ	2.1 σ

