

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, 100 fb^{-1} 。

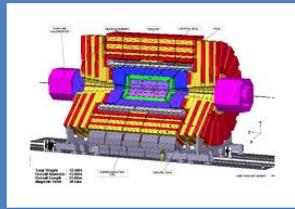
2023年 300 fb^{-1} のデータセット。

203X年 3000 fb^{-1} の大データセット。

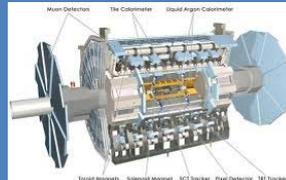


ジュネーブ市街

CMS実験



ATLAS実験



LHC実験は始まったばかり。
新しい物理の発見が期待される!!

円周27km

陽子を7 TeVまで加速して正面衝突

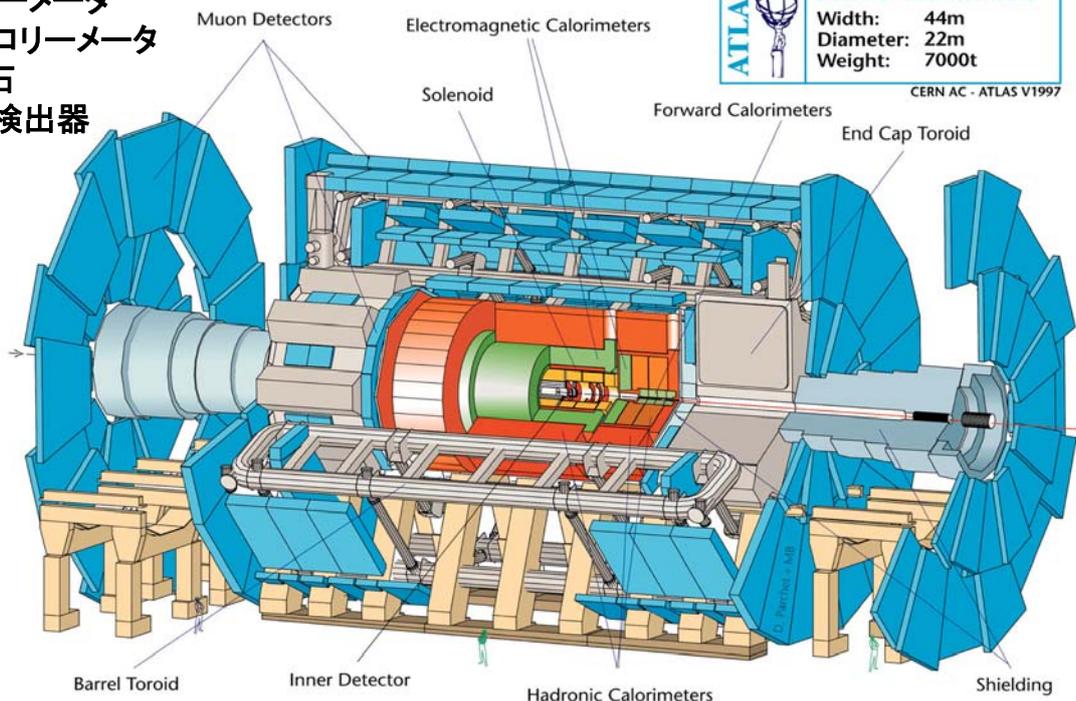
- シリコン検出器
- 飛跡検出器
- ソレノイド磁石
- 電磁カロリメータ
- ハドロンカロリメータ
- トロイド磁石
- ミュオン検出器

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...

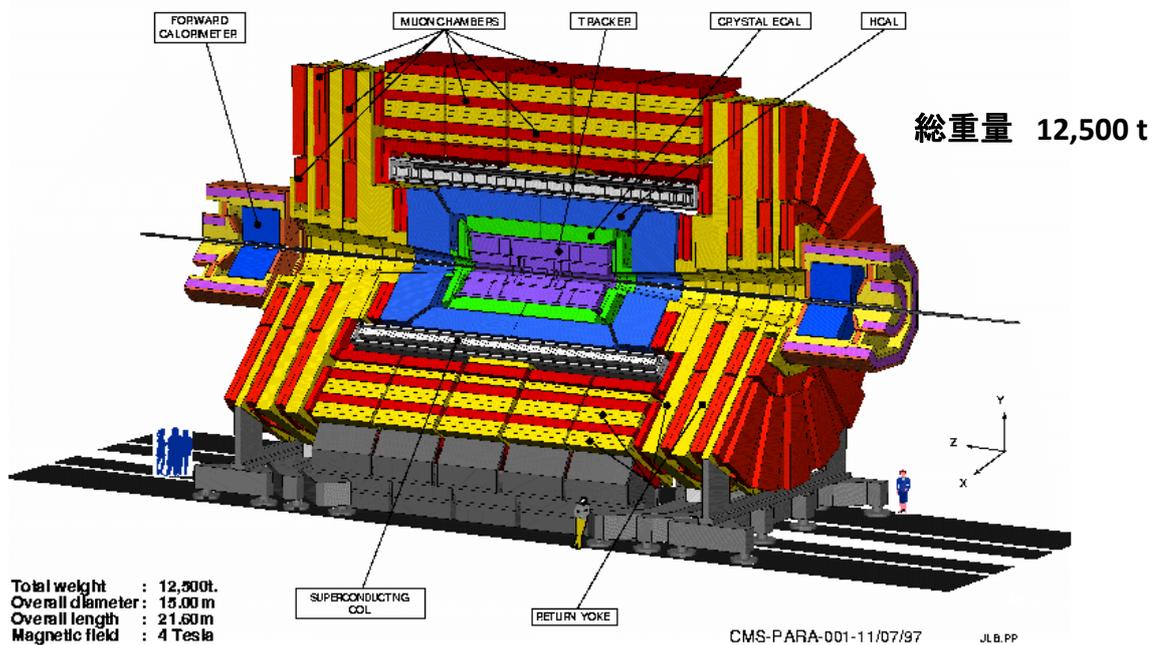
ATLAS実験



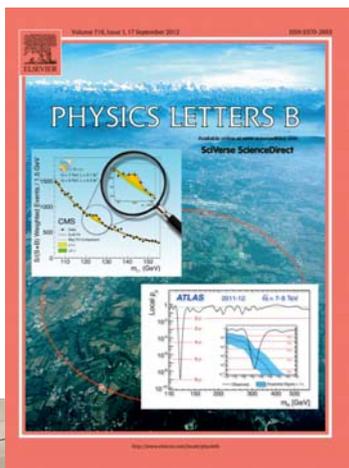
CMS検出器

- 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



ヒッグス粒子発見

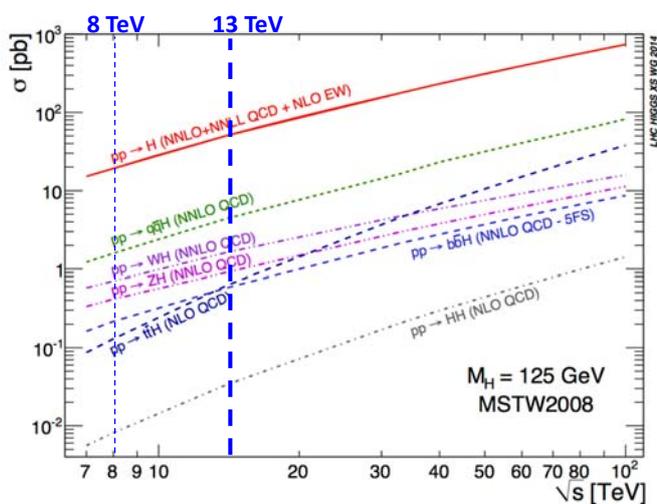


2012年7月4日 LHC加速器の
ATLAS/CMS両実験が発見を報告
2013年 アングラール、ヒッグス
がノーベル物理学賞を受賞

7

ヒッグス粒子の性質(標準理論の計算)

- 生成断面積



	$\sigma(14\text{TeV})/\sigma(8\text{TeV})$
$gg \rightarrow H$	2.6 ($M_X=M_H$)
$qq \rightarrow qqH$	2.6 (probes high M_X)
$qq \rightarrow VH$	2.1 ($M_X=M_V+M_H$)
$gg \rightarrow ttH$	4.7 (phase space+ M_X)



Figure 1: Leading-order Feynman diagrams for Higgs boson production via the (a) ggF and (b) VBF production processes.

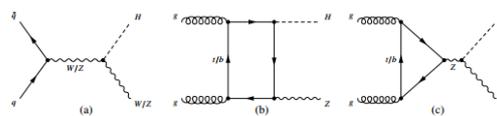


Figure 2: Leading-order Feynman diagrams of Higgs boson production via the (a) $q\bar{q} \rightarrow VH$ and (b,c) $gg \rightarrow ZH$ production processes.

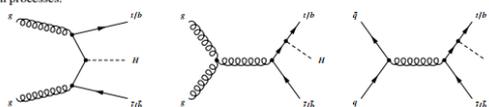


Figure 3: Leading-order Feynman diagrams of Higgs boson production via the $q\bar{q}/gg \rightarrow tH$ and $q\bar{q}/gg \rightarrow bbH$ processes.

8

ヒッグス粒子の性質(標準理論の計算)

さまざまな生成・崩壊モード

- さまざまな測定を行い、標準理論を検証できる。

重心エネルギー8 TeV⇒13 TeV

- 生成断面積は、2-5倍。
- Run2では、たくさん作って様々なチャンネルで精密測定する。

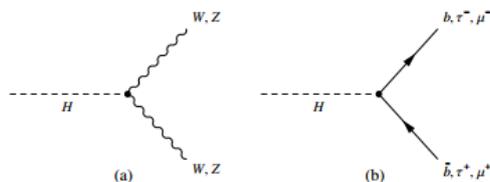


Figure 5: Leading-order Feynman diagrams of Higgs boson decays (a) to W and Z bosons and (b) to fermions.

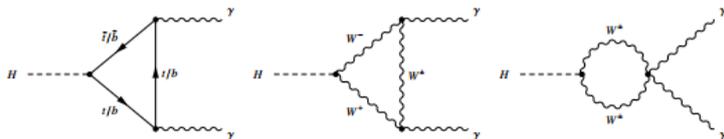


Figure 6: Leading-order Feynman diagrams of Higgs boson decays to a pair of photons.

- 崩壊分岐比 ($m_H = 125$ GeV)

$H \rightarrow b\bar{b}$	$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	$H \rightarrow \mu^+\mu^-$	$H \rightarrow c\bar{c}$
57.7%	6.32%	0.022%	0.029%

$H \rightarrow gg$	$H \rightarrow \gamma\gamma$	$H \rightarrow Z\gamma$	$H \rightarrow WW$	$H \rightarrow ZZ$	Γ_H [MeV]
8.6%	0.23%	0.15%	21.5%	2.64%	4.07

9

Run1での信号の有意度

ATLAS、CMS個別

Channel	References for individual publications		Signal strength [μ]		Signal significance [σ]	
	ATLAS	CMS	ATLAS	CMS	ATLAS	CMS
$H \rightarrow \gamma\gamma$	[51]	[52]	$1.15^{+0.27}_{-0.25}$ (+0.26, -0.24)	$1.12^{+0.25}_{-0.23}$ (+0.24, -0.22)	5.0	5.6
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$	[53]	[54]	$1.51^{+0.39}_{-0.34}$ (+0.33, -0.27)	$1.05^{+0.32}_{-0.27}$ (+0.31, -0.26)	6.6	7.0
$H \rightarrow WW$	[55, 56]	[57]	$1.23^{+0.23}_{-0.21}$ (+0.21, -0.20)	$0.91^{+0.24}_{-0.21}$ (+0.23, -0.20)	6.8	4.8
$H \rightarrow \tau\tau$	[58]	[59]	$1.41^{+0.40}_{-0.35}$ (+0.37, -0.33)	$0.89^{+0.31}_{-0.28}$ (+0.31, -0.29)	4.4	3.4
$H \rightarrow b\bar{b}$	[38]	[39]	$0.62^{+0.37}_{-0.36}$ (+0.39, -0.37)	$0.81^{+0.45}_{-0.42}$ (+0.45, -0.43)	1.7	2.0
$H \rightarrow \mu\mu$	[60]	[61]	-0.7 ± 3.6 (±3.6)	0.8 ± 3.5 (±3.5)		
$t\bar{t}H$ production	[28, 62, 63]	[65]	$1.9^{+0.8}_{-0.7}$ (+0.72, -0.66)	$2.9^{+1.0}_{-0.9}$ (+0.88, -0.80)	2.7	3.6

3 σ : "兆候が見えた"
5 σ : "発見した"

- メインの生成・崩壊過程はほぼRun 1で発見がすんだ。
- 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

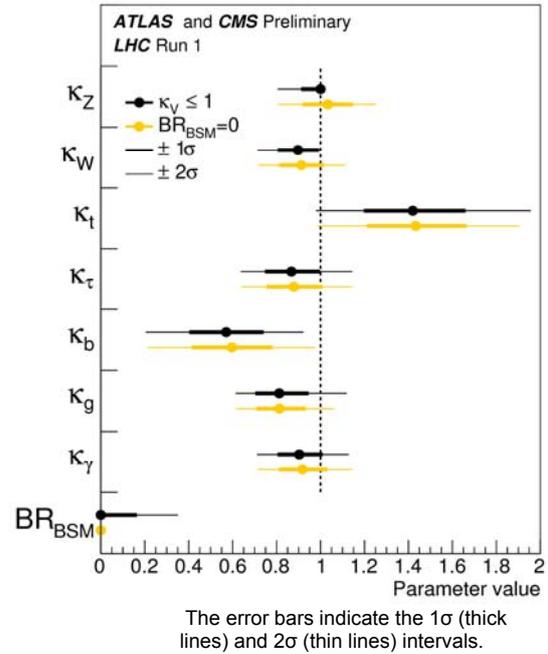
Production process	Measured significance (σ)	Expected significance (σ)
VBF	5.4	4.7
WH	2.4	2.7
ZH	2.3	2.9
VH	3.5	4.2
$t\bar{t}H$	4.4	2.0
Decay channel		
$H \rightarrow \tau\tau$	5.5	5.0
$H \rightarrow b\bar{b}$	2.6	3.7

結合の測定

$$g_F = \sqrt{2} \frac{m_f}{v}$$

$$g_V = 2 \frac{m_V^2}{v}$$

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



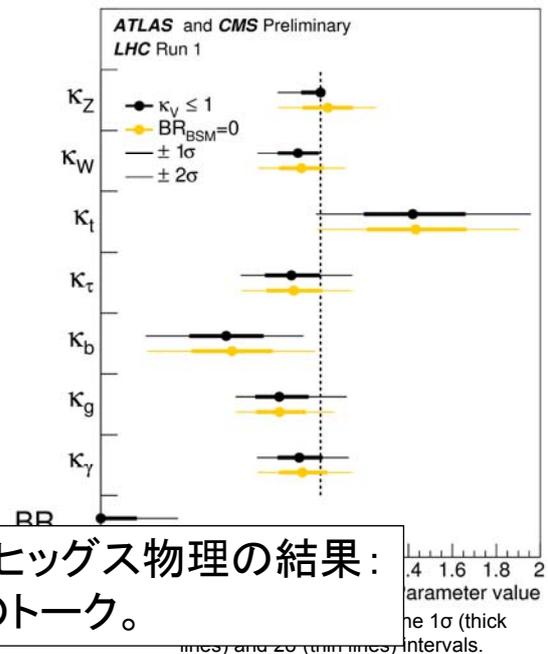
- いまのところ、標準理論の予言とよく一致しているが、測定誤差が大きい。
- 今後、データを増やして精密測定していく。
 - 標準理論からずれていれば、新しい物理がそこにある!!

結合の測定

$$g_F = \sqrt{2} \frac{m_f}{v}$$

$$g_V = 2 \frac{m_V^2}{v}$$

- $\kappa = \frac{g^{measured}}{g^{SM}}$ と定義して
測定結果を κ で示す。



Run1での標準理論を超えるヒッグス物理の結果：
永田君、湊君のトーク。

- 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。
 - 標準理論からずれていれば、新しい物理がそこにある!!

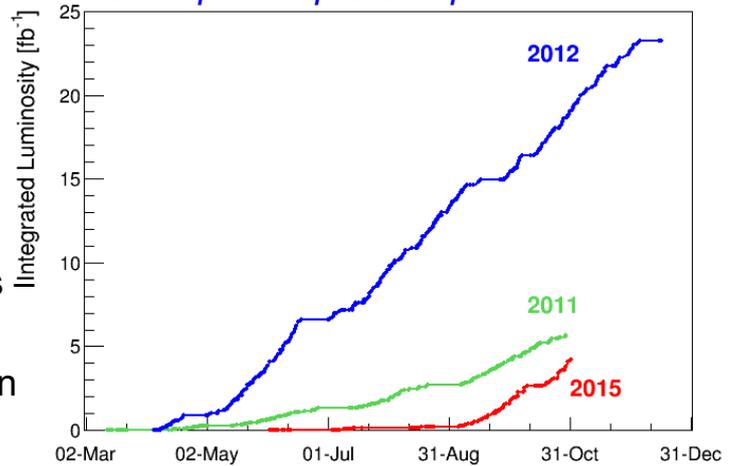
LHC in 2015

Successful learning year of Run 2 ($\sqrt{s}=13$ TeV, 25 ns bunch spacing).

- $\sqrt{s}=8$ TeV, 50 ns in Run 1.

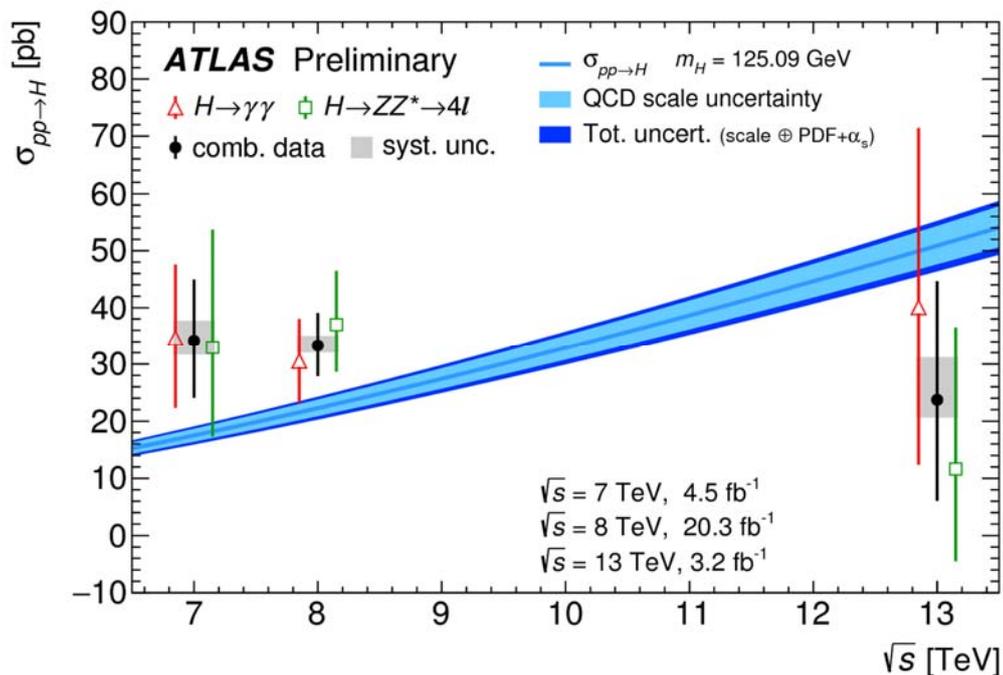
- The initial projections of integrated luminosity for 2015 were $\sim 8-10$ fb $^{-1}$.
- Finally achieved > 4 fb $^{-1}$ for ATLAS and CMS
- Slope at the end of the run better than in 2011, and not far from 2012 slope
 - *More than 1 fb $^{-1}$ produced last week of proton-proton operation*

- The main reasons for the lower value:
 - Start-up delays (~ 6 weeks)
 - Availability issues (radiation failures on the quench protection tunnel electronics solved now)
 - Difficulties to master electron clouds \rightarrow slower intensity ramp-up



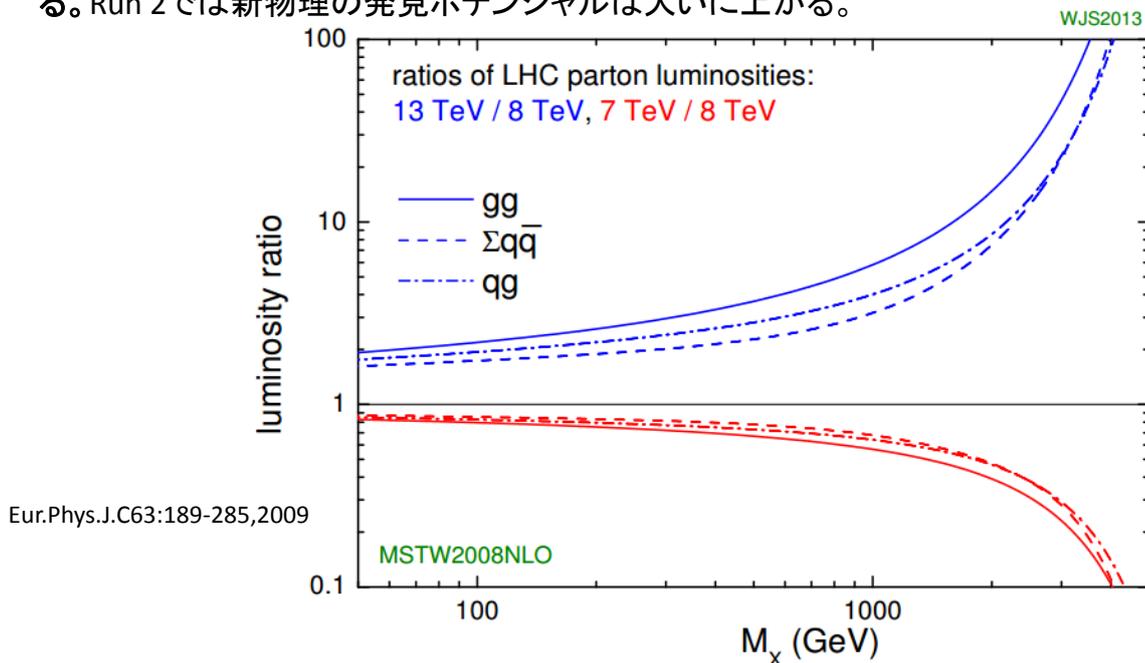
13

2015データでの $H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow ZZ^*$ 測定



重い新粒子の生成しやすさ

陽子から、新粒子Xを作り出すだけの高エネルギーのグルーオンやクォークを引っ張り出す確率は、陽子を高エネルギーに加速すれば高くなる (Parton Distribution Function)。8⇒13 TeVの加速器エネルギー増強は、質量1(2) TeVの新粒子の生成を3-5(5-10)倍にする。Run 2では新物理の発見ポテンシャルは大いに上がる。



=> 2015データでの新物理探索については、大川さんのトーク。

15

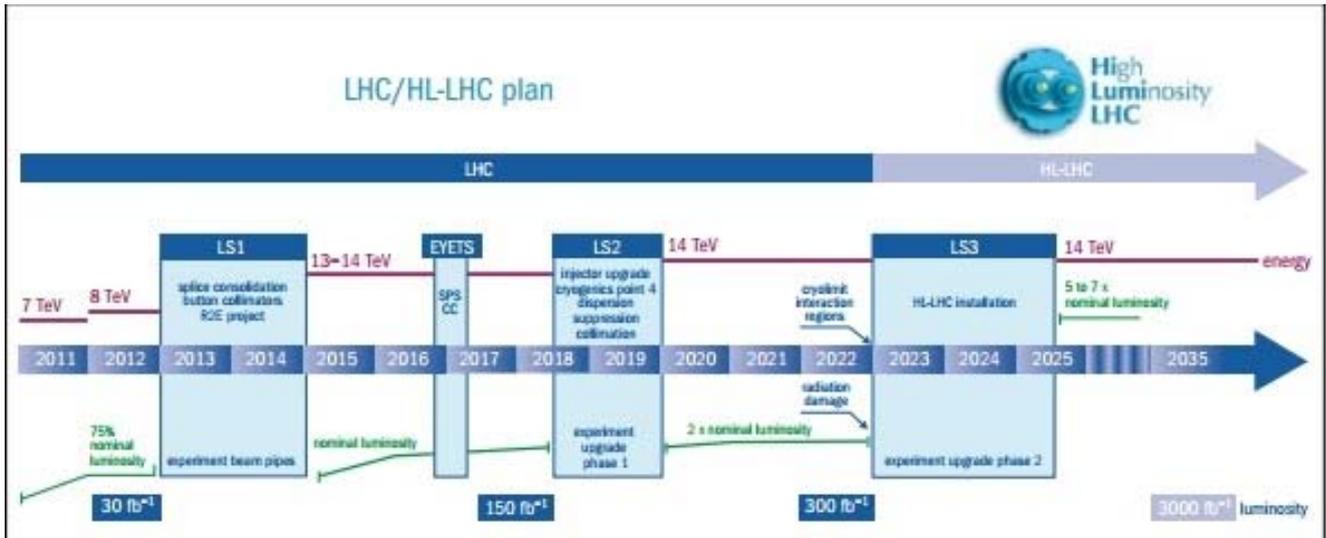
Possible performance after YETS

- 2016 – Production year, setting stage for Run 2:
 - 6.5 TeV
 - β^* reduction to 40 cm in ATLAS and CMS ($\beta^* = 80$ cm in 2015)
 - Limited the maximum number of bunches to around 2400 for 2015 due to weakness of injection protection device.
 - Exchange planned during winter stop
 - Number of bunch (design) = 2808.

	Peak lumi E34 cm ⁻² s ⁻¹	Days proton physics	Approx. int lumi [fb ⁻¹]
2015	~0.5	~50	4
2016	1.2	160	~35

LHCの長期計画

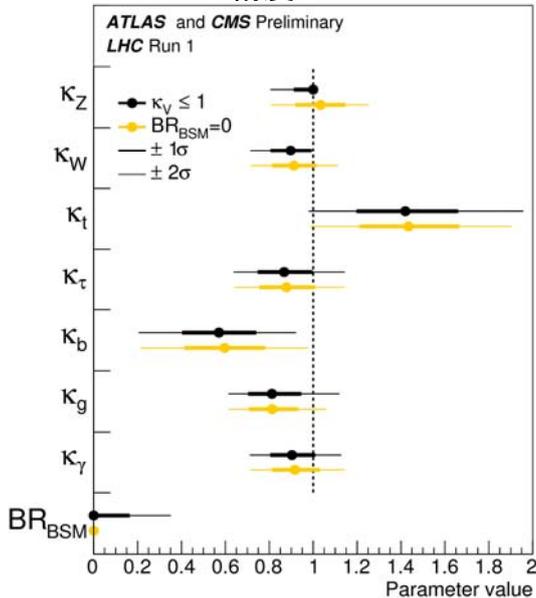
- High Luminosity-LHC計画



HL-LHCで到達できるヒッグス測定の精度

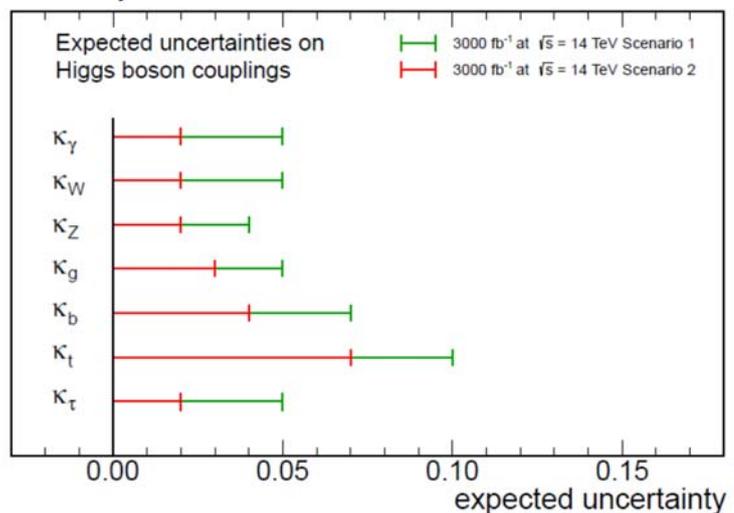
- Run 1で±10%だった測定が、14 TeV, 3000 fb⁻¹貯めれば±2 - 5%の精度で測定できる。

Run 1での精度



HL-LHCで期待される精度

CMS Projection

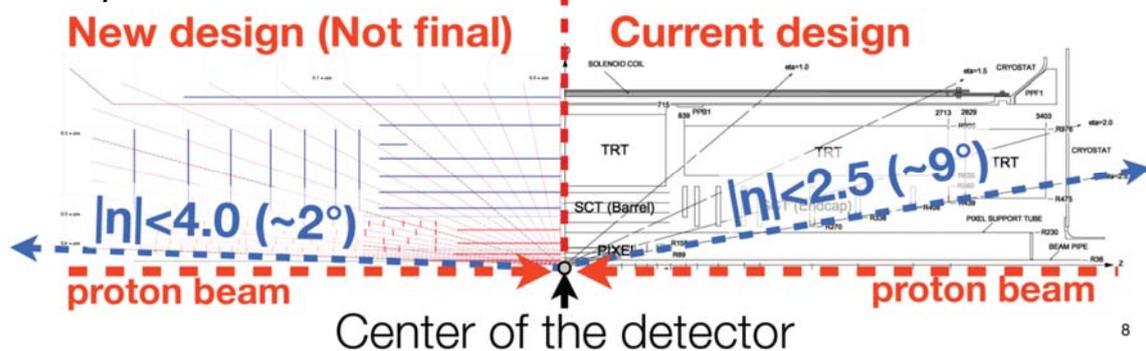


HL-LHCでのInner Detector

- 現行のPixelは 400 fb^{-1} 、SCTは 600 fb^{-1} 、IBLも 800 fb^{-1} の積算ルミノシティ相当の放射線までしか耐えられない。
- 瞬間ルミノシティも高くなるため、TRTのoccupancyも問題になる。

	LHC	HL-LHC
$L_{inst.}$	1×10^{34}	5×10^{34}
$N_{pp \text{ collision}} / X_{ing}$	23	140

- IDを総入れ替え、すべてシリコン検出器にする。
 - 5 pixel + 4 strip layers
 - η 方向のカバレッジを広くする。



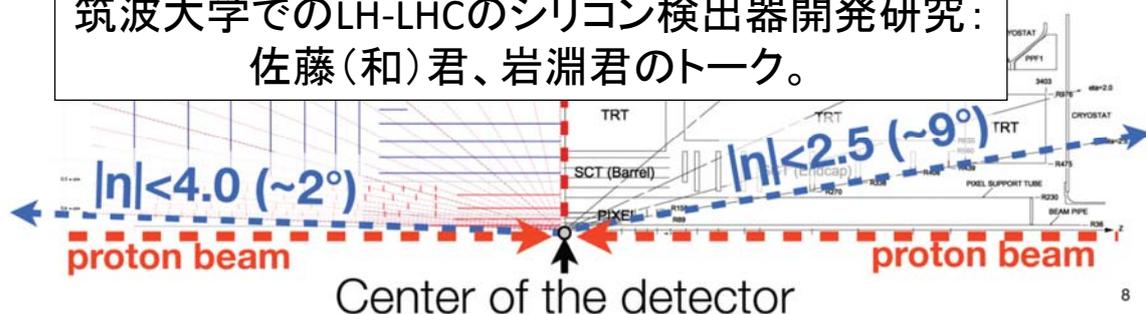
HL-LHCでのInner Detector

- 現行のPixelは 400 fb^{-1} 、SCTは 600 fb^{-1} 、IBLも 800 fb^{-1} の積算ルミノシティ相当の放射線までしか耐えられない。
- 瞬間ルミノシティも高くなるため、TRTのoccupancyも問題になる。

	LHC	HL-LHC
$L_{inst.}$	1×10^{34}	5×10^{34}
$N_{pp \text{ collision}} / X_{ing}$	23	140

- IDを総入れ替え、すべてシリコン検出器にする。
 - 5 pixel + 4 strip layers
 - η 方向のカバレッジを広くする。

筑波大学でのLH-LHCのシリコン検出器開発研究：
佐藤(和)君、岩淵君のトーク。



まとめ

- Run 1
 - LHC Run 1では、2012年にヒッグス粒子を発見した。
 - Run 1データで、様々なカップリングを $\pm 10 - 20\%$ で測定した。
- Run 2
 - Run 2初年の2015年には、13 TeV運転を確立。 $0.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成、 4 fb^{-1} のデータを取得。
 - 2016年には、 $\sim 1.2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成し、 $\sim 35 \text{ fb}^{-1}$ のデータを取得の予定。
 - Run 2以降では、ヒッグス粒子の測定を精度を上げていく。
 - 新粒子への感度が大幅増大する。
 - $\frac{\sigma(13 \text{ TeV})}{\sigma(8 \text{ TeV})} \sim 3 - 5 (M_X = 1 \text{ TeV}), 20 - 40 (M_X = 3 \text{ TeV})$
- LS3 Upgrade
 - HL-LHCでは、ヒッグス粒子の様々なカップリングを $\pm 2 - 5\%$ の精度で測定する。
 - HL-LHCはLHCの5倍の瞬間輝度 \rightarrow IDを総入れ替え。
 - 新しいPixelとstrip型シリコン検出器を開発している。

セッションのプログラム

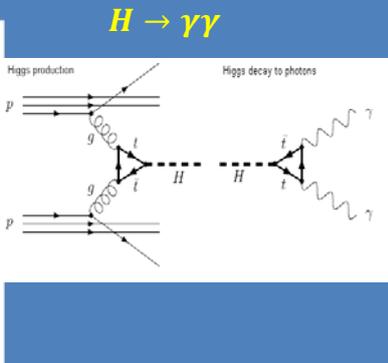
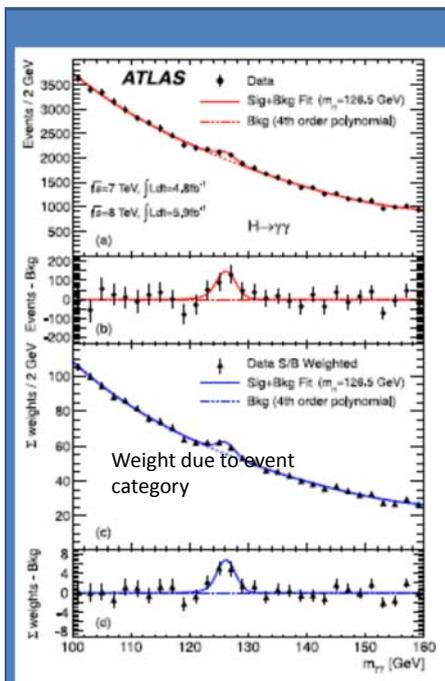
- 16:00-16:20 「ATLAS 実験の概要」
佐藤 構二(CiRfSE 素粒子構造部門)
- 16:20-16:50 「ATLAS 実験におけるダイボソン共鳴事象の探索」
大川 英希(CiRfSE 素粒子構造部門)
- 16:50-17:10 「ATLAS 実験における荷電ヒッグス粒子の探索」
永田 和樹(筑波大学数理物質科学研究科物理学専攻)
- 17:10-17:30 「ATLAS 実験におけるヒッグス粒子対生成の探索」
瀧 遼亮(筑波大学数理物質科学研究科物理学専攻)
- 17:30-17:45 「HL-LHC へ向けたピクセル検出器のビームテスト解析」
佐藤 和之(筑波大学数理物質科学研究科物理学専攻)
- 17:45-18:00 「HL-LHC ATLAS 実験用シリコンストリップセンサーの放射線耐性評価」
岩瀨 周平(筑波大学数理物質科学研究科物理学専攻)

backup

LHC Run 1でのヒッグス粒子発見

- 2012年7月4日 CERNセミナーで発表

事象中のヒッグス粒子の質量を、相対性理論を利用して再構成した結果

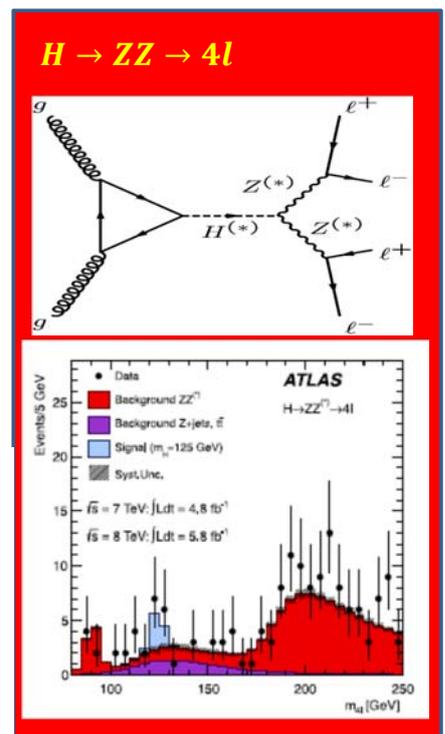


各実験単独で、同時に発見
ATLAS:

global 5.1σ , local 5.9σ .
 $m_H = 126.0 \pm 0.6 \text{ GeV}/c^2$

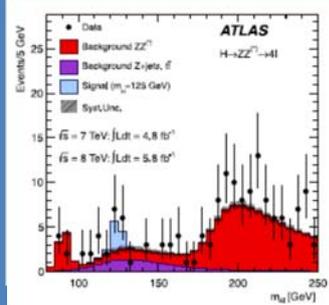
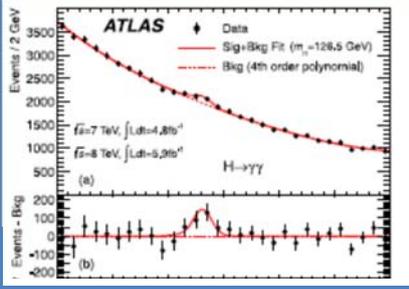
CMS:

global 4.6σ , local 5.0σ .
 $m_H = 125.3 \pm 0.7 \text{ GeV}/c^2$



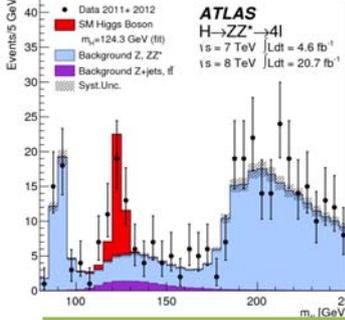
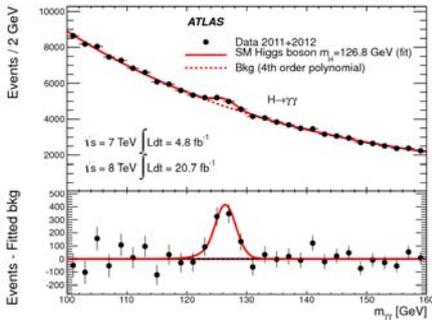
全Run 1データでのアップデート

2012年夏の結果



[Phys. Lett. B 716 \(2012\) 1-29](#)

2チャンネル合わせて5.9σ.



データが増え、解析手法も改善しているため、ヒッグス粒子のピークがよりハッキリ見える

[Phys. Lett. B 726 \(2013\), pp. 88-119](#)

2013年夏の結果

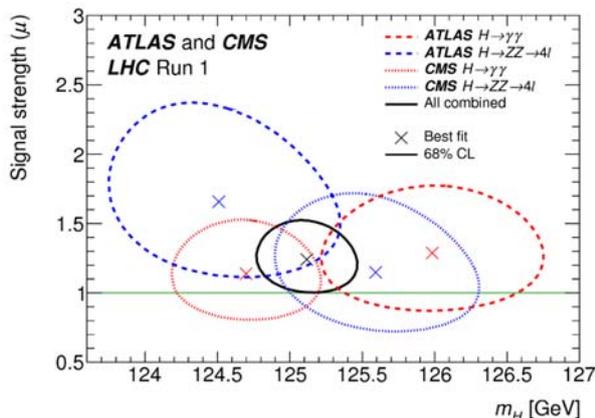
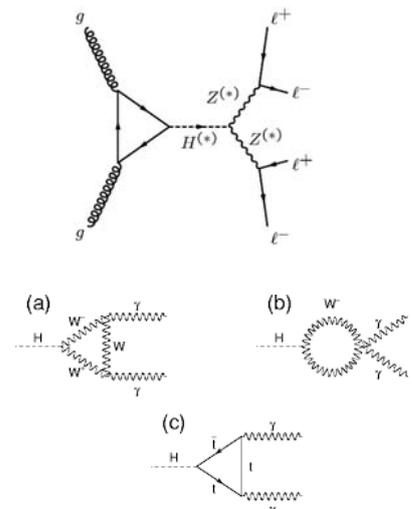
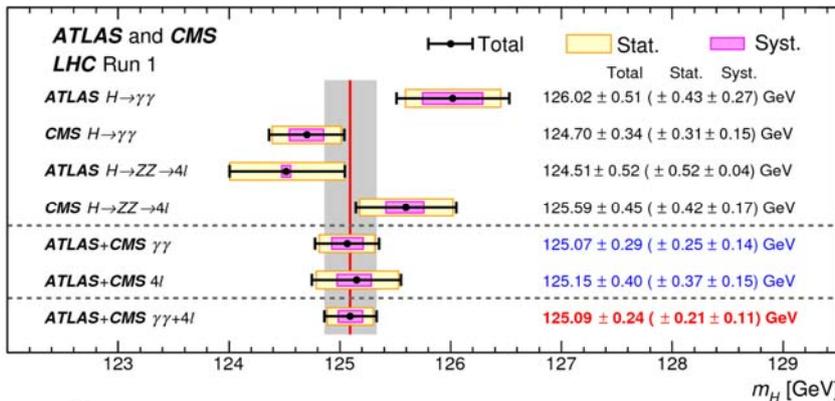
Signal significance:
Observed: 7.4σ
Expected: 4.3σ

Significance:
Observed: 6.6σ
Expected: 4.4σ

25

ヒッグス質量 [Phys. Rev. Lett. 114, 191803](#)

(2015年3月)



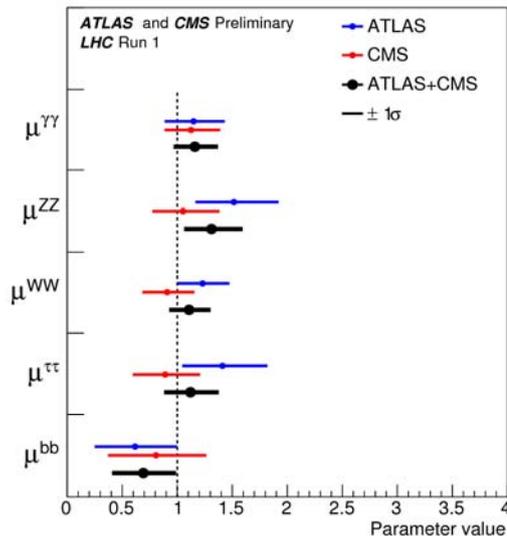
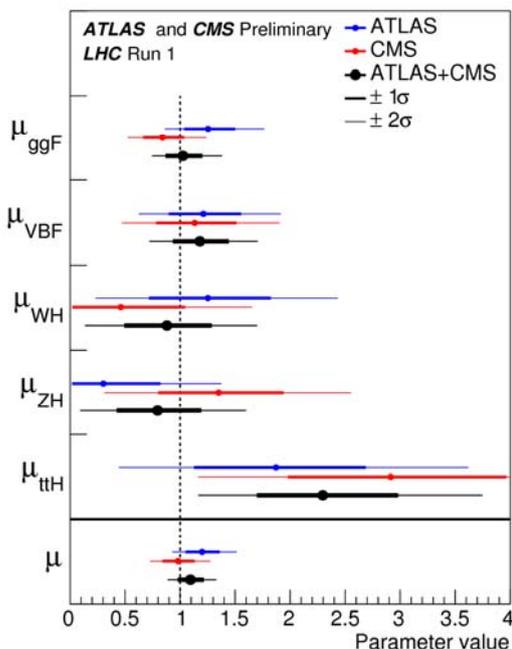
- $\pm 0.19\%$ ($\pm 0.24 \text{ GeV}/c^2$)の精度。
- 発見から2年半(2015年3月)の結果。

26

ヒッグス信号強度の測定結果

- 信号強度(断面積、崩壊頻度)は標準理論の予言値との比を測定している。

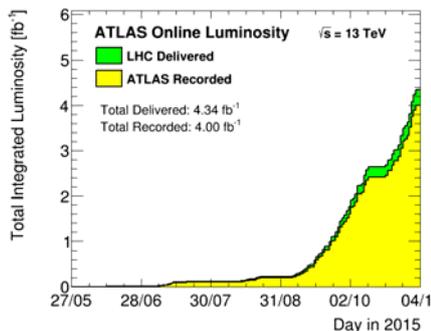
$$\mu_i^f = \frac{\sigma_i \cdot BR^f}{(\sigma_i)_{SM} \cdot (BR^f)_{SM}} = \mu_i \times \mu^f$$



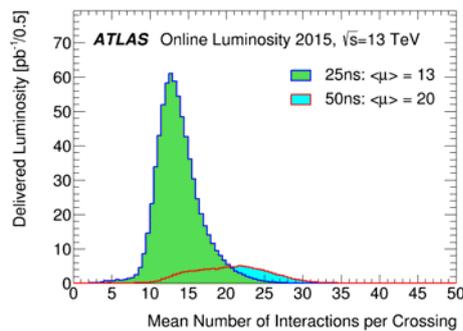
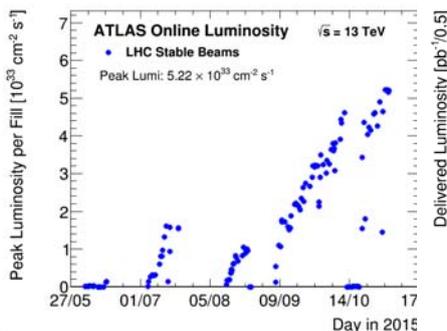
27
ATLAS-CONF-2015-044

Luminosity Status

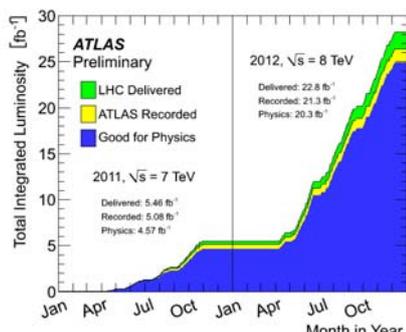
2015 : 13 TeV



13 TeV dataset: 3.55 fb⁻¹

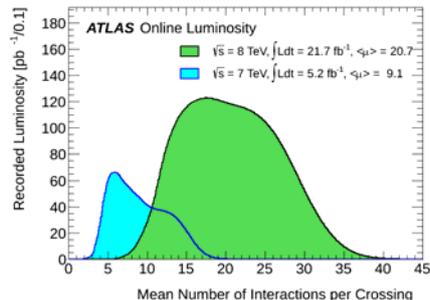
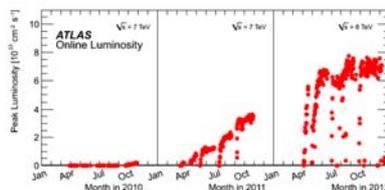


2010-2011 : 7 TeV, 2012 : 8 TeV



8 TeV dataset: 20.3 fb⁻¹

7 TeV dataset: 4.57 fb⁻¹





LHC Machine Status report

*L. Ponce (BE department, OP group)
On behalf of the LHC Team*

LHC Run 2 goals (2015 - 2018)

- Operate the LHC at 6.5 TeV (or higher).
- Operate with 25 ns bunch spacing.
 - *For Run 1 operated with 50 ns spacing (e-cloud).*
- Maximize the integrated luminosity & collect $\geq 100 \text{ fb}^{-1}$.

Objectives for 2015:

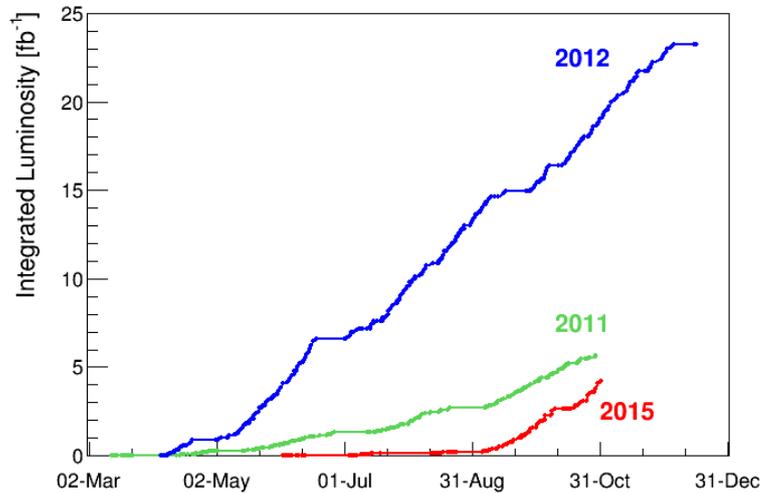
- Learning year of Run 2 (6.5 TeV, 25 ns bunch spacing)
 - *Energy: lower quench margins, lower beam loss tolerance*
 - *25 ns: electron cloud, UFOs, larger crossing angle*
- Achieving reliable operation with 25 ns spacing is top priority.
 - *β^* at the IPs were relaxed to ease operation: $\beta^* = 80 \text{ cm}$ was selected while 60-40 cm was in reach. We plan to move to 40-50 cm in 2016.*

Integrated luminosity

- The initial projections of integrated luminosity for 2015 were $\sim 8\text{-}10 \text{ fb}^{-1}$.
- Finally achieved $> 4 \text{ fb}^{-1}$ for ATLAS and CMS
- Slope at the end of the run better than in 2011, and not far from 2012 slope
 - *More than 1 fb^{-1} produced last week of proton-proton operation*

- The main reasons for the lower value:

- Start-up delays (~ 6 weeks)
- Availability issues (radiation failures on the quench protection tunnel electronics – solved now)
- Difficulties to master electron clouds \rightarrow slower intensity ramp-up

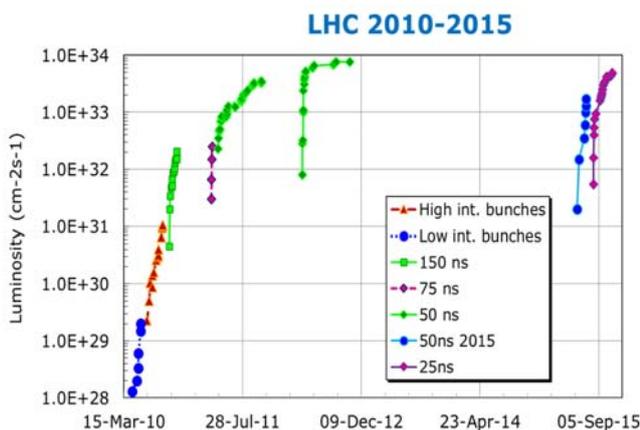
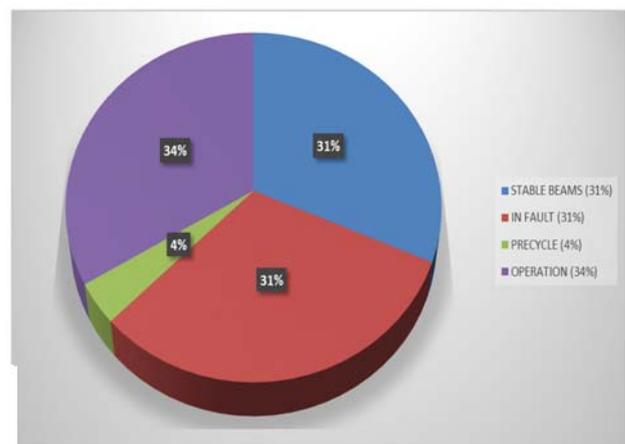


The 2015 proton run is finished now, this year will close with a 4 week lead ion run.

31

Luminosity production 2015

- **Luminosity production (25 ns):**
 - We spend 31% of the scheduled time delivering collisions to experiments
 - (compared to 33 % in 2011 and 37% in 2012)



- **Peak Luminosity:**

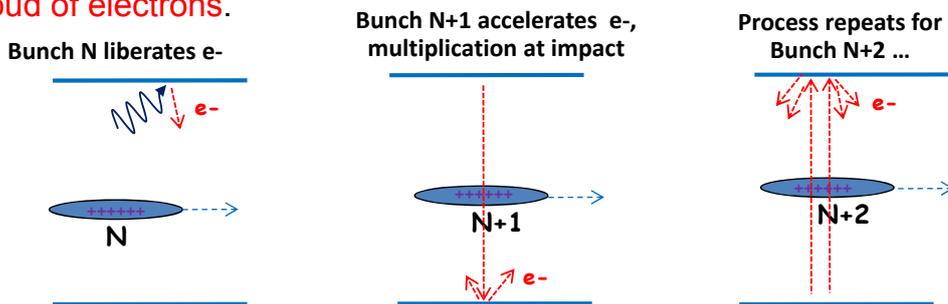
- Run 1: $7.6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
- Run 2: $5.1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Design lumi:

$1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

Electron cloud challenge

- When operating with **positively charged beams** and **closely spaced bunches** electrons liberated on vacuum chamber surface can multiply and build up a **cloud of electrons**.

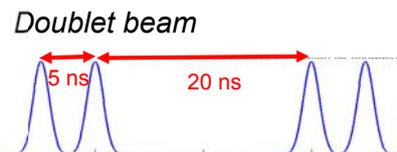
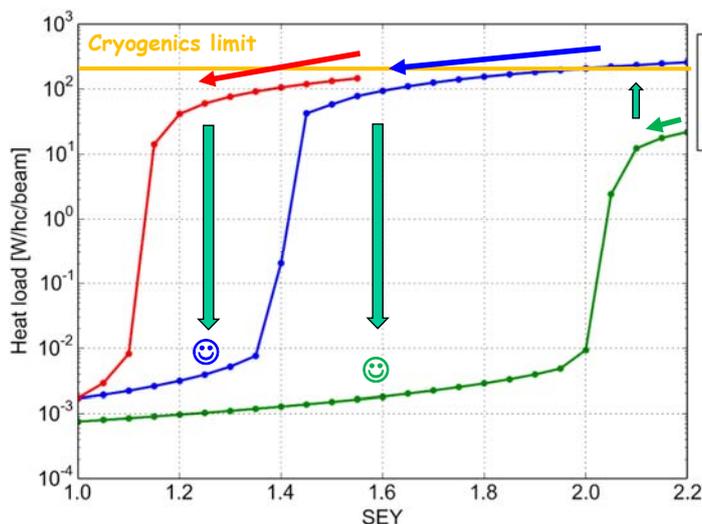


- Consequences of e-cloud build-up:
 - Vacuum pressure increases → interlocks triggered
 - Impact on beam quality (emittance growth, instabilities, particle losses)
 - Excessive energy deposition → cryogenic cooling capacity and stability
- The key parameter for e-clouds is the **Secondary Emission Yield (SEY)** of electrons from the vacuum chamber surface.
 - SEY reduced by electron bombardement of the surface (**SCRUBBING**)

33

Scrubbing strategy

- There is a strong dependence of e-cloud build up on bunch spacing:
 - Conditioning requires a beam that is **more powerful** (→ more electron generation) than the beam used for operation !
- For 50 ns: scrubbing with 25 ns, then revert to 50 ns for operation.
- For 25 ns: try the same strategy → invented a new **doublet beam** to enhance the e-cloud further.
- Doublet beam could not be used, too unstable beam – SEY too high.



- We came out of the scrubbing runs with an **important residual e-cloud activity**.
- Conditioning continued during physics production

34

Possible performance after YETS

- Exchange of Injection absorbers should allow nominal train injection (288 bunches per injection)
 - *Could help to complete scrubbing*
- 2016 – Production year, setting stage for Run 2:
 - *6.5 TeV*
 - *β^* reduction to 40 cm in ATLAS and CMS*
 - *Not yet fully scrubbed for 25 ns*

=> Re-establish present conditions, good for operations up to ~2000 bunches, continue pushing

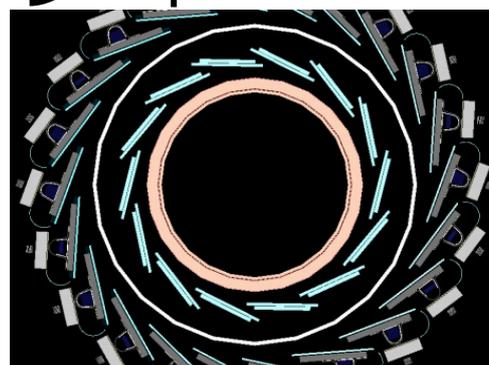
	Peak lumi E34 cm ⁻² s ⁻¹	Days proton physics	Approx. int lumi [fb ⁻¹]
2015	~0.5	~50	4
2016	1.2	160	~35

=> All options to be discussed at Evian and Chamonix Workshops

35

LS1中のアップグレード

- Pixel 検出器
 - 最内層に IBL を追加
 - ビームパイプも交換
 - サービスの交換
- Calorimeter
 - LV の交換
- Muon 検出器
 - EE chamber などの追加
- Software
 - シミュレーション、再構成ツールの刷新
 - Gridソフトウェアの改善



Trigger

- **New central trigger processor**
- **Tile – Muon coincidence**
- **High level trigger の再構築**
- **Fast Track Trigger**
- **L1Caloの改善**

36

陽子陽子衝突

Good data

ATLAS pp 25ns run: August-November 2015

Inner Tracker			Calorimeters		Muon Spectrometer				Magnets	
Pixel	SCT	TRT	LAr	Tile	MDT	RPC	CSC	TGC	Solenoid	Toroid
93.5	99.4	98.3	99.4	100	100	100	100	100	100	97.8

All Good for physics: 87.1% (3.2 fb^{-1})

Luminosity weighted relative detector uptime and good data quality (DQ) efficiencies (in %) during stable beam in pp collisions with 25ns bunch spacing at $\sqrt{s}=13 \text{ TeV}$ between August-November 2015, corresponding to an integrated luminosity of 3.7 fb^{-1} . The lower DQ efficiency in the Pixel detector is due to the IBL being turned off for two runs, corresponding to 0.2 fb^{-1} . Analyses that don't rely on the IBL can use those runs and thus use 3.4 fb^{-1} with a corresponding DQ efficiency of 93.1%.

/ 37

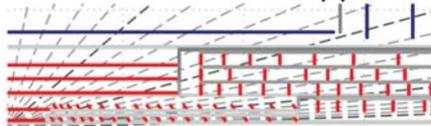
37

Layout

- Two baseline design to cover $|\eta| < 4.0$.

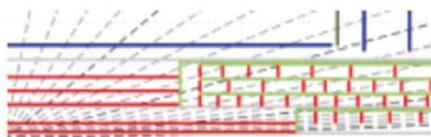
- ➔ Inclined:

- ✓ Pros: hit multiplicity, less silicon, less multiple scattering.
- ✓ Cons: elaborate support structure.



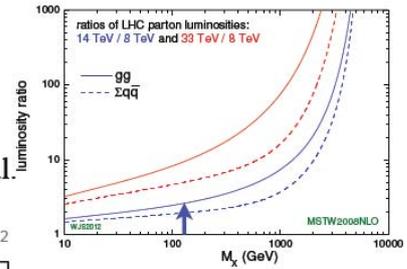
- ➔ Long barrel:

- ✓ pros: simple structure, less material.
- ✓ cons: study needed for tracking parameter resolutions.

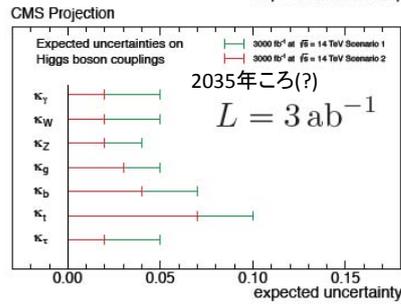
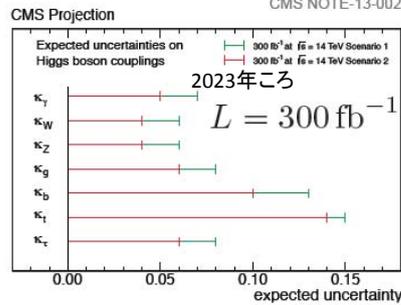
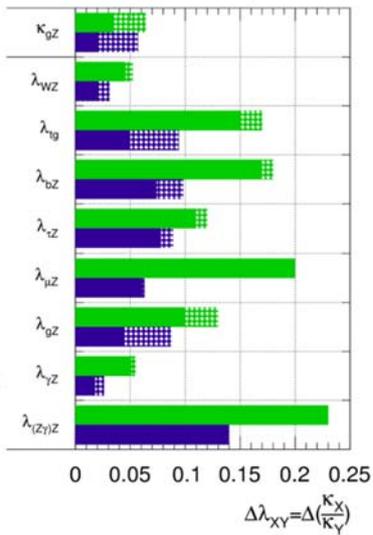


High Luminosity LHC (HL-LHC)

- ECFA HL-LHC with $L=300 \text{ fb}^{-1}$ (3 ab^{-1}) physics study.
- Higgs mass precision $\Delta M_H \sim 100$ (50) MeV.
- Access to top-Yukawa coupling via ttH , and rare decay $H \rightarrow \mu\mu$.
- Coupling precision of 10 to 5% reachable (even few% in κ_V/κ_Z).
- Detector performances (trigger, lepton-id, fake, τ/b -id) are crucial.
- Theory uncertainty dominates - challenge for theorists!



ATL-PHYS-PUB-2014-016
 ATLAS Simulation Preliminary
 $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$: $\int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}$; $\int L dt = 3000 \text{ fb}^{-1}$



	$\sigma(14\text{TeV})/\sigma(8\text{TeV})$
$gg \rightarrow H$	2.6 ($M_X = M_H$)
$qq \rightarrow qqH$	2.6 (probes high M_X)
$qq \rightarrow VH$	2.1 ($M_X = M_V + M_H$)
$gg \rightarrow ttH$	4.7 (phase space + M_X)

CMS

Scenario 1

current systematic uncert.

Scenario 2

theory uncert. $\searrow 1/2$

other systematics $\searrow 1/\sqrt{L}$

10
39