

# ATLAS実験の最近の物理結果から

佐藤構二

宇宙史センター 構成員会議

2023/6/27

# 内容

- LHC加速器とATLAS実験
- Run3実験の状況
- 最近の物理解析結果から
- HL-LHCに向けて

# LHC実験



SUISSE  
FRANCE

CMS

LHCb

ATLAS

CERN Meyrin

CERN Prévessin

SPS 7 km

ALICE

LHC 27 km

# Large Hadron Collider (LHC)

スイス、ジュネーブ郊外のCERNにある大型加速器  
世界最高エネルギーでの素粒子実験

$E_{CM} \leq 14 \text{ TeV}$ での陽子・陽子衝突

これまでの経緯:

2011 物理Run開始

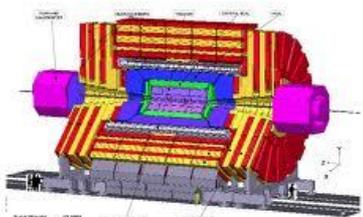
2012 ヒッグス粒子発見

2022~2025 Run 3

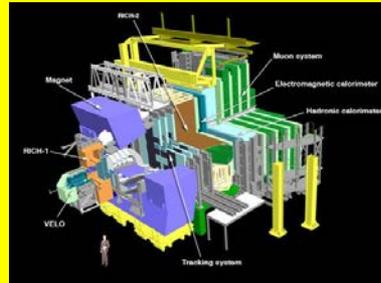
SUISSE  
FRANCE

CMS

CMS実験

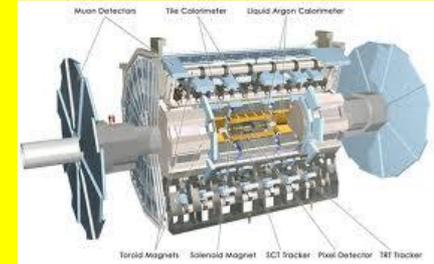


LHCb実験 B物理



LHC 27 km

ATLAS実験



ATLAS

CERN Meyrin

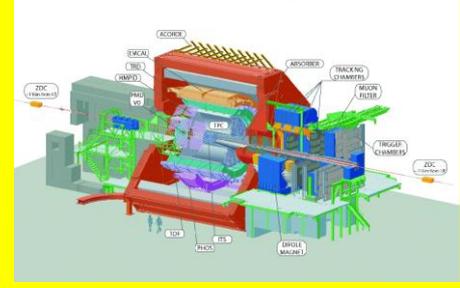
LHCb

CERN Meyrin

SPS 7 km

ALICE

ALICE実験 QGP

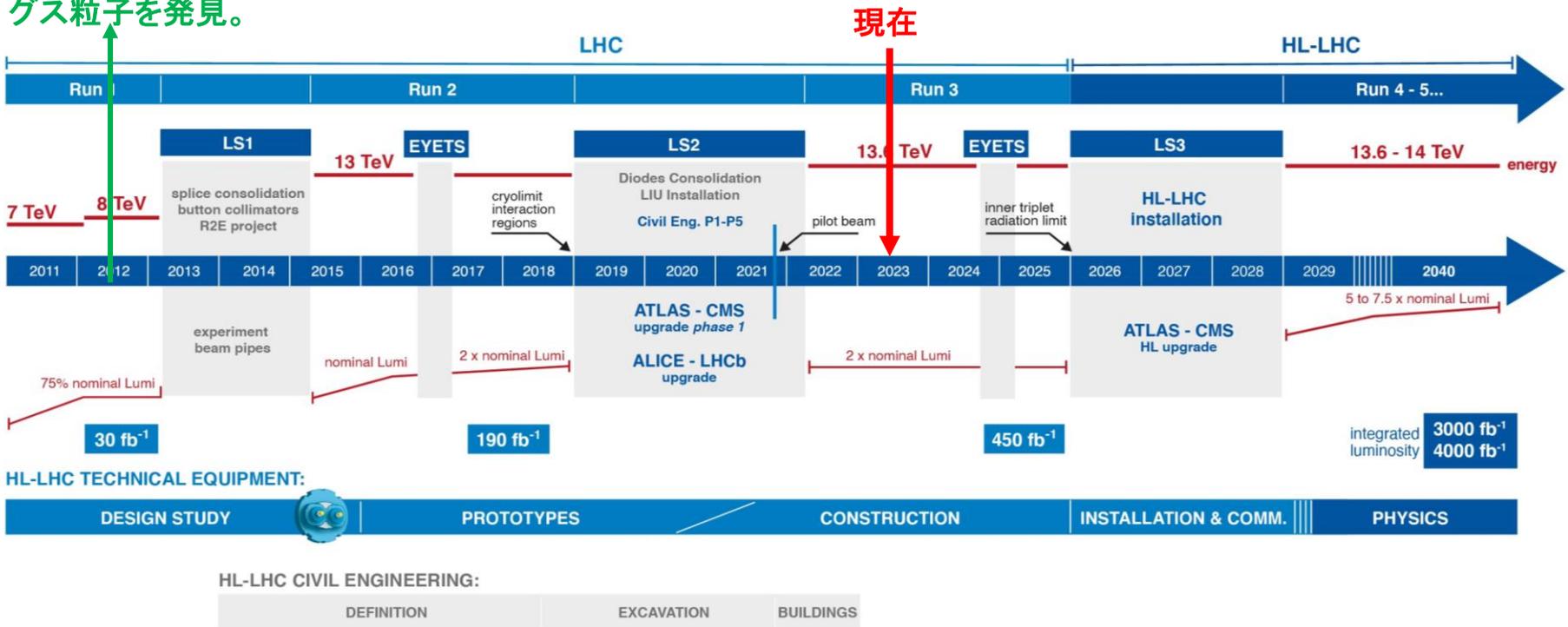


円周27km

陽子を最大7 TeVまで加速して正面衝突

# LHC長期スケジュール

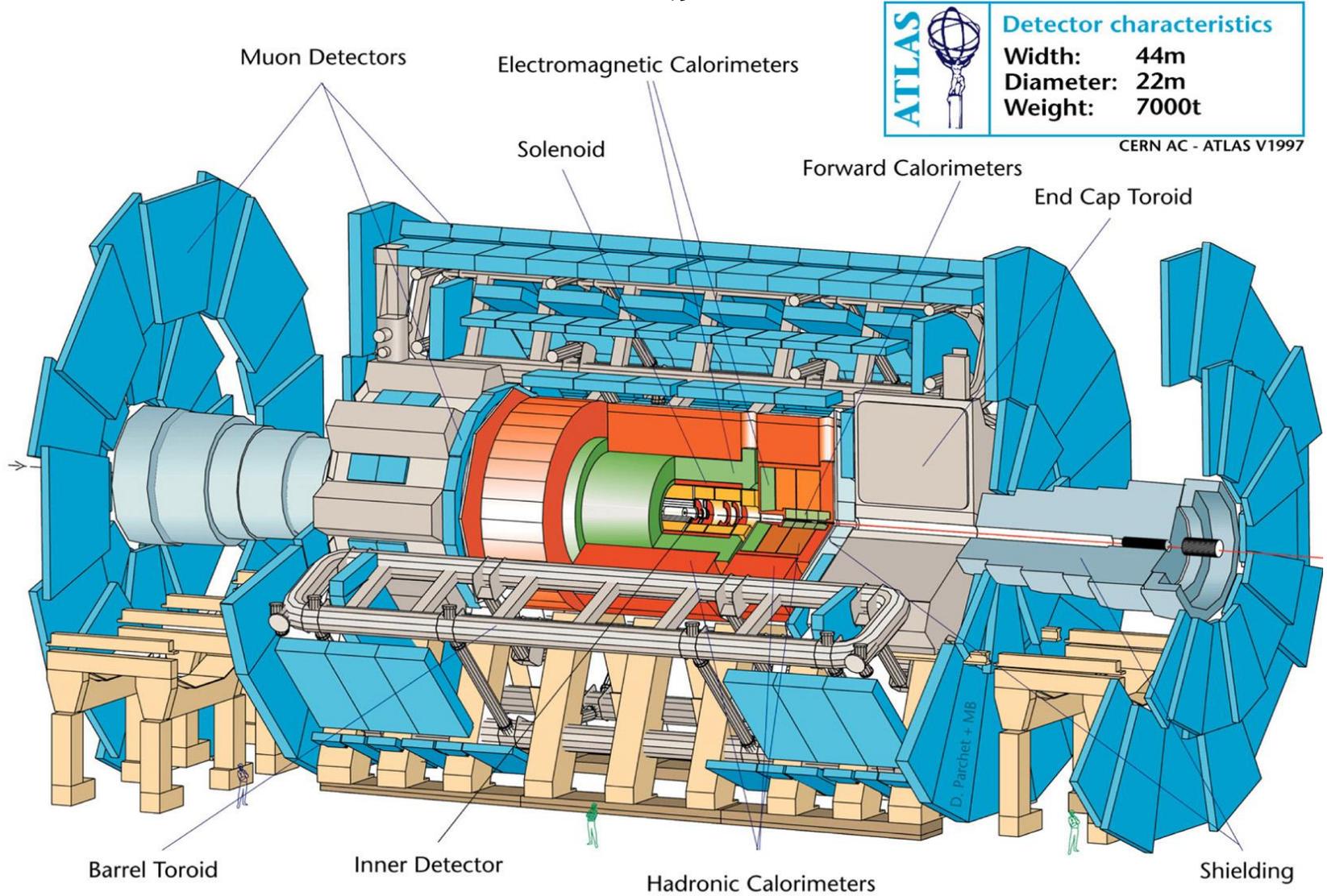
ATLAS/CMSがヒッグス粒子を発見。



- データ量は、積算ルミノシティ(単位  $b^{-1}$ )で測る。
  - 積算ルミノシティ  $L$ 
    - 生成される事象数  $n = \sigma \times L$
- (例)  $\sigma(H) \sim 49 \text{ pb}$ 、Run 2で生成されたヒッグス粒子は、  
 $49000[\text{fb}] \times 139[\text{fb}^{-1}] \sim 6.7\text{M}$ (個)

	year	$E_{CM}$ (TeV)	integ lumi [fb <sup>-1</sup> ]
Run 1	2011	7	5
	2012	8	21
Run 2	2015-2018	13	139
Run 3	2022-2025	13.6	250
HL-LHC	2029-2038	14	3000

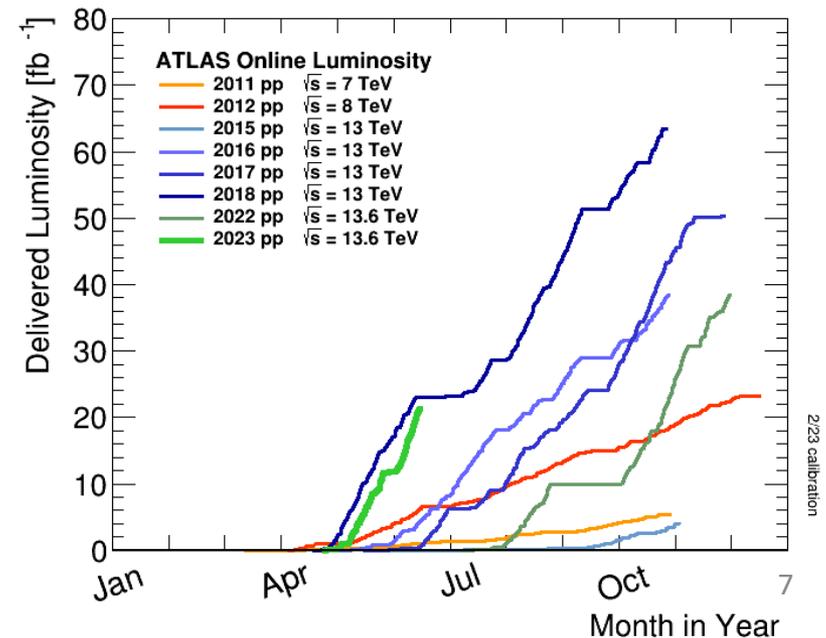
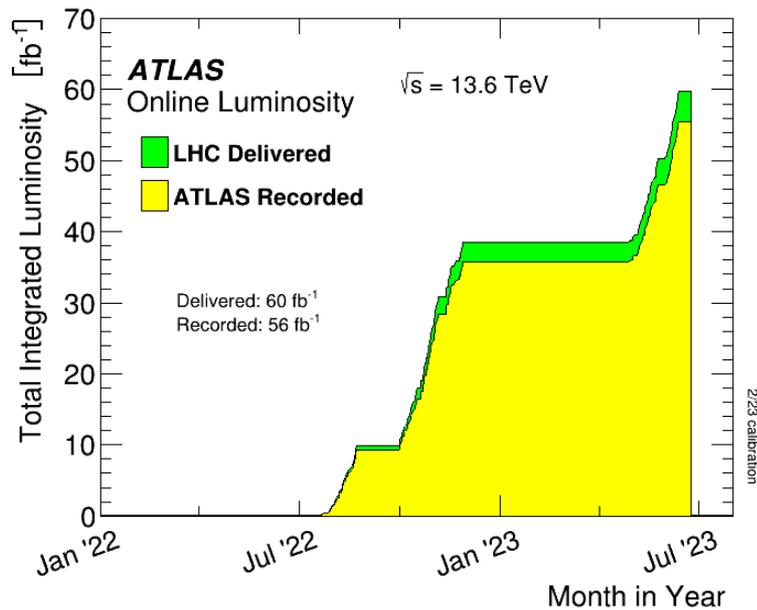
# ATLAS検出器



- 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...

# Run3の現状

- 2019-2021長期シャットダウン。加速器と検出器とも、高輝度化のためのアップグレードを行った
- 2022/7/5にRun 3運転が開始
  - 2022-2025に250 fb<sup>-1</sup>を蓄積予定。
  - 2022年に35.7fb<sup>-1</sup>を取得。
  - 2023年6月24日現時点で56fb<sup>-1</sup>を取得済み。
  - データ収集効率～93%



# 省電力での運転

CERN Accelerating science

Sign in Directory



ABOUT NEWS SCIENCE RESOURCES Q SEARCH | EN -

News › Opinion › Topic: At CERN

[Voir en français](#)

## Taking measures to save energy

CERN is taking measures to save energy over the coming winter and in the long term

11 OCTOBER, 2022 | By Raphaël Bello & Mike Lamont

In line with the strategic objectives of the current CERN Management, CERN has been working on a plan to improve the Organization's energy management in the long term. However, the current energy crisis makes the need to save energy ever more pressing now, and measures are being implemented for the coming winter to ensure that we play our part in mitigating the impact of the crisis. The 2022 year-end technical stop (YETS) will start on 28 November, two weeks earlier than initially planned. In 2023, the YETS is now scheduled to start at the end of October, with a curtailed operational year for the LHC and the operation of the full injector complex reduced by around 20% overall. Should things improve in the meantime, the 2023 plans will be revisited.

In addition, various measures are being implemented to save energy on the CERN campus. These include switching off street lighting overnight, using sleep mode for unoccupied meeting rooms and turning the heating down one degree. Plans have also been developed for reduced-power configurations to face possible load shedding should it be required by our electricity supplier, EDF.

Looking further ahead, work has been proceeding well with our application for [ISO 50001](#) energy management

2023年の運転時間は20%削減(→75日程度)  
限られた時間の中で、積算輝度(データ)を最大化する運転

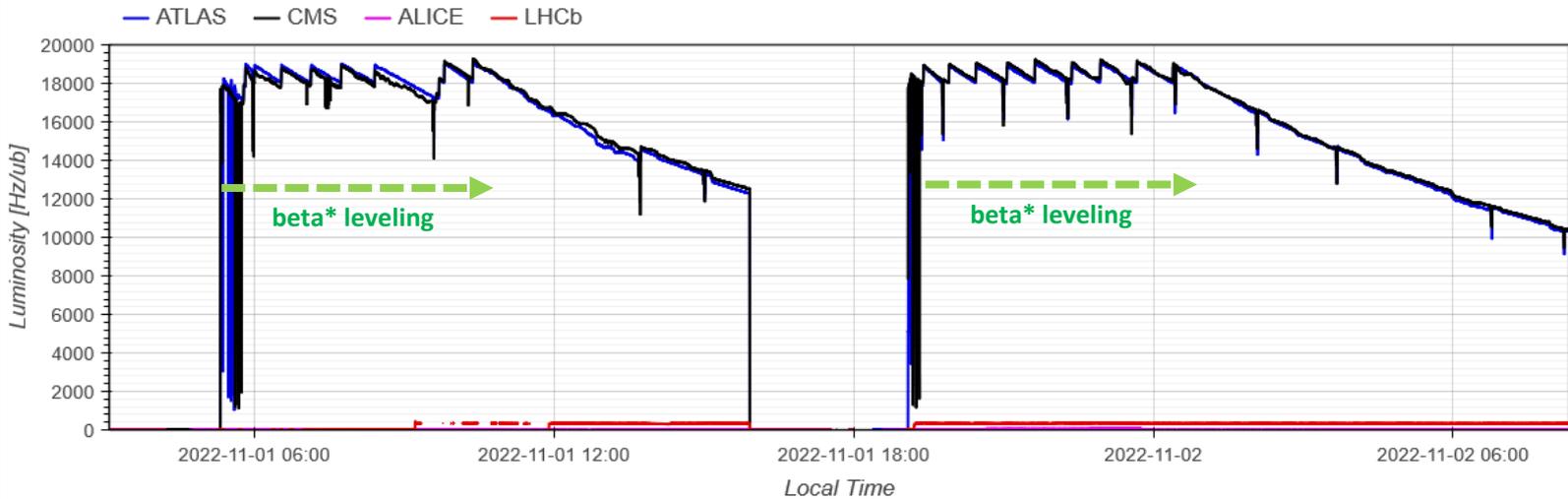
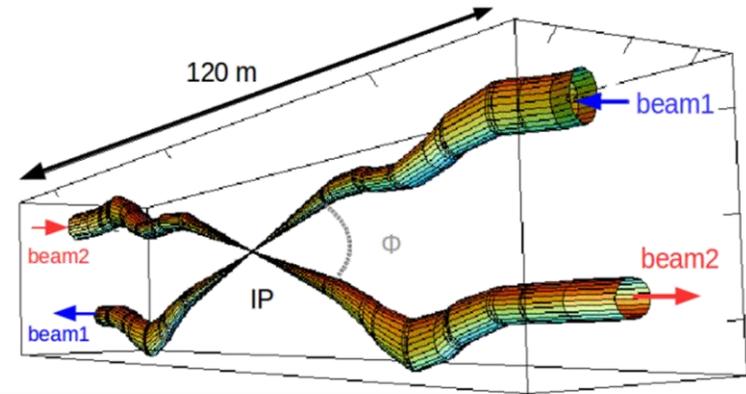
### Related Articles



# Impressive level of control, for example...

- Beta\* levelling routinely used for the first 5-6 hours of every fill

- Fully automated levelling for IP1 / IP5 ( $\mu = 54 \pm 2.5\%$ )
- Luminosity jumps below  $\sim 5\%$  (as requested by Experiments)
- Inner Triplet cooling for collision debris limited to  $\sim 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$



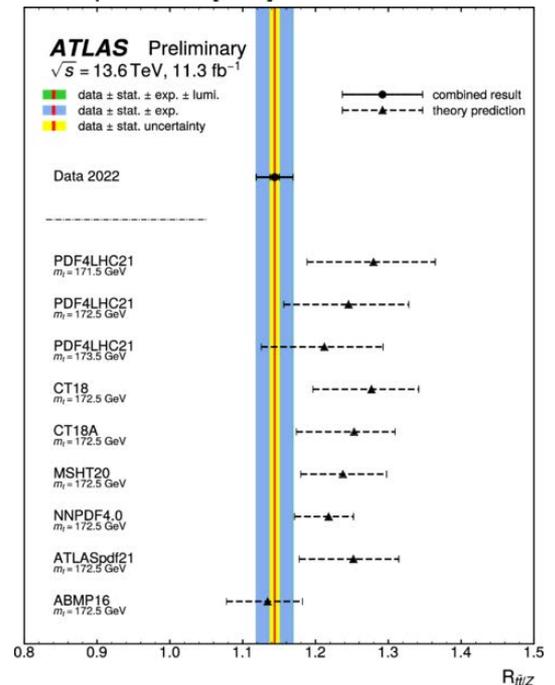
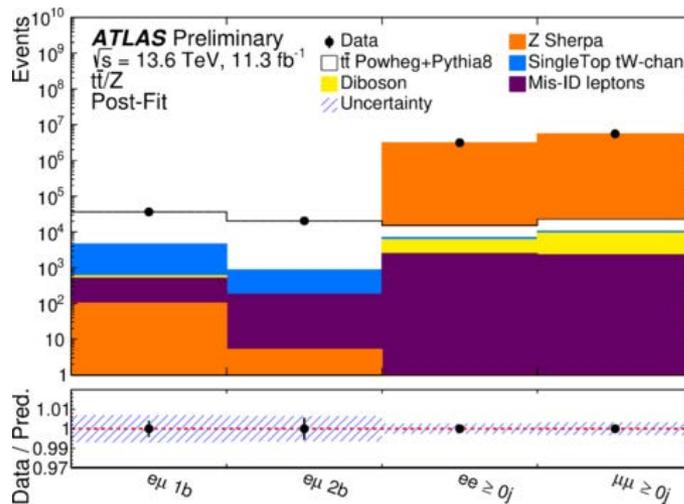
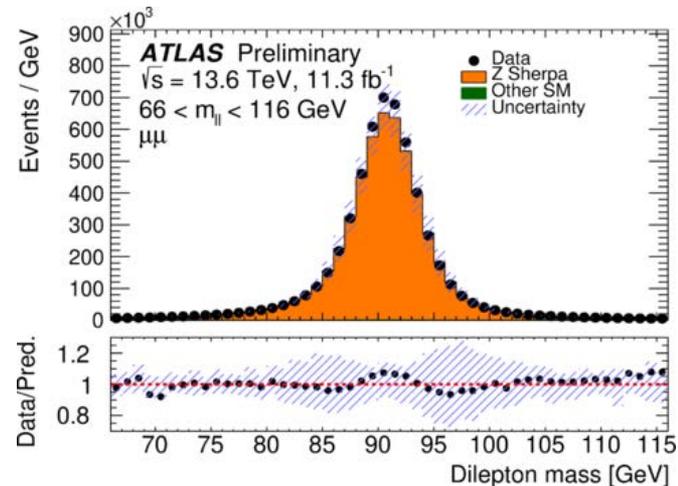
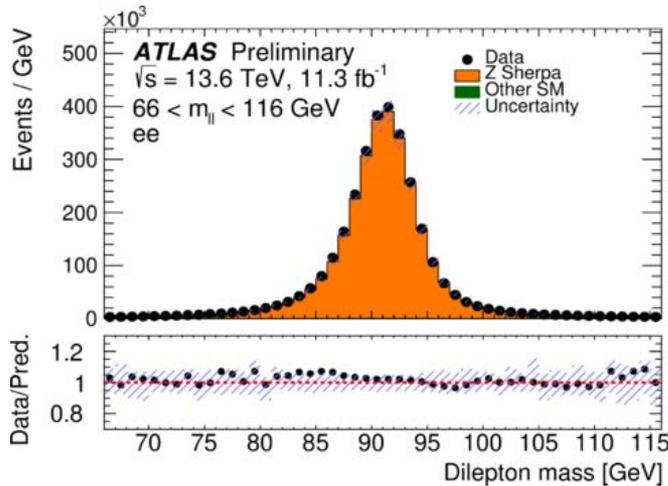
[Generated at: 2022-11-02 08:22:33]

# 物理過程の生成断面積

陽子・陽子衝突の重心系エネルギーが増加することにより、重い粒子の生成断面積が増える。

Channel	Run 2→ Run 3		Run 3→ HL-LHC
	13.6 / 13 TeV		14 / 13.6 TeV
H (ggF)	標準理論の過程	7%	6%
HH		11%	7%
tt		11%	6%
ttH		13%	7%
tttt		19%	11%
SUSY stop (1.2–1.5 TeV)		20–30%	14–19%
Z' (5–6 TeV)		50–70%	30–40%
QBH (9.5 TeV)	重い新粒子生成	250%	100%

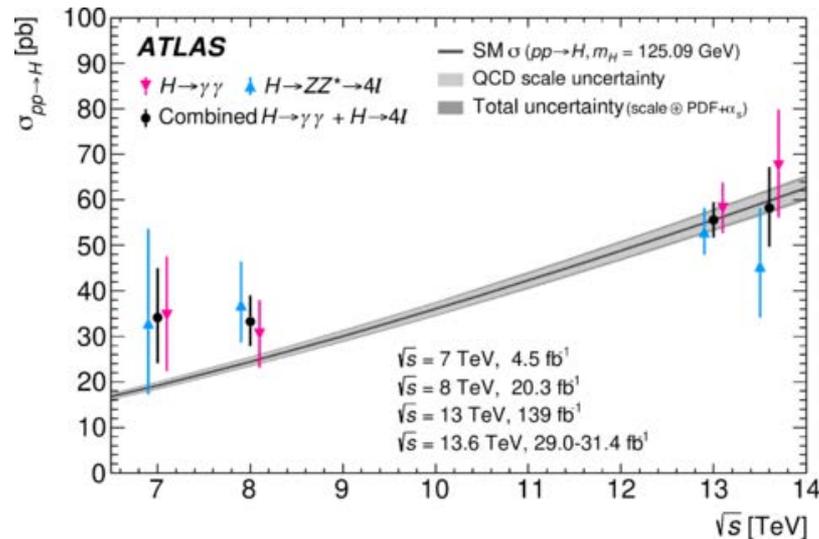
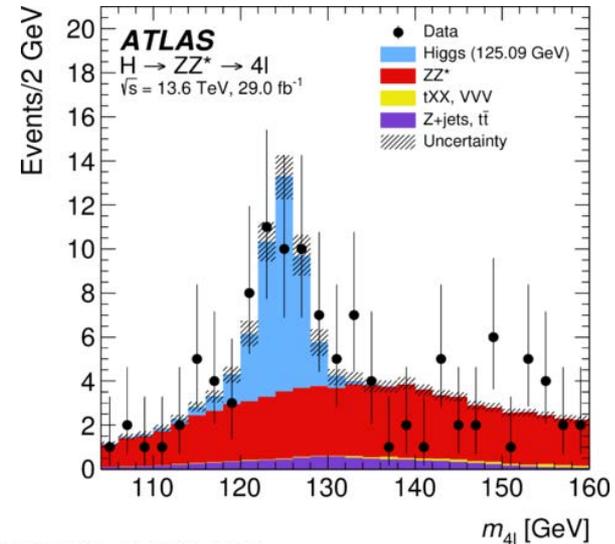
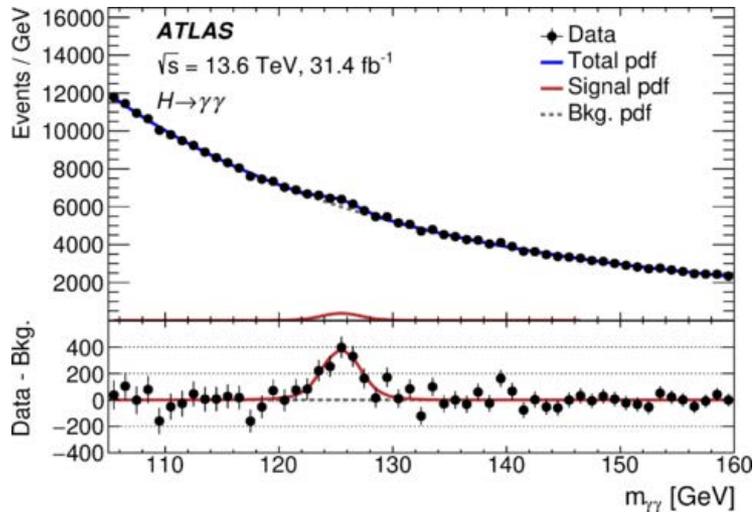
# $t\bar{t}/Z$ Cross Section Ratio in 2022 Data



- $\sigma_{t\bar{t}} = 859 \pm 4(stat) \pm 22(syst) \pm 19(lumi) \text{ pb}$
- $\sigma_{Z \rightarrow \ell\ell} = 751 \pm 0.3(stat) \pm 15(syst) \pm 17(lumi) \text{ pb}$
- $\sigma_{t\bar{t}}/\sigma_{Z \rightarrow \ell\ell} = 1.144 \pm 0.006(stat) \pm 0.022(syst) \pm 0.003(lumi)$

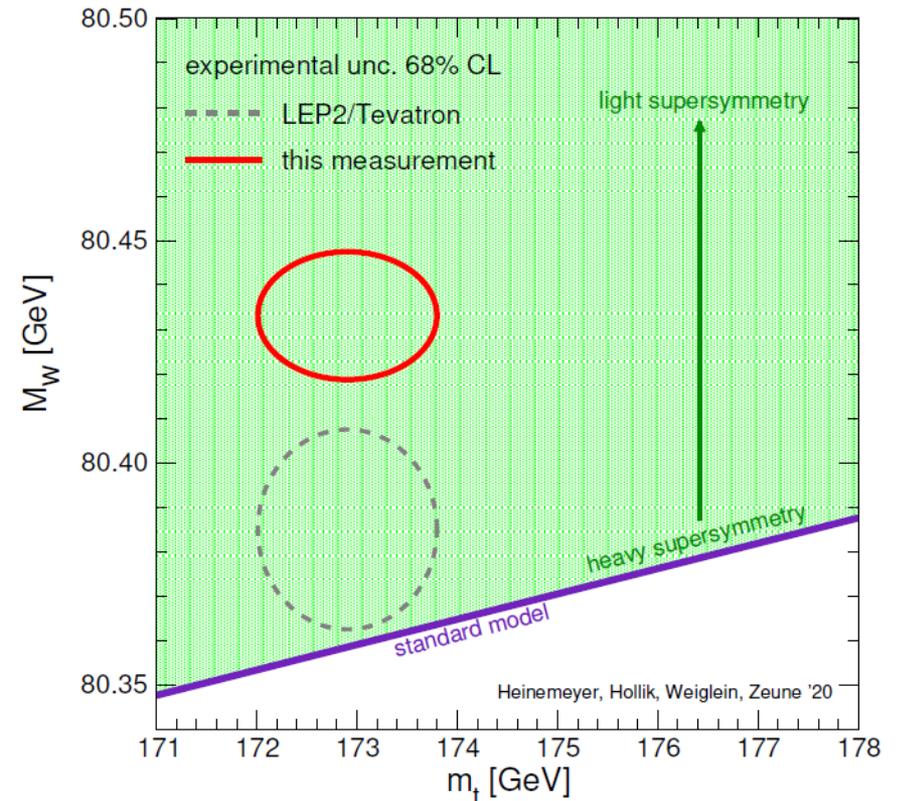
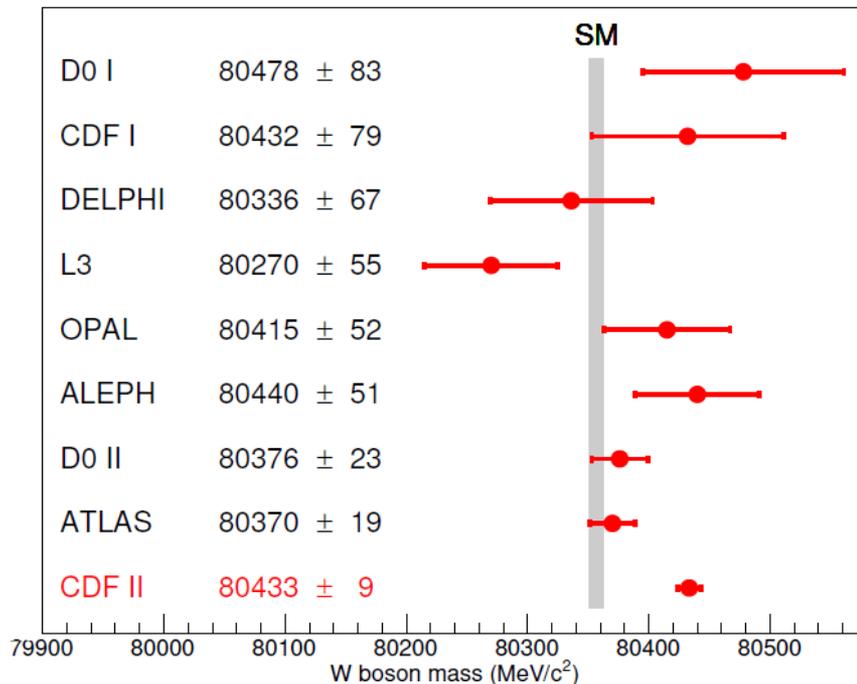
# $H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ in 2022 Data

- $H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ は、ヒッグス粒子発見時のメインチャンネルだった
- 質量やCP測定など、ヒッグス粒子の精密測定がしやすいチャンネル



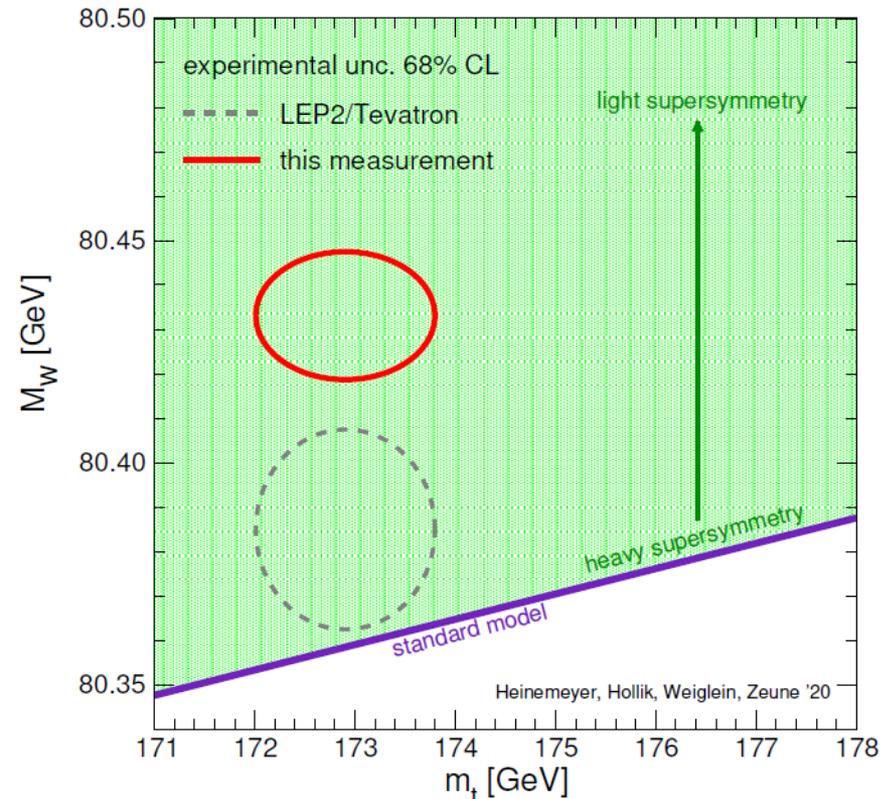
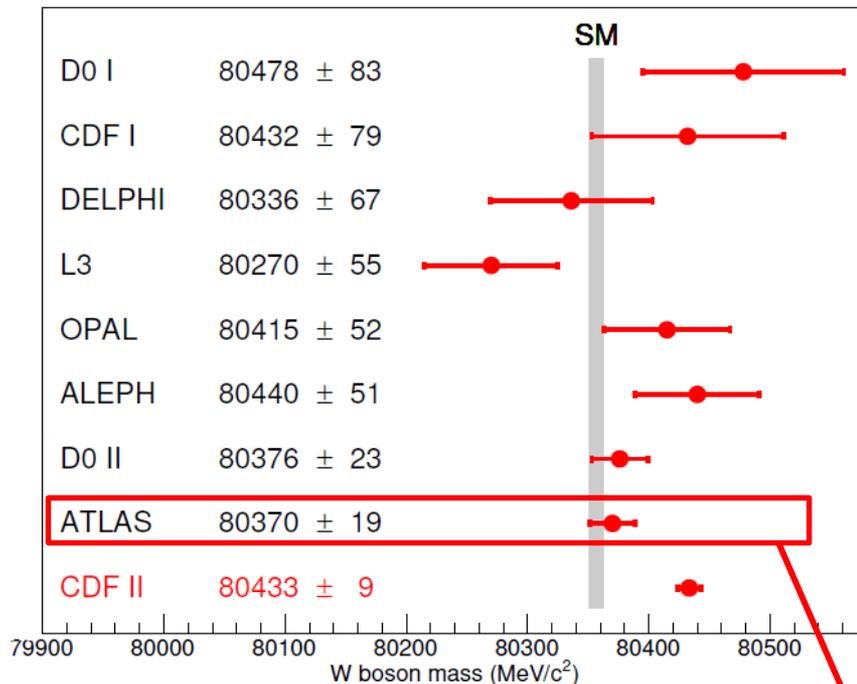
# CDFによるW質量のアップデート (2022)

- CDF update:  $M_W = 80\,433.5 \pm 9.4$  MeV
  - More precise than all previous measurement combined.
  - Tension of  $7\sigma$  with SM expectation.
- SM expectation:  $M_W = 80\,357 \pm 6$  MeV



# CDFによるW質量のアップデート (2022)

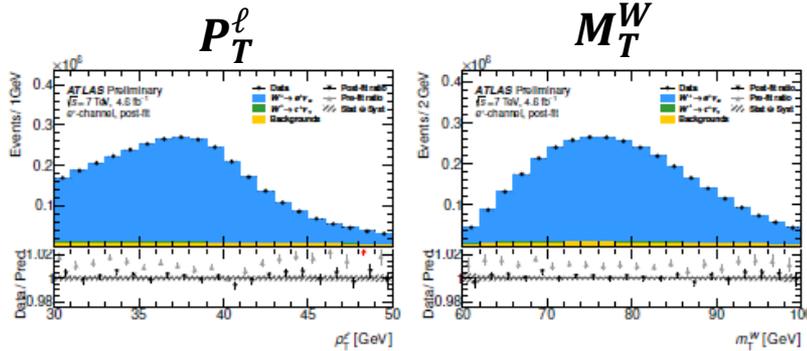
- CDF update:  $M_W = 80\,433.5 \pm 9.4$  MeV
  - More precise than all previous measurement combined.
  - Tension of  $7\sigma$  with SM expectation.
- SM expectation:  $M_W = 80\,357 \pm 6$  MeV



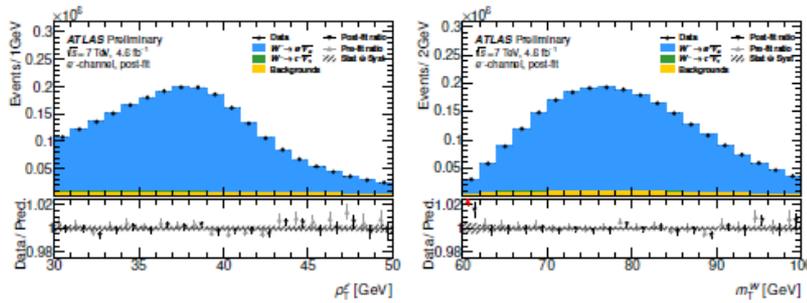
7 TeVデータを解析しなおし、2023年にアップデート

# ATLAS Run1 7 TeV dataでのW質量

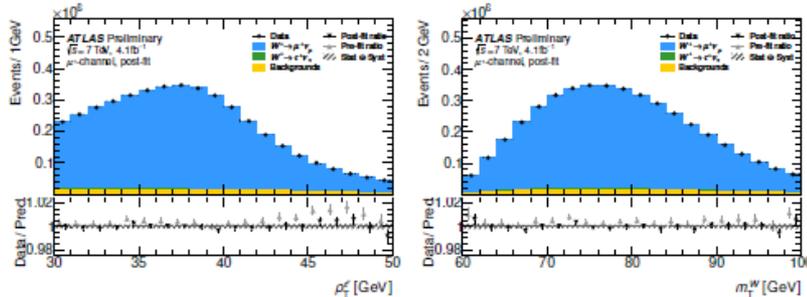
$$W^+ \rightarrow e^+ \nu_e$$



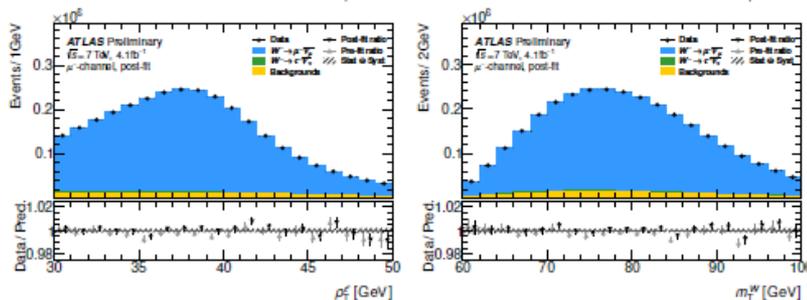
$$W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$$



$$W^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$$



$$W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$$



2018論文からの変更点

1. Profile Likelihoodフィッティング手法を使用
  - 2018論文は、templateフィッティングだった
2. 最新のPDF関数を使用
  - CT10 → CT18

2018年論文

$$m_W = 80370 \pm 19 \text{ MeV}$$

2023年アップデート

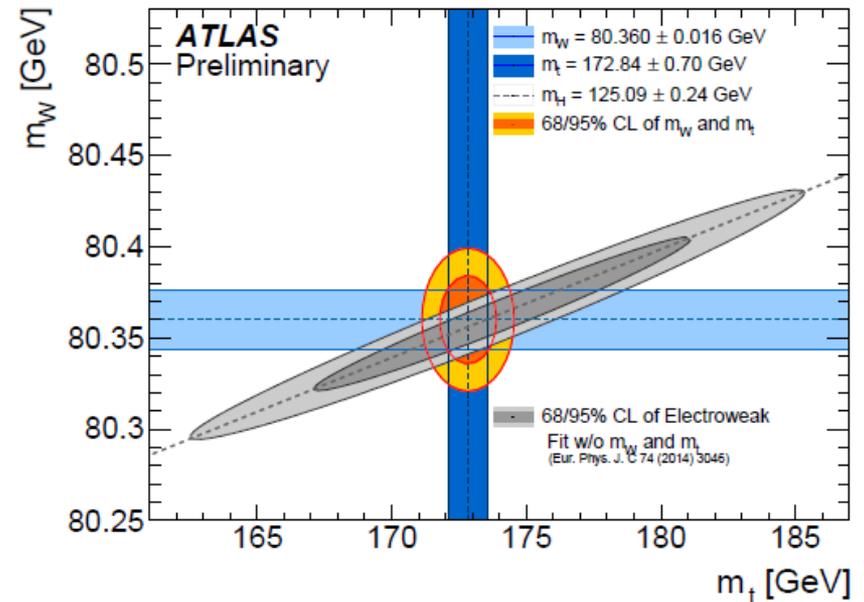
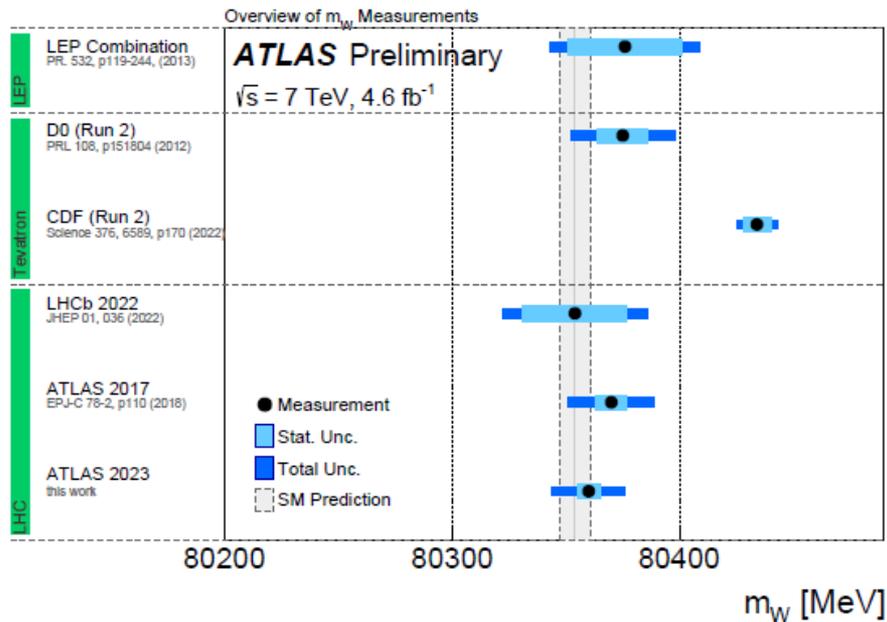
$$m_W = 80360 \pm 16 \text{ MeV}$$

CDFの2022年結果

$$m_W = 80357 \pm 6 \text{ MeV}$$

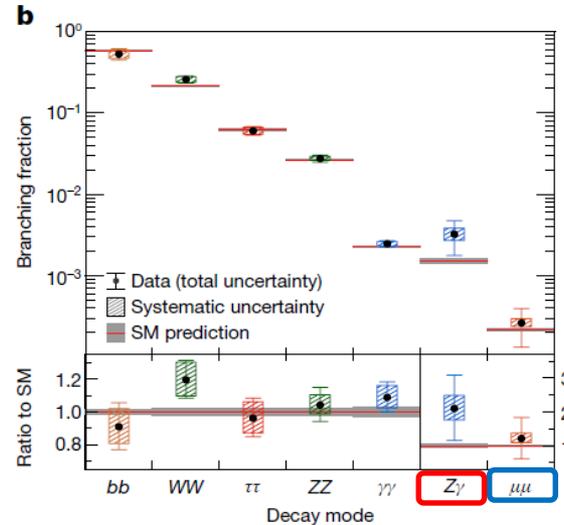
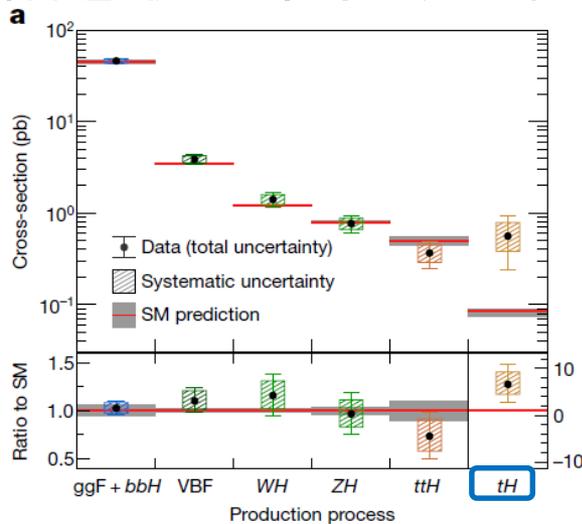
# ATLAS 2023 Result weighs in

- ATLASでのW質量測定結果と標準理論は、非常によく一致している



# ヒッグス粒子の生成・崩壊の精密測定

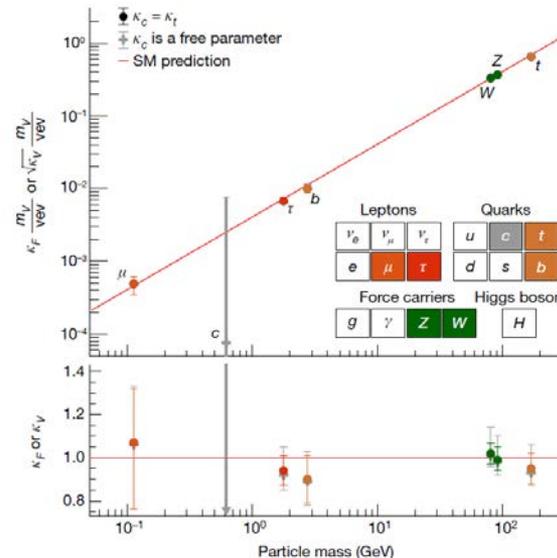
- ヒッグス粒子のさまざまな生成・崩壊過程を精密測定し、標準理論を厳しく検証する。



標準理論通りなら、ヒッグス粒子とフェルミオンの結合は、 $m_f$ に比例する:

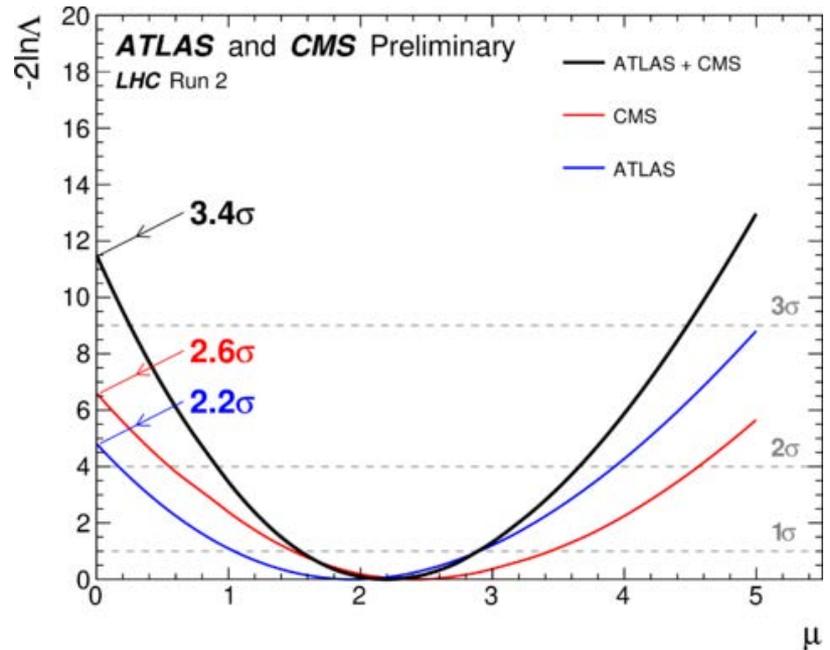
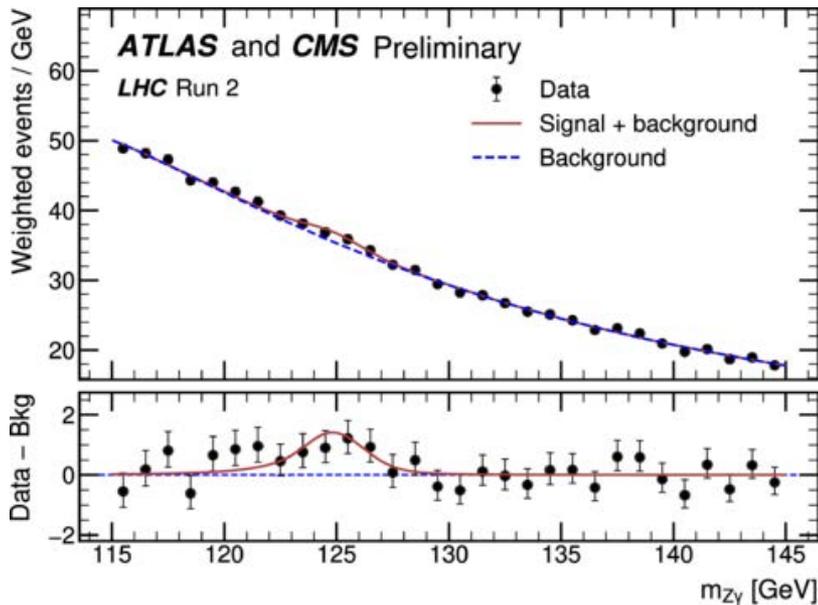
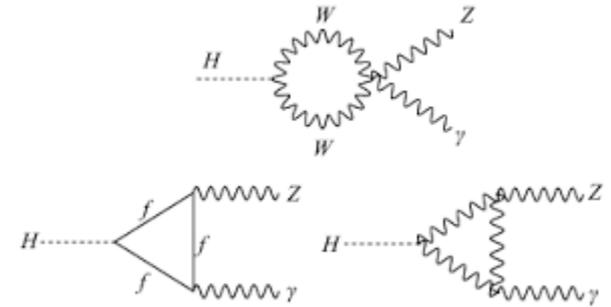
$$g_F = \sqrt{2} \frac{m_f}{v}$$

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



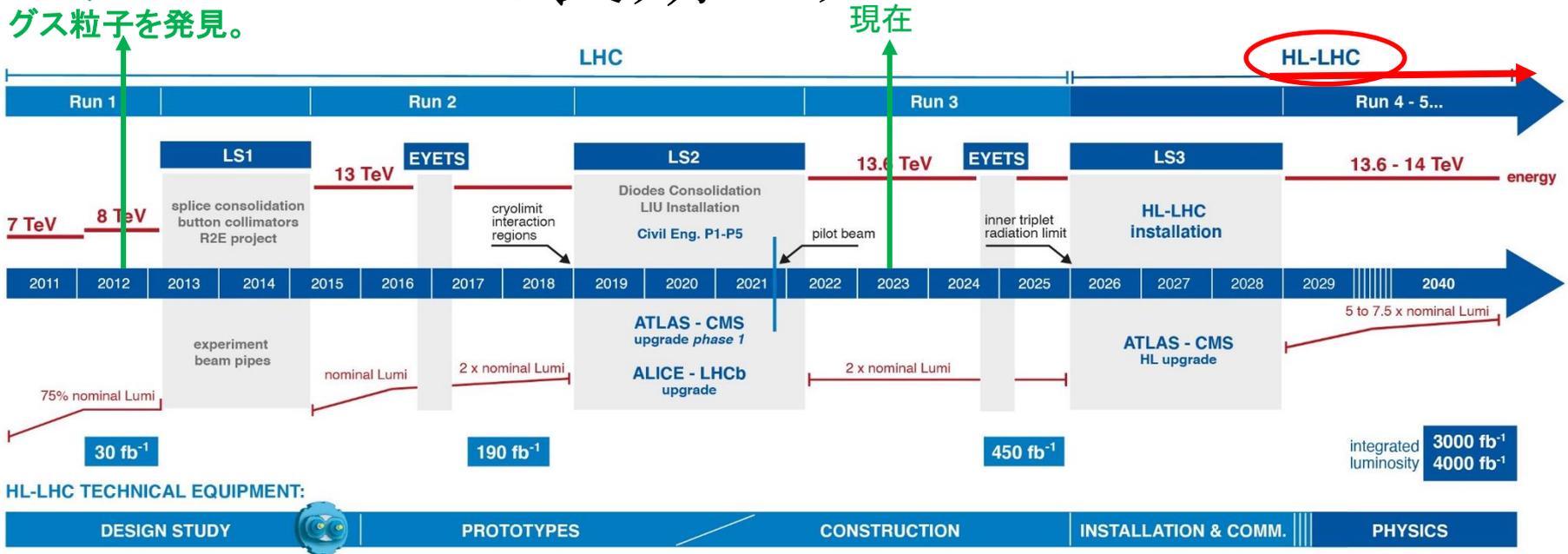
# $H \rightarrow Z\gamma$ の兆候

- CMSとのコンバイン解析で $3.4\sigma$ で  
 $H \rightarrow Z\gamma$ 過程の兆候を確認
- $Br(H \rightarrow Z\gamma) = (3.4 \pm 1.1) \times 10^{-3}$ 
  - $Br^{SM} \sim 1.5 \times 10^{-3}$
  - $\lesssim 1.9\sigma$ で標準理論と一致



# LHC長期スケジュール

ATLAS/CMSがヒッグス粒子を発見。



## HL-LHC TECHNICAL EQUIPMENT:



## HL-LHC CIVIL ENGINEERING:

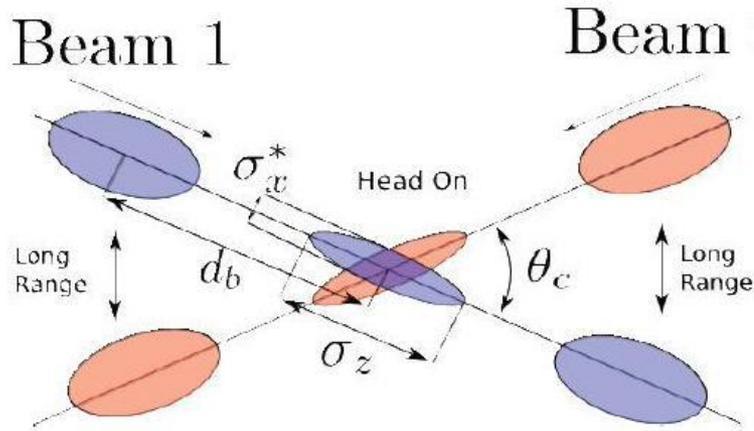


- データ量は、積算ルミノシティ(単位  $b^{-1}$ )で測る。
  - 積算ルミノシティ  $L$ 
    - 生成される事象数  $n = \sigma \times L$
- (例)  $\sigma(H) \sim 49 \text{ pb}$ 、Run 2で生成されたヒッグス粒子は、  
 $49000[\text{fb}] \times 139[\text{fb}^{-1}] \sim 6.7\text{M}$ (個)

	year	$E_{CM}$ (TeV)	integ lumi [fb <sup>-1</sup> ]
Run 1	2011	7	5
	2012	8	21
Run 2	2015-2018	13	139
Run 3	2022-2025	13.6	250
HL-LHC	2029-2038	14	3000

# パイラアップ事象

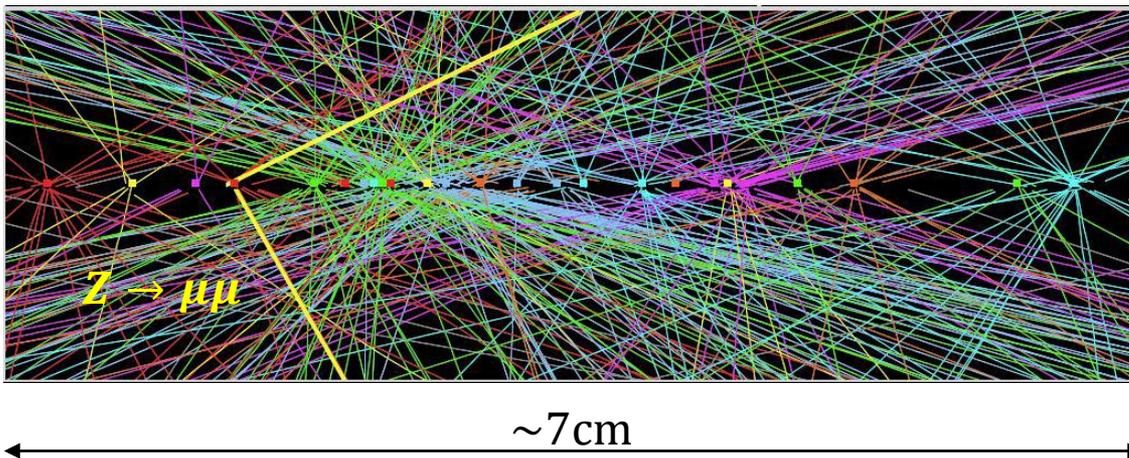
LHCではバンチ化した陽子ビームが衝突



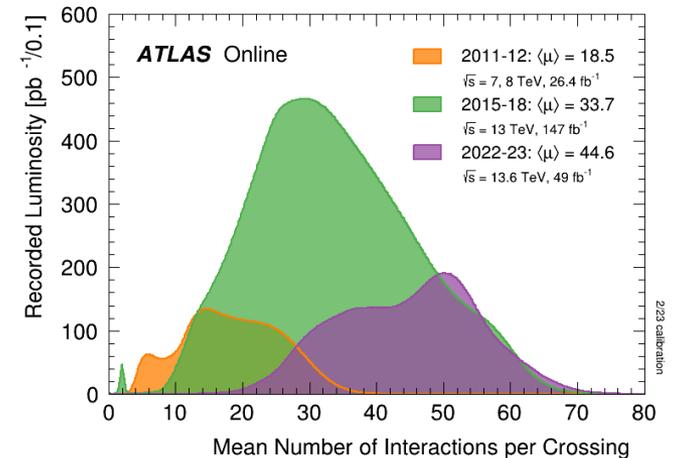
	LHC(2015)	HL-LHC
バンチ長(cm)	8	9
バンチ直径(cm)	8.5	7
バンチあたり陽子数	$11 \times 10^{10}$	$22 \times 10^{10}$
瞬間輝度( $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-2}$ )	$2.1 \times 10^{34}$	$5.0 \times 10^{34}$

1回のバンチクロッシングで複数のpp衝突が起きる

2012年のデータ中に見つかった25 vertex事象

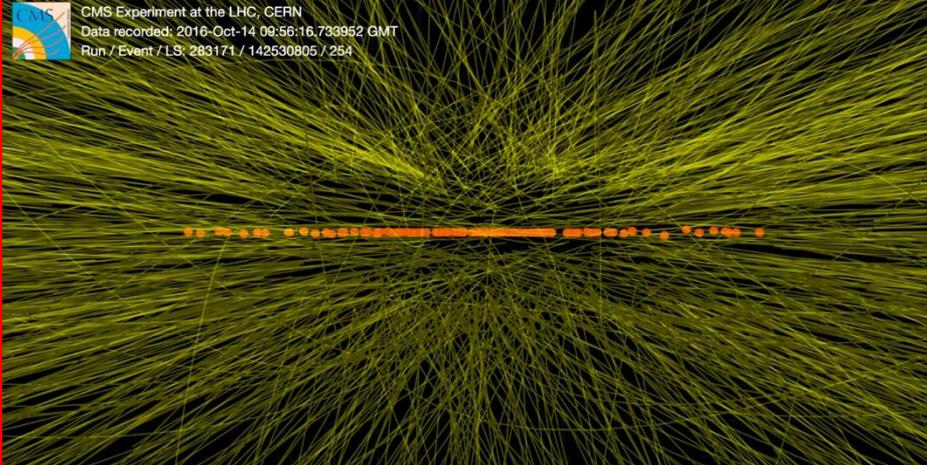


Run3では、平均50vertexらい



## HL-LHCでは。。。

~100 vertex事象

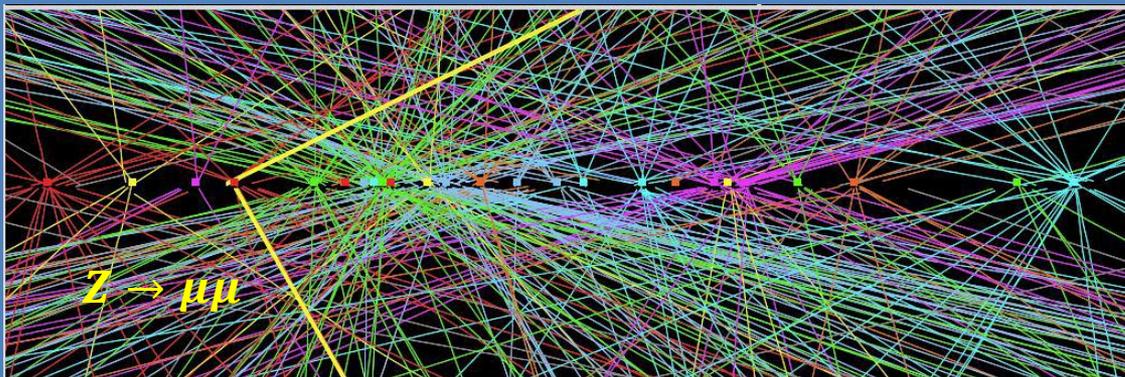


1回のバンチクロッシングで平均~280の  $pp$  衝突が起きる。  
従来の検出器では、あまりに多くの粒子が通過するため、鳴りっぱなしになってしまう。

- ⇒チャンネルを細分化し、放射線に強い検出器が必要。
- ⇒Inner Detectorをすべてシリコン検出器に置き換えたITkにアップグレード。

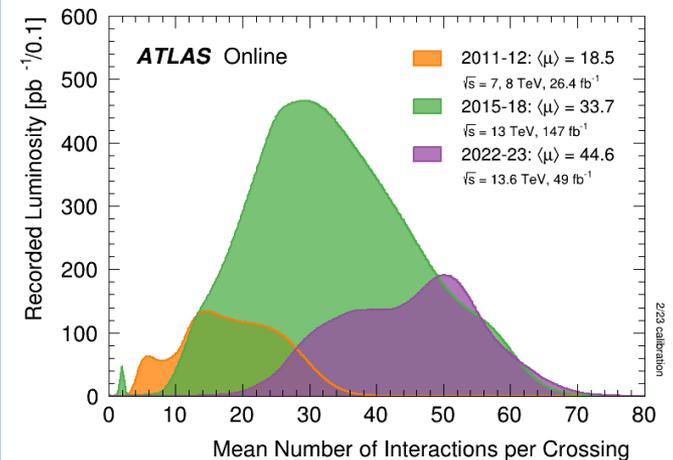
1回のバンチクロッシングで核   $pp$  衝突が起きる

2012年のデータ中に見つかった25 vertex事象



現在のLHCの典型的なパイルアップ

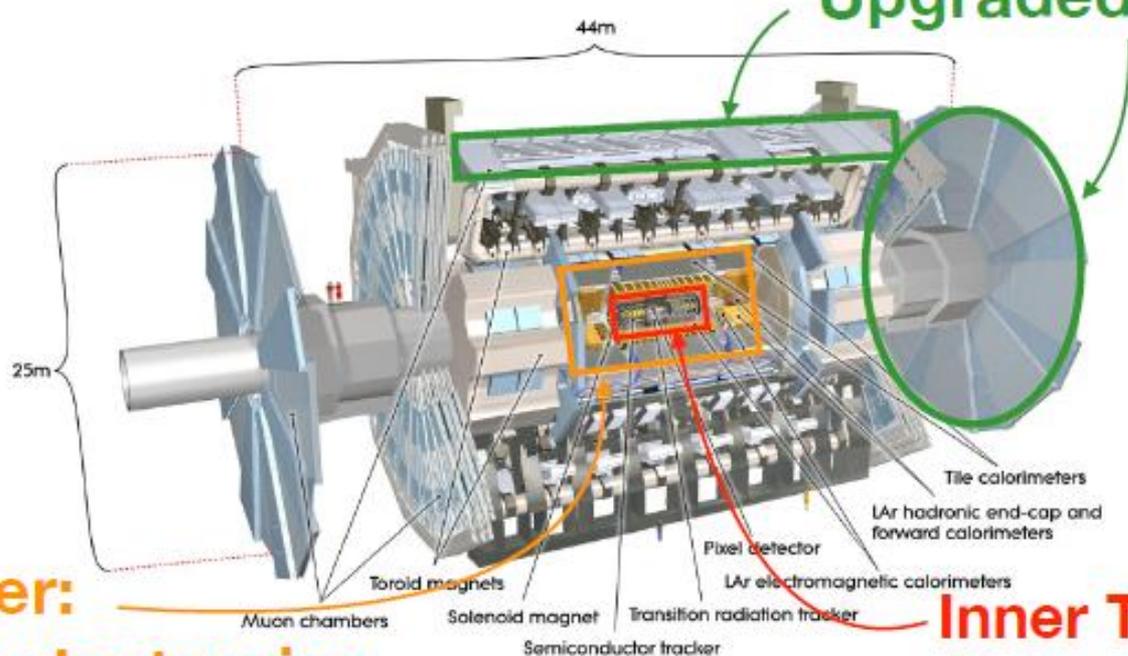
Run3では、平均50vertexらい



# ATLAS Detector Upgrade for HL-LHC

- Upgraded / consolidated most of parts due to...
  - ➔ Higher particle density
  - ➔ Higher radiation damage
  - ➔ Higher trigger rate

**Muon System:  
Chamber upgrade,  
Upgraded electronics**

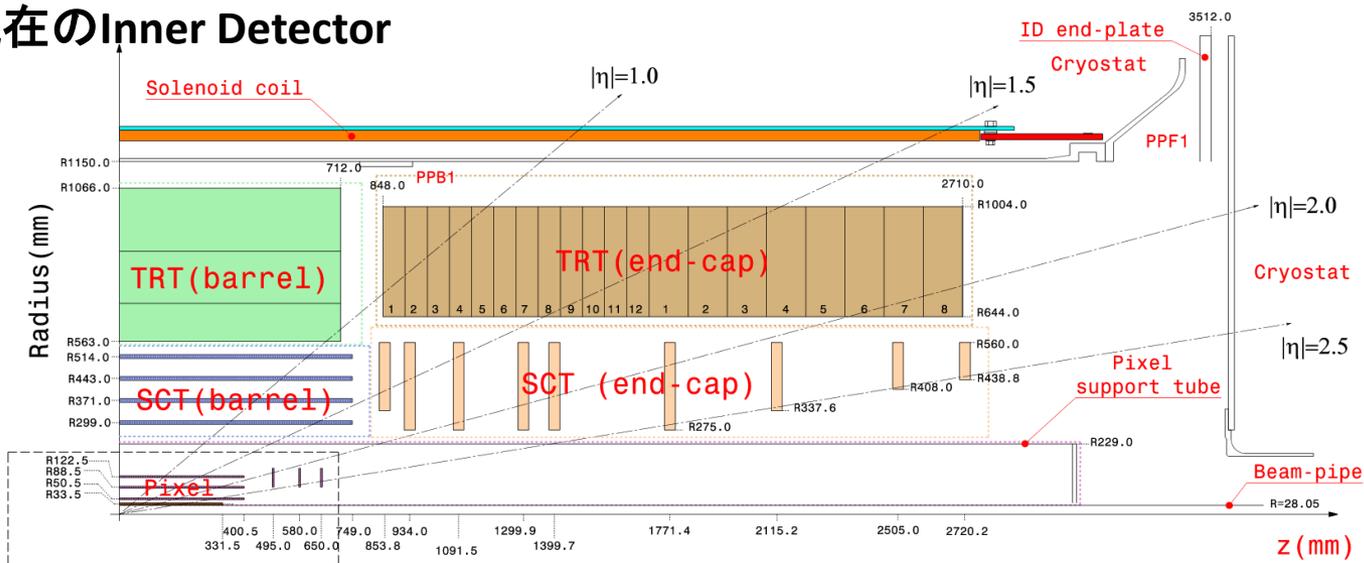


**Calorimeter:  
Upgraded electronics**

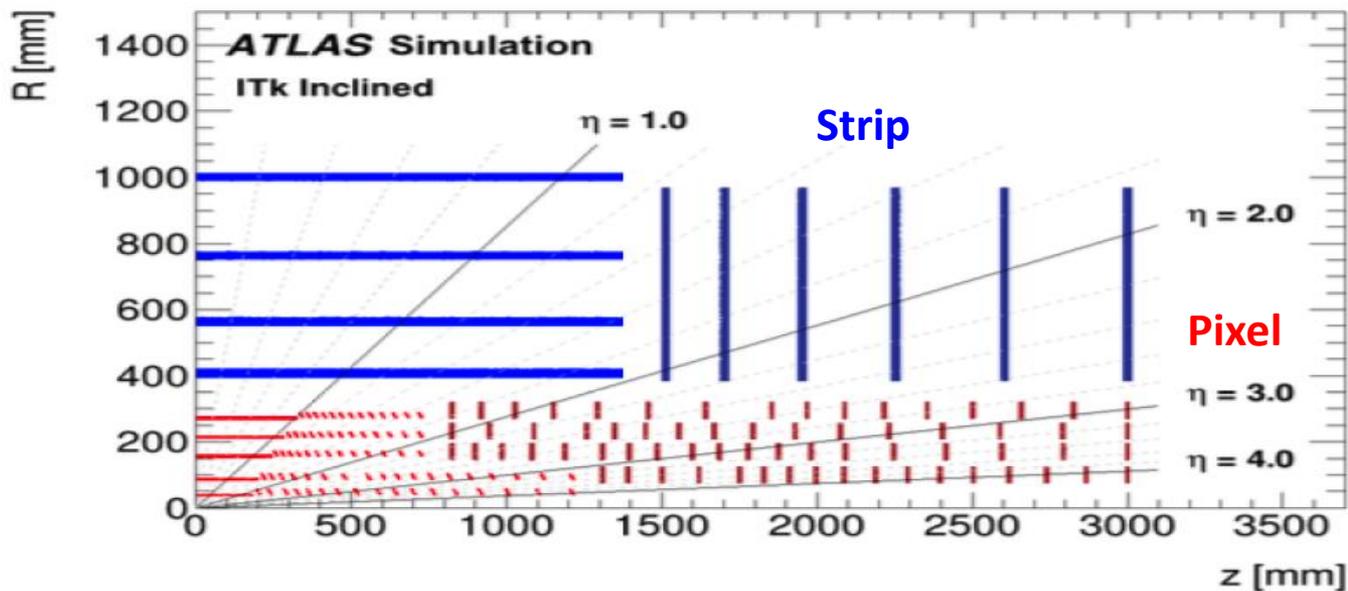
**Inner Tracker:  
Fully replaced.**

# 現在の内部検出器とITk—レイアウト比較

## 現在のInner Detector



## ITk



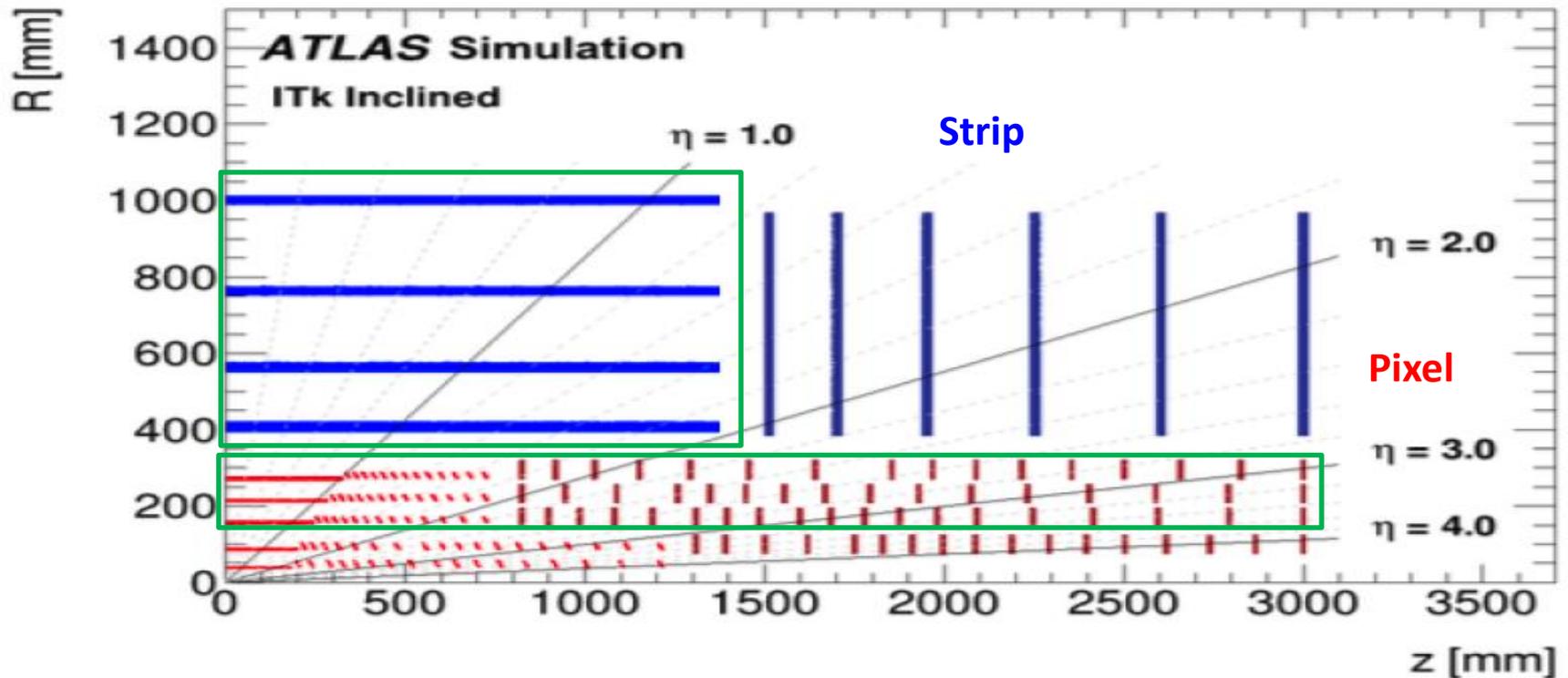
# 日本グループの分担

ストリップ

バレル部の半数のセンサーを製造

ピクセル

Layer 2-4の約1/4のモジュールを製造

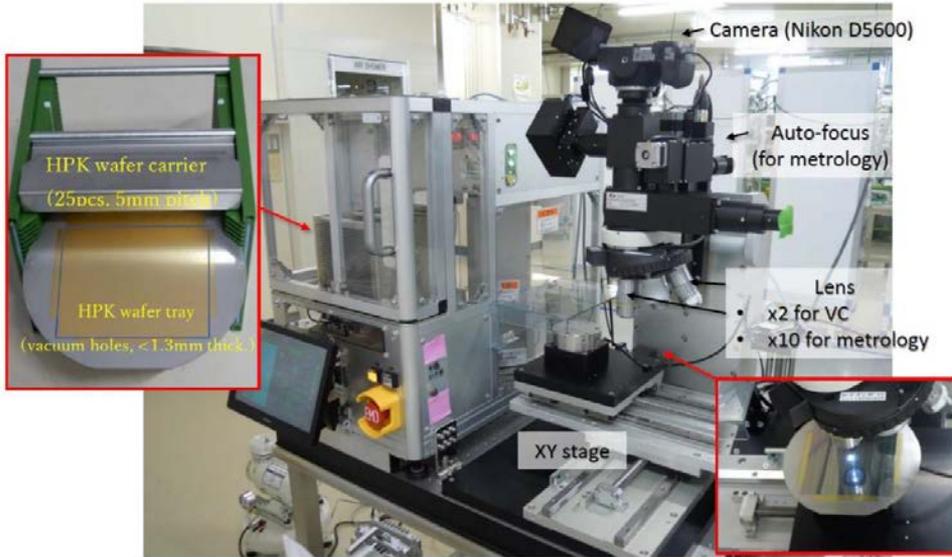


2023年度は、ストリップもピクセルも量産の段階。

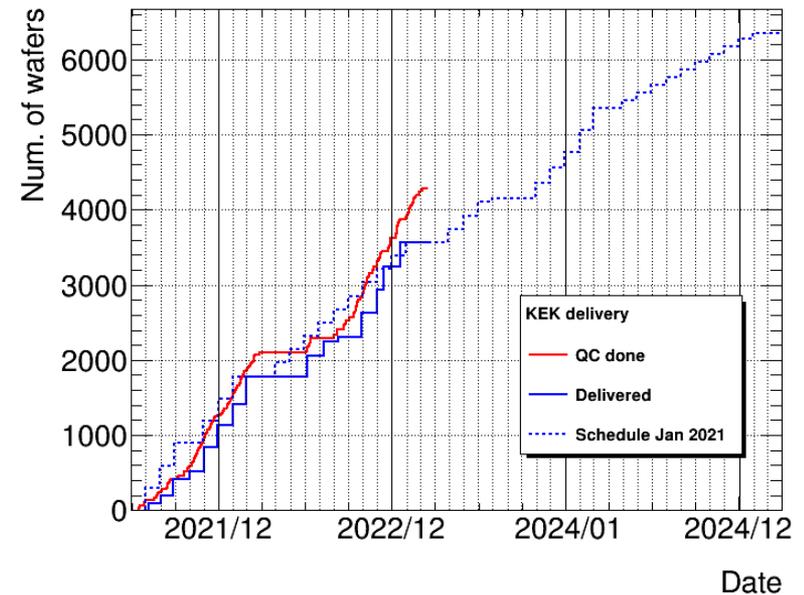
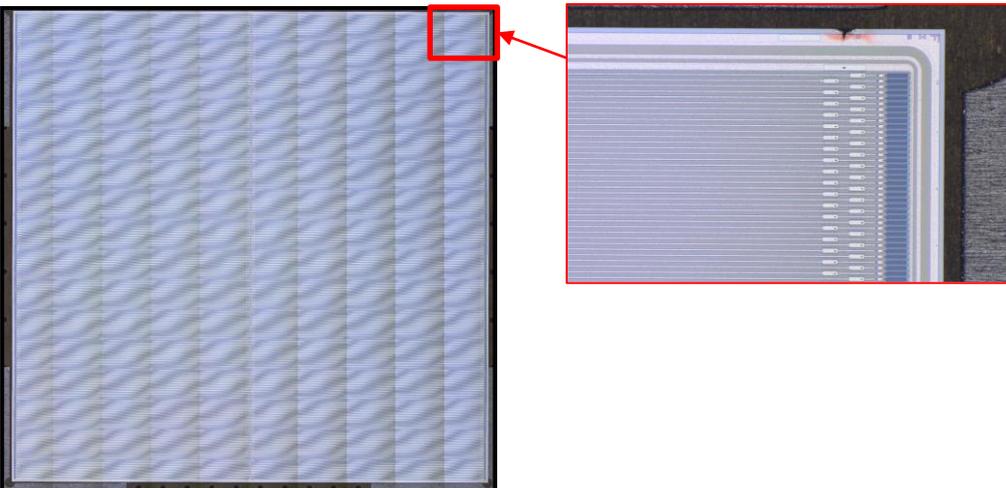
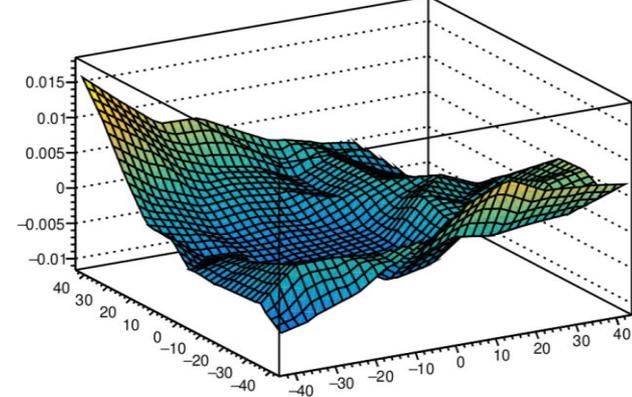
- ピクセルはセンサー＋読み出しをモジュールに組み上げる作業。
- 製造品をCERNに送る前に測定し、性能をチェック=QC, Quality Control。
- 製造品をサンプリングし、放射線照射試験により放射線耐性をチェック=QA, Quality Assurance。

# ストリップQC

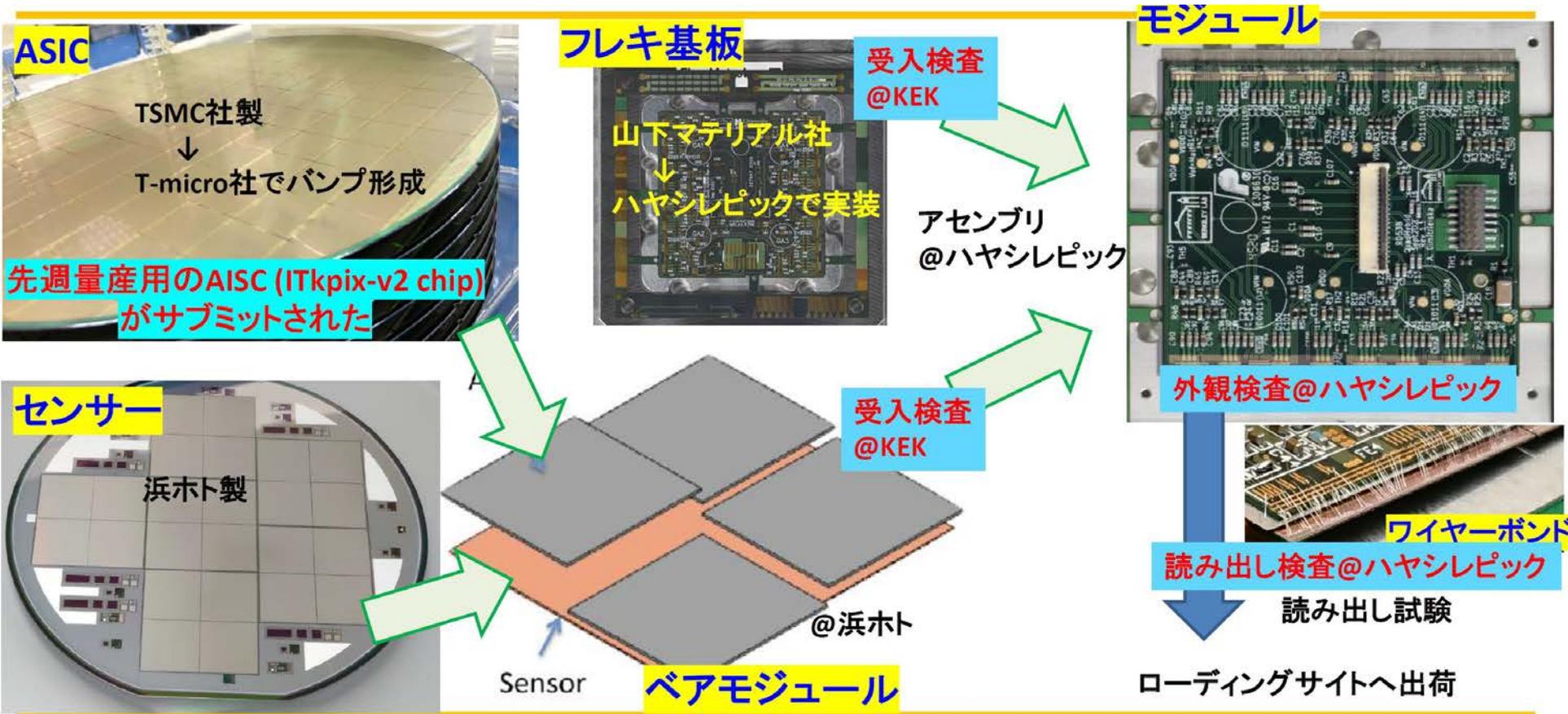
- 浜ホトにて写真撮影＋メトロロジー、筑波大からはリモートでモニター、解析。



たわみ測定



# ピクセルモジュールの量産



日本グループで2,200モジュールを担当。

# ピクセル量産中のKEKでのQC、QA測定

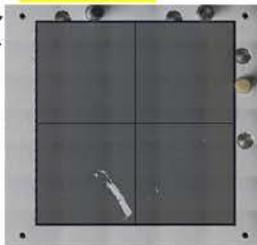
## QC測定のセットアップ

*Metrology machine @ KEK*

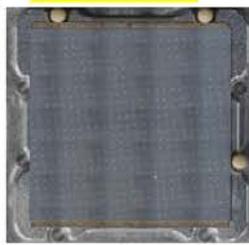


## 外觀写真

センサー



モジュール



## サイズ測定



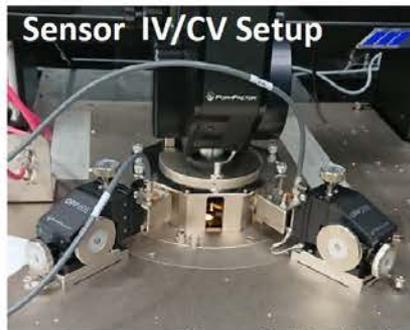
## 厚み測定



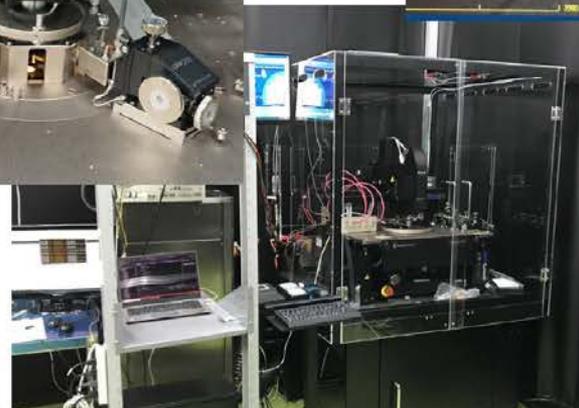
## センサーQA測定のセットアップ

*Semi-Auto Prober @ KEK*

Sensor IV/CV Setup

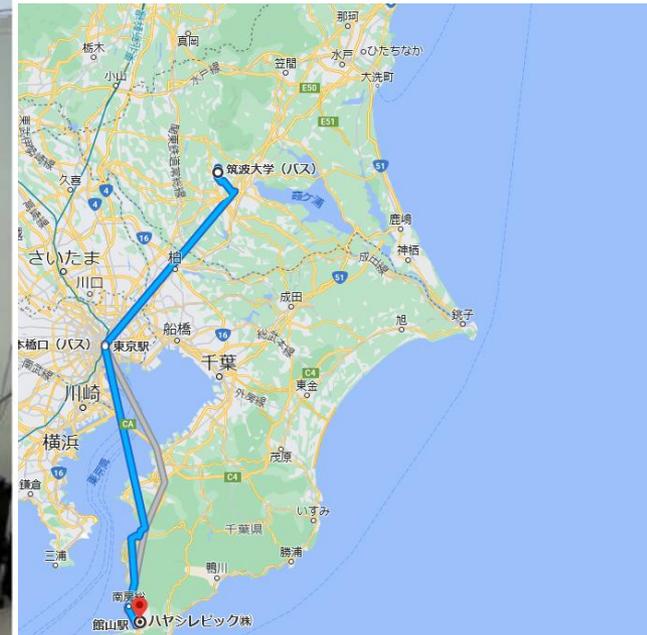


## モジュールIV測定



# ピクセルモジュールの量産

- モジュール製作は、ハヤシレピック社内のクリーンルームで、ITk日本グループのスタッフ・学生がシフトを取って行う。



2020

2021

2022

2023

2024

2025

Pixel

Design validation

Preparations for  
pre-production

Pre-  
production

Mass production

# ピクセルモジュールの量産

- モジュール製作は、ハヤシレピック社内のクリーンルームで、ITk日本グループのスタッフ・学生がシフトを取って行う。

熱サイクル用恒温槽

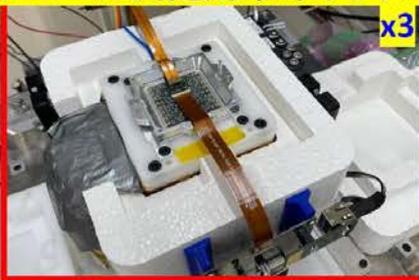


外観検査装置

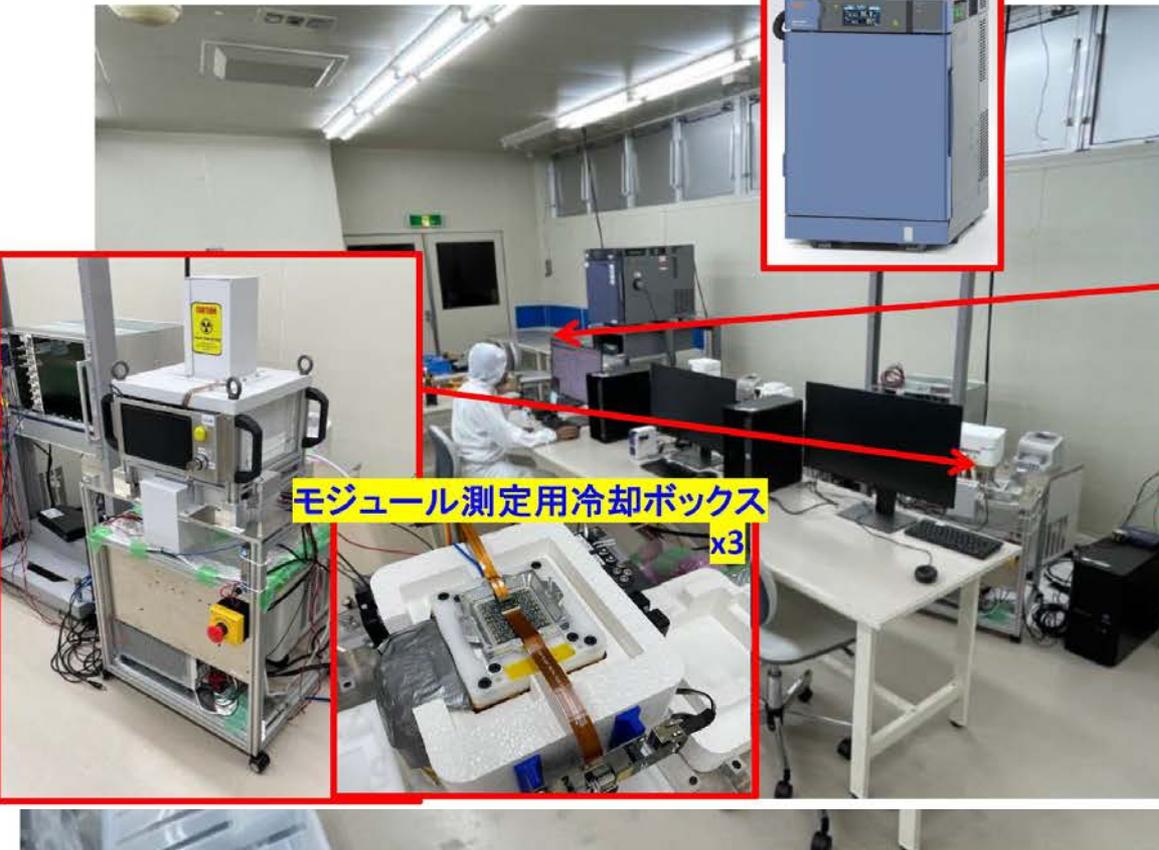
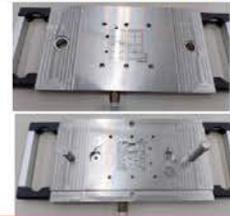


モジュール測定用冷却ボックス

x3



アセンブリツール



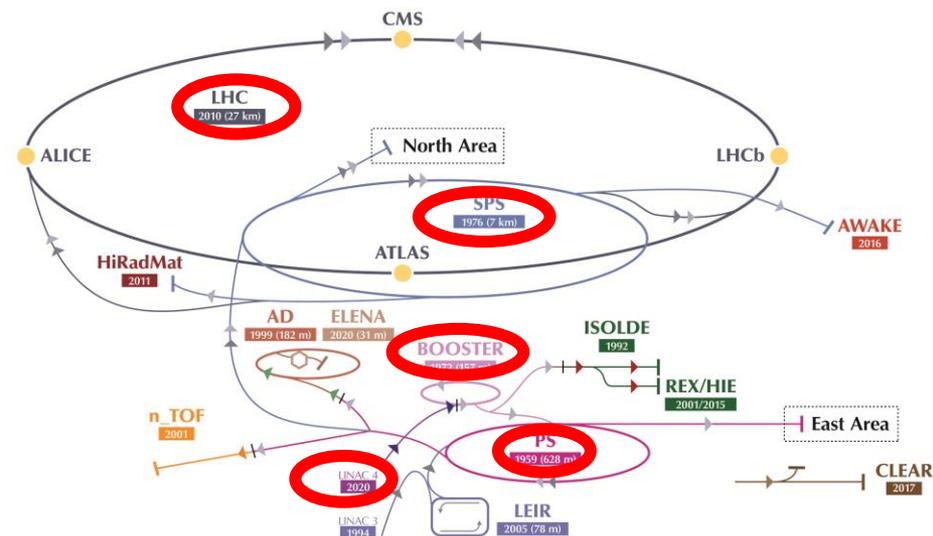
# まとめ

- ATLAS実験では、LHCによる世界最高エネルギーの陽子・陽子衝突データを取得、解析している。
- 2022年にはRun3実験が始まった。節電要請の中で、短縮したビーム時間で最大のデータを取得する運転を行っている。
- Run3の13.6 TeVデータの解析結果が、すでにいくつか公表されている。
  - $\sigma_{t\bar{t}}/\sigma_Z$
  - $H \rightarrow \gamma\gamma, H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$
- Run2データの解析も、続いている。
- ITkの量産体制について
  - ストリップセンサーの量産が順調に進んでいる。
  - 2023年度にはPixelモジュールのPreproductionが本格化する。

backup

# LS2での加速器のアップグレード

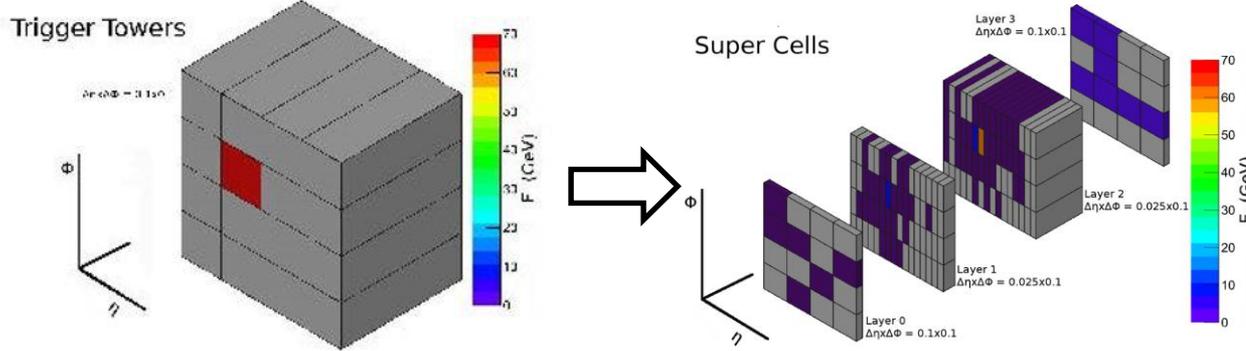
- LS2 (2019-2021)
  - Run3の準備とメンテナンスだけでなく、HL-LHCに向けての加速器アップグレードも多く行われた。
- 陽子ビームの強度を上げるために、Linacで $H^-$ を加速する。
  - Linac 2 をLinac 4で置き換え。
  - Booster injectionをアップグレード。
  - SPSのRFをアップグレード:真空管を半導体トランジスターに交換。
- ビームエネルギーの増強(to 6.8 TeV).
- 磁石の交換,その他のメンテナンス, ...



# ATLAS LS2 Upgrade: L1 Calo Trigger

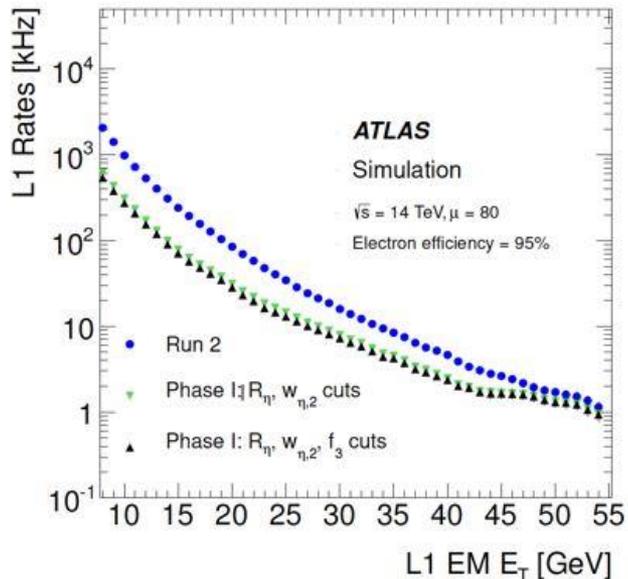
トリガー用読み出しを細分化することで、電子、光子トリガーへのバックグラウンドの影響を減らす。

トリガーエレクトロニクスアップグレード。



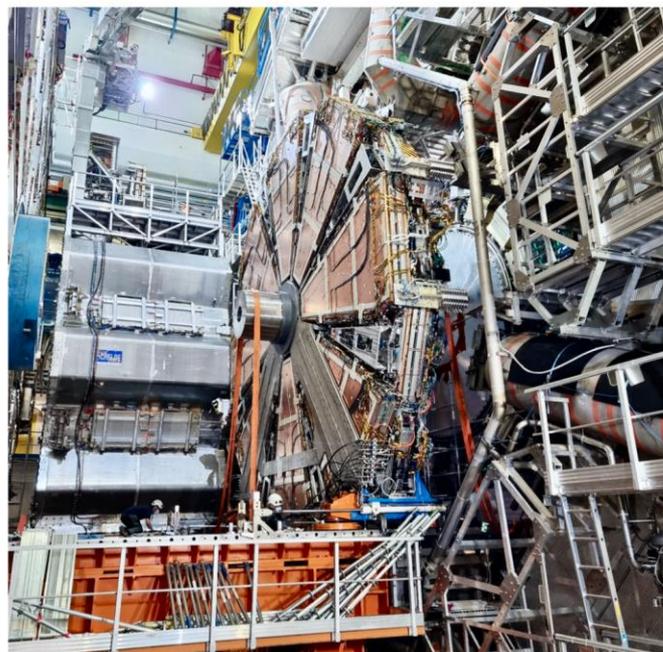
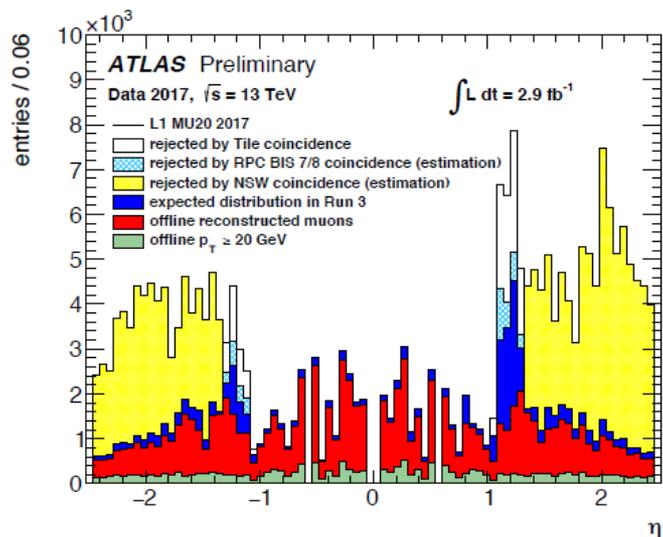
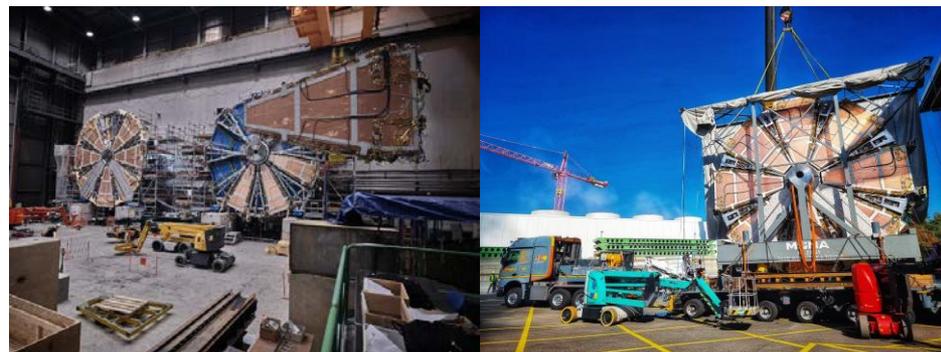
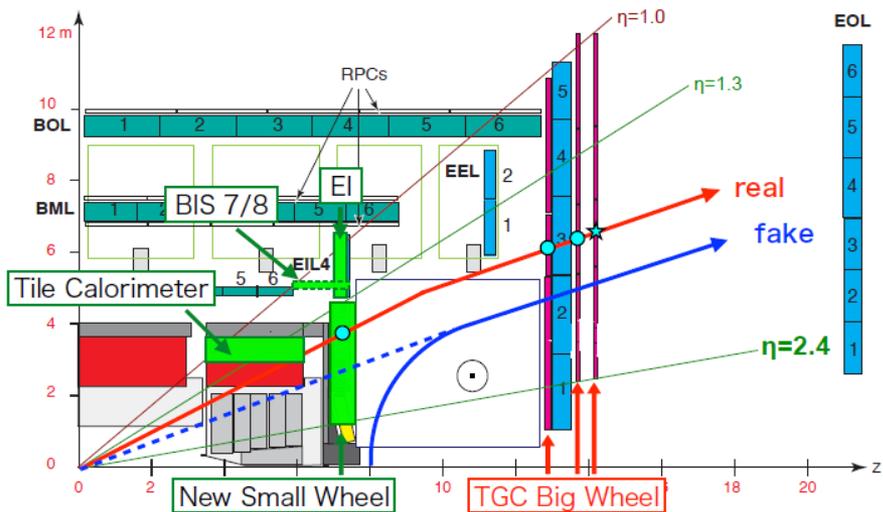
## Key numbers

- 5000 new optical fibres
- 1524 Front-End readout Boards refurbished
- 23.6 Tbps (Tera-bits per second) of data from the Super Cells



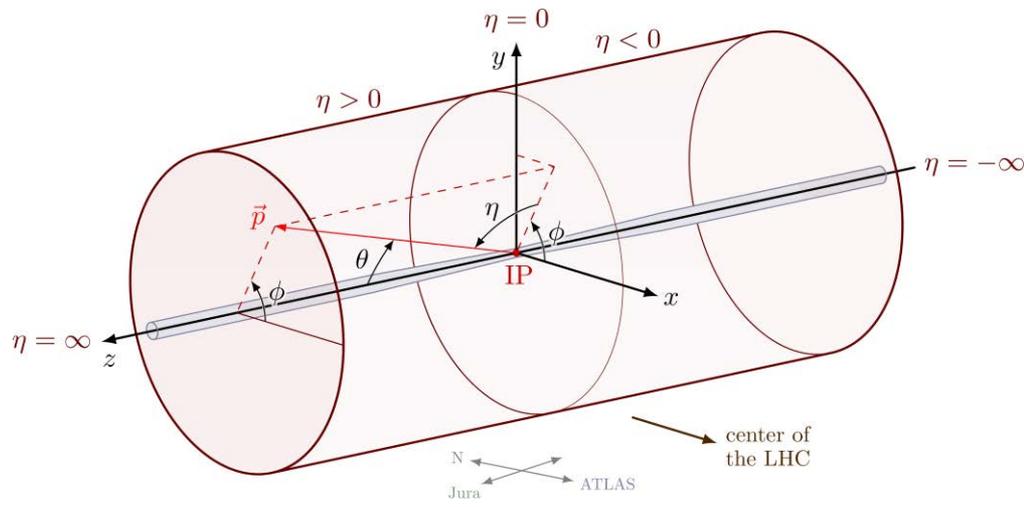
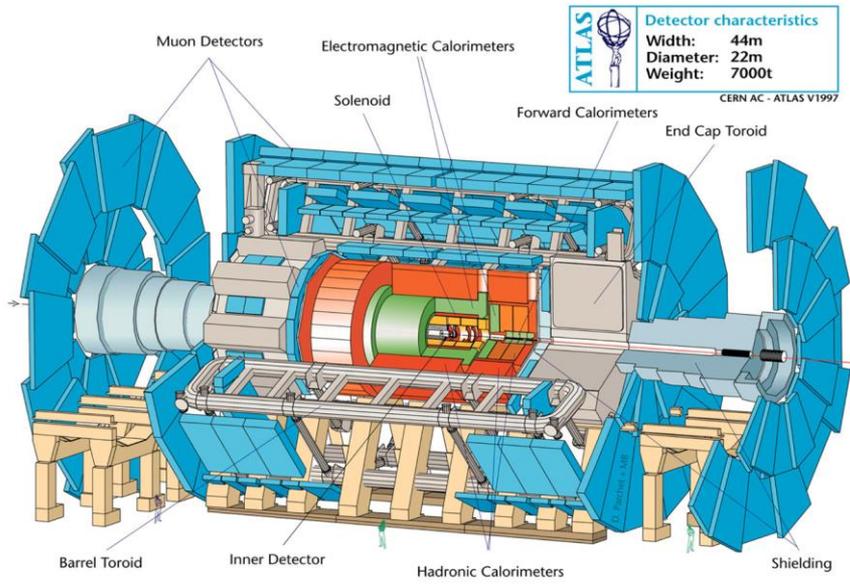
# ATLAS LS2 Upgrade: L1 Muon Trigger

前方領域に新しいトリガーチェンバー-New Small Wheelをインストール。



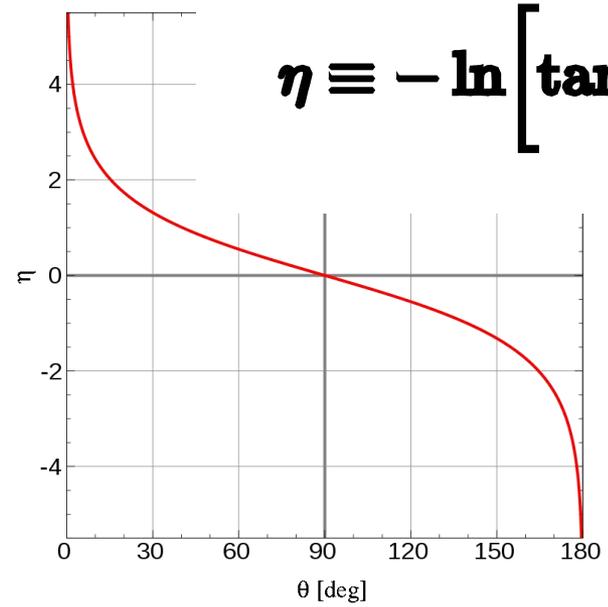
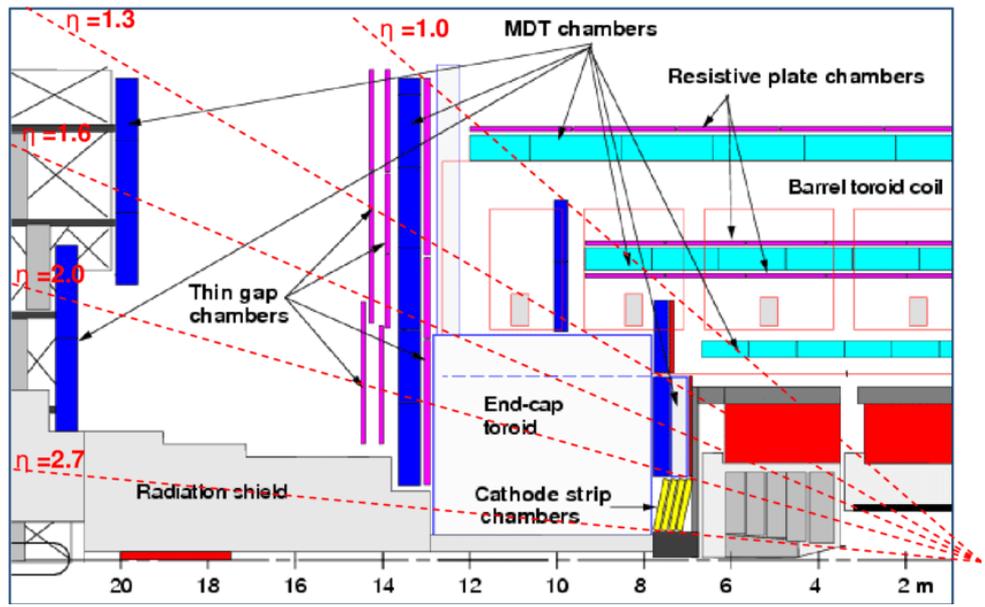
NSW being positioned

# Detector Coordinates



## Pseudo-rapidity

$$\eta \equiv -\ln \left[ \tan \left( \frac{\theta}{2} \right) \right]$$



# World Averages of Heavy Particle Masses

Prog. Theor. Exp. Phys.2020, 083C01 (2020) and 2021 update

	Mass ( $\text{GeV}/c^2$ )		Precision	Contributing Experiments	discovery
$W$	80.387	$\pm 0.016$	$\pm 0.02\%$	LEP, Tevatron, LHC	1983
$Z$	91.1876	$\pm 0.0021$	$\pm 0.002\%$	LEP	1983
$top$	172.76	$\pm 0.30$	$\pm 0.2\%$	Tevatron, LHC	1995
$Higgs$	125.25	$\pm 0.17$	$\pm 0.1\%$	LHC	2012

- Improving top quark mass is challenging, due to top quark engagement with strong interaction.
- Higgs measurement still have room for improvement, both for systematic and statistical uncertainties.
- W boson mass measurement is at  $\pm 0.02\%$  precision.
  - Measurement technique is mature, and improvement is most challenging!

# Profile Likelihood Fitting

- Template fittingでは、統計不確かさのみを考慮して $\chi^2$ を最小化していた。
- PLHでは、系統不確かさに関するパラメータも最適化しながらフィットが行われる。

$$L(\mu, \vec{\theta} | \vec{n}) = \prod_j \prod_i \text{Poisson}(n_{ji} | \nu_{ji}(\mu, \vec{\theta})) \cdot \text{Gauss}(\vec{\theta}),$$

Bin  $i$  of event category  $j$

$n_{ji}$  number of events in  $(ji)$

$\theta$  Nuisance Parameter for each systematic source

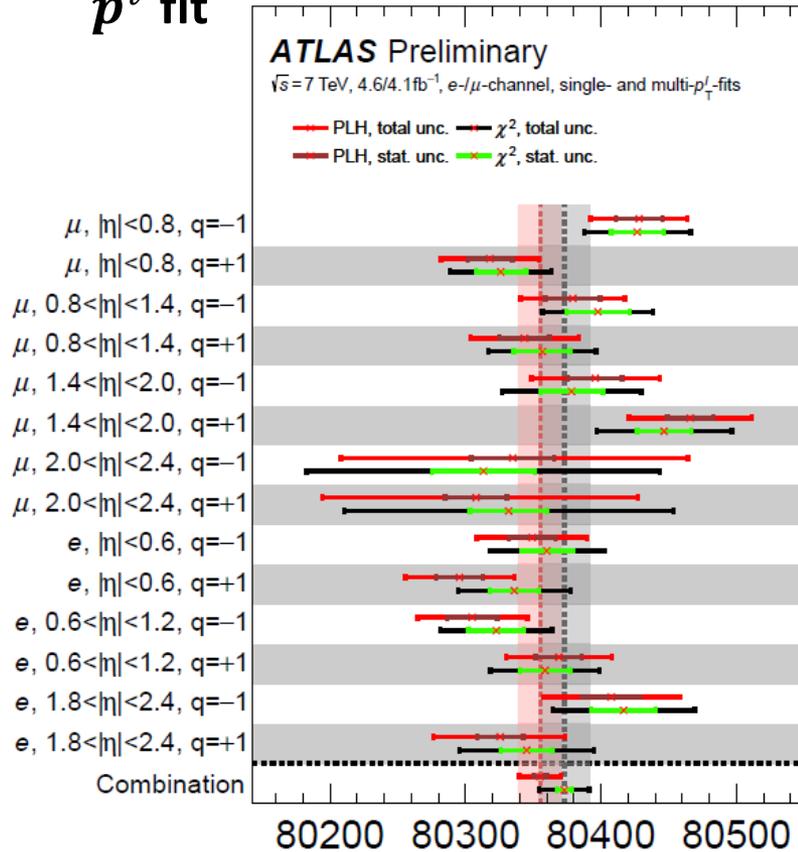
$\mu$  parameter of interest, e.g.  $m_W$

$$\nu_{ji} = S_{ji}(\mu, \vec{\theta}) + B_{ji}(\mu, \vec{\theta})$$

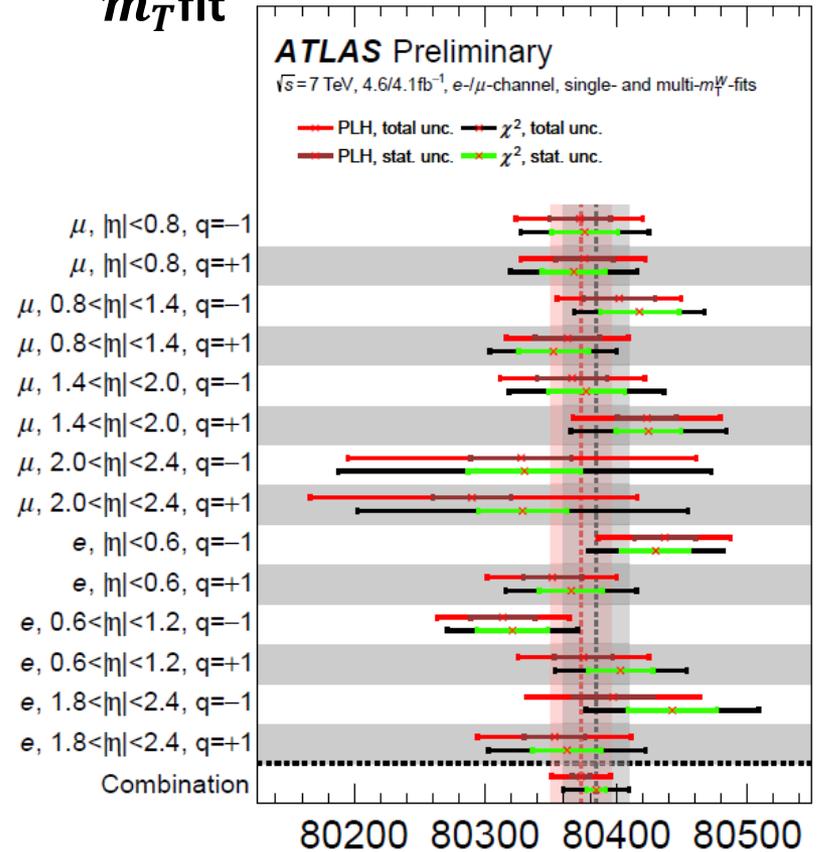
$$\begin{aligned} \nu_{ji}(\mu, \vec{\theta}) = & \Phi \times \left[ S_{ji}^{\text{nom}} + \mu \times (S_{ji}^{\mu} - S_{ji}^{\text{nom}}) \right] + \sum_s \theta_s \times (S_{ji}^P - S_{ji}^{\text{nom}}) \\ & + B_{ji}^{\text{nom}} + \sum_b \theta_b \times (B_{ji}^{P'} - B_{ji}^{\text{nom}}), \end{aligned}$$

# Template vs PLH fit results

$p^\ell$  fit



$m_T$  fit



$m_W$  中心値のシフト -16 MeV  $m_W$  [MeV]

$m_W$  中心値のシフト -12 MeV  $m_W$  [MeV]

$p^\ell$  と  $m_T$  のコンバインドフィット結果比較:

Template  $87370 \pm 19$  MeV

PLH  $80355.1 \pm 15.6$  MeV

# Pseudo Exp. results

- 系統不確かさNPをふりながらのPEでは、 $p^\ell$ フィットの揺らぎは16 MeV

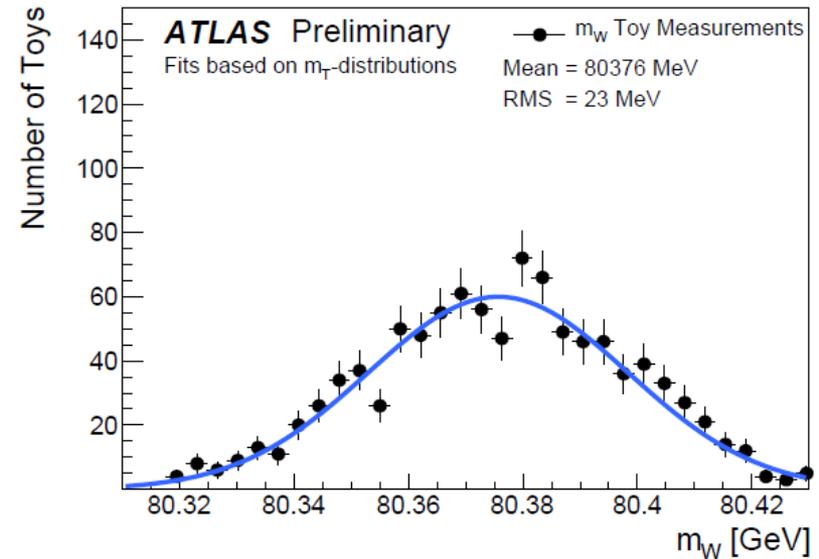
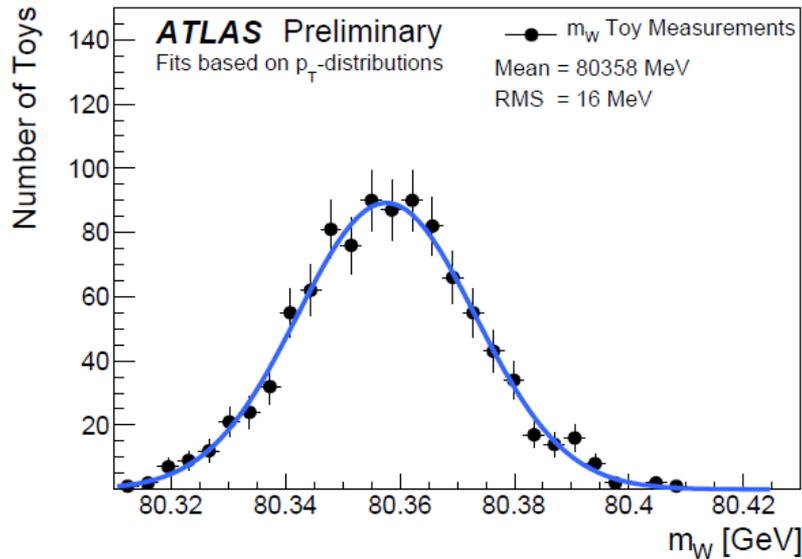
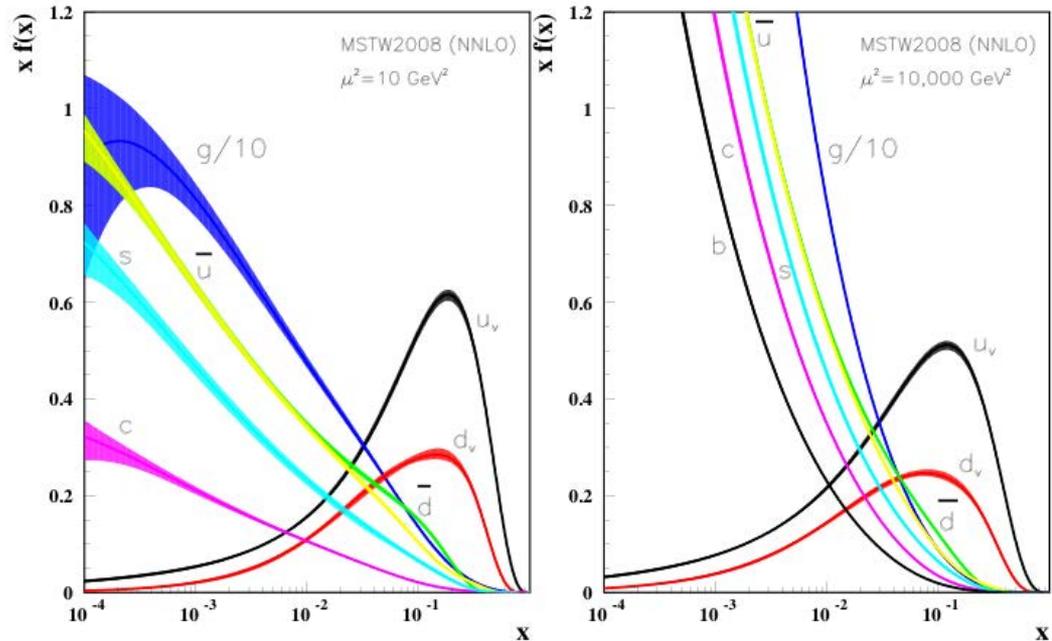
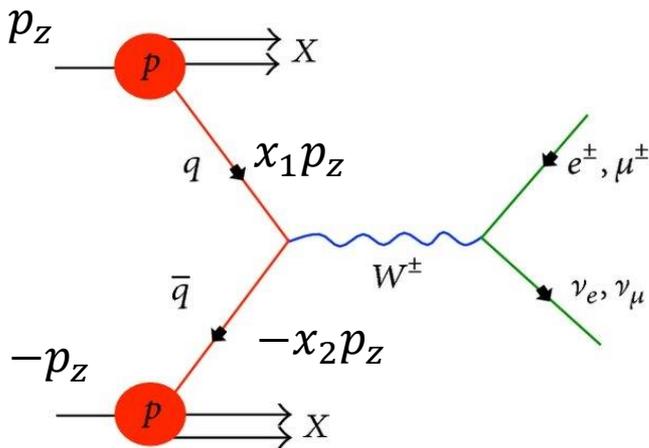


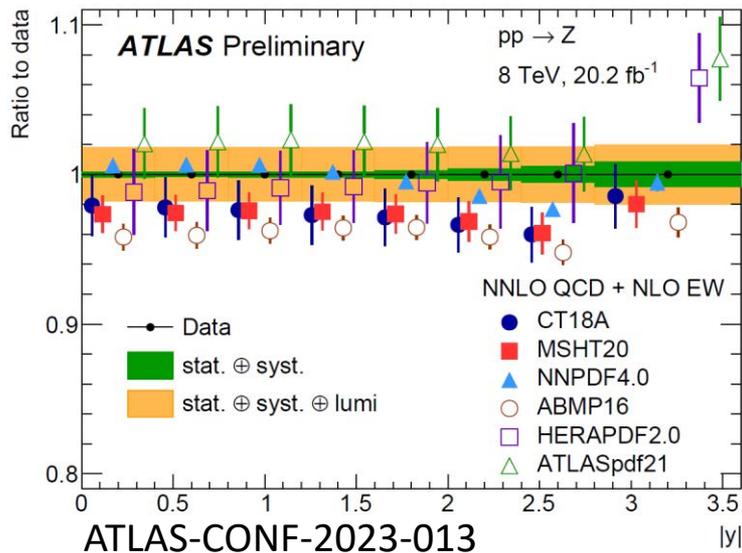
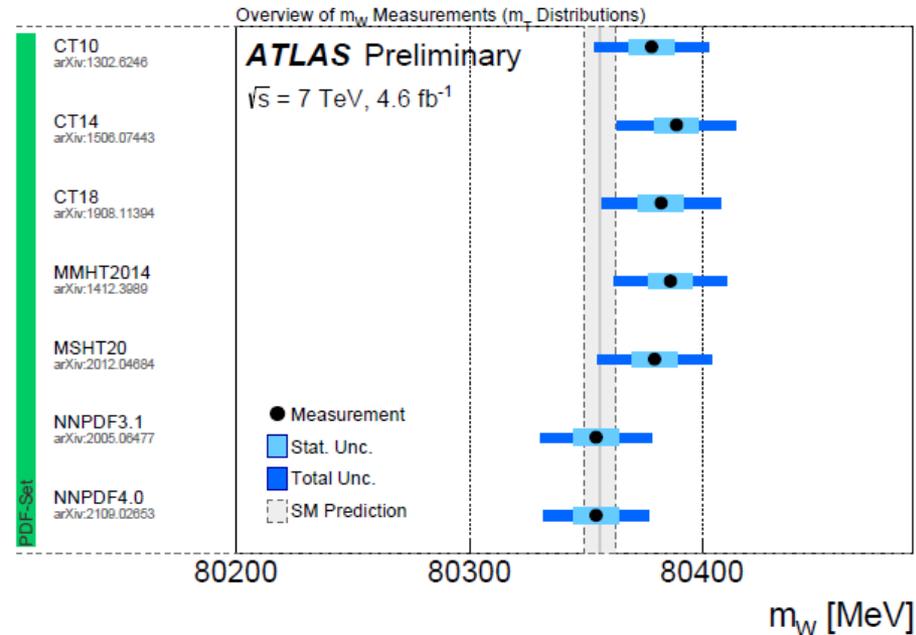
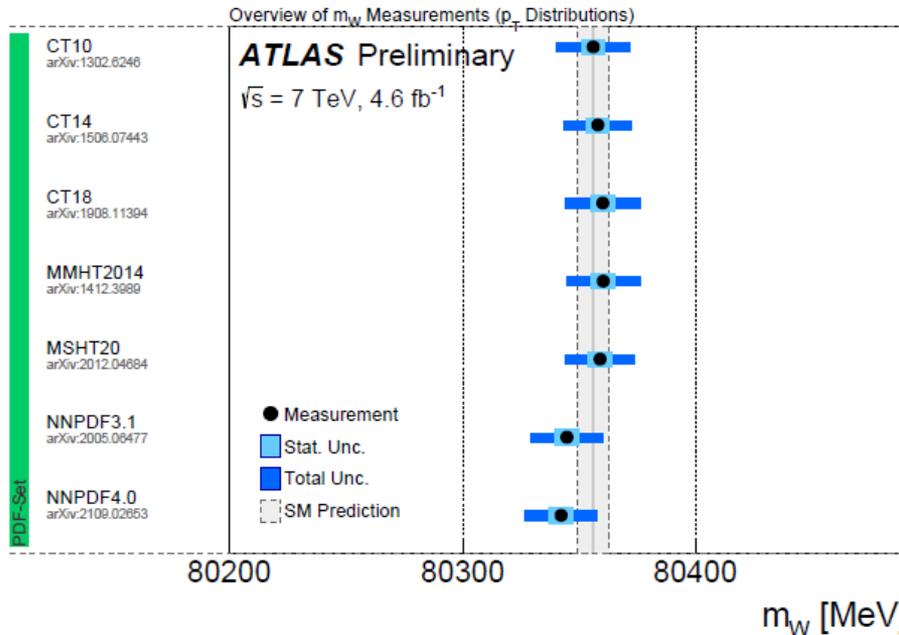
Figure 2: Spread of  $m_W$  fit results for 1000 random variations of all sources of systematic uncertainty, using the  $p_T^\ell$  distribution (left) and the  $m_T$  distribution (right), and the CT10nnlo PDF set.

# Parton Distribution Functionとは

- 陽子の $p_z$ のうち、反応するパートンがもらう割合 $x$ の確率密度関数
- 過去のいろいろな実験のデータをフィットすることで経験的に決まっている



# PDF Dependence



- NNPDFは、Zボソンのrapidity分布など、データと整合がよくない場合がある
- NNPDF以外では、 $m_W$ のフィット結果はPDFを変えても4MeV以内しかシフトしない
- CT18をnominalとし、 $p^l$ と $m_T$ をコンバインして最終結果は

$$m_W = 80360.4 \pm 16.3 \text{ MeV}$$

(CT10では、 $80355.1 \pm 15.6 \text{ MeV}$ だった)

# ATLAS 2018 と 2023 と CDF の結果の比較

2018	$87370 \pm 19 \text{ MeV}$
2023	$80360.4 \pm 16.3 \text{ MeV}$
CDF	$80433.5 \pm 9.4 \text{ MeV}$

2018 ATLASの不確かさテーブル

Source	Uncertainty (MeV)
Lepton energy scale	3.0
Lepton energy resolution	1.2
Recoil energy scale	1.2
Recoil energy resolution	1.8
Lepton efficiency	0.4
Lepton removal	1.2
Backgrounds	3.3
$p_T^Z$ model	1.8
$p_T^W/p_T^Z$ model	1.3
Parton distributions	3.9
QED radiation	2.7
W boson statistics	6.4
Total	9.4

2018 ATLASの不確かさテーブル

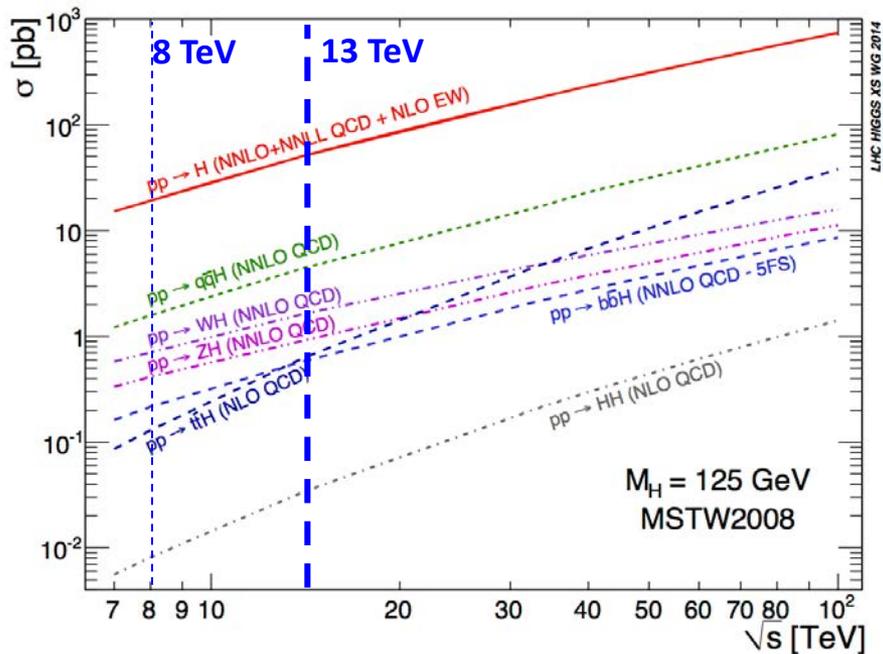
Combined categories	Value [MeV]	Stat. Unc.	Muon Unc.	Elec. Unc.	Recoil Unc.	Bckg. Unc.	QCD Unc.	EW Unc.	PDF Unc.	Total Unc.	$\chi^2/\text{dof}$ of Comb.
$m_T-p_T^\ell, W^\pm, e-\mu$	80369.5	6.8	6.6	6.4	2.9	4.5	8.3	5.5	9.2	18.5	29/27

2023 ATLASの不確かさテーブル

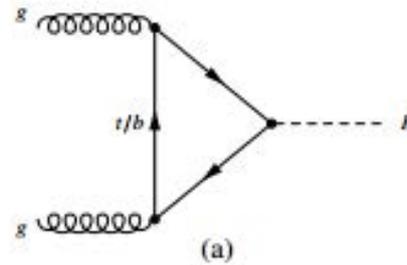
Obs.	Mean [MeV]	Elec. Unc.	PDF Unc.	Muon Unc.	EW Unc.	PS & $A_i$ Unc.	Bkg. Unc.	$\Gamma_W$ Unc.	MC stat. Unc.	Lumi Unc.	Recoil Unc.	Total sys.	Data stat.	Total Unc.
$p_T^\ell$	80360.1	8.0	7.7	7.0	6.0	4.7	2.4	2.0	1.9	1.2	0.6	15.5	4.9	16.3
$m_T$	80382.2	9.2	14.6	9.8	5.9	10.3	6.0	7.0	2.4	1.8	11.7	24.4	6.7	25.3

# LHCでのヒッグス粒子の生成

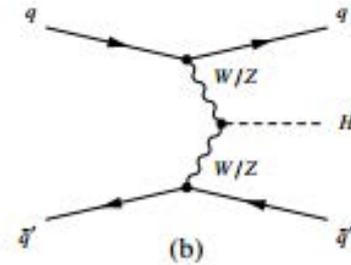
- LHCでは、4つの物理過程でヒッグス粒子は生成される。



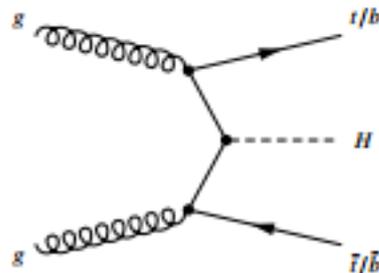
$$gg \rightarrow H$$



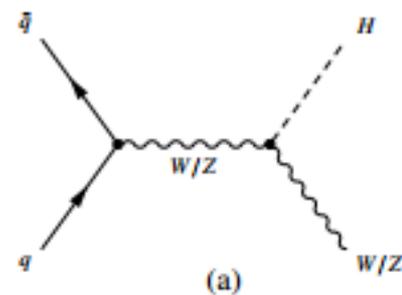
$$qq \rightarrow qqH$$



$$gg \rightarrow ttH$$



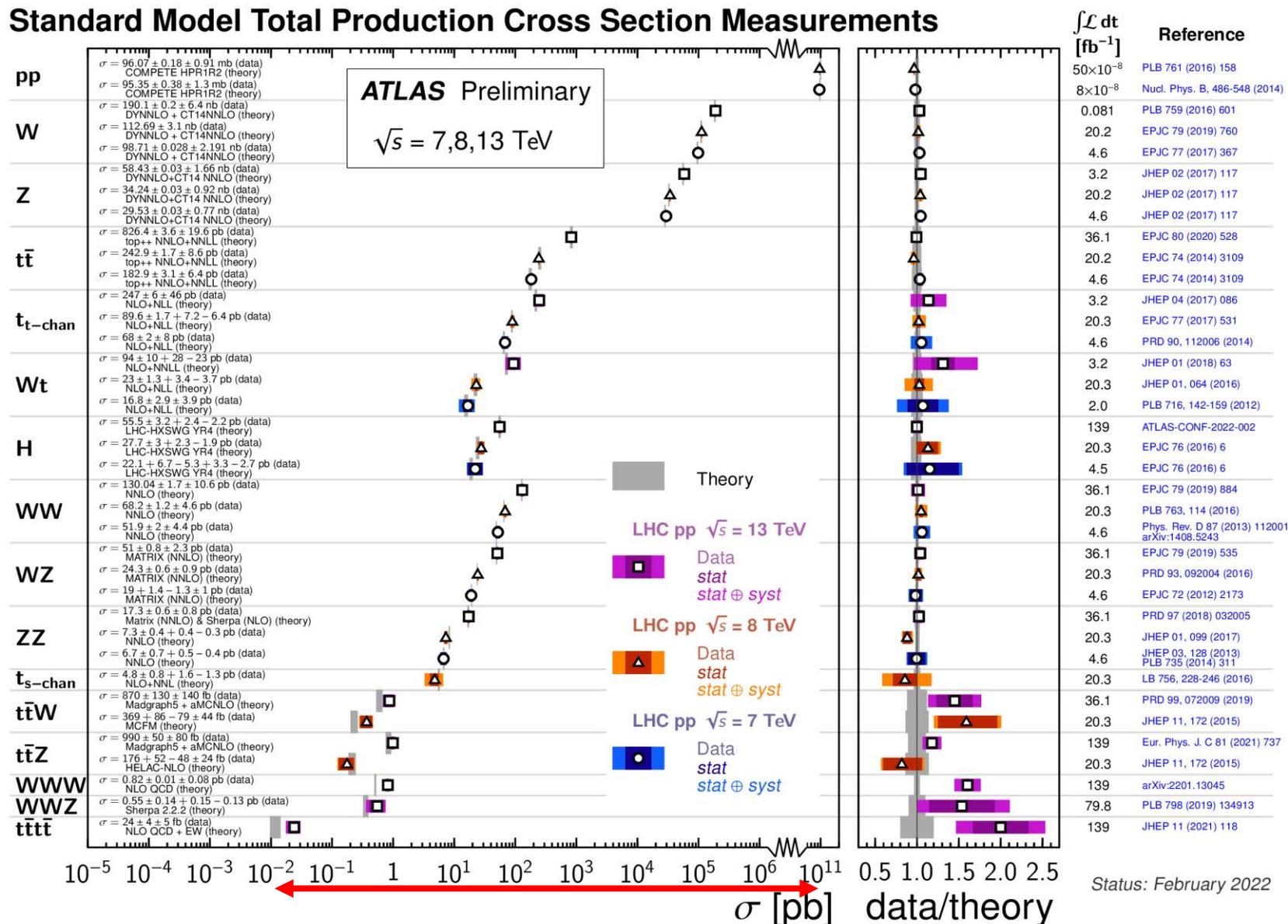
$$aa \rightarrow VH$$



$\sqrt{s}$ (TeV)	$\sigma_{gg \rightarrow H}$ (pb)
13.0	48.61
13.6	52.23
14.0	54.72

# 標準理論とデータの比較

## Standard Model Total Production Cross Section Measurements



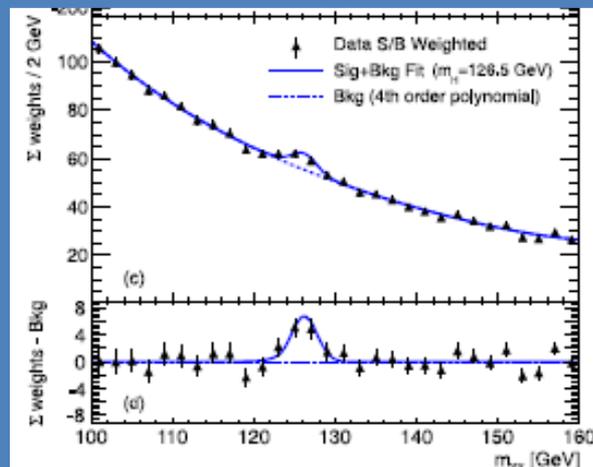
13桁にわたる様々な生成断面積が、どれもよく一致している。

# ヒッグス発見チャンネルの現在

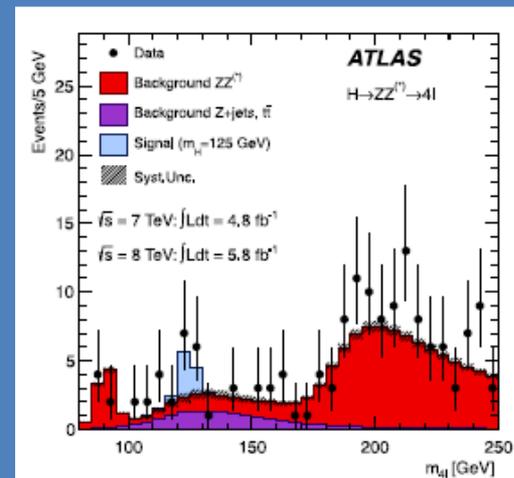
2012年夏、ヒッグス粒子  
発見時のデータ

$H \rightarrow WW^*$  チャンネルも合わせて  $5.9\sigma$  の有意度でヒッグス粒子を発見。

$H \rightarrow \gamma\gamma$



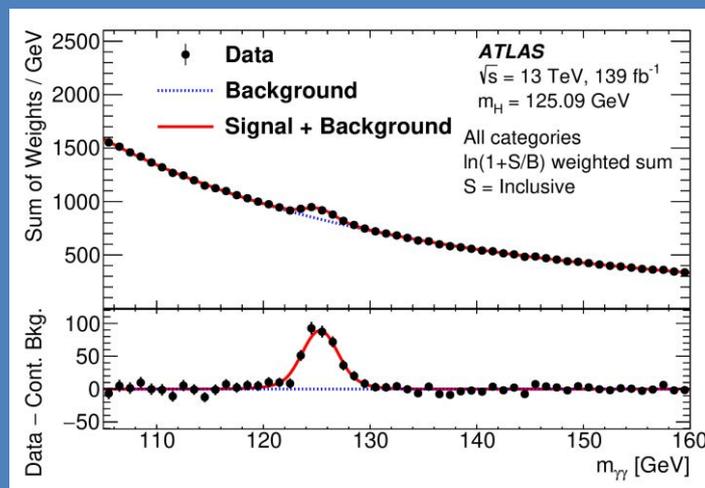
$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$



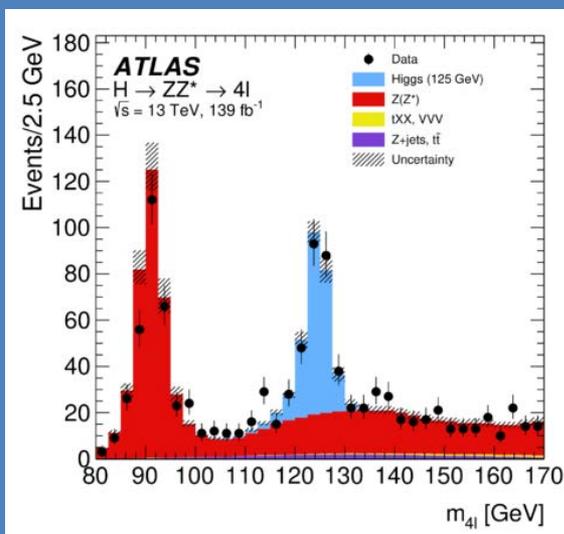
[Phys. Lett. B 716 \(2012\) 1-29](#)

Run 2全データの分布

現在では、発見に使ったチャンネルでは大量の候補事象。Run2データではヒッグス粒子の精密測定を行っている。



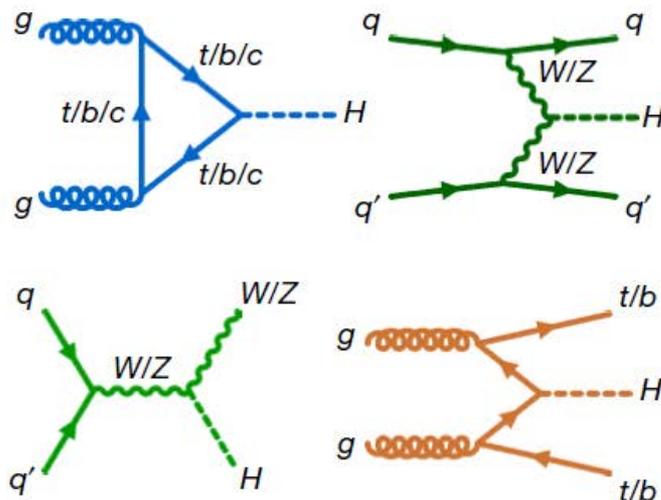
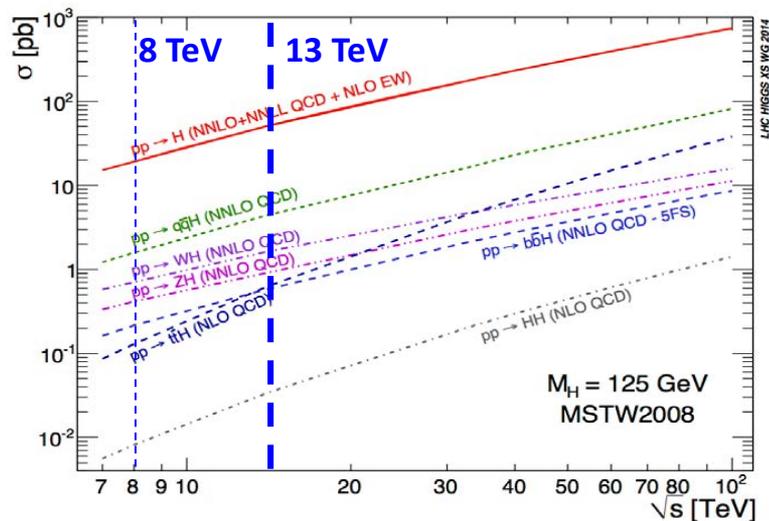
arXiv:2207.00348



Phys. J. C 80 (2020) 942

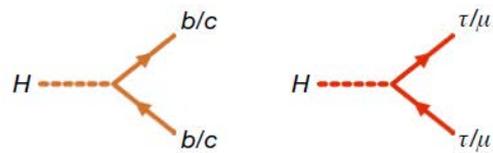
# LHCでのヒッグス粒子の生成・崩壊

- 主な生成モードが4つある



- 崩壊分岐比

$H \rightarrow b\bar{b}$	$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	$H \rightarrow \mu^+\mu^-$	$H \rightarrow c\bar{c}$
57.7%	6.32%	0.022%	2.91%



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

