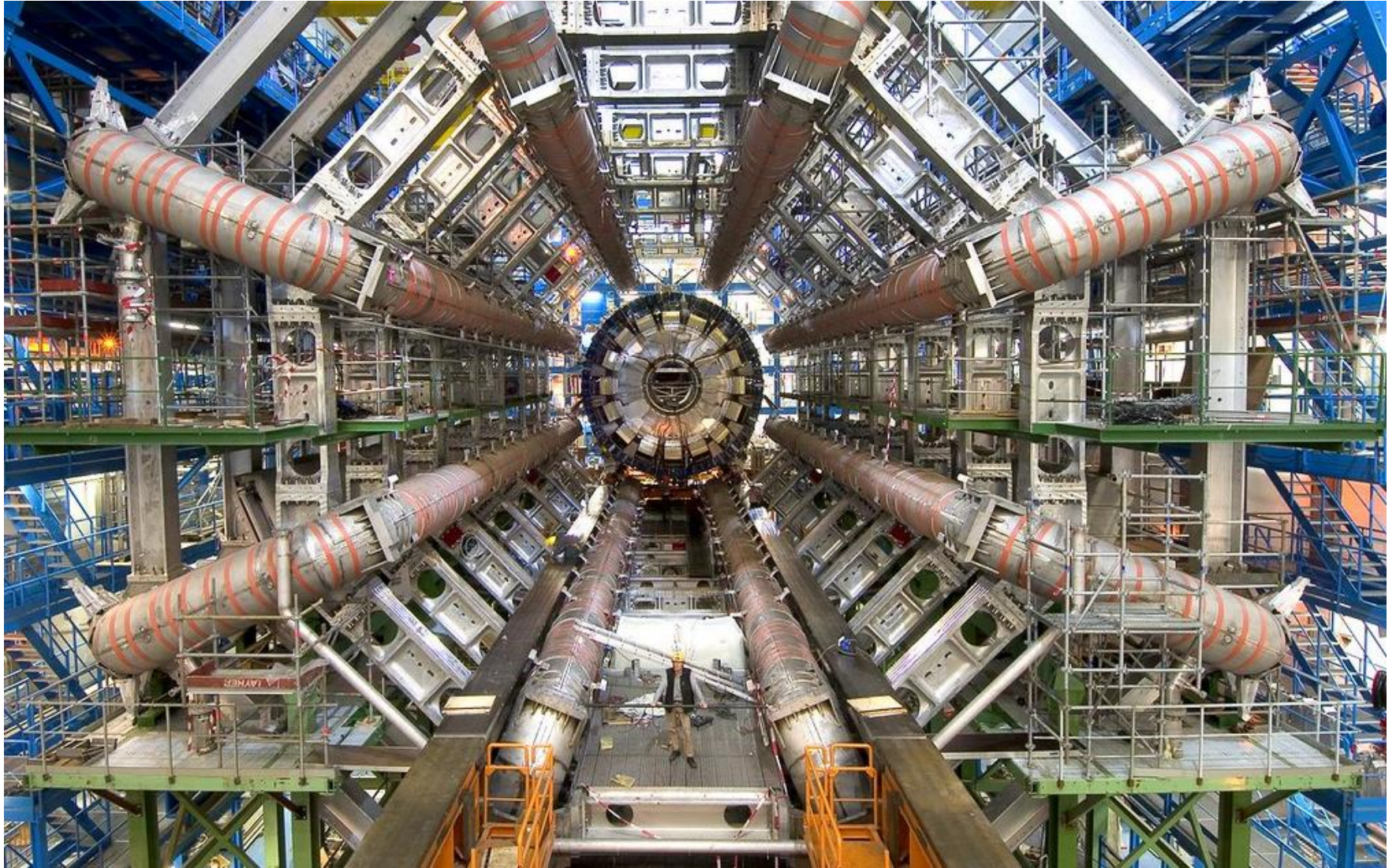


ATLAS実験の最近の物理結果



佐藤構二

宇宙史センター 構成員会議

2022/11/28

内容

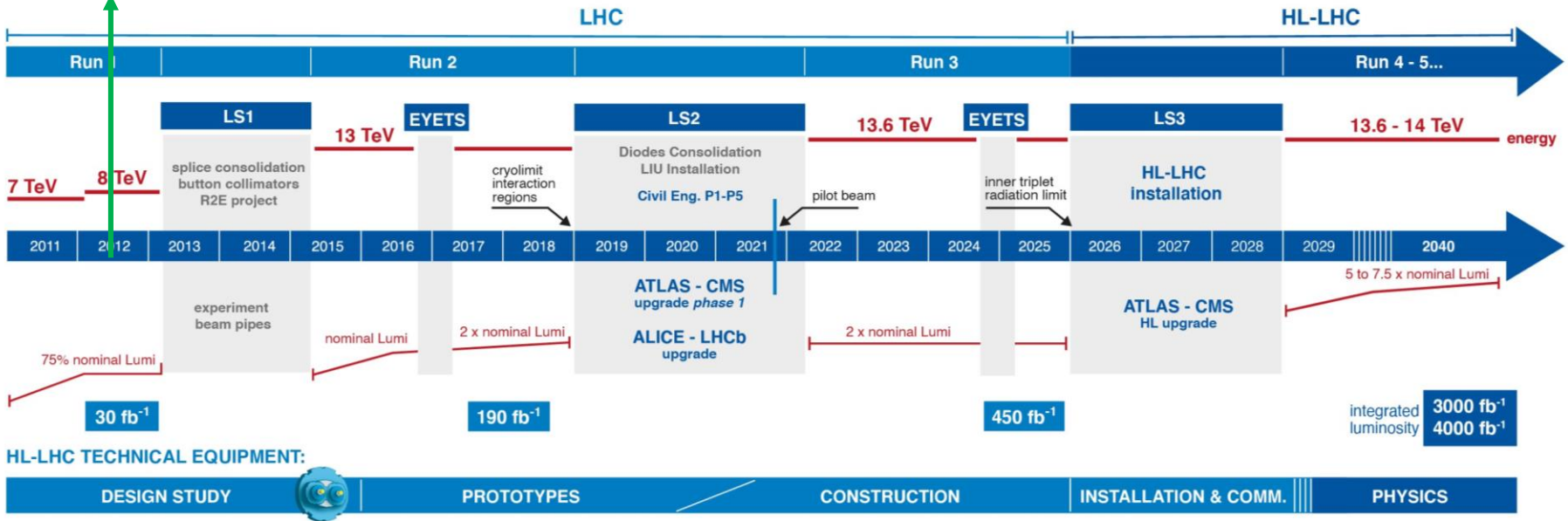
- LHC加速器とATLAS実験
- Run3実験が始まった
- ヒッグス粒子発見から10周年
- 最近のヒッグス粒子の精密測定

LHC実験



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:

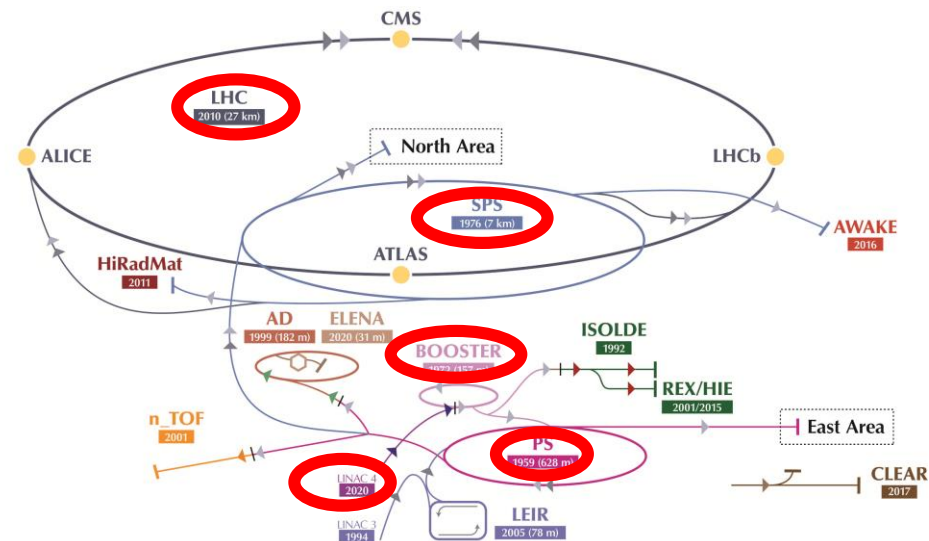


- データ量は、積算ルミノシティ(単位 b^{-1})で測る。
 - 積算ルミノシティ L
 - 生成される事象数 $n = \sigma \times L$
- (例) $\sigma(H) \sim 49 \text{ pb}$ 、Run 2で生成されたヒッグス粒子は、
 $49000[\text{fb}] \times 139[\text{fb}^{-1}] \sim 6.7\text{M}$ (個)

	year	E_{CM} (TeV)	integ lumi [fb ⁻¹]
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


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, ...

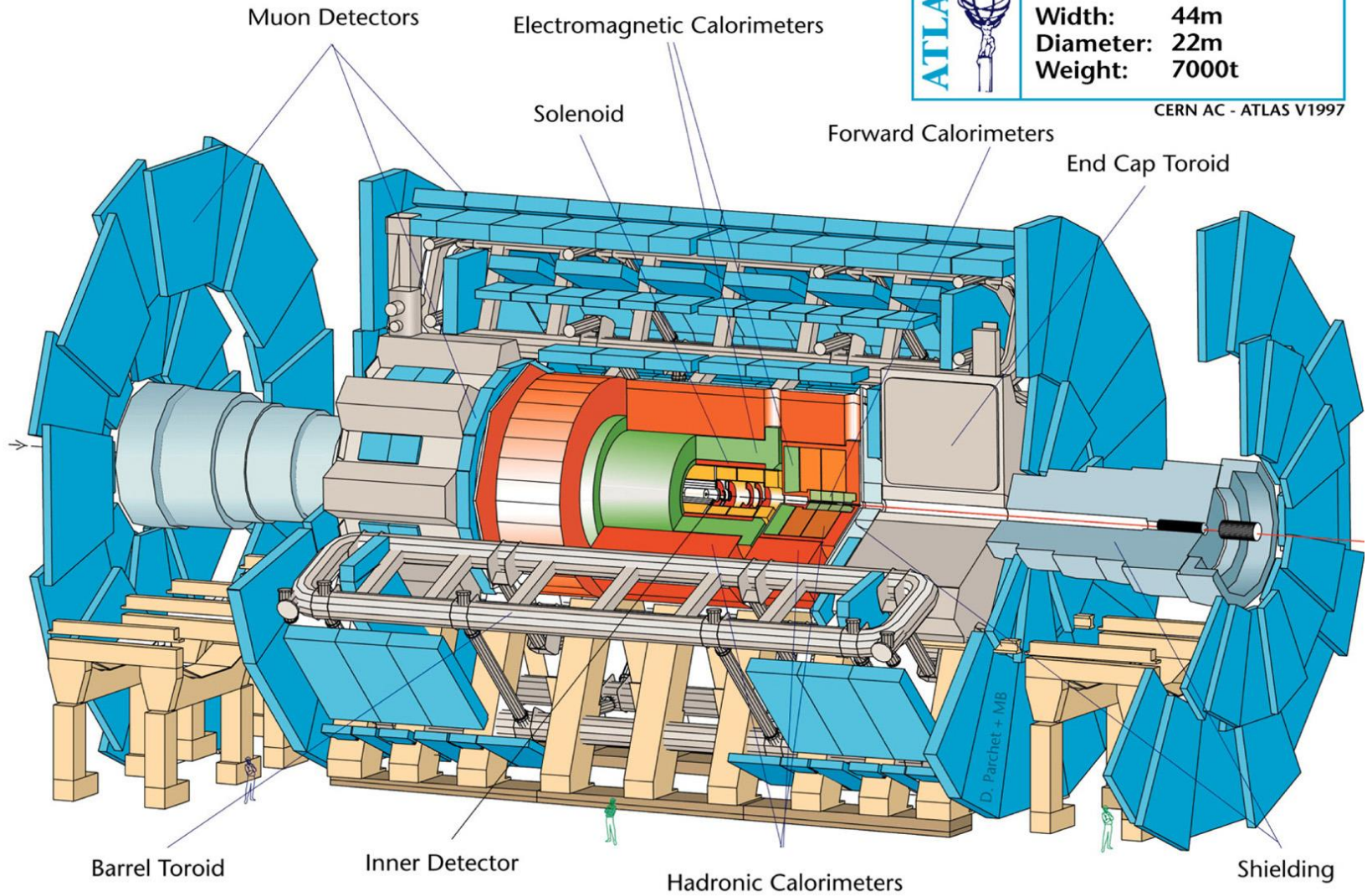


ATLAS検出器

総重量 7,000 t

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

CERN AC - ATLAS V1997

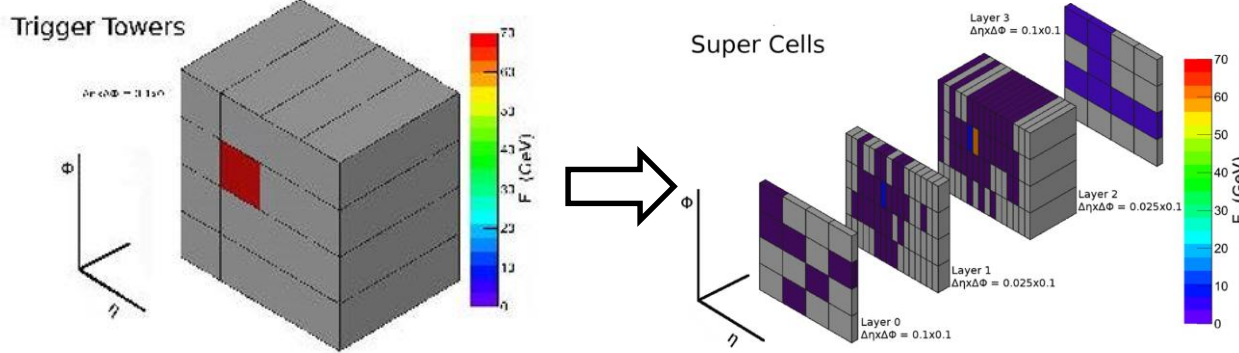


- 最高エネルギーでのさまざまな素粒子反応の研究
 - ヒッグス粒子、標準理論、トップクォーク、Bメソン、超対称性、新物理探索、重イオン衝突...

ATLAS LS2 Upgrade: L1 Calo Trigger

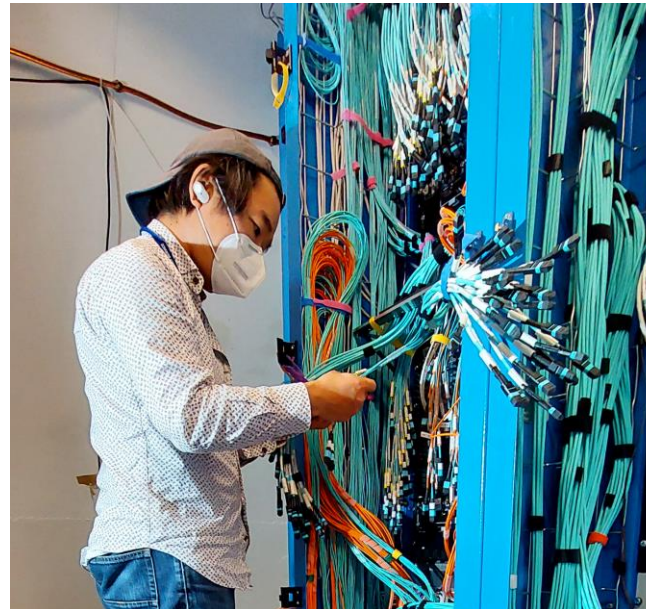
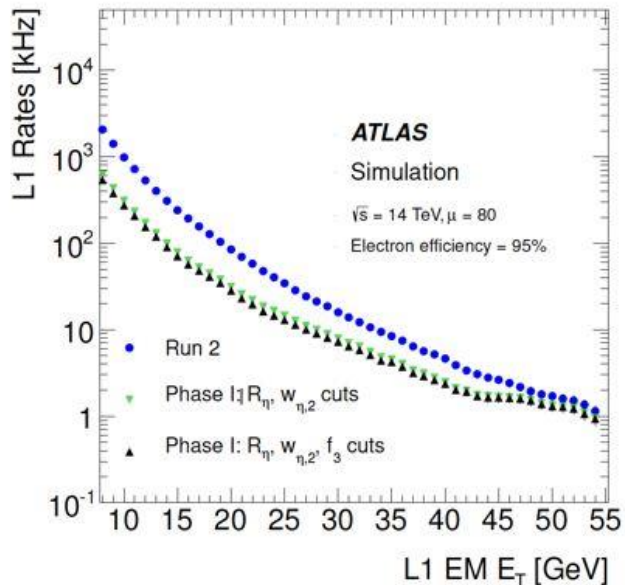
トリガー用読み出しを細分化することで、電子、光子トリガーへのバックグラウンドの影響を減らす。

トリガーエレクトロニクスアップグレード。



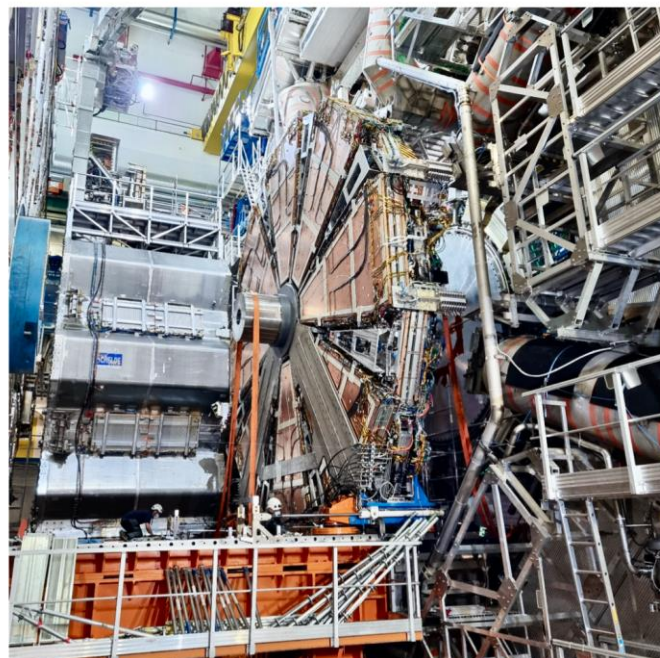
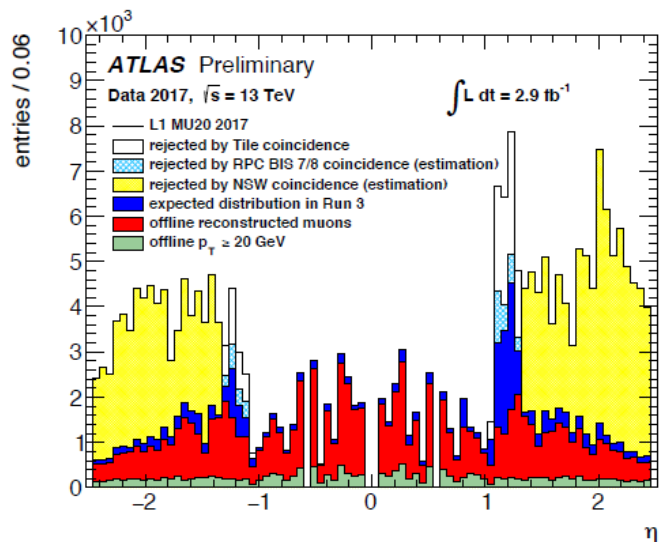
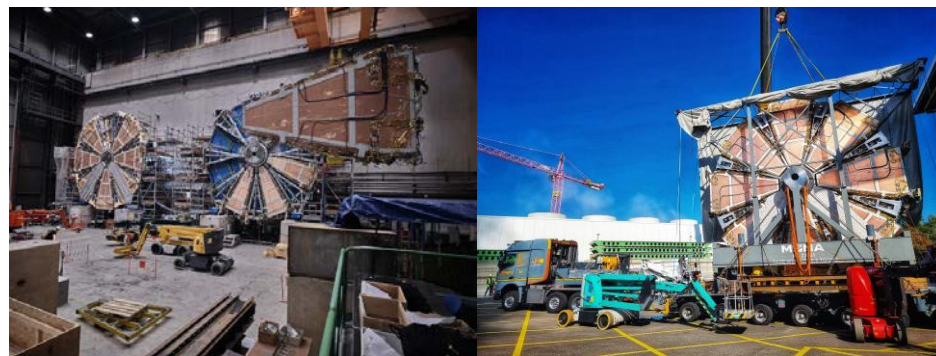
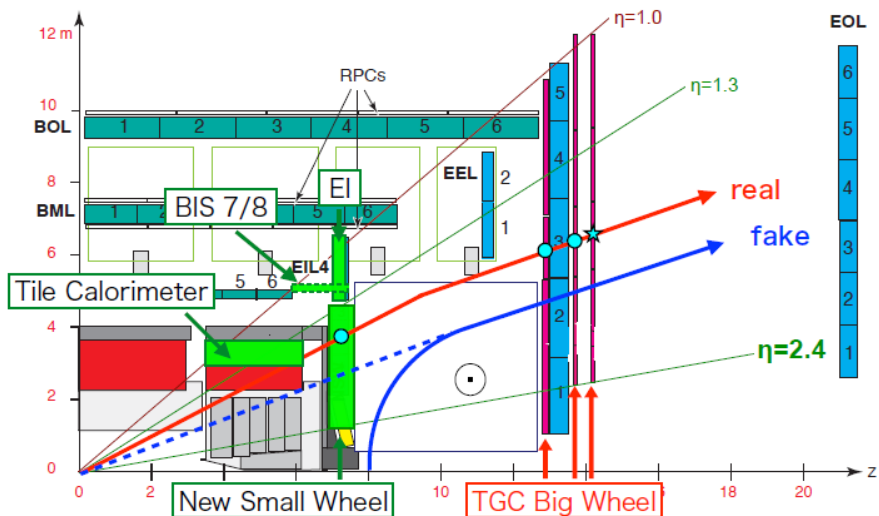
Key numbers

- 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

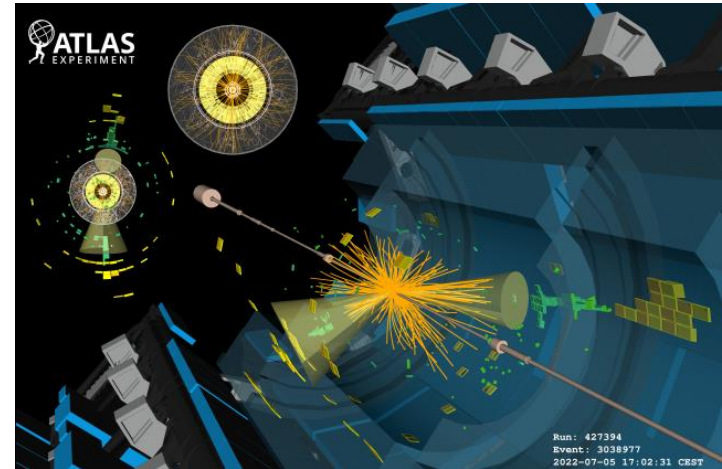
前方領域に新しいトリガーチェンバー-New Small Wheelをインストール。



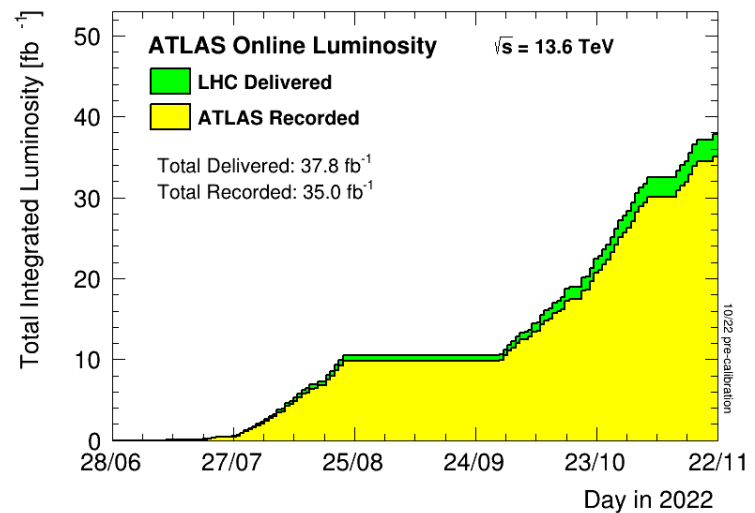
NSW being positioned

Run 3の開始

- 2019-2021 の長期シャットダウン(加速器と検出器の増強)から復帰
- 2022/7/5にRun 3運転が開始



- 2022-2025に 250 fb^{-1} を蓄積予定
- 11/22までに 35 fb^{-1} を取得



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%

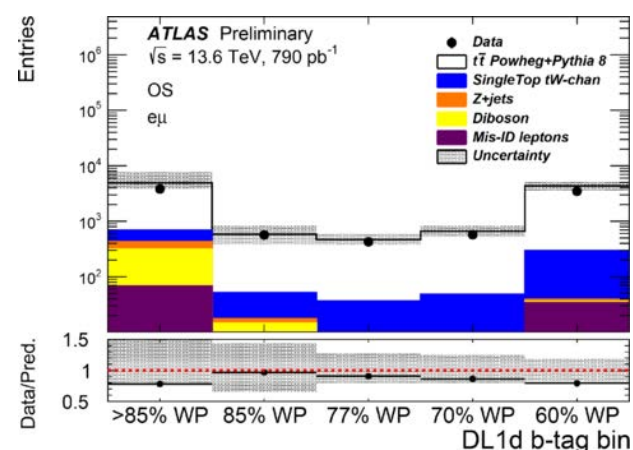
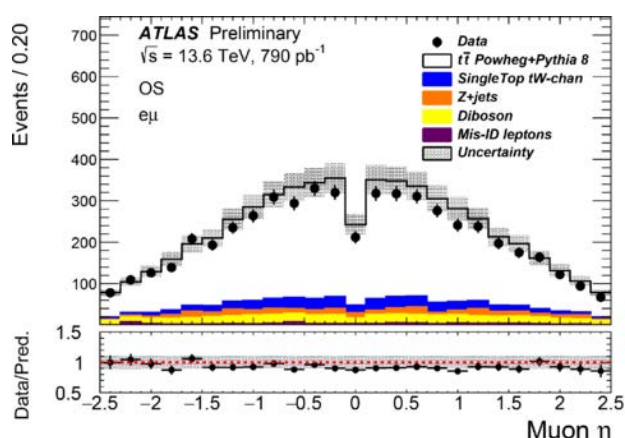
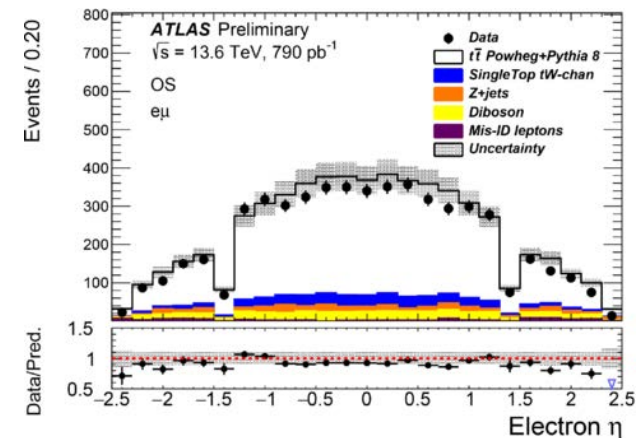
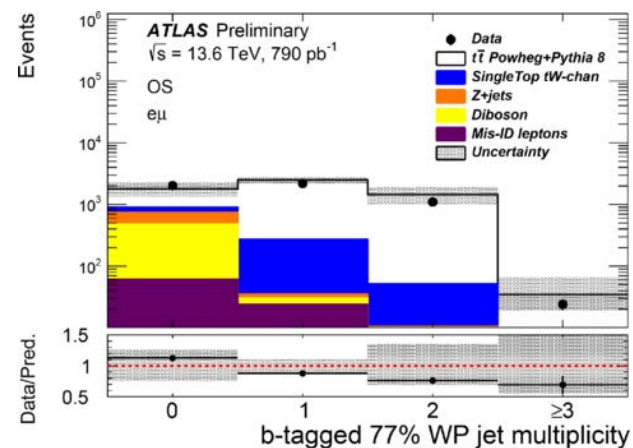
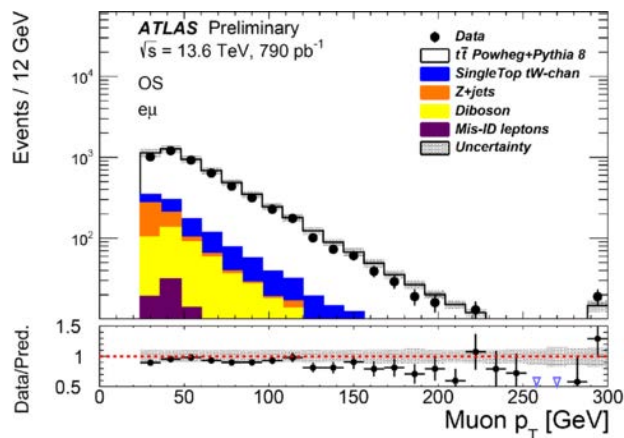
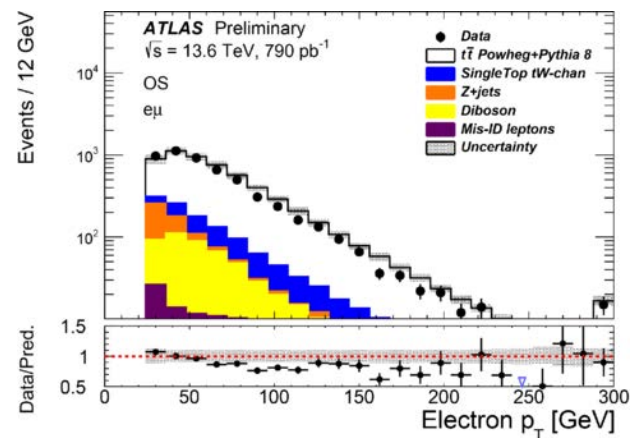
物理過程の生成断面積

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%

Run 3データのMCシミュレーションとの比較

• $e^\pm\mu^\mp$ 事象

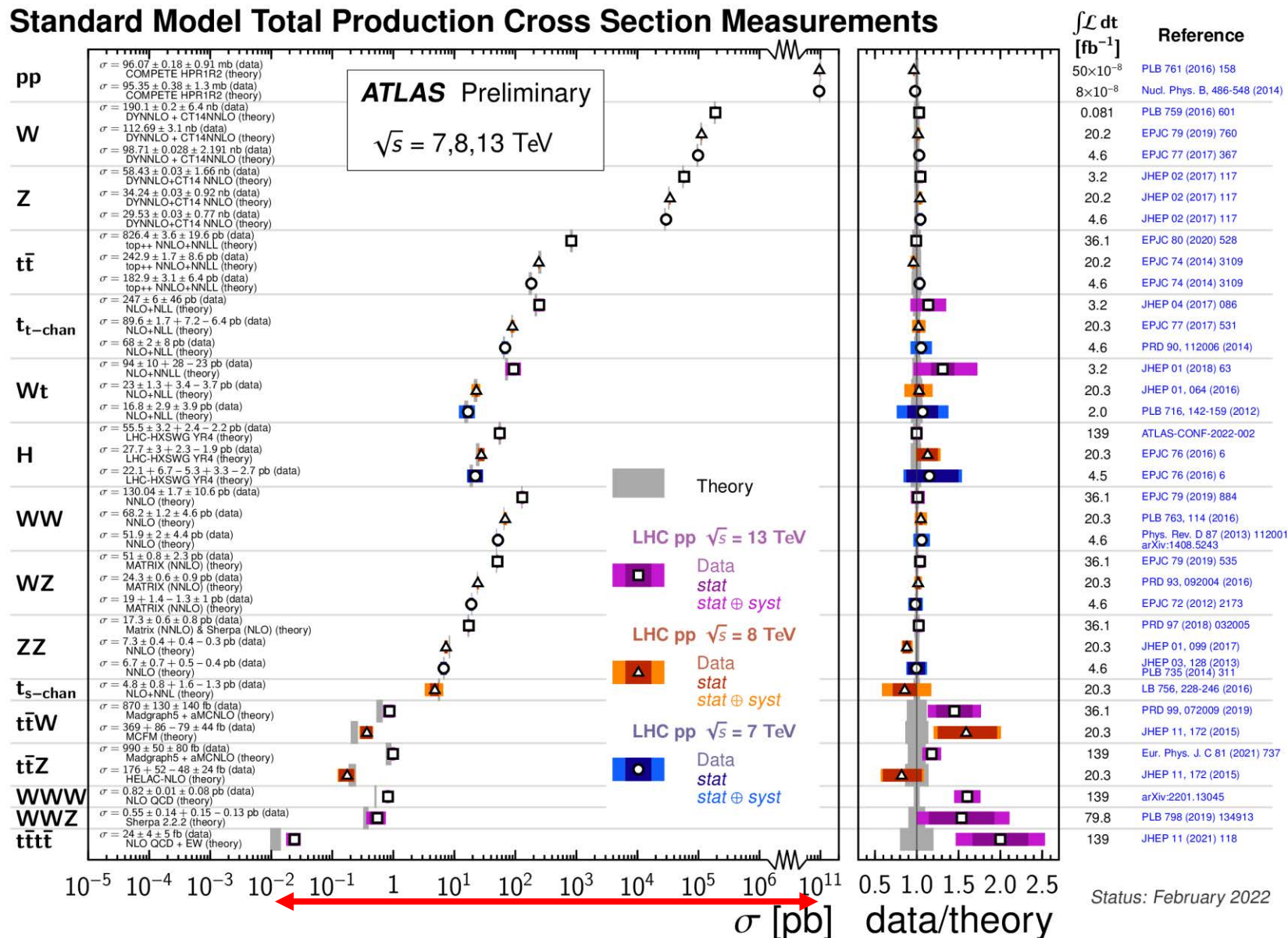


Run3の結果は、今後にご期待を!!

次ページからの物理結果は、Run2の結果です。

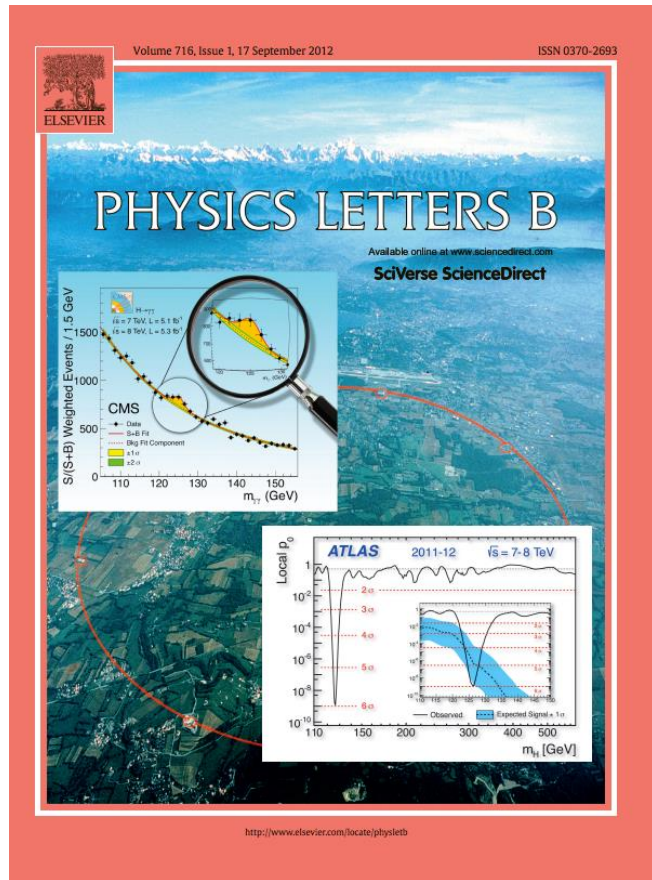
標準理論とデータの比較

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。

ヒッグス粒子の発見



- 2012年7月4日 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

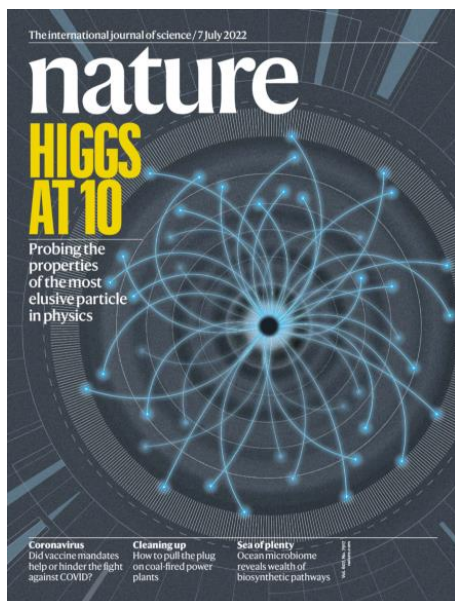


ヒッグス粒子発見10周年

- 2022年 ヒッグス粒子発見
- 2024年はヒッグス粒子発見から10周年
 - 7月4日にCERNでシンポジウム
 - ATLAS: Nature volume 607, pages 52–59 (2022)
 - CMS: Nature volume 607, pages 60–68 (2022)
 - ATLAS日本グループでも8月末にイベントを行いました。



CERNでのセミナーの様子



Article

A detailed map of Higgs boson interactions by the ATLAS experiment ten years after the discovery

<https://doi.org/10.1038/s41586-022-04893-w> The ATLAS Collaboration¹

Received: 21 March 2022

Accepted: 23 May 2022

Published online: 4 July 2022

Open access

Check for updates

The standard model of particle physics¹ describes the known fundamental particles and forces that make up our Universe, with the exception of gravity. One of the central features of the standard model is a field that permeates all of space and interacts with fundamental particles^{2,3}. The quantum excitation of this field, known as the Higgs field, manifests itself as the Higgs boson, the only fundamental particle with mass⁴.

Article

A portrait of the Higgs boson by the CMS experiment ten years after the discovery

<https://doi.org/10.1038/s41586-022-04892-x> The CMS Collaboration¹

Received: 21 March 2022

Accepted: 23 May 2022

Published online: 4 July 2022

Open access

Check for updates

In July 2012, the ATLAS and CMS collaborations at the CERN Large Hadron Collider announced the observation of a Higgs boson at a mass of around 125 gigaelectronvolts. Ten years later, and with the data corresponding to the production of a 30 times larger number of Higgs bosons, we have learnt much more about the properties of the Higgs boson. The CMS experiment has observed the Higgs boson in numerous fermionic and bosonic decay channels, established its spin–parity quantum numbers, determined its

ヒッグス粒子発見10周年

イベント

ヒッグス粒子発見から10周年。
ヒッグス粒子の発見から10年経ち、その性質について、最新の研究成果を発表する。

2022年 8/29日 つくば国際会議場
14:30 (14:00 開場) ~ 16:30

対象 ▶ 中高生・大学生
(+ 保護者の方)

講演者
高エネルギー加速器研究機構
CMS実験グループリーダー
田花 花穂和成氏

講演
ヒッグス粒子発見後の
素粒子物理学

参加申し込み
事前登録制 8月22日まで
定員 150名
<https://atlas.kek.jp/main/events/higgs10>
お問い合わせ higgs10@m1.post.kek.jp

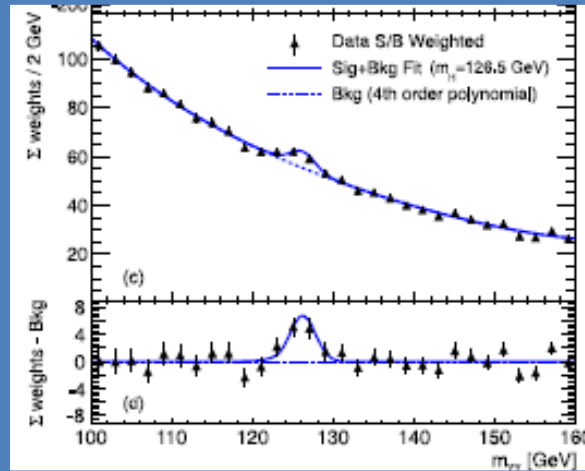
主催 高エネルギー加速器研究機構・素粒子学研究所

ヒッグス発見チャンネルの現在

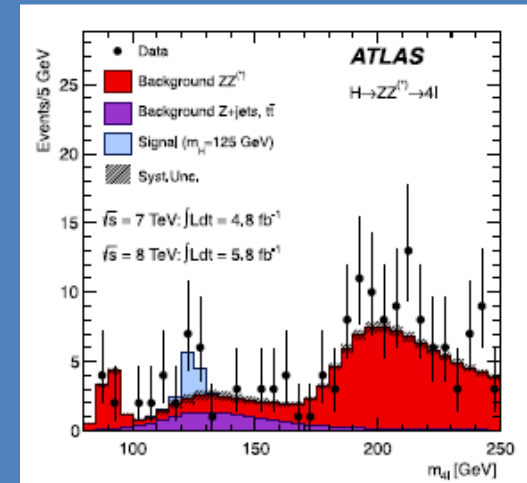
2012年夏、ヒッグス粒子
発見時のデータ

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

$H \rightarrow \gamma\gamma$



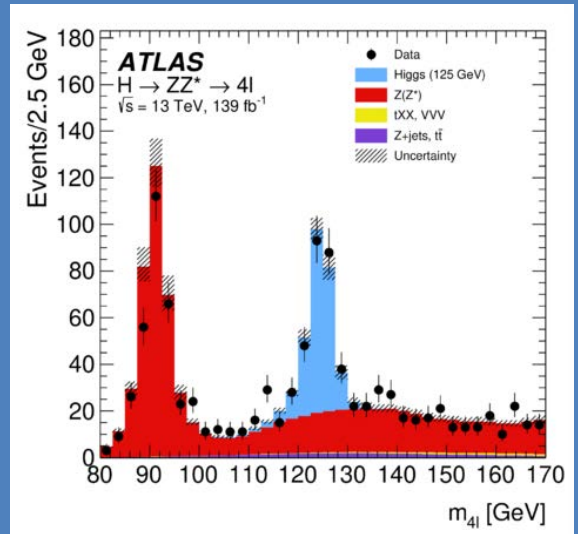
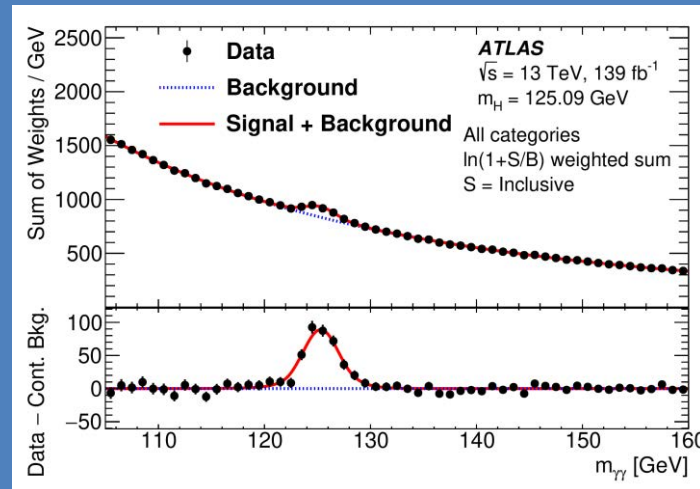
$H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$



[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。



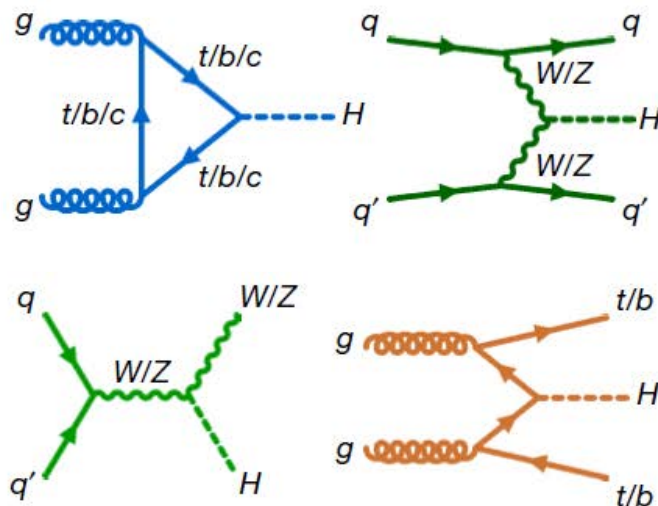
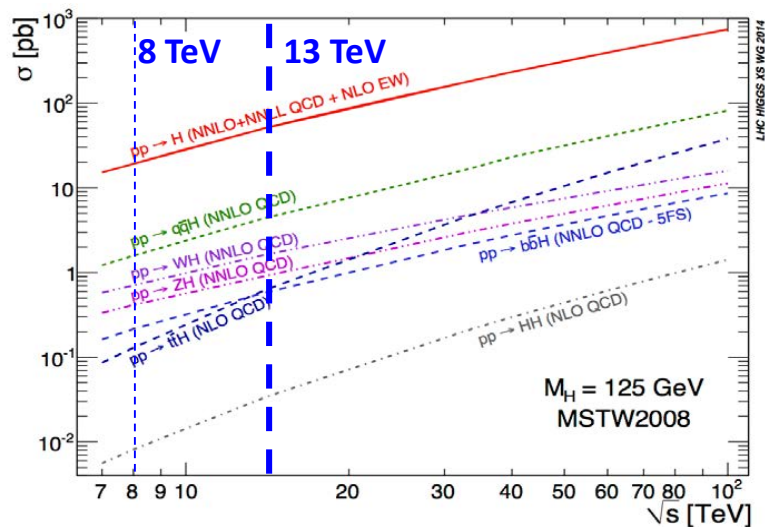
arXiv:2207.00348

Phys. J. C 80 (2020) 942

17

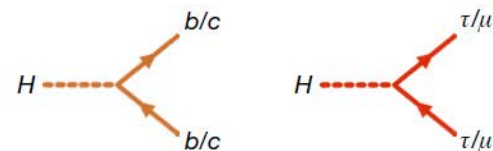
LHCでのヒッグス粒子の生成・崩壊

- 主な生成モードが4つある

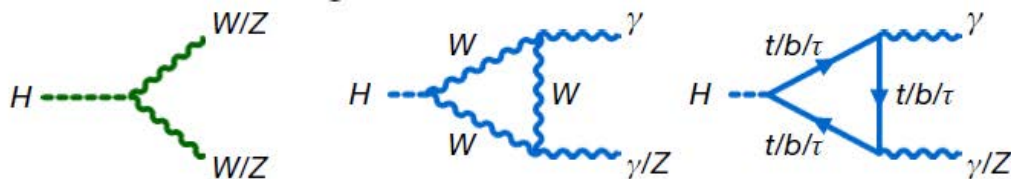


- 崩壊分岐比

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

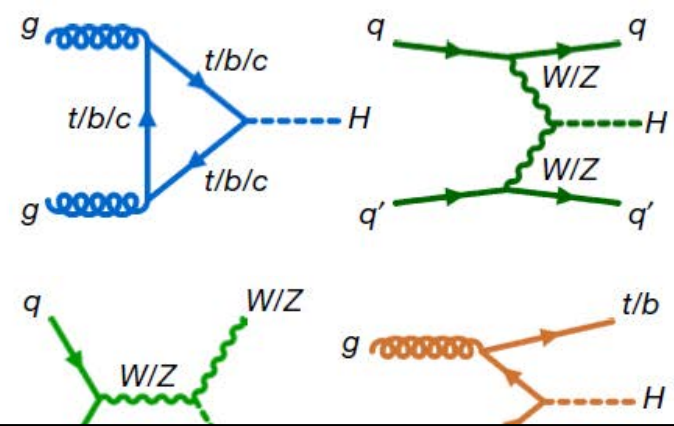
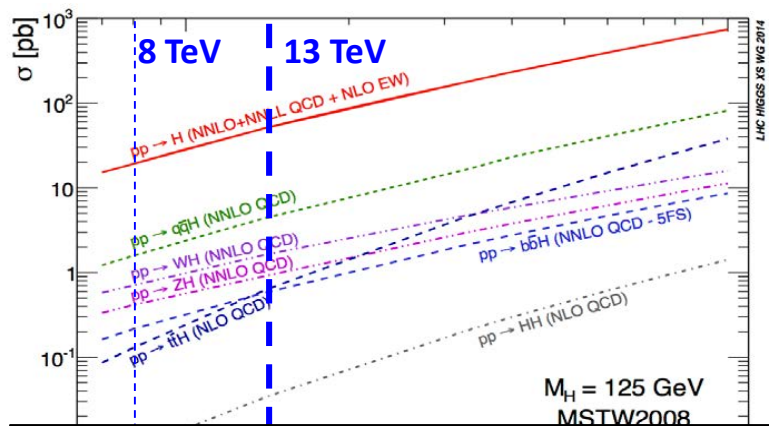


$H \rightarrow gg$	$H \rightarrow \gamma\gamma$	$H \rightarrow Z\gamma$	$H \rightarrow WW$	$H \rightarrow ZZ$	Γ_H [MeV]
8.6%	0.23%	0.15%	21.5%	2.64%	4.07



LHCでのヒッグス粒子の生成・崩壊

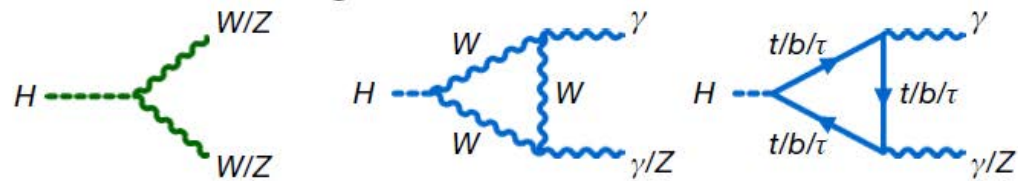
- 主な生成モードが4つある



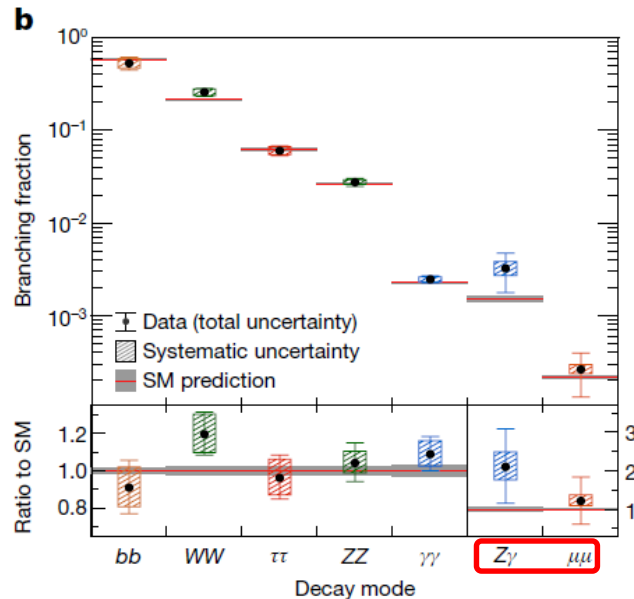
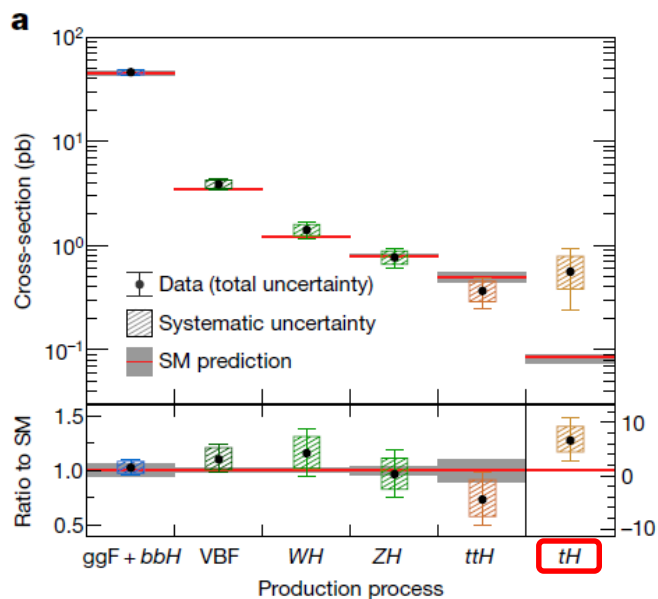
LHCでのヒッグス粒子の物理は、さまざまな生成・崩壊モードを観測できる豊富なプログラム。

それぞれのモードでの測定結果が標準理論と一致するかどうかを検証することで、厳しく標準理論を検証できる。

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



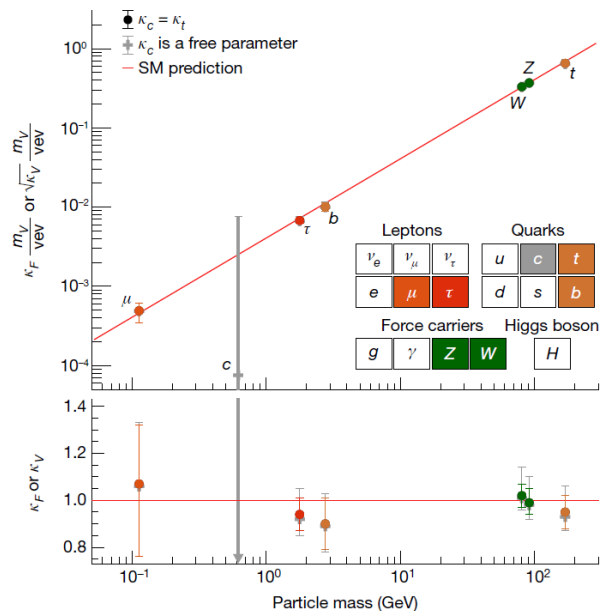
ヒッグス粒子の生成・崩壊の精密測定



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:

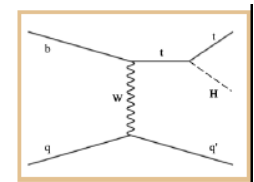
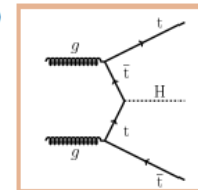
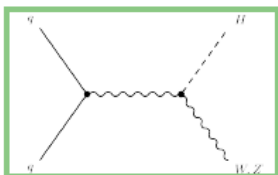
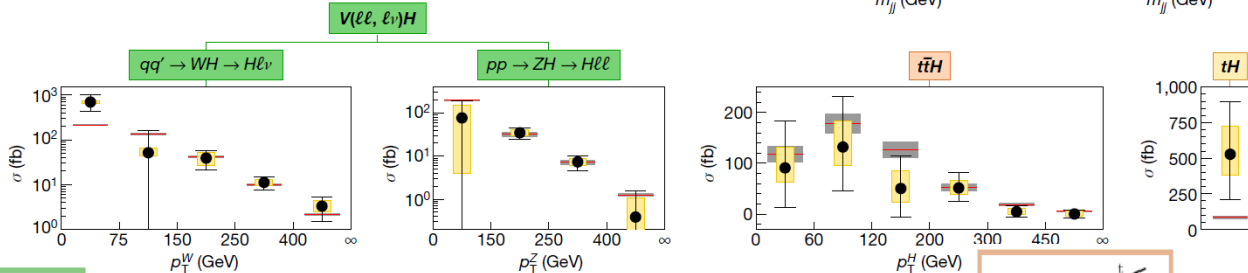
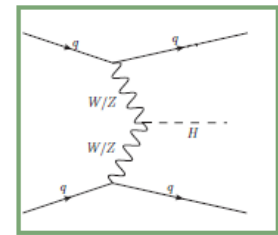
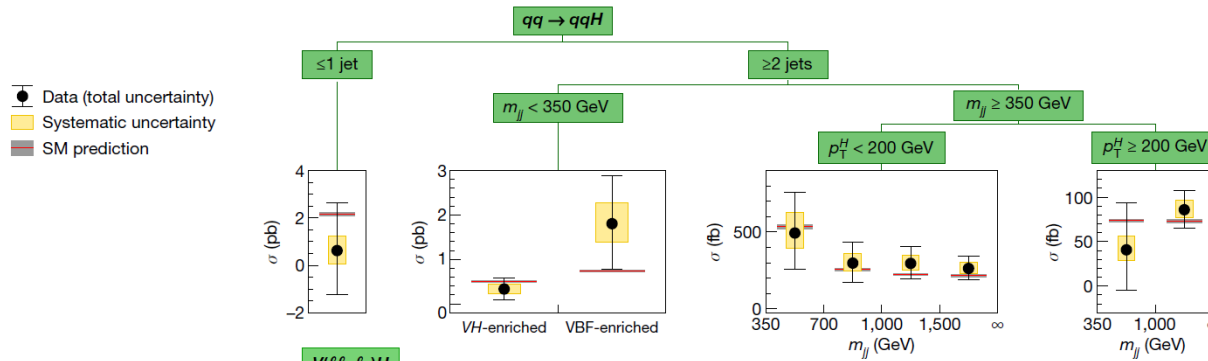
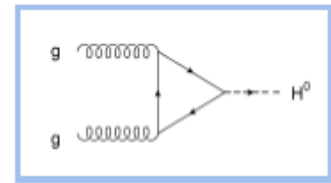
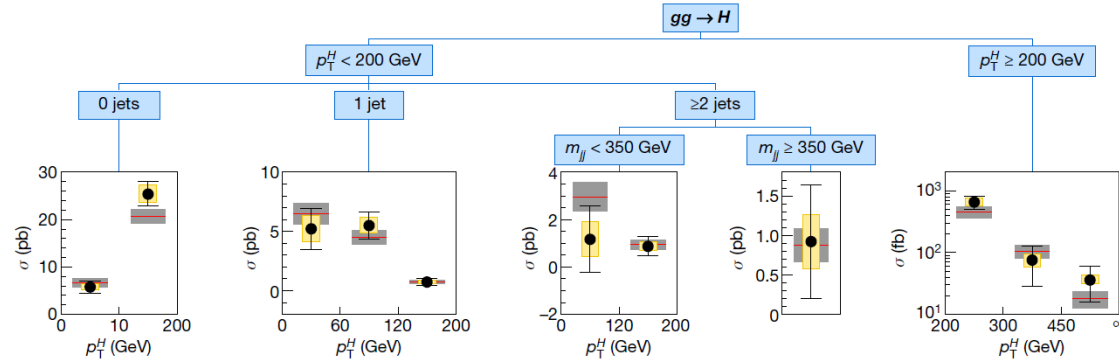
$$g_F = \sqrt{2} \frac{m_f}{v}$$

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



Simplified Template Cross Section (STXS)

- さまざまな終状態の解析結果をコンバイン。
- 36の運動学的領域でのヒッグス粒子の生成断面積を測定。



オフシェルでのヒッグス粒子の生成

- $$\sigma_{gg \rightarrow H \rightarrow ZZ^*}^{on-shell} \sim \frac{g_{ggH}^2 \cdot g_{HZZ}^2}{m_H \Gamma_H} \Leftrightarrow \sigma_{gg \rightarrow H \rightarrow ZZ}^{off-shell} \sim \frac{g_{ggH}^2 \cdot g_{HZZ}^2}{m_{ZZ}}$$

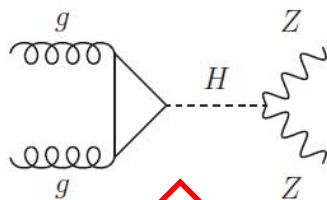
- $\sigma_{gg \rightarrow H \rightarrow ZZ^*}^{on-shell}$ は、 $H \rightarrow ZZ^*$ 解析でよく測れている。

- m_H から外れた不変質量領域で $\sigma_{gg \rightarrow H \rightarrow ZZ}^{off-shell}$ を測れば、 $\sigma_{gg \rightarrow H \rightarrow ZZ^*}^{on-shell}$ との比を取って Γ_H を測定できる。

実際には $\mu = \sigma/\sigma_{SM}$ を測定し、
 $\frac{\mu^{on-shell}}{\mu^{off-shell}}$ から Γ_H を測定している。

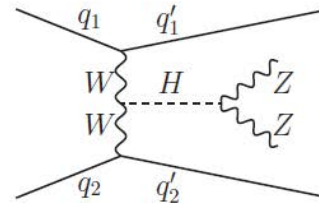
- 電弱ZZ過程との干渉項に気を付けながら解析する必要がある。

$gg \rightarrow H \rightarrow ZZ:$



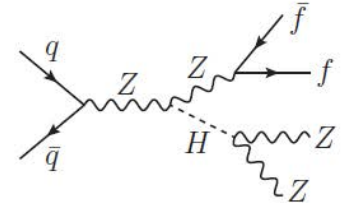
⇕ 干渉する

$q_1 q_2 \rightarrow q'_1 q'_2 H \rightarrow q'_1 q'_2 ZZ:$

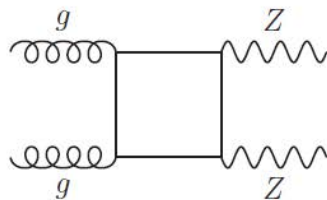


⇕

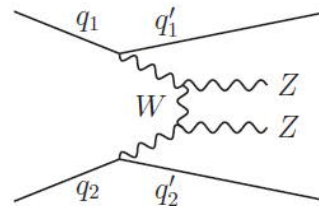
$q\bar{q} \rightarrow ZH \rightarrow ZZZ:$



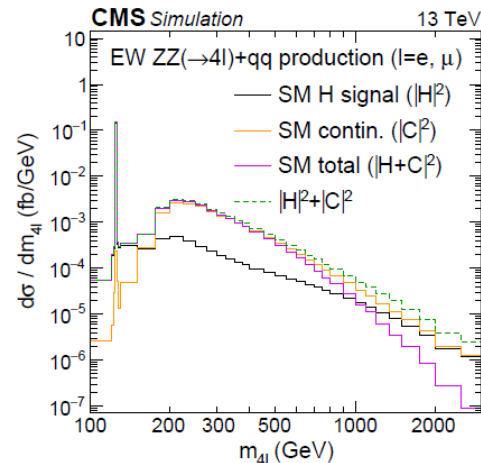
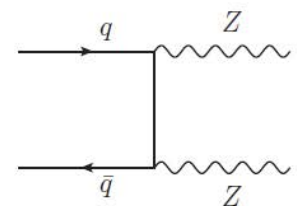
$gg \rightarrow ZZ:$



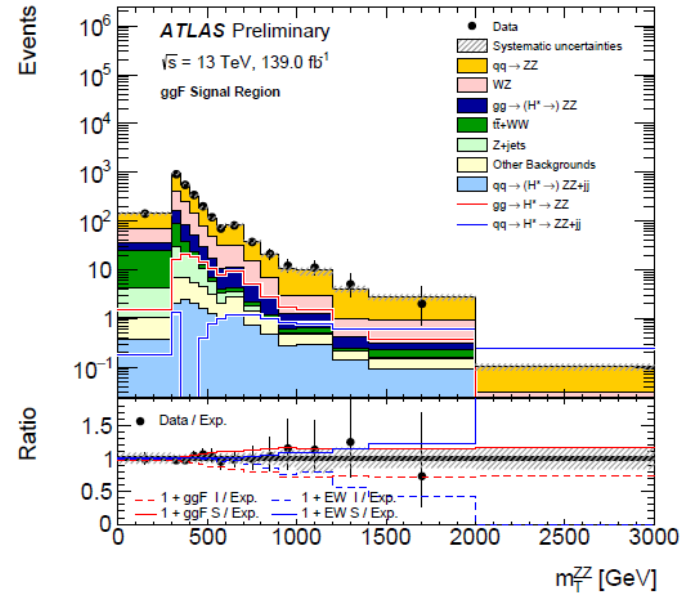
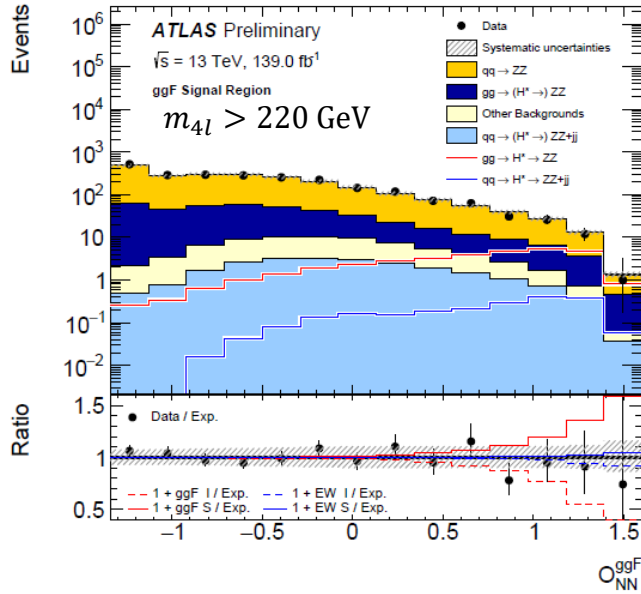
$q_1 q_2 \rightarrow q'_1 q'_2 ZZ:$



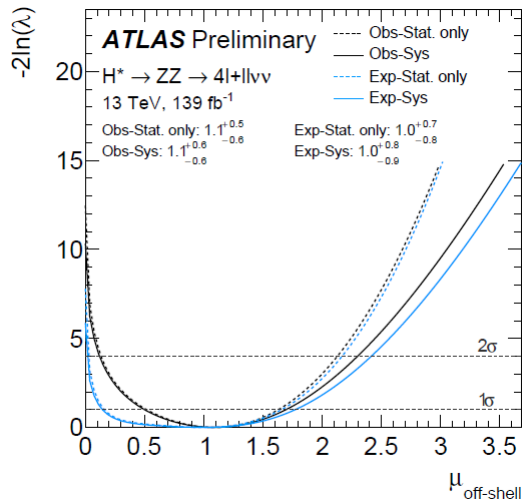
$q\bar{q} \rightarrow ZZ:$



オフシェルでのヒッグス粒子の生成 (2)

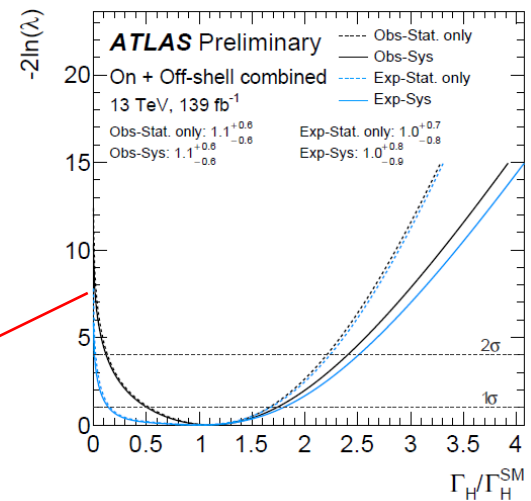


- H 信号は $\mu^{off-shell}$ に比例、干渉項は $\sqrt{\mu^{off-shell}}$ に比例するとし、フィットで $\mu^{off-shell}$ を決める。



Off-shellでのヒッグス粒子生成を 3.2σ の有意度で観測 (2.4σ exp)。

$$\Gamma_H = 4.6^{+2.6}_{-2.5} \text{ MeV}$$



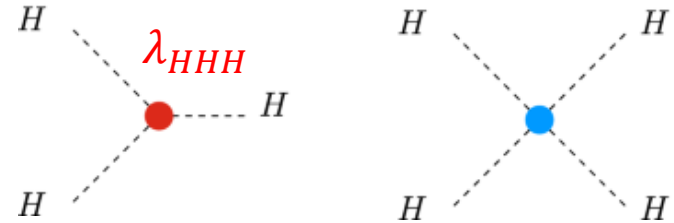
ヒッグス自己結合

- 標準理論ラグランジアン:

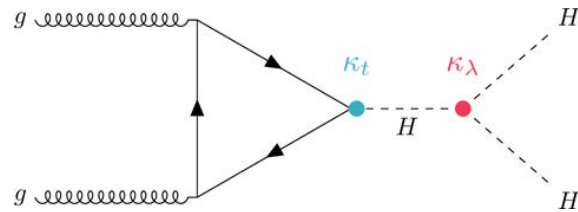
$$L_h = \frac{1}{2}(\partial^\mu h)(\partial_\mu h) + \frac{M_h^2}{2} h^2 - \frac{M_h^2}{2v} h^3 - \frac{M_h^2}{8v^2} h^4$$

$$+ \left(M_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} + \frac{1}{2} M_Z^2 Z_\mu Z^\mu \right) \left(1 + \frac{h}{v} \right)^2$$

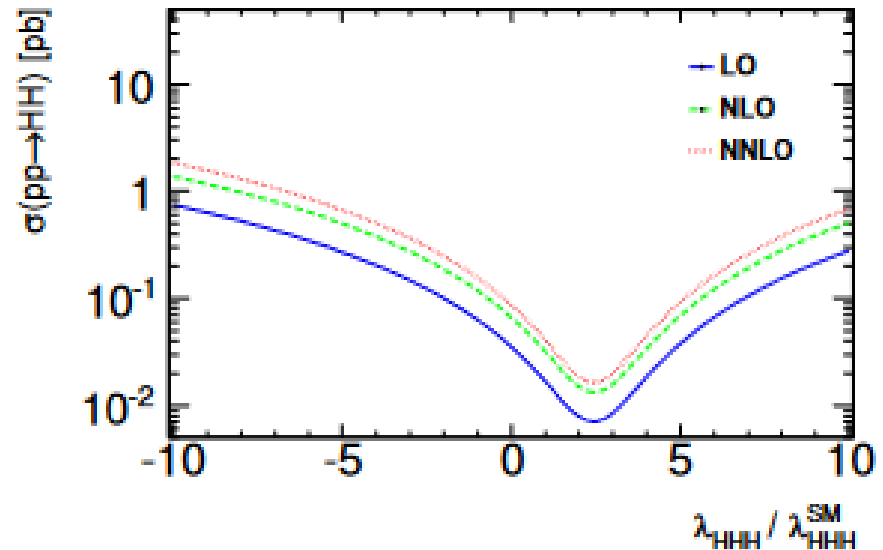
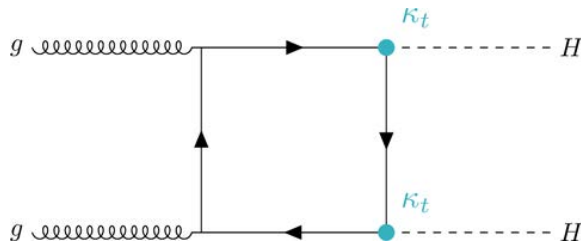
$$- \sum_f m_f \bar{f} f \left(1 + \frac{h}{v} \right).$$



- 自己結合 (λ_{HHH}) は、DiHiggs事象を探して解析する。
 - もし自己相互作用 (λ_{HHH}) がなければ、HH生成の断面積は2倍になる。

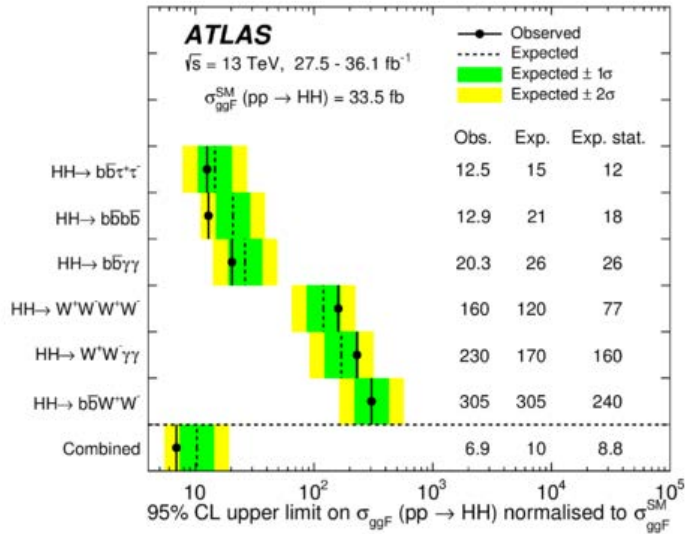


↑↓ 干渉する

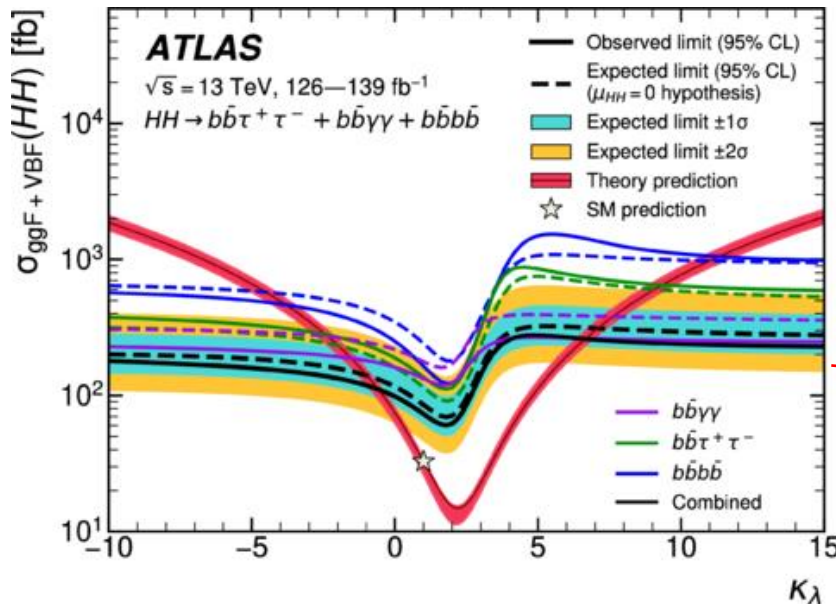
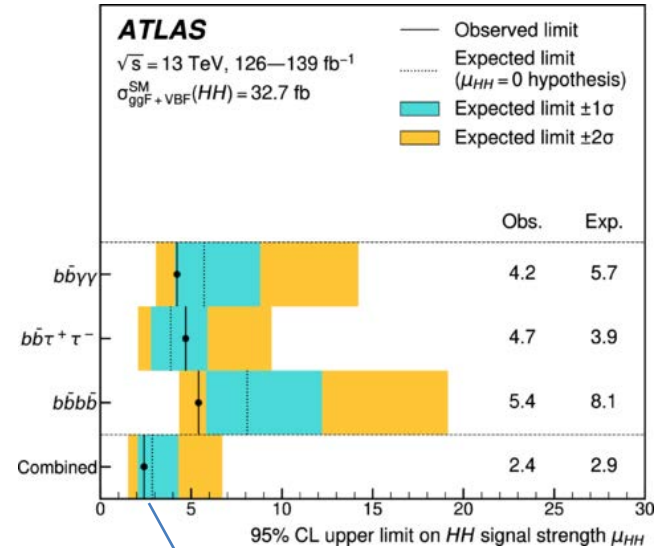


DiHiggs過程の探索結果

2015-2016データ



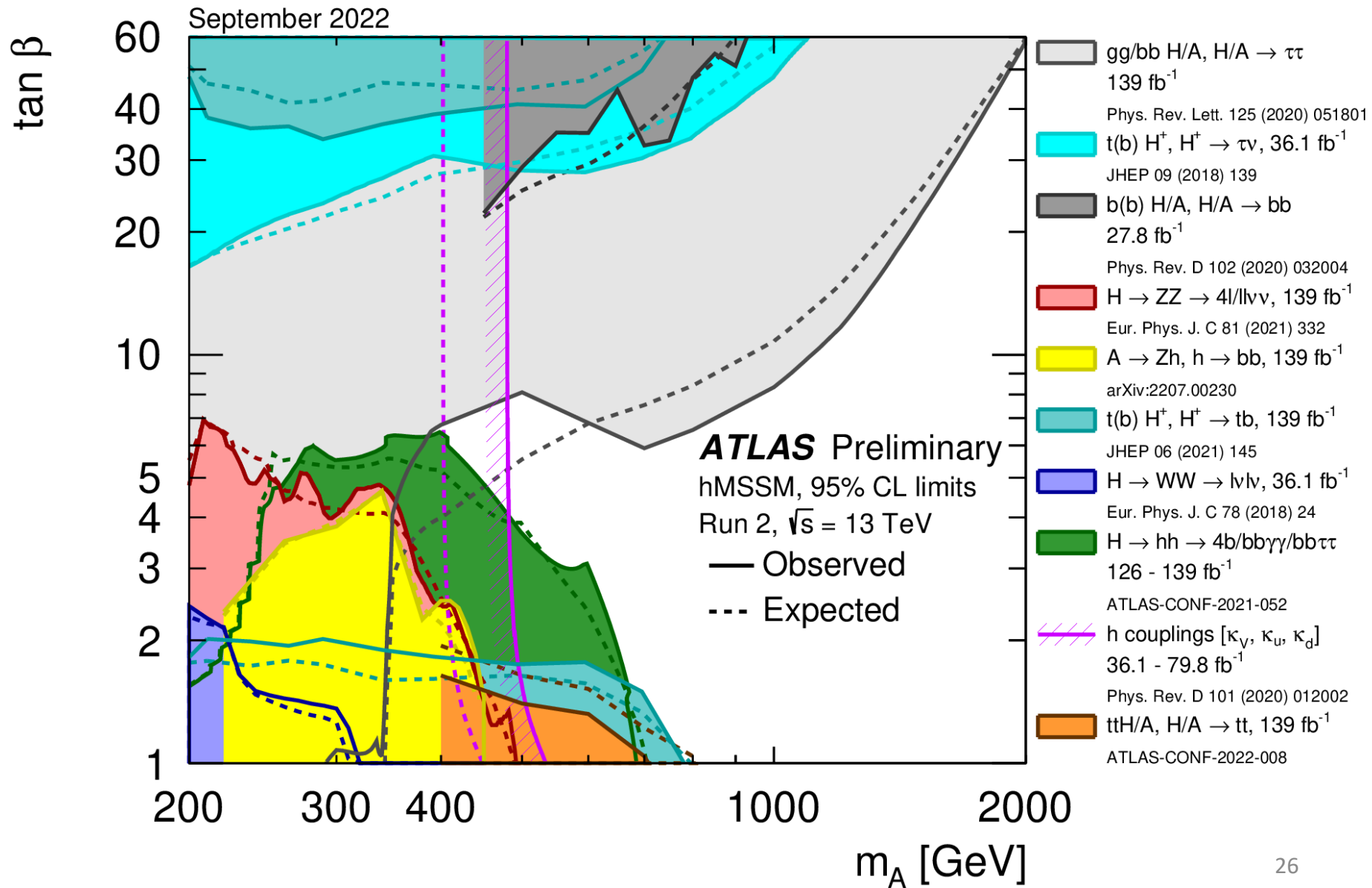
全Run 2データ



$$\mu_{HH} = \frac{\sigma_{HH}}{\sigma_{HH}^{SM}} < 2.4 \text{ (95\% CL)}$$

$$-0.4 < \kappa_\lambda = \lambda_{HHH} / \lambda_{HHH}^{SM} < 6.3 \text{ (95\% CL)}$$

MSSM ヒッグス粒子の探索結果



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実験が始まり、13.6 TeVのデータをすでに 35 fb^{-1} 取得した。2025年までに 250 fb^{-1} 蓄積できる予定。
- 2022年は、ヒッグス粒子が発見されてから10周年である。
 - 10年の間に、ヒッグス粒子の測定と理解の精度がどんどん高まってきた。
 - 2022年秋には、質量幅の直接測定が行われた。

backup

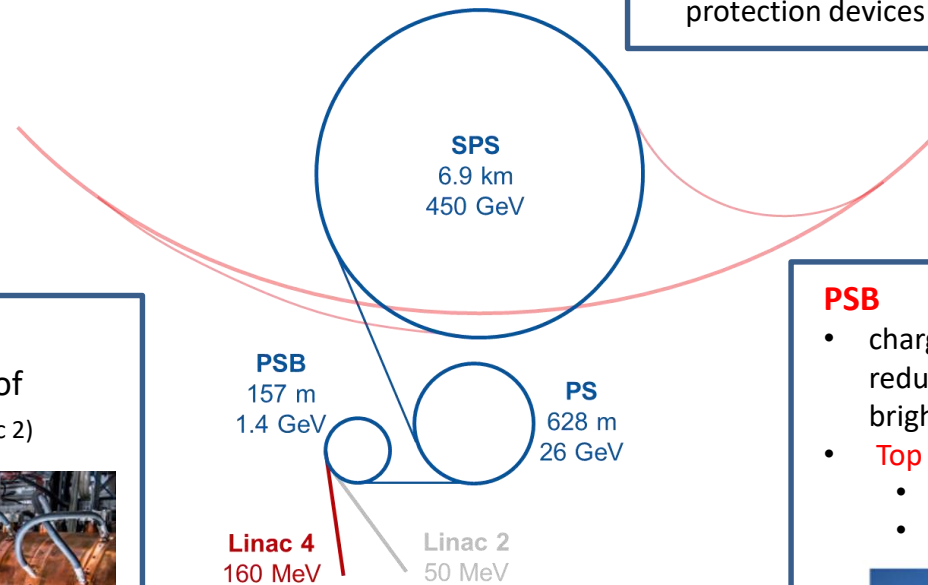
LHC Injectors Upgrade

Deployed in LS2 (2019-20)

- Preparation for HL-LHC, as well as Run 3 and maintenance.
- More intense, concentrated beam, with new Linac accelerating H^- instead of proton.
 - Replace Linac 2 with new Linac 4.
 - Upgrade Booster injection.
 - RF system upgrade in SPS

SPS

- RF system upgrade → solid state power amplifiers
- Impedance mitigation
- Robust beam dump and protection devices



Linac 4

H- ions at a higher energy of 160 MeV (was 50 MeV with Linac 2)



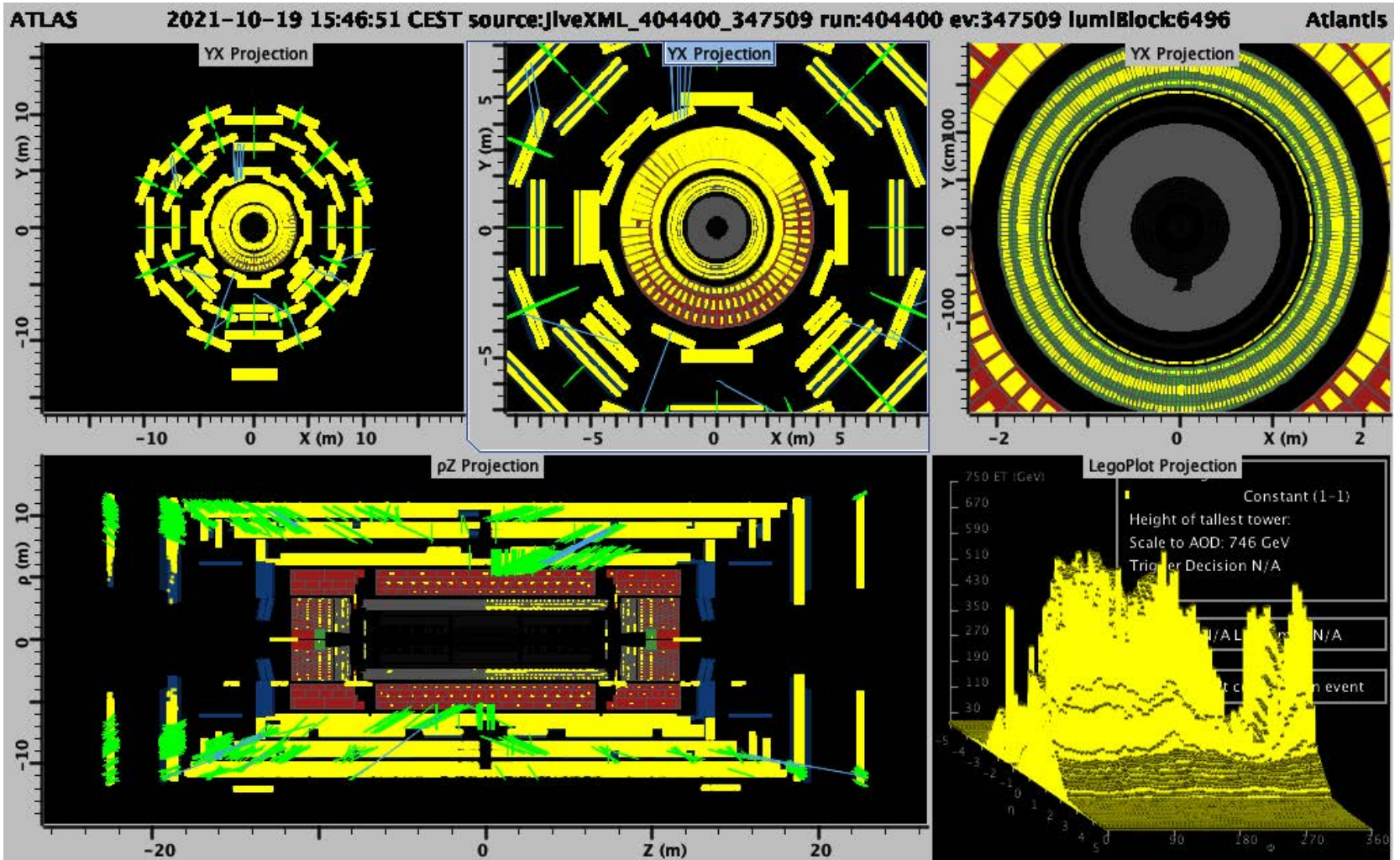
PSB

- charge exchange injection at 160 MeV, reduced space charge → improved brightness
- **Top energy: 1.4 GeV to 2 GeV**
 - New main power supply
 - New RF systems

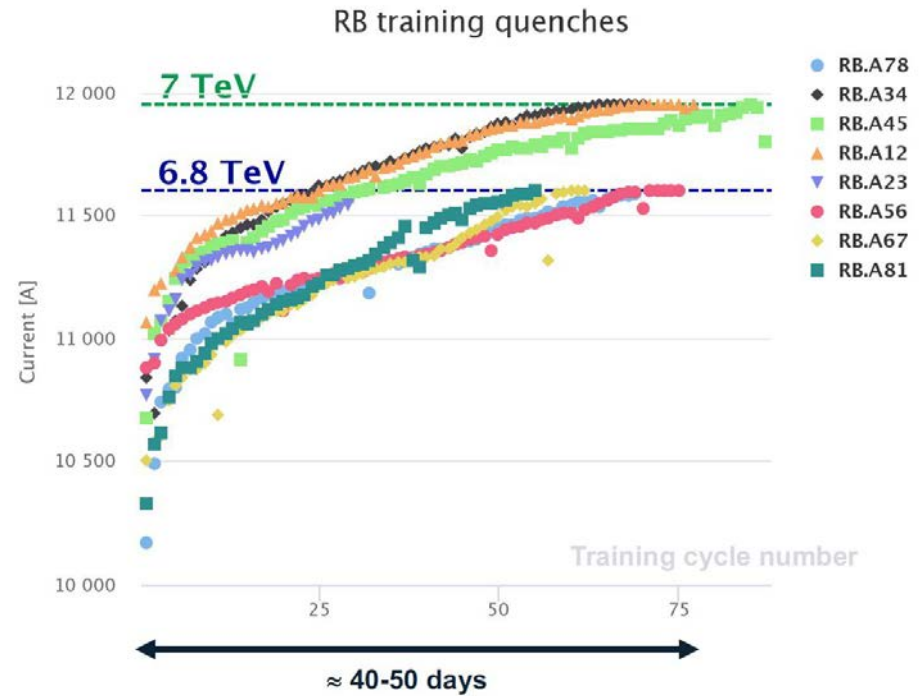
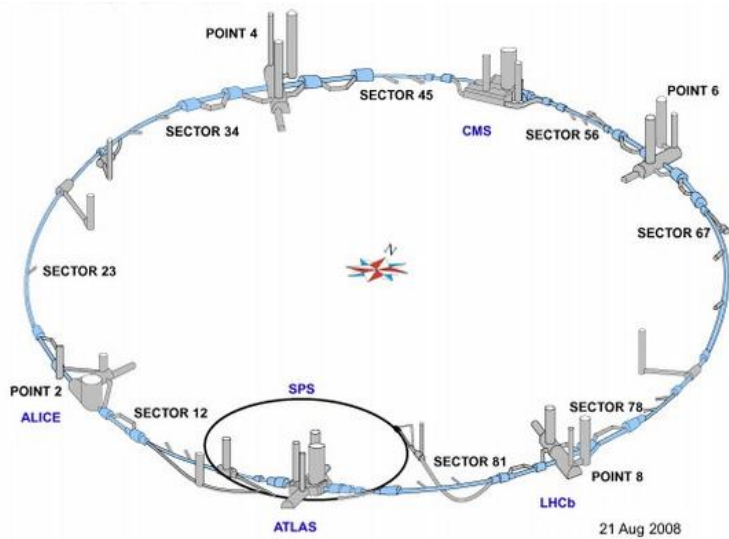


LHC Pilot Run

- 10/19 LHCに約3年ぶりにビームを入射。
- 10/26 低エネルギーの陽子(450 GeV)どうしを衝突。



超電導ダイポール磁石のトレーニング



故障があったSector 23(diode),
78(inter-turn short)は、修理・交換済
み。
トレーニングこれから(10月時点)。

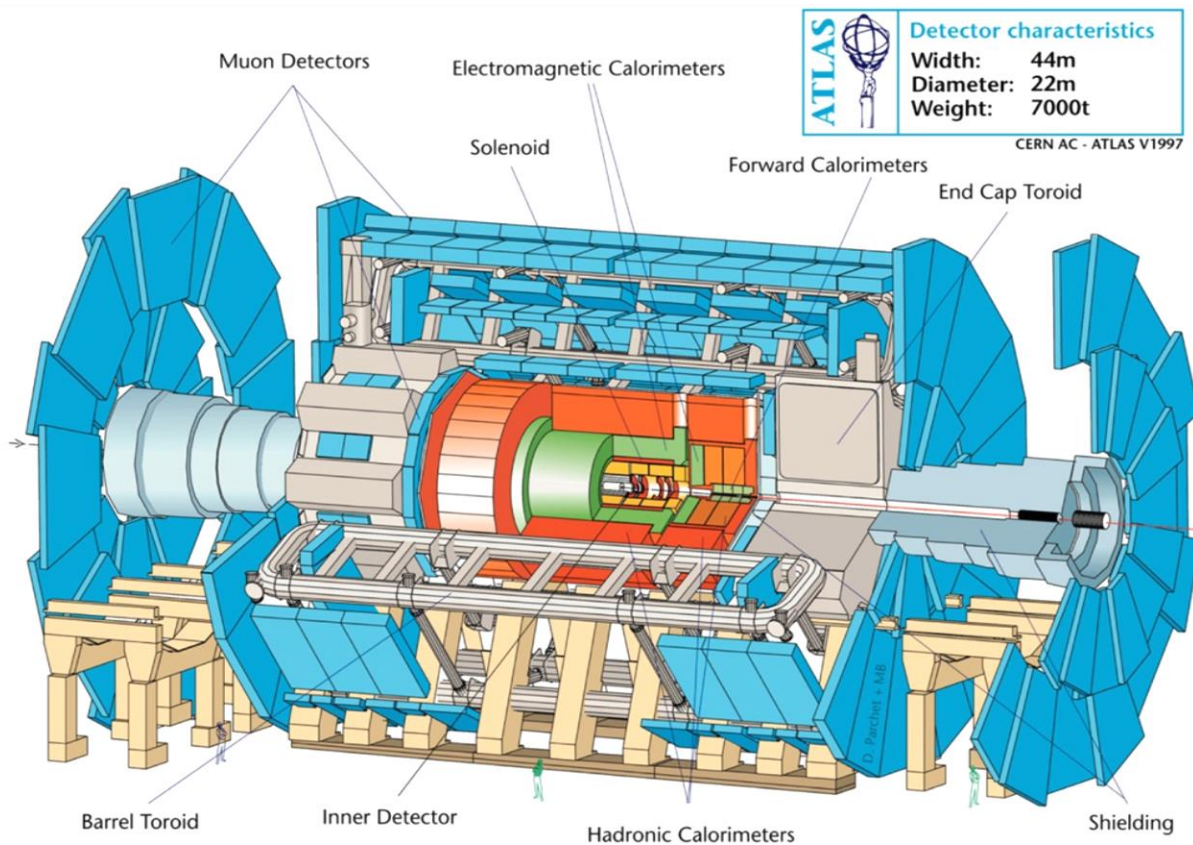
Run 3の陽子ビームエネルギーは、6.8
TeVになる。

$$\Rightarrow E_{CM} = 13.6 \text{ TeV}$$

Circuit	No. circuit quenches	Current of last quench (A)	E (TeV)
RB.A78	69	11585	6.8 - ε
RB.A34	70	11950	7.0
RB.A45	87	11950	7.0
RB.A12	77	11950	7.0
RB.A23	29	11538	6.8 - ε
RB.A56	75	11600	6.8
RB.A67	62	11600	6.8
RB.A81	55	11600	6.8

RB.78 and RB.23 to be re-trained...

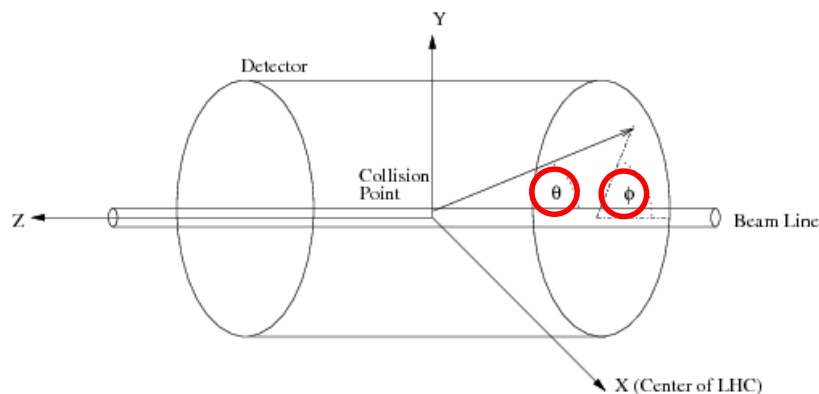
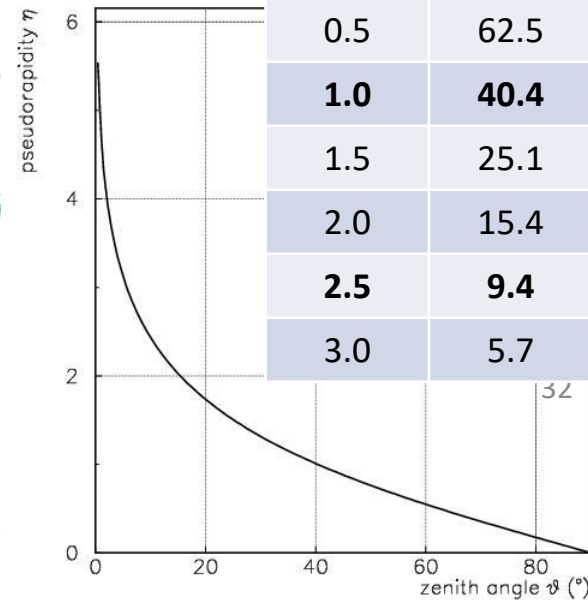
ATLAS検出器、座標系



Pseudorapidity:

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

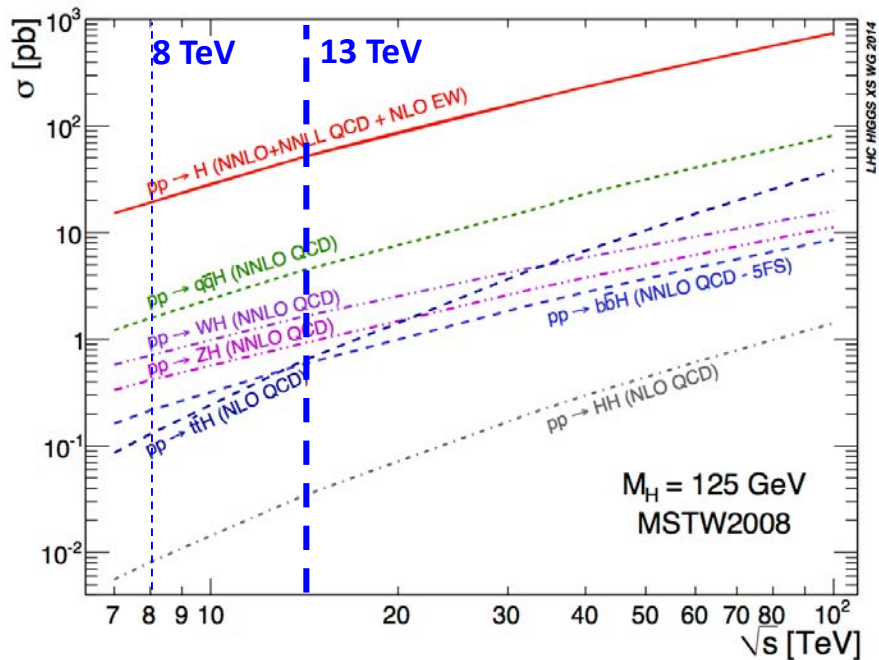
η	θ (度)
0	90.0
0.5	62.5
1.0	40.4
1.5	25.1
2.0	15.4
2.5	9.4
3.0	5.7



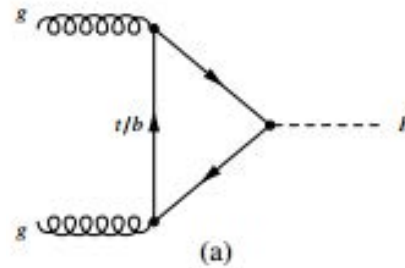
粒子の運動量は、
 P_T, η, ϕ
 であらわす場合が多い。

LHCでのヒッグス粒子の生成

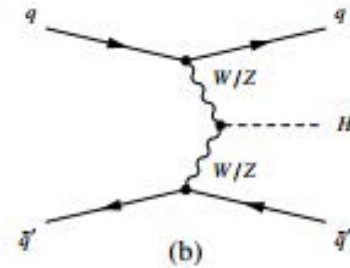
- LHCでは、4つの物理過程でヒッグス粒子は生成される。



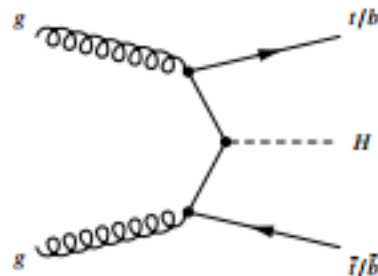
$$gg \rightarrow H$$



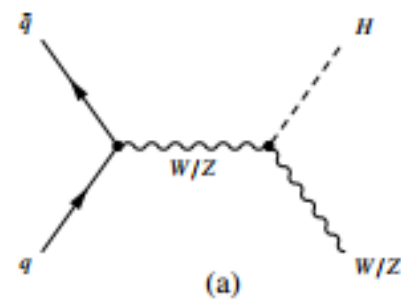
$$qq \rightarrow qqH$$



$$gg \rightarrow ttH$$

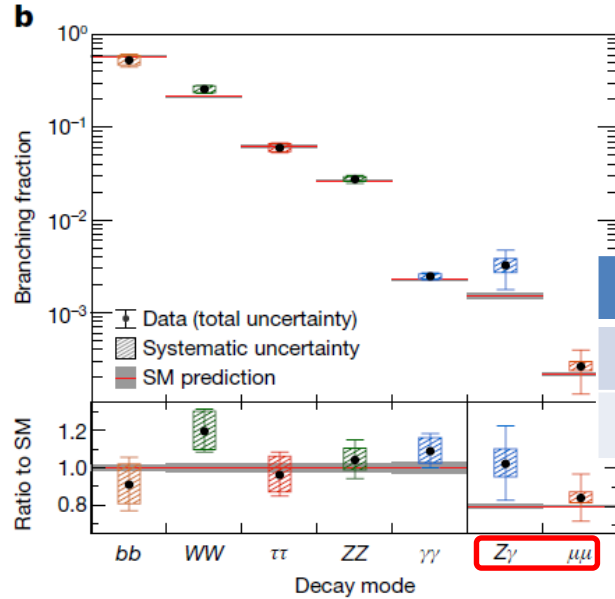
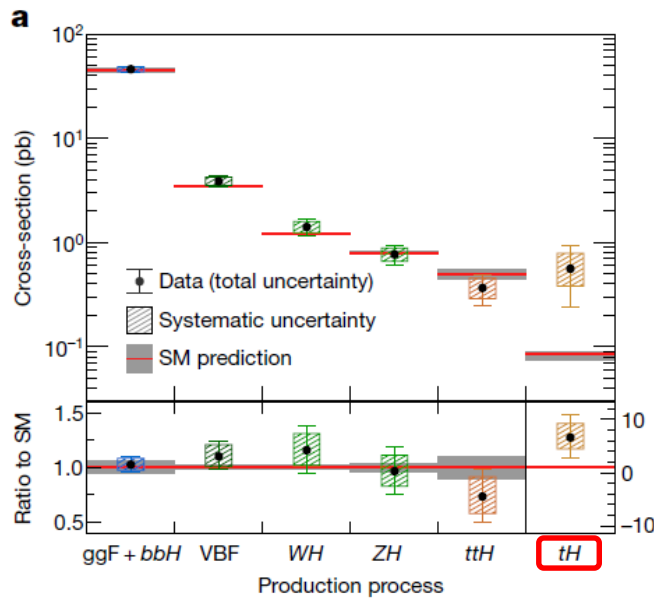


$$aa \rightarrow VH$$



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

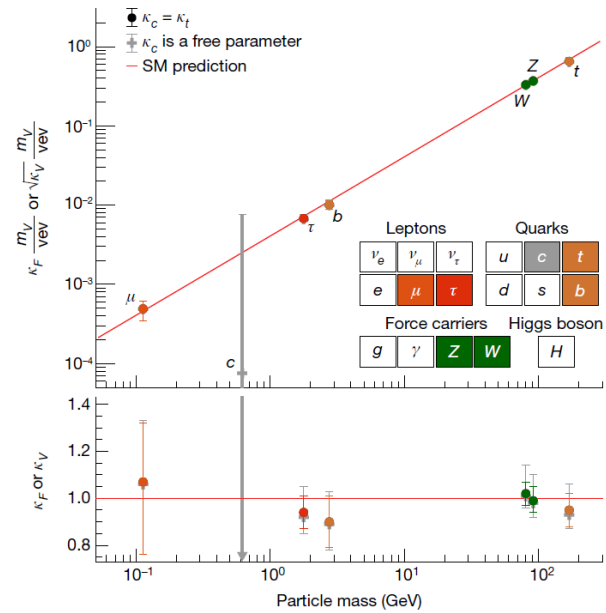
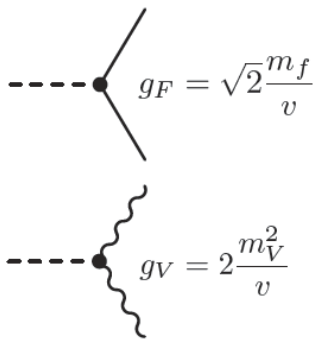
ヒッグス粒子の生成・崩壊の精密測定



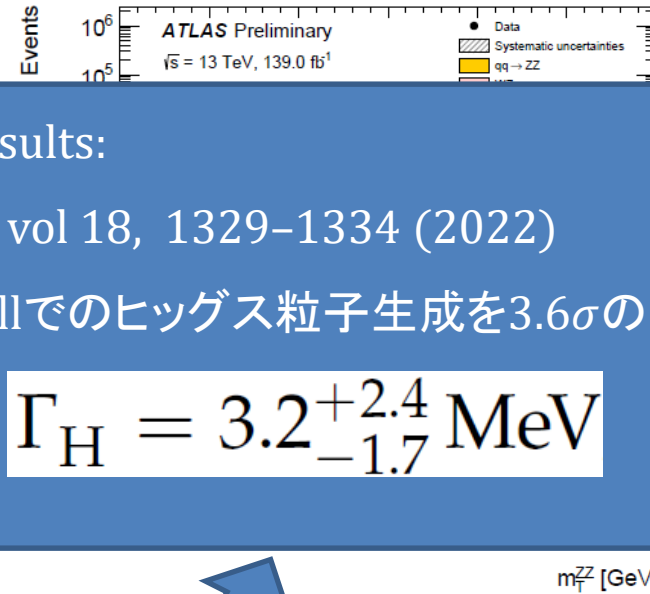
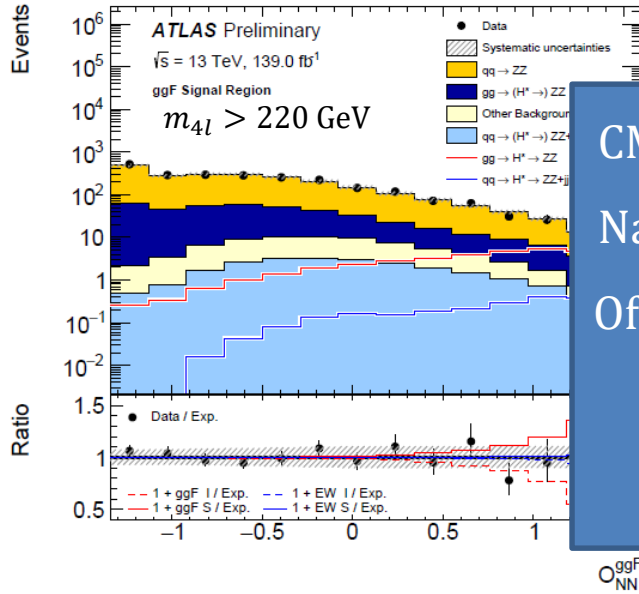
これから観測を目指す
チャンネルの現状

tH	$< 15 \times \sigma_{SM}$
$H \rightarrow \mu\mu$	2.0σ (1.7σ exp)
$H \rightarrow Z\gamma$	2.3σ (1.1σ exp)

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:



オフシェルでのヒッグス粒子の生成 (2)



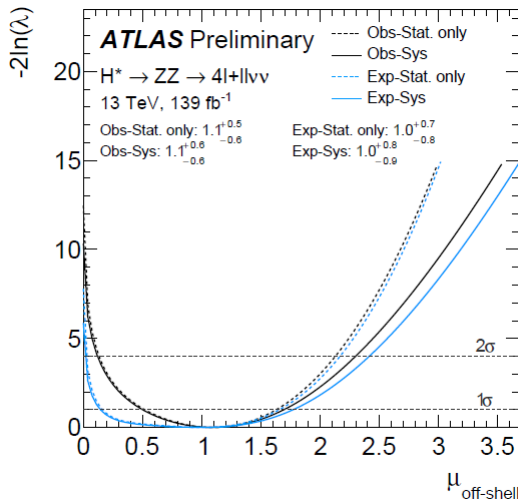
CMS results:

Nature vol 18, 1329-1334 (2022)

Off-shellでのヒッグス粒子生成を3.6σの有意度

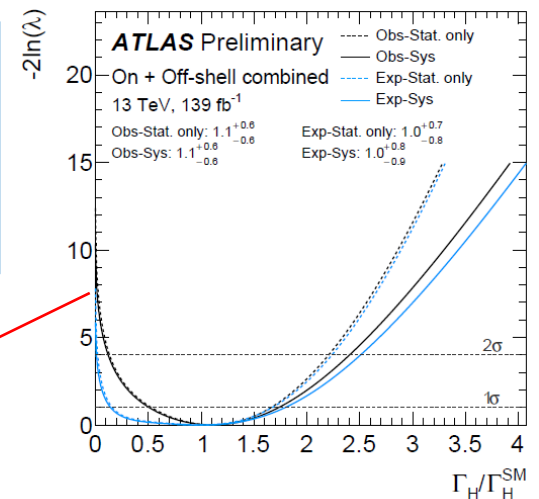
$$\Gamma_H = 3.2_{-1.7}^{+2.4} \text{ MeV}$$

- H 信号は $\mu^{off-shell}$ に比例、干渉項は $\sqrt{\mu^{off-shell}}$ に比例するとし、フィットで $\mu^{off-shell}$ を決める。



Off-shellでのヒッグス粒子生成を3.2σの有意度で観測 (2.4σ exp)。

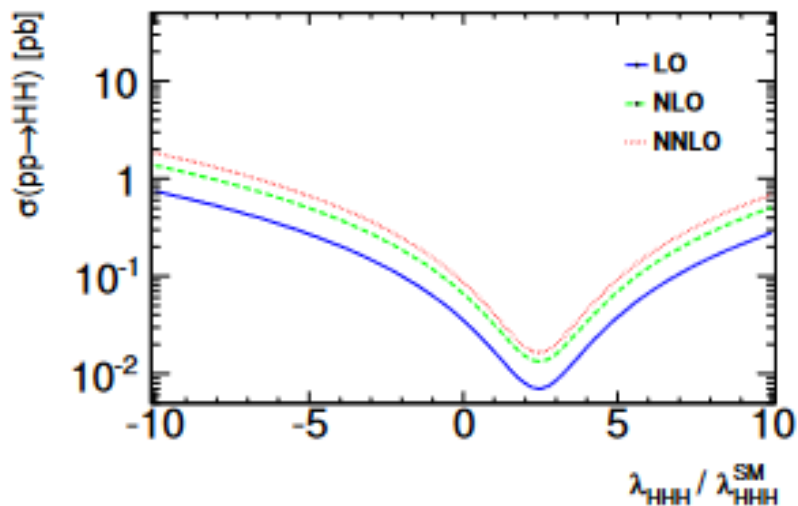
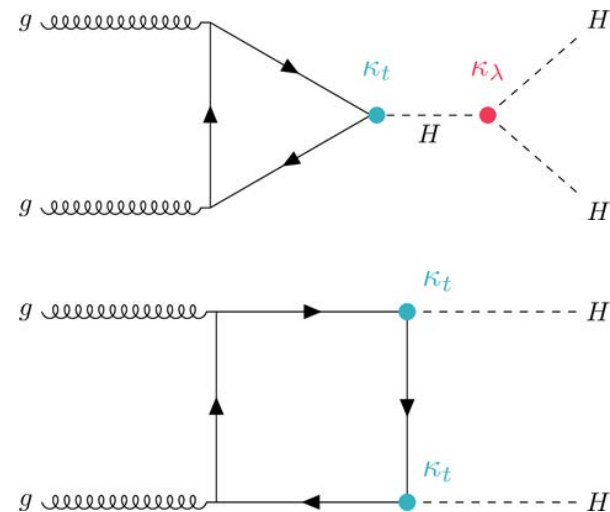
$$\Gamma_H = 4.6_{-2.5}^{+2.6} \text{ MeV}$$



ヒッグス自己結合測定

$$\kappa_\lambda = \frac{\lambda_{HHH}}{\lambda_{HHH}^{SM}}$$

- DiHiggs事象を探して解析する。
- DiHiggsは、2つのダイヤグラムの干渉が起こる。
- もし自己相互作用(λ_{HHH})がなければ、HH生成の断面積は2倍になる。



Expected event yields for $\frac{\lambda_{HHH}}{\lambda_{HHH}^{SM}} = 1$

Decay Channel	Branching Ratio	Total Yield (3000 fb ⁻¹)
$b\bar{b} + b\bar{b}$	33%	40,000
$b\bar{b} + W^+W^-$	25%	31,000
$b\bar{b} + \tau^+\tau^-$	7.3%	8,900
$ZZ + b\bar{b}$	3.1%	3,800
$W^+W^- + \tau^+\tau^-$	2.7%	3,300
$ZZ + W^+W^-$	1.1%	1,300
$\gamma\gamma + b\bar{b}$	0.26%	320
$\gamma\gamma + \gamma\gamma$	0.0010%	1.2

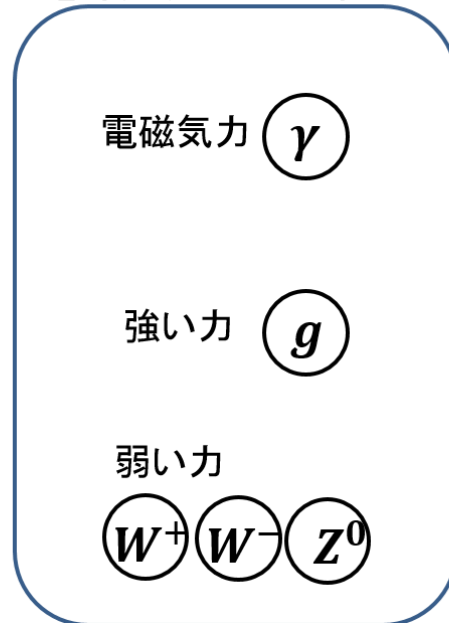
荷電ヒッグス粒子を探すモチベーション

- 現在までの素粒子実験の結果は、標準理論の予言とよく一致している。
- **標準理論では、ヒッグス粒子は1つだけ。**

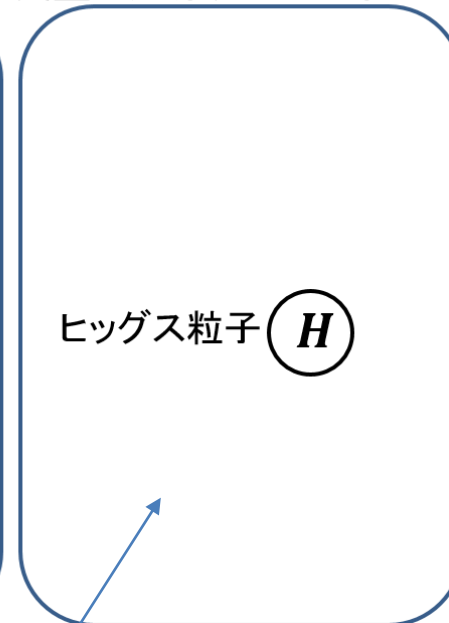
物質を構成する粒子

	第一世代	第二世代	第三世代
クォーク	u	s	t
	d	c	b
レプトン	ν_e	ν_μ	ν_τ
	e	μ	τ

力を媒介するゲージ粒子



質量の起源、ヒッグス粒子

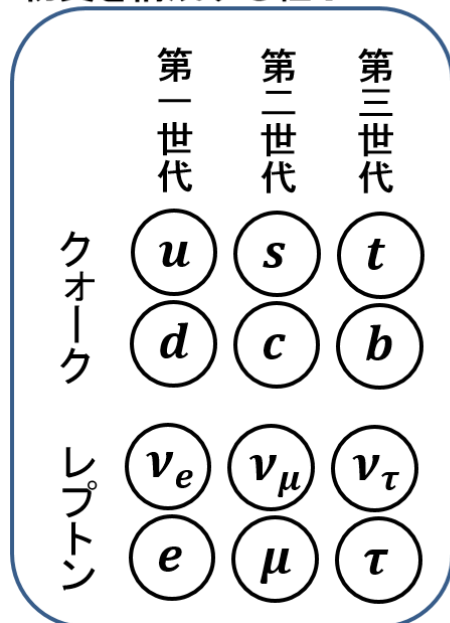


ヒッグス粒子だけ1種類しかない。。。

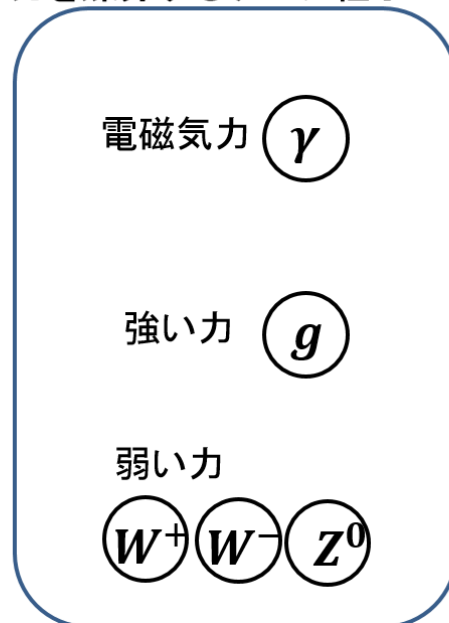
荷電ヒッグス粒子を探すモチベーション

- 現在までの素粒子実験の結果は、標準理論の予言とよく一致している。
- **標準理論では、ヒッグス粒子は1つだけ。**

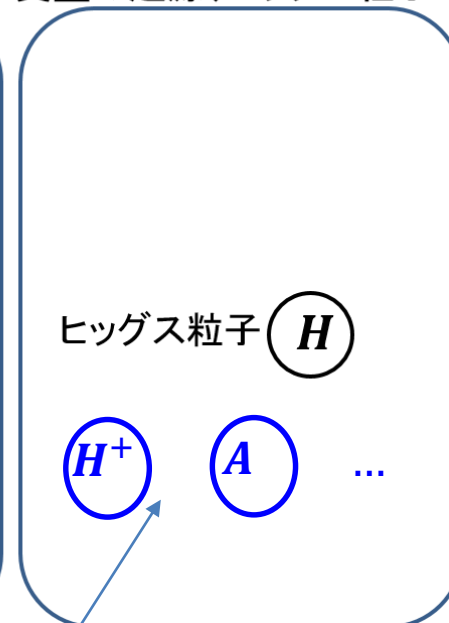
物質を構成する粒子



力を媒介するゲージ粒子



質量の起源、ヒッグス粒子



ヒッグス粒子だけ1種類しかない。。。
もっとあってもいいじゃないか？
多くのBSM理論で、荷電ヒッグス粒子 H^\pm を含む複数のヒッグス粒子が予言されている。
e.g. 2HDM, 超対称性

2 Higgs Doublet Model (2HDM)

- 標準理論: ヒッグス・ダブレットを一個入れた。

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_1 + i\phi_2 \\ \phi_3 + i\phi_4 \end{pmatrix}$$

- 4つの自由度 $\rightarrow W^+, W^-, Z$ の質量 + ヒッグス粒子
- Vacuum Expectation Value $v = 246 \text{ GeV}$
- ヒッグス・ダブレットを2つ入れたら、、、

$$H_u = \begin{pmatrix} H_u^+ \\ H_u^0 \end{pmatrix}, \quad H_d = \begin{pmatrix} H_d^0 \\ H_d^- \end{pmatrix}$$

- 8つの自由度 $\rightarrow W^+, W^-, Z$ の質量 + 5個のヒッグス粒子
 h, H, A, H^+, H^-

- 2つのVEV: v_1, v_2

$$\sqrt{v_1^2 + v_2^2} = 246 \text{ GeV}$$
$$\tan \beta = v_2/v_1$$

2HDMのヒッグス物理は、 $m(H^+)$ と $\tan\beta$ の2変数で記述される。

超対称性理論では、標準理論どおりの単一ヒッグス粒子では筋の通った理論に作れない。必ず複数のヒッグス粒子があるべき。

MSSMのLagrangianは、2HDMのヒッグス機構と同じ。

超対称性

フェルミ粒子とボーズ粒子の間の対称性＝超対称性。

- ヒッグス質量の発散が自然に抑えられる(?)
- 力の大統一が自然にできる。
- 標準理論と同じ数の未発見粒子があるはず。
- 未発見粒子が暗黒物質である可能性。

