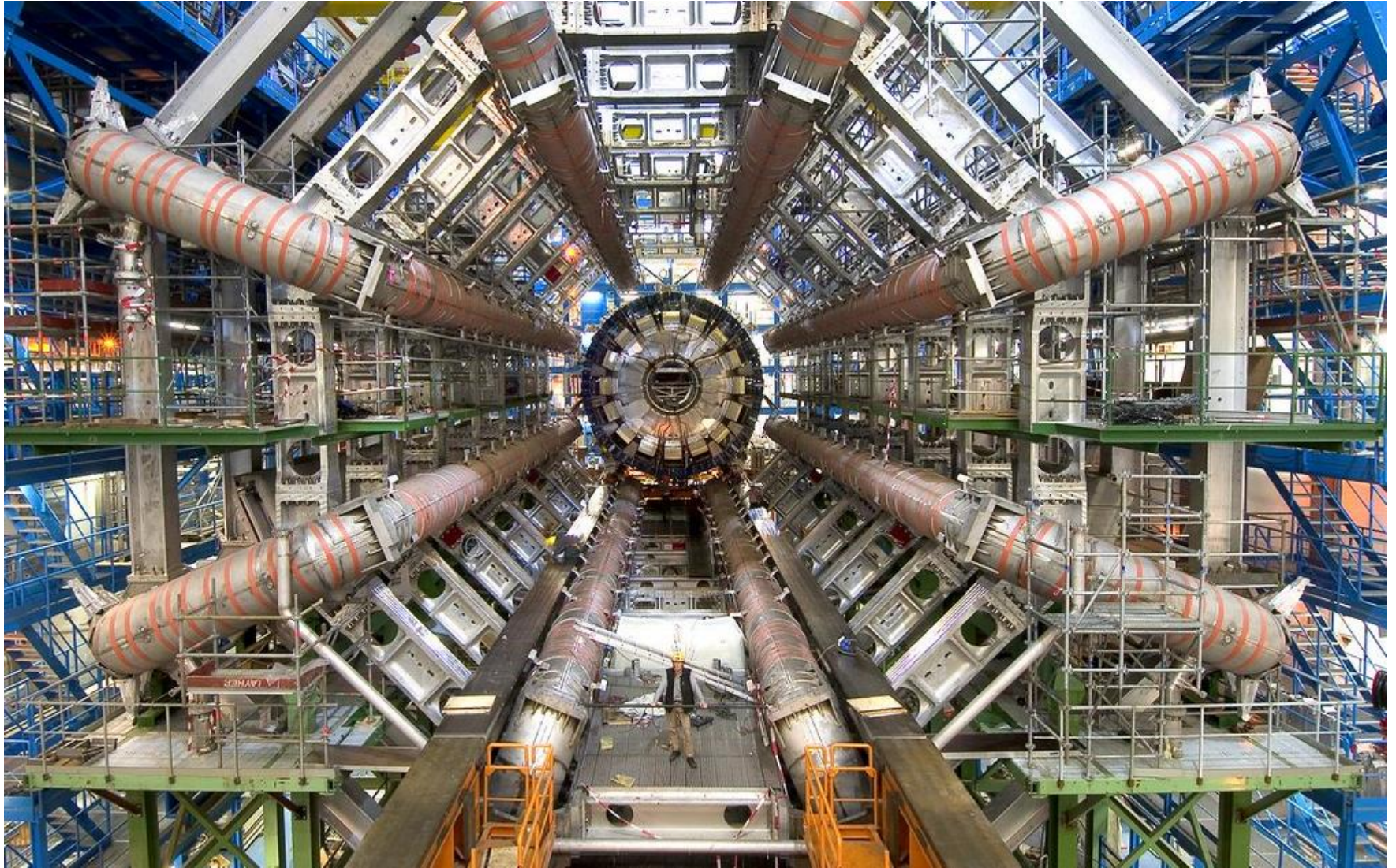


ATLAS実験の最近の物理成果



佐藤構二

宇宙史センター 構成員会議

2021/11/26

LHC実験

スイス・アルプス山脈

世界最高エネルギーでの加速器実験

$E_{CM} \leq 14$ TeVでの陽子・陽子衝突

2010年 LHC加速器稼動開始。

2011-12年 物理Run開始。Ecm=7 – 8 TeVでデータ取得。

2012年 LHC加速器のATLAS/CMSがヒッグス粒子を発見。

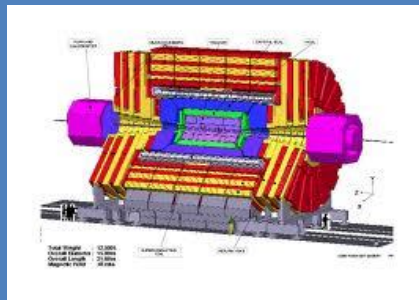
2015-18年 Run 2実験。Ecm=13 TeV。

2022-2024年 Run 3。Ecm=13.6 TeV のデータセット。

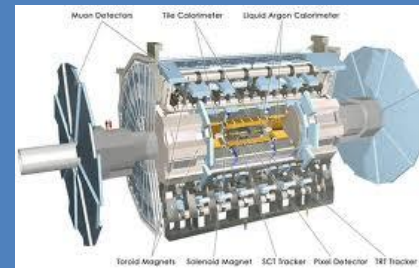
2026-203X年 HL-LHC実験。~3000 fb⁻¹の大データセット。ジュネーブ市街



CMS実験



ATLAS実験



円周27km

陽子を最大7 TeVまで加速して正面衝突

COVID status at CERN

CERN Accelerating science Sign in Directory

CERN is in COVID-19 Level 2 - Yellow from 19 July 2021 until further notice

On-site COVID-19 vaccine now available for ALL

SAFETY RULES ▾ SERVICES & SUPPORT ▾ YOUR HSE ▾ ABOUT US ▾

COVID-19 Information

Information related to Covid-19 at CERN

COVID-19 https://hs.cern Coronavirus information

CERN'S COVID-19 SCALE AND MEASURES

The COVID-19 level in place reflects the prevailing epidemiological situation, and determines corresponding measures across the Laboratory.

TRANSITION BETWEEN LEVELS
Determined via a combination of the incidence rate in the local area and a qualitative assessment by CERN.

Level	Color	Category	Criteria
4	Red	High	Over 100 cases per 100 000
3	Orange	Medium	Over 10-25 cases per 100 000
2	Yellow	Low	Fewer than 10-25 cases per 100 000
1	Green	Negligible	

Based on number of confirmed cases at CERN, presence of new variants, vaccination, stratified testing campaign, etc.

The level can move up or down the scale, according to the epidemiological situation

Further information

Introduction

As of 1 June 2021, CERN has implemented a four-level COVID-19 scale, determining conditions for on-site access, telework and other measures that concern CE

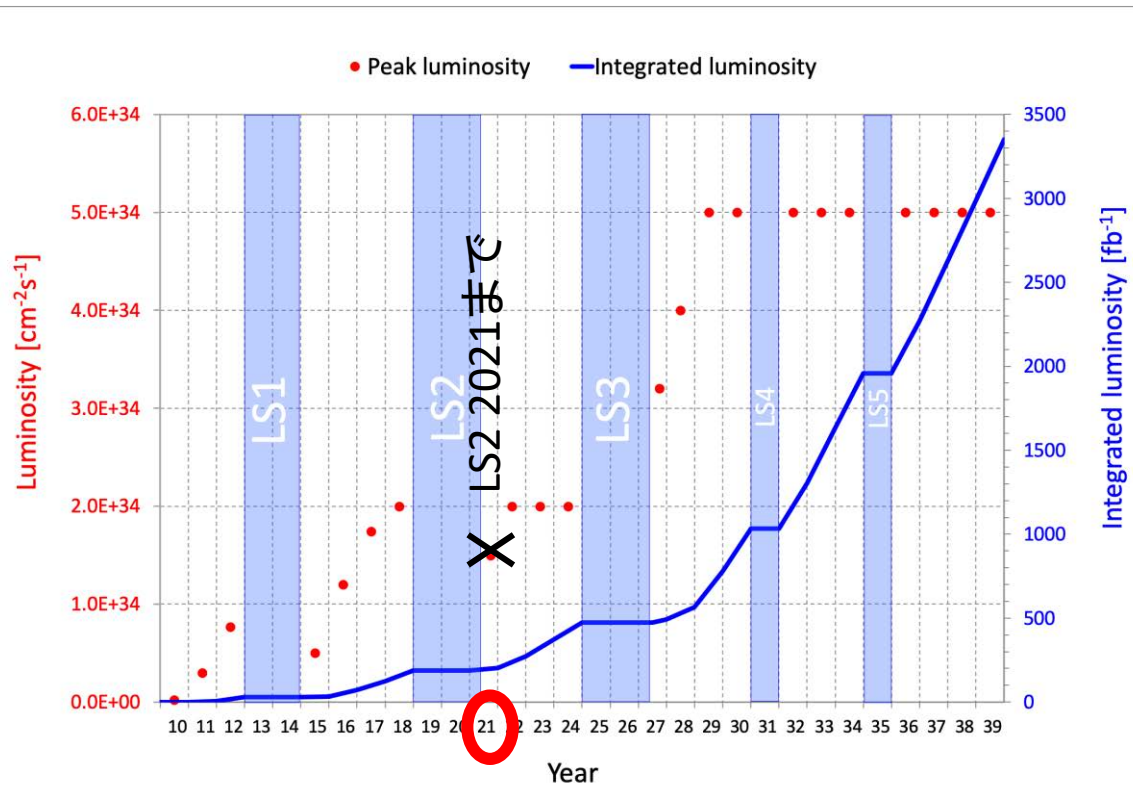
COVID-19 level 2 - Yellow from 19 July onwards

Respect for CERN's measures reduces transmission on-site

- Proximeter use is mandatory on-site;
- Masks must be worn in all shared spaces at all times, unless seated in a cafeteria or restaurant while consuming food or drink;
- Seating limits indicated on each table in the cafeterias and restaurants must be respected and chairs must not be moved between tables.



LHC長期スケジュール



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) $\sigma(H) \sim 55 \text{ pb}$ 、Run 2で生成されたヒッグス粒子は、
 $55,000[\text{fb}] \times 139[\text{fb}^{-1}] \sim 7.6\text{M}$ 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	2022-2024	13.6	160
HL-LHC	2026-	14	3000

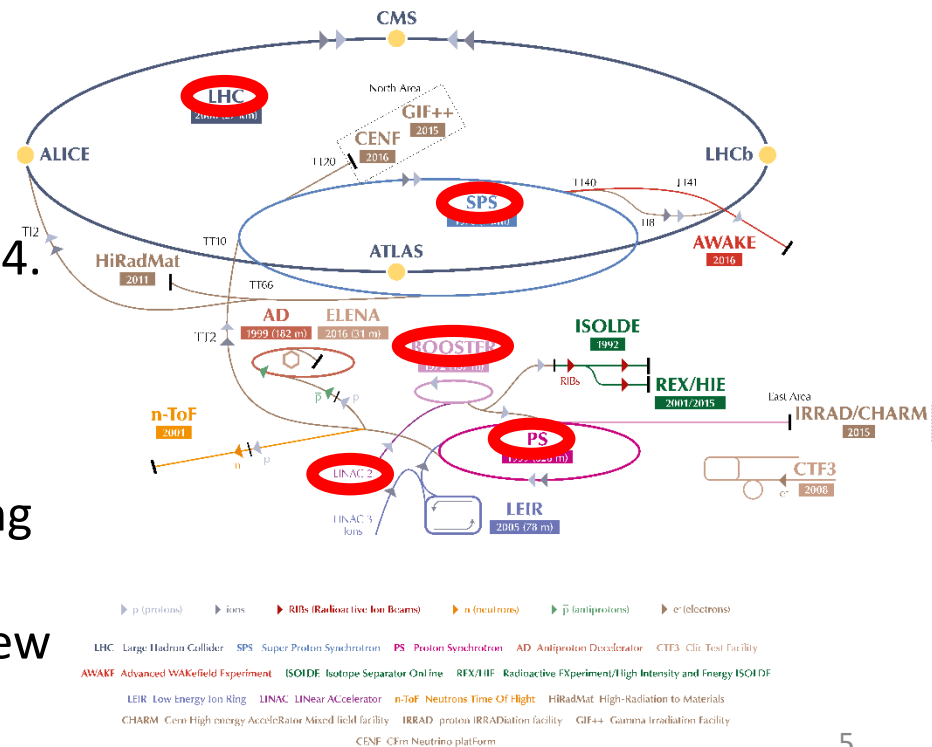
Accelerator LS2 Upgrades

- 2019-2021: Long Shutdown (LS2) preparing for Run 3 in 2022-2024.

Key Plans for LS2 Accelerator Upgrades

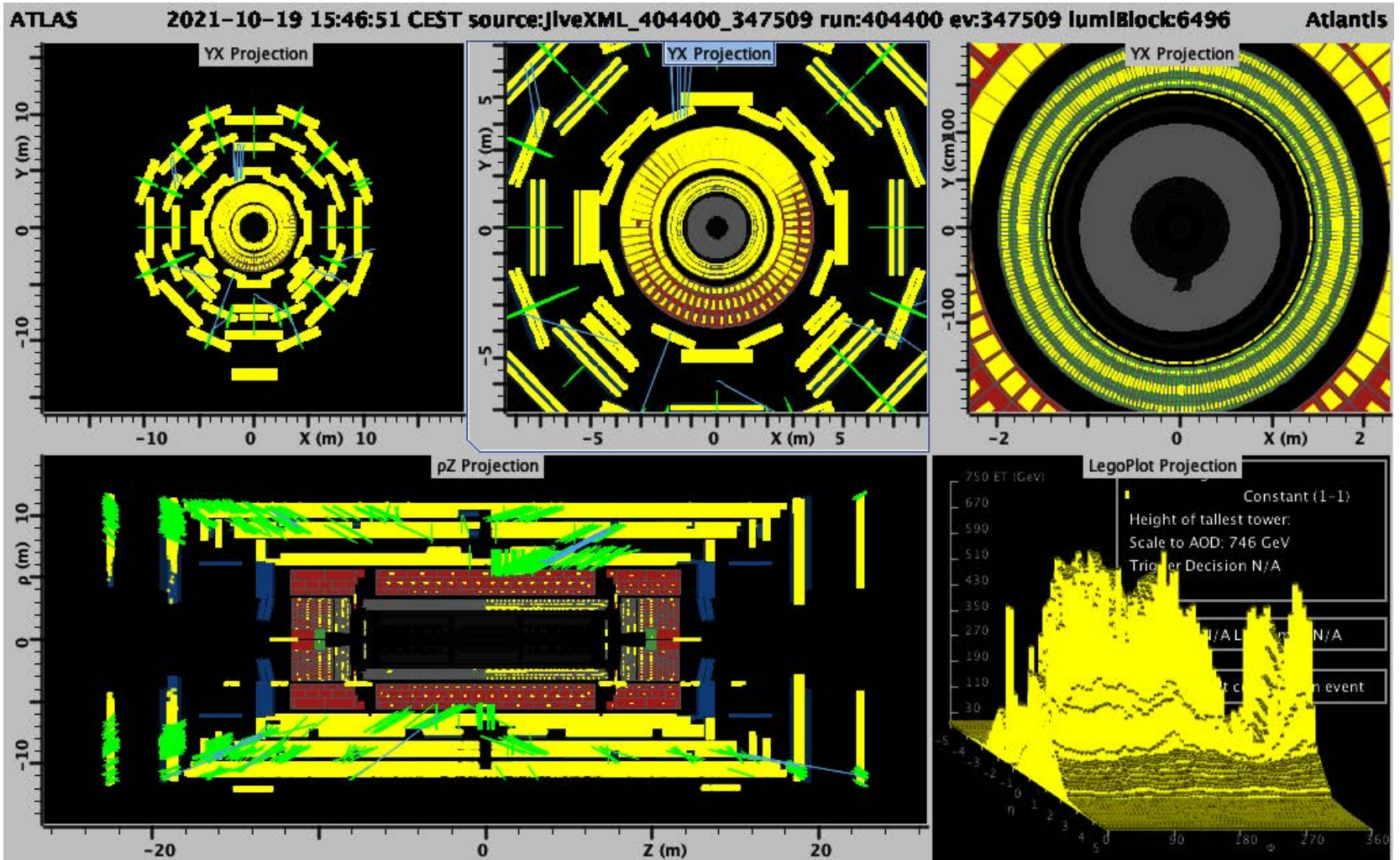
<https://home.cern/news/news/accelerators/key-plans-next-two-years-lhc>

- 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.
 - New RF system in SPS.
- Bring beam energy up to 7 TeV.
 - Consolidate the diodes providing current to dipole magnets
- ~20 magnet replacements, install new lifts, ...

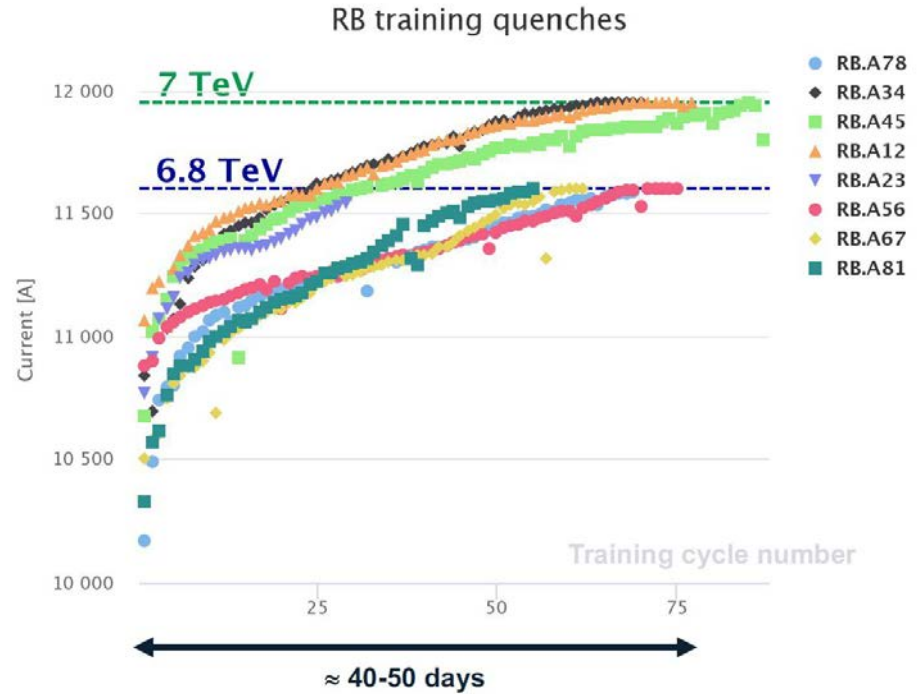
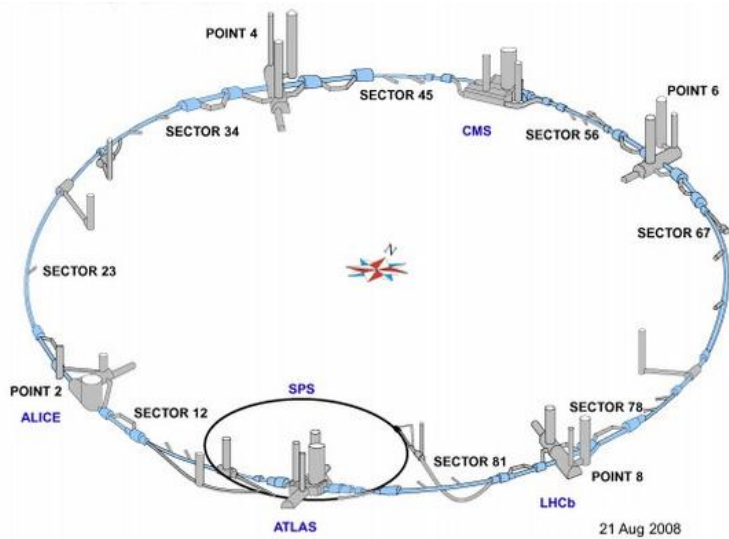


LHC Pilot Run

- 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



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

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。

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

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

物理過程の生成断面積


Run 2 → Run 3

Channel		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%

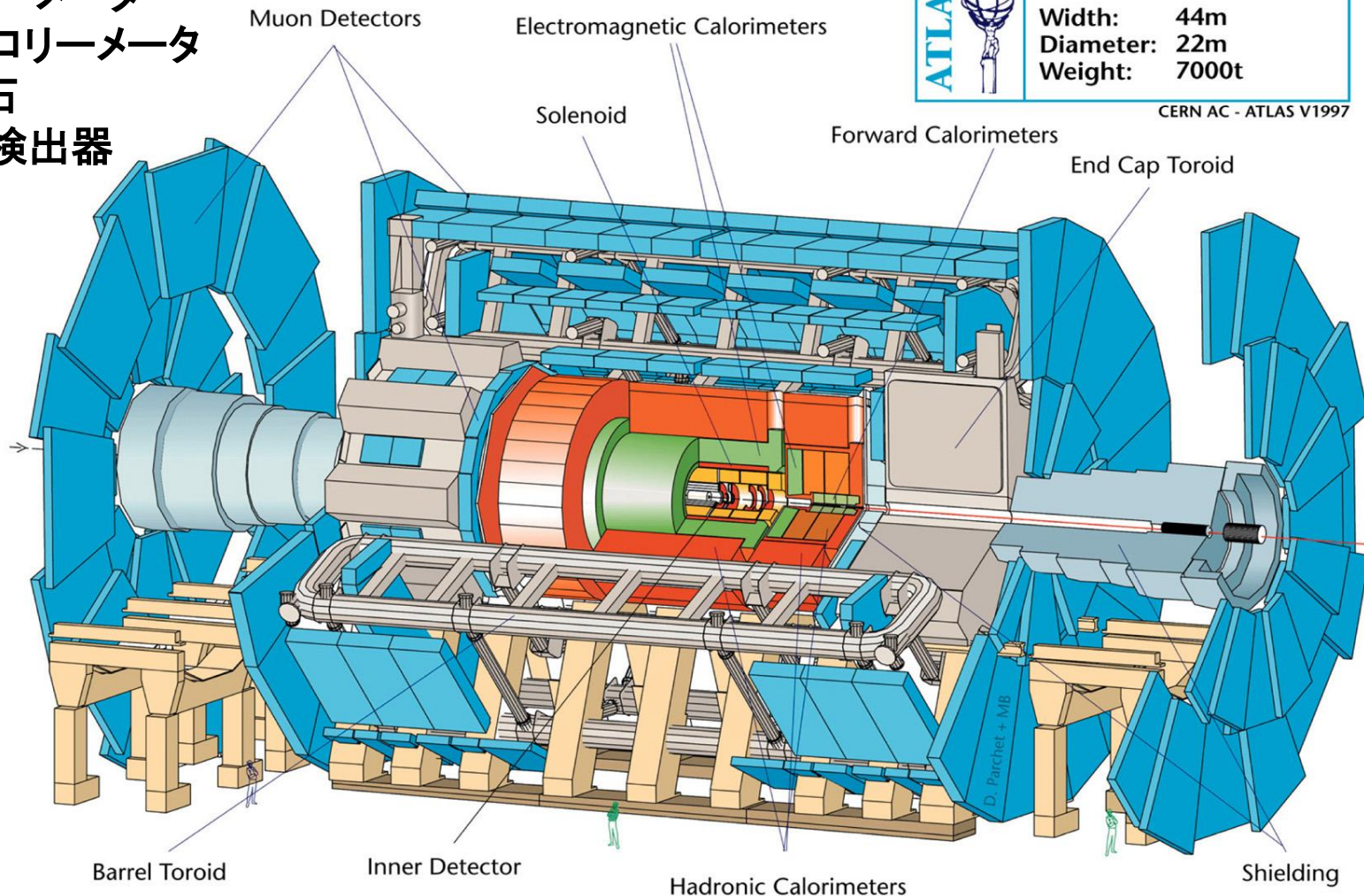
- シリコン検出器
- 飛跡検出器
- ソレノイド磁石
- 電磁カロリメータ
- ハドロンカロリメータ
- トロイド磁石
- ミューオン検出器

ATLAS検出器

総重量 7,000 t

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

CERN AC - ATLAS V1997

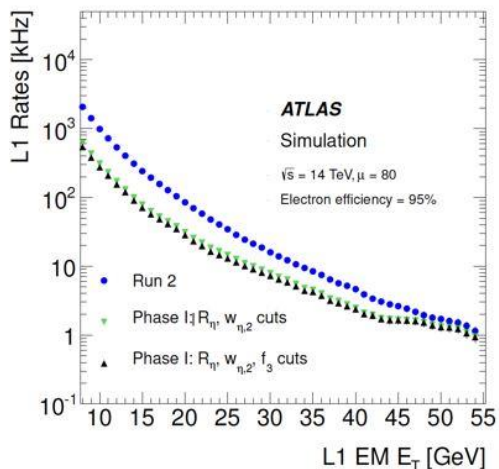
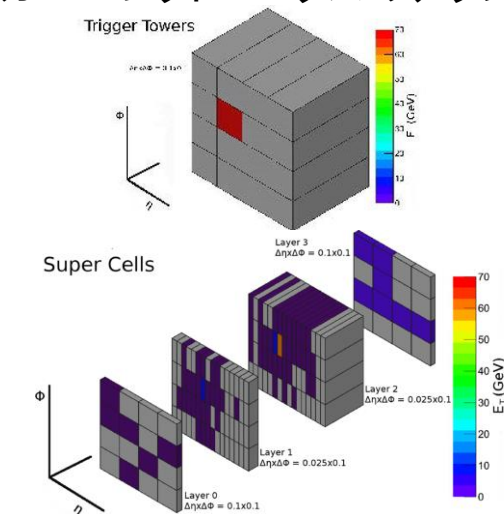


- 最高エネルギーでの、**さまざまな素粒子反応の研究**
 - ヒッグス粒子、標準理論、トップクォーク、Bメソン、超対称性、新物理探索、重イオン衝突...

ATLAS LS2 Upgrades

L1 Calo Trigger Upgrade

トリガー用読み出しを細分化することで、電子、光子トリガーへの他バンチヒットの影響を減らす。
トリガーエレクトロニクスのアップグレード。

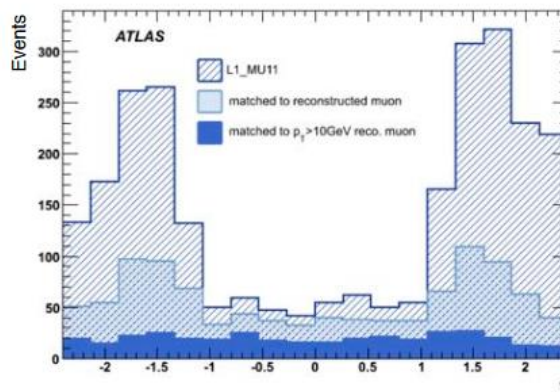
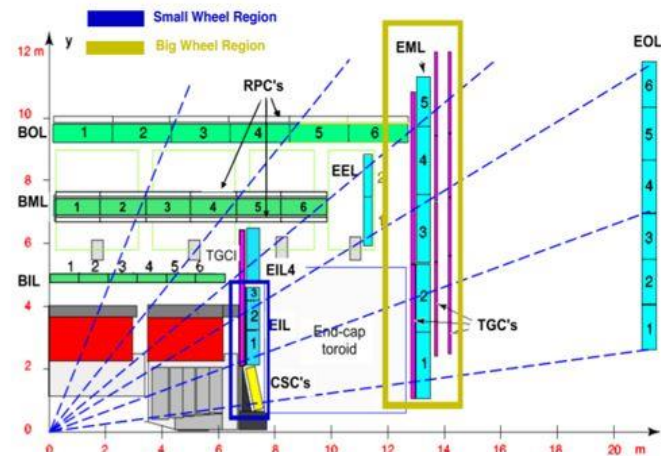


Nucl.Instrum.Meth. A824 (2016) 374-378

New Muon Small Wheel

For L1 Muon Trigger

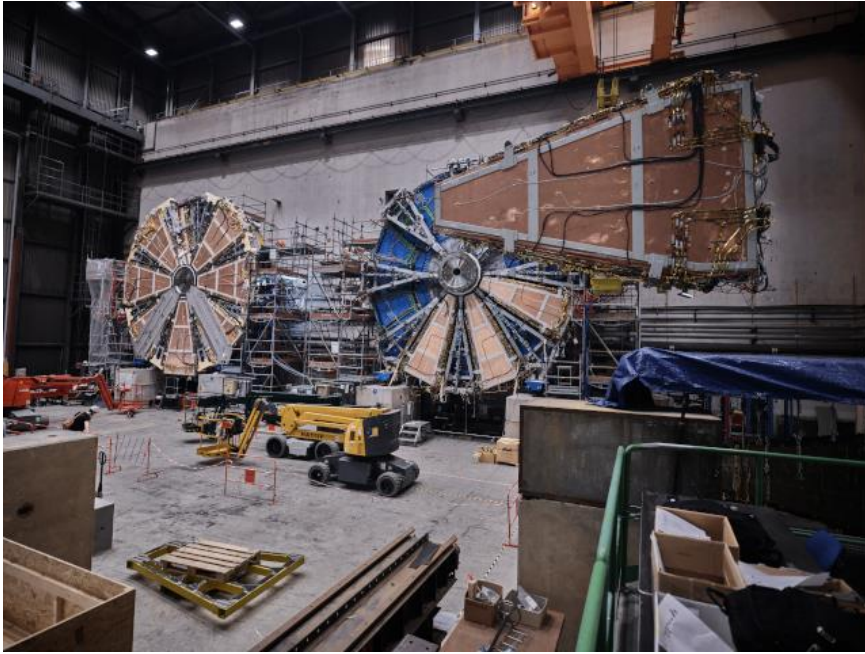
内層に新しいトリガーチェンバーを入れる。



TDAQ Upgrade

arXiv:1810.01394

New Small Wheel Muon Detectors

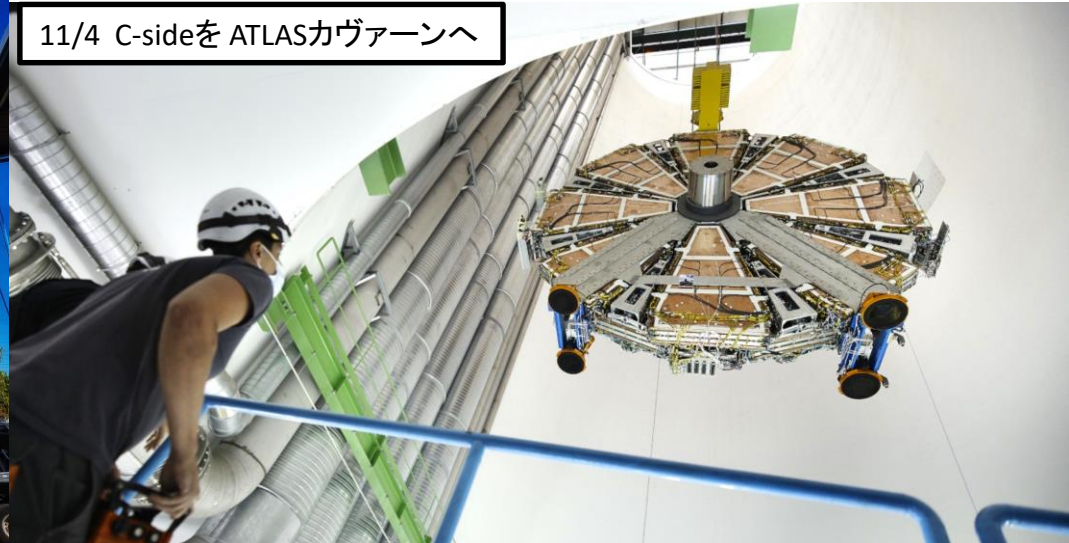


A-sideは6月にインストールされた

10/14 C-sideを ATLAS衝突点へ運搬



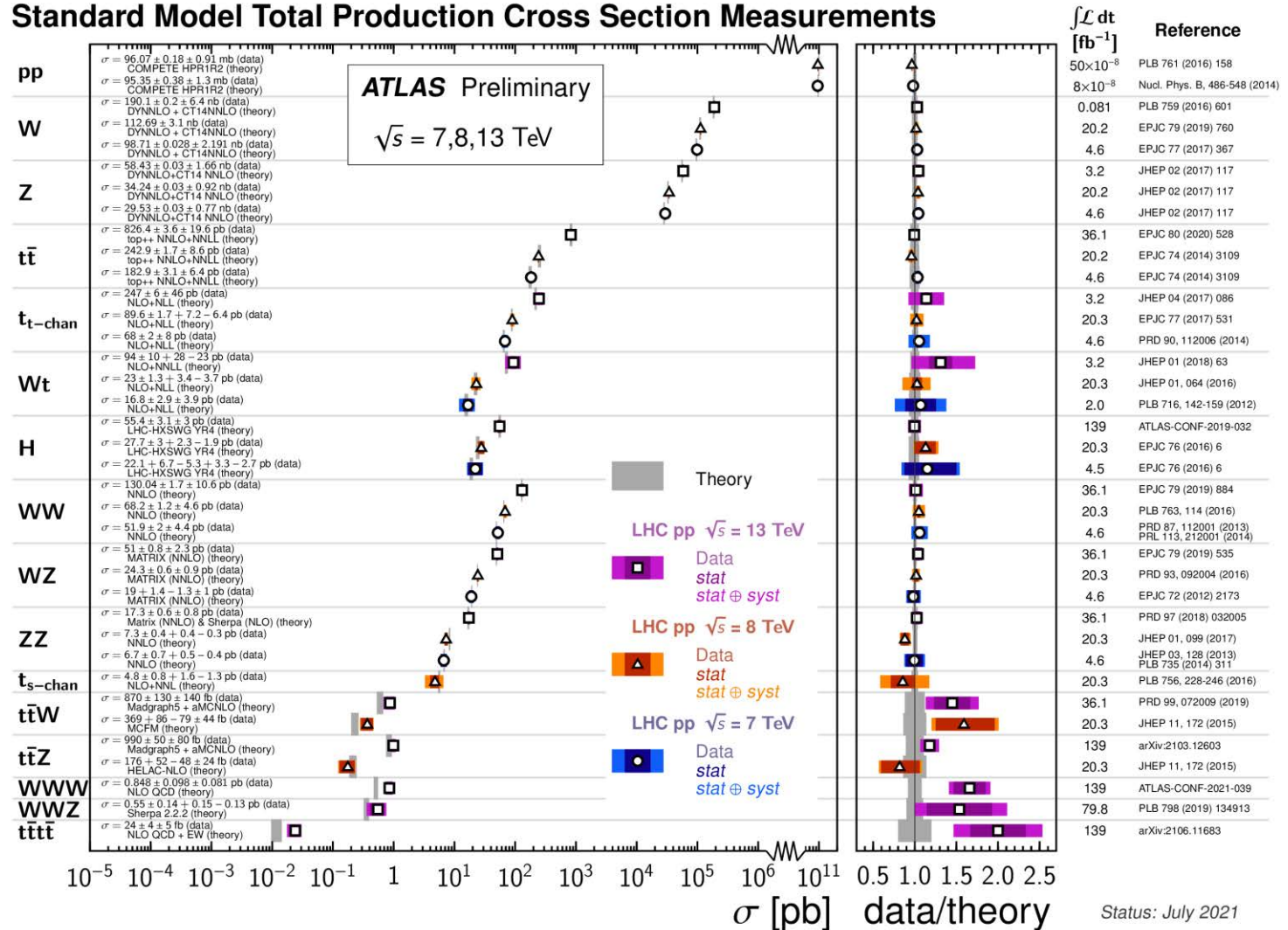
11/4 C-sideを ATLASカヴァーンへ



ATLASでの標準理論 (SM) の検証

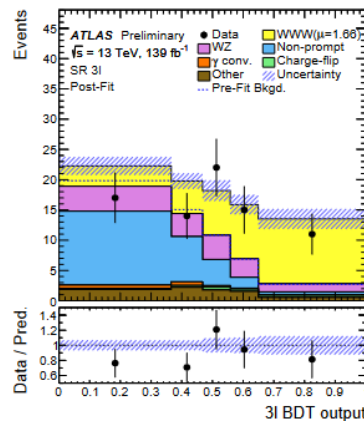
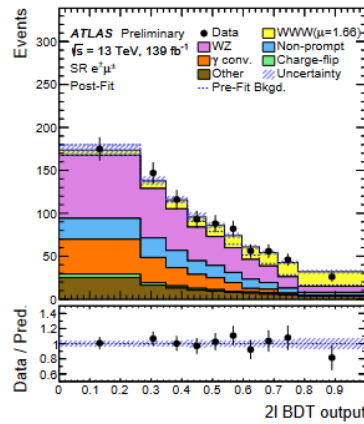
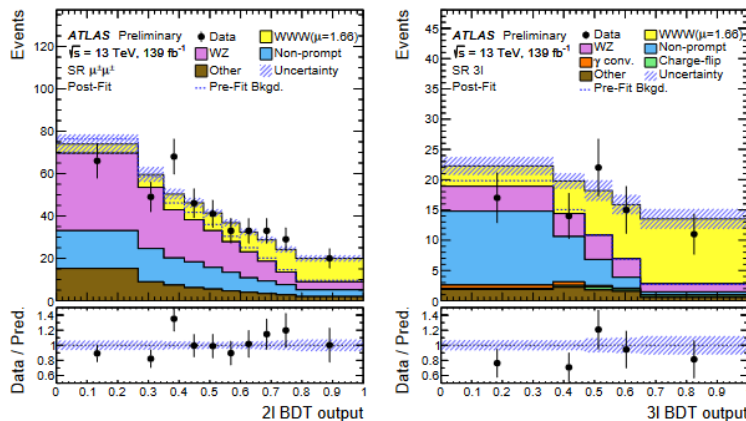
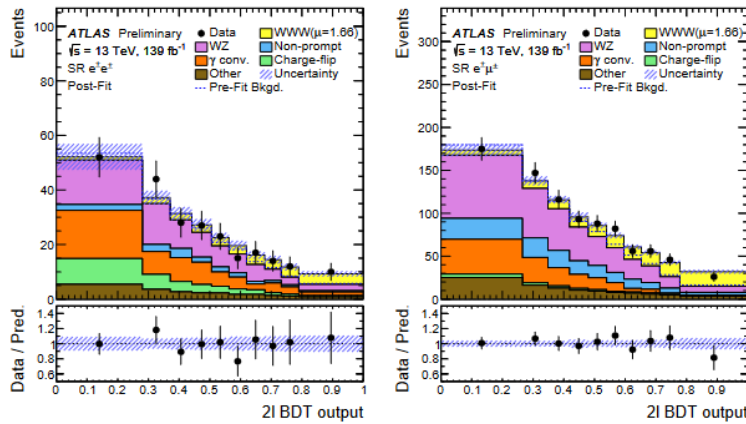
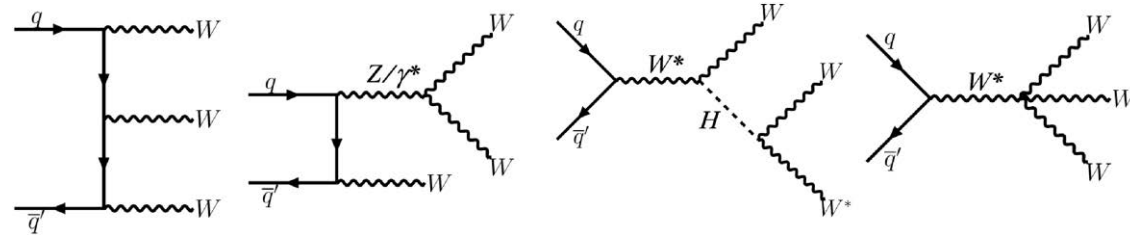
- さまざまな物理過程の生成断面積測定は、標準理論とよく合っている。
- Run 2全データの解析では、 $O(10 \text{ fb})$ の過程を観測し始めている。

Standard Model Total Production Cross Section Measurements



WWW生成過程の観測

- $e^+e^+/e^+\mu^+/\mu^+\mu^+$ jetsと Triplepton channelを解析。
- ゲージボソンの多重結合やヒッグス粒子との結合を精密検証。

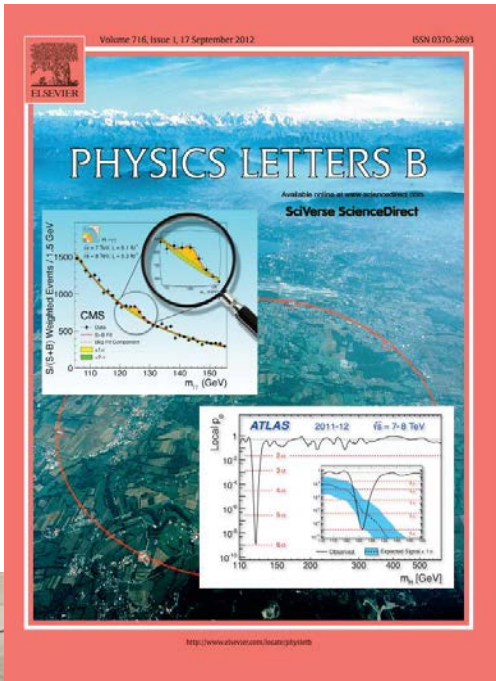


Fit	Observed (expected) significances [σ]	$\mu(WWW)$
$e^\pm e^\pm$	2.3 (1.4)	1.69 ± 0.79
$e^\pm \mu^\pm$	4.6 (3.1)	1.57 ± 0.40
$\mu^\pm \mu^\pm$	5.6 (2.8)	2.13 ± 0.47
2ℓ	6.9 (4.1)	1.80 ± 0.33
3ℓ	4.8 (3.7)	1.33 ± 0.39
Combined	8.2 (5.4)	1.66 ± 0.28

$$\sigma(pp \rightarrow WWW) = 850 \pm 100(stat) \pm 80(syst) \text{ fb}$$

$$\text{c.f. } \sigma_{SM} = 551 \pm 42 \text{ fb}$$

ヒッグス粒子発見の発表 2012年



2012年7月4日 LHC加速器の
ATLAS/CMS両実験が発見を報告

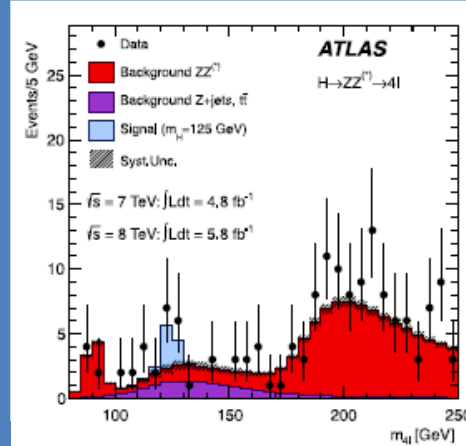
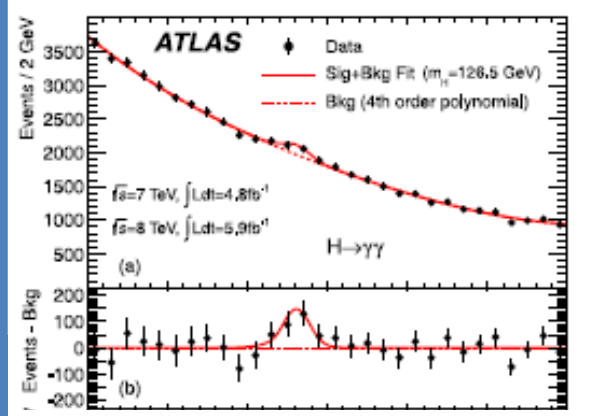
2013年 アングラール、ヒッグス
がノーベル物理学賞を受賞



ヒッグス発見チャンネルの現在

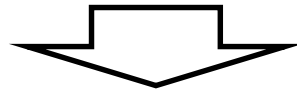
2012年夏、ヒッグス粒子発見時のデータ

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

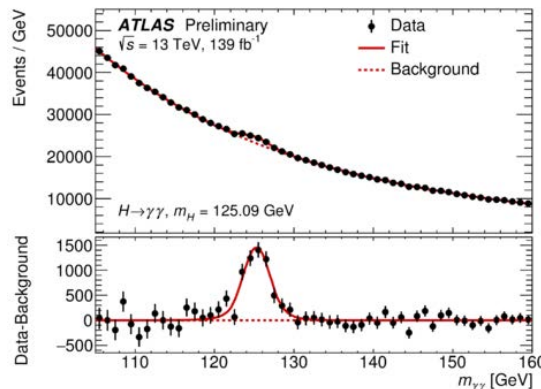


2チャンネル合わせて 5.9σ .

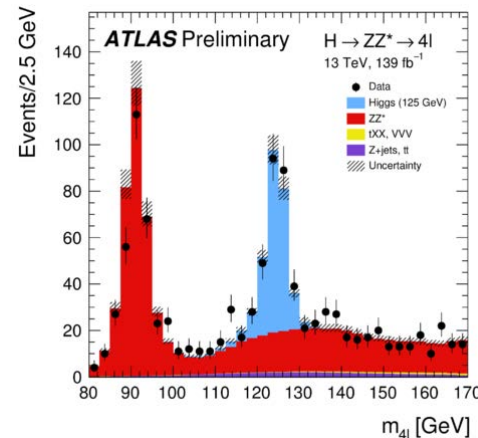
$H \rightarrow \gamma\gamma$



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



ATLAS-CONF-2019-032

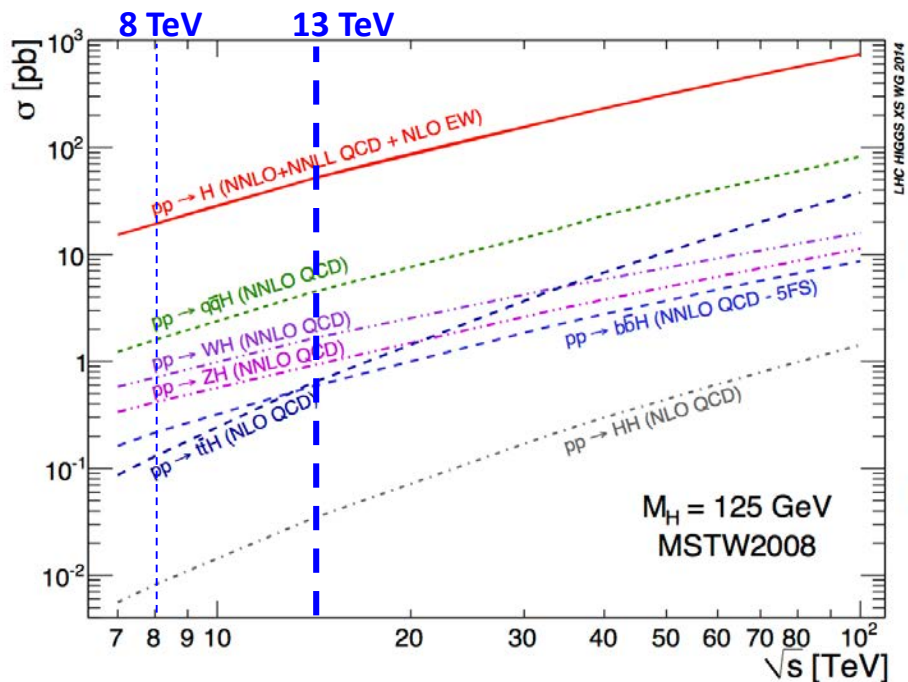


ATLAS-CONF-2019-025

現在では、発見に使ったチャンネルでは大量の候補事象。
ヒッグス粒子の精密測定の時
代に入っている。

LHCでのヒッグス粒子の生成

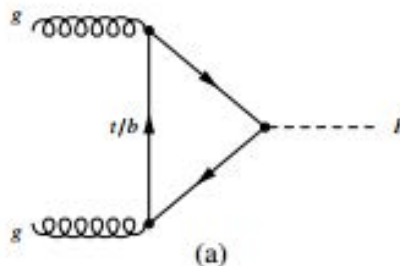
- LHCでは、4つの物理過程でヒッグス粒子は生成される。



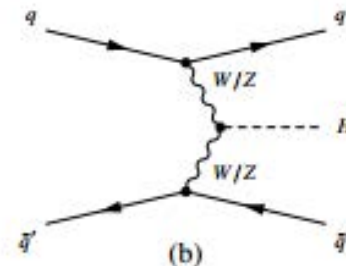
$\sigma_{gg \rightarrow H}$

\sqrt{s} (TeV)	σ
13	48.61 pb
14	54.72 pb
27	146.65 pb

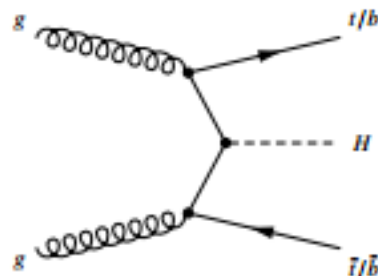
$gg \rightarrow H$



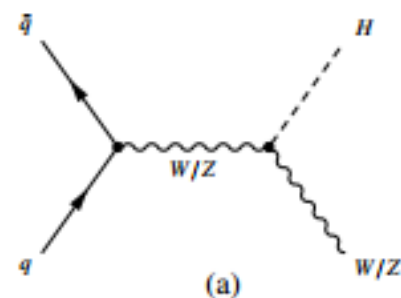
$qq \rightarrow qqH$



$gg \rightarrow ttH$

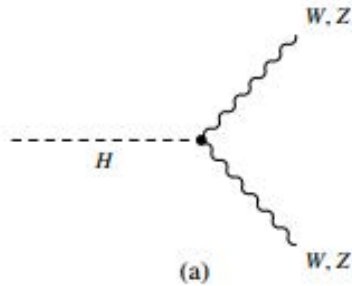


$aa \rightarrow VH$

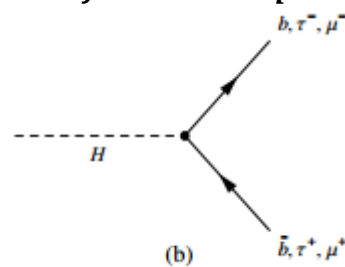


ヒッグス粒子の崩壊

$H \rightarrow WW / ZZ$



$H \rightarrow \text{fermion pair}$

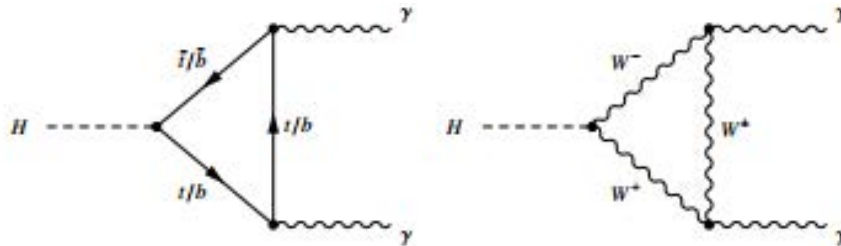


さまざまな生成・崩壊モード

- さまざまな測定を行い、標準理論を検証している。

重心エネルギー—13 TeV

$H \rightarrow \gamma\gamma$



- 崩壊分岐比 ($m_H = 125 \text{ GeV}$)

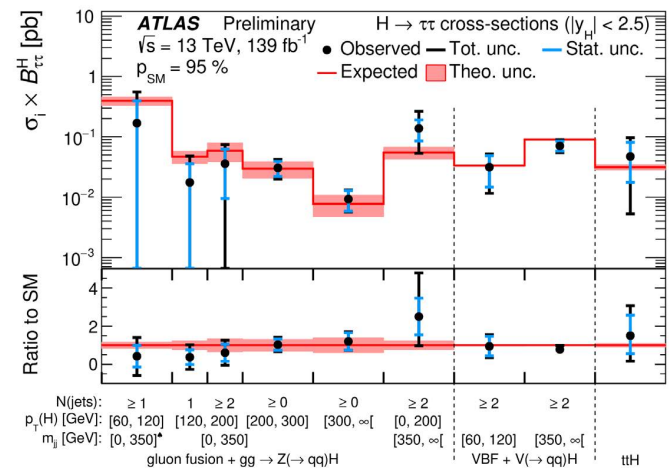
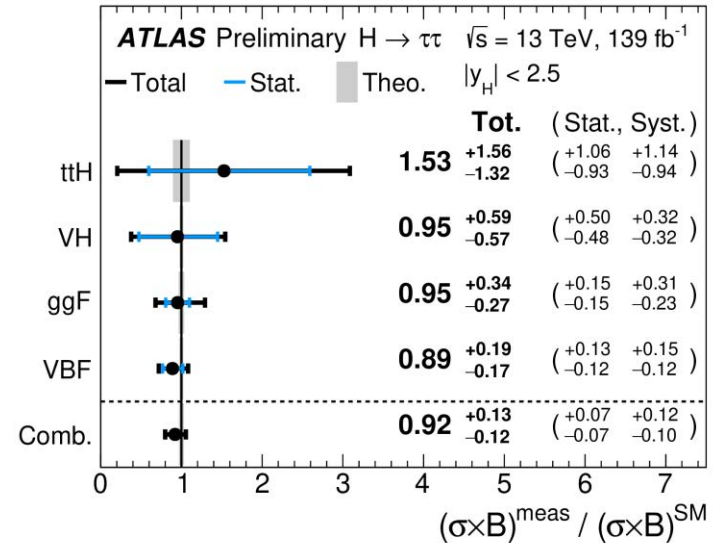
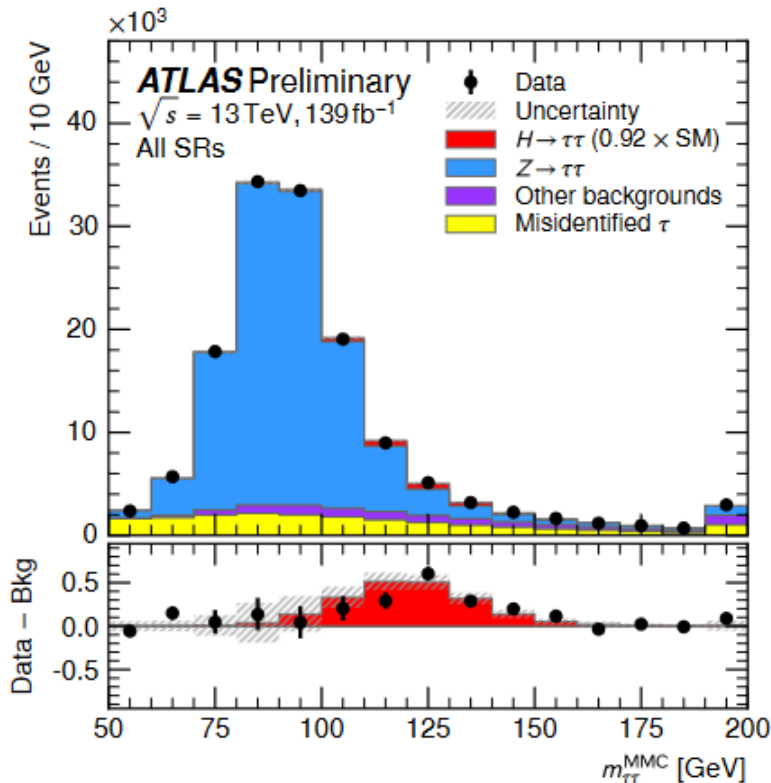
$H \rightarrow b\bar{b}$	$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	$H \rightarrow \mu^+\mu^-$	$H \rightarrow c\bar{c}$
57.7%	6.32%	0.022%	2.91%

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

$H \rightarrow \tau^+ \tau^-$

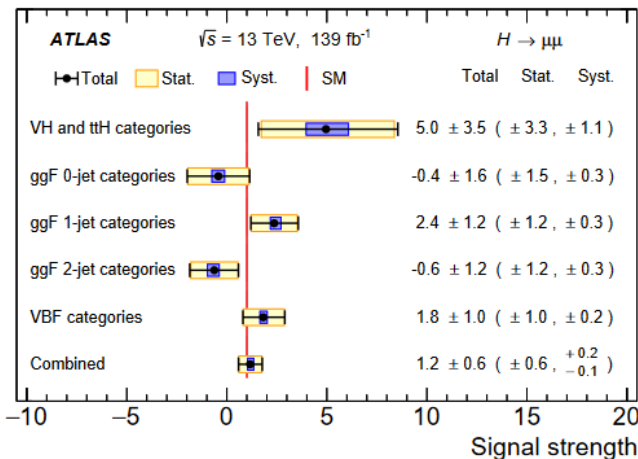
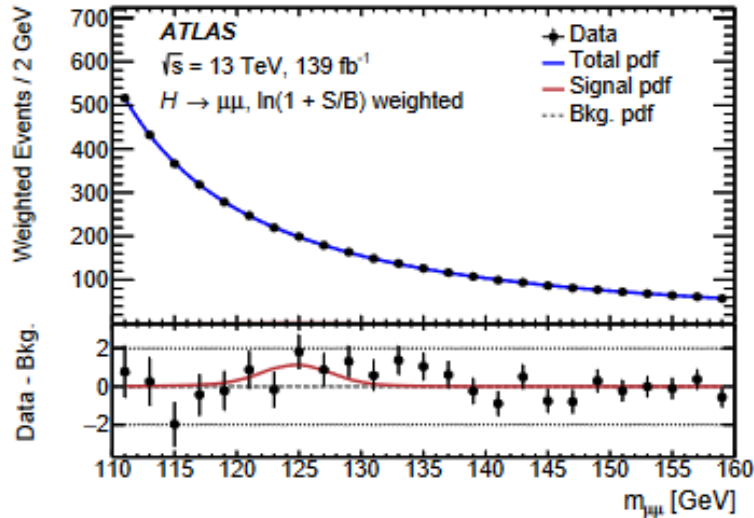
(廣瀬)

- ヒッグス粒子の生成過程ごと、 τ 粒子の崩壊過程ごと(e/ μ /had)でサブチャンネル分け。
- 生成崩壊モードごとの断面積のほか、N(jet), Pt(H), m(jj)のビンに分けて微分断面積測定も。

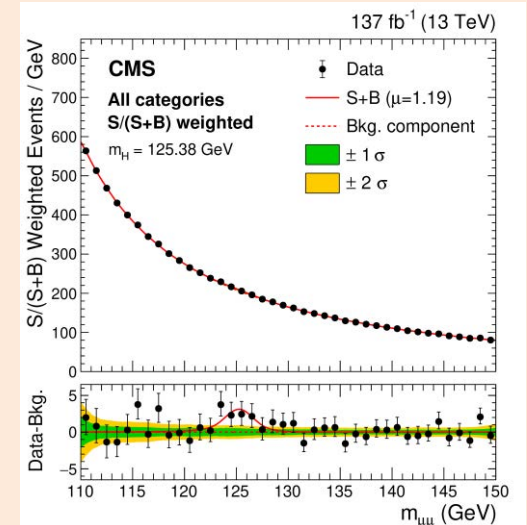


$$H \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

- 第2世代フェルミオンへのヒッグス結合をはじめて直接観測できる。
- 生成過程ごとにチャンネル分けし、最後にコンバインして $H \rightarrow \mu\mu$ 過程を探す。



JHEP 01 (2021) 148



CMS :

3.0 σ の有意度で兆候が見えた！
 (予想: 2.5 σ)

ATLAS :

2.0 σ の有意度 (予想: 1.7 σ)
 $\sigma(H \rightarrow \mu\mu) < 2.2 \times \sigma_{SM}$

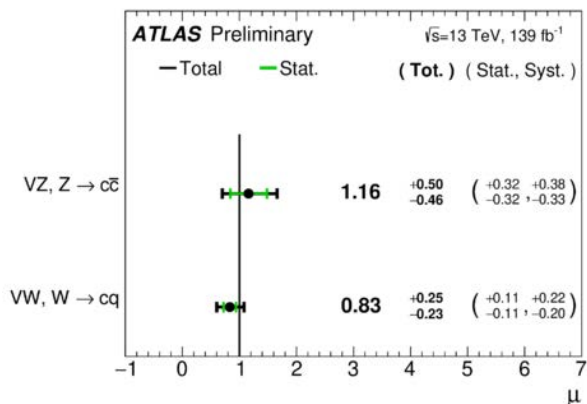
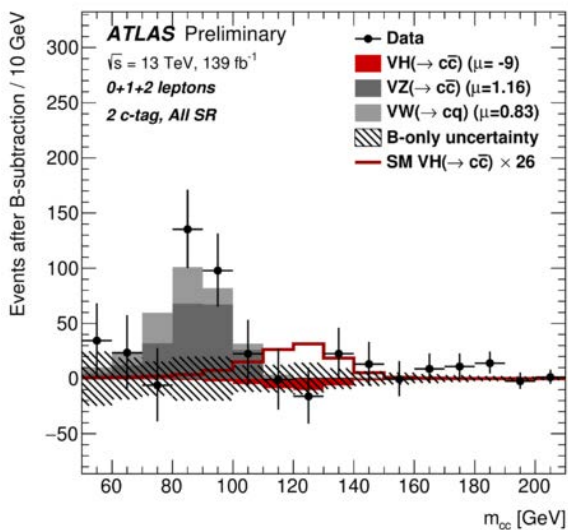
Run 3で観測を確立し、精密測定することが重要。

$VH, H \rightarrow c\bar{c}$

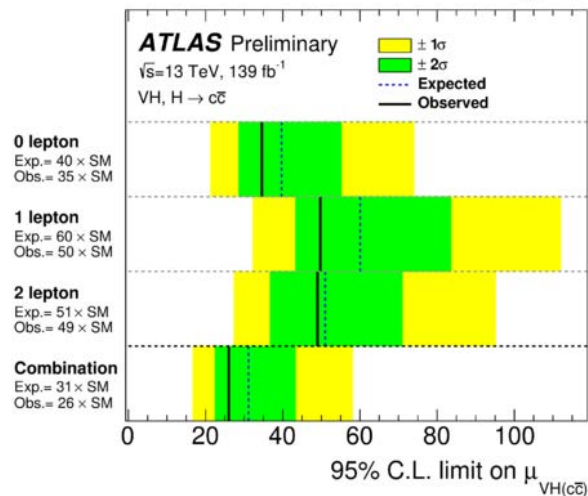
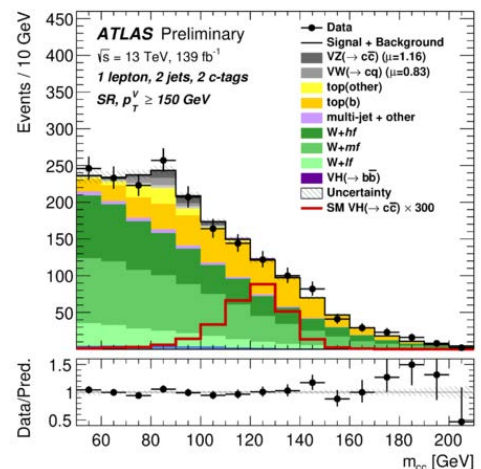
- 0,1,2 レプトンチャンネル。
- 多変量解析を用いたCharmタギング
- #c-tag jetによりサブチャンネル分け。

jet truth flavor	(mis-)Tagging efficiency (%)
c	27%
b	8%
light	1.6%

$VV \rightarrow Vcc$ 過程を測定して手法を検証



$VH \rightarrow Vcc$ 過程の探索結果



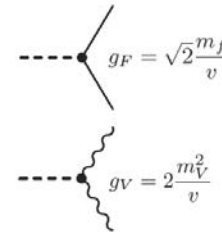
ヒッグス粒子の結合の精密測定

- さまざまな生成、崩壊過程での測定をコンバインし、ヒッグス粒子結合を測定。

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

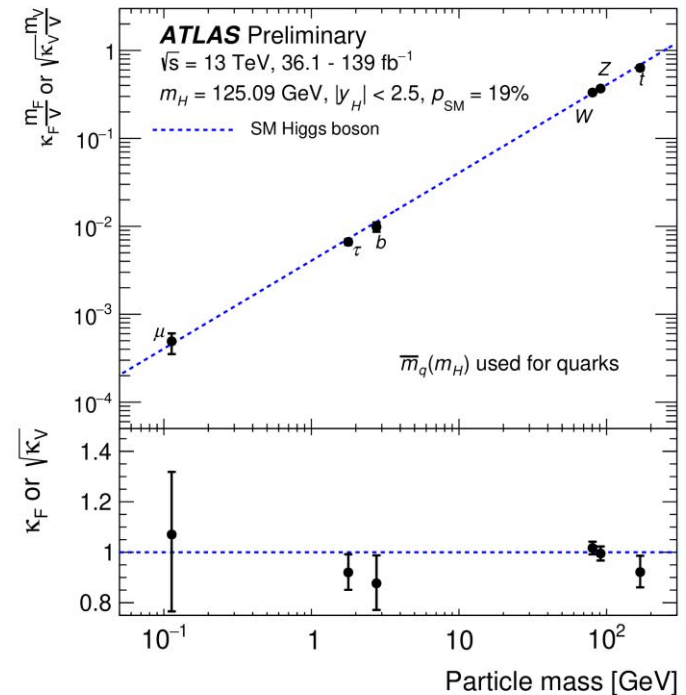
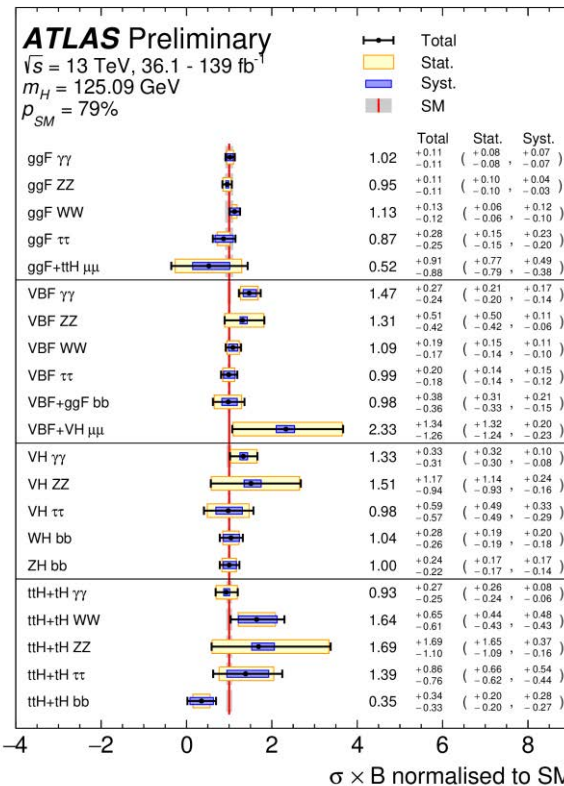
$$+ \left(M_W^2 W_\mu^+ W^{-\mu} + \frac{1}{2} M_Z^2 Z_\mu Z^\mu \right) \left(1 + \frac{h}{v} \right)^2$$

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



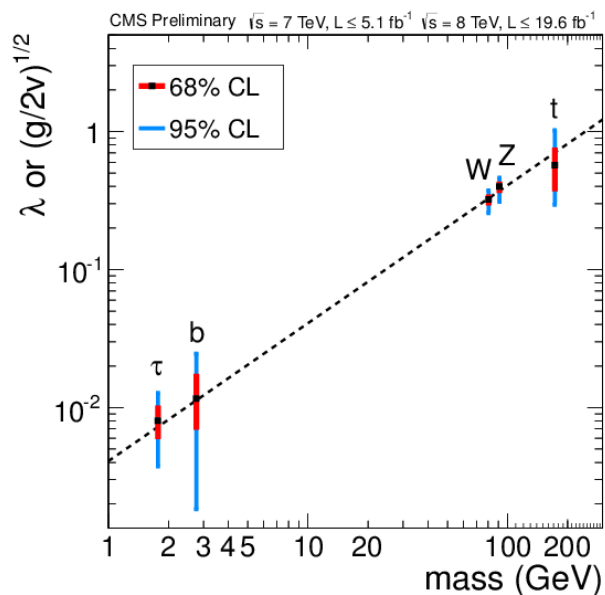
$$g_F^{meas} = \sqrt{2} \kappa_F \frac{m_f}{v}$$

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

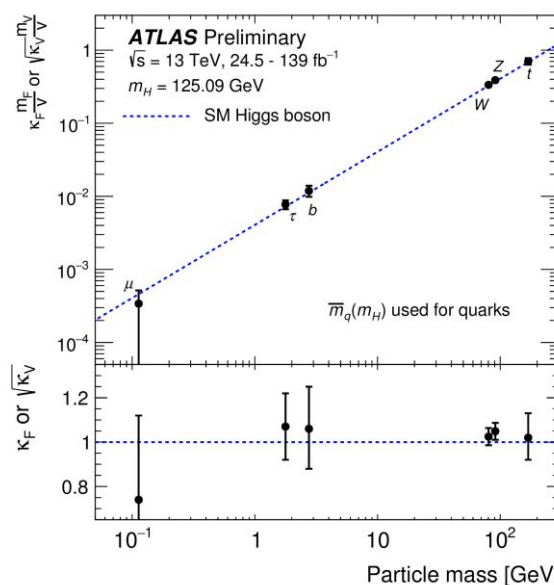


ヒッグス粒子の結合 測定精度の変遷

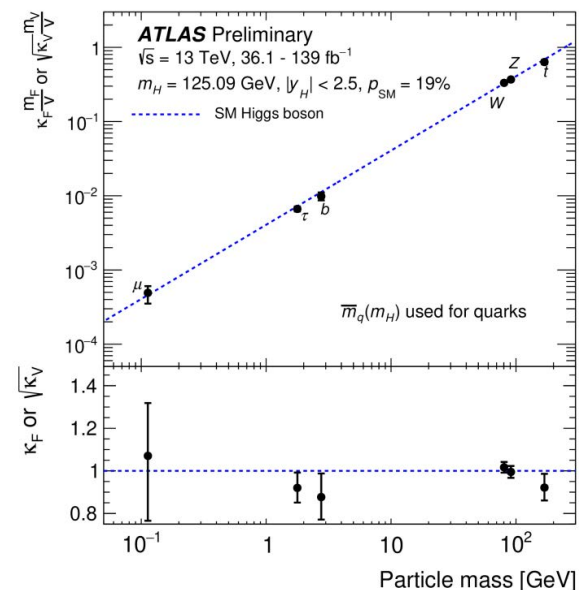
2016年ごろの図
(Run 1データ)



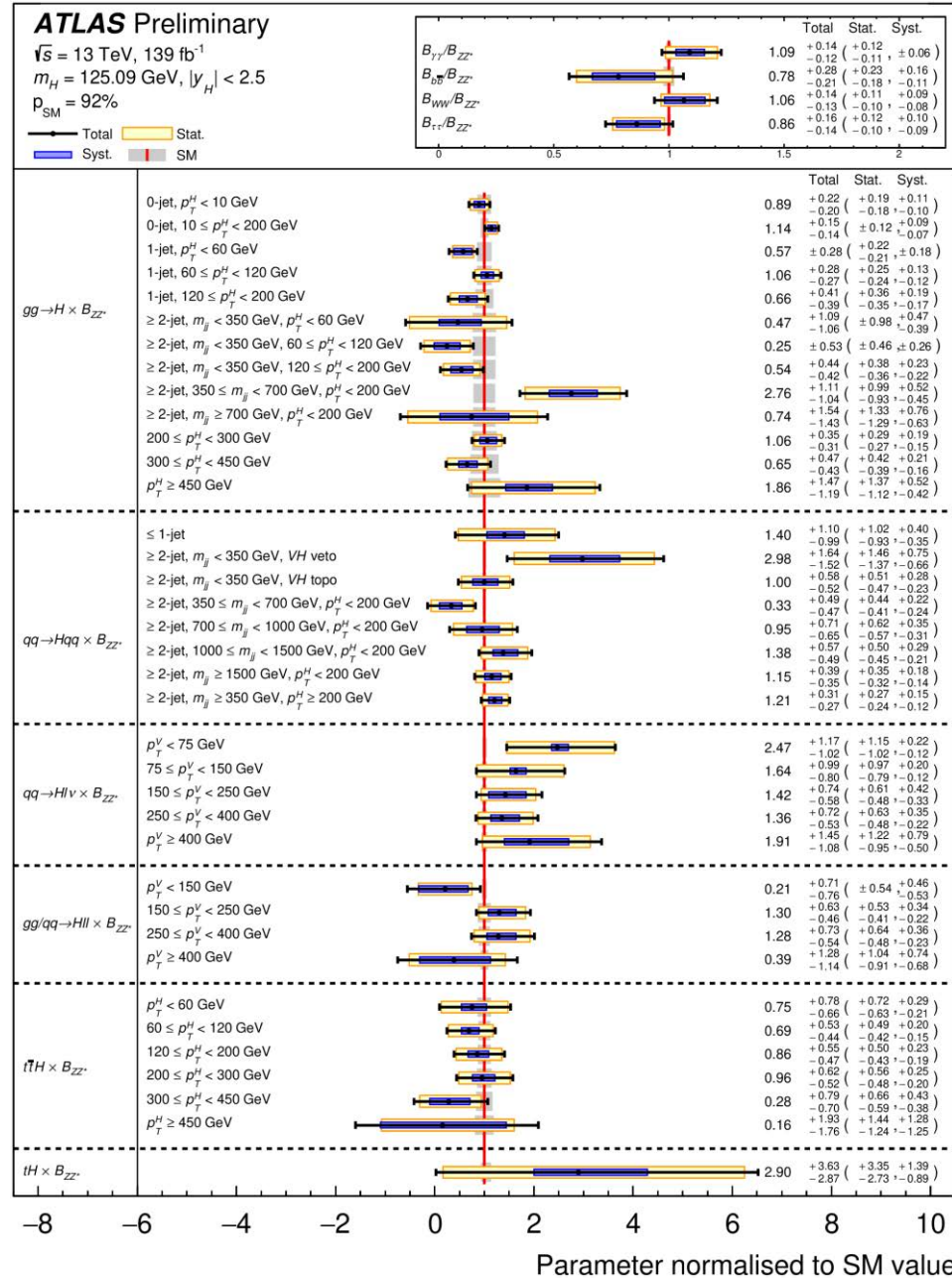
2019年ごろの図
(Run 2データ)



現在の図
(Run 2データ)



ヒッグス粒子生成の微分断面積



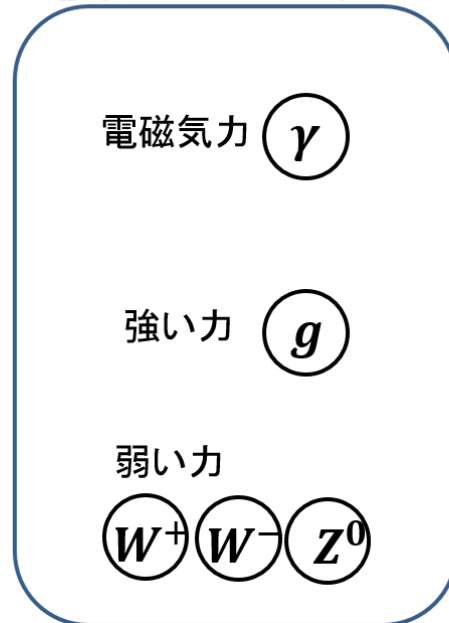
荷電ヒッグス粒子を探すモチベーション

- 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。**

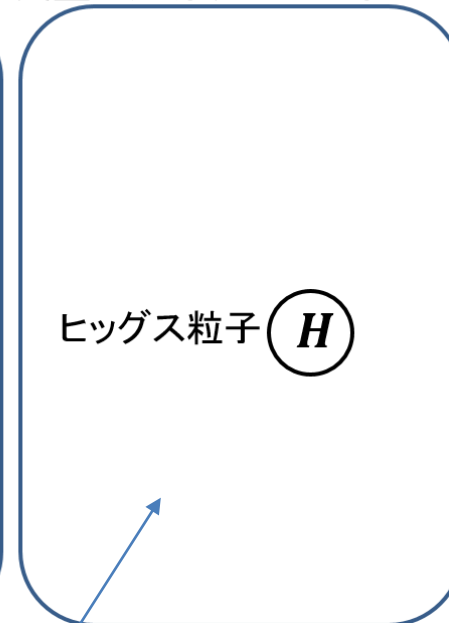
物質を構成する粒子

	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

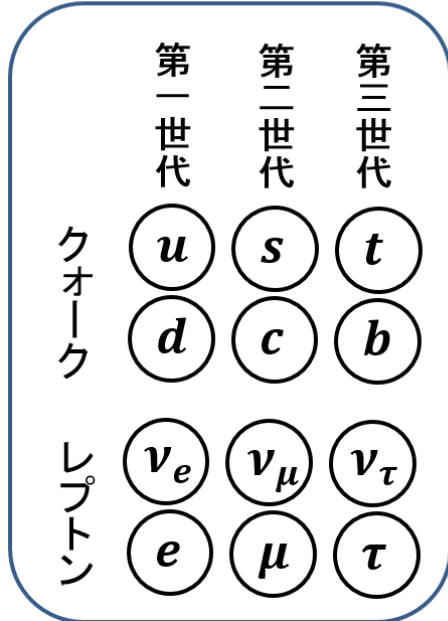


ヒッグス粒子だけ1種類しかない。。。

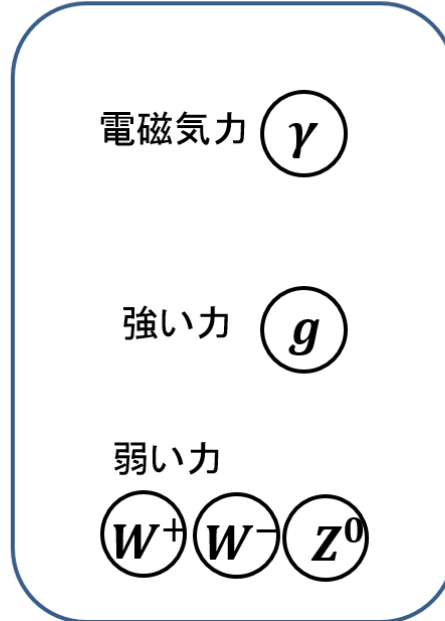
荷電ヒッグス粒子を探すモチベーション

- 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。**

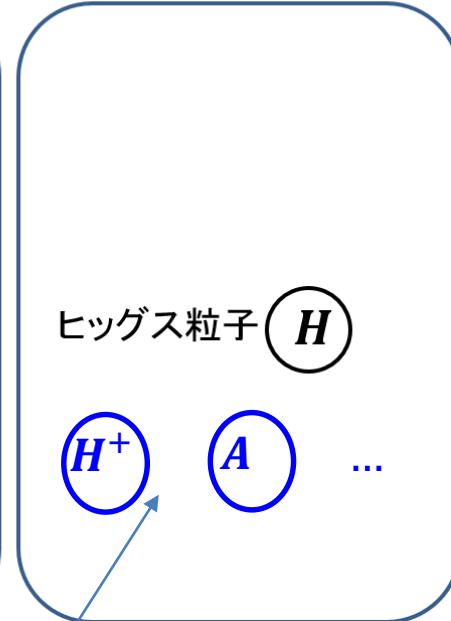
物質を構成する粒子



力を媒介するゲージ粒子



質量の起源、ヒッグス粒子



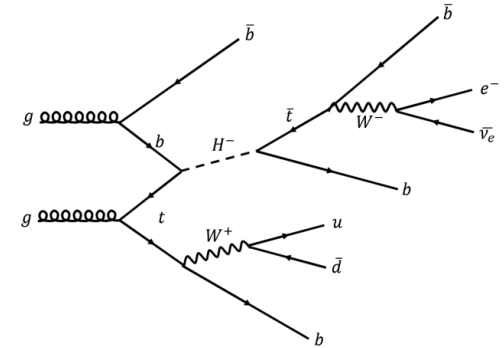
ヒッグス粒子だけ1種類しかない。。。
もっとあってもいいじゃないか？
多くのBSM理論で、荷電ヒッグス粒子 H^\pm を含む複数のヒッグス粒子が予言されている。
e.g. 2HDM, 超対称性

MSSMへの制約

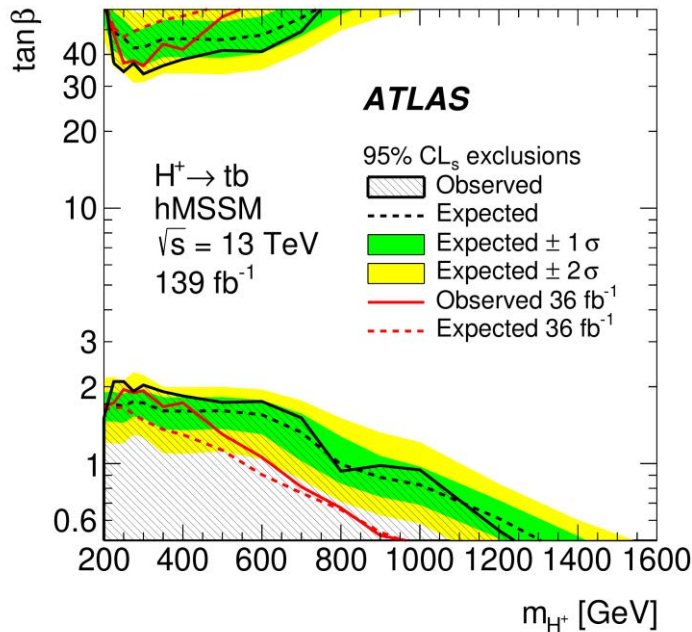
(山内、佐藤)

[JHEP 06 \(2021\) 145](#)

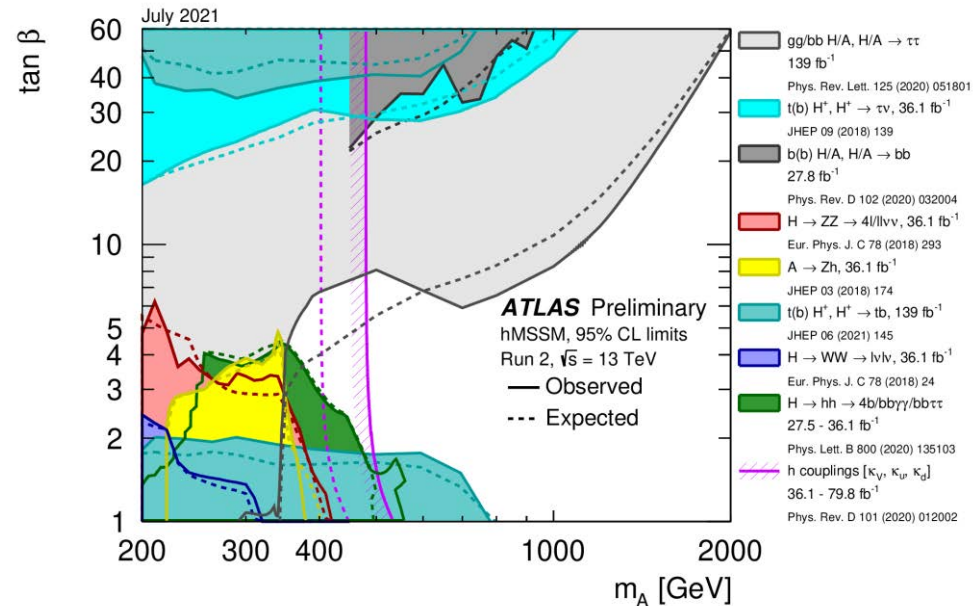
- H^+ は、重いトップやボトムクォークとの結合が強い。
 - tbH 結合を介して生成・崩壊するモードを探す。
- 信号事象: $tbH^+ \rightarrow tb(tb) \rightarrow \ell \nu + qq'bbbb$
- ニューラルネットワークによる多変数解析。



得られたMSSMへの制約



ATLAS実験のさまざまなヒッグス粒子探索によるMSSMへの制約

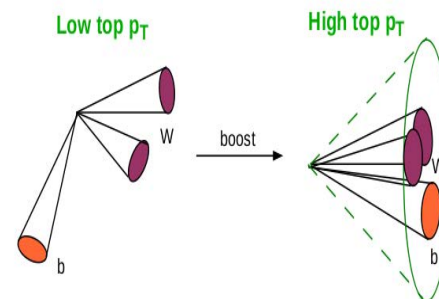
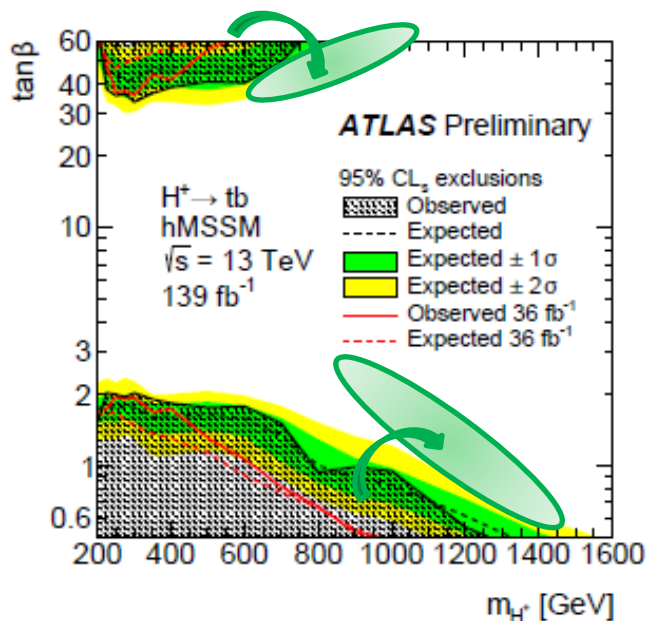
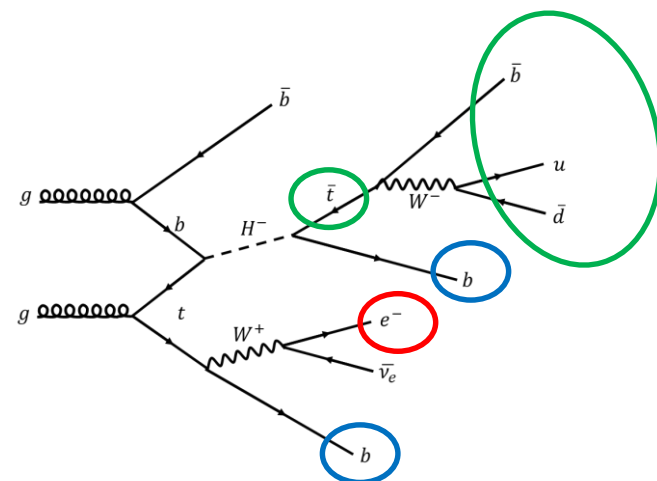


現在、低 $\tan\beta$ 領域で最も高い質量領域を棄却している解析

今後の予定

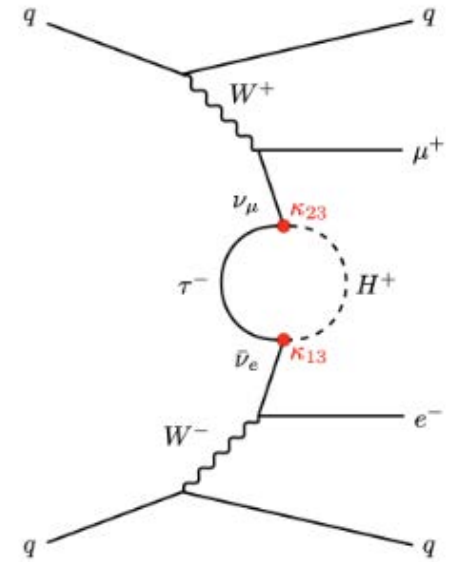
(山内、廣瀬、佐藤)

- いままでは、 $1\ell + \geq 5jet$ 事象を解析してきた。
- H^\pm が重くなると、トップクォークが高運動量になる。
- 高運動量のトップクォークは、1個の太いジェット (**boosted jet**) として再構成した方が有利。
- Boosted jetを使った新しいチャンネルを解析し、高質量の荷電ヒッグス粒子への感度をあげる。



荷電ヒッグス粒子によるレプトン・フ レーバー非保存の探索 (和田、廣瀬)

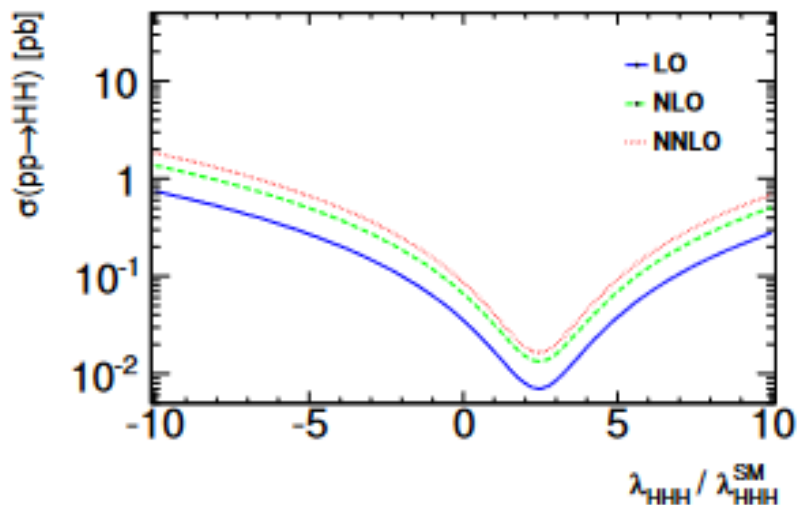
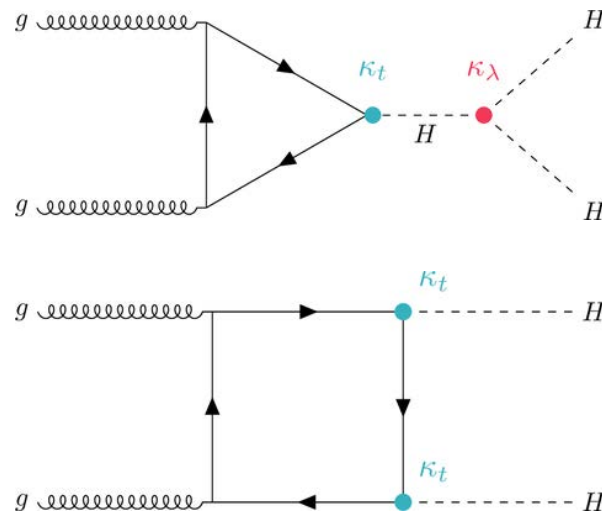
- 新しい物理解析。
- LHCでのレプトン・フレーバー非保存の探索。
- まずは、バックグラウンドが少ない $e^\pm\mu^\mp$ チャンネルで探索する。
 - $\tau^\pm\ell^\mp$ チャンネルでの探索も可能
- Vector Boson Fusionの特徴的な前方ジェット対を持つ特徴的な信号。
- TeV領域の荷電ヒッグス粒子まで探索することが可能。



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 $\frac{\lambda_{HHH}}{\lambda^{SM}} = 1$

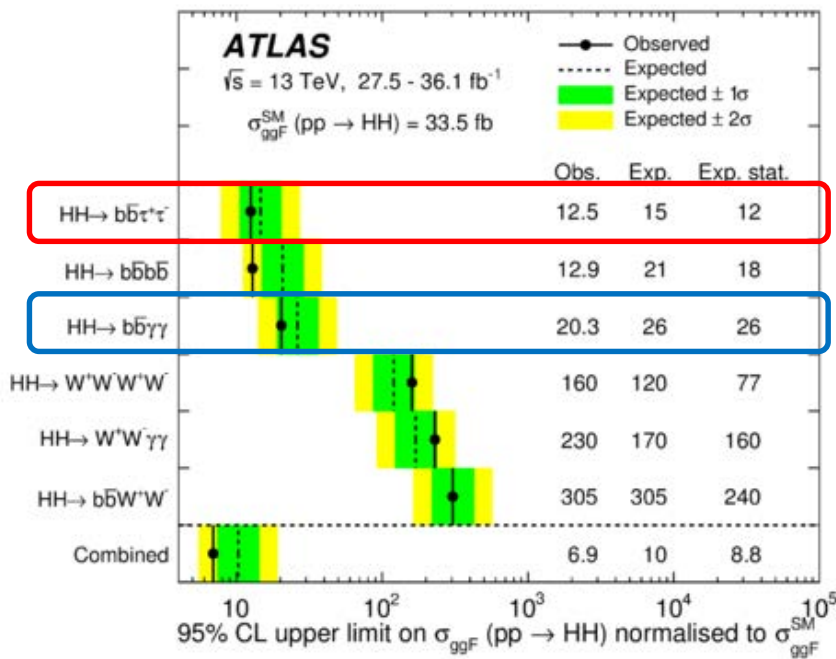
Decay Channel	Branching Ratio	Total Yield (3000 fb ⁻¹)
$b\bar{b} + b\bar{b}$	33%	40,000
$b\bar{b} + W^+W^-$	25%	31,000
$b\bar{b} + \tau^+\tau^-$	7.3%	8,900
$ZZ + b\bar{b}$	3.1%	3,800
$W^+W^- + \tau^+\tau^-$	2.7%	3,300
$ZZ + W^+W^-$	1.1%	1,300
$\gamma\gamma + b\bar{b}$	0.26%	320
$\gamma\gamma + \gamma\gamma$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

DiHigg探索結果

データ量が増えた以外にも、解析手法の改善により感度が大きく向上した。

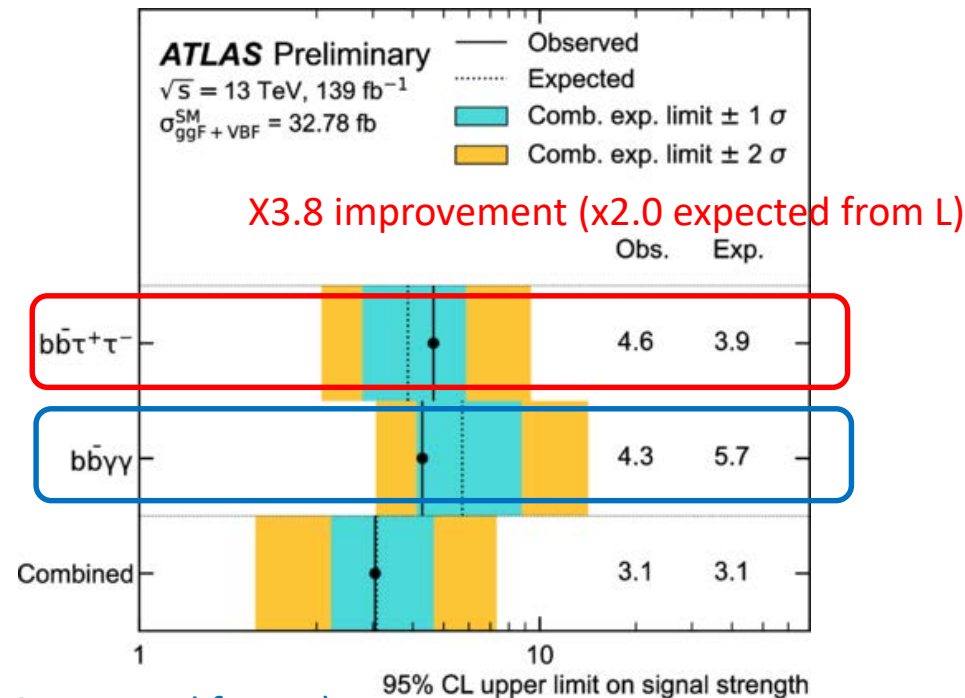
- サブチャンネルへの分割、多変量解析の導入、オブジェクト再構成の向上、...

2015-2016データ



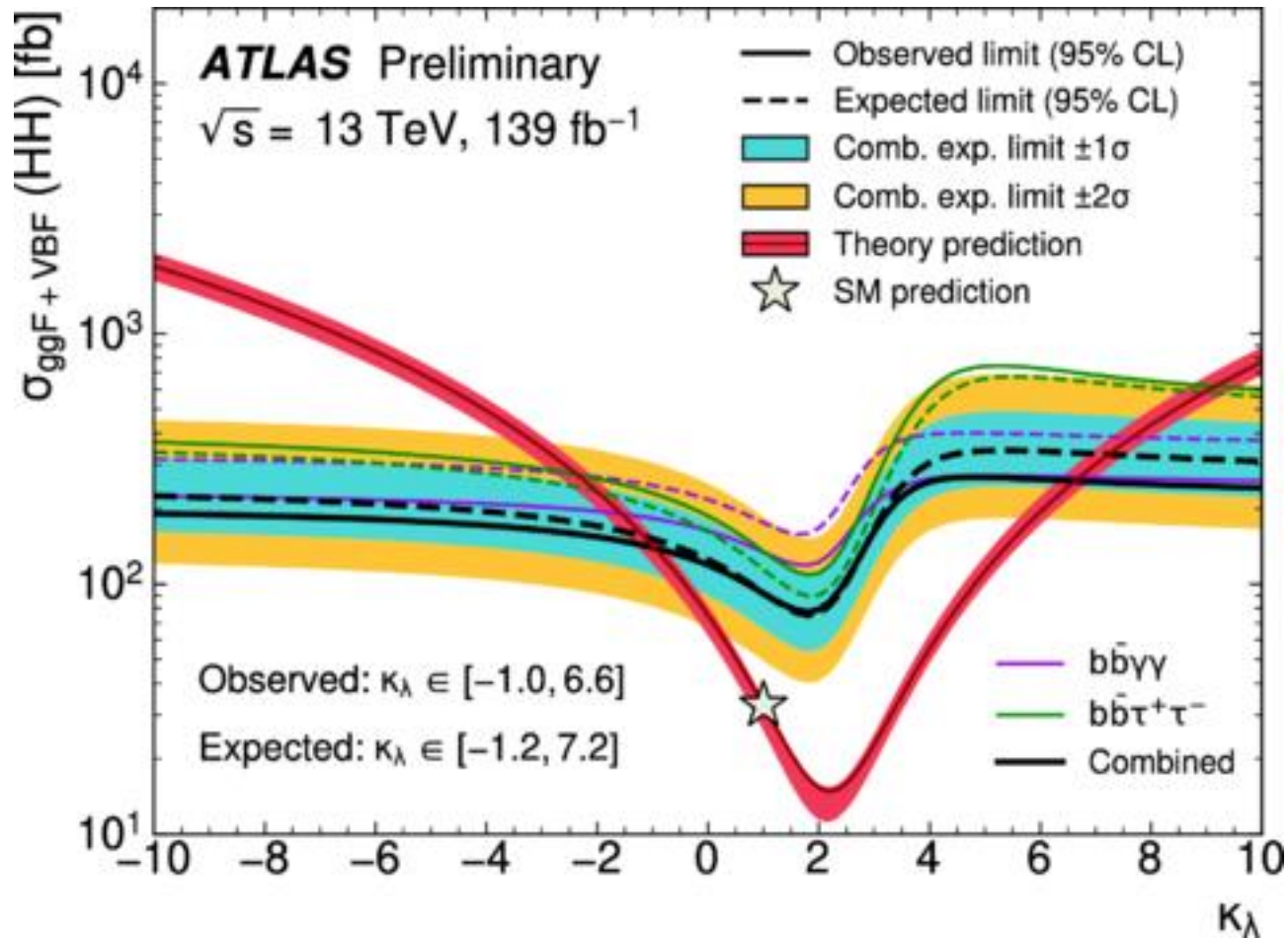
x4.6 improvement (x2.0 expected from L)

全Run 2データ



$$\frac{\sigma(HH)}{\sigma_{SM}} < 3.1$$

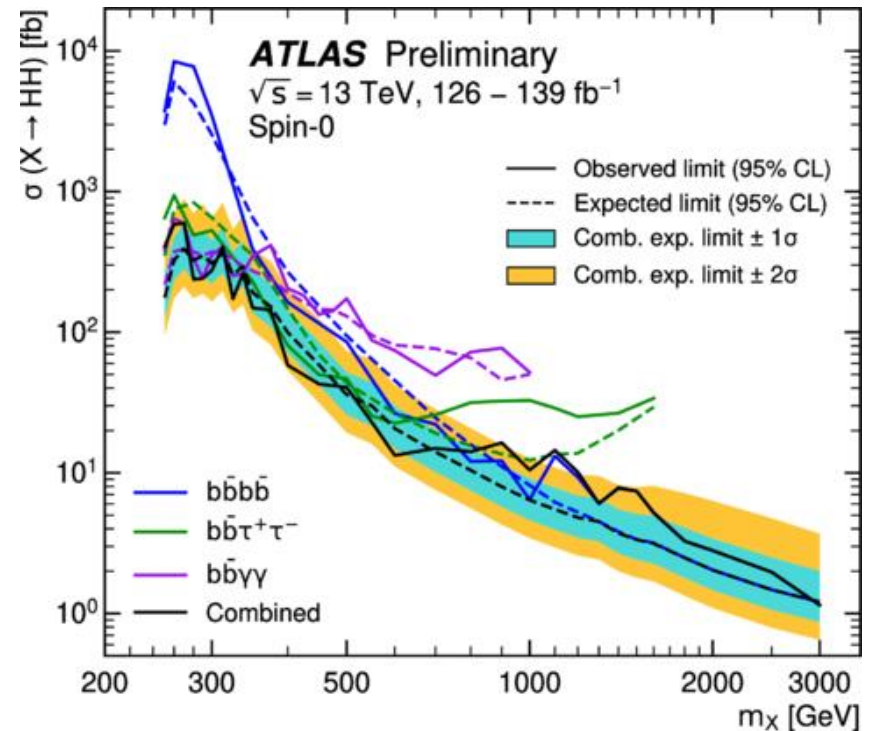
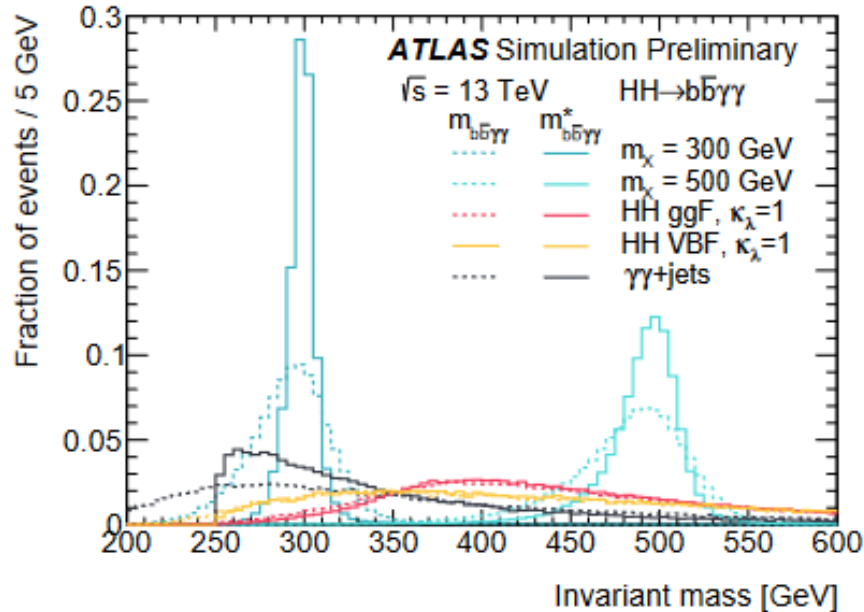
κ_λ への制約



$$-1.0 \leq \kappa_\lambda \leq 6.6$$

$X \rightarrow HH$ 探索の結果

- 標準理論のDihiggs生成では、 $m(HH)$ はピークを作らない。
- 重い新粒子があれば、 $m(HH)$ は鋭いピークを作るため、同じ解析で新粒子探索をすることができる。



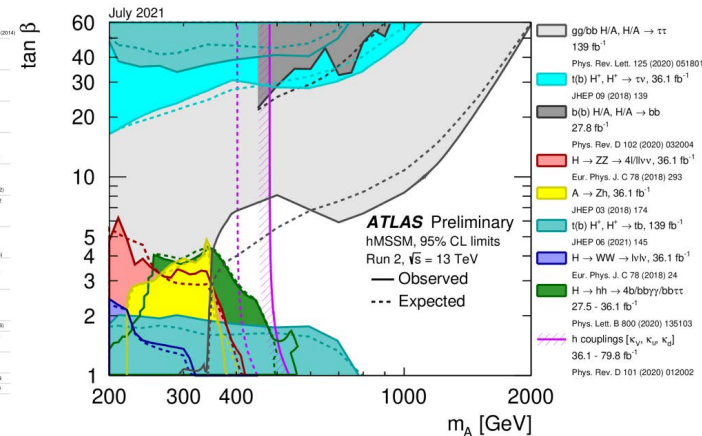
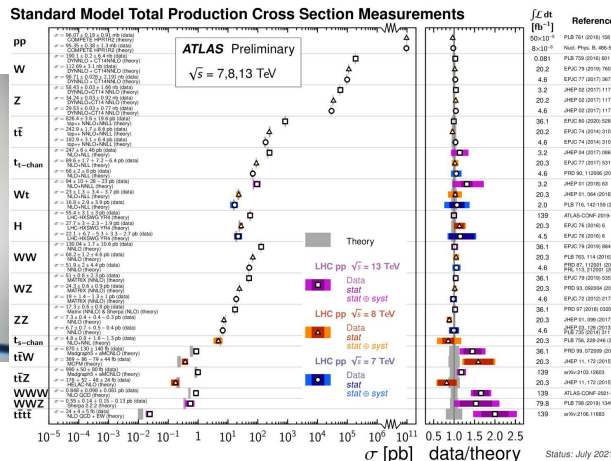
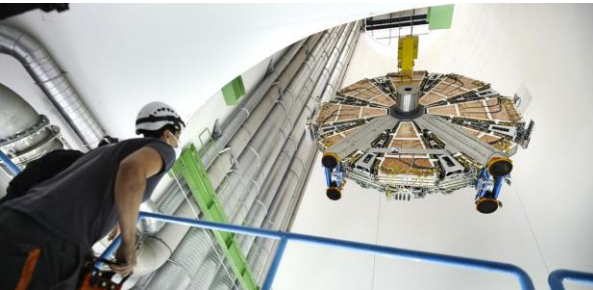
まとめ

- LHCは、2019–2021の長期シャットダウン中。
 - Run 3、HL-LHCに向けて、加速器、検出器ともアップグレード中。
- LHCは、2022–2024に、Run3運転を行う。
 - COVID-19のため、シャットダウンが1年延長になっている。
 - 陽子エネルギーは、6.8 TeVに決定した。
- 2015–2018に取得したRun 2データを解析中。
 - 本講演では、ATLAS実験の最近の物理成果のうち、以下のトピックを紹介した。
 - 標準理論の検証
 - ヒッグス粒子の精密測定
 - 荷電ヒッグス粒子の探索
 - Dihiggs生成過程の探索

backup

LHC・ATLAS実験

- 世界最高エネルギーでの素粒子実験。陽子・陽子衝突型加速器。
- 2019–2021 加速器と検出器のアップグレードのための長期シャットダウン中。
- 2022–2024 Run 3運転を予定。
 - $E_{CM} = 13.6$ TeV (Run 1: 7 – 8 TeV、Run 2: 13 TeV、LHCデザイン: 14 TeV)
- Run 2(2015–2018)で取得した 139 fb^{-1} データの解析
 - 標準理論の検証、新物理の探索
 - ATLASの論文数: 全1018、Run 2:411、2021:46 (10月時点)

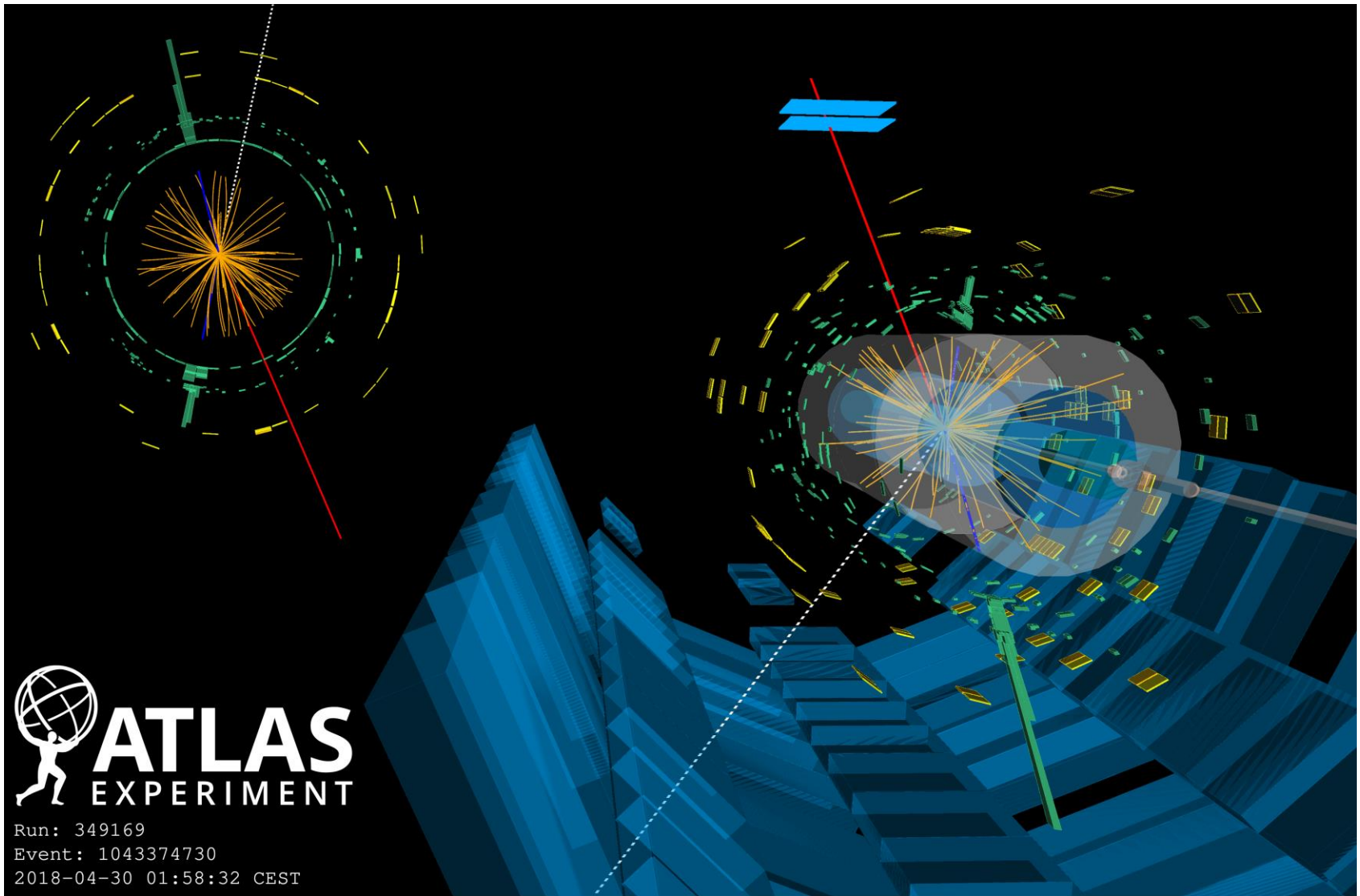


新しミュオンチェンバーの運搬が完了(11/4)。

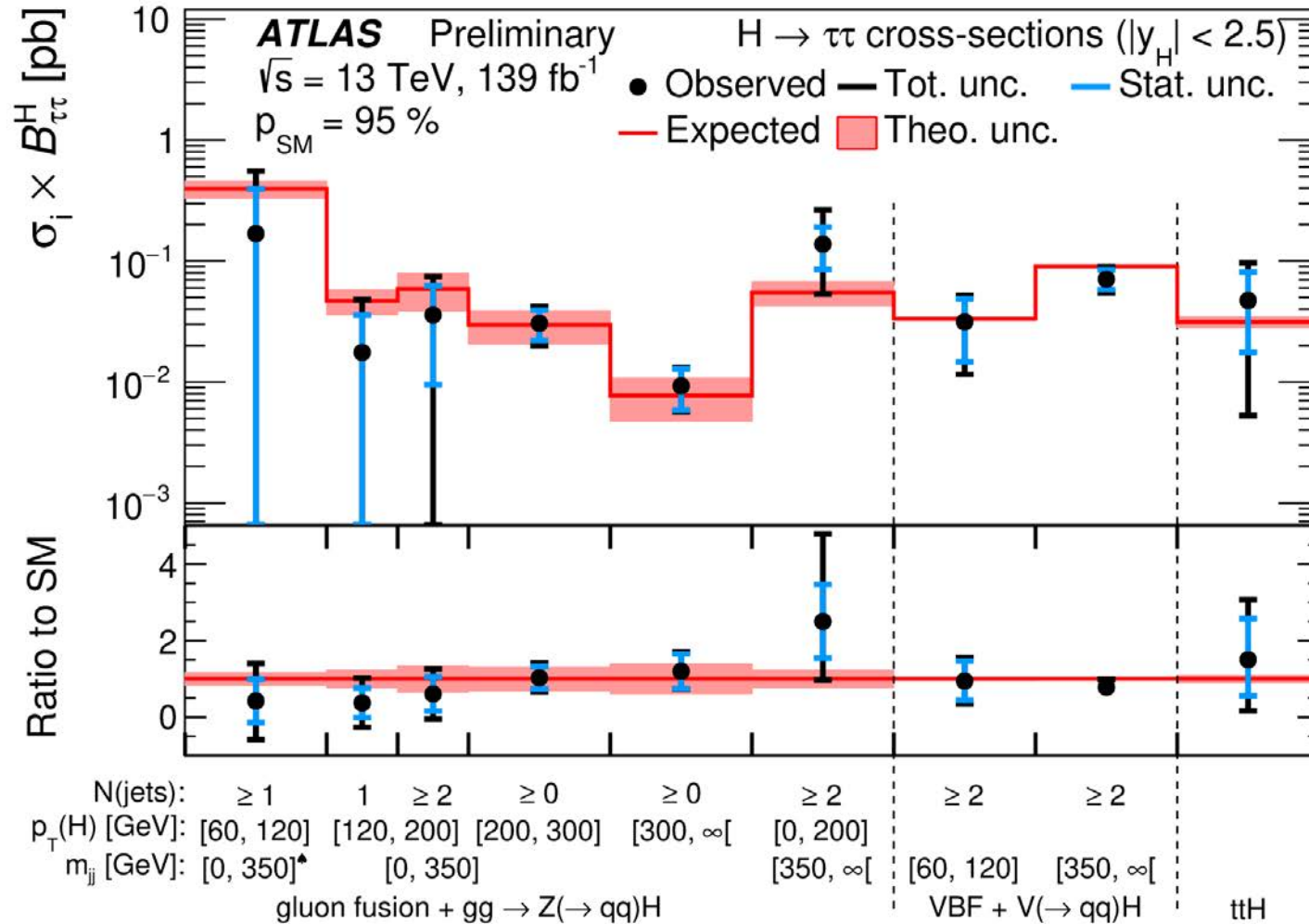
さまざまな物理過程の生成断面積の測定。標準理論を検証している。

超対称性モデルのヒッグス粒子をさまざまな生成・崩壊過程で探索。

WWW候補事象の例



STXS測定 ($H \rightarrow \tau\tau$)



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

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

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

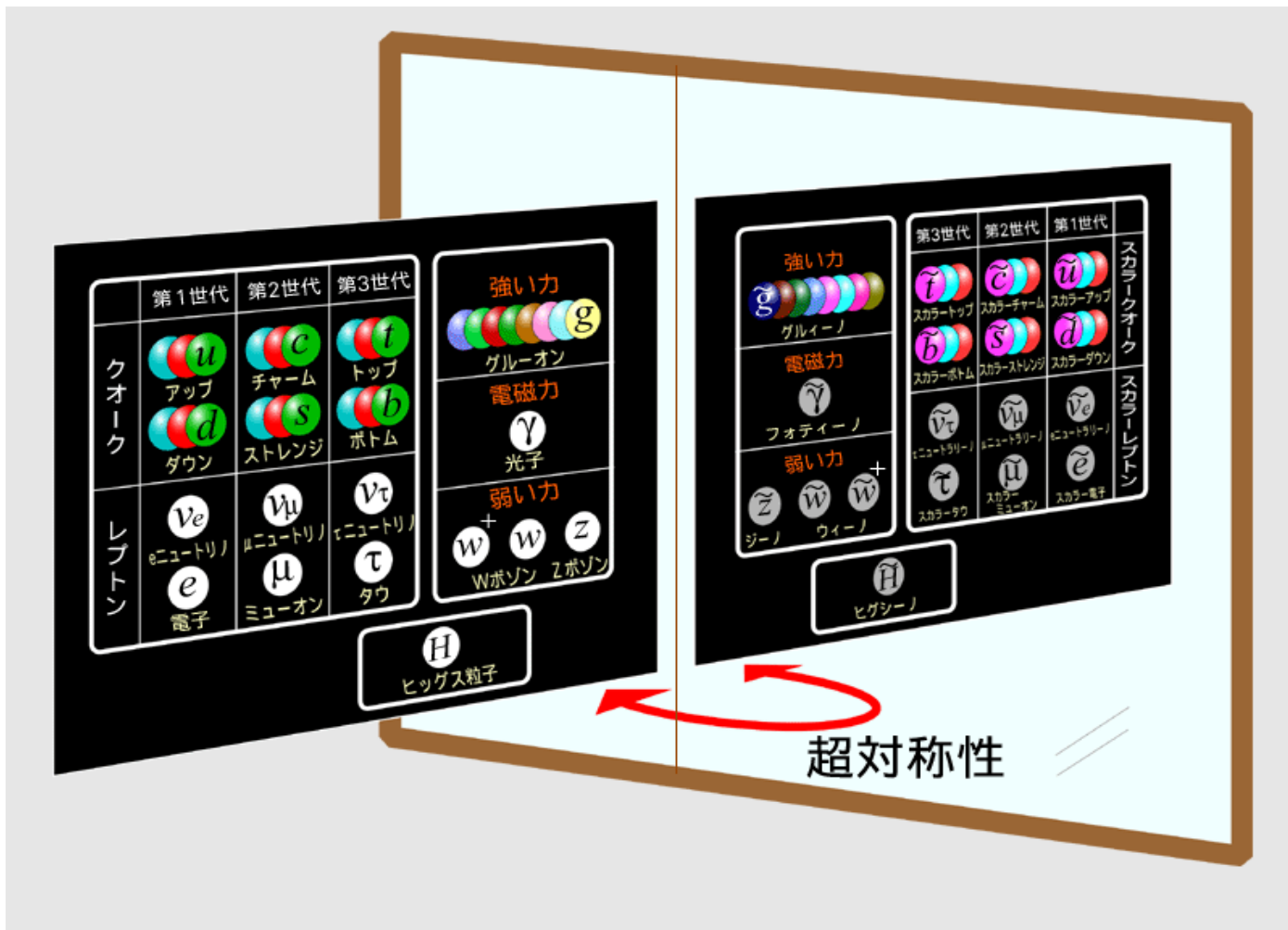
超対称性理論では、標準理論どおりの単一ヒッグス粒子では筋の通った理論に作れない。必ず複数のヒッグス粒子があるべき。

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。



荷電ヒッグス粒子の $H^+ \rightarrow tb$ 崩壊の探索

筑波大学グループは、 $H^+ \rightarrow tb$ 崩壊の探索解析に貢献してきた。

Run 1

– 永田- Ph.D. in Dec 2016

– JHEP 03 (2016) 127

Run 2 (36.1 fb⁻¹)

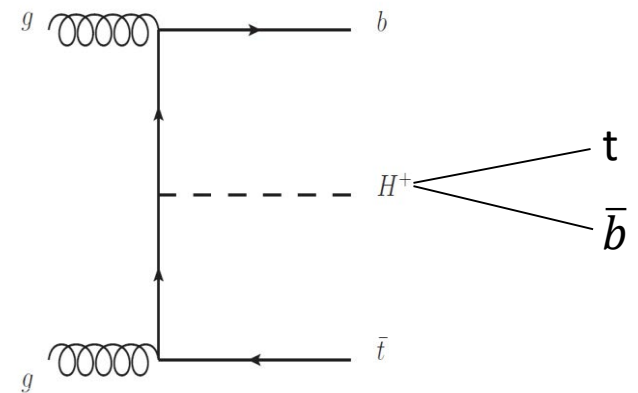
– 萩原- Ph.D. in Feb 2018

– JHEP 11 (2018) 085

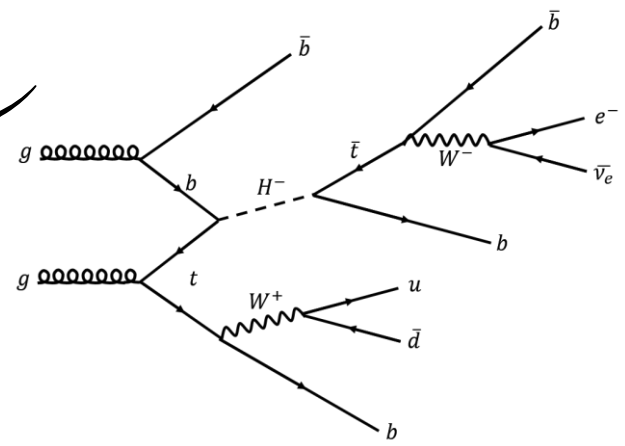
Run 2 (139 fb⁻¹) – 現在解析中

– 山内(D2)、(廣瀬、佐藤)

- [JHEP 06 \(2021\) 145](#)

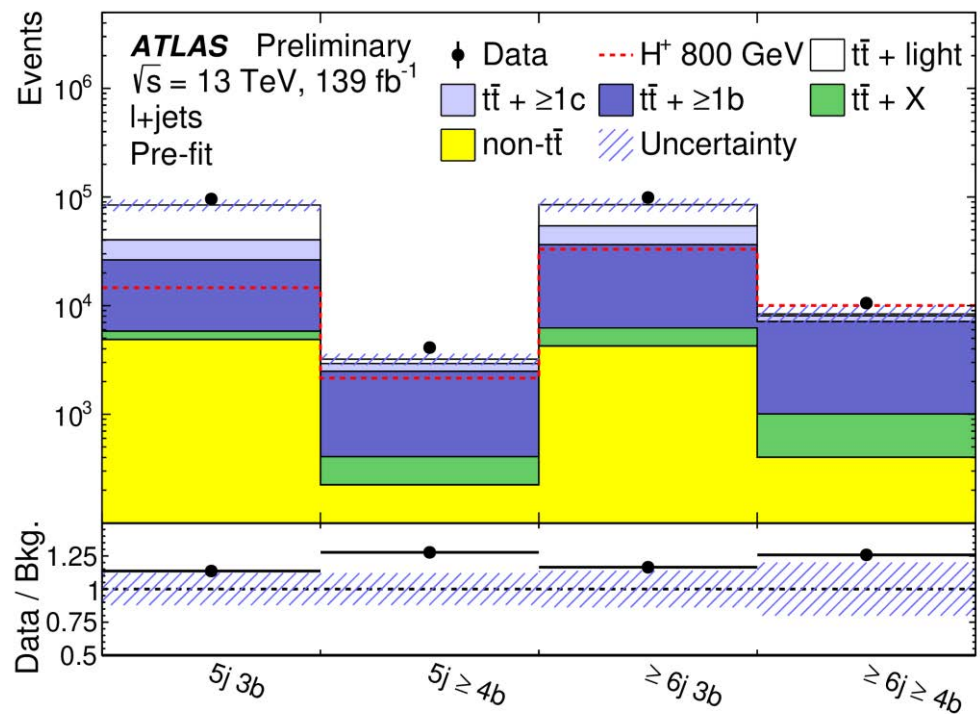


解析チャンネル



- $\bar{t}bH^+ \rightarrow \bar{t}b (t\bar{b}) \rightarrow (W^- \bar{b})b(W^+ b)b$
- 2つのWの崩壊モードが片方がレプトン、もう片方がハドロンに壊れるモードで探している。
 - $\ell + jets$ チャンネル: $\ell\nu + qq'4b$

- イベント中のジェット数/bタグ数によって、さらにサブチャンネルに分けて解析。
 - $\ell + jets$: $\ell + 5j3b, \ell + 5j \geq 4b, \ell + \geq 6j3b, \ell + \geq 6j \geq 4b$
- バックグラウンド: $t\bar{t} + jets, t\bar{t} + V, \text{single top}, V + jets, t\bar{t}h, \text{multijets}$

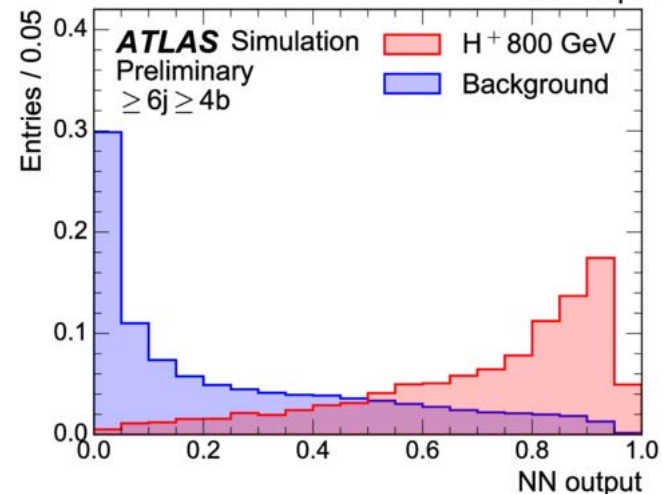
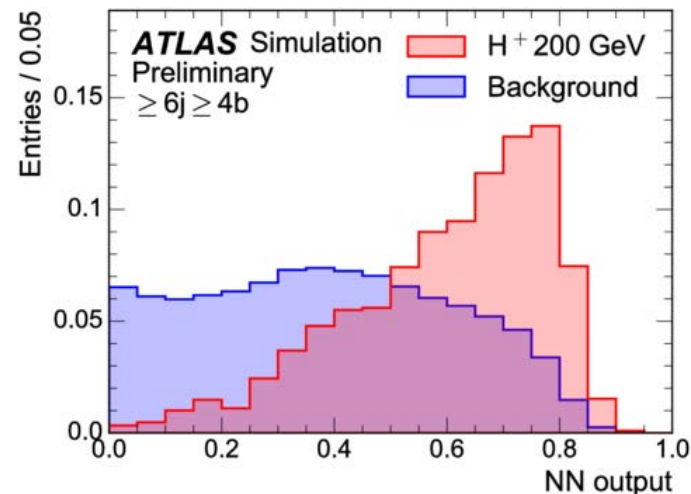


多変数解析によるS/B分離

- ニューラルネットワークによる多変数解析。
- 15個の運動学的変数の関数として、S/B分離が非常に良い変数を作った。

NN variables

p_T of the leading jet
 p_T of fifth leading jet
Scalar sum of the transverse p_T of all jets
Second Fox-Wolfram moment calculated using all jets and leptons [93]
Invariant mass of the b -jet pair with minimum ΔR
Invariant mass of the b -jet pair with maximum p_T
Maximal invariant mass of a b -jet pair
Invariant mass of the jet triplet with maximum p_T
Invariant mass of the untagged jet-pair with minimum ΔR
Average ΔR between all b -jet pairs in the event
 ΔR between the lepton and the pair of b -jets with smallest ΔR
Centrality calculated using all jets and leptons
The kinematic discriminant defined in the text
Number of jets (only in $\geq 6j3b$ and $\geq 6j\geq 4b$ regions)
Number of b -jets (only in $5j\geq 4b$ and $\geq 6j\geq 4b$ regions)

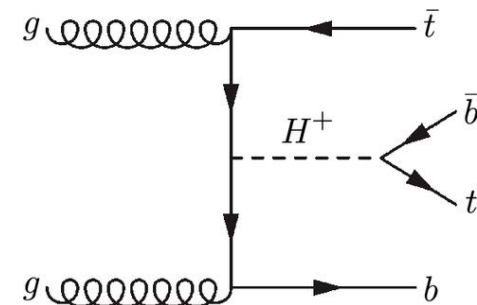


LHCでの荷電ヒッグスの性質

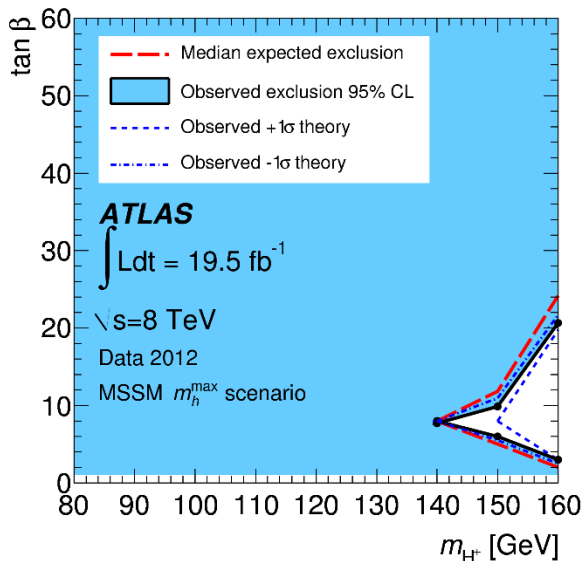
- H^+ は、重いトップやボトムクォークとの結合が強いため、LHCではトップクォークを伴って生成するケースが多いと予想される。

– $\bar{t}bH^+$ 生成

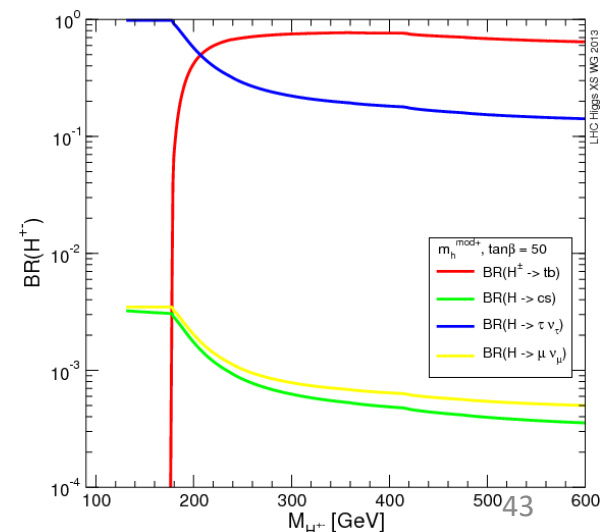
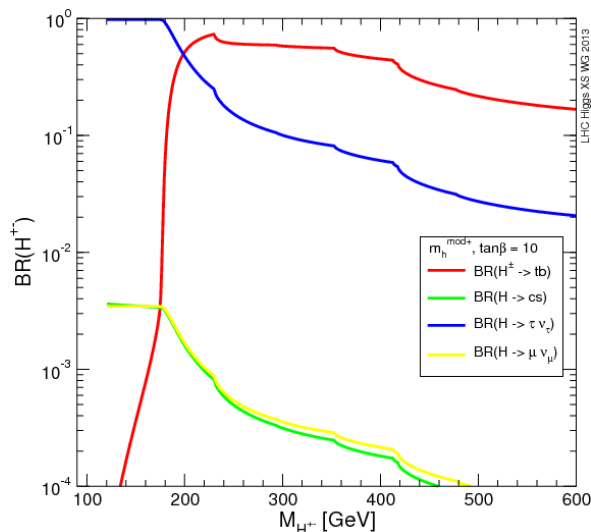
- $m_{H^+} \lesssim 160 \text{ GeV}$ の領域は厳しく棄却されている。
- $m_{H^+} \gtrsim 200 \text{ GeV}$ では、 $H^+ \rightarrow tb$ 崩壊の分岐比が大きい。



$H^+ \rightarrow \tau\nu$ 探索による棄却域

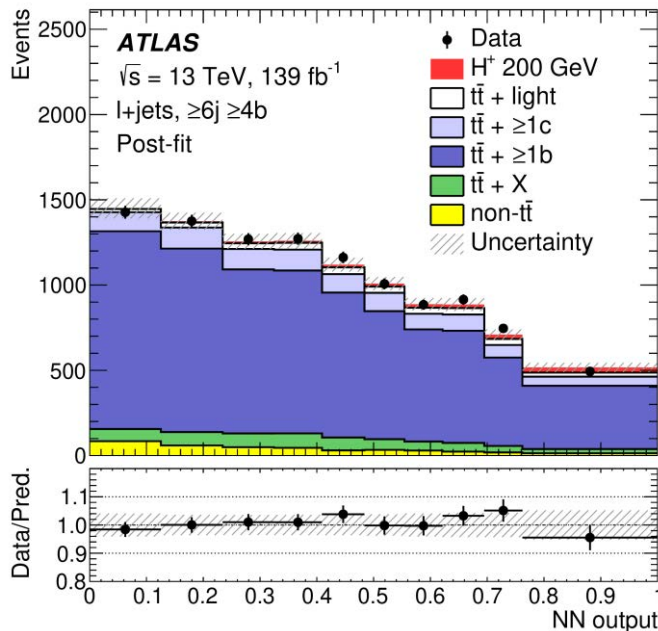
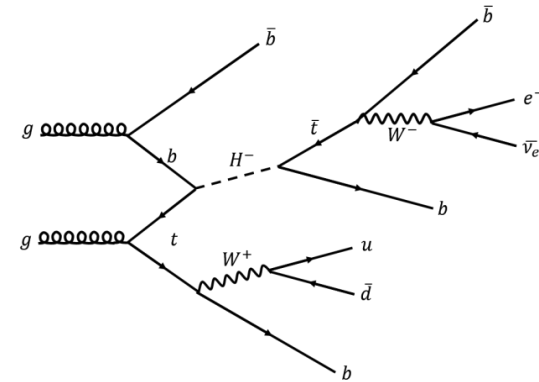


崩壊分岐比 MSSMの例

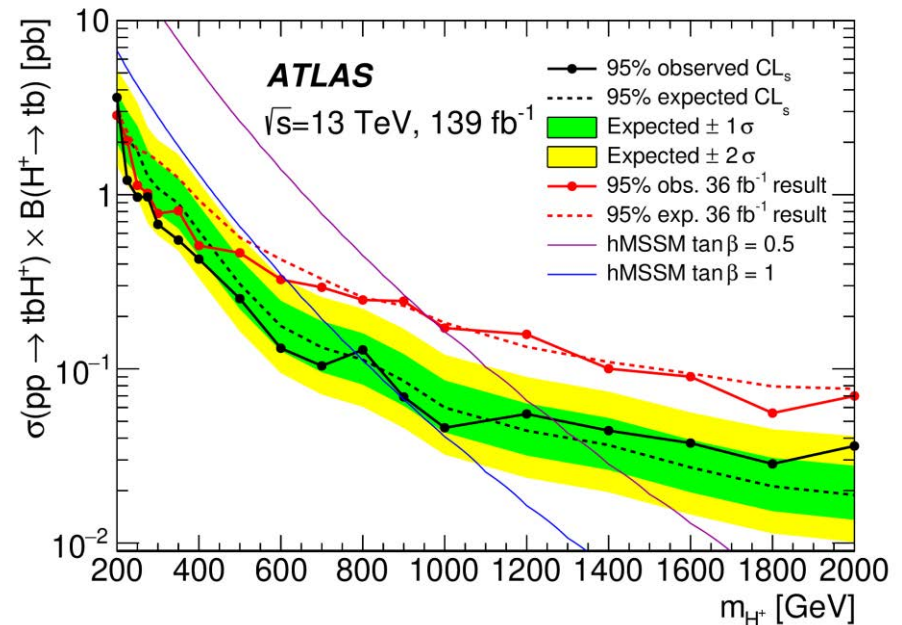


$H^+ \rightarrow tb$ 探索

- 信号事象: $tbH^+ \rightarrow tb(tb) \rightarrow \ell \nu + qq'bbbb$
- イベント中のジェット数/bタグ数によりサブチャンネルに分けて解析。
 - $\ell + 5j3b, \ell + 5j \geq 4b, \ell + \geq 6j3b, \ell + \geq 6j \geq 4b$
- ニューラルネットワークによる多変数解析。



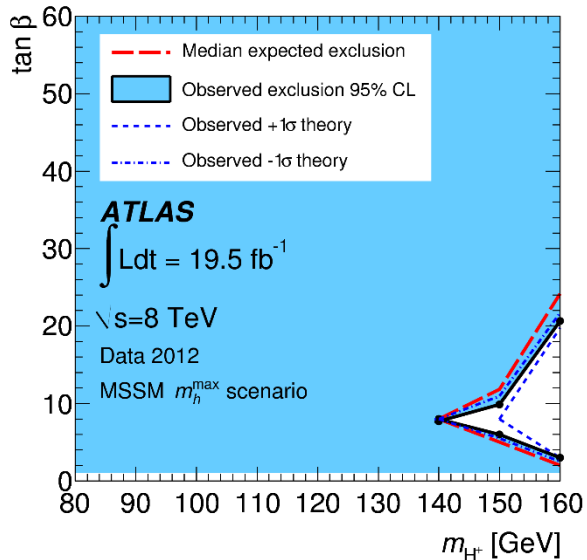
荷電ヒッグス粒子の生成断面積の上限



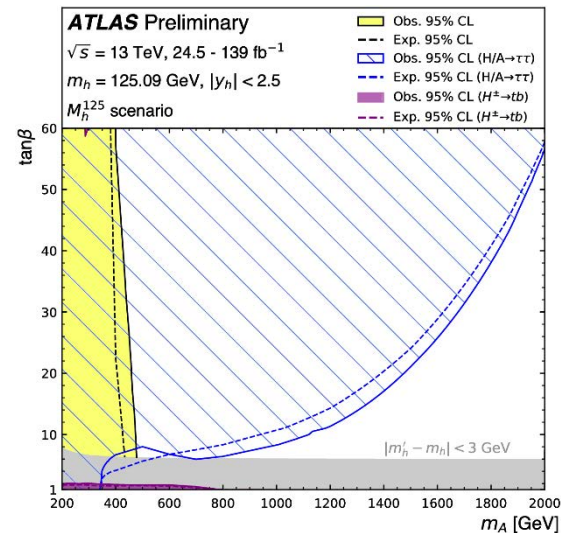
重い荷電ヒッグス粒子を探すモチベーション

- トップクォークよりも軽い場合は、 $H^\pm \rightarrow \tau\nu$ 探索の結果により広く棄却されている。
- 既に発見されているヒッグス粒子の精密測定結果は、重い H^\pm と整合が良い。

$H^+ \rightarrow \tau\nu$ 探索による棄却域



$h(125)$ の精密測定から得られたMSSMへの制約



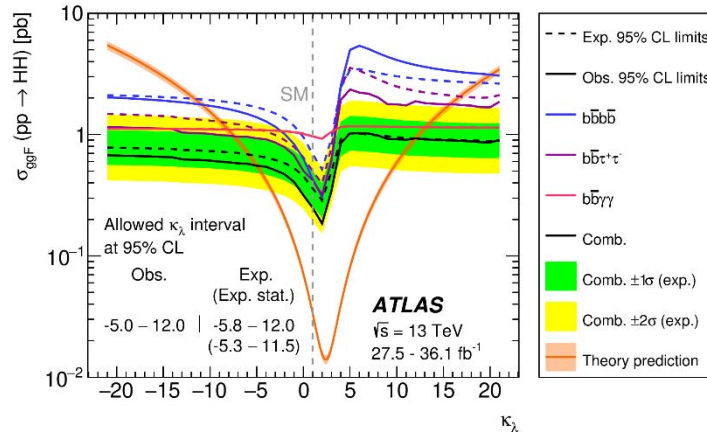
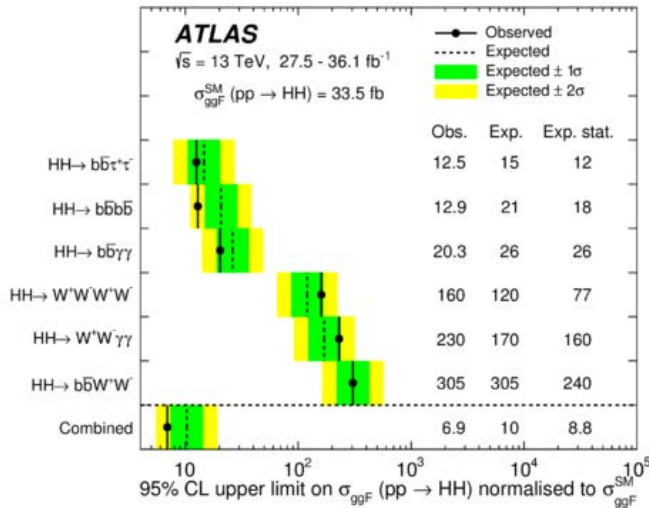
$m_A \sim m_{H^\pm}$, for $m_A \gg m_W$

Run 2でのDihiggs探索結果

2019スライド

- まずはDihiggs事象を探している。

Dihiggs事象の生成断面積に対する上限 自己相互結合に対する制限



$-5.0 < \kappa_\lambda < 12.1$ at 95% CL.

$S \rightarrow hh$ 事象の探索として、
同じデータを解釈することも
できる:
(e.g. S =heavy Higgs)

