

LHC実験での荷電ヒッグス粒子 の探索

佐藤構二

宇宙史センター構成員会議

2020年11月30日

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

$\sqrt{s} \leq 14 \text{ TeV}$ 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, 25 fb⁻¹のデータ取得。

2012年 LHC加速器のATLAS/CMS両実験がヒッグス粒子を発見。

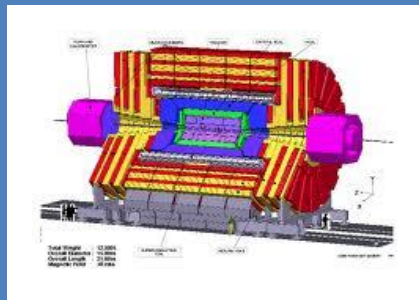
2015-18年 エネルギーをEcm=13 TeVに上げてRun 2実験。

2022-2024年 Run 3。Ecm=13-14 TeV, ~300 fb⁻¹のデータセット

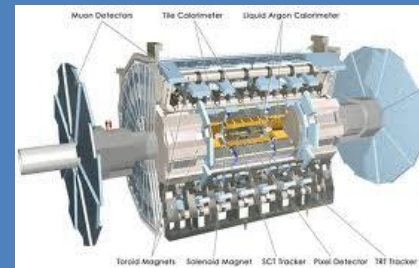
2027-203X年 HL-LHC実験。~3000 fb⁻¹の大データセット。



CMS実験



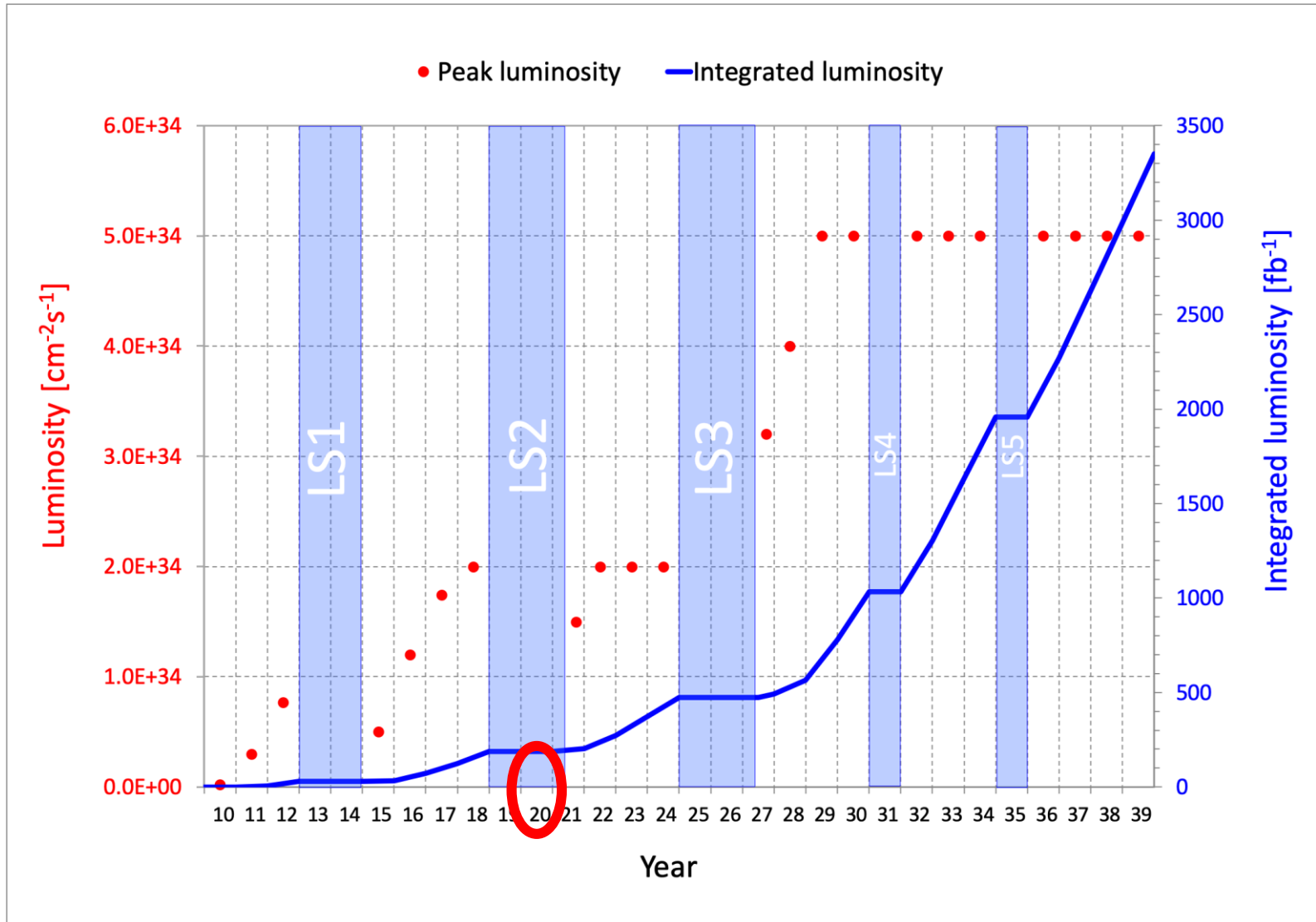
ATLAS実験



円周27km

陽子を最大7 TeVまで加速して正面衝突

LHCの長期将来計画



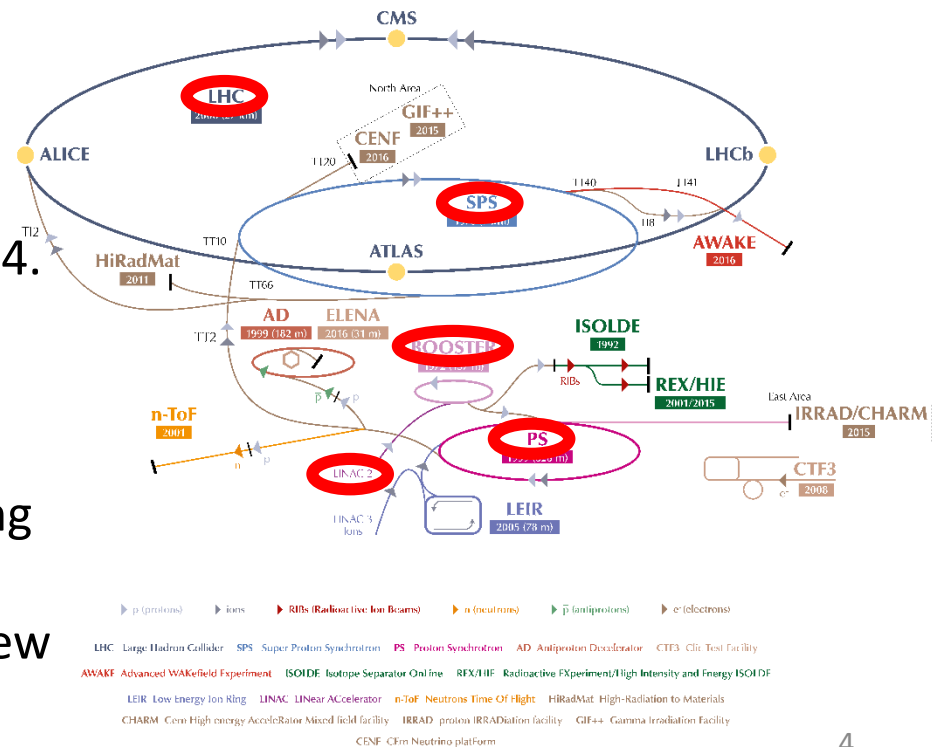
Accelerator LS2 Upgrades

- 2019-2021: Long Shutdown (LS2) preparing for Run 3 in 2022-2023.

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, ...

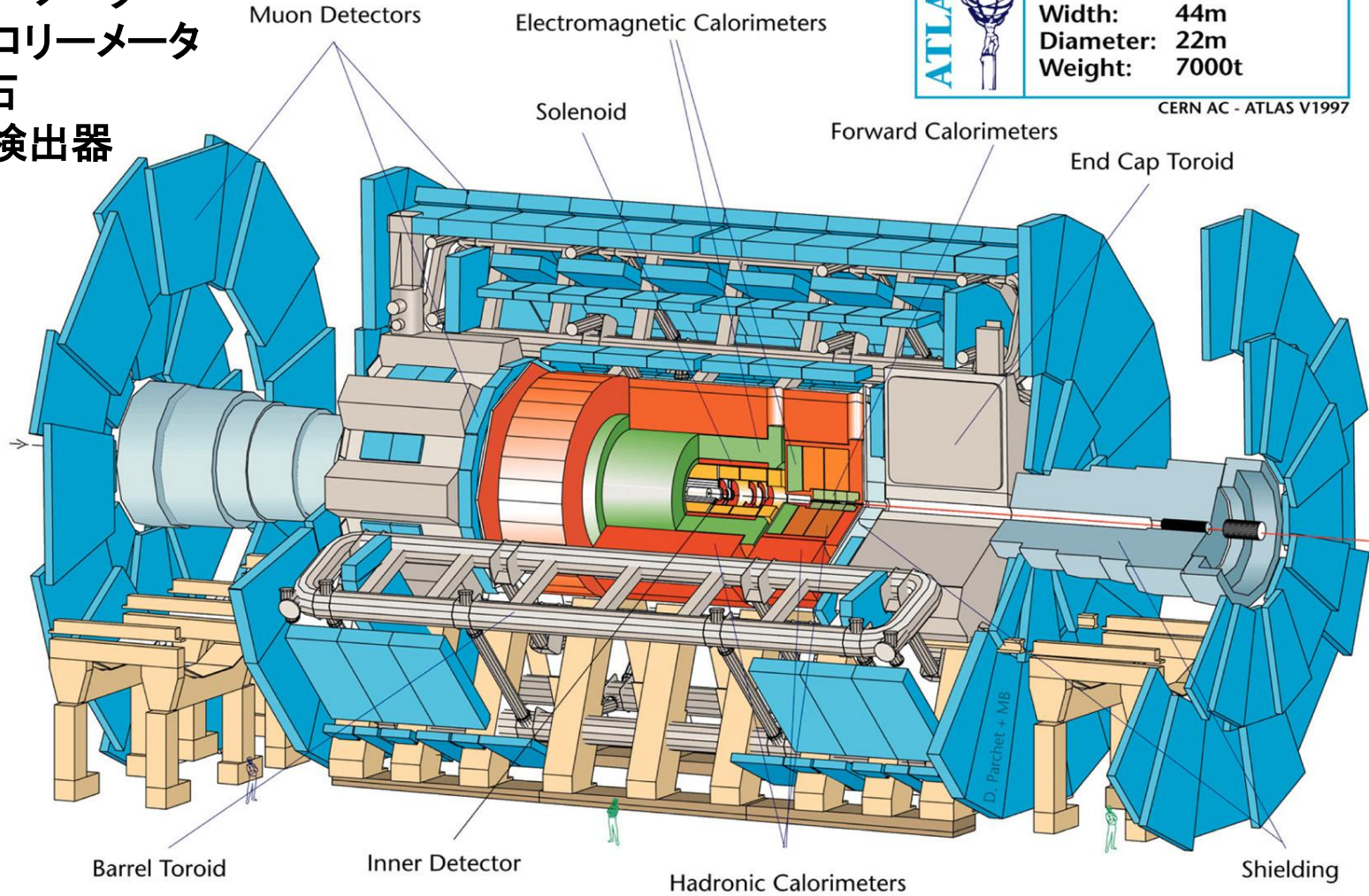


- シリコン検出器
- 飛跡検出器
- ソレノイド磁石
- 電磁カロリメータ
- ハドロンカロリメータ
- トロイド磁石
- ミューオン検出器

ATLAS検出器

総重量 7,000 t

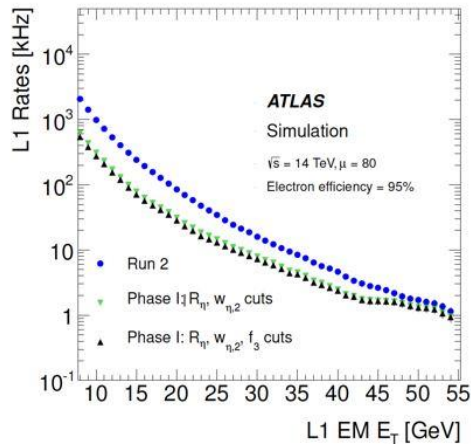
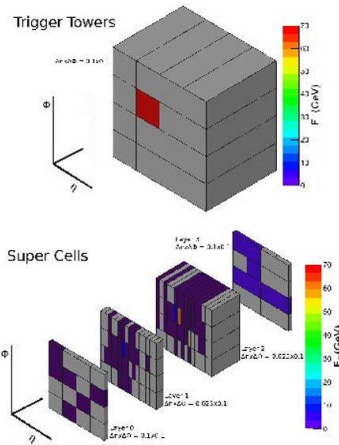
	Detector characteristics	
	Width:	44m
	Diameter:	22m
	Weight:	7000t
CERN AC - ATLAS V1997		



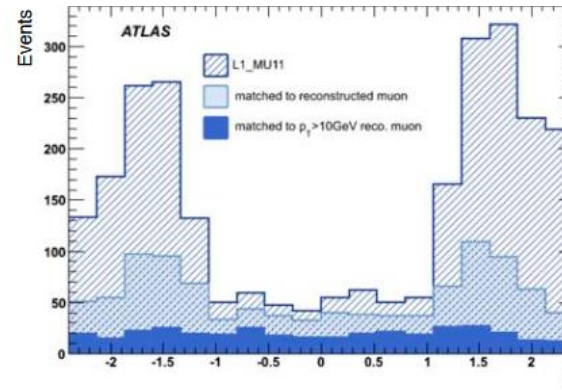
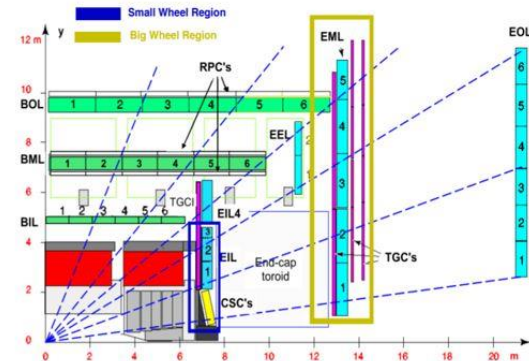
- 最高エネルギーでの、**さまざまな素粒子反応の研究**
 - ヒッグス粒子、標準理論、トップクォーク、Bメソン、超対称性、新物理探索、重イオン衝突...

ATLAS LS2 Upgrades

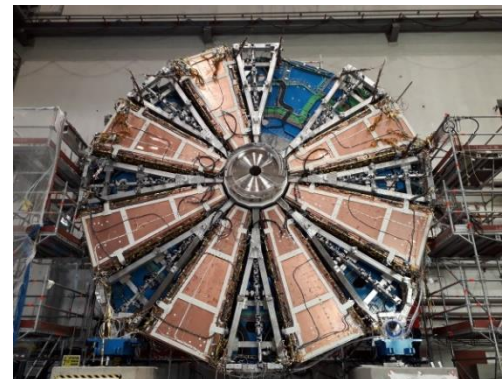
L1カロリメータ・トリガーのアップグレード



新しいミュオン検出器 Muon Small Wheel



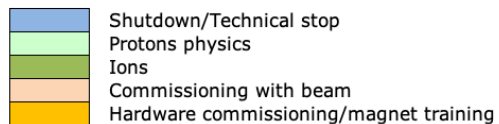
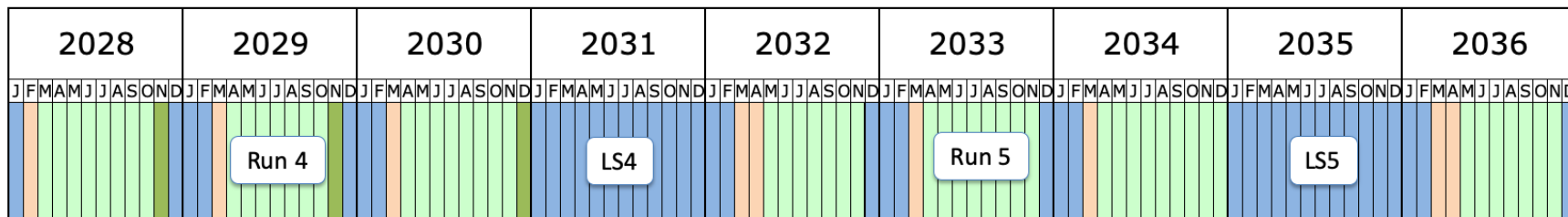
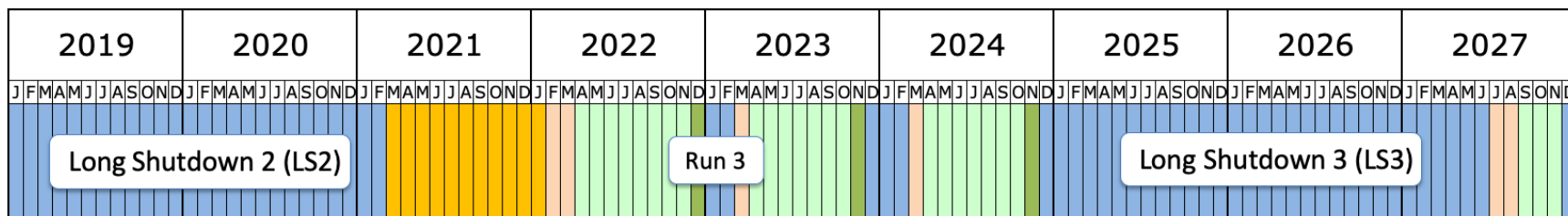
arXiv:1810.01394v



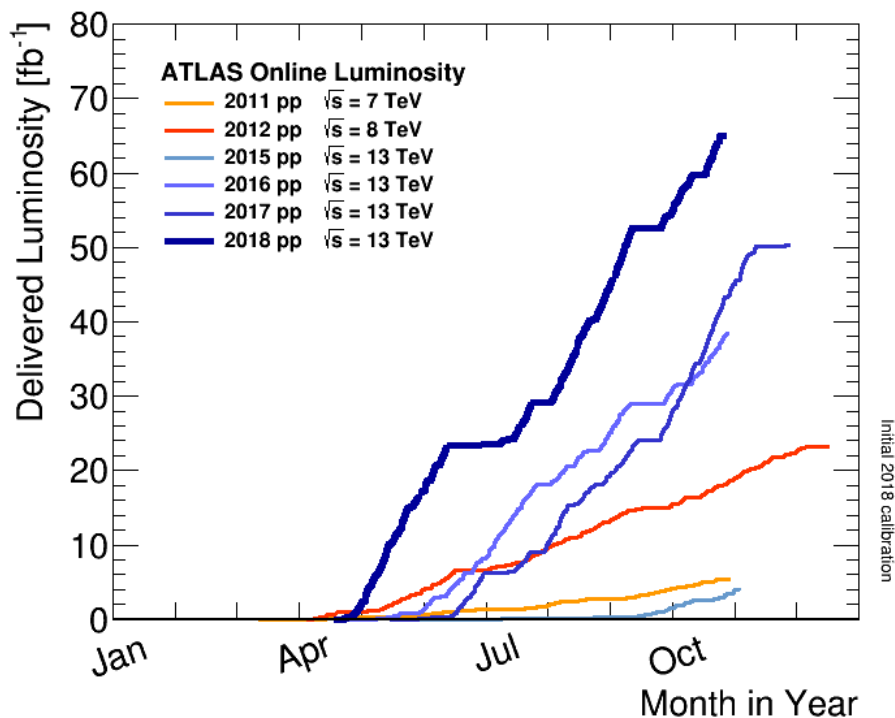
新しいミュオンチェンバー(NSW)の建設 (写真は2020年9月)

LHCの長期スケジュール

LS2が2021年いっぱいまで、延長されることが決定した。



これまでATLAS実験が取得したデータ



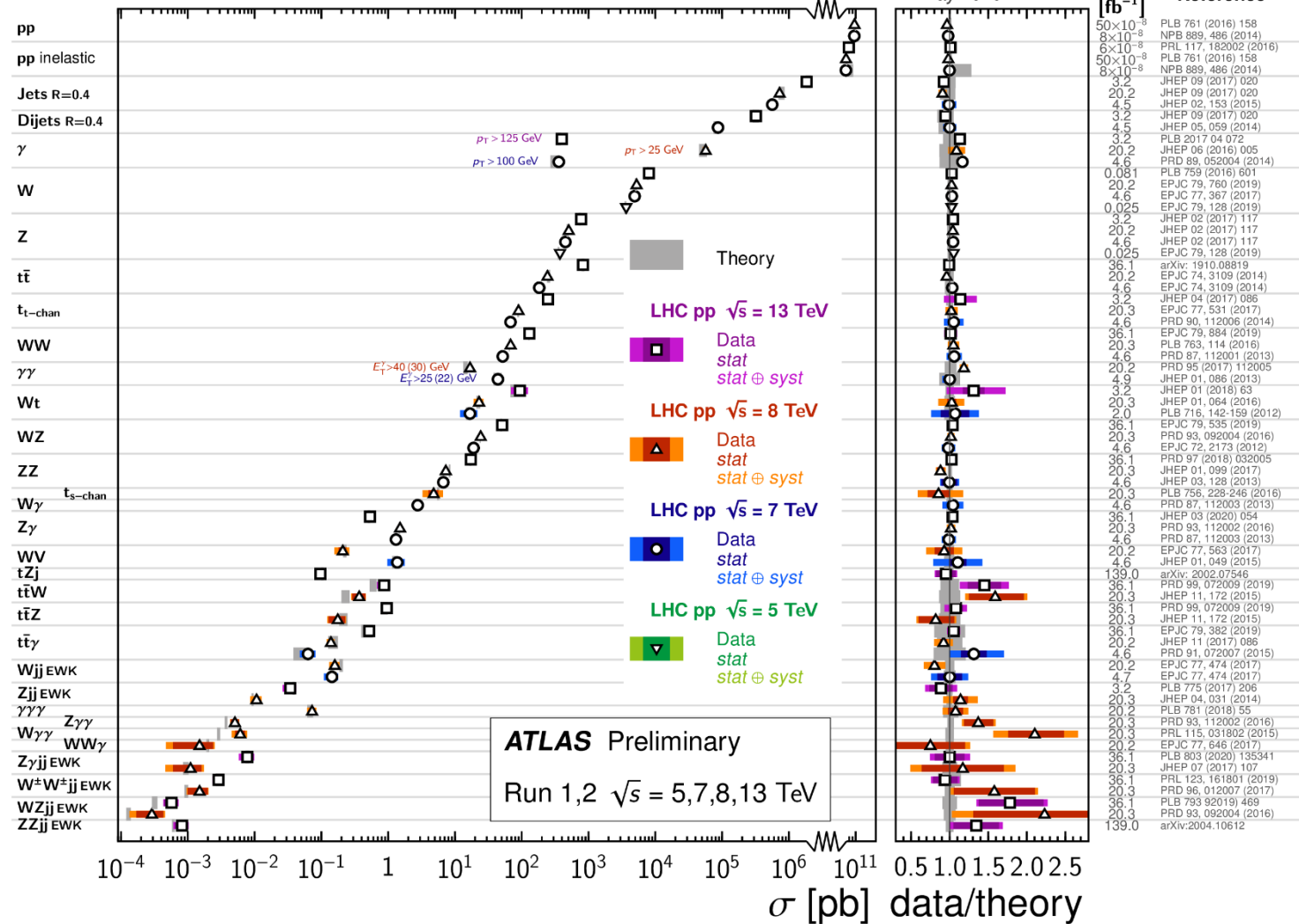
Run 1	E_{CM} (TeV)	integ lumi [fb ⁻¹]
2011	7	5
2012	8	21

$E_{CM} = 13$ (TeV)

Run 2	Peak lumi E34 cm ⁻² s ⁻¹	Days pp physics	Recorded integ lumi [fb ⁻¹]	Good for Physics [fb ⁻¹] 累積
2015	0.5	56	3.9	3.2
2016	1.4	122	36.0	36
2017	1.9	150	46.9	80
2018	2.1	152	65.0	139

標準理論の精密検証

Standard Model Production Cross Section Measurements

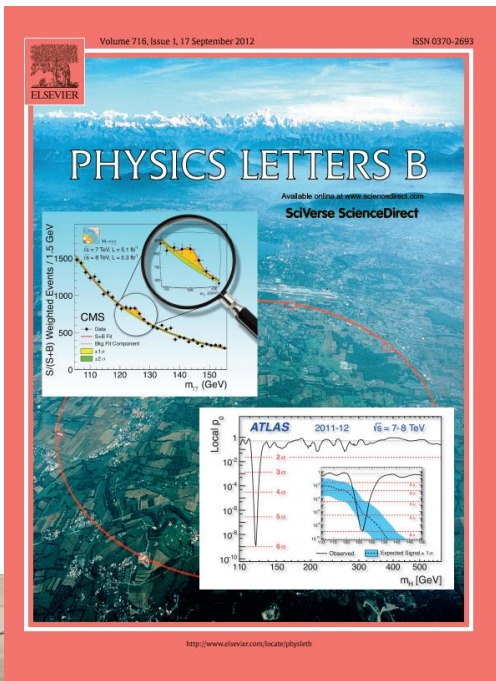


$\sigma_{t\bar{t}\bar{t}} = 24^{+7}_{-6}$ fb (SM: 12.0 ± 2.4 fb), 4.3 s.d. (2020年夏の結果)

15桁に渡るさまざまな断面積のプロセスを精密測定しながら、標準理論を検証している。

0(1 fb) 過程を観測し始めている。

ヒッグス粒子発見の発表



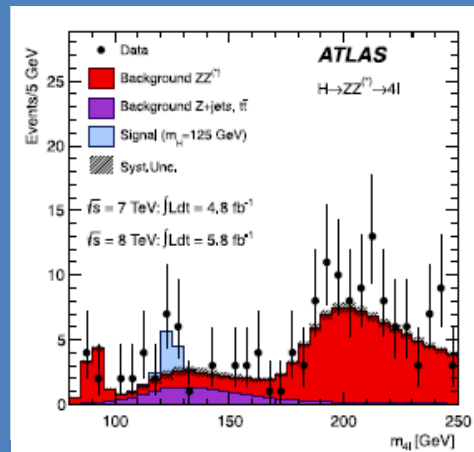
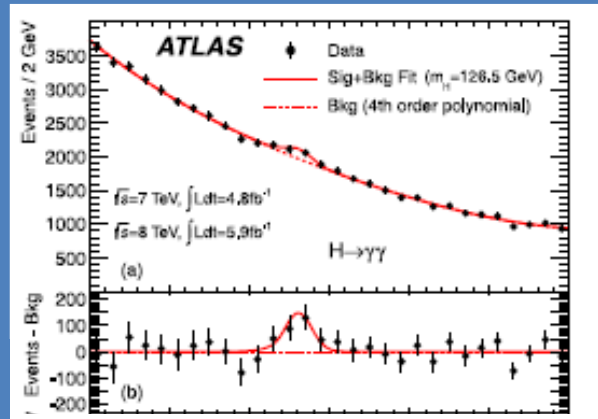
2012年7月4日 LHC加速器の
ATLAS/CMS両実験が発見を報告

2013年 アングラール、ヒッグス
がノーベル物理学賞を受賞



発見チャンネルの現在

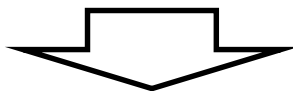
2012年夏の結果



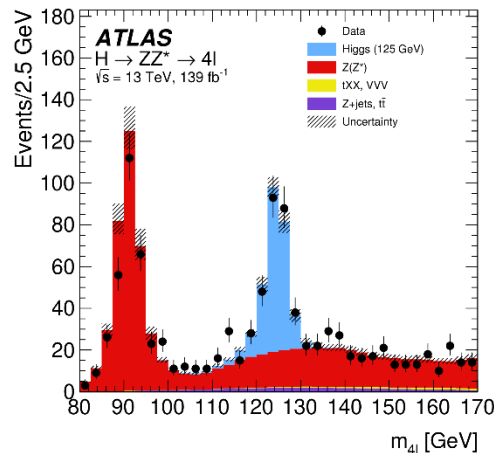
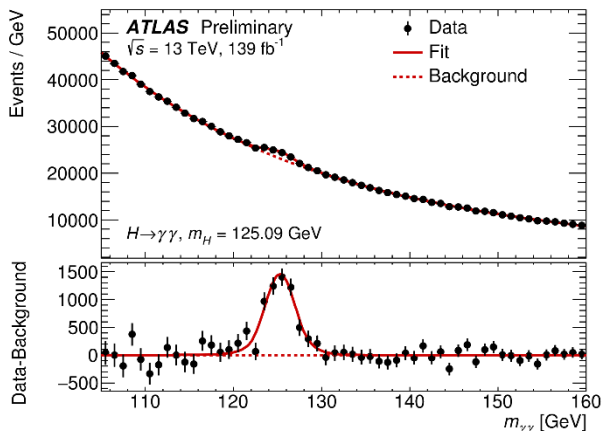
[Phys. Lett. B 716 \(2012\) 1-29](#)

2チャンネル合わせて5.9 σ .

$H \rightarrow \gamma\gamma$



$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\ell$



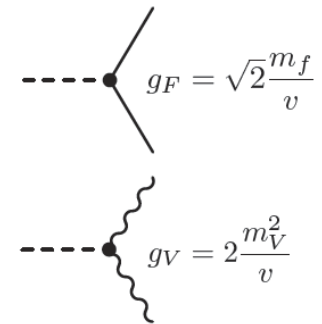
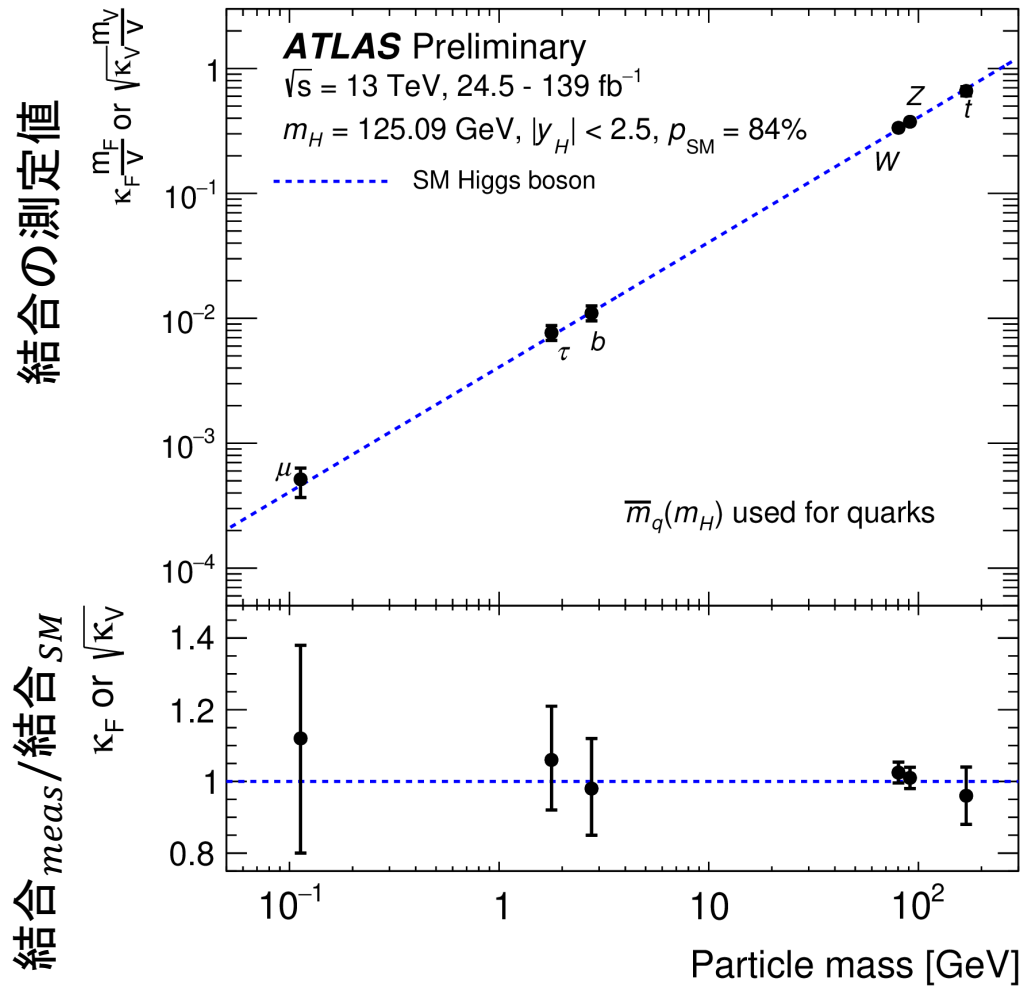
データが増えたため、ヒッグス粒子のピークがよりハッキリ見える
→現在は、ヒッグス粒子の精密測定の時

Run2全データでの解析

ATLAS-CONF-2019-029

[Eur. Phys. J. C 80 \(2020\) 941](#)

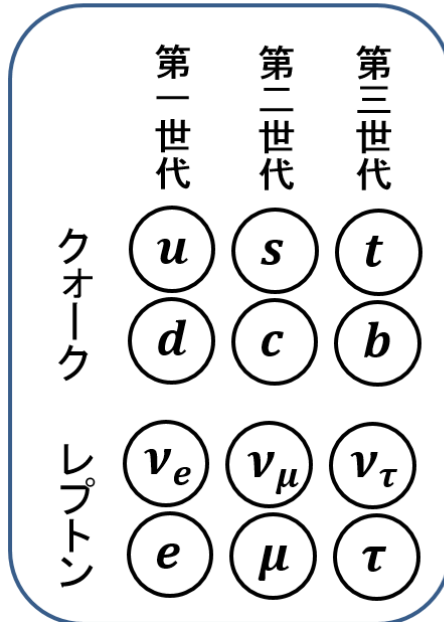
ヒッグス粒子の結合の測定結果



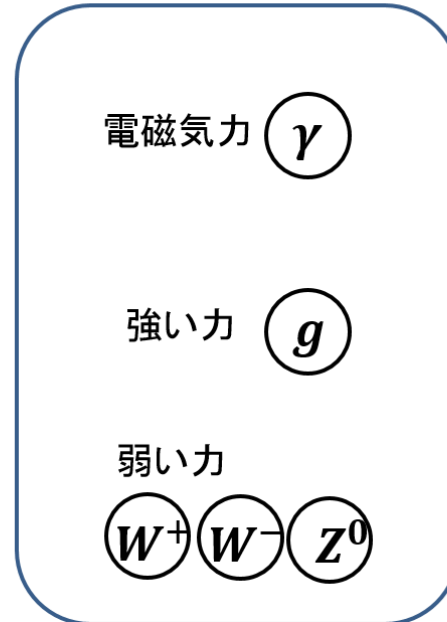
標準理論の粒子

- 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。**

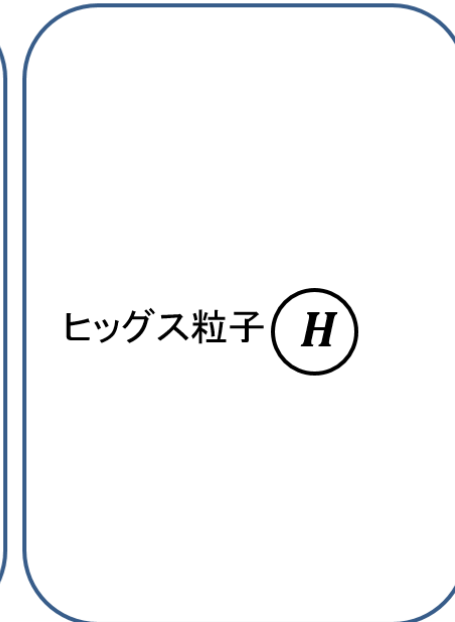
物質を構成する粒子



力を媒介するゲージ粒子



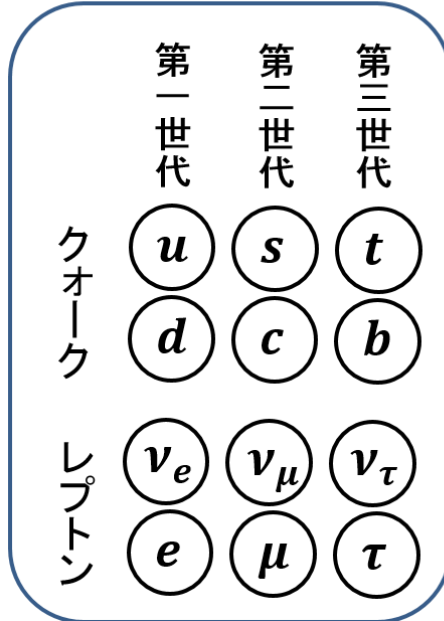
質量の起源、ヒッグス粒子



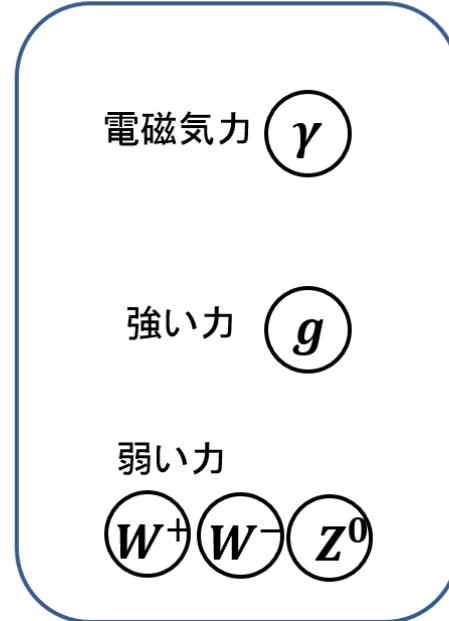
標準理論の粒子

- 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。**

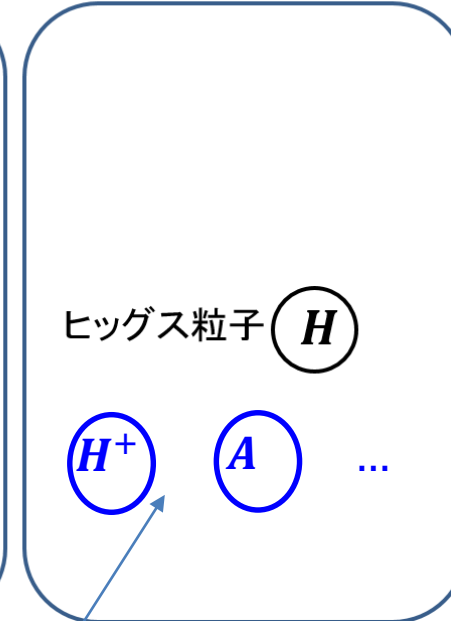
物質を構成する粒子



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？

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。

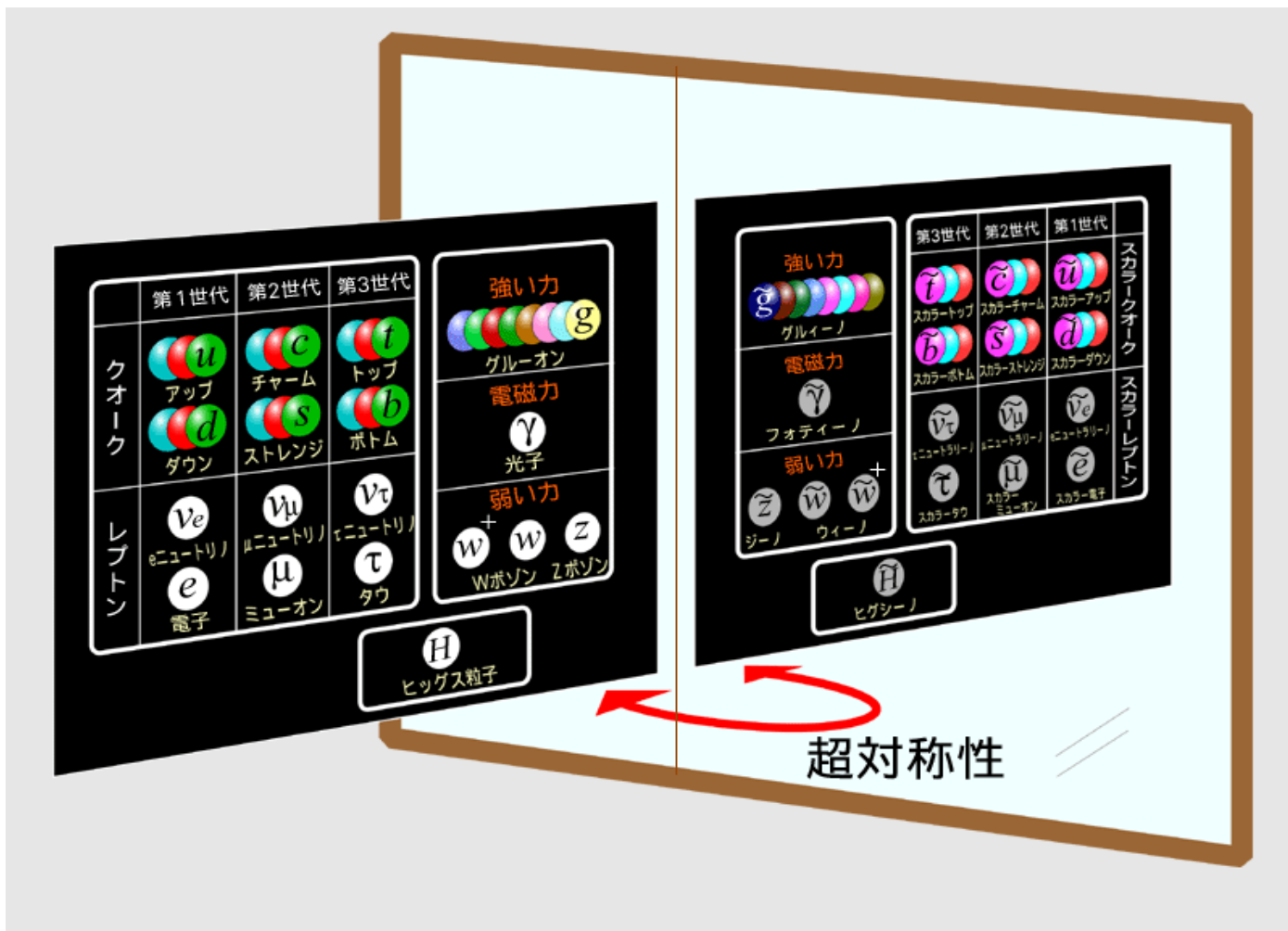
超対称性理論では、標準理論どおりの単一ヒッグス粒子では筋の通った理論に作れない。必ず複数のヒッグス粒子があるべき。

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。

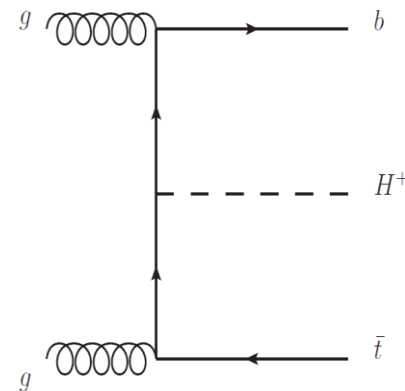


LHCでの荷電ヒッグスの性質

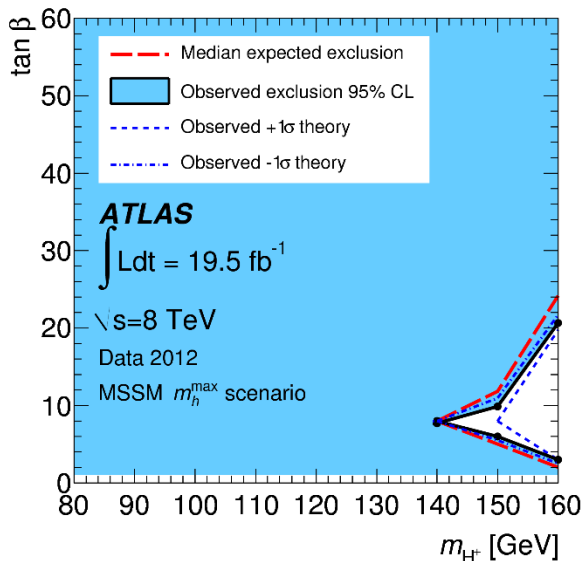
- H^+ は、重いトップやボトムクォークとの結合が強いため、LHCではトップクォークを伴って生成するケースが多いと予想される。

– $\bar{t}bH^+$ 生成

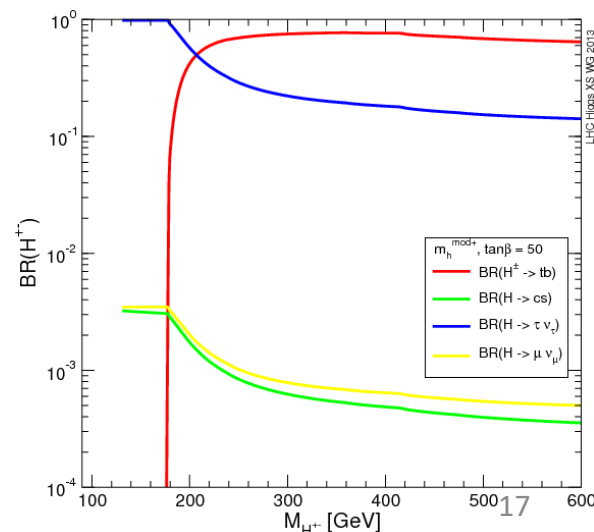
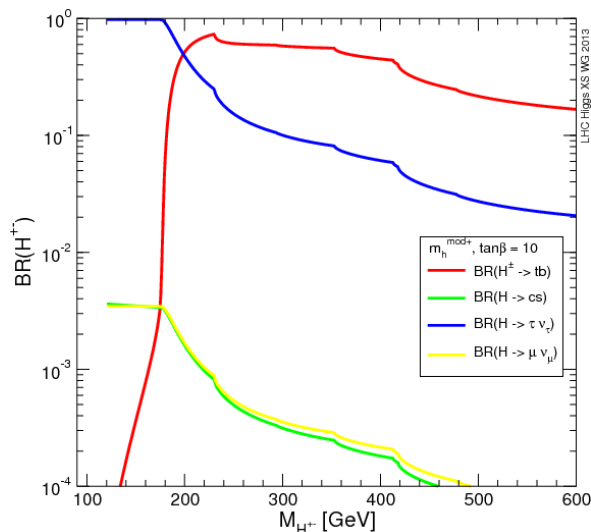
- $m_{H^+} \lesssim 160$ GeVの領域は厳しく棄却されている。
- $m_{H^+} \gtrsim 200$ GeVでは、 $H^+ \rightarrow tb$ 崩壊の分岐比が大きい。



$H^+ \rightarrow \tau\nu$ 探索による棄却域



崩壊分岐比 MSSM ($m_h^{\text{mod}+}$ シナリオ) の例



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

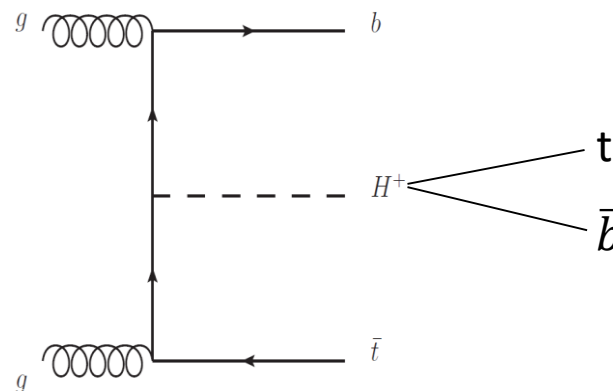
Run 2 (36.1 fb⁻¹)

- 萩原- Ph.D. in Feb 2018
- JHEP 11 (2018) 085

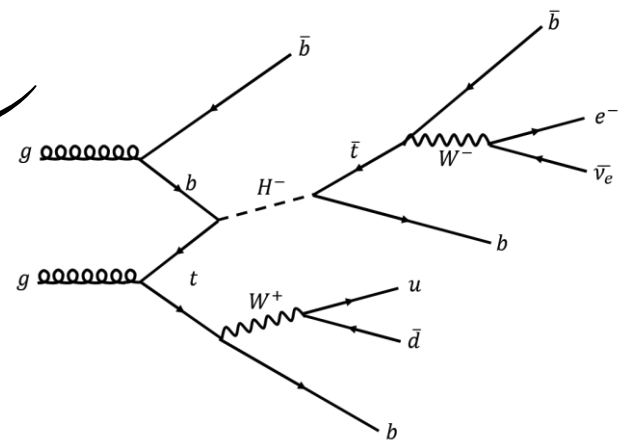
Run 2 (139 fb⁻¹) – 現在解析中

- 山内(D2)、(廣瀬、佐藤)

- 今日のメイン: ATLAS-CONF-2020-039

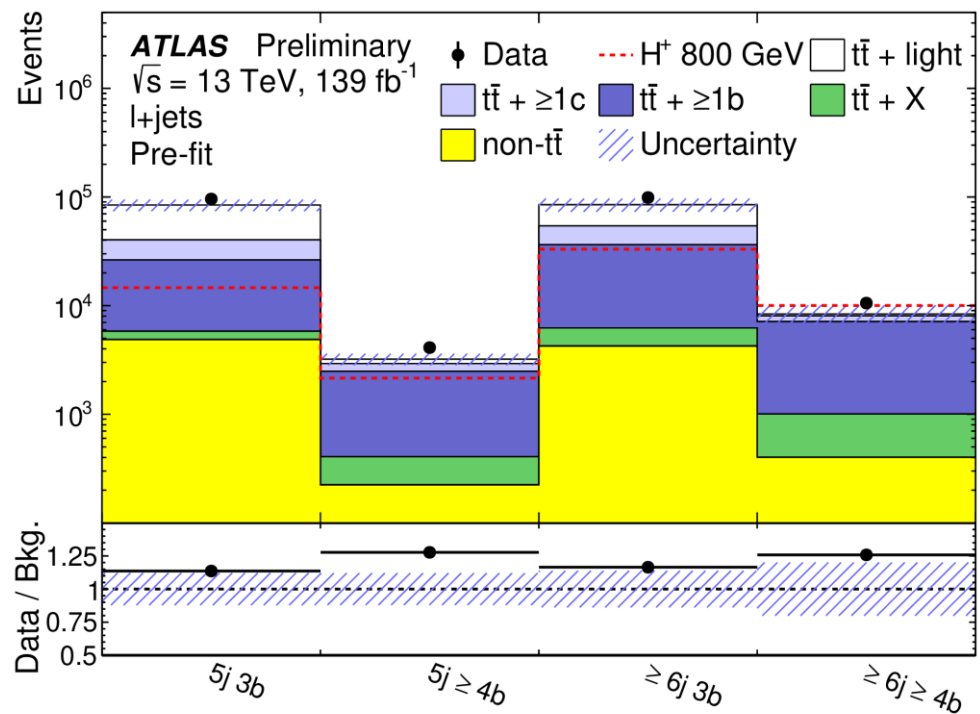


解析チャンネル



- $\bar{t}bH^+ \rightarrow \bar{t}b (t\bar{b}) \rightarrow (W^- \bar{b})b(W^+ b)b$
- 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: $t\bar{t} + jets, t\bar{t} + V, \text{single top}, V + jets, t\bar{t}h, \text{multijets}$

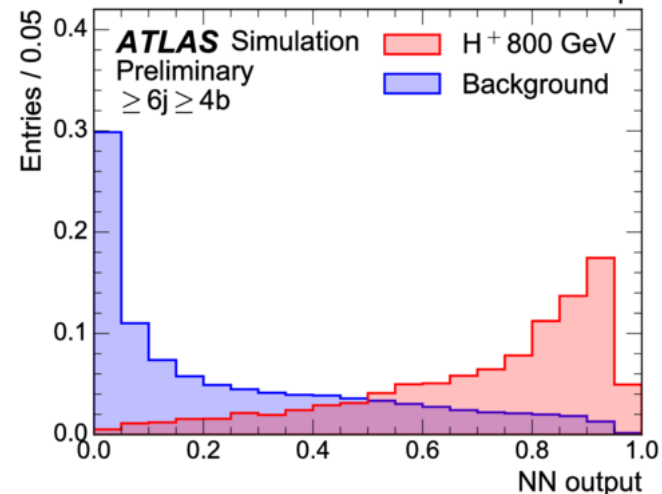
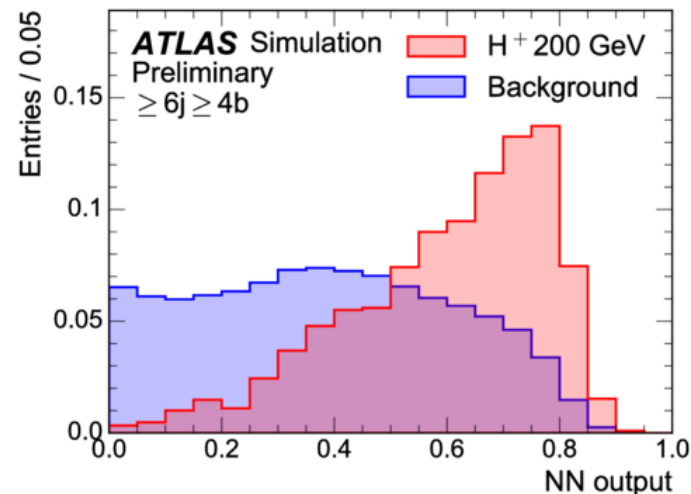


多変数解析によるS/B分離

- 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

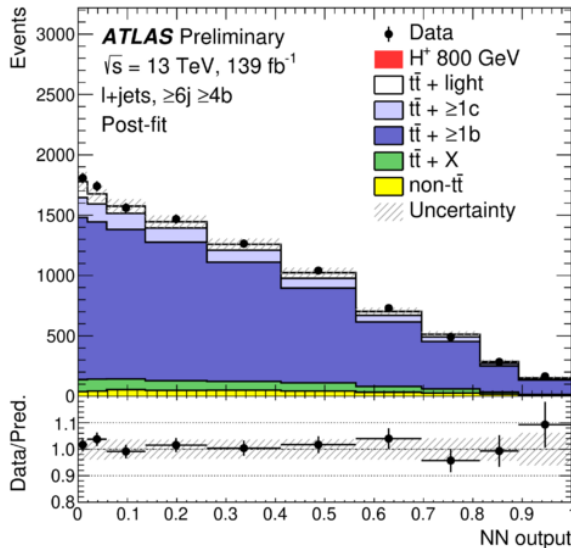
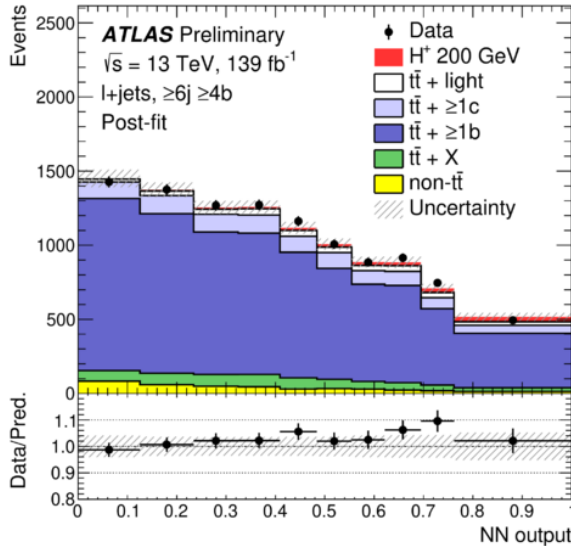
p_T of the leading jet
 p_T of fifth leading jet
Scalar sum of the transverse p_T of all jets
Second Fox-Wolfram moment calculated using all jets and leptons [93]
Invariant mass of the b -jet pair with minimum ΔR
Invariant mass of the b -jet pair with maximum p_T
Maximal invariant mass of a b -jet pair
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)



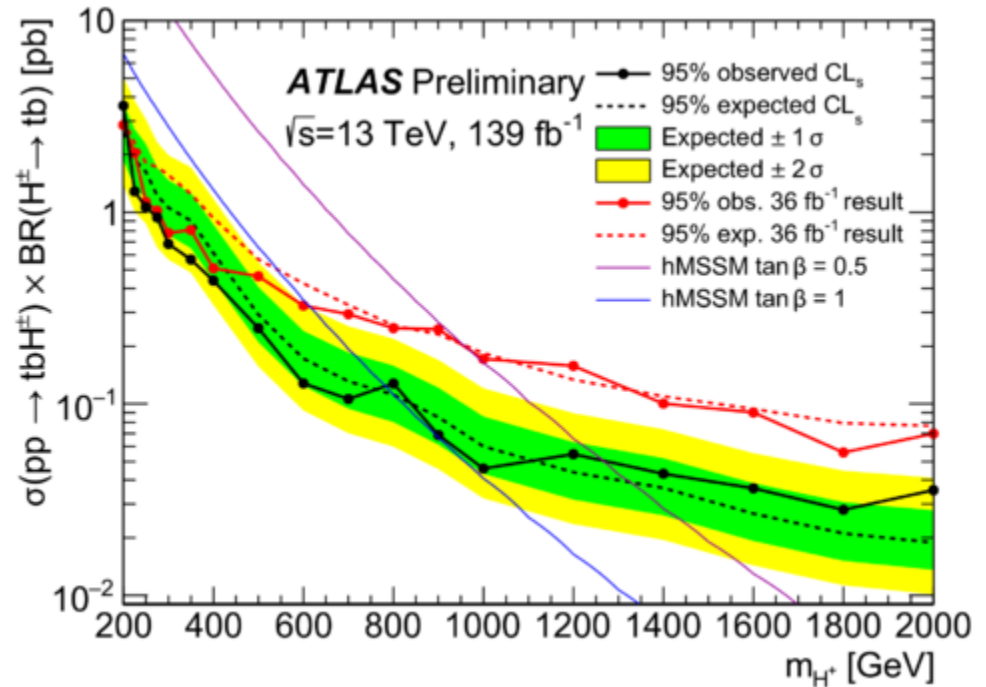
データの分布

荷電ヒッグス粒子の兆候はみられなかった

データの分布



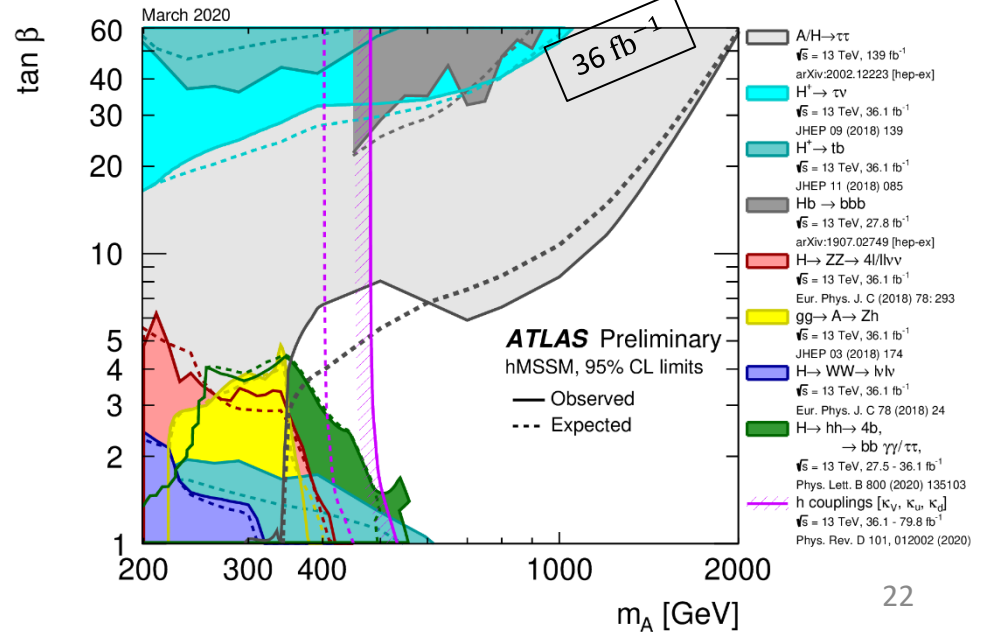
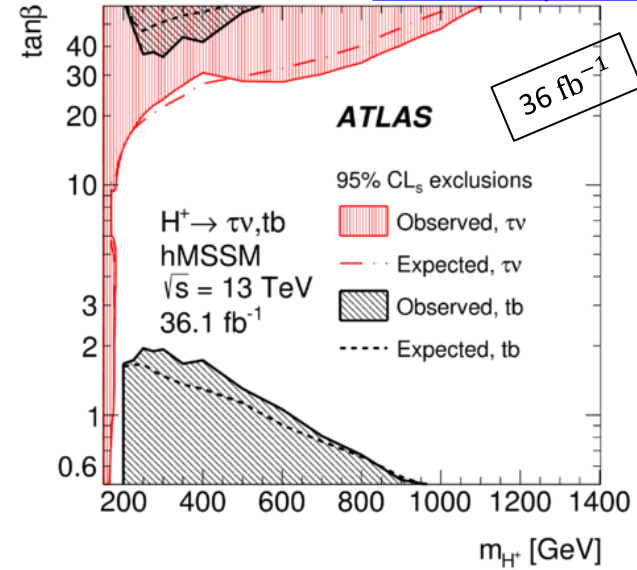
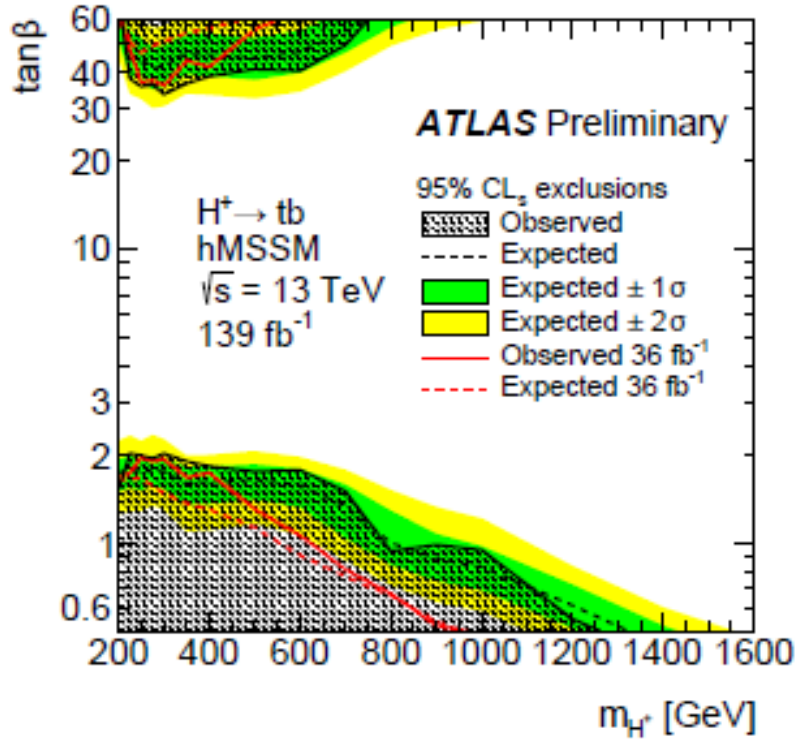
荷電ヒッグス粒子の生成断面積の上限



MSSMへの制約

JHEP 11 (2018) 085

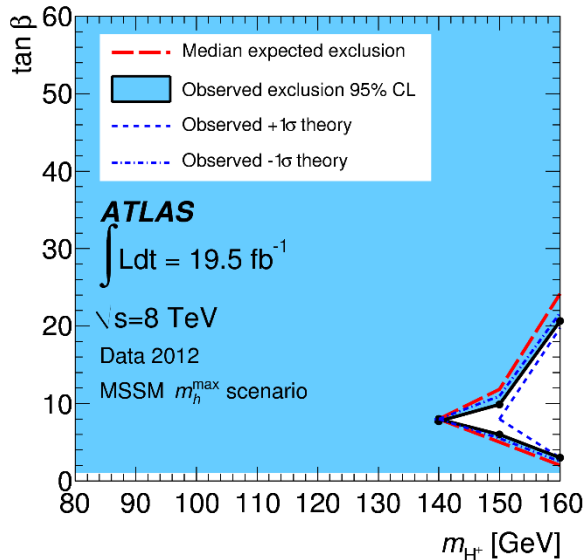
新しく得られたMSSMへの制約



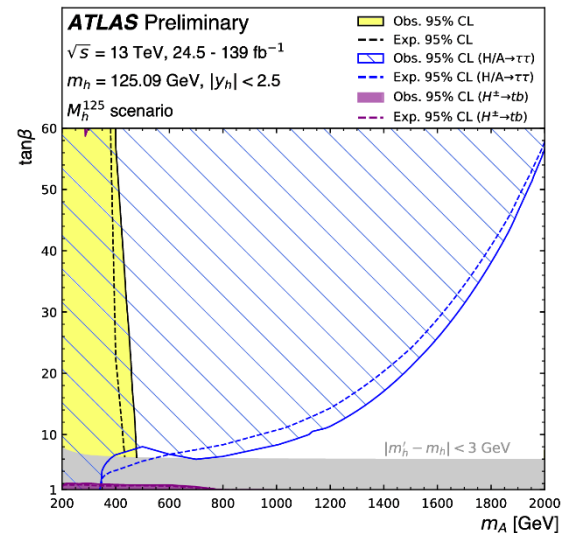
重い荷電ヒッグス粒子を探すモチベーション

- 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。

$H^\pm \rightarrow \tau\nu$ 探索による棄却域



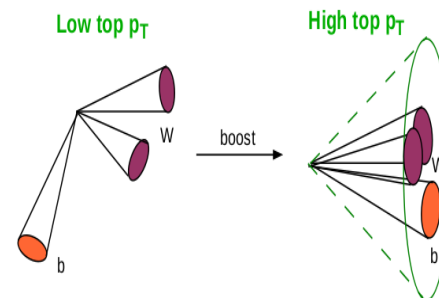
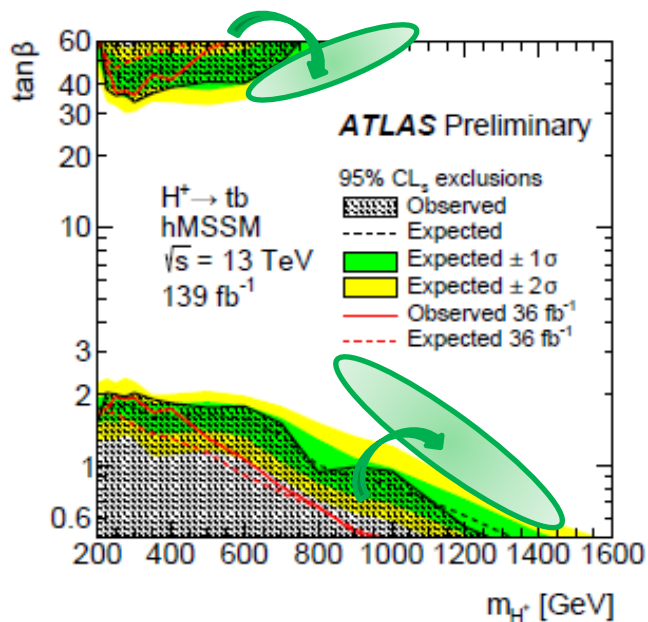
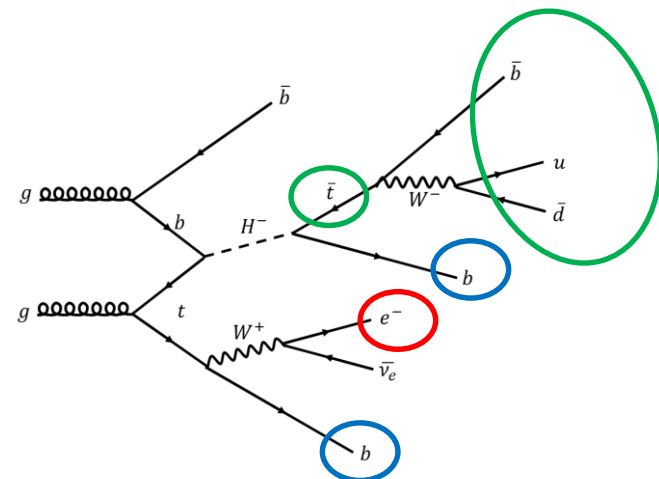
$h(125)$ の精密測定から得られたMSSMへの制約



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

今後の予定

- 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。



まとめ

- LHCは、2019年からの長期シャットダウン中。Run 3は2022年から開始予定。
- ATLASもアップグレード作業が進行中。
- Run 2で取得した 139 fb^{-1} データの解析を行っている。
- 本講演では、標準理論とヒッグス粒子の精密測定について紹介した。
- 筑波大学グループは、 $H^{\pm} \rightarrow tb$ 崩壊する荷電ヒッグス粒子を探索している。
 - 今年の夏の国際会議で結果を発表し、現在論文の準備中。
 - Boosted jetを使って新しいチャンネルを開発、Run2データを解析する。

Backup

Vacuum stability

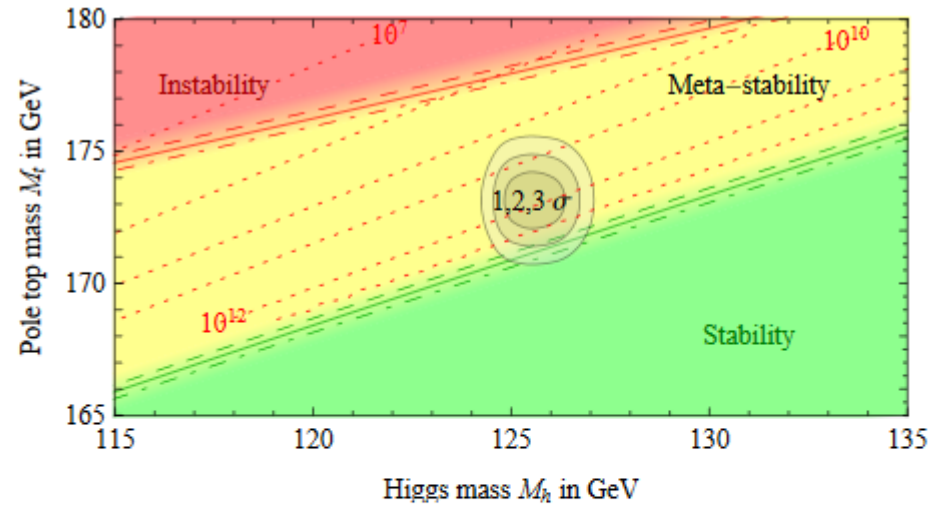
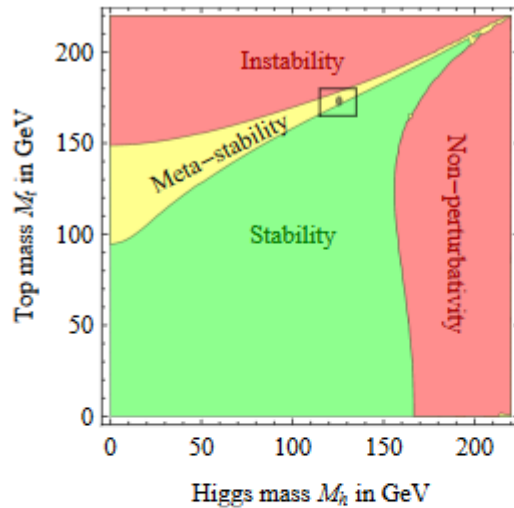
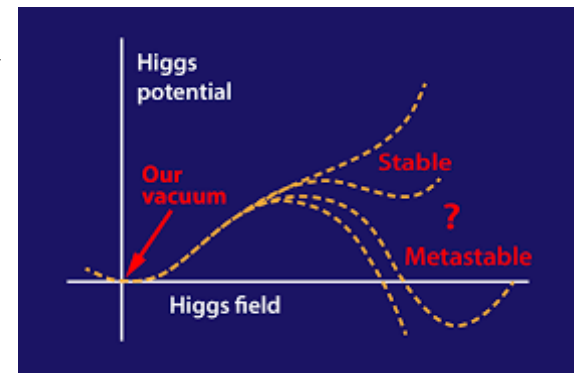


Figure 5: *Regions of absolute stability, meta-stability and instability of the SM vacuum in the M_t - M_h plane (upper left) and in the λ - y_t plane, in terms of parameter renormalized at the Planck scale (upper right). **Bottom:** Zoom in the region of the preferred experimental range of M_h and M_t (the gray areas denote the allowed region at 1, 2, and 3 σ). The three boundary lines correspond to $\alpha_s(M_Z) = 0.1184 \pm 0.0007$, and the grading of the colors indicates the size of the theoretical error. The dotted contour-lines show the instability scale Λ in GeV assuming $\alpha_s(M_Z) = 0.1184$.*

[10.1007/JHEP08\(2012\)098](https://arxiv.org/abs/10.1007/JHEP08(2012)098)

MSSM ヒッグスの質量関係式

- $\tan \beta = v_2/v_1$ として、Tree Levelで:

$$M_{H^\pm}^2 = M_A^2 + M_W^2$$

$$M_{h,H}^2 = \frac{1}{2} \left[M_A^2 + M_Z^2 \mp \sqrt{(M_A^2 + M_Z^2)^2 - 4M_A^2 M_Z^2 \cos^2 2\beta} \right]$$

- ただし、Tree Levelでは:

$$M_h \leq M_Z, M_A \leq M_H$$

$$M_W \leq M_{H^\pm}$$

で、 $m_h = 125.5 \text{ GeV}/c^2$ はRadiative Correctionで実現する。

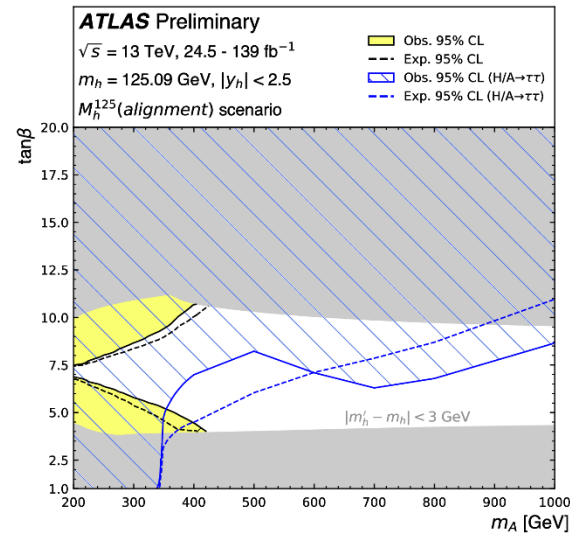
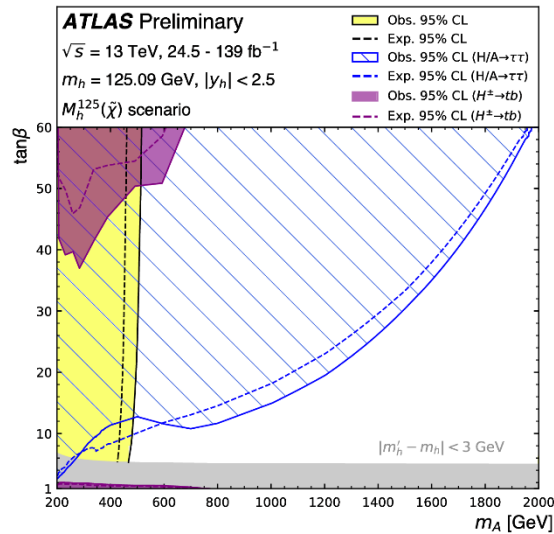
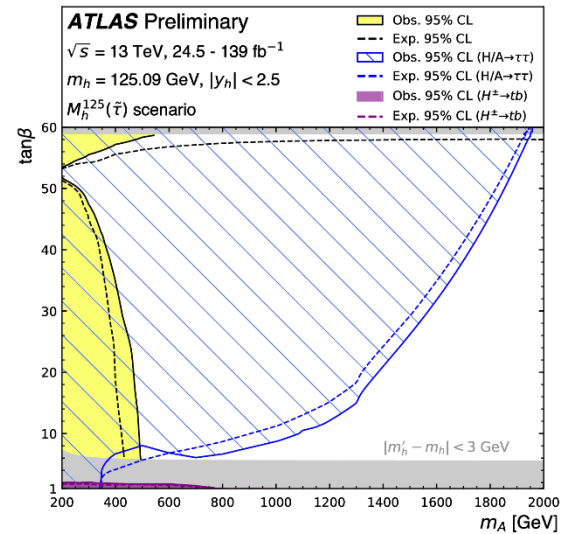
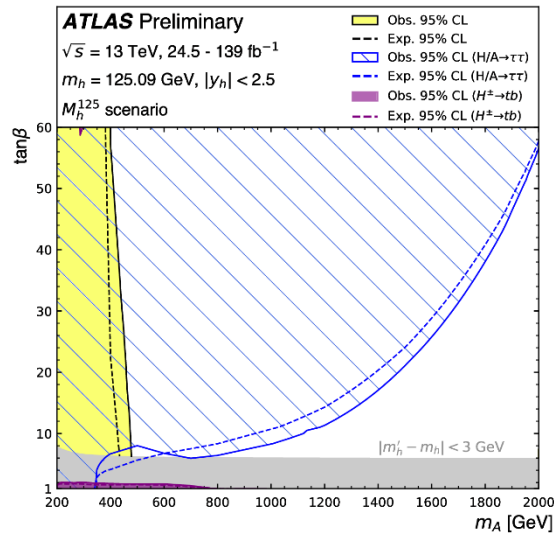
多くの場合、 h がいま見えている
ヒッグス粒子だと思っている。

- CP -even mass mixing angle:

$$\text{tg}2\alpha = \text{tg}2\beta \frac{M_A^2 + M_Z^2}{M_A^2 - M_Z^2} \quad \text{with} \quad -\frac{\pi}{2} < \alpha < 0$$

- 2HDM, MSSMでは、 $(M_A, \tan\beta)$, (α, β) など、2パラメータを決めると物理が(ほぼ)決まる。

h(125)測定からのMSSMへの制約



荷電ヒッグス粒子の性質

- 2HDMのLagrangian:

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}}^{2\text{HDM}} = - \sum_{f=u,d,\ell} \frac{m_f}{v} \left(\xi_h^f \bar{f} f h + \xi_H^f \bar{f} f H - i \xi_A^f \bar{f} \gamma_5 f A \right) \\ - \left\{ \frac{\sqrt{2} V_{ud}}{v} \bar{u} (m_u \xi_A^u P_L + m_d \xi_A^d P_R) d H^+ + \frac{\sqrt{2} m_\ell \xi_A^\ell}{v} \bar{\nu}_L \ell_R H^+ + \text{H.c.} \right\}$$

$P_{L/R}$ are projection operators for left-/right-handed fermions

	Type I	Type II	Lepton-specific	Flipped
ξ_h^u	$\cos \alpha / \sin \beta$	$\cos \alpha / \sin \beta$	$\cos \alpha / \sin \beta$	$\cos \alpha / \sin \beta$
ξ_h^d	$\cos \alpha / \sin \beta$	$-\sin \alpha / \cos \beta$	$\cos \alpha / \sin \beta$	$-\sin \alpha / \cos \beta$
ξ_h^ℓ	$\cos \alpha / \sin \beta$	$-\sin \alpha / \cos \beta$	$-\sin \alpha / \cos \beta$	$\cos \alpha / \sin \beta$
ξ_H^u	$\sin \alpha / \sin \beta$	$\sin \alpha / \sin \beta$	$\sin \alpha / \sin \beta$	$\sin \alpha / \sin \beta$
ξ_H^d	$\sin \alpha / \sin \beta$	$\cos \alpha / \cos \beta$	$\sin \alpha / \sin \beta$	$\cos \alpha / \cos \beta$
ξ_H^ℓ	$\sin \alpha / \sin \beta$	$\cos \alpha / \cos \beta$	$\cos \alpha / \cos \beta$	$\sin \alpha / \sin \beta$
ξ_A^u	$\cot \beta$	$\cot \beta$	$\cot \beta$	$\cot \beta$
ξ_A^d	$-\cot \beta$	$\tan \beta$	$-\cot \beta$	$\tan \beta$
ξ_A^ℓ	$-\cot \beta$	$\tan \beta$	$\tan \beta$	$-\cot \beta$

Fox Wolfram moment

- i, j : all leptons and jets in our analysis.

$$\begin{aligned} H_\ell &= \sum_{i,j=1}^N \frac{|\vec{p}_i| |\vec{p}_j|}{\sqrt{s} \sqrt{s}} \frac{4\pi}{2\ell + 1} \sum_{m=-\ell}^{\ell} Y_\ell^m(\Omega_i) Y_\ell^{m*}(\Omega_j) \\ &= \sum_{i,j=1}^N \frac{|\vec{p}_i| |\vec{p}_j|}{s} P_\ell(\cos \Omega_{ij}) , \end{aligned}$$

$$\cos \Omega_{ij} = \cos \theta_i \cos \theta_j + \sin \theta_i \sin \theta_j \cos(\phi_i - \phi_j).$$

- Legendre polynomial:

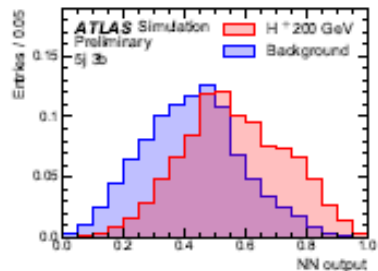
$$P_0(x) = 1$$

$$P_1(x) = x$$

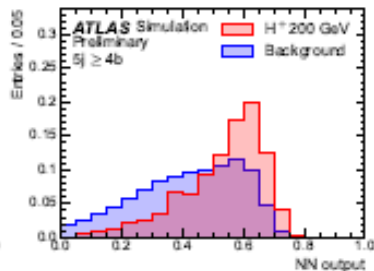
$$P_2(x) = \frac{1}{2} (3x^2 - 1)$$

$$P_3(x) = \frac{1}{2} (5x^3 - 3x)$$

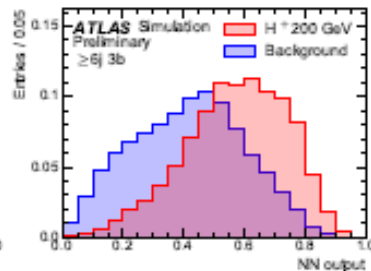
NN outputの分布



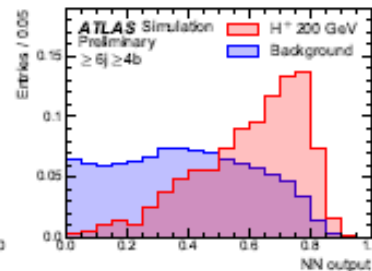
(a) 5j3b



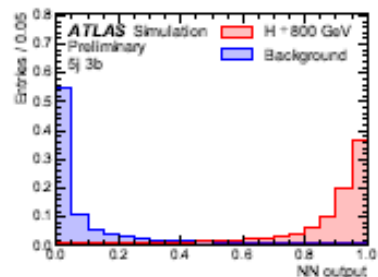
(b) 5j ≥ 4b



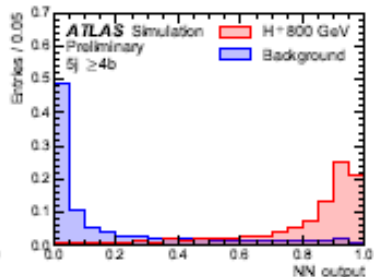
(c) ≥ 6j3b



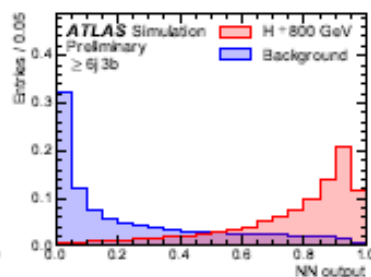
(d) ≥ 6j ≥ 4b



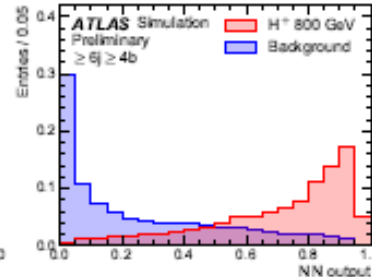
(e) 5j3b



(f) 5j ≥ 4b



(g) ≥ 6j3b



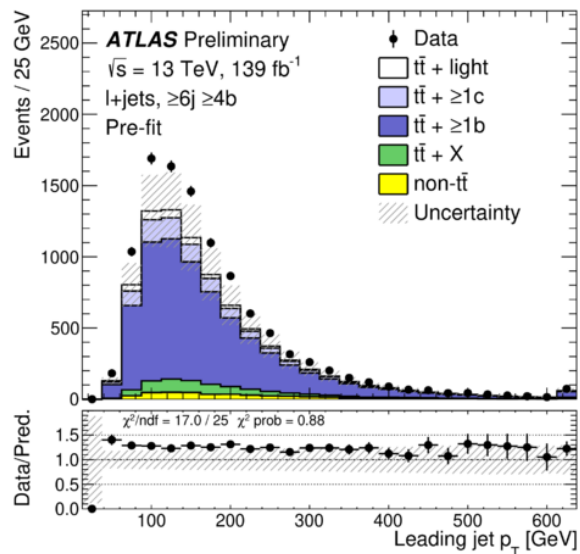
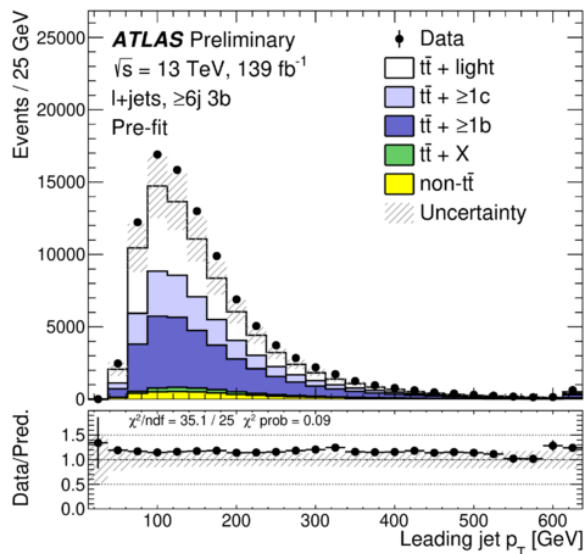
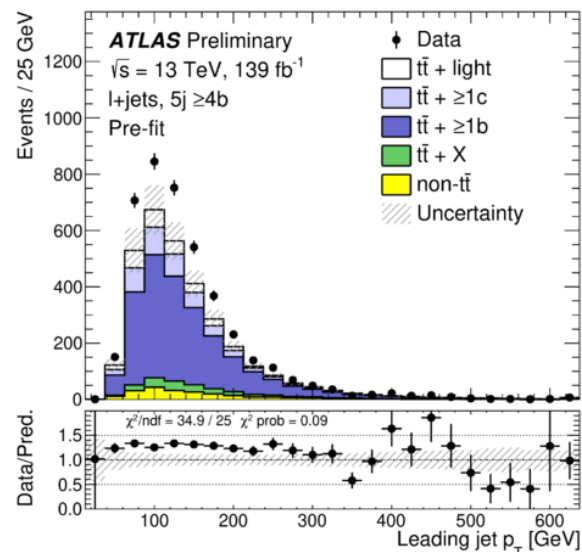
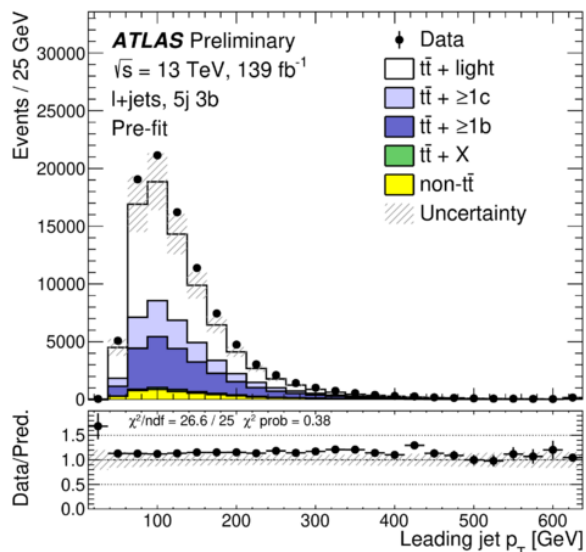
(h) ≥ 6j ≥ 4b

Systematic Uncertainties

Uncertainty Source	$\Delta\mu(H_{200}^+)$ [pb]	$\Delta\mu(H_{800}^+)$ [pb]
$t\bar{t} + \geq 1b$ modelling	0.94	0.025
Jet energy scale and resolution	0.38	0.0095
$t\bar{t} + \geq 1c$ modelling	0.32	0.006
Jet flavour tagging	0.24	0.025
Reweighting	0.22	0.007
$t\bar{t} +$ light modelling	0.23	0.009
Other background modelling	0.15	0.011
MC statistics	0.11	0.008
JVT, pile-up modelling	0.05	0.002
Luminosity	<0.01	0.002
Lepton ID, isolation, trigger, E_T^{miss}	<0.01	<0.001
H^+ modelling	0.04	0.002
Total systematic uncertainty	1.35	0.05
$t\bar{t} + \geq 1b$ normalisation	0.28	0.008
$t\bar{t} + \geq 1c$ normalisation	0.023	0.016
Total statistical uncertainty	0.42	0.025
Total uncertainty	1.36	0.054

NNへのインプット変数

Leading jet Pt



CMSの結果との比較

