ATLAS実験でのトップクォークとボトムクォークに崩壊する荷電ヒッグス粒子の探索

Search for a Charged Higgs Boson at the ATLAS Experiment

佐藤構二

宇宙史センター構成員会議

2018/11/22（木）

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 TeVでの陽子･陽子衝突

2010年　LHC加速器稼動開始。

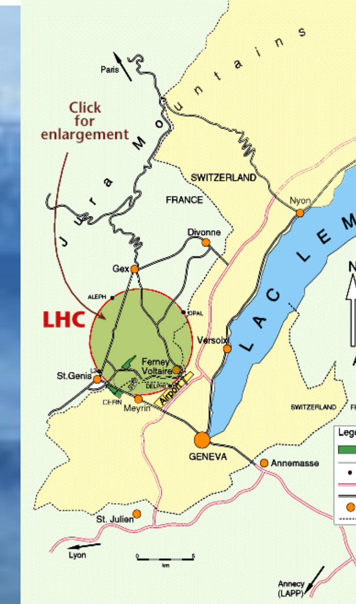
2011-12年　物理Run開始。Ecm=7 – 8 TeV, 25 fb^{-1}のデータ取得。

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。

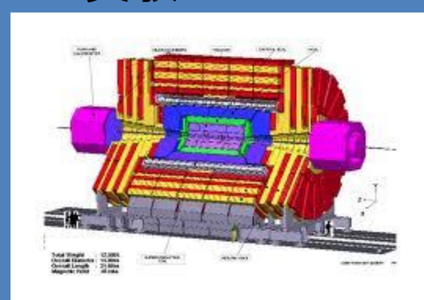
2021-2023年　Run 3。Ecm=14 TeV , ～300 fb^{-1}のデータセット。

2026-203X年　HL-LHC実験。～3000 fb^{-1}の大データセット。

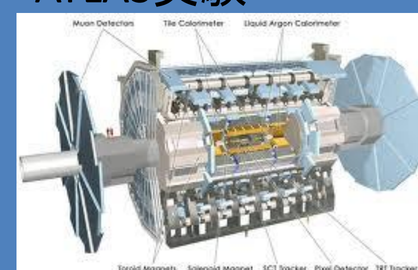


ジュネーブ市街

CMS実験



ATLAS実験



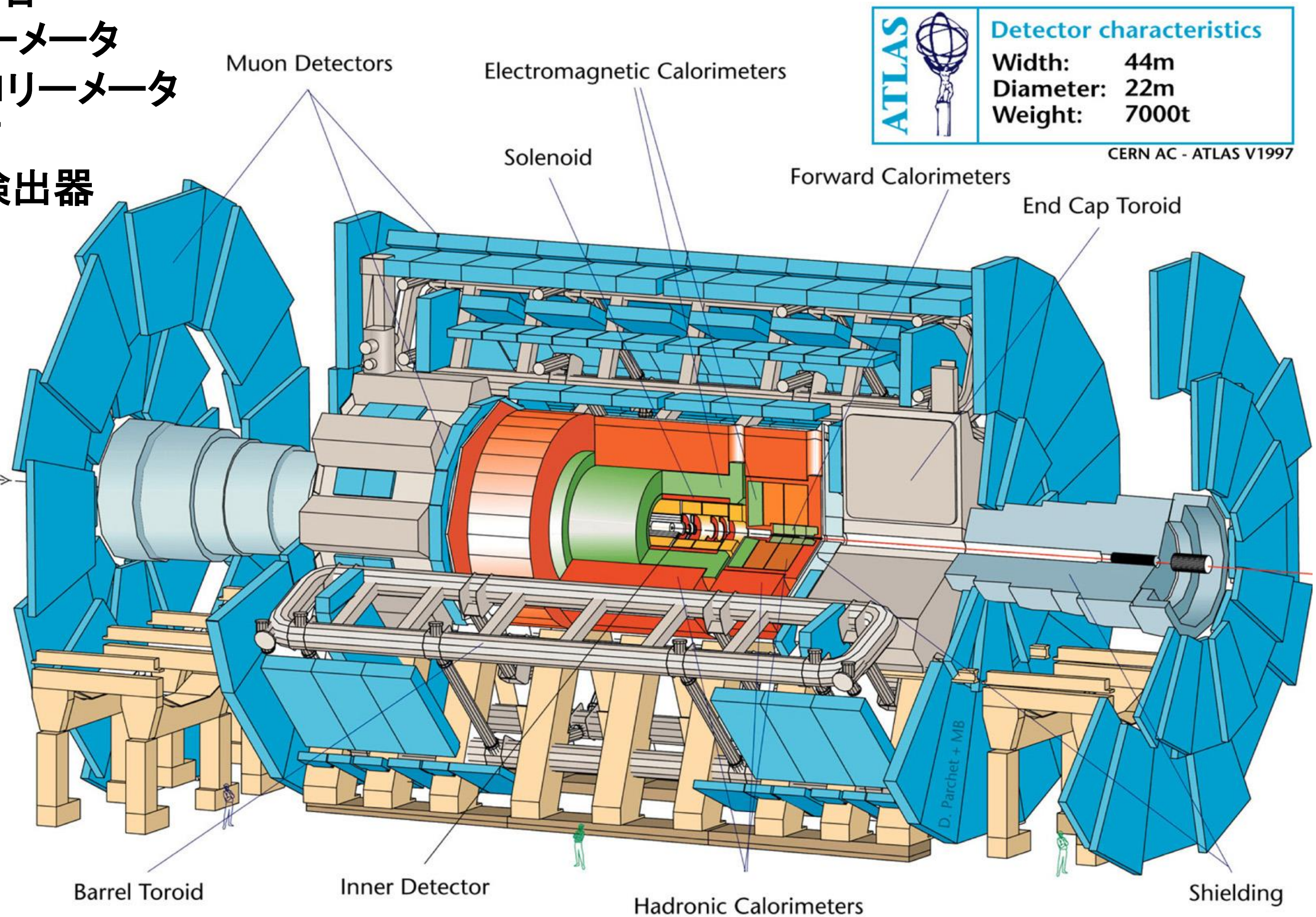
円周27km

陽子を最大7 TeVまで加速して正面衝

ATLAS検出器

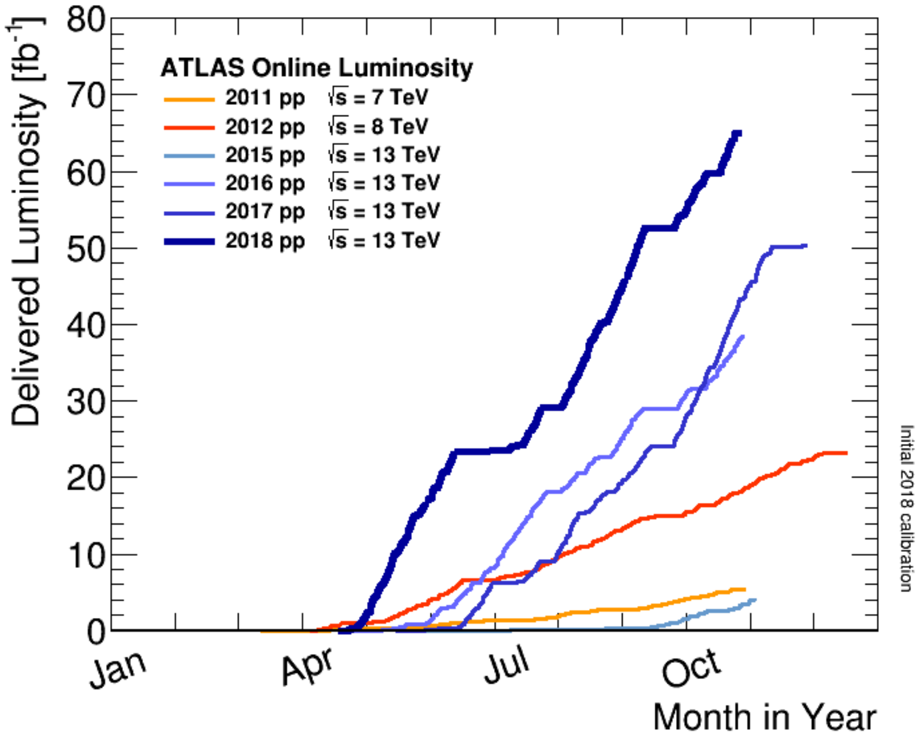
- シリコン検出器
- 飛跡検出器
- ソレノイド磁石
- 電磁カロリーメータ
- ハドロンカロリーメータ
- トロイド磁石
- ミューオン検出器

総重量　7,000 t



- 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…

Luminosities in Run 2



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

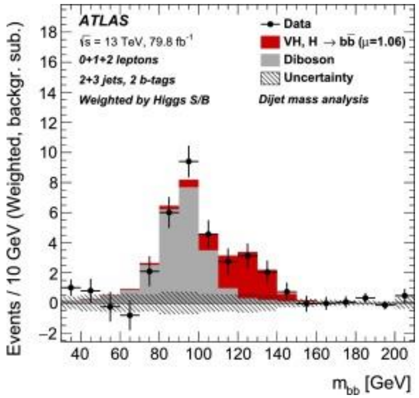
本講演の物理解析では、2015～2016年に取得した36.1 fb-1 を使った。Run 2全体では、物理に使えるのは ~128 fb-1 。

$$E_{CM} = 13\ (\mathrm{TeV})$$

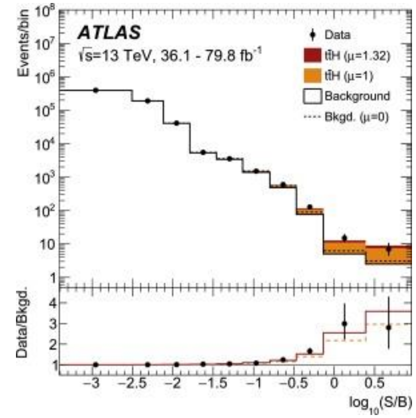
Run 2	Peak lumi E34 $cm^{-2}s^{-1}$	Days pp physics	Recorded integ lumi [fb-1]	累積 Recorded lumi [fb-1]
2015	0.5	56	3.9	3.9
2016	1.4	122	36.0	39.9
2017	1.9	150	46.9	86.8
2018	2.1	152	62.2	148.8

2018年夏のハイライト

$H \rightarrow bb$崩壊モードを観測（5.4σ）



ttH生成過程を観測（6.3σ）

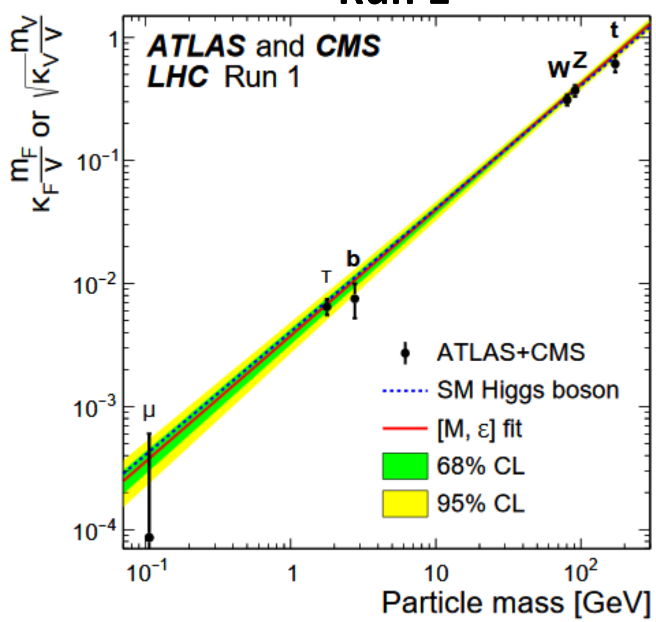


本多俊介氏（2018年3月Ph. D）

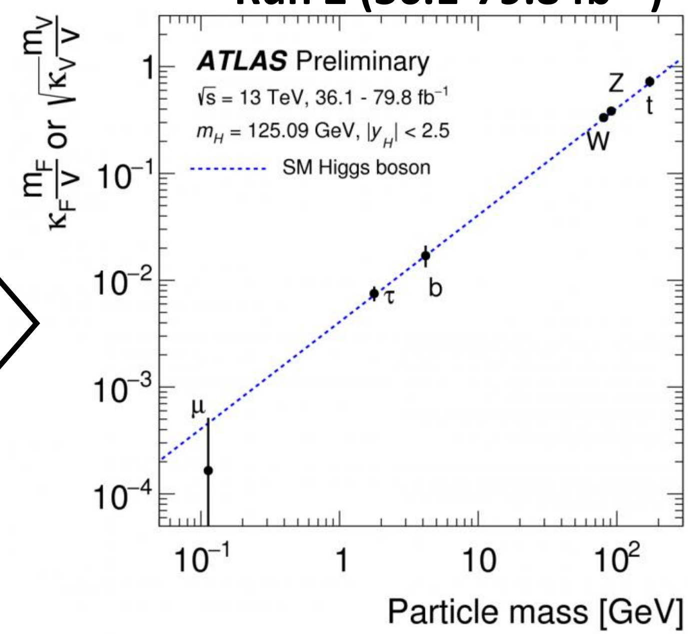
- 2019年物理学会若手奨励賞
- 第20回高エネルギー物理学奨励賞

ヒッグス粒子の結合の測定

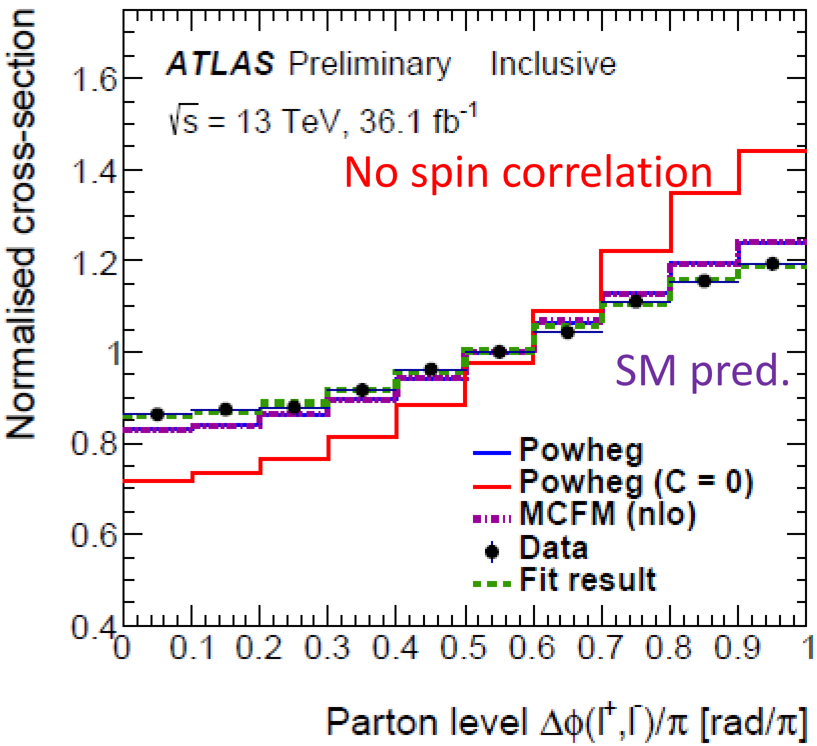
Run 1



Run 2 (36.1-79.8 fb^{-1})



Top Spin Correlation



- $t\bar{t} \rightarrow (Wb)(Wb) \rightarrow (e\nu b)(\mu\nu b)$
- eとμの間の角度相関。
- SM(NLO QCD)の予言値よりも強い相関がみられた。
- テンプレート・フィット

  $n_i = f_{SM} \cdot n_{spin} + (1 - f_{SM}) \cdot n_{nospin}$

  フィット結果：

  $f_{SM} = 1.250 \pm 0.026 \pm 0.063$
- SMからのずれ：3.2σ (syst込み)

荷電ヒッグス粒子の探索

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

Run 1

– 永田和樹- Ph.D. in Dec 2016

– JHEP 03 (2016) 127

Run 2 (36.1 fb^{-1})

– 萩原睦人- Ph.D. in Feb 2018

– JHEP 11 (2018) 085

荷電ヒッグス粒子を探すモチベーション

- 多くのBSMモデルでは、ヒッグス機構を拡張する。 ほとんどの場合、荷電を持ったヒッグス粒子 H^{+}、H^{-} の存在が期待される。

- 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→ W^{+}, W^{-}, Zの質量＋ヒッグス粒子

- ヒッグス・ダブレットを2つ入れたら、、、（2HDM、MSSMの例）

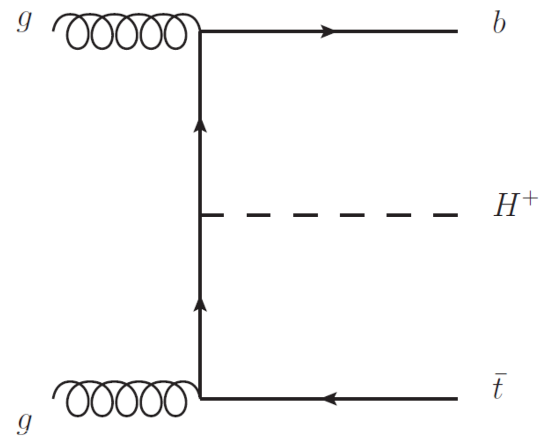
$$\mathrm{H}_u = \begin{pmatrix} H_u^{+} \\ H_u^{0} \end{pmatrix}, \mathrm{H}_d = \begin{pmatrix} H_d^{0} \\ H_d^{-} \end{pmatrix}$$

  – 8つの自由度→W^{+}, W^{-}, Zの質量＋5個のヒッグス粒子

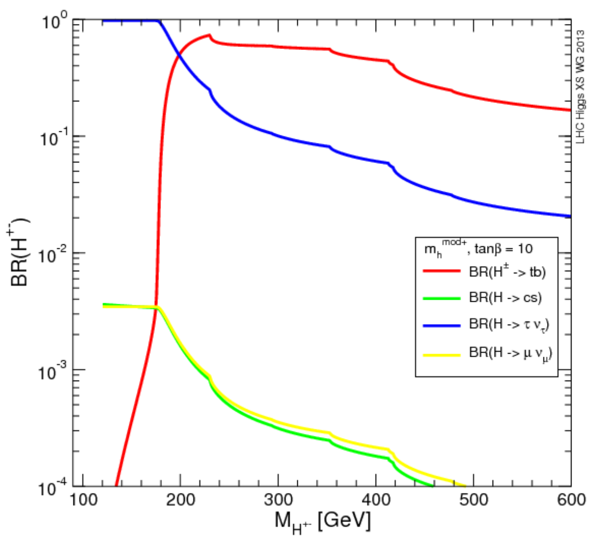
$$h, H, A, H^{+}, H^{-}$$

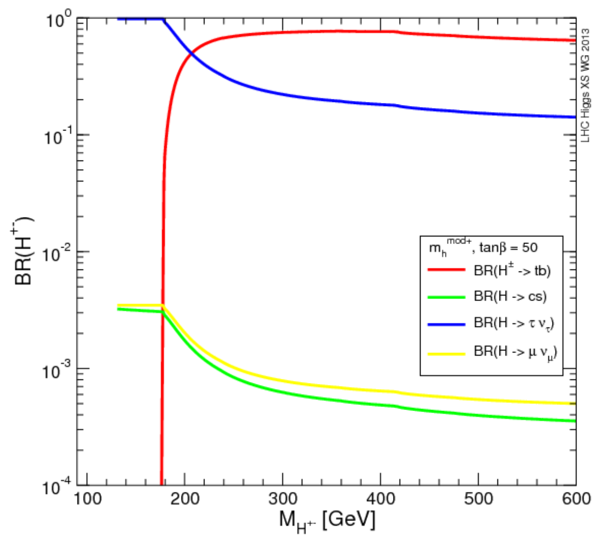
ＬＨＣでの荷電ヒッグスの性質

- 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場合が多いと予想される。
  - $\bar{t}bH^+$生成
- $m_{H^+} \geq 200$ GeVでは、$H^+ \to tb$崩壊の分岐比が大きい。

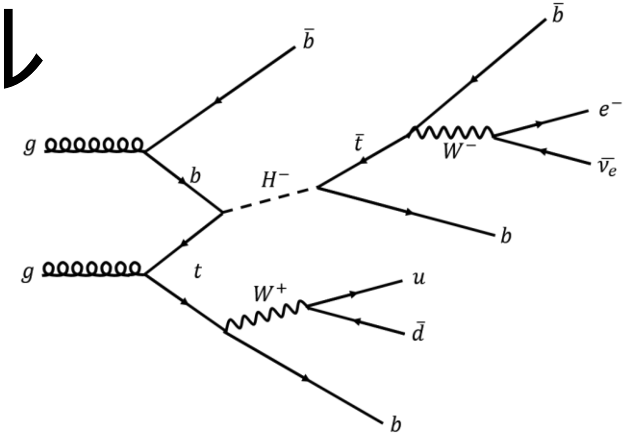


崩壊分岐比　MSSM（m_h^{mod+}シナリオ）の例

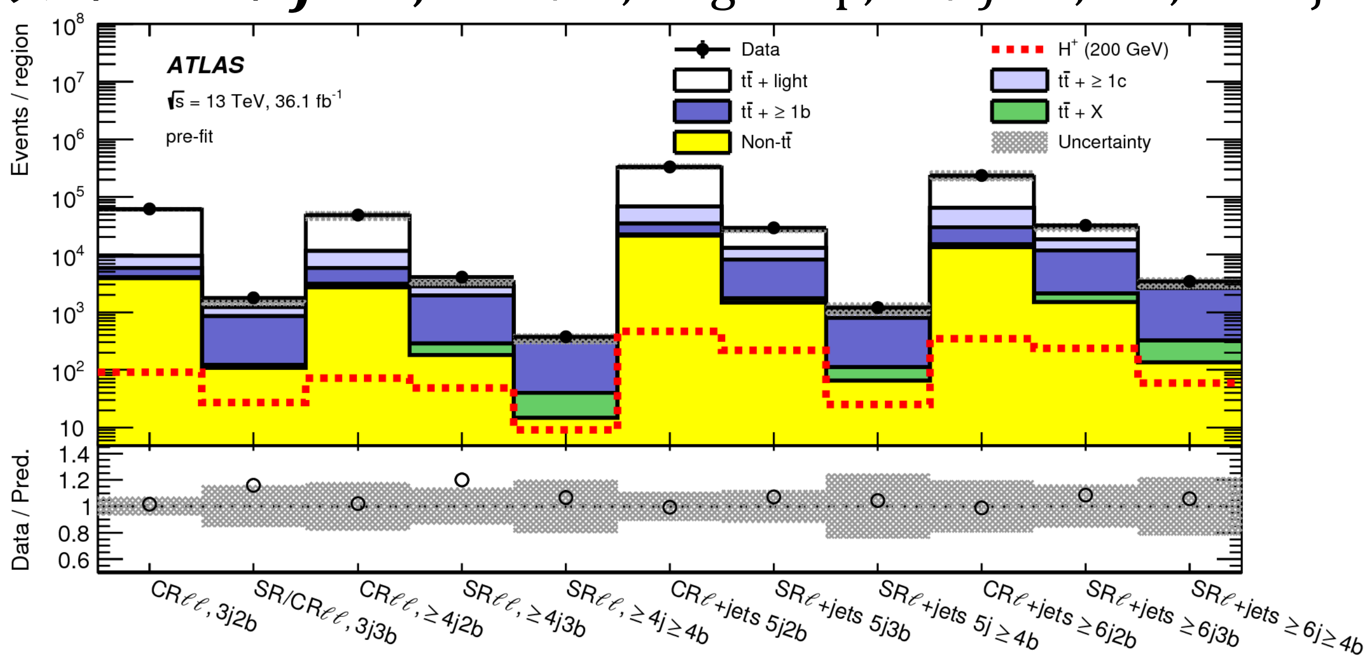




解析チャンネル

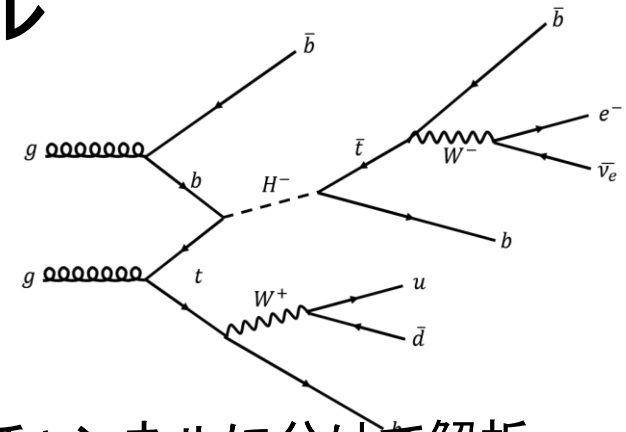


- $\bar{t}bH^+ \rightarrow \bar{t}b\,(t\bar{b}) \rightarrow (W^-\bar{b})b(W^+b)b$
- ２つのWの崩壊モードによって、異なった終状態の解析チャンネルにわける。
  - $\ell + jets$チャンネル: $\ell\nu + qq'4b$
  - Dileptonチャンネル: $\ell\nu\ell\nu + 4b$
- イベント中のジェット数/bタグ数によって、さらにサブチャンネルに分けて解析。
  - $\ell + jets$:　$\ell + 5j3b, \ell + 5j \geqq 4b, \ell + \geqq 6j3b, \ell + \geqq 6j \geqq 4b$
  - $dilepton$: $\ell\ell + \geqq 4j3b,\ \ell\ell + \geqq 4j \geqq 4b$
- バックグラウンド: $\boldsymbol{t\bar{t} + jets}$, : $t\bar{t} + V$, single top, $V + jets$, $t\bar{t}h$, multijets

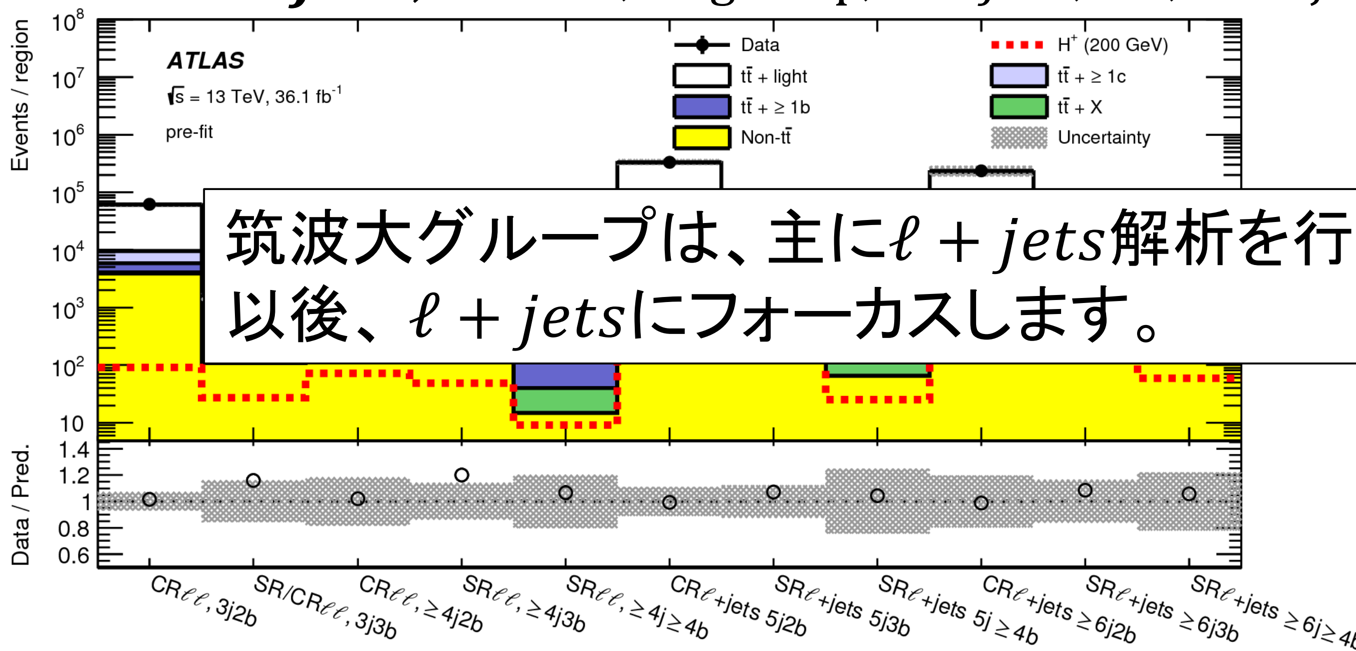


解析チャンネル

- $\bar{t}bH^{+} \rightarrow \bar{t}b\left(t\bar{b}\right) \rightarrow \left(W^{-}\bar{b}\right)b(W^{+}b)b$
- 2つのWの崩壊モードによって、異なった終状態の解析チャンネルにわける。
  - $\ell + jets$チャンネル: $\ell\nu qq + 4b$
  - Dileptonチャンネル: $\ell\nu\ell\nu + 4b$



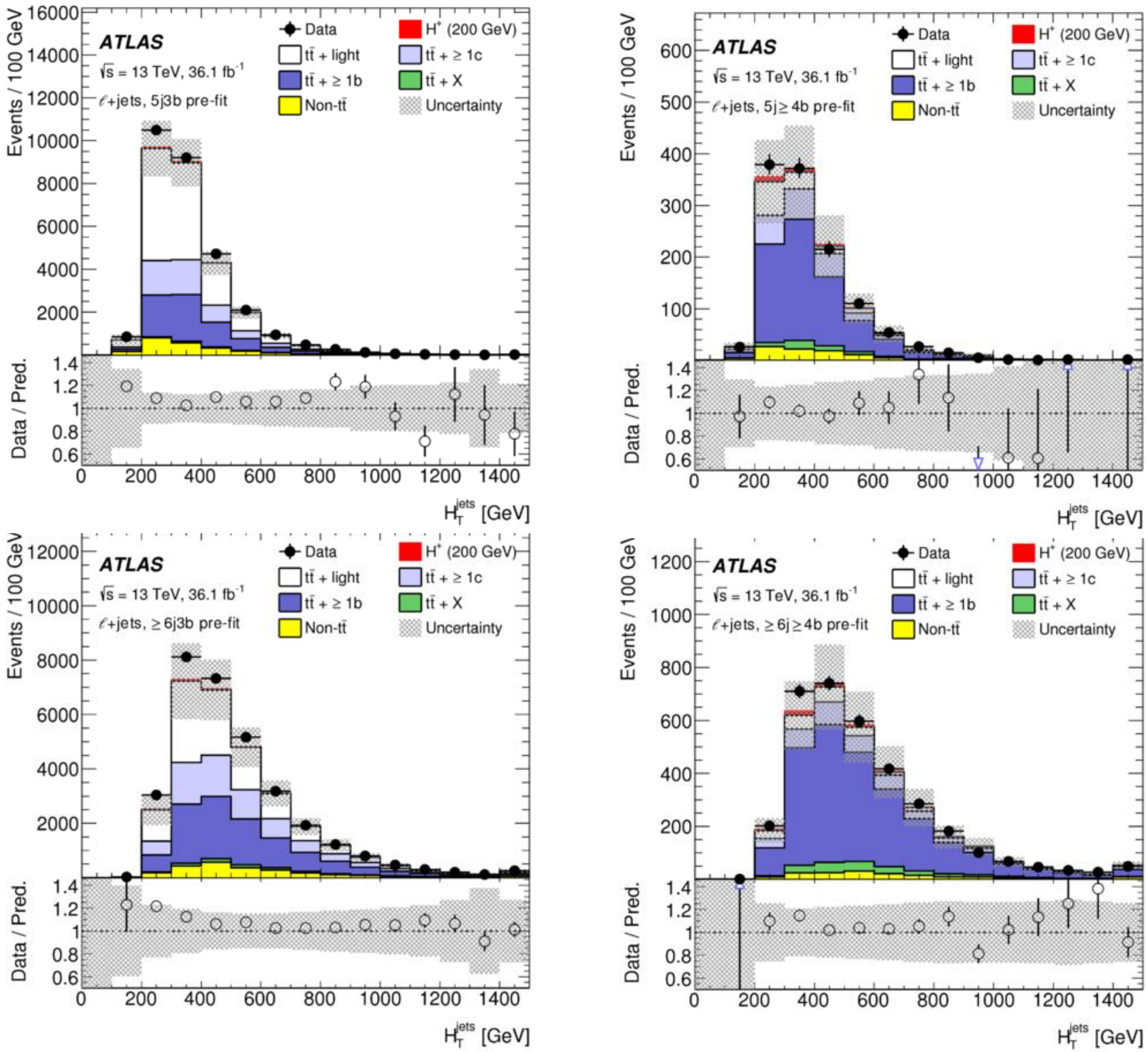
- イベント中のジェット数/bタグ数によって、さらにサブチャンネルに分けて解析。
  - $\ell + jets$: $\ell + 5j3b, \ell + 5j \geqq 4b, \ell + 6j3b, \ell + \geqq 6j \geqq 4b$
  - $dilepton$: $\ell\ell + \geqq 4j3b, \ell\ell + \geqq 4j \geqq 4b$
- バックグラウンド: $\boldsymbol{t\bar{t} + jets}$, : $t\bar{t} + V$, single top, $V + jets, t\bar{t}h$, multijets



筑波大グループは、主に$\ell + jets$解析を行った。
以後、$\ell + jets$にフォーカスします。

H_T^{jet}分布(ℓ +jetsチャンネル)

- H_T^{jet}: イベント中のジェットのPtのスカラー和。

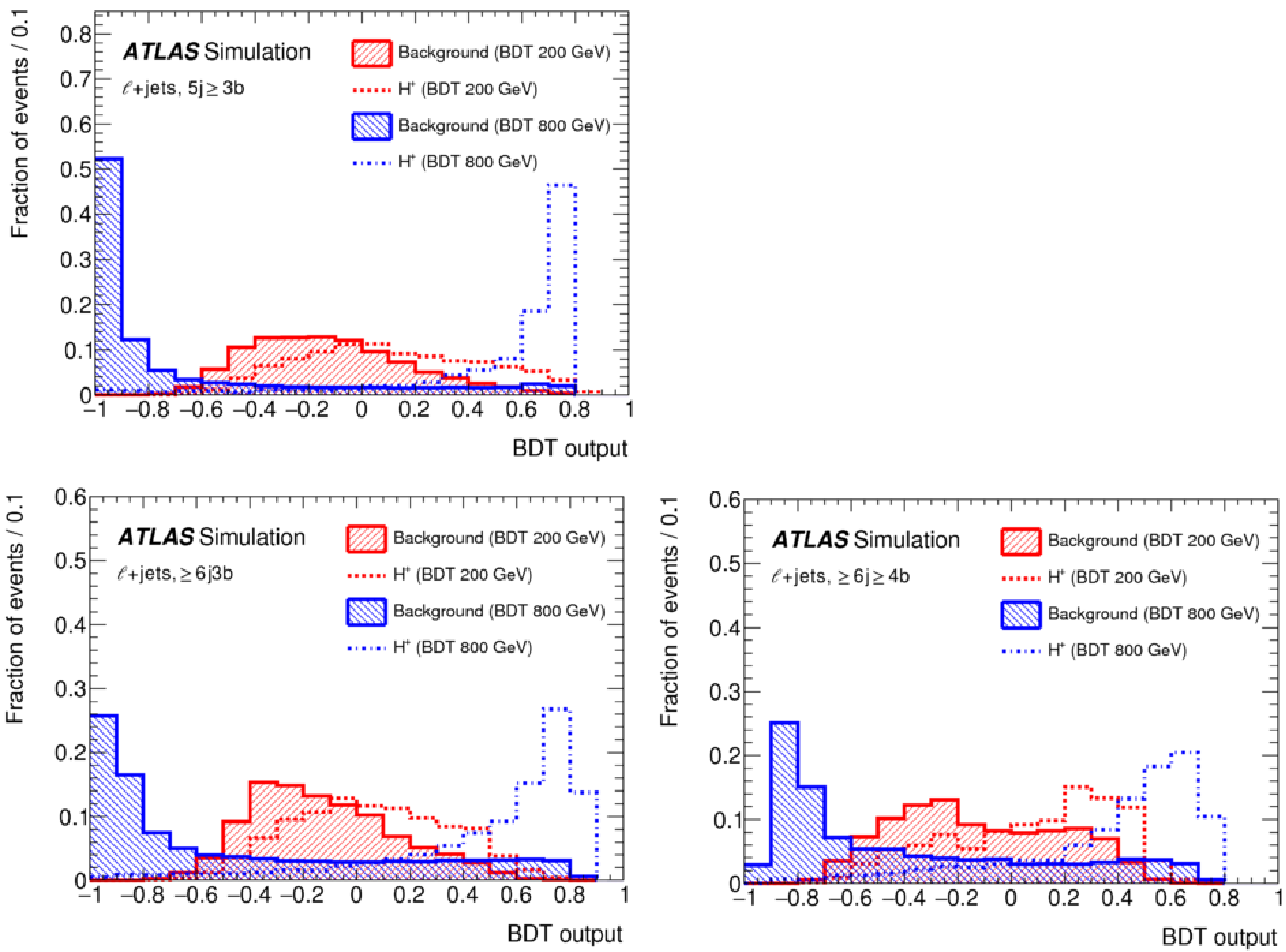


ＢＤＴ変数(ℓ +jetsチャンネル)

- よりよいS/B分離のために、BDTをトレイニングした。
  - 全11変数。
  - もっとも効く変数はH_T^{jets}, 次いで$P_T(j_1)$。
  - S/B分離が難しい低質量領域（$m_{H^+} \leq 300$ GeV）では、キネマティックスとbタグ情報に基づき、「信号らしさ」を評価するDiscriminantを追加（１２変数）。

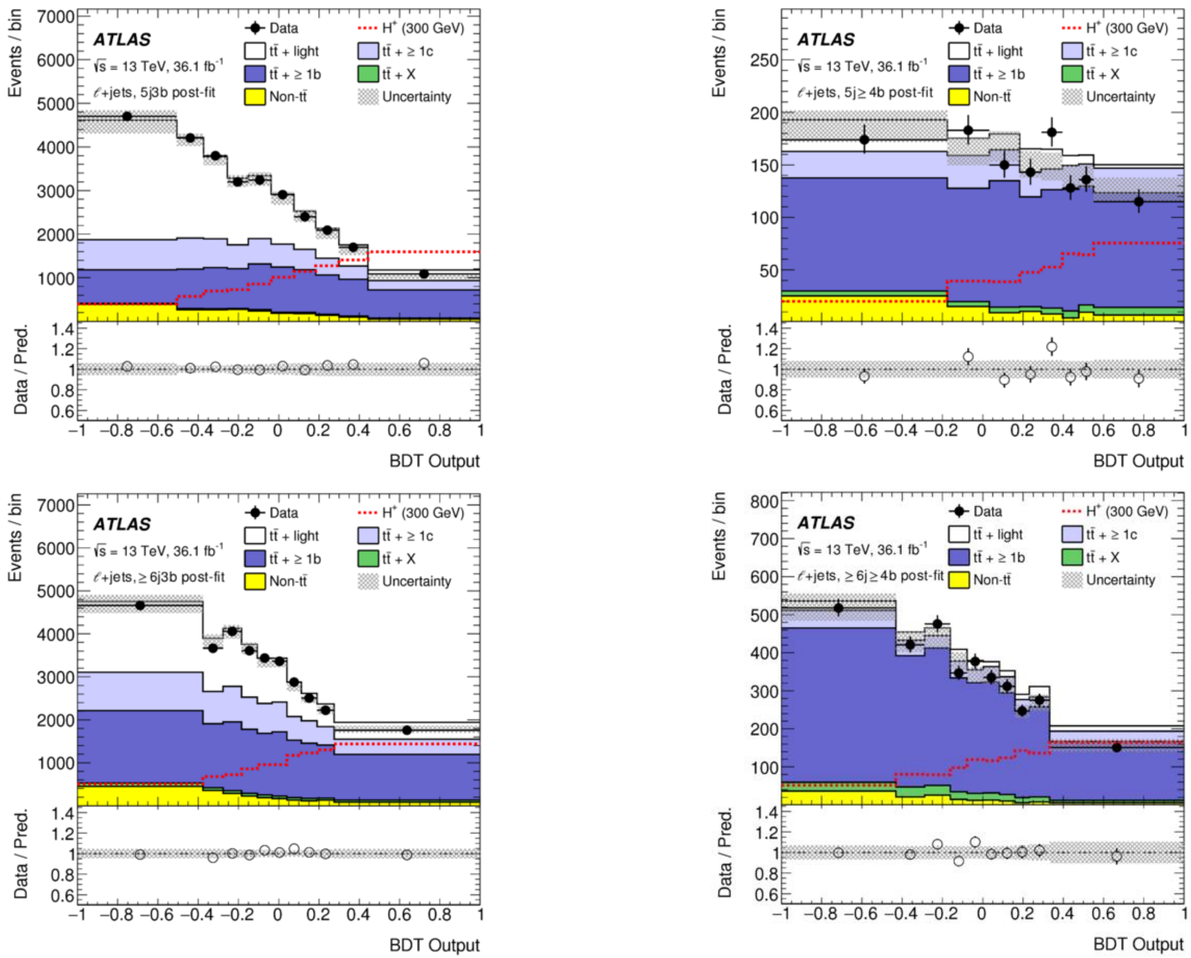
ℓ+jets channel	
$p_{\mathrm{T}}(j_1)$	Leading jet transverse momentum
$m(b\text{-pair}^{\Delta R^{\min}})$	Invariant mass of pair of b-tagged jets with smallest ΔR
$p_{\mathrm{T}}(j_5)$	Transverse momentum of fifth jet
H_2	Second Fox–Wolfram moment [130] calculated using all jets and leptons
$\Delta R^{\mathrm{avg}}(b\text{-pair})$	Average ΔR between all b-tagged jet pairs in the event
$\Delta R(\ell, b\text{-pair}^{\Delta R^{\mathrm{n}}}$	ΔR between the lepton and the b-tagged jet pair with smallest ΔR
$m(u\text{-pair}^{\Delta R^{\min}}$	Invariant mass of the non-b-tagged jet-pair with minimum ΔR
$H_{\mathrm{T}}^{\mathrm{jets}}$	Scalar sum of all jets transverse momenta
$m(b\text{-pair}^{p_{\mathrm{T}}^{\max}})$	Invariant mass of the b-tagged jet pair with maximum transverse momentum
$m^{\max}(b\text{-pair})$	Largest invariant mass of any two b-tagged jets
$m^{\max}(j\text{-triplet})$	Largest invariant mass of any three jets
D	Kinematic discriminant based on mass templates (for $m_{H^+} \leq 300\,GeV$)

ＢＤＴによるS/Bの分離



データのBDT分布　（$\ell + jets$）

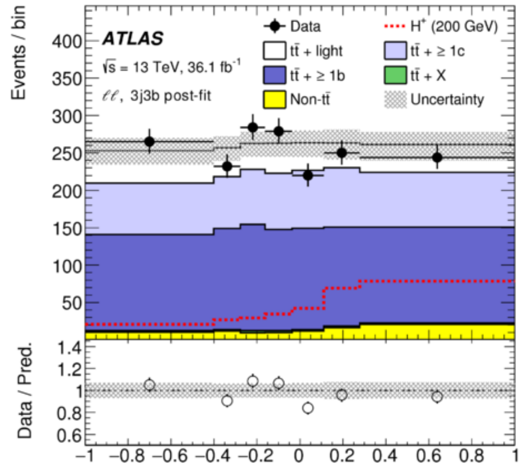
- $M_{H^+} = 300$ GeVの信号に対してトレーニングしたBDTの例。

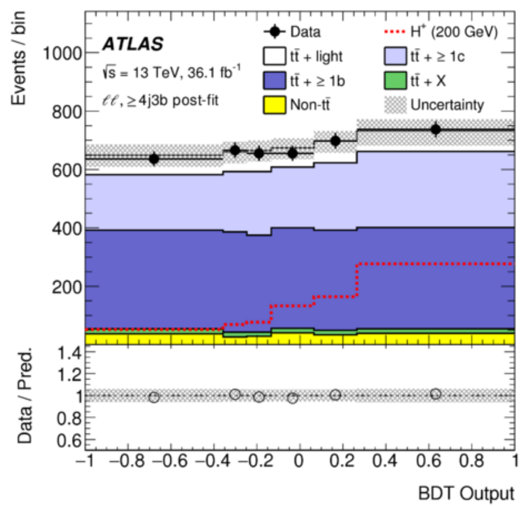


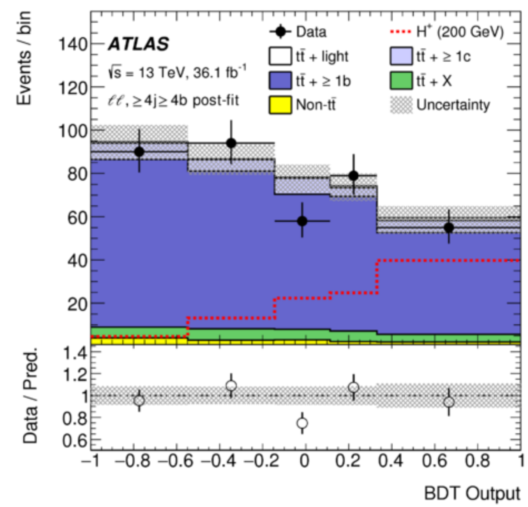
- バックグラウンドとよく一致している。

データのBDT分布　（ dilepton ）

- $M_{H^+} = 300$ GeVの信号に対してトレーニングしたBDTの例。





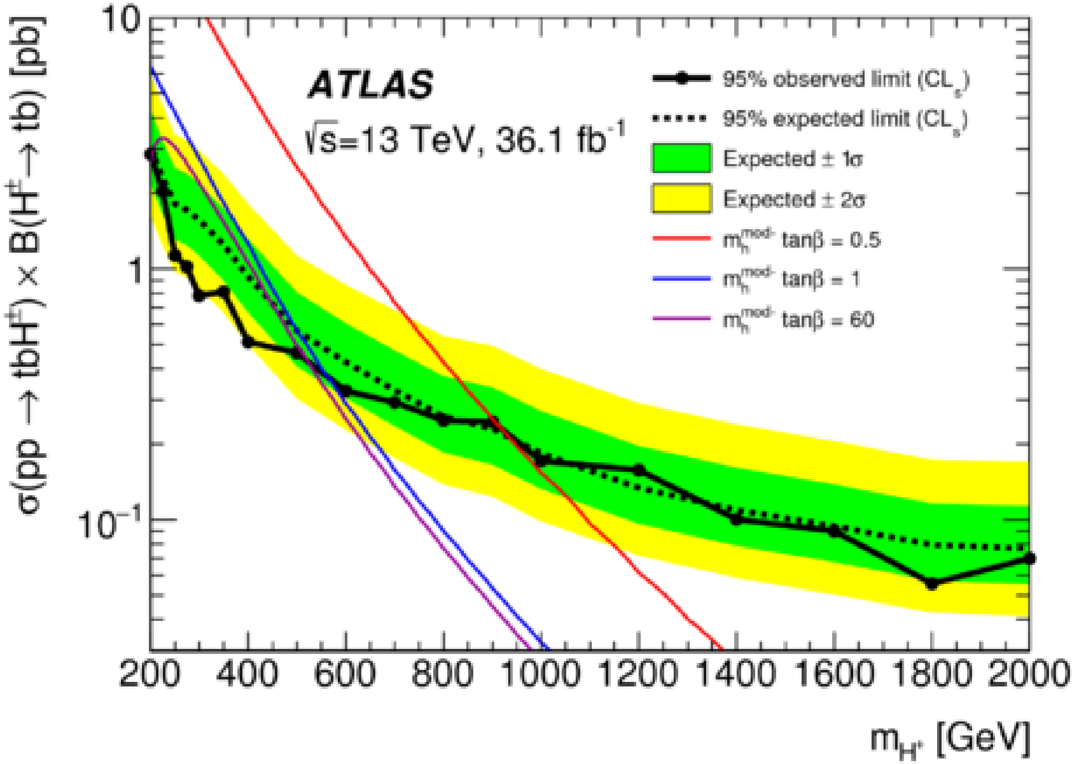


- バックグラウンドとよく一致している。

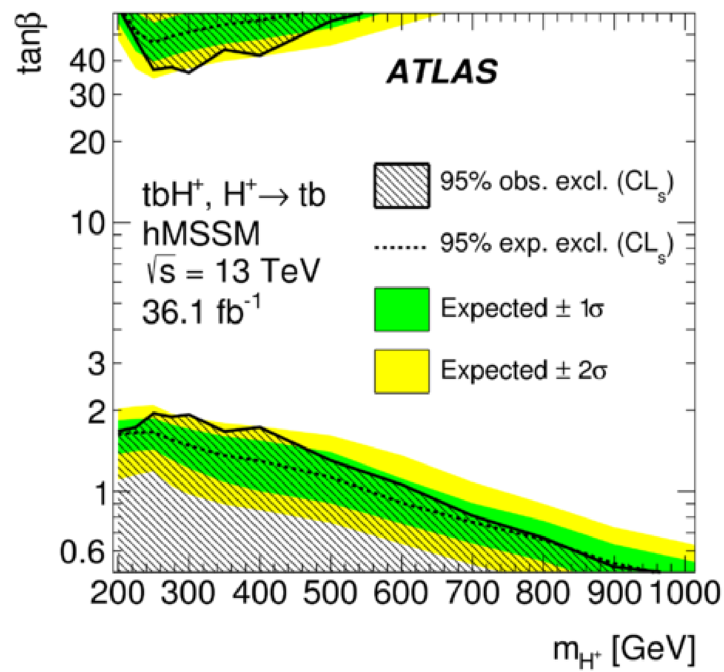
荷電ヒッグス粒子に対する制約

- 荷電ヒッグス粒子の信号は見つからず、データはバックグラウンドとよく一致した。

生成断面積に対する制約

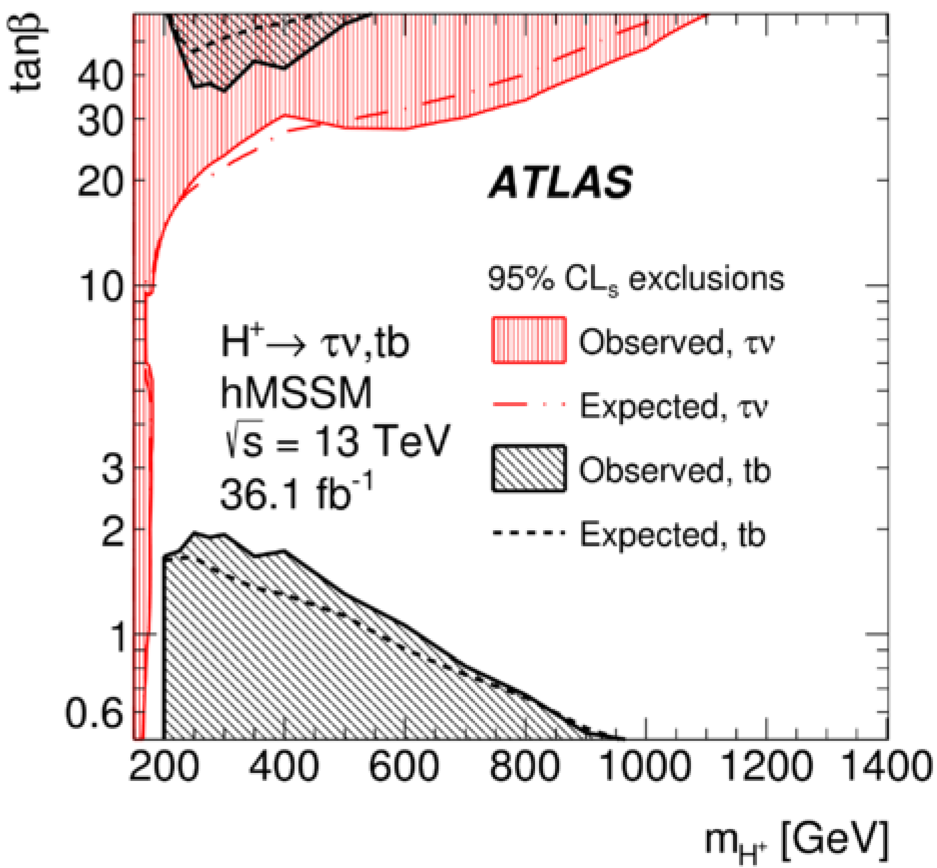


MSSM（hMSSMシナリオ）に対する制約



$H^+ \to \tau\nu$チャンネルとの比較

- $H^+ \to \tau\nu$チャンネルとは、感度のある領域が異なるため、MSSMの解析という意味でも相補的といえる。

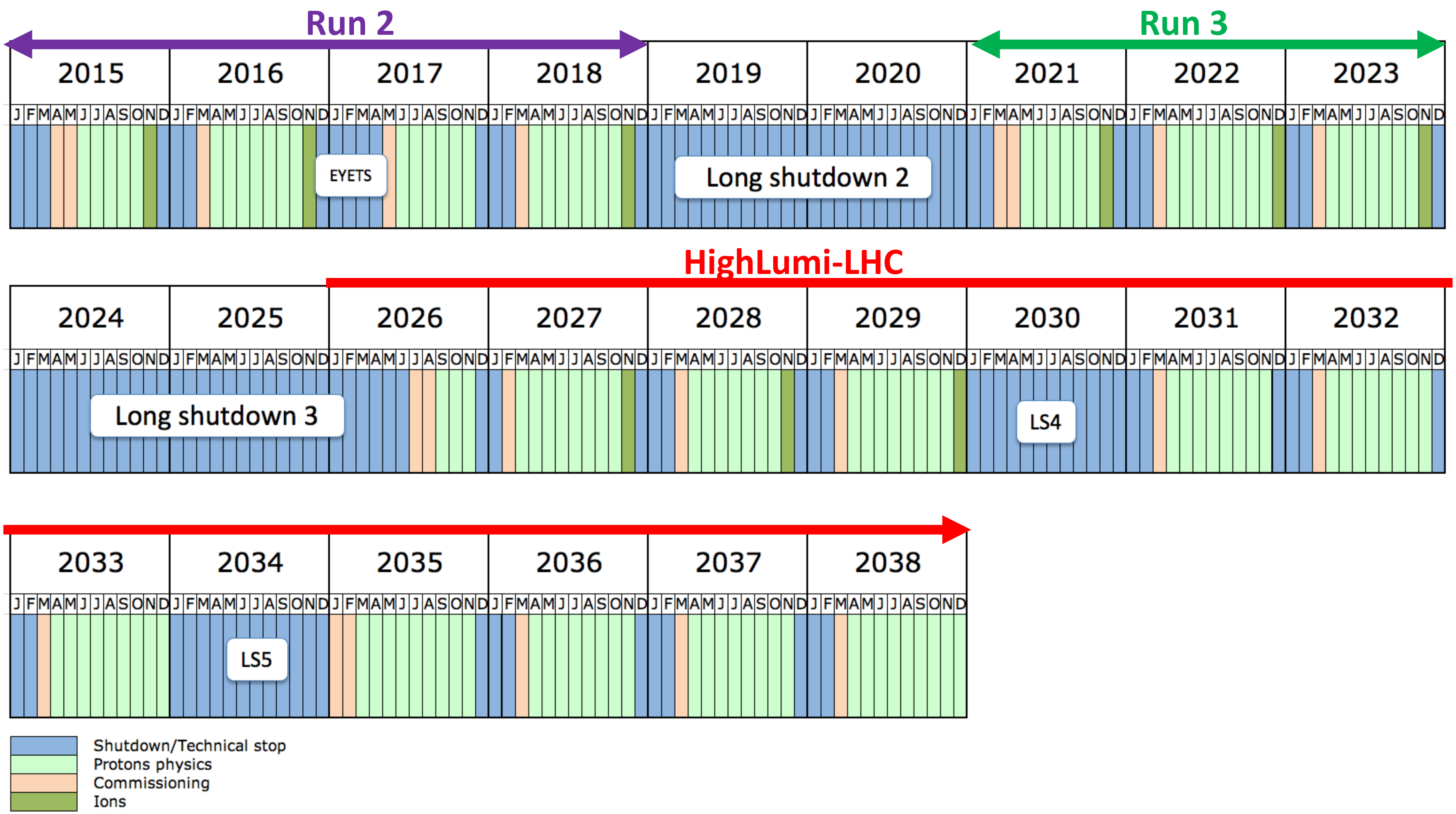


結論

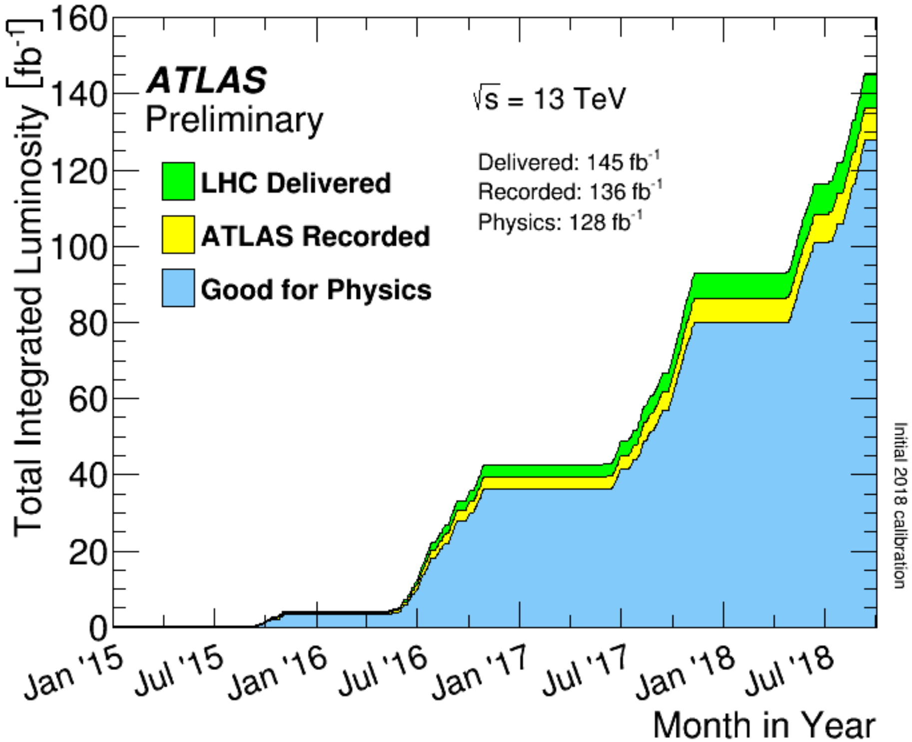
- ATLAS実験では、2015－2016年に取得した重心系エネルギー13 TeVでの陽子･陽子衝突事象($36.1\ \mathrm{fb}^{-1}$)を用いて、$H^{+} \rightarrow tb$崩壊をするH^{+}を探索した。
- データはSMバックグラウンドとよく一致した。
- 200-2000 GeVの質量域のH^{+}に対して、生成断面積に対する上限を評価した。
  - $\sigma \times Br < 2.9\ (0.070)$ pb for $m_{H}^{+} = 200\ (2000)\ \mathrm{GeV}$
- MSSMに制約を与えた。
  - hMSSMシナリオで、$0.5 < \tan\beta < 1.95,\ 200 < m_{H^{+}} < 965\ \mathrm{GeV}$ の範囲の一部を棄却した。

バックアップ

LHCの長期将来計画


Run 2
Run 3
2015
2016
2017
2018
2019
2020
2021
2022
2023
EYETS
Long shutdown 2
HighLumi-LHC
2024
2025
2026
2027
2028
2029
2030
2031
2032
Long shutdown 3
LS4
2033
2034
2035
2036
2037
2038
LS5
Shutdown/Technical stop
Protons physics
Commissioning
Ions

Luminosities in Run 2



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

本講演の物理解析では、2015～2016年に取得した36.1 fb^{-1} を使った

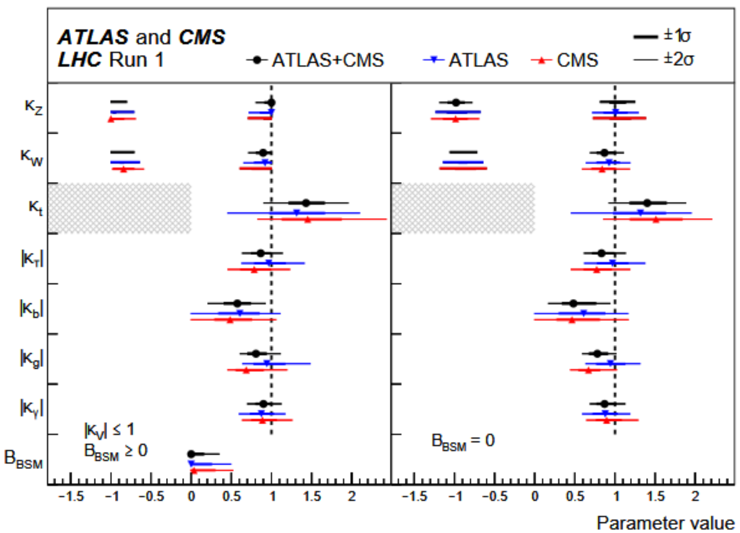
$E_{CM} = 13$ (TeV)

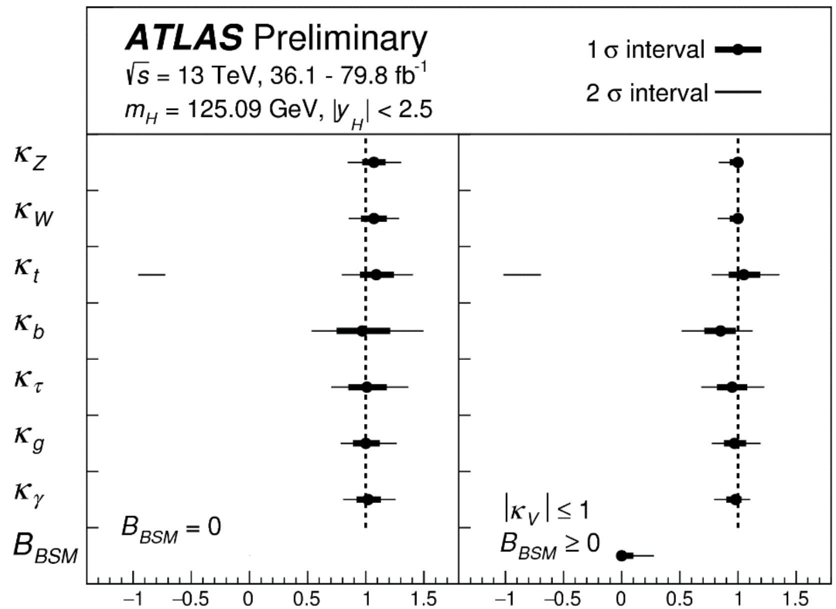
Run 2	Peak lumi E34 cm^{-2}s^{-1}	Days pp physics	Recorded integ lumi [fb^{-1}]	累積 Recorded lumi [fb^{-1}]
2015	0.5	56	3.9	3.9
2016	1.4	122	36.0	39.9
2017	1.9	150	46.9	86.8
2018	2.1	152	62.2	148.8

ヒッグス粒子の結合の測定

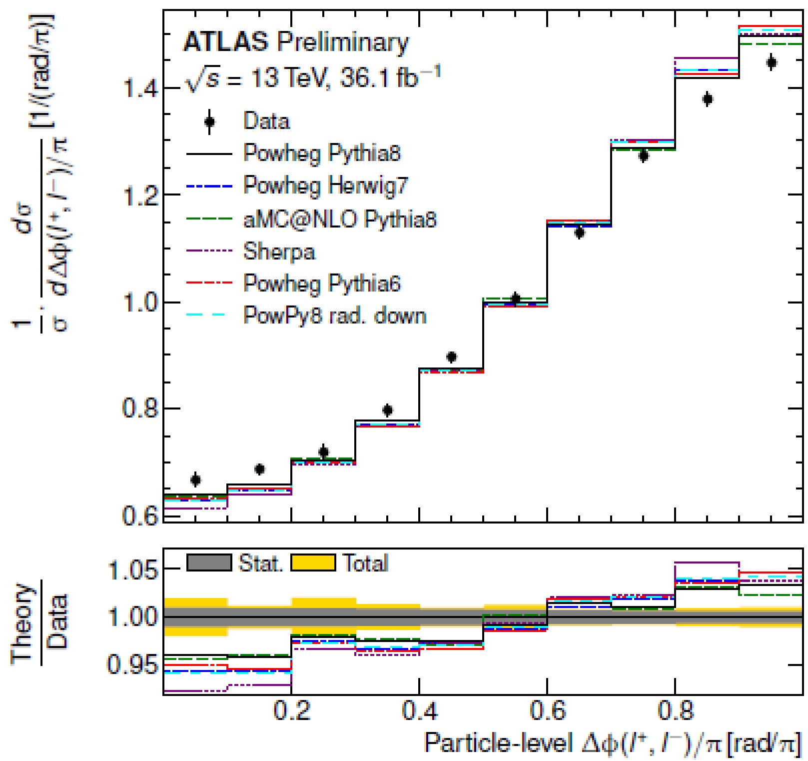
Run 1

Run 2 (36.1-79.8 fb^{-1})





Top Spin Correlation



- $t\bar{t} \rightarrow (Wb)(Wb) \rightarrow (e\nu b)(\mu\nu b)$
- eとμの間の角度相関。
- SM(NLO QCD)の予言値よりも強い相関がみられた。
  $f = 1.250 \pm 0.026 \pm 0.063$
- SMからのずれ: 3.2σ

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:

$$\begin{aligned} M_h &\leq M_Z, M_A \leq M_H \\ M_W &\leq M_{H^\pm} \end{aligned}$$

で、$m_h = 125.5\ \mathrm{GeV}/c^2$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。

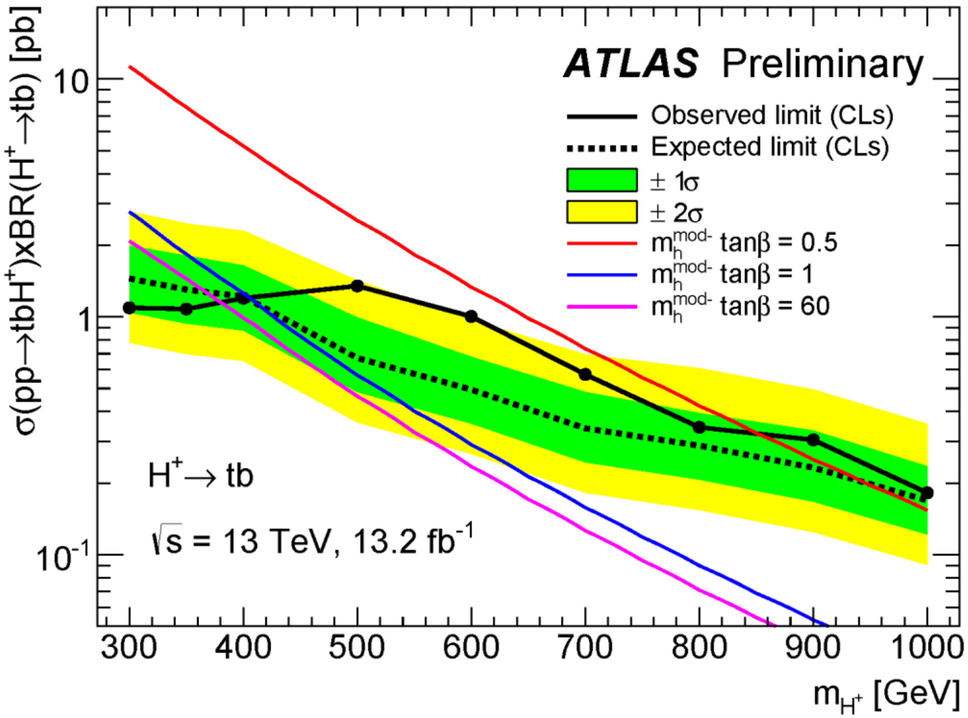
- CP-even mass mixing angle:

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

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

過去の結果

- 2016年夏(Run 2)のATLASの結果



- 今回は、
  - データ量を約3倍に増加: $13.2\ \mathrm{fb}^{-1} \rightarrow 36.1\ \mathrm{fb}^{-1}$
  - 探索質量範囲を$200 - 2000\ \mathrm{GeV}$に広げた。
  - $\ell + jets$チャンネルに加え、dileptonチャンネルも解析に加えた。

物理オブジェクトの再構成

- Leading lepton
  - e: $P_T > 27\ \mathrm{GeV}, |\eta| < 2.47$
  - μ: $P_T > 27\ \mathrm{GeV}, |\eta| < 2.5$
- 2nd lepton (dileptonチャンネル)
  - e or μ: $P_T > 10\ \mathrm{GeV}$ ($P_T > 15\ \mathrm{GeV}$ for dielectron event)
- Jet: $P_T > 25\ \mathrm{GeV}, |\eta| < 2.5$

解析サブチャンネルのイベント数と、バックグラウンドの内訳

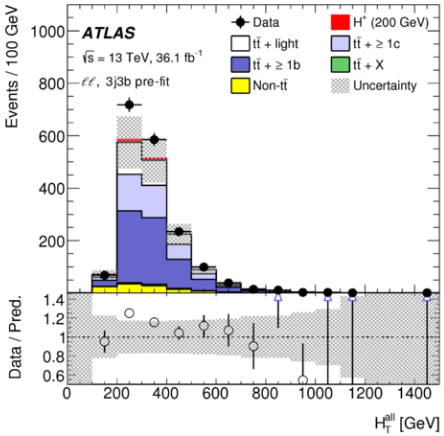
L+jets

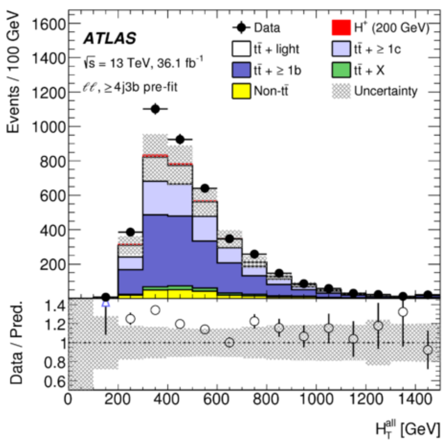
Process	CR 5j2b	SR 5j3b	SR 5j≥4b	CR ≥6j2b	SR ≥6j3b	SR ≥6j≥4b
$t\bar{t}+\geq1b$	$15\ 300\pm2300$	7400 ± 1000	750 ± 110	17100 ± 2800	$11\ 100\pm1500$	2410 ± 260
$t\bar{t}+\geq1c$	$47\ 000\pm12\ 000$	6400 ± 1700	260 ± 80	$55\ 000\pm11\ 000$	9400 ± 2000	450 ± 180
$t\bar{t}$ + light	$226\ 000\pm11\ 000$	$12\ 200\pm1100$	89 ± 35	$132\ 000\pm10\ 000$	8500 ± 1100	260 ± 120
Non-prompt leptons	$15\ 000\pm6000$	600 ± 500	11 ± 8	$13\ 000\pm6000$	700 ± 400	4 ± 5
$t\bar{t}W$	340 ± 50	29 ± 4	0.66 ± 0.22	540 ± 80	72 ± 11	5.0 ± 1.2
$t\bar{t}Z$	390 ± 50	78 ± 10	12.2 ± 2.2	720 ± 90	183 ± 23	50 ± 7
Single top Wt	8900 ± 2400	690 ± 210	23 ± 13	5400 ± 1800	640 ± 260	53 ± 31
Other top	328 ± 27	28.2 ± 2.6	3.1 ± 0.6	183 ± 20	46 ± 11	14 ± 5
Diboson	410 ± 210	29 ± 15	2.0 ± 2.1	340 ± 170	37 ± 19	4.3 ± 2.5
W + jets	9000 ± 4000	540 ± 240	16 ± 9	5200 ± 2100	470 ± 200	27 ± 12
Z + jets	2100 ± 600	104 ± 35	4.9 ± 1.8	1300 ± 400	130 ± 40	11 ± 4
$t\bar{t}H$	252 ± 24	127 ± 13	30 ± 4	520 ± 50	315 ± 32	117 ± 16
tH	19.5 ± 2.4	10.6 ± 1.3	2.21 ± 0.32	27.2 ± 3.5	15.7 ± 2.0	5.0 ± 0.7
Total	$328\ 000\pm7000$	$28\ 400\pm900$	1220 ± 60	$233\ 000\pm6000$	$31\ 800\pm800$	3410 ± 150
Data	334 813	29 322	1210	234 053	32 151	3459
H^+ (200 GeV)	470 ± 50	220 ± 23	25.3 ± 3.3	340 ± 50	235 ± 34	60 ± 9
H^+ (800 GeV)	630 ± 90	390 ± 70	56 ± 12	1230 ± 190	1020 ± 170	350 ± 70

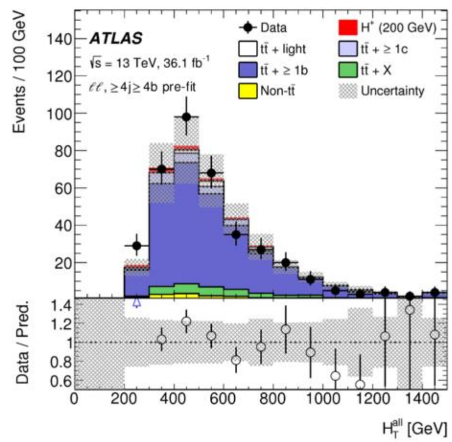
Dilepton

Process	CR 3j2b	SR/CR 3j3b	CR ≥4j2b	SR ≥4j3b	SR ≥4j≥4b
$t\bar{t}+\geq1b$	2330 ± 330	940 ± 130	3300 ± 500	2050 ± 280	322 ± 35
$t\bar{t}+\geq1c$	6100 ± 1300	520 ± 140	9900 ± 2000	1310 ± 290	30 ± 14
$t\bar{t}$ + light	$50\ 700\pm2300$	260 ± 70	$32\ 500\pm2100$	420 ± 120	4 ± 5
Non-prompt leptons	420 ± 110	6.7 ± 2.4	620 ± 160	48 ± 13	2.2 ± 0.8
$t\bar{t}W$	48 ± 7	1.48 ± 0.17	129 ± 7	9.8 ± 1.1	0.55 ± 0.21
$t\bar{t}Z$	43 ± 5	5.8 ± 1.1	174 ± 10	32.9 ± 2.0	7.0 ± 1.3
Single top Wt	1700 ± 500	40 ± 12	1110 ± 330	63 ± 26	3.9 ± 2.0
Other top	3.9 ± 0.5	0.12 ± 0.05	21.8 ± 3.5	5.8 ± 2.2	2.0 ± 0.9
Diboson	36 ± 4	1.2 ± 0.4	46 ± 6	3.1 ± 0.9	0.48 ± 0.28
Z + jets	1600 ± 500	42 ± 16	1300 ± 400	82 ± 29	5.3 ± 2.0
$t\bar{t}H$	26.2 ± 1.3	8.5 ± 0.5	116 ± 6	52.2 ± 3.5	16.0 ± 1.9
tH	1.95 ± 0.27	0.42 ± 0.10	5.7 ± 0.7	2.14 ± 0.32	0.48 ± 0.09
Total	$62\ 800\pm2800$	1810 ± 110	$49\ 300\pm2300$	4060 ± 200	390 ± 28
Data	62 399	1774	48 356	4047	376
H^+ (200 GeV)	92 ± 12	27 ± 4	72 ± 12	49 ± 8	9.0 ± 1.6
H^+ (800 GeV)	70 ± 12	32 ± 7	212 ± 33	157 ± 27	44 ± 9

H_T^{jet}分布（ $dilepton$ ）







BDT Variable list

ℓ+jets channel	
$p_{\mathrm{T}}(j_1)$	Leading jet transverse momentum
$m(b\text{-pair}^{\Delta R^{\min}})$	Invariant mass of pair of b-tagged jets with smallest ΔR
$p_{\mathrm{T}}(j_5)$	Transverse momentum of fifth jet
H_2	Second Fox–Wolfram moment [130] calculated using all jets and leptons
$\Delta R^{\mathrm{avg}}(b\text{-pair})$	Average ΔR between all b-tagged jet pairs in the event
$\Delta R(\ell, b\text{-pair}^{\Delta R^{\min}})$	ΔR between the lepton and the b-tagged jet pair with smallest ΔR
$m(u\text{-pair}^{\Delta R^{\min}})$	Invariant mass of the non-b-tagged jet-pair with minimum ΔR
$H_{\mathrm{T}}^{\mathrm{jets}}$	Scalar sum of all jets transverse momenta
$m(b\text{-pair}^{p_{\mathrm{T}}^{\max}})$	Invariant mass of the b-tagged jet pair with maximum transverse momentum
$m^{\max}(b\text{-pair})$	Largest invariant mass of any two b-tagged jets
$m^{\max}(j\text{-triplet})$	Largest invariant mass of any three jets
D	Kinematic discriminant based on mass templates (for $m_{H^+} \leq 300\,GeV$)

$\ell\ell$ channel, $m \leq 600\,GeV$		3j3b	≥4j3b	≥4j≥4b
$m((j,b)^{p_{\mathrm{T}}^{\max}})$	Inv. mass of the jet and b-tagged jet with largest p_{T}	✓		
$\Delta E(j_3, \ell_2)$	Energy difference between the third jet and the subleading lepton	✓		
$E(j_3)$	Energy of third jet	✓		
$\Delta m(j_1 + j_2, j_1 + j_3 + \ell_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	Inv. mass difference between $j_1 + j_2$ and $j_1 + j_3 + \ell_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$	✓		
$\Delta R(j_2, j_1 + \ell_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	Angular difference between subleading jet and $j_1 + \ell_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$	✓		
$p_{\mathrm{T}}(b_1)$	p_{T} of leading b-tagged jet	✓		
$p_{\mathrm{T}}((\ell,b)^{\Delta\eta^{\max}})$	p_{T} of the pair of lepton and b-tagged jet with largest $\Delta\eta$	✓		
$m((\ell,b)^{\Delta\phi^{\min}})$	Inv. mass of the pair of lepton and b-tagged jet with smallest $\Delta\phi$		✓	
$\Delta E(b_1, \ell_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	Energy difference between the leading b-tagged jet and $\ell_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$		✓	
$\Delta m(j_2 + j_3, j_1 + \ell_1 + \ell_2)$	Inv. mass difference between $j_2 + j_3$ and $j_1 + \ell_1 + \ell_2$		✓	
$\Delta m(\ell_1 + j_3 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}, j_1 + j_2 + \ell_2)$	Inv. mass difference between $\ell_1 + j_3 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$ and $j_1 + j_2 + \ell_2$		✓	
$\Delta p_{\mathrm{T}}(j_1, j_3)$	p_{T} difference between leading and third jet		✓	✓
$m^{\min}(b\text{-pair})$	Smallest invariant mass of any b-tagged jet pair		✓	✓
$m^{\min}(\ell, b)$	Smallest invariant mass of any pair of lepton and b-tagged jet		✓	✓
$p_{\mathrm{T}}(b_2 + \ell_1 + \ell_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	p_{T} of $b_2 + \ell_1 + \ell_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$			✓
$\Delta R(\ell_2, j_2 + j_3 + \ell_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	Angular difference between ℓ_2 and $j_2 + j_3 + \ell_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$			✓
$H_{\mathrm{T}}^{\mathrm{all}}$	Scalar sum of all jets and leptons transverse energy			✓

$\ell\ell$ channel, $m > 600\,GeV$		3j3b	≥4j3b	≥4j≥4b
$p_{\mathrm{T}}((\ell,b)^{\Delta\eta^{\min}})$	p_{T} of the pair of lepton and b-tagged jet with smallest $\Delta\eta$	✓		✓
$\Delta p_{\mathrm{T}}(j_1, j_3)$	p_{T} difference between leading and third jets	✓		✓
$\Delta m(j_2 + \ell_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}, j_1 + j_3 + \ell_1)$	Inv. mass difference between $j_2 + \ell_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$ and $j_1 + j_3 + \ell_1$	✓		
$p_{\mathrm{T}}((\ell,b)^{\Delta R^{\min}})$	p_{T} of the pair of lepton and b-tagged jet with smallest ΔR	✓		
$m(j\text{-pair}^{\Delta\eta^{\min}})$	Inv. mass of the jet pair with smallest $\Delta\eta$	✓		
$\Delta p_{\mathrm{T}}(j_1, j_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	p_{T} difference between leading jet and $j_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$	✓		
$p_{\mathrm{T}}(j_1 + j_2 + j_3 + \ell_1)$	p_{T} of $j_1 + j_2 + j_3 + \ell_1$	✓		
$\Delta E(\ell_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}, j_1 + j_2)$	Energy difference between $\ell_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$ and $j_1 + j_2$	✓		
$E(j_1)$	Energy of the leading jet	✓	✓	
$p_{\mathrm{T}}^{\max}(j\text{-pair})$	Maximum p_{T} of any jet pair	✓	✓	
$m(b_1 + b_2 + \ell_1 + \ell_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	Inv. mass of $b_1 + b_2 + \ell_1 + \ell_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$		✓	
$p_{\mathrm{T}}((\ell,b)^{\Delta\eta^{\min}})$	p_{T} of the lepton-b-jet pair with smallest separation in η		✓	
$\Delta p_{\mathrm{T}}(\ell_2, u_1 + b_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	p_{T} difference between subleading lepton and $u_1 + b_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$		✓	
$\Delta p_{\mathrm{T}}(\ell_2, u_1 + b_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	p_{T} difference between subleading lepton and $u_1 + b_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$		✓	
$\Delta p_{\mathrm{T}}(\ell_2, \ell_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	p_{T} difference between subleading lepton and $\ell_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$		✓	
$\Delta p_{\mathrm{T}}(j_1, j_3 + \ell_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	p_{T} difference between leading jet and $j_3 + \ell_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$		✓	
$\Delta E(\ell_1, j_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	Energy difference between leading lepton and $j_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$		✓	
$m^{\min}(b\text{-pair})$	Smallest invariant mass of any b-tagged jet pair		✓	✓
$H_{\mathrm{T}}^{\mathrm{all}}$	Scalar sum of all jets and leptons transverse momenta			✓
$p_{\mathrm{T}}(j_3 + \ell_1)$	p_{T} of $j_3 + \ell_1$			✓
$\Delta p_{\mathrm{T}}(b_2, b_1 + \ell_2)$	p_{T} difference between subleading b-tagged jet and $b_1 + \ell_2$			✓
$\Delta p_{\mathrm{T}}(j_2, j_3 + \ell_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	p_{T} difference between subleading jet and $j_3 + \ell_1 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$			✓
$\Delta E(j_3, j_2 + \ell_1 + \ell_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	Energy difference between third jet and $j_2 + \ell_1 + \ell_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$			✓
$\Delta m(j_2 + \ell_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}, j_1 + \ell_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}})$	Inv. mass difference between $j_2 + \ell_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$ and $j_1 + \ell_2 + E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$			✓

Discriminant D

- 信号とバックグラウンドの分離が非常に悪い$m_{H^+} \leq 300$ GeVでだけ、Discriminantを組んだ。

$X_{H_h} = M_{bb_hqq} - M_{b_hqq}$ $(H^+ \to bt \to b(b_hqq)$崩壊イベント)
$X_{H_\ell} = M_{bb_\ell\ell\nu} - M_{b_\ell\ell\nu}$ $(H^+ \to bt \to b(b_\ell\ell\nu)$崩壊イベント)
$X_{t_h} = M_{b_hqq} - M_{qq}$

イベントkinematicsの信号らしさ:

$P(x)$: 変数xのPDF (MC study)

$$P_{\rm sig}^{\rm kin}(x) = P_{\rm sig}(X_H) \cdot P_{\rm sig}(X_{t_h}) \cdot P_{\rm sig}(M_{b_l l\nu}) \cdot P_{\rm sig}(M_{qq})$$

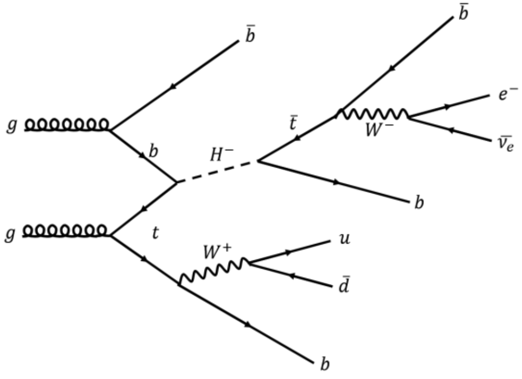
Btag情報の信号らしさ:

$P_b(jet_i)$: jet_iのb-taggingスコアのPDF (MC study)

$$P_{\rm sig}^{\rm btag}(x) = P_b(jet1) \cdot P_l(jet2) \cdot P_l(jet3) \cdot P_b(jet4) \cdot P_b(jet5)$$

イベントの信号らしさ:

$$P_{\rm sig}(x) = \frac{\sum_{k=1}^{N_P} P_{\rm sig}^{\rm btag}(x) P_{\rm sig}^{\rm kin}(x)}{\sum_{k=1}^{N_P} P_{\rm sig}^{\rm btag}(x)}$$

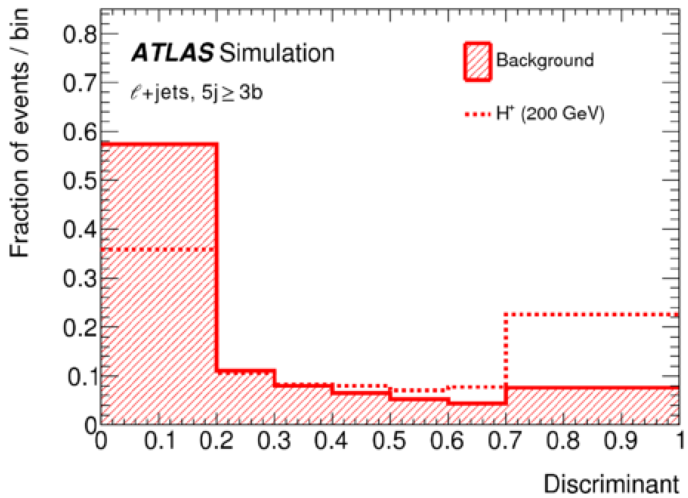


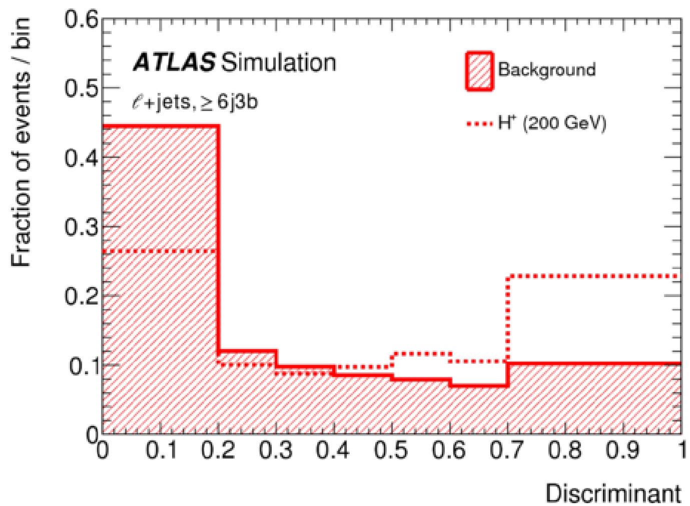
Discriminant定義

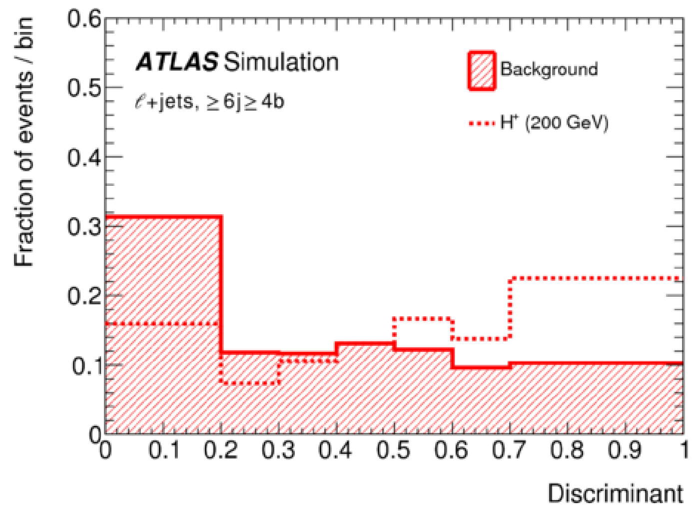
$$D = \frac{P_{\rm sig}(x)}{P_{\rm sig}(x) + P_{\rm bkg}(x)}$$

Discriminant DによるS/B分離

- 信号とバックグラウンドの分離が非常に悪い$m_{H^+} \leq 300$ GeVでだけ、Discriminantを組んだ。







Fox Wolfram moment

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

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

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

- Legendre polynomial:

$$P_0(x) = 1$$
$$P_1(x) = x$$
$$P_2(x) = \frac{1}{2}\left(3x^2 - 1\right)$$
$$P_3(x) = \frac{1}{2}\left(5x^3 - 3x\right)$$

Systematic Uncertainties

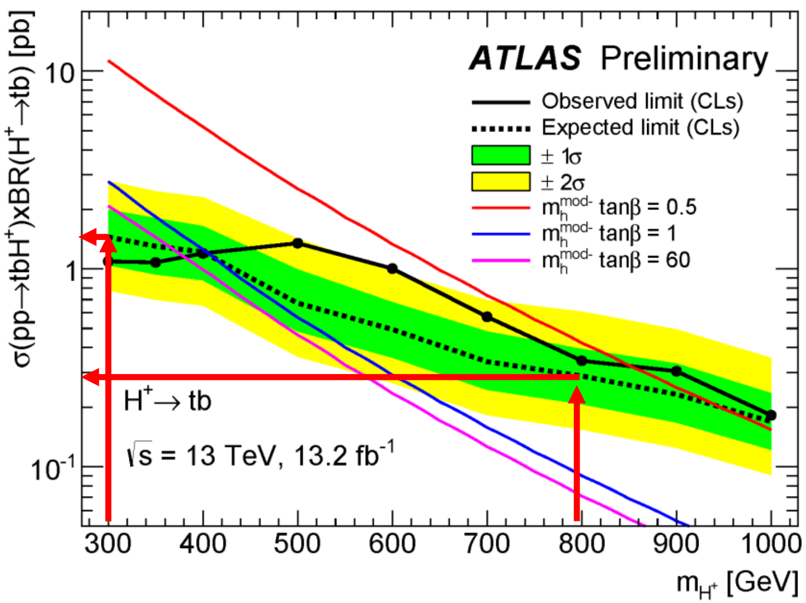
- $\mu=\sigma(pp \to H^+) \times B(H^+ \to tb)$のベストフィット値：
  $\mu(m_{H^+}=200\ \text{GeV}) = -0.4$ pb / $\mu(m_{H^+}=800\ \text{GeV}) = -0.02$ pb に対して：

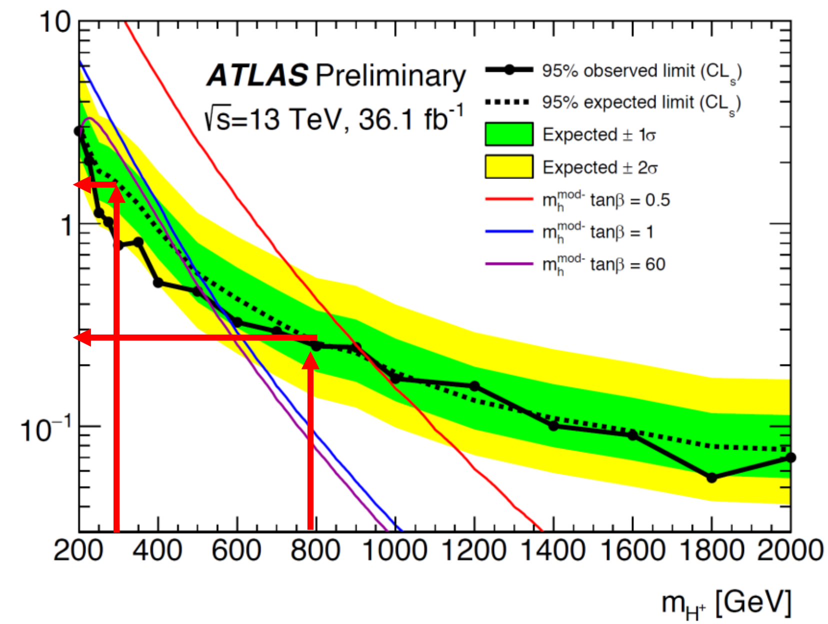
Uncertainty Source	$\Delta\mu(H^+_{200})$ [pb]	$\Delta\mu(H^+_{800})$ [pb]
Jet flavour tagging	0.70	0.050
$t\bar{t}+\geq 1b$ modelling	0.65	0.008
Jet energy scale and resolution	0.44	0.031
$t\bar{t}$+light modelling	0.44	0.019
MC statistics	0.37	0.044
$t\bar{t}+\geq 1c$ modelling	0.36	0.032
Other background modelling	0.36	0.039
Luminosity	0.24	0.010
Jet-vertex assoc., pile-up modelling	0.10	0.006
Lepton, $E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}}$, ID, isol., trigger	0.08	0.003
H^+ modelling	0.03	0.006
Total systematic uncertainty	1.4	0.11
$t\bar{t}+\geq 1b$ normalisation	0.61	0.022
$t\bar{t}+\geq 1c$ normalisation	0.28	0.012
Total statistical uncertainty	0.69	0.050
Total uncertainty	1.5	0.12

$H^+ \to tb$ 2016夏と2018夏の結果比較

2016
- $\ell + jets$のみ
- Kinematic variablesによる多変数解析(BDT)

2018
- $(\ell + jets)$ + dilepton
  - $\ell + jets$の寄与が大
- ベースは多変数解析(BDT)
  - m_{H^+} <300 GeVでは、pseudo-continuous b-tagも含めたDiscriminantをBDTインプットした。





ATLAS hMSSM summary plot