

# LHC-ATLAS実験における 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

筑波大学 数理物質科学研究科

博士後期課程 2年 山内大輝

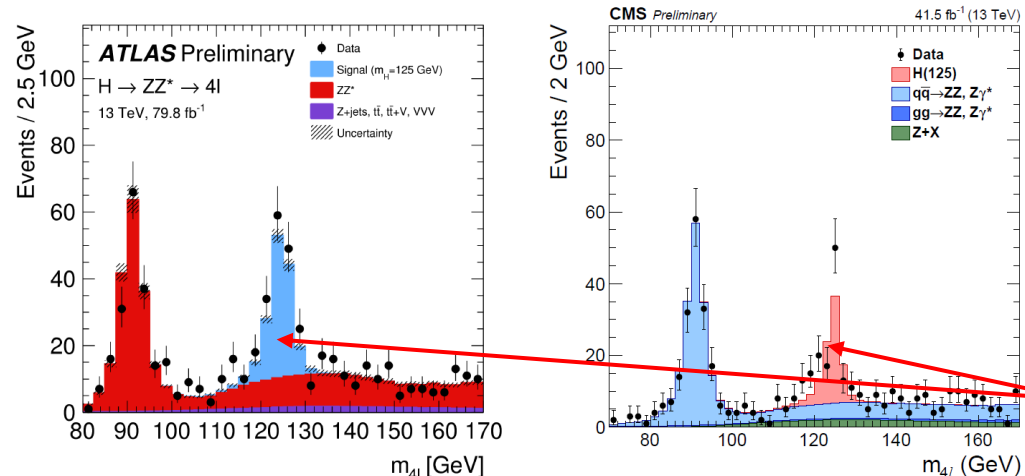


筑波大学  
University of Tsukuba

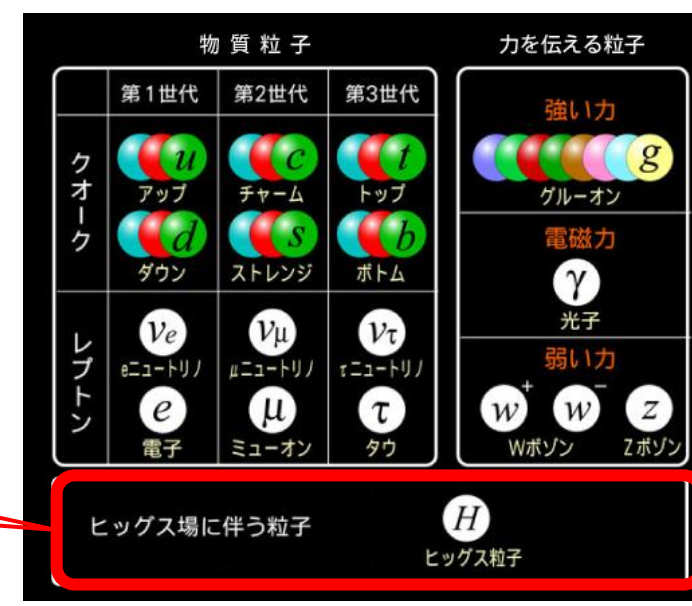
# 標準模型を超える物理の探索へ

□ 標準模型では、電荷をもたない中性ヒッグス粒子の存在が予言されていた

- 2012年、ATLASグループとCMSグループが共にヒッグス粒子らしき新粒子を発見したと報告した。
- 現在は、発見された新粒子が標準模型のヒッグス粒子の性質を満たすのか、様々な精密測定が行われている



## 標準モデルの素粒子



□ 精密測定が行われている一方、標準模型の枠組みを超えたモデル (BSM) で予言される、様々なヒッグス粒子の探索も進められている

□ 今回は、BSMの一つであるMSSMで予言されている、荷電ヒッグス粒子の探索について紹介する

- MSSM : "Minimal Supersymmetry Standard Model"

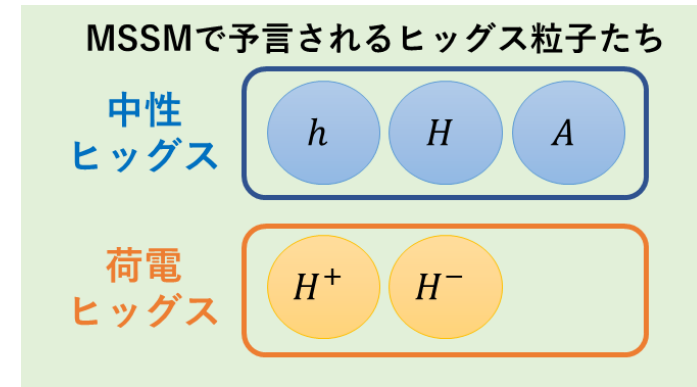
# MSSMで予言される荷電ヒッグス粒子

□ MSSMとは、2 Higgs Doublet Model (2HDM)で分類されるモデルの1つである

- 2HDM: 2つのヒッグス2重項 (Higgs Doublet) を仮定する、拡張ヒッグス模型 (標準模型では、1つのヒッグス2重項を仮定する)

□ MSSMでは5つのヒッグス粒子の存在が予言される (右図)

- 荷電ヒッグス粒子は、その内の2つである



□ 上記MSSMヒッグス粒子の湯川相互作用:

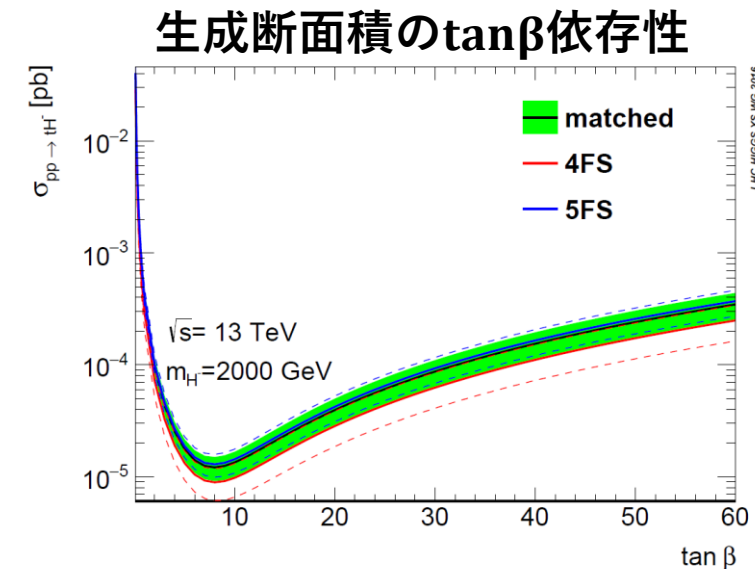
$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}}^{2\text{HDM}} = -\sum_{f=u,d,l} \frac{m_f}{v} (\xi_h^f \bar{f} f h + \xi_H^f \bar{f} f H - i \xi_A^f \bar{f} \gamma_5 f A) \quad \text{※} \tan\beta: \text{真空期待値の比}$$

$$- \left\{ \frac{\sqrt{2} V_{ud}}{v} \bar{u} \left( m_u \left( \frac{1}{\tan\beta} \right) P_L + m_d (\tan\beta) P_R \right) d H^+ + \frac{\sqrt{2} m_l \xi_A^l}{v} \bar{\nu}_L l_R H^+ + \text{H. c.} \right\}$$

荷電ヒッグス粒子とフェルミオンの相互作用項

□ 荷電ヒッグス粒子とフェルミオンの相互作用の大きさは、 $m_u$ ,  $m_d$ ,  $\tan\beta$ の大きさに依存する

- トップクォークとボトムクォークとの結合が大きい
- 生成断面積は、 $\tan\beta \sim 0$ の範囲で最も大きくなる



# 荷電ヒッグス粒子の生成・崩壊モード

荷電ヒッグス粒子の生成・崩壊モードは、その質量 $M_{H^+}$ に大きく依存する

**$H^+$ 生成のFeynman図**

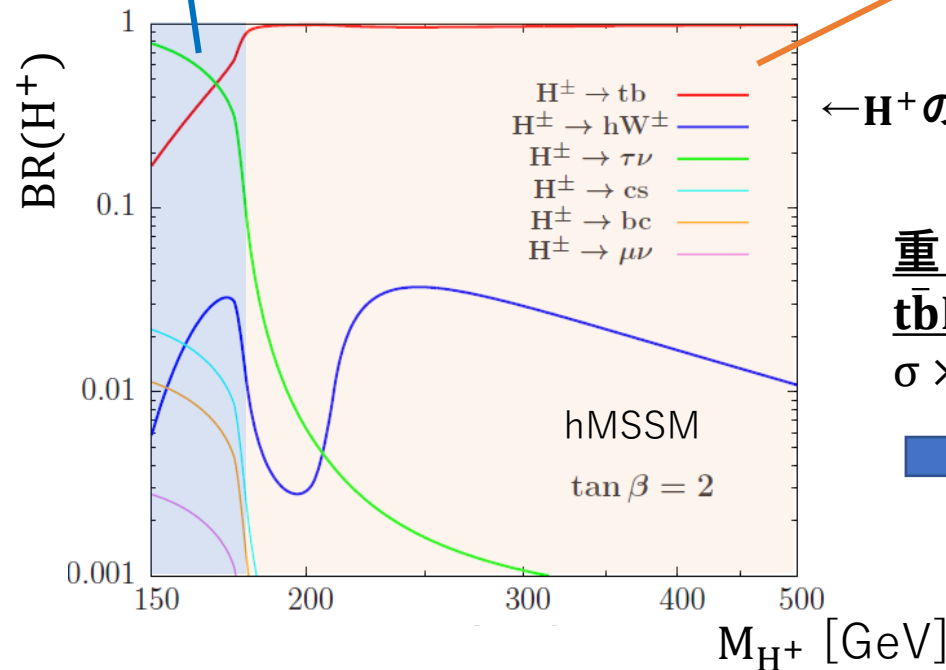
$M_{H^+} \lesssim M_{\text{top}}$

生成モード： $t \rightarrow H^+ b$   
崩壊モード： $H^+ \rightarrow \tau \nu_\tau$

**$H^+$ 生成のFeynman図**

$M_{H^+} \gtrsim M_{\text{top}}$

生成モード： $pp \rightarrow t\bar{b}H^+$   
崩壊モード： $H^+ \rightarrow t\bar{b}$



←  $H^+$ の崩壊分岐比に関する $M_{H^+}$ 依存性

重い荷電ヒッグス粒子に対して、  
 $t\bar{b}H^+ \rightarrow t\bar{b}(t\bar{b})$ チャンネルは、  
 $\sigma \times \text{Br}(H^+)$ が最も大きくなるチャンネル

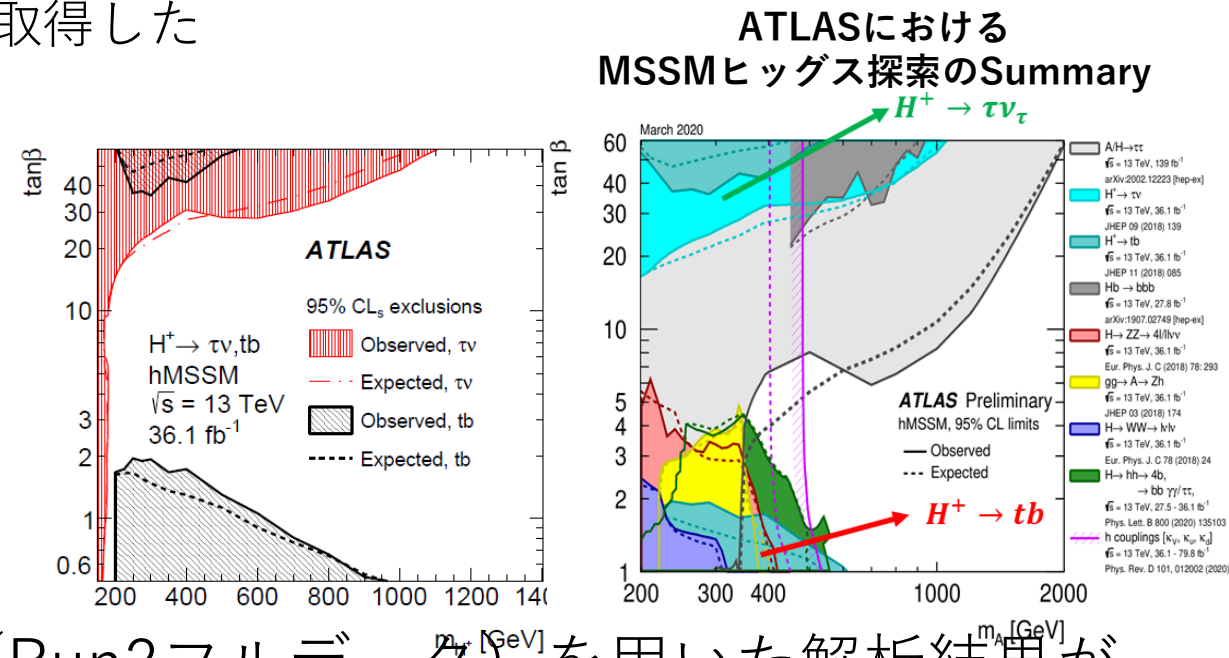
**➡ 今回の話のターゲット**

□ CERNで行われているATLAS実験では、LHCで加速された陽子の衝突事象を用いて、荷電ヒッグス粒子探索が行われている

- 現在、LHCはRun2の運転を終え、Run3へ向けたアップグレード中
- ATLAS検出器では、Run2で139 fb<sup>-1</sup>のデータを取得した

□ 右は、36.1 fb<sup>-1</sup>のデータ（Run2データの一部）を用いた、荷電ヒッグス粒子探索の結果である

- $H^+ \rightarrow \tau\nu_\tau$ 探索と $H^+ \rightarrow tb$ 探索は、互いに相補的に棄却領域を作る
  - $H^+ \rightarrow \tau\nu_\tau$ : 高tanβ領域
  - $H^+ \rightarrow tb$ : 低tanβ領域



□ つい先日、 **$H^+ \rightarrow tb$ 探索**における139 fb<sup>-1</sup>（Run2フルデータ）を用いた解析結果がSubmitされた

- Link : [arXiv:2102.10076](https://arxiv.org/abs/2102.10076)

## 今回はこの最新の解析結果について紹介する

# $H^+ \rightarrow tb$ 探索の信号事象

□  $t\bar{b}H^+ \rightarrow t\bar{b}(t\bar{b})$ チャンネルは、イベント中の2つのトップクォークの崩壊様式で、さらに細かくチャンネルを分類できる

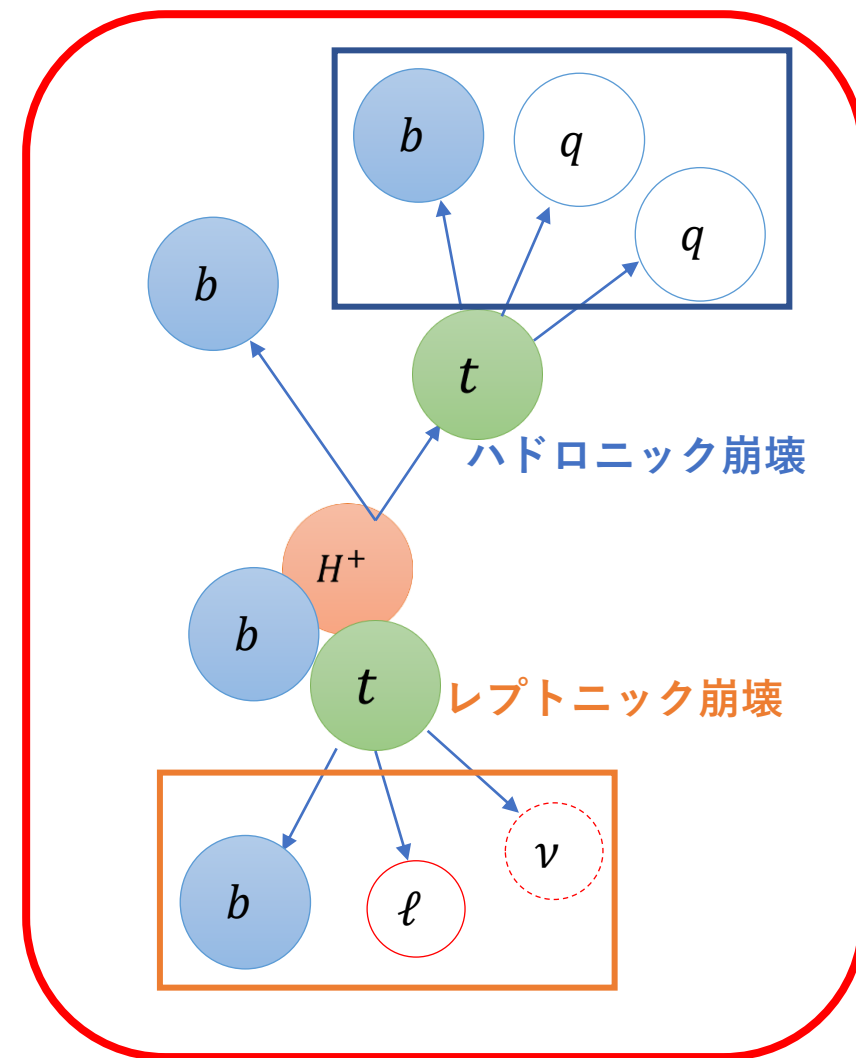
チャンネル	崩壊分岐比
All-hadronic チャンネル	44%
<b>Semi-leptonic チャンネル</b> ※ただし、 $\tau$ レプトンへの崩壊は除く	<b>30%</b>
Di-lepton チャンネル	5%

□ 本解析では、Semi-leptonicチャンネルに着目して探索を行っている

- 背景事象を削減しつつ、Acceptanceを稼げる良いチャンネル
- $36.1 \text{ fb}^{-1}$ での解析では、Di-leptonチャンネルでも解析を行い、Semi-leptonicチャンネルと結果をCombineしたが、ほとんどContributionはなかった

□ ATLAS検出器で取得されたデータから、右図のようなトポロジーを持つイベントを探す

$H^+ \rightarrow tb$   
(セミレプトニックチャンネル)

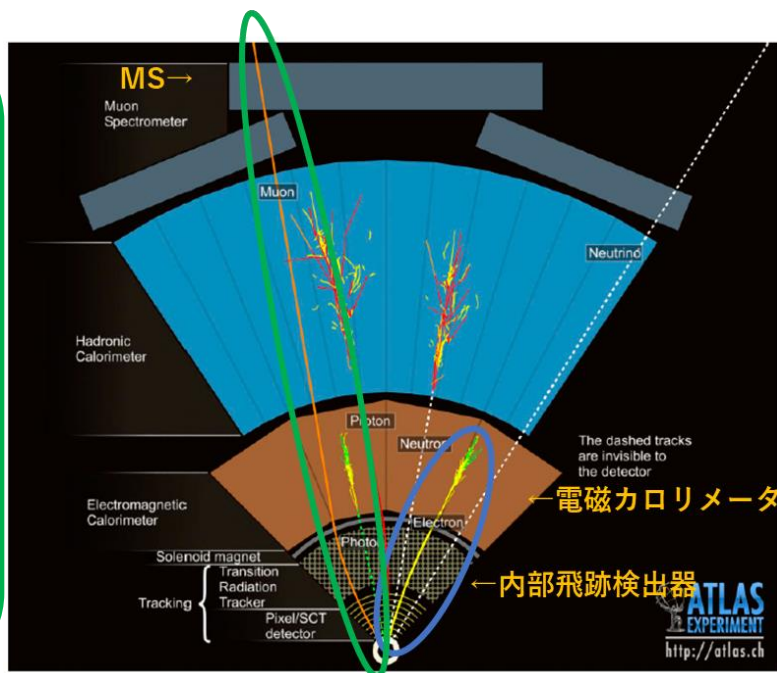


# レプトンを持つイベントの要求

- ATLAS検出器で検出される大量のイベントから、レプトン（電子orミューオン）が一本だけのイベントを要求する
- ATLAS検出器におけるレプトンの検出：

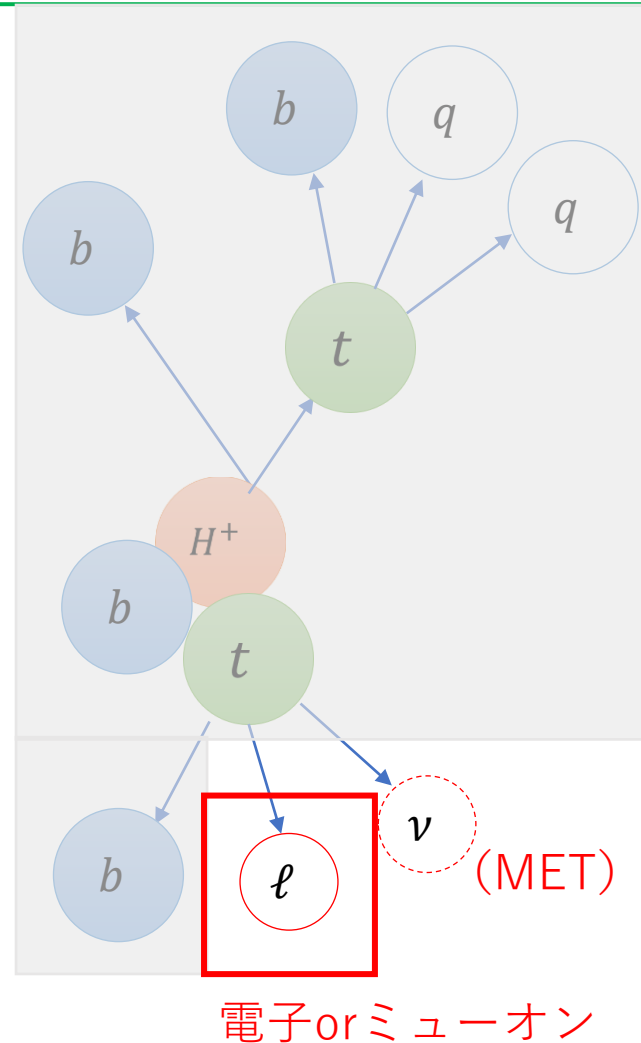
## ミューオン

- IDを通過した後、一番外側のMSまで通過する
- IDとMS中の飛跡情報からミューオンが再構成される



## 電子

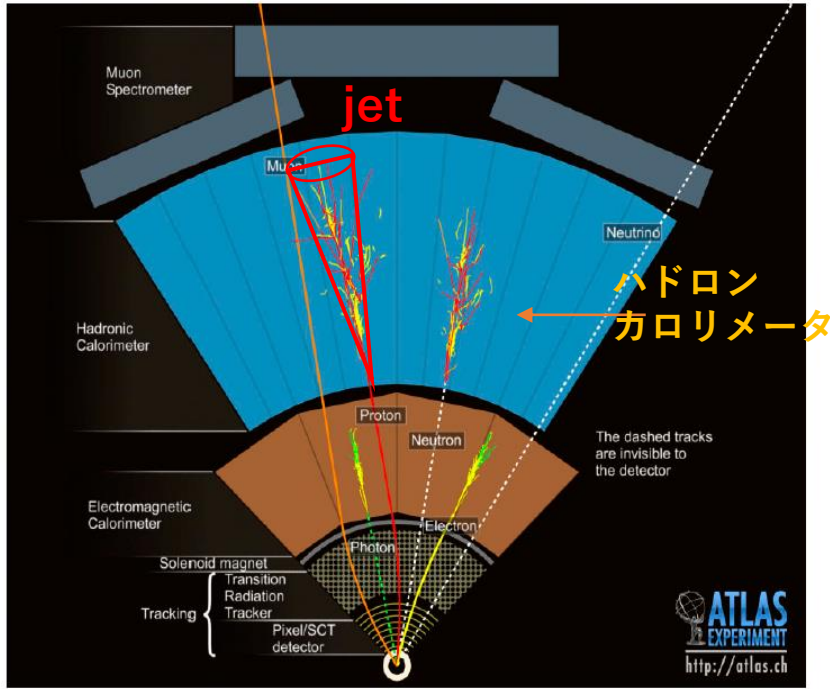
- IDを通過した後、カロリメータでシャワーを形成する
- IDの飛跡情報を用い、シャワーから電子が再構成される



- ニュートリノは検出できないため、消失横運動量 (MET)として計算される

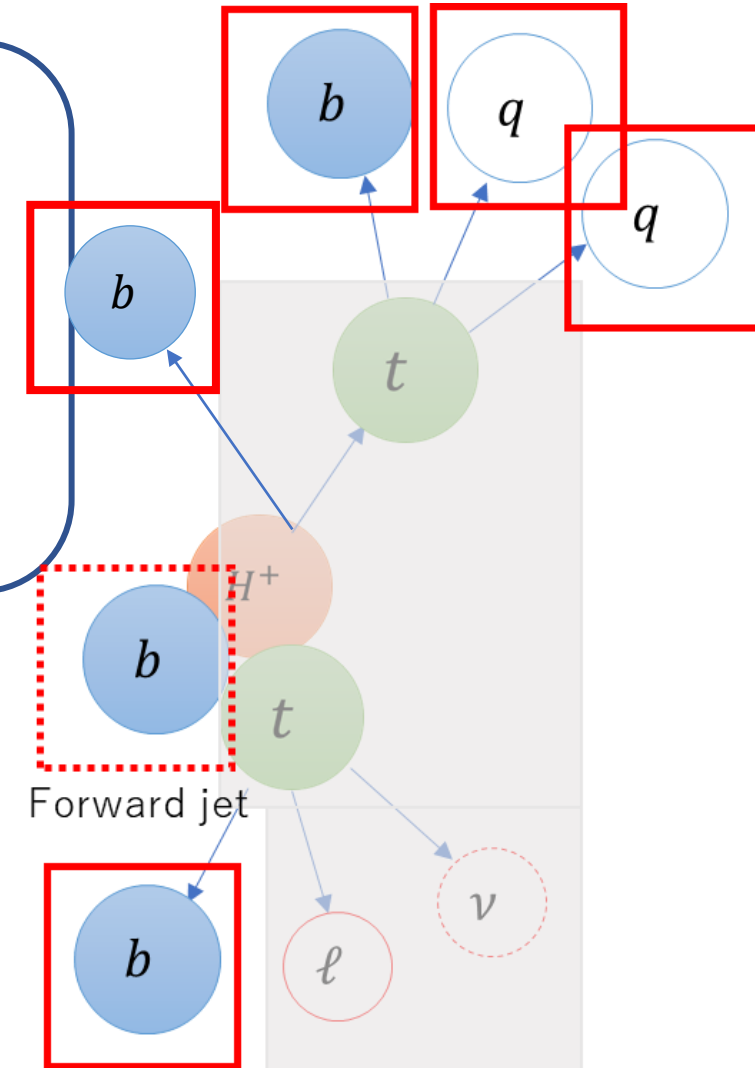
# 5本以上のジェットを持つイベントの要求

□ 終状態の $b$ や $q$ は、ジェットとして検出される



## ジェット

- ハドロン化したパートンがカロリメータを通過する際、シャワーを形成
- シャワーがカロリメータに落とすエネルギーをクラスタリングし、ジェットを再構成している



□ 5本以上のジェットが再構成されるイベントを要求する

- Diagram上では6本のジェットが存在するが、内1本 ( $H^+$ と随伴する $b$ ) はビーム軸方向に生成されるため、検出効率が非常に悪い
- そのため、ジェットの件数の要求は1本少なくしている



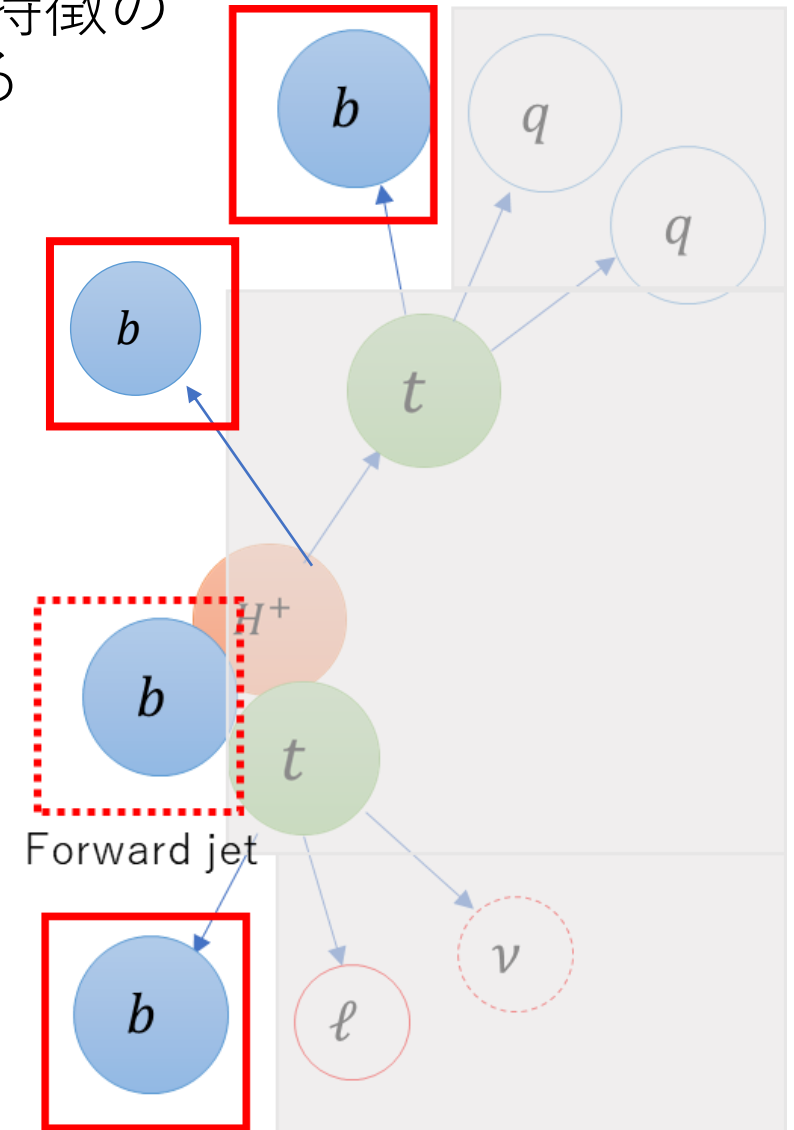
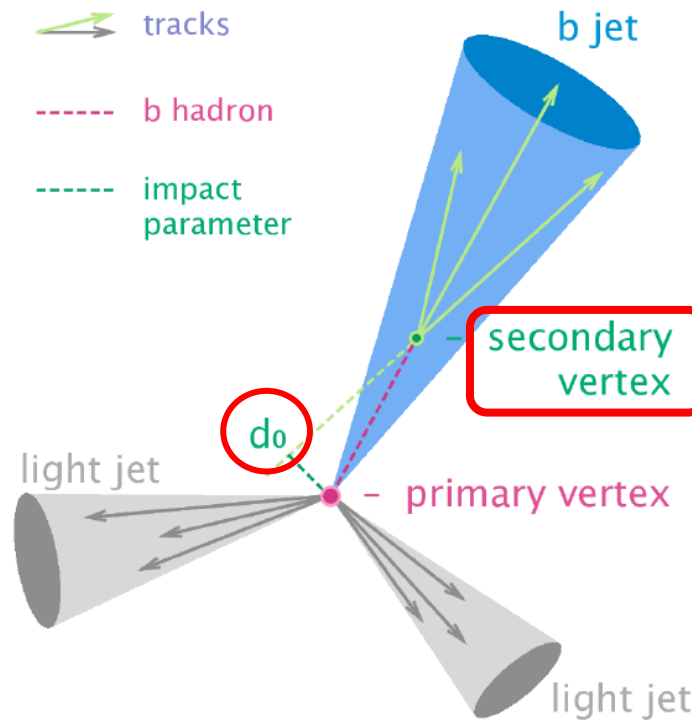
# 3本以上のbジェット持つイベントの要求

□ bクォーク由来のジェット (bジェット) は、その物理的特徴のため、他のフレーバー由来のジェットと識別が可能である

- b-hadronは崩壊するまでに数mm飛ぶ ( $c\tau \sim 500\mu\text{m}$ )



大きなImpact parameter ( $d_0$ )、Secondary-vertexを持つ



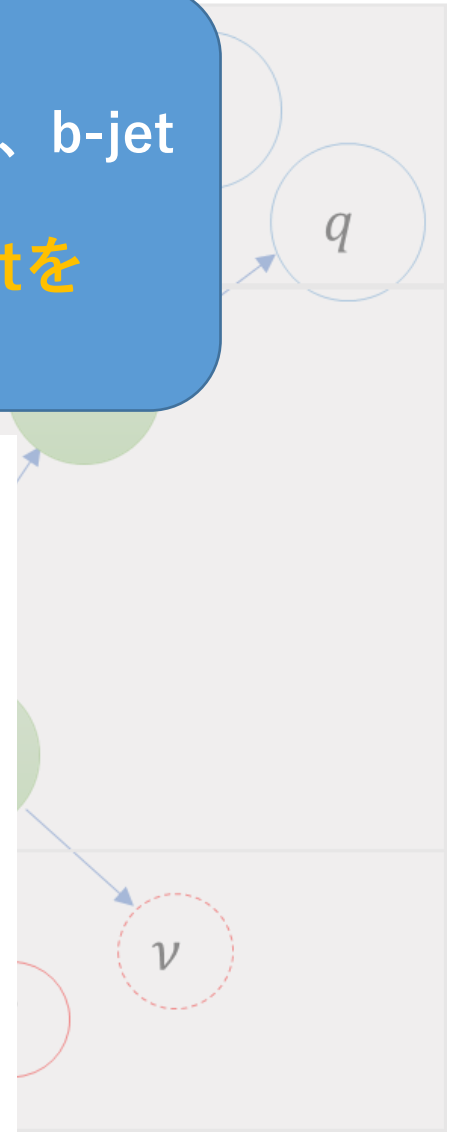
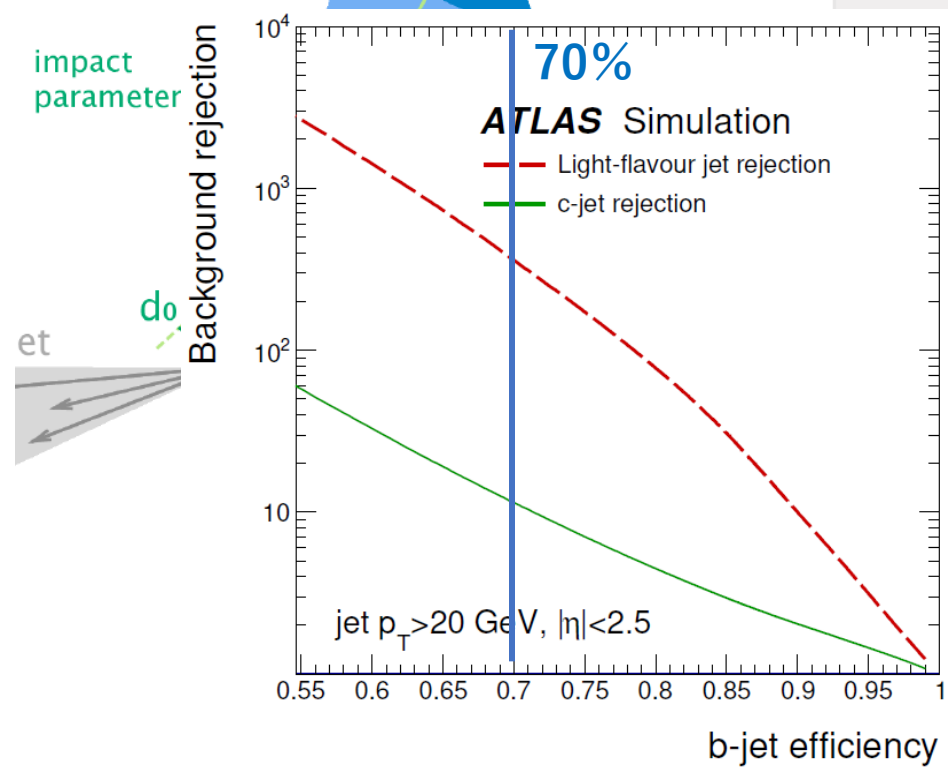
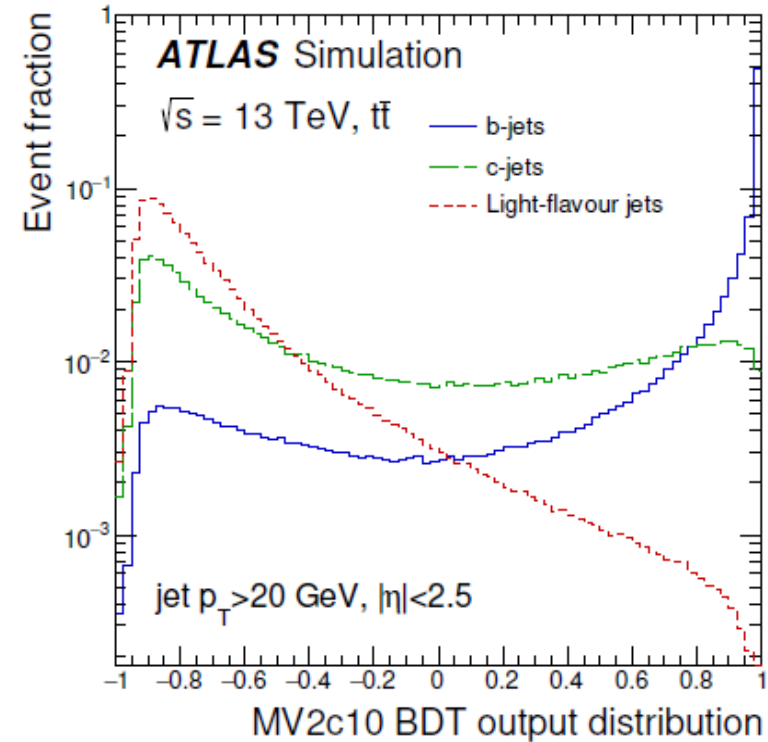
# 3本以上のbジェット持つイベントの要求

□ bクォークのため

● b

**b-tagging:**  
parameter ( $d_0$ )などの特徴量を入力変数として多変量解析 (BDT) を行い、b-jetをc-jetやlight-jetと識別している  
**本解析では、イベント中に70%のtag効率で検出されたb-jetを3本以上要求する**

大さ  
Secc



# 本解析の主な背景事象

□ここまでの事象選別によって、イベント中には以下の物理Objectが残っている

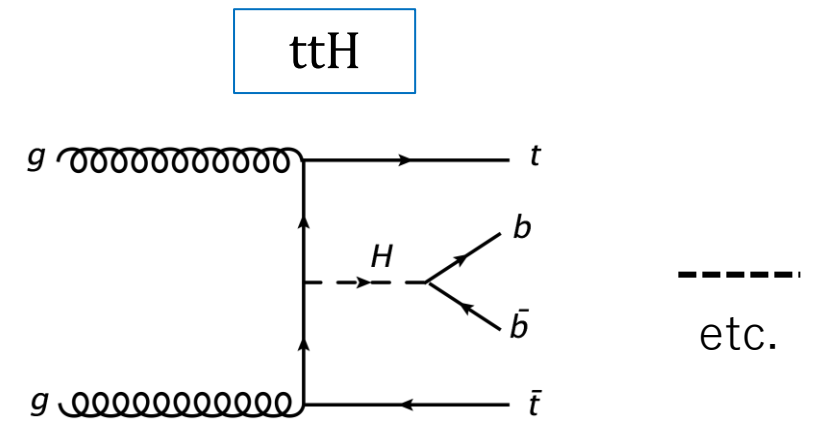
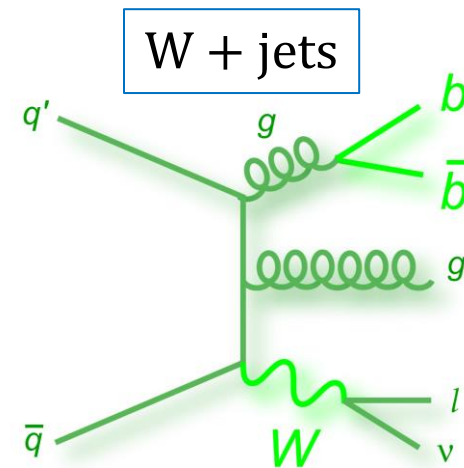
Physics object	本数
レプトン (電子 or ミューオン)	1本
ジェット	$\geq 5$ 本
bジェット	$\geq 3$ 本

□事象選別を生き残るような背景事象には、主に以下のような事象がある。

$t\bar{t} + \text{jets}$

Main background

$q=u, d$	$q=c$	$q=b$
$t\bar{t} + \text{light}$	$t\bar{t} + \geq 1c$	$t\bar{t} + \geq 1b$



信号事象をこれらの背景事象と如何に分離するか... ?

➡ 探索感度をあげるために重要な戦略

# 信号領域の細分化

□  $t\bar{t} + bb$ と信号事象の終状態は同じである

➡  $t\bar{t} + \geq 1b$ と信号を分離することが、感度向上のために特に重要となる

□ 信号領域の細分化：

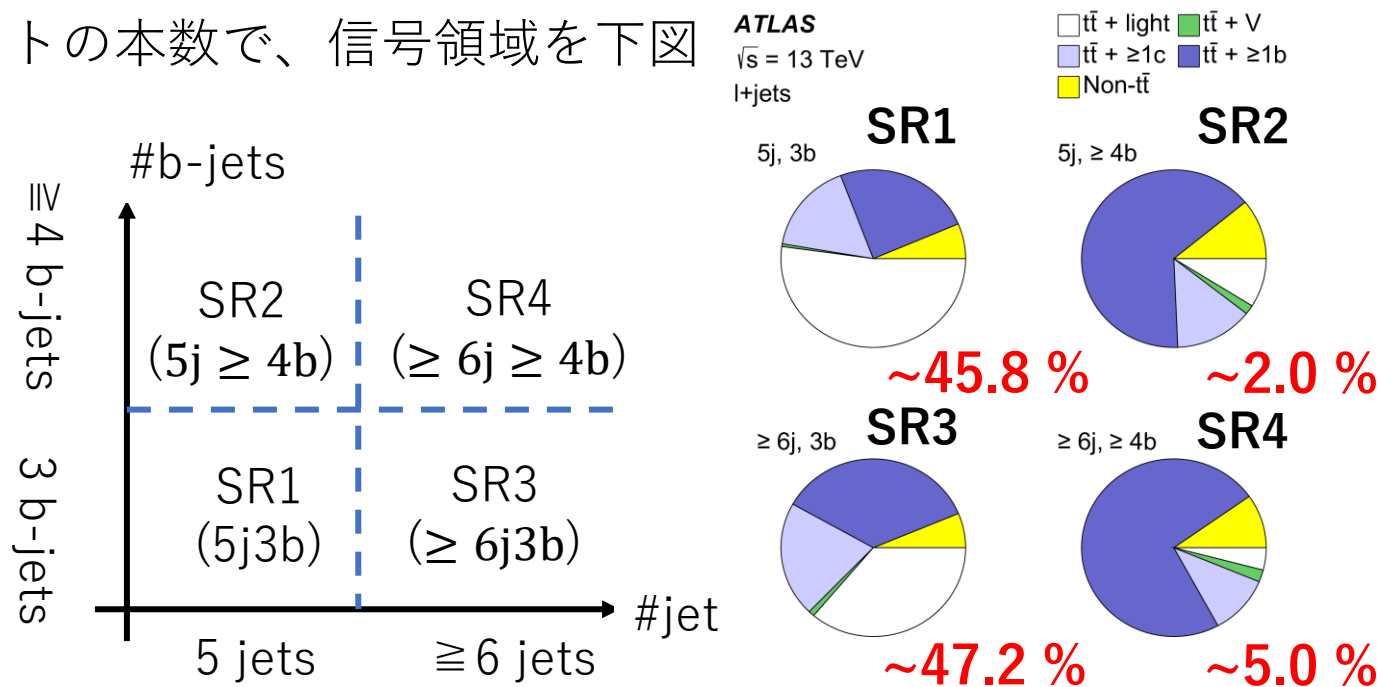
● 本解析では、ジェットの本数とbジェットの**本数**で、信号領域を下図のように4分割している

● SR2とSR4は、 $t\bar{t} + \geq 1b$ のイベントの割合が大きくなっている

➡  $t\bar{t} + \geq 1b$ に関する系統誤差を抑制しやすくなる

● SR1とSR3は、 $t\bar{t} + \geq 1b$ のイベントの割合が比較的小さい

➡ S/Bが向上し、感度改善につながる



# 多変量解析の導入

□  $t\bar{t} + \geq 1b$ と信号事象の分離を更に良くするため、本解析ではニューラルネットワーク (NN)を用いた多変量解析を導入している

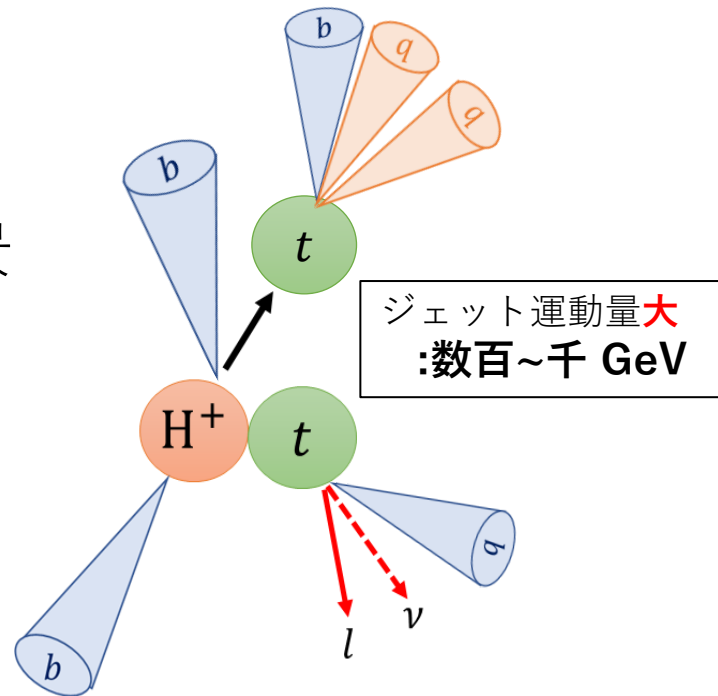
□ 信号事象では、荷電ヒッグス粒子の大きな質量により、高運動量のジェットが生成される

□ また、ジェット同士の相関も背景事象と異なる

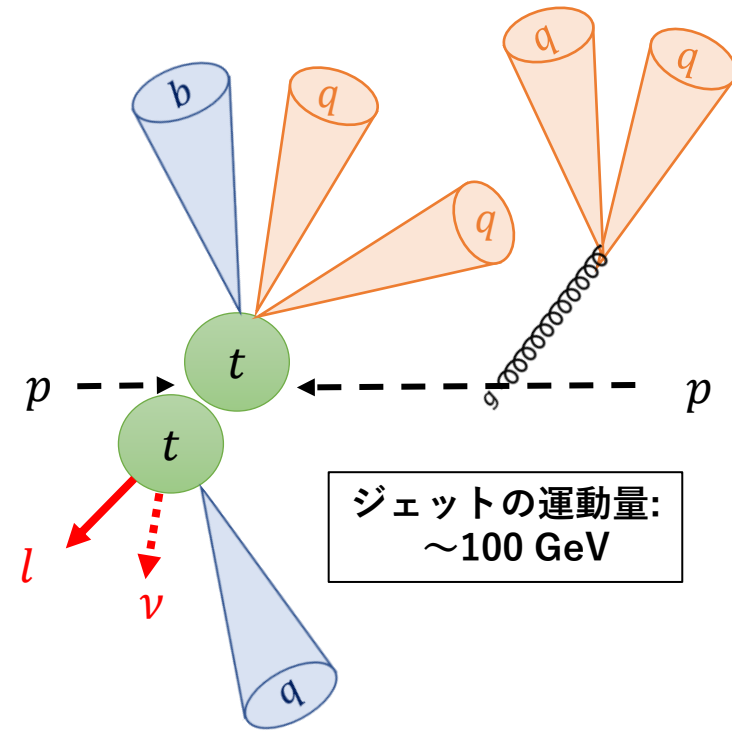


ジェットの運動量や高運動量  
ジェットで組んだ不変質量などの  
変数をNNの訓練に取り入れた

## 信号事象



## 背景事象

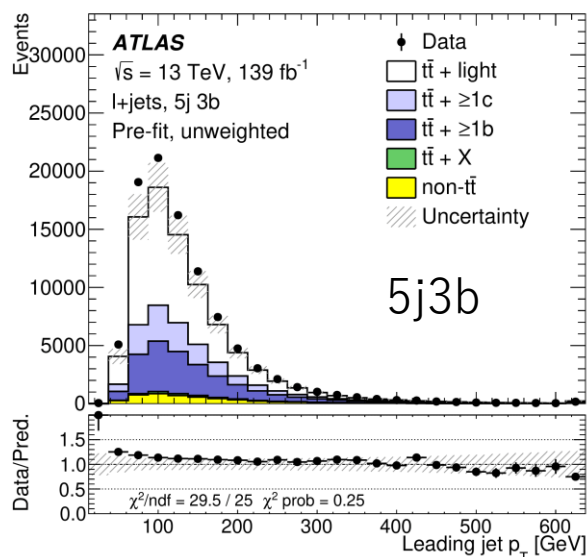


# NNの出力分布

## □ NNの訓練は、信号領域ごとに行われる

- 全ての背景事象サンプルが訓練に用いられる
- 全てのMass point ( $m_{H^+} = 200 \sim 2000$  GeVの18点) の信号サンプルが、一度に訓練に使用される
  - NNの出力値は、 $m_{H^+}$ の関数

### 1<sup>st</sup> ジェットの運動量分布

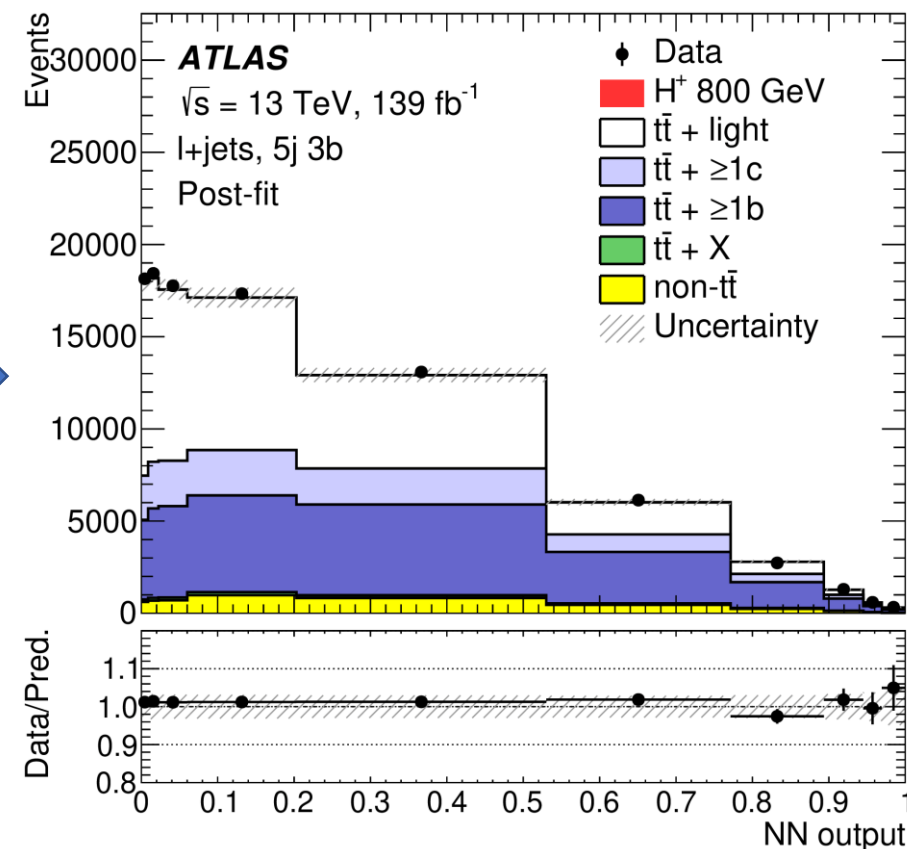


2組のbジェットペアの  
不変質量分布

全てのジェットの運動量の  
スカラー和

などの、**計15変数**がNNの訓練に用いられた。

### NNの出力値@ $m_{H^+} = 800$ GeV

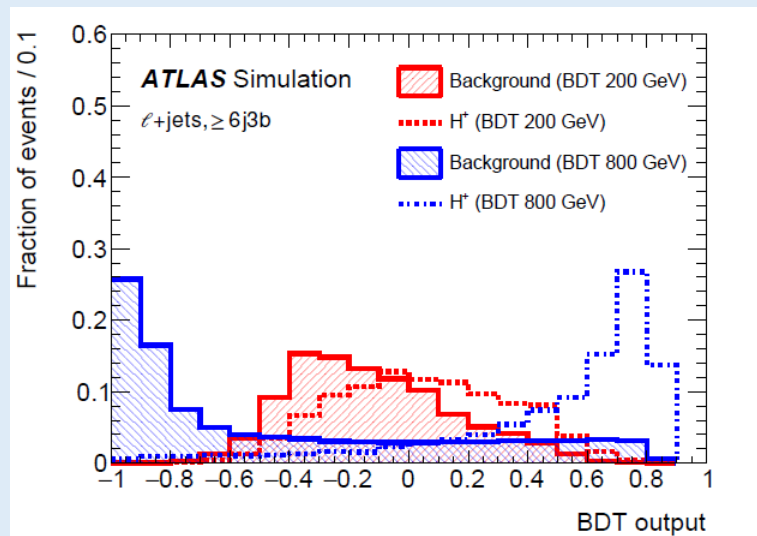


## □ NN

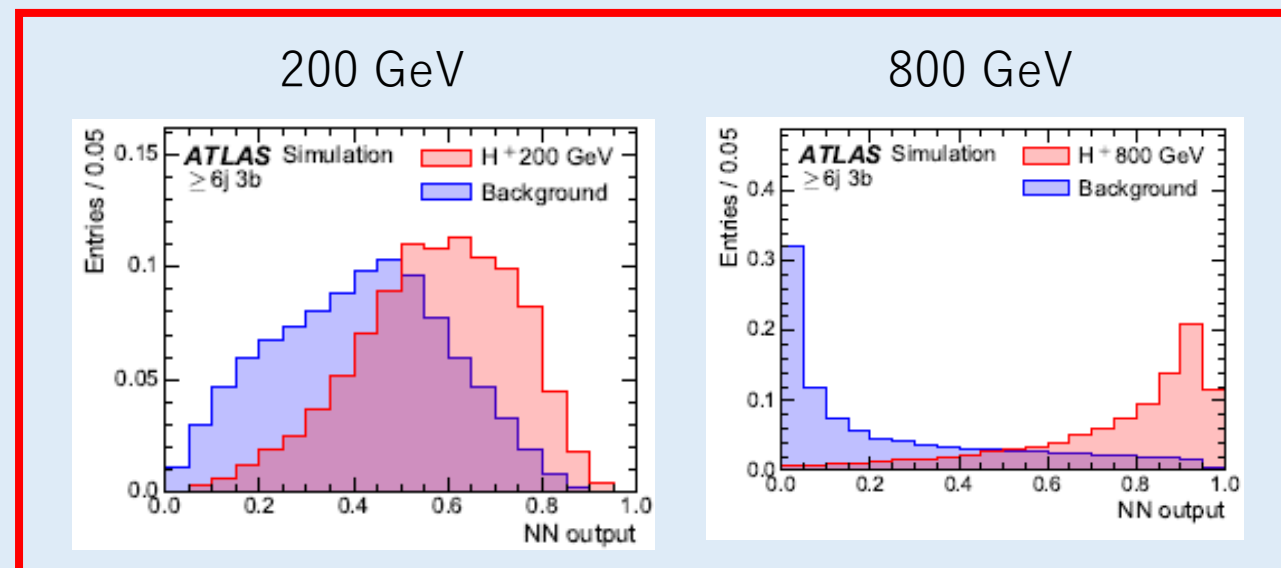
- 36 fb<sup>-1</sup>の解析では、NNではなくBDTを用いて多変量解析を行った
  - 背景事象サンプルには $t\bar{t}$ イベントのみ使用し、 $m_{H^+}$ 毎に訓練を行った
- BDTの分離能力と今回のNNの分離能力を比べると、**低質量領域において向上が見られた**
  - 高質量領域はそもそも分離能力が良いため、ほとんど変わらない

### BDT outputの分離能力

(破線：200 GeV, 実線：800 GeV)

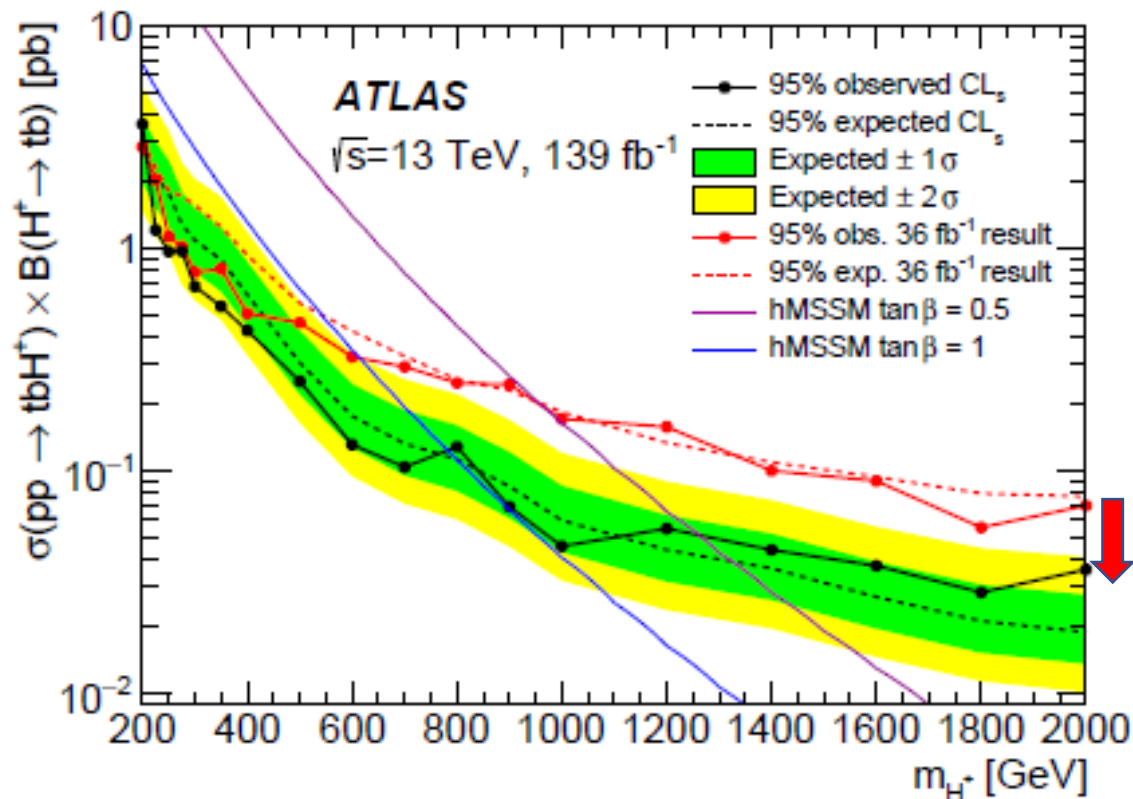


### NN outputの分離能力

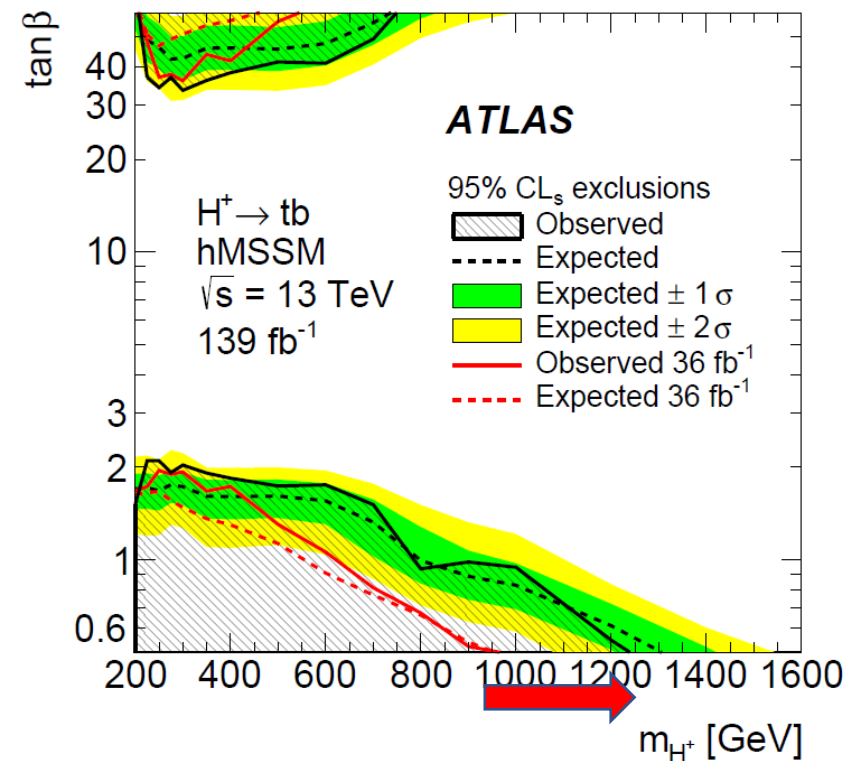


- 得られたNN分布をデータにFitし、探索感度を算出した (下図)
- 期待される標準模型の背景事象を超過するようなイベントは観測されなかった
- 36.1 fb<sup>-1</sup>の時の結果と比べて、cross sectionの上限値に対してさらに厳しい制限を与え、(m<sub>H<sup>+</sup></sub>, tanβ)平面における棄却領域も高質量方向に拡大した

cross sectionに対する上限

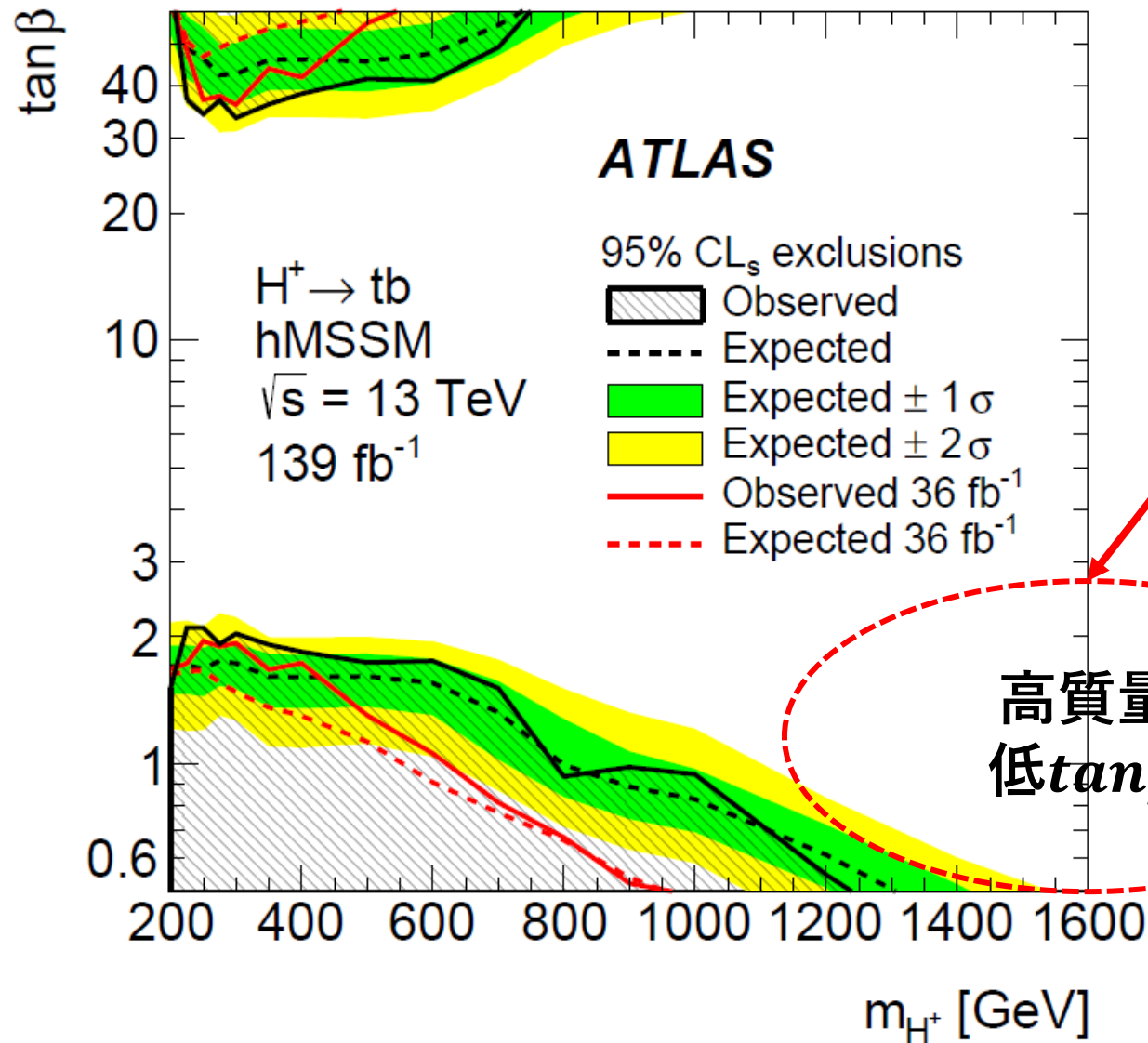


(m<sub>H<sup>+</sup></sub>, tanβ)平面における棄却領域





# 次のターゲット



高質量, 低 $\tan\beta$ 領域の更なる感度向上を目指す



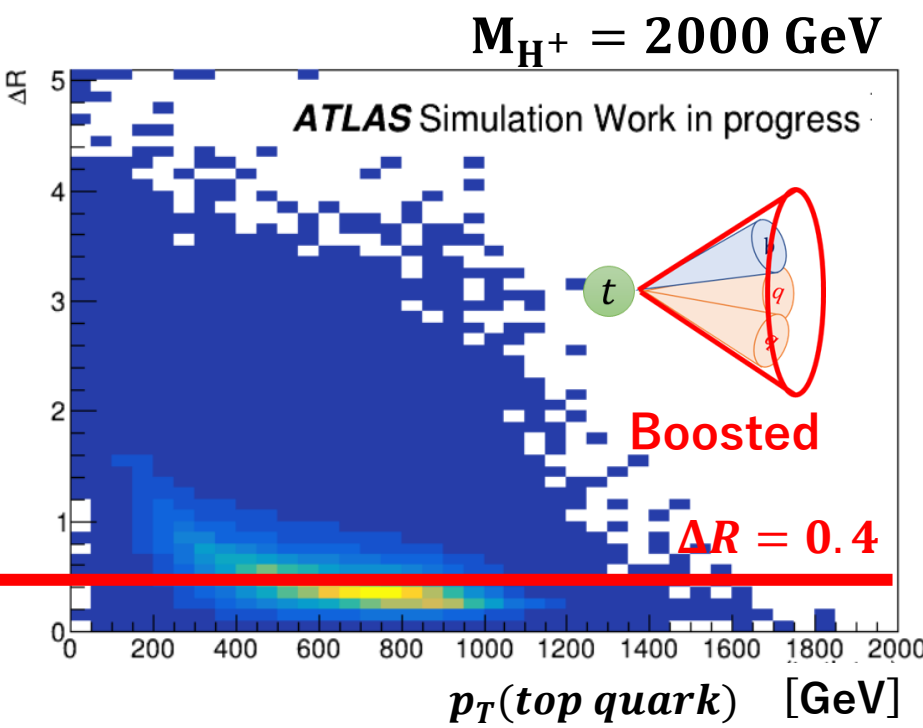
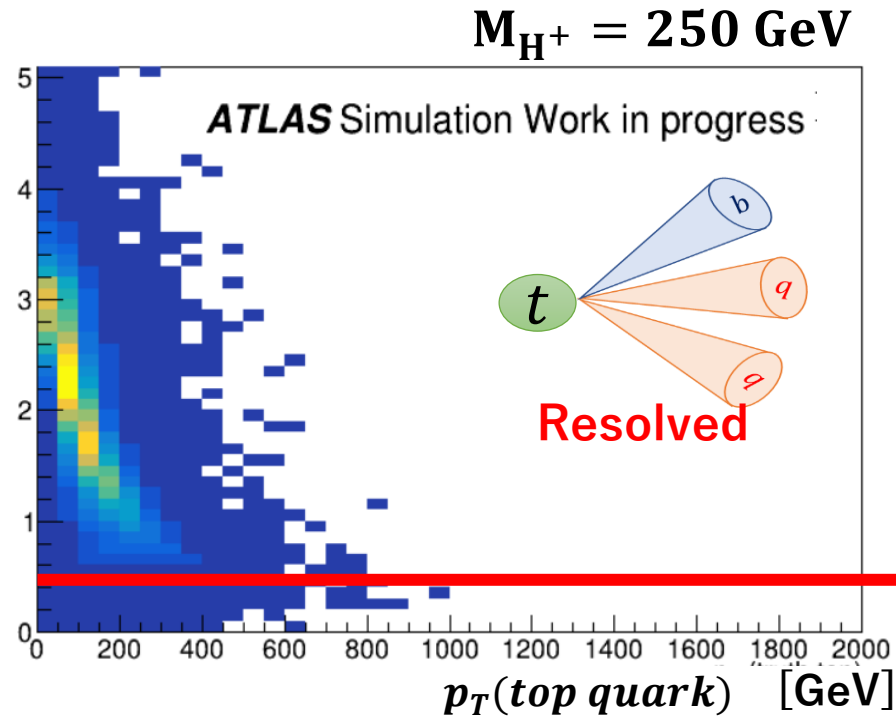
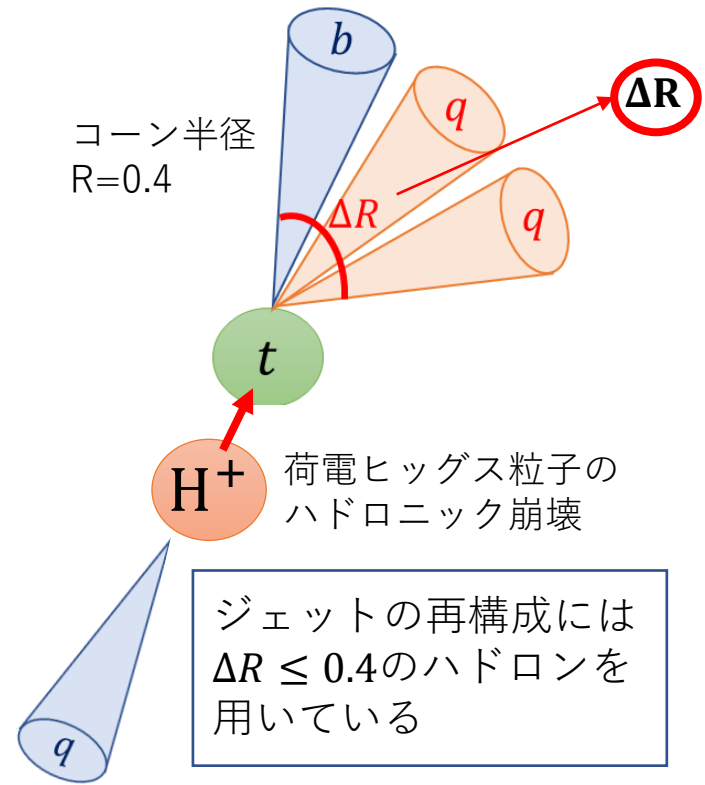
新しい解析手法の導入が  
必要 (次ページ)

# 大半径Jetを用いたBoosted解析の導入（進行中）

## Resolved解析（従来の解析）：

- ジェットの本数が5本以上（内、b-jetが3本以上）のEventを信号領域と定義した

## しかし、 $H^+$ 由来のトップクォークがハドロンに崩壊する場合、質量が大きくなるとBoostするため、個々のjetの分離が難しくなる



ブーストしたトップクォークを大半径ジェットで再構成することで、高質量領域における感度改善を図る（Boosted解析）

# まとめ

- MSSMでは、重い荷電ヒッグス粒子の存在が预言されている
- ATLAS検出器で取得したデータを用いて、 $H^+ \rightarrow tb$ 探索が進められている
  - つい先日、 $139 \text{ fb}^{-1}$  (Run2フルデータ) を用いた解析結果がarXivにアップロードされた
- $139 \text{ fb}^{-1}$ のデータ解析：
  - Semi-leptonicチャンネルに絞って探索が行われてた
  - 信号領域の細分化、ニューラルネットワークを用いた多変量解析によって感度向上を図った
  - $36 \text{ fb}^{-1}$ のデータ解析の結果と比べ、cross sectionの上限値に対してより厳しい制限を与えた
  - また、 $(m_{H^+}, \tan\beta)$ 平面での棄却領域を、更に高質量領域にまで拡大させた
- 現在は、高質量・低 $\tan\beta$ 領域における更なる感度改善を目指して、ブーストしたトップクォーク事象を用いたBoosted解析の導入も進んでいる

Back up

- Search for charged Higgs bosons in the  $H^\pm \rightarrow t b$  decay channel in pp collisions at  $\sqrt{s} = 8$  TeV using the ATLAS detector (20.3 fb<sup>-1</sup>)
  - Link: [arXiv:1512.03704v2 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1512.03704v2) 24 Mar 2016
  
- Search for charged Higgs bosons decaying into top and bottom quarks at  $\sqrt{s} = 13$  TeV with the ATLAS detector (36.1 fb<sup>-1</sup>)
  - Link: [arXiv:1808.03599v2 \[hep-ex\]](https://arxiv.org/abs/1808.03599v2) 26 Nov 2018
  
- Search for a charged Higgs boson decaying into a top and a bottom quarks at  $\sqrt{s}=13$  TeV with ATLAS detector (139 fb<sup>-1</sup>)
  - Link: [arXiv:2102.10076](https://arxiv.org/abs/2102.10076)

# Event yields for $m_{H^+} = 800$ GeV hypothesis

$m_{H^+} = 800$ GeV hypothesis				
	5j, 3b	5j, $\geq 4b$	$\geq 6j$ , 3b	$\geq 6j$ , $\geq 4b$
$t\bar{t}$ + light	46000 $\pm$ 4000	330 $\pm$ 120	33000 $\pm$ 4000	500 $\pm$ 200
$t\bar{t}$ + $\geq 1b$	29600 $\pm$ 3100	2920 $\pm$ 210	41000 $\pm$ 4000	8100 $\pm$ 400
$t\bar{t}$ + $\geq 1c$	14000 $\pm$ 6000	440 $\pm$ 190	17000 $\pm$ 7000	870 $\pm$ 330
$t\bar{t}$ + $W$	108 $\pm$ 15	3.3 $\pm$ 0.6	233 $\pm$ 35	16.0 $\pm$ 2.7
$t\bar{t}$ + $Z$	300 $\pm$ 40	50 $\pm$ 7	660 $\pm$ 90	171 $\pm$ 23
Single-top $Wt$ -channel	2000 $\pm$ 500	56 $\pm$ 33	1400 $\pm$ 500	100 $\pm$ 60
Single-top $t$ -channel	740 $\pm$ 300	53 $\pm$ 21	600 $\pm$ 500	70 $\pm$ 50
Other top-quark sources	130 $\pm$ 16	17.7 $\pm$ 3.2	190 $\pm$ 70	61 $\pm$ 24
$VV$ & $V$ + jets	1900 $\pm$ 700	73 $\pm$ 25	1700 $\pm$ 600	130 $\pm$ 50
$t\bar{t}H$	520 $\pm$ 60	125 $\pm$ 19	1130 $\pm$ 120	420 $\pm$ 60
$H^+$	30 $\pm$ 80	4 $\pm$ 10	70 $\pm$ 180	20 $\pm$ 50
Total	94700 $\pm$ 2800	4070 $\pm$ 140	97800 $\pm$ 2800	10400 $\pm$ 400
Data	95852	4109	98929	10552

各領域の背景事象の割合    **~45.8 %**    **~2.0 %**    **~47.2 %**    **~5.0 %**

---

## NN variables

---

$p_T$  of the leading jet

$p_T$  of fifth leading jet

Scalar sum of the  $p_T$  of all jets

Second Fox–Wolfram moment calculated using all jets and leptons [97]

Invariant mass of the  $b$ -jet pair with minimum  $\Delta R$

Invariant mass of the  $b$ -jet pair with maximum  $p_T$

Largest 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  $\Delta R$

Average  $\Delta R$  between all  $b$ -jet pairs in the event

$\Delta R$  between the lepton and the pair of  $b$ -jets with smallest  $\Delta R$

Centrality calculated using all jets and leptons

Kinematic discriminant  $D$  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)

---

Uncertainty source	$\Delta\mu(H_{200}^+)$ [pb]	$\Delta\mu(H_{800}^+)$ [pb]
$t\bar{t} + \geq 1b$ modelling	1.01	0.025
Jet energy scale and resolution	0.35	0.009
$t\bar{t} + \geq 1c$ modelling	0.32	0.006
Jet flavour tagging	0.20	0.025
Reweighting	0.22	0.007
$t\bar{t} +$ light modelling	0.33	0.009
Other background modelling	0.19	0.011
MC statistics	0.11	0.008
JVT, pile-up modelling	<0.01	0.001
Luminosity	<0.01	0.002
Lepton ID, isolation, trigger, $E_T^{\text{miss}}$	<0.01	<0.001
$H^+$ modelling	0.05	0.002
Total systematic uncertainty	1.35	0.049
$t\bar{t} + \geq 1b$ normalisation	0.23	0.007
$t\bar{t} + \geq 1c$ normalisation	0.045	0.015
Total statistical uncertainty	0.43	0.025
Total uncertainty	1.42	0.055