

ATLAS実験

(ヒッグス粒子の物理の最新結果から)

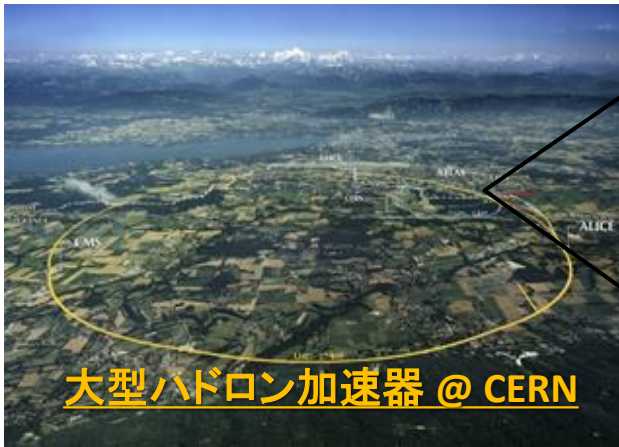


2020/6/15 宇宙史研究センター成果報告 & 交流会

廣瀬茂輝

(素粒子実験研究室)

■ LHC-ATLAS実験



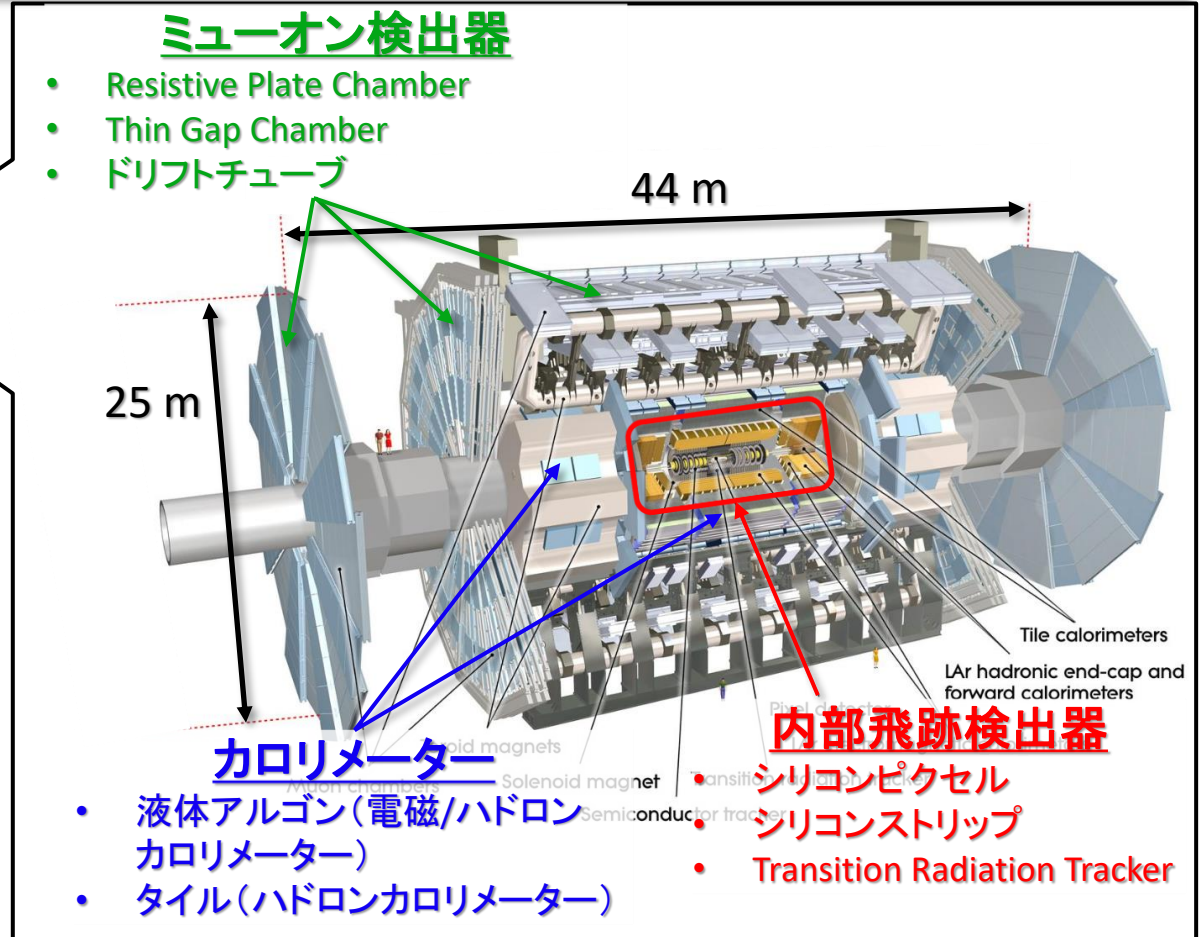
大型ハドロン加速器 @ CERN

- 周長27 km
- $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ でのpp衝突
(設計は14 TeV)

• ATLAS検出器

- 飛跡検出器、カロリメーター、ミュオン検出器から構成される
- **重い粒子の崩壊**から出る高運動量粒子を捉える

未知の素粒子やトップクォーク、**ヒッグス粒子**など



■ ヒッグス粒子の性質を決める

- ヒッグス粒子は素粒子質量起源に深くかかわる
 - ヒッグス機構によってウィークボソン(W、Z)が質量を獲得
 - 湯川相互作用を通じてクォークと荷電レプトンに質量が付与される
 - 「2012年に発見されたボソン」をプローブに、これらの機構を検証する！
- ヒッグス場の相互作用

$$L_{SM} = \dots$$

$$+(D_\mu \Phi)^\dagger (D^\mu \Phi)$$

ヒッグス粒子と弱ボソンとの相互作用

$$-\mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda |\Phi^\dagger \Phi|^2$$

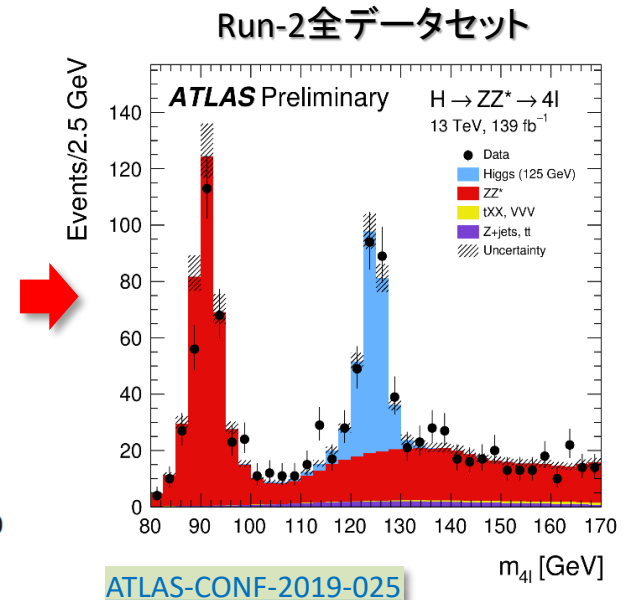
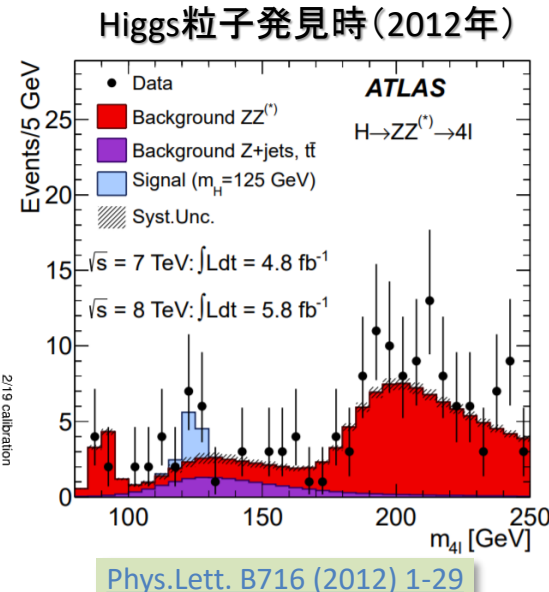
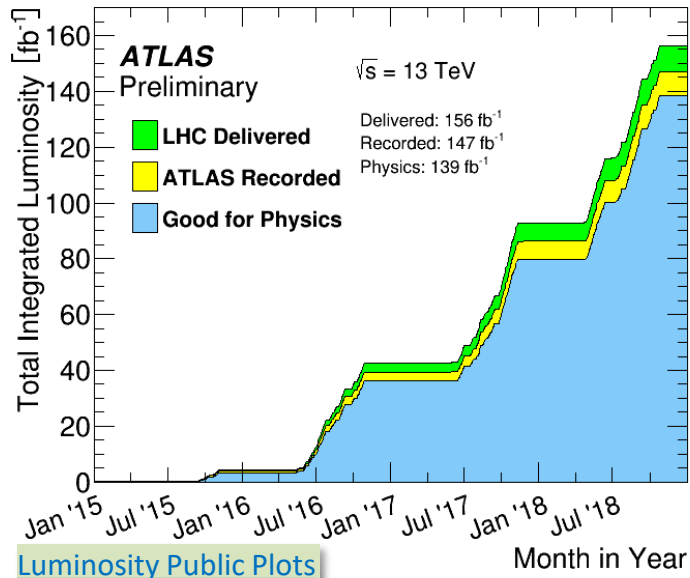
ヒッグス粒子の質量・自己結合

$$-\bar{\psi}_L Y \Phi \psi_R - h.c.$$

ヒッグス粒子とクォーク、
レプトンとの湯川相互作用

生成断面積などの測定量からそれぞれの項の係数を決定していく

LHC・ATLASのRun 2運転

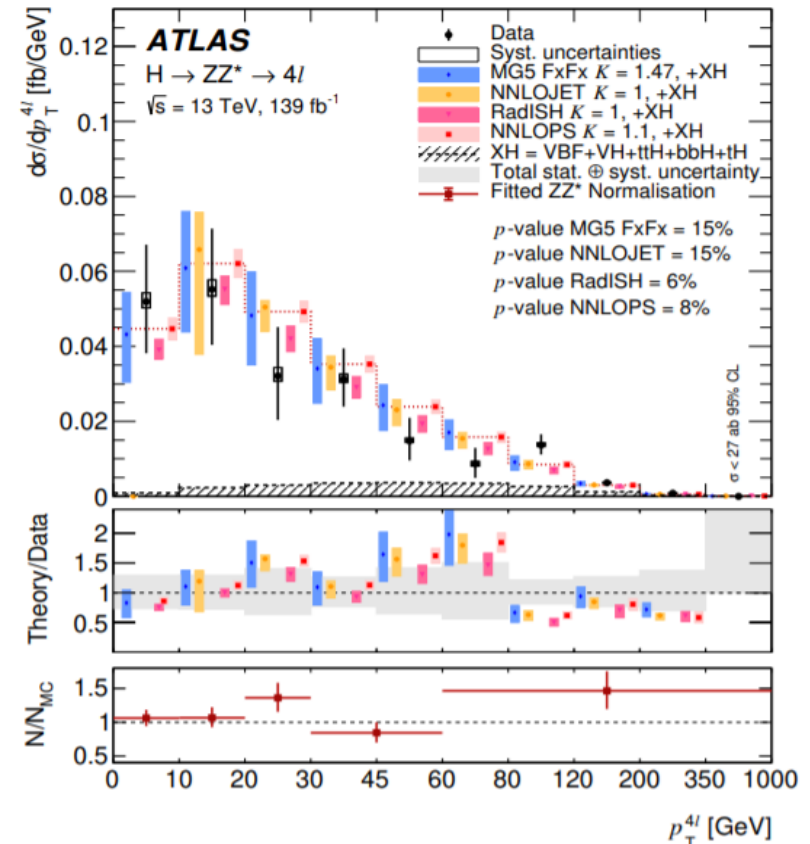
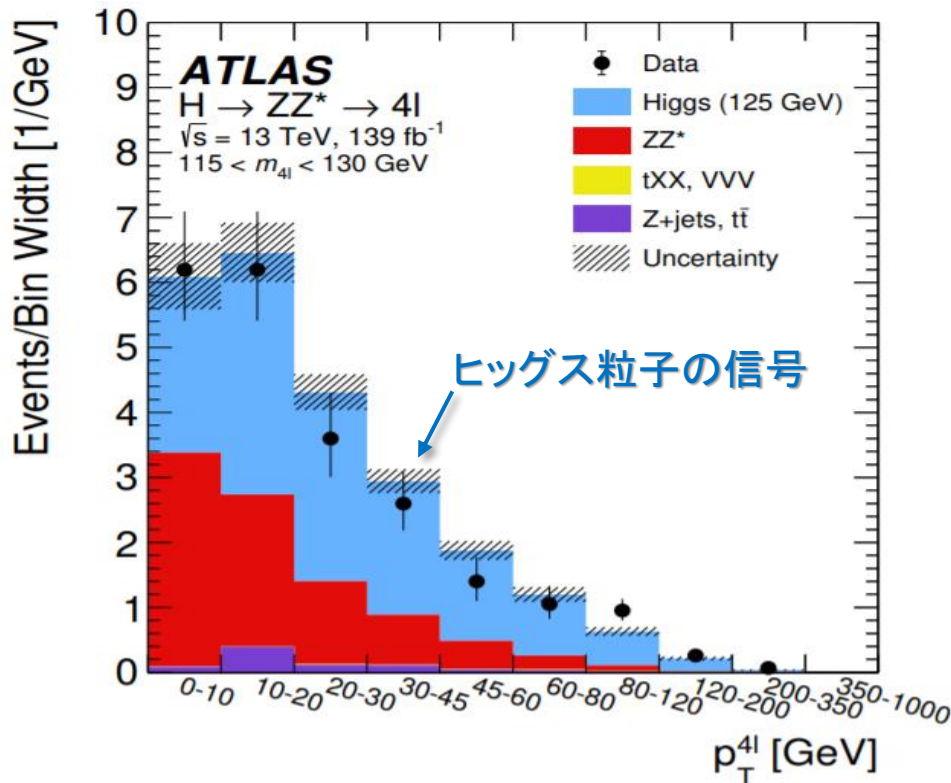


- Run 2運転 @ 13 TeVが2018年に終了
 - データ収集効率89%を記録 → 安定したデータ収集を実現した
 - 大量のデータによりヒッグス物理が大きく進展
 - ヒッグス粒子の数: 5×10^5 (Run 1) から 8×10^6 個 (Run 2) に
 → Run 1のときより複雑で精密な測定が可能に
- ヒッグス粒子の発見から、その性質を理解する時代へ

■ $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell (\ell = e, \mu)$

arXiv:2004.03969 (submitted to EPJC)

- きれいに再構成できる崩壊モード
 - 崩壊分岐比は小さい: $\text{BR}(H \rightarrow ZZ^*) \times [\text{BR}(Z \rightarrow \ell\ell)]^2 = 1.2 \times 10^{-4}$
- 微分断面積を測定可能
 - 未知相互作用があると高運動量 ($p_T > 100 \text{ GeV}$) に影響が出る
 - 現状では標準模型予想と無矛盾だが、精度はまだ不十分



■ ヒッグス粒子質量測定

ATLAS-CONF-2020-005

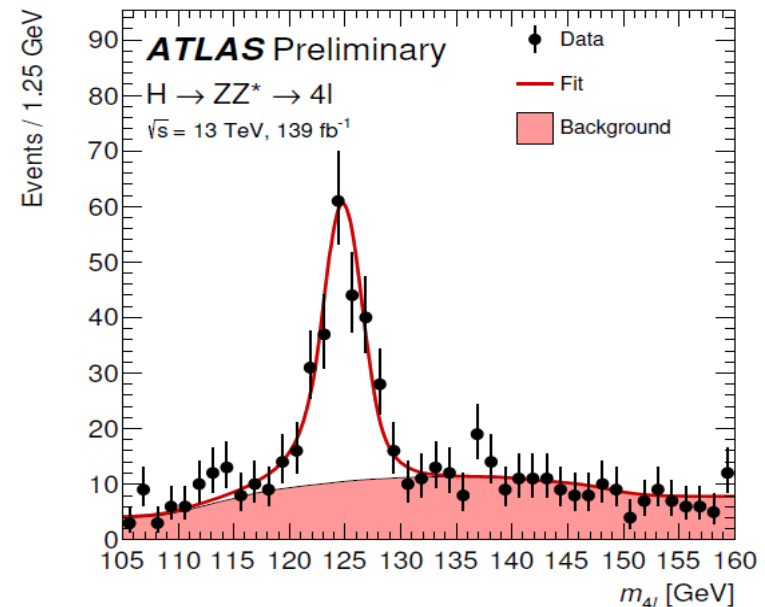
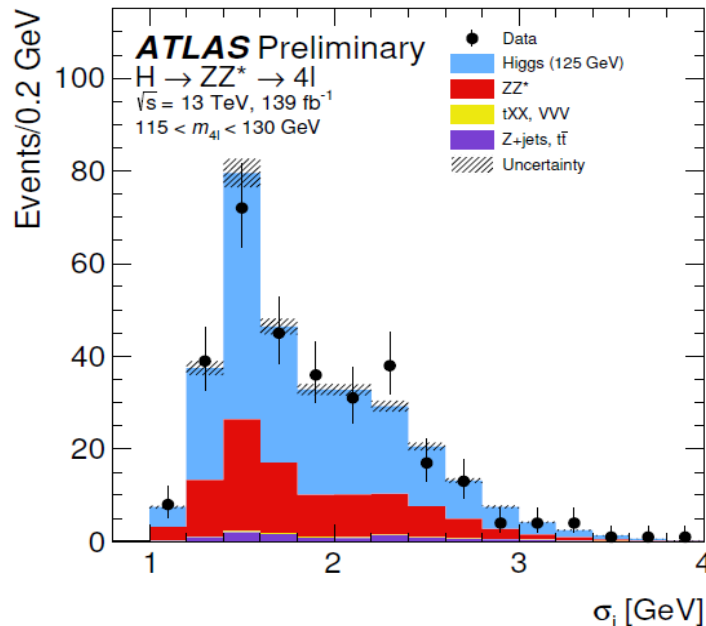
- $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ による質量測定

真空期待値 $v = 246$ GeV:

ミュオン粒子寿命から精度よく与えられる

$$m_H = \sqrt{2\lambda}v$$

- λ (ヒッグスポテンシャルの形を決めるパラメーター)が決まる
- 精度良く測定するための工夫
 - Z質量の制約をかけて、レプトン対運動量の精度を向上
 - 回帰型ニューラルネットワークによる質量分解能見積もり



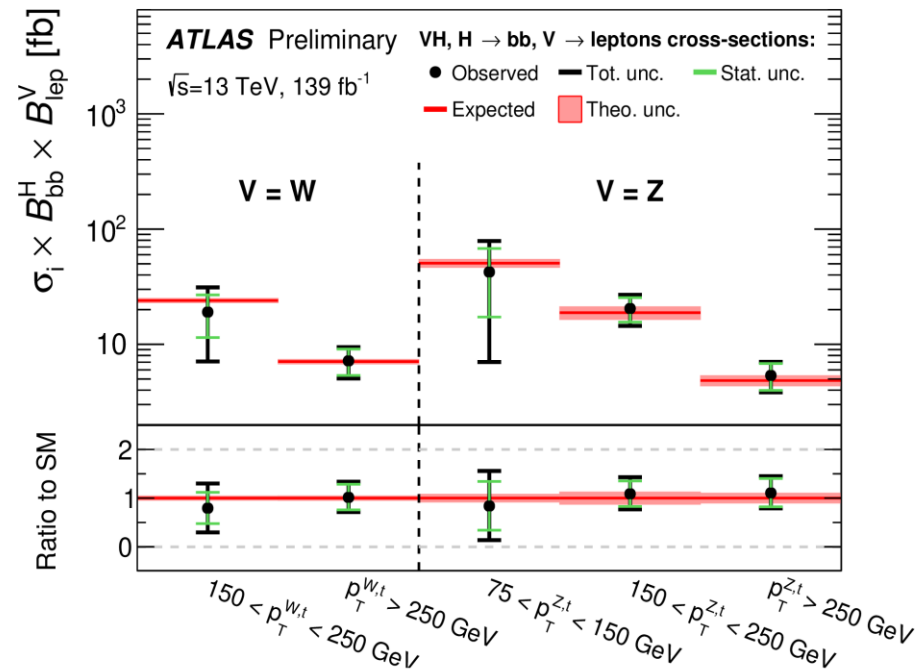
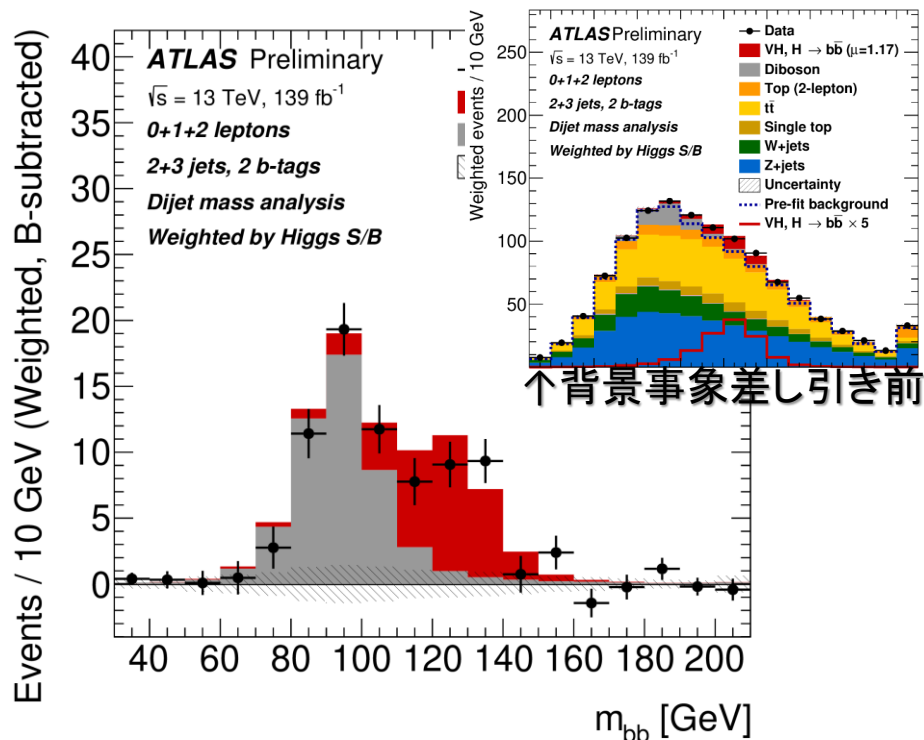
$$m_H = 124.92 \pm 0.19(\text{stat})_{-0.06}^{+0.09}(\text{syst}) \text{ GeV}$$

(現在の世界平均: 125.10 ± 0.14 GeV)

■ $H \rightarrow bb$

ATLAS-CONF-2020-006

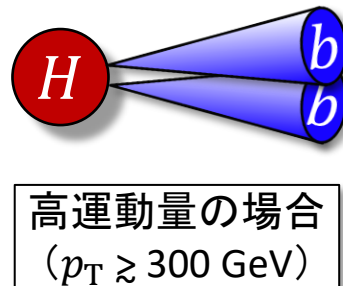
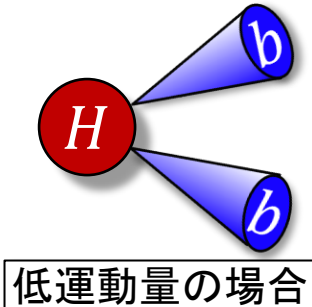
- 崩壊分岐比58% → ヒッグス崩壊の中で最大
 - ただし、QCD由来の背景事象に強く影響される
 - ウィークボソンを伴う”レア”な生成過程のみを利用する
- 2018年に 5σ の有意度で観測 → H - b 結合の確立
 - データ量1.75倍で微分断面積測定



■ $H \rightarrow bb$: 高運動量を狙った解析

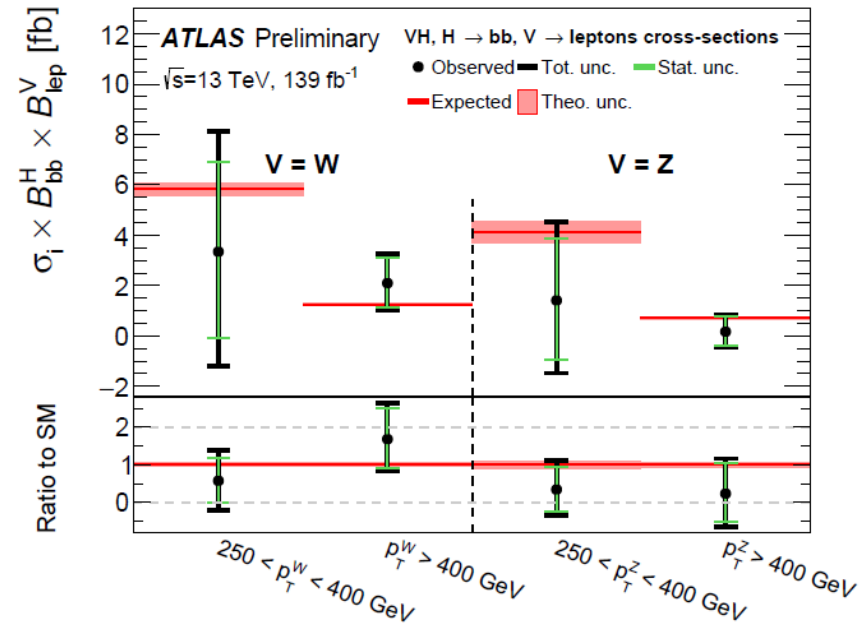
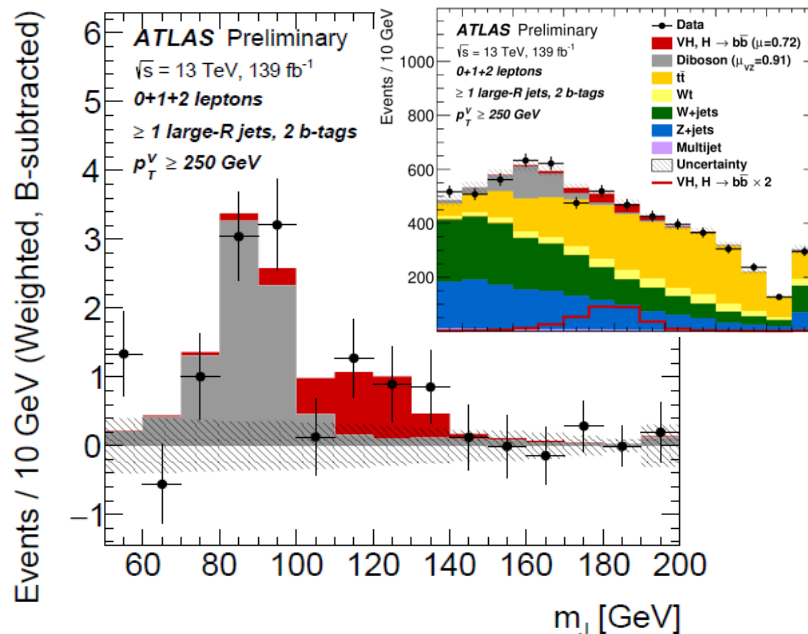
ATLAS-CONF-2020-007

- ヒッグス粒子が高運動量になると、再構成効率が激減する



} これを1つの巨大なクォークジェットとみなして再構成

- 新しい手法でも、約 2σ の有意度で信号を観測
 - $p_T > 250$ GeVを2領域に分割して断面積を測定

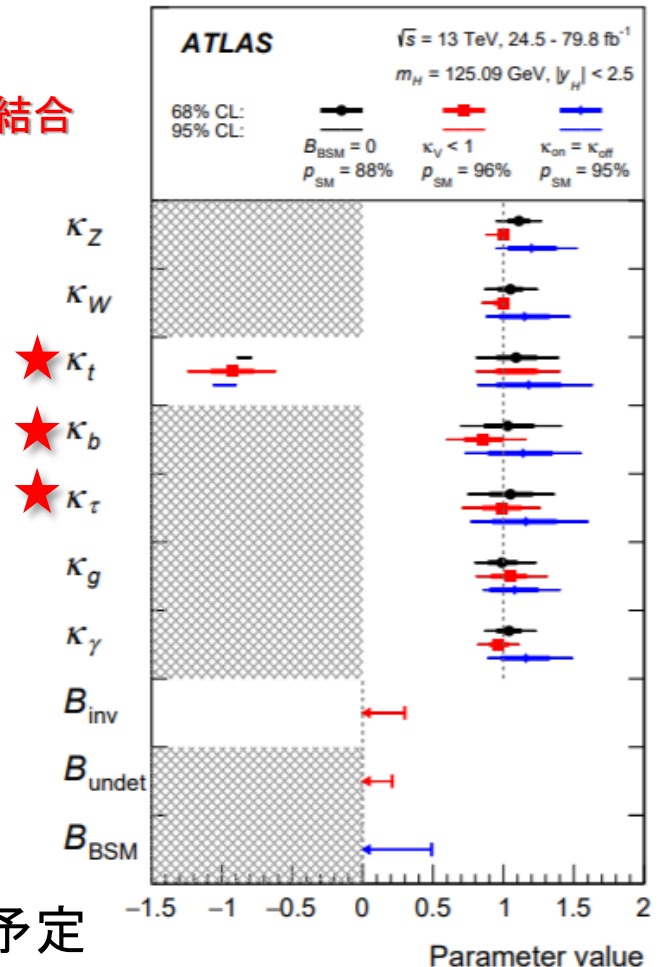
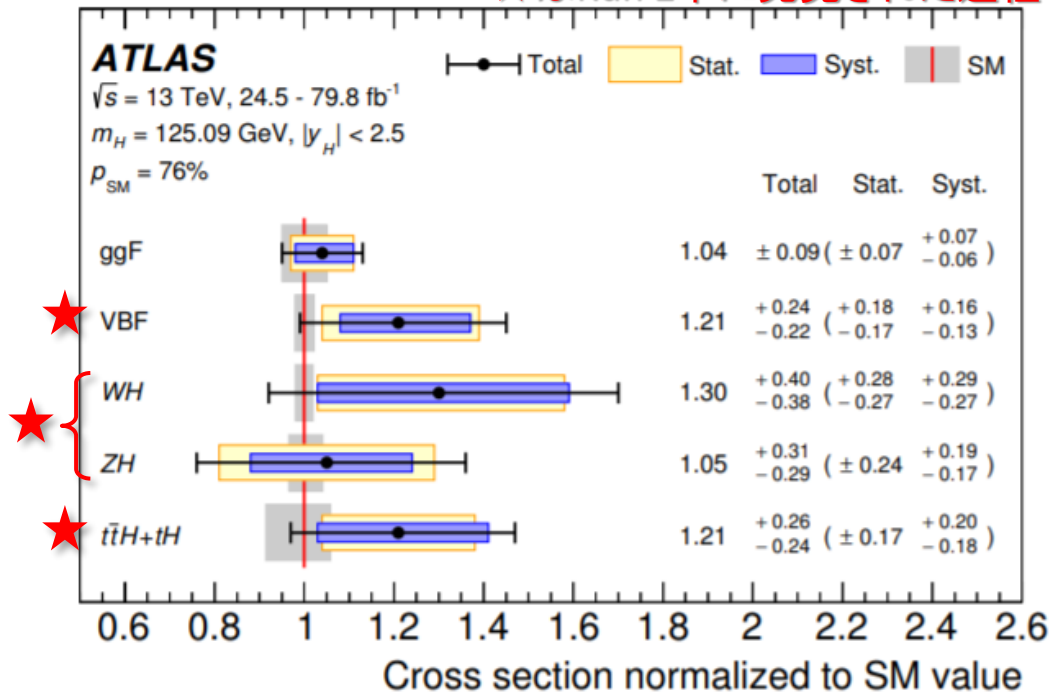


■ ヒッグス粒子統合解析

Phys. Rev. D 101, 012002 (2020)

- すべてのヒッグス粒子測定結果を統計解析
- Run 2運転の間に、複数の生成・崩壊過程の発見に至った
 - ただし、新物理の効果は $O(1\%)$ の寄与である可能性が高いので、もっと精度を上げる必要がある

★はRun 2中に発見された過程や結合



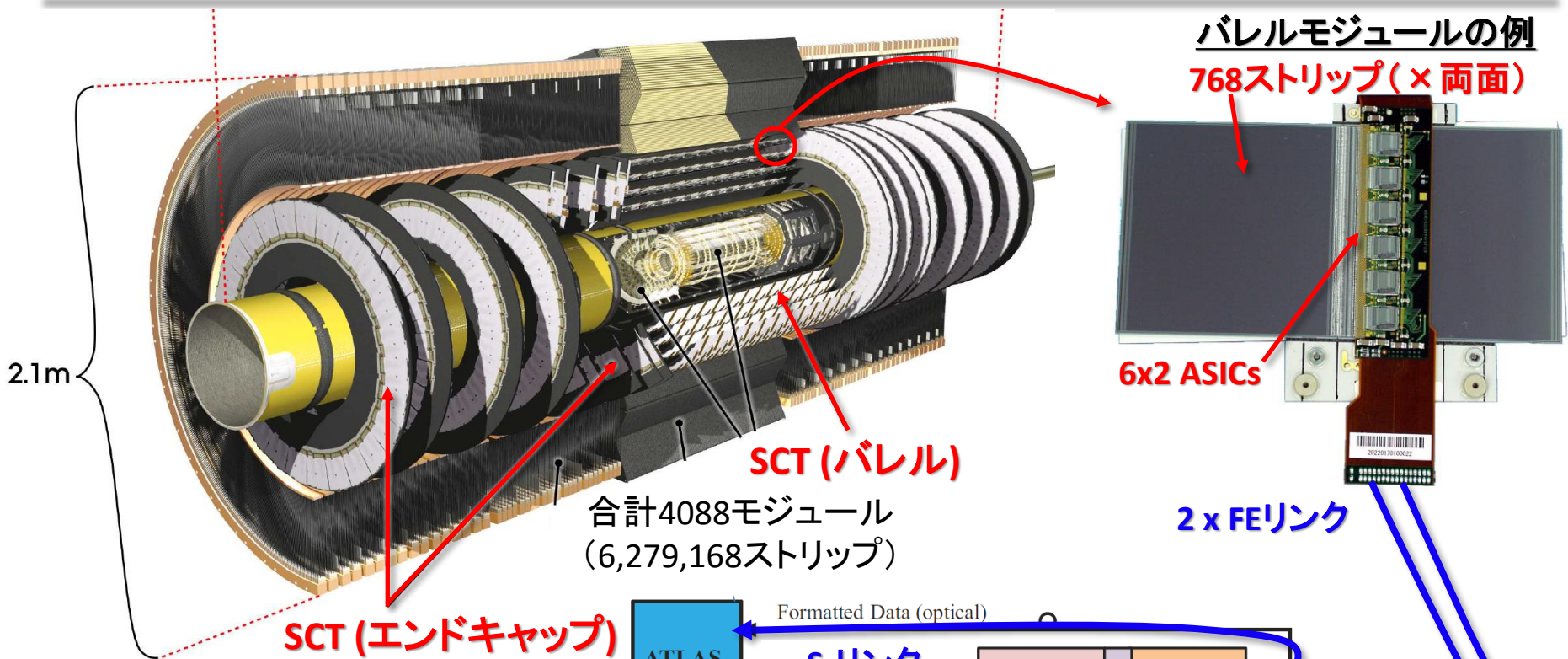
7月下旬の国際会議でRun 2全データの結果を公表予定

実験装置を動かす

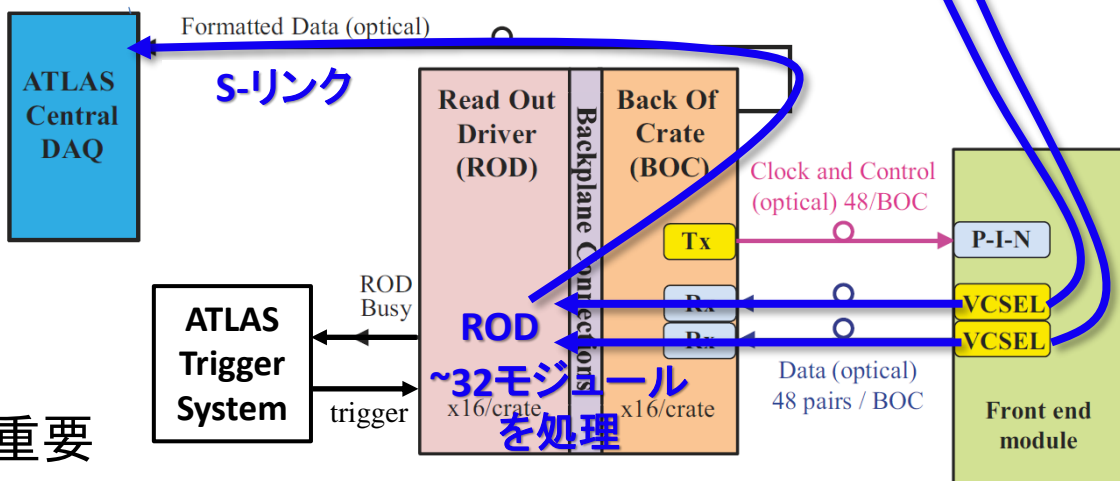


[Photo: ATLAS Blog \(23 June 2017\)](#)

SemiConductor Tracker (SCT)



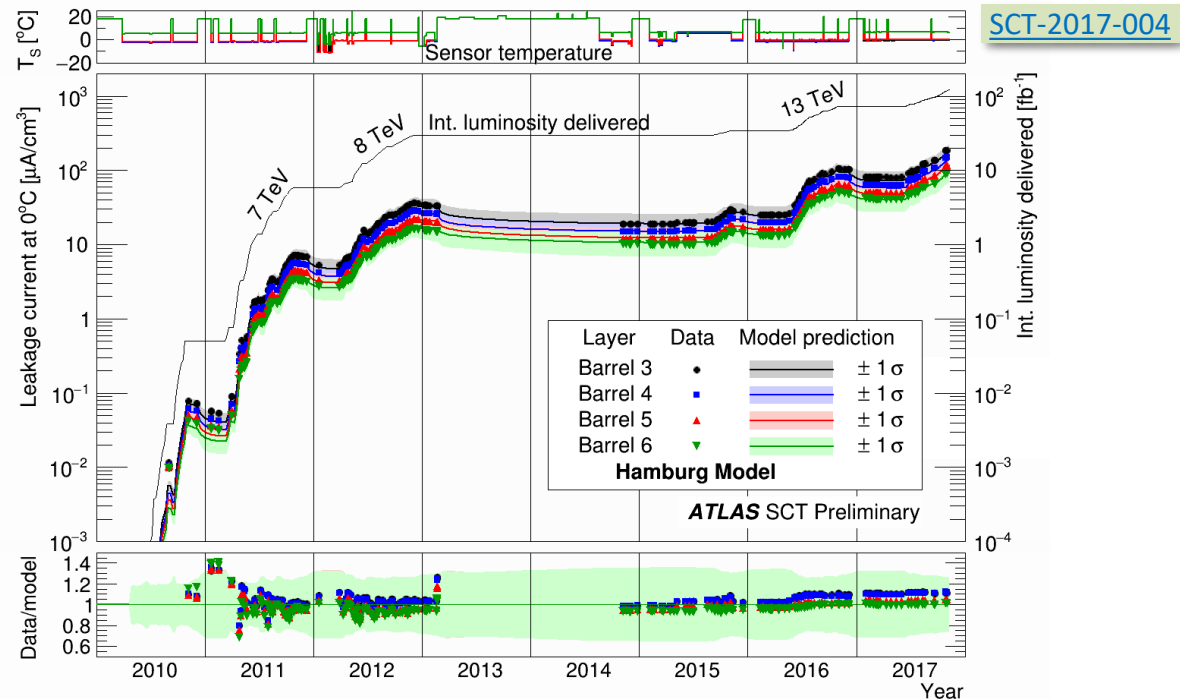
- バレル4層+エンド
キャップ9ディスク×2
- 大きな体積をカバー
 - p_T 分解能などの観点で重要な検出器



■ 現場での作業・研究

- 約10名がCERNに常駐し、Run 3に向けた準備などを行っている~~る~~
た
 - 壊れた部品の交換
 - 定期的なセンサーの基礎特性測定
 - ソフトウェア開発などで、CERN外からの参加も5～10名ほど
- 筑波をはじめ、日本グループが大活躍

■ シャットダウン期間中にやるべきこと



- システムはRun 2運転中に確立しており、大きな変更はしない
- 激しい放射線損傷が問題
 - 1 MeV中性子換算で最大 $6 \times 10^{13}/\text{cm}^2$ を受けている
 - 漏れ電流は当初に比べて10万倍に増加
- Run 3を走り切るために入念な準備が必要！
 - いまの検出器の状態を理解する → 現在のSCTの性能評価

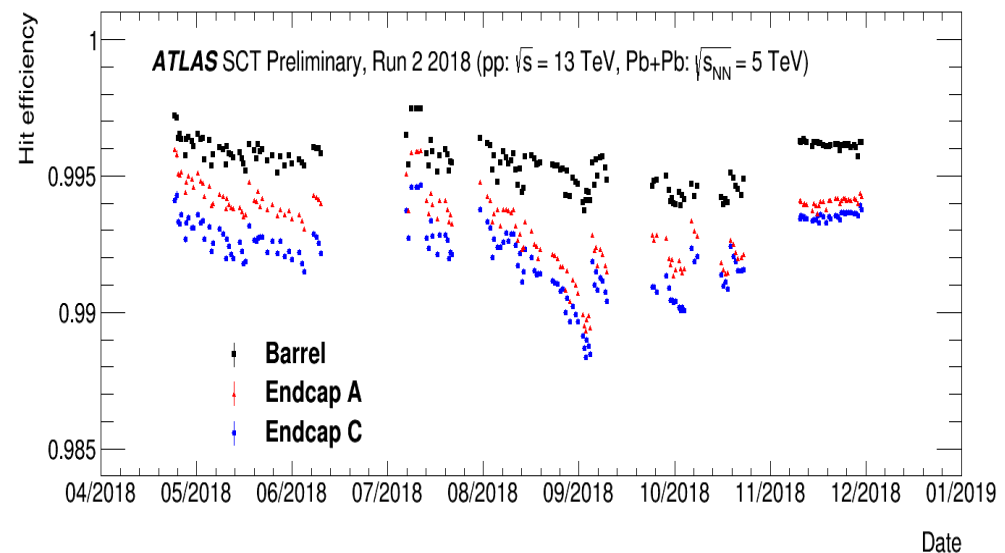
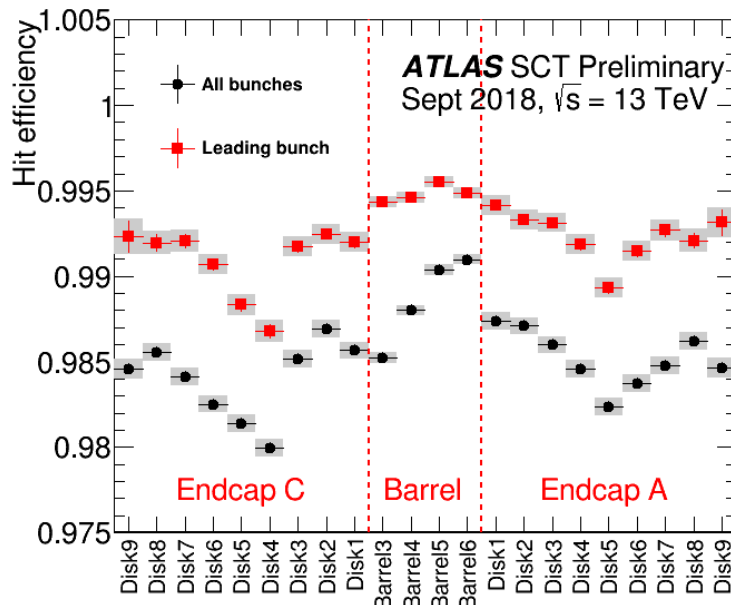
■ ヒット検出効率の測定

SCT-2019-002

- ヒット検出効率は、もっとも重要なSCTのパラメーター
 - 荷電粒子をセンサーが検出する確率

$$\varepsilon = \frac{N_{\text{hit}}}{N_{\text{hit}} + N_{\text{hole}}}$$

- 精度良い飛跡検出のためには、合計4層8枚のセンサーすべてで高確率で信号を検出する必要がある

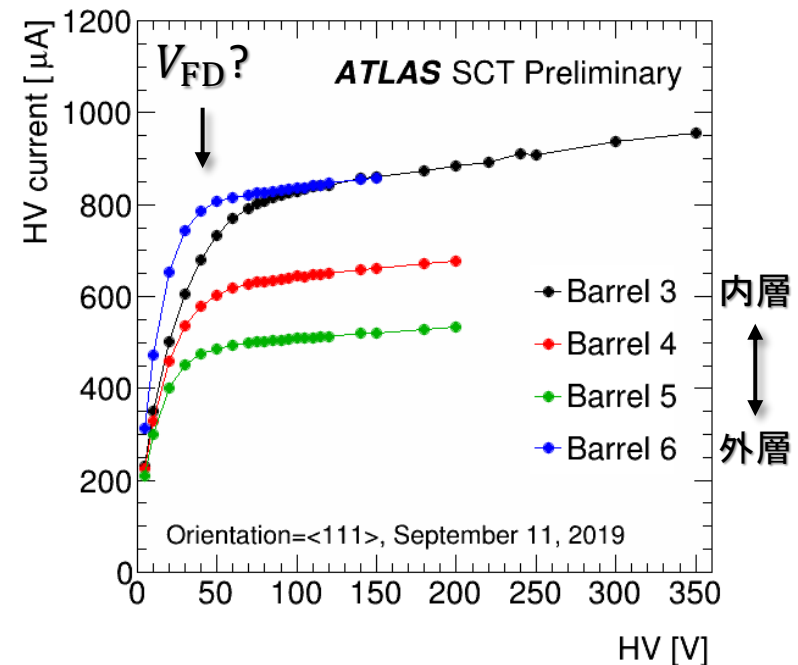
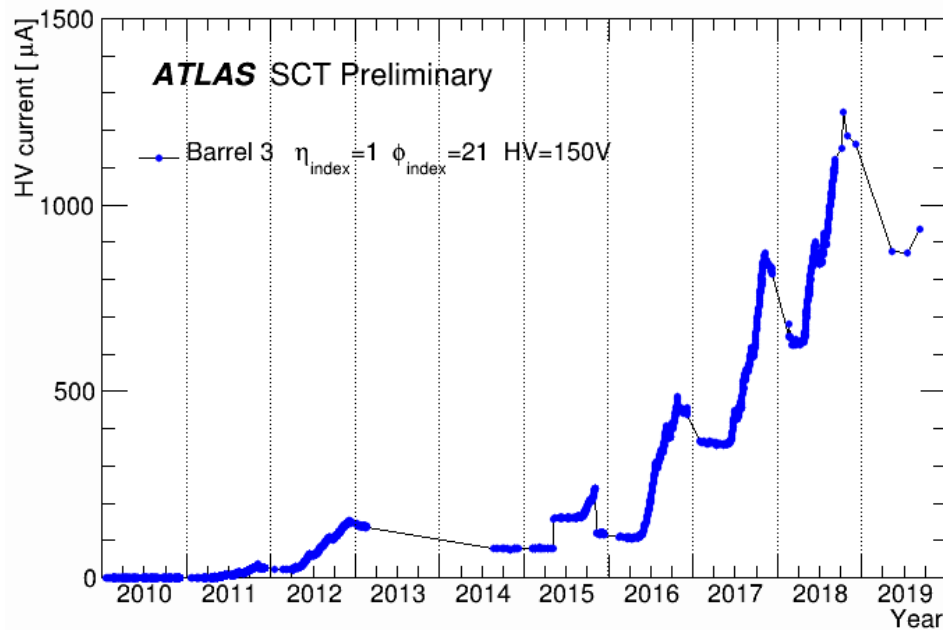


Run-2最終年(2018年)でも、概ねヒット検出効率 >99%を維持できていた

■ 漏れ電流

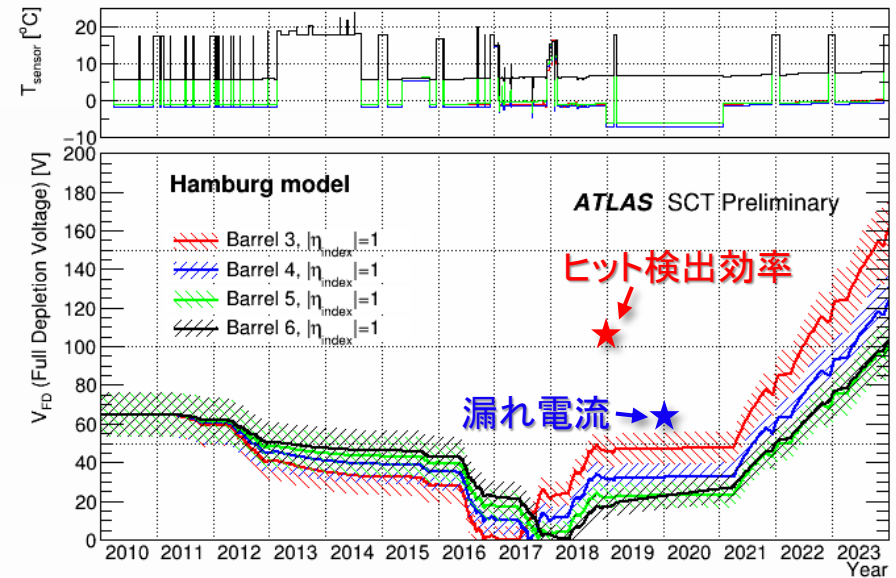
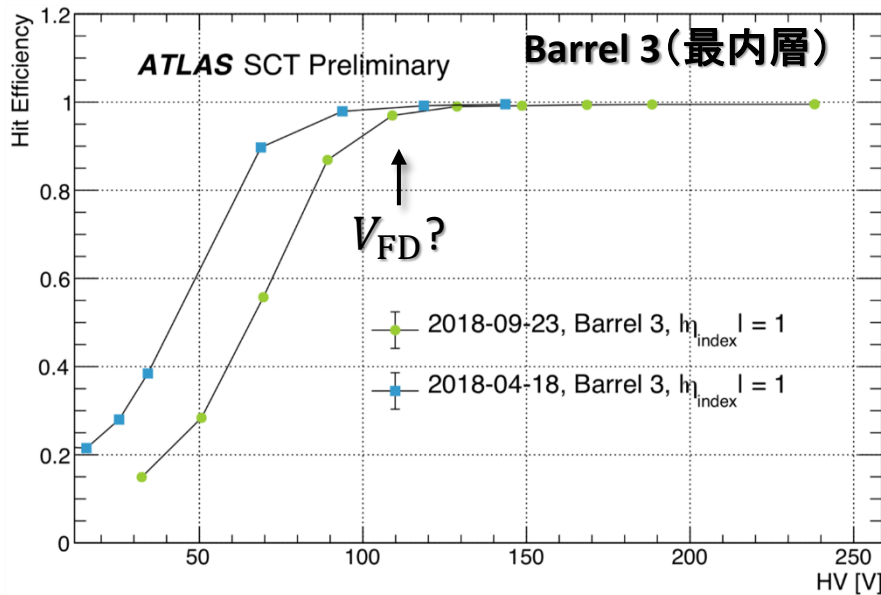
SCT-2019-002

- 2010年の実験開始当初より継続的にモニター
 - 2016-2018年には毎年300-400 μA ずつ増加
 - シミュレーションによる予想と30%以内の誤差で一致
→ SCT付近の放射線量をよく理解できている証拠
- 漏れ電流の印可電圧依存性 → 完全空乏化電圧の見積もり
 - 内層ほど V_{FD} が高い傾向がはっきり見えている



完全空乏化電圧の見積もり

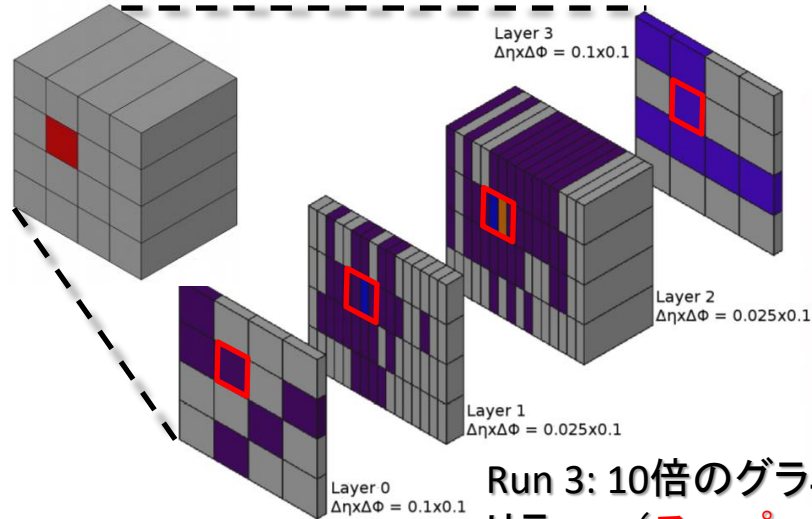
SCT-2019-001



- 様々なパラメーター(ヒット検出効率、漏れ電流、...)から V_{FD} 見積りを進行中
 - 印可電圧に対する応答を見る → 測定量の変化がフラットになったあたりが V_{FD}
- ヒット検出効率 > 99%を得るための電圧は V_{FD} 予想より高い
 - 最大印可電圧は500 Vなので、運転上は問題なさそう
 - シリコンセンサーの放射線損傷に関する研究としても興味深い

■ 他の検出器の様子

Run 2のグラニュラリティー



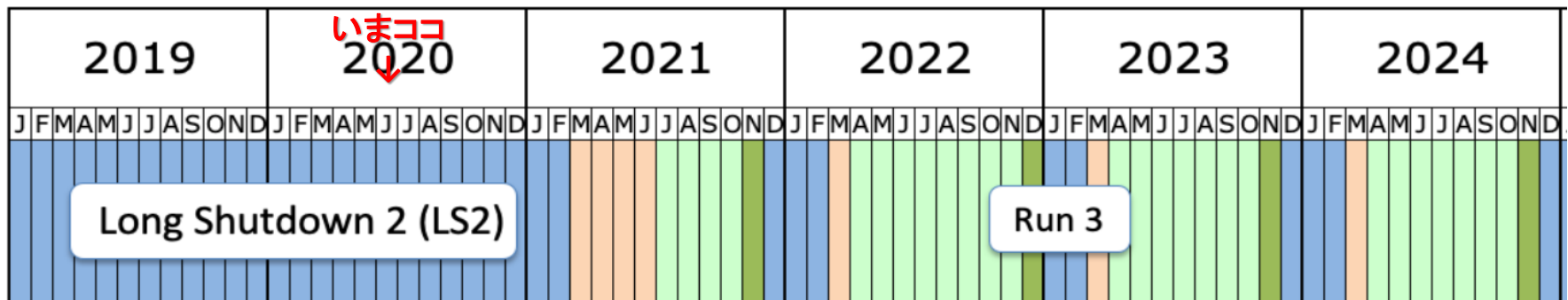
Run 3: 10倍のグラニュラリティー (スーパーセル)



- カロリメーター: 読み出し回路の一新
 - 今までの10倍のグラニュラリティーをハードウェアトリガーで使用
→ オブジェクト(ジェット、光子、...)の情報まで使うことで、より効率的にトリガーを発行する
- ミューオン検出器: NSWをインストール
 - 2層から8層に増加 = 飛跡を追えるようになる
→ 衝突点から離れて生成された荷電粒子を効率よく落とす

COVID-19の影響

- 3/17-5/16の間、CERN研究所が閉鎖された
 - 物理解析への影響は最小限
 - アップグレード作業への影響は大きい
(世界中の大学・研究所がほぼ閉鎖)
- 現在も限られた作業のみが許可されている
 - 今後少しずつ入構者数を増やし9月下旬からの完全再稼働
 - 先月のATLAS統合テストは完全リモートで行われた



最終的に200 fb⁻¹前後のデータ収集を目指す

■ まとめ

- Run 2運転(2015-18)の全データによるヒッグス粒子の解析が進行中
 - まだ一部しか結果が出ていない → 今年7月の国際会議で様々な結果が発表される予定
 - 微分断面積測定による新物理の効果の検証が今後重要になる
- Run 3運転(2021-24)に向けた準備状況
 - SCTのメンテナンスや性能評価に筑波大学が大きく貢献
 - 他の検出器アップグレードも進行中
- Run 3運転のその後...
 - ルミノシティを3倍以上に引き上げた高輝度LHCが2027年より開始
 - ヒッグス-フェルミオン結合を $O(1\%)$ で測定できる
 - シリコン検出器は総取り換え
 - 本番用検出器の製作が始まりつつある(筑波大学も大きく貢献)