

ATLAS実験からの最近の結果と Run 3運転の状況

2022/6/24 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

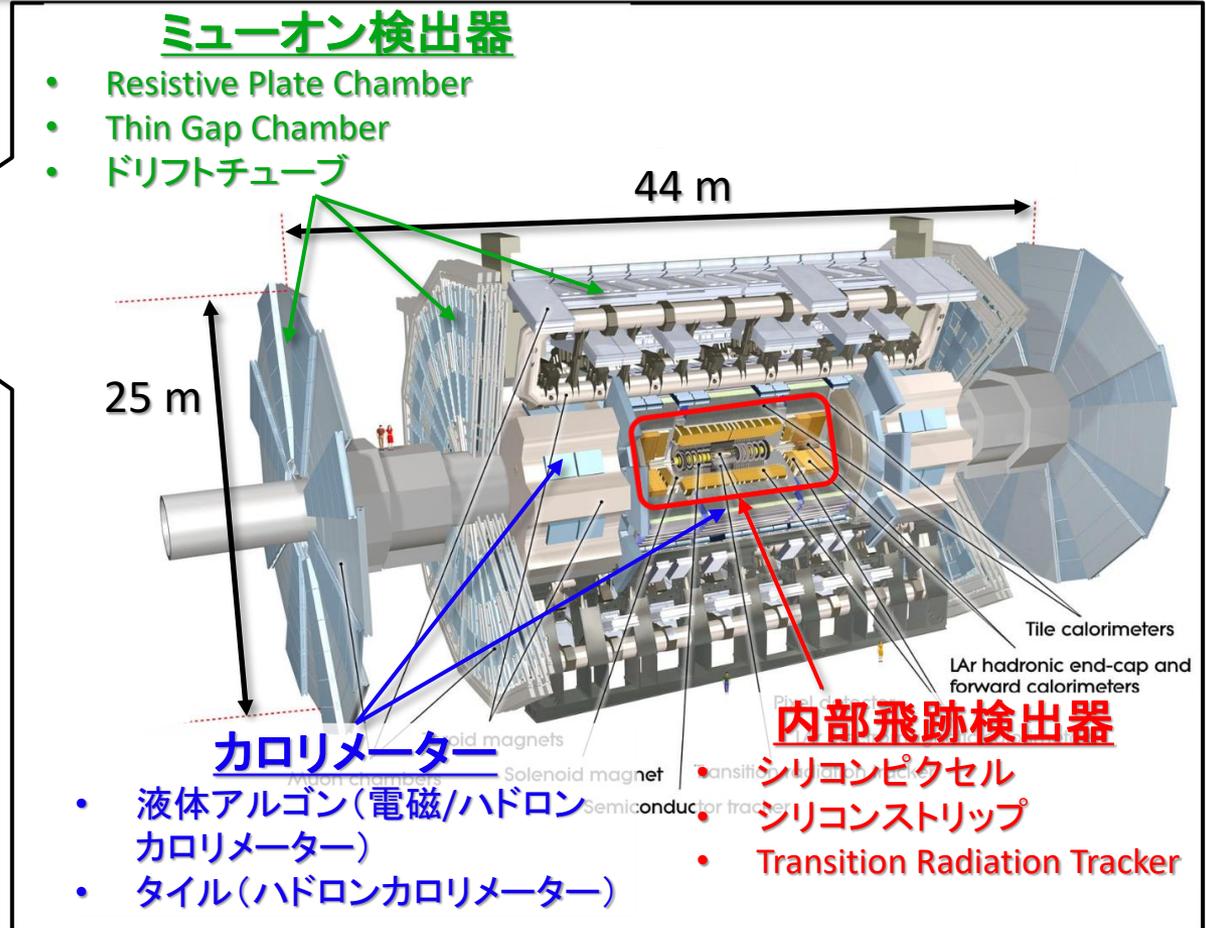


- 周長27 km
- $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ でのpp衝突 (設計は14 TeV)

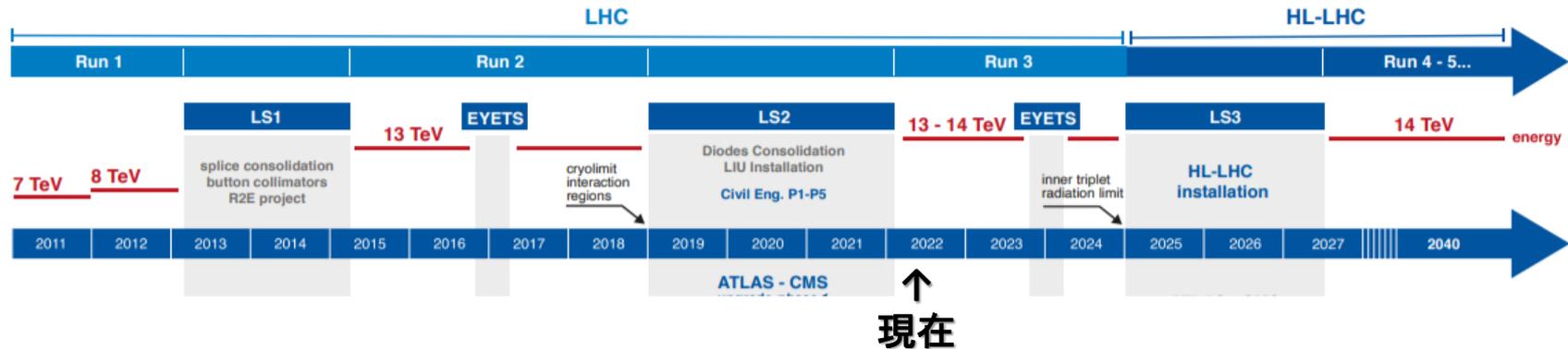
• ATLAS検出器

- 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



■ ATLAS実験の状況



ヒッグスの物理



↑
ヒッグス発見!

「精密測定」へ
(様々な生成・崩壊過程を観測)

- より稀な過程の探索
- ダイヒッグス過程の探索
- ヒッグスをプローブとした新物理探索

SUSYなどの探索



- より高質量 (= 低生成断面積) を狙う
- レアなプロセス (電弱生成など) を狙う
- 解析技術向上で検出可能なフェーズスペースを増やす (低運動量レプトン、長寿命粒子検出など)

- 実験休止期間 (LS2) が終了し、Run 3が始まりつつある

■ ヒッグス粒子の物理

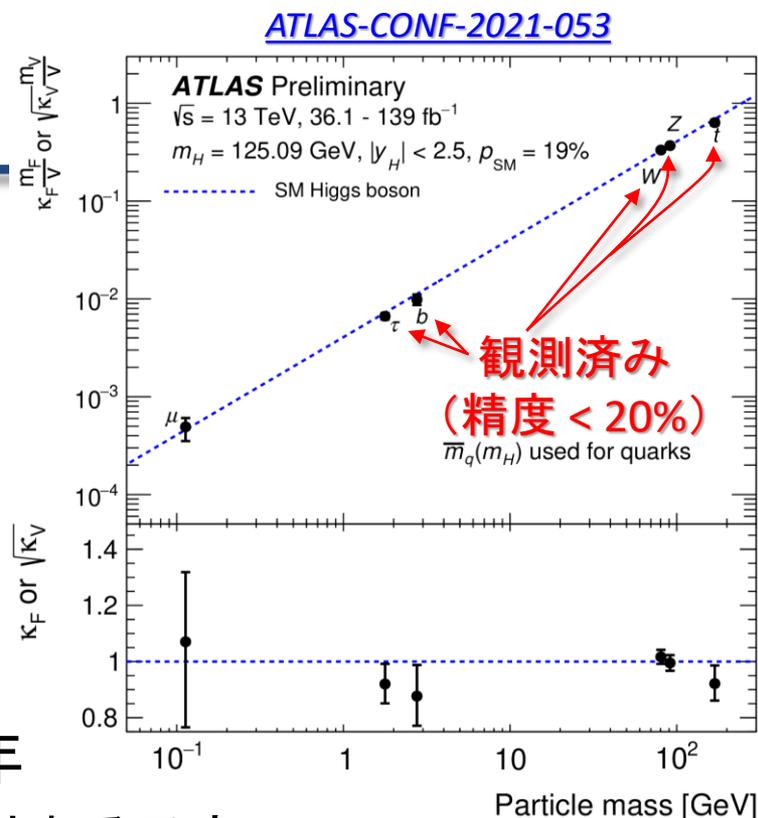


4 July 2022
CERN
Europe/Zurich timezone

<https://indico.cern.ch/event/1135177/>

There is a [live webcast](#) for this event.

- 今年ヒッグス粒子発見から10周年
 - 7/4にCERNで記念シンポジウムが開催される予定
- この10年で、ヒッグス粒子への理解は大きく進展した
 - 他の素粒子への結合の精密な理解
 - ヒッグス粒子の力学分布や、質量などの基本的物理定数の決定
 - ヒッグス対生成探索によるヒッグスポテンシャルの理解
- 「精度を高める」のもとても大事
 - 新物理により結合定数が1-10%変わるかも？ [T. Barklow et al., PRD 97, 053003 \(2018\)](#)



■ $H \rightarrow \tau\tau$ の最新結果

- Run 2期間に収集された全データによる結果を公表 [arXiv:2201.08269](https://arxiv.org/abs/2201.08269)
 - 廣瀬が解析のコアメンバーとして貢献した
- 本解析では、 $Z \rightarrow \tau\tau$ 背景事象の抑制が重要となる

- $m_Z = 91.2 \text{ GeV}$ は $m_Z = 125.3 \text{ GeV}$ と近い

- 終状態が信号と全く同じ

- 生成断面積が莫大

- $\sigma(Z) = 58 \text{ nb}$
- $\sigma(H) = 0.048 \text{ nb}$ ($\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$)

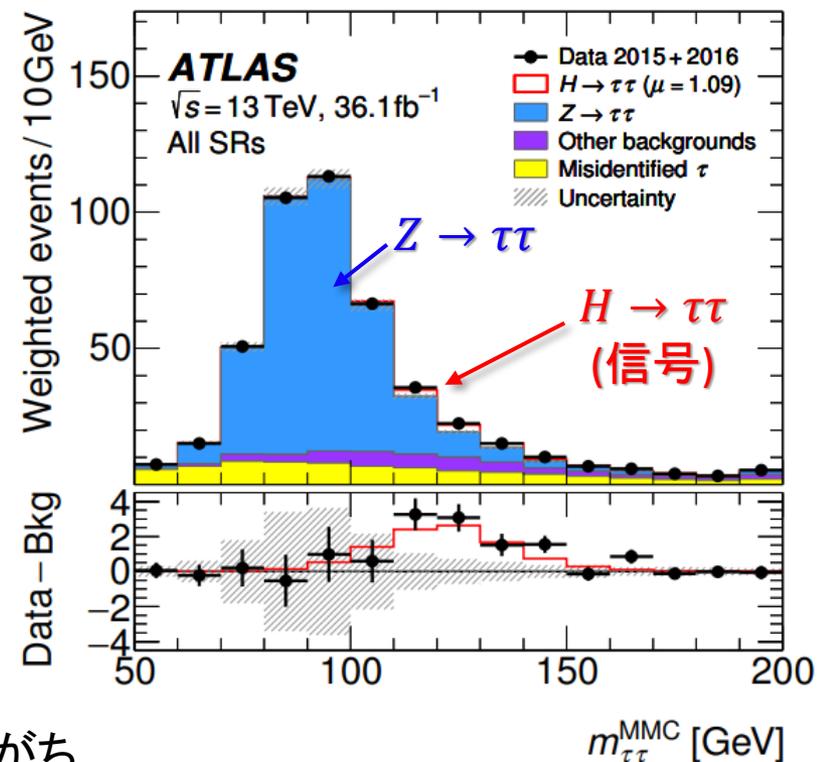


- $Z \rightarrow \tau\tau$ 抑制の工夫

- Z 事象が少ない力学的領域に集中する

- ヒッグス粒子の方が高運動量になりがち

- 機械学習による信号と背景事象の分類



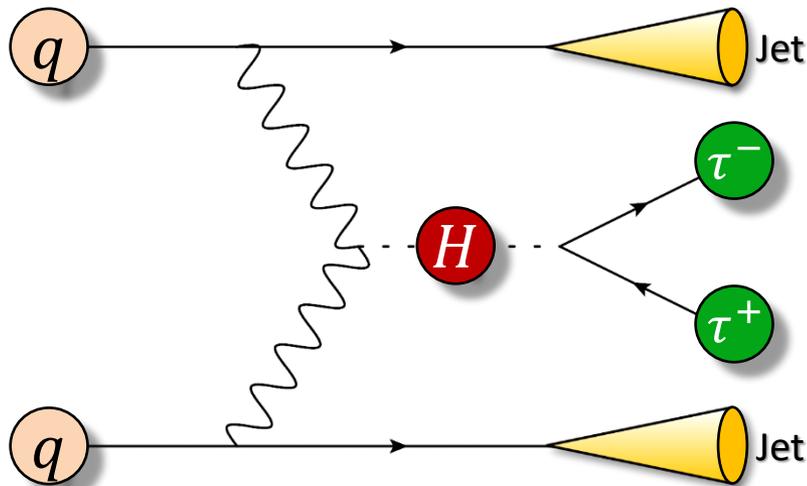
[Phys. Rev. D 99, 072001 \(2019\)](https://doi.org/10.1103/PhysRevD.99.072001)

■ 機械学習の適用

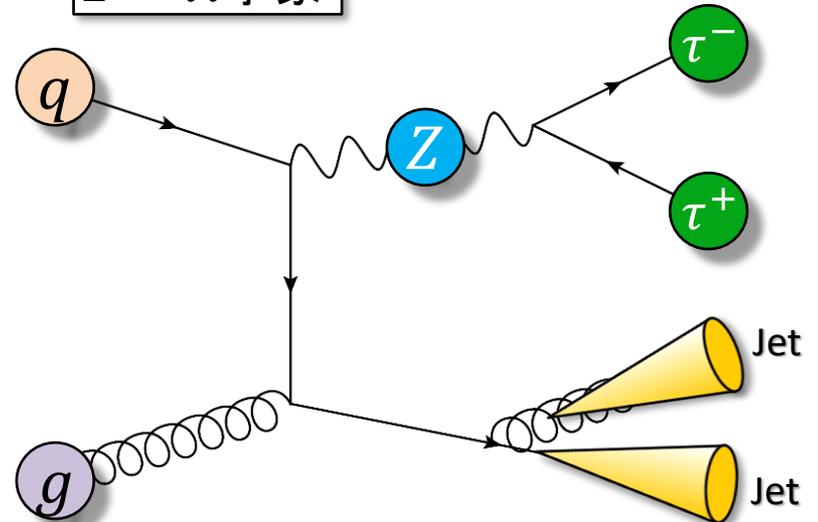
生成過程	断面積 [pb]
グルーオン融合 (H)	48.5
ベクターボソン融合 (Hjj)	3.8
ベクターボソン随伴生成 (VH)	2.3
トップクォーク随伴生成 ($t\bar{t}H$)	0.5

- LHCでのヒッグス粒子生成過程のうち、ベクターボソン融合過程をターゲットに機械学習を適用
 - グルーオン融合に対して断面積は10%以下だが、2つのジェットの特徴を引き出せば背景事象を抑制できる
- Boosted Decision Treeにより信号 vs 背景事象を分類
 - 2個のジェットの4元運動量や互いの相関を入力変数として選んだ

信号(ベクターボソン融合過程)

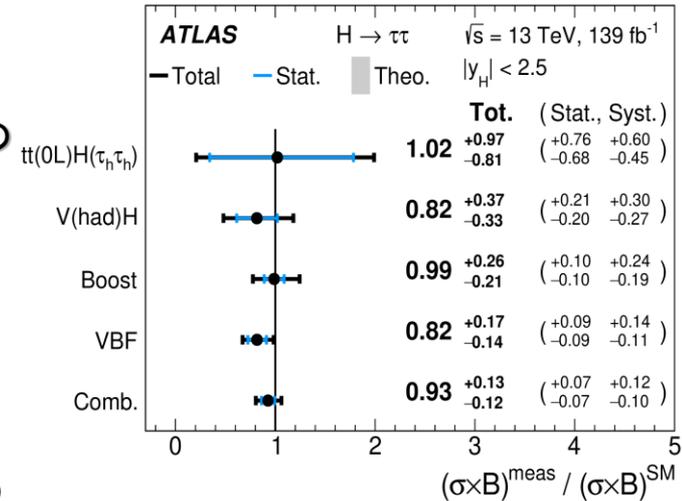
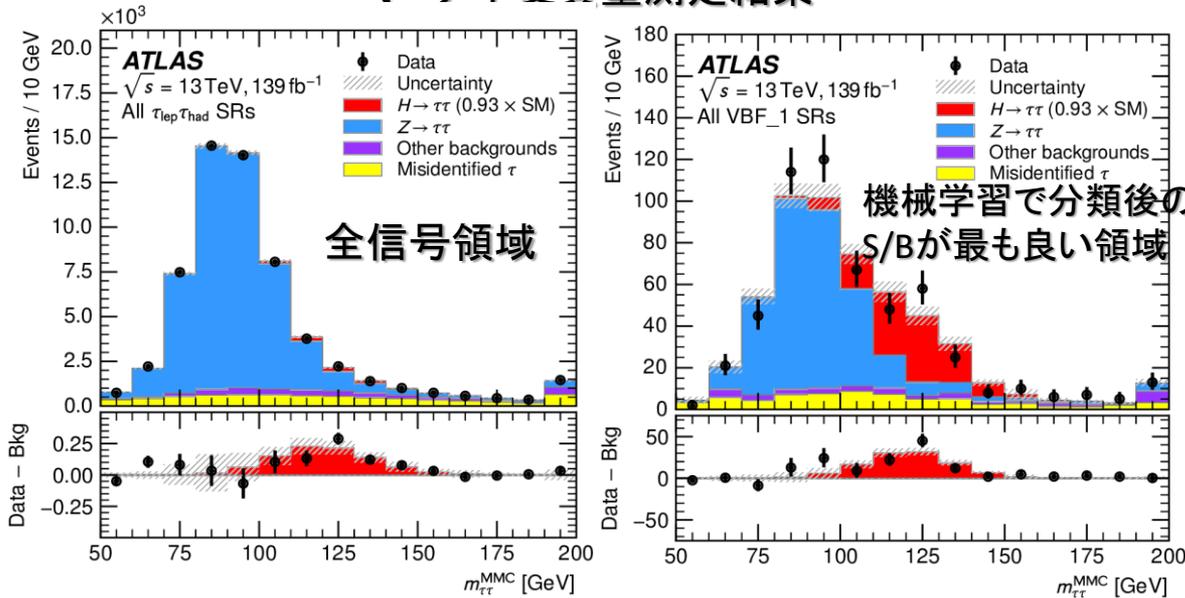


$Z \rightarrow \tau\tau$ 事象



測定結果

τ ペア不変質量測定結果

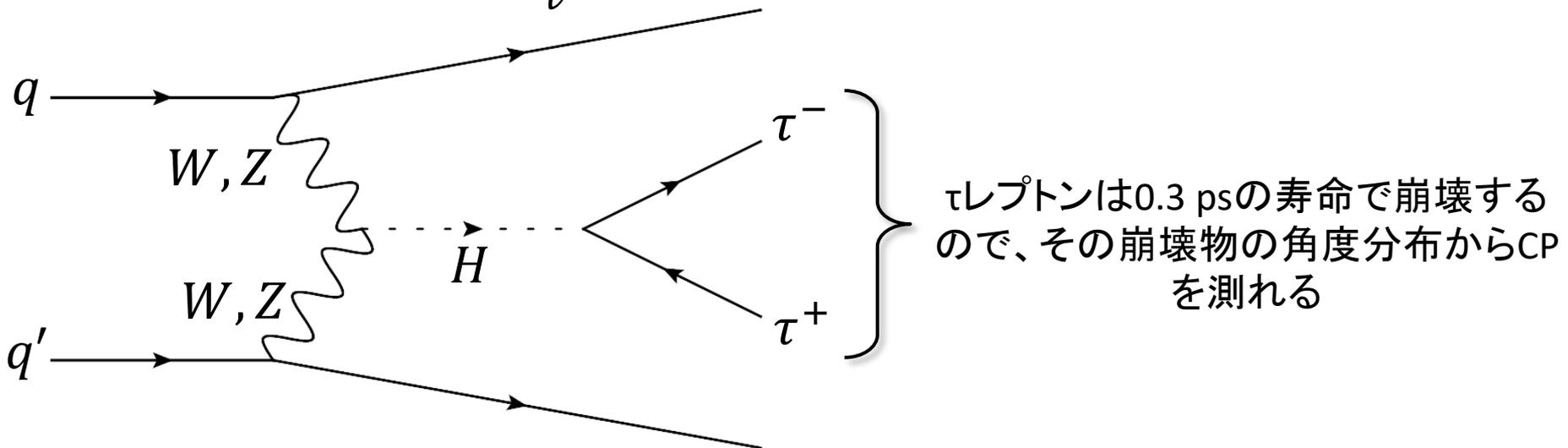


- はっきりと信号が見えた！
 - 13%の精度で生成断面積を測定（統計誤差は10%を切っている）
 - 4つの生成過程を独立に測定し、すべて標準模型予想と一致した
- 単なる生成断面積だけでなく、様々な「性質」を測定できる
 - 微分断面積測定 → 現在進行中
 - CP測定 → 次に紹介します

■ ヒッグス粒子のCP固有値

- 標準模型では、ヒッグス粒子のCP固有値は+1
 - 純粋なCP固有値 = -1である可能性は実験的に否定されている
 - しかし、CP = +1とCP = -1の混合状態はあり得る
 - 新たなCP対称性の破れの起源かも？

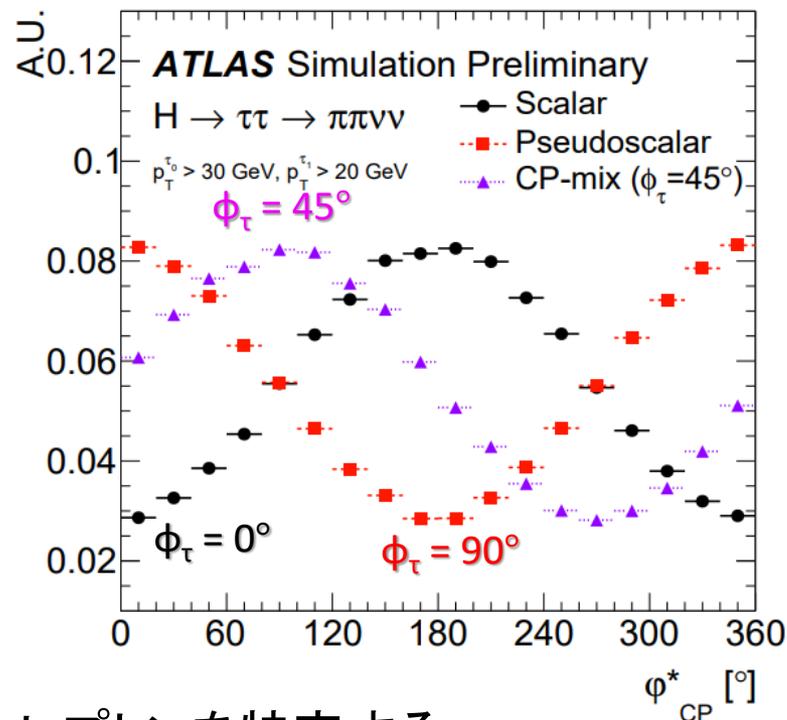
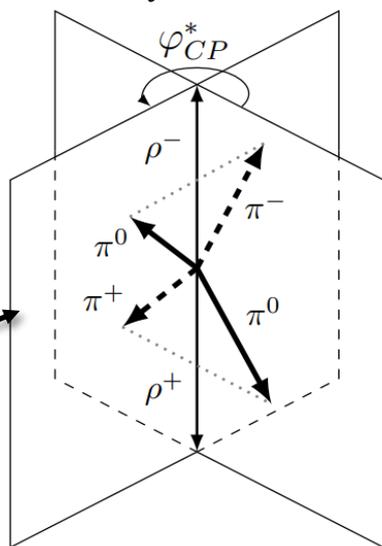
$$\mathcal{L} = -\frac{m_\tau}{v} \kappa_\tau (\cos \phi_\tau \bar{\tau} \tau + \sin \phi_\tau \bar{\tau} i \gamma_5 \tau) H$$



- $H \rightarrow \tau\tau$ を使うことの利点
 - 崩壊分岐比が比較的大きいので、信号統計を稼げる
 - CP = -1状態が H - τ 結合に特有な場合は $H \rightarrow \tau\tau$ を使う必要がある

■ $H \rightarrow \tau\tau$ のCP破れ測定

2個の τ が両方とも
 $\tau^- \rightarrow \pi^- \pi^0 \nu_\tau$ に崩壊した場合

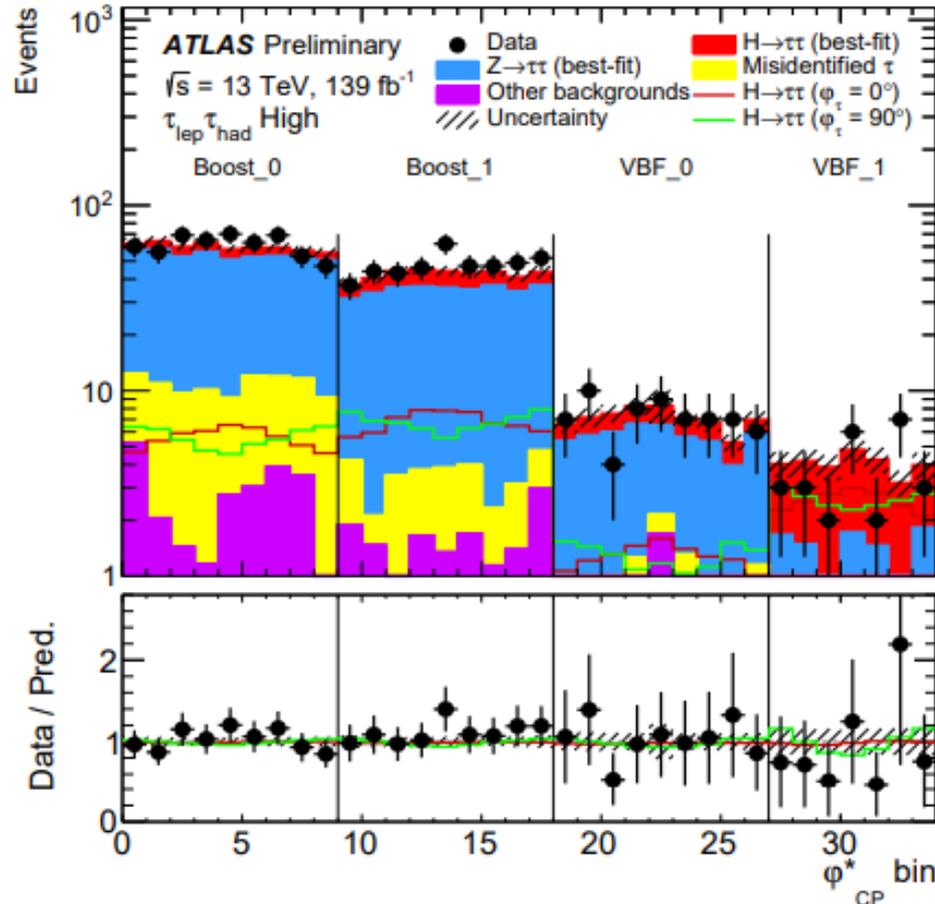


• 測定方法

- τ レプトンの崩壊物から、2個のタウレプトンを特定する
 - タウレプトン崩壊物の静止系で、 τ レプトン崩壊面を張る
 - 崩壊面同士の角度 ϕ_{CP}^* を測定する → これが α に感度のある測定量
- τ レプトンの崩壊モードごとにニュートリノ数や運動量の測定精度異なるため、それぞれ異なる解析をする必要がある

■ $H \rightarrow \tau\tau$ のCP破れ測定

信号領域のうち4つ

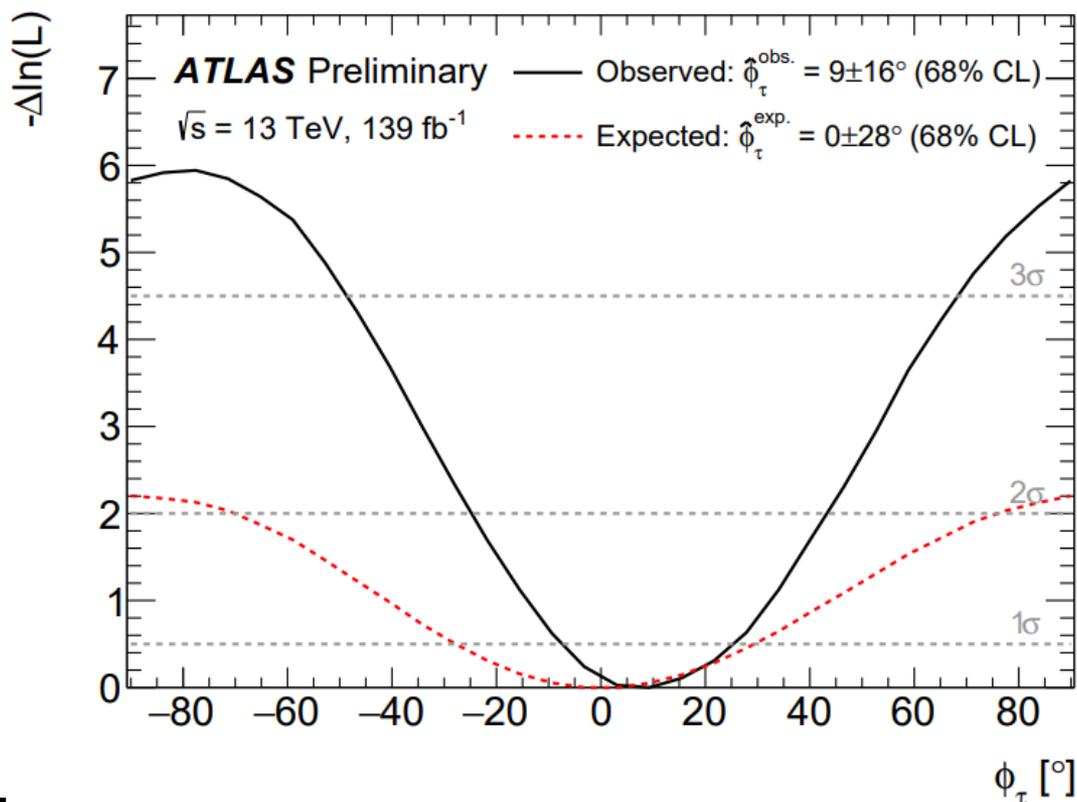


1つ1つの領域で見ても、 α の違いは統計的ふらつきに完全に埋もれてしまう

- 感度の異なる24の信号領域から、わずかな振幅の違いを統計解析によって絞り出す、非常に難易度の高い解析

■ $H \rightarrow \tau\tau$ のCP破れ測定

ATLAS-CONF-2022-032



• 測定結果

$\phi_\tau = 9 \pm 16^\circ$, 純粋なCP = -1仮説を3.4 σ (99.9%信頼度)で否定

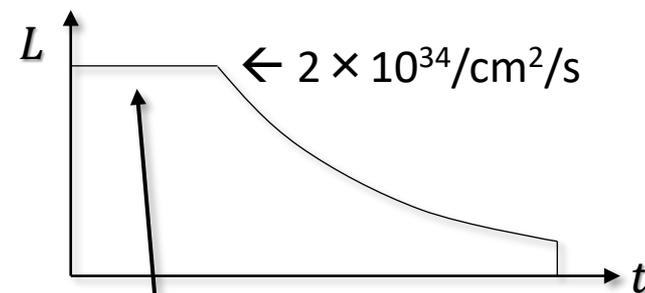
- 期待値よりもよい精度が出たが、統計のふらつきの範囲内
- 統計誤差が支配的であり、今後のRun 3～高輝度LHCで重要な解析

■ Run 3に向けた準備状況

- 2022年からの運転再開に向けて準備が進行中
 - COVID-19の影響や高輝度LHC用アップグレードの遅れにより、開始を1年、終了を2年遅らせた(合計4年間に) [Longer term LHC schedule](#)



- $\sqrt{s} = 13.6$ TeVに決定
- $L_{\text{peak}} = 2 \times 10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ (Run 2と同程度)
- 4年間でRun 2の2倍以上のデータ収集を目指す



ATLAS検出器のアップグレード

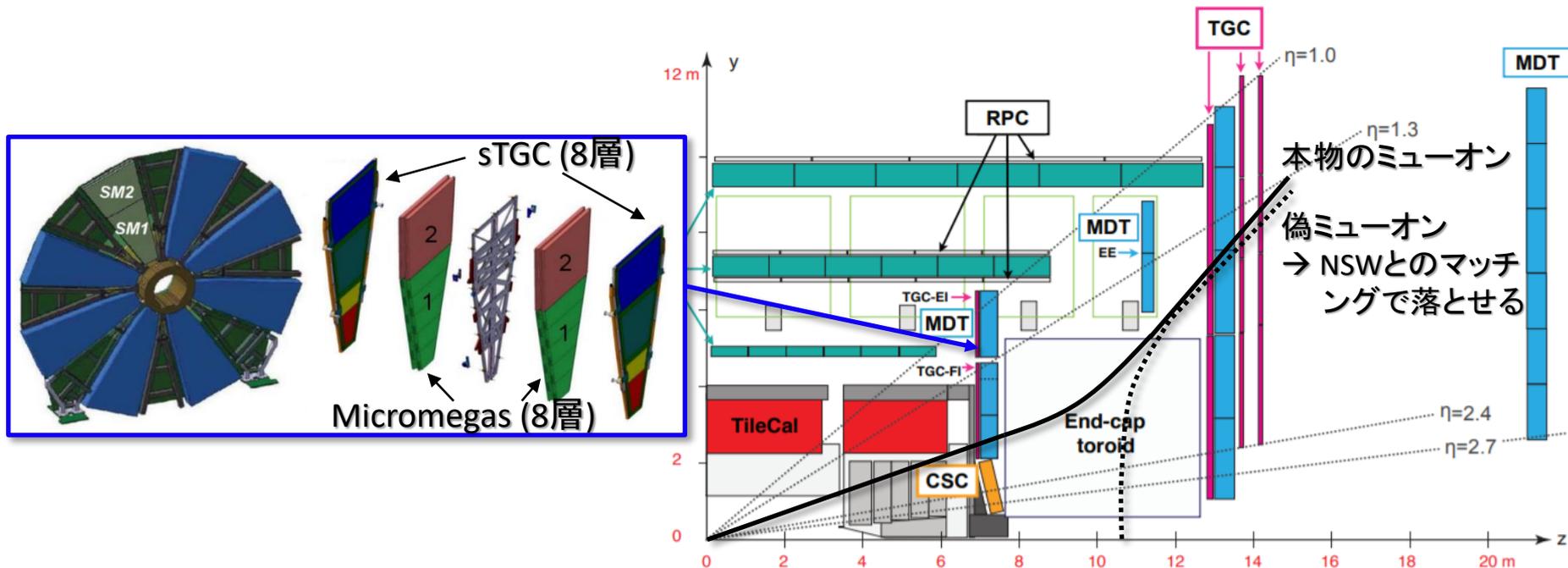
- LArカロリメーターのエレクトロニクス交換
- 新しいミュオン検出器の導入



Level 1(ハードウェア)トリガーを改良する

「レベリング」で
積分ルミノシティを稼ぐ

■ ミューオン検出器アップグレード



- 新しいミューオン検出器を追加・交換
 - Small WheelをNew Small Wheel (NSW)に交換
(ATLAS Phase-1アップグレード最大のプロジェクト)
 - 複数レイヤーで”トラッキング”できるよう
→ 偽ミューオンによるトリガーレートを抑制する

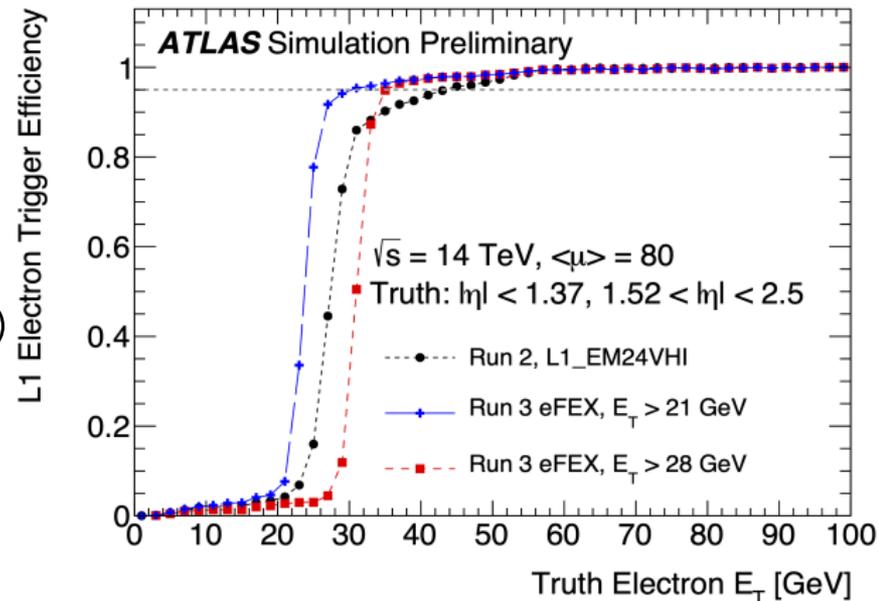
■ カロリメータ用ボードの交換

- LArカロリメータ用後段ボードを3年がかりで交換
 - 1,500枚以上のボード交換を含む、かなり大変な作業
 - カロリメータのより正確な測定をハードウェアトリガーで利用可能に
 - Run 2まで使っていた古いトリガー回路も使える
→ 2022年はこちらを使いながら新しい回路を調整、
来年以降に本格的に使う



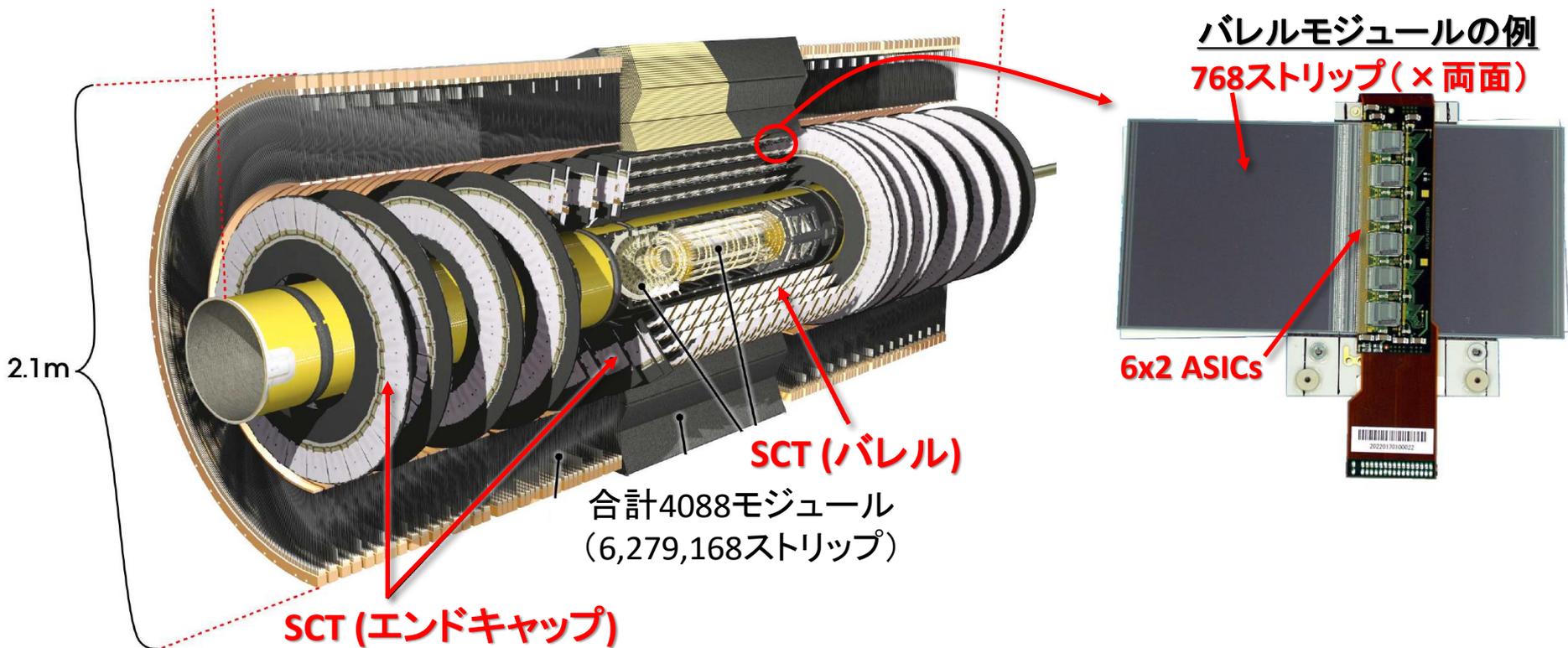
• 新しい回路の恩恵

- 古い回路よりも10倍のデータを処理可能に
- エネルギー測定精度向上により、ハードウェアトリガーで粒子の種類(ジェット、 τ レプトン、電子etc.)を粗く判定可能に



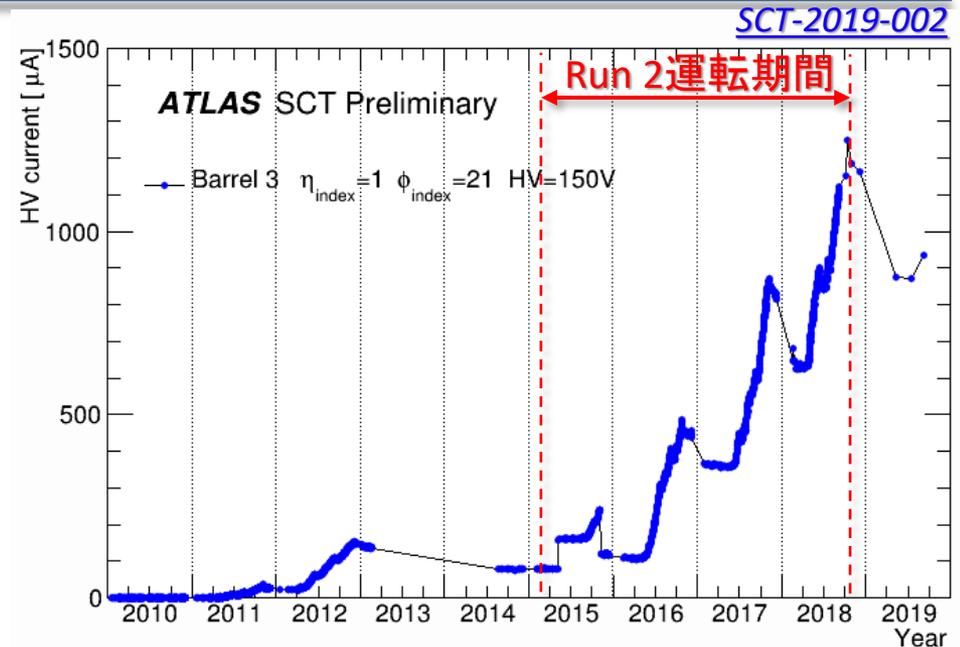
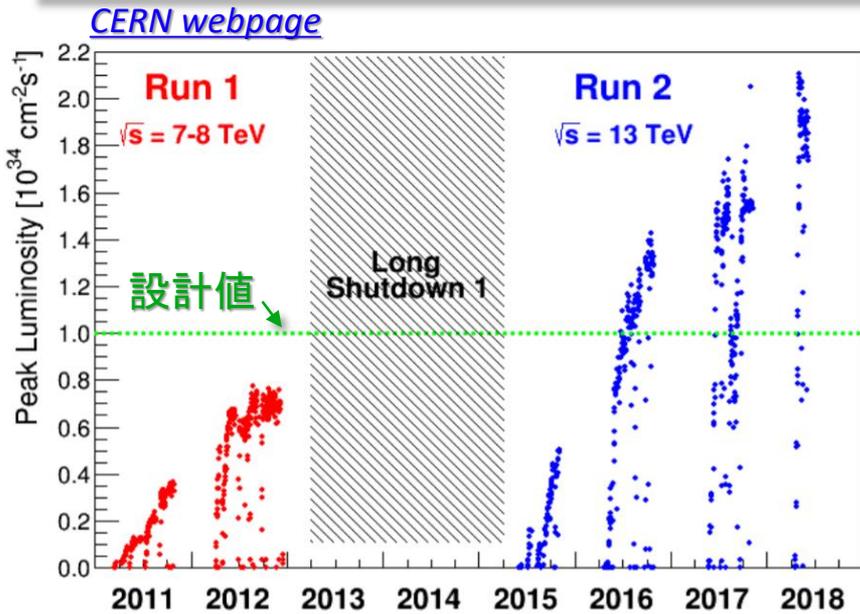
■ SemiConductor Tracker (SCT)

- 筑波大は、SCT運転に大きな貢献をしている



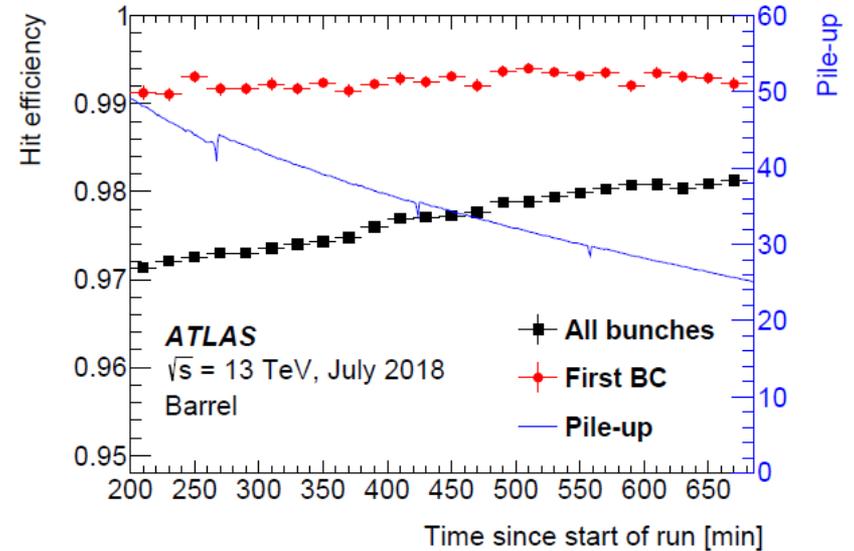
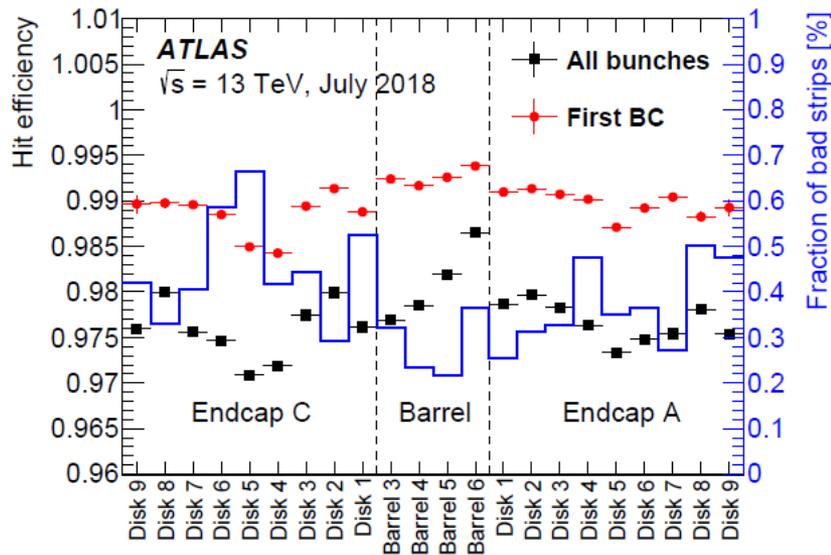
- 大きな体積をカバーするシリコンストリップ検出器
 - p_T 分解能などの観点で重要
- Run 3に向けた大きなアップグレードはしない
 - メンテナンス作業 & 放射線損傷の理解が主なタスク

■ SCT Run 2運転 (2015-18)

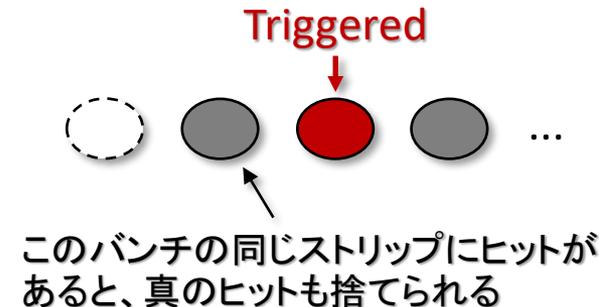


- Run 2の環境はSCTにとってとても大変だった
 - 想定 of 2倍のルミノシティ → データをロスなく取るためのDAQ改善
 - 激しい放射線損傷: 漏れ電流はRun 2当初の10倍以上に
 - 状況に応じた運転パラメーターの調整が必要となった
 - 同時に、 p^+ -on- n センサーの興味深い特性が見えている
- 現在のSCTの状況を正確に理解し、Run 3運転に備える
 - SCT Run 2まとめ論文を公表 [JINST 17 \(2022\) P01013](#)

■ 荷電粒子検出効率

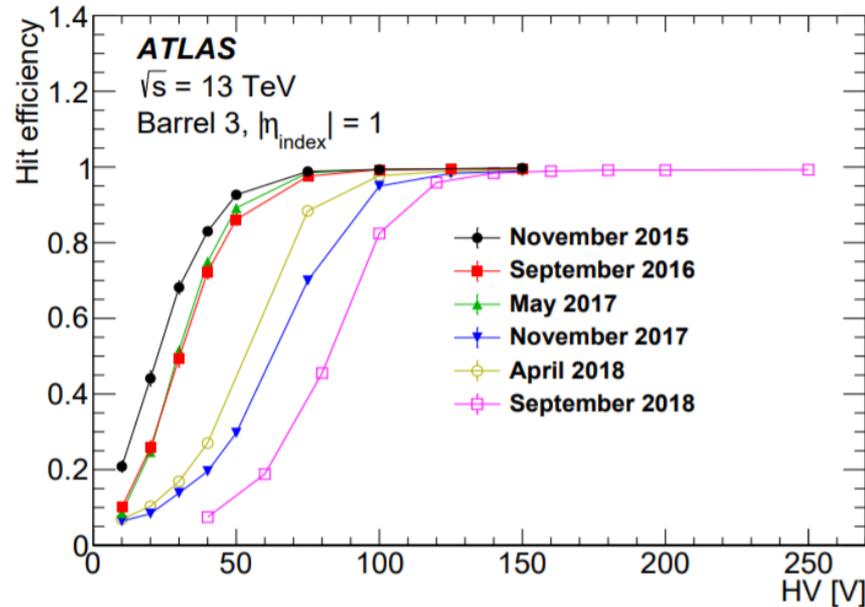


- 検出効率はバンチトレインの先頭バンチで測定できる
 - “01X” (トリガーされた1個前のバンチにはヒットがない) の要求のため、偶然2バンチ連続できたヒットは捨てられてしまう
 → 先頭バンチではそれが無い
- 先頭バンチで >99%、全バンチで >97% の検出効率



高パイルアップ下でも高い検出効率を維持できていた

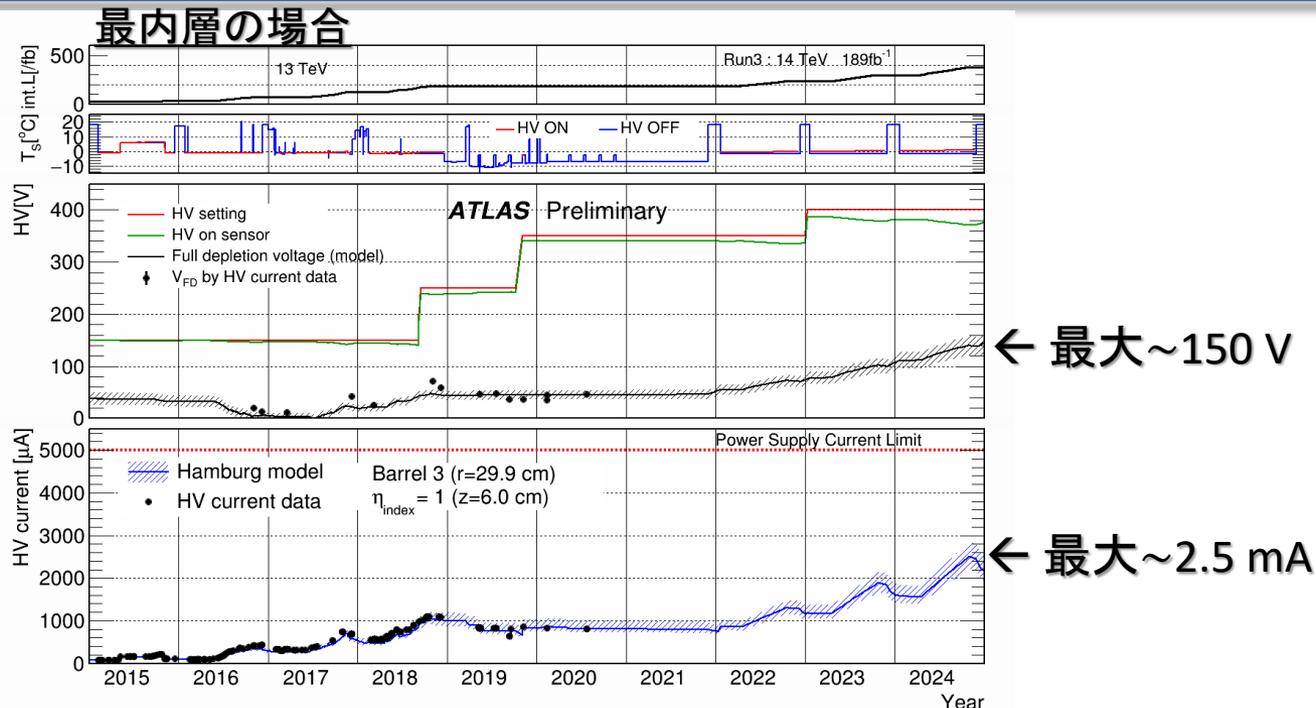
■ シリコンバルクの型変換



- SCTは n バルク → バルク損傷により p バルクに変換する
 - 実効アクセプター濃度が上昇するため
 - $\sim 2 \times 10^{13} n_{\text{eq}}/\text{cm}^2$ で型変換 → 最内層では2016年ごろにあたる
- 実際に型変換の影響が様々な指標が見えている
 - 例: 検出効率のバイアス依存性の立ち上がりが緩やかになる

型変換後は常に完全空乏化電圧 (V_{FD}) 以上のバイアスをかけ続けなければならない

■ Run 3 運転への展望



- 電源システムは450 V・5 mA/moduleが上限

- Run 2まで、測定値と予想値はよくあっている

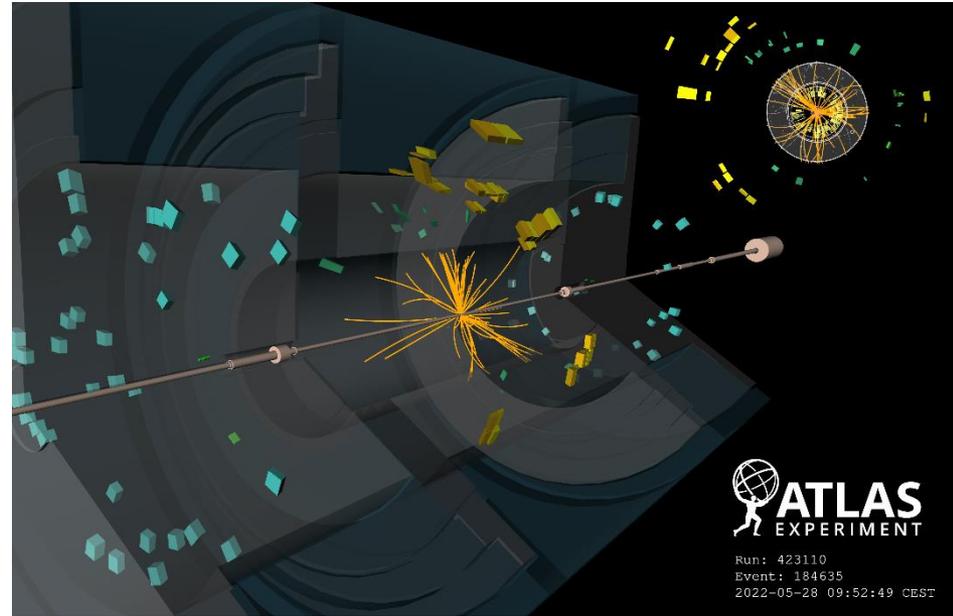
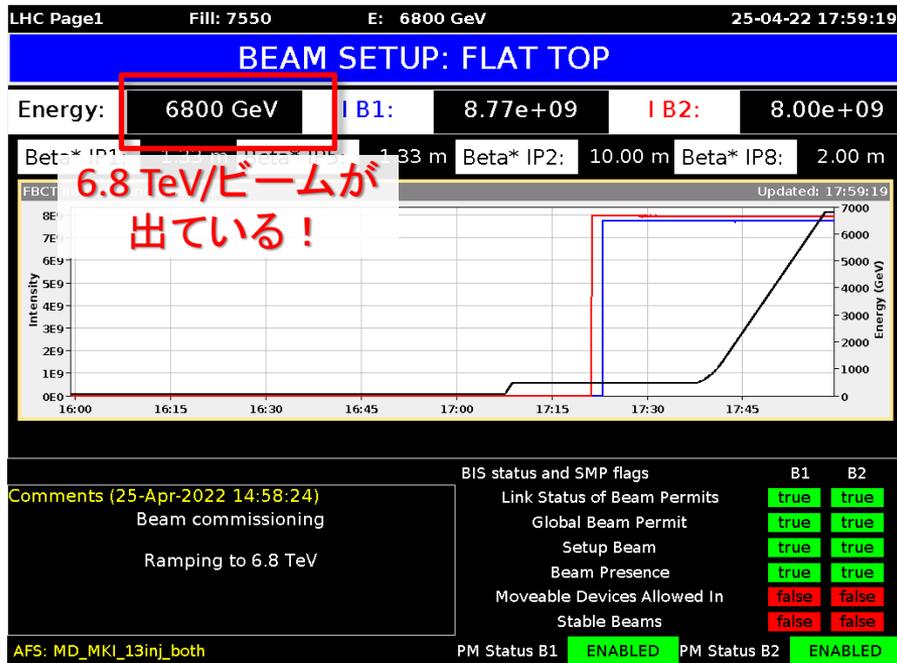
- Run 3終了まで外挿すると最大で $V_{FD} \sim 150$ V、 $I_{leak} \sim 2.5$ mA

いずれも問題ない

- ただし、検出効率 > 99%を維持するには V_{FD} (予想) × 2が必要？

- TCADによる正確な理解を目指した研究を続けている [和田, 2021秋物理学学会](#)

■ Run 3運転がいよいよスタート！



- ~3月まで、宇宙線を使ったコミッションングを随時行ってきた
- 4/22より、正式にLHC Run 3運転開始
 - 6.8 TeV/ビームも達成
- 5/27-29に900 GeVでの衝突
 - Run 3で初めて、stable beamを使った衝突を行った
- SCTもLS2後の調整を完了し、99%以上の検出効率を確認

■ まとめ

- ATLAS実験における最近の結果
 - まだまだRun 2データの徹底解析が進行中
 - 特殊な解析を除いて、来年春までにすべて完了する
 - Run 3データの解析に向けた準備や、初期に公表する解析戦略の議論も進んでいる
- Run 3運転が4/22にスタート
 - ATLAS検出器のコミッショニングが進行中
 - COVID-19や高輝度LHCに向けたアップグレードの状況から、スケジュールが確定した
 - 2022-2025の4年間で約 300 fb^{-1} を収集する(Run 2の2倍以上)
 - エネルギーが13.6 TeVに、少しだけ引き上げられる
 - ヒッグス粒子などの断面積が約10%増加
 - 13.6 TeVでの初衝突を7/4に予定
 - その後、本格的なデータ収集を開始予定！