

ATLAS実験からの最近の結果と Run 3実験に向けた準備状況

2021/6/25 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

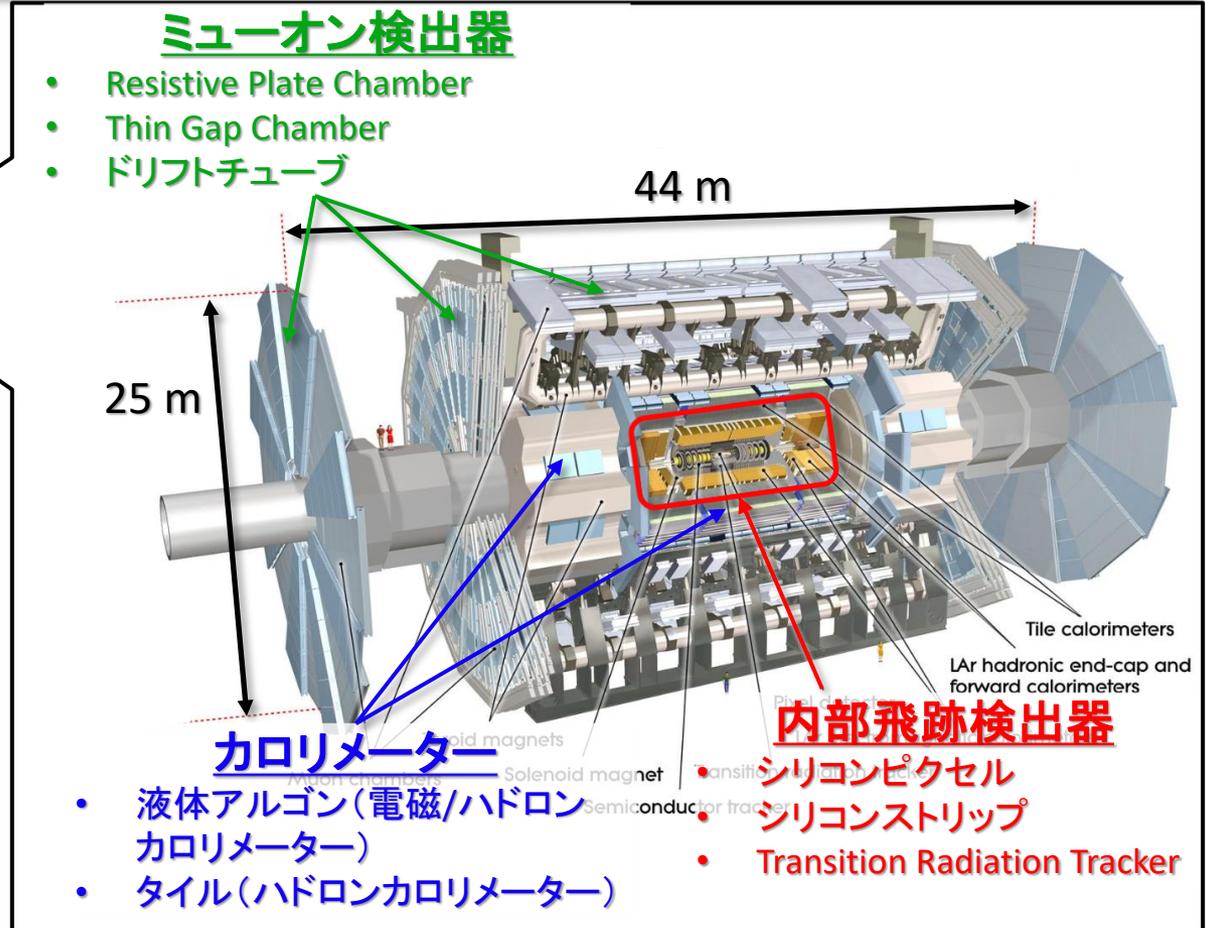


- 周長27 km
- $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ でのpp衝突 (設計は14 TeV)

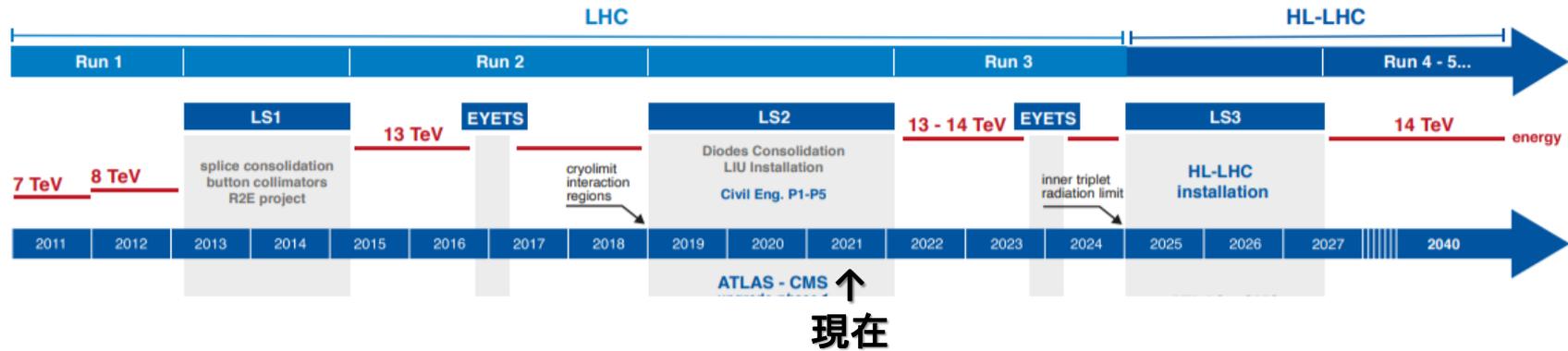
• ATLAS検出器

- 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



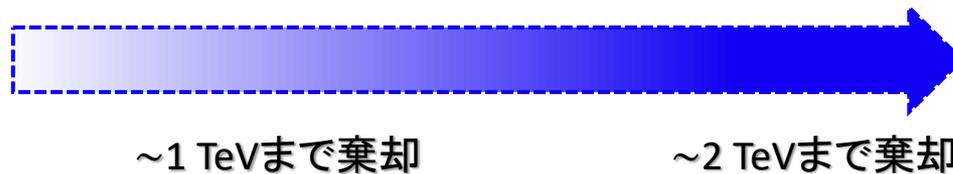
現在

ヒッグスの物理



- 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)

- 現在は実験休止期間 (LS2と呼ばれる)
 - Run 2までにためた大量のデータを徹底解析
 - Run-3 (& 高輝度LHC) にむけた加速器・検出器のアップグレード

■ ATLAS実験の最近の物理成果

- 標準模型の精密な検証、トップやヒッグス粒子の測定、重い未知粒子探索など、様々な新結果が続々と公表されている
 - 今日は主にヒッグス粒子の物理に関する結果を紹介します。
- ヒッグス場が関わるラグランジアン

$$L_{\text{Higgs}} = \dots$$

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

ヒッグス粒子と弱ボソンとの相互作用

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

ヒッグス粒子とフェルミオンとの相互作用

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

ヒッグス粒子の質量・自己結合

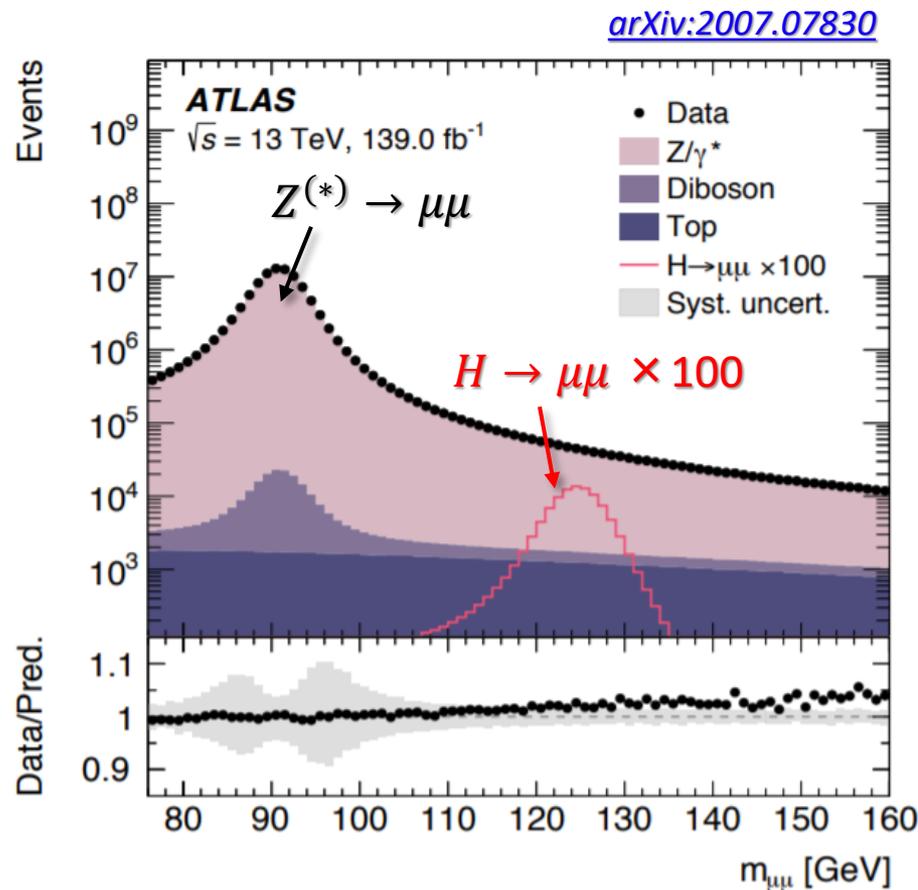
$$+L_{\text{non-SM}}$$

標準模型に含まれない相互作用

生成断面積などの測定量からそれぞれの項を検証する

■ $H \rightarrow \mu\mu$

- 第三世代クォーク & 荷電レプトンとヒッグスとの結合はすべて観測された
 - 次なる問い: 軽い第二世代の質量も湯川相互作用由来か?
→ $H \rightarrow \mu\mu$ を使って検証する
- $BR(H \rightarrow \mu\mu) = 0.022\%$
 - 圧倒的に大きな $\sigma \times BR$ をもつ
ドレルヤン過程背景事象が問題
- BDTによる背景事象抑制
 - p_T やミューオン角度分布などの違いを利用



■ $H \rightarrow \mu\mu$

- 各生成過程ごとに事象を分類 → BDTをトレーニング

σ 小 ↓ 大	生成過程	選別条件	カテゴリ数
	ttH	$H \rightarrow \mu\mu$ 候補 + $\geq 1\ell$ + $\geq 1b$ ジェット	1
VH	$H \rightarrow \mu\mu$ 候補 + 1-2 ℓ ($\ell = e, \mu$)	3	
VBF	$H \rightarrow \mu\mu$ 候補 + 2ジェット	4	
ggF	$H \rightarrow \mu\mu$ 候補 + 0-2ジェット (not VBF)	12	

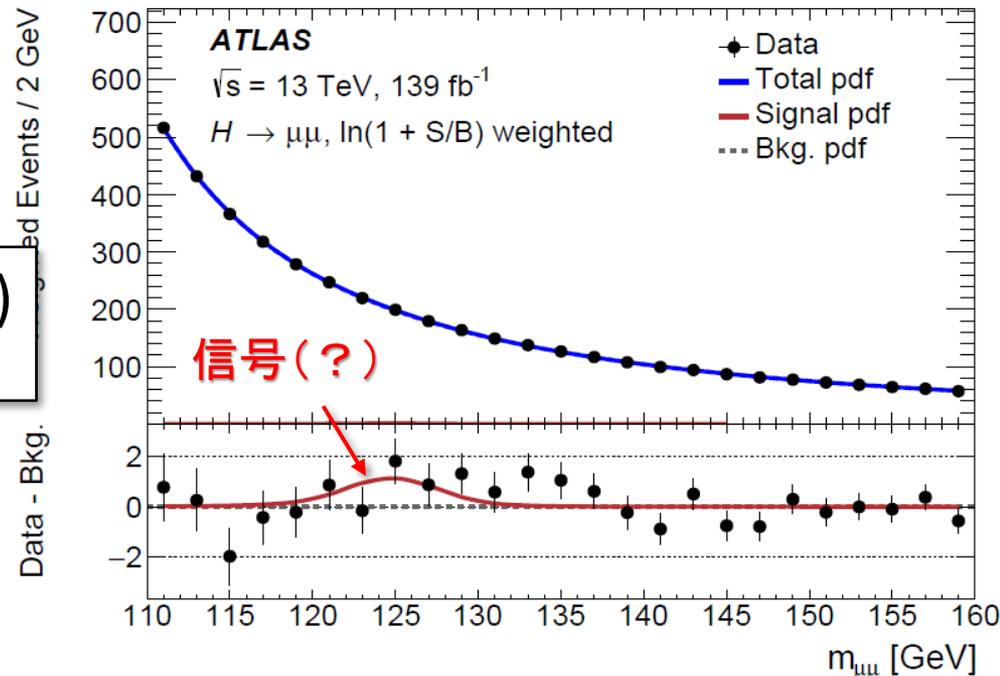
→ BDT出力に応じて領域分け (合計20領域)

- 得られた信号強度 μ は

$$\mu = 1.2 \pm 0.6 \text{ (統計)}^{+0.2}_{-0.1} \text{ (系統)}$$

(2.0 σ observed [1.7 σ expected])

標準模型予想に対する観測された信号数



■ $H \rightarrow \mu\mu$: CMSとの比較

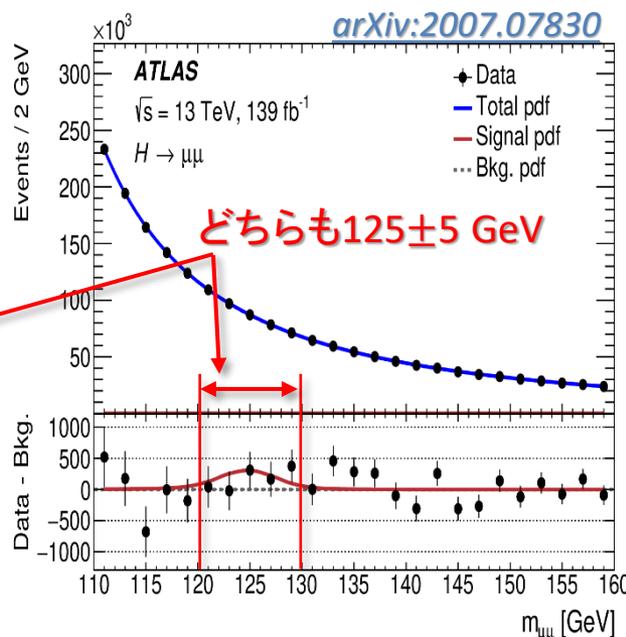
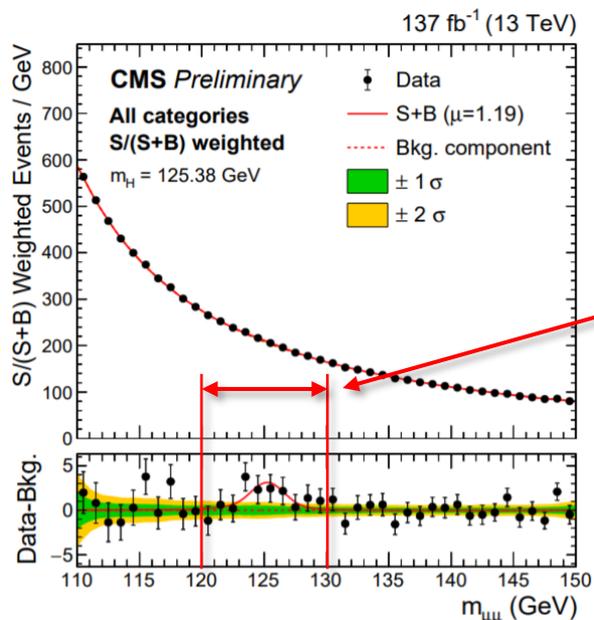
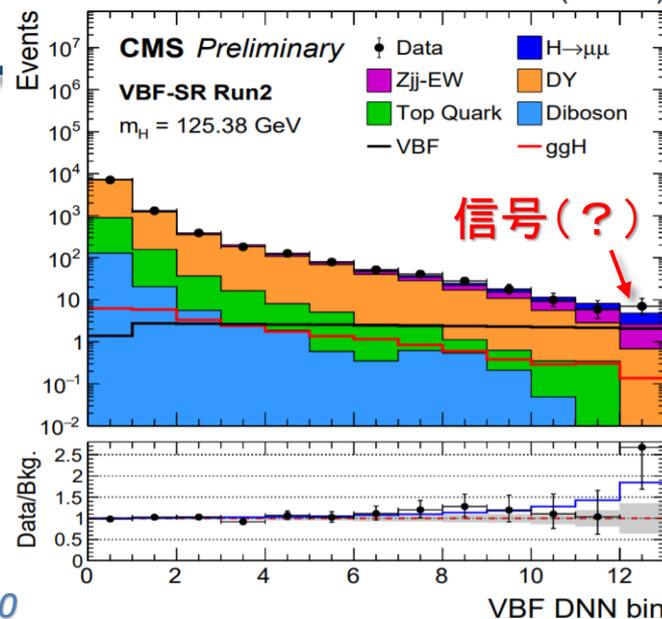
- CMS実験も昨年夏に結果を公表した
 - 一番感度の高いカテゴリーで
 - 深層ニューラルネットワークを使用
 - 出力分布にフィット

$$\mu = 1.19^{+0.41}_{-0.39} (\text{統計})^{+0.17}_{-0.16} (\text{系統})$$

(3.0 σ observed [2.5 σ expected])

CMS-PAS-HIG-19-006

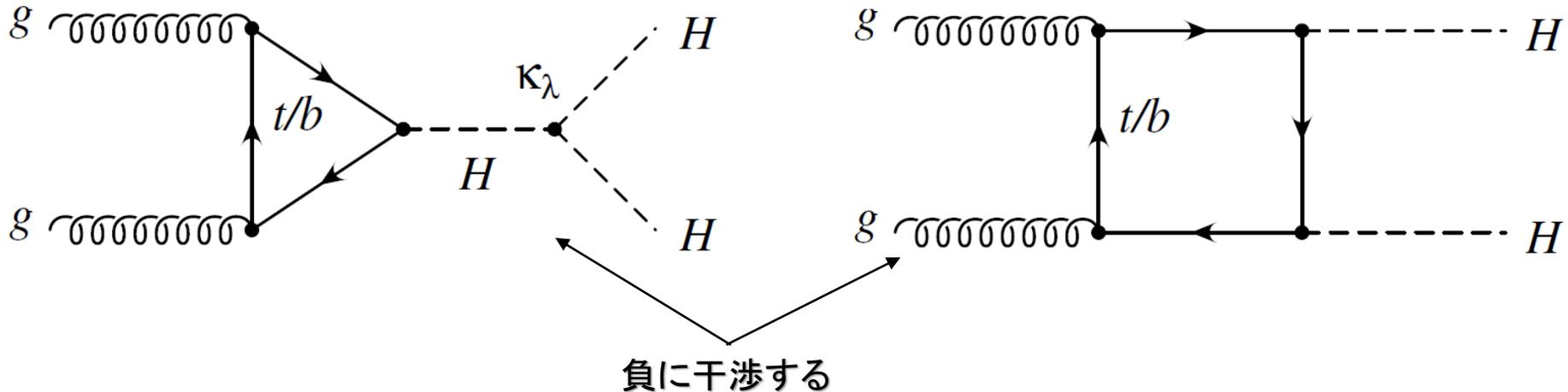
137 fb⁻¹ (13 TeV)



ソレノイドの磁場の違い(ATLAS: 2 T vs CMS: 3.8 T)による運動量分解能が、質量分解能に現れている
→ 感度の違いの最大の要因

ATLAS、CMS両実験において第二世代フェルミオンへの崩壊の兆候が見られた！

■ ダイヒッグス生成の探索



- 自己結合項の係数を直接測れる

$$V(|h|) = \lambda_2 h^2 + \lambda_3 h^3 + \lambda_4 h^4$$

- 測定は容易ではない

$$= \kappa_\lambda \lambda v$$

SMなら	$\lambda_2 = \lambda v^2$
	$\lambda_3 = \lambda v$
	$\lambda_4 = \lambda/4$

- ヒッグスが2個ある(重い!)
- 2つの振幅が負に干渉する
- 終状態が様々

断面積が小さい(33.5 fb @ 13 TeV)

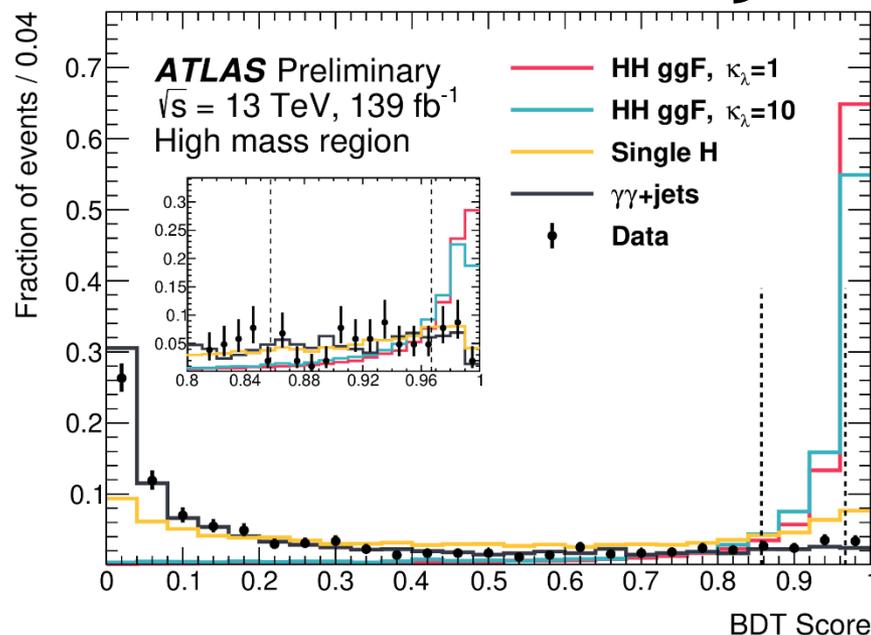
→ 140 fb⁻¹で約5000個

- これまでのATLASでの制限:

$$-2.3 < \kappa_\lambda < 10.3 \text{ (95\%信頼区間)} \quad \text{ATLAS-CONF-2019-049}$$

■ ダイヒッグス過程の探索

- この春に $HH \rightarrow b\bar{b}\gamma\gamma$ の結果が更新された
 - $H \rightarrow b\bar{b}$ (BR = 58%) で統計を稼ぎつつ、 $H \rightarrow \gamma\gamma$ (0.2%) できれいに再構成
 - 前回解析 (JHEP 11 (2018) 040) に比べて統計量3.9倍
- 様々な工夫により感度を劇的に向上
 - 機械学習 (BDT) によりカテゴリー分け
 - $m_{HH} > 350$ GeV と $m_{HH} < 350$ GeV 別々に解析 } 同時フィット



■ ダイヒッグス過程の探索

ATLAS-CONF-2021-016

- 得られた結果は
 $\sigma_{HH} < 130 \text{ fb}$ (95%信頼度)
(標準模型による予想は32.7 fb)

- κ_λ に対する制限
 $-1.5 < \kappa_\lambda < 6.7$

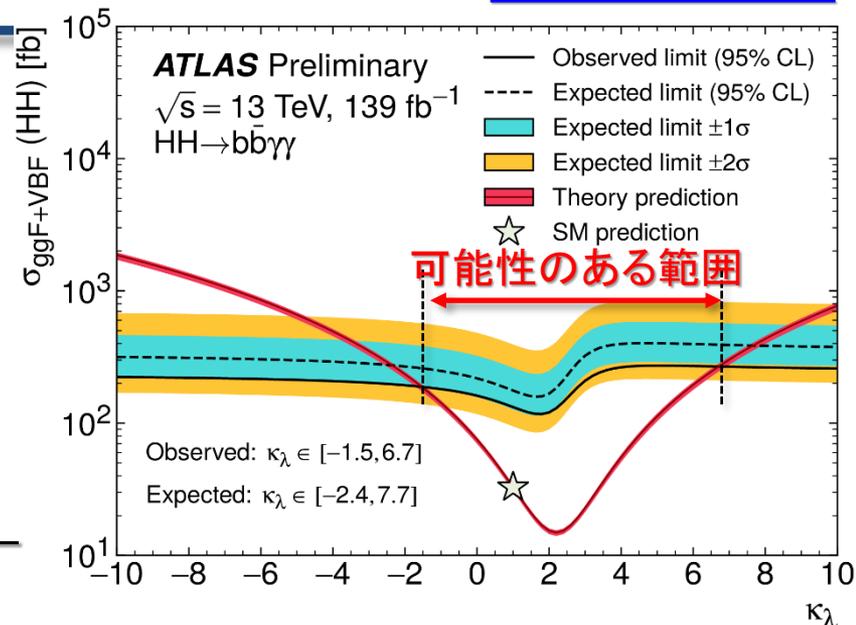
単独の測定でこれまでより良い結果!

- 統計に加え、解析手法によって
2.5倍の改善

- 他の主要チャンネル($HH \rightarrow bbbb, HH \rightarrow bb\tau\tau$)の解析は
現在進行中
- 高輝度LHC(3000 fb^{-1})への展望(2018年時点の外挿)

$$-0.1 < \kappa_\lambda < 2.7, 5.5 < \kappa_\lambda < 6.9 \text{ (信号有意度 } 3.5\sigma)$$

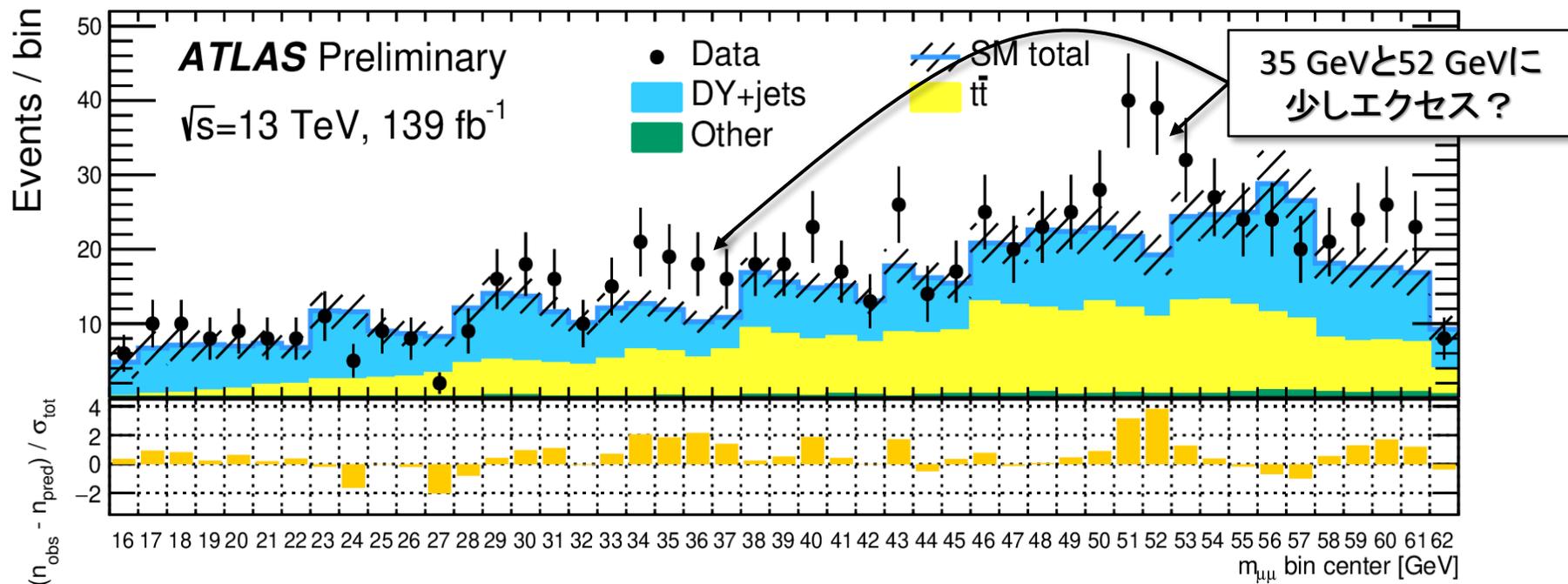
- 今後の改善 + CMS実験との共同解析によって観測($>5\sigma$)に至る可能性は十分にある!



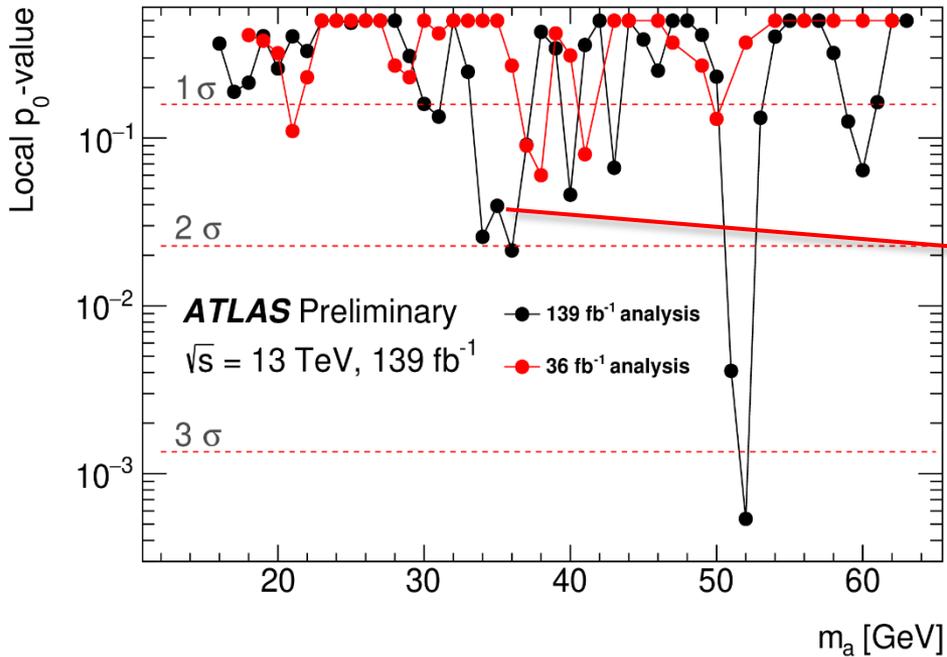
ATL-PHYS-PUB-2018-053

■ $h \rightarrow a(\rightarrow bb)a(\rightarrow \mu\mu)$

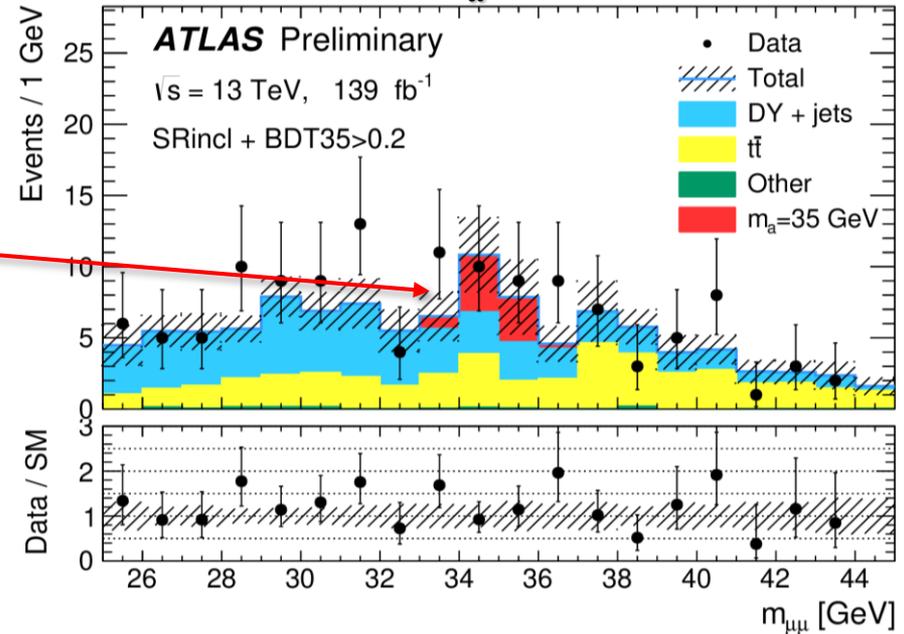
- ヒッグス崩壊で出てくる擬スカラーヒッグス a 探索 (2HDM+S)
 - $a \rightarrow bb$ で統計を稼ぎつつ、 $a \rightarrow \mu\mu$ をきれいに再構成
- Cut-and-countingによる解析
 - $m_{\mu\mu} \pm 1$ GeV (45 GeV以上は ± 1.5 GeV) のウィンドウ内の信号数を計測
 - バックグラウンド数は、 $t\bar{t}$ とドレルヤンCRで決定



■ $H \rightarrow a(\rightarrow bb)a(\rightarrow \mu\mu)$



※これは $m_a = 35 \text{ GeV}$ のもの

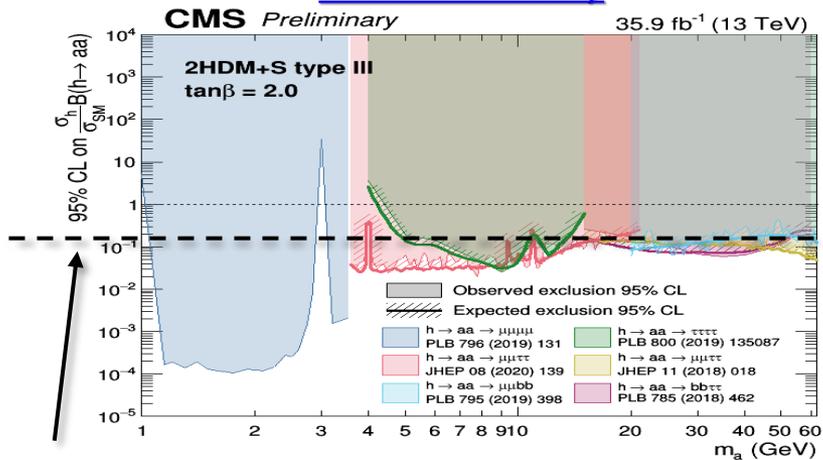


- 最大のエクセスは 1.7σ @ $m_a = 52 \text{ GeV}$ (global)
 - 36.1 fb^{-1} の解析では見えていなかった

■ 軽い擬スカラーヒッグスボソン探索まとめ



2HDM+S summary



BR(h → undetected) < 19%

(BR(h → aa)はこれ以下でないといけない)



ATL-PHYS-PUB-2021-008

ATLAS Preliminary

March 2021

Run 1: $\sqrt{s} = 8$ TeV

Run 2: $\sqrt{s} = 13$ TeV

2HDM+S Type-III, tanβ = 2

↔↔↔↔ expected ± 1 σ

— observed

Run 1 20.3 fb⁻¹ H → aa → μμττ
PRD 92 (2015) 052002

Run 1 20.3 fb⁻¹ H → aa → γγγγ
EPJC 76 (2016) 210

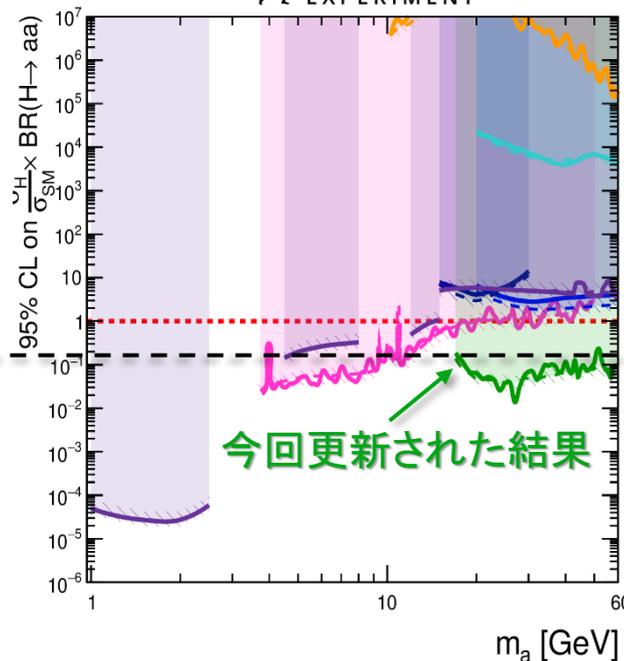
Run 2 36.1 fb⁻¹ H → aa → μμμμ
JHEP 06 (2018) 166

Run 2 36.1 fb⁻¹ H → aa → bbbb
JHEP 10 (2018) 031

Run 2 36.1 fb⁻¹ H → aa → bbbb
PRD 102 (2020) 112006

Run 2 36.7 fb⁻¹ H → aa → γγγγ
PLB 782 (2018) 750

Run 2 139 fb⁻¹ H → aa → bbμμ
ATLAS-CONF-2021-009



• 2HDM+Sにおける軽い擬スカラーヒッグスボソン

– 上の図はtype-III, tanβ = 2での比較

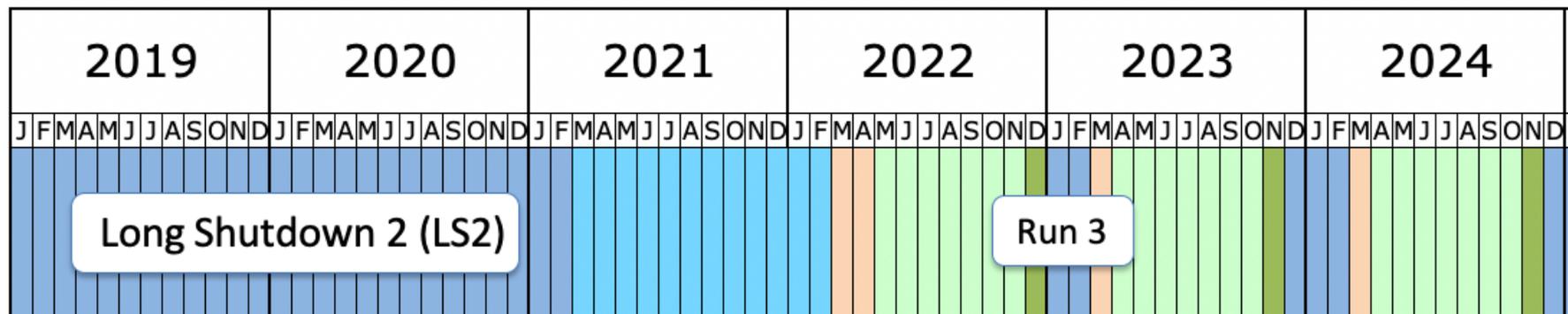
– 低 m_a ではμμμμ、中 m_a ではμμττ、高 m_a ではbbμμの感度が高い

– CMSのbbμμは36 fb⁻¹での結果

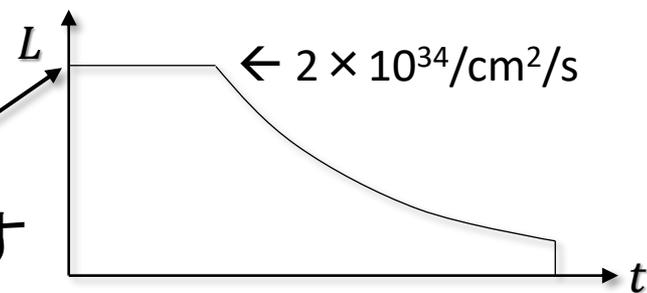
■ Run 3に向けた準備状況

- 2022年からの運転再開に向けて準備が進行中

Longer term LHC schedule



- $\sqrt{s} = 13-14$ TeV (今年決定)
- $L = 2 \times 10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$ (Run 2と同程度)
- レベリングで積分ルミノシティを稼ぐ



3年間でRun 2以上のデータ量収集を目指す

加速器のアップグレード

- 入射器の更新 (Linac 4)
- PS Boosterの改良

※高輝度化(2027~)を見据えた改良

ATLAS検出器のアップグレード

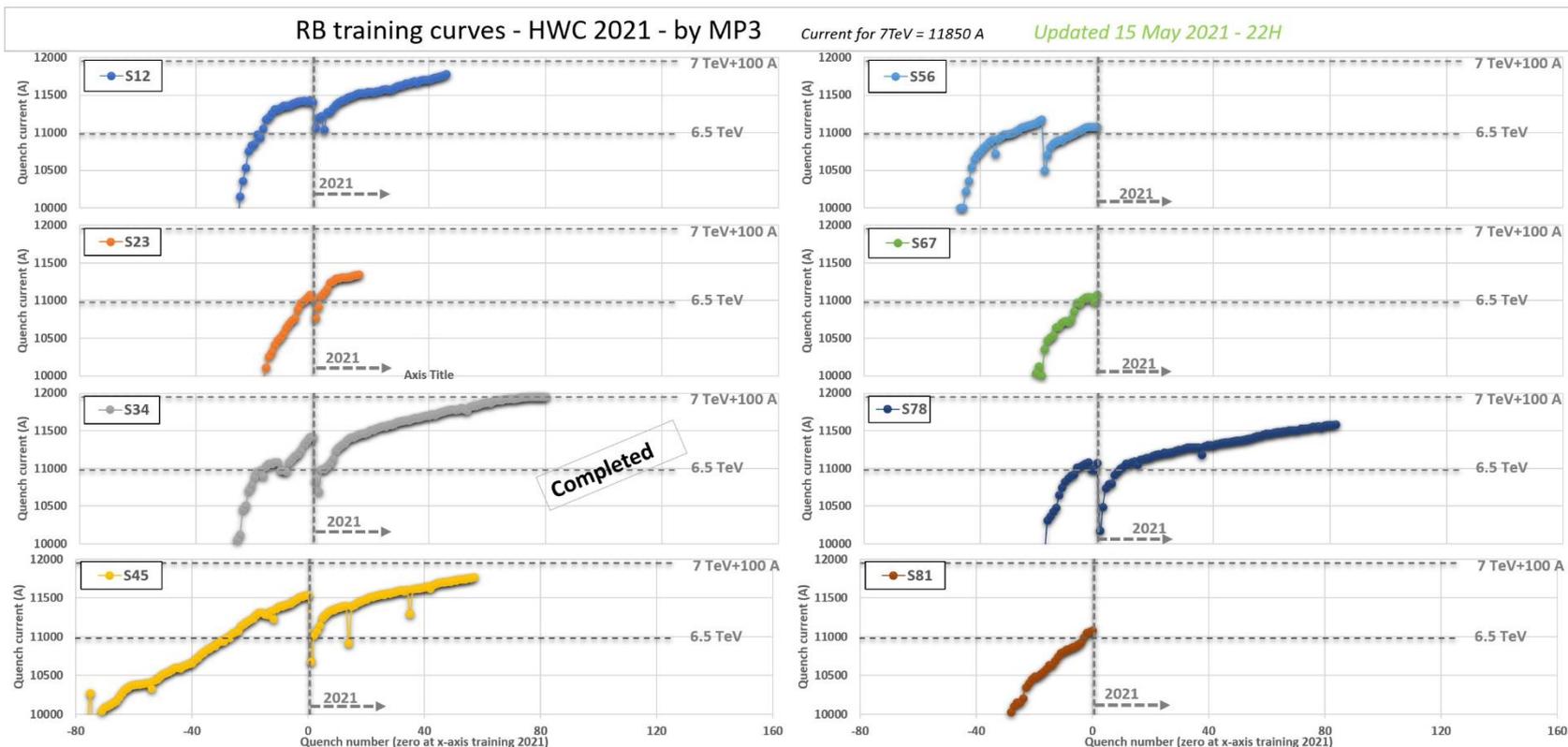
- LArカロリメーターのエレクトロニクス交換
- 新しいミュオン検出器の導入



Level 1(ハードウェア)トリガーを改良する

■ 運転再開に向けた「トレーニング」

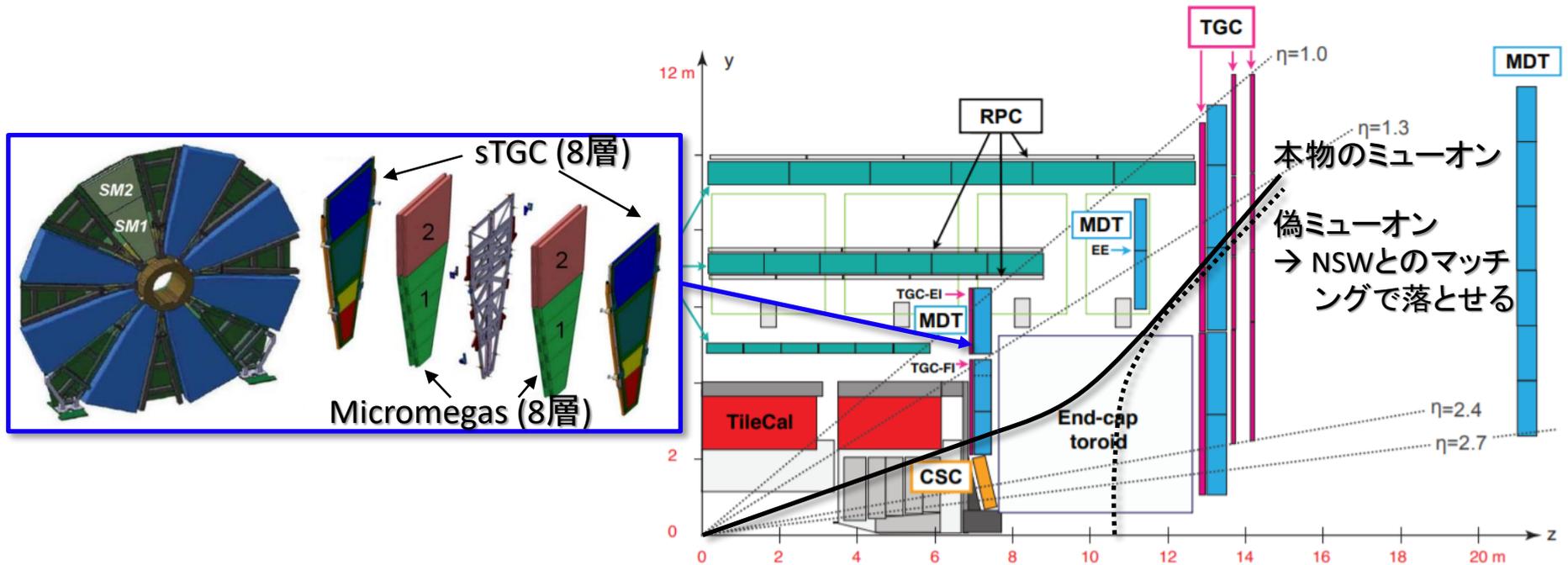
- エネルギーを上げるにはダイポールマグネットのトレーニングが必要
 - クエンチを繰り返すことで、少しずつ流せる電流量が上がっていく



※ $\sqrt{s} = 14$ TeVまで上げるには、すべてのグラフが一番上に到達する必要がある

- これまでに3セクター (out of 8) が7 TeVに到達

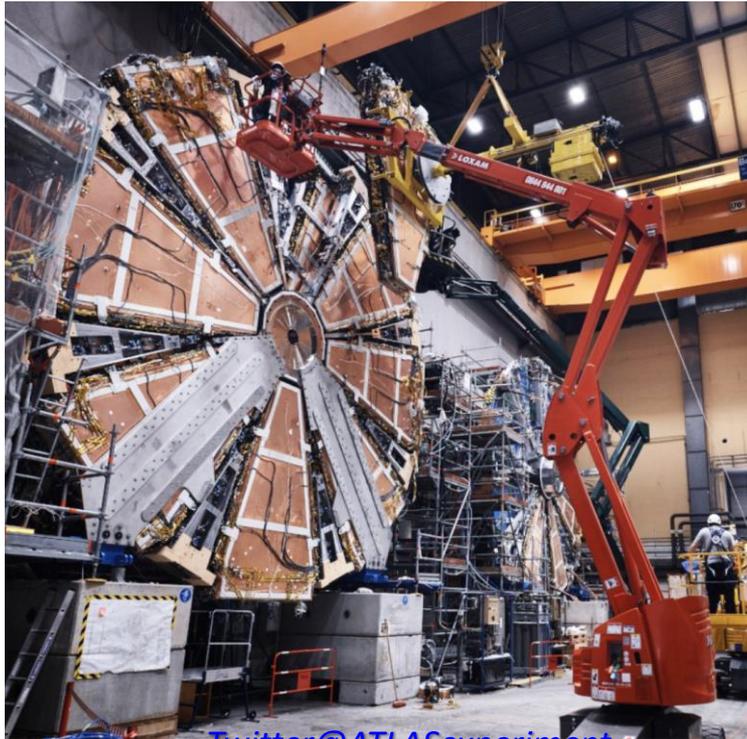
■ ミューオン検出器アップグレード



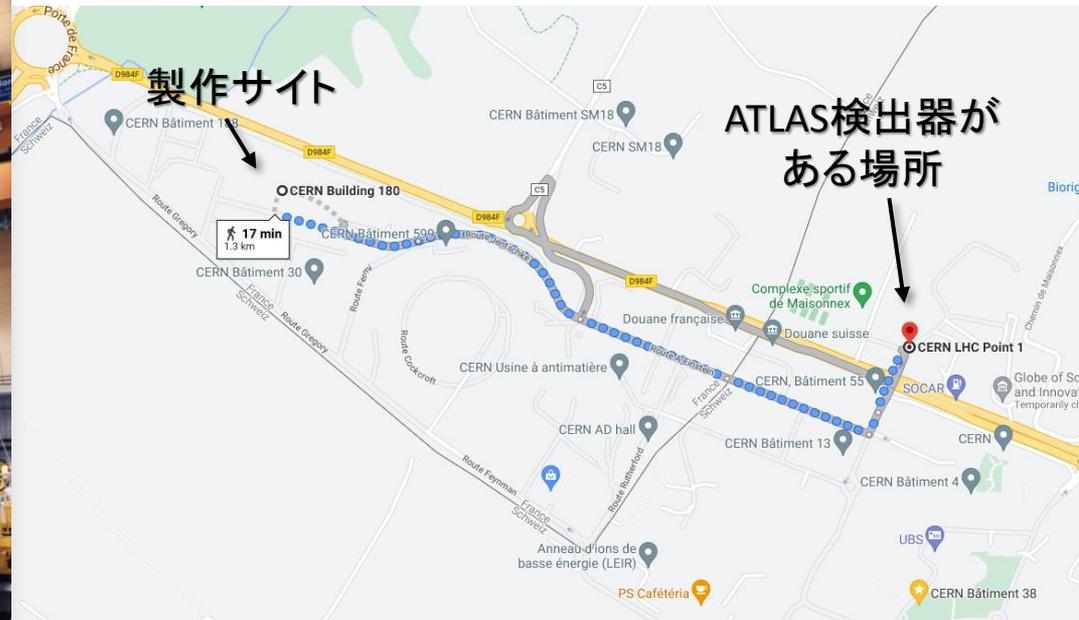
- 新しいミューオン検出器を追加・交換
 - Small WheelをNew Small Wheel (NSW)に交換
(ATLAS Phase-1アップグレード最大のプロジェクト)
 - 複数レイヤーで”トラッキング”できるようになる

偽ミューオンによるトリガーレートを抑制する

■ ミューオン検出器アップグレード

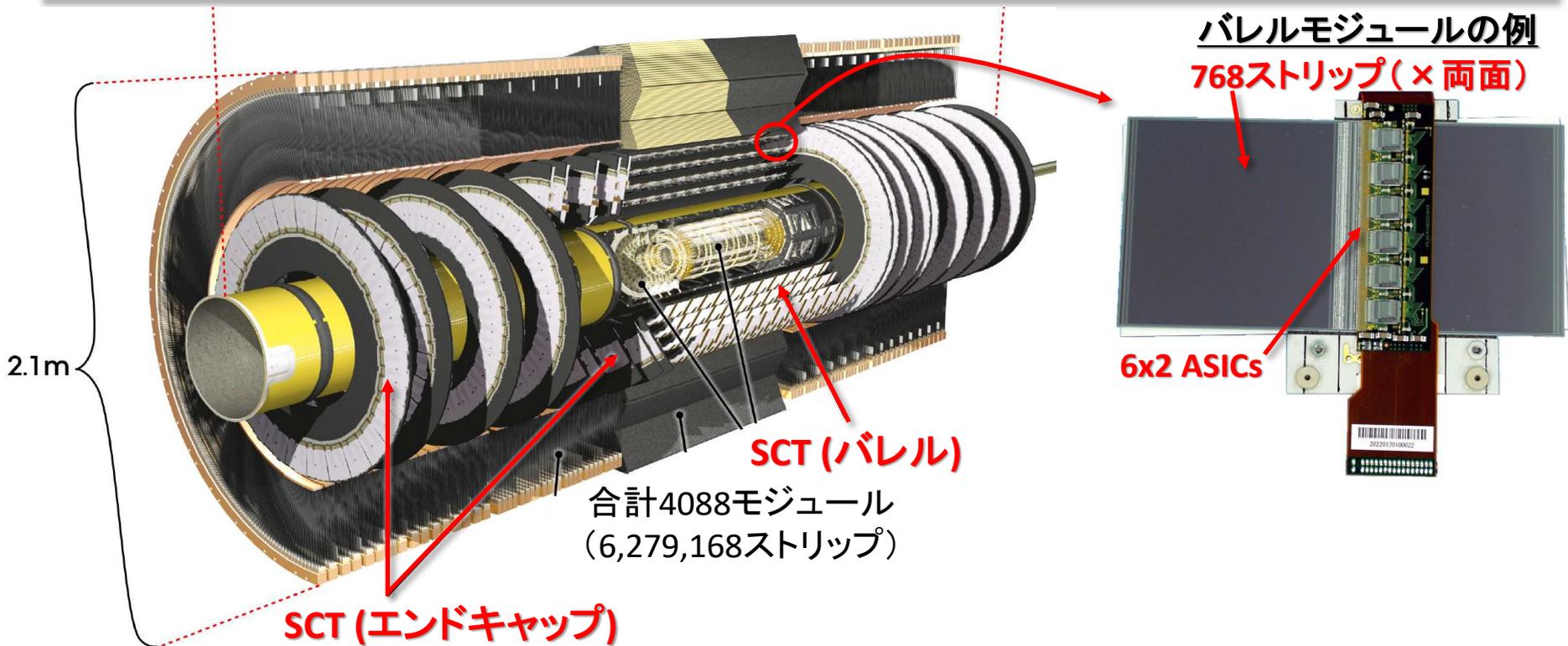


[Twitter@ATLASexperiment](https://twitter.com/ATLASexperiment)



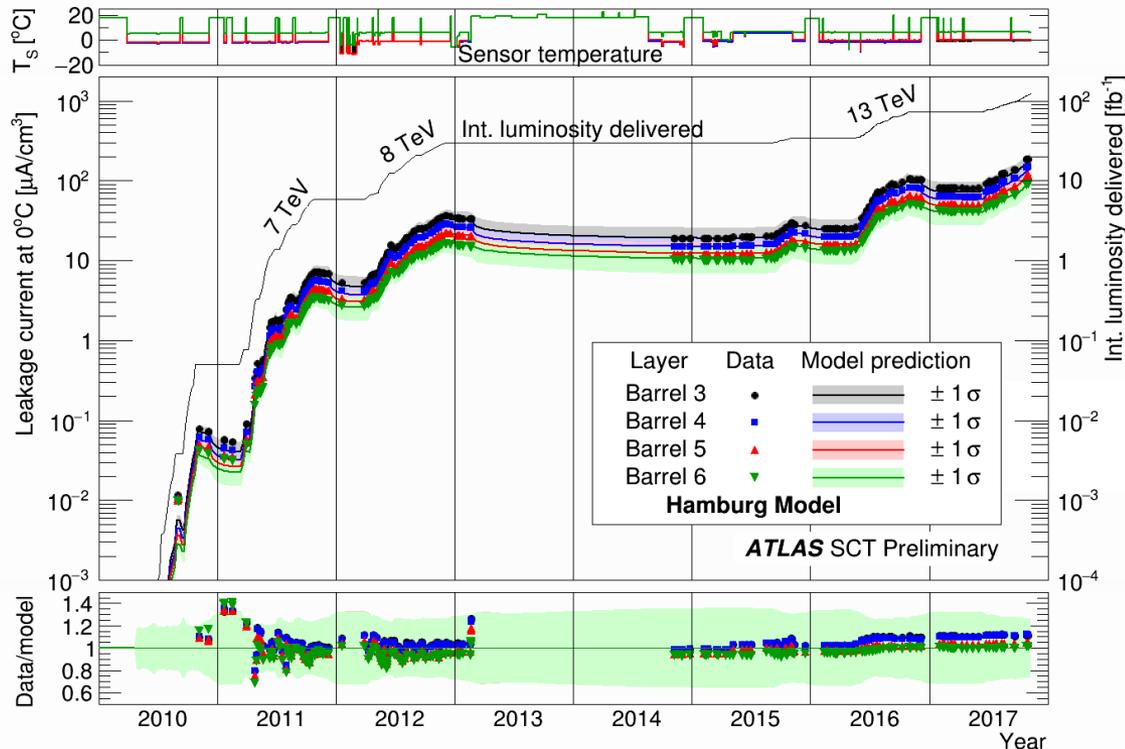
- NSW-Aの製作が完了！
 - 来月、ATLAS検出器まで運ぶ
 - NSW-Cの製作も始まっている
- Run 3開始までにインストールする予定
 - タイムなスケジュールだが、作業は鋭意進行中

■ SemiConductor Tracker (SCT)



- 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
- 筑波大素粒子実験グループが大きな貢献をしている

■ LS2中にやるべきこと



- SCTはこれまで10年間で激しく放射線損傷を受けている

- 例) 漏れ電流は当初に比べて数桁増加

- Run 3を走り切るために準備が不可欠

[PoS\(Vertex2019\) 005](#)

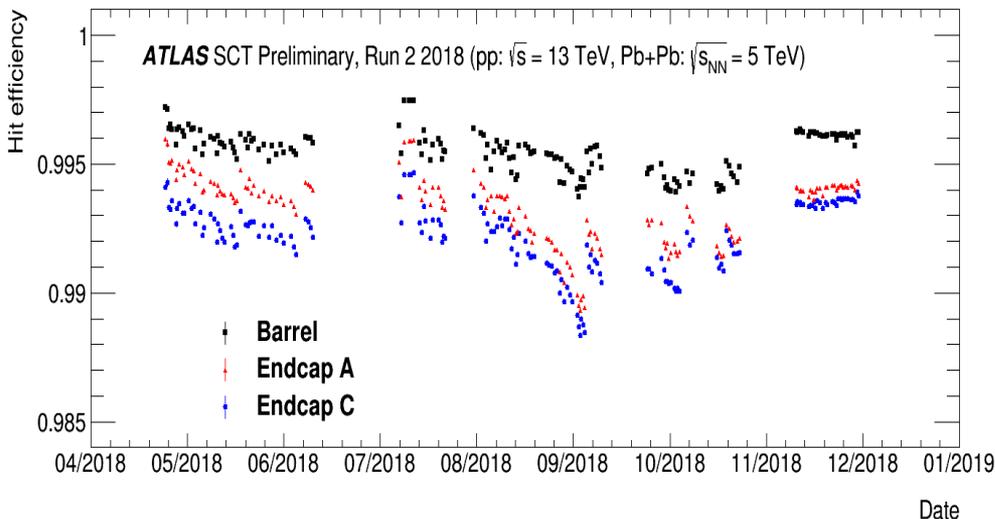
→ 論文化を進行中

- いまの検出器の状態を理解する → 現在のSCTの性能評価

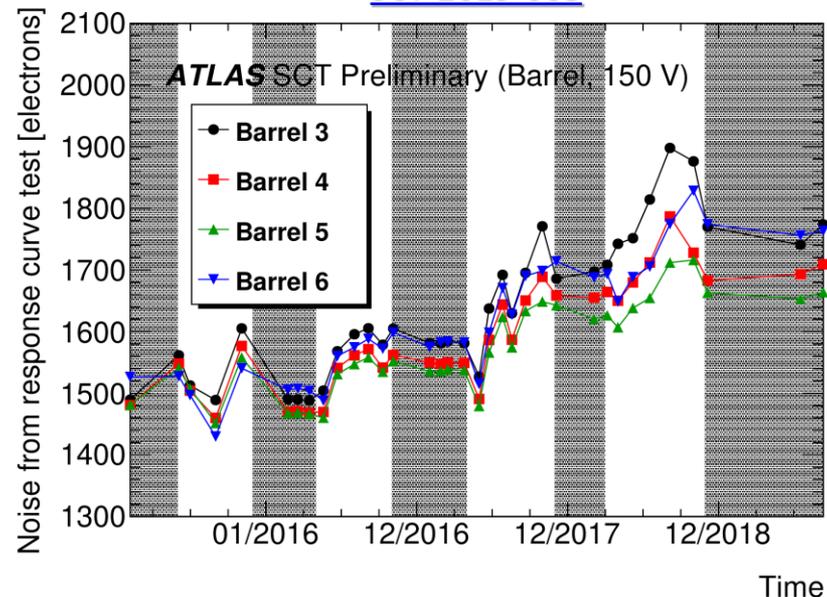
- 起きうる問題に備えておく → メンテナンス・モニタリングツール開発

■ SCTの基礎的性能

SCT-2019-002

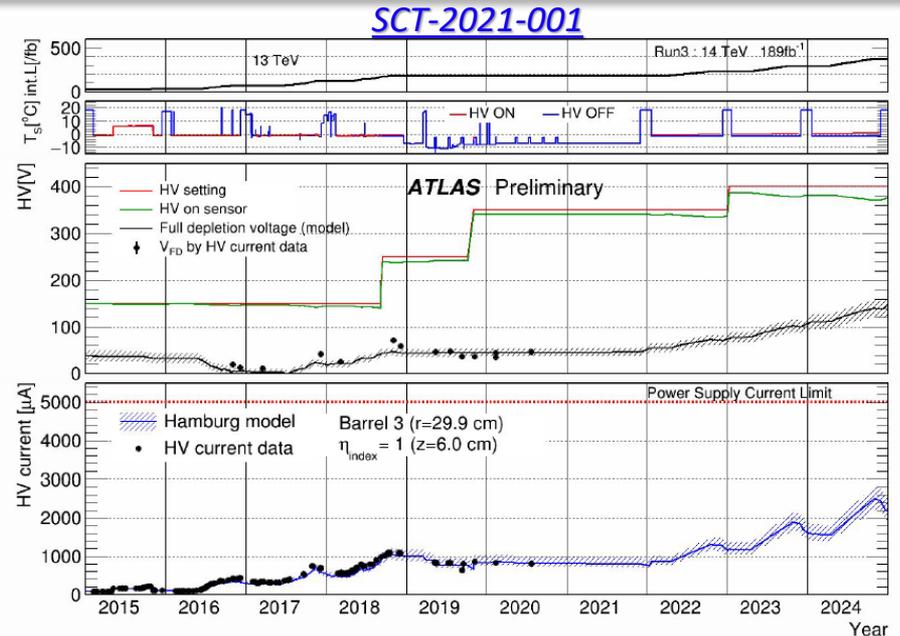
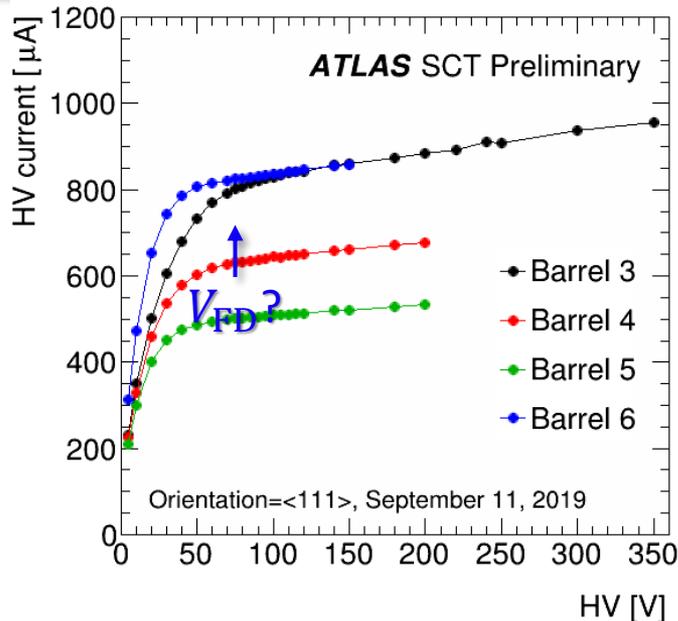


SCT-2019-003



- ヒット検出効率、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
 - 飛跡を追うには、合計4層8枚のセンサーすべてができるだけ信号を出してほしい
 - Run-2最終年(2018年)でも、概ねヒット検出効率 >99%を維持できた
- ノイズは小さく抑えたい
 - Run-2最後でも2000 e⁻程度 → 閾値1 fC = 6250 e⁻より十分に低い

■ 完全空乏化電圧の見積もり



- 完全空乏化に必要な電圧 V_{FD} をIV特性から見積もれる
 - $I_{leak} \propto$ 空乏層体積のため、 V_{FD} に達するとIの増加が緩やかになる
 - IVから見積もった V_{FD} は予想値とよく合っている
- Run-3最後の時点でも、 V_{FD} は十分に低いと予想
 - ヒット検出効率 > 99%を得るための電圧は V_{FD} 予想よりだいぶ高い
 - TCADを使い、放射線損傷後の電場分布や特性を評価中

■ Run 3に向けたコミッショニング

- 1-2ヶ月に一度ATLAS全体で試運転をしている
 - CERNは通常モードに戻ってきている現在も、感染拡大に気をつけつつ工夫しながらコミッショニングを進めている
 - できるだけリモートでも参加できる工夫も

SCT作業時(6/14-18)の予定表

	Mon	Tue	Wed	Thu	Fri
9:30 - 13:30	Koichi/Hiroki,Ynyr	Dave/Ynyr,Hiroki	Dave/Masahiro	Elisabeth/Cristiano	Dave/Cristiano
task	Setup,calibration	DAQ or other test	backup	IV scan	backup
13:30 - 17:30	Elisabeth/Per	Elisabeth/Cristiano	Koichi/Hiroki	Koichi/Ynyr,Hiroki	None/Per,Hiroki
task	Calibration	DAQ or other test?	Even/Odd	IV scan	backup

一人はCERN 一人はリモート



■ まとめ

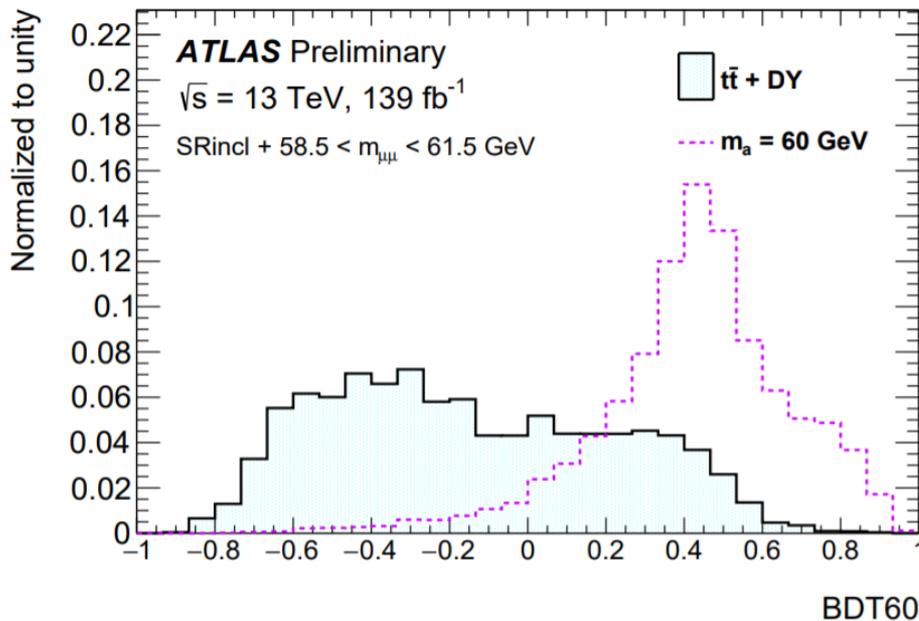
- ATLAS実験における最近の結果
 - Run 2運転終了から2.5年が経過したが、まだまだ徹底解析が進行中
(ちなみに、最近1000本目の論文が出ました → [ATLAS news](#))
 - エネルギーフロンティアでの新粒子探索だけでなく、大統計データによる電弱対称性破れの精密な理解が可能に
 - 未公表のチャンネルも、夏(EPS)の公表にむけて鋭意進行中
- Run 3にむけて
 - 2022年運転再開に向けて検出器のアップグレードやコミッショニングは順調に進行中
 - 収集予定の統計量は2倍程度だが、新しいトリガーにより効率を向上できる(もちろん、解析そのものの改善も)

今後も、ATLAS実験による物理成果にご期待ください

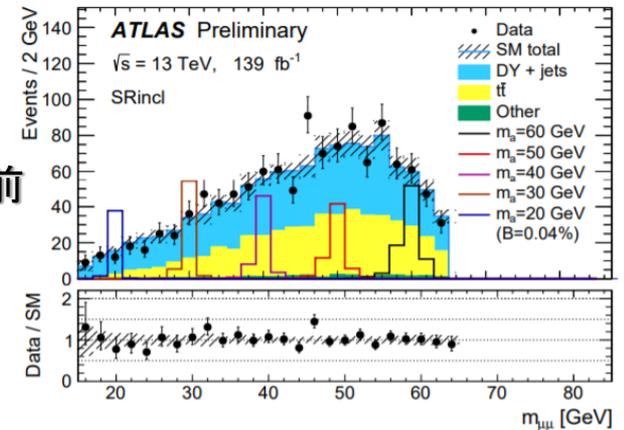


■ $H \rightarrow a(\rightarrow bb)a(\rightarrow \mu\mu)$

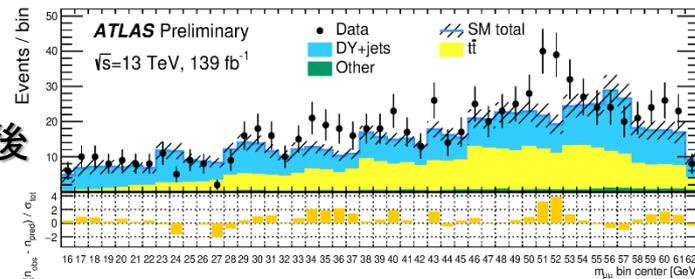
- invariant massや角度情報を使ってBDTをトレーニング
 - トレーニングは10 GeVごとに $m_a \pm 8$ GeVウィンドウの領域で行った
 - トレーニングに使っていないmass pointについては、一番近いpointのBDTを使う(例: $m_a = 32$ GeVの信号を見積もる時には、30 GeVでトレーニングしたBDTを使用) → 10 GeVごとに不連続が見えている原因
 - BDT > 0.2 でカットをかける



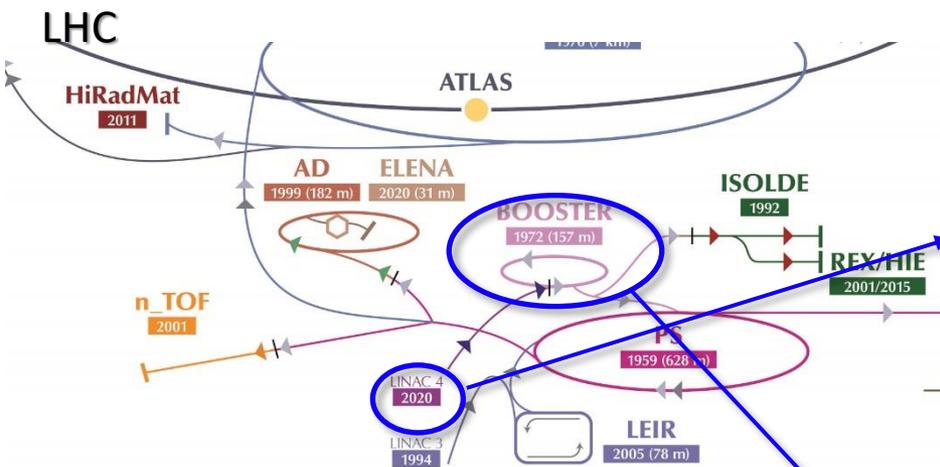
BDTカット前



BDTカット後



■ 加速器アップグレード



Linac 4

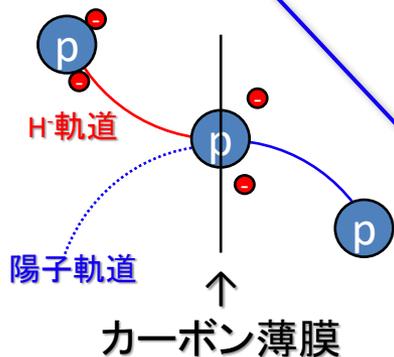
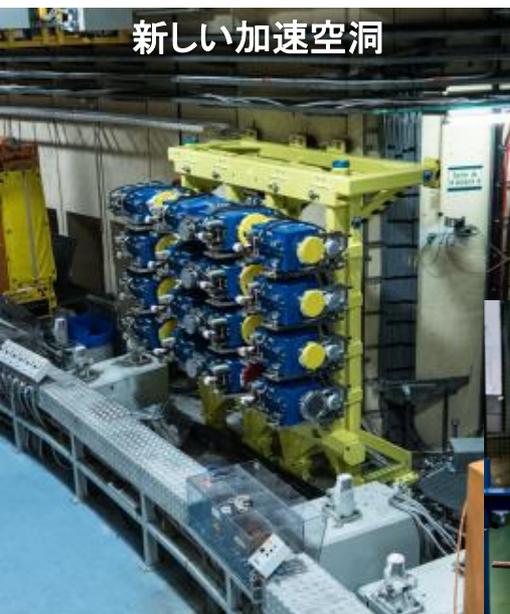
- エネルギーを引き上げ空間電荷効果を抑制
- H⁻イオンを加速

	Linac 2	Linac 4
エネルギー	50 MeV	160 MeV
加速粒子	陽子	H ⁻ イオン

PS Booster

- H⁻の電子をカーボン薄膜ではぎ取る
- 160 MeV → 2.0 GeVに加速
($\beta = 0.16$) ($\beta = 0.91$)
- ファインメットを使った加速空洞により全加速周波数をカバー 
- 旧システムでは3種類が使われていた

新しい加速空洞



CERN News 18 July 2017

加速器のアップグレード作業はほぼ完了
→ LHC運転再開に向けた調整中

CERN News 12 June 2019