

LHC • ATLAS status

陣内修

東京工業大学

August 11, 2020

新テラスケール研究会 on Zoom



今回の新Terascale研究会は LHCに関して言うと

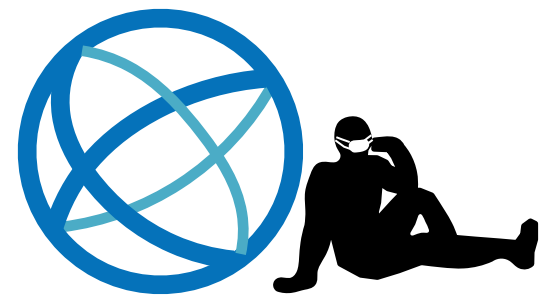
- 最新物理解析結果（主にRun-2から）
- Run-3で期待される物理（理論から）
- HL-LHC (Run-4以降)への期待（理論から）

の話題が混在

- 現行のLHC/ATLASと共に
- Run-3, HL-LHCで期待される検出器performance
をここで最初にまとめています

注) 内容に偏りがあります, 予めご了承下さい

CERN/LHCの近況・計画

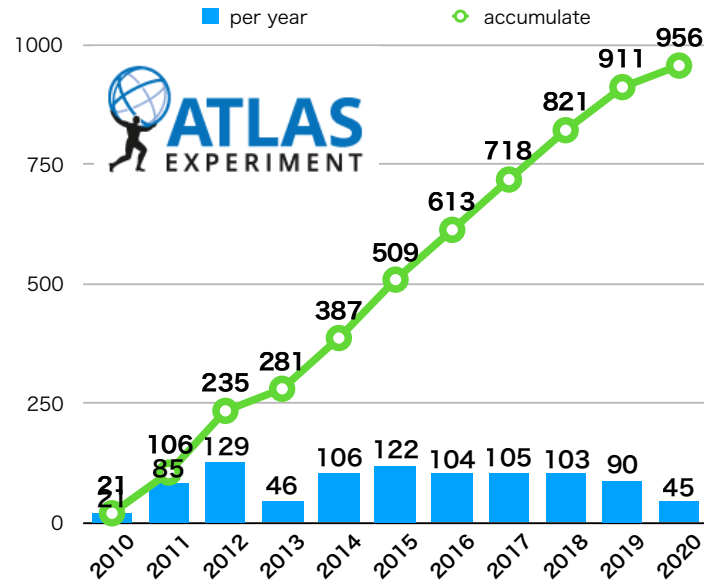


LHC/ATLAS これまでの結果

2020/08/11
新Terascale



ATLAS 出版論文数 推移(submit含む)



CMSは今年の6月に1000本を越えたいらしい [リンク](#)

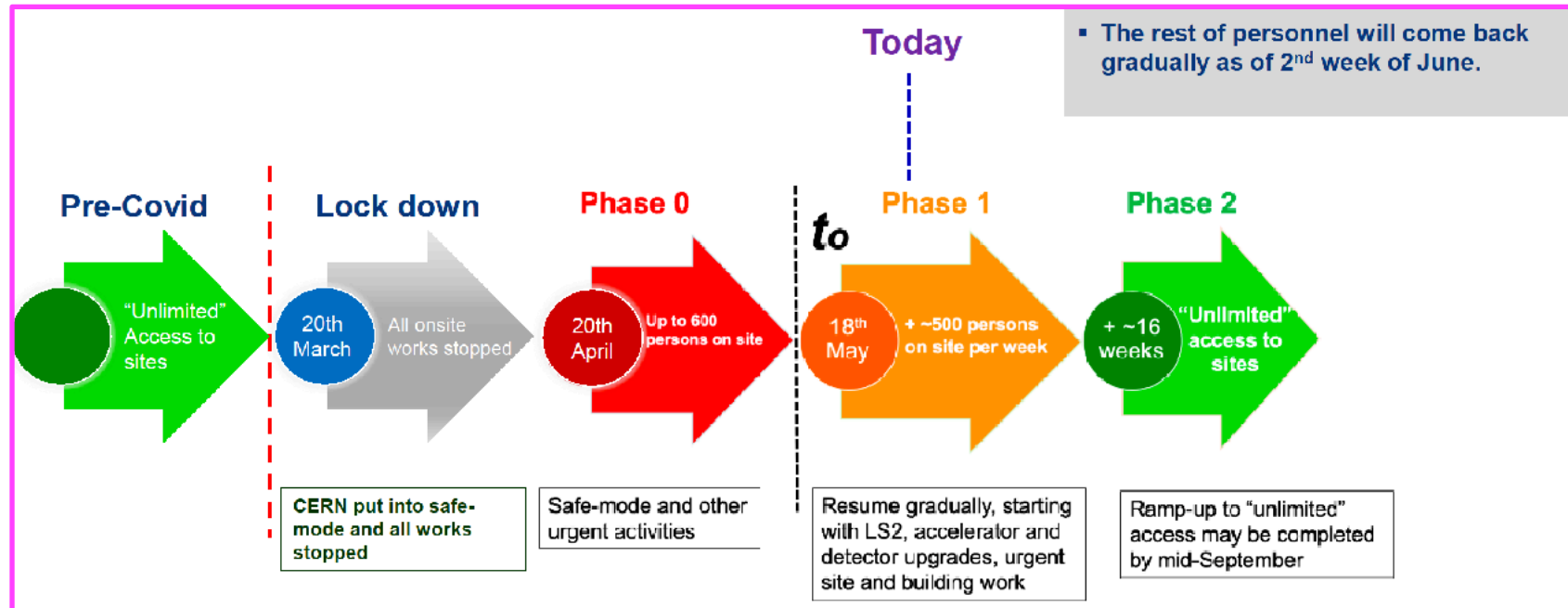
ATLAS 論文出版戦略

- Full Run2 論文 2019年
- 探索論文 (包括的なもの) 2020年
- Sys. dominantな解析 2020年
- 精密測定論文 それ以降

	2010 (H22)	2011 (H23)	2012 (H24)	Run1	2015 (H27)	2016 (H28)	2017 (H29)	2018 (H30)	Run2
Energy	7 TeV	7 TeV	8 TeV	7-8 TeV	13 TeV	13 TeV	13 TeV	13 TeV	13 TeV
delivered	48.1 /pb	5.46 /fb	22.8 /fb	28.3/fb	4.2/fb	38.5/fb	50.2/fb	63.3/fb	156/fb
ATLAS	45.0 /pb	5.08 /fb	21.3 /fb	26.4 /fb	3.9 /fb	35.6 /fb	46.9 /fb	60.6 /fb	147 /fb
< μ >	9.1		20.7	~20	13.4	25.1	37.8	36.1	~34



Frédéric Bordry 2020/6/22



- 3/20 以降 通常6000人通勤しているCERN職員はsafe modeにより250人レベルへ
- 4/20 以降 600人レベルへ
- 5/18 (≡ t_0) 以降 +500人/週 の割合で人々を戻していく
(8月現在 ATLAS関係者は200人程度 site accessをしている)
- $t_0 + 16$ weeks (9月半ば?) CERN reopen 予定



<https://home.cern/news/news/accelerators/l2-report-new-schedule>

Closure of accelerators

- 2020/7/3 Closure of the PS Booster
Closure of Linac 4
- 2020/8/28 Closure of the PS injection area
- 2020/10/9 Closure of Linac 3
- 2020/10/23 Closure of the PS extraction area
- 2020/12/4 Closure of the SPS

- ▶ • **2021/2/19 Closure of the LHC**
- 2021/5/21 Closure of LEIR

2020年末まで LHC の 7 out of 8 sectors がcool downされる

Electrical quality tests, powering tests and a long campaign of quench training for the magnets will follow

- ▶ • **2021年9月に LHC low intensity beamを使ったテストを行う**

Restart of physics runs

- 2021/8以降 ISOLDE, North Area, AD/ELENA, East Area, etc.

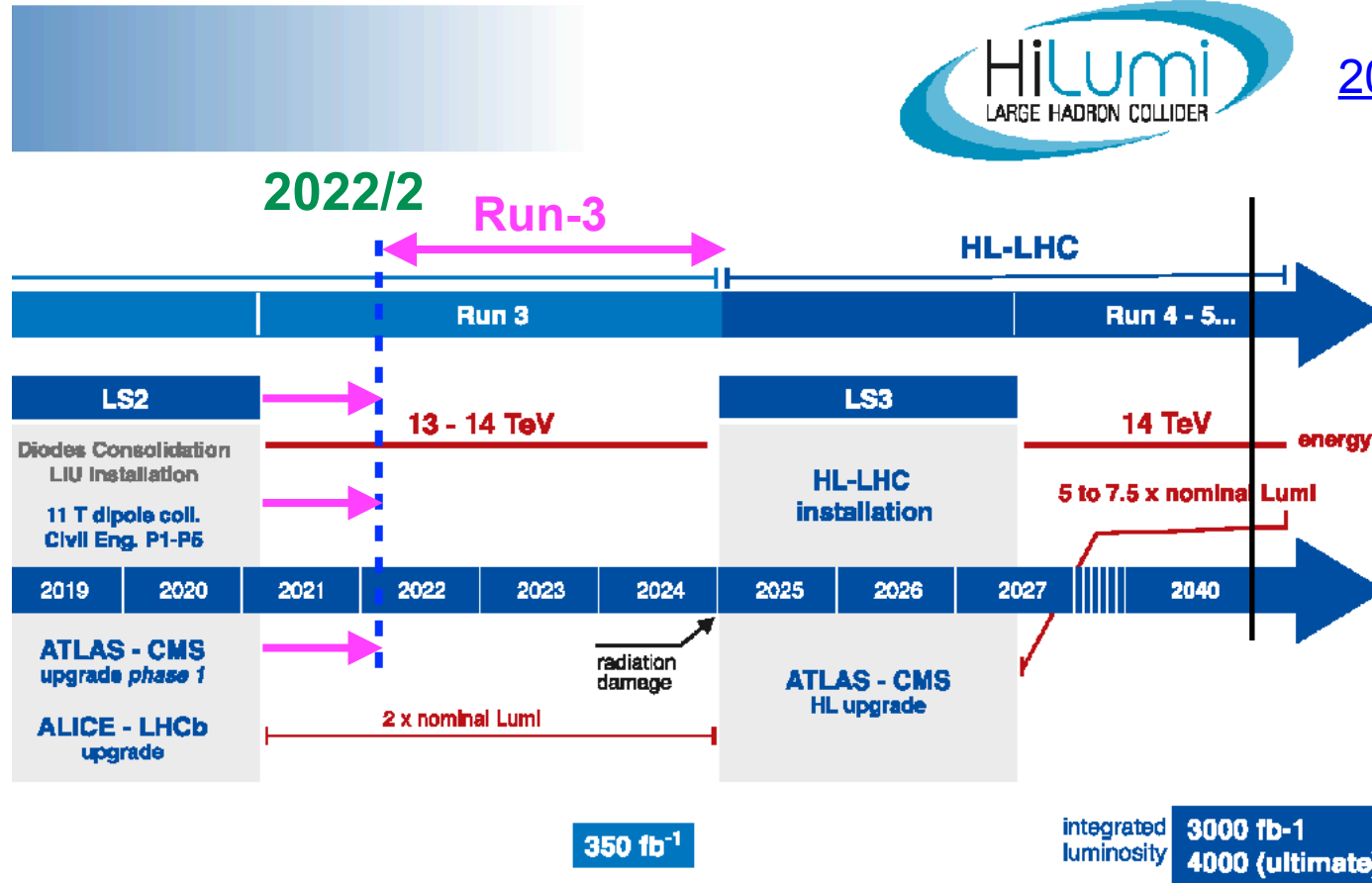
- ▶ • **2022/2/1 Closure of LHC experiments**
- **2022/2 LHC Physics run**

LHC/ HL-LHCの予定

2020/08/11
新Terascale



2020.1月版



- Run-3開始はコロナの影響で遅れる (検出器の状況次第では 2021.11に早まる可能性も)
- (現状では) LS3の開始は予定通り2025より
- 現場レベルではHL-LHC向けUpgradeの予定がほうぼうで大幅に遅れがでており元々のスケジュール遵守は厳しい

RUN-3に向けて





- pile-upの増加 ($\langle \mu \rangle = 70$ 程度まで)
 - **pile-up対策**
- 検出器性能の劣化
 - **データ品質試験の重要性**
- HL-LHC前に限られたデータ統計で最大限の成果を得る
 - **解析手法の改善**
- **High pile-up環境下で どのように性能を維持（改善）するか**
 - low pT track
 - low pT lepton ID
 - MET in high pileup
 - Flavor tagging in high pileup
 - Vertexing in high pileup
 - Calorimeter trigger in pileup

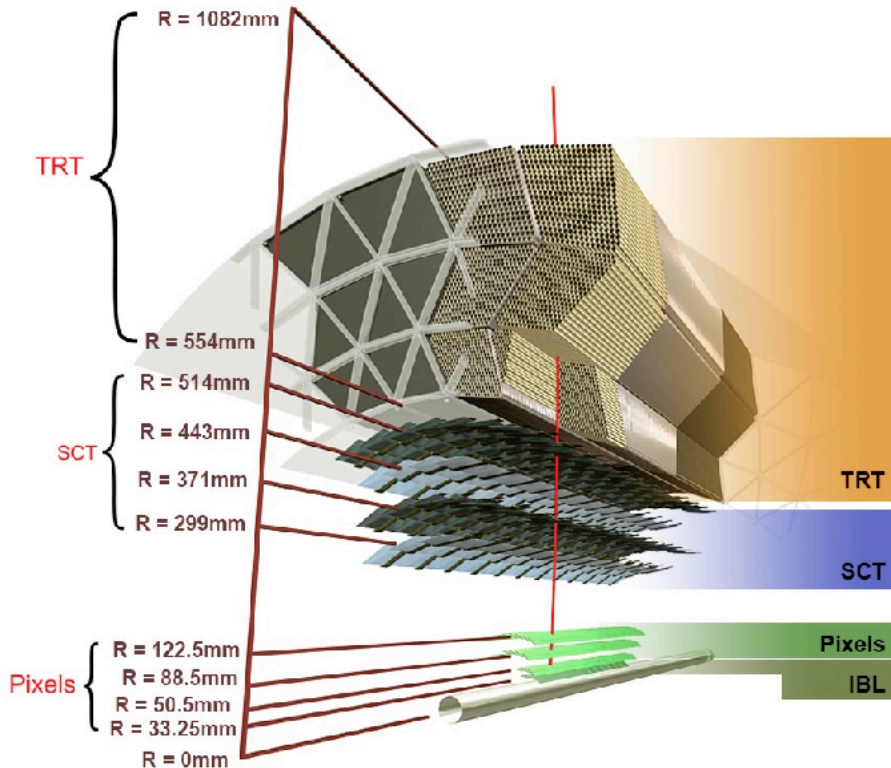
ATLAS Tracking system (Run3まで)

2020/08/11
新Terascale



- $|\eta| < 2.5$ & 2T ソレノイド磁場
- pixel: IBL(1層) + Pixel (3層) **b-tag vertex**
2014年にインストール
- strip: SCT (両面 4層) **pT 測定**
- gas tube : TRT (平均30層) **electron ID**

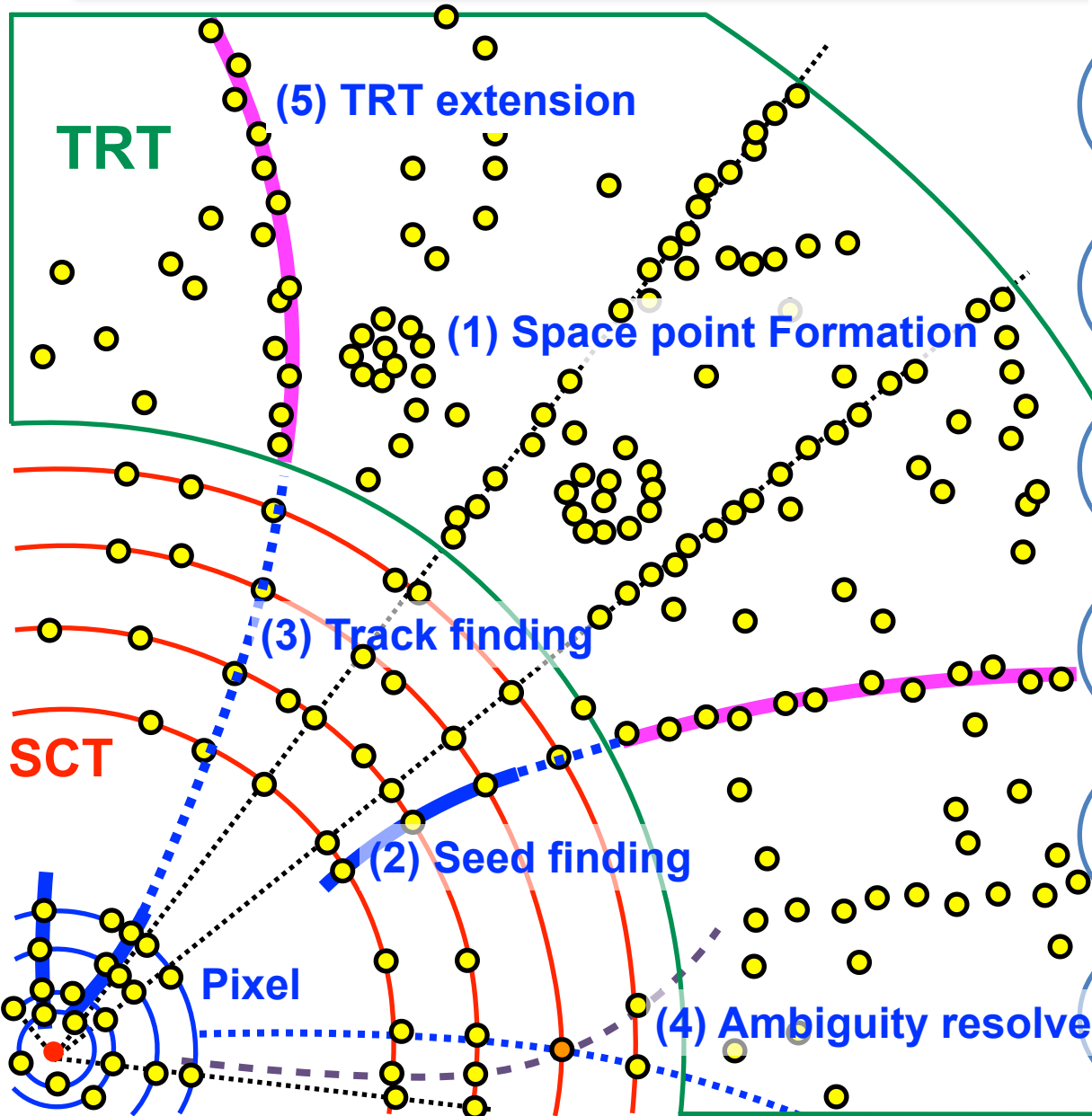
	element size	Resolution	N channels
Pixel & IBL (silicon pads)	50 μ m \times 400 μ m (x 250 μ m IBL)	<u>10μm\times115μm</u>	92M
SCT (Si μ strips)	80 μ m \times 12cm	17 μ m \times 580 μ m	6.3M
TRT (gas tube)	4mm	130 μ m	350K



参考(CMS)



- $|\eta| < 3.0$ & 3.8T ソレノイド磁場
2017 Phase 1 でPixel 総取り替え
- 3cm – 1.1 m all Silicon
- Pixel: BA: 4層, EC: 3層づつ
- Strip: 両面 BA: 4層, EC:12層づつ



(1) Space point formation

検出器Hitからクラスター生成

(2) Seed finding

つながる 3 Hits からseedを作る

(3) Track finding

likely pathの中からKalman filterで最適trackを選別

(4) Ambiguity resolving

combinationで一番良いfitを採用
Silicon only trackで一番いいものを選ぶ

(5) TRT extension

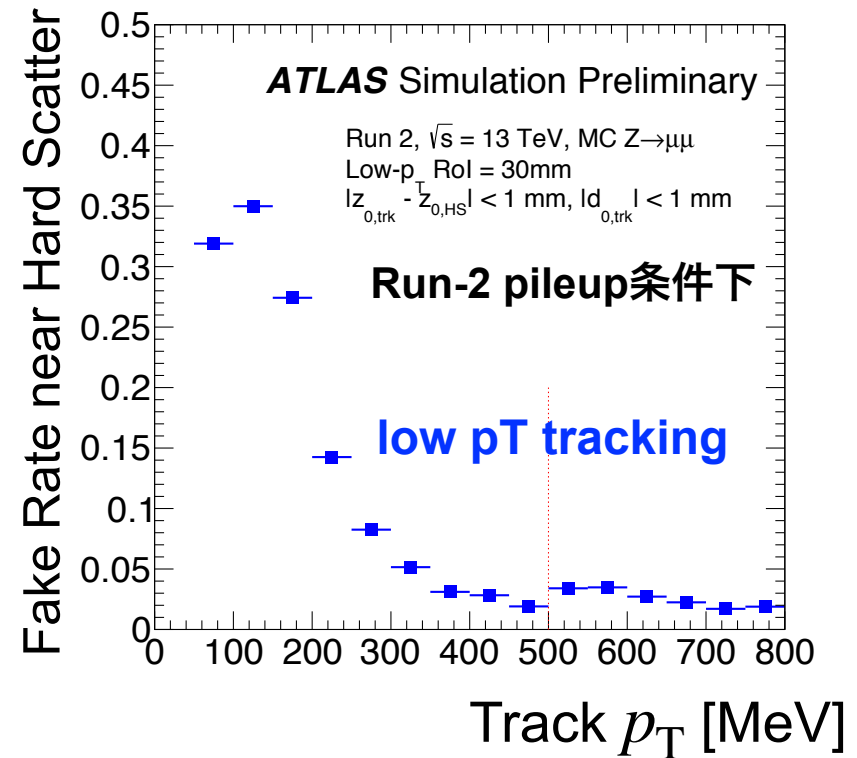
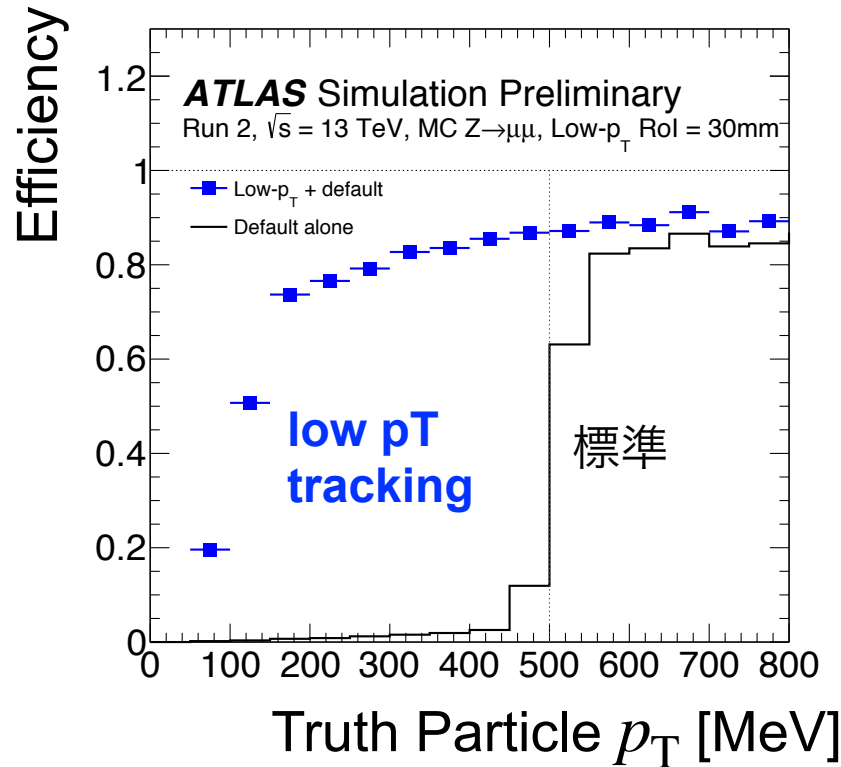
pT精度が増す, 最終track paramを決定

(6) Vertex finding

primary vertexの決定
secondaryやphoton conversionも



- Standard Trackingでは500 MeV以上
- 新物理探索のため low pT track再構成がとても重要に
 - Charm taggingを改善, SUSY 質量縮退 model, etc
- 標準tracking後に, 未使用のhitに緩めた条件で再度 tracking (**Low pT tracking**)



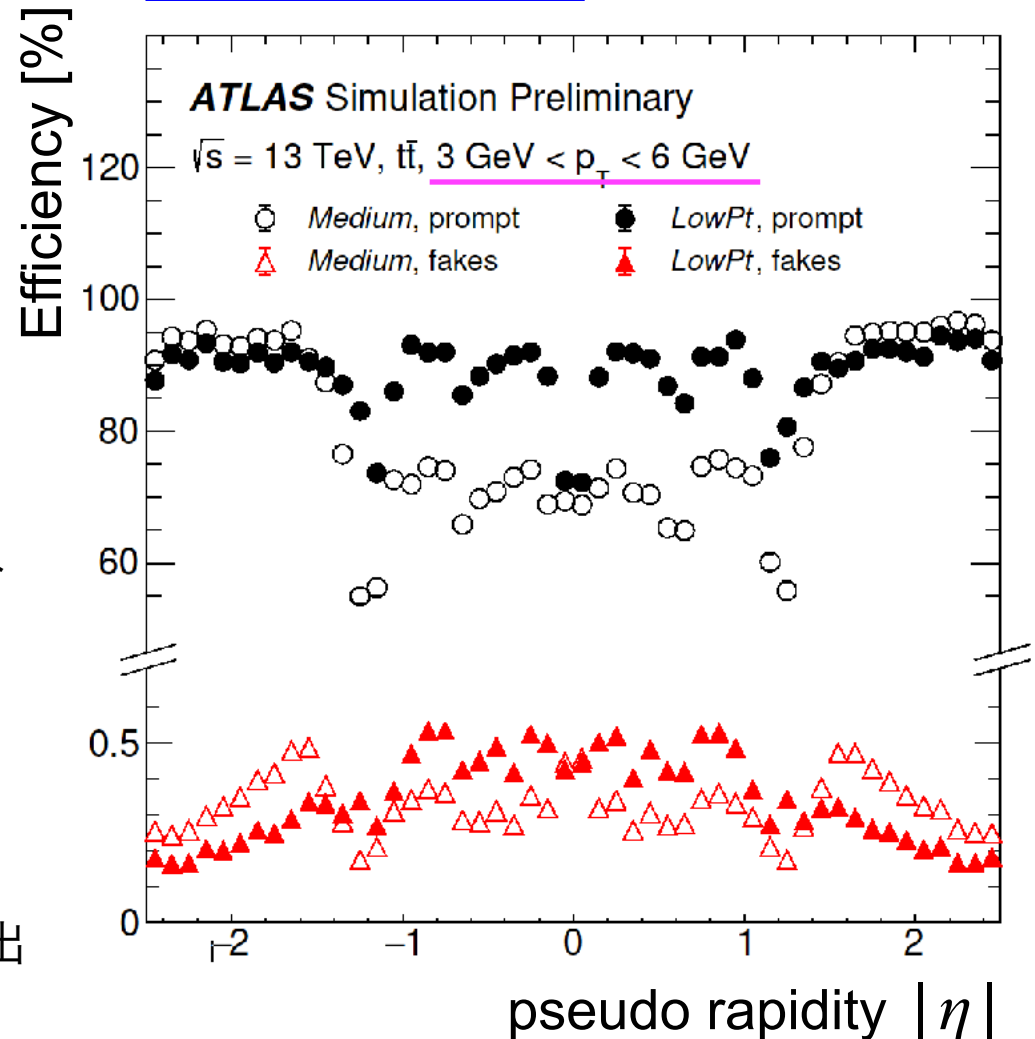
- ROI (track seedが向かう領域) 範囲を最適化, Run-2 PU環境で200 MeVまでは下げられる
- High pileup下では難しい ($\mu=70$ で動作するものが必要), さらなる改善必要



- 新物理感度を上げるために重要
- pT 5GeV以下のmuonはIDが困難
(カロリメータで数GeV落とす)
- 新変数に基づく**Low Pt WP**を課すことで
 - 3 GeV-6 GeV で **~90%**
 - miss ID below **0.5%**
- **MBS** (Momentum Balance Significance) : ID とMS + Caloエネルギーロス の運動量バランス
- **SNS** (Scattering Neighbor Significance): trackの向き変更量
- **SCS** (Scattering Curvature Significance): 崩壊によるkinkを検出



[ATL-PHYS-PUB-2020-002](#)



Pile-up環境下におけるMissing ET

2020/08/11
新Terascale



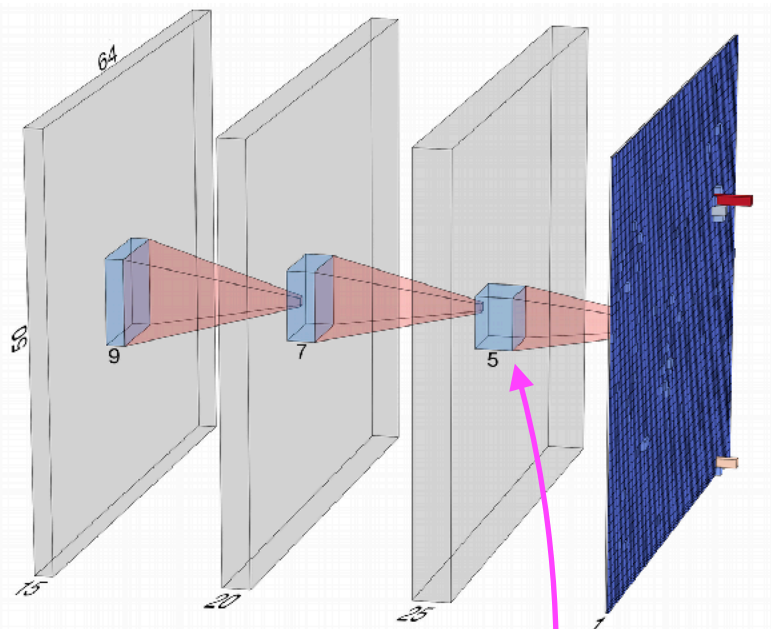
標準としてはまだ使われていない

しかしRun3用として有望

[ATL-PHYS-PUB-2019-028](#)

イベントはmulti-layerイメージとして表現される
CNN (convolutional Neural Network) を

トレーニングして pileupを排除した E_T^{miss} を予想



$|\eta| < 2.5$ 50bin
full ϕ 64bin
 $0.1 \times 0.1 \text{ rad}^2$ に相当

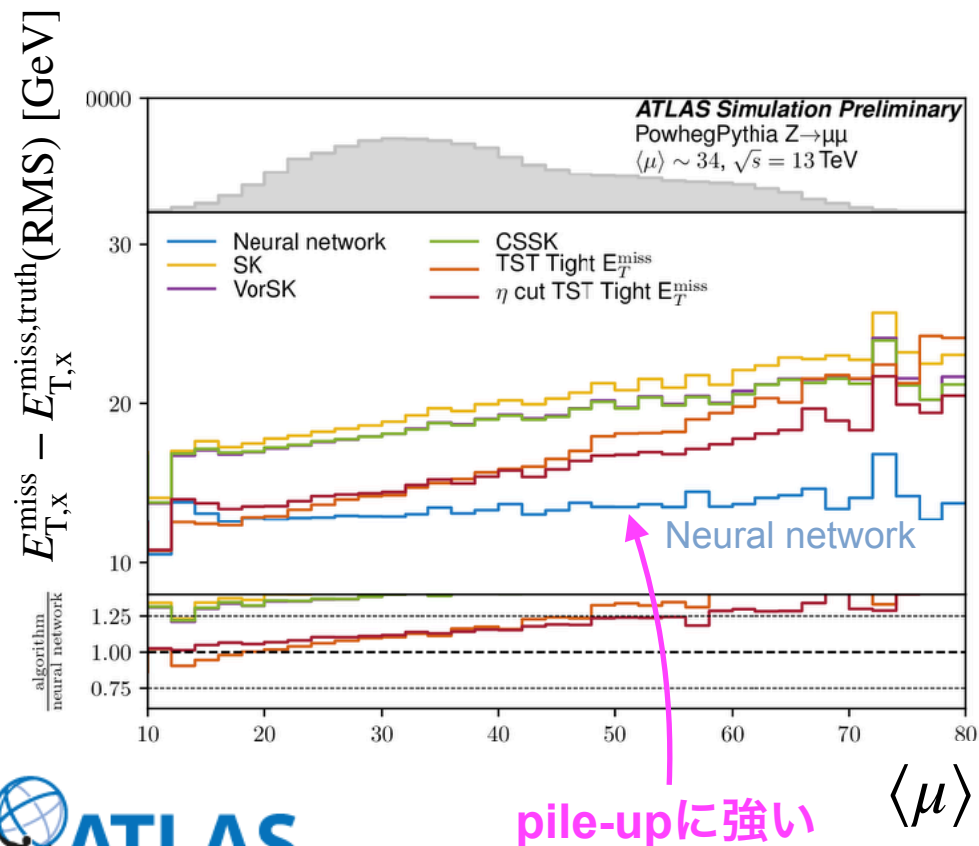
青い箱
filter sizeを表す

Inputsは Cluster分布, primary, pileup vertex tracks

SK (Soft Killer)

CSSK (Constituent Subtraction + SK)

VorSK (Voronoi subtraction +SK)



ATLAS flavor tagging



Low-level taggers: 物理事象ベース, 検出器依存

secondary vertex
mass, distance...

jet topology
decay chain, c-hadron...

tracks
impact param.

tracks
impact param.
decay multiplicity
quark mom frac

SV1

JetFitter

IP3D

RNNIP

[ATL-PHYS-PUB-2018-025](#)

[ATL-PHYS-PUB-2017-013](#)

BDT

NN

NN

MV2

DL1

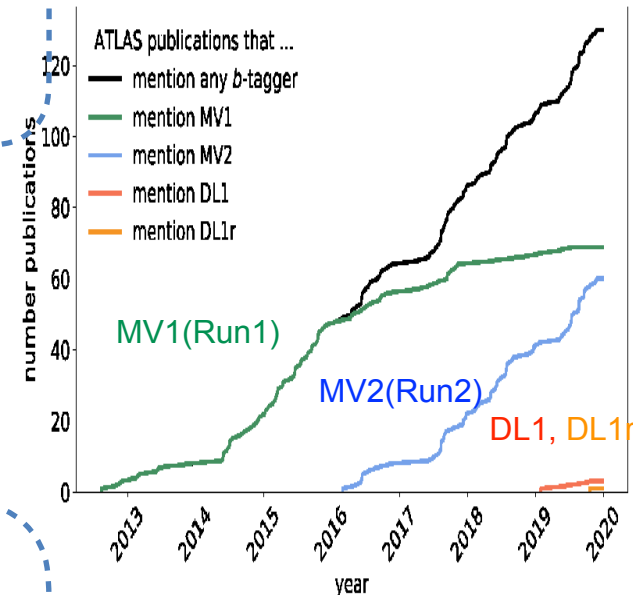
DL1r

手法は異なるが
インプットは同じ

RNNIP追加 [ATL-PHYS-PUB-2017-003](#)

(トラックImpact Param間の相関見る)

出版に登場する回数

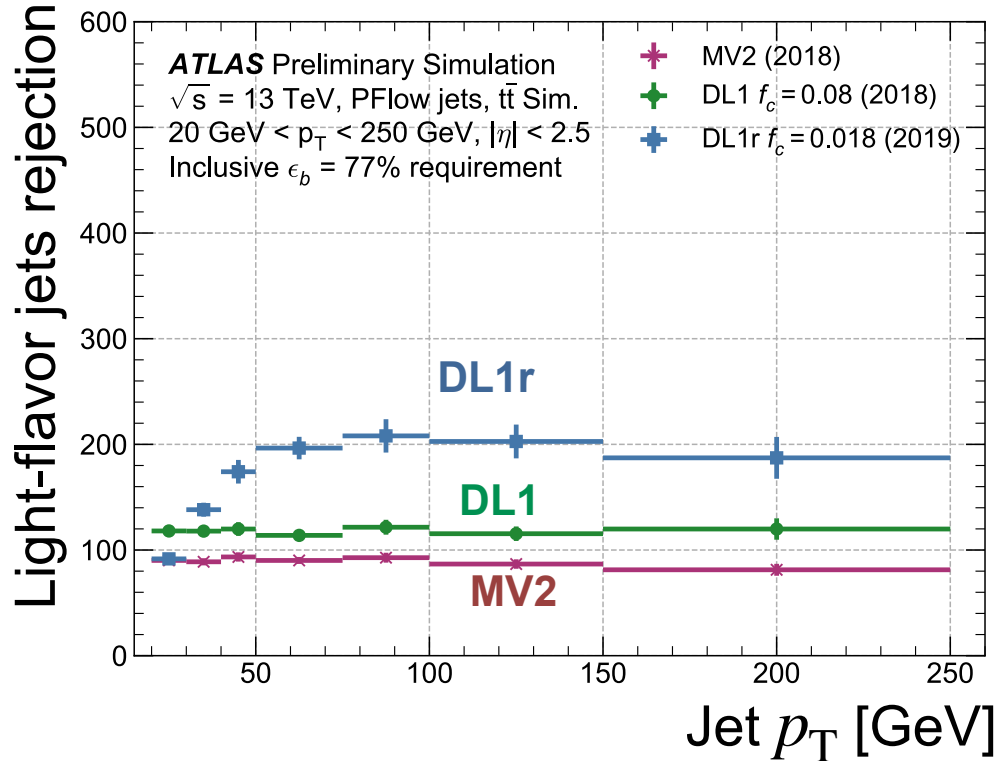


Philipp Windischhofer

High-level taggers: Likelihood評価, 検出器非依存

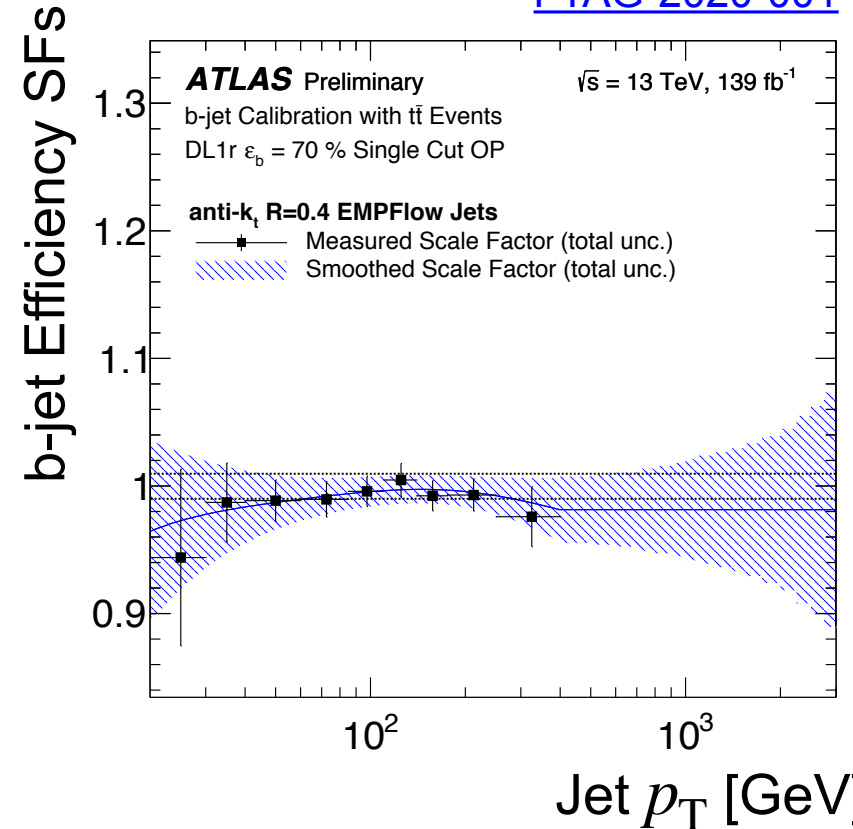


FTAG-2019-005



- b-tag効率77%に対するlight jet rejection DL1rを使うと, light jet, c-jetのrejectionが大きく改善する

FTAG-2020-001

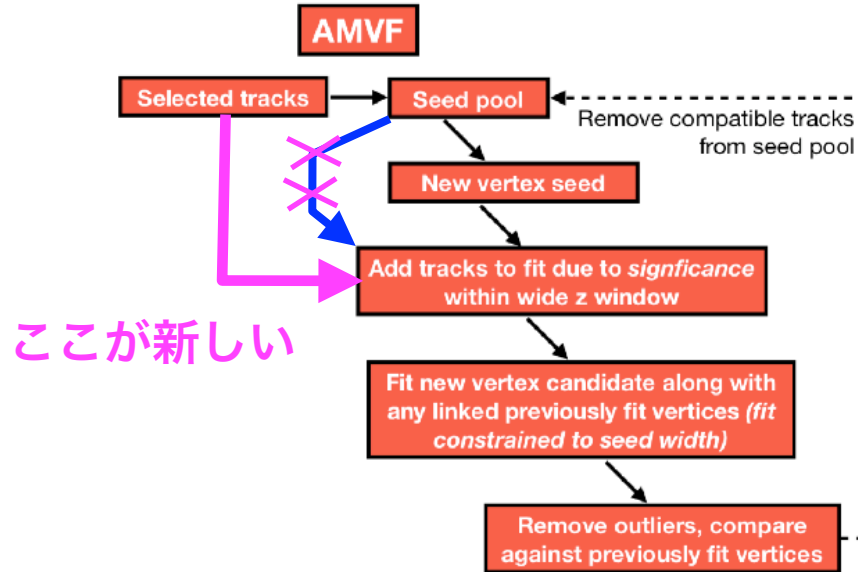


- Top dataを使って測定, 効率の精度1%程度で決定, high p_T では数%に広がる

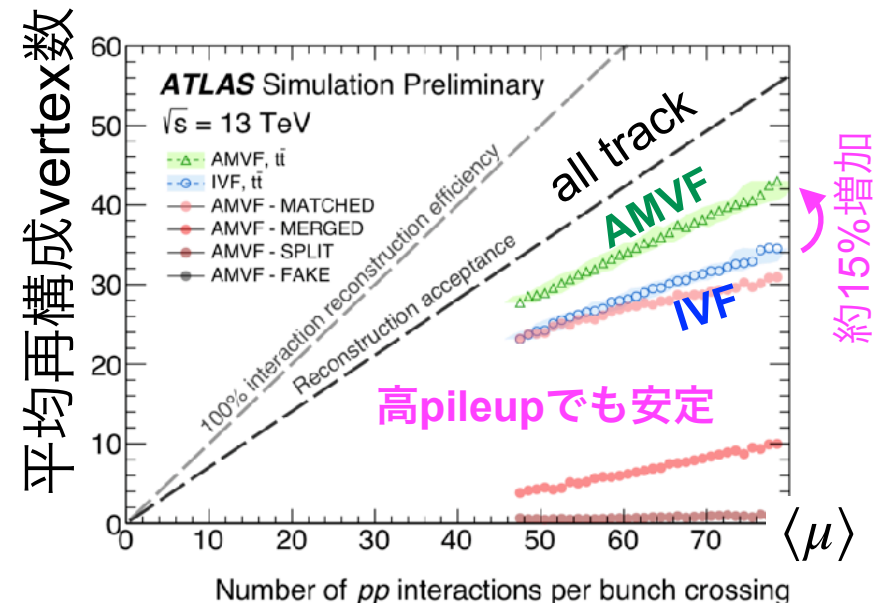
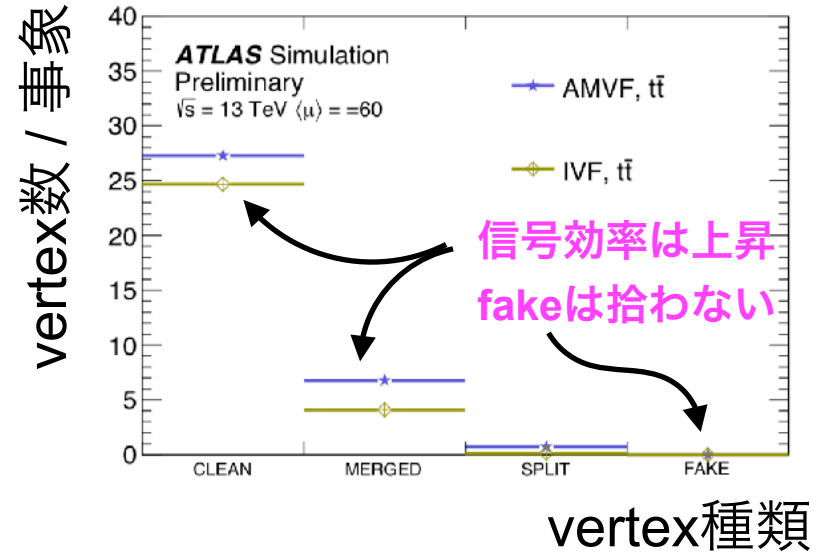
Vertex-ing in high pileup



Adaptive Multi Vertex Finder (AMVF) vs. Iterative Vertex Finder (IMV)



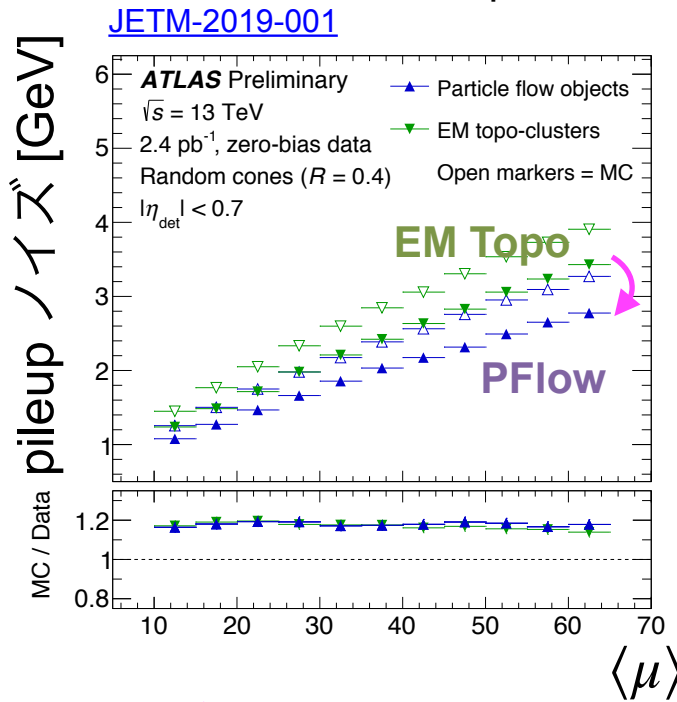
- **IMV**はiterativeにvertexを作りtrackを探して(足して)いく
→ 既成のvertexはそのまま, いじらない
- **AMVF**は
複数のvertexとtrackとの相関 (weight)を同時に扱う
→ global fitの結果 vertexの位置が変化
→ trackは global track poolから選ぶ
(既に使われているものも対象)



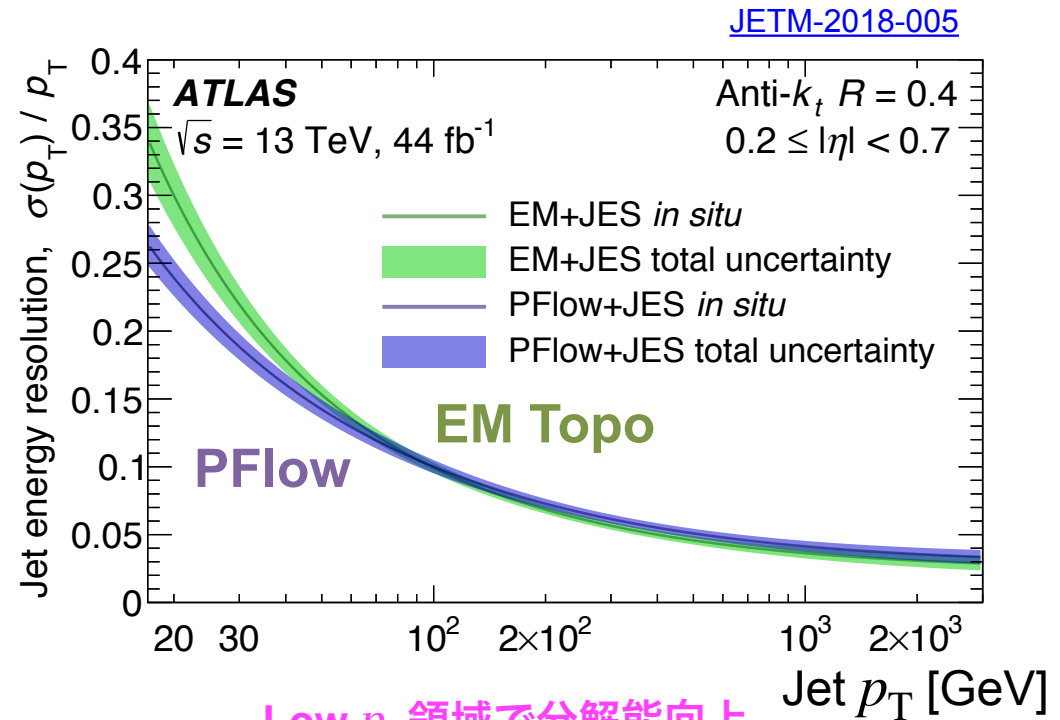
Jet reconstruction in high pileup



- 2017年頃 **Particle Flow (PFlow) algorithm** 実戦投入される [Eur. Phys. J. C 77 \(2017\) 466](#)
現在アトラスの標準 Toolに (それまではTopological clustering)
- **TopoClustering** : Calorimeter cell energy をtopological に3次元的に組み上げる (Seed →しきい値を越えた周りのcellへ)
- **PFlow objects** : Track + Calorimeter
 - Trackに対応するTopo clusterをJetから抜く
 - 選ばれたtrackと残ったTopo clusterを統合

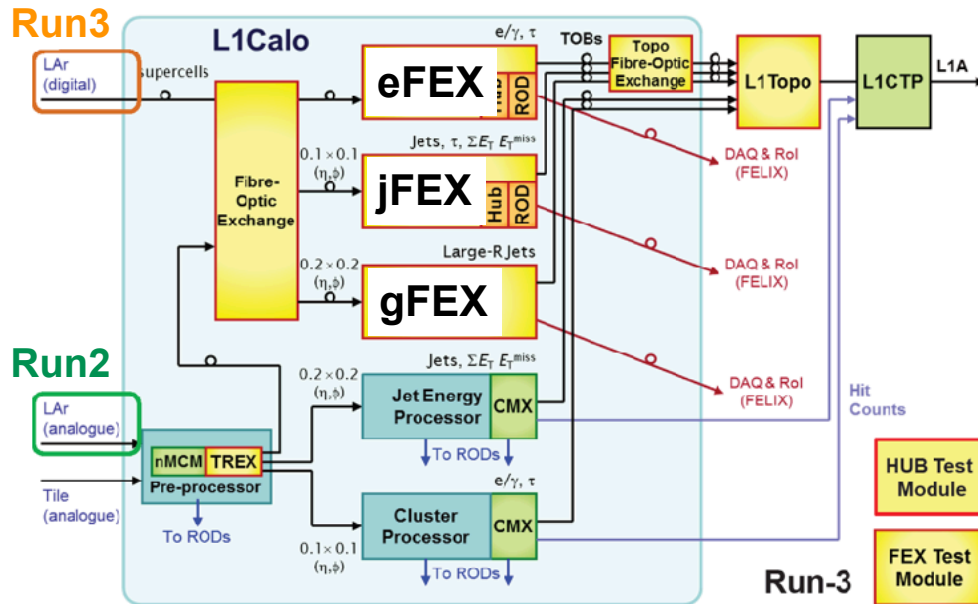


Track情報を優先するので, pileupに強い

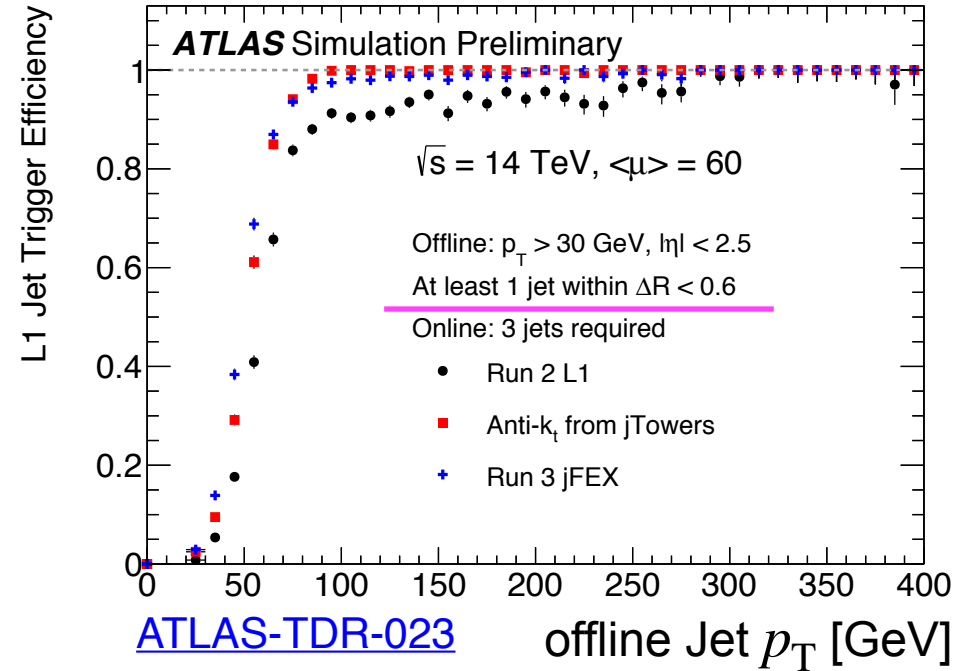


Low p_T 領域で分解能向上

Phase-I L1 Calo trigger for High luminosity



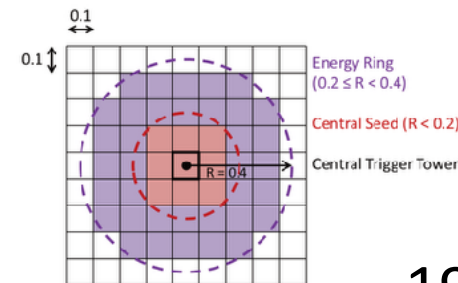
近くにもう一つjetがいたときのL1トリガー効率



- Run3から3つの新Hardware trigger FEX (Feature Extractor) を導入
 - eFEX: isolated e/γ , tau 候補
 - jFEX: ジェット, HT, MET
 - gFEX: large R-jet, MET, etc.
- Run3初期は Run2 scheme と同時に走らせる (Run2式は徐々に廃止)

- jFEX では0.9 x 0.9 の丸形sliding window
- 他のjetに近いjet の再構成に強い
- H \rightarrow bb のboostしたものなどに有効

- Run2 L1で90% trigger効率
 → jFEXでは100%近くに



HL-LHCに向けて

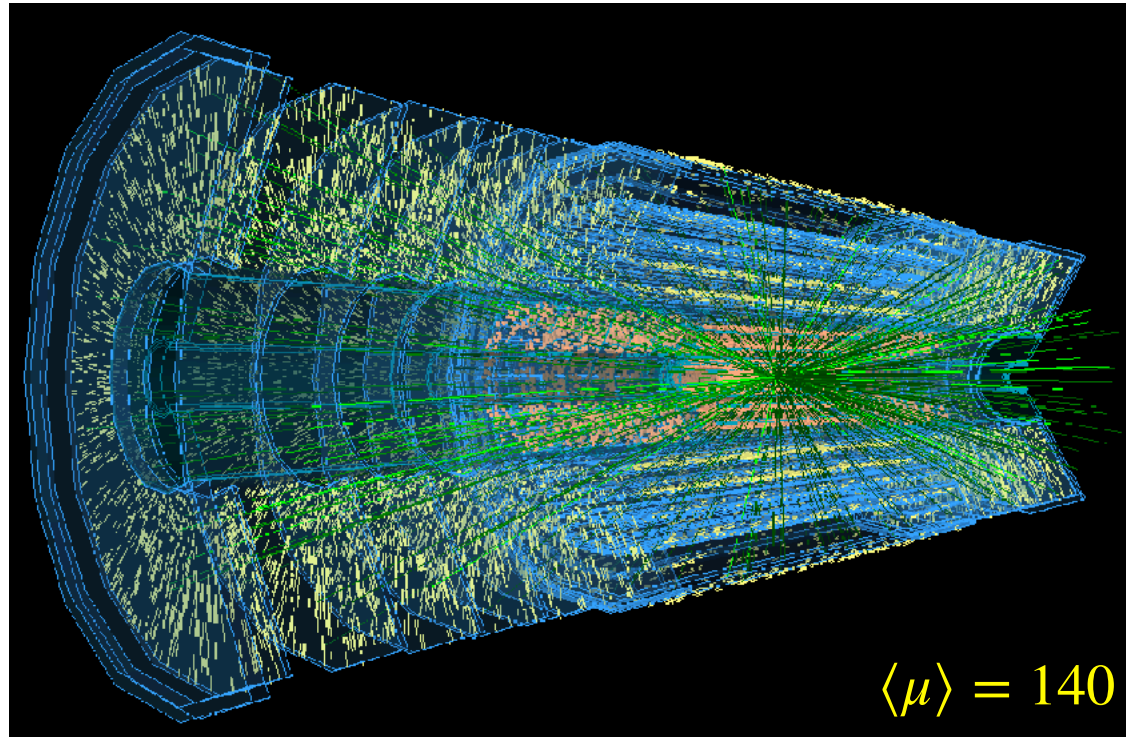


Pileup at HL-LHC

2020/08/11
新Terascale

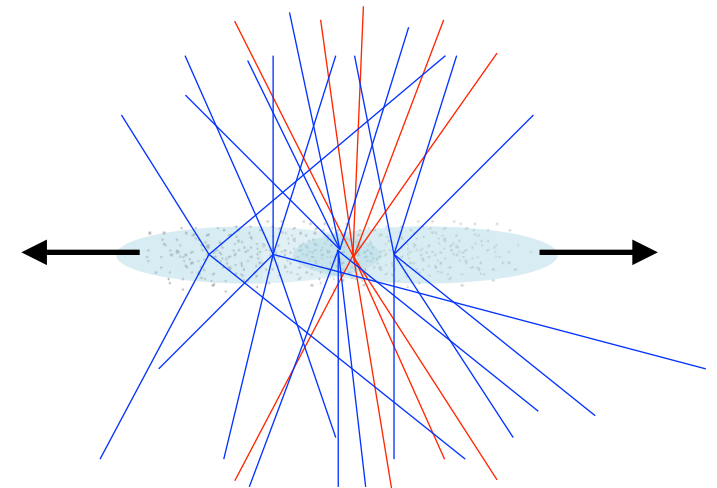


$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$, instant Lumi $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 $\langle \mu \rangle \sim 200$, 最終 Luminosity $4,000 \text{ fb}^{-1}$



赤：信号 (Hard Scattering)

青：BG (pileup)



赤のトラックだけを選び出したい

- 1) HL-LHC実験 = 「pileupとの闘い」
pileupを制するものはHL-LHCを制する
- 2) high bandwidth data flow, 大量データの扱い

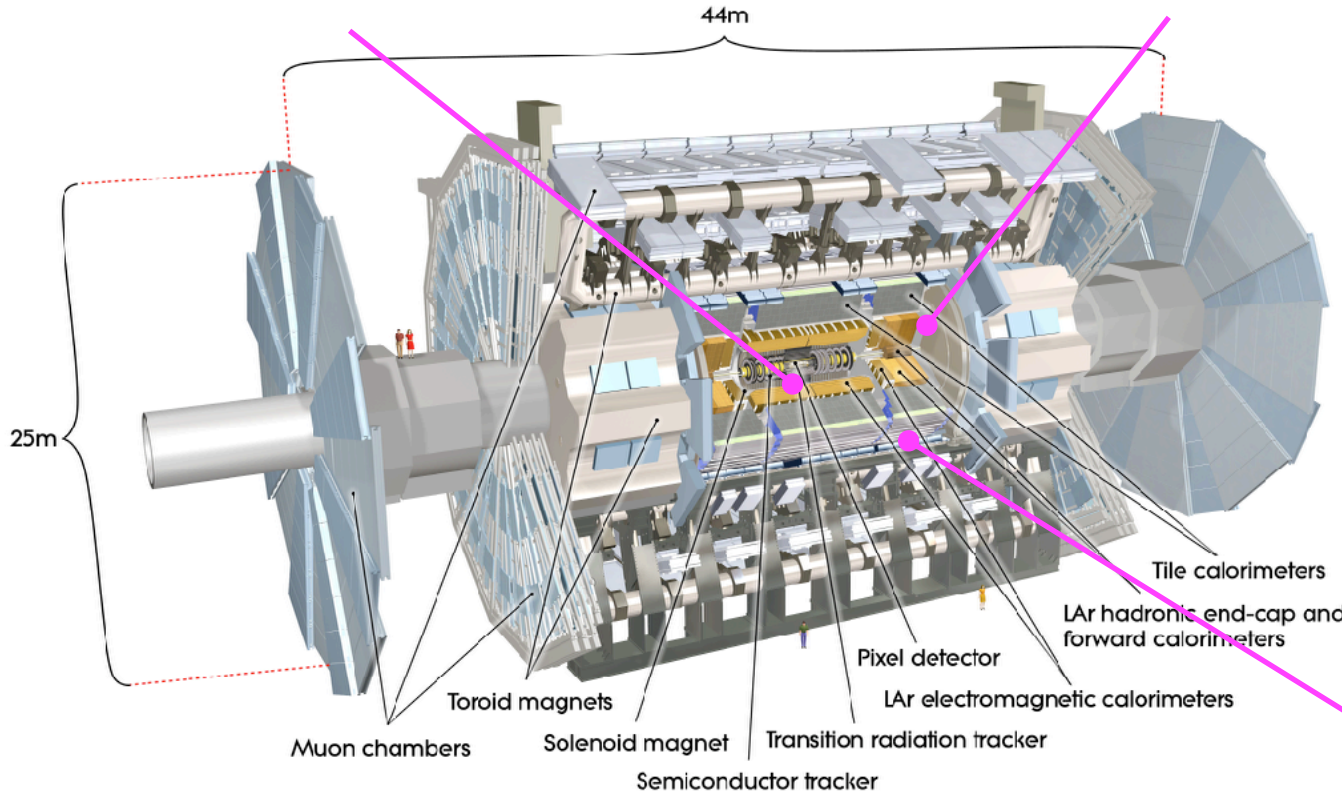


[2] 新内部飛跡検出器 (ITk)

- 全シリコン, $|\eta| < 4$ までカバー

[3] 微細時間分解能検出器 (HGTD)

- HL-LHCの高pileupを抑制



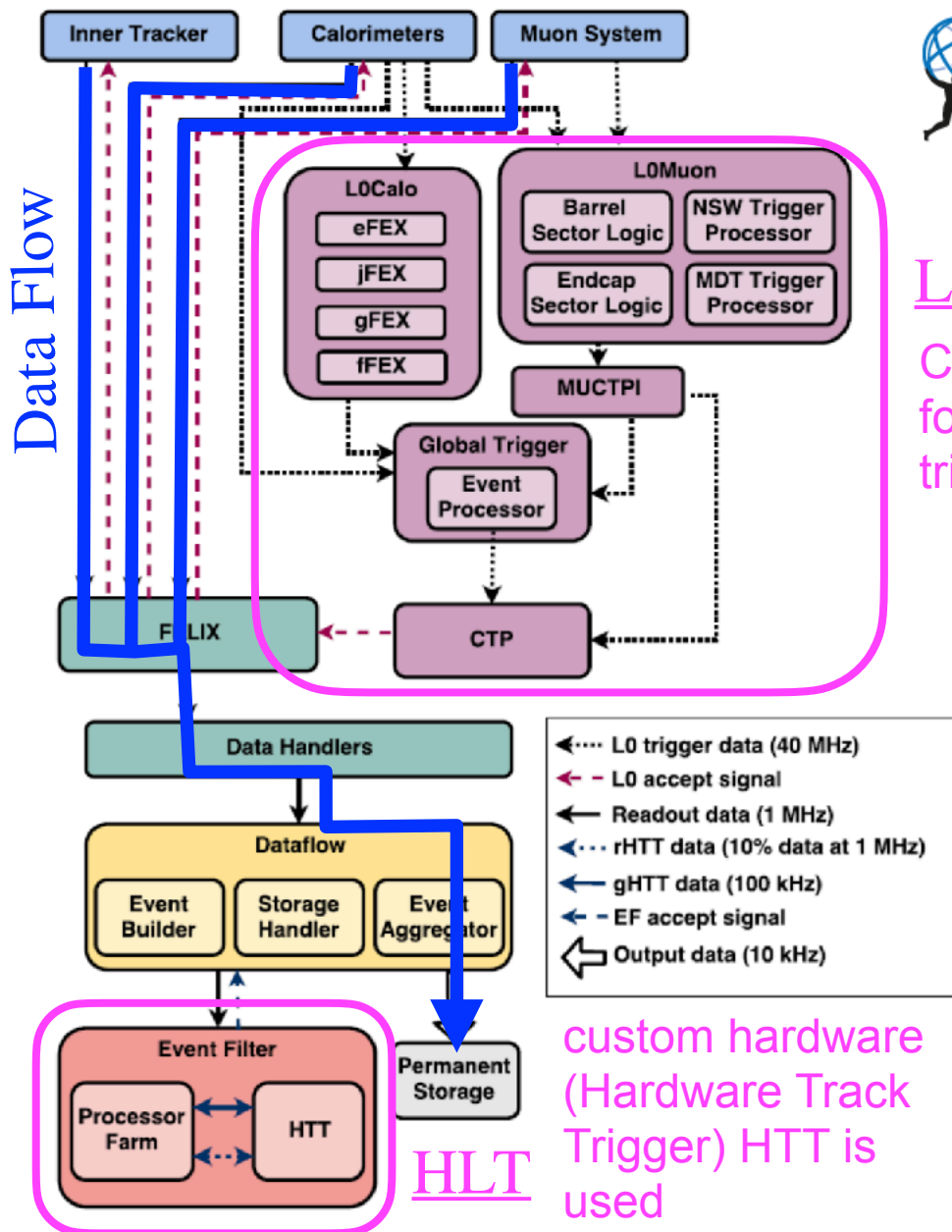
[1] DAQ Upgrade

- L0ハードウェアトリガー
- Off-detector TDAQ
エレクトロニクスの刷新
- Readout
- 後段トリガー

[4] 新muon chamber barrel inner region

$\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$, instant Lumi $7.5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
 $\langle \mu \rangle \sim 200$, 最終 Luminosity $4,000 \text{ fb}^{-1}$

[1] DAQ upgrade



L0

CALO, MUON info for L0 hardware trigger

L0 Trigger Rate 1 MHz
(100 kHz in Run1 & Run2)

L0 latency < 10 μs
(2.5 μs in Run1 & Run2)

Permanent storage @10 kHz
(1-2kHz in Run1 & Run2)

custom hardware (Hardware Track Trigger) HTT is used

HLT

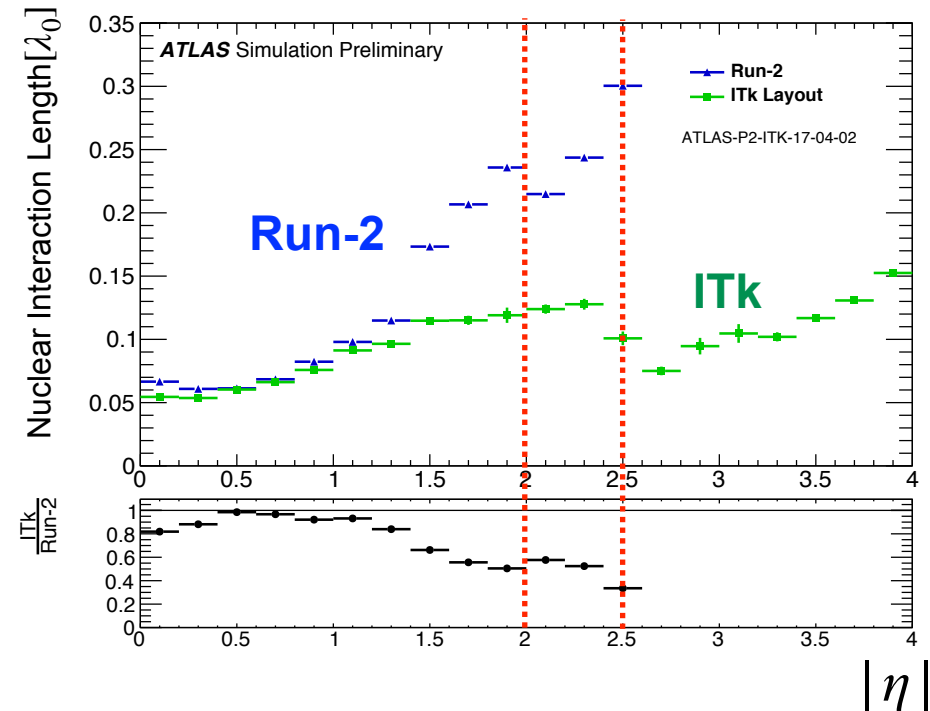
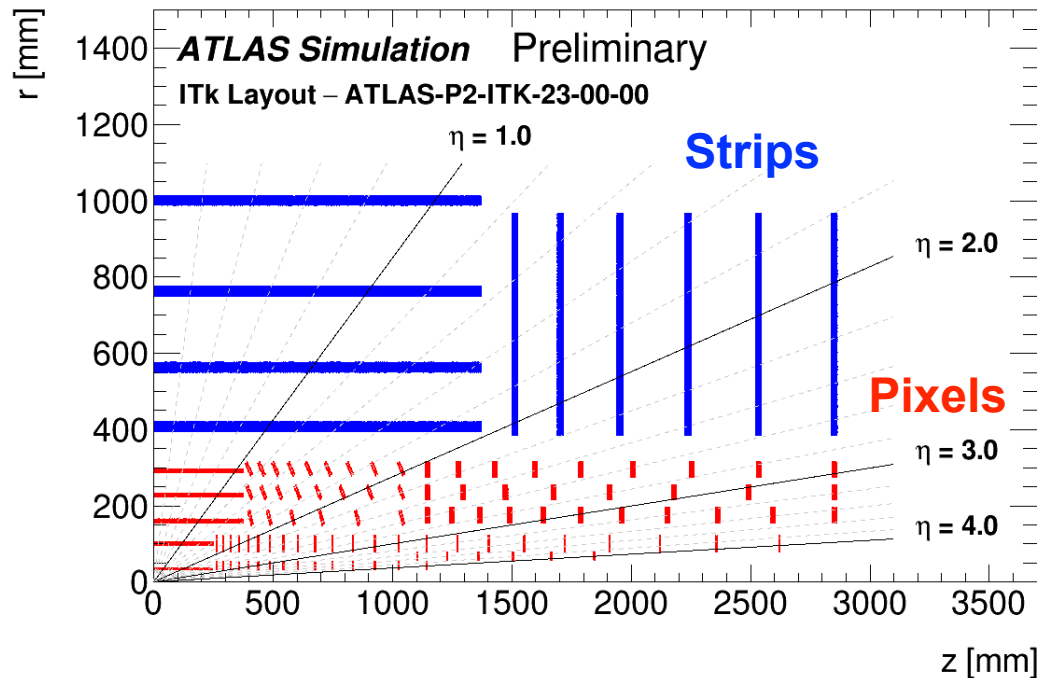
[2] ITk : The ATLAS Inner Tracker



- Pixel coverage $|\eta| < 4.0$ (Barrel $\times 5$, EndCap ring layers)
- Strip coverage $|\eta| < 2.7$ (Barrel $\times 4$, Endcap $\times 6$)
- 現行IBL $50 \times 250 \mu\text{m}^2 \rightarrow$ ITk $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ (1/5 サイズ)
- 最内層は半径 34mm ($25 \times 100 \mu\text{m}^2$ 3D Pixel sensors)



Run-2のIDに比して
最大50%の物質質量削減



- $p_T > 1 \text{ GeV}$, $|z_{\text{vertex}}| < 150 \text{ mm}$ のtrackに対して
- Minimum 9 hitを与える
- High efficiency & low fake rate [ITK-2020-002](#)

多重散乱, エネルギーロスを極力減少
→ trackingの品質向上

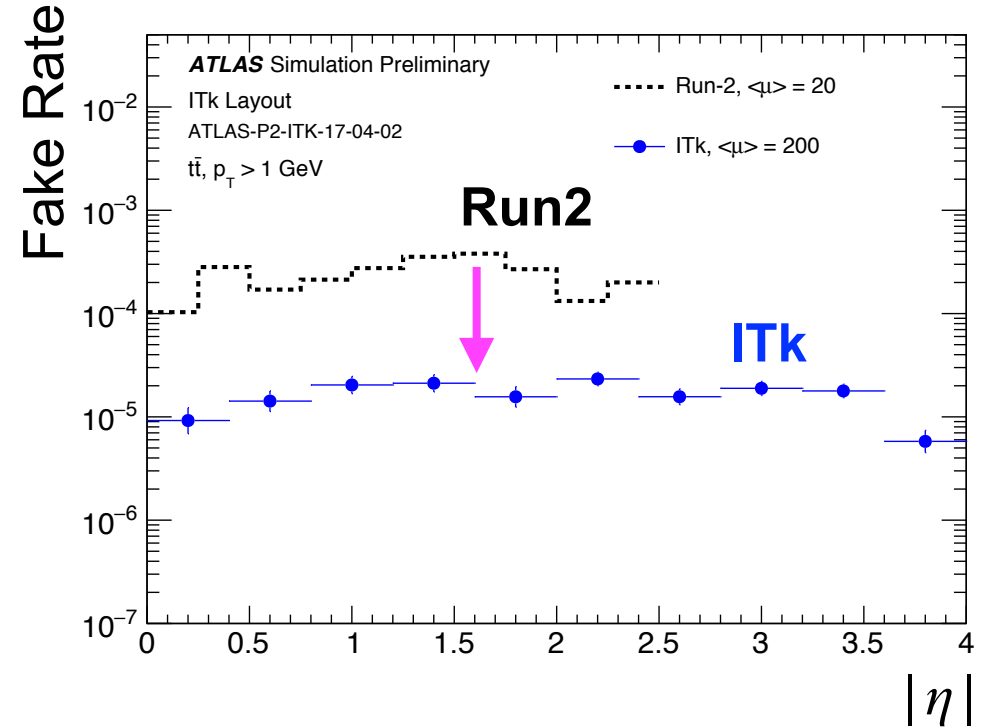
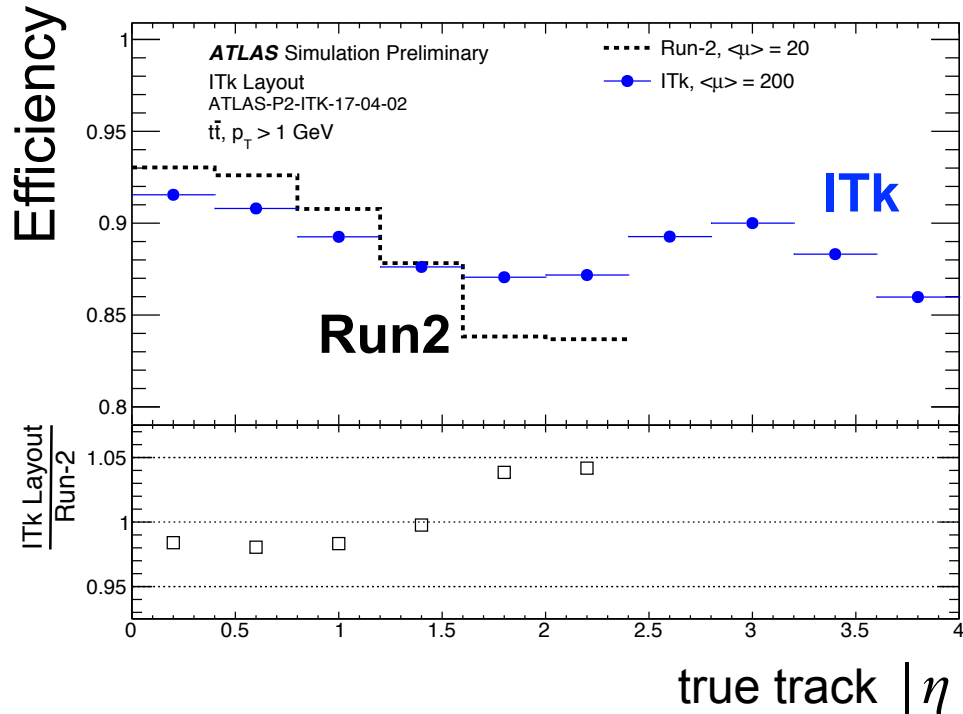
ITk efficiency & fake rate

2020/08/11
新Terascale



Efficiency : $|\eta| \sim 4.0$ まで 85-90% 台をキープ
Run-2 $\langle \mu \rangle = 20$ の performance と同等

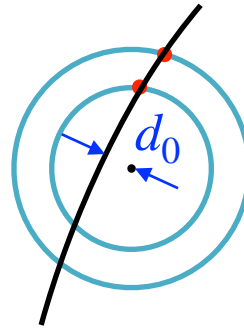
10倍のpileup環境にも関わらず
fake rateは1/10倍へ



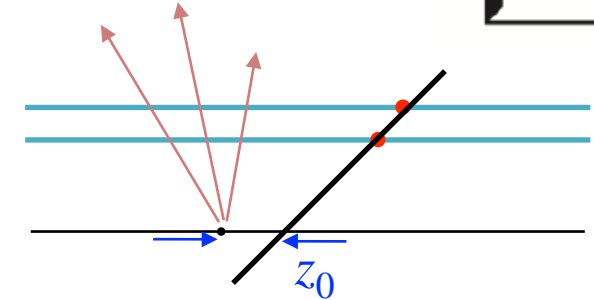
検出器内物質削減 → 物質との相互作用減らす
多数Hitカウント要求 → より厳しいtrack選別

ITk impact param resolution

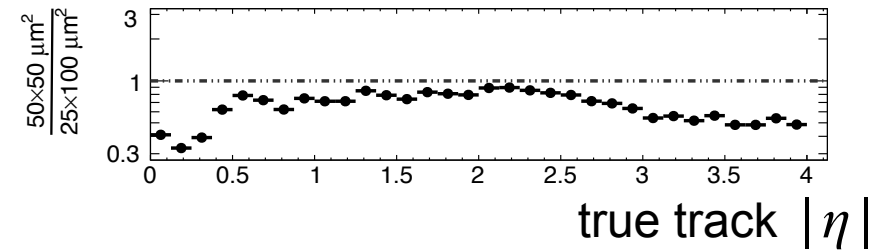
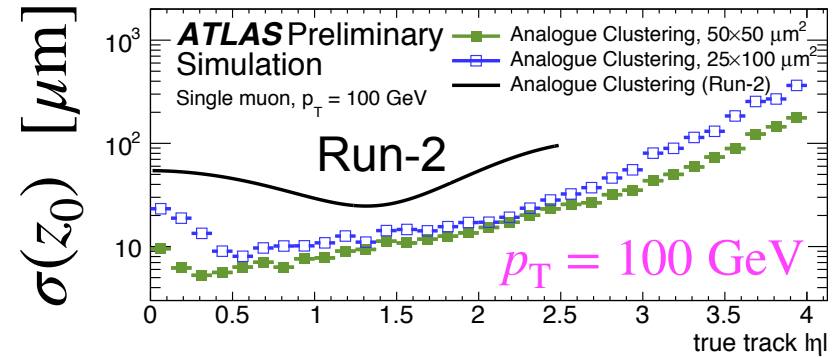
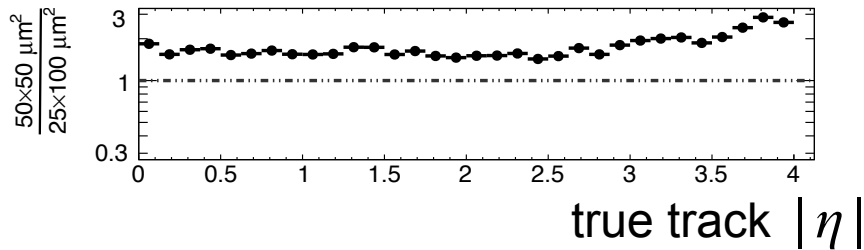
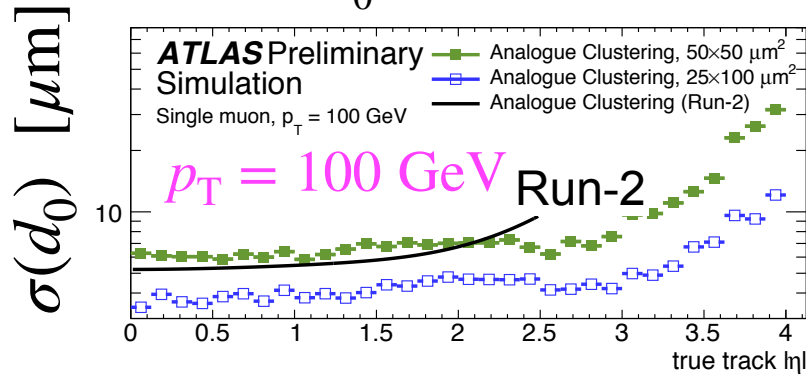
2020/08/11
新Terascale



d_0 : transverse



z_0 : longitudinal

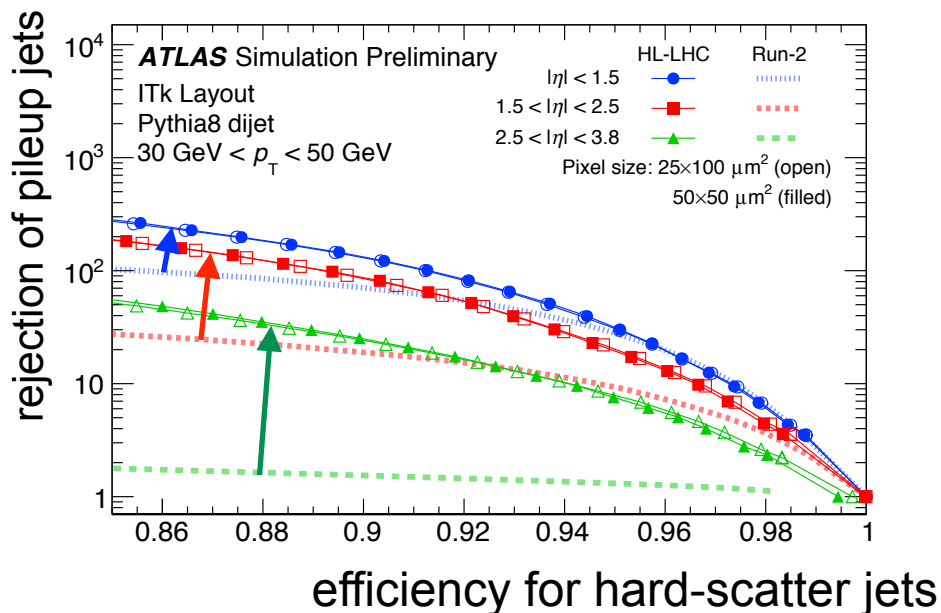


- ITk d_0 の分解能はRun-2と同等(5 – 6 μm)
- 最内層だけ25x100にすると更に良くなる
- low p_T (1GeV)では Run-2に劣る(約2倍)

z 方向のpixel pitch 400(250) $\mu m \rightarrow 50 \mu m$
 分解能大幅に改善 $\sigma(z_0) = 50 \mu m \rightarrow 10 \sim 20 \mu m$
 →高pileup環境に重要

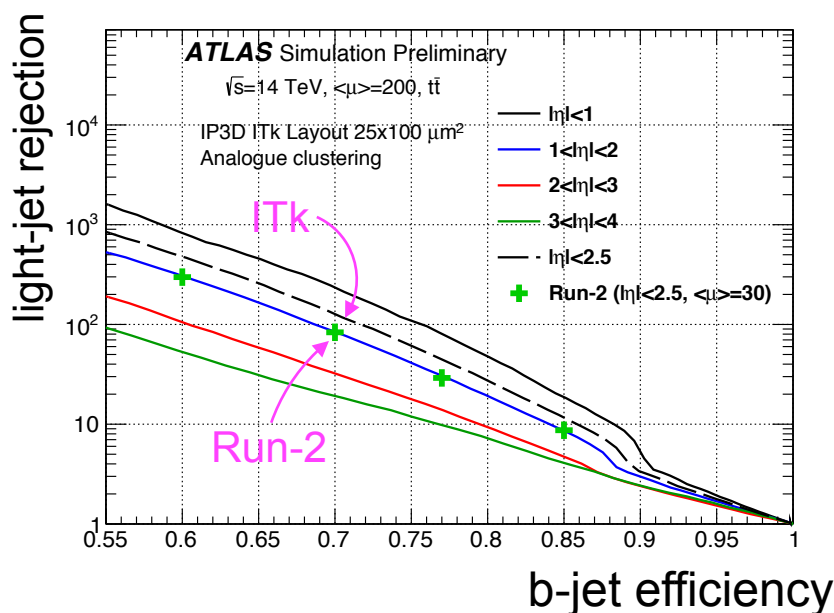


$\langle \mu \rangle = 200$ におけるpileup jetのrejection



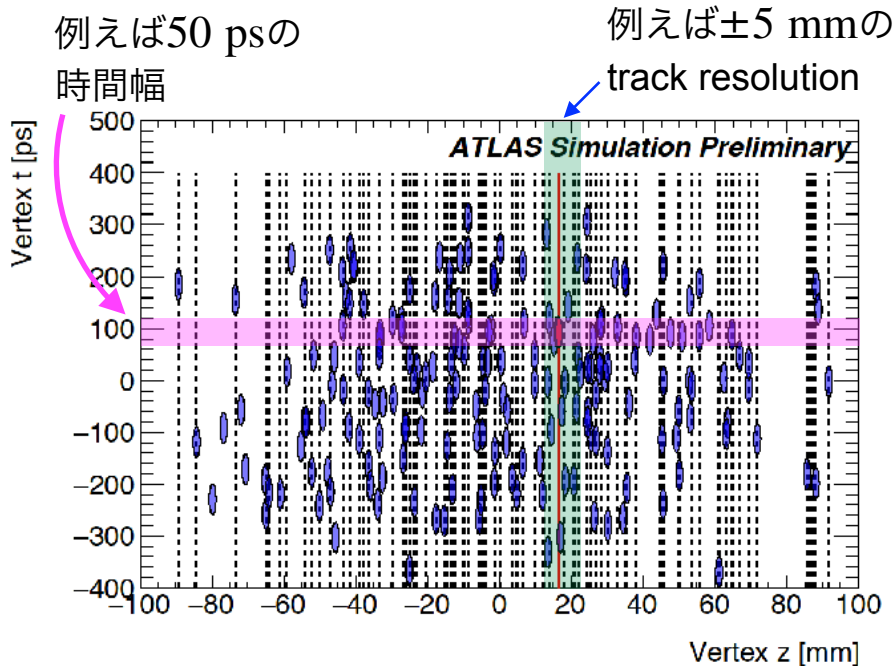
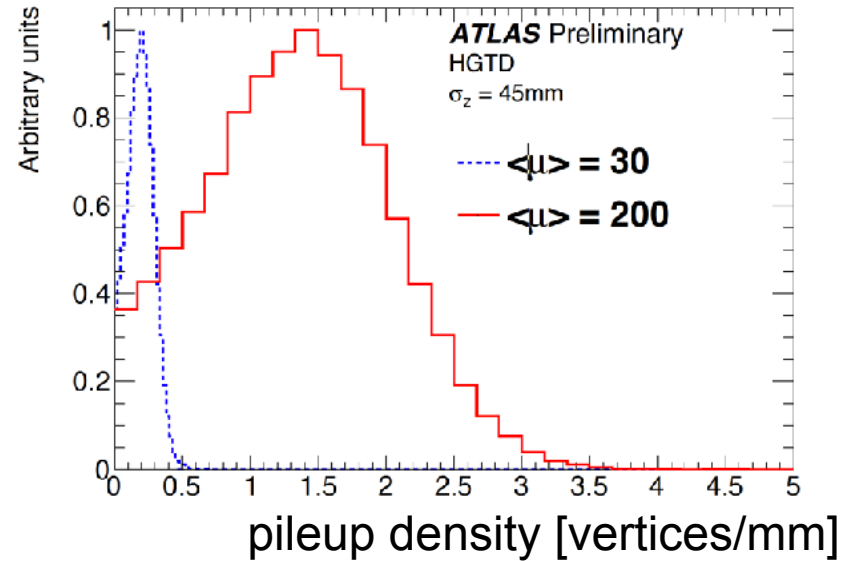
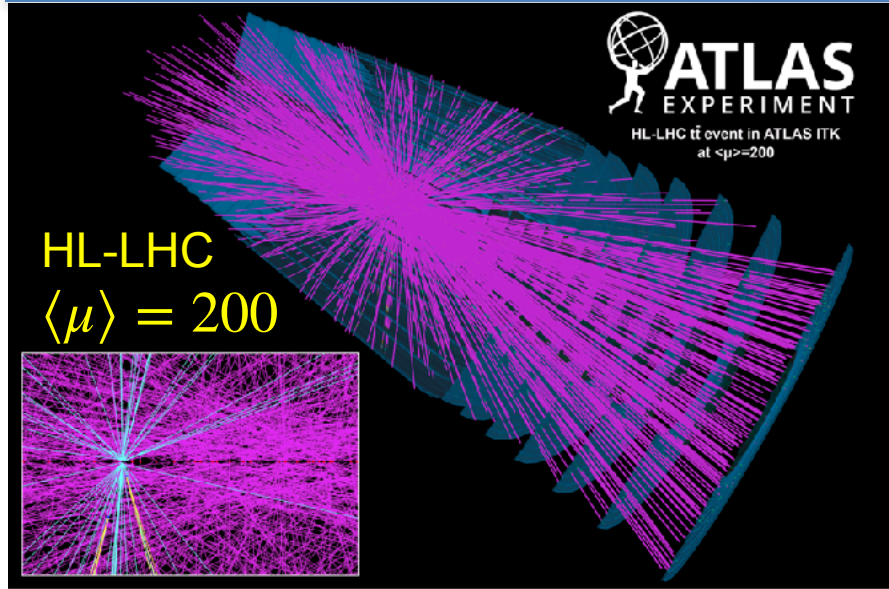
- Run-2 ($|\eta| < 2.5$) と比較すると
 - mid-rapidityでは ITk > Run-2
 - forward方向では ITk \gg Run-2
- (25 × 100, 50 × 50の差はほぼない)

$\langle \mu \rangle = 200$ におけるb-tagging 性能



pile-up抑制, I.P. 改善により
より高いpileup環境でもtagging性能が向上

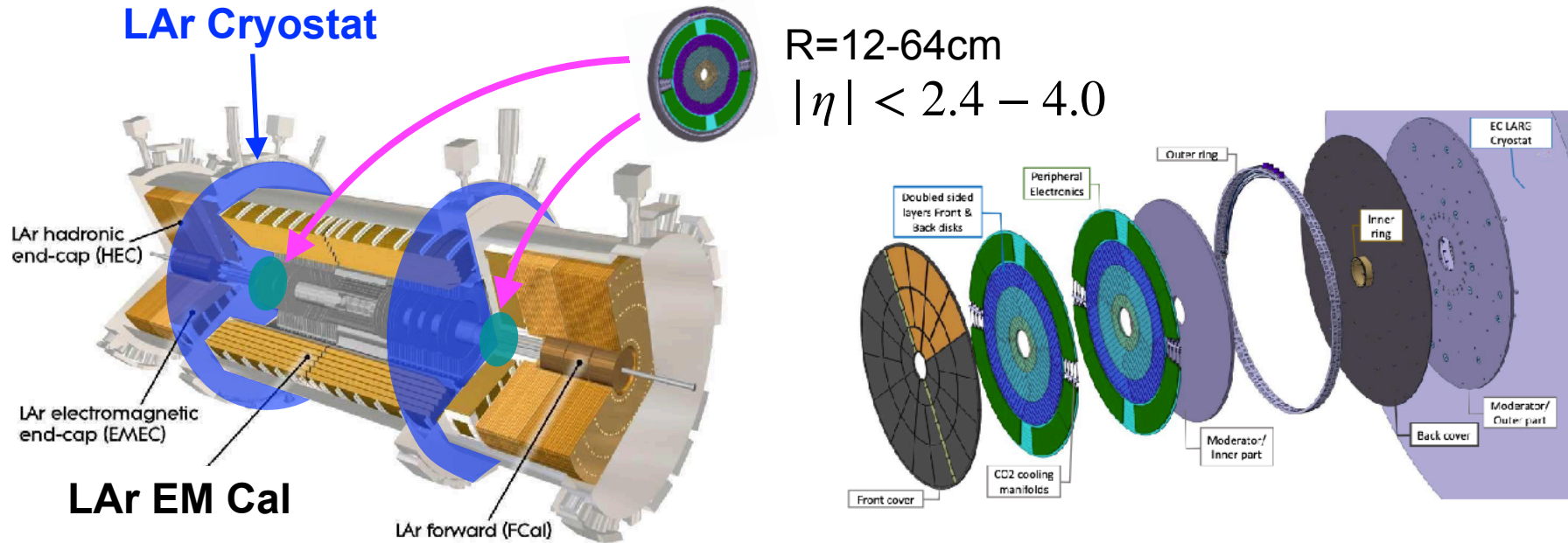
[3] Timing 検出器の必要性



pileup vertexが非常に【密に！】
 $\rightarrow \rho_{vertex} = 1 - 3 \text{ [/mm]}$

- ITkのvertex resolutionはcentralでは小さいが前方では low pT track に対して $\sim 5\text{mm}$ くらいまで悪化
- 時間情報の付与（特に前方）により pileup を大きく回避できる





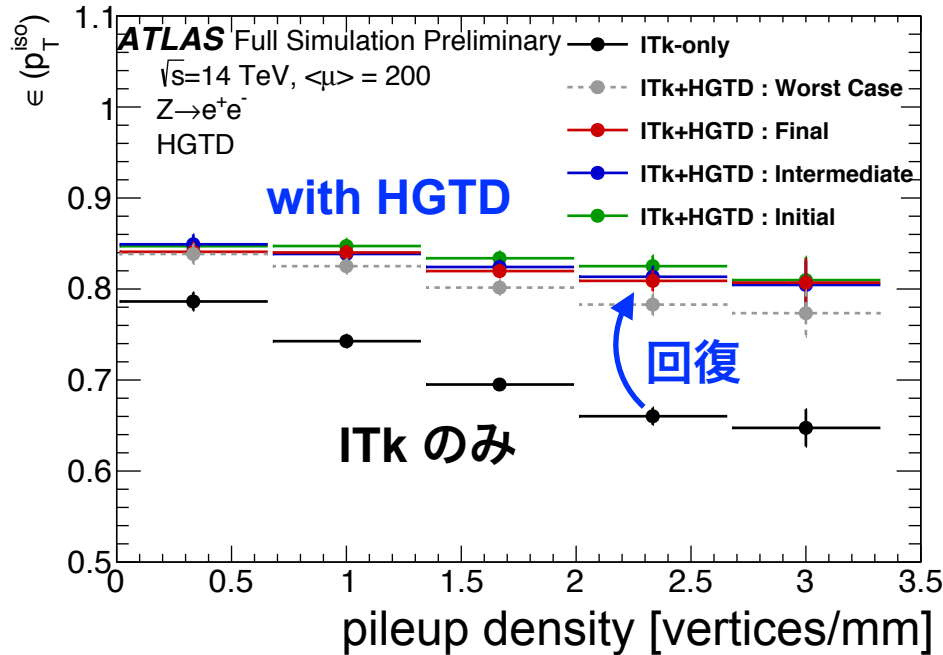
- Inner Detector (tracker) とLAr Endcap EM Calの間, LAr Cryostatの内側
- 高精度時間情報検出器を置くことで, 衝突間の時間差から高エネルギー衝突だけを抜き出す
- シリコン Low Gain Avalanche Detector (LGAD) 検出器

$$\Delta t = 30 - 50 \text{ ps} \quad 1 \text{ track 当たり } 2 \text{ hit を生成}$$

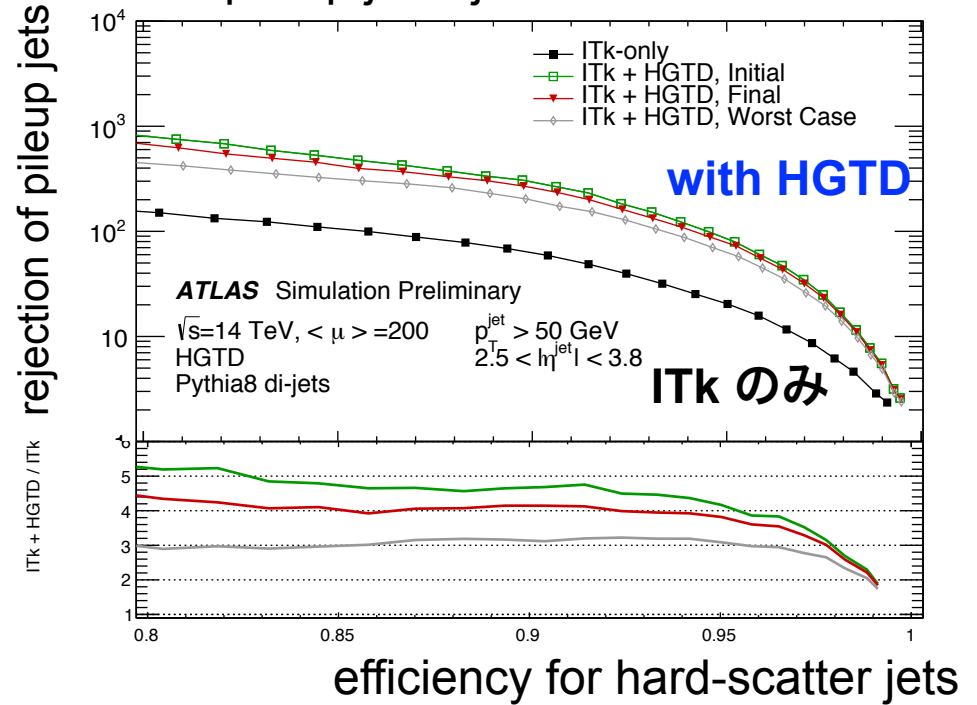
- 今回 ITk がカバーする前方方向 ($2.4 < |\eta| < 4.0$) のpileupを抑えることで前方のjet, lepton再構成性能を強化する
- 副次的に online/offline ルミノシティモニタとしても用いられる



Electron isolation selection efficiency



pileup jet rejection factor



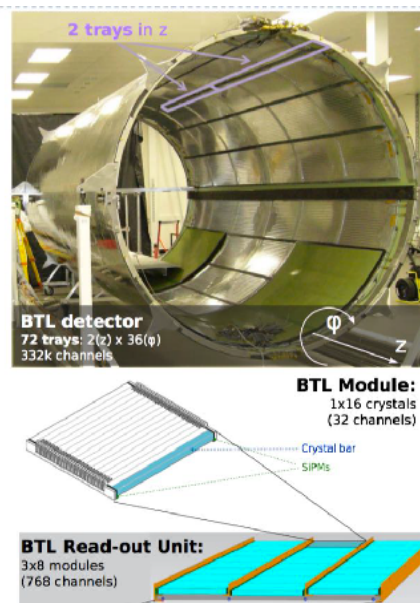
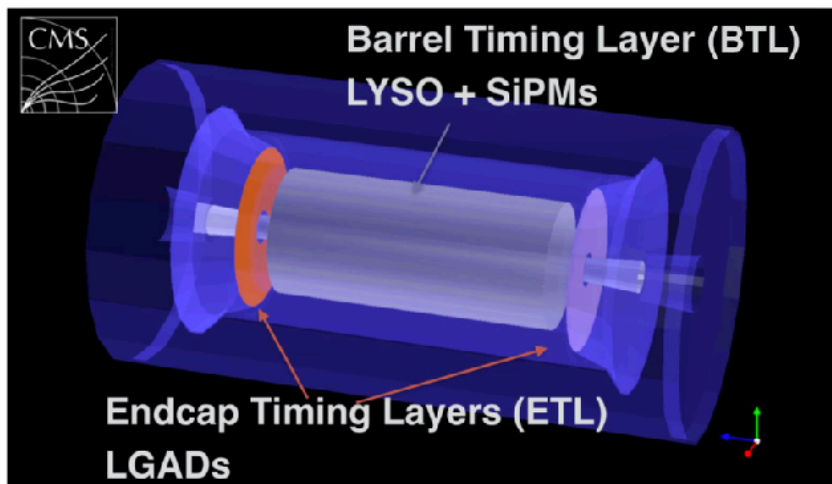
- Lepton isolation, Jet selectionにおいて
絶大な威力を発揮



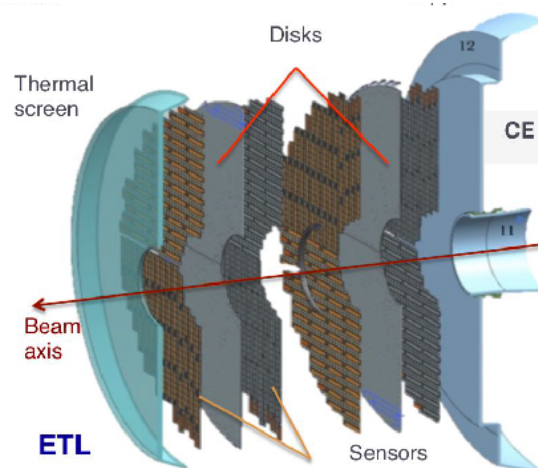


ATLAS同様にPhase2 upgradeで導入
目的は基本的に同じ pileup mitigation

IDとEM CALの間に設置する
Barrel, EndCap両方をカバー

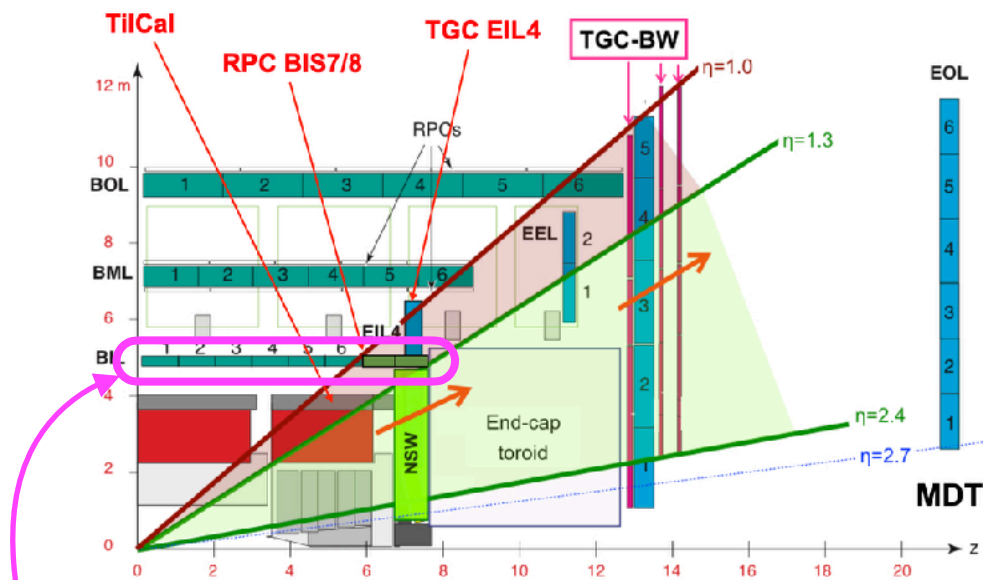


Barrel : BTL
LYSO crystal with
dual-end SiPM readout
 $\Delta t \sim 30$ ps



EndCap : ETL
LGAD (low gain
avalanche detector)

ATLASと似たシステム
 $\Delta t \sim 30$ ps



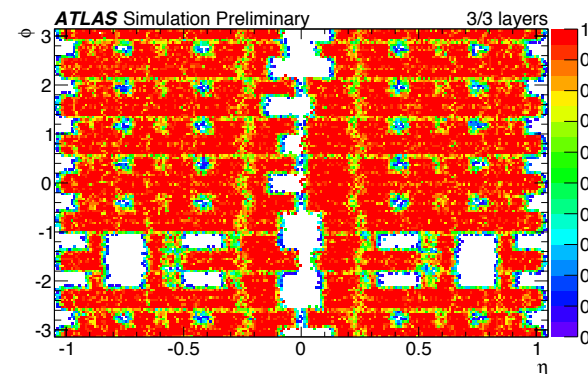
(1) New detectors:

- 現 BIL MDTの上に新たな RPCを設置
- 現 BIS MDT を sMDT + RPCに交換

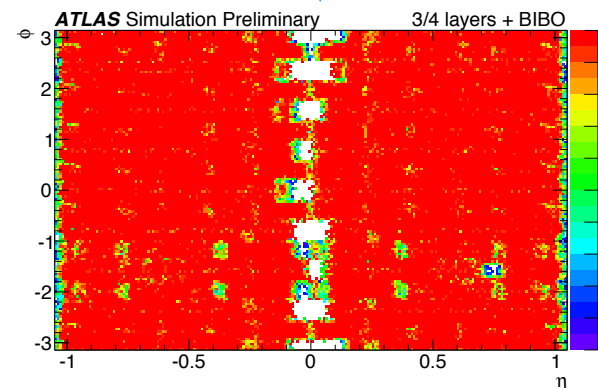
(2) L0 muon trigger:

- RPC(BI), TGC(EIL4), TileCal, etc からの情報も用いてacceptanceを補強
- 選別条件を厳しく → fake triggerを削減

ATL-PHYS-PUB-2016-026



78%
(Run-2)



96%
(Run-4)



- CERN/LHCの活動： Run-3開始は 2022年2月に遅延
それ以降の計画については今後更新される情報を注視
- Run-3に向けて：
 - Pileupの抑制, low pTを狙った様々な工夫が導入されている
 - 深層学習を取り入れたものも実用されており, 開発要素は
いろいろとありそう
- HL-LHCに向けて：
 - $\langle \mu \rangle = 200$ にも関わらずITk, HGTDの導入により tracking等
の性能はRun2と遜色ないか, 逆に良くなるものもある
 - これらの性能を前提として新物理探索のアイデアを
出していけるとよい

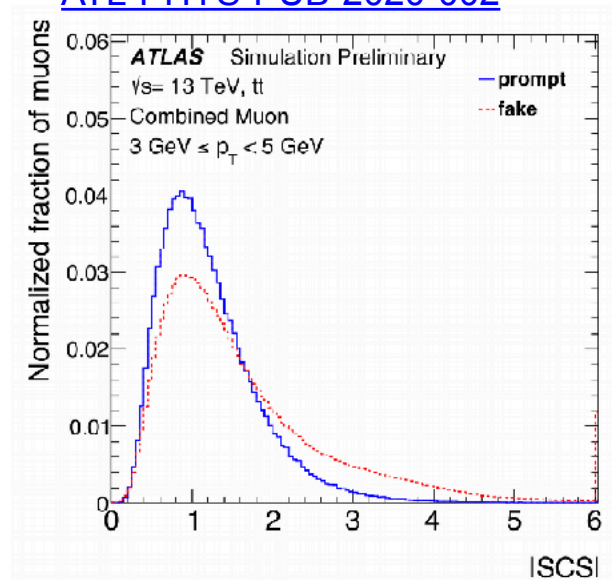
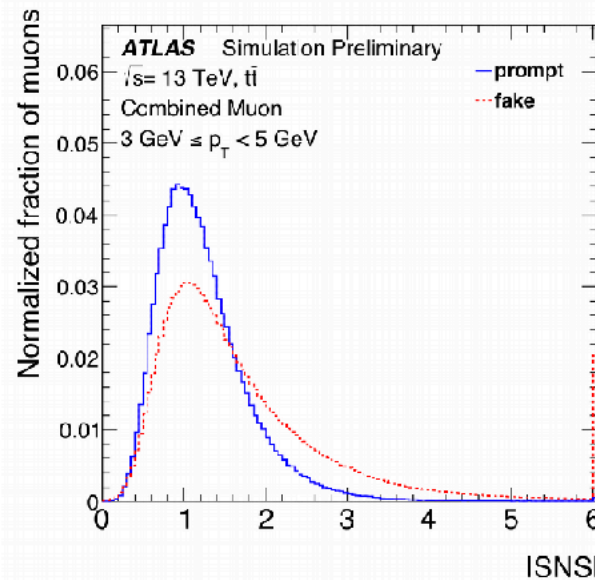
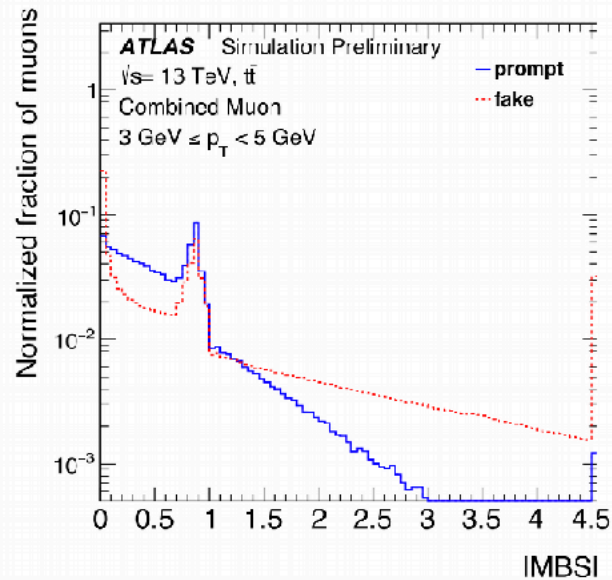
Backup slides

Low p_T muon identification variables

2020/08/11
新Terascale



[ATL-PHYS-PUB-2020-002](#)



Momentum balance significance:

Difference between momentum in ID and momentum in MS + energy loss in calorimeters, weighted by uncertainty on energy loss

Scattering neighbor significance:

Estimates significance of a direction change along the track, as expected in the presence of a hadron decaying to a muon

Scattering curvature significance:

Sensitive to very large kinks along the trajectory, as e.g. arising from in-flight decays of hadrons



Adaptive Multi Vertex Finder (AMVF) Iterative Vertex Finder (IMV)

