

# LHC ATLAS実験Run-3における ピクセル検出器の性能と運転状況

---

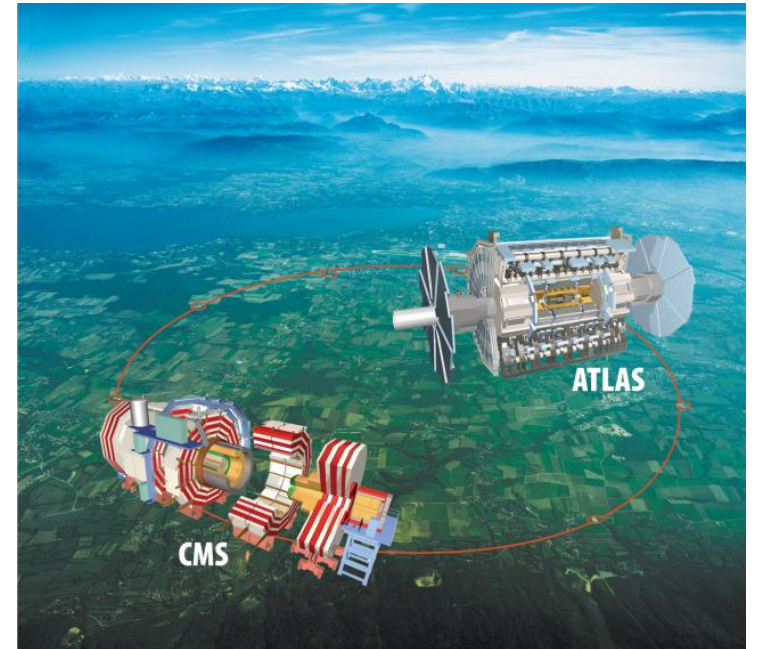
河野 能知(お茶の水女子大学)

計測システム研究会2025

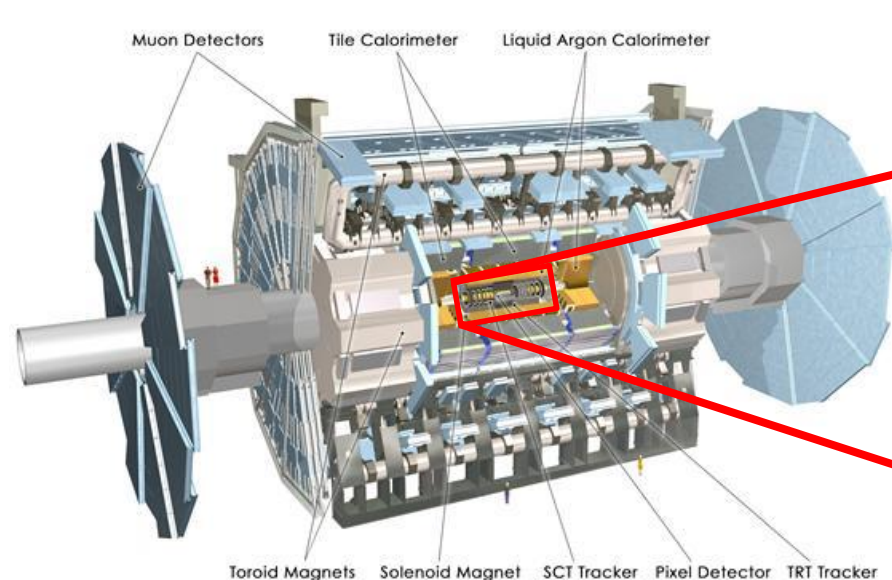
J-PARC、2025年11月17-18日

# LHCとATLAS実験

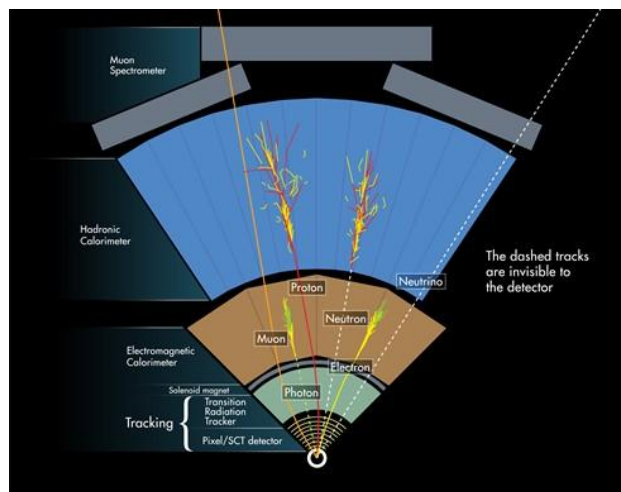
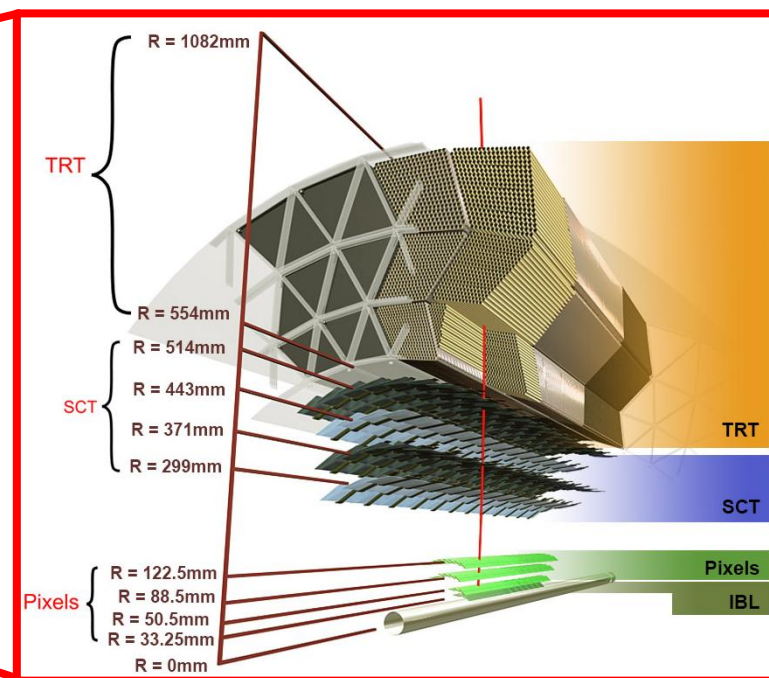
- Large Hadron Collider (LHC): ジュネーブ近郊の欧州原子核研究機構(CERN)に設置された陽子・陽子衝突型加速器
- 2010年から重心系エネルギー $\sqrt{s}$ を上げながら3期のデータ収集期間を設けてきた
  - $\sqrt{s} = 7, 8 \text{ TeV}$  (2010 – 2012, Run-1)
  - $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$  (2015 – 2018, Run-2)
  - $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$  (2022 – 2026, Run-3)
- ATLAS実験では、LHCの衝突点の一つに汎用の粒子測定器を設置して、TeVスケールの素粒子現象の研究を進めている
  - ヒッグス粒子の発見とその性質の解明、電弱対称性の破れの起源、新粒子探索など
- 約3,000人の研究者(国内から約100人)からなる国際共同実験



# ピクセル検出器



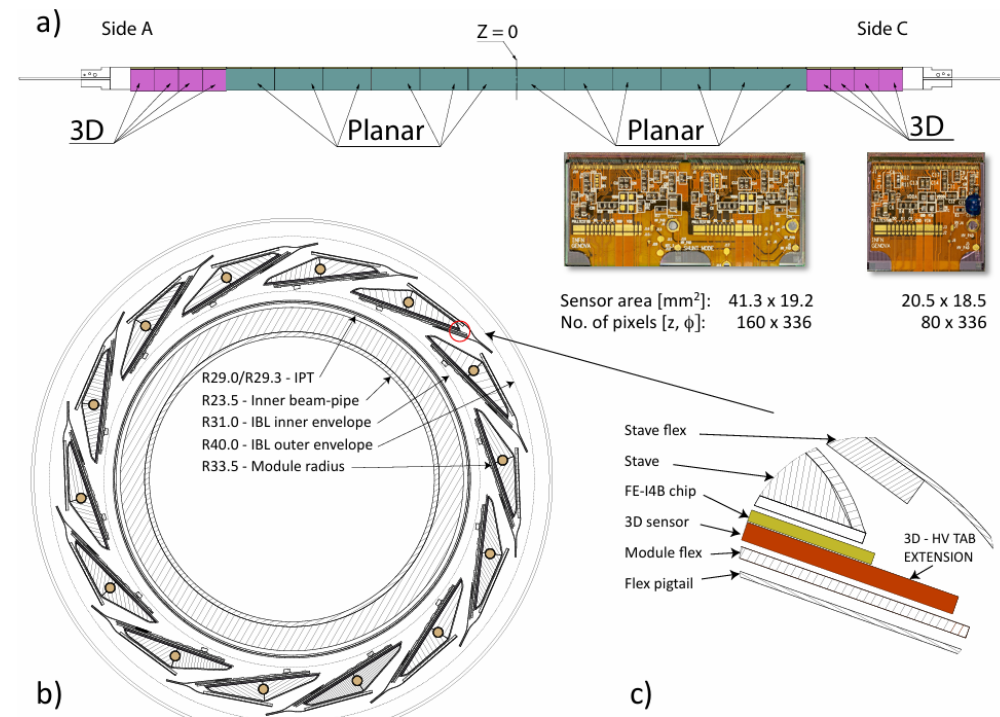
内部飛跡検出器  
Inner Detector (ID)



- ピクセル検出器は内部飛跡検出器を構成する検出器群の一つで衝突点に最も近いところに位置する
- 4層 (IBL, B-Layer, Layer-1, Layer-2) のシリコン・ピクセル検出器からなる
  - ピクセルサイズは、IBLは $50 \times 250 \mu\text{m}^2$ 、それ以外は $50 \times 400 \mu\text{m}^2$ となっている
- 荷電粒子の飛跡の再構成、衝突点や崩壊点の測定が主な目的

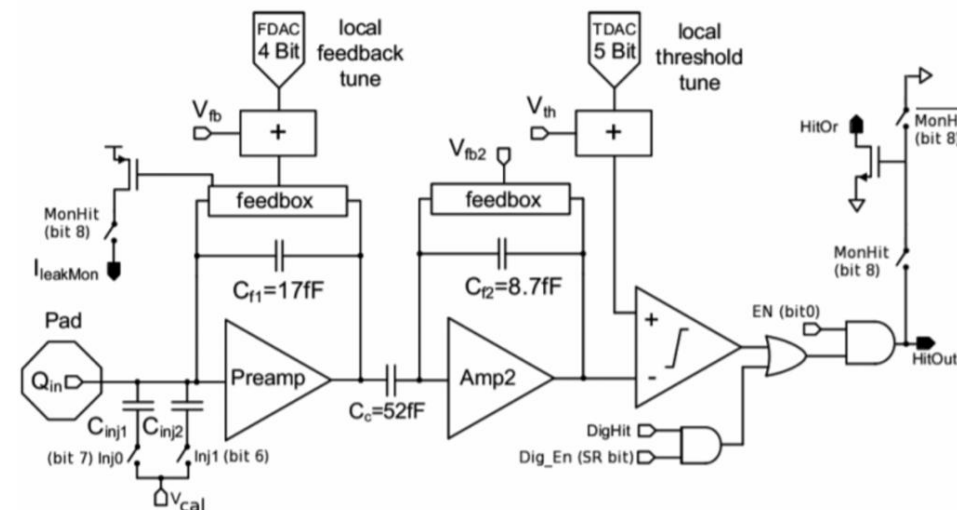
# Insertable B-Layer (IBL)

- IBLはRun-2から導入され、ピクセル検出器の再内層を構成する
  - 2種類のシリコン・センサーを使用
    - $n^+$ -in- $n$ 平面型センサー(41.3x18.6 mm<sup>2</sup>, 200  $\mu$ m厚)
    - $n^+$ -in- $p$  3Dセンサー(20.5x18.6 mm<sup>2</sup>, 230  $\mu$ m厚)
  - ビーム軸から半径33 mmに設置
  - ピクセルサイズが50x250  $\mu$ m<sup>2</sup>に微細化
  - 26,880 pixels/chip (全ピクセル数: 約12M)
    - 他の3層の合計ピクセル数: 約80M
  - 新しい読み出しASIC(FE-I4)を使用
    - 他の層はFE-I3
  - 放射線耐性の向上:  $5 \times 10^{15}$  n<sub>eq</sub>/cm<sup>2</sup> までの耐性
    - B-Layerは  $1 \times 10^{15}$  n<sub>eq</sub>/cm<sup>2</sup> までの耐性



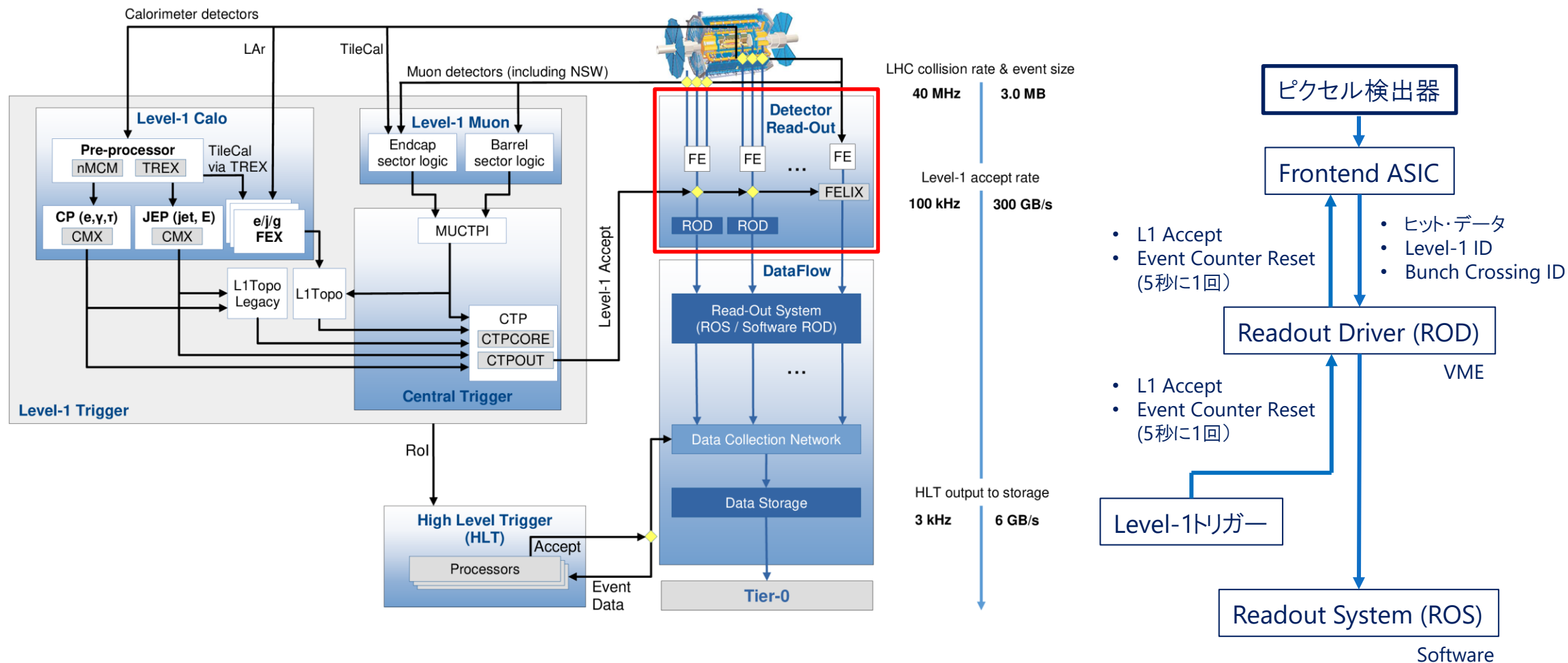
# ピクセル検出器の読み出し

- FE-I3, FE-I4チップともに各ピクセルに対して以下の機能をもつ
  - プリアンプ、増幅器、ディスクリミネータ
  - プリアンプのフィードバック電流の調整 (4 bits)
  - 閾値の設定 (5 bits)
  - Time-over-threshold (ToT)を記録
    - FE-I3 8 bits, FE-I4 4 bits
  - 試験電荷入力





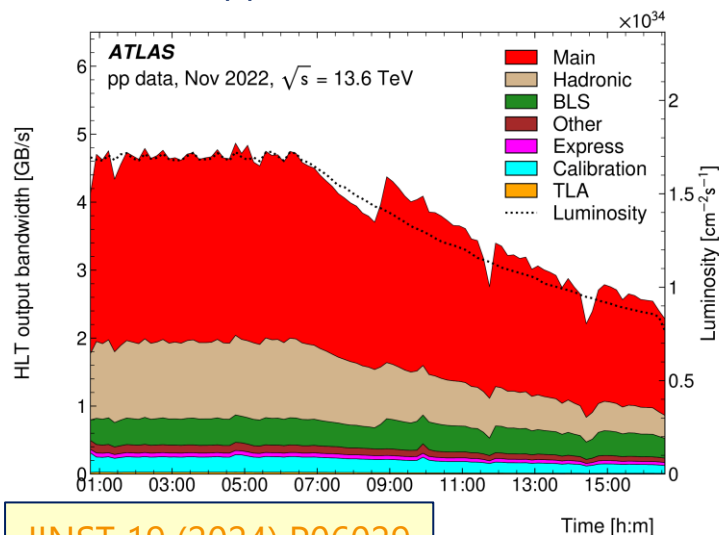
# ATLASのデータ収集系



# ATLAS Run-3 operation

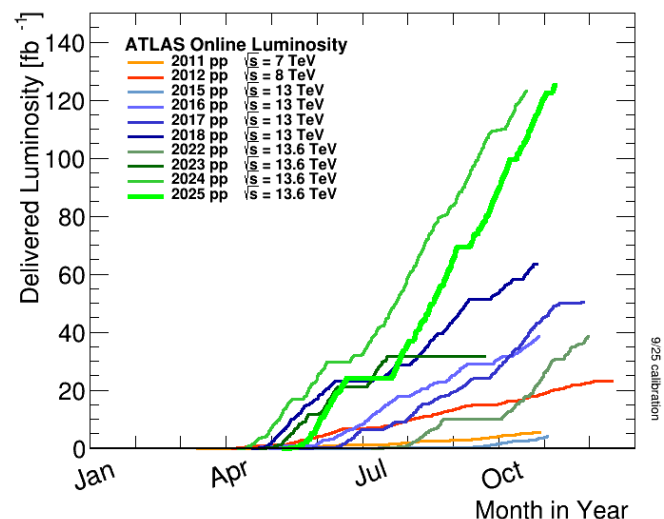
- Run-2 (2015 – 2018):  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ ,  $\int L dt = 140 \text{ fb}^{-1}$
- Run-3 (2022 – 2026):  $\sqrt{s} = 13.6 \text{ TeV}$ ,  $\int L dt = 300 \text{ fb}^{-1}$  (2025まで)
- LHCはluminosity levelingを実施
  - ルミノシティの上限を  $L = 2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  に制限(収束用磁石が温まるのを防ぐため)
  - Run-3ではビーム強度の大幅な上昇によってバンチ交差当たりのpileup事象数も増加
- 2025年末でRun-1～Run-3の合計  $\int L dt = 500 \text{ fb}^{-1}$  (LHC delivered) を達成

典型的なppラン中のトリガーレートの変遷

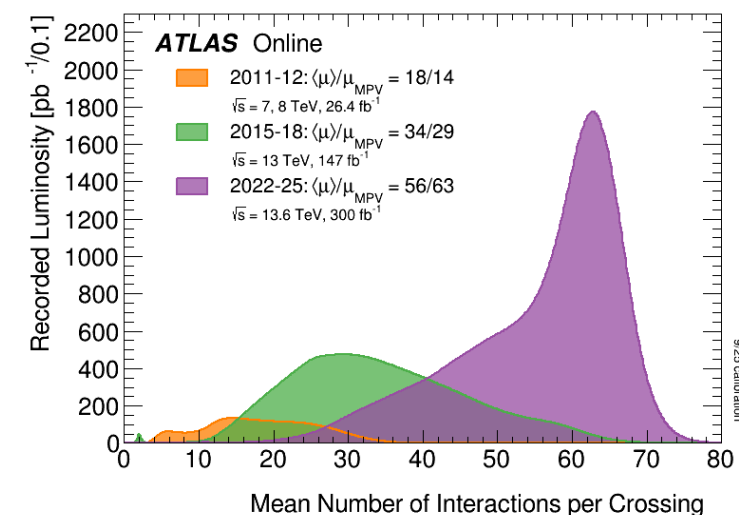


JINST 19 (2024) P06029

Run-2/3における年毎の積算ルミノシティの変遷



Run-1/2/3における平均pileup事象の分布

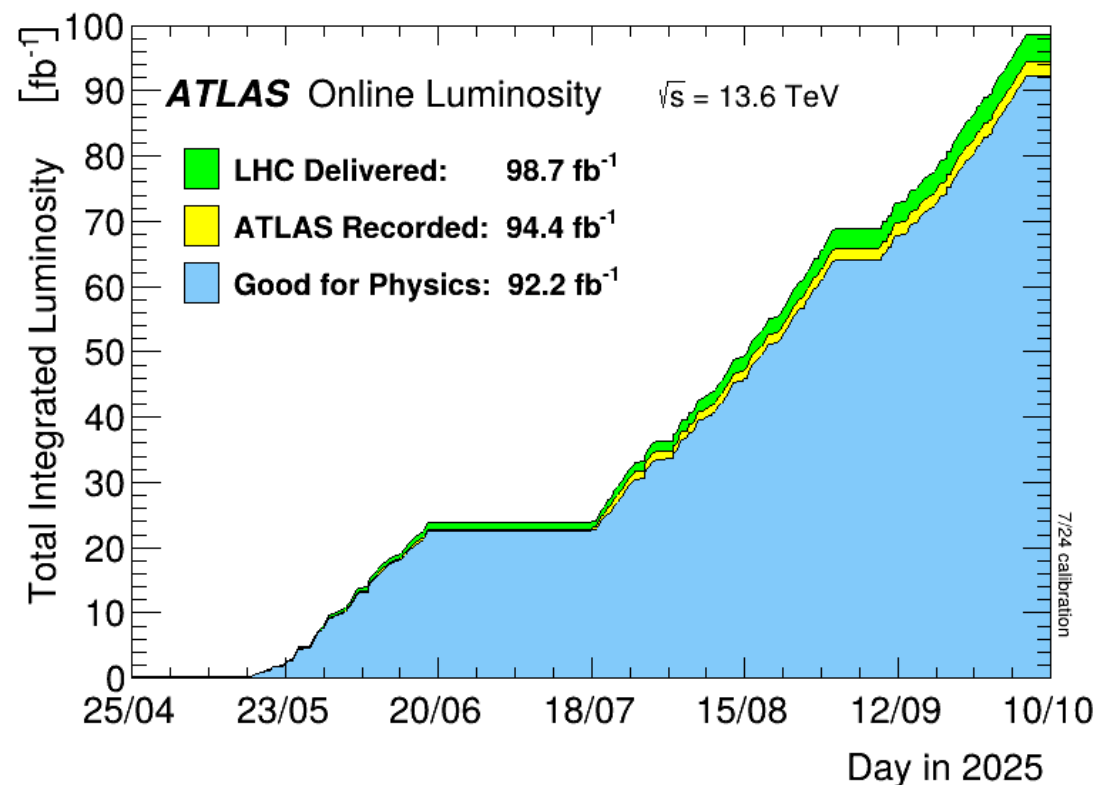
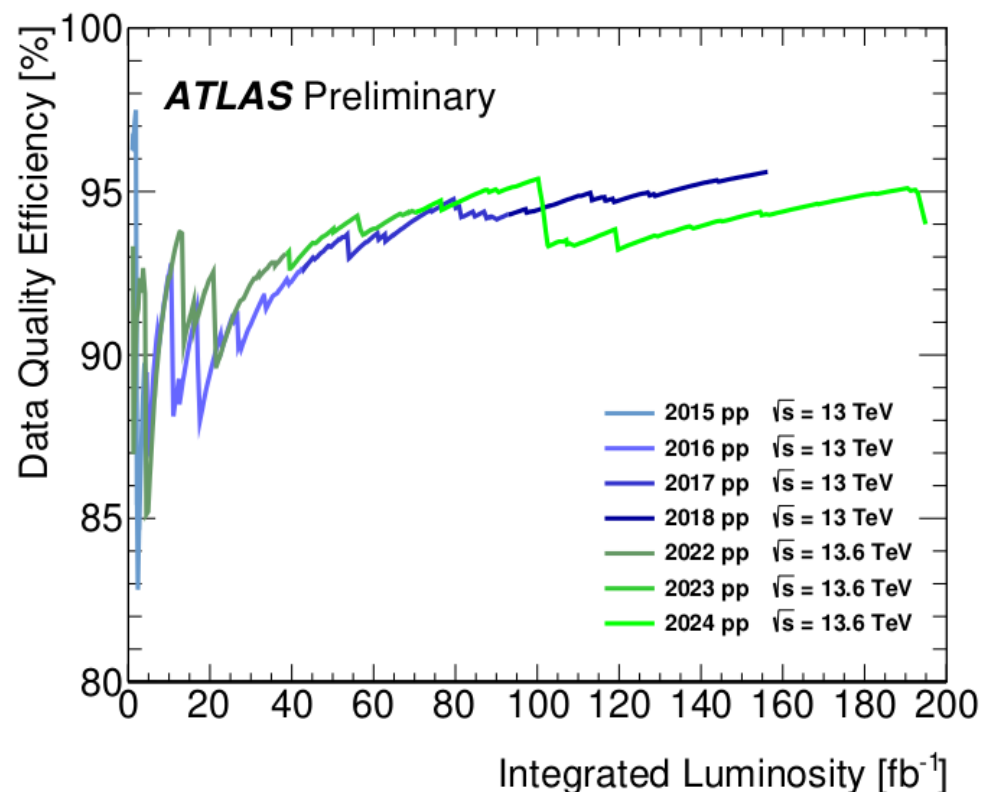


# データ取得効率

LHCから供給された衝突事象数 → ATLASで記録された事象数 → 物理解析で使える事象数  
(LHC delivered) (ATLAS recorded) (good for physics)

ATLASによるデータ収集効率

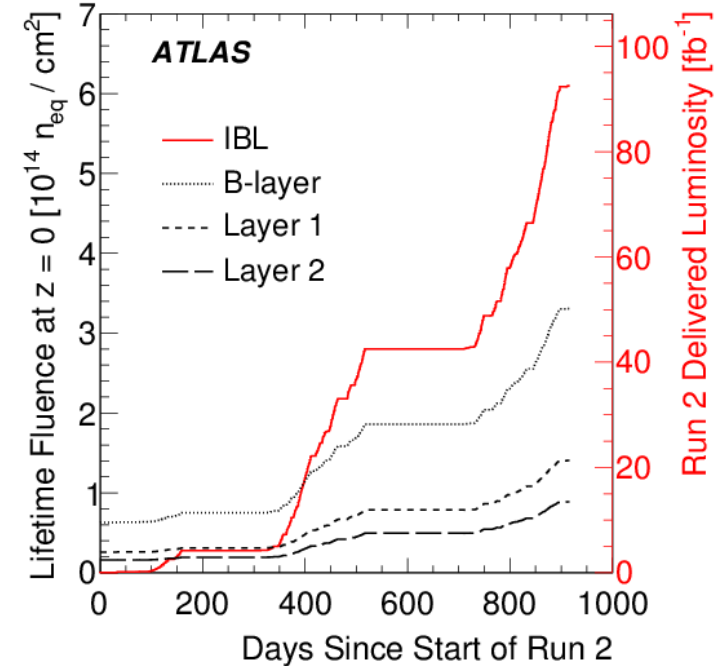
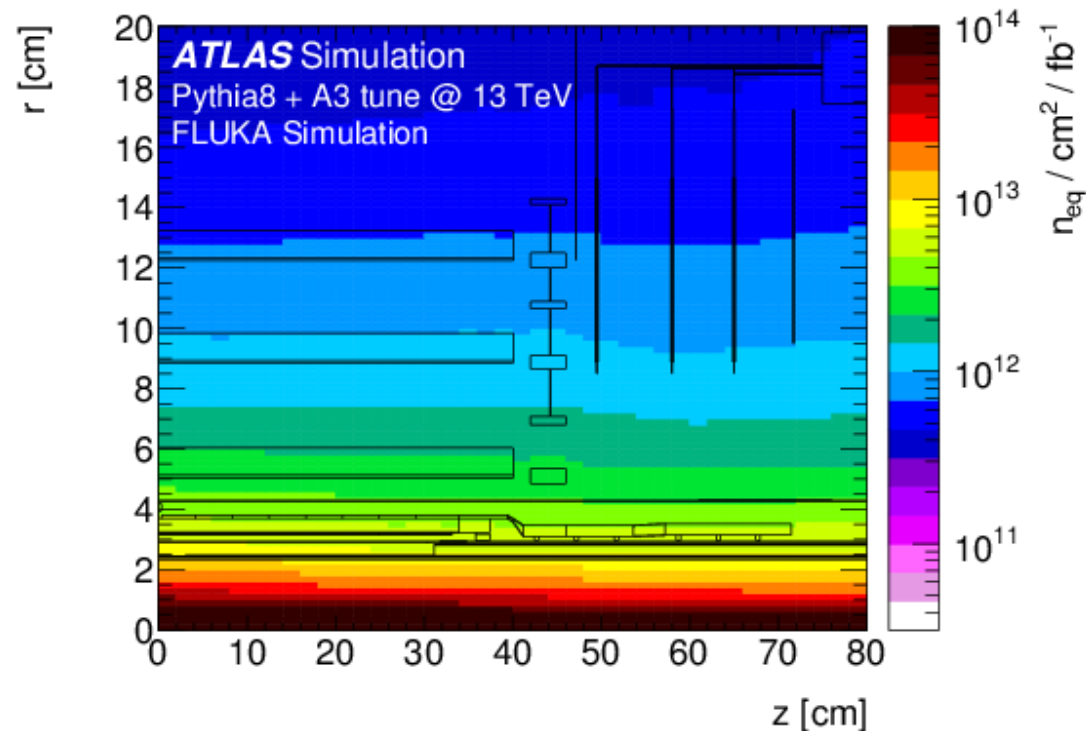
記録されたデータの質のチェック





# ピクセル検出器の照射量

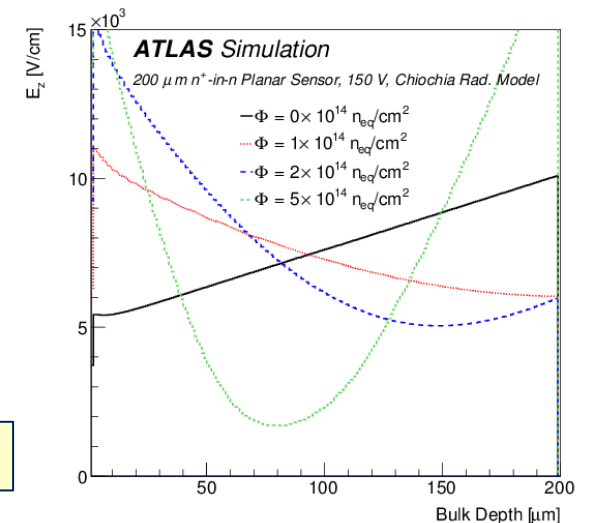
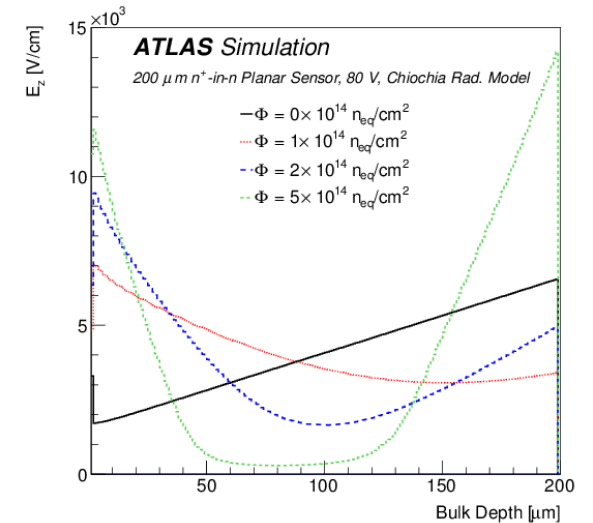
- 積算ルミノシティの増加に伴って、ピクセル検出器の照射量が増加する
- 衝突点に近い層ほど照射量が多くなっている



# 放射線損傷のシミュレーション

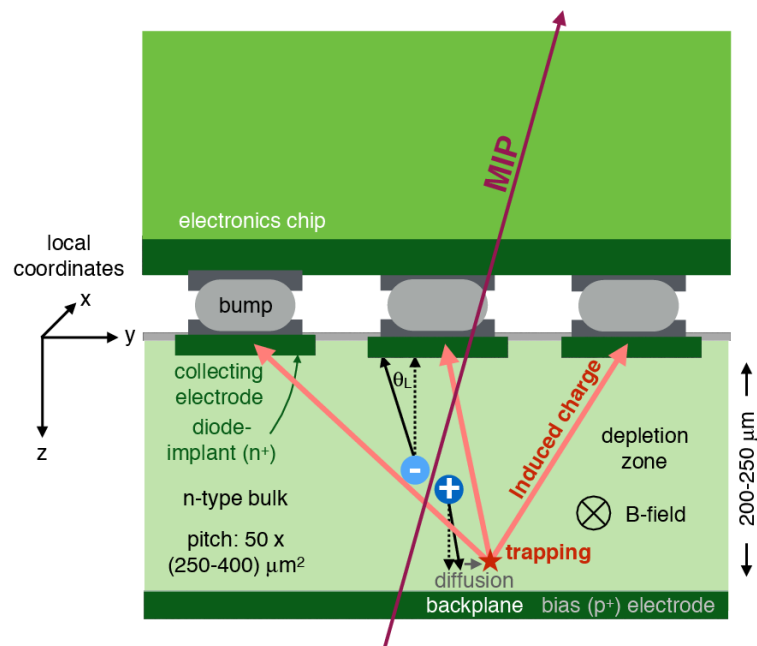
## シリコン・センサーのバルク損傷の影響

- 結晶中にできた格子欠陥を生成
  - 不純物準位(トラップ)を形成
- 荷電粒子の通過で生じた電子・ホール対が電極に移動する際にトラップに束縛される
  - 電子はn型電極、ホールはp型電極に向かって移動
  - n型(p型)電極付近の空間電荷がより $- (+)$ に変化する
  - 空乏層の内側で電場弱くなり、両電極付近で強い電場が生じる
- これによって、空乏層を移動するキャリアの移動時間が長くなり、トラップされる確率も増える → 収集電荷量の低下



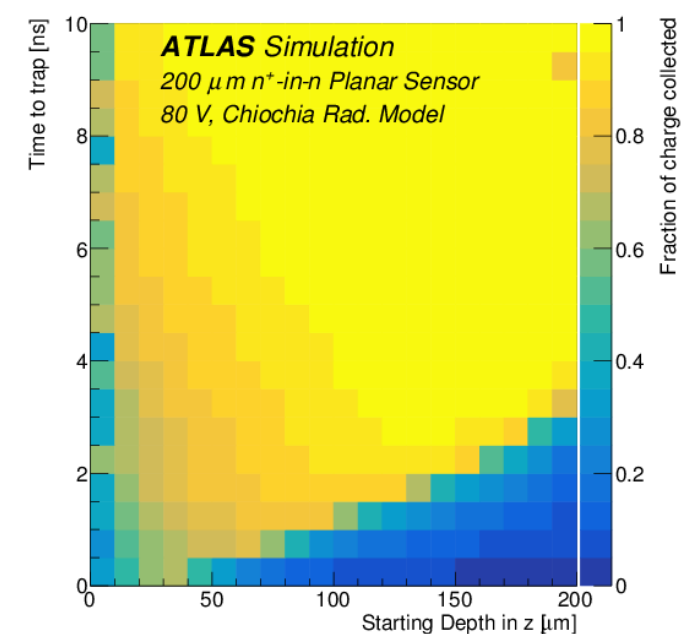
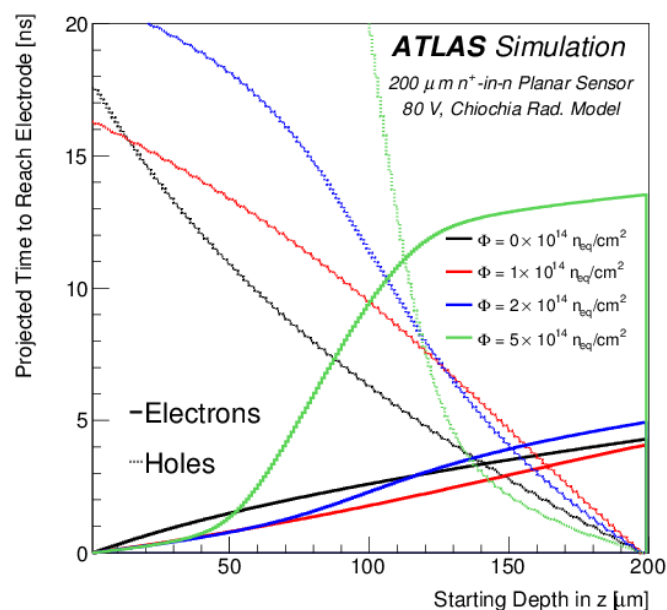
JINST 14 P06012

# シミュレーションの実装



JINST 14 P06012

- 空乏層のある深さで発生した電子・ホール対を電場中で移動
- ある時間内にトラップされる確率と電極への到達時間を比較
- これによって、ある確率で電荷がトラップされて電極での収集電荷量は低下する
  - 電荷が発生した深さによって電極で収集される確率が変わる

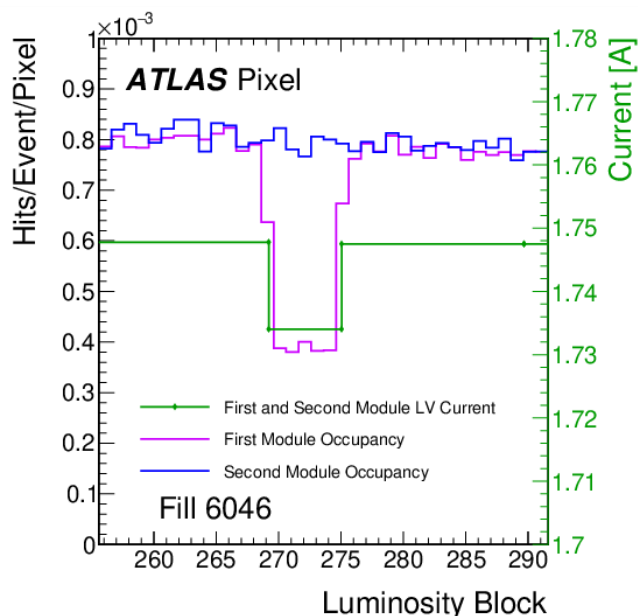


# Run-3におけるピクセル検出器の運転状況

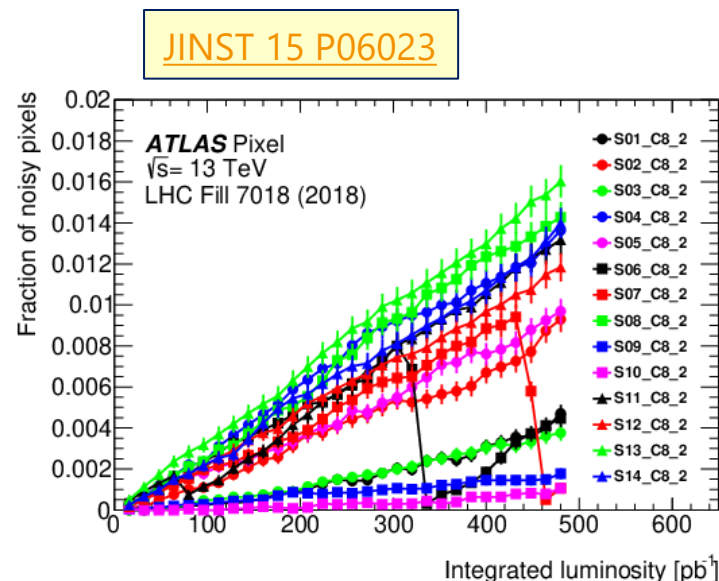
---

- ピクセル検出器では全92Mチャンネルの内、約94%のチャンネルが動作している
- 放射線損傷による短期的な影響: Single event upset (SEU), Single event transient (SET)
  - ASIC内のレジスタのビット反転
    - FE-I4Bではビット反転に対しての対処(DICE latchで3重化)しているが、それでも起こる
    - Global register → データ転送の失敗、LV currentの変動
    - Pixel register (enable bit, threshold設定) → ピクセルの無効化、ノイズの増加
- 高レートへの対処
  - ASIC内のバッファ(最大16 events)のオーバーフローの問題

# SEUによる影響

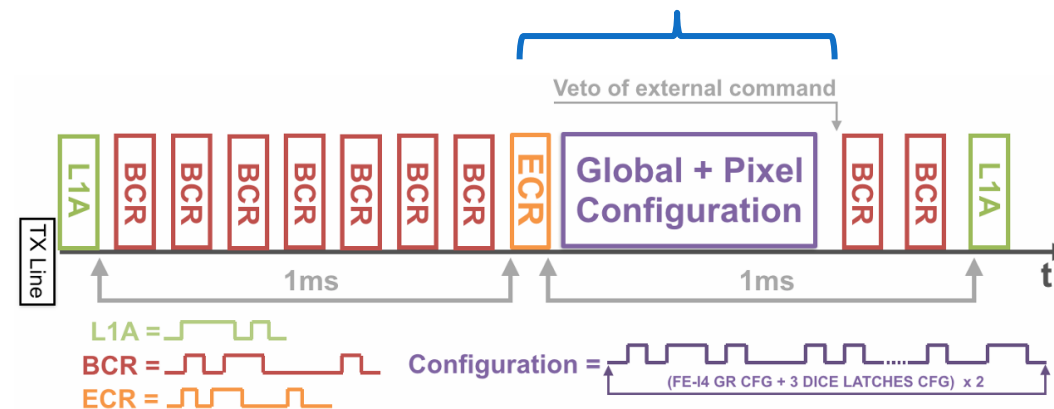


- Global registerのビット反転によってLV電流が低下している
- Global registerを再書き込みすることで復帰



Pixel thresholdのビット反転でノイズの多い  
ピクセル数が時間とともに増加している

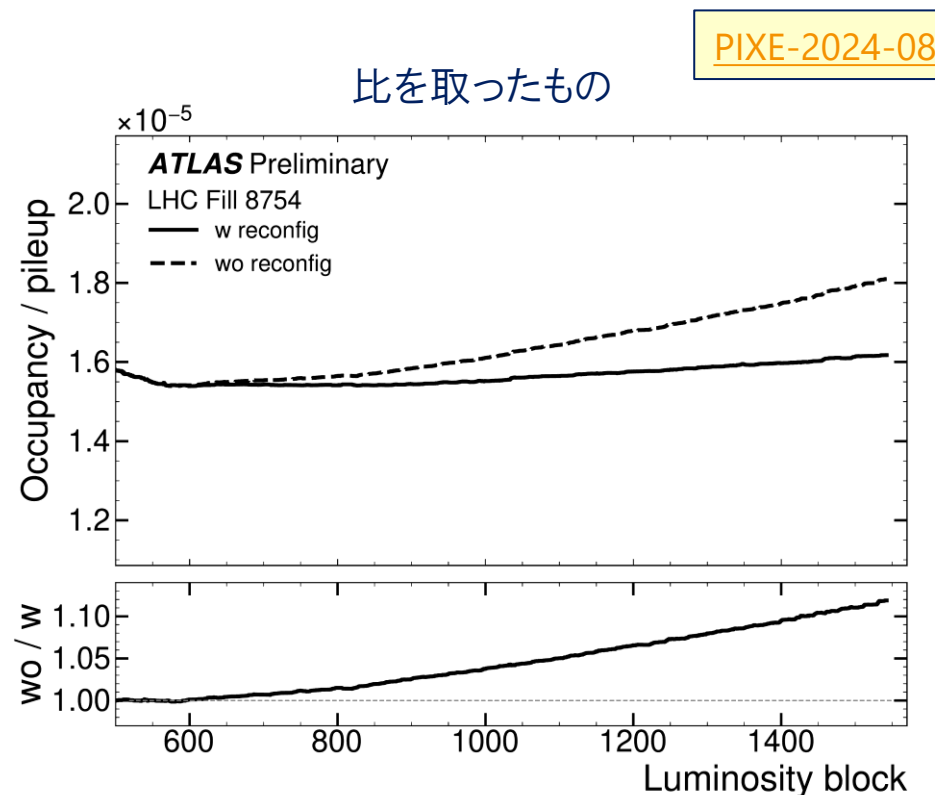
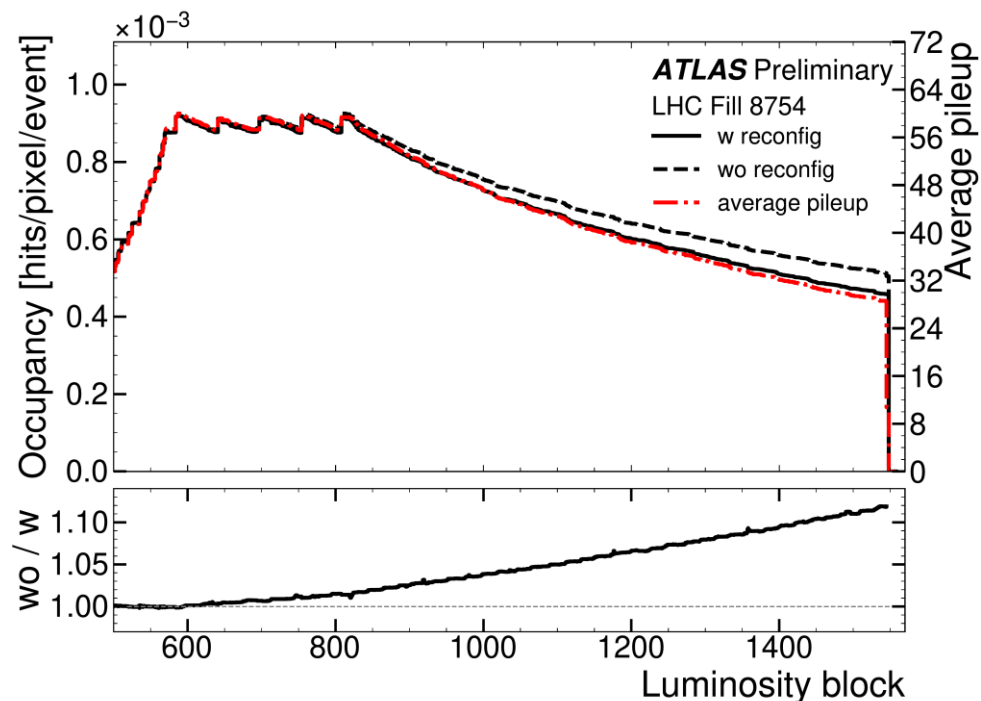
ECR信号を受け取ってすぐGlobal registerと pixel registerの一部を再設定するコマンドを ASICに送信



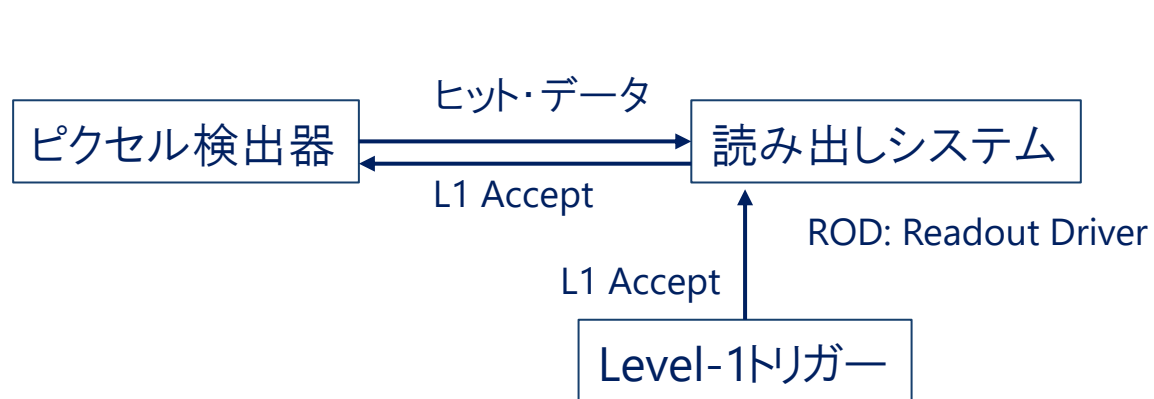


# SEUによる占有率増加への対処

- SEUにより閾値を設定しているレジスタのビット反転が起こると、誤った閾値でヒットを取得してしまう
- 1ランを通してこのエラーが蓄積すると約80%データ量が増す可能性がある
- 5秒に一回設定値を再書き込み(reconfiguration)することで対処

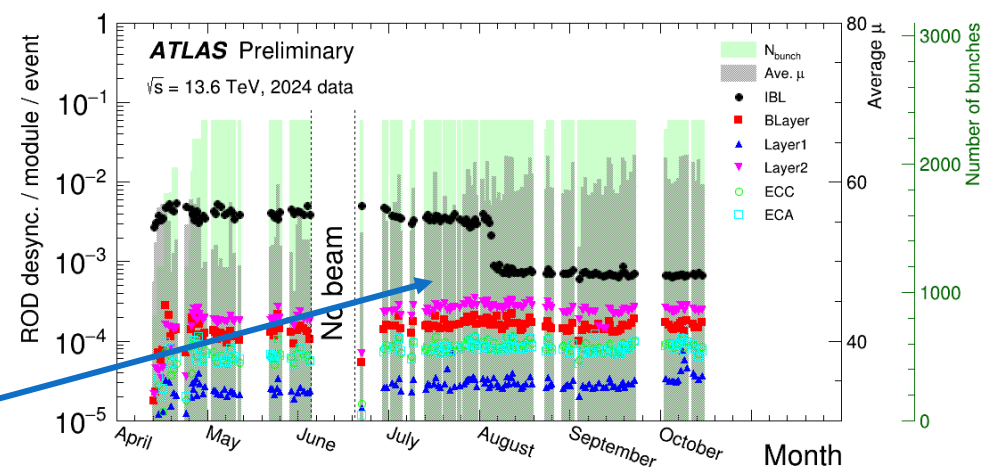
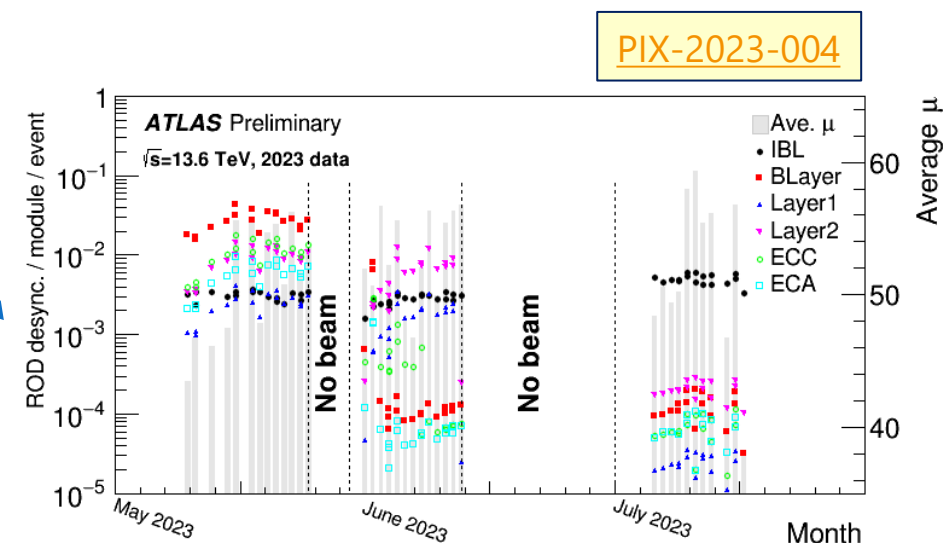


# Desyncエラーがあったモジュール数/FE数

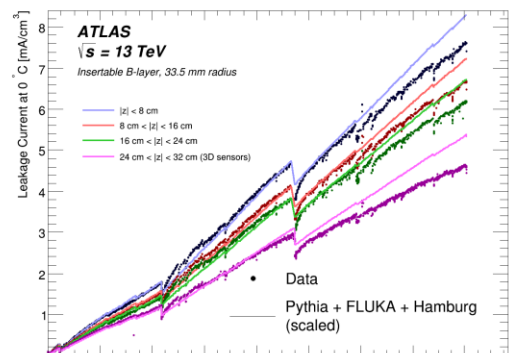


## 非同期エラー

- ピクセル検出器ASICから送られてくるデータのLevel-1トリガーID (L1ID)またはBunch crossing ID (BCID)が、実際にトリガーされた事象と異なる(L1IDは5秒に1回リセットされている)
  - これらのモジュールは再構成では使わない
- ASIC内のバッファ(16 events)が溢れることを回避するため、RODでモニターしてオーバーフローしそうなモジュールにはL1 Acceptを送らないことで対応(実装時期は層によって異なる)
- IBLでは稀にASICが壊れたeventデータを送ってきていたものをRODで回復する処理を実装

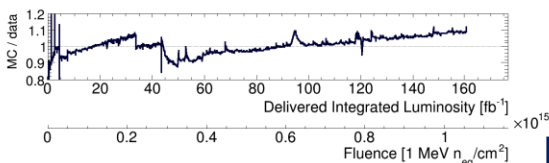


# Leakage current

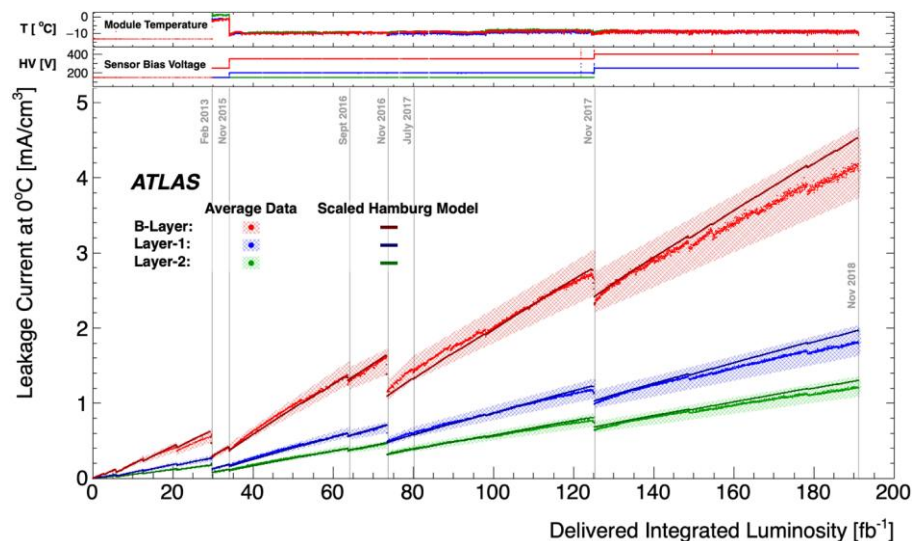


IBL

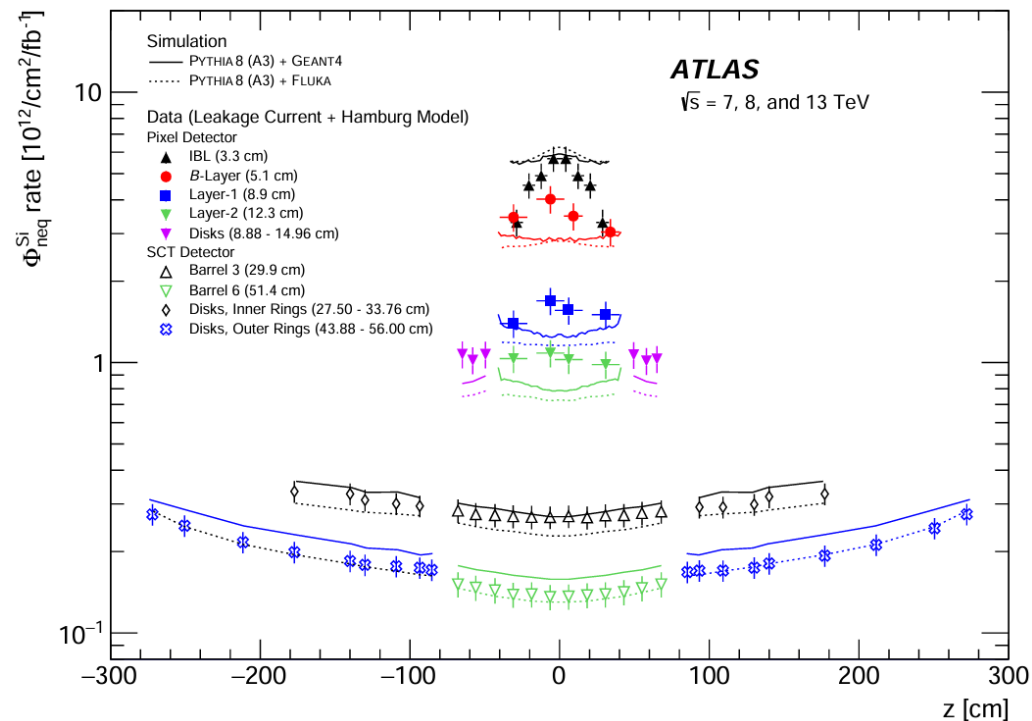
- Hamburg modelと比較 
$$I_{\text{leak}} = (\Phi/L_{\text{int}}) \cdot \sum_{i=1}^n V_i \cdot L_{\text{int},i} \cdot \left[ \alpha_I \exp\left(-\sum_{j=i}^n \frac{t_j}{\tau(T_j)}\right) + \alpha_0^* - \beta \log\left(\sum_{j=i}^n \frac{\Theta(T_j) \cdot t_j}{t_0}\right) \right]$$
- 約10%の範囲内でシミュレーションと一致する
- 測定結果から、積分ミノシティ → 照射量の換算係数 $\Phi$ を領域ごとに決定



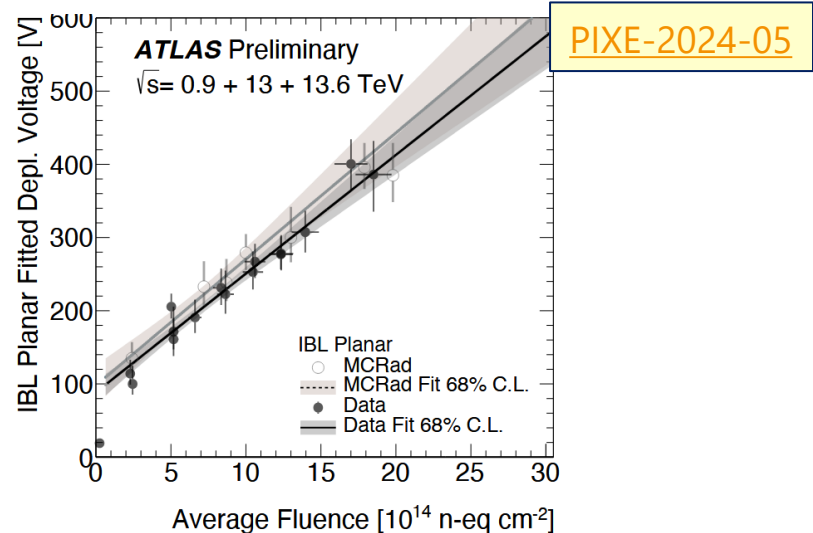
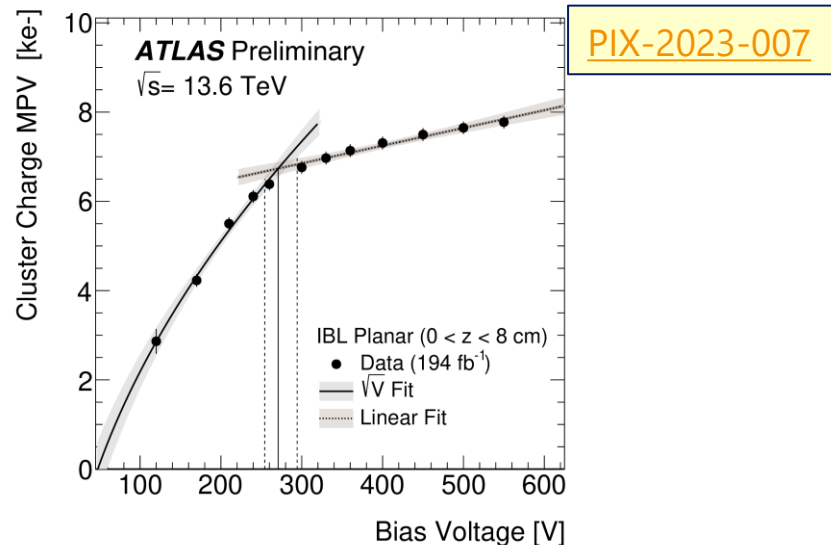
B-Layer, Layer-1, Layer-2



JINST 16 P08025



# ピクセル検出器の運転条件

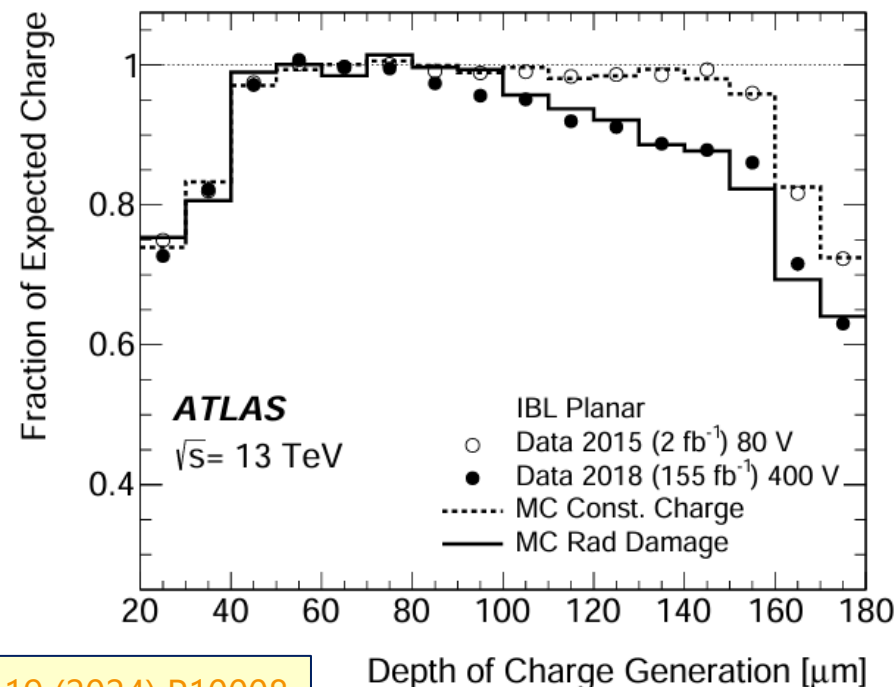
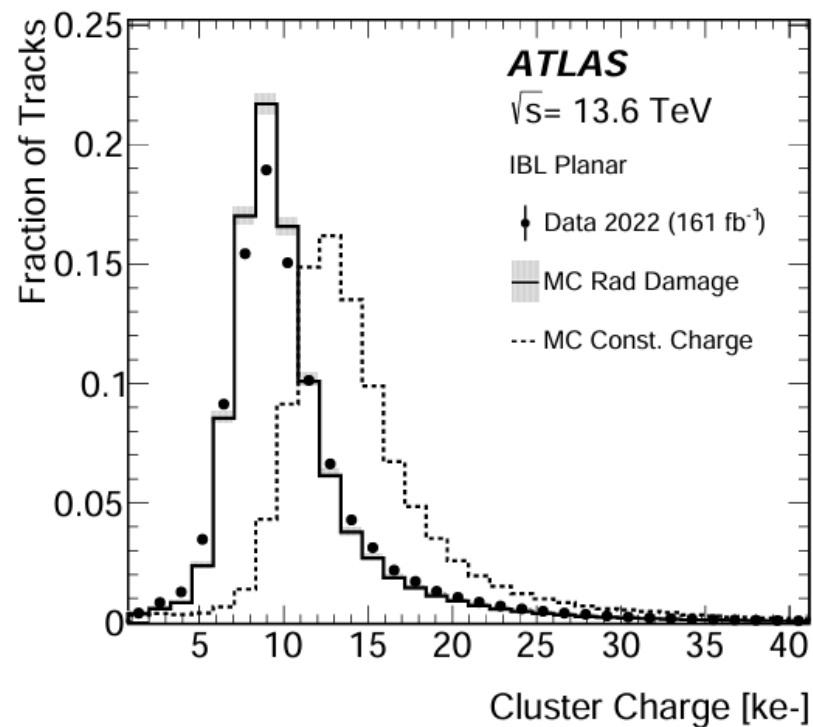
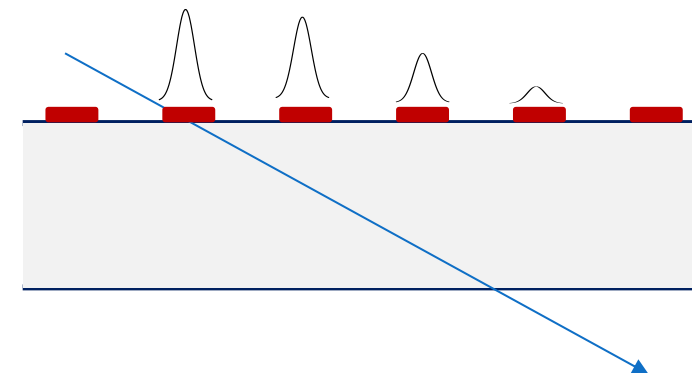


年	IBL	B-Layer	Layer-1	Layer-2	Endcap
2015	80 V/2500e	250 V/3500e	150 V/3500e	150 V/3500e	150 V/3500e
2016	80 V/2500e	350 V/3500e	200 V/3500e	150 V/3500e	150 V/3500e
2017	350 V/2500e	350 V/3500e	200 V/3500e	150 V/3500e	150 V/4500e
2018	350 V/2000e	400 V/4300e	250 V/3500e	250 V/3500e	250 V/3500e
2022	400 V/1500e	450 V/3500e	300 V/3500e	300 V/3500e	300 V/3500e
2023	450 V/1500e	450 V/4700e	350 V/4300e	350 V/4300e	350 V/4300e
2024	450 V/1500e	450 V/4700e	350 V/4300e	350 V/4300e	350 V/4300e
2025	500 V/1500e	500 V/4700e	350 V/4300e	350 V/4300e	350 V/3500e

- センサーが全空乏化するようにHVを年々上昇させていった
- 放射線損傷により収集電荷量が減っていくため、閾値は下げたいが、高レートに対応するため上げざるを得ない面もある

# 電荷収集に対する放射線損傷の影響

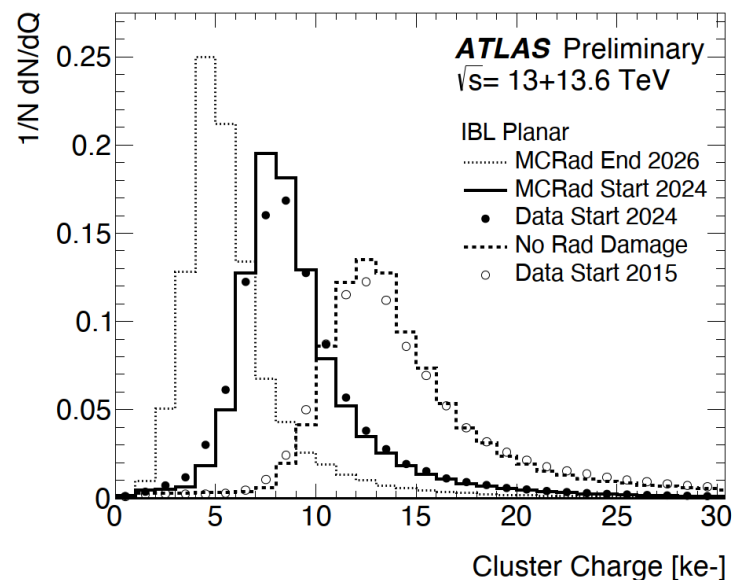
- IBLにおける収集電荷量の分布
- IBLにおける電荷が発生した深さとその電荷の収集効率の関係
  - Charge Collection Efficiency (CCE)
- 放射線損傷を取り入れたシミュレーションでよく再現できている



JINST 19 (2024) P10008

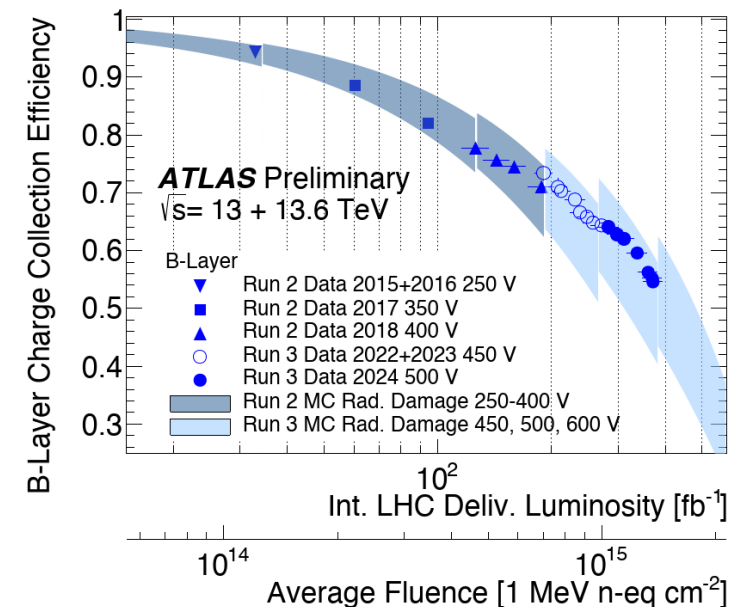
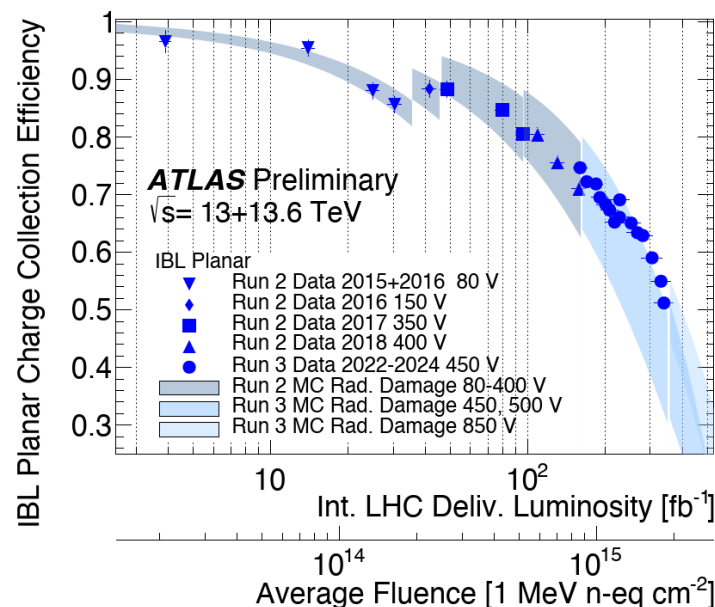


# Run-3を通した収集電荷量の変遷



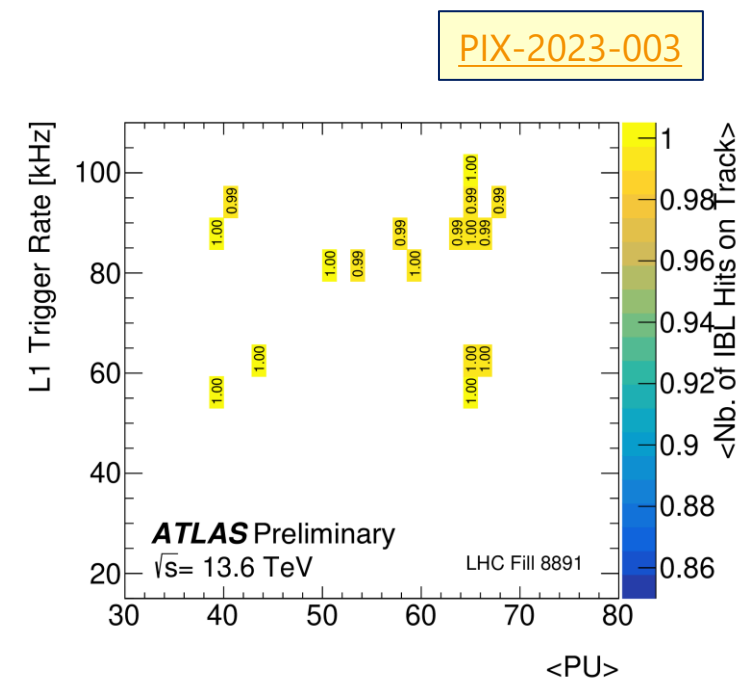
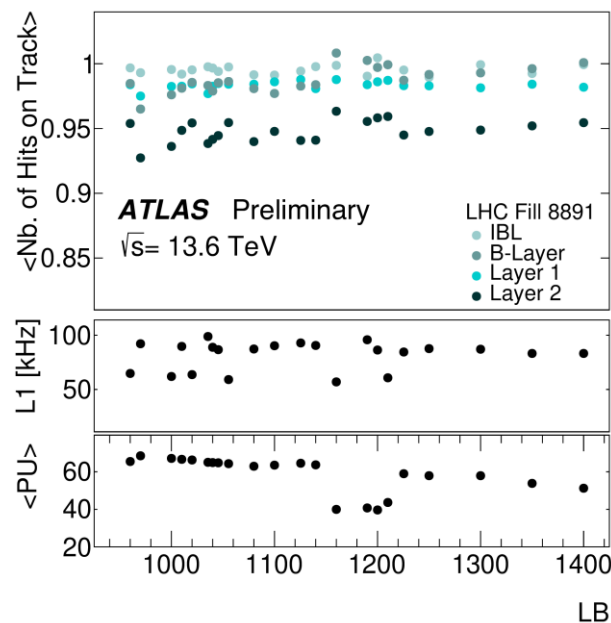
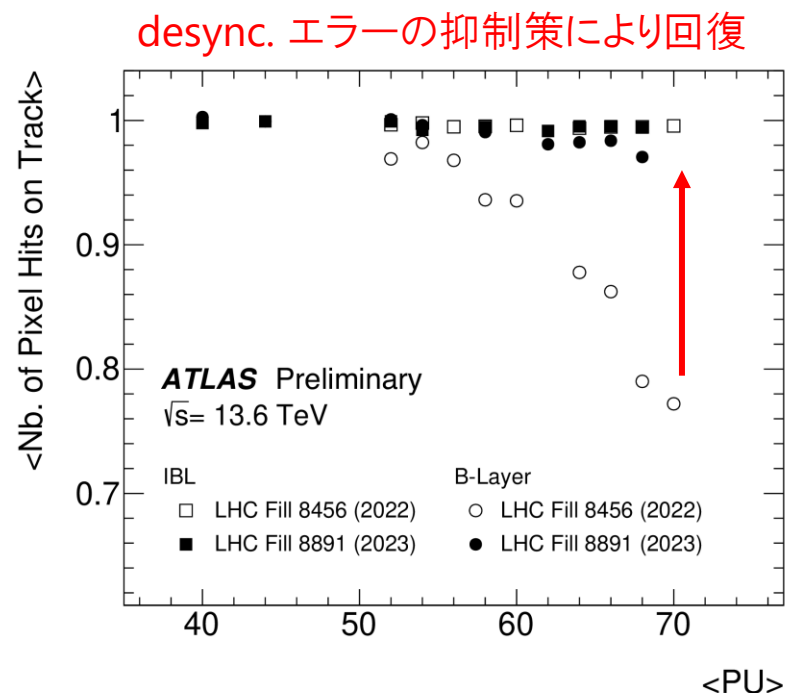
- IBLにおける収集電荷量の分布
- IBL及びB-Layerの電荷収集効率の照射量依存性
- 放射線損傷を取り入れたシミュレーションでよく再現できている

JINST 19 P10008



# ヒット検出効率

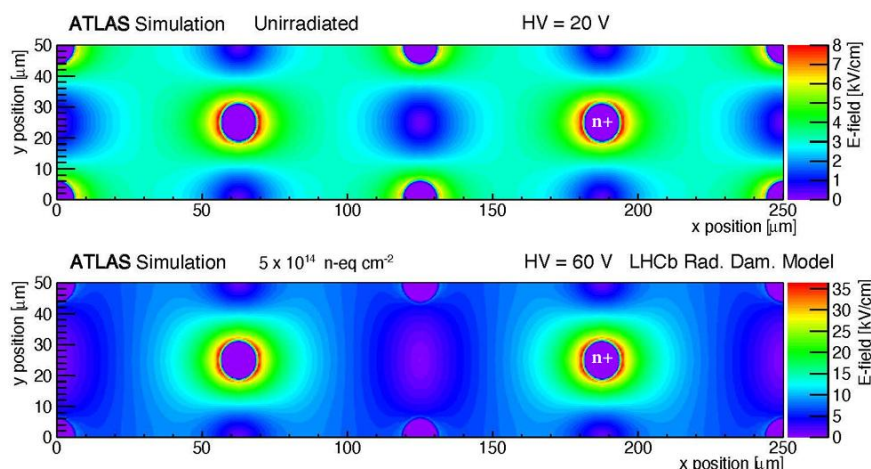
- 非同期(desync.)エラーを抑制する対策のおかげでpileup事象数の多い状況でヒット検出効率を回復できた
- 電荷収集効率は低下していても、ヒットの検出効率は高いレベルで安定している
- Pileup事象数やLevel-1トリガーレートによらず高いヒット検出効率を維持できている



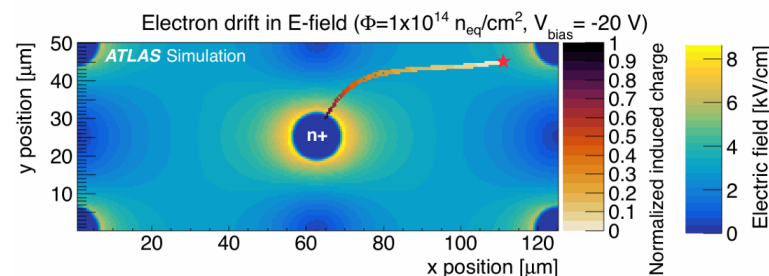
# 3Dセンサーの性能

- 3Dセンサーは放射線耐性が高く、Run-4では最内層に採用されるため、性能を理解しておくことは重要である
- IBLでは2種類のセンサー（FBK社とCNM社製）を使っている
- 放射線損傷のシミュレーションはFBKのセンサーしか実装されていない

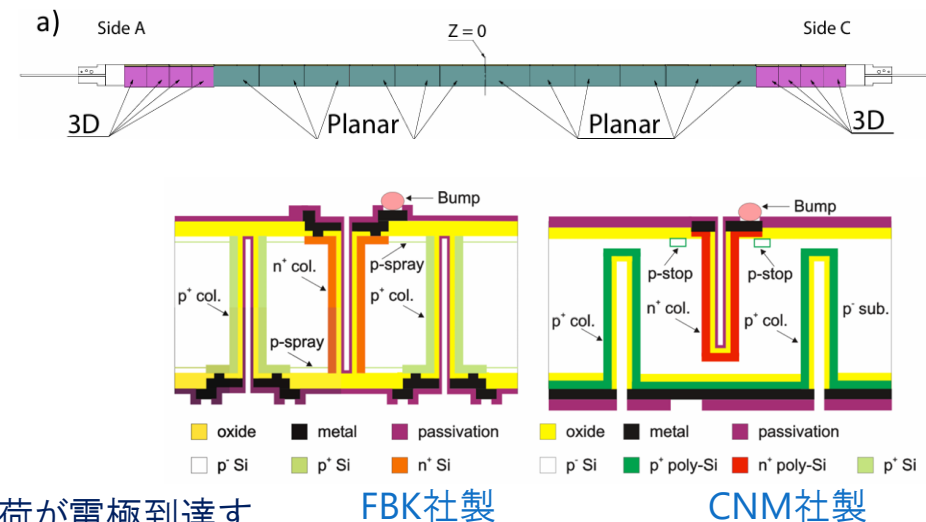
照射前(上)と後(下)における電場構造



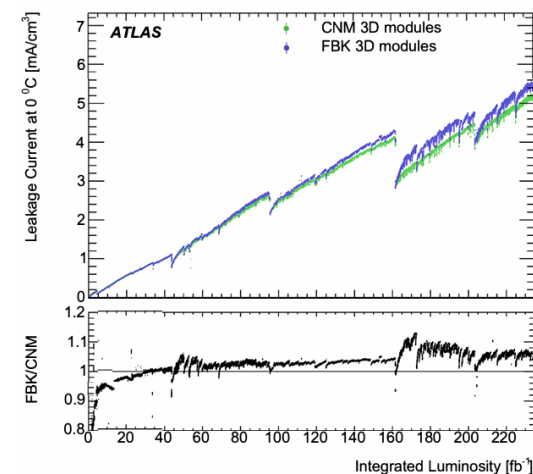
- ある場所で発生した電荷が電極到達するまでの軌跡
- 途中でトラップされた場合、電極では誘起電荷が観測される



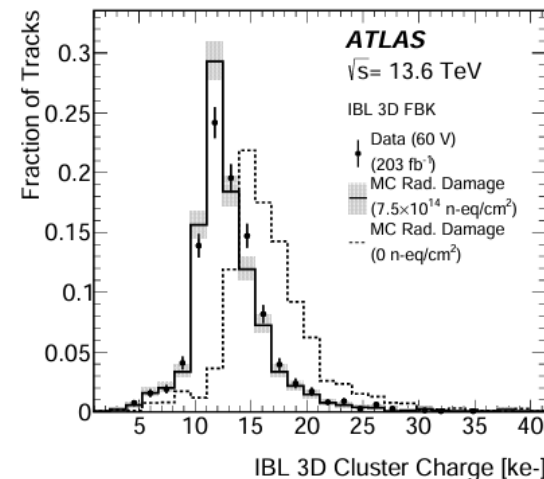
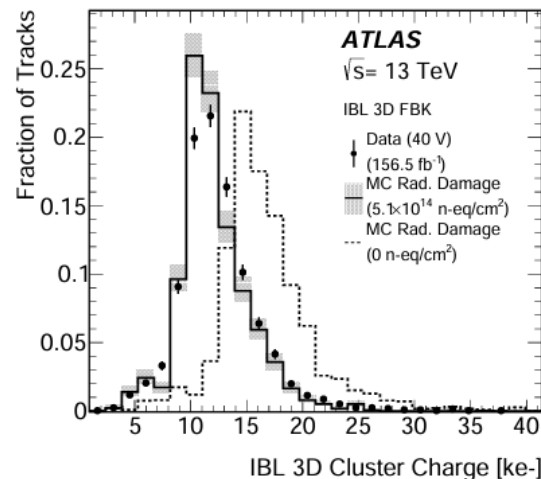
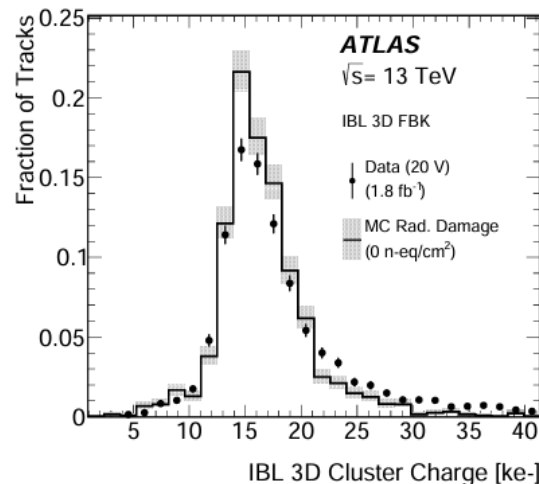
JINST 19 (2024) P10008



Leakage current



# 3Dセンサーの収集電荷量

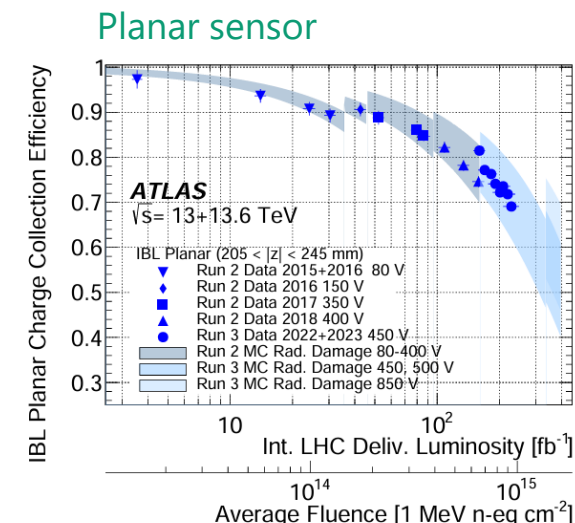
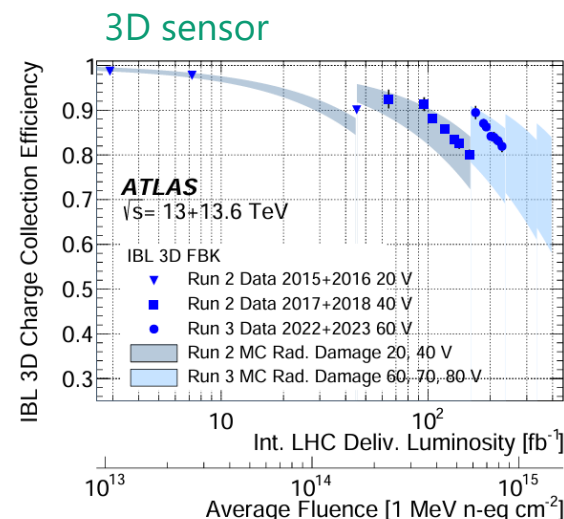


JINST 19 (2024) P10008

- 3Dセンサーについても、不定性の範囲内で放射線損傷のシミュレーションによって記述できている
- Planarより3Dセンサーの方が収集電荷量の低下が小さい

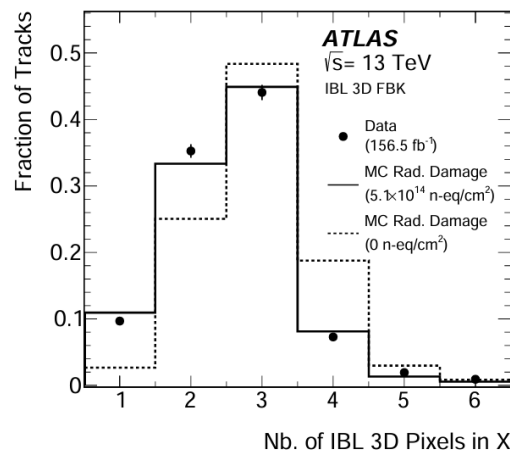
積分ルミノシティ ↔ 照射量の換算係数

- Planar:  $(4.1 \pm 0.4) \times 10^{12} \text{ [n-eq cm}^{-2}\text{/fb}^{-1}\text{]}$
- 3D:  $(3.6 \pm 0.4) \times 10^{12} \text{ [n-eq cm}^{-2}\text{/fb}^{-1}\text{]}$

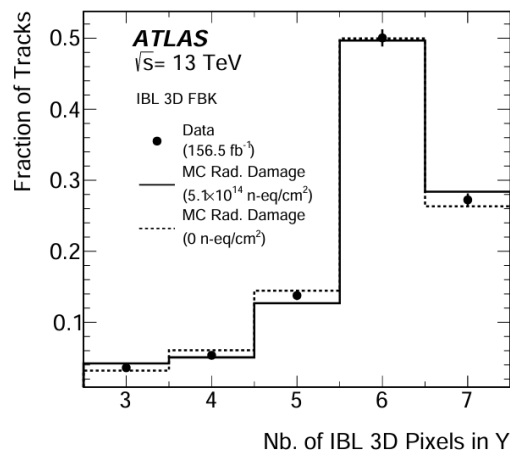


# 3Dセンサーにおける電荷の拡がり

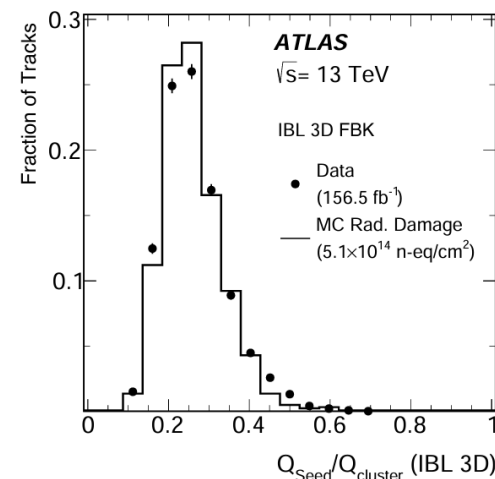
$\phi$ 方向のクラスター数



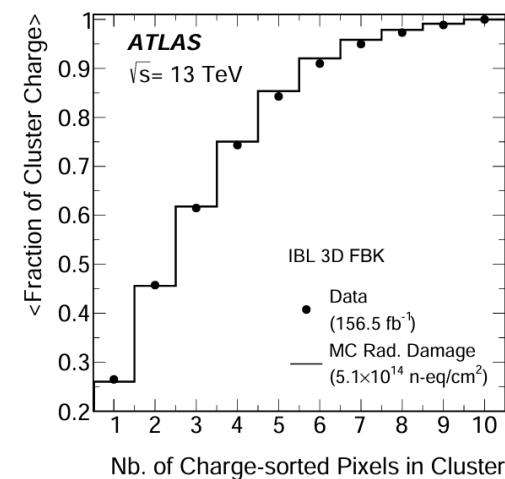
$\eta$ 方向のクラスター数



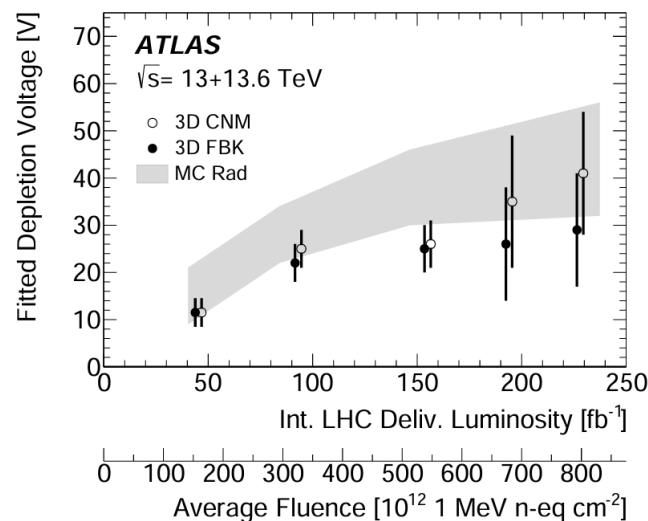
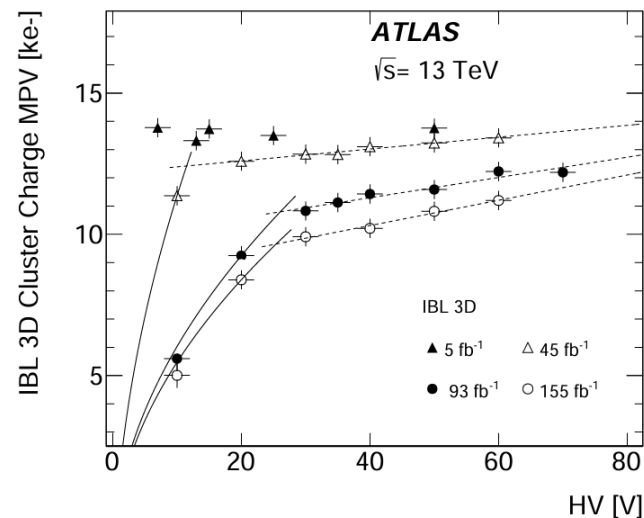
クラスター内で最大電荷量をもつピクセルのもつ電荷の割合



クラスター内のn個のピクセルの電荷量の和



JINST 19 (2024) P10008



← 完全空乏化電圧  
Planarでは500 V掛けていたことと比べるとかなり低い値で空乏化できる



# まとめ

---

- ATLAS実験は2010年より、Run-1, Run-2そしてRun-3とデータを収集し、2025年末までに約440 fb<sup>-1</sup>のデータを蓄積した
- ピクセル検出器では、これまでに受けた放射線損傷に加えて、ルミノシティが約 $2 \times 10^{34}$  cm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>という状況で運転する必要があった
  - 約94%のチャンネルが有効
  - Single event upsetに対処するため、5秒ごとにfrontend ASICのレジスタの再書き込み
  - 高レートによる非同期エラーには、ROD firmwareにbuffer overflowへの対応を実装
  - 高いデータ収集効率、高品質のデータ取得を実現できた
- ピクセル検出器の性能
  - 放射線損傷による影響をモデル化したシミュレーションを開発した
  - 照射量の増加に伴い収集電荷量はIBL, B-Layerでは顕著に低下している
  - 飛跡再構成に重要なヒット検出効率は高い値を維持している (IBL: 95%, その他: 99%)
  - 3Dセンサーの特性も実データをもとに調べた

# Backup slides

---