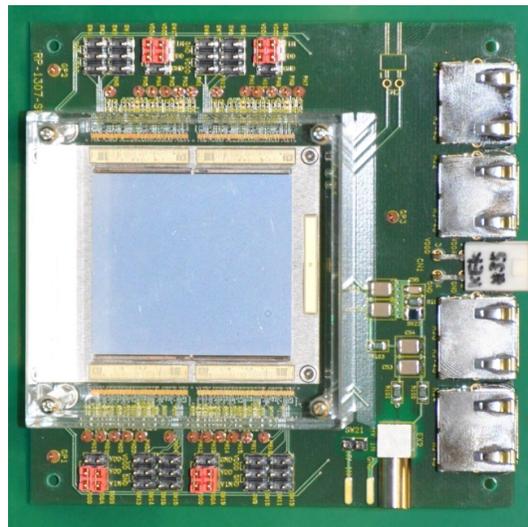


# 高輝度LHC実験に向けた ピクセル半導体検出器の開発



陣内 修

東工大理学院

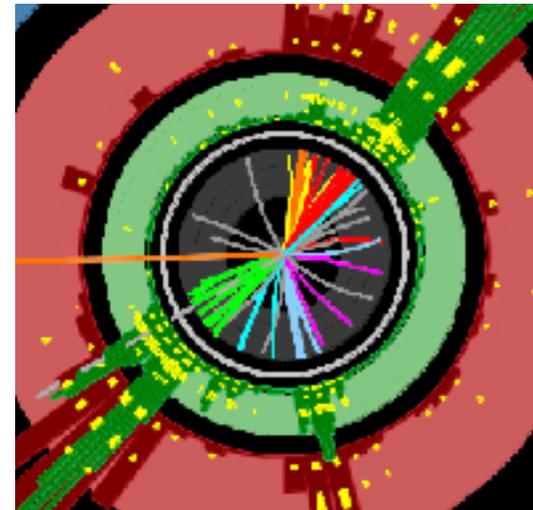
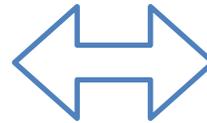
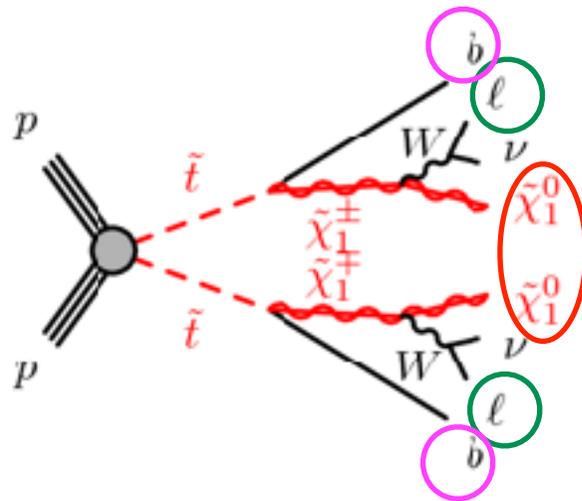
先端物理計測開発室キックオフワークショップ

2016. 12. 22

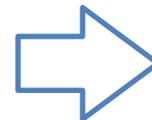


- BSMの2大根拠
  - 階層性問題 (ヒッグス質量問題)
  - 暗黒物質候補

## 超対称性粒子探索の例



- 新物理発見の鍵を握るのは
  - レプトン(電子、ミューオン)
  - ジェット (特にb-クォーク起源)
  - 消失エネルギー

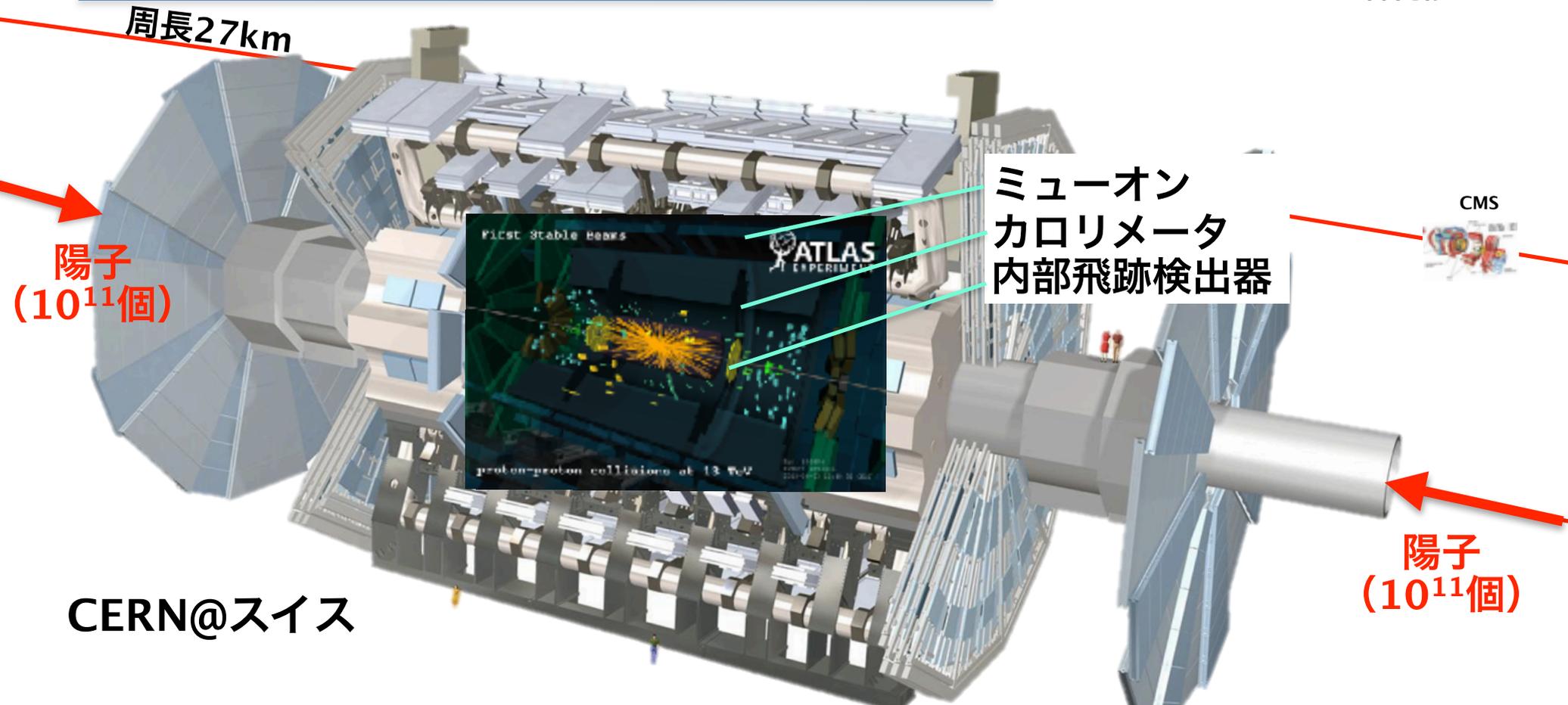


荷電粒子の飛跡検出  
がとても重要

# LHC(加速器) & ATLAS(検出器)

2016/12/22  
AILAP workshop  
陣内修

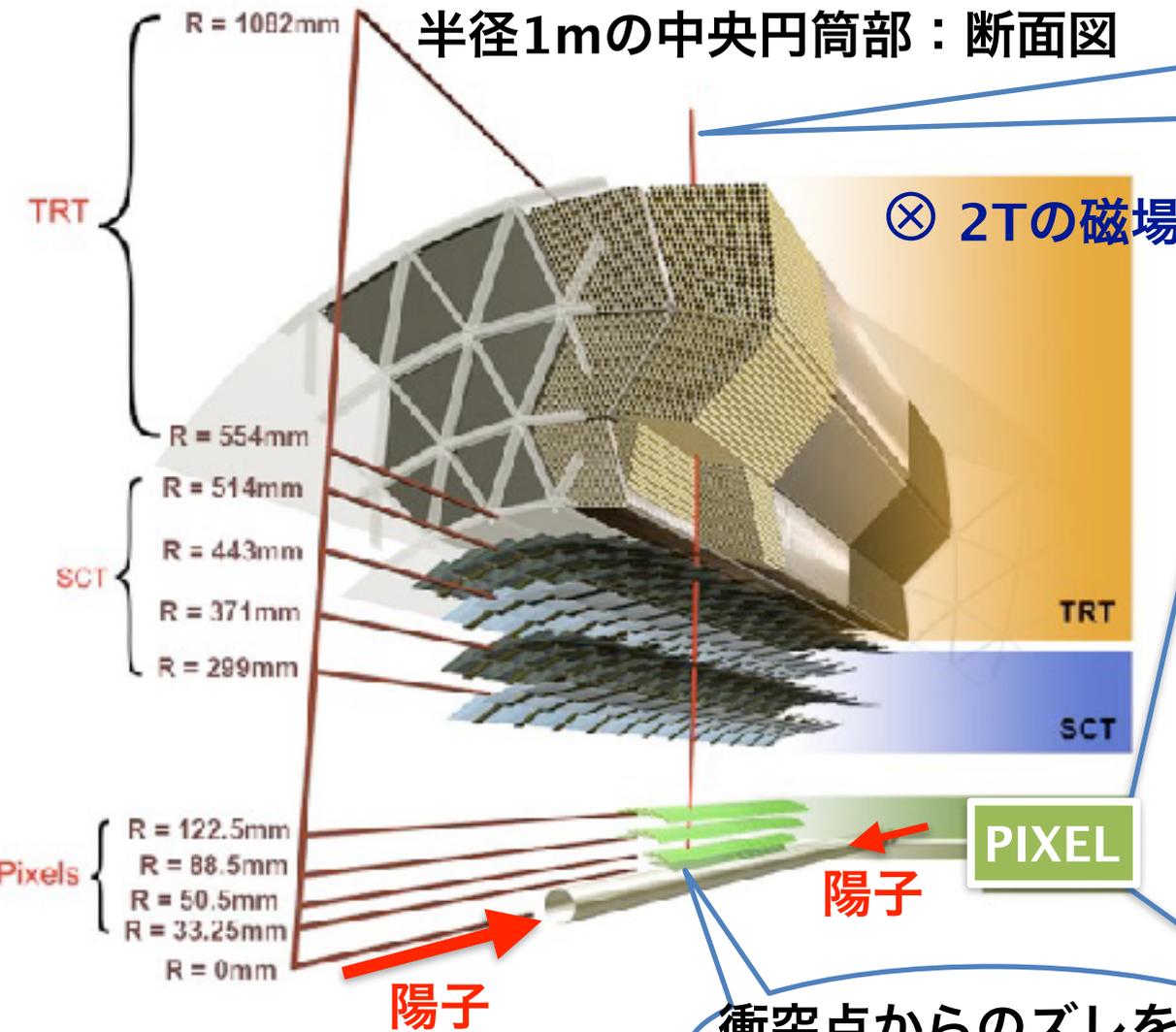
4



CERN@スイス

- 強力な飛跡検出(内部・ミュオン)+エネルギー測定 (カロリメータ)
- 2015年 13TeV陽子・陽子衝突開始 (Run-2)
- (25n秒に一度の衝突) x (数十事象 同時発生)

# 現在の内部飛跡検出器(トラッカー)



ローレンツ力で荷電トラックが曲がる  
曲率から運動量精密測定  
 $\delta p/p \sim 3\% @ 10\text{GeV}$

- シリコン半導体検出器  
厚さ 250  $\mu\text{m}$   
ピクセルサイズ  
1層目: 50x250  $\mu\text{m}^2$   
2-4層目: 50x400  $\mu\text{m}^2$
- エンドキャップもあわせて  
ピクセルだけで90Mチャンネル  
(検出器全体の約半数)

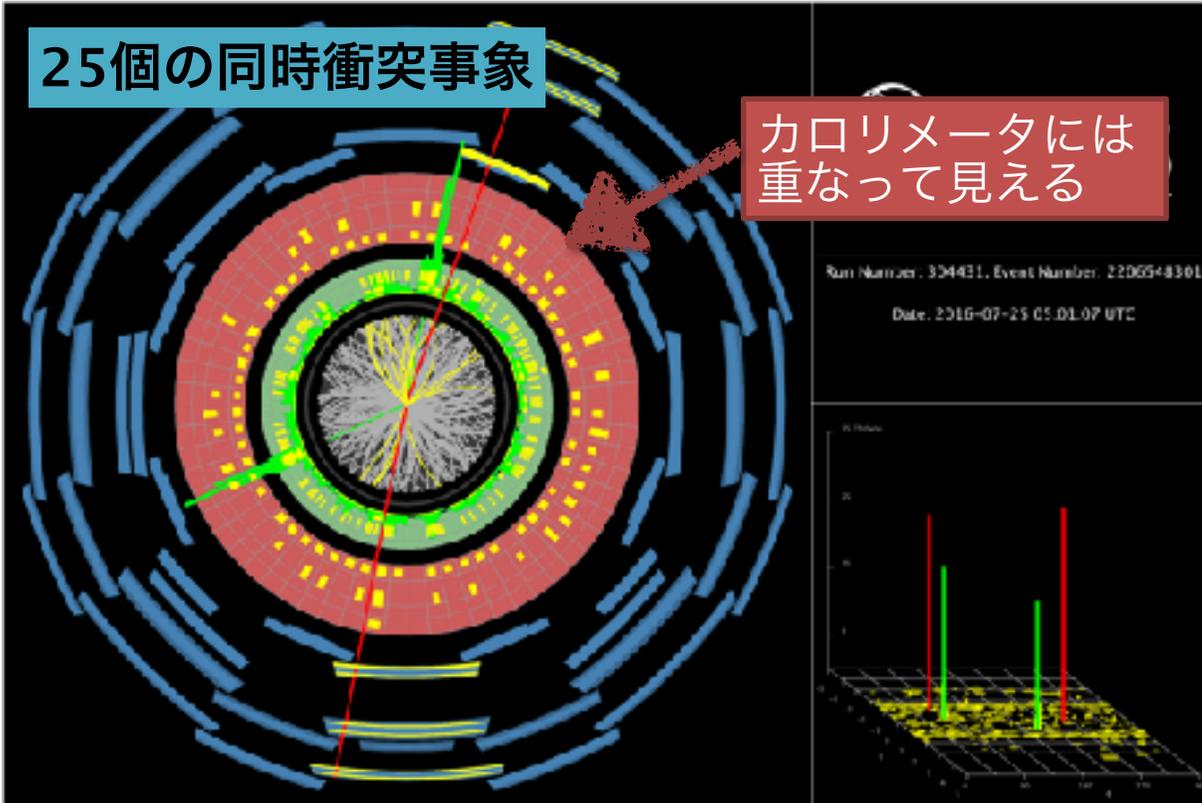
衝突点からのズレを測る  
間近で測る

細かさ・読み出し!

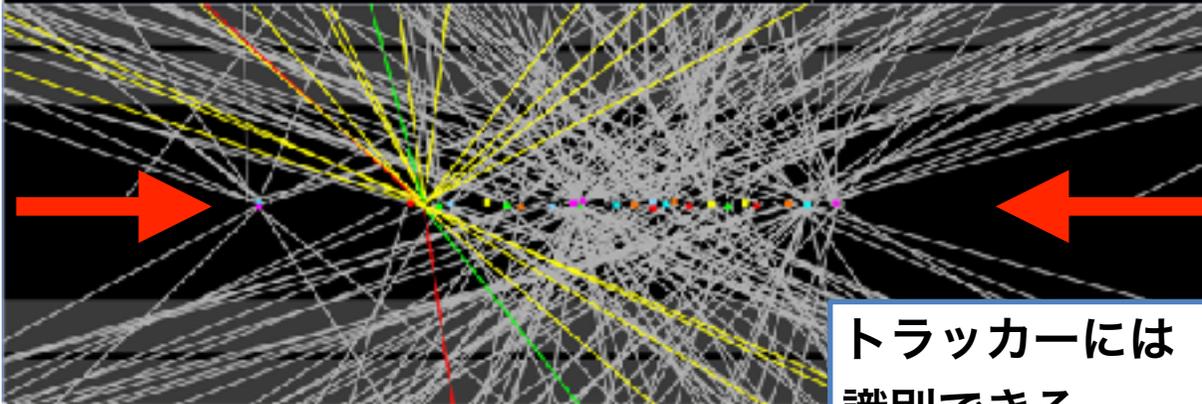
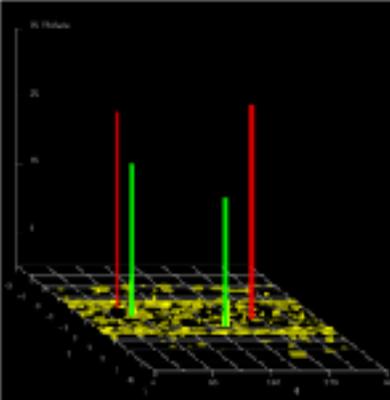
# LHC実験の難敵 Pile-up対策

25個の同時衝突事象

カロリメータには重なって見える



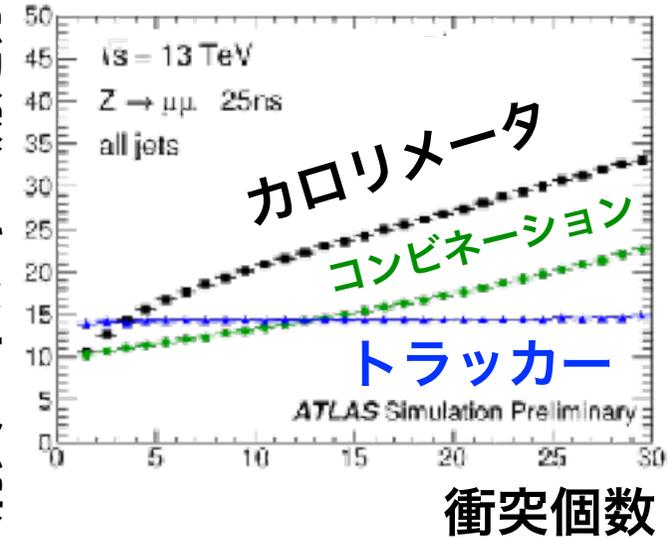
Run Number: 324431, Event Number: 2206548361  
Date: 2016-07-25 05:01:07 UTC



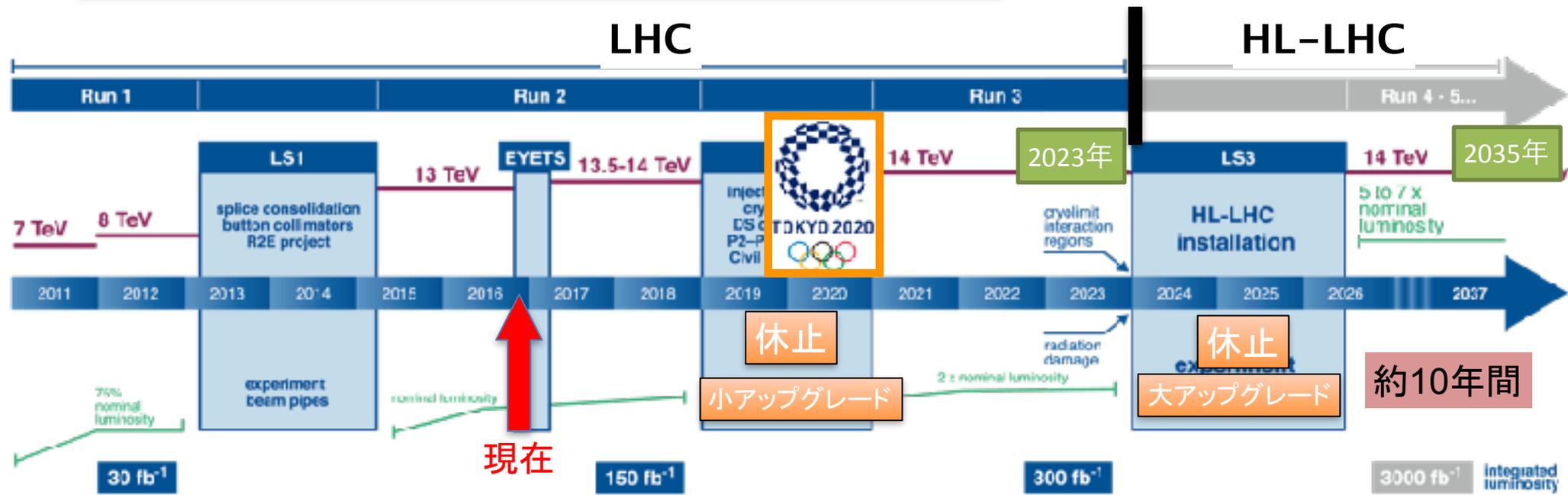
トラッカーには識別できる

消失エネルギー測定分解能

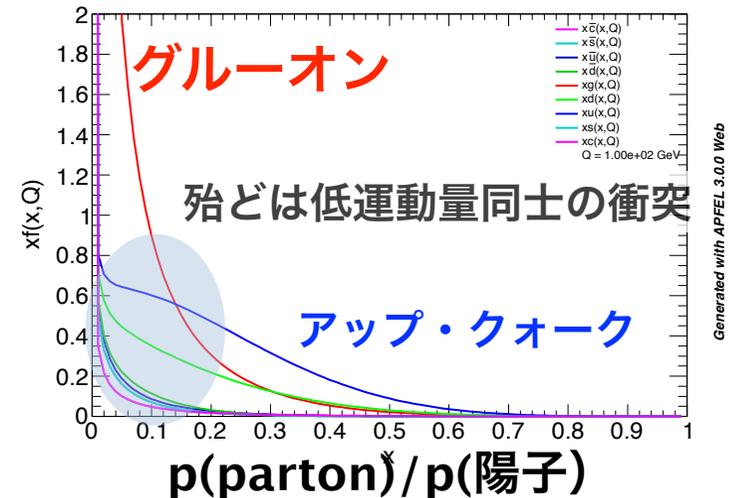
(一例)



- 2016年Runでは平均20個
- 輝度をあげるために将来の増加は必至
- トラッカーがなければ勝負にならない

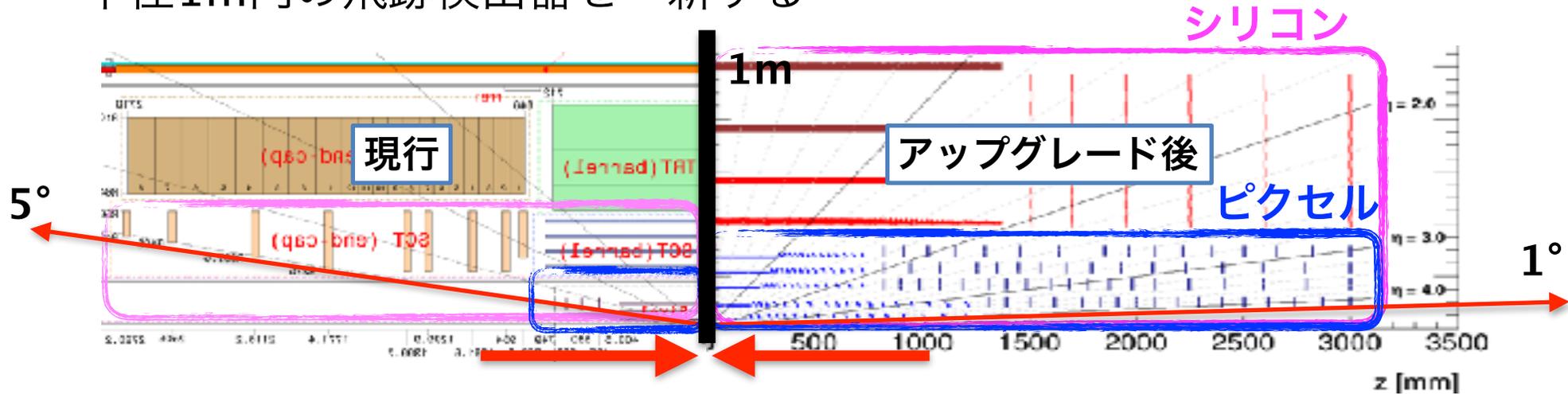


- HL(高輝度)-LHCでは
  - エネルギーは据え置き
  - 瞬間luminosity : 現設計の 5-7倍
  - 積算luminosity : 2023年までの10倍
- データを増やすだけでOK?
  - 実効的にエネルギースケールの増加



# 大輝度化の代償→検出器への厳しい要求

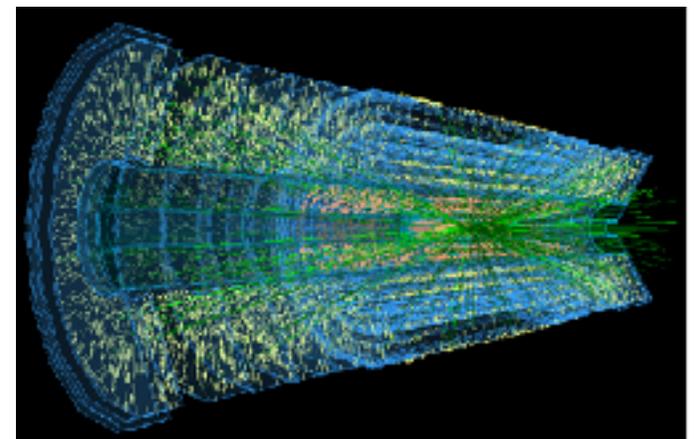
- 現行の飛跡検出器は2023年まで(放射線損傷、読み出し)
- 半径1m内の飛跡検出器を一新する



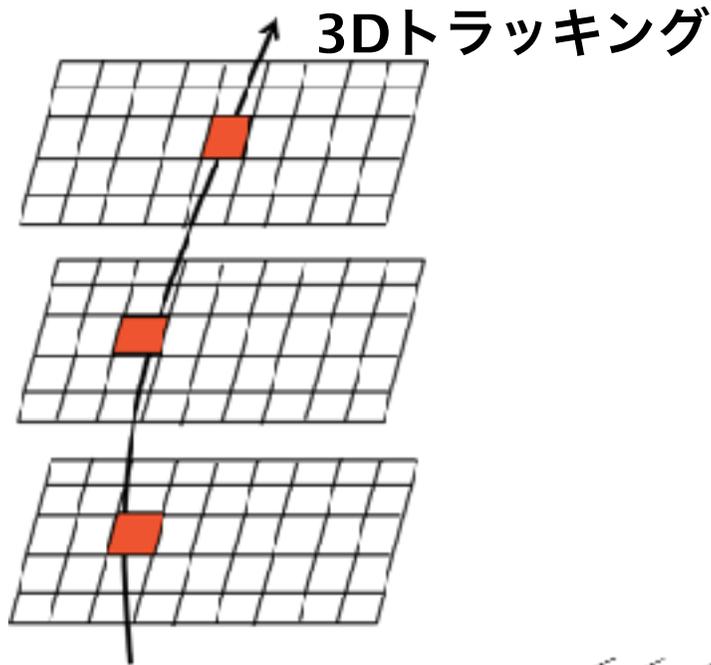
- 受容放射線量：現行検出器の約10倍
  - 放射線耐性  $5 \times 10^{15}$  [neq/cm<sup>2</sup>]で動作
- pile-up ~200同時衝突
  - ピクセルの微細化 → 50x50 μm<sup>2</sup>

**この要求を満たすPIXEL検出器の開発**

**アトラス内規格 & 国際競争**



n=200のシミュレーション



ピクセル状に細分化された検出器

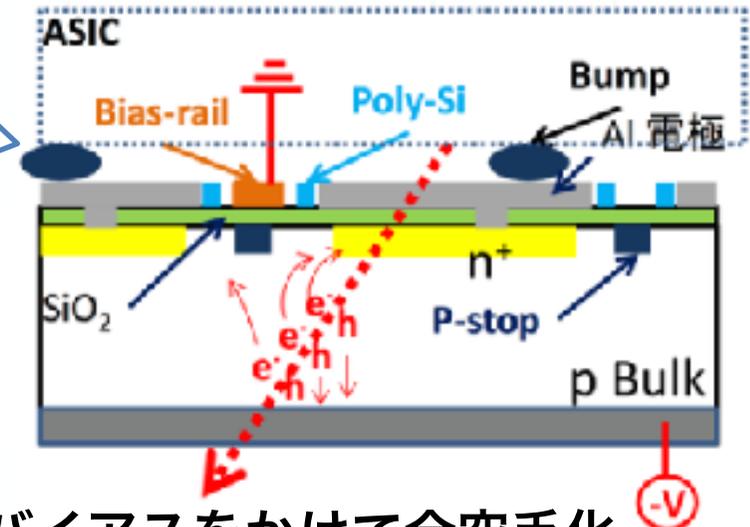
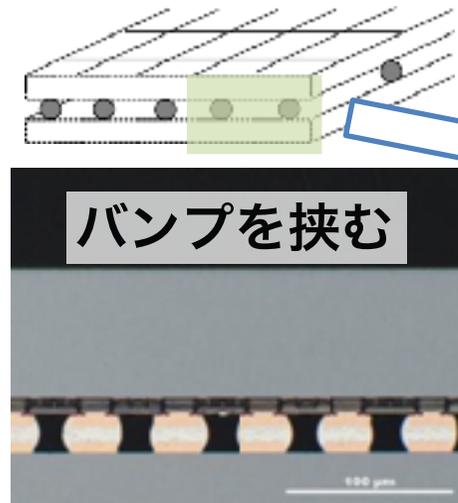
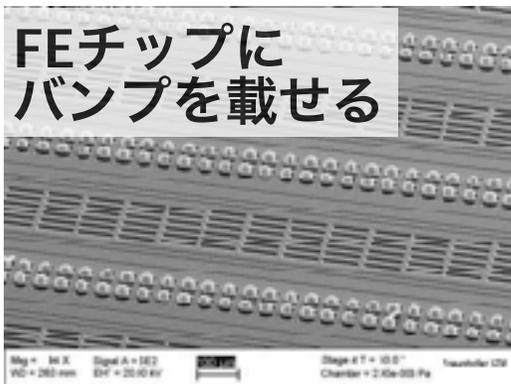
どうやって信号を読み出すのか

→センサー部は一体、

n-p接合 & 読み出し電極がピクセル状

→読み出しASIC(FEチップ)と直接接合

バンパ・ボンド



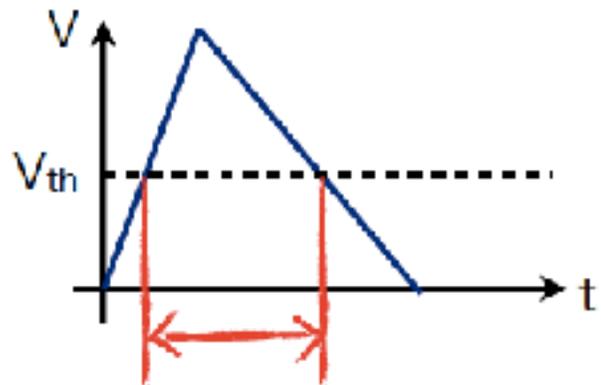
逆バイアスをかけて全空乏化

# Pixelセンサーの性能

- 評価基準
  - 安定した製作歩留まり・動作
  - 検出効率
    - 入射した荷電粒子に対しヒット信号を出すか
    - エネルギー損失は必須→電荷を正しく収集できるか
    - センサー全体で99%以上が目安
  - 電荷量測定
    - センサー→ASIC（デジタル化）→読み出し
    - 電荷量情報はTOTという数値化(4bit)

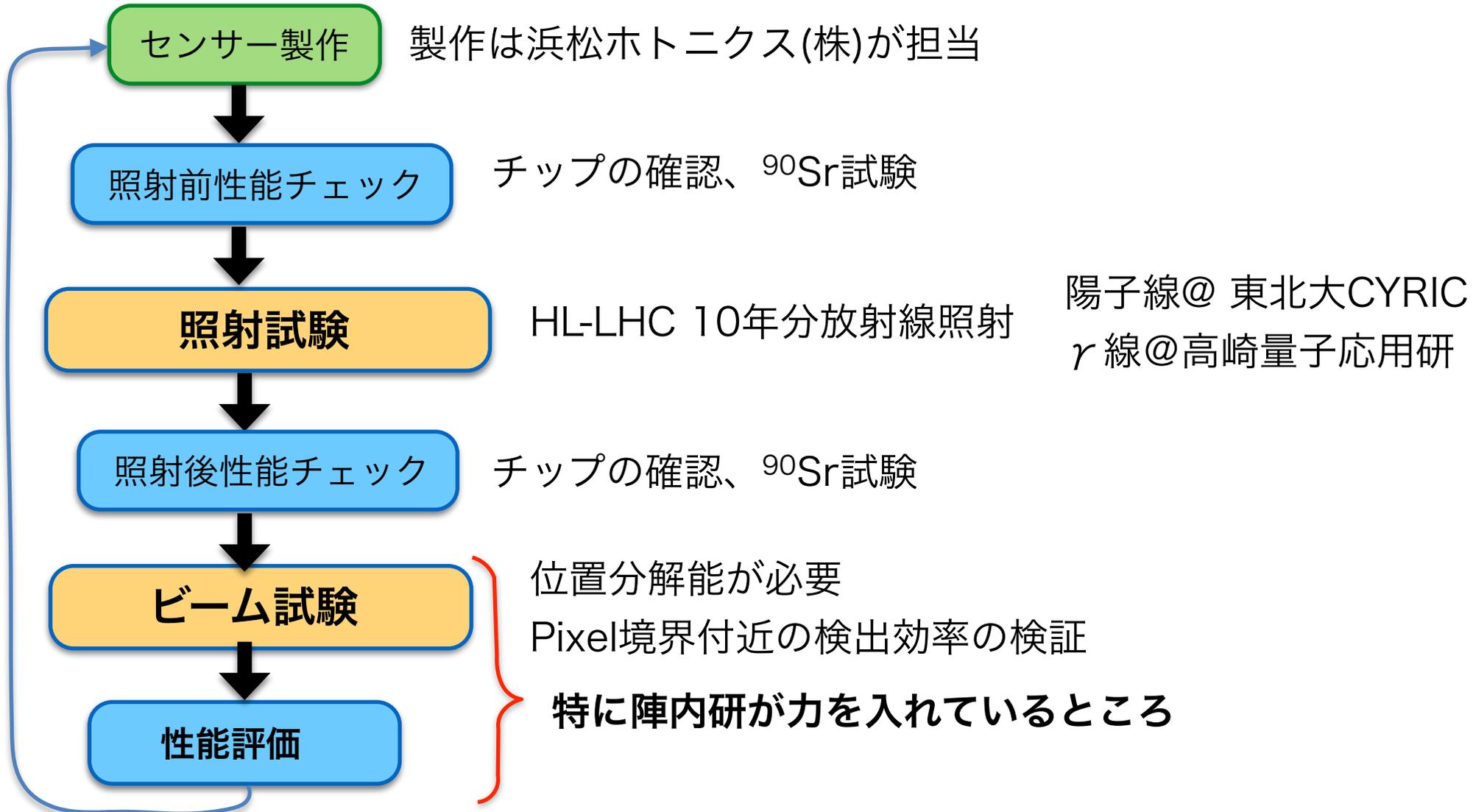
放射線損傷後にこれらを保障する必要

Time over Threshold

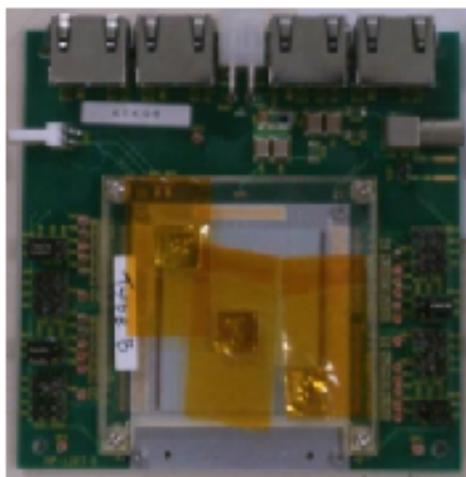


V<sub>th</sub>を越えた時間 (25 ns単位)

## アトラス日本シリコングループとの共同研究で進めている



- 東北大CYRICにて、70MeVの陽子線を用いた照射試験
  - 照射量目安：  $3 \times 10^{15}$  [1MeVn<sub>eq</sub>/cm<sup>2</sup>]  
HL-LHC Pixel 3層目 10年間の放射線量の2倍
  - beam auto scan：満遍なく照射
  - 照射量は下流のドシメトリで測定

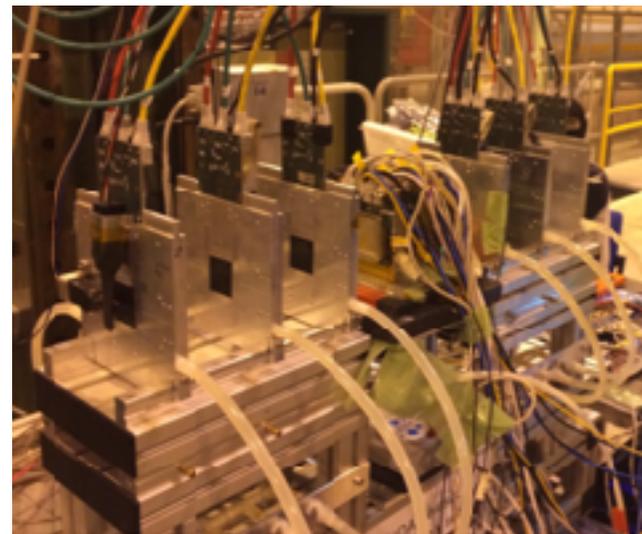


ドシメトリ用アルミ



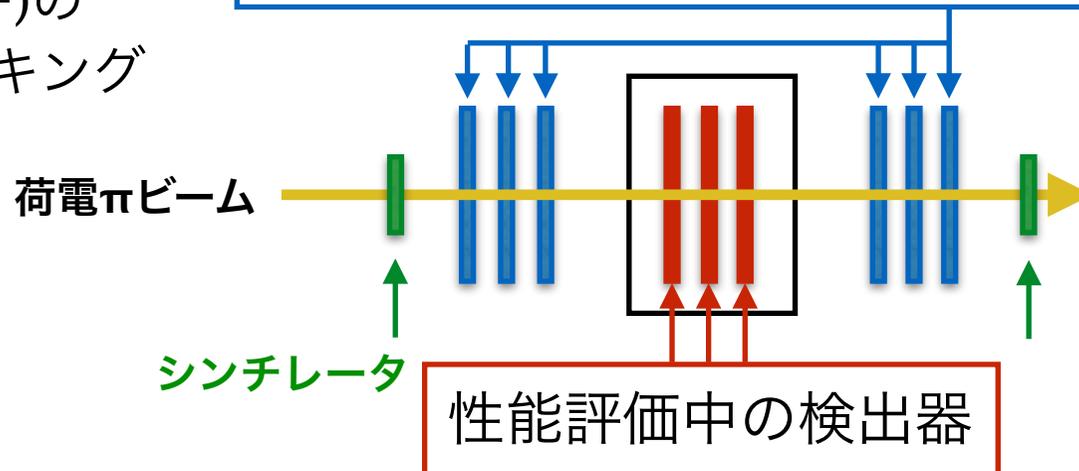
Irradiation box @ CYRIC

- 目的：
  - 開発中の検出器のピクセルサイズより1/10程度の分解能で、検出効率などの構造依存性を検証する
- 場所：主にCERN SPS
  - 120GeV 荷電 $\pi$ 粒子
  - 高位置分解能( $18 \times 18 \mu\text{m}^2$ )のピクセル検出器でトラッキング ( $\sigma = 3 \sim 5 \mu\text{m}$ )



## テレスコープ

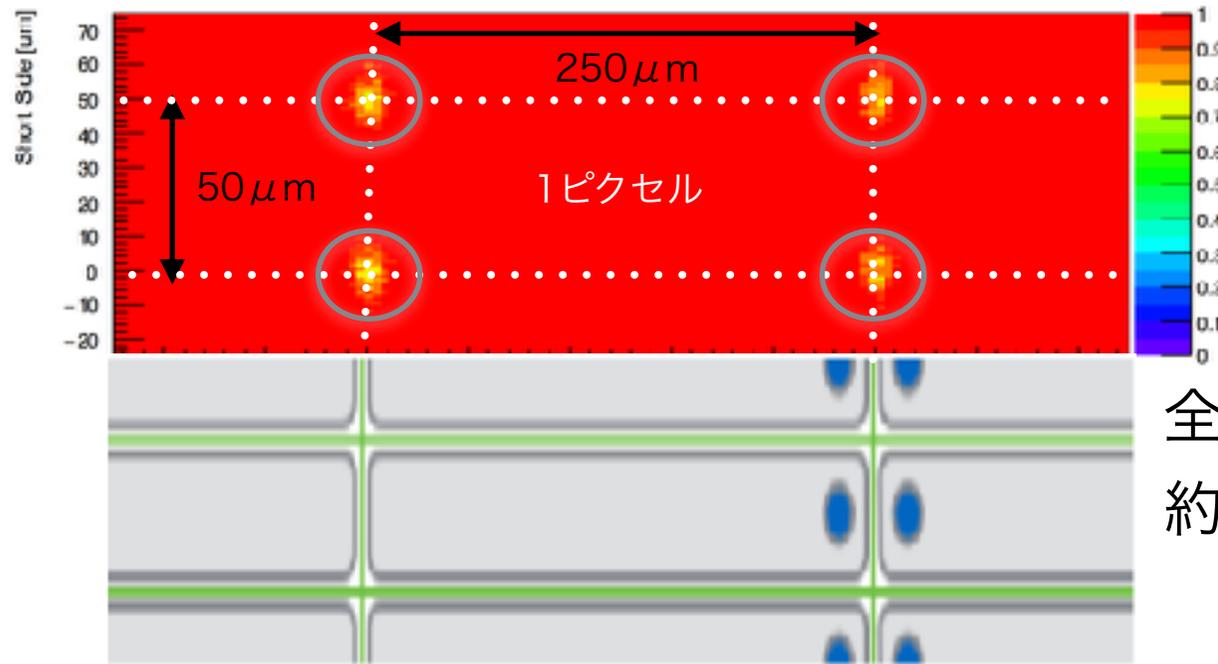
トラッキング用高位置分解能ピクセル検出器



# 開発状況

(2016年6月に行われたビーム試験の解析結果)

ピクセル内のヒット位置ごとの検出効率

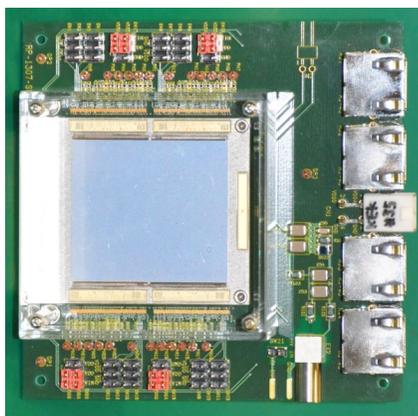


全体での検出効率  
約99%

様々な試行錯誤の末（割愛）、  
一様に高効率なセンサーの製造方法を確立  
→ピクセルの境界部で若干の検出効率低下があるが支障なし

- LHCでは飛跡検出器が重要な役割を担う
- HL-LHC用のピクセル検出器開発を進めている
- より最終版（実機）に近い型のセンサーで現在試験を進めている。
  - 40 mm x 40 mm (ASIC 4つ搭載)
  - 50x50  $\mu\text{m}^2$  ピクセルサイズ
  - 専用高速読み出しASICへの対応
- 来年度末の「技術選択」で残ることが目標

4xASIC



50x50 $\mu\text{m}^2$

