

LHC-ATLAS実験

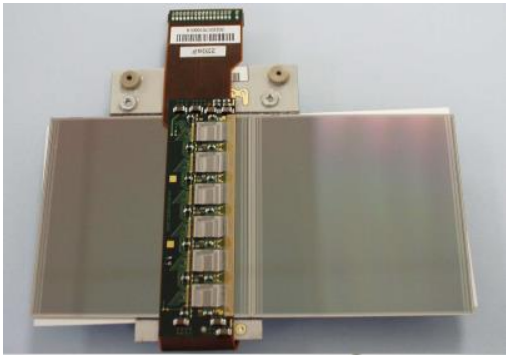
シリコンストリップ検出器の 放射線損傷の現状

2018.3.22

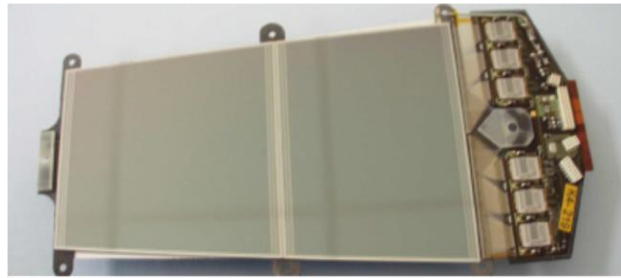
近藤敬比古, 音野瑛俊^A, 織田勸^A, 調翔平^A, 永井康一^B,
南條創^C, 萩原睦人^D, Ian Dowson^E, Arka Santra^E

他アトラスSCTグループ

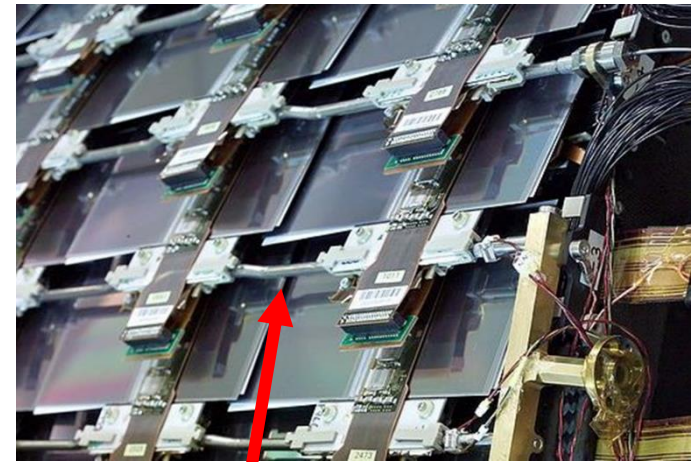
高工研, 九州大^A, Oxford大^B, 大阪大^C, 筑波大^D, Sheffield大^E, Valencia大^E



Barrel 型 (2112個)



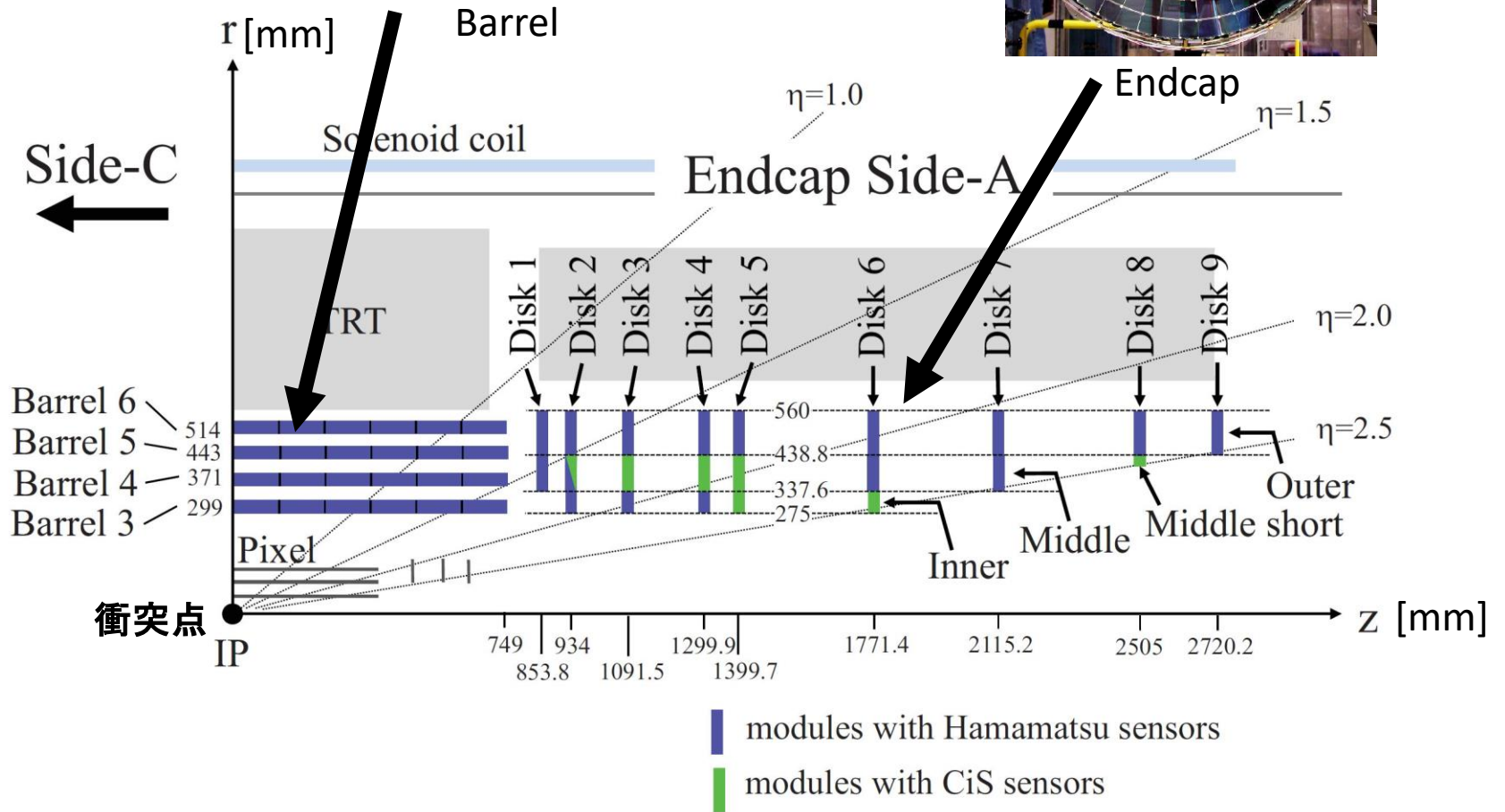
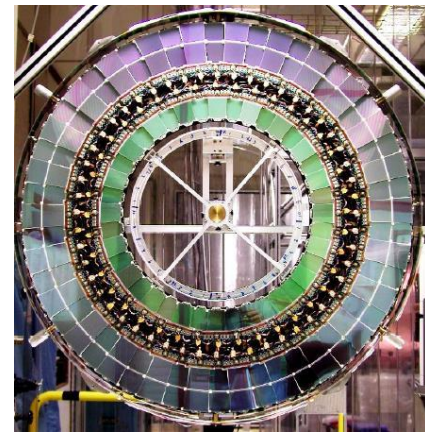
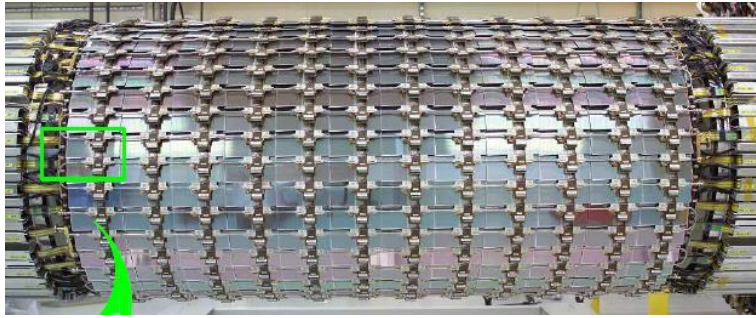
Endcap 型 (1976個)



C_3F_8 cooling pipe (4mm ϕ)

アトラス実験シリコンストリップ検出器

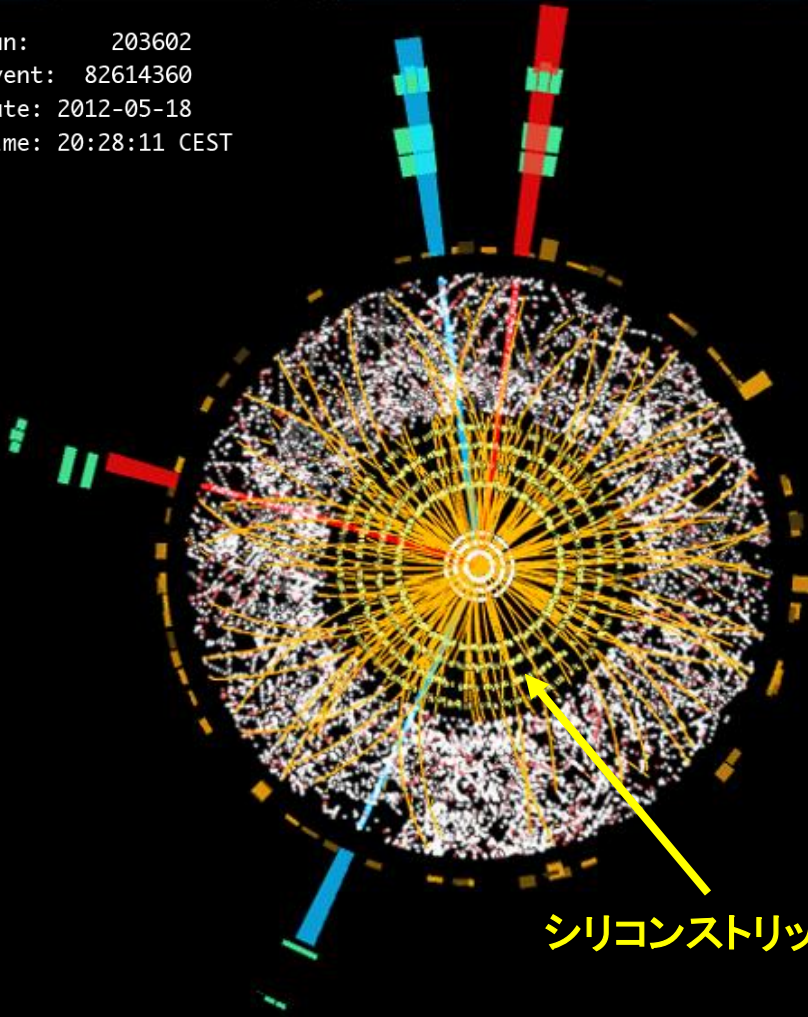
- センサー: p-on-n型 $285\mu\text{m}$ 厚 strip幅 \times 長= $80\mu\text{m}\times 12\text{cm}$, 全空乏電圧= $70\pm 10\text{V}$
- 浜松ホトニクス製 (88%) + CiS製 (12%)
- 4088モジュール、全面積= 60m^2 約600万channel
- デジタル読出回路: 1 fC threshold、ゲート幅 25ns
- C_3F_8 2相流による冷却でセンサーを $-10\sim +5^\circ\text{C}$ に保つ。



ATLAS実験ストリップ型シリコン飛跡検出器(SCT)システムの四半部断面図

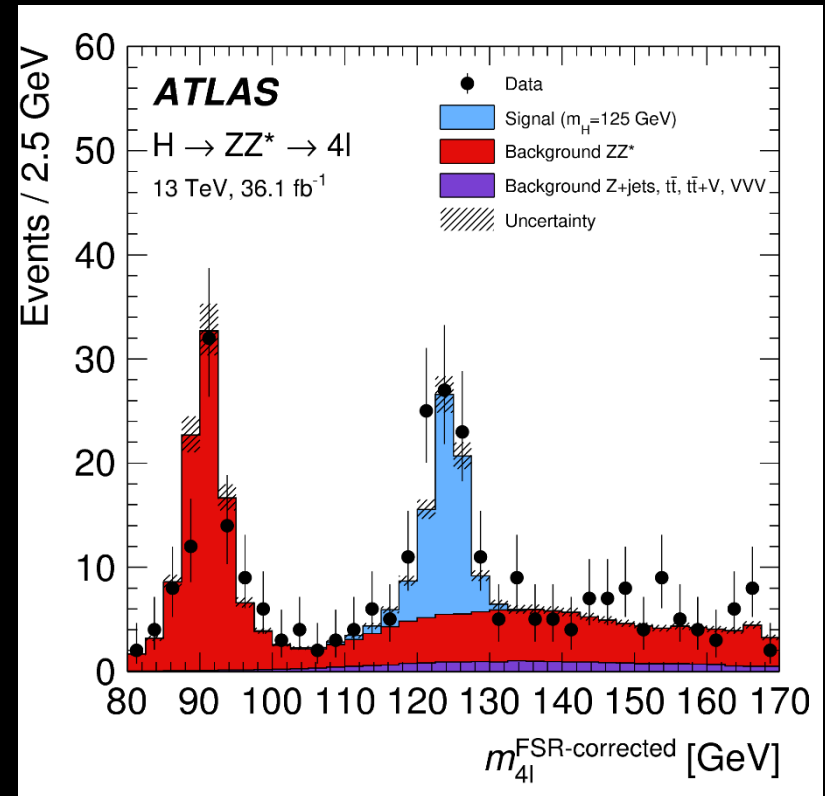
シリコンストリップ検出器はアトラス実験の中心的な飛跡検出器として2012年のヒッグス粒子発見に貢献した。

Run: 203602
Event: 82614360
Date: 2012-05-18
Time: 20:28:11 CEST



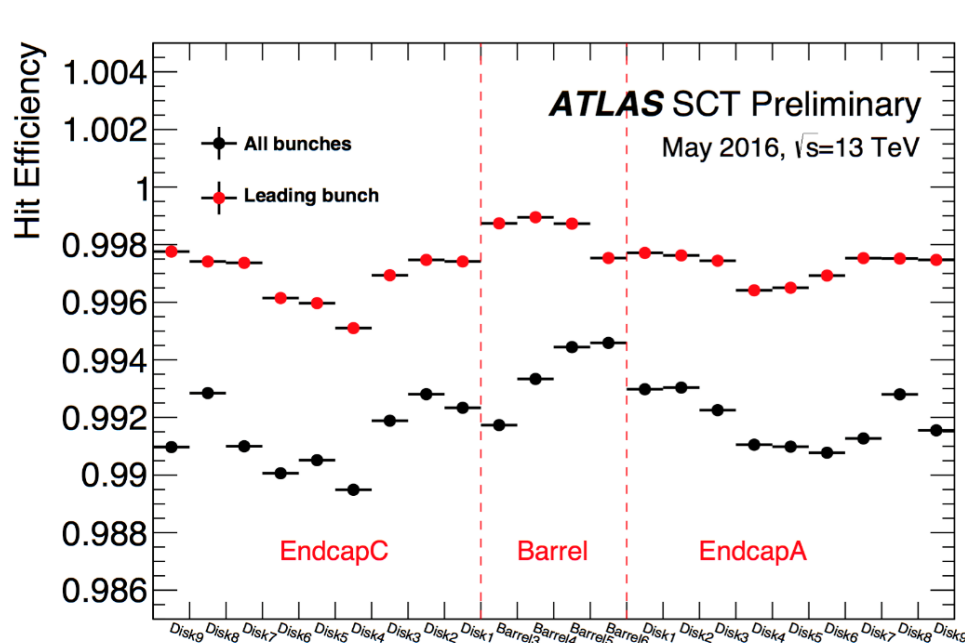
シリコンストリップ検出器

candidate of $H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-e^+e^-$

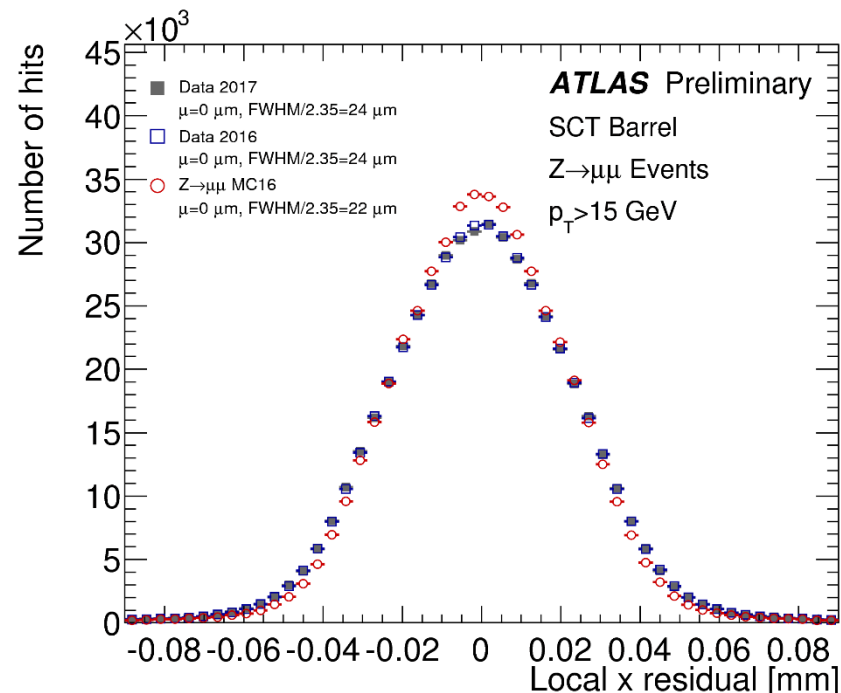


ATLASストリップ型シリコン検出器システムの運転状況

- **98.7%** が正常に動作している(2017年11月現在)



ストリップあたりの飛跡検出効率
 ~99.7% (最初のバンチ)
 ~99.2% (前バンチ存在するとき)



位置精度は24 μm (予想22 μm)

シリコンバルクの主な放射線損傷:

- ① リーク電流が NIEL単位で表した通過放射線量 Φ_{eq} に比例して増える。

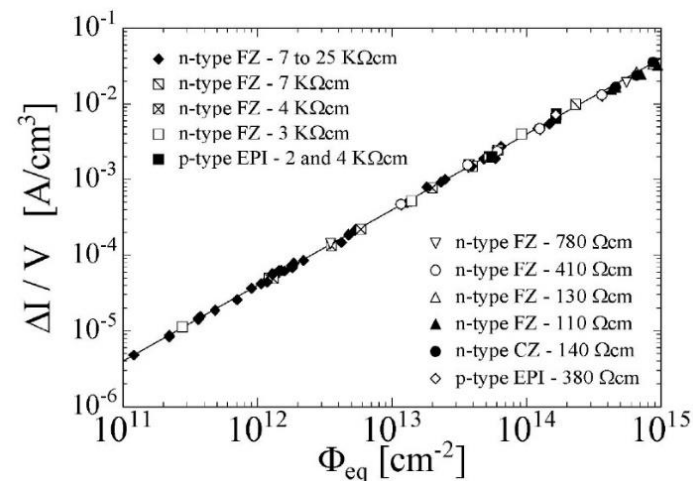
$$I_{leak} = \alpha(T, t) \cdot \Phi_{eq}$$

- ② 不純物濃度 N_{eff} が変化して全空乏電圧 V_{FD} が変わる。n型からp型へのType inversionが起こる。

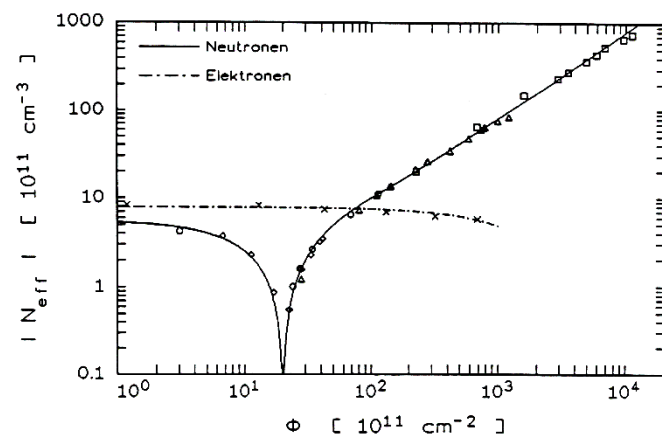
$$V_{FD} = \frac{e |N_{eff}|}{2\epsilon\epsilon_0} d^2 \quad (d : \text{sensor thickness})$$

- ③ 電荷 (e,h) がドリフト中にトラップされる。

SCTでは全期間でtrappingは小さい。



M. Moll's thesis DESY(1999)



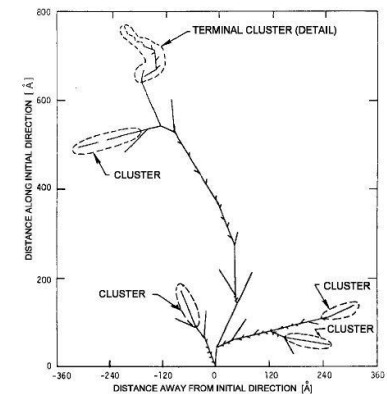
R. Wunstorf, PhD Thesis, University of Hamburg (1992)

NIEL (Non Ionizing Energy Loss) 仮説

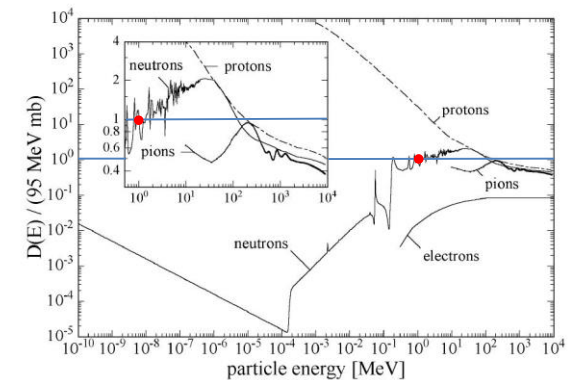
- 通過粒子は格子上のSi原子と反応してPKA (primary knock on atom)を作りPKAは格子欠陥 (vacancy)クラスターを作る。
- 格子欠陥を作る率は通過粒子の種類とエネルギーに強く依存する。そのため**1MeVの中性子**による格子欠陥生成量を基準に放射線量を規格化する。

例 24GeV proton → 0.62 1MeV n-eq
 193MeV pion → 1.14 1MeV n-eq

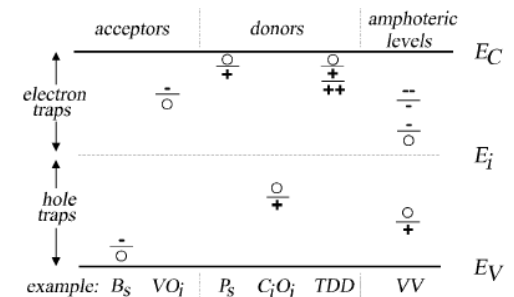
- 格子欠陥のために禁止バンド中に各種のtrap levelが出現し、リーク電流が増え不純物濃度 N_{eff} が増減する。



50keVのPKAによる格子欠陥 [1]



各種粒子による格子欠陥生成率 [2]



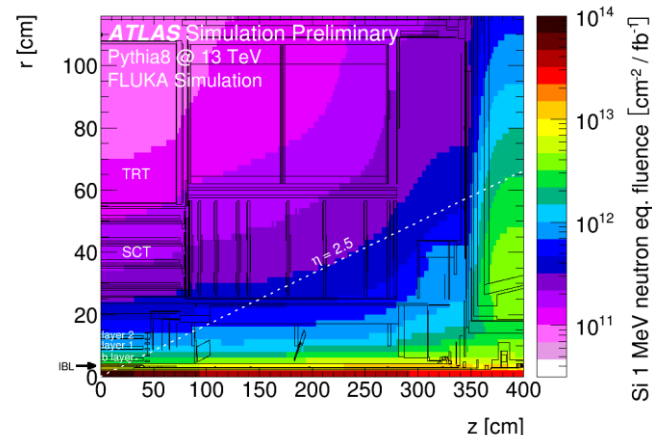
禁止バンド中のtrap levels

[1] Mechanisms of Radiation Effects in Electronic Materials. John Wiley & Sons 1980

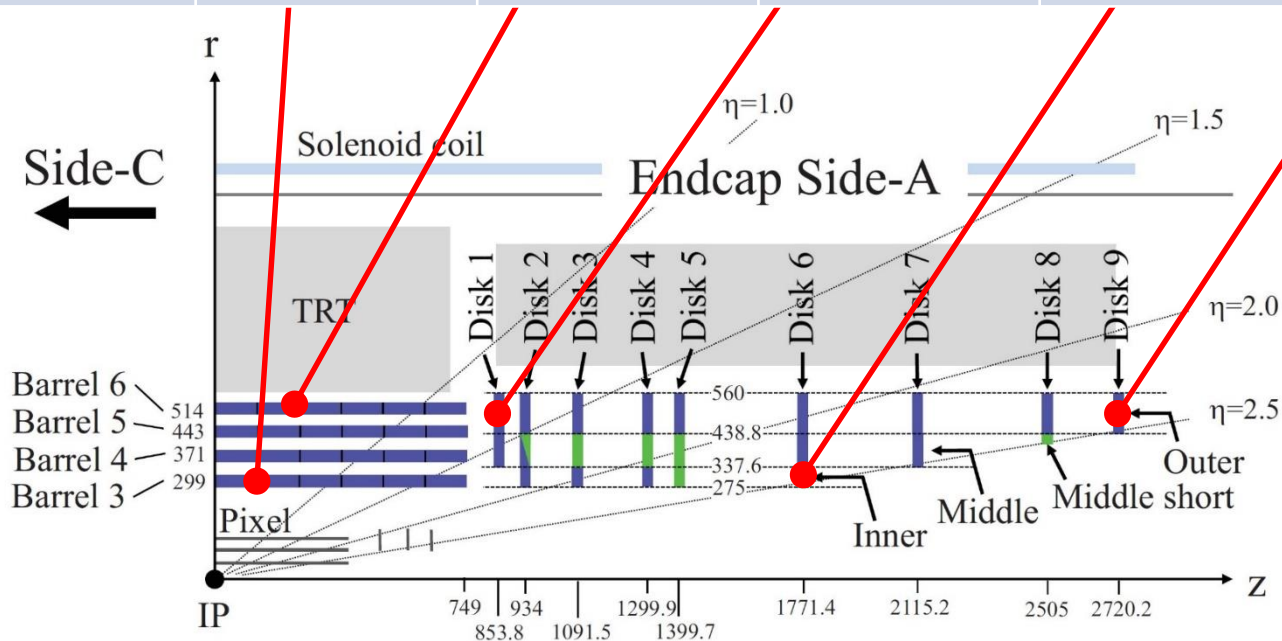
[2] A. Vasilescu, ROSE/TN/97-2, and RD48 STATUS REPORT CERN/LHCC 97-39, 20 June 1997

現在まで受けた放射線量

- pp衝突においてシリコン検出器が受ける放射線量はFLUKAを使ったシミュレーションで予想できる[1]。
- 2017年11月までの7/8/13 TeVランでのpp衝突の積算 delivered luminosityは 5.62/23.2/93.0 fb⁻¹ を使った。



location	Barrel 3	Barrel 6	Disk 1 Outer	Disk 6 Inner	Disk 9 Outer
1 MeV n-eq Fluence [cm ⁻²]	3.0x10¹³	1.7x10¹³	2.0x10¹³	3.7x10¹³	3.5x10¹³



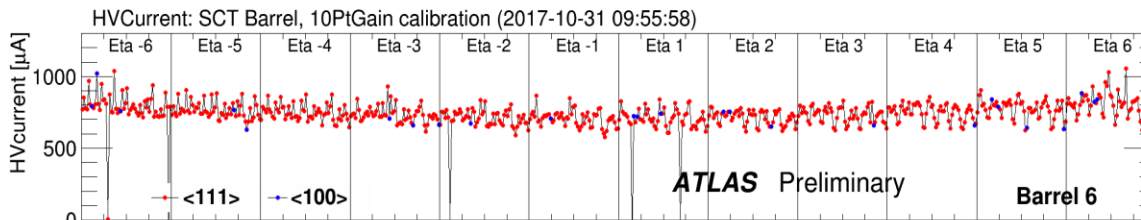
■ modules with Hamamatsu sensors
■ modules with CiS sensors

[1] S. Abaranov et al., ATL-GEN-2005-001

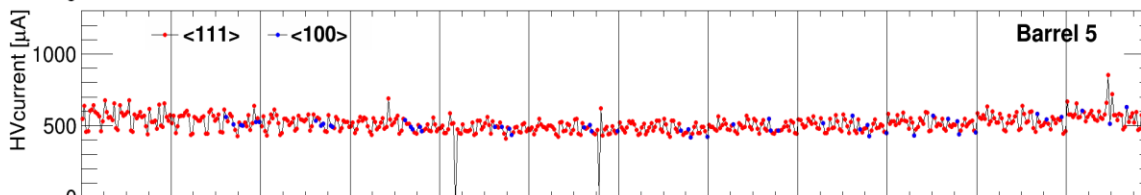
リーク電流分布 (バレル部) : 2017-10-31

(注)このグラフはビーム軸方向に12列あるモジュールを1列ごとにphi方向(0°-360°)で展開して並べてプロットしたもの。

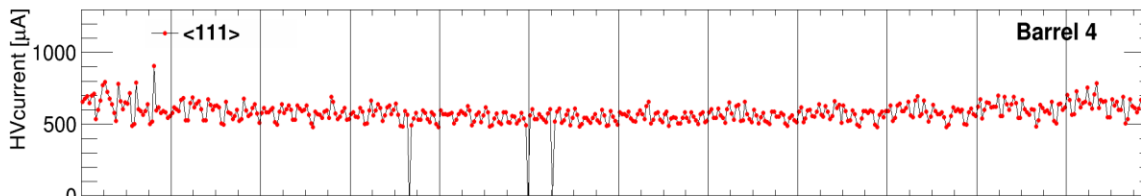
Barrel 6



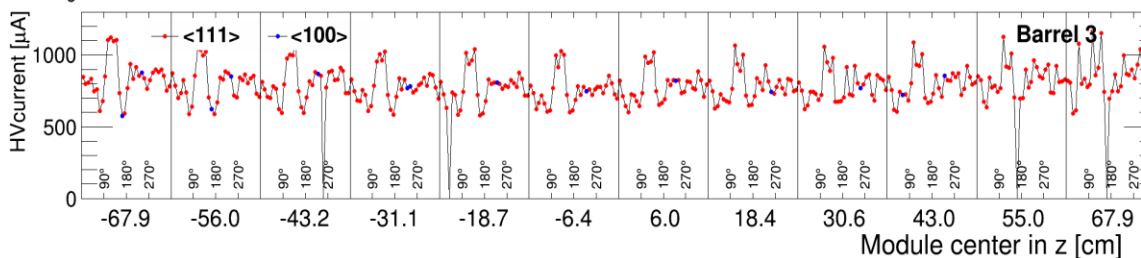
Barrel 5



Barrel 4



Barrel 3



- モジュールのリーク電流はほぼ**一様**である。
- Barrel 3の周期的なバンプはcooling pipe (No. 96) の温度設定が高いため。

リーク電流とモデルの比較

(1) リーク電流を**統一温度 (0°C)**での単位体積 (1 cm³) あたりの値に換算するため、generation currentの温度依存性

$$\frac{I_0}{I_1} = \left(\frac{T_0}{T_1}\right)^2 \exp\left(-\frac{E_{gen}}{2k_B}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_1}\right)\right), \text{ where } E_{gen} = 1.21\text{eV [1]}$$

を使った。センサー温度はハイブリッド基板の温度から推定した。

(2) **リーク電流モデル**: 両方とも強い温度依存性を持った**アニーリング効果**が入っている。

Hamburg model [2]: $\alpha(t) = \alpha_I \cdot \exp(-t / \tau_I) + \alpha_0^* - \beta \cdot \ln(t / t_0)$

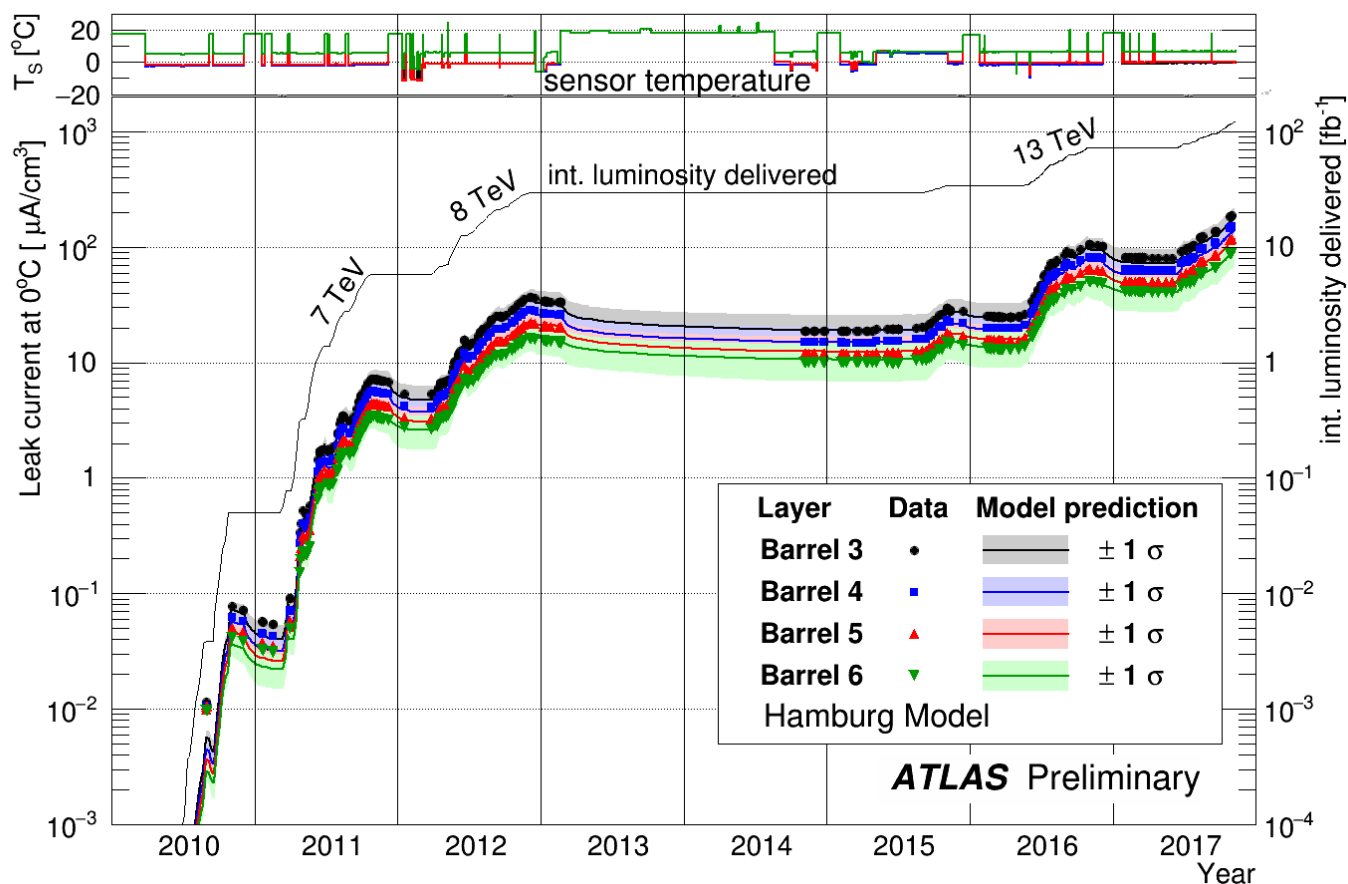
Sheffield-Harper model [3]

$$\alpha(t) = a_1 e^{-t/\tau_1} + a_2 e^{-t/\tau_2} + a_3 e^{-t/\tau_3} + a_4 e^{-t/\tau_4} + a_5 e^{-t/\tau_5}$$

[1] A Chilingarov, 2013 JINST 8 P10003

[2] M. Moll, Thesis DESY(1999), [3] R. Harper, Thesis U of Sheffield(2001)

リーク電流の経年変化 Barrel, Hamburg model



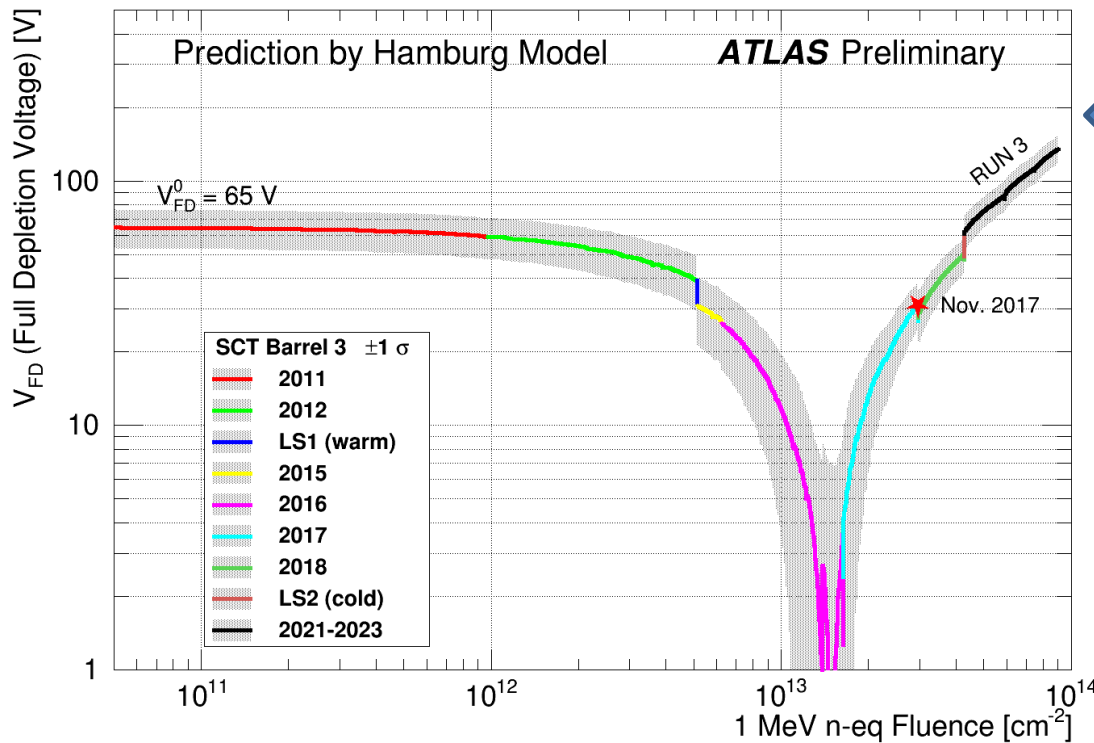
- モデルパラメータの調整なしでも、8年にわたり殆ど一致している。
- Sheffield-Harperモデルも誤差の約+20%の範囲内でデータに合う。
- Endcap部はセンサー温度の推定が困難でモデル比較できてない。



全空乏電圧 V_{FD} の変化: Hamburg model [1]による予言

$$N_{eff} = N_{eff}^0 - N_C^0 (1 - e^{-c\Phi_{eq}}) - g_C \Phi_{eq} - g_a e^{-t/\tau_a} \Phi_{eq} - g_Y (1 - \frac{1}{1+t/\tau_Y}) \Phi_{eq}$$

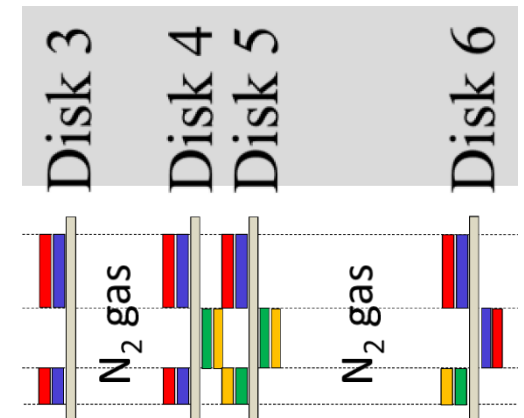
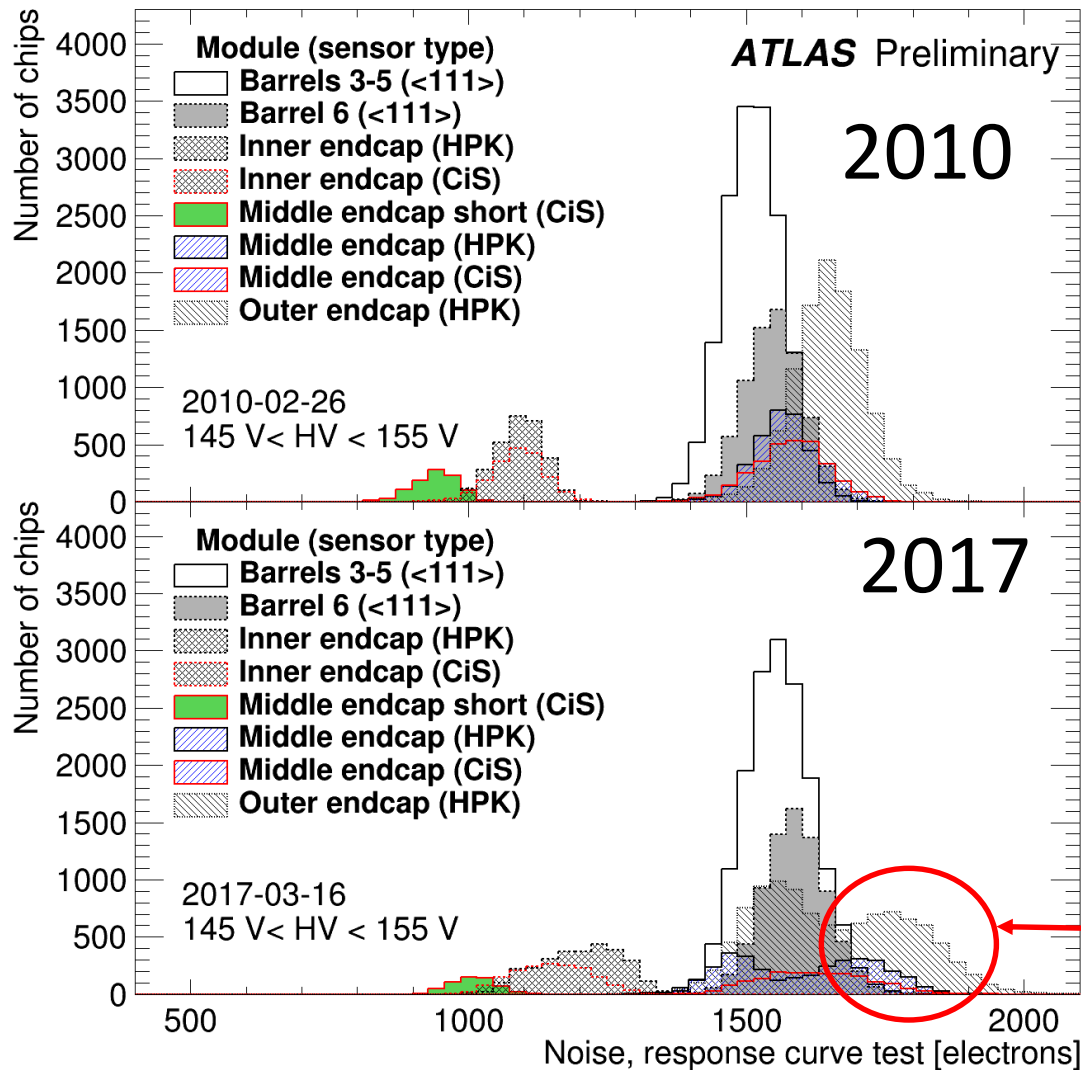
Initial doping \uparrow N_{eff}^0
 Donor removal \uparrow $N_C^0 (1 - e^{-c\Phi_{eq}})$
 Stable acceptor \uparrow $g_C \Phi_{eq}$
 Unstable acceptor \uparrow $g_a e^{-t/\tau_a} \Phi_{eq}$
 Reverse annealing \uparrow $g_Y (1 - \frac{1}{1+t/\tau_Y}) \Phi_{eq}$



Hamburg modelによる全空乏電圧の予想値

- Barrel 3では2016年の秋頃に n型 → p型へのtype inversionが起っているはず。
- 2017末にその兆候は出ているがまだ公表できない。
- 2019-2020を冷し続けたら2023末では150V以下。温めたら200V近くまで上昇する。

ノイズ(ENC=equivalent noise charge)の分布



Endcap moduleでN₂ガス側のストリップ面(■)のノイズが増加している。検出効率には影響ない。

ちなみにデジタル信号の閾値は1fC(6250e)である。

まとめ

- アトラス実験ストリップ型シリコン検出器システムはビーム開始から8年経った現在も98.7%が安定に作動し高効率・高精度を保っている。
- これまでに最内層で $3 \sim 4 \times 10^{13}$ 1MeV n-eq/cm²の放射線量を受けたと推定される。
- 放射線損傷によるリーク電流の増加はモデルの予想と10%程度で一致している。
- Noiseはほぼ安定している。
- Barrel 3ではn→p type inversionが2016年末に起こっていると予想される。2017年末にその証拠が見えだした。
- 2023末までの全空乏電圧やリーク電流は設計以内と予想される。2019-2020のLHC休止中は冷やしておいた方がいい。