

# ATLAS実験シリコンストリップ飛跡検出器の ローレンツ角による性能評価

東京工業大学 基礎物理学専攻  
寄林 侑正



陣内 修、東城 順治<sup>D</sup>、池上 陽一<sup>D</sup>、海野 義信<sup>D</sup>、木村 直樹<sup>F</sup>、近藤 敬比古<sup>D</sup>、高嶋 隆一<sup>C</sup>、  
寺田 進<sup>D</sup>、永井 康一<sup>E</sup>、中野 逸夫<sup>B</sup>、花垣 和則<sup>A</sup>、原 和彦<sup>E</sup>、寄田 浩平<sup>F</sup>  
東工大、A:阪大、B:岡山大、C:京都教育大、D:高工研、E:筑波大、F:早大理工研、他アトラスSCTグループ

# 1. イントロダクション

## — LHC / ATLAS —

- LHC ( Large Hadron Collider ) :
  - 2009年11月初ビーム衝突観測

衝突粒子	陽子 — 陽子	Pb — Pb
重心系エネルギー	7 [ TeV ]	2.76 [ TeV ]
積分ルミノシティ	2.59 [ fb <sup>-1</sup> ]	9.2 [ μb <sup>-1</sup> ]
瞬間最高ルミノシティ	2.72 · 10 <sup>33</sup> [ cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ] (2011/09/09現在)	3.0 · 10 <sup>25</sup> [ cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]

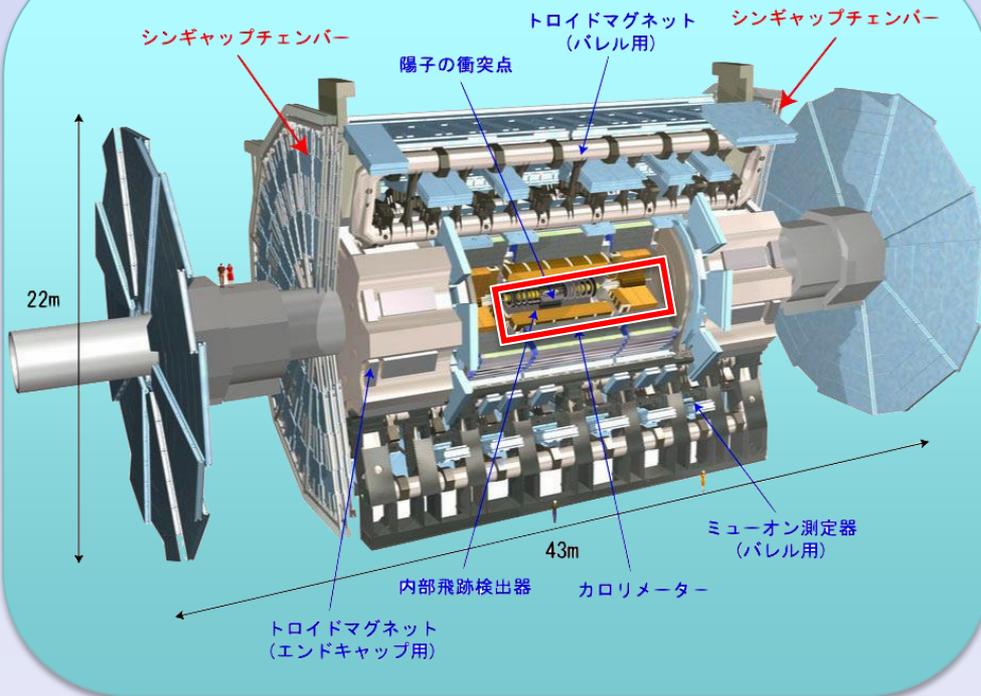
- ATLAS ( A Toroidal LHC ApparatuS )
  - Higgs, SUSY, 余剰次元など  
様々な新物理の実験的観測を目指す汎用検出器
  - ソレノイド・トロイド磁石によりレプトンの検出に注力
  - 主な検出器: 内部飛跡検出器・カロリメータ・ミュオンスペクトロメータ

# 1. イントロダクション

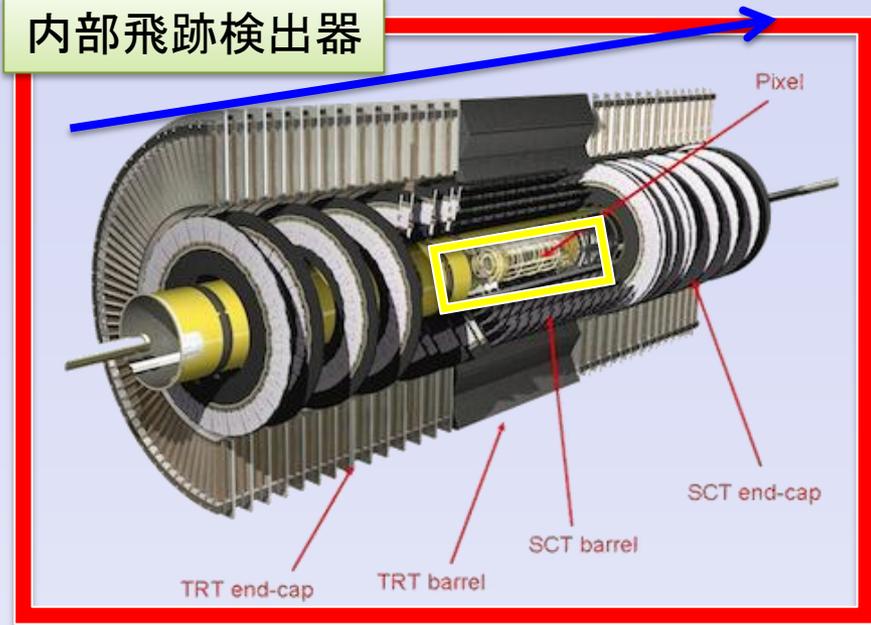
## — 内部飛跡検出器とSCT —

磁場 : 2 [T]

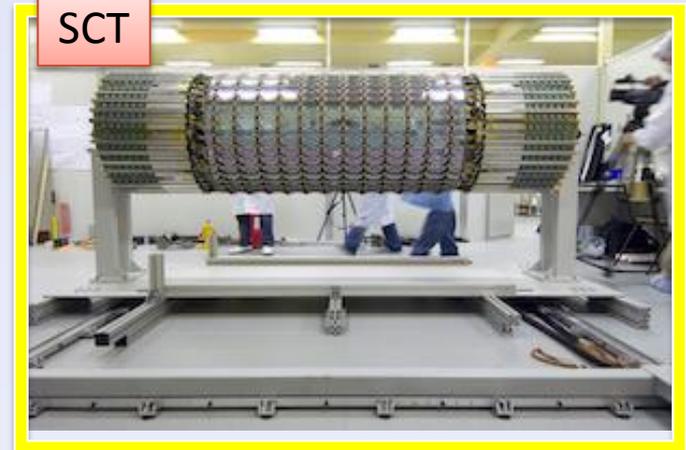
ATLAS



内部飛跡検出器



SCT



Semi-Conductor Tracker (SCT) ...

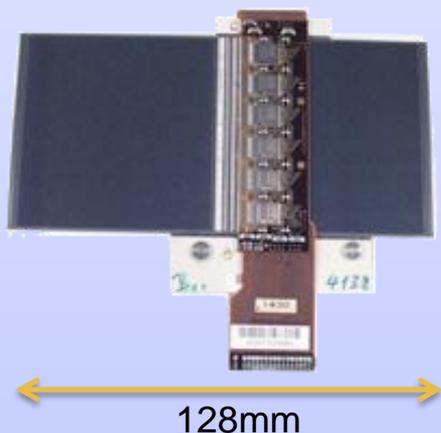
バレル部: 4 層  
 エンドキャップ部: 9 層

# 1. イントロダクション

## — 内部飛跡検出器とSCT —

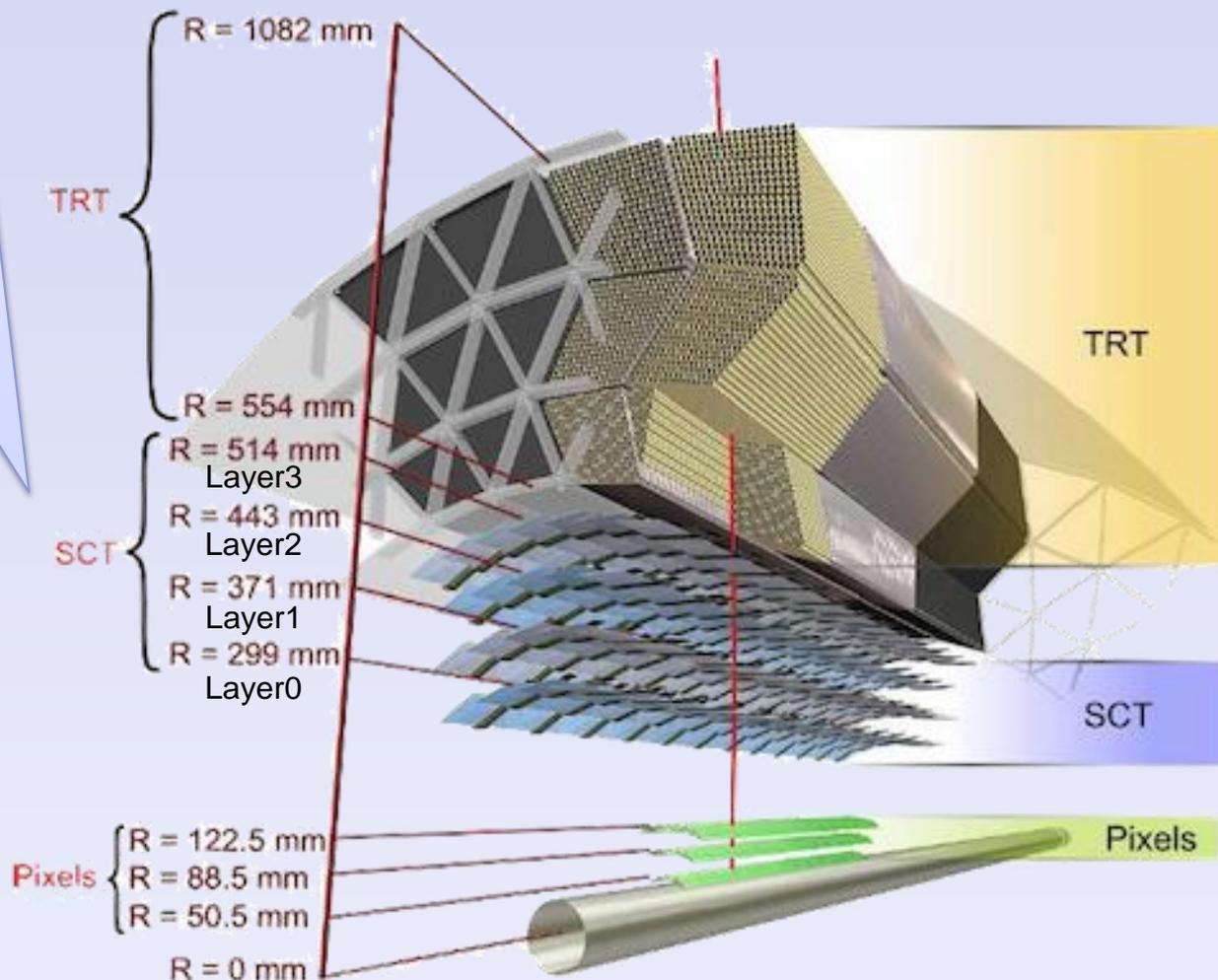
### Semi-Conductor Tracker (SCT)

シリコンの厚さ: 285  $\mu\text{m}$   
半導体タイプ: p-in-n  
ストリップ間隔: 80  $\mu\text{m}$   
ストリップ: 768 本



センサー1枚は、  
一次元の位置情報を出す

1層: ビーム軸平行なセンサー  
40mrad傾いたセンサー  
2枚1組で2次元位置測定が可能



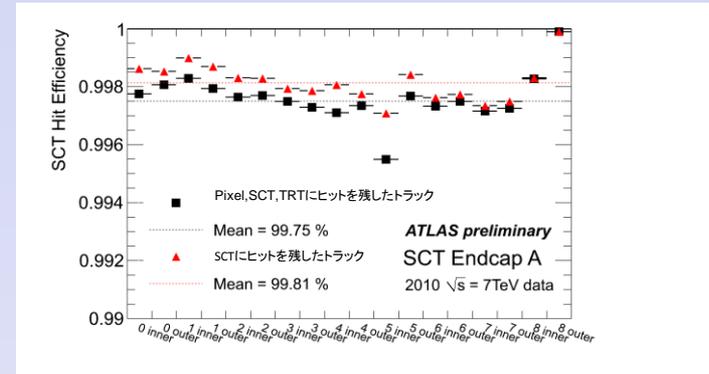
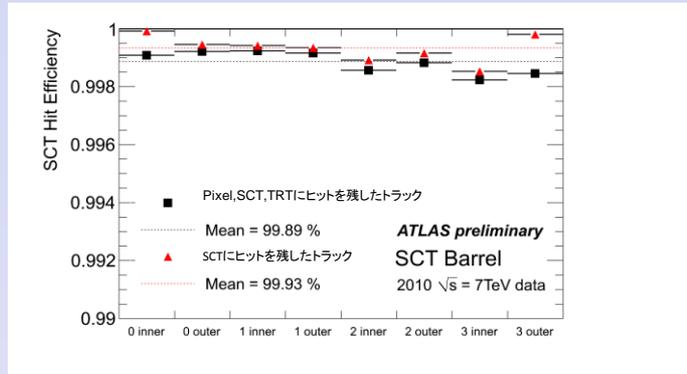
# 1. イントロダクション

## — SCTのパフォーマンス —

検出効率

バレル部

エンドキャップ部



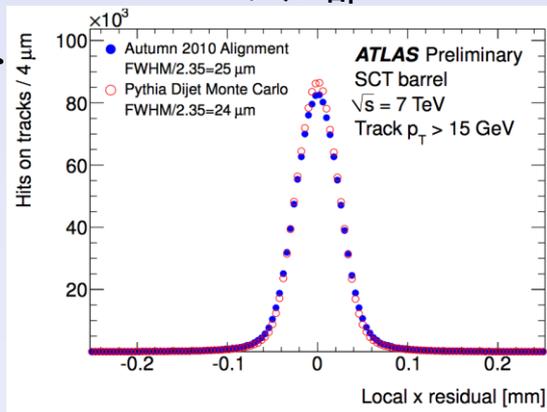
2010年のSCTの検出効率は99.89% (バレル部平均) であった。

SCT上でのヒット位置と再構成したトラックの通過位置の差

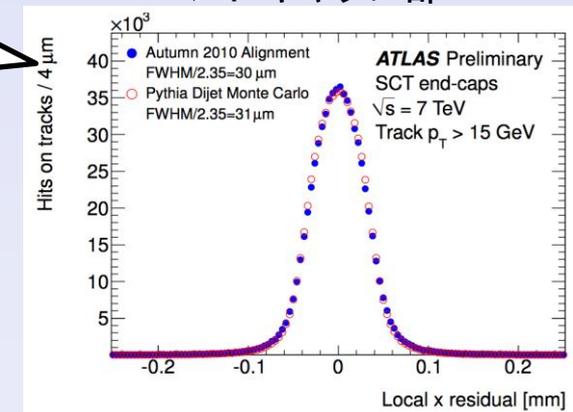
バレル部

エンドキャップ部

FWHM  
MC: 24[ $\mu\text{m}$ ]  
Data: 25[ $\mu\text{m}$ ]



FWHM  
MC: 31[ $\mu\text{m}$ ]  
Data: 30[ $\mu\text{m}$ ]



2010年10月のAlignment後の分解能は

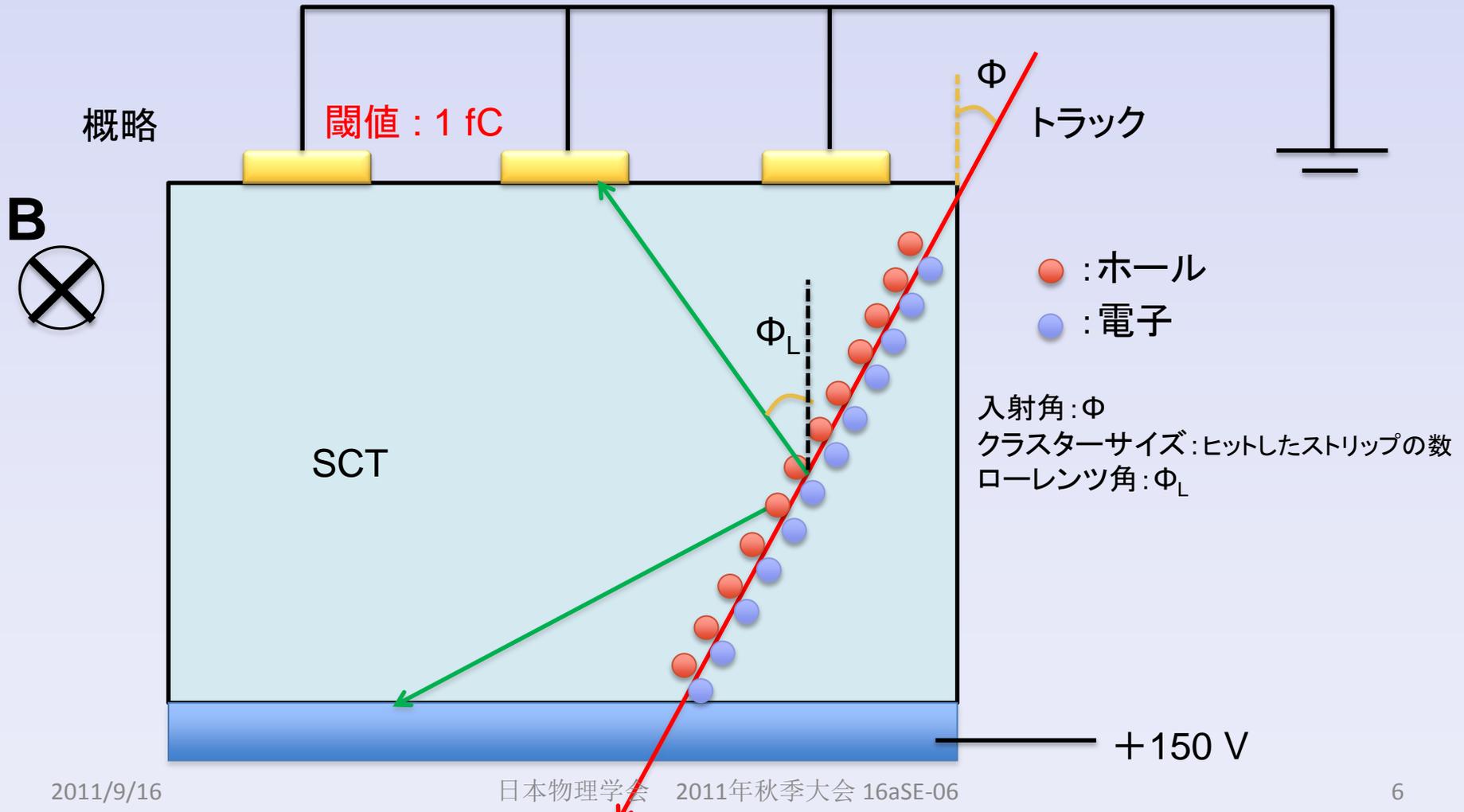
SCTセンサーの位置補正が完全なシミュレーションと非常によく合っている。

→データ取得時のSCTセンサーの位置補正は数 $\mu\text{m}$ オーダーでうまくいっている。

# 2. ローレンツ角

ローレンツ角・・・電荷収集の際、ローレンツ力によってホールの移動方向が曲げられた角度

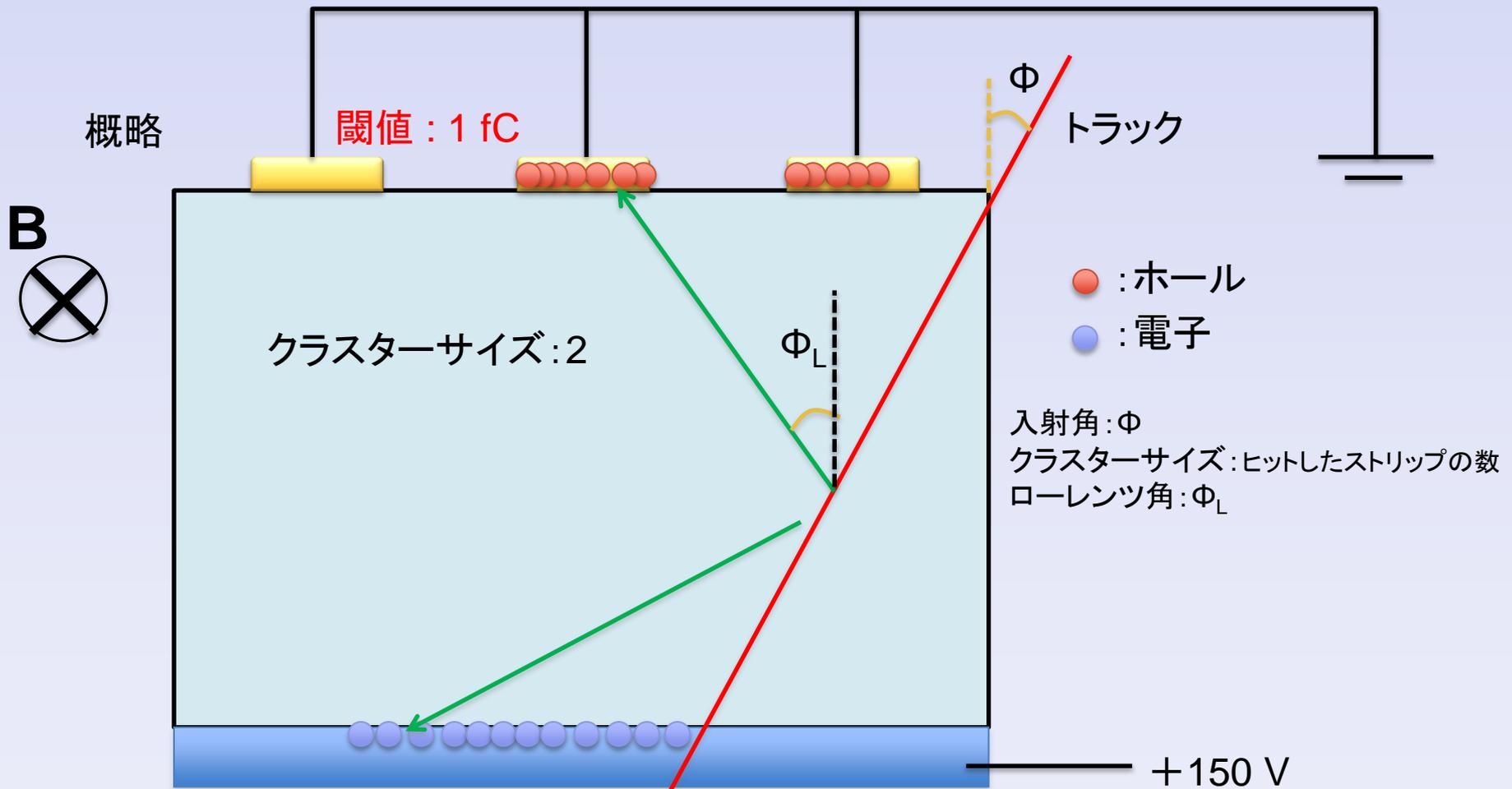
$$F = q(E + v \times B)$$



# 2. ローレンツ角

ローレンツ角・・・電荷収集の際、ローレンツ力によってホールの移動方向が曲げられた角度

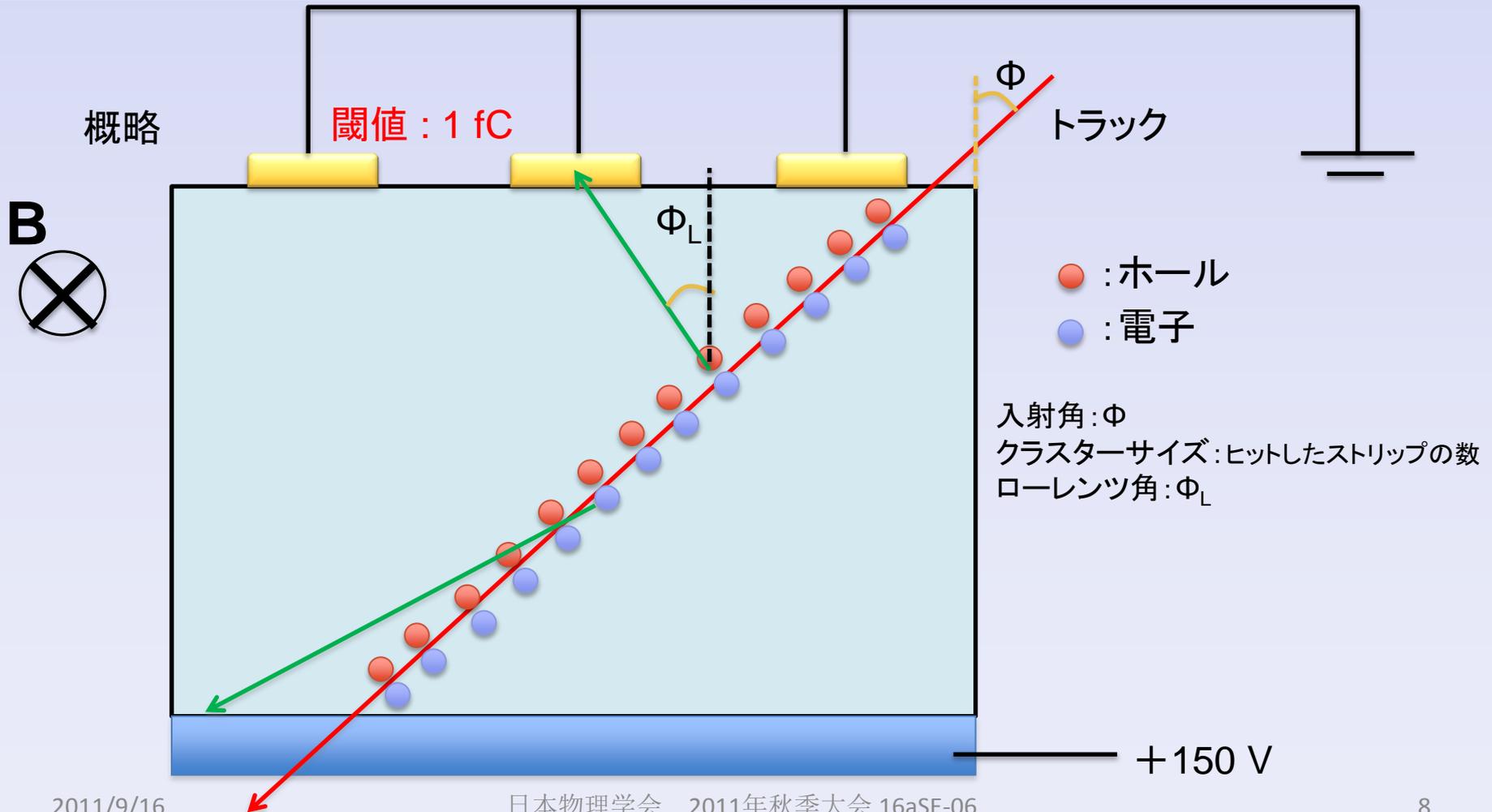
$$F = q(E + v \times B)$$



# 2. ローレンツ角

ローレンツ角・・・電荷収集の際、ローレンツ力によってホールの移動方向が曲げられた角度

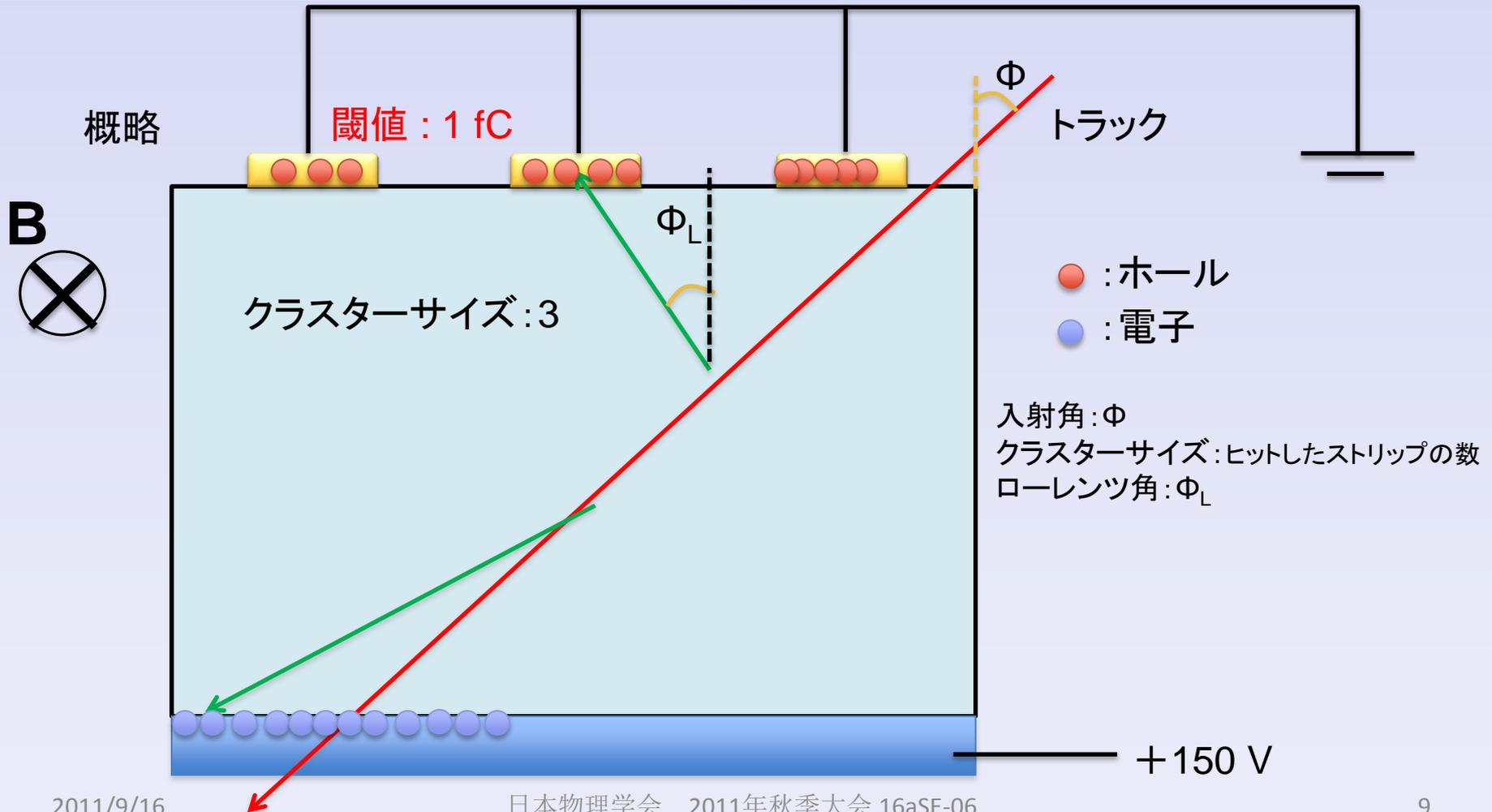
トラックがより角度を持って入射した場合・・・



# 2. ローレンツ角

ローレンツ角・・・電荷収集の際、ローレンツ力によってホールの移動方向が曲げられた角度

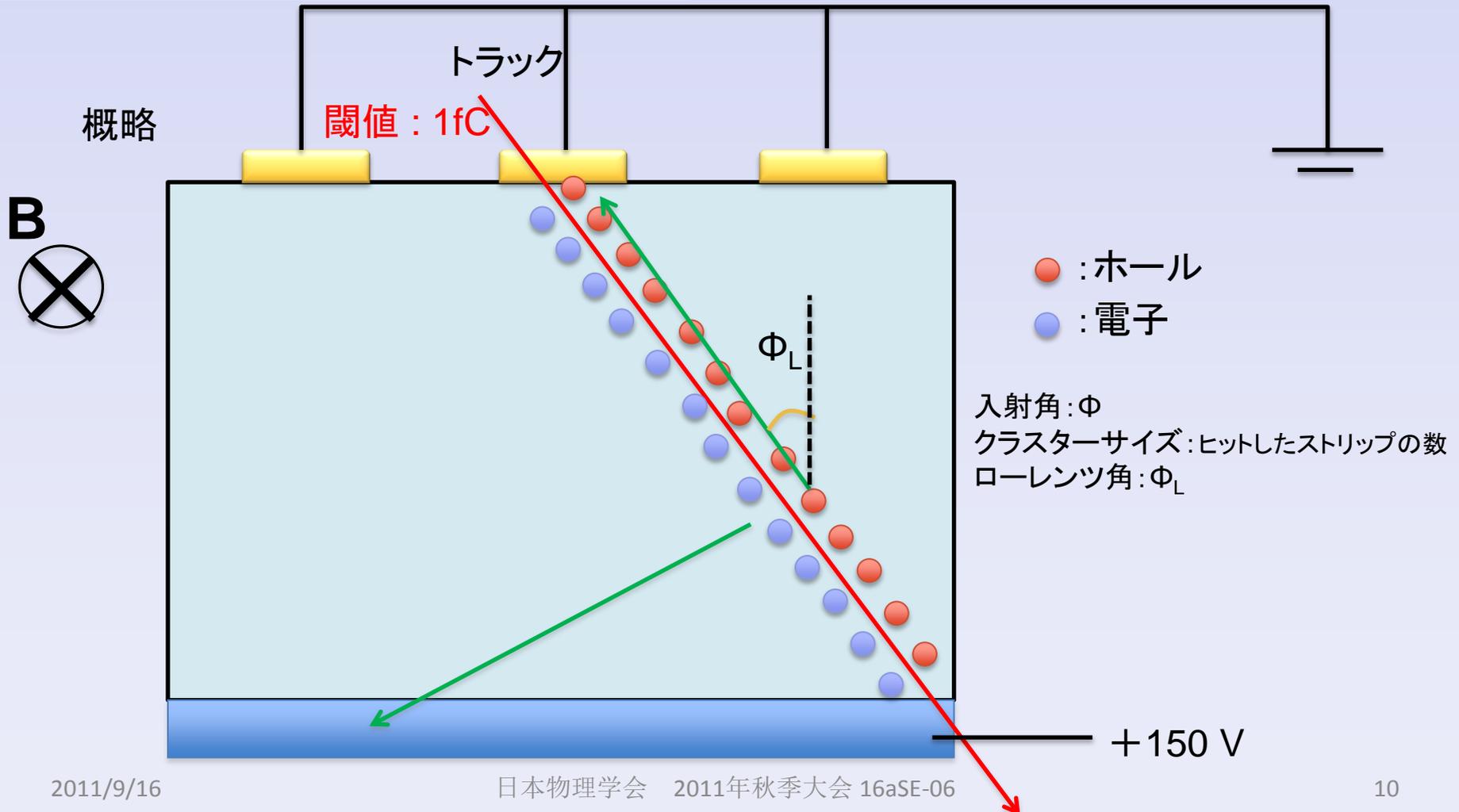
トラックがより角度を持って入射した場合・・・



# 2. ローレンツ角

ローレンツ角・・・電荷収集の際、ローレンツ力によってホールの移動方向が曲げられた角度

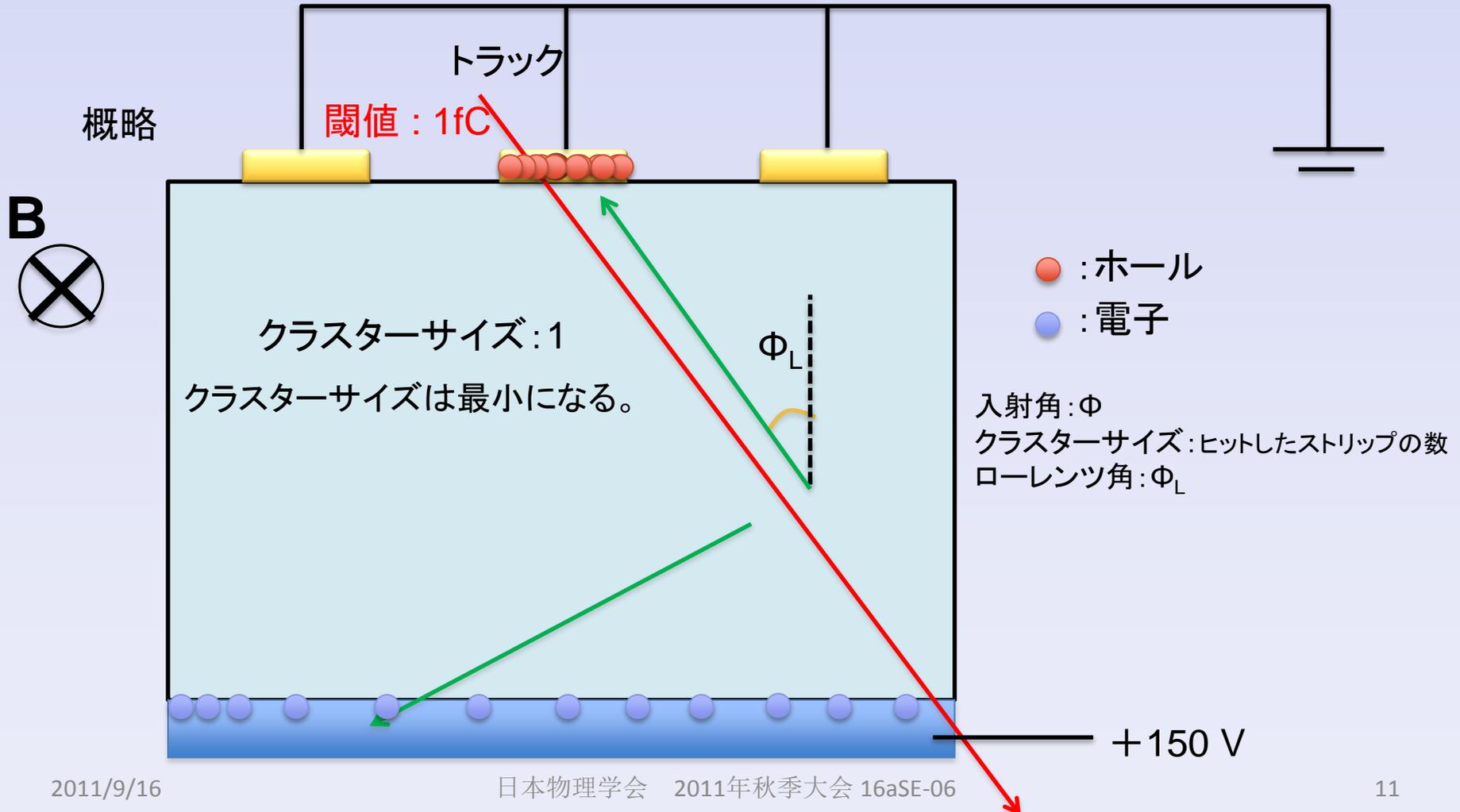
トラックがローレンツ角で入射した場合・・・



# 2. ローレンツ角

ローレンツ角・・・電荷収集の際、ローレンツ力によってホールの移動方向が曲げられた角度

トラックがローレンツ角で入射した場合・・・



# 2. ローレンツ角

## — データからの導出 —

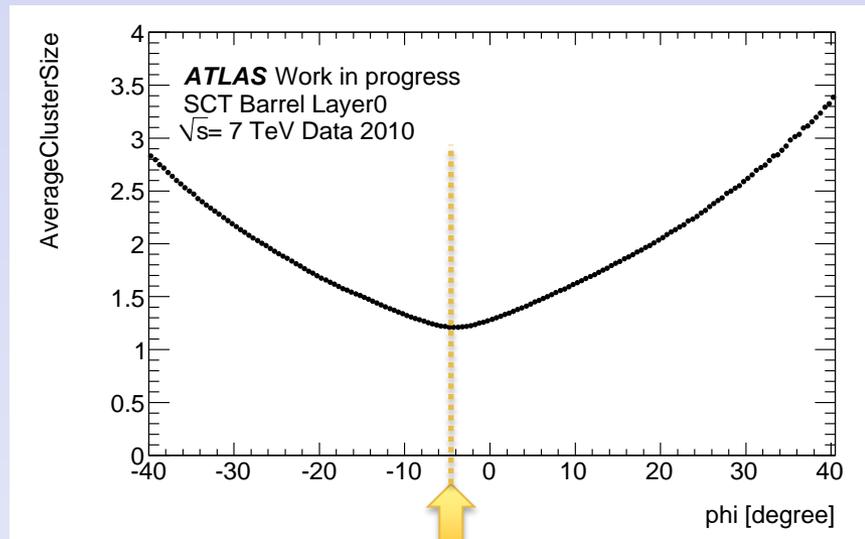
ローレンツ角入射の飛跡はクラスターサイズが最小になることを利用

用いるグラフ(右図)

縦軸: クラスターサイズの平均

横軸: 入射角 [deg.]

以下のフィット関数によりローレンツ角を求める



ローレンツ角

$$f(\varphi) = (a|\tan \varphi - \tan \varphi_L| + b) \otimes \text{Gaussian}(\varphi)$$
$$= \int_{-\infty}^{\infty} (a|\tan \varphi' - \tan \varphi_L| + b) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(\varphi - \varphi')^2}{2\sigma^2}\right) d\varphi'$$

上式:

角度 $\varphi$ で入射したトラックに対してクラスターサイズを再現する式  
ガウシアンは、収集される電荷の拡散の効果を考慮

# 2. ローレンツ角

## — 飛跡再構成に与える影響 —

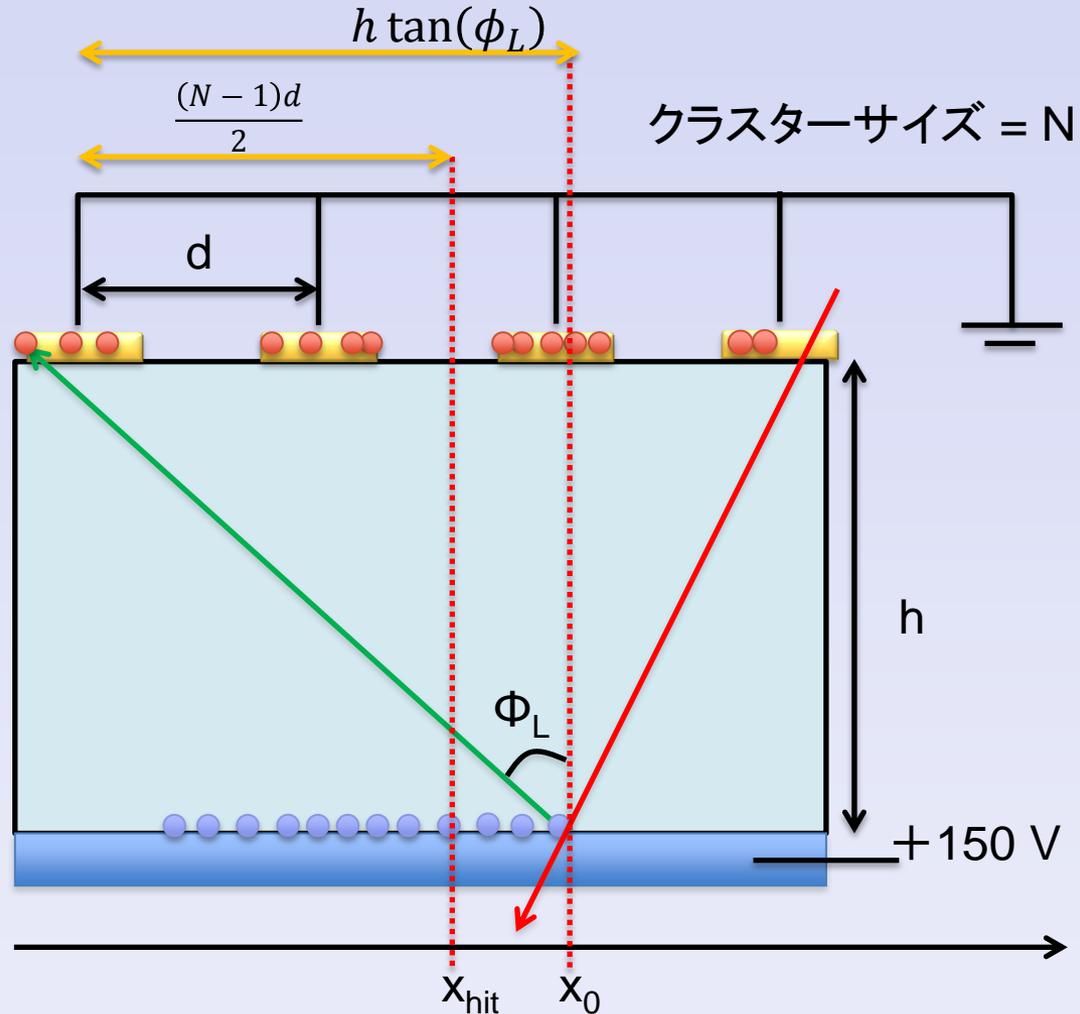
$x_0$ : 実際のトラック位置  
 $x_{hit}$ : 検出器が出すトラック位置

磁場の向きは一定なので常に  
 $x_0 > x_{hit}$

右の図より正確な飛跡を求めるためには

$$x_0 - x_{hit} \cong h \tan(\phi_L) - \frac{(N-1)d}{2}$$

$$\Leftrightarrow x_0 \cong x_{hit} + h \tan(\phi_L) - \frac{(N-1)d}{2}$$

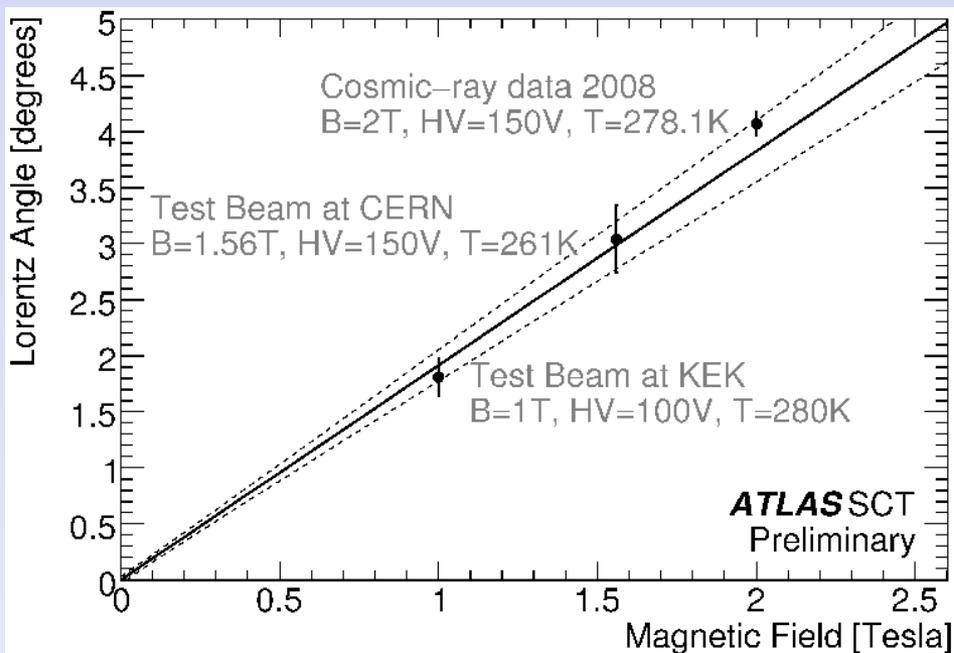


ローレンツ角・クラスターサイズのモニターは飛跡再構成に重要

# 2. ローレンツ角

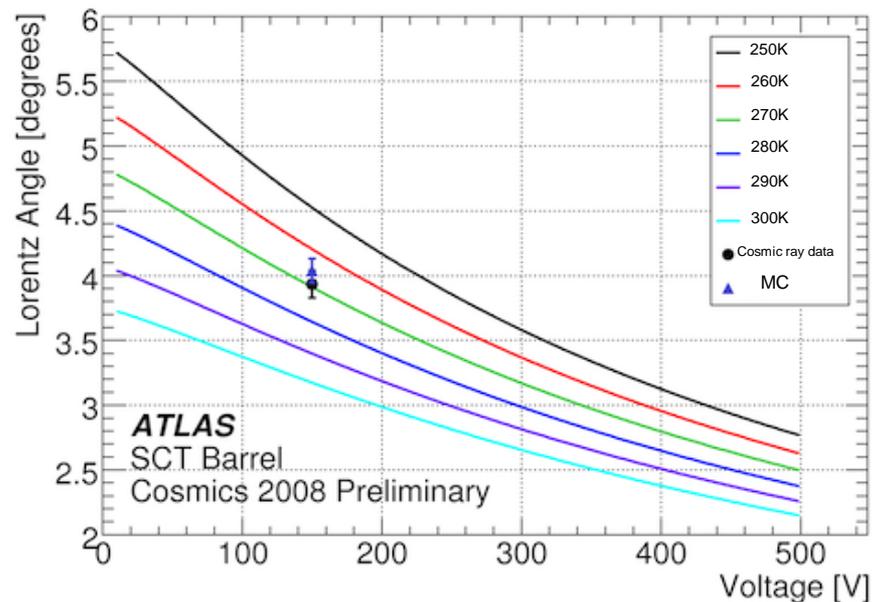
## — SCTの状態を反映 —

ローレンツ角は磁場や電場、温度で値が変わるため、検出器の状態を反映



磁場の変化によるローレンツ角の変化

各データは HV=150 V, T=273 K に合わせてある



印加電圧, 温度変化によるローレンツ角変化

SCT印加電圧 150 V では

$$d\phi_L/dT = -(0.042 \pm 0.003)[\text{deg/K}]$$

ローレンツ角をモニターすることで異常検知の一つの指標になる

# 2. ローレンツ角

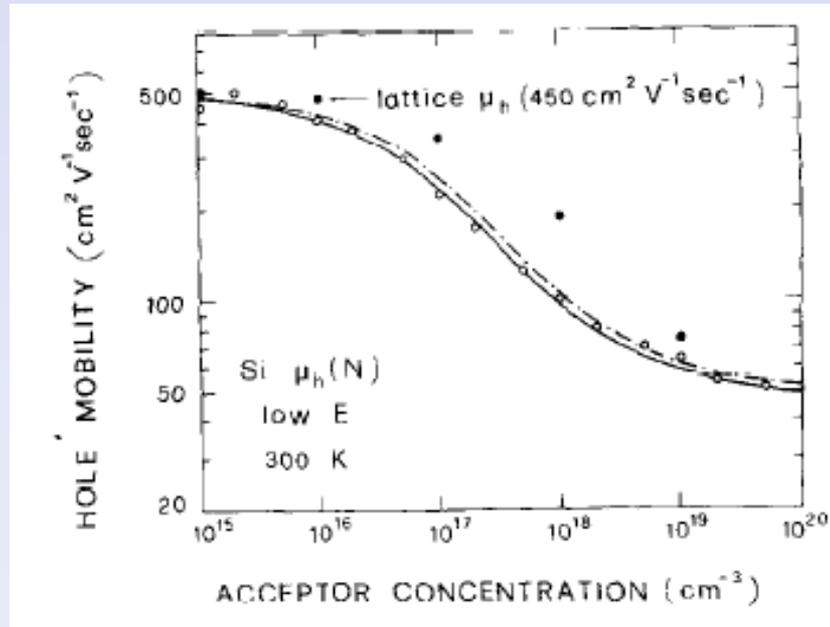
## — SCTの放射線損傷モニター —

ローレンツ角はSCT内の磁場、電場から以下のような関係式が成り立つ

$$\tan \phi_L = \mu_H B = r \mu_d B \quad \mu_d = \frac{v_s / E_c}{[1 + (E/E_c)^\beta]^{1/\beta}}$$

	Electrons	Holes
$v_s$ (cm s <sup>-1</sup> )	$1.53 \cdot 10^9 \cdot T^{-0.87}$	$1.62 \cdot 10^8 \cdot T^{-0.52}$
$E_c$ (V cm <sup>-1</sup> )	$1.01 \cdot T^{1.55}$	$1.24 \cdot T^{1.68}$
$\beta$	$2.57 \cdot 10^{-2} \cdot T^{0.66}$	$0.46 \cdot T^{0.17}$
$r$	$1.13 + 0.0008 \cdot (T - 273)$	$0.72 - 0.0005 \cdot (T - 273)$

半導体内のdrift mobility ( $\mu_d$ ) は、アクセプタンス濃度の変化に影響を受ける



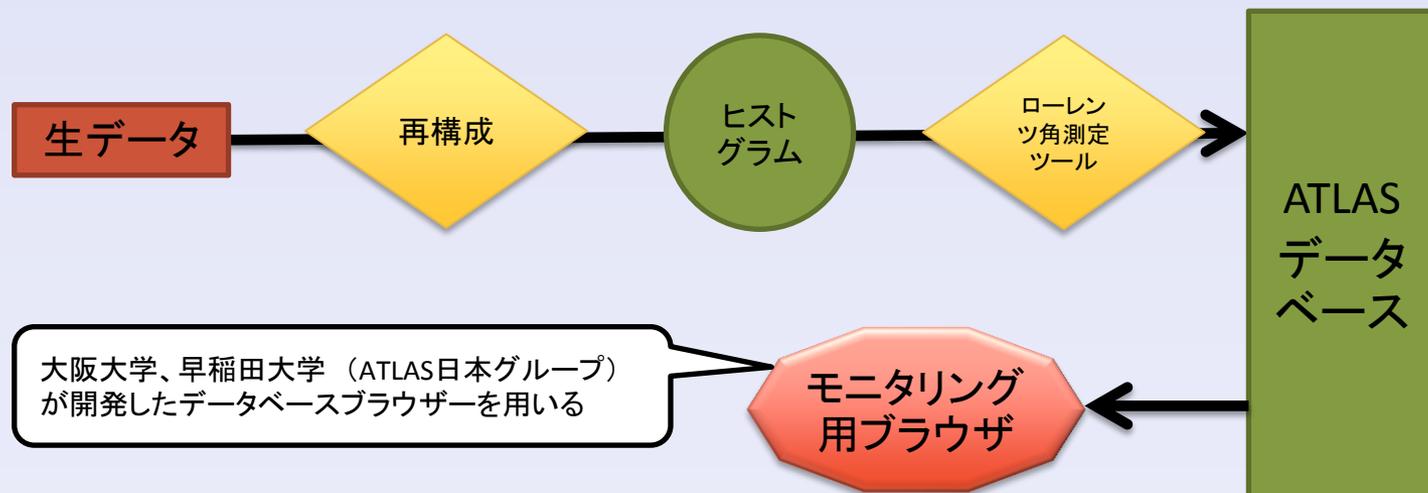
放射線損傷でドナー → アクセプター への転移が知られている  
ローレンツ角で放射線損傷の度合いをモニターできないかを検討中

## 2. ローレンツ角 ー モニタリング用ツール ー

SCTでの飛跡再構成・SCTの状態を保証するために

ローレンツ角をモニターする

- ATLASのデータベースに各Run毎のローレンツ角・最小クラスターサイズを(半)自動でuploadできるようにした
- ローレンツ角・最小クラスターサイズのモニターが容易に



# 3. 2011年のローレンツ角推移 ートラックセレクションー

以下の条件をトラックに課した。

上の5つはATLASのトラックの選別で一般に用いられているものである。

- $P_t > 500 \text{ MeV}$

Pt: 横方向運動量

- $|d_0| < 1 \text{ mm}$

track と vertexの最接近距離

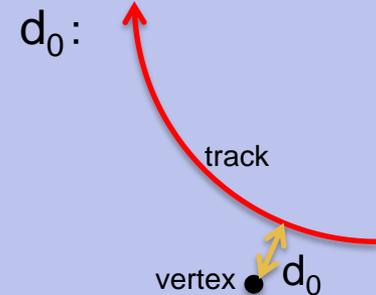
- $|z_0 \cdot \sin(\theta)| < 1 \text{ mm}$

- $\#SCTHits > 6$  (8枚中)

ヒットのあったSCT, Pixelの数

- $\#pixelHits > 1$  (3枚中)

- $Charge < 0$



SCTは中心方向に

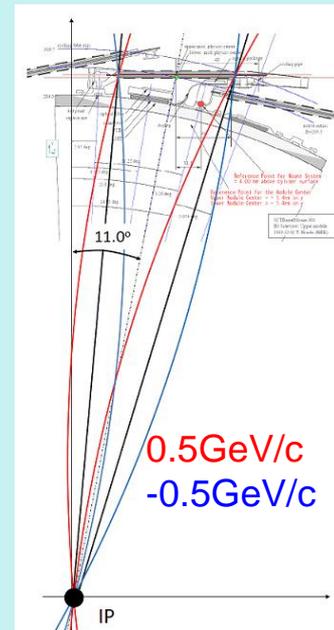
-11° (Layer0,1)、

-11.25° (Layer2,3)

傾いているため、負の電荷のトラックがSCTに垂直に入りやすい。

ローレンツ角は垂直方向に近い場合、

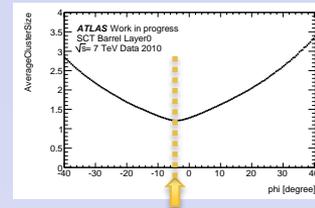
負の電荷のトラックがローレンツ角を構成する主なものである。



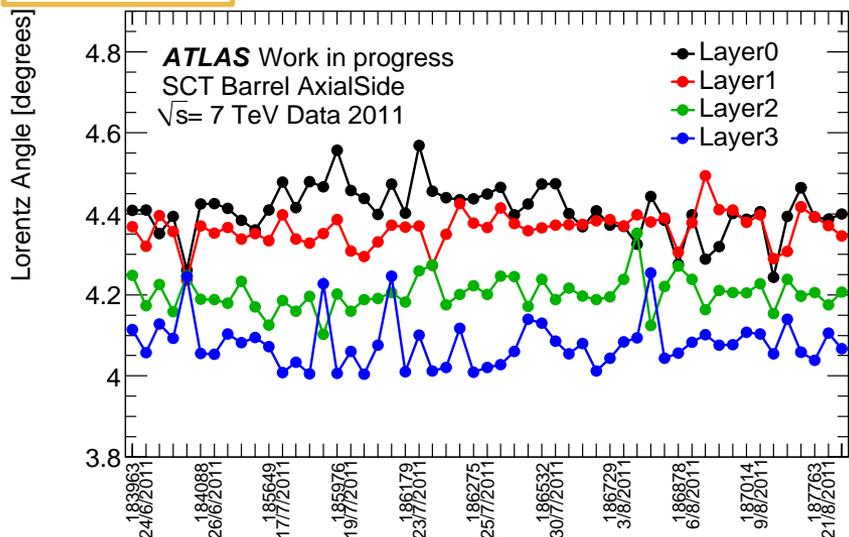
# 3. 2011年のローレンツ角推移

## ー ローレンツ角の推移 ー

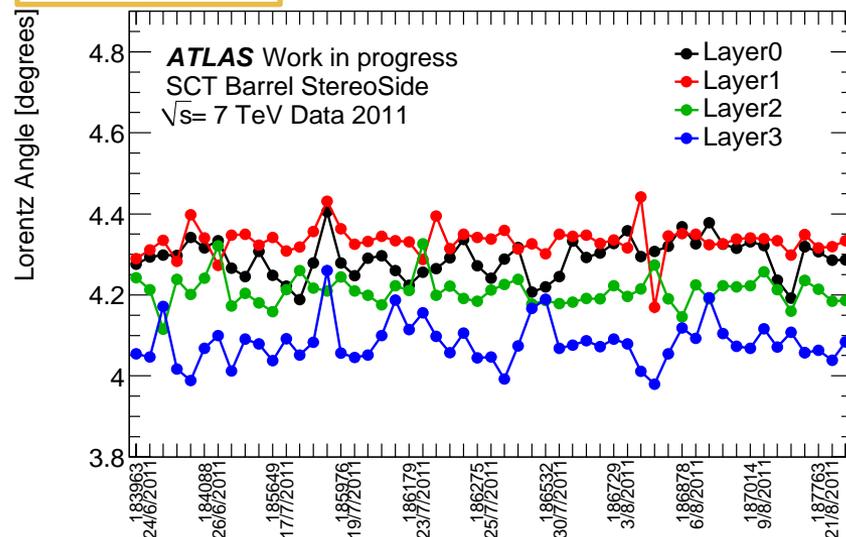
2011年6月末～8月末までのローレンツ角の推移



Axial Side



Stereo Side



from  
24/6/2011

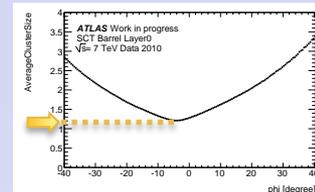
to  
22/8/2011

ローレンツ角のベースラインは変動していない → 今後もモニターしていく

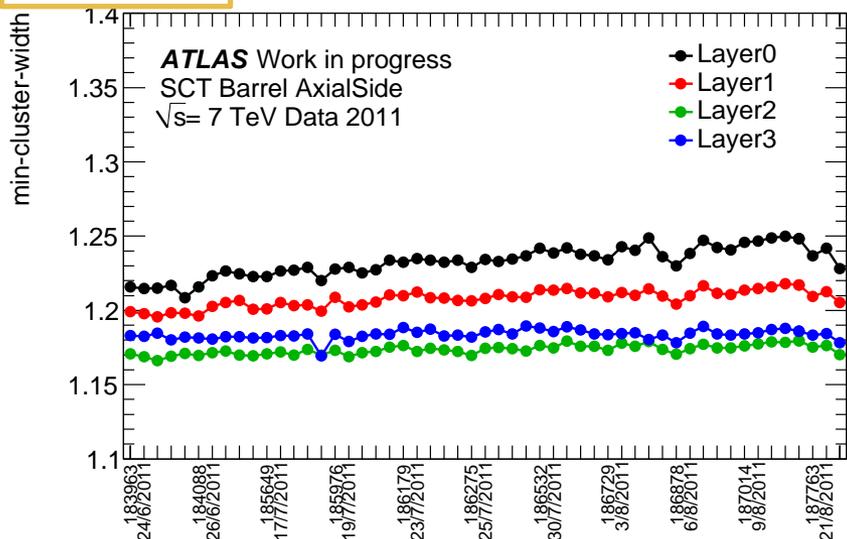
ビームラインに近い層ほどローレンツ角が大きく出ている → 現在調査中

# 3. 2011年のローレンツ角推移 — 最小クラスターサイズの推移 —

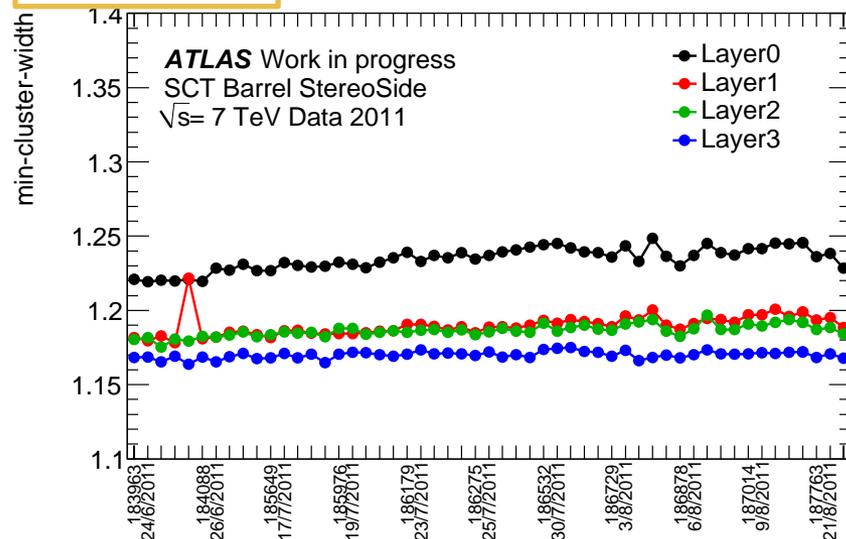
2011年6月末～8月末までの最小クラスターサイズの推移



Axial Side



Stereo Side



from  
24/6/2011

to  
22/8/2011

最小クラスターサイズは、ビームラインに近い層ほど上昇傾向にある → 現在調査中

# まとめと展望

- ATLAS-SCTの飛跡再構成にはローレンツ角・クラスターサイズが重要
- ローレンツ角は検出器内の状態で値が変化する
- 長期モニタリングに向けてATLASデータベースにローレンツ角・最小クラスターサイズが自動的にあがるように更新

## 最近2ヶ月の

- ローレンツ角は、
  - ベースラインは安定している
  - 内層ほど値は大きい
- 最小クラスターサイズは、
  - 内層で上昇が見られる

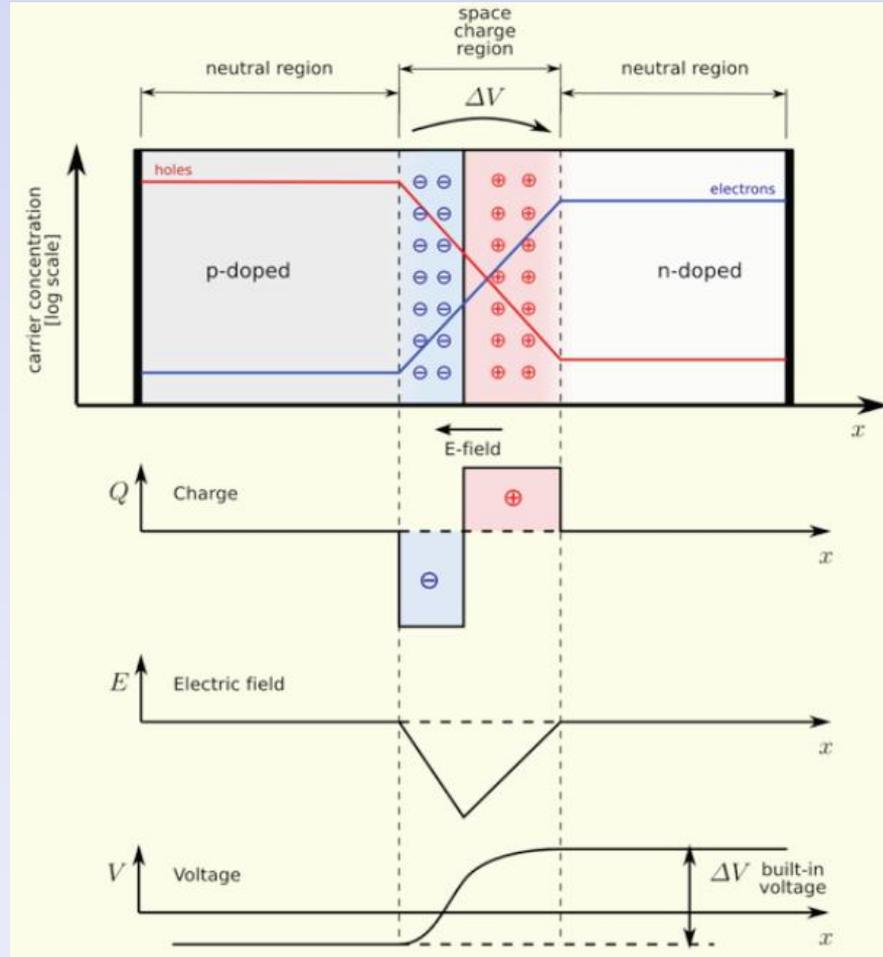
## 今後

- ローレンツ角の推移と検出器の状態の関係を把握
- 長期に渡るモニタリングを行う

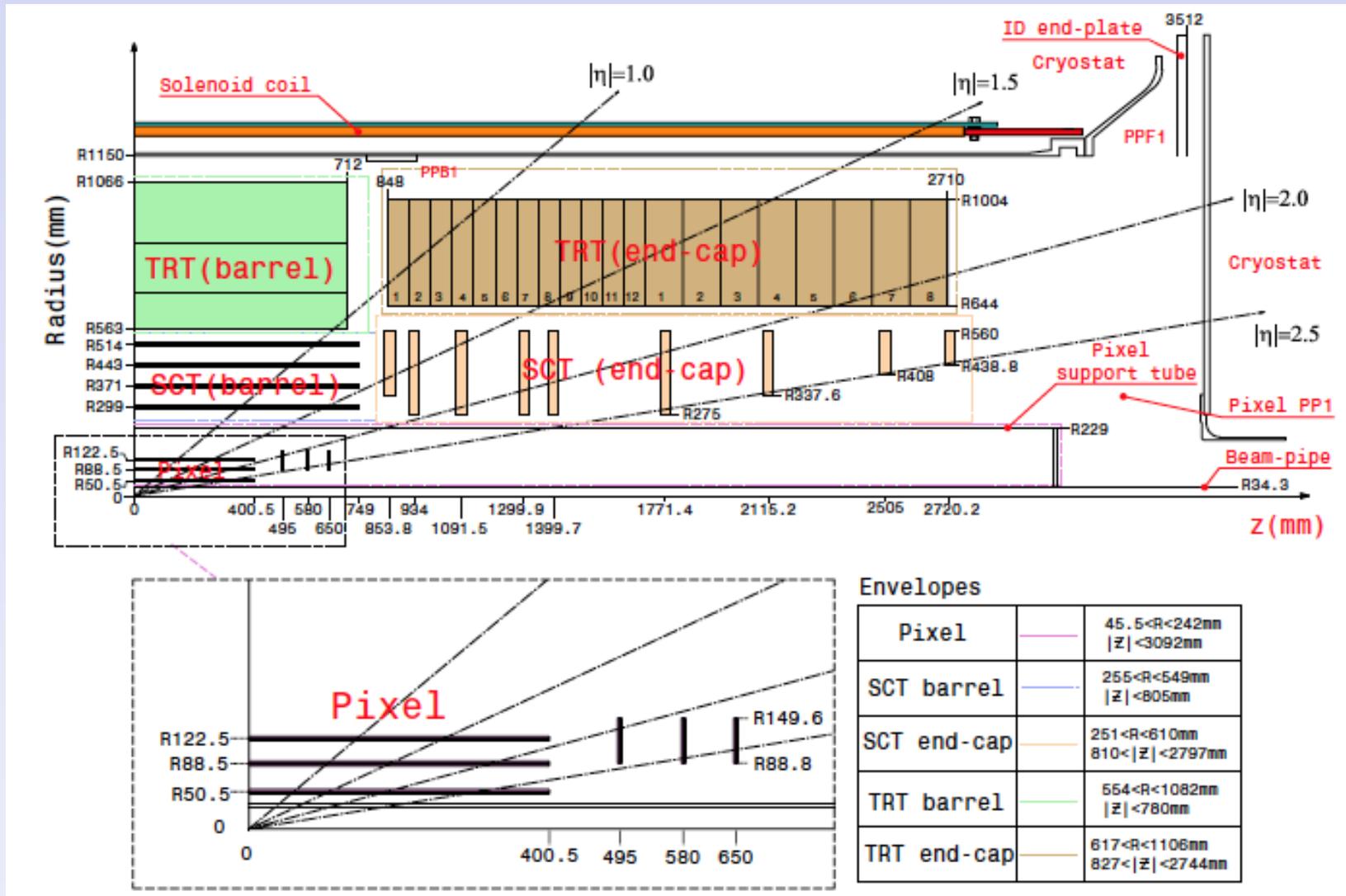


# BackUp

# 半導体検出器の原理

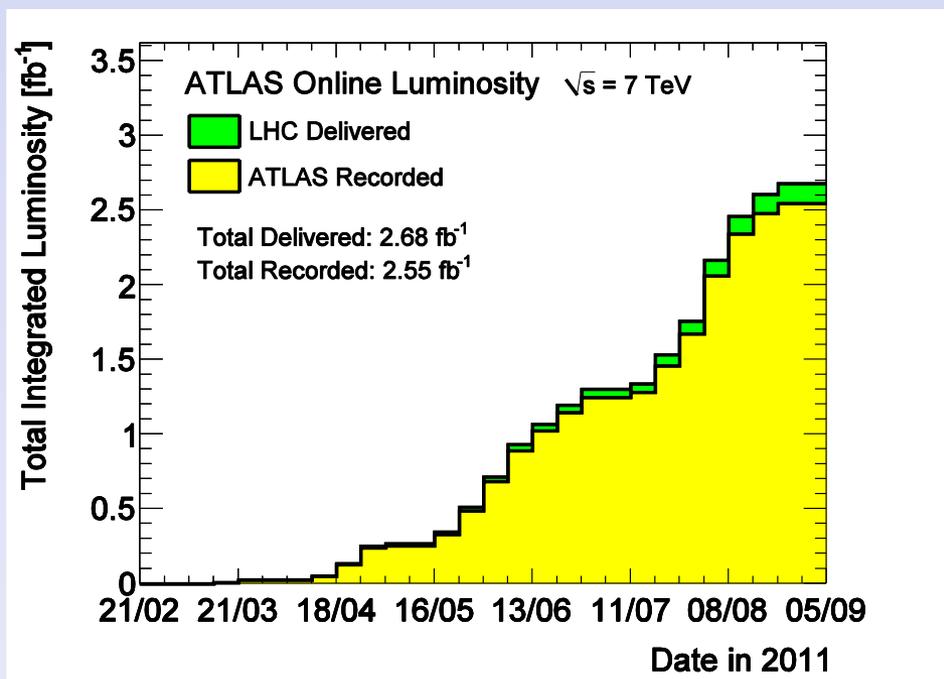


# 有感領域



# —安定した長期稼働に向けて—

- 積分ルミノシティ



これだけのデータを余すことなく測定したい

SCTで安定したオペレーションを行うために

→ 磁場と電場の変化に敏感なローレンツ角で  
検出器の異常を検知できないか

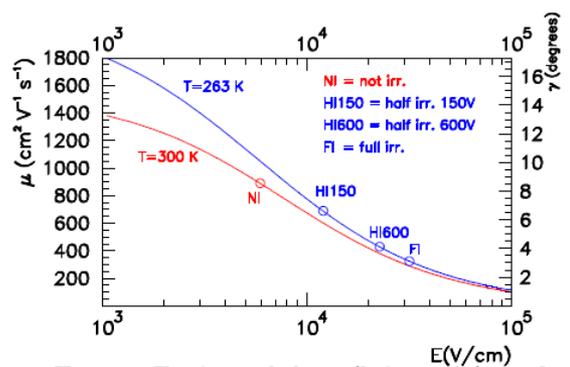
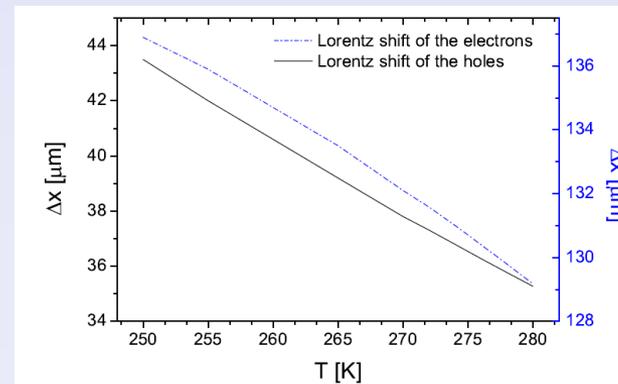
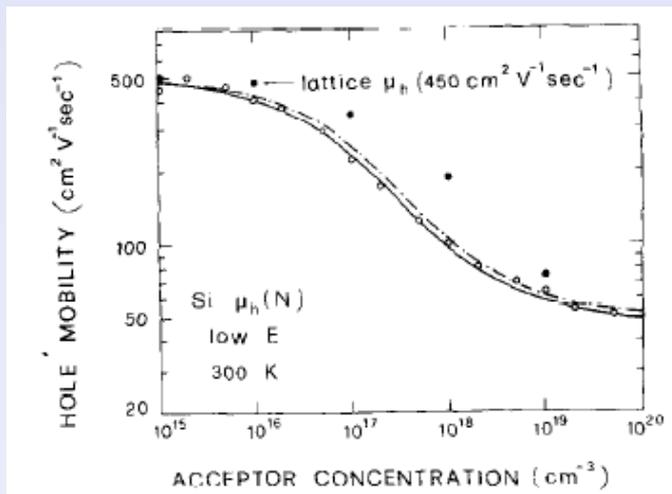
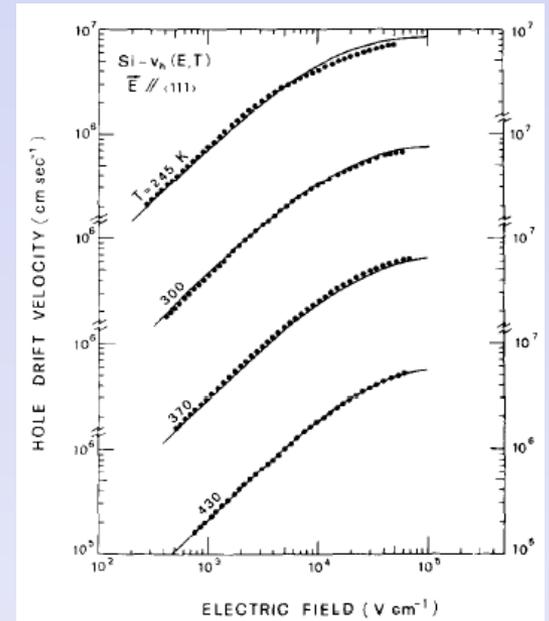
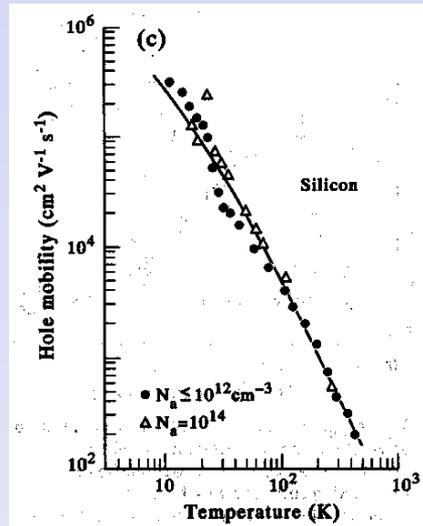
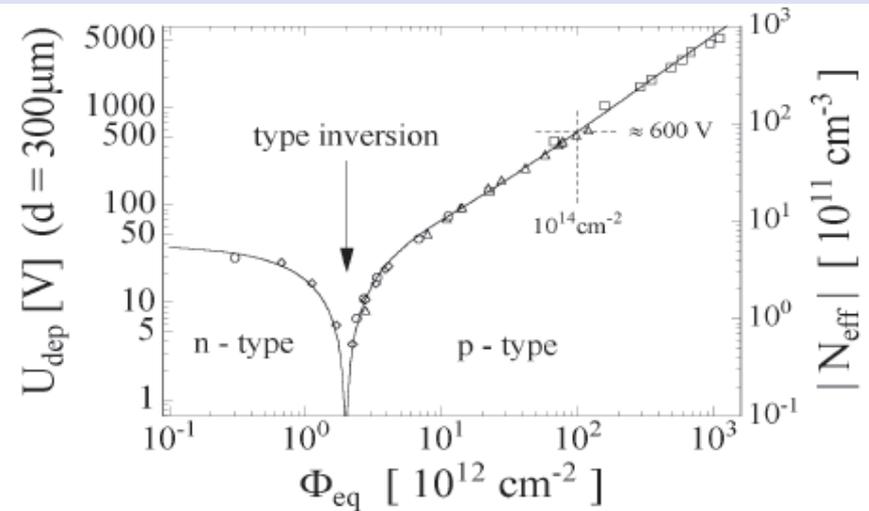
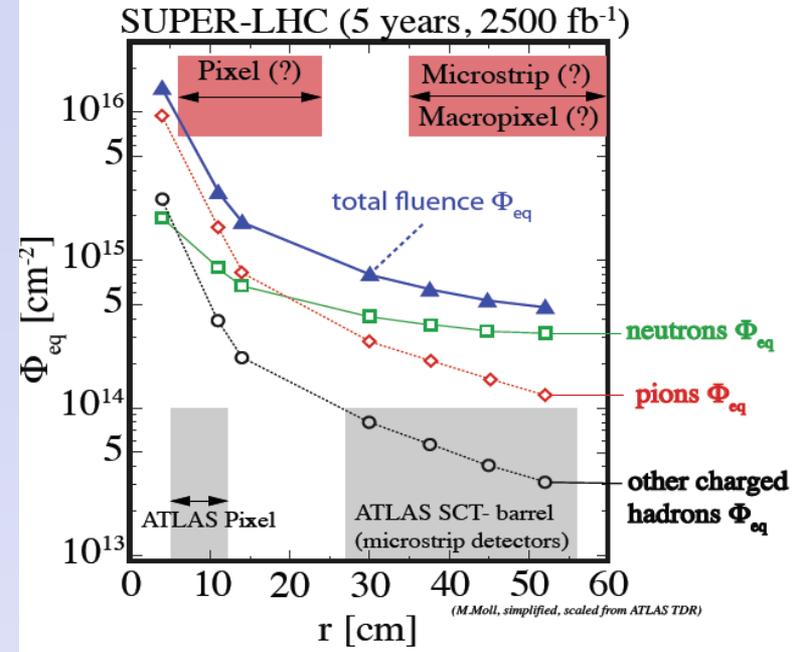
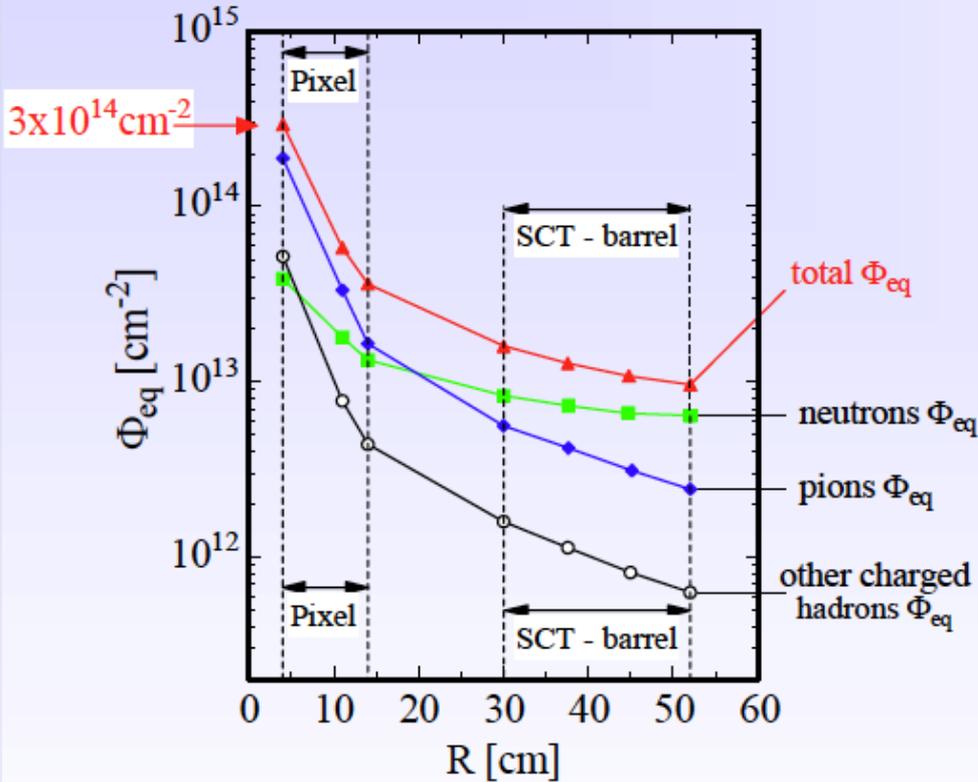


Fig. 3. Drift mobility (left scale) and Lorentz angle (right scale) as a function of electric field for 263 K and 300 K. The points corresponding to the mean electric field and temperature of the studied detectors are also reported.



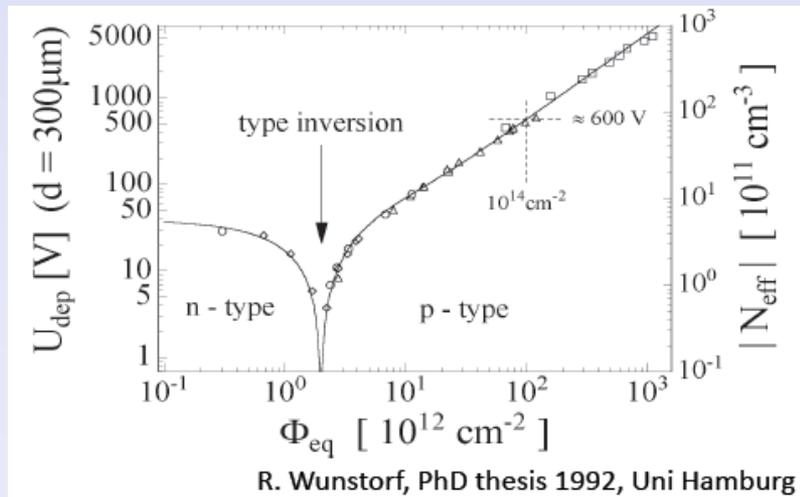
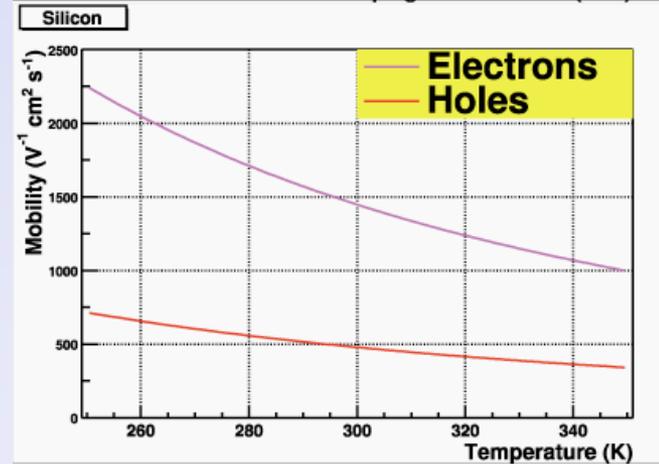
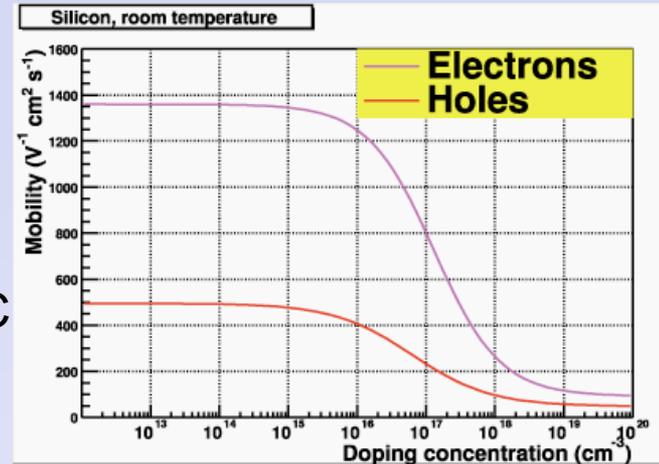
• Fluences per year at full Luminosity



R. Wunstorf, PhD thesis 1992, Uni Hamburg

# Mobility Irradiation dependence

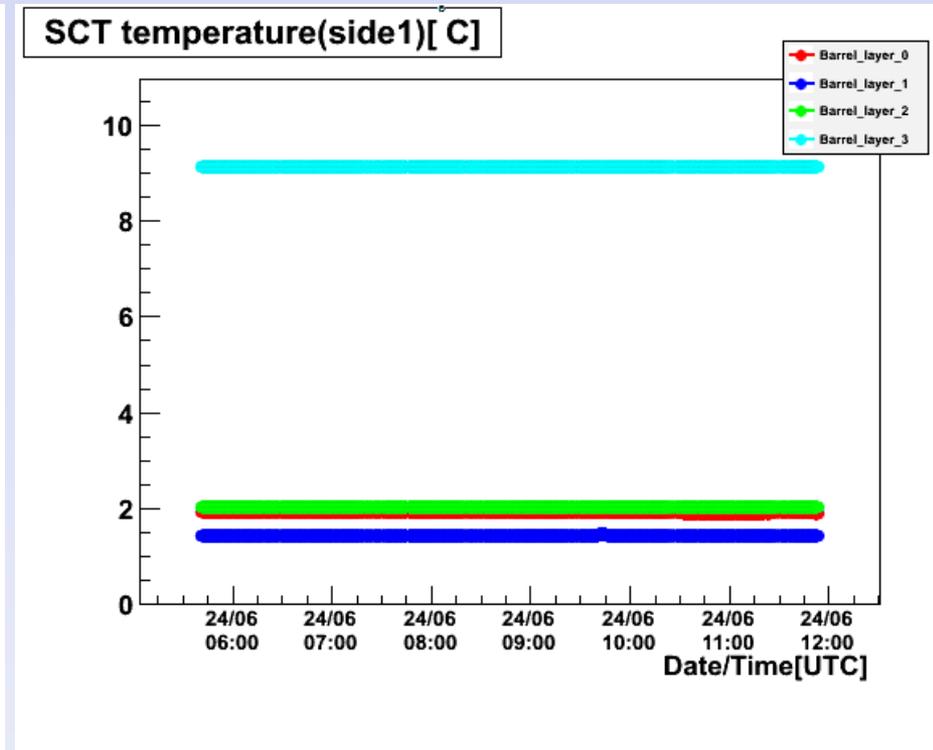
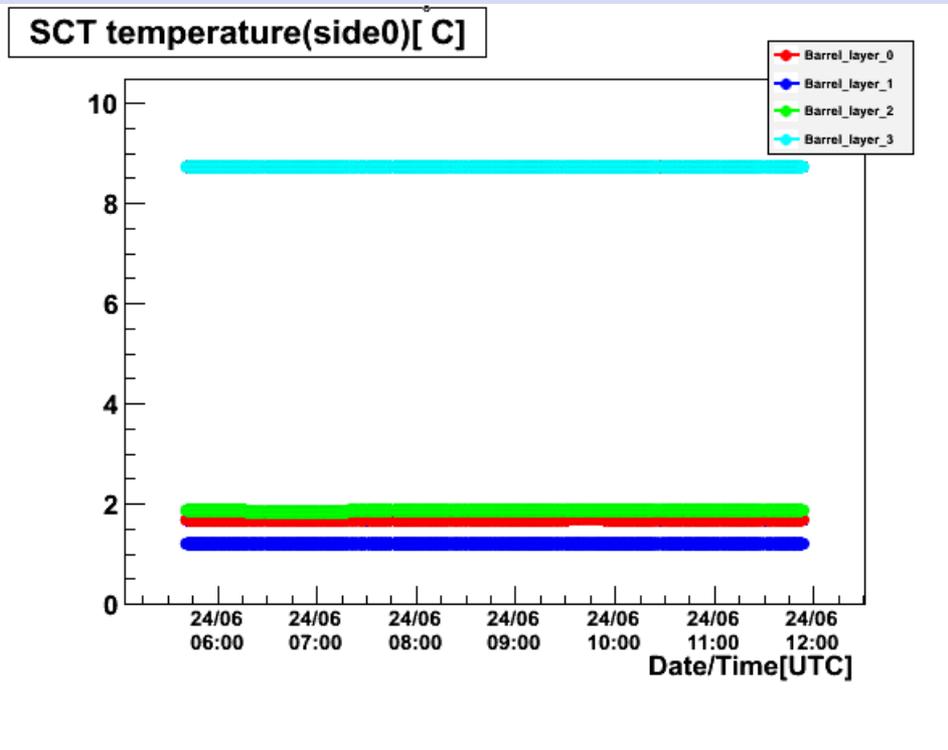
$10^{12} \text{ cm}^{-3}$  at the beginning of LHC



SCTではLHC稼働10年間で $2 \times 10^{14} \text{ cm}^2$ の1 MeVの中性子通過と同等

# SCT の温度

モジュールの温度(≠センサー温度)



センサー温度

Layer0~2 : 2 °C

Layer3 : 4.5 °C

$$\tan \Theta_L = \mu_H B = r \mu_d B \quad \mu_d = \frac{v_s/E_c}{[1 + (E/E_c)^\beta]^{1/\beta}}$$

電子1個の運動について

$$\begin{cases} m \frac{dv_s}{dt} = e(\mathbf{E} + \mathbf{v}_s \times \mathbf{H}/c) \\ \mathbf{I} = (e/V)v_s \end{cases}$$

$$\frac{d\mathbf{I}}{dt} = (e^2/m)[(\mathbf{E}/v) + (\mathbf{I} \times \mathbf{H}/ec)]$$

$$d\mathbf{I} = \left\{ \left( \frac{e^2}{m} \right) \left[ \left( \frac{\mathbf{E}}{v} \right) + \left( \mathbf{I} \times \frac{\mathbf{H}}{ec} \right) \right] \right\} dt$$

電子N個の系では

$$d\mathbf{I} = \Sigma_i d\mathbf{I}_i = \left\{ \left( \frac{e^2}{m} \right) \left[ \left( \frac{\mathbf{E}}{v} \right) + \left( \mathbf{I} \times \frac{\mathbf{H}}{ec} \right) \right] \right\} dt$$

衝突による変化は、

$$d\mathbf{I} = -\mathbf{I}dt/\tau$$

$$\mathbf{I} = (ne^2\tau/m)\mathbf{E} - \mathbf{I} \times \mathbf{H}(e\tau/mc)$$

I : x-axis, H : z-axis のとき

$$\begin{cases} I_x = (ne^2\tau/m)E_x = \sigma E_x \\ 0 = \sigma E_y - (I_x H_z)(e\tau/mc) \end{cases}$$

$$\begin{cases} E_x = I_x / \left( \frac{ne^2\tau}{m} \right) = I_x / \sigma \\ E_y = -(I_x / \sigma)(e\tau H_z / mc) \end{cases}$$

$$\tan \theta = E_y / E_x = e\tau H_z / mc = \mu H_z / c$$