

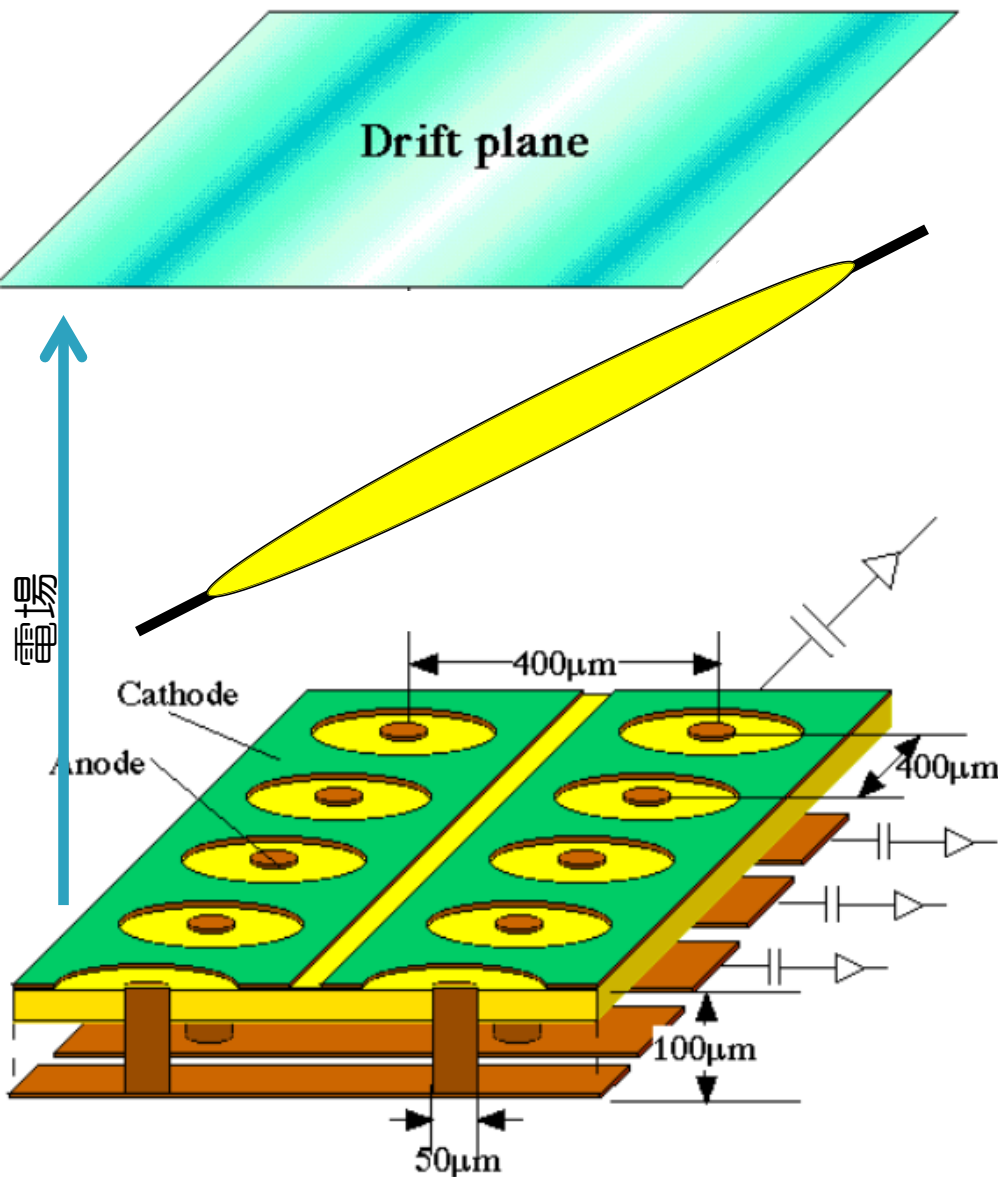


# Garfield++を用いた μ-PICのガス増幅シミュレーション

京都大学 宇宙線研究室  
高田淳史

- Introduction
- μ-PICと電場構造
- ガス増幅Simulation
- 信号波形の再現
- まとめと今後

# Micro Pixel Chamber ( $\mu$ -PIC)



- ▶ 2次元ガスイメージング検出器
- ▶ プリント基板技術で製作
- ▶ ピクセル間隔： $400\mu\text{m}$
- ▶ 個々のピクセルでガス増幅
- ▶ 大面積： $10\times 10\text{ cm}^2$  and  $30\times 30\text{ cm}^2$
- ▶ 大きな増幅率：max  $\sim 15000$
- ▶ 高い位置分解能：RMS  $\sim 120\mu\text{m}$
- ▶ 均一な応答：RMS  $\sim 5\%$  ( $10\times 10\text{ cm}^2$ )
- ▶ 1ヶ月を超える連続安定動作が可  
(@ gain  $\sim 6000$ )

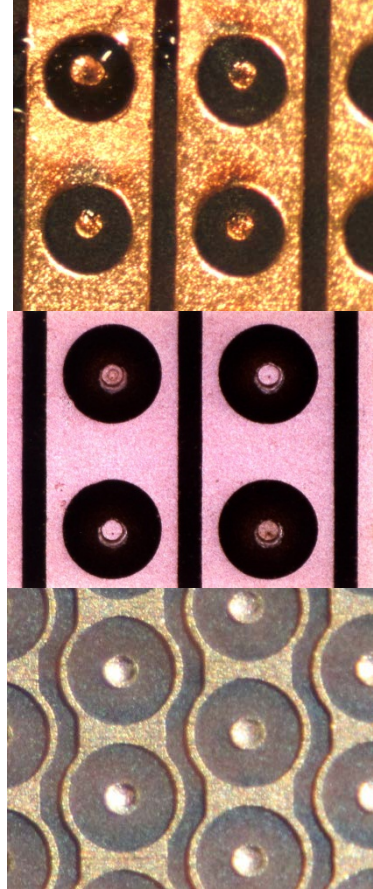
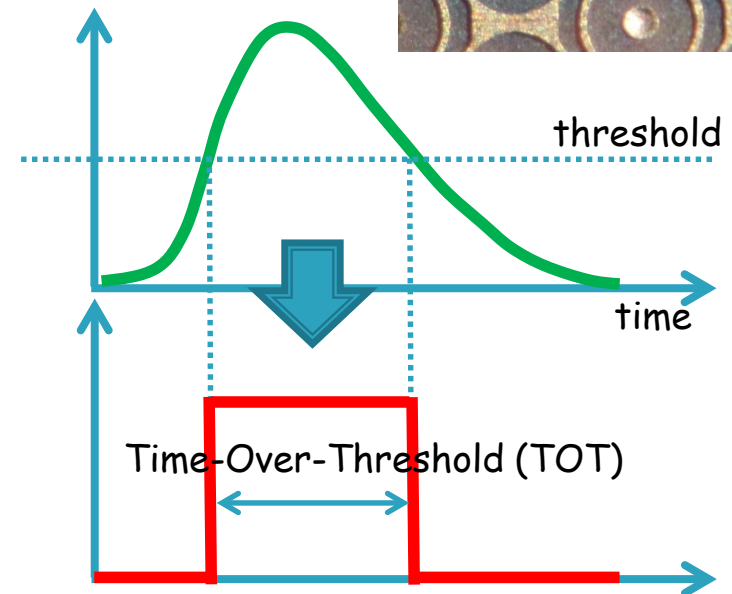
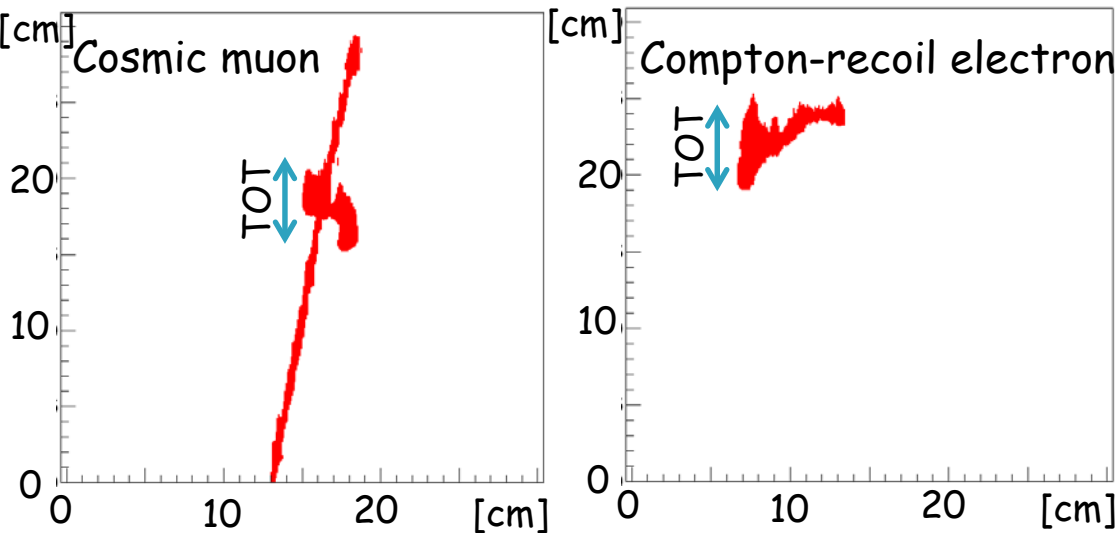
- MeVガンマ線望遠鏡  
(小田 13日 15:20-)
- 環境調査用ガンマ線カメラ  
(友野 13日 16:20-)
- 医療用ガンマ線カメラ
- 中性子イメージング検出器  
(Parker 14日 14:30-)
- ダークマター探査実験

他

# $\mu$ -PICの詳細な理解を!!

- $\mu$ -PICの設計は経験のみに頼ってきた
  - より高ゲイン・安定な $\mu$ -PICにするには...?
  - 各パラメータの振る舞いを実験で調べるには限度がある
- 各種応用での振る舞いの理解にSimulationは必須
  - **ガス飛跡検出器の応答は?**  
preampへの入力は最小で20fC程度 @ gain ~30000  
生信号は誰も見たことがない

⇒ **Simulationを用いたStudyを!!**



# ガス検出器Simulation

## Garfield

<http://garfield.web.cern.ch/garfield>

- Fortran
- 比例計数管・MWPCを想定
- 基本的に2次元のみの計算
- 巨視的な計算



## Garfield++

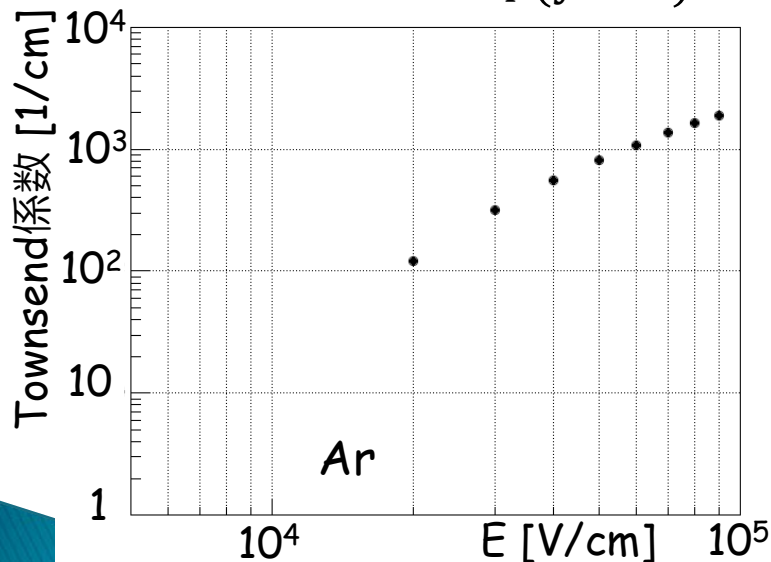
<http://garfieldpp.web.cern.ch/garfieldpp>

- C++
- 微細な電極を持つ検出器も想定
- 3次元で計算
- 微視的な計算

### Townsend係数 $\alpha(E)$

-> 電子の経路で積分  $\int \alpha dx$

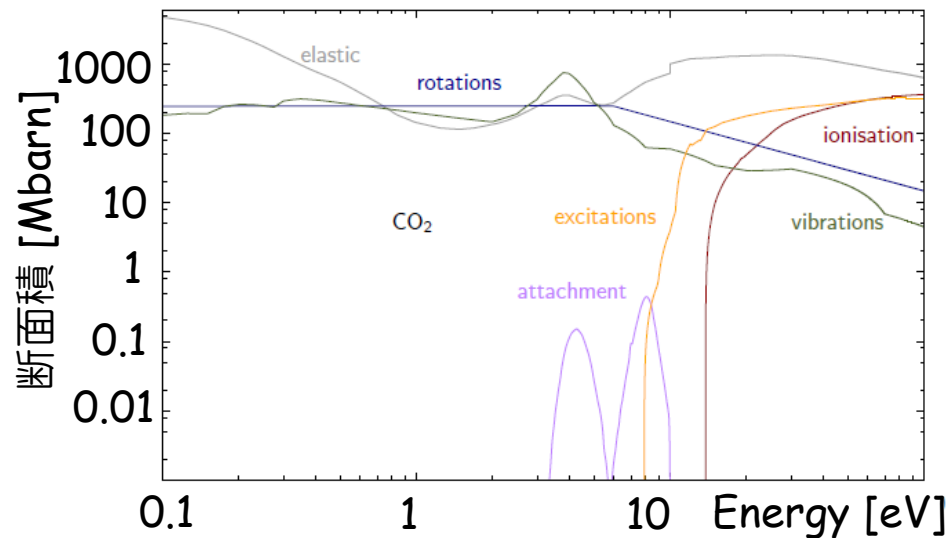
-> 増幅率 =  $\exp(\int \alpha dx)$



### 反応断面積

-> イオン-電子対の生成

-> 増幅率 = イオン-電子対の数



ガス飛跡検出器の応答 ⇒ GarfieldではETCCのガス飛跡検出器を再現できなかった  
Garfield++では???



# $\mu$ -PICの電場構造

## ➤ Geometry

Gmshで有限要素法用のメッシュを定義  
測定した幾何情報を基にモデル化

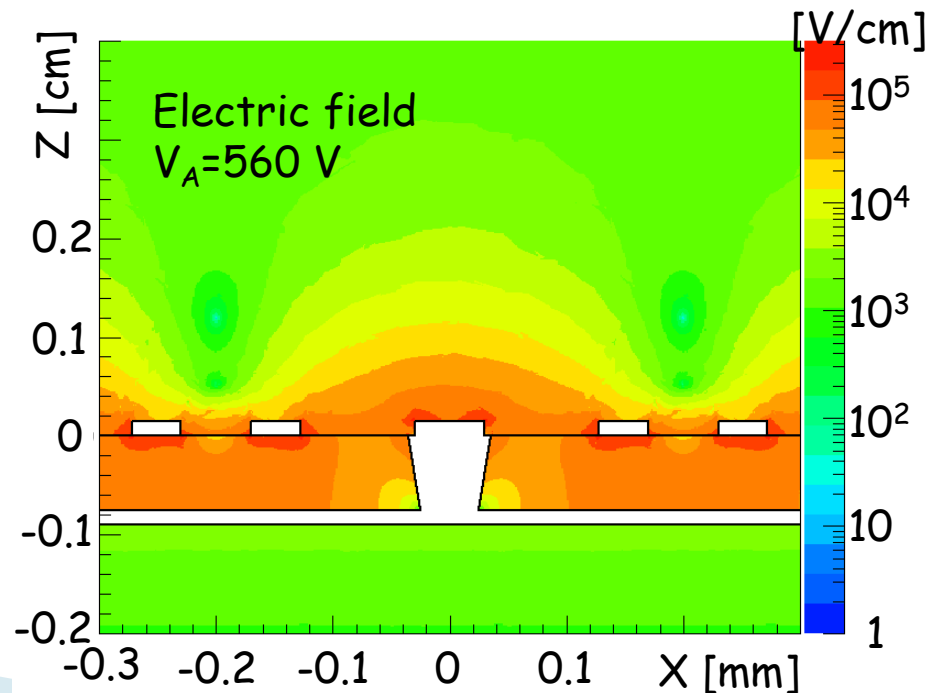
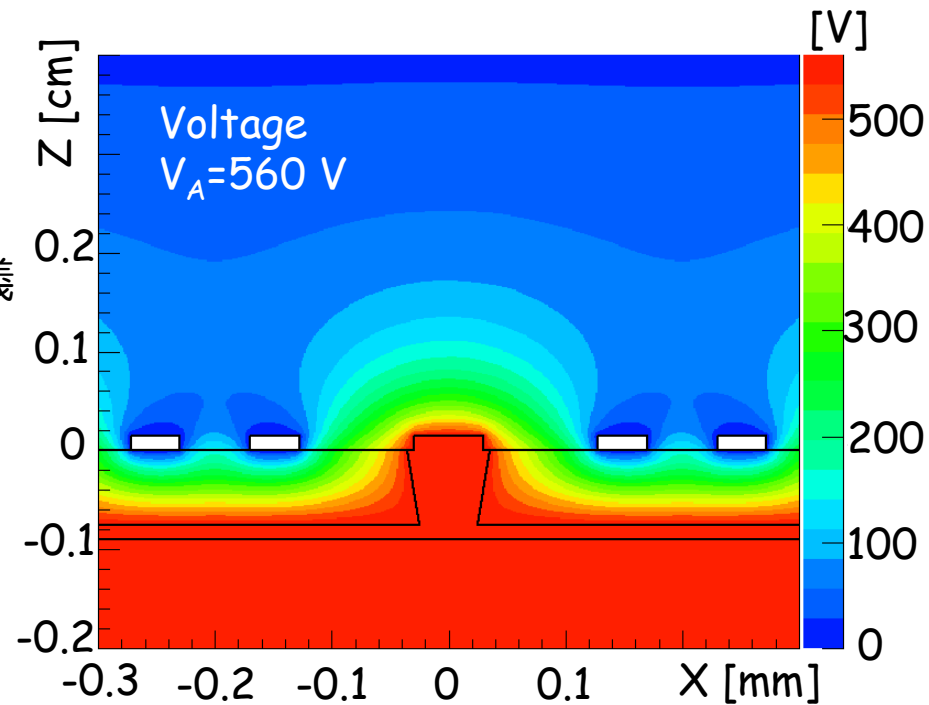
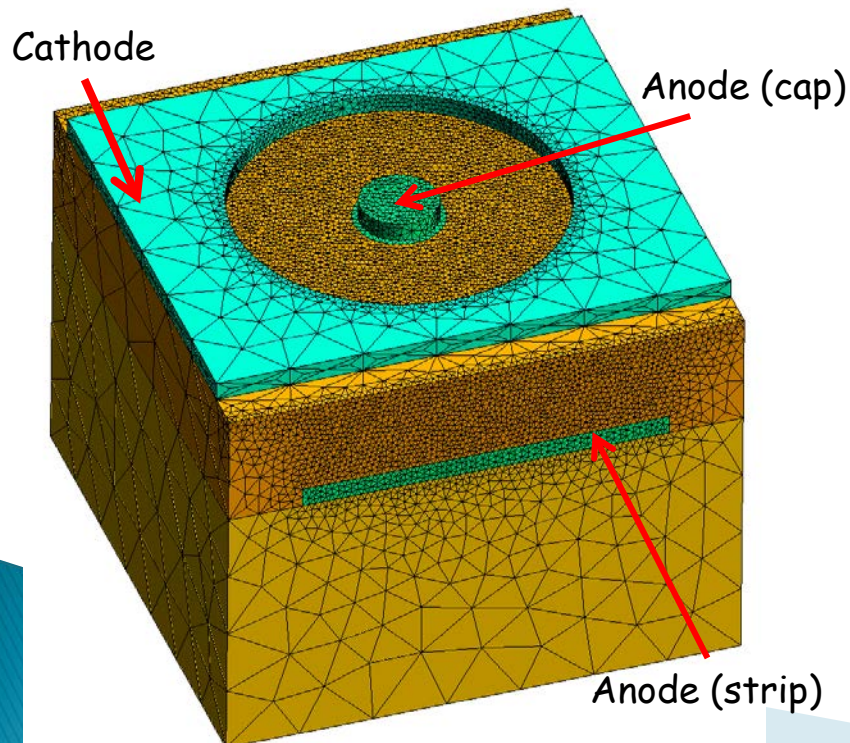
## ➤ Electric, Potential, Weighting Field

Elmerを用いて3次的に計算

⇒ Garfield++へ入力

Gmsh: <http://geuz.org/gmsh>

Elmer: <http://www.csc.fi/english/pages/elmer>



# Single electron spectrum

電子1個を $\mu$ -PICに入射

⇒ イオン-電子対の数からガス増幅率

比例計数管の場合...

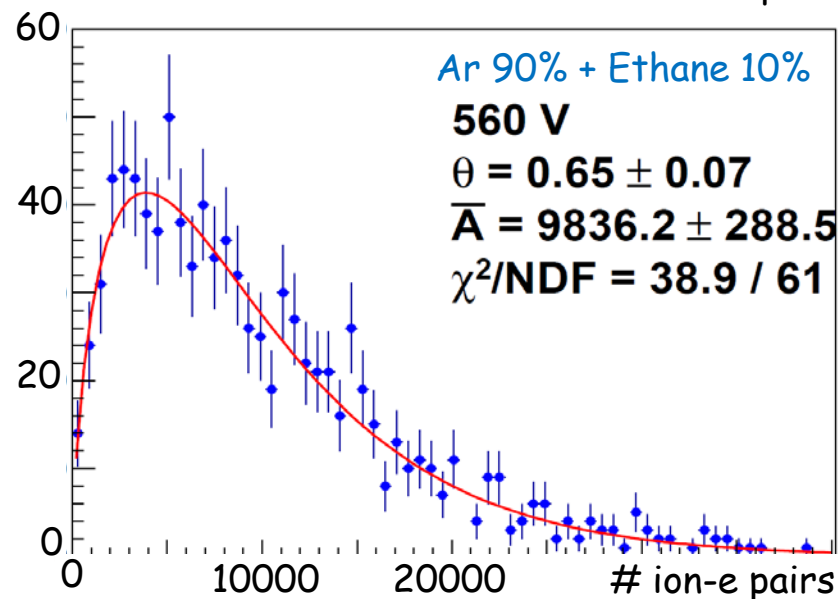
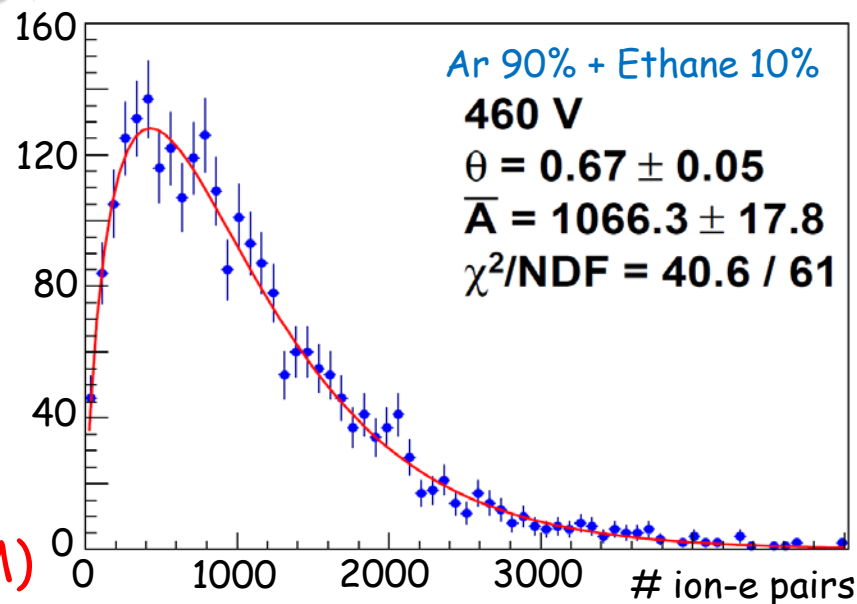
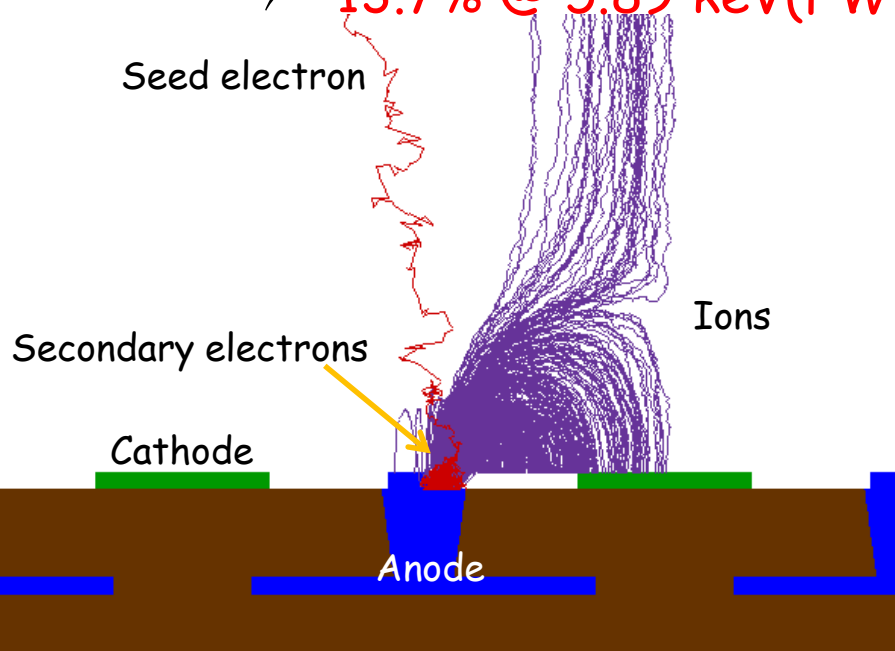
増幅率のゆらぎはPolya分布に従う

$$f(x) = \left( \frac{x(1+\theta)}{\bar{A}} \right)^\theta e^{-\frac{x(1+\theta)}{\bar{A}}}$$

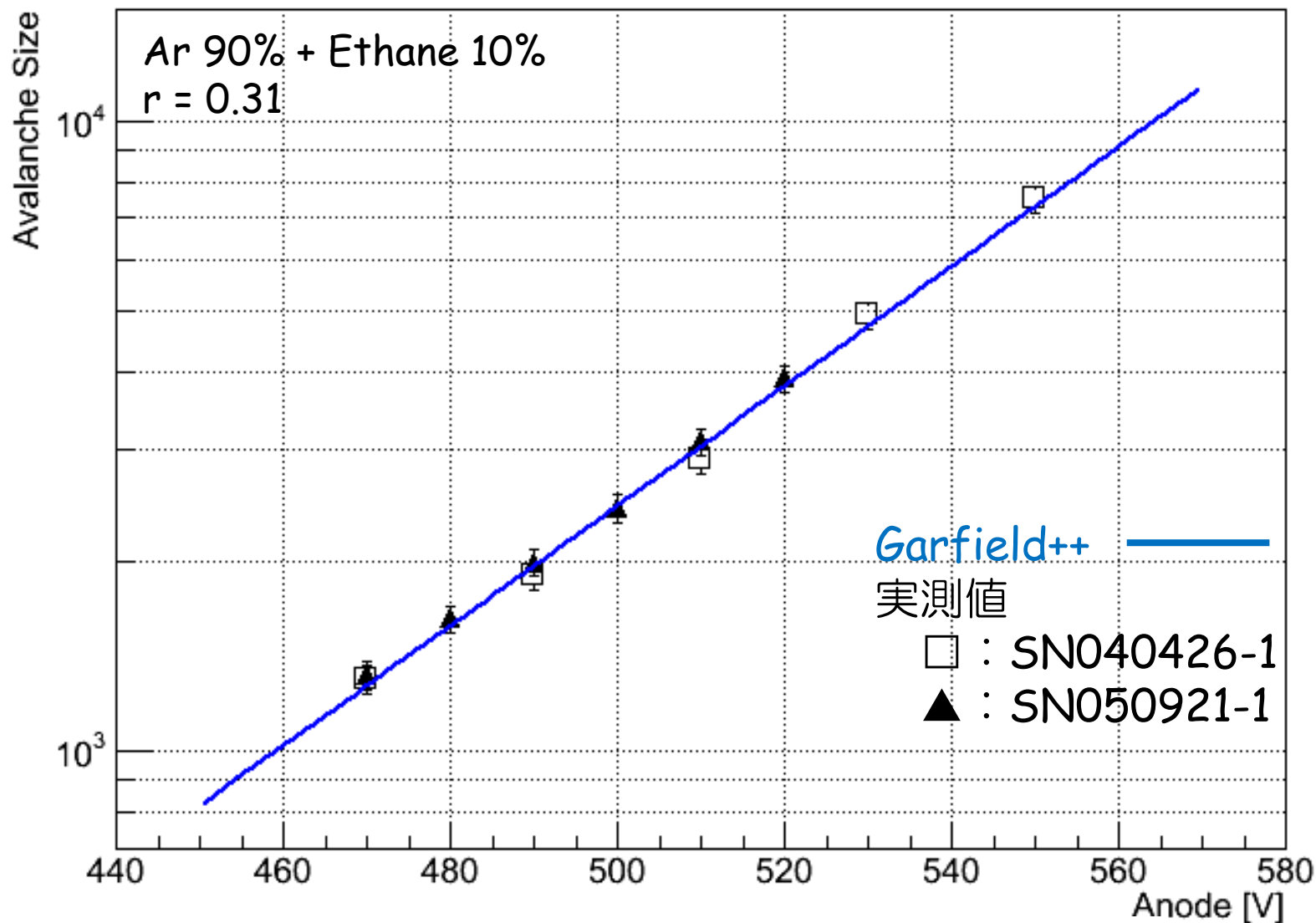
$\mu$ -PICのガス増幅率もPolya分布

$\theta$ はアノード電圧によらず  $\sim 0.65$

⇒ **13.7% @ 5.89 keV (FWHM)**



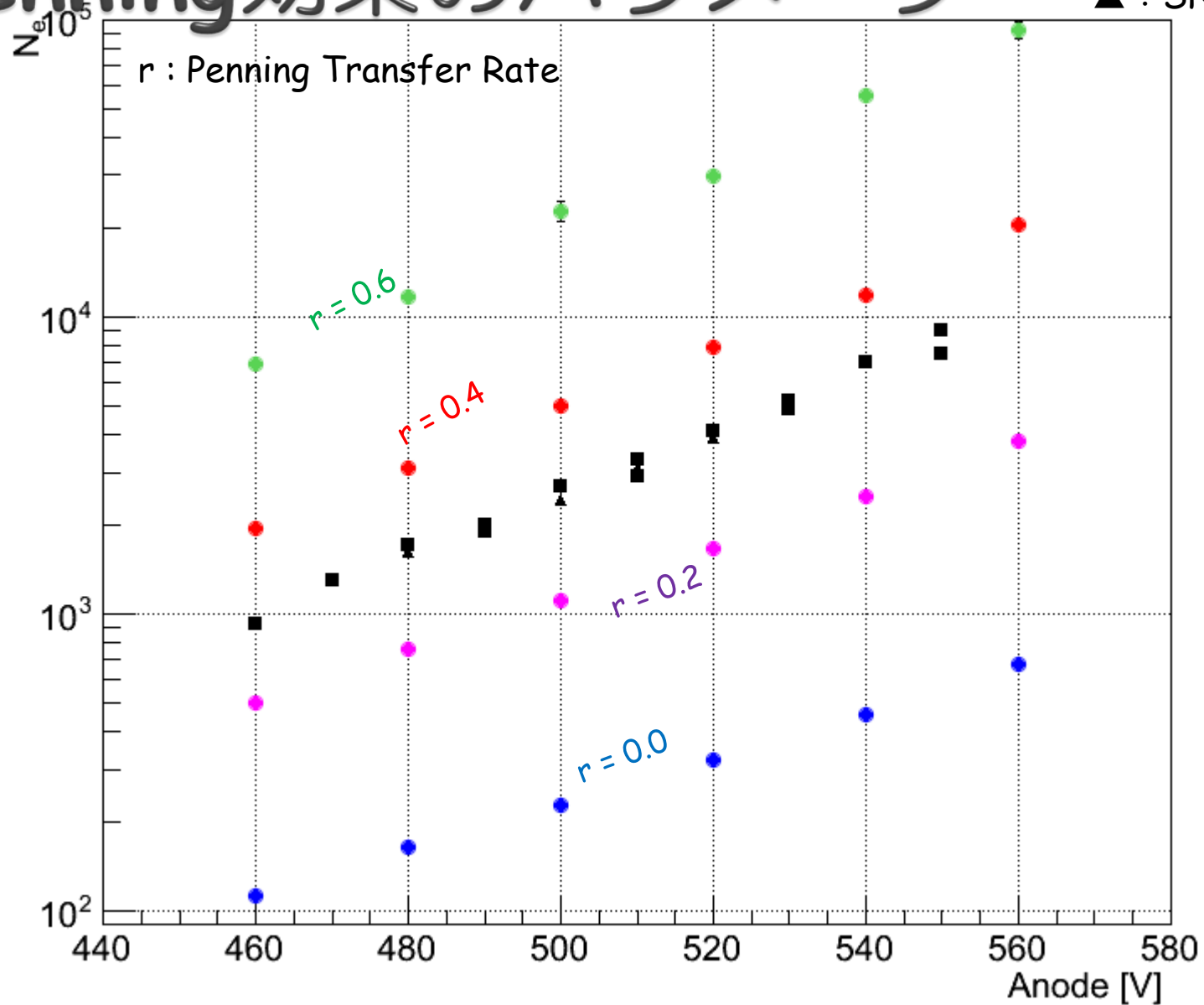
# ガス増幅率のアノード電圧依存性



Garfield++による増幅率は実験値を良く再現

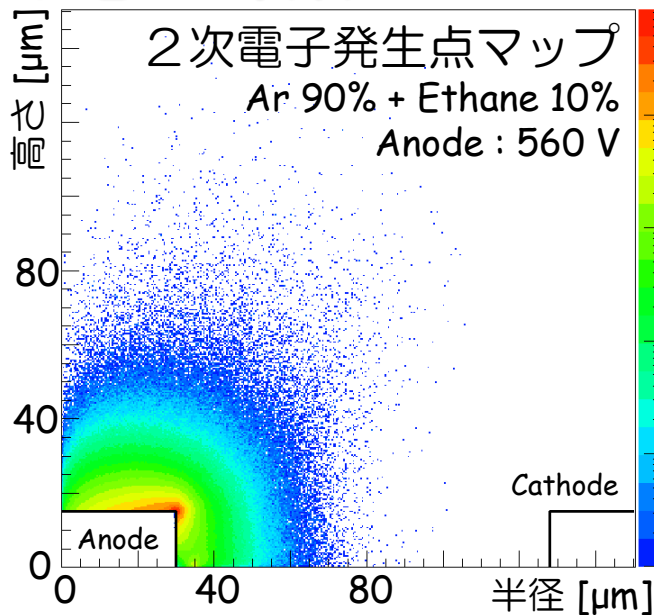
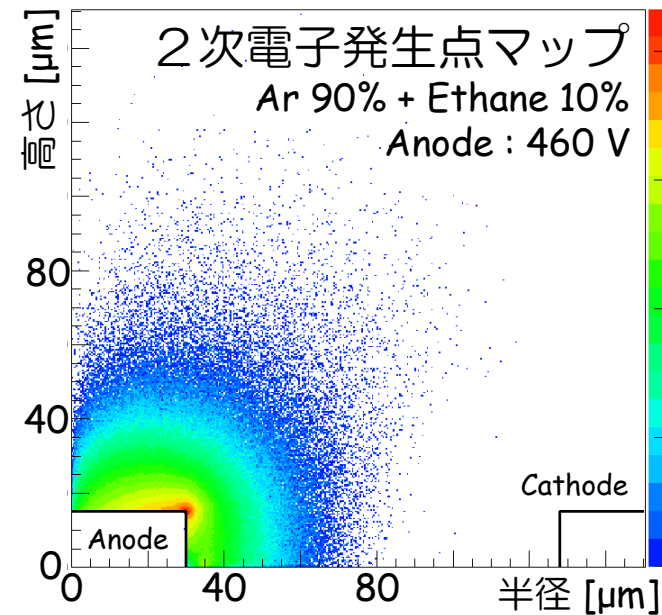
# Penning効果のパラメータ

■ : SN040426-1  
▲ : SN050921-1



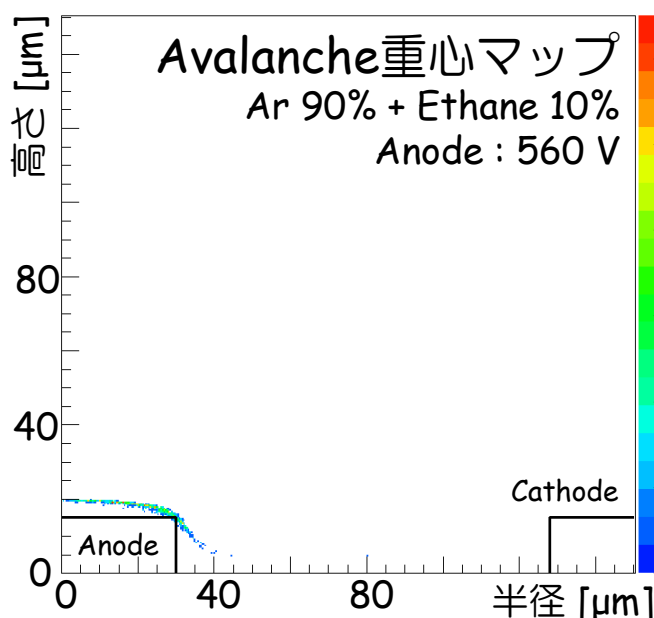
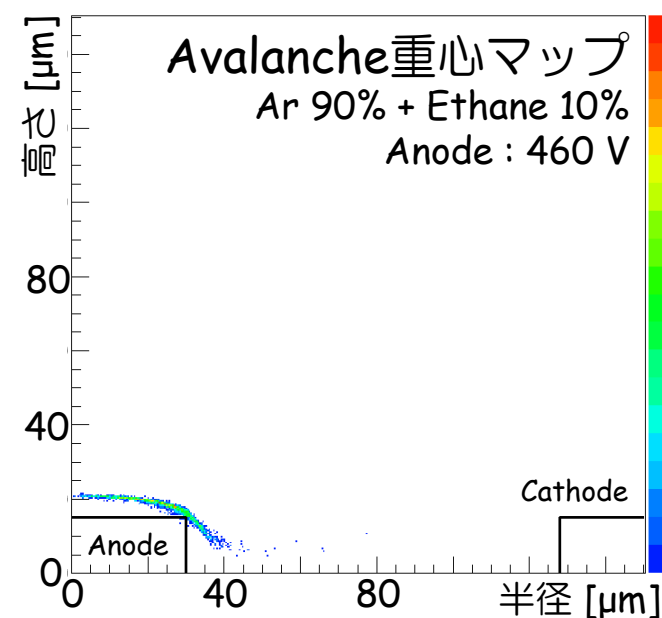


# Avalancheの発生点



➤ イオン-電子対発生点  
アノード近傍  
100 μm以下  
電圧依存はあまり無い

➤ 増幅の重心位置  
アノードの  
5 μm上に集中  
電圧依存はあまり無い

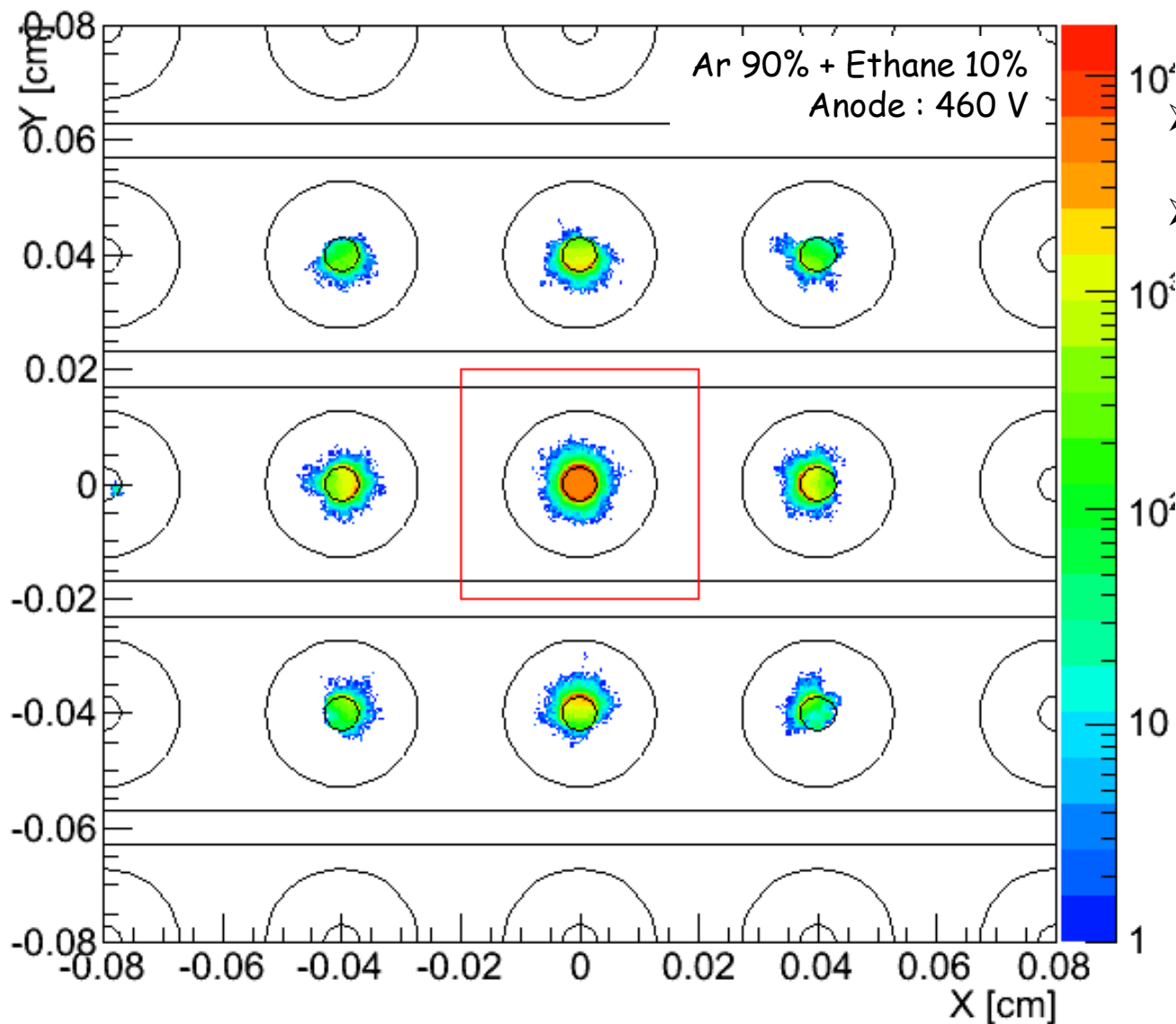


信号はイオン・電子の  
移動による誘導電荷



信号波形は  
電圧に対して鈍感  
電荷量(=増幅率)と形を  
別々に考慮する

# 増幅で生じた電子終着点

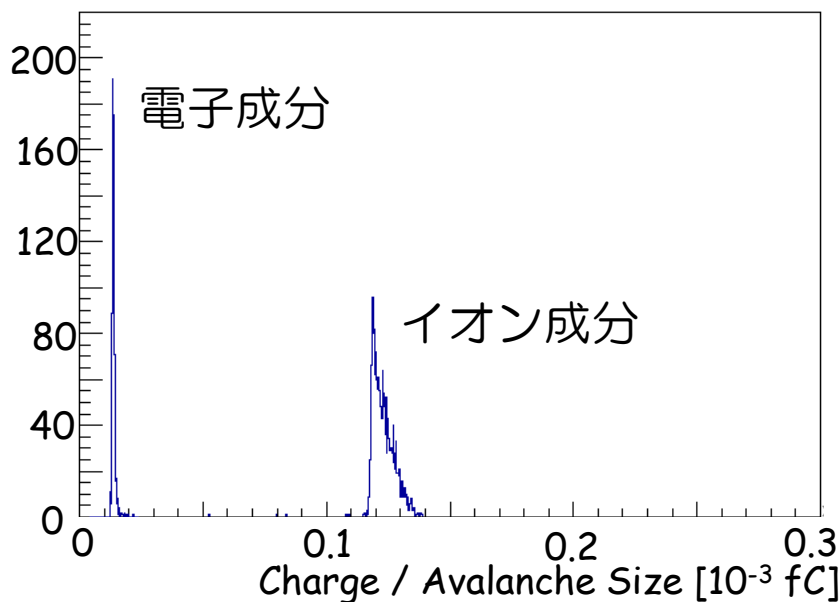
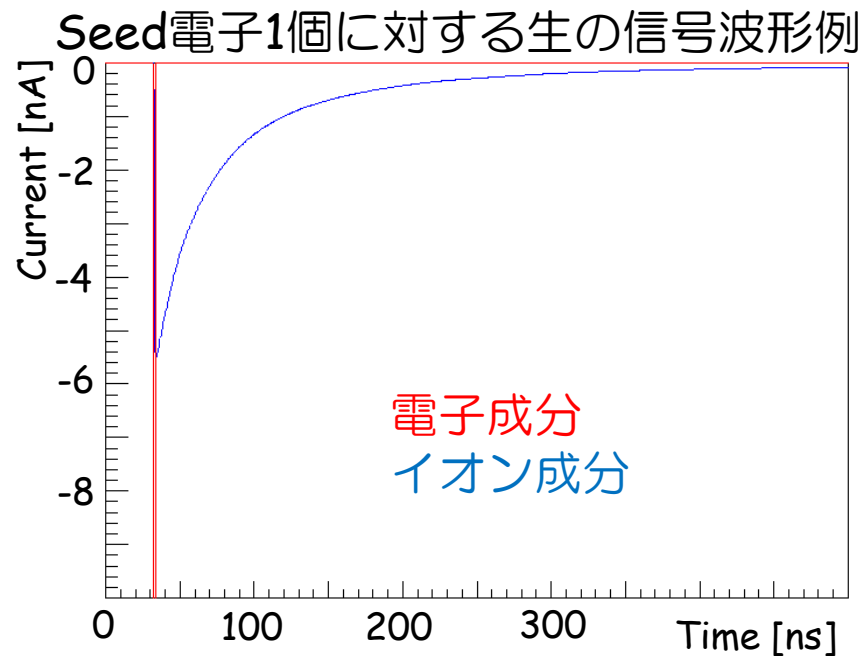
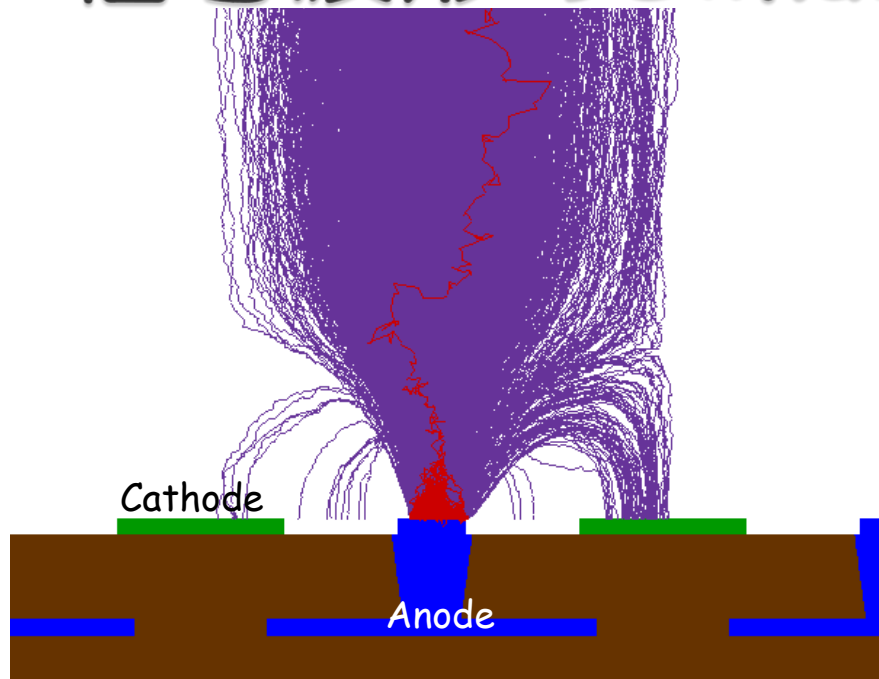


- 基板から1mm上方赤四角内から電子を発生
- ガス増幅により生じた電子の全てについて追跡

アノードに到達 **98%**  
基板に降着 **2%**

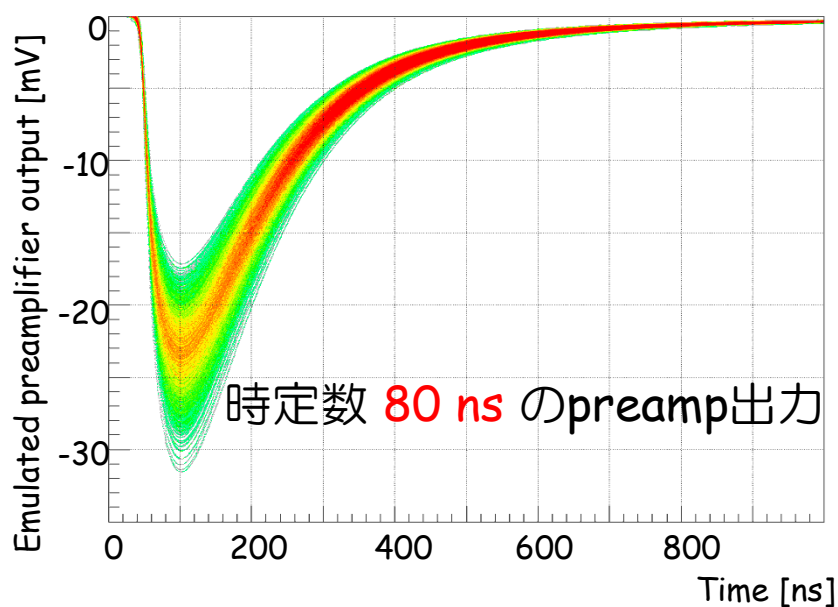
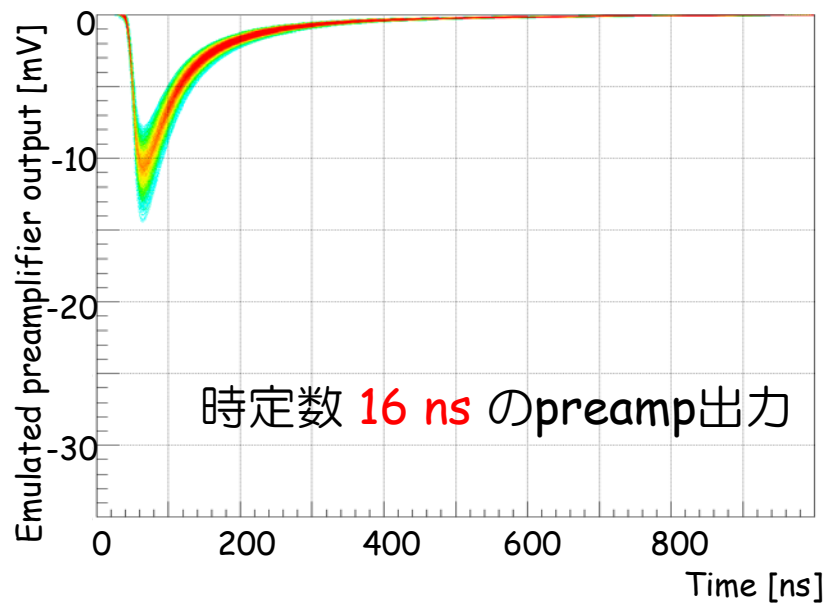
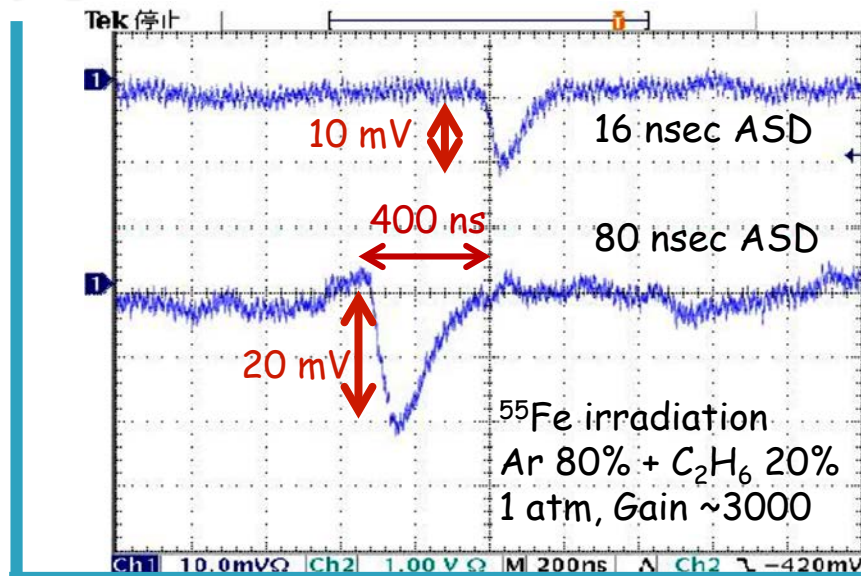
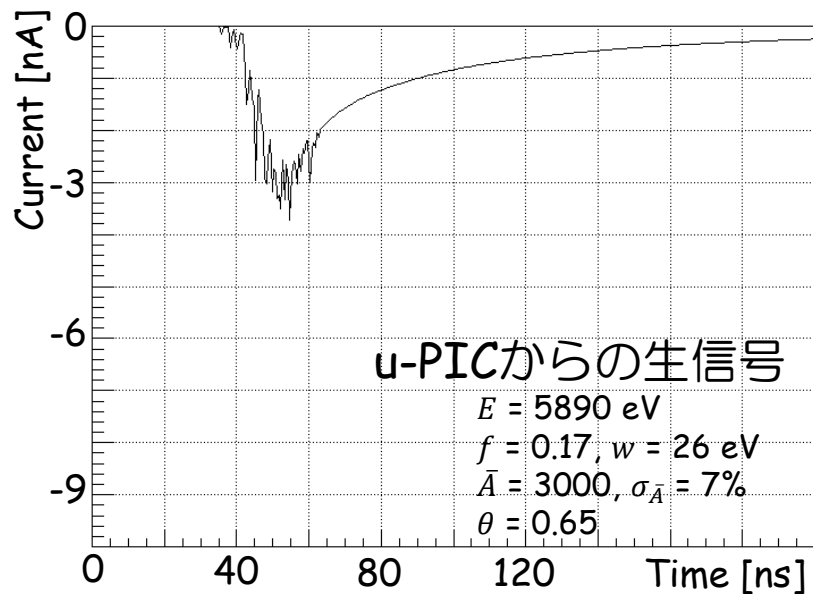
以前のGarfieldでのSimulationをConfirm

# 信号波形のSimulation



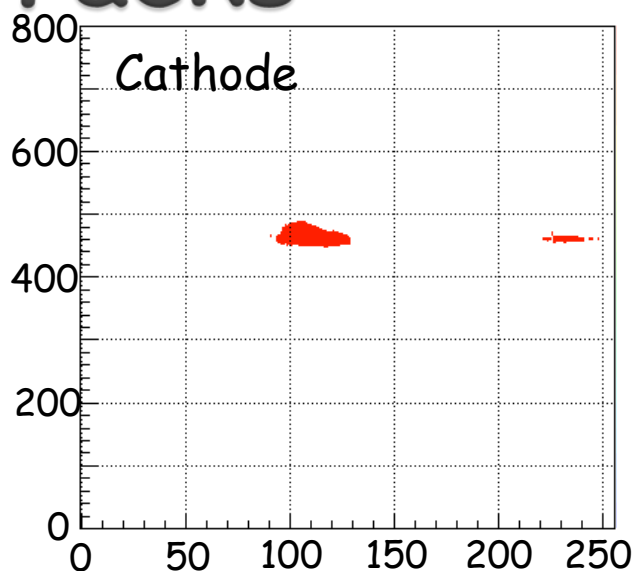
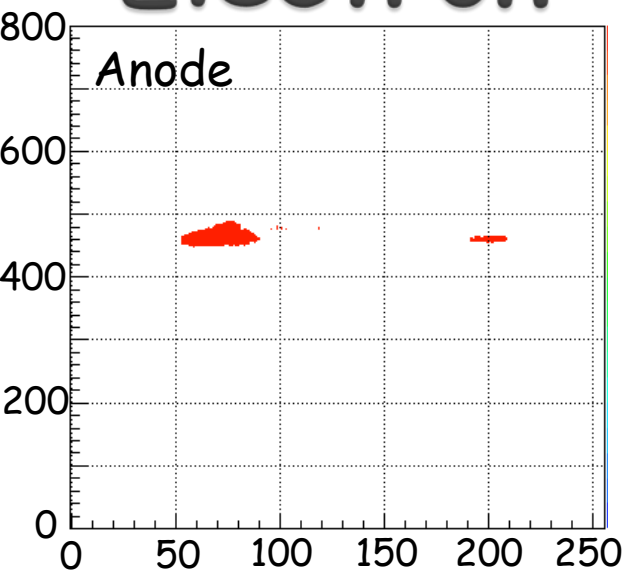
- 立ち上がりの時刻揺らぎ  
⇒ Drift方向の拡散
- パルス幅1~2 nsecの鋭いスパイク  
⇒ 電子による誘導電荷
- ~100 nsecのゆっくりした成分  
⇒ イオンによる誘導電荷
- 電子成分：イオン成分 = 1：9  
( $\mu$ -PICサイズの比例計数管 = 1：8.4)

# $^{55}\text{Fe}$ の信号の再現



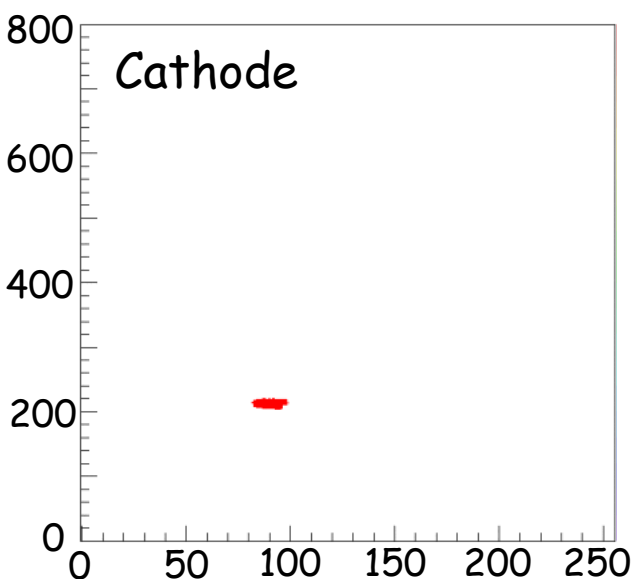
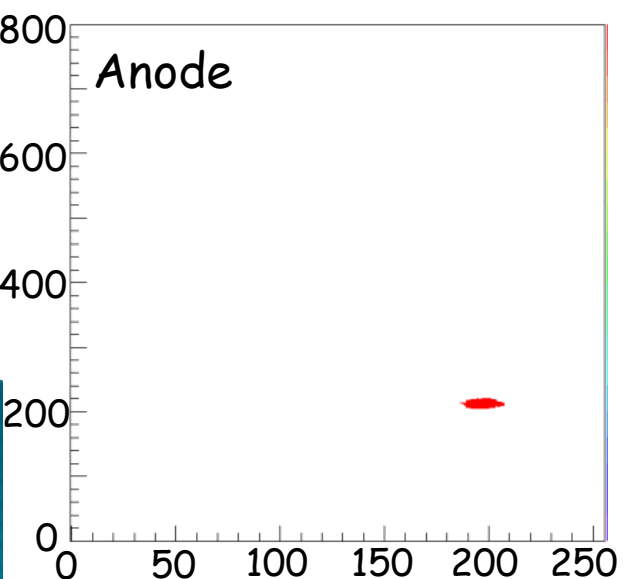
実験で得られたパルス高がSimulationで説明できた

# Electron Tracks



## 実験で得た飛跡

Ar + C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (10%), 1 atm  
Gain ~48000  
Gain uniformity  $\sigma = 15\%$   
Threshold -18/+32mV  
ASD 80ns  
Drift 3.6cm/us  
<sup>133</sup>Ba irradiation

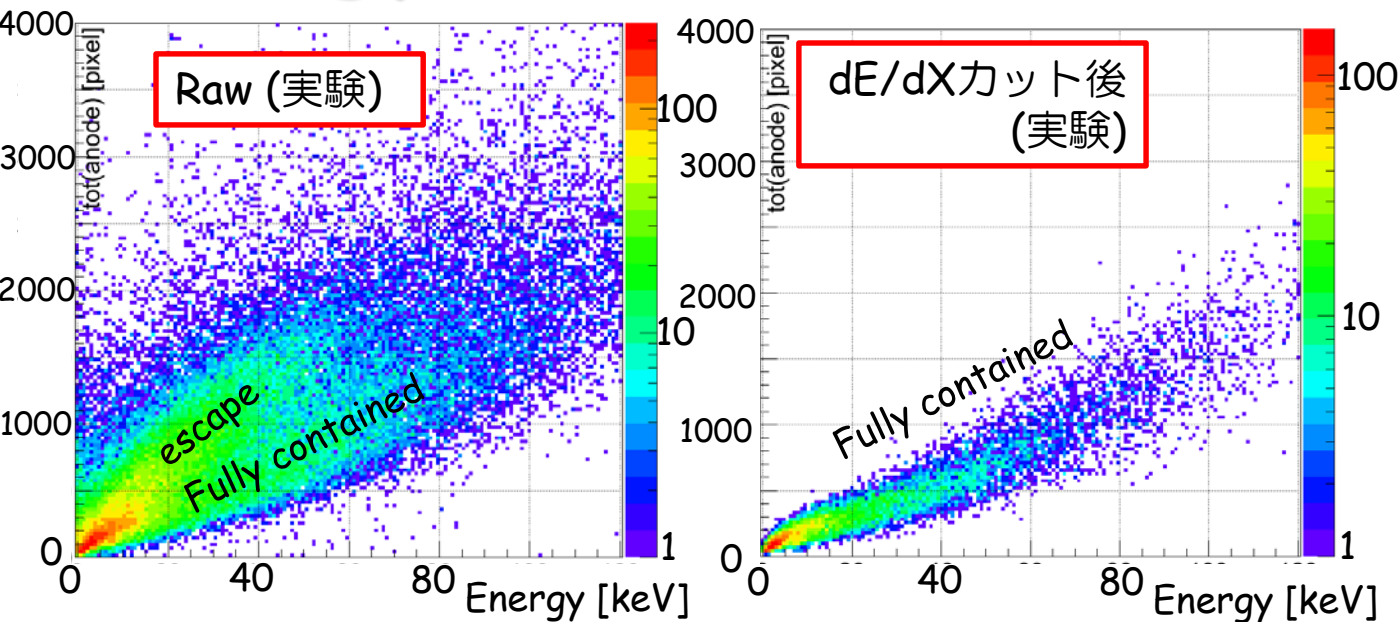


## 計算から得た飛跡

Ar + C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> (10%), 1 atm  
 $w = 26\text{eV}$ ,  $f = 0.17$   
Gain ~48000  
Gain uniformity  $\sigma = 5\%$   
Threshold 24mV  
ASD 80ns  
Drift 4.2cm/us  
Electron energy <200keV



# Energy vs TOT hit

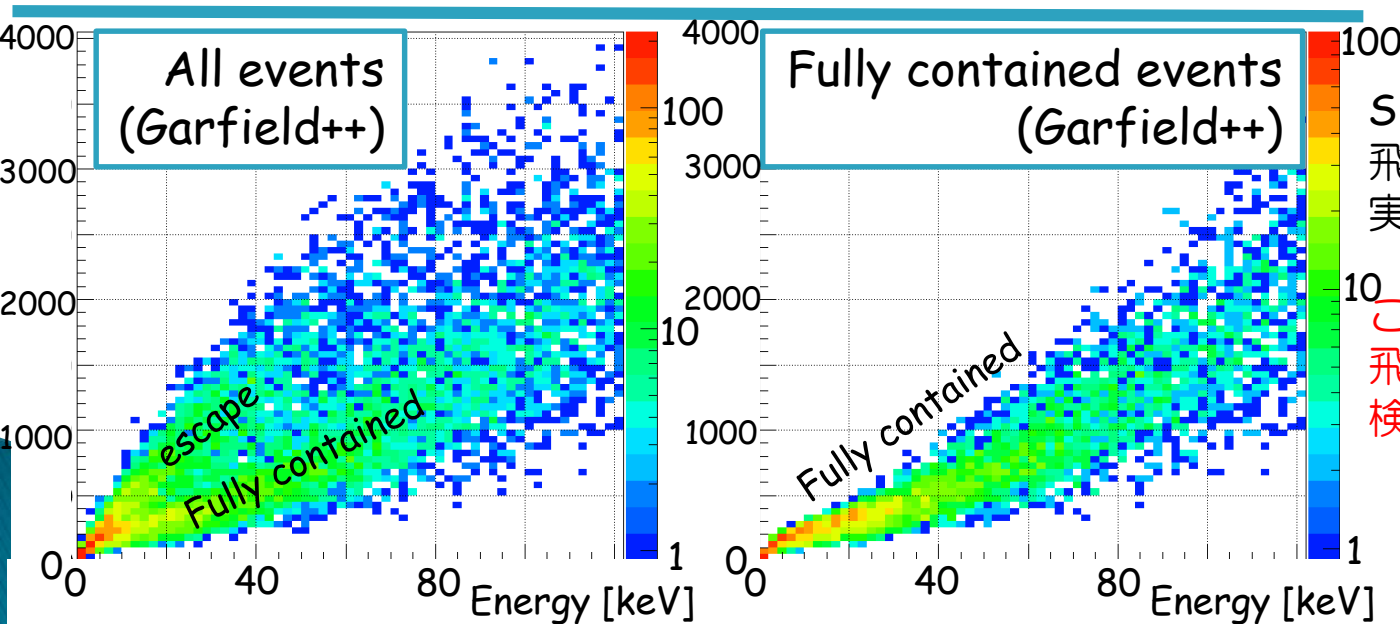


➤ Escape event  
有感領域から  
外へ出ていく電子

➤ Fully contained  
有感領域内で  
止まった電子



dE/dXで  
止まった電子のみ  
選択可



Simulationから得た  
飛跡画像の面積は  
実験結果を大よそ再現

このSimulatorを使用して  
飛跡解析やガンマ線再構成の  
検証が可能に

# まとめ

- ▶ Garfield++を用いた $\mu$ -PICのSimulationを行った
- ▶ Gmsh, Elmerにより3次元電場構造を有限要素法で計算
- ▶ Single electron spectrumはPolya分布で説明可  
 $\theta = 0.65 \Rightarrow$  Energy分解能の限界値：13.7% @ 5.89keV (FWHM)
- ▶ ガス増幅率のアノード電圧依存性をよく再現
- ▶ イオン-電子対の発生点はアノードの $\sim 5 \mu\text{m}$ 上
- ▶ 信号波形をSimulation  
電子成分：パルス幅 1~2 ns      イオン成分： $\geq 100$  ns  
電子成分の電荷量：イオン成分の電荷量 = 1 : 9
- ▶  $^{55}\text{Fe}$ の信号を再現  $\Rightarrow$  パルス高のpreamp時定数による変化を再現  
16ns amp : 80ns amp = 1 :  $\sim 2.3$
- ▶ TOT分布：escape/fully contained eventの2つとも再現  
 $\Rightarrow$  SimulationによるETCCの解析方法の検証を可能に