



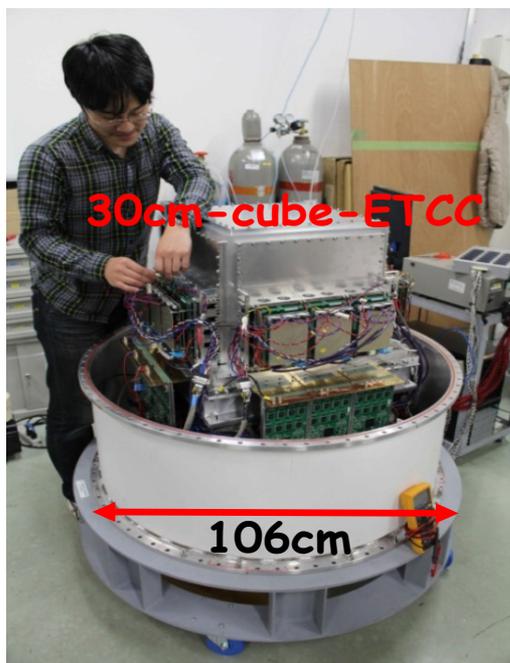
大面積Micro Pixel Chamberの開発 9

京都大学 生存圏研究所 高田淳史

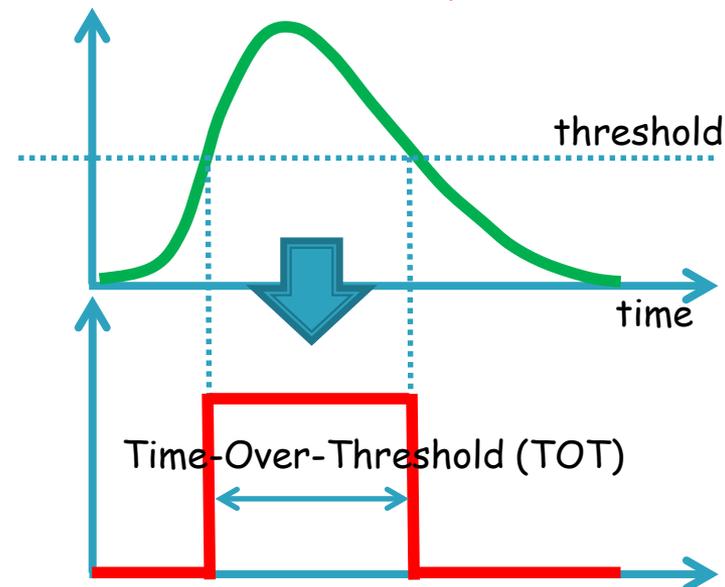
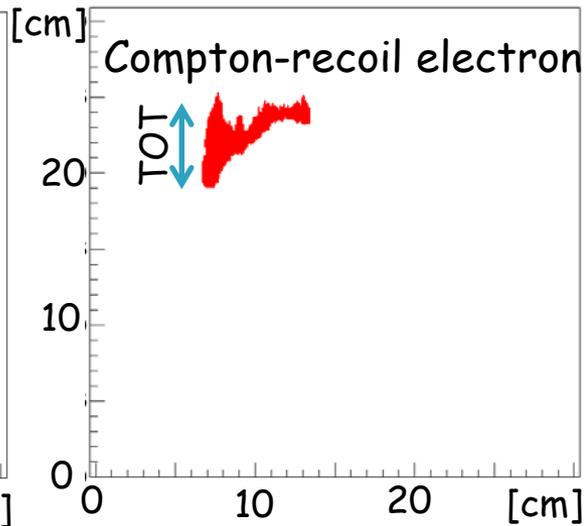
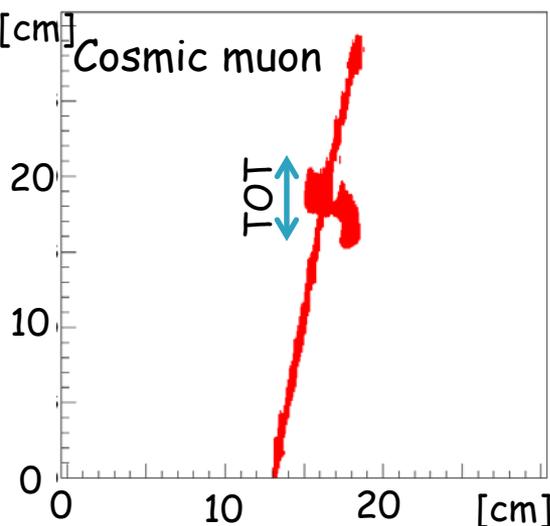
谷森達, 窪秀利, Parker Joseph, 水本哲矢
水村好貴, 友野大, 岩城智, 澤野達哉, 中村輝石
松岡佳大, 古村翔太郎, 中村祥吾, 小田真, 園田真也
身内賢太郎, 岸本祐二, 株木重人, 黒澤俊介

- 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

飛跡検出器の詳細な理解へ向けて



- TPCの大幅な改善
 - 詳細・鮮明な荷電粒子飛跡が取得可能に
 - dE/dx による粒子識別も明確に
 - ETCCの検出効率・角度分解能も向上
- ETCCの理解にSimulationは必須
 - Simulatorの構築は実験ほど進んでいない
 - 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++

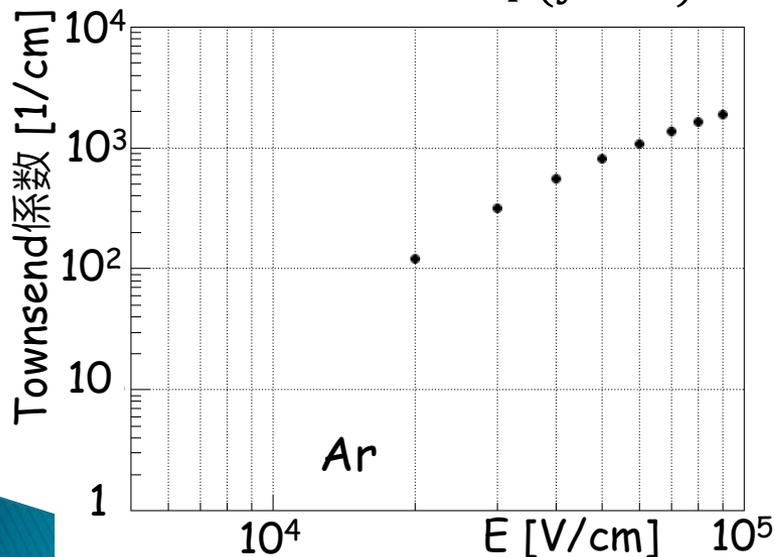
<http://garfieldpp.web.cern.ch/garfieldpp>

- 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 $\int \alpha dx$

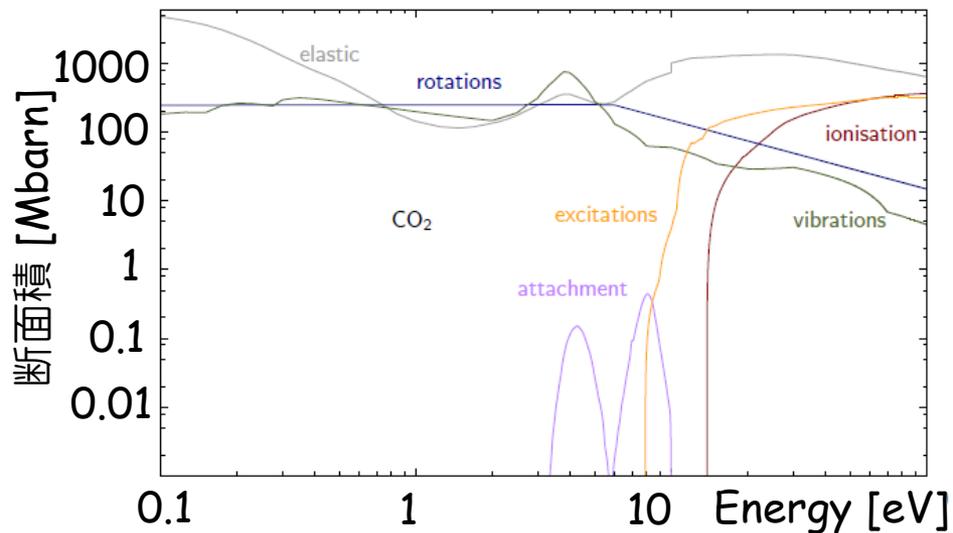
-> 増幅率 = $\exp(\int \alpha dx)$



反応断面積

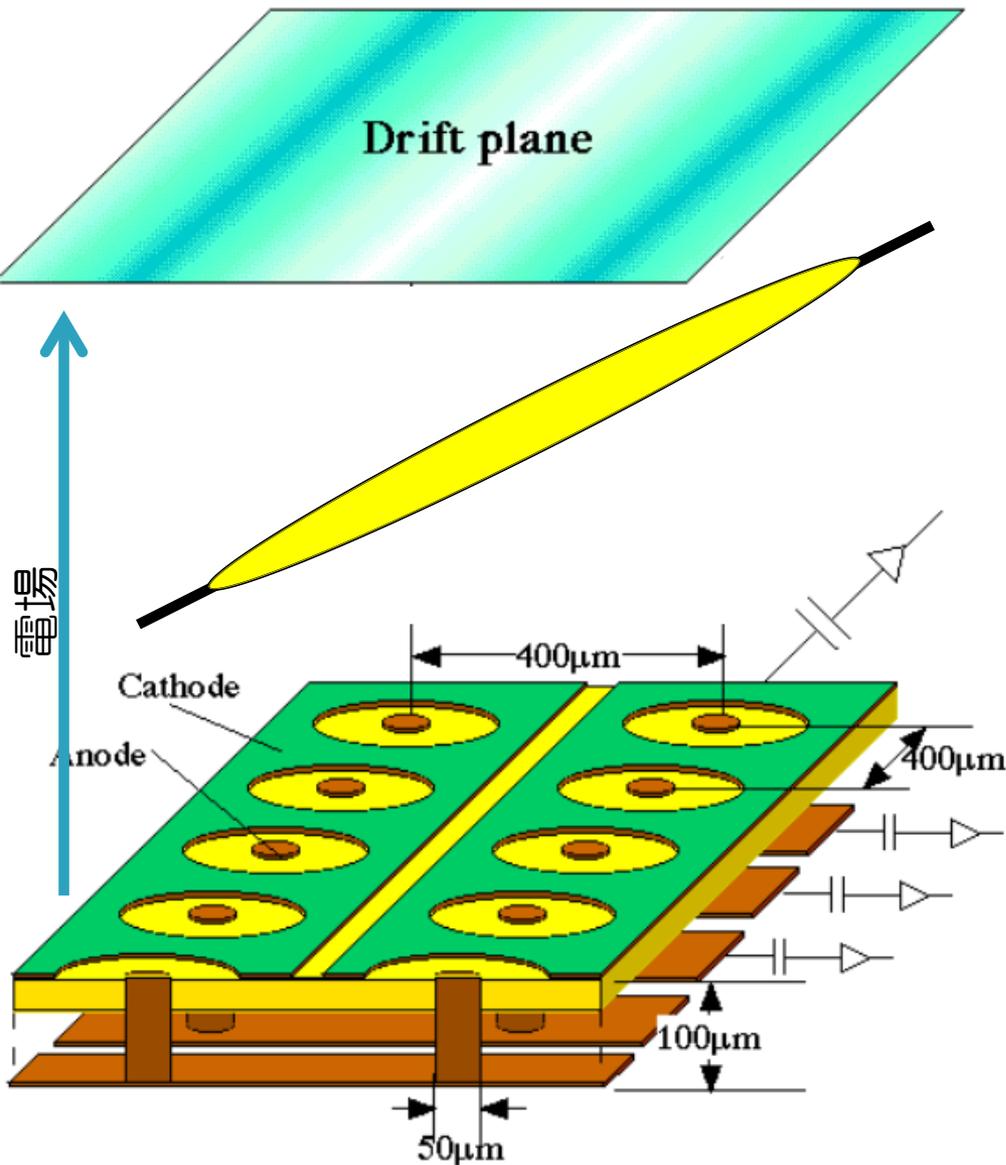
-> イオン-電子対の生成

-> 増幅率 = イオン-電子対の数



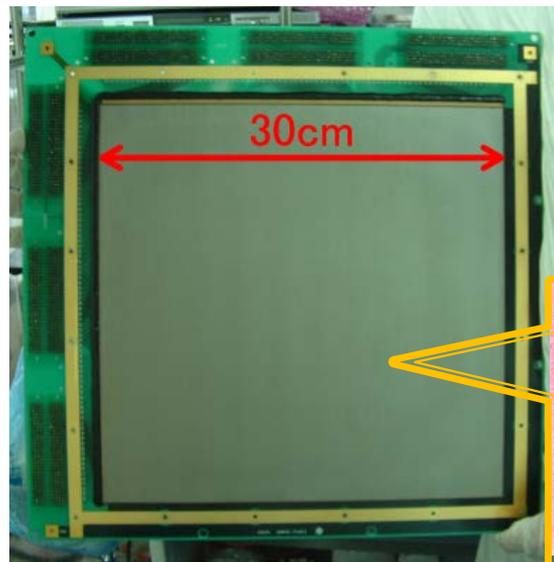
ガス飛跡検出器の応答 ⇒ GarfieldではETCCのガス飛跡検出器を再現できなかった
Garfield++では???

ガス飛跡検出器



Micro Pixel Chamber (μ -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 μ m
- ▶ 個々のピクセルでガス増幅
- ▶ 大面積：10 \times 10 cm² and 30 \times 30 cm²
- ▶ 大きな増幅率：max \sim 15000
- ▶ 高い位置分解能：RMS \sim 120 μ m
- ▶ 均一な応答：RMS \sim 5% (10 \times 10 cm²)
- ▶ 1ヶ月を超える連続安定動作が可
(@ gain \sim 6000)



μ -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

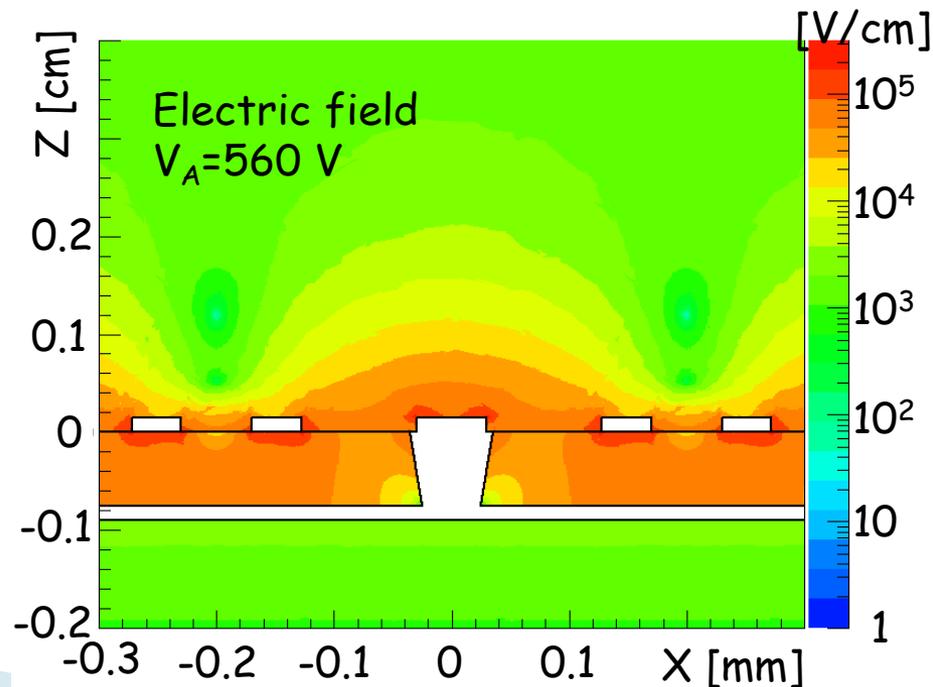
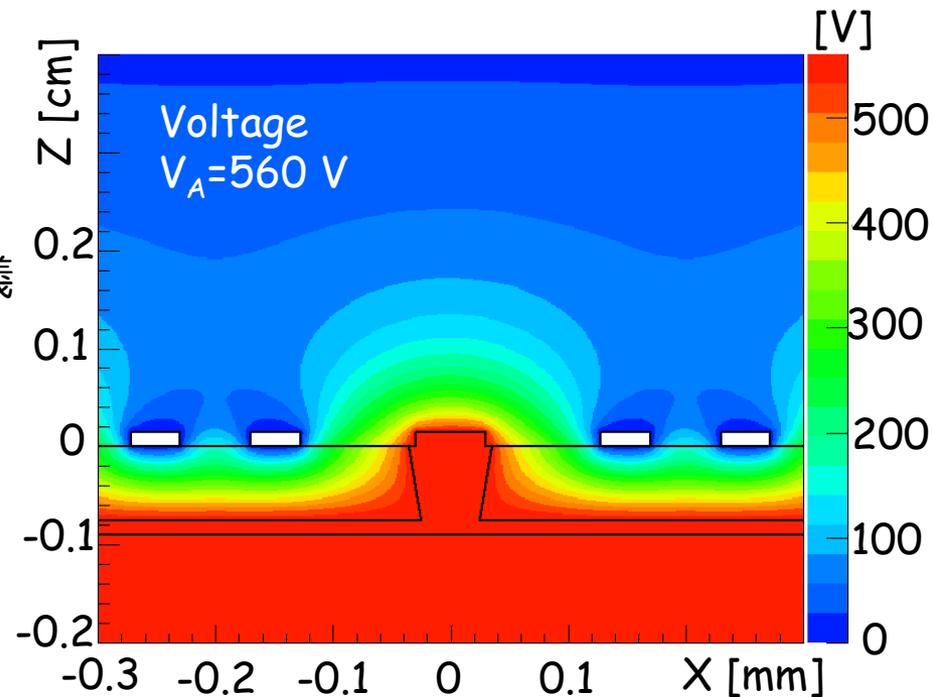
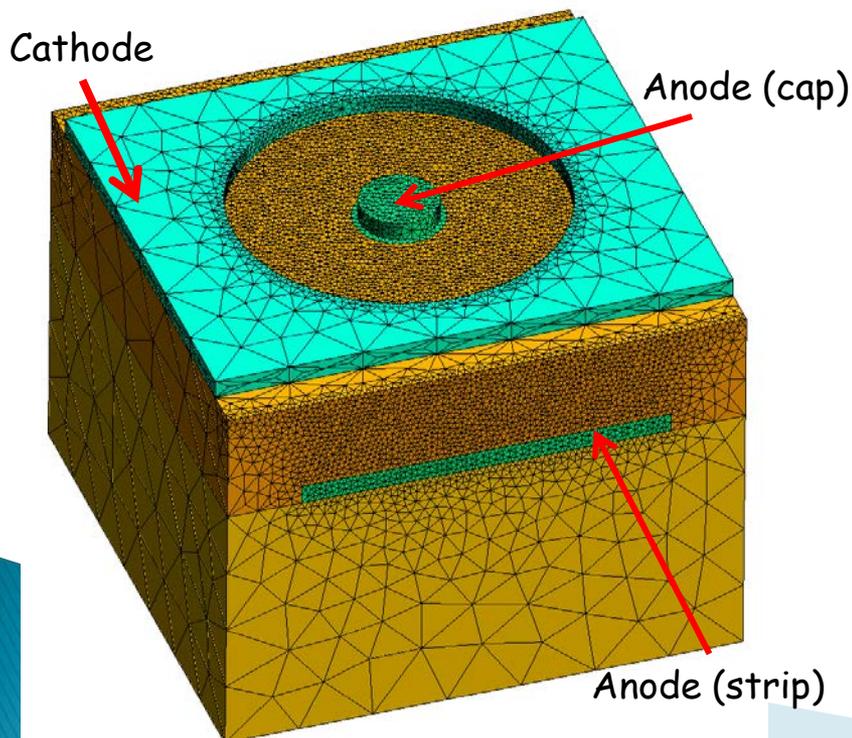
➤ Electric, Potential, Weighting Field

Elmerを用いて3次元的に計算

⇒ 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 μ -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...

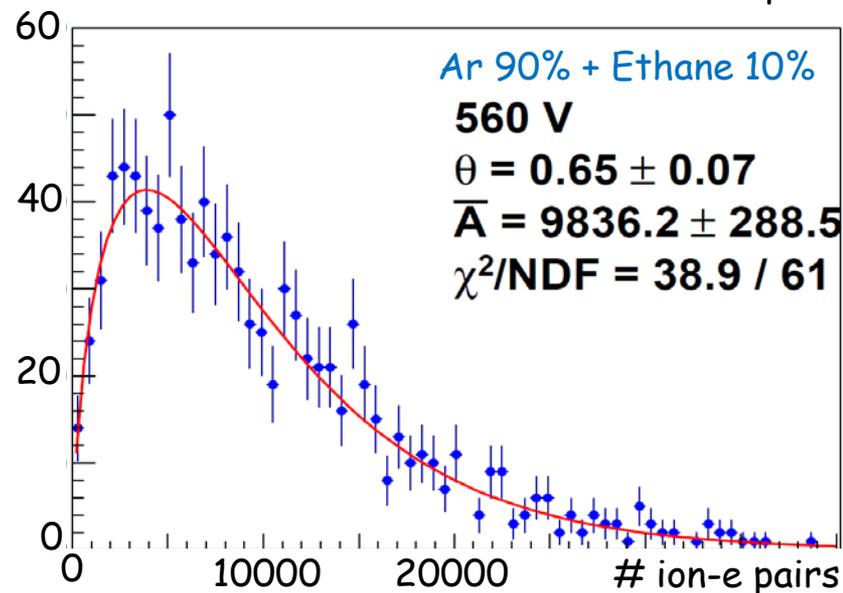
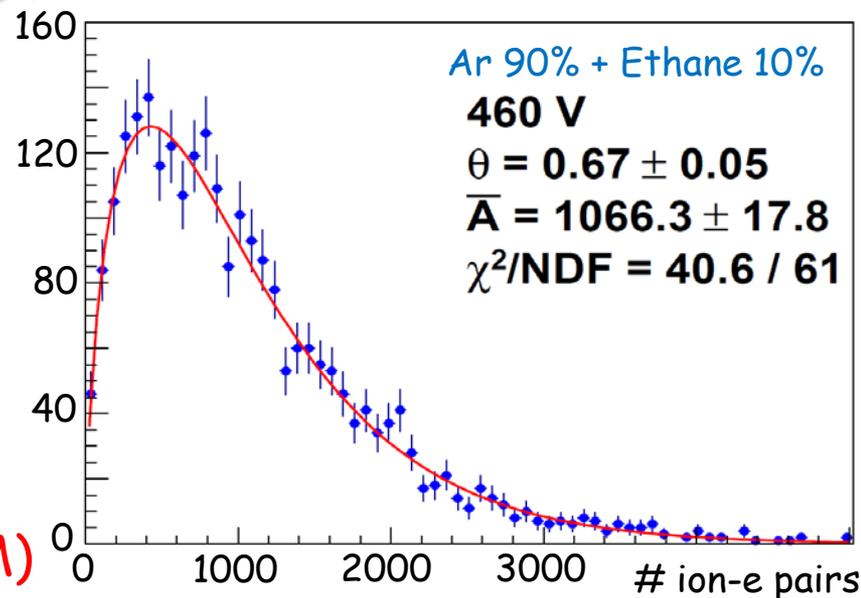
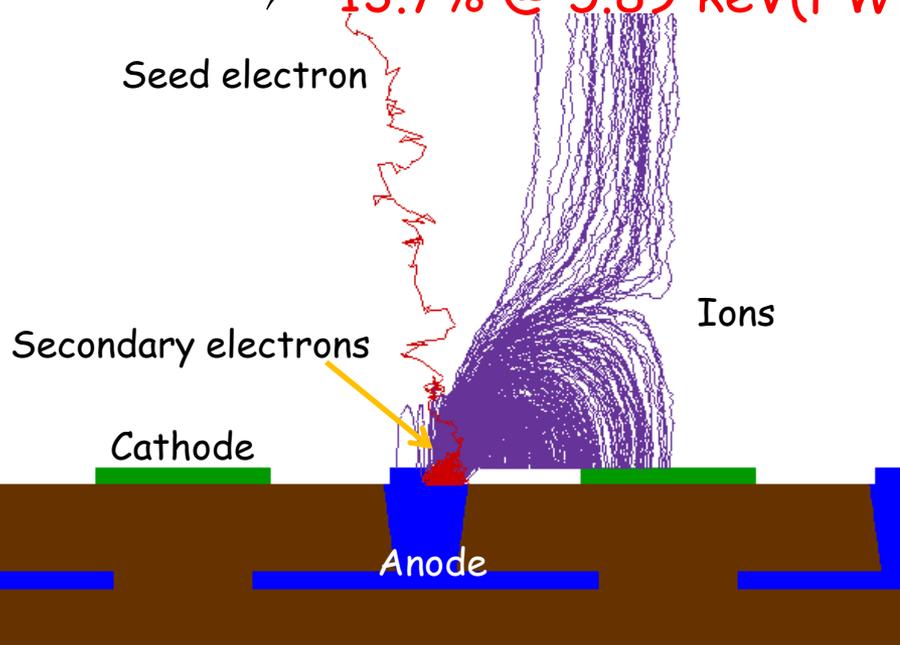
増幅率のゆらぎはPolya分布に従う

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

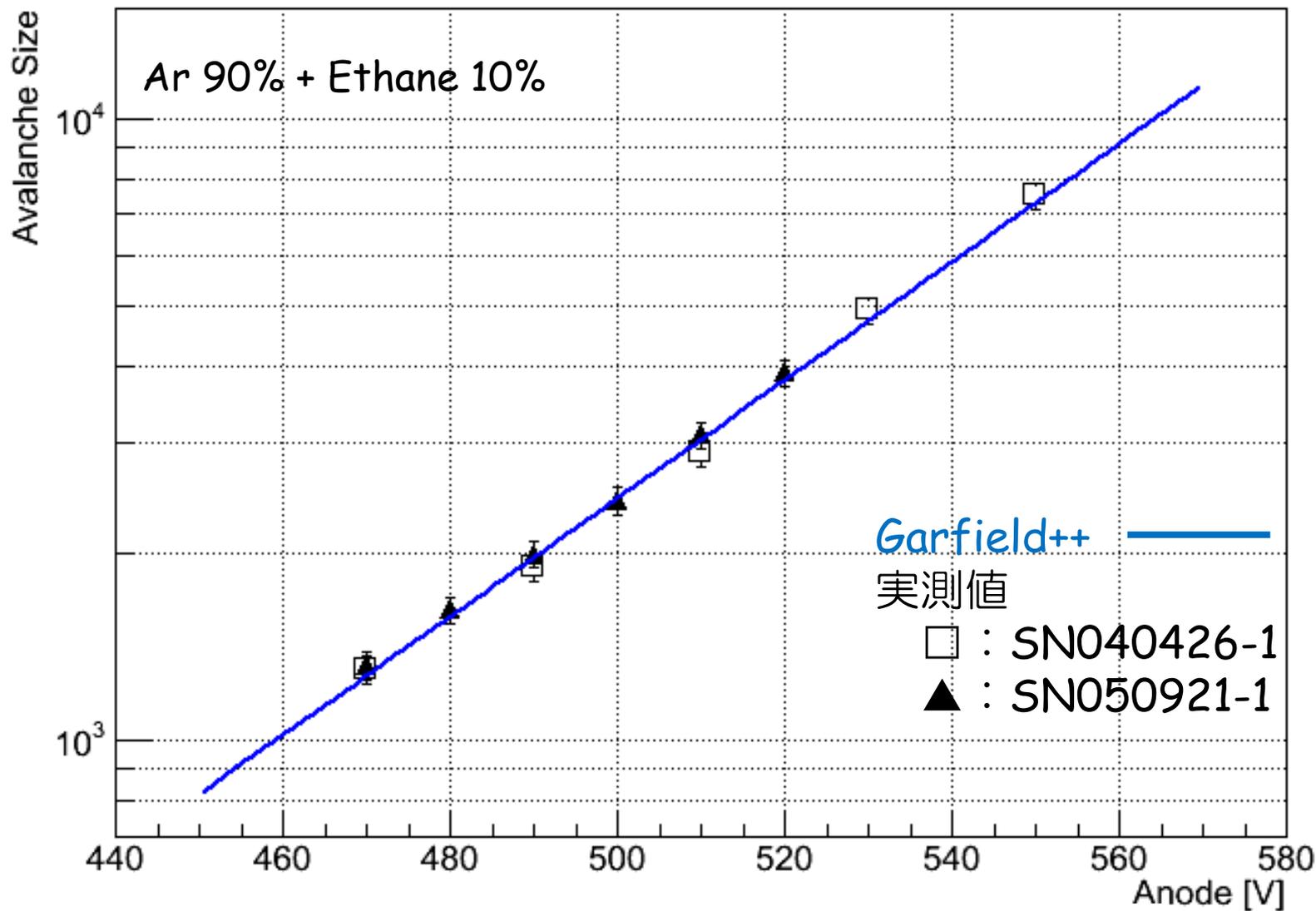
μ -PICのガス増幅率もPolya分布

θ はアノード電圧によらず ~ 0.65

⇒ **13.7% @ 5.89 keV (FWHM)**

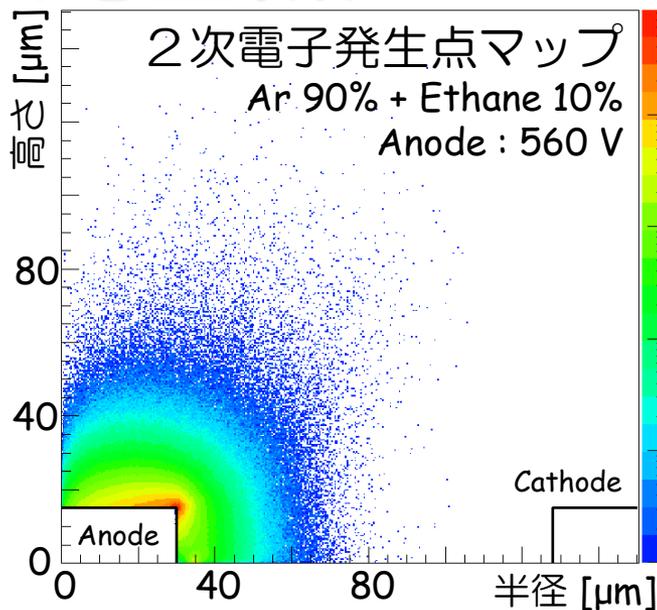
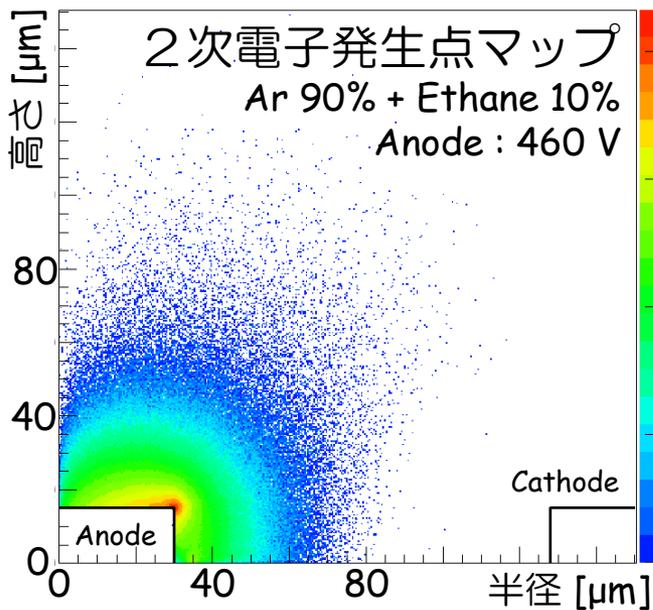


ガス増幅率のアノード電圧依存性



Garfield++による増幅率は実験値を良く再現

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

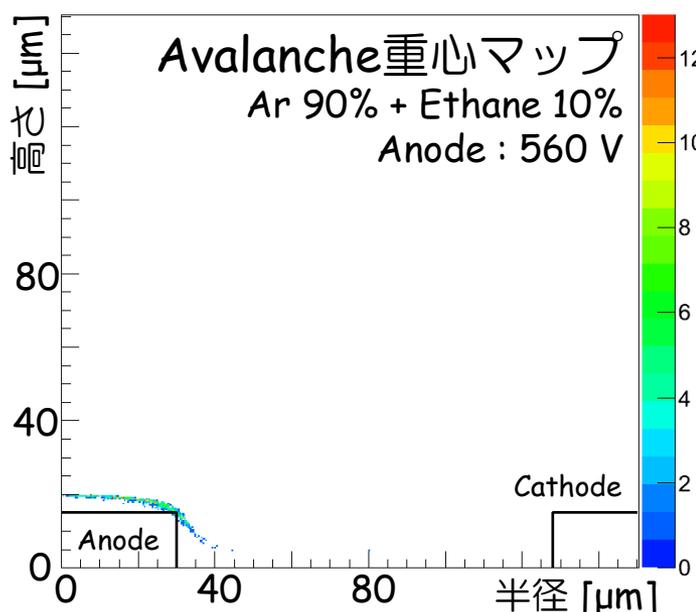
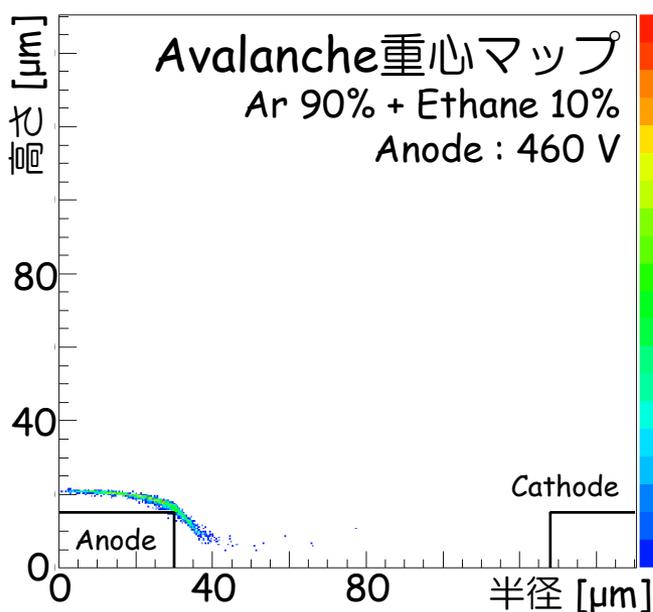
➤ 増幅の重心位置
アノードの
5 μm上に集中
電圧依存はあまり無い



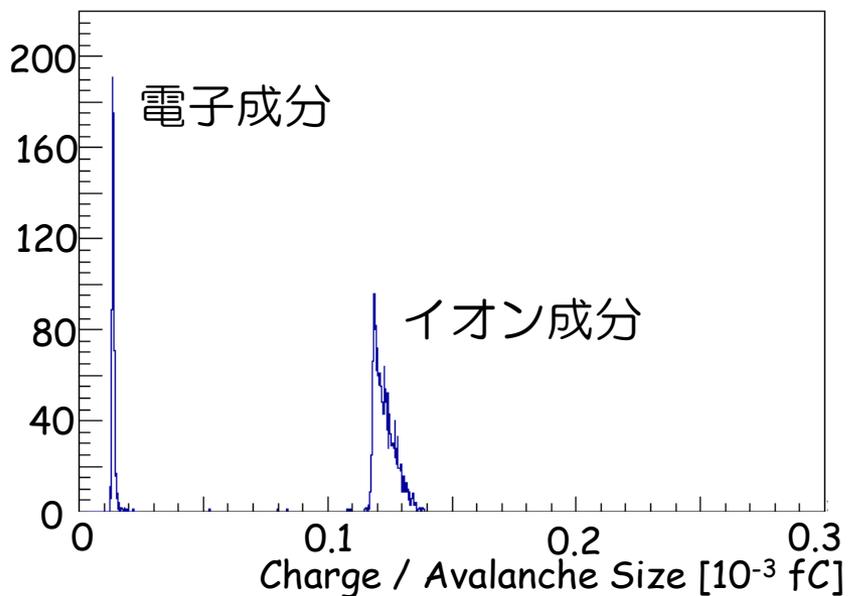
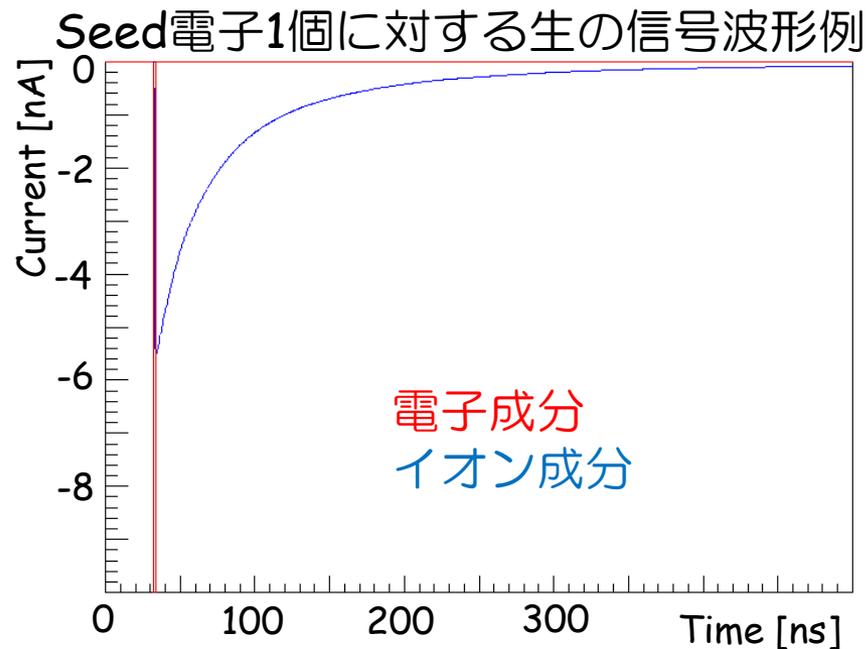
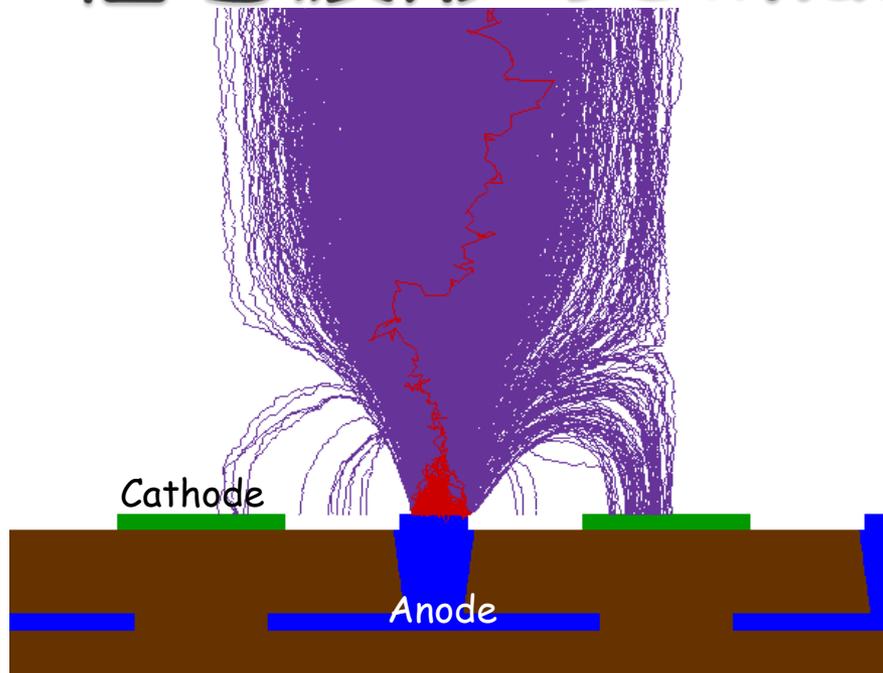
信号はイオン・電子の
移動による誘導電荷



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

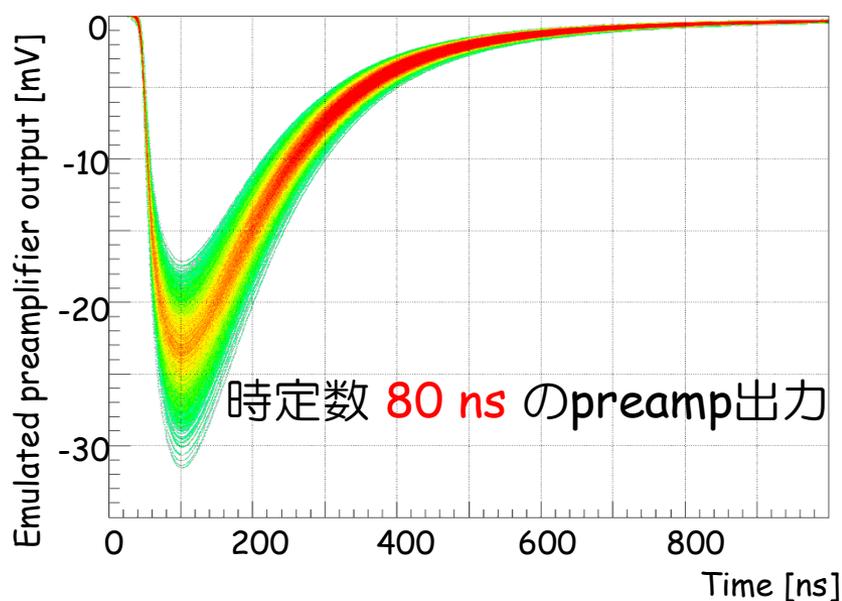
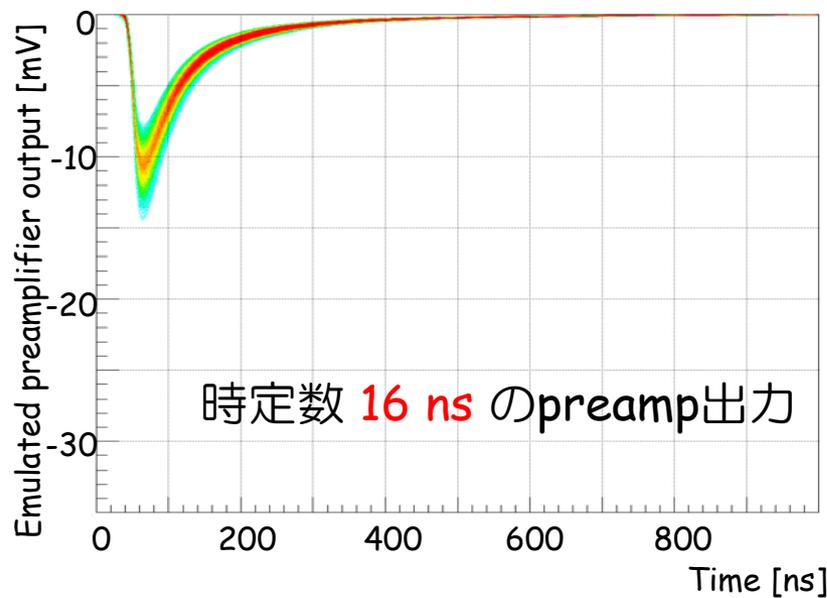
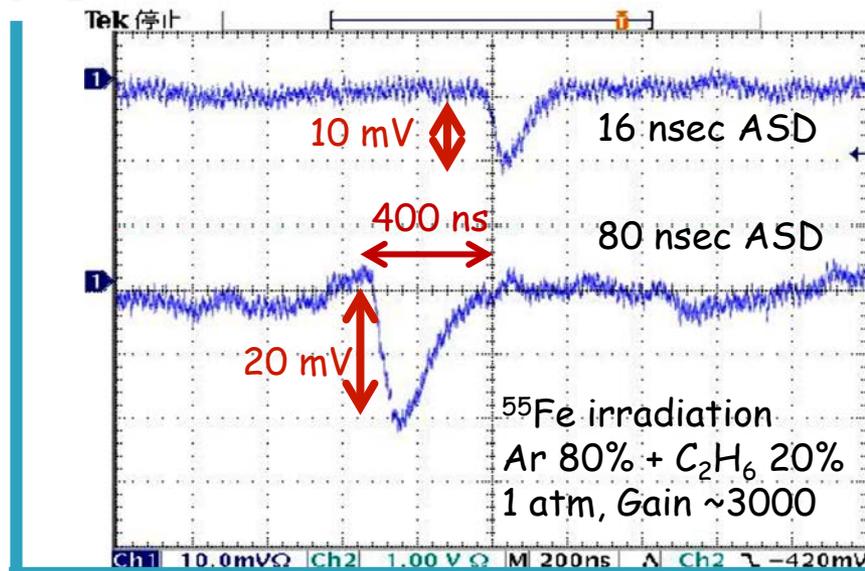
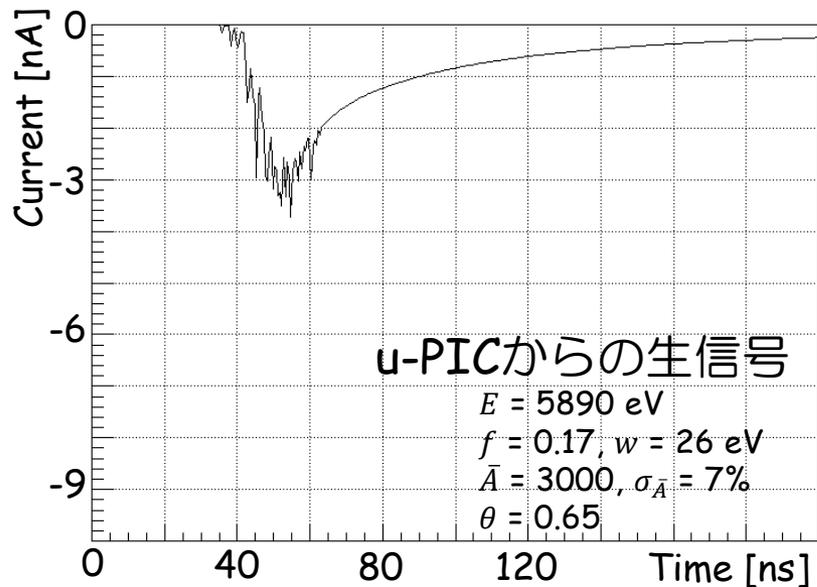


信号波形のSimulation



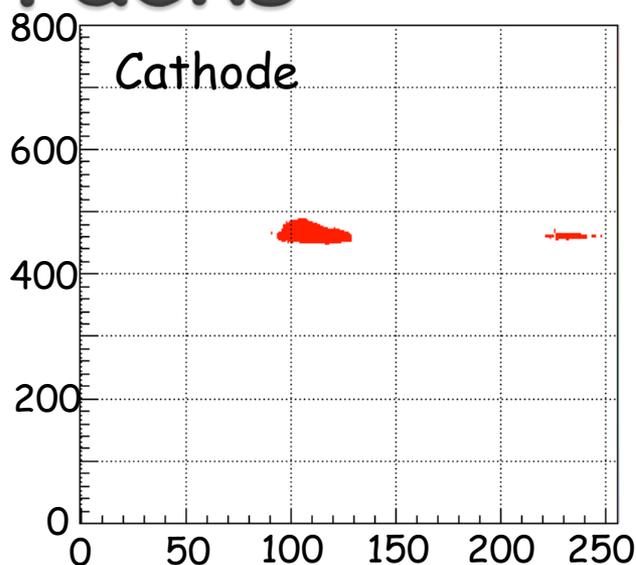
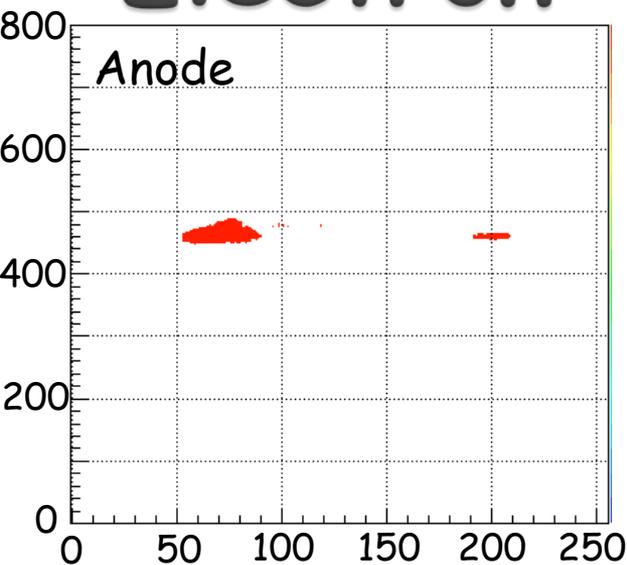
- 立ち上がりの時刻揺らぎ
⇒ Drift方向の拡散
- パルス幅1~2 nsecの鋭いスパイク
⇒ 電子による誘導電荷
- ~100 nsecのゆっくりした成分
⇒ イオンによる誘導電荷
- 電子成分：イオン成分 = 1：9
(μ -PICサイズの比例計数管 = 1：8.4)

^{55}Fe の信号の再現



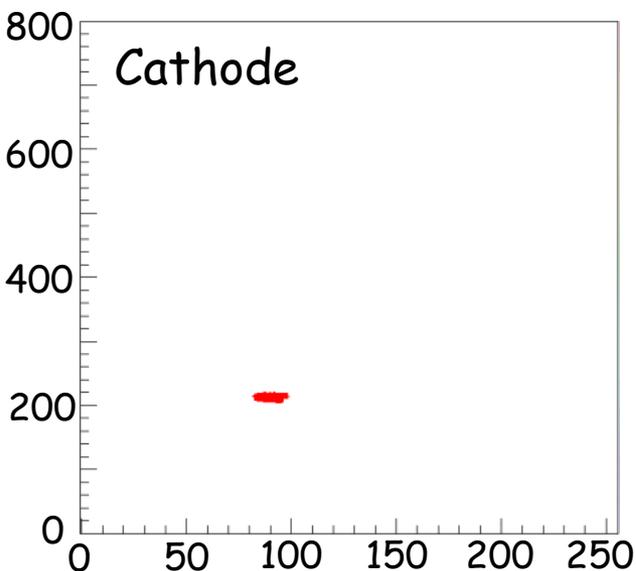
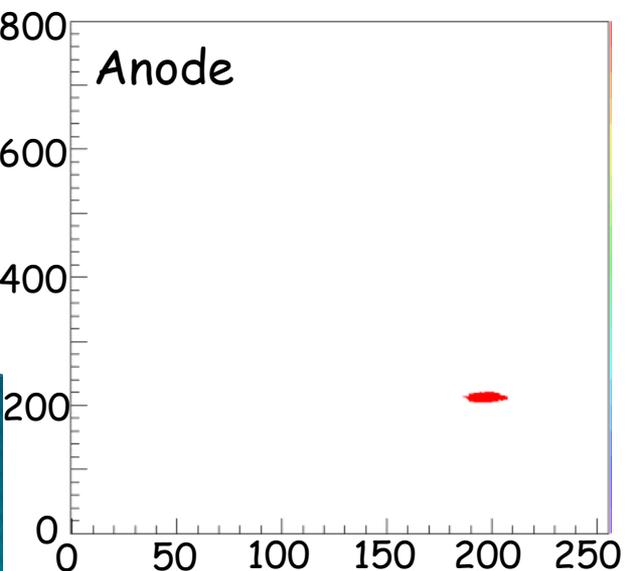
実験で得られたパルス高がSimulationで説明できた

Electron Tracks



実験で得た飛跡

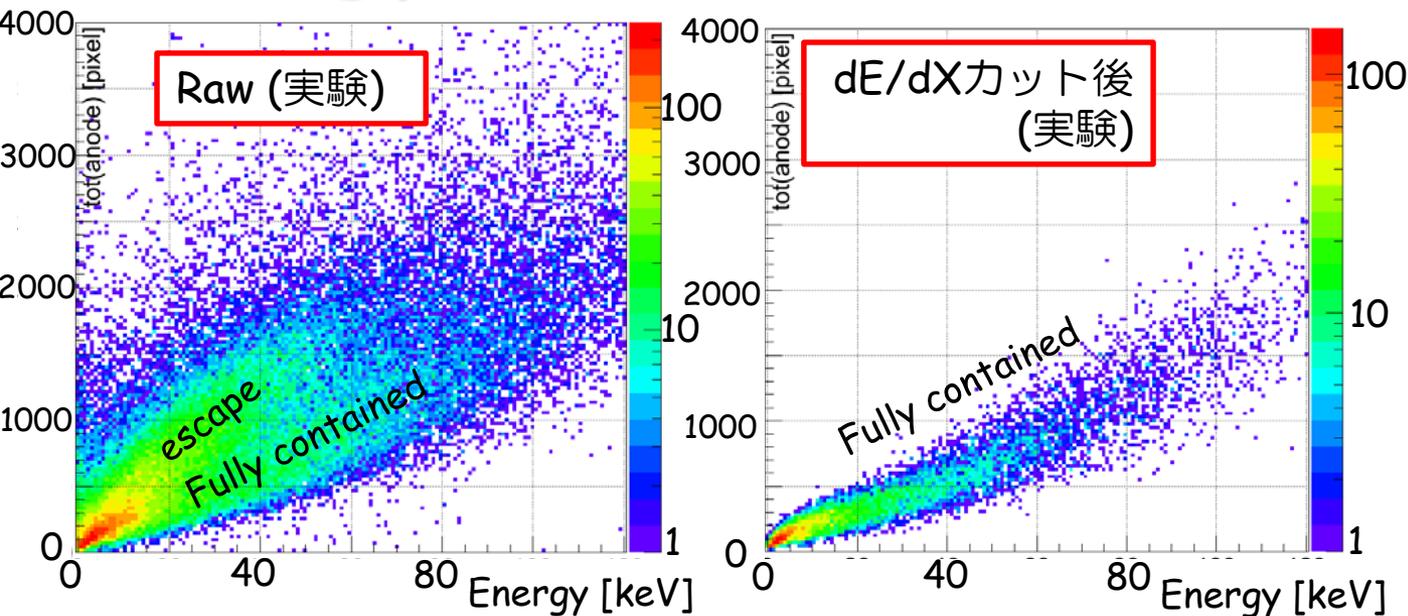
Ar + C₂H₆ (10%), 1 atm
Gain ~48000
Gain uniformity $\sigma = 15\%$
Threshold -18/+32mV
ASD 80ns
Drift 3.6cm/us
¹³³Ba irradiation



計算から得た飛跡

Ar + C₂H₆ (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

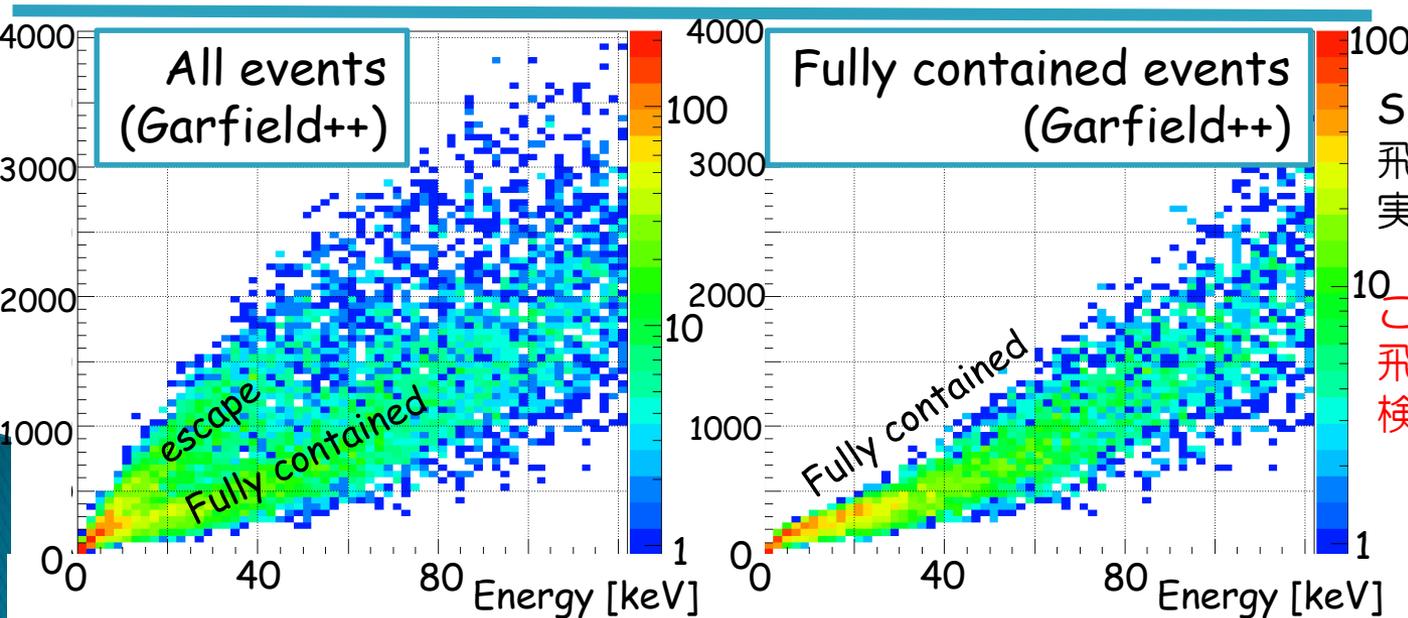


➤ Escape event
有感領域から
外へ出ていく電子

➤ 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



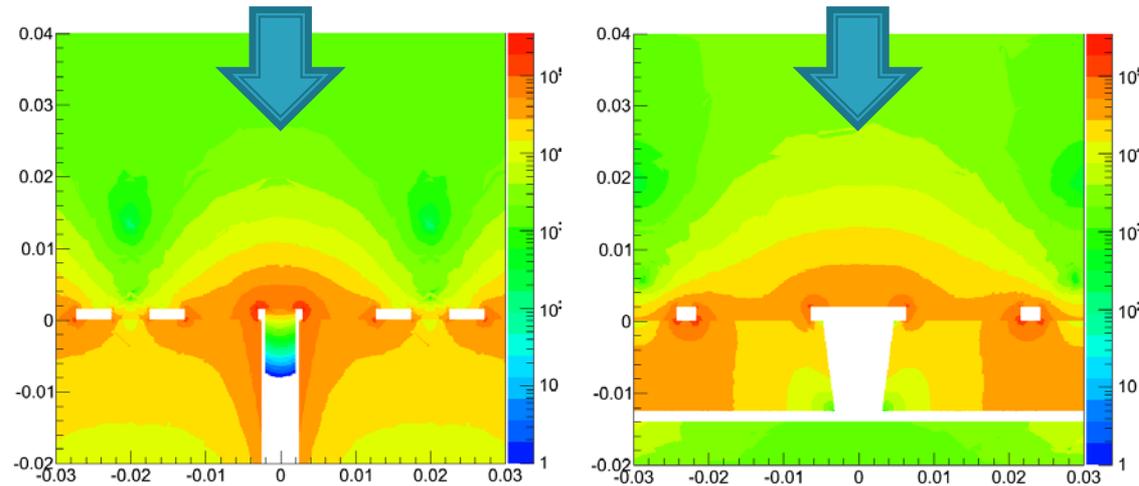
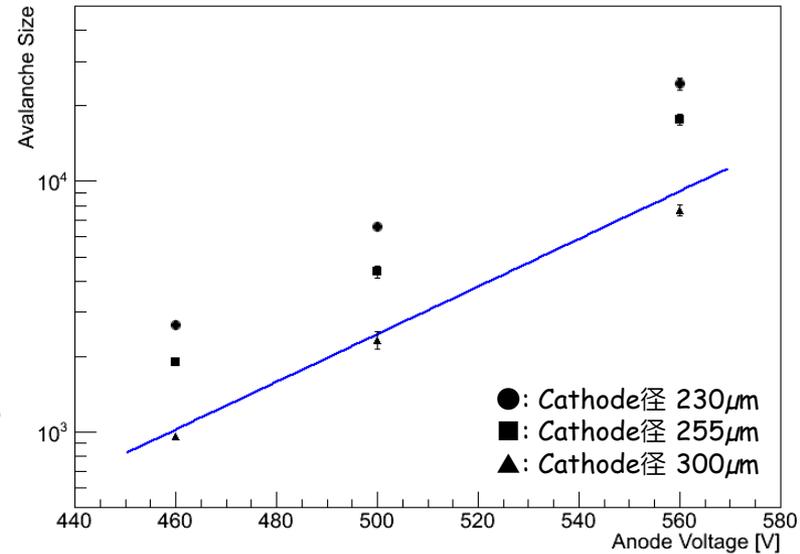
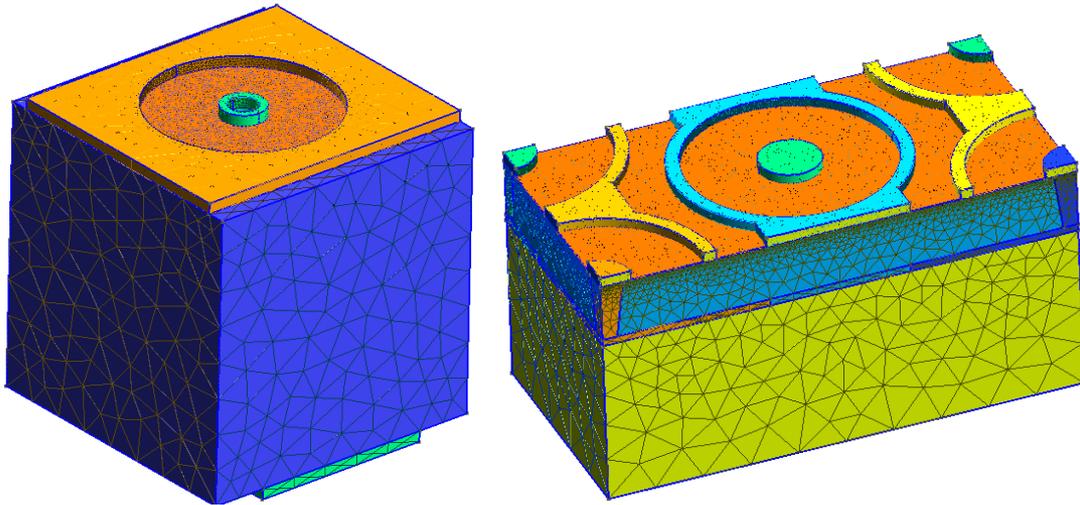
Simulationから得た
飛跡画像の面積は
実験結果を大よそ再現

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 μ -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： ≥ 100 ns
電子成分の電荷量：イオン成分の電荷量 = 1 : 9
- ▶ ^{55}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 : ~ 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

μ-PICの開発への応用

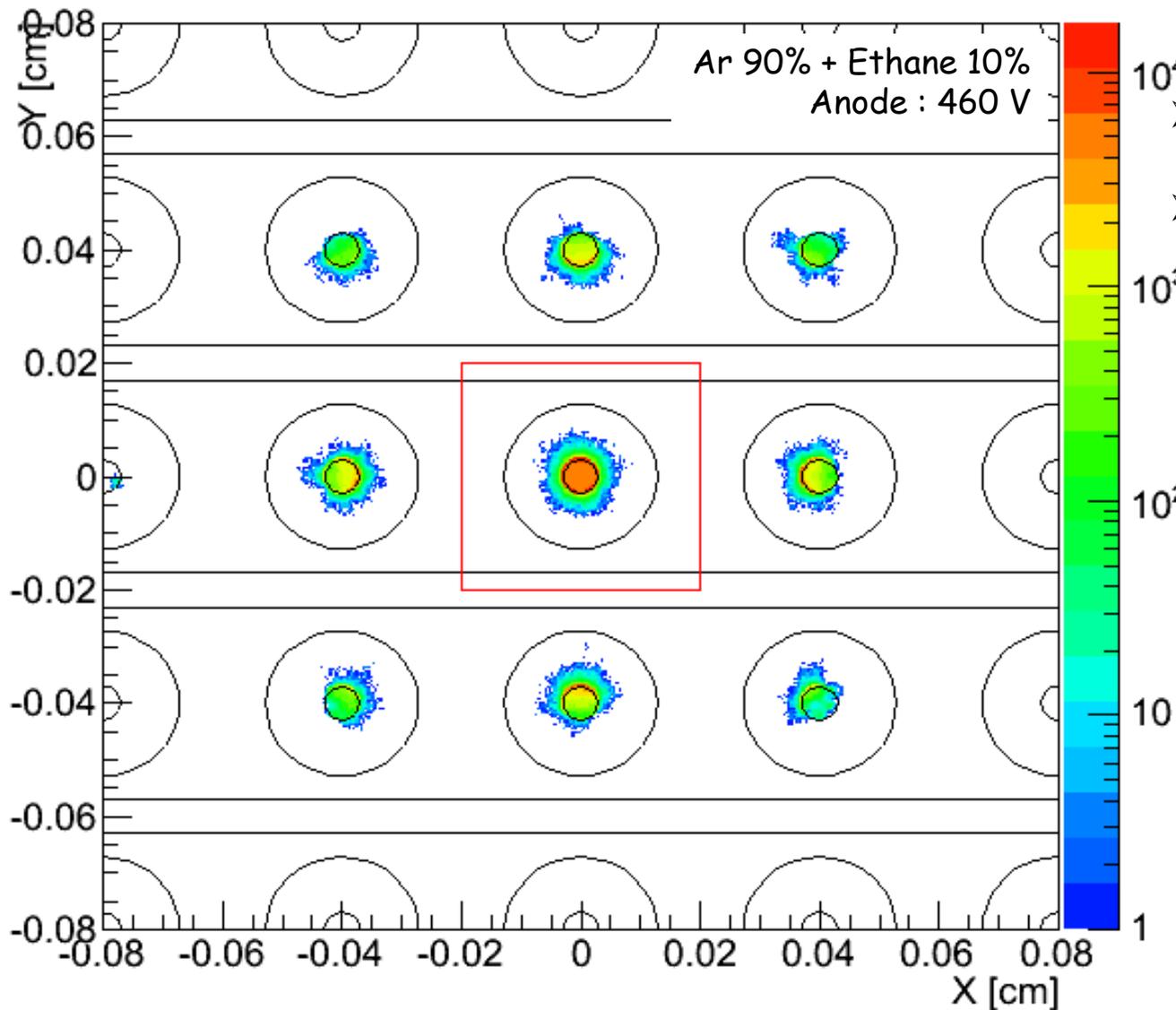


現状のμ-PICを良く再現
⇒ 電極構造の最適化も可能

より安定・高増幅率な電極構造の
Garfield++を用いた検討も開始
効率的な開発を可能に

おわり

増幅で生じた電子終着点

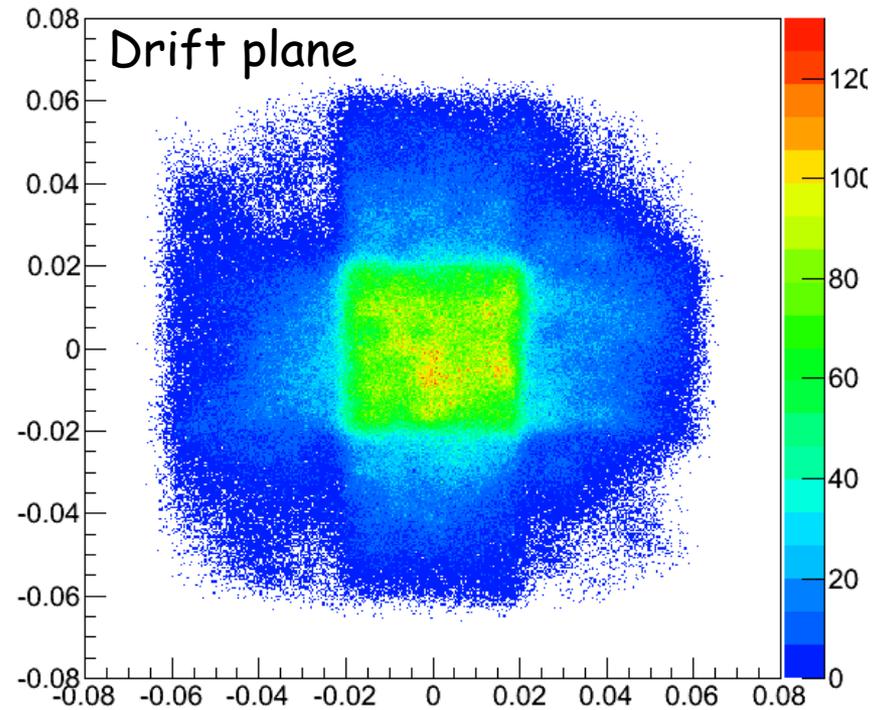
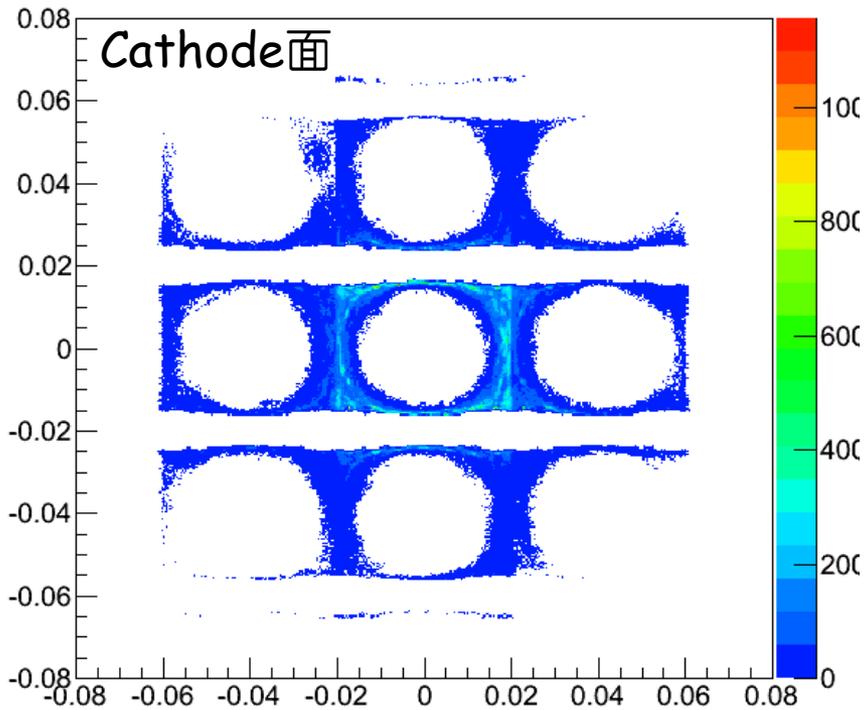


- 基板から1mm上方赤四角内から電子を発生
- ガス増幅により生じた電子の全てについて追跡

アノードに到達 **98%**
基板に降着 **2%**

以前のGarfieldでのSimulationをConfirm

Ion End Points



➤ Cathode行 : Drift plane行 = 1 : 1.67

^{55}Fe の信号を再現してみる

1. 電離電子の作成

Fano factorの考慮, 整数化

Ar ($w=26\text{eV}$, $f=0.17$) \Rightarrow 平均230個, $\sigma = 6.25$ 個

2. ドリフト時の拡散

縦方向 \Rightarrow 立ち上がりに影響 $\Rightarrow \sigma = \sim 5\text{ns} @ 1\text{cm drift}$

横方向 \Rightarrow イメージに影響

3. ガス増幅の揺らぎ

Single Electron SpectrumはPolya分布

$$\Rightarrow f(x) = \left(\frac{1.65x}{\bar{A}}\right)^{1.65} e^{-\frac{1.65x}{\bar{A}}}$$

4. 波形の揺らぎ

Garfield++で計算した波形をテーブル化して対応

\Rightarrow 波形を2000通り用意

5. 足し合わせ

6. 回路のレスポンス

ここで初めて実験と比較可能 \Rightarrow ASD(16ns/80ns)を考慮

