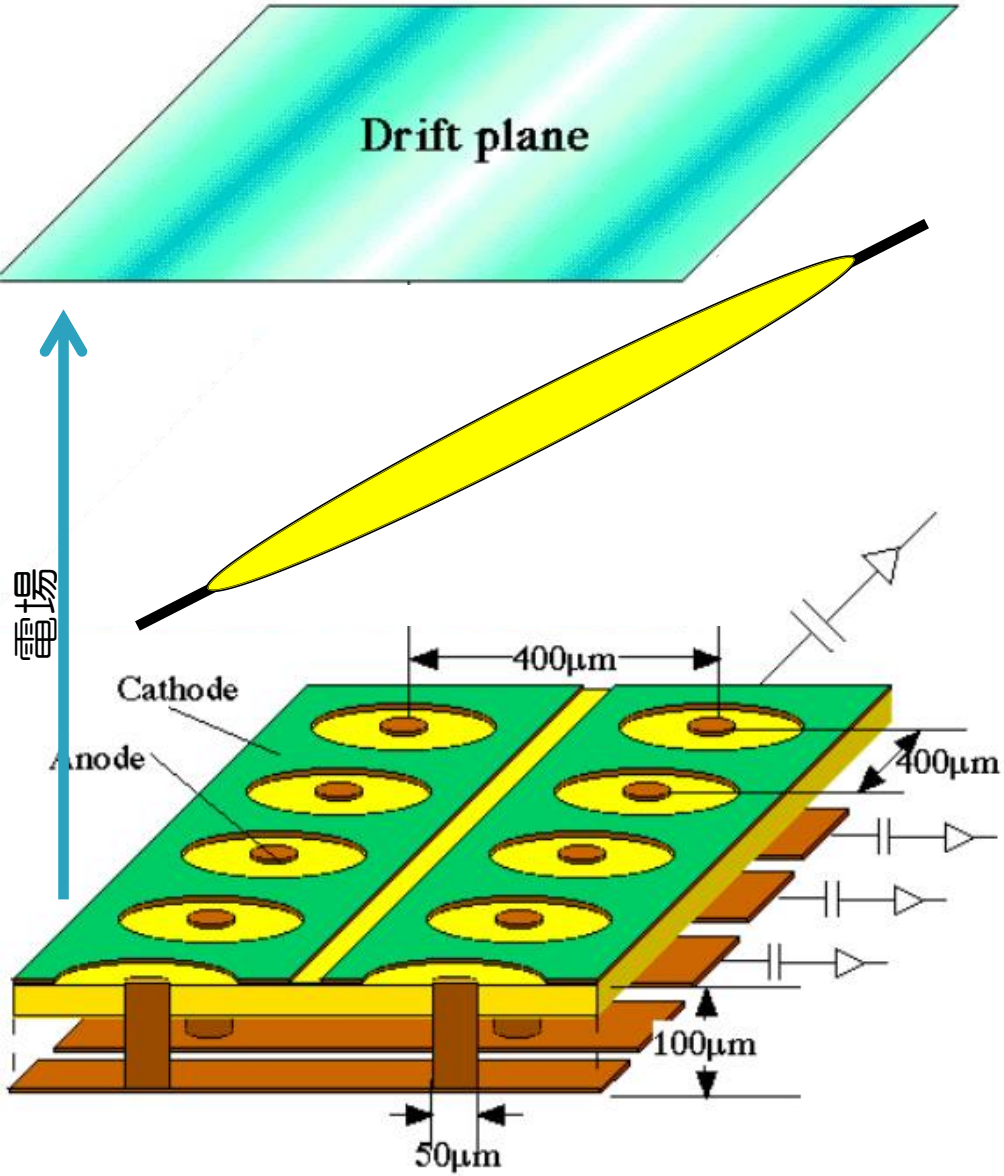
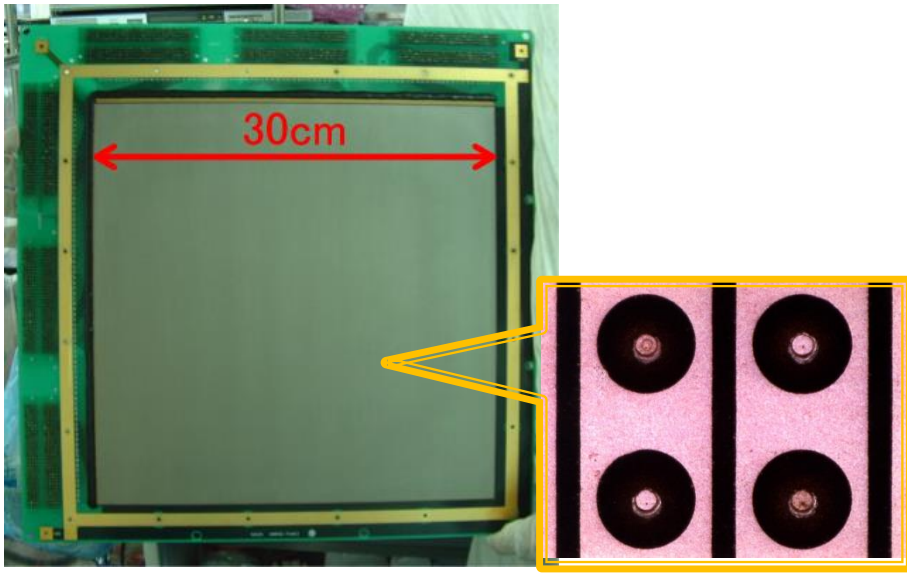
再構成電子飛跡の高精度化を目指した3軸μ-PICの開発

阿部 光, 谷森 達, 髙田 淳史, 池田智法, 吉川 慶, 吉田 有良, 荻尾 真吾, 津田 雅弥, 園田 真也, 古村翔太郎, 岸本 哲朗, 竹村 泰斗, 中村 優太, 小野坂 健, 斎藤 要, 水本　哲矢,（京都大), Joseph Parker (CROSS), 身内 賢太朗 (神戸大), 澤野 達哉 (金沢大), 水村 好貴 (JAXA)

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 μm
- 個々のピクセルでガス増幅
- 大面積： 10×10 cm^2 and 30×30 cm^2
- 大きな増幅率：max ~15000
- 高い位置分解能：RMS ~120 μm
- 均一な応答：RMS ~5% (10×10 cm^2)
- １ヶ月を超える連続安定動作が可 (@ gain ~6000)

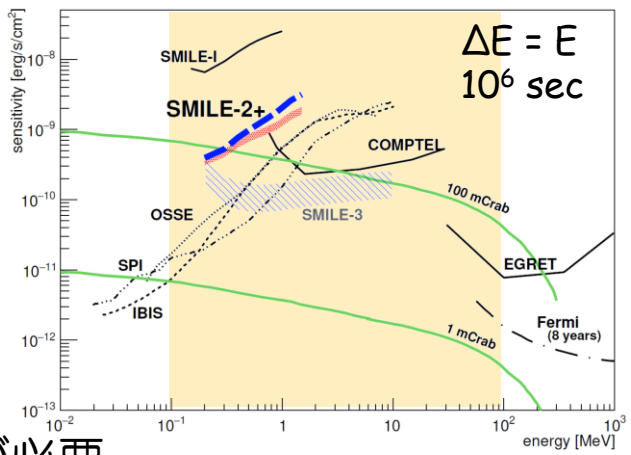


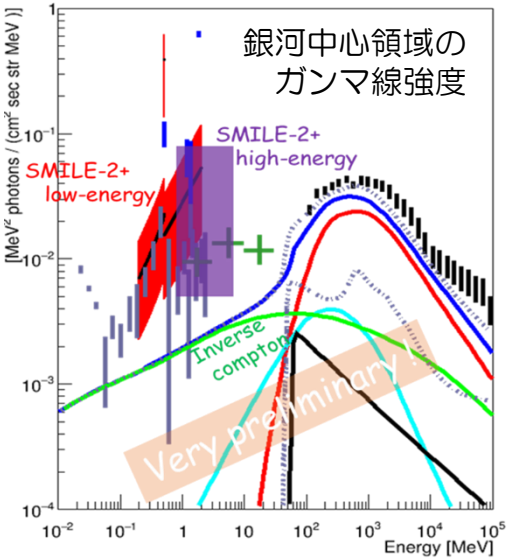
MeVガンマ線望遠鏡とμ-PICへの要求

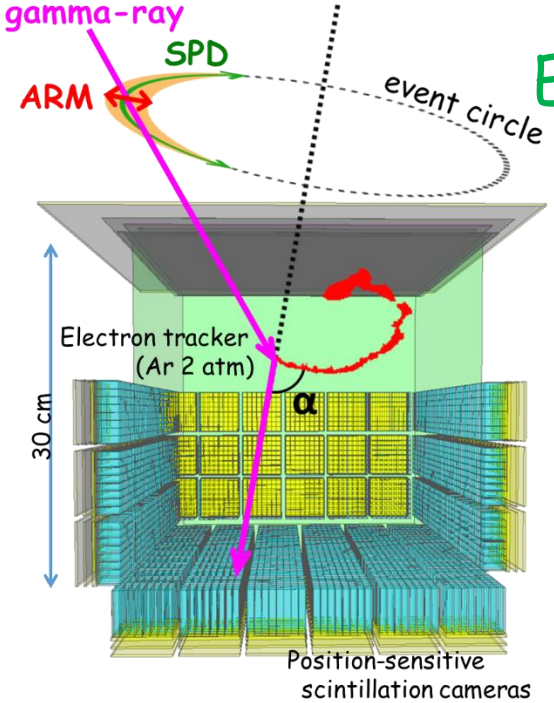
MeVガンマ線天文学

17pSM10, 17pSM11

- 0.1-100 MeVでの宇宙探査
- Science:
  元素合成・粒子加速・
  PBH・物質循環・銀河進化
  …etc
- 高角度分解能・低雑音な観測が必要







Electron-Tracking Compton Camera (ETCC)

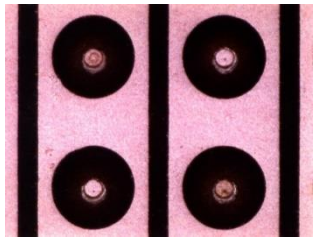
- μ-PICによるTPC
  ⇒ 反跳電子のエネルギー, 散乱点, 反跳方向
- シンチレータ
  ⇒ 散乱ガンマ線のエネルギー, 吸収点

⇒
- ✓ 事象毎に到来方向が一意に決定
- ✓ 余剰のパラメータを用いた雑音除去

μ-PICへの要求

- 高利得化・安定化 ⇒ ガラス基板の採用
  (2018年秋季大会 阿部講演)
- 電子飛跡の詳細化 ⇒ 今回の話

直交型strip電極の問題点と3軸化



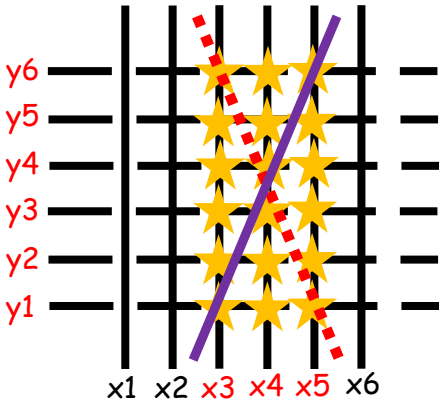
400 μm pitch, 30 cm角　＝　589,824個の比例計数管

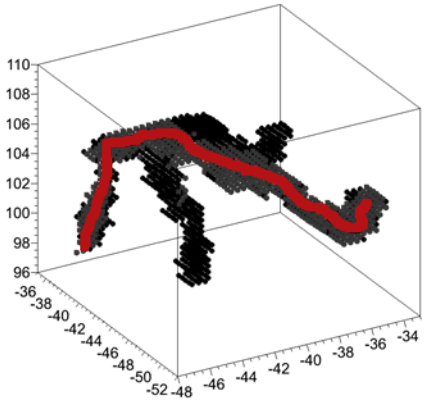
⇒　回路数の削減 (=電力の削減) の為

直交strip型電極で読み出し　1,536 ch

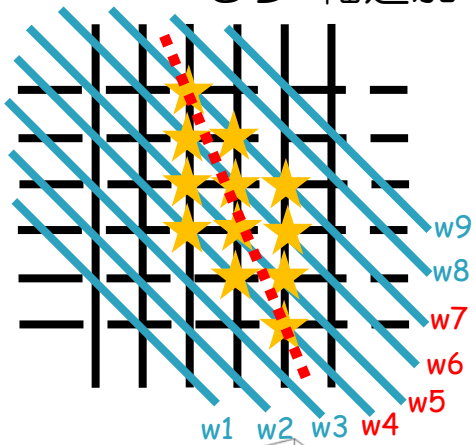
⇒　但し3次元飛跡に大きな不定性を残す

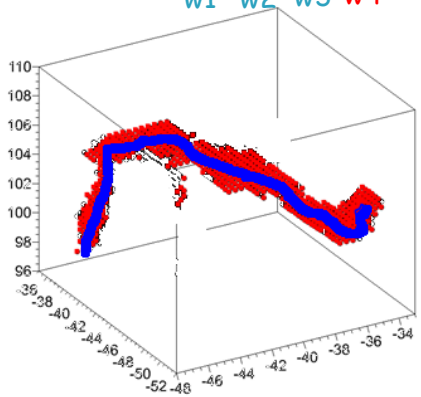
現行のμ-PIC

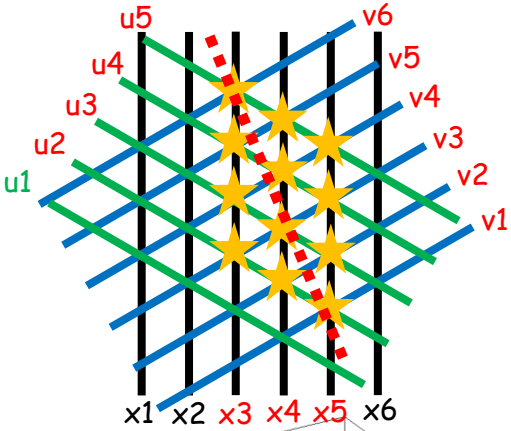


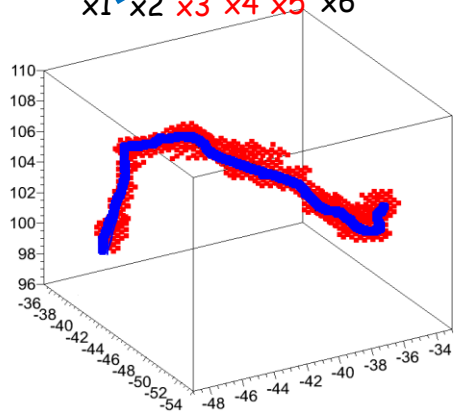


もう1軸追加できれば・・・





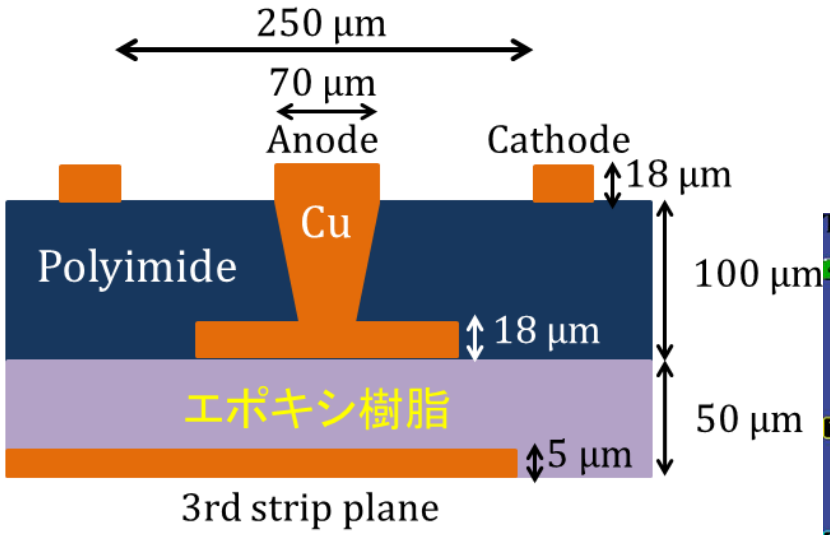




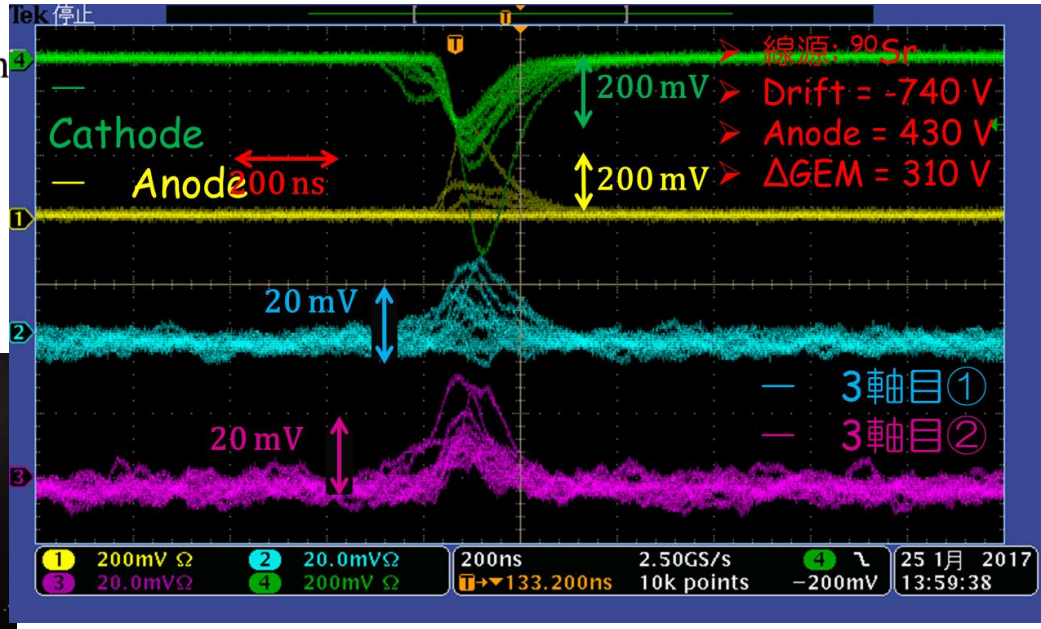
飛跡の不定性をある程度解く事が可能に！

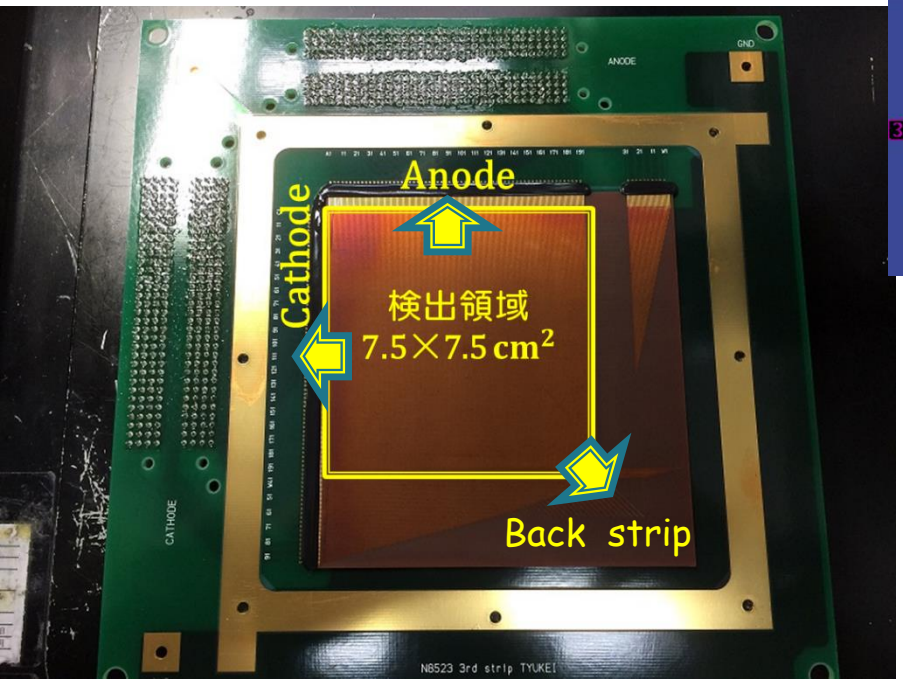
過去のアプローチ

(2017年秋季大会 谷口講演)



- プリント基板 (PCB)
- μ-PICの検出領域： 7.5 ×7.5 cm^2
- 直交型 + 斜め45度のback strip





3軸目からの信号は確認

Anode : Cathode : back strip = 1 : 1 : 0.1

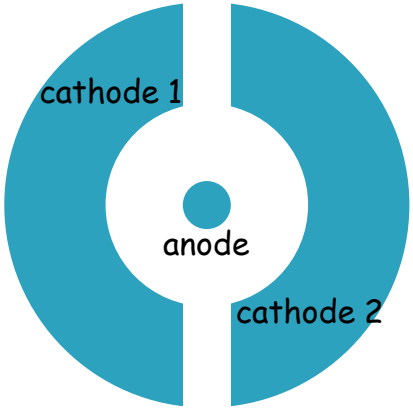
読み出しアンプの増幅率を上げる

or

avalancheで生じたイオン・電子を直接見るような電極構造に変える

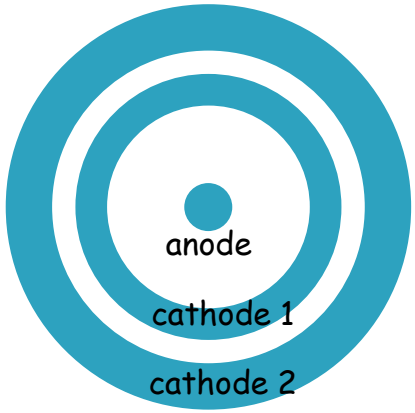
3軸μ-PICの設計

- 全ての電極でイオン・電子を直接観測するように配置
  - ⇒　3軸目の信号が1/10より大きくなる(事を期待)
  - cathodeを分割するような構造
- Anode周辺の構造は、現状の物を踏襲
- 絶縁体としてガラス基板を採用
  - ⇒　ガス増幅は確実に
- Cathode面積はある程度確保する必要あり　(2016年秋季大会 竹村講演)
  - ⇒　Cathode面積が小さいとガス増幅も小さい



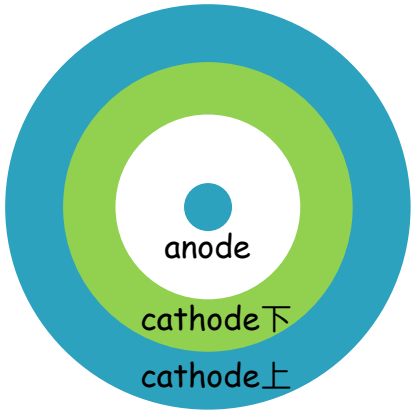
左右分割型

× Avalancheの場所により
電荷分割比率に大きな差が生じる
× cathodeの角での放電が怖い



同心円型

× cathode間のgapが意外に大きい
△ gap間にイオンが落ちると
charge upが起こる？
○ cathode面積の調整で
電荷分割比をコントロール可



段重ね型

△ 電極構造が立体的
作れるのか？
○ cathode面積の調整で
電荷分割比をコントロール可

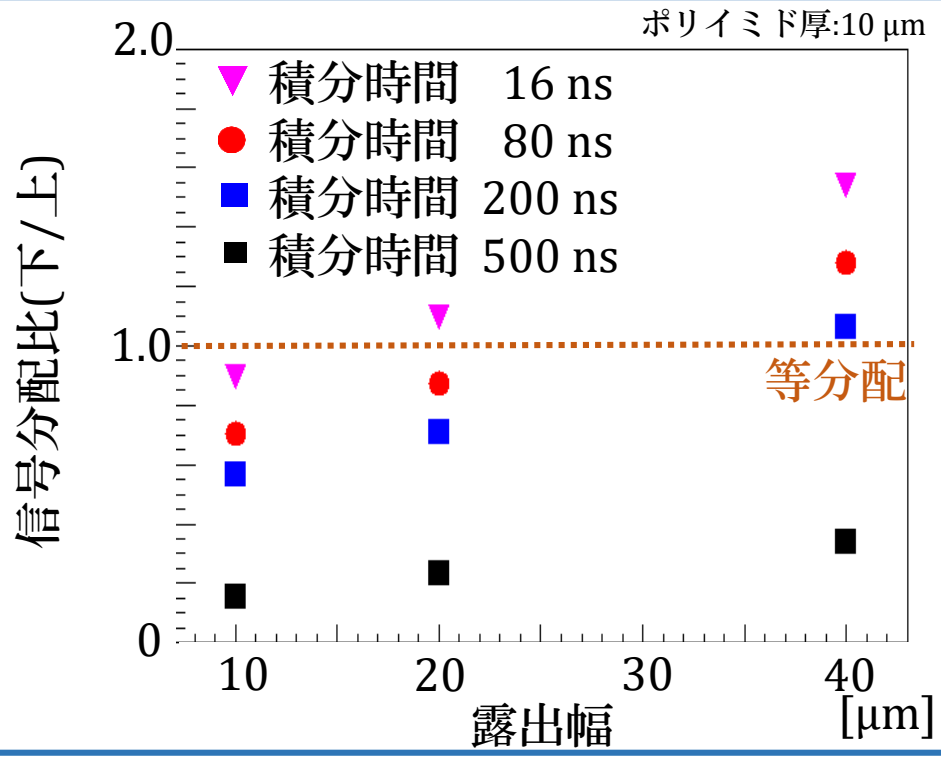
これを採用

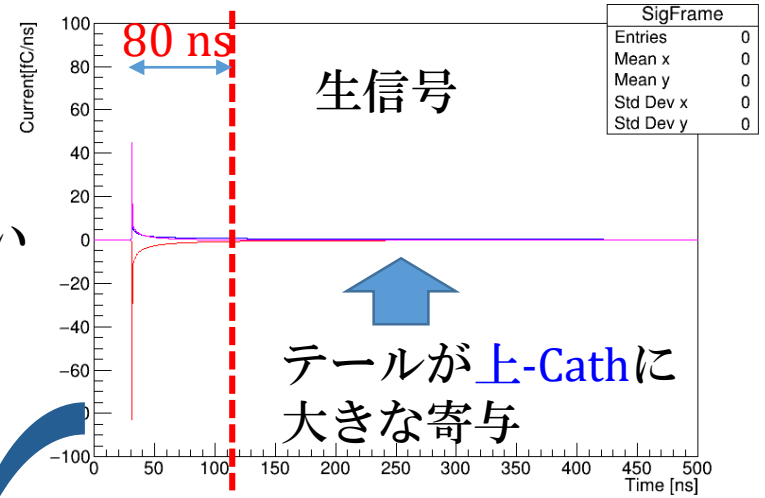
(2018年秋季大会 阿部講演)

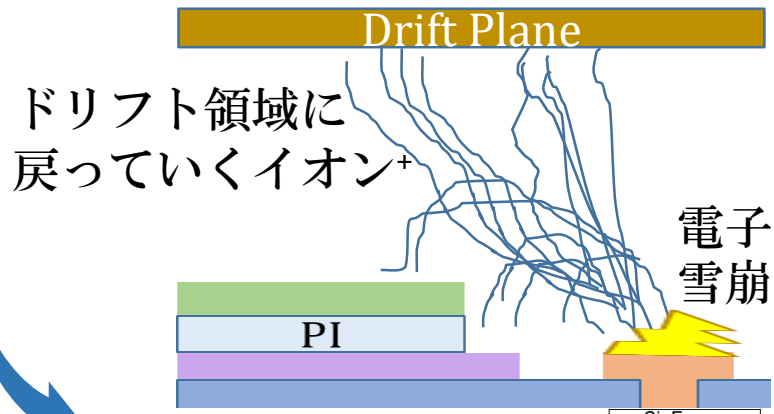
上,下-Cathodeの信号分配

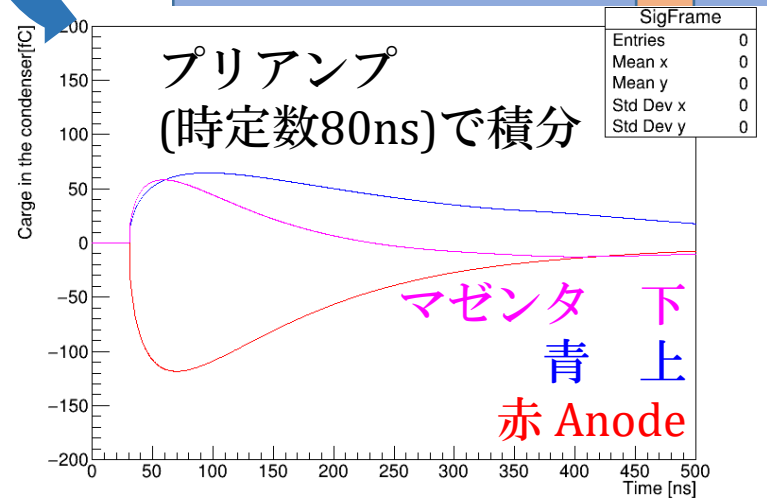
上,下-Cathodeの信号の大きさが同じくらい
⇒同じアンプで読み出せるので(経済的に)うれしい

信号の大きさの比の平均値vs下-Cathの露出幅





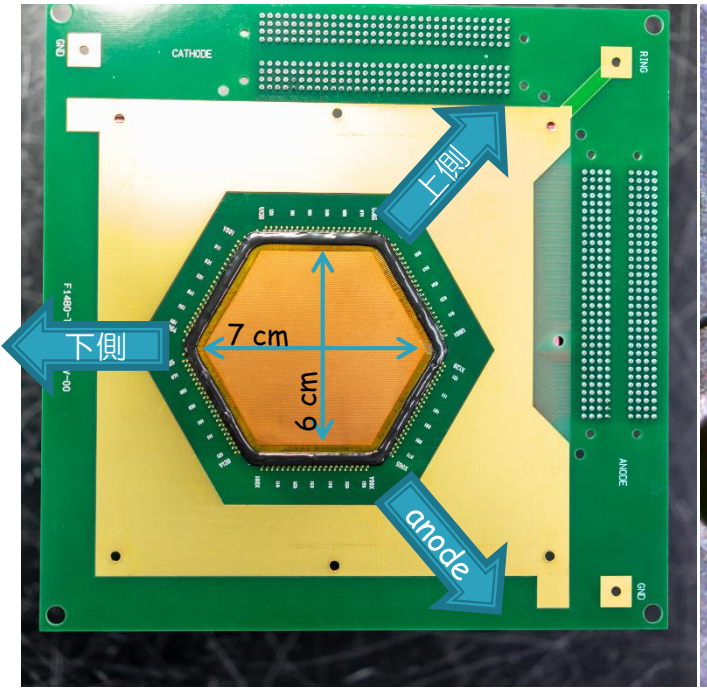


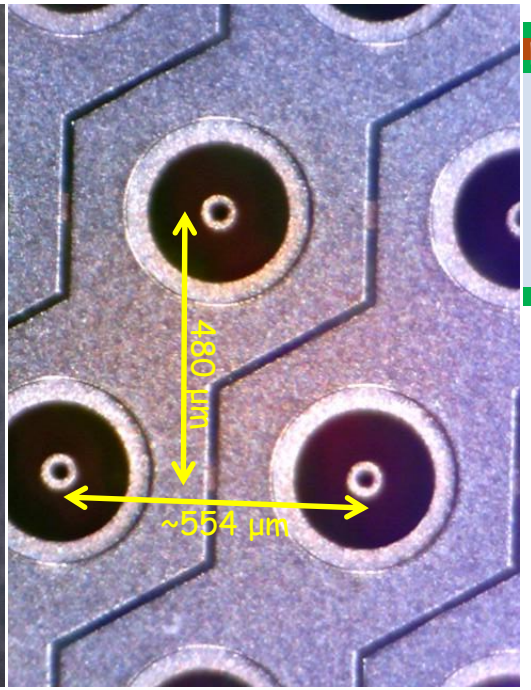


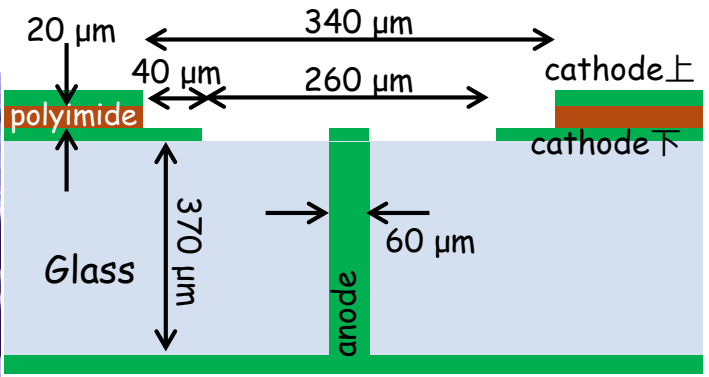
時定数~80 nsで信号を切れば、
おおむねどの露出幅でも
同じアンプで読み出せる

大日本印刷との共同研究による開発

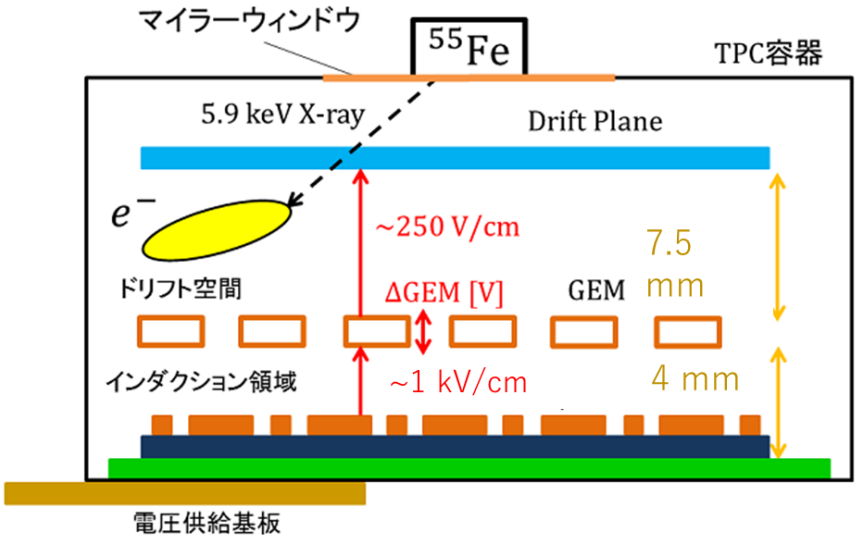
製作した3軸μ-PIC

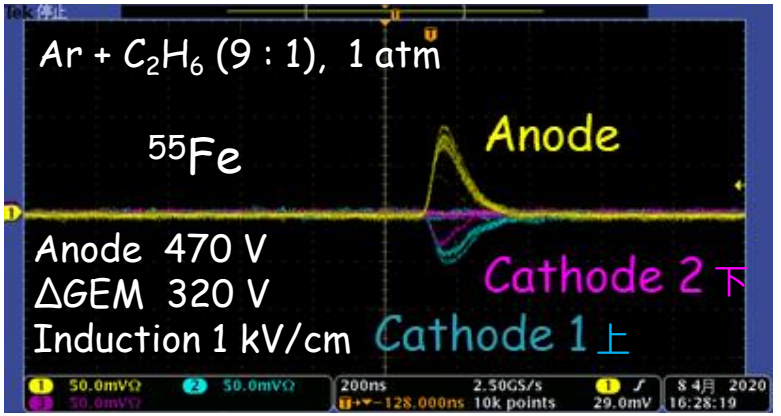






- TGV μ-PIC
- 最密充填なpixel配置
- 各軸のなす角は120°
- 各軸に128 strip
- Strip電極のpitch：480 μm
- Pixel間距離：~554 μm

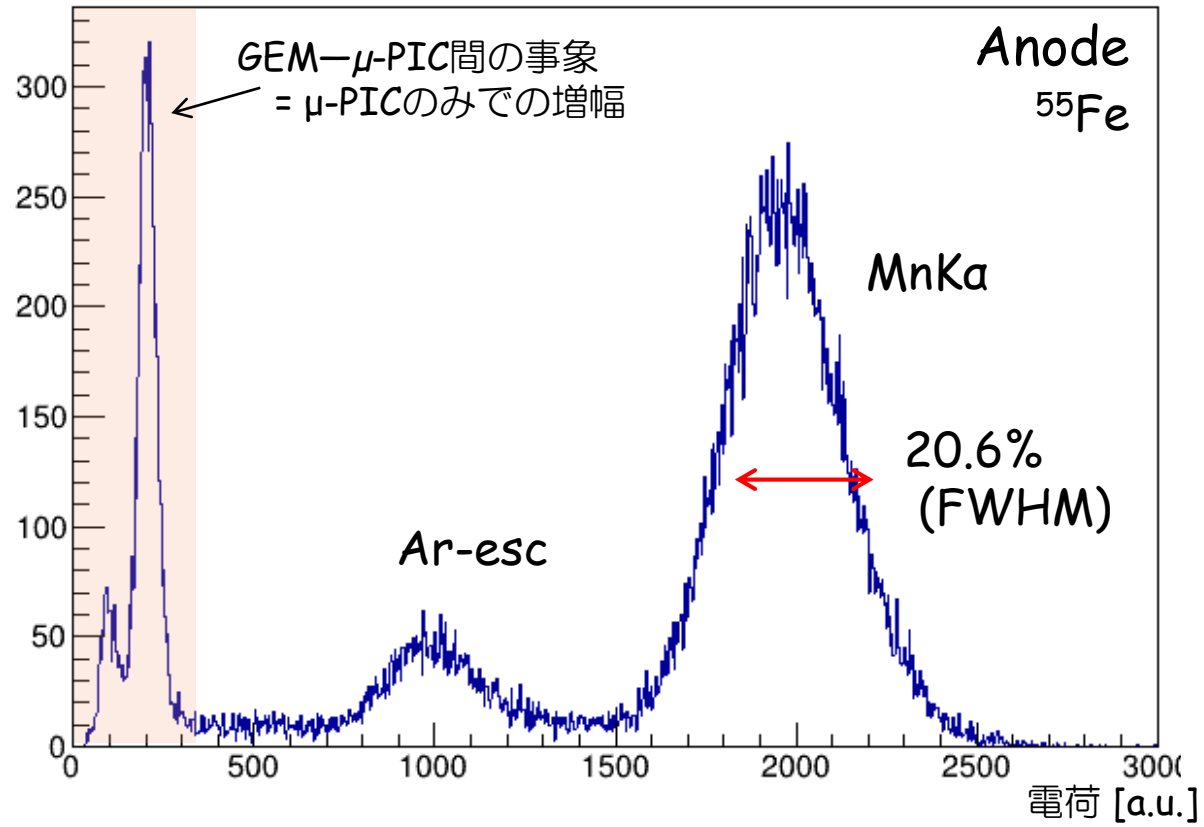


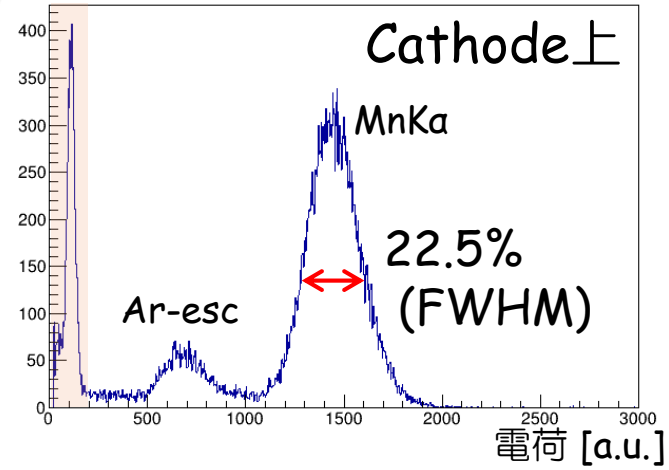


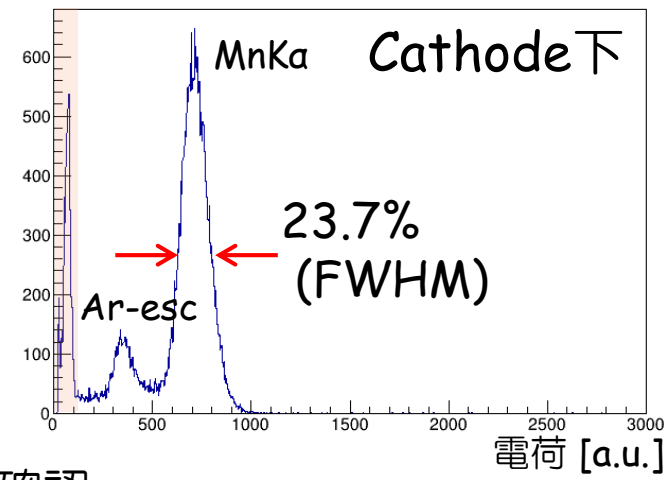
^{55}Feの信号を各軸で確認！

エネルギースペクトル

Anode 510 V
ΔGEM 320 V
Induction 1 kV/cm

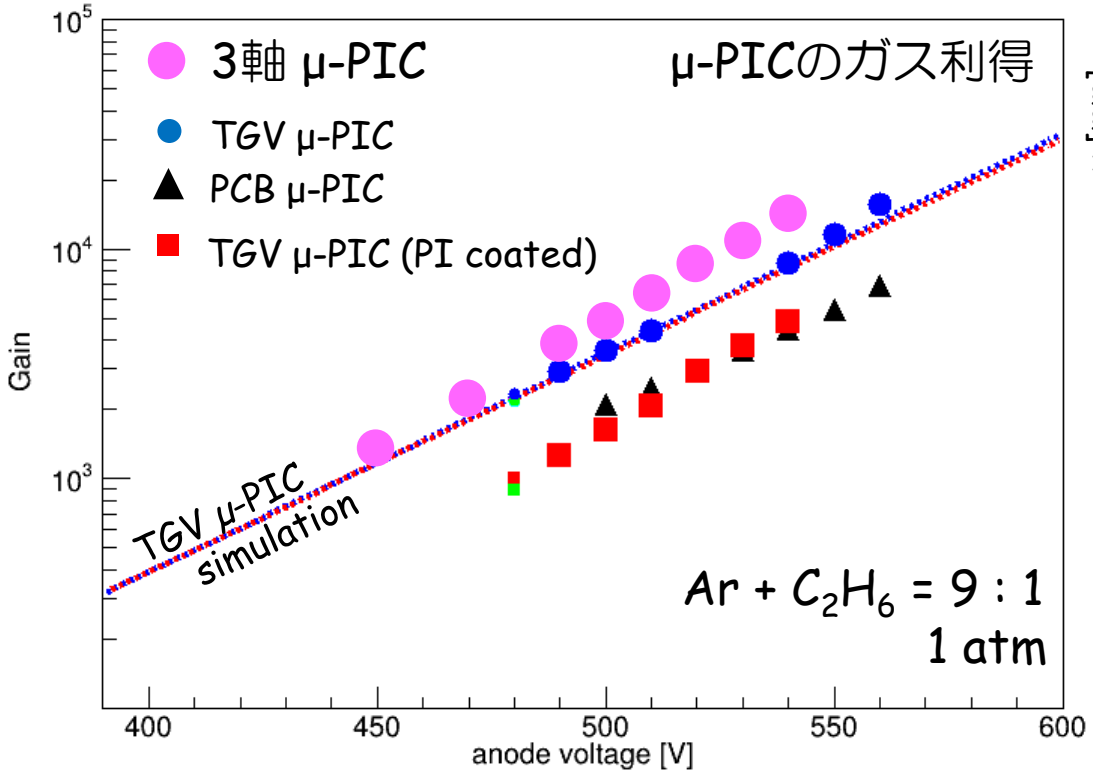


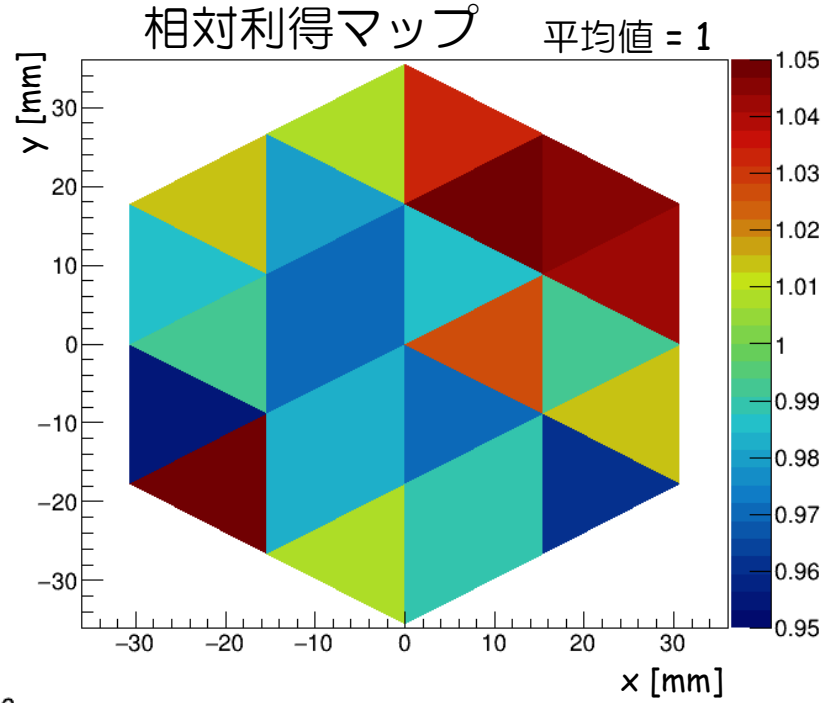




- 電荷積分により3軸全てで^{55}Feのスペクトルを確認
- 電荷比は anode : cathode上 : cathode下 ≃ 3 : 2 : 1
  ⇔ 電圧比では anode : cathode上 : cathode下 ≃ 2 : 1.5 : 1
  (cathode下の波形の違いが反映)
- エネルギー分解能は全面で20.6% (FWHM)を達成

Gain curve



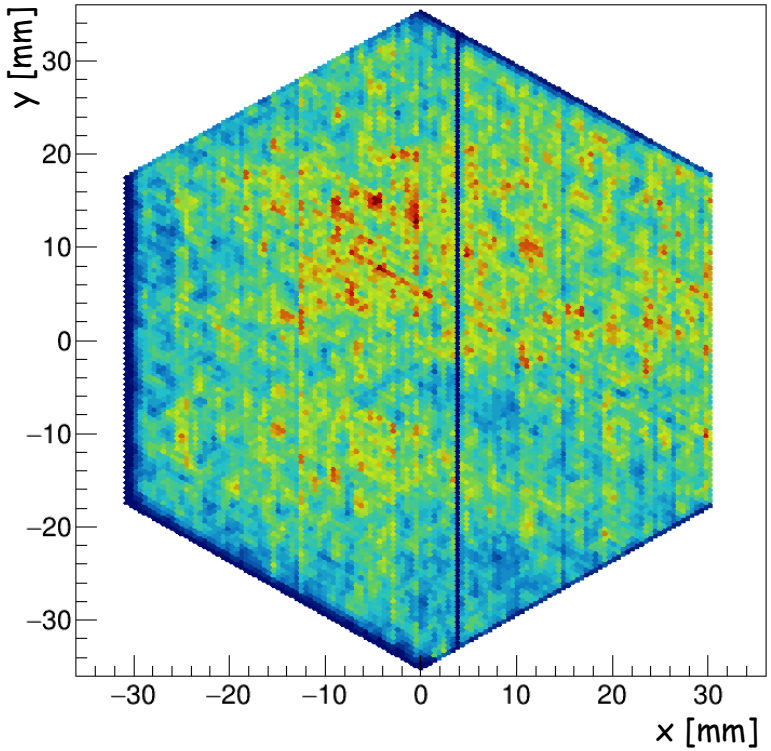


- 3軸μ-PICのガス利得はTGV μ-PICと同程度を達成
  PCB μ-PICよりも大きなガス利得
  ⇒　3軸化以外は同じ構造をしている為
- ひとまず1.4×10^4までは確認
- ガス利得の場所依存性は小さく抑えられている (σ/mean = 0.6%)

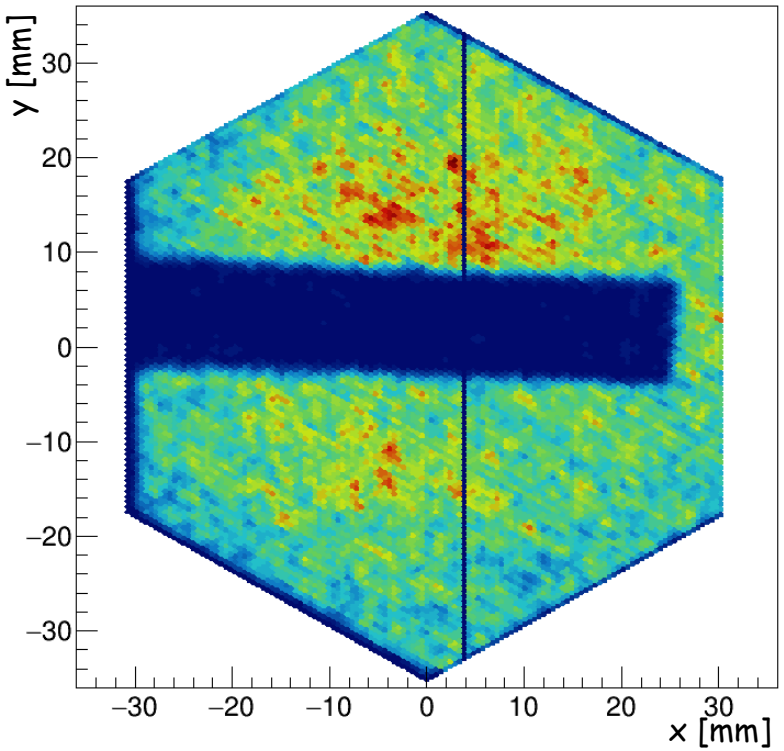
3軸μ-PICによるX線透過画像

Ar : C_2H_6 = 9 : 1, 1 atm

^{55}Fe全面照射時



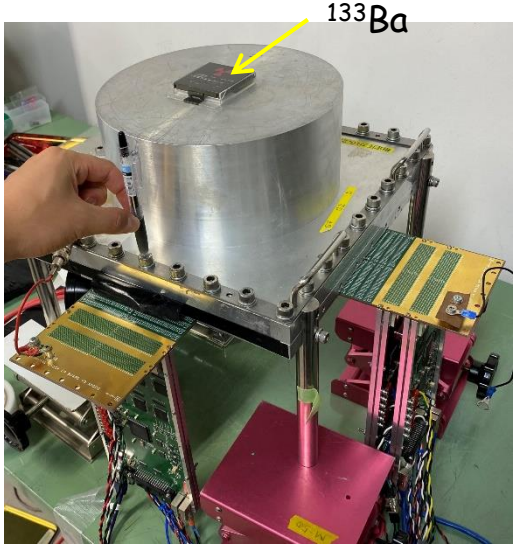
^{55}Fe全面照射 + 銅箔テープ

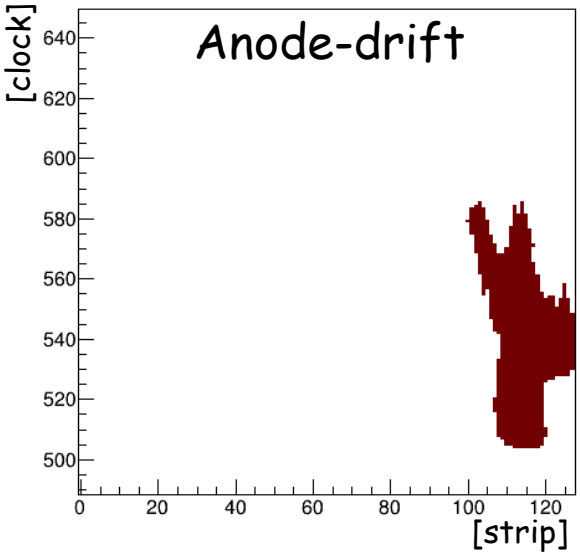


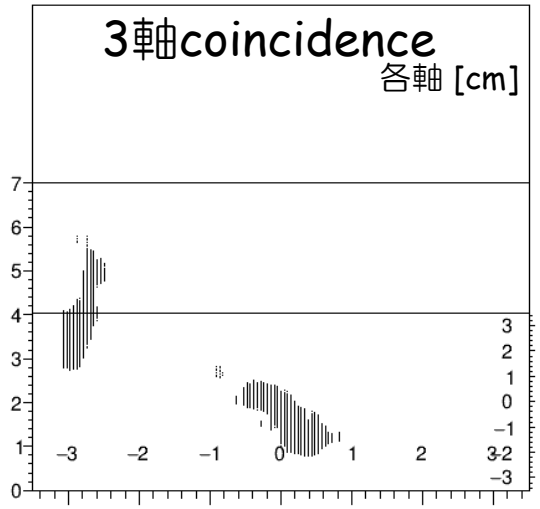
- 3軸全ての同時　⇒　X線透過画像の取得に成功
- Avalancheで生じたイオン・電子を直接観測できる電極構造
  ⇒　3軸全部で同じアンプで読み出しができた

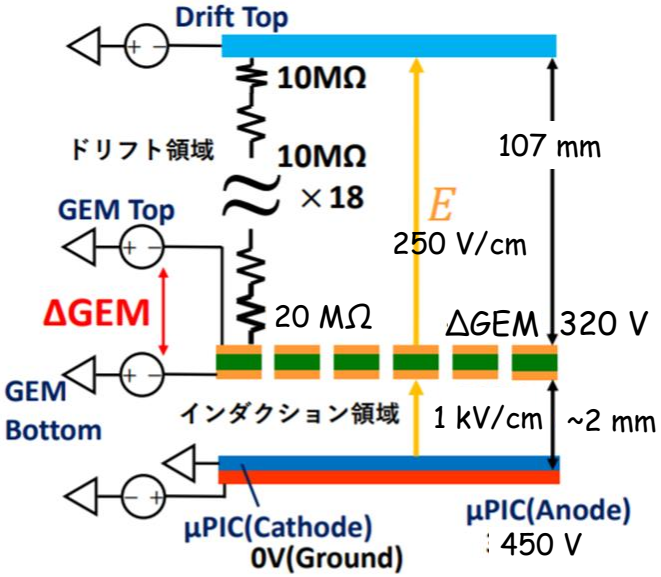
Time projection chamberでの試験

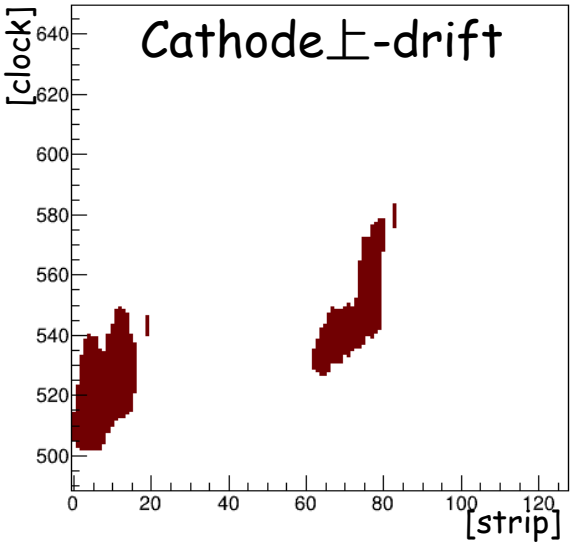
Ar : C_2H_6 = 9 : 1, 1 atm

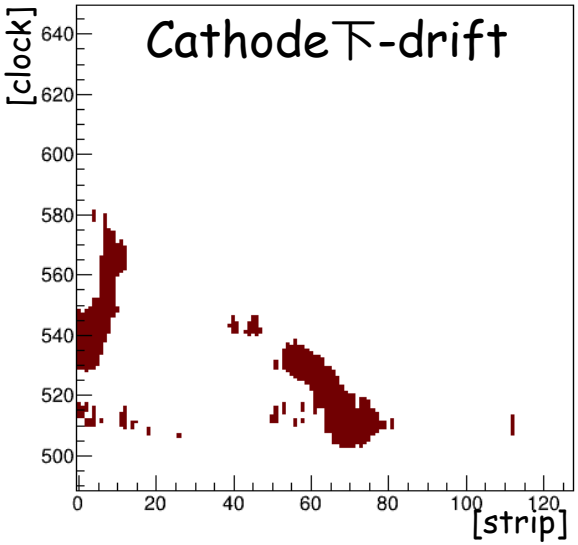


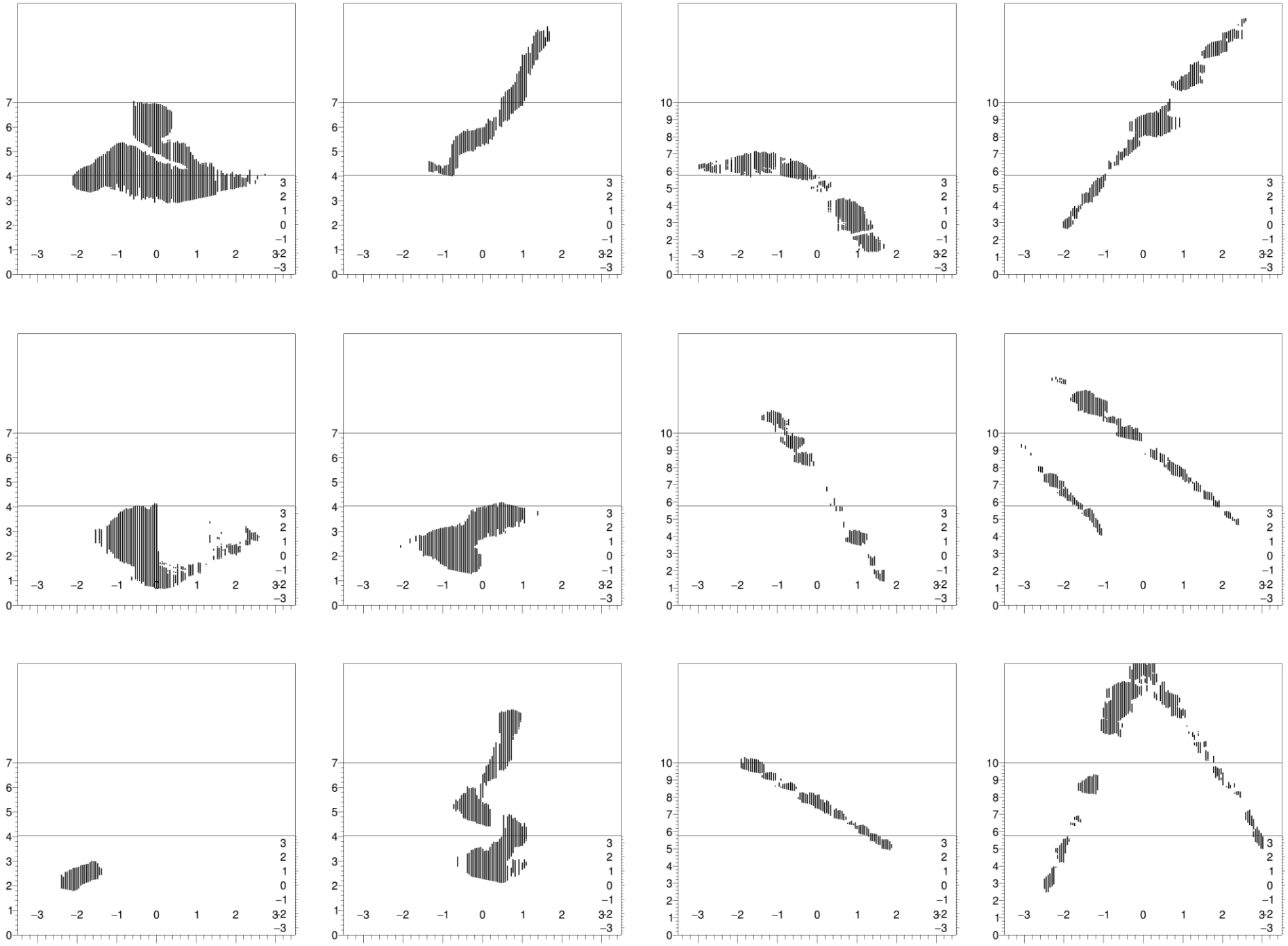












まとめ

- MeVガンマ線望遠鏡の角度分解能向上に向けて
  より詳細な電子飛跡の取得が必要
- 直交strip型の電極で生じる飛跡の不定性を解くため3軸目を導入
- ガラス基板による3軸μ-PICを開発
  - Garfield++ simulationに基づいた電極構造設計
  - 最密充填なpixel配置　立体的にCathodeを分割して3軸を実現
  - pixel pitch : ~554 μm　strip pitch : 480 μm
- 3軸全てで^{55}Feによる信号を確認
  - ガス利得　1.4×10^{4}までは確認
  - 導通したpixelは今のところ無し
  - エネルギー分解能　20.6% (5.9 keV, FWHM, 全面)
  - 3軸全ての同時を取る事でX線透過画像の取得にも成功
- TPCとしての動作も確認
  - 縮退した飛跡も多くは解くことができている

今後は
コンプトン反跳電子の精度の定量評価
30 cm角並みの大面積化

http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp