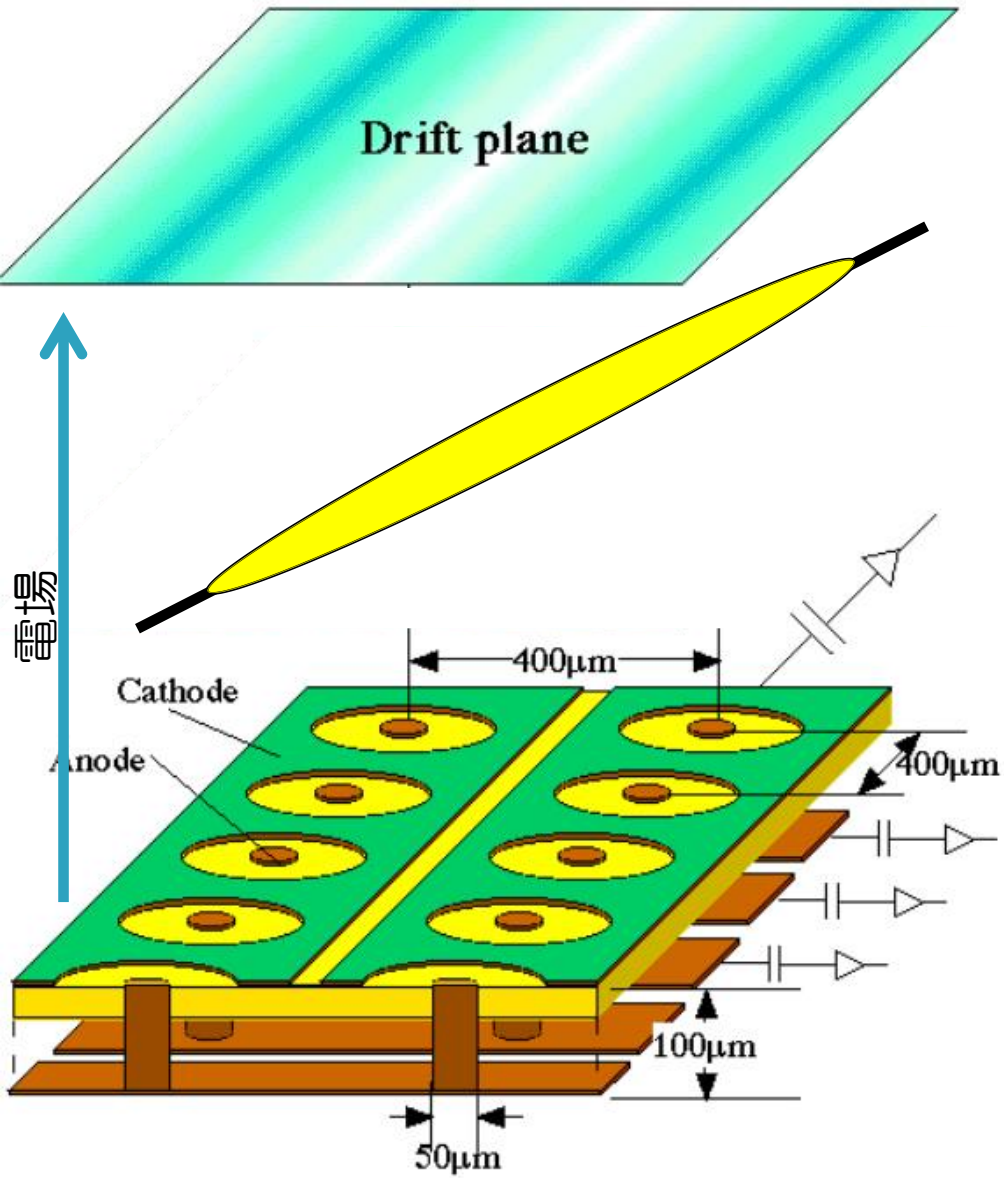
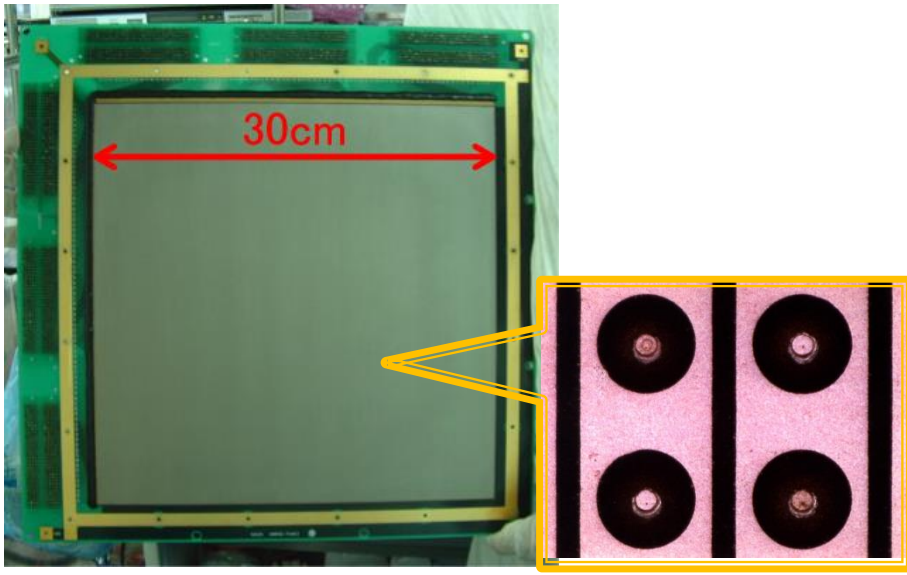
MEMS技術を用いた低雑音・高空間分解能なガス飛跡検出器に向けた基礎開発

髙田　淳史 (京都大学)

Micro Pixel Chamber (μ-PIC)

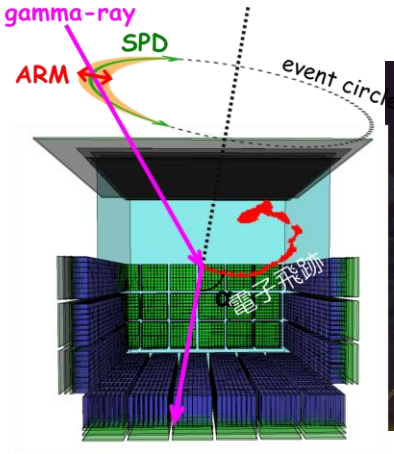


- 2次元ガスイメージング検出器
- プリント基板技術で製作
- ピクセル間隔：400 μm
- 個々のピクセルでガス増幅
- 大面積： 10×10 cm^2 and 30×30 cm^2
- 大きな増幅率：max ~15000
- 高い位置分解能：RMS ~120 μm
- 均一な応答：RMS ~5% (10×10 cm^2)
- １ヶ月を超える連続安定動作が可 (@ gain ~6000)

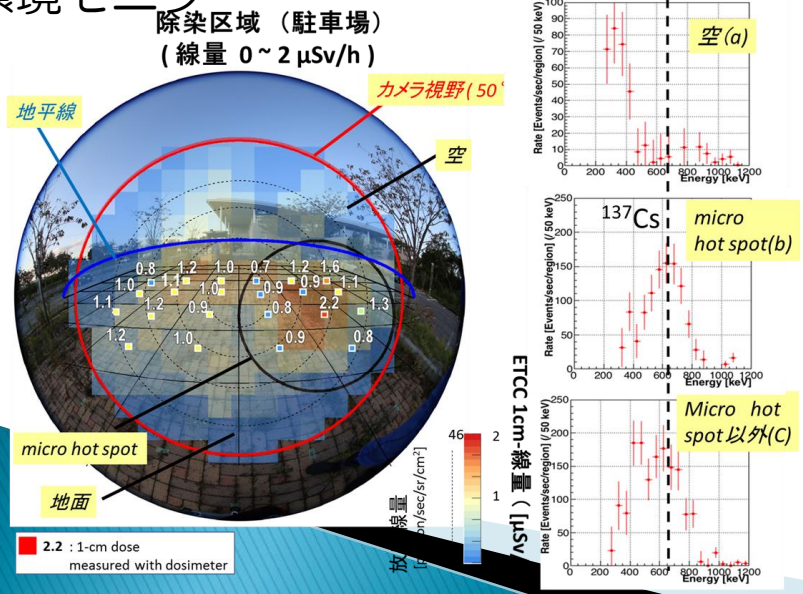


μ-PICの応用

MeVガンマ線イメージング



環境モニタ

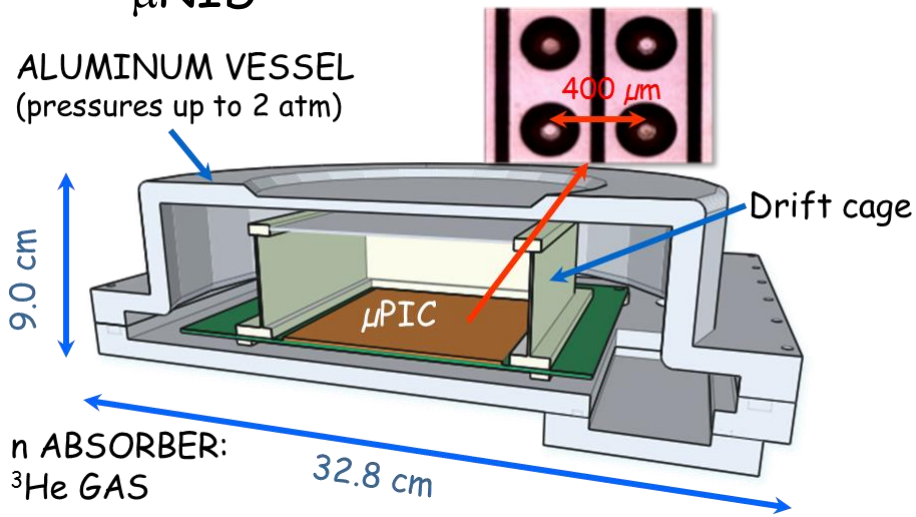


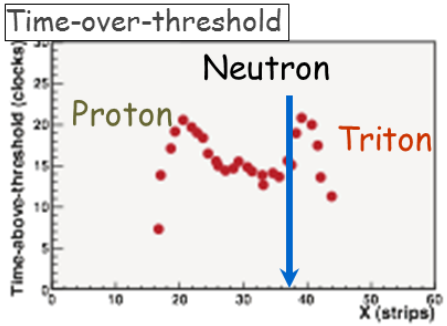
D. Tomono (2017)

中性子イメージング

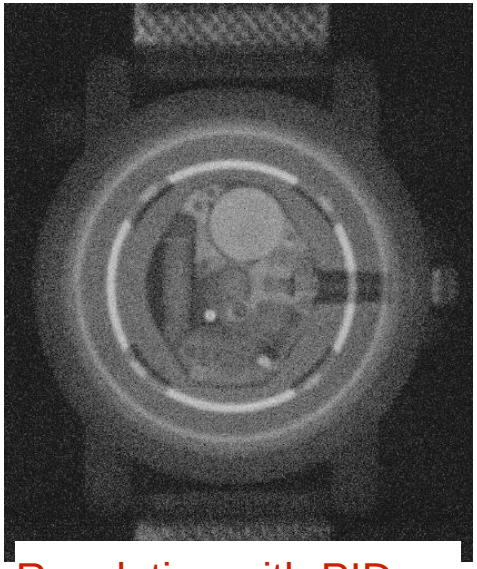
J. D. Parker+, NIM A (2013)

μNID





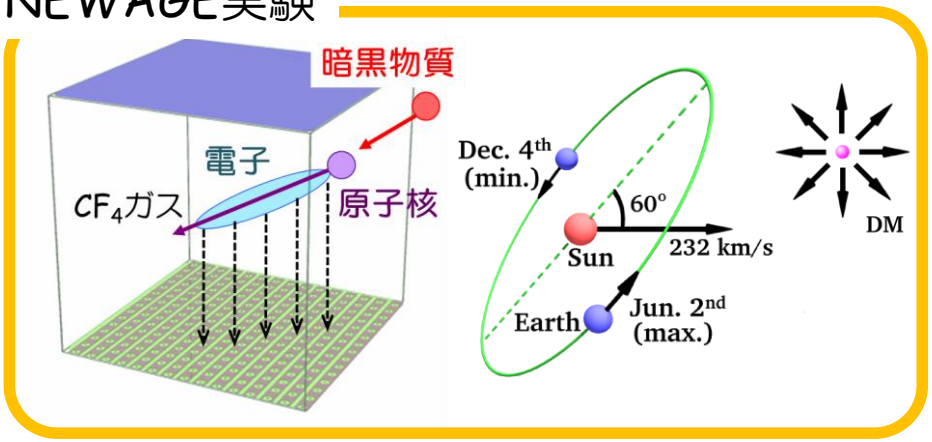
- $^3He + n \rightarrow p + {}^3H$
- Using template of ToT, we obtain neutron incident position

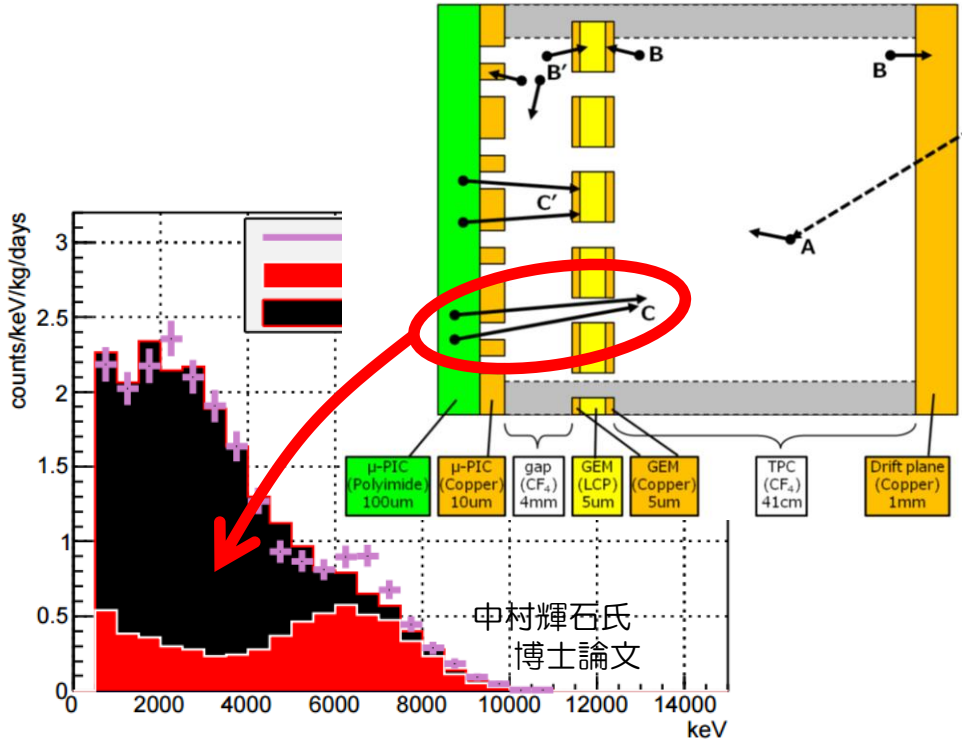


Resolution with PID: 105~130 μm(σ)

本研究の目的

NEWAGE実験





ポリイミド基板中のガラス繊維がBG源

→ 基板の材質を変えるべし

MeVガンマ線望遠鏡・中性子イメージング

→ 高利得・高空間分解能

→ MEMS技術を使った新しいμ-PICへ

MEMS技術によるμ-PICを試験しその特性を調べると共に、Garfield++によるシミュレーションをもちいて検証を行う。

- MEMS-μPICの高空間分解能化・大面積化
- シミュレーションによる電極構造の最適化
- MEMS-μPICの内部放射線

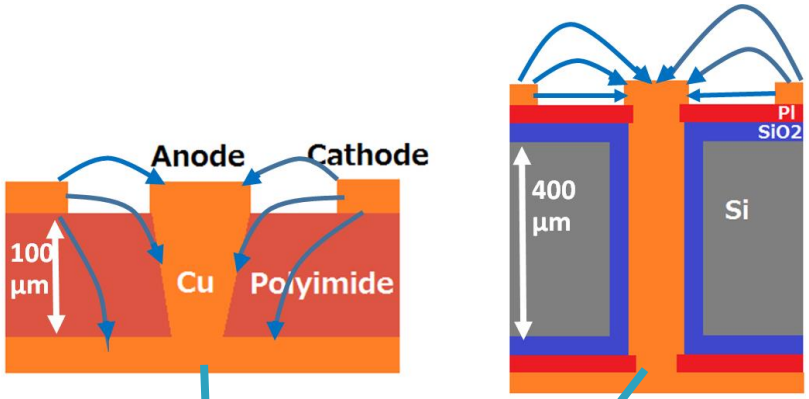
@申請書

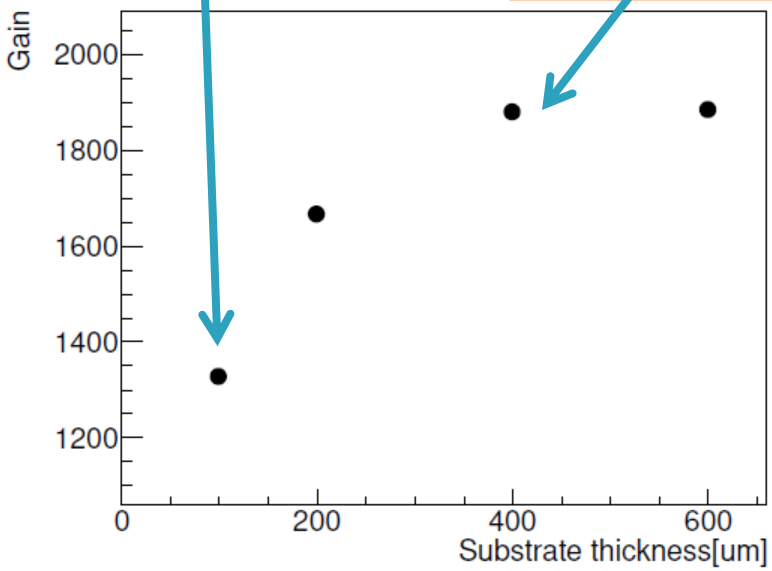
MEMS技術によるμ-PICの開発

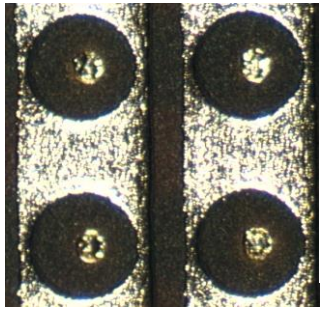
μ-PIC応用からの要求:

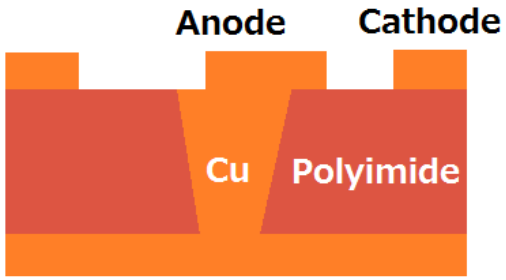
1. より高いガス利得
2. 強い放電耐性
3. 高空間分解能

- 基板の厚みの最適化
- 高精度な電極形成
- 細かいピッチの電極









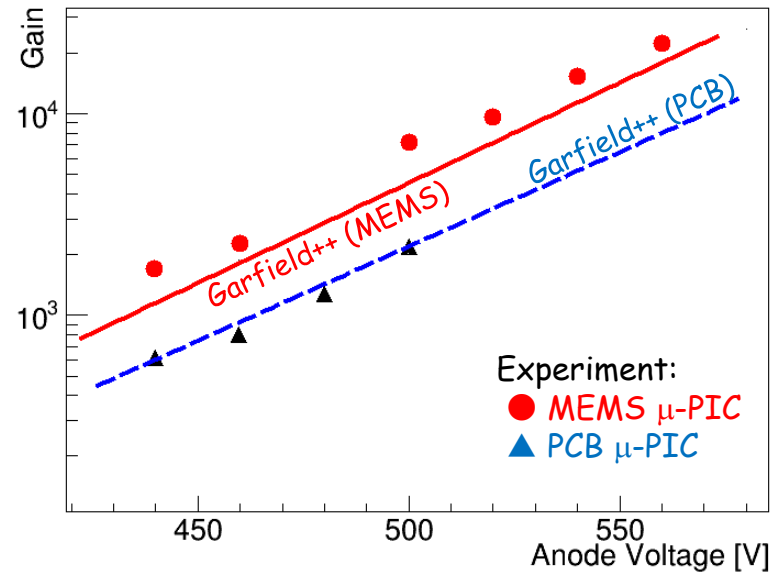
プリント基板技術の限界：

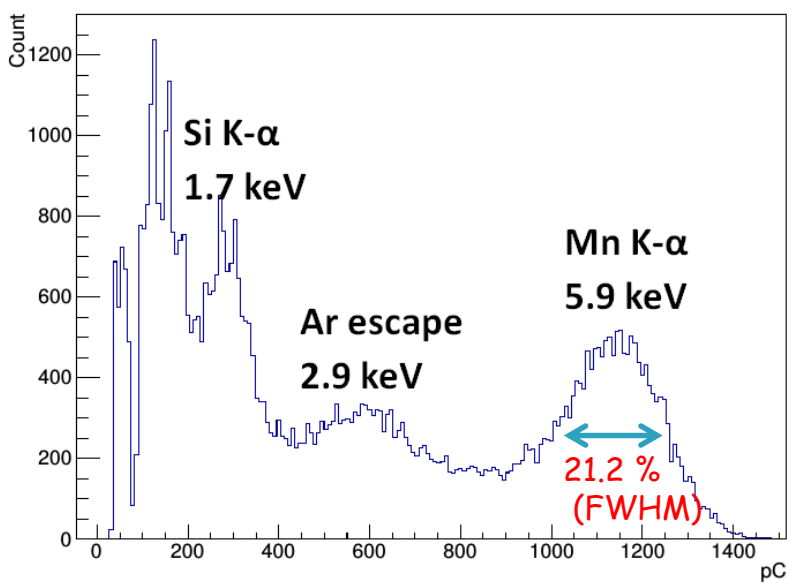
- 基板を厚くするとアノードが太くなる
- 政策制度は ~10 μm
- 実現可能なアノード直径は 50 μm
  -> 電極の間隔はアノード直径が律速

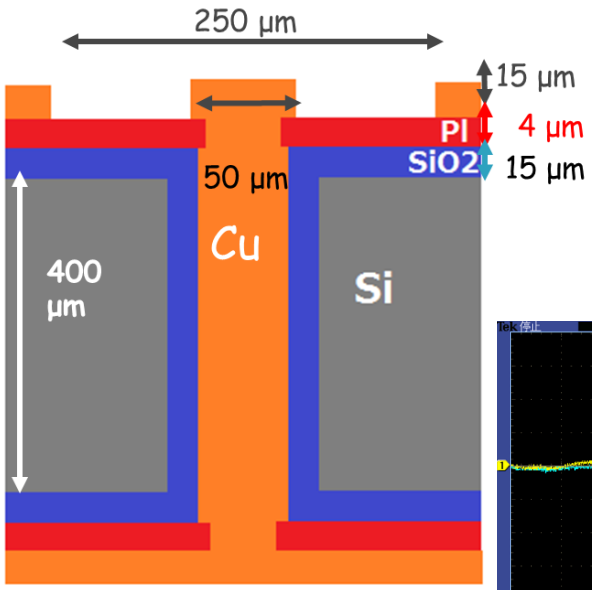
Micro Electro Mechanical Systems

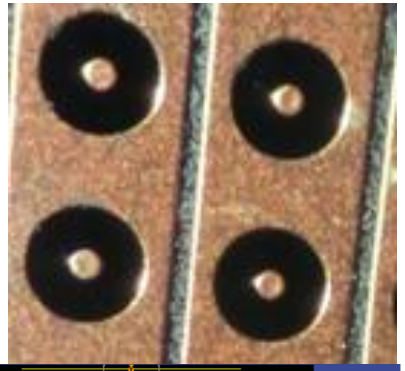
- MEMS技術では厚い基板にも細い穴を開ける事が可能
- 製作精度は数μm

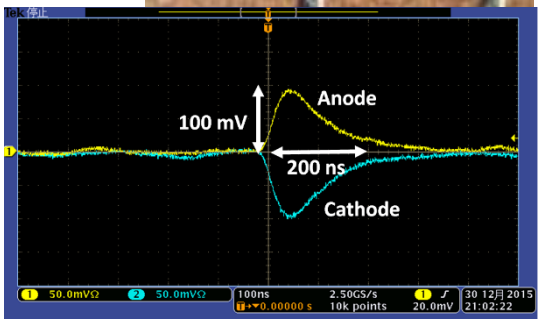
TSV μ-PIC







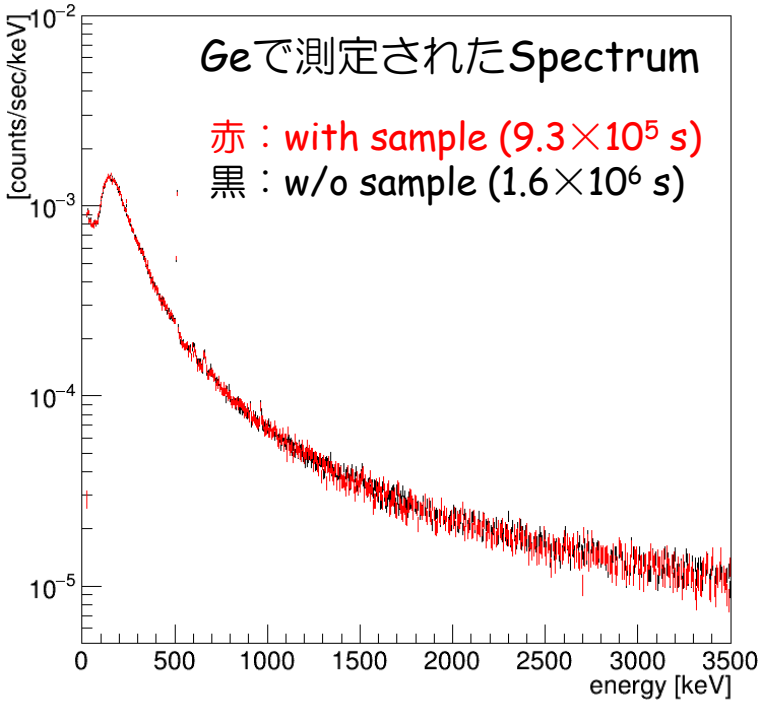




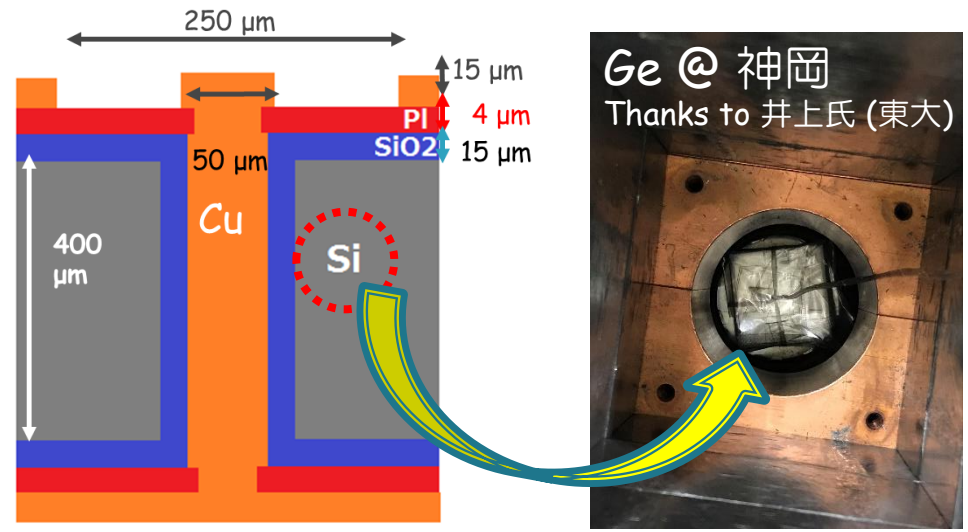
- TSV μ-PICでX線の検出に成功
- 高いガス利得を安定に実現：
  22000 (20時間の間放電無し)
  15000 (300時間以上放電無し)
- エネルギー分解能：
  21.2% @ 5.89 keV (FWHM)
- 従来のμ-PICよりも放電しにくい

TSV μ-PICは
従来μ-PICの性能をあらゆる面で上回る
MEMS技術によるμ-PICに期待

TSV μ-PIC BG測定



5 cm角TSV μ-PIC基板材料(Si 0.4 mm) 32枚

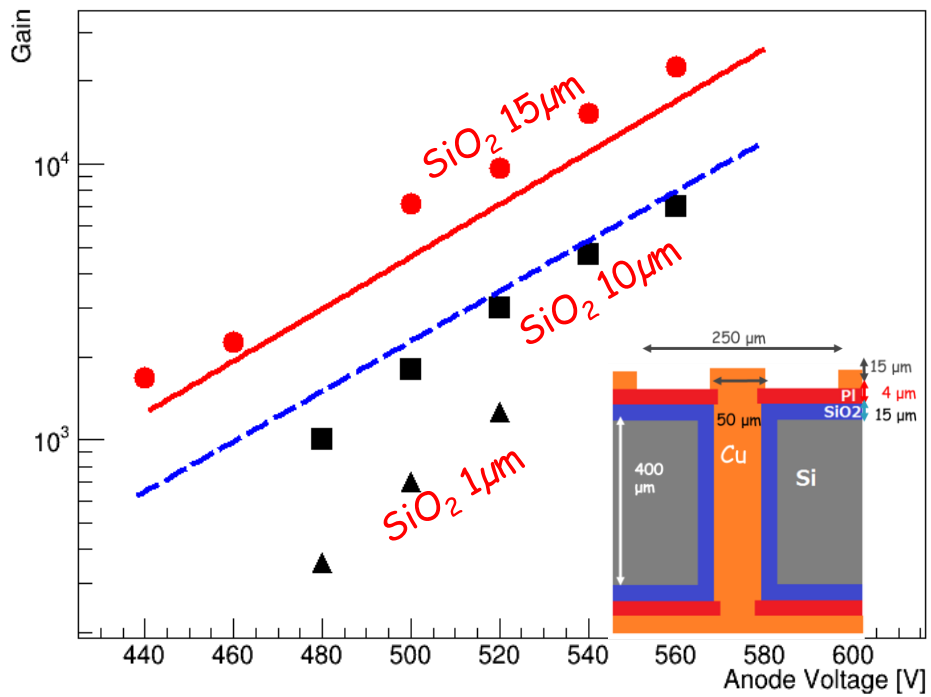


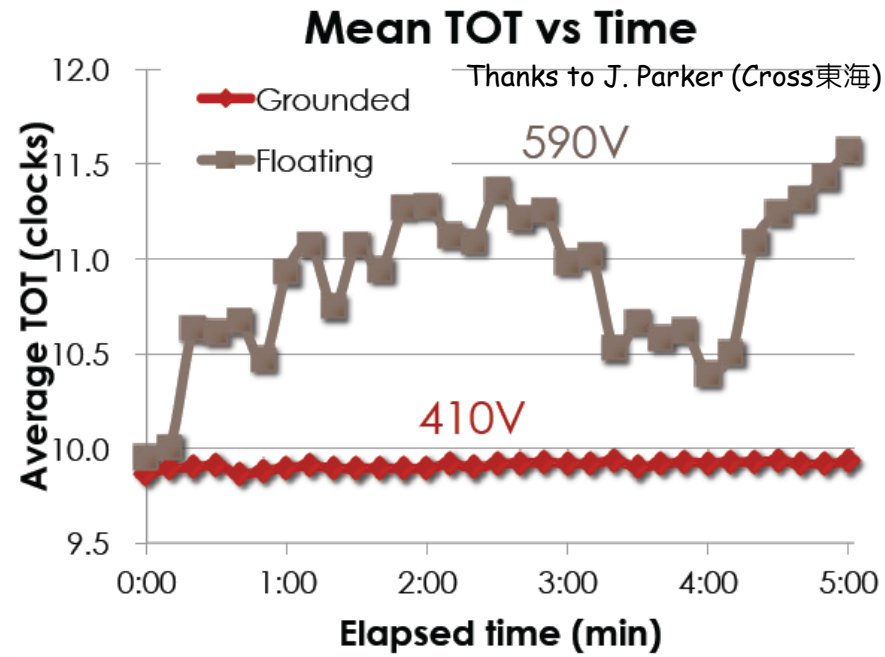
Energy range	src	w/ sample [cps]	w/o sample [cps]	differential [cps]	90% C.L.
609±5 keV	^{214}Bi (U)	$(1.80\pm0.10)\times10^{-3}$	$(1.84\pm0.08)\times10^{-3}$	$(-0.36\pm1.30)\times10^{-4}$	1.9×10^{-4} cps
583±5 keV	^{208}Tl (Th)	$(1.84\pm0.11)\times10^{-3}$	$(1.87\pm0.08)\times10^{-3}$	$(-0.36\pm1.33)\times10^{-4}$	2.0×10^{-4} cps
1460±5 keV	^{40}K	$(4.22\pm0.31)\times10^{-4}$	$(4.59\pm0.24)\times10^{-4}$	$(-3.7\pm3.9)\times10^{-5}$	4.6×10^{-5} cps

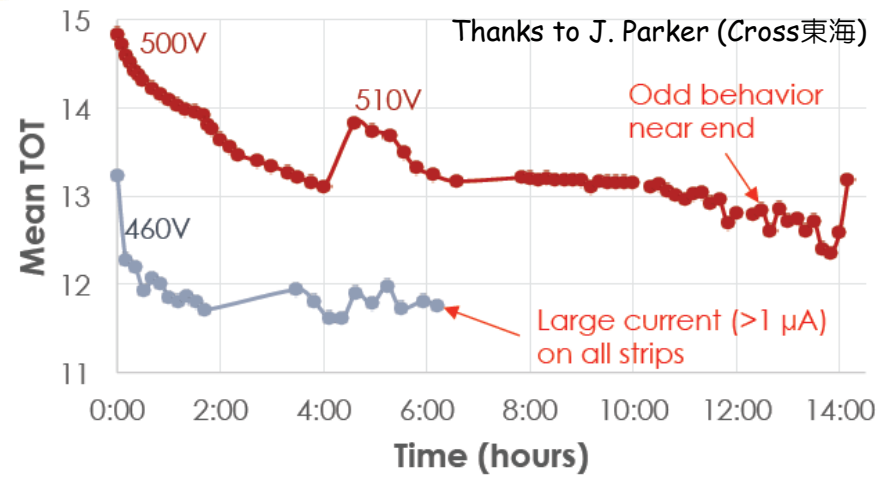
TSV μ-PICの
Si基板に含まれるBG

^{238}U	< 0.14 Bq/kg	< 0.012 ppm
^{232}Th	< 0.08 Bq/kg	< 0.019 ppm
^{40}K	< 0.30 Bq/kg	< 0.001 ppm

一方で…







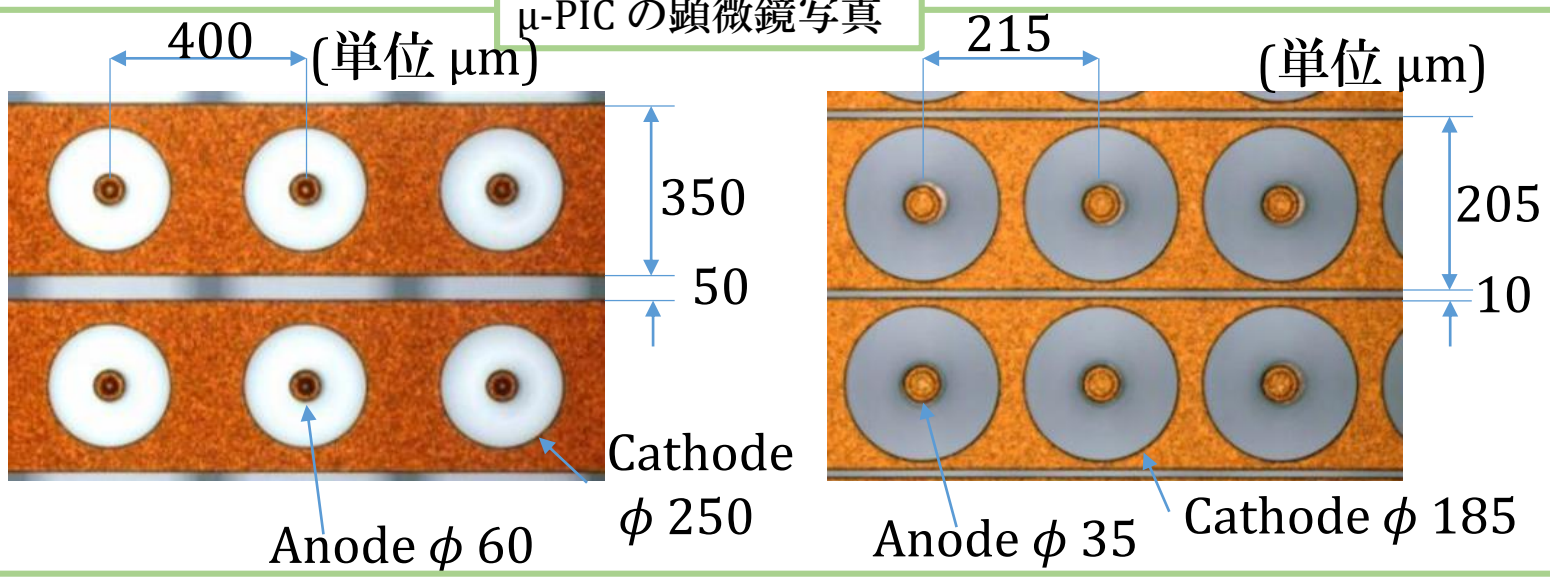
Si基板周囲の絶縁層の厚みによって
得られるガス利得が大幅に変化
⇒　絶縁層を厚く形成するのは困難
(特にanode via周囲)
中性子照射時にガス利得が変動
⇒　Si基板を0Vに設定すると
利得は安定するも
高電圧がかからない

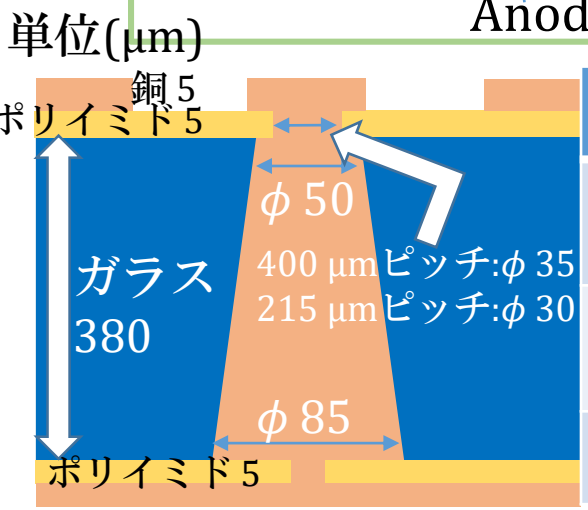
半導体であるSiは扱いが面倒
⇒　絶縁体にしたい

ガラス基板を使ったμ-PIC(TGV μ-PIC)

- 大日本印刷と共同で開発
- TGV(Through Glass Via)技術により高アスペクト比のAnode形成が可能
- ピッチ間隔400 μm(5 cm角)、215 μm(3 cm角)の2種類の素子を製作

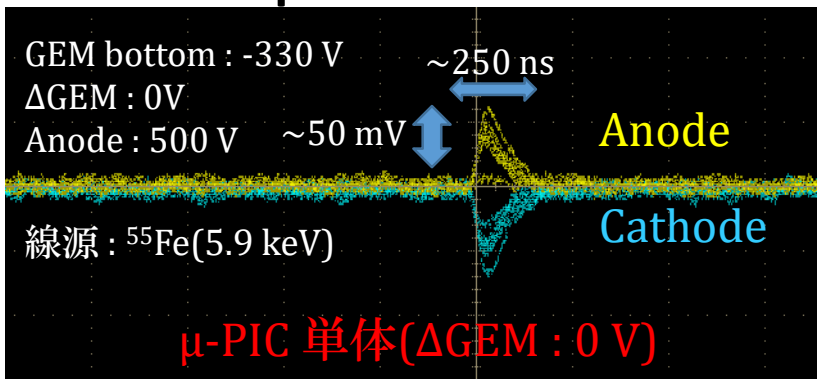
μ-PIC の顕微鏡写真



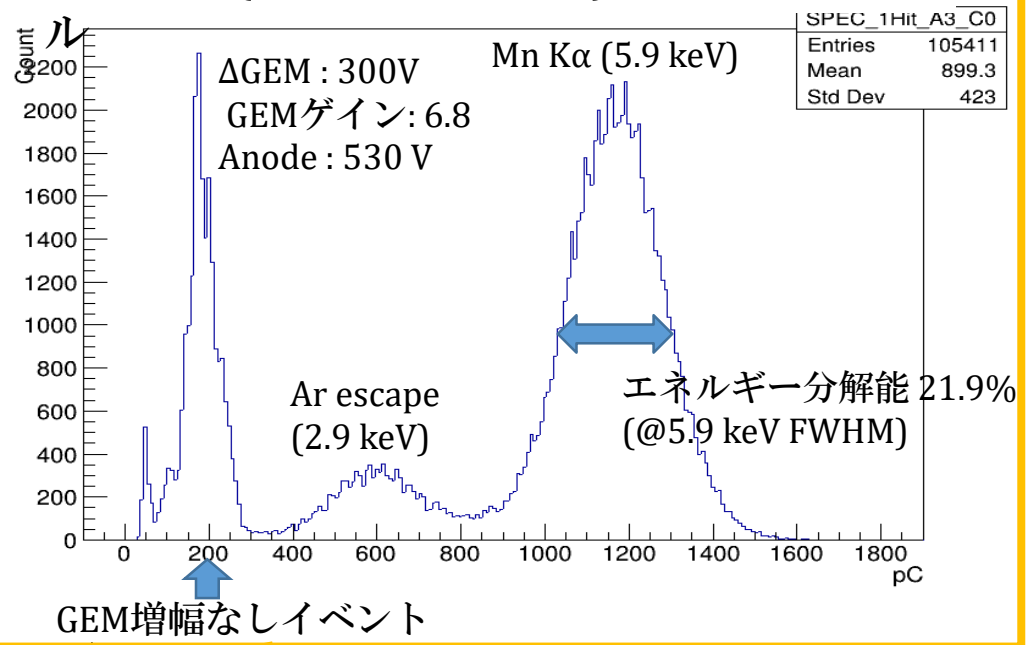


	PCB μ-PIC	TSV μ-PIC	TGV μ-PIC
基板材質 (誘電率)	ポリイミド (3.2)[1MHz]	シリコン(+SiO_2膜) (Si:11, SiO_2:4.5)	無アルカリガラス (5.8)[1MHz]
アノードの アスペクト比	~ 2 (100 μm/60 μm)	~ 8 (400 μm/50 μm)	~ 6.5 (390 μm/60 μm)
製作精度	~ 10μm	~ 数 μm	~ 10 μm

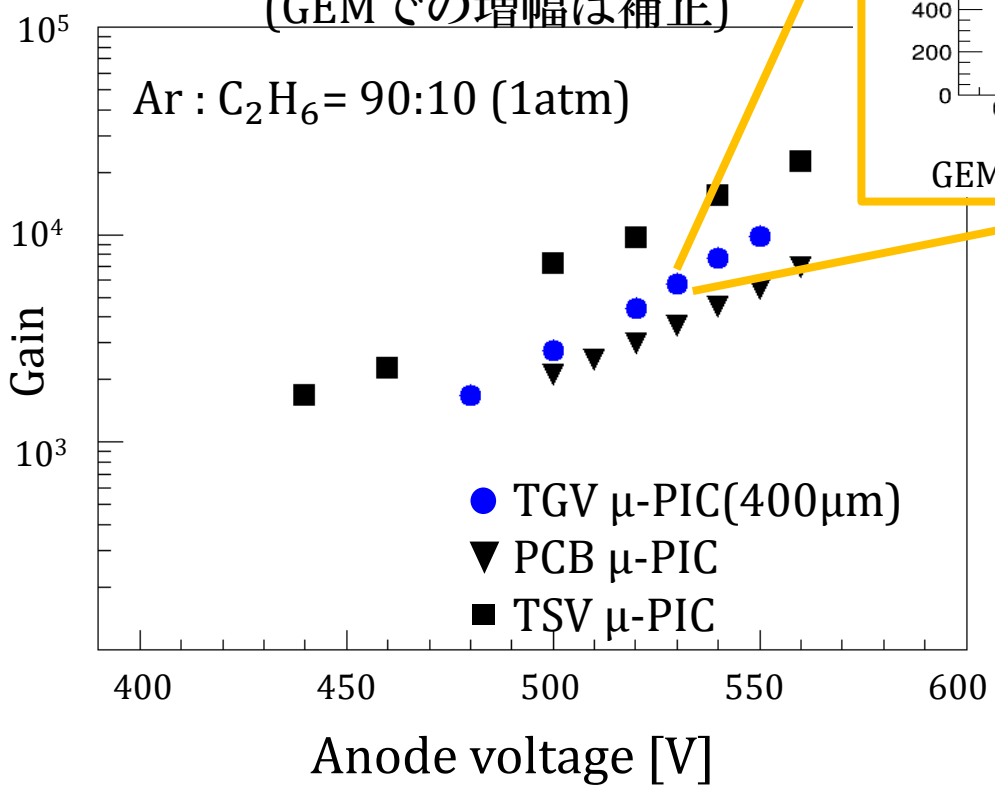
400μmピッチ TGV μ-PIC 動作試験



ある領域(2.5 cm × 2.5 cm)でのスペクトル



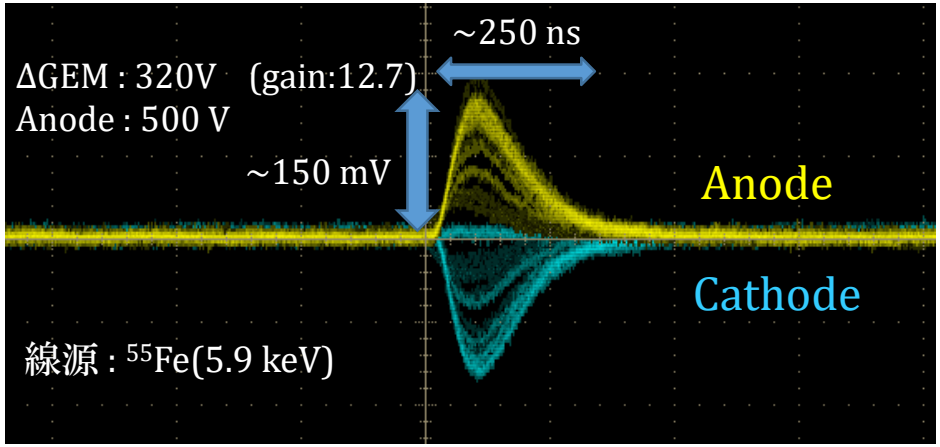
μ-PICのゲインカーブ
(GEMでの増幅は補正)



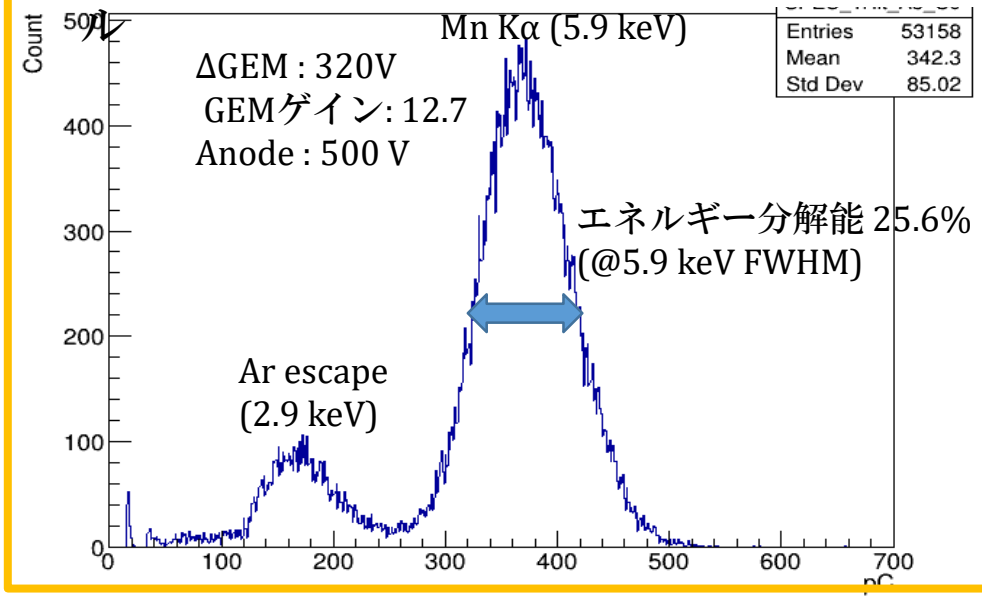
TGV μ-PIC 単体で初めて X線の検出に成功

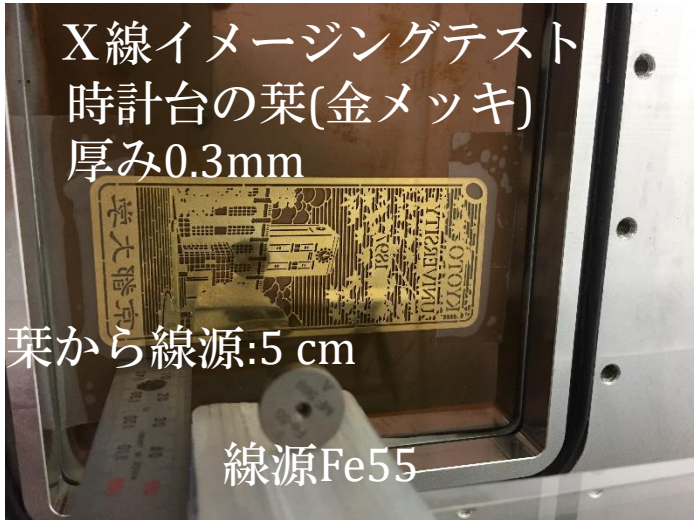
PCB μ-PIC と同程度のゲイン

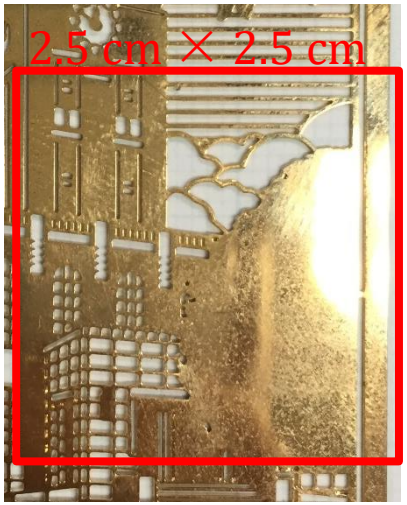
215μmピッチ TGV μ-PIC 動作試験



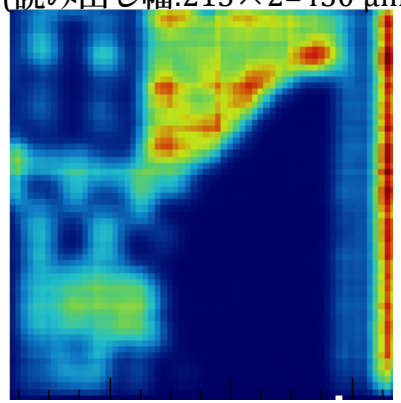
ある領域(1.5 cm × 1.5 cm)でのスペクトル







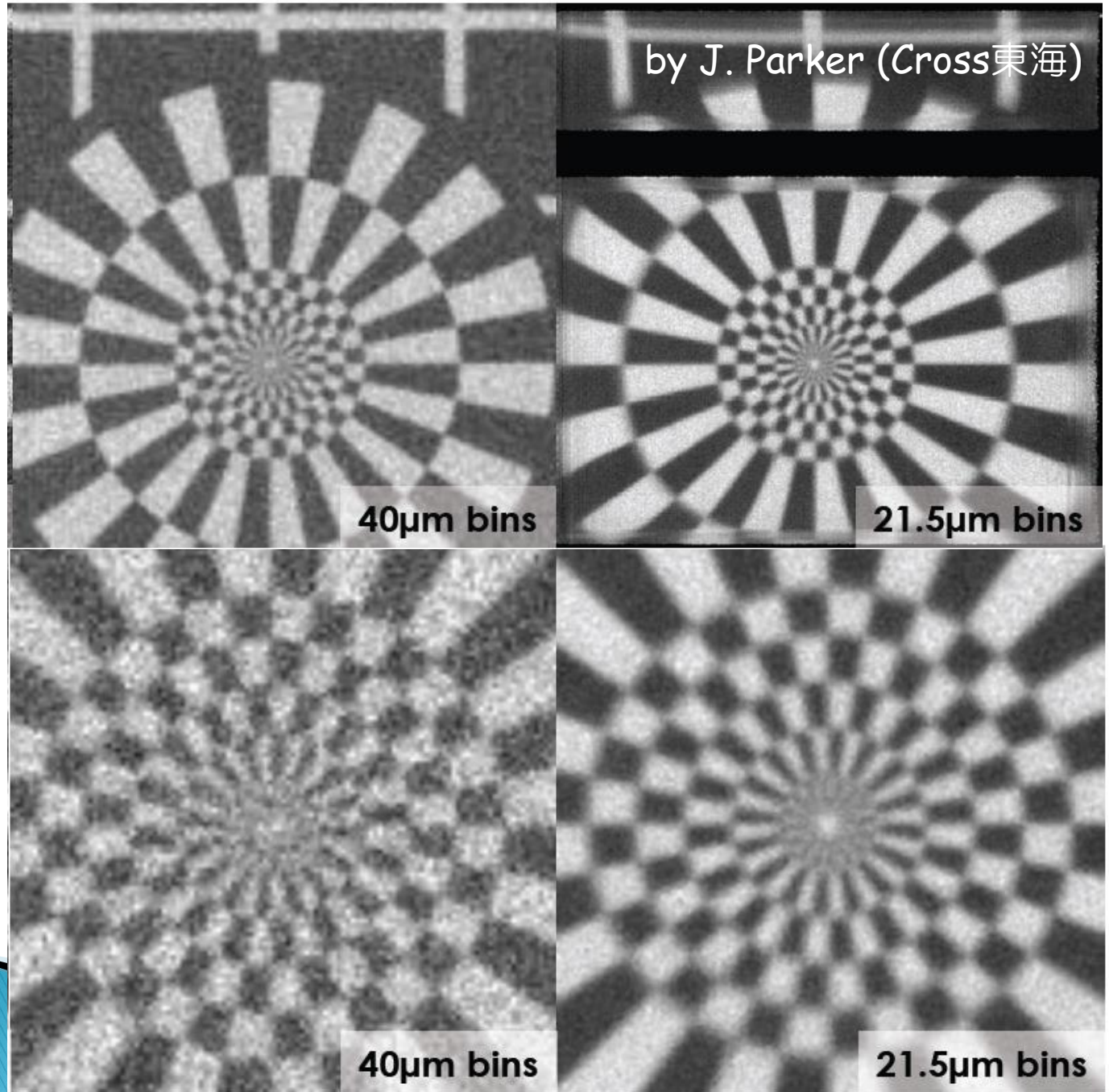
(読み出し幅:215×2=430 μm)



二次元X線イメージングに成功
2次元位置感度型検出器としての動作を確認

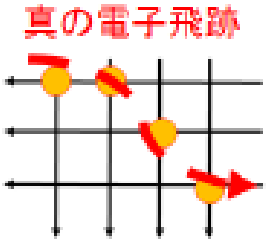
400μm PCB μPIC

215μm TGV μPIC

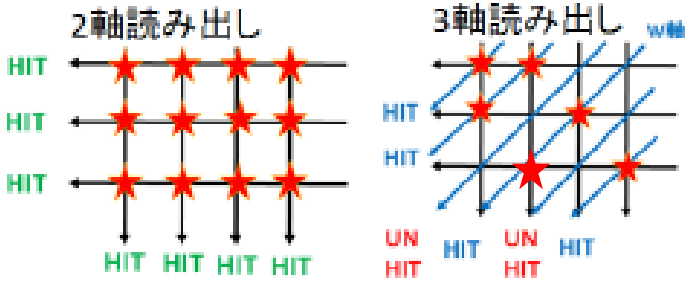


3軸読み出し可能なμ-PIC(3軸 μ-PIC)

- Anode+Cathode＋3軸目
- 飛跡の不確定性を排除し、位置決定精度を上げることで高角度分解能化を目指す



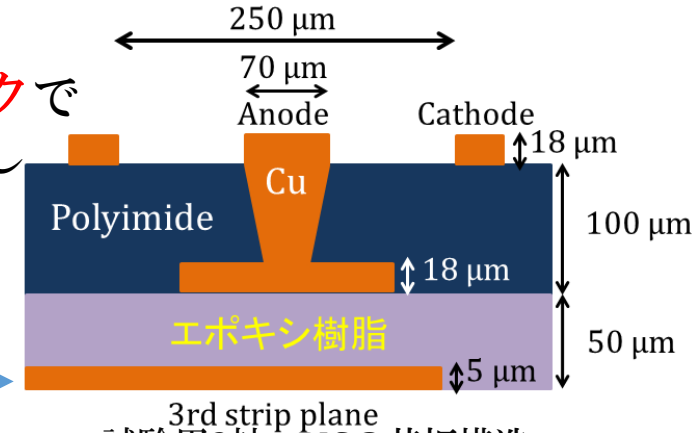
通常の10 cm角μ-PICに対して、
- pixel読み出し：256×256 ch
- strip読み出し：256+256 ch



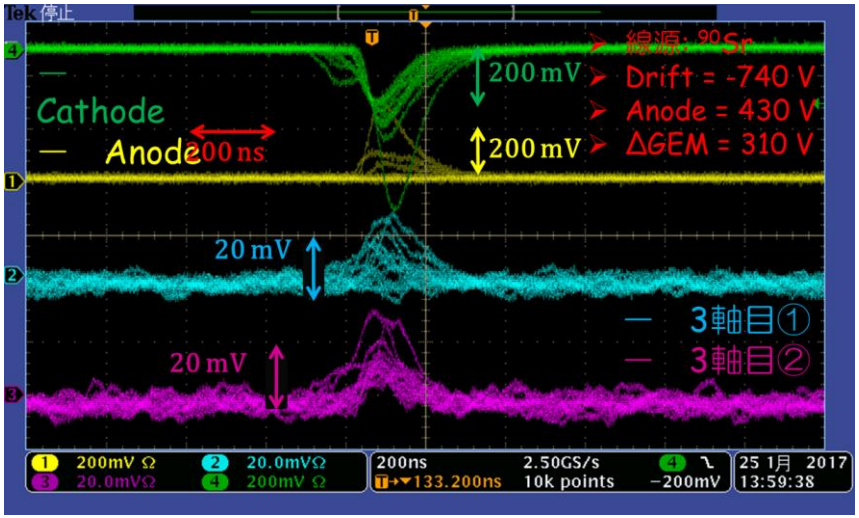
- 製造方法：プリント基板(PCB)
- μ-PICの検出領域：7.5 ×7.5 cm^2
- ピクセルピッチ：400 μm

試験用3軸 μ-PICを作製(2017年谷口講演)

Anodeとの
クロストークで
3軸目読み出し



試験用3軸μ-PICの基板構造



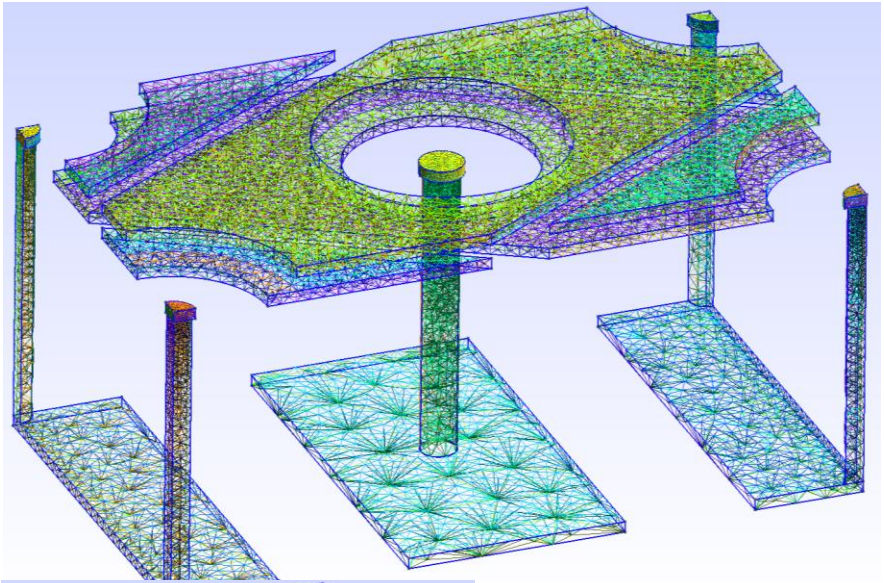
試験用3軸μ-PICのオシロ波形

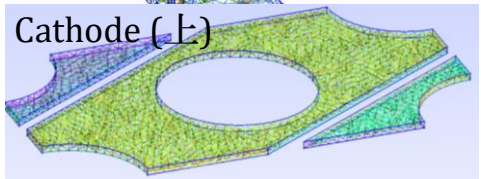
3軸目の信号を確認。ただし、Anode,Cathodeの1/10
読み出すには増幅率の大きな3軸用のアンプが必要

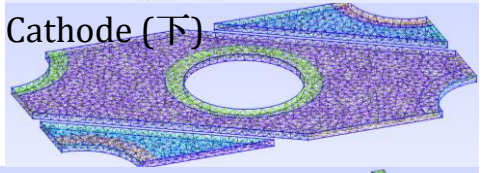
→ Cathodeを二つに分けた電極構造

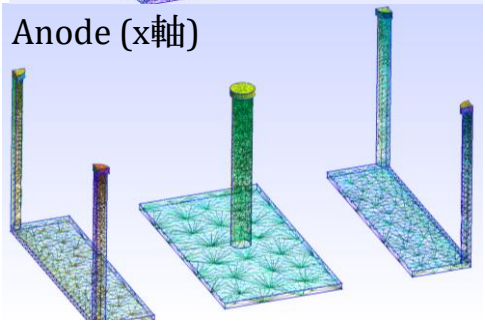
新3軸μ-PIC

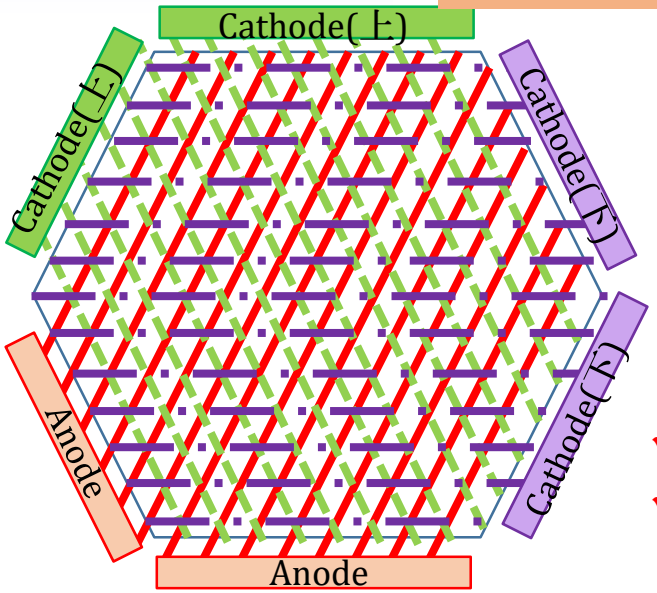
Cathodeを分割・立体交差した3軸μ-PIC



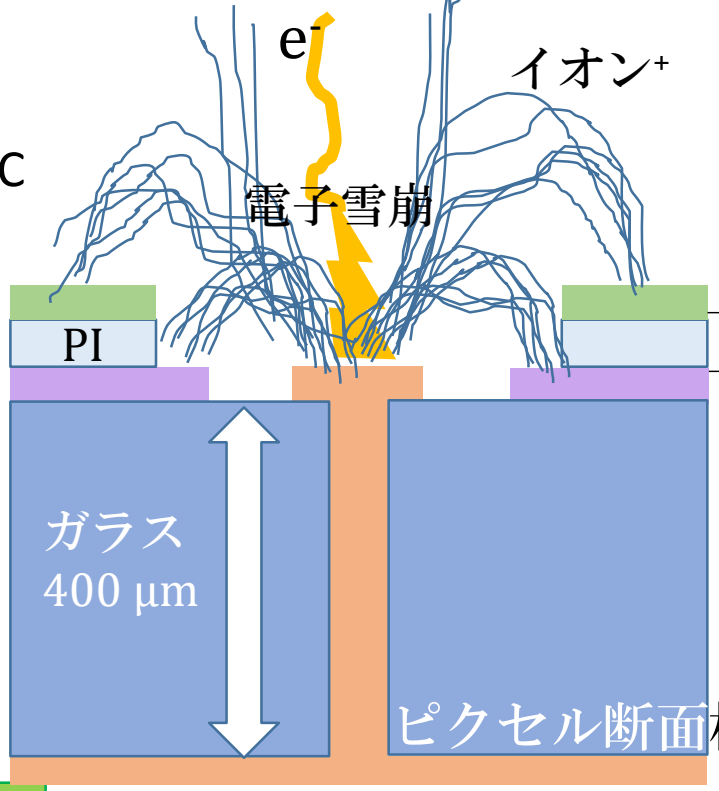








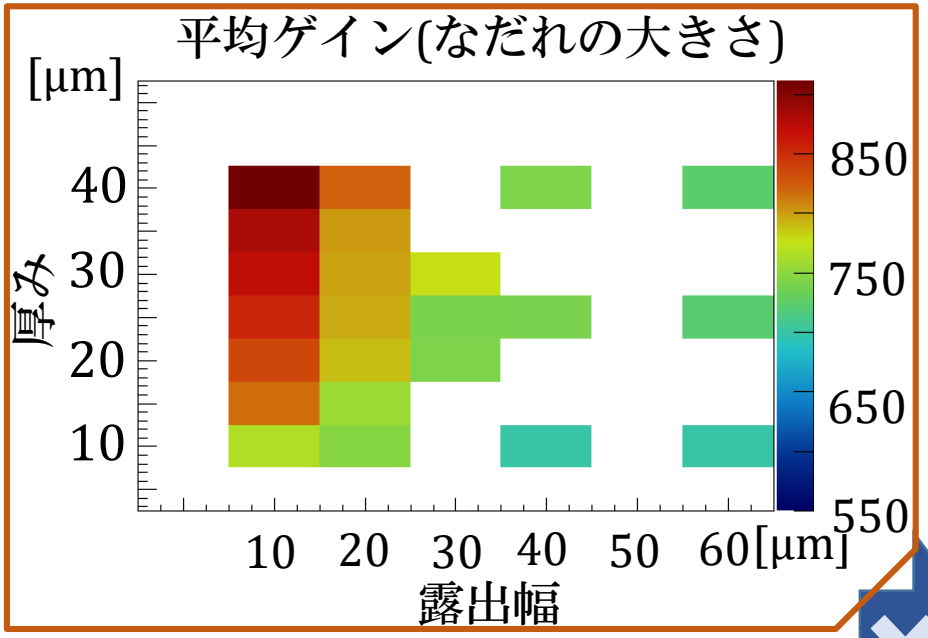
読み出しストリップの概観

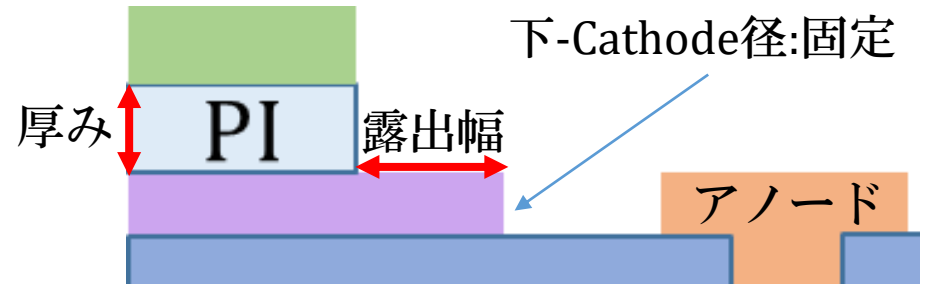


- 各ストリップのなす角120度
- ピクセル配列は最密充填
  六角形μ-PIC

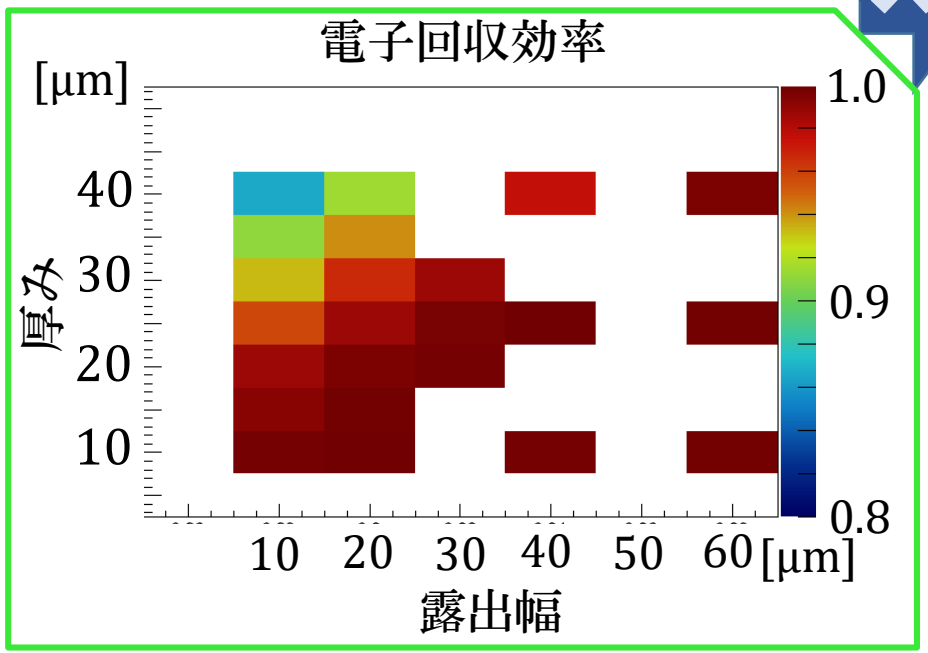
✓ 電子雪崩は起こるのか?
✓ 狙い通りカソード信号は分割されるのか?

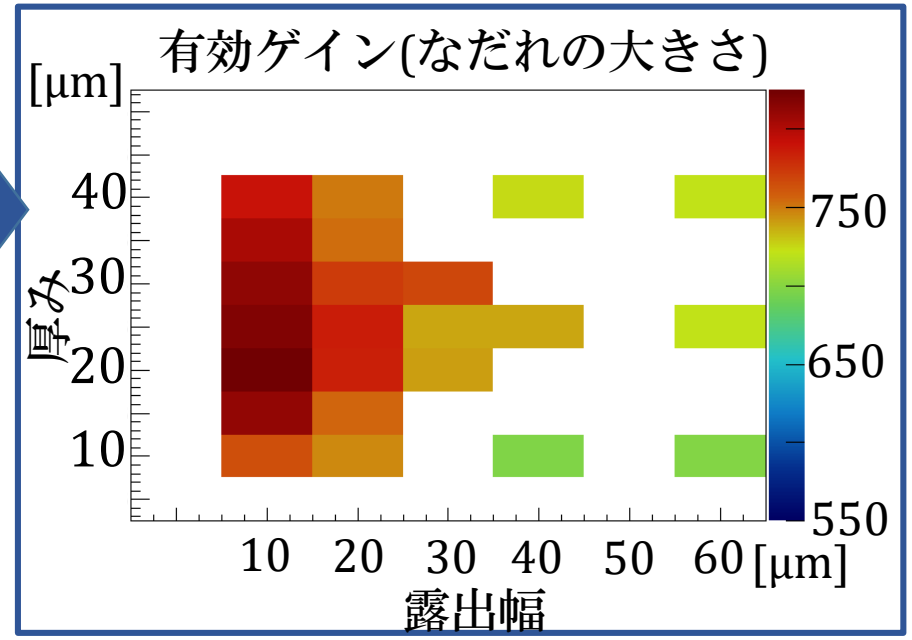
ジオメトリパラメータとゲインの関係





参考:シミュレーション値(Anode 400 V)
400 μmピッチガラスμ-PIC ゲイン~550





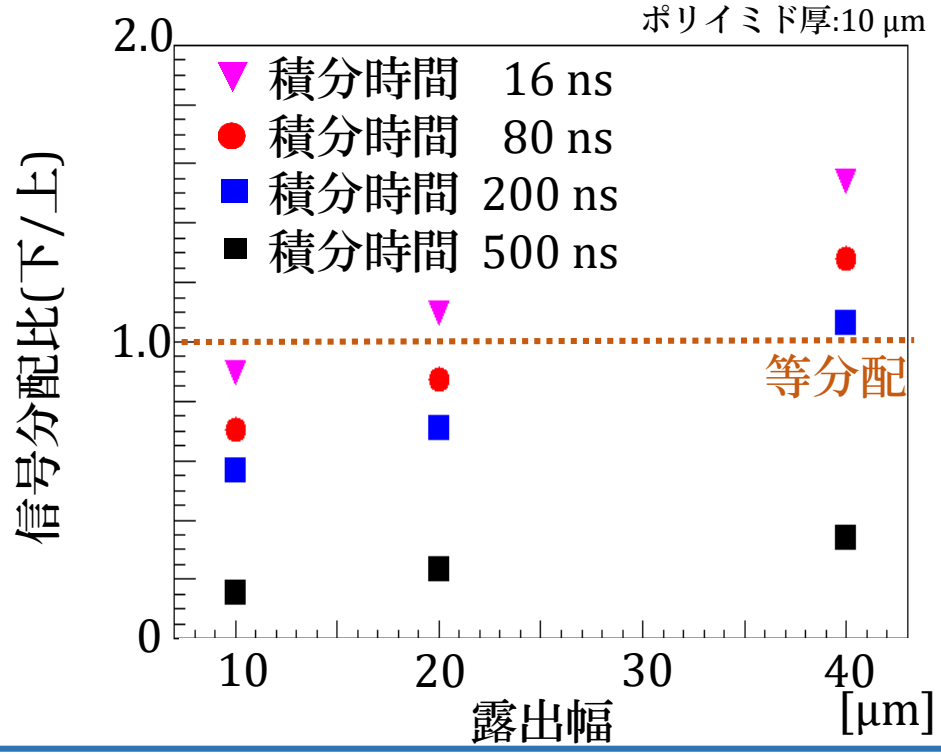
パラメータを変えても、電子雪崩は
起こり電子は増幅された。
有効ゲイン(=平均ゲイン×回収効率)は
露出幅小ゲイン大

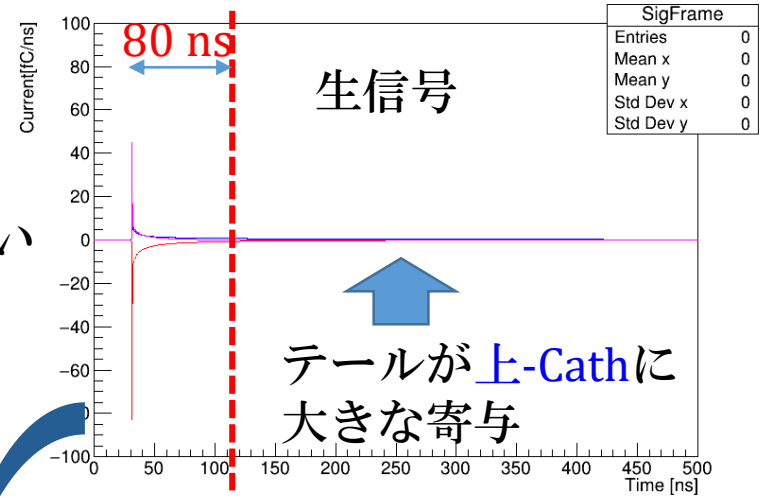
✓ カソード信号は分割されるのか?

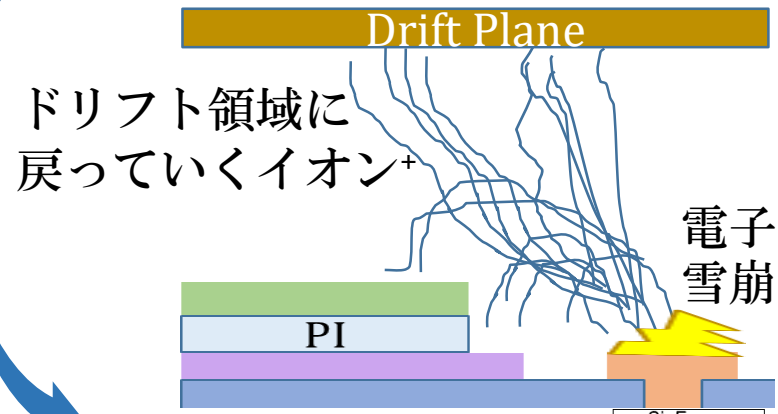
上,下-Cathodeの信号分配

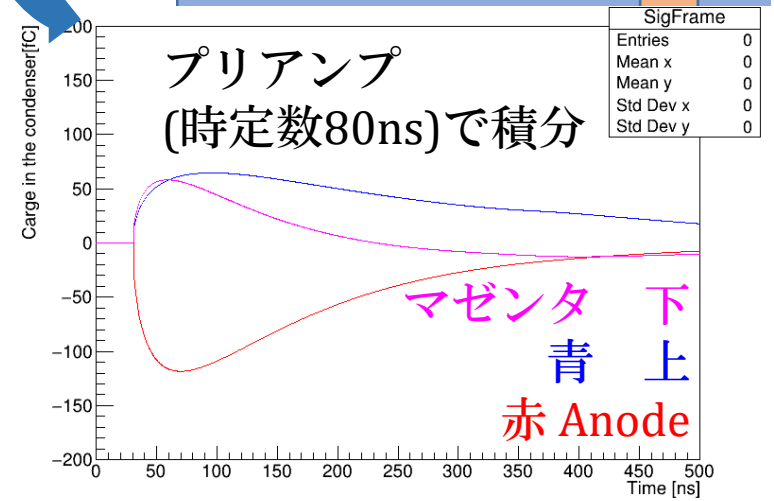
上,下-Cathodeの信号の大きさが同じくらい
⇒同じアンプで読み出せるので(経済的に)うれしい

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

まとめ

MEMS技術によるμ-PICを試験しその特性を調べると共に、Garfield++によるシミュレーションをもちいて検証を行う。

- MEMS-μPICの高空間分解能化・大面積化
- シミュレーションによる電極構造の最適化
- MEMS-μPICの内部放射線

- TSV, TGVの2種類のMEMS μ-PICを大日本印刷と共同開発
- どちらもガス検出器として動作を確認
  - 高空間分解能化・大面積化
    ⇒ 215 μmピッチ TGV μ-PICで空間分解能向上を確認
  - 電極構造最適化
    ⇒ TGV μ-PICをベースに3軸読み出しμ-PICの電極構造シミュレーションを実施
    実際の製作に向けて大日本印刷と協議中
  - 内部放射線調査
    ⇒ TSV μ-PICのSi基板からはBGを超えるガンマ線は検出されず
    TGV μ-PICの調査はこれから (合成石英ガラスでの製作も技術的には可)
- Si基板やガラス基板による新たな課題も

Thank you for your attention!

http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/MeV-gamma/wiki