

# 表面アルファ線分析のための GEMとCMOSによる 光学TPC開発

神戸大学大学院理学研究科

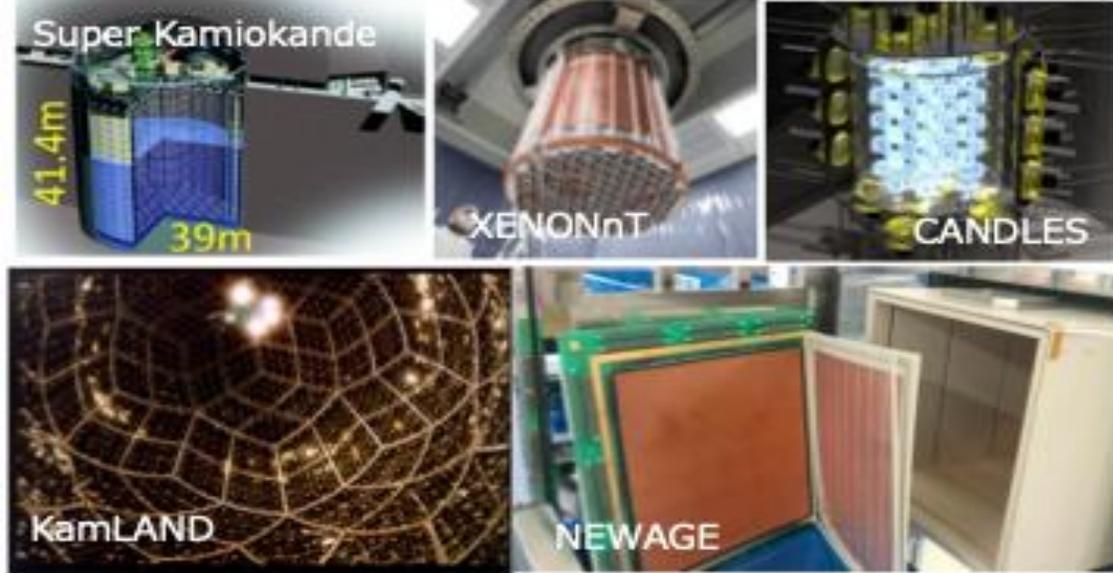
青山 真也

MPGD & アクティブ媒質TPC合同研究会2025 @岩手大学



# 1. 研究背景

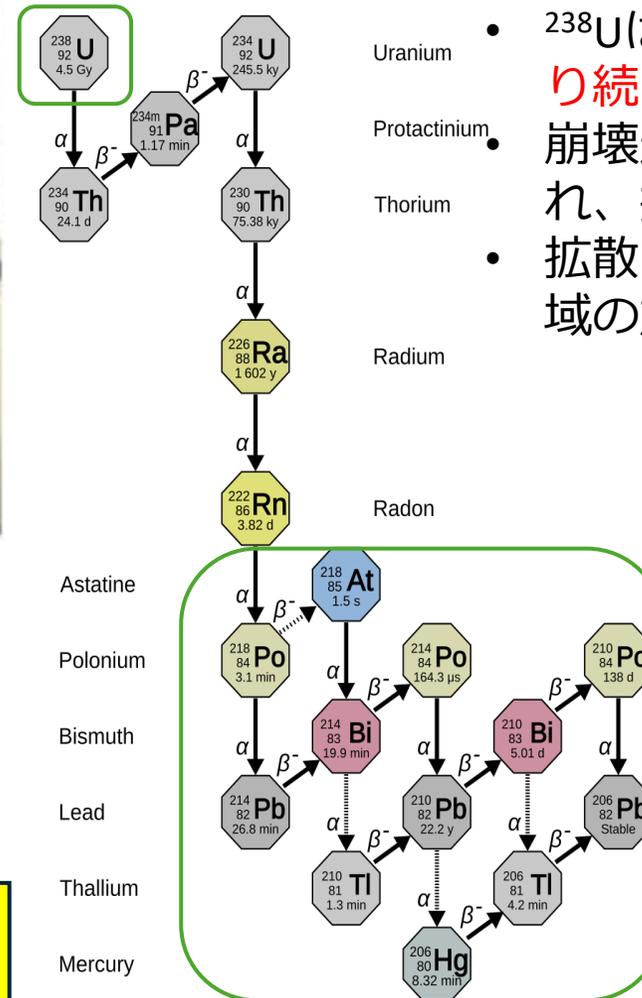
現在稼働している代表的な地下実験グループ



- 宇宙素粒子実験のための検出器は、バックグラウンド(BG)となる宇宙線を削減するために、地下に設置されている。
- また、共通してRI不純物などによる放射線も重大なBGとなっている。

極限まで不純物少ないの材料 + 大型化 が要求

自然放射能のウラン系列

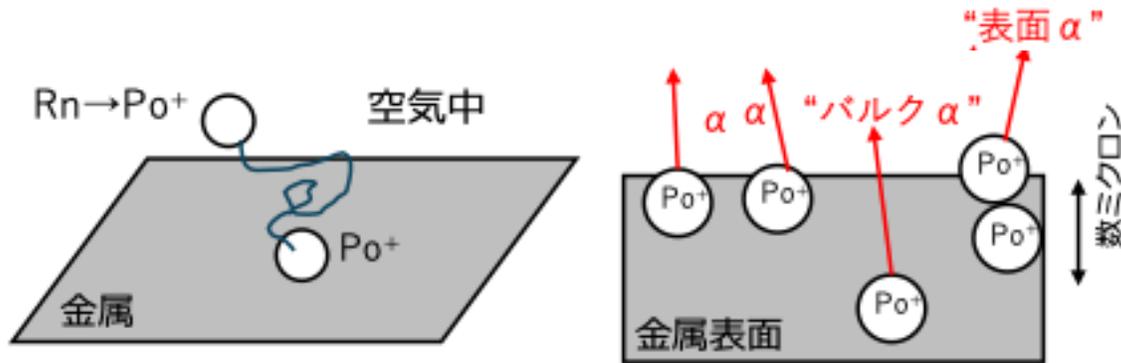
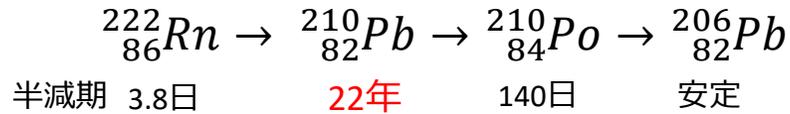


- Uranium •  $^{238}\text{U}$ は半減期が4.5Gyと長く地球上に残り続ける。→自然放射能
- Protactinium • 崩壊途中で貴ガスである $^{220}\text{Rn}$ が放出され、拡散される。
- Thorium • 拡散された $^{222}\text{Rn}$ が崩壊して、数MeV領域の放射線を出す。

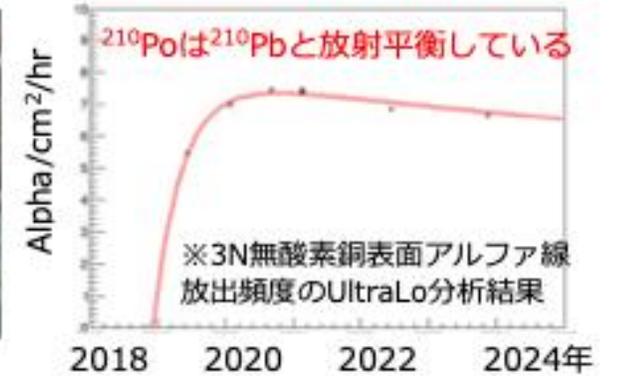
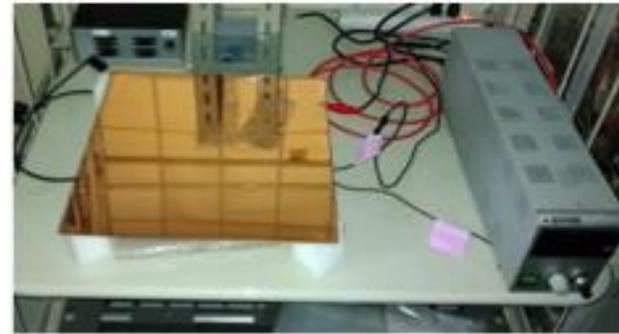
各地下実験グループではRI不純物の少ない材料を用いた材料を用いられている。

# 2.表面アルファ線

- いくら材料自身が綺麗でも、空気中に置いておくだけでラドン由来の放射性不純物が付着し汚染される。
- Rn娘核の $^{210}\text{Po}$ が表面数ミクロンまで埋め込まれる。
- ウラン系列の $^{210}\text{Pb}$ の半減期は22年と非常に長く、汚染された表面から、娘核の $^{210}\text{Po}$ が定常的に5.3MeVのアルファ線を放射する。



神岡坑内のラドン豊富な空気に暴露したのち放置



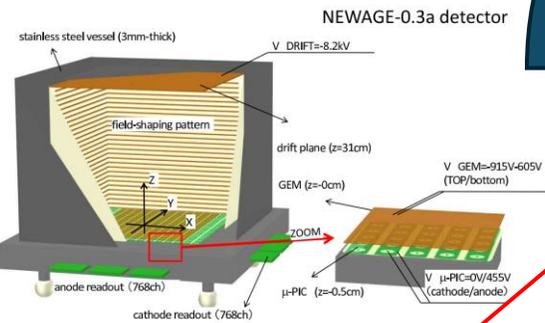
- 坑内の豊富なラドン娘核が金属表面に付着し、 $^{210}\text{Pb}$ (半減期:22年)として定着。
- 子孫核種の $^{210}\text{Po}$ が逐次生成され、表面アルファ線量が増える。その後、 $^{210}\text{Pb}$ の半減期に沿って減衰する様子が確認できる。

材料の放射能汚染を測定することを目的とした  
極低放射能な表面アルファ線検出器の開発

# 3. lowBG アルファ線イメージ分析

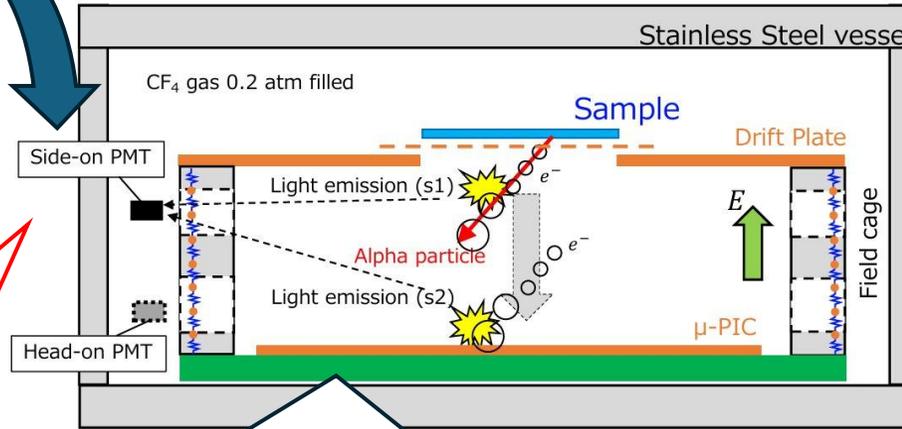
NEWAGE-0.3a:地下における  
3次元方好感度を持つDM発  
探索(Sep.~Dec. 2008 in 神岡)

Phys Lett B 686 (2010) 11.



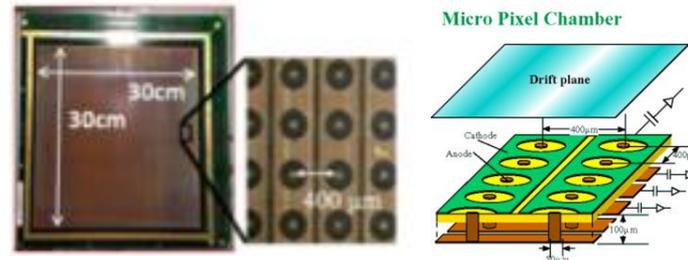
## AICHAM : Alpha-particle Imaging CHAMber

表面アルファ線イメージ分析のための、  
 $\mu$ -PICを用いたガスTPC(time-projection chamber)  
Nucl Inst Meth A 953(2020) 163050.

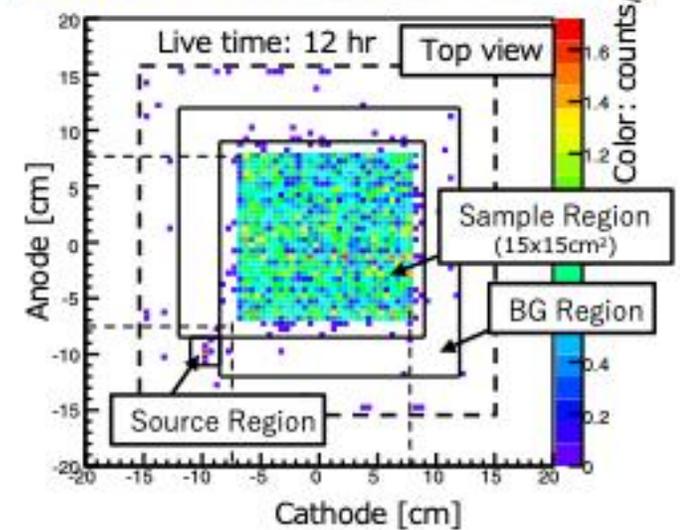
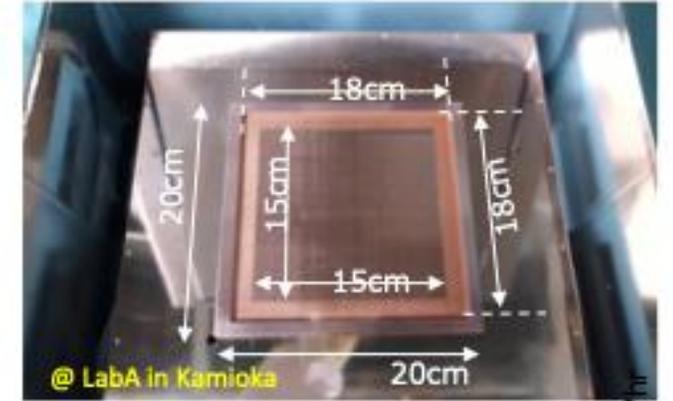
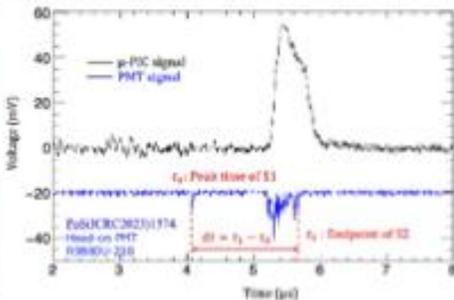


## Low- $\alpha$ $\mu$ -PIC (micro-pixel imaging chamber)

- Anode and cathode 2-D strip sensor.
- 400  $\mu$ m pitch, 768ch+768ch, 300 x 300 mm<sup>2</sup> covered.
- Low alpha emission from the surface  
Nucl Inst Meth A 977 (2020) 164285.



Side-on Photo-multiplier Tube (PMT) : この小型  
PMTは、TPCと真空容器の隙間に実装。



## 感度評価

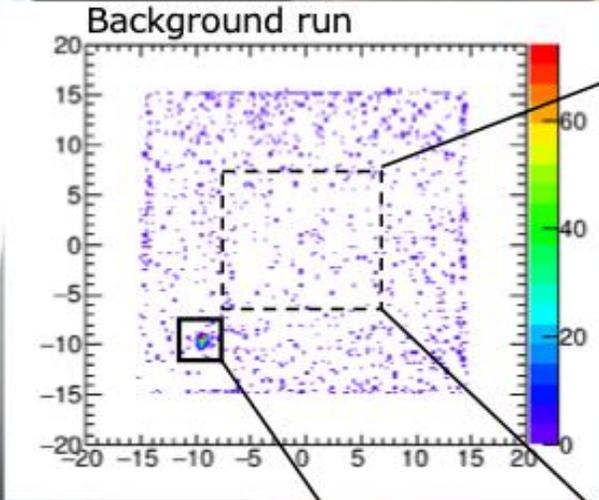
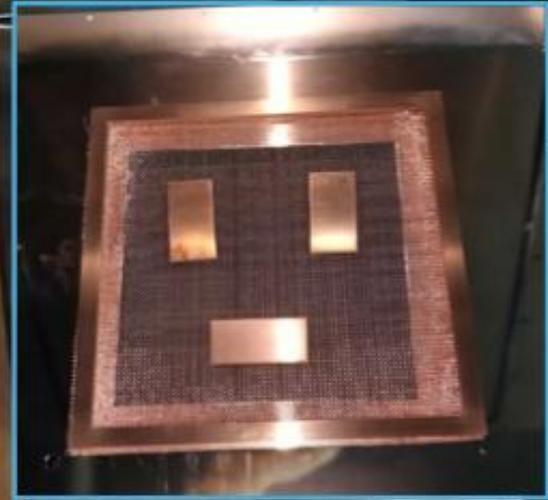
分析限界(w.o. PMT):  $\sim 3 \times 10^{-3} \alpha/\text{hr}/\text{cm}^2$  (90%CL)

分析限界(w.PMT) :  $O(10^{-4}) \alpha/\text{hr}/\text{cm}^2$  (90%CL)

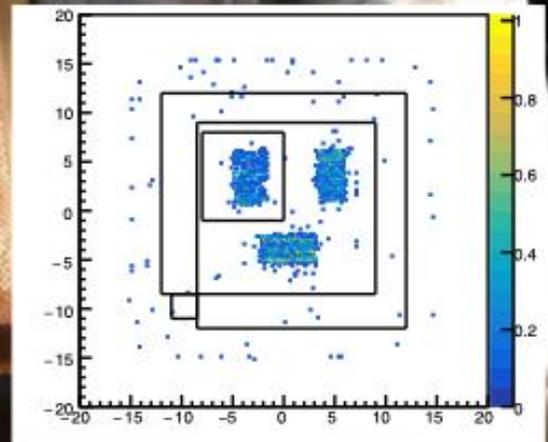
# 4.AICHAM

## 3. AICHAMのアクティビティ

有効面積 : 15x15 cm<sup>2</sup>  
メッシュの上にサンプルを乗せる。



同時に測定する小型 $\alpha$ 線源  
ドリフト板に穴が空いている。



$\alpha$ 線源を置いた箇所に分布が存在してイメージ取得できている。

# 5. アルファ線分析機の高感度化

Ultra Lo 1800, XIA LLC  
※商品, 神岡にもあります



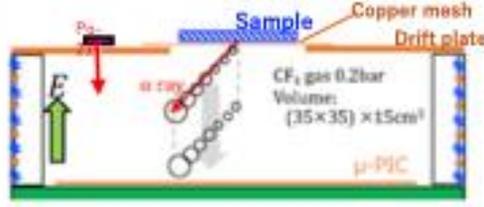
IEEE Trans NS 62(2) (2015) 3020  
NIMA 884 (2018) 157  
arXiv.2009.08002z

原理: 1気圧 Arガス  
イオンチェンバー  
イメージングなし

有効面積: 707 cm<sup>2</sup> (typical)  
1800 cm<sup>2</sup> (max)

BG rate  
~10<sup>-4</sup> a/cm<sup>2</sup>/hr

AICHAM @神岡



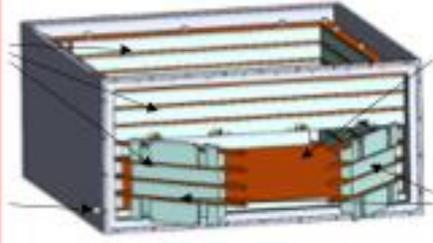
AIP Conf. Proc. 1921, 070001 (2018).  
NIMA 953 (2020) 163050.  
J. Phys.: Conf. Ser. 2156 012176 (2021).

0.2気圧 CF<sub>4</sub>ガスTPC

30x30cm<sup>2</sup> LA μ-PIC  
Effective area: 15x15cm<sup>2</sup>

~2023  
Sensitivity ~10<sup>-3</sup> a/cm<sup>2</sup>/h<sub>(90%CL)</sub>  
2024~  
Sensitivity O(10<sup>-4</sup>) a/cm<sup>2</sup>/h<sub>(90%CL)</sub>

Screener3D @上海  
上海交通大学



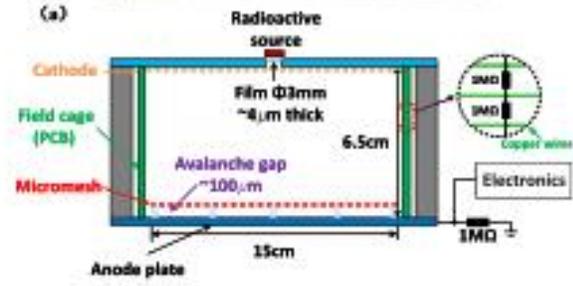
Nucl. Sci. Tech. 32(12), 142 (2021).  
Rad. Det. Tech. Meth. 7, 90 (2023).

1気圧 Ar:CO<sub>2</sub>(orイソブタン)  
混合ガスTPC

20x20 cm<sup>2</sup> Micro-megas  
Effective area: 14.6x14.6cm<sup>2</sup>

BG rate  
(4.7±0.9)x10<sup>-4</sup> counts/cm<sup>2</sup>/hr

Ultra-LowBG TPC @Hefei, China  
中国科学技術大学



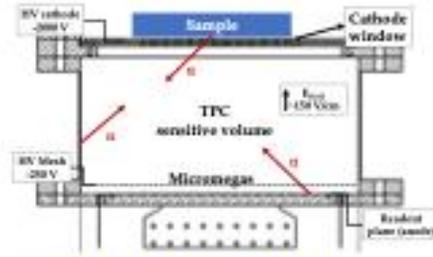
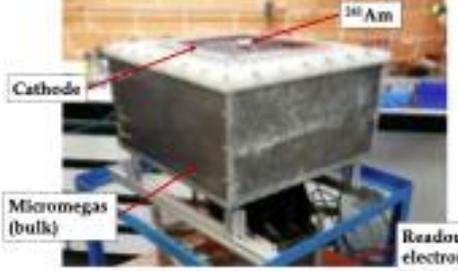
Rev. Sci. Instrum. 93, 013303 (2022).

1気圧 Ne:イソブタン=95:5  
混合ガスTPC

15x15 cm<sup>2</sup> Micro-megas  
Effective area: 5x5cm<sup>2</sup>

BG rate <1.6x10<sup>-3</sup> cpm (95%CL)  
< 10<sup>-1</sup> counts/cm<sup>2</sup>/h

AlphaCamm @Spain  
(proposal)



JINST 17 P08035 (2022).

1気圧 Ar+イソブタン2% ??  
混合ガスTPC

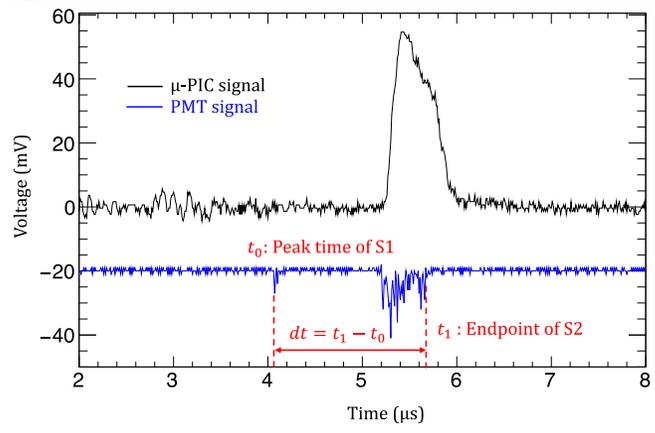
Using Micro-megas  
Effective area: 25x25cm<sup>2</sup>

Simulation-base  
BG rate estimate  
<2.1x10<sup>-4</sup> a/cm<sup>2</sup>/hr (95%CL)

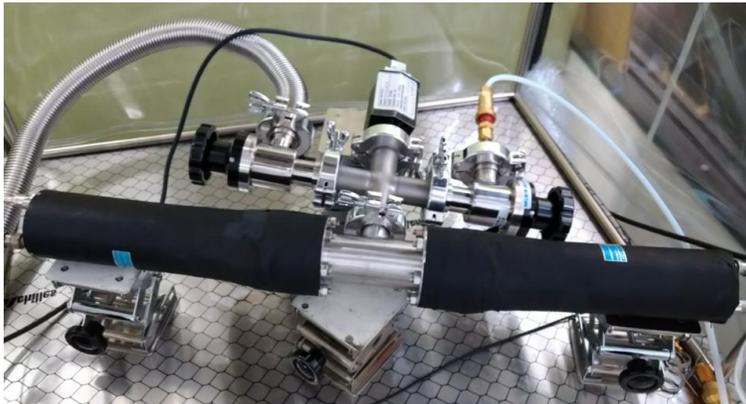
# 6. 光読み出し型のTPC開発(先行研究)

- 安価でより簡単に扱えるアルファ線検出機を開発したい
- AICHAMでは、PMTでS1,S2信号を観測できている。

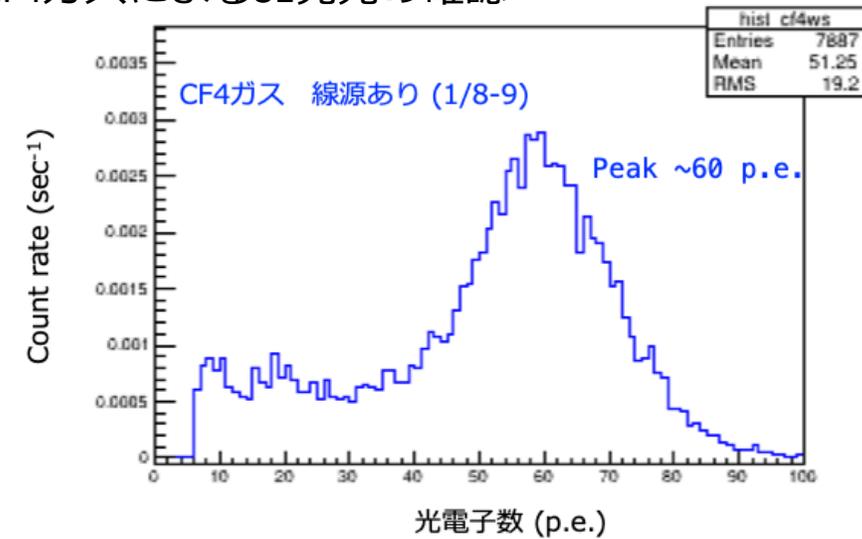
→光読み出し型の表面 $\alpha$ 線検出器が作れるかもしれない



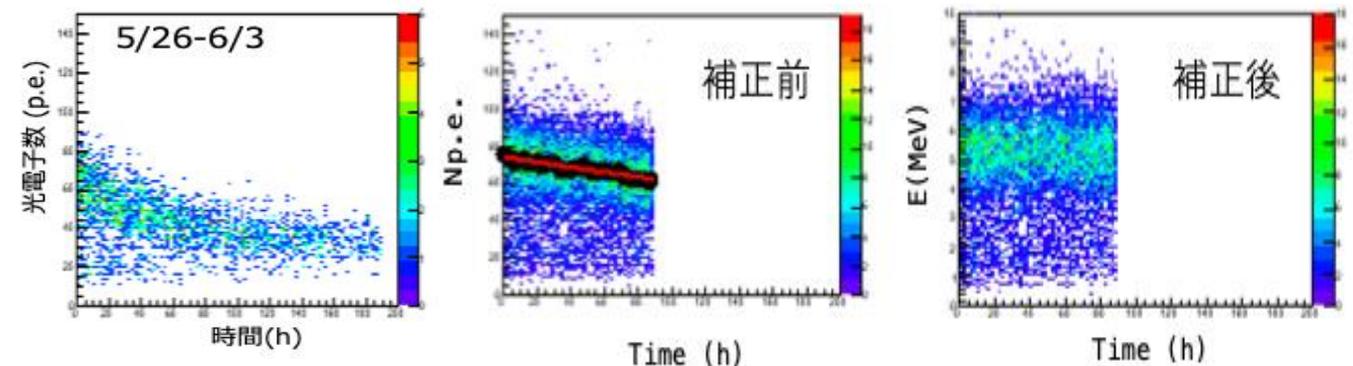
- $CF_4$ ガスの発光試験(東京理科大の先行研究)



- $CF_4$ ガスによるS1発光の確認



- $CF_4$ ガスの時間劣化による光電子数の減少

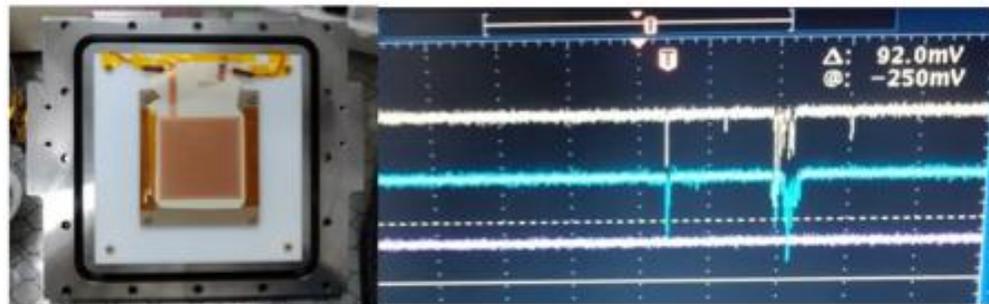


活性炭を入れてガス循環をすること抑制

# 6. 光読み出し型のTPC開発(先行研究)

## PMTとGEMを用いたアルファ線検出器

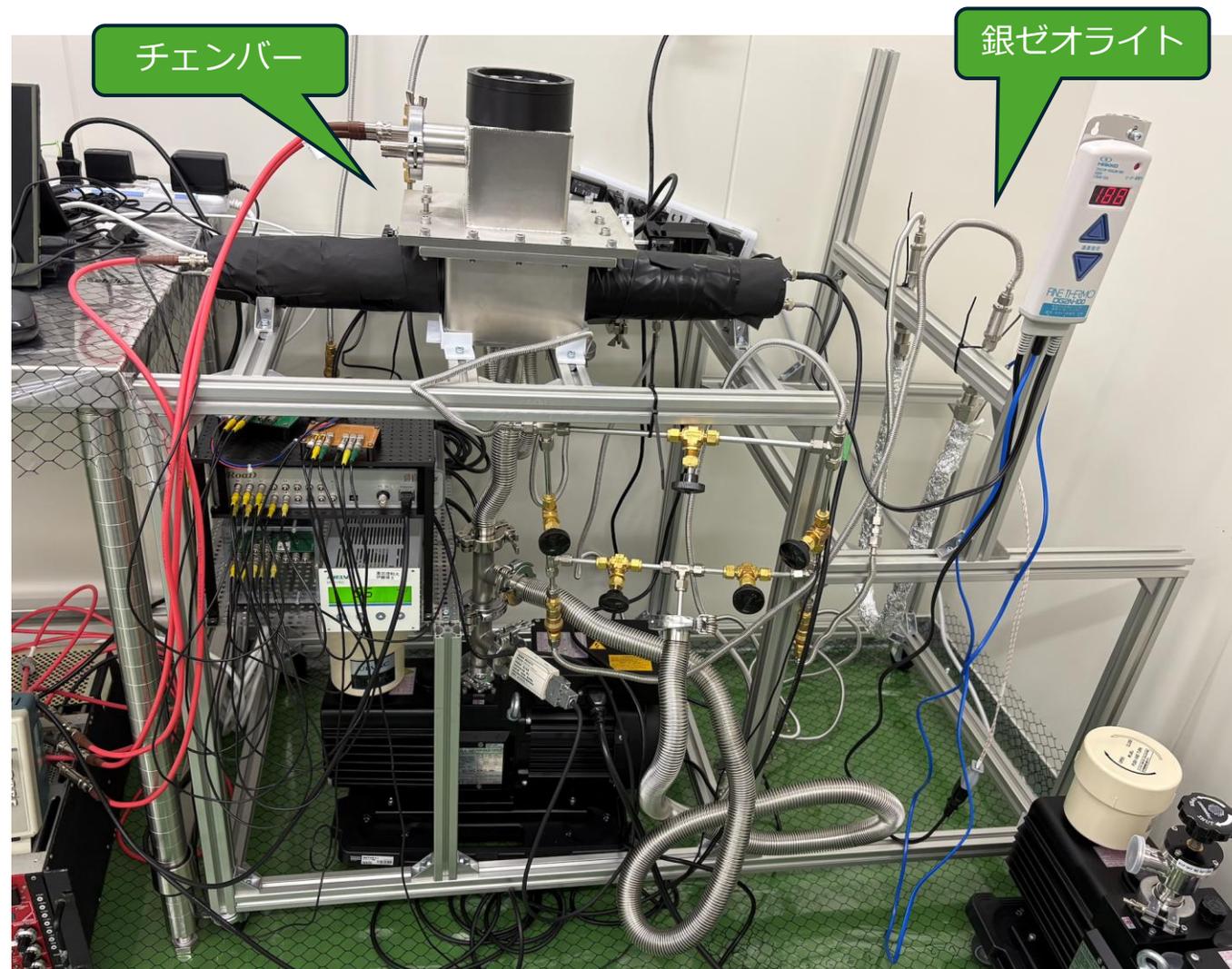
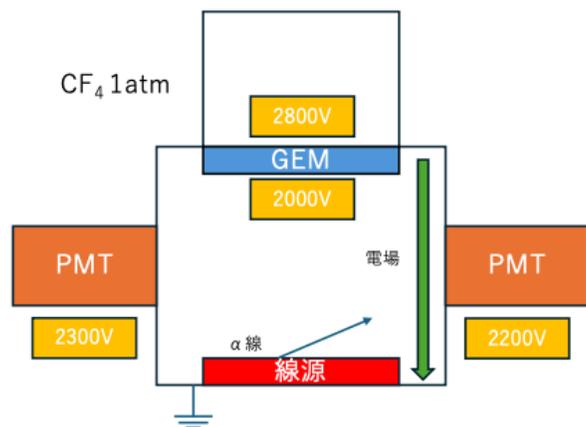
- $\alpha$ 線が $CF_4$ ガスを電離させながらシンチレーション光(S1)を出す。
- 電離電子が、電場によりGEMに引き寄せられる。
- GEMで電子が加速され、光(S2)を出す。



## チェンバーの断面図概略

### GEMの仕様

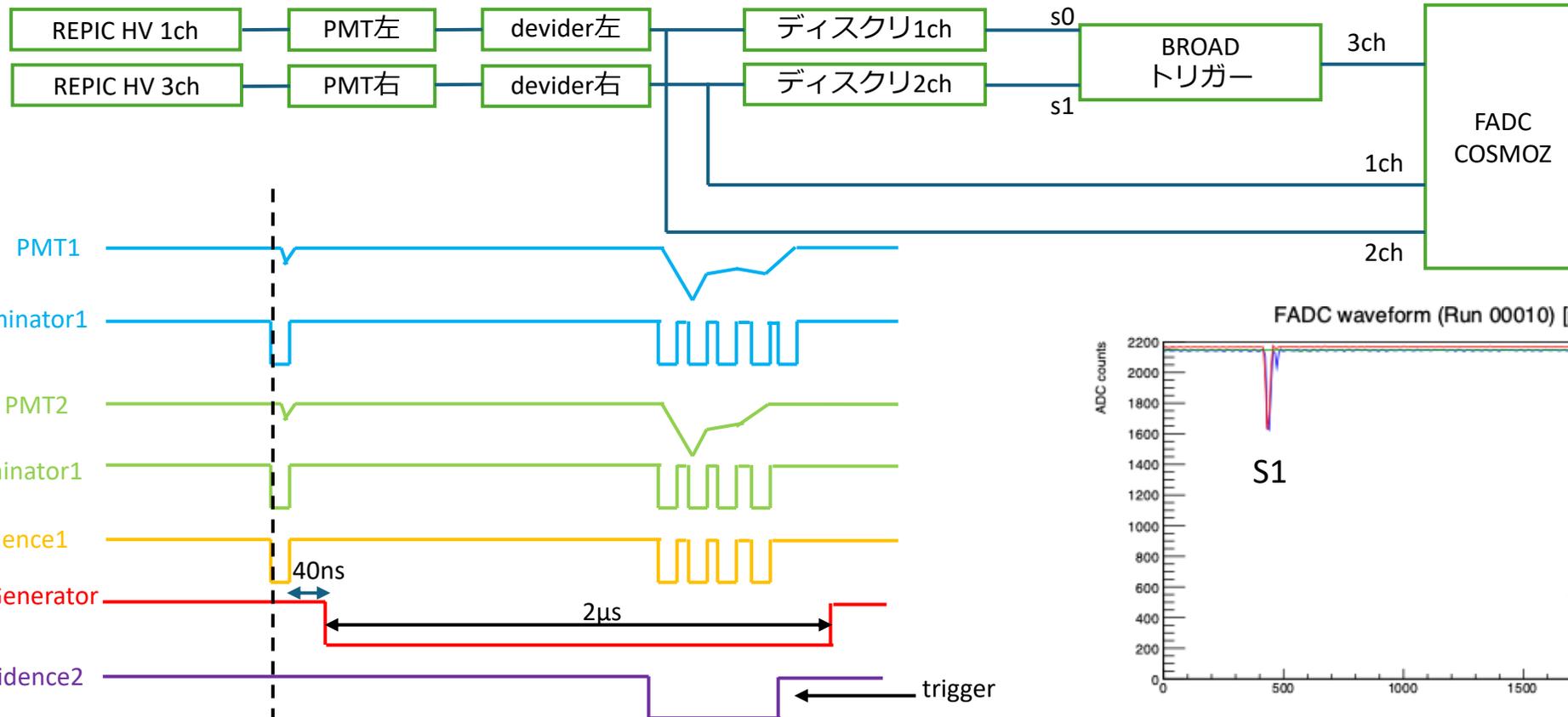
- 50mm×50mm
- 140 $\mu$ m pitch
- 70 $\mu$ m-phi
- 100 $\mu$ m thickness



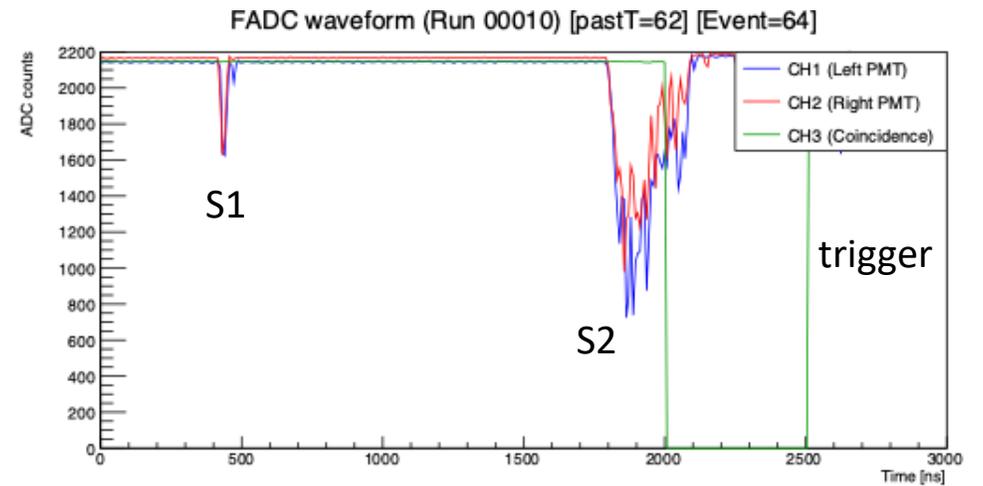
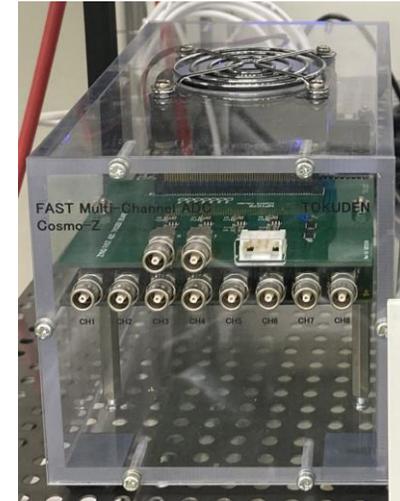
# 6. 光読み出し型のTPC開発(先行研究)

$\alpha$ 線が発生すると2つのPMTから時間差で2つの信号が発生

2つのPMTから同じタイミングで来るイベントが一定時間内に2回以上発生した際に波形取得をする。



FADC Cosmo-Z  
125MHz  
8ch読み出し



# 6. 光読み出し型のTPC開発(先行研究)

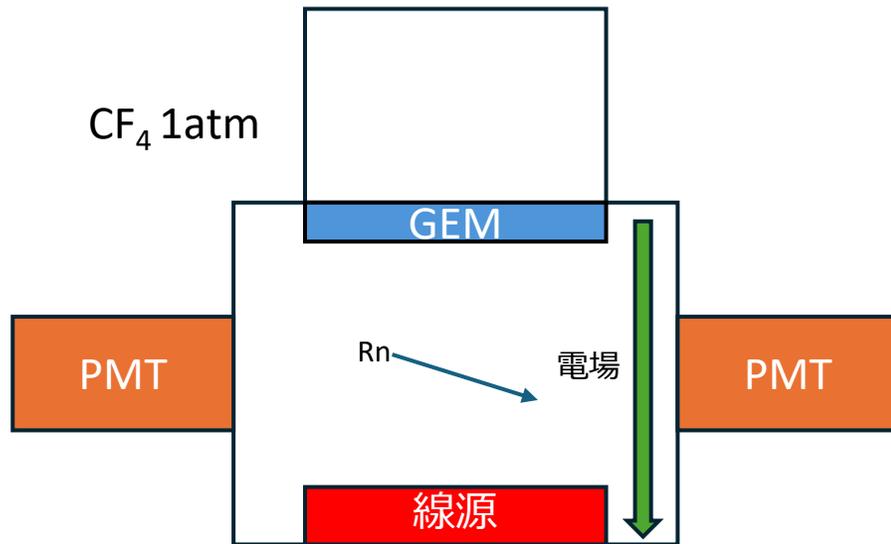
## 銀ゼオライトによるバックグラウンドの削減

- 現在の主要なBGは、 $CF_4$ ガス内の残留ラドン
- ラドンを減らすことが感度上昇に大きく効いてくる。

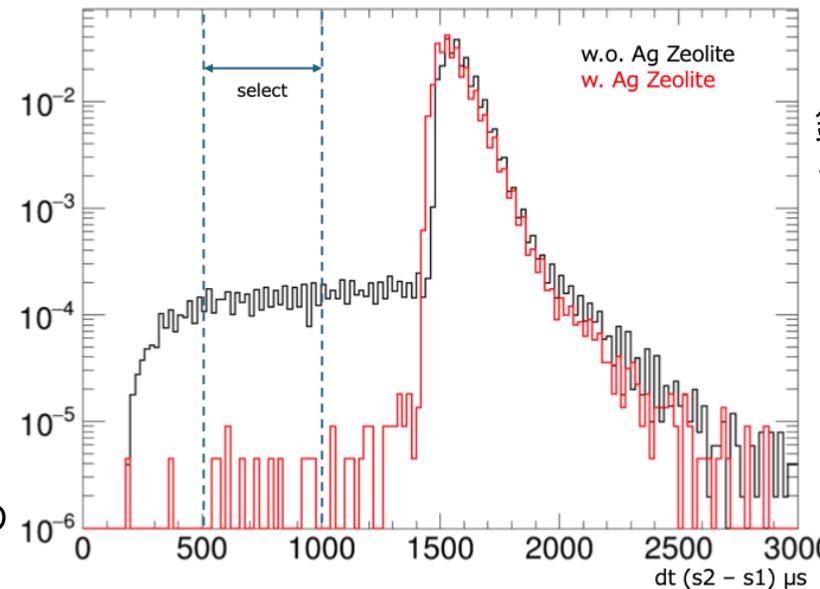


銀ゼオライト 8AgFER-D 30g

- イオン交換によって銀イオンが導入されたゼオライト
- 冷却なしで活性炭よりも強いラドン除去性能を持つ。



- ラドンは気体中に拡散しているため。s1信号とs2信号の時間差の分布が平らになる。
- また、線源由来の $\alpha$ 線は上向きだが、ラドン由来の $\alpha$ 線は上向と下向きの両方が存在する。



銀ゼオライトを入れることによりラドン由来の $\alpha$ 線が減ったと言える。

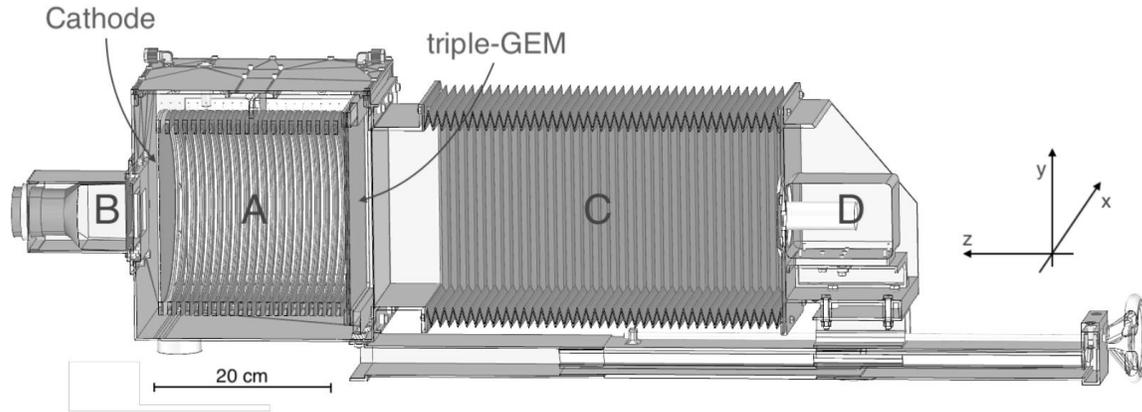
## 今後の課題

- ガス流量
- 種類
- ガス圧
- ベイキングの温度依存

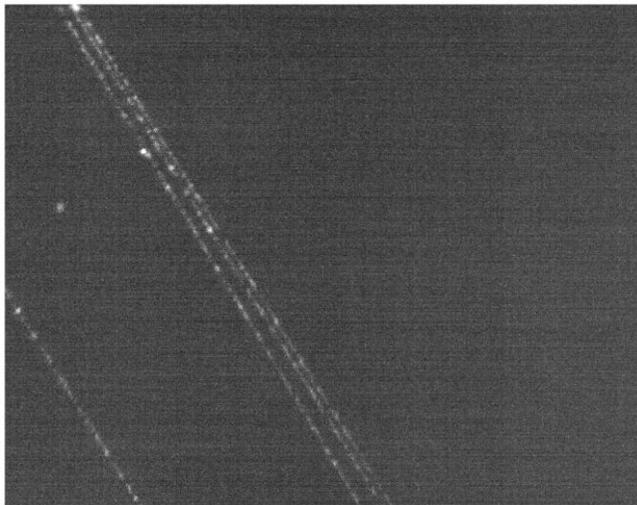
# 7. CYGNO実験(Optical Readout TPC)

## CYGNO実験 (CYGNO LEMON Prototype)

- 暗黒物質の方向感度検出を目指した光学型ガスTPC
- sCMOS、triple-GEM、PMTを用いた3次元飛跡再構築



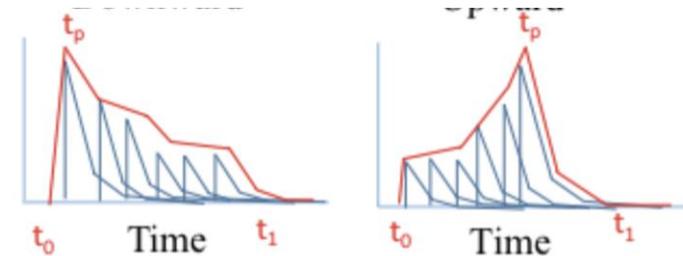
NIMA 999 (2021) 165209



CYGNO実験で捉えた  
宇宙線ミュオンの飛跡

## 光読み出し型のアルファ線検出器

- PMT+GEMを用いてS1,S2信号を捉えることはできた。
- ミューオンに比べて $\alpha$ 線の $dE/dx$ は非常に大きいため、もっとシンプルな仕組みで飛跡を観測できるかもしれない。
- CMOSカメラによる二次元情報に対して、PMTの時間情報を加えることで3次元の飛跡を再構成するTPC開発



PMTによる方向判断

$$F_{\text{down}} = S_2 / (S_1 + S_2),$$

$$S_1 = \int_{t_0}^{t_p} v(t) dt, \quad S_2 = \int_{t_p}^{t_1} v(t) dt.$$

# 8.CMOSカメラを用いた飛跡観測

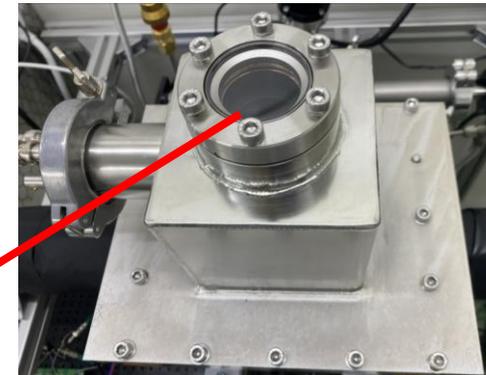
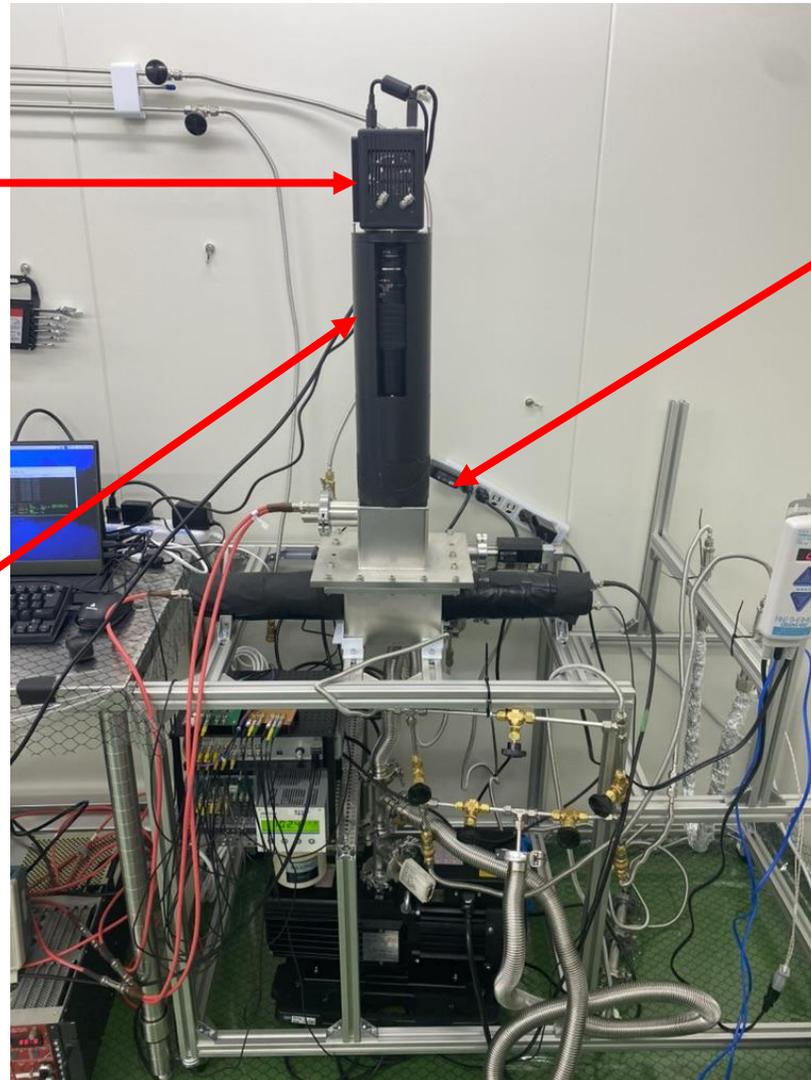
## セットアップ



浜松フォトニクス  
ORCA-FUSION  
デジタルCMOSカメラ  
型番:C13440-20CU

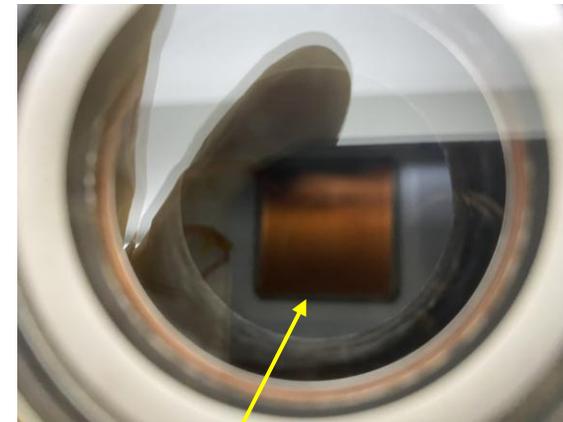


マミヤ製レンズ  
焦点距離  
→120mm  
最短撮影距離  
→400mm



ICF70  
クリスタル窓

ICF70から覗いたGEM



GEM

※測定時は暗幕を被せて遮光しています

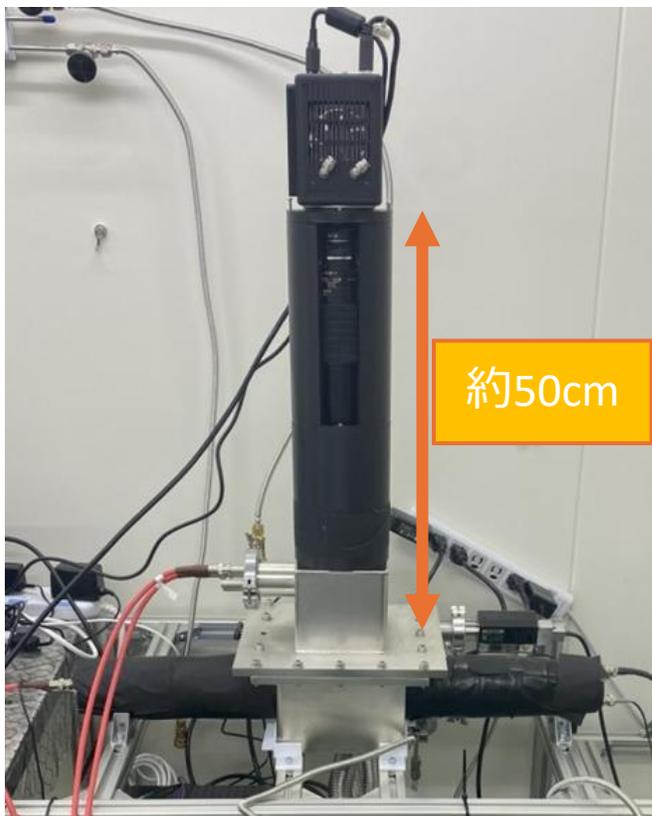
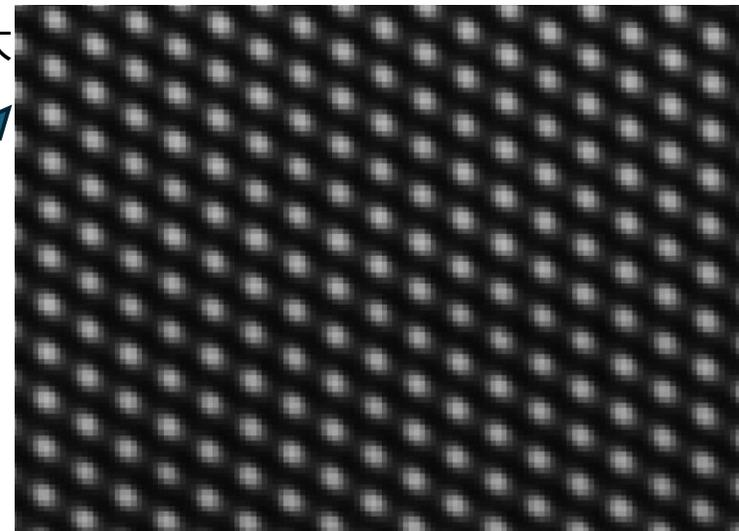
# 8.CMOSカメラを用いた飛跡観測

## GEMの撮影

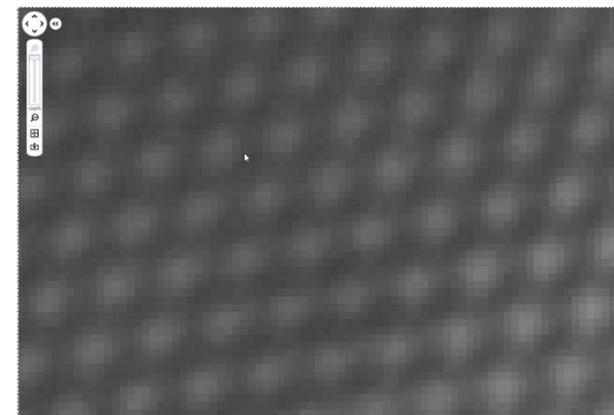
- GEMでのS2発光の飛跡を観測するためにGEMにピントを合わせる。
- チェンバー内にライトを入れて、GEMの穴から光を出す。
- ピントを調整するために拡大をしながら、GEMの穴がくっきり見えるようにレンズを調整

750%拡大

GENの穴のピント



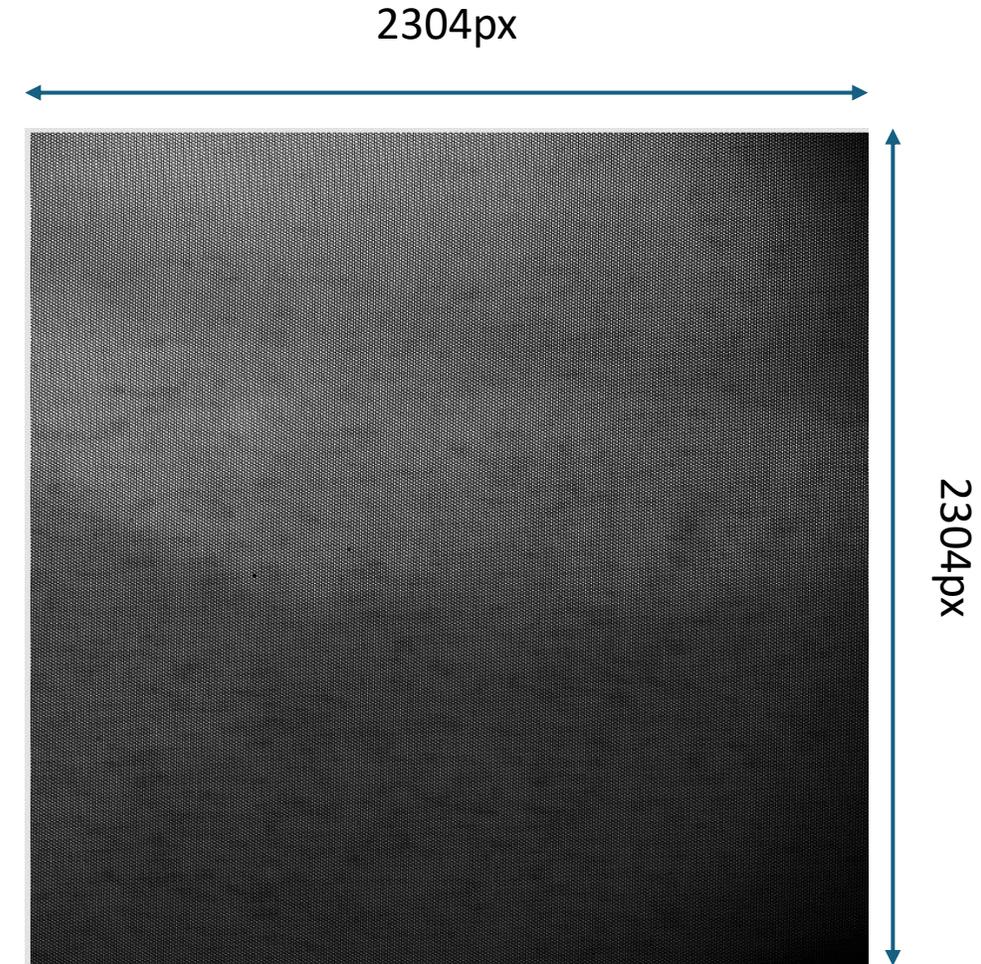
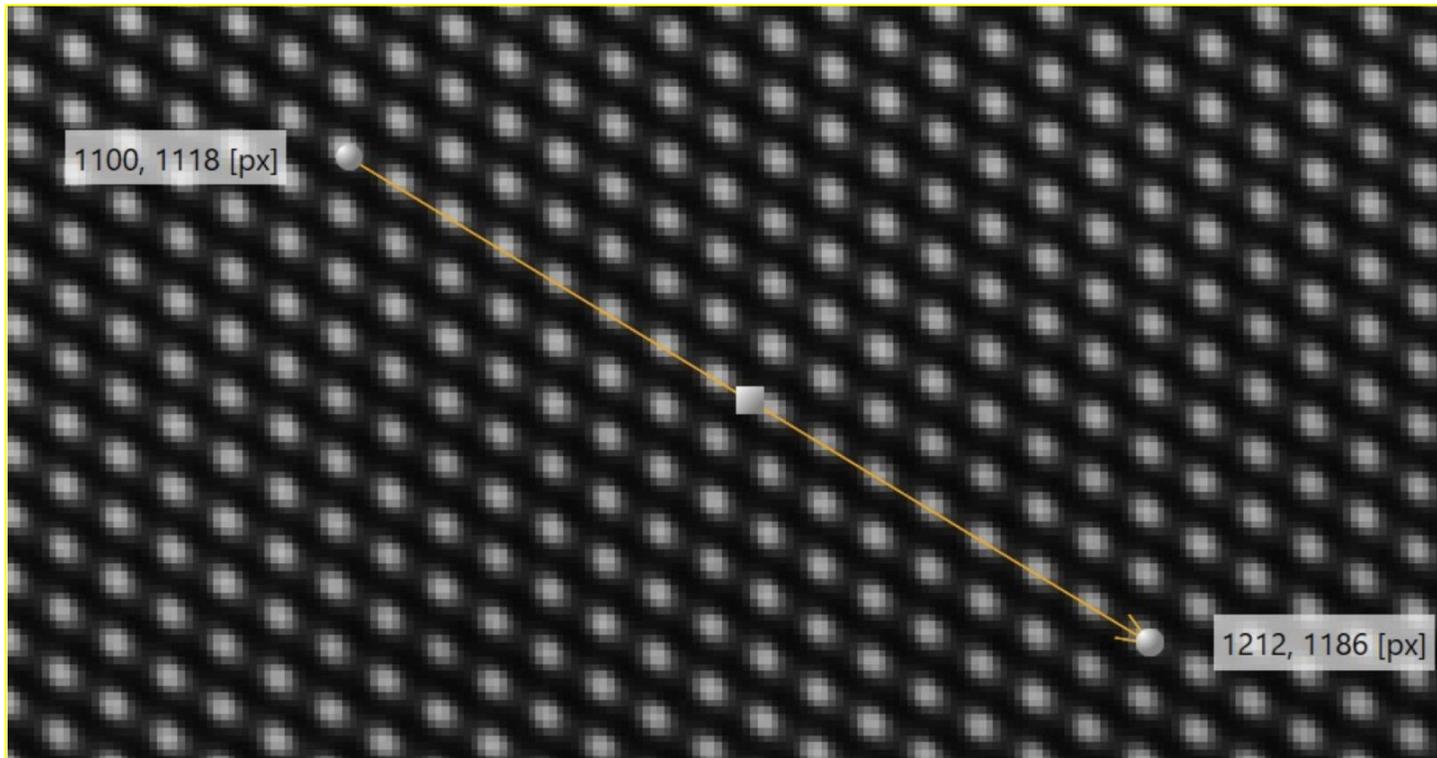
ピントが微妙に合っていない



# 8. CMOSカメラを用いた飛跡観測

## 撮影範囲

- GEMの穴が $140\mu\text{m}$ ピッチであることと、ピクセル数を比較する
- 写っていた範囲は約 $4\text{cm}\times 4\text{cm}$ の範囲のみ
- $5\text{cm}\times 5\text{cm}$ のGEMなので全範囲は写っていない。



# 8. CMOSカメラを用いた飛跡観測

## 飛跡の観測

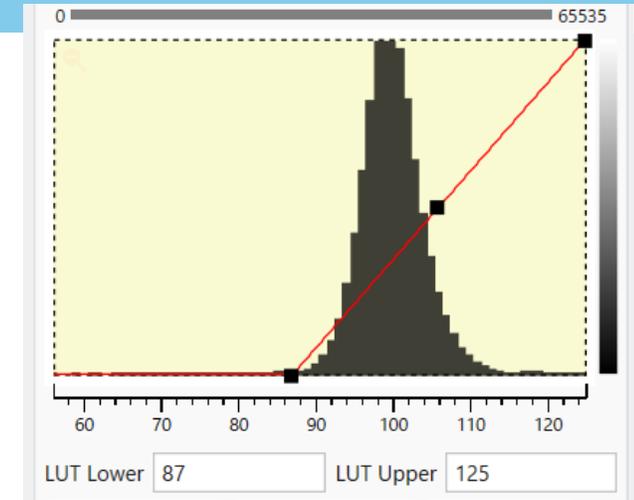
- アルファ線線源を用いて、アルファ線の飛跡を観測
- $\text{CF}_4$ ガス: 1気圧、GEM内電位差: 900V
- 露光時間: 0.1s 撮影時間: 2min 撮影フレーム: 1200枚

## 飛跡の頻度比較

- GEM+PMTのみでの計測(22.36hour):  $51.4 \pm 1.6$  alpha/cm<sup>2</sup>/hour
- CMOSカメラで捉えた飛跡の数(2min):  $43.2 \pm 7.2$  alpha/cm<sup>2</sup>/hour
- (1枚ずつフレームを見ていき、飛跡を数えた)



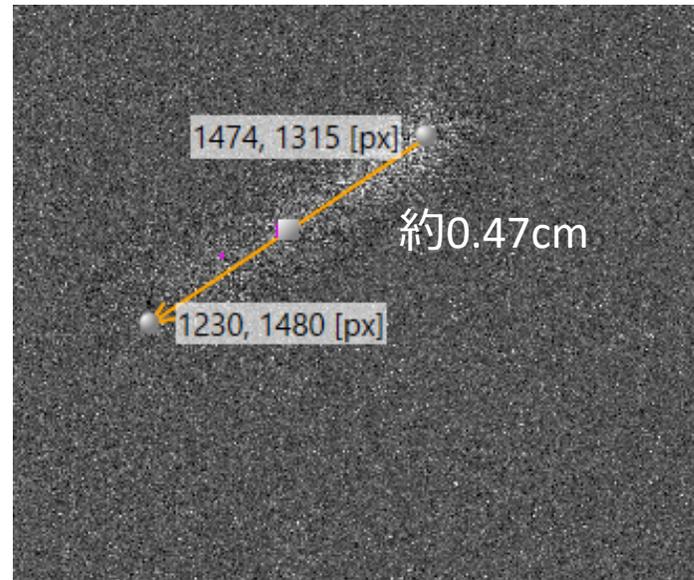
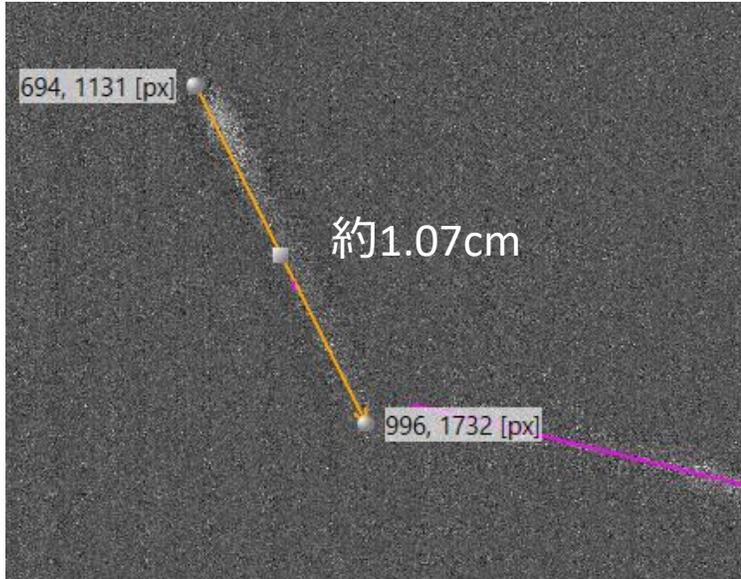
$\alpha$ 線源(Po-210)



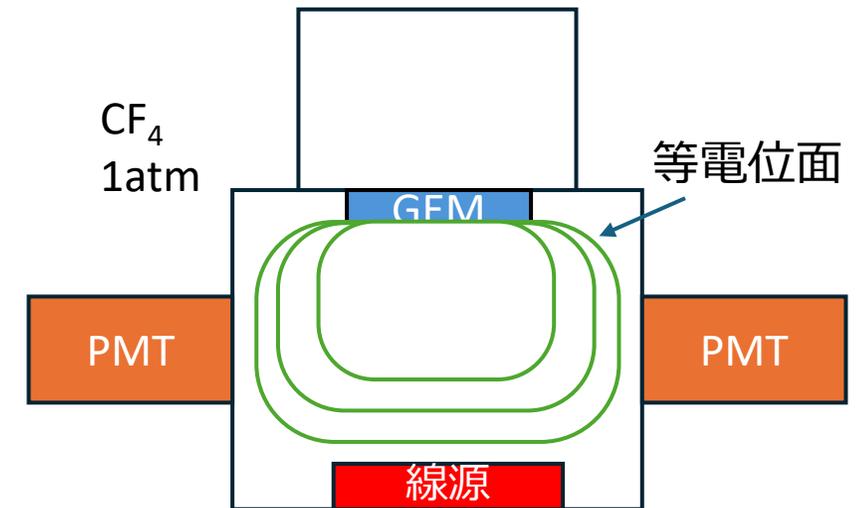
# 8. CMOSカメラを用いた飛跡観測

## 二次元飛跡長の長さ

- GEMのピントを合わせた時の1pxあたりの長さを  
用いて飛跡の長さを測定する。



- おおよその飛跡の長さ
  - 0.5cm~1cmほど
- ただし、電場による飛跡の歪みは考慮していない。



# 9. 今後の展望

1. DAQ開発
2. 飛跡再構成と解析手法
  - CMOSカメラとPMTによる飛跡再構成
  - 電場シミュレーションによる飛跡補正
3. 面積を拡張することによる感度向上
  - GEMを5cm×5cmを10cm×10cmに変更することによる感度向上
  - それに伴って、チェンバーやレンズの仕様変更
4. バックグラウンド抑制
  - 銀ゼオライトによるラドン除去の最適化

# BACKUP

## CF<sub>4</sub>ガス内の5.3MeVアルファ線の飛跡長

- 1気圧：3cm
- 0.2気圧：8cm

