

表面アルファ線分析のための GEMとCMOSに基づく 光学TPC開発

神戸大学大学院理学研究科

青山 真也

第2回 学術変革『地下稀事象』若手研究会



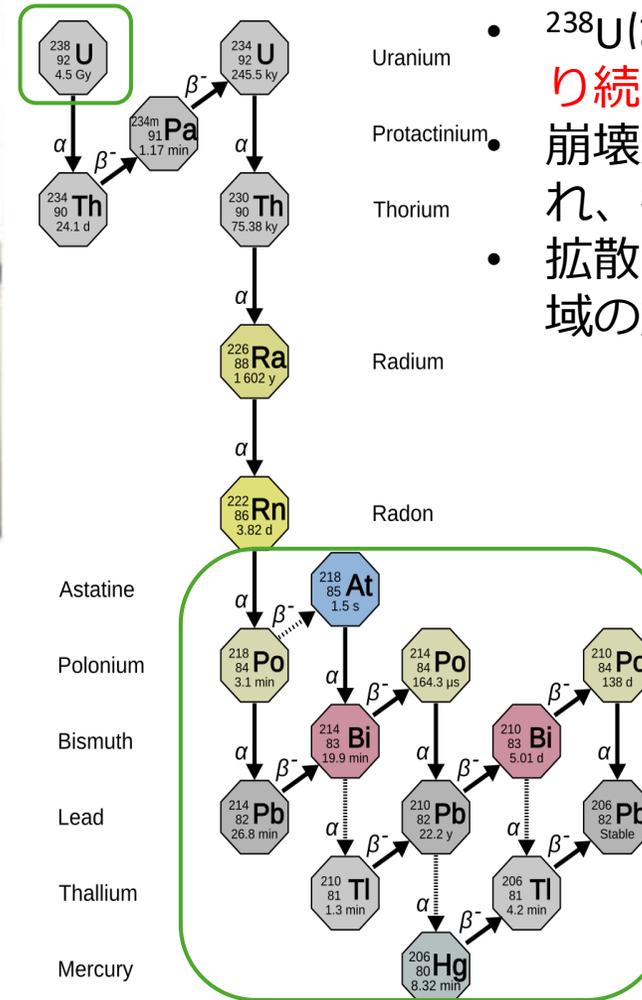
1. 研究背景

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。

自然放射能のウラン系列

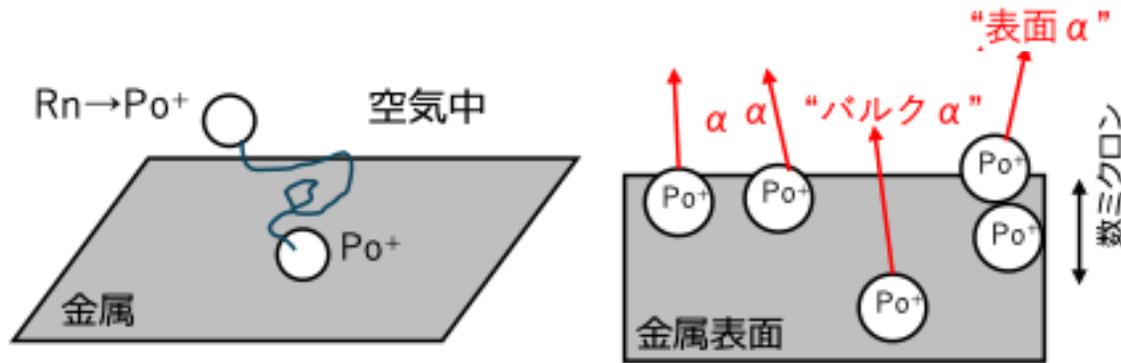
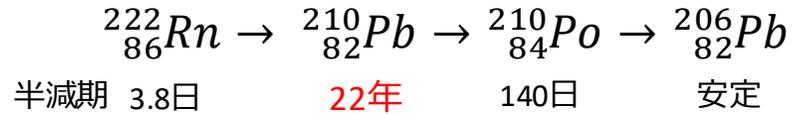


- ^{238}U は半減期が4.5Gyと長く地球上に残り続ける。→自然放射能
- 崩壊途中で貴ガスである ^{222}Rn が放出され、拡散される。
- 拡散された ^{222}Rn が崩壊して、数MeV領域の放射線を出す。

材料純化をはじめとした低BG化が進められている

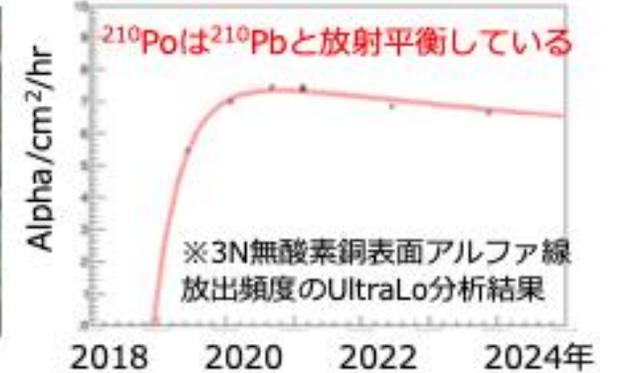
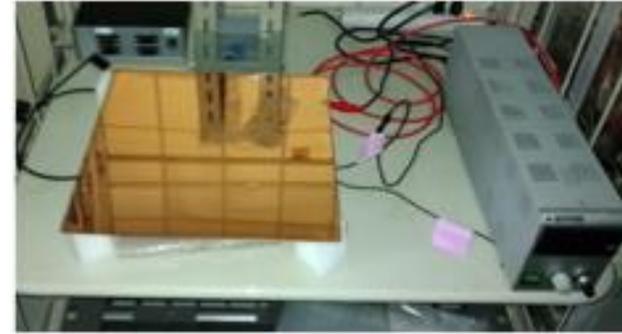
2.表面アルファ線

- 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。



²¹⁰Pb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²¹⁰Po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



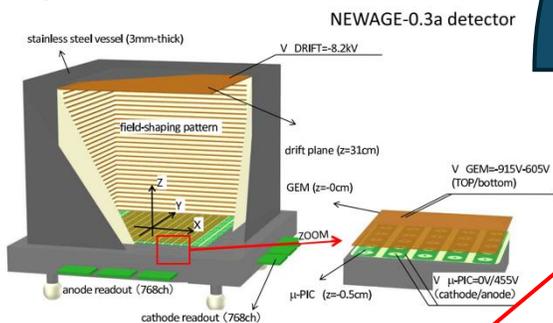
- 坑内の豊富なラドン子孫核種が金属表面に付着し、²¹⁰Pb(半減期:22年)として定着。
- 子孫核種の²¹⁰Poが逐次生成され、表面アルファ線量が増える。その後、²¹⁰Pbの半減期に沿って減衰する様子が確認できる。

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

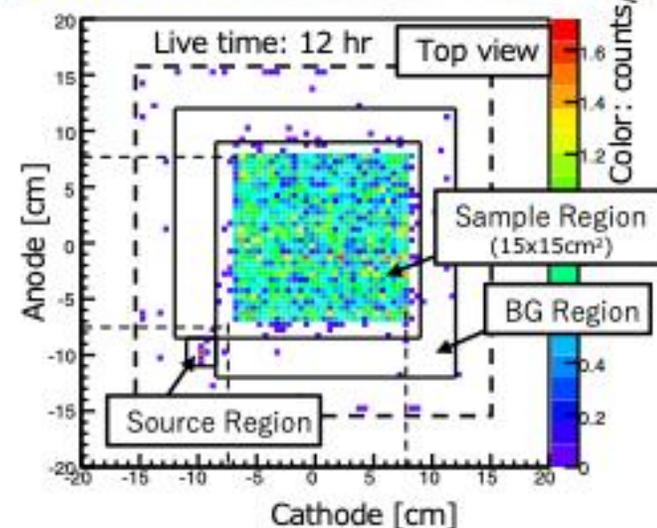
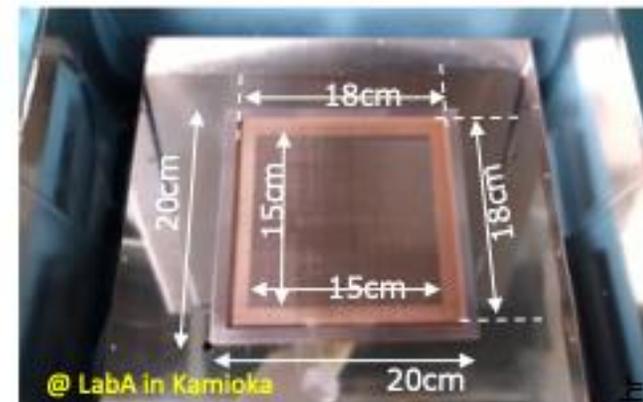
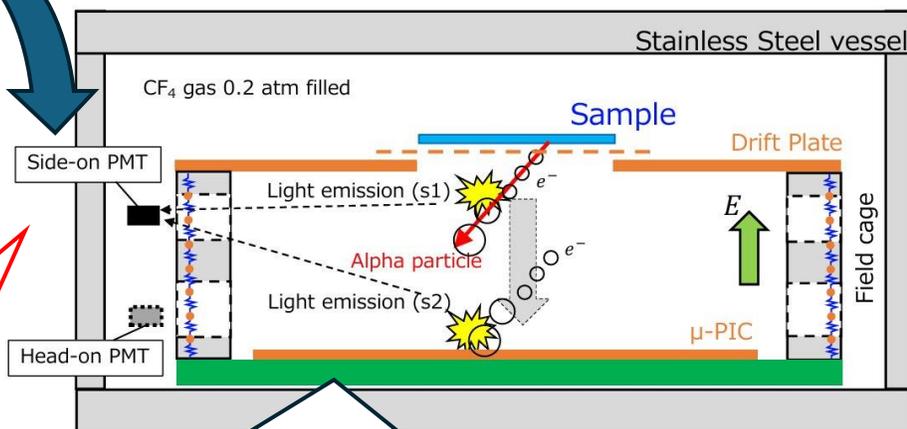
3. lowBG アルファ線イメージ分析

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

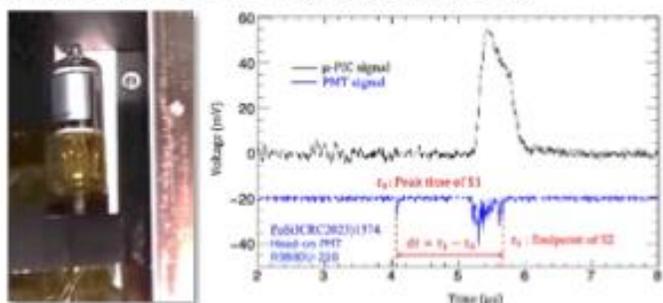
Phys Lett B 686 (2010) 11.



AICHAM : Alpha-particle Imaging **CHAM**ber
 表面アルファ線イメージ分析のための、
 μ -PICを用いたガスTPC(time-projection chamber)
 Nucl Inst Meth A 953(2020) 163050.

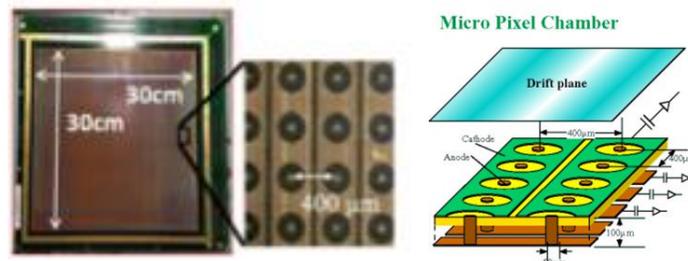


Side-on Photo-multiplier Tube (PMT) : この小型PMTは、TPCと真空容器の隙間に実装。



Low- α μ -PIC (micro-pixel imaging chamber)

- Anode and cathode 2-D strip sensor.
 - 400 μ m pitch, 768ch+768ch, 300 x 300 mm² covered.
 - Low alpha emission from the surface
- Nucl Inst Meth A 977 (2020) 164285.



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. アルファ線分析機の高感度化

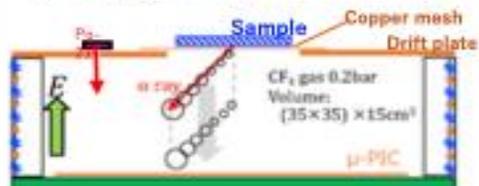
Ultra Lo 1800, XIA LLC

※商品, 神岡にもあります



IEEE Trans NS 62(2) (2015) 3020
 NIMA 884 (2018) 157
 JINST 18 P01027.

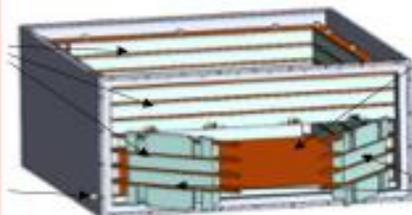
AICHAM @神岡



AIP Conf. Proc. 1921, 070001 (2018).
 NIMA 953 (2020) 163050.
 J. Phys.: Conf. Ser. 2156 012176 (2021).
 PoS (ICRC2023) 1374.
 PoS (ICRC2025) 495.

Screener3D @上海

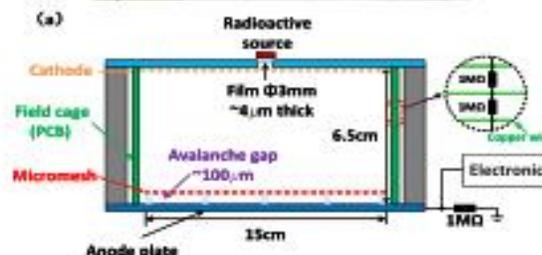
上海交通大学



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

Ultra-LowBG TPC @Hefei, China

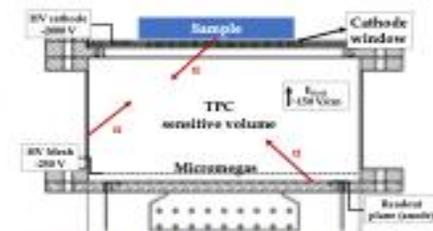
中国科学技术大学



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

AlphaCamm @Spain

(proposal)



JINST 17 P08035 (2022).
 PhD Thesis, arXiv:2507.02172.

原理: 1気圧 Arガス イオンチェンバー イメージングなし	0.2気圧 CF_4 ガスTPC	1気圧 Ar:CO ₂ (orイソブタン) 混合ガスTPC	1気圧 Ne:イソブタン=95:5 混合ガスTPC	1気圧 Ar+イソブタン2% ?? 混合ガスTPC
有効面積: 707 cm ² (typical) 1800 cm ² (max)	30x30cm ² LA μ -PIC Effective area: 15x15cm ²	20x20 cm ² Micro-megas Effective area: 14.6x14.6cm ²	15x15 cm ² Micro-megas Effective area: 5x5cm ²	Using Micro-megas Effective area: 25x25cm ²
BG rate $\sim 10^{-4}$ a/cm ² /hr	~2023 Sensitivity $\sim 10^{-3}$ a/cm ² /h _(90%CL) 2024~ Sensitivity O(10^{-4}) a/cm ² /h _(90%CL)	BG rate (4.7 \pm 0.9)x10 ⁻⁴ counts/cm ² /hr	BG rate <1.6x10 ⁻³ cpm (95%CL) < 10 ⁻¹ counts/cm ² /h	Simulation-base BG rate estimate <2.1x10 ⁻⁴ a/cm ² /hr _(95%CL)

5.光呼び出し型TPC

光読み出し型のアルファ線検出器

- 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 α 線検出器が作れるかもしれない

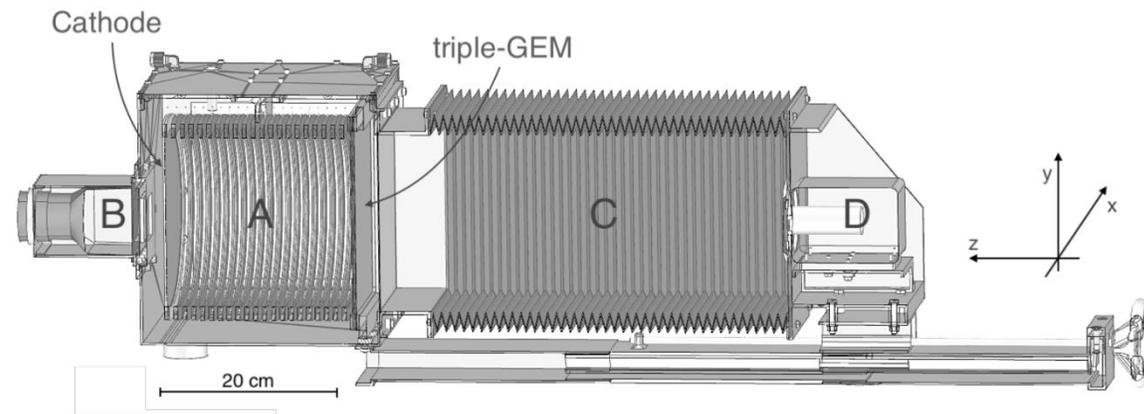
電荷読み出し型TPC
低エネルギー事象○
読み出し手法が複雑
ノイズが多い
比較的高価



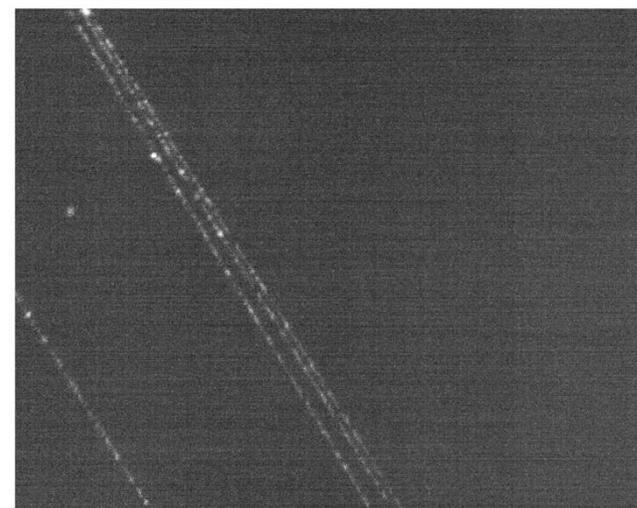
光読み出し型TPC
低エネルギー事象△
読み出し手法が単純
ノイズが少ない
比較的安価

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

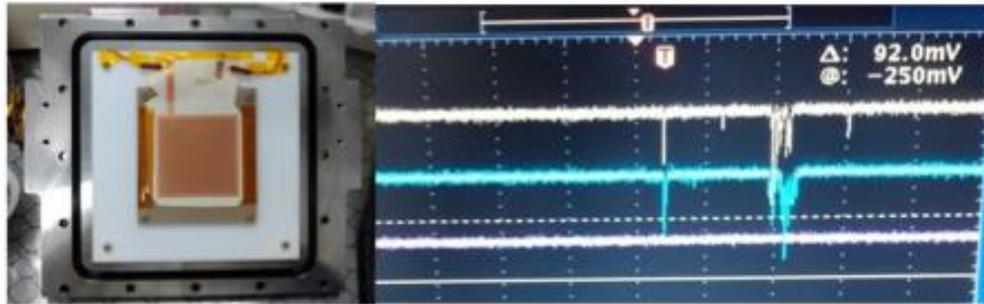


CYGNO実験で捉えた
宇宙線ミュオンの飛跡

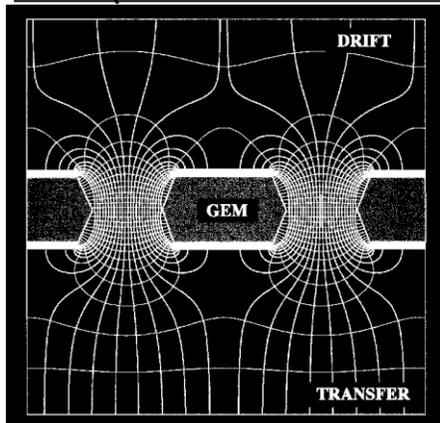
5. 光読み出し型TPC

PMTとGEMを用いたアルファ線検出器

- α 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。



GEM(Gas Electron Multiplier)



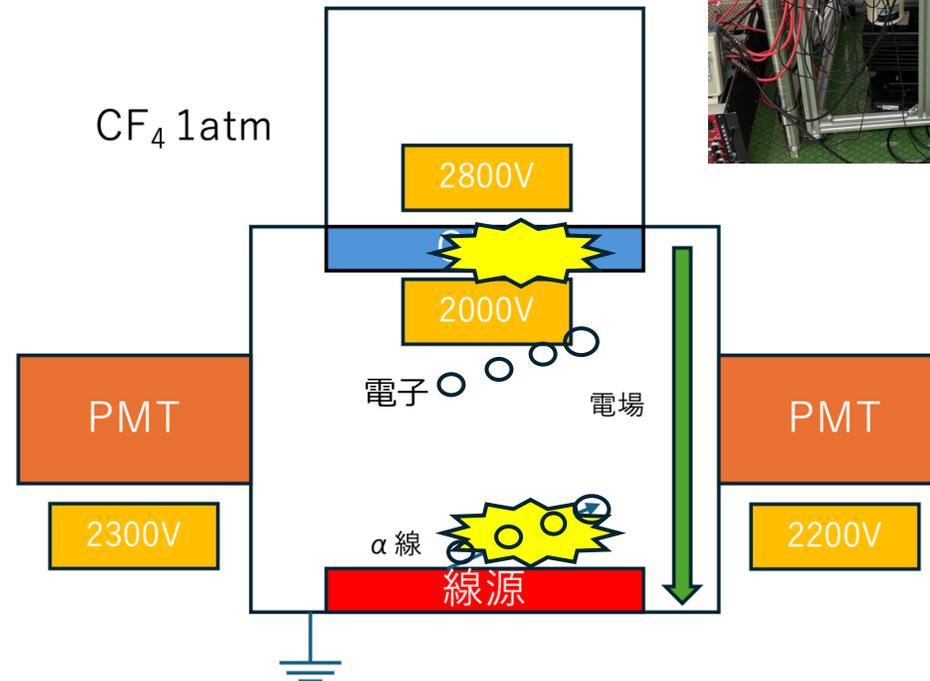
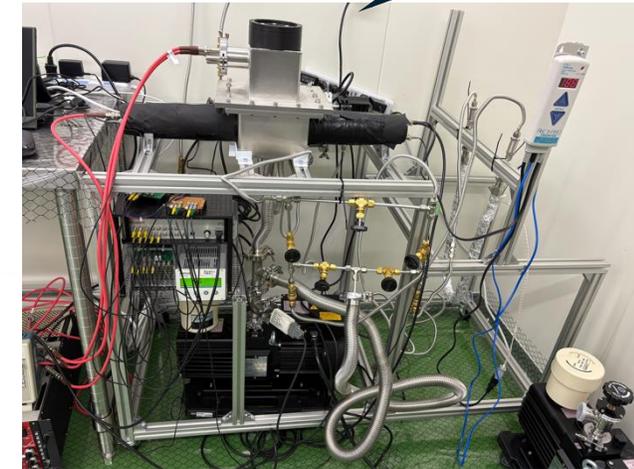
GEMの仕様

- 50mm×50mm
- 140 μm pitch
- 70 μm -phi
- 100 μm thickness

• Nuclear Physics A 663(1)

検出器の概要(神戸大学で立ち上げ)

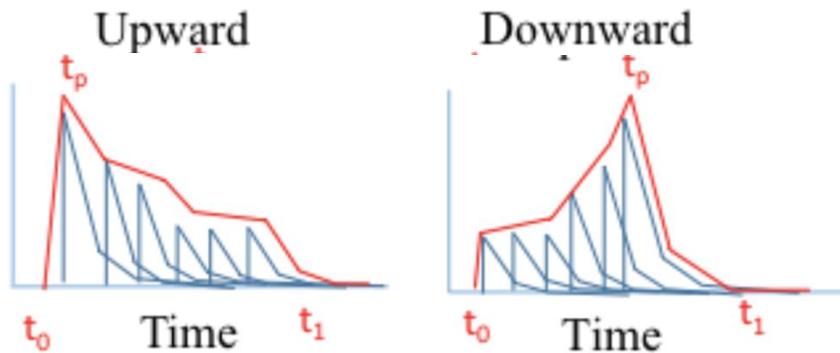
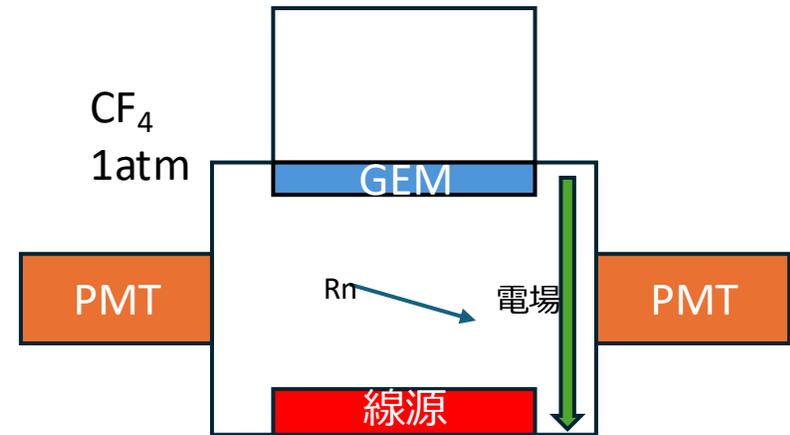
チェンバー



5. 光読み出し型TPC

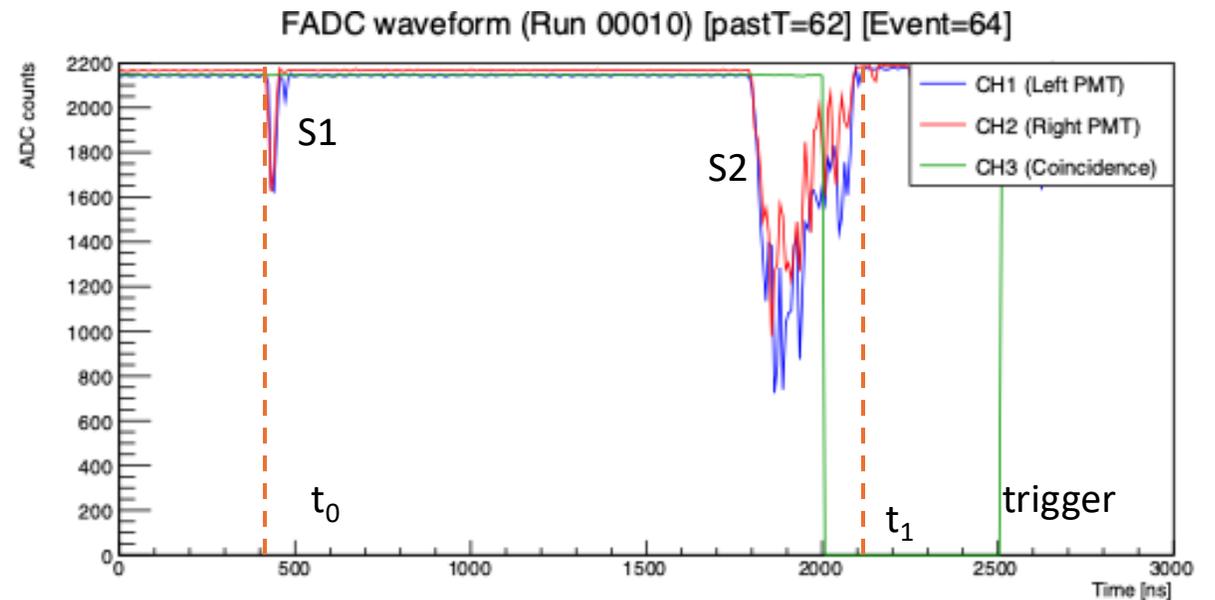
PMTを用いたz軸方向の飛跡再構成

- α 線が発生すると、時間差で2つの信号が発生
 - GEMからの距離: $dt = t_1 - t_0$
 - 飛跡のz軸方向の飛跡: S2信号の長さ
 - 向き: Braggピークの位置



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

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



6.CMOSカメラを用いた飛跡観測

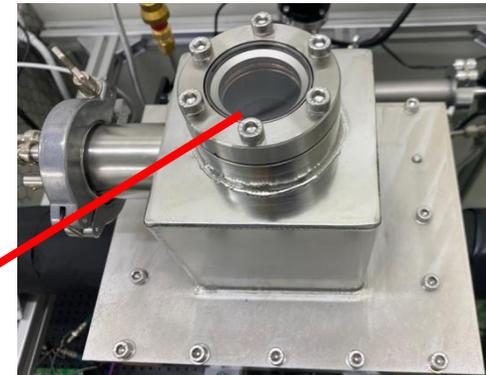
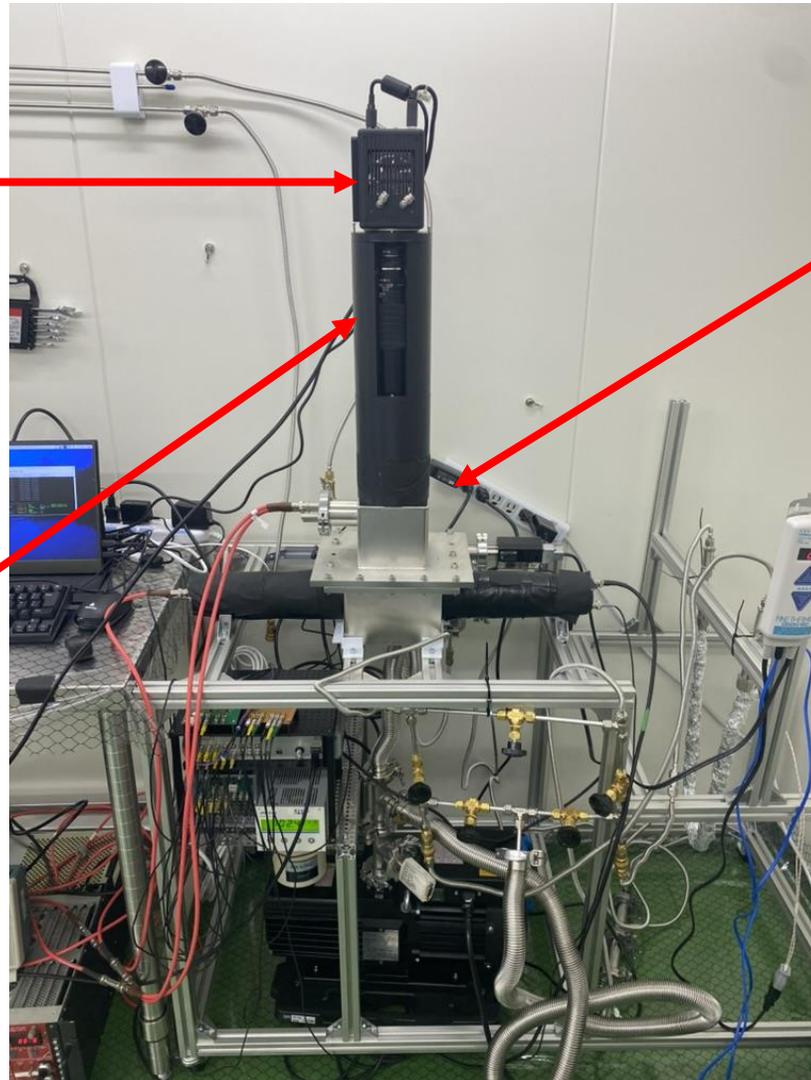
セットアップ



浜松フォトニクス
デジタルCMOSカメラ
型番:C13440-20CU

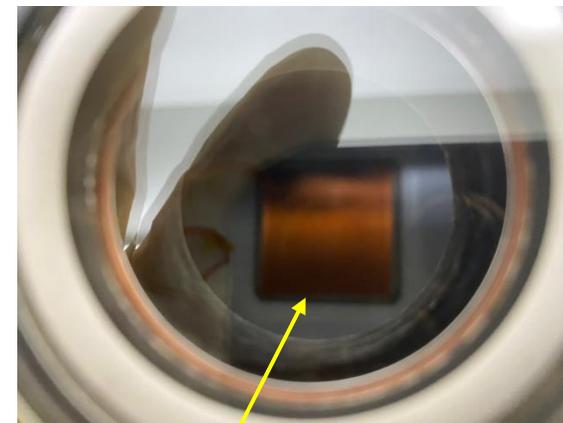


マミヤ製レンズ
焦点距離
→120mm
最短撮影距離
→400mm



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

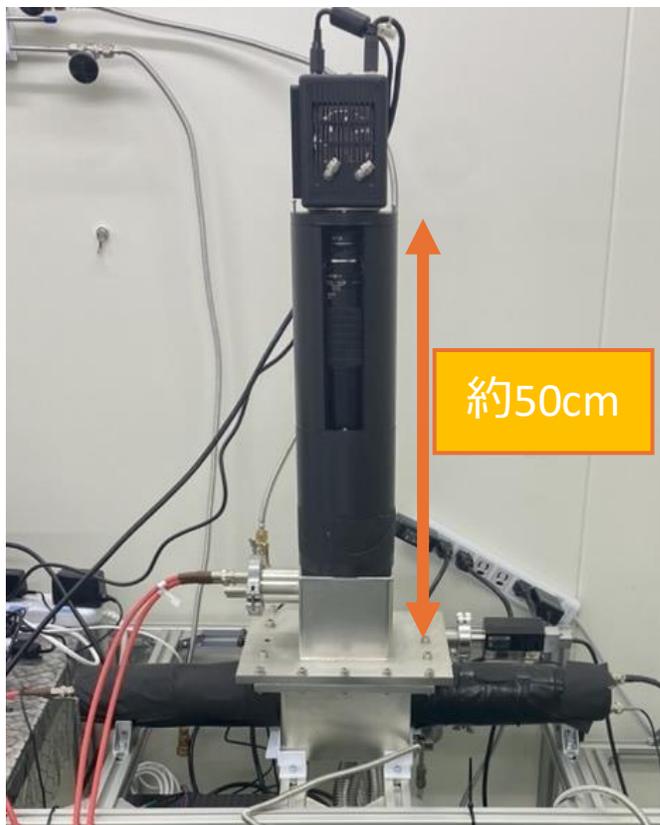
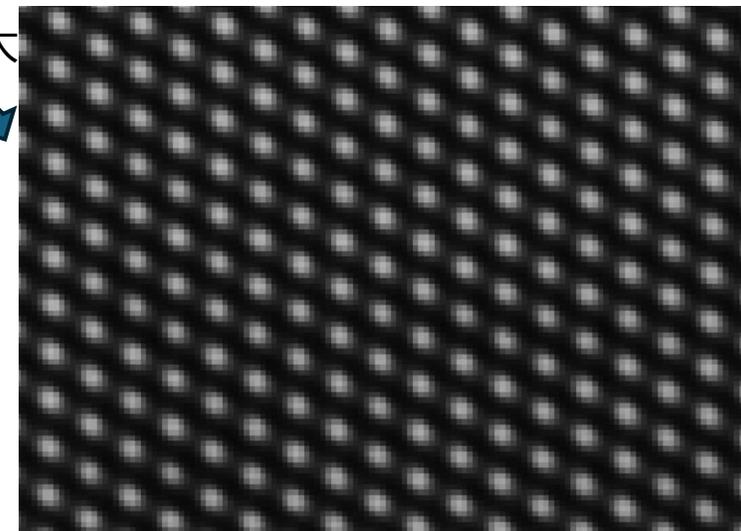
6.CMOSカメラを用いた飛跡観測

GEMの撮影

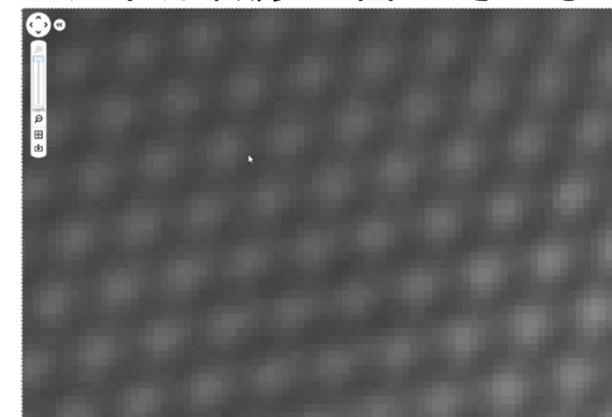
- GEMでのS2発光の飛跡を観測するためにGEMにピントを合わせる。
- チェンバー内にライトを入れて、GEMの穴から光を出す。
- ピントを調整するために拡大をしながら、GEMの穴がくっきり見えるようにレンズを調整

750%拡大

GENの穴のピント



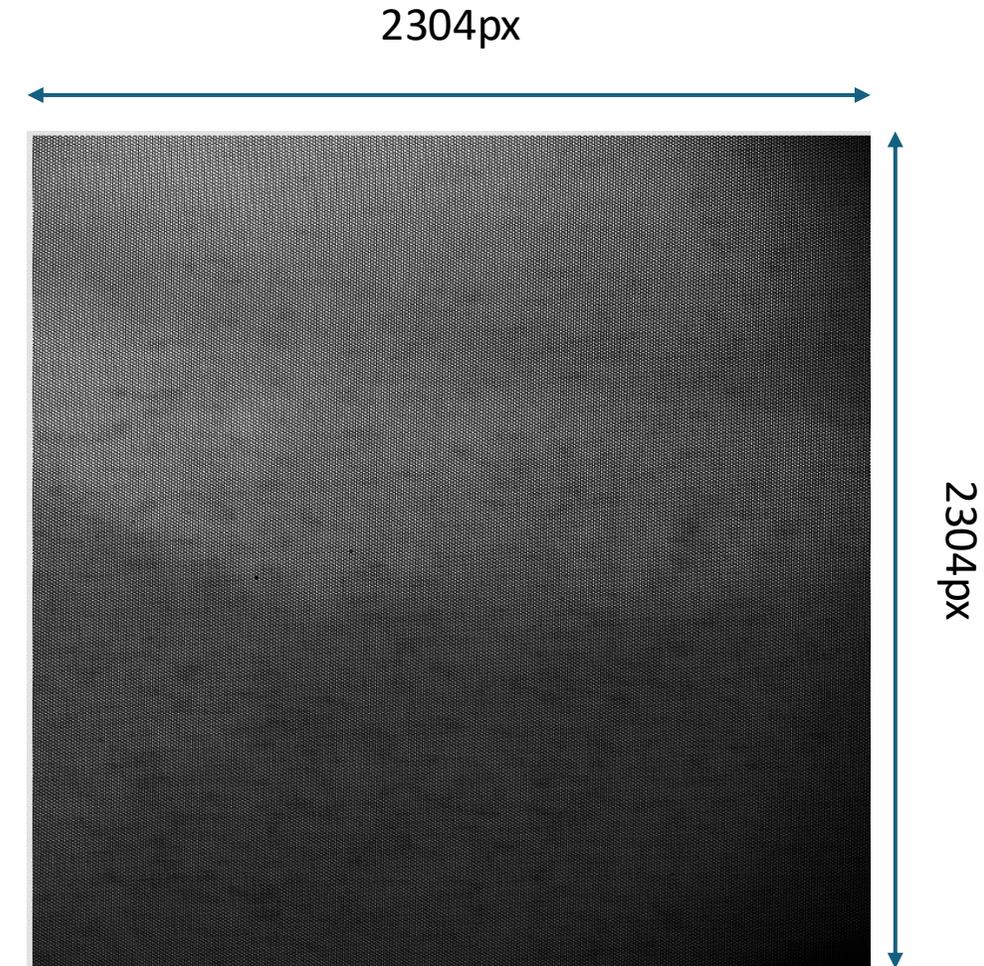
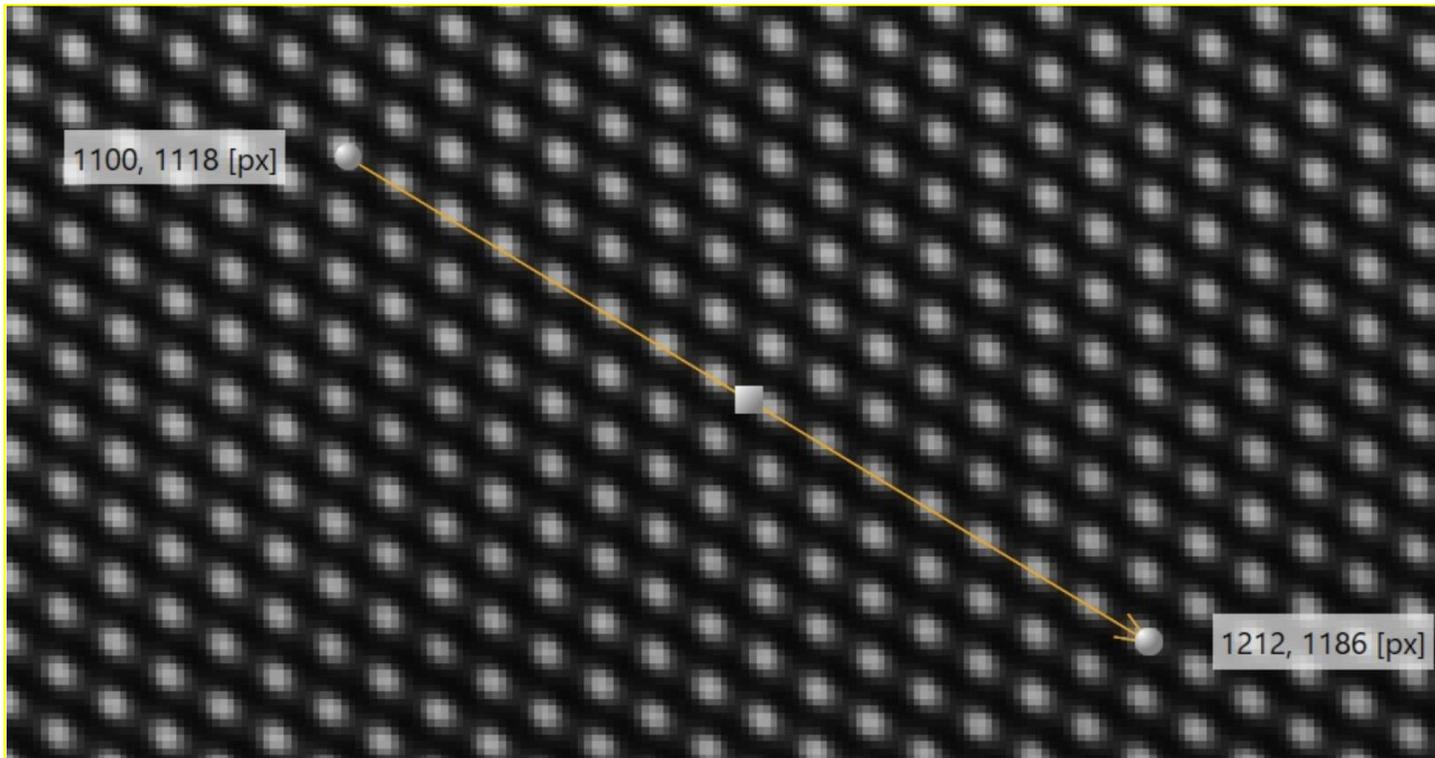
ピントが微妙に合っていない



6.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。



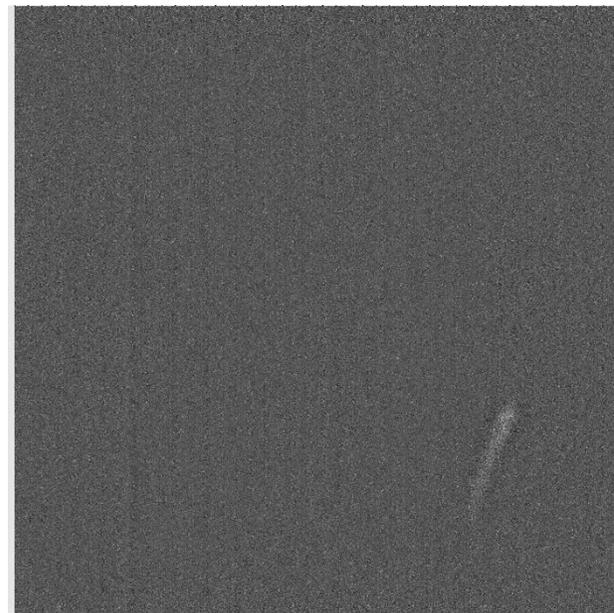
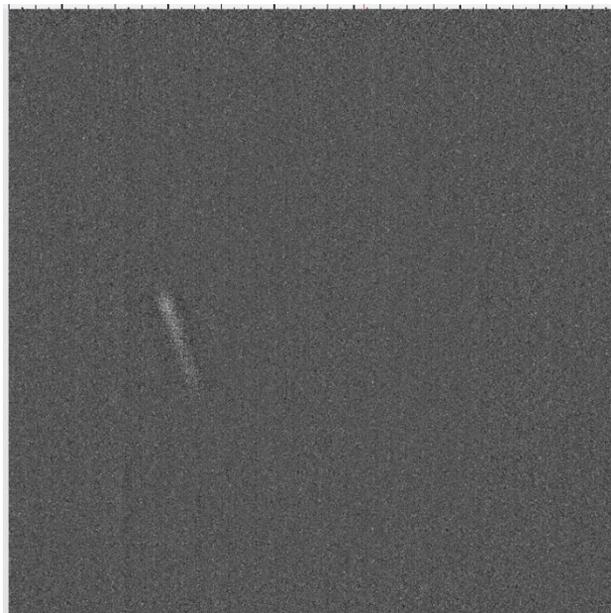
6.CMOSカメラを用いた飛跡観測

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
- 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
 - (1枚ずつフレームを見ていき、飛跡を数えた)

飛跡の頻度比較

- 2分間での飛跡 : 36counts (1枚ずつフレームを見ていき、飛跡を数えた)
→ 43.2 ± 7.2 alpha/cm²/hour
- AICHAMを用いて測定した線源強度(2025年11月12日)
 - 線源1 → 49.2 ± 1.1 alpha/cm²/hour
 - 線源2 → 58.8 ± 1.0 alpha/cm²/hour
 - 合計線源強度 → 54.1 ± 0.7 alpha/cm²/hour
- 検出効率
 - → 80 ± 13 % (統計が少ないため、誤差が大きい)

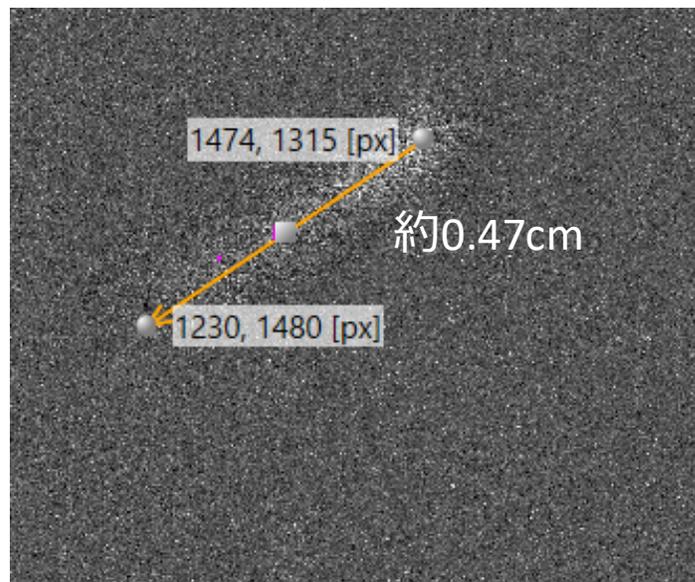
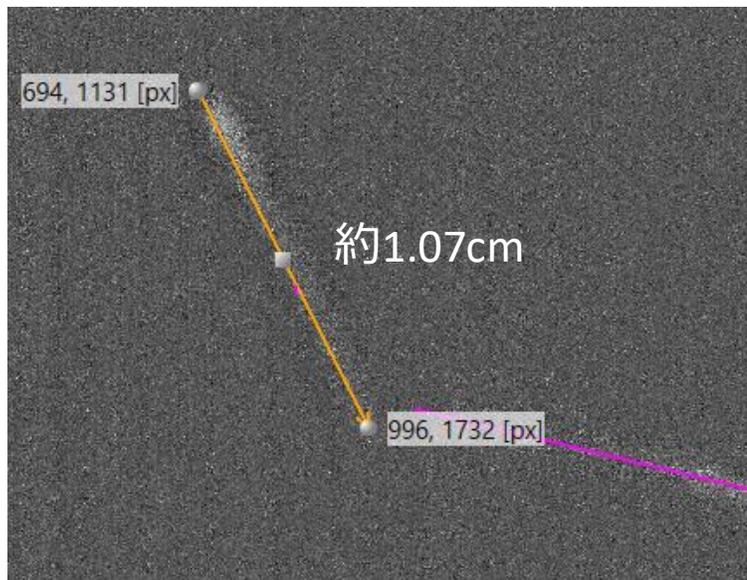


AICHAMで計測した銅板線源

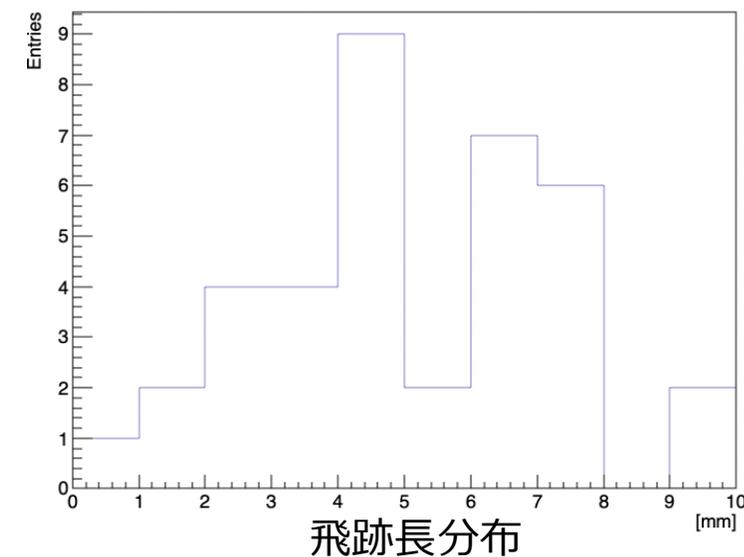
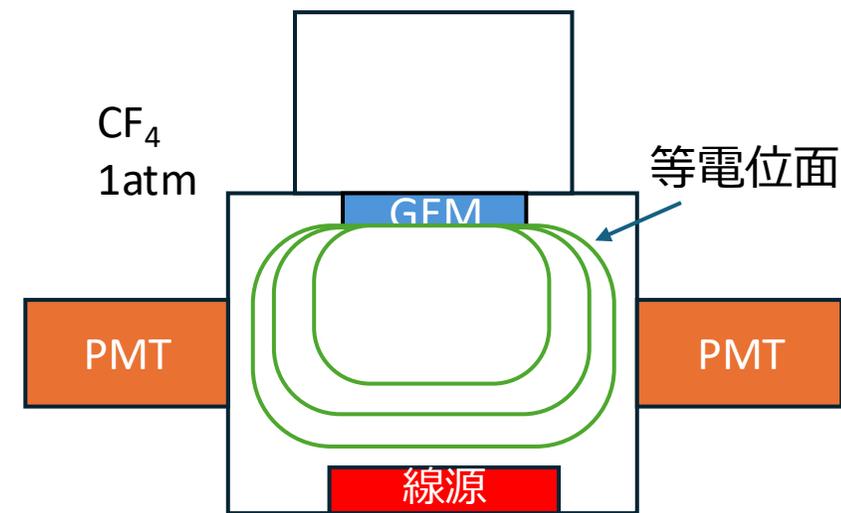
6. CMOSカメラを用いた飛跡観測

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
- 5.3MeVの α 線は CF_4 1気圧で3cmほど進む。
- ただし、電場による飛跡の歪みは考慮していない。



7. 今後の展望

1. DAQ開発

- CMOSカメラのトリガー

2. 飛跡再構成の解析手法

- 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

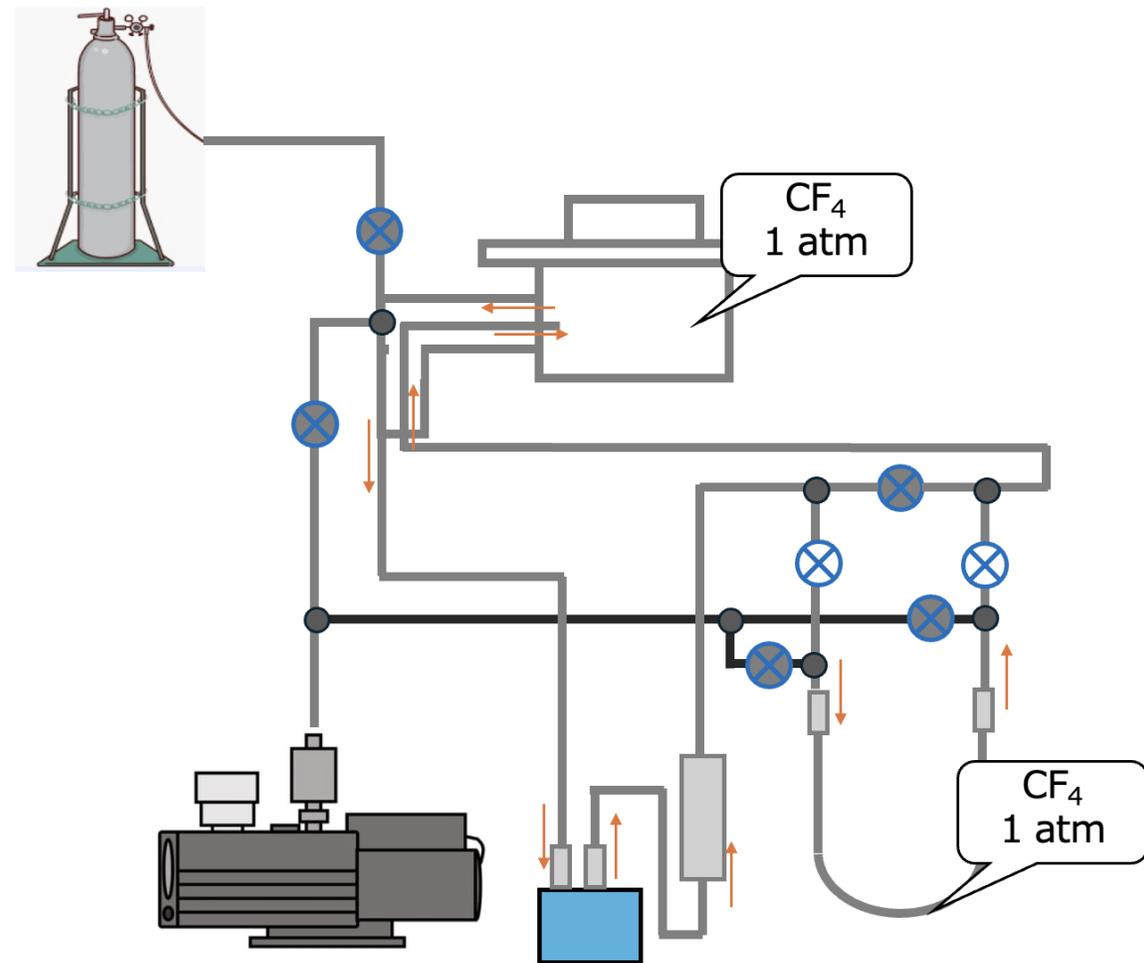
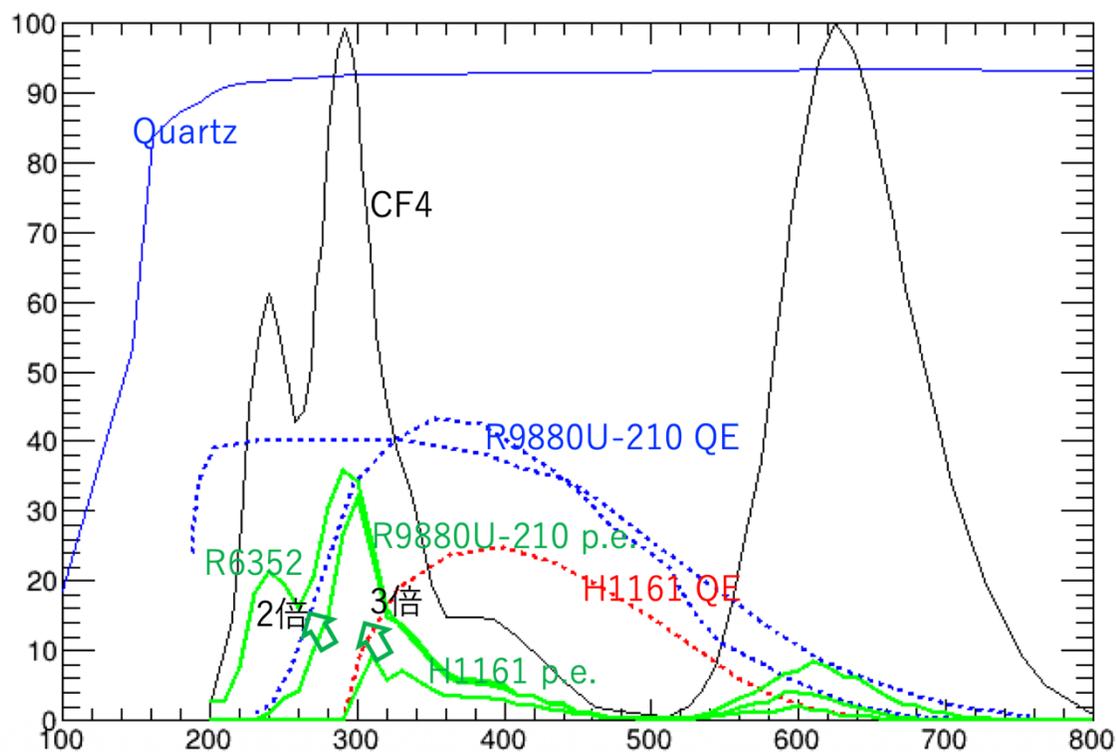
3. 面積を拡張することによる感度向上

- 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

BACKUP

CF₄ガス内の5.3MeVアルファ線の飛跡長

- 1気圧：3cm
- 0.2気圧：8cm



4. AICHAMを用いた測定

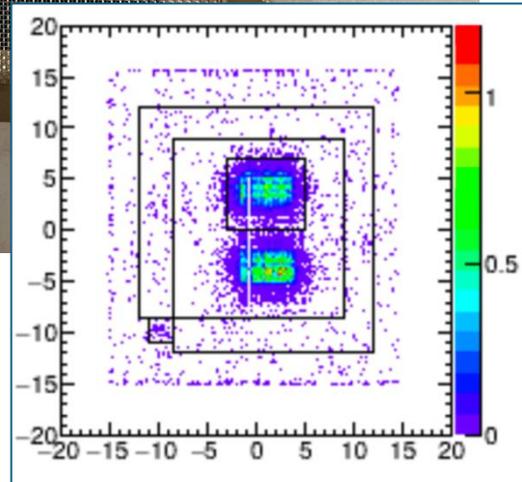
有効面積: 15×15 cm²
メッシュの上に線源をおく

神岡坑内で
曝露した銅板

線源2

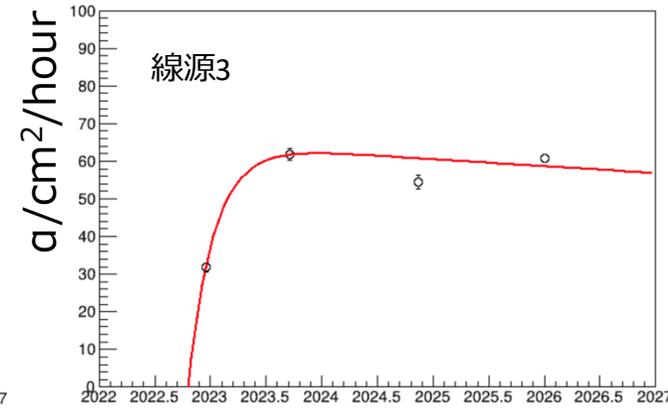
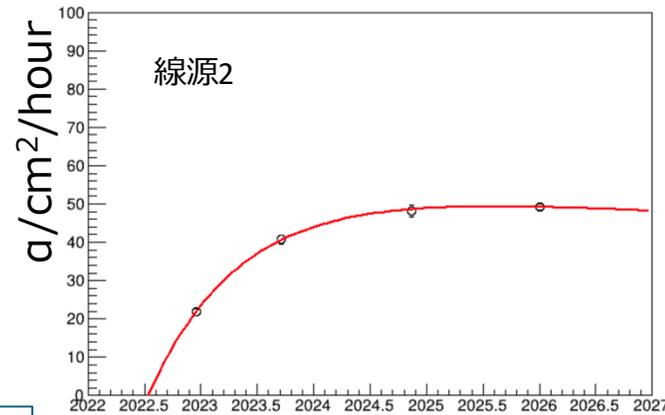
線源3

α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。



神戸大学で用いる銅線源のα線放出量測定

- 検出効率の見積もりやキャリブレーションに用いるために測定
- 過去のデータと今回のデータを用いて線源強度の推定



フィット関数

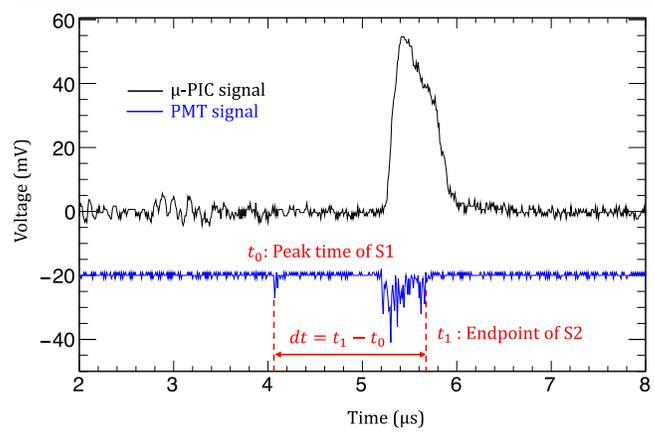
$$A \left(\underbrace{1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right)}_{\text{減衰項}} \right) \times \underbrace{\exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right)}_{\text{立ち上がり項}}$$

A : 線源の初期強度
 τ_1 : ²¹⁰Poの半減期(22年)
 τ_2 : 時定数

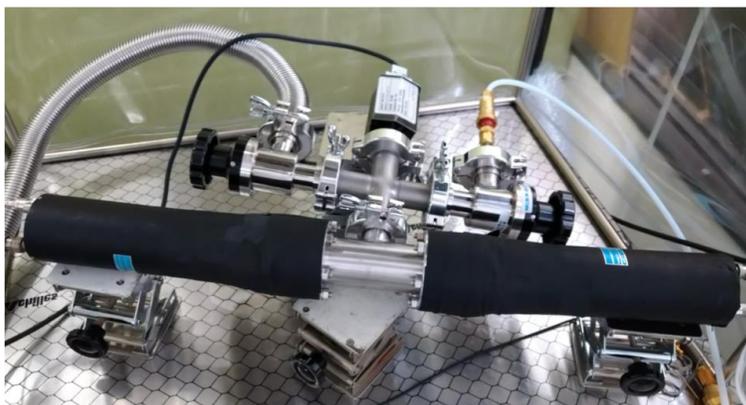
6. 光読み出し型のTPC開発(先行研究)

- 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。

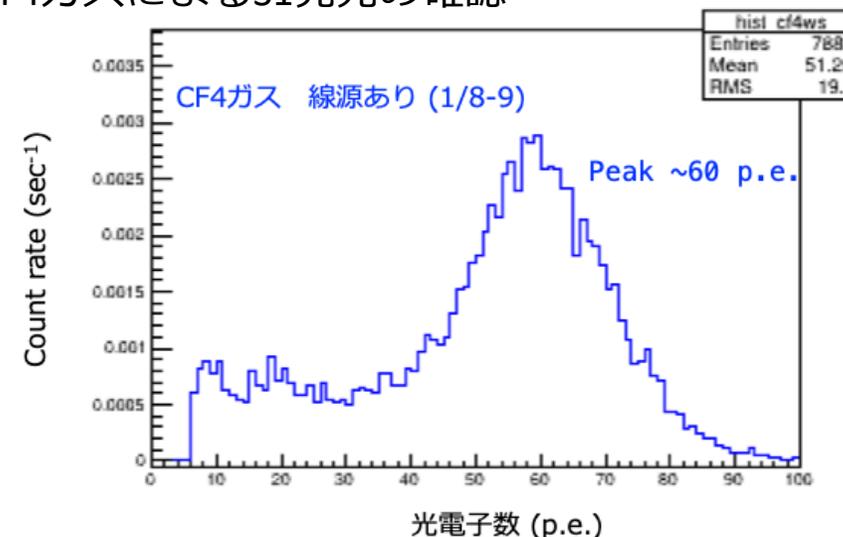
→光読み出し型の α 線検出器が作れるかもしれない



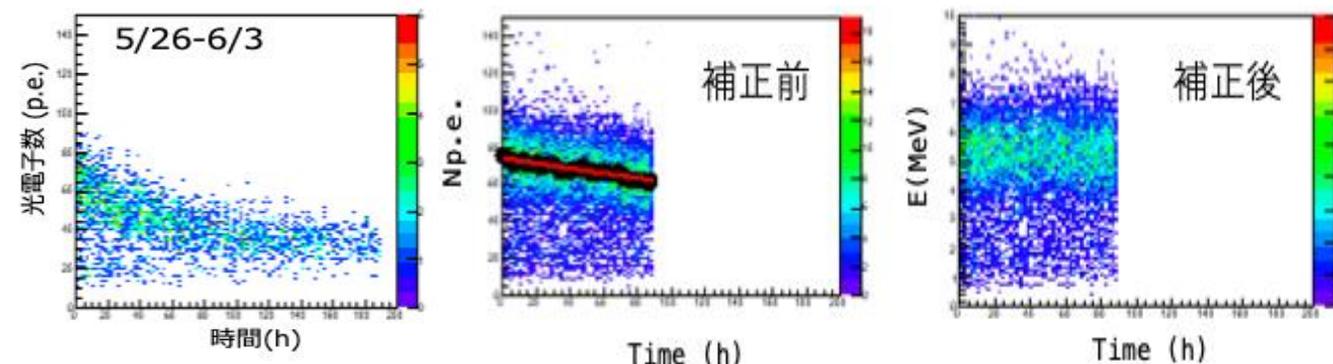
- CF_4 ガスの発光試験(東京理科大の先行研究)



- 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)

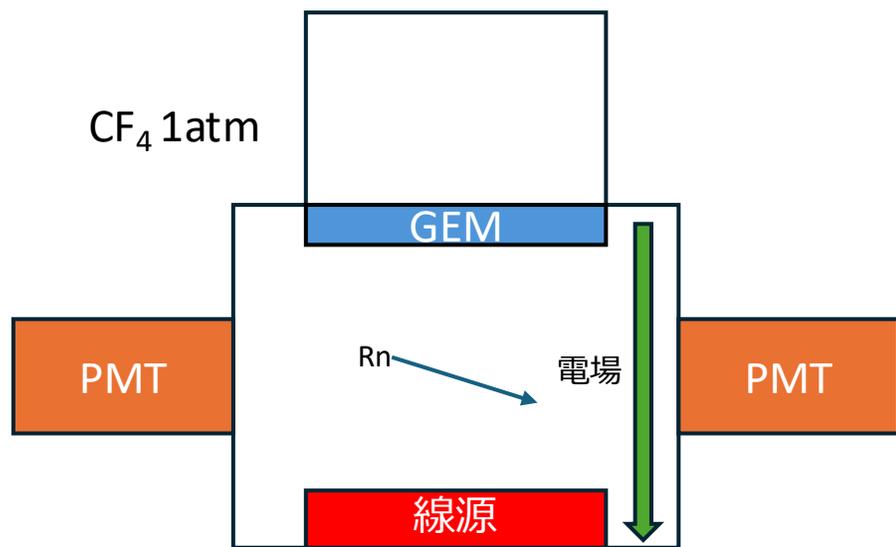
銀ゼオライトによるバックグラウンドの削減

- 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。

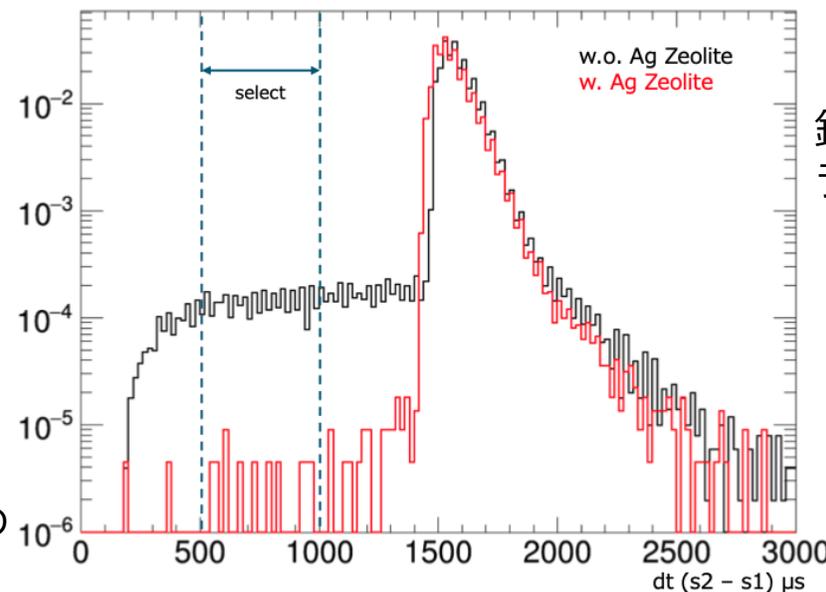


銀ゼオライト 8AgFER-D 30g

- 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 α 線は上向きだが、ラドン由来の α 線は上向きと下向きの両方が存在しうる。



銀ゼオライトを入れることによりラドン由来の α 線が減ったと言える。

今後の課題

- ガス流量
- 種類
- ガス圧
- 베이キングの温度依存