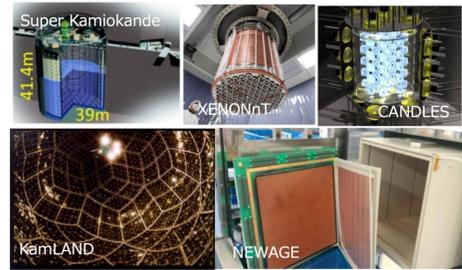
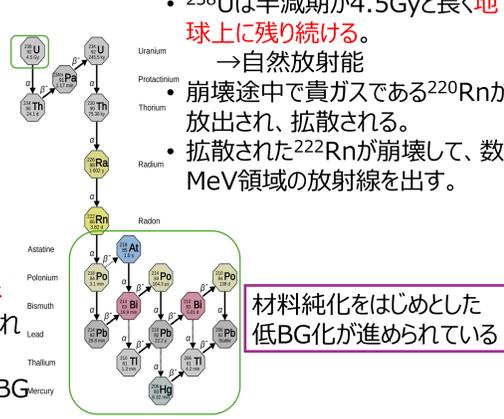


1. 研究背景

現在稼働している代表的な地下実験グループ



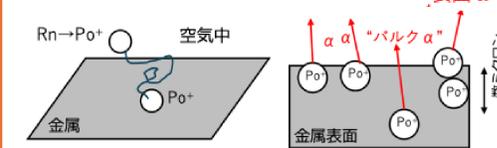
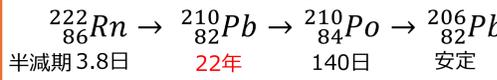
- 宇宙素粒子実験のための検出器は、バックグラウンド(BG)となる宇宙線を削減するために、地下に設置されている。
- また、共通してRI不純物などによる放射線も重大なBGとなっている。



材料純化をはじめとした低BG化が進められている

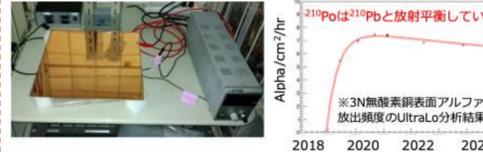
2. 表面アルファ線

いくら材料自身が綺麗でも、空气中に曝露するとラドン由来の放射性不純物が付着し汚染される。



^{210}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}Po が定常的に5.3MeVのアルファ線を放射し続ける。

神岡坑内のラドン豊富な空气中に曝露したのち放置



- 坑内の豊富なラドン娘核が金属表面に付着し、 ^{210}Pb (半減期:22年)として定着。
- 子孫核種の ^{210}Po が逐次生成され、表面アルファ線量が増える。その後、 ^{210}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. low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 CHAMBER
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.

Low- α μ -PIC (micro-pixel imaging chamber)
• Anode and cathode 2-D strip sensor.
• 400 μm pitch, 768x768ch, 300 x 300 mm² covered.
• Low alpha emission from the surface Nucl Inst Meth A 977 (2020) 164285.

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.

原理: 1気圧 Arガス イオンチェンバー イメージング

有効面積: 707 cm² (typical)
1800 cm² (max)

BG rate $\sim 10^{-4}$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{hr}$

AICHAM @神岡
Lab in Kamioka

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

0.2気圧 CF₄ガスTPC

Live time: 12 hr
Top view
Sample Region (15x15cm)
BG Region
Source Region

感度評価
分析限界(No. PMT): $\sim 3 \times 10^{-3}$ $\alpha/\text{hr}/\text{cm}^2$ (90%CL)
分析限界(No. PMT): $O(10^{-4})$ $\alpha/\text{hr}/\text{cm}^2$ (90%CL)

Ultra Lo 1800, XIA LLC	AICHAM @神岡	Screener3D @上海	Ultra-LowBG TPC @Hefei, China	AlphaCMM @Spain (proposal)
IEEE Trans NS 62(2) (2015) 3020 NIMA 884 (2018) 157 JINST 18 P01027.	AIP Conf. Proc. 1921, 070001 (2018). NIMA 953 (2020) 163050. J. Phys.: Conf. Ser. 2156 012176 (2021). Pos (ICRC2023) 1374. Pos (ICRC2025) 495.	Nucl. Sci. Tech. 32(12), 142 (2021). Rad. Det. Tech. Meth. 7, 90 (2023).	Rev. Sci. Instrum. 93, 013303 (2022).	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	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 $\sim 10^{-4}$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{hr}$	~ 2023 Sensitivity $\sim 10^{-3}$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{hr}$ (90%CL) $2024\sim$ Sensitivity $O(10^{-4})$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{hr}$ (90%CL)	BG rate $(4.7 \pm 0.9) \times 10^{-4}$ counts/cm ² /hr	BG rate $< 1.6 \times 10^{-3}$ cpm (95%CL) $< 10^{-1}$ counts/cm ² /h	Simulation-base BG rate estimate $< 2.1 \times 10^{-4}$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{hr}$ (95%CL)

5. PMTを用いた α 線検出

光読み出し型のアルファ線検出器

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

CYGN0実験 (CYGN0 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

CYGN0実験で捉えた宇宙線ミューオンの飛跡

PMTとGEMを用いたアルファ線検出器

- α 線がCF₄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の仕様
• 50mm x 50mm
• 140 μm pitch
• 70 μm -phi
• 100 μm thickness

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

上向き: Braggピークが前
下向き: Braggピークが後

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

$$S_1 = \int_{t_0}^{t_1} v(t) dt, S_2 = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt$$

t_0 : Peak time of S1
 t_1 : Endpoint of S2
 $dt = t_1 - t_0$

6. CMOS+GEMによる飛跡観測

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 $\rightarrow 120\text{mm}$
最短撮影距離 $\rightarrow 400\text{mm}$

約50cm

ICF70から覗いたGEM

※測定時は暗幕を被せて遮光しています

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

GEMの穴が140 μm ピッチであることと、ピクセル数を比較する
 \rightarrow 約4cm x 4cmの範囲のみ

2304px
750%拡大
2304px

アルファ線の飛跡観測

- アルファ線線源を用いて、アルファ線の飛跡を観測
- CF₄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

約1.07cm

飛跡長分布

検出効率の概算
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)
 $\rightarrow 43.2 \pm 7.2$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{hour}$

AICHAMを用いて測定した線源強度(2025年11月12日)
線源2 $\rightarrow 49.2 \pm 1.1$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{hour}$
線源3 $\rightarrow 58.8 \pm 1.0$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{hour}$
合計線源強度 $\rightarrow 54.1 \pm 0.7$ $\alpha/\text{cm}^2/\text{hour}$

検出効率
 $\rightarrow 80 \pm 13\%$ (統計が少ないため、誤差が大きい)

7. 今後の展望

- DAQ開発
 - CMOSカメラのトリガー
- 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
- 面積を拡張することによる感度向上
 - GEMを5cm x 5cmを10cm x 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