

「第9回極低放射能技術」研究会

日時：2024年2月6日～2月7日

対面（横浜国立大学 教育文化ホール）とZoomのハイブリッド開催

新学術領域「地下から解き明かす宇宙の歴史と物質の進化」

計画研究D01「極低放射能技術の最先端宇宙素粒子研究への応用」主催

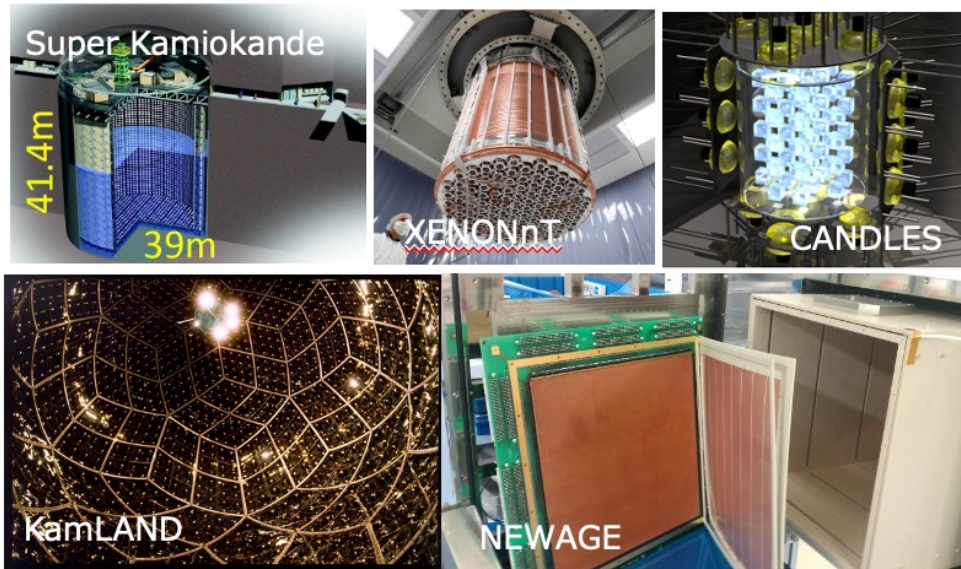


極低放射能アルファ線分析の最近の動向と ガス発光を用いた検出器開発の展望

伊藤博士
(東京理科大学)

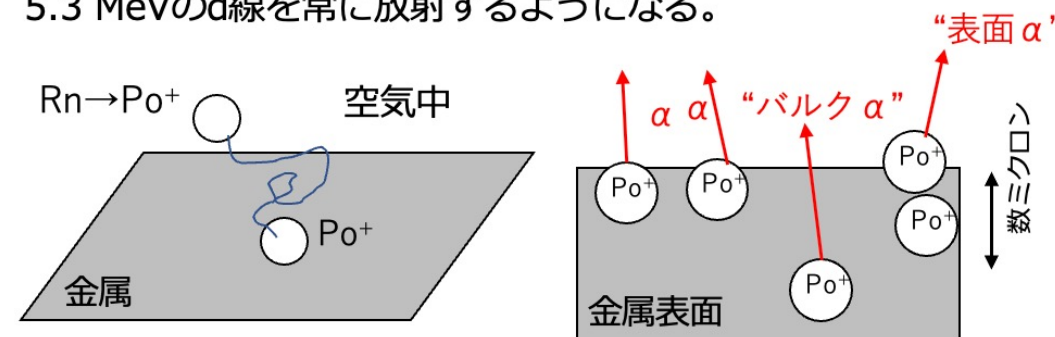
1. 研究背景

現在稼働している代表的な地下実験グループ

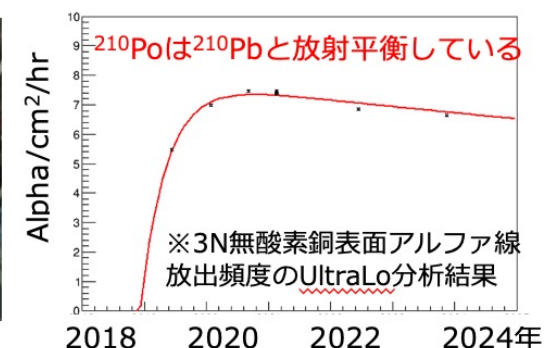
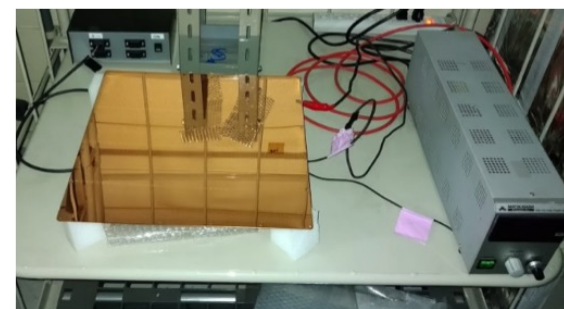


- 宇宙素粒子実験のための検出器は、「**極限まで少ない不純物**」+「**大型化**」が**共通して**要求される。これまで綺麗な素材確保・生成、分析技術が確立されてきた。
- その分析技術のひとつである、**表面アルファ線分析**について今回は焦点を当てる。
- 例えば、PTFEは比較的安価でDM検出器のフィールドケージ壁にも良く使用されるため、表面汚染検査は非常に重要。

- 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表面に付着し汚染される。
- Rn娘核のPo-218が表面数ミクロンほど埋め込まれる。**ウラン系列である鉛-210が半減期22年なので、その娘核のPo-210が5.3 MeVのα線を常に放射するようになる。



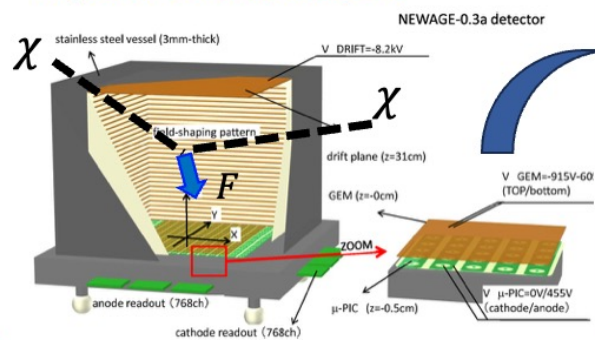
神岡坑内のRn豊富な空気に暴露したのち放置



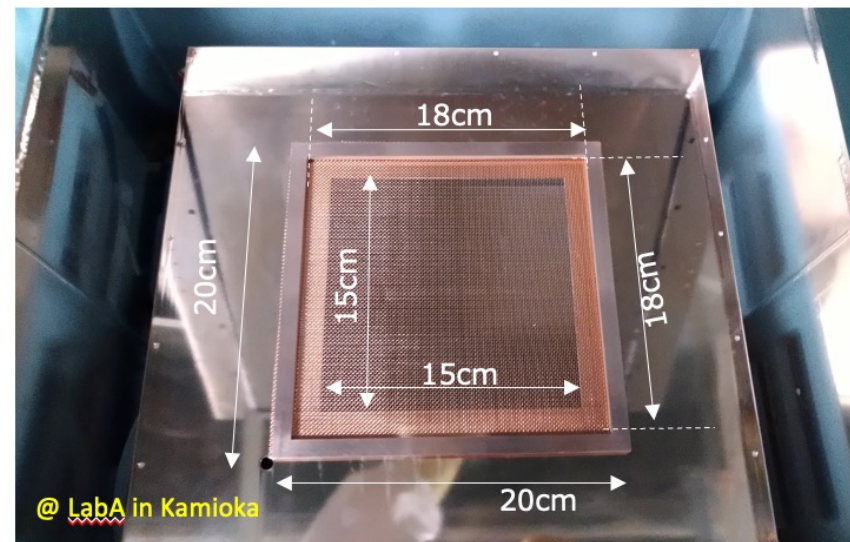
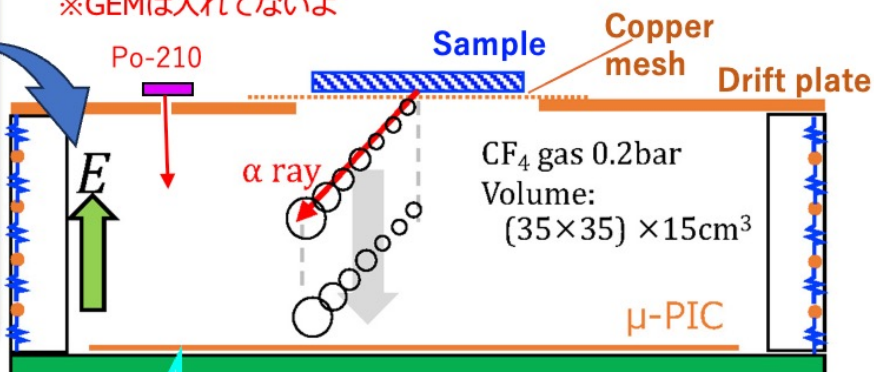
- HPGeなどの全量試験で、試料表面が汚染されていた場合、過小評価する可能性がある。そのため、**表面アルファ線分析は独立的に重要な極低BG測定手法**である。

2. low-BG 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.

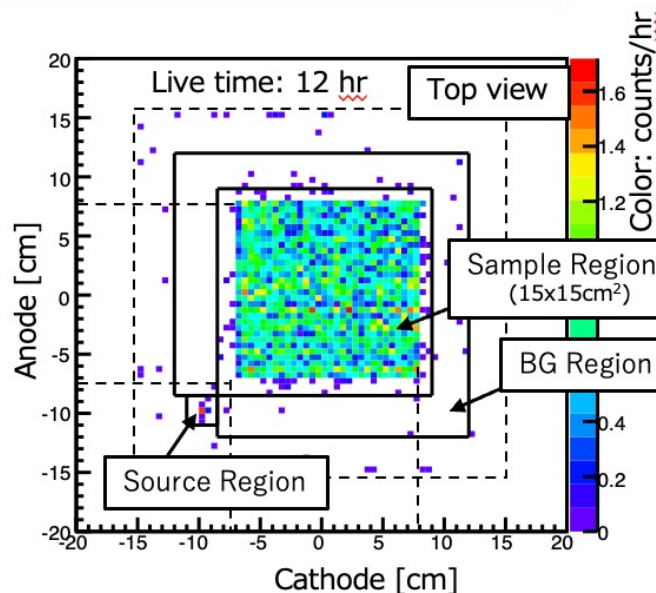
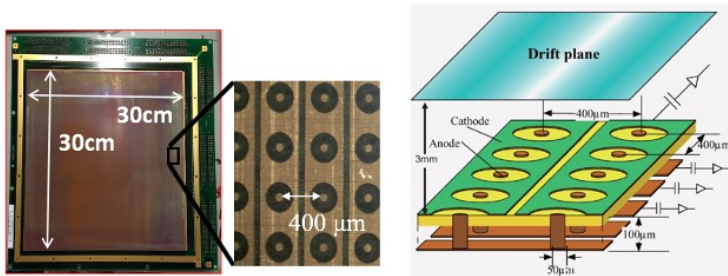


AICHAM: Alpha-particle Imaging CHAMber
表面アルファ線イメージ分析のための、
 μ -PICを用いたガスTPC(time-projection chamber)
Nucl Inst Meth A 953 (2020) 163050.
※GEMは入れてないよ

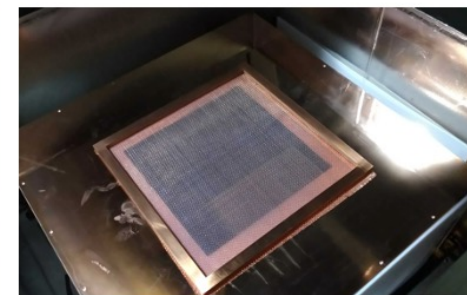
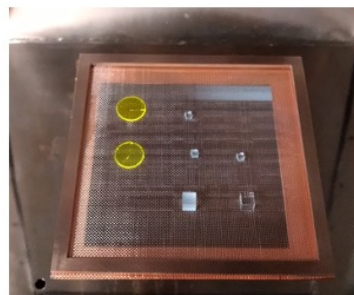


Low- α μ -PIC (micro-pixel imaging chamber)

- 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.



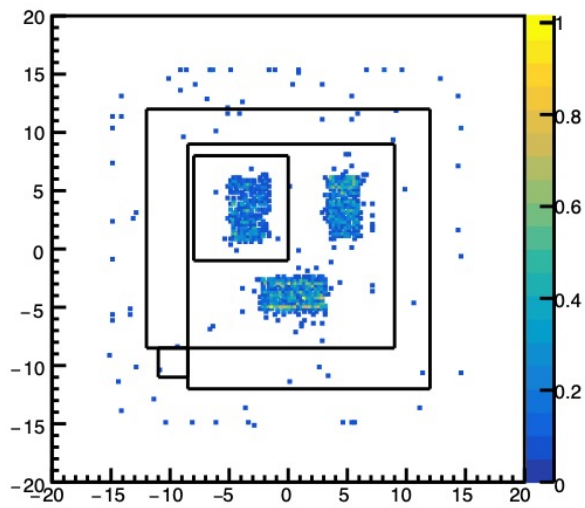
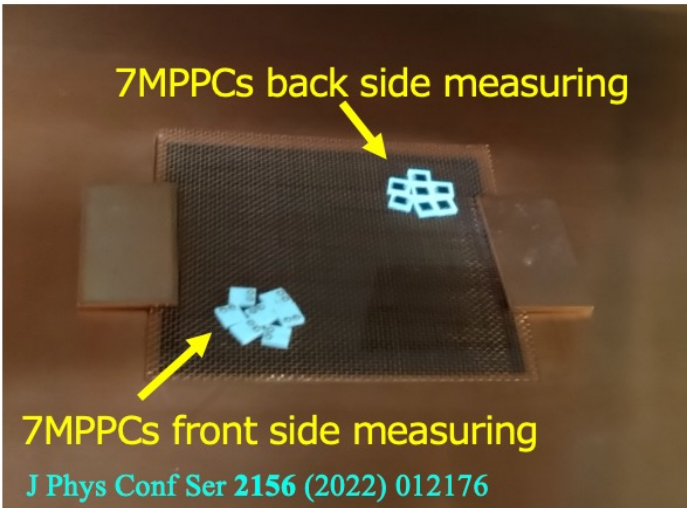
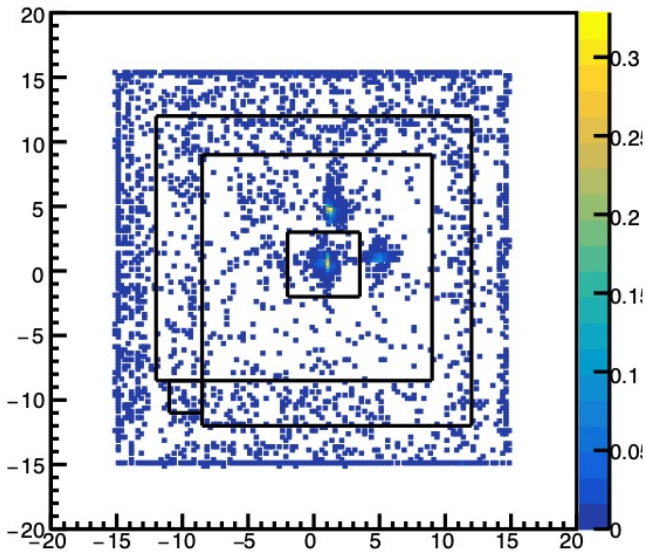
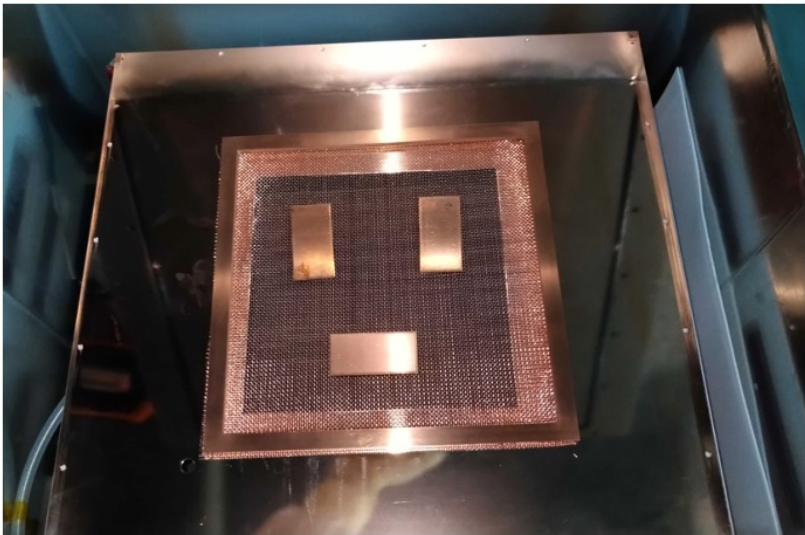
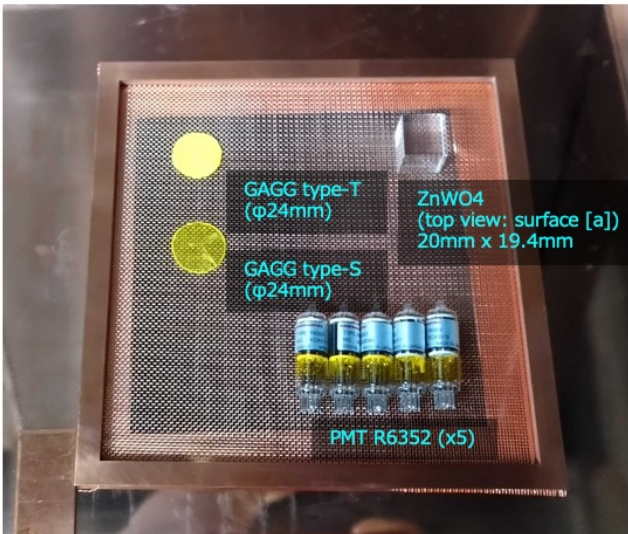
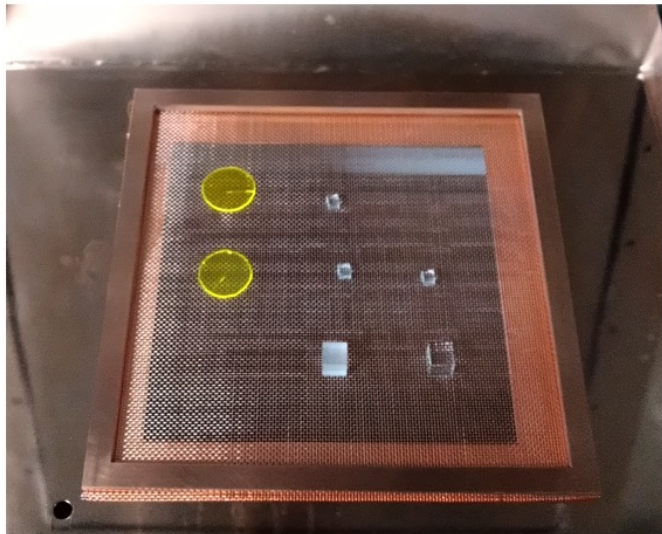
AICHAMを使った分析は、
感度 $\sim 10^{-3}$ a/hr/cm² (90%CL)
@E>2.5MeV, 15x15cm²で、
さまざまな研究グループから依頼され分析を実施してきた。



学会・研究会公開を条件に、
現在無償で測定してます。

2. low-BG アルファ線イメージ分析

AICHAMを用いた分析事例紹介



3. TPCベースのアルファ線イメージ分析装置開発の動向

Ultra Lo 1800, XIA LLC
※商品, 神岡にもあります

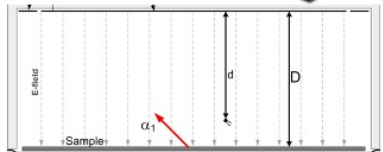


Figure 10-2: Schematic overview of the important parts of the UltraLo-1800's active volume.

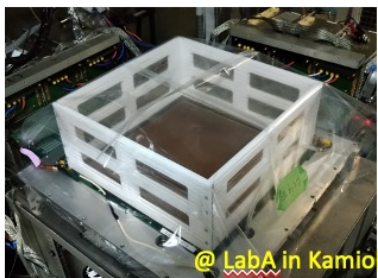
IEEE Trans NS 62(2) (2015) 3020
NIMA 884 (2018) 157
arXiv.2009.08002

原理：1気圧 Arガス
イオンチェンバー
イメージングなし

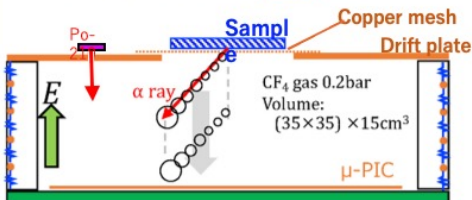
有効面積: 707 cm²
(typical)
1800 cm² (max)

BG rate
~10⁻⁴ α/cm²/hr

AICHAM @神岡



@ LabA in Kamioka



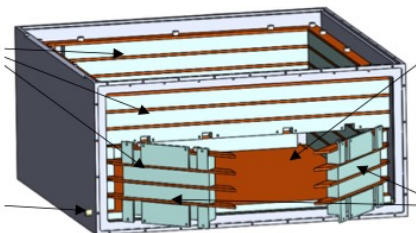
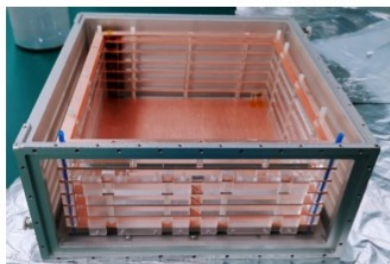
AIP Conf. Proc. **1921**, 070001 (2018).
NIMA 953 (2020) 163050.
J. Phys.: Conf. Ser. **2156** 012176 (2021).

0.2気圧 CF₄ガスTPC

30x30cm² LA μ-PIC
Effective area: 15x15cm²

Sensitivity
~10⁻³ α/cm²/hr (90%CL)

Screener3D @上海
上海交通大学



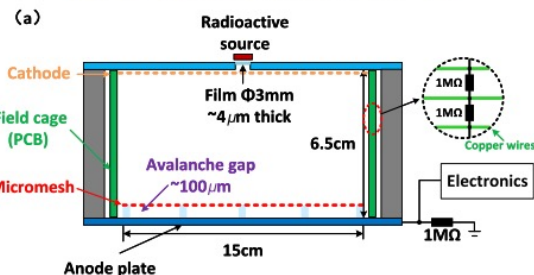
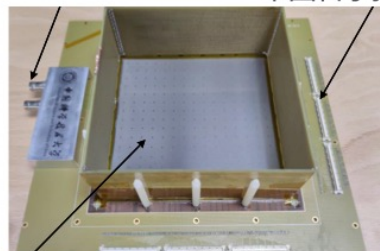
Nucl. Sci. Tech. 32(12), 142 (2021).
arXiv.2208.03046 (2022).

1気圧 Ar:CO₂(orイソブタン)
混合ガスTPC

20x20 cm² Micro-megas
Effective area: 14.6x14.6cm²

BG rate
(4.7±0.9)x10⁻⁴ counts/cm²/hr

※検出器の名前はまだついてない
Ultra-LowBG TPC @Hefei, China
中国科学技術大学



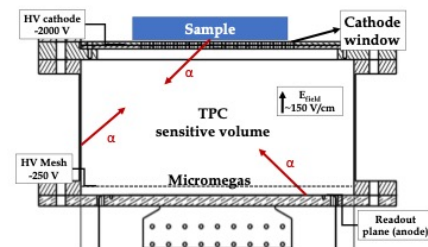
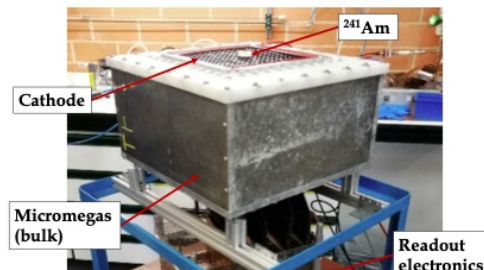
Rev. Sci. Instrum. **93**, 013303 (2022).

1気圧 Ne:イソブタン=95:5
混合ガスTPC

15x15 cm² Micro-megas
Effective area: 5x5cm²

BG rate <1.6x10⁻³ cpm (95%CL)
< 10⁻¹ counts/cm²/h

AlphaCamm @Spain
(proposal)



JINST **17** P08035 (2022)
arXiv.2201.01859

1気圧 Ar+イソブタン2% ??
混合ガスTPC

Using Micro-megas
Effective area: 25x25cm²

Simulation-base
BG rate
<2.1x10⁻⁴ α/cm²/hr (95%CL)

AICHAMも性能向上する必要がある

4. CF₄ガス発光とアルファ線検出の基礎研究

最近ガスシンチレーション発光に注目して、極低放射能分析装置が開発できないか。

モチベーション

- CF₄ガス発光検出をAICHAMに組み合わせると、セルフトリガーTPCでありながら、アルファ線飛跡のドリフト距離が決定できる。
- ラドン由来のアルファ線事象を同定・排除し、分析感度を向上する。

まず、CF₄ガスのシンチレーション光について特性理解から基礎研究をスタートした。

理科大のアクティビティ

東京理科大 八田 B4研究(2021)

東京理科大 秋澤 B4研究(2022)

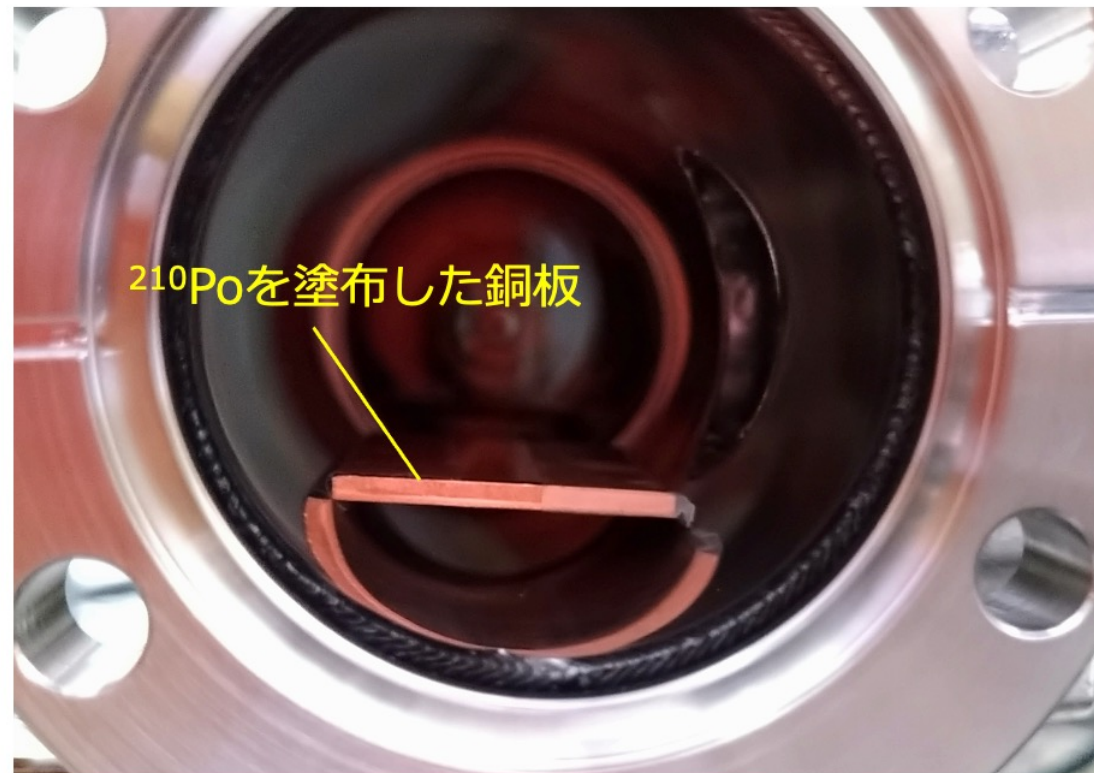
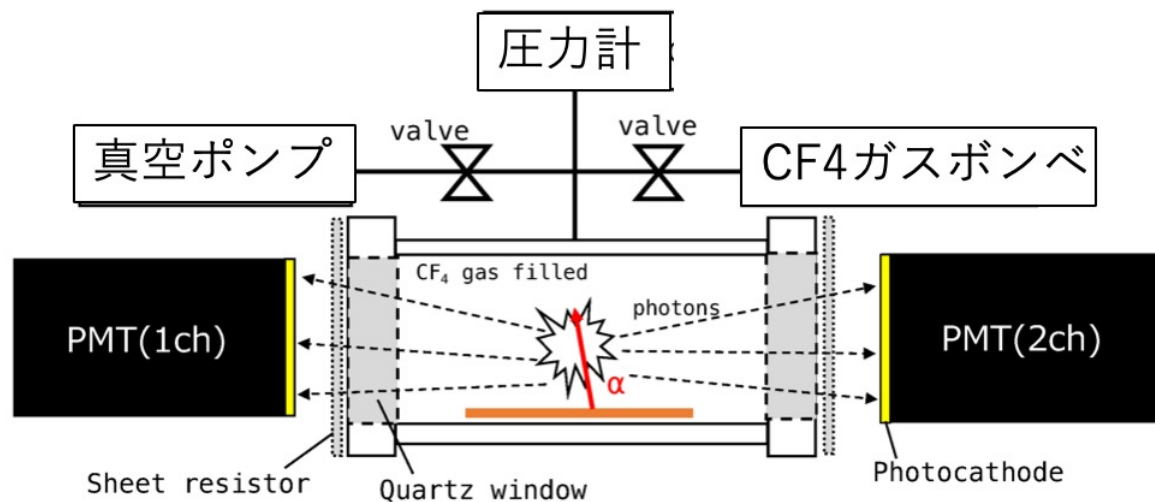
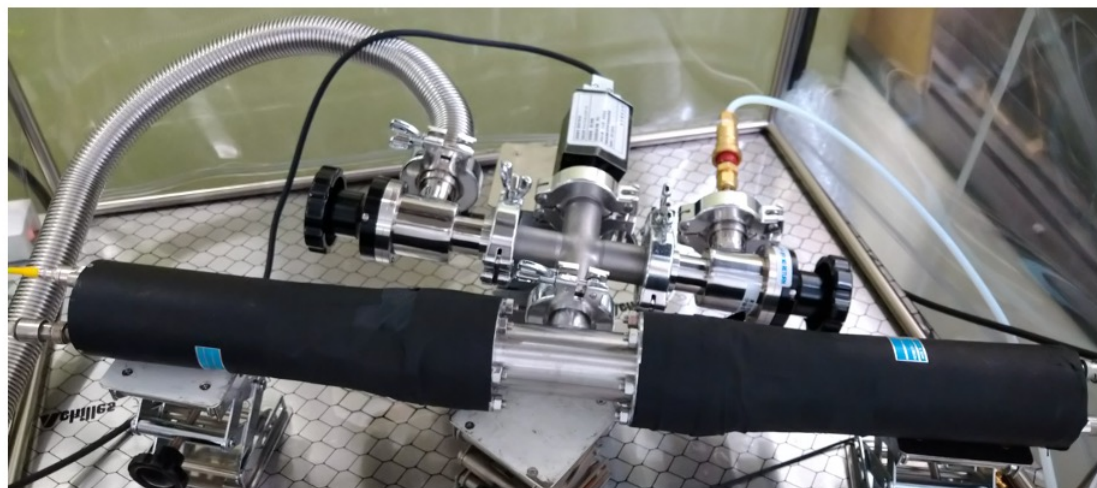
東京理科大 船橋 B4研究(2022)

東京理科大 若生 B4研究(2023)

4. CF_4 ガス発光とアルファ線検出の基礎研究

CF_4 ガスはどれくらい発光するのか？

セットアップ



PMT : H1161

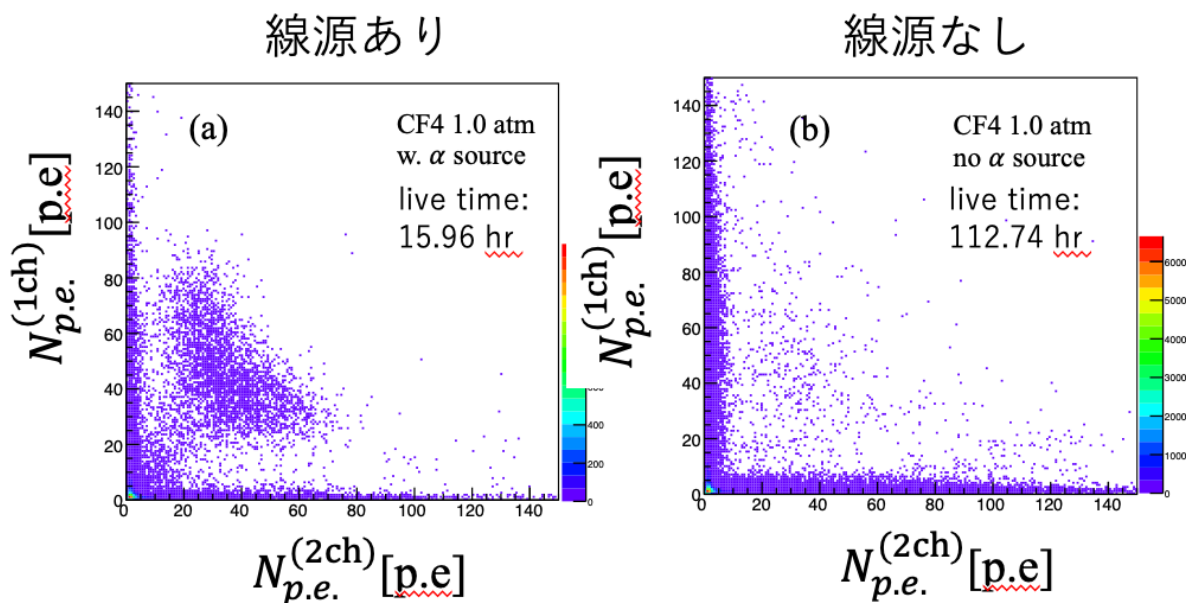
バイアルカリ光電面
2インチサイズ

銅板 : 面積 5 cm × 2.5 cm

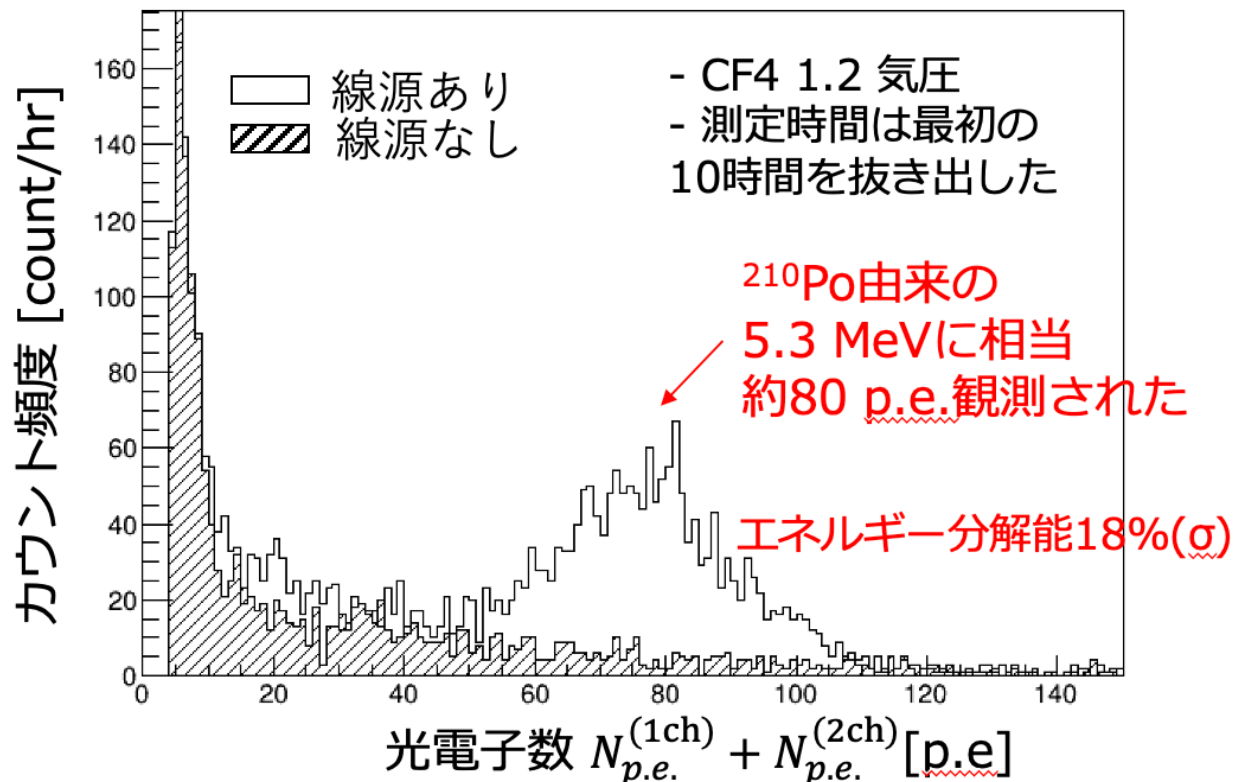
4. CF₄ガス発光とアルファ線検出の基礎研究

CF₄ガスはどれくらい発光するのか？

2つのPMTの観測された光電子数の2次元分布



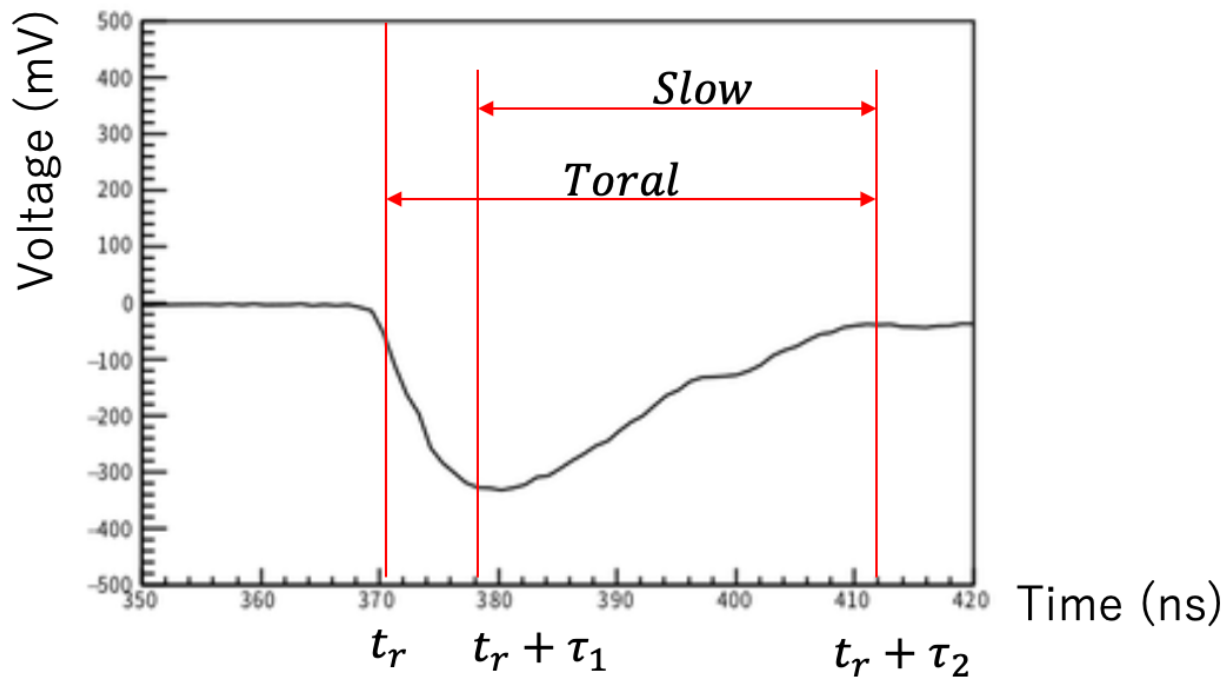
α 線源ありの場合、明らかにPMT2つが同時に有意な光を観測している。



4. CF₄ガス発光とアルファ線検出の基礎研究

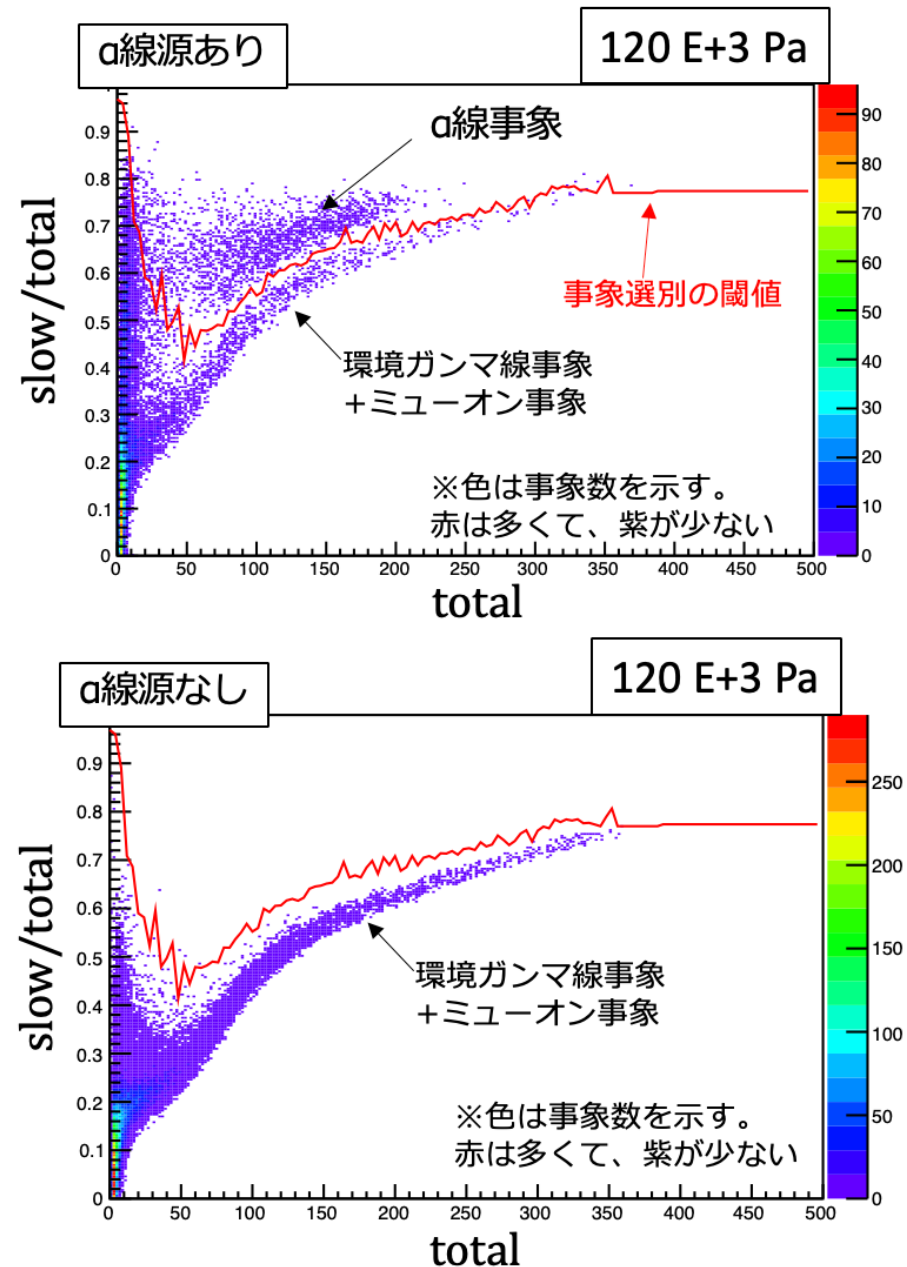
CF₄ガス発光でも波形弁別(PSD)は有効か？

アルファ線による典型的な波形



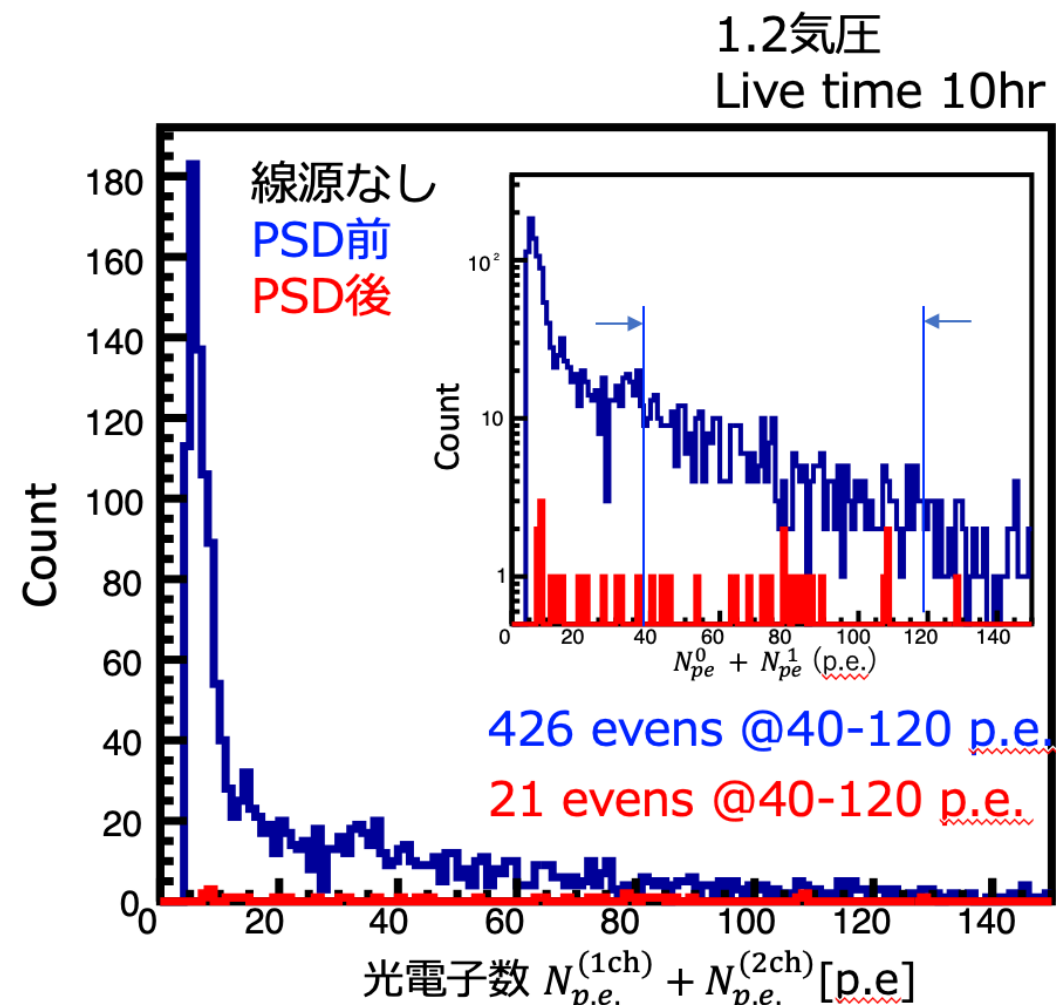
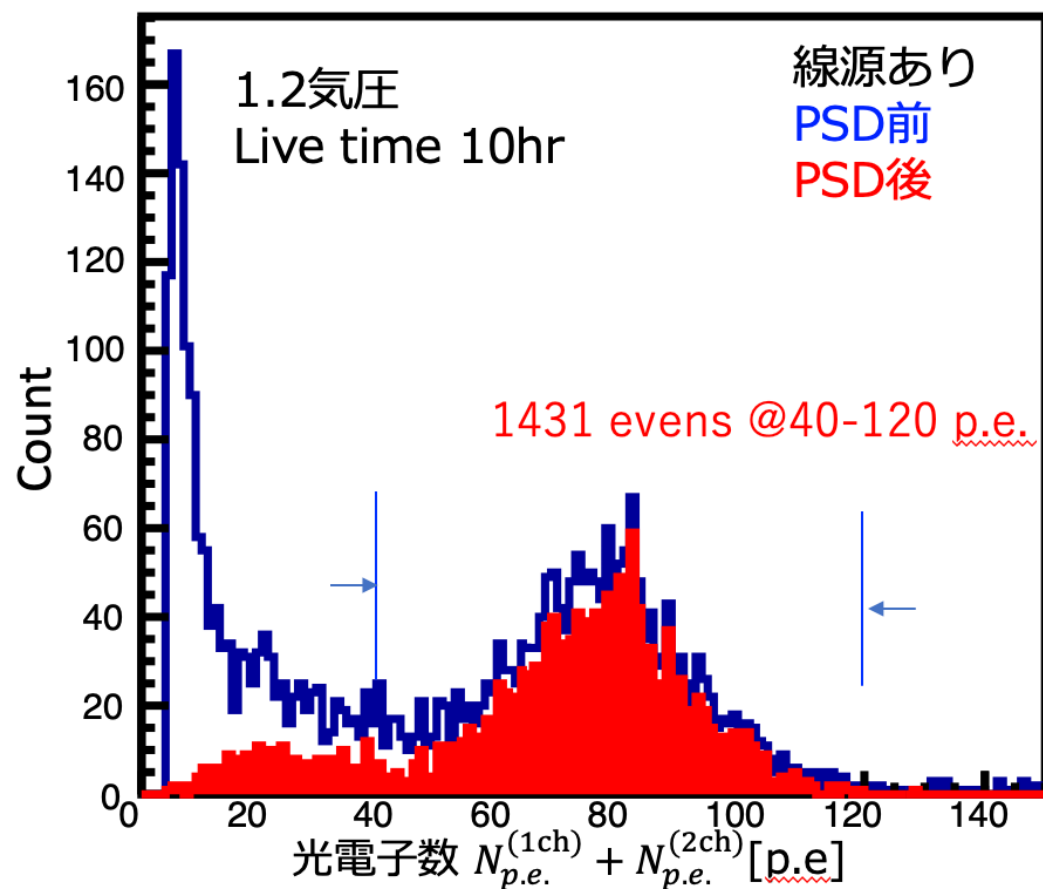
$$Slow = \int_{t_r + \tau_2}^{t_r + \tau_1} v(t) dt$$

$$Total = \int_{t_r + \tau_2}^{t_r} v(t) dt$$



4. CF₄ガス発光とアルファ線検出の基礎研究

CF₄ガス発光でも波形弁別(PSD)は有効か？



結果：波形弁別(PSD)によってアルファ線事象を選別できることを実証した。

4. CF₄ガス発光とアルファ線検出の基礎研究

長波長可視光(500 ~ 800 nm)について

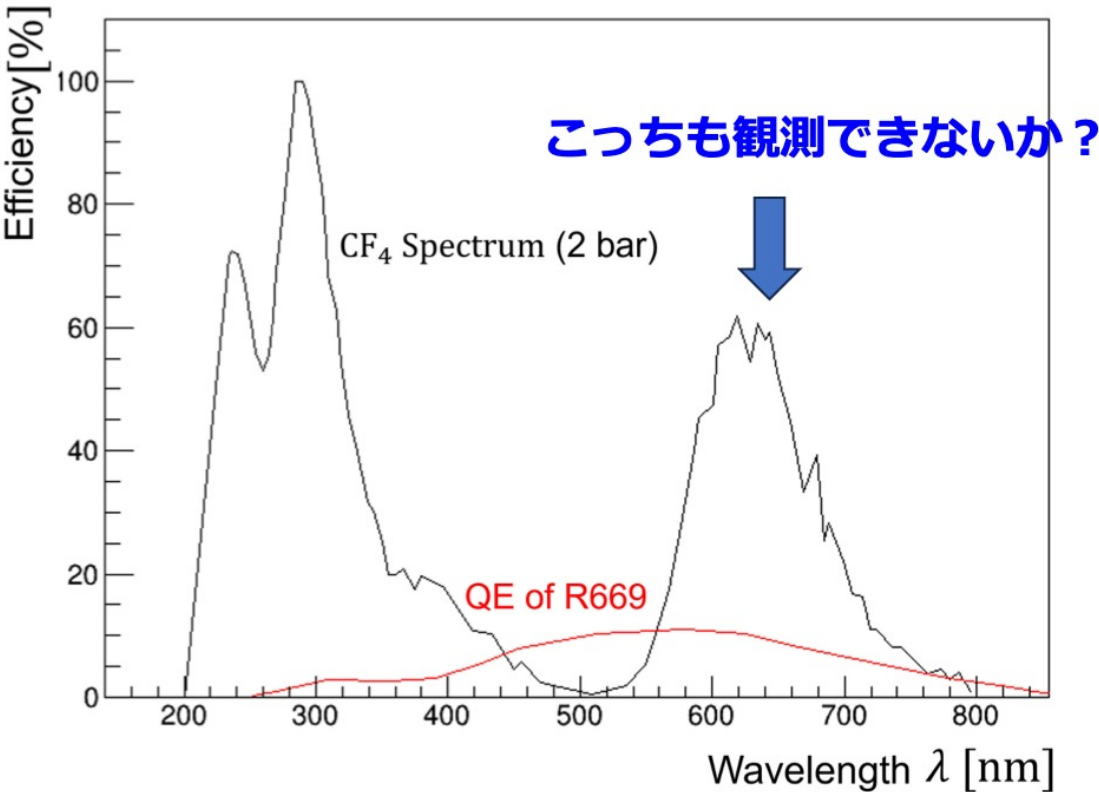


表 2.1. 浜松ホトニクス社 R669 型の仕様 [14]

種類	ヘッドオン型
有効感度領域	300 ~ 900 nm
感度波長 (ピーク値)	600 nm
光電面の種類	赤感度増強マルチアルカリ
電子増倍部 (ダイノード) の種類	ボックス型
電子増倍部 (ダイノード) の増幅段数	10 段

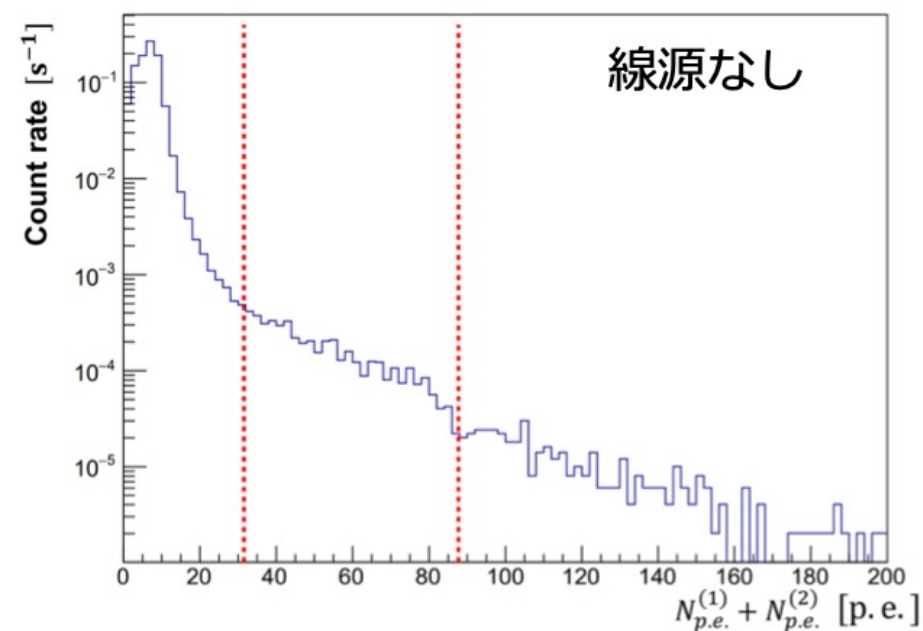
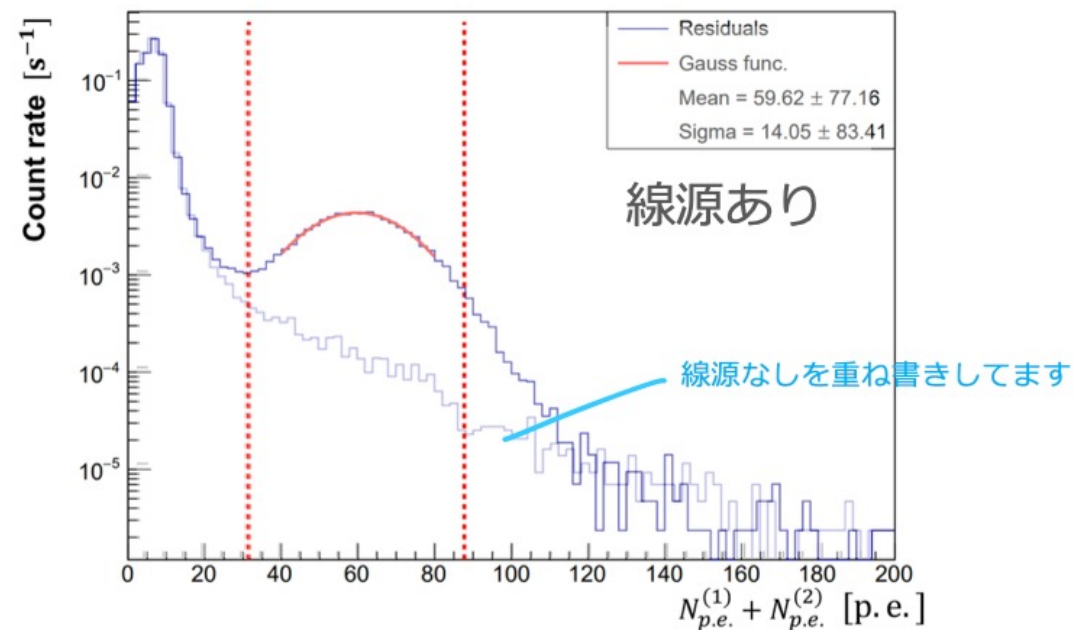
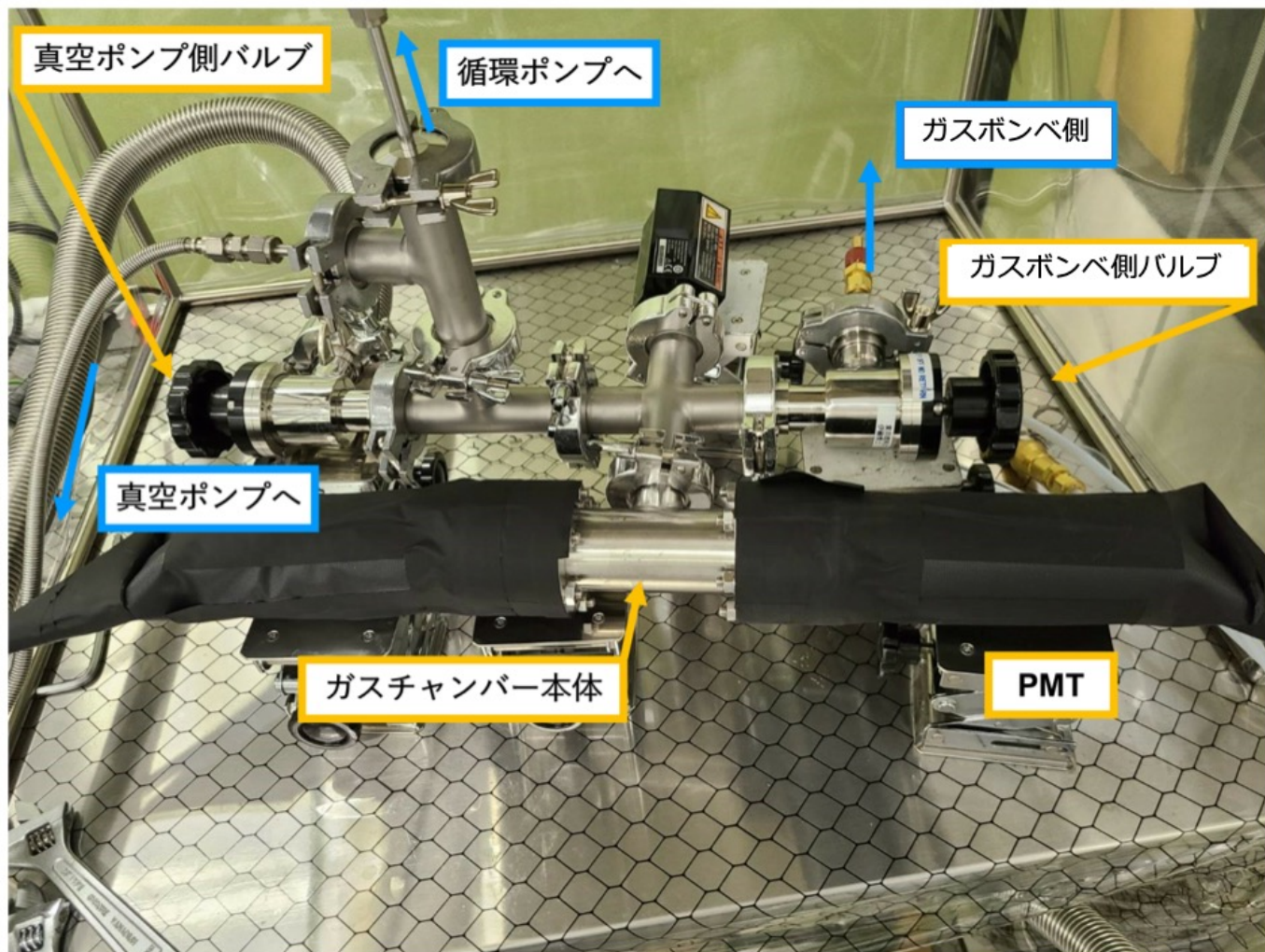
2つのPMT増幅率測定

$(6.07 \pm 0.07_{\text{stat.}} \pm 0.04_{\text{syst.}}) \times 10^6$ @1500V
 $(9.52 \pm 0.11_{\text{stat.}} \pm 0.11_{\text{syst.}}) \times 10^6$ @1500V

4. CF₄ガス発光とアルファ線検出の基礎研究

長波長可視光(500 ~ 800 nm)について

セットアップ

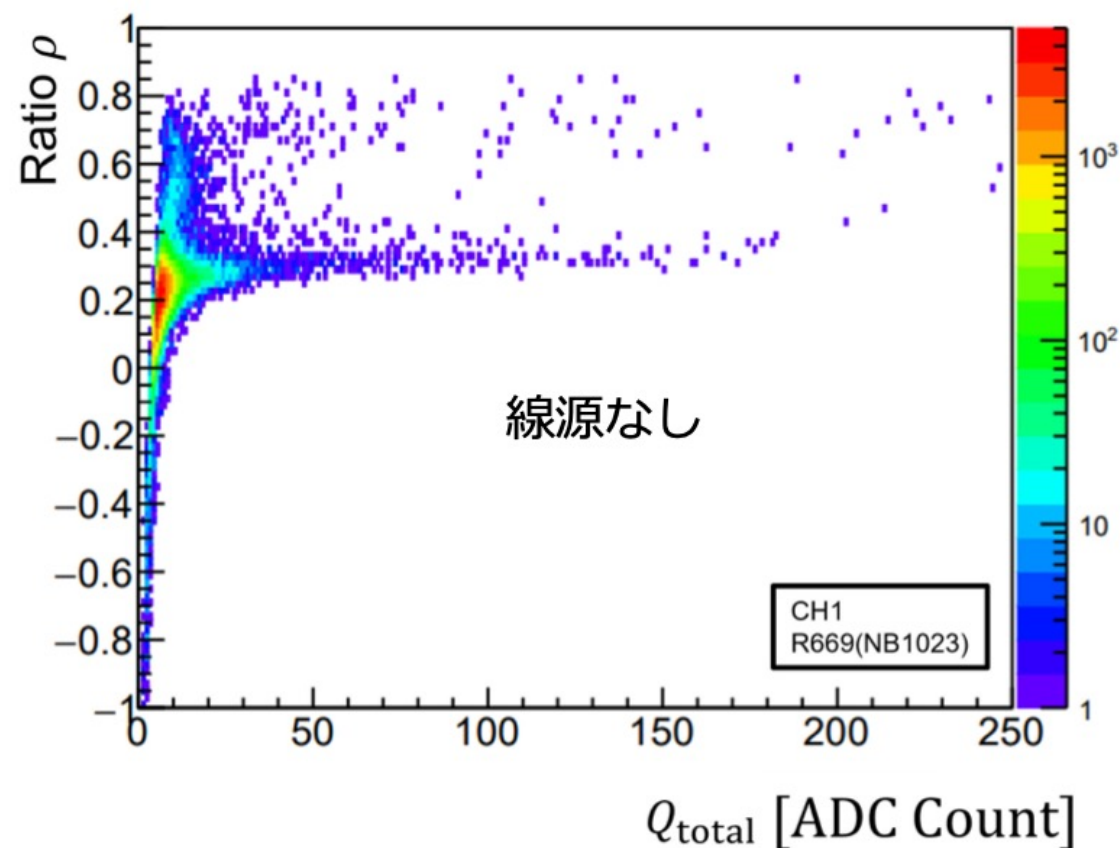
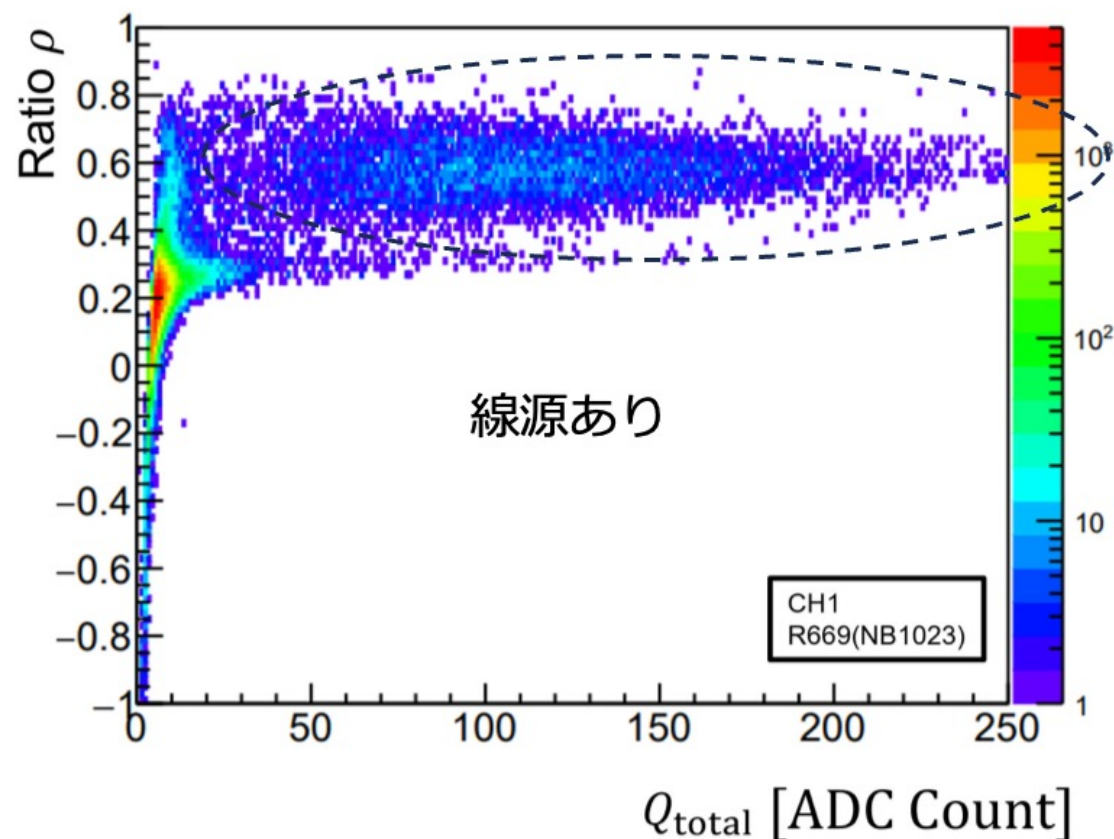


4. CF₄ガス発光とアルファ線検出の基礎研究

長波長可視光(500 ~ 800 nm)について

PSDも適用可能か検証

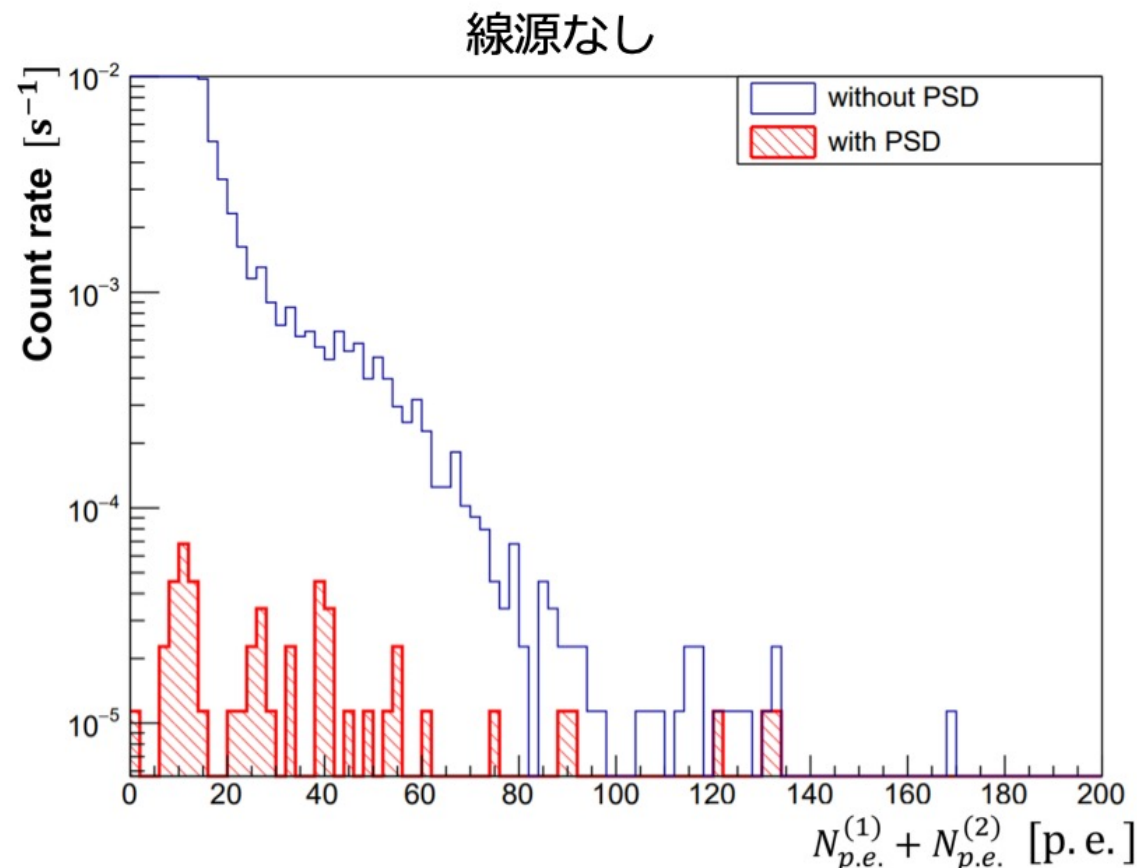
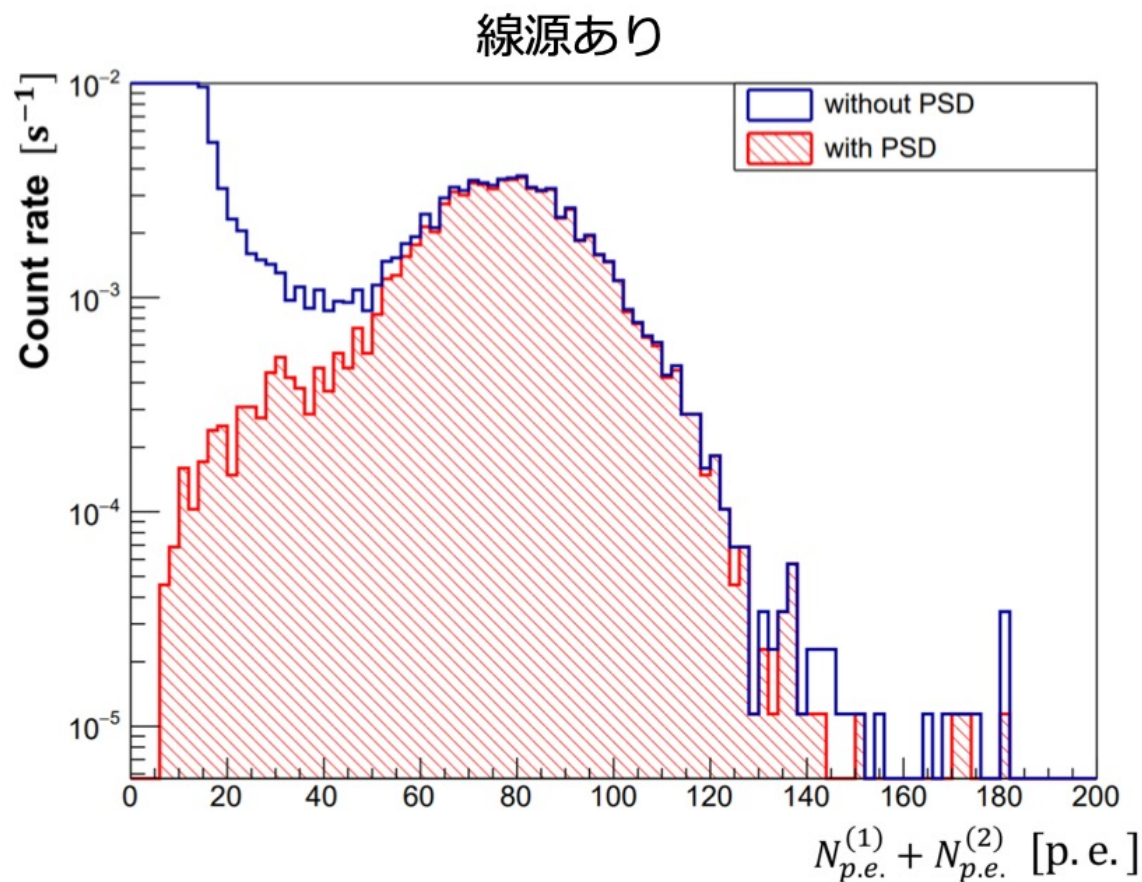
$$\rho \equiv \text{Slow}/\text{Total}$$



4. CF₄ガス発光とアルファ線検出の基礎研究

長波長可視光(500 ~ 800 nm)について

PSDも適用可能か検証



4. CF₄ガス発光とアルファ線検出の基礎研究

長波長可視光(500 ~ 800 nm)について

このデータを使って、アルファ線放出量の感度推定すると？

Slow/Totalの閾値 ρ_{thr} を変えながら、性能評価した結果

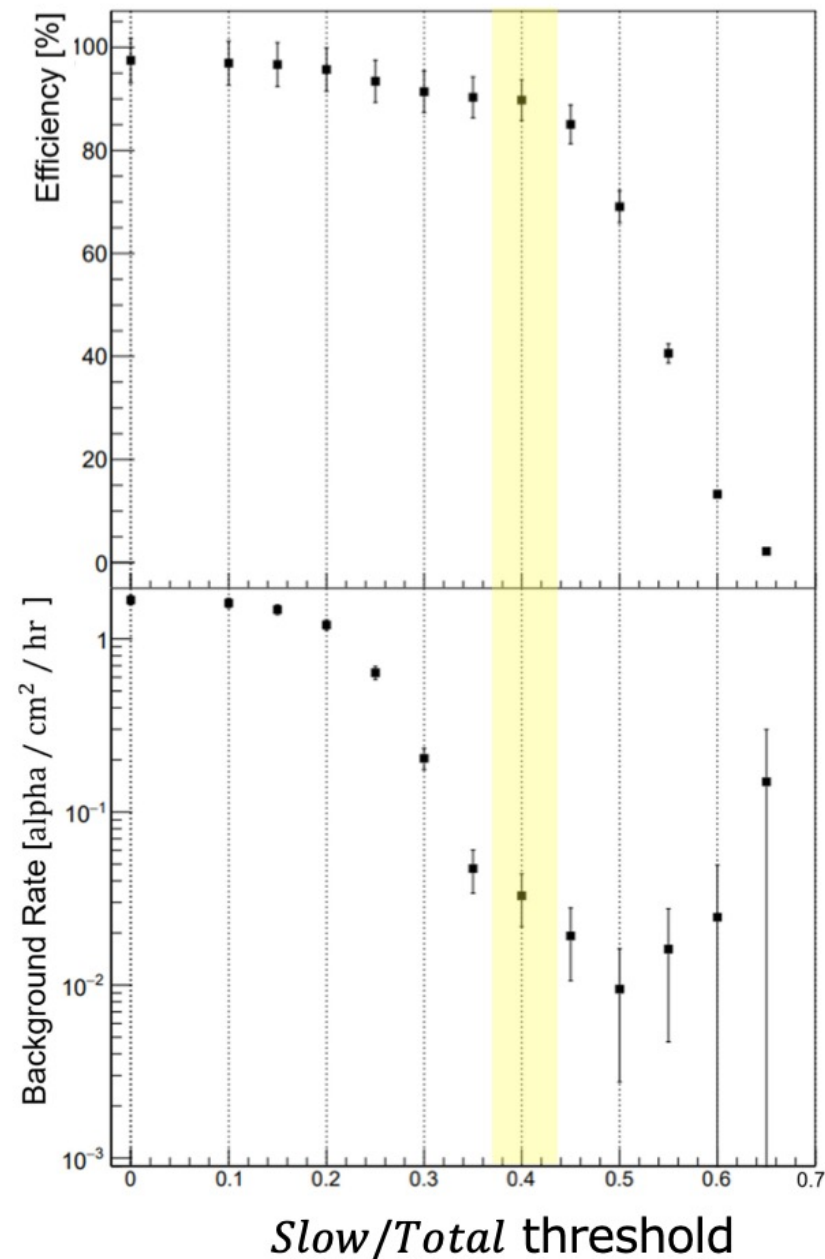
$\rho_{\text{thr}} = 0.4$ の場合、下の表が得られる。

ただし、測定時間1日、分析試料面積を12.5 cm²の場合

表 5.1. 極低放射能アルファ線検出器としての評価 (PSD あり)

項目	計算値 ($\rho_{\text{thr}} = 0.4$)
エネルギー分解能	$22.38 \pm 0.07\%$
検出効率	$89.9 \pm 3.9\%$
バックグラウンド頻度	$(3.2 \pm 1.1) \times 10^{-2} \text{ alpha/cm}^2/\text{hr}$

装置サイズ拡張、分析時間延長で、感度改善が見込める。

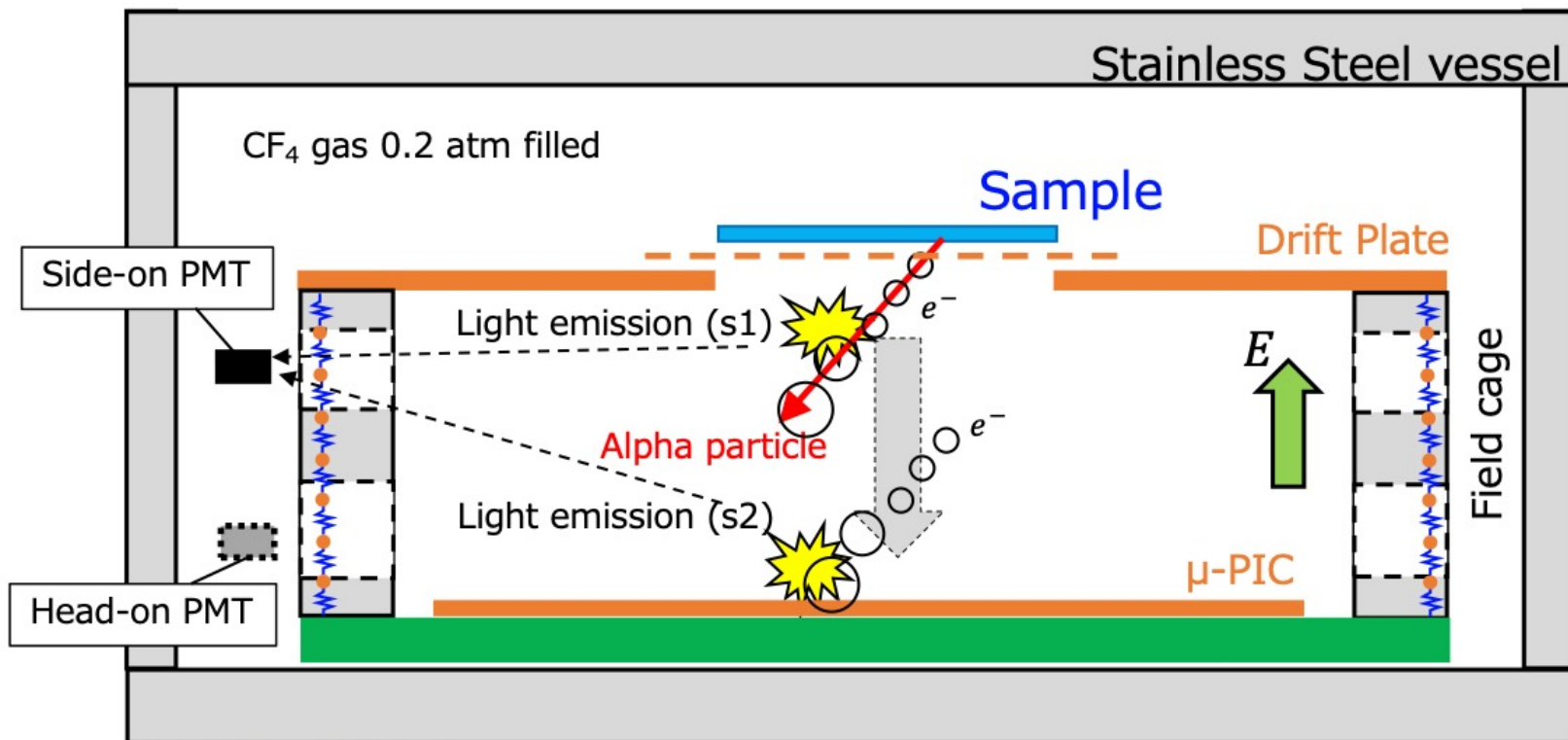


5. CF_4 ガス発光検出を用いたAICHAMの改良

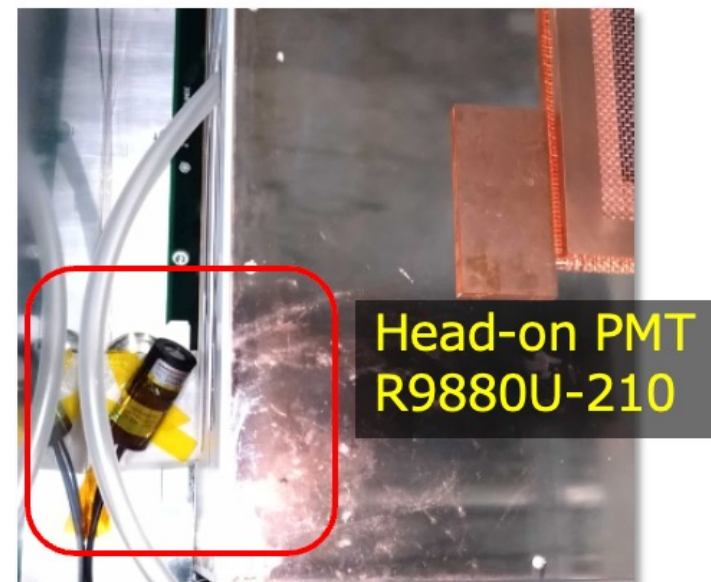
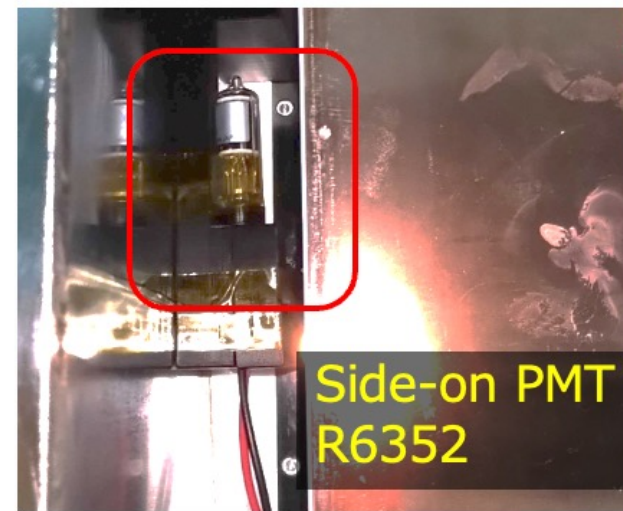
AICHAMにPMTを実装したい！

構造的な制約：

真空容器とフィールドケージの狭いスペースにPMT
を実装する必要がある。



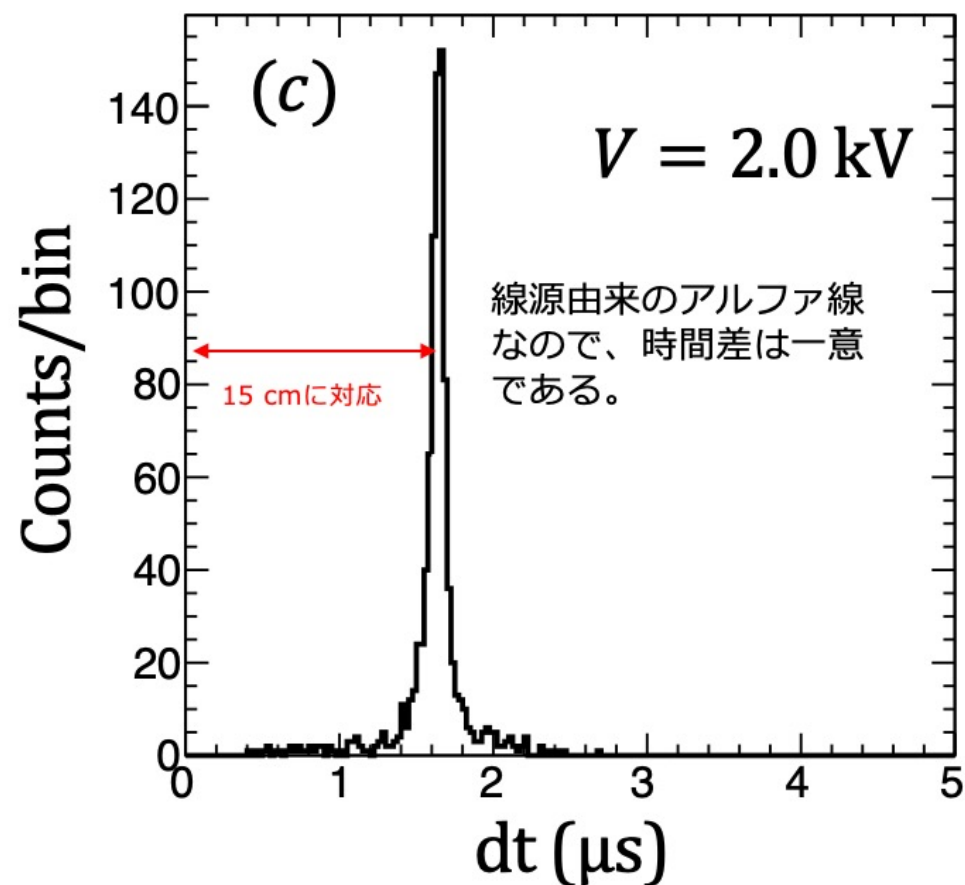
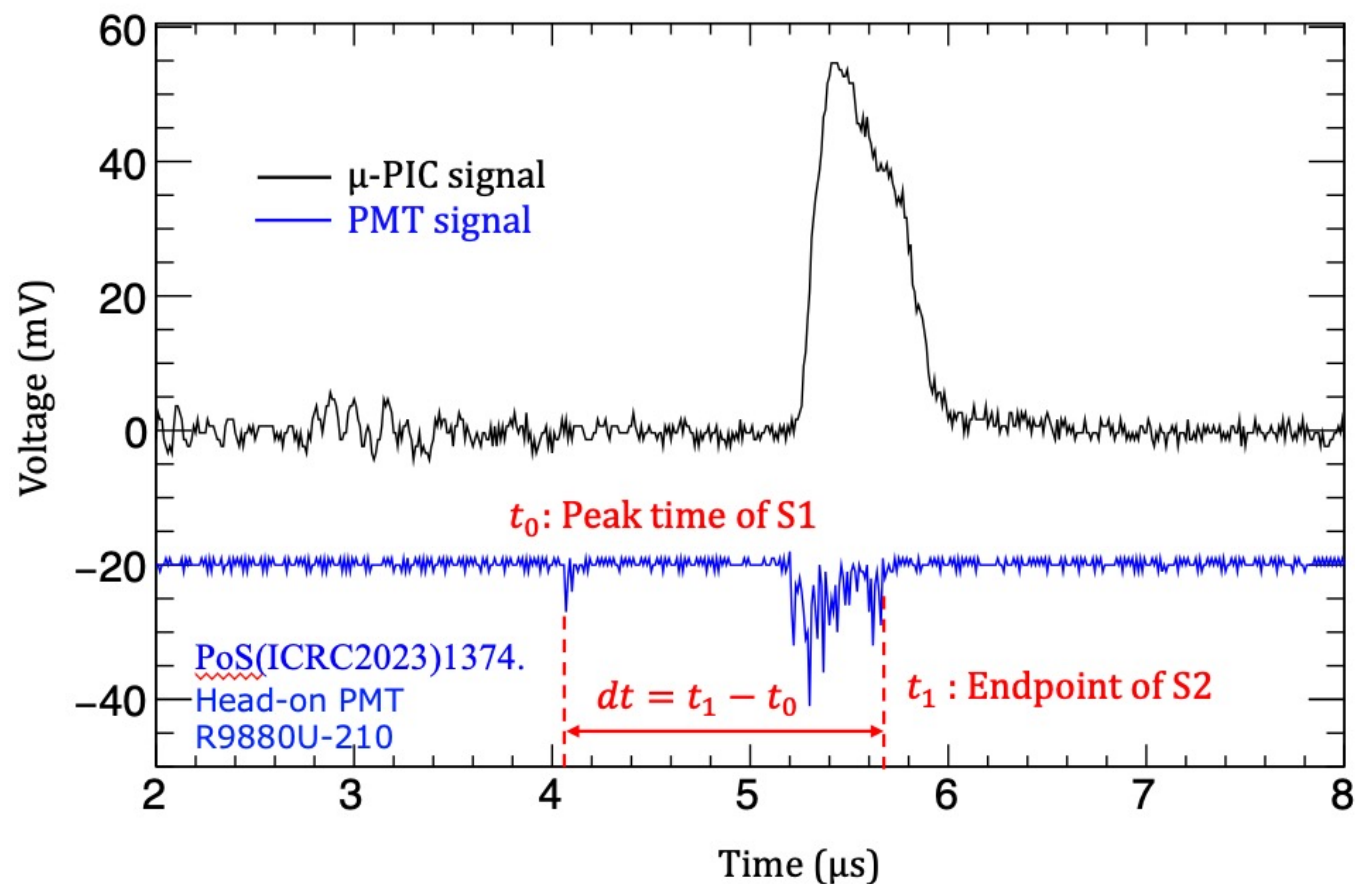
[PoS\(ICRC2023\)1374](#).



5. CF₄ガス発光検出を用いたAICHAMの改良

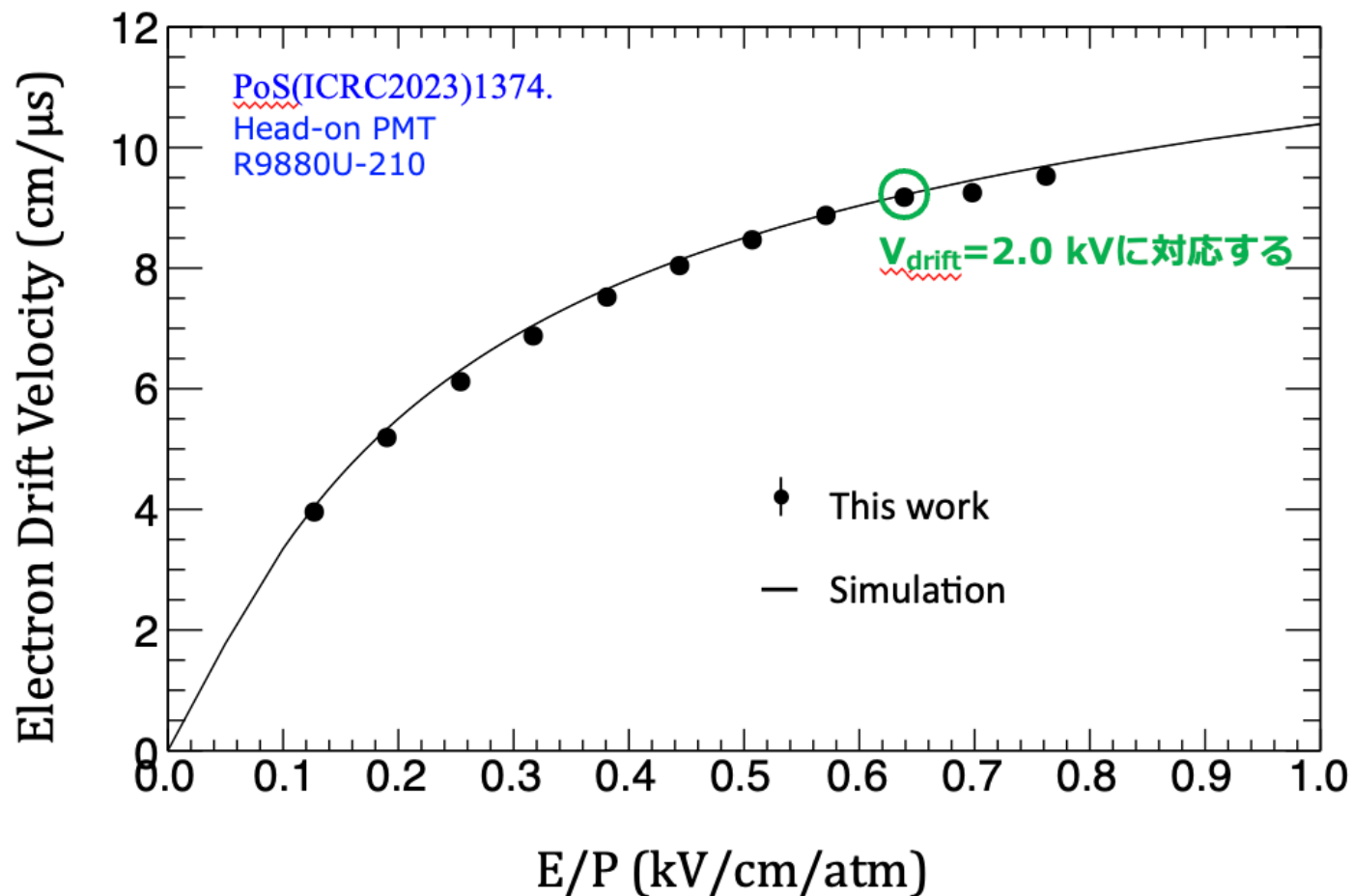
アルファ線によるガス発光(s1)と、
μ-PICでガス増幅した時に発する光(s2)を観測した

s1, s2の時間差はドリフト距離に対応する。

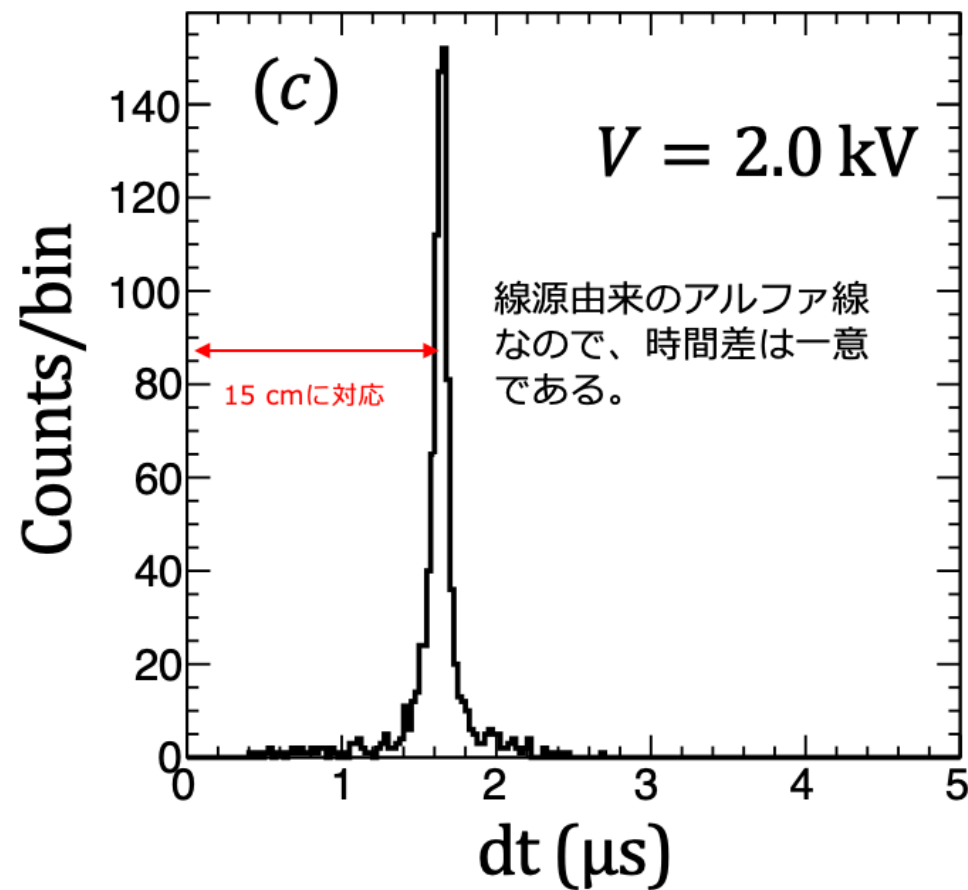


5. CF₄ガス発光検出を用いたAICHAMの改良

電子ドリフト速度測定



s1, s2の時間差はドリフト距離に対応する。

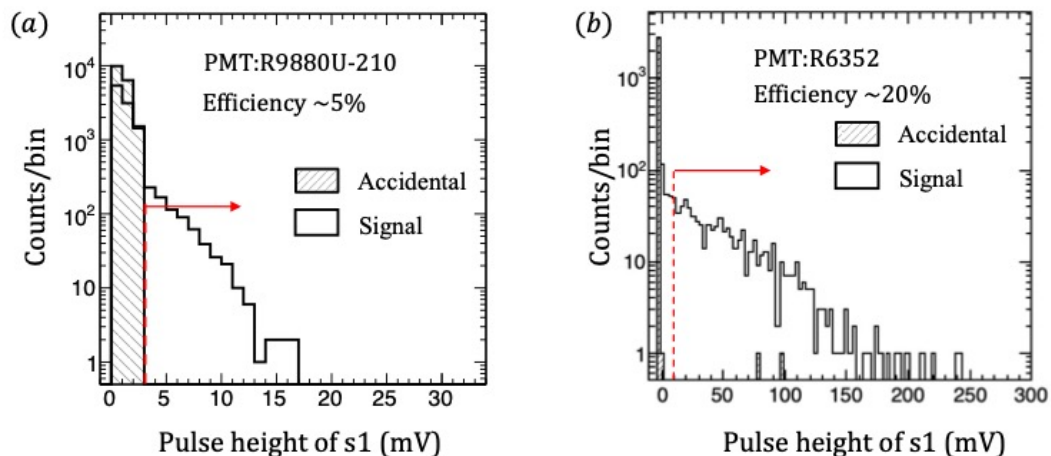


5. CF₄ガス発光検出を用いたAICHAMの改良

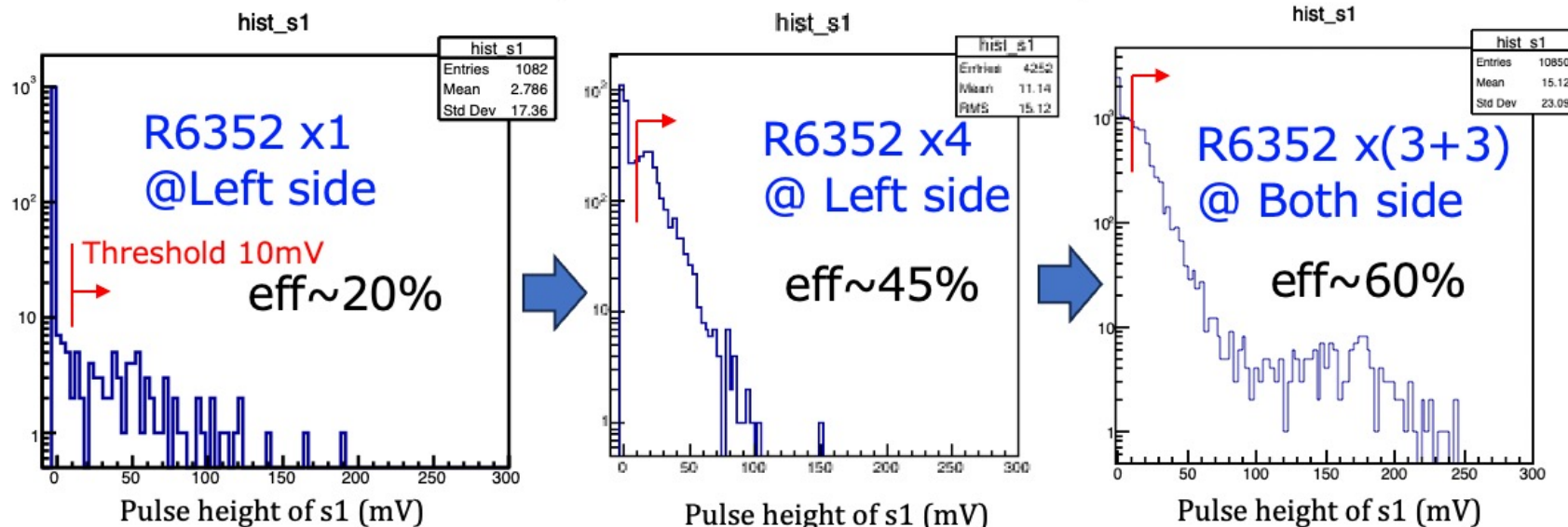
s1検出効率は、PMTの受光面積と量子効率に依存する。

PMTを増やして、s1検出効率を改善した。

Side-on PMTは並べて配置できるので採用した。



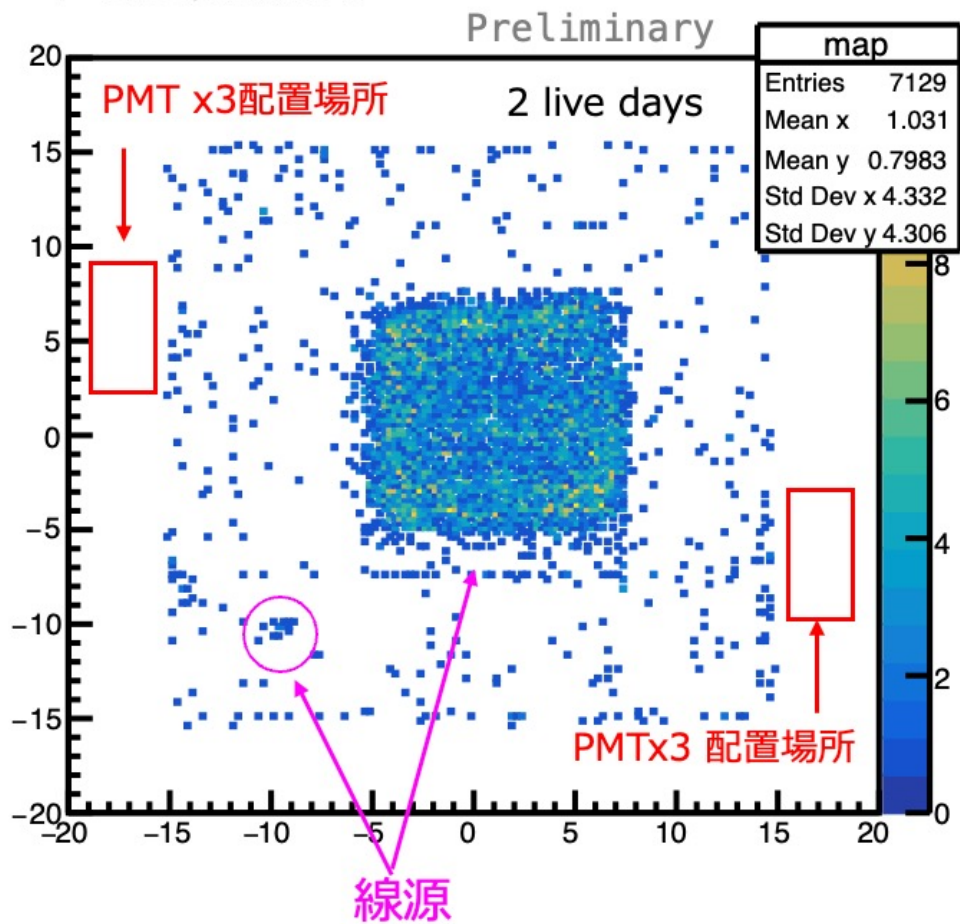
[PoS\(ICRC2023\)1374.](#)



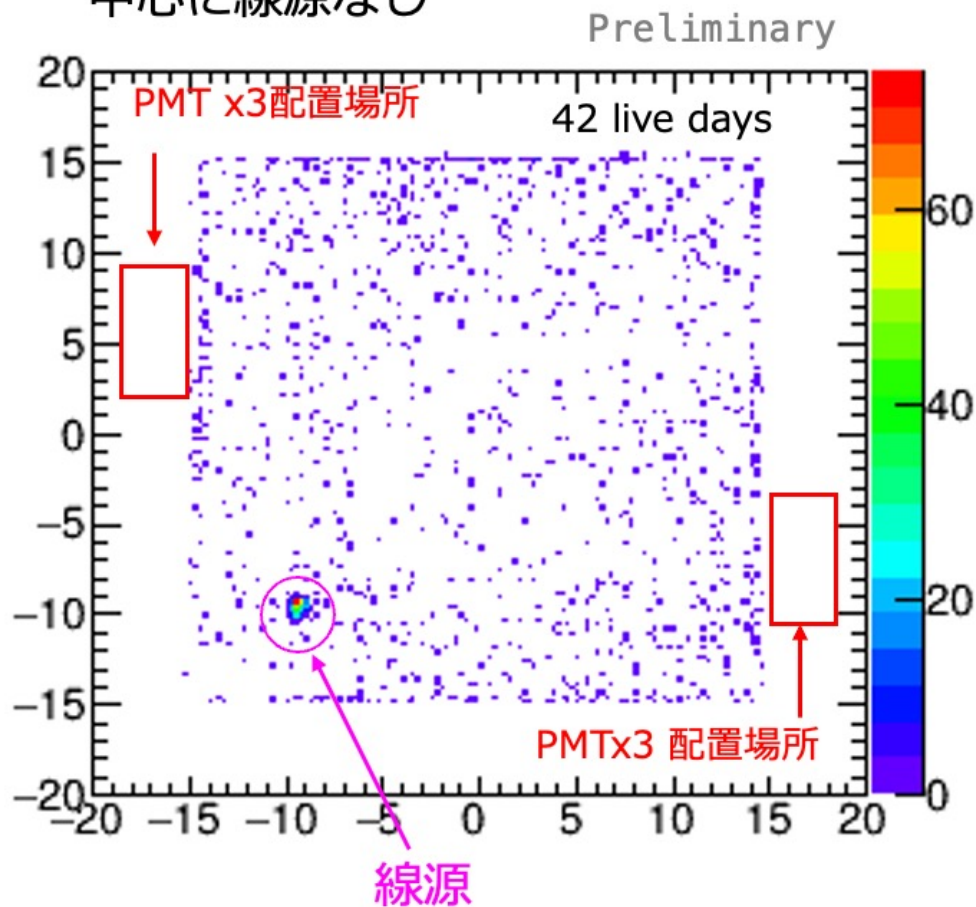
5. CF₄ガス発光検出を用いたAICHAMの改良

集光効率によるイメージマップの一意性は？

中心に線源あり



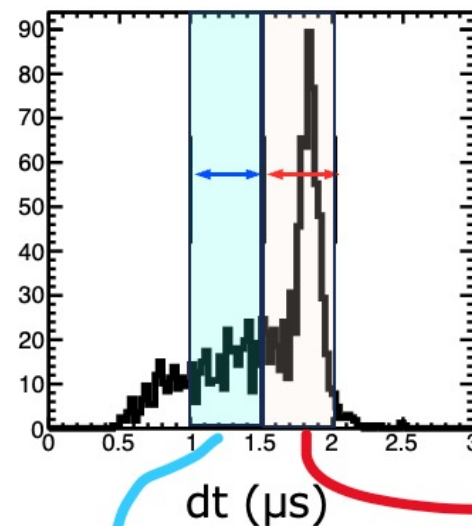
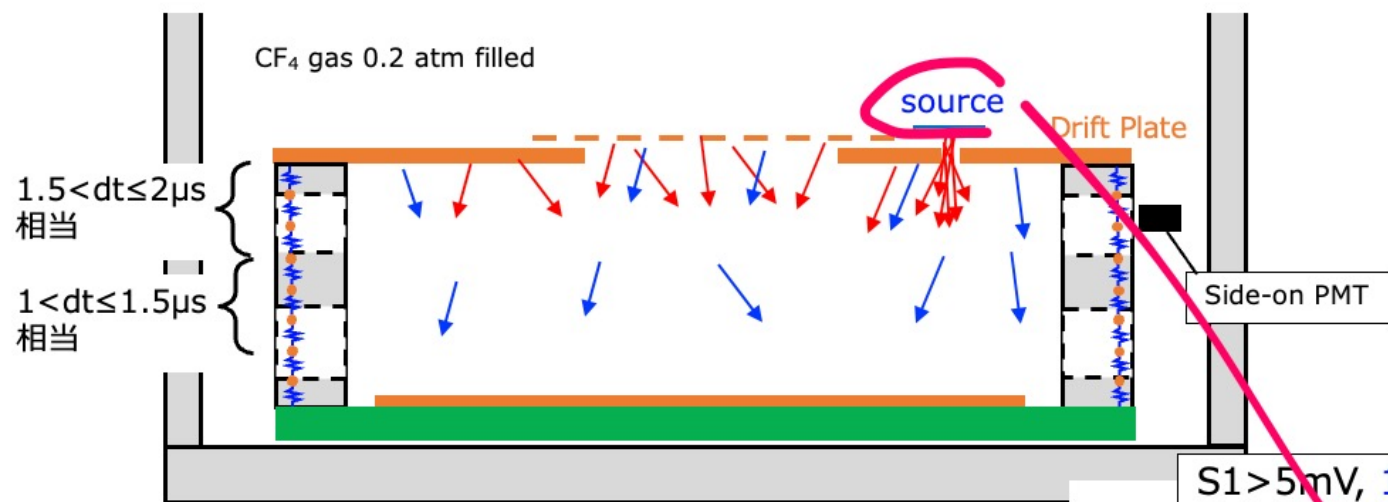
中心に線源なし



コメント：大きな非一様性はみられない

5. CF₄ガス発光検出を用いたAICHAMの改良

PMT実装したAICHAMによるデモンストレーション



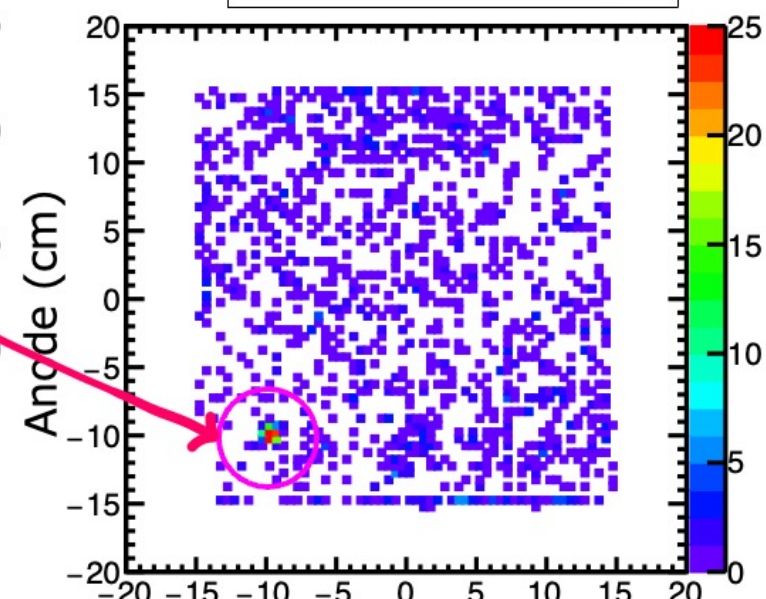
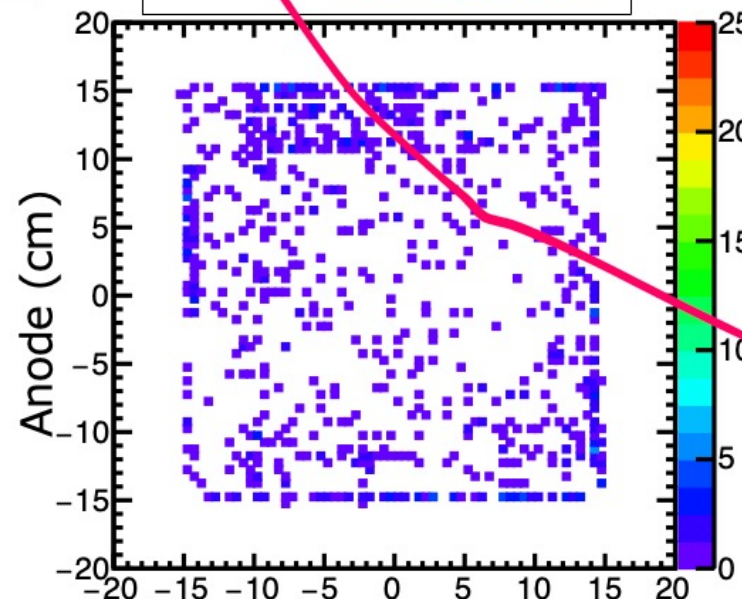
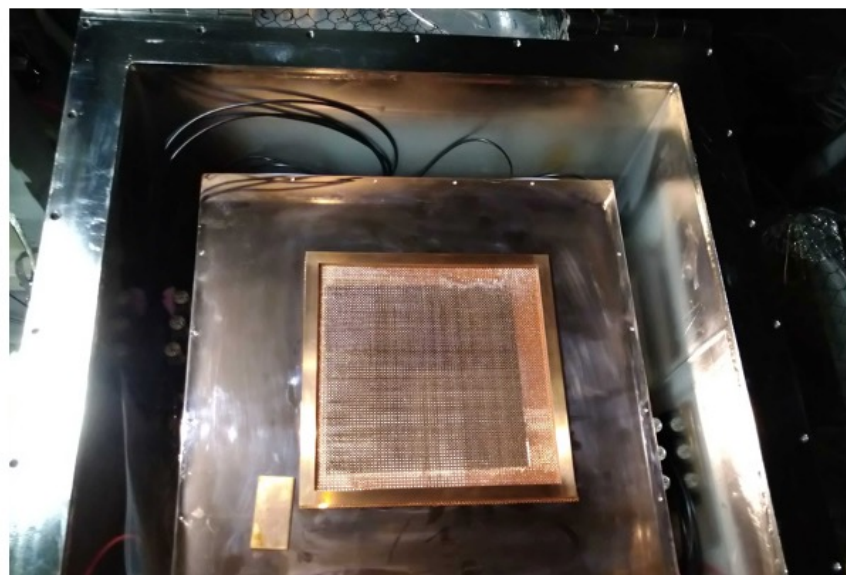
銅メッシュ、ドリフト板からのアルファ線が観測できている。



サンプル設置のメッシュなどもLowBG化すべき

S1 > 5mV, 1.0 < dt ≤ 1.5 μs

S1 > 5mV, 1.5 < dt ≤ 2 μs



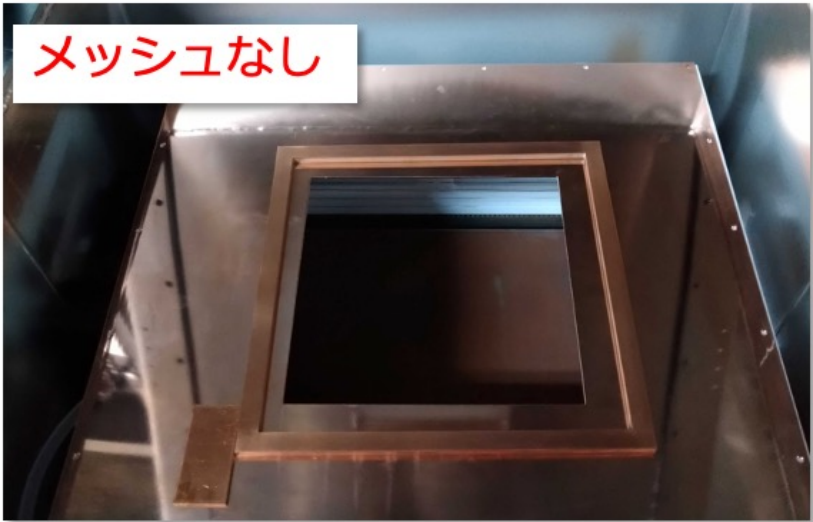
2023/09/17

AICHAM (伊藤 Cathode (cm))

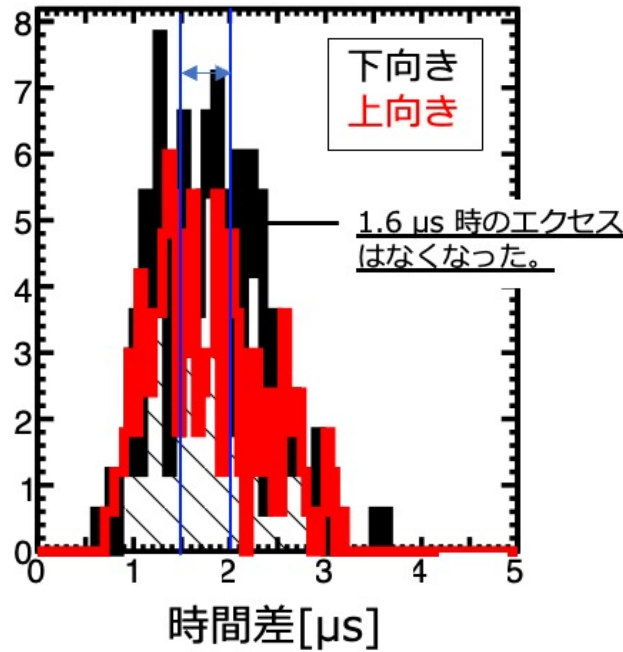
Cathode (cm)

5. CF₄ガス発光検出を用いたAICHAMの改良

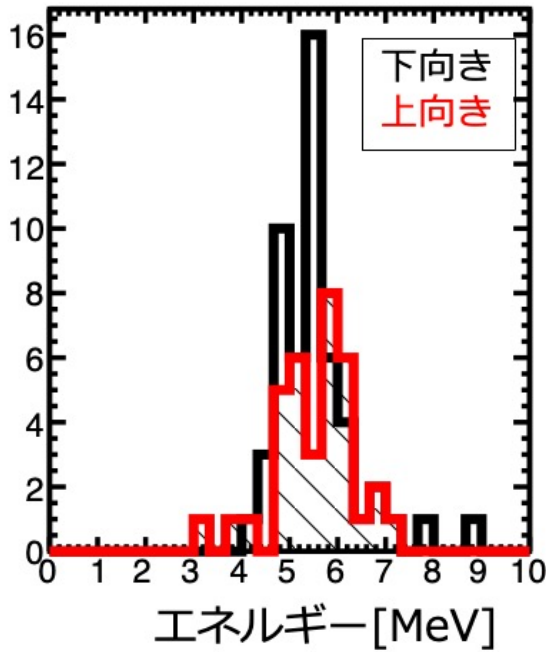
PMT実装したAICHAMの性能(分析感度)は？



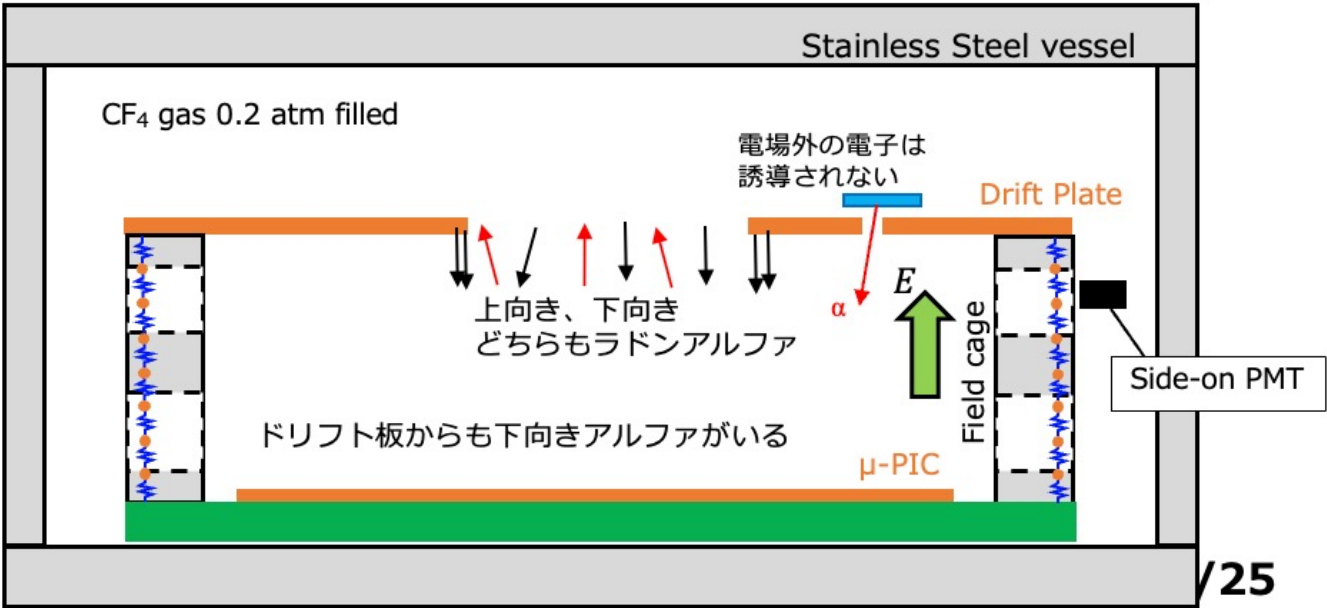
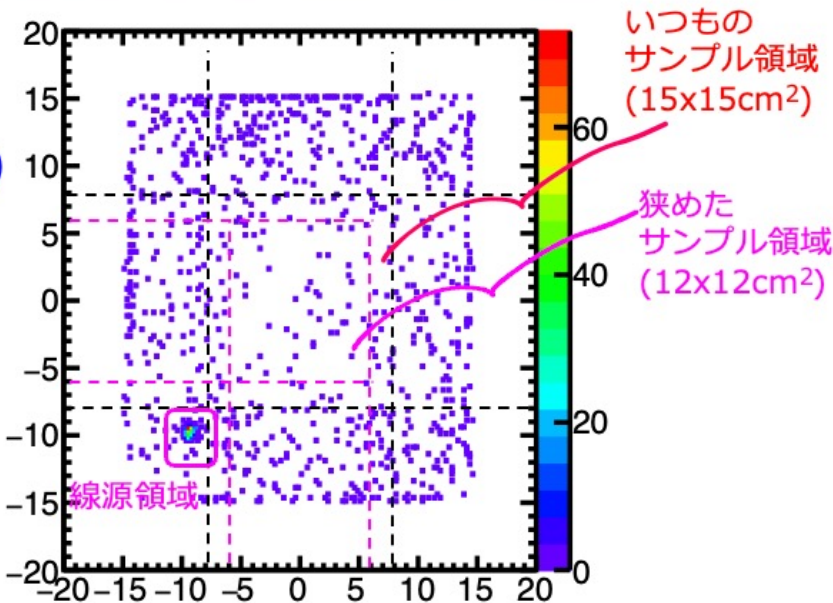
狭めたサンプル領域事象を選択



1.5 – 2.0 μ s の事象を選択

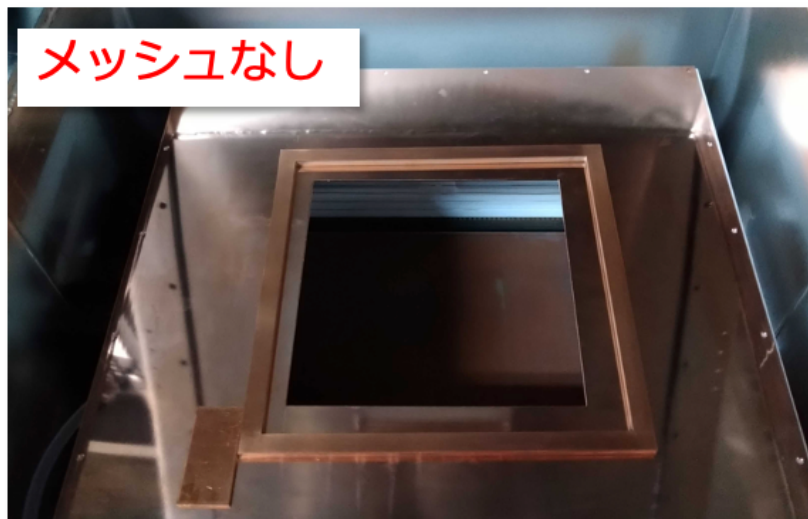


live time
698 hr
(29.1 days)

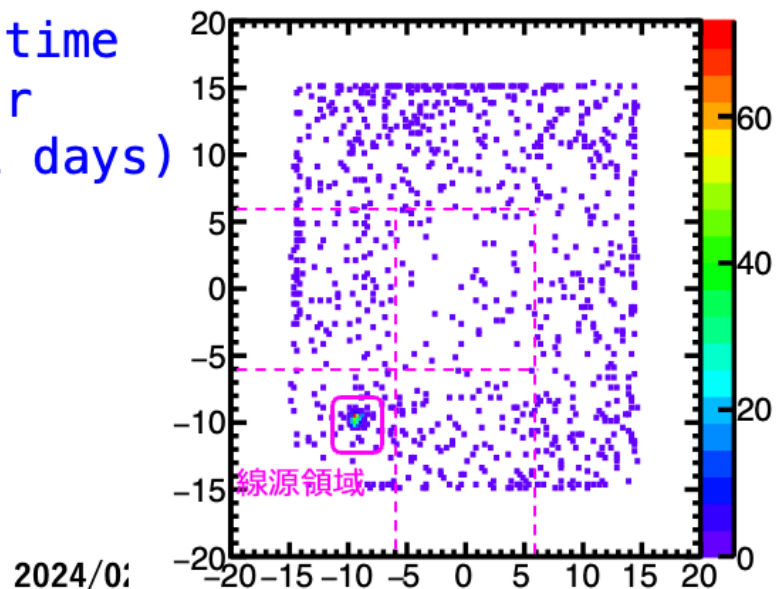


5. CF₄ガス発光検出を用いたAICHAMの改良

PMT実装したAICHAMの性能(分析感度)は？

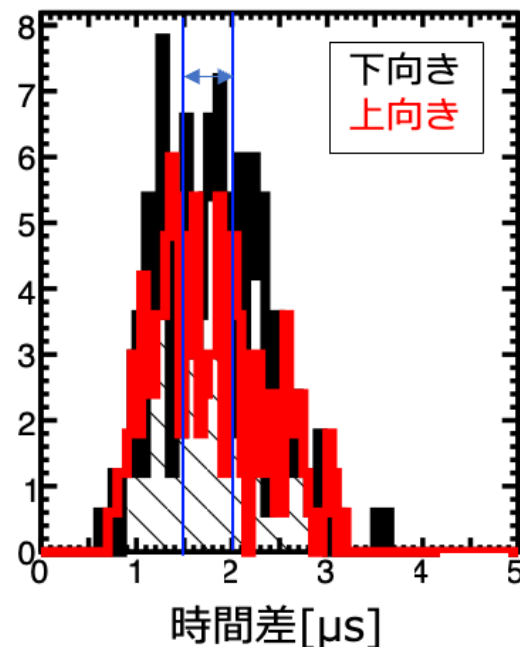


live time
698 hr
(29.1 days)

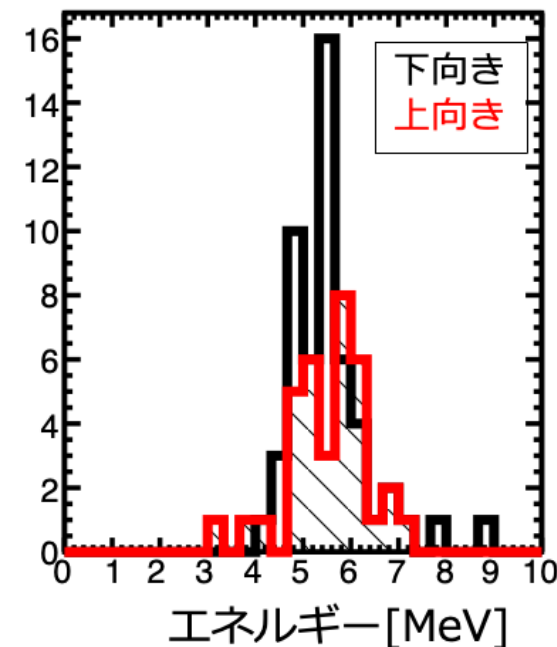


2024/01

狭めたサンプル領域事象を選択



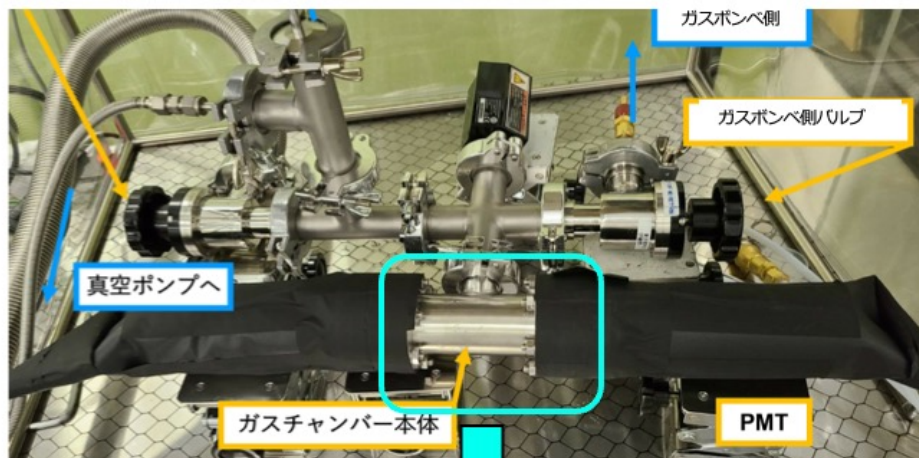
1.5 - 2.0 μs の事象を選択



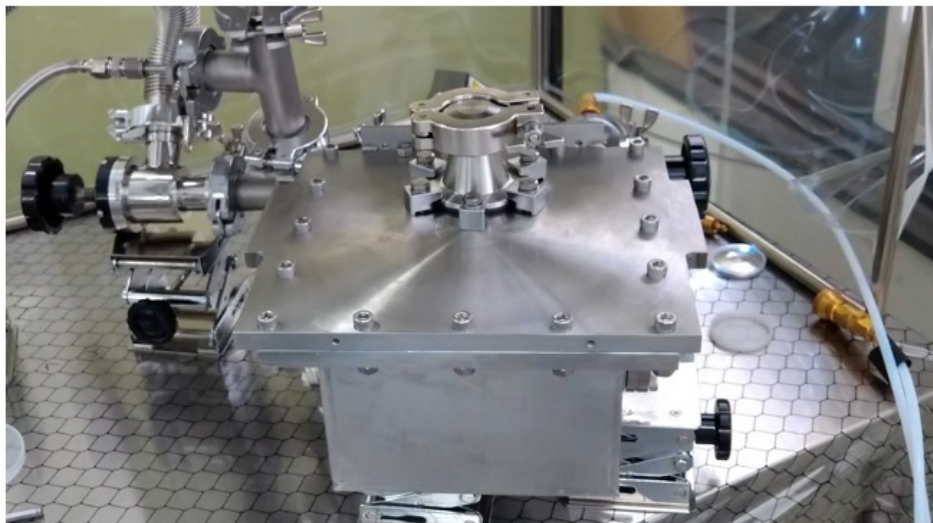
Effective area = 144 cm²
Detection efficiency = 0.334±0.005
of events (downward) = 52
alpha emissivity = $(1.57 \pm 0.22) \times 10^{-3}$ a/cm²/hr
of events (upward) = 35
bkg emissivity = $(1.10 \pm 0.18) \times 10^{-3}$ a/cm²/hr

検出限界: 8.5 x 10⁻⁴ a/cm²/hr (90%CL)
1.1 x 10⁻³ a/cm²/hr (99%CL)
1.3 x 10⁻³ a/cm²/hr (99.7%CL, 3σ)

6. 今後の展望



チェンバーサイズ拡大



CF₄ガス発光を用いた
アルファ線分析

AICHAM改良：ラドン抑制(lowBG材料使用、
活性炭吸着)；分析面積拡張；
⇒ 高感度α線イメージ分析を運用可能

大型液体CF₄によるニュートリノ・
暗黒物質探索実験への応用

- CF₄ガスで長波長可視光の観測検証できた。
- 長波長光は、透過長が長く、アクティブ標的
体積の拡張で検出される光量ロスが低い。
- ガス/液体で発光特性のちがいなど興味深い。

ホウ素によるB(n,α)反応で、
極低放射能環境中性子の測定へ応用

- B(n,α)反応のアルファ線のエネルギーは~3 MeV。
- ラドン由来のアルファ線のエネルギーは~6 MeV。
- 既存の中性子検出器の性能を上回るか？

まとめ

- 極低放射能アルファ線イメージ分析は、独立して重要な分析技術のひとつで、我々はAICHAMを開発し、現在神岡で運用している。
- AICHAM以降、海外でもTPC-baseのアルファ線イメージ分析装置開発が進んでおり、AICHAMも日々アップデートする必要がある。
- 最近、ガスシンチレーション発光に注目し、理科大で発光特性理解を進めてきた。
5.3 MeVアルファ線によるCF₄ガスのシンチレーション光は、簡易的なセットアップで70~80 p.e.観測された。
- AICHAMにPMTを実装して、CF₄ガスのシンチレーション光を観測した。s1-s2の時間差から、電子ドリフト距離を決定でき、ラドン由来のアルファ線事象除去の可能性を示し、暫定的に性能を評価した。
- 今後の展開
 - (1) PMTを追加したAICHAMの改良と安定運用
 - (2) 新装置開発(チェンバーサイズ拡大)
 - (3) 中性子測定への応用
 - (4) CF₄を用いた ν /DM検出器応用