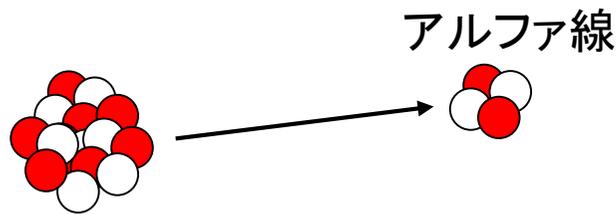


高感度アルファ線測定装置 および測定技術

東京理科大学 理工学部 物理学科
助教 伊藤 博士

2022年11月8日

はじめに、アルファ線とは？



放射性同位体(RI)

例) ウラン、トリウム、ラドン
アメリシウム

(^{238}U , ^{232}Th , ^{222}Rn , ^{241}Am)

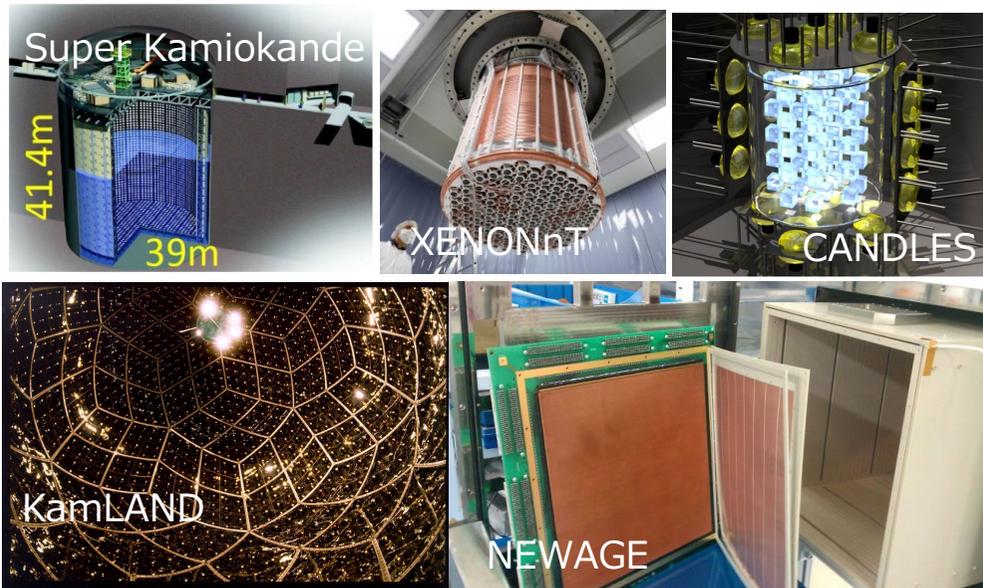
- ヘリウム原子核(質量数4, 電荷+2e)
- 空気中で数cm飛ぶ。紙1枚で止まる。
- 自然界には、**空気中にラドン(α 線放出)**が $100\text{Bq}/\text{m}^3$ 程度含まれている*。
- 被曝に関する**等価線量係数が20**: 他のベータ線、ガンマ線が1に比べて非常に高い。

*Bq(ベクレル): 1秒間に1個アルファ線が放出する頻度に相当する単位。

- 原子炉の燃料廃棄物から大量のアルファ線が発生する。
- BNCT法など、アルファ線を用いた治療法も期待されている。
- アルファ線(一般に放射線)は、半導体メモリなどに損傷を与えデータ破損させうるため、**関連部品はRI(放射性同位体)不純物を極限に減らす必要**がある。

宇宙素粒子実験の先端技術を社会へ還元

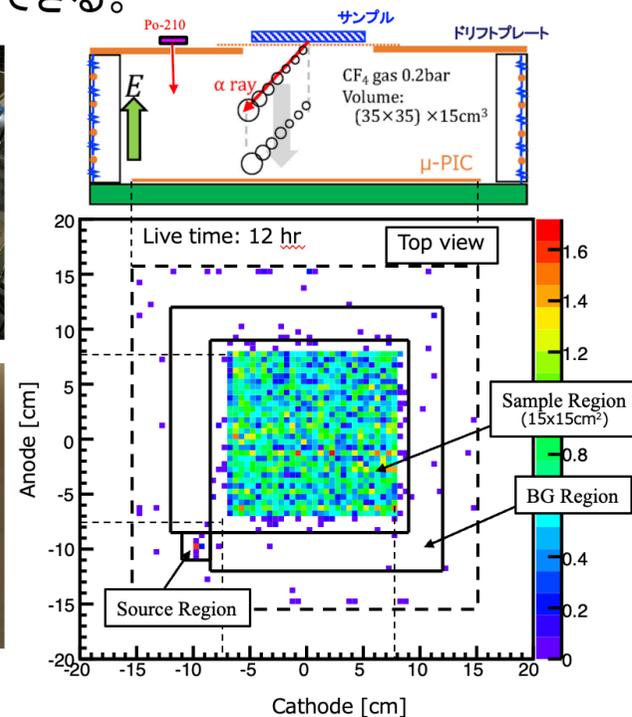
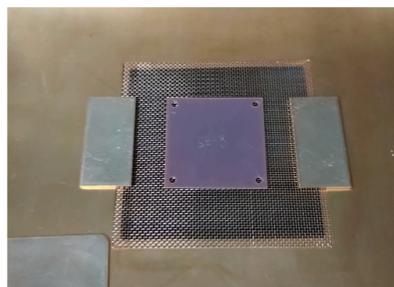
国内外で有名な素粒子実験グループ



- 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**」が要求される。これまで綺麗な素材確保・生成・分析技術は確立されてきた。
- 材料表面の微小な放射能汚染でも、地下実験では大問題！
- 表面アルファ線分析も重要である。**

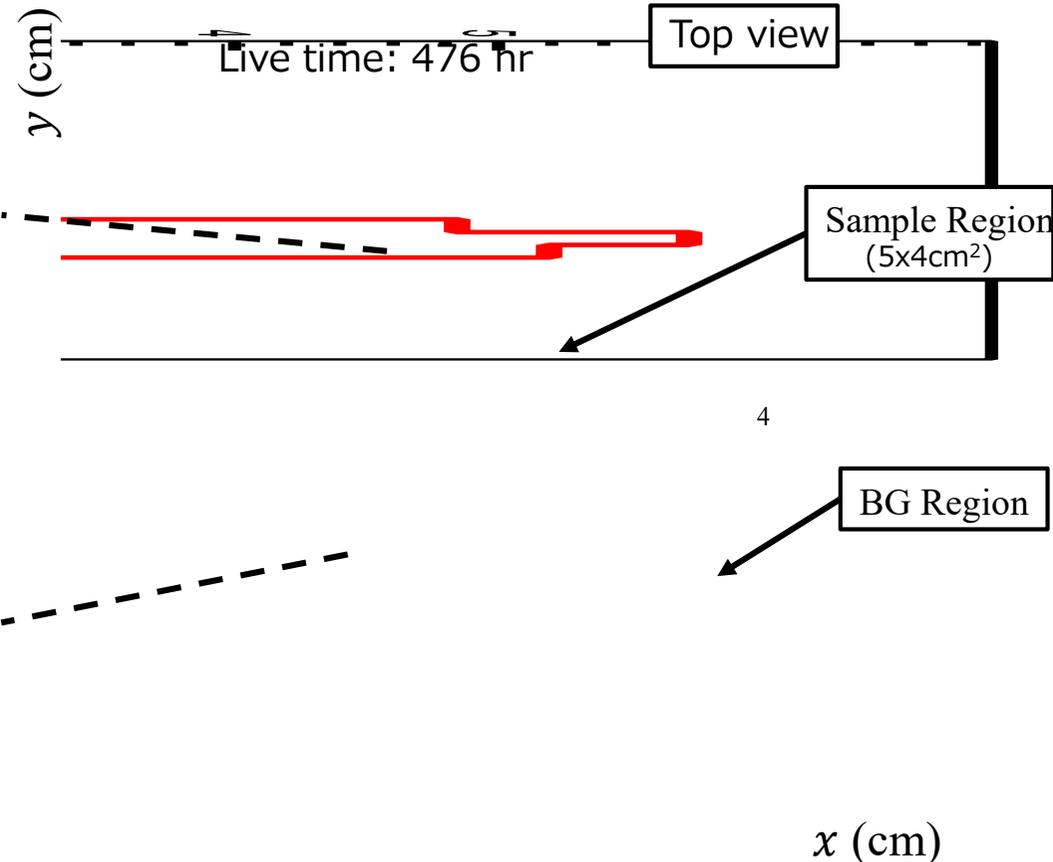
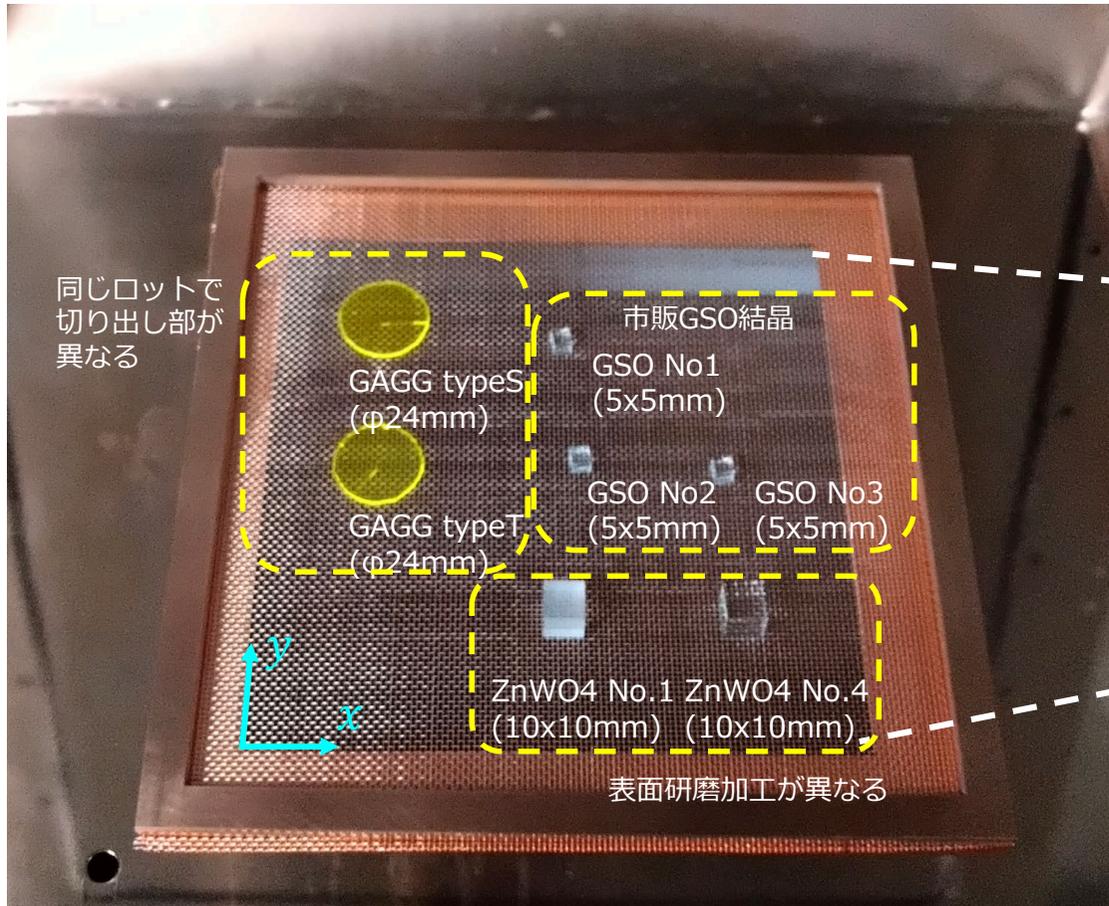
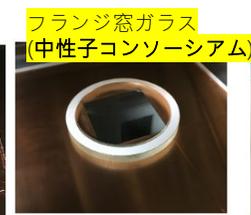
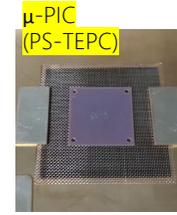
学術領域内で開発した表面 α 線分析装置

- ガスTPC(**タイムプロジェクションチェンバー**)技術を用いた先端技術に基づいた。
- 空気中の自然放射能物質が表面に付着するような汚染ですら検出できる高い感度。
- 汚染イメージが取得できる。
- エネルギー分布から、 α 線が材料表面から or 内部から放射しているか判断できる。



宇宙素粒子実験の先端技術を社会へ還元

分析感度 $\sim 1 \times 10^{-3}$ (90%CL) $\alpha/\text{hr}/\text{cm}^2$ @ $E > 2.5 \text{ MeV}$ で、
学術領域の研究グループから依頼され分析を実施してきた実績がある。



GSO No2: $43.27 \pm 0.97_{\text{stat}} \pm 0.73_{\text{sys}} \alpha/\text{cm}^2/\text{hr}$

宇宙素粒子実験の先端技術を社会へ還元

- 半導体ICチップの細密化に伴って放射線耐性が脆弱になる課題を抱えている。特に、**超伝導量子ビット回路でも放射線の影響**が報告されている。
- 従来の低アルファ部品では、今後対応しきれなくなると危惧されるため、**超低アルファ金属および材料**が必要である。当然、**分析装置の高感度も必要**である。
- いくつかの企業が低アルファ材料開発を始めている。
 - 三菱マテリアル社は、低アルファ線はんだを開発・生産($\sim 10^{-3}$ a/cm²/h)。
 - Honeywell社は、低アルファ金属を使った基板を取り扱う。

Article
Impact of ionizing radiation on superconducting qubit coherence

<https://doi.org/10.1038/s41586-020-2619-8>
Received: 25 January 2020
Accepted: 5 June 2020
Published online: 26 August 2020

Antti P. Vepsäläinen^{1,2}, Amir H. Karamlou¹, John L. Orszal^{1,3}, Akshuna S. Dogra⁴, Ben Loefer¹, Francisco Vasconcelos¹, David K. Kim¹, Alexander I. Melville^{1,2}, Bethany M. Niedzielski², Jonilyn L. Yoder¹, Simon Gustavsson¹, Joseph A. Formaggio¹, Brent A. VanDevender¹ & William D. Oliver^{2,3}

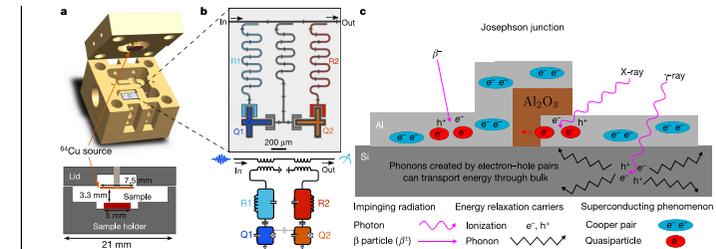


Fig. 1 | Schematic of the experiment. **a**, Sample holder and ⁶⁴Cu radiation source. The source is mounted 3.3 mm above the silicon chip containing the superconducting aluminium transmon qubits. **b**, False-colour micrograph and circuit schematic of the qubit sample. The sample consists of two transmon qubits, Q1 (blue, left) and Q2 (orange, right). The resonators used to read out the qubits are shown with red and cyan. The resonators are inductively coupled to a common microwave transmission line, through which both qubit control and readout pulses are sent. The control pulses and the measurement pulses are generated by microwave sources and arbitrary waveform generators at room temperature (not shown here; see Extended Data Fig. 1e). **c**, Diagram of the possible quasiparticle generation processes. Incoming ionizing radiation (from beta particles, gamma-rays and cosmic rays) interact with the Al qubit and Si substrate, creating electron-hole pairs due to the ionization of atoms and phonons (see text). Beta particles create electron-hole pairs continuously near the surface of dense materials. X-rays also interact with the surface, whereas gamma-rays penetrate deeply. The subsequent energy cascade of these electron-hole pairs ultimately breaks Cooper pairs and thereby generates quasiparticles.

参考文献
Nature 584 (2020) 551.

三菱マテリアル 電子材料サイト

HOME 製品紹介 事業所情報

低アルファ線はんだペースト

印刷工法に適した
パンパ形成用はんだペーストです



Honeywell INDUSTRIAL Applications Products Resour

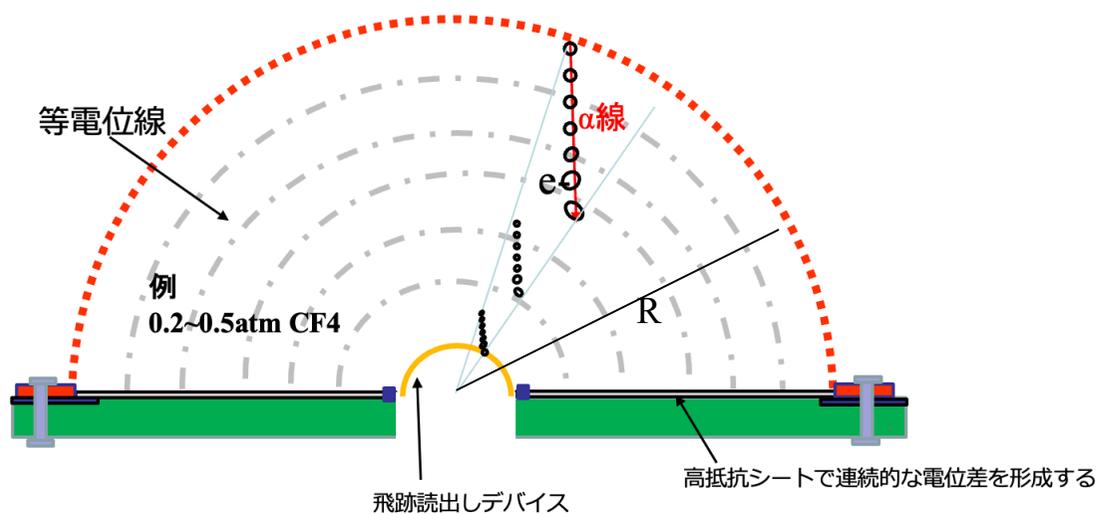
Low Alpha Materials

Low alpha packaging solutions are critical for reliable production of high-performance semiconductor devices. Honeywell RadLo™ materials include solder material of various low alpha grades for devices challenged by soft errors.

アルファ線分析の新測定技術

(要素1) 表面汚染分析なので、感度を上げるためには、有効面積を広げる必要がある。

- ・ 読み出しデバイスの面積を増やすと大変。
- ・ そこで新しく、少ないデバイス面積でも大面積を分析できるTPCの電場を構築した。

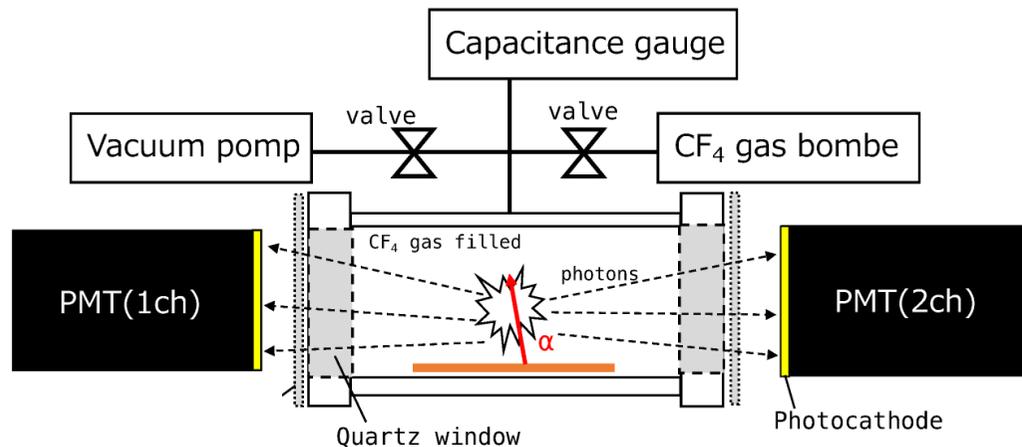


半径Rに比例して分析面積の拡張性をもつ

(要素2) TPC技術は取扱いのハードル高い。

もっと手軽に高感度アルファ線分析をしたい。

- ・ 不活性ガスのシンチレーション発光を用いる。
- ・ 発光パターンから粒子識別することで環境ガンマ線の雑音事象を抑制する。高感度化できる。



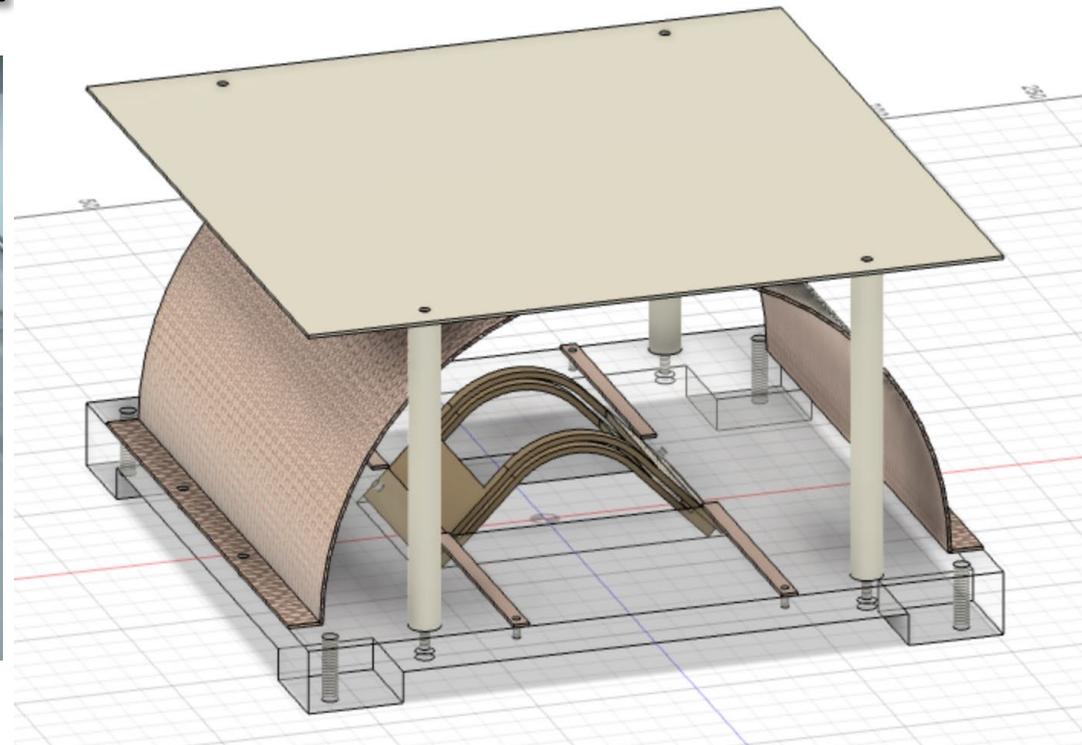
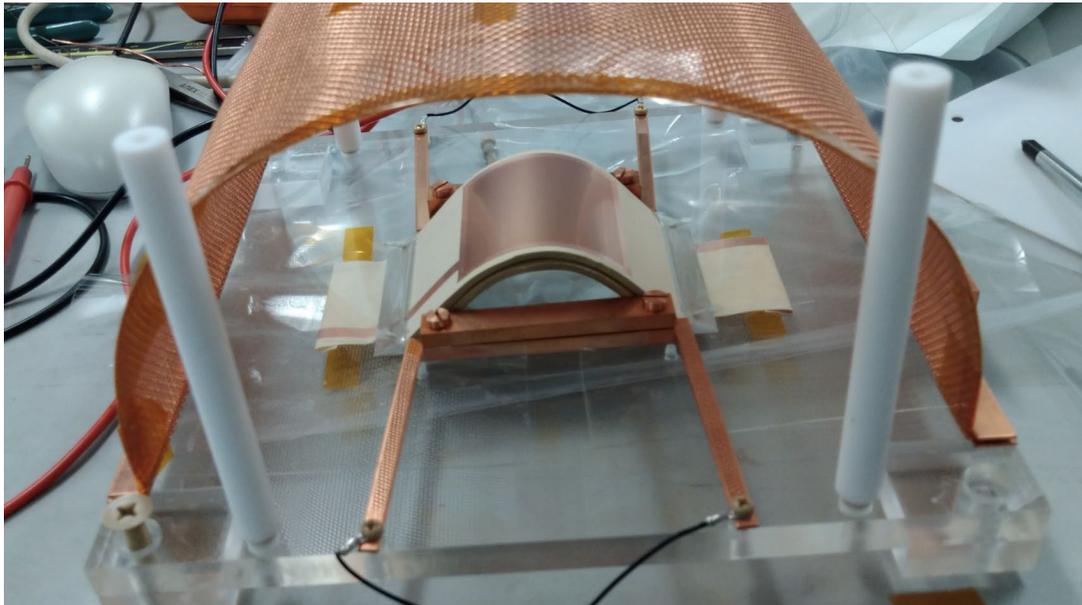
容器内の不純物を抑えることで低放射能環境下での分析を可能にできる。

アルファ線分析の新測定技術

(要素1) 表面汚染分析なので、
感度を上げるためには、有効面積を広げる必要がある。

- ・ 読み出しデバイスの面積を増やすと大変。
- ・ そこで新しく、少ないデバイス面積でも大面積を分析できるTPCの電場を構築した。

- 飛跡を中心に集める電場を形成するため、デバイスを曲げて動作する必要がある。
- そのため、実際に試作設計し、アルファ線源を用いて信号読み出し試験を実施した。

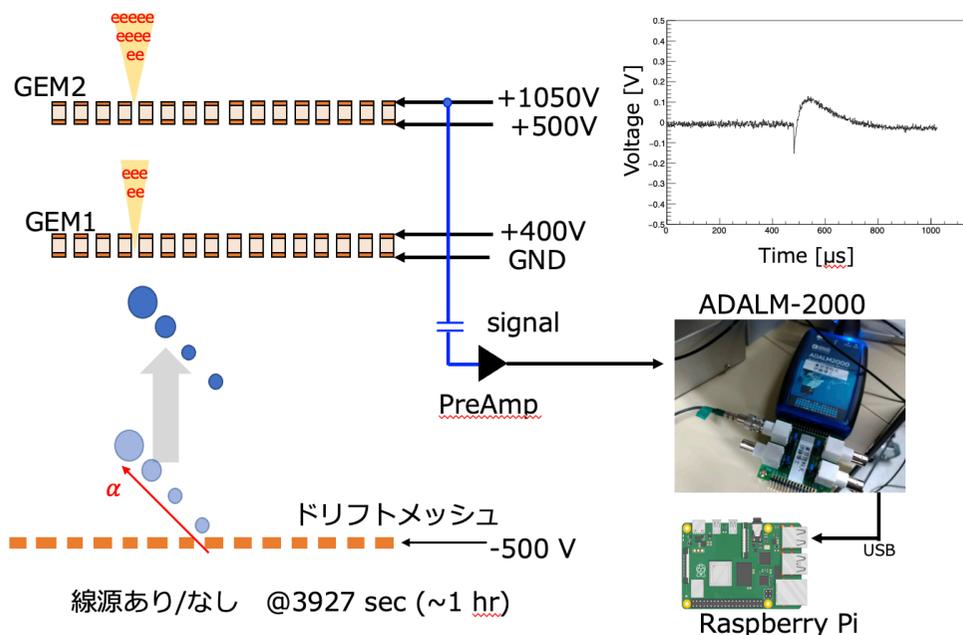


アルファ線分析の新測定技術

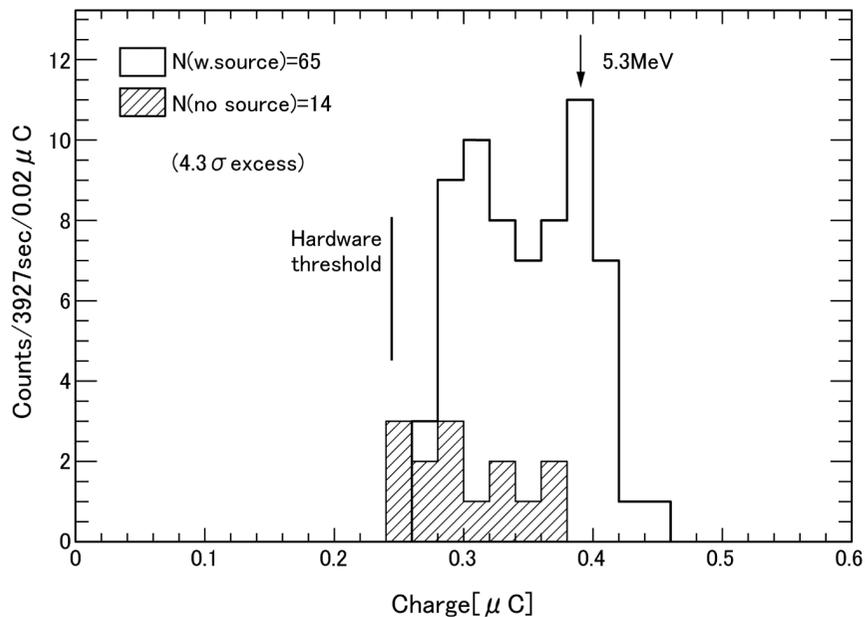
(要素1) 表面汚染分析なので、
感度を上げるためには、有効面積を広げる必要がある。

- ・ 読み出しデバイスの面積を増やすと大変。
- ・ そこで新しく、少ないデバイス面積でも大面積を分析できるTPCの電場を構築した。

試作機のための、簡単な読み出し回路



- 飛跡を中心に集める電場を形成するため、デバイスを曲げて動作する必要がある。
- そのため、実際に試作設計し、アルファ線源を用いて信号読み出し試験を実施した。
- **結果:** 線源を入れた場合、入れてない時と比べて有意な信号を観測できたので、**デバイス(GEM)を曲げて動作することを検証できた。**

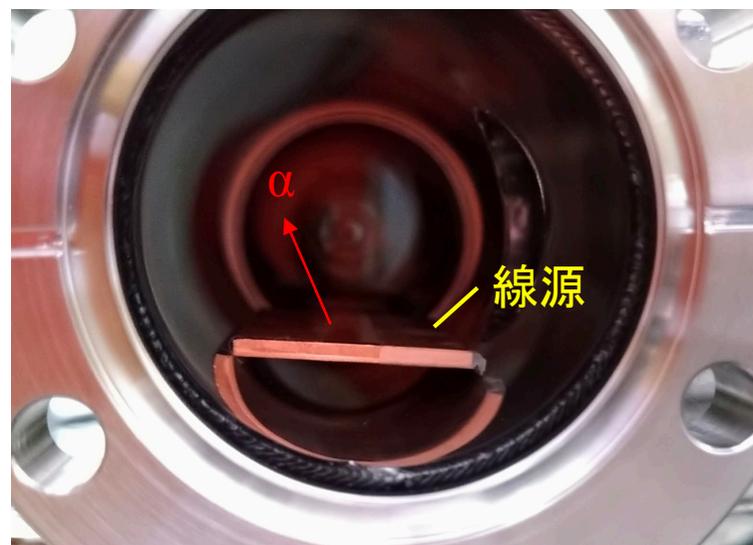
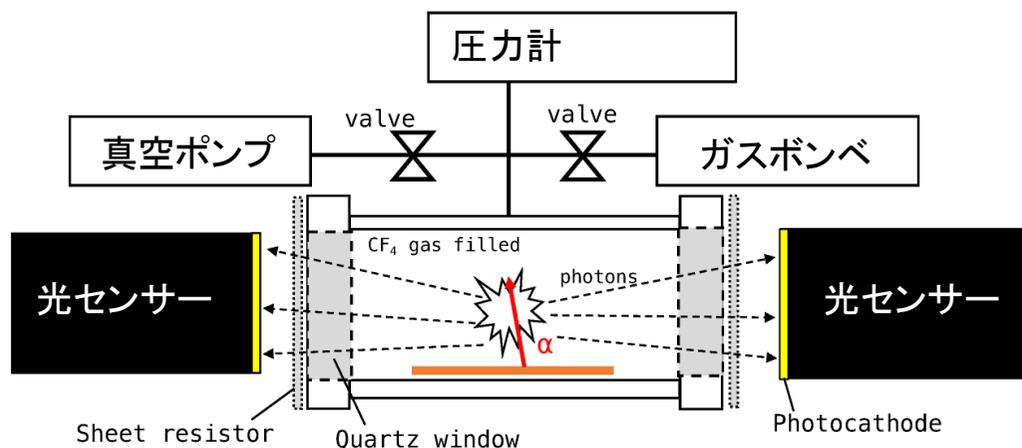
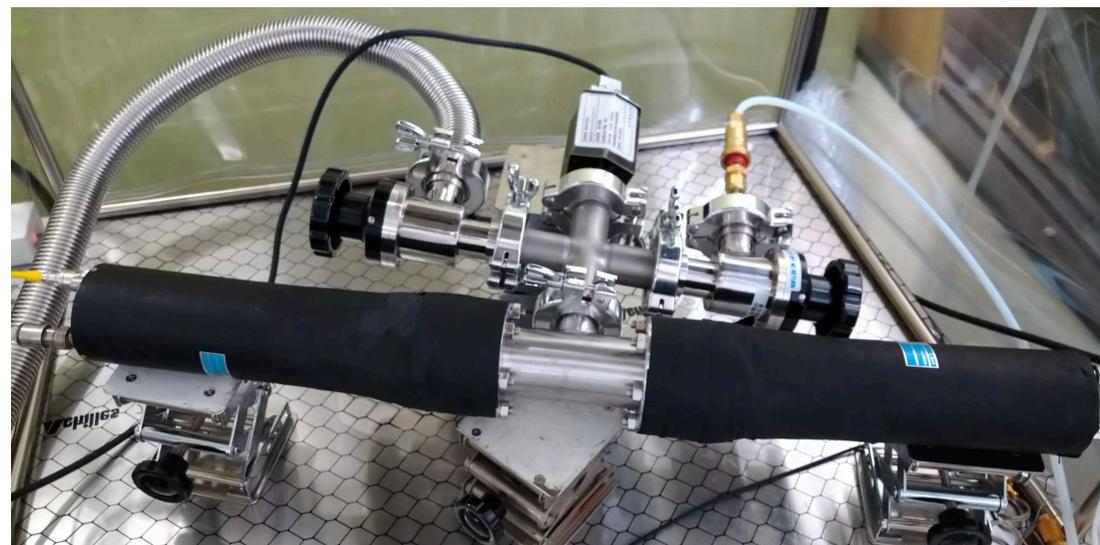


アルファ線分析の新測定技術

(要素2) TPC技術は取扱いのハードル高い。

もっと手軽に高感度アルファ線分析をしたい。

- ・ 不活性ガスのシンチレーション発光を用いる。
- ・ 発光パターンから粒子識別することで環境ガンマ線の雑音事象を抑制する。高感度化できる。

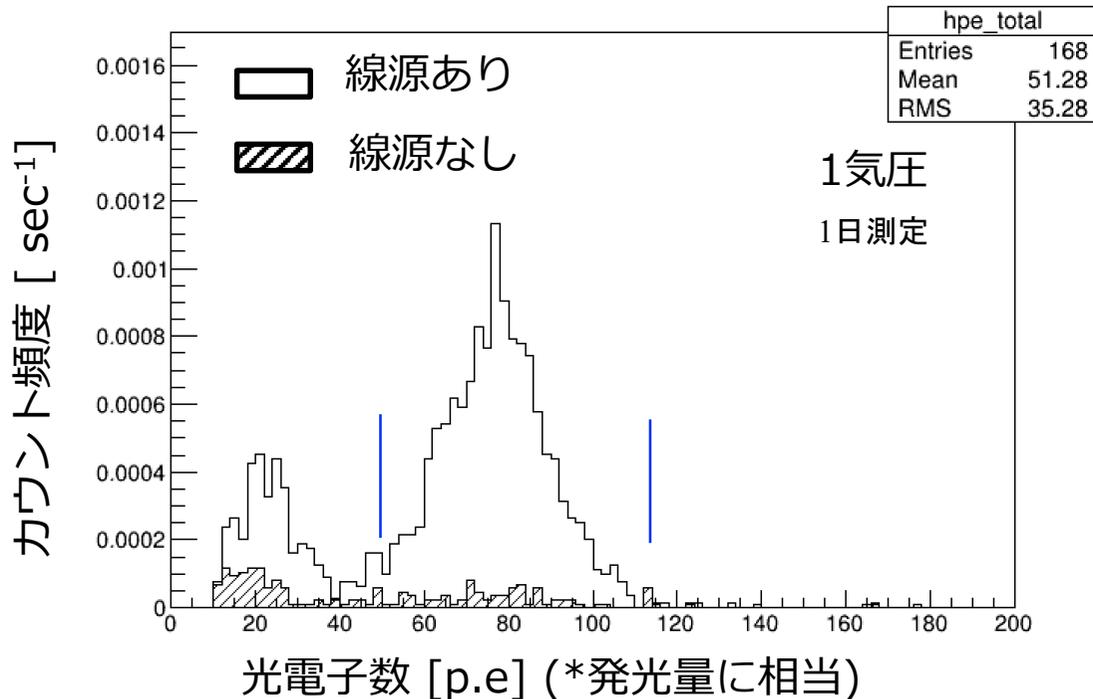
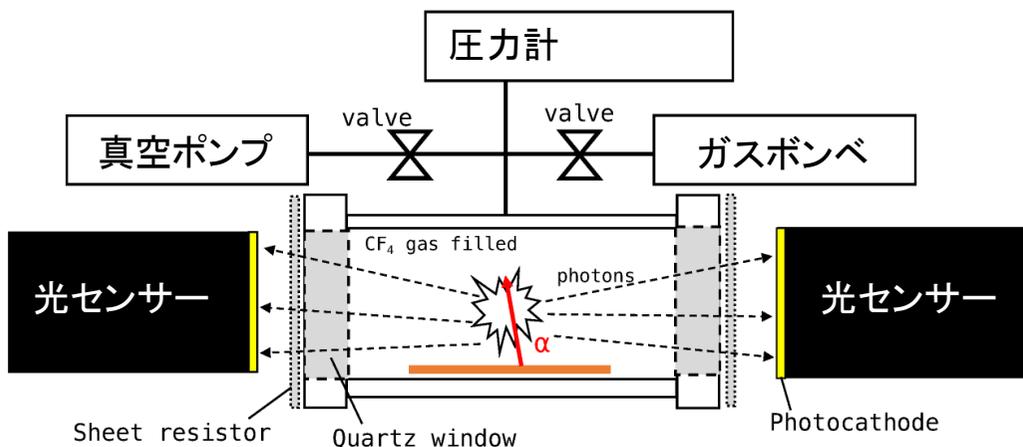


アルファ線分析の新測定技術

(要素2) TPC技術は取扱いのハードル高い。

もっと手軽に高感度アルファ線分析をしたい。

- ・ 不活性ガスのシンチレーション発光を用いる。
- ・ 発光パターンから粒子識別することで環境ガンマ線の雑音事象を抑制する。高感度化できる。



- ・ 線源あり・なしを比較することで、アルファ線によってCF₄ガスが発光している現象を明らかに観測できた。
- ・ この時のCF₄ガスの発光量は、約80光電子数*で、これは十分にアルファ線分析できることを示す。

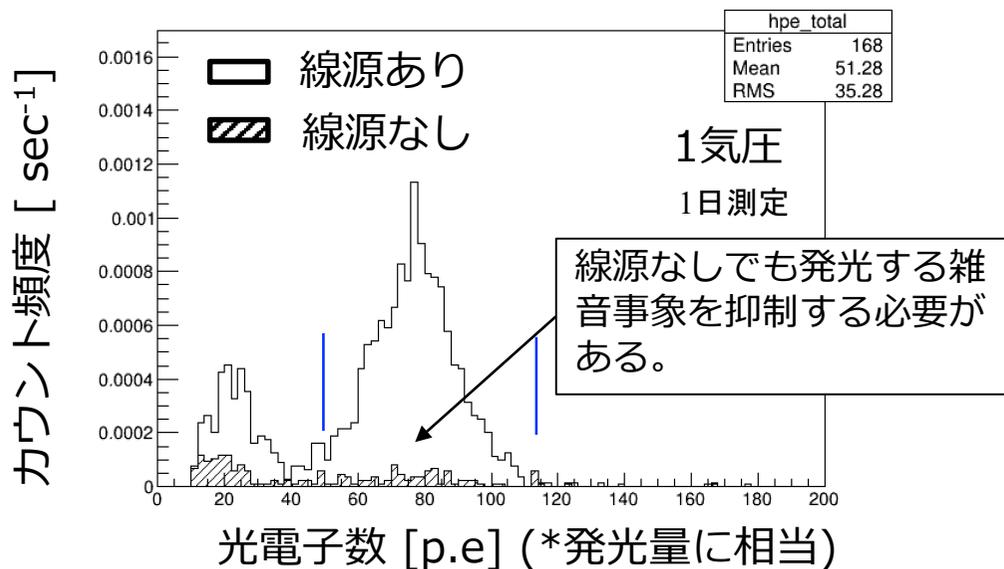
*光電子数：光センサーに入射した光を、観測できる信号として生成された電子の数。光電子数は光量の指標として使用される。

アルファ線分析の新測定技術

(要素2) TPC技術は取扱いのハードル高い。
もっと手軽に高感度アルファ線分析をしたい。

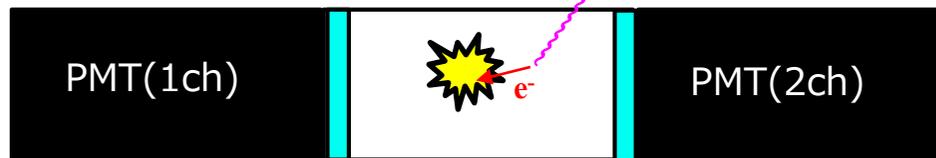
- ・ 不活性ガスのシンチレーション発光を用いる。
- ・ 発光パターンから粒子識別することで環境ガンマ線の雑音事象を抑制する。高感度化できる。

- ・ ガンマ線、宇宙線ミュオンなどが、アルファ線分析の大きな背景雑音(バックグラウンド)になる。
- ・ 高感度化のために、線源なしでも発光しうる雑音事象を抑制する必要がある。

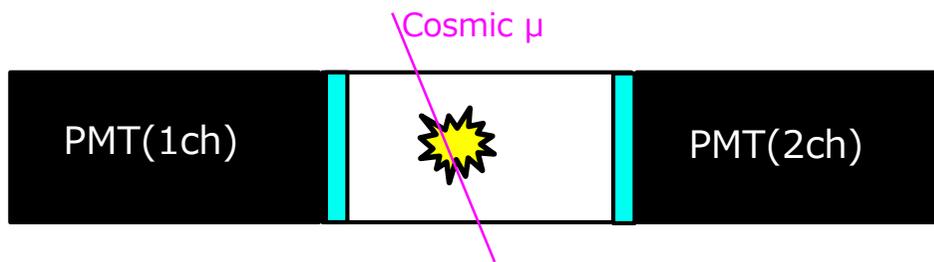


□ 環境ガンマ線

コンクリートや、空气中、検出器素材中からのガンマ線



□ 宇宙線ミュオン



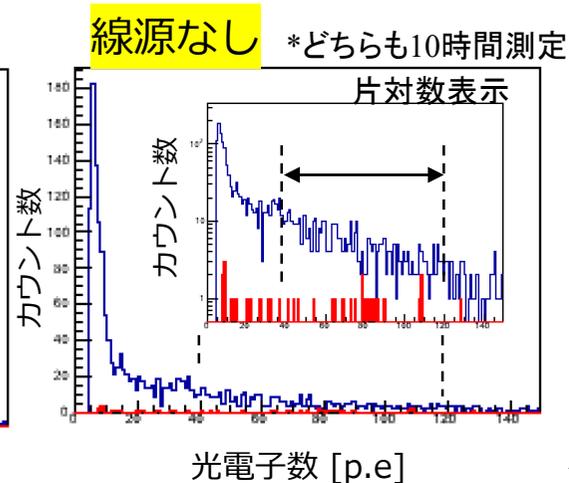
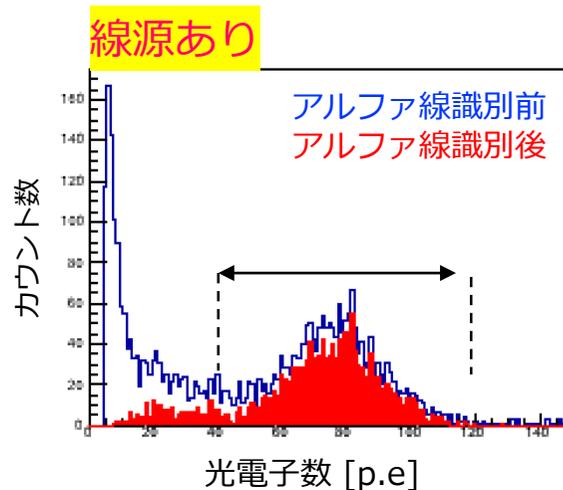
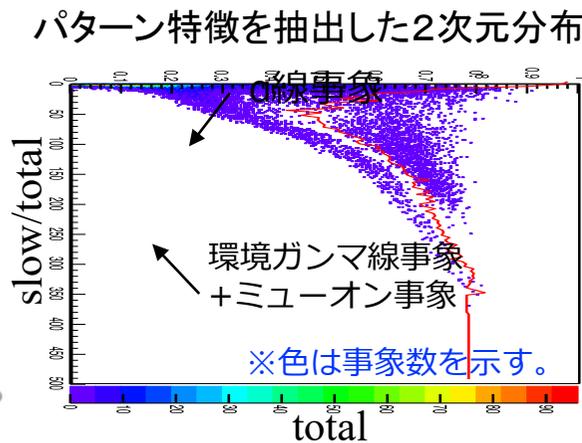
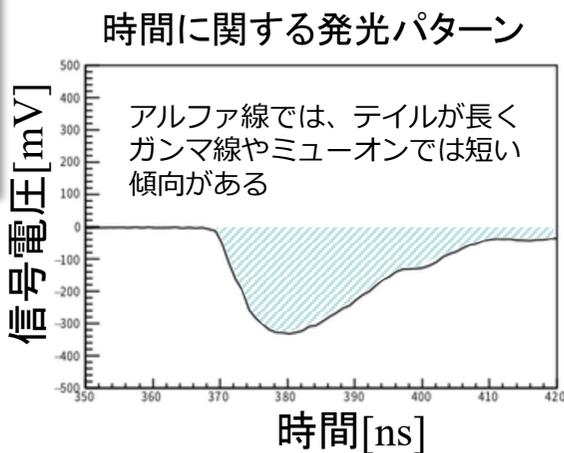
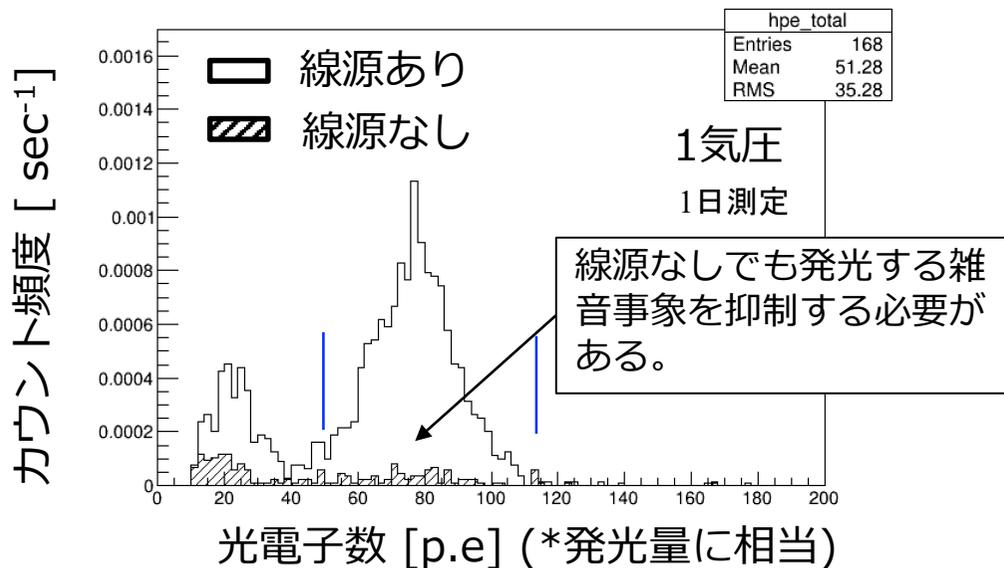
アルファ線分析の新測定技術

(要素2) TPC技術は取扱いのハードル高い。

もっと手軽に高感度アルファ線分析をしたい。

- ・ 不活性ガスのシンチレーション発光を用いる。
- ・ 発光パターンから粒子識別することで環境ガンマ線の雑音事象を抑制する。高感度化できる。

- 時間に関する発光パターンの特徴を抽出して分布をみると、 α 線と他粒子(ガンマ線、ミューオンなど)と異なり、粒子識別できることを検証した。
- つまり、鉛遮蔽や宇宙線ベトーなしでも効率よく雑音事象を抑制。



市販のアルファ線測定器

※代表的な装置を紹介しています。

Alpha Suite, ORTEC



原理: 真空+半導体検出器

- ・エネルギー分解能:
20keV (FWHM) @5MeV
- ・分析最大面積: $\phi 5\text{cm}$
- ・分析感度: -

WPC-1050, Protean



原理: ガスフロー型比例計数管

- ・エネルギー分解能: なし
- ・鉛遮蔽による環境 γ を抑制
- ・分析最大面積: $\phi 2\text{インチ}$
- ・分析感度: 0.05cpm
 $\sim 3.8 \times 10^{-2} \text{ a/cm}^2/\text{h}$

Ultra-Lo1800, XIA



原理: イオンチェンバー(Ar)

- ・エネルギー分解能
9% (FWHM) @4.6MeV
- ・分析最大面積: 1800cm^2
- ・分析感度: $< 10^{-4} \text{ a/cm}^2/\text{h}$

新技術の特徴・従来技術との比較

エネルギー測定

Alpha Suite, ORTEC



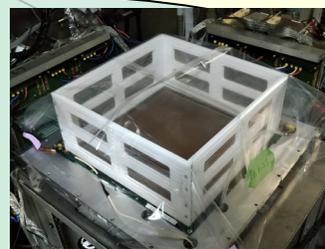
Ultra-Lo1800, XIA



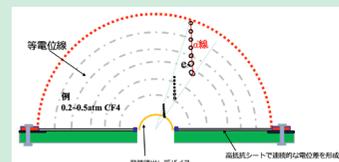
WPC-1050, Protean



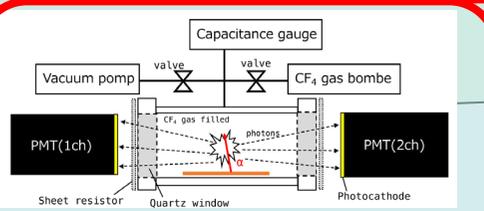
イメージ測定



Alpha imaging chamber



新技術(要素1)



新技術(要素2)

計数頻度(感度)

想定される用途

- 極低放射能サンプルの表面汚染分析。
 - 主に半導体(量子コンピュータ開発)関連の材料・素材メーカーに需要がある。
 - 宇宙素粒子実験の検出器を開発する上で、高感度分析技術は需要がある。この分野で、分析感度の改善は際限のない永遠のテーマ。
- (n, α)反応を用いた中性子測定
 - 例えば、ホウ素試薬(BNCTなど)に対して、中性子照射量に対する、アルファ線放射量の関係などがリアルタイムで明らかになる。
- 重イオンビームのモニター
 - アルファ線の正体はHe原子核。新技術(要素1)を応用して、重イオンビームの飛跡を小型センサーでありながら大面積をカバーできる。

実用化に向けた課題

- 現在、動作原理検証と性能評価は実証済み。試作器による高感度アルファ線(イメージ)分析を提供できる段階にある。
- ガス発光量の増加は、低エネルギーのアルファ線分析にとって重要。**ガス種類の最適化と、光センサー性能向上**は今後の課題である。
- 試作器では、読出し回路に汎用的なモジュールを用いている。そのため、製品化の際、**専用回路を構築する必要がある**。
- 現在の配管作業は完全マニュアル操作である。サンプル交換などで、製品化の際、真空容器の開閉に伴う**バルブ操作の自動化**が必要である。

企業への期待

- 宇宙素粒子実験の先端技術を社会に還元したい。
 - 半導体、材料、化学など、他分野でも幅広く役立てたい。
 - 高感度アルファ線分析のご依頼も、学術領域を超えて受け入れています。
- 装置を普及するために、ユーザーインターフェイスの大幅な改善が必要である。ユーザー目線の意見も欲しい。
- 本技術の性能をさらに向上するために、**低雑音アナログ回路設計と構築が重要な鍵**になる。より低エネルギーへ領域拡張でき、長期安定動作が実現できる。

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称：放射線検出装置
出願番号：特願2021-191168
出願人：東京理科大学
発明者：伊藤博士、石浦宏尚
- 発明の名称：放射線測定装置
出願番号：特願2022-135318
出願人：東京理科大学
発明者：伊藤博士

お問い合わせ先

東京理科大学

産学連携機構 岸井 貞浩

TEL 03-5228-7431

FAX 03-5228-7442

e-mail ura@admin.tus.ac.jp