

以下、記述には明朝体12ポイントを使用して下さい。

研究の目的（この研究の完成によって、科学技術の分野で期待される成果）

極低放射能 α 線イメージング分析装置は、従来の μ -PICを用いた暗黒物質探索の検出器を改良して開発され、ppmレベルの含んだ試料の表面汚染分布の取得に成功した。本装置は不純物を極限に取り除いた素材を扱う宇宙素粒子や半導体材料などの分野で大きな貢献が期待される。また、本装置に使用されているTime Projection Chamber (TPC)技術は宇宙・環境・医療と幅広く応用されており、本研究はTPC技術感度の底上げが期待される。

【宇宙素粒子】方向感度を持つ暗黒物質、飛跡を追った二重ベータ($0\nu\beta\beta$)崩壊の探索では、稀事象を検出した時に強い証拠を示す。飛跡検出する実験において、汚染位置情報は「雑音となる事象の発生源」を特定できるため感度を飛躍的に改善する。

【半導体材料】メモリに使用される半導体素材が放射線に晒されると、ある確率で0/1フリップシデータが損傷される。はんだに多くの鉛の放射性同位体が含まれていることは知られており、 $\sim 10^{-4}$ alpha/cm²/hrの低汚染量で画像化できれば、汚染箇所を排除するだけで済む。そのため、生産段階で破棄する量を削減できる。

【解析アルゴリズム】TPCは e^- を電場で読出し面に誘導して、2次元画像+時間から3次元飛跡情報に再構成する技術である。読出しに使用される μ -PICは縦横ストリップでヒット位置を返す原理から、垂直または水平に伸びた飛跡は感度が低い。各ストリップのclock情報や信号波形から感度回復させる必要がある。

研究の経緯（一連の研究の着手時期と、これまでに得られた成果の要点、および今回の研究計画概要とのつながりについて記述して下さい。）

2014年から科研費の新学術領域「宇宙の歴史をひもとく宇宙素粒子地下実験」のD班:極低放射能技術開発の一つとして、表面 α 線分析装置を開発してきた[1]。2013年まで神岡地下で暗黒物質探索をした装置(NEWAGE-0.3a [2])を α 線検出に特化させて改良した(図1)。申請者は2017年から本件を担当し、不純物が少ない μ -PICを本装置に実装し、飛跡再構成法を改良した。5.3 MeVの α 線(Po-210)線源を用いて、良いイメージが得られ性能評価を実施した(図2)。エネルギー分解能7% (σ), 位置分解能7 mm (σ)。サンプルからの α 線の測定感度を100倍改善させた($\sim 10^{-3}$ alpha/cm²/hr) [3]。さらなる感度改善のために、いくつか知見が得られた。

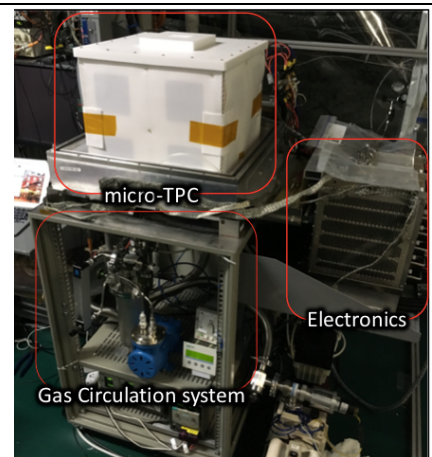


図1. 装置外観

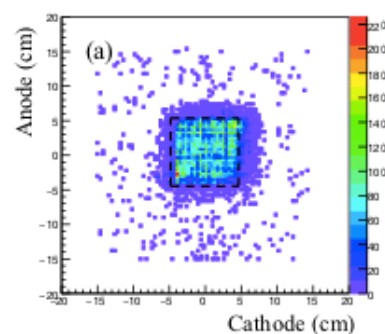


図2. アルファ線イメージ

るプリント基盤から雑音となる α 線が放出されている。解析では良い飛跡情報を採用しているため検出効率が約20%であり改善の余地がある。

[1] T. Hashimoto, et al., AIP Conf. Proc. 1921, 070001 (2018).

[2] K. Miuchi, et al., Phys. Lett. B 686 (2010).

[3] H. Ito, et al., submitted to Nucl. Instr. Meth. A.; arxiv.1903.01090.

研究計画概要（これから1～2年間の要点と成果の見込）

α 線イメージング装置の感度改善のために4つの施行を実施する。

① 解析アルゴリズム改良

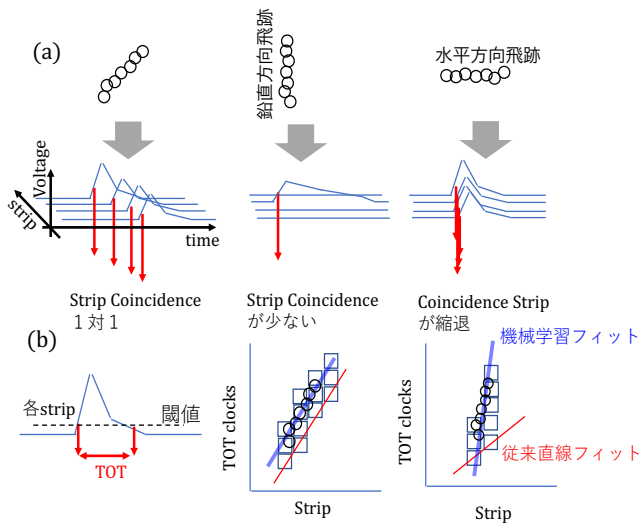


図3. 飛跡再構成の概念図

図3に示す通り、TPCは一般にストリップ軸に沿った飛跡再構成が苦手である。ストリップごとに信号の閾値を超えた時間幅TOTを記録して、軸方向でも再構成する手法が確立されてきたが、1 MeV以下の α 線の飛跡は、ドリフト中に電子が拡散するためぼやける。

Monte Carloシミュレーション教師データを用いて、射影画像から3次元飛跡再構成する機械学習アルゴリズムを開発する。単純な直線フィッティングに比べて方向決定精度が最大5倍の改善が予想される。

② 同時校正機能の追加

本装置はサンプルの α 線イメージをバックグラウンドと同時に計測することで、一度に正味のレートを測定できる。さらに効率良く測定するために、本研究ではエネルギー校正データも同時に取得する。

線源は ^{210}Po が表面に添付された銅板で、試料由来の α 線と混同しないよう端に設置する(図4)。 ^{210}Po 娘核の ^{206}Pb は安定な金属として銅板表面に埋め込まれているため、 ^{253}Am 密封線源とは異なり真空引きした時に放射能漏れする恐れがない点も配慮している。ガス増幅率の変動による較正值と検出効率を時間推移で補正できるため、エネルギー分解能と放射能決定の不確かさが改善される。

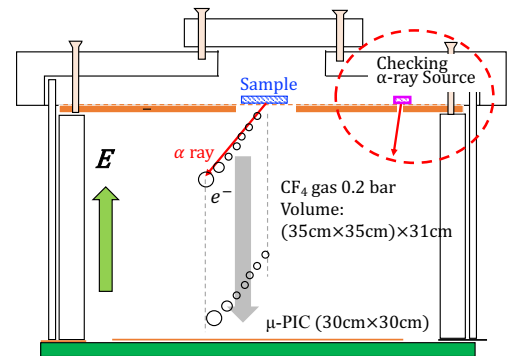


図4. 装置断面の概念図と校正線源の配置

③ 冷却活性炭の実装

サンプル由来 α 線の主なバックグラウンドは気体中のラドン(Rn)である。本装置を構成する素材に含まれる微量なウラン・トリウムから発生するRnが気体中に染み出す。Rnは等方的に α 線を発生させる。本装置は α 線の方角を決定できるが、下向きのRn α 線は除去できない。そこで、マイナス50度に冷却した活性炭にガスを通しRnを吸着する技術を用いて、根本的に除去する。これによって、感度を一桁以上改善し、 $\sim 10^{-4}$ alpha/cm²/hrを達成する。

④ 今後の基礎研究として装置素材の選定

活性炭によって ^{222}Rn (半減期3.8日)の α 線は抑制できるが、 ^{220}Rn (半減期2.2秒)の α 線は抑制できない。 ^{220}Rn はトリウム系列の核種で寿命が短いため、装置の材質に含まれる不純物を除去する必要がある。現在わかっているものでは、 μ -PICの実装プリント基盤(PCB)にトリウムを含むガラス繊維が混入しており、そこから ^{220}Rn が発生する。また、壁から内側上方向に α 線を観測しており、PCBから α 線が放射されていることから裏付けている。他に、 μ -PICもさらに不純物を取り除いた素材を使う余地を残している。PCBと μ -PICの素材を $\sim 10^{-5}$ alpha/cm²/hrを達成する。

研究方法の特長(当該分野における他の研究と比較した本法の有効性を記述すること)

本研究の特徴は3次元飛跡を取得できる点である。2013年まで暗黒物質探索に使用されたTPCを改良して、 α 線イメージング装置を構築している。以下の表に他の α 線検出器との仕様比較を示す。ZnS(Ag)+Si-PMは、有感領域が狭いが位置分解能が0.2mmと高い。雑音はガス検出器と比べて悪い。Ultra-Lo 1800はXIA社の α 線検出器で、信号波形解析することで雑音信号を除去できる特徴を持つ。感度は現在の本装置より良いが、画像解像度を持たない。Ultra-Lo 1800は本装置較正の比較対象として用いられる。

	現在の本装置[3]	ZnS(Ag)+Si-PM [4]	Ultra-Lo 1800 [5]
検出原理	ガスTPC	シンチレーション光	ガス電離箱
有効面積	10 cm × 10 cm	8 mm × 8 mm	2,600 cm ²
位置分解能	7 mm(σ)	0.2 mm(FWHM)	—
エネルギー分解能	7%(σ)@5.3MeV	74%(FWHM)@5MeV	4.7%(σ)@5.3MeV
感度限界	10 ⁻³ a/cm ² /hr	0.06 counts/min	10 ⁻⁴ a/cm ² /hr [6]
検出効率	21%	0.3%	99.75%

本研究が完成した時、画像解像度を持つ α 線装置で感度10⁻⁵ a/cm²/hrを達成し、宇宙素粒子・半導体材料の分野で素材純度検査に汚染位置情報という新たな価値を与える。具体的には、方向感度を持つ暗黒物質探索や飛跡検出する0 $\nu\beta\beta$ 崩壊事象で雑音信号発生源を特定できる。製造された素材の汚染情報を判断できれば、汚染箇所を取り除くだけで品質を保持でき、コストを抑えることに繋がる。

[4] S. Yamamoto, et al., NIMA 894 (2018) 33.

[5] B.D. McNally, et al., NIMA 750 (2014) 96.

[6] K. Abe, et al., NIMA 884 (2018) 157.

島津財団助成金の使途(当該の研究計画における当助成金の有効性)

装置改良のための部品 (60万円) :

- 配管、コネクタ、クランプ、Oリング
- 電子部品、高抵抗シート、電熱線
- 装置治具
- 冷凍機

データ解析用計算機 (20万円) :

- マザーボード、CPU Intel i7(with CPUクーラー)、高速GPU、メモリ、PCケース、電源、キーボード、マウス、ディスプレイ、接続ケーブル、HDD 8TB、SSD 512GB

素材購入費(20万円)

- プリント基盤素材
- 活性炭

[illegible]