

## 白雲母を用いた Q-ball ダークマター検出に関する研究

Study for Q-ball dark matter detection with the muscovite mica

中 竜大<sup>1)</sup> 井戸悠生<sup>2)</sup> 斎藤優心<sup>1)</sup> 加藤文典<sup>2)</sup> 石川法人<sup>3)</sup>

Tatsuhiko Naka, Yuki IDO, Hiroto SAITO, Takenori KATO

<sup>1)</sup>東邦大学 <sup>2)</sup>名古屋大学 <sup>3)</sup>原子力機構

## (概要)

本研究は、地球年代スケールを持つ鉱物試料に記録された放射線起因の飛跡（ダメージトラック）の素粒子宇宙物理学的な視点での新たな現象の探求を行うものである。特に、素粒子物理ならびに宇宙物理における諸問題を解決し、宇宙における暗黒物質の候補である Q-ball の探索を、白雲母を軸に研究を進める。本課題において、白雲母のダメージトラック検出能の基礎理解のため、60 MeV ならびに 70 MeV、減速材によって 10 MeV ならびに 3 MeV の Fe イオンを照射し、トラック形成を確認した。また、高エネルギー重粒子加速器である QST の HIMAC の結果も合わせ、先行研究との整合性を確認し、トラック形成効率が一次イオン化率に依存することを確認した。また、将来的な宇宙線分析に向けて、人工ガラスを用いたトラック形成の確認も行い、エッチング条件を調整することによってダメージトラックの形成の確認を行うことができた。また、その検出可能閾値は約 30 MeV/mg/cm<sup>2</sup> 程度であることを評価した。

## キーワード：

鉱物検出器、暗黒物質、Q-ball, 宇宙線

## 1. 目的

本研究は、さまざまな鉱物が、放射線の痕跡（飛跡）を結晶のダメージとして、地球年代スケールで記憶していることに着目し、そのトラック分析を通じた宇宙における暗黒物質の正体解明ならびに素粒子物理学・宇宙物理学におけるさまざまな課題に対する新たなアプローチを進めるものである。特に、白雲母が持つ飛跡検出における閾値の低さ、拡張性ならびに劈開性と光学的透明性に着目し、白雲母による”Q-ball”の探索を軸に研究を進めた。

Q-ball は、場の量子論から、U(1)対称性を持つスカラー場のポテンシャルによって生成される non-topological なソリトンとして特徴づけられ、このスカラー場を超対称性理論模型ならびに初期宇宙における超対称性の自発的破れによって Affleck-Dine (A-D) 機構[1]が働くことで、この宇宙においても Q-ball が生成されることが期待される。また、A-D 機構はバリオン数ならびにレプトン数の生成を予言することから、宇宙におけるバリオン数やレプトン数の起源を説明できる。また、バリオン数あたりの Q-ball の質量が陽子の質量以下であれば、それ以上の崩壊を起こせないため Q-ball は安定となる[2][3]。すなわち、Q-ball は宇宙空間を暗黒物質（またはその一部）として浮遊していると期待される。Q-ball の質量は、 $10^{10}$  GeV/c<sup>2</sup> 以上であると期待されるため、Q-ball の全てが現在の暗黒物質の全てを説明できたとしてもその到来量は極めて小さくなり、人工的に検出器を用いた実験ではそもそも限界が生じる。一方、鉱物を検出器に用いることで、地球年代スケールの観測を行うことができるため、高々数 cm<sup>2</sup> の面積で、これまでの人工的な実験で行われた観測を超えた探索感度を出すことができる。

2023 年度は、白雲母が持つ検出器としての特性の基礎的理解ならびに過去の先行研究のクロスチェックを行うことを目的として、タンデム加速器によるイオン検出性能の評価を進めた。また、同時に、今後のさまざまな鉱物試料分析に向けた、月面のインパクトガラスを意識した人工ガラスでのトラック検出の検証を行った。本研究は、量子科学技術研究開発機構 (QST)・HIMAC ビームラインでの照射実験と合わせて、広いエネルギー領域での飛跡検出性能を評価することを目的としている。

## 2. 方法

白雲母は、ブラジル産の試料を用いて、劈開し厚みが 100  $\mu\text{m}$  程度のフィルム状のサンプルを作成し、図 1 のような自作の治具に取り付けイオン照射を行った。このとき、治具の角度をビーム水平面から 0、30、60、90 度にセットすることで、照射角度条件を選択できるようにした。また、人工ガラスサンプルについても同様に、ビーム径程度にカットした試料を治具にセットする形で照射を行った。

照射後の試料は、所属研究室へ郵送されたのちエッチング処理を行った。エッチング処理後、位相差光学顕微鏡によって飛跡検出の有無、ならびにその分析を行った。エッチング処理は、白雲母ならびにガラスについて 48% のフッ化水素を用いた。

照射イオン種は、Fe イオンを選定し、60MeV または 70MeV のエネルギーでの照射を行った。また、ポリエチレンフィルムを用いて減速し、10、5 および 3MeV 相当のエネルギーについても照射を行った。Dose 量は、 $10^7/\text{cm}^2$  以上入ってしまうと光学顕微鏡での分析が困難になるため、数 nA までビーム電流を落とし、シャッターの開閉を手動で行うことで Dose 量を調整した。



図.1 イオン照射用試料設置治具

表.1 Fe イオンビームの本実験における照射条件

エネルギー [MeV]	Dose 量 [ $/\text{cm}^2$ ]	備考
70	$10^6 - 10^7$	-
60	$10^6 - 10^7$	-
10	$10^6 - 10^7$	70MeV を減速材にて減速 (13-15 $\mu\text{m}$ ポリエチレン)
5	$10^6 - 10^7$	60MeV を減速材にて減速 (13-15 $\mu\text{m}$ ポリエチレン)
3	$10^6 - 10^7$	70MeV を減速材にて減速 (18-20 $\mu\text{m}$ ポリエチレン)

## 3. 結果及び考察

[白雲母]

今回の白雲母で記録されて飛跡像について図 2 に示した。すべてのエネルギー・角度についてトラック形成が成されていることが確認できた。この結果を過去の先行研究ならびに QST・HIMAC による高エネルギーイオンの結果を併せてまとめたものを図 3 に示した。これらの結果は、過去、調べられた白雲母のトラック形成特性と無矛盾な結果であり、Bragg peak よりも速度の速い領域 (すなわち、Bethe-Bloch 機構によるエネルギー阻止能が支配的領域) についての白雲母の飛跡形成閾値は 13 MeV/mg/cm<sup>2</sup> 程度であることが明らかになった。また、Bragg peak を超えた領域においても飛跡形成が成されており、飛跡形成効率が一次イオン化率に相関するという過去の考察を裏付ける結果となっている。Q-ball の検出においては、Bethe-Bloch 機構ではなく、Lindhard 機構が支配的な速度領域を対象となることから、飛跡形成の性質は異なるものと期待される。これについては、今後の研究課題である。

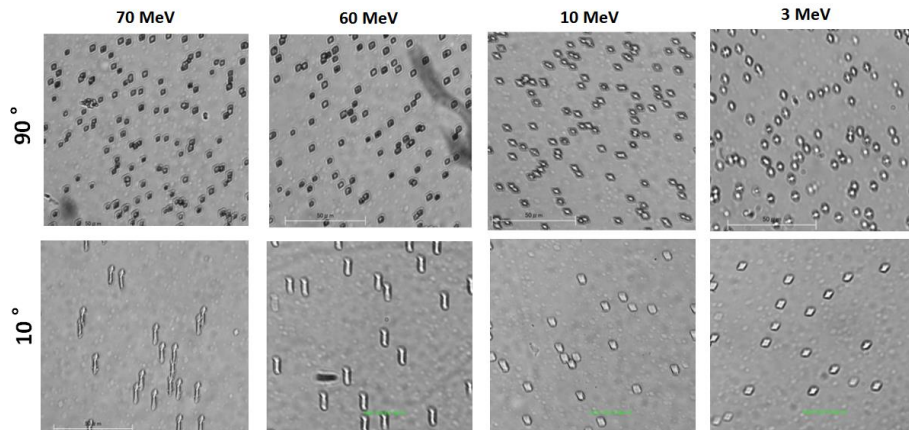


図2 白雲母で検出されたFe イオントラック。上段：90°（ビーム方向に対して垂直）、下段：ビーム方向に対して10°。左からエネルギーが70, 60, 10（減速）、3（減速）MeV

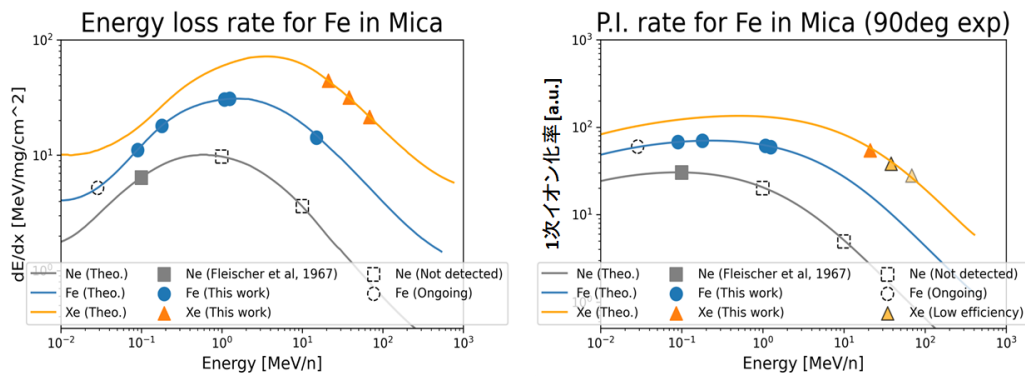


図3 エネルギー阻止能に対する飛跡形成能力。橙色：Xe (HIMAC)、青：Fe (タンデム加速器+HIMAC)、灰色：Ne ([4]参照)。左は Bethe-Bolch 阻止能、右はイオン化率に対するもので、Fe における○は今後の検証予定。Ne の口は、飛跡形成が確認されなかったことを意味する[4]。

[ガラス]

ガラス試料についても本実験によって飛跡形成の確認を行った。今回の実験で、HF (45%) 20°Cのエッチング処理において、ガラス試料の面低下速度ならびにピット成長速度が速く、数10秒の処理で十分なトラックの観察が可能であることが明らかになった。本実験におけるFe 70MeVのトラック画像を図4に示した。また、QST・HIMACのXe照射の結果から、このピットの太さは入射イオン電荷に依存している可能性が示唆され、電荷識別能を持ちうる。これによって、今後のインパクトガラスのような鉱物ガラスによる宇宙線解析の可能性を示すことができた。

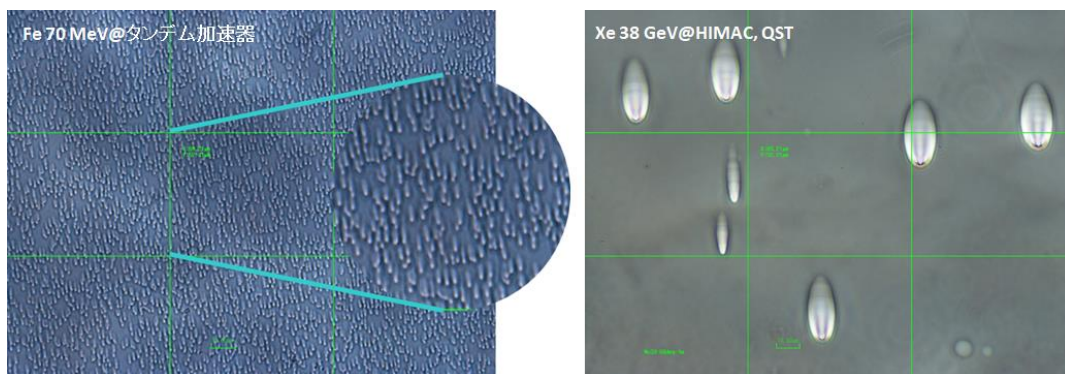


図4 人工ガラスにおけるダメージトラックの位相差顕微鏡画像。左はタンデム加速器によるFe 70MeVの飛跡。右は、HIMACによる38GeVによるXeの飛跡。

#### 4. 引用(参照)文献等

- [1] I. Affleck and M. Dine, A New Mechanism for Baryogenesis, Nucl. Phys. B 249 (1985) 361–380.
- [2] J.-P. Hong, M. Kawasaki and M. Yamada, Charged Q-ball Dark Matter from B and L direction, JCAP 08 (2016) 053, [1604.04352].
- [3] J.-P. Hong and M. Kawasaki, New type of charged Q -ball dark matter in gauge mediated SUSY breaking models, Phys. Rev. D 95 (2017) 123532, [1702.00889].
- [4] R. L. Fleischer, P. B. Price, R. M. Walker and E. L. Hubbard, Criterion for Registration in Dielectric Track Detectors, Phys. Rev. 156 (1967) 353–355.