

第2回学術変革「地下稀事象」若手研究会

鉱物が持つ放射線飛跡検出能力を生かした未知宇宙線および 超重暗黒物質の探索

東邦大学

水谷 尚貴

中 竜大¹, 齊京 一成¹, 二村 翔太², 井戸 悠生², 加藤 丈典², 橋口 美奈子², 伊神 洋平³, 村瀬 孔大⁴, 廣瀬 重信⁵

¹東邦大学, ²名古屋大学, ³京都大学, ⁴ペンシルベニア州立大学, ⁵JAMSTEC

パレオディテクター

鉱物を用いた放射線飛跡検出器



カンラン石



白雲母



ジルコン



ピジョン輝石

メリット

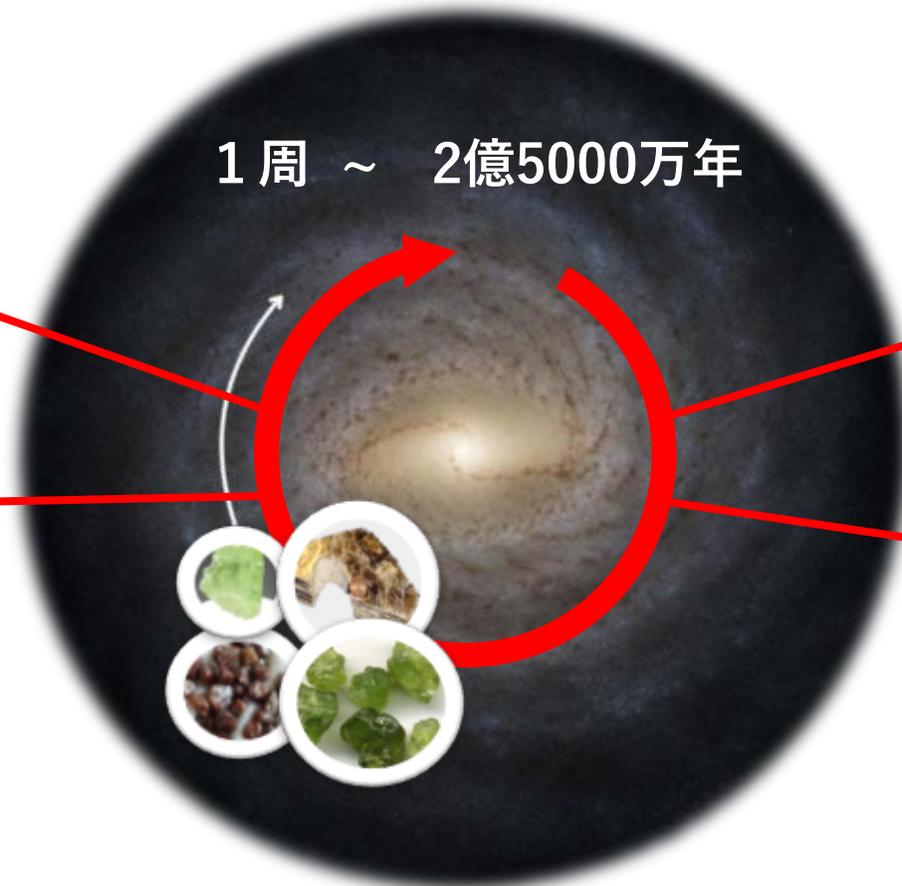
形成から億年スケールでの時間が経過しており、宇宙で発生した様々な現象由来の飛跡を地質学的な年代スケールで、記録、保持する事が可能

中性子星連星合体 (NSM)

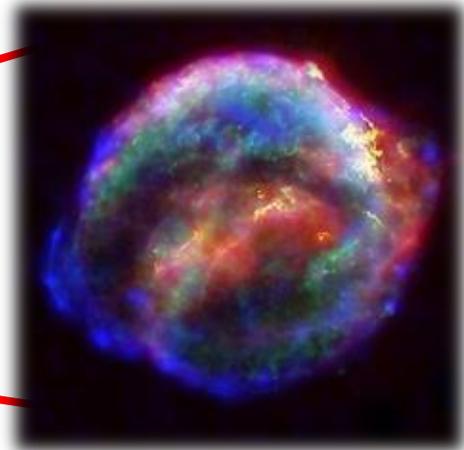


数十万年に一度

1周 ~ 2億5000万年



超新星爆発



数百年に一度

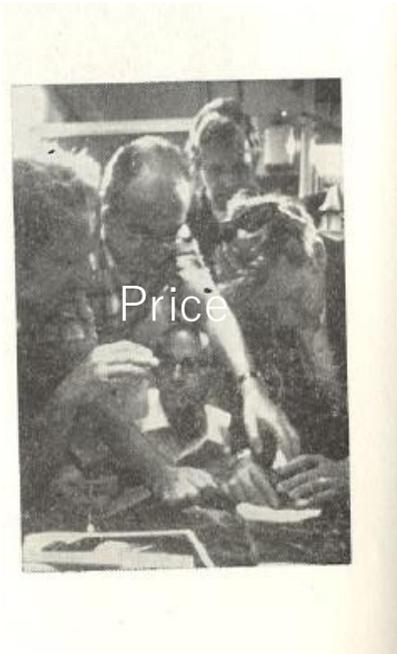
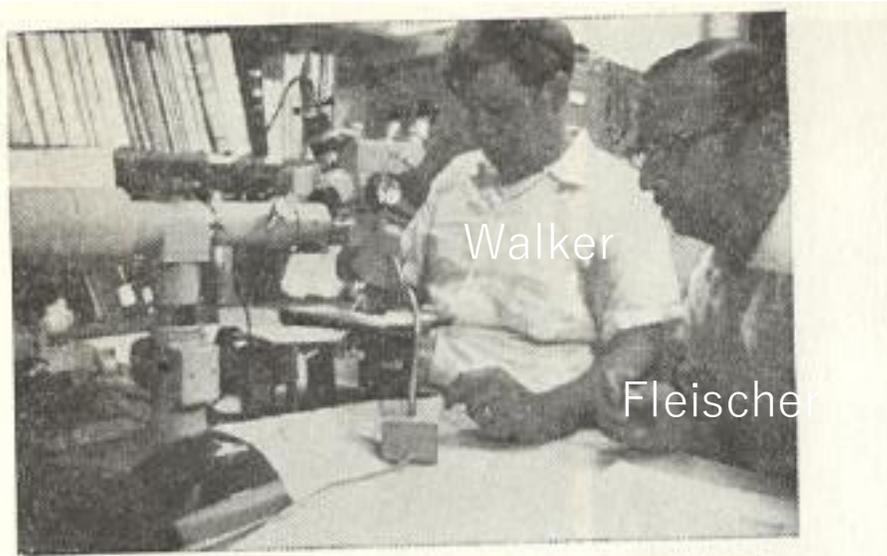
鉱物の形成年代は太陽系形成年代の4 6億年前

→ 稀な高エネルギー天体現象を何度も経験

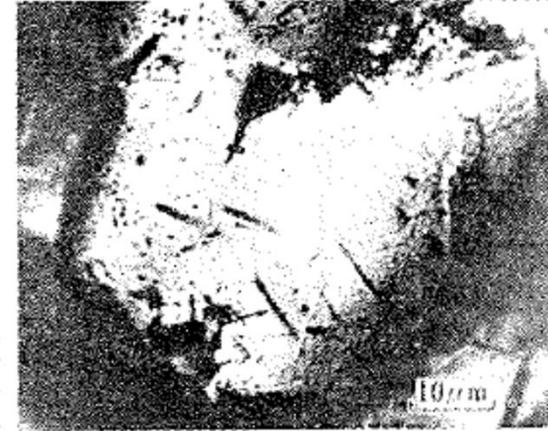
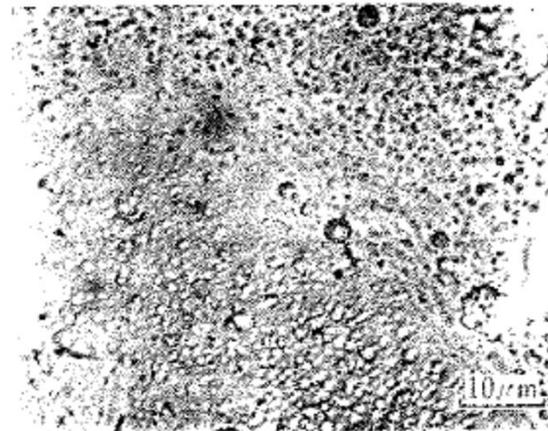
→ 人工的な検出器では測定不可な, 稀現象由来のユニークな記録を掘り起こせる

パレオディテクターの歴史

1960 ~ 1980年に積極的に研究されていた



月試料のトラック



(a) R.L. Fleischer et al. *Geochim, Cosmochim Acta Suppl.* 1 3, 2103 (1970)



図 86 隕石中の重イオントラック [R. L. Fleischer, P. B. Price, R. M. Walker: *J. Geophys. Res.* 72, 355 (1967)]

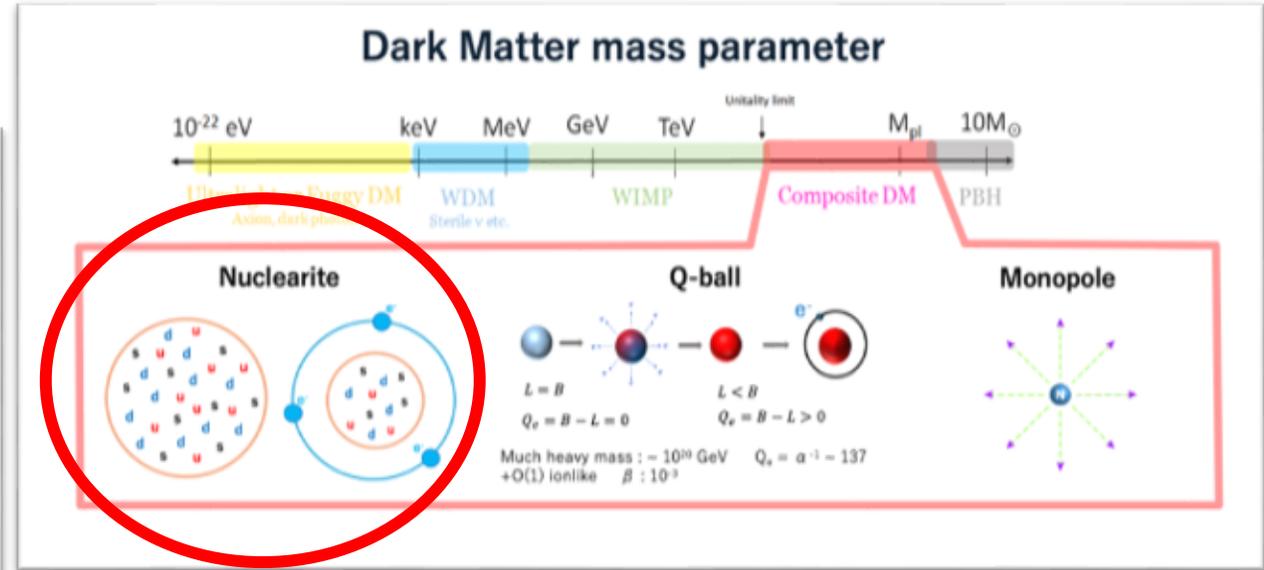
→ 加速器実験などへシフト

現代の知見を用いて再構築を目指す

超重銀河宇宙線

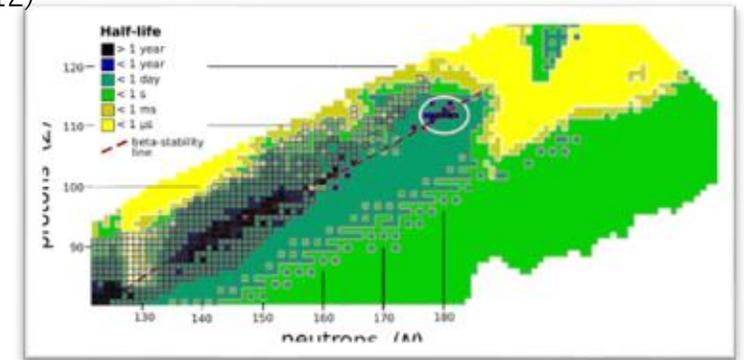


中性子星の連星合体から、どのくらい重く、安定な元素が生成されうるかはわかっていない



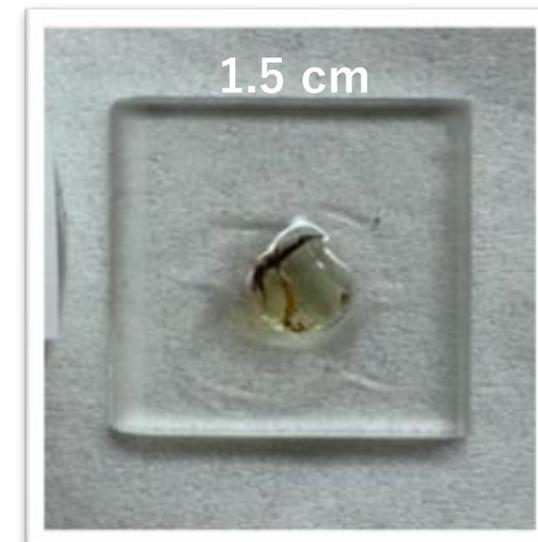
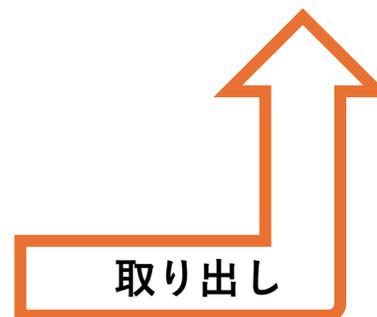
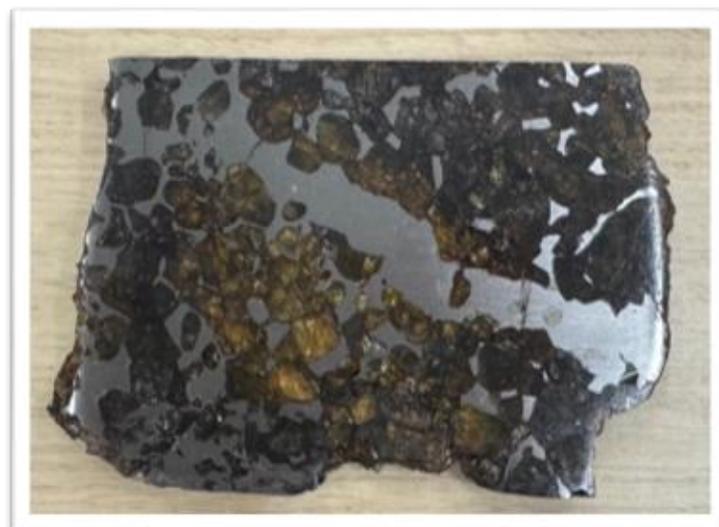
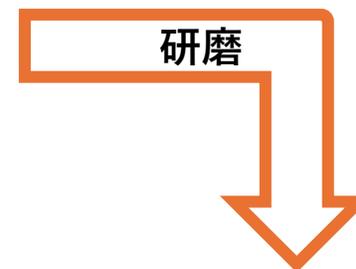
中性子星の連星合体で作られる可能性がある

Bucciantini et al., Phys. Rev. D (2019)
Biswas et al., Phys. Lett. B (2012)

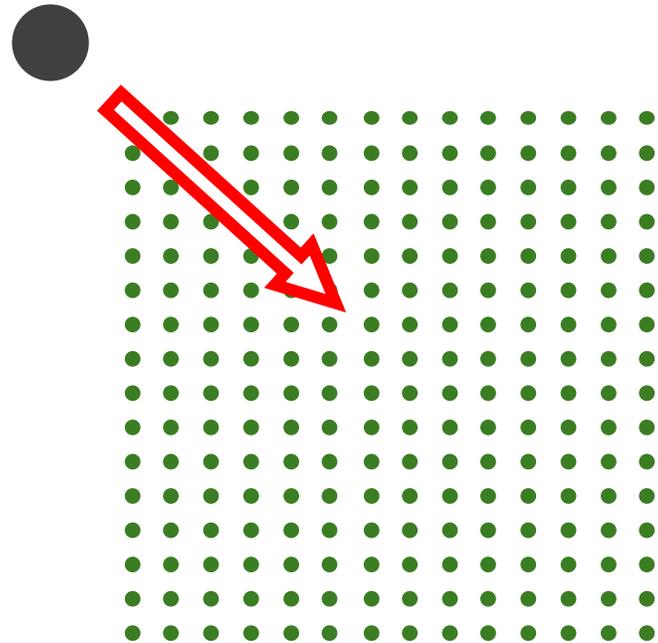


安定の島に存在する新元素発見の可能性

パラサイト隕石

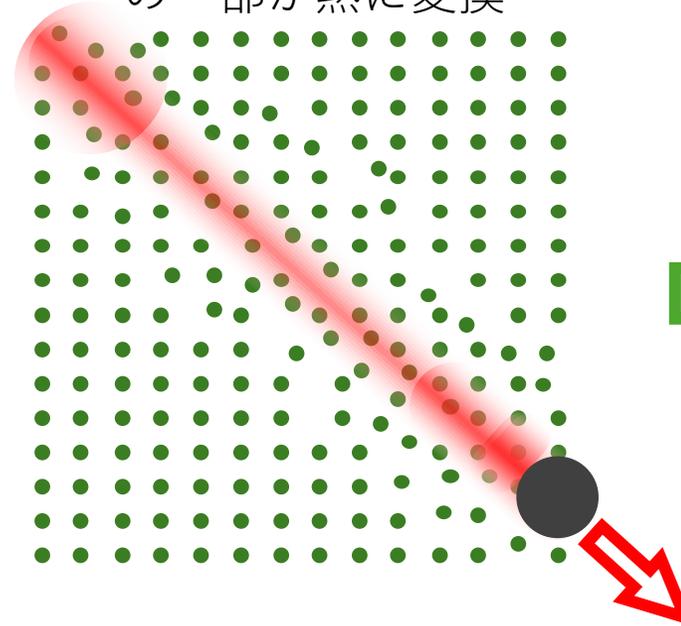


サーマルスパイクモデル

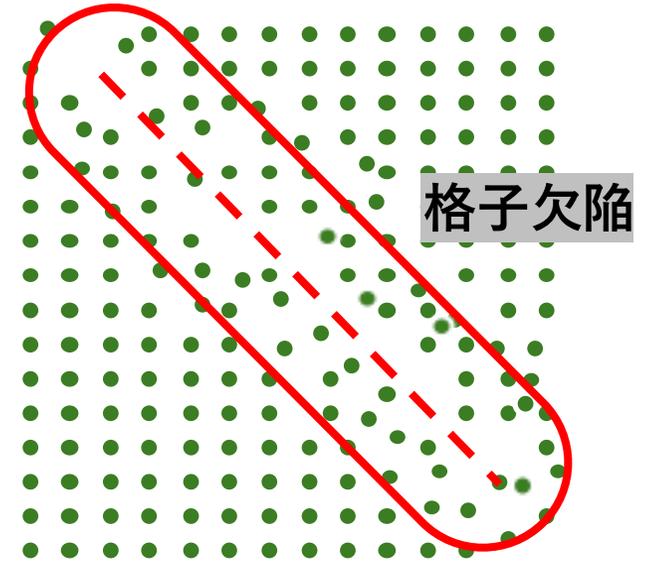


鉱物内に荷電粒子が入射する

入射粒子が落としたエネルギー
 dE/dx
の一部が熱に変換

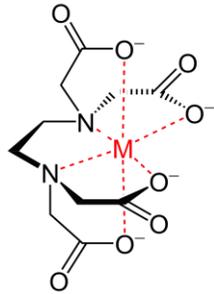


荷電粒子が通過した部分が局所的に高温に加熱され、結晶が融解する

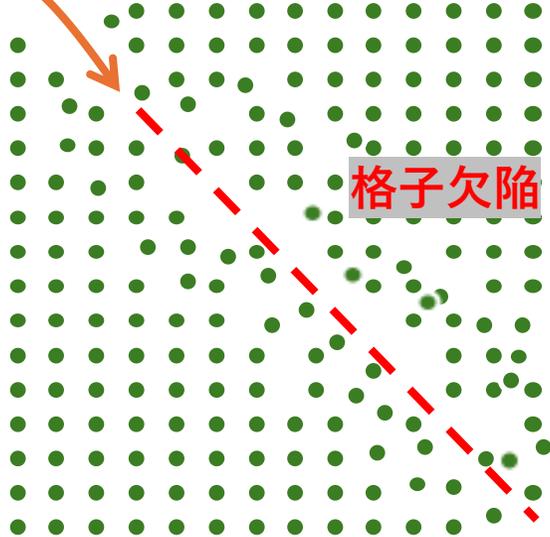


融解した部分が周囲の温度差により急激に冷やされ、格子欠陥が生じる

この格子欠陥を光学顕微鏡で測定するためにエッチングという化学処理を行う→

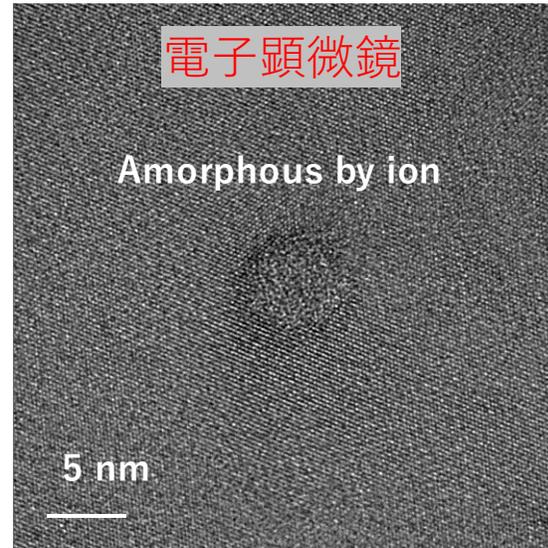
EDTA⁴⁻

EDTA錯体



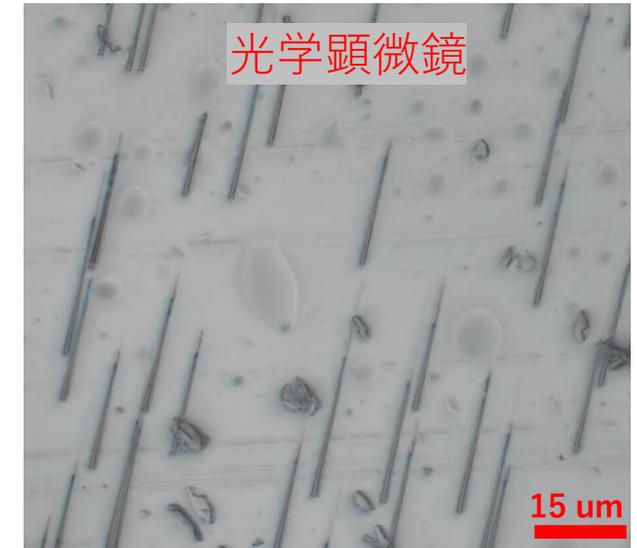
格子欠陥

アモルファス化したカンラン石表面

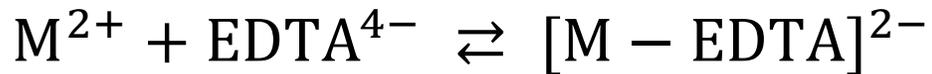


Xe 100 MeV no etching

光学顕微鏡で観察したカンラン石内の飛跡



Xe 0.5~2 GeV 30d 14h etching

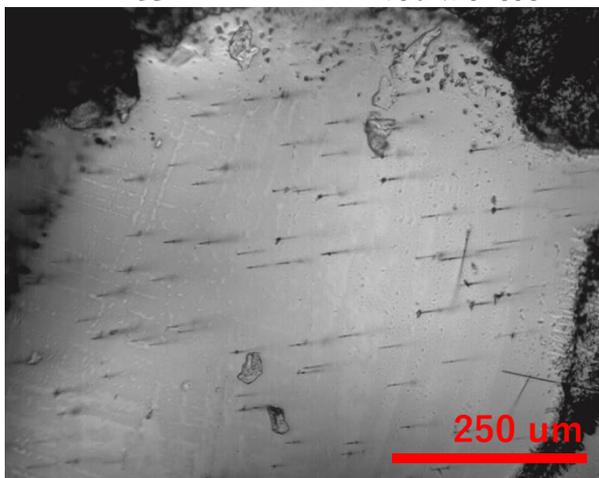


エッチング溶液に浸すと、荷電粒子の通過により生まれた格子欠陥の部分において結晶内の金属イオンが強力なキレート剤であるEDTAの錯体形成に用いられるため結晶がどんどん崩れていく

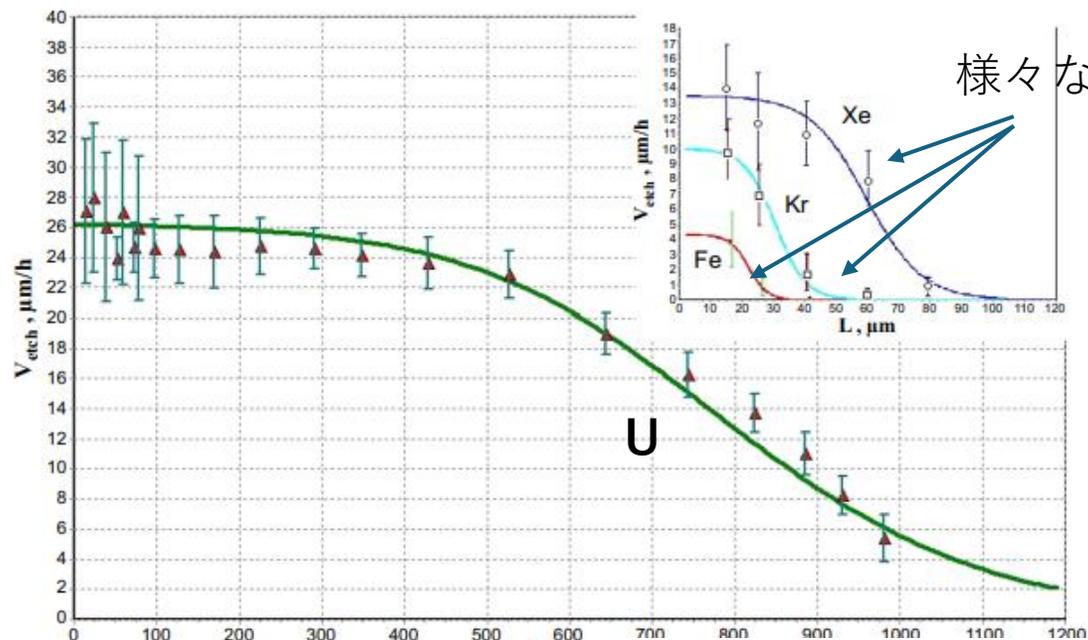
格子欠陥が生じた部分は歪みなどにより他の部分と比べて化学反応が起こりやすい状態になっているためその部分が優先的にエッチングされていき、光学顕微鏡で測定できるようになる



Astrophys. J. 829:120(2016)
照射サンプルの飛跡画像

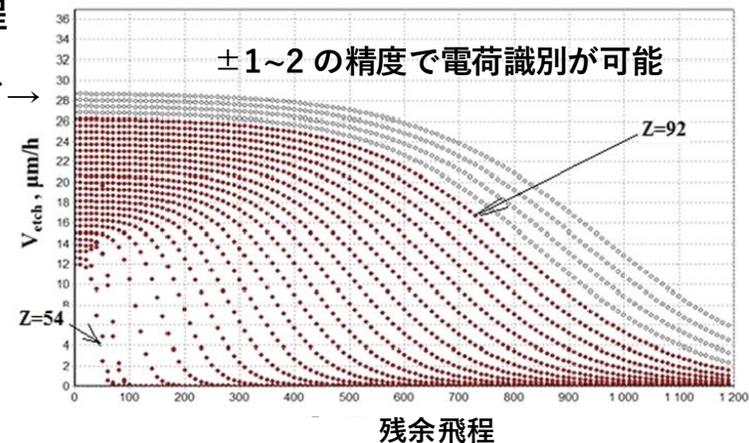


OLIMPIYA キャリブレーション実験



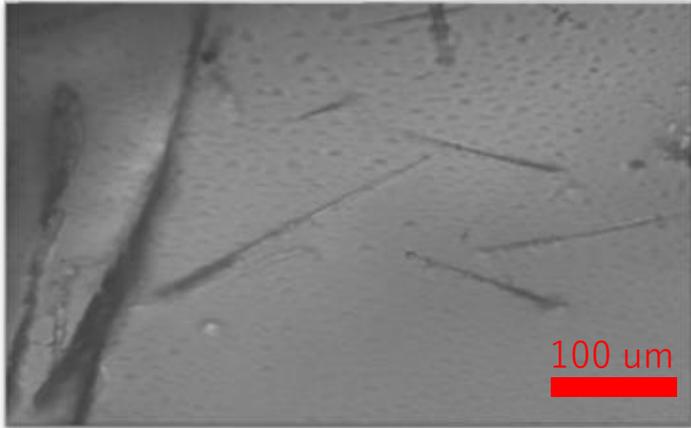
残余飛程

ロジスティック型関数でフィッティング→



残余飛程

隕石カンラン石内のトラック

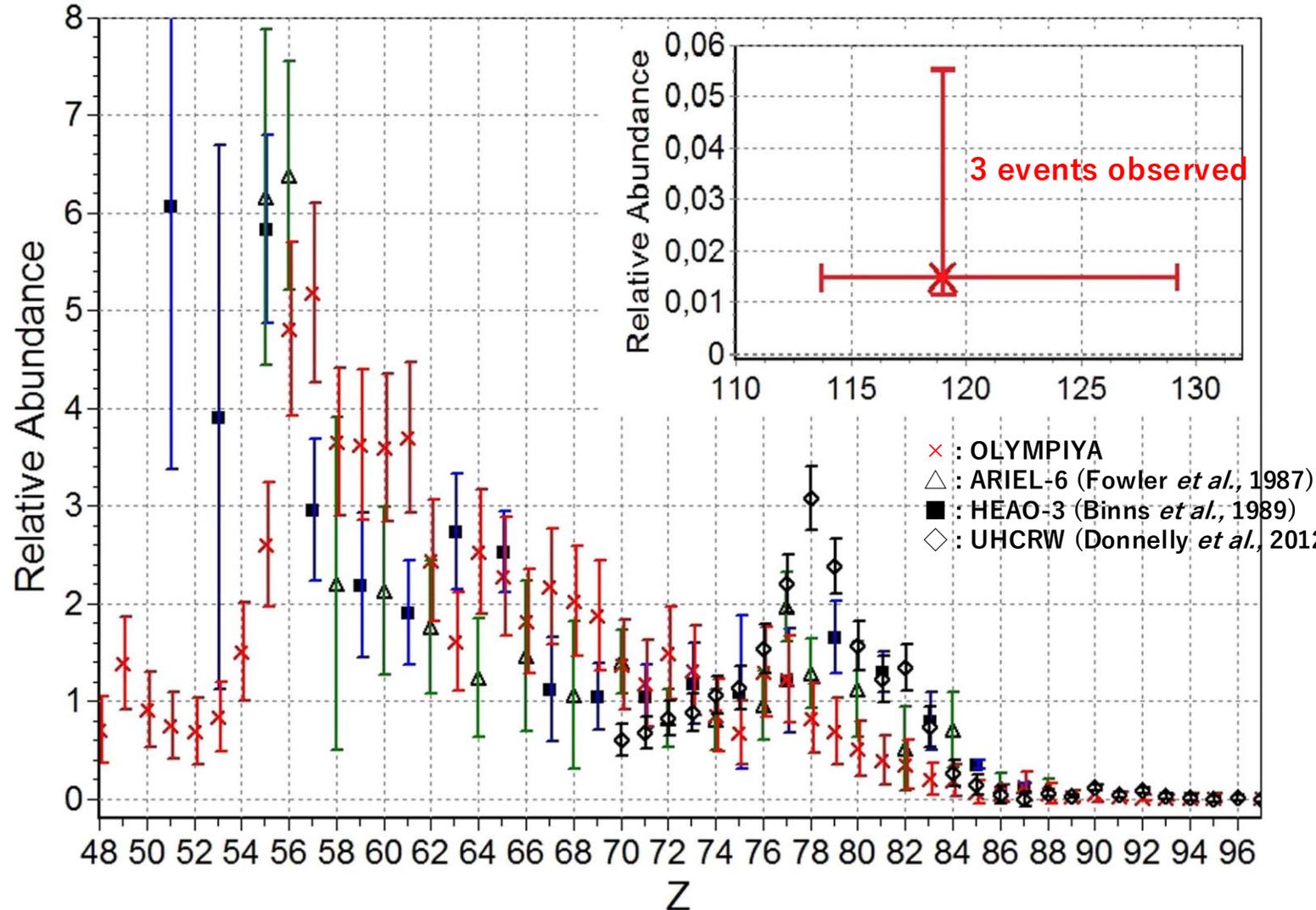


Astrophys. J. 829:120(2016)

Table 2
Registered Events of Heavy and Superheavy Nuclei in Various Experiments

Z Interval	Ariel 6 (1)	HEAO-3 (2)	UHCRE (3)	OLYMPIYA
1 $Z \geq 50$	412	362	—	10283
2 $50 \leq Z \leq 58$	240	204	—	5612
3 $60 \leq Z \leq 68$	84	34	—	2814
4 $Z \geq 70$	88	62	2567	1233
5 $70 \leq Z \leq 73$	29	10	—	715
6 $74 \leq Z \leq 80$	29	42	—	449
7 $81 \leq Z \leq 86$	27	10	—	59
8 $88 \leq Z \leq 103$	3	0	35	9
9 $Z \geq 92$	2	0	—	4

442 olivine



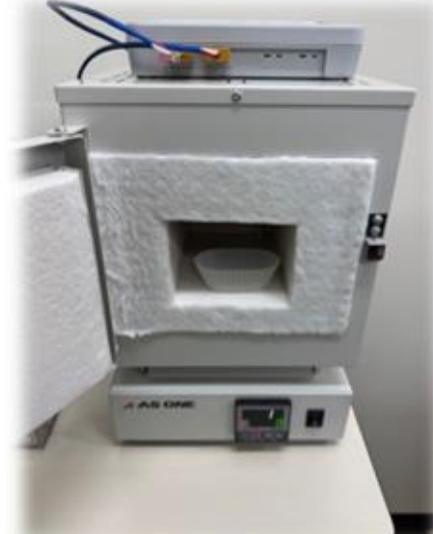
カンラン石サンプルの作成方法



粒状のカンラン石
(China)



岩石マウント用レジン



電気炉

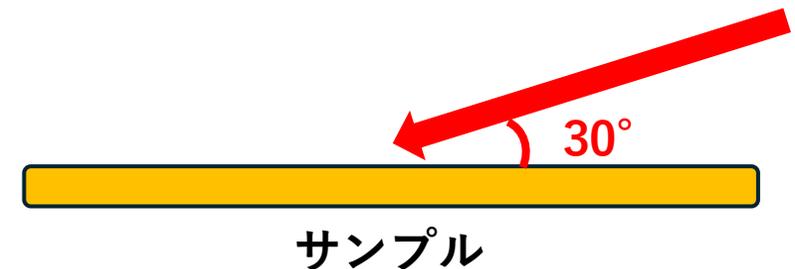


レジンに埋め込んだカンラン石サンプル

イオン照射実験

今回分析に用いたカンラン石サンプルの実験施設と実験条件

Xe 290 MeV/n (BF:10.96 mm)	量子科学技術研究開発機構 (HIMAC)
Au 350 MeV	JAEA Tandem



WN溶液を安定的に作成できるレシピを作成

WN 溶液

4:3 NaOH溶液	超純水 120mL	NaOH 90g
エッチング液	超純水 100mL	EDTA 40g
	シュウ酸 1g	リン酸 1mL



WN 溶液



オイルバスに浸した耐熱, 耐圧ボトル

温度条件 $108 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$

エッチング時間間隔

3h → 4h → 5h → 6h → 8h → 10h → 12h → 14h → 16h

飛跡が伸び切ったことを確認

エッチングで消えないマークをつけることでevent by eventで飛跡を測定することが可能に



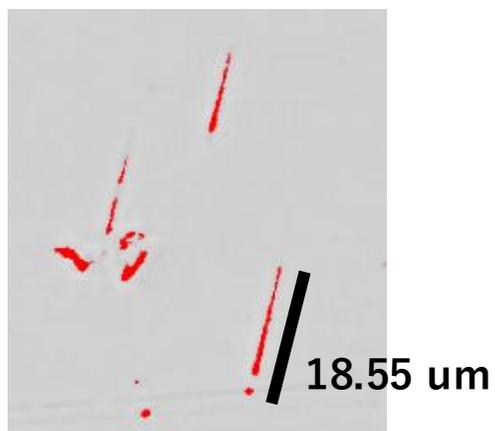
A: x_1, y_1, z_1
B: x_2, y_2, z_2
C: x_3, y_3, z_3
D: x_4, y_4, z_4
$\chi: x, y, z$



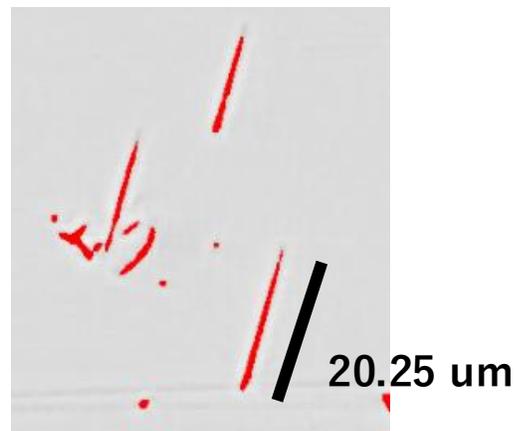
A: x'_1, y'_1, z'_1
B: x'_2, y'_2, z'_2
C: x'_3, y'_3, z'_3
D: x'_4, y'_4, z'_4
$\chi: x', y', z'$



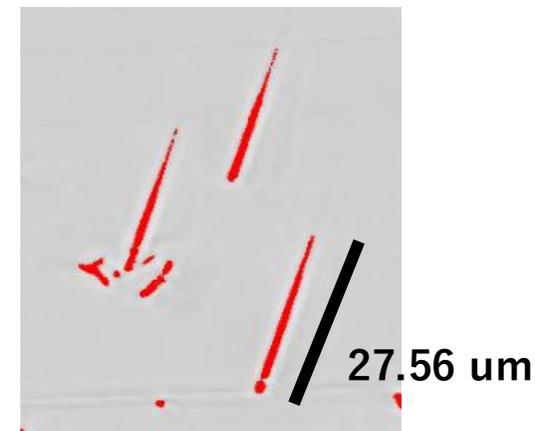
4h etching



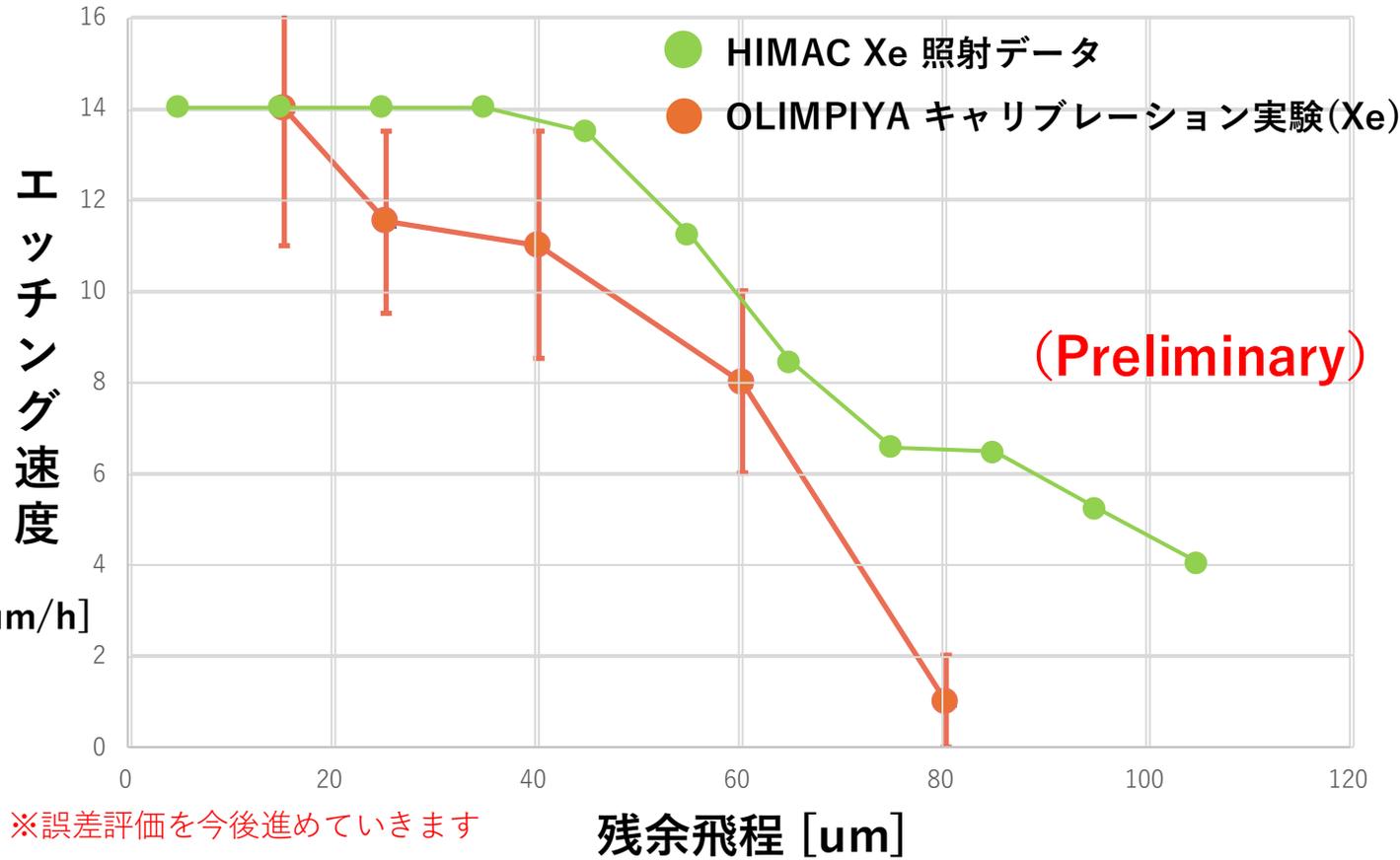
5h etching



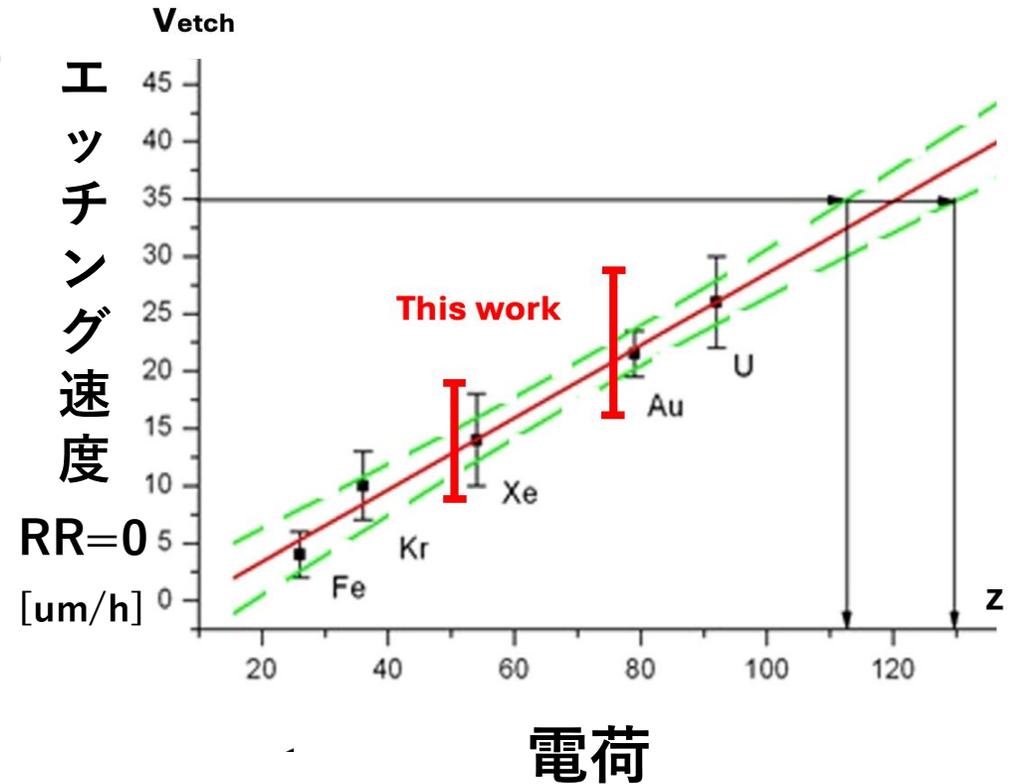
6h etching



残余飛程とエッチング速度の関係



電荷と最大エッチング速度の関係



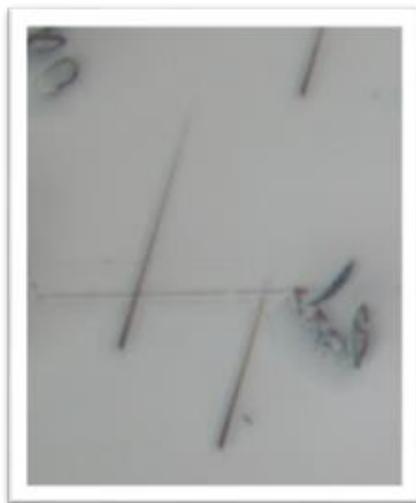
パレオディテクターとは鉱物を用いた飛跡検出器

- 人工的な実験では観測する事ができない到来頻度が極めて稀な粒子に対して感度がある
(… 超重銀河宇宙線 重いダークマター)
- エッチングという化学処理を行い光学顕微鏡で分析する

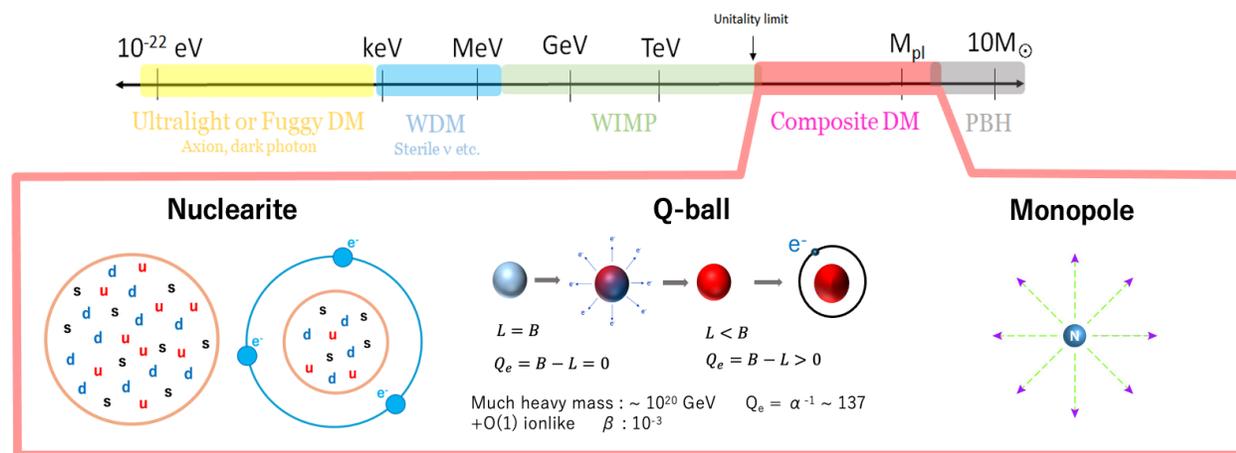
カンラン石



カンラン石中の飛跡



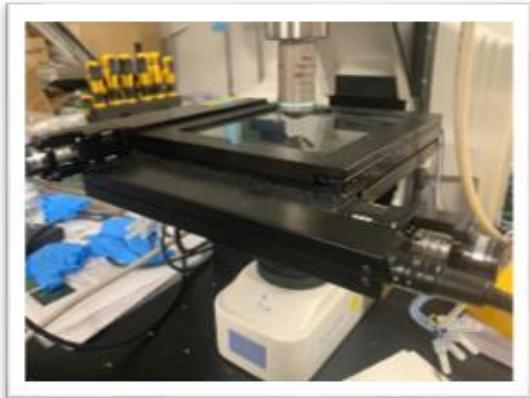
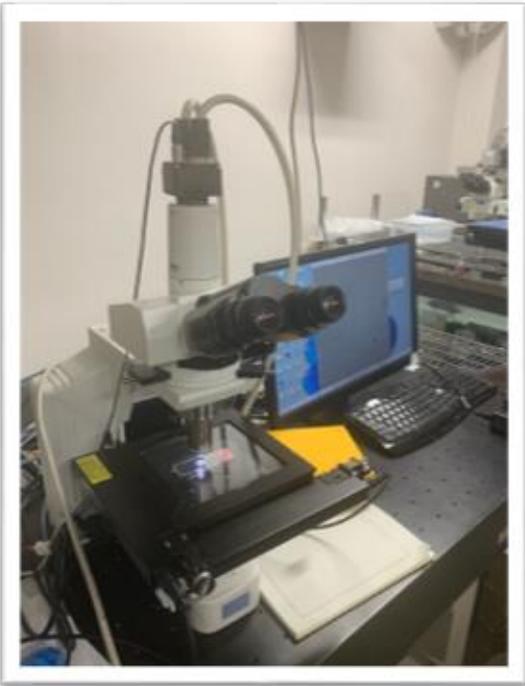
Dark Matter mass parameter



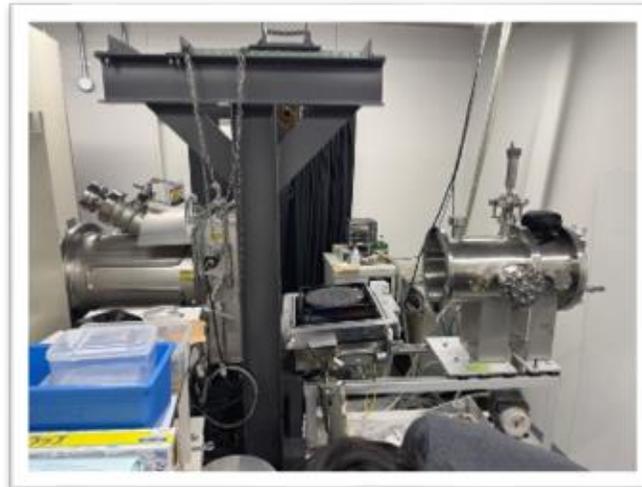
- ・カンラン石のエッチング手法の確立
- ・Xe, Au サンプルのエッチング速度の測定

鉍物内飛跡自動読み取り装置 [QTS]

名古屋大学 二村 翔太



超重暗黒物質探索に向けて



Xe 180 KeV
Dose : 1.0×10^9

Kanagawa
University



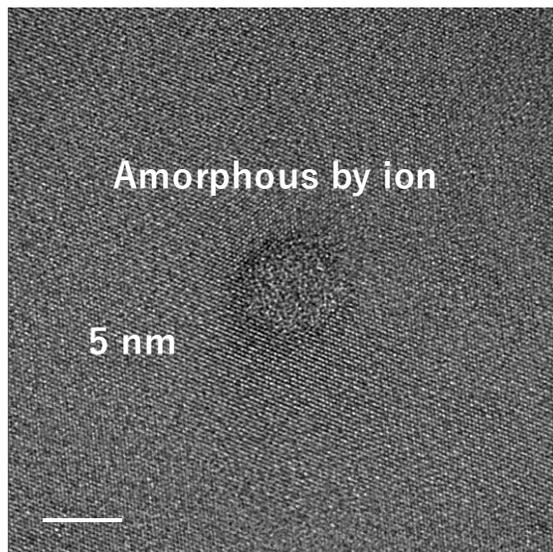
Sample 1

Sample 2
6h etching (90 °C)

検出器としての性能評価

- ・サーマルスパイクモデルの検証 (飛跡形成閾値)
etchable trackの定量化
- ・エッチングされたトラックの電子顕微鏡での分析

アモルファス化したカンラン石表面

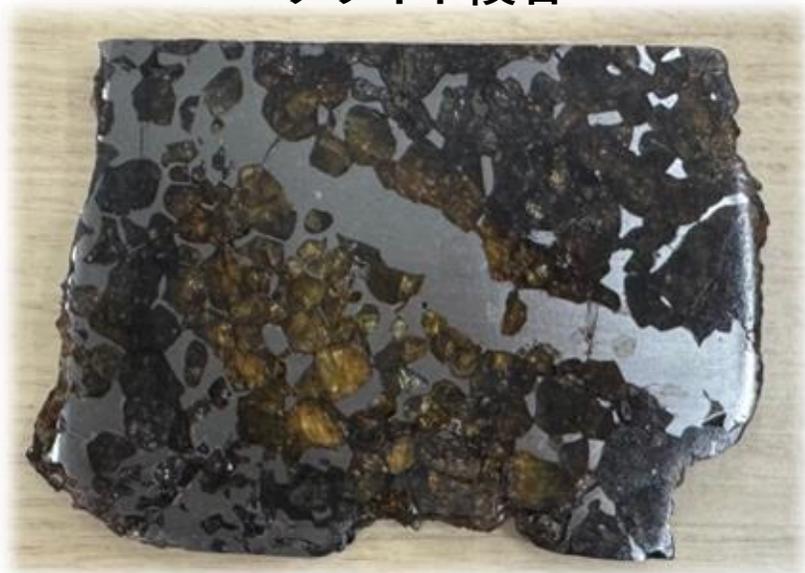


Xe 100 MeV no etching

→電荷によってアモルファス半径に違いが生まれるなら
トラック太さも分析に用いる事ができる可能性がある

隕石サンプルの分析

パラサイト隕石



Imilac Found 1822 Atacama, Chile

レジンに埋めた隕石カンラン石



エッチングの様子

