

プレッシャーSiCに残されていた恒星風起源ヘリウム

馬上 謙一¹, 和泉 樹¹, 大槻 悠太¹, 甘利 幸子², 塚本 尚義¹

1 北海道大学, 2 ワシントン大学

2026年3月4日

惑星物質科学のフロンティア研究会

プレソーラー粒子

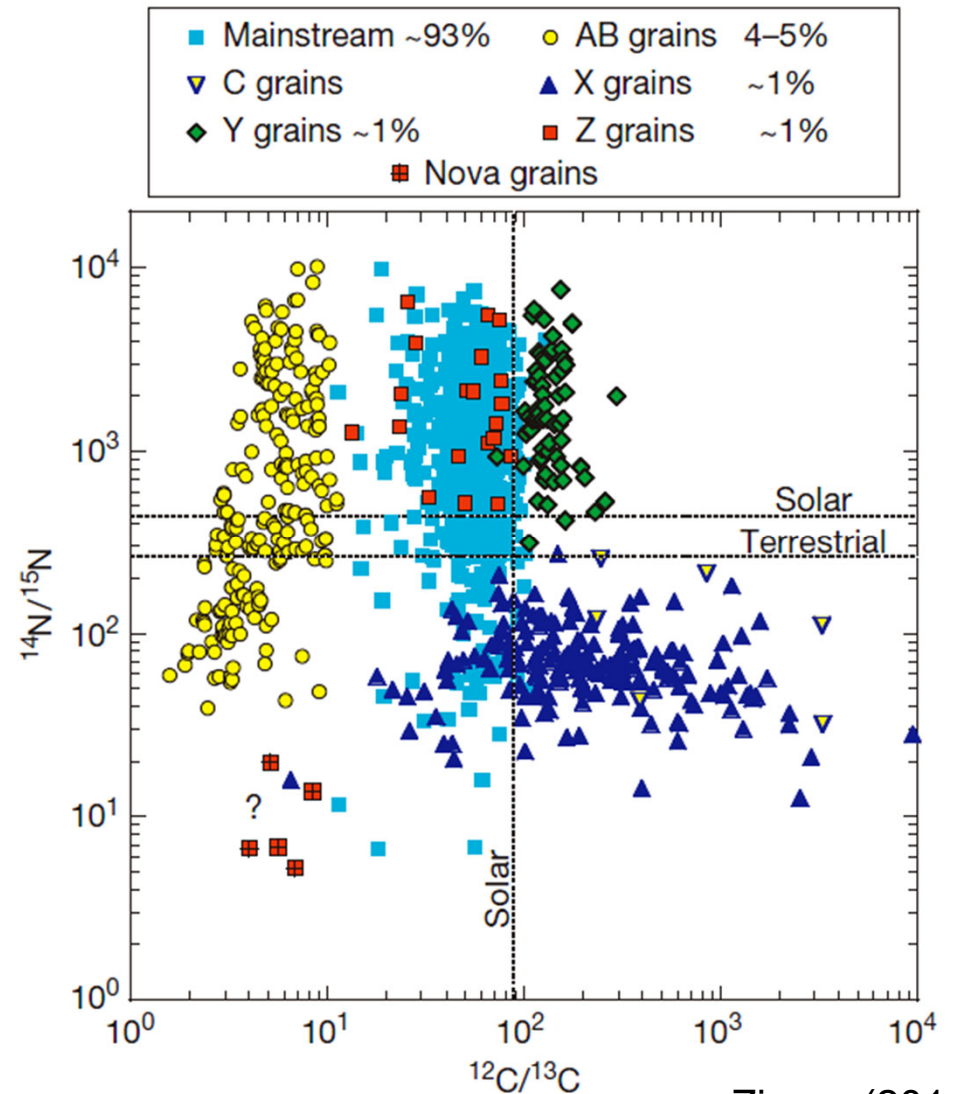
プレソーラー粒子

- 太陽系形成以前に作られ，起源となる恒星の組成を保持しており，太陽組成とは異なる。

プレソーラー炭化ケイ素 (SiC)

- He, Ne, N, 主成分であるSi, Cなどの同位体分析からプレソーラーSiCは主に漸近巨星分枝 (AGB) 星の星周で形成されたと考えられている。

(Bernatowicz et al., 1987; Heck et al., 2007)



Zinner (2014)

プレソーラーSiCの希ガス元素組成

プレソーラーSiCはHeに富む

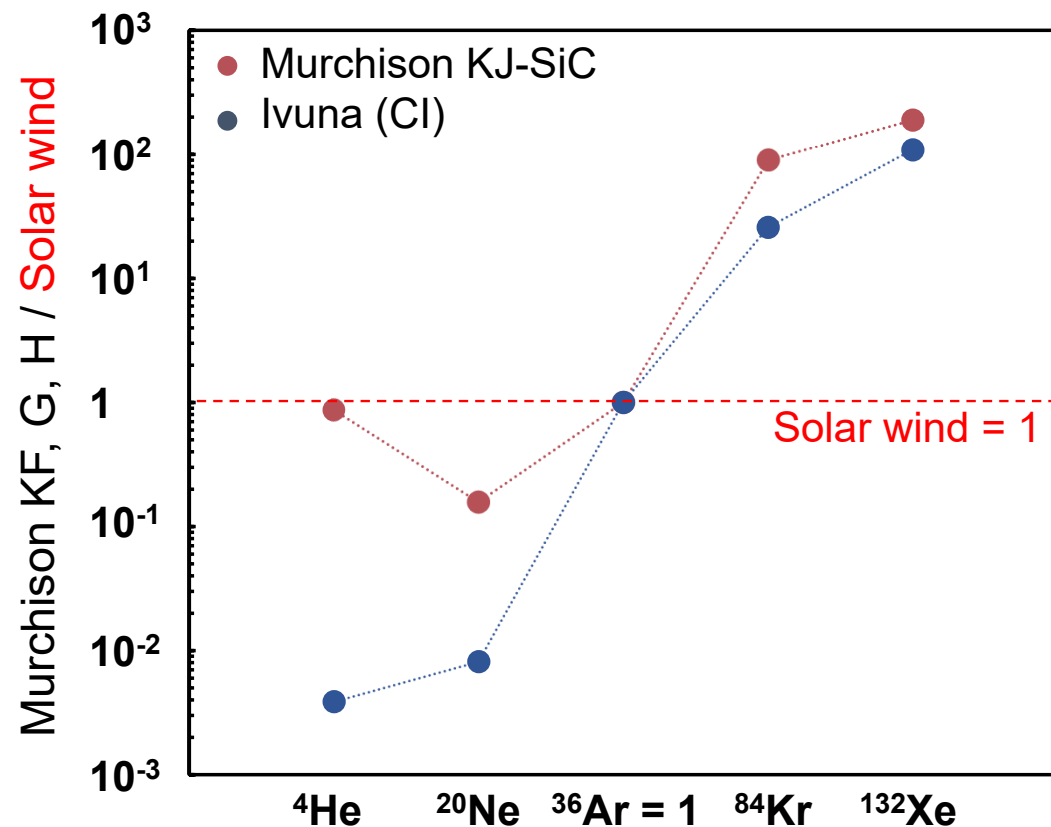
CI chondrite: $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} = 200\sim 500$

Murchison KJ-SiC: $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} \sim 4000$
(Lewis et al., 1994; Heck et al., 2009)

SW: $^4\text{He}/^{20}\text{Ne} \sim 700$ (Heber et al. 2009)

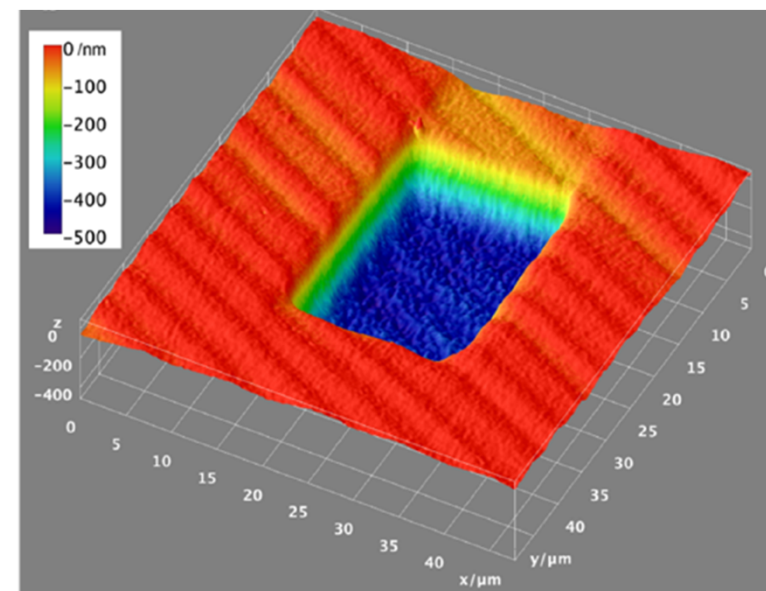
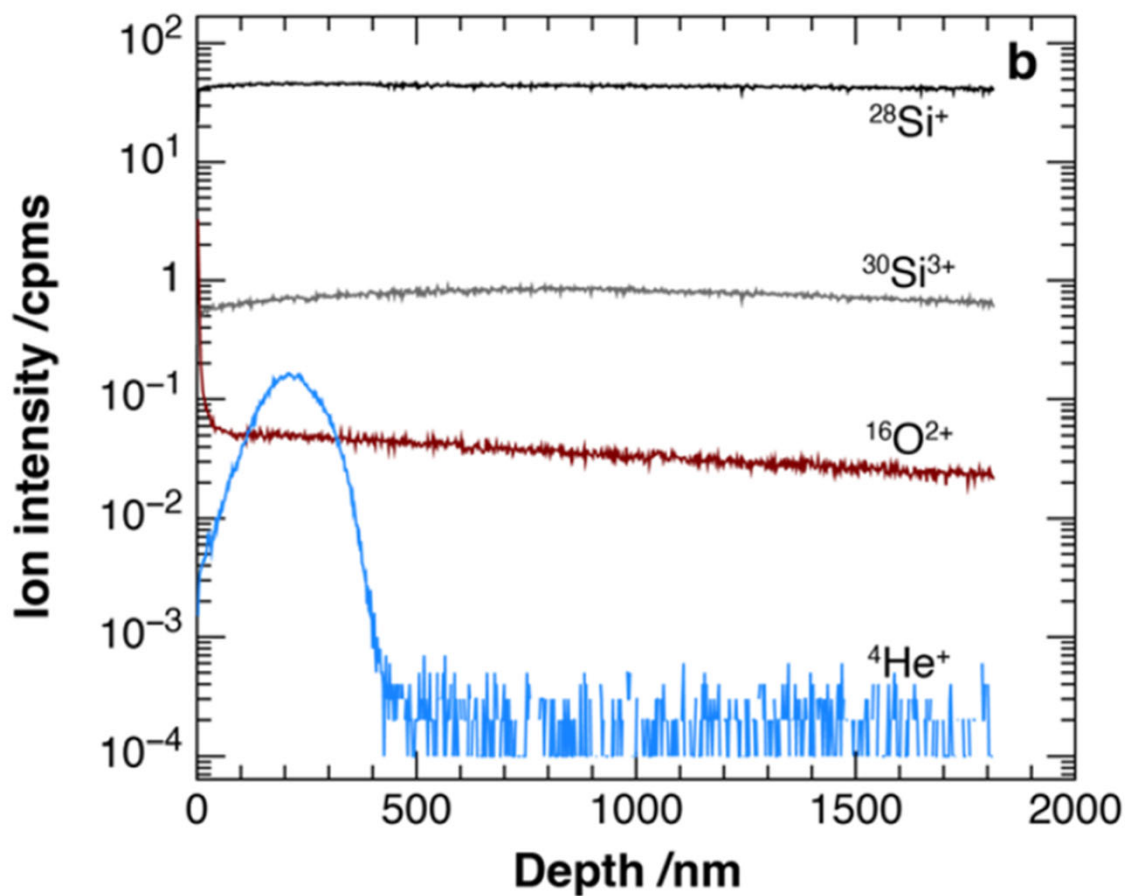
^4He の過剰 → イオン注入があった？

Heの起源を手掛かりに, SiC
形成環境を明らかにする.



KF, G, H: Lewis et al., 1994;
Solar wind: Heber et al., 2009;
Ivuna: Mazor et al., 1970

イオン注入

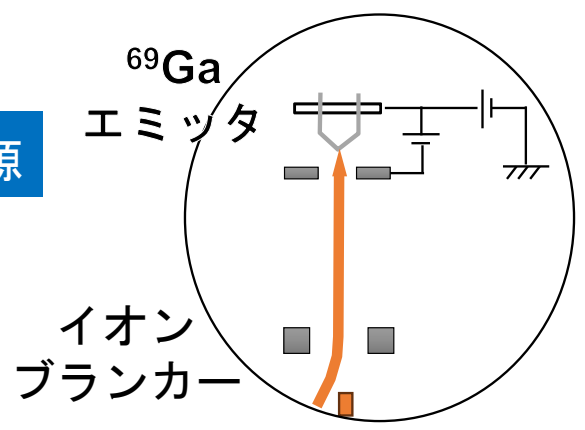


After Otsuki et al. (2025)

深さ方向に一次イオンビームで掘り進めながら質量分析をする。
イオン注入の場合、深さ方向に大きな変動がある。

LIMASによる深さ方向分析

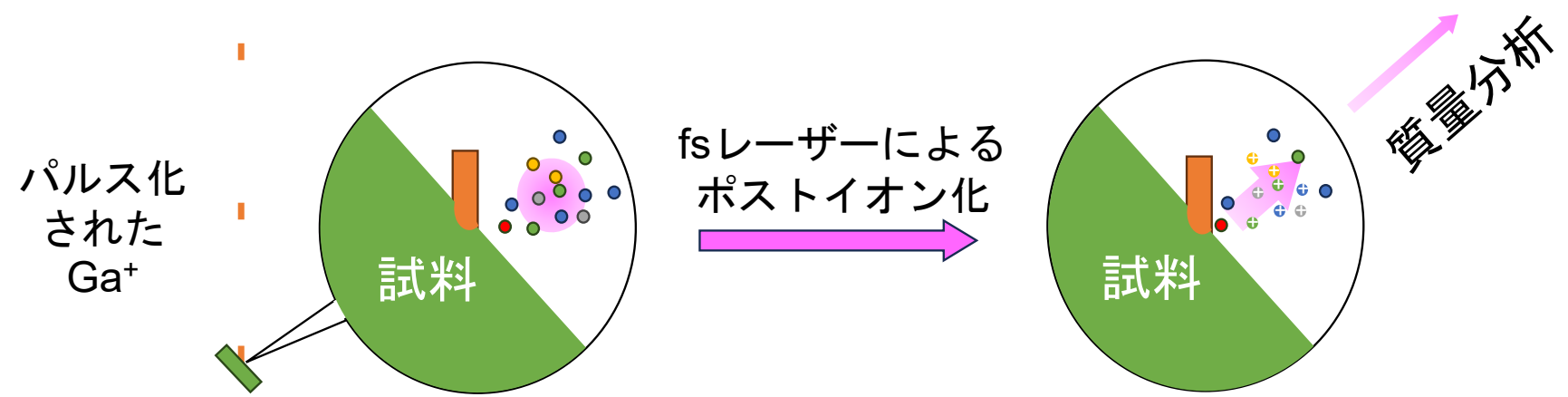
イオン源



(SEM観察により) 分析領域を決定する.

→ 試料にFIB (パルス) を走査して, 各点におけるイオン強度を測定し, 二次元分布を取得する. これを繰り返す.

パルス
ビーム



スパッタ

測定周期はfsレーザーの繰り返し周波数の1 kHz

イオン注入したSiC基盤の深さ方向分析

^4He 、 ^{20}Ne 共注入SiC (@NIMS)

^4He : 30 keV、 $1 \times 10^{15} \text{ cm}^{-2}$

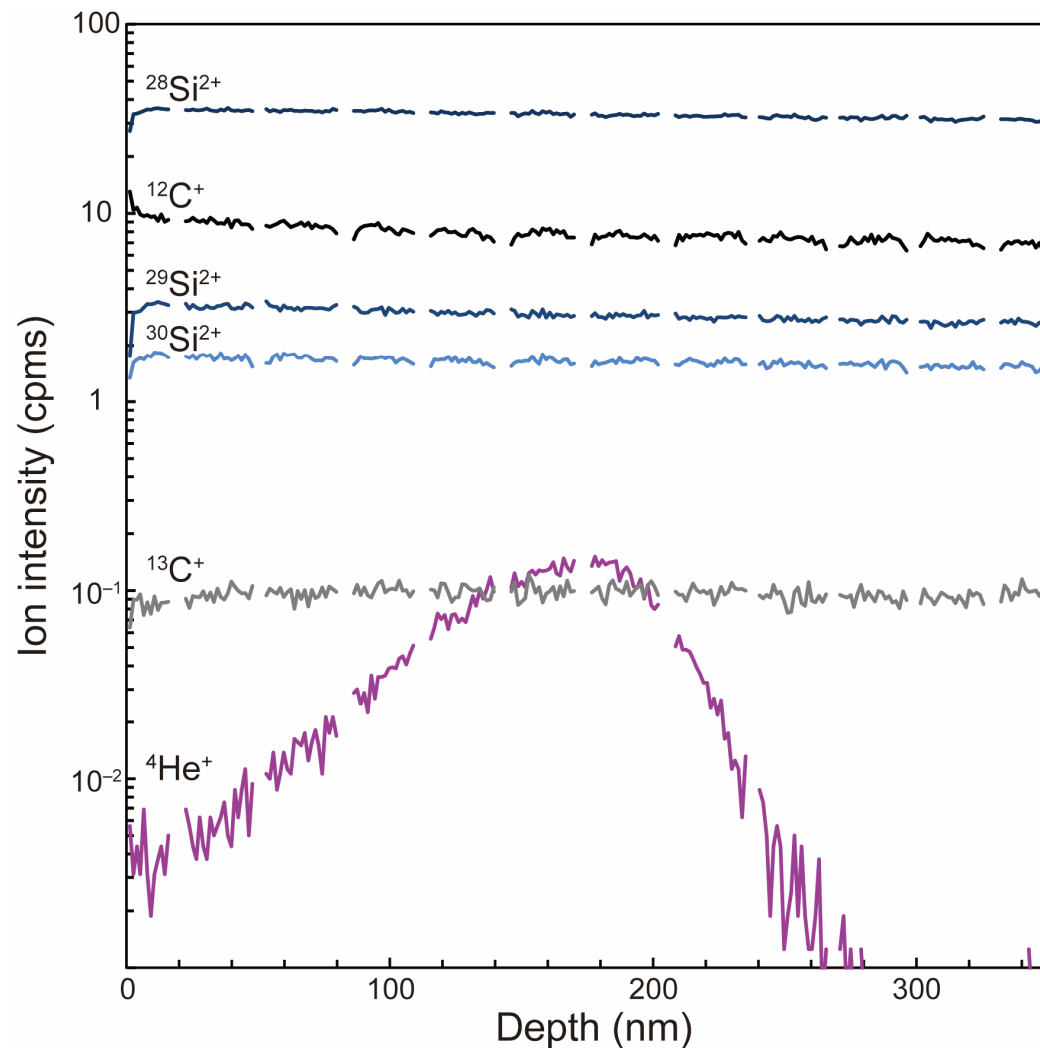
分析条件

$^4\text{He}^+$, $^{28,29,30}\text{Si}^{2+}$, $^{12,13}\text{C}^+$ を分析

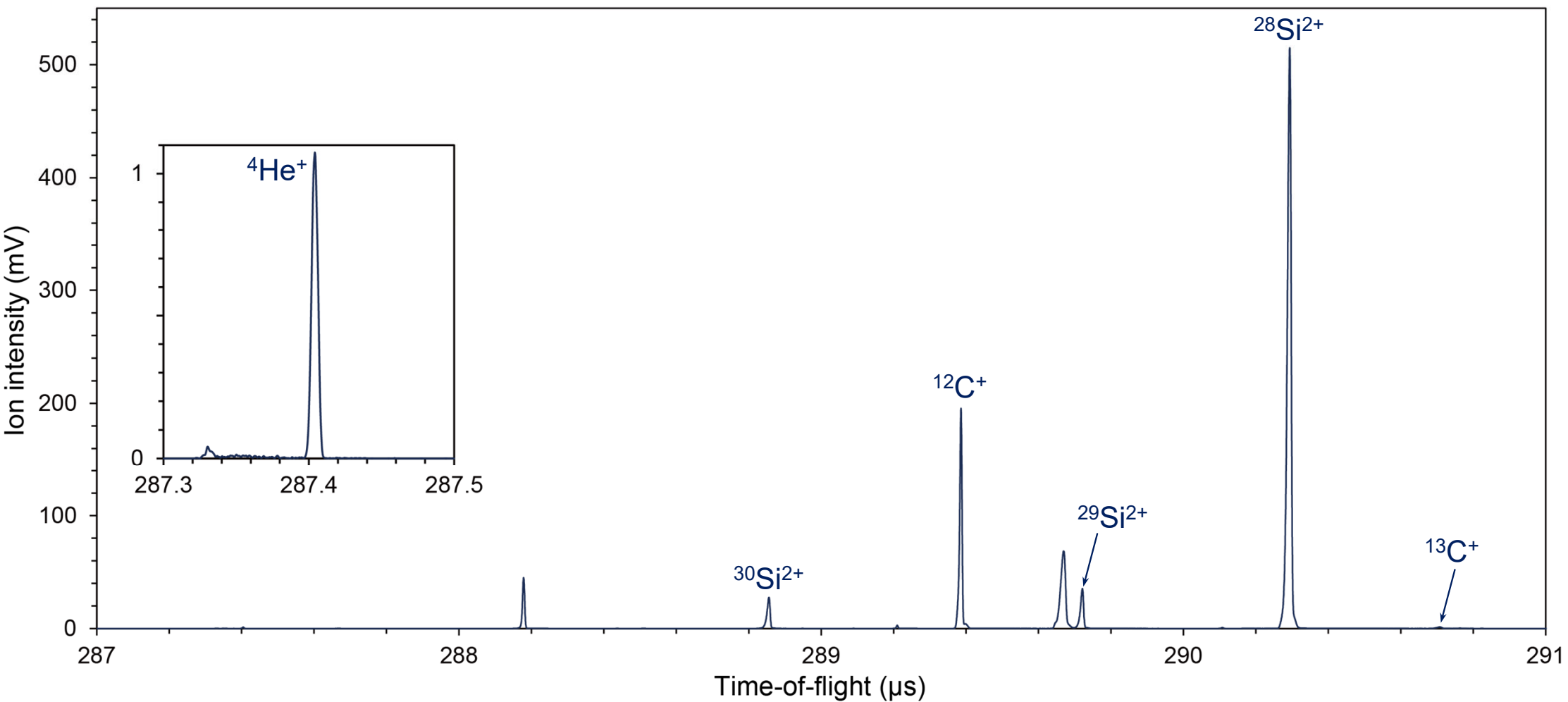
クレーター径: $9 \times 16 \mu\text{m}^2$

$2 \times 3 \mu\text{m}^2$ の分析データを使用

1層 (~1.3 nm) あたり, 1600質量スキャン



TOFスペクトル

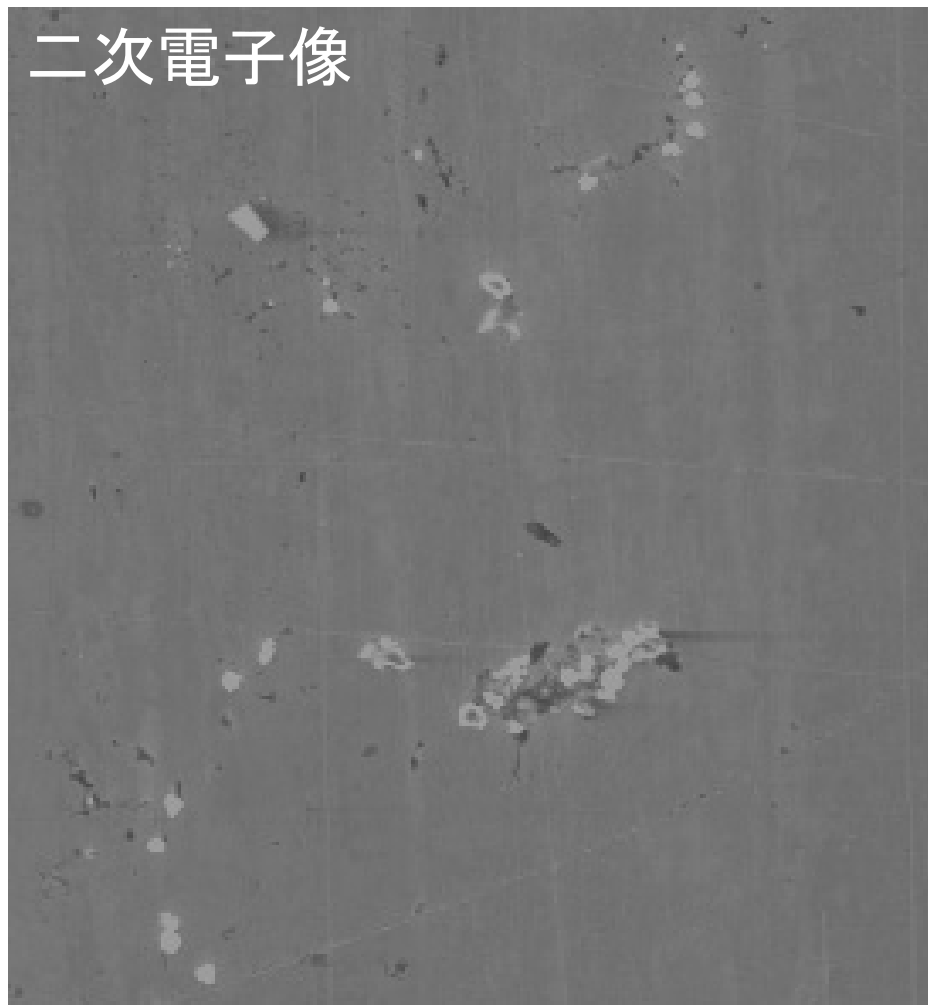


MULTUM IIで ${}^4\text{He}^+$ を95周, 飛行距離 125 m $\Rightarrow T/2\Delta T \sim 28000$

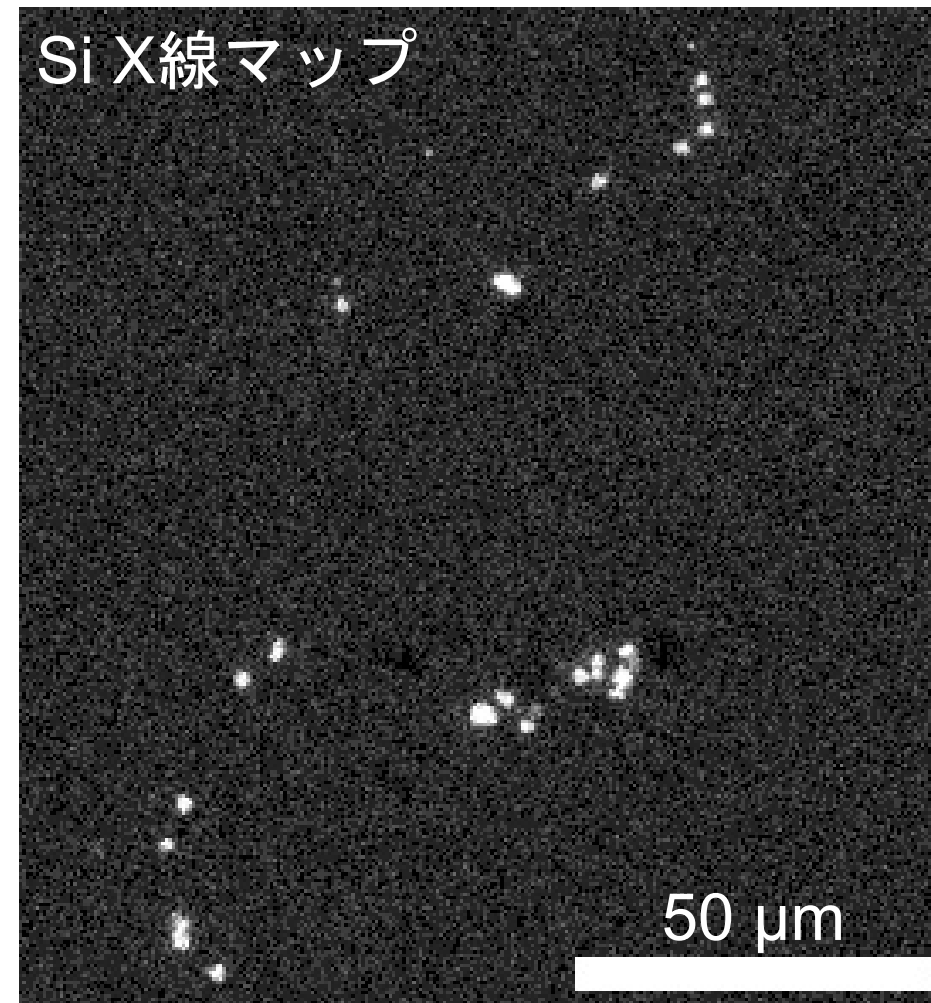
Murchison SiC (KJG)

Murchisonから化学・比重分離したKJGフラクション (Amari et al., 1993).
金基盤にSiCを乾固させた後, FE-SEM-EDSで観察し, 金蒸着を行い, LIMASへ.

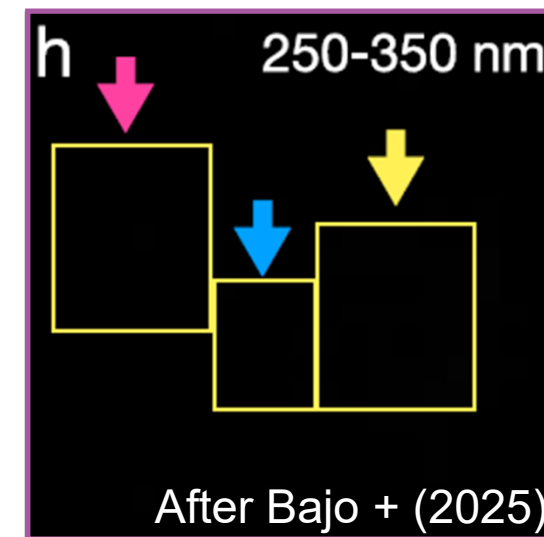
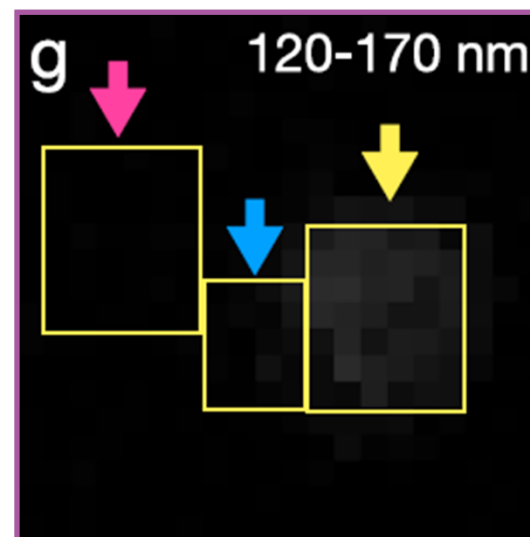
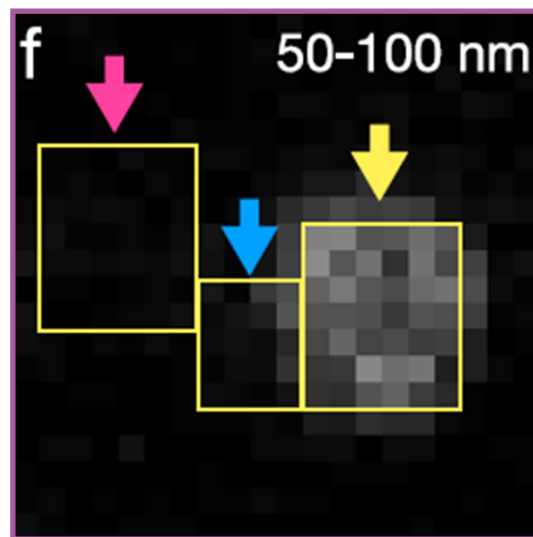
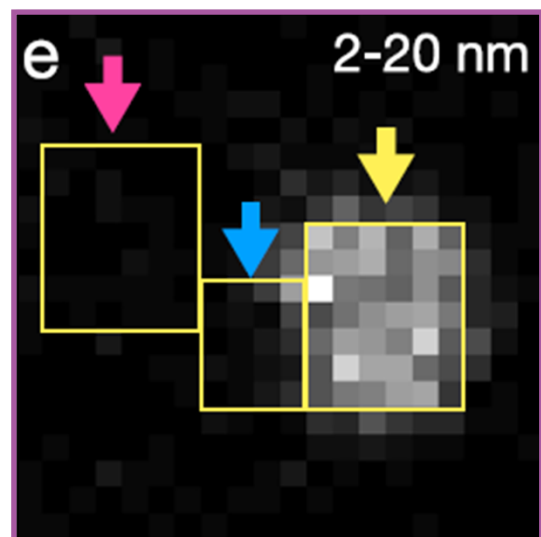
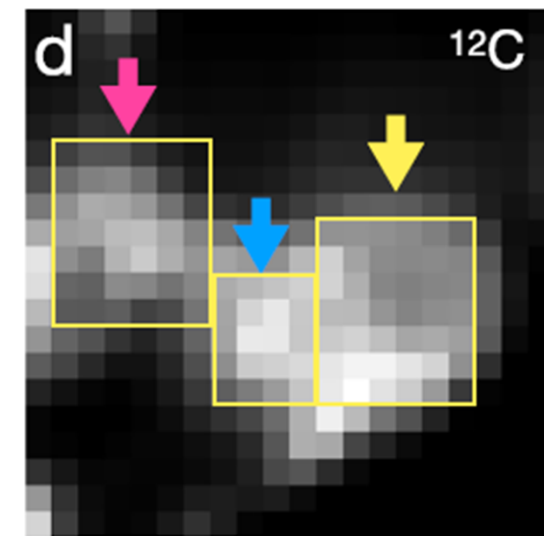
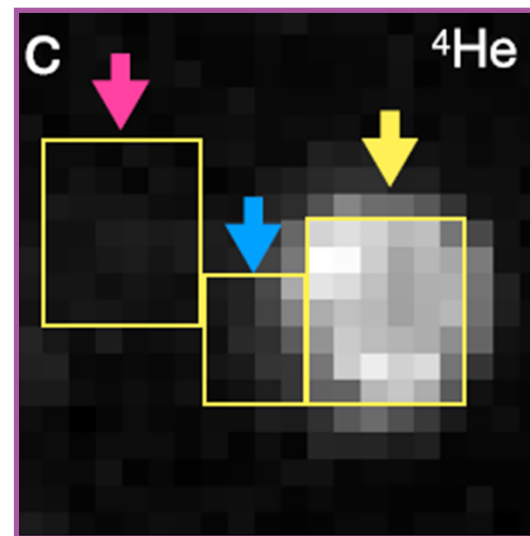
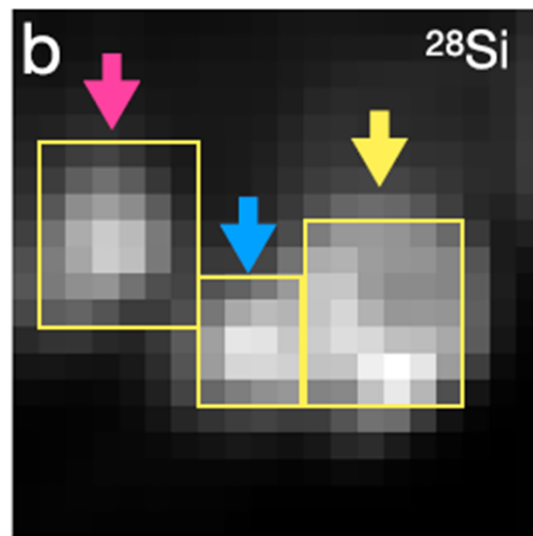
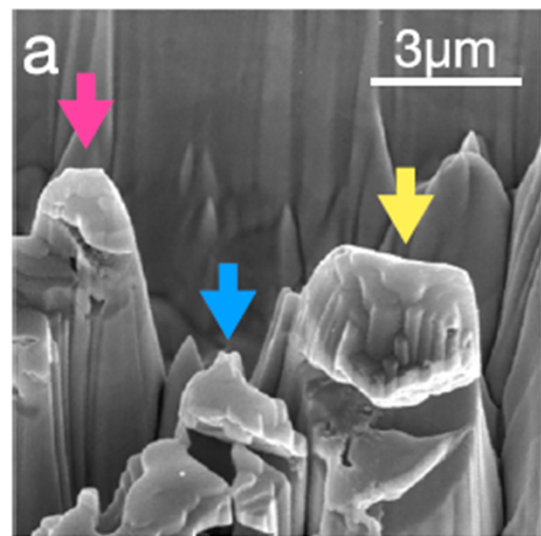
二次電子像



Si X線マップ



SiCの深さ方向イメージング

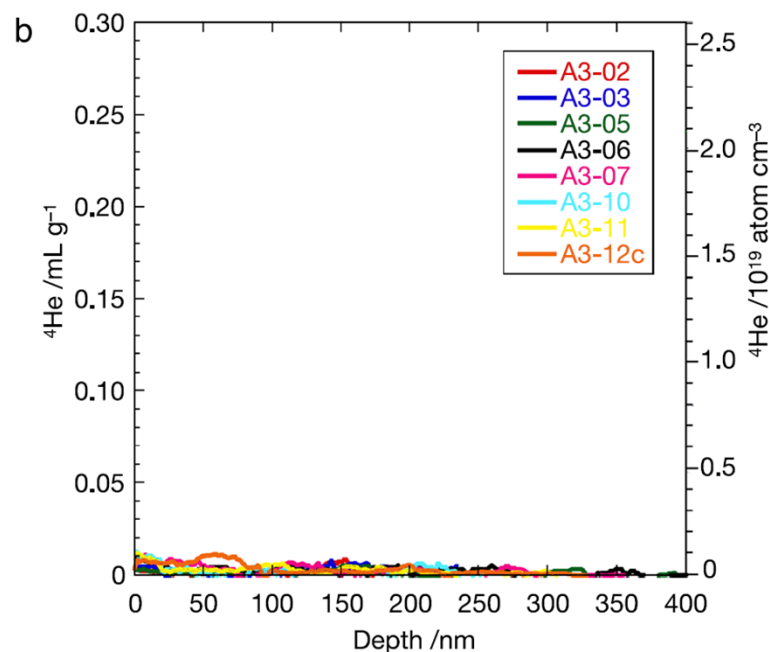
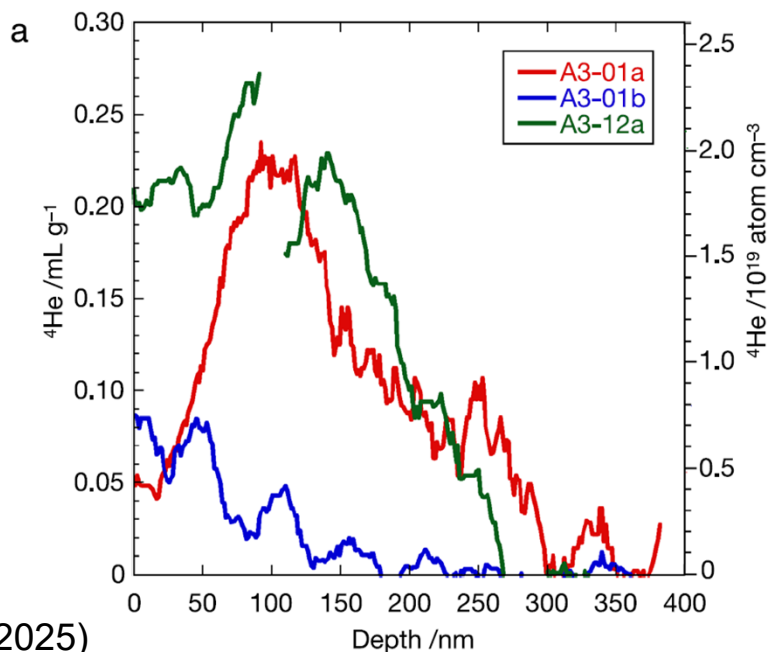


SiCの深さ方向プロファイル → ⁴He濃度プロファイルへ変換

$$RSF = \frac{\Phi \times n}{\sum \left\{ \left(I_{4He} - I_{4He}^{BG} \right) / I_{12C} \right\}_{std} \times d}$$

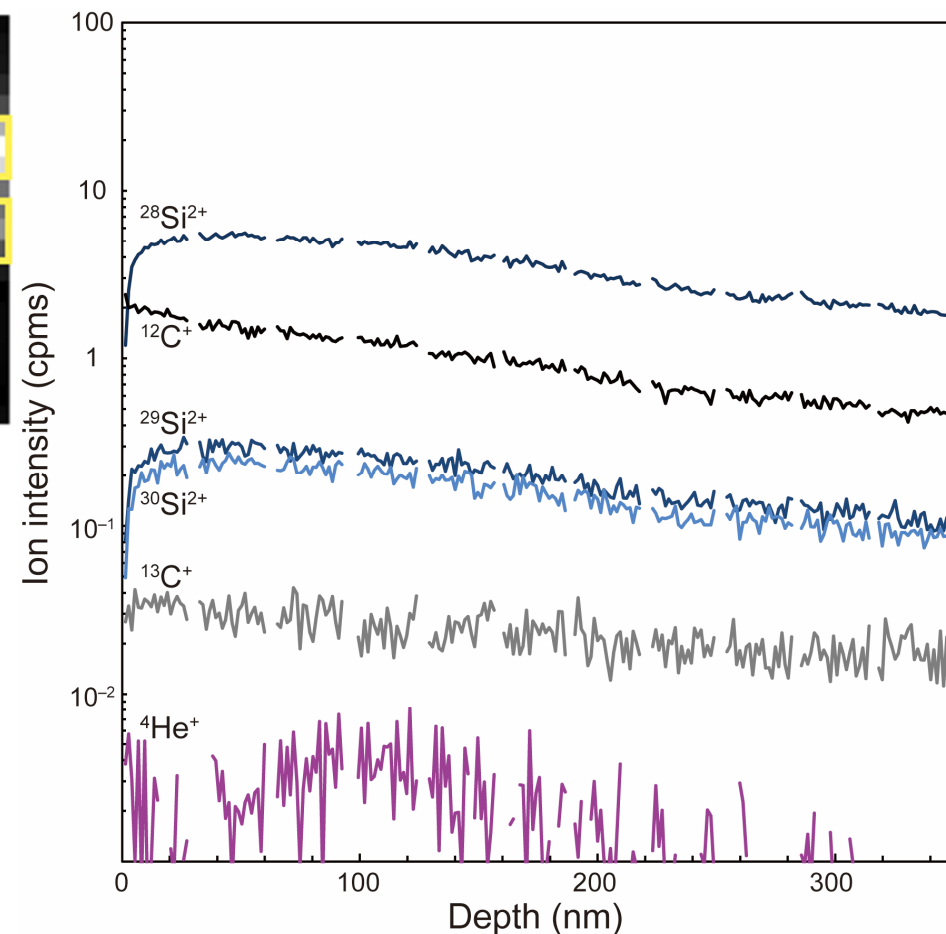
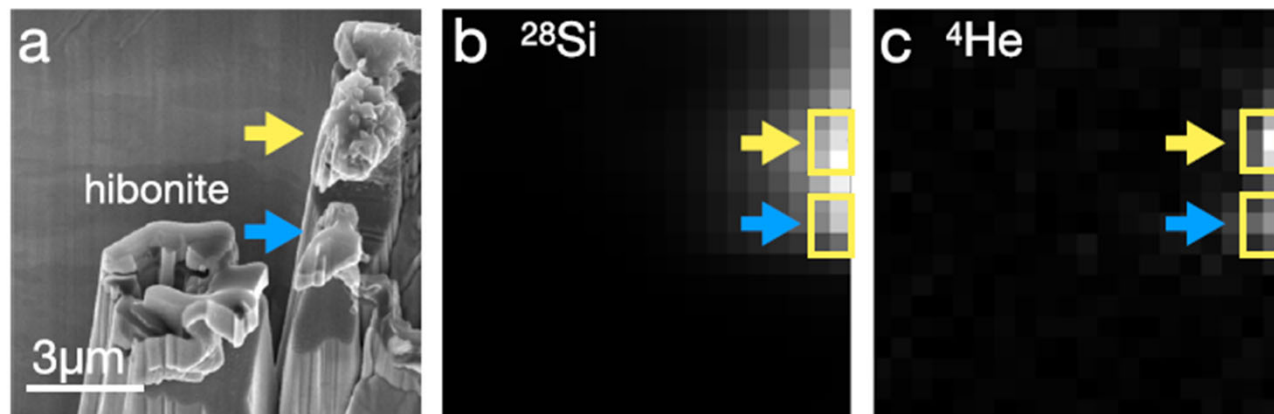
$$\left[{}^4\text{He} \right] = RSF \times \left(I_{4He} / I_{12C} \right)$$

RSF: 相対感度係数
 Φ : Heフルエンス
n: 総層数
d: クレーター深さ
 I_i : イオン強度
 $[{}^4\text{He}]$: ⁴He濃度



3/15粒子で有意な⁴Heが測定できた。

SiC: A3-01a

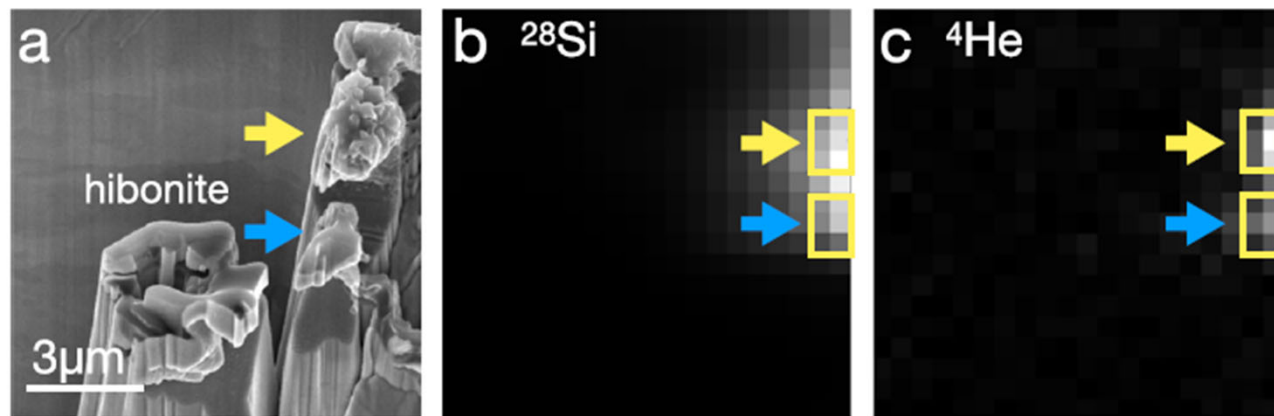


^4He 注入SiC基盤で得られたイオン強度より低い.

- 1. 粒子が小さく, 一次イオンビーム全てが粒子に当たっていない
- 2. 粒子のトポグラフィー

(今後の課題)

SiC: A3-01a

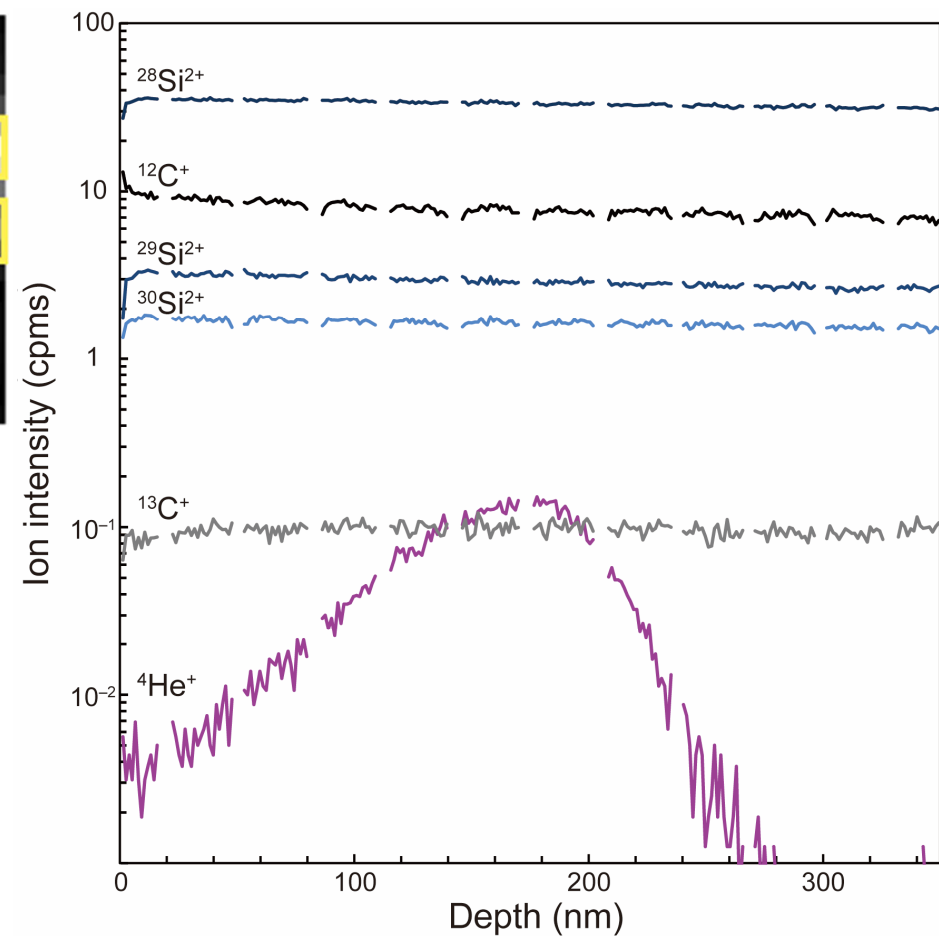


^4He 注入SiC基盤で得られたイオン強度より低い.

→ 1. 粒子が小さく, 一次イオンビーム全てが粒子に当たっていない

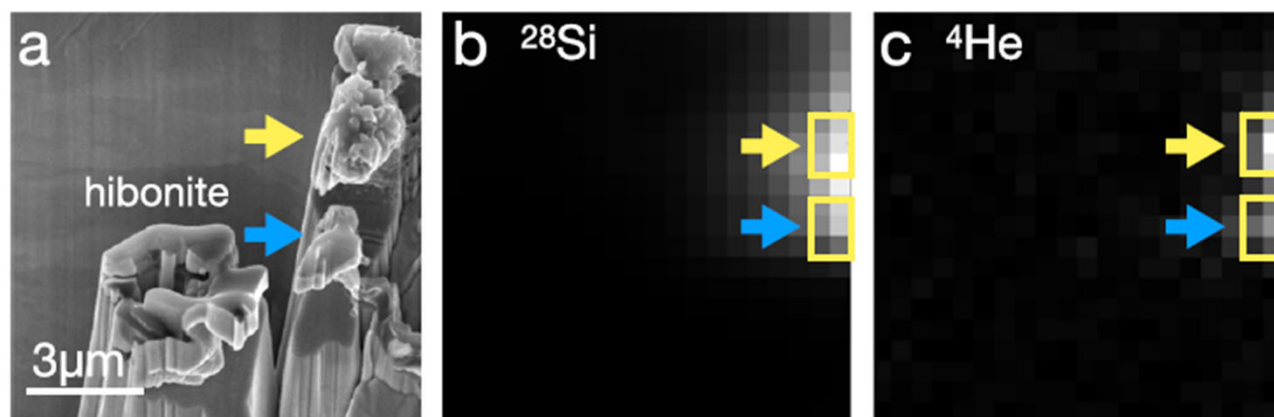
2. 粒子のトポグラフィー

(今後の課題)



After Bajo + (2025)

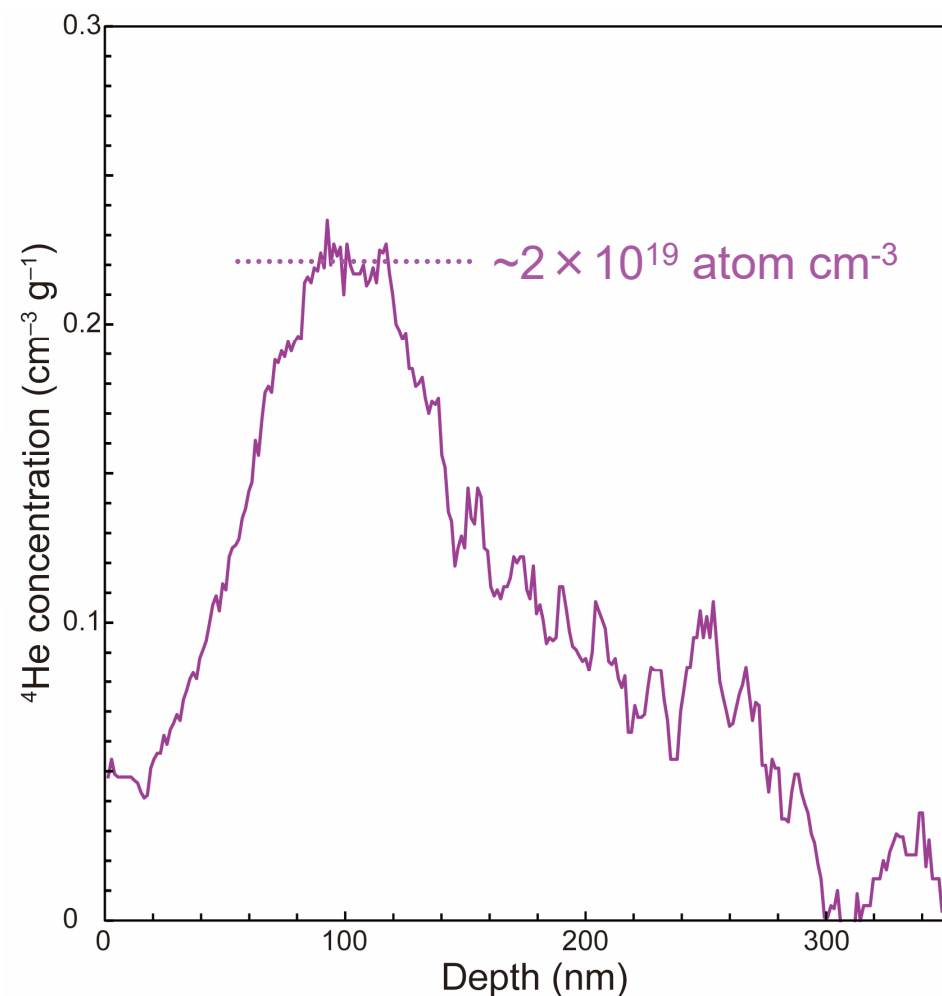
SiC: A3-01aの⁴Heプロファイル



$$[{}^4\text{He}] = \text{RSF} \times (I_{4\text{He}}/I_{12\text{C}})$$

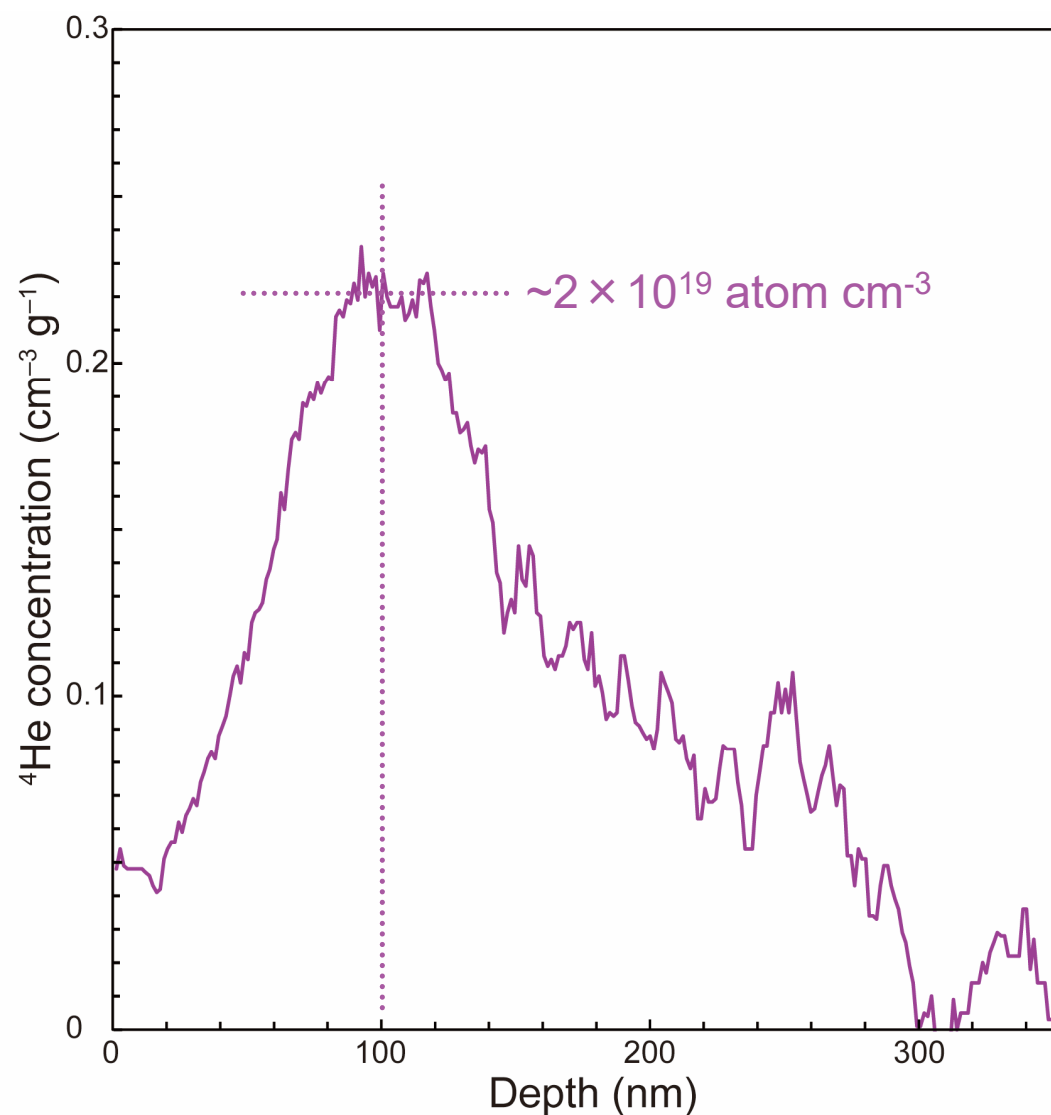
各層で得られた⁴He/¹²C比を基に⁴He濃度を計算.

→ ピーク深さ ~100 nm, ピーク濃度
~ 2×10^{19} atom cm⁻³の深さ方向プロファイルが得られた.



After Bajo + (2025)

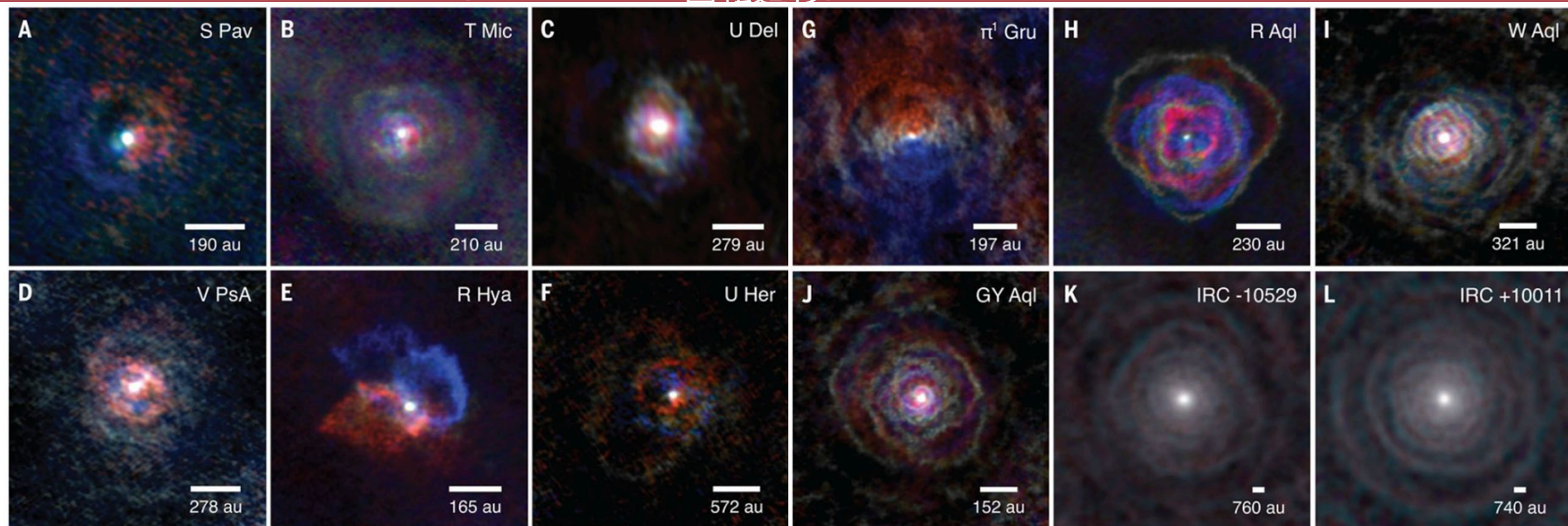
SiC: A3-01a ^4He イオン注入プロファイル



- ~100 nmにピークをもつプロファイル
- SRIMで $^4\text{He}^+$ の速度を見積もってみる.
密度 3.22 g cm^{-3} のSiCとして計算
- 15-16 keVの注入エネルギー
- ~850 km s^{-1}

AGB星の恒星風の終端速度は $5\text{--}40 \text{ km s}^{-1}$,
AGB星はその後惑星状星雲中心 (CSPN) へ
進化し, 高速の恒星風 ($10\text{--}40 \text{ keV nucleon}^{-1}$
($> 1000 \text{ km s}^{-1}$), Verchovsky+2004) が吹き出す.

ALMAによる ^{12}CO ($J = 2 \rightarrow 1$ 回転遷移) 輝線分布: 高速の恒星風



Decin et al. (2020)

AGB星の最終晩期, 惑星状星雲中心 (CSPN) へ進化し, AGB星風 (数十 km s^{-1}) よりも高速の恒星風 ($500\text{--}3500 \text{ km s}^{-1}$, e.g., Kudritzki+2006) が吹き出す.

まとめ

Murchisonから単離したマイクロメートルサイズのSiC粒子の ^4He 深さ方向分析を行った.

1. 分析した15粒子の内, 3粒子で有意な ^4He を測定することができた.
2. ^4He の深さ方向プロファイルから, Heの起源がイオン注入によることが示唆された.
3. 見積もられた注入Heの速度から, AGB星風ではなくCSPN期の高速の恒星風起源の ^4He であることが示唆された.