

宇宙ダストの形成過程の解明に向けた S-520観測ロケットによる微小重力実験

木村勇氣

北海道大学

石塚紳之介

北海道大学

中坪俊一

北海道大学

齋藤史明

北海道大学

山崎智也

北海道大学

左近樹

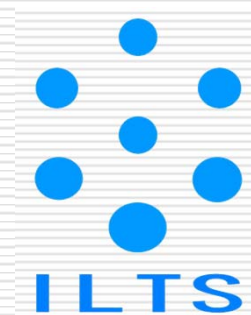
東京大学

竹内伸介

ISAS

稲富裕光

ISAS



Importance of cosmic dust

- Building block of planetary system.

Alycia J. Weinberger, *Nature* 433,114-115, 2005.

- Substrate for molecular formation.

N. Watanabe, A. Kouchi, *Prog. Surf. Sci.*, 83, 439-489, 2008.
J. A. Nuth, N. M. Johnson, *Science*, 336, 424-425, 2012.

- Energy transducer in the interstellar and circumstellar environment.

P. F. Roche, et. al., *Nature* 337, 533-535, 1989.
J. E. Felten, E. Dwek, *Nature* 339, 123-125, 1989

- Key player for efficient star formation

L. J. Tacconi, et al., *Nature* 463, 781-784, 2010.
C. F. McKee, *Science* 333, 1227-1228,2011.

大目標

- 137億年の宇宙史における、分子、鉱物粒子(ダスト)、惑星、そして生命へとつながる有機物の形成過程や変遷を、物質科学の視点から理解する。そして、物理、化学の素過程に立脚した揺ぎ無い宇宙物質の創成史を確立する。

目標達成には、

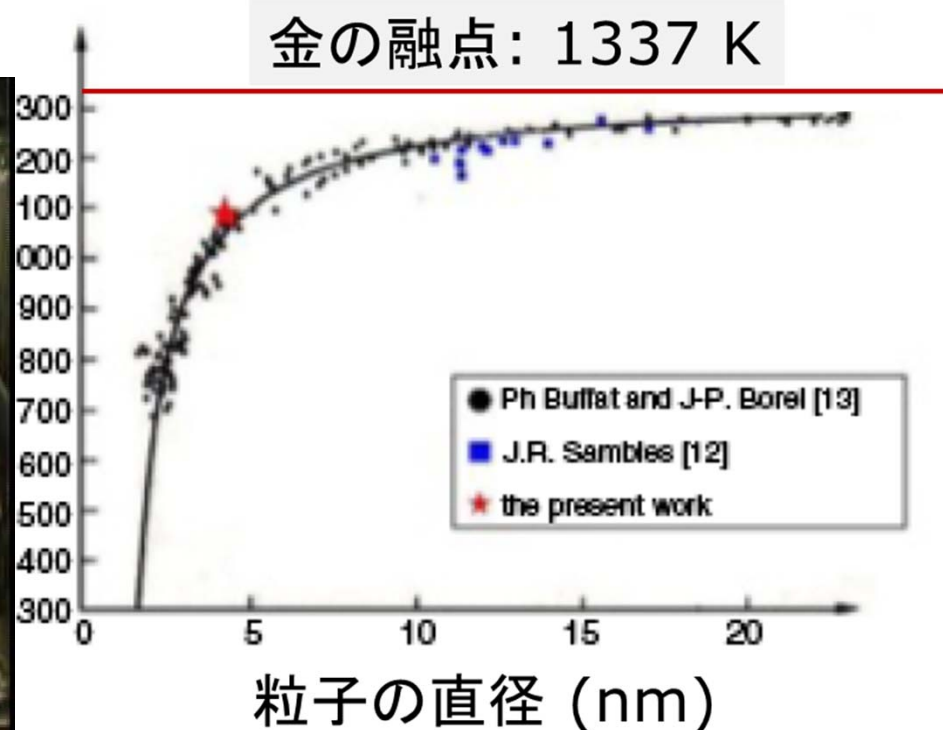
- ・ナノ粒子特有の物性、現象の理解

- ・微小重力実験

が必須！

なぜナノ粒子を理解する必要があるのか？

Auナノ粒子



Lee, et al., *Nanotechnology*, 20 (2009) 475706.

核生成理論によるダスト生成の見積り

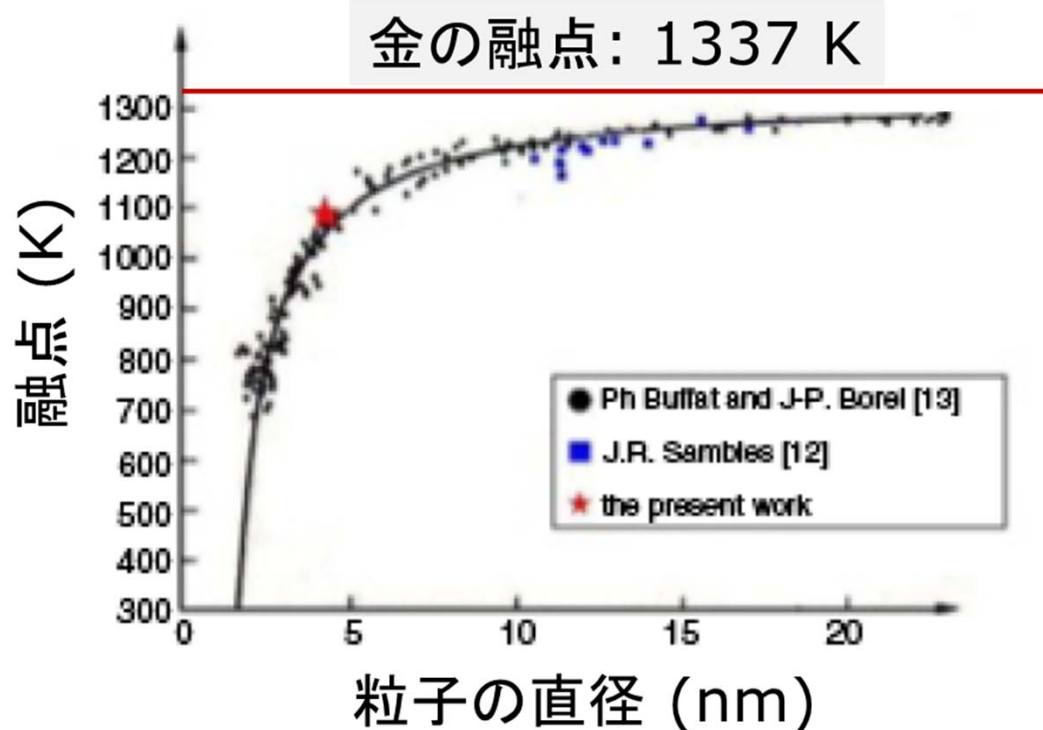
$$J = \alpha \exp[-(16\pi\gamma^3 v^2) / (3\Delta\mu^2 kT)]$$

α : 付着確率

γ : 表面自由エネルギー

なぜナノ粒子を理解する必要があるのか？

Auナノ粒子



Lee, et al., *Nanotechnology*, 20 (2009) 475706.

核生成理論によるダスト生成の見積り

$$J = \alpha \exp\left[-\frac{16\pi\gamma^3 v^2}{3\Delta\mu^2 kT}\right]$$

α : 付着確率

γ : 表面自由エネルギー

なぜ微小重力実験か？

- 流体力学において、レイノルズ数が同じ系は物理的に同様に扱える様に、宇宙ダストの生成過程は冷却の時間スケールと衝突頻度が相似形 (Λ で評価) であれば、同様に取り扱いえる。

(Yamamoto & Hasegawa 1977)

$$\Lambda = v \tau_{\text{sat}}$$

$$= v t / \ln S(t)$$

$$S(t) \approx \exp\left(\frac{t}{\tau_{\text{sat}}}\right)$$

Λ : 過飽和度の増加と分子の衝突頻度の比

v : 分子の衝突頻度 (s^{-1})

τ_{sat} : 過飽和度が増加する時間スケール

S : 過飽和度

t : 過飽和になってからの時間

	Novae	Super-novae	Evolved star	Solar Nebula	1 G experiment
Λ	10^0-10^2	10^4	10^3-10^5	10^9	10^0-10^2

□ The Λ value of μG experiment is 10^4 .

なぜ微小重力実験か？



地上実験
熱対流で

そもそも、宇宙での物質形成を
地上実験で理解できるのか！？

環境で起る

スペクトルフィーチャーの起源の解明

様々な天体で9.7 μm フィーチャーが観測されている。

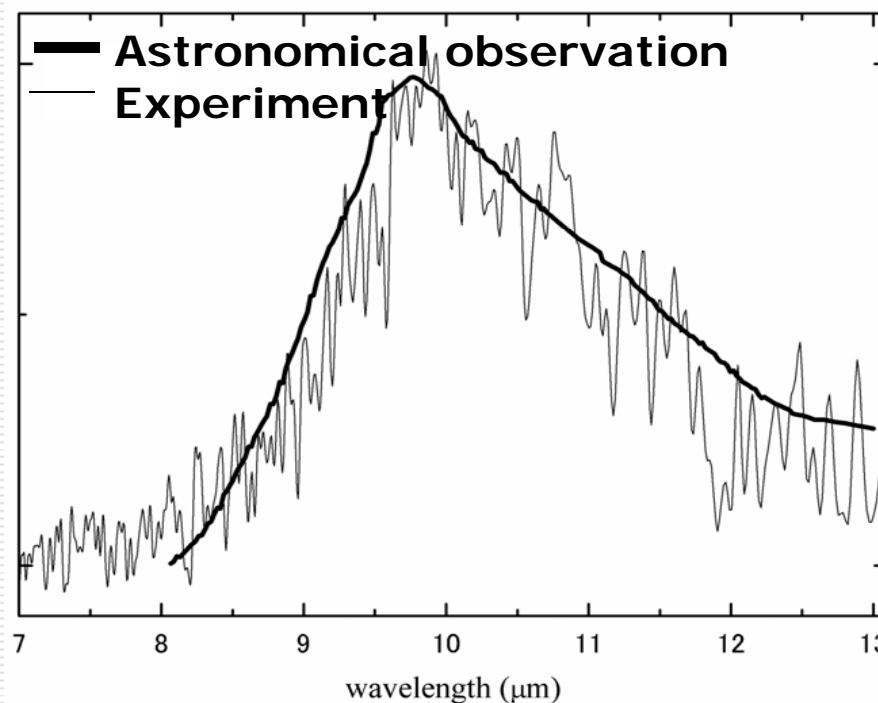
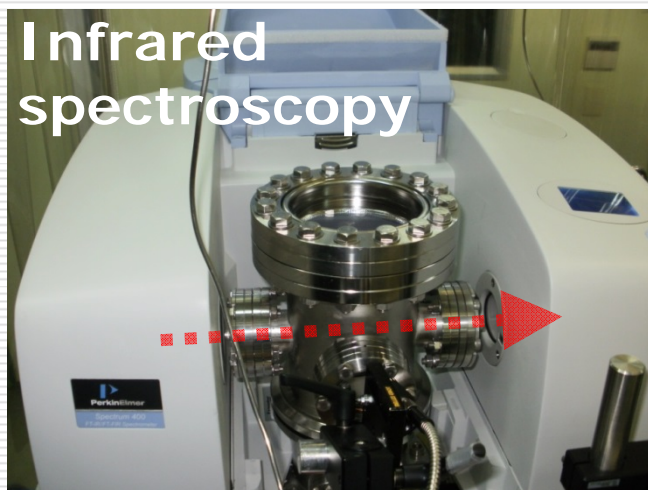
(Speck et al. 2000)

起源物質: アストロノミカルシリケート

⇒ 実体のない架空の鉱物

マグネシウム珪酸塩に鉄をまぜれば良い...と言われていた

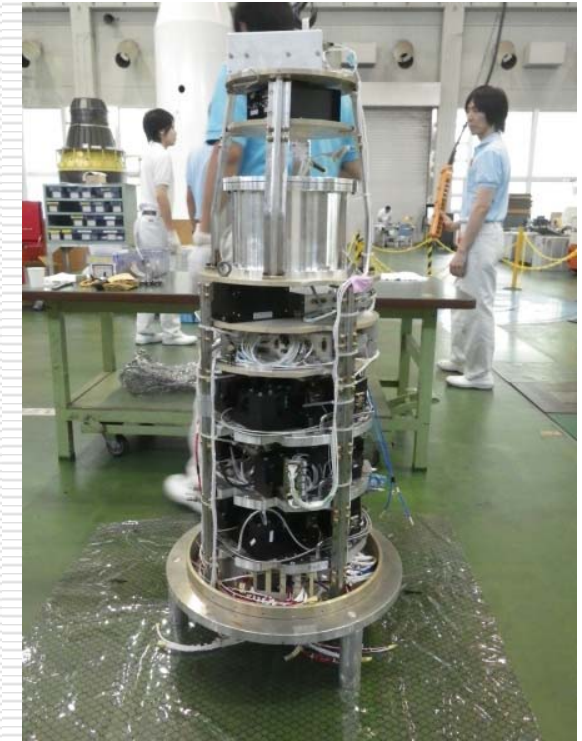
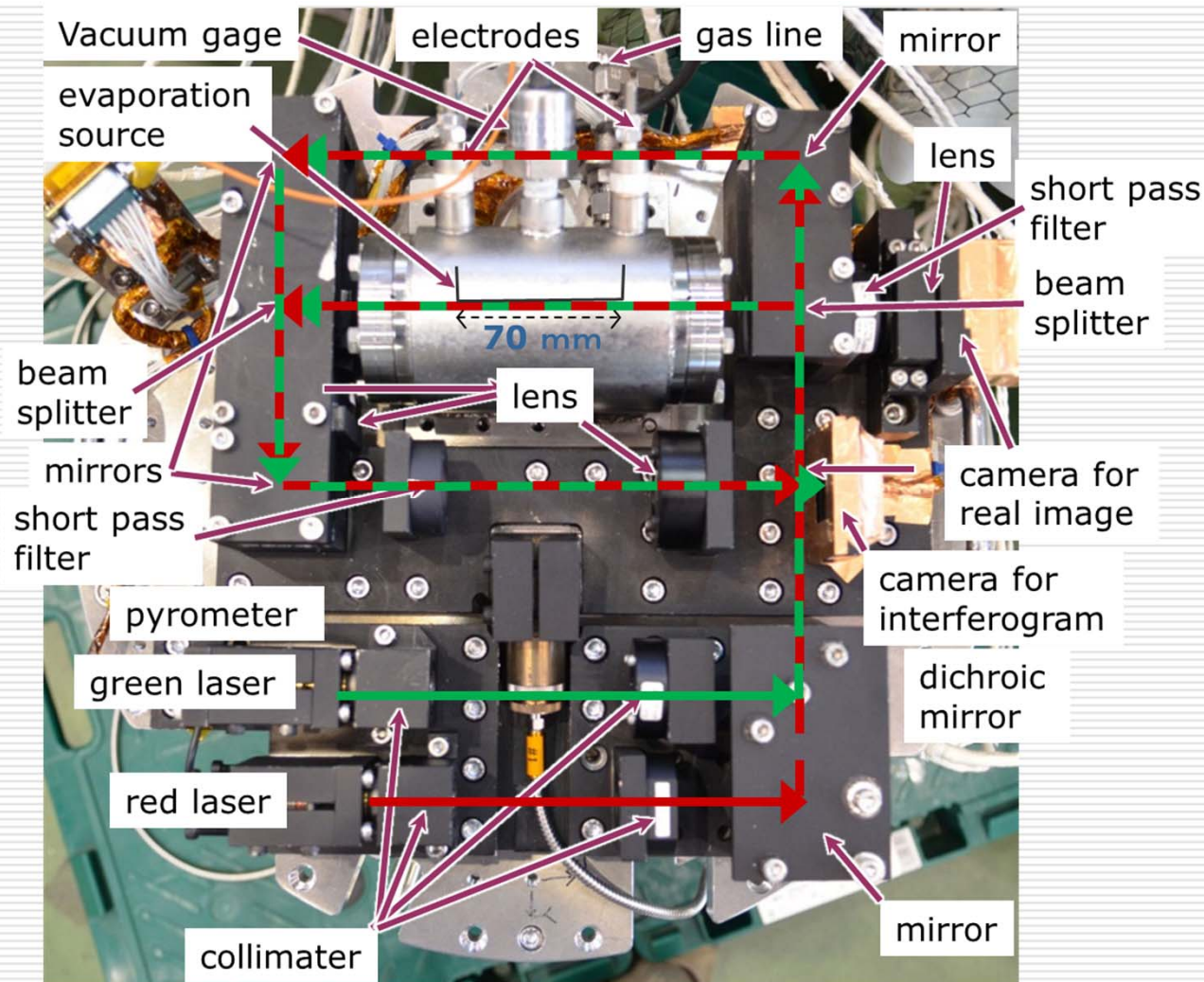
□ 赤外スペクトルその場測定



鉄フリーのマグネシウム珪酸塩で9.7 μm フィーチャーが再現できる。

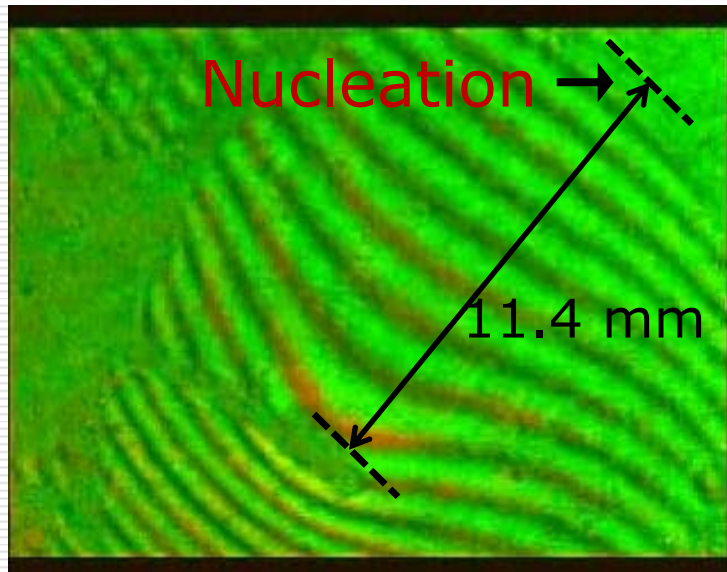
Ishizuka, Kimura, Sakon, *ApJ*, 2015.

観測ロケットを用いた鉄の付着確率の決定 (S-520-28)



目的:ダストの主原料ながら存在形態が不明な鉄の付着確率を求め、鉄ダストの核生成過程を理解する。

観測ロケットを用いた鉄の付着確率の決定 (S-520-28)



Nucleation T: **891 K**

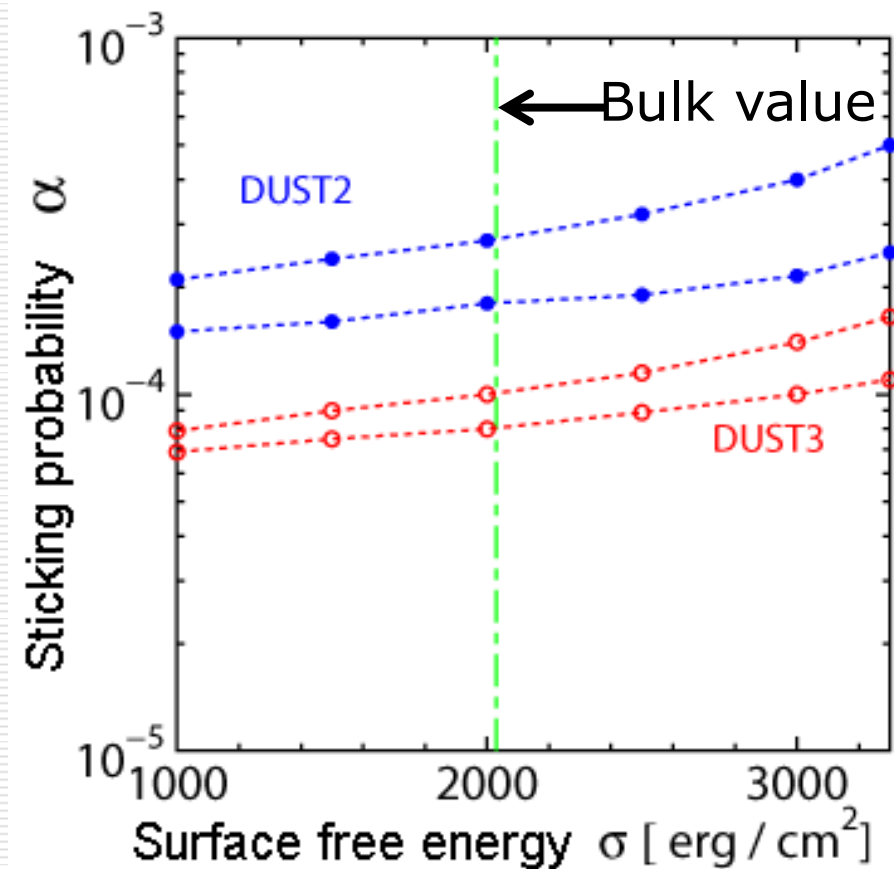
P: 2.2×10^3 Pa

P_e : 2.4×10^{-11} Pa

$P/P_e = 9 \times 10^{13}$

τ : 8.4×10^{-2}

ΔT : **1495 K!**



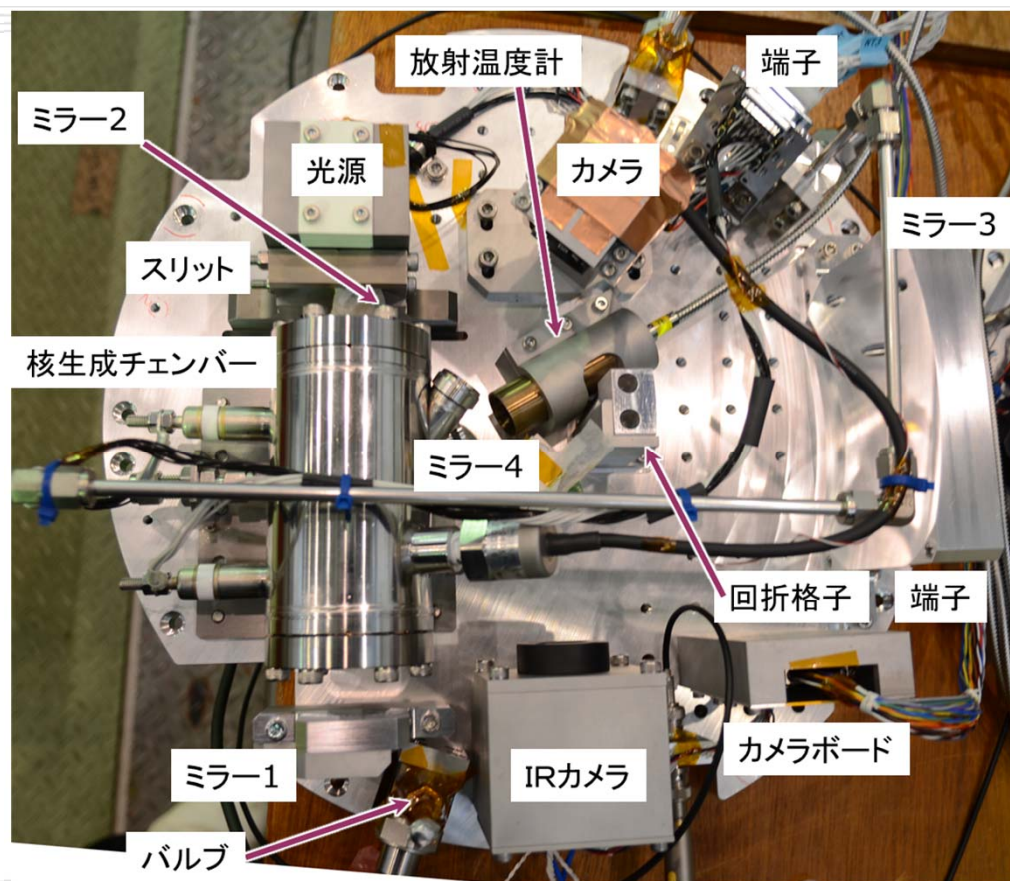
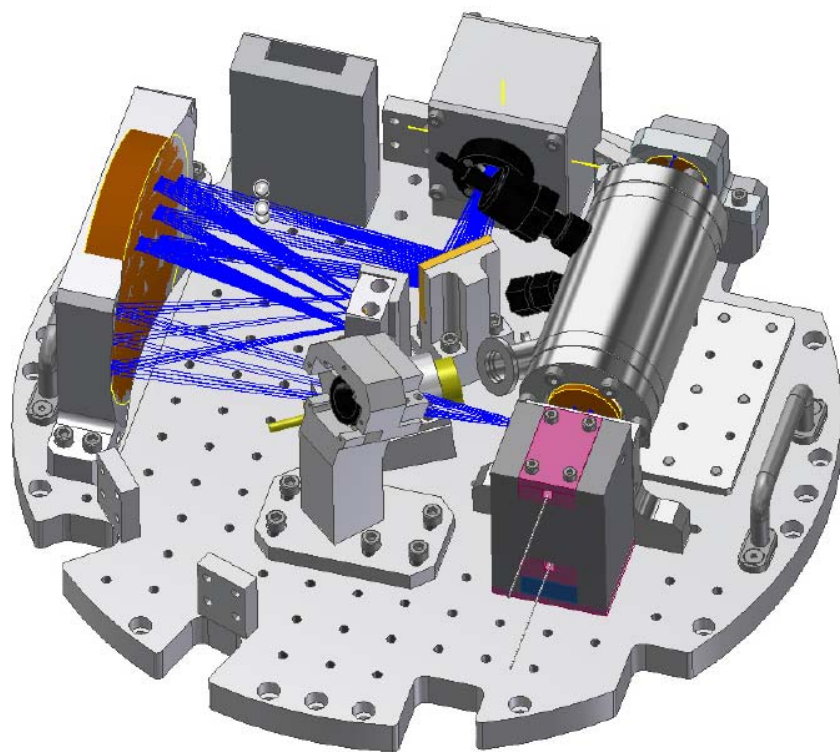
$$\alpha = (0.7-5) \times 10^{-4}$$



Bulk: ~ 1

(e.g. Tachibana et al. 2011)

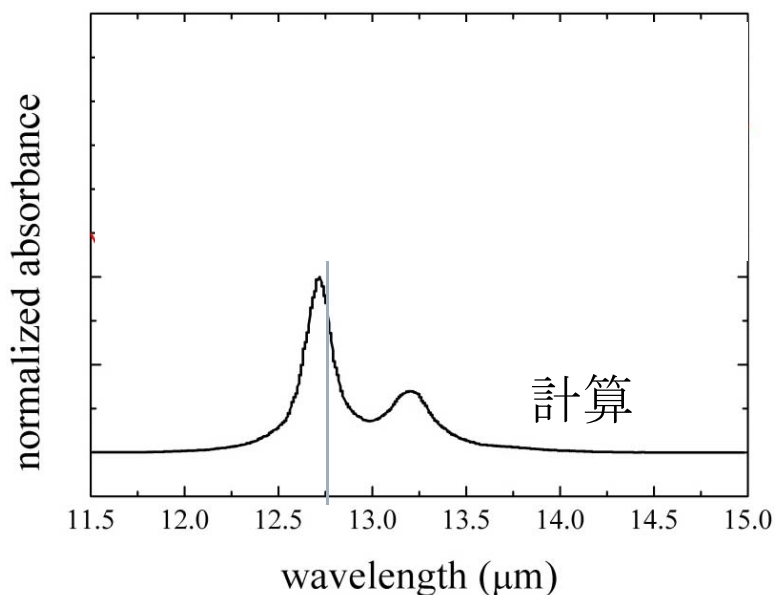
浮遊ダスト赤外線スペクトルその場測定 (S-520-30)



- 目的: 1. アルミナとシリカの付着確率求め、核生成効率を検証する。
2. アルミナが核生成して大きな粒子へと成長する過程において赤外線スペクトル測定を行い、酸素リッチ星で最初に現れる $13 \mu\text{m}$ 帯ピークがアルミナに由来するか否かを明らかにする。
3. シリカの蒸気圧データの検証

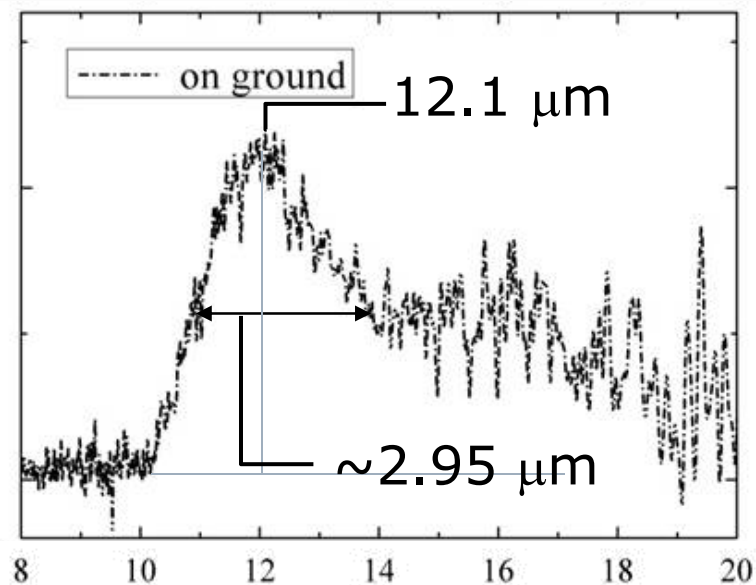
S-520-30号機 実験データ IRC アルミナ

計算から予想される球形のコランダムと今回実験で得られた赤外スペクトルの比較 [計算: Takigawa et al. 2015]

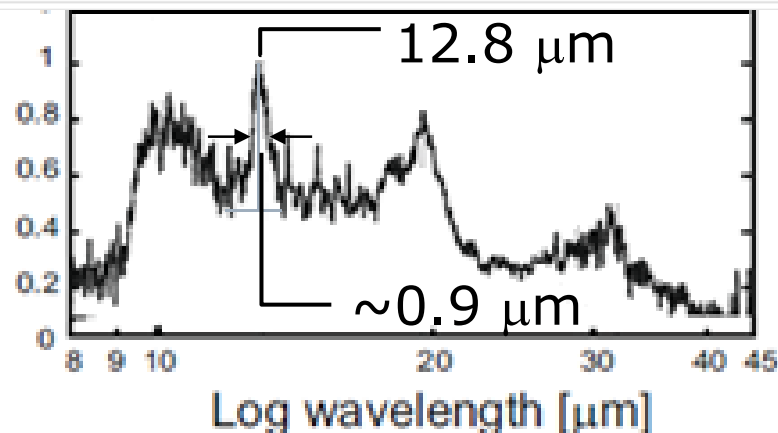


ピーク位置に加え、半値幅が良く再現されている。

地上での従来法



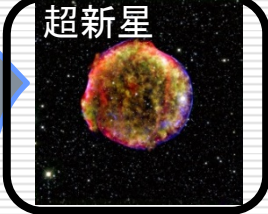
赤外線観測のスペクトル



宇宙ダストの核生成過程の解明にむけて

2012年12月実施
(S-520-28号機)

超新星



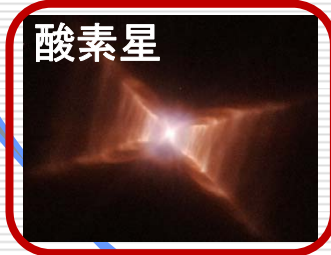
鉄粒子の核生成実験

目的: 単原子物質を用いて核生成の素過程を解明し、宇宙における鉄の存在形態を理解する。
成果: 鉄原子同士の核生成時の付着確率は、その後の成長時の値よりも4桁も小さいことを明らかにした。

これは、従来の考えでは相容れなかった、遅い核生成そして続くダストの急速成長が両立できることを示す結果であり、**全く新しいダスト生成モデルが提案できた。**

2015年9月実施
(S-520-30号機)

酸素星



酸化物系(シリカとアルミナ)の核生成実験

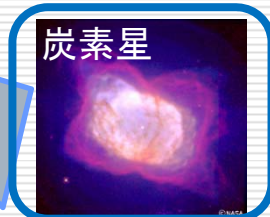
目的: **地球を含めた太陽系天体の材料の初期状態を知る。**

実験装置: 二波長干渉計による核生成環境の計測に加えて、最近開発した『**浮遊ダスト赤外スペクトルその場測定装置**』を小型化して搭載することで、天体周辺に浮いているダストのスペクトルを再現する。

将来計画

(次号機以降に実施予定)

炭素星



炭素質物質の生成過程の解明

目的: 星間物質の主要成分の一つである炭素質物質の生成に必須のデータを取得し、その進化史を解明する。
波及効果: はやぶさ2が回収する炭素を含んだ小惑星試料や、次世代赤外線天文衛星SPICAなどによる観測データの解釈の根拠となる実測データを取得できる。

意義: 星間物質進化のスタート地点である、晩期型巨星で生成するダストの核生成過程が解明される。**ダスト形成を伴う様々な天体現象の観測データと組み合わせ、恒星風の化学組成や密度、温度環境など、様々な物理・化学パラメータを厳密に決定できるようになり、当該分野に革新的な寄与を与えられる。** また、**宇宙ダストの核生成理論に対する実験検証**ができ、宇宙における物質進化の理解において、最初のマイルストーンとしての役割を担う。