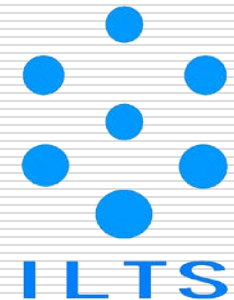


観測ロケットを用いた微小重力実験による 宇宙ダストの核生成

木村勇氣	北海道大学
石塚紳之介	北海道大学
田中今日子	北海道大学
野沢貴也	国立天文台
左近樹	東京大学
竹内伸介	ISAS
松原英雄	ISAS
稲富裕光	ISAS



WG: DUSTの核生成（昨年12月に採択）

WG: DUSTの核生成の大目標

- 138億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！

宇宙ダストの重要性

□ 惑星の材料

A. J. Weinberger, *Nature* 433,114, 2005.

□ 分子形成の基板（結合エネルギーを逃がせる）

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

□ 星間や星周環境でエネルギー収支を担っている

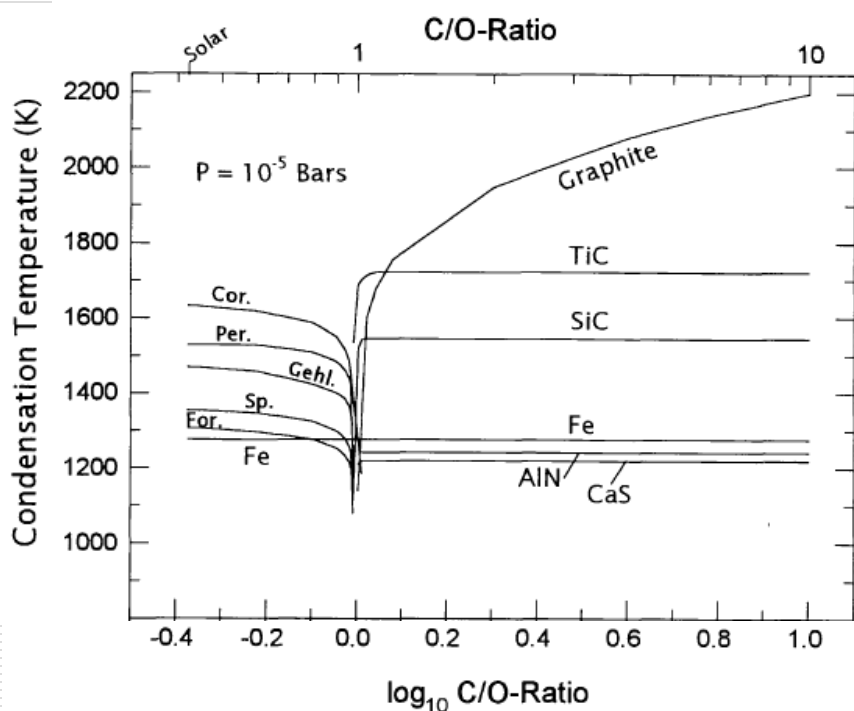
Schutte & Tielens, *Astrophys. J.* 343, 369, 1989.
Takeuchi *et al.*, *Astron. Astrophys.* 440, L17, 2005.

□ 星形成を促進する（2桁大きな星形成率）

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

ダストの組成やサイズ・質量を
明らかにする事が決定的に重要

ダストの組成やサイズ・質量の見積り



ガスの温度が下がると、蒸気圧の低い物質から順に核生成する。

Cor. Corundum, コランダム, Al_2O_3
Per. Periclase, ペリクレイス, MgO
Gehl. Gehlenite, ゲーレナイト, $\text{Ca}_2\text{Al}(\text{AlSi})\text{O}_7$
Sp. Spinel, スピネル, MgAl_2O_4
For. Forsterite, フォルステライト, Mg_2SiO_4
Fe Iron, 鉄, Fe

Lodders et al. Meteoritics 30 (1995) 661.

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

α : 付着確率 = 1 γ : バルクの表面自由エネルギー

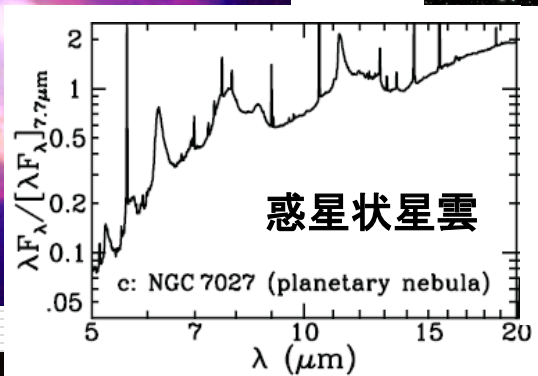
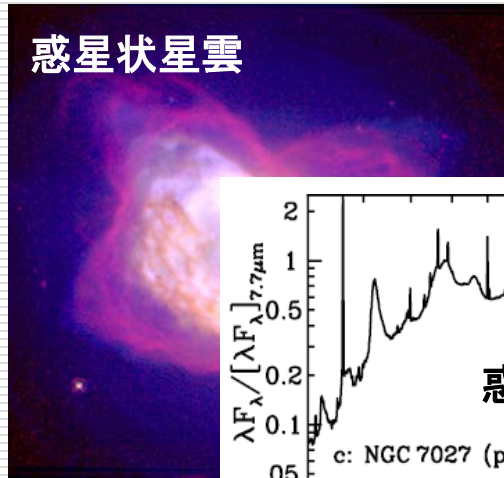
J : 核生成率 k : ボルツマン定数

v : 分子一個の体積 T : 温度

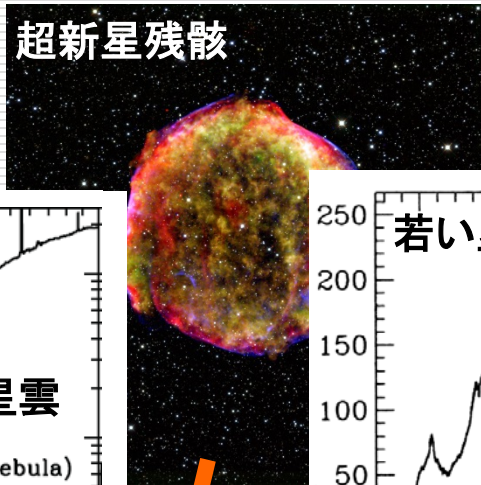
μ : ケミカルポテンシャル

ダストの組成やサイズ・質量の見積り

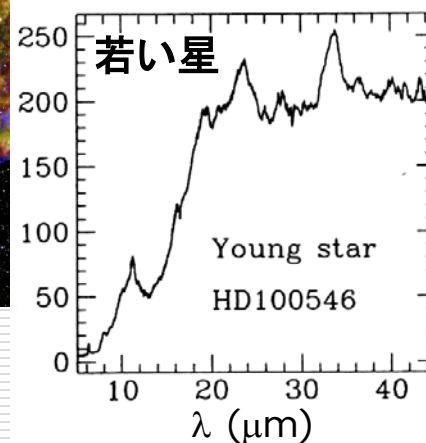
惑星状星雲



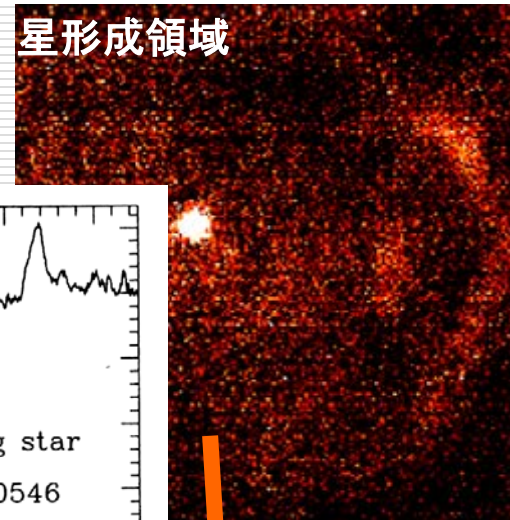
超新星残骸



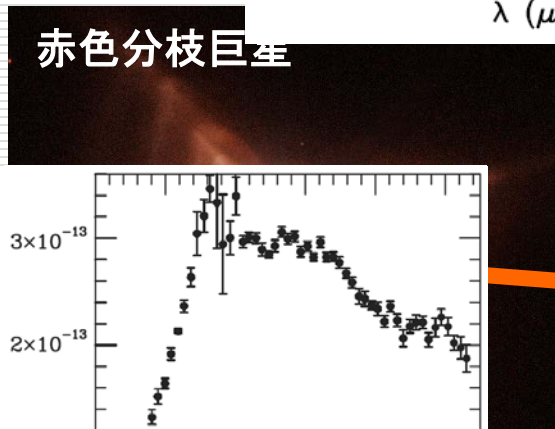
若い星



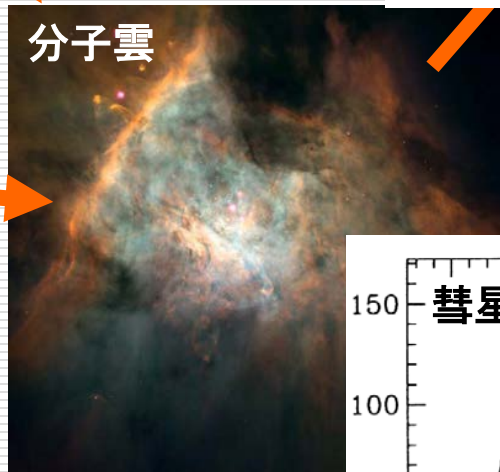
星形成領域



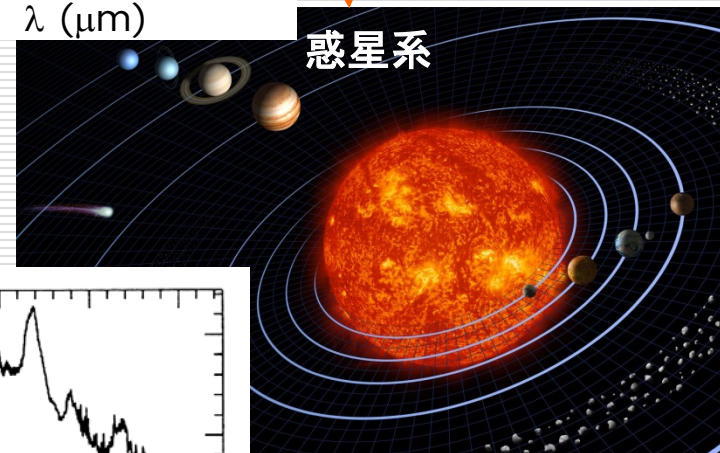
赤色分枝巨星



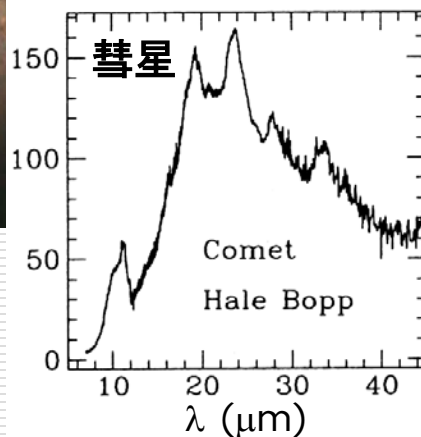
分子雲



惑星系



彗星



従来の赤外線スペクトル測定の問題点

従来:ダストの候補物質を
媒質(主にKBr)に埋め込
んで赤外線スペクトルを測
定



- ❑ KBrに埋め込むと、ダストの候補物質の赤外フィーチャーは、凝集や表面構造の変化、粒子表面の電荷が媒質の分極によって打ち消されることによるピークシフトなどの影響を強く受ける。
- ❑ これまでは、影響を受けたスペクトルを基準とした天体のスペクトル解析に甘んじていた。

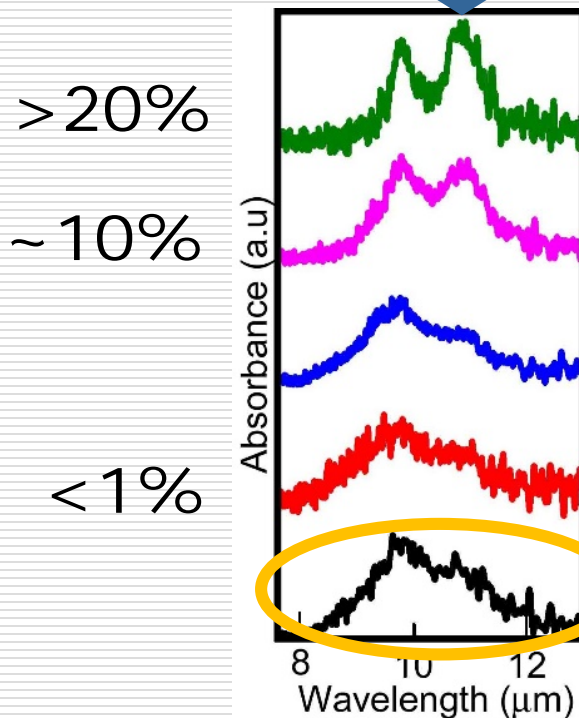
従来の赤外線スペクトル測定の問題点の解決

- 浮遊ダスト赤外線スペクトル
その場測定装置を開発

↓

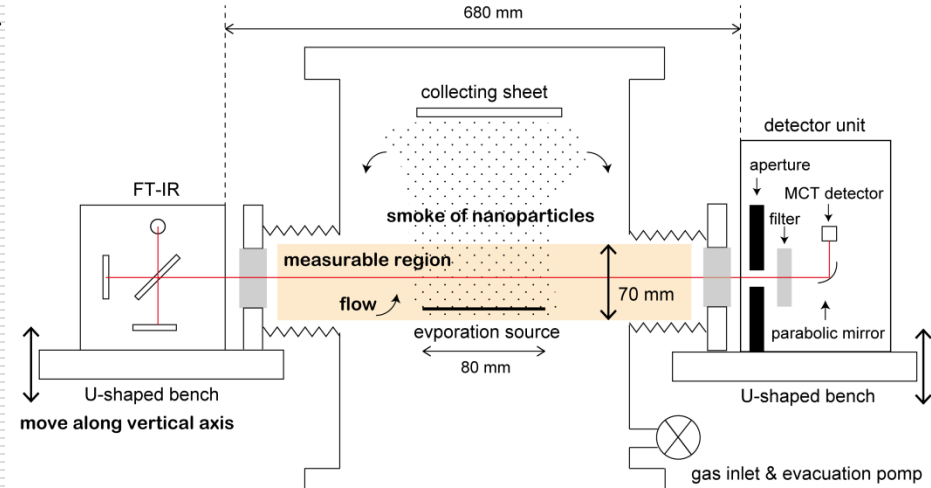
Mg_2SiO_4 に適用

結晶に起因するピーク



- 気相状態から結晶化するまで
時間を追ってスペクトルを取得
できる

様々な天体で観測されている
9.7 μm フィーチャーと比較



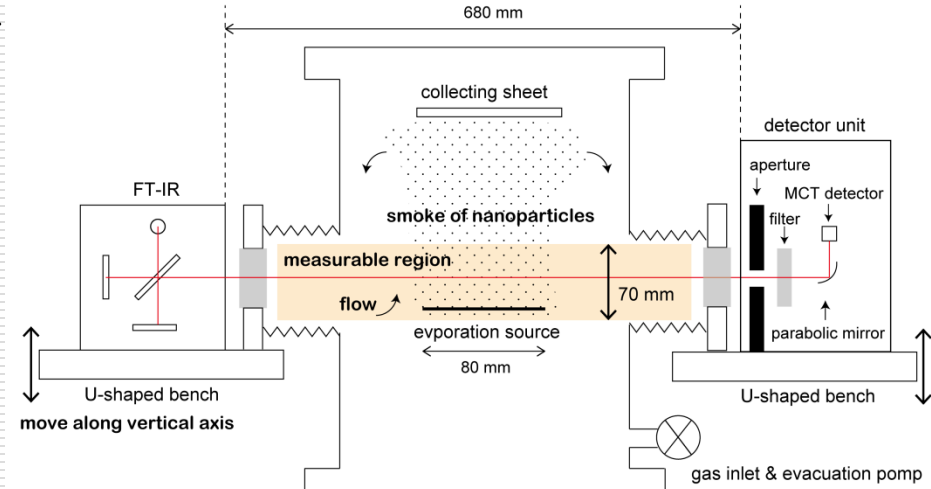
Ishizuka, Kimura, et al. *Chemistry of Materials*, 2016.

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

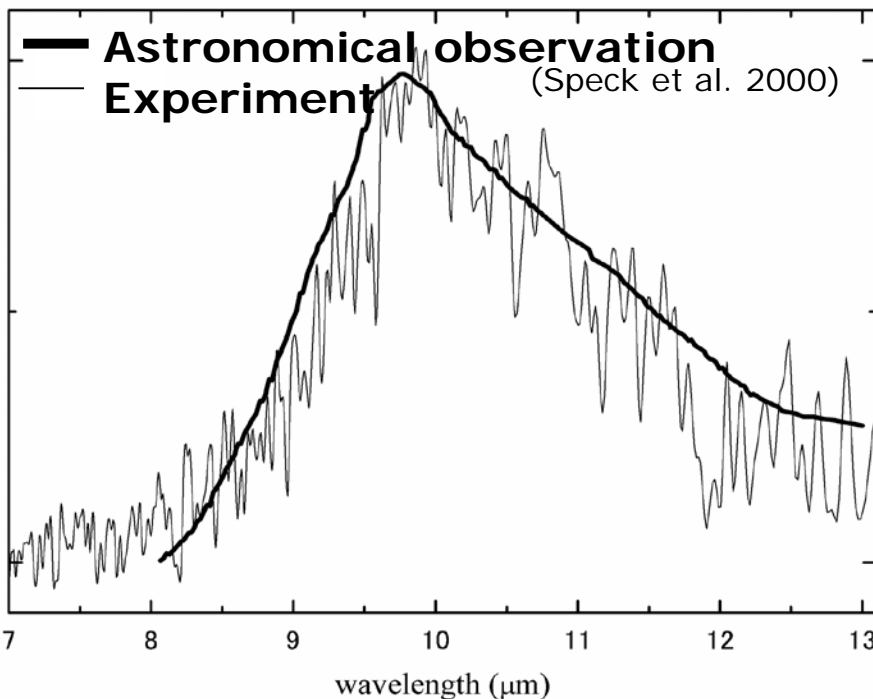
従来の赤外線スペクトル測定の問題点の解決

□ 浮遊ダスト赤外線スペクトル その場測定装置を開発

様々な天体で観測されている
9.7 μm フィーチャーと比較



Ishizuka, Kimura, et al. *Chemistry of Materials*, 2016.



起源物質: アストロミカルシリケート
⇒ 結晶の光学定数を用いた計算から
提案された架空の鉱物

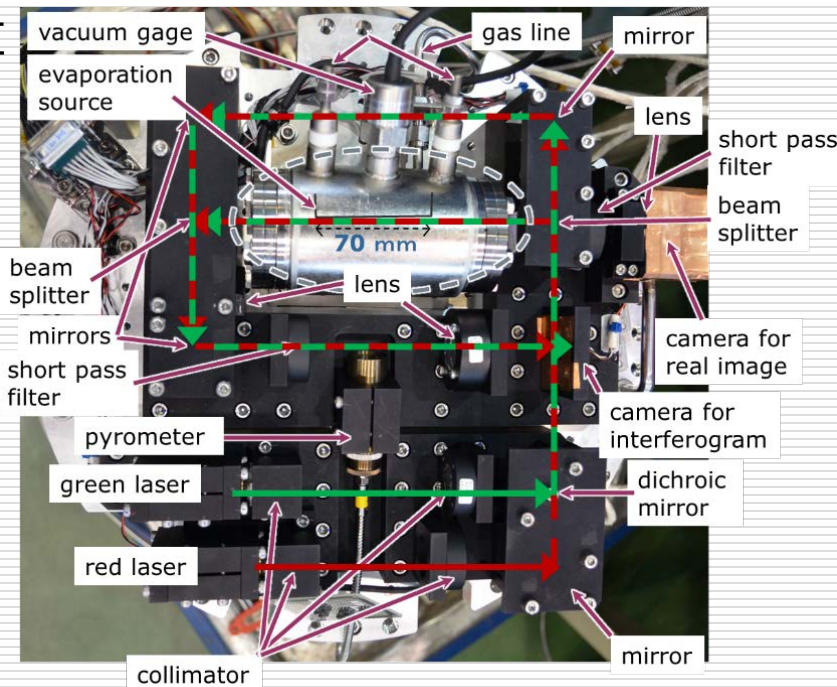
(Draine & Lee, 1984)

初めて実験的に直接再現
できた！

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

宇宙ダストの初期状態を知ることを目的に、独自の搭載機器を開発し 観測ロケットを用いた微小重力実験を実施

二波長マッハツェンダー型レーザー干渉装置

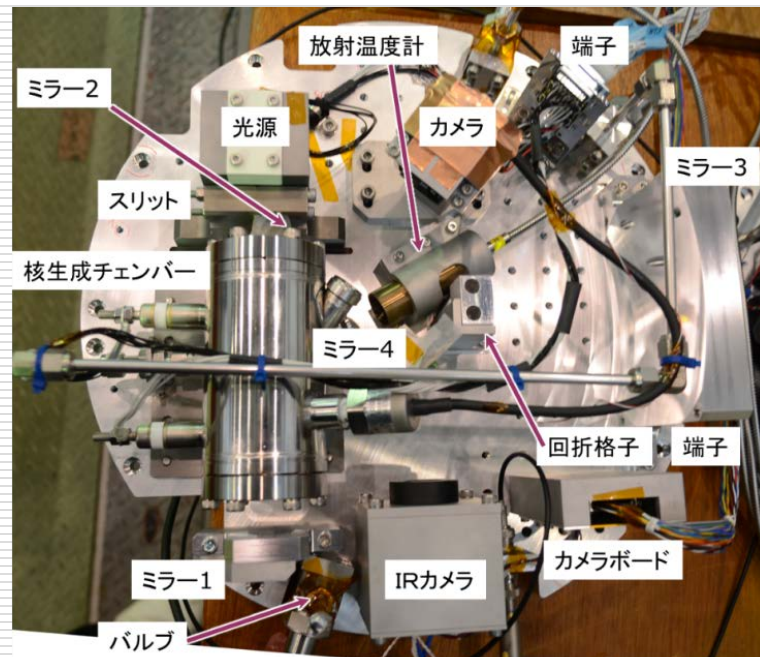


特徴

- 極微量な屈折率変化の検出
- 核生成時の温度と濃度を同時決定

⇒ ダストの物理定数を決定可能

浮遊ダスト赤外線スペクトルその場測定装置

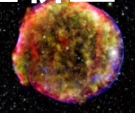


特徴

- 波長分散型で高時間分解能を有する
 - ダスト生成過程のスペクトルの取得
 - 天体のスペクトルと直接比較可能
- ⇒ 未同定赤外バンドの解明

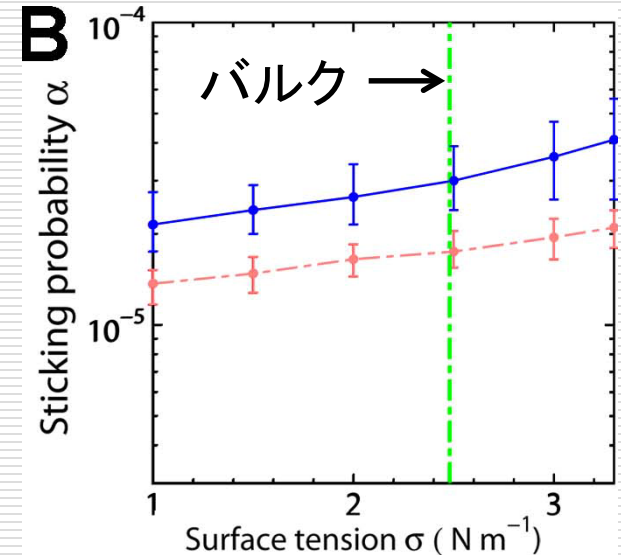
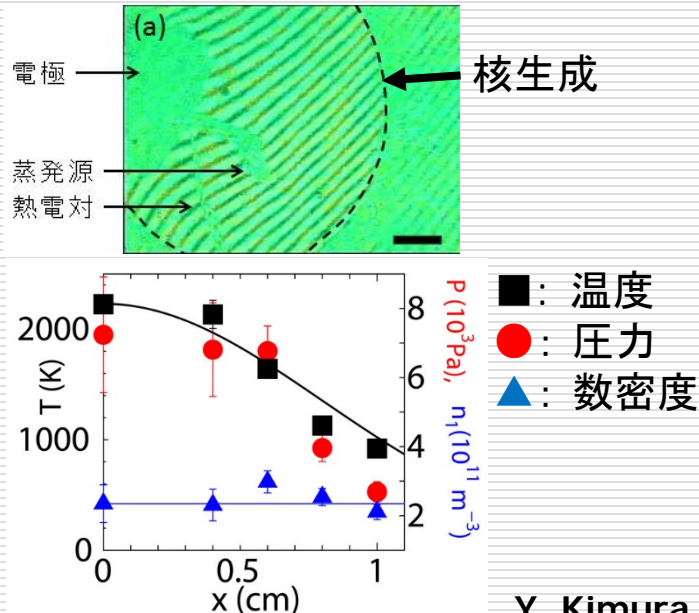
S-520-28号機:鉄粒子の核生成実験

超新星



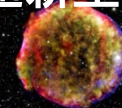
目的: 宇宙における鉄の存在形態を理解する

- 天体観測からは、星間空間では鉄の99%が固体の粒子として存在している。
- しかし、どのような鉱物であるのかは、確かめられていない。
- 天体観測では直接検出できない金属鉄だと信じられてきた。
- 鉄の主要な供給源である超新星爆発(特にIa型超新星)の後に、鉄粒子が生成する可能性を調べる再現実験を行った。



S-520-28号機:鉄粒子の核生成実験

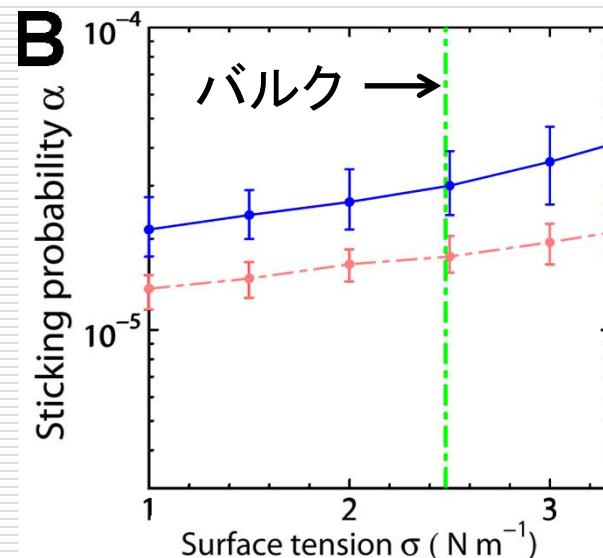
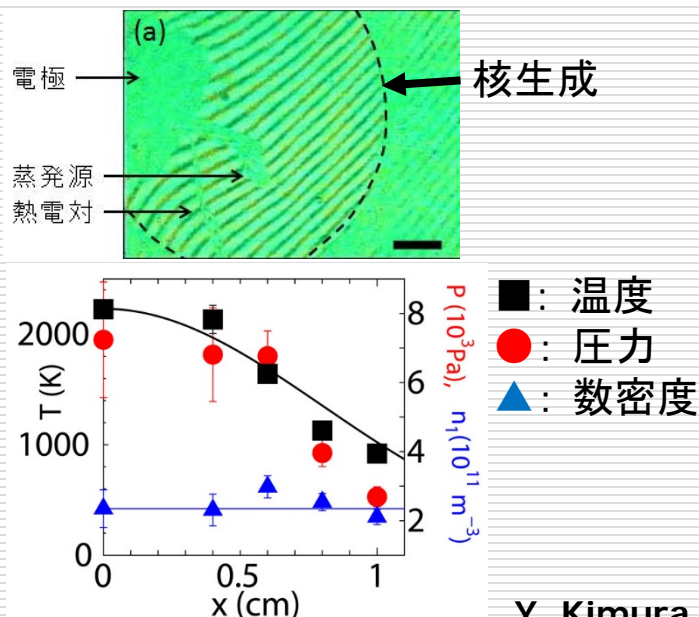
超新星



目的: 宇宙における鉄の存在形態を理解する

成果

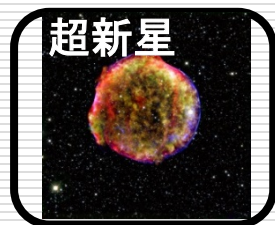
- ❑ 超新星爆発で鉄粒子が作られる過程の再現に成功
- ❑ 鉄ダストがガスから生成する時、鉄原子同士の付着確率は、0.002%程度であることを発見
- ❑ 宇宙で鉄は金属として存在しているとの通説を否定
- ❑ 鉄は他の微粒子中に不純物として取り込まれる、または化合物として存在することを示唆
- ❑ 宇宙における物質の進化モデルの書き換えを迫る成果



将来計画・・・試料回収がしたい！

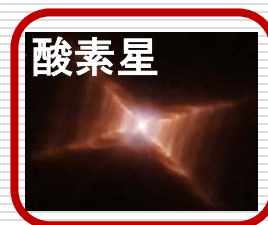
日米欧の国際協力で観測ロケット実験を行うために『DUSTの核生成』WGを立ち上げた。

2012年実施(S-520-28号機)



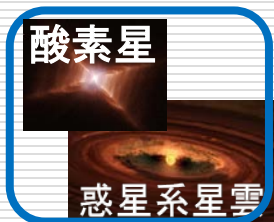
鉄：付着確率の
決定に成功

2015年実施 (S-520-30号機)



アルミナ：赤外スペクトルのその場測定に成功

将来計画1・・・J. A. Nuth (NASA/GCSF) のグループと協力



目的：シリケートダストの生成過程の理解

- (i) アストロノミカルシリケートの実態解明
- (ii) 結晶質シリケートと非晶質シリケートの凝縮条件の解明
- (iii) プレソーラー粒子の表面物質
- (iv) 星間空間における鉄の存在形態の解明

将来計画2・・・J. Blum (地球物理・地球外物理研究所, ドイツ)のグループと協力



目的：炭素質ダストの生成過程の解明

- (v) 難揮発性物質の炭素が、常にコアーマントル粒子のマントルを構成している理由
- (vi) 炭素星が示す21 μm フィーチャーの起源