

S-520-30 号機の実験結果と今後の計画

木村勇氣¹、石塚紳之介¹、中坪俊一¹、齋藤史明¹、山崎智也¹、左近樹²、竹内伸介³、稲富裕光³

¹北海道大学 低温科学研究所 〒060-0819 札幌市北区北 19 条西 8 丁目

²東京大学 天文学教室 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

³宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

Experimental results of sounding rocket S-520-30 and future plan

Yuki Kimura¹, Shinnosuke Ishizuka¹, Shunichi Nakatsubo¹, Fumiaki Saito¹, Tomoya Yamazaki¹,
Itsuki Sakon², Shinsuke Takeuchi³, Yuko Inatomi³

¹Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University, Kita 19, Nishi 8, Kita-ku, Sapporo
060-0819 Japan

²Department of Astronomy, Graduate School of Science, The University of Tokyo, Hongo 7-3-1,
Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033 Japan

³Institute of Space and Astronautical Science, Yoshinodai, Sagami-hara, Kanagawa 229-08510 Japan

Abstract: In order to elucidate the formation process of alumina and silicate around evolved stars, we performed microgravity experiment using sounding rocket S-520-30 on September 11th, 2015 from Uchinoura. Two double-wavelength Mach-Zehnder-type interferometers and an infrared spectrometer were boarded into the rocket. Two interferometers are for alumina and silicate, and a spectrometer is for alumina. We successfully obtained all of data according to the plan. In the future experiment, we are planning to do similar experiment using carbonaceous materials to understand the material evolution in more various environment of universe.

Key words; Cosmic dust, Sounding rocket, nucleation, nanoparticle

1. はじめに

宇宙での微粒子（宇宙ダスト）生成は、主に晩期型巨星や超新星が放出するガス中で起こる。ここで、最初に生成する微粒子は、残りのガスが固体になるための下地として働くことが予想される。これは、気相状態にある原子や分子が自ら集まって固体を形成することは非常に難しく、下地があると、その上に優先的に成長するためである。従って、最終的な微粒子のサイズや分布、組成などは、最初に生成する微粒子が決定すると言える。それ故に我々は、その最初の微粒子の素性を知ることが、宇宙における物質循環の理解において、根幹になると考えている。通常は地上の実験室で研究を進めており、核生成を理解する上で最も重要な二つの物理定数（表面自由エネルギーと付着確率）の決定に

成功している[1]。しかし、重力環境下では、宇宙の微小重力環境下で生成する微粒子の再現には限界がある。そこで、今回は S-520 観測ロケットを用いることで、酸化物ダストが均質核生成から作られる過程を“その場”で観察・計測する実験を立案した。これにより、地球を含めた太陽系天体の材料の初期状態を知ることができる。

“核生成”は原子や分子などの成長ユニットが集合して粒子を形成することでおこり、生成粒子の結晶構造や晶癖（形）、サイズや数密度などを決める。そこで、核生成理論を用いて、宇宙に存在している微粒子の特徴を予測する試みがなされている。しかし、核生成過程における素過程の理解は乏しく、メゾスコピック領域に特有の物性の変化も考慮されてこなかった。

そこで、我々は観測ロケットを用いて、核生成理論を元にした予測に最も重要であり、かつ、現在最も大きな不定性のある表面自由エネルギーと付着確率を、酸素リッチ星周で最初に核生成すると考えられている酸化アルミニウムと、最も豊富なシリケートの構成要素であるシリカに関して求める実験を行った。

また、ある酸素リッチ星では、特徴的な $13\ \mu\text{m}$ の放射が観測されており、シリケートに起因する放射よりも先に生成する固体物質の存在を示唆している。この起源物質は、最初に核生成し、他の元素の核生成の為の下地として働いている可能性が高い。しかし、地上実験では、その起源物質を決定できていない。そこで、候補物質として最も有力な酸化アルミニウムに関して、ガスから核生成する過程の赤外スペクトルを取得する実験を合わせて行った。

2. 実験準備

今回は、核生成理論による予測のために最も重要な物理定数である、核生成時の分子の付着確率と表面自由エネルギーを評価するために、二波長干渉計による核生成環境の計測を行った。また、これまでの研究で開発してきた『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した。

二波長マッハツェンダー型レーザー干渉装置は、赤 ($635\ \text{nm}$) と緑 ($532\ \text{nm}$) の二つのレーザーから成り、核生成環境の温度と濃度を同時に決定できる仕様になっている。装置の基本構成は、2012年に実施した S-520-28号機を用いた微小重力実験と同様である。今回は、図1に示すベースプレートとその上に配置する光学部品を保持して光軸を出すために必要なすべての部品を北海道大学低温科学研究所の技術部装置開発室で作製した。本実験では、 10^{-6} 以下の非常にわずかな屈折率変化を捉える必要がある。そのため、光学部品を適切な位置に精度よく配置する必要があり、残留応力による加工歪の発生を抑制するなどの工夫を施して作製した。

浮遊ダスト赤外スペクトルその場測定装置を搭載して、ガスから核生成を経てナノ粒子へと成長する過程の赤外スペクトルの直接測定を計画した。地上実験では、フーリエ変換赤外分光光度計を用いて実験を行っており、観測ロケット実験用には、その小型機を搭載すべく検討していた。しかし、観測ロケットに特有の厳しい振動試験に耐えることが難しく、今回の実験用に新たに回折格子を用いた分光計を設計した。

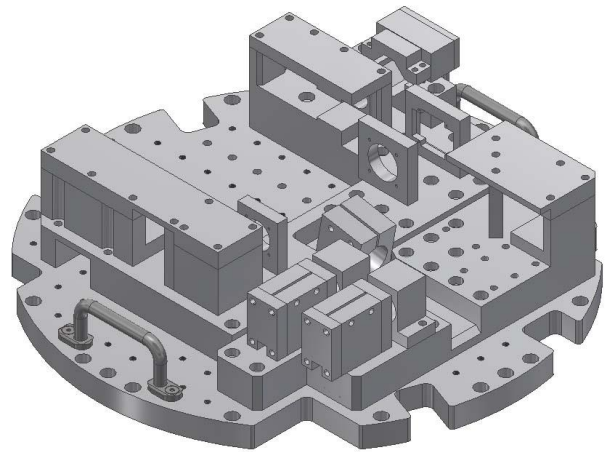


Fig. 1 Schematic illustration of the experimental system using double-wavelength Mach-Zehnder-type interferometers made in Technical Division, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University. All of components such as optics, vacuum chamber, cameras, lasers were placed on this system.

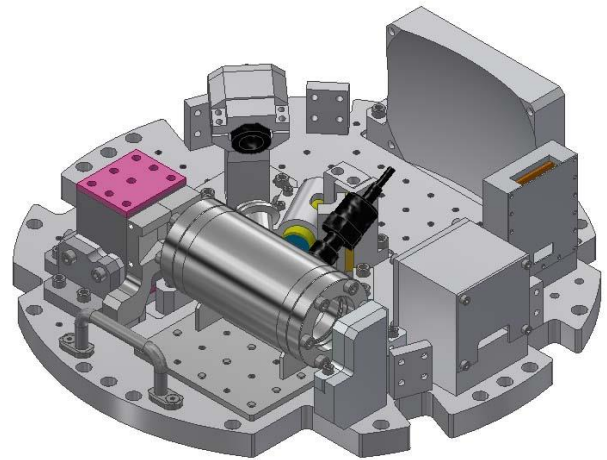


Fig. 2 Schematic illustration of the experimental system using infrared spectrometer made in Technical Division, Institute of Low Temperature Science, Hokkaido University.

この装置の特徴は、天文観測で得ている天体周辺での宇宙ダストの生成過程のスペクトルと直接比較できる点にある。従来は、このような直接の観測装置がなく、ダストの候補物質を媒質（臭化カリウムなど）に埋め込んで赤外線を照射し、試料固有の赤外吸収スペクトルを測定していたために、埋め込むことによる凝集や表面構造の変化などの影響を受けたスペクトルでの

解析に甘んじていた。図2に実験装置の外観を示す。今回は、 $13\ \mu\text{m}$ に特徴的なピークを持つ物質の起源がアルミナであるかの解明が目的であり、中間赤外領域の波長 $9\text{-}17\ \mu\text{m}$ の光を回折格子で分光して、赤外線カメラの素子で強度を測定した。光学系は、光が核生成領域を2回通るオフナー式を採用した。ミラーには膜厚 $150\ \text{nm}$ のAlコーティングを施し、反射率は $\sim 98\%$ 以上を確保した。

3. 微小重力実験による、宇宙ダストの再現実験

シリカの核生成過程を干渉計でその場観察した実験結果を示す。打ち上げから180秒後に蒸発源へ電圧を印加し、温度を上昇させる。それに伴って、バッファーとして導入しているアルゴンガスが温まるために圧力が上昇する。予定通り195秒で印加電圧は8Vまで上がり、蒸発源温度はそこからゆっくりとした上昇に変化した。その後、230秒で印加電圧はoffされ、温度、圧力とも急激に下降した。

得られた干渉画像と実像画像の1例を図3に示す。干渉縞の曲がりや予想通り小さかった。これは、蒸発源近傍での密度の低下が小さいためである。印加電圧が8Vまで上がる直前の193秒程度で蒸発源に用意していたシリカが蒸発し、均質核生成を経て生成した微粒子は、矢印で示すように蒸発源から同心円状に煙のように見られた。核生成の瞬間から同心円状に画面の外側に広がっていく煙の様子まで捉えられた。地上実験では、蒸発源が作る熱対流によって冷たいアルゴンガスが下方から供給される。結果、蒸発ガスは急冷されて短時間に核生成する。一方、微小重力実験では、同心円状にゆっくり拡散した後に均質核生成することが確認できた。

酸化アルミニウムの実験に関しても予定通りのデータが取得でき、これまでに理論的に予言されてきた球形のコランダム(α アルミナ)粒子が持つ $13\ \mu\text{m}$ 帯のピークを再現できた。これまでの地上実験では、再現できていなかった晩期型巨星のスペクトルを初めて再現できた成果といえる。地上実験では、蒸発源が作る熱対流によって生成粒子はすぐに上方へと運ばれてしまうが、微小重力実験では、蒸発源近傍に比較的長時間留まることになる。そのため、生成粒子の総数が少なくとも赤外スペクトルの吸収を検出することが可能になる。その結果、今回のデータ取得の成功につながったと言える。

4. 今後の計画

流体力学において、レイノルズ数が同じ系は

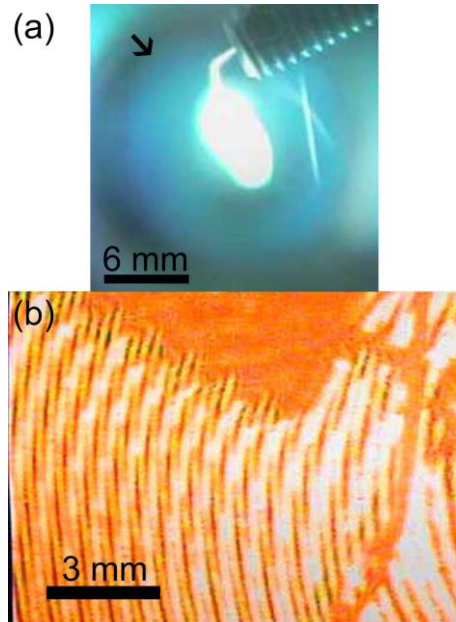


Fig. 3 Example snapshots of silica experiment using interferometer at 194 s after launch. (a) real image, (b) interference fringes.

物理的に同様に扱えるように、宇宙ダストの生成過程は冷却に伴う過飽和度の増加の時間スケールと成長ユニットの衝突頻度が相似形であれば、同様に扱うことが知られている[2]。これまでの実験で、地上で再現可能なのは、新星周囲でのダスト形成であり、現在の宇宙ダストの主な供給源であると考えられている超新星や晩期型巨星周囲での核生成過程と相似形の実験はできないことが分かっている。我々は、対流が抑制されるために、超新星や晩期型巨星周囲での核生成過程と相似形の実験ができることを実証した[3, 4]。今後は、星間物質の主要成分の一つであり、鉄やシリコンを主成分とした微粒子よりも大きな存在度が予想される、炭素質物質の核生成実験を行い、その際の付着確率や表面自由エネルギーを決定することで、宇宙における物質進化過程の総合的な理解を目指す。

謝辞

本実験の一部は、科研費基盤研究S「核生成」(15H05731)や低温研萌芽研究の助成により行われた。

参考文献

- 1) Y. Kimura, K. K. Tanaka, H. Miura, K. Tsukamoto, *Crystal Growth & Design*, 12, 3278 (2012).

- 2) T. Yamamoto, H. Hasegawa, *Progress of Theoretical Physics*, 58, 816 (1977).
- 3) Y. Kimura, Y. Inatomi, H. Miura, K. K. Tanaka, I. Sakon, T. Nozawa, T. Nakamura, K. Tsukamoto., *Space Utiliz Res*, 28, 23 (2012).
- 4) Y. Kimura, K. K. Tanaka, I. Sakon, T. Nozawa, H. Miura, K. Tsukamoto, S. Takeuchi, Y. Inatomi, *Int. J. Microgravity Sci. Appl.* 31, 130, (2014).