

## 実験、観測、理論から総合的に探る宇宙塵の描像

Comprehensive understanding of cosmic dust based on experimental, observational, and theoretical viewpoints.

主任研究員：茅原 弘毅

分担研究員：井上 昭雄

協力研究員：小池 千代枝（立命館大学理工学部）

### 研究課題の背景

宇宙塵（Cosmic Dust）とは一般に「宇宙に天然に存在する固体粒子」をさす。これらは 1 ミクロンメートル程度以下の微粒子として、主に生まれたばかりの恒星（原始星）や死にかけの恒星（晩期星）の周囲に存在していると考えられている。固体である宇宙塵は、光を吸収し熱を放出するという著しい特性を持つため、天体物理現象におけるエネルギー収支を司るという重要な役割を果たしている。また、宇宙塵がどのような化学組成や物理的構造をもち、それらが光学的性質とどのような関係をもつのかを知ることは、天文学や惑星科学の様々な局面において非常に興味深い。本研究課題では、本学に在籍して宇宙塵研究を行っている複数名の天文学研究者により、それぞれの研究手法に基づいて様々な天体における宇宙塵の本質に迫り、多角的な見地からそれらの理解を深めようとするものである。

### 1：研究成果の概要

観測および理論分野：アルマ望遠鏡による最遠方銀河の宇宙塵の観測（井上）

ALMA 望遠鏡を用いた観測による「宇宙最古の酸素」の存在を遠方銀河で確認したとの報告が 2016 年 6 月 24 日発行の *Science* 誌に掲載され、メディアによる報道もなされた。報道では特に宇宙最古の酸素の発見について強調されていたが、論文中では初期宇宙の銀河における宇宙塵の存在量やその形成メカニズムについて、我々の銀河系との比較をもとに議論がなされた。

実験分野：遊星ボールミルを用いた非晶質物質の作成と分光測定（茅原、小池）

宇宙塵は結晶として存在する場合と、非晶質（アモルファス）として存在する場合がある。一般には星周で非晶質として形成された宇宙塵が、何らかの加熱機構を経て結晶化すると考えられている。したがって、非晶質の宇宙塵模擬物質を作成し、その分光特性を知ることは、宇宙塵の形成と進化を探るうえで重要な研究課題となり得る。そこで我々は、遊星ボールミルを用いて宇宙塵候補鉱物である非晶質シリケートの合成に取り

組み、この新しい方法によって初めて非晶質シリケートの合成に成功した。ただし、現在のところ、実験条件によって生成物の構造や分光特性に微妙な違いがあるため、今後の議論が期待される。

## 2 : 国際研究会の開催援助

2016年8月15日～19日の5日間にわたって、宇宙塵に関する国際研究会 (The 9th meeting on Cosmic Dust) を東北大学青葉山キャンパスにおいて開催した。欧米やアジアの国々から51名の参加があり、活発な討論が繰り広げられた。本研究組織の構成員(茅原、井上)は現地組織委員として研究会の開催業務に携わり、本研究組織の予算から特に国内からの講演者に対して旅費及び滞在費の補助を行った。発表論文は学術誌の特集号に、すべて査読を経て出版される予定である。

## 3 : 国際研究会での成果発表

- 1, "Structure and chemistry of dust from laboratory perspective",  
Hiroki Chihara, The 9th meeting on Cosmic Dust, Sendai, August 2016, (招待講演)
- 2, "Dust in the Epoch of Cosmic Reionization: a dust-poor galaxy at  $z=7.2$ ",  
Akio K. Inoue, The 9th meeting on Cosmic Dust, Sendai, August 2016

# 遊星ボールミルを用いた非晶質物質の作成と分光測定

茅原 弘毅（教養部）、小池 千代枝（立命館大学）

宇宙塵(ダスト)は、晩期星の周りで星から放出された重元素を含むガスが冷却する過程で形成される。高温のガスが極低温の宇宙空間に放出されると、非常に大きな冷却速度で急激に冷やされるため、エネルギー的に安定な結晶構造がとれず、準安定な非晶質（アモルファス）と呼ばれる構造になると考えられる。実験室レベルにおける非晶質の作成にはいくつかの方法がある。最もよく用いられるのは、結晶を千数百度以上に加熱し溶融したメルトを急冷することでアモルファスを得る方法である。また、アルコキシドという化学物質を用いた、常温での液体試薬反応（ゾル-ゲル法）も工業的にはよく用いられている。さらに高エネルギーの粒子線やレーザー光を結晶に照射することでもアモルファス化が促進されることが知られている。しかし、いずれにしても、原子配置の秩序性が全くないアモルファス物質を大量に合成することは比較的困難である。

そこで我々は、遊星ボールミルと呼ばれる粉碎装置を用いることで非晶質物質を合成する実験を行った。遊星ボールミルは物質の粉碎のみならず、原子レベルでの物質の構造を破壊することが可能である。すなわち遊星ボールミルは、複数の粉体試薬の構造を原子レベルでいったん破壊し、衝撃の運動エネルギーで化学反応を促進させ、新たな化合物を合成する装置として使用することが可能である。昨年度までは、単純な2成分系である二価の酸化鉄（FeO）の合成を試み、この物質の赤外線分光やX線回折測定などから、構造と光学特性の関係を調べることに成功した。今年度は、もう少し複雑な3成分系を用いて、珪酸塩（シリケート）の非晶質物質の合成を試みている。これらは、鉄、マグネシウム、珪素を含むオリビン

( $Mg_{2x}Fe_{2(1-x)}SiO_4$ ) と、パイロキシン ( $Mg_xFe_{1-x}SiO_3$ ) と呼ばれる物質であり、有力な宇宙塵候補物質である。非晶質シリケートの赤外線吸収スペクトルには、 $10\mu m$  と  $20\mu m$  付近に幅の広い特徴的な吸収があることが知られており、生成物にはこれらが明瞭に見えている(図1)。ただし、現在のところ、実験条件によって生成物の構造や分光特性に微妙な違いが示されており、これらの違いの原因を特定することが今後の課題である。

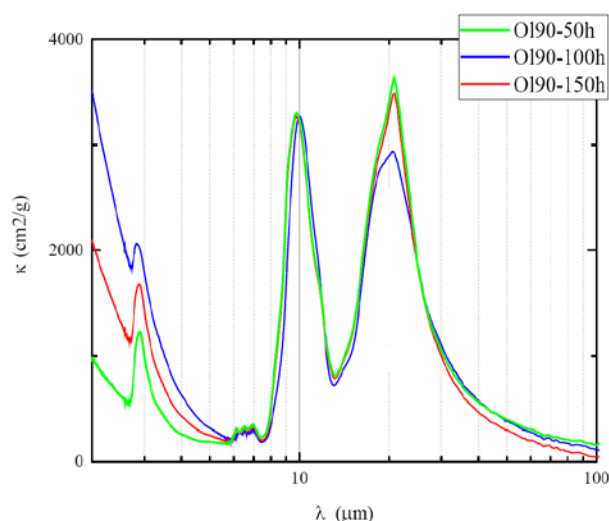


図1:合成した  $Mg_{1.8}Fe_{0.2}SiO_4$  の IR 吸収スペクトル

# アルマ望遠鏡による最遠方銀河の宇宙塵の観測

井上 昭雄（教養部）

天文学ではリチウムより重い元素を「重元素」と総称する。宇宙塵は、重元素のうち特に、炭素や酸素、ケイ素、マグネシウム、鉄などが凝結した固体微粒子である。重元素は、宇宙に元々存在しているものではなく、恒星の内部で起こる核融合反応で生成され、恒星の死とともに星間空間に供給される。銀河系の星間空間では、重元素の質量の約半分が固体微粒子、宇宙塵となり、残り半分は気体として存在している。さて、初期宇宙の銀河の重元素や宇宙塵はどのようになっているのか？南米チリに建設されたアルマ望遠鏡の稼働により、この疑問にアプローチできるようになってきている。そこで本研究では、宇宙年齢 7 億年の時代に見つかった一つの銀河をアルマ望遠鏡で観測した。結果、電離した酸素の輝線を検出した一方、宇宙塵の放射は検出されなかった。全体的なスペクトルの分析から、酸素を始めとする重元素の量は少ないものの、太陽組成の 10 分の 1 程度はすでに存在していることが分かった。仮に銀河系と同様に重元素の半分が宇宙塵になっているとすれば、宇宙塵からの放射がアルマ望遠鏡で検出できたはずである。しかしこれが検出されなかったことから、重元素のうち固体の宇宙塵になっている割合は 20% 未満であると結論した。したがって、初期宇宙の銀河は、銀河系より小さい宇宙塵/重元素質量比を持つことが分かった。この成果は 2016 年 6 月 24 日発行の Science 誌に掲載された。さらに、アルマ望遠鏡で得られた宇宙塵の放射強度の上限値から、この銀河に含まれる宇宙塵質量の上限値を見積もったところ、最大でも太陽質量の 600 万倍であることが分かった。これは、初期宇宙でこれまでに観測された宇宙塵質量の中でも小さい。一方で、今回観測した銀河に比べるともう少し宇宙年齢が経った頃の時に見つかった銀河の中には、すでに太陽質量の 10 億倍もの宇宙塵を持っているものも報告されている。したがって、初期宇宙の銀河の宇宙塵量には相当な多様性があると言える。銀河の宇宙塵量進化理論モデルと比較検討したところ、今回私たちが観測した銀河は非常に年齢が若いがゆえに宇宙塵量の蓄積がまだ少ないと考えられる。一方、すでに太陽質量の 10 億倍もの大量の宇宙塵を持つ銀河の存在は、現状の理論モデルでは説明が難しく、今後、モデルの再検討が必要である。これらの成果については、2016 年 8 月 15-19 日に東北大学で開催された Cosmic Dust IX において口頭発表を行なった。