

## 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）

村川 幸史（全学教育機構非常勤講師）

### 研究課題の背景

リチウムよりも重い元素（天文学ではこれらを重元素と呼ぶ）は、恒星の進化とともに、恒星内部の熱核融合反応によって合成され、恒星の死に伴って宇宙空間へ放出される。これらは希薄な星間空間をしばらく漂ったのち再び集合して分子雲と呼ばれる雲を形成し、その中で新たな恒星や惑星が誕生する。重元素には気体と固体のものがあるが、この間の様々な物理的、化学的過程において、固体元素は宇宙塵(Cosmic Dust)と呼ばれる微小な粒子を形成する。宇宙塵は地球や月など固体天体の原材料であるばかりか、天体物理現象のエネルギー収支を支配する重要な存在である。宇宙塵がどのような化学組成や物理的構造を持ち、どのように誕生し進化するのか、また、星から発せられる光（電磁波）とどのような相互作用をするのかを知ることは、天文学や惑星科学において解明すべき重要な基礎的問題の一つである。本研究課題は、実験、理論、観測の各手法に基づいた考察による多角的な見地から、宇宙塵の本質に迫り、その理解を深めようとするものである。

### 研究成果の概要

#### 実験分野

##### 1：LIME シリケート固溶体； $(\text{Mg}_x\text{Mn}_{1-x})_2\text{SiO}_4$ の赤外分光測定

宇宙塵の化学組成は、マグネシウムと鉄、およびケイ素からなることが宇宙元素存在度から予想される。しかし、鉄に乏しくマンガンに富んだ物質(LIME:Low Iron Manganese Enriched)が、探査機によるリターンサンプル中にみつかることがある。これらの成因と光学特性を調べるため、実験室でこの物質を合成し、赤外線領域でのスペクトル測定を行い、鉄マグネシウムケイ酸塩との比較から観測による検出可能性の議論を行った。

##### 2：酸化鉄(II)の合成と赤外分光測定

二価の酸化鉄(ウスタイト： $\text{Fe}_{1-x}\text{O}$ )は宇宙塵候補物質のひとつと考えられている。この物質は構造中に格子欠陥を持ち、格子欠陥の量により赤外線吸収スペクトルの形が異なることが知られていたが、系統的な研究はなされていなかった。この物質を遊星ボールミルを用いて室内で合成し、格子欠陥の量を X 線回折法によって定量化した（京大理学研究科との共同研究）。その結果、赤外線吸収帯のピーク位置の変化と結晶構造（～格子欠陥の量）との関係が

明らかとなった (Koike, Matsuno and Chihara, 2017, ApJ 845, 115K)。

### 3 : 遊星ボールミルを用いた非晶質物質の合成実験

恒星周囲に放出されたガスは、急激な冷却のため、非晶質（アモルファス）とよばれる構造をとりやすい。遊星ボールミルを用いることで、2成分系である酸化鉄(II)の非晶質合成に成功したことから、出発物質を3成分系に発展させ、 $\text{Mg}_{0.6}\text{Fe}_{0.4}\text{SiO}_3$ という宇宙塵の標準的な化学組成と考えられる鉄マグネシウムシリケート（輝石）の非晶質を合成する実験を行った。実験条件によって赤外分光特性に微妙な違いが生じており、この違いの原因を特定することが今後の課題である。今年度から赤外線分光のほか、本学構内にて X 線回折計が使用できるようになったため、X 線回折分析と赤外線スペクトルとの比較が容易に行えるようになり、非晶質の程度を定量化できる段階まで研究が進んだ。

### 4 : 斜長石固溶体; $(\text{Na}\cdot\text{K})_{1-x}\text{Ca}_x(\text{Al}_{1+x}\text{Si}_{1-x})\text{Si}_2\text{O}_8$ の赤外線分光測定

月の石として知られる斜長石は、ナトリウム、カリウム、カルシウム、アルミニウムを含む複雑な化学組成をもつシリケート鉱物であり、基本構造である  $\text{SiO}_4$ 四面体は、そのすべての頂点にある酸素を使って互いに結合している。広い化学組成範囲の固溶体を用いて赤外線分光測定を常温および極低温において行い、スペクトル変化の挙動に関する、化学組成と温度による依存性を明らかにした。また、観測との比較を行い、宇宙における斜長石の固体微粒子の存在を議論した (Chihara & Koike, PSS, in press)。

## 観測, 理論分野

### 5 : 原始惑星系円盤中の fluffy aggregate 粒子の観測予測

原始惑星系円盤中での固体粒子の衝突による合体成長がどのように起こるのかは、惑星形成論において重要な課題である。成長が進み、ミクロンメートルサイズの粒子は微惑星に進化すると考えられる一方で、円盤動径方向への微粒子の移動や破壊により、塵粒子の成長が妨げられることも指摘されている。しかし、塵粒子が極めて緩く束縛されているような状態 (fluffy aggregate) であれば、塵粒子の成長は妨げられることはないとの指摘もあり、fluffy aggregate に対する輻射輸送計算から、観測されるべき原始惑星系円盤の観測予測を行った。

### 6 : 銀河の宇宙塵と重元素の質量比に関する研究

我々の銀河系以外の銀河での、宇宙塵の材料物質に違いがあるのかどうかを知るため、様々な年齢の銀河における宇宙塵/重元素質量比のデータを文献から収集し、各銀河の重元素量との比較を行ったところ、銀河の種類によって宇宙塵量に違いがあることがわかった。これは星形成活動のタイムスケールの相違によるものと解釈できることがわかった。

### 7 : ALMA 望遠鏡による最遠方銀河の宇宙塵の観測

ALMA 電波望遠鏡による観測から、宇宙最古の酸素の存在を遠方銀河で発見した。これは宇宙初期における重元素の起源や、宇宙再電離の仕組みを解くカギとなる。さらに、宇宙初期

に形成された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して議論した (Inoue et al. 2016, Science, 352, 1559I)。

### 国際研究会の開催支援

宇宙塵に関する国際研究会 (Meeting on Cosmic Dust) を毎年日本で開催している。欧米やアジア各国から例年 50~60 名の参加があり、太陽系内の惑星間塵や微隕石、恒星周囲の星周塵、星間空間の星間塵、銀河の内外に付随する宇宙塵など、様々な階層の天体に付随する宇宙塵について活発な議論と討論が行われた。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、本研究組織の一部予算を用い講演者に対する旅費及び滞在費等の支援を行った。また、主な発表論文は査読を経て学術専門誌 (Planetary and Space Science) の特集号にて公表、出版される。

\* The 7th meeting on Cosmic Dust (2014/8/4-8 : 大阪産業大学梅田キャンパス)

\* The 8th meeting on Cosmic Dust (2015/8/17-21:千葉工業大学)

\* The 9th meeting on Cosmic Dust (2016/8/15-19 : 東北大学)

### 国際研究会での発表

- 1, "Infrared spectra of LIME olivine", Hiroki Chihara, Kento Ando, Chiyoe Koike, and Akira Tsuchiyama, The 7th meeting on Cosmic Dust, Osaka, 2014.
- 2, "Dust-to-metal ratio in galaxies", Akio K. Inoue, The 7th meeting on Cosmic Dust, Osaka, 2014
- 3, "Prediction of observational results of fluffy aggregations in protoplanetary disks", Koji Murakawa, Satoshi Okuzumi, Akimasa Kataoka, Hidekazu Tanaka, and Hiroshi Kobayashi, The 7th meeting on Cosmic Dust, Osaka, 2014.
- 4, "The infrared spectra of iron oxides particles II : In the case of wüstite", Chiyoe Koike, Hiroki Chihara and Junya Matsuno, The 7th meeting on Cosmic Dust, Osaka, 2014.
- 5, "Structure and chemistry of dust from laboratory perspective", Hiroki Chihara, The 9th meeting on Cosmic Dust, Sendai, 2016 (招待講演)
- 6, "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, 2016

### 出版論文

1. "Infrared absorption spectra of plagioclase feldspar: Dependencies of composition and temperature" Hiroki Chihara and Chiyoe Koike, PSS, in press (DOI:10.1016/j.pss.2017.06.003)
2. "Variations in the Infrared Spectra of Wüstite with Defects and Disorder" , C. Koike, J. Matsuno and H. Chihara, 2017, ApJ, 845, 115K
3. "Detection of an oxygen emission line from a high-redshift galaxy in the reionization epoch", Akio K. Inoue et al., 2016, Science, 352, 1559I

**学会等での口頭発表(主なもの)**

2017/3. 15-18 日本天文学会 2017 年春季年会 (九州大学)

「Diagnosis of dust crystallinity based on "Sum rule"」

茅原弘毅, Harald Mutschke, Simon Zeidler, 小池千代枝

2016/8. 15-19 The 9th meeting on Cosmic Dust (Tohoku University)

「Structure and chemistry of dust from laboratory perspective」

Hiroki Chihara (招待講演)

2015/9. 9-11 日本天文学会 2014 年秋季年会 (甲南大学)

「Infrared absorption spectra of LIME olivine and its detection feasibility in observations」

茅原弘毅, 安藤健人, 小池千代枝, 土山明

# 斜長石固溶体; $(\text{Na}\cdot\text{K})_{1-x}\text{Ca}_x(\text{Al}_{1+x}\text{Si}_{1-x})\text{Si}_2\text{O}_8$ の赤外線分光測定

茅原 弘毅 (デザイン工学部環境理工学科), 小池 千代枝 (立命館大学)

宇宙塵を構成すると考えられる鉱物は、宇宙元素存在度と平衡凝縮論の二つの理論から予測される。これは、太陽の化学組成を持った高温のガスが冷却する過程で、どの温度で、どんな化学組成を持った物質が、どれだけたくさん形成されるかを予測する理論である。この理論に基づいて、我々はこれまでケイ酸塩と呼ばれる物質のうち、オリビン族、パイロキシン族、メリライト族について研究を行ってきた。これらは、すべて結晶内に  $\text{SiO}_4$  の四面体構造を持ち、四面体の結合に関する架橋酸素の数によって分類される。今回研究を行った長石族は  $\text{SiO}_4$  四面体頂点の4つのすべての酸素を使って互いに結合している。長石は月の石としても知られ火成作用による成因が一般的だが、平衡凝縮論では恒星が放出したガスが比較的低温になってから形成が始まる鉱物である。長石はナトリウム、カリウム、カルシウム、アルミニウムを含む複雑な化学組成をもつ。特に天文学で重要と考えられる化学組成を持つ固溶体を斜長石と呼び、カルシウム、ナトリウム、アルミニウムの濃度が化学量論性を保ったまま段階的に変化する (表1を参照)。本研究では、広い化学組成範囲の斜長石固溶体を用いて赤外線分光測定を、常温および極低温において行い、スペクトルの化学組成と温度による挙動の変化を明らかにした。使用した鉱物を表1に示す。

これらをサブミクロン程度まで粉砕したのち、適切な媒質に分散させて中間および遠赤外線領域 ( $5\text{--}200\ \mu\text{m}$ :  $2000\text{--}50\ \text{cm}^{-1}$ ) で吸収スペクトルを測定した。常温での各化学組成の質量吸収スペクトルを図1に示す。縦軸が質量吸収係数、横軸が波長である。化学組成の違いにより、吸収帯のピーク位置、半値幅、強度が段階的に変化する。カルシウムが増えるほど、ピークのシフトは  $40\ \mu\text{m}$  から短波長側では長波長にずれるが、長波長側では短波長にずれることなどもわかった。

参考文献:

"Infrared absorption spectra of plagioclase feldspar: Dependencies of composition and temperature", Hiroki Chihara and Chiyoe Koike, PSS, in press (DOI:10.1016/j.pss.2017.06.003)

表1: 試料名と化学組成

Sample name	Composition
An <sub>100</sub>	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
An <sub>96</sub>	$\text{Na}_{0.039}\text{K}_{0.003}\text{Ca}_{0.959}\text{Al}_{1.959}\text{Si}_{2.041}\text{O}_8$
An <sub>79</sub>	$\text{Na}_{0.209}\text{K}_{0.005}\text{Ca}_{0.786}\text{Al}_{1.786}\text{Si}_{2.214}\text{O}_8$
An <sub>59</sub>	$\text{Na}_{0.381}\text{K}_{0.025}\text{Ca}_{0.594}\text{Al}_{1.594}\text{Si}_{2.406}\text{O}_8$
An <sub>21</sub>	$\text{Na}_{0.751}\text{K}_{0.041}\text{Ca}_{0.208}\text{Al}_{1.208}\text{Si}_{2.792}\text{O}_8$
An <sub>2</sub>	$(\text{Na}\cdot\text{K})_{0.98}\text{Ca}_{0.02}\text{Al}_{1.02}\text{Si}_{2.98}\text{O}_8$

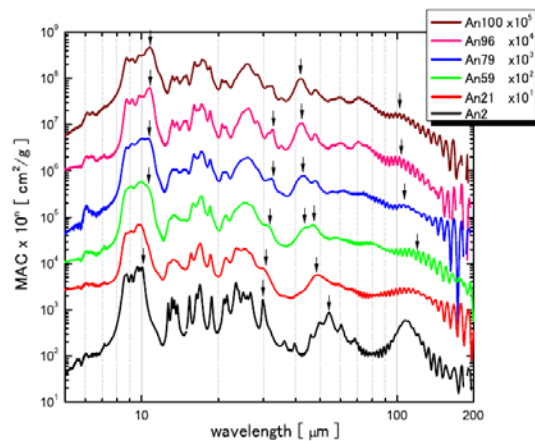


図1: 斜長石固溶体の吸収スペクトル。ピークシフトの変化を図中の矢印で示す。

# 銀河の宇宙塵の宇宙論的進化の観測とその理論的解釈

井上 昭雄 (デザイン工学部環境理工学科)

## 学術的背景・目的

現在の宇宙にはさまざまな元素が原子・分子気体、液体あるいは固体という多様な形態で存在する。地球や人類もそれら元素の集合体である。水素、ヘリウムとごく微量のリチウムは宇宙開闢ビッグバンのときに合成され、その他の元素は全て恒星の内部で起こる核融合反応や恒星の死とともに起こる超新星爆発などにより合成される。一部の元素は固体微粒子「宇宙塵」という形態で存在している。宇宙塵の主要構成元素は炭素、酸素、ケイ素、マグネシウム、鉄などである。宇宙塵は例えば地球のような固体惑星の材料ともなり、その他さまざまな物理・化学過程を担う宇宙の重要な構成要素である。本研究課題は、宇宙塵の存在量の変化を 138 億年の宇宙史にわたって調査することを目的とした。以下では、ビッグバンで合成できないリチウムより重い元素を「重元素」と呼ぶ。

## 研究成果1: 重元素中の宇宙塵割合の銀河種族による差異とそれを生み出す物理過程

宇宙では、さまざまな種類の銀河が存在する。まず、宇宙塵と重元素に関するこれまでの観測結果をできる限り収集し、それらの各種相関を調査し、銀河の種族による差異があるかないか調べた。結果、星形成活動が非活発な銀河ほど重元素のうち固体微粒子「宇宙塵」として存在する割合（宇宙塵/重元素質量比）が高いことを発見した。ゆっくりと星形成を行なっている銀河の星間媒質では、重元素が宇宙塵に凝固する時間を十分に確保でき、結果として宇宙塵/重元素質量比が高くなると解釈できる。この成果は 2014 年 8 月に本学梅田サテライトキャンパスにおいて開催された国際研究会 Cosmic Dust VII において発表した。

## 研究成果2: アルマ望遠鏡による初期宇宙の重元素と宇宙塵の観測

初期宇宙の重元素や宇宙塵を、南米チリに設置された電波望遠鏡アルマを用いて観測した。宇宙年齢 7 億年の時代の銀河を観測したところ、電離した酸素を検出した一方、宇宙塵は検出されなかった。結果、宇宙塵/重元素質量比は 20%未満であると結論した。この成果は 2016 年 6 月 24 日発行の Science 誌に掲載された。その後さらに、宇宙年齢数億年付近の複数の銀河の観測を実施したところ、宇宙塵が検出されるものと検出されないものがあることが分かって来た。他の観測者の結果も総合すると、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、重元素から宇宙塵への凝固が活発になる重元素量に閾値があり、それを超えると「星間媒質の相変化」が起こって宇宙塵量が急増し、観測で検出されるようになると考えられる。これらの成果は近く論文化する予定である。