

## 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.

主任研究員名：茅原 弘毅

分担研究員名：井上 昭雄

協力研究員名：村川幸史（大阪産業大学 教養部非常勤講師）、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。固体物質は光を吸収し赤外線（熱）を放射するため、固体である宇宙塵は様々な天体物理現象における冷媒として働き、天体物理現象の速やかな進行を促すという重要な役割を果たしている。さらに、宇宙塵は地球や月などの固体天体の原材料物質でもあることから、宇宙塵がどのような物質できており、どのような性質を持つのかを知ることは、天文学や惑星科学の枠を超えて非常に興味深い。ただし、一般的に宇宙塵は非常に遠方に存在するため、人類が実際に手に取ることでできた試料はほんの数例しかない。そこで、まず観測天文学の手法を用いて、天体を分光観測しスペクトルを取得する。スペクトルからは天体自身や周囲の物質の情報が読み取れる。しかし、観測されたスペクトルを解釈するためには、実験室において宇宙物質と考えられる模擬物質の分光測定から得られたスペクトルと照合する必要がある。実験室で得られたスペクトルが観測されたものと同じならば、模擬物質が実際の宇宙塵の正体（または、それに似たもの）であろうと結論できる。さらに、恒星周囲の宇宙塵がどのように分布をしており、望遠鏡でどのように見えるのか、時間的にどのように進化していくのかといったことは、理論的手法を用いて、宇宙塵を取り巻く環境のモデル化を行うことによって予測する事が可能である。本研究課題では、非常勤講師も含め本学に在籍する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宇宙塵の本質に迫り、多角度的な見地からその理解を深めようとするものである。

### 1: 研究成果の概要

#### (1) 実験分野

##### (a) LIME シリケイトの赤外線分光測定（茅原、小池）

宇宙元素存在度を鑑みると、結晶質ケイ酸塩（シリケイト）で出来ていると考えられ

る宇宙塵の化学組成は、マグネシウムと鉄を含むことが予想され、この化学組成はこれまでの観測研究とも整合性がある。しかし、鉄の代わりにマンガンが濃集している組成を持つものが、始原的なコンドライト隕石や、NASA（米航空宇宙局）による彗星探査ミッションにより地球に持ち帰られた彗星塵試料の中にわずかながら存在する。これらは Low-Iron, Manganese-Enriched の頭文字を取って LIME と称される。LIME シリケートについての報告はほとんど文献になく成因も未知であるため、これを実験室で合成し、赤外線領域でのスペクトル測定を行い、鉄マグネシウムシリケートとの比較を行って、観測での検出可能性の議論を行った。

#### (b) 酸化鉄(II)の合成と赤外線分光測定（小池、茅原）

二価の酸化鉄は 21-23 ミクロンメートルに吸収ピークをもつ宇宙塵候補鉱物と考えられている。実験では金属鉄と 3 価の酸化鉄（ヘマタイト： $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ）を混合し、大気圧下において遊星ボールミル中で衝撃を加えながら攪拌することで 2 価の酸化鉄（ウスタイト： $\text{Fe}_{1-x}\text{O}$ ）を合成した。ウスタイトには結晶構造中に欠陥があり、欠陥の量を X 線回析法により定量化すると、赤外線吸収帯のピーク位置との相関が明らかになった。今後、これらの分光実験の結果を、超新星爆発や赤外線星の観測結果と比較する事で宇宙塵としての酸化鉄の存在を議論していく予定である。

#### (2) 観測分野：原始惑星系円盤中の fluffy aggregate 粒子の観測予測（村川）

原始惑星系円盤のなかで、宇宙塵粒子同士の衝突による成長と沈殿がどのように起こるのかは、惑星形成論において非常に重要な事項である。成長が進むと、ミクロンメートルサイズの塵粒子はマクロスコピックなサイズや質量を持つ微惑星に進化する。その一方で、円盤の動径方向への塵粒子の移動や破壊が、塵粒子の成長を妨げることも指摘されている。しかし、極めて緩く束縛された塵粒子群 (fluffy aggregates) ならば成長を妨げられないとの指摘もあり、fluffy aggregates に対して輻射輸送計算を行い、観測されるべき原始惑星系円盤の予測を行った。

#### (3) 理論分野：銀河の宇宙塵とその材料である重元素の質量比（井上）

我々の銀河系以外の銀河での宇宙塵の材料物質の違いを探るため、様々な時代で見つかった様々な種類の銀河における宇宙塵／重元素質量比を文献から収集し、それぞれの銀河の重元素量との相関をとったところ、銀河の種類によって宇宙塵の量に違いがあり、これは星形成活動のスピードの違いによるものと解釈できる事がわかった。

## 2: 研究環境の整備

2014 年度は、特に分光実験機器の移設、整備と再立ち上げを研究遂行に先だって行った。これにより、極低温分光クライオスタットおよびフーリエ変換型赤外分光計 (FT-IR) が整備され、常温から実際の宇宙空間の温度にほぼ対応する 8 K 程度までの温度範囲で、 $7000\text{ cm}^{-1} \sim 100\text{ cm}^{-1}$  ( $1.4 \sim 100\text{ }\mu\text{ m}$ ) までの近赤外～遠赤外の連続した波数範囲で分光測

定が可能となった。

### 3:国際研究会の開催援助

2014年8月4日～8日の5日間にわたって、宇宙塵に関する国際研究会（The 7th meeting on Cosmic Dust）を本学梅田サテライトキャンパスにおいて開催した。欧米やアジアの13カ国から合計51件の講演があり、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国内外の招待講演者に対して渡航および滞在費の補助を行った。特に発展途上国等の博士研究員など優秀な若手研究者の参加を促すことが出来た。発表論文は学術誌の特集号として出版される予定である。

### 4:国際会議での成果発表

- 1, "Infrared spectra of LIME olivine", Hiroki Chihara, Kento Ando, Chiyoe Koike, and Akira Tsuchiyama, The 7th meeting on Cosmic Dust, Osaka, August 2014.
- 2, "Dust-to-metal ratio in galaxies", Akio K. Inoue, The 7th meeting on Cosmic Dust, Osaka, August 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, August 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, August 2014.

# LIMEオリビンの赤外線吸収スペクトルと観測による検出可能性

茅原 弘毅 (教養部)

宇宙元素存在度を鑑みると、太陽系内における固体元素のうち最も量の多いものは、鉄とマグネシウムである。したがって、宇宙塵候補鉱物であるオリビン（カンラン石）の隕石中での化学組成は  $Mg_2SiO_4$  と  $Fe_2SiO_4$  の間の固溶体組成を持つことが期待される。マンガンの存在量は、鉄およびマグネシウムの1%であるにもかかわらず、本来存在するべき鉄が欠乏しマンガンが濃集してしているオリビンが、非平衡普通コンドライト隕石や、成層圏下層で採取された惑星間塵(IDPs: Inter Planetary Dusts)、NASAが行った彗星探査（スターダストミッション）により地球に持ち帰られた、Wild2 彗星の試料の中に見つかっている (Klöck et al 1989, Zolensky et al. 2006)。この特殊な化学組成を持つオリビンは、“Low-Iron, Manganese-Enriched”の頭文字を取って LIME オリビンと呼ばれている。化学組成は  $(Mg_{1-x}Mn_x)_2SiO_4$  である。LIME オリビンは惑星間塵や始原的隕石のマトリックス物質の成因を解くために重要であるが、ほとんど文献中に報告がなされていない。そこで、実験室において、広い固溶体範囲で合成を行い、8~100  $\mu m$  の赤外線波長域において、吸収スペクトルの測定を行った。その結果、スペクトルは、鉄マグネシウムオリビンと驚くほどよく似ていたが (図1)、遠赤外線領域にある2つの小さな吸収帯 (49  $\mu m$  と 69  $\mu m$ ) のピーク位置同士の相関をとると、Mg100%から不純物 (鉄またはマンガン) が増えるに従って、きれいに二つの傾向に分れることがわかった (図2)。例えばこれをヒントに将来的に観測によって、鉄マグネシウムオリビンと LIME オリビンの区別がつけば、奇妙な化学組成である LIME の成因に制限を付けることが可能となると考えられる。この成果は、2014年8月4日~8日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 The 7th meeting on Cosmic Dust において発表した。

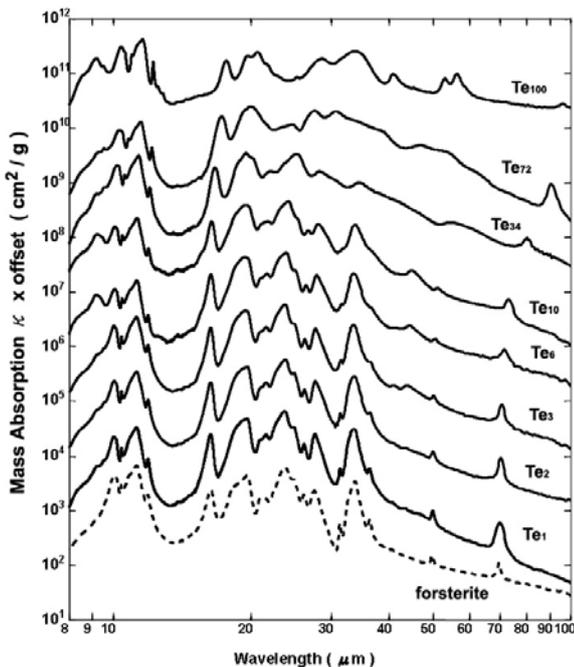


図1 LIME オリビンの赤外線吸収スペクトル。横軸は波長( $\mu m$ )、縦軸は質量吸収係数( $cm^2/g$ )。下から上に向かってマンガンの濃度が増える。

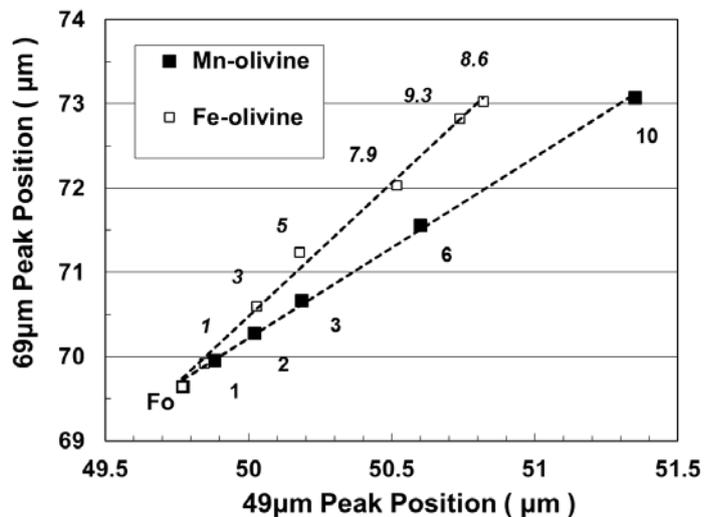


図2 遠赤外線吸収帯のピーク位置の相関。横軸が49  $\mu m$ 、縦軸が69  $\mu m$  の吸収ピーク位置。図中の数値は鉄およびマンガンの濃度。

# 銀河の宇宙塵とその材料である重元素の質量比

井上 昭雄 (教養部)

宇宙塵は、主に炭素やケイ素、マグネシウム、鉄などの天文学的な意味での「重元素」(リチウム以上の元素の総称)が固体となったものである。宇宙塵/重元素の質量比は、宇宙空間で固体相にある重元素の質量割合を表し、宇宙空間での宇宙塵形成、成長、破壊の過程と密接に関わっていると考えられるため、大変興味深い。そこで、さまざまな時代で見つかっている色々な種類の銀河において、宇宙塵/重元素質量比がどのように違うのか、あるいは同じなのか、調査した。宇宙塵質量や重元素量の観測値を文献からできるだけ多く集めた。併せて、銀河の恒星質量や赤方偏移(つまり遠方銀河までの距離)の情報も収集した。結果の一例を図1に示す。これまでの研究で知られていたように、宇宙塵/重元素質量比は重元素量と良い相関を示すことを確認した。すなわち、重元素量が多いほど、宇宙塵/重元素質量比は大きい。今回の新しい発見として、銀河間空間に見つかる濃い中性水素雲(Damped Ly $\alpha$  system; DLA)と、近傍銀河(Nearby galaxy)では、重元素量—宇宙塵/重元素質量比関係がずれていることがまず挙げられる。このことは、近傍銀河とDLAでは星形成活動のスピードが異なり、DLAの遅い星形成活動では、宇宙塵が成長する時間が十分に確保できるため、同じ重元素量でも固体相(つまり宇宙塵)になる割合が増えるのだと解釈できる。この解釈を今後理論モデルと比較検討する必要がある。また、遠方銀河には、同じような重元素量でも宇宙塵量の多い銀河と少ない銀河があることも分かった。これについては、銀河の進化フェイズの違いにより起こっている可能性がある。これらの成果は、2014年8月4日—8日に本学梅田サテライトキャンパスにおいて開催した、国際研究会 Cosmic Dust VIIにおいて発表した。

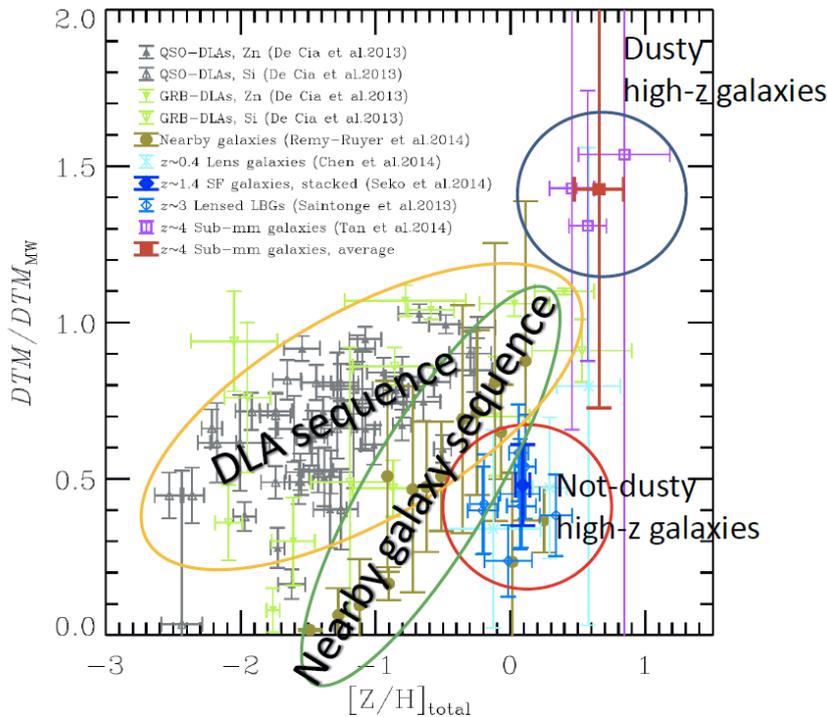


図1 さまざまな銀河について、水素に対する重元素量の対数(横軸)と宇宙塵/重元素質量比(縦軸)の関係。横軸は太陽の値で、縦軸は銀河系の値でそれぞれ規格化してある。