

近赤外線観測で探る原始惑星系円盤の ダストの内部構造



田崎 亮^{1,2,3}

〈¹Université Grenoble Alpes, CNRS, IPAG, 38000 Grenoble, France〉

〈²CNES Postdoctoral Fellowship〉

〈³東北大学大学院理学研究科天文学教室 〒980-8578 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3〉

e-mail: ¹ryo.tazaki1205@gmail.com

惑星形成の第一歩はダストの合体成長である。しかし、その詳細の多くが未だ謎に包まれている。最近の展開のひとつとして特筆すべき点は、ダストのサイズ・内部構造進化が原始惑星系円盤の観測的視点から語られるようになってきたことである。特にダストの内部構造の情報は、ダストがどのように成長しているかを紐解く重要な手がかりとなる。本稿では近赤外線観測に基づく筆者らの研究成果を中心に、原始惑星系円盤内のダストの内部構造に関する観測的研究について紹介する。

1. 惑星形成ははじめの一步

「塵も積もれば山となる」。地球のような固体惑星の形成は、まさにそのようなものであるとされる。始まりは大きさ $1\mu\text{m}$ にも満たない宇宙塵(ダスト)である。それが原始星の誕生とともにその周囲に形成される原始惑星系円盤において、およそ数百万年から数千万年の時をかけて集積し、惑星になる。集積の過程では大きさ約 $1\sim 100\text{ km}$ 程度の微惑星と呼ばれる小天体も形成される。これが太陽系の小惑星や彗星の祖先である。

惑星形成ははじめの一步はダストの凝集、つまり、ダストの凝集体(アグリゲイト)を作ることである。ダストの凝集の痕跡は今もなお彗星に残されている。彗星探査機ロゼッタは67P/Churyumov-Gerasimenko彗星(以降、67P/C-G彗星)から飛来する固体粒子を採取し、粒子がサブミクロンサイズの構成微粒子からなるアグリゲイトであることを明らかにした[1-3]。このことはアグリゲイトを

材料として彗星が形成されたことを物語っている。

アグリゲイトの内部構造、これは微惑星形成論における重要なトピックである。なぜなら、構造の種類によって円盤内のダストの成長や運動、ひいては微惑星形成シナリオまでもが変わりうるためである[4, 5]。興味深いことに、67P/C-G彗星から図1左下にあるような極めてすかさずかな内部構造を持つアグリゲイト(半径約 $10\mu\text{m}$)が発見された[1, 2]。これらは惑星形成の最初期に起こったダスト凝集の産物であると考えられている。ではダスト凝集が進行中の原始惑星系円盤内の固体粒子も、このようなすかさずかな内部構造を持っているのだろうか。本稿では、この問いに観測的に答えようという試みを紹介する。

惑星形成の現場である原始惑星系円盤の観測は、過去十年で飛躍的に進展した。円盤中のマイクロメートル程度の大きさのアグリゲイトの性質は、近赤外線観測によって調べることができる。今日までの地上大型望遠鏡等の活躍により、豊富な近赤外線の円盤観測データが存在する。しか

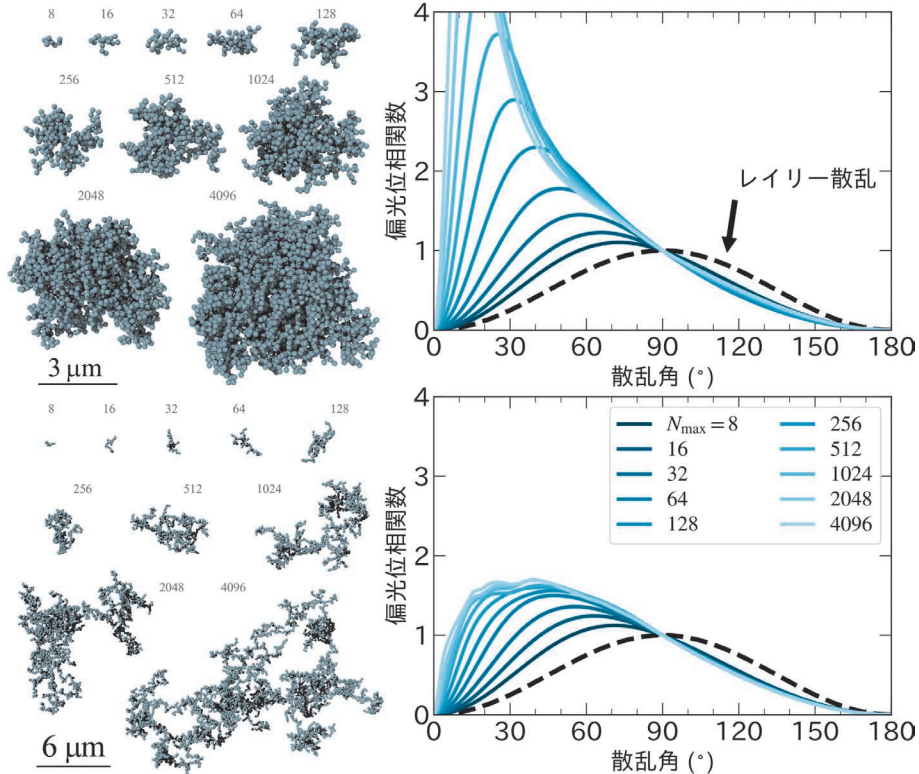


図1 高密度アグリゲイト ($d_f \sim 3.0$) と低密度アグリゲイト ($d_f \sim 1.9$) の形状モデルの例 (左図) と平均化した偏光位相関数 (右図)。偏光位相関数は散乱角 90° で規格化している。偏光位相関数の計算ではアグリゲイトの冪乗サイズ分布 (冪指数 -3.5) を仮定し、最小・最大のアグリゲイトの構成微粒子数を $N_{\min}=8, N_{\max}=8 \dots 4096$ とした。またアグリゲイトの構成微粒子半径は $0.1 \mu\text{m}$ 、入射 (散乱) 光の波長は $1.63 \mu\text{m}$ である。破線がアグリゲイトが小さい極限の近似解であるレイリー散乱の偏光位相関数である。光散乱データベース AggScatVIR [6] を基に作成。

し、観測データに基づくアグリゲイトの内部構造の研究は、ほとんど手付かずの状態であった。

筆者は円盤中のアグリゲイトの内部構造を観測的な観点から調べてきた。特に近年、我々は位相関数と呼ばれる観測的情報に着目し、アグリゲイトの構造を判別するアイデアを提案した。そして、それを実際の若い原始惑星系円盤の観測データに適用することで、円盤中のミクロンサイズの粒子がすかすかな内部構造を持っていることを発見した [7]*1。そこで本稿では近赤外線観測に基づく我々の研究成果 [7] を中心に、円盤アグリゲイトの内部構造の観測的研究について紹介する。

2. アグリゲイトの光散乱特性

アグリゲイトの内部構造を観測的に区別するにはどうすれば良いだろうか。その鍵として我々が注目しているのは、光散乱の散乱角依存性である。アグリゲイトに電磁波が入射すると、四方八方に散乱波が広がっていく。この時、散乱波の広がり方はアグリゲイトの大きさや構造によって異なる。散乱光の散乱角度分布は位相関数 (phase function) と呼ばれ、天文学のみならず気象・大気分野等でも微粒子のサイズや形状を診断する指標として利用されている。

*1 実は円盤中のより大きな粒子 (正確なサイズは論争中だが、 $10^{\pm 1} \text{mm}$ 程度とされる) に着目すると、比較的高密度なアグリゲイトが観測と整合すると考えられている [8, 9]。詳しくは第5章参照。

ここでアグリゲイトの構造を定量的に表すためにフラクタル次元を導入しよう。同一の構成微粒子から成るアグリゲイトの質量を m , 特徴的なアグリゲイト半径を a とした時, 両者の間に

$$m \propto a^{d_f}, \tag{1}$$

の冪乗関係があるとき, アグリゲイトはフラクタル次元 d_f を持つと定義する。一様球は, 質量が半径の3乗に比例するため, $d_f=3$ に相当する。直線鎖のアグリゲイトは, 質量が長さに比例するため, $d_f=1$ である。一般に, フラクタル次元が下がるほど, よりすかすかな構造になる。彗星から見つかった低密度アグリゲイトは $d_f \sim 1.70$ と推定されている [2]。本稿では, $d_f < 2$, $d_f \sim 3$ となるアグリゲイトをそれぞれ低密度・高密度アグリゲイトと呼ぶことにする。

図1右に低密度・高密度アグリゲイトの位相関数の数値計算結果の例を示す [6]。ここでは後々の天文観測への応用を見据え, 散乱強度の直線偏光成分の角度依存性 (偏光位相関数) を示している。各偏光位相関数は, 方向平均 (各粒子のランダムな配向を仮定), 異なる形のアグリゲイト (構成微粒子数およびフラクタル次元を固定し, 構成微粒子の配列パターンを変えたもの) によるアンサンブル平均, 冪乗サイズ分布平均を考慮した値である。つまり, 図1右はある特徴的な構造を持つアグリゲイトの集団の平均的な偏光位相関数を表している。

粒径が波長に比べて十分小さい場合, その散乱はレイリー散乱で記述される。散乱角を θ とすれば, レイリー散乱の偏光位相関数は $1 - \cos^2 \theta$ に比例する [10]。この時, 偏光位相関数は散乱角90度に対して対称であり, 偏光強度は散乱角90度で最大となる (図1右の破線)。アグリゲイトの大きさが小さければ, 偏光位相関数はレイリー散乱と同様に散乱角90度付近で最大値を取る。しかし, アグリゲイトの大きさが増大すると, 位相関数のピークは徐々に小散乱角側へシフトして

いく。さらに, 低密度・高密度アグリゲイトの結果を見比べると, 両者のピーク強度が大きく異なっていることがわかる。この違いはサイズ・構造の違いに起因する光の干渉パターンの違いとして定性的に説明できる [11]。

この性質の違いを利用することで円盤内のアグリゲイトの内部構造を診断できるのではないか, というのが我々の狙いである。そのためには, アグリゲイトからの散乱光を散乱角の関数として観測しなければならない。どのような観測がこれを可能にするだろうか。それを次章で述べる。

3. 原始惑星系円盤の近赤外線偏光観測

2010年代の地上大型望遠鏡による原始惑星系円盤の近赤外線撮像観測は, 偏光観測が主戦場となった。偏光観測を行うことで明るい中心星光 (無偏光) を抑え, 星周辺に淡く広がった原始惑星系円盤からの散乱光 (一般に直線偏光している) を鮮明に撮像できる (詳しくは文献 [12] 参照)。実際の原始惑星系円盤の近赤外線での偏光撮像画像を図2上に示す。これは Very Large Telescope が撮像した, おおかみ座IM星 (以降, IM Lup 星) 周囲の原始惑星系円盤の姿である [13]。中心星は画像中央の灰色のハッチ領域に位置する。中心星を取り囲むように見えているのが原始惑星系円盤である。円盤は中心星の光をダストが反射 (散乱) することで輝いている。

IM Lup 星周囲の円盤は本研究の目的に打って付けである。我々はこの円盤を約55度傾いた視点から観測しており (円盤の輪郭がおよそ楕円形に見えているのはそのためである), 我々は様々な角度で散乱された光を観測している。例えば, 円盤の観測者に近い側で散乱角は小さく, 遠い側で散乱角は大きくなる (図2下)。円盤の軌道傾斜角と幾何学的厚みを考慮すると, 観測可能な散乱角の範囲は $\sim 25^\circ - 135^\circ$ 程度と推定できる。したがって, 円盤の方位角方向の明るさ分布を調べることで, 円盤に存在するダストの偏光位相関数の

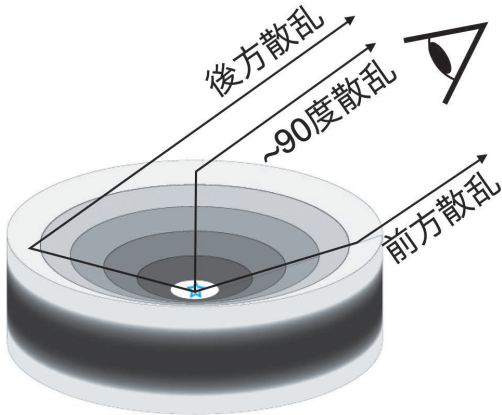
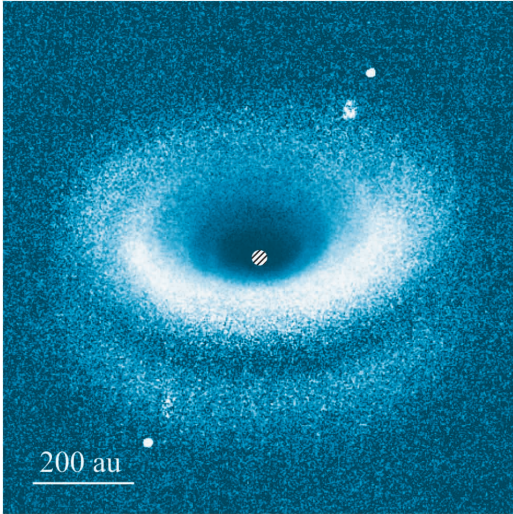


図2 (上図) IM Lup 星周囲の原始惑星系円盤の近赤外線偏光撮像画像 (波長約 $1.63 \mu\text{m}$)。中心星からの距離の二乗でスケールした偏光強度 (正確には方位角ストークス成分 Q_ϕ) の画像 (文献 [7] の図1を改変)。中心の灰色のハッチ領域が中心星の位置である。より白色に近いほど散乱偏光強度が大きくなる。(下図) 円盤における光散乱過程の概念図。

情報を抽出できるのである。

そのような視点で改めて観測結果を見てみよう。すると円盤の手前側 (画像の下側) と奥側 (画像の上側) で明るさが異なっていることに気がつく。これは散乱角が小さいほど、散乱偏光強度が明るくなっていることを意味する。もし仮にダストがレイリー散乱をしているとすると、偏光

強度は小散乱角側で下がるため、円盤の手前側が暗くなるはずである。このことから円盤表層のダストは非レイリー散乱的、すなわち、波長と同程度かそれ以上のサイズを持っていることが示唆される。

4. 原始惑星系円盤の偏光位相関数

図2に示した観測データはどのようなアグリゲイトの存在を示唆するだろうか。本章ではこれを明らかにしていく。

4.1 アグリゲイトのサイズと構造

前章で円盤の方位角方向の表面輝度分布がダストの位相関数に対応すると述べた。しかし、この説明は厳密には正しくない。なぜなら、原始惑星系円盤は近赤外線で光学的に厚く、多重散乱や周縁増光効果 (Limb brightening effect) といった輻射輸送の効果もまた表面輝度分布に影響するためである (詳しくは文献 [7] の Appendix C 参照)。こうした効果を扱うためには3次元輻射輸送計算が必要である。そこで我々の方針は次の通りである。まず大きさや構造などを少しずつ変化させた様々な種類の高密度アグリゲイト (126通り) と低密度アグリゲイト (214通り) を数値的に作成し、その光学特性を数値的に求める。次に IM Lup 星周囲の円盤モデルを構築し、アグリゲイト光学特性と3次元輻射輸送計算を組み合わせ、モデル画像を作成する。最後に、モデル画像と観測画像のそれぞれから位相関数を抽出し、各モデルの妥当性を評価する。

得られた結果を図3に示す。Jバンド・Hバンドのそれぞれの観測画像から抽出した位相関数がデータ点、理論モデルが実線で示されている。ここでは位相関数以外の観測量を再現できないモデルは予め除き、高密度アグリゲイト27モデル、低密度アグリゲイト36モデルの結果を示している (各モデルの結果が細線で示され、そのうちのベストモデルが太線である)。その結果、観測された偏光位相関数は、高密度アグリゲイトが予言

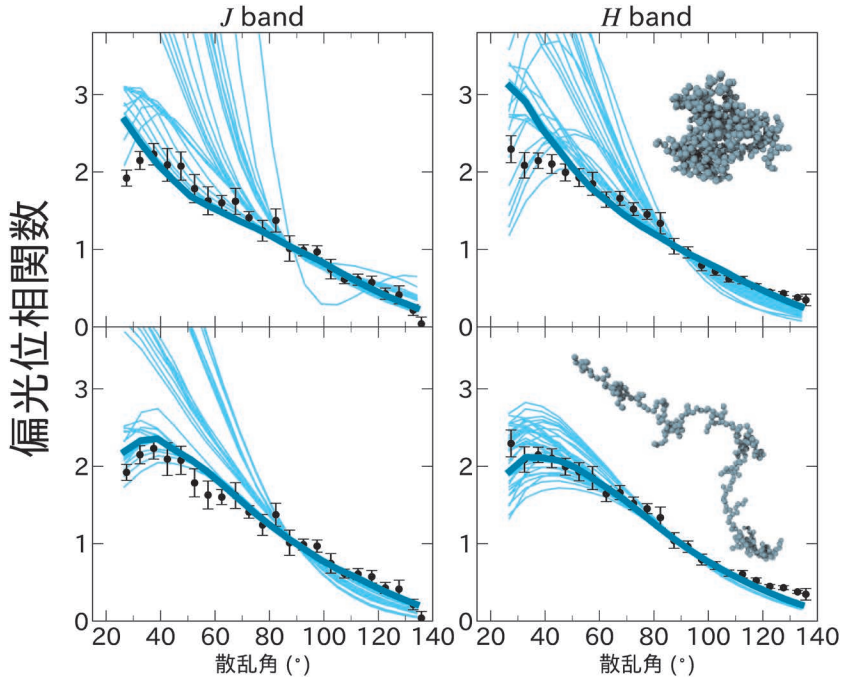


図3 IM Lup星周りの原始惑星系円盤の近赤外線偏光位相関数の観測結果（データ点）と理論予測（実線）. 左図は波長 $1.25\ \mu\text{m}$, 右図は波長 $1.63\ \mu\text{m}$ の結果を, 上段は高密度アグリゲイト, 下段は低密度アグリゲイトの結果である. 偏光位相関数は散乱角 90° で規格化している. 細い実線はアグリゲイト半径や構造を少しずつ変化した高密度・低密度アグリゲイトモデルの結果であり, 太線がそのうちのベストフィットを示す. 文献 [7] の図5を改変.

するような急峻なものではなく, 比較的緩やかなものであることがわかった. それぞれのアグリゲイト形状で reduced chi-square χ_r^2 の値が最も小さくなるモデルは, 高密度アグリゲイトが $d_f \approx 3.0$, 最大アグリゲイト半径 $a_{\text{max}} \approx 3.1\ \mu\text{m}$ ($\chi_r^2 = 5.0$), 低密度アグリゲイトが $d_f = 1.5$, $a_{\text{max}} \geq 2.1\ \mu\text{m}$ ($\chi_r^2 = 3.6$) であった. つまり, 低密度アグリゲイトが最もよく観測を再現できる.

とはいえ, 両者の違いは僅差であるという見方もできる. それでも我々が低密度モデルが優れていると考えているのは, その位相関数のパラメータ依存性の弱さにある. 低密度アグリゲイトはフラクタル次元やアグリゲイト半径を変化させても, 位相関数は大きく変化しない. 低密度アグリゲイトの半径に関して, 下限値 ($a_{\text{max}} \geq 2.1\ \mu\text{m}$) しか得られなかったのはこのような性質のため

ある. 一方で高密度アグリゲイトの場合は, そのサイズや空隙率が変化すると位相関数が大きく変化してしまう. これは図3上の細線のばらつき具合からも見て取れる. パラメータの微調整なしに観測を再現できる点で低密度モデルは優れている, というのが我々の解釈である.

4.2 構成微粒子半径

アグリゲイトは微粒子の集合体である. アグリゲイトを構成する個々の微粒子をモノマーと呼ぶ. モノマーの大きさはアグリゲイト同士の付着のしやすさを決めるため, ダスト成長モデルにおける重要なパラメータのひとつである. 多くのモデル計算では彗星塵アグリゲイトのモノマー半径や星間ダスト半径などを参照し, $0.1\ \mu\text{m}$ や $1\ \mu\text{m}$ といった値が用いられてきた. しかし, モノマー半径を原始惑星系円盤の観測から決定する研究は

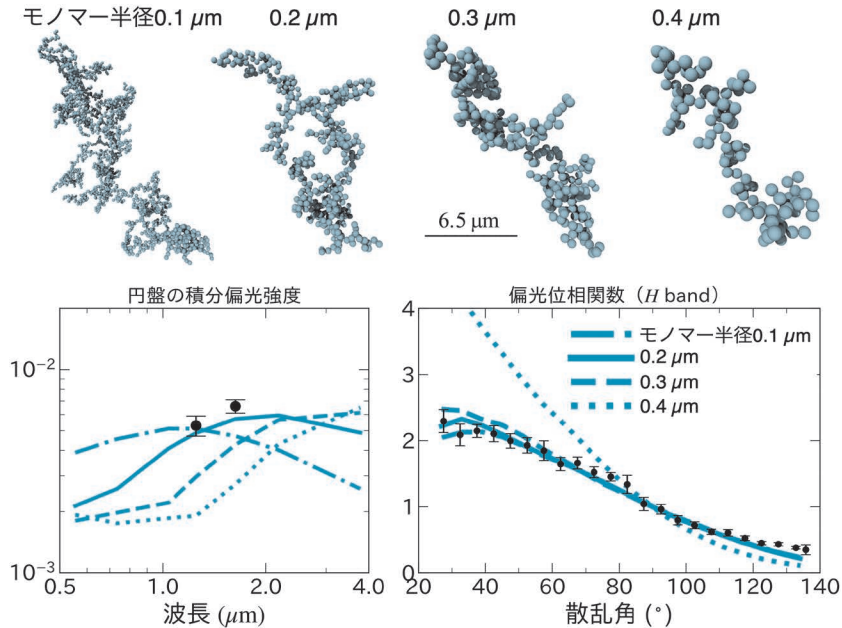


図4 異なるモノマー半径を持つ4種類の低密度アグリゲイト ($d_f \approx 1.9, a \approx 6.5 \mu\text{m}$) (上段). 輻射輸送計算から得られた偏光強度の円盤全体での積分値と偏光位相関数 (下段). 偏光位相関数は散乱角 90° で規格化している. ここでは比較の都合のためベストフィットから示唆された $d_f = 1.5$ ではなく 1.9 を採用したが, その違いによる影響は軽微である. 文献 [7] の図3を改変.

行われていなかった.

我々はモノマー半径を観測的に調べるために, 同様のフラクタル次元・大きさを持つ異なるモノマー半径を持つ4種類の低密度アグリゲイトを用意した. これらのモデルと観測結果を比較したものが図4である. モノマー半径が $0.4 \mu\text{m}$ の場合を除き, 位相関数はモノマー半径にほとんど依存しない. 一方でモノマー半径は円盤全体の表面輝度を積分した積分偏光強度, 及びその波長依存性 (色) に大きく影響することがわかった. モノマー半径が $0.1 \mu\text{m}$ のアグリゲイトは, 観測データがある波長帯において青い (短波長側で明るい) 波長依存性を示す. これは細粒なモノマーによるレイリー散乱の性質を反映している. モノマーの大きさを次第に増加させると, 円盤は暗く・赤く (短波長側で暗く) になっていく.

観測結果とモデル計算の比較から, モノマー半径 $0.2 \mu\text{m}$ のモデルが最もよく観測を再現するこ

とがわかった. つまり, 円盤中のアグリゲイトはサブミクロンサイズのモノマーからできているという従来の描像と矛盾しない結果が得られた.

5. 低密度成長の起源とその行く末

本研究によって IM Lup 星周りの原始惑星系円盤に, 低密度アグリゲイトが存在することが示唆された. 得られたフラクタル次元は $d_f = 1.5$ であり, アグリゲイトはまるで木の枝のような構造を持っている (図3). こうした低次元のアグリゲイトはどのように形成されるのだろうか.

低次元アグリゲイトの形成は室内実験・理論計算の双方から期待されていた. ダストの合体成長の最初期段階ではブラウン運動によってアグリゲイトが形成される. この時, 衝突はアグリゲイトを変形させるのに十分な運動エネルギーを持たないこと, 衝突時にアグリゲイトが回転していることにより, 低次元のアグリゲイトが形成される.

微小重力環境におけるブラウン運動によるダスト凝集実験では、 $d_f=1.3-1.4$ 程度のアグリゲイトの形成が確認されている [14, 15]. また粒子回転を考慮したブラウン運動駆動の凝集数値シミュレーションからは $d_f\sim 1.1-1.46$ という値が得られている [16]. 高速衝突によって構造の圧縮が起こると、フラクタル次元は $d_f\sim 2.5$ 程度まで増加する [17, 18].

したがって、低次元アグリゲイトは衝突圧縮段階以前の低速衝突による凝集（例えばブラウン運動によるもの）によって形成された可能性が高い。実際、IM Lup星はClass II天体の中でも若い天体（年齢 ~ 1 Myr [13]）であり、円盤外縁・表層部でこのようなダスト凝集の初期段階が進行中であることはあり得る。

低密度アグリゲイトはその後どのように成長していくのだろうか。低密度構造を維持できるか否かは、微惑星形成にとって運命の分かれ目である。なぜなら、ここが様々な微惑星形成仮説の最初の大きな分岐点になっているためである [4, 5]. 近年のALMAによる円盤観測により、大きさ $10^{\pm 1}$ mm程度（正確なサイズは論争中）の粒子は比較的高密度な構造を持っていることがわかってきた [8, 9]. これらの結果の最も単純な解釈は、低密度アグリゲイトは成長の過程で高密度化する、というものである。しかし、高密度化がどのようにして起こったかは未だよく分かっておらず、具体的な高密度化過程の研究が進められている [19]. また、その他の起源の可能性の検討も今後の課題の一つである。

6. まとめと今後の展望

ダスト成長を紐解く鍵であるダストの内部構造の研究は、これまで室内実験・太陽系内探査・理論計算が主導であったが、近年ではそこに原始惑星系円盤の観測的知見が加わりつつある。我々は近赤外線偏光位相関数という観測的情報に着目し、IM Lup星周りの原始惑星系円盤の外縁・表層

部には、低密度アグリゲイトが存在することを示唆した。この結果が正しければ、我々は惑星形成のはじめの一步を目撃していることになる。

ダストの進化を体系的に理解するには、より多くの原始惑星系円盤のダストの性質を調べていくことが重要である。我々は既に複数の原始惑星系円盤から偏光位相関数を抽出し、位相関数の形は天体によって異なることを指摘した [20]. こうした位相関数の多様性はダストの衝突進化史の多様性を反映しているのではないかと筆者は予想している。また、アグリゲイトの形態だけでなく、その組成について理解することも物質進化の観点から極めて重要である。今後は位相関数をキーワードに、様々な円盤のダストの性質を調べ、原始惑星系円盤のダストの衝突・物質進化史を明らかにしていきたい。

謝辞

本研究内容は筆者が日本学術振興会海外特別研究員としてアムステルダム大学に派遣中に行った研究成果 [6, 7] を基にしています。まず派遣を支援していただいた日本学術振興会、そしてホスト研究者であるアムステルダム大学のCarsten Dominik教授にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。さらに本研究を観測面から大きくサポートしていただいた共同研究者のChristian Ginski氏に感謝します。最後に、この度執筆の機会をいただきました編集委員の岩崎一成氏、前編集委員の富田賢吾氏にこの場を借りてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Bentley, M. S., et al., 2016, *Nature*, 537, 73
- [2] Mannel, T., et al., 2016, *MNRAS*, 462, S304
- [3] Mannel, T., et al., 2019, *A&A*, 630, A26
- [4] 片岡章雅, 2014, *天文月報*, 107, 278
- [5] 奥住 聡, 2016, *天文月報*, 109, 833
- [6] Tazaki, R., Ginski, C., & Dominik, C., 2023, *AggScatVIR*, Zenodo
- [7] Tazaki, R., et al., 2023b, *ApJ*, 944, L43
- [8] Tazaki, R., et al., 2019, *ApJ*, 885, 52

[9] Zhang, S., et al., 2023, ApJ, 953, 96
 [10] Bohren, C. F., & Huffman, D. R., 1983, Absorption and Scattering of Light by Small Particles (New York: Wiley)
 [11] Tazaki, R., et al., 2016, ApJ, 823, 70
 [12] 橋本 淳, 2015, 遊星人, 24, 282
 [13] Avenhaus, H., et al., 2018, ApJ, 863, 44
 [14] Blum, J., et al., 2000, Phys. Rev. Lett., 85, 2426
 [15] Krause, M., & Blum, J., 2004, Phys. Rev. Lett., 93, 021103
 [16] Paszun, D., & Dominik, C., 2006, Icarus, 182, 274
 [17] Wada, K., et al., 2008, ApJ, 677, 1296
 [18] Suyama, T., et al., 2008, ApJ, 684, 1310
 [19] Tanaka, H., et al., 2023, ApJ, 945, 68
 [20] Ginski, C., et al., 2023, ApJ, 953, 92

Dust Coagulation in a Young Planet-Forming Disk Probed by Near-Infrared Observations

Ryo TAZAKI

Université Grenoble Alpes, CNRS, IPAG, 38000 Grenoble, France/CNES Postdoctoral Fellowship/Astronomical Institute, Graduate School of Science Tohoku University, 6-3 Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan

Abstract: Dust coagulation is the first step in planet formation. However, it remains a mystery how dust coagulation proceeds in protoplanetary disks. Observational understanding of dust properties is essential to answer this question. The scattering phase function at near-infrared wavelengths is one of the key techniques to characterize dust properties. In this article, I will explain the scattering phase function of dust aggregates and how we can use it to constrain the aggregate morphology in a protoplanetary disk.