

<p>【領域番号】 2302</p>	<p>【領域略称名】 系外惑星</p>
<p>【領域代表者（所属）】 林 正彦(自然科学研究機構 国立天文台・台長)</p>	
<p>【研究項目A01】</p> <p>研究項目 A01 では、観測的手法により、ガス惑星の直接撮像・分光と地球型惑星の検出を目的としている。これを実現するため、(1) すばる望遠鏡によるガス惑星や円盤の直接撮像観測、(2) 直接分光観測によるガス惑星の特徴付け、(3) 地球型惑星の間接検出、以上3つの個別目標を設定した。</p> <p>1. すばる望遠鏡によるガス惑星や円盤の直接撮像観測</p> <p>【目的】 すばる望遠鏡を用いて、太陽系のサイズ(1-40 AU)にあるガス惑星を直接撮像する。</p> <p>【進展状況】 オールジャパン体制のもと、プリンストン大学やマックスプランク研究所との共同研究により、すばる望遠鏡による戦略観測プロジェクト SEEDS (Strategic Exploration of Exoplanets and Disks with Subaru) が順調に進展している。これには5年間で120夜の観測時間が割り当てられており、現時点でほぼ3/4の観測が終了した。ガス惑星の直接検出については確実な1個について出版済みで、他に複数の候補天体について確認中である。また研究項目 B01 との連携のもと、多数の原始惑星系円盤の撮像にも成功しており、当初の予定通り順調に進展している。</p> <p>2. 直接分光観測によるガス惑星の特徴づけ</p> <p>【目的】 高コントラスト赤外線面分光器 (CHARIS) と超高精度波面補償光学装置 (SCExAO) を開発してガス惑星を直接分光し、A02 班の理論研究との連携のもと、惑星を特徴づける (キャラクター化)。</p> <p>【進展状況】 CHARIS の開発・製作は、プリンストン大学との共同研究として、ほぼ当初計画通りに順調に進展している。これまでに概念設計、詳細設計を終了し、現在は最終設計を実施中である。また光学部品、赤外線検出器等の調達を進めており、当初計画に沿って順調に進展している。SCExAO は国立天文台ハワイ観測所にて製作中であり、マイルストーンごとにすばる望遠鏡に搭載し実験を行って性能確認をしている。</p> <p>3. 地球型惑星の間接検出</p> <p>【目的】 間接検出法によって地球型惑星を間接検出する。</p> <p>【進展状況】 ドップラー法による観測については、すばる望遠鏡への高精度赤外線ドップラー分光器の搭載を待つて開始する予定である。トランジット法については、専用のカメラを南極ドームふじ基地に設置し、遠隔制御試験を実施中である。重力マイクロレンズ法については、2011年と2012年のシーズンを終えて、スーパーアースを含む10個の系外惑星を検出するなど、予定よりも順調に研究が進展している。</p> <p>【研究項目A02】</p> <p>研究項目 A02 では、理論や数値シミュレーションを手法として、系外惑星大気の詳細なモデリングとその形成進化過程の確立を目的としている。これを実現するため、(1) 系外惑星の大気循環と熱収支の解明と予測、(2) 系外惑星の大気進化の多様性の解明、(3) 系外惑星のキャラクター化と解釈、以上3つの個別目標を設定した。</p> <p>1. 系外惑星の大気循環と熱収支の解明と予測</p> <p>【目的】 独自の階層化数値モデルのコンセプトに基づく大気数値モデル群を発展させ、系外惑星で想定される多様な境界条件の下で大気循環と熱輸送を自在にシミュレートできる数値モデルを開発する。それを用い、未知の系外惑星大気の大気循環と熱輸送の諸過程を明らかにする。</p> <p>【進展状況】 階層的数値モデル群の中核をなす、全球大気循環モデルと局所雲対流モデルの開発を進めた。これにより、A01 班の検出目標となる同期回転地球型惑星を想定した大気循環シミュレーションの系統的执行が可能となり。特に小質量星周りのハビタブルゾーン内縁境界を決める暴走温室状態の発生過程につ</p>	

いて解明が進んだ。また、複数の凝結成分を含む木星型惑星大気の雲対流数値シミュレーションに成功し、積乱雲の発生の間欠性と凝結成分の濃度の間に強い相関関係があることを発見した。さらにハビタブルゾーン外縁部の地球型惑星に出現が期待される、大気主成分の凝結が生じる高圧二酸化炭素大気での雲対流の数値シミュレーションが可能になり、温室効果源となる二酸化炭素雲層が安定に滞留することを示唆する結果を得た。これらは、当初予定通り順調に進展している。

2. 系外惑星の大気進化の多様性の解明

【目的】海洋形成理論に代表される先駆的アイデアを打ち出してきたハビタブル水惑星大気の形成進化理論を拡張し、さまざまな境界条件と進化段階にある惑星大気・表層環境の組成・構造の多様性について、理論的に明らかにする。

【進展状況】地球型惑星の表層環境の進化経路について解明が特に大きく進んだ。具体的には、軌道上の中心星放射強度により、初期に獲得した水の保持性や初期マグマオーシャンの持続期間が大きく二分されることを発見した。この成果は、本計画研究で雇用している PD 研究員を筆頭著者とする論文として Nature 誌に掲載され(濱野ら)、News and Views 欄でも取り上げられるなど大きな世界的反響を得て、研究が予定していた以上に進展した。また流体力学的大気散逸シミュレーションモデルに高精度移流スキームを導入し、現実的な散逸率が先行研究に比べて著しく高いことを明らかにした。

3. 系外惑星のキャラクタリゼーションと解釈

【目的】惑星放射スペクトルを数値的に推測・再現する数値モデルを構築し、研究項目 A01 の明らかにする木星型系外惑星の直接分光データから、これら惑星大気のキャラクタリゼーションを行い、大気構造とその多様性を明らかにする。多数の惑星について相互比較を行い、多様性をもたらす要因ならびに大気進化過程について理論的解析を行う。また、同班の検出する地球型系外惑星の姿を予言し、次期の目標となる、これらの直接分光観測に向けた知見を蓄積提供する。

【進展状況】地球型惑星とガス惑星それぞれを想定した大気放射伝達の数値モデルの開発を進めた。ここから循環シミュレーションから得た同期回転惑星における昼夜間熱輸送過程に基本的な解釈を与えることに成功し、また木星型惑星の観測スペクトルに影響する対流圏界面付近の雲形成機構や、成層圏逆転層の形成過程について重要な示唆を得た。またエアロゾル生成とその放射特性を求める光化学実験を進め、これに基づき各成分の上層大気における存在度の決定機構について考察を進めつつあり、当初の予定通り順調に進展している。

【研究項目 B01】

研究項目 B01 では、観測・理論・実験の手法を結集して、原始惑星系円盤から地球型惑星形成へと至る過程の全貌解明を目的としている。これを実現するため、(1) 円盤構造の解明、(2) 円盤内固体物質の組成や成長の解明、(3) 円盤ガス物質の組成や進化の解明、以上 3 つの個別目標を設定した。

1. 円盤構造の解明

【目的】原始惑星系円盤から地球型惑星形成へと至る過程の全貌解明のため、近赤外から電波波長における観測的手法を通じて円盤の構造を解明する。

【進展状況】すばる望遠鏡による固体微粒子(ダスト)散乱光近赤外撮像観測、及び ALMA 望遠鏡によるダスト・ガスの観測が進展した。近赤外散乱光では、惑星によって生じた可能性のある溝状構造や非軸対称構造を複数の円盤で見出した。特に、密度波理論を用いた渦巻き形状の解析により、直接捉えられていないガス惑星の位置を推定した。この成果は今後、惑星検出を目的としたより高感

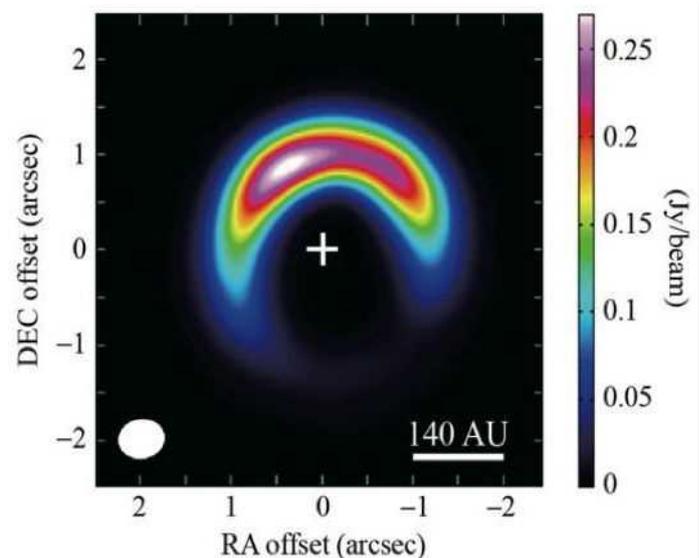


図 3-1 : ALMA によって取得された若い星 HD142527 に付随する原始惑星系円盤のサブミリ波・ダスト連続波イメージ。十字は星の位置を、左下の白い楕円は点源を観測したときに得られる広がりを、それぞれ示す。

度な追観測研究の戦略を立案する上で重要な基礎を与える。一方、ALMA によって観測されるミリ波・サブミリ波放射からは、近赤外散乱光に比べ円盤物質の質量や温度をより直接的に導出できる。初めての ALMA 共同利用公募にあたる Cycle 0 観測では、HD142527 に付随する原始惑星系円盤の中に、ダストが極度に集中し自己重力が効くほど高密度とみられる領域を中心星から 150AU 離れたところに見出した (図 3-1)。これは、比較的軽い円盤中の半径 30AU 以内で岩石惑星やガス惑星岩石コアが作られたとする標準的太陽系形成理論とは全く異なる状況であり、地球型惑星形成過程もまた、多様な環境下で起こりうることを示唆するという大きな進展があった。Cycle 1 では本グループ関係者が含まれる観測提案が 5 件採択され、平成 25 年度中のデータ取得を見込んでいる。以上は、ほぼ予定通り進展したと評価できる。

2. 円盤内固体物質の組成や成長の解明

【目的】数値計算を通じて、地球型惑星形成シナリオの中で曖昧だったダストから微惑星へと至る成長過程の理解を深める。

【進展状況】数値計算に基づく研究から、ダスト成長初期に形成される高空隙率・低密度天体が、ガス動圧や自己重力による圧縮作用によって、現在の太陽系小天体で実現されている程度にまで高い密度をもつ微惑星に至ることを示した。この研究は、研究項目 B02 との連携によって実施し (【研究項目 B02】I-(1)を参照)、当初の想定を超える成果が得られている。また、原始惑星系円盤や残骸円盤で見られる結晶化したダストの形成機構に関する理論的成果を得た。これは、円盤ダストの基本的性質を明らかにしたというだけでなく、結晶化ダストを捉えた観測データから円盤物理状態を見積もる重要な手がかりを与える点でも意義深い。この他、氷微惑星の衝突破壊条件を実験的に調べるための低温衝突実験設備を整備し、岩石質ダストに加えて氷ダストが円盤中でどう成長していくかを総合的に理解していく基盤を当初の予定通り整えた。今後、これらの進展を融合させた円盤から地球型惑星へと至る過程の一貫した説明の完成に向けて、明るい展望が開けた。

3. 円盤内揮発性物質の組成や成長の解明

【目的】円盤内の揮発性物質の進化を化学的観点から解明する。

【進展状況】原始星期における星周ガス化学組成に関するモデル計算が進展し、複数の論文を発表した。また、地球の海水に含まれる重水素の割合が宇宙元素存在度に比べて有意に高いことに関連して、極低温の原始星で近年観測されている極めて高い D/H 比をもつ水が原始惑星系円盤に取り込まれた後どのように破壊・再生成されるかについてもモデル計算を進め、その初期成果をまとめつつある。これらは当初見込んでいた通りの進捗状況であり、今後、原始惑星系円盤内の惑星材料物質のガス化学進化を考える際の初期条件を与え、地球型惑星の海や生命を作った材料物質と宇宙物質との繋がりを理解する第一歩と位置づけられる。これらの知見は、今後、ALMA などによる観測的検証を通じて、さらなる精緻化を見込んでいる。

【研究項目 B02】

研究項目 B02 では、理論や数値シミュレーションを手法として、ハビタブル地球型惑星の形成理論の賀来ルツを目的としている。これを実現するため、(1) 巨大ガス惑星の多様性、(2) スーパーアースの多様性、(3) ハビタブル惑星の存在確率、以上 3 点の解明を個別目標として設定した。目標(1)、(2)に関してはさらに以下のようなサブテーマを掲げ、研究を推進した。

I. 巨大ガス惑星の多様性

1. 微惑星形成過程の解明

【目的】固体微粒子(ダスト)から微惑星への成長過程を説明する理論モデルを獲得する。

【進展状況】原始星の形成過程およびその直後に始まる原始惑星系円盤の形成過程のシナリオの構築を行い、さらにダストから微惑星への過程に直接的な影響を与える円盤ガスの磁気回転乱流の詳細を明らかにした。それをふまえて、円盤内のダストの空隙率進化に着目して、ガス抵抗による中心星落下を乗り越えて氷微惑星が形成されることを世界で初めて示した。これは、研究項目 B01 と B02 の研究をうまく連携させて、氷微惑星形成の有力モデルを構築した成果である。また、観測可能性についても解析した。岩石微惑星の形成については、円盤乱流の渦の効果、永年的な自己重力不安定の可能性を検討した。この課題は、予想以上に進展している。

2. 複数の巨大ガス惑星の連鎖形成仮説の検証と新しい連鎖形成モデルの提案

【目的】太陽系の木星・土星のように、一つの系内に複数の巨大ガス惑星が形成されるメカニズムを解明する。

【進展状況】巨大ガス惑星がひとつ形成されると、その外側で急速に次の巨大ガス惑星が連鎖的に形成されるという仮説に関して、それが実際に起こることを示し、木星・土星系の形成の新しいモデルを提案した。円盤の粘性散逸光蒸発についても解析を行い、順調に進展している。

3. 巨大ガス惑星の軌道多様性

【目的】巨大ガス惑星の軌道の多様性についてその成因を解明する。

【進展状況】巨大ガス惑星の軌道不安定の高精度軌道計算を行い、内側に飛ばされた惑星のうちの30%は潮汐力により（逆行や離心率の軌道のものを含む）ホットジュピターとなり、中間領域に残ったものは高い軌道離心率を維持することがわかり、これまでの観測データを見事に説明した。研究項目 A01 が目指す、直接撮像法によって観測可能な遠方領域に散乱される巨大ガス惑星の分布も予測した。固体コアとして散乱された後でガス集積することにより、遠方であつ円軌道に近い軌道になることも示し、予定以上に進展している。

II. スーパーアースの多様性

4. 中心星と円盤ガスの磁気結合（→ 組成の多様性）

【目的】スーパーアースの多様性を探るため、中心星と円盤ガスの磁気結合についてその役割を考察する。

【進展状況】ケプラー衛星望遠鏡などの最新の観測結果は、太陽型星の数十%以上が短周期スーパーアース（大型地球型惑星）を持ち、その大多数は複数系であることを示す。一方、太陽系を含めて短周期惑星が存在しない系も多い。その後に観測が急進展し、この軌道の多様性とともバルク密度（組成）に大きな多様性があることがわかった。組成の多様性の起源の問題は獲得目標 II-(5)でも扱い、この多様性は揮発性成分含有量の多様性を反映しているはずで、惑星が保持する揮発性成分量は惑星のハビタビリティを左右する。つまり、スーパーアースのバルク密度の多様性の起源を解明することは、獲得目標 III-(6)のハビタブル惑星の形成可能性を理解することに密接に関わる重要な問題でもある。大気はまさに揮発性成分なので、研究項目 A02 とも密接にからむ。したがって、当初計画した中心星と円盤ガスの磁気結合の問題に進む前に、観測データとの比較検討をベースにして、惑星組成の問題に取り組んだ。取り組む順番を変えて進めて、成果を得ている。

5. 巨大衝突に因る集積

【目的】計算機シミュレーションを通じて共鳴軌道に無いスーパーアースの起源を探る。

【進展状況】原始惑星の巨大衝突の軌道計算により、観測されている共鳴軌道にないスーパーアースの起源を明らかにした。衝突による揮発性元素の剥ぎ取りの問題は、テストケースとして、木星のガリレオ衛星の組成の多様性の問題に取り組み、さらに3次元衝突シミュレーションを続けており、順調に進展している。

III. ハビタブル惑星の存在確率

6. ハビタビリティに関するファクターの洗い出しとの各要因の解析

【目的】総合的な知見に基づき、ハビタブル惑星の存在確率について科学的な根拠を得る。

【進展状況】上記課題の結果をふまえて、後半年次において重点的に進める課題であるが、すでに惑星質量や惑星自転軸の安定性というハビタビリティの各ファクターについての解析は始めており、順調なスタートを切っている。