
2021 年度 第 51 回 天文・天体物理 若手夏の学校
星・惑星形成 アブストラクト集

臼井 寛裕 (宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所・教授)

8月23日 14:30–15:30 A 会場

はやぶさ2、火星衛星サンプルリターン計画、そして太陽系探査の将来：次の世代につなぐ惑星科学の最前線

はやぶさ・はやぶさ2の成功により、小天体からのサンプルリターン探査で世界をリードする JAXA は、その次のターゲットとして、火星の衛星からのサンプルリターンを計画している。一方、重力天体を対象とした探査では、アルティミス計画に代表されるように、月・火星を舞台とした国際探査が加速する。このような国際情勢を鑑み、JAXA では、2020-2030 年代に行う戦略的火星探査プログラムを検討している。戦略的火星探査プログラムにおいては、(1) 火星衛星からのサンプルリターンを目指す火星衛星探査計画 (MMX: Martian Moons Exploration) を端緒に、(2) 周回機による地下水分布の調査を目的とした Mars Ice Mapper 計画、そして (3) 着陸機による地下圏探査をマイルストーンとする。これら 1–3 のミッションは、国際協働の枠組みを利用しながら、ミッション間での技術的連続性を意識し、戦略的に配置されることが特徴である。本講演では、日本のお家芸となったサンプルリターン探査や、国際協働による月・火星探査計画を中心に、JAXA の進める太陽系探査計画の概要と期待される科学成果を紹介する。

相川 祐理 (東京大学 大学院理学系研究科天文学専攻・教授)

8月24日 11:15–12:15 B 会場

星・惑星系形成領域のアストロケミストリー

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) では、ダスト連続波で $0.03''$ 、分子輝線で $0.1''$ の空間分解能が達成されている。これは近傍の星形成領域でそれぞれ 5 au, 15 au に相当し、星・惑星系形成過程の詳細な観測が可能となった。輝線観測は連続波に比べて長時間積分が必要であるが、ガスの分布、速度構造の解明に不可欠である。さらにガスの分子組成は温度や紫外線強度などの物理パラメータにも依存しながら時間とともに変化している。分子組成が物理パラメータにどのように依存するのかを理解すれば、輝線観測から星形成過程や星周構造をよりよく読み解くことができる。例えば、CO は安定で存在度も高いためガス全体の分布や速度構造を調べるために最もよく用いられるが、低温 (≤ 10 K) 高密度 ($\geq 10^5$ cm $^{-3}$) な分子雲コア中心部ではダスト表面に凍結してしまう。そのような領域は、代わりに N $_2$ H $^+$ などの輝線が用いられる (e.g. Aikawa et al. 2005; Crapsi et al. 2005)。また、衝撃波や昇温によって存在度が大きく変化する CH $_3$ OH, SO などの輝線は、原始星近傍の高温 (≥ 100 K) 領域や円盤へのガス降着を選択的にとらえることができる (e.g. Aikawa et al. 2012; Sakai et al. 2014, Oya et al. 2016; 2019; Aota et al. 2015; Miura et al. 2017)。

星・惑星系形成領域の分子組成の解明は、そこで形成される惑星系の物質科学的理解にも直結する。例えば、原始星近傍では CH $_3$ OH をはじめさまざまな有機分子が検出されているが、それらの相対的な存在度比や同位体比は、近年 Rosetta 衛星で探査された彗星 (67P/C-G) の組成とよい相関を示す (e.g., Jorgensen et al. 2016; Furuya et al. 2016; Altwegg et al. 2017; Drozdovskaya et al. 2019)。

一方、原始惑星系円盤内でも現在までに CO などの 2 原子分子から CH $_3$ OH, CH $_3$ CN など比較的大きな有機分子まで様々な分子が検出されている。ダスト連続波でみられるリング-空隙構造との相関、円盤の電離度、同位体比、元素組成の不均一性などについて観測的な研究が可能となってきた。講演では、これら星・惑星系形成領域でのアストロケミストリーについて、基礎となる理論的知見と近年の観測結果を合わせて紹介する。

星惑 1

ダークマターとバリオン間の相対速度による超音速駆動ガス天体形成

仲里 佑利奈 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

宇宙の再結合時には、バリオンとダークマター (DM) の間に超音速の相対運動 (Streaming Velocity; SV) が一般的に存在する。これは初期宇宙におけるバリオンの音響振動に由来するもので、この運動が宇宙初期の構造形成に大きな影響を与えていることが近年明らかとなった (Tseliakhovich & Hirata 2010)。SV の存在下では、DM よりもガスの自己重力が支配的と考えられる天体の形成 (超音速駆動ガス天体; 以下ガス流天体)、も示唆されており、球状星団の起源であると考えられている (Naoz & Narayan 2014)。SV を考慮したシミュレーションは近年実行され、ガス流天体の存在が確認されたが (Chiou et al. 2018)、星団形成において重要な冷却剤である水素分子 (H_2) 冷却が考慮されていなかった。

そこで本研究では初期条件で SV による相対運動を考慮し、 H_2 生成を含む化学反応を解く 3 次元流体シミュレーションを実行し、相対速度の標準偏差 $0, 2\sigma$, H_2 冷却のあり/無しの計 4 パターンの条件下で $z = 200$ から $z = 25$ までのハローの進化を追った。結果として SV あり/ H_2 冷却ありの条件でもガス流天体の形成が確認され、 $z = 25 - 30$ ではその数が H_2 冷却なしの場合よりも多いことが判明した。ガス流天体の形状を詳細に調べたところ、 H_2 冷却によってガス流天体がフィラメント状に形成され、 H_2 冷却無しの計算に比べてより複雑な構造をもつことを明らかにした。この効果は後の星形成に影響を与える。さらに、それぞれの条件でガス流天体の密度-温度進化をみると、SV あり/ H_2 冷却ありの場合には、同一ハロー内で異なる温度進化を示す領域があり、それぞれガスの収縮時間が異なることを発見した。低温領域 (~ 300 K) では H_2 が生成され、その冷却が支配的となる一方、高温領域 (~ 8000 K) では相対速度がガス流天体近傍の DM ハローにせき止められラム圧が生じ、 H_2 が解離したため、 H_2 冷却が非効率的になったと考えられる。本講演では、各条件でのガス流天体生成率や形状、およびその形成メカニズムを比較し、SV と H_2 の複合的効果がもたらすガス流天体の性質について発表する。

星惑 2

Super star cluster RCW 38 における分子ガス高解像度観測

鈴木 大誠 (大阪府立大学 M1)

Super Star cluster (以下、巨大星団) は、サイズ 1 pc 以下の狭い範囲に若い O 型星が多数集中する特異な星団である。銀河系内の若い巨大星団は 4 例ほどしか知られておらず、その中でもっとも若い (0.1 Myr) 巨大星団が RCW 38 である。この領域の母体分子雲はほとんど散逸しておらず、大質量星形成の初期段階を探る上で重要な天体である。本講演ではこの領域の分子ガスの詳細観測を行った、2 本の論文紹介を行う。

Fukui et al. 2016[1] では単一電波望遠鏡による $^{12}CO(3-2)$ 輝線等の観測結果より、 $\sim 2 \text{ km s}^{-1}$ (リング状雲) と $\sim 14 \text{ km s}^{-1}$ (フィンガー状雲) の異なる速度を持つ 2 つの分子雲の存在が明らかになった。その 2 つの速度成分を空間的、速度的に接続するブリッジ構造も見られたことから、2 つの異なる速度の分子雲が衝突することにより、リング状雲の中心 0.5 pc 以内に存在する ~ 20 個の O 型星形成を誘発した可能性を提案した。

この複数の速度成分が見られた領域において、星形成に直結する分子雲コアや原始星周構造の詳細を明らかにするため、Torii et al. (2021)[2] は ALMA による観測を行った。 $C^{18}O(2-1)$ 輝線のデータに基づいて質量 $10-130 M_{\odot}$ 程度の大質量分子雲コアを 20 個程度同定した。それらのコアのうち、数 $100-1000 \text{ au}$ 程度のコンパクトな 1.3 mm 連続波源が付随するものを 2 つ確認した (Source A, B)。両ソースから最大速度 $30-70 \text{ km s}^{-1}$ 程度、力学的時間 $\sim 1000 \text{ yr}$ のアウトフローを確認した。連続波源の質量は $2-5 M_{\odot}$ で、うち Source A では $C^{18}O(2-1)$ 輝線により回転していると思われる速度構造を確認したことから、大質量な星周円盤が形成されている可能性が高い。これらは太陽系近傍の小質量星形成領域では見られない大質量な原始星系の母体天体を含めた分子雲コアは分子雲衝突による強い圧縮を受けて形成されたと考えられる。

また、本講演では以上の先行研究の紹介に加えて、我々が現在行っている同領域の新たな ALMA のデータの解析についても紹介する。

1. Fukui et al, ApJ, 820, 26, 2016
2. Torii et al, PASJ, 73, 205, 2021

星惑 3

大マゼラン雲 N113 領域における大質量星形成：潮汐相互作用によるトリガー 西岡 丈翔 (名古屋大学 M1)

大マゼラン雲は、最も巨大で明るい H II 領域である 30 Dor 以外にも、広範囲に活発な大質量星形成を示すことで注目される。30 Dor については、銀河間相互作用に起因するガ

ス流衝突が星形成をトリガーした可能性が指摘されている (Tsuge et al. 2019) が、それがどの程度一般性を持つかは明らかになっていない。大マゼラン雲のほぼ中央に位置する H II 領域 N113 に付随する分子雲の総質量は $4 \times 10^5 M_{\odot}$ であり (Fukui et al. 2008)、後期の進化段階 (Type III; Kawamura et al. 2009) に分類される。我々は同領域の ALMA Cycle 3 の $^{13}\text{CO}(J=2-1)$, $\text{H}^{13}\text{CO}^+(J=3-2)$ 輝線等のアーカイブデータを調べ、空間分解能 $\sim 0.1 \text{ pc}$ の観測により、分子雲の大局的な構造から分子雲コアまでの詳細な分布を明らかにした。H I および H α データとも比較することより、主に以下のような結果が得られた。

1. 分子雲は長さ約 20 pc の 2 本のフィラメント状成分からなり、H α の分布に沿って V 字型を形成する。
2. フィラメントの一部で H^{13}CO^+ によりトレースされる高密度部分が 7 カ所程度存在する。
3. H I ガスが付随しており、青方偏移 (L) 成分と銀河円盤 (D) 成分が相補的に重なっている。両成分の相対変位をガス雲衝突の解析によって求めると、L 成分が 50 pc ほど東方に移動していたと推定される。

以上の結果から、この領域では H I ガスが銀河円盤と衝突相互作用し、ガスを圧縮した可能性が考えられる。ガス速度から衝突時間スケールは 1 Myr と見積もられ星団の年齢 (Bica et al. 1996) と矛盾がないことから、潮汐相互作用に起因する大質量星形成は銀河の南東にかぎらず、中央部でも働いていると推測され、潮汐相互作用の数値シミュレーションとも合致する (Tsuge et al. 2020)。

星惑 4

教師なし機械学習を用いた分子雲ガスデータの形状分類に向けたコードの開発

山口 知留 (名古屋大学理論宇宙物理学研究室 (Ta 研) M1)

星は分子雲と呼ばれる低温の水素分子ガスからなる天体の中で形成される。したがって星形成過程を理解するために、分子雲の進化に対する理解が重要となる。分子雲での進化過程をいくつかのステージに分けたモデルはいくつか存在する (e.g. Kumar et al. 2020; Kawamura et al. 2009)。Kumar et al. (2020) では、分子雲フィラメントから大質量星を含む星団までの進化過程を、4 つのステージに分けたモデルが提唱されている。このモデルは観測されたデータと矛盾がないように考案されたモデルであり、4 つのステージは形状が大きく異なっている。しかしこのような分類は理論的に予想された分子雲や分子雲フィラメントの進化過程を念頭になされたものであり、研究者の先入観が多分に入っていると言える。そこで本研究では、観測データを先入

観を一切持たない機械学習によって形状分類させ、機械が行った分類を物理的に解釈することで、星形成過程を理解することを目的としている。機械学習によって形状分類することで、一切の先入観なく分類でき、さらには人間では気づきにくい複雑な構造を捉えて分類することが期待できる。また手法が確立すれば、分類された各ステージの存在比から、各ステージのタイムスケールを見積もることもできる。本発表では、コードを開発のために用いた「MNIST」という手書き数字のデータセットに対する性能テストの結果報告を行う。また作成したコードの観測データへの適用についても議論する。

星惑 5

大質量星形成クランプにおける分裂スケールの解析

石原 昂将 (総研大/国立天文台 修士 2 年)

星形成の初期段階には、高密度ガスの階層的な分裂が寄与する。重力収縮の過程で、主として自己重力と圧力勾配力からなるジーンズ不安定により分裂が起こると考えられている。観測的には、大質量星は星団として誕生すると同時に、連星・多重星系を構成していることが知られている (e.g., Lada & Lada 2003, Duchêne & Kraus 2013)。分裂のスケールは分裂後の高密度コアの質量や空間分布に影響を与えるため、分裂過程の理解は星団・連星形成を理解する上で重要である。

本研究では、星団形成に繋がる sub-pc スケールのクランプの分裂を観測的に解明することを目指した。クランプ分裂を説明する物理メカニズムとして、クランプ内部のガスの熱的な運動と乱流運動が不安定に寄与することが示唆されている。予想される分裂スケールであるジーンズ長と観測結果との比較から、どちらの寄与が支配的なのかを推測することができる。具体的には、28 の大質量星形成クランプ (距離 $\sim 1.3 - 5.3 \text{ kpc}$) の ALMA 1.3 mm 連続波観測データを解析し、分裂スケールを統計的に調べた。構造解析アルゴリズム Dendrogram (Rosolowsky et al. 2008) を用いて 535 個のコアを同定し、同定されたコアの座標に幾何学的アルゴリズム Minimum Spanning Tree (Gower & Ross, 1969) を適用し、間隔の分布を取得した。間隔分布には、特徴的な長さスケールの存在を示唆するピークが確認され、その値は熱ジーンズ長程度であることが分かった。これはクランプ分裂が熱的なジーンズ不安定性に支配されていることを示唆する結果である。また、本講演では観測天体の距離のばらつきによる観測的なバイアスを考慮した結果についても紹介する。

星惑 6

ALMA 観測で探る赤外線暗黒星雲内の高密度コアの特徴

森井 嘉穂 (東京大学 理学系研究科天文学専攻 M2)

星は星間分子雲中の高密度領域、分子雲コアの重力収縮により形成される。太陽の 8 倍以上の質量をもつ大質量星は、存在数が少ない一方で、強い紫外線を放射し、銀河形成や次世代の星形成に大きく影響を及ぼす、重要な存在である。しかし、大質量星は進化のタイムスケールが短く、太陽近傍にほとんど存在しないため、観測例が少なく、大質量星形成過程は未だ十分に理解されていない。

大質量星形成の理論モデルとして、大質量星なしコアから大質量星が形成される「コア降着モデル」や、小中質量原始星が大質量クランプやフィラメントからガスを獲得して大質量星を形成するという「質量獲得モデル」が提唱されているが、これらのモデルに、観測的に制限を与え、大質量星形成モデルを構築するためには、初期段階のコアの物理状態を理解することが不可欠である。そこで、高密度 ($n(\text{H}_2) > 10^4 \text{ cm}^{-3}$) かつ大質量 ($M > 500 M_\odot$) で、中間赤外線源をもたない赤外線暗黒星雲 (IRDC) に注目した。

本発表では、ALMA 望遠鏡 (空間分解能 ~ 1.5 秒角: $\sim 0.01\text{--}0.04 \text{ pc}$) を用いた、IRDC 27 領域の 1.3 mm 連続波観測の結果を紹介する。構造解析アルゴリズム dendrogram を用いて計 278 個のコアを同定した。うち $10 M_\odot$ 以上の質量をもつコアは 11 個で、約半分は $1 M_\odot$ 以下の質量をもつ小質量コアであった。クランプの質量とそこで形成される星の最大質量の間には $m_{\text{max}}^* \propto M_{\text{clump}}^{0.45}$ という経験則 (Larson 2003) があり、同定された最も大質量なコアがこの最大質量をもつ星を形成すると仮定した場合、80% 以上の領域が 100% 以上の星形成効率、すなわち周囲からのガス獲得を示唆する結果を示した。これらの結果に基づき、IRDC における星形成について議論する。

星惑 7

分子雲高密度コアの初期状態と進化過程

矢野 雄大 (東京大学理学系研究科天文学専攻 M1)

星間空間には高密度コアと呼ばれる分子雲の高密度領域が存在する。高密度コアは星が直接的に生まれる初期状態として考えられるため、星形成過程において重要視される。しかし星形成過程におけるコア中心部の状態は、周囲のダストに遮蔽されて観測困難である。そこで数値計算による星形成過程の再現が期待されている。近年では、高密度コアの初期条件として磁場を導入することで、原始星アウトフローと呼ばれる観測的事実を数値計算で再現することに成功している [1]。

ただし先の研究では、高密度コアの初期条件として理想

的な平衡状態を選択しており、これは現実に存在しうる高密度コアの一般的な力学状態が反映されていない。例えば、重力不安定や非球対称なコア、外部圧力で抑え込まれたコアといった非平衡状態の初期条件が挙げられる。そこで現実的なコアの進化過程を適切に追うために、本研究ではまず、3 次元で等温かつ重力と圧力勾配力が平衡状態にある Bonnor=Ebert 球 (BE 球) の進化過程を計算した。1 次元球対称な BE 球では、密度分布に特徴的な冪乗関係があることが数値計算から分かっており [2]、本研究における 3 次元での数値計算においても同様の結果が得られた。この 3 次元 BE 球の計算を元に、非平衡状態の初期条件を設定して、最終的なコア質量などの定量的な評価を行うことが期待できる。また計算量削減のために、原始星アウトフローをモデル化して導入するなどの近似的計算から行うことが考えられる。

本研究では、数値計算用ソフトには ENZO を用いて、Adaptive Mesh Refinement (AMR) や Sink Particle といった近似計算スキームを利用する。そして数値計算の設定や高密度コアの初期条件と進化過程の関係性について議論を行う。

1. Masahiro N. Machida, Tomoaki Matsumoto, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, vol421, pages588, 2012
2. Erica Kaminski et al., The Astrophysical Journal, vol790, pages70, 2014

星惑 8

輻射輸送計算による原始星コアの物理構造の推定 水谷 洋輔 (東京大学理学系研究科天文学専攻 M1)

ALMA 望遠鏡等によって Class 0, I 原始星の観測が盛んになり、各原始星コアによって光度や強く検出される分子に違いがあることが明らかになってきている。この理由として、各天体で物理構造や化学構造が異なっていることが予想される。物理構造が異なる場合、化学構造も異なることが予想されるため、まずは原始星コアの物理構造を推定することが必要になる。

本研究は、観測の進んでいる原始星コア (CB68, L483) の簡単なモデルを作成し観測データと比較することで、それらの物理構造を推定することを目的とする。作成したモデルはガス分子の数密度が $n = n_0(r/1\text{au})^{-p}$ に従う球対称分布に角度 θ のキャビティを開けたもので、これに対して輻射輸送計算を行うことで温度構造を決定した。輻射輸送計算は RADMC-3D (Dullemond et al. 2012) を利用し、モデルの観測データ作成にもこれを利用した。まず、モデル

のパラメータを変化させて各パラメータがデータに与える影響を分析した。次に、その結果を踏まえてフィッティングを行いモデルの SED、連続波画像と観測データを一致させることで対象天体の物理構造を推定した。

CB68 に対しては良いモデルが得られず、今研究で用いた簡単化したモデルとは異なる構造を持つことが予想される。一方、L483 に対しては観測データをよく再現するモデルを作成することができ ($n_0 = 5 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$, $p = 0.9$)、実際の物理的構造もモデルに近い単純な構造だと考えられる。したがって、CB68 と L483 の周囲は異なる物理構造を持つということが示唆された。

星惑 9

星風衝撃波が駆動する原始惑星系円盤光蒸発モデルの提案

海野 真輝 (大阪大学 宇宙進化グループ M1)

原始惑星系円盤のガスは、中心星の紫外光が駆動する光蒸発や磁気駆動円盤風により数 Myr 程度で散逸すると考えられている [1]。円盤は惑星誕生の場であるため、惑星形成論の完成には円盤進化の理解が不可欠である。中心星は円盤にとって主要な重力・エネルギー源であるから、星が円盤に及ぼす主要な影響を把握仕切ることが重要である。しかし、過去の理論研究では星風の影響が十分に考慮されてこなかった。若い星は磁気活動性が高く強い星風を出しているはずなので [2]、星風の影響を評価せずに円盤進化の全容解明は成し得ない。これまで考慮されてこなかった背景には、星風の質量放出率といった基本的な量が理論・観測の両面で十分制約できなかったことに起因する。そのため、星が円盤に与える影響を解き明かすには、星風自体の物理量を観測から制約する手法も同時に提案する必要がある。

星風が円盤ガス散逸に与える影響を調べるため、我々は遷移円盤と呼ばれる進化段階の円盤が星風にさらされている状況を考慮することにした。遷移円盤とは、中心に 10-30 au の穴を持つガス散逸後期段階にある円盤である。過去の多くの光蒸発研究では、星からの極端紫外線 (EUV) が主要な駆動源と考えられていた。しかし星風は数 100-1000 km/s 程度の超音速流であるため、円盤内縁に衝突して衝撃波がたてば、衝撃波後面も EUV 光源となることに我々は気づいた。この新しい着眼点のもと、遷移円盤が星風にさらされている状況を 2 次元軸対称流体シミュレーションで調査した。その結果、星風が生じる衝撃波は光蒸発を駆動する EUV 光源になりうるということがわかった。さらに、これまで測定が極めて困難であった星風の質量放出率を将来の紫外線観測で推定する方法も提案する。このアプローチは星風に着目することで円盤進化のみならず若い星の理解を進める強みがある。本講演では得られた結果と展望について

議論する。

1. Alexander, R., Pascucci, I., Andrews, S., Armitage, P., and Cieza, L., in *Protostars and Planets VI*, ed. H. Beuther, R. S. Klessen, C. P. Dullemond, and T. Henning, 475, 2014
2. Cranmer, S. R., Gibson, S. E., and Riley, P., *SSRv*, 212, 1345, 2017

星惑 10

原始惑星系円盤光蒸発の輻射流体計算：円盤ダスト-ガス質量比依存性

駒木 彩乃 (東京大学 修士課程 2 年)

太陽系近傍星形成領域の観測から原始惑星系円盤の寿命は約 3-6 百万年で消失すると見積もられている [1]。円盤消失機構の一つとして光蒸発が挙げられている。光蒸発とは中心星または近傍にある星から放出された Extreme Ultraviolet (EUV; $13.6 \text{ eV} < h\nu < 100 \text{ eV}$), Far Ultraviolet (FUV; $6 \text{ eV} < h\nu < 13.6 \text{ eV}$), X-ray ($0.1 \text{ keV} < h\nu < 10 \text{ keV}$) によって円盤物質が加熱され、円盤から流れ出ていく現象である。惑星系は円盤を構成するガス・ダストを材料として形成されるため、円盤寿命は惑星形成の直接的な時間制限となる。星形成領域でのミリ波観測から、年齢と共に円盤中のダスト質量が変化することが示唆されている [2]。そのため、より詳細な円盤進化を明らかにするためには各進化段階のダスト量における光蒸発過程の違いを考慮する必要がある。観測によって多様な惑星が発見されていることから、様々な性質を持つ円盤の円盤進化を理論的に明らかにするという点においても重要である。

二次元輻射流体計算をダスト-ガス質量比が 10^{-8} - 10^{-1} の円盤に対して遂行し、ダスト量の光蒸発への影響を明らかにした。中心星輻射の輸送、非平衡化学反応、流体 (連続の式、オイラー方程式、エネルギー方程式) を同時に解いた。本研究では EUV による水素原子の光電離に伴う加熱、FUV による光電加熱、 H_2 pumping による加熱、X 線による各種元素の電離に伴う加熱を考慮して熱化学分布を自己整合的に計算した。その結果、ダスト-ガス質量比が 10^{-3} 以上の円盤表面では FUV 光電加熱が主な加熱源となった一方、ダスト-ガス質量比が 10^{-3} 以下の円盤表面では H_2 pumping が主な加熱源となっていた。また、加熱過程の違いにより円盤面密度損失率の分布が異なっていた。これらから円盤進化によってダスト量が変わることで質量損失も変化することを明らかにした。

1. Haisch et al., *ApJL*, 553, L153, 2001
2. Mathews et al., *ApJ*, 745, 23, 2012

星惑 11

降着円盤の角運動量輸送に起因する不安定及び構造形成

徳野鷹人 (東京大学理学系研究科天文学専攻 M1)

近年、ALMA 等による高解像度の観測により、原始惑星系円盤にはリング状の構造が普遍的に存在している事がわかっており [1]、また、数値実験でもリング状の構造が形成される事が確認されている [2]。リング状の構造はダストを集めて微惑星を成長させ、惑星形成を促進する事が数値実験から示唆されている [3] 為、この構造形成の理解は惑星形成理論に不可欠と言える。

現在、磁場による不安定性を介したリング状の構造形成のメカニズムが Riols et al.(2019) [4] で提案されている。しかし、Riols et al.(2019) [4] ではデカルト座標系を採用している為に角運動量の向きを定義できず、磁場による角運動量輸送と質量の降着を考慮せずに議論していた。原始惑星系円盤の磁場は一般的に双曲的な形状を持ち、磁場と乱流による外側への角運動量輸送により中心天体方向への質量の降着が駆動される。この角運動量輸送と降着は磁場が強ければ強いほど、また密度が低ければ低いほど強くなる事が知られている [5]。これによりガス降着が「渋滞」した結果として、高密度弱磁場の領域と低密度強磁場の領域に分かれるような不安定性が生じ、この不安定性が原始惑星系円盤のリング状構造の形成の一因であると考えられる。

我々は双曲的な構造の磁場かつ角運動量輸送や降着を定義可能な円柱座標系の下で上記の描像に基づいて理論的解析を行い、不安定条件や成長率を導出した。将来的には、大規模数値計算により磁気流体シミュレーションを実行する事で、先行研究と同様にリング状の構造が再現される事を確認した後、上記の不安定条件や成長率が妥当であるかを検証する予定である。

1. Andrews et al. 2018, ApJL, 869, L41
2. Suriano et al. 2019, MNRAS, 484, 107
3. Taki et al. 2021, ApJ, 909, id.75
4. Riols et al. 2019, A&A, 625, A108
5. Suzuki & Inutsuka 2009, ApJ, 691, L49

星惑 12

原始惑星系円盤における一酸化炭素同位体組成の測定可能性

吉田 有宏 (国立天文台／総合研究大学院大学 M1)

同位体組成は原始惑星系円盤 (PPD) から惑星系にいたる物質の形成・進化のトレーサーとして有用である。例えば、ある隕石には、希少な酸素同位体の存在度 $^{17}\text{O}/^{16}\text{O}$ 、

$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ が太陽組成よりも 20 % 程度大きい物質が含まれていることが知られており、太陽系形成時の水の組成を反映していると考えられている。この同位体分別のメカニズムとして、PPD での一酸化炭素分子 (CO) の同位体選択的光解離が提案されているが、観測的には未検証である。

また、PPD の化学反応モデル計算からは、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}/^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ が炭素-酸素比 (C/O) に強く依存することが示唆されている。 C/O は太陽組成では 0.6 程度であるのに対し、いくつかの PPD では 1 よりも大きいことが観測的に示唆されているが、具体的な値はわかっていない。 CO 同位体比から C/O を制限できれば、そこで形成される惑星の組成にも示唆が得られる。

PPD では一般に $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 輝線の中心は光学的に厚く、その柱密度を見積もることができない。しかし、輝線は分子の熱運動によって広がりを持つから、その「すそ」には光学的に薄い部分が存在し、柱密度の比であれば測定することができる。

本研究では TW Hya まわりの PPD を想定し、この手法による CO 同位体比の測定可能性を具体的に調べた。まず PPD の物理・化学構造を計算し、次に輻射輸送計算を実行した。その結果、ALMA を用いた観測で、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}/^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ の半径プロファイルを 5 % の精度で決定でき、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}/^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ についても制限できる可能性があることがわかった。発表では ALMA アーカイブデータの解析結果についても報告する。

星惑 13

原始惑星系円盤における乱流とダスト成長 山本昌平 (筑波大学 数理物質科学研究科物理学専攻 M1)

太陽系の形成初期段階において、原始惑星系円盤標準モデルによると、原始太陽の周りをガス、また惑星の元となる固体微粒子であるダストが回転しており、ダストはガスの中で付着成長していき微惑星へと成長したとされる。しかし、ダストは回転速度がやや遅いガスとの摩擦により角運動量を失うので、中心星から 1 AU に存在するダストは最短 100 年で中心星に落ちてしまう問題がある。また、一定速度以上で衝突したダストは跳ね返りや破壊が起きてしまい、付着成長できないという問題もある。これらの問題を解決するメカニズムとして近年ストリーミング不安定が提唱されている。これはダストの中心星への落下中において、先方のダストが風よけの役割をすることによってダスト成長が急激に進められるというメカニズムだ。ストリーミング不安定が有効になるためには、ダストがセンチサイズまで成長していること、ダストガス比が数倍になっている必要がある。(Ishihara et al. 2018) そこで、乱流中でダスト

が中心星に落下しながらでもストリーミング不安定が有効になる条件までダストを成長させることができるかということが本研究の目的である。

本研究ではガスによる乱流を非圧縮のナビエ-ストークス方程式をフーリエ・スペクトル法を用いて数値計算することにより求めた。そして、その中で中心星方向を想定した一方向にのみ初期速度を持つダストを置くことによってダストの乱流中での振る舞いからダストどうしの衝突確率の計算を行った。結果、比較的短い時間で速度の非等方性がなくなり、乱流中でもストリーミング不安定を有効のようにダスト成長が起きることが分かった。

本公演では、計算手法や結果について詳しく議論する。

星惑 14

ダスト移流成長シミュレーションに基づく原始惑星系円盤 HD 163296 のダストリング形成機構の制限

土井 聖明 (総研大/国立天文台 修士 2 年)

惑星は原始惑星系円盤内でのダストの合体成長により形成されると考えられている。したがって、ダストの分布や成長環境の解明は惑星形成の解明に必須である。近年の ALMA 望遠鏡によるミリ波連続波観測により、多くの原始惑星系円盤がダストリング構造を持つことが明らかとなった (e.g., Andrews et al. 2018)。これらのダストリング部分ではダストが濃集しており、微惑星形成を引き起こすと考えられている。ダストリングの成因として、これまで複数の形成機構が提案されてきたが、観測されたリングがどの機構によるものかは議論の渦中である。

本研究では原始惑星系円盤 HD 163296 のリング形成機構を観測とシミュレーションの比較から制限する。この天体は二つの明瞭なダストリングを持ち、観測に基づいてダストの動径分布、鉛直分布の両方が制限されている天体である。特に鉛直分布に関して、内側リングではダストがガスと同程度に巻き上がっているのに対して、外側リングではダストは赤道面に沈殿していることが明らかになった (Doi & Kataoka 2021)。ここでは、1. 惑星重力によるガスギャップ形成によるダストリング形成 (e.g., Zhu et al. 2012)、2. 揮発性物質の昇華・凝結に伴うダスト破壊の促進によるリング形成 (Okuzumi et al. 2016) の二つのリング形成機構を同時に考慮したダスト移流成長シミュレーションを行い、観測に基づくダスト分布と比較することでこの天体のリング形成機構を制限する。

星惑 15

3 次元流体計算と小天体軌道計算による惑星への小天体衝突率の導出

岡村 達弥 (名古屋大学 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 M2)

近年の惑星形成理論では km サイズの微惑星に加えて、より小さい mm-cm サイズ粒子 (ペブル) の降着による惑星形成が盛んに議論されている [1]。これら固体小天体は原始惑星系円盤や惑星大気中をガス抵抗を受けながら運動しており、この運動により惑星と小天体の衝突断面積が決まる。そのため惑星形成を議論するにあたり原始惑星系円盤ガス・惑星大気を考慮することが必要不可欠である。そこで本研究では、ペブルから微惑星まで幅広いサイズの小天体の惑星への衝突率を求めるために流体計算と小天体の軌道計算を行った。

本研究では、まず原始惑星重力により摂動を受けた原始惑星系円盤ガスの流れを 3 次元流体計算で求めた。流体計算の結果、惑星の周りに閉じた流れができ、惑星は惑星大気を形成する。大気の外側の流れも惑星の重力を受けた特徴的な構造になる。惑星の進行方向前後には馬蹄形流が形成される。

次に、この流れ中の小天体の軌道を数値積分により求めた。本研究では、mm - km にあたるサイズの小天体の軌道計算を行った。軌道計算の結果をもとに、惑星への衝突率 P_{col} を求めた。その結果、m - km サイズの小天体は密度の大きい惑星大気から強く影響を受け、大気がない場合に比べ衝突率は大幅に上昇する。それよりもサイズの小さな天体は原始惑星系円盤ガス流とよく結合しており惑星近傍を通過する時間と惑星に沈降する時間によって衝突断面積は決まる。さらにサイズの小さな天体では馬蹄形流により衝突軌道が狭められる効果などが見られる。これらの効果を考慮して衝突率の新たな解析解を導出した [2]。

1. Ormel, C. W., & Klahr, H. H. 2010, A&A, 520, A43
2. Okamura, T., & Kobayashi, H. 2021, ApJ

星惑 16

地球への水輸送を目的とした微惑星の軌道進化シミュレーション

安田 郁斗 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

地球は生命を育む水惑星であるが、海洋の水の質量は地球質量の 0.02% 程度で、地球内部に含まれる水を考慮しても、地球の水含有率は非常に低い。つまり地球は水を集積しない環境で形成され、形成後に水が供給されたと考えるのが自然である。リュウグウをはじめとする C 型小惑星を母天体に持つと考えられる隕石の水素-重水素比 D/H 比が、地球の D/H 比と一致するため、C 型小惑星の前駆体である氷微惑星が地球に衝突し、水を提供した可能性が高い。

木星のような巨大惑星による重力散乱で微惑星の軌道離心率が上昇し、微惑星は地球と遭遇できるような軌道になる。一方、小惑星帯の小惑星は地球と遭遇するほど離心率が大きくないので、離心率が原始惑星系円盤によるガス抵抗によって低下し、準安定な軌道に落ち着く必要がある。重力散乱では初期の軌道で決まる保存量に従って離心率が上昇し、微惑星の内部密度が一定の時、サイズが大きいほどガス抵抗で離心率が低下するまでに時間がかかる。よって微惑星の輸送は、重力散乱で離心率が上昇する時間に比べてガス抵抗が効くかによって決まる。Raymond & Izidoro (2017) では N 体軌道計算によって、巨大惑星の成長とガス円盤によるガス抵抗の効果で、太陽系外側で形成した微惑星が小惑星帯に準安定な軌道を持ち、地球軌道にも到達し得ることが示された。そこで本研究では巨大惑星が形成し、ガスが残存している段階を仮定し、木星を模した惑星を 6 AU に配置した時の、周囲の微惑星の軌道進化を N 体シミュレーションによって計算し、地球への水輸送が可能な条件を探る。さらに同様の輸送プロセスで太陽系外側に原始惑星や材料物質を供給し、惑星成長をさせることが可能なのかについても考える。本講演では以上の点について議論する。

星惑 17

原始惑星への小惑星衝突による蒸発についての理論的研究

宮山 隆志 (名古屋大学 理論宇宙物理学研究室 Ta 研 M1)

地球のような生命を育む惑星の表層環境の形成には大気の進化が重要である。惑星は、小天体の衝突により大気のはぎとりや衝突脱ガスによる大気の組成編成が起こるため、天体の衝突現象は惑星大気の進化を支配する重要な現象である。本研究では、衝突にともなう蒸発について調べる。衝突による蒸発量は、衝突天体の運動エネルギーに比例して、増えることが知られている (O' Keefe & Ahrens. 1982, Kraus et al. 2011)。しかし、衝突エネルギーが小さい時は先述の比例関係と比較して、蒸発量が著しく小さくなる。そして、衝突速度が音速よりも小さい時はほとんど衝突は起きない。つまり、蒸発が起こる臨界速度が存在するようである。私は、この臨界速度を求めるため、1 次元衝突シミュレーションを行った。シミュレーションの結果、衝突による衝撃波により被衝突天体の圧力が上がり、衝撃波通過後の断熱膨張により密度が元の値に戻ったときに蒸発が起こることが示された。つまり、衝撃波が弱いときには蒸発が起こらずに、臨界速度が求められる。この結果を解析的にも解釈を与えた。ランキン=ユゴニオの関係式で決まる最大圧力は衝突速度から見積もることができる。また、断熱膨張により密度が元に戻ったときの内部エネルギーに応じて

蒸発量が決められる。この結果、衝突エネルギーが小さい衝突による蒸発量を解析的に求めることに成功した。また、多次元の衝突シミュレーションの結果についても議論する。

星惑 18

すばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam を用いたメインベルト小惑星の観測とサイズ分布の測定

前田 夏穂 (神戸大学 D1)

小惑星帯 (メインベルト) には、S 型・C 型をはじめとする様々なスペクトル型を持つ小惑星が存在する。スペクトル型は表面組成等を反映すると考えられている。

小惑星のサイズ分布は、それらの継続的な衝突進化過程を強く反映すると考えられている [1]。我々は、観測的手法を用いて、小惑星のスペクトル型の違いが、それらのサイズ分布に違いを生じ得るかどうかを調べた [2]。まず、すばる望遠鏡に搭載された広視野撮像カメラ Hyper Suprime-Cam を用いて、広域撮像観測を実施した。得られた撮像データから、24.2 等級より明るい約 3500 個のメインベルト小惑星を検出し、それらの絶対等級と $g-r$ カラーを測定した。さらに、各天体を $g-r$ カラーに基づいて S 型小惑星と C 型小惑星に分類し、それぞれのサイズ分布を得た。

その結果、S 型小惑星と C 型小惑星のサイズ分布は、直径約 0.4 km - 5 km の範囲においてよく一致することがわかった。これは、少なくともこのサイズ範囲において、小惑星の組成の違いは衝突破壊強度にほとんど影響しないことを示唆する。サイズ分布が一致したサイズ範囲は、小惑星の自転周期分布に見られるスピンバリアのサイズ範囲と整合的である [3]。本研究の結果は、直径 0.4 km - 5 km の小惑星の大半がラブルパイル天体であるという見解を支持する。

1. Bottke, W. F., Broz, M., O'Brien, D. P., et al., in Asteroids IV, 701 - 724, 2015
2. Maeda, N., Terai, T., Ohtsuki, K., et al., Astron. J., 投稿中
3. Chang, C-K, Ip, W-H, Lin, H-W, et al, Astron. J., 219, 27, 2015

星惑 19

エジェクタ堆積物の赤道リッジ形成への寄与 池谷 蓮 (神戸大学理学研究科惑星学専攻 M1)

小惑星 Ryugu はコマ型をしており赤道リッジをもつ。こういった小惑星はこれまでに複数発見されている。赤道リッジの形成モデルとしては主に二つで、高速自転時に変形したとするモデル [1] と、集積したときにすでにコマ型になるというモデル [2] がある。本研究では、高速自転時にエジェクタが赤道域へ集中して堆積することで、赤道リッジ

が形成されるという三つ目のモデルを提案する。エジェクタ分布を計算することで、Ryugu の赤道リッジ形成には自転が 3 時間の期間が合計で MBA なら 28^{+47}_{-27} Myr、NEA なら 3100^{+4200}_{-1200} Myr 必要だということがわかった。km サイズの天体が衝突破壊されるまでの平均寿命は数百 Myr [3] [4] とされるので、赤道リッジは MBA で形成されたことが示唆される。MBA においては形成に必要な時間が衝突破壊寿命より短いことから、赤道リッジ形成にエジェクタ堆積物が寄与している可能性は十分あると考える。

引用

1. Scheeres, D.J., et al., Nature Astron. 3, 352361, 2019
2. Michel, P., et al., Nat. Commun. 11, 2655, 2020
3. O' Brien, D.P., Greenberg, R., Icarus 178, 179212, 2005
4. Bottke, W., et al., 337
UTF2013357, 1994

星惑 20

月の熱進化に及ぼすマグマの生成・移動と放射性元素輸送の影響

于 賢洋 (東京大学 M2)

重力異常や表面地形の観測から、月では初期の数億年間に数 km 程度の半径膨張が起き [1]、海の火成活動の極大期を経たのち [2]、収縮が起きた [3] ことが示唆されている。本研究ではこのような月内部の熱史を理解するべく、従来の月内部の熱進化シミュレーションでは考慮されていなかったマグマの生成・移動とそれに伴う放射性元素の移動を反映させた数値モデルを構築した。

初期条件は、深部・中部マントルでは融解していないとし、また、浅部マントルは初期に部分溶融しているとした [4]。マグマの生成は、ある地点の温度が溶融温度を超えた地点で発生するとし、その移動は液相・固相の密度差によって駆動される浸透流と仮定した [5]。内部熱源となる放射性元素は、時間とともに崩壊熱が減衰するほか、マグマに伴って輸送されると仮定した [6]。

その結果、深部マントルで発生したマグマが上部マントルへと上昇する過程でさらに累進的に融解が起こり、これにより初期の数億年間膨張が起こった。さらにマグマによる熱輸送と、深部マントルの放射性元素の欠乏の結果、月は冷却し、後期の収縮が起こることがわかった。特に、半径が最も膨張した時期はマントル広域で最も溶融した時期でもあり、海の火成活動極大期と一致している。また、初期条件として与える深部・中部マントルの温度があまりにも高いと、マグマの移動により放射性元素が最初の数千万年で地殻に

濃集してしまい、マントル中の放射性元素が枯渇することによって初期膨張が発生しないことがわかった。このことから、形成期の月内部温度は 1450K から 1600K 程度であり、コア・マントル境界直上に放射性元素に濃集した領域があったと推定した。これは月形成過程への制約となり得る。

1. Andrews-Hanna J. C. et al., Science, 339, 675-678, 2013
2. Hiesinger H. et al., J. Geophys. Res., 108, 5065, 2003
3. Watters T. R. et al., Science, 329, 936-940, 2010
4. Elkins-Tanton L. T. et al., Earth Planet. Sci. Lett., 304, 326-336, 2011
5. Ogawa M., Geophys. J. Int., 215, 2144-2155, 2018
6. Ogawa M., Geophys. J. Int., 220, 1409-1420, 2020

星惑 21

短周期 super-Earth の大気の光蒸発に伴う軌道進化: 観測への示唆

藤田 菜穂 (京都大学 M2)

近年 Kepler 宇宙望遠鏡などの活躍によって系外惑星探査が大きく進展し、数多くの系外惑星が発見されてきた。中でも super-Earth の発見数は飛躍的に増加しており、発見された super-Earth は分厚い大気を持つものからほとんど大気を持たないものまで様々である。また、系外惑星の分布からは、半径 $1.5\text{--}2.0R_{\oplus}$ の惑星が少ない、海王星サイズの惑星が少ないなどいくつかの特徴があることも分かっている。

このような系外惑星の多様性や統計的な分布における特徴の起源は明らかになっていないが、惑星からの大気散逸が重要な役割を担っていると考えられている。実際、観測により示されている特徴のいくつかは、大気散逸によって説明できるということがすでに示されている [1]。ただし、過去の研究では、大気散逸を経験する惑星の軌道は変化しないと仮定して計算が行われてきた。しかし実際には、中心星-惑星系全体の軌道角運動量を考慮すると、大気散逸による質量損失に伴って惑星が外側に移動するという軌道進化も起きると考えられる。

本研究では、super-Earth の質量-軌道分布の理解を目的とし、惑星大気の光蒸発に伴う軌道進化が最終的な惑星系の構造に与える影響、そして観測された惑星分布における特徴が軌道進化を含めても再現されるのかを調べた。計算の結果、このような軌道進化は軌道間隔の狭い密集 super-Earth 系では特に重要になってくることが分かった。さらに、軌道進化を含めた場合でも惑星分布における特徴が再現され、観測と整合するということが確認できた。今後は観測によ

て M 型星周りの super-Earth 系が多数発見されることが期待されるため、本研究はそのような観測に先駆けた理論的予測となる。さらに、将来的には観測データと計算結果を比較することで、この理論モデルを再検証することが可能になる。本講演ではこのような今後の系外惑星探索との関連性についても議論したい。

1. Owen, J. E., & Wu, Y. 2017, ApJ, 847, 29

星惑 22

太陽系外惑星の近赤外トランジット観測

平野 佑弥 (兵庫県立大学 物質理学研究科 光学赤外線天文学研究室 M2)

1995 年に 51 Peg という恒星の周りで巨大なガス惑星が発見された。それ以来、太陽系外惑星の研究が盛んに行われるようになった。太陽系外惑星探査機ケプラーやトランジット系外惑星探査衛星 TESS などの活躍により、現在 4000 個以上の太陽系外惑星が発見されている。さらに次の段階として太陽系外惑星の特徴づけが行われており、大気組成の推定が大きな目標である。トランジットとは太陽系外惑星が主星の前面を周期的に通過する現象のことである。これに伴う主星の明るさの変化と恒星の半径から惑星の半径を求めることができる。またトランジット中、主星の光の一部は惑星大気原子・分子に吸収される。惑星大気には波長依存性があるので、波長によってわずかにトランジットの深さが異なる。特に近赤外領域では分子の吸収が多く見られるため、大気組成を調べることができる。

本研究では西はりま天文台なゆた望遠鏡 (口径 2 m) に搭載された近赤外撮像装置 NIC を用いてトランジット測光観測を行う。NIC は J バンド (1.2 μm)、H バンド (1.6 μm)、Ks バンド (2.1 μm) を同時に観測することができる装置である。また表面温度が高温 (1000 K 以上) のガス惑星であるホットジュピターを観測対象星とする。取得した画像は画像処理ソフト IRAF で処理・解析を行い、光度曲線フィッティングツール EXOFAST を用いて波長ごとの惑星の半径を求める。さらに惑星大気シミュレーションツールである Planetary Spectrum Generator を用いて太陽系外惑星の大気モデルを作成し、モデルと観測値を比較することで大気組成を推定する。

本講演では Qatar-9 (K5V、有効温度 約 4300 K) を公転する太陽系外惑星 Qatar-9 b の観測結果を報告し、波長依存性から惑星の大気組成を議論する。

星惑 23

CARMENES 近赤外データの再解析と視線速度測定精度の調査

池田 圭吾 (東京工業大学 理学院地球惑星科学系 M2)

視線速度法は中心天体が惑星系との共通重心を周回することで生じる視線速度の変化を、スペクトル線のドップラーシフトとして観測する太陽系外惑星探査法である。CARMENES[1] は Calar Alto 3.5m 望遠鏡に搭載された可視・近赤外同時分光器であり、視線速度解析パイプラインとして SERVAL[2] が開発、使用されている。CARMENES は M 型星周りの惑星を中心に探索しており、ハビタブルゾーン内の地球型惑星発見 [3] などの成果を挙げている。

その一方で近赤外における視線速度測定精度は可視領域のものに比べて劣り、本来想定される精度にも劣ることがわかっている。このため、CARMENES における視線速度法での惑星探索では近赤外の観測結果が十分に活用されていない。この問題に対し我々は視線速度の解析方法について注目した。すばる望遠鏡に搭載された近赤外分光器である IRD では分光器内において生じる視線速度変化 (RV drift) があり、この RV drift は時間変化し、オーダーやオーダー内でも異なることがわかっている。IRD における視線速度解析パイプライン [4] では RV drift を Instrumental Profile(IP) とし、更に telluric の影響を考慮したモデルを解析に用いており、SERVAL と解析方法に違いがある。本研究では IRD のパイプラインを CARMENES の近赤外データに応用し、解析方法の違いが及ぼす視線速度測定精度への影響を調査することを目標としている。本講演では、CARMENES における RV drift について独自の方法を用いた視線速度測定精度改善の取り組みを報告する。

1. A.Quirrenbach et al, Proceedings of the SPIE, Volume 9908, id.990812 14pp, 2016
2. Zechmeister, M.,Reiners, A. et al, A&A, Volume 609, id.A12, 13 pp., 2018
3. Zechmeister, M.,Dreizler, S. et al, A&A, Volume 627, id.A49, 14 pp., 2019
4. Hirano Teruyuki, Kuzuhara Masayuki et al, PASJ, Volume 72, Issue 6, id.93, 21 pp., 2020

星惑 24

系外惑星トランジットの多バンド同時高速撮像

直川 史寛 (東京大学理学系研究科物理学専攻 M1)

1995 年に Mayor と Queloz がペガサス座 51 番星の周りを周回する惑星の発見を発表して以来、様々な方法で系外惑星の探索が続けられている。中でもトランジット法による観測は、惑星の存在や物理的パラメータへの制限に加え、分光観測を行うことで惑星大気についての情報を得ることができる。またトランジット時の光度曲線は主星や惑星の

様々な状況を反映し変化する。観測波長ごとにも異なる曲線を描く。[1]

上記のことを考えると、ただ主星の減光を観測するだけでなく、トランジット光度曲線の形をバンド毎に、正確に決定することは系の情報を引き出すために極めて重要である。本研究は時間領域天文学の観測装置で系外惑星トランジット観測を試みたものである。京都大学岡山天文台せいめい望遠鏡にとりつけられている TriCCS カメラの試験を兼ねて観測を行った。時間領域天文学をリードしている Tomo-e Gozen カメラ（東京大学木曽観測所）に比べ、せいめい望遠鏡 TriCCS カメラは視野は狭い反面、より感度が高く、また3バンドで同時撮像が可能であることが大きな特徴である。具体的には、g バンド、r バンド、i バンド（or z バンド）で 10 fps や 100 fps といった高速撮像が行える。

今回の観測では、g、r、z バンドを用い 10 fps で TrES-1 系 [2] トランジットの3バンド同時高速撮像（食の出前後の約2時間）を行った。観測日時が限定されていたため、当日に観測可能な天体の中から比較的 SN 比の良好なものとして天体を選定した。本稿執筆時点ではまだ観測データの解析を行っていないが、発表までに解析を行った上で、その結果を報告する予定である。また今回の観測結果を踏まえ、今後のトランジット観測への応用可能性も議論する。

1. 田村元秀, 『太陽系外惑星』, 日本評論社, 2015
2. Alonso, R., Brown, T. M., Torres, G., et al. 2004, ApJL, 613, L153

星惑 poster1

初期宇宙での超大質量ブラックホール形成過程としての冷たい降着流による超大質量星形成シナリオの検証

喜友名 正樹 (京都大学大学院 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 天体核研究室 M2)

赤方偏移 $z \sim 6$ の初期宇宙において質量が $10^9 M_\odot$ 以上の超大質量ブラックホール (SMBH) が数十例見つかり、その形成過程は現代の理論天文学に課された未解決問題の一つである。この問題を解決するシナリオがいくつか提案されており、有力なシナリオの一つに「初期宇宙に $\sim 10^5 M_\odot$ の超大質量星 (SMS) が形成されて重たい種 BH になって、その後降着成長した」とする Direct Collapse Scenario (DC) がある [1]。

DC が起こるためには、初期宇宙の星形成で主たる冷却過程を担う水素分子の量を抑制する必要がある。そのモデルの一つに、ハローへの降着流で生じる衝撃波による衝突解離モデルが提案されている [2]。その妥当性について先行研究 [3] で宇宙論的シミュレーションによって検証されてお

り、結果は「 $\sim 10^7 M_\odot$ のハローではハロー中心部まで降着流が届かず高密度化しないため SMS は形成できない」とされている。

しかし、「この結果はハロー質量が小さくショック加熱後の冷却が効かなかったせいであり、まだ検証されていない $10^7 - 10^{11} M_\odot$ のハローの場合は SMS が形成できる」可能性が指摘されている [4]。筆者は、冷たい降着流による SMS 形成の 3D シミュレーションによる検証に向け、目下準備を進めている。これまで z によらず $10^{11} M_\odot$ 以下のハローでは中心部まで降着流が届くと考えられていた [5] が、実際には降着流が中心部に届くようなハローの質量には下限があると考えられるため、まず「どの質量で降着流によるショック波面が安定に存在できなくなるか」を調べる必要がある。本発表では、本研究に関連する論文数点のレビューを行い、SMS 形成に必要なハロー質量の下限についての 1D モデルでの数値計算結果を紹介する。

1. V. Bromm & A. Loeb, Nature, 425, 812, 2003
2. K. Inayoshi & K. Omukai, MNRAS 422, 2539, 2012
3. R. Fernandez, et al., MNRAS, 439, 3807, 2014
4. K. Inayoshi et al., Annu. Rev. Astron. Astrophys., 58, 27, 2020
5. Y. Birnboim & A. Dekel, MNRAS, 000, 1, 2002

星惑 poster2

月面反射電波観測から始める SETI

中村 美香 (熊本大学大学院 自然科学教育部理学専攻物理科学コース 修士1年)

地球以外にも我々人類のような進化を遂げた生命が存在するのだろうか。さらに、人類と同じように通信機器を使って情報をやり取りしている地球外生命体の痕跡を探るためにはどのような方法で観測すればいいのだろうか。現段階の天文学では地球外生命体について未知なる要素が多いので、まずは唯一生命の存在が知られている地球からの電波を見本として、太陽系外惑星からの電波を観測する地球外生命体探査 (SETI) に繋げていきたい。地球の外から見た地球、つまり生命が存在する惑星がどのように見えるのかを究明できれば、同様の観測方法を用いて系外惑星を観測しその惑星に存在する生命の存在を証明することができる。

地球の外から地球の人工電波を観測する試みの第一歩として、地球から漏れ出た人工電波の観測が行われてきた。その一例として、1978 年には月面に反射したテレビ局からの電波を観測する実験が行われた。さらに、2012 年の MWA (1) での月面反射人工電波観測では、観測領域に月が存在する日と存在しない日での信号強度の差分から FM 周波数帯に大きな信号を捉えることができた。このような観測を行

うことによって、地球の外から見た時の地球の人工電波を擬似的に検出できる。

本研究では、地球から漏れ出た人工電波のうち月に反射して再び地球に戻ってきた月面反射人工電波を飯館惑星電波望遠鏡で観測し、その観測データを解析した。2 日間にわたる定点観測では 1 日目は月からの反射電波を含めた信号を検出し、2 日目は月の公転移動により月を含まない空を見た時の信号を検出した。この 2 日間の観測データを各周波数ごとに時間積分し差分を取ることで月面反射電波を検出できると考えられる。以上の結果を用いて、系外惑星からの人工電波検出の可能性について検討する。

1. McKinley B., et al., 2013, The Astronomical Journal, 145, 23

星惑 poster3

SPH 法におけるシア問題への取り組み

櫻井 雄太 (名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

惑星形成の舞台である原始惑星系円盤等の形成・進化の研究には流体力学的数値計算が有効である。そのような計算法の一つである SPH 法は流体を Lagrange 的に記述するため、流体素片の軌跡を簡単に追えるというメリットがある。しかし、音速が円盤回転速度に比べてはるかに小さい原始惑星系円盤など、「冷たいシア流」が重要となる流体の数値計算を限られた粒子数で行うと、非物理的な密度誤差が発生し精度良く計算できないという問題（シア問題）がある。

シア問題の解決策として Imaeda & Inutsuka (2002)、Inayoshi 2019 (名古屋大学・修士論文) では密度が非一様な流体計算において SPH 法を再定式化し、流体要素の速度と SPH 粒子の速度を区別する方法が提案されている。ただ、この方法は角運動量、運動量を厳密に保存するように定式化されておらず、また、計算コストが高いという課題がある。

他の解決策としては、カーネル関数のスムージング長を平均粒子間隔より大きく設定して、シア流によって生じた密度誤差をならすという方法が挙げられる。しかし、一般にスムージング長を平均粒子間隔より大きく設定すると典型的なカーネル関数では圧力の効果で SPH 粒子のクランピングが起こるという別の困難がある。もしこの圧力によるクランピングの問題を解決できれば Imaeda & Inutsuka (2002) や Inayoshi 2019 らとは別のアプローチからシア問題に対して取り組むことが可能である。Walter Dehnen & Hossam Aly (2012) は Wendland kernel があらゆる波長の波の摂動に対して安定でクランピングを起こさないこ

とを標準 SPH の線形安定性解析によって示している。そこで、本研究では Wendland kernel 等を用いたシア問題解決への取り組みを紹介する。

星惑 poster4

地球型系外惑星の将来観測に向けた惑星マッピングの発展

桑田 敦基 (東京大学 大学院理学系研究科 天文学専攻 D1)

系外惑星科学において、系外惑星の検出だけでなくその性質を詳細に調べる特徴付けが盛んに行われるようになってきた。本研究では惑星表面を探索することに主眼を置く。特徴付けの根幹をなす観測手法は直接撮像法と呼ばれる惑星を直接観測する手法であり、現在計画されている宇宙望遠鏡 LUVOIR や HabEx によって 2030 年代には地球型系外惑星の直接撮像が実現しようとしている。しかし、系外惑星の典型的な見かけの直径は数マイクロ秒角であり、惑星表面を空間分解して探索することは不可能である。そこで、惑星表面を空間分解せずとも、惑星の反射光の時間変動から惑星表面の二次元空間分布を得る Spin-Orbit Tomography (SOT) が開発された [1]。

本研究ではこれまで行われてきた SOT の応用研究をさらに発展させ、将来観測に向けたより実用的な方法論を開発することを目的とする。具体的には、SOT に (1) 解のスパース性を用いて効率的な推定を行うスパースモデリング [2]、(2) 複数の表面組成の反射スペクトルを同時に推定するスペクトル分離 [3]、および (3) 確率分布として推定を行うベイズ推定 [4] を適用した応用研究を融合させる。本発表では (1) と (2) を組み合わせた方法論に関する解説と地球のシミュレーションデータを用いたテスト結果を報告する。さらに、実際に SOT を適用できる系外惑星の観測データが得られたとき、推定解の評価のために必須となる (1) と (3)、および (2) と (3) の融合に関する研究計画を述べる。

1. Kawahara, H., & Fujii, Y. 2010, ApJ, 720, 1333
2. Aizawa, M., Kawahara, H. & Fan, S. 2020, ApJ, 896, 22
3. Kawahara, H. 2020, ApJ, 894, 58
4. Kawahara, H. & Masuda, K. 2020, ApJ, 900, 48

星惑 poster5

Formation of Population III star clusters in first galaxies

Oerd Xhemollari (University of Tsukuba M1)

The counter-intuitively called Population III (Pop.III) stars, which are the first stars in the Universe, have

been one of the most heavily discussed topics in modern astrophysics, and with good reason. Their undeniable impact in the transformation of the early Universe includes, among other things, the chemical enrichment of the intergalactic medium(IGM), reionization, and formation of supermassive black holes(SMBH). I review the work of Regan et al.(2020), in which simulations are performed to study the formation of supermassive stars(SMS) in pristine atomic cooling haloes under mild ($J_{LW} \sim 2 - 10 J_{21}(z)$) Lyman-Werner (LW) background. The results obtained show that 20 very massive stars form with stellar masses greater than $1000 M_{\odot}$, including the largest one with mass of over $6000 M_{\odot}$. It is noticed that the accretion of all stars strongly declines after the first ~ 100 kyr of evolution as the stars are pushed to lower density regions. Ionising radiation is analyzed, and it is concluded that it does not limit the SMS formation or growth. Ending their lives as direct collapse black holes, these massive stars will set out to be the seeds for the small haloes with populations of black holes ranging from $300 M_{\odot}$ to $10,000 M_{\odot}$, eventually merging to form intermediate mass black holes detectable by LISA [1]. In this talk, I also briefly introduce the results of my recent test calculations using the GADGET-3 code and comment on the statistical nature of key physical processes under strong ultraviolet(UV) background.

1. Regan, John A. and Wise, John H. and Woods, Tyrone E. and Downes, Turlough P. and O' Shea, Brian W. and Norman, Michael C., The Open Journal of Astrophysics, 3, 15, 2020
2. Makito Abe and Hidenobu Yajima and Sadegh Khochfar and Claudio Dalla Vecchia and Kazuyuki Omukai, arXiv e-prints, arXiv:2105.02612, 2021
3. Inayoshi, Kohei and Omukai, Kazuyuki and Tasker, Elizabeth, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 445, L109–L113, 2014

星惑 poster6

**ALMA を用いた大マゼラン雲 N159 領域の観測:
分子雲の全体像
南 大晴 (大阪府立大学 M2)**

大マゼラン雲の H II 領域 N159 に付随する分子雲は $10^7 M_{\odot}$ に迫る質量を持ち、同銀河の中でも最も巨大な分子雲の一つである。これまでの観測から N159E/W 領域には大質量星を形成しているフィラメント状の分子雲を確認し

た。一方で、N159S 領域は星形成が不活発であるが、北東部に一部フィラメント状構造が存在している (南他 2021 年春季年会)。

分子ガスのさらに広範囲な空間分布を探るため、ALMA 12m+7m+TP array を用いて観測された $^{12}\text{CO}(1-0)$ 輝線の アーカイブデータ (2019.1.00915.S) の解析を行った。これまでの CO 観測よりも 4 倍程度広範囲な領域 ($\sim 43\text{pc} \times 46\text{pc}$) を N159E/W/S の 3 領域それぞれでカバーしており、空間分解能は $\sim 0.5\text{pc}(2.''1 \times 1.''7)$ である。観測範囲が広がったことで、特に原始星や H II 領域が見られない部分、N159W の西側や N159S の周辺部における分子雲の詳細分布が明らかになった。N159W の東側ではフィラメント構造が卓越しているが、大質量星形成が見られる分子雲と比較して、4 倍程度は平均的な柱密度が低い ($\sim 4 \times 10^{22} \text{cm}^{-2}$)。N159S ではさらに柱密度が低く薄く広がる構造が大部分を占めていた。一方、N159E 領域の分子ガスは、広がった構造はあまり見られず、周りに存在する H II 領域と概ね相補的な構造をしていることから、周囲の大質量星の影響により概ね解離・電離されていることが示唆される。これらより大質量星形成の観点で進化段階は若い方から、N159S, N159W, N159E であると推定される。フィラメント状構造は広がった分子ガスの中で比較的早期に形成されるが、星形成が活発になった後は、N159E の様に発達したフィラメント状構造のみが取り残されていると考えられる。

星惑 poster7

**磁気駆動円盤風による若い原始惑星系円盤の構造形成
早川 喬 (九州大学 M1)**

近年の ALMA の観測によって、原始惑星系円盤ではリング状構造が形成されていることが分かった (e.g. Loomis et al. 2017[1])。このような原始星周りの円盤におけるリング構造の形成メカニズムはよくわかっていないが、一つの可能性として観測では捉えられない惑星によるギャップ形成が考えられている。Sheehan & Eisner (2017)[2] がクラス I の原始星 W L17 の観測を行ったところ、この天体でもリング状構造を持つことがわかった。W L17 の年齢は不確かさはあるものの、 0.5Myr と示唆されている。しかし、このような若い段階で惑星を形成するのは非常に難しいかもしれない。したがって、WL17 の観測結果は円盤進化の初期段階でリング構造が形成される別のメカニズムがあることを示唆している。Takahashi et al.(2018)[3] では惑星ではない別のメカニズムとして、磁気駆動円盤風によるリング形成の可能性を調べた。この論文では円盤形成のタイムスケール (約 10^6yr) に近い若い年齢の円盤に焦点を当ててい

るため、最小質量円盤モデルなどのように、すでに形成された円盤を初期状態として想定することはできない。その代わりとして分子雲コアを初期条件に採用し、分子雲コアの重力崩壊と円盤の進化を同時に計算している。従来の研究では、分子雲コアから原始惑星系円盤、その後の長期進化を一括りにした3次元シュミレーションは計算能力の限界によりなされていなかった。Takahashi et al.(2018) で注目している若い円盤の進化は、円盤進化の初期条件である星と円盤の形成の最終結果に強く依存している可能性がある。Takahashi et al.(2018) では、分子雲コアから円盤の長期進化までを1次元モデルとして提案し、円盤内のダストとガスの面密度の時間変化を計算して、若い円盤におけるリング構造の形成を調べた。分子雲コアの重力崩壊の計算では(Takahashi et al.2013;Takahashi et al.2016a[4][5]) を参照に1次元半解析モデルを用いた。このモデルの磁気回転不安定性による乱流、磁気円盤風による質量損失、ダストサイズ(ストークス数)の3つのパラメータを評価し、円盤の構造形成がこれらのパラメータに依存しているかどうかを調べた。WL17天体について今回行ったモデル計算で扱った3つのパラメータの適当な数値を考え、リング半径やリング幅からWL17と比較してこのモデルの妥当性について議論する。

本講演で Takahashi et al.(2018) をレビューし、磁気駆動円盤風によるリング構造形成の可能性について議論する。

1. Loomis, R. A., Öberg, K. I., Andrews, S. M., & MacGregor, M. A., ApJ, 840, 23, 2017
2. Sheehan, P. D., & Eisner, J. A., ApJL, 840, L12, 2017
3. Sanemichi Z. Takahashi & Takayuki Muto, ApJ, 865, 102(17pp), 2018
4. Takahashi, S. Z., Inutsuka, S., & Machida, M. N., ApJ, 770, 71, 2013
5. Takahashi, S. Z., Tomida, K., Machida, M. N., & Inutsuka, S.-i, MNRAS, 463, 1390, 2016a

星惑 poster8

太陽系外惑星大気の高波長トランジット観測 熊澤 希珠 (埼玉大学 天文学研究室 M1)

系外惑星は、1995年に発見されて以来、現在までに4000個ほど発見されている。例えば、主星近傍を公転するガス惑星のホット・ジュピターや地球質量の約数倍の岩石惑星のスーパーアースなど多様な惑星がある。惑星を検出する方法の一つにトランジット法がある。トランジット法は、主星の前を惑星が通過する際に起こる減光を観測し、主星の光の一部は惑星大気を透過して観測される。透過した光は

大気の組成や温度、雲の有無などにより、吸収・散乱を受けるため、観測される減光の深さに波長依存性がみられる。そのため、高波長同時トランジット観測により惑星大気を推定できる。大気は、水やメタン、ヘリウム、ナトリウムやカリウムなどが含まれ、雲やヘイズとしても存在する可能性があり、生命の可能性を考える上で、重要な要素の一つである。先行研究(石岡 2020 修士論文)では、ホット・ジュピターの大気組成の統計的な特徴の有無についての調査を目的とし、可視4波長観測と近赤外3波長観測が行われた。主星と惑星の半径比の波長依存性と惑星の物理量の相関関係や大気モデルとの比較から惑星の大気組成の推定がされた。その結果、惑星の雲の有無について、主星の金属量と惑星の密度に関係することが示唆されている。本研究では、惑星大気に対して影響のある主星の活動と惑星の大気の組成や雲の有無の関係を探ることを目的とした。埼玉大学 55cm 望遠鏡 SaCRA と三波長同時撮像装置 MuSaSHI を用いて、HAT-P-43b と HAT-P-56b についてトランジット現象の高波長同時測光観測を行った。三波長同時撮像装置 MuSaSHI は、rバンド(550-680nm)、iバンド(700-810nm)、zバンド(820-1000nm)の3バンドの観測を行うことが可能である。EXOFAST と Pytransit を用いて r,i,z バンドの光度曲線を求めた。結果から、減光率やその波長依存性について比較し、大気の組成を推定した。本講演では、先行研究と本研究の観測・解析結果を合わせて、減光率の波長依存性と主星・惑星の物理量の関係についての議論を行う。