

星形成・惑星系分科会

松本 倫明 氏 (法政大学)

7月27日 09:45 - 10:45 B 会場

「観測も理論も高解像時代の星・惑星形成の研究」

ALMA 望遠鏡をはじめ最近の望遠鏡は高い空間分解能を持つようになった。これらの望遠鏡によって精緻な天体像が得られるようになった。一方、理論のシミュレーションにおいても、適合格子細分化法 (AMR 法) をはじめとする数値計算技術によってシミュレーションは高い空間分解能を持つようになった。従来の数値シミュレーションでは天体の一部だけを取り出して単純化したシミュレーションが行われていたが、AMR 法を用いると天体全体を解きつつ局所的に高解像度を得ることができる。このように、今日は観測と理論の両方が高い空間分解能を持つ。そして観測と理論を比較することが可能になった。星・惑星形成 (とくに星形成) の分野では、観測と理論を比較して天体の物理学を理解するという方法論が流行しつつある。本講演では観測と理論を直接した研究事例をいくつか取り上げて、観測・理論の比較研究のシナジー効果について検証する。とくに講演者が関わった研究プロジェクトの事例を中心に紹介する。取り上げる主な事例は、高密度分子雲コア MC27 (または L1521F) (Matsumoto et al. 2015a)、原始連星系 L1551 NE (Takakuwa et al. 2014)、そして大質量星形成領域 Cygnus OB 7 分子雲 (Matsumoto et al. 2015b) の予定である。なお、修士課程の大学院生が聴講することを考慮して、星形成の初歩的な物理学の内容から講演をはじめ。しかし講演のゴールは最先端の話題なので、博士課程の大学院生にも満足できる内容である。また最近の数値計算法の動向にも触れ、これから数値シミュレーションをはじめめる若手へのアドバイスも示す。とくに最近の数値計算法は大変複雑であるが、これらを用いて研究を行う上での考え方についても触れる。

1. Matsumoto, T., Onishi, T., Tokuda, K., Inutsuka, S.-i. 2015a, MNRAS, 449, L123
2. Takakuwa, S., Saito, M., Saigo, K., et al. 2014, ApJ, 796, 1
3. Matsumoto, T., Dobashi, K., Shimoikura, T. 2015,b ApJ, 801, 77

松尾 太郎 氏 (大阪大学)

7月27日 14:15 - 15:15 B 会場

「太陽系外惑星科学の現在と未来」

これまでに 3000 を超える系外惑星が発見され、その多様性が明らかになってきた。私は、視線速度法で発見されている恒星を公転する 700 の伴星を選択し、惑星系の力学的、化学的パラメータに着目して統計的解析を行った結果、伴星が質量に関して 4 領域に分類されることが分かった。この 4 領域を惑星形成論と比較した結果、この 4 領域は多様な惑星の形成過程を反映していると考えられる。一方、系外惑星科学におけるゴールのひとつに、生命を育む環境の調査、究極的には生命の探査がある。私は、トランジットによる大気分光によって、その目的に迫ることを目指している。その鍵になるのが数時間にわたって高精度に分光測光を行うことである。前半では、これまでの太陽系外惑星の発見から分かってきた多様性とその理解について私の研究を中心に紹介を行い、後半では現在取り組んでいる 2020 年代のアメリカの Decadal Survey の提案へ向けた NASA との共同研究についてお話しします。

星惑 a1 フィラメント状分子雲における分子雲コア質量関数の理論の数値実験による検証

川村香織 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M2)

星は分子雲の中で形成される。近年の Herschel 宇宙望遠鏡による Gould Belt 領域のサーベイ観測では、星の初期質量関数と分子雲コア質量関数の形がよく似ていることが明らかになった (Andracuteme et al. 2010)。したがって、星形成を理解するためには、分子雲コア質量関数の形成機構を解明することが必要であるといえる。また同じ観測で、分子雲中には周囲よりも密度が高い領域が幅 0.1mpc 程度で細長く伸びたフィラメント状の構造 (以下、フィラメント状分子雲) が多数存在していることも示された。分子雲コアや原始星はこのフィラメント状分子雲に沿って分布している。この分布から、星形成においてフィラメント状分子雲の分裂が重要であることが示唆される。

フィラメント状分子雲における分子雲コア質量関数の理論はすでに Inutsuka(2001) で提案されている。Inutsuka(2001) では、宇宙論において銀河ハロー形成過程の研究で用いられる Press-Schechter 理論を応用し、フィラメント状分子雲の線密度ゆらぎのパワースペクトルから分子雲コア質量関数を解析的に求めている。例として、パワースペクトルが波数の -1.5 乗に比例する形の場合、観測結果と整合する質量関数が得られることが示されていた。そして近年の観測で、パワースペクトルは波数の -1.6 ± 0.3 乗に比例しているという結果が報告された (Roy et al. 2015)。この観測結果は、Inutsuka(2001) の理論で分子雲コア質量関数を説明できることを期待させる。しかし、一般に Press-Schechter 理論は幾つかの仮定を含んでおり、理論の正当性について検討する余地が残っていた。

そこで、本研究では数値実験により、Inutsuka(2001) の理論の正当性を検証する。計算機上にフィラメント状分子雲の線密度ゆらぎを作成して観測的にコアを同定する数値実験を行い、Inutsuka(2001) との対応を調べた。本講演では、その結果を紹介し、Inutsuka(2001) を観測に応用する際の制限について議論する。

- 1 Andracuteme, Ph., Men^{prime}shchikov, A., Bontemps, S., et al. 2010, A&A, 518, L102
- 2 Inutsuka, S. 2001, ApJ, 559, L149
- 3 Roy, A., et al. 2015, A&A, 584, A111

星惑 a2 分子雲コアの質量関数と連星の統計的性質の関係について

三杉佳明 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M1)

星は分子雲コアから生まれることが様々な研究から示されている。さらに近年、星形成領域の観測によりこの分子雲コアの

質量関数 (CMF) は星の初期質量関数 (IMF) ととても似通った形を持つことが明らかになった (ex., K^{prime}onyves et al. 2015)。この結果は IMF が CMF により決まっていることを示唆している。一方で分子雲コアは重力収縮の際に複数の星に分裂することが数値計算により示されている。この結果と宇宙に存在する太陽質量程度の星の約半数は連星として存在しているという事実から、CMF の IMF への進化を考える際に連星を考慮することの重要性が理解できる。

本研究は CMF から IMF と連星の分布を同時に再現するような星形成理論を求めることを目的としている。そこで研究の第一段階として分子雲コアのさまざまな進化モデルを考え、そのモデルの違いによって IMF がどのように変化するかを統計的に計算した。ここでの進化モデルとは、1 つのコアが最終的に何個の星にどのように質量を分け与えるかということの意味している。この研究の結果として、分子雲コアの分裂による複数の星の形成は CMF から計算した IMF の形を大きく変えないことがわかった。その一方で CMF と IMF の形からコアの進化モデルを特定することは困難であると言わざるを得ない。

ゆえに本研究の二段階目では連星の頻度分布および質量比分布関数を考慮することにより、1 つのコアから生まれる星の数などに制限をかけることを試みた。その結果としてコアの分裂の仕方が自己相似的である場合、観測されている質量比分布を再現できないことがわかった。この結果と、コアの分裂による連星の形成理論は周期が 10^8 日を超えるような連星の存在を説明できないという事実を基に、我々は分子雲コア同士の相互作用による連星形成メカニズムの重要性を示す。

- 1 K^{prime}onyves et al. A&A, 584, A91 (2015)

星惑 a3 初代星の形成と生存可能性

佐伯優 (九州大学 惑星系形成進化学研究分野 M1)

宇宙初期に形成された初代星の研究は、初期宇宙の構造がどのように進化してきたかを理解する上で、必要不可欠である。これまで初代星は大質量であると考えられていたが、最近の研究では低質量の初代星が形成される可能性も示唆された。もし初代星の質量が 0.8 太陽質量以下なら、寿命は宇宙年齢よりも長くなるので、現在まで生き残る可能性がある。このような初代星を探すための観測が行われた結果、初代星の候補、あるいはその次世代星と見られる天体が発見された (Placco et al. 2014 他)。しかし、初代星が形成されている現場を観測することは非常に難しく、その様子は未だ解明されていない。

Greif et al. (2012) では、低質量の初代星がどのように形成されるかを流体シミュレーションを用いて計算した。その結果、ガス雲の中心に位置する原始星 (以下一次原始星) 周りの円盤から新たにいくつかの原始星 (以下二次原始星) が誕生した。二次原始星は一次原始星に落下する場合もあるが、他の二次原始星との相互作用により、シミュレーション終了時まで生き残る場合があることが分かった。これは二次原始星が他の二次原

始星と角運動量のやりとりをすることで、軌道半径がより大きくなる位置に移ることができ、一次原始星への落下をまぬがれたためである。二次原始星の形成数は、シミュレーションの時間が進むにつれて単調増加し、それに伴い二次原始星の生存数も単調増加した。この関係は、シミュレーション時間を超えてもなお維持されると考えているが、計算時間が 10yr と短いため、本当に二次原始星が生き残っていくかは定かではない。したがって、さらなる時間進化の計算を行う必要があるとともに、二次原始星が現在まで生き残るかを議論するためには質量の考慮も必要である。

本講演では、Greif et al. (2012) のレビューを行う。さらにこの研究で解決すべき問題点と初代星の生き残りの可能性について議論し、今後の展望について述べる。

- 1 Greif, T. H., Bromm, V., Clark, P. C., et al. 2012, American Institute of Physics Conference Series, 1480, 51
- 2 Placco, V. M., Frebel, A., Beers, T. C., et al. 2014, ApJ, 781, 40

星惑 a4 超大質量形成における円盤の安定性 松木場亮喜 (東北大学天文学専攻 M2)

観測により、赤方偏移 $z \sim 7$ の初期宇宙に質量 $\sim 10^9 M_{\odot}$ の超大質量ブラックホールが存在することが示唆されている。この観測事実から、初期宇宙環境下で巨大な質量を持つ天体を迅速に形成するシナリオが求められている。その形成シナリオとして有力視されているのがダイレクトコラプスシナリオである。ダイレクトコラプスシナリオとは、超大質量星と呼ばれる $\sim 10^5 M_{\odot}$ の星がその死後に残す同程度の質量を持つブラックホールを種として、超大質量ブラックホールを形成するシナリオである。超大質量星を形成するためには、その原始星周囲の円盤からの降着率が高いことが必要である。高い降着率の下では、原始星からの輻射によるフィードバックを抑えることができるため、原始星は高い降着率を保って成長し超大質量星になると期待される。しかし、高い降着率をもつ円盤は自己重力的に不安定化しやすく、分裂を起こす可能性がある。円盤が分裂することで、原始星への降着率は時間変動するようになり、原始星の成長に影響を及ぼすと推察される。円盤は高い降着率の他にも温度が低いほど分裂しやすく、その冷却過程は円盤中のガスの化学進化に依存する。先行研究となる Latif and Schleicher 2015 において、始原ガス円盤における安定性について論じられている。しかし化学進化に関して簡単なモデル化をしており、化学進化の取り扱いに課題を残していた。

そこで本研究は、一次元定常降着円盤中の始原ガスの化学進化及び冷却過程を詳細に追うことで、降着流の進化を調査した。この結果に基づき、円盤の安定性と原始星から超大質量星への成長について議論する。

- 1 M. A. Latif, D. R. Schleicher., A&A, 578, A118 (2015)

- 2 Hosokawa T., Omukai K., Yorke H. W., ApJ, 756, 98 (2012)
- 3 Sakurai Y., Hosokawa T., Yoshida N., Yorke H. W., MNRAS, 452, 755 (2015)

星惑 a5 ALMA の観測により解明される原始星エンベロープの角運動量の変換効率 寺澤祥子 (国立天文台三鷹 M1)

半径が数百 AU であるケプラー円盤を持つ原始星からは、分子線を用いた観測によって周囲に若い恒星物質が確認されている。例えば T Tauri や Herbig Ae/Be 星でみられており、これらは惑星形成の跡であると考えられている。クラス 0 と 1 の原始星では、円盤の半径や原始星の質量が大きく異なっており、クラス 0 から 1 の原始星へと進化していくにつれ原始星の質量と円盤の半径が小さくなっていく。

ここ数年の観測結果では、(1) 半径が数百 AU 規模のケプラー回転を行うクラス 0 や 1 の原始星の進化の傾向は、始めは遅いが徐々に早くなってゆく (Yen et al. 2013) ことや、(2) 高質量の原始星はより大きなケプラー円盤を示す傾向がある (Harsono et al. 2014; Aso et al. 2015) ことが明らかになった。これらの結果から原始星のエンベロープ回転の角運動量の多くは角運動量保存則より、円盤形成領域へと変換される。よって、ケプラー円盤はサイズの成長と共に自己崩壊を起こしていくシナリオを支持している。だが、この角運動量の変換の効率は未だに不透明のままであった。

そこで ALMA の 1.3mm の連続波の ^{12}CO 、 C^{18}O そして SO をクラス 0 の原始星に対して行った観測データに、運動モデルをフィッティングすることで原始星の質量とディスクの半径を推測する。そして、特定の角度の角運動量をそれぞれクラス 0 から 1 の原始星で複数比較を行って、どの程度の割合でエンベロープ回転の角運動量がケプラー円盤へ変換されたかを述べた論文のレビューを行い、今後の原始星惑星系円盤の研究の展望を示していく。

- 1 Yen et al. 2017, ApJ, 834, 178

星惑 a6 対流平衡下における前主系列星の安定性 井上裕貴 (首都大学東京宇宙理論研究室 M1)

恒星 (以下星と呼ぶ) の性質で最も測りやすいものは (L) と表面有効温度 (T_e) であり、これをプロットしたものが HR 図と呼ばれる。その HR 図上で大部分の星が分布する帯状の分布を主系列と呼び、水素燃焼の核融合反応をエネルギー源として輝く。この主系列に達する前の星を前主系列星と呼び、重力収縮により解放される重力ポテンシャルエネルギーをエネルギー源として輝く。この前主系列星が重力収縮し、中心温度が水素燃焼可能な温度に達すると主系列星となる。星はその生涯のほとんどを主系列上で過ごし、中心の水素が枯渇すると主系列から外れて壮年期を迎えるというのが一般的な星の進化過程であ

る。

上で挙げた各エネルギーは主に星の中心付近で生成され、星表面へと輸送されていく。その際の星内部におけるエネルギー輸送は対流と放射の2つが存在し、効率の良い方が優勢となる。前主系列星の進化過程の前半は Hayashi トラックと呼ばれ、対流によるエネルギー輸送が優勢となっている。それに対し前主系列星の進化過程の後半は Henyey トラックと呼ばれ、放射によるエネルギー輸送が優勢となっている。この変化は、星内部が温度上昇につれ光学的に透明化することに依るものである。Hayashi トラックよりも低温側の領域は Hayashi の禁止領域と呼ばれ、この領域の星は力学平衡状態にあり得ないことが知られている。

本研究ではこの星の表面温度の下限値を調べるために静水圧平衡にある星のモデルを考え、対流平衡を課す。表面での条件を記述するパラメーターを初期条件として与え、星表面から中心に向かって微分方程式を解くことで、各初期条件に対する星の解を求めた。そしてそれらの解の安定性と表面有効温度との関連性を調べることで、対流平衡にある星には表面有効温度の下限値が存在し、その下限値よりも低い表面有効温度を持つ星の解は不安定であることを示した。

- 1 Hayashi, C., Hoshi, R., and Sugimoto, D., *Progr. Theoret. Phys. Suppl.*(Kyoto),22,1(1962)

星惑 a7 原始惑星系円盤に与える Hall effect の影響 古賀駿大 (九州大学 惑星系形成進化学研究分野 M1)

原始惑星系円盤 (以後、円盤) は、重力収縮する分子雲コアにおいて原始星の周りに形成される。円盤は、原始星の重力に対し遠心力によって支えられているため、そのサイズは持っている角運動量に依存する。よって、初めに同じ角運動量をもつ分子雲コアでも、重力収縮中に中心部から外部へ輸送される角運動量が異なれば形成される円盤のサイズが変化すると考えられる。角運動量輸送において重要な役割を果たしているのが磁場である。なぜなら、分子雲コアを貫く磁場と、コアの回転により、磁気制動が働くことで、角運動量を外部へ輸送することが可能になるためである (Tomisaka 2002)。角運動量の輸送効率は、非理想磁気流体力学の効果である Hall effect を考慮すると変化することが示された (Krasnopolsky et al. 2011 他)。Hall effect は磁力線を分子雲コアの回転方向または回転と逆方向に捻じ曲げる効果であるため、磁気制動を強めたり弱めたりすることができる。Hall effect による磁場の変形の度合と向きは、拡散係数というパラメータで表せるため、Hall effect の拡散係数を調べることは角運動量の輸送効率の変化を調べるうえで重要である。

Braiding & Wardle (2012) では、Hall effect を考慮した回転する等温の分子雲コアの半解析的な重力収縮のモデルを用いて、収縮のダイナミクスに Hall effect が与える影響を調べた。そ

の結果、角運動量の輸送効率が変化し、円盤のサイズが変わった。しかし、実際には、拡散係数は、分子雲コアに含まれるダストや、起こっている化学反応に依存するため複雑である。したがってダストや化学反応を考慮に入れた計算が必要である。本発表では Braiding & Wardle (2012) の紹介をしたうえで、Hall effect の拡散係数について議論し、今後の研究の展望について述べる。

- 1 Braiding and Wardle j.1365-2966.2012.20601.x (2012)

星惑 a8 原始惑星系円盤における永年重力不安定性の非線形発展

富永遼佑 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M2)

原始惑星系円盤 (以下、円盤) は惑星の母体となる天体である。円盤は主に水素分子からなるガスと固体微粒子 (ダスト) から構成される。このダストが衝突合体を繰り返すことで惑星の素となる微惑星が形成されたと考えられているが、未だその詳細は明らかになっていない。

近年のアルマ望遠鏡による高解像度観測によって様々な円盤に多重のリング構造が発見された。ALMA Partnership et al. (2015) によって報告された HL Tau のリング構造はその代表例である。観測されたリングの形成機構の候補のひとつとして永年重力不安定性が考えられている。永年重力不安定性はダストとガスの摩擦によって自己重力的に安定な円盤においても成長する不安定性であり、もともと微惑星形成機構として提唱された (e.g., Takahashi & Inutsuka 2014)。Takahashi & Inutsuka (2016) は HL Tau の多重リング構造が永年重力不安定性によって形成されるということを局所線形解析に基づいて示した。しかし永年重力不安定性によるリング形成と微惑星形成をより詳細に解析するためには永年重力不安定性の非線形発展を調べる必要がある。

本研究では永年重力不安定性の非線形数値計算を行った。永年重力不安定性の長時間発展を調べるために、Symplectic 法を流体計算法に応用した新たな長時間流体計算法を開発した。この計算法を用いて、初期に大域的な圧力勾配のない円盤で永年重力不安定性の非線形発展を調べた。その結果、ダストの面密度が初期の 100 倍程度まで上昇し、ダスト-ガス比が 10 程度のリングが形成された。このダストリングの線密度は等温フィラメントの重力収縮を考えた際の臨界線密度程度であることがわかった。この結果は永年重力不安定性が微惑星形成にとって有力な機構となり得ることを示唆している。さらに形成されたダストリングは自己重力により 10^{-4} au/yr 程度で徐々に円盤内側に落下することがわかった。この落下速度を半解析モデルによって再現することに成功した。

- 1 ALMA Partnership, Brogan, C. L., P'erez, L. M., et al. 2015, *ApJL*, 808, L3
- 2 Takahashi, S. Z., & Inutsuka, S.-i. 2014, *ApJ*, 794, 55

星惑 a9 原始惑星系円盤の化学構造と、分光観測を用いた H₂O スノーラインの検出可能性 野津翔太 (京都大学宇宙物理学教室 D2)

太陽質量程度の前主系列星周りの原始惑星系円盤 (以後、"円盤") の場合、円盤赤道面における H₂O スノーラインは、中心星から数 AU の位置に存在する。しかし、撮像観測によって H₂O スノーラインを検出する事は、空間分解能が足りない為に困難である。

一方で円盤はほぼケプラー回転している為、円盤から放射される輝線はドップラーシフトを受け広がっている。この輝線のプロファイル形状の解析から、輝線放射領域の中心星からの距離の情報が得られる。そこで我々はこれまでに、数値計算の結果に基づき、H₂O 輝線プロファイルの観測から円盤内の H₂O 分布、特に H₂O スノーラインを同定する方法を提案してきた ([1],[2])。具体的にはまず円盤の化学反応ネットワーク計算 (e.g., [3]) を行い、H₂O を含む様々な分子種の存在量とその分布を調べた。すると H₂O スノーラインの内側の円盤赤道面付近だけでなく、円盤外側の上層部高温領域や光解離領域でも H₂O ガスの存在量が多い事が分かった。またその計算結果を元に、円盤から放出される H₂O 輝線のプロファイルを多数の輝線について計算した。その結果、アインシュタイン A 係数 (放射係数) が小さく、励起エネルギーが比較的高い輝線のプロファイルを高分散分光観測で調べる事で、H₂O スノーラインを同定できる可能性がある事が分かった。そして、このような特徴を持つ H₂O 輝線が、中間赤外線からサブミリ波までの幅広い波長帯に多数存在し、その強度は波長が短い程大きい事が分かった。

また最近では、モデル計算の範囲を広げ、新たに ALMA band 5 領域の H₂O 輝線や H₂¹⁸O 輝線を用いた H₂O スノーライン同定可能性の調査も行なっている。更に円盤からの H₂O 輝線検出を目指した ALMA 観測も提案しており、一部のデータが取得済みである。本発表では、これまでの解析結果の紹介と今後の高分散分光観測 (ALMA, SPICA など) での H₂O スノーラインの同定可能性の議論、更に可能な範囲で観測結果の一部を紹介する。

- 1 Notsu, S., Nomura, H., Ishimoto, D., Walsh, C., Honda, M., Hirota, T., Millar, T. J., ApJ, 836, 118 (2017)
- 2 Notsu, S., Nomura, H., Ishimoto, D., Walsh, C., Honda, M., Hirota, T., Millar, T. J., ApJ, 827, 113 (2016)
- 3 Walsh, C., Millar, T. J., Nomura, H., ApJ, 722, 1607 (2010)

星惑 a10 原始惑星系円盤内のガス・ダスト進化に対する光蒸発の影響

山川暁久 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M2)

惑星は、星形成の結果として星の周りに形成される原始惑星系円盤 (以下、円盤) と呼ばれるガスと塵 (ダスト) からなる天体で形成されると考えられている。円盤から惑星に至る過程を解明する上で、円盤内のガスとダストの物理状態を理論的・観測的に明らかにすることは重要である。特に、大型電波干渉計 ALMA などの観測機器の発展によって、様々な円盤のガス・ダスト分布が明らかになっていることから、観測結果を理論的に解釈することが求められている。円盤内のガスは、中心星への乱流粘性降着や中心星からの紫外線による光蒸発、ガス惑星による捕獲などの過程を経て散逸する。特に、太陽系を含め多くの星・惑星系の母胎と考えられている若い星団内では、近傍の大質量星からの紫外線による光蒸発の効果を無視できないと考えられる。

そこで本研究では、Takeuchi & Lin (2005) の孤立系における計算手法をもとに、近傍の大質量星からの輻射による光蒸発の効果を取り入れた円盤内ガス・ダストの面密度進化を計算する。ここで、ダストの特徴的なサイズや粘性降着率、星からの紫外線量などをパラメータとして計算し、光蒸発がガス・ダストの面密度進化におよぼす影響を調べる。さらに、太陽系から最も近い若い星団であるトラペジウム星団における、ALMA とハッブルによる円盤観測 (e.g., Vicente et al. 2005, Mann et al. 2014) と計算結果を比較し、円盤のガス・ダスト分布およびダストの性質を定める各物理パラメータが観測結果と整合的となる値の範囲を調べる。本講演では、外部からの輻射による光蒸発を考慮したガス・ダストの面密度進化と、若い星団内の円盤の観測とを比較することで、本研究の理論計算の妥当性を評価し、観測されている円盤内ガス・ダストの物理状態について議論する。

- 1 Takeuchi, T. & Lin, D. N. C. 2005, ApJ, 623, 482
- 2 Vicente, S. M. & Alves, J. 2005, A&A, 441, 195
- 3 Mann, R. K., Di Francesco, J., Johnstone, D. et al. 2014, ApJ, 784, 82

星惑 a11 原始惑星系円盤中の塵粒子の大規模循環 桑原滉 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

星の誕生とともに形成される原始惑星系円盤はダストとガスにより構成されている。惑星はその円盤内のダストの合体、成長により形成されていくと考えられている。この原始惑星系円盤で完全に解明されていないことの一つにガス及びダスト円盤の散逸機構がある。原始惑星系円盤の散逸時間は、近赤外線観測により 10⁶ ~ 10⁷ 年であると推察されているが、理論的にはその構造は未だ解決されていない。円盤の散逸機構に関して、中心星からの紫外線や X 線放射による光蒸発や、乱流ガスの角運動量輸送による中心星への質量降着が研究されている。

一方、磁気回転不安定性 (MRI) 起源の磁気乱流による円盤風についても、光蒸発と同等以上に円盤散逸の効果があるとの指摘が、Suzuki & Inutsuka (2009) により報告されている。原始惑星系円盤のガスの散逸はダストの運動に影響を与えるが、円盤風を考慮したダストの動力学はあまり調べられていなかった。Miyake et al.(2016) では磁気乱流駆動型の円盤風を考慮した原始惑星系円盤中のダスト密度の鉛直方向分布時間進化を、単純化した1次元数値シミュレーションの手法で調べて、さまざまなサイズのダストの動力学について研究を行なった。ダストのサイズに依存して、円盤風で巻き上げられたダストが円盤外に流れ出る、またはある高さで留まる、あるいは円盤内に留まるという結果だった。しかし実際には円盤上空に連れてガス密度が薄くなり、ダストとガスのカップリングが弱まる。そして大局的に見ると巻き上げられたダストは磁気遠心力により円盤の動径方向外側へ輸送されると考えられる。そこで本研究では、Miyake et al.(2016) では考慮できていなかった、円盤の時間進化とダストの大局的な循環の効果を原始惑星系円盤の進化に取り入れた。鉛直方向への質量損失、動径方向の動きを考慮し、ダストの時間進化をガスと同時に解いた。そして粒径別でダスト/ガス比の動径分布の時間変化を調べた。その上で観測結果との比較を議論する。

- 1 三宅智也 (2016)
- 2 Suzuki, T., Ogihara, M., Morbidelli, A., Crida, A., & Guillot, T. (2016)

星惑 a12 ダストから暴走成長までを包括的に扱える数値計算コードの開発 西川花 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M1)

星形成の副産物である原始惑星系円盤の中で、 $0.1, \mu\text{m}$ 程度の固体微粒子 (ダスト) は衝突合体を繰り返し、 1万 km サイズの惑星にまで成長する。ダストから惑星までのサイズの変化は13桁と非常に幅広く、その詳細な過程は未だに明らかにされていない。ダストは円盤ガスから抵抗を受けて角運動量を失い、中心星に向かって動径移動する。衝突合体の過程でダストが空隙の多い構造になることで、中心星まで落下してしまうことなく微惑星が形成される [1]。ダストの成長が進み微惑星が数 km 以上の大きさにまで成長すると、微惑星間の重力相互作用が効き始めて暴走成長が起こり、原始惑星が形成される [2]。

これまでの惑星形成過程の研究は、 $0.1, \mu\text{m}$ のダストから 1m 以上の小石まで、または数 km の微惑星から暴走成長まで、あるいは 10km 以上の微惑星から惑星までといったように、サイズ空間に対して部分的に行われてきた。しかし、衝突合体や動径移動を繰り返すことで、微惑星が形成された後のサイズ分布と動径方向の面密度分布は、初期の分布とは全く異なったものとなる。また近年では、原始惑星が円盤外縁部から落下してきた小石を集積して成長する効果も脚光を浴びている。そのた

め、幅広いサイズ分布を考慮し、それぞれの過程をまたがるような惑星形成を考える重要性が高まっている。

そこで本研究では、ダストから惑星への成長過程を一連の流れとして調べることを試みる。その第一歩として、ダストが成長し暴走成長が起こるまでを一貫して扱うことのできる数値計算コードを開発する。数値計算ではダストの内部密度進化、乱流によるかき乱しを考慮し、固体天体 (ダスト、小石、微惑星) の衝突合体による成長とガス抵抗による動径移動を、同時に計算する。本講演では、固体天体のサイズ分布と動径方向の面密度分布の時間発展を計算した結果を紹介する。また、太陽系の惑星を再現するために必要な円盤の初期条件についても議論する。

- 1 Okuzumi, S., Tanaka, H., Kobayashi, H., & Wada, K. 2012, ApJ, 752, 106
- 2 Kobayashi, H., Tanaka, H., & Okuzumi, S. 2016, ApJ, 817, 105

星惑 a13 SPH 法におけるシア問題の解決策 稲吉勇人 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M1)

流体力学をラグランジュ的に数値計算する方法として、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法がある。流体をオイラー的に記述するメッシュ法と比べ、SPH 法はラグランジュ的に記述するので、高密度の領域を高精度に記述できる点や、流体が大きく変形する場合の計算に有利である点などで優れていると言える。しかし、シア流が存在する流体の計算を SPH 法で行うと、非物理的な密度エラーが発生し、精度良く計算できないことが分かっている。特に低温の場合は、密度エラーが 150% を超えるほどであり、シア問題が顕著に現れる (Imaeda & Inutsuka 2002)。実際の原始惑星系円盤や円盤銀河は低温であり、さらに差動回転をしているため、シア流が存在する。したがって、これらの形成や進化を SPH 法を用いて数値計算することは極めて困難である。このシア問題を解決するために様々な方法が提案されているが、円盤の形成や進化のタイムスケールに相当する回転数に達している方法は存在しない。例えば、Imaeda et al. (2007) では隣り合う SPH 粒子間で質量を交換することによって粒子を再配置するという Particle Rezonance (PR) 法が提案されており、密度エラーを 10% 以内に抑えることに成功しているが、100 回転を超えるような長時間の計算では 10% を超える無視できない密度エラーが生じてしまい、円盤進化の長時間数値計算をするには不十分である。そこで、本研究では SPH 粒子内部の流れ場という全く新しい発想を導入し、シア問題の解決を目指す。本講演ではシア問題を紹介した後に、我々の新しい計算法の概念や定式化、さらにその有用性について議論する。

- 1 Imaeda, Y., Inutsuka, S., *Astrophys. J.*, 569 (2002) 501
- 2 Imaeda, Y., Tsuribe, T., Inutsuka, S., *SPHERIC Inter-*

星惑 a14 周連星惑星の軌道と連星物理量の関係について

山中陽裕 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

今日までに約 3500 個の太陽系外惑星が発見され、惑星形成についての様々な研究がなされている。一方、観測されている系外惑星のほとんどは単独星周りの惑星で、周連星惑星は未だ 20 個ほどしか発見されておらず、その形成過程の議論は単独星周りのものほど進んでいない。

中心連星周りでは重力場が時間変化するために惑星が安定な軌道を保てない領域が存在することが知られていて、Kepler によって観測されている周連星惑星のほとんどはこの不安定領域のすぐ外側に位置している (Bromley et al. 2015)。見つかった周連星惑星はどれもホットジュピター系のガス惑星で、現在の位置でその場形成したとは考えにくく、遠方で形成した惑星がマイグレーションしてきたと考えられる。一方で、中心連星の重力場によって周連星原始惑星系円盤ガスに inner cavity を生じることがシミュレーションによりわかっている (Artymowicz et al. 1994) が、その大きさは軌道の不安定領域よりも小さく、惑星のマイグレーションが不安定領域付近で止まる理由は定かではない。

我々は惑星の軌道位置が中心連星の物理量 (軌道離心率、質量比) で特徴付けられると考え、ガス抵抗を加えた重力 N 体計算を用いて不安定領域内における惑星の振る舞いから、軌道と連星物理量の関係性を調べた。本講演では、計算結果の報告をし、観測との比較について議論する。

- 1 Bromley B. C., Kenyon S. J., 2015, ApJ, 806, A98
- 2 Artymowicz, P., & Lubow, S. H. 1994, ApJ, 421, 651

星惑 a15 氷天体衝突による蒸発過程の解明に向けた 3 次元 SPH シミュレーション

伊藤広大 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M1)

惑星は大小様々なサイズの天体同士が衝突をくりかえして形成された。その際の衝突にともなう温度上昇により、物質の蒸発が生じる。特に氷天体は比較的蒸発に必要なエネルギーが小さいため、氷惑星の形成にとって衝突に伴う蒸発は非常に重要な物理過程である。また地球に彗星のような氷天体が衝突し水が供給される場合にも大きな影響を及ぼすだろう。衝突現象の解明のために地上でも衝突実験は行われているが、地上で天体スケールの衝突を行うことは難しい。そのため数値計算によるシミュレーションは衝突現象を理解するのに非常に重要な手段である。先行研究ではメッシュ法を用いた流体シミュレーションにより氷天体の衝突が調べられている (O'Keefe et al. 1982)。彼らは固体物質を扱うために一般的に知られている状態方程式として Tillotson の状態方程式 (Tillotson

1962) を導入した。これにより氷天体を表現し、衝突による蒸発を取り扱うことが可能になった。シミュレーションの結果から 9.1m/s 以上の衝突速度で蒸発が起こり、蒸発が起こると衝突エネルギーの 22% ところで本研究では Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法と呼ばれるラグランジュ的な流体力学の数値計算方法を用いて、3 次元の衝突シミュレーションを行う。また、この SPH シミュレーションにおいても Tillotson の状態方程式を用いて、蒸発を取り扱う。シミュレーションの結果から衝突時に起きる水の蒸発量を求め、衝突パラメータ (衝突速度、衝突角度など) と蒸発量との関係性について議論する。

- 1 O'Keefe et al. Journal of Geophysical Research, 87, 6668
- 2 Tillotson, J.H. 1962. Rep. GA-3216, July 18, Gen. At., San Diego.

星惑 a16 巨大衝突ステージにおける衝突破壊の重要性: N 体計算・統計的手法のハイブリッドコードの開発

磯谷和秀 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M1)

太陽系の地球型惑星は、最終段階で火星サイズの原始惑星同士が衝突合体を繰り返し形成される。この巨大衝突ステージにおいて地球や地球-月系が形成される。一方、太陽系外で起こる巨大衝突ステージは、衝突に伴い放出される破片によりデブリ円盤が形成され、観測されている暖かいデブリ円盤 (すなわち地球形成領域のデブリ円盤) を説明することができる [1]。

巨大衝突ステージに形成されるデブリ円盤について調べるためには、原始惑星の長期的軌道進化と、破壊を扱うことができる計算が必要である。しかし衝突により放出される破片の数は 10^{35} 個以上にもなり、 N 体計算ではとても扱うことはできない。このような多数の粒子を取り扱うには、一つ一つの粒子を取り扱うのではなく、統計力学に基づいた統計的手法が有効であるが、統計的手法では、破片が重力的に集積する際にサイズ分布が非軸対称になることや、原始惑星による軌道共鳴のような、重力相互作用の取り扱いができない。すなわち N 体計算と統計的手法を同時に用いると、軌道進化と破壊を同時に考慮した計算を行うことができる。

そこで本研究では、 N 体計算と統計的手法を組み合わせた、衝突破壊を扱うことができるハイブリッドコードの開発を行う。多数の破片を少数のトレーサーと呼ばれるスーパー粒子に近似することで N 体計算のコストを抑える。またそれぞれのトレーサーの周りに扇形領域 [2] を考え、その領域に入った他のトレーサーを用いて表面数密度と平均相対速度を計算し、破壊による天体の減少 [3] を取り扱う。さらに本講演では、ハイブリッドコードにより得られる、巨大衝突ステージにおけるデブリ円盤の明るさの空間分布進化についても議論する。

- 1 Genda, H., Kobayashi, H., & Kokubo, E. 2015, ApJ, 810, 136

- 2 Morishima, R. 2015, *Icarus*, 260, 368
- 3 Kobayashi, H., & Tanaka, H. 2010, *Icarus*, 206, 735

星惑 a17 巨大衝突による広いデブリ円盤からの天王星の衛星形成

石澤祐弥 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

天王星は他の太陽系内惑星と異なり、自転軸が約 90 度と大きく傾いている。また天王星の主な衛星も同様に傾いた赤道面を周回している。何らかの原因で天王星が傾き、その後衛星が形成されたと考えられる。これらを説明するシナリオとして、ジャイアントインパクト (GI) モデルが考えられる (Slattery et al., 1992)。形成段階の惑星同士の衝突により周囲に衛星の材料となる破片 (デブリ) が散らばってデブリ円盤が形成され、円盤中でデブリが重力によって集められ衛星になるという説である。GI モデルならば天王星の大きな傾きと現在の衛星分布を同時に説明できる可能性がある。それを論じるためには、まずデブリ円盤からの天王星の衛星形成を説明できる必要があるが、その検証は未だ成されていない。この形成過程を数値計算によって検証し、現在の衛星分布を説明することを目指す。

また Ueta et al. (in prep.) によって、天王星の GI について新たな高解像度の衝突計算が行われ、GI 後のデブリ円盤は考えられていたよりも広く分布していた可能性があることがわかった。その結果を元にした広い円盤を初期条件にして重力 N 体計算を行った。数値計算を行うにあたって、大規模並列粒子計算のためのフレームワーク、FDPS (Iwasawa et al., 2016) を実装した N 体計算コードを開発した。本講演では、得られた計算結果の議論を行うとともに、新しく提案した天王星衛星形成シナリオについて報告する。

- 1 Benz, W., Slattery, W. L. & Cameron, A. G. W. 1992, *Icarus*, 99, 167
- 2 Iwasawa, M., Tanikawa, A., Hosono, N., et al. 2016, *PASJ*, 68, 54

星惑 a18 地球型惑星大気の進化に対する惑星表層での元素分配の寄与

櫻庭遥 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M1)

地球型惑星の大気に含まれる希ガスは、大気や海洋、生命のもととなる揮発性元素の起源を知る手がかりである。地球型惑星の大気は、隕石重爆撃期における天体衝突による衝突脱ガスという共通の起源を持つと考えられている (de Niem et al. 2012 など)。しかし、金星・地球・火星の希ガス量はこの順で約 2 桁ずつ少なくなっており、その原因は未だ解明されていない。そこで、惑星表層環境の違い (金星: 暴走温室状態、地球: 炭素循環、火星: CO₂ 氷の形成) によって元素分配過程が異なるという、従来考えられていなかった過程を考慮し、希ガス存在量の違いを再現する条件を調べた。

本研究では、隕石重爆撃機の大気量・組成の進化の理論計算を行った。個々の天体衝突による大気の供給とはざとりについては、流体シミュレーションに基づくスケーリング則 (Shuvalov 2009, Svetsov 2000) を用いた。そして、表層環境の違いによる元素分配の効果は以下のように考慮した: 金星ではすべての元素を大気に分配し、地球では海洋形成と炭素循環による H₂O・CO₂ 分圧上限、火星では氷の形成による H₂O・CO₂ 分圧上限を設けた。

計算の結果、地球と火星において、元素分配の効果によって最終的に獲得する N₂+ 希ガス量が減少することが分かった。これは、元素分配により、CO₂ や H₂O の大部分が大気から取り除かれると、大気中の N₂+ 希ガス濃度が高くなり、天体衝突の大気はざとりによって失う N₂+ 希ガス量が増加するためである。講演では、獲得する N₂+ 希ガス量の衝突天体サイズ分布・揮発性元素含有量・分圧上限などのパラメータ依存性を示し、揮発性元素を齎した衝突天体や各惑星の初期表層環境について議論する。

- 1 de Niem, D., et al. 2012, *Icarus* 221, 495-507.
- 2 Shuvalov, V. 2009, *Meteor. Planet. Sci.*, 44, Nr 8, 1095-1105.
- 3 Svetsov, V.V. 2000, *Solar Syst. Res.*, 34(5), 398-410.

星惑 a19 オリオン星形成領域における近赤外線トランジット探査

谷本悠太 (国立天文台三鷹 M1)

NASA EXOPLANET ARCHIVE によれば、5 月現在 3000 個を超える系外惑星が発見され、その多様性についても明らかになっている。しかし、系外惑星の形成と進化に関してはいまだわかっていないことが多く、それを明らかにするためには形成直後、ないしは形成中の惑星の情報が重要である。若い星の周りに惑星が見つければ、惑星の形成時期を制限できるだけでなく、追加観測から惑星の内部構造や大気について調べることも可能となり、惑星形成過程のさらなる理解につながると考えられる。

系外惑星の検出手法としては、惑星の重力による主星のふらつきを観測するドップラー法、惑星が主星の前を横切ることによる減光を捉えるトランジット法、惑星の重力レンズ効果による背景天体の増光を観測するマイクロレンズ法などが挙げられる。このうちトランジット法は、広視野で観測すれば同時に多天体について探査することが可能となり、系外惑星の発見には有利な手法である。

トランジット法によって発見されている若い星周りでの系外惑星候補としては、van Eyken et al.(2012) による発見が挙げられる。彼らはオリオン OB1a 領域において変光星調査を行った際に年齢が 2.7Myr 程度の T タウリ型星周りを回る系外惑星候補を発見した。また、David et al.(2016) や Mann et al.(2016) は Upper Scorpius OB 領域において年齢が 5-10Myr

程度の M 型星の周りを回る系外惑星候補を発見している。

これに対し、本研究ではさらに若い星周りで惑星候補発見を目指し、Orion Nebula Cluster という年齢が 1Myr 程度の非常に若い星形成領域をターゲットとして、岡山天体物理観測所 91cm 反射望遠鏡に搭載された OAOWFC (岡山天体物理観測所広視野カメラ) による K バンドモニター観測データを用いて系外惑星トランジット探査を行った。本発表では、2015 年 10 月 14 日から 2016 年 1 月 16 日までの約 3 ヶ月分のライトカーブから、トランジット探査の結果及びその他検出された変光現象と合わせて、今後の観測方針や検出可能性について報告したい。

- 1 van Eyken, J. C., et al. 2012, ApJ, 755, 42
- 2 David, T. J., et al. 2016, Nature, 534, 658
- 3 Mann, A. W., et al. 2016, AJ, 152, 61

星惑 b1 オリオントラペジウム星団における星同士の遭遇による星周円盤の破壊 長谷川大空 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

本発表では Portegies Zwart(2015) についてのレビューを行う。

若い星の星周円盤の状態を調べることは、星や惑星の形成を理解するのに重要である。星周円盤は中心星からの輻射などにより、数 Myr のタイムスケールで失われることが観測から示唆されている。他にも近くの大質量星による光蒸発や星同士の近接遭遇によっても円盤が破壊されると考えられている。実際、観測によって、密度の高い星団では星周円盤を持つ星の割合が低いことが示唆されている。

オリオン星雲のトラペジウム星団は半径 3 pc、年齢 0.3 Myr ほどの若い星団である。Portegies Zwart(2015) は、トラペジウム星団の現在の星周円盤の状態が、星同士の遭遇による円盤の破壊により形成されたものかを調べるために、星同士の近接遭遇による星周円盤の破壊と質量降着を考慮した N 体シミュレーションを行い、トラペジウム星団の星周円盤のサイズの分布の再現を試みた。具体的には、近接遭遇によって円盤が乱されたことにより 2 つの星へその一部が降着し、円盤のサイズ及び質量が失われていくという効果を入れている。

その結果、初期条件が星の数 $N = 2500 \pm 500$ 、半質量半径 $R = 0.5$ pc、初期ビリアル比 Q が 0.3 または $Q = 0.5$ 、フラクタル次元 F が 1.6 の時に 0.2-0.5 Myr の時刻でトラペジウム星団を良く再現することに成功した。

ALMA により、星団内の円盤について多くのサンプルが観測されることが期待されている。また、円盤の破壊の効果や星団のモデルについても更なる改良の余地があり、今後より詳しく検討する予定である。

- 1 Portegies Zwart, S. F. 2016, MNRAS, 457, 313

星惑 b2 焼結の効果を入れたダストアグリゲイトの 3 次元衝突シミュレーション 長尾整道 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M1)

ダストアグリゲイトは、粒子の衝突合体によって作られる粒子の集合体であり、微惑星の材料になる。ダストアグリゲイトが形成されるには、アグリゲイト同士がぶつかっても壊れないことが必要であり、破壊が起こる衝突速度に関して、いくつかの 3 次元衝突シミュレーションが行われてきた。しかし、これまでの 3 次元衝突シミュレーションでは焼結の効果は考慮されていなかった。

焼結とは、融点より少し低い温度で物質を温めることによりその物質の表面分子が移動する現象のことである。焼結が進むと、その物質は硬化する一方、塑性は失われて脆くなる。アグリゲイトの焼結を考慮した場合、粒子同士の接触面が大きくなり、アグリゲイト同士をぶつけた時の挙動も変わってくる。現在、2 次元での焼結の効果を入れたアグリゲイト衝突シミュレーションはすでに行われている。その研究結果は、焼結がおこるとアグリゲイトは壊れやすくなることを示している。

本研究では、焼結の効果を入れた 3 次元衝突シミュレーションを行った。その目的は、焼結がダストアグリゲイトの衝突に与える影響に関して、2 次元と 3 次元での比較を行うことである。まず、先行研究ですすでに行われた焼結の効果を入れた 2 次元衝突シミュレーションをもとに、3 次元に適用できるモデルをたてた。ここで、2 次元シミュレーションでは考慮されない、接触している 2 粒子がねじれる際にかかる力を導入した。シミュレーションでは、破壊が起こる速度、衝突により生じた破片の分布について調べた。

3 次元のシミュレーションの結果、2 次元シミュレーションと定性的な傾向は似ているが、破壊が起こる速度や跳ね返りの有無、破片の分布の違いが確認された。

本研究によって、2 次元シミュレーションと 3 次元シミュレーションの違いを示すことができた。今後は、ダストアグリゲイトの粒子数依存性や、衝突による圧縮の度合いについてさらに研究する必要がある。

- 1 Sin-iti Sirono, Haruta Ueno. arXiv:1705.04778(2017)
- 2 Wada, K., Tanaka, H., Suyama, T., Kimura, H., & Yamamoto, T. 2008, ApJ, 677, 1296

星惑 b3 火星衛星の捕獲説の再検討：火星原始大気の回転の影響について 鈴木智浩 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M1)

火星には二つの小さな衛星、Phobos と Deimos が存在している。火星衛星の起源としては主に捕獲説と衝突説が議論されてきたが、決着はついていない。Phobos と Deimos の反射ス

ベクトルが C 型や D 型の小惑星のそれに類似しているという点は、捕獲説を支持する。一方で、火星に飛来する小天体の方向はランダムであることが期待されるので、二つの火星衛星が小さな軌道傾斜角（つまり、ほぼ火星赤道面上を公転している）を持っているということを自然には説明できない。火星衛星の捕獲説に関する先行研究 (Hunten, 1979; Sasaki, 1990; Burns, 1992) でも、火星との潮汐相互作用や火星周りの静止した原始大気的气体抵抗によって衛星の離心率が現在のようにほぼ 0 になることがわかっているが、軌道傾斜角の問題は全く解決されていない。そこで、本研究では、火星周りの原始大気が静止しているのではなく、火星の自転方向に回転運動をしているような場合を考慮すれば、捕獲された小天体の軌道傾斜角も変化するのではないかと考えた。本研究では、回転速度をパラメータとして、Sasaki (1990) で用いられた原始大気的气体密度分布を考慮して、捕獲後の衛星の軌道傾斜角の変化を数値的に計算した。その結果、ガス回転速度によって軌道傾斜角の落ち方にかなりの差が出て、ガス回転速度がケプラー速度の 50% 以下ではあまり変化がないことがわかった。原始惑星系円盤ガス中で成長する原始惑星が捕獲する大気の運動に関して、Ormel et al. (2015) は等温で非粘性な流れを二次元系で計算している。彼らの計算結果によると、火星質量の天体が捕獲する原始大気回転速度は、ケプラー速度の 10% 程度であることが示されているので、本研究で得られた結果を適用すると、小天体が火星に捕獲された後に現在の軌道になる確率は従来の確率からわずかにしか上がらない。そのため、現段階での我々の知見では捕獲説で現在の火星衛星系を作ることは困難であると言える。

- 1 Craddock, R. A. (2011). *Icarus* 211, 1150-1161
- 2 Ormel, C. W. et al. (2015). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 446, 1026-1040
- 3 Sasaki, S. (1990). Abstract of the Lunar and Planetary Science Conference, volume 21, page 1069

星惑星 c1 OMC-2, FIR3/4/5 領域の多輝線観測 小山田朱里 (国立天文台三鷹 M2)

銀河系内の星の多くは星団で生まれる。したがって、銀河系内の星形成過程を理解するためには、星団が形成される環境での星形成過程を解明する必要がある。特に、星団形成領域ではすでに誕生した星からのフィードバックが次世代の星形成に多大な影響を及ぼすと考えられているが、その影響についてはまだよくわかっていない。そこで我々は、太陽近傍の星団形成領域であるオリオン座 A 分子雲 OMC-2 中の FIR3/4/5 領域を野辺山 45m 電波望遠鏡に搭載された FOREST と T70 受信機を用いて、 $^{12}\text{CO}(J=1-0)$, $^{13}\text{CO}(J=1-0)$, $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$, $\text{N}_2\text{H}^+(J_{F_1,F}=1_{1,2}-0_{1,2})$, $\text{CCS}(J_N=8_7-7_6)$, $\text{HN}^{13}\text{C}(J=1-0)$, $\text{H}^{13}\text{CO}^+(J=1-0)$, $\text{H}^{13}\text{CN}(J=1-0)$, $\text{HCO}^+(J=1-0)$, $\text{N}_2\text{D}^+(J_{F_1,F}=1_{2,3}-0_{1,2})$, $\text{DNC}(J=1-0)$, $\text{DC}_3\text{N}(J=9-8)$ のマッピング観測を行った。FIR3/4/5

領域は、島尻らによる NMA 観測から、原始星 FIR3 からのアウトフローが FIR4 に衝突し、小さなガス塊に分裂している様子が報告されている (Shimajiri et al. 2008)。本研究の目的は、多輝線データから、この領域の物理状態を調べ、この領域で進む星形成過程の理解をさらに進めることである。取得データから N_2H^+ のコアが FIR4/5 付近で同定できた。そのコアから南西付近にかけて比較的強い DNC が検出され、冷たいガスが広がっていることが示唆された。また、その付近全体に弱い CCS 輝線が分布していることが発見された。先行観測では、OMC2/3 領域では、CCS 輝線は検出されておらず (Tatematsu et al. 2008)、今回の高感度 FOREST 観測により、OMC-2 領域でも CCS が存在することが明らかになった。講演では、柱密度、アバundance等の物理量の分布をより正確に求め、FIR3 からのアウトフローが FIR4/5 領域に及ぼす影響について報告する予定である。

星惑星 c2 近赤外撮像データにおける MonR2 IRS3 の測光方法の検証 儀間博考 (鹿児島大学 M1)

星形成領域 MonR2 では、電波観測で周期約 30 日程度のメタノールメーザーの周期変動が見つかっており、その変動と中心天体の赤外線強度の変光に関係があるのではないかと示唆されている。そこで、近赤外線での中心星の変光を調べ、MonR2 からのメタノールメーザーと中心星からの赤外線との関係を明らかにしたいと考えている。通常、ネビュラに覆われている星では、アパーチャー測光をすることはできないが、MonR2 では、中心星に対してネビュラが暗いため影響は小さい。そこで、アパーチャー測光をしたところ、J,H バンドで約 0.3 等程度の変光があることが確認できている。この方法では、ネビュラが変光していたり、中心天体のに対してネビュラが明るい領域ではその影響を受けるため、精度良く測光することができない。そのため、ネビュラの影響の少ない測光方法を模索している。現在は、異なるシーイング環境での赤外線撮像画像をデコンボリューションなどを用いてシーイングサイズを揃えて比較をし、ネビュラの変光の有無を調べることで測光の精度を上げることができると考えている。今回は、その進捗状況について報告する。

星惑星 c3 野辺山 45m 望遠鏡による CH_3OH メー ザー源の分子輝線観測 石川果奈 (茨城大学 電波天文観測研究室 M2)

大質量星形成領域中の Hot molecular core(HMCs) と呼ばれる領域では、 H_2O 、 CH_3OH 、OH メーザーが観測されることがある。 CH_3OH の class II メーザーは早期段階の大質量原始星との相関が高いと言われている。これまでの観測研究の結果、そのうち 10

茨城大学では日立-高萩 32m 電波望遠鏡を運用しており、 CH_3OH と H_2O のメーザー源について定期観測を行なってい

る。我々は日立 32m 電波望遠鏡で観測された CH₃OH class II メーザー源を周期性の有無により分類し、野辺山 45m 電波望遠鏡により観測を行うことになった。本観測では、大質量星形成領域の観測として一般的な C¹⁸O(1-0)、¹³CO(1-0)、N₂H⁺(1-0)、CH₃CN(5-4) を用いる。C¹⁸O(1-0)、¹³CO(1-0) により低密度なガスの分布をトレースし、分子ガスの全体量を求める。また、低温高密度領域のトレーサーとして *rm*N₂H⁺(1-0)、高音高密度領域のトレーサーとして CH₃CN(5-4) を使用し、N₂H⁺ と CH₃CN の分布割合から大質量星の進化段階について明らかにすることができる。

今回の発表では、CH₃OH メーザーと CH₃CN 輝線について述べた先行研究 (purcell 2006) についてのレビューを行うほか、研究の進展状態報告を行う。

星惑星 c4 赤外線による大質量星形成過程へのアプローチ

吉田泰 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

小中質量の星形成過程は大方解明されつつあるが、大質量の星形成過程はそもそも大質量の星の数が多くないことと星形成のタイムスケールも短いことから、解明が低質量星に比べて遅れている。星の形成過程において、星の周囲の現象を見るのに変光を見るのが有効である。低質量星では変光によって最近傍の構造や運動が調べられているが、大質量星では変光が存在するかどうかもわかっていなかった。

近年メーザーによるモニタ観測で変光が見つかり、注目が集まっていた。加えて昨年、赤外線に変光する大質量の YSO (Young Stellar Object) が発見された。赤外線観測は光度などの物理パラメータを直接得られるため、今後の研究が大いに期待される。

本講演では昨年発見された大質量の VYSO (Variable Young Stellar Object) の論文を紹介しつつ、大質量 VYSO の赤外線での観測の展望について述べる。

1 THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 833:24, 2016 December 10

星惑星 c5 NRO 銀河面サーベイプロジェクト (FUGIN): ホットコアの無バイアスサーベイ 佐藤一樹 (国立天文台三鷹 M1)

ホットコアは大質量星形成領域で観測される天体であり、分子雲が収縮し中心で原始星が誕生した段階にあたる。分子雲内で原始星が誕生した際に周りの分子が暖められ励起するため、それらの励起輝線が観測される。大質量星の形成メカニズムは未だ解明されておらず、大質量星の形成段階にあたるホットコアを統計的に研究することは重要である。

FUGIN (FOREST Unbiased Galactic Plane Imaging survey with Nobeyama 45m telescope) プロジェクトでは、野辺山

宇宙電波観測所の 45m 電波望遠鏡を用いて銀河面において ¹²CO、¹³CO、C¹⁸O の輝線同時観測を行った。この観測帯域に含まれる HNC、CH₃CN、SO₂ 等の輝線も解析し、銀河面内でホットコアを無バイアスサーベイすることが本研究の目的である。これらの分子はホットコアの良いトレーサーとなる。本研究は、ダスト連続波のサーベイに依存しない、分子スペクトル線のみによる初の系統的なサーベイを目指している。これらの輝線が検出され解析が可能か検証するために、すでに知られているホットコア領域の存在する W33 領域で解析を行ったところ、W33 Main および W33 A の HNC(109.906GHz)、CH₃CN(110.364GHz) の輝線の検出に成功した。本講演ではこれらの結果を報告するとともに、今後の他領域での分子の検出およびホットコアサーベイの実現性について議論する。

星惑星 c6 ALMA のための原始惑星系円盤とアウトフローの観測的可視化

北亦裕晴 (大阪大学 宇宙進化研究グループ M2)

2013 年、チリはアタカマ砂漠にて大型電波干渉計 Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) が稼働を開始した。従来の観測機器では成し得なかった超高感度・高分解能な観測により、宇宙物理学の諸分野における観測的研究は急速に発展している。星形成過程の研究も例外ではなく ALMA の恩恵を受けている。原始星は密度の濃い分子雲の中で誕生するため、従来の観測機器では直接観測することは困難であった。現在は ALMA により、原始星に付随する原始惑星系円盤の回転などが詳細に観測できる。

原始惑星系円盤中のガスは角運動量を持っており、円盤の形成と進化において角運動量の輸送が重要である。円盤の角運動量を輸送する物理機構の一つとして磁場により駆動されるアウトフローがある。アウトフローの理論的研究は古くから為されているが、観測的研究は ALMA の登場によって進展し始めたばかりである。既にアウトフローの観測に関する論文が報告されており (e.g. Bjerkeli et al. 2016, Zapata et al., 2015)、今後はアウトフローをはじめ原始惑星系円盤の観測的研究はより推進されると予想される。

ALMA による観測の進展に対し、観測と直接比較できる精密な理論モデルが強く求められている。この需要に応える手法の一つが流体力学シミュレーションの結果から輻射輸送計算により観測的性質を計算する、観測的可視化である。我々はこの手法により現実的な物理過程を含む磁気流体シミュレーションの結果から観測的性質を予言し、観測された天体の物理的状态を推定する系統的な手法を確立することを目指している (Tomida et al., 2017)。本発表では観測的可視化の方法を紹介すると共に、この方法を用いて理論・観測の両面から原始惑星系円盤の物理を解明する研究について最近の進展を報告する。

1 Bjerkeli et al., 2016, Nature, 540, 406

2 Zapata et al., 2015, ApJ, 798, 131

3 Tomida et al., 2017, ApJL, 835, L11

星惑星 c7 原始惑星系円盤中でのシア－不安定性 小野智弘 (京都大学宇宙物理学教室 D3)

原始惑星系円盤は惑星形成の現場であり、その構造・進化は形成される惑星の性質に影響を与える。近年の ALMA 望遠鏡による観測によって、三日月状構造を持つ原始惑星系円盤の存在が明らかにされており、円盤進化・惑星形成への影響に注目が集まっている。三日月状構造は差動回転円盤中でのシア－不安定性によって形成される巨大渦によって説明され得る。形成される巨大渦について知るためには、シア－不安定性に対する深い理解が必要となると考えられる。しかし、天文分野ではシア－不安定性について十分な理解が成されてこなかった

一方、地球大気分野では非圧縮流体ではあるが、シア－不安定性について深く理解されている。特に、その物理機構は 2 本のロスビー波同士の相互作用によって説明される。本講演の前半では、地球大気分野で培われたシア－不安定性の物理機構について紹介する。後半は、系を差動回転円盤まで拡張することで、原始惑星系円盤中でのシア－不安定について概観する。これらは、降着円盤や銀河円盤など、多様な天体上の物理現象を理解する上でも役立つことが期待される。

1 Ono et al. 2016, ApJ, 823, 84

星惑星 c8 原始惑星系円盤において磁気流体構造に依存するスノーライン 森昇志 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 D2)

原始惑星系円盤において、氷ダストは固体物質の質量の大部分を占め、微惑星形成において重要な役割を果たしている。それに加え、氷ダストは岩石型惑星の海の起源とも関連しており、惑星形成過程において氷ダストの分布を知ることは、惑星形成のみならず生命の起源を考える上でも欠かせない。氷ダストは、氷の昇華境界 (スノーライン) 以遠で存在することができ、スノーラインの位置を決定している円盤の温度構造を理解することが特に重要である。円盤が散逸するまでは、スノーラインが存在する円盤内側は光学的に厚いので、降着ガスの重力エネルギーが乱流粘性によって変換された熱が円盤に蓄積し、円盤内側の温度構造を決定すると考えられている。すなわち、この粘性加熱によって、円盤赤道面付近のスノーラインの位置が支配されている (Oka et al. 2011)。粘性加熱を考慮する際、加熱率が赤道面に集中する分布がよく仮定される。しかし、このような仮定は必ずしも現実的であるわけではない。原始惑星系円盤内における乱流の駆動源の 1 つは、磁場と円盤ガスとの相互作用によって引き起こる磁気回転不安定である。しかしこの機構は、ガスの電離度が比較的高い円盤の表面部でのみ起こると考えられている。このような場合、円盤内部での熱の蓄積が十分に起こらず、赤道面の温度上昇が起こりにくいことが輻射磁気流体シミュレーションによって示されている (Hirose

& Turner 2011)。本研究では、この事実に着目し、磁気乱流構造に基づいた円盤の温度構造を求め、スノーラインの位置を調べる。具体的には、成層構造と電離度分布を考慮した 3 次元の磁気流体計算を行い、得られたエネルギー散逸率の分布から動径方向の赤道面温度構造とスノーラインの位置を求める。ポスターでは、円盤の温度構造が磁気流体状態の空間分布によって大きく変わりうることを示す。

1 S. Hirose and N. J. Turner *apjl* 732:L30 (2011)

2 A. Oka, T. Nakamoto, and S. Ida *apj* 738:141 (2011)

星惑星 c9 原始惑星系円盤内における惑星軌道の変化 柳沼優太 (新潟大学宇宙物理学研究室 M1)

この講演は参考文献 [1] についてのレビューである。現在、惑星形成の標準モデルでは原始惑星系円盤内においてダストが衝突・合体し成長することで惑星が形成されると考えられている。地球などの太陽系の惑星は太陽を中心とした楕円軌道を描いて公転していることがわかっているが、どのようにして惑星の軌道が楕円軌道へ変化したのかを考える。ダストの衝突などによって形成された惑星は円盤にトルクを及ぼし、惑星・円盤間において角運動量とエネルギーが円盤外向きに輸送される。このトルクは一定ではなく惑星の軌道によって変化する。円軌道の場合はリンドブラッド共鳴、離心軌道の場合は共回転共鳴によって惑星が円盤にトルクを及ぼす。リンドブラッド共鳴によるトルクは惑星軌道の離心率を増大させ、共回転共鳴によるトルクは惑星軌道の離心率を減少させる。このようにして惑星軌道は変化する。ここでは木星と原始惑星系円盤間の相互作用から惑星軌道の変化について示す。

1 P. Goldreich, S. Tremaine, *ApJ* 241, 425 (1980)

星惑星 c10 連星系周りの惑星についての Habitable Zone

奥谷彩香 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M1)

1995 年以降の相次ぐ系外惑星の発見より、生命が居住可能 (habitable) な惑星についての議論は近年盛んに行われている。地球とはまったく異なる惑星でも条件をみれば habitable 惑星になりうる。

そこで、二重連星まわりの habitable zone (HZ) の条件を定式化する Jaime et al. (2014) の論文について、レビューを行う。この論文では、以下の二つの独立な条件を HZ の条件として用いる。

A. 中心星からの放射: HZ は中心星放射によって定義されるが (たとえば Kopparapu et al. 2013)、一つの中心星まわりの放射条件を二つの放射源がある場合に拡張する。連星系ではこの条件をみたく範囲 “radiative Habitable Zone (rHZ)” が、各星のまわり、または連星系まわりにあらわれる。rHZ の内側の

境界と外側の境界の位置によって、rHZ のタイプは三種類に分けられる。各タイプについて全軌道が rHZ 内に入るような惑星の円形軌道を定める。軌道離心率をもつ連星系の場合は、近星点と遠星点についての rHZ をみたく惑星の円軌道を求め、より厳しい条件を採用した。

B. 惑星軌道の安定性：生命が出現するまでに十分な時間、惑星が安定にとどまるような軌道は、一方の恒星に十分近い軌道と連星両方から十分離れた軌道の二種類が存在する (Pichardo 2005)。

この二つの条件を同時に満たすような軌道範囲を連星系の HZ とし、太陽系近傍の 64 個の連星系についてこれを適用した。その結果、56% の連星系が HZ をもつことが分かった。

連星系は宇宙では希少な存在ではなく、恒星のうち約四分の 1 が連星系をなしていると考えられている。それゆえ、連星系についての HZ を考えることは、将来 habitable 惑星発見の可能性をひろげることにつながる。

- 1 Jaime L., Aguilar L., and Pichardo B., *Astron. Soc.*, 431, 1 (2014)
- 2 Kopparapu R.K., Ramirez R., Kasting J.F., and et al., *Astrophys. Journal*, 765, 131 (2013)
- 3 Pichardo B, Sparke S.L., and Aguilar L., *Astron. Soc.* 359, 521 (2005)

星惑星 c11 「第二の地球」の地図作り: 3 次元大気モデルを用いた模擬観測と光度曲線解析 中川雄太 (東京大学 宇宙理論研究室 M2)

系外地球型惑星の直接撮像は、主星との空間的分離やコントラスト補正などの数多の問題を乗り越えて、近い将来に達成されると考えられている。その中から「第二の地球」と呼べるような、液体の水が存在して生命を宿しうる惑星、あるいは生命の存在する惑星を探索することは、荒唐無稽にも思えるが、天文学的に興味深いのみならず、人類の世界観・宇宙観を揺るがしうる重要なテーマである。実際このような「第二の地球」に関する研究は、その探索方法論だけでなく居住可能性 (“ハビタビリティ”) や、「生命」の汎惑星的定義付けまで、多岐にわたって行われている (e.g., Seager 2013)。

系外地球型惑星の環境を知る手段として、惑星表面で散乱した恒星光を用いることが提案されている。Kawahara (2016) は、理論的に構成した散乱光の光度曲線を周波数解析することにより、自転軸傾斜角 (「地軸の傾き」に相当する) が推定できることを予言した。しかしながら上で用いた理論光度曲線は地球の雲分布の観測データをそのまま使っているため、自転軸傾斜角の異なる惑星において適当な雲分布であるとは考えにくい。惑星気候力学の観点からも、自転軸傾斜角の異なる惑星では、熱循環構造が変化し雲分布は大きく異なると予想される。

以上の状況を踏まえ、本研究では 3 次元惑星大気モデルを用いて任意の自転軸傾斜角に対して雲分布を計算し、地球と同様

の雲分布であるという仮定をはさまない散乱光の光度曲線を作成する。加えて、作成した光度曲線を逆解析し、自転軸傾斜角が推定可能であるかについても議論する。

- 1 Seager S., *Science*, 340 (2013) 577
- 2 Kawahara H., *Astrophysical Journal*, 822 (2016) 112

星惑星 c12 トランジット法による系外惑星大気観測の今後の展望 寺田由佳 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

系外惑星はこれまで、直接観測法、視線速度法、トランジット法、重力マイクロレンズ法など様々な手法で探査、観測が行われてきた。その中でも、最も多くの系外惑星を発見した手法がトランジット法である。トランジット法は、系外惑星の公転面が観測者に沿う場合に見られる、主星を公転する惑星による食に伴う明るさやスペクトルの変化を観測するものである。この手法は系外惑星の間接的な観測法であるが、惑星大気についての情報を得ることが可能である。トランジットが起こっている間、恒星の光の一部が惑星の大気中を通過し、大気に一部が吸収される。この吸収が波長依存性を持つことを利用して、惑星の大気を透過してくる主星の光を分光することで惑星の大気を調べることが出来る。

現在、TESS、JWST、CHEOPS といったトランジット法を用いた系外惑星の探査や分光を行う望遠鏡や衛星の打ち上げが計画されており、今後、ますますトランジット法による系外惑星の大気の観測が盛んになることが予想される。

今回の発表では、トランジットによる大気観測の現状と打ち上げ予定の観測装置によって近い将来、どのような観測ができるかについて述べる。

- 1 Kevin B. Stevenson et al. arXiv:1602.08389
- 2 Eliza M.-R. Kempton, Jacob L. Bean2 arXiv:1705.05847
- 3 A. Wyttenbach et al. arXiv:1702.00448

星惑星 c13 木星の内部構造における未解決問題と木星学的手法への期待 芋生真子 (東京大学大学院理学系研究科地球惑星科学専攻 M1)

木星の内部構造は、惑星系形成の起源や進化を理解する上で極めて重要であるが、よく理解されていない。主な問題の一つが、惑星系形成に制約を与えられる精度でコア質量やエンベロープの重元素量を求められない点だ。これは、超高压下での水素とヘリウムなどの状態方程式に大きな不確実性が残っているためである。Miguel et al. (2016) では、最新の状態方程式を用いて、内部構造の不確実性が定量的に示されている。

従来は、重力モーメントの観測値と整合的な内部の密度分布を決定することで、内部構造の推定が行われてきた。近年の木

星探査機 Juno の観測により、以前よりも高精度な重力モーメントが得られている。しかし、重力モーメントはエンベロープの浅い部分に感度があり、エンベロープの深部構造を推定するためには有用ではないため、この手法に代わる新たな方法が必要とされていた。

そこで、現在提案されているのは日震学・星震学を応用した方法(木震学)だ。つまり、木星の表面自由振動から内部構造の知見を得る手法である。例えば、Jackiewicz et al. (2012) では、木星で期待される密度不連続の位置・強度を推測することは、観測される振動モードで十分であることを数値計算で示した。これにより、木星のコアのサイズや質量に制限を与えられることが期待される。本ポスターでは、Miguel et al. (2016) と Jackiewicz et al. (2012) をレビューし、木星の内部構造に関する問題とその解決方法について議論する。

- 1 Jackiewicz J., et al., 2012, *Icarus* 220 (2) , 844
- 2 Miguel Y., Guillot T., Fayon L., 2016, *A&A* 596, A114

星惑星 c14 AKARI and Spinning Dust Emission A look at microwave dust emission via the Infrared Bell Aaron (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 D3)

The microwave emission from our Milky Way galaxy has several components that can be very difficult to distinguish: free-free emission, synchrotron emission, thermal dust emission as well as the more recently discovered "anomalous microwave emission" (AME) which likely comes arises from spinning small dust grains. Likewise, the infrared emission profile of interstellar dust emission has several overlapping constituents that we cannot yet completely identify the sources of. We are attempting to investigate one of the major characteristic sources of 6 to 12 micron dust emission-nanoscale carbonaceous dust (like polycyclic aromatic hydrocarbons or PAHs), to the yet unexplained anomalous microwave emission. We do this by comparing microwave data from the Planck Observatory with IR dust emission mapped by the AKARI space telescope. We focus on the AKARI Infrared Camera (IRC) which traces the PAH emission features very well. Our work supports that AME comes from dust, but does not support a situation where AME is exclusively caused by PAHs or similar molecules. There may be several contributors, and environmental factors (like the interstellar radiation field) may play a larger role than previously thought in producing the AME portion of the galactic microwave foreground.

- 1 Kogut, A., Banday, A. J., Bennett, C. L., Gorski, K. M., Hinshaw, G., & Reach, W. T. 1996, *ApJ*, 460, 1
- 2 Draine, B. T., & Lazarian, A. 1998, *ApJ*, 508, 157, 1999,

ApJ, 512, 740

- 3 Ishihara, D., et al. 2010, *A&A*, 514, A1