

2016 年度 第 46 回
天文・天体物理若手夏の学校

講演予稿集
星形成・惑星系分科会

星形成・惑星系分科会

星・惑星の古今東西に迫る

日時	7月26日 16:30 - 17:30 7月27日 9:00 - 10:00, 10:15 - 11:15 (招待講演: 元木 業人氏), 17:15 - 18:15 7月28日 9:00 - 10:00 (招待講師: 谷川 享行氏) 10:15 - 11:15, 14:45 - 15:45 (分科会別ポスター), 17:15 - 18:15 (分科会別ポスター), 18:30 - 19:30
招待講師	元木 業人氏 (国立天文台) 「高分解能原始星観測の現状と将来展望」 谷川 享行氏 (一関工業高等専門学校) 「巨大ガス惑星周りにおける衛星系形成過程のレビュー」
座長	森昇志 (東京工業大学 D1)、松下祐子 (九州大学 M2)、荒川創太 (東京工業大学 M2)、河瀬哲弥 (京都大学 M2)、逢澤正嵩 (東京大学 M2)
概要	<p>本分科会では、分子雲コアの収縮による星や原始惑星系円盤の形成、円盤内のガスとダストの物理現象、太陽系内および太陽系外天体の形成史や表層・内部構造に関する研究を扱います。この分野では、観測・探査技術の進歩が著しく、赤外線・電波での観測による原始惑星系円盤の詳細な構造の検出、系外惑星大気分光観測、太陽系内衛星の表層・内部構造の解明といった驚くべき結果が報告されています。特に、ALMAの超高解像度観測ではおうし座HL星(HL Tau)周りの円盤の鮮明な姿が明らかになりました。加えて、国内の系内惑星探査では、小惑星探査機「はやぶさ2」、金星探査衛星「あかつき」、火星衛星へのサンプルリターン計画など巨大プロジェクトが目白押しで、太陽系惑星科学の急速な進展が期待されています。また、系外惑星探査では、トランジット観測衛星TESS、次世代超大型望遠鏡TMTなどの次世代の観測装置が新たな世界を切り拓くでしょう。一方で、理論研究の進展も見逃せません。例えば、アウトフローや輻射フィードバックを考慮した星形成シミュレーションや、ダストの内部密度進化を考慮した微惑星形成モデル、ガス惑星まわりの周惑星円盤における衛星系形成シナリオなどが挙げられます。また、HL Tauの詳細な円盤構造を説明するため、様々な理論モデルが提案されています。加えて、最近では天体力学の研究によって海王星以遠に第9惑星の存在が示唆されたことも記憶に新しいです。これらの観測・探査・理論研究の目覚ましい成果は相互の進展に大きく寄与することは言を待ちません。特にALMAによる本格的な科学観測が始まり星形成・惑星系研究は新しい時代を迎えつつあります。本分科会に参加される、新時代の研究を担う皆様には、夏の学校での発表や議論を通じて観測や理論といった枠にとらわれずに視野を広げ、今後の研究に役立てて頂くことを期待します。</p> <p>注) 水素燃焼する質量の星は太陽・恒星分科会で扱います。 注) サブpcスケールの分子雲コアやアウトフローは星形成・惑星系分科会で扱いますが、pcスケールの星形成領域や分子雲などは星間現象分科会で扱います。</p>

元木 業人 氏 (国立天文台)

7月27日 10:00 - 11:00 B会場

「高分解能原始星観測の現状と将来展望」

H, He, Li のわずか 3 元素から始まった宇宙は、恒星の生と死を通じて元素合成を繰り返し現在の姿に至る。誕生する星の量と質を問う星形成研究は宇宙の物質進化を考える上で最も基本的な分野の 1 つであると言える。我が国においては歴史的経緯から惑星形成過程や基礎的な星間物理の実験場として近傍の低質量形成が重要視されてきた。一方、宇宙における星形成の大部分は星団形成によって占められており、物質進化の文脈においては大質量星を含む星団形成過程がより重要な意義を持っている。母体雲深くに埋もれた主質量降着期にある原始星の研究は、電波干渉計による観測を中心に進められてきた。こうした高分解能観測による原始星研究では余剰角運動量/磁束の抜き取りや円盤分裂など降着現象に関する物理過程や、原始星進化とそれに伴う星周環境へのフィードバック (アウトフロー、輻射、電離領域) が主たる研究テーマである。特に自身のフィードバックが最終的な星質量に強く影響する大質量原始星においては高分解能観測が果たす役割は非常に大きい。近年 ALMA/J-VLA による感度と分解能の大幅な向上によって、原始星近傍 100AU スケールでの降着円盤撮像が急速に進んでいる。また 1 - 0.1 pc スケールの母体雲と 1000 AU 以下の個別原始星を結ぶ階層的な降着構造についても観測が進みつつある。本講演では低質量/大質量原始星観測の現状について紹介するとともに、SKA/TMT など次世代観測装置を用いた原始星大気とその超近傍環境の観測可能性についても紹介する。

1. Hirota, T et al. 2014, ApJ, 797, 35
2. Hosokawa, T., Yorke, H. W. and Omukai, K. 2010, ApJ, 721, 478
3. Lim, J et al. 1998, Nature, 392, 575L

谷川 享行氏 (一関工業高等専門学校)

7月28日 9:00 - 10:00 B会場

「巨大ガス惑星周りにおける衛星系形成過程のレビュー」

衛星系は、我々の太陽系においてはガス惑星 (木星・土星)・巨大氷惑星 (天王星・海王星) の周りに普遍的に見られる。全衛星質量の大部分を担う規則衛星 (惑星に近くほぼ円軌道・同一平面上) は、その軌道的特徴から周惑星円盤内で形成されたと考えられている (Lumine and Stevenson 1982)。しかし、太陽系形成の標準モデルと同様に質量供給の無い円盤を採用すると、初期条件として既に現在の衛星系を再現しうる全質量を同時に持つ必要があるため、(1) 円盤面密度・温度が高くなり現在の衛星系の主要材料物質である氷が気化してしまう、(2) 形成した衛星が重い円盤との重力相互作用で即座に惑星へと落下してしまう、などの困難が明らかになってきた。そこで、質量供給が続いている円盤を考えると、円盤質量を小さくすることができるため、円盤温度が下がり氷が固相のまま存在し、かつ衛星落下を低減させられる可能性が示された (Canup and Ward 2002)。未解明であった円盤への質量供給過程は、特にガス供給については、数値流体計算 (Tanigawa et al. 2012, Tanigawa & Tanaka 2016) により具体的描像が明らかになってきている。一方、固体材料物質の供給については軌道計算 (Tanigawa et al. 2014) による研究は行われているものの、まだ未解明な点が多い。本講演では、周惑星円盤における規則衛星形成過程について、現状の問題点も含めて紹介する。さらに、中・小サイズ規則衛星の形成過程について、惑星周りの粒子リングからサイズ分布も含めて非常に良く再現されるモデル (Crida & Charnoz 2012) が提案されているので、これも紹介する。

1. Canup and Ward, AJ, 124, 3404 (2002)
2. Crida and Charnoz, Science, 338, 1196 (2012)
3. Tanigawa et al., ApJ, 747, 47 (2012)

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的検証

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) M1)

星は星間媒質中の分子雲の中で形成されると考えられている。その過程を理解することは現代の天文学における大きな課題である。Herschel 宇宙望遠鏡による Gould Belt 領域のサーベイ観測で、分子雲中には幅 0.1pc 程度の細長く伸びた構造があまねく存在し、分子雲コアや原始星はこのフィラメント状構造に沿って分布していることが明らかになった (André et al. 2010)。この結果はフィラメント状構造の分裂が重要であることを示唆する。またこの観測では、分子雲コアの質量関数と星の初期質量関数の形がよく似ていることも示された。このような事実から、星形成の理解において、まずは分子雲コアの質量関数の形成機構を解明することが必要であると考えられる。

Inutsuka(2001) は宇宙論において銀河ハロー形成過程の研究でよく用いられる Press-Schechter 理論をフィラメント状分子雲に応用することで、分子雲コアの質量関数を求める理論を提唱している。この理論では質量関数はフィラメントの線密度ゆらぎのパワースペクトルによって決定される。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、得られる質量関数は観測結果とよく一致することが示されていた。近年の Herschel 観測でゆらぎの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 (Roy et al. 2015)、Inutsuka(2001) の理論で分子雲コアの質量関数を説明できることが期待される。しかし、一般に Press-Schechter 理論では幾つかの仮定が用いられており、実際のコアと理論から得られる質量関数が対応していることは自明ではない。

そこで本研究では、計算機上にフィラメントの線密度分布を再現し、具体的にコアを同定して質量関数を求めることを通して、Inutsuka(2001) の数学的な正しさと実際の観測へ応用できる可能性を検証する。本講演では Inutsuka(2001) のレビューを行った後に、検証の結果について議論する。

1. André, Ph., Men^{Primes}chikov, 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 ガスト成長が星形成に及ぼす影響

国松 翔太 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ
M1)

星形成過程では星間ガスが重力により収縮して原始星を形成するが、ガスが収縮するには輻射または化学反応による冷却が必要である。現在の星形成過程において輻射輸送を支配しているのは主にダストの熱放射であり、既にそれを取り入れた輻射流体シミュレーションが多数行われている (Masunaga & Inutsuka 2000, Tomida et al. 2013 他)。ダストは星間ガス中に存在する微小な個体微粒子であり AGB 星や超新星から放出されたものに由来する。このダストは比較的密度の高い星間雲中では重元素の付着、ダスト同士の衝突による合体あるいは破碎、または蒸発により、サイズ分布が変化すると考えられる。特に付着はダストと重

元素が豊富な領域では活発に起こり、ダストのサイズを大きくする方向に働き、サイズに対する表面積が大きい小さなダストに対してこの影響は大きくなる。ダストはケイ酸塩を主として様々な組成があるが、この組成の違いはダスト同士の衝突の際の、合体・破碎の頻度を変えると考えられる。これらの過程によるダストのサイズ分布の変化はダストの総表面積の変化に直結し、オパシティを変化させる。上で述べたような計算ではダストの性質は事前に計算したテーブルを利用しており、ダストサイズ分布の進化は考慮されていなかった。本発表ではこの効果を調べた研究 (Hirashita & Omukai 2009) を紹介する。この研究ではダストとしてシリケート及びカーボン系のものが考慮されていたが、実際の星形成過程では氷のダストが重要である。氷ダストは 150K 程度で蒸発するため、その前後でオパシティに大きな影響を及ぼす。これらの現実的な要素を取り入れたダストの成長モデルと、それをを用いた星形成過程の研究の進展についても報告したい。

1. Hirashita, H. and Omukai, K. 2009, MNRAS, 399, 1795
2. Masunaga, H., and Inutsuka, S.-i. 2000, ApJ, 531, 350
3. Tomida, K., Tomisaka, K., Matsumoto, T., Hori, Y., Okuzumi, S., Machida, M. N., and Saigo, K. 2013, ApJ, 763, 6

星惑 a3 非理想 MHD 効果による連星形成への影響

中村 亮介 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ
M1)

宇宙において連星は非常にありふれた存在であり、その形成について理解することは極めて重要である。分子雲から原始星が形成され、その周りに円盤や連星が生まれる過程について様々な研究がなされてきた。この過程で重要なのは磁場による角運動量輸送であるが、磁場による角運動量輸送の効率が非常に高いために円盤や連星が形成されにくい、Magnetic Braking Catastrophe または Fragmentation Crisis と呼ばれる問題が存在する (Mellon & Li 2008, Hennebelle & Fromang 2008 他)。この問題は最近精力的に研究され様々な解決策が提案されているが、その一つとしてオーム散逸等の非理想 MHD 効果による磁場の散逸で角運動量輸送を抑制することが考えられている (Tomida et al. 2015 他)。連星系の形成の形成を理解するためにはこのような現実的物理過程を取り入れた精密な研究が必要である。

連星系の形成条件はオーム散逸を考慮した磁気流体シミュレーションにより既に調べられている (Machida et al. 2008)。本発表ではまずこの研究について紹介し、連星系形成と磁場、回転の関係を説明する。現在この研究を拡張し、ambipolar diffusion (電離度が非常に低い領域で中性粒子と荷電粒子の結合が弱くなり、ガスから磁場が抜ける効果) も取り入れたより現実的なシミュレーションにより連星系形成条件への影響を調べているため、その進展についても報告したい。

1. Machida et al. ApJ, 677, 327 (2008)
2. Tomida et al. ApJ, 801, 117 (2015)
3. Hennebelle & Fromang A&A, 477, 9 (2008)

星惑 a4 宇宙の進化と星形成過程の変遷

樋口 公紀 (九州大学 大学院理学院 地球惑星科学専攻 M2)

星形成環境は宇宙の進化に伴い変化し続けている。星形成環境を変化させる一因として、分子ガス雲の重元素量と電離度(宇宙線強度と放射性元素崩壊で生じる γ 線強度)が挙げられる。重元素は星の進化とともに形成され、増加する。また、周囲の電離環境に伴い、分子雲ガスの電離度は異なる。重元素量と電離度は、星形成過程を考える場合、冷却効率を変化させるため重要である。例えば、宇宙初期のような重元素や電離源が存在しない環境では、ガスの冷却効率が悪く、高温になる。星への質量降着率は温度に依存する。そのため、宇宙初期の星形成環境における質量降着率は現在の値よりも大きく、大質量星がしやすい環境となる。また、電離度は磁場の散逸度合を変化させるため、磁場を考える上でも重要となる。星間空間に磁場が存在することは既知であり、星形成を考える際に磁場の影響を無視することはできない。磁場は、星形成過程や宇宙の構造形成に伴い生成・増幅されるので、宇宙初期の磁場は、現在の磁場より弱いと考えられている。しかし、宇宙初期の磁場は観測できないため、その強度は未だ不明である。本研究では、宇宙初期から現在までの星形成過程に磁場が及ぼす影響を検証する。初期条件として、電離源のない環境で、重元素量を $0-1Z_{\text{sun}}$ まで変化させた。低金属量星形成環境の初期磁場は、観測結果より得ることができない。そこで、現在の星形成環境で重力エネルギーと磁気エネルギーの比(Mass-to-Flux Ratio)が、1程度であるので、宇宙初期から現在までの星形成環境でもその比が1程度であると仮定する。本発表では、そのような初期条件のもと、分子雲コアから原始星形成までの、磁場の散逸(オーム散逸・両極性拡散)を考慮した3次元非理想磁気流体力学(MHD)シミュレーションを行い、その結果を用いて、星形成過程に磁場の及ぼす影響を議論する。

1. Susa, H., Doi, K., & Omukai, K. 2015, ApJ, 801, 13

星惑 a5 高降着率をもつ星形成分子雲での磁場を考慮した大質量アウトフロー

松下 祐子 (九州大学 大学院理学院 地球惑星科学専攻 M2)

原始星からの双極分子流(以下、アウトフロー)は、星形成過程において普遍的に出現すると考えられている。したがって、アウトフローは、星形成過程を理解する上で重要な指標となる。大質量星の形成過程は、未だ解明されていないが、近年のアウトフローの観測結果から、大質量星の形成過程は低質量星形成のスケールアップ版ではないかと示唆されている。本研究では、アウトフローに着目し、3次元非理想磁気流体力学(MHD)シミュレーションを用いて、分子雲コアから原始星が形成するまでを計算した。初期の分子雲コアの不安定性(重力エネルギーに対する熱エネルギーの比)をパラメータとすることで、低質量星から大質量星までの広い質量範囲をカバーしている。本研究の結果では、観測結果と同様に、原始星質量(光度)とアウトフローの物理量に強い相関があることが示された。したがって、低質量星から大質量星まで同じ形成メカニズムであることが示唆される。今回のシミュレーションでは、星からの放射の影響を考慮していないにも関わらず、観測結果とよく一致し

ていた。以上より、大質量星形成においても、磁場と円盤へのガス降着の過程が星形成を支配していると考えられる。また、低質量星同様に大質量星においても、アウトフローにより主に角運動量が輸送されていることが分かった。この結果から、大質量星における角運動量輸送と円盤分裂についても議論する。

1. Beuther, H et al., 2002, A&A, 383,892B
2. Machida, M. N., & Hosokawa, T. 2013, MNRAS, 413, 1719
3. Wu, Y., et al., 2004, A&A, 426, 503

星惑 a6 AKARI を用いた YSO の氷吸収の観測・解析

木村 智幸 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

今研究では、銀河系内に見つかった2つの young stellar object(YSO)候補天体についての近赤外から中間赤外の波長域(2.5-13 μ m)で得られたスペクトルについて解析を行う。この YSO candidates は赤外線天文衛星 AKARI に搭載された近・中間赤外線カメラ IRC のスリットレス分光モードで銀河面を無バイアスに観測していた際に偶然発見されたものである。

両天体のスペクトルには、星周円盤やエンベロープに存在する固体の H₂O、CO₂、CO、XCN⁻、silicates による吸収や、気体の CO の可能性のある吸収のバンドが見られる。推定される XCN⁻ の柱密度が非常に大きいことから、両天体は Class I のダストに深く埋もれた YSO であることが示唆される。しかし、両天体は既知の星形成領域に属してはいない。

典型的な YSO の放射のピーク波長に比べて両天体のピーク波長が $\sim 4\mu$ m と非常に短い所にあり、遠赤外での放射が弱く観測できていないという事実は既存の YSO の SED モデルからは説明できない。一方で XCN⁻ の feature の存在や、天体の見られる領域に星雲が見られないことは、観測天体が background star ではないだろうとも推測できる。本講演では、得られた結果を元に観測天体の物理的特徴を議論する。

1. Aikawa, Y., Kamuro, D., Sakon, I., et al. A&A, 538, A57 (2012)
2. Boogert A. C. A., Gerakines P. A., Whittet D. C. B., ARA&A, 53 541 (2015)
3. Noble, J. A., et al. ApJ, 775, 85 (2012)

星惑 a7 ALMA Cycle1 による原始星 L1448-mm の観測

黒瀬 一平 (国立天文台三鷹 東京大学大学院理学研究科天文学専攻 M2)

星形成過程で、若い星の周囲に原始惑星系円盤と呼ばれる星周円盤が形成されることが知られているが、その役割は、惑星系の形成に加えて、円盤を通じた角運動量輸送や中心星への質量降着など、星形成自体にとっても極めて重要である。この観点から円盤の力学的進化の過程を明らかにすることは、星形成から惑星系形成、ひいては我々の太陽系の形成過程を理解する上で重要である。今回は原始星初期段階の L1448-mm (Class 0, T_{bol}=69K) を ALMA Cycle 1 にて 1.3mm 連続波, C¹⁸O(J=2-1), D₂CO(J=4_{0,4}-3_{0,3}), N₂D⁺(J=3-2) で観

測した結果を報告する。空間分解能は $0.36'' \times 0.24''$ を達成した。1.3mm 連続波で中心星から半径 20AU の分子流の軸にほぼ直する東西に伸びた構造を検出することができた。この伸びた構造は、主に星周円盤の構造を示すものと思われる。又この天体は連星系であることが知られているが、本観測でも主星から南東方向に $7''$ 離れた伴星を連続波で確認することができた。一方、円盤周囲のガスを捉えているとされる $C^{18}O$ では円盤長軸方向に速度勾配が認められ、この速度勾配は中心に近づくほど大きくなり、このことから円盤とその周囲のガスの差動回転運動をトレースしていると考えられる。 D_2CO においても、 $C^{18}O$ と同じ方向に速度勾配が検出されたが、そのプロファイルは $C^{18}O$ とは大きく異なり、中心から離れるほど速度が大きくなることが分かった。講演では、 $C^{18}O$ の観測結果とモデルとの比較、 D_2CO の起源等について議論する。

1. Yen, H.-W., Takakuwa, S., Ohashi, N., Ho, P. T. P. 772, 22
2. Hirano, N., Ho, P. T., Liu, S.-Y., Shang H., Lee, C.-F., Bourke, T. L. 2010, ApJ, 717, 58

星惑 a8 疎性モデリングによる原始惑星系円盤の超解像イメージング

山口 正行 (国立天文台三鷹 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 M1)

本研究では、ALMA 望遠鏡の長基線キャンペーンで得られた HL Tau の観測データに対して、疎性モデリングと呼ばれる新たな超解像イメージング法を適用し、天体画像の復元を試みた。電波干渉計データからの画像復元は、観測量不足のために不良設定問題となり、有限のサイズを持った合成ビームやそのサイドローブの影響を強く受けてしまう。よって、回折限界よりも小さな天体構造の復元が困難であった。そこで我々は疎性モデリングという新しいイメージング法を使用することで、この不良設定問題を解き、超解像画像の復元を目指した。ALMA 望遠鏡の 1.3mm 連続波で観測した HL Tau の観測ビジビリティを 200 秒積分し、さらに計算処理の軽減化として gridding を行い、疎性モデリングを適用した結果、HL Tau の復元に成功した。これは、疎性モデリングを ALMA 望遠鏡の観測データに適用した初めての研究である。

1. ALMA Partnership, 2015, *Astrophys. J. Let.* 808,
2. Honma, M., Akiyama, K., Umemura, M., & Ikeda, S. 2014, *PASJ*, 66, 95

星惑 a9 永年重力不安定性の解明に向けた数値計算法の開発

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) M1)

星が生まれる際にその周りには原始惑星系円盤が形成される。原始惑星系円盤は、主に水素分子からなるガスと固体微粒子(ダスト)からなる。惑星形成の古典的標準理論では、この円盤中でダストが自己重力によって集積し合体成長することで惑星が形成されると考えられている。したがって惑星形成理論を解明するためには円盤中のダストの運動を理解することが大変重要である。

原始惑星系円盤中のダストにはガスとの速度差に起因する摩擦力が働く。この摩擦によって永年重力不安定性 (Secular GI) という不安定

性が起こることが指摘されている (e.g., Takahashi & Inutsuka 2014)。Secular GI は自己重力安定な円盤でも起こるため、新たな微惑星形成法として提唱された。しかし微惑星形成過程を詳細に議論するためには Secular GI の大局的非線形成長を調べる必要がある。

近年の観測によって原始惑星系円盤中に様々なリング構造が発見された。特に 2015 年にアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) によって観測された HL Tau の多重リング構造は注目を集めている (ALMA Partnership et al. 2015)。Takahashi & Inutsuka (2016) では、HL Tau のリング構造が Secular GI によって説明されうることを線形理論によって示していた。したがってリング形成のメカニズムを理解するためにも Secular GI の大局的進化を調べることは非常に重要である。

本研究の目的は数値計算によって Secular GI の大局的非線形成長を調べることである。Secular GI の成長時間は円盤の回転周期と比べてかなり長いので、数値散逸を生じることなく長時間流体の計算を行える計算法を用いる必要がある。そこで本研究では Symplectic 法を数値流体力学に応用した新しい数値計算法を開発した。開発した計算法では Lagrange 的な定式化を行うことで数値誤差によるエネルギー散逸を回避している。本講演では開発した数値計算法を紹介し、Secular GI の非線形発展について議論する。

1. ALMA Partnership, Brogan, C. L., Pérez, L. M., et al. 2015, *ApJ*, 808, L3
2. Takahashi, S. Z., & Inutsuka, S. 2014, *ApJ*, 794, 55
3. Takahashi, S. Z., & Inutsuka, S. 2016, *ArXiv e-prints*, arXiv : 1604.05450

星惑 a10 隕石中の固体微粒子から探る岩石微惑星形成

荒川 創太 (東京工業大学 地球型惑星科学専攻 中本研究室 M2)

地球型惑星は、km サイズの岩石微惑星が衝突合体を繰り返すことで形成されたと考えられている。この岩石微惑星は、隕石を構成する粒子、つまり、コンドリュール (mm サイズの球形粒子) およびマトリックス粒子 (nm- μ m サイズの微粒子) の集積によって形成されたと考えられるが、その集積過程は解明されていない。さらに、コンドリュールおよびマトリックス粒子がいつ、どこで形成されたのかも明らかでない。

微惑星は、その形成過程において 10ms^{-1} を超える高速衝突を経験する。衝突時に粒子の集合体 (アグリゲイト) が合体するか破壊するかは、集合体を構成する 1 つ 1 つの粒子 (モノマー) の物性およびサイズに依存する。従来の惑星形成の理論研究においては、アグリゲイトを構成するモノマー粒子の大きさは μm 程度と考えられてきた。これは星間物質の観測 (e.g., Mathis et al., 1997) などに基づくものである。一方、実際に隕石中を電子顕微鏡で観察すると、サイズ分布のピークは nm サイズであることが分かっている (Toriumi, 1989)。岩石の場合、 μm サイズのモノマー粒子からなるアグリゲイトは高速衝突によって破壊され、微惑星を形成することができないが、モノマー粒子のサイズを nm サイズと仮定すれば衝突破壊が回避される (e.g., Wada et al., 2008)。

本研究では、コンドリュールとマトリックス粒子が同時に集積した場合、これらの粒子からなるアグリゲイトはどこまで成長することができるのかを調べた。その結果、マトリックス粒子が nm サイズの場合には、岩石微惑星まで成長可能であることが判明した。本講演では、コン

ドリュールとマトリックス粒子の集積・形成過程について議論する。

星惑 a11 微惑星の衝突破壊を考慮した巨大衝突ステージにおける原始惑星の軌道進化

佐藤 雄太郎 (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)

太陽系の地球型惑星は火星程度の大きさの原始惑星同士の衝突によって形成したと考えられており、惑星形成におけるこの段階は巨大天体衝突ステージと呼ばれる。このことは理論的な研究からだけでなく、地質学的な証拠からも支持されている。そこで、このステージで原始惑星が巨大衝突を起こして地球型惑星が形成する過程の N 体シミュレーションを行った。その結果、確かに巨大衝突は起こり、地球型惑星が形成した。しかし、形成した惑星の離心率は現在の地球型惑星のものよりもはるかに大きくなってしまった。この原因は、本研究において原始惑星同士の衝突のみを扱ってきたことにあると考えられる。なぜならば、実際の宇宙には様々なサイズの惑星が存在しているからである。そこで、原始惑星の周りに小さな微惑星が多数存在しているような系を考える。この系では微惑星と原始惑星の力学的摩擦によって、形成した地球型惑星の離心率を下げられるはずである。しかし、周りの微惑星は衝突破壊により数が増える。 N 体シミュレーションの計算量は粒子数の二乗に比例するので、この様に多くの粒子が必要な長時間の計算をすることはできない。この問題を解決するため、 N 体計算と統計的計算を融合した新たな惑星集積コードが開発された (Morishima 2015)。その結果、Morishima (2015) では形成後の地球型惑星の離心率が抑制されることを示唆した。しかしながら、Morishima (2015) では、微惑星の合体しか取り扱っておらず、破壊の影響が考えられていない。地球型惑星形成後期では微惑星のランダム速度が大きいので微惑星同士の衝突は合体ではなく破壊を引き起こす。本研究では、微惑星の破壊を考慮して、微惑星達との力学的摩擦により地球型惑星の離心率が抑制され、その後破壊によりこれらの微惑星が消失することを明らかにしたい。そこで、本講演では微惑星の破壊を考慮した計算コードの開発に向けて行った種々の計算と結果について議論する予定である。

1. Morishima(2015)
2. Kobayashi & Tanaka (2010)
3. Chambers et al. (1996)

星惑 a12 原始惑星系円盤の円盤風による進化を考慮した巨大衝突ステージにおける地球型惑星形成

常盤 直也 (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)

恒星が誕生する際、その星の周りにガスとダストからなる原始惑星系円盤 (以後、円盤と呼ぶ) が形成される。惑星は円盤中で形成されるため、円盤の時間進化が惑星形成過程に多大な影響を及ぼす。円盤は数百万年程度で散逸すると示唆されているが、その散逸機構は未だ完全には解明されていない。有力な散逸機構は、磁気乱流により駆動される円盤風である (Suzuki & Inutsuka 2009)。本講演では、円盤風による円盤進化を考慮して巨大衝突ステージにおける地球型惑星形成を調べた論文 (Ogihara et al .2015) のレビューをする。

惑星は円盤との重力トルクを通じた相互作用により中心星に向かい螺旋軌道を取り落下する (I 型惑星移動)。太陽系最小質量円盤モデルの円盤中で I 型惑星移動の典型的なタイムスケールは 10 万年以下である (Tanaka et al. 2002)。移動時間は円盤の散逸時間に比べてずっと短いため、形成された惑星は中心星に落ちてなくなってしまう (惑星落下問題)。しかし、これまでのモデルでは円盤風による円盤の時間進化を考慮していなかった。円盤風による円盤の消失の効率は円盤鉛直方向にかかる磁場の強さに依存するため、様々な磁場の強さを考えて円盤進化を計算し、その円盤中での惑星成長を N 体計算により調べた。その結果、シミュレーションを実施した円盤風を考慮した全てのモデルにおいて、軌道長半径 1AU より内側に存在する火星質量程度の惑星は、惑星落下問題を回避できることがわかった。重い円盤ほど円盤から強い重力トルクを受けるため惑星の動径移動は速くなるが、円盤風により円盤面密度分布が変化するため惑星移動は遅くなる。その結果、重い円盤でも惑星移動による落下は起きないことがわかった。

しかし、太陽系の地球型惑星の軌道や質量の分布を説明できたわけではない。本講演ではさらに、円盤風を考慮した円盤の面密度進化を様々なパラメータで数値計算を行い、地球型惑星の軌道や質量分布を説明可能な原始惑星系円盤について議論する。

1. Ogihara, M., Kobayashi, H., Inutsuka, S., & Suzuki, T. K. 2015b, A&A, 579, A65
2. Suzuki, T. K., & Inutsuka, S.-i. 2009, ApJL, 691, L49
3. Tanaka H., Takeuchi T., Ward W. R., 2002, ApJ, 565, 1257

星惑 a13 惑星形成 N 体計算の大粒子数化に向けて：FDPS を用いた P^3T 法の並列計算

山川 暁久 (東京工業大学地球惑星科学系野村研究室 M1)

微惑星集積による地球型惑星の形成過程は N 体計算によって解明されつつあり、暴走成長や寡占成長 (Kokubo and Ida 1996, 1998) といった形成過程が存在することが明らかとなっている。しかし、これまでの N 体計算は計算コストの問題から、完全合体を仮定したうえで狭い領域を少ない粒子数で計算するものがほとんどである。より現実的な惑星形成過程のシミュレーションには、衝突による破壊を考慮した上で、大粒子数による長時間積分を行う必要がある。

そこで本研究では、大粒子数による惑星形成 N 体計算を行うために、計算効率の良いアルゴリズムである P^3T 法 (Particle-Particle Particle-Tree 法)[1] の並列化の実装を行った。

P^3T 法では、2 粒子間の重力を滑らかなカットオフ関数によって近距離力と遠距離力とに分割する。近距離力は粒子間相互作用をエルミート法と独立時間刻みによって高精度に積分する。遠距離力はツリー法とリーブフログ法によって効率良く積分する。 P^3T 法を用いることにより、低い計算コストで高精度に時間積分することができる。 P^3T 法の並列処理にあたって、ツリー法の領域分割を高速に処理するライブラリである FDPS(Framework for Developing Particle Simulator)[2] を用いる。

本発表では、FDPS を用いた P^3T 法の並列計算性能を評価し、大粒子数による N 体計算が可能であることを示す。今後は衝突による破壊を考慮した惑星形成 N 体計算を行おうと考えている。

1. S. Oshino, Y. Funato, and J. Makino. PASJ,63,881-892 (2011)
2. M. Iwasawa, A. Tanikawa, N. Hosono, K. Nitadori, T. Muranushi, and J. Makino. arXiv:1601.03138 (2016)

星惑 a14 進化するガス円盤中のペブル集積による地球型惑星への水供給

山村 武 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M1)

地球は 0.023wt%-1wt% の水その表面と内部に含んでいると言われている。また、観測から火星と金星もかつて水を持っていた可能性が示唆されている。これを元に、我々は昨今議論が盛んになっているペブル集積によって、地球型岩石惑星が獲得する含水量を数値シミュレーションを用いて計算した。

本研究において、snow line の位置は非常に重要な問題である。近年の研究から、snow line は太陽系星雲進化の晩期に約 0.7AU の位置に移動していたことが分かっている。故に原始惑星系円盤中の氷ダストが原始惑星によって集積され、その結果水を獲得した可能性が考えられる。

このモデルを用いて、Sato et al. 2016 では、ペブル集積によって原始地球が獲得する水の量を計算した。この先行研究では、ガス円盤の時間進化は考慮せずに、snow line の時間進化もパラメータを振って計算を行っていた。そこで我々は、ダスト円盤の時間進化は Sato et al. 2016 と同じモデルを採用した一方、ガス円盤と snow line の時間進化を数値シミュレーションで解いた。また、今回の計算では火星、地球、金星、水星の 4 つを想定した惑星を設置し、それぞれの惑星のペブル集積によるダストマフラックスの減少効果も入れて計算した。その結果、惑星が最終的に獲得する水の量は、snow line が惑星軌道を通過する時点で外側に残っているダスト総質量に惑星によるペブルの filtering rate をかけたものでおおよそ見積もれることがわかった。また、filtering rate は惑星質量と Stokes number から求めることができる。

1. Sato et al. 2016
2. Ida et al. 2016

星惑 a15 ジャイアントインパクトモデルによる天王星の衛星形成

石澤 祐弥 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

天王星は他の太陽系内惑星と異なり、公転面に対して赤道面が約 90 度と大きく傾いている。さらに、天王星の主な衛星はおおよそ天王星赤道面上に分布している。これより、惑星形成期に衛星が形成される周惑星円盤がすでに公転面に対して傾いていたと思われる。

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) モデルが考えられている (Slattery et al. 1992)。GI モデルとは、比較的大きい原始惑星同士の衝突により周囲に散らばった破片から微衛星が形成され、微衛星が重力で集められ衛星になるという説である。GI モデルならば赤道傾斜角の大きさを説明できる可能性がある。それを論じるためには、まず天王星の衛星形成を説明できる必要がある。しかし、GI モデルによる天王星衛星形成の詳細な検証は未だ成されていない。

い。そこで、本研究ではその検証を進める。

第一段階として、微衛星形成終了時から衛星形成までを、重力 N 体計算を用いて考える。地球の月形成は GI モデルによる説明が有力とされており、先行研究も多い。特に微衛星集積による月形成については多くの N 体計算が行われている (e.g., Ida et al. 1997)。その手法を参考に、天王星周りで微衛星集積によって衛星が形成される過程を N 体計算で検証する。本講演では研究の進展状況を報告し、その結果について議論を展開する予定である。

1. Slattery, W. L., Benz, W., & Cameron, A. G. W. 1992, Icarus, 99, 167
2. Ida, S., Canup, R. M., & Stewart, G. R. 1997, Nature, 389, 353

星惑 a16 Chandra 衛星による HD189733b のトランジット観測

上塚 奈々絵 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

系外惑星が発見されてから現在まで、観測や調査は可視光・赤外線が主流である。一方、X 線は銀河団や超新星残骸などにおける高エネルギー天体現象の観測で利用されることが多い。そのような中、Poppenhaeger らは初めて X 線で太陽系外惑星 HD189733b のトランジット現象を観測することに成功した (Poppenhaeger et al. 2013)。最近では X 線天文衛星 Chandra や XMM-Newton によって X 線観測は増えつつある。可視光や赤外線は惑星大気を通過することができるが、X 線は大気中の原子や分子によって光電吸収を受けるため通過しにくい。この特徴を利用することで、系外惑星の大気に関する研究が一段と飛躍すると期待されている。これまでに可視光で観測された主星 HD189733 の減光率、すなわちトランジットの深さは 2.41% 程度であることがわかってきた (Winn et al. 2007)。しかし、Poppenhaeger et al.(2013) によると、X 線で観測されたトランジットの深さは 6-8% であった。さらに、X 線のライトカーブは「W」のような形をしていることもわかった (Poppenhaeger et al. 2015)。X 線によるトランジットの深さが大きくなった原因として、トランジットをしている間に主星から放射された X 線を惑星大気が光電吸収を起こしているからであると考えられている。本研究では、2 つの解析を行った。1 つ目はトランジット現象の再現実験、2 つ目は主星が放射する X 線スペクトルの解析である。トランジット中のスペクトルには、主星のスペクトルに加えて惑星大気による吸収の兆候が現れていると推測できる。従って、スペクトルをトランジット中とトランジット前後の 2 種類に分け、スペクトル差から惑星の大気による吸収の効果を調べた。本講演では、X 線におけるトランジット現象の再現実験と X 線スペクトル解析の結果と課題を報告し、今後の系外惑星と X 線観測について議論したい。

1. K.Poppenhaeger, J.H.M.M.Schmitt, S.J.Wolk 2013, AJ, 773, 62
2. J.N.Winn, M.J.Holman, G.W.Henry, et al. 2007, AJ, 133, 1828
3. K.Poppenhaeger, S.J.Wolk, J.H.M.M.Schmitt 2015, 18th Cambridge Workshop (Edited by G. van Belle and H.C. Harris., pp.733-738)

星惑 a17 直接観測で見る系外惑星・褐色矮星の大気構造

田中 祐輔 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

太陽系外惑星の探査方法には直接観測法、視線速度法、トランジット法、重力マイクロレンズ法など、様々な方法が存在する。直接観測法は他の方法では得ることの難しい光度、色、スペクトルなどを得ることができる点で優れており、現在さかんに研究が進められている方法の一つである。色やスペクトルなどの情報から、惑星の温度や大気といった物理量を得ることができる。また、ハワイ、マウナケア山に存在するすばる望遠鏡には、超補償光学 SCEXAO と組み合わせられる面分光装置 CHARIS が近々搭載される予定である。本講演では、系外惑星探査における直接観測の現状と、直接観測によって検出された天体 (HR8799、がが座β星、51 Eri、GJ 504) に付随する惑星とその大気についてレビューを行う。さらに、CHARIS が運用を開始された際に、どのようなサイエンスが期待されるか議論する。

1. M.Kuzuhara et al. The Astrophysical Journal, 774:11, (2013)
2. Jeffrey Chilcote et al. The Astrophysical Journal, 798:L3 (2015)
3. Travis S. Barman et al. Astrophysical Journal, 804:61, (2015)

星惑 a18 地球超高層大気からの X 線輝線スペクトルの解析

森田 佳恵 (埼玉大学 理工学研究科 物理機能系専攻 田代・寺田研究室 M1)

超高層大気は、成層圏より上の高度 80 - 1000 km に広がる最も上層の大気圏を指す。特にこの領域は、太陽からの荷電粒子の入射や紫外線・X 線放射を強く受けており、低層とは異なった電離状態の原子、分子、化合物があると考えられている。その化学平衡は、太陽放射によって変化すると期待され、対流圏の気候変動にも間接的に影響すると考えられている。しかし、その詳細については多くのモデル計算があるものの、直接の観測は手薄である。低軌道を周回する X 線天文衛星の視野に入る日照中の地球大気からは、窒素や酸素の輝線スペクトルが得られている。将来の高分散 X 線分光による詳細な化学分析の基礎として、我々は、地球超高層大気の大気輝線スペクトルを太陽活動周期にわたって俯瞰するデータ解析を行っている。用いたデータはさすがに衛星に搭載されている軟 X 線検出器 (X-ray Imaging Spectrometer; XIS) の観測データである。今回、我々はさすがの XIS の観測データから太陽風の影響を強く受けている昼の地球を観測しているデータを取り出し、夜の地球を観測している時間帯のデータを差し引くことで、日照大気からの X 線スペクトルを得た。大気構造モデルから、X 線放射のほとんどは高度 100 km 程度の超高層大気をターゲットとした散乱 X 線と考えられる。また、400 eV と 530 eV 付近に見られる酸素と窒素の K 輝線を散乱連続成分と比較することで、それぞれの組成と化合物の割合に制限をつけることができる。本講演ではこれらの詳細な解析方法とその解釈、および将来に向けての展望について議論する。

星惑 b1 オリオン A 巨大分子雲におけるダストと $C^{18}O$ の比較

浦沢 優弥子 (新潟大学宇宙物理学研究室 M1)

今回は参考文献 [1] の論文にそって発表します。分子雲は星形成の場であると考えられている。水素や一酸化炭素、多数の分子イオンなどの存在が確認されている。観測対象として ^{12}CO や ^{13}CO などがあるが、今回はダストと $C^{18}O$ に注目している。AzTEC での観測で 1.1mm マップと、 $C^{18}O$ ($J=1\sim 0$) 輝線のデータを基にした、オリオン A 巨大分子雲コアのカタログをつくる。まず、クランプメソッドを使って 1.1mm マップで 619 のダストのコアに分類する。半径、質量、密度はそれぞれ $0.01 - 0.20 pc$ 、 $0.6 - 1.2 \times 10^2 M_{\odot}$ 、 $0.3 \times 10^4 - 9.2 \times 10^6 cm^{-3}$ と推定しています。 $C^{18}O$ のデータからは 235 のコアを確認した。半径、速度幅、LTE 質量、密度はそれぞれ $0.13 - 0.34 pc$ 、 $0.31 - 1.31 km s^{-1}$ 、 $1.0 - 61.8 M_{\odot}$ 、 $(0.8 - 17.5) \times 10^3 cm^{-3}$ としている。これらのダストと $C^{18}O$ のコアの特別な分布を比較することで、4 つの特別な関係が明らかになった。(1) ダストと $C^{18}O$ のコアのピークの位置がそれぞれ一致していること。(2) 2 つかそれ以上の $C^{18}O$ のコアがダストのコアのピークの位置の周辺に分布していること。(3) $C^{18}O$ コアの 56.8% がダストのコアと関係ないこと。(4) ダストのコアの 69.3% が $C^{18}O$ コアと関係ないこと。以上のことについて発表する。

今後は NRO でオリオン A 巨大分子雲についての観測プロジェクトに参加し、より詳しい解析をする予定である。

1. Yoshito Shimajiri et al., ApJS, 7,35,2015

星惑 b2 UH88 を用いた高銀緯分子雲における星形成の可視分光探査

平塚 雄一郎 (埼玉大学教育学部理科専修 天文学研究室 M1)

星は分子雲から形成される。星形成は銀河円盤付近の高密度分子雲で多く起こると考えられている。一方で、密度の低い銀緯 $\pm 30^{\circ}$ に位置する高銀緯分子雲は距離が近い、背景星の混入が少ないという特徴もある。一方で星なし分子雲とも呼ばれるなど広領域で前主系列星の探査観測例も少ないため、星形成の様子が明らかではない。そのため、高銀緯分子雲中で星形成が起こっているかどうか、そしてどのような特徴を持つかを調べる。また、銀河面の分子雲との星形成の描像に違いがあるのかを調べ、高銀緯での星形成過程の解明の助けとする。本研究では 2012 年～2015 年までに T タウリ型星の H α 輝線探査を目的としてハワイ大学の 2.2m 望遠鏡と WFGS2 (広視野グリズム分光撮像装置) を用いたスリットレス可視分光観測を行った。観測対象として Magnani カタログから MBM01、MBM03 と MBM32 及び参照領域としてペルセウス座分子雲 L1455 を観測対象として選択した。可視分光観測の結果、各領域で H α 輝線が検出された T タウリ型星候補天体を複数同定した。さらに、ROSAT、USNO、2MASS、WISE などの多波長測光値を用いて、これらの T タウリ型星候補天体について、赤外超過や X 線検出の有無、距離の推定を行った。また HR 図と進化トラックから質量と年齢の算出を行い、分子雲の電波 CO 強度図と T タウリ型星候補天体の空間分布を調べた。その結果、高銀緯分子雲では質量の軽い星が形成しやすく、分子雲の進化が進んでいる傾向があることが示唆された。本講演では H α

の等価幅や赤外超過、X線検出の有無、HR図の結果から、Tタウリ型星候補天体が高銀緯分子雲中で形成したのか、その場合の星形成率について議論する。

星惑 b3 初期宇宙における超大質量ブラックホールの形成可能性

高野 凌平 (九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻 M1)

最近の観測により、赤方偏移 $z = 7.09$ に質量 $2 \times 10^9 M_{\text{sun}}$ の超大質量ブラックホール (SMBH) の存在が確認されている。この観測事実は SMBH の形成シナリオに大きな制限を与えた。この SMBH を形成するため、いくつかのシナリオが考えられており、その1つとして、大質量のガス雲が直接重力崩壊して超巨大ブラックホールとなる説 (ダイレクト・コラプス説) がある。Inayoshi et al. (2014) では、宇宙初期に SMBH の種となりうる超巨大星 ($> 10^5 M_{\text{sun}}$) の形成可能性を評価している。

Inayoshi et al. (2014) では、3次元流体シミュレーションを用いて、超巨大星形成過程の計算を行った。宇宙初期では、重元素が存在しないため、水素分子冷却の影響が大きい。そこで、周りの銀河や星からの強い紫外線放射による水素分子の光解離、光学的に厚くなった場合での水素分子同士による衝突解離を考慮した。さらにこれまでの先行研究では考えられてこなかった、光学的に厚い領域での、 $\text{Ly}\alpha$ 放射による寄与や、水素分子冷却による影響も取り入れている。シミュレーションの結果、 $1 M_{\text{sun}}$ まで原始星を成長させたときの質量降着率が $\dot{M} \sim 2 M_{\text{sun}}/\text{yr}$ であった。今回得られた質量降着率は、非常に大きく、輻射によるフィードバックを考えなくてよいとされる $0.01 M_{\text{sun}}/\text{yr}$ を達成している。また、宇宙初期では重元素が存在しないため、原始星からの輻射フィードバックと脈動不安定による質量放出とともに原始星の成長を妨げる要因ではないということが分かっている。以上より、ダイレクト・コラプスを起こすような超巨大星が宇宙初期に形成可能であることを示唆した。

1. Inayoshi, Omukai, Tasker, MNRAS, 445, L109L113 (2014)

星惑 b4 宇宙黎明期における低質量種族 III 星の生存可能性

下山 ちひろ (九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻 M1)

宇宙黎明期における星形成は、未だ詳しく解明されていない。宇宙黎明期とは、赤方偏移 $z = 1100 \sim 6$ の期間のことであり、初期宇宙でできた金属を持たない星を種族 III 星と呼ぶ。初代星が $0.8 M_{\text{sun}}$ 以下の低質量星である場合、寿命が宇宙年齢より長い。そのため、現在まで生き残った種族 III 星は、超金属欠乏星として観測される可能性がある。ここで、超金属欠乏星とは、Fe の量が太陽の 300 分の 1 以下の星のことを指す。金属汚染の効果を考え、 $0.8 M_{\text{sun}}$ 以下の質量を持つ超金属欠乏星が観測されれば、その星は種族 III 星である可能性が高い。

Ishiyama et al. (2016) では、宇宙論的 N 体シミュレーションと種族 III 星形成モデルを用いて、天の川銀河中と矮小銀河中におけるそれぞれの低質量種族 III 星の観測可能性を調べた。計算の結果、低質量種族 III 星は、天の川銀河中でハローとサブハローの中心に集中することが分

かった。しかし、ハロー中心部では星が大量に存在しており、その中から種族 III 星を見つけることは容易ではない。また、ハローの高緯度領域で低質量種族 III 星を探そうとしても、光度の低い小さい星であるので発見しにくい。一方で、低質量種族 $m\text{III}$ 星は矮小銀河に集中することも分かった。よって、矮小銀河近傍を調査すると、低質量種族 III 星は、天の川銀河中より発見され易い。また、近傍の矮小銀河をいくつか調査すると、低質量種族 III 星が 1 個見つかる可能性がある。以上の結果に観測的制限を加味し、低質量種族 III 星の観測可能性を評価した。本発表では、Ishiyama et al. (2016) の紹介をする。さらに、現在まで生き残ることが可能な $0.8 M_{\text{sun}}$ 以下の種族 III 星が、宇宙黎明期においてどのような条件下で形成されるのかを議論する。宇宙黎明期における低質量星の形成の研究は、初期宇宙の情報を得るため、また、初期宇宙での天体形成過程を理解するために重要である。

1. Ishiyama T. et al., ApJ, submitted (arXiv:1602.00465)
2. Kroupa, P. 2001, MNRAS, 322, 231

星惑 b5 へび座分子雲における超低質量天体形成の観測的研究

小田 達功 (埼玉大学教育学部理科専修 天文学研究室 M1)

超低質量天体と呼ばれる褐色矮星・惑星質量天体は、非常に暗いため観測数が少なく、形成過程の理解があまり進んでいない。超低質量天体は近赤外に輻射のピークを持つことや、近赤外が分子雲による吸収散乱の影響を受けにくいことから、分子雲内の超低質量天体の探査観測には近赤外が適している。以上のことから本研究では、UKIRT3.8m 望遠鏡と広視野赤外線撮像装置 WFCAM を用いて、近赤外線測光観測法による若い超低質量天体の探査を行った。研究領域は、若い中質量星が超低質量天体の形成に及ぼす影響を探るため、近傍の中質量星形成領域であるへび座分子雲とした。へび座分子雲は大きく 3 つの領域 (A, B, South) に分けられる。A 領域では、すばる望遠鏡による近赤外線観測から新たに超低質量天体候補が 1000 以上発見されている。さらに、CO の電波観測との比較から、分子雲密度が低い環境で惑星質量天体が形成されやすいと報告されている。本研究では、超低質量天体が見つかっていない B 領域について、超低質量天体形成の有無を探った。測光結果から 2 色図を作成し、赤外超過が見られる YSO 候補天体を、約 1600 同定した。また、YSO 候補天体の年齢を 100 万年と仮定することで、質量を推定し、惑星質量天体候補と褐色矮星候補を合わせて約 700 同定した。結果、分子雲密度が高い領域で褐色矮星候補が存在する一方、Class0 天体及びそのアウトフローの周囲を除く全域に惑星質量天体候補は存在していることがわかった。特にアウトフローの方向に惑星質量天体候補は多く、Class0 天体付近には存在せず、少しはなれた領域で多く発見された。これらから、分子雲密度が高い領域で褐色矮星が形成されている可能性と、Class0 天体のアウトフローが惑星質量天体形成を抑制および促進している可能性が示唆される。

星惑 b6 埼玉大学 55cm 望遠鏡 SaCRA を用いた V1647 Ori における変光探査

佐藤 耕平 (埼玉大学教育学部理科専修 天文学研究室 M1)

本研究はFU Ori 型星である V1647 Ori を可視・近赤外で長期的に観測を行い、その光度変化から変光の原因を物理的に検証し、明らかにする。FU Ori 型星は、短い期間に爆発的に増光する天体で、星周物質の質量降着によってアウトバーストを起こすと考えられている。V1647 Ori は 2003 年 11 月にアウトバーストが始まり約 4 ヶ月の間に可視で 5 等程明るくなったが、その後 2 年ほどで元の明るさに戻り、2008 年に再びアウトバーストを起こした FU Ori 型星である。本研究では V1647Ori の可視・近赤外の光度変化を調べるために、可視測光観測には主に埼玉大学 55cmSaCRA 望遠鏡を、近赤外観測には兵庫県立大学西はりま天文台 2m なゆた望遠鏡を用いて観測した。2014 年 11 月～2016 年 3 月の 31 晩の観測データに対して、「IRAF」を用いてアパーチャー測光を行った。V1647 Ori の光度変化の特徴から、2014 年 11 月 13 日～12 月 1 日の間に約 0.7 等の増光、また 12 月 1 日～12 月 24 日の間に同程度の減光が見られ、周期光度解析からは 1.5 日と 3 日の変動周期が得られた。2015 年 1 月 8 日～16 日の間に、i バンドと H,Ks バンドに同程度の減光を示す相関、さらに 2016 年 1 月 8 日～20 日の間に、i バンドと z バンドにそれぞれ 0.5 等と 0.1 等の減光を示す相関があった。先行研究と合わせて光度変化から、2008 年のアウトバースト以後 V1647Ori の光度はほとんど変化していないことから、2nd アウトバーストは 2016 年 3 月現在も継続していることが分かった。また広島大学かなた望遠鏡による近赤外分光観測から V1647Ori に見られる Br- γ 輝線の等価幅が数時間単位で変動しているのがわかった。本研究からは、V1647 Ori の不規則な変光の原因は質量降着による可能性があると考えられる。

星惑 b7 電子加熱による原始惑星系円盤中の磁気乱流の抑制

森 昇志 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 D1)

原始惑星系円盤の乱流は、円盤内の角運動量輸送を担い、円盤進化に大きな影響を与える。現在、円盤乱流の起源として有力な候補は磁気回転不安定性 (MRI) である。中心星から遠くでは MRI は十分成長すると考えられているが、そこでは MRI 乱流に付随する強電場が電子を加熱する (電子加熱; Inutsuka & Sano 2005)。我々はこれまで見落とされてきた電子加熱現象が円盤乱流に与える影響について研究を行ってきた。その結果、円盤内の広い領域で電子加熱が起こることを示した (Mori & Okuzumi 2016)。電子加熱が起こると、加熱電子がダストに衝突し吸着され、電離度が減少し、オーム散逸が増幅する (Okuzumi & Inutsuka 2015)。そのため、この効果により円盤内の磁気乱流が抑えられるかもしれない。

我々はこの可能性を検証するために、電子加熱によってオーム散逸が増幅する効果を単純な解析的なモデルで模擬し、MHD シミュレーションを行った。その結果、電子加熱によって電流密度が低い値に抑制されればされるほど、降着応力が減少することを確認した。また、電子加熱の効果がよく効く時、磁気乱流は全く起きず、定常的な層流状態になることを発見した。そのときの降着応力は整列した磁場によるマクスウェル応力が支配的である。そして最終的に、このシミュレーション結果と、マクスウェル応力と電流密度間のスケール則の両方から、電子加熱時の降着応力の予言公式を得た。つまり、電子加熱領域において、飽和状態の電流密度が分かれば、降着応力を与えることができる。本発表では、得られた経験式を用いて、電子加熱が円盤の大局的構造に与える影響についても議論する予定である。

1. Inutsuka, S. and Sano, T. 2005, ApJ, 628, L155
2. Mori, S. and Okuzumi, S. 2016, ApJ, 817, 52
3. Okuzumi, S. and Inutsuka, S. 2015, ApJ, 800, 47

星惑 b8 原始惑星系円盤形成段階における微惑星形成の可能性

本間 謙二 (東京工業大学理学院地球惑星科学コース M1)

微惑星は惑星のビルディング・ブロックとなる天体であり、微惑星が形成される条件を明らかにすることは、現在の太陽系の成り立ちや系外の惑星系の理解のために非常に重要な事である。微惑星は、原始惑星系円盤 (以後、“円盤”と呼ぶ) 中の μm サイズの固体微粒子 (ダスト) が合体成長し km サイズまで成長し形成されると考えられるが、その過程には様々な困難がある。中でもメートルサイズのダストがガス円盤中でガスによる抵抗力を受け、角運動量を失って中心星へ落下してしまう中心星落下問題は深刻な問題である。一方、空隙率の大きいダストアグリゲイトは中心星への落下を回避しうることが示唆されている (Okuzumi et al. 2012) が、このような円盤モデルではガス円盤の時間進化は考慮されていない。ダストの合体成長がどのようなタイミングで開始するのかが円盤の状態に依存するので、実際の微惑星形成を考える場合は、円盤の形成から粘性進化とダストの合体成長を同時に考える必要がある。本研究では、円盤の形成とダストの合体成長が同時に起きているという状況を考え、分子雲コアの崩壊から円盤の粘性進化を含めた、時間進化する円盤モデルを用いてダストの合体成長を調べた。その結果、微惑星サイズへと合体成長可能なのは、比較的大きな角速度を持つ分子雲から形成され、なおかつ粘性の小さい円盤の場合であることがわかった。この場合は、氷ダストが中心星へ落下するようなサイズになる前に、十分な空間密度の氷ダストがスノーライン外側に供給されるからである。またこの結果は、そのような円盤であれば、微惑星は分子雲コアの崩壊から数十万年で形成される可能性を示唆している。

1. Okuzumi, S., Tanka, H., Kobayashi, H., & Wada, K. 2012, ApJ, 752, 106

星惑 b9 トランジット観測による系外惑星大気における水蒸気の発見

前嶋 宏志 (宇宙科学研究所 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻 M1)

本発表では、系外惑星 HD 189733 b のトランジット観測における各波長での減光量の違いから、HD 189733 b の大気に水蒸気が存在することを示した論文 (Tinetti et al. 2007) についてレビューする。水蒸気はホットジュピターの大気に多く含まれていると予測されており、水蒸気検出の試みは他にもあったが、決定的な証拠を発見したものは当時はなかった。

トランジット中の主星の減光量には惑星大気における吸収に起因する波長依存性がある。これを利用し、トランジット中の複数波長帯での減光量を比較することで、惑星大気の組成を推定することができる。

Tinetti et al.(2007) では、ホットジュピター HD 189733 b のトランジットを Spitzer/IRAC の 3 波長帯 (3.6, μm , 5.8, μm , 8, μm) で観測をし、その結果を惑星大気モデルの吸収シミュレーションと比較することで、観測された 3 バンドの減光量が水蒸気存在によって説明できることを示した。

このトランジット観測に加え、HD 189733 b は主星の背後を通過する 2 次食も観測されており (Grillmair et al. 2007)、2 次食中の減光量から惑星の放射スペクトルを推定することができる。しかしこの観測では上の結果と反対に、水蒸気の放射特徴が見られなかった。Tinetti et al. (2007) はこの矛盾を説明するために放射スペクトルについてもシミュレーションを行った。その結果、HD 189733 b の大気が鉛直方向にほぼ等温な構造をしている場合は、水蒸気が十分存在しても水蒸気の特徴が放射スペクトルに現れないことを示した。

1. Tinetti, G. et al. Nature 448, 169-171 (2007)
2. Grillmair, C. J. et al. Astrophys. J. 658, L115-L118 (2007)

星惑 b10 円偏光によるアミノ酸異性体過剰生成モデルの構築

北澤 優也 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

地球上の生命に欠かせない物質の一つとしてアミノ酸がある。アミノ酸は L 型と D 型の構造を持つ鏡像異性体であり、これらは化学的性質が等しい。そのため化学合成反応では両者は等量生成される。しかし地球上の生物は、そのほとんどが L 型のアミノ酸のみを利用している。これを L 型アミノ酸ホモキラリティといい、その起源は未だ説明されていない。近年、地球に飛来した隕石の中からアミノ酸が検出され、それらが地球上のアミノ酸同様 L 型に偏っていることがわかった。これはアミノ酸の起源が宇宙に由来することを裏付ける証拠の一つとなり、今後 L 型異性体過剰生成のさらなる理論的考察が求められる。

星間空間における異性体過剰生成機構の一つとして、円偏光によるアミノ酸の光不斉分解が提案されている (P. Modica et al. 2014)。アミノ酸は、左巻きと右巻きの円偏光の吸収度に差があり (circular dichroism: CD)、CD スペクトルは L 型と D 型のアミノ酸で対称的な振る舞いをする。星間空間で L 型と D 型のアミノ酸が片方の円偏光の照射を受けた場合、一方のアミノ酸は他方に比べより多く円偏光を吸収し光分解する。その結果異性体過剰が生成され、これらが隕石中に保存され地球に飛来することで、地球上のアミノ酸ホモキラリティの起源になったと考えられる。

本研究では、鏡像異性体を持つ最もシンプルなアミノ酸であるアラニンとその中間体の CD を、量子力学計算を用いて第一原理的に求める。星間ダスト上で起こりうるアラニンの生成機構を検討し、生成経路における中間体とアラニンの CD を算出する。求めた CD を比較することで、光不斉分解を起こしやすい中間体を特定する。それらは異性体過剰生成に有意に働く分子であると期待される。さらに、反応生成物の安定性と反応障壁のエネルギー評価を行うことで、最も有効なアミノ酸生成経路を特定し、より現実的なアミノ酸のホモキラリティ形成のモデル構築を行う。

1. P. Modica et al. ApJ, 788, 79 (2014)

星惑 c1 低金属度大質量星形成における輻射フィードバック効果

福島 肇 (京都大学 天体核研究室 D1)

大質量星は紫外線放射によるガスの電離、超新星爆発による運動エネルギーの注入や重元素放出による化学進化を行うことで星間空間に多大な影響を与える。銀河の進化に対してこのように重要な天体であるが、大質量星の形成過程には以下のような困難があり、いまだ標準的なシナリオは存在しない。星は、高密度コアが重力収縮することで非常に小さい原始星が形成された後、ガスが原始星に降着することで質量を増大させる。大質量星形成における問題点は、原始星が降着により大質量になると、降着流内でダスト粒子が輻射を吸収することで輻射圧が働き、質量降着が妨げられることである。現在の星形成における一般的な降着率である $10^{-5} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ の場合には質量が $15 M_{\odot}$ 程度で降着限界となる。この限界質量は降着率に対して依存性を持つことがわかっている。また、降着流へのフィードバックを考える際に重要な原始星の光度は、降着率と星形成領域の金属度によって異なることがわかっている。低金属度環境における星形成では降着流内のダスト粒子の数密度も減少し輻射フィードバックが弱くなるため、より大質量な星を形成できることが期待される。先行研究では、数値計算で得られた原始星の光度に対して解析的に輻射フィードバックの効果を求めているが、外層における輻射やガスの構造、ダスト粒子のサイズ分布や破壊の過程については計算されていない。本研究では、定常降着率での原始星進化計算から得られた光度をもとに、球対称定常の仮定における降着流の内部構造を求めた。この際、原始星からの輻射フィードバックを調べるために、輻射場の構造をダスト粒子による吸収・再放射を含め計算した。これより、原始星による降着流への輻射フィードバック効果の金属度、質量降着率依存性を議論する。

1. Hosokawa, T. & Omukai, K. 2009, ApJ, 703, 1810
2. Wolfire, M. G. & Cassinelli, J. P. 1987, ApJ, 319, 850

星惑 c2 種族 III 星形成における $\Omega\Gamma$ -限界の効果

杉浦 宏夢 (京都大学 天体核研究室 M1)

本講演は論文 [1] のレビューである。

宇宙で最初に誕生した星は種族 III (population III) と呼ばれ、重元素をまったく含んでいなかったと予想されている。種族 III 星と現在の星の形成過程は、種となる分子雲が現在の星形成領域 ($\sim 10\text{K}$) と比べて高温であること ($\sim 200\text{-}300\text{K}$)、そのため質量降着率が初期宇宙の方がずっと大きいこと等の違いがあり、近年活発に研究されている。

先行研究 [2] は、種族 III 星の初期質量が $100 M_{\odot}$ を越える可能性を指摘している。初期質量は、原始星光度が大きくなると輻射圧により原始星への質量降着が妨げられることなどにより決まる (質量降着が可能な光度の上限が Eddington 限界である)。ただし、回転を考慮すると、遠心力により重力が実効的に弱められ、質量降着が可能な上限光度が回転していない場合に比べて小さくなる (この修正された Eddington 限界は $\Omega\Gamma$ -限界と呼ばれる)。そのため、原始星の回転はその初期質量に影響する可能性があるが、先行研究 [2] などではその効果は考慮されていなかった。

今回紹介する研究 [1] は、種族 III 原始星の回転の効果の数値的に調べたものである。本講演では、まず降着円盤からの質量降着によって原

始星が成長する過程, 特に原始星の角運動量進化について見る. そして, Ω -限界が種族 III 星の初期質量や半径に与える影響について詳しく論じる. 主要な結論は, 種族 III 星が初期質量として $20 - 40M_{\odot}$ を超えることは困難であること, そして, 回転していない場合と比較してコンパクトになる ($R < 50R_{\odot}$) ことである.

1. H. Lee and S. Yoon, ApJ, 820, 10 (2016)
2. T. Hosokawa, K. Omukai and H. W. York, ApJ, 756, 93 (2012)

星惑 c3 原始星周囲の円盤形成と進化

崔 仁士 (国立天文台三鷹 東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 M1)

低質量星の形成過程は大きく分けて二つの段階、即ち、形成中の若い星が母体となる分子雲に深く埋もれた原始星期と、分子雲が晴れ上がった T タウリ期に分けられる。原始星期には、分子雲の重力収縮から原始星が形成されるが、その際に、原始星の周囲に星周円盤も形成される。中心星への質量降着はこの星周円盤を介して進む。最終的には周囲のガスが散逸し、星周円盤への質量降着は止まる。この段階が T タウリ期である。T タウリ期には、中心の若い星は可視光でも観測される T タウリ型星となる。一方、星周円盤内ではダスト同士の衝突から惑星が形成されると考えられている。そのため、星周円盤は星惑星形成において重要な役割を果たすと考えられ、そのような理由から、原始惑星系円盤とも呼ばれる。このような若い星に付随する星周円盤は、当初は T タウリ型星周囲のものが主に観測されていたが、現在では、質量降着が続いている原始星周囲にも円盤の存在が確認されている。しかしながら、原始星周囲での円盤の詳細な形成過程や、円盤が原始星期から T タウリ期の間にどのように進化していくのかについては、未だ明らかではない。

このような状況の中、これまでにない高感度、高空間分解能を達成することのできる ALMA 望遠鏡の登場により、原始星周囲での円盤形成や円盤進化の過程が急速に解明されつつある。本発表では、原始星周囲の円盤形成に関する最近の論文のレビューを行い、これらの研究の進展を展望する。

星惑 c4 3D 輻射流体力学シミュレーションを用いた Bow Shocks によるコンドリュール形成モデル

佐藤 拳斗 (東京工業大学理学院地球惑星科学系中本研究室 M1)

コンドライト隕石内で発見されているコンドリュールの融解と結晶化は太陽系の形成過程での未解決問題である。コンドリュールは実験から温度変化過程の一部を推定することができる。しかし、コンドリュール形成の詳しいメカニズムはまだ明らかになっていない。微惑星が円盤ガス内を超音速で動くことによってコンドリュールを溶かすことが可能な Bow Shock を生み出すことができる。この論文では微惑星がまとっている Bow Shock の 3D 輻射流体力学的シミュレーションでのコンドリュールの形成過程を研究している。Flux-Limited Diffusion 近似とモンテカルロ法を組み合わせた新しい輻射輸送計算を用いると Bow Shock 近傍の複雑な挙動をとらえることができる。状態方程式は水素分子の回転や振動を考慮し、解離も考慮している。ダストの運動は直接計算を行い、加熱過程を記録した。その結果から断熱膨張によって急激な

冷却が起こる。また、原始惑星の後ろの tail shock によって 2 度目の加熱が起こる。そこから、全熔融を経験したコンドリュールは形成できそうであるが、部分熔融を経験したものは断熱の極限のみで形成されるということがわかった。この研究は原始惑星系円盤内の固体物質が受ける加熱過程を理解するための重要な一歩である。

1. Boley, A. C., M. A. Morris, and S. J. Desch. The Astrophysical Journal 776.2 (2013): 101.

星惑 c5 マグマオーシャンによる表層・マントルへの水の分配について

小佐々 唯 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M1)

このポスターでは惑星表層の環境の決定にとって重要な過程であるマグマオーシャン関連の論文を紹介する。形成段階初期における地球は、天体の集積のエネルギー等によりマントルが部分的あるいは完全に融解した状態であるマグマオーシャンを経験したと考えられている。このマグマオーシャンが固化する過程では、マグマ中の揮発性成分が惑星表面から脱ガスすることにより表層部分に分配される。そのため、マグマオーシャンを理解することは惑星の表層環境の決定を考える上で非常に重要である。

マグマオーシャンの深さを変えつつ、固化過程における揮発性成分の分布の進化を追った Elkins-Tanton(2008) では、固化終了後にはマントルに含まれていた水の大部分 (7-9 割以上) が表層に脱ガスされるという結果を示している。しかし、現在の地球においてマントル中に含まれる水の量は海の質量のおよそ 1-10 倍と推定されているため、マグマオーシャンによる表層への高い割合での水分配と、現在のマントル中の水の量の両方を説明するには、表層の水を大量に宇宙空間に逃がすか、あるいはマグマオーシャン固化後に再び水がマントル中に沈みこむといったプロセスを考えなくてはならない。さらに、最終的な水の分配はマグマオーシャンの最終段階によって大きく決定されるにもかかわらず、その段階の物理的な過程はあまり分かっていない等、マグマオーシャンの固化過程そのものにおける水の分配についても議論の余地があると考えられる。よって、以上のテーマに関する論文もいくつか紹介し、議論する。

1. L.T. Elkins-Tandon Earth and Planetary Science Letters 271 (2008) 181-191

星惑 c6 エンケラドスの軌道進化と潮汐加熱

中嶋 彩乃 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M1)

土星の衛星であるエンケラドスは土星中型衛星で唯一熱的に活発な天体として知られており、カッシーニの観測によって約 16GW の赤外放射が観測されている (Howett et al., 2011)。しかし、一般的に用いられる土星の散逸係数 $Q_{\text{Saturn}} = 18,000$ の場合、潮汐加熱による熱放射は最大 1.1GW となり、観測値を説明することができなかった。近年の観測から従来の値より小さい散逸係数 Q_{Saturn} が示唆された。本研究では従来より小さい散逸係数を用いて土星中型衛星 4 体の軌道進化を計算し、

エンケラドスにおける潮汐加熱量の見積もりを行った。

従来より小さい値 ($Q_{\text{Saturn}} = 1,680$) を用いた場合、土星円盤は後から捕獲された天体が潮汐破壊を受けることによって形形成され、土星中型衛星はその円盤で形成されると考えられる (Charnoz et al., 2011)。この時、エンケラドスはテティスより先に形成され、軌道進化する。その結果、 $Q_{\text{Saturn}} < 10,000$ であれば軌道進化の過程で、必ずエンケラドスとテティスの軌道が接近することになる。

我々の計算によれば、2天体の軌道が接近する時、エンケラドスはテティスとの平均運動共鳴に捕獲される。テティスはエンケラドスに比べて質量が大きく軌道進化が早いので、エンケラドスは共鳴関係を維持したまま、テティスの軌道進化に引きずられる。この時にエンケラドスの離心率が上昇し、やがて軌道交差を起こしてテティスの軌道の内側へ散乱される。その後、自身の潮汐によって離心率は減衰し、その際に莫大なエネルギー散逸が起こる。このような共鳴捕獲と軌道交差によってエンケラドスが約 16GW の熱放射を起こすことが説明できる可能性があることがわかった。

しかし、我々が今まで行ってきた 4 次のエルミート法を用いた計算では、計算時間の問題からラプ数を現実的な値より大きくすることで軌道進化を早めているという問題点があった。そのため、新たに SyMBA を用いることで、より現実的な値に近いラプ数で同様な軌道計算を行い、このような軌道進化と熱放射が実際に起こるかを検討する。

1. Charnoz, S., et al. *Icarus* 216, 535-550 (2011)
2. Howett, C.J.A., Spencer, J.R., Pearl, J., Segura, M. F. *Geophys. Res.* 116, E03003 (2011)

星惑 c7 原始月円盤の熱進化

河瀬 哲弥 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

月形成の最有力シナリオはジャイアント・インパクト説である。この説では、原始地球に火星サイズの原始惑星が衝突し、その結果、この円盤物質が自己重力で集積し、合体成長することで月が誕生したとされる。

衝突から原始月円盤の形成の段階においては SPH 法のシミュレーションにより多くの理論的研究がされている。その結果、非常に高温で岩石の気体や液体物質からなる原始月円盤が形成されることが示唆されているが、その後どのような過程で原始月円盤が進化したかについては現在もよく分かっていない。月サンプルの同位体比や元素組成の測定から原始月円盤がどのように進化するかを試みがあるが、原始月円盤の進化の理論的研究は未だ不十分である。特に月サンプルの元素組成の測定から、原始月円盤において揮発性元素が除去されたことが示唆されているが、それがどのような過程で起こったのかは不明確である。

今回の発表では、原始月円盤の 1D シミュレーションを行った Charnoz & Michaut (2015) について紹介する。特に原始月円盤の力学的、熱力学的進化のシミュレーション結果の他、原始月円盤における揮発性元素の除去の過程について紹介する。また、今後の展望についても議論する。

1. Charnoz, S., & Michaut, C. 2015, *Early Solar System Impact Bombardment III*, 1826, 3002

星惑 c8 弾性体ゴドノフ SPH 法を用いた衝突合体による複雑形状小惑星の形成シミュレーション

杉浦 圭祐 (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) D1)

近年、探査機によるその場観測によって幾つかの小惑星の形状の詳細が明らかとなってきた。例えば、探査機はやぶさの小惑星イトカワの観測や、探査機ロゼッタのチュリュモフ・ゲラシメンコ彗星の観測の結果、イトカワはラッコのような細長い形状を、チュリュモフ・ゲラシメンコ彗星はアヒルの玩具のような石が 2 つくっついた形状をしていることが分かった。このような球から離れた複雑な形状は微惑星の衝突によってできたと考えられており、形成に必要な衝突条件を明らかにすることによって、形成時の微惑星の軌道や運動の様子を知ることができる期待される。細長い形状や 2 つの石がくっついたような形状の小惑星の形成条件を調べるために、Jutzi and Asphaug (2015) は Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を用いて、km サイズの微惑星が m/s 程度の低速度で衝突する様子を再現した。彼らは弾性体力学に拡張された SPH 法にひび割れ、摩擦、塑性、空隙のモデルを導入し、現実的な岩石を扱える計算手法を用いて衝突の様子シミュレーションを行った。その結果、限られた質量の天体に対してのみであるが、細長い形状の小惑星が形成されるための衝突速度と衝突角度の条件を明らかにした。我々はこれまでの研究で、ゴドノフ SPH 法 (Inutsuka 2002) を弾性体力学に拡張し、さらにひび割れ、摩擦、塑性、空隙のモデルを導入した。我々が開発した弾性体ゴドノフ SPH 法は引き伸ばされた固体も安定に扱えるという利点を持っている (Sugiura and Inutsuka 2016)。本講演では弾性体ゴドノフ SPH 法を用いて微惑星の衝突を模擬した結果を紹介し、複雑形状小惑星の形成について議論する。

1. M. Jutzi and E. Asphaug, *Science*, 38, 1355, (2015)
2. S. Inutsuka, *J. Comput. Phys.*, 179, 238, (2002)
3. K. Sugiura and S. Inutsuka, *J. Comput. Phys.*, 308, 171, (2016)

星惑 c9 MOA-2012-BLG-505; バルジ領域にある惑星系

永金 昌幸 (大阪大学 芝井研究室 M2)

惑星イベント MOA-2012-BLG-505 の解析を行った結果、 7.0 ± 1.2 kpc 離れたバルジ領域に位置する、 $8_{-4}^{+13} M_{\oplus}$ の惑星が $0.12_{-0.06}^{+0.19} M_{\odot}$ の M 型星周りを軌道長半径 $1.3_{-0.4}^{+0.8}$ AU で周回する惑星系であることが分かった。惑星系までの距離が求まると、主星が銀河系内でディスクの部分に属するかバルジの部分に属するかが分かる。ディスクの星は比較的最近に出来たために若く金属量が多い。一方バルジの星は比較的早く金属量が少ないものも多い。しかし、その特徴が惑星形成にどのように寄与しているのかははっきりしていない。唯一重力マイクロレンズ法でのみ探査可能な銀河系中心までの領域における系外惑星系の分布を知ること、主星の金属量や年齢などのパラメータと惑星の形成頻度との関係性を解き明かす上で重要である。

1. Penny, M. T., Henderson, C. B., & Clanton, C. 2016, arXiv:1601.02807

星惑 c10 重力マイクロレンズイベント MOA-2014-BLG-472 の解析

山田 瞳子 (大阪大学 芝井研究室 M1)

重力マイクロレンズ現象とは、ある恒星（ソース天体）と観測者の間を質量を持つ天体（レンズ天体）が通過したときに、レンズ天体の重力場によってソース天体からの光が曲げられ、観測者にはソース天体が一時的に増光して見える現象である。レンズ天体が単星の場合、ソース天体の光度曲線は単調に増光して減光するが、伴星を持つ場合はそのような光度曲線に変化が生じる。この変化を解析することで主星と伴星の質量比や距離を求めることができる。私が所属する MOA グループでは、ニュージーランドの Mt. John 天文台にある口径 1.8m の MOA-II 望遠鏡を用いて、広視野・高頻度で重力マイクロレンズイベントを観測している。今回は 2014 年に発見された重力マイクロレンズ現象による惑星イベント、MOA-2014-BLG-472 の解析について報告する。

星惑 c11 太陽系外における惑星のリングの探索

逢澤 正嵩 (東京大学 宇宙理論研究室 M2)

天体 J1407b が 1 天文単位程度のリング構造の周惑星円盤を持つという報告を除き、未だに太陽系外においては惑星のリング、具体的には土星がもつほど大きなリングは発見されていない。それを踏まえ、最近の研究では、蝕を通じて惑星を発見した Kepler 衛星の公開データを用いて、21 の短周期惑星の中からリングが探索されたが、結果的に発見には至らなかった。この結果は惑星が中心星に近いと、リングが物性的にも軌道的にも不安定であることと矛盾しない。

この状況を踏まえ、我々は Kepler 衛星が発見した長周期惑星の周りでリングの探索を行った。ターゲットとしては Kepler の公式チームが発見した長周期惑星に加え、我々のグループ、そして別の第 3 のグループが新たに発見した長周期惑星を選んだ。次に、我々はターゲットにした 86 の惑星の全ての蝕について、単一惑星による蝕で解釈をし、光度曲線の中の惑星モデルで説明できないリング付き惑星特有のズレを探索した。そして、その 86 天体の蝕のズレを定量的に評価し、S/N が悪くリングの大きさに上限が与えられない系を 64 例、リングでは説明できないほどのズレを示す系を 7 例、リングでうまく説明できそうなズレをもつ系を 8 例、リングを持っている可能性が低い系を 7 例同定した。そして、リングでうまく説明できそうな 8 例の蝕については詳細に吟味をおこない、その中の 1 つの天体が土星ほどの大きさのリングをもつ惑星である蓋然性が高いことを示した。これは世界初のリング付き惑星候補天体の発見である。また、リングを持っている可能性が低い系については、リングの大きさに上限を与えた。本発表では、以上の流れに従って、惑星リング探索の手法、リング付き惑星候補の詳細な解析結果について紹介する。

星惑 c12 Doppler Tomography による公転軸傾斜角 λ の測定

渡辺 紀治 (国立天文台三鷹 総合研究大学院大学 M1)

初めて系外惑星が発見されてから今日まで、様々な軌道を描く惑星が見つけられている。惑星の軌道進化を考察する際、惑星公転軸と見かけの主星自転軸とのずれ（公転軸傾斜角） λ が重要な手口となる。この λ を

測る方法として、惑星がトランジットする際に主星の見かけの視線速度が変わる Rossiter-McLaughlin 効果 (RM 効果) を観測する方法がある。しかし、近年では、RM 効果より正確に λ が決定できるという理由から、主星のスペクトル線の影を見る Doppler Tomography という手法での観測もされている。これからの研究で、Doppler Tomography で観測されていない系外惑星の λ を算出し、RM 効果での λ と比較する。そこで、今回は、ESO の HARPS のデータから Doppler Tomography で HD189733b の λ を求めた論文、Cameron et al.(2009) のレビューを行う。

1. Cameron, A. Collier et al. Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 403 (2010) 151 arXiv:0911.5361
2. Triard A. H. M. J., et al., 2009, arXiv, arXiv:0907.2956

星惑 c13 SKA(Square Kilometre Array) による地球外知的生命の探査

向野 伝 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

近年、観測技術の進歩により太陽系外惑星が次々と発見されている。その中で地球と同じような環境の惑星を探し、そこに生命が存在する痕跡を探す。しかし、生命の痕跡となるシグナルは非常に弱いため、実際に生命の存在を証明することは極めて困難である。一方で、我々は知的生命からの人工的な電波を観測する手段はある。そこで、知的文明を探すことを論じる。我々が地球から宇宙に垂れ流している電波などの人工的な信号、特に受信を意識した信号は、生命の痕跡を探すことよりもはるかに容易である。1960 年、電波天文学者の F. Drake が宇宙文明からの電波通信の受信 (Communication with Extra-Terrestrial Intelligence : CETI) を試みた。しかし、この当時観測できる惑星の数は少なく、系外惑星からの人工電波の受信は失敗に終わった。それから数十年、科学技術の進歩に伴い、観測技術も向上したため、CETI は宇宙文明の探査=SETI(Search for Extra-Terrestrial Intelligence) へと変わっていった。SETI は、相手からの電波を待つ CETI とは違い、電波望遠鏡を用いてその惑星からの文明的な電波を傍受する。本研究では、国際共同で 2020 年代の実現を目指す 1 望遠鏡 SKA による SETI (10 年間で 100 万星を観測する) について議論する。

1. Andrew P. V. Siemion (2014)