

2019 年度第 49 回 天文・天体物理 若手夏の学校
星・惑星形成分科会 アブストラクト

福井 康雄 (名古屋大学 天体物理学研究室 A 研) 7月31日 14:30–15:30 B 会場

大質量星・巨大星団形成の謎を解く

太陽の10倍以上の大質量星の形成は、天文学の大きな謎として長年議論されてきた。ここ十年の私たちの研究によって、その仕組みが解けてきた。ここでは、最新の研究成果の概要と、球状星団形成に向けた展望について解説しよう。

大質量星形成については、星自体の放射圧が強くそのためにガスの降着が阻止されるという困難が指摘されていた。いくつかの解決策が提案されていたが、これらは観測的には立証されていなかった。2009年、我々は大星団 Westerlund2 において分子雲衝突が星団の形成をトリガーしたことに気がつき、以降、系統的に分子雲衝突を調べてきた。現時点で50を超える大質量星形成領域で分子雲衝突が起きていることを見出し、分子雲衝突によるガスの強力な圧縮が、大質量星と星団の主たる形成機構であることを観測的に示した。この研究の過程において、分子雲衝突の理論研究を活用して観測的特徴を整理し、系統的に衝突を特定する手法を開発した。その発展として、マゼラン雲、アンテナ銀河などの星形成が分解して観測された例について解析を行い、銀河一般における星団形成にも共通して衝突によるトリガーが効いていることを示した。以上の知見は、宇宙初期にも期待される現象であり、球状星団の形成におけるトリガーとして分子雲衝突が作用している可能性が十分ある。

1. Y. Fukui, et al. 2017, PASJ, 69L, 5F
2. Y. Fukui, et al. 2018, ApJ, 859, 166F
3. K. Tsuge, et al. 2019, ApJ, 871, 44T

片岡 章雅 (国立天文台)

8月1日 13:15–14:15 B 会場

惑星ができない！理論・観測両面から迫る惑星形成

惑星はある。私達の住む地球は惑星だし、太陽系外にも数千個の惑星が見つかっている。しかしながら、惑星を作る過程はそう単純ではない。宇宙にある固体物質の大きさは数ミクロン程度であるのに対し、惑星の大きさは数千キロメートルだ。すなわち、惑星形成は、ミクロンからキロメートルへの固体のサイズ成長過程であると考えられる。このようなサイズ成長は、生まれたての星の周りにできる原始惑星系円盤内で起こると考えられている。近年の観測手法の発達により、惑星形成の現場である原始惑星系円盤の観測は劇的に向上した。しかし、その中で起こっている固体成長過程は予想していたものと大きく異なっていた—

本講演では、ALMA 等による最新の原始惑星系円盤の観測に触れながら、観測によって惑星形成の描像がどう変わり、理論的に何がいま問題なのかを議論したい。

1. Ansdell et al. 2016, ApJ, 828, 46
2. Andrews et al. 2018, ApJL, 869, L41
3. Kataoka et al. 2013, Astronomy and Astrophysics, 557, L4

星惑 a1 分子雲におけるフィラメント状構造の起源と星形成初期条件の解明に向けた数値シミュレーション

安部 大晟 (名古屋大学 理論宇宙物理学研究室 (Ta研) M2)

星は、水素分子ガスからなる分子雲中の高密度領域で形成されるが、近年の観測によって、その高密度領域がフィラメント状であることがわかった (e.g., Andre et al. 2010)。さらに、星形成は、分子ガスの圧力等で支えきれないほど重く自己重力的に不安定な状態 (超臨界状態) にあるフィラメント内で起こることが観測的に明らかになった。よって、どのようなときにフィラメントが超臨界状態になり星形成を引き起こすのかを解明する必要がある。一方、Inoue & Fukui (2013) では数値シミュレーションを用いて、分子雲が衝撃波に圧縮されるという現象からフィラメントが形成されることを発見した。実際、分子雲はその一生のうちに超新星爆発由来の衝撃波圧縮を数十回以上経験することが知られており、衝撃波と分子雲の衝突現象は普遍的である。また形成されたフィラメントから星形成に発展する場合もあることが数値シミュレーションからもわかってきた (Inoue et al. 2018)。

しかし、Inoue et al. (2018) では1つのパラメータセットの計算しかされておらず、星を形成するような超臨界フィラメントの形成条件は研究されていない。つまり、問題点はどのような(=ガスを長い時間押す、などの) 衝撃波がどのようなフィラメントを形成するののかに対する理解がまだ不十分な点である。

そこで本研究では衝撃波と分子雲の衝突を模擬した3次元理想MHDシミュレーションを多様なパラメータで実行することで、衝撃波が分子雲を掃いたときどのようなフィラメントが形成されるかを検証した。

結果として、ガスを長時間圧縮し続ける計算では、超臨界フィラメントが形成され、大質量星形成領域のような激しい星形成モードと整合的な結果を得た。また、ガスを短い時間だけ圧縮する計算ではフィラメント形成すら起こらないことが分かった。

1. Andre, Ph. et al. 2010 arXiv:1005.2618
2. Inoue, T., & Fukui, Y. 2013, APJ, 774, 31
3. Inoue, T. et al. 2018, PASJ, 70S, 53I

星惑 a2 野辺山 45m 望遠鏡を用いたアンモニアマッピングサーベイプロジェクト KAGONMA W33 について

村瀬 建 (鹿児島大学 M2)

分子雲の温度を見積もることは高密度の分子雲から星が形成される過程を知る良い手がかりとなる。アンモニア分子は臨界密度が高く、高密度トレーサーとして使われる。また、周波数 23 GHz に多数の輝線を放つ多原子分子であり、異なる準

安定状態の輝線強度比から、観測天体の物理量を知ることができる。我々 KAGONMA (KAGoshima Galactic Object survey with Nobeyama 45-M telescope in Ammonia lines) では、分子雲全体にわたる広範囲のマッピングサーベイを数年前から行っている。目標は分子雲中での温度分布を手掛かりに個々の星形成領域の性質の解明、星形成過程の解明である。今回の発表では大質量星形成領域 W33 について報告する。W33 はコンパクト HII 領域を伴った大質量星形成領域で距離 2.4 kpc に位置する (Immer et al. 2013, Urquhart et al. 2013)。我々は NH₃(1,1), (2,2), (3,3) と H₂O maser の 4 輝線の観測を行なった。解析の結果、2つのクランプを同定することができた。回転温度の見積もりから観測領域の東西で温度勾配が見られた。観測したアンモニア 3 輝線の線幅の相関から NH₃(3,3) 輝線は他の 2 輝線に比べて線幅が広いことがわかった。これは、高励起状態になるにつれて分子雲のより内部をトレースしていることを示唆する (Urquhart et al. 2011)。コンパクト HII 領域が存在する領域では NH₃(1,1), (2,2) 輝線にのみ吸収の影響が見られた。放射成分と吸収成分に分離したところ、NH₃(3,3) の放射成分と、吸収線の線幅が一致することを我々は見出した。アンモニア分子の吸収線は分子雲内部の物理状態を知る手がかりとなる可能性がある。

1. Immer, K., Reid, M. J., et al. 2013, *A&A*
2. Urquhart, J. S., Morgan, L. K., et al. 2011, *MNRAS*
3. Urquhart, J. S., Thompson, M. A., et al. 2013, *MNRAS*

星惑 a3 深層学習を用いた天文データ解析

吉田 大輔 (名古屋大学 理論宇宙物理学研究室 (Ta研) M1)

星は分子雲中の分子雲コアという高密度領域が重力的に収縮することで形成されると考えられており、星の質量毎の形成頻度分布である星の初期質量関数 (IMF) と分子雲コアの質量分布関数 (CMF) の類似性が観測的に指摘され注目を集めている。CMF は分子雲コアから星への進化過程を知る上で重要で、観測の発展と共に CMF の精密化も進みつつある。しかし、太陽質量程度の部分に比べ大質量側は依然としてエラーバーが大きい。その理由は大質量星や大質量コアの形成頻度の低さにある。大質量星は天文学的に非常に重要であり、その形成率を正確に知ることは極めて重要である。

CMF のエラーバーを小さくするには大質量コアの観測数を大幅に多くすることが要求されるため、非常に大きな領域の観測データを解析し、コアの同定と各々の質量測定が必要となる。そこで、我々は FUGIN プロジェクトで得られた数 kpc に及ぶ天の川銀河の分子ガスの大規模観測データに注目し、この画像の解析を目指す。しかし、この画像の解析を困難にする要因が大きく 2 つある。1 つはスケールの大きい差である。FUGIN の画像は kpc スケールであるが、分子雲コアはそれよりも 4 桁も小さい 0.1pc 程度でしかない。2 つ目は、この画像には距離

が大きく異なる天体が写っており、天体毎に解像度の違いがあることだ。そこで、本研究では従来の高分解能観測領域でのみコアが同定可能な解析手法ではなく深層学習を用いた新しい解析方法を開発し、効率的な解析を目指す。

本発表では FUGIN の画像の解析に向けた深層学習のコード開発とその性能テストとして OrionA 領域の解析を行った。この領域は多くの分子雲コアが観測されてカタログ化されている。この領域で開発した深層学習の手法の性能や有用性をまとめ、FUGIN データ解析に繋げる議論をする。

1. Shima-jiri et al. 2015 arXiv:1502.03100v1
2. Onishi et al. 1996 Astrophysical Journal v.465, p.815

星惑 a4 オリオン A 分子雲の高密度領域内外における高密度コアの質量関数 竹村 英晃 (国立天文台 M2)

星は分子雲の中に点在する高密度コアで誕生し、その進化過程は星の形成時の質量に強く依存する。小質量星の形成過程はこれまでに観測・理論両面から盛んに研究され、高密度コアの重力収縮で星形成が開始されるという標準シナリオが構築された (Shu et al. 1987; Andre et al. 2000)。一方、 $8M_{\odot}$ を超える大質量星の形成過程については、遠赤外線放射などの小質量星形成では影響の小さい物理過程を考慮する必要があることと、観測された天体数が少ないことが原因で理解が進んでいない。

大質量星と小質量星が同様のメカニズムで形成されるとすると、大質量星形成領域の高密度コアの質量関数 (CMF) と小質量星形成領域の CMF は類似した特徴を持つことが期待される。近傍の小質量星形成領域においては、大質量側で星の初期質量関数 (IMF, Salpeter et al. 1995) に似たベキを持つ CMF が報告されている (e.g. Sadavoy et al. 2010)。

本研究では、近傍 (~ 400 pc) の巨大分子雲であるオリオン A 分子雲の CARMA+NRO45m 大規模合成データ (Kong et al. 2018) を用いて高密度コアの無バイアスサーベイを行った。データは高密度領域をトレースする $C^{18}O(J=1-0)$ 輝線の広域・高角分解能マップである。階層構造解析アルゴリズム Dendrogram (Rosolowsky et al. 2008) を用いてコアを同定し、Herschel のダスト連続波の観測 (Lombardi et al. 2014) から求めた $C^{18}O$ の存在比より質量を導出した。次に、ビリアル解析の結果と HOPS カタログ (Furlan et al. 2016) を用いて、重力的に束縛された星なしコアを抽出し、CMF を導出した。

ここで、星はガスやダストが多く存在する領域で誕生しやすいとすると、高密度領域の内外で CMF の形状に違いが見られることが期待される。そのことを確かめるべく、高密度領域の内外においてそれぞれ CMF を導出して比較した。その結果、高密度領域の内外の CMF は大質量側で Salpeter の IMF に似たベキを持つが、高密度領域の内側では、質量の大きいコアの割合が高いことがわかった。さらに他の物理量も比較したとこ

ろ、高密度領域の内側ではサイズが小さく、線幅が大きいコアの割合が高いことがわかった。

1. Ikeda et al. 2007, ApJ, 665, 2, 1194-1219
2. Motte et al. 2018, NatAs, 2, 478-482
3. Nakamura et al. 2019, PASJ, in press

星惑 a5 ミニハロー内の分子雲コアにおける乱流の増幅 東 翔 (甲南大学 宇宙理論研究室 M1)

宇宙で最初に作られた恒星である初代星 (PopIII) はミニハロー内にある水素とヘリウムのみからなるガス雲の重力収縮によって形成されたと考えられている。ミニハロー内の分子雲は乱流状態にあり、その乱流は星形成過程で重要な役割を担うとされているが、収縮していくコア中で乱流の駆動源やどのような状態にあるかは未だはっきりとはわかっていない。

一方、宇宙論における速度ゆらぎの式において、ガス雲の中心の小スケール領域で重力勾配と圧力勾配が無視できるとすると、速度ゆらぎの渦度はスケールファクターの -2 乗に比例して減衰する。また、初代星形成時の物質優勢な宇宙では、物質の密度はスケールファクターの -3 乗に比例するので、膨張宇宙では速度ゆらぎの渦度は密度の $2/3$ 乗で減衰する。

しかし逆の宇宙膨張、つまり収縮を考えた場合には速度ゆらぎの渦度はスケールファクターの 2 乗で増加する。したがって、収縮過程において小スケールの領域で、速度ゆらぎの渦度は密度の $2/3$ 乗に比例して増幅されると考えられる。

本研究では、AMR+Nbody Code である Enzo (Bryan 2014) を用いて、ミニハロー内にあるガスを模して、ランダムに小さな速度のゆらぎを与えた Bonner-Ebert 球の重力収縮を計算することにより、中心領域での密度の上昇と速度ゆらぎの成長を追う。また、それにより速度ゆらぎの増幅による乱流の駆動と維持についても議論する。

1. Matsumoto, T., & Hanawa, T. 2011, ApJ, 728, 47
2. Yoshida, N., Omukai, K., Hernquist, L., & Abel, T. 2006, ApJ, 652, 6
3. Omukai, K., & Nishi, R. 1998, ApJ, 508, 141

星惑 a6 大質量連星形成と連星間距離の解析的研究 原田 直人 (九州大学 惑星系形成進化学研究分野 M1)

総質量が $10M_{\text{sun}}$ を超える大質量連星は今までに多数観測されており、その多くに当てはまる特徴として「連星間距離が 1AU を下回る近接連星であること」がわかっている。しかし、近接連星系が形成されるメカニズムの詳細は明らかになっていない。連星がガス降着により成長する段階を考える場合、降着ガスが連星系に持ち込む角運動量が何らかの機構で制限されなければ、連星間距離が広がってしまう。

Lund & Bonnell (2018) は、磁気制動によって従来よりも少ない角運動量が連星系にもたらされた場合、連星間距離が定性的にどれほど変化するかを準解析的に調べた。その結果、総質量 $30M_{\text{sun}}$ で連星間距離が数十 R_{sun} の連星系が形成されることがわかった。これは磁場がないモデルと比較して1桁以上近接しており、大質量近接連星の形成における磁場の重要性を示唆している。しかし、この先行研究では磁気制動の効果をモデルとして取り入れているので、より正確に磁場の影響を評価するためには電磁流体 (MHD) 計算を行う必要がある。

そこで、本研究では最初に、オーム散逸と呼ばれる磁場の散逸過程を考慮した MHD 計算により critical Bonnor-Ebert 球の時間進化を追うと同時に、中心にはシンクを置き、シンクの質量・角運動量も求めた。続いて、中心シンクが連星であると仮定し、Lund & Bonnell (2018) と同様の解析的手法を用いることで、シンクの質量・角運動量から連星間距離を見積もった。本研究では、シンクを用いたことで、連星系にもたらされるであろう質量・角運動量の長時間計算を可能にした。本研究の結果、磁気制動により比角運動量のある程度抑えられたガスの降着が、連星間距離を 1AU のオーダーまで縮める可能性があることが示された。

1. Lund, Kristin. & Bonnell, Ian A., 2018, MNRAS, 479, 2235L

星惑 a7 うみへび座 TW 星周囲のギャップを持つ原始惑星系円盤でのダスト進化 松浦 孝之 (東京工業大学 地球惑星科学系 M1)

円盤におけるダストの進化を理解するうえで理想的な天体の 1 つが、うみへび座 TW 星 (TW Hya) である。TW Hya は原始惑星系円盤を持つ若い星であり、この円盤は様々な波長で観測が行われてきた。特に、ALMA による高分解能観測 [1] によって、TW Hya 円盤は 25 au, 41 au にダストのギャップを持つことなどが明らかになった。

ギャップ形成のメカニズムの 1 つに惑星と円盤の重力相互作用によるものがある。近年、惑星の存在する円盤におけるガスおよびダストの進化シミュレーションが盛んに行われている。その結果、そのような円盤でのダストの分布は、円盤ガスの物理的性質や惑星の質量だけでなく、ダストの合体成長物 (アグリゲイト) のサイズにも大きく依存することが明らかになっている。そして、アグリゲイトのサイズは、円盤のガスの乱流強度やアグリゲイトの強度に依存する。

そこで本研究では、ダスト成長理論と TW Hya 円盤の ALMA 観測との比較を通じて、この円盤に存在する惑星やダストの物理的性質を探ることを目的とする。具体的には、25 au, 41 au に惑星をもつガス円盤を仮定し、そこでのダストの面密度および代表サイズの動径分布の進化をダストの成長・破壊・落下・拡散を考慮して計算した。惑星質量とダストの衝突破壊速度をパラメータとし、ALMA によって得られている TW

Hya のミリ波輝度温度の動径分布が再現されるようなパラメータ範囲を模索した。

その結果、惑星質量を 10 地球質量、破壊速度を 0.5 m s^{-1} と仮定した場合に観測されたギャップ形状が再現された。破壊速度はギャップ外縁に集積するダストの量に寄与し、惑星質量はギャップの深さに寄与することが判明した。

本研究で得られた破壊速度は、ダストが従来の円盤ダストの成長理論から期待されていた値よりも小さく、アグリゲイトを構成している氷微粒子の粒径が $10 \mu\text{m}$ 以上の大きなサイズである可能性 [2] や、構成微粒子の表面が二酸化炭素氷で覆われている可能性 [3] を示唆している。

1. Tsukagoshi et al. (2016)
2. Wada et al. (2013)
3. Musiolik et al. (2016)

星惑 a8 惑星が駆動する原始惑星系円盤ガス流によるペブル降着抑制と惑星形成への示唆 桑原 歩 (東京工業大学 地球惑星科学系 M2)

近年、惑星形成理論において、ペブル降着モデルが盛んに議論されている [e.g., 1,2]。mm~cm サイズの粒子 (ペブル) の降着によって惑星が形成されるペブル降着モデルは、km サイズの微惑星によって惑星が形成される従来の微惑星集積モデルの問題点を克服できる可能性を秘めている。更に、太陽系内惑星のサイズ分布や系外惑星の多様性も説明することが出来ると期待されている。ペブル降着モデルと微惑星集積モデルの大きな違いは、ペブルが惑星との重力相互作用の他に、原始惑星系円盤ガスの抵抗を受けながら運動するという点にある。従って、ペブル降着による惑星形成を考える際は、円盤ガスの影響を考慮することが極めて重要になる。

従来のペブル降着モデルは、惑星重力の影響のないシア一流のもとで議論されてきた。しかし、先行研究の 3 次元流体計算 [e.g., 3] から、形成途中の惑星の周囲には、惑星重力によって駆動される 3 次元的なガス流構造が存在することが明らかになった。この流れ場は、ペブル降着に影響を及ぼす可能性がある。本研究では、まず惑星周りのガス流に関する 3 次元非等温流体計算を行い、その結果を元に、ガス流の影響を考慮して幅広い惑星質量・ペブルサイズに対するペブル軌道計算を行った。惑星が駆動するガス流の影響により、従来仮定されていたシア一流中と比較してペブル降着率が減少した。また、惑星質量が大きいほど、ペブルサイズが小さいほど降着が抑制されることを突き止めた。更に、ペブル降着が抑制される条件式を解析的に導き出した。また、この結果から期待される惑星形成過程への影響について議論する。

1. Ormel, C. W., & Klahr, H. H. 2010, A&A, 520, A43
2. Lambrechts, M., & Johansen, A. 2012, A&A, 544, A32
3. Ormel, C. W., Kuiper, R., & Shi, J.-M. 2015, MNRAS, 446, 1026

星惑 a9 巨大衝突によって形成される惑星系の軌道構造の中心星質量依存性 星野 遥 (国立天文台 M2)

現在の惑星形成の標準モデルでは、星の誕生と同時に原始惑星系円盤が周囲に形成され、その中のダストが合体・成長を繰り返して、惑星まで成長すると考えられている。1995年以降これまでに約4000個もの系外惑星が発見されているが、太陽系の構造とは違った特徴をもつ惑星系が多く、標準モデルではこれらの特徴を説明できない。円盤の質量や密度分布、惑星の分布の変更など、これまで様々な修正がなされてきたが、中心星の質量については、太陽質量に固定する場合がほとんどであった。中心星の質量を変えた場合、ハビタブルゾーン内に惑星が形成される可能性についての議論 (Raymond et al. 2007) が多少あるものの、惑星集積過程にもたらす影響についての詳しい研究は今まで行われていない。

そこで本研究では、原始惑星から惑星へと成長する過程において、中心星の質量を系統的に変化させた場合の惑星系の軌道構造への影響を明らかにし、軌道要素の中心星質量依存性を定式化することをめざす。原始惑星は重力散乱により軌道が乱され、巨大衝突を繰り返すことで地球型惑星の大きさにまで成長すると考えられている。惑星系形成の最終段階に着目する本研究は、系外惑星探査の結果と比較することも可能になる。この巨大衝突過程においてN体シミュレーションを行うために、まずコードの開発を行った。時間積分の方法として、予測子・修正子法の一部である、4次のエルミート積分法 (Kokubo et al. 1998) を実装した。今後、中心星の質量を太陽の0.1/0.2/0.5/1.0倍と変化させてN体シミュレーションを行い、軌道要素の変化およびその質量依存性を調べる。原始惑星同士の重力相互作用を直接計算することで、現実に近い力学構造を再現可能であり、惑星の間隔や離心率などの系の力学構造の進化を詳細に調べることができる。

本講演では、研究手法の紹介、研究経過およびシミュレーションの結果について議論する。

1. Raymond, S. N., Scalo, J., & Meadows, V. S. 2007, ApJ, 669, 606
2. Kokubo, E., Yoshinaga, K., & Makino, J. 1998, MNRAS, 297, 1067

星惑 a10 Particle-Particle Particle-Tree 法を用いた惑星系形成のN体計算 石城 陽太 (東京大学 理学系研究科 地球惑星科学専攻 D1)

一般に、惑星系は、中心星を取り巻く原始惑星系円盤から形成したと考えられている。特に、固体惑星やガス惑星のコアは、原始惑星系円盤内でkmサイズの天体(微惑星)の集積により形成したとされている。微惑星の集積過程は、主に微惑星系の

重力多体計算(N体計算)によって議論されている。また、従来の惑星系形成標準理論にも様々な未解決問題が指摘されており、近年、それらの問題を解決するために様々な惑星系形成モデルが提唱されている。しかし、これらの新しいモデルにも問題点のないものは存在しない。また、十分な粒子数のN体計算が行われていないため、汎惑星系形成論となるモデルは未だ構築されていない。本研究では、惑星系形成シミュレーションのためのparticle-particle particle-tree (P³T)法を用いた新しいN体計算コード、GPLUMの開発を行った。GPLUMでは、カットオフ半径より近距離の粒子間の重力相互作用を4次エルミート法で計算し、それより遠距離の粒子間重力相互作用をツリー法を用いて計算する。また、従来のP³T法を用いたコードでは、系内の粒子について質量比が大きいくつくと計算速度が低下するという問題があるが、GPLUMでは、カットオフ半径を粒子間の相互作用ごとに質量と軌道長半径に基づいて定める新たなアルゴリズムを実装することで、従来のP³T法コードの問題点を解決している。GPLUMの性能は、従来のP³T法コードと比較して、大きな質量比のついた質量分布を持つ粒子系のシミュレーションに対しては大幅に改善される。N体計算コードの性能を改善することにより、惑星系形成過程の大域的なシミュレーションが可能になる。GPLUMによって、N体計算で $\sim 10^6$ - 10^7 粒子を扱うことが可能となり、これまでN体計算で扱うことができなかった広範囲、高解像度のN体計算を行うことができる。さらに、計算コストが向上したことで、たくさんの数値実験が可能となり、パラメータサーベイによる新たな議論も可能となることが期待される。

1. S.Oshino, Y.Funato, & J.Makino, 2011, PASJ, 63, 881
2. M.Iwasawa, S.Oshino, M.S.Fujii, & Y.Hori, 2017, PASJ, 69, 81

星惑 a11 惑星系形成における衝突破壊の重要性の再検討

河合 航佑 (名古屋大学 理論宇宙物理学研究室 (Ta研) M1)

星形成の副産物として形成される原始惑星系円盤の中で、固体天体が衝突を繰り返して固体惑星は形成される。ガス惑星も10倍地球質量程度の固体核が形成され、暴走的なガス集積が起きることで形成される。惑星系形成において、天体の衝突速度は非常に重要である。惑星系形成後期では、惑星は周りの微惑星と衝突して成長する。惑星が成長して重くなると、周りの微惑星を重力散乱するようになる。そのとき、微惑星の衝突速度は大きくなるが、惑星と微惑星と衝突しても惑星の重力のため破壊の効果は小さい。しかし、微惑星同士が衝突すると、破壊が起こる。この破壊により小さな破片が生成され、それらも衝突・破壊を繰り返すことで更に小さな破片が生じる。この衝突・破壊により小さくなった破片は円盤中のガスの抵抗を強く受け、角運動量を失って中心星へ落下する。つまり、衝突・破壊により

固体物質が枯渇するため、原始惑星の成長を阻害される。この効果は惑星が火星程度になると起こるため、非常に重要である。

これまでの研究で、この破壊現象において、衝突天体の質量に比べて衝突によって生じる破片の総質量が半分以上になるような大規模破壊よりも、総質量が1%以下となる様なずっと小さな局所破壊の方が衝突頻度が高いため、より重要であり、微惑星の減少時間はこの局所破壊が決めていると見積もられている (Kobayashi et al., 2010)。しかしそのような小規模な衝突・破壊のシミュレーションは十分にされていなかったため、SPHシミュレーションにより固体天体の衝突による局所破壊をシミュレーションする。本公演ではSPH衝突シミュレーションコードの開発についても説明したい。

1. Kobayashi, H. and Tanaka, H., 2010, *Icarus* 206, 735.

星惑 a12 ダスト高密度領域における雷によるコンドリユール形成モデル

池田 千尋 (東京工業大学 地球惑星科学系 M1)

コンドリユールとは、コンドライト隕石の主要な構造物 (Scott 2007) で、半径 1 mm 程度の球状の組織である。コンドリユールの形成は太陽系形成初期に起きたことが分かっているため、その形成メカニズムを明らかにすることは原始太陽系星雲について知るうえで重要となる。コンドリユールは原始太陽系星雲内でダスト粒子が数分以内で加熱されて溶融し、1-1000 K/hour の速度で冷却され固まって形成されたと考えられている (Desch et al. 2012)。その形成メカニズムは解明されていないが、衝撃波、天体衝突、X-wind、雷によって形成されたとする説がある。本研究では、雷によるコンドリユール形成について、コンドリユールの熱進化の観点から研究を行った。コンドリユールの熱進化は今までに、Horanyi et al. (1995) で研究された。この先行研究では原始太陽系星雲内で雷が発生することを仮定し、雷内のガスの密度や温度の時間進化と高温のガスによって加熱されるダスト粒子の温度の数値計算を行った。計算の結果ダスト粒子は完全に溶融するが、その冷却速度は結晶組織の分析から推定されているコンドリユールの冷却速度よりも速くなることが分かった。本研究では原始太陽系星雲内のダスト密度の高い領域での雷の発生を仮定し、コンドリユールの熱進化を数値計算した。ダスト密度の高い領域を想定することは、雷の発生するために必要であり、また、コンドリユール内の揮発性物質の存在を説明する上でも必要である。本研究ではダスト密度が高いことから、ダスト粒子同士の相互作用を考慮に入れた。その結果、推定されるコンドリユールの熱史に合う雷の条件が存在することが分かった。

星惑 a13 HD189733b の X 線、紫外線によるトランジット観測

森岡 夏未 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

1995年に初めて系外惑星が観測されて以降、約4000個の系外惑星が観測され、太陽系内にはないホットジュピターや、地球とよく似た惑星など、様々な種類の惑星が発見されている。現在は、系外惑星の発見だけでなく、系外惑星の組成や環境、大気を知ることが重要とされている。惑星の大気の情報を知る上で有効な方法が、紫外線やX線を用いたトランジット観測である。系外惑星が大気を持つ場合、可視光、赤外線は惑星大気を透過できるが、紫外線、X線は大気中の原子や分子により散乱、吸収が起こる。こうした特徴から、紫外線やX線による観測を系外惑星に利用することで、惑星大気の情報を得られると注目されている。

Poppenhaeger et al. (2013) はHD189733系をX線観測し、初めてX線でのトランジット観測に成功した。X線でのトランジットの深さは、可視光で観測されたトランジットの深さより大きくなり、広がった惑星大気による吸収が指摘された。この惑星は短軌道を周回するホットジュピターのため、主星からのX線、紫外線照射や恒星風の影響を大きく受けて、大気の蒸発、質量損失が生じていると考えられている。これまで経験した質量損失を考えることは、惑星の進化を考える上で重要であると考えられる。

本研究では、XMM-Newton衛星のX線データを用いてライトカーブを作成し、X線での光度差が可視光での光度差よりも大きいことを確認した。また、Optical Monitorのデータを用いて紫外線のライトカーブを作成すると、トランジットの特徴が見られた。本講演ではX線と紫外線でのトランジットの結果を報告し、X線、紫外線による系外惑星の観測について議論したい。

1. Poppenhaeger, K. et al. 2013, *ApJ*, 773, 62

星惑 a14 重力マイクロレンズ法を用いた系外惑星の電波放射の観測

潮平 雄太 (熊本大学自然科学教育部 M1)

太陽系内の巨大惑星は磁場を持ち、太陽風や衛星との相互作用から低周波の電波を放射することが知られている。今日までの多種多様な系外惑星の発見を考慮すると、磁場を持つような系外惑星の存在を容易に考えることができる。その中でも恒星の近傍を公転する巨大惑星、ホットジュピターが磁場を有するとき、主星から磁気圏へのエネルギーの流入が多いため、木星の $10^3 \sim 5$ 倍の強力な電波を放射するだろうと推測されている。電波放射からの間接的な磁場の検出は、惑星内部の構造を知り、惑星の物理的性質についてのより良い理解につなげるために必要であるが、その系外惑星からの放射は未だに検出されていない。

そこで本研究では、ホットジュピターからの電波放射を検出するために、重力マイクロレンズ法を応用した新たな手法を考えた。

一般的な重力マイクロレンズ法は、レンズ星を周回する惑星の重力による光源となる恒星の増光を検出するために用いられる手法であるが、それに対して、我々は電波領域で主星よりも明るいだらうと予測されているホットジュピターを光源として利用し、増幅された放射の検出を考えた。この場合、光源となる惑星は公転運動をしながら主星と共にレンズ星の背後を通過していくため、サイクロイド曲線に似た軌跡で通過することになる。そこで、この軌跡における惑星の電波放射の増幅についてのシミュレーションを行うと、惑星の放射は、公転運動による光源-レンズ星間の角度の周期的な変化を誘因とする複数のピークを持つ増光を示した。この結果は、惑星電波放射を検出したかどうかを判断するための一つの指標になるということを示した。

さらに、ホットジュピターの軌道半径の分布をもとにしたシミュレーションから、軌道半径ごとの電波放射の強度を推定し、SKA や LOFAR の望遠鏡を想定してそれぞれの感度についての検出可能性を求めた。

1. Zarka, P., Lazio, J., & Hallinan, G. 2015, *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)*
2. Rahvar, S. 2016, *apj*, 828, 19.

星惑 a15 ペブル集積による小惑星セレスへのアンモニア氷の供給

奈良 悠冬 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M1)

始原天体である小惑星の成り立ちを調べることは、地球や太陽系がどのように進化し形成されたかを知る上で重要な手がかりとなる。小惑星セレスは、太陽系で最大の質量をもつ小惑星として知られている。近年の探査機 Dawn のスペクトル解析から、セレス表面にアンモニア化層状ケイ酸塩の存在が示された。このアンモニア化層状ケイ酸塩は、アンモニアが分化中のセレス表面で層状ケイ酸塩と化学反応し形成されたと考えられている。しかし、現在のセレスの表面温度 240 K はアンモニア昇華温度 85 K よりもはるかに高温であるため、アンモニアは単独の固体としては存在できない。これは、セレスが現在の位置よりも遠方の低温領域で形成された後に現在の位置まで移動したか、もしくは初期の原始太陽系星雲が低温であったために、現在のセレス位置でもアンモニアを含んだ物質が捕獲できたことを示唆している。

本研究では、上記の 2 つの可能性のうち後者の可能性を検証し、原始太陽系星雲において天体が含アンモニア氷ダストを捕獲するモデルを構築した。具体的には、標準粘性降着円盤モデルを用いて、円盤ガスの面密度・温度構造の進化を計算し、か

つそこでのダストの成長・移動を計算した。さらに、最新の研究で示されたペブル集積の解析公式を用いて、3 au 付近の小天体が捕獲する含アンモニア氷の量を計算した。

その結果、セレス表面の含アンモニア氷集積厚みは、円盤の質量 M_{disk} および乱流の強さを表す無次元量 α に強く依存することがわかった。 $M_{\text{disk}} < 10^{-2} M_{\odot}$ かつ $\alpha > 10^{-3}$ の場合は、セレス表面に 10 km 以上の集積厚みがかたらされることもわかった。この結果は、セレス表面にクレーターによって鉛直方向に ~ 10 km 程度の起伏があり、アンモニア化層状ケイ酸塩が全球にわたって存在するという観測結果を説明しうる。また、含アンモニア氷の捕獲量は、天体サイズに強く依存することがわかった。このことは、セレスと、セレスよりもサイズの小さな天体では、アンモニア化層状ケイ酸塩厚みが異なることを理論的に示唆する。

1. de Sanctis, M. C., Ammannito, E., Raponi, A., et al. 2015, *Nature*, 528, 241
2. Sato, T., Okuzumi, S., & Ida, S. 2016, *A&A*, 589, A15
3. Visser, R. G., & Ormel, C. W. 2016, *A&A*, 586, A66

星惑 a16 X 線天文衛星「すざく」で観測した彗星における電荷交換反応モデルの検証

鈴木 光 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

彗星からの X 線は 1996 年、ROSAT 衛星によって検出され、彗星の中性大気であるコマと太陽風の高電離したイオンとの電荷交換反応の結果であると分かっている。電荷交換反応とは、イオンが中性原子・分子から電子を奪う反応であり、イオンによって捕獲された電子が高いエネルギー状態から低いエネルギー状態に落ちるときに特定のエネルギーを持つ X 線輝線を放出する。電荷交換反応は銀河や銀河団、超新星残骸でも示唆されており、その輝度分布を知ることは広く宇宙物理にとって重要であり、彗星はその格好の天体である。

73P/Schwassmann-Wachmann3 (以下、73P/SW3) は明るい分裂彗星であり、2006 年に太陽と地球に接近した際に X 線天文衛星「すざく」で観測された。観測は計 3 回の時期に行われ、露光時間は合計 65 ksec であった。「すざく」に搭載された CCD はエネルギー分解能がよく、低エネルギーの応答に優れているため、私はこのデータを使って 0.2 - 0.8 keV のスペクトルを解析した。9 本のガウス関数によるフィッティングを行なったところ、輝線の重ね合わせでよく再現でき、それぞれの輝線は C VI, O VII などに対応していることが分かった。私はさらに天体からの電荷交換反応の最新モデルである AtomDB Charge Exchange model (version 1.0.2) と SPEX (version 3.05.00) CX model でフィットを行い、モデルの検証を行った。本講演では 73P/SW3 以外に観測された Tuttle 彗星のデータも含め、スペクトル解析の結果について報告する。

星惑 a17 N 体計算による準惑星ハウメアのリング形成過程の検証

角田 伊織 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M2)

準惑星ハウメアは、リングを持つ唯一の太陽系外縁天体である。そのリングは、ハウメアの自転周期と 3:1 の平均運動共鳴を起こす位置にある (Ortiz et al., 2017)。ハウメアは三軸不等楕円体の形状をしており、その周囲の非球対称重力場がリングの力学に影響を及ぼしていると考えられるが、リングの形成過程については解明されていない。我々は、ハウメアの自転による分裂によってハウメアの 2 つの衛星が形成されたという説 (Ortiz et al., 2012) に着目し、このモデルに基づいて以下のようなハウメア系形成のシナリオを提示した。まず、ハウメアから衛星サイズの破片が複数飛び散ったという状況を考える。ハウメア周囲の非球対称重力場のため、ハウメアの近傍では物体が安定して存在できない。また、安定軌道にある物体のうち、ロッシュ限界の内側にあるものは、潮汐力によって破壊され、それがハウメアを公転することでリングになる。ロッシュ限界の外側に位置していた物体は、潮汐で軌道進化し、現在の衛星の位置まで移動する。以上のシナリオのうち、本研究では、軌道不安定領域の外側かつロッシュ限界の内側に位置している物体が潮汐破壊され、リングになる過程を検証する。まず、三軸不等楕円体の周囲の重力場を計算し、時間変動する重力場を組み込んだシミュレーションにより、ハウメアを公転する物体が安定して存在できる領域を見積もった。その結果、ちょうど現在のリングの位置よりも内側では、物体の軌道が不安定となることがわかった。さらに、パラメータスタディとして、物質強度を変数とした N 体シミュレーションを行ったところ、多くのパラメータにおいて、ロッシュ限界の位置が現在のリングの位置付近になることが示された。そのため、本研究で提示したシナリオによって、リング形成過程を説明できる可能性があることがわかった。

1. Ortiz, J. L., et al., Nature, 550, 7675 (2017)
2. Ortiz, J. L., et al., MNRAS, 419, 2315 (2012)

星惑 b1 へび座分子雲における低質量 YSO の近赤外分光観測

大出 康平 (埼玉大学 大朝研究室 M1)

近年、多数の存在が分かりつつある惑星質量天体/褐色矮星であるが、形成過程や存在頻度などは未解明な点が多い。我々は、環境による惑星質量天体/褐色矮星の形成について差異を探るべく、太陽近傍 (~1kpc) で複数の星形成領域において可視近赤外測光分光観測を行なっている。本研究の観測対象は、同一分子雲内でガス・ダスト密度の異なる 3 つのクラスターをもつへび座分子雲 (~436pc) である。すばる望遠鏡、UKIRT 望遠鏡を用いて、へび座分子雲 (2284 平方分) について YSO の

近赤外測光探査観測が行われ、約 8000 天体の惑星質量天体/褐色矮星候補天体が同定された (佐藤 2015, 小田 2018)。しかし、先行研究は測光観測のため有効温度が求められないので、若い天体の年齢を 1Myr と仮定して質量が推定されている。そこで本研究では、すばる望遠鏡/MOIRCS を用いてへび座分子雲における惑星質量天体/褐色矮星候補天体を含む低質量 YSO 候補の多天体近赤外分光観測を行なった。低質量 YSO 候補の有効温度を導出し、先行研究の光度と組み合わせ、HR 図と超低質量天体の理論進化モデルを用いると、年齢の仮定に寄らないより正確な質量と年齢の推定が可能となる。低質量 YSO 候補のスペクトル解析の結果、低温度星に見られる H₂O の吸収があるスペクトル、長波長側にかけて光度が大きくなる Class I と考えられるスペクトル、星形成の特徴である Br γ や H₂ の輝線が見られるスペクトルなどが得られた。H₂O の吸収量が有効温度と表面重力によって変化する (Itoh et al. 2002) ことに着目し、有効温度の導出には H₂O の吸収量を用いた。本研究では、減光量に依存しない H₂O の吸収量比 Q を定義 (Oasa 2011) し有効温度の導出を行なった。本講演では、多波長測光値から作成した SED による温度と、分光解析結果から導出した有効温度の比較についても議論を行う。

星惑 b2 R CrA 領域における若い超低質量天体の近赤外測光探査

金井 昂大 (埼玉大学 教育学部理科専修 天文学研究室 M1)

星の質量分布は初期質量関数で示され、1 太陽質量程度の低質量星までは質量が小さいほどほぼ同じ傾きで天体数が増加することが様々な研究で示されている (e.g. Salpeter 1955)。一方で、質量が非常に小さいために水素の核融合反応を起こさない超低質量天体はどの程度形成されるのか、また、その形成過程などは不明な点が多い。先行研究では、活発な星形成領域である S106 領域やオリオン座 B 分子雲において、大質量星の形成によって超低質量天体の形成が抑制されている可能性が示唆されている (Oasa et al. 2006, 北島 2017 卒業論文)。このような超低質量天体の形成が普遍的か多様性を持つかを探るために、様々な物理量を持つ分子雲に着目し環境による星形成の相違点を明らかにする必要がある。本研究では、低質量星形成領域である R CrA を観測対象として選択し、分子雲の環境が星形成に及ぼす影響について探る。質量が小さい YSO (若い天体) は低温であるため、近赤外線に輻射のピークを持つ。加えて、近赤外線は分子雲による減光の影響を受けにくいいため、YSO の観測は近赤外線が適している。以上の点から、UKIRT3.8m 望遠鏡を用いた深い近赤外 (JHK) 測光データを解析した。まず、[J-H]/[H-K] 2 色図から赤外超過量を元に YSO 候補を選別した。そして、J バンド等級から距離・赤化減光補正を行って YSO 固有の光度を求めた。さらに年齢を仮定することで低質量星の理論進化モデル (Baraffe et al. 2015) と比較して質量を推定した結果、現段階では褐色矮星候補を 5 天体、惑星質量天

候補を 646 天体同定した。また、Herschel 望遠鏡の $250\mu\text{m}$, $350\mu\text{m}$, $500\mu\text{m}$ の観測から得られた分子雲のダスト柱密度と比較すると、ダスト柱密度が高い領域では質量が大きい天体が形成され、柱密度が低い領域では質量が小さい天体が形成されている傾向が示された。加えて、WISE や Spitzer のデータを用いて SED を作成し YSO の有効温度を算出し、星周円盤の有無を調べた。これらの初期質量関数は惑星質量天体にかけて増加する傾向が見られた。

星惑 b3 銀河面低密度領域における星形成の広域探査観測

竹内 媛香 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

星は分子雲コア中で形成され、前主系列星 (PMS) の段階を経て主系列星に進化する。PMS は分子雲のガス・ダスト密度の高い領域で集団的に存在しているため、高密度領域では星形成が活発に行われていると考えられている。しかし、低密度領域における PMS の探査は不十分であり、星形成の理解は進んでいない。そこで我々は、銀河面における PMS の広域探査を行い、その分布から銀河面での分子雲のガス・ダスト密度等が異なる環境における星形成の相違を探っている。

本研究では、銀河面における PMS と分子雲との空間分布や関係を調べるため、野辺山 45 m 電波望遠鏡と FOREST を用いた銀河面レガシープロジェクト (FUGIN) の観測領域を対象として、PMS の分光探査観測を行った。

我々は、低質量 PMS が示す観測的特徴のうち、赤外超過と $H\alpha$ 輝線をもとに PMS 候補天体を選別した。まず、可視 r' , i' , $H\alpha$ による銀河面測光探査観測 (IPHAS)、及び、全天近・中間赤外探査観測 (2MASS, WISE) のアーカイブデータの測光値を用いて 2 つの方法で PMS 候補天体を選別し、次に分光観測を行った。1 つ目では、JHK 二色図から赤外超過を示す天体を選別した。2 つ目は、JHK[3.4], K[3.4][4.6] の二色図から少なくとも 1 つの二色図で赤外超過を示す天体を選別した。2 つの手法で選別した赤外超過天体について r' , i' , $H\alpha$ 二色図から $r' - H\alpha$ 超過が見られる天体を PMS 候補天体と同定し、1、2 の手法まとめて ~ 250 天体選別した。これらの PMS 候補天体の一部について、兵庫県立大学なゆた 2.0 m 望遠鏡と広島大学かなた 1.5 m 望遠鏡を用いて、可視中低分散分光観測を行った。

本講演では、PMS の選別手法や分光データの解析により得られたスペクトル型、多波長測光観測による SED との比較などについて議論を行う。

星惑 b4 6.7 GHz メタノールメーザーは大質量星原始星のアウトフローに付随するか？

中村 桃太郎 (山口大学 電磁宇宙物理学研究室 M1)

6.7 GHz メタノールメーザーは大質量星形成領域の原始星の近傍 (100 - 1000 AU) に付随することが知られている。特に、VLBI を使った高分解能な観測による空間分布および固有運動の計測から、特に星周円盤へのトレーサーである可能性が有力

とされている。中でも、6.7 GHz メタノールメーザーの空間分布は現在までに 100 天体以上に及んでおり、それらの統計的性質からは、実際は円盤のようなリング状の分布よりも、まばらで複雑な形状 (コンプレックス天体と呼ばれる) の方が多数あることがわかってきた。このコンプレックス天体がどのような物理現象を反映しているのかはよく分かっていない。そこで、このコンプレックス天体が原始星からのアウトフローをトレースしている可能性に注目した。本研究で着目しているのが、メーザー天体 G59.783+00.065 (以下 G59) である。G59 は高頻度に強度変動するコンプレックス天体であり、視線速度で 15 km/s にも及ぶとても広いスペクトル幅を有することが特徴的である。また、この領域の近傍には CO や近赤外線 ($2.2\mu\text{m}$) でアウトフローが確認されている。本天体について、大学連携 VLBI 観測網 (JVN) を使ってマルチエポック観測を行い、メタノールメーザーの空間分布と固有運動を導出した。

その結果、G59 のメタノールメーザーの形状は大きく変化しておらず、固有運動は概ね東西方向の運動を示した。これは、CO のアウトフローや近赤外線のアウトフローの放出方向とも一致している。また先行研究による水メーザー (アウトフローのトレーサー) の分布と非常に近いことから、メタノールメーザーもアウトフローに沿った運動を示している可能性が高いことがわかった。

今後も継続観測によって、運動の精度を高め、モデルの検証とより具体的な原始星周囲の構造を考察していきたいと考えている。

星惑 b5 初代星形成における磁場の影響

定成 健児エリック (東北大学 天文学専攻 M1)

磁場に貫かれた星形成領域雲では Magnetic breaking により角運動量が引き抜かれたり、アウトフローが発生したりする。それらの効果が星周円盤や連星の形成に影響する。たとえ初期磁場が小さくとも、乱流による増幅を受けて強い磁場が生成される可能性がある (Schober et al.(2012b))。そのため初代星形成においても磁場が重要となる。Machida et al. (2008) では始原ガス雲から原始星形成までの 3 次元理想磁気流体シミュレーションを行った。その結果、回転と磁場の大きさに応じてアウトフローや連星が形成されることが示されており、初代星形成においても磁場の存在が重要だとわかる。しかしながら、彼らの計算ではバロトロピックな状態方程式を仮定していることに問題がある。特に磁場が収縮を妨げるほど強くなる場合には圧縮加熱が弱くなり、磁気加熱が効いてきて、バロトロピックからずれる (Nakauchi et al.(2019))。そのため磁気加熱を含むエネルギー方程式を解きつつ多次元非理想磁気流体計算を行う必要がある。本講演では初代星形成における磁場の影響についての先行研究を紹介する。

1. Machida M.N., Matsumoto T., Inutsuka S., 2008, ApJ, 685, 690
2. Nakauchi D., Omukai K., SUSA H., arXiv:1904.08336

星惑 b6 初代星形成時の星周円盤と周連星円盤について

織田 篤嗣 (甲南大学 宇宙理論研究室 M2)

宇宙で最初に誕生する星、初代星は、宇宙の進化と密接に関係している。そのため、初代星の初期質量関数を知ることは重要であり、そのためには、初代星形成について理解する必要がある。

初代星形成は、現在の星形成と異なる。初代星を形成する始原ガスは、重元素やダストを含まないため、星間分子雲と比べて、輻射冷却が効かない。そのため、初代星の高密度コアは、分子雲コアの温度に比べて2桁ほど高く、原始星への質量降着率は、約1000倍となる。

この高降着率によって、初代星形成は次の様な過程を辿ることが、シミュレーションにより知られている (Greif et al.2012 など)。まず質量降着により、原始星周りの降着円盤はすぐさま重くなり、自己重力不安定により分裂する。分裂で生まれた分裂片は、中心星に合体、もしくは、原始星として生き残る。そして再び、すぐさま円盤が重くなり・・・という過程を繰り返し、初代星は多重星として誕生する。

1つの高密度コアから、形成される星の数によって、初期質量関数は大きく変化する。ゆえに、初代星形成を理解するためには、原始星円盤の分裂と分裂片の運命 (合体 or 生存) を決める物理過程を理解する必要がある。

(Susa2019) は、降着期の初代星形成シミュレーションを行い、質量比が0.1以上の連星においては、分裂は主に星周円盤で起き、周連星円盤ではあまり起こらないことを見つけた。しかし、(Susa2019) は初期条件が1つだけであった。

そこで本研究では、その物理過程を理解するために、2次元流体コードを用いて、初代星連星シミュレーションを行い、質量降着率やエンベロープの角運動量などを幅広く変化させた。そして、質量降着率などの大きさによって、分裂がどちらの円盤で起きるのかを調べた。加えて、円盤分裂が起きず、安定した原始星成長が起こりうる質量降着率などについても調べた。

1. Greif,T.H,et al.2012,MNRAS,424,399
2. Susa,H.2019,arXiv:1904.09731

星惑 b7 ミニハローにおける磁場の増幅 柳崎 真詩 (甲南大学 宇宙理論研究室 M1)

これまで宇宙初期において磁場は非常に弱いと考えられていたため、磁場を考慮した初代星形成モデルの研究は少ない。ところが近年、初代星が形成されるミニハローのsmallスケールダイナモによって磁場が急速に増幅される可能性が指摘されている。smallスケールダイナモとは、乱流の運動エネルギーを元に磁場のエネルギーが逆カスケードする磁気流体力学

プロセスである。この乱流は原始星にミニハローのガスが降着することで生まれると考えられ、最小スケールは分子スケールである。これはジーンズ長の 10^{-4} 倍と非常に小さいため、渦輸送時間が自由落下時間に比べ非常に短く、磁場を急速に増幅させることができる。smallスケールダイナモをシミュレーションで再現するには計算領域を非常に細かく分割する必要がある、計算資源の問題で現実的ではない。そこで、カザンツェフ方程式を使って解析的に取り扱う手法がとられている。カザンツェフ方程式とは磁場の2点相関関数の時間発展を解くことによりsmallスケールダイナモを求める方程式である。Schober et al.(2012) はカザンツェフ方程式によってミニハローにおける磁場の増幅率を解析的に調べた。その結果、原始星形成の極初期 (数密度 $1 \sim 5\text{cm}^{-3}$) の非常に小さい領域で磁場が指数関数的に増幅することがわかったが、原始星形成直前の磁場スペクトルは未だわかっていない。磁気圧により降着円盤の分裂を妨げたり、磁場がアウトフローを作る働きをし原始星コアのガス降着を妨げるといった、原始星形成後期段階における磁場の影響を調べるためには形成直前の磁場スペクトルを知る必要がある。そのためにはカザンツェフ方程式を数値的に解く必要がある。本発表では初代星環境におけるカザンツェフ方程式を数値的に解き、原始星コア内部の磁場スペクトルを調べる研究の進捗報告を行う。

1. J Schober, D Schleicher, C Federrath, S Glover... - The Astrophysical Journal, 2012
2. J Schober, D Schleicher, C Federrath, R Klessen... - Physical Review E, 2012
3. MN Machida, K Doi - Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2013

星惑 b8 原始星円盤形成に対する磁気散逸の効果 小野 遥香 (東北大学 天文学専攻 M1)

星は分子雲中の高密度領域である分子雲コアで生まれる。分子雲コアが重力収縮した結果、原始星と星周円盤を形成する。観測によれば分子雲コアは強い磁場に貫かれている (Troland & Crutcher 2008)。これまで分子雲コアについて、磁場凍結を仮定した理想磁気流体シミュレーションが行われてきた。それによれば分子雲コアが強い磁場に貫かれている場合、磁気制動による角運動量輸送の結果、星周円盤が形成されないことが分かっている (Mellon & Li 2008)。しかしながら、分子雲コア中では電離度が非常に低いため、先行研究では考慮されていない非理想磁気効果が重要になる可能性がある。Tsukamoto et al. (2015) では、オーム散逸と両極性拡散といった非理想磁気効果を考慮した3次元流体シミュレーションを行い、分子雲コアの収縮から星周円盤の形成までを一貫して追った。その結果、分子雲コアが初期に強い磁場を持つ場合でも磁気散逸のため、星周円盤の形成が可能となることがわかった。本講演ではTsukamoto et al. (2015) をレビューし、原始星円盤形成に対

する磁気散逸の効果について議論する。

1. Y.Tsukamoto, K.Iwasaki, S.Okuzumi, M.N.Machida and S.Inutsuka MNRAS 452 278-288 (2015)

星惑 b9 深層学習を用いた 3DMHD の高速化による長時間原始惑星系円盤進化シミュレーション 中野 龍之介 (東京大学 鈴木研究室 M2)

これまでに 4000 個を超える太陽系外惑星が発見されてきた。この中には地球の様な岩石惑星の発見も増えてきている。一方でこの様な惑星系が、どの様に誕生しさらに進化してきたのかは大きな不確定性要素がある。惑星系形成および進化を考える上で、初期段階にあたる原始惑星系円盤の時間進化の理解は本質的に重要である。ガスの散逸のタイムスケールは GASPS の観測より 20Myr とされている (Dent et al. 2013) が、3次元磁気流体シミュレーション (3DMHD) では力学時間の 1000 倍程度までしか行えないが、これは太陽系での 1au だと 1000 年に相当する。

本研究では 円盤進化を計算する 3D MHD シミュレーションを深層学習によって 10000 倍に高速化し、ガス散逸のタイムスケールまで追うことで、新たな円盤進化の描像を探る事で円盤進化の多様性を解明する。

先行研究では、CERN で素粒子生成のシミュレーションを深層学習の一種である 3次元敵対的生成ネットワーク (GAN) を用いて高速化した研究 (Carminati et al. 2018) があり、GIANT4 の精密シミュレーションで 1 分かかっていたシミュレーションが GAN で生成したニューラルネットワークを用いると 0.04 ミリ秒まで高速化 ($\times 150$ 万) していた。

先行研究を参考に Suzuki et al. 2019 の 3DMHD からデータを生成し深層学習によってサロゲートモデル生成についての取り組み、それに対する考察を発表する。

3DMHD では基礎方程式に関係付けられた原始変数間の微分方程式を解く必要があるが、GAN で生成されたサロゲートモデルでは全ての原始変数間の線型結合となっているため高速化が可能である。また陽解法とは異なり、全空間の情報を用いるため CFL 条件も自動的に満たすことができる為、数値発散を防げると考えられる。

1. Suzuki, T.K. ; Taki, T. ; Suriano, S.S. 2019 arXiv:1904.05032
2. Dent, W.R.F. ; Thi, W.F. ; Kamp, I. ; et al. 2013 PASP ,125 ,477
3. F.Carminati et al. 2018 J. Phys.:Conf.Ser.1085 032016

星惑 b11 非軸対称擾乱がストリーミング不安定性に及ぼす影響

加藤 大明 (愛知教育大学大学院 M2)

我々人類が住む地球をはじめとする惑星は、原始惑星系円盤において微惑星から形成されるとされている。その微惑星は円盤初期に存在するミクロンサイズのダストから形成されると言われているが、未だにその形成プロセスについては解明されていない。大きさが 9 桁、質量にすると 40 桁ものギャップがあるその成長過程にはいくつかの障壁が存在することが知られており、現在ではそれらを解決しうる物理メカニズムが多く提唱されている。

微惑星形成において注目されている物理メカニズムのうちの 1 つに、ストリーミング不安定性がある。ストリーミング不安定性とは、円盤中を異なる速さで回転するダストとガスの速度差に起因する不安定性で、線形段階でダストの集積を促進し非線形段階でダストクランプを形成する (Youdin & Goodman 2005)。これまで、ストリーミング不安定性の線形解析や非線形シミュレーションが多く行われてきたが、それらのほとんどは円盤の $r-z$ 平面内のモードに注目したものであり、 $r-\phi$ 平面内での振る舞いについては詳しく調べられていなかった。

ところが最近の 2D シミュレーションによると、 z 方向に波が伝搬しない状況においても $r-z$ 平面内のものと同様な振る舞いが見られ、 $r-\phi$ 平面内でもダストクランプが形成されることが示唆されている (Schreiber & Klahr 2018)。また、その $r-\phi$ 平面内のモードの成長率は $r-z$ 平面内のものよりも大きいと指摘されており、微惑星形成を助けうるものとしてそのモードの振る舞いに注目が集まっている。

しかし、これまでに非軸対称性を考慮したストリーミング不安定性の線形解析は行われておらず、非軸対称擾乱がストリーミング不安定性に及ぼす影響については分かっていない。そこで、本研究では非軸対称性を考慮した線形解析を行い、ストリーミング不安定性の非軸対称擾乱に対する応答を調べた。

1. Youdin, A.N., & Goodman, J., 2005, ApJ, 620, 459
2. Schreiber, A., & Klahr, H., 2018, ApJ, 861, 47

星惑 b12 埼玉大学 55cm 望遠鏡 SaCRA/MuSaSHI を用いた系外惑星の多波長トランジット測光観測

石岡 千寛 (埼玉大学 教育学部理科専修 天文学研究室 M1)

近年の系外惑星探査衛星の活躍により、トランジット法を用いて系外惑星が多く発見されている。トランジット法では、惑星が恒星の前面を通過するときに恒星の一部を遮蔽して起こる減光から、惑星の半径や軌道長半径・軌道傾斜角などの物理量を求めることができる。また、惑星が恒星の前を通過する際に、恒星の光の一部は惑星大気を通過して観測される。このとき、恒星の光は透過してくる惑星の大気成分や温度、雲の有無など

を反映して吸収・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、多波長でトランジット観測を行うことによって系外惑星の大気を推定することができる。本研究では、埼玉大学 55cm 望遠鏡 SaCRA と三波長同時撮像装置 MuSaSHI、埼玉大学 36cm 望遠鏡と CCD を用いて、系外惑星のトランジット現象を起こす天体の多波長測光観測を行った。MuSaSHI では、r バンド (中心波長 600nm) , i バンド (同 750nm) . z バンド (同 900nm) の 3 バンド、36cm 望遠鏡では、g バンド (同 447nm) を使用し、最大で合計 4 バンドで同時観測を行うことが可能である。現在までに、HAT-P-3, WASP-36 を含む計 8 天体について観測を行い、その内の 6 天体について EXOFAST を用いて光度曲線のフィッティングを行った。例えば、WASP-52 は r, i, z バンドでそれぞれフィッティングした結果、減光率が 2.900%, 2.715%, 2.760%、誤差は 0.08 0.12% と求められ、r バンドの減光率が長波長側と比べて大きいことが示された。その他、減光率の波長依存性がみられなかったものが 4 天体、r バンドの減光率が比較的小さいものが 1 天体ずつみられた。本講演では、減光率の波長依存性から推定した大気組成や、波長依存性の違いと主星・惑星の物理量の関係についての議論を行う。

星惑星 c1 分子雲コアの角運動量の起源について 三杉 佳明 (名古屋大学 理論宇宙物理学研究室 (Ta 研) D1)

星の形成と進化を繰り返すことで、銀河は進化する。一方、星の進化はその質量により決まる。星の生まれる場所である分子雲コア (以下、コア) は分裂し多重星を作り出すことが知られており、一つのコアからどれくらいの質量の星が何個できるかによって、生まれる星の質量は異なる。したがって、多重星形成過程の解明は星の形成と進化を決定することであり、銀河進化を理解する上でも重要である。上記の分裂過程において、分裂の有無を決める重要な物理量がコアの初期角運動量であるが、コアが角運動量を獲得する機構については詳しく研究されていない。一方で、近年の Herschel 宇宙望遠鏡による観測は分子雲内のフィラメント構造が普遍的であること、およびコアはこのフィラメント構造に沿って分布していることを明らかにした。したがって、フィラメントからのコア形成理論は観測されているコアの角運動量を説明する必要がある。角運動量を計算する上で重要な物理量はフィラメント内の速度場である。観測によりフィラメントの各部分の重心速度 (centroid velocity) の空間分布ゆらぎが亜 (遷) 音速であることがわかっているが、3次元速度構造は明らかになっていない。そこで我々はまず簡単のため、角運動量の起源としての乱流を考え、任意のポワースペクトルに従う 3次元速度場をフィラメント内に作った。次にコアをつくる領域内での角運動量保存を仮定し、領域内の角運動量をコアの角運動量として採用した。その結果、速度ポワースペクトルが波数 k に対し $P(k) \propto k^{-5/3}$ であるとき、観測されているコアの角運動量を再現できることがわかった。ま

た、観測されているフィラメント内の速度場を解析することにより、観測の速度ポワースペクトルはこのモデルと無矛盾であることが明らかになった。さらに、分子雲からのフィラメント形成シミュレーションにおいて同定されたフィラメント内の速度場を解析した結果、上記の速度場モデルと整合的であることがわかり、その根拠も解析的に理解できた。この結果は近年提唱されているフィラメント形成シナリオがコアの角運動量を説明可能であることを示している。

星惑星 c2 初代星形成における輻射フィードバック 吉岡 佑太 (京都大学 天体核研究室 M1)

宇宙初期に重元素を含まない始原ガスから形成された星は初代星と呼ばれており、初代星の質量決定は宇宙の再電離、最初の重元素生成などを理解する上で非常に重要である。しかし初代星の形成環境は現在の星形成の環境とは大きく異なっている。例えば現在の星形成では重元素の輝線放射やダストの赤外線放射による冷却が重要であるが、初代星形成では重元素が存在せず H_2 や HD の輝線放射のみしか冷却過程がない。他には CMB 以外の外部からの輻射がないこと、初代星形成初期では磁場が弱く無視できることなども現在の星形成と大きく異なっている。初代星の質量降着を止め質量を決定するのは輻射によるフィードバックであると考えられる。今回は回転を考えた時の輻射フィードバックを解析的に考察し、降着終了時における質量を計算した Tan and McKee(2008) のレビューを行う。論文の中では以下の 4 つのフィードバックが考察されている。(1) 初期段階における H_2 の光分解。前述のように H_2 による冷却は非常に重要であるが、原始星の成長につれ FUV 放射が H_2 を光分解することで冷却効率が落ちる。これにより降着率は落ちるが降着を完全に止めることはない。(2) 電離領域の境界での $Ly \alpha$ 輻射圧。原始星が成長すると自身の輻射により周りのガスを電離し、電離領域を形成する。電離領域と中性領域の境界での $Ly \alpha$ の輻射圧により、極方向では降着を阻害されるが、それ以外の方向からは降着可能である。(3) 電離領域の膨張。電離領域の膨張速度が落ち込んでくるガスの自由落下速度と同程度になると降着は止まる。しかしこの効果は完全に降着を止めるわけではなく、中心星からの光が遮られている円盤の陰からの降着は可能である。(4) 円盤の光蒸発。電離領域の膨張により円盤表面は電離 UV にさらされ電離されると、Bondi 半径 (ガスが重力的に束縛されている半径) 外ではガスは円盤から流出する。最終的に降着を完全に止めるのは (4) の光蒸発であり、最終質量は $140M_{\odot}$ 程度であると結論される。

1. Tan, J. C., and McKee, C. F. 2004, ApJ, 603, 383-400
2. Tan, J. C., and McKee, C. F. 2008, ApJ, 681, 771-797

星惑星 c3 連星形成におけるアウトフローの駆動メカニズム

佐藤 亜紗子 (九州大学 惑星系形成進化学研究分野 M1)

観測から、太陽近傍の恒星の約6割が連星系に属し、さらに星形成領域では、より高い割合の星が連星系に属することが知られている。これより、星形成過程を理解する上で連星形成過程を理解することが必要であると分かる。

分子雲コアの重力収縮によって連星が形成される際に、分子雲コアが持っていた角運動量のほとんどが失われ(角運動量問題)、この角運動量輸送を担う機構の一つにアウトフローがある。連星系からのアウトフローは、星周円盤から駆動されると考えられており、この際に起こる円盤からアウトフローへの角運動量の受け渡しは、円盤消失の一因と考えられている。よって円盤・アウトフローの駆動メカニズムの理解は、分子雲コアの角運動量輸送ならびに連星形成過程を理解する上で重要となる。しかし、単星系からのアウトフローを調べた先行研究はいくつもあるが、連星系からのアウトフローを調べたものはほとんどなかった。

Kuruwita et al. 2017 は、3次元理想磁気流体計算を用いて、単星・近接連星・遠隔連星の3つの系を、対象の星が原始星になった状態(その原始星を sink 粒子に置き換える)から約3000年まで計算し、3系からのアウトフローを比較した。彼らは、数値計算に sink 粒子を用いることで、長時間の連星進化過程を調べることを可能にした。

しかし、sink 粒子を用いた Kuruwita et al. 2017 の結果では、正しい駆動メカニズムから円盤とアウトフローを定性的に調べた、とは言えないことが予想される。なぜなら、円盤・アウトフローの駆動メカニズムを調べるためには、中心星周りの駆動領域を計算する必要があり、sink 粒子を用いた数値計算では、解像できない sink 半径内にその駆動領域が存在するためである(e.g. Machida and Hosokawa 2013)。

今回の発表では、Kuruwita et al. 2017 のレビューと共に、先に述べた彼らの計算の問題点を、他の先行研究(e.g. Machida and Basu 2019)と比較し、議論する予定である。また、私が現在行っている単星からの円盤・アウトフローの駆動メカニズムの解析も紹介し、今後の展望を議論したい。

1. Kuruwita et al. 2017
2. Machida and Basu 2019

星惑星 c4 星団形成期における周囲の星による星周円盤の破壊

長谷川 大空 (東京大学天文学教室 D1)

星団は多くの星の集団的形成・進化の現場であり、多くの惑星が存在することが期待されるが、これまで3500以上の系外惑星が発見されているにもかかわらず、星団の中で発見されて

いるものは20個程度と非常に少ない。星団内での惑星の発見数の少なさの主な原因として以下の2つの可能性が考えられている。1つ目は、星団という星が密に存在する環境が、惑星の発見・形成を阻害していることが考えられ、特に、恒星同士の近接遭遇(恒星遭遇)の際の重力産卵により惑星が惑星系から放出されてしまうという可能性である。2つ目は、惑星の材料たる星周円盤が周囲の大質量星による遠紫外域の輻射(光蒸発)や恒星同士の近接遭遇(恒星遭遇)時の潮汐効果によって破壊され、惑星形成が阻害される、という可能性である。前者について、Pacucci et al. (2013)により、散開星団内の惑星系からどの程度惑星の放出が期待されるのかN体シミュレーションによって調べられているが、140 pcと比較的近傍の距離にあるプレアデス星団でも、惑星系全体の26%程度しか惑星の放出は期待できず、この効果だけでは星団内での発見数の少なさを説明するには不十分である。後者について、近年の観測の分解能の向上によって、近傍の星団において星周円盤の詳細な観測が可能になり、両効果について詳細に調べられるようになってきたが、両効果がどれほど星周円盤の破壊に寄与するのかについては議論の余地がある。本研究では Fujii & Portegies Zwart(2015)による、乱流を持つ分子雲からのSPHシミュレーションの結果得られた星分布を初期条件に用い、光蒸発及び恒星遭遇時の潮汐効果による星周円盤の破壊について調べた。その結果、星団では多くの円盤が光蒸発によって破壊され、特に星団中心では光蒸発が支配的であることがわかった。恒星遭遇時の潮汐効果が効くには 10^7 pc^{-3} 以上の密度が必要であり、young massive cluster や散開星団ではほとんど寄与しないことがわかった。

1. Fujii, M. S. & S. Portegies Zwart, MNRAS 449:726–740 (2015)
2. Breslau et al. (2014)
3. Anderson et al. (2013)

星惑星 c5 原始惑星系円盤における円盤風の駆動 川崎 良寛 (九州大学 惑星系形成進化学研究分野 M1)

原始惑星系円盤(以降、円盤)の角運動量分布の時間進化は、惑星の形成過程や軌道進化などに影響を与えてくるので重要である。円盤は回転で支えられているので、内側への質量降着を実現するには、外側への角運動量輸送が必要である。しかし、未だ角運動量の輸送機構の詳細は明らかにされていない。

角運動量の輸送機構の有力な説として、Hawley & Balbus(1991)では、磁場によって引き起される磁気回転不安定性が提唱された。この不安定性によって、弱磁場に貫かれた差動回転円盤の内部において乱流が引き起こされる。その乱流による実効的粘性が生じ円盤外側への角運動量輸送が行われていると示されてきた。これまでの研究は主に円盤内の乱流に着目し、円盤風を対象とするものは行われてなかった。

一方、円盤表層において、磁気回転不安定性により生じる乱流が円盤風を駆動させると予想されてきた。その円盤風は円盤の進化に多大な影響を与えるだろうと考えられていたが、数値計算の扱いの困難性、特に境界条件の扱いの難しさにより定量的な議論が行われてなかった。Suzuki & Inutsuka 2009 では、計算領域の上下の境界で物理量が流出できる境界条件を取り入れた電磁流体力学計算を行い、この円盤風の詳細を調べ、円盤の進化への影響を初めて明らかにした。

本講演で、上の Suzuki & Inutsuka 2009 をレビューし、今後の原始惑星系円盤の進化を研究を見据えて、磁気回転不安定性により駆動される円盤風が円盤進化に与える影響や問題を議論する。

1. Suzuki, T. K. & Inutsuka, S. 2009, ApJ, 691, L49

星惑星 c6 Streaming instability の物理 吉田 雄城 (国立天文台 M1)

惑星形成理論のシナリオではまず原始惑星系円盤中でダストが衝突・合体を繰り返して成長する。この時原始惑星系円盤はガスとダストで構成されており、ガスの存在量が多い。ダストはケプラー回転するが、ガスはガス自身の圧力勾配が存在するためケプラー回転より遅く回る。するとある程度成長したダストはガスの向かい風により抗力を受け、角運動量を失い中心に落下してしまう。これでは惑星の材料がなくなってしまうため、惑星形成理論の中の問題の一つである。この問題の解決のためには、ガスからの抗力が無視できるほどに大きく、しかも落下する前に成長することが要求される。ダストの急成長には様々な不安定が考えられており、streaming instability もその一つである。Streaming instability についてはまずガスとダストの運動方程式から始まる。これらを組み合わせるうえで、終端速度近似を用いる。終端速度近似を用いるにあたり線型解析をする際に分かることであるが、波長があるスケールより長くなければならなかったり、途中の式の変形において項を無視する際に波長が長い要素を考えている。するとガス-ダストに対する移流の式が得られる。この式には移流の項に加え、不安定を表す項が存在する。不安定項が表すのはダストがガス圧の極大付近に集められることである。すると集まったダストがガスを引き付け、ガス圧の極大は維持され、再びダストを集める。この正のフィードバックによりダストが一気に集まり成長できるというのが streaming instability である。このようなガス圧極大は擾乱により起こる。ガス圧がこの極大をつぶそうとするが、コリオリ力により打ち消され地衡風となる。コリオリ力がないと平衡へ向かうとし、不安定は消えてしまう。このように回転系や終端速度近似の下で streaming instability が引き起こされると考えられ、ダスト急成長を引き起こす不安定の一つと考えられている。今学校では Emmanuel.J et al(2011) を紹介し、Streaming instability の物理について解説する。

1. Emmanuel.J, Steven.B and Henrik.L

星惑星 c7 有機物の原始惑星系円盤における形成と微惑星形成への影響

本間 和明 (東京工業大学 地球惑星科学系 M2)

有機物は、宇宙に存在する元素の上位 5 つである H、He、C、O、N のうち、H、C、O、N を含み、隕石や彗星由来の物質である惑星間塵に広く存在する物質である。また、有機物は隕石中の主な固体炭素源であり [1]、生命の発生や惑星形成を促した可能性 [2] を持つため、惑星科学においても非常に重要な物質である。そのため、いつ・どこで・どの程度の有機物が形成し、有機物が生命の発生や惑星形成にどの程度の影響を及ぼしたかを明らかにすることは重要である。発表では自身が今後取り組む予定である、この課題を考える上で重要な論文 [3] を紹介する。隕石中の有機物の高い水素同位体比を説明できるため、有力視されている有機物形成過程に、低温な環境下に存在する H₂O や CO などを含む氷への紫外線照射がある [1]。この状況は原始惑星系円盤の遠方でも達成しうる可能性があるが、これまで検討されてこなかった。そこで本論文は原始惑星系円盤における氷ダストの移動と、氷への総紫外線照射量の時間発展を計算し、この可能性を検証した。その結果、円盤中心面に存在する氷が乱流拡散によって、円盤上層に持ち上げられ、紫外線照射を十分に受けることを示した。加えて、発表では自身のこれまで研究から明らかになった、有機物の惑星形成における役割についても述べる [2]。岩石惑星形成における大きな困難に、惑星の原材料であるダストの付着成長が衝突によって妨げられるダストの衝突破壊がある。しかし、これまで無視されてきた表面が有機物で覆われたダストを考慮すれば、柔らかい有機物がダストの付着を促す糊として働くため、この困難を解消できることがわかった。この有機物による付着力の向上については昨年度も発表したが、今年度は昨年度発表できなかった、この結果から得られた惑星形成における示唆を加えた発表を行う。

1. Alexander,C.M.O., Cody,G.D., DeGregorio,B.T., Nittler,L.R., & Stroud,R.M. 2017, *Geochem*, 77, 227-256
2. Homma, A. K., Okuzumi, S., Nakamoto, T., & Ueda, Y. 2019, *ApJ*, in press
3. Ciesla, F. J., & Sandford, S. A. 2012, *Sci*, 336, 452

星惑星 c8 Assessing the Dusty Outflows from Super-puff with Grain Microphysics

大野 和正 (東京工業大学 地球惑星科学系 D3)

Kepler 宇宙望遠鏡により、質量は海王星以下、サイズは木星程度という超低密度惑星 (Super-puff) の存在が明らかとなった。これらの天体は、大規模な大気散逸によって短期間で大気を失うことが示唆されており (Cubillos et al. 2017)、何故 Super-puffs が現在まで生存できたのか大きな謎となっている。

近年、散逸大気中のダスト opacity によって、Super-puff は実際より遥かに大きなサイズとして観測されているという説が

提唱された (Wang & Dai 2019, 以下 WD19)。WD19 は、ダストの運動を考慮した大気散逸計算を行い、ダストとガスの質量比が 0.01 程度であれば、Super-puffs が生存可能な大気散逸率でも観測される密度が説明できることを示した。一方、WD19 は一定サイズのダストを仮定しているが、その妥当性は明らかではない。

そこで我々は、大気散逸中のダスト成長計算を行ない、ダスト成長が惑星の見かけのサイズに与える影響を調べた。大気散逸流には等温 Parker 風モデルを採用し、ダストの衝突合体によるサイズ分布進化を計算した。その結果、ダストは効率的に成長し、殆どのダストが大気散逸流に逆らって惑星に落下してしまうことが分かった。本講演では、典型的 Super-puff である Kepler-51b の (硬めの発泡スチロールと同等の) 低バルク密度を再現できるかについても議論する。

1. Cubillos, P., Erkaev, N. V., Juvan, I., et al. 2017, MN-RAS, 466, 1868
2. Wang, L., & Dai, F. 2019, ApJL, 873, L1

星惑星 c9 惑星集積時のコア形成と大気剥ぎ取りに着目した地球形成シナリオ 櫻庭 遥 (東京工業大学 地球惑星科学系 D1)

炭素 (C) や窒素 (N)、水素 (H) などの揮発性元素は、海や大気の主要構成元素であり、その起源を明らかにすることは地球形成条件を探る上で非常に重要である。地球の揮発性元素は主にコンドライト母天体によってもたらされたと考えられているが、両者の組成パターンには大きな乖離がある。地球はコンドライト組成に比べて N, C, H の順に枯渇しており、高い C/N 比および低い C/H 比を示す [e.g., 1]。

本研究では、地球集積時の衝突による大気散逸および各リザーバ間の元素分配過程をモデル化し、地球の揮発性元素組成進化を調べた。微惑星集積による惑星形成を仮定し、マグマオーシャン期と後期天体集積期それぞれに対し元素分配モデルを構築した。前者では大気-マグマオーシャン-金属鉄間の化学平衡分配を、後者では海洋や炭素循環の存在を考慮した大気-海洋-地殻・マントル間の元素分配を計算した [e.g., 2, 3]。また全集積過程に渡って天体衝突に伴う大気剥ぎ取りを考慮した。計算の結果、集積条件によってはコンドライト組成の微惑星集積によって現在の地球の揮発性元素組成を再現可能であることが分かった。揮発性元素の中でも親鉄性が高い炭素はコアに取り込まれ、大気に分配されやすい窒素は後期天体集積期の衝突で選択的に剥ぎ取られることによって枯渇したと考えられる。

1. Bergin, E., et al., 2015, Proc. Nat. Acad. Sci. USA., 112, pp. 8965.
2. Hirschmann, M. M., 2016, Amer. Mineral., 101, pp. 540.
3. Sakuraba, H., et al., 2019, Icarus, 317, pp. 48.

星惑星 c10 ハーシェル宇宙望遠鏡の撮像データを用いた系外彗星雲の研究

西出 朱里 (京都産業大学大学院 M2)

太陽系の最外縁には彗星の元となる天体が球殻上に広がっている「オ尔特雲」が存在すると言われている。これは観測された彗星の軌道計算から予測されている天体群であり、直接的観測的証拠はない。一方、系外の恒星に関しても惑星系形成後に残る円盤状の微惑星円盤が銀河潮汐力と恒星遭遇によって軌道進化し、球殻状になると考えられる。本研究では系外彗星雲 (Extra-Solar Oort Cloud : ESOC) と定義されるこれらの天体群に関して、存在や構造に関して議論をする。これらを明らかにすることは恒星系進化の過程や、星形成において太陽系の特殊性、普遍性に関して議論するきっかけとなりうる。彗星雲に位置する天体は、中心星からの輻射及び星間輻射を吸収し、遠赤外線域で再輻射していると推定される。よって恒星系の周囲における彗星雲にあたる大きさ (原始惑星系円盤の典型的なサイズ 1000 天文単位を超越したサイズ) において遠赤外線輻射を検出することができれば、系外彗星雲の存在に制約を与えることができる。本研究では遠赤外線域で比較的高度な表面温度である A,F,G 型星、現時点で球殻状に進化している年齢であると考えられる、光度階級が IV,I である天体を候補にあげ、そのうち SED で赤外超過の確認できる天体を研究対象とした。そしてハーシェル宇宙望遠鏡に搭載されている PACS および SPIRE の撮像データを用いて太陽系外オ尔特雲に存在する微小天体から生じるダストからの熱輻射の探査を行い、彗星雲の有意性及び形状に関して議論する。

1. J.H.Oort(1951)
2. A. S.Stern(1991)
3. F. Y. Morales et al.(2016)

星惑星 c11 近赤外線視線速度観測による低質量星まわりの惑星検出

笠木 結 (国立天文台 M1)

太陽系外惑星の探査方法の一つである視線速度法は、中心星の視線速度変化をスペクトル中の吸収線のドップラー偏移から測り、惑星を検出する方法である。この手法は系外惑星の初検出に使われて以来、今でも惑星系を探すための重要な役割を担っている。今後様々な特徴を持つ系外惑星の検出から、惑星形成過程の解明につながる研究が期待されている。

近年、地球型惑星の探査に対し、M 型星という赤色矮星を中心星とする惑星系が注目されている。M 型星は太陽より質量が小さく、太陽近傍に最も多く存在する星である。しかし、可視光で暗いため観測が難しく、検出された惑星数も少ない。一方で、ハビタブルゾーンが太陽型星よりも近い位置に存在すると考えられるため、視線速度法を使った地球型惑星の検出に適した天体である。また、M 型星は近赤外で明るく、スペクトルに

多くの吸収線を持つ。Reiners et al. (2010) は近赤外線での低質量星周りの惑星に対する視線速度法精度や、恒星活動による視線速度信号への影響を検討した。その結果、中期から晩期 M 型星に対しては可視光よりも高い精度が得られることがわかった。そして、現在すばる望遠鏡戦略枠観測では、それらの中～晩期 M 型星周りの惑星を対象にすばる望遠鏡用赤外線ドップラー装置 IRD (InfraRed Doppler) による観測を行っている。

そこで今回は、上記の論文のレビューを踏まえつつ、IRD の特徴や戦略枠観測で期待される成果等を紹介する。また、現状では近赤外線での視線速度測定精度は、理論的な限界 (光子ノイズ) に達していない。精度を制限していると考えられる地球大気吸収・検出器応答や分光器の温度安定性、モダルノイズといった要因の調査や、その回避といった今後の研究課題についても報告する。

1. B. Sato et al., Search for Planets like Earth around Late-M Dwarfs: Precise Radial Velocity Survey with IRD, (2018)
2. A. Reiners et al., ApJ, 710, 432 (2010)

星惑星 c12 系外惑星探査への Deep Learning の適用 桑田 敦基 (東京大学天文学教室 M1)

系外惑星は 1995 年に初めて発見されて以来、今日までに 3,900 個以上発見されている。その中の約 3,000 個はトランジット法という手法により発見された。トランジット法は、主星の周りを公転する系外惑星が主星の前を横切る際に起こる、わずかな明るさやスペクトルの変化を観測するものである。2009 年に打ち上げられた系外惑星探査衛星 Kepler は、はくちょう座まわりを継続観測し、特に Habitable Zone にある惑星を探すサーベイを行った。サーベイした恒星の数は 50 万個以上にのぼり、2018 年 10 月に運用を終了した。さらに 2018 年 4 月には Kepler の後継機である TESS (Transiting Exoplanet Survey Satellite) が打ち上げられ、Kepler よりも広範囲にわたり現在も観測が行われている。

Kepler はトランジット法によって惑星候補を発見しているが、この候補の中には偽陽性 (恒星が連星であることによる減光など) が含まれている。そこで、惑星による減光であることを判断するために、Deep Learning を用いた Astronet (Shallue & Vanderburg, 2018) や Exonet (Ansdell et al. 2018) というネットワークが開発された。これらのネットワークは、現段階では観測データから減光が抽出された後に適用されている。実際、Astronet によって判断されたデータが、その後のフォローアップ観測によって新たな系外惑星であると確認された事例もある (Shallue & Vanderburg, 2018)。本講演では、系外惑星探査への Deep Learning の適用についてのレビューおよび、今後のさらなる活用について議論する。

1. Shallue & Vanderburg, 2018, AJ, 155, 94
2. Ansdell et al. 2018, ApJL, 869, 7

3. Dattilo et al. 2019, AJ, 157, 169

星惑星 c13 木星大気に存在する大赤斑の維持機構の考察

半谷 康介 (名古屋大学 理論宇宙物理学研究室 (Ta 研) M1)

太陽系において質量、大きさともに最大の惑星である木星はガス惑星であるということが知られており、その組成や構造は地球のような岩石惑星とは大きく異なっている。現在までにバイオニアやヴォイジャーといった探査機の観測により、大気組成や温度構造などは次第に明らかになってきている。また木星の熱放射を観測すると太陽輻射で受け取る熱よりも多い熱量を放出しており、これは木星の重力収縮が原因だと考えられている。その一方で木星の内部構造は不確定なことが多く、2016 年に打ち上げられたジュノーによる観測が期待されている。

木星大気上には大赤斑と呼ばれる渦が南半球に存在しており、その規模は次第に縮小しているものの 40,000km×12,000km ほどのおおきさで地球約三個分の大きさを有している。観測以来、350 年以上渦の機構を散逸せず維持しており、その発生機構や維持機構はソリトンという説 (Redekopp 1977) や地衡風渦説 (Ingersoll and Cuong 1981) などが挙げられるが、いずれも大赤斑のモデルとしては不十分であり、木星の重力収縮によるエネルギーの解放や粘性による散逸をモデルに組み込む必要がある。

大赤斑の周りには反時計回りの大気の流れや対流が存在し、渦機構が散逸しないための何らかの要因が存在すると考えられている。ガス惑星である木星の大気を記述する上では木星内部の構造も考慮に入れた三次元でのシミュレーションが必要であるが、本研究では前述の通り木星の内部構造が不明瞭であるため、二次元でのシミュレーションを SPH 法と呼ばれる、流体をラグランジュ粒子と近似し、粒子間の相互作用などを解くことによって流体现象を記述する粒子法を用いて大赤斑の維持機構を議論したい。

星惑星 c14 Tomo-e Gozen による小惑星探査 紅山 仁 (東京大学天文学教室 M1)

2013 年、ロシアのチェリャビンスク州に隕石が落下した。20m クラスであったこの隕石のエネルギーは広島に投下された原子爆弾の 30 倍以上とされる。もしも分裂せず地球に衝突していれば、被害は桁違いのものになっていただろう。現在までに太陽系内において数多くの小惑星が発見されている。発見だけでなく、はやぶさ、はやぶさ 2 のような探査衛星がサンプルリターンすることにより詳細な情報を得ることに成功している。しかしこれらは比較的大きな隕石であり、チェリャビンスク隕石のような 100m 以下の小惑星の観測はほとんどなされていない。100m 以下サイズの小惑星でも、地球接近型小惑星 (近日点距離 1.3AU 未満のもの) であれば距離が近く、反射光を観測することはできる。ただし高速で動くため高速撮像が

必要である。そこで今年 4 月に全センサー取り付けを終えた Tomo-e Gozen を用いて世界初広視野動画観測による観測を行う。Tomo-e Gozen は長野県木曾にある東京大学木曾観測所口径 105cm シュミット望遠鏡に取り付けられた CMOS カメラで、シュミット望遠鏡の広視野と CMOS カメラの高速読み出しを兼ね備えており、移動天体探査において世界でも類をみないサーベイ性能を持つ。Tomo-e Gozen を用いれば地球接近型小惑星以外にも超新星、重力波天体、太陽系外縁天体、オールト雲天体、太陽系外惑星など様々な天体が発見されることが期待される。装置未完成の段階ですでに超新星、小惑星候補の発見に成功している。本発表では Tomo-e Gozen の科学戦略の概観を述べ、その最新の観測結果についても発表する。