

2020 年度 第 50 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

徳田 一起 (大阪府立大学/国立天文台 理学系研究科物理科学専攻 研究員)

8月25日 14:30–15:30 room 2

最新電波望遠鏡で星の卵の進化を追う 星誕生の瞬間を求めて

恒星は宇宙の最も基本的な構成要素の1つであり、身近な太陽(系)をはじめとしてその形成過程を知ることは我々自身の起源を知ることにつながる。また星間ガスからどのように星が形成され、周囲の環境をどのように変化させるかという問題に関しては、銀河の形成/進化とも関連してくるため、星形成研究は宇宙の大小様々なスケールの現象を統一して理解するための「要」とも言える。本講演では、星間空間の中でも最も分子が濃く集まった領域である分子雲コア(星の卵)がどのように星に至るかを調べた研究を、概ね30年に渡って進められてきた電波観測を中心に概観する。「星なし」分子雲コアは赤外線等で明るい目印がなく観測ターゲットとして選定するのが困難なため、星形成領域全体を単一電波望遠鏡により無バイアスに観測することにより多数発見し、その質量の頻度分布が初期質量関数と酷似していることなどを明らかにしてきた。現在はアルマ望遠鏡をはじめとするそれらの高解像度観測に研究の主流が移行しつつあるが、空間的に広がった構造を捉えることが難しい電波干渉計と、中心部が概ね一定の密度分布を持つ星なし分子雲コアとの相性が悪く、いくつかの観測的な困難に直面することが浮き彫りになった。しかしながら工夫を凝らして観測を実行すると、分子雲コアが原始星に至るまでの進化の時間を測定することや星形成プロセス最初の静水圧平衡天体であるファーストコアの有力な候補の発見など興味深い結果が得られつつあり、星形成初期段階の理解に向けて今後の発展的な研究が期待される。

小久保 英一郎 (国立天文台 科学研究部教授)

8月26日 14:30–15:30 room 2

楽しい粒子円盤系 – もしくは惑星系の構造と起源

宇宙には多数の粒子からなる回転で支えられた円盤形状の天体、粒子円盤系が存在する。例えば、空間スケールの小さいものから大きいものへ、惑星環、周惑星(原始衛星系)円盤、原始惑星系円盤、円盤銀河など。これらの天体は環の縞構造や銀河の渦巻構造など、多様な構造をもつ。粒子円盤系の構造と進化を支配する物理には多くの共通点がある。粒子の運動の基本は公転運動であり、粒子間の重力(自己重力)や衝突によって公転軌道は変化していく。そして系の重力不安定性や非弾性衝突によるエネルギー散逸によって円盤に構造が形成される。また、系は、衝突系か無衝突系か、ロッシュ限界の内側か外側か、などによって多様な進化を見せる。ここでは粒子円盤系の基本物理について概説し、その応用として惑星系形成の素過程について論じる。

星惑 1 オリオン A 分子雲の分子雲コアの質量関数で探る星の形成シナリオ

竹村 英晃 (総合研究大学院大学 物理科学研究科 天文科学専攻 D1)

星は分子雲の中に点在する分子雲コアで誕生する。分子雲コアと形成された星の質量分布はそれぞれコアの質量関数 (CMF) と星の初期質量関数 (IMF) と呼ばれ、大質量側はべき乗分布で近似できる。そして、CMF と IMF は最大値をとる質量と大質量側のべきで特徴付けられ、IMF のべきは普遍的な性質であると考えられている。これまでの近傍の小質量星形成領域の観測では、CMF が IMF よりも大きな質量で最大値をとり、IMF に似たべきを持つことが多く報告されてきた。この結果より、CMF から IMF への進化、つまり分子雲コアから星への進化は一定の星形成率を考慮すると説明できると解釈されている。一方で近年の大質量星形成領域の高空間分解能観測の結果、IMF よりも緩やかなべきを持つ CMF が数例報告されている。よって、CMF と IMF の関係を明らかにするには、より詳細な CMF の観測が必要となっている。

我々は CMF と IMF の関係から星形成過程を明らかにするために、オリオン A 分子雲 (距離 ~ 414 pc) の中心領域である Orion Nebula Cluster (ONC) 領域 ($\geq 30' \times 30' \sim 3.6$ pc $\times 3.6$ pc) において、C180 (J=1-0) 輝線マップから導出した CMF と、Da Rio et al. (2012) で観測された星のカタログから導出した IMF を直接比較した。マップは高空間分解能 (~ 3300 au) の CARMA+NR045m 合成データ (Kong et al. 2018) であり、階層構造解析アルゴリズム Dendrogram (Rosolowsky et al. 2008) を適用して 677 個の星なしコアを同定した。また、ビリアル解析の結果より星なしコアのうち 196 個を重力的に束縛されたコアに分類した。

本研究では、これまでに観測されてきた CMF と IMF の関係とは異なり、CMF と IMF がいずれも ~ 0.1 太陽質量で最大値を取ることを明らかにした。この結果は、原始星からのフィードバックで分子雲コアの質量の大部分が放出されることを考慮すると、周囲のガスの降着などによって分子雲コアがこれから質量を獲得する必要があることを示唆する。また、重力的に束縛されたコアのみから星が形成されれば、星のカタログより推定される星形成率の増加傾向が説明できることも明らかにした。

星惑 2 赤外線暗黒星雲 G23.477 における星形成活動の検出

森井 嘉穂 (東京大学 理学系研究科天文学専攻 M1)

大質量星は銀河進化や周囲の星形成に多大な影響を及ぼすが、存在量の少なさや、観測的困難さからその形成過程は未だ十分に理解されていない。大質量星形成初期段階にあると考えられる赤外線暗黒星雲 (IRDC) の構造を観測的に明らかにす

ることは、大質量星の初期段階の解明につながると考えられる。

本研究は、ALMA を用いて複数の IRDC の高分解能観測を行い、その物理的構造や星形成活動を統計的に明らかにすることを目的としている。今回はケーススタディとして行った、太陽から 4.9 kpc に位置する、IRDC の 1 つ G23.477 の ALMA 観測結果を報告する。この領域は、電波干渉計 PdBI を用いた観測から、大質量星形成直前の段階にあり、4 つの星なしコアからなると報告されている (Beuther et al. 2013b)。本研究では、星形成活動を探るため、ALMA を用いて 1.3 mm 連続波に加え、アウトフローをトレースする CO / SiO、高密度トレーサー (N₂D⁺, HCO⁺, DCN) による観測を行なった (角度分解能 ~ 1.2 arcsec)。

1.3 mm 連続波から 6 つのコアを同定し、1-12 太陽質量であることを見積もった。Beuther et al. (2013) で同定されたコアも含む 3 つのコアに付随するアウトフローが CO/SiO 輝線から検出され、すでに原始星が誕生していることを明らかにした。そのうち 2 本のアウトフローは双極で、位置-速度図 (P-V 図) を作成すると Hubble Wedge とよばれるタイプに分類される分布をしていた。これは、不規則な質量降着を示唆する結果である。

また、Beuther et al. (2013b) で最も質量が大きい (36 太陽質量) とされていたコアからはアウトフローは検出されず、星形成の兆候がない大質量コアであることがわかった。一方で、N₂D⁺ 輝線が強く検出されたこと、ビリアル比が 0.3 となり重力的に不安定なコアであることから、星形成直前もしくは原始星形成直後にあると考えられる。

本講演では、ALMA 観測結果を用いて、この領域における星形成活動について議論を行う。

星惑 3 回転・磁場を考慮した星間雲の構造と安定性と進化

上野 皓斗 (新潟大学 宇宙物理学研究室 M1)

この講演は参考文献についてのレビューである。

回転と磁場は星形成において重要な役割を果たす。回転に関しては双極ガス流に関連したガス円盤の詳細な観測により、円盤が非常に高速で回転していることが示されている。ガス円盤よりもはるかに小さい中心星が存在するため、双極ガス流では中心星の形成において回転の効果が重要である。また磁場に関しては一般的な星間雲において磁場のエネルギーは自己重力エネルギーに匹敵し、磁場が星間雲に対し凍結していれば、星間雲の収縮を妨げるか、少なくとも収縮率を大幅に低下させる。磁場の影響によって磁力線に垂直な雲の収縮が中断され、雲は円盤状になる。実際に近赤外線放射の偏光観測から、磁場が円盤に対し垂直であることが分かっている。

回転、磁場がある雲は準静的に進化すると仮定して研究されている。準静的進化はプラズマドリフトと magnetic braking によって駆動される。プラズマドリフトとは、弱電離のガス雲

においてイオンは磁場と結合するが中性粒子は磁束を横切って抜けること、magnetic braking は、回転する雲が磁場をねじり、磁場に沿って伝播する torsional Alfvén wave を駆動する。この時 torsional Alfvén wave は角運動量を移動させる。

雲では、プラズマドリフトによる質量分布の変化と magnetic braking による角運動量の減少が同時に発生する。本論文では、これら2つのプロセスを考慮し、角運動量の損失率やプラズマドリフトの時間スケールを求め、雲の準静的進化を示していく。

星惑 4 深層学習を用いた天文データ解析手法の開発：分子雲コアの同定及び解析

吉田 大輔 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M2)

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議論されている。しかし、CMF の大質量側のデータが不足しており、大質量星形成の理解の妨げになっている。この問題点の解決のために、以下の二点を解決する必要がある。

1. 観測データの領域を広げ、観測できるコアの個数を増やすこと
2. 従来の分子雲コア解析手法は解像度や S/N 比が一定とみなせる領域の解析を想定しており、広域データの解析には不向きであるため、新手法の開発が求められること。

これらを踏まえ、我々は深層学習を用いた新手法を開発し、FUGIN という大規模電波マップに応用することで大質量コアの観測数を増やすことを目的に研究を進めている。本発表では、OrionA 領域を用いて深層学習のコード開発と性能テストの報告を行い、性能のさらなる向上に取り組みについて議論する。

星惑 5 大質量近接連星の形成における磁気制動の重要性

原田 直人 (九州大学 理学府地球惑星科学専攻 M2)

大質量連星の多くは連星間距離が 1au を下回る近接した系であることが観測より明らかとなっている。大質量近接連星は重力波観測で発見されている連星ブラックホールの起源天体となりうるため重要であるが、その詳しい形成メカニズムはわかっていない。連星間距離を短くする主な機構として考えられているのは磁気制動による角運動量輸送であり、先行研究では磁気流体シミュレーションや準解析的な手法を用いて磁気制動を考慮した連星間距離の進化が調べられている (e.g. Kuruwita et al. 2017, Lund & Bonnell 2018)。

しかし、シミュレーションで2つの星を解像すると、計算コストの問題から長時間の進化が追えない。一方、準解析的な手法では磁場の構造を単純化している為、磁気制動の効果を正しく見積もることが出来ない。

そこで、本研究では磁気流体シミュレーションと解析モデルを組み合わせた新たな手法を確立し、磁気制動による角運動量輸送の効果を考慮した連星間距離の長時間進化を調べた。シミュレーションでは一様磁場のもと剛体回転している分子雲コアを初期条件とし、その後のコアの収縮を計算した。その際、シミュレーションの解像度を原始星やその周りの円盤を解像しないほど粗く設定し、中心の高密度領域に持ち込まれる質量と角運動量だけを記録することで、長時間のシミュレーションを可能にした。続いて、シミュレーションにより得られた中心部の質量と角運動量を連星のものだと仮定し、Lund & Bonnell(2018) の解析モデルを使用することで連星間距離を見積もった。磁場強度や初期の磁場と回転軸のなす角などをパラメータとした計 30 モデルの計算を行った結果、いくつかのモデルでは数十 au まで近接した連星系が形成されることがわかった。本公演では磁気制動効率のパラメータ依存性を示し、大質量近接連星の形成における磁場の役割を議論する。

星惑 6 ALMA による大質量星形成領域でのコアスケールの分裂過程の統計解析

石原 昂将 (総合研究大学院大学 物理科学研究科天文科学専攻 M1)

8 太陽質量を超える大質量星の多くは連星系を形成する。大質量星が連星系を形成するメカニズムとして、分子雲コアの分裂、円盤の分裂、多体相互作用などが提案されてきたが、高感度・高分解能観測の不足からはっきりとした事は分かっていない。分裂は様々な空間スケールで発生し、階層的なプロセスであると考えられている。本研究では大質量星形成領域での連星系や多重星系の形成過程を解明する第一段階として、30 の大質量星形成領域を観測し、分子雲コアの空間スケール (>1000 au) について調べることで、コアの分裂過程に観測的な制限を与えることを目指した。

大質量星形成領域で観測されたコアの分裂を説明するために、熱的なジーンズ分裂と乱流的なジーンズ分裂が示唆されている。これらの分裂によるコア間の距離はジーンズ長程度になると考えられており、更に熱的ジーンズ長と乱流的ジーンズ長のスケールは異なる。よってコア間の距離分布を統計的に求めることで、どちらの分裂過程が支配的なのかを知る手がかりを得られる。そこで我々は ALMA で得られた大質量星形成クランプの 230 GHz ダスト連続波観測データを 500\UTF{2013}1000 au (~0.3 ") の空間分解能で解析した。構造解析ツール Dendrogram を用いて分子雲コアを同定し、MST (Minimum Spanning Tree) の解析により各コア間の間隔分布を求めた。また、ATLASGAL のデータを用いて各領域

の親ガス（クランプ）のジーンズ長を推定し、間隔分布との比較を行った。結果として、導出された間隔分布には先行研究には見られない有意なピークが確認された。また、熱ジーンズ長スケール（数千 au）の分布を示していることが分かった。これはコアスケールでの分裂過程は乱流よりも熱的な重力不安定性に支配されていることを示唆する。

星惑 7 6.7 GHz メタノールメーザーは大質量原始星からのアウトフローに付随するか？

G59.783+0.065 の内部固有運動の研究・続

中村 桃太郎 (山口大学 創成科学研究科基盤科学系専攻 M2)

6.7 GHz メタノールメーザーはこれまで 1000 天体以上で検出されており、大質量星形成領域に限って付随する特性があることから、大質量星形成を探る上で重要なプローブとして観測が行われている。特に VLBI による高分解能観測により、6.7 GHz メタノールメーザーが多様な分布形状をなすことが明らかになり、中でも”リング”と分類される形状では、星周円盤への付随を示唆する内部固有運動 (Sanna et al. 2010b, Sugiyama et al. 2014) が報告されている。しかし、実際には形状から付随する星周構造を推定できないメーザー源が過半数を占めており、にも関わらずそのような天体の研究例が少ないのが現状である。我々は、これらのような複雑な空間分布を有し、メーザーのスペクトル幅が広い天体 G59.783 + 0.065 (以下 G59) に注目し、この天体のメーザーとアウトフローとの関係を探るために JVN (Japanese VLBI Network) による VLBI モニター観測を行った。

今回の講演では、観測データから導出した G59 の 6.7 GHz メタノールメーザーの内部固有運動について、22 GHz 水メーザー (アウトフローのトレーサー) の分布・運動および他観測データとの比較、円錐アウトフローによる 3次元運動のモデルフィットによって、アウトフローへの付随の可能性について議論し、今後の展望としてアウトフロー付随説の統計的な検証に向けた研究計画について簡単に紹介する。

星惑 8 Ca II 三重輝線と Mg I 輝線を用いた若い恒星の彩層活動の調査

山下 真依 (兵庫県立大学 物質理学研究科 光学赤外線天文学研究室 M2)

彩層活動の起源は光球のダイナモ活動にある。ロスビー数 $N_R (= \text{自転周期}/\text{対流層の回転時間})$ が小さいほどダイナモ活動が活発であり、強い彩層輝線を示す (Marsden et al. 2009)。Noyes et al. (1984) は F,G,K 型主系列星のロスビー数と Ca II HK 輝線の強度の依存関係から、混合距離パラメータ $\alpha (=1/H_p; 1$ は混合距離, H_p は圧

カスケールハイト) を求めた。 α からは対流速度とコリオリ力を計算できる (Deinzer 1965)。恒星のコリオリ力とローレンツ力は釣り合う (Baliunas et al. 1996) ので、彩層輝線の観測から磁場強度を測定できる。

前主系列星は速い自転速度と分厚い対流層を持ち、ダイナモ活動が活発であると予想される。一方で Mohanty et al. (2005) では前主系列星の質量降着率と近赤外 Ca II 輝線のフラックスは正の相関を示し、原始惑星系円盤からの質量降着により彩層輝線が発生する可能性も考えられる。これまでの研究 (Yamashita et al. 2020, submitted; 天文学会 2019 年秋季年会 P114b) では、60 天体の前主系列星の近赤外 Ca II 三重輝線 (λ 8498, 8542, 8662 Å) を解析し、質量降着よりもダイナモ活動による彩層輝線が優勢である天体を区別した。その結果、質量降着による強い彩層輝線を示した天体は 4 天体のみであった。多くの前主系列星は自転が速い零歳主系列星並みに明るい近赤外 Ca II 三重輝線を示し、ダイナモ活動を起源とする彩層活動を持つことが判明した。前主系列星の Ca II 三重輝線の強度はロスビー数に対して一定であり、表面の全体を光学的に厚い活動領域が占めることが示唆される。ゆえに α の測定には Ca II より光学的に薄い原子の輝線の解析が必要である。

VLT/UVES のアーカイブを用いた予備調査では、零歳主系列星 9 天体、前主系列星 6 天体の Mg I 輝線 (λ 8808 Å) を解析した (天文学会 2020 年春季年会 P104b)。いずれの天体でも Mg I 線は狭輝線成分を持ち、その強度は零歳主系列星の Ca II 三重輝線より暗かった。本講演ではすばる望遠鏡/高分散分光器 HDS と Anglo-Australian 望遠鏡による数十天体のアーカイブデータを加え、Mg I 輝線の自転活動関係について議論する。

星惑 9 収縮するミニハローにおける乱流の増幅

東 翔 (甲南大学 自然科学研究科物理学専攻 M2)

宇宙最初の星である初代星はミニハロー内のガスが重力収縮することで形成される。このミニハロー内のガスは乱流的であることが知られているが、非常に高い空間分解能のシミュレーションが必要であるためにあまり考慮されていなかった。しかし近年、乱流を人工的に与えたミニハローの収縮を追ったシミュレーションにおいて、強い乱流を与えるほど質量降着期においてガスの分裂により誕生する星の数が増加する傾向にあることが明らかになってきた (e.g., Clark et al. 2011; Wollenberg et al. 2020)。初代星の数はその平均的質量に直結するため、その後の宇宙の熱的・化学的進化を決める鍵となる量である。そのため、初代星の数を左右する乱流は重要であるが、その乱流がどうやって駆動されるかはよくわかっていない。

今回我々は乱流を駆動するメカニズムの候補の一つである自己重力による収縮に着目し、AMR シミュレーションコードを用

いてミニハローを模した初期条件から、乱流を正しく分解できる高解像度のガスの収縮シミュレーションを行うことで、単純な収縮のみによる乱流の増幅を調べた。また、収縮による乱流の増幅を解析的に推定し、シミュレーションによって得られた結果と比較した。

シミュレーションの結果、収縮とともに最初音速に比べて十分に小さい乱流速度が単調に増加し、超音速に達した。

また、増幅過程におけるガスの密度と乱流速度の相関は、収縮による駆動モデルの解析的な推定とほぼ一致することがわかった。これにより、ミニハロー内の超音速乱流の起源が重力収縮によるものであることが示された。

これらの結果は、重力収縮するガス雲において、収縮が十分進めば、音速程度の乱流は必ず誘起され、常に考慮されるべきであることを示している。

星惑 10 磁場環境化での初代星形成

定成 健児エリック (東北大学 理学研究科天文学専攻 M2)

磁場に貫かれた星形成雲では磁気制動による角運動量の引き抜きやアウトフローによるガスの流出などの現象が見られる。これらの効果は星周円盤や連星の形成、星形成効率などに影響する。初代星形成に対する3次元MHDシミュレーションの先行研究としては、Machida et al. (2008) があり、磁場が初代星形成に大きな影響を与えることが確認されている。しかしながら彼らのシミュレーション one-zone 計算から得たパロトロピック関係を用いているという問題があった。そこで本研究では冷却過程と非平衡化学反応を考慮しつつエネルギー式を整合的に解いて3次元MHDシミュレーションを行い、始原ガス雲の高密度コアから原始星が形成されるまでの収縮期について調べた。本講演ではパロトロピック仮定を用いた従来の計算方法と比較しながら今回のシミュレーション結果について報告する。特に衝撃加熱や磁気圧による収縮の遅れが熱進化にあたる影響について調べ、それらの影響が初代星の性質にどのように影響を与えるかを議論する。

星惑 11 初代星の形成

中村 和貴 (甲南大学 自然科学研究科物理学専攻 M1)

宇宙の初期に形成された初代星は初期宇宙の構造、その後の星形成に大きくかかわる非常に重要な星である。宇宙空間の密度分布は揺らぎが存在している。平均よりも高密度領域では宇宙の膨張に取り残され分子雲ができ、その中で高密度の分子雲コアから自己重力によって星が形成される。この星形成の過程は流体方程式を用いて考えることができる。Larson(1969) は回転、磁場、内部の乱流の影響を無視し、一様な球対称の密度分布の初期条件を設定して分子雲コアの重力崩壊を数値的に計

算した。

初代星の形成過程は Larson(1969) が研究した分子雲からの現在の星形成とは大きくは変わらなく、宇宙が膨張する過程で平均密度よりも高いミニハローが形成され、その内部のガスが中心に降着することでから初代星が形成される。その後冷却しながら収縮し、ある時を境に逃走的収縮を起こす。その後中心部に初代星が形成され、周囲のガスが降着していくことで成長していく。最終的に成長し温度が上昇すると降着円盤の垂直方向のガスが電離し、ガス圧によって周囲のガスが吹き飛ばされ、すべての物質が降着すると成長は止まる。

今回の発表では初代星の形成について紹介する。

星惑 12 鉛直降着流による周木星円盤へのガリレオ衛星材料物質の供給

前田 夏穂 (神戸大学 理学研究科惑星学専攻 M2)

木星の代表的な衛星であるガリレオ衛星は、その軌道の規則性と大きさから、周木星円盤内での固体物質の集積により形成されたと考えられる。しかし、衛星材料となる固体粒子がどの程度の降着率で周木星円盤に供給されたのかは未解明であり、かつ重要な問題である。

3次元数値流体計算により、原始惑星系円盤ガスは周惑星円盤へ鉛直方向に流入することがわかっている (Tanigawa et al. 2012)。そのため小粒子は鉛直降着流とともに周木星円盤に供給された可能性がある。固体粒子の周惑星円盤への供給を調べた従来の研究 (Tanigawa et al. 2014; Homma et al. 2020) では、惑星質量が土星質量程度の場合のガス場を用いて議論している。しかし衛星は、惑星形成のごく末期に形成されたと考えられるため、ガリレオ衛星形成過程を明らかにするためには、原始惑星がより成長した段階について調べることが重要である。

そこで本研究では、先行研究より原始惑星質量が大きい場合について、鉛直降着流による周惑星円盤への小粒子の供給を調べた。具体的には、惑星質量が 0.4, 0.7, $1 \times$ 木星質量の場合について数値流体計算とガス抵抗を考慮した粒子の軌道計算を行い、惑星質量の増加によるガス場の変化と、それが周惑星円盤への固体粒子供給に及ぼす影響を調べた。その結果、周惑星円盤に降着するガスの存在領域は、惑星質量が大きいほど軌道半径方向に広がることがわかった。これにより、原始惑星系円盤の固体面密度が一定の場合、粒子の供給が促進され得る。本講演では、これまでの研究経過および最新の結果について議論を行う。

1. Tanigawa, T. et al. 2012, ApJ, 747, 47
2. Tanigawa, T. et al. 2014, ApJ, 784, 109
3. Homma, T. et al. 2020, ApJ, in revision

星惑 13 周惑星円盤の赤外線・電波観測のモデル計算：衛星形成の条件

胡 博超 (東京工業大学 理学院地球惑星科学専攻 M1)

衛星は周惑星円盤から形成されたと考えられている。周惑星円盤中の衛星形成に関する様々な理論的モデルがあるが、周惑星円盤の物理状態に対する観測的制限はほとんどついていない。ここで、木星衛星の氷・岩石比は非一様であることが知られている。周惑星円盤内の水のスノーライン内側の高温領域では、氷は気化して、主に岩石が衛星の材料物質になる。したがって、衛星の形成条件を考える上で、周惑星円盤の物理状態、特に温度状態を調べることは重要である。近年、高解像度の ALMA 望遠鏡などを使って、たくさんの若い星の周りにある原始惑星系円盤の詳細構造が観測されている。さらに、周惑星円盤に似たような構造も発見された (e.g. PDS 70, TW Hya)。また、2021 年に打ち上げ予定の赤外線宇宙望遠鏡 JWST により、さらに多くの周惑星円盤が検出されると期待されている。

本研究では、モデル計算とこれらの観測を比較することによって、周惑星円盤の温度状態を調べる方法を確立する。これまでの研究では ALMA 観測を想定して、乱流粘性降着円盤 (Zhu et al. 2018) と照射加熱円盤 (Rab et al. 2019) のミリ・サブミリ波のダスト・ガス放射強度が予測されてきた。本研究では JWST 観測に向けて、まず粘性加熱が良く効く周惑星円盤を仮定し、降着率や粘性係数などの物理量を変えて、赤外線・電波放射強度がどのように変化するかを調べた。その結果、JWST によるダスト連続波の観測で、周惑星円盤を比較的容易に検出できる可能性が示された。今後さらに化学反応計算を行い、様々なガス輝線の赤外線・電波放射強度が円盤物理量にどのように依存するかも調べる予定である。

- 1.Ch. Rab, I. Kamp, C. Ginski et al. 2019, A & A, 624, A16
- 2.Z.Zhu, S.M. Andrews and A. Isella, 2018, MNRAS 479, 1850

星惑 14 円盤の熱進化を考慮した天王星周りの衛星形成

木原 遥大 (京都大学 理学研究科宇宙物理学教室 M1)

天王星周りには 27 個の衛星が存在する。そのうち 5 つの主要な衛星が衛星系全体の質量の 99% を担っている。そして天王星に限らず、巨大惑星まわりの衛星達がどのようなメカニズムで形成されたのかについて様々なモデルが存在する (Canup & Ward. 2006; Sasaki et al. 2010)。しかし他の太陽系内惑星とは異なり天王星の赤道傾斜角は 98 度傾いており、その自転軸の周りを衛星が回転している。そのため上記の論文のモデルをそのまま適用しても、軸を傾けるためのメカニズムを別に考えなければならない。その系を説明する方

法として二つの原始惑星が衝突し、その衝突によって自転軸が曲げられかつ破片が自転軸周りに散らばり円盤が形成されるというジャイアントインパクト説が提唱された。実際にこの仮説の元 SPH 計算が行われた結果、赤道傾斜角の傾きと衛星の元となるような円盤が惑星周りにできることが説明された (Slattery et al. 1992)。そのデブリ円盤をもとに N 体計算で今の衛星系を形成できるかが検証されたが、初期円盤の面密度は中心惑星より外側のほうが小さくなるので、外側の衛星の質量が実際の観測結果より小さくなることが分かった (Ishizawa et al. 2019)。

上記の外側の衛星の質量が観測より小さくなってしまいう点を解消するために、ジャイアントインパクトによってできた円盤の熱進化を考慮した天王星周りの初期円盤モデルが提唱された (Ida et al. 2020)。本発表ではこの円盤モデルの物理過程について、および円盤の熱進化を考慮することによってなぜ天王星周りの衛星形成の説明にとって都合がいいのかを紹介する。また我々が行っている実際に観測から分かっている衛星系の再現を目的とした、円盤の熱進化を考慮した N 体計算についても紹介する。

星惑 15 N 体計算を用いた巨大天体衝突に伴う衛星系形成のパラメータスタディ

長谷川 祐一 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

惑星形成過程の最終段階では原始惑星同士の衝突が頻繁に起こると考えられている。衝突によって生じる破片は原始惑星の周囲にデブリ円盤を形成し、集積して衛星になると考えられる。地球の月も巨大衝突で形成可能であることが数値計算で示されており、そのパラメータの調査も行われてきた。一方で、巨大天体衝突による衛星系形成の系統的な研究は数値計算上の困難からほとんど行われてこなかった。

しかし、系外惑星周りの衛星系は今後重要な観測ターゲットとなることが期待されるため、一般的な衛星の形成過程を理解することは重要である。そこで、本研究では多様な衛星系の形成条件を明らかにするため、衝突破片円盤の質量と半径をパラメータとして系統的な N 体計算を行い、形成された衛星の位置・個数・質量との関係を調査した。結果、ロッシュ半径のやや外側に最大の衛星が一つでき、円盤が広い場合にはさらに円盤の外側で比較的小さな衛星が複数個できることがわかった。

星惑 16 衛星の内部海のシミュレーションのための SPH 法のコード開発

村嶋 慶哉 (京都大学 理学研究科宇宙物理学教室 M1)

近年、Europa や Enceladus などの氷衛星で内部海の存在を示唆する証拠が見つかっている。液体の水の存在は生命の

誕生に必要不可欠であると考えられており、内部海の内部構造、特に温度の分布と進化について理解することは重要なことである。内部海は潮汐加熱と放射冷却のバランスによって保たれていると考えられる。そこで、我々は氷衛星の内部海について三次元の流体数値シミュレーションを行うことを目的として、粘性、熱伝導と放射冷却を考慮した Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法のコードを開発した。

SPH 法は天文や惑星科学の分野でよく使われている粒子法的流体シミュレーション法である。しかし、標準的な SPH では粘性を考慮すると剛体回転する系を解くことができない。これは、SPH 法における一般的な粘性がシアのある系では回転を止めるような非物理的な力として働いてしまう形式になっていることと、標準的な SPH は元々接触不連続面や自由表面で適切な計算ができないという問題を抱えていることが原因である。まず一つ目の問題を解決するために、粘性流体の方程式の SPH 法での定式化の見直しを行った。また二つ目の問題を解決するために、従来の SPH 法ではなく、不連続面での困難を発生させないように定式化されている Saitoh & Makino(2013) で開発された Density Independent SPH (DISPH) 法を用いた。本発表では、このコード開発の進捗報告を行う。

星惑 17 原始惑星系円盤進化の中心星質量への依存性

中野 龍之介 (東京大学 総合文化研究科広域科学専攻 D1)

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。円盤はダストとガスから出来ており、岩石惑星の形成進化はダストが中心的役割を果たすが、ダストの動力学や成長を解明する上で背景のガス成分の物理状態を理解することが不可欠である。円盤の散逸は中心星からの放射による光蒸発や磁気駆動円盤風に担われるが、これらが時間とともにどの様に寄与し、更に中心星質量の違いにより異なるのかは分かっていない。

本研究では X 線による光蒸発 (Owen et al. 2012) と磁気駆動円盤風 (Suzuki & Inutsuka et al. 2009) を考慮した、原始惑星系円盤のガス成分の動径方向 1 次元のシミュレーションを行い、中心星質量の違いにより円盤進化がどの様に異なるかを調査した。

質量降着、円盤風、光蒸発の効果をそれぞれ考慮したシミュレーションをした上で、散逸機構の組み合わせの中心星質量依存性に着目した。もっとも現実的な組み合わせの場合、中心星質量が大きいほど内側が消失が早くなる事が分かった。また、

中心星の光度から定義する雪線で規格化した場合でも、中心星質量が大きいほど内側が消失が早くなる事が分かった。

更に、観測での円盤寿命の傾向と比較するため、SED を求め、その傾きの進化から観測との整合性を確認した。

星惑 18 原始惑星系円盤の光蒸発シミュレーション: 中心星質量依存性

駒木 彩乃 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

分子雲が重力収縮することにより、中心部では原始星が形成される。中心星の周りには原始惑星系円盤と呼ばれる幾何学的に薄い円盤が形成される。円盤は寿命を持ち有限の時間で消失する。惑星は円盤内部で円盤物質から形成されるため、円盤進化は惑星形成を考える上で重要である。

太陽系近傍星形成領域の観測によって、原始惑星系円盤の寿命はおよそ 3-6 百万年であると見積もられている。赤外線観測から 2 太陽質量以上の大質量星の円盤は低質量星に比べて円盤寿命が短いことが示唆されている (Ribas et al. 2015)。また、ミリ波観測から太陽質量以下の中心星周りの円盤寿命は太陽質量以上の中心星周りの円盤に比べて短いことが示唆されている (Ansdell et al. 2017)。以上から円盤進化が中心星質量に依存することが明らかになってきている。円盤消失の機構の一つとして光蒸発が挙げられる。光蒸発とは中心星または近傍星から放出された Extreme Ultraviolet (EUV; 13.6 - 0.1 keV), Far Ultraviolet (FUV; 6 - 13.6 eV), X-ray (0.1 - 10 keV) によって円盤ガスが加熱され、円盤表面から流出する現象である。観測によって様々なスペクトル型の中心星周りで惑星が発見されているため、円盤進化に寄与する光蒸発を様々な主星周りについて考える必要がある。

本研究では二次元輻射流体シミュレーションを 0.5 - 7.0 太陽質量の中心星を持つ系に対して遂行し、光蒸発率の中心星質量依存性を明らかにした。輻射輸送、非平衡化学反応、流体の式を同時に解いた。EUV による水素原子の光電離に伴う加熱、FUV による光電加熱、X 線による各種元素の電離に伴う加熱を考慮して熱化学分布を自己整合的に計算した。円盤表面からの質量流出率も導き、各中心星質量 (Mstar) での円盤寿命を見積もった。その結果、円盤寿命は太陽質量の中心星周りで 8.09 Myr となり Mstar の^{-1.5} 乗に比例した。Mstar の増加と共に光蒸発率も増加した。これは中心星が太陽質量以上の場合について観測と整合的である。また、円盤面密度の損失率はどの Mstar の場合でも中心星からの距離の約^{-1.3} 乗に比例した。

星惑 19 土星の偏光観測

川上 碧 (兵庫県立大学 物質理学研究科物質科学専攻 M1)

光は電磁波の一種であり、電場・磁場は光の進行方向と互いに垂直な方向に振動しながら空間を伝わる。偏光とは、光の振動方向の分布が一様でなく特定の方向に偏っている光であり、太陽光などの自然光はあらゆる方向に振動しているため無偏光である。偏光は光の偏り度合いを示す偏光度と、偏りの向きを示す偏光方位角を用いて表される。偏光は物質が無偏光の光を反射することによって起こるため、偏光を調べることで物質の物性や形状を推定できる。太陽系内の天体は太陽光を反射して輝くため、偏光観測によって天体表面の物質の情報を得ることができる。

土星は太陽系で2番目に大きく、環を持つガス惑星である。土星の環には数 mm 程度の大きさを持ち、表面が粗い氷の粒子が存在する。そして、それらの粒子が太陽光を一回散乱していることがこれまでの可視光の偏光観測から分かっている。土星の観測は環に着目されることが多く、土星本体は環に比べると先行研究が少ない。

本研究では土星本体の偏光分布を調べ、土星本体の大気表面の構造について議論した。観測は西はりま天文台 2 m なゆた望遠鏡と同時偏光撮像・分光装置 POL を用いた。波長は 440 nm : B バンド、550 nm : V バンド、660 nm : R バンドで観測を行った。

V バンド画像の解析を行った結果、偏光度は土星の中心から周縁部に向かって増加し、本体の端で最大になることがわかった。また、偏光方位角は土星の東西の端では南北方向をおおよそ示し、本体の縁に対して水平であった。レイリー散乱による偏光を考えると、これらの結果は密度に差がある大気によって2回のレイリー散乱が起きていることで説明できる。惑星大気は内側から外側にかけて密度が小さくなる。土星では本体の周縁部で大気密度の変化が一定ではなく、大気の外側から内側にかけて密度勾配が大きくなるため、大気密度の境界面に対して水平方向に強い偏光を示すと考えられる。

星惑 20 Tomo-e Gozen サーベイデータに対するランダムフォレストを用いた移動天体検出システムの開発

紅山 仁 (東京大学 理学系研究科天文学専攻 M2)

木曾観測所口径 105 cm シュミット望遠鏡に搭載された CMOS カメラ Tomo-e Gozen は晴天時には毎晩サーベイ観測を行う。シュミットの広視野 (有効視野 20 平方度) と CMOS センサの 2Hz 動画観測により世界トップクラスのサーベイ効率を誇り、毎晩約 20TB ものデータを生成する。

このサーベイビッグデータからは様々な突発天体の発見が期待され、地球接近小惑星 (Near Earth Asteroid 以下 NEA) もその一つである。

一般に NEO の観測においては星像が伸びることによる感度低下 (トレイリングロス効果) が問題となるが、CMOS センサを用いた Tomo-e Gozen の動画観測では短時間露光によりその影響を

抑えることで従来は困難であった高速移動 NEO を検出することができる。

しかし毎晩 20TB に及ぶサーベイデータから検出される移動天体候補は 100 万天体に達し、この中から目視で NEO を選択することは難しい。

NEA の発見すなわち軌道決定には、同一天体に対して 3 点以上の多点観測が必要であり、天体を見失わないための一刻も早い追観測が不可欠である。

すなわち Tomo-e Gozen サーベイデータから NEO を発見するためには、毎晩検出される 100 万天体の中から高速に真の移動天体を抽出する必要がある。

そのようなリアルタイム解析を実現するため、決定木を複数用意することで過学習を防ぐランダムフォレストアルゴリズムを用いた天体検出システムを開発した。

本システムの計算時間は移動天体検出に比べ十分短く、システム全体の処理速度に影響を及ぼさない移動天体抽出が可能となる。

また実際の観測データに対する誤検出除去率は 99.9 % を達成している。

本システムを用いたリアルタイム解析により、多数の NEO 候補天体の発見・追観測に成功し、これまでに 11 天体に仮符号が付与されている。

本講演ではランダムフォレストを用いた本機械学習モデルについての詳細と発見される NEO を用いた今後のサイエンスについて述べる。

星惑 21 原始惑星系円盤でのガス流が引き起こす高空隙ダストの自転による破壊

辰馬 未沙子 (東京大学 理学系研究科天文学専攻 D2)

惑星は原始惑星系円盤内でサブミクロンサイズのダストが成長し形成する。このダスト成長は衝突破壊により止まる可能性があり、破壊が作る破片は観測されている原始惑星系円盤内のダストサイズを説明できると考えられてきた。ここで我々は別のダスト破壊メカニズムとしてダストの自転運動による破壊を導入する。ダストの自転運動による破壊は、星間ダストに関して研究されてきた (Hoang 2019, ApJ, 876, 13)。星間空間では、ダストは大質量星などからの強い輻射圧によるトルクで自転運動し、その遠心力により破壊される。自転しているダストは整列することがわかっており、ダスト整列は原始惑星系円盤内においてもミリ波偏光観測により示唆されている。これは、原始惑星系円盤内のダストも星間ダストと同様に自転している可能性があることを示している。

そこで我々は、空隙を持つダスト集合体が自転運動により破壊されるかどうかを計算し、ダスト成長に影響を与えるかどうかを調べた。ダストの自転運動を引き起こすものとして、輻射と円盤ガス流によるトルクを考えた。さらに、ダスト集合体は定

常状態の剛体回転をすると仮定し、回転遠心力による引張応力を求めた。それを付着 N 体計算で求めたダスト集合体の引張強度 (Tatsuumi et al. 2019, ApJ, 874, 159) と比較し、自転により破壊されるかどうかを調べた。その結果、高空隙なダスト集合体が円盤のガス流によるトルクで自転し破壊されることがわかった。ダストの成長と圧縮による内部密度進化を考慮すると、ストークス数が 0.1 まで成長したダスト集合体转自転により破壊されることがわかった。

星惑 22 惑星形成における衝突破壊の再検討

河合 航佑 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M2)

惑星は固体天体が衝突をくり返し成長することで形成される。惑星形成最終期では、原始惑星は微惑星を集積し成長する。そのとき原始惑星の強い重力散乱により微惑星の衝突速度は大きくなる。その結果、微惑星同士が衝突することにより、破壊が起こる。様々なサイズの微惑星同士の衝突・破壊が次々に生じる衝突カスケードが起きることで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 (Tanaka et al. 1996)。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、惑星形成の理解に非常に重要である。

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と、総質量が 1% 以下となる様な局所破壊がある。Kobayashi & Tanaka (2010) では、衝突により生じる破片の総質量に関して破壊モデルを作り、天体のサイズ分布の導出やそれぞれの衝突が起こる頻度を考慮に入れて解析することで、局所破壊の方がより重要であることを導いた。

しかしこの破壊モデルには不確定性があり、特に小規模な衝突・破壊のシミュレーションはこれまで十分にされていない。そこで私は破壊物理の理解を深め、この破壊モデルの妥当性を確かめるために、数値計算を用いて固体天体の衝突による破壊をシミュレーションする。本講演では、研究手法の紹介や研究経過およびシミュレーション結果について議論したい。

星惑 23 原始惑星系円盤 HD 163296 のミリ波連続波観測からのダストスケールハイトの制限

土井 聖明 (総合研究大学院大学 物理科学研究科天文科学専攻 M1)

惑星は、原始惑星系円盤内でダストが合体成長を繰り返すことで形成されると考えられている。そのため、原始惑星系円盤のダスト分布の解明は、惑星形成過程の解明の手がかりとなる。近年の ALMA 望遠鏡による高解像度ミリ波観測により、多くの

原始惑星系円盤でダスト面密度はリング構造を持つことが明らかとなった。しかし、リングの形成機構や物理状態には未解明の部分が多く残されている。

本研究では、リングのダストスケールハイトに着目し、リングにおける物理状態を観測的に制限することを目指した。本研究では、まず視線方向から傾いた原始惑星系円盤のリングに着目し、ダストスケールハイトの違いが、観測される短軸上でのリングの幅と輝度に影響することを明らかにし、長短軸の輝度比を定量的に導出した。

次に実際の天体への応用として、HD 163296 の ALMA large program DSHARP によって観測された波長 1.25 mm での高解像度ダスト連続波画像と、RADMC-3D を用いた輻射シミュレーション画像を比較することで、ダストスケールハイトの制限を行った。この天体は、半径 67 au と 100 au に二つのはっきりとしたリング構造を持つことが知られており、本研究ではこの二つのリングそれぞれについてダストスケールハイトを決定した。その結果、内側 (67 au) のリングではダストスケールハイトはガススケールハイトと同程度に厚くなっているのに対し、外側 (100 au) のリングでは、ガススケールハイトの 1/10 程度まで沈殿していることが明らかとなった。この結果は、2つのリングにおいてリングの物理状態や形成機構が異なることを示唆しており、内側のリングはダストが小さい、あるいはガス乱流強度が大きい一方で、外側のリングはダストが大きい、あるいはガス乱流強度が小さいと考えられる。発表ではそれぞれのリングの形成機構についての議論も行う。

星惑 24 原始惑星の重力を考慮した原始惑星系円盤ガス流中での固体小天体集積の見積もり

岡村 達弥 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

惑星は原始惑星系円盤中で形成される。

この原始惑星系円盤は星形成に伴いつくられ、星の数 % 程度の質量で水素とヘリウムが主成分のガスがほとんどを占め、残りの 1% 程度が固体ダストでできている。ダストが集まり微惑星となった後、微惑星がさらに合体成長をくり返し惑星の姿へと進化を遂げる。

現在の惑星のような姿になる前には微惑星が集まってできた原始惑星があり、その質量が地球質量程度に成長すると重力により原始惑星系円盤のガス流に影響を及ぼす (Ormel et al. 2015)。

近年の惑星形成理論では km サイズの微惑星集積に加えて、ペブル降着モデルという cm-m サイズ粒子の降着による惑星形成が盛んに議論されている。このペブルと微惑星の違いはペブルは粒子サイズが小さいためガス抵抗を受けやすく、微惑星はペブルに比べてサイズが大きくガス抵抗を受けにくいことである。すなわち、原始惑星系円盤のガスの流れ場が惑星の成長に

影響を与える。ゆえに、ペブル降着モデルを用いて惑星の成長を研究する上で原始惑星系円盤のガスの流れ場を考慮することは極めて重要となる。

さらに原始惑星は月質量以上になると大気を持ち、大気があることで原始惑星の衝突断面積は大きくなる (Inaba & Ikoma 2003)。また、固体小天体は降着時にエネルギーを解放して熱化し大気へ影響を与えるので降着時の固体小天体のエネルギーを求めることは必須である。

そこで本研究では、原始惑星への固体小天体集積の見積もりを研究する第一歩として原始惑星周りの原始惑星系円盤のガスの流れ場を得るために3次元流体計算を行い、得たガスの流れ場を考慮して粒子の軌道計算を行ったのでその研究手法、結果について議論する。

星惑 25 IRD-SSP による M 型星周りの惑星検出に向けた視線速度測定 of 安定性向上について

笠木 結 (総合研究大学院大学 物理科学研究科天文科学専攻 M2)

現在までに 4000 以上の系外惑星が見つかっており、地球のような低質量惑星も普遍的な存在であることが明らかになってきた。太陽よりも軽く、銀河系内に最も多く存在する M 型星の周りには、低質量の惑星が多く存在することがわかっており、近年 M 型星をターゲットとした系外惑星探査が注目されている。M 型星は軽い惑星に対しても比較的大きな視線速度変動が生じるため、視線速度法を用いた探査に適したターゲットでもある。ハビタブルゾーン内に位置する地球質量惑星は、将来の大型望遠鏡で特徴付けを行う重要な候補となるはずである。またその発見は、天文の分野を越えて地球外生命に対する議論を深める要因として重要な役割を担っている。

現在、すばる望遠鏡赤外線ドップラー装置 (InfraRed Doppler: IRD) を用いた系外惑星探査が、すばる戦略性観測 (SSP) として行われている。これは恒星活動が穏やかな、中期～晩期 M 型星をターゲットとした 5 年間のサーベイである。M 型星は近赤外線で見えるため、この波長帯で高い精度を達成できることが示されている一方で、実際の観測では、視線速度測定の安定性が様々な要因によって制限されており、低質量惑星の検出を妨げている。それぞれのノイズ源がどの程度影響を与えているかを見積もり、後処理によって補正することで、理論的な限界精度まで安定性を近づけることが本研究の最終的な目標である。

本講演では、IRD-SSP による近赤外線視線速度法を用いた系外惑星探査について紹介する。また、視線速度測定に影響を与えるノイズ源について、検出器モデルによるシミュレーションや、実際の観測スペクトルを用いてその影響を評価した。その結果と後処理による補正法の可能性について報告する。

星惑 26 惑星ドック：太陽系外惑星を CT スキャンし世界地図を描く

桑田 敦基 (東京大学 大学院理学系研究科天文学専攻 M2)

太陽系外惑星科学の究極の目標の一つは、生命を検出し太陽系外に居住可能な環境を特徴づけることである。1995 年に太陽型恒星の周りに初めて太陽系外惑星が発見されて以来、4000 個以上の太陽系外惑星が発見され、生命が存在できるかもしれない惑星候補まで発見されている。そのような生命がいるかもしれない太陽系外惑星表面の環境の理解は、地球において大陸と海が存在が生命にとって重要な役割を果たしていることから、生命探査において重要である。太陽系外惑星観測を主導してきたドップラー法やトランジット法などの恒星を観測することで惑星のシグナルを検出する「間接観測」に対し、系外惑星そのものを観測する「直接観測」も 2004 年頃から急速に発展してきたが、10pc の距離から地球を観測したとしても見かけの直径は 10 マイクロ秒角となり、地球型惑星の直接観測は点を観測しているのに他ならない。よって、もし地球型惑星が直接発見されたとしても、その小ささにより惑星表面の様子を直接見ることは不可能である。しかし、惑星を空間分解できない場合でも、CT (Computed Tomography) スキャンにより人体を切断せず体内の断面図を得るように、惑星の光度変動から惑星表面の二次元情報を得る方法「Spin-Orbit Tomography (SOT)」が開発されてきた (Kawahara & Fujii 2010, 2011; Fujii & Kawahara 2012)。SOT は宇宙気象観測衛星 DSCOVR による地球の観測データなどに適用され、実際に大陸を空間分解することが可能になってきている。本講演では、SOT へのスパースモデリングおよび非負値行列因子分解の導入とその結果をまとめて報告する。

星惑 27 バイナリーレンズにおける重力マイクロレンズ法による太陽系外惑星の電波放射観測

赤木 晋 (熊本大学 自然科学教育部理学専攻物理科学コース M1)

太陽系のいくつかの惑星は磁場を持ち太陽風や衛星との相互作用により電波放射をすることが知られており、他の惑星系についてもアナロジーから同様の系外惑星の存在が考慮できる。特に短軌道を周回する巨大惑星、ホットジュピターが磁気圏を有する場合、恒星風のエネルギー流入量が多いため、主星よりも強力な電波放射源になると期待されている。また電波放射から磁場強度が推定可能なため惑星の内部構造や物理的性質の情報が得られるという利点がある。しかし、今日に至るまで系外惑星からの電波放射は検出されていない。

遠方天体からの光が一般相対論に基づく重力場による湾曲を受けた場合その天体の多重像を観測できることがあり、これら像の強度の総和が光源の増光として観測される。先行研究では

この重力マイクロレンズ現象による増光を系外惑星からの電波放射を光源に応用することで電波検出する系外惑星探査の手法が考案された。主星の周りを公転する惑星を考えた場合主星の移動に伴いサイクロイド曲線のような軌跡でレンズ星の背後を通過する。この軌跡を元に電波放射の増光シミュレーションを行い、増光率の周期的な変化を明らかにした。また、この特徴は惑星電波放射の同定に有効であることを示した。

この結果はシングルレンズについてであるが、実際はレンズ星が n 重連星である場合も考えられる。特にバイナリーレンズは重力マイクロレンズ現象全体の約 10 % を占めており無視できない要素であり、本研究ではバイナリーレンズにおいてホットジュピターがどのように増光するかを考察し、電波放射の増光シミュレーションを行うことで惑星電波放射の検出の判断となる根拠を検討する。

1. Zarka, P. 2007, Planet. Space Sci., 55, 598-617
2. Paczyński, B. 1996, ARA&A., 34, 419
3. Shiohira et al. 2020, MNRAS, 495, 1934-1942
4. Mao & Paczyński, 1991, ApJ, 374, L37-L40

星惑 28 短周期 super-Earth の大気散逸による軌道進化

藤田 菜穂 (京都大学 理学研究科宇宙物理学教室 M1)

近年 Kepler 宇宙望遠鏡などの活躍によって系外惑星探査が大きく進展し、数多くの系外惑星が発見されてきた。中でも super-Earth の発見数は飛躍的に増加しており、系外惑星の大多数を占めるのは super-Earth であるということが明らかになった。観測から推定された super-Earth の大気量は分厚い大気を持つものからほとんど大気を持たないものまで様々であり、複数惑星系の場合の軌道分布も系によって様々である。このように super-Earth はその大気量や軌道半径において非常に多様性に富んでいるが、その多様性の起源は明らかになっていない。

ただし、特に中心星近傍を回る短周期 super-Earth では、原始惑星系円盤散逸直後の状態を現在も維持しているとは考えにくい。短周期 super-Earth は、中心星からの強力な X 線、EUV 照射による大気の流体力学的散逸を経験して現在の大気量になっているはずである。この大気散逸については今までにも多くの研究がなされている。しかし、中心星-惑星系全体の軌道角運動量保存を考慮すると、実際には大気散逸のみではなく、大気散逸による質量損失に伴って惑星が外側に移動するという軌道進化も起こっていると考えられる。

本研究では super-Earth 系の多様性の起源を探ることを目的とし、様々な初期条件において惑星大気の流体力学的散逸に伴う軌道進化を見積もった。その際、中心星の光度進化や惑星の熱進化なども考慮し、惑星の大気散逸と軌道進化についての計算を同時に行った。計算の結果、惑星は予想通り外側に

移動することが分かり、このような軌道進化は軌道間隔の狭い密集 super-Earth 系では特に重要になってくるであろうという示唆が得られた。また今後は観測によって M 型星周りの super-Earth が多数発見されることが期待されるため、本研究はそのような観測に先駆けた理論的な予測となると考えられる。さらに、将来的には観測データと計算結果を比較することで、この理論モデルを再検証することが可能になる。本講演ではこのような今後の系外惑星探査との関連についても議論したい。