
星・惑星形成 アブストラクト集
2022年度 第52回 天文・天体物理若手夏の学校

細川隆史（京都大学 天体核研究室 准教授）

High-mass star formation across the cosmic time

太陽のおよそ 10 倍以上の質量を持つ恒星、大質量星は宇宙史のどの段階においても多様で重要な役割を演じてきた。近傍宇宙では数の上では少数派だが、特に銀河スケールの星形成を考える上ではフィードバックの観点から支配的である。一方、重元素量の極めて少ない初期宇宙では現在の標準的な理解では数の上でも多数派となり、初代銀河形成、巨大ブラックホールの起源、宇宙再電離など種々の問題と深く関わっている。さらに最近では重力波源天体の progenitor となる点でも脚光を浴びている。これら大質量星、あるいはそれらを多く含む星団がどのように誕生するか、また宇宙の歴史上でその形成過程がどのように進化してきたか、は重要な問題であり活発に研究が繰り返されている。本講演ではこの問題についての、特に理論研究の観点からのこれまでの進展と現在の標準的理解、そしてこれからの展望について述べる。銀河系での OB 型星形成、初期宇宙でのいわゆる初代星形成、さらにその中間的な極めて重元素量が低い場合など多様な星形成環境での大質量星形成を概観し、包括的な描像を与えたい。

藤井悠里（京都大学 人間・環境学研究科 助教）

神話通りの衛星形成シナリオ!? 天文学 × 人文学のいろいろ

太陽系には多種多様な衛星があり、また太陽系外にも衛星の候補天体が発見されつつある。これらの中でも、特に大きなもの—土星の衛星タイタンや木星の衛星ガニメデは水星よりも大きい—は周惑星円盤の中で形成されたと考えられている。周惑星円盤とは、原始惑星系円盤中でのガス惑星の集積に伴い、文字通り、その惑星の周りに形成される円盤状天体である。本講演では、周惑星円盤の形成とそこでの衛星形成について論ずる。とりわけ、形成された衛星が次々と土星に飲み込まれる様は、生まれた子を次々と飲み込むクロノスの神話と（たまたまではあるが）重なる。

衛星形成の理論研究に加え、天文学と人文学のコラボレーション研究についても紹介する。古典文献の天文学への応用—藤原定家の明月記に記された超新星の爆発は有名である—や天文学的考察が歴史解釈に与える影響の例について触れ、学際研究の面白さを共有したい。

若い星状天体の円盤、アウトフロー、磁場の初期進化とダストモデルの違いによる影響 赤池 祐貴 (九州大学 惑星系形成進化学研究分野 修士1年)

低質量の若い星状天体 (young stellar objects, 以下 YSOs) の形成や時間発展を、3次元の非理想磁気流体シミュレーションを用いて調べられている。

本研究では、YSOs の質量が $0.1M_{\odot}$ に達した、原始星形成後の 10^4 年までの時間発展による物理現象を調べている。特にダストサイズの違いによる影響に着目し、5つのモデルを比較していく。結果、どのダストモデルでも、星周円盤は形成されることがわかった。円盤は原始星形成時には約 10AU、 10^4 年後には数十 AU にまで達し、円盤質量は中心星質量に匹敵すること、重力不安定性が成長していることがわかった。更に、小さいダストモデルのシミュレーションにおいて、 10^4 年後 pseudodisk の揺らぎの成長していることがわかった。この揺らぎは、円盤の磁気制動を強める働きを持ち、円盤のサイズは小さくなる。Ion-neutral drift はダストサイズ $\geq 0.2\mu\text{m}$ 、 $M \geq M_{\odot}$ でエンベロープ内で発生しうることを見つけた。アウトフローは、ダストのサイズと反相関を示し、大きいダストサイズでは弱いアウトフロー、小さいダストサイズでは強いアウトフローを出すことを確認した。

今回の発表では、Tsukamoto2020 をレビューし、各天体现象と揺らぎについての問題を議論する。

1. Tsukamoto, Y., Machida, M. N., Susa, H., Nomura, H., Inutsuka, S. 2020, ApJ, 896, 158

Corona Australis 分子雲 IRS7 領域における分子雲コアの性質と星団形成 深谷 直史 (名古屋大学 M1)

小質量星形成のモードには孤立した星形成と星団形成があるが、星団形成においてどのように高密度コアが形成されるかはわかっていない。我々は星団形成領域における小質量星形成の初期条件の理解を目的として、最近傍 ($d = 149$ pc) の活発な小質量星団形成領域である Corona Australis 分子雲を対象とした ALMA データの解析を進めている。ACA を用いた観測 (2018.A.00056.S, 分解能 $\sim 5''.8$) では、幅 ~ 0.1 pc のフィラメント構造の内部により密度の高い幅 $\lesssim 0.02$ pc のサブフィラメントが多数存在することを確認した (Nishioka et al. in prep.)。本研究ではその中でも特に高密度な領域である IRS7 領域に対する 12m array による観測データ (2019.1.01792.S, 分解能 $\sim 0''.9$) を解析している。

今回 IRS7 領域の 1.3mm 連続波と C^{18}O ($J=2-1$) に関して解析した結果を紹介する。まず、連続波点源を 5つ同定した。これらのうち 1つは対応する赤外線源がない若い class 0 原始星、3つは冷たい SED を持つ class 0/I 天体と考えられ、残り 1つは対応天体がなく新検出である。また、点源を繋ぐ弱く広がった連続波放射も見られた。一方 C^{18}O の強度分布から、連続波放射に沿ってフィラメント状に広がった構造と、その中に埋もれた数 100 AU 程度の C^{18}O クランプが 10 個程度検出された。これらのクランプおよび連続波点源は 1000 AU ほどの間隔でフィラメント内部に分布していた。 C^{18}O イメージに対してピークの半値を境界とし広がった連続波放射と C^{18}O が一致するものをコアと定義し、連続波点源の付随から星ありコアを 3 個、星なしコアを 2 個同定し

た。広がった連続波放射から導出したコアの物理量は柱密度 $\sim 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ 、密度 $\sim 10^7 \text{ cm}^{-3}$ 、質量 $\sim 0.01 M_{\odot}$ であり、これらは C^{18}O から求めたものとはほぼ同程度であった。これらの結果は分子雲中で多数形成された高密度フィラメントが短い波長 (1000 AU 程度) で星形成に直結する微小コアに分裂し星団形成に至ることを示す。

太陽系外惑星の天気の調査

平野 佑弥 (兵庫県立大学 理学研究科 光学赤外線天文学研究室 D1)

太陽系外惑星に大気が存在する場合、トランジット観測で求められる惑星の半径は分子や原子の吸収により波長によって異なる場合がある。近赤外領域には大気分子の振動遷移による大きな吸収が見られ、多波長で太陽系外惑星の半径の波長依存性を調べることで大気組成の推定ができる。しかし惑星の半径が観測された約 4000 天体のうち、大気組成の推定が行われた惑星は約 100 天体しかない。

そこで 2020 年から 2021 年の期間に西はりま天文台なゆた望遠鏡に搭載された近赤外撮像装置 NIC を用いて、複数の太陽系外惑星の近赤外トランジット測光観測を行った。観測で得られた相対フラックスから惑星の半径を求め、惑星大気モデルの半径と比較することで惑星の大気を推定した。観測した惑星のうち XO-2N b は CH_4 の大気、Qatar1 b は CO_2 の大気を持つ可能性があることがわかった。しかし先行研究では 2011 年から 2012 年の観測で、Qatar1 b は可視光領域で大気モデルより約 30% 大きな惑星半径を示している [1]。

我々はヘイズ粒子や雲の量が変化したために、同じ波長でも惑星半径が異なって観測されたのではないかと考えた。そこで本研究では西はりま天文台のなゆた望遠鏡と 60 cm 望遠鏡を用いて惑星半径の変動を捉え、太陽系外惑星の天気を観測する。本講演では、先行研究と本研究の観測・解析結果を合わせて、太陽系外惑星の天気の変動の可能性について議論する。

1. E Covino, M Esposito, M Barbieri, L Mancini, V Nascimbeni, R Claudi, S Desidera, R Gratton, A.F. Lanza, A Sozzetti, et al., *Astronomy & Astrophysics*, Vol. 554, p. A28, 2013

近接遭遇による惑星系の軌道進化と AMD を用いた安定性評価

神原 祐樹 (東京大学 修士 1 年)

現在の惑星形成モデルでは、ガス惑星は主星から離れた領域で形成されたと考えられている。しかし系外惑星の観測により、軌道長半径が 0.1 au 程度より短いガス惑星であるホットジュピターも見つかった。ホットジュピターは外側で形成したガス惑星が主星の近くまで移動したものと解釈されている。移動モデルの一つに、離心率の大きいガス惑星が、潮汐によりエネルギーを失い、軌道が小さくなったとするモデルがある。惑星形成時には離心率が小さかったと考えられているため、このモデルによる HJ 形成のためには離心率を大きくする必要がある。離心率を大きくするメカニズムとして、周囲の恒星との近接遭遇による摂動と、摂動を受けた後の惑星間の相互作用が考えられている [1]。

惑星系の軌道進化を調べるためには、軌道の長期的な安定性を調べるのが重要になる。軌道

の安定性を評価する方法として、Angular Momentum Deficit (AMD) を用いる方法が存在する [2]。この手法では、AMD の閾値を決定して、それより大きければ不安定、小さければ安定だとして軌道の安定性を評価している。

本研究では、恒星との近接遭遇により摂動を受けた惑星系がその後どのような軌道進化をするかについて、数値シミュレーションを行って検証した。さらに、AMD を用いた軌道の安定性評価法を発展させることで、軌道進化の可能性を AMD 量によって評価する方法を提案する。この結果を惑星系のシミュレーションと組み合わせることで、ホットジュピターの形成確率の計算が可能になる。

1. Yi-Han Wang, Rosalba Perna, Nathan W C Leigh, Michael M Shara, MNRAS, 509, 5253-5264, 2022
2. Lascar, J., Petit, A. C., A&A, 605, A72, 2017

SETI につながる月面反射電波観測

上内 雅暁 (熊本大学院 自然科学教育部 理学専攻 物理学コース 修士 1 年)

我々人類のような知的生命は、地球以外の惑星に存在するのだろうか。知的生命が存在すれば、その惑星には文明が存在し人工電波を発信している可能性がある。地球外知的生命探査 (SETI) の中で最も大規模に行われている方法は、電波を地球上の電波望遠鏡で受信し、それを解析することで地球外知的生命から発信されたものを探査するというものである。

しかしながら、地球外文明が放出される人工電波の特徴は未知である。そのため、まずは知的生命が存在する惑星からの人工電波をどのように観測し、解析すれば検出できるかを検証する必要がある。月面反射電波観測はその 1 つで、これは現時点で唯一知的生命の存在が知られている地球からの人工電波のうち、月に反射して戻ってきた月面反射人工電波を電波望遠鏡で観測するという手法である。それを疑似的に知的生命が存在する惑星からの人工電波とみなすことで、知的生命から放射された人工電波の観測につなげていく。

本研究で観測する人工電波には、月面で反射して戻ってきた人工電波と望遠鏡に直接入射する人工電波の 2 種類があるが、両者を区別することは難しい。そのため、月面方向 (on-moon) と月面以外の方向 (off-moon) から検出される人工電波強度の差を取れば月面反射人工電波のみを検出することができる。今回用いるデータは水沢 VLBI 観測所で 2 日間観測を行い得られた人工電波である。現在、1 日目のデータを解析中でこの日は K-band で観測した。on-moon と off-moon を同時に観測し、それぞれを 1 μ 秒で時間積分しデータを解析した。その差を図示することで月面反射人工電波の有無を探る。

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

トランジット測光による系外惑星 KELT-9 b のスピン傾斜角の推定

河合 優悟 (東京大学 総合文化研究科広域科学専攻 M1)

惑星はどのように形成されるのか。天文学はこの謎を解明するため、これまで5,000個以上の惑星を太陽系の外に発見してきた。観測技術の進歩によりこれらの惑星の詳細な調査が可能となり、惑星の形成や進化の歴史を解明する手がかりが得られるようになった。中でも、主星の自転軸に対する惑星の公転軸の傾きである「スピン傾斜角」は、惑星が形成時に受けた力学的な影響の情報を保存している。この情報から、「どのような惑星は軌道がズレるのか」を紐解くことができ、これは惑星の軌道が進化する仕組みの解明につながる。

これまでの研究から、主星の温度が約6,250K以下(低温星)の系ではスピン傾斜角は0度に近いことがわかっている。[1]これは、低温星は表面に対流層を持ち、その対流層と惑星の潮汐の相互作用により時間とともに軌道が揃ってしまうためであると考えられている。反対に、表面に対流層を持たない6,250K以上(高温星)の系では、惑星の形成時の軌道の情報が揃うことなく残っている。その例として、高温星まわりでは、主星の北極と南極を通過する極軌道や、主星の自転方向と反対の逆行軌道の惑星が観測されている。[2]

本研究では、高温星まわりの系外惑星 KELT-9 b のスピン傾斜角を $84^\circ \pm 1^\circ$ と推定した。太陽系惑星のスピン傾斜角は全て 10° 程度であるため、KELT-9b の極軌道は、太陽系惑星とは全く異なる形成や軌道進化の過程を示唆している。推定には、トランジット測光と呼ばれる手法を採用した。トランジットとは、惑星が主星の前を通ることを指す。このときの主星の明るさを観測(測光)すると、惑星が隠すぶん主星は暗くなって見える。このときの観測データの形状から、スピン傾斜角を推定することができる。本講演では、この推定手法及び結果の報告に加え、KELT-9b について考えられる形成、軌道進化のシナリオについて議論する。

1. Albrecht et al. ApJL, 916, L1, 2021
2. Narita et al. PASJ, 61, L35, 2009

星間衝撃波により形成されるフィラメント状分子雲の化学進化

小道 雄斗 (東京大学理学系研究科天文学専攻 M1)

分子雲では100種以上の分子種が検出されており、各分子の存在度は分子雲の物理化学状態を反映する。よって、分子雲の形成・成長過程をその化学組成を含めて理解することは、星形成過程における物質進化プロセスの解明に繋がる。

星間分子の形成過程は、分子雲での典型的な物理パラメータ(密度・温度・ A_V)の下で化学反応ネットワークを計算する疑似進化モデルで調べられてきた[1]。疑似進化モデルは、分子雲での非平衡な組成進化を明らかにしてきた。しかし、このモデルでは、物理パラメータは一定で、初期のガス組成は水素のみ分子としその他は全て原子と仮定している。実際の分子雲は、水素原子ガスから非定常な物理的成長過程を経て形成されることから、疑似進化モデルは過度に単純化されている。

一方、分子雲の形成・成長過程については、星間衝撃波に伴う原子ガスの圧縮によるフィラメン

ト状分子雲形成が注目されている [2]。フィラメントの形成・成長過程は、3次元磁気流体計算により近年盛んに研究されている。しかし、このような計算では C^+ や CO 等のガス冷却に効く必要最低限の原子・分子に絞って単純化された化学モデルが用いられており、より複雑な分子の生成過程を考慮するに至っていない。

以上を受けて、本研究では、まず3次元磁気流体計算によりフィラメントの形成・進化過程を再現した。そして、計算したフィラメントにおけるガスの流れを解析し、定常流を仮定した詳細な化学反応ネットワーク計算を行った。

結果、フィラメントの分裂による分子雲コア形成を経験した流体素片のもつ氷の組成は、原始星観測で得られた結果と整合的であった。ガス組成については、TMC-1 や L134N といった近傍分子雲の平均的な組成と比較したところ、単純な2原子分子等は観測と整合的であったが、炭素鎖分子の存在度は観測を桁で下回った。これは従来の疑似進化モデルと異なる傾向であり、組成進化を考える上で分子雲の形成・物理進化を考慮することの重要性を示唆する。

1. Harada et al., ApJ, 871, 238, 2019
2. Inutsuka et al., A&A, 580, A49, 2015

微惑星衝突に伴う固体蒸発量とその状態方程式依存性 宮山 隆志 (名古屋大学 M2)

惑星は衝突合体を繰り返しながら成長すると考えられているため、惑星形成過程において天体衝突は普遍的な現象である。中でも、高速度の衝突による温度上昇は物質の蒸発を引き起こす。さらに蒸発が生じる基準は物質によって異なるため、衝突蒸発によって惑星の組成編成を引き起こす現象である。つまり衝突蒸発現象の理解は、多種多様な惑星の起源を解明する物理的素過程として重要である。そこで本研究では数値シミュレーションを用いて、天体衝突による蒸発計算を行い、蒸発現象についての理論的な解明を行う。衝突によって生じた圧縮波の伝搬速度が物質の音速を超える様な場合は、衝撃波が発生し、不可逆的な加熱圧縮によりエントロピーの上昇を引き起こす。衝撃波によって加熱圧縮された物質は熱力学第一法則に従い、等エントロピー的な膨張によって急速に冷えていく。つまり衝撃圧縮によって、物質の沸点を超えるようなエントロピーの上昇が引き起こされた場合には物質の蒸発が生じる (Ahrens & O'Keefe 1972)。したがって、衝突によって生じた衝撃波が引き起こすエントロピーの増加を求める事によって蒸発量を求めることができる。しかし、その蒸発量は用いる状態方程式に依存することが知られている。そこで蒸発を適切に評価するために、最低限の物理を失わず、なおかつ高速計算に適用可能な状態方程式が必要とされる。本研究ではまず、惑星衝突分野で広く用いられている Tillotson EOS (Tillotson 1962) のパラメータ改善を行い、衝突蒸発シミュレーションをおこなった。その上で、より洗練された状態方程式である ANEOS (Thompson & Lauson 1972) を用いて衝突蒸発シミュレーションを行ない、結果の比較をおこなった。その結果、Tillotson EOS による計算結果が、ANEOS による結果と整合的であることが確認できた。

SPH 法におけるシア問題の解決へ向けて

櫻井 雄太 (名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M2)

惑星形成の舞台である原始惑星系円盤等の形成・進化の研究には流体力学的数値計算が有効である。そのような計算法の一つである SPH 法は流体を Lagrange 的に記述するため、粒子の持つ物理量が時間発展させても完全に保存されるというメリットがある。しかし、音速が円盤回転速度に比べてはるかに小さい原始惑星系円盤など、「冷たいシア流」が重要となる流体の数値計算を限られた粒子数で行うと、粒子が近づきすぎてしまい、非物理的な密度誤差が発生して精度良く計算できないという問題（シア問題）がある。

シア問題の解決策として、密度が非一様な流体計算において SPH 法を再定式化し、流体要素の速度と SPH 粒子の速度を区別する方法が提案されている [1][2]。ただ、この方法は角運動量、運動量を厳密に保存するように定式化されておらず、さらに、計算コストが高いという課題がある。

本研究では2つの解決法に取り組んだ。一つはカーネル関数のスムージング長を平均粒子間隔より大きく設定することで、シア流によって生じた密度誤差をならすという方法である。この方法は密度誤差を幾分か減少させるため有効であるが、大きく減らすまでには至らないことがわかった。

もう一つの方法はシア流によって粒子間距離が平均粒子間隔よりかなり小さくなった時に圧力勾配力を大きく増やし、粒子同士の反発力を補うという方法である。しかし、この圧力勾配力を増やすという操作は、圧力を上げる（ \equiv 温度を高くする）ことに対応しているため、本来見たい現象に影響を与える可能性がある。そこで、この手法を用いたときの音波の伝搬を測定することによって、この方法の妥当性を吟味した。この結果をもとに今後の研究の可能性についても議論する。

1. Imaeda & Inutsuka 2002, ApJ, 569, 501
2. Inayoshi 2019, 名古屋大学・修士論文

SPH 法の不連続面における密度計算法の開発

瀬野 泉美 (名古屋大学大学院 理学研究科 理学専攻 M1)

星形成や惑星形成、原始惑星系円盤といった宇宙の多くの現象は流体力学によって記述される。しかし、流体力学の基礎方程式は解析的に解けない複雑な流体現象の解析の際は、空間的・時間的に離散化して近似解を求める数値流体計算法がよく用いられている。

SPH 法とは、ある時刻で有限の大きさに離散化した流体粒子を流体に乗った座標系（Lagrange 系）で追跡する数値流体計算法の一つで、宇宙物理学の分野で非常に幅広く使われている。SPH 法における最大の特徴は、密度を離散化した粒子の質量と Kernel 関数の足し合わせで表現していることである。Kernel 関数とは規格化条件や無限遠での収束条件、対称性の性質を持ったベル型関数のことで、離散化した粒子の位置と広がりを持っている。Kernel 関数は種々なものが用いられているが、本研究では Gaussian を用いる。一般的に粒子の広がりやスムージング長と呼ばれ、空間的に可変的な量で、その大きさは粒子間隔程度が良いとされている。

本講演では、可変スムージング長の考えから、拡張される密度定義式のうち単純な2つの方法 Scatter 法と Gather 法について詳細に再検討する。具体的には、手法による差が顕著に現れる密度が急激に変化する不連続面付近での計算を行い、理論的な考察を行う。さらに、不連続面付近の密度計算について新手法を提案し、改善の見られた結果についても発表する。

スパースモデリング (SpM) による超解像度画像解析 所司 歩夢 (九州大学理学府地球惑星科学専攻 M1)

Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) の観測によって、近傍の小質量星形成領域にはダスト半径 r がおよそ 20 – 40au 以下のコンパクトな原始惑星円盤が多く存在することが明らかとなった。しかしながら、従来の CLEAN による解析はこれ以上空間分解能を上げることが難しいため、そのサブストラクチャーは調査されていなかった。Yamaguchi et al. の新しく開発された画像解析技術であるスパースモデリング (SpM) を利用して、数 au のスケール構造を調べた。SpM 画像解析は空間周波数における不完全なビジビリティデータを復元し、ALMA 望遠鏡画像でより空間分解能を達成することができる。この論文では T Tau 星系へ SpM を応用した結果を紹介している。ALMA 望遠鏡の 1.3mm 連続波データを使用して、17au の解像度で従来の CLEAN ビームサイズと比較して 30% (5au) の効果的な空間分解能を実現する可能である。より高い分解能を達成した結果、ダスト半径 $r = 24$ au の T Tau N コンパクト円盤に $r = 12$ au の新しい環状ギャップ構造が存在し、T Tau Sa と Sb の2つの放射源に分解することができた。

今回の発表では Yamaguchi et al. のレビューと共に、先行研究 J.Encalada et al.2021 でバイナリであることが報告されている Oph_emb_10 に SpM を適用した結果を紹介し、今後の展望を議論したい。

1. Masahiro Yamaguchi et al. 2021
2. Frankie J.Encalada et al. 2021

大マゼラン雲における O 型星アソシエーションと Hi 及び CO 分布の比較 玉城 磨生 (名古屋大学 博士前期過程 1 年)

大質量星、特に質量 $\gtrsim 20M_{\odot}$ の O 型星は、紫外線放射や恒星風などにより周囲の星間物質に多大な影響を及ぼす。しかし、その形成機構は明らかではない。大マゼラン雲 (LMC) 小マゼラン雲との潮汐相互作用を起源とする Hi の衝突が大質量星団の形成を誘発したとのシナリオが提案されている [1, 2]。しかし LMC における大質量星のサーベイは限定的である。これまでの最も包括的なカタログ [4] は、限られた領域に対する分光観測をまとめたもので、不均一なサンプルであり統計的な研究には不適である。

そこで我々は、[5] による LMC 全面での *UBV* 測光データを元に O 型星候補天体の同定を試みた。[3] の O 型主系列星のカラーのテーブルを参照し、[6] で得られた近赤外減光マップから星間赤化を考慮した結果、O 型星候補天体を 1100 個同定した。これら O 型星候補天体の分布は不均一

で、グループを形成して存在している傾向が見られた。ここで、それぞれのグループを星団と考え、それぞれの星団の物理情報を得るために近赤外減光マップの分解能である $24 \text{ kpc pixel}^{-1}$ に含まれる天体数から、面密度の Fits 画像を作成した。その Fits 画像に対して Dendrogram [7] を用いることで 73 個の星団候補を同定した。1 つの星団は平均で $4 \times 10^3 \text{ kpc}^2$ の広がりを持ち、約 8.3 個の O 型星候補天体が含まれていた。同定された星団は H α や CO の強度が強い領域に多く分布する傾向があり、stellar bar にはほとんど存在しなかった。また、衝突により減速されたと考えられる H α の中間速度成分 [8] の分布とは良い一致を示した。さらに、得られた星団の物理情報から星団形成のシナリオも考察する。

1. Fukui et al, PASJ, 269, 5, 2017
2. Tsuge et al, Apj, 871, 44, 2019
3. Pecaut et al, ApJS, 208, 9, 2013
4. Bonanos et al, AJ, 138, 1003, 2009
5. Zaritsky et al., AJ, 128, 1606, 2004
6. Furuta et al, PASJ, 74, 639, 2022
7. Rosolowsky et al, Apj, 679, 1338, 2008
8. Tsuge et al, arXiv e-prints, 2020

太陽系外惑星 TrES-1b の多波長トランジット観測

植野 雅々 (兵庫県立大学 理学研究科 光学赤外線天文学研究室 M2)

1995 年に Mayor と Queloz が 51Peg の周りを周回する惑星 51Peg b の発見して以来、様々な方法で系外惑星の研究が続けられており、現在 5000 個以上の系外惑星が発見されている。主星近傍を公転するガス惑星のホットジュピターや地球質量の約数倍の質量を持つ岩石惑星のスーパーアースなど多様な惑星がある。惑星を検出する方法の一つにトランジット法がある。トランジット法は、系外惑星が主星を隠すときに起こる、主星のわずかな減光を検出することで系外惑星を観測する。系外惑星が大気を持っている場合、トランジット中に主星の光の一部が惑星の上層大気を通過し、原子・分子によって吸収されることがあり、波長によってわずかにトランジットの深さを変化させる。

本研究では、西はりま天文台なゆた望遠鏡に搭載された近赤外撮像装置 NIC を用いて観測を行った。TrES-1(半径 0.85 太陽半径、質量 0.88 太陽質量、有効温度 5250 K) の周りを公転する TrES-1b の観測結果を報告する。TrES-1b は、半径 1.1 木星半径、質量 0.76 木星質量、公転周期 3.03 日のホットジュピターである。NIC は J バンド (中心波長 1.25 μm)、H バンド (1.63 μm)、Ks バンド (2.14 μm) を同時に観測することができる。近赤外線の波長領域 (0.8~5.0 μm) には分子の吸収が多く、惑星の大気成分の特徴を検討するにはよい波長範囲である。波長ごとの主星と惑星の半径比を比較することで、惑星の大気特性について検討した。取得した画像は画像処理ソフト IRAF で処理・解析を行い、EXOFAST を用いて光度曲線を求めた。

木星の氷微惑星散乱による雪線内側への水供給についての理論的研究

安田 郁斗 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M2)

地球は生命を育む水惑星であるが、海洋の質量は全地球質量の 0.02%程度と、地球の水含有率は非常に低い。つまり地球は氷を集積しない雪線の内側で形成され、形成後に少量の水が供給されたと考えるのが自然である。リュウグウをはじめとする C 型小惑星は水を多く含んでいたと考えられており、はやぶさ 2 ミッションの成果からも、木星や土星よりも外側で形成し、小惑星帯そして、地球近傍へと移動したことが示唆されている。氷微惑星の移動は木星形成後に期待される。木星形成直後には、固体核材料である氷微惑星とガス集積を可能にするガス円盤が残っていると考えられる。従ってガス集積した木星の強い重力により微惑星は太陽系の内側にも外側にも散乱され、原始惑星系円盤によるガス抵抗で軌道が安定化する。先行研究ではこうしたプロセスで、小惑星帯への微惑星輸送と地球への水供給の可能性が示唆された (Raymond & Izidoro 2017) が、初期条件や仮定への依存性が強いとも考えられるため、本研究では輸送過程を解析することで、輸送のパラメータ依存性などを知り、輸送メカニズムを明らかにすることを目指す。N 体シミュレーションにより、ガス抵抗を考慮した制限三体問題として木星と微惑星の軌道進化を計算し、様々な解析を行う。今回は軌道進化を遠日点距離の変化で見ることで、内側への重力散乱では遠日点距離がほとんど変化しないが、ガス抵抗により遠日点が木星軌道から離れて安定軌道を取ることを明らかにした。こうした軌道の定性的な進化や今後の展望についても議論する。

分子ガス同位体比の新しい測定手法を用いた TW Hya 円盤における不均一な $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比の発見

吉田 有宏 (総合研究大学院大学/国立天文台 M2)

星間空間から惑星系へ至る物質進化を探るうえで、同位体組成は強力なトレーサーである。特に、惑星形成の現場である原始惑星系円盤 (以下、円盤) における同位体組成を観測的に調べることには大きな意義がある。しかし円盤の分子ガス輝線では、豊富な同位体種はしばしば光学的に厚く、希少な同位体種は検出が難しいために、同位体組成の測定は容易ではない。

本研究では、電波干渉計を用いて円盤における同位体組成をモデル非依存に測定する新たな手法を開発した。輝線は熱運動により拡がりを持つため、光学的に厚い線中心ではなく、光学的に薄い「すそ」の部分を用いることで同位体柱密度比を導出できる。我々は、この考えを定式化し、現実的なモデルを用いて正しい値が得られることを確認した。さらに、本手法を TW Hya 円盤における $^{12}\text{CO } J=3-2$, $^{13}\text{CO } J=3-2$ 輝線の ALMA 観測アーカイブデータに適用し、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比を測定した。その結果、中心星から 100 au 以内の領域では、 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比は星間空間の平均値の約 0.3 倍に減少していることがわかった。このメカニズムとしては、気相の炭素-酸素比が 1 よりも大きい環境下で、炭素イオンと CO 間の同位体交換反応が進んだことが考えられる。また、100 au 以遠の領域では、1.2 倍かそれ以上に増大していることが示唆された。これは、CO ガスの凍結と、氷からの脱離エネルギーが同位体間で微小に違うことにより説明できる。太陽系では炭素同位体比 $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ は場所によらずほぼ一定であるとされており、単一の円盤で 4 倍以上に及ぶ同位体組成の

変化が見られたことは、そこで形成される天体の組成を考える上でも興味深い。

原始惑星系円盤の外側の領域における弱い乱流の起源

下川 貴史 (九州大学 M1)

原始惑星系円盤における角運動量輸送の仕組み、そしてこの輸送に伴い乱流が発生するかは惑星形成において非常に重要な問題である。角運動量輸送の機構としては MRI, Magnetic wind による機構が考えられている。MRI (Balbus & Hawley 1998) では、非理想磁気流体の効果を検討すると mid-plane では乱流はほとんど発生しないものの (Simon et al 2013a, 2013b), 円盤の外縁部では MRI による乱流が発生する (Simon et al 2013)。また Magnetic wind (Suzuki & Inutsuka 2009) によっても角運動量が著しく失われることがわかっている。近年、ALMA 観測によってこういった円盤の外側ではこれまで行われてきた理論計算から予想される MRI 起源の乱流と比べて弱い乱流 ($\sim 0.05 \sim 0.1c_s$) が発生していることが示唆されている。これらの観測結果から磁気降着風はほとんど層流であると解釈できる。

これらの観測結果を受けて Jacob B. Simon et al 2018 ApJ 865 10 では電離度や磁場といった初期条件を変化させて shearing-box でシミュレーションを行い、観測結果と同様の結果が得られるような初期条件を模索した。このシミュレーション結果によると磁場により強い層流ほど近い風が発生している場合であっても局所的に MRI が不安定になる場所が存在し強い乱流が存在することが判明した。また、乱流速度が観測結果の下限値を下回るのは従来の理論研究で仮定されている電離度及び磁場が低く設定されている時のみであったことを明らかにした。

本講演では上記の Jacob B. Simon et al 2018 ApJ 865 10 をレビューし観測結果およびシミュレーション結果から予想される原始惑星系円盤内の磁場構造及び、それに伴う角運動量の輸送機構についての議論を行う。

1. Jacob B. Simon et al 2018 ApJ 865 10

高汎用性 N 体計算コード REBOUND 及びその使用例

谷安 要 (京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

惑星形成を研究する文脈において、N 体数値積分がよく用いられる。手法としてはエルミート法やルンゲクッタ法、シンプレクティック数値積分法など様々ある。しかしコード開発においても各々が開発することが多いため、詳細が存在しないコードや記載があれど入手することができないコードが存在する。その結果として、先行研究として参考とする際に結果を自身で再現することが難しくなるといった問題が生じることになる。

この問題を解決するため、様々な問題に対して使えるよう開発されたオープンソースの N 体計算コードは多々ある。その内の一つが REBOUND [1] である。このコードは C, Python どちらでも利用できる。REBOUND は積分器として IAS15 [2], WHFast [3], MERCURIUS [4] 等を使い分けできるようになっており、ライブラリ形式で利用できるため衝突合体・重力計算の処理などを関数の形で変更することができる。

また、現在 REBOUND を用いて研究を行っている。現在の研究対象は、連星系のハビタブルゾーン周りにおける粒子安定性についてである。本発表においては REBOUND 自体の説明に加え、研究対象の N 体積分で REBOUND がどのような役割を持っているかを説明することによりコードの有用性を示す。

1. H.Rein & S.F.Liu, A&A, vol537, A128, 2012
2. H.Rein & D.S.Spiegel, MNRAS, vol446, p1424-1437, 2015
3. H.Rein & D.Tamayo, MNRAS, vol452, p376-388, 2015
4. H.Rein et. al., MNRAS, vol485, p5490-5497, 2019

分子雲コアの周辺環境の違いによる質量降着率と星形成効率の変化 野崎 信吾 (九州大学 理学府地球惑星科学専攻 M1)

星は星間分子雲内で密度が高い分子雲コアと呼ばれる領域が自己重力によって収縮することで形成される。形成した星は様々な質量を持つ。そのため、星が形成段階でどのように質量を獲得するのかを考えることは、星形成過程を理解する上で非常に重要である。星形成領域で星と分子雲コアの質量頻度分布を表したものを IMF と CMF と呼ぶ。多くの星形成領域で 2 つの関数は類似しており、CMF を 0.3-0.7 倍すると IMF と良く一致する。そのため、孤立した分子雲コアのガスの 30-70% が星に変換されると考えられていた。[1] 一方、近年の観測から ONC 領域では IMF を CMF と一致させるためには CMF を 100% 以上増加させる必要があることが分かった。[2][3] これは、分子雲コアがその進化過程で外部から質量を獲得する必要があることを示唆している。

本研究では IMF と CMF の関係を調べるため、磁気流体シミュレーションコード [4] を用いて星形成過程でのガス雲コアの質量増大に関する数値計算を行った。分子雲コアと同程度、もしくは、より大きな質量の星ができることを再現するため、分子雲コアの初期密度分布と重力圏の大きさをパラメータとして質量降着率の変化を調べた。様々なパラメータで長時間の質量降着率を見積もるため中心にシンクを置き、磁場・回転を無視して計算を行った。結果、分子雲コアの周辺密度が比較的高い場合、高い質量降着率が維持されることが分かった。さらにそのような場合の質量降着率は、時間が経つにつれ Bondi 降着率に漸近することが示された。

1. Machida, M. N., and Matsumoto, T., 2012, MNRAS, 421, 588-607
2. Takemura, H., et al., 2021a, PASJ
3. Takemura, H., et al., 2021b, ApJL, 910, 7
4. Machida, Masahiro N., and Hosokawa, T., 2013, MNRAS, 431, 1719-1744