

星・惑星形成

1 星団形成期における星周円盤の破壊

長谷川 大空 (東京大学天文学教室 M2)

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にもかかわらず、これまでに観測された惑星の主星の多くは、星団に属していない星、フィールド星である。フィールド星の少なくとも半分は惑星を持つが、星団では、年齢が3 Myr 以下の若い星団を除き、星周円盤を持つ星の割合自体が2割以下である。この違いを明らかにするには星団内での星周円盤の進化を追うことが必要である。

星団内の星とフィールド星との大きな違いは、周囲の恒星との相互作用の有無である。円盤は、円盤自身の内的進化及び外的効果による消失の2つの効果を受ける。前者は中心星への降着や中心星からの輻射、星風であり、後者には周囲に存在するOB型星からの輻射による円盤の消失(光蒸発)や、恒星同士の近接遭遇による円盤破壊がある。周囲に星がないようなフィールド星では、外的効果は起こらない。外的効果について、Adams et al.(2004)などは光蒸発が主要因であると述べている。一方、Portegies Zwart(2016)などは恒星同士の近接遭遇時の円盤破壊が主要因であると主張しており、どちらが主要因なのかまだわかっていない。

そこで、本研究ではまず、分子雲の収縮運動を反映した初期条件を用い、恒星同士の近接遭遇による円盤破壊の効果のみを入れたN体シミュレーションを実行し、巨大分子雲から誕生した星団内における星周円盤の進化を調べた。また、星団内のOB型星からの輻射の強さを見ることで、光蒸発がどの程度効いているのか見積もり、2つの外的効果の円盤の進化への影響を調べた。

その結果、光蒸発はOB型星からおよそ1 pc以内で大きな役割を果たすこと、恒星遭遇による円盤破壊はOB型星からの距離に依らず効くこと、かつシミュレーション開始後0.5 Myrまでの短期間に集中していることが示唆された。以上より、光蒸発・恒星遭遇による円盤破壊のどちらの効果も円盤の外的破壊に大きな役割を果たすことがわかった。

1. Adams et al., 2004, ApJ, 611, 360
2. Portegies Zwart, 2016, MNRAS, 457, 313
3. Fujii & Portegies Zwart, 2015, MNRAS, 449, 726

2 星形成領域におけるキラル分子生成過程

中村 帆南 (筑波大学 宇宙理論研究室 M1)

地球上の生物を構成するアミノ酸や糖などの生体分子は、ほとんどが鏡像異性体構造を持つキラル分子である。鏡像異性体は互いの物理的、化学的性質は全く同じである。しかし、生体内にはどちらか一方の鏡像異性体の型のみが使われていることが知られている。この偏りは自然界のホモキラリティーといわれ、その起源は未解明である。近年、隕石や彗星中にキラル分

子が見つかったことで、ホモキラリティーが宇宙から持ち込まれた可能性が示された。また、左右の一方に偏った円偏光をキラル分子に照射する実験により、鏡像異性体の吸収度の違いから僅かなホモキラリティーが生じることもわかっており、星間空間での異性体過剰メカニズムとして有力である。

2016年、天の川銀河の中心付近にある巨大分子雲SgrB2において、星間空間で初めてキラル分子(酸化プロピレン)が発見された(McGuire et al. 2016)。観測された酸化プロピレンの異性体過剰の有無は不明だが、鏡像異性体構造を持つ複雑な分子が星形成領域で発見されたことは今後の研究にとって重要である。星間空間でキラル分子がどのように生成されるか、その環境で異性体過剰が起こり得るかについて、研究が進むことが期待される。

本研究では、気相中の酸化プロピレンについて、その生成過程における中間体や安定構造のエネルギーを、量子力学計算を用いて第一原理的に求める。求めた反応生成物の安定性や反応障壁を比較し、起こり得る生成経路を特定する。酸化プロピレンからメチル基を抜いた構造を持つ酸化エチレンは、既に1997年にSgrB2分子雲中に発見されており、いくつかの生成経路が提案されている(Bennett et al. 2005)。それらの気相中の生成経路について理論的検証を行い、その結果をもとに酸化プロピレンの生成過程を検討する。

1. B. McGuire et al. Sci, 352(6292), 1449-1452 (2016)
2. C. Bennett et al. ApJ, 634(1), 698-711 (2005)

3 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) M2)

星の進化はその質量により決められており、星が進化することで銀河は進化する。星の生まれる場所である分子雲コア(以下、コア)は分裂することにより多重星を作りうることが知られており、何個の星を作るかで星の質量は大きく異なる。したがって、多重星形成過程を調べることは星の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。上記のコア分裂過程において、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(e.g., Machida et al. 2008)が、コアの角運動量獲得機構については詳しく研究されていない。コアの角運動量の性質として観測によりわかっていることは主に以下の二つである。(1) 比角運動量は $j = 10^{20} - 10^{21} \text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ 程度であり、(2) コア質量 M に対して若干の増加傾向にある(Tatematsu et al. 2016)。一方で近年のHerschel宇宙望遠鏡による観測によって、コアはフィラメント状の分子雲に沿って分布していることが明らかになった(Andre et al. 2010)ため、フィラメントからのコア形成過程で上記のコアの角運動量の性質を説明する必要がある。コアの角運動量にとって重要な物理量はフィラメント内の速度場であるが、観測からは視線速度および分散しか得られない。そのため、速度場は亜(遷)音速であるという

事実しかわかっていない。

そこで本研究では、フィラメント内に3次元超音速速度場を数値的に作成し、ある領域内のガスが将来コアになるとして角運動量を計算した。その結果、等方なコルモゴロフ則に従う速度場では観測のコアの角運動量を再現できず、フィラメント短軸方向の波により多くのエネルギーを渡した、非等方パワースペクトルにより再現できることが明らかになった。これはフィラメントが分子雲中のガスの圧縮からできるというシナリオと無矛盾である。これらの結果はフィラメントからのコア形成過程で、コアの角運動量を説明可能であることを示している。本講演では以上の結果について紹介し、コアの角運動量の起源について議論する。

1. Andre, P., Men'shchikov, A., Bontemps, S., et al. 2010, A&A, 518, L102
2. Machida, M. N., Tomisaka, K., Matsumoto, T., & Inutsuka, S.-i. 2008, ApJ, 677, 327
3. Tatematsu, K., Ohashi, S., Sanhueza, P., et al. 2016, PASJ, 68, 24

4 原始星周囲の磁場構造 -ALMA のための疑似偏光観測シミュレーション-

藤城 翔 (名古屋大学 天体物理学研究室 (A 研) M1)

星形成過程では磁場が角運動量輸送やアウトフロー駆動に大きな役割を果たすため、原始星周囲の磁力線構造を知る事は重要である。分子雲中のダストは磁力線に対し垂直に整列するため、偏光観測により磁力線の方向を調べることができる。そこで近年、ALMA 等による偏光観測で原始星周囲の磁力線構造が研究されている。単純な重力収縮モデルでは、磁力線は収縮するガスに引きずられて中心がくびれた砂時計型になると考えられている。しかし観測では砂時計状の磁場を持つ天体がある一方、明確な構造が見られない天体もある [Hull et al. 2017]。後者は磁場が弱く乱流によって磁力線が乱されている可能性が指摘されている。

一方、現実的な理論モデリングにはアウトフローによる磁場の巻き込みや見込み角等によって視線方向に磁力線が重なり、偏光が打ち消される効果も考慮する必要がある。そのため観測と理論を対応させるには、現実的なモデルに基づいた輻射輸送計算が必要である。加えて、干渉計はある大きさより広がった構造を復元することができない。従って、アウトフローの広がりより復元可能なスケールが小さい場合、実際の磁力線構造が復元できない可能性が示唆される。

本研究では星形成過程の MHD シミュレーションに対しダスト熱放射の偏光を含む輻射輸送計算を様々な見込み角に対して行い偏光の性質を調べた。そして、そのモデルを観測シミュレーションソフト CASA を用いて様々な観測条件で疑似観測し、干渉計による偏光観測の及ぼす影響を調べた。その結果、

アウトフロー内では視線方向の磁場が相殺することにより偏光度が下がり、その効果は見込み角ごとに異なることが分かった。またアウトフロー領域まで含めた観測を行う場合、従来使用されてきた小さいスケールの分解に優れた観測設定ではなく、より広いスケールを復元することのできる観測設定を用いなければならないことが分かった。

1. Hull, Charles L. H., et al. 2017, ApJ, 842, 9
2. Tomida, K., et al. 2017, ApJ, 835, L11
3. Kataoka, A., et al. 2012, ApJ, 761, 40

5 Atacama Compact Array による小質量星形成領域分子雲コアの詳細観測

高 宇辰 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

原始星は分子雲の高密度領域である分子雲コアが重力収縮することにより形成される。形成される星の質量や連星/多重星の個数は原始星形成直前の状態にある分子雲コアの性質に強く依存すると言われており、このような分子雲コアを同定し、その物理的性質を観測的に明らかにすることは、星形成の初期条件を探る上で重要かつ本質的な課題である。これまでの赤外線減光観測や単一電波望遠鏡によるミリ波連続波放射の観測で分子雲コアの詳細な構造が測定されてきた (e.g., Ward-Thompson et al. 1994; Alves et al. 2001)。これらの観測には空間分解能の限界があり、中心部の ~ 1000 AU 以下の密度の高まりの有無やその内部構造を特定することが困難であったが、ALMA を用いることによりこの問題を突破することが可能である。しかしながら、ALMA Main Array では必ずしも広がった成分に対する感度が十分でない。単一鏡を用いて得られていた結果と合わせて 1000 AU 以上のスケールから数 100 AU 程度の連続的な密度分布を明らかにするため、我々は ACA (Atacama Compact Array) を用いて、小質量星形成領域に存在する分子雲コア 16 天体に対して 1.2 mm 帯連続波等による観測を行った。その結果、約半数以上の天体で連続波放射を検出し、分子雲コアの中心部はこれまでの単一鏡等の観測で示されていたように必ずしも一様密度となっているわけではなく、複数の局所的な強度ピークなど複雑な内部構造を持っているものも存在することが分かった。また、おうし座分子雲に存在する MC5 という天体は、観測サンプルの中で最も軽い質量 (~ 0.2 太陽質量) であるにも関わらず、中心部が $\sim 10^6 \text{cm}^{-3}$ と最も高密度であった。これらの結果は連星/多重星系や、褐色矮星など非常に低質量な天体の形成機構を探る上で極めて重要な手がかりになり得ると考えられる。

1. Ward-Thompson et al. 1994
2. Alves et al. 2001

6 円盤形成におけるホール効果の影響:ダストサイズ分布と宇宙線強度依存性

古賀 駿大 (九州大学 惑星系形成進化学研究分野 M2)

原始惑星系円盤 (以後、円盤) は、重力収縮する分子雲コアの中で原始星の周囲に形成される。円盤は、原始星の重力に対し遠心力によって支えられているため、そのサイズは円盤、または落下するガスが持つ角運動量に依存する。よって、初期に等しい角運動量をもつ分子雲コアでも、重力収縮中に中心部から外部へ輸送される角運動量が異なれば形成される円盤のサイズが変化すると考えられる。角運動量輸送において重要な役割を果たしているのが磁場である。角運動量の輸送効率は、非理想磁気流体力学のホール効果を考慮すると変化すると考えられている。ホール効果の強さは、磁場の強度だけでなく、ガス中に存在している荷電粒子の存在量によって決まり、荷電粒子の存在量はダストサイズ分布と宇宙線強度によって決まる。

Tsukamoto et al. (2015, 2017) では、3次元シミュレーションによって、あるダストサイズ分布と宇宙線強度を仮定して、ホール効果が円盤の形成に大きな影響を与えることを示した。しかし、シミュレーションではダストサイズ分布と宇宙線強度のパラメータを変えて、それらの影響を調べることは難しい。そこで本研究では、初期に角運動量を持たない分子雲コアを仮定し、ダストサイズ分布と宇宙線強度などをパラメータにして、ホール効果によって誘起されるガスの比角運動量を求めた。さらに形成される円盤のサイズの見積もりを行なった結果、ホール効果はダストサイズ分布と宇宙線強度などのパラメータに対する依存性が強く、また、円盤の構造に十分寄与を与えるほどの角運動量をガスに与えることがわかった。

本公演では、星形成過程での磁場の振る舞いに対するダストサイズ依存性が強いことを考慮し、現在行なっているダスト成長を含めたシミュレーションの方法についても議論する。

1. Tsukamoto, Y., Iwasaki, K., Okuzumi, S., Machida, M. N., & Inutsuka, S. 2015a, ApJ, 810, L26
2. Tsukamoto Y., Okuzumi S., Iwasaki K., Machida M. N., Inutsuka S.-i., 2017, PASJ, 69, 95

7 SPH 法におけるシア問題の解決策

稲吉 勇人 (名古屋大学 理論宇宙物理学研究室 (Ta 研) M2)

宇宙には原始惑星系円盤や円盤銀河、ブラックホールの降着円盤等、様々な円盤が存在している。円盤の形成や進化の過程は非常に複雑であり解析的に解くことができないため、これらの理論研究には流体の数値計算が不可欠である。

流体力学の数値計算法として、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法がある。流体をオイラー的に記述するメッシュ法と比べ、SPH 法はラグランジュ的に記述するため、高密

度の領域を高解像度に記述できる点や、流体が大きく変形する場合の計算に有利である点などで優れている。しかし、シア流が存在する流体の数値計算を SPH 法で行うと、非物理的な密度エラーが発生し、精度良く計算できないことがわかっていく (シア問題)。特に低温の場合は、密度エラーが 300% を超えるほどである。よって、原始惑星系円盤や円盤銀河は低温で差動回転、つまりシア流が存在している流体であるため、これらの円盤の形成や進化を SPH 法で計算することは極めて困難である。SPH 法を用いてこれらの円盤の計算を精度良く行うためには、シア問題の解決が不可欠である。

このシア問題の解決策として、Imaeda & Inutsuka (2002) では SPH 法の定式化を見直し、流体素片の速度と SPH 粒子の速度を区別する手法が提案されている。この手法は、密度がほぼ一様な流体のみ有効であるが、密度エラーを 20% 程度に抑えることを可能にした。つまり、この手法の密度一様という制約さえ解消すれば、シア問題の解決に直結する。そこで本研究では、Imaeda & Inutsuka (2002) の定式化をさらに見直し、密度が非一様な流体の計算も可能にすることを目指す。本講演では我々の新しい定式化を紹介し、さらにその有用性について議論する。

1. Gingold, R.A., Monaghan, J.J., Mon. Not. R. Astron. Soc. 181 (1977) 375
2. Imaeda, Y., Inutsuka, S., Astrophys. J., 569 (2002) 501
3. Inutsuka, S., J. Comput. Phys. 179 (2002) 238

8 前主系列星を含む初代銀河スペクトルの理論計算

三谷 啓人 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

宇宙初期に生まれた初代星、いわゆる種族 III 星、は金属を含まず宇宙の再電離の第一段階を担い、超新星爆発により、重元素を放出したと考えられている。初代星は初期宇宙の進化と密接に関わっているため、初代星の観測は現在の天文学における重要な課題の一つである。これらの星が生まれた直後に当たる遠方では、種族 III の星団や銀河が観測されることが期待される。こういった天体のスペクトルの理論予測はこれまでにいくつかされており、赤方偏移のために近赤外領域でピークを持つ。前述のスペクトル計算はほぼ全ての星が主系列である様な十分に時間が経った場合のみを考慮しており、多くの軽い星が主系列に入る前の若い場合を計算していない。前主系列星は温度が低く、より長波長の光を放出する。また、温度が低いが半径が大きいものがあるため明るく、前主系列星を含む若い銀河はより「赤く」と予想される。

現在の銀河と異なり、種族 III 原始星を生み出す分子ガス雲には金属が存在せず、ダストに囲まれていないため、放出された光が観測可能であると考えられる。こうした星々の観測は、2020 年 5 月に打ち上げ予定の James Webb Space Telescope (JWST) での主目的の一つである。JWST に先立ち、初期銀

河のスペクトルを理論予測することは、理論的だけでなく、観測的にも重要である。

本研究では、星進化コード MESA を用いて前主系列段階を含んだ進化計算を行い、それぞれの星のスペクトルを BT-Settl モデルを用いて計算し、いくつかの初期質量関数 (IMF) を仮定して、赤方偏移 $z = 10$ の若い銀河のスペクトルを計算した。また、銀河スペクトル進化コード PEGASE を用いて、星生成が複数回の場合についても計算した。これらの特徴やその JWST での観測可能性について議論する。

1. Tumlinson J., Giroux M. L., Shull J. M., 2001, ApJ, 550, L1
2. Bromm, V., Kudritzki, R. P., & Loeb, A. 2001, ApJ, 552, 464

9 中心星質量による原始惑星系円盤進化の変化

中野 龍之介 (東京大学 鈴木・蜂巢研究室 M1)
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。

最初に、円盤風だけのシミュレーションで質量を変えたところ、パラメータには依存するが、各パラメータ毎に質量によるスケールを揃えると面密度の時間進化の形はほぼ変わらない事が分かった。次に、光蒸発の効果を取り入れた所、特に進化の後期 $10^6 - 10^7$ yr において散逸が強くなる事が分かった。

異なる中心星質量の場合に、円盤風と光蒸発による影響の比を考えると、重い中心星ほど光蒸発の影響が強くと寄与することが分かった。これは X 線の光蒸発の効果 (Preibisch et al. 2005) が中心星質量に対して約 1.5 乗とやや敏感に依存する為、小質量星では磁気駆動円盤風に対してその寄与が相対的に小さくなるのが原因と考えられる。

1. Owen, James E.; Clarke, Cathie J.; Ercolano, Barbara MNRAS.422.1880O(2012)
2. Suzuki, Takeru K.; Inutsuka, Shu-Ichiro

ApJ...691L..49S(2009)

3. Preibisch, Thomas; Feigelson, Eric D. ApJS..160..390P(2005)

10 巨大衝突ステージにおける惑星-微惑星間の力学的摩擦と微惑星間の衝突・破壊の関係

磯谷 和秀 (名古屋大学 理論宇宙物理学研究室 (Ta 研) M2)

太陽系の地球型惑星は、最終段階で火星サイズの原始惑星同士が衝突合体を繰り返し形成されたと考えられており、この進化段階は巨大衝突ステージと呼ばれる。巨大衝突ステージを模擬し原始惑星の N 体計算を行うと、合体成長を繰り返し数億年程度で現在の太陽系の地球型惑星のようないくつかの地球質量の惑星が形成される [1]。しかし、原始惑星同士が軌道交差を起こすほど軌道が歪んだ状態で衝突合体が起きるため、最終的に形成される地球型惑星の離心率 (~ 0.1) は、現在の太陽系の地球型惑星の離心率 (~ 0.01) を説明できない。これに関する現在の惑星形成論の理解では、地球型惑星が形成された後に残存する微惑星との力学的摩擦によって地球型惑星の離心率が下げられるという説が有力である [2]。ところが、この力学的摩擦によって微惑星の離心率が上がるため、微惑星同士の破壊的な衝突が起きるほど相対速度は速くなり、この破壊現象によって微惑星円盤の面密度は減少していく [3]。微惑星の面密度減少によって力学的摩擦の効率が下がるため、本当に地球型惑星の離心率を下げるのが可能なのかという問題が残る。

この問題を調べるためには、長期的軌道進化と破壊を扱うことができる計算が必要である。しかし破壊によって生じる様々なサイズの微惑星は 10^{35} 個以上にもなり、 N 体計算ではとても扱うことはできない。このような多数の粒子を取り扱うには統計力学に基づいた統計的手法が有効であるが、統計的手法では重力相互作用の取り扱いができない。すなわち N 体計算と統計的手法を同時に用いると、軌道進化と破壊を同時に考慮した計算を行うことができる。

そこで本研究では、 N 体計算と統計的手法を組み合わせた、衝突破壊を扱うことができるハイブリッドコードを開発した。さらに本講演では、このコードにより得られた、巨大衝突ステージにおける力学的摩擦と破壊現象の関係についても議論する。

1. Kokubo, E., Kominami, J., & Ida, S. 2006, ApJ, 642, 1131
2. Morishima, R., Stadel, J., & Moore, B. 2010, Icarus, 207, 517
3. Kobayashi, H., & Tanaka, H. 2010, Icarus, 206, 735

11 有機物マントルを持つ岩石ダストの付着:モデル構築と微惑星形成への応用

本間 和明 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M1)

原始惑星系円盤内で、円盤に含まれる μm サイズの微粒子やその集合体 (アグリゲイト) が、どのように微惑星へ成長するか知ること、惑星形成を理解する上で重要である。現在、形成過程の1つとして、直接合体成長という過程が考えられている。これは微粒子やアグリゲイトが衝突することで付着し、微惑星に成長するという過程である。

しかし、直接合体成長では、アグリゲイトが岩石微惑星へ成長することは困難である。なぜなら、岩石型微惑星のもとであるシリケート質の微粒子からなるアグリゲイトは、シリケートの付着力が低いため、円盤内で衝突しても付着せずに破壊されるからである [1]。

そこで本研究では、岩石微粒子の表面に有機物層が存在することに注目する。彗星由来と考えられる惑星間塵は、表面に有機物層を持つシリケート微粒子からなるアグリゲイト (有機物アグリゲイト) であることが知られている [2]。また、有機物はシリケートより柔らかく付着しやすい。そのため、有機物アグリゲイトは、柔らかい有機物が付着効率を促進することで、直接合体成長により微惑星へ成長した可能性がある。しかしながら、このような有機物層の効果は、従来の惑星形成では無視されてきた。

そのため本研究では、有機物の柔らかさにより、アグリゲイトが衝突破壊を免れ、微惑星を形成するかを次のことを行い調べた。まず有機物マントル、岩石コアからなる微粒子の近似付着モデルを構築し、アグリゲイトが衝突により付着できる上限の速度を計算した [1]。次に、得られた速度を用い、原始惑星系円盤でのアグリゲイトの成長を計算した [3]。

その結果、有機物アグリゲイトは、直接合体成長を通じて付着成長し、1.6AU より内側で微惑星を形成することが分かった。そのため本研究により、表面の柔らかい有機物による付着効率の上昇を考えれば、有機物アグリゲイトは直接合体成長により、微惑星を形成することが示された。

1. Wada, K., Tanaka, H., Okuzumi, S., et al. 2013, *A&A*, 559, A62
2. Flynn, G. J., Wirrick, S., & Keller, L. P. 2013, *Earth, Planets, and Space*, 65, 1159
3. Okuzumi, S., Tanaka, H., Kobayashi, H., & Wada, K. 2012, *ApJ*, 752, 106

12 原始惑星系円盤における周連星惑星の軌道進化

山中 陽裕 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M2)

Kepler 宇宙望遠鏡によって、連星の近くを公転する周連星惑

星が見つかっている。それらの惑星は海王星から土星程度の惑星質量、およそ 1AU 以内の軌道長半径という共通した特徴を持っている。これらの惑星は、周連星原始惑星系円盤の遠方で形成した後に現在の軌道までマイグレーションしてきたと考えられる。一方、連星の公転によって時間変動する重力場により、連星の近傍には力学的な不安定領域が存在する (Holman & Weigert, 1999)。実際の周連星惑星の軌道はこの不安定領域境界のすぐ外側に位置している。周連星原始惑星系円盤の内側には空隙が生じ (Artymowicz & Lubow, 1994)、円盤内縁半径はこの不安定領域の中にあることがわかった。

そこで我々は、惑星は一度軌道不安定領域へ侵入して円盤内縁まで移動するが、その後円盤の散逸に伴って不安定領域の外へ移動するという軌道進化シナリオを立てた。円盤の内縁近くでは不安定領域の中なので惑星は連星から強い重力摂動を受けて軌道が励起される。一方で十分な量の原始惑星系円盤ガスがあれば、ガス抵抗によって惑星軌道の励起が抑制される。惑星の軌道はこれらの釣り合う位置で決まり、円盤ガスの散逸に伴って惑星は外側へ移動し、不安定領域のすぐ外側の軌道を公転する。以上のシナリオを検証するため、我々は連星の離心率と質量比をパラメータとして N 体計算を行った。結果、以上のシナリオで不安定領域のすぐ外側の周連星惑星の軌道が再現可能であることがわかった。また惑星が不安定領域内の軌道移動を生き延びることができる連星離心率の範囲は実際の周連星惑星を持つ連星系と調和的であり、軌道移動の間のガス降着による惑星成長を考慮することで実際の周連星惑星の軌道を説明出来る可能性があることがわかった。

1. Artymowicz & Lubow, 1992
2. Holman & Weigert, 1999
3. Pierens & Nelson, 2008

13 周惑星円盤における微衛星形成に対するダストサイズ分布の影響

尾崎 遼平 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M1)

木星のようなガス惑星はその形成過程で、周惑星円盤と呼ばれる降着ガスの円盤を持つ。ガリレオ衛星はこの周惑星円盤の中で形成されたと考えられているが、微衛星の起源は未解明である。本研究では、周惑星円盤中で、小さな固体粒子から微衛星が形成される可能性に着目する。

Shibaike et al. (2017) は、定常な周惑星円盤を仮定し、一定の割合で供給される氷ダストの合体成長と落下を計算した。その結果、氷ダストが微衛星まで成長するための条件は、ダスト流入率のガス流入率に対する比が 1 以上であるということを示した。ただし Shibaike et al. (2017) では単純化のため、ダストのサイズ分布は考慮しなかった。このため、各機動距離での微小なダストの存在がダストの成長や周惑星円盤の温度分布に与える影響を指摘しつつ、詳細な計算はしていなかった。

本研究の目的は、氷ダストが直接合体成長のみで落下問題を回避し、また周惑星円盤の温度が氷ダストの昇華温度より低く保たれる条件を求めることである。そこで本研究では、ダストサイズ分布の広がりやを考慮した、ダスト合体成長の数値計算を行なった。また、各時刻のダストサイズ分布から円盤の光学的厚みを求めることで、円盤温度分布進化を同時に計算した。

その結果、ダスト落下の回避条件は、ダスト流入率のガス流入率に対する比が1以上であることがわかった。これは Shibaike et al. (2017) の結果とよく一致した。一方で、ガス流入率が大きいと円盤は高温になり、氷ダストが昇華してしまうことがわかった。この結果から、ガス流入率について100万年あたり0.0005木星質量以下という条件が加わった。

本研究の結果は、氷微衛星形成が惑星形成の最終段階で起こる可能性を示唆する。周惑星円盤内での微衛星形成のための条件をさらに絞り込んでいくと共に、微惑星捕獲など別のアプローチと組み合わせて考えることで、衛星形成の全体像を明らかにしていくことが今後の課題となる。

1. Shibaike, Y., Okuzumi, S., Sasaki, T., & Ida, S. 2017, ApJ, 846, 81
2. Okuzumi, S., Tanaka, H., Kobayashi, H., & Wada, K. 2012, ApJ, 752, 106

14 Gas flow around embedded planets: the dependence of outflow speed on the planetary mass

桑原 歩 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M1)

Kepler 宇宙望遠鏡を用いた観測によって、短周期スーパーアースと呼ばれる、地球よりも一回り大きな半径を持ち、かつ公転周期が短い惑星が数多く存在していることが明らかになった。この天体の形成メカニズムは未だ完全には解明されておらず、惑星形成理論に多くの謎を投げかけている。

原始惑星系円盤内における惑星近傍のガスダイナミクスに関する先行研究の3次元流体シミュレーションにより、原始惑星系円盤内に埋没した惑星のエンベロープには、ガスが Bondi 領域の高緯度から流入 (inflow) し、低緯度から流出 (outflow) するという流れ場が存在していることが明らかになった。このようなガスのコンスタントな流入・流出によって、大気のリサイクルリングが生じることが指摘されている [e.g., 1]。このリサイクルリングメカニズムは、エンベロープの冷却・収縮を遅らせると考えられ、短周期スーパーアースの形成過程を説明できると期待されている。また、outflow 速度が比較的速ければ、固体物質 (e.g., ペブル) の惑星コアへの流入を抑制する可能性がある。そのため、惑星周りのガスの流れ場は、ガス及び固体物質の降着率に影響を及ぼすと考えられる。

本研究では、原始惑星系円盤内に埋没した惑星近傍におけるガスの流れ場の性質が、惑星質量にどのように依存するかに焦点

を当て、円盤ガスに等温・非粘性仮定を設けた3次元流体シミュレーションを実施した。その結果、先行研究と同様の流れ場の三次元構造を確認した。また、中心星近傍 (< 1 au) を周る $1 M_{\oplus}$ の惑星の Bondi 領域からは、 $0.5 c_s$ 程度の速度を持った outflow が出ていることが明らかとなった。更に、解析的な議論によって、outflow 速度は、 $|u_{\text{out}}| \propto m c_s (R_{\text{Bondi}} \leq R_{\text{Hill}})$, $|u_{\text{out}}| \propto (m/3)^{1/3} c_s (R_{\text{Bondi}} \geq R_{\text{Hill}})$ とそれぞれ表せることが分かった (m は惑星質量、 c_s は等温音速をそれぞれ表す)。

1. Ormel, C. W., et al. (2015), MNRAS, 447, 3512.

15 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 M1)

恒星の掩蔽観測によって準惑星ハウメアの周囲にリングが発見され、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ことがわかった (Ortiz et al., 2017)。このリングの形成過程は、まだわかっていない。本研究では、このリングの形成過程を理解することを目的とする。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。三軸不等楕円体の形状をしているハウメアの自転によって、ハウメアの近くでは重力場が乱され、そこでは物体が安定して存在できない。また、安定領域にある物体のうち、ロッシュ半径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。ロッシュ半径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半径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。一方、三軸不等楕円体の周囲のロッシュ半径を、完全剛体と完全流体に対して計算した。その結果、完全剛体ロッシュ半径と完全流体ロッシュ半径の間に現在のリングが位置することがわかった。そこで現在、物質強度の効果を取り入れたラブルパイル N 体シミュレーションのコードを開発し、リングが形成される過程について数値計算による検証を行っているところである。

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

16 Condensation Growth Model of Cloud Particles with Size Distribution for Exoplanetary Atmospheres

関 航佑 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M1)

The atmospheric properties are the keys to understand the planet formation or planetary evolution. Recent transit observations reveal that a number of super-Earths have featureless transmission spectra, which imply the presence of high-altitude thick clouds. Therefore, cloud formation models for exoplanetary atmospheres are important to understand the detailed atmospheric properties.

Previous studies investigated the cloud-top height of some super-Earths which have the featureless transmission spectra using the microphysical model assuming the size distribution of cloud particles is narrow. However, it is unclear that the size distribution of cloud particles is enough narrow and the cloud-top height suggested by the featureless transmission spectra have not been reproduced by this model for some super-Earths.

In this study, we aim to reproduce the cloud-top height of the typical super-Earth GJ1214 b, taking into account the size distribution thorough the vertical transport and condensation growth of cloud condensate nuclei (CCNs).

We find that the cloud-top height ascends higher than the height calculated by the single size approximation model, yet is still lower than the predicted cloud-top height to explain its featureless transmission spectra even in the case of the atmospheric metallicity is the $100\times$ solar metallicity.

We are going to discuss the uncertainty of the eddy diffusive coefficient predicted from 3D global circulation model because the eddy diffusivity drastically changes the cloud-top height.

1. Ohno, K., & Okuzumi, S., ApJ, in press
2. Ackerman, A. S., & Marley, M. S. 2001, ApJ, 556, 872
3. Kreidberg, L., Bean, J. L., De serf, J.-M., et al. 2014, Nature, 505, 69

17 WASP-80b に対する多色同時トランジット観測

寺田 由佳 (東京大学天文学教室 M2)

今日までに 3700 個以上の系外惑星が発見され、その多様性が明らかになってきている。そして、最近の観測機器の発展により、個々の惑星の大気の特徴付けも進められている。この特徴付けに用いられる手法としてトランジット法が挙げられる。この手法はトランジット惑星の大気透過光観測と呼ばれ、トランジットの減光率の波長依存性から、大気組成を決定することが

できる。この手法により、ホットジュピターで可視域ではアルカリ金属 (Na,K)、水素分子によるレイリー散乱を、近赤外域では水やメタン、CO などの分子が検出されている。

本研究では、WASP-80b をターゲットとして、岡山天体物理観測所の 188cm 望遠鏡の多色同時撮像カメラ MuSCAT、TCS1.52m 望遠鏡の MuSCAT2 を用いてトランジット探査を行った。WASP-80 は公転周期約 3 日のトランジット巨大惑星 (WASP-80b) をもつ、有効温度約 4150K の K/M 型主系列星である (Triaud et al. 2013)。また、主星のスペクトルに強い Ca II H&K 線が見られることから主星の活動度が高く、若い年齢をもつと考えられている ($\sim 100Myr$, Triaud et al. 2013)。晩期型星まわりの巨大惑星はめずらしく、特に WASP-80b は平衡温度が 800K と他のホットジュピターに比べて低いことから、その大気特性に注目が集まっている (e.g., Fukui et al. 2014)。この惑星系は、これまでに複数回トランジットが観測されているが、考えられている大気モデルを制限するに至っていない。そのため、MuSCAT による多色同時観測、特に g band の透過分光観測結果により、モデルの制限ができると考えられる。本講演では、今回の観測で得られたデータの解析手法とその結果の紹介を行い、そこから得られる大気モデルについて議論を行う。また、今後の観測方針について報告したい。

1. Triaud, A. H. M. J., et al. 2013, A&A, 551, A80
2. Fukui, A., et al. 2014, ApJ, 790, 108

18 連星系をなす M 型潮汐固定惑星の habitability に G 型星が与える影響

奥谷 彩香 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M2)

Habitable Zone (HZ) とは惑星表面に液体の水が存在しうるような惑星軌道領域である。恒星の約 3/4 を占める、質量が太陽の 0.1-0.5 倍の暗い M 型星は、半径が小さいため HZ 内の惑星の観測に好都合な系として注目を集めている。一方で、M 型星は光度も小さいため HZ が中心星に近く、HZ の惑星は潮汐固定されて高温な昼面・低温な夜面をもつと考えられる (Kasting et al. 1993)。その結果、潮汐固定された「陸惑星」(表面に地球の 100 分の 1 程度以下の少量の水が存在する惑星) では、極端に寒冷化した夜面に水が固体としてトラップしてしまう可能性がある。さらに、他の大気分子までもが夜面に凝結し始めると、大気による熱輸送や温室効果が失われ、惑星全体はさらに寒冷化する。このように潮汐固定された陸惑星は HZ 内に位置していても、液体の水が惑星表面に存在するような環境を非常に実現しづらい。

しかし、潮汐固定惑星をもつ M 型星が、より明るい星である G 型星と連星系をなしている場合、G 型星からの放射で惑星表面の温度分布が変わり、惑星は上記の問題を受けにくくなるであろう。そこで本研究では、地球大気または CO₂ 大気をもつ陸惑星と海惑星について、惑星の地表面温度分布を、恒星放射

の時間変化・惑星の熱容量・温室効果・惑星表層での熱輸送を含む2次元エネルギーバランスモデル (e.g., North 1975) を用いて計算し、水の局在凍結や大気の前夜凍結 (大気崩壊) へのG型星の影響を調べた。

その結果、海惑星において連星系のHZは単独M型星のHZを中心星から遠ざかる方向に平行移動した形になり、G型星の放射はHZの幅を変化させないことがわかった。一方で陸惑星において、単独星周りでは極端な昼夜の温度差のため、水の凍結・大気崩壊を免れて水が惑星の表面に液体できるような領域がないが、連星系においては夜面の温度が大幅に上昇することによってHZが現れること、潮汐固定領域内の大部分が大気崩壊を免れるようになることが明らかになった。

1. Kasting J. F., Whitmire D. P., and Reynolds R. T. Icarus 101, 108 (1993)
2. North J. Atoms. Sci, 32, 2033 (1975)
3. Raghavan D. et al. ApJ. Suppl. 190:1 (2010)

19 大気大循環モデルを用いた系外惑星の光度曲線解析による自転傾斜角推定

中川 雄太 (東京大学 宇宙理論研究室 D1)

地球のように海陸の分布などによって色の不均一な惑星を遠方から観測すると、自転と公転に伴って観測される散乱光が変動する。この時間変動を解析すれば地表面に関する情報や惑星の自転情報を取り出すことができる。観測で角度分解できない太陽系外惑星の場合、表層の情報を取り出す手段はこの光度曲線解析に限られる。Kawahara (2016) は、惑星の光度曲線の周波数変調からその自転傾斜角と自転周期を推定する手法を提案し、地球のデータから雲の影響を取り除いた光度曲線を解析することでその有用性を示した。

今回我々は雲の効果を考慮しても自転傾斜角を推定できるかどうかシミュレーションで調べた。地球のように雲が形成されて地表の大部分を覆う惑星では、雲はその高い反射率で光度曲線に強く影響する。自転傾斜角の異なった惑星における雲構造と大気構造を矛盾なく考慮する必要があるため、我々は大気大循環モデル DCPAM5 を用いて雲の形成・運動を表現した。惑星表層環境は地球と揃えたが、自転傾斜角のみは0度から180度まで6通りに変更した。さらに輻射輸送計算と組み合わせることで惑星の散乱光度曲線を構成し、時間-周波数解析を行った。

この結果、北半球が照らされている様子をノイズなく観測できる場合、惑星の自転傾斜角と自転周期をよく推定できることがわかった。これは、北半球に集中する大きな陸の周りでは気候学的に雲の形成や運動が制限され、Kawahara (2016) の想定した「雲の合間から定常的に陸が見える」という条件が満たされたためである。反対に大きな陸の少ない南半球では、本手法を用いた推定は困難であった。以上のことから、雲を考慮した場合におけるKawahara (2016) の自転パラメータ推定法の適応可能性は惑星の地形に依ると考えられる。

1. H. Kawahara ApJ 822 122 (2016)
2. Y. O. Takahashi et al. <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/> (2018)
3. B. Mayer and A. Kylling Atmos. Chem. Phys. 5 1855 (2005)

b 講演 (b1-4)

20 オリオン座 A 分子雲におけるコアの同定

竹村 英晃 (国立天文台 M1)

星は分子雲の中にある高密度コアで誕生すると言われていて、よって、星形成の過程を解明する上で、分子雲内部において星の誕生現場である高密度コアの分布や構造、物理状態を明らかにすることは非常に重要である。典型的な分子雲の大きさは大きさが数十pc程度、質量は10万太陽質量程度、密度 10^2 cm^{-3} 程度である。それに比べて典型的な高密度コアは大きさが0.1pc程度、質量が数十太陽質量、密度 10^4 cm^{-3} 程度と非常にコンパクトである。このような構造を十分な分解能で検出するには、高感度・高角分解能の分子輝線の高分解能データが必要である。さらに、詳細な高密度コアの構造や分布だけでなく、ガスの淡い構造を広い視野で検出することも分子雲の様子を探る上で重要なことである。

そこで我々は、高密度ガス ($\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$) をよくトレースする $\text{C}^{18}\text{O} (J=1-0)$ 輝線データを用いて、最も近傍 (414pc) にある巨大分子雲であるオリオン座 A 分子雲内の高密度コア探査を行なった。この分子雲の高分解能マップを作成するために、我々は、野辺山 45m 単一電波望遠鏡で取得した C^{18}O データを使い、Dendrogram というツールを用いて、 C^{18}O の階層構造の解析を行い、エミッションの local peak を高密度コアとして同定した。予備的な結果であるが、積分強度図上でコアを同定すると、南北にのびる細長い領域に集中して分布していることがわかった。今後、position - position - velocity の cube data での同定も進め、物理量を出す予定である。発表では、 $\text{C}^{18}\text{O} (J=1-0)$ 輝線データおよび他観測データの解析結果や算出した物理量について紹介する。

21 銀河面における前主系列星の広域探査

木内 穂貴 (埼玉大学 教育学部理科専修 天文学研究室 M1)

星は銀河面の円盤部に近くにある密度の高い分子雲で主に形成されると考えられている。一方、分子雲の付随しない、またはガス・ダスト密度が低い領域において、若い前主系列星 (PMS) の探査は不十分であり、低密度領域での星形成の理解が進んでいない。そこで我々は銀河面付近及び高銀緯の低密度分子雲領域において、 $\text{H}\alpha$ 輝線、赤外超過などの特徴を示す PMS の無バイアスな探査を行い、どのように星形成が起きているのか、また分子雲密度等の異なる環境における星形成の相違は何か

について探っている。

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に、野辺山 45m 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) の観測領域について PMS の探査観測を行った。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、IPHAS の二色図と 2MASS, WISE の二色図から、 $H\alpha$ 輝線かつ赤外超過を持つと期待される PMS 候補天体を選別した。次にこれらの PMS 候補天体に対し、 $H\alpha$ 輝線等価幅測定とスペクトル型等の決定を目的として、兵庫県立大学なゆた 2.0m 望遠鏡を用いた可視分光観測を行った。結果、24 天体で $H\alpha$ 輝線が検出された。 $H\alpha$ 輝線を示す PMS に対して $H\alpha$ 等価幅とスペクトル型を求めるとともに、これら PMS と、FUGIN により新たに同定された分子雲との空間分布や距離の比較を行い、異なる分子雲密度等における星形成について考察した。

本講演では、PMS の選別手法を検証するとともに、二色図や SED による赤外・紫外超過の有無、分光観測から求めた温度と多波長測光観測による SED から求めた温度の比較、距離の推定や Gaia による距離との比較、分子ガスとの関係などについて議論を行う。

1. Barentsen G., et al., 2011, MNRAS, 415, 103
2. Kesseli, A. Y., West, A. A., Veyette, M., et al. 2017, ApJS, 230, 16

22 雲から探るスーパーアースの大気組成と形成過程

大野 和正 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 D2)

近年のハッブル宇宙望遠鏡による大気透過光の分光観測から、短周期スーパーアースの大気中には雲が普遍的に存在することが示唆されている (Crossfield & Kreidberg 2017)。これらの惑星の大気は高層雲に覆われていることが示唆されており、分光観測から大気組成を直接決定することが非常に困難である。そのため、観測結果を正しく解釈するためには系外惑星における雲の形成過程を理解することが重要となる。

我々は雲の構成粒子 (雲粒) の輸送・成長を自己無撞着に計算することで、短周期スーパーアースの大気中に形成される雲の空間構造及び高層雲の形成条件について調べてきた (Ohno & Okuzumi 2018)。本講演では衝突合体に伴う内部空隙の形成を考慮し、雲粒が雪片のような低密度粒子となる影響について調べた。その結果、雲粒の内部密度は空隙形成によって物質密度より 2-3 桁程度下がりがうることが分かった。雲は従来考えられていたよりも巨大な粒子で構成され、それらは大気上空まで輸送されることが分かった。また、個別天体の観測と比較した結果、観測されたスペクトルは大気中の重元素量が非常に高い場合に形成される雲と整合的であることが分かった。今回推

定された高い大気重元素量は、その惑星の形成場所や獲得した固体物質の情報を反映している可能性がある (Fortney et al. 2013)。

1. Crossfield & Kreidberg (2017), ApJ, 154, 261
2. Ohno & Okuzumi (2018), ApJ, in press
3. Fortney et al. (2013), ApJ, 775, 80

23 土星内部構造モデルを考慮した土星中型衛星軌道進化

中嶋 彩乃 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 D1)

衛星の形成・進化を明らかにするためには衛星自身の軌道進化過程を追うことが非常に重要である。このような衛星の軌道進化は中心惑星である土星の内部構造モデルや散逸モデルに大きく依存しているが、それを考慮した軌道計算はこれまでほとんど行われてこなかった。

そこで本研究では、土星がエンベロープとコアから成る二層モデルを仮定し、1) Shoji&Hussmann (2017) で提示された、衛星軌道と土星の粘弾性コアの周波数依存性を考慮するモデルと、2) Fuller et al. (2016) によって提示された、土星エンベロープの散逸と衛星軌道の周波数が共鳴することで起こる Resonant locking を考慮した軌道進化を比較し、どちらの土星散逸モデルが妥当であるかを衛星軌道進化の観点から検討する。1) と 2) のモデルではそれぞれ軌道進化の描像が大きく異なるため、土星衛星形成モデルに関しても制約を与えることが可能になる。

我々は、以上 2 つの散逸モデルに対して、土星内部構造を考慮した土星中型衛星 5 体 (ミマス、エンケラドス、テティス、ディオオーネ、レア) の解析計算を行った。その結果、1) のモデルを用いた場合、衛星は後天的に獲得された土星リングから形成されるモデルが、2) のモデルを用いた場合は、衛星が周惑星円盤から形成されるモデルが有利になることがわかった。しかし、衛星間相互作用も考慮した場合、共鳴捕獲や軌道交差、衝突・合体などによって現在の衛星軌道配置を再現することが非常に困難になることが知られているため (Nakajima et al., submitted)、今後はこの解析計算を N 体計算に発展させ、現在の軌道配置を再現可能な土星散逸モデルの検討と土星衛星形成モデルの妥当性を検討する。

1. D. Shoji and H. Hussmann A&A 599, L10 (2017)
2. J. Fuller, J. Luan and E. Quataert MNRAS 458, 38673879 (2016)

c 講演 (c1-17)

24 分子雲中におけるフィラメント形成と星形成開始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) M1)

星は宇宙を構成する基本要素であり、星形成は銀河進化に繋がることから星形成の理解は宇宙全体の理解において極めて重要である。近年の観測から星形成は分子雲中のフィラメント (線状の高密度領域) で行われることが明らかになったため (André et al. 2010), 分子雲からの、フィラメントを介した星形成過程を解明する必要がある。

分子雲は普遍的に超音速の乱流状態であり (Larson 1981), 分子雲内で衝撃波が生成されている。Inoue et al.(2018)(以下, I18) では高解像度シミュレーションを用いることで、分子雲が衝撃波に圧縮されるというありふれた現象からフィラメント形成を発見した。フィラメントはある線密度を超えると重力不安定を起し、星形成を始めることが知られている。この線密度は臨界線密度と呼ばれ、星形成開始条件と星の初期質量を決める重要な物理量である。フィラメントの平衡状態の臨界線密度を見積もった Tomisaka(2014)(以下, T14) は、臨界線密度はフィラメントを貫く磁束密度に比例すると主張している。I18 ではシミュレーションから、T14 の臨界線密度がフィラメント崩壊の初期条件を決めると示唆している。

しかしながら、T14 で調べられた平衡状態は、I18 で考えられた、分子雲が衝撃波によって圧縮されているという動的な状況とは異なっている。さらに I18 では 1 つのパラメータでしか計算されていない。したがって I18 のように動的にフィラメントが形成されて成長するとき、T14 の平衡解が臨界線密度の見積もりを現実には与えるのか検証する必要がある。

本講演では T14 の平衡解と I18 での計算結果について論じ、今後のフィラメントからの星形成研究の展望を示す。また本研究では I18 の高解像度シミュレーションを様々なパラメータで実行することで T14 の臨界線密度の見積もりの正当性を検証するための計算をするつもりである。

1. Inoue, T.; Hennebelle, P.; Fukui, Y.; Matsumoto, T.; Iwasaki, K.; Inutsuka, S. 2018,PASJ,70S,53I
2. Tomisaka, K. 2014, ApJ, 785, 24
3. Andre et al. 2010 arXiv:1312.6232

25 初代星分裂片の振る舞い

織田 篤嗣 (甲南大学 M1)

初代星形成シミュレーションは、今までいくつかのグループによって行われてきた。しかし、計算資源の制限から、降着円盤の分裂を考慮したものでは、原始星の誕生から輻射フィードバックが働く数千年後までに相当する長時間シミュレーションは行われていない。初代星分子雲コアは現在の分子雲コアに比

べて高温で降着率が非常に大きく、降着円盤は重くなる為一部分裂する。分裂片の多くは合体によって失われるが、一部が合体せず生き残ることで、初代星の初期質量関数に大きな影響を与えるだろう。

Susa(2018) は、降着円盤の分裂を考慮したシミュレーションを行い、時間が経つにつれて初代星分裂片の数が増加することを見つけた。これらの初代星分裂片の数や質量などがどのような物理的要因によって、決まっているのかを説明することが私の研究目標である。

そこでまず、初代星分裂片の進化について基本的振る舞いを理解する為に、分子雲コア内での seed binary の進化についての研究を参考にすることにした。これは、Bate&Bonnell(1997),Ochi et al.(2005),Hanawa et al.(2010),Young et al.(2015),Satsuka et al.(2018) などにより、シミュレーションによって調べられている。彼等は、分子雲コアの中心に seed binary を置き、連星の質量比と分子雲コアの固有角運動量及び温度を変化させ、それぞれの場合での質量比変化と連星間距離変化の関係について調べた。それらの結果によると、分子雲コアの固有角運動量が連星の固有角運動量より小さいとき質量比は小さくなり、連星間距離は減少する。また、固有角運動量が大きくなるにつれて質量比は大きくなり、連星間距離が大きくなることが示された。

本発表では、連星進化の上記論文のレビュー及び、初代星分裂片の振る舞いについての研究への活用を議論する。

26 Present day における連星形成

佐伯 優 (九州大学 惑星系形成進化学研究分野 M2)

太陽近傍の恒星は 60~70% が連星系に属しており、星形成領域においてはその割合がさらに高いことが知られている。これは、星が誕生する際、ほとんどが連星系を形成することを示唆しており、星の形成過程を理解するためには、連星系の形成過程を理解する必要がある。また、連星は現在観測可能な、様々な天文現象を引き起こす存在でもある。例えば、Ia 型超新星や、近年直接検出に成功している重力波は、2 つの恒星間距離が星の半径の数倍程度以下の連星 (以下、近接連星) による連星間質量輸送や、合体の結果生じる現象である。また、初期宇宙に誕生した初代星の生き残りの候補として考えられている金属欠乏星も、初代星の近接連星が起源であると考えられている。しかし、連星系の形成メカニズムは未だ解明されていない。

本研究では、連星の形成進化モデルを構築するため、初期条件として、磁場を無視した分子雲コアの回転角速度をパラメータとし、数値シミュレーションを数通り行った。本発表では、計算の結果から得られた連星の形成過程に対する、回転角速度のパラメータ依存性について議論する。さらに今後の展望について述べる。

1. Duchêne, G., & Kraus, A. ARA&A 2013, 51, 269

2. Greif, T. H., Bromm, V., Clark, P. C., et al. 2012, American Institute of Physics Conference Series, 1480, 51
3. Machida, M. N. 2014, ApJ, 796, L17

27 Star formation during collapsing phase in low metallicity environments

樋口 公紀 (九州大学 惑星系形成進化学研究分野 D2)

It is important to explain the star formation history from primordial to present-day universe for understanding the evolution of universe. Using three dimensional non-ideal MHD nested grid simulations, we study the evolution of outflow and jet driving in various environments. We set up various star-forming clouds by combining 7 different metallicities ($Z/Z_{\text{sun}} = 0, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}$ and 1) and ionization strength ($C_{\zeta}=0, 0.01, 1$ and 10, where C_{ζ} represents the coefficient controlling the ionization intensity and $C_{\zeta} = 1$ corresponds to the ionization strength of nearby star-forming regions). Starting from Bonner-Ebert isothermal clouds with rotation and uniform magnetic field, we calculate the cloud evolution from the molecular cloud core ($n_c \sim 10^4 \text{cm}^{-3}$, where n_c is the central number density) to the stellar core. Roughly, the outflow appears when $Z > 10^{-4} Z_{\text{sun}}$ and $C_{\zeta} \geq 0.01$. We expect that the transition of star formation mode from massive stars to normal solar-type stars occurs when the cloud metallicity is enhanced to reach $Z \sim 10^{-4} - 10^{-3} Z_{\text{sun}}$ above which relatively low-mass stars would preferentially appear owing to strong mass ejection.

1. Higuchi, K., Machida, M. N., & Susa, H. 2018, MNRAS, 475, 3331
2. Omukai, K., Tsuribe, T., Schneider, R., & Ferrara, A. 2005, ApJ, 626, 627
3. Susa, H., Doi, K., & Omukai, K. 2015, ApJ, 801, 13

28 Massive Outflow Driven by Magnetic Effects with High Mass Accretion Rates

松下 祐子 (九州大学 惑星系形成進化学研究分野 D2)

Protostellar outflows are ubiquitously observed around low- and high-mass protostars. outflows provide profitable clues for elucidating the star formation process, in which they transport the excess angular momentum and determine the star formation efficiency. To investigate the relation between the mass accretion and mass ejection rates, using a three-dimensional MHD simulation, we calculate the evolution of collapsing magnetized clouds with different thermal

stabilities that control the mass accretion rate onto the protostar. Both massive protostars and massive outflows are formed in highly gravitationally unstable cores. The simulated outflow properties are well agreement with observations. This indicates that massive stars form in the same manner as low-mass stars. In addition, massive outflows are driven by magnetic effects as explained in the low-mass star formation process.

1. Matsushita et al. 2018, MNRAS, 475, 391
2. Matsushita et al. 2017, MNRAS, 470, 1026
3. Machida & Hosokawa 2013, MNRAS, 431, 1719

29 分子雲コアの進化における外部圧力の重要性

渡辺 大輝 (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。

星間空間には希薄な星間物質が存在していて、その中で高密度領域では主成分の水素が分子になっているので星間分子雲と呼ばれ、さらにその中でも密度が高い部分は分子雲コアと呼ばれている。その分子雲コアが収縮することで星が形成されると考えられており、分子雲コアの進化を調べるためにビリアル解析という手法が用いられる。このとき考えなければいけないのは分子雲コアの内圧と自己重力のつりあいだけでなく、外部からの圧力も考えることが重要になってくる。

この論文ではへびつかい座 ρ 分子雲について、野辺山の 45m 電波望遠鏡で観測した H^{13}CO^+ のデータを用い 68 個の分子雲コアを同定し、その同定した分子雲コアにおいてそれぞれのコアの半径や質量を求めた。実際の分子雲コアにおいてビリアル解析をすることで、分子雲コアの形成と進化において外部からの圧力が重要な役割を果たすことを示していく。

1. H.MARUTA THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 714:680-698 (2010 May 1)

30 原始星および原始惑星系円盤における X 線観測の展望

梅谷 翼 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

分子雲が自身の重力によって潰れて密度が上昇することにより原始星は生みだされる。原始星の重力により周りの分子雲も潰れていくが、分子雲自身の回転による遠心力があるために潰れる方向が回転軸の方向に制限されるため、原始星の周りに円盤状の構造ができあがる。これが原始惑星系円盤である。このように、原始惑星系円盤と原始星は同じ分子雲から作られるため、原始星そのものの形成過程およびそこで起こる現象を知ることには、原始惑星系円盤における惑星形成で及ぼされる影響を考える上で、研究の足がかりとなりうる。X 線を用いた原始星の探査では、周囲を取り巻いている分子雲を透過して原始星自体の進化を探求できることに利点がある。カロリメータのように高

い分光能力を備えた次世代の X 線観測においては、例として以下のようなことが可能になると考えられている。第一は原始星の自転周期と半径を輝線からしらべること、これは原始星の収縮過程を考えるにあたり重要なものである。第二は原始星自身からの硬 X 線の影響により円盤から放出される光子の輝線のドップラーシフトを観測して、円盤の動力学を解明することである。第三はそもそも原始星が X 線で発光し始めるのがいつかを探求することである [1]。本稿では原始星と原始惑星系円盤における X 線を用いた研究の将来の展望について述べる。

1. ASTRO-H Space X-ray Observatory White Paper Stars Accretion, Shocks, Charge Exchanges and Magnetic Phenomena

31 タイトル近赤外 CaII 三重輝線を用いた前主系列星の彩層活動の調査

山下 真依 (兵庫県立大学 光学赤外線天文学研究室 その他)

恒星大気は内側から光球・彩層・コロナに分けられる。ひので衛星により太陽の彩層は激しく変動しており、光球のエネルギーをコロナに伝える重要な役割があることが観測的に初めて分かった。太陽以外の恒星にも彩層やコロナが存在する。主系列星の彩層活動は自転速度を一つのパラメータとするダイナモ機構に依存していることが Noyes et al.(1984) で発見された。恒星が誕生してから内部の核融合を開始するまでの若い天体を前主系列星というが、その彩層はより活発であると言われている。小質量星 ($M = 1 \sim 2M_{\odot}$) の前主系列段階として原始星、古典的 T タウリ型星 (CTTS) と弱輝線 T タウリ型星 (WTTS) と進化すると考えられる。近年、CTTS と WTTS の間の進化段階として遷移円盤天体 (TDs) が定義された。円盤からの物質降着により熱せられた彩層からは近赤外 CaII 三重輝線 ($\lambda 8498 \cdot 8542 \cdot 8662\text{\AA}$) が放出されるため、それが彩層活動の指標となる。先行研究では前主系列星の彩層活動はダイナモ機構ではなく、円盤からの質量降着率に依存している。また円盤の質量が同程度であれば TDs の CaII 輝線の強度は CTTS の 10 倍弱いことが確認できた。TDs の段階では、原始惑星によって円盤内縁から恒星の赤道面への降着は阻害されていると考えられる。光学的に厚い円盤外縁の物質が恒星の極へと流れる可能性があるが、両方とも現段階では断定することはできない。中心星付近での降着の様子は解明されていない。原始惑星系円盤の半径と比較し、円盤のどこから物質が降着しているのかを考察するため、本研究では T タウリ型星の自転周期と CaII 三重輝線の強度および速度幅の時間変動周期の検出を試みた。おうし座分子雲に付随する T タウリ型星 17 天体を 2 m なゆた望遠鏡と中低分散分光器・MALLS を用いて取得した。そのうち 3 天体は 1200 秒積分の中分散分光観測を繰り返した。CTTS では CaI 輝線の等価幅の変動が見られた。WTTS の輝線は一回目のみ検出できた。これからもモニター観測を続ける予定である。

1. Batalha, C.C., Stout-Batalha, N.M., & Basri, G., et al. 1996, ApJS, 103, 211
2. Hamann, F. & Persson, S. E., 1992, ApJ, 394, 628
3. Noyes, R. W., Hartmann, L. W., & Baliunas, S. L., et al. 1984, ApJ, 279, 763

32 Herbig Ae/Be 型星 Z CMa の可視分光モニター観測

秋本 妃奈子 (兵庫県立大学大学院光学赤外線天文学研究室 D2)

前主系列星の変光を調べることは、若い星の進化段階における質量獲得のメカニズムの解明に役立つと考えられる。B 型の前主系列星である Z CMa は $16M_{\odot}$ 程度の主星と $3M_{\odot}$ 程度の伴星からなると報告されている連星で、2014 年から 2018 年の間に 4 度の急激な増光を起こし、静穏時には V 等級で 11 等であるのに対し増光時には 8 等前後まで明るくなった。

本研究では 2 度のアウトバーストを含む 2015 年 10 月から 2018 年 1 月にかけての分光モニター観測の結果を報告する。観測には西はりま天文台の 2m 反射望遠鏡「なゆた」に搭載される、可視光中低分散分光器 MALLS (Medium And Low-dispersion Long-slit Spectrograph) を使用した。グレーティングは 1800 l/mm 、波長分解能は R 7500、観測した波長域はおおよそ 6280 \AA から 6720 \AA であり、計 19 夜のデータを得た。また解析には Keck 望遠鏡の高分散分光器 HIRES のアーカイブデータから取得した、2000 年から 2008 年までの 5 夜のデータも使用する。

得られたスペクトルには H α や FeII など多数の輝線が確認されたが、今回は 6300 \AA の [OI] の禁制線に着目した。先行研究により [OI] の輝線は連続光の急激な増光の前後で強度と形が変わったことが確認された。本研究の観測期間中 [OI] の等価幅は -0.2 \AA から -3.5 \AA まで変化し、V 等級が明るくなると等価幅は小さくなることが分かった。

6300 \AA の [OI] は、若い星の質量放出率と相関があることが先行研究で示されている。今回得られた等価幅から質量放出率を見積もり、 $3.07 \times 10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ から $2.35 \times 10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ の値を得た。これらの結果から Z CMa の連続光の急激な増光と質量放出との関係を議論する。

1. M.E.van den Ancker et al. 2004
2. Patrick Hartigan et al. 1995

33 自己重力不安定な原始星円盤における連星形成

長尾 颯太 (東北大学 天文学専攻 M1)

恒星はその幾らかが連星系を構成していることが観測によって調べられているが、その連星系を形成する機構は十分に理解されてはいない。原始星円盤の自己重力不安定性に起因する分裂によってできる分裂片が連星の元になる可能性が有力視されており、円盤分裂の理解は連星系の起源を探るための重要な手掛

かりとなっている。しかし実際にどのような円盤であれば分裂が起きて連星系を形成するのか、その条件がよくわかっていないのが現状である。形成間もない原始星は周囲のガスに覆われていて観測が難しいため、連星形成における重力不安定の役割を調べるためには流体シミュレーションを用いる必要がある。K. M. Kratter et al. (2010) では原始星円盤における動力学的な性質が重力不安定に与える影響に着目し、3次元シミュレーションを行った。そのシミュレーションでは円盤の音速、回転周期とコアから円盤への質量降着率とを比較した二つの無次元パラメータを導入され、それらパラメータと連星形成の関係性が調べられた。その結果、原始星円盤へと降着するガスが円盤の重力不安定性に影響を与え、円盤の分裂及び連星系の形成を決めることがわかった。本講演では上記の K. M. Kratter et al. (2010) をレビューし、円盤分裂による連星形成について議論する。

1. Kratter K. M., Mfatzner C.D., Krumholz M.R., Klein R.I., ApJ, 708,1585 (2010)

34 超大質量星形成における星周円盤の分裂

松木場 亮喜 (東北大学 天文学専攻 D1)

ビッグバンからわずか10億年の間に $10^7-10^8 M_{\odot}$ と大質量の超大質量ブラックホールが100天体以上形成されていることが観測から明らかになっている。これらのブラックホールの種は成長時間の問題からある程度重いことが推察されており、超大質量星と呼ばれる $10^5 M_{\odot}$ の星がその死後に残す同程度の質量のブラックホールがその種として有力視されている。超大質量星を形成するには、星周円盤からの高い降着率のもとで星が膨張し電離フィードバックが抑制されることが重要であると考えられている。しかし降着率の高い円盤は自己重力的に不安定化しやすく、それによって分裂を起こす可能性がある。もし円盤が分裂すると降着率が時間変動するようになり、星の成長に影響を与える。したがって、星周円盤の自己重力不安定性による分裂の有無は超大質量星の形成を考えるうえで重要である。Sakurai et al. (2016) では星周円盤の時間進化シミュレーションから得られた降着率をもとに星の進化計算を行い、時間変動のある降着率のもとで超大質量星が形成できるのかを調べている。その結果から降着率が小さい時間が星が収縮するタイムスケールより短い場合に超大質量星が形成可能であるという示唆を与えている。しかし円盤の自己重力不安定性は円盤ガスの温度に依存するためガスの熱進化が重要となるが、Sakurai et al. (2016) は状態方程式をバロトロピックにすることで熱進化を考慮していない。

本研究では円盤ガスの熱進化を考慮したうえで、星周円盤の2次元流体シミュレーションを行った。それから得られる円盤の自己重力不安定性および星への降着率の時間変動をもとに星の進化について考える。これより超大質量星が形成可能なのかについて議論をする。

1. Matsuoka Y., et al., 2018, preprint, (arXiv:1803.01861)
2. Hosokawa T., Yorke H. W., Inayoshi K., Omukai K., Yoshida N., 2013, ApJ, 778, 178
3. Sakurai Y., Vorobyov E. I., Hosokawa T., Yoshida N., Omukai K., Yorke H. W., 2016, MNRAS, 459, 1137

35 ダスト-ガス混合系の現象論的な方程式の定式化と新しい不安定性

富永 遼佑 (名古屋大学 理論宇宙物理学研究室 (Ta 研) D1)

近年のアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) による原始惑星系円盤の高解像度観測によって、様々な天体にダストの多重リング構造が発見された。ALMA Partnership et al. (2015) で報告された HL Tau のリング構造はその代表例である。観測されたリングの形成機構の候補の1つとして永年重力不安定性によるものが考えられている。永年重力不安定性はダストとガスの間の摩擦によって自己重力的に安定なガス円盤の中で成長する不安定性であり、もともと微惑星形成機構として提唱された (e.g., Takahashi & Inutsuka 2014)。永年重力不安定性の成長過程を考える上で重要な物理過程の1つにダストの乱流拡散がある。先行研究ではこの効果を単にダストの連続の式に拡散項を導入することでモデル化していた。しかしこのようなモデル化には、円盤の全角運動量が保存しないという理論的な不備がある。角運動量の非保存は特にダストの運動に大きく影響するため、ダスト濃集過程やリング形成過程を議論する上で解決すべき問題である。そこで本研究では平均場近似に基づき、摩擦が強い場合の乱流拡散を適切に記述する現象論的な方程式を定式化した。この方程式系を用いて線形解析を行った結果、永年重力不安定性は指数関数的に単調成長するモードであることがわかった。これはパラメータによっては過安定モードとして現れていた先行研究とは本質的に異なる結果である。さらにガスの乱流粘性がある場合には永年重力不安定性とは異なる新しい不安定性 (Two-component viscous gravitational instability, TVGI) が現れることがわかった。TVGI は粘性と摩擦によってガスとダスト両方のコリオリ力が弱まることによって成長する不安定性である。TVGI の最大成長波長は半径 100au で 10au 程度、その成長時間は円盤の回転周期の 100 倍から 1000 倍程度であるため、永年重力不安定性と同様に多重リング構造の起源となり得る不安定性である。また TVGI の成長過程ではダストがガスに先行して集積するため、微惑星形成機構にもなり得る現象であることがわかった。

1. ALMA Partnership et al., 2015, ApJ, 808, L3
2. Takahashi S. Z., Inutsuka S.-i., 2014, ApJ, 794, 55

36 原始惑星系円盤内における惑星移動の三次元計算:温度勾配の効果

岡田 航平 (東北大学 天文学専攻 M1)

惑星の形成過程における未解決問題の一つが惑星落下問題である。若い星の周りに作られる原始惑星系円盤で惑星は形成されたと考えられている。しかし、形成中の惑星はガス円盤に密度波を励起しその反作用で負のトルクを受けるため、その結果惑星は中心の恒星へ落下することが指摘されてきた。さらに、その落下時間は短く、惑星が十分に成長する以前に落下してしまうため、この惑星落下は深刻な問題となっている。一方、系外惑星の中心星近くを巡回するホットジュピターを説明する上では、この惑星移動メカニズムは有用である。

これまで、惑星にかかるトルクの計算は線形計算と流体計算の両方により調べられてきたが、三次元線形計算は等温円盤のみに限定されてきた (Tanaka, et al 2002)。これは、動径方向の温度勾配を含めた三次元計算は発散を含むため、この発散の問題は未だ解決されていない。そのため、最近行われた三次元流体計算の結果を線形計算で検証することができていない。本研究では、新たな近似により、温度勾配を含めた三次元線形計算を試みている。

原始惑星系円盤と惑星の重力相互作用による三次元密度波は、線形計算においては円盤回転軸方向 (z 方向) の速度成分をもたない二次元的波と、 z 方向速度成分を持つ三次元的波との重ね合わせで表される。このうち、三次元的波が温度勾配の効果を生み出すのであるが、三次元的波による惑星へのトルクの寄与はわずか 1% 程度と非常に小さい。そこで、本研究では、寄与が小さいと考えられる三次元的波を無視することで、温度勾配がある場合のトルクを近似的に求める。実際、三次元流体計算において発散は起こっていないため、このような近似は有効であると期待される。本講演では、温度勾配を含めた惑星移動の三次元線形計算の結果及び三次元流体計算との比較について紹介する。

1. Tanaka, H., Takeuchi, T., & Ward, W.R. 2002

37 巨大衝突盆地 (SPA) における K 及び Th 濃縮地域の起源

松田 一真 (国立天文台 M1)

月の南極エイトケン盆地 (SPA) は、太陽系最大の衝突盆地である。SPA では Th、Fe の濃度が、周囲の月高地よりも高い。また、SPA 形成時の隕石衝突により、月内部のマントル物質が掘り返され表層にもたらされたと考えられている。すなわち、SPA 内の元素分布や鉱物組成を調査することで、月内部の情報を得ることができる。先行研究では、SPA 北部に高 Ca 輝石が主成分の地域が存在すること、それらの地域は K・Th 濃縮域と一部重なっていることが分かった。さらに、かぐや搭載分光カメラの観測データから、SPA 形成した衝突は初期マントル構

造の大規模な変化 (オーバーターン) 後に起きたこと、衝突による impact melt sheet は分化していたことがわかった。本研究では、まず較正式の導出に際し統計誤差を考慮することで、より正確な較正式を導出し、それに基づき K・Th 濃度地図を作成した。次に K・Th 濃度地図を TC データによる標高地図、MI データによる鉱物組成図、SP データによる反射率グラフと比較・検討した結果、K・Th 高濃度地域は低 Ca 輝石が多く含まれるという鉱物学的特徴を持つことがわかった。また、mare には K・Th がほとんど存在しないことが確かめられた。以上の結果から、SPA 内の K・Th 高濃度地域は SPA 形成時に掘り返されたマントル上部と、SPA の地下にかつて存在した K・Th に富む層に由来することが推測された。

38 エンスタタイトコンドライト集積による地球大気形成

櫻庭 遥 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 惑星系研究室 M2)

地球表層に存在する揮発性元素は、大気や海洋を形成するため、地球や生命の起源を探る上で非常に重要である。地球大気は主に後期天体集積による衝突脱ガスによってもたらされた揮発性元素によって形成されたと考えられている (e.g., de Niem et al., 2012)。ただし、衝突天体の組成は現時点で正確には明らかになっていない。本研究では、特にコンドライト組成に比べて地球表層の C/H 比および N/H 比が小さいことに着目し、後期天体集積期にこれを再現する条件を探る。

原始惑星への天体衝突における衝突脱ガスと大気剥ぎ取り (Svetsov 2000, Shuvalov 2009) について、大気組成 (CO_2 , H_2O , N_2 の 3 成分を仮定) を考慮した大気進化を計算した。初期地球表層では海洋と炭素循環の存在を仮定し、 H_2O と CO_2 の海洋・炭酸塩への分配を考慮した。衝突天体組成についてはその揮発性元素含有量をパラメータとし、計算結果と現在の地球表層の揮発性元素組成を比較した。

衝突脱ガスと大気剥ぎ取りによる大気進化では十分時間が経つと供給と損失がつりあう定常状態に近づくことが分かった。その定常量は衝突天体組成に依存し、揮発性元素含有割合が小さいほど少量の大気量に収束した。また、衝突と同時に炭素が炭酸塩に、水素が海洋に固定されることで、地球表層に獲得される C/H 比と N/H 比は衝突天体の値から減少した。幅広いパラメータ・サーベイの結果、地球表層の C/H/N 量および存在比から見積もられる後期集積天体組成はエンスタタイトコンドライト組成であることを発見した。

1. de Niem, D., et al. 2012, *Icarus*, 221, 495.
2. Svetsov, V. 2000, *Solar Syst. Res.*, 34, 398.
3. Shuvalov, V. 2009, *Meteor. Planet. Sci.*, 44, 1095.

39 地上電波望遠鏡 SPART による金星中層大気微量分子の観測・解析

築山 大輝 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

中心星の活動が周辺の地球型の惑星大気環境に与える影響について理解を深めるべく、我々は、国立天文台野辺山宇宙電波観測所の 10m 電波望遠鏡を用いて、太陽系惑星大気中の微量分子の 100/200GHz 帯スペクトル線を監視する SPART ミッションを推進し、ALMA 望遠鏡やあかつき衛星との同時/連携観測などを展開している。特に火星や金星はすでに磁場を失っており、中心星の活動の影響をダイレクトに受ける貴重な実験場である。電波のヘテロダイン分光は周波数分解能が高く、金星であれば高度 60km 付近に存在する濃硫酸の雲より上層大気中の微量分子の観測が可能である。これまでの観測から金星の中層大気の一酸化炭素 (CO) は太陽活動の低下と連動するように減少傾向にあることが分かってきた。また、太陽活動の影響だけでは説明のつかない短期スケールの一酸化炭素 (CO) の変動を有すことも分かっている。そこで、引き続き、金星と火星の微量分子の変動の動向を探り、到来しつつある太陽活動の極小期における大気酸化反応ネットワーク/大気ダイナミクスのリンクを紐解く計画である。また、100/200GHz 帯の観測スペクトルと放射輸送モデルの比較解析も行っており、講演では本ミッションの観測データの解析について説明し、その結果について報告を行う。

1. 中井直正、坪井昌人、福井康雄 [編] 「シリーズ現代の天文学 16 巻 宇宙の観測—電波天文学」 日本評論社
2. 福井康雄、犬塚修一郎、大西利和、中井直正、舞原俊憲、水野亮 [編] 「シリーズ現代の天文学 6 巻 星間物質と星形成」 日本評論社
3. 浅野正二 [編] 「大気放射学の基礎」 朝倉書店

40 惑星大気の物理 金星のスーパーローテーション

瀬戸 麻優子 (お茶の水女子大学 理学専攻 物理学コース 宇宙物理研究室 M1)

スーパーローテーションとは、惑星や衛星の大気循環において赤道付近を含む広い範囲で自転方向に自転速度を大きく上回る速度の風が吹き続けるという現象のことをいう。特に金星では、自転の約 60 倍にあたる秒速 100 メートルほどの強風がその大気中を吹き荒れていることが観測によって確認されている。地球の上空にもジェット気流のような自転方向に吹く風は存在しているが、自転に対する速度は金星ほど大きくはない。金星のスーパーローテーションのメカニズムは未だに明らかにされておらず、大きな謎の一つとなっている。

本研究ではスーパーローテーションの簡単なモデルを作ること、更にはそのモデルを通して金星の大気の運動を理解することを目指していく。金星の大気の特徴は、非常に厚く、

高温高圧な点である [1]。大気の主成分は温室効果をもたらす二酸化炭素である。更にその上空には硫酸の雲が存在し、その雲の中の風は非常に強風になっている。これらのことから金星の大気の運動を駆動する大きな要因は自転ではなく、温度差であると考えた。自転が非常に遅く、ほぼ止まった状態として捉えることのできる金星では、自然に考えると大気循環は昼面と夜面を結ぶ直径に対して対称性を持っているはずだ。ところがスーパーローテーションではその対称性は破られ、一つの大きな大気の流れができています。そこで、昼面と夜面の温度差が駆動する二次元の対流モデルによってその対称性が破られる様子を描けるか議論していく。また、系外惑星、特にホットジュピターにはスーパーローテーションが見出されている。これについてもどれだけ記述できるか、同じモデルから考察していく。

1. Makoto Taguchi et al. *Icarus* 29, 502 (2012)