

# 星形成・惑星系分科会

理論と観測が紐解く、星と惑星たちの物語

日時	7月27日 15:15 - 16:15 7月28日 9:00 - 10:00, 18:30 - 19:30 (招待講演: 関根 康人 氏) 7月29日 10:15 - 11:15 (招待講演: 深川 美里 氏), 17:15 - 18:30
招待講師	関根 康人 氏 (東京大学)「太陽系氷天体の起源、進化、ハビタビリティ」 深川 美里 氏 (国立天文台)「見えてきた惑星形成」
座長	上赤翔也(東京大学 D1)、芝池諭人(東京工業大学 M2)、杉浦圭祐(名古屋大学 M2)、 野津翔太(京都大学 M2)
概要	<p>本分科会では、分子雲コアからの星や原始惑星系円盤の形成、円盤内で起こる惑星形成を代表とする物理現象、太陽系内惑星 &amp; 衛星、系外惑星の観測とその大気・表層環境に迫る理論研究といった、幅広い領域を取り扱います。</p> <p>これらの分野では近年観測技術・手法の進歩が著しく、赤外線・電波観測による円盤の非軸対称構造の検出や、多種多様な系外惑星の発見、系外惑星大気の分光観測、木星・土星の衛星の表層・内部構造の解明などの驚くべき観測結果が報告されています。特に昨年には、ALMA(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計)による超高解像度観測でおうし座 HL 星 (HL Tau) 周りの円盤の鮮明なリング上構造が報告されたのも、記憶に新しいところです。</p> <p>一方で近年の理論研究の進展も見逃せません。例えばアウトフローや輻射フィードバックを考慮した星形成の 3D シミュレーションや、高空隙率ダストを經由した微惑星形成過程の解明、惑星の軌道進化・重力不安定などを考慮した円盤進化・惑星形成モデルの構築、中心星進化の効果なども取り入れたハビタブルプラネット(生命居住可能惑星)の存在条件の探索などが挙げられます。</p> <p>これら観測・理論の目覚ましい成果は相互の進展に大きく寄与すると期待されるため、これからの星形成・惑星系分野において、観測と理論の緊密な情報交換が必要となることは疑いようがありません。ALMA の本格的な稼働を控え、また地球型惑星の直接撮像を見据えた光学赤外線・次世代超大型天体望遠鏡 (TMT) の建設が本格的に開始された今、星形成・惑星系研究は新たな時代を迎えつつあります。本分科会に参加される新時代を担う皆様には、夏の学校での発表や議論を通じて観測や理論といった枠に囚われず視野を広げ知識を深め、今後の研究の発展と自身の成長のために役立てて頂くことを期待します。</p> <p>注) 水素燃焼する質量の星は太陽・恒星分科会で扱います。 注) サブ pc スケールの分子雲コアは星形成・惑星系分科会で扱いますが、pc スケールの星形成領域や分子雲などは星間現象分科会で扱います。</p>

関根 康人 氏 (東京大学)

7月28日 18:30 - 19:30 B会場

## 「太陽系氷天体の起源、進化、ハビタビリティ」

氷衛星や準惑星などの探査によって、これらの天体の起源や進化のみならず、地下海におけるハビタビリティまで議論されるようになった。本講演では、これら氷天体への探査の最新結果と、その意義について議論する。

深川 美里 氏 (国立天文台)

7月29日 10:15 - 11:15 B会場

## 「見えてきた惑星形成」

近年、系外惑星の人口調査は急速に進展し、惑星系は（少なくとも太陽近傍では）普遍的な存在として認識されている。それら惑星がどのように誕生するのかを理解し、その理解の元で太陽系や地球の形成および存在をとらえ直すことは、天文学における最重要課題の一つである。形成を理解するには、惑星誕生の現場となる原始惑星系円盤の物理・化学的性質を理解することが必須となる。問題は、密度や温度分布といったごく基本的な情報についてさえ、観測的な理解が不足していることである。原始惑星系円盤の観測には、0.1 秒角（近傍星形成領域を対象にすればおよそ 10 AU）を切る高い空間分解能がまず重要となり、また波長によっては円盤に比べて非常に明るい星の光を低減する工夫が必要となる。

この講演では、原始惑星系円盤の近赤外線・サブミリ波観測の結果を紹介する。近赤外線撮像においては、すばる等の大口径望遠鏡と補償光学、さらに観測手法の工夫の組み合わせによって、またサブミリ波においては干渉計によって、0.1 秒角程度かそれを切る空間分解能での観測が可能になっている。すばる等による近赤外線撮像においては、年齢 100 万年程度のいくつかの円盤において、スパイラルや溝状の構造が顕著な非軸対称性とともに見出されている。これらの結果は、年齢 100 万年程度で既に惑星や伴星が円盤内に存在する可能性を示唆する。また、ALMA による観測では、円盤の中で塵が集まって成長し、惑星が形成されていく兆候が見え始めている。さらに、年齢 10 万年程度の HL Tau をとりまく円盤に、複数の溝構造が見出されたことは記憶に新しい。これら最新の結果を概観し、今後取り組むべき課題についても述べる。

## 星感 a1 低金属度環境における大質量星原始星からの 輻射フィードバック効果

福島 肇 (京都大学 天体核研究室 M2)

銀河は現在の宇宙において多種多様な構造をしている。銀河内の構成要素である星や星間物質の進化を理論的に追うことによって、それらを理解する試みがなされてきた。その中で、星の初期質量関数や星形成率といった銀河内での星形成を特徴づけるパラメーターは上記の議論に必要な。特に、大質量星は膨大な輻射による H II 領域の形成を行う。また、寿命が尽きることで超新星爆発とそれに伴う重元素放出をする。これらにより、大質量星は銀河環境全体をコントロールしその後の星形成過程に決定的な影響を与えるため、その形成率は重要である。始原ガスからの星形成過程は理解が進んできていて、形成される星の多くは太陽の数十倍から百倍の大質量星になることがわかってきた [1]。しかし、低金属度領域における星の初期質量分布や星形成率は不明であるため、大質量星の形成率がわからない。このため、低金属度銀河進化を議論する際に課題となっている。本研究では、大質量星の質量決定に重要と考えられる、原始星の降着成長における輻射フィードバックを調べた。降着流とともに原始星内部の進化を計算することで放出される輻射の量を求めた。これにより、ダスト層 (ダストによって降着流が光学的に厚くなっている層) への輻射圧によって降着が止められる条件と H II 領域の膨張により降着が止まる条件を議論する [2]。ダスト層における光学的厚みや降着流の大きさは金属度によって変化するため、金属度ごとに調べた。本講演では上記の内容を説明した後、得られた結果を発表する。

1. Hirano, S. et al. ApJ, 781, 60 (2014)
2. Hosokawa, T. & Omukai, T. ApJ, 691, 823 (2009)

## 星感 a2 大質量星への質量降着率とアウトフローの 関係

松下 祐子 (九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻 M1)

一般に大質量星とは  $\sim 8M_{\odot}$  以上の質量をもつ星を指す。大質量星からの輻射は、銀河進化や重元素合成、星形成の過程に多大な影響を与える。そのため、大質量星形成を理解することは、宇宙の進化を考える上で重要である。しかしながら、大質量星の形成過程は明らかになっていない。

Beuther et al. (2002) は、大質量星形成領域で  $^{12}\text{CO} J = 2 - 1$  の輝線を用いてアウトフローの観測を行った。彼らの結果では、原始星アウトフローの質量や運動量は、中心星質量と共に増加することを示している。そのため、大質量星のアウトフローも小質量星の場合と同様の機構で駆動されると考えられる。我々は数値シミュレーションを用いて、大質量星形成の計算を行った。この中で、初期の分子雲の安定性 ( $\alpha_0$ : 熱エネルギーと重力エネルギーの比) をパラメータとした。  $\alpha_0$  の値が小さいほど、初期のガス雲は、重力的に不安定で、星への降着率が大きい。解析の結果、大降着率を示すガス雲ほど、アウトフローの質量や運動量は増加した。また、降着率とアウトフロー率の比は一定になるという関係性が得られた。

1. Beuther, H. Astronomy and Astrophysics. 383, 892 (2002)
2. Tan, J. C. Protostars and Planets VI, University of Arizona Press. 914, 149 (2013)

## 星感 a3 ALMA 観測から見る原始星の力学進化

麻生 有佑 (国立天文台三鷹 D2)

星形成初期にあたる原始星では動的降着 (インフォール) するエンベロープが特徴的である。一方で、原始星より進化した段階にある古典的 T タウリ型星 (CTTS) の周囲にはインフォールするエンベロープは見られず、ケプラー回転している円盤 (原始惑星系円盤、ケプラー円盤) が卓越している。惑星系形成の現場としても注目される原始惑星系円盤は、この原始星と CTTS の間の進化段階で形成されると考えられているが、その形成過程はよく理解されていないのが現状である。円盤形成に代表されるような力学的進化を調べる目的で、3 つの原始星 (L1527 IRS, TMC-1A, L1489 IRS) に対して ALMA を用いてミリ波の分子ガス輝線を観測した。さらに、過去にケプラー円盤が同定されている 11 個の原始星も含めて、原始星段階における力学の進化を調べたので報告する。進化段階の指標として赤外域も含む SED から決まる Class、 $T_{bol}$  及び  $L_{bol}/L_{submm}$  を用いた。まず、取り上げた 14 天体の中心星質量には進化とともに増大する傾向が見られた。14 天体中 6 天体に対してはケプラー回転に加え、円盤へインフォールする成分も検出されており、これら 6 天体のケプラー円盤半径は中心星質量と正の相関を示した。この相関は、時間を追うごとに円盤へ大きな角運動量が持ち込まれるという古典的なシナリオ (Terebey, Shu, and Cassen 1984) に定量的にも矛盾しないが、磁場を含むシミュレーションでは、中心星質量は増え続けながらも円盤の成長が止まるという予想もある (Machida et al. 2014)。取り上げた原始星のうち 4 天体は自由落下よりも遅いインフォールを示すのに対して、最も進化している L1489 IRS では円盤の上下から自由落下する成分が検出されたので、インフォールについても考えられる仕組みを議論する。

1. N. Ohashi et al., ApJ, 796, 131, 2014
2. H.-W. Yen et al., ApJ, 793, 1, 2014

## 星感 a4 星間アミノ酸の合成シミュレーション

加藤 貴大 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M1)

現在、星間雲で複雑な有機物が多数発見されている。しかし、そのような複雑な有機分子がどのような化学反応を経て形成されているかは解明されていない。今までの観測では、有機分子の 1 つであるアミノアセトニトリルの発見が報告されている。これは、最も単純なアミノ酸であるグリシンの前駆体の 1 つと考えられていて、宇宙空間での有機物合成を考える上で重要な手がかりとなる。しかし、隕石中ではグリシンの存在が確認されているにもかかわらず、観測によるグリシンの検出例は現在報告されていない。

本研究では、星間空間でグリシンがどの程度の確率で合成されるかを、DUmode (参考文献 1) を応用したコンピュータシミュレーションによって調査した。その結果、グリシンの合成経路候補として多く議論がなされているストレッカー反応以外の方法で、グリシンが生成されているということがわかった。また、グリシンとアミノアセトニトリルの生成率の温度依存性を調べたところ、以下のことがわかった。

- 1) 数百 K 以下では両方とも生成されなかった。
- 2) 数千 K 以上では、両方の生成率はほぼ同じであった。しかし実際は、そのような高温状況ではアミノ酸は分解してしまい、存在できない。

3) 数百～数千 K の温度領域においては、グリシンよりもアミノアセトニトリルの方が生成率で桁が大きい。

星間分子雲は通常、10～数 10K であるが、局所的に紫外線加熱を受けることがあり、1000K 程度になっている領域があることがわかっている。そのような領域において、複雑有機物が生成されたとすれば、本研究の結果は、アミノアセトニトリルが検出されているのにグリシンが検出されていないということを説明可能である。

1. J. Dugundji, I. Ugi, *Top. Curr. Chem.* 1973. 39. 19.

## 星惑 a5 原始太陽系星雲における同位体比均質化の可能性

竹石 陽 (東京工業大学地球惑星科学専攻 M1)

### 序論

太陽系は分子雲コアの重力崩壊を経て形成された。分子雲の構成物質に複数の超新星爆発や赤色巨星から放出された物質が含まれると推定されるため、分子雲コア内の固体物質の同位体比は互いに不均質と考えられる。一方、分析によると地球・月・火星・隕石などの固体物質の主要元素の同位体比は互いに均質である。これは太陽系が形成される過程で、全ての固体物質(ダスト)がガスになるほどの高温を経験したことを示唆するが、どのようにして生じたかは分かっていない。

### 目的

本研究ではそのような高温プロセスが分子雲コア崩壊から原始太陽系星雲形成および進化の過程で実現可能であるかを調べる。

### モデル

1 太陽質量の剛体回転している分子雲コアの崩壊を考え、中心への降着は Shu(1977) モデルを用いる。降着を考慮した原始太陽系星雲の形成および進化は Cassen & Moosman (1981) のモデルを用いる。つまり分子雲コアの物質は降着開始前の角運動量に応じた遠心力半径内に落下する。原始太陽系星雲内のダストは乱流による影響を受ける。これを加味したモデル (Wehrstedt & Gail 2002) で、ダスト面密度の時間発展を計算する。熱源は粘性加熱とし、ダストが 2000K 以上を経験することで同位体比の均質化が起こるとする。本研究では分子雲コアの温度と角速度をパラメーターとし、分子雲コア崩壊開始から 3Myr 後の原始太陽系星雲内の全ダストの均質化が生じる場合を調べた。

### 結果

原始太陽系星雲の温度は中心星に近いほど高温となった。このため、形成された原始太陽系星雲内の全ダストの同位体比が均質となるのは、分子雲コアの初期温度が高く、角速度が小さい場合であった。

### 結論

分子雲コア崩壊から原始太陽系星雲形成および進化の過程で全ダストが蒸発・再凝結し、同位体比の均質化が起こりうるということが分かった。ただし、そのようなことが起こるのは分子雲コアの初期温度が高く角速度が小さい場合である。そのときに形成される円盤は、半径が比較的小さいものとなる。

1. Cassen, P., & Moosman, A. 1981, *Icarus*, 48, 353

2. Shu, F. H. 1977, *ApJ*, 214, 488

3. Wehrstedt, M., & Gail, H.-P. 2002, *A&A*, 385, 181

## 星惑 a6 ダスト・ガス比の高い場合の衝撃波シミュレーション：コンドリュール形成モデルへの応用に向けて

勝田 祐哉 (東京工業大学地球惑星科学専攻中本研究室 M1)

コンドリュールは隕石の主成分である mm サイズのケイ酸塩組成組織である。コンドリュールは岩石学的検証から、ダストの急激な加熱と冷却によって形成されたことが分かっている。また、同様に周囲の環境についても様々なことが推定されているが、具体的な形成プロセスについては未だに議論がなされている。しかし、コンドリュールが形成されたと考えられる太陽系初期の情報を知る為に、この形成プロセスを決定することが重要な課題である。

検討されている形成プロセスの中で、有力なモデルとして我々が注目しているモデルが衝撃波モデルである。これは衝撃波後面でダストとガスの間に相対速度が生じ、ダストがガス摩擦を受けて加熱されるというモデルである。また衝撃波の発生源も問題となるが、我々は楕円軌道を回る微惑星に注目している (cf. Boley et al. 2013)。このモデルの問題点として上げられているのはコンドリュール形成時の酸素分圧で、太陽組成よりも酸素分圧の高い状況が説明されない。

そこで、我々はダストの割合が高い場合についての衝撃波の振る舞いについて調べることにした。これはダストが蒸発することで気相に酸素が供給され、ガス・ダスト比  $\sim 1:1$  の場合に問題点が解決されることが見込まれるためである (Jones et al. 2000)。また、今後コンドリュールの形成について詳細に議論するために、ダストの多い場合についての計算コード開発を行った。

解析結果として、ダストの割合が高い場合には温度が上昇するという結果が得られた。これは、酸素分圧の高い状況が形成されやすいことを示している。また、数値計算の結果も解析的な手法によって得られた値と一致し、計算コード開発にも成功したと言える。今後はこの計算コードを改良して、よりリアルなコンドリュール形成の議論を行っていきたい。

1. Boley et al., *The Astrophysical Journal*, 776 (2013)

2. R. H. Jones et al., *Protostar and Planets IV* (2000)

3. J. M. Stone and M. L. Norman, *The Astrophysical Journal Supplement Series* 80, 753 (1992)

## 星惑 a7 液滴の衝突による合体と分離

荒川 創太 (東京工業大学地球惑星科学専攻中本研究室 M1)

コンドリュールはコンドライト隕石に多量に含まれる 1 mm 程度の球形のシリケート構成物である。多くのコンドリュールは単体で隕石中に含まれているが、コンドリュール全体の 5% 程度は 2 つ以上のコンドリュールが付着合体したかたち (複合コンドリュール) で隕石中に取り込まれている。コンドリュールは形成時に溶融され、その後冷却することで球形となる。複合コンドリュールは、この冷却時に、独立なコンドリュールが衝突することによって形成されたのではないかと考えられて

いる (Yasuda et al. 2009). 複合コンドリュールの形成過程を理解することは、コンドリュールの形成条件、ひいては微惑星形成期の原始太陽系の状況を明らかにすることにつながると期待される。

複合コンドリュール形成を理解するためには液滴 (非圧縮性流体) の衝突に関する物理を理解することが必要である。水の液滴に関しては Ashgriz & Poo (1990) によって実験的および理論的な研究が行われ、衝突の性質は2つの液滴のサイズ比、インパクトパラメータ、そしてウェーバー数 (慣性力と表面張力の比を表す無次元数) によって決まり、反射的分離、伸張的分離、合体などのいくつかのパターンに分けられることが明らかになった。

今回の発表では、この2つの論文のレビューを行い、複合コンドリュール形成のメカニズムとその基礎となる物理について議論することで、今後の研究課題を示す。

1. Ashgriz, N., & Poo, J. Y. 1990, J. Fluid Mech., 221, 183
2. Yasuda, S., Miura, H., & Nakamoto, T. 2009, Icarus, 204, 303

## 星惑 a8 原始惑星系円盤の化学反応と、 $H_2O$ スノーラインの分光観測による検出可能性

野津 翔太 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

太陽質量程度の前主系列星周りの原始惑星系円盤 (以後、“円盤”) の場合、円盤赤道面における  $H_2O$  スノーラインは、中心星から数 AU の位置に存在する。しかし、撮像観測によって  $H_2O$  スノーラインを検出する事は、空間分解能が足りない為に困難である。一方で円盤はほぼケプラー回転している為、輝線のドップラーシフトの解析から輝線放射領域の中心星からの距離の情報が得られる。そこで高分散分光観測を行い、得られた  $H_2O$  輝線のプロファイル形状を解析すれば、円盤内の  $H_2O$  ガス分布に制限をかけ、 $H_2O$  スノーラインの位置を同定できると考えられる。

我々はこれまで、円盤中の  $H_2O$  の存在量とその分布を化学反応計算 [1] で調べてきた。またその結果を用いて、近赤外線からサブミリ波までの多数の  $H_2O$  輝線プロファイルの計算を行い、分光観測による  $H_2O$  スノーライン決定の可能性を調べてきた。その結果、アインシュタインの A 係数が小さく励起エネルギーが高い複数の輝線プロファイルを高分散分光観測で調べる事で、 $H_2O$  スノーラインを同定できる事を報告した [2],[3]。

本研究では、新たに化学反応計算においてダスト表面反応を導入した場合と、ダストサイズを成長させた場合について  $H_2O$  の存在量とその分布を調べ、その結果を元に  $H_2O$  輝線プロファイルを計算した。まずダスト表面反応を導入した場合は、円盤赤道面のスノーライン内側では  $H_2O$  ガスの存在量が増加する一方、円盤表層部の高温領域では減少した。その結果、輝線の放射強度が数倍程度増加し、かつその増加量は波長が短い輝線ほど多い事も分かった。また、円盤表層部の高温領域からの寄与が小さくなった事で、A 係数がより大きな輝線も  $H_2O$  スノーラインの決定に使える可能性が示された。一方ダストサイズを成長させた場合は、円盤表層部の高温領域での  $H_2O$  ガス存在量が、増加する事が分かった。講演では将来の分光観測との関係についても議論する。

1. Walsh, C., Millar, T. J., & Nomura, H., ApJ, 722, 1607 (2010)
2. Notsu, S., et al., ASPCS, in press. (2015)
3. Notsu, S., Nomura, H., et al. in prep.

## 星惑 a9 HiCIAO を用いた赤外線偏光観測による IM Lup の星周円盤の観測

辰馬 未沙子 (国立天文台三鷹 M1)

惑星は前主系列星である T タウリ星やハービッグ Ae/Be 星の周りにある原始惑星系円盤から形成される。この惑星形成過程を知るためには星周円盤の観測が必要であり、今まで数多くの円盤が観測されてきた。その中でも特に、おおかみ座星形成雲にある M0 型 T タウリ星の IM Lup は、過去の観測から典型的な T タウリ星であるが比較的大きな星周円盤を持つことが知られている。しかし、円盤の全体像はわかるが細かい構造はわかっていなかった。そのため、高いコントラストで円盤の中心領域を見る必要がある。

そこで今回、我々は SEEDS プロジェクトの一環として、すばる望遠鏡 HiCIAO カメラの偏光差分撮像モードを用い、H バンド ( $1.6\mu\text{m}$ ) で IM Lup の星周円盤の偏光強度 (偏光度  $\times$  全強度) を観測した。中心星やそのスペckルノイズは無偏光 (偏光度 = 0) なので、今までの観測とは違いこの方法では完全に中心星の影響を取り除くことができ、円盤の中心領域まで見ることができる。その結果、円盤の楕円によるフィッティングや動径方向、方位角方向の輝度分布から、偏光強度が短軸に対して非軸対称であることがわかった。一方、過去の観測による全強度の画像からは、このような短軸に対する非軸対称性は見られていない。

この非軸対称性の起源としては二つの可能性が考えられる。一つ目としては全強度に時間変動がない場合、偏光度に非軸対称性があるということであり、これは性質の異なるダストが非軸対称に分布しているということを示している。二つ目としては全強度に時間変動がある場合、全強度に非軸対称性があるということであり、これは非軸対称な内縁円盤の shadowing 効果によるということを示している。この非軸対称性の起源を探るために、円盤モデルとのフィッティングや追加観測を予定しており、本講演ではその結果の紹介とともに今後の課題についても議論する。

1. C. Pinte, D. L. Padgett, F. Ménard, et al., A&A, 489, 633 (2008)

## 星惑 a10 原始惑星系円盤におけるダストと乱流場の相互作用

古谷 眸 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

原始惑星系円盤において、ダストがサブミクロンサイズからセンチメートルサイズへ成長するにあたり、衝突破壊問題が指摘されている。衝突破壊は乱流渦に追従することによって加速されたダスト同士の相対速度が、限界付着速度を超えてしまうため生じる問題である。しかし、乱流渦中のダストの運動は、ダストサイズに依存するため、相対速度は乱流渦とダストの運動を統合的に解いて決めなくてはならない。ダストとガスの相対速度の緩和時間を乱流渦の時間スケール (コルモゴロフ時間) で規格化した無次元量を Stokes 数といい、乱流渦に対するダストの追従性を表す指標となる。Stokes 数が 0 の時、ダストは乱流渦と共に運動する。Stokes 数が 0 から大きくなるにつれて、ダストは乱流渦から弾き飛ばされ、渦度の小さい領域に集中し、強い空間相関が誘起される。Stokes 数が 1 のオーダーにおいて、もっとも極端な空間相関が現れることが示唆されている (Pan et al. 2011)。Stokes 数が 1 になるダストサイズは、原始太陽系円盤の場合、太陽から 10AU の距離でおよそ  $10\mu\text{m}$

である。一方、Stokes 数が大きすぎるとダストは完全に乱流渦とは独立に運動する。

しかしながら、先行研究では、乱流のカスケードと散逸について、粘性流体の正しい支配方程式 (Navier-Stokes 方程式) は解いておらず、格子サイズで決まる数値粘性によって疑似的に扱っているため、この結論が正しいか否かはわからない。そこで我々は、Navier-Stokes 方程式を直接解く 3 次元大規模直接数値計算 (DNS) を行っている。この計算により、Stokes 数が 0 から 10 まで変化した場合のダストの運動の違いを明らかにし、Stokes 数に依存したダストの相関関数を計算することができる。これによって、ダストの相対速度と衝突確率を正確に見積もることが可能となる。

本講演では先行研究との比較を行い、ダストの衝突破壊問題を解決する可能性について議論する。

1. Liubin, P., et al. ApJ, 740, 6 (2011)

## 星惑 a11 磁気乱流により駆動される原始惑星系円盤 風中でのダストの動力学

三宅 智也 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M2)

星が新たに誕生すると同時に、その若い星の周りにガスとダストから成る原始惑星系円盤が形成される。惑星は、その原始惑星系円盤中で形成されると考えられている。原始惑星系円盤進化の上で、未だ理論的に解明されていないことの一つに円盤の散逸機構がある。近赤外線観測から、原始惑星系円盤の散逸時間は  $10^6 - 10^7$  年であると推察されている。円盤の散逸機構の候補として、中心星からの UV や X 線放射による光蒸発が幅広く研究されている。しかし、Suzuki & Inutsuka (2009) では、磁気回転不安定性 (MRI) を引き金とした、磁気乱流により駆動される円盤風もまた、光蒸発と同等以上に円盤散逸の効果があることがわかっている。

ガスの散逸はダストの運動に影響を与えるため、この円盤風を考慮したダストの動力学を研究することは非常に重要である。そこで本研究では、磁気乱流により駆動する円盤風を考慮した原始惑星系円盤の鉛直方向に対して、ダストの密度分布の時間進化を数値シミュレーションすることにより、さまざまなサイズのダストの動力学について研究を行った。

その結果、ガスと同様に運動する比較的小さいダストは、円盤風により円盤外部へと流れ出す。一方、大きいダストは、円盤内部に留まる。面白い事に、中間サイズのダストは、重力と円盤風によるダストを持ち上げる力が釣り合い、最小質量円盤 (MMSN; Hayashi 1981) を仮定した場合、1AU で  $20 - 40\mu\text{m}$  サイズのダストが、赤道面から  $5 - 10$  スケールハイトの位置に浮いて滞留するという結果を得た。また、中心星からの距離に対する依存性を考慮すると、比較的小さいダストは円盤外側の領域にのみ残る。一方、大きいダストは計算領域内に収まるといった結果を得た。

これらの結果は、円盤内のダストが円盤内側領域から、そして小さいサイズから消失していくということを暗示している。また、若い天体まわりのダストを含む物質の観測結果を本研究結果で上手く説明できる可能性がある。

1. Miyake, T., Suzuki, T. K., & Inutsuka, S.-i. 2015 submitted to ApJ (arXiv:1505.03704)

2. Suzuki, T. K., & Inutsuka, S.-i. 2009, ApJ, 691, L49
3. Hayashi, C. 1981, Progress of Theoretical Physics Supplement, 70, 35

## 星惑 a12 赤外線天文衛星「あかり」と近赤外線地上望遠鏡 IRSF により検出したデブリ円盤の特性

渡邊 華 (名古屋大学 理学研究科 宇宙物理学研究室 赤外線グループ (UIR 研) M1)

デブリ円盤とは、年齢 1 千万から 10 億年の主系列星が保持するダストの円盤を指す。これらの円盤では、惑星の元となる微惑星が衝突合体を繰り返す際にダストを供給していると考えられ、定常進化モデルで説明されてきた。しかし、これまでのデブリ円盤のサンプルは、数十 ~ 百 AU に位置する冷たいダストから構成されるものが多く、数 AU 相当の円盤の研究には、暖かいダストの放射を検出する中間赤外線での探査が必要である。本研究では、赤外線天文衛星「あかり」の中間赤外線全天サーベイデータを用い、デブリ円盤を無バイアスに探査することでサンプルを増やし、円盤の特性を議論する。

デブリ円盤は、主星の放射に対し赤外域で超過を示す。「あかり」全天サーベイデータと照合できた主系列星 681 天体に対し、赤外超過の有無を調査した。先行研究にない 2MASS 近赤外線カタログを用いたが、検出器飽和により、明るい天体の測光精度が悪かったため、近赤外線地上望遠鏡 IRSF で近傍の明るい 325 天体を追観測し、測光精度を一桁改善した。波長  $18\mu\text{m}$  での観測値と主星放射の比の頻度分布に、正規分布を仮定し、 $3\sigma$  以上の超過放射を持つ天体をデブリ円盤とした。検出したデブリ円盤に対し「あかり」の波長  $9\mu\text{m}$ 、WISE の波長 11、 $22\mu\text{m}$  の測光値を加え、円盤スペクトルからその特性を導出した。

探査の結果、新検出の 9 天体を含む、53 天体のデブリ円盤を検出した。主星放射の見積りに IRSF の観測結果を用いたことで、近傍で明るい主星のデブリ円盤の検出精度を向上することに成功した。検出確率は ~8% で、先行研究と矛盾がない。また、検出したデブリ円盤の年齢とダスト量を比較したところ、定常進化モデルでは説明できないほど、年齢に対して大量のダストを保持する天体が存在した。これらは、巨大衝突など突発的なイベントの寄与を示唆する。

## 星惑 a13 多体惑星系における軌道の長期的安定性と その進化

佐藤 雄太郎 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M1)

太陽系の地球型惑星は火星程度の大きさの原始惑星同士の衝突によって形成されたと考えられており、これは巨大衝突ステージと呼ばれる。このことは理論的な研究からだけでなく、地質学的な証拠からも支持されている。このステージが起こるまでの時間は原始惑星の軌道間隔に非常に強く依存しており、間隔が広がるほど不安定時間が急激に長くなる。本講演では、この物理現象を発見した Chambers et al. (1996) のレビューをまざり行う。

離心率と軌道傾斜角が十分小さい 2 つの原始惑星が太陽の周りを公転するとき、初期の軌道長半径の差を相互ヒル半径で規格化した無次元の長さ  $\Delta$  が  $2\sqrt{3}$  より大きい場合は軌道不安定にならないことは解析的に

も数値計算からも知られている。しかし、3つ以上の原始惑星が存在する系の不安定性については解析的には解けないため、数値計算によって調べられた。 $\Delta$  をパラメータとして  $\Delta = 10$  まで彼らが数値計算した結果、数値計算を行った時間内で系は必ず不安定になり、不安定時間  $t$  は  $\Delta$  の指数関数になることがわかった。火星程度の原始惑星が隣の原始惑星と衝突を繰り返し地球ができる、大きくなるにつれて惑星が間引かれるため軌道間隔は広がる。地球ができる直前の軌道間隔は約13倍のヒル半径となり、その不安定時間を見積もると太陽系の年齢を超えてしまう。これは、 $t$  が  $\Delta$  の指数関数になっているため、軌道間隔をすこし変えただけで不安定時間が劇的に増加するからである。もちろん、不安定時間が太陽系の年齢を超えることはないことがその後の研究で確認されている。(e.g., Kominami & Ida 2002)

本講演ではさらに、不安定になった後の衝突・合体を取り扱い、その後の原始惑星の軌道進化について数値計算を行う予定である。そして、この研究をさらに発展させ原始惑星系円盤の消失過程が巨大衝突ステージに与える影響についても議論したい。これにより、太陽系の地球型惑星の軌道分布やそれらの形成年代や形成メカニズムについて理論的に迫りたいと考えている。

1. J. E. Chambers, G. W. Wetherill, and A. P. Boss 1996, *Icarus*, 119, 261
2. J. Kominami and S. Ida 2002, *Icarus*, 157, 43
3. K. Nakazawa and S. Ida 1988, *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 96

#### 星惑 a14 負の圧力への応用に向けたゴドノフ SPH 法の改良

杉浦 圭祐 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M2)

固体惑星は天体衝突の繰り返しによる合体成長で形成されたと考えられている。従って惑星の起源を詳しく理解するにあたって、小天体同士の衝突による破壊及び合体の効果を詳細に理解することは極めて重要である。しかし小天体は km 以上のサイズを持つため、室内実験で衝突を再現することは不可能である。よって数値計算を用いて小天体の衝突破壊・合体の効果を評価する必要がある。近年小天体の衝突計算が、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法という流体の数値計算方法を弾性体に応用することで行われている (e.g. Benz and Asphaug 1999)。しかしこの標準 SPH 法には、固体が引き伸ばされた時に生じる張力を表す負の圧力の状態において、Tensile Instability という粒子同士がくっついてしまう不安定性が存在する (Swegle et al. 1995)。Monaghan 2000 ではこの不安定性を人工圧力という項を導入して解決したが、この解決方法は元の方程式にない非物理的な項を導入した不自然なものである。さらに Mehra et al. 2012 では、この人工圧力の項では高速衝突計算における Tensile Instability を防ぐことができなかったと報告されている。従って天体の衝突計算を SPH 法で行うにあたって、より自然で堅牢な解決方法が必要である。SPH 法における Tensile Instability の起源はその離散化誤差である。標準 SPH 法では離散化をする際に荒い近似を使用しているため、一般の粒子配置では空間 1 次精度すら達成できない。一方でゴドノフ SPH 法 (Inutsuka 2002) では離散化を注意深く行い、空間 2 次精度を達成している。よってこの高精度なゴドノフ SPH 法を用いれば Tensile Instability を自然に解決することが可能であると考えられる。そこで本講演ではゴドノ

フ SPH 法の安定性を線形安定性解析で評価した結果を紹介し、ゴドノフ SPH 法を用いた Tensile Instability の自然で新しい解決方法について論ずる。(Ref.) "An Extension of Godunov SPH: Application to Negative Pressure Media", Sugiura and Inutsuka 2015 submitted to JCP (arXiv: 1505.05230)

1. S. Inutsuka, *J. Comp. Phys.*, 179, 238-267, 2002
2. J. W. Swegle, D. L. Hicks and S. W. Attaway, *J. Comp. Phys.*, 116, 123-134, 1995
3. J. J. Monaghan, *J. Comp. Phys.*, 159, 290-311, 2000

#### 星惑 a15 WPH 法による月形成シミュレーション

河瀬 哲弥 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

最も有力な月形成のモデルとしてジャイアント・インパクト説がある。この説では、原始地球に火星サイズの原始惑星が衝突したと考えられている。その結果、衝突物のマントルが飛び散り、差動回転円盤が形成される。その後、この円盤物質が自己重力で集積し、合体成長することで月が誕生したとされる。この説は月のコアが他の太陽系天体のコアと比べて小さいなどのいくつかの観測事実をうまく説明できる。

実際にジャイアント・インパクト説で月形成が可能かどうかを確かめるため、月形成のシミュレーションが多くの先行研究でなされてきた。しかし、それらはジャイアント・インパクトから円盤形成までを粒子法流体スキームの 1 つである SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics)[1]、円盤内での月形成を N 体計算 [2] で行うといった 2 段階のものであった。このため、段階間で多くの仮定を必要とし、最終的な結果に不定性が残っている。ジャイアント・インパクトから月形成までの一貫した流体シミュレーションが行われてこなかった理由は、差動回転円盤の長時間の計算に SPH 法が適していないからである。近年、この問題を克服した新しい粒子法流体スキームである WPH 法 (Weighted Particle Hydrodynamics) が開発された [3]。これにより差動回転円盤の流体シミュレーションが長時間可能となった。

本研究では、N 体計算で行われた円盤内での月形成を WPH 法で計算し、両者の結果を比較する事を目標とした。その結果、まだ簡単なモデルではあるが、WPH 法による周地球円盤の数値計算の結果、N 体計算と同様に一個の重い天体が形成され、WPH 法を用いた月形成シミュレーションが有効である可能性が高い事が確認できた。今後は WPH 法でジャイアント・インパクトから月形成まで一貫したシミュレーションを行う予定である。

1. Benz, Slatery, & Cameron, *Icarus* 66, 515-535 (1986)
2. Ida, Canup, & Stewart, *Nature* 389, 353-357 (1997)
3. Gaburov & Nitadori, *MNRAS* 414, 129 (2011)

#### 星惑 a16 周期解析を用いたケプラー光度曲線からの惑星系シグナルの抽出

逢澤 正嵩 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

宇宙望遠鏡ケプラーによるトランジット (主星の蝕による減光) 観測によって、1000 を超える系外惑星が検出されている。トランジット惑星は、ケプラーから得られた光度曲線を解析することで検出されるが、光度曲線には統計誤差の他に、装置由来の誤差やフレアや黒点等の星の活



動による系統誤差が含まれている。そうしたノイズの除去は、スーパーアースやまだ検出されていない系外衛星 [1]、リング、トロヤ群 [2] (惑星のラグランジュポイント L4, L5 付近の小惑星群) 等の微弱なシグナルの検出に不可欠である。

従来、ノイズ除去のための光度曲線のデータリダクションには、phase folding というトランジットの何周期分ものデータを平均する手法が取られてきた。phase folding による解析は、データの増加による統計誤差の減少は望めるが、系統誤差を取り除くためには誤差の性質をモデル化した解析が別個必要となる。そこで [3] では、光度曲線をフーリエ級数近似した後、トランジットの周期に対応するフーリエ係数のみを抜き出してデータを再構成する手法を提案した。この手法を用いると、惑星の公転周期と同期したシグナルのみを光度曲線より抜き出す事ができるため、結局惑星や衛星の情報を保ったまま星の活動等の系統誤差の除去が期待できる。またこの手法は系統誤差のモデル化の必要が無いため簡便であり、解析速度も phase folding に比べ早い。

本講演では、[3] に基づいた周期解析と phase folding の二つの手法の長所、短所について考察したのち、周期解析をケプラーで得られた光度曲線 (e.g. HAT-P-7) に適用して、系外衛星やトロヤ群を探索した結果を報告する。

1. Hippke, M. 2015, arXiv:1502.05033
2. Janson, M. 2013, ApJ, 774, 156
3. Samsing, J. 2015, arXiv:1503.03504

## 星惑 a17 惑星内部の対流シミュレーション：二重拡散対流の理解に向けて

大野 由紀 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M2)

惑星の進化の理解において、惑星内部の構造や熱の輸送は重要である。惑星内部では全体に対流現象が起きていて熱を外に逃がしていると考えられてきたが、それでは説明のできない半径を持つ惑星が数多く存在している。例えば、太陽系外にはホットジュピターと呼ばれる中心星の近くを回る巨大なガス惑星がある。収縮による重力エネルギーの解放が中心星から受ける放射の効果で遅れていることが計算されているが、それでは説明できないほど大きな半径を持っているものもある。また、太陽系内の惑星についても土星や天王星においても現在の光度が説明できていない。これらの問題の解決方法として、惑星内部の組成勾配によって、対流による外部への熱の輸送効率に変化していることが挙げられている。

一般に対流現象は重力下で温度勾配が断熱温度勾配よりも急である場合に発生する (Schwarzschild の条件)。組成 (平均分子量) に勾配がある場合には、組成的に下の方が重ければその分安定化、逆であれば不安定化し、この場合の安定条件は Ledoux の条件で表される。実際の現象では熱や組成の勾配に加えて、これらの拡散の効果も加わるため、非常に複雑になる。例えば、組成的に不安定で熱的に安定なときに、拡散の影響で二重拡散対流と呼ばれる現象が起こることが知られている。

本研究では、熱と組成の勾配と拡散のそれぞれを考慮した場合の対流現象について、熱フラックスを定量的に評価し、観測結果と整合性のある惑星形成の理論の構築を目指す。SPH 法を用いて 2 次元の対流の数値シミュレーションを行い、熱フラックスを計算する。流体の数値計算手法の中でも SPH 法は粒子を用いたラグランジュ的な計算手法であるので、拡散の効果を完全に取除いた計算をすることができ、拡散が結

果に与える効果をはっきりと確認できるというメリットがある。本講演では、数値シミュレーションの結果を紹介し議論する。

1. Baraffe, Chabrier and Barman 2010, Rep. Prog. Phys. 73 016901
2. Leconte and Chabrier 2013, Nature Geoscience, 6, 347-350
3. Rosenblum et al. 2011, ApJ, 731, 66

## 星惑 a18 系外惑星雲モデルの構築と観測との比較

大野 和正 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M1)

透過スペクトルから分子の吸収線が読み取れない系外惑星が発見されつつある。その原因として、大気に存在する雲が透過光を遮ってしまっていることが示唆されている。このような現象が発生するか議論するには、系外惑星に形成される雲の光学的性質を推定することが重要となる。雲の光学的性質は雲を構成する粒子のサイズ分布、数密度分布によって決定される。しかし、従来の系外惑星雲モデルはサイズ分布や粒子成長の物理仮定をパラメーターで表現しており、環境条件に十分な制約がかけられないモデルとなっている。そこで、本研究では雲粒子成長過程のパラメーター任意性を最小限に抑えることを目指し、雲形成の物理を無矛盾に計算する 1 次元雲モデルを作成した。

本モデルでは地表から見て上昇する粒子を雲粒、落下する粒子を雨粒として 2 種類の粒子のサイズ分布、数密度分布の進化を計算する。また粒子成長の物理は衝突成長と凝縮成長の 2 種類を考慮し、雲粒と雨粒の相互作用も考慮して計算する。本モデルのテストとして、地球海上での雲粒の粒径を計算し、海上での観測データと矛盾のない結果が得られることを明らかにした。

1. Rogers, R. Yau, M.1989, International Series in Natural Philosophy. Pergamon Press
2. Rossow, W.B.1978, Icarus, 36, 1
3. Zsom, A. Kaltenecker, L. Goldblatt, C. 2012, Icarus, 221, 603

## 星惑 a19 X 線天文衛星「すざく」と惑星分光観測衛星「ひさき」による木星の同時観測

沼澤 正樹 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

本講演では X 線天文衛星「すざく」による 2014 年の木星の観測結果について発表する。木星は太陽系最大の惑星である。地球の約 10 倍もの磁場強度 (木星表面) と数百木星半径にも及ぶ磁気圏を持ち、さらには衛星イオをプラズマ源としてその軌道にイオプラズマトラス (IPT) を形成している。これまでの先攻研究で、木星の磁極領域からの制動放射 (Bhardwaj et al. 2007) や、1-5 キロ電子ボルトの硬 X 線で木星の放射線帯やイオの軌道に一致する領域に広がった放射 (Ezoe et al. 2010) が確認されている。様々な高エネルギー現象を内包した木星の研究を進めることは宇宙物理学を紐解く上で有意義である。

「すざく」の特徴である低いバックグラウンドは、木星やその周辺の広がった X 線の観測に優位であるといえる。私たちは 2014 年 4 月 15 日から 同 21 日まで、合計 140 キロ秒、14 個の観測データを取得した。本データのスペクトル解析を行った結果、スペクトルは 3 つの輝線と制動放射、巾開度で再現することができた。制動放射は 0.4 キロ電子ボルト

ト程度、巾関数の光子指数は 0.37 程度と非常にフラットで、非熱的放射を強く示唆するものである。

次にイメージ解析として、まず木星の軌道に沿った天空イメージを作成し、これにより木星の軌道に沿って X 線が検出できていることがわかった。さらに木星と地球の移動を補正した静止座標系イメージを作成し、木星からの放射の検出を確かめた。「すざく」の 2006 年で観測された木星周辺に広がった放射については現在解析中である。

名古屋大による木星付近での太陽風シミュレーションによると、本観測前半 (4 月 15 日から 17 日の間) に密度の高い太陽風が木星近辺を通過しており、更に X 線放射の時間変動にも注目して検証を進めている。本発表ではこれらの解析結果について述べる。

1. Bhardwaj et al. 2007
2. Ezoe et al. 2010

## 星惑 b1 R CrA 分子雲の原始星の短期、及び長期的 X 線時間変動

矢吹 健 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M1)

原始星は星間ガスの動的降着期にある中心天体で、星の芯が急激に成長しつつある星の誕生の動乱期にあたる。分子雲コアと降着ガスは原始星そのものを厚く包み、原始星本体はすべての波長領域で検出不可能であった。赤外から電波では原始星が観測されるが、それらは原始星本体ではなく、星本体を包む周辺物質及びジェットである。

あすか衛星はこの検出不可能だとされていた原始星本体から硬 X 線を初めて検出した。その線のルミノシティは太陽のものと同くらべ 103 106 倍と桁違いに大きく、主系列星として安定に輝いている星よりも高エネルギー活動において活発であることが明らかになった。

R CrA 分子雲はあすか衛星で最も初期に原始星からの X 線が発見された記念碑的な領域の一つである。距離は約 130pc と非常に近い。あすかによる観測では原始星 IRS7 のフレアの際に鉄ラインのスプリット (6.81keV と 6.17keV) がみられた。6.17keV のラインは 6.7keV に観測される He-like の鉄輝線はもちろん、6.4keV の蛍光鉄輝線のドップラーシフトと考えてもオーダーが大きすぎる。また、XMM-Newton の観測では、Class 0 という原始星初期段階に近い原始星からも X 線が検出されている。私はこの領域の原始星の短期、及び長期的な時間変動を追うため、チャンドラ、及び XMM-Newton 衛星の全てのアーカイブデータを解析した。そして大きな時間変動を確認した。それらについて報告する。

1. Hamaguti et al. 2005 APJ 623,291

## 星惑 b2 全天 X 線監視装置 MAXI を用いた近傍の Young Stellar Object のフレア探査

鈴木 涼太 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M1)

恒星として安定に核融合反応を起こすよりはるか前から星は活発なフレア活動を行なっている。我々のグループは全天 X 線監視装置 MAXI でそのような天体から X 線フレアを数例検出しており、若い星からの大規模フレアを MAXI で確かにスタディーできる感触を得ている。私は太陽系近傍の若い星に着目し、それらの X 線時間変動を打ち上げ直後からの MAXI のデータを使って探査した。その結果について発表を行う。

また、原始星段階のように未だ塵が降着している段階の星は、塵に埋もれ、誕生のプロセスを直接観測できるのは X 線帯域のみである。原始星のフレアにおける偏光を測定することにより、中心星及びその周辺の構造に迫ることができる。この偏光を観測する装置の開発についても発表する。

1. Adric R. Riedel, et al., arXiv:1401.0722 (2014)

## 星惑 b3 電子加熱が磁気乱流に与える影響

森 昇志 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M2)

原始惑星円盤内の乱流はその角運動量を外側へ輸送する一方で、サブミクロンサイズのダストからキロメートルサイズの微惑星までその成長に影響を及ぼす。円盤で乱流を起こす機構の一つとして磁気回転不安定性が考えられている。この不安定性は電離度に依存しており、低電離度では不安定は発達しない。円盤内ではダストが荷電粒子を吸着し、低電離度になるために乱流が起きない場所があり、デッドゾーンと呼ばれる (Gammie 1996)。これまでデッドゾーンの外側では激しい乱流が起きていると考えられていた。しかし、その発達した磁気乱流によって作られる強い電場が電子を加熱し (電子加熱)、加熱された電子がダストに効率よく吸着され、電離度が減少し、磁気乱流が弱まる可能性が指摘されている (Okuzumi & Inutsuka 2015)。我々は、電子加熱が原始惑星系円盤中のどの領域で起こりうるかを調べ、どの程度磁気乱流が抑制されるかを推定した。その結果、デッドゾーンの外側の 20 AU から 80 AU という広い領域で電場加熱が起きうることを明らかにした。また、磁気乱流は従来の理解に対し、著しく弱まることを示唆された。さらに、負に帯電したダストが静電反発力によってダスト同士が衝突しにくくなる影響についても議論する予定である。

1. Gammie, C. F. 1996, ApJ, 457, 355
2. Okuzumi, S., & Inutsuka, S. 2015, ApJ, 800, 47
3. Mori, S., & Okuzumi, S., submitted to ApJ

## 星惑 b4 pebble accretion 過程を考慮した新たな衛星形成モデルの構築に向けて

芝池 諭人 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M2)

木星と土星の衛星が、地球に次ぐ第二の生命存在環境として近年注目されている (e.g., Hsu et al., 2015)。特に、エンケラドスとエウロパは内部海を持ち、プリュームが噴出している。また、エンケラドスの内部には、生命誕生の場として有力な海底熱水系が確認された。さらに、タイタンは窒素とメタンから成る厚い大気を持ち、有機物が豊富に存在すると考えられる。しかし、これらの衛星の形成過程はまだよくわかっておらず、現在の衛星の環境も不明な点が多い。

一方で、近年、惑星形成論において従来とは描像の異なる「pebble accretion モデル」が提唱された (Lambrechts and Johansen, 2012)。このモデルは、円盤外側で形成された 10cm ほどの固体物質 “pebble” が (原始) 惑星に大量に集積し、惑星が急成長するモデルである。この pebble accretion 過程は、衛星形成過程においても重要となる可能性がある。

本研究では、原始惑星系円盤と周惑星円盤の条件設定を変えつつ以下

を計算し、pebble accretion 過程を考慮した衛星形成モデルを構築する。すなわち、まず大規模数値流体計算 (Tanigawa et al., 2014) を用いて、ガスにトラップされて周惑星円盤流入する pebble のモデルを作る。そして、両円盤内での pebble の移動と成長の同時計算を行い、各衛星の pebble 集積量の推移と各衛星の成長を計算する。

なお、この衛星形成モデルは、土星 (と木星) より優位に高く彗星に等しい、エンケラドスの D/H 比を説明できる可能性がある。つまり、氷 pebble は彗星同様円盤の外側で形成され高い D/H 比を持つと考えられるため、これら氷 pebble により D/H 比を保ったままエンケラドスを形成すれば良い。また、円盤外側にて氷 pebble にクラスレートとして捕獲された揮発性元素は、タイタン大気やエンケラドスなど氷衛星の内部海の元素組成に影響を与えたと考えられる。各衛星の集積した揮発性元素量、特に有機物量は生命存在可能性にも示唆を与えるだろう。

本発表では、これまでの研究経過を報告し、今後の見通しを紹介する。

1. H.W. Hsu, F. Postberg, Y. Sekine, T. Shibuya, S. Kempf, M. Horányi, A. Juhász, N. Altobelli, K. Suzuki, Y. Masaki, T. Kuwatani, S. Tachibana, S. Sirono, G. Moragas-Klostermeyer and R. Srama, Nature, 519, 207-210 (2015)
2. M. Lambrechts and A. Johansen, A&A, 544, A32 (2012)
3. T. Tanigawa, A. Maruta and M.N. Machida, ApJ, 748, 109 (2014)

## 星惑 c1 低い磁気プラントル数でのスモールスケールダイナモ

望月 星那 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙初期の磁場はおそらく極端に弱かったが、現在の宇宙は強く磁化されている。この何桁にもわたる磁場の強さの成長を説明するために、速い増幅プロセスが働く必要がある。今日知られている最も効果的なメカニズムはスモールスケールダイナモとよばれるもので、乱流の運動エネルギーを磁場のエネルギーにかえるものである。その効率は、乱流スペクトルのべきに依存する。この研究では、非圧縮のコルモゴロフ乱流から、圧縮性の高いバーガーズ乱流までの乱流スペクトルを調べ、低い磁気プラントル数  $P_m$  (磁気レイノルズ数  $R_m$  とレイノルズ数  $Re$  の比) のために起こる乱流の特性を分析した。我々は、カザンツェフ方程式 (乱流の進化を記述する方程式) を WKB 近似を用いて解いた。低い磁気プラントル数の極限で磁場の成長率は  $R_m$  の  $(1 - ) / (1 + )$  乗に比例する。ここで、 $$  は乱流スペクトルのべきである。我々はさらに、臨界磁気レイノルズ数  $R_{m,crit}$  についても議論する。 $R_{m,crit}$  の値はだいたいコルモゴロフ乱流では 100 でバーガーズ乱流では 2700 である。また、もし磁気レイノルズ数が十分大きければ、低い磁気プラントル数のもとでスモールスケールダイナモが働くことがわかった。小さいスケールでの磁場の増幅は幅広い範囲の天体物理的環境で起こり、弱い磁場を短い時間のスケールで増幅することができる。

## 星惑 c2 宇宙初期の星形成と磁場の効果

樋口 公紀 (九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻 M1)

初期宇宙の磁場強度は非常に弱く、 $1nG$  未満であると考えられている (Barrow et al. 1997; Schleicher et al. 2008)。そのため宇宙初期の天体形成の研究では、多くの場合磁場の効果が無視されてきた。しかし

宇宙の構造形成に伴い磁場は局所的に  $\mu G$  程度まで増幅されることが示唆されている。近年の研究では、初代星が誕生する環境でも磁場は small-scale turbulent dynamo と呼ばれる機構によって、星や他の天体形成に影響を与える程度まで増幅することが認識され始めてきた (e.g., Schleicher et al. 2010)。以上の事実から初期宇宙の星形成を考える場合でも磁場を考慮する必要があると考えられる。

Susa et al. (2015) では、宇宙線と放射性元素によるイオン化を考慮し、異なる金属量を持つガス雲の熱・化学進化を計算した。また計算結果を用いて磁場とガスの結合の度合いを評価した。その結果、金属量が低いほど、または宇宙線やガスに含まれる放射性元素量が多いほど、磁場はガスとよく結合していることを示した。さらに磁場の散逸が星形成雲のダイナミクスに与える影響と  $Z = 0$  の初期宇宙の small-scale dynamo action に与える影響について議論を行った。

本発表では Susa et al. (2015) に沿って磁場を考慮した様々な環境における星形成過程を議論し、今後自分が行う研究について述べる。

1. Susa, H., Doi, K., & Omukai, K. 2015, ApJ, 801, 13
2. Nakano, T., & Umebayashi, T. 1986, MNRAS, 218, 663
3. Turk, M. J., Oishi, J. S., Abel, T., & Bryan, G. L. 2012, ApJ, 745, 154

## 星惑 c3 ファーストスターの進化と最終的な質量

宮首 宏輝 (九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻 M1)

初期宇宙においてファーストスターは重要な役割を担っている。ファーストスターによる超新星爆発によって合成された重い元素は二代目や三代目の星形成を促進する。また、ファーストスターは高赤方偏移で観測される超質量ブラックホールの形成にきっかけを与える。ファーストスター形成の理解はそれゆえ、宇宙初期の歴史について知るうえで必要不可欠である。どのようにしてファーストスターが原始ガス雲から形成されたかということについては近年急速に理解されてきている。しかしファーストスターの質量分布については依然として解明されていない。この講演では先行研究についてのレビューを行った後、今後に行う研究について述べる。先行研究については、宇宙論に基づいて原始星形成の輻射流体力学計算を行ったものを紹介する (Hirano et al. 2014)。この計算では、100 のミニハローの統計サンプルを用いて、第一世代の星は 10 太陽質量から 1000 太陽質量までの幅広い質量分布を持つことが示された。まず最初に、この研究では原始星形成ガス雲を生み出す宇宙論的シミュレーションを実行した。そして、星の輻射フィードバックによって初代星へのガス降着が止まるまでの星形成や、その後の原始星進化を計算している。最終的な星の質量を決定する降着率は、原始ガス雲ごとに著しく異なる。降着率が低い場合は、輻射フィードバックによって原始星の成長は抑えられている。そして最終的な質量は数十太陽質量になる。降着率が高い場合は、原始星の外層は拡大し続けていて、原始星の表面温度は低いままである。このような初代星には強い輻射フィードバック効果が働くことはなく、100 太陽質量にまで成長できる。この研究で得られた幅広い質量範囲によって、初期宇宙でファーストスターがさまざまな役割を果たすことを示された。また最終的な星の質量と星形成ガスの物理的特性の間に確かな相関性があることが見つけられた。この相関性から、詳細に原始星の進化を辿ることなしに、ガス雲の物理的な特徴や母体であるハローの特徴からファーストスターの質量を見積もることができる。

1. S.Hirano et al., Apj 781, 60 (2014)

al.,PASJ,63,105(2011))

## 星惑 c4 化学進化から調べる星団形成

大橋 聡史 (国立天文台三鷹 D2)

分子雲コア (~0.1 pc,  $10 M_{\odot}$ ) は乱流場が卓越し、安定平衡状態であることが知られている。分子雲コアがどのように不安定になり、どのように星形成を始めるのかは、星形成研究において最も重要な課題の一つである。そこで我々は化学進化と力学進化の両方の観点から分子雲コアの進化を調べている。特に、銀河系のほとんどの星は巨大分子雲の中で星団として誕生することが知られているので、太陽系から最も近い巨大分子雲である Orion A GMC で研究を行っている。現在までの研究によって CCS, HC<sub>3</sub>N 分子は分子雲コアの初期で豊富になり、N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> や NH<sub>3</sub> は後期段階で豊富になることが明らかになった。つまりこれらの分子の柱密度比を計ることで分子雲コアの進化が判別できる。また、化学進化とコアの乱流の散逸には相関があることも、新たにわかった。乱流の散逸が分子雲コアを不安定にし、星形成を始める上で重要な役割であることを示している (Ohashi et al. 2014, Tatematsu et al. 2014)。本公演では、分子雲コアに対するガスの運動も議論し、星団形成の様子について示唆する。

1. Ohashi, S., Tatematsu, K., Choi, M., et al. 2014, PASJ, 66, 119
2. Tatematsu, K., Ohashi, S., Umemoto, T., et al. 2014, PASJ, 66, 16

## 星惑 c5 Star Formation in the Orion A Molecular Cloud

佐々木 一成 (新潟大学宇宙物理学研究室 M1)

オリオン A 巨大分子雲 (Orion A Giant Molecular Cloud, Orion A GMC) では活発に星形成がおきていると考えられている。論文「New Panoramic View of 12CO and 1.1mm Continuum Emission in the Orion A Molecular Cloud. I. Survey Overview and Possible External Triggers of Star Formation (Shimajiri, Y., Kawabe, R., Takakuwa, S., et al)」による Orion A GMC 北部の 12CO 及び 1.1mm 連続輝線広域観測の結果を紹介する。1.1mm 波はチリの Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE) 10m 望遠鏡に搭載された AzTEC カメラで観測した。また 12CO 輝線は野辺山国立天文台 (NRO) 45m 望遠鏡及び 25 ビーム受信機 BEARS を用いて観測した。AzTEC では 12pc\*17pc の領域を空間分解能 ~40" で、NRO45m 鏡では速度分解能 ~1.0km・空間分解能 ~21" でデータを得られた。観測の結果 Orion A では 2 つの要因による星形成が起きていることがわかった。1) OMC-2,3 東部との衝突による乱流 2) フィラメント構造への UV 照射

この結果から Orion A での星形成を包括的な視点から研究する。また今年 10 月末から NRO45m 望遠鏡及び 4 ビーム受信機 Forest を用いた Orion A の星形成レガシプロジェクトに参加・研究する予定なので、今回の講演をそのときにいかしたいと思う。

1. New Panoramic View of 12CO and 1.1 mm Continuum Emission in the Orion A Molecular Cloud. I. Survey Overview and Possible External Triggers of Star Formation (Shimajiri, Y., Kawabe, R., Takakuwa, S., et

## 星惑 c6 へびつかい座 分子雲の構造析

神 貴志 (新潟大学自然科学研究科数理物質専攻 M1)

暗黒星雲は一般的に低温かつ高密度であり、ガスが主として分子の状態である星間雲を分子雲と呼ぶ。この分子雲が自己重力によって収縮することで分子雲コアが形成される。へびつかい座 分子雲は近傍にある暗黒星雲であり、星形成の現場として非常に良い研究対象である。

Maruta et al の研究では、へびつかい座 分子雲の 68 個の分子雲コアを同定し、オリオン A 巨大分子雲と距離の補正を行い比較した結果、物理的な特性が類似していることが分かった。また同定したコアをピリアル解析を適用することでコアの大部分は重力的に束縛された状態にあるが重力エネルギーより外圧の効果が重要な役割を果たしていることを示している。このことからクラスター形成環境下でのコアの形成と進化は外圧が重要であることが示される。今回は以上について発表を行う。

1. Maruta, H et al 2010, Apj 714 680

## 星惑 c7 周期的な強度変動を示すメタノールレーザー放射源 G9.62+0.20 のモニター観測

佐藤 宏樹 (茨城大学理工学研究科理学専攻物理系 M1)

6.7GHz メタノールレーザーは大質量星形成領域のみから検出される非常に明るい放射で、HII 領域形成より前に多く見られる。これより、レーザーは大質量星の進化・形成を明らかにする上で良い観測プローブとなり得る。今回の研究では大質量原始星周辺では珍しい周期的な強度変動レーザーが初めて観測された G9.62+0.20 を対象とした。Goedhart et al. 2004 においてレーザー強度の変動周期は約 246 日とされている。

この天体は日立 32 m 電波望遠鏡 (以下、日立局) で 2012 年 12 月 30 日から 2014 年 1 月 10 日、及び 2014 年 5 月 7 日から現在まで毎日観測を行っている。16 のスペクトル成分を検出し、そのうち 4 成分の周期的強度変動を確認した。日立局のビーム半値全幅が 4.6 分角のため、対象天体から 10 秒角南に位置する G9.61+0.19 のスペクトル成分を同時に受信してしまっているが、日立局の観測結果の各スペクトル成分に、過去の VLBI 観測による空間分布を対応させた結果、4 つの周期的強度変動成分は対称天体に付随していることが判明した。これらの周期的強度変動成分のうち 3 成分は新検出で、変動周期は 4 成分ともおよそ 246 日であった。

今後は新検出成分についての空間分布の把握と、各強度変動成分の周相位相のずれと空間分布の関係を明らかにするための解析などを行っていく予定である。

1. Goedhart et al., 2014, MNRAS 355, 553G
2. Fujisawa et al., 2014, PASJ 66, 31
3. Walsh et al., 1998, MNRAS 301, 640W

## 星惑 c8 IC1848 における変光・移動天体サーベイ

蓮岡 克哉 (岡山理科大学 M2)

IC1848 (W5) は大質量星形成領域の一つで、Spitzer 宇宙望遠鏡や Herschel 宇宙望遠鏡によって早期のターゲット天体として観測されている。銀経  $+137^{\circ} 51'$ 、銀緯  $0^{\circ} 55'$  であり、ほぼ銀河面に位置するカシオペア座の星形成領域である。IC1848 に連なる W3 の距離は Hachisuka et al. (2006) の VLBA 観測により  $2.04 \pm 0.07$  kpc と見積もられている。研究室では検出例の少ない若い変光天体で激変を示す FU Ori 型星の探査を行っている。

本研究では IC1848 を対象に 2 つの時期が異なる画像 (POSS1 と POSS2 の R バンド) を用いた R-GB 法により、変光天体と移動天体のサーベイを行った。解析データは The STScI Digitized Sky Survey (DSS) から取得した。1 領域を  $5 \times 5$  として、260 領域調べ、変光天体 16 個、移動天体 210 個を検出した。発見した変光天体のうち 9 天体は SIMBAD に対応天体があるが、既知の変光天体は LW Cas (FU Ori 型と推定) のみであった。変光天体は追観測をする予定である。

今回は、IC1848 方向に多くの移動天体 (中速度の固有運動星と考えられる) を発見したため、主に移動天体について報告する。発見した天体は  $1.5 - 9.6$  の移動が見られ、平均的に  $3.5$  すなわち固有運動の速度は  $0.1$  /yr だった。また、移動方向は銀河面に対して平行に移動する天体が多い傾向が見られたが、銀河面に対して上方向に移動する天体も 4 個見られた。

## 星惑 c9 長いタイムスパンを持つオリオン・トラペジウムクラスターの赤外線撮像観測

伊藤 綾香 (国立天文台三鷹 M1)

オリオン・トラペジウムクラスターは、地球に最も近い大質量星形成領域にある若い星団である。このクラスターは明るい星雲 (オリオン大星雲) に埋もれており星間塵による吸収が大きいため、可視光では観測困難である。さらに若くても低質量の天体は低温であるため、年齢の若い (100 万年程度の) 低質量恒星・褐色矮星・浮遊惑星の観測には赤外線波長が最も有効である。

本研究では南アフリカ天文台に設置された IRSF 望遠鏡で 2000 年・2005 年・2014 年に取得された赤外線画像 (JHK バンド) を解析する。観測装置は、2000 年は SIRIUS, 2005・2014 年は SIRPOL を使用している。約 15 年の長いタイムスパンによる取得画像の比較は、これらの装置を使用した観測において初めての試みである。

現在、2000 年と 2005 年のデータの処理を完了した段階である。測光誤差が 0.05 等以下の星を解析の対象とする。キャリブレーションは 2MASS のデータで行い、41 星に対する等級差の標準偏差は J, H, K に対してそれぞれ、0.085, 0.048, 0.071 等であった。観測時間が異なるため、誤差 0.05 等に対応する概略の限界等級は 2000/2005 年で、 $J=14.5/13$  等、 $H=13.5/12$  等、 $K=13/11.5$  等であった。

二色図上で塵によって赤化を受けた背景の星と、塵の円盤からの熱放射によって赤い色をしている若い星団の星を区別することができる。2000 年と 2005 年の二色図から数 10 個の塵円盤を持つ可能性のある星が同定できた。今後、2014 年のデータも加えることで得られるデータの長いタイムスパンを利用して、色-等級図の解析から得られる明るさと変光の情報、さらに、固有運動のデータも合わせて、これらの星の性質を詳しく調べる。

1. J.Koornnef. et al, Near-infrared photometry, Astron,Astrophys.128,84-93, 1983

2. John M.Carpenter et al, Near-infrared photometric variability of stars toward the orion a molecular cloud, The Astronomical Journal,121:3160-3190, 2001

## 星惑 c10 低質量原始星における化学組成の多様性

今井 宗明 (東京大学理学系研究科物理学専攻山本研究室 M1)

これまで、原始星天体の化学組成の特徴として Hot Corino 化学と呼ばれる現象が知られていた。原始星が誕生する前の分子雲コアの段階で CO 分子が星間塵に吸着し、水素化されて  $\text{CH}_3\text{OH}$  などの飽和有機分子に変化する。それが星形成に伴って蒸発して飽和有機分子に富む環境を作ることで説明される。これに対し、近年原始星近傍に  $\text{C}_4\text{H}_2$  のような炭素鎖分子が多く存在し、飽和有機分子が少ない天体 (L1527) が観測され、この化学組成を説明するため、WCCC (Warm Carbon-Chain Chemistry) という概念が提案された。WCCC では、分子雲コアの時代に C が CO に変化する前に星間塵に吸着される場合を考える。この C が H と反応し  $\text{CH}_4$  となり、それが原始星の誕生に伴う温度上昇によって蒸発し、 $\text{C}^+$  と反応することにより炭素鎖分子が生成されるとされている。この WCCC の考え方を支持する証拠の一つとして、実際に L1527 では、 $\text{CH}_4$  が蒸発する 25K 以上に対応する原始星の周りの領域に、炭素鎖分子が豊富に存在している観測結果が得られている。その他にも Hot Corino で激しく起こる重水素濃縮が L1527 では顕著でないことも、WCCC の考え方に矛盾しない結果である。これらの結果は、星形成を考える上で、今までの物理的な観測では見えてこなかった原始星の進化過程が、化学的な見方で見えてくることを示唆する点で興味を持たれる。今回特に、Hot Corino と WCCC の重水素を含んだ分子の組成の違いについての観測結果を紹介するとともに、今後の原始星の統計的な観測によって見えてくるのが期待される、Hot Corino や WCCC の違いを生み出す物理や、また、それぞれの惑星系のその後の進化についてなど、将来の研究の展望を述べる。

1. 坂井南美,2013, 天文月報 106,780

## 星惑 c11 星周円盤の分裂と進化に与える非局所的な輻射の影響

山本 貴宏 (京都大学 天体核研究室 M1)

本発表は論文 [1] のレビューである。

近年、大きい軌道半径 ( $10 \sim 10^3$  AU) を持つガス惑星が発見された。こうした惑星の形成モデルとして、原始星を取り巻く星周円盤の重力不安定性に基づくモデルが提唱されている。これは円盤が重力不安定性によりガス球を形成し、このようなガス惑星に進化したというシナリオである。本論文では、特に大質量円盤 ( $\sim 0.1 M_{\odot}$ ) が原始星 ( $\sim 10^{-3} M_{\odot}$ ) を取り巻いている状況に注目して、ガス球の形成条件およびガス球の進化について研究した。具体的には、原始星が形成されてから約  $10^4$  年までの円盤の分裂・ガス球の形成・進化を SPH 法によりシミュレーションし、その結果を解析した。

円盤の冷却については、粘性加熱と局所的な輻射輸送が釣り合うモデ

ルが主流であった。しかし、本論文のシミュレーションの結果、実際には鉛直方向の輻射よりも動径方向の輻射のほうが卓越していることがわかった。これにより今まで円盤の分裂条件とされてきた Gammie の条件は成り立たない。さらに初期条件を変えてシミュレーションした結果、ガス球の形成条件が質量降着率と回転エネルギーに依存する形で与えられた。また本論文では、渦状腕上の Toomre の  $Q$  や渦状腕の腕の長さも形成条件に寄与すると示唆している。さらに、円盤内で形成されたガス球は、原始星の第一コアと同様に、断熱的な進化をすることもわかった。これにより円盤中のガス球に対しても、普通の星形成と同様の進化過程を想定することができる。私は本論文の結果を受けて、ガス惑星だけではなく、褐色矮星や連星系の形成に対してもこのシナリオが適用できるかを研究しようと考えている。

1. Y.Tsukamoto, S.Z.Takahashi, M.N.Machida and S.Imutsuka, MNRAS, 446, 1175 (2015)

## 星惑 c12 赤外線天文衛星「あかり」全天サーベイによるデブリ円盤のスタック解析

小島 拓也 (宇宙科学研究所 M1)

可視光の星カタログの位置に基づいて赤外線天文衛星「あかり」の全天画像のスタッキングを行い、デブリ円盤と中心星の年齢との関係を調べた。

デブリ円盤とは、主系列星の周りのダスト円盤であり、星形成時の原始惑星系円盤が残存したものではなく、微惑星同士の衝突などによって二次的に形成されたものと考えられている。ダストが赤外線を放射するため、デブリ円盤は赤外線領域で観測される。Rieke et al.(2005) による赤外線天文衛星 IRAS の  $25 \mu\text{m}$ 、ISO、Spitzer の  $24 \mu\text{m}$  の観測から A 型星のデブリ円盤と中心星の年齢との関係が調べられ、星の周りのダスト量を示す赤外線超過比の最大値が星の年齢に反比例し、150 Myr のオーダーで減衰することが明らかにされた。

ただし、Rieke et al.(2005) は、A 型星のみで、かつ  $24 \mu\text{m}$  のみでの調査であったが、他の星のスペクトル型、他の波長についても調べる必要がある。他の星のスペクトル型であれば、中心星の温度が異なるので、デブリ円盤の様子が異なると予想される。また、ダストの中心星からの距離とダストが放射する光の波長には相関があるので、他の波長で解析することで中心星から異なる距離に存在するダストについて議論できる。そこで、他の星のスペクトル型、他の波長についてデブリ円盤と中心星の年齢との関係を調べる。

赤外線天文衛星「あかり」は 9, 18, 65, 90, 140,  $160 \mu\text{m}$  の 6 バンドで全天サーベイを行っており、これを利用してデブリ円盤を調査する。解析手法として、可視光の星カタログの位置に基づいて赤外線天文衛星「あかり」の全天画像のスタッキングを行う方法をとる。「あかり」の全天サーベイは大規模なデータサンプルを持つものの個別の星を解析しても S/N 比が足りずデブリ円盤を見ることができない。そのため、スタッキングを行うことによってデブリ円盤の統計的な性質を調べ、その星のスペクトル型依存性、波長依存性を見ることができると期待される。

1. Rieke, G. H., Su, K. Y. L., Stansberry, J. A., et al. 2005, ApJ, 620, 1010.

## 星惑 c13 分光観測によって発見された連星系 HD139461 における「惑星」の存在について

中島 健太 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M1)

近年、系外惑星が大量に見つかるようになってきており、その多くは太陽系の惑星とは様相が異なっている。そのため、標準的なコアアクリションモデルや古典的な重力不安定性モデルで簡単には説明できないことが議論されている。また、これまでの惑星形成理論であまり考えられてこなかった連星系をなす星の周りでも系外惑星は発見されている。HD139461 は分光観測により連星系であることが分かり、連星系の軌道長半径  $2.05 \text{AU}$ 、離心率は  $0.83$  と求められた (Kato et al. 2013)。この HD139461 の連星系の視線速度の変化には、二体問題では説明できないようなズレが存在する。このズレは周期的に変化しており、その周期は  $24.685$  日である。そのため、主星 (HD139461A) の周りには三つ目の天体、「惑星」が存在することが示唆されている。さらに加藤らはこのズレを「惑星」が主星の周りをケプラー軌道で公転しているとの仮定の上で解析し、この「惑星」は連星系の主星の周りを軌道長半径  $0.179 \text{AU}$ 、離心率が  $0.31$  の軌道で公転しており、質量が最低でも  $0.7$  木星質量程度と見積もった。しかし、この結果に従うと「惑星」と伴星の軌道が非常に接近するため、力学的に不安定なことが予想される。つまり、視線速度のズレを解析する上で行ったように、伴星の重力を無視したケプラー軌道での解析から「惑星」の軌道は大幅に変更されるだろう。本研究では、伴星の重力も考慮した数値シミュレーションを行うことで、視線速度のズレを説明するにはどのような「惑星」が必要なのか制限をつけることを目指す。また、このような連星系での惑星形成は惑星形成理論においても非常に興味深く、この HD139461 の「惑星」がどのように形成されたかについても議論したい。

1. Kato, Itoh, Toyota, and Sato, Astrophys. J. 145:41 (2013)

## 星惑 c14 高速自転星と超短周期惑星からなる系外惑星系 PTFO 8-8695 の光度曲線の解析

上赤 翔也 (東京大学 宇宙理論研究室 D1)

系外惑星系 PTFO 8-8695 は、年齢が 300 万年ほどの T タウリ型星とホットジュピターからなる系である。この系に対しては、2009 年と 2010 年に 2 回観測されているトランジット (惑星による主星の食) の際の光度曲線の形状が互いに大きく異なるという特異性が指摘されている [1]。この光度曲線の時間変化は、 $0.671$  日以下という主星の高速自転と  $0.448$  日という惑星の超短周期軌道に起因した、主星の自転軸と惑星の公転軸の歳差運動によるものと考えられている。先行研究 [2] では、歳差運動の力学モデルを通して惑星の半径や質量、軌道傾斜角などといった系のパラメータを決定しているが、そこでは「主星の自転周期が惑星の公転周期と等しい」という、この系においては非自明な仮定が課されている。そこで本研究では、その仮定を除いた上でデータを再解析した結果、歳差運動の周期がそれぞれ 200 日、500 日、800 日に対応する 3 つの解が存在することを発見した。加えて、2014-15 年にかけて京都産業大学・神天文台においてこの系の追観測を行い、200 日の歳差周期に対応する解が支持されるという結論を得た。本発表ではこの結果の報告に加え、他の高速自転星の光度曲線に対する本モデルの応用可能性についても議論する。

1. van Eyken, J. C., et al., ApJ, 755, 42 (2012)
2. Barnes, J. W., et al., ApJ, 774, 53 (2013)

### 星惑 c15 系外惑星の高解像度直接撮像観測

石塚 将斗 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

系外惑星の発見数は近年急増しています。系外惑星の観測方法としては、ドップラー法やトランジットなどの間接観測と、直接惑星を捉える直接観測があります。直接観測は今まで技術的に困難でしたが、近年の技術の進化で可能になってきています。今回は系外惑星の直接観測の紹介(主に SEEDs)と、SEEDs で得られた T タウリ型星 GQLup の直接観測のデータの解析結果を紹介しようと思います。

1. D Lafreniere et al. 2007

### 星惑 c16 ガリレオ衛星食を用いた分光観測による木星上層大気の構造解析

山門 峻 (東北大学天文学専攻 M1)

木星の縞模様の形成メカニズムや上層大気の構造などは完全には解明されていない。Tsumura et al.(2014) では、ガリレオ衛星が木星の影の中で太陽光に直接照らされていないにも関わらず、予想に反して明るくという結果が得られた。この原因として、木星上層大気のヘイズ (haze) で散乱された太陽光がガリレオ衛星を照らしている可能性が最も高いと判断された。通常こういった希薄な大気は、反射光を観測することは極めて困難で、大気の透過光を観測する必要があるが、そのためには木星の影側に回って観測しなければならず現実的ではない。そこで、ガリレオ衛星食の分光観測を行い、スペクトルの時間変化を解析することにより、地上での観測で木星上層大気の構造を解明することが本研究の目的である。更にこの観測は大気透過光を観測するという共通点から、トランジット観測による系外惑星大気の観測にも応用が期待される。

本研究では、東広島天文台のかなた望遠鏡に搭載されている HONIR を用いて、 $1.5\mu\text{m} - 2.4\mu\text{m}$  の近赤外領域の分光観測を行った。観測の結果、エウロパが影から出現してくる瞬間の分光スペクトルを得ることが出来た。このデータから各波長のライトカーブ及びスペクトルの時間変化を求め、希薄な木星上層大気の構造解析を行う。

1. K. Tsumura et al. 2014 ApJ 789 122