

# 星形成・惑星系分科会

作ろう星・惑星！探そう系外惑星！

日時	7月28日 15:15 - 16:15, 16:30 - 17:30 (招待講演: 大向 一行 氏) 7月29日 13:30 - 14:30, 17:15 - 18:15, 18:30 - 19:30 (招待講演: 佐藤 文衛 氏) 7月30日 18:30 - 19:30
招待講師	大向 一行 氏 (東北大学)「宇宙初期の星形成」 佐藤 文衛 氏 (東京工業大学)「系外惑星を見つけるには」
座長	小野智弘 (京大 M2)、増田賢人 (東大 D1)
概要	<p>本分科会では分子雲コアからの星や円盤の形成、星周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・系外惑星の観測から表層環境に至るまでの惑星系研究といった広い領域を取り扱います。これらの分野では近年観測技術の進歩が著しく、原始惑星系円盤の非軸対称構造の検出や、直接法と間接法の双方による多種多様な系外惑星の発見、系外惑星大気分光観測等の驚くべき観測結果が報告されています。こうした詳細な観測はまた、理論研究の進展にも大きく寄与することが期待されます。これからの星形成・惑星系分野において、観測と理論が緊密に情報交換を行いながら研究を進めることの必要性は疑いようがありません。ALMAをはじめとした最新鋭の観測機器が登場し、TMTを用いた地球型惑星観測の計画(SEIT)も近い将来実現される今、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して観測や理論といった枠に囚われず知識を深め、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>

---

大向 一行 氏 (東北大学)

7月28日 16:30 - 17:30 B(大コンベンションホール)

## 「宇宙初期の星形成」

星形成全般について概観したうえで、宇宙初期の星形成過程がどう違うのか、その結果、生まれてくる星の性質がどう変わるのかについて講演する。また宇宙初期の超大質量BHの起源となりえる超大質量星の形成の可能性についても考察する。

---

佐藤 文衛 氏 (東京工業大学)

7月29日 18:30 - 19:30 B(大コンベンションホール)

## 「系外惑星を見つけるには」

系外惑星の発見から約20年経った。この20年間に観測精度は大幅に向上し、地上及びスペースからの大規模な探索によって候補天体を含めると数千個もの系外惑星が現在までに発見されている。地球質量、地球サイズの惑星も発見され、最新の統計によると太陽に似た恒星が何らかの惑星を一つでも保有する確率は約70%以上とも言われている。宇宙で惑星はありふれた存在と言えるだろう。

こう聞くと、系外惑星を見つけるのはたやすいことのように思えてくるが、実際には一つの系外惑星をきちんと発見するのはそう簡単ではない。観測誤差は言うまでもなく、親星があの手この手で惑星の発見を邪魔するので、惑星を見つけるにはまず親星のことをよく知る必要がある。

本講演では、系外惑星検出法の一つである視線速度法の場合を中心に、系外惑星がどのようにして「発見」されるのかを解説する

## 星感 a1 低金属量ガス雲の重力収縮シミュレーション

千秋 元 (東京大学 宇宙理論研究室 D2)  
 宇宙で最初の星 (初代星) は大質量 (数  $10\text{--}1000$  太陽質量) であったと考えられている [1] 一方、現在の星の平均質量は太陽質量以下である。典型的な星の質量はいつ、どのようにして小さくなったのか。初代星は金属 (ヘリウムより重い元素) を含まないガス雲で形成されるため、金属がその鍵を握っている。特に最近の研究 [2] では、金属が凝縮してできる固体微粒子 (ダスト) が星質量の遷移にとって重要であることが示唆されている。ガス雲の重力収縮過程でダストによる冷却が働くと、ガスは不安定になり、分裂するからである。本研究では 3 次元流体シミュレーションを用いて、初期宇宙でのガス雲の重力収縮過程を追い、形成される星の質量を求める。特にここでは、ダストの取り扱いを厳密にすることを試みる。

まず、先行研究 [3] では、ダスト量として近傍宇宙での値を用いている。しかし、現在の宇宙では様々なダストの供給源がある一方で、初期宇宙では超新星に限られてしまう。さらに、超新星内ではダストを破壊する効果もある。したがって、初期宇宙におけるダスト量は現在の値に比べて小さい。また、ガス雲が重力収縮して密度が上がっていく過程では、ガス中の金属原子がダストに取り込まれていく現象 (ダスト成長) が起き、ダスト量が増えるが、先行研究では考慮されていない。本研究では、超新星でのダスト形成/破壊の計算から得られたダスト量を用い、分子雲中でのダスト成長も考慮した。本講演ではその結果得られる星質量について発表する。

1. Hirano, S., Hosokawa, T., Yoshida, N., et al. 2014, ApJ, 781, 60
2. Omukai, K., Tsuribe, T., Schneider, R., and Ferrara, A. 2005, ApJ, 626, 627
3. Dopcke, G., Glover, S. C. O., Clark, P. C., and Klessen, R. S. 2011, ApJL, 729, L3

## 星感 a2 パースト降着下での超大質量星形成過程計算

櫻井 祐也 (東京大学 宇宙理論研究室 M2)  
 近年の可視光・赤外線観測から、宇宙が 10 億歳以下の時に、質量が 10 億  $M_{\odot}$  程度の超巨大ブラックホール (SMBH) が約 20 個存在していることが示された。この SMBH 形成過程を明らかにすることが、現代天文学の課題の一つとなっている。従来の SMBH 形成理論では、 $100 M_{\odot}$  程度の BH が種となり、これが降着・BH 合体を繰り返して SMBH になると考えられていた。しかしこの理論の問題の一つとして成長時間が足りないということが挙げられている。この問題を解消する理論として有力なものに、 $10$  万  $M_{\odot}$  程度の超大質量星から、SMBH の種となる同質量程度の BH が直接崩壊によりできるという direct collapse 理論の一種が考えられている [1]。

超大質量星が形成されるダークマターハロー中のガス雲では、ガスの星への急速降着が起きると考えられている。星が形成される過程でも星が縮むと、星が熱くなり、そこから多量の紫外線が出る。それが周辺ガスを電離し (フィードバック)、ガスの急速降着を妨げる。超大質量星ができるためには、星進化の過程でフィードバックが起これないことが重要であり、これを探究するためには星進化の数値計算を行う必要がある。従来の研究では、周辺ガスの質量降着率を一定とした星進化の計算が行われてきた [2]。0.1  $M_{\odot}/\text{yr}$  以上の一定降着率では、フィードバックが起きずに星が大質量になるまで進化できる可能性が示された。しか

し現実的な状況では降着率は時間変動する。本研究では、時間変動降着としてより現実的なパースト降着 [3] を考え、 $2 M_{\odot}$  の星が数百-数万  $M_{\odot}$  程度になるまで 1 次元の星進化の計算を行った。本研究で、平均降着率が 0.1  $M_{\odot}/\text{yr}$  以上の場合にも、フィードバックが起きる可能性があることが示された。

1. Haiman, Z., ASSL, 396, 293 (2013)
2. Hosokawa, T., Yorke, H. W., Inayoshi, K., Omukai, K., Yoshida, N., ApJ, 778, 178 (2013)
3. Vorobyov, E. I., Desouza, A. L., Basu, S., ApJ, 768, 131 (2013)

## 星感 a3 講演キャンセル

## 星感 a4 ALMA による原始星形成初期段階の高密度分子ガス観測

徳田 一起 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 D1)  
 原始星は分子雲コアが重力的に収縮することによって形成される。しかし、星形成の研究において、形成される星の質量分布や連星の形成機構など、本質的な課題が未解決である。これは、分子雲コア中で原始星が形成される直前と直後に対応する星形成の最初期状態が観測的に明らかになっていないことに対応する。MC27 (=L1521F) という天体は、おうし座星形成領域において最も進化した分子雲コアであり、重力的に収縮する様子が示唆されていた (e.g., Onishi et al. 1999)。さらに、Spitzer 望遠鏡の観測により、中心に超輝度の原始星および、その原始星からのアウトフロー起因と考えられる散乱光が確認されており、星形成の極めて初期段階にあると示唆されている (e.g., Bourke et al. 2006)。しかし、この原始星周辺のダイナミクスを調査するために、分子雲コアから原始惑星系円盤のスケールである (0.1 pc-100 AU) までの空間分布を明らかにできる観測が要求されていた。

本研究では ALMA (Cycle 0) を用いて MC27 を分子輝線 (e.g.,  $\text{HCO}^+ (J=3-2)$ ,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+ (J=3-2)$ ) およびダスト連続波による観測を行った。その結果、(1) 非常にコンパクトで若い ( $\sim 200$  年) アウトフロー、(2) 原始星とは離れた ( $\sim 100$  AU) 位置に極めて密度の高い ( $\sim 10^7$   $\text{cm}^{-3}$ ) 星なし分子雲コア、(3) アーク構造 ( $\sim 2000$  AU) や複数の分子雲コアの存在等が明らかになった。これらは進化段階の異なる構造体が動的に相互作用し、連星形成を進行させるといった描像を提案するものであり、本研究で初めて明らかにできたものである。

1. Bourke, T. L., et al., ApJL, 649, L37 (2006)
2. Onishi, T., et al., PASJ, 51, 257 (1999)

## 星感 a5 回転不安定から考える原始惑星系円盤の外側領域の構造

小野 智弘 (京都大学宇宙物理学教室 M2)  
 1990 年代初頭に太陽系外惑星が初めて発見されて以後、2014 年 5 月の段階で 1700 個以上の系外惑星が発見されている。これらの中には、巨大惑星にもかかわらず短周期軌道を持つ短周期巨大惑星などの太陽系内惑星とは異なった性質を持つ惑星が多数存在する。このように、系外惑

星は軌道や質量における多様性を持つ。しかし、系外惑星が持つ多様性の成因は未解決な問題である。この問題を解決する為に、惑星形成の場である原始惑星系円盤の構造や進化を従来研究に比べ、より詳細に調べることが必要である。

ケプラー回転円盤の気体面密度分布の解析解として、自己相似解がある (Lynden-Bell & Pringle 1974)。最近では高感度電波観測によって原始惑星系円盤の測定が成されており、観測は原始惑星系円盤の気体面密度分布が自己相似解であることを示唆している。また、この気体面密度分布が自己相似解であることを仮定することで、原始惑星系円盤の大きさや質量などを観測結果から得ている。つまり、自己相似解は円盤の諸性質を測る為の定規として利用されている。

我々は自己相似解が円盤外側領域において、重力に比べ圧力勾配力が無視できなくなる点に着目した。回転円盤内の圧力勾配力が無視できない領域では、回転不安定がおこることが理論的に知られている (Chandrasekhar 1961)。自己相似解の安定性について解析的に調べた結果、中心星の質量が小さく、かつ円盤外側で高温な場合には、自己相似解が回転不安定性の為に円盤外側領域で破綻することを発見した (Ono et al. 2014)。

この結果は、自己相似解は円盤の諸性質を測る為の定規として、常に有用であるわけではないことを示唆する。また、円盤外側の面密度分布は ALMA 等の高感度電波観測により、近い将来詳細な観測が可能であると考えられる。これらの観測を本研究の結果と比較することで、回転不安定性の観測的検証が期待される。

1. Ono, Nomura and Takeuchi, 2014, ApJ, 787, 37

## 星惑 a6 原始惑星系円盤の化学反応と H<sub>2</sub>O スノーラインの検出に向けて

野津 翔太 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

原始惑星系円盤において、中心星近傍は高温のため H<sub>2</sub>O はダスト表面から脱離し気体となるが、遠方では低温のためダスト表面に凍結する。この境界が H<sub>2</sub>O スノーラインであり、ダストの合体成長で惑星を作る際 H<sub>2</sub>O スノーラインの内側では地球型の岩石惑星が形成される。一方外側ではダストの総量が増加する。このため重力で周りのガスを大量に集める事が可能となり、木星型のガス惑星が形成される。太陽質量程度の前主系列星周りの円盤の温度分布を計算すると、H<sub>2</sub>O スノーラインは中心星から数 AU 程度に存在するとされている。しかし系外惑星系の場合空間分解能が足りず、撮像観測による H<sub>2</sub>O スノーラインの検出は困難であった。

一方最近 Spitzer や Herschel で円盤から放射される H<sub>2</sub>O 輝線を検出できるようになった。異なる波長の H<sub>2</sub>O 輝線の強度比を用いて H<sub>2</sub>O スノーラインの位置を見積もる研究もなされつつあるが [1]、円盤の温度分布のモデルに依存するものであった。しかし今後波長分解能の高い分光観測が可能になれば、輝線スペクトルの速度プロファイルを解析することで、モデルに依存せず H<sub>2</sub>O スノーラインを同定できると考えられる。

そこで本研究では、このような観測で H<sub>2</sub>O スノーラインを同定する方法を提案する。具体的にはまず原始惑星系円盤の化学反応計算を行い、H<sub>2</sub>O の存在量とその分布を調べた。すると H<sub>2</sub>O スノーラインの内側の円盤赤道面付近だけでなく、円盤上層部の高温領域でも H<sub>2</sub>O ガスの存在量が多い事が分かった。またその結果を元に、円盤から放出される H<sub>2</sub>O 輝線のプロファイルを、近赤外線からサブミリ波までの複数の輝線について計算した。すると放射係数が小さく励起エネルギーが高い

複数の輝線のプロファイルを分光観測で調べる事で、H<sub>2</sub>O スノーラインを検出できると分かった。講演ではこの解析結果、及び将来の分光観測との関係について議論する。

1. Zhang, K., et al. ApJ, 766, 82 (2013)

## 星惑 a7 乱流が存在する原始惑星系円盤中の固体微粒子の動力学

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) M1)

乱流が存在する原始惑星系円盤中の固体微粒子の動力学について調べた、Youdin & Lithwick(2007)を紹介し、さらに、この論文においても考慮されていなかった円盤風の効果を取り入れた場合の固体微粒子の分布について論じる。

原始惑星系円盤中には乱流が存在しており、その乱流は磁気回転不安定性 (MRI) によって発生すると考えられている。乱流ガスによる粒子の攪拌の状況を決めることは、惑星形成の分野、特に微惑星の形成を研究する上で重要な研究課題である。具体的には、粒子同士の衝突時の相対速度を決定することにより、衝突合体もしくは破碎の条件の規定や、非弾性的なエネルギー散逸を見積ることが可能になる。

この論文では、周転円振動と垂直振動の両方を含むケプラー円盤の動力学の効果を取り入れ、固体微粒子に及ぼすガスの乱流運動による力を確率的扱った上で、固体粒子の拡散と、そのランダムな速度の時間発展を計算している。

方法としては、等方的な乱流を仮定しており、ブラウン運動を記述するランジュバン方程式を用いて、粒子のランダムな速度と拡散について解析的に求める。その結果、以下のような固体微粒子の拡散に関する結果が得られた。(i) 動径方向の粒子の拡散に対するガスの拡散の割合は乱流の最も大きい渦の回転時間によらず、粒子の大きさに依存する。(ii) 垂直方向の粒子拡散から、円盤の粒子層は大きな粒子になるほど赤道平面に沈殿するため薄くなる。(iii) 同じ粒子の大きさでも、乱流の渦の回転時間が軌道振動する時間よりも大きいと薄くなる。

一方、MRI によって円盤風が駆動されることが指摘されている。しかしながら、固体微粒子の動力学に与える円盤風の影響はこれまで調べられていない。そこで、円盤風の効果を取り入れた場合の固体微粒子の運動についても議論する予定である。

1. Andrew N. Youdin & Yoram Lithwick. 2007, Icarus, 192, 588.
2. Takeru K. Suzuki and Shu-ichiro Inutsuka. 2009, ApJ, 691, L49

## 星惑 a8 原子惑星系円盤の磁気乱流による電子の加熱と電離度の減少

森 昇志 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M1)

現在、原始惑星系円盤の中心星への降着は、磁気回転不安定性に起因する磁気乱流によって、円盤の角運動量が外側へ輸送されることで起きると考えられている。しかし、実際に磁気回転不安定性がおきるかどうかは、そこでの電離度に依存しており、原始惑星系円盤は低電離であるために、磁気回転的に安定な領域が存在する (Sano et al., 2000)。原子惑星系円盤で起きる乱流は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。そのため、円盤の乱流

状態を知ることは惑星形成を考える上で非常に重要である。

本研究では電子の電場加熱による電離度の変化に着目する。これまでの原始惑星系円盤の磁気乱流に関する研究は、電子の温度は中性ガスの温度に等しいとしていた。しかし、磁気乱流が成長すると強い電場を作り、電場による電子の加熱が無視できないかもしれない (Inutsuka & Sano, 2005)。電子の熱速度が大きくなるとダストに吸着されやすくなるために、ガス中の電子の数密度は減少する。これらの結果として、ある程度強い電場では電場の上昇に伴い電離度が減少する (Okuzumi & Inutsuka, in prep)。電離度は磁気乱流の強さに影響するため、電子の電場加熱の重要性を検討する必要がある。

本研究では、原始惑星系円盤で電子の電場加熱による電離度の減少がどこで起こるかを求めた。磁気回転不安定な領域で、磁気乱流と共に発達する電場に対する電離度の値を計算した。そして、低電離度のために磁気乱流が弱まるかを調べた。その結果、ダストサイズ  $0.1\mu\text{m}$ 、ダストガス質量比  $0.01$  の最小質量円盤では、 $20\sim 70\text{AU}$  まで電場加熱によって電離度が減少することを明らかにした。この領域では磁気乱流が成長することで電離度が減少するため、従来考えられていた値よりも非常に低い値で乱流が飽和状態に達すると考えられる。

1. Sano, T., Miyama, S. M., Umebayashi, T., & Nakano, T. 2000, ApJ, 543, 486
2. Inutsuka, S., & Sano, T. 2005, ApJ, 628, L155
3. Okuzumi, S., & Inutsuka, S. in prep

## 星惑 a9 擬物理量を用いた SPH 法の開発

山本 智子 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 牧野研究室 M2)

天文学および惑星科学の研究において、流体シミュレーションは大きな役割を果たしている。このため、高精度な流体数値計算手法の開発は研究分野の発展に大きく貢献する。計算手法には様々なものが、構造変化が大きい場合には、ラグランジュ的流体計算手法である Smoothed Particle Hydrodynamics (Lucy, 1977; Gingold & Monaghan, 1977, 以下 SPH 法) を用いる事が有利である。しかし、従来の SPH 法 (以下、SSPH 法) では、密度が不連続もしくは、0 となるような、接触不連続面や自由表面を適切に扱えないという問題がある。これは、SSPH 法において、密度の微分可能性と正值性を仮定して、流体の基礎方程式の定式化を行なっている為である。そのため、接触不連続面や自由表面でこの仮定に矛盾が生じ、適切な計算ができていなかった。そこで、Saitoh & Makino (2013) では、密度の代わりに圧力の微分可能性と正值性を仮定して、基礎方程式の定式化を行なった SPH 法である DISPH 法が開発された。DISPH 法は接触不連続面を扱うことに優れている。しかし、圧力が 0 になる自由表面では、圧力の正值性の仮定と矛盾が生じ、適切な計算が出来ない。そのため、接触不連続面と自由表面で適切な計算をするには、これらの面で、微分可能かつ正值である量の導入が必要である。しかし、そのような物理量は存在しない。そこで、本研究では、新たに、オイラー方程式に現れない擬密度  $y$  と擬質量  $Z$  を導入し、 $y$  の微分可能性と正值性を仮定して、基礎方程式の定式化を行なった。(この SPH 法を SPSPH 法と呼称する。) 我々は、この  $y$  に人工的な拡散を施す事で、 $y$  がいたるところで、微分可能かつ正であることを保証する。また、 $Z$  は、 $y$  の拡散が、ラグランジアンに影響しないように、 $y$  と共に変化する量である。

1. Gingold R. A., Monaghan J. J. 1977, MNRAS, 181, 375
2. Lucy, L. B. 1977, AJ, 82, 1013
3. Saitoh, T. R., & Makino, J. 2012, arXiv:1202.4277

## 星惑 a10 SPH 法による天体の衝突破壊の数値シミュレーション

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) M1)

天体同士の高速衝突による破壊や合体は惑星系の形成の際に非常に重要な役割を果たす。たとえば地球と月のような惑星・衛星系の形成や小天体の形成などは天体同士の衝突によって生じたと考えられている。衝突により天体がいくつもの小さな欠片に破壊されて元に戻らなくなる臨界衝突の運動エネルギーを決定することは、衝突破壊による惑星系形成のモデルの構築や天体の質量分布の見積もりの為に必須である。しかしながら惑星系に存在する天体のサイズは  $\mu\text{m}$  サイズから  $10000\text{km}$  サイズまで非常に幅がある上に、衝突の速度も  $\text{km/s}$  程に及ぶ。一方実験室での直接の衝突実験により調べられるのは非常に狭い範囲に限られており、破壊プロセスの詳細を解明できる理論はまだない。

そこで本講演では Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法と呼ばれるラグランジュ的な流体力学の数値計算方法を弾性体のモデルに適用し、さらに変形によるひびの形成や成長による破壊という効果をモデル化して取り入れ、衝突破壊に必要な運動エネルギーを数値シミュレーションによって求めた方法を紹介する (Benz and Asphaug 1999)。

この方法により、衝突天体のサイズが数百 m より小さい場合自己重力よりも物質の微視的結合強度の方が重要なため、サイズが大きくなるにつれて破壊しやすくなることが分かった。一方数百 m よりサイズが大きい天体では、自己重力の効果によりサイズが大きくなると破壊しにくくなった。この結果、数百 m サイズの天体が衝突により最も壊れやすいこともわかった。

しかしながら、上記の解析で仮定したモデルの妥当性や、シミュレーションに用いた計算法の精度に対しては慎重な吟味が必要である。例えば、SPH は接触不連続面や衝撃波面において物理量の空間微分の記述精度が低く、解析に誤差を与えることが懸念されている。そこで講演では、解析で仮定したモデルの問題点や SPH 法の改善方法についても論じ、今後の発展について議論する。

1. Willy Benz and Erik Asphaug, Icarus 142,5-20 (1999)
2. Willy Benz and Erik Asphaug, Icarus 107,98-116 (1994)
3. Shu-ichiro Inutsuka, Journal of Computational Physics 179,238-267 (2002)

## 星惑 a11 巨大ガス惑星の形成初期光度の推定

青山 雄彦 (東京大学地球惑星科学専攻 M1)

近年、観測技術の発展に伴い系外惑星の赤外放射を直接観測した例がいくつか報告されている。これらはどれも長周期の巨大ガス惑星である。TTVなどで質量を求めることができる短周期の巨大惑星とは異なり、長周期ガス惑星の質量推定には惑星の光度と年齢の関係を用いる。赤外放射が検出される巨大ガス惑星は若い(数百万年から数千万年)。そのような若い惑星では、理論的な光度進化は初期条件として与える光度(初

期光度)に大きく依存する。つまり、仮定する初期光度によって質量推定の結果が異なってくる。従って、形成論から初期光度を推定することは、長周期巨大ガス惑星の質量推定・進化を議論する上で重要である。

Marley et al. (2007) ではガス惑星の光度進化に対する初期光度の影響について議論しているが、初期光度の起源については定量的な考察を行っていない。そこで本研究では、惑星への円盤ガスの降着過程を精査することによって現実的な初期光度の定量化を目指す。惑星の初期光度は、惑星に降着するガスの持ち込むエントロピー量に依存する。惑星に降着するガスは超音速であり、惑星周りで衝撃波を形成して加熱され、放射冷却でエントロピーを失う。この衝撃波の効果を定量的に扱うために、放射の効果を加味した流体シミュレーションを行う必要がある。Tanigawa & Watanabe (2002) によると、惑星に降着するガスはコリオリ力と惑星重力の釣り合いによる円運動をしており、その運動は球対称ではない。また、衝撃波の一部は円盤のスケールハイトよりも惑星に近い領域で発生するので2次元近似も適当ではなく、衝撃波による加熱と放射冷却の効果を正確に見積もるためには3次元で計算する必要がある。従って、FLASHコードを用いて3次元の放射流体シミュレーションを行い、惑星に持ち込まれるエントロピー量を求め、初期光度への影響を議論する。

1. Mark S. Marley, Jonathan J. Fortney, Olenka Hubickyj, Peter Bodenheimer, and Jack J. Lissauer ApJ 655 (2007)
2. Takayuki Tanigawa and Sei-ichiro Watanabe ApJ 580 (2002)

## 星惑 a12 ケプラー宇宙望遠鏡を用いたトランジット系外惑星の質量推定

仲谷 峻平 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

2009年に打ち上げられたケプラー宇宙望遠鏡は、太陽系外の惑星によるトランジット(主星に蝕を起こすこと)の際に引き起こされる主星の減光を観測するものである。減光が観測されると、太陽系外の星に惑星が存在するという間接的な証拠となり、実際に1000近くの系外惑星がこのトランジット法により発見されてきた [1]。

しかし、減光を観測した時点では、トランジット天体は系外惑星「候補」とされるに留まる。蝕を起こす連星系がトランジット惑星の減光シグナルを模している場合もあるからである。したがって、系外惑星候補が真に惑星であるという確証を得るためには、その質量が惑星質量程度であることを示す必要がある。

これまで、質量をはじめとした系外惑星のパラメータは、主に分光観測から求まる主星の視線速度により決定されてきた。しかし、ケプラーのターゲットには暗い星周りの惑星系が多く、このような系では各波長に分けて光子数を測定する分光観測は困難である。そこで近年、ケプラーによって発見されたトランジット惑星の質量推定法としてよく用いられるのが Transit Timing Variation (TTV) の解析である。TTVとは、複数惑星系における惑星同士の重力相互作用に起因するトランジットの一定周期からのずれのことを指す。この TTV をモデル化することで、惑星の質量などのパラメータを精密に決定することができる [2]。TTV のデータは、トランジットの減光のみを解析して得られるため、視線速度とは異なり分光の必要がない。したがって、特に暗い星周りの惑星系において、TTV による質量推定法は大変有用なものとなる。

このような質量推定法により、ケプラーのデータから多くの惑星が発見されてきた一方で、まだ質量が決まっていない惑星も数多く残っている。そこで今回は、これら未解析の系のうち、複数の惑星(候補)を持

ち、かつ顕著な TTV が予想される系 (KOI-935 など [3]) を選び、TTV による質量推定法を適用した結果を議論する。

1. Borucki, W.J. et al., Science 327, 977(2010)
2. Holman, M.J. et al., Science 330, 51(2010)
3. Fabrycky, D.C. et al., ApJ 750,114(2012)

## 星惑 a13 Direct Imaging Constraints on the Tidally Heated Exomoons

鶴山 太智 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

20世紀には太陽以外の恒星も惑星を持っているだろうと考えられていたが、太陽系外の惑星が初めて発見されたのは1995年とつい最近のことである。しかし、それ以降現在までの20年弱で候補天体も含めると4000個以上も報告され、歴史が浅いながらも系外惑星天文学は非現実的なものから一気に天文学の「ホットスポット」にまで上り詰めた。

系外惑星を検出するといっても方法は複数あり、ケプラー宇宙望遠鏡をはじめ、現在までに発見されている系外惑星の大多数は間接的手法によるものである。しかし今回は、直接惑星を撮像するという検出方法で、更に系外惑星ではなく「系外衛星」について議論していく。現在のところ系外衛星の存在は一つも確認されていないが、理論上では潮汐力によって暖められた衛星 (Tidally Heated Exomoons、通称 THEMs) は直接撮像で検出できる可能性があるという論文 (Mary Anne Peters and Edwin L. Turner 2013 ApJ 769 98) が発表された。この論文では主に理論的な議論をしておりデータ解析をしていなかったため、実際に近傍の  $\tau$  Cet、 $\epsilon$  Eri という二つの天体についてすばる望遠鏡を用いて撮像し、データ解析を行った。その結果、主星回りに伴星と思われる点状天体は検出できなかったが、すばる望遠鏡 HiCIAO の検出限界から THEMs の存在範囲に制限をつけることができた。

もし系外衛星を直接撮像できるようになれば、地球型惑星を検出するよりも用意に地球型の天体を検出することができるかもしれない。そうなれば地球外生命についての議論も活発になり、これまで以上に系外惑星天文学の発展に繋がるだろう。

1. Mary Anne Peters and Edwin L. Turner 2013 ApJ 769 98

## 星惑 a14 フレアが惑星大気に及ぼす影響の解析

上原 翔 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

1990年代までは存在しないとさえいわれていた太陽系外惑星は、今や3000個以上の候補が発見され、宇宙には惑星が無数に存在することがわかってきている。いくつかの惑星検出方法のうち、2009年に打ち上げられたケプラー宇宙望遠鏡は、恒星の可視光の明るさを高精度で測定でき、惑星が主星を隠す時に生じる周期的な明るさの変化を検出できる。惑星による主星の掩蔽をトランジットと呼び、この手法をトランジット法という。惑星がこのような軌道を持つ確率は低いが、ケプラー衛星は一度に10万個の恒星を一度に観測することができるので、トランジットをする惑星を多数検出できる(惑星候補数2362個、2012年1月現在)。

ケプラー衛星により得られた膨大な系外惑星データのうち、私は主星がフレアを起こす場合に注目した。先行研究として、軌道周期が1日未満である惑星 Kepler Input Catalog (KIC)12557548b (Rappaport+12,

Kawahara+13) ではでは、トランジットの際の光度変化が一定でない点から惑星の大気が蒸発していることを発見した。私は、大気が定期的に蒸発する場合に限らず、例えばフレアといった主星に大きな光度変化がある時に、惑星大気が瞬間的に大きな変化を示すのではないかと考えた。

我々は、Kepler データから、スーパーフレアが検出される恒星で、トランジットを起こしている惑星候補を探し、数個の候補を発見した。今回は、そのうちのスーパーアースサイズの候補天体について解析を報告する。

1. S.Rappaport Volume 752, Issue 1, article id. 1, 13 pp. (2012)
2. H.Kawahara Volume 776, Issue 1, article id. L6, 6 pp. (2013)

## 星惑 a15 冥王代における後期重爆撃による大陸の破壊と溶融

芝池 諭人 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M1)

冥王代すなわち約 40 億年前より以前にできた岩体は世界中のどこにも見つかっていない。しかし近年、冥王代の放射性年代をもつジルコンを含む堆積岩が発見され、冥王代にはすでに大陸地殻があったと考えられるようになった。この大陸地殻は、いったいなぜ消えてしまったのだろうか。消失の原因として冥王代末期の天体衝突の集中、後期重爆撃 (Late Heavy Bombardment) による破壊や溶融が挙げられるが、定量的な推定はあまりなされていない。

本研究ではこれを解析的に計算する式を導出し、後期重爆撃による大陸地殻消失の説明が、困難であることを明らかにした。具体的には、後期重爆撃を Cataclysm, Soft-Cataclysm, Standard の三つのモデルで表し、衝突天体のサイズ分布を変化させ、冥王代の大陸地殻が掘削される量と溶融する量を推定した。

まず、地球に衝突する総質量、月面への最大衝突および月面のクレーター数密度をそれぞれ固定し、後期重爆撃の大陸に与える影響を見積もった。このとき、衝突天体とされる小惑星のサイズ分布を、実際の観測によって与えられた分布の累乗近似とし、そのベキ指数をパラメータとして変化させた。次に、月面の巨大衝突盆地 (Cataclysm モデル) のデータと、力学的数値シミュレーション (Soft-Cataclysm モデル) および月面のクレーター数密度 (Standard モデル) を定式化したものから、後期重爆撃の規模と大陸への影響の時間推移を推定した。なお、大陸地殻への影響として、総掘削体積、総溶融体積、掘削および溶融領域による地球表面のカバー率、の四つを推定した。

結果としては、後期重爆撃のいずれのモデルであっても、いくつかの巨大衝突によって大陸成長曲線と同程度の体積を溶融する可能性はあるが、溶融領域が地球表面を覆うことはできないとわかった。冥王代の大陸地殻は地球表面に点在していたと想像されるため、これら全てが溶融されるとは考えにくい。すなわち、後期重爆撃によって冥王代の岩体の消失を説明することは困難である。ただし、サイズ分布や大陸の分布によっては、大陸の大部分を掘削あるいは溶融した可能性があるとわかった。

## 星惑 b1 トランジット時刻変動を用いた低密度惑星系の発見

増田 賢人 (東京大学 宇宙理論研究室 D1)  
ケプラー宇宙望遠鏡によって発見された複数トランジット惑星系の

質量推定法として近年よく用いられるのが、TTV (Transit Timing Variation; 惑星どうしの重力相互作用によるトランジットの一定周期からのずれ) の解析である。TTV は、視線速度とは異なり基本的に測光データのみを用いて解析可能である。そのため、ケプラーのターゲットに数多く含まれる暗い星の周りの惑星系において、TTV の解析は特に有用である。

このような複数トランジット惑星系のうち、本研究では Kepler-51 (KOI-620) という系に着目した。この系は、力学的安定性から質量の上限値 [1] が与えられている 2 つのトランジット惑星 Kepler-51b (周期 45.2 日)、Kepler-51c (周期 85.3 日) およびトランジット惑星候補 KOI-620.02 (周期 130.2 日) の 3 つのトランジット天体を有しており、これらは 1 : 2 : 3 の平均軌道共鳴近くに存在している。本研究ではこれら 3 惑星の TTV を解析することで、各惑星の質量をそれぞれ  $2.1_{-0.8}^{+1.5} M_{\oplus}$  (Kepler-51b)、 $4.0 \pm 0.4 M_{\oplus}$  (Kepler-51c)、 $7.6 \pm 1.1 M_{\oplus}$  (KOI-620.02) と決定し、KOI-620.02 もまたこの系に属する惑星 (Kepler-51d) であることを立証した。さらに、トランジットから求めた惑星半径を上記の結果と組み合わせると、3 つの惑星全てがこれまで発見された中で最も低い密度 ( $0.05 \text{ g cm}^{-3}$  以下) をもつことが明らかになった [2]。この値は太陽系で最も密度が低い土星 ( $0.7 \text{ g cm}^{-3}$  程度) のさらに 1/10 以下であり、Kepler-51 系は現在の理論では形成が非常に難しい特異な惑星系であることが示された。

上記の結果は、「短周期の複数トランジット惑星系に属する惑星は、それ以外の惑星と比べて密度が低くより多くのガスを含む」という近年指摘され始めた傾向 [3] を支持する新たな証拠となった。この差異は、短周期の複数トランジット惑星系における他とは異なる形成・進化の経路の存在を示唆するものである。

1. Steffen et al., 2013, MNRAS, 428, 1077
2. Masuda, 2014, ApJ, 783, 1
3. Jontof-Hutter et al., 2014, ApJ, 785, 15

## 星惑 b2 NGC2264 における原始星の X 線長期変動

兼藤 聡一郎 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M1)

NGC2264 は巨大分子雲 Mon OB1 の中で赤外線帯域で最も明るい活発な星生成領域である。電波の連続波での観測ではたくさんのコアが確認されており、まさに今、星が生成されていることを表している。X 線帯域では、角度分解能、エネルギー分解能の良い X 線観測衛星 Chandra が 2002 年に 1 観測、2011 年に 4 観測のモニター観測を行っていた。

そこで我々は、この全てのデータを解析し、300 以上の X 線ソースの検出を確認した。視野内には Peretto et al.(2006) で発見されたダストコアの集団、領域 C と D が含まれていた。これらの領域にはたくさんの Class 0 天体が含まれている。このダストコア周辺部に我々は複数の X 線源を検出し、それらの長期的時間変動を捉えた。さらに X 線源の進化段階を Spitzer および 2MASS のデータを使ってクラス分けを行った。発表では X 線源が、赤外線、電波においてどのように検出されているかを報告し、それぞれの進化段階などの詳細についても報告する。

## 星惑 b3 暗黒星雲コアにおける化学進化の観測的研究

種倉 平晃 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)  
暗黒星雲コアの化学組成は、コアの物理・化学的環境、進化・形成過程を理解する上で重要な知見を与えてくれる。牡牛座分子雲は 150 pc 程



度の距離にある小質量星形成領域であり、現在、大質量星などの活動の影響を受けていないことから、暗黒星雲コア自身の進化・形成過程を述べるのに適した領域といえる。L1544 領域はこの牡牛座分子雲の北東に位置し、比較的進化の進んだ pre-stellar コアとして知られている。その中心では CCS や CO などの分子で depletion が進んでおり、また 0.1 pc スケールの円盤状構造の回転や infall などを示唆する速度プロファイルも報告されている。我々は野辺山 45 m 望遠鏡を用いて 10 種類近くの分子輝線を用いた L1544 コアのマッピング/ストリップ観測を行った。その結果、CCS 分子と SO 分子が反相関するように分布しながら、かつ、コアの中心では SO 分子も depletion していることが分かった。このことは、CCS と SO は暗黒星雲においてそれぞれ化学進化の前半と後半に豊富となり、SO はさらに密度が上昇していくと気層からダストへの depletion が進み、存在量は減少していく、という数値化学進化のモデルの描像と良く一致している。一方で我々はさらに、このコアの中心から北東に約 0.1 pc 離れた場所に、L1544 領域において最も SO 強度の強い clump 状構造が存在することを発見した。この clump では、高密度コアの化学進化の後半をトレースする  $\text{NH}_3$  や  $\text{N}_2\text{H}^+$  といった分子は検出できていない。さらにハーシェル衛星の 250  $\mu\text{m}$ 、500  $\mu\text{m}$  などのダスト放射などから導出した温度環境は、L1544 コア中心と同程度であった。また clump において算出した可視減光度 (ないし  $\text{H}_2$  柱密度) は 4 等程度と translucent cloud のレベルであり、少なくともコアの中心よりも 3 倍程度は少ないものと見積もられる。このように密度・柱密度の少ない領域で、なぜ化学進化の後半をトレースする SO 分子が豊富に存在しているのだろうか。L1544 コアの物理状態 (ダイナミクス、構造、密度、温度) や化学状態を多角的に探り、その原因について迫る。

1. N. Ohashi and Siow Wang Lee ApJ 518 (1999)
2. Y. Aikawa and N. Ohashi ApJ 552 (2001)
3. M. Tafalla and D. Mardones ApJ 504 (1998)

## 星惑 b4 Ophiuchus North region における分子雲の観測的研究

松本 貴雄 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

Ophiuchus North region における分子雲は、距離 $\sim$ 130pc に位置しており、トータル質量は  $4 \times 10^3 M_\odot$  である。また、この領域は星形成がほとんど行われておらず、約 0.3 % の低い星形成効率が見積もられている (Nozawa et al. 1991)。ただし、周辺に  $\text{Oph}$  (O 型星) が存在しており、分子ガスはそれによる紫外線の放射の影響を受けていると考えられている (Tachihara et al. 2000)。我々は、この領域の分子ガスの物理的性質、O 型星・HII 領域による分子ガスへの影響、将来の星形成の可能性等を探るため、1.85m 電波望遠鏡を用いた  $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=2-1$ ) の 3 スペクトル同時観測によって、この領域の一部観測を行った。2014 年 1 月から 4 月の期間で、 $l=4^\circ \sim 12^\circ$ ,  $b=17^\circ \sim 23^\circ$  に対応する 20 平方度をカバーし総観測点数は 72000 点である。3.35 分角の有効空間分解能に対し、1 分角グリッドにて OTF (On the Fly) 観測を実施した。得られたスペクトルの平均雑音温度は、速度分解能 0.08 km/s で  $T_{\text{rms}}=0.6\text{K}$  であった。

フィラメント構造の分子雲 L204 において  $^{13}\text{CO}$  ( $J=2-1$ )/ $^{12}\text{CO}$  ( $J=2-1$ ) 比が高いところで、 $\text{C}^{18}\text{O}$  輝線が見られることが分かった。また、 $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=1-0$ ) のデータと 1.85m 電波望遠鏡のデータの比較により、分子雲の密度や温度の物理量の導出を行った。講演ではこれらデータ比較の結果について報告する。

1. S., Nozawa, et al., ApJ, 77, 31 (1991)
2. K., Tachihara, et al., ApJ, 528, 24 (2000)

## 星惑 b5 原始惑星のガス捕獲による軌道進化

菊地 章宏 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M2)

近年の直接撮像観測により、ほぼ円軌道で長周期 ( $\sim 30-1000\text{AU}$ ) の巨大ガス惑星が発見されている。長周期では惑星形成時間が円盤ガスの散逸時間よりも長く、その場で形成されたとは考えにくい。本研究では、ガス捕獲によるコアの軌道進化の式を解析的に導出し、それらを数値的に解くことで、以下のコア集積モデルに基づいた形成シナリオで観測を説明しようか調べた。1)  $< 30\text{AU}$  で微惑星が集積してコアができる。2) 近くのガス惑星によってコアが散乱されて高離心率になる。3) 遠点近くで大きな角運動量のガスを捕獲することで、軌道長半径はあまり減少せずに円軌道化する。4) 結果として、ほぼ円軌道の長周期巨大ガス惑星になる。結果、以下のことが分かった。質量が 10 倍増加する間に離心率は 1/5 になる。軌道長半径は、離心率が 1 から 0 に減少する間に多くて 1/2 しか減少しない。ゆえに、このシナリオは観測された円軌道長周期巨大ガス惑星の形成を説明しよう。もし散乱されたコアの遠点距離が円盤サイズよりも大きければ、軌道長半径は円盤サイズの約 1/4 になる。ホットジュピターの軌道長半径が円盤の内縁を示しているのと同様、長周期ガス惑星の軌道長半径は円盤の外縁を反映していると言える。

1. Ida, S., Lin, D. N. C. & Nagasawa, M. 2013, ApJ, 775, 42

## 星惑 c1 二重拡散対流による乱流混合と層形成

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) M1)

二重拡散対流は、熱と組成の拡散によって起こる対流であり、地球の海洋ではよく知られた現象である。二重拡散対流は、熱的・組成的に成層化された系において、Ledoux の条件では安定であるが、Schwarzschild の条件では不安定な領域で発生し、天体物理学においても二重拡散対流が熱や組成の輸送を担っている状況は幅広く生じている可能性がある。例えば、中質量星では平均分子量の勾配が対流コアの端で大きくなる。この平均分子量の勾配が十分大きくなった領域は二重拡散対流領域になる。また、巨大ガス惑星の内部において、エンベロープの水素とヘリウムが分離して存在している領域や、岩石コア近傍の金属量の多い領域について、二重拡散対流の熱や組成の輸送に果たし得る役割が議論されている。さらに、白色矮星の脈動のメカニズムや、トランジットしている系外惑星の異常に大きな半径を説明するメカニズムとしても提案されている。しかし、この二重拡散対流の性質はよく分かっていない。

Rosenblum et al. (2011) では、二重拡散対流の 3 次元シミュレーションを行っている。ある場合では、二重拡散対流は一樣な乱流状態になることが分かった。しかし、乱流によるフラックスは組成勾配のない通常の対流よりも小さい。別の場合では、系は熱と組成による多数の薄い層を形成する。その後、形成した多数の薄い層は合体して一つの層になる。この結果を海洋学分野の層形成の理論と比較すると、よく一致することが確認された。熱と組成の混合率は、層が形成されるときに大きく増加し、それぞれの層が合体するときさらに増加する。多層構造の中の熱

フラックスは、層の高さの簡単な関数になっていることが分かった。

今回は、Rosenblum et al. (2011) のレビューを行う。さらに、これまでの研究の問題点を論じ、今後の発展についても議論する。

1. Rosenblum et al. ApJ 731 66 (2011)

## 星惑 c2 M 型星周りの惑星形成シミュレーション

磯江 麻里 (国立天文台三鷹 M1)

近年、観測技術の発展に伴い太陽型星よりも小さい質量を持つ M 型星の周りにおいても系外惑星が発見されている。M 型星は中心星近傍にハビタブルゾーンを持つのでハビタブルプラネットの観測可能性が太陽型星よりも高い。また、中心星の断面積が小さいので太陽型星よりも小さい惑星をトランジット法で検出することができる。一般に、地球型惑星形成は暴走的成長/寡占的成長と、それに続く円盤ガス散逸後の巨大衝突段階の 2 段階で記述される。惑星形成の軌道構造 (平均運動共鳴、離心率、軌道長半径) に大きな影響を及ぼすものとして惑星を中心星方向に移動させる効果 (タイプ I 惑星移動) が重要だと考えられてきた。しかし、タイプ I 惑星移動の効果だけでは説明できない平均運動共鳴に捕獲されていない系外惑星が最近の観測で発見された。そこで本講演では、M 型星の中心近傍での地球型惑星形成を、円盤ガスを考慮に入れた N 体シミュレーションによって、最新の観測結果の説明を試みた “N-body simulations of planetary accretion around M dwarf stars” (Ogihara & Ida 2009) を紹介する。この論文では、タイプ I 惑星移動がある場合とない場合に巨大衝突段階までの地球型惑星形成シミュレーションを行った。その結果、惑星移動が遅いと始めに平均運動共鳴に捕獲された状態で並ぶ惑星の数が増え、円盤ガスの散逸後に巨大衝突を起こし平均運動共鳴から外れることを明らかにした。つまり、先述した観測された惑星は惑星移動速度が遅い状況で形成されたことが示唆された。しかし、共鳴に入った惑星系の円盤散逸後の安定性はまだわかっていないため更なる研究が必要とされる。本講演では地球型惑星形成について調べた論文を紹介し、観測結果との整合性をふまえ最新の研究成果と問題点を挙げ、今後の研究課題を示す。

1. M.Ogihara, & S.Ida, 2009, ApJ, 699, 824

## 星惑 c3 星と惑星形成の初期段階

鈴木 匠 (新潟大学宇宙物理学研究室 M1)

本発表では、Zhi-Yun Li, Robi Banerjee, Ralph E. Pudritz, Jes K. Jorgensen, Hsien Shang, Ruben Krasnopolsky, Anaëlle Maury arXiv:1401.2219 [astro-ph.SR] についてのレビューを行う。星形成と惑星形成は、原始惑星系円盤を通して繋がっている。原始惑星系円盤の理論的理解は、近年急激な進展を見せている。ここで、初期の原始惑星系円盤の形成とアウトフローの理論とその観測、また、それらと惑星形成の初期段階の繋がりに注目した。円盤の形成は、流体力学的なコアの収縮の間、角運動量は保存するというシンプルな結果で考えられていたが、磁化したガスの中では、より捉えにくいものになっている。この場合、その rotation は、磁力によって崩されうる。この「magnetic breaking catastrophe」について知られていること、その解決方法、初期の原始惑星系円盤の現在の状態の観測をこの論文により理解する。また、アウトフローについても、円盤の形成に深く関係しており、これは、星形成の

重要な手がかりでもある。この初期の円盤とアウトフローの特性は初期段階の惑星形成の鍵となっている。

1. Zhi-Yun Li, Robi Banerjee, Ralph E. Pudritz, Jes K. Jorgensen, Hsien Shang, Ruben Krasnopolsky, Anaëlle Maury arXiv:1401.2219 [astro-ph.SR]

## 星惑 c4 回転分子雲コアの分裂条件

福島 肇 (京都大学 天体核研究室 M1)

星の質量分布は初期質量関数 (IMF) として与えられるが、理論的に分布の説明はなされていない。しかし、観測的に星形成の初期条件である分子雲コアの質量分布と IMF に相関があると示唆されているため、分子雲コアの重力崩壊の過程を調べる事は重要である。ここでは、等温、等密度の一樣回転している回転楕円体分子雲コアの収縮を扱う。回転しない場合は自己相似的な収縮が見られるが、回転が加わると分子雲の収縮には三つの結果があり、(1) 自己相似的な収縮を行い中心に一つの断熱的なコアを作る (2) 細長い形状に収縮するが分裂しないもの (3) 等温収縮の段階で分子雲コアが分裂するもの、と分けることがわかった。特に角速度が小さい極限では、初期の熱エネルギーと重力エネルギーの比によって分裂が起こるかどうかが決定できる。本発表は [1] のレビューである。

1. T.Tsuribe and S.Inutsuka Apj, 526, 307 (1999)

## 星惑 c5 降着衝撃波による初代銀河中での超巨大質量ブラックホールの形成

森田 一平 (九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻 M1)

初代銀河の中心付近の衝撃波が発生する場所での超巨大質量星の新しい形成シナリオの提案をする。ピリアル温度以上の初代銀河の集合体は冷たく、密度が高いガスの流入をよって成長する。衝撃波後面では Ly  $\alpha$  放射と等圧収縮で 8000K 程度まで冷える。衝突波後面の等圧収縮が続くかどうかは次の条件による。もし、密度が水素の回転を励起するほど高ければ、高くなった水素分子の分裂が冷却よりもガスを圧縮するかどうかということである。この場合、衝突波後面は巨大質量の分子雲をつくり、これは分裂せずに、Ly  $\alpha$  の冷却によって等圧的に崩壊する。結果として超巨大星が形成し、超巨大質量ブラックホールの種として進化することが予測される。熱進化を計算することで超巨大質量星の形成条件を定めることができる。これは初期のイオン化度に依存する。また、金属量が 1000 分の 1 以下であれば、超巨大星の形成に影響を及ぼさないことが分かった。今までの超巨大質量星の形成シナリオと異なる点は、強力な放射が必要でないということである。新しく提案するシナリオであれば、強い放射なしに超巨大質量ブラックホールの種となるブラックホールの初代銀河中での形成を説明することができる。

1. Kohei Inayoshi and Kazuyuki Omukai. Soc.422,2539-2546 (2012)

## 星惑 c6 異なる金属量における星形成後期段階の進化

中村 鉄平 (九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻 M2)

星形成後期段階を金属量  $0 \leq Z \leq Z_{sun}$  で変化させシミュレーションを行った。静水圧平衡状態のクラウドからスタートし、原始星誕生後 100 年までを計算した。星形成プロセスは  $Z \leq 10^{-4} Z_{sun}$  と  $Z > 10^{-4} Z_{sun}$  で大きな違いが見られた。 $Z \leq 10^{-4} Z_{sun}$  では分裂が頻繁に起こり、安定した円盤は形成されずに多くの原始星が形成される。それと同時にいくつかの原始星が原始星同士の相互作用によってクラウド中心から射出され、最終的に多くの原始星がクラスター状に形成される。 $Z > 10^{-4} Z_{sun}$  では原始星がひとつ形成され、周囲には安定した円盤が形成される。円盤内で時折分裂が起き、最終的に中心の原始星に落ちてくる。これらの違いは熱進化と質量降着率の違いによって生じる。クラウドの熱進化はファーストコアの生存時間を決定する。 $Z > 10^{-4} Z_{sun}$  の場合には原始星が形成される前にファーストコアが発生するが、 $Z \leq 10^{-4} Z_{sun}$  ではファーストコアは発生しない。ファーストコアは次第に円盤に成長し、円盤は角運動量輸送を起し、分裂を抑制する。 $Z \leq 10^{-4} Z_{sun}$  の場合は質量降着率が高く円盤の表面密度は短時間で増加し、円盤は重力的に不安になる。結果的に活発な分裂が引き起こされると考えられる。

## 星惑 c7 星周円盤における分裂片の破壊

加藤 広樹 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ D1)

星間空間中にある分子雲が収縮して、原始星が形成されるという過程において、分子雲は角運動量を持っている為に、原始星の周りには円盤が形成される。形成された円盤の質量が原始星質量と比べてある程度重い場合、円盤内で重力的に不安定になり、円盤の分裂片が形成されると考えられている。形成された分裂片は、周りの円盤との相互作用により中心の原始星へと落下していき、円盤の寿命と比べて早く落下する場合は中心の原始星と衝突をする可能性がある。この時、分裂片は自己重力により形状を保っているが、中心にある原始星による重力の寄与も受けており、分裂片の中心から見て、分裂片の重力が支配的に作用する境界領域を表す Hill 半径と呼ばれる半径が存在する。Hill 半径の大きさは両者の質量比と中心星からの距離で決まる為、中心星へと分裂片が落下する事により変動し、分裂片の大きさが Hill 半径を上回ると、分裂片の一部が剥ぎ取られていき、結果として分裂片が破壊されることがあり得る。しかし、この破壊にかかる時間と落下の時間との詳しい関係は不明であり、中心にある原始星へと落下しきる前に全て壊されるのか、ある程度の形を保って落下するのか等はわかっていない。

今回、我々は原始星周りを回転する薄い円盤を考え、その中で形成された分裂片の二次元平面内の流体運動を SPH 法を用いて計算した。分裂片の面密度分布としてポルトローブ球による断熱状態のものを考え、これに中心星が及ぼす重力の影響を加えて、中心星周りをケプラー速度で周回させた時の分裂片の時間進化を追った。結果として、分裂片の大きさが Hill 半径と同程度になる位置に達すると、中心星へとガスが剥ぎ取られていき、その一部が分裂片の運動に寄与して、クランプの中心星への落下が早まるという結果が得られた。落下の加速によって、分裂片が Hill 半径に達する位置よりも、さらに中心星に近づいた位置に落ちて行きながら破壊されることがわかった。

1. Nayakshin S.2010,MNRAS.408.36
2. Vorobyov E.I.,&Basu S.,2005,ApJ,633,137

3. Toomre A.,1964,ApJ,139,1217

## 星惑 c8 重力マイクロレンズ法による惑星イベント MOA-2012-BLG-527 の解析

越本 直季 (大阪大学 芝井研究室 M2)

我々 MOA(Microlensing Observations in Astrophysics) グループではニュージーランドの Mt.John 天文台において、重力マイクロレンズ現象を利用した系外惑星探査を行っている。重力マイクロレンズは観測天体(ソース天体)の光がそれより手前の天体(レンズ天体)の重力によって曲げられることで、増光して観測される現象である。レンズ天体が一つの場合は増光の時間変化(光度曲線)は対称的になるが、伴星を伴う場合はその形がずれ、光度曲線に特徴的な形(anomaly)が見られる。得られた光度曲線を解析することにより質量比などがわかり、惑星を検出する。今、ある天体がマイクロレンズ現象を起している確率は  $10^{-6}$  で、惑星を検出できるのはさらにその数%と低い。また、伴星が惑星質量程度の場合は anomaly が数時間~数日程度と非常に短い。これらの要求を満たすため、我々は口径 1.8m、視野 2.2 平方度の広視野望遠鏡 MOA-II を用いて、銀河系中心領域の星約 5000 万個を対象に 15 分-90 分に 1 回という高頻度で毎晩観測を行っている。一つの望遠鏡では 24 時間カバーできないが、MOA と同程度の高頻度サーベイ観測をチリで行っている OGLE-IV との連携により、光度曲線を連続的にカバーできるようになってきている。さらに、データをリアルタイムで解析することで、anomaly が見つかり次第、世界中のフォローアップグループにアラートを出し、高頻度追観測を行っている。

本研究では 2012 年の重力マイクロレンズイベント MOA-2012-BLG-527 の解析を行った。このイベントはフォローアップグループの小さな望遠鏡で観測するには暗かったため、MOA と OGLE の両サーベイグループによるデータ点しか得られていない。惑星モデルフィッティングの結果、質量比が  $2 \times 10^{-4}$  であることがわかった。レンズ天体は M 型、K 型などの低質量星である確率が高いため、この質量比は氷惑星~土星質量程度に相当する。サーベイグループのデータのみから木星質量以下の惑星が検出できたのは本イベントで 2 例目である。また、銀河の密度分布などを仮定した銀河モデルを事前確率としたベイズ解析によりレンズ天体の質量や軌道長半径の確率分布が得られる。本講演ではそれらの詳細な解析結果を報告する。

## 星惑 c9 自己重力不安定な円盤における巨大ガス惑星の軌道進化

植田 高啓 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M1)

惑星形成理論には大きく分けて 2 つのモデルが存在する。1 つは、原始惑星系円盤内でダストが合体して微惑星を形成し、微惑星が集積して惑星を形成するコア集積モデルである。もう 1 つは、円盤が自身の重力によって分裂し、分裂したガス球が収縮して惑星を形成する円盤自己重力不安定モデルである。近年、直接撮像法によって、離心率が小さく軌道長半径が数十 AU を超えるような長周期巨大ガス惑星が発見されてきている。コア集積モデルでは、遠方領域ほど惑星コアの成長が遅いため、このような長周期巨大ガス惑星をその場で作るのは困難であると考えられる。一方で、円盤の自己重力不安定は遠方領域ほど起こりやすいため、このような長周期ガス惑星が形成される可能性がある。本研究では、自

己重力不安定な円盤内で形成された巨大ガス惑星の軌道進化を、円盤ガスとの重力相互作用と乱流の効果を考慮して、運動方程式を数値的に解くことによって調べた。その結果、中心星から 100AU 程度離れた場所で形成されたガス惑星は、 $10^4$  年程度という比較的速いタイムスケールで円盤内側 (-10AU) まで移動することがわかった。この結果から、観測で見つかっているような長周期円軌道ガス惑星を自己重力不安定モデルで形成するのは困難であることが予想される。

1. Forgan, D., & Rice, K. 2013, eprint arXiv:1304.4978
2. Muto, T., Takeuchi, T., & Ida, S. 2010, ApJ, 737, 37
3. Tanaka, H., & Ward, W. R. 2004, ApJ, 602, 388

## 星惑 c10 Kepler-51 系における形成時の水素ヘリウム大気量推定

黒崎 健二 (東京大学地球惑星科学専攻 D2)

Kepler 宇宙望遠鏡の活躍により多数の系外惑星系が発見されてきており、複数惑星系も多く確認されるようになってきた。特に、複数惑星系はトランジット法のみでの観測でも TTV 法によって惑星質量を推定することができる。複数惑星系は形成時期に加え、軌道進化によって複雑な形成プロセスをたどることが考えられ、形成過程を制約することは、惑星形成を議論する上で重要である。

複数惑星系のうち、本研究では Kepler-51 系に焦点をあてる。Kepler-51 系は 3 つの惑星を 0.5AU 以内持ち、トランジット法で半径を、TTV 法によって質量をそれぞれ決定されているが、それらの平均密度が  $0.05\text{g cm}^{-3}$  以下と低密度な惑星系であることがわかっている (Masuda 2014)。これらの惑星は中心星近傍のコンパクトな系であることから、質量散逸の影響を強く受け、形成時の水素ヘリウム大気量は現在のそれよりも多いことが予想される。しかし、初期に大量のエントロピーを保持していた hot start と、形成時から冷却していた cold start の違いにより、その後の熱進化および惑星放射強度が異なることは知られている (Marley et al. 2007)。質量散逸を含めた熱進化は hot start に該当する進化のみ扱われており (Lopez & Fortney 2013, Owen & Wu 2013), cold start の場合について言及した研究はこれまでなかった。

本研究では Kepler-51 系をモデルケースに、熱進化と質量散逸計算を行い、惑星が形成直後に持っていたと考えられる水素ヘリウム大気量の推定を試みた。その結果、現在の惑星放射強度の違いで、形成初期に保持する水素ヘリウム大気量が異なることがわかった。また、それら形成初期における水素ヘリウム大気量に最小値が存在することもわかった。

1. Masuda, K. 2014, ApJ, 783, 53
2. Lopez, E. D., & Fortney, J. J. 2013, ApJ, 776, 2
3. Owen, J. E., & Wu, Y. 2013, ApJ, 775, 105

## 星惑 c11 乱流の効果を考慮した重力不安定モデルによる微惑星形成過程

白井 陽祐 (東京大学地球惑星科学専攻 M1)

惑星系の形成過程において、地球型惑星・巨大ガス惑星ともに 1km から数百キロメートルサイズの微惑星が元になると考えられている。微惑星そのものは原始惑星系円盤内の  $1\mu\text{m}$  以下のダストから形成される。

この微惑星の形成シナリオについて、ダストの自己重力不安定による収縮によって形成される「重力不安定モデル」と、ダストどうしの衝突の連続によって形成される「連続合体成長モデル」の 2 つが有力である。今回は前者のプロセスに注目した。自己重力による収縮を引き起こすためにはダストの密度がロッシュ密度をこえる必要があり、赤道面へのダストの沈着によるダスト層の形成、円盤の径方向へのダストの移動、円盤ガスの光蒸発などによる密度増大の要因が考えられてきた。これらの見積もりは多くにおいて静的な円盤状態を仮定としており、円盤内に乱流が多く存在する場合を考慮すると乱流がそれらの要因を妨害し、ダストの局所的な密度増加を妨げると考えられていた。しかし、近年の研究 (Youdin and Goodman(2005), Cuzzi et al(2001) など) によって、乱流の効果による重力以外の要因でダストの高密度領域ができる可能性が示唆されている。ダストの組成に関わらない微惑星形成プロセスを説明できるという意味で重力不安定モデルの理解を深めることが重要であると考え、Youdin and Goodman(2005) を基に議論する

1. Youdin and Goodman(2005)
2. Cuzzi et al(2001)

## 星惑 c12 Pop III/II Transition 低質量星形成の条件について

宮澤 航平 (東北大学天文学専攻 M1)

初代星 (Pop III star) 形成の理論的な研究によると、これらの星の典型的な質量は  $10\text{-}100M_{\odot}$  と考えられている。その一方で太陽近傍の種族 I の星 (Pop I star) や金属量が太陽の 1% 程度の種族 II の星 (Pop II star) の星の典型的な質量は太陽質量程度であり、小質量である。このことから宇宙の星形成の歴史の中で星の典型的な質量が大質量から小質量へと遷移が起こったと考えられている。(Pop III/II Transition)

星の質量は母体となるガスの分裂スケールと原始星へのガスの降着により決定するが降着するガスは原始星となった中心コアの周りを取り残されたエンベロープであるので、ここではできる星の質量スケールを考える上で母体のガスの分裂スケールに注目する。フラグメントの質量スケールはジーンズ質量程度であり、これはガスの温度と密度で決定される。したがって分裂片の質量スケールの見積りにはガスの熱進化を追うことが重要である。このガスは cosmic web を通して初期銀河に流入した後、冷却に伴い定圧で進化すると考えられている。ガスの冷却には原子・分子・金属イオンによる放射冷却や高密度ではダストの熱放射が寄与する。従って冷却の効率は分子生成やガスの金属量によって大きく影響される。また外部輻射が存在すると、それに伴う加熱や分子生成への影響によりガスの冷却に影響を及ぼす。ガスの熱進化を正確に追うためには、これらの効果を総合して計算を進める必要がある。

今回はこの遷移が起こった理由、及び星の母体となるガスの分裂スケールを決める条件について、ガスの熱進化に注目して研究した論文についてまとめ、レビューを行う。

1. Safronek-Shrader, Bromm & Milosavljević, 2010, ApJ, 723, 1568
2. Omukai, Schneider, Haiman, 2008, ApJ, 686, 801
3. Inayoshi, Omukai, 2012, MNRAS, 422, 2539

## 星惑 c13 コア形成過程におけるガスの状態

水野 友理那 (東北大学天文学専攻 M1)

S.Inutsuka & M.Miyama (1998) では、等温フィラメントからの分裂・収縮・合体等について、非線形解析の数値的シミュレーションを使って調べている。非摂動状態には自己相似的な収縮を与えている。シミュレーションの進化過程では等温としている。シミュレーションにおいて等温状態を考えたが、加熱と冷却が釣り合って、等温が保たれるかどうか調べている。結果は以下のようである。a) 球対称で暴走的に収縮する解が見つかった。b) フィラメントの軸方向に収縮し、分裂せずに細長くなる解もあった。c) 典型的なガス塊の密度・長さ・質量のスケールがわかった。一方で、T.Hanawa (2000) では、ポルトロップガス球の安定性を調べている。安定性を調べる上で、摂動は bar/Ori-Piran/spin-up の 3 種類を与えている。この結果で、最も注目すべきは、断熱比熱比  $\gamma$  が 1.097 以下なら bar mode の摂動に対して不安定であるということだ。収縮している等温ガス塊 ( $\gamma = 1$ ) を考えると、bar mode の摂動が成長し、さらにフィラメントが出来てしまう。回転に対する摂動の不安定性も起こるが、等温付近を考えると摂動の成長率は、bar mode の方が大きい。これではガス塊が階層的に分裂し続けてしまう。私のポスター発表では、この 2 つの論文をレビューし、それぞれの論文の解析の過程で考えられた状況や条件の対応について言及し、収縮して星になる前のコアについての考察する。

1. S.Inutsuka and M.Miyama ApJ. 480.681I(1997)
2. T.Hanawa PASJ 52.241H(2000)

## 星惑 c14 磁気流体波動駆動型の巨大ガス惑星からの質量放出と大気構造

田中 佑希 (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) D2)

近年は多数の太陽系外惑星が発見されており、その中には中心星に極めて近接した軌道を公転している巨大ガス惑星も多く存在している事が分かっている。このような惑星はホットジュピターと呼ばれており、中心星からの強力な輻射を受けて表面は 1000K 程度の高温に加熱されている。また様々な観測から、ホットジュピターが持つ大きく膨張した水素大気の大気存在や、大気からの大量の質量放出現象の存在も分かっている。ホットジュピターからの質量放出については、大気の上層部から高速で流れ出す水素大気の大気存在が観測から明らかになっており、モデル依存性はあるものの質量放出率の推定値も得られている。しかし、このような大量の質量放出現象の詳細なメカニズムは未だにはっきりとは解明されていない。

そこで我々がホットジュピターからの質量放出のメカニズムとして提案しているのが、磁気流体波動によって駆動される太陽風の質量放出現象である。巨大ガス惑星が固有磁場を持っており、惑星表面に乱流が存在している場合は、表面で磁気流体波動が励起される。さらにその波が上空へ伝播し散逸することによって大気の運動エネルギーとなり、質量放出を駆動する事が考えられる。本研究では、太陽風と同様の数値計算を、ホットジュピターに関して典型的だと考えられるパラメータを用いて行った。

その結果、磁気流体波動によって引き起こされた質量放出の値は、観測から推定されている質量放出率を説明出来る事が分かった。また、発見されている惑星の半径や質量、推定される表面温度などは様々である

ため、これらをパラメータとして計算を行った。計算の結果から、ガス流は大気上層で超音速まで加速され、さらに高層大気は数万 K にまで加熱されることも示した。

本講演では、ホットジュピターだけではなく巨大ガス惑星全般における質量放出の可能性や大気構造への影響についても議論したい。

1. Y. A. Tanaka, T. K. Suzuki & S. Inutsuka, arXiv (2014)
2. Vidal-Madjar et al. 2003, Nature

## 星惑 c15 Direct Imaging Exoplanet Searching of the Nearby Solar-type Star Epsilon Eridani

Nugroho Stevanus Kristianto (東北大学天文学専攻 M1)

Epsilon Eridani is one of the nearest stars to the Sun. From indirect method it has been reported for the existence of its giant planet companion and also a lot of direct imaging observation have been made but none of them detected imaging confirmation of its existence. It is one of the most popular targets to study with direct imaging. So far most of the direct imaging observations yields no detection result at any wavelength except for H-band and CH4R12-band direct imaging with Subaru HiCIAO+AO188 in SDI mode which have been analyze with LOCI subtraction algorithm by Fuji et al. (2012). The S/N ratio was 2-3 and it has been done with several statistical methods to reject the possible feature from the image. However it is not so strong enough to reject or to accept the possible result. The most recent direct imaging data was obtained for H-band with Subaru HiCIAO+AO188 in ADI mode. In this poster we will present the detection limit of the observation and the minimum mass that can be detected with present data.

1. Fujii et al. 2013 Master Thesis Tohoku University
2. Lafreniere et al. 2007 ApJ, 660, 770
3. Baraffe, I., Chabrier, G., Barman, T. S., Allard, F., & Hauschildt, P. H. 2003, A & A, 402, 701

## 星惑 c16 高速自転星と超短周期惑星からなる系の角運動量の力学進化

上赤 翔也 (東京大学 宇宙理論研究室 M2)

PTFO 8-8695 系は、周期 0.67 日以下という高速で自転する T タウリ型星と、それを 0.44 日という短周期で公転するホットジュピターからなる。高速自転により、主星の赤道付近の光度は極付近と比べ低下している (重力減光)。この系に対しては 2009 年と 2010 年の 2 回トランジット観測が行われているが、それらの光度曲線の形状は互いに大きく異なっていた。これは、主星が非球対称であることで惑星との間にトルクが働き、主星の自転軸と惑星の公転軸が互いに 1 年程度の周期で歳差運動していることに起因する。つまり、惑星が緯度によって光度の異なる主星の表面を、時間によって様々な方向から通過すれば、それに応じて光度曲線の形状も時間変化する。先行研究はこの歳差運動をモデル化し、観測データから主星の自転軸と惑星の公転軸の傾き ( $\psi$ )、歳差周期など系のパラメータを決定している。しかし、この理論モデルは主星の自転周期と惑星の公転周期の同期という仮定の下で導出されている。

一般に主星と近傍の惑星の間には潮汐力が働き、系は自・公転軸が揃い ( $\psi \rightarrow 0$ )、自・公転周期が同期する方向に進化する。しかし先行研究では  $\psi$  は  $70^\circ$  と 0 から大きく外れており、自・公転が同期している必然性はない。そこで本研究では、より一般的な理論モデルの下で系の角運動量の力学進化を計算した。このモデルの下では、自・公転周期の同期の仮定なしに、主星の自転、惑星の自・公転という 3 つの角運動量の時間進化を計算できる。結果、系の歳差周期は主星の自転周期に応じて有意に変化することを見出した。この依存性を踏まえた上で、本発表では将来のトランジット光度曲線の形状予測を行う。この系の歳差周期は 1 年程度と短い故に、この予測の妥当性は観測により直接確認できる。つまり、将来の観測でその時期の光度曲線の形状を見ることで、モデルの妥当性の確認と、 $\psi$  を含む系の様々なパラメータのより高精度での決定が可能となる。

1. Barnes, J. W., et al. 2013, ApJ, 774, 53
2. Correia, A. C. M., et al. 2011, CeMDA, 111, 105