

# 星形成・惑星系分科会

切り拓け、星と惑星の新時代

日時	7月29日 14:30 - 15:30 (招待講演: 武藤 恭之 氏) , 15:30 - 16:30 7月30日 11:00 - 12:30, 16:00 - 17:00 (招待講演: 河原 創 氏) 7月31日 14:30 - 15:45 8月1日 9:00 - 10:45, 11:00 - 12:00 (招待講演: 細川 隆史 氏)
招待講師	武藤 恭之 氏 (工学院大学) 「原始惑星系円盤の愉しみ」 河原 創 氏 (東京大学) 「まだ見ぬ世界と生きているうちが華の系外惑星探査」 細川 隆史 氏 (東京大学) 「銀河系と初期宇宙での星形成」
座長	黒崎 健二 (東京大学 D1)、田中 祐希 (名古屋大学 D1)、田崎 亮 (京都大学 M2)、水木 敏幸 (東北大学 M2)
概要	<p>近年の観測技術の発達が目覚ましく、特に系外惑星の発見個数は1年あたり1000個に迫る飛躍的なペースでの発見が続いています。また、これまでは見ることが出来なかった星形成・惑星形成の現場である原始惑星系円盤の直接撮像も可能となり、研究に新たな知見をもたらしています。このような、分子雲コアからの星の形成や原始惑星系円盤、惑星に至るまでの広い領域を取り扱っているのが星形成・惑星系分科会です。星形成は歴史のある分野であり古くから研究が続けられていますが、角運動量や磁場の問題など、今なお未解決の課題が残されています。原始惑星系円盤においては、円盤の進化過程やその振る舞い、惑星の形成メカニズムなどには不明な点が多く、活発に議論が交わされています。最近では直接観測によって円盤が多彩な構造を持っている事が示されています。円盤のスパイラル構造やギャップの存在など、驚くべき程の詳細な情報が得られており、理論の進歩に大きな期待が寄せられています。系外惑星の観測は今までは間接的にその存在を検出出来ている状態でしたが、惑星の直接観測も可能となり、発見例も大幅に増え続けている最も活発な分野となっています。最近では惑星大気分光観測も行われ、研究の進歩によって宇宙生物学などの新たな分野への道も拓かれつつあります。</p> <p>ALMA を初めとした最新鋭の観測機器の登場や TMT を用いた地球型惑星観測の計画 (SEIT) などもあり、星形成・惑星系の分野は新しい時代へと突入しています。本分科会に参加する皆さんは、星と惑星の新時代を担う研究者の卵です。夏の学校での発表や議論を通して知識を広め、今後の研究の発展と自身の成長のために役立てて頂きたいと思います。</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>

武藤 恭之 氏 (工学院大学)

7月29日 14:30 - 15:30 C(広瀬鳴瀬)

## 「原始惑星系円盤の愉しみ」

原始惑星系円盤は、惑星形成の現場として観測・理論の両面から活発に研究がされている。原始惑星系円盤は、ガスとダスト（固体粒子の成分）から成っており、この中でダストが集積し、最終的にガスが散逸することによって惑星系が出来上がると考えられている。しかし、原始惑星系円盤がそもそもどのような姿をしているのか、またその中でどのような物理過程が起こって多様な惑星が形成されるのか（またはされないのか）という基本的な部分で多くの謎が残っている。

本講演では、原始惑星系円盤に関する基礎的な理論や最新の観測結果について、特に「原始惑星系円盤の物理構造と進化」をキーワードとしながら概説する。具体的には：

1. 原始惑星系円盤の基本的な描像
2. 原始惑星系円盤における力学過程と非軸対称構造
3. 最近の観測で明らかになってきた原始惑星系円盤の描像
4. 将来の観測で明らかになると期待される原始惑星系円盤の姿

といった話題を、講演者自身の研究も交えながら簡単に紹介したい。

河原 創 氏 (東京大学)

7月30日 16:00 - 17:00 A(サファイア)

## 「まだ見ぬ世界と生きているうちが華の系外惑星探査」

私が系外惑星に足を突っ込んでから高々数年、その間、第二の地球候補が続々と見つかってしまった。でもその中に、本当に人の心を打つような世界は待っているのだろうか？本講演では、地球型系外惑星探査の方法論や現状をお話ししたい。特に惑星の表層環境をいかに知るか、生命由来と考えられるシグナルは何か、等の課題は、私たちが生命であるがゆえに、何か特別な興味を引き起こす気がする。このような探査法の中には、ちまたで聞かれる予算予算予算や縮小中止廃止のニュースと比して、到底現実味のなさそうに思えるものも含まれているかもしれない。しかし、思い出してほしい。人類は40年以上前に月に降り立ったらしいし、私がかが72歳になる予定の40年先には何が起こるか分からないではないか。それから、検出可能性をうじうじする机上の理論だけではなく、具体的に10年オーダーの未来にできる一歩として、晩期型星周りの地球型惑星の直接観測計画、SEIT計画を主に楽観的な若手で進めている。始まったばかりの挑戦的な装置開発や楽観的すぎる探査計画をより現実近づけることなどに興味を持ってもらえるようにがんばります。

細川 隆史 氏 (東京大学)

8月1日 11:00 - 12:00 A(サファイア)

## 「銀河系と初期宇宙での星形成」

星は様々な天体の中でも最も基本的なものであり、その形成過程についての研究は長い歴史がある。この講演では、これまでのこの分野の研究の進展を踏まえつつ、これからの研究がどのように進んで行くか、どのような研究が大きな成果につながるか、など主として理論研究を中心に将来展望にも重点をおいて紹介する。銀河系の星形成について標準シナリオの受け入れられている低質量星( $\sim 1 M_{\odot}$ )の形成、謎の多い大質量星(OB型星)の形成過程について触れたのち、後半では初期宇宙での星形成過程について銀河系での星形成過程との類似点、相違点を明らかにしつつ説明する。宇宙の再電離、巨大ブラックホールの起源、初期宇宙から現在の宇宙に至る宇宙論的時間での星形成過程の進化など、関連する話題にも時間の許す限り触れる。

## 星惑 01a 初代原始星システム～形成と進化～

中村 鉄平 (九州大学 M1)

この論文では、宇宙暗黒時代の終わりに最初に誕生する星の形成を研究した。ダークマターハローの中心にできる初代原始星の形成、ガスの収縮について、3次元のムービング・メッシュシミュレーションを使用して計算を行った。今回のシミュレーションでは25桁以上の異なる密度レンジをカバーしており、 $0.05R_{\odot}$ の空間分解能を持つ。この空間分解能は初代原始星の進化を理解するには十分であり、周囲のガスの影響も調べることが出来る。計算の結果、最初に形成する原始星の周りに出来るケプラー円盤がいくつかの原始星に分裂することがわかった。円盤と周囲のガスの重力相互作用によって原始星のシステムは複雑に進化する。また、少数の原始星はN-体インタラクションを通して他の原始星から角運動量を得て、外側の軌道に放出される。しかし、存在する原始星の数は単調増加する。これは、初代原始星のシステムがここでシミュレーションされた限られた時間を越えて成長し続けることを示唆している。

1. Yoshida, N and Omukai, K and Hernquist, L . 2012. Science, 321, 669

## 星惑 02a 天体現象における Rayleigh-Taylor 不安定性

松本 達矢 (京都大学 M1)

重力場中で密度の小さな流体層の上に密度の大きな流体層が存在するとき、Rayleigh-Taylor 不安定性と呼ばれる流体の不安定性が生じる。宇宙では、大質量星や活動銀河核などの大光度をもつ天体からの輻射圧により、このような流体の配位が数多く存在することが知られている。本発表では、輻射流体の基礎方程式に対して線型摂動解析を行い、流体の配位の安定性条件について議論する。特に optically thin な場合では、大きな輻射圧にさらされた HII 領域が不安定性をもつこと、また、optically thick な場合でも不安定化が起こり、[2] での大質量星形成のシミュレーションにみられるような bubble の不安定化を説明することがわかった。これらの特性は例えば、30 Doradus における HII 領域の構造や大質量星形成における物質の降着を説明することができる。本発表は [1] のレビューである。

1. Jacquet, E and Krumholz, M. R. 2011. ApJ, 730, 116
2. Krumholz, M. R., Klein, R. I., McKee, C. F., Offner, S. S. R., and Cunningham, A. J. 2009. Science, 323, 754

## 星惑 03b 降着モデルの違いによる大質量星の進化の変化

加藤 広樹 (大阪大学 M2)

本講演は、Hosokawa, T., Yorke, H. W., & Omukai, K. 2010, ApJ, 721, 478 のレビューである。大質量星 ( $M_* > 8M_{\odot}$ ) の形成には高い質量降着率 ( $> 10^{-4} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ ) が必要であると考えられており、観測においてもこの事を示唆している。今回の講演ではこのような高い質量降着率につ

いて、円盤を形成して中心星に落下する場合と、球状に一樣等方な方向から中心星に落下する場合を考える。これらの降着の仕方の違いによって、中心星へのエントロピーの流入の違いが生じ、その結果中心星は二つの場合で異なる進化を辿る事になる。具体的には  $M_* < 8M_{\odot}$  までの星の進化を見た時に、球状の場合と円盤状の場合とでは、球状の方が半径が一桁程大きいという結果が得られる。更にその後の進化を見た場合には  $M > 10M_{\odot}$  では星の半径は両降着モデルでほぼ等しくなり、その後の進化は同じになる。本講演では、このような違いが具体的にどのようにして起きるかを示し、その理由について考察する。

また、今後の展望としては、星の場所による降着の違い等が考えられる。今回の星形成の条件では円盤状に降着した場合も、最後に星に質量降着する瞬間は、星の表面においてどこでも一様に降着が起きるとしたが、実際には円盤の形状による影響や、星の磁場による影響により、場所によって降着率の違いが生じる可能性があり、そこから予測される事柄について述べる。

1. Hosokawa, T., Yorke, H. W., & Omukai, K. 2010, ApJ, 721, 478
2. Wolfire, M. G., & Cassinelli, J. P. 1987, ApJ, 319, 850
3. Stahler, S. W., Shu, F. H., & Taam, R. E. 1980, ApJ, 242, 226

## 星惑 04b さまざまな金属量における分子雲の熱進化

井手 良輔 (九州大学 M1)

分子雲の熱的、化学的進化を異なる金属量 Z で調べた。金属量 Z が非常に低い場合には分子雲は主として H しか含まれていない。そのため  $H_2$  や HD の回転と振動による冷却がよく効く。しかし、低温ではこれらの冷却が効率的でないため、金属量 Z が低い分子雲は十分に冷えることが出来ない。金属量 Z が高いときは、様々な元素が存在する。そのため、酸素や炭素による冷却によって分子雲は低温まで冷えることが出来る。また、このときダストも多く含まれるためダストによる放射冷却やダスト表面での  $H_2$  の合成も冷却を促進する。結果として、金属量 Z が多い場合は分子雲は低温まで冷却される。

## 星惑 05b 回転軸と磁力線が一致していない場合の分子雲コア収縮時におけるアウトフローと質量降着

橘田 英之 (九州大学 M1)

アウトフローやジェットは星形成過程において分子雲コアから質量、角運動量、エネルギーなどを再分配するという重要な役割を持っている。この研究では、回転軸と磁力線のなす角  $\alpha$  が  $\alpha \neq 0$  で分子雲コアが収縮する時にできるアウトフローの形成を3次元理想 MHD シミュレーションを用いて行い、 $\alpha$  を変化させた時の時間発展を調べた。その結果、角度  $\alpha$  を増加させると、アウトフローの質量放出の効率は悪くなる事、また  $\alpha \sim 90^\circ$  ではアウトフローは抑制される事がわかった。さらに、アウトフローは  $\alpha \neq 0$  の時、歳差運動をし不安定になる傾向がある事もわかった。

## 星惑 06b すばる 8.2m を用いたへび座分子雲における若い超低質量天体の探査観測

佐藤 太基 (埼玉大学 M1)

褐色矮星は質量が太陽の 8% 以下で中心温度があまり高くなりえずに水素核融合反応を起こすことが出来ない天体である。また、褐色矮星よりもさらに軽く、質量が惑星程度であるにも関わらず恒星の周りを公転せず単独で存在する惑星質量天体が存在する。褐色矮星は 1995 年、惑星質量天体は 1999 年 (Oasa et al. 1999) と、近年の観測から初めて発見され、その後ペルセウス座分子雲やオリオン座分子雲など (e.g. Oasa et al. 2008) の星形成領域で多数見つかった。褐色矮星は現在までに 1000 天体ほど見つかり、惑星質量天体は、たとえば S106 において約 100 天体同定されている (Oasa et al. 2006)。しかし、このような超低質量天体の形成過程についての理解はあまり進んでいない。

超低質量天体は非常に暗い天体であるが、誕生した頃には近赤外波長で比較的明るく輝くという点に着目し、我々は国立天文台すばる 8.2m 望遠鏡と MOIRCS (多天体近赤外撮像分光装置) を用いて深い近赤外 (JHKs) 測光観測を行った。観測対象は中質量星形成領域であるへび座分子雲 (赤経 18:30、赤緯 +01:15 付近。距離 ~260pc) である。へび座分子雲 (Serpens Molecular Cloud) には Herbig Ae/Be 型星があり、その近傍に Main Serpens Core と呼ばれる赤い反射星雲がある。また、サブミリ/ミリ波の観測により 2 つのコアがあることが明らかにされている (Gorlova et al. 2012)。今回は 4 領域 ( $8' \times 7'$ ) の解析を行った結果、J バンドの 10 $\sigma$  限界等級 ~23.3 等が得られた。測光結果から二色図を作成し、検出天体のうち、赤外超過が見られる天体を YSO 候補天体と同定した。また、YSO 候補天体についての色等級図から、この領域で褐色矮星や惑星質量天体が多数誕生していることが示唆された。

1. Oasa, Yumiko; Tamura, Motohide; Sunada, Kazuyoshi; Sugitani, Koji. 2008, AJ, 136, 13720
2. Oasa, Yumiko; Tamura, Motohide; Sugitani, Koji. 1999 ApJ, 526, 3360
3. Gorlova, Nadya; Steinhauer, Aaron; Lada, Elizabeth. 2010 ApJ, 716, 634G

## 星惑 07b 重力マイクロレンズ法による系外惑星探査の現状について

手塚 謙次郎 (東京大学 M1)

系外惑星探査の手法の一つであるマイクロレンズ法に関する最新の論文を読み、JASMINE 計画との関係性を検討した。まず、2 体系のレンズの系に注目し、マイクロレンズ法に関する基礎的な物理を紹介する。マイクロレンズ法を用いて惑星の質量と軌道半径を決定するのは難しいが、光度曲線と高解像度の画像の詳細な解析によって決定することができる。地上での観測でも惑星系の物理量を測定することが可能だが、宇宙での観測の方が、より正確に決定できる。マイクロレンズ法では、主星と惑星の距離が遠くても惑星を検出することが可能なので、宇宙での観測から惑星系の軌道長半径の分布を調べた。2 次元的に投影された惑星の個数に対する観測データから、3 次元的なデータを取得する統計的な手法が 2011 年に Brown 氏によって考案されているので、それを用いて軌道長半径密度に対する単純なべき分布を発見した。さらに、地上での観測から惑星形成過程の鍵を握る自由浮遊惑星が多く存在することに

ついて言及し、宇宙での観測によって、自由浮遊惑星の質量分布の測定にどの程度貢献できるのかを示した。

1. Emanuela Giannini and Jonathan I Lumine. 2013. Rep. Prog. Phys. 76 056901

## 星惑 08a フィラメント状分子雲の進化と多様な環境下における最小ジーンズ質量

野口 みな子 (名古屋大学 M2)

最近の観測によって、星はフィラメント構造を持つ分子雲の中で形成されることがわかってきた。また、星が形成されているフィラメントは、安定的に存在できる臨界線密度よりも大きな線密度を持ち、動的に収縮することがわかってきた。Masunaga & Inutsuka (1999) は、フィラメント状分子雲の収縮が止まる時の密度 (臨界密度) と、重力不安定となりえる最小の質量 (最小ジーンズ質量) を解析的に求めた。しかし、彼らは初期の線密度依存を無視しているが、実際は収縮過程は線密度に強く依存する。従って、本研究では、フィラメント状分子雲の収縮過程を定量的に求めるために、詳細な加熱冷却過程を考慮した 1zone モデルを用いて、広いパラメータ範囲 (金属量、初期温度、線密度) で調べた。その結果、収縮が止まる時の密度は、Masunaga & Inutsuka (1999) の予言より 2 桁程度大きい事が分かった。これによって最小ジーンズ質量も小さくなり、低質量星の形成に示唆を与える事ができる。また、Inutsuka (2001) は、静水圧平衡状態のフィラメント状分子雲の重力的分裂によって、形成される分子雲コアの質量関数を Press-Schechter 理論を用いて求めた。フィラメント状分子雲の動的収縮の効果を取り入れることで、現実的な分子雲コアの質量関数を求めることができることから、Inutsuka (2001) のレビューも行う。

1. H. Masunaga & S. Inutsuka. 1999, ApJ, 510, 822
2. S. Inutsuka. 2001, ApJ, 599, L149
3. S. Inutsuka & M. Miyama. 1992, ApJ, 388, 392

## 星惑 09a 散乱光における原始惑星系円盤表層の水氷ダスト分布の影響

高附 翔馬 (東京工業大学 M1)

原始惑星系円盤における水氷の分布を探ることは惑星形成や生命の起源において重要なことである。水氷の半径方向の分布を探ることは一般的に難しいが、2008 年に井上らによって新たな観測手法が提案された。これは K バンド (2.15 $\mu\text{m}$ )、H<sub>2</sub>O バンド (3.1 $\mu\text{m}$ )、L' バンド (3.75 $\mu\text{m}$ ) の 3 色を用いる手法であるが、2009 年に本田らによって HD142527 の星周円盤に初めて適用された。彼らによって、この手法の有効性と HD142527 原始惑星系円盤表層の 140AU 以遠に氷が存在することに成功しているが、散乱光の赤化が説明できなかった。この散乱光の赤化は HD100546 でもみられるが、散乱光の赤化の原因として Mulders らはダストサイズによる散乱の角度依存性を挙げている。一方で、岡らの計算によると早期型 (A, B 型) の原始惑星系円盤表層には UV 光脱離過程により、氷微粒子は安定に存在できないという結果がある (Oka et al. 2012)。HD100546 は若い B 型星であるため、UV 光脱離過程が効いて

いれば HD100546 原始惑星系円盤表層には氷水が安定に存在できないはずである。これと Mulders らのダストモデルに氷水ダストが考慮されていないことから、本研究では氷水ダストと光脱離過程に注目し、これらがどのように観測されるかを K、 $H_2O$ 、 $L'$  それぞれのバンドで 2D モンテカルロ放射輸送計算を使って調べた。光脱離過程の効果により、( $K - H_2O$  と  $H_2O - L'$  のカラー差が 1 等ほど小さくなる結果が得られた。また、氷水の分布が ( $K - H_2O$ 、 $H_2O - L'$  のカラー差から読み取ることができる)ことがわかった。

## 星惑 10a SPH 法の自由表面と接触不連続面への対応

山本 智子 (東京工業大学 M1)

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法とは数値流体力学における計算手法の一つであり、これまで主に天文学や惑星科学の分野において幅広く用いられてきた。しかしながら、SPH 法には自由表面や接触不連続面の存在する様な問題を解く際、適切な計算ができていないという問題が知られていた。この問題を解決するため、これまで様々な改良が SPH 法に加えられてきた。しかしながら、これまでのところ、両問題を同時に解決するような SPH 法の改良は、存在していない。そこで本研究では接触不連続で発生する問題を解消する SPH 法を開発し、それと Monaghan が 1994 年に開発した自由表面で発生する問題をある程度解消した SPH 法と組み合わせることによって、両問題を同時に解決する SPH 法を開発した。

## 星惑 11a 惑星形成における天体の衝突・破壊の理論と数値シミュレーションについて

加納 孝基 (名古屋大学 M2)

現在の理論では、原始惑星系円盤内において微惑星同士が衝突・合体することにより原始惑星が形成され、原始惑星が 10 倍の地球質量程度まで成長すると、周囲のガスを集積させることによって木星型惑星 (巨大ガス惑星) が形成されると考えられている。ガス集積を起こせるような大きな原始惑星ができる過程では、天体の衝突は合体だけでなく破壊ももたらす。破壊によって生成された小さな破片は、ガス抵抗によって減速されて角運動量を失い、中心星に落下し消失してしまう。その結果、原始惑星の成長できる大きさには限界が存在し、その限界は天体の破壊強度によって決められることになる。この様に、天体の破壊強度は巨大ガス惑星の形成の可否を決めるために非常に重要である。しかし、十分に理解されているとは言い難く、破壊を記述するモデルは各々が独自のものを使っている状態であり、まだまだ発展途上であるといえる。そのため、惑星形成に適用するための破壊モデルを完成させることが私の目標である。本講演では、1km 以上の大きさの自己重力の効いた天体の破壊に必要なエネルギーを簡単に見積もり、その結果と数値シミュレーションとの比較を行い、破壊モデルの構築を目指す。

1. Kobayashi et al. 2011. ApJ,738:35(11pp)
2. Wada et al. 2005. Icarus,180,528-545

## 星惑 12a 磁気回転不安定性による円盤風駆動

小堀内 啓 (名古屋大学 M1)

電離度の大きいガス円盤があまり強くない磁場に貫かれて差動回転している場合を考えると、このときほぼ無条件に磁気回転不安定性 (MRI) と呼ばれる不安定性が成長し、乱流状態になることが線形解析および数値シミュレーションによって知られている。

今回は Suzuki&Inutsuka(2009) をレビューし、降着円盤内の MHD 現象について発表する。この研究では局所シアリングボックス内で 3 次元 MHD シミュレーションを行い、円盤風と呼ばれる上下面からのガスの流出が起こることが示されている。いわゆる Channel Flow が最も成長するのはスケールハイトの 1.5-2 倍の高さの領域であり、そこでの磁気圧はガスの圧力と同程度だがわずかに小さい。Channel Flow がリコネクションによって崩壊することでポインティングフラックスがガスに輸送され、円盤風が駆動される。これらの特徴は初期の磁場の強さを変えても確認でき、原始惑星系円盤の自発的な動的蒸発に重要な役割を果たすと考えられる。また Channel Flow の崩壊によって赤道面に向かう Alfvén 波や (磁気) 音波も発生し、これが赤道面でのダストの集積にかかわっている可能性がある。

1. Suzuki, T.K., and Inutsuka, S. 2009, ApJ, 691, L49
2. Balbus, S.A., and Hawley, J.F. 1998, RvMP, 70, 1

## 星惑 13a ホットスーパーアースの大気構造

伊藤 祐一 (東京工業大学 M2)

現在までに 800 個以上の系外惑星が観測されている。そのなかでも質量が地球の数倍から数十倍程度、半径が地球の数倍程度の惑星はスーパーアースと呼ばれており、岩石が主成分と考えられる惑星も発見されている。岩石主成分のスーパーアースである CoRot-7b(4.8 $M_E$ , 1.7 $R_E$ , 0.017AU) は、潮汐加熱や強烈な恒星放射により、表面が高温下になりマグマオーシャンに覆われ、シリケート大気を形成すると推測されている (Valencia et al.(2010))。またシリケート大気の揮発性元素の有無について特定することができれば CoRot-7b の組成の起源について制約ができることが期待されている。現在、このようなシリケート大気の大気構造、透過スペクトルは明らかになっていない。本研究では CoRot-7b のような高密度ホットスーパーアースの大気構造、組成、起源を特定するため、大気組成の主要成分 Na,  $CO_2$ , SiO の吸収断面積を明らかにした。この吸収断面積を用いて大気モデルから温度構造、透過スペクトルを推定することが可能となる。

## 星惑 14a ホットジュピターの乱流を用いた大気モデル

岩佐 真生 (京都大学 M1)

近年観測技術の進歩とともに、太陽系外の惑星が多く発見されてきた。その観測結果から、中心星を回る軌道に関して、軌道長半径が極端に小さいホット・ジュピターが見つかり、太陽系とは異なる様相を示すものが発見されてきた。ホット・ジュピターのなかには、異常なほど大きな半径をもつものがある。また赤外線観測によりホット・ジュピターの成層圏で温度の逆転が生じていることがわかっており、これらのことが問題として挙げられている。これらの問題を同時に解決する大気モデルに乱流を用いた大気モデルがある。今回は参考文献 [1]、[2] を用いてこの乱流を用いた大気モデルについてレビュー発表を行う。

1. Andrew N. Youdin and Jonathan L. Michell. 2010. ApJ 721:1113-1126
2. David S. Spiegel, Katie Silverio and Adam Burrows. 2009. ApJ 699:1487-1500

## 星惑 15a オーム散逸によるホット・ジュピターの熱進化

荒井 隆志 (京都大学 M1)

恒星に極めて近い位置にあるにも関わらず、木星級の半径・質量を持つ系外惑星は「ホット・ジュピター」と呼ばれている。このホット・ジュピターが何故大きな半径を持つのかは、未だ謎多き問題である。この問題を説明する方法の一つに、オーム散逸による惑星内部の加熱がある。恒星からの強い照射を受けた惑星の大気は、アルカリ金属元素がイオン化する程度まで加熱され高速で循環している。この帯状の気流は、惑星の大気に流れる電流と見なせる。電流と惑星の磁場の相互作用によって惑星内部に誘導電流が生じ、この誘導電流のオーム散逸によって生じた熱で惑星が支えられている。このオーム散逸による加熱と生じた熱による惑星の構造形成を数値的に計算し、有効温度や質量などの境界条件を与えたときに到達しうる半径が導かれている。この数値計算結果から、惑星が現実的な重金属コアを持っている場合、オーム散逸モデルはホット・ジュピターの観測例を十分説明できることが分かった。

1. Batygin, K., Stevenson, D. J., & Bodenheimer, P. H. 2011, ApJ, 738, 1
2. Batygin, K., & Stevenson, D. J. 2010, ApJL, 714, L238

## 星惑 16a ホットジュピターにおける磁氣的活動と質量放出に関する理論的研究

田中 佑希 (名古屋大学 D1)

近年多数発見されている太陽系外惑星の中には様々な種類のものが発見されている。なかでも、中心星に極めて近接した軌道を持つ巨大ガス惑星、いわゆるホットジュピターと呼ばれるものが多く存在することが分かっている。このホットジュピターは、中心星からの強い輻射を受けて大気から大量の質量放出を起こしていると考えられている。また、トランジット観測からも大気の流出の兆候が確認されている。

一方で、ガス惑星は強い固有磁場を持っている可能性がある。この場合は、太陽風のメカニズムと同様な、表面対流による乱流に起因するアルフヴェン波駆動ガス流による質量放出が起きている事が考えられる。ガス惑星からの大気散逸に関する理論的な研究は多く存在するが、磁場を介した質量放出に関する研究は未だ存在しない。本研究では、太陽風による質量放出を計算するコードを用いて、ガス惑星からの質量放出率の計算を行った。

その結果、ホットジュピターに対して典型的と考えられる表面温度や表面での擾乱を与えて計算を行うと、質量放出率の観測値(厳密には下限値)を十分説明する強度の惑星風が噴き出すことが分かった。また、惑星半径や惑星質量によっても質量放出率は大きく変化し、そのパラメータ依存性も導出することが出来た。本発表では、ガス惑星における質量放出率の数値計算の概要とその結果、および惑星半径や質量へのパ

ラメータ依存性について発表する。

1. Suzuki and Inutsuka. 2005. ApJ
2. Suzuki and Inutsuka. 2006. ApJ
3. Vidal-Madjar et al. 2003. Nature

## 星惑 17a 原始惑星系円盤中のリング構造形成過程

高橋 実道 (京都大学 D2)

近年、すばる望遠鏡の SEEDS プロジェクトなどにより、原始惑星系円盤に形成されているリング構造が観測されている。このような構造は、円盤の進化や円盤中で惑星形成を理解する上で鍵となると考えられており、注目を集めている。しかし、これらのリング構造の起源は未だに明らかになっておらず、これらの観測を説明する理論的研究の進展が急務となっている。観測されたリング構造の起源の候補として、viscus overstability [1] による軸対称な不安定モードが考えられる。粘性ガス円盤の線形解析から、原始惑星系円盤において  $10^5$  年程度で軸対称モードが成長することが示唆されている。しかし、この解析は定常な円盤での局所的な不安定の成長を解析しており、非線形段階においてこの不安定がどのように振る舞うかについては未だ明らかではない。そこで、本研究では粘性円盤の一次元流体計算を行った。そして、原始惑星系円盤での不安定性の成長を非線形段階まで計算した。その結果、波は非線形段階でも成長し、面密度は最大で 10 倍程度まで大きくなることが分かった。最大の面密度は円盤のポルトロープ指数  $\gamma$  が小さく等温に近いほど、また、波長が大きい mode ほど大きくなることが分かった。この数値計算の結果から、円盤に観測されている構造がこの不安定性によって形成されていた場合、密度構造が周期的に変化することが示唆される。

1. Schmit, U., and Tscharnuter, W. M. 1995, Icarus, 115, 304

## 星惑 18a ガス巨大惑星の形成と極低質量星の進化に関する論文レビュー

笠 嗣昭 (総合研究大学院大学 M1)

ガス巨大惑星の形成と M 型星、褐色矮星について理解を深めるために、ガス巨大惑星の形成理論について書かれた Spiegel & Burrows(2012) の Spectral and Photometric Diagnostics of Giant Planet Formation Scenario[1] と極低質量星の進化計算について書かれた G. Chabrier et al.(2000) の Evolutionary Models for Very Low-Mass Stars and Brown Dwarfs with Dusty Atmospheres[2] のレビューを行った。

1. Spiegel, D.S., & Burrows, A. 2012. ApJ, 754, 174.
2. Chabrier, G., Baraffe, I., Allard, F., & Hauschildt, P. 2000. ApJ, 542, 464.

## 星惑 19a 惑星移動シミュレーションによる短周期巨大惑星の形成過程考察

小野 智弘 (京都大学 M1)

現在数多くの短周期巨大惑星が太陽系外で観測されている一方で、短周期巨大惑星は太陽系内には存在しない。本研究では、粘性降着や光蒸発、惑星によるギャップ形成等の過程を考慮した原始惑星系円盤ガスの面密度進化、円盤との重力相互作用による惑星移動、及び惑星コアへのガス降着を数値計算することで、形成される惑星の軌道長半径と質量にどのような制限や関係があるか調べた。特に光蒸発過程としては、中心星からだけでなく、近傍の大質量星からの紫外線照射が惑星の最終軌道長半径と質量へ及ぼす影響も調べた。結果として、惑星コアが1 Myr 以内で形成されれば短周期巨大惑星が形成されることが分かった。

## 星惑 20a 海王星の移動

工藤 哲也 (名古屋大学 M2)

太陽から 40-50AU 離れた位置に軌道を持つカイパーベルト天体の中で、海王星との平均軌道共鳴の位置にある天体の軌道分布は海王星の軌道が20AU 程度から現在の30AU に移動したことを示している。この外向き移動は、角運動量輸送により移動が引き起こされたと考えられ、ガス円盤、または、微惑星円盤との相互作用により可能となる。現在の海王星は木星や土星のような大量の大気を持っていないため、大質量のガス円盤が残っている状況で形成されたとは考えにくい。そのため、海王星はガス円盤との相互作用による移動ではなく、微惑星円盤との相互作用により移動したと考えるのが自然である。先行研究 (Ida et al 2000) により海王星の移動は自律的なものであり、移動することにより新しい微惑星円盤と出会うことで移動を続けることができることが示された。しかし、そのシミュレーションは海王星周りだけを取り扱った局所な計算であり、正確な移動速度を求めるには大局的な計算が必要になる。本研究では、大局的なシミュレーションを行い海王星の移動速度を求めるとともに、先行研究 (Ida et al. 2000, Ormel et al. 2012) が求めた簡単な解析解がどのような場合に成り立つかについてもシミュレーションと比較することで議論する。

## 星惑 21a 系外巨大ガス惑星周りのハビタブルムーンの形成とその安定性

佐藤 貴央 (東京工業大学 M1)

太陽系外惑星が発見されるにつれて、それらの中に生命居住可能 (ハビタブル) な惑星は存在するの否かという問題は重要なテーマとなってきた。そのなかでも、本研究では、系外巨大ガス惑星周りに存在していると考えられる系外衛星の生命居住可能性について考察した。

系外衛星がハビタブルであるために必要な衛星質量の下限値が先行研究 (Williams et al. 1997) によって見積もられており、ガス惑星の潮汐による熱フラックスを効果的に受ける場合は地球質量の 0.12 倍の衛星質量が必要であると考えられている。そこで、本研究ではガス惑星がハビタブルゾーン内に存在した時、この質量を保持した衛星 (ハビタブルムーン) の形成可能性や軌道安定性を複数の先行研究をもとに検証した。

その結果、形成についてはその起源である周惑星円盤の温度構造から、

衛星が形成される場合、岩石衛星になりやすいことが示唆できた。また、軌道安定性についても恒星からの潮汐力による影響や、ガス惑星のタイプ II 軌道移動の影響を受けることなく、ハビタブルゾーン内で安定して存在していられることが示唆できた。

よって本研究から、ハビタブルゾーン内に巨大ガス惑星が存在した場合、その周りにはハビタブルな衛星が存在している可能性が高いことが示された。

1. Williams, D. M., Kasting, J. F. & Wade, R. A. 1997, Nature, 385, 234

## 星惑 22a スペクトル線の歪みの直接検出による中心星自転軸と惑星公転軸の関係の測定

上赤 翔也 (東京大学 M1)

最初の系外惑星の発見以来、中心星近傍を公転する巨大ガス惑星 (ホットジュピター) が数多く発見されてきたが、既存の惑星形成理論ではこれらを観測された位置で形成することは困難である。それゆえ、ホットジュピターはまず原始惑星系円盤の外側で形成され、その後何らかの機構によって現在の位置に移動したと考えられている。この軌道進化の要因として、円盤との相互作用や惑星同士の重力散乱などいくつかの可能性が議論されているが、未だ理論的な解明には至っていない。これらの機構を観測的に制限する手法として、ロシター・マクローリン効果 (RM 効果) を用いた中心星の自転軸と惑星の公転軸の傾き  $\lambda$  の測定がある。例えば、軌道進化が円盤との相互作用によるものであれば  $\lambda$  は常に小さくなるのに対し、惑星同士の重力散乱によるものであれば大きくばらつくことが予想されている。従来の RM 効果の測定は、トランジット (惑星による中心星の食) の際、惑星が自転している中心星の近づく/遠ざかる側を順に隠すことで生じるスペクトル線の変化 (赤方/青方偏移) をドップラーシフトとして検出することで行われていた。ところが、近年ではトランジットによって生じるスペクトル線の歪みを直接検出し、その時間変化を解析することで  $\lambda$  を求めるという新しい手法が用いられてきた ([1],[2])。この手法は、従来の手法で波長の精密較正に用いていたヨードセルを必要としないため、スペクトルの広い領域を用いた解析が可能であることに加え、半径の小さい惑星に対する信号の減衰の度合いが小さいといった利点を持つ。そこで本講演では、この新しい手法を [3] に沿って紹介し、XO-3 という惑星系でこの手法を用いて実際に解析を行った結果を示し、従来の方法による解析結果との比較を行う。

1. Cameron A. C. et al. 2010. MNRAS, 403, 151
2. Cameron A. C. et al. 2010. MNRAS, 407, 507
3. Albrecht S. et al. 2013. arXiv:1302.4443v2 [astro-ph.SR]

## 星惑 23c スーパーアースの限界質量と限界半径

黒崎 健二 (東京大学 D1)

宇宙望遠鏡 (CoRoT や Kepler) による観測により、多数の系外惑星が発見されており、それらの惑星の質量-半径の多様性から、惑星の組成に対する多様性も示唆されてきた。その中でも、惑星が水を保持できるかどうかを議論することは、観測の面からも形成論の面からも重要な問題である。本研究では、内側から岩石コア、水マントル、水蒸気大気を



持つ、水に富む惑星の構造計算と熱進化、質量散逸を計算し、惑星の質量-半径関係および惑星が水を保持できる限界質量を求めた。本研究では (1) 惑星が水を保持できる限界質量および (2) 理論的に求めた限界質量とその半径を観測データと比較して惑星が水を保持できる領域の制約を行う。本研究により、惑星が水を保持できる限界質量の最小値を求めることができた。本研究から理論的に求められた質量-半径関係と観測された系外惑星を比較すると、水を保持した惑星の質量-半径関係図上における存在可能領域を制約することができる。また、軌道長半径-質量関係図や軌道長半径-惑星半径関係図から、岩石惑星である可能性が高い領域を制約することもできた。本研究の成果は、惑星の組成や起源についての議論や、今後の観測ターゲットを選択する上で有益な情報を与えることが期待される。

1. Lopez, E. D., Fortney, J. J., & Miller, N. 2012, APJ, 761, 59
2. Rogers, L. A., Bodenheimer, P., Lissauer, J. J., & Seager, S. 2011, APJ, 738, 59
3. Valencia, D., Ikoma, M., Guillot, T., & Nettelmann, N. 2010, A&A, 516, A20

## 星惑 24c 惑星大気の透過スペクトルの理論的推定

川島 由依 (東京大学 M1)

1995 年に系外惑星が発見されて以来、現在までに 900 個近い系外惑星が報告されている。系外惑星の代表的な観測手法として、トランジット法と視線速度法がある。前者から惑星半径、後者から惑星質量が検出される。さらに最近では、GJ 1214b や GJ3470b、GJ436b のような系外惑星については、トランジット時における大気の透過光スペクトルを検出することが可能となってきた [1]。この透過光スペクトルは、惑星大気中の気体分子による吸収の影響を受けていると考えられる。よって、透過光スペクトルから惑星大気の組成を制約することが可能である。惑星大気の組成は、惑星表面環境や惑星の熱進化を考える上でとても重要である。本研究では、透過光スペクトルの理論的推定を行った。水、二酸化炭素、水素の気体分子に着目しスペクトルを理論的に計算した。今回の理論スペクトルのピーク位置と透過光スペクトルのピーク位置を比較することで組成の特定につながることを期待される。

1. N.Narita, A.Fukui, M.Ikoma, Y.Hori, K.Kurosaki, Y.Kawashima et al. 2013. arXiv:1305.6985
2. A. R. Howe & A.S.Burrows. 2012. THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 756:176(14pp), 2012 September 10
3. L.S.Rothman et al. 1998. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 60 (1998) 665-710

## 星惑 25c 多重トランジット惑星系 KOI-94 における TTV の解析とその惑星食への示唆

増田 賢人 (東京大学 M2)

系外惑星の質量・離心率といったパラメータは、多くの場合、分光観測から求めた中心星の視線速度を解析することで決定される。一方で、トランジット惑星系においては、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 (TTV; Transit Timing Variation) を

解析することで、測光観測のデータのみからこれらのパラメータを推定できる場合もある (e.g. [1])。

このような解析を行う好例として、我々は KOI-94 という系に着目した。KOI-94 は、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であり、中心星の近傍およそ 0.3AU 以内に b (周期 3.7 日)、c (10 日)、d (22 日)、e (54 日) という 4 つのトランジット惑星を有する。これらの惑星に対しては、視線速度法による質量・離心率の推定が行われており、いずれの質量も惑星と呼べる範囲にあることが分かっている [2]。ところが、惑星 c、e に対する質量の制限はほぼ上限値のみであるうえ、得られた離心率の値には系の力学的安定性を鑑みると不自然に大きなものも含まれている。そこで我々は惑星 c、d、e の TTV を N 体計算を用いて解析することで、それらの質量・離心率に対して測光観測のみに基づく独立な制限を与えた。この結果、惑星 c、e の質量などのパラメータをより高い精度で決定した。得られた制限は視線速度法によるものと概ね整合的であったが、一方で先に述べたような大きな離心率は現れず、また惑星 d の質量は視線速度法で得られた値よりも有意に小さいという差異もみられた。加えて、惑星 e の TTV は、今回用いた 4 惑星によるモデルでは説明できなかつた。これらの不一致は、視線速度の更なる長期観測などに基づくより詳細な研究の必要性を示すものである。

本講演では、上記の内容に加え、その結果が KOI-94 で観測された planet-planet eclipse と呼ばれる興味深い現象 [3] に与える示唆についても議論する。

1. Lissauer, J. J., et al. 2013, ApJ, 770, 2
2. Weiss, L. M., et al. 2013, ApJ, 768, 14
3. Hirano, T., et al. 2012, ApJ, 759, L36

## 星惑 26c 原子惑星系円盤の化学進化における円盤風の影響

石本 大貴 (京都大学 D1)

本研究の目的は、円盤の散逸機構として近年提唱されている円盤風の効果を取り入れた化学反応計算を行うことによって、円盤風が円盤の化学進化に与える影響を調べ、円盤風が観測的に検証可能であるかを調べることである。化学反応計算の結果、円盤風の効果によって分子の多い円盤中層領域から分子の少ない円盤上層領域にかけて分子の存在量が増加した。これは、円盤上層の高温領域に中層からの水素分子が供給され、これにより中性-中性反応が進んだためである。また、その結果を用いた放射輸送計算の結果、円盤風の影響を受ける輝線は主に高励起の赤外線として観測される輝線であった。これは、赤外線を主に放射する高温領域において分子量が増加したためである。また、輝線強度は大きくなるが、速度プロファイルはあまり大きな変化は見られなかった。最近の CO4.7 $\mu$  m 輝線の高分散赤外線観測により示唆された、高速度でワイドアングルの円盤風の速度分布を用いて輝線の放射輸送計算を行った結果、円盤風の影響が無い場合には円盤のケプラー回転のためにダブルピークの速度プロファイルを持つものが、シングルピークになるという結果になり、高分散赤外線観測を再現する結果となった。さらに、同じ速度分布を用いて (サブ) ミリ波輝線の計算を行った結果、(サブ) ミリ波輝線もシングルピークとなることが分かった。(サブ) ミリ波輝線は赤外線輝線よりも赤道面に近い領域をトレースするため、本研究の結果と今後の電波干渉計 ALMA の観測結果を比較することにより、円盤風駆動

点付近の速度構造や、ひいては円盤風による円盤ガス散逸率に制限が与えられると期待される。

1. Heinzeller, D., Nomura, H., Walsh, C., & Millar, T. J. 2011, ApJ, 731, 115
2. Suzuki, T. K., & Inutsuka, S. 2009, ApJ, 691, L49
3. Walsh, C., Millar, T. J., & Nomura, H. 2010, ApJ, 722, 1607

## 星惑 27c 高空隙率ダストの光学特性計算と原始惑星系円盤表層部におけるダストのダイナミクス

田崎 亮 (京都大学 M2)

彗星には非常に高温を経験したダストが含まれているということが様々な観測によって示唆されている。それらのダストは原始惑星系円盤の内縁部で形成され、その後、彗星が形成されるような円盤外縁部まで運ばれたと考えられている。そこで本研究では、中心星輻射圧によって高空隙率ダスト(アグリゲイト)が外側に向かって移動する効果について調べた。まずアグリゲイトに働く輻射圧を求めるために、アグリゲイトの光学特性について計算を行なった。光学特性は Effective Medium Theory(EMT) 及び、T-Matrix method for Clusters of Spheres(CTM) の2つの数値計算法を用いた。その結果、モノマーのサイズが  $r_0 = 0.01\mu\text{m}$  の時、EMT と CTM による結果はほぼ一致し、輻射圧と重力の比  $\beta \sim 0.04$  程度となった。しかし、モノマーのサイズが  $r_0 = 0.1\mu\text{m}$  の場合、CTM による計算は  $\beta \sim 0.2$ 、EMT は  $\beta \sim 0.04$  となり、2つの計算法に差が現れることがわかった。さらに講演においては、得られた結果を元に原始惑星系円盤上層部におけるアグリゲイトの運動について議論する。

## 星惑 28c ダスト成長を考慮した低金属量の星形成ガス雲の進化

千秋 元 (東京大学 D1)

天文学では、炭素や酸素など、ヘリウムより重い元素を「金属」と呼び、それら金属はガス雲の放射冷却率に大きく寄与している。ガス雲が重力収縮をして星が形成される時、ジーンズ質量の議論から、ガス雲の温度によって星の典型的な質量が決定される。従って、金属を含まないガスから形成された第一世代星は典型的に大質量(太陽質量の数十から数百倍)であったと考えられている。そして、宇宙空間の金属量が上昇して行く過程で、現在のように典型的な星質量が小さく(太陽質量程度)になったと考えることができる。近年、銀河ハロー中に発見された星(SDSS J102915+172927) [1] は非常に低金属量(太陽金属量の  $4.5 \times 10^{-5}$  倍以下)ながら質量は小さい(太陽質量の 0.8 倍以下)ことが分かった。このような非常に低金属量の環境でも、低質量星は形成されるのか。

金属量が非常に低いとき、低質量星形成の条件として、ダスト冷却が効果的かどうかは鍵となると考えられている。ダスト冷却はガス雲が高密度になると作用するので、ジーンズ質量をより小さくすることができるためである。ダスト冷却を求めるためには、今考えている初期宇宙におけるダスト量が分かっているとイケない。初期宇宙では、ダストは主に超新星によって供給されるが、超新星ではダストを破壊する作用も働く。超新星によるダスト破壊の影響を大きく受け、ダスト量が小さく

なったガス雲中では、ガスの冷却が不十分である可能性がある。先行研究 [2] では、SDSS J102915+172927 の金属量(太陽金属量の  $4.5 \times 10^{-5}$  倍以下)に対して、ダスト量が小さいモデルではガスが十分冷却されないことが示唆されていた。しかし彼女らは、ガス雲の重力収縮中でダスト量が一定であると仮定していた。それに対して、[3] は、ガスの重力収縮に伴って密度が上昇すると、ダストがガス中の金属原子を取り込むこと(ダスト成長)で、ダスト量が上昇する可能性があることを示唆した。

本研究では、ダスト成長とガス雲の温度進化を同時に計算することで、ダスト成長によってガス雲中のダスト冷却率がどれほど影響を受けるかを調べた。その結果、SDSS J102915+172927 の金属量に対し、[2] ではダスト量が小さいためにダスト冷却が十分に起きないとされていたモデルでも、ダスト成長を考慮することで、ダスト冷却が効果的となることが分かった。

1. Caffau, E., Bonifacio, P., François, P., et al. 2011a, Natur, 477, 67 Initial condensation factor
2. Schneider, R., Omukai, K., Inoue, A. K., & Ferrara, A. 2006, MNRAS, 369, 1437
3. Nozawa, T., Kozasa, T., & Nomoto, K. 2012, ApJL, 756, L35

## 星惑 29c Direct Collapse Black Hole

鄭 昇明 (東京大学 M2)

近年、 $z > 7$  において非常に大質量なブラックホール ( $\sim 10^9 M_\odot$ ) が観測された [1]。宇宙初期にできた初代星(Pop 3 star)と呼ばれる星は現在の星に比べて非常に質量が大きいと考えられている ( $40 \sim 100 M_\odot$ ) が、それでもこのような大質量なブラックホールの形成を説明する事には未だ成功していない。本研究ではこのような大質量ブラックホールができる一つのシナリオとして有力視されている Direct Collapse について考える。Direct Collapse とは、宇宙初期に周囲の初代星からのフィードバックによってジーンズ質量が大きくなり  $\sim 10^5 M_\odot$  程度の非常に重いブラックホールの種がまず形成される。これがどんどん成長して大質量ブラックホールを形成する、というシナリオである。

1. Fan X. et al., 2003, AJ, 125, 1649

## 星惑 30c 散逸円盤中の円盤温度変化による惑星の獲得大気の応答

廣瀬 翔 (東京大学 M1)

多数の発見報告がある低密度スーパーアースは、様々な内部組成モデルが議論されている。観測の進展により、質量と半径がともに分かった惑星も増えており、組成に対する議論も可能となった。しかし、質量-半径の関係のみでは、H-He 大気存在量によって岩石主体惑星と水分主体惑星のどちらかを区別することができず、組成が縮退してしまうことが知られている。本研究では、従来の固体コア質量と獲得大気質量比計算では考慮されていなかった固体コアの熱進化を考慮することを目的とし、円盤温度に対する獲得大気量の応答を調べた。結果、主星から遠い位置で形成されたスーパーアースほど、大気質量が小さいことが分かった。今後固体コアの熱進化も入れて計算することで、さらに正確に内部組成に制約が与えられ、惑星形成への理解が進むと期待される。

.....

## 星惑 31c 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 M1)

近年、直接撮像によりほぼ円軌道の長周期巨大ガス惑星が発見されている。惑星形成の標準理論であるコア集積モデルでは、コアの形成時間を考えると、巨大ガス惑星が中心星から遠い場所で形成されたとは考えにくい。そこで本研究では、大きな離心率の楕円軌道にある原始惑星のガス捕獲による軌道進化を考え、ほぼ円軌道の長周期惑星の形成が可能かどうかを調べた。質量増加率が1公転周期の間で一定である場合について、軌道進化の式を解析的に導出し、それを数値的に解くことで、軌道要素と質量の関係を求めた。ガスを捕獲することで、離心率は効率的に減少する一方、軌道長半径はあまり減少せず、初期の半分が限度であることがわかった。また円盤の大きさが有限の場合の数値計算を行い、円軌道化したときの軌道長半径と円盤の大きさに関係があることを示した。

1. Ikoma, M. and Nakazawa, K. and Emori, H. 2000. ApJ, 537, 1013