

学位論文の要旨

氏名

高石大輔

学位論文題目

Formation and dynamical evolution of protostars and protoplanetary disks
in turbulent molecular cloud cores
(乱流分子雲コアにおける原始星および原始惑星系円盤の形成と力学的進化)

本論文は、原始星および原始惑星系円盤の形成と力学的進化において、母体の分子雲コアが持つ乱流が及ぼす影響を研究しまとめたものである。

第1章は、原始星や原始惑星系円盤の形成進化過程に関するこれまでの理論研究および観測研究についてまとめる。特に、Kepler宇宙望遠鏡やすばる望遠鏡、ALMA望遠鏡などの観測研究や、大規模数値シミュレーション等を用いた理論研究から得られた最新の研究結果と未解決課題について記述する。

第2章は、本研究で用いる流体力学および磁気流体力学シミュレーションに関する基礎事項を記述する。本研究は、分子雲コアの自己重力収縮と乱流速度場によるガスの力学的進化を再現するために適した数値計算手法であるSmoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法を用いて行う。また、長時間計算および原始星の物理量評価の目的を達成するためにsink particle法を導入する。これらの数値計算手法について詳説する。

第3章は、乱流分子雲コア中で誕生した原始星および原始惑星系円盤の回転軸進化に関する研究成果を報告する。本研究は、原始星の自転軸と惑星形成の初期条件である原始惑星系円盤の回転軸の形成初期段階でのずれを明らかにした。単一星が形成する場合、原始惑星系円盤の形成初期には、円盤の回転軸と原始星の自転軸は必ずしも揃っておらず、円盤の回転軸と原始星の自転軸はなす角130度以下でランダムに分布することを明らかにした。一方で、原始惑星系円盤形成から1万年程度経過すると、円盤の回転軸と中心星の

自転軸はなす角20度以下で整列することが分かった。これらの結果は、近年多数報告されている主星自転軸に対して傾いた公転軸を持つ惑星の形成メカニズムに制限を与える。

第4章は、乱流分子雲コア中で形成した三重連星系における原始星の自転軸および原始惑星系円盤の回転軸の長時間進化に関する研究結果を報告する。近年のALMA望遠鏡を用いた観測から、回転軸が互いに傾いた原始惑星系円盤や互いに逆回転する円盤を持つ若い連星や多重星が多数発見されている。しかし、回転軸が互いに傾いた円盤や逆回転する円盤の形成過程はまだ明らかになっていない。本研究は、連星周囲に付随する周連星系円盤が重力不安定により分裂し三重連星へと成長した系において、原始星連星を周回する3つ目の原始星に付随する原始惑星系円盤が進化の途中で逆回転することを発見した。この進化シナリオは、これまでに提唱されていない全く新しい逆回転円盤の形成シナリオである。この結果は、原始星の捕獲や磁場の効果といった複雑な物理過程を考慮することなく、流体力学的なガスの進化から逆回転円盤が形成することを示している。また、観測されている回転軸が互いに傾いた円盤や逆回転する円盤を説明する可能性がある。

第5章は、星形成において重要な役割を果たす分子雲コア中の磁場に着目し、磁場を持つ乱流分子雲コア中で誕生した原始星および原始惑星系円盤の形成進化過程に関する研究を報告する。星形成領域では、双極アウトフローを駆動する天体に加えて、単極アウトフローを駆動する天体がこれまでにいくつか発見されている。しかし、その起源はまだ明らかになっていない。本研究では、3次元非理想磁気流体力学シミュレーションの結果、磁場を持つ乱流分子雲コア中で形成した原始星天体から単極アウトフローが駆動することを発見した。また、その駆動条件が分子雲コアの持つ磁場のエネルギーと乱流のエネルギーの比に強く依存することを見出した。

第6章では、本研究で得られた成果をまとめ、分子雲コアの持つ乱流が星形成過程に与える影響について総括する。

Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation:

Formation and dynamical evolution of protostars and protoplanetary disks
in turbulent molecular cloud cores

Name: Daisuke Takaishi

This thesis summarizes the effects of turbulence of the molecular cloud cores on the formation and dynamical evolution of protostars and protoplanetary disks.

Chapter 1 gives an overview of previous theoretical and observational studies on the formation and evolution of protostars and protoplanetary disks. It specifically describes the latest research findings and unresolved issues obtained from observational studies using instruments like the Kepler Space Telescope, Subaru Telescope, ALMA Telescope, as well as theoretical research involving numerical simulations.

Chapter 2 outlines the fluid dynamics and magnetohydrodynamics (MHD) simulations used in this study. The Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method is employed to simulate the gravitational collapse of the molecular cloud cores. The sink particle method is introduced to calculate the long-term evolution of protostars and protoplanetary disks. We introduce these numerical methods in this chapter.

Chapter 3 reports the research on the misalignment of the rotational axes of protostars and protoplanetary disks formed in the turbulent molecular cloud cores. The results show that the rotation axis of the protostar is not always aligned with that of the protoplanetary disk at the early phase of the evolution. In contrast, the rotation axis of the protostar is gradually aligned with that of the protoplanetary disk in a timescale of 10,000 years after the protostar formation. The results provide the constraints on the formation mechanisms of the exoplanets that have the orbital planes misaligned relative to the spin axis of their host stars.

Chapter 4 presents the research on the new formation scenario of a counter-rotating protoplanetary disk formed by the spiral-arm accretion from a circumbinary disk in a triple protostar system. This new formation pathway during the disk evolution in Class 0/I Young Stellar Objects (YSOs) possibly explains the counter-rotating disks recently discovered by the ALMA observations.

Chapter 5 reports the research on the formation and early evolution of the protostars and protoplanetary disks formed in the magnetized turbulent cloud cores. We perform the three-dimensional non-ideal MHD simulations and find that the unipolar outflows are driven by the low-mass protostars and protoplanetary disks formed in the weakly magnetized cases.

Chapter 6 summarizes the achievements of the research and provides the effect of the turbulence in the molecular cloud cores on the formation and early evolution of protostars and protoplanetary disks.