

氏 名 土井 聖明

学位(専攻分野) 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第 2520 号

学位授与の日付 2024 年 9 月 27 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Constraining Physical Properties of Protoplanetary Disks
from Spatial Distributions of Dust Millimeter Continuum
Observations

論文審査委員 主 査 立松 健一
天文科学コース 教授
廣田 朋也
天文科学コース 准教授
岩崎 一成
天文科学コース 助教
田中 秀和
東北大学 大学院理学研究科 教授
百瀬 宗武
茨城大学 理工学研究科 教授

博士論文の要旨

氏 名：土井 聖明

論文題目：

Constraining Physical Properties of Protoplanetary Disks from Spatial Distributions of Dust Millimeter Continuum Observations

The process of planet formation is considered to be the growth process from micron-sized dust particles to thousand-kilometer-sized planets. The discovery of more than 5000 exoplanets with various sizes and orbits, alongside the diversity of rocky, icy, and gaseous planets within our solar system, shows that planet formation occurs commonly with diverse outcomes. In the standard core accretion scenario, dust grains grow by coagulation through collisions to form planetesimals, and then they grow into planets by gravitational accumulation.

However, there are several problems in the formation theory, especially in the initial dust growth process. One is the radial drift problem, in which the dust grains migrate and fall onto the central star before reaching meter size. Another one is the fragmentation/bouncing problem, in which the dust grains are fragmented or bounce at high-velocity collisions. Thus, we need to reveal how the dust grains overcome these problems and grow larger to form planetesimals.

Observations of protoplanetary disks, which are the ongoing site of dust growth, can provide clues to reveal the planet formation process. In particular, recent high-resolution radio observations with ALMA have enabled us to spatially resolve protoplanetary disks. These observations have revealed many substructures in the dust emission and improved our understanding of the dust distribution in the disks, but the physical properties of the disks and the mechanisms that form these substructures are not well understood yet.

In this thesis, from the perspective of the spatial distribution of the dust emission, we aim to reveal the physical properties of protoplanetary disks and planet-disk interaction. Since the dust spatial distribution is determined by the growth, accumulation, and diffusion, we can estimate these physical properties of the disks from the spatial distribution of the dust emission. By revealing the physical properties of the disks, we can understand the environment and the pathway of the dust growth and accumulation.

First, we propose novel methods to reveal the physical properties of protoplanetary disks from observed images. We demonstrate that the dust scale height can be estimated from azimuthal variations of the dust continuum intensity. We also propose

a new method to constrain the dust size distribution, including both the maximum dust size and the exponent of the grain size distribution, from the wavelength dependence of the spatial distribution of the dust emission. Then, we apply these methods to the HD 163296 disk and show that the dust scale height and the dust size distribution are different between the two dust rings of the disk: the millimeter sized dust grains are vertically puffed-up in the inner ring, while the centimeter-sized or larger dust grains are settled near the midplane in the outer ring. Also, the exponent of the dust size distribution is estimated to be ~ -3.5 , which is consistent with the theoretical prediction when the dust growth is limited by collisional fragmentation. From the estimated dust properties, we further estimate the physical properties of the HD 163296 disk, including the gas turbulence strength. We reveal that the dust grains grow to larger than millimeter size and then stop growing due to collisional fragmentation under relatively strong turbulence ($\alpha_{\text{turb}} > 10^{-3}$).

Then, we investigate the planet-disk interaction in the PDS 70 system. Although previous Band 7 observations showed an almost axisymmetric dust ring outside the planets, our Band 3 observations show a clear asymmetry with a peak in the northwest direction. The observations reveal that the dust grains are accumulated both radially and azimuthally outside the planet and form the optically thick peak. We also measure the disk eccentricity from the position of the central free-free emission and the outer ring, and estimate the mass of the exoplanet in the PDS 70 system to be less than 6.7 Jupiter masses if the turbulence strength $\alpha_{\text{turb}} = 10^{-3}$. We clarified the process of dust grain accumulation influenced by the exoplanet within the disk.

In this thesis, we successfully reveal the dust growth and accumulation in the protoplanetary disks, providing snapshots of the planet formation process, from the perspective of the spatial distribution of the dust emission. Our proposed methods provide new constraints on the physical properties of the disks, and we can further apply these methods to more disks at different evolutionary stages to reveal the pathway of the planet formation process.

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 土井 聖明

T i t l e
論文題目 Constraining Physical Properties of Protoplanetary Disks from Spatial Distributions of Dust Millimeter Continuum Observations

惑星形成のメカニズムは、21 世紀の現代天文学に残された大きな未解決問題の一つである。惑星形成のプロセスは、ミクロンサイズのダスト粒子から数千キロメートルサイズの惑星への成長プロセスである。標準的なコア集積シナリオでは、ダスト粒子は衝突による凝集をもとにした成長を通じて微惑星を形成し、その後重力蓄積によって惑星に成長すると考えられている。しかし、形成理論、特に初期のダスト成長プロセスには、衝突破壊、中心星へのダスト落下、不安定性によるダスト集積、といった克服すべき問題がある。ダスト粒子がこれらの問題を克服して成長し、微惑星を形成する仕組みを明らかにする必要がある。

近年のアルマ望遠鏡による高解像度電波観測により、原始惑星系円盤のサブストラクチャが明らかになり、円盤内のダスト分布に関する理解が深まった。一方、円盤の物理的特性や、これらのサブストラクチャを形成するメカニズムの理解は、まだ十分とは言えない。

出願者は、アルマ望遠鏡による高解像度電波観測によるダストの空間分布から、原始惑星系円盤の物理的特性を明らかにするための 2 つの新しい方法を提案した。ダスト円盤のスケール高さを、ダスト連続波の強度の方位角変化から推定できることを実証した。また、ダストサイズ分布の、最大ダストサイズと冪指数の両方を、リング幅の波長依存性とスペクトル指数から制限する新しい方法を提案した。出願者は、これらの方法を HD 163296 円盤に適用し、ダストスケール高さとダストサイズ分布が円盤の 2 つのダストリング間で異なることを示した。これは、ダストの成長が、従来の理解と異なり、円盤の外側から進んでいる可能性を示す興味深い結果である。ダストの空間分布から、それを再現する円盤の乱流強度の推定を行うことができ、乱流がある程度強いことを明らかにした。また、ダストサイズ分布の冪指数は ~ -3.5 と算出され、これは衝突による破砕によってダストの成長が制限される場合の理論的予測と一致することが分かった。

出願者は次に、惑星形成の証拠が得られている PDS 70 円盤における惑星と円盤の相互作用を研究した。出願者が提案し採択されたアルマ望遠鏡での観測により、ダスト粒子が、原始惑星系円盤のリング中に、非軸対称の形態を持つ「光学的に厚いピーク」を形成していることが明らかになった。また、自由-自由放射で特徴づけられる中心星領域と外側リングの形状から離心率を測定し、過去のシミュレーションを用いた研究結果との比較から、PDS 70 円盤の系外惑星の質量は 4.9 木星質量未満であると算出した。惑星がすでに誕生している原始惑星系円盤内のダストの成長と蓄積を明らかにし、惑星形成プロセスのスナップショットの獲得に成功した。

本研究は発想から研究の立案、ターゲットの選定、観測とそのデータ解析、得られた結果に基づく考察に至るまで、論文の執筆も含めて出願者が主体的に行ったものである。

原始惑星系円盤のダストサイズの進化（小さなダストから大きなダストへ）を観測的に追うことはとても重要であったが、従来はダストサイズ分布の冪指数を仮定して最大サイズが推定され、その仮定の妥当性は十分に検証されていなかった。本研究で提案された方法である、「最大サイズ」と「冪指数」を、リング幅の波長依存性とスペクトル指数の2変数で追い込むという新しい手法の開拓により、より強い制限をつけることが可能になった。原始惑星系円盤の物理的特性に対する新しい観測的制約を提供し、さらに将来的にはこれらの方法をさまざまな進化段階にある多くの円盤に適用し、惑星形成プロセスの経路を明らかにできるものと期待され、惑星の形成メカニズムの理解に大きく貢献すると考えられる。

用いた手法は、世界的に見ても例のない斬新な手法であるという点は、大いに評価される。従って、審査委員全員一致で学位の授与に値すると判断した。