

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 4 月 15 日現在

機関番号：32613

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24840037

研究課題名(和文)理論・観測の両面から迫る原始惑星系円盤の物理的性質の解明

研究課題名(英文)Revealing Physical Properties of Protoplanetary Disks from Theory and Observations

研究代表者

武藤 恭之(Muto, Takayuki)

工学院大学・基礎・教養教育部門・助教

研究者番号：20633803

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円、(間接経費) 690,000円

研究成果の概要(和文)：惑星形成の過程を知るためには、その現場である原始惑星系円盤を理解することが不可欠である。近年の観測技術の発展によって、原始惑星系円盤の多様な姿を観測によって直接的に捕えることが可能になってきた。

本研究課題では、(1)現実的な円盤の姿を最新の観測をもとに明らかにする、(2)円盤における物理過程を理論的に解析して観測につなげていく、の二点を中心的な目的としていた。

(1)については、すばる望遠鏡やALMA望遠鏡による観測結果の解釈や検討に加わり、観測された円盤の非軸対称性の起源を探った。(2)については、原始惑星系円盤内の惑星によるギャップ生成モデルに関する研究などを共同研究者と行った。

研究成果の概要(英文)：Understanding the physical properties of protoplanetary disks is important in understanding planet formation scenario. Recent observations have revealed several non-axisymmetric, bumpy structures in protoplanetary disks.

The main goals of this project are (1) to explore what the "realistic" models are for protoplanetary disks based on the most recent observations at NIR and mm/sub-mm wavelengths, and (2) to (re-)investigate the fundamental physical processes in protoplanetary disks and make the link between the theory and observations.

To achieve the goal (1), we have been involved in the discussions of the data taken by Subaru or the early observations of ALMA, which show interesting morphological structures such as rings or spirals. To achieve the goal (2), we have done theoretical studies including the investigations of disk-planet interaction and gap formation processes.

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：天文学

キーワード：原始惑星系円盤 直接撮像観測 赤外線天文学 電波天文学 円盤惑星相互作用

## 1. 研究開始当初の背景

生まれたばかりの若い星の周囲には、原始惑星系円盤と呼ばれる、ガスと塵粒子(ダスト)から成る薄い円盤が存在することが知られている。原始惑星系円盤は、惑星形成の現場として盛んに研究が進められてきた。

惑星形成の大きなシナリオとしては、原始惑星系円盤内のダスト粒子が集まり、だんだんと大きくなって惑星が出来、最終的にガス成分が散逸して、太陽系のような惑星系が出来るといったことが標準的に考えられている。しかし、このモデルには、様々な理論的な困難が存在しているということが知られており、そもそも惑星を作る母体である原始惑星系円盤の物理的性質を良く知る必要があると考えられている。

従来、原始惑星系円盤のモデルとしては、軸対称でなめらかな円盤モデルが使われてきた。ところが近年、観測技術の進展により、原始惑星系円盤の姿を、直接画像として捉える観測が可能になってくると、原始惑星系円盤は豊かな構造を持つということが明らかになってきた。

そこで、このような原始惑星系円盤の構造の観測から何を読み取ることが出来るのか、また、原始惑星系円盤の構造を生み出す起源が何か、ということ明らかにしていくことが喫緊の課題となっている。そして、構造を持った原始惑星系円盤が普遍的に存在しているのか、そこからどのような惑星が生まれるのかを明らかにし、惑星形成の新しいシナリオを構築していくことが求められている。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、上記のような背景に基づき、理論・観測の両面から原始惑星系円盤の物理的状態を探っていくことを大きな目標としていた。特に、以下のような点を明らかにすることを目的としていた：

(1) 原始惑星系円盤の撮像観測について、観測された構造から何が言えるのかを明らかにし、観測と比較可能なモデルの構築を目指す。

(2) 原始惑星系円盤や、その中で円盤と惑星の相互作用に関する理論的研究をもとに、原始惑星系円盤内で起こる物理的素過程を明らかにし、それがどのように観測につながるのかを明らかにする。

## 3. 研究の方法

研究の目的(1)を達成するためには、観測を専門とする研究者と協力し、実際の観測データの検討を行っていくことが必要である。そこで、すばる望遠鏡を用いて、原始惑星系円盤直接撮像観測および系外惑星系の直接撮像観測を集中的に行うプロジェクト「SEEDS」に参加し、得られたデータの検討

などを行った。(国立天文台・大阪大学・NASAゴダード宇宙センターなどとの共同研究)

また、初期観測が始まった ALMA 望遠鏡のデータについても、観測を主な専門とする研究者と連携して、データの検討などを行った。(大阪大学・茨城大学・国立天文台などとの共同研究)

研究の目的(2)を達成するために、いくつかの理論的な研究を行ったが、本稿では特に原始惑星系円盤におけるギャップ生成過程に注目した研究について簡単に紹介する。(北海道大学との共同研究)

## 4. 研究成果

### 4-1. SEEDS 計画により得られた原始惑星系円盤の構造

本研究は、すばる望遠鏡を用いた SEEDS 計画によって得られたデータについて、共同研究者とともに解析や結果の解釈について議論を行ったものである。

一つの結果として、[PZ99] J160421.7-213028 という星の周囲に、リング状の構造(図1、雑誌論文の1の図1より転載)が観測された。この観測に対し、円盤・惑星相互作用の理論から、惑星が存在するとしたらどのような惑星が存在すると考えられるか、また、将来の観測ではどのようなことが予測されるのかといったことについて議論を行い、論文としてまとめた(雑誌論文1)。

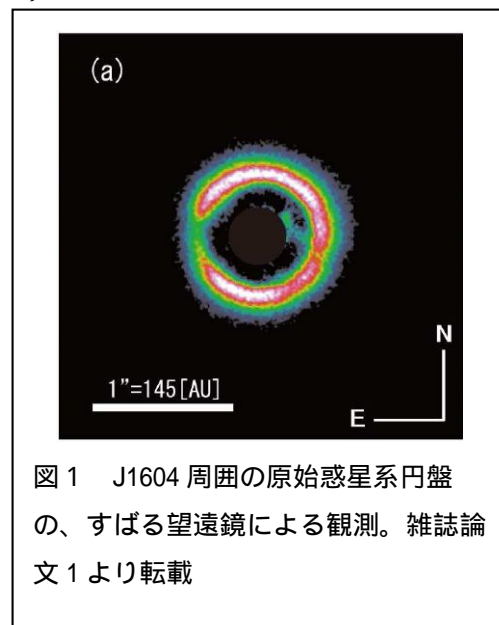


図1 J1604 周囲の原始惑星系円盤の、すばる望遠鏡による観測。雑誌論文1より転載

また、SEEDS によって得られた別の結果として、MWC 758 という星の周囲の原始惑星系円盤に、スパイラル状の構造が存在することが分かった(図2、雑誌論文2の図2より転載)。この構造について、作動回転円盤における密度波理論を用い、円盤の温度構造がどのようになっているかということや、もしもこのスパイラル構造が惑星によって引き起こされたものであるとすると、どのあた

りに惑星が存在しそうであるかといったことについて定量的な解析を行った。この解析手法は、すでに 2012 年 4 月に、本研究の研究代表者が中心となって執筆した論文 (Muto et al. ApJL., 748, L22) の中で導入されているものであるが、今回は別の天体でも同様の解析が出来ることを示し、また、モデル自身のパラメータ縮退度等についてもより詳細な議論を行った。以上の結果は、雑誌論文 2 にまとめられている。

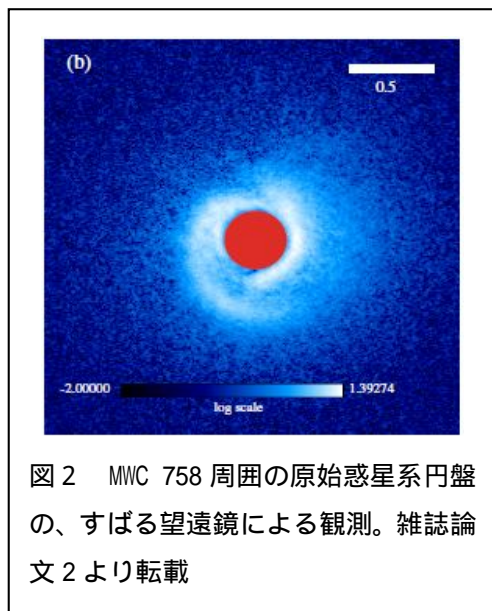


図 2 MWC 758 周囲の原始惑星系円盤の、すばる望遠鏡による観測。雑誌論文 2 より転載

#### 4 - 2 . ALMA 望遠鏡初期観測による HD 142527 周囲の原始惑星系円盤の観測

ALMA 望遠鏡の初期観測が開始され、サブミリ波の領域でこれまでに無い高感度の観測を、これまでの電波干渉計と同程度の空間分解能で行うことが可能になった。

ALMA サイクル 0 の観測では、HD 142527 という星の周囲の原始惑星系円盤について、ダストの連続光および一酸化炭素輝線の観測が行われ、そのデータに関する解析や解釈を、大阪大学・茨城大学・千葉大学・国立天文台等の研究者と共同で行った。

この観測では、ダスト連続波に対して強い非軸対称性が観測された (図 3、雑誌論文 3 の図 1 より転載) が、光学的に厚いガスに関してはほぼ軸対称の構造を示唆するような結果となった。また、ダスト連続波の強度は予想以上に明るく、きわめて多量のダストが存在しているか、あるいは円盤の一角に強く濃集しているということが示唆された。

この円盤の状態として考えられる可能性としては以下の二通りがありうる。第一は、もともとの円盤の質量が大きいと、円盤全体が重力不安定となっており、強い非軸対称の構造が出来ているという可能性である。第二には、円盤の一部に、ダストが強く濃集しており、その場所ではダスト・ガスの密度比が典型的な値に比べて 100 倍程度まで大きくなっているという可能性である。

いずれの可能性であったとしても、この円盤は、惑星形成という観点で見ると非常にアクティブな状に、今まさに惑星が誕生している状態にあるかもしれない、ということが示唆される。以上の点をまとめ、雑誌論文 3 として発表した。

現在、データのより詳細な解析を進めて、円盤の物理状態に関する結果を得つつある。また、次の ALMA 観測に向けた準備も進めている段階である。

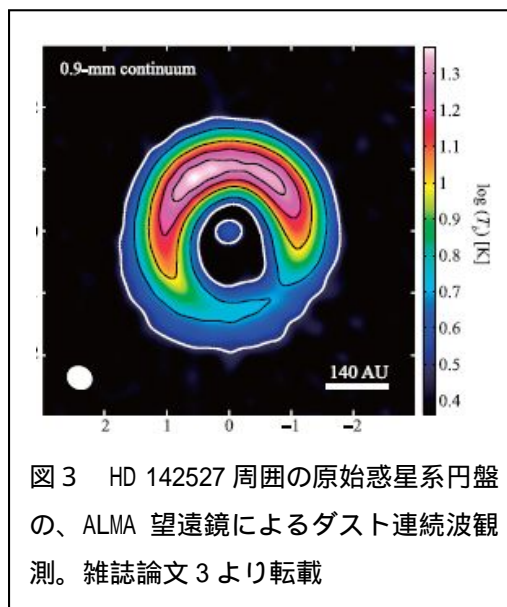


図 3 HD 142527 周囲の原始惑星系円盤の、ALMA 望遠鏡によるダスト連続波観測。雑誌論文 3 より転載

#### 4 - 3 . 原始惑星系円盤中のギャップ構造の理論的解析

ここまで述べてきたような観測的な研究を共同で進めるとともに、原始惑星系円盤に関する理論的な研究も進めてきた。特に、原始惑星系円盤中に存在する惑星によって空けられるギャップの構造に関する研究を、北海道大学の研究者と共同で行った。

原始惑星系円盤中にある程度質量の大きな惑星が存在すると、その軌道の周囲に面密度の小さいギャップと呼ばれる領域が形成される。このギャップの深さや幅は、原始惑星系円盤の厚みや(実効的な)粘性の大きさ、また惑星の質量に依存する。ギャップに関する研究はこれまでも存在しているが、本研究では特に角運動量保存則の取り扱いを見直すことによって、ギャップ生成過程において重要となる物理過程の再検討を行った。その結果、惑星によって出来るギャップの形状について、新しい知見を得ることができ、また最新の数値流体計算の結果を理論的に説明することが可能になりつつある。

本研究の結果は、日本天文学会ではすでに発表がされ、現在論文をまとめている段階にある。また、将来的にはこの結果をもとに、ギャップを観測できたかどうかのようなことが言えるのかということも深く検討を行い、来るべき観測に備えていきたいと考えている。

以上のように、本研究課題においては、理論・観測の両面から原始惑星系円盤に関する研究を行い、最新の観測結果から新しい原始惑星系円盤の描像を打ち立てていくための足がかりを得られたと考えている。特に、原始惑星系円盤の複雑な構造から何を読み取ることが出来るのか、という問いに対しては、いくつかの場合について一定の解答を得つつあると考えている。

本研究課題において取り組んだテーマのうちの一部は、平成26年度より開始された、若手研究(B)「原始惑星系円盤の詳細構造から探る物理過程と惑星形成」にも引き継ぎ、さらに検討を深めていきたいと考えている。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計11件)

1. 眞山聡、橋本淳、武藤恭之、他(全55名) Subaru Imaging of Asymmetric Features in a Transitional Disk in Upper Scorpius、The Astrophysical Journal Letters、査読有、2012、760巻、id.L26 (5pp)

2. C. A. Grady、武藤恭之、橋本淳、他(全74名) Spiral Arms in the Asymmetrically Illuminated Disk of MWC 758 and Constraints on Giant Planets、The Astrophysical Journal、査読有、2013、762巻、id.48 (13pp)

3. 深川美里、塚越崇、百瀬宗武、他(全18名中の8番目) Local Enhancement of the Surface Density in the Protoplanetary Ring Surrounding HD 142527、Publication of the Astronomical Society of Japan、査読有、2013、65巻、Article No. L145 (5pp)

[学会発表](計23件)

1. 武藤恭之 「Subaru/HiCIAOによる観測で明らかになった原始惑星系円盤の非軸対称構造」 日本惑星科学会秋季講演会 2012年10月24日~26日 神戸大学

2. 武藤恭之 「原始惑星系円盤内に惑星が作る構造の高空間分解能観測の可能性」 NAOJ 研究集会「将来装置による地球型系外惑星直接検出および撮像」 2013年1月24日~25日 国立天文台

3. 武藤恭之 「ALMA 最新科学成果と将来の展望~原始惑星系円盤観測~」 日本天文学会春季講演会特別セッション 2013年3月22日 埼玉大学

4. 武藤恭之 「原始惑星系円盤の撮像観測

と円盤モデル」 京都大学宇宙物理学教室談話会 2013年6月28日 京都大学

5. 武藤恭之 「原始惑星系円盤における力学過程と円盤直接撮像観測」 原始惑星系円盤研究会 2013年8月19日 国立天文台

6. Takayuki Muto 「ALMA Observations of the Asymmetrically Gapped Disk around HD 142527」 Exoplanets and Disks: Their Formation and Diversity II 2013年12月9日 米国ハワイ州コナ

7. 武藤恭之 「原始惑星系円盤と惑星形成」 基礎物理学研究所セミナー 2014年1月31日 京都大学基礎物理学研究所

8. Takayuki Muto 「ALMA Observations of a Protoplanetary Disk around HD 142527 II: Disk Model」

[その他]

ホームページ:

<http://www.ns.kogakuin.ac.jp/~ft13389/>

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

武藤 恭之 (Takayuki Muto)

工学院大学 基礎・教養教育部門 助教

研究者番号: 20633803