

円盤非軸対称構造から探る星・惑星形成の初期段階

Early Stages of Star and Planet Formation via Disk Asymmetry

所属機関： 工学院大学 代表研究者氏名：武藤 恭之

研究期間： 2023年6月11日～2023年12月11日

区分：個人A

研究分担者：

滞在研究機関： Leiden Observatory, Leiden University
Niels Bohrweg 2, NL-2333 CA Leiden, The Netherlands

共同研究者等： Dr. Nienke van der Marel

Protoplanetary disks are disks around young stars, where planets are born. Recent observations using Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) have found they have rich structures that may be connected to formation processes of planets. It is therefore important to develop methods to extract structural information from the data taken by interferometry, which is an incomplete set of Fourier coefficients of spatial brightness distribution. Here, we have developed the formulation and methods to analyze the data directly in the Fourier space, from which the information of spatial structures can be efficiently extracted. We have checked the methods using mock observations of a series of model disks as well as real observations of the disk around IRS 48. Our studies clearly show that the degree of dust concentration varies with observing wavelengths, which is an indication of dust growth. The visit to Leiden Observatory has also led us to new projects and successful observing proposals that are now waiting for new data.

海外研究活動概要

原始惑星系円盤は、若い星の周囲に存在する、水素を中心とするガスとシリケートなどの固体物質（ダスト）から成る円盤である。原始惑星系円盤の中で、ダストが集積することにより、惑星が形成される。星形成の過程の中で、ダスト集積がいつ、どのように起こり、惑星がどのように形成されるかは、天文学における大きな問題として長年にわたり研究がされてきた。

ALMA 望遠鏡は、ミリ波・サブミリ波の波長体において、原始惑星系円盤を空間的に分解して観測することを可能にする画期的な望遠鏡である。ALMA 望遠鏡により、原始惑星系円盤には、ギャップ構造・リング構造・非軸対称構造など、様々な構造が存在していることが明らかとなり、惑星形成過程の研究は大きく進展した。これらの構造は、原始惑星系円盤において、ダストがある場所に集積していたり、

すでに存在している惑星への影響によってガスやダストの分布が一様ではなくなっていたりすることによって生じている可能性がある。したがって、原始惑星系円盤の構造を観測することで、惑星形成の現場に直接的に迫ることができる。

本研究では特に、ALMA 望遠鏡の観測データに円盤構造の情報がどのような形で含まれているかを中心的なテーマとして検討した。

ミリ波・サブミリ波という長波長で高い空間分解能の観測を行うために、望遠鏡を広範囲に配置し、それぞれの信号を干渉させることで実質的に口径の大きな望遠鏡として運用するということが行われる。これにより、長波長ながら高い空間分解能の観測が実現する一方で、本質的に不十分なデータから空間構造を推定する必要が生じる。

電波干渉計の観測量は、天球上の明るさ分布のフーリエ成分の一部である。ここから実際の空間構造

を推定するために、これまでは空間構造を点源の集まりとしてモデル化する手法が長らく用いられていた。しかし、この手法は、データに内在する空間構造の情報を全て引き出せないことが近年の研究によって明らかになりつつある。そこで本研究では、観測で得られたフーリエ成分の情報を直接分析する手法を開発した。具体的には、観測で得られた二次元フーリエ成分のデータについて、フーリエ空間の基底を変換することにより、フーリエ空間内における多重極展開の係数を計算する。このことで、軸対称成分や非軸対称成分の強さを定量的に評価し、それらを実際の天球上の構造の情報に焼き直すことが可能であることが数学的に証明できる。本研究では、この定式化の実用性を確認するために、疑似観測のデータや実際の観測データを用いてその検証を行った。観測データは、電波天文学の専門家である滞在先の共同研究者より提供を受け、解析手法などについても綿密な議論を行いながら研究を進めた。

成果

検証の結果、新たな定式化の下での手法によって、従来の手法で得られるよりもより小さな空間構造の情報を引き出せることが確認できた。具体的には、従来手法において定義される空間分解能よりも二倍程度小さな構造の情報を、観測データの直接解析によって得られる可能性が示唆された。この結果については、国際会議での発表を行い、現在、投稿論文をまとめる段階にある。

検証を行う観測データとして、IRS 48 という星の周囲の原始惑星系円盤のデータを用いたが、その解析の中で、サイズの大きなダストがより集積している可能性が示唆された。本研究では、手法の徹底的な検証を主眼としていたが、このような科学的成果も同時に得られたことで、この天体の JVLA 望遠鏡による追観測の提案にもつながった。この観測提案は高い評価を得て受理され、今後実施される観測を待っている段階にある。

また、他の共同研究についても進展があった。これまでに共同研究を行ってきたテーマにおいて、研究論文の投稿や受理があった他、滞在先研究機関に所属する大学院生を含めた共同研究も開始している。上記の JVLA 望遠鏡の観測提案についても、これまでの共同研究者に加え、滞在先研究機関の共同研究者や大学院生を含めたチームを構成して提案したものであり、現地に滞在することによって共同研究の

幅が広がったものと言える。

今後の展望

今回の共同研究により、原始惑星系円盤の構造を解析するための基本的な定式化についての検証はされ、科学的な結論を導くための手段は準備できたものと考えている。一方で、現状の解析手法において、一層の技術的な検討が必要な点についても明らかになってきており、今後は、この点についての検討を進めていく。また、今回の手法を実装した解析コードを、多天体に応用するための開発も進めていきたい。ALMA 望遠鏡のアーカイブには、多くのデータが眠っている。これらの解析を進めることにより、原始惑星系円盤の(特に非軸対称な)構造について、統計的理解を深めて惑星形成の謎に迫ることを目標としている。

研究の発表

口頭発表

1. Takayuki Muto, “Methods to explore the disk asymmetries and its application to a young protoplanetary disk”, Exoplanets & Planet Formation Workshop 2023, Dec. 16-19, Beijing, China

ポスター発表

1. Takayuki Muto, “Visibility-based Analyses of Non-axisymmetric Structures of Protoplanetary Disks”, ALMA at 10 years: Past, Present, and Future, Dec. 4-8, Puerto Varas, Chile

誌上発表

1. Jun Hashimoto, Hanyu Baobab Liu, Ruobing Dong, Beibei Liu, Takayuki Muto, Yuka Terada, “Centimeter-sized Grains in the Compact Dust Ring around Very-low-mass Star CIDA 1”, The Astronomical Journal, 166, id.186 (2023)

他、投稿中論文 3 件