

論文審査の結果の要旨

氏名 山口 正行

本論文は、スパースモデリング (SpM) を用いた電波干渉計イメージング法を ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) での原始惑星系円盤観測データに適用し、手法の性能を評価するとともに、円盤構造について調べたものである。

本論文は5章からなる。第1章は序章であり、本論文の背景や研究動機などがまとめられている。惑星系形成の現場である原始惑星系円盤では、近年、ダスト熱輻射の観測でリング-空隙構造などが多数見つかっている。空隙は惑星と円盤の相互作用によって形成されている可能性もあり、円盤構造を高い空間分解能で観測することは惑星系形成過程の解明において重要である。ALMAをはじめとする電波干渉計のデータ解析では CLEAN アルゴリズム (以下 CLEAN) が広く使われているが、近年、より高い解像度を実現する解析手法が検討されている。SpM はその手法の1つである。本研究では SpM を原始惑星系円盤の ALMA アーカイブデータに適用することで SpM の性能を評価するとともに、円盤構造の詳細な解析を行った。

第2章では、遷移円盤 HD 142527 のアーカイブデータを用いた SpM の検証が行われている。最大基線長の3倍異なる2種類のダスト熱輻射観測データから SpM および CLEAN を用いて円盤画像を導出した。先行研究で示されていた非軸対称な構造はどちらの解析手法でも確認できた。基線長の短い (分解能の低い) データを SpM で解析した結果は、基線長の長い (分解能の高い) データを CLEAN で解析した結果とよく一致し、SpM では CLEAN よりも高い実効的な空間分解能が得られることが実証された。

第3章では、より小さな円盤の解析を行っている。太陽系近傍の星形成領域の観測では、半径 20~40 au 以下の小さな円盤が多いことが知られている。このような円盤の構造は、CLEAN を用いた解析では空間分解能が足りないため、詳細には調べられていない。そこで T Tau のアーカイブデータを用い、SpM で小さな円盤の構造を空間分解できるかを検証した。T Tau は三重連星システムであり、半径 24 au の円盤をもつ T Tau N と近接連星系である T Tau S からなる。従来の CLEAN での解析では空間分解能が 17 au であり、T Tau N の円盤内の構造や T Tau S の連星系は空間分解できていなかった。SpM による解析では約 5 au の実効的な空間分解能が達成された。T Tau N の円盤には半径 12 au の位置に円環状の空隙が発見され、T Tau S の近接連星系も空間分解された。円盤の粘性パラメータを 10^{-3} と仮定し、惑星と円盤の相互作用の理論モデルを用いると、T Tau N の円盤空隙には土星程度の質量の惑星が存在すると推定された。

第4章では、SpM により達成される実効的な空間分解能、適用限界、および円盤構造のより統計的研究が行われている。ALMA アーカイブデータから 0.1~0.2 秒角分解能の比較的高い信号/雑音比 (以下、S/N 比) をもつ 40 天体のデータを選び、SpM で解析した。SpM による実効的な空間分解能は半数の円盤において CLEAN に比べて 2~3 倍高かった。SpM は、半径が小さく S/N 比の高い円盤において特に CLEAN に比べて高い分解能を達成した。

SpM による解析で 23 個の空隙、29 個のリング、30 個の屈曲点が同定された。空隙の位置を円盤半径で規格化すると、0.1 および 0.4~0.7 の位置に多くの空隙が存在した。一方、屈曲点は半径 10~20 au の位置に多く、これらが空間分解できていない空隙だとすると空隙は円盤内に満遍なく存在することになる。本研究で選んだ 40 天体には中心星質量の大きな天体が少数しか含まれないので、「高解像度による原始惑星系円盤構造観測プロジェクト (DSHARP)」で調べられている空隙-リング構造を追加し、空隙の深さと幅の積で決まる指標を統計的に調べた。空間分解された空隙の指標の値は、M-K 型星の円盤では $10^1 \sim 10^2$ 、A-F-G 型星の円盤では 10^3 程度であり、中心星の質量に依存することがわかった。空隙が惑星と円盤の相互作用でできていると仮定し、理論モデルを参照して空隙の深さおよび幅から惑星質量を推定した。中心星が M-K 型星の円盤では外縁部の空隙を作る惑星の多くは海王星質量程度と推定された。一方、G-F-A 型星の円盤で空隙を作る惑星は木星質量程度であった。つまり、中心星質量によって惑星質量が異なる傾向が見られた。

第 5 章は論文のまとめである。

本論文で議論されている原始惑星系円盤のリング-空隙等の構造は惑星系形成過程を解明する上で非常に重要である。太陽系近傍の星形成領域には ALMA をもってしても従来の解析手法では十分に空間分解できない小さな円盤が多数存在する。より高い空間分解能を達成し得る SpM の適用可能性を示し、従来の解析結果との詳細な比較を行った本研究の学術的価値は高い。また 40 天体という多数の円盤の解析から、空隙の大きさおよびそこから推定される惑星質量が中心星質量に依存する可能性を示唆した点も評価できる。

なお、本研究は川邊良平・池田思朗・秋山和徳・片岡章雅・田崎文得・深川美里・本間希樹・塚越崇・武藤恭之・中里剛・野村英子・田村元秀との共同研究であるが、論文提出者が主体となって行ったもので、論文提出者の寄与が十分であると判断する。

したがって、博士（理学）の学位を授与できると認める。