

アルマ望遠鏡によるうみへび座TW星の サブミリ波多波長観測



塚 越 崇

〈茨城大学 〒310-8512 茨城県水戸市文京 2-1-1〉

e-mail: takashi.tsukagoshi.sci@vc.ibaraki.ac.jp

われわれが住む太陽系はどのように誕生したのか？ これを探るには、惑星系形成の土台となる原始惑星系円盤を調べるのが重要である。近年ではアルマ望遠鏡の活躍により、極めて詳細な円盤構造の様子が明らかにされており、円盤から惑星系形成へ至る過程を調べるうえで革新的成果を生みつつある。本記事では、われわれの研究グループが行ってきた、原始惑星系円盤に対するアルマ望遠鏡を用いた観測と、それによって明らかになった惑星形成現場に迫る最新の研究成果（Tsukagoshi et al., 2016, ApJL 829, L35^{ref.1)}）について紹介する。

1. 研究の背景

1.1 原始惑星系円盤：惑星系形成の土台

太陽系のような惑星系の形成を探るうえで重要となるのは、惑星系形成の土台となる原始惑星系円盤の構造、およびその進化に伴う形状変化を明らかにすることである²⁾。原始惑星系円盤は低温のガスと固体微粒子（ダスト）からなり、若い星の周りに遍在していることが知られているが、円盤内でどのように惑星が形成されているのかについてはいまだ深い謎に包まれている。円盤内における惑星形成の発端は、初期サイズ1マイクロメートル以下で存在するダストの合体成長、およびそれらの赤道面への沈殿の過程である。これらは円盤進化においてガスとダストを切り分ける重要な素過程であり、それに伴って円盤構造の多様性を生み出す。このような円盤ガスおよびダストの分布の多様性は、近年相次いで発見されている多様性に富む系外惑星系の要因になると考えられている^{3), 4)}。それゆえ、ダストとガスの分離過程に伴った実際の円盤構造の変化を観測的に明らかにすることが重要である。

われわれの研究グループでは、高い角度分解能による観測研究により、このような原始惑星系円盤の構造を直接撮像する観測を推進してきた。

1.2 うみへび座TW星

原始惑星系円盤の構造を詳しく調べるためには、それに適した観測天体を選定する必要がある。われわれの研究グループでは、うみへび座TW星（TW Hya）という若い恒星に着目し観測を行ってきた。この天体は、0.8太陽質量程度の重さを持ち、星の年齢はおおよそ1,000万年程度である⁵⁾。恒星の年齢としては若く、前主系列星に属するが、原始惑星系円盤を伴う天体としては比較的進化が進んだ段階にある。地球からの距離はおおよそ54 pcであり、地球から最も近い位置にある原始惑星系円盤のサンプルである。また、円盤の回転軸が視線方向とほぼ平行であり、円盤の姿を真上から捉えることが可能なため、円盤構造を詳しく調べるのに適した天体である⁶⁾。このような天体の特徴から、太陽系の形成過程を調べるうえで非常に重要な観測天体として、これまでさまざまな観測が行われてきている。

近年の赤外線高分解能観測では、円盤の中心星

からおよそ 20–30 au ほどの位置で赤外線放射が弱くなる様子が明らかになっている^{7), 8)}。このような特徴は、何かしら円盤内の惑星系形成に関連した構造と考えられているが、関係性をより詳しく調べるためには、赤外線観測で得られる情報に加え、電波観測によって低温のガスやダストの分布を捉え円盤物理量を直接的に導出することが必要とされていた。

1.3 アルマ望遠鏡による先行研究観測

本稿で詳説する研究につながる先行研究として、われわれの研究グループでは、TW Hya に付随する原始惑星系円盤に対して、アルマ望遠鏡を用いた観測を行ってきた⁹⁾。この先行観測は 2015 年の 5 月に行われており、バンド 7 (およそ 336 GHz) の周波数でおよそ 20 au 相当の分解能が達成されている。観測の結果、原始惑星系円盤のサブミリ波放射分布を空間分解して検出できており、中心の恒星からおよそ 20–30 au あたりに円盤密度のギャップ構造があることが明らかになった。この研究では、光学的に薄いサブミリ波の観測によって、円盤ダストの密度分布にギャップ構造を直接見だしており、TW Hya のような比較的進化の進んだ原始惑星系円盤では初めての検出例である。このギャップ構造は、惑星起源の構造として矛盾なく説明できているものの、いくつか課題も残されていた。一つはアルマ望遠鏡の解像度が不足しており、ギャップ自体の構造を正確に評価できていなかった点である。二つめは円盤内のダストサイズの分布が測定できなかった点である。惑星形成過程を調べるうえでは、ダスト成長の過程を観測することが重要であるが、先行観測は単一周波数の観測であったため、その導出に難があった。

2. アルマ望遠鏡を用いたサブミリ波多波長観測の推進

2.1 観測提案に至った経緯

われわれが行った TW Hya に対する先行研究では、複雑なダスト円盤構造の一端を明らかにしたことは間違いない。しかしながら、観測の分解能や感度の面で不足があり、また単一の観測周波数であったことから、ギャップの詳細な構造については言及しきれなかった。それゆえ、アルマ望遠鏡によるさらに高解像度となる観測、かつ複数周波数による観測でギャップ構造周辺のダストの性質を調べることが求められていた。

先行研究の成果が日の目を見始めた頃、世を賑わせていたのは、アルマ望遠鏡が最長基線配列による超高分解能で捉えた、おうし座 HL 星 (HL Tau) に付随する多重リング構造を示す原始惑星系円盤である¹⁰⁾。円盤研究におけるアルマ望遠鏡の潜在能力を見せつけた観測結果といえよう。この超高分解能観測を用いることで、TW Hya で見いだされたギャップの詳細構造を調べることも可能となる。その観測提案が、先行研究に基づいた次のステップとなった。

しかし、当時はサイクル 3 での観測募集が締め切った後であり、まさに最長基線観測が行われていた時期であった。アンテナ配列が変更されてしまうと、その後しばらくは最長基線での観測ができなくなってしまう。科学的な重要度や緊急性を鑑みて、われわれはアルマ望遠鏡のディレクター裁量時間での観測申請を行い、観測時間を得ることに成功した。

2.2 アルマ望遠鏡による観測

観測提案の受理後、2015 年 12 月 1 日から 2 日にかけて、われわれの観測はすぐに実行された。すでにアンテナ配列の変更中ではあったものの、36 台の 12 m アンテナが稼働しており、10.4 km という最大基線長で観測を行うことができた。本研究では、ダスト円盤からの熱放射を効率良く捉

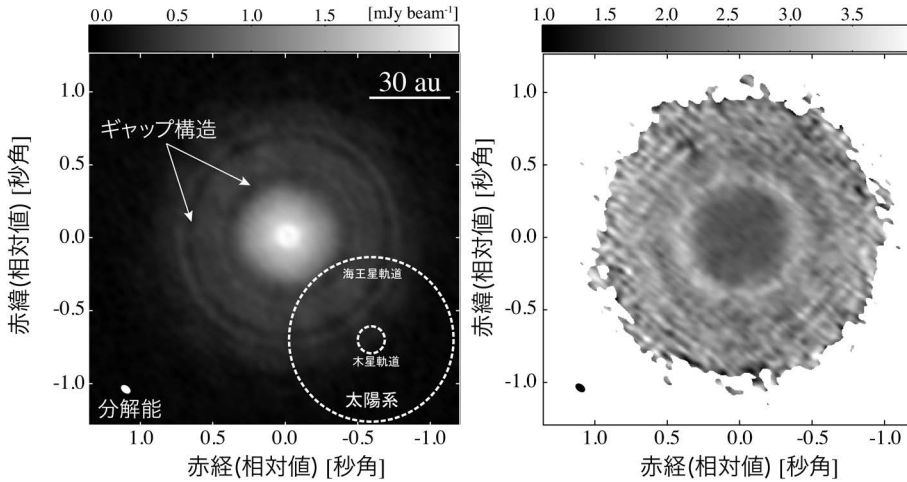


図1 アルマ望遠鏡を用いた高分解能・2周波観測によるTW Hyaに付随するサブミリ波放射のマップ(左)とスペクトル指数のマップ(右). 左下の楕円はアルマ望遠鏡の分解能を表す. 比較のため, 同じ距離から太陽系を見た場合の, 海王星と木星の軌道に相当する大きさを右下の円で示す.

えることを目的とし, 連続波観測に特化した観測設定を用いている. また, バンド4およびバンド6の二つの周波数で観測を行っており(それぞれ145および233 GHzの周波数に相当), 両バンドのデータを組み合わせ, 多周波合成法(Multi-frequency synthesis method; MFS)を用いてマップの作成を行った¹¹⁾. これにより, バンド間のデータを補完してサブミリ波輝度の周波数依存性を解くことができ, 高品質のマップを作成するとともに, バンド間での強度比であるスペクトル指数 α のマップも同時に作成することが可能である. 最終的に得られた画像の解像度はおよそ3 au程度であり, 先行研究に比べて5倍ほど向上した.

2.3 多波長観測によるダストサイズ分布の推定

サブミリ波のフラックス密度 I_ν は, 放射領域の密度と温度のほか, ダスト吸収係数 κ_ν に依存する形で変化する. このダスト吸収係数は, サブミリ波帯では $\kappa_\nu \propto \nu^\beta$ と記述される周波数依存性をもつが, ダストを構成する物質や形状が均一であればダストの大きさに依存するため, ダストサイズの違いが β に反映される. 放射が光学的に薄い場合, 観測で得られるサブミリ波放射はこのダストサイズを反映することになり, そのフラックス密

度はおよそ $I_\nu \propto \nu^{\beta+2}$ の関係をもつことになる. つまり, 本研究で得られるサブミリ波のスペクトル指数 α のマップから, 円盤内の β , つまりダストサイズ分布の情報を得ることが可能となる.

星間空間においては, およそ $\beta=0-2$ の範囲をとることが知られており, ダスト成長に伴いサイズが大きくなると, β の値は小さくなる. 実際, ある程度のダスト成長が期待される原始惑星系円盤においては, 典型的に $\beta=0-1$ 程度であることが知られている¹²⁾.

3. 観測結果

3.1 多重リングギャップ構造の検出

図1(左)は, バンド4および6のデータをMFSにより合成して作成した, 中心周波数190 GHzのサブミリ波強度マップである. 中心にある恒星を囲う形で, 半径およそ50 auに広がるサブミリ波放射が広がっている. 放射はほぼ円となっており, 円盤ダストからの放射を真上から見ている様子を示している. 円盤放射の中には, 非均一な間隔で並ぶいくつかのギャップ構造が視認できる. このギャップ構造は半径22, 37 auに位置しており, さらに内側のほうでは, 半径5 au

の穴構造も見ることができる。これらのギャップ・穴構造は、本研究に先立って報告された、Andrewsらによるバンド7（およそ345 GHz）での1 au分解能の観測によって明らかになっていた構造でもある¹³⁾。われわれの研究では、そのギャップ構造の存在を、異なる二つの周波数において裏づけると同時に、新たにスペクトル指数の情報をつ加したことが新たな観点となっている。

3.2 スペクトル指数分布の導出

図1（右）に観測によって得られたスペクトル指数 α の分布を示した。サブミリ波強度の分布と同様、中心の恒星に対して極めて対称な分布をしている。動径方向の変化を見てみると、外側から内側にかけて α の値が減少する傾向が見取れるが、一方でギャップ構造に対応する形で α が増加する様子も見取れる。ギャップ構造とスペクトル指数の対応を見やすくするため、方位角方向に平均をとった、サブミリ波強度およびスペクトル

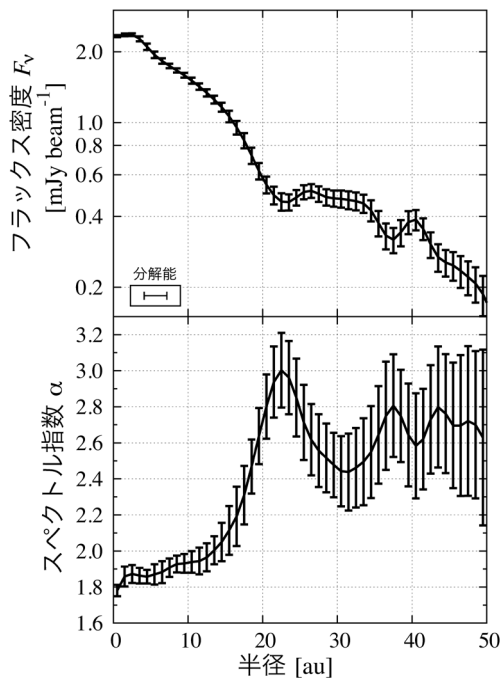


図2 中心の恒星からの距離に対するサブミリ波強度（上）とスペクトル指数（下）の動径方向プロフィール。

指数分布の動径方向プロファイルを作成した（図2）。これを見ると明らかなように、とりわけ半径22 auのギャップ構造において、ギャップ構造に対応する形で α が顕著に増大している様子が見取れる。以降の議論においては、この22 auギャップの構造に着目して解説をしていく。

22 auギャップにおけるスペクトル指数 α はおよそ3となっており、単純に $\beta = \alpha - 2$ を仮定すれば $\beta \sim 1$ となる。温度などを仮定しもう少し厳密に見積もると、およそ $\beta \sim 1.5$ 程度となる。この値は、星間空間に漂うダストに対して見積もられた値とほぼ同等であり、すなわち“あまり成長していない”ダストが多いことを示唆している。一方、ギャップ箇所以外では $\beta \sim 0-1$ 程度であり、これは原始惑星系円盤で見られる典型的な値であるため、ある程度のダスト成長を示唆していることになる。得られた β の値を厳密にダストサイズに焼き直すことは難しいが、理論計算をベースに大雑把に見積もってみると¹⁴⁾、ギャップ位置（ $\beta \sim 1.5$ ）においてはミクロンメートルサイズのダスト、それ以外ではミリメートルサイズのダストが多く存在していることを示唆している。

4. ギャップ構造の解釈：どのような惑星が存在するか

スペクトル指数分布の解析により明らかになったのは、22 auギャップにおいて、サイズの大きいダストが排斥され小さいダストのみ存在している描像であった。このようなダストサイズ分布は、ギャップ内での惑星形成起因の理論的解釈と対応が良い¹⁵⁾。円盤内のある位置で惑星が形成されると、惑星の軌道半径上にある物質を取り込み、円盤の主成分であるガス分布にギャップ構造を形成する。ガス円盤においてギャップ構造が存在すると、ガスには重力の他に圧力勾配が働くことになるが、一方で同じ半径にあるダストには圧力勾配が働かないため、ガスとダストの回転速度には差異が生まれる。この速度差は抵抗力となっ

てダストに作用し、ダストの角運動量を変化させるため、ギャップ内に存在するダストは、ギャップの外側へはじき出されるような振る舞いとなる。この抵抗力は粒子サイズの関数となっているため、ある程度成長したダストで効きやすくなる。これにより、ギャップ内からは比較的大きいサイズのダストが排斥され、小さいサイズのダストは残存することから、観測から推測されるようなダストサイズ分布となりうる。

ではどのような惑星が形成されていれば、観測されたギャップ構造を再現できるのだろうか？金川らの理論研究によると^{16), 17)}、惑星によって作られるギャップの幅と深さは、惑星質量の関数であることが示唆されている。この関係を用いることで、観測で測定できるギャップ構造から、惑星質量を見積もることが可能である。理論計算の詳細については、本特集の金川氏による解説記事を参照されたい。

サブミリ波の強度は、放射領域の温度構造とダスト吸収係数を与えれば密度（もしくは光学的厚み）に比例する。観測で得られたマップからギャップの密度構造を調べると、半値幅として得られるギャップ幅はおよそ5 au、背景密度分布に対するギャップの深さの割合はおよそ0.5程度であった（べき乗分布の背景密度を仮定して導出）。

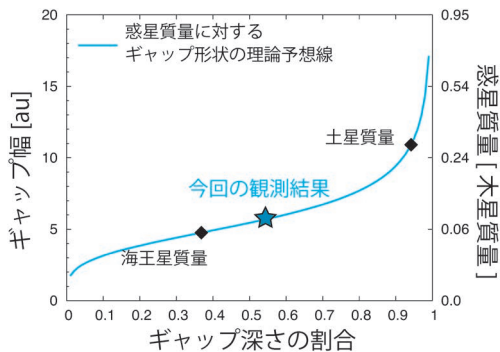


図3 金川ら^{16), 17)}の理論計算に基づいた、ギャップの形状と惑星質量の関係の予想線（図中青線）。円盤の粘性 $\alpha=10^{-3}$ およびスケールハイト $h/R=0.05$ とした場合の計算結果を示す。

この結果を理論計算による予測と比較したものを図3に示す。

観測により得られたギャップ構造の値は、理論予想線と良い一致を示しており、惑星によるギャップ形成を支持している。そのときに見積もられる惑星質量は、海王星より少し重い程度であることがわかる。なお、この理論予想線はガスギャップに対する理論計算であり、本研究で得られるダストギャップ形状による見積もりからは、惑星質量の上限値として与えられることに注意されたい。

中心星から22 auという距離は、太陽系では天王星と海王星の軌道の間に相当する。TW Hyaは太陽とほぼ同じ重さの若い星であることを考えると、ここで誕生している惑星は天王星や海王星とよく似た巨大氷惑星である可能性が高いと考えられる。

5. 研究の発展

本研究では、いくつかの観点から、惑星によるギャップ形成の可能性が高いことを見てきたが、ガス円盤におけるギャップ構造を生み出す要因としては、さまざまなモデルが提唱されており、惑星の存在を必要としないモデルも存在する¹⁸⁾⁻²¹⁾。またダストの性質変化によって、円盤内でダストサイズ分布を変化させるモデルなどもあり^{22), 23)}、TW Hyaで見いだされたギャップが惑星に起因するかどうかについては、さらに多様な観点から研究を推進し、確度を高めていく必要があるだろう。

われわれの研究グループでは、今回の研究結果を受けて、複数の次期アルマ観測提案につなげている。一つは電波偏光を用いてダストサイズに強い制限を与える観測である。本研究で用いたスペクトル指数によるダストサイズの推定は、不定性が大きく、厳密にダストサイズに焼き直すことが難しい。一方、近年の理論計算によると²⁴⁾、電波偏光度には強い波長依存性があり、またそれらはダストサイズとよく対応するため、さまざまな

波長で電波偏光を調べることで、ダストサイズに強い制限をつけられる可能性が示唆されている。もう一つは、円盤のガス成分を観測し、ガスギャップの構造を調べる観測である。今回の研究では円盤のダスト成分のみに着目したが、円盤成分の主成分はガスであるため、ガスギャップの構造がより直接的に惑星質量の見積もりを与える。

これらの観測提案はすでにアルマ望遠鏡サイクル4の観測で受理されており、間もなく実行される予定である。

謝 辞

本稿で紹介した研究は科学研究費補助金の補助を受けて実行されました(課題番号: 24103504, 23103004, 23103005, 25400229, 26800106, 15H02074, 16K17661)。本稿の内容には、アルマ観測データ ADS/JAO.ALMA#2015.A.00005.S および ADS/JAO.ALMA#2012.1.00422.S を使用しています。データ解析の一部には、国立天文台天文データセンターの共同利用データ解析システムを使用しています。本稿の機会をくださった平松正顕氏ほか編集委員の皆様へ感謝いたします。

参考文献

- 1) Tsukagoshi T., Nomura H., Muto T., et al., 2016, ApJL 829, L35
- 2) Hayashi C., 1981, Progress of Theoretical Physics Supplement 70, 35
- 3) Batalha N. M., Rowe J. F., Bryson S. T., et al., 2013, ApJS 204, 24
- 4) Kokubo E., Ida S., 2002, ApJ 581, 666
- 5) Andrews S. M., Wilner D. J., Hughes A. M., et al., 2012, ApJ 744, 162
- 6) Qi C., Ho P. T. P., Wilner D. J., et al., 2004, ApJL 616, L11
- 7) Akiyama E., Muto T., Kusakabe N., et al., 2015, ApJL 802, L17
- 8) Rapson V. A., Kastner J. H., Millar-Blanchaer M. A., Dong R., 2015, ApJL 815, L26
- 9) Nomura H., Tsukagoshi T., Kawabe R., et al., 2016, ApJL 819, L7
- 10) ALMA Partnership, Brogan C. L., Pérez L. M., et al.,

- 2015, ApJL 808, L3
- 11) Rau U., Carnwell T. J., 2011, A&A 532, A71
- 12) Ricci L., Testi L., Natta A., et al., 2010, A&A 512, A15
- 13) Andrews S. M., Wilner D. J., Zhu Z., Birnstiel T., Carpenter J. M., Pérez L. M., Bai X. N., Öberg K. I., Hughes A. M., Isella A., Ricci L., 2016, ApJL 820, L40
- 14) Draine B. T., 2006, ApJ 636, 1114
- 15) Zhu Z., Nelson R. P., Dong R., Espaillat C., Hartmann L., 2012, ApJ 755, 6
- 16) Kanagawa K. D., Muto T., Tanaka H., et al., 2015, ApJL 806, L15
- 17) Kanagawa K. D., Muto T., Tanaka H., et al., 2016, PASJ 68, 43
- 18) Johansen A., Youdin A., Klahr H., 2009, ApJ 697, 1269
- 19) Lorén-Aguilar P., Bate M. R., 2015, MNRAS 453, L78
- 20) Youdin A., 2011, ApJ 731, 99
- 21) Takahashi S. Z., Inutsuka S.-i., 2014, ApJ 794, 55
- 22) Zhang K., Blake G. A., Bergin E. A., 2015, ApJL 806, L7
- 23) Okuzumi S., Momose M., Sirono S.-i., Kobayashi H., Tanaka H., 2016, ApJ 821, 82
- 24) Kataoka A., Muto T., Momose M., et al., 2015, ApJ 809, 78

Submillimeter Multi-Wavelength Observations for the Protoplanetary Disk around a Young Star TW Hydrae with Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array

Takashi TSUKAGOSHI

Ibaraki University, 2-1-1 Bunkyo, Mito, Ibaraki 310-8512, Japan

Abstract: For understanding how planetary systems like our Solar system are formed, it is crucial to investigate the birthplaces, protoplanetary disks. Recent observations with ALMA have unveiled the detailed structures of the protoplanetary disks, and these new results are making a great progress on revealing the planet formation process beginning from the protoplanetary disk. In this article, we give a summary report on the newest result of our high-resolution observational study for the protoplanetary disk with ALMA.