

SAO 206462 周囲の原始惑星系円盤の中に 発見された小さな渦巻き模様

武藤 恭之

〈工学院大学基礎・教養教育部門 〒163-8677 東京都新宿区西新宿1-24-1〉
e-mail: muto@cc.kogakuin.ac.jp

橋本 淳・田村 元秀

〈国立天文台太陽系外惑星探査プロジェクト室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-2〉

深川 美里

〈大阪大学大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-1〉

原始惑星系円盤は惑星形成の現場と考えられており、近年、活発に研究が進められている。本稿では、すばる望遠鏡戦略枠プロジェクト「SEEDS」の一環として観測されたSAO 206462という星の周囲にある原始惑星系円盤について紹介する。今回、この円盤の中に渦巻き状の構造が存在していることが初めて見いだされた。このような非軸対称な構造は、原始惑星系円盤の力学的な活動性に起因している可能性があり、惑星形成過程とのつながりを考えるうえでも重要である。ここでは、この渦巻き状の構造を密度波理論を用いて解釈することを試み、原始惑星系円盤の温度分布の新しい推定方法を提案する。そして、今後の観測や原始惑星系円盤中における形成途中の惑星の存在の可能性などについて議論する。

1. 原始惑星系円盤と惑星形成

近年、数多くの系外惑星が見つかってきており、系外惑星の形成に関する研究も活発に行われている。現在考えられている惑星形成の標準的なシナリオでは、生まれたての若い星の周囲に存在する、ガスと塵粒子からなる原始惑星系円盤の中で、塵粒子が集積することによって惑星が生まれると考えられている。そして、最終的には何らかのメカニズムによってガス成分が散逸し、惑星系ができあがると考えられている。

原始惑星系円盤は惑星形成の母体として重要な役割を担っているが、その姿については不明など

ころが多い。理論的には、現在の太陽系の姿を基にして導かれた最小質量円盤モデル¹⁾が標準的なものとして使われることが多い。しかし、太陽系が宇宙の中で標準的な系であるという保証はなく、どのような円盤が標準的なのかということは観測的に調べていく必要がある。

また、原始惑星系円盤の進化過程についても未解明の問題が多い。特に、円盤ガスの成分がどのように散逸し、最終的に惑星がどのように形作られていったのかという部分に関しては、多くの議論がある。原始惑星系円盤は、基本的には粘性降着円盤であり、円盤中の乱流を起源とする粘性(乱流粘性)による角運動量交換によって長時間

進化が起こると考えられている。しかし、原始惑星系円盤の散逸過程として提唱されているメカニズムとしては、中心星への質量降着だけではなく、中心星からの紫外線などの放射によってガスが散逸するという光蒸発²⁾や、円盤の乱流を起源とする円盤風³⁾なども考えられており、どの過程が最も支配的なのかどうかについて、決着はついていない。さらに、原始惑星系円盤の中で惑星が形成していると、その影響が円盤の構造に影響を与える⁴⁾ということも指摘されており、惑星形成と原始惑星系円盤の進化は切っても切り離せない関係にある。

近年、原始惑星系円盤の進化に関連して、興味深い天体が観測されている。これは、「遷移円盤」と呼ばれるクラスの原始惑星系円盤で、円盤の内側部分に塵粒子がほとんどない領域が存在することが示唆されているものである。遷移円盤は、もともとは星のSED（スペクトルエネルギー分布）で、中心星からの放射に加えて、円盤に起因する長波長の成分のうち、近赤外線から中間赤外線領域の成分が存在しないものとして発見された⁵⁾。このことは、中心星に近く、外側に比べてより温度の高くなるべき部分に円盤が存在していない、すなわち円盤の内側の物質がなくなっているということを示唆している。そして電波干渉計を用いた塵粒子の連続波の観測によって、実際に中心部分に「穴」があいているということが、限られた解像度ながら画像として確認された⁶⁾。

遷移円盤は、原始惑星系円盤から円盤が散逸し、惑星系が形作られていく最終段階にある天体であると考えられ、円盤が進化していく現場をまさにとらえているという点で興味深く、さまざまな観測が世界中で行われている。個別の遷移円盤をこれまでになく高解像度で詳しく調べること、円盤の中でどのようなことが起こっているのかを推測することができ、またいくつかの円盤を比較することによって円盤進化の全体としての描像も得ることができよう。

今回は、遷移円盤の一つであるSAO 206462（別名HD135344B）のすばる望遠鏡による偏光撮像観測について紹介する⁷⁾。

2. すばる望遠鏡による円盤・惑星観測プロジェクト—SEEDS

ここで、すばる望遠鏡戦略枠プロジェクト「SEEDS」(Strategic Explorations of Exoplanets and Disks with Subaru) について簡単に紹介しておこう。これは、すばる望遠鏡に搭載された最新鋭の観測装置HiCIAOを用い、近傍のおよそ500個の星の周囲の構造の撮像観測を行う5年計画のプロジェクトである。現在はおよそ2年が経過したところであり、順調に観測が進んでいる。HiCIAOを用いることで、星の周囲の淡い構造を高い感度・角度分解能でとらえることが可能になる。SEEDSプロジェクトでは、直接撮像法による惑星の探査と原始惑星系円盤の観測を通じた惑星形成過程の解明の2点を大きな目標とし、原始惑星系円盤の撮像観測と惑星探査の観測（円盤をもたない星の観測）の両方を並行して行っている。本稿で紹介した研究は、このうち原始惑星系円盤の観測の中から得られた成果の一つである。今回紹介するSAO 206462のほかにも、原始惑星系円盤観測からはLkCa 15⁸⁾、AB Aur⁹⁾、MWC 480¹⁰⁾、UX Tau¹¹⁾、PDS 70¹²⁾などがすでに論文となっている。

3. 原始惑星系円盤の偏光撮像観測

原始惑星系円盤からやってくる光のうち、近赤外線の撮像観測で見えるのは、中心星の光が原始惑星系円盤内の塵粒子によって反射されて観測者の方向にやってくる光である。撮像観測によって見える円盤の領域では、円盤の温度は低い（典型的にはおよそ100 K程度以下）ので、近赤外線での熱放射は非常に弱い。一方で、原始惑星系円盤の面密度は大きく、近赤外線に対して光学的に十分に厚いため、中心星からやってきた光が円盤表

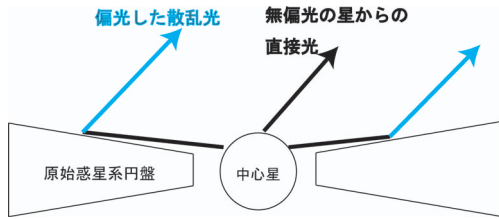


図1 原始惑星系円盤からの散乱光観測の概念図.

面で散乱される。

しかし、円盤からの散乱光と中心星からの直接光を比較すると、後者のほうが格段に明るい。したがって、単純に観測するのでは、散乱光が中心星からの光にまぎれてしまい、原始惑星系円盤の姿をとらえることは難しい。そこで、中心星から直接やってくる光をできるだけ抑えるため、コロナグラフを用いて中心星を隠して観測をする。さらに、原始惑星系円盤からやってくる光を選択的に観測するために、偏光に注目する(図1)。中心星から直接観測者に到達する光は、通常無偏光の状態である。一方で、円盤に1回反射して観測者に到達する光は、中心星方向に垂直な向きに直線偏光している。したがって、直線偏光成分のみを取り出すような観測を行うことで、円盤からの散乱光を選択的に観測することができる。これを実現するのがHiCIAOのPDI(偏光差分撮像)モードと呼ばれる観測モードで、直線偏光の独立な2成分の強度分布を同時に取得することができる。二つの偏光成分を同時に取ることによって、スペクトルノイズの影響を低減させることができ、原始惑星系円盤の構造を鮮明に撮像することが可能になる。

4. SAO 206462周囲の遷移円盤

SAO 206462は地球から距離およそ140パーセントの位置にあるハービックFe型星で、質量がおよそ1.7太陽質量、年齢はおよそ900万年と見積もられている。この天体は今までもよく研究されてきた天体の一つで、星周円盤の存在は1980

年代から知られており^{13), 14)}、電波の観測からガス成分(一酸化炭素)の存在も明らかになっている¹⁵⁾。星そのものの回転¹⁶⁾やCO輝線プロファイルの観測をもとに、円盤の天球面からの傾きがおよそ10度強であることが明らかになっており、われわれは円盤をほぼ真上から見ている状態にある。スピッツァー望遠鏡を用いた観測を含めた天体のスペクトルエネルギー分布から、この円盤の中心部には塵粒子の少ない領域が存在しているということが示唆され¹⁷⁾、実際にSMAを用いた電波の連続波観測によって、塵粒子の「穴」が空間的に分解して観測された¹⁸⁾。Andrewsらのモデル⁶⁾によれば、この穴の半径は50天文単位程度であり、穴の中の塵粒子成分の面密度は、外側の円盤成分に比べて10万分の1程度のレベルまで減少しているという。ただし、近赤外線における一酸化炭素の回転振動輝線の観測により、中心星から数天文単位以下の領域には円盤が存在していることが示唆されており¹⁹⁾、SAO 206462の星周構造は、小さなスケール(数天文単位以下)の内側円盤・ほとんど塵粒子成分が存在しない「穴」の領域・50天文単位程度以遠に拡がった外側円盤成分の三つの成分からなるという描像になっている。さらに、最近のSMAを用いた電波の一酸化炭素輝線観測により、穴の領域ではガス成分の量も減少している傾向があるが、多少は穴の中に残っている可能性があるということも示唆されている²⁰⁾。

今回、すばる望遠鏡搭載のHiCIAOを用い、SAO 206462周囲の原始惑星系円盤の近赤外線での撮像観測を行った。前節で紹介したPDIモードでの観測を行い、原始惑星系円盤の直線偏光強度(Polarized Intensity)のマップを得ることに成功した。観測には半径0.15秒(SAO 206462の距離でおよそ20天文単位に相当する)のコロナグラフマスクを用いている。図2には、今回の観測によって得られたSAO 206462周囲の原始惑星系円盤の画像を示す。星の周囲の原始惑星系円盤

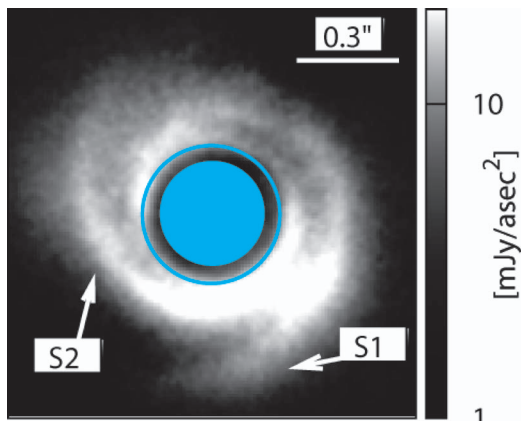


図2 グレースケールで示したものはHバンド（波長1.6ミクロン）の偏光強度分布を示しており、中心の塗りつぶしてある部分がコロナグラフで隠されている部分に対応する。ただし、その外側に描かれている円（半径0.2秒、SAO 206462の位置で28天文単位に相当）よりも外側にある構造が実際の天体のリアルな構造であると考えている。S1とS2は、今回発見された渦巻き構造の位置を表している（本文6節参照）。

をはっきりととらえることに成功していることがわかるだろう。

この観測から、二つの興味深い結果がわかった。一つは、この天体で今まで「穴」とされていた領域（半径およそ50天文単位、約0.35秒）よりも内側にも円盤散乱光の成分が存在していることである。もう一つは、この天体の原始惑星系円盤の中に、非軸対称な渦巻きのような形をした構造が発見されたということである。紙面の都合も考慮し、本稿では特に、後者の渦巻き構造について主に取り扱う。ただし、前者の「穴の中に散乱光が存在している」という点も重要であることを注意しておこう。例えば、これは近赤外線の散乱光に寄与する塵粒子の成分（「小さな塵粒子」と呼ばれる）と、電波の放射に寄与するような塵粒子の成分（「大きい塵粒子」と呼ばれる）との間で空間的な分布が異なるということを示唆しているのかもしれない。

5. 円盤中の渦巻き構造の理論—密度波理論

実際の観測結果について議論する前に、円盤における渦巻き構造の理論について概略をまとめておく。本節の詳しい内容については、過去の天文月報記事²¹⁾も参考にいただければ幸いである。

渦巻き構造を解釈する一つの可能性として、「密度波理論」を用いる方法が挙げられる。これは、原始惑星系円盤などの差動回転する円盤において励起される波の理論であり、もともとは渦巻き銀河の構造を説明するために発展してきたものである。しかし、理論そのものは一般的に適用可能である。原始惑星系円盤のように媒質が流体から構成されている場合、基本的には原始惑星系円盤中を伝わる音波を記述する理論であると考えれば良い。

まず、原始惑星系円盤の全体的な構造について簡単にまとめておこう。原始惑星系円盤は、中心の星の周囲を回転する冷たい円盤である。動径方向には、中心星からの重力・回転運動の遠心力・ガス圧力の三つの力が釣り合っている。しかし、中心星の重力エネルギーに比較してガスのもつ熱エネルギーは非常に小さい（これが冷たいということの意味である）ため、中心星の重力と回転運動がほぼ釣り合っており、原始惑星系円盤を構成するガスはほぼケプラー回転している。したがって、円盤ガスは、半径によって角速度が異なるという差動回転の状態にある。

円盤の鉛直方向については、中心星重力の鉛直成分とガス圧力が釣り合っている。ガスの熱エネルギーは中心星の重力エネルギーに比較して十分小さいので、この釣り合いを実現するためには、円盤は非常に薄く、中心星重力のほとんどの成分が中心星の方向を向いているようになっていなければならない。円盤の厚みを H としたとき、円盤の赤道面から高さ H 程度の場所にかかる中心星重

力の鉛直方向成分は、単位質量あたり GM_*H/r^3 である。圧力勾配力の典型的な大きさは、圧力 P 、密度 ρ のガスに対して単位質量あたり $P/\rho H$ 程度である。音速を c とすると $P/\rho=c^2$ であるので、中心星重力と圧力勾配力の釣り合いより、円盤の厚みは $H=c/\Omega$ 程度であることがわかる。ここで、 Ω は円盤のケプラー角速度を表す。円盤の半径を r とし、ケプラー速度を v_K とすると $H/r=c/v_K$ と書きかえられる。典型的には原始惑星系円盤の厚み H と半径 r の比は $H/r\sim 0.05-0.1$ 程度であるから、別の言い方をすると、原始惑星系円盤はマッハ 10 から 20 程度の超音速流であるということもできる。

さて、このような背景流の中になつ音波の性質を考えよう。一般に、波を記述する理論はその分散関係式を求めて波の性質を明らかにすることを目標にする。例えば、一様な媒質中を伝播する音波であれば、角振動数 ω と波数 k の間に、 $\omega^2=c^2k^2$ という関係が成立している。ここで音速 c は、媒質の物理的性質によって決まっている。逆に言えば、音波の振動数と波数を測定することによって、媒質の性質が明らかになるということが言える。この状況は原始惑星系円盤の中を伝播する密度波についても同様である。ただし、原始惑星系円盤の場合、媒質が差動回転をしているという効果があり、伝わる波の性質にも影響を与える。密度波理論では、円盤中を伝わる波を、時間方向と方位角方向のフーリエ変換によって次のような成分に分離する：

- ・波の振動数 ω
- ・方位角方向の腕の数 m

すなわち、時間を t 、動径座標を r 、方位角を θ とすると、波の形は $f(r)\exp[-i(\omega t - m\theta)]$ と表される。ここに $f(r)$ は適当な動径座標の関数である。そして、それぞれの ω と m に対し、波が円盤中をどのように伝播するかということが独立に計算できる。特に振動数 ω が、パターン角速度 Ω_p (定数) を用いて $\omega=m\Omega_p$ と表せる場合を考

えよう (これは仮定であるが、これでもかなり一般的な議論が可能である)。ここでパターン角速度とは、「その角速度で波の形が剛体的に回転しているように見える角速度」という意味をもっている。

実際、波の形は $f(r)\exp[-im(\Omega_p t - \theta)]$ となるので、波の位相は $\theta=\Omega_p t$ と時間的に回転していくような変化に対して一定、つまり波の形が変わらないということになる。波のパターン角速度は、必ずしもその場所での媒質の回転運動の速度とは一致しないことに注意しよう。ここで「共回転半径」という言葉を導入する。原始惑星系円盤は中心星の周囲を回転しており、その回転角速度はおおむねケプラー角速度に等しい。円盤のある半径 r の位置での円盤の回転角速度を $\Omega_K(r)$ とおくと、適当に選んだ $\omega=m\Omega_p$ に対し、 $\Omega_K(r_c)=\Omega_p$ となる半径 $r=r_c$ が存在する。この半径のことを「共回転半径」と呼ぶ。共回転半径では、波のパターン角速度と円盤物質の回転角速度が等しくなる。そこで、中心星を原点とし、角速度 Ω_p で剛体回転するような座標系を考えると、波としてのパターンは、この回転座標系において完全に止まっているように見えている。また、共回転半径の場所では円盤の回転は止まって見え、それよりも内側の物質は共回転半径の場所の物質を追い越していくように、外側の物質は共回転半径の場所の物質から遅れていくように見える。ケプラー回転の速さは円盤の音速よりもずっと速いので、この運動は (共回転半径のごく近傍を除けば) 超音速の運動である。

以上のことを踏まえて、波の形がどのようなかを直観的に理解することができる。共回転共鳴の内側では、円盤のケプラー回転の流れに乗ってパターンは回転方向に前に流されていくような形になり、一方で共回転共鳴の外側では後ろ向きに流されていくような形になる。ちょうど、浅い流れの急な川に杭を刺したような状況を思い浮かべてほしい。杭の後ろ側には、V字型の波紋がで

きているだろう。これは、川の流れを反映して、杭によって励起された波が後ろに「流された」ためにできたものである。川は常に流れているものの、杭の後ろにできた波紋の形状は時間が経っても変わらない。川の流れの場合には、「共回転半径」というものが存在しないが、今の場合、「川」の役割をしているのは原始惑星系円盤であり、場所によって流れの速さが変わっているため、共回転半径が存在している。

さて、この直観的な議論の中で、分散関係の議論をした際に出てきた m というパラメーター（方位角方向の腕の数）はどこにも出てきていない。これは、実は波の形が m に依存しないということを表している。実際、波の分散関係式をもとに数学的に波の形を計算することもできるが、このようにして求めた波の形は（WKB 近似の範囲内で） m に依存しない。また、差動回転円盤の流れをもとに、二次元超音速定常流の理論を用いて（フーリエ変換の手続きなしに）波の形を導くこともできるが、この結果は分散関係に基づいて導いた結果と一致するということが付け加えておこう。

いずれにしても、密度波理論を用いることで、円盤中を伝わる音波の波形を知ることができる。その際に必要なパラメーターは：

- ・円盤の音速（あるいは温度）の分布
- ・円盤の差動回転のプロファイル
- ・共回転半径の位置

である。原始惑星系円盤における渦巻き模様は密度波だと考えると、その形は

$$\theta(r) = \theta_0 - \frac{\text{sgn}(r-r_c)}{h_c} \times \left[\left(\frac{r}{r_c} \right)^{1+\beta} \times \left\{ \frac{1}{1+\beta} - \frac{1}{1-\alpha+\beta} \left(\frac{r}{r_c} \right)^{-\alpha} \right\} - \left(\frac{1}{1+\beta} - \frac{1}{1-\alpha+\beta} \right) \right] \quad (1)$$

と表される。ここで、円盤中心を原点とした円盤面内の極座標系 (r, θ) を取っており、 θ_0 は定数、

α と β はそれぞれ円盤の回転角速度分布 $\Omega(r) \propto r^{-\alpha}$ と、音速の分布 $c(r) \propto r^{-\beta}$ を表すべき指数である。また、共回転半径は $r=r_c$ で、 h_c は共回転半径における円盤の厚みと半径の比を表す。この公式を用いれば、「観測された渦巻き構造は密度波の一部と解釈する」という仮定の下で、円盤の温度などを求めることが可能になる。

6. 観測された渦巻き構造

さて、上記の密度波理論を用いて観測された渦巻き構造の解析を行ってみよう。まず、観測された画像の中から渦巻きの構造に対応する部分を定量化して抜き出さなければならない。そこで今回は：

- 1) 得られた偏光強度分布を中心からの半径の2乗でスケールし直し
- 2) いろいろな方位角方向で、動径方向の明るさ分布の極値をとる場所を探す

という方法で、渦巻き構造の位置を特定した。偏光強度分布に半径の2乗をかけたのは、中心星のフラックスが距離の2乗に反比例して下がっていくために、散乱光強度もそれに応じて下がっていく効果を考慮したものである。この結果、北東側 (S1) と南側 (S2) から、二つの非軸対称な構造を抜き出した。

観測画像から渦巻きの形を抜き出すことができたので、式(1)によるフィッティングを行い、円盤のパラメーターなどを求める。式のパラメーターは $(r_c, \theta_0, \alpha, \beta, h_c)$ の五つあるが、今回はそのうち α と β を固定し、残り三つのパラメーターに関するフィットを行った。 α は円盤の回転プロファイルを表すパラメーターであるので、ケプラー回転の値 ($\alpha=1.5$) に固定し、音速分布のべきに対応する β の値は0.4に固定している。これは、LyoらによるSMAの観測で求められた温度分布²⁰⁾に対応するようなべきの値である。また、散乱光の動径方向の明るさ分布を調べることで、よってもある程度 β の値を予測することが可能で

ある．円盤表面が中心星からやってくる光線に対してどの程度傾いているのかという幾何学的な情報が動径方向の散乱光の明るさの分布を決めているわけだが，円盤の厚みは円盤の温度と回転によって決まる．つまり，円盤表面の傾きがどのようになっているかは，円盤の動径方向の温度分布と関係している．今回採用した $\beta=0.4$ という値は，今回の観測で得られた画像から割り出した明るさの動径方向分布とも整合的な値になっている．フィッティングパラメーターのうち， α と β を固定したので，円盤の物理量に関するパラメーターは h_c （円盤の厚み）の一つとなり，また渦巻きS2の位置を決めるパラメーター（ r_0, θ_0 ）の二つを合わせた三つのパラメーターでフィッティングを行う．

その結果，渦巻きS1については（ r_0, θ_0, h_c ）=

（ $0.39''$ ， 204° ， 0.08 ）がベストフィットを与え，渦巻きS2に関しては（ r_0, θ_0, h_c ）=（ $0.9''$ ， 353° ， 0.24 ）がベストフィットとなった．ただし，パラメーターの縮退はあり，その様子を表したものが図3である．全体としては，円盤の厚み h_c が0.1から0.2程度の値であれば観測された構造を説明することができる．このことから，SAO 206462周囲の原始惑星系円盤は比較的温度が高く，円盤の厚みが半径に対して10%から20%程度あるということが示唆される．これは，Andrewsらのモデル⁶⁾によって求められた値と無矛盾である．

ここで強調したいのは，密度波理論を用いた原始惑星系円盤の厚み（ひいては温度）の推定は，現在までに行われているSEDや電波の観測などを用いた方法とは独立なものだということである．したがって，他の観測と矛盾がないということは，観測された渦巻き構造を密度波理論を用いて解釈することへの一つの正当化を与えていると考えられる．あるいは，もしも密度波理論を用いて求められた温度が他の観測と食い違うのであれば，観測された構造は密度波として解釈できないとするか，ここで用いた理論モデルの仮定のどこかに正しくない部分があることを表している．例えば，今回用いたモデルは円盤の鉛直方向に構造がないような波のモードを考えているが，実際に立っている波はそうではないことや，背景流となる円盤そのものの鉛直構造が複雑な形をしている可能性を考える必要が出てくる．

7. 密度波理論の予測

ここまでで，観測された渦巻き構造は，密度波理論に現れる渦巻き構造の形によって解釈可能であり，理論から示唆される円盤の温度は他の観測によって推定された温度の値と無矛盾であるということを示した．そこで，密度波理論によって観測された渦巻き構造が説明できるとすると，将来の観測に対してどのような予測ができるかということを考えてみよう．

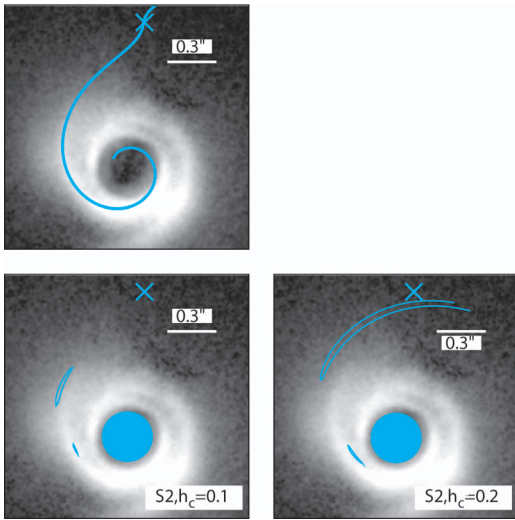


図3 上の図は渦巻きS2に対するベストフィットのパラメーターを用いた式(1)が表す構造（青線）を表す．青の×印は（ r_0 ）の位置を示す．下の図の×印はベストフィットの（ r_0 ）の位置，線は， h_c の値を固定（左が $h_c=0.1$ ，右が $h_c=0.2$ ）して（ r_0, θ_0 ）を変化させたときの，ベストフィットからのカイ2乗値のずれの等高線（ 1σ の信頼領域）を示す．ベストフィットの h_c の値と固定した h_c の値が異なるため，×印が信頼領域内に入る必要はないことに注意．

密度波は「共回転共鳴における角速度で、剛体的に回転するパターン」である。したがって、密度波理論から得られる将来観測に対する予測として、このパターンの回転ということが挙げられる。原始惑星系円盤はほぼケプラー回転していると考えられるから、パターンの角速度は

$$\Omega_p = 0.8 \left(\frac{r_c}{70 \text{AU}} \right)^{-3/2} \left(\frac{M_*}{1.7 M_\odot} \right)^{1/2} \text{ [deg/yr]} \quad (2)$$

と与えられる。ここで注意すべきは、 Ω_p は共回転半径 r_c の関数ではあるが、円盤の動径座標 r の関数ではないということである。つまり、回転角速度は半径に依存しない（これが「剛体回転している」ということの意味である）。これは、ケプラー回転とは明らかに異なる性質である。もし、墨流しのように観測されたパターンがその場の流れの速度（これはほぼケプラー速度に等しい）に従って回転していくとすれば、しだいにこの渦巻きは崩れていくだろう。一方、もしこの構造が密度波の構造だとすれば、渦巻きの形を保ったまま全体が剛体回転する。すばる望遠鏡の空間分解能を考慮すると、渦巻き構造の動きだけであればおよそ10年程度の間隔をあげた観測で、また上記のような「墨流し」の場合と密度波の場合を区別するためにはさらに10年程度の間隔をあげた観測で明らかにできるものと考えられる。渦巻き銀河における密度波でも、同じような時間発展は起こりうるが、銀河の場合は力学的な時間スケールが非常に長いため、実行可能な観測とはならないだろう。原始惑星系円盤は、大きさが小さく力学的な時間も短いため、構造が実際に動いていく様子をとらえることが可能であると考えている。また、原始惑星系円盤よりもさらに力学的時間が短い土星の環においては、実際に構造が時間変化していく様子がすでに観測されているということも付言しておこう。

8. 本当に密度波？

密度波理論を用いた渦巻き構造の解釈における大きな仮定は、「今回の観測で見つかった構造が、原始惑星系円盤のガスの面密度構造を反映している」という部分である。すでに述べたように、近赤外線の撮像観測で見えるのは、中心星の光が円盤表面で散乱された光である。典型的な値として、原始惑星系円盤における近赤外線の散乱表面は円盤の厚みの指標である c/Ω のおよそ3から4倍の高さの部分にあり、その場所でのガス密度は、円盤中心面に比べて1/1,000以下になっている。つまり、近赤外線で観測されている構造は、原始惑星系円盤表面の「薄皮」の構造を反映しているものであり、これが原始惑星系円盤の中心面の構造と直接結びついているという保証はない。

このことを確かめるためには、円盤中心面の構造を直接確かめる以外に方法はないだろう。そのためには、電波の連続波で高空間分解能の観測をする必要がある。電波の連続波であれば、原始惑星系円盤は光学的に薄くなるので、円盤中心面を見通すことが可能になる。すでに、SMAなどでこの天体の連続波マップは観測されているが、今回の近赤外線の画像と比べると空間分解能という点で劣っており、渦巻き構造まで分解して観測するということではできていない。（この天体が南天にあるということも、観測を難しくしている原因の一つである。）しかし、ALMA望遠鏡を使えば、今回の近赤外線の画像と比較可能なレベルの画像を得られると期待できる。また、密度波理論を用いた解析の方法に関しては、近赤外線の観測に特化したものではなく、電波観測などにもそのまま応用できるものであるという点も注意しておく。

9. 渦巻き構造を作り出す原因

ここまで、渦巻き構造を作り出す原因は何かということについて、詳しい議論をあえて行っていない。密度波理論は、「渦巻き構造は何か」

ということを説明する一つの可能性を提示するものであり、将来の観測によってその正当性を検証することが可能である。しかし、密度波理論は「なぜその渦巻きができたか」ということには答えることはできない。同じことを大気中の音波になぞらえて言えば、「何か音が聞こえたときに、音波の理論を用いて大気中の温度がわかり、さらに何秒後に別のある場所で音が聞こえるかを予測する」ということはできるが、この議論で「何がその音を発しているのか」については簡単には答えられないということである。

以上の断りのうえで、「もしもこの波が円盤中に存在する惑星の重力によって励起された波であれば、どのようなことが言えるか」ということを考えてみよう。原始惑星系円盤の中に惑星が存在していると、その重力的な影響によって密度波が励起される。第ゼロ近似では原始惑星系円盤はケプラー回転をしており、また惑星の公転速度もケプラー速度なので、惑星の存在する位置で円盤の回転速度と惑星の公転速度はほぼ等しい。したがって、惑星の軌道半径がほぼそのまま共回転半径となる。また、惑星が作る密度波の場合、惑星の質量と密度波の振幅の間に関係がつく。この関係は、背景流の円盤の面密度を Σ 、そこからの摂動を $\delta\Sigma$ 、円盤の厚みと半径の比を h 、惑星質量と中心星の質量比を q と置く

$$\frac{\delta\Sigma}{\Sigma} \sim \frac{q}{h^3} \quad (3)$$

と表される。惑星の質量が大きい場合や、惑星が円軌道にない場合にはほかの波のモードも励起され、また上記の振幅の関係も修正が必要になるが、軽い惑星（具体的には、上式で $\delta\Sigma/\Sigma$ が1よりも小さくなるような場合）が中心星の周囲を円軌道しているという最も単純な場合には以上のように惑星と密度波の関係が与えられる。

そこで、密度波のフィッティングの結果のうち、共回転半径 r_c の値がほぼ惑星の存在する位置を表すと考えられる。また、密度波の振幅を、観

測された散乱光強度の揺らぎから推定すると、惑星の質量はおよそ木星質量の半分程度であろうという予測もできる。ただし、より詳しく調べるには、密度波の原始惑星系円盤中の伝播を考慮する必要がある。密度波は、原始惑星系円盤中の乱流粘性の効果²²⁾や、それ自身が衝撃波となるという効果^{23), 24)}によって散逸していき、それによって密度波の振幅は変化する。どのような物理過程が今回観測された円盤において重要なのかということについて、今後より詳しく検討していかなければならない。この「惑星質量」の見積もりは、そもそも惑星が存在するという大きな仮定を置いたうえでのオーダーの見積もり程度のものであるということに注意しておこう。

10. まとめと今後

すばる望遠鏡戦略枠プロジェクト SEEDS では、HiCIAO を用いて高空間分解能の原始惑星系円盤の画像が続々と得られている。本稿では、特に遷移円盤天体 SAO 206462 の観測を取り上げ、新たに見つかった渦巻き状の構造について考察を行った。もしこの構造が密度波であれば、「原始惑星系円盤にあるべきものがあつた」ということになるし、そうでないとするこの構造をどのように解釈すべきかということをもう一度考え直す必要が出てくる。多くの理論家にとって、モデルを考えるうえで、「非対称性」は最も難しい（かつ、面白い）部類に入るのでないだろうか。これまで、「簡単のために」軸対称や球対称のモデルを考えていたところに、観測から「現実に目を向けろ」と厳しい要求が突きつけられたということだ。今回の渦巻き構造については、たまたま解釈可能でありそうなモデルがあつたものの、本稿で展開した密度波理論を用いた解釈にも反駁の余地が大いにある。そして、より複雑な構造をした円盤が見つかってきた際に、どのように考えていくかは大きな問題となるだろう。それと同時に、このような観測があるからこそ原始惑星系円盤の物

理や惑星形成過程に関する理解が深まってくるといふこともある。SEEDS計画は、今後観測数を増やし、原始惑星系円盤と惑星形成の関係について、統計的な議論ができるレベルにまで発展していこうとしている最中にある。

謝 辞

本研究はSEEDS計画のもと、多くの共同研究者によって成り立っている研究です。特に、ゴダード宇宙研究所のCarol Grady氏には、論文のアイデアの段階から深く議論にかかわっていただきました。また、天文月報への執筆の機会を与えていただき、遅筆な筆者らを暖かく見守っていただいた柏川伸成氏には改めて深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 井田 茂, 2007, 系外惑星 (東京大学出版会)
- 2) Gorti U., Hollenbach D., 2009, ApJ 690, 1539
- 3) Suzuki T. K., Muto T., Inutsuka S.-i., 2010, ApJ 718, 1289
- 4) Zhu Z., Nelson R. P., Hartmann L., Espaillat C., Calvet N., 2011, ApJ 729, 47
- 5) Strom K. M., Strom S. E., Edwards S. E., Cabrit S., Skrutskie M. F., 1989, AJ 97, 1451
- 6) Andrews S., Wilner D. J., Espaillat C., Hughes A. M., Dullemond C. P., McClure M. K., Qi C., Brown J. M., 2011, ApJ 732, 42
- 7) Muto T., Grady C. A., Hashimoto J., Fukagawa M., et al., 2012, ApJ 748, L22
- 8) Thalmann C., Grady C. A., Goto M., Wisniewski J. P., et al., 2010, ApJ 718, L87
- 9) Hashimoto J., Tamura M., Muto T., Kudo T., et al., 2011, ApJ 729, L17
- 10) Kusakabe N., Grady C. A., Sitko M. L., Hashimoto J., et al., 2012, ApJ 753, 153
- 11) Tani R., Itoh Y., Kudo T., Hioki T., et al., 2012, PASJ, accepted, arXiv: 1206.1215
- 12) Hashimoto J., Dong R., Kudo T., Honda M., et al., 2012, ApJL, accepted, arXiv: 1208.2075
- 13) Walker H. J., Wolfstencroft R. D., 1988, PASP 100, 1509
- 14) Coulson I. M., Walther D. M., 1995, MNRAS 274, 977
- 15) Dent W. R. F., Greaves J. S., Coulson I. M., 1995, MNRAS 359, 663
- 16) Müller A., van den Ancker M. E., Launhardt R., Pott J. U., Fedele D., Henning Th., 2011, A&A 530, A85
- 17) Brown J. M., Blake G. A., Dullemond C. P., Merin B. et al., 2007, ApJ 664, L107
- 18) Brown J. M., Black G. A., Qi C., Dullemond C. P., Wilner D. J., Williams J. P., 2009, ApJ 704, 496
- 19) Pontoppidan K. M., Blake G. A., van Dishoeck E. F., Smette A., Ireland M. J., Brown J., 2008, ApJ 684, 1323
- 20) Lyo A.-R., Ohashi N., Qi C., Wilner D. J., Su Y.-N., 2011, AJ 142, 151
- 21) 武藤恭之, 2010, 天文月報 103, 688
- 22) Takeuchi T., Miyama S. M., Lin D. N. C., 1996, ApJ 460, 832
- 23) Goodman J., Rafikov R. R., 2001, ApJ 552, 793
- 24) Muto T., Suzuki T. K., Inutsuka S.-i., 2010, ApJ 724, 448

Discovery of Spiral Structures in a Protoplanetary Disk around SAO 206462 (HD135344B)

Takayuki MUTO, Jun HASHIMOTO,

Misato FUKAGAWA, and Motohide TAMURA

Division of Liberal Arts, Kogakuin University, 1-24-2 Nishi-Shinjuku, Shinjuku-ku, Tokyo 163-8677, Japan

Abstract: We present the discovery of the spiral structure in the protoplanetary disk around SAO 206462 (HD 135344B). The spiral structures are indicative of the dynamical processes in a protoplanetary disk, which are possibly connected to the planet formation processes. In this article, we show that such non-axisymmetric structures may be used as an indicator of the disk temperature profile by using the spiral density wave theory. We then discuss how this interpretation can be verified in future observations. We also make comments on the possibilities of the existence of the planet(s) embedded in the disk.