

惑星系形成の最初期を観る



大橋 永芳

〈中央研究院天文及天体物理研究所 〒10617 台北市羅斯福路四段1號中央研究院／台灣大學天文數學館11樓〉
e-mail: ohashi@asiaa.sinica.edu.tw

アルマ望遠鏡の活躍により、惑星系形成の理解はこの10年で飛躍的に進んだ。その結果、従来の惑星系形成の描像が塗り替えられつつある。その一つが「いつ惑星は作られるのか」という点である。最近の研究から、惑星系は星形成過程の初期段階にある原始星周囲の円盤で、既に形成が開始されているのではないかと示唆が得られている。本稿では、この10年間で原始星周囲の円盤の研究がどのように進んだかを振り返るとともに、惑星系形成の最初期を観る試みとしてアルマ望遠鏡を用いて行われた、ラージ・プログラム“Early Planet Formation in Embedded Disks (eDisk)”に焦点を当てて、プログラムの概要と初期成果について概説する。

1. 惑星系形成はどこまでわかったか？

目から鱗が落ちるとは、まさにこの事だろうか。代表的な前主系列星^{*1}であるHL Tau周囲の原始惑星系円盤を、アルマ望遠鏡を用いて視力2000で撮像した画像 [1] を見たときのことである。その画像には何本もの溝を持つ円盤が映し出されていた。筆者がアルマ望遠鏡の建設計画に携わっていた当時、期待される科学的成果の一つとして、円盤内で形成中の惑星が重力相互作用によって円盤に溝を作る様子が見えるという、「見てきたような」想像図を毎回見せていたが、その想像図が観測開始からわずか数年で現実になるとは、正直夢にも思わなかった。さらに筆者を驚かせたのは、多くの原始惑星系円盤で溝や腕といった内部構造が次々と発見されたことである [2-4]。

そのさらに数年後には、原始惑星系円盤内で形成中の「原始惑星」を取り巻く周惑星円盤がアルマ望遠鏡により直接撮像された [5]。これにより、若い星に付随する原始惑星系円盤が、惑星系形成の現場であることが確実となった。このように、アルマ望遠鏡の観測開始から10年で惑星系形成の理解は飛躍的に進んだ。

このような飛躍的な進展は、新たな問いも我々に投げかけている。その問いの一つが、「いつ惑星は作られるのか」という点である。従来の惑星系形成のシナリオでは、惑星系形成は前主系列星周囲の円盤内で進行する、というものであった。しかしながら上述したように、前主系列星周囲の原始惑星系円盤ではほぼ普遍的に溝や腕といった内部構図を伴うことが明らかとなった。これは裏を返せば、原始惑星系円盤の多くで既に惑星系形

^{*1} 前主系列星とは、Tタウ型星に代表される可視光で見える形成中の若い星のことである。一方、前主系列星よりもさらに若い、可視光ではまだ見えない形成中の星のことを、原始星と呼ぶ。さらに、原始星はより若い段階にあるクラス0天体と、比較的進化が進んだクラスI天体に分けられることがある。

成がかなり進行している、あるいはほぼ終了していることを意味する。溝や腕といった内部構造の原因が必ずしも惑星ではない可能性も議論されているが、最近の観測では少なくとも複数の円盤の溝で惑星の存在する兆候が得られている [6]。一方、近年の研究から、前主系列星周囲の原始惑星系円盤には、木星のような巨大惑星を作るのに十分な質量がないことが指摘されている [7, 8]。このようなことから、惑星系形成の開始時期は前主系列星期よりも前の段階、すなわち、原始星期ではないかと示唆されている。

2. 原始星は円盤を伴うのか？

さて、前の章で述べた、いつ惑星系形成が始まるのか、という問いに答えるためには、前主系列星周囲の原始惑星系円盤よりもさらに若い円盤、つまり、原始星周囲の原始星円盤を詳しく調べる必要がある。特に、原始星円盤が原始惑星系円盤のような内部構造を持つかどうか重要だ。ところが、実はつい最近まで、原始星周囲に円盤が存在する確たる観測的証拠は得られていなかった。もちろん、従来の星形成の理論的シナリオ [9] によれば、原始星周囲には円盤が形成されるはずである。また、原始星周囲に円盤が存在するであろう「間接的」証拠はいくつも得られている。しかしその一方で、原始星は母体となるエンベロープに埋もれており、そのエンベロープと円盤の区別は必ずしも容易ではない。さらに事態を悪くするのは、そのエンベロープの形状が円盤状であり、しかも円盤に見られるような回転運動をしていることである [10, 11]。つまり、一見すると円盤のように見えても実はエンベロープの内側を見ている可能性が拭えない。その一方で、磁場の影響で原始星周囲には円盤ができないと主張す

る理論研究もあった（例えば [12]）。このような状況を打破するには、原始星周囲の円盤の決定的証拠が必要だった。

では、決定的証拠とは何か？それは円盤を特徴付けるケプラー回転を検出することである。上述したように、エンベロープも回転運動を伴うが、エンベロープは中心に向かってインフォールしており回転で支えられているわけではない。つまり、ケプラー回転ではないのである。エンベロープ中のインフォールするガスは比角運動量一定の半径分布を示すため [13, 14]、その回転速度は中心からの距離に反比例する。一方、ケプラー回転ではその速度は中心からの距離の平方根に反比例する。この違いを検出できれば、エンベロープと円盤を区別することができるというわけだ。

原始星周囲でケプラー円盤を検出することの重要性に早くから着目していた筆者らは、アルマ望遠鏡での観測に備えて、2012年からサブミリ波アレイ（SMA）で観測を開始していた。その結果、比較的進化の進んだクラスI原始星でケプラー円盤の検出に成功した [15]。しかし、より若いクラス0原始星周囲ではケプラー円盤の検出には至らず、アルマ望遠鏡での観測を待つことになった。幸い、筆者らはアルマ望遠鏡のサイクル0での観測が認められ、その結果、L1527 IRSというクラス0原始星周囲にケプラー円盤を検出することに成功した [16, 17]^{*2}。原始星周囲でケプラー円盤を検出する科学的意義は、単に円盤の存在を証明するだけでなく、原始星の質量を推定するという重要な側面、さらにその質量を用いてインフォール速度や質量降着率といったさまざまな重要な物理量を推定できるという側面もあるが、ここでは紙面の制約上、詳しくは触れない。L1527 IRSの観測後、アルマ望遠鏡を用いた原始

^{*2} アルマ望遠鏡での観測以前に、CARMAを用いた観測でL1527 IRSがケプラー円盤を伴う事が示唆されていたが [18]、この論文では、観測された回転曲線をケプラー回転を仮定してフィットしたのみで、必ずしもエンベロープ中のインフォールとの切り分けを行ったわけではない。

星周囲のケプラー円盤の観測は引き続き行われ、その数は増えつつあるが、決して統計的に有意と言えるほどの数が観測されているわけではないし、また、すべての原始星でケプラー円盤が検出されているわけでもない。とはいえ、原始星は円盤を伴うと結論づけてもよいだろう。原始星円盤の存在が確認されたことにより、いつ惑星系形成が開始するののかという問いに答えるために、原始星円盤を詳しく調べるといったアイデアが現実的なものとなった。

3. 長い道のり

原始星円盤の存在が確認され、いよいよ本題の原始星円盤は内部構造を持つのか、という話に入る。筆者らのグループが原始星円盤の内部構造の探査を開始する以前にも、そのような研究は行われており、実際に内部構造を持つ、あるいは持つと思われる原始星円盤が見つかった（例えば [19]）。しかしながら、それらの研究は限られた数の円盤を単発で調べるにとどまっており、統計的な議論をするには不十分であった。原始星円盤の内部構造の探査を通じて、いつ惑星系形成は開始するののかという問いに答えるためには、内部構造の探査を系統的に行う必要がある。また、そのような探査は十分に高い空間分解能で行う必要がある。さらに、内部構造の探査だけではなく、分子輝線を使ったケプラー回転の探査も同時に行い、ケプラー円盤自体の存在も確認するのがベストなアプローチと考えた。このような大規模な観測は、アルマ望遠鏡といえども非常に長い時間を要する。アルマ望遠鏡は観測開始当初、最大観測時間50時間という制限を設けていたが、50時間で観測可能な原始星の数には限りがある。そのような大規模な観測を可能にするため、アルマ望遠鏡は、「ラージ・プログラム」をサイクル4から導入した。そこで筆者らはこのラージ・プログラムに応募することにしたのである。長い道のりの始まりである。

筆者らはサイクル4での観測を目指して、2015年からラージ・プログラムの準備を開始した。ただし、2015年の時点ではHL Tau周囲の円盤で内部構造が見つかったのみで、筆者らが準備したプロポーザルは、原始星円盤の内部構造を調べるというものではなく、原始星周囲のケプラー円盤の探査を系統的に行う、というものであった。2015年の暮れにはプロポーザル準備のためのワークショップを国立天文台三鷹キャンパスで開催し、準備万端でラージ・プログラムに応募をしたが、容易に想像がつくようにラージ・プログラムは極めて狭き門であった。サイクル4のラージ・プログラムには27件の応募があったが採択されたのはわずかに2件、筆者らのプロポーザルは見事に不採択であった。余談だが、このわずかに採択された2件のプロポーザルの一つが、前主系列星周囲の原始惑星系円盤内の内部構造を系統的に調べる、DSHARPと呼ばれるものであった。DSHARPについては後ほどまた触れることになる。

「継続は力なり」という教えに従い、筆者らはその後もラージ・プログラムに応募し続けたが、サイクル5, 6でも不採択という状況が続いた。転機が訪れたのは、サイクル6での不採択通知を受け取った後だった。先にも述べたDSHARPが2018年暮れに論文を発表したのである。DSHARPは20個の原始惑星系円盤を100分の4秒角という極めて高い空間分解能で観測し、そのほとんどに溝や腕といった内部構造を明確に見出した [2]。この結果に、筆者らの心は大きく揺り動かされた。「原始星円盤でも内部構造の探査を系統的に行うべきではないか？」それに追い討ちをかけたのが、サイクル6で採択されたラージ・プログラムFAUST（本特集の大小田氏記事参照）である。FAUSTは50天文単位という空間分解能で原始星を観測し、原始星周囲のガスの化学組成を明らかにするというプログラムであるが、分子輝線の観測を行えば当然原始星周囲のガスのダイナミクスも研究対象となる。チーム内で何度も議論を重

ね、その結果、100分の4秒角という高分解能で19個の原始星周囲の円盤（アーカイブからの2天体を含む）の内部構造を探索することをプログラムの第一の目的とするという決断に至った。その方針転換に伴い、プロポーザルも大幅に書き直し、プログラムのタイトルも新たに“Early Planet Formation in Embedded Disks”とし、サイクル7でようやく採択に漕ぎ着けた。応募当初はプログラムのニックネームはまだなかったが、プログラム採択を受けて、“eDisk”と呼ぶことにした。

しかし、長い道のりはまだ続く。2019年に採択されたeDiskの観測は、2020年の春から始まるはずだった。ところが、そこに立ち上がったのが、新型コロナウイルスCOVID-19である。アルマ合同観測所はeDiskの観測開始直前に観測所の一時閉鎖を決定、当然、eDiskも含め予定されていた全ての観測は中断に追い込まれた。結局、観測所の閉鎖は約1年にわたり、観測が再開されたのは2021年3月、eDiskの最初の観測が行われたのが、2021年4月であった。アンテナ配列のスケジュールの関係上、一部取得できなかったデータがあったものの、観測所の努力の甲斐あって2022年7月に無事観測を終了することができた。

4. eDisk コラボレーション

さて、ラージ・プログラムを進めるにあたっては、チーム作りやその運営が非常に重要である。プログラムの採択まで四年を費やしたため、その間にチームメンバーの入れ替わりもあったが、最終的にはPIの筆者に加えて、2名のCo-PI (John Tobin と Jes Jørgensen) と17名のCo-Iというチーム構成になった。また、これらのメンバーに加えて、若い学生や博士後研究員17名^{*3}が加わり、合計37名の体勢を整えた。この若い学生や博士後研究員達が非常に重要な役割を果たしているのは言うまでもない。また、37名中20名がアジア



図1 2023年4月に京都で開かれた、eDisk コラボレーション会議の集合写真。

地域から加わっており、アジア圏の研究者が大いに活躍しているのも注目値する。ここではメンバー全ての名前を挙げるスペースはないが、その代わりに2023年4月に京都で開いたコラボレーション会議の際の集合写真を載せておく(図1)。これらのメンバーで隔週でサイエンス・テレコンをこれまでで行ってきているが、アジア、アメリカ、ハワイ、ヨーロッパと世界中に散らばっているチームメンバーがテレコンで一同に会するのは、誰かが真夜中のテレコンに参加しない限り不可能である。できるだけ「全員参加」を目指してきたeDiskコラボレーションでは、苦肉の策でテレコンの時間を3つの時間帯でローテーションしている。それぞれの地域は少なくとも2つの時間帯でテレコンに参加することができる。3回に1回は参加できないが、そこはテレコンを録画することでカバーしている。

5. eDiskの初期成果

eDiskの初期成果としては、プログラムの概要を示した論文 [20] とそれに続く13編の論文 [21–33] が出版、あるいは投稿中である。以下、1.3 mm 連続波と分子輝線の観測結果の概要を記述する。

^{*3} 若い学生と博士後研究員のメンバーに関しては、チーム立ち上げ当初から既に入れ替えが進んでいる。

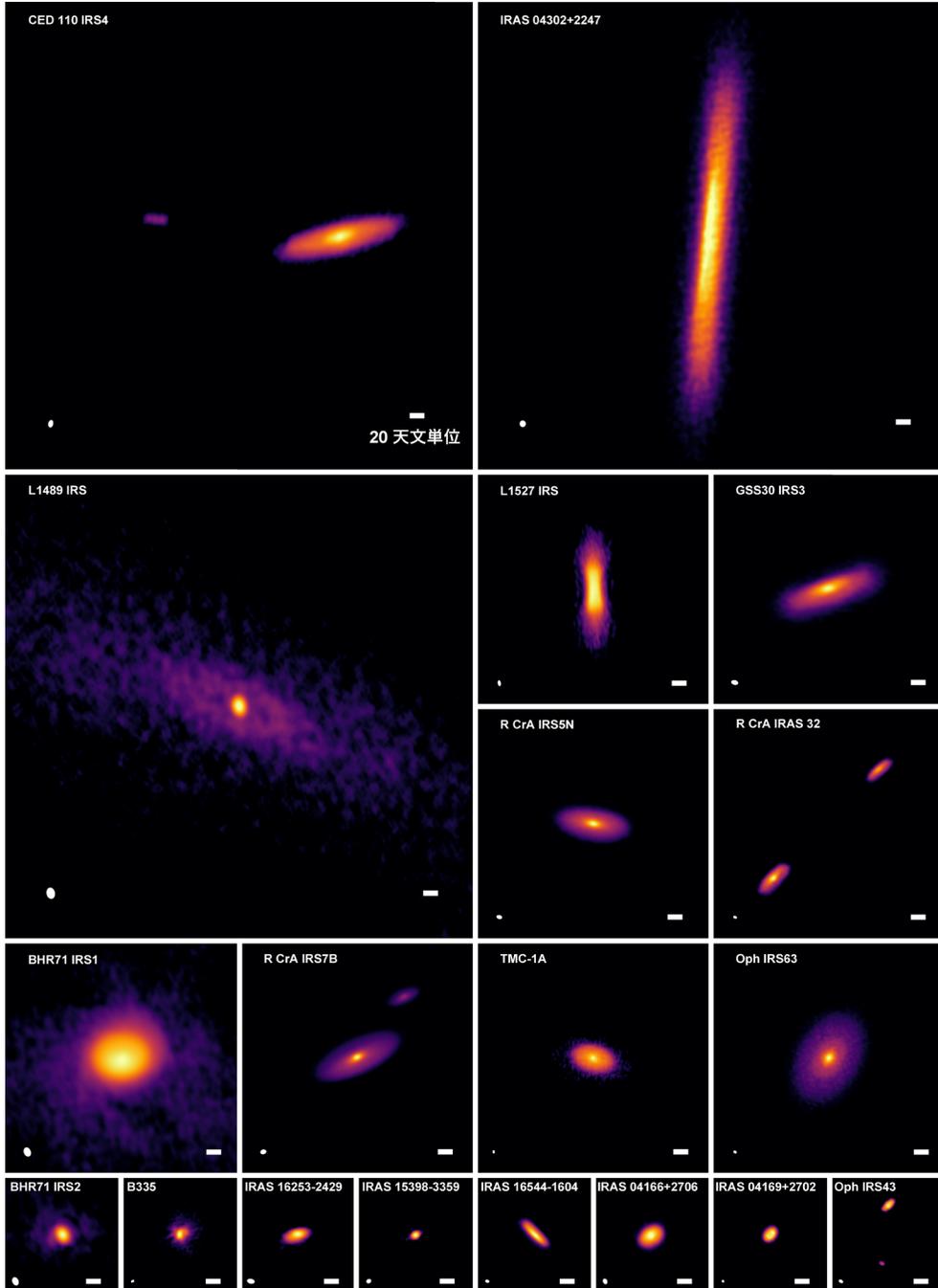


図2 eDiskで得られた1.3 mm連続波イメージギャラリー。すべてのパネルが同じリニア・スケールで示されている（一番大きなパネルは640天文単位四方）。各パネルの左下にはビームサイズ、右下には20天文単位のスケールが示されている。[20]より転載。巻頭カラーグラビア参照。また、オンライン版はカラー表示。

5.1 1.3 mm連続波

図2に観測で得られた1.3 mm連続波イメージのギャラリーを示す。この図ではすべてのイメージを同じリニア・スケールで示している。アルマ望遠鏡の高い感度のおかげで、すべての原始星で連続波が検出された。また、観測された原始星システムのうち、新たに3つの連星が同定され、既知の連星も含め、4つのシステムが連星となった。伴星も含めると、23の連続波源が検出されたことになる。これらの連続波は程度に差はあるもの、おおむね円盤を斜めから観た楕円形の構造を示している。後で示すように、ほとんどの天体でケプラー回転も検出されていることから、これらの連続波は基本的に原始星周囲の円盤をトレースしていると考えてよい。非常に印象的なのは、連続波の空間的広がり大きな差が見られることである。最もコンパクトなものは100分の4秒角という空間分解能を持ってしても、ぎりぎり分解できる程度である。2次元ガウシアンでイメージをフィッティングしたところ、広がり差は約二桁にわたることがわかった。この大きな差が進化によるものなのか、あるいは円盤固有の違いなのかは現時点でははっきりとはわからない。今後の重要な研究対象である。一方、連続波の強度を輝度に換算すると、8割近くが50 K以上の輝度を持ち、5つの連続波源では150 K以上の非常に高い値を示すことがわかった。このような高輝度は連続波が光学的に厚いことに起因するものと思われる。さらに、円盤のモデル計算をしてみると、150 K以上の高輝度は中心星からの輻射のみでは再現することができず、円盤内の降着運動による加熱を考慮する必要があることもわかった [33]。

さて、連続波で最も興味があるのは連続波が内部構造を示すかどうかである。円盤の内部構造の有無を調べるために、それぞれの連続波源を拡大したイメージを図3に示す。図3から明らかなのは、殆どの連続波源は溝や腕といった内部構造を示さない事である。わずか2天体（Oph IRS 63と

L1489 IRS）で溝が見られるが、その構造は非常にコントラストが低く淡い。この2天体のうち、IRS 63に関しては先行研究 [34] でも同様の内部構造が報告されていた。一方、L1489 IRSに関しては、eDiskのデータを用いた円盤内部構造の詳細な解析を行なった結果、溝と歪みを持つ円盤構造が明らかとなった [23]。加えて、IRAS 04169+2702でも内部構造の兆候が見られる。実際、さらに分解能を上げたIRAS 04169+2702の連続波イメージでは、中心に三日月状の構造が見られる。とは言え、この天体でも内部構造は非常に淡い。第1章で述べた前主系列星周囲の円盤と比べると、内部構造の見え方の違いは明白である。

図3からもう一点明らかなのは、原始星周囲の連続波の強度分布が非対称であるという点である。特に多くの連続波がその短軸方向に非対称性を示している。この強度の非対称性に関しては、逆に前主系列星周囲の円盤ではほとんど見られず、原始星円盤に特有の特徴と言ってもよい。原始星円盤と前主系列星円盤との間にこのような明白な違いが見られるとは、筆者らも予想をしていなかった。

これらの違いは何を意味するものであろうか？まず、1点目の内部構造の見え方の違いについて考える。第1章で述べたように、溝などの内部構造が惑星系形成の進行を示唆するのであれば、原始星円盤では前主系列円盤ほど惑星系形成が進行していないことを意味する。ただし、ここで注意が必要なのは、原始星円盤から放射される1.3 mm連続波が光学的に厚い点である。すなわち、光学的に厚い連続波は円盤の内部構造を覆い隠してしまう可能性がある。この点を明らかにするためには、より光学的に薄いであろう長波長域の（例えば波長7 mm）連続波で原始星円盤を観測して見る必要がある。eDiskでは既にVLAを用いて長波長域でeDiskサンプルを観測するプログラムを進めているが、今のところ長波長域で内部構造が見えるという結果は得られていない [35]。

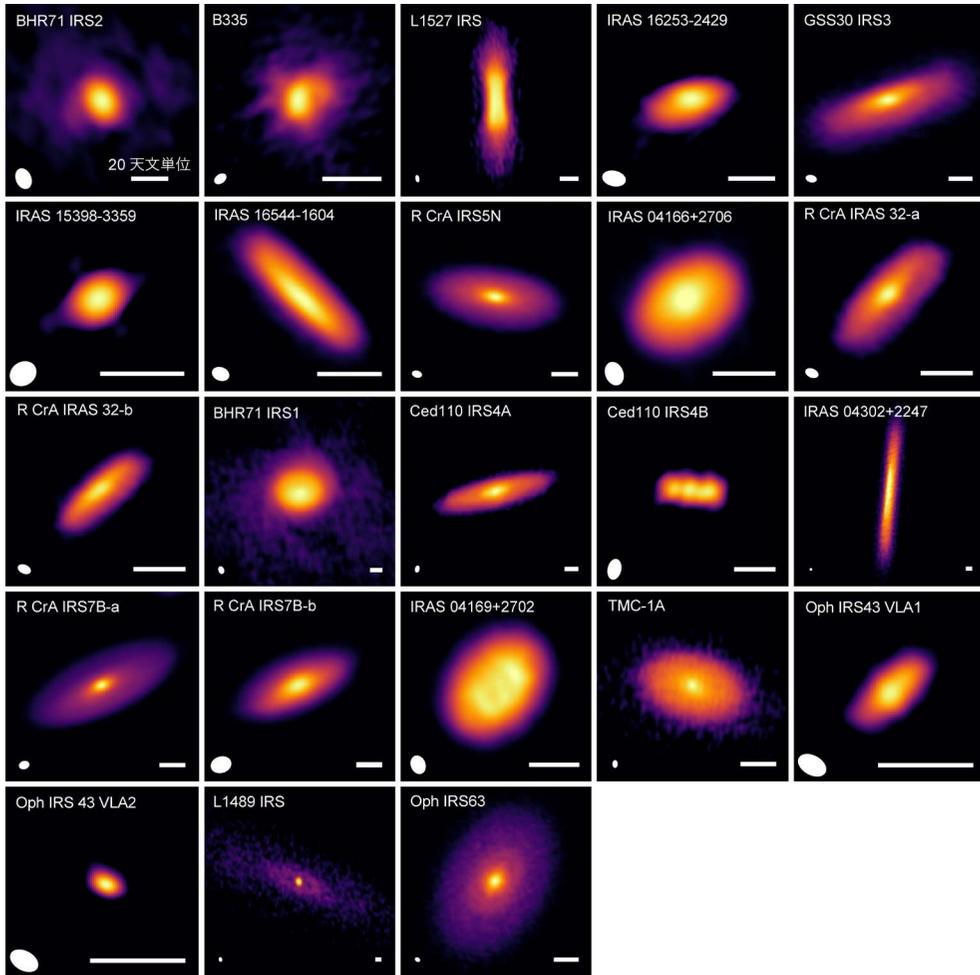


図3 eDiskで得られた1.3 mm連続波拡大イメージギャラリー。天体は原始星や前主系列星の進化段階の指標である bolometric temperature (T_{bol} ; 進化が進むほど高い値を示す傾向にある) の値の順番に並べられている (一番左上が最も低い T_{bol} , 一番右下が最も高い T_{bol})。各パネルの左下にはビームサイズ, 右下には20天文単位のスケールが示されている。[20] より転載。

次に2点目の強度の非対称性の違いについて考えよう。非対称性の原因が実際の塵粒子の分布の違いを反映しているのかどうか最大のポイントであるが、先にも述べたように1.3 mm連続波が比較的光学的に厚いとする、非対称性が塵粒子の分布の違いを反映しているとは考えにくく、むしろ温度の違いを反映していると考えの方が自然である。もし円盤内の塵粒子が円盤の鉛直方向にも広がっているとすると、図4に示したように温

度差が円盤の短軸方向に現れる。つまり、原始星の位置に対して遠い側からは、より暖かい円盤の表面近くからの放射を、一方、手前側からはより冷たい円盤面近くからの放射を観測することになり、その温度差が円盤の短軸方向に見られるというわけだ。実際、IRAS 04302+2247やR CrA 7B-aのケースでは、鉛直方向に広がった構造を持つ円盤モデルを用いて観測がよく再現されることを確かめた [21, 33]。塵粒子が鉛直方向にも広

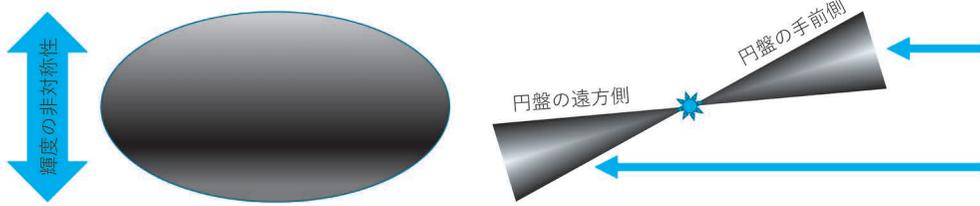


図4 右の図が円盤の幾何学構造と視線（青の矢印）との関係を示し、左の図が天球面上に投影された円盤のイメージを示す。黒色がより高温の領域を示す。

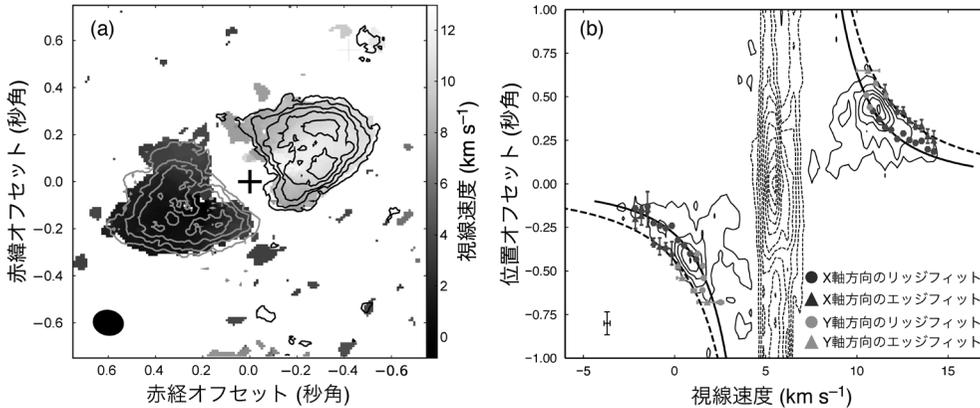


図5 (a) R CrA IRS 7B-aの $C^{18}O$ 2-1積分強度マップ（等高線）と平均速度マップ（グレースケール）。プラスは中心星の位置を、左下の楕円は空間分解能を示す。(b) ダスト連続波の長軸方向に沿って切った位置速度図。丸と三角はSLAMを用いたリッジフィットとエッジフィットで得られたデータ点を、実線と波線のカーブはリッジフィットとエッジフィットから得られた回転曲線をそれぞれ示す。(a), (b) 共に [20] 中の図を改変後に転載。

がっているということは、すなわち、円盤面に沈殿していないことを意味する。前主系列星円盤では、短軸方向に強度の非対称性は見られないことから、原始星円盤に比べて塵粒子の円盤面への沈殿がより進行していると考えられる。惑星系形成の進行には塵粒子の円盤面への沈殿が必須であることを考慮すると、原始星円盤内では惑星系形成はまだ進行していないという、1点目の内部構造の見え方の違いから得られたのと同様の結論に至る。まとめると、原始星円盤内では塵粒子が円盤面にまだ十分に沈殿しておらず、塵粒子の成長、すなわち惑星系形成がまだ進行していない。一方、前主系列星円盤内では塵粒子の円盤面への沈殿が十分に進行し、それに伴い塵粒子の成長が進み、惑星系形成の進行を促進する。原始星円盤と前主

系列星円盤の間に明確な違いが見えることから、塵粒子の円盤面への沈殿とそれに伴う惑星系形成は、原始星が前主系列星へと進化する10万年から100万年ほどの間に急速に進むものと考えられる。

5.2 分子輝線

eDiskでは、1.3 mm連続波に加えて $C^{18}O$ 2-1など多くの分子輝線も観測している。その目的の一つがケプラー回転の検出である。前の章で述べたように、1.3 mm連続波は原始星周囲の円盤をトレースしていると考えられるが、分子輝線では1.3 mm連続波を取り巻くようなガス成分が検出されている。図5aにはその一例として、R CrA IRS 7B-aで検出された $C^{18}O$ の結果を表示している。 $C^{18}O$ の積分強度マップは、連続波で見られたような円盤状の南東から北西に向けて伸びた構

造を示している。また、平均速度マップを見ると、円盤状の構造の伸びた方向に沿って速度勾配があることがわかる。この伸びた構造に沿った速度勾配は、円盤状の構造の回転をトレースしていると考えるのが最も自然である。そこでこの回転運動の詳細を調べるため、伸びた構造に沿った位置速度図を見てみよう (図5b)。すると、位置が中心星に近づくにつれて速度が増加する、いわゆる差動回転の特徴を示していることがわかる。ただし、これを見てケプラー回転が見えた、と拙速に結論を出してはいけない。第2章でも述べたように、角運動量を保存しながら中心に向かってインフォールするエンベロープでも、差動回転が見られるからである。ケプラー回転であることを示すためには、回転速度が半径の平方根に反比例することを示さなければならない。そこでeDiskでは麻生有佑さんと崔仁士さんが中心となって、差動回転を示す位置速度図をフィットして回転運動の詳細を調べるツール、SLAMを新たに開発した [36]。SLAMを用いて半径 r の単一冪関数 ($V_r \propto r^p$) で位置速度図をフィットしたところ、その冪 p は -0.6 から -0.5 となった (図5b)。この値はケプラー回転を示す -0.5 と完全には一致をしないが、角運動量を保存する場合の -1 と比べると、 -0.5 により近い。このことから回転運動はケプラー回転であると示唆される。このように、ケプラー回転とインフォールに伴う回転との違いを見分けるには定量的評価が必要であり、見た目だけの判断は非常に危険であることを強調しておきたい。eDiskではSLAMを用いた詳細な解析を行い、その結果、19天体中少なくとも15天体でケプラー回転を検出した。

分子輝線の観測からケプラー回転以外にも、非常に様々なことがわかる。例えば、IRAS 04302+2247 [21] と L1527 IRS [22] ではCOのスノーライン、Oph IRS 63 [29]、IRAS 16253-2429 [25]、IRAS 16544-1604 [26]、IRAS 04169+2709では、ストリーマーと呼ばれる、中心に向かってイン

フォールする帯状の構造や、腕構造がエンベロープ中で見つかっている。また、L1489 IRS [23] や Oph IRS 63 [29] 等では、ショックにより増加したと思われるSO輝線が検出されている。さらに、BHR 71 IRS1 や IRS2では様々な分子輝線が検出されており、アストロ・ケミストリーの観点からも非常に興味深い [32]。

6. これからの10年

最後に、これからの10年で惑星系形成の最初期段階の研究がどのように進むのかを、展望してみよう。eDiskプログラムに関して言えば、まだ初期成果を出版している最中でより詳細な解析、例えば、円盤の内部構造をより詳細に調べるための解析や、フォワード・モデルを用いた円盤の回転運動のより詳細な解析が現在進行中である。また、ダスト連続波の偏波の観測も磁場が惑星系形成に与える影響を調べるために重要となる。さらに、新たに見つかったエンベロープ中のストリーマーや腕構造に関しても、eDiskの複数の天体でより系統的な解析を進める必要がある。円盤の内部構造という点では、より光学的に薄い長い波長での高分解能の観測が既にアルマ望遠鏡バンド3やVLA7 mmで行われており、それらのデータの解析を進めているところである。これらの解析結果はeDiskのサンプル全体を通してより統計的に議論される。また、上記のバンド3の観測も含めた多波長のダスト連続波の観測から、ダスト連続波のスペクトラル・インデックスを求め、ダスト粒子の成長の可能性についても議論を行う準備を進めている。このようなeDiskのデータやフォローアップ観測のデータを用いた研究が、少なくとも数年は続くだろう。eDiskプログラムの次の段階としては、eDiskやDSHARPのような観測をもっと大がかりに進め、より統計的に有意な議論を行う必要がある。できれば、領域を絞ってもよいので、コンプリートなサーベイを行いたい。また、アルマ望遠鏡の次の段階としては、

ngVLA の活躍が期待される。ngVLA では波長3ミリから7ミリで光学的により薄いと考えられるダスト連続波を、非常に高い空間分解能で観測することが可能となる。これらの研究を通して、惑星系形成の最初期段階の理解が大きく進むことに期待したい。

謝 辞

ここに記述された eDisk の成果は、eDisk コラボレーションにより得られたものです。また、新型コロナウイルスを乗り越えて観測を遂行した、合同アルマ観測所職員の多大なる努力に感謝します。この原稿を執筆するにあたっては、eDisk コラボレーションのメンバーでもある、相川祐理さん、高桑繁久さん、富田賢吾さんに読んでいただきコメントをいただきました。

参考文献

- [1] ALMA Partnership, et al., 2015, ApJ, 808, L3
 [2] Andrews, S. M., et al., 2018, ApJ, 869, L41
 [3] Long, F., et al., 2019, ApJ, 882, 49
 [4] Cieza, L. A., et al., 2021, MNRAS, 501, 2934
 [5] Benisty, M., et al., 2021, ApJ, 916, L2
 [6] Pinte, C., et al., 2023, Astron. Soc. Pacific Conf. Ser., 534, 645
 [7] Tychoniec, L., et al., 2020, A&A, 640, A19
 [8] Miotello, A., et al., 2023, Astron. Soc. Pacific Conf. Ser., 534, 501
 [9] Terebey, S., et al., 1984, ApJ, 286, 529
 [10] Ohashi, N., et al., 1997, ApJ, 475, 211
 [11] Momose, M., et al., 1998, ApJ, 504, 314
 [12] Mellon, R. R., & Li, Z.-Y., 2008, ApJ, 681, 1356
 [13] Ohashi, N., et al., 1997b, ApJ, 488, 317
 [14] Yen, H.-W., et al., 2011, ApJ, 742, 57
 [15] Yen, H.-W., et al., 2013, ApJ, 772, 22
 [16] Ohashi, N., et al., 2014, ApJ, 796, 131
 [17] Aso, Y., et al., 2017, ApJ, 849, 56
 [18] Tobin, J. J., et al., 2012, Nature, 492, 83
 [19] Sheehan, P. D., & Eisner, J. A., 2017, ApJ, 840, L12
 [20] Ohashi, N., et al., 2023, ApJ, 951, 8
 [21] Lin, Z.-Y. D., et al., 2023, ApJ, 951, 9
 [22] van't Hoff, M. L. R., et al., 2023, ApJ, 951, 10
 [23] Yamato, Y., et al., 2023, ApJ, 951, 11
 [24] Sai, J., et al., 2023, ApJ, 954, 67
 [25] Aso, Y., et al., 2023, ApJ, 954, 101
 [26] Kido, M., et al., 2023, ApJ, 953, 190
 [27] Sharma, R., et al., 2023, ApJ, 954, 69
 [28] Thieme, T. J., et al., 2023, ApJ, 958, 60
 [29] Flores, C., et al., 2023, ApJ, 958, 98
 [30] Narayanan, S., et al., 2023, ApJ, 958, 20
 [31] Encalada, F. J., et al., 2023, ApJ, submitted
 [32] Gavino, S., et al., 2023, ApJ, submitted
 [33] Takakuwa, S., et al., 2023, ApJ, submitted
 [34] Segura-Cox, D. M., et al., 2020, Nature, 586, 228
 [35] Sheehan, P. D., et al., 2022, ApJ, 934, 95
 [36] Aso, Y., & Sai, J., 2023, arXiv e-prints, arXiv:2311.07988

Proving the Earliest Stage of Planet Formation

Nagayoshi OHASHI

Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics, 11F of Astronomy-Mathematics Building, AS/NTU No. 1, Sec. 4, Roosevelt Rd, Taipei 10617, Taiwan, R.O.C.

Abstract: Thanks to the great success of ALMA, our understanding of planet formation has advanced dramatically over the last 10 years. As a result, the conventional picture of planet formation is being revised. One of such revisions is “when planets are formed”. Recent research suggested that planet formation might already begin in disks around protostars in earlier phases of star formation. In this article, I briefly review studies on disks around protostars conducted over the last 10 years, and then describe the ALMA large program “Early Planet Formation in Embedded Disks (eDisk)” to observe the earliest stage of planet formation, including its overview and initial results.