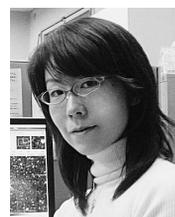


TMTによるサイエンス—星・惑星形成

深川 美里

〈大阪大学大学院理学研究科 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-1〉

e-mail: misato@iral.ess.sci.osaka-u.ac.jp



星と惑星の誕生の過程には、未解明の点が多く残されている。星形成分野における重要課題の一つは、初期質量関数の起源の理解である。TMTを用いれば、銀河系内の遠方領域や系外銀河において若い星団の個々の星を分離できるようになり、さまざまな星形成環境下での関数の測定が可能になる。大質量星と褐色矮星・惑星質量天体の形成に関する理解も進むはずである。惑星形成分野では、原始惑星系円盤の10 AU以内（ハビタブルゾーンを含む）の詳細観測が、TMTにより初めて本格的に進むと考えられる。例えば近・中間赤外域での高分散分光等により、円盤と相互作用しながら成長しつつある惑星の様子が見えてくると期待される。また、水（氷）や有機分子などの惑星の材料物質に関し、その化学組成や円盤における空間分布が多数の天体について得られるだろう。

1. 星と惑星の誕生

星の誕生と進化は、宇宙・銀河の化学進化と相互に密接に関係する。同時に、星が生まれる際の副産物として、星間物質を原材料とした原始惑星系円盤ができ、おそらく惑星が誕生し、生命が発生することもあるかもしれない。そのように重要な現象でありながら、星生成率（単位時間あたりに生まれる星々の総量）や星の質量が何によって決まるのかといった根本的な問題は、未解明のまま残されている¹⁾。惑星の形成ともなると、観測データがさらに不足していることも手伝って、その過程の理解からはほど遠いと言って差し支えないだろう。しかし新しいデータは次々ともたらされ、速いスピードで知識の更新を迫られる状況にある。TMT稼働までの間にどのような進展があるのかの想像も難しい。未開拓、かつ魅力的な分野である。

TMTはこれらの分野において、どのような貢献を果たす、あるいは果たして欲しいだろうか。TMT国際サイエンス検討チーム（International

Science Development Teams; ISDTs)の星・惑星形成グループでは、重要な科学的課題としてどのようなものがあるか（自分たちが何をやりたいか）について議論を始めたところである。具体的には、まずは2007年発行のTMTで取り組むべき課題をまとめた文書（Detailed Science Case; DSC）の改訂を行っている（ちなみにこの2007年版には、時代遅れに感じられる記述が散見され、それ自体はたいへんほっとする話である）。DSCの2014年版で重視したい課題として挙げられているのが、星の初期質量関数の起源と、原始惑星系円盤の内側、親星から約10 AU以内における物理・化学的性質の理解である。本稿では、その内容をかいつまんで紹介する。なお、筆者以外に、次のISDTメンバーの検討によるものであることを記しておきたい。Jessica R. Lu (University of Hawaii IfA), Babar Ali (IPAC), Adam J. Burgasser (UCSD), Richard de Grijs (KIAA Peking University), Carol A. Grady (Eureka Scientific, NASA GSFC), Priya Hasan (Muffakham Jah College of Engineering and Technology), Gregory J. Herczeg

(KIAA Peking University), 本田充彦 (神奈川県大学), Quinn M. Konopacky (Dunlap Institute), Di Li (NAOC), 武藤恭之 (工学院大学), Joan R. Najita (NOAO), Devendra K. Ojha (TIFR), 岡本美子 (茨城大学), Deborah L. Padgett (NASA GSFC), Klaus M. Pontoppidan (STScI), Matthew J. Richter (UC Davis), Jonathan C. Tan (University of Florida).

2. 星 形 成

星 (星団) 形成を理解し, それを正確に予測できるモデルを構築することは, 銀河形成・進化をはじめとするさまざまな分野の研究にとって非常に重要である. そのためには, 統計的に十分で, かつなるべく不定性の少ない解析によって, 観測的な制限を得ることが必須となる. その際の理想的な観測対象が, 年齢数百万年未満の若い星団である. 質量や年齢の見積りに不定性が伴うものの, 誕生しつつある, もしくは生まれて間もない状態を直接観測できる (図1).

TMTがもたらす高い解像度を考えると, その得意とするところは, 星団の個々の星を空間的に分解することだろう. つまり取り組むべきテーマとして「星の重さは何によって決まるか」がまず挙がってくる. どの重さの星がどのくらいの割合で生まれるかを示すのが, 初期質量関数 (Initial Mass Function; IMF) である. サイエンス検討グループのメンバーの言葉を借りれば, 『IMFの起源は, 天体物理や天文学に携わっている者なら, 誰しも一度は興味をもつ問題』である. 現在認識されている観測的問題は, 特に太陽質量程度以下までの広い質量範囲にわたる IMF が, 主に銀河系内の太陽近傍 (<1 kpc) でしか調べられていないことである. また, IMFの両端, つまり非常に重い星と非常に軽い天体については統計が十分でなく, 連星系を分離できていない可能性も残る. 次節以降で述べるように, TMTはこれらの問題を大きく改善できる.

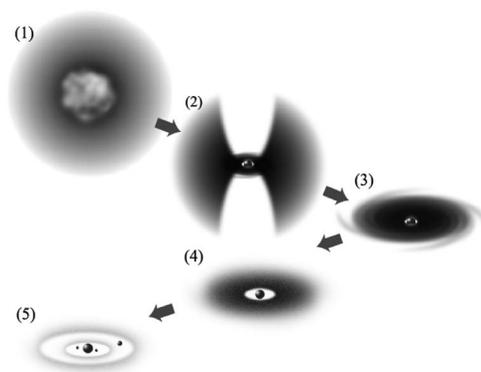


図1 主系列に至るまでの, 星周構造の進化の模式図. このおおまかな描像は, 太陽程度もしくはそれより軽い質量をもつ低質量星に対して得られている. 分子雲コアの収縮で星が誕生し (1), 原始星の周囲に原始惑星系円盤が形成される (2). 周囲を取り巻いていたエンベロープが晴れ上がり, 星が可視光で見え, 円盤が観測しやすくなる (年齢100万年程度) (3). 円盤中の小さいダストが微惑星形成等によって失われるにつれ, 円盤が光学的に透明になる (年齢100-1,000万年) (4). 若い主系列星の周囲に, 惑星と残存するダスト (デブリ円盤) や小天体からなる系ができあがる (5).

なお, すでに稼働を始めているサブミリ・ミリ波干渉計 ALMA は, 分子雲コアや原始星といった進化のより初期の情報を, TMTと似たような空間分解能でもたらすだろう. つまり, TMTとALMAによって, 星形成のスタート地点から, ガスが晴れ, 星団内で星々間の力学的相互作用がある程度進んだ状態までを広く追えることになる. 例えばALMAでコアの初期質量関数, TMTで星の初期質量関数がわかり, それらを比較できる. このほかにも以下に述べるすべての課題について, ALMAの結果を組み合わせた議論はたいへん有用となるはずである.

2.1 多様な環境下における初期質量関数

これまでの主に銀河系内の若い星団に対する観測からは, IMFはどこで測定しても大局的にはほぼ同じ形であることが示されている. つまり, 0.1-1太陽質量程度の範囲に特徴的なピークをも

ち、大質量側へ向かって一定の傾きを示す（いわゆる Salpeter の IMF²⁾。しかし、銀河系の中心や極端に（桁で）金属量の低い環境では、この普遍的な形からのずれも示唆されている。では、何が IMF を決めているのだろうか。これを調べる方法の一つが、考えられる要因をパラメーターとみなし、それらをとにかく大きく振ってみる、というものである。金属量、分子雲のガス密度、輻射場強度や星団の星密度などが、これらパラメーターにあたる。銀河系内であっても、太陽から遠距離にある星団を含めて考えればさまざまな星形成環境が存在する。さらに系外へ目を向けると、確保できるパラメーターの範囲がぐんと広がる。

TMT を用いれば、距離が遠く（見かけ上）混み合った若い星団について、星々を空間的に分離し、できる限り低質量側までの、あるいは特徴的なピークを含む IMF を構築できるだろう。銀河系内の若い（～100 万年）星団を例にとると、数 kpc という距離にあっても、褐色矮星や、減光の程度によっては何と惑星質量天体まで検出できるようになる（図2）。また、IMF 構築の際に星の質量や年齢をより正確に見積もるには分光データが不可欠である。現在の8-10メートル級望遠鏡で中分散のスペクトルを取得しようとする10太陽質量程度までしか感度がない領域でも（例えば銀河系中心）、TMT の第一期装置 IRIS を用いれば、1太陽質量程度以下まで分光できるようになる³⁾（図3）。

さらに系外の近傍銀河であれば（銀河全体で）太陽の半分以下の金属量を示すものも観測対象として視野に入ってくる。そして、現在銀河系内で行われていると同様の測定が、それら系外で可能になる。残念な点を正直に挙げるとすれば、大小マゼラン雲は南天にあり TMT で観測できないのだが、それらの徹底的なマッピングは例えば E-ELT に任せ、TMT では M31 (780 kpc), M33 (840 kpc), NGC 6822 (490 kpc), IC 10 (950 pc) などを対象とした観測ができるだろう。例えば

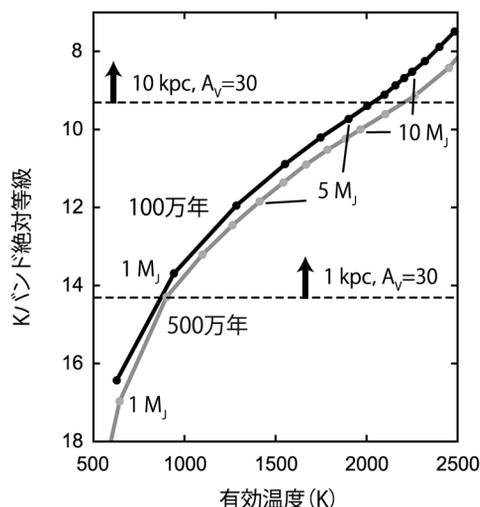


図2 IRIS 撮像モードを使い、Kバンドで30分積分したときにシグナル・ノイズ比5で検出できる天体の質量 (M_J は木星質量)。年齢100万年と500万年について、星と同様の形成プロセスを仮定した光度進化モデルを示してある⁴⁾。減光 (A_V) を30等級と仮定すると、距離1 kpcでは1-5 M_J (温度1,000 K未滿) の天体、10 kpcでも13 M_J 以下の惑星質量天体を検出できる。

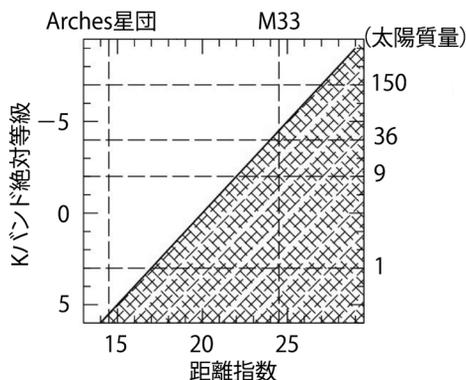


図3 IRIS で波長分解能4,000の面分光を行う場合について、3時間の積分によりシグナル・ノイズ比50が得られるKバンドの明るさを、距離指数に対して示してある。網掛け部分ではシグナル・ノイズ比が50を下回る。星の混み具合と減光は考慮していないが、減光は距離が遠くなることと同等の効果をもたらす。銀河系中心 (Arches 星団) の距離では太陽質量程度、M33では40太陽質量程度の星についてスペクトルが得られる。(TMT DSC 2007, 2014から引用。)

M33で星の混み具合による検出限界を見積ると、星団の星密度が銀河系中心のArches星団と同程度であると仮定した場合、有効半径（内側の光度が星団の全光度の約半分）の5倍程度離れた星団の裾野において、太陽質量程度の星を10%の測光精度で観測できる。M33の距離にある太陽質量程度の星は、IRISを使ったKバンドにおける1時間積分の撮像により検出可能である。

2.2 連星系

星の大部分は、連星系をなす。また、主星の重さや星団の密度といった形成環境に対し、連星系の性質がどう依存するかを調べることで、星形成モデルを検証できる。これまでの視線速度や撮像観測から、大質量星ではほぼ100%、褐色矮星では20%程度が連星であることや、若いほど連星系の割合が大きいこと、また、非常に軽い星を除いて（およそ0.3太陽質量以上）、質量比は主星の質量によらないことなどがわかってきた⁵⁾。しかし例えば周期およそ10,000日程度以上の連星は分光で調べにくく、逆に射影離角約0.05秒角以下になると撮像で空間分解しにくいという問題は残っている。

TMTによる回折限界の撮像であれば、このように観測が進んでいない範囲に手が届く。また、分光連星の一部を直接分解することもできるため、アストロメトリと組み合わせると、連星系のそれぞれの星の質量を力学的に求めることが可能となるだろう。これにより、星の質量と年齢の見積りに使用される進化モデルのキャリブレーションが、十分な統計で行えるようになるはずである。さらに、TMTの高コントラスト装置を用いれば、大質量星に付随する太陽質量未満の伴星といった、質量比の大きい連星も観測できるようになる。

これまでの若い連星系の観測は、主に近傍（約140 pc）の星形成領域を対象として行われてきたが、星形成環境が連星形成にどう影響するかを知るには、遠方の大質量星形成領域において調査を行うことも必要になる。TMTを用いた高解像度

撮像によって距離数kpcの星団を観測対象にできるほか、その高感度を生かし、より軽い星について分光連星のサーベイができるようになる。

なお、連星系形成を理解するには、なるべく誕生直後の連星系を観測するのが理想的であるが、若いほどダストに深く埋もれているため、観測が難しい。TMTの中間赤外線装置（MICHI）を使えば、近傍（140 pc）星形成領域にある年齢10万年程度の系について、20 AU以下しか離れていない連星を分解できる。また、高分散分光の機能を用いれば、非常に近接した連星の統計が得られると期待できる。

2.3 大質量星の形成

大質量星は、その強烈な星風や超新星爆発により、銀河から原始惑星系円盤に至るまで、周辺の物質やさまざまな構造に物理・化学的影響を及ぼす。しかし、大質量星の形成過程となると、低質量星に比べて理解がかなり遅れている。理論的には、大質量星がその質量を得る方法として、円盤からの質量降着（基本的には太陽質量程度の星と同様）や、星団中心における周辺の天体とのガスの奪い合いなどが議論されているが、何しろ観測的な制約が不十分である。大質量星は進化のスピードが速く、周囲のガスが降り積もっている最中に主系列に達するため、大きな減光が邪魔になると同時に、進化の過程を追うことが難しいからである。また、IMFからわかるように数が少なく、もともと統計的に十分なサンプルを確保しにくいという問題もある。さらに、常に集団の中で誕生するが、われわれからの距離が遠いため、近く別の星や星周構造を見分けるのが困難である。そのため、とにかくも、若い大質量星の周辺を空間的・力学的に分解し、エンベロープ、降着円盤、アウトフローの性質、伴星の有無や周縁での低質量星コアの数密度などについてデータを得ることが必要である⁶⁾。

上述の観測的な困難を考えると、赤外域での高解像度観測が必須となり、ここにTMTの活躍す

る場がある。銀河系内の大質量原始星は、典型的に距離3 kpc程度に位置する。つまり1,000 AU程度の大きさの構造は0.3秒角に相当するため、中間赤外域でもTMTでその詳細を調べることができる。特に赤外での分光観測には、物質組成や運動がわかるという利点がある。低質量星の観測でも用いられる近赤外の水素分子やCO、中間赤外のシリケートフィーチャーに加え、2ミクロン帯にあるBr γ 、He I、12.8ミクロンの[Ne II]は、周囲を電離し始めた大質量原始星を調べるのに有用なラインである。したがってTMTのIRIS面分光やMICHUによる高分散（波長分解能約3万以上）分光が重要となる。例えば、電離ガスがアウトフローと星への降着のどちら（または両方）に付随しているのかや、アウトフローや降着が大質量原始星に対しどのくらい対称に分布しているのかといった情報は、星の形成・フィードバック機構の理解に有用であると考えられる。

2.4 褐色矮星、惑星質量天体の形成

IMFの逆の端、低質量側になると、惑星との関連が気になってくる。実際、星形成領域の観測から、親星をもたない惑星質量天体の存在が知られている。惑星の定義は、現時点では曖昧にせざるをえない部分がある。つまり、形成過程で分類したくても、それが観測からわからないため、質量で分類されることが多い（質量の見積にも、形成過程に応じて大きな不定性がつきまとうのではあるが）。その際は、重水素の核融合反応が起こるかどうかに基づき、およそ13木星質量が褐色矮星と惑星との境界とされる。しかし個々の天体に着目すれば、親星をもつ惑星であっても、星から遠く離れており質量が大きいなら、連星系形成のように分子雲の分裂で生じたのかもしれない。逆に孤立して存在していても、原始惑星系円盤から生まれたものの、他の惑星との重力相互作用で系の外に弾き飛ばされた可能性もある。いずれにしても、天体物理学的な興味は、このように非常に軽い天体がどのようにして誕生したのかということ

ろにある。分子雲コアの収縮で誕生するならば、収縮できる限界の密度（形成される天体の質量）が存在するはずで、それがIMFの低質量側の終端やスロープの変化として観測される可能性がある。また、低質量側は星団の密度など、外的な作用を受けやすいとも言え、したがってIMFをさまざまな環境下で測定することにも意味があるだろう。

最近の近傍（<500 pc）の星団を対象とした観測では、約6木星質量程度までのIMFが得られており「端」はまだ明確に確認されていない⁷⁾。ただしこのあたりの質量においても、まだ統計の改善や、注意深い解析を進める必要がある。今後の観測には大きく二つの方向性があり、一つは褐色矮星や比較的重い惑星質量天体について、特に分光の統計を改善すること、もう一つは、木星程度かそれ以下の質量の天体まで検出できるような、高い感度の観測を行うことである。

TMTを用いれば、分光観測によって質量と年齢の不定性を低減しながら、多くの星団でIMFの低質量側の測定が可能になると期待できる。一方、より低質量側を追及するという点に関しても、軽い天体の検出そのものに関してはTMTの高感度が役に立つことは明らかである（図2）。ただし、メンバー星がまばらに存在する近傍（<200 pc）領域を観測対象とする場合は、別の広視野サーベイに適した望遠鏡・装置で候補天体を検出しておき、TMTでじっくり分光を行うという役割分担が適当ではないかと考えられる。そして表面重力や組成といった大気の特徴を、親星をもつ惑星と比較するのがおもしろい。

3. 惑星形成

原始惑星系円盤は、ガスとダストからなる平坦な回転構造であり、星形成の過程で主に角運動量保存により作られる。円盤物質は惑星の材料となり、生まれたばかりの惑星との重力相互作用によってその軌道の進化をコントロールする。年齢

100–1,000万年の間に円盤ガスは散逸するが、その後（デブリ円盤期）も惑星や微惑星等の中での重力散乱や衝突により、激しい軌道変化や岩石惑星の成長が起これると考えられている。

この研究分野の最終目標は「どのような惑星が、いつ、どこでどのように誕生するか」を理解することである。この問いは多くの観測・理論的アプローチを包含しており、いくらでも細分化、あるいは言い換えることができる。例えば理論研究者いわく、「惑星は、母胎である円盤とどう相互に影響を及ぼし合い、成長・軌道進化するのか」について定量的な観測的制限を得ることが、惑星形成理論の大きな前進をもたらす。他方、観測者はその経験から、既存の装置で調べにくいパラメーター領域には常に新しい（予想外の）情報があることを知っている。そのため、例えばあまり手のついていない「星から1 AU付近で、円盤の物理・化学的性質はどうなっているのか」を追究したいという声は多い。また、これまで比較的詳しく調べられている円盤が、近傍（<200 pc）にあるごく一部の明るいものに限られているという事実を考えると、「原始惑星系円盤の多様性は何に起因し、惑星系の多様性とどうリンクするのか」を、より多くの円盤を対象として調べることも

も重要となる。

星形成の節で述べたさまざまな星形成環境下での近・中間赤外観測は、円盤寿命やおおまかな円盤構造についての環境依存性の情報も、同時にもたらす。それ自体がTMTの重要な貢献となることは確かだ。ただ、惑星形成に対する理解の現状を考えると、おそらく鍵となるのは、原始惑星系円盤の各場所で、惑星誕生の初期条件となる温度・密度分布や物質の組成を調べたり、生まれつつある惑星を捉えたりする観測であろう。円盤の大きさは典型的に100 AUで、近傍の星形成領域の距離は140 pcであるから、まず必須なのは、高い解像度である。また、これまでの系外惑星本体の撮像観測は、中心の親星からおよそ30 AU以遠には巨大惑星がほとんど存在しないことを示唆している。誕生時の場所から内側に移動する可能性はもちろんあるが、惑星形成の議論にあたっては、太陽系の惑星が存在しているような内側領域（～10 AU内）を詳しく調べる観測が、いずれにしても必要となる。そしてここには、ハビタブルゾーンも含まれる。典型的な円盤の温度分布等を考えると、近・中間赤外域は、まさにこの内側を調べるのに適した波長域である（図4）。

TMTで補償光学により回折限界程度の解像度

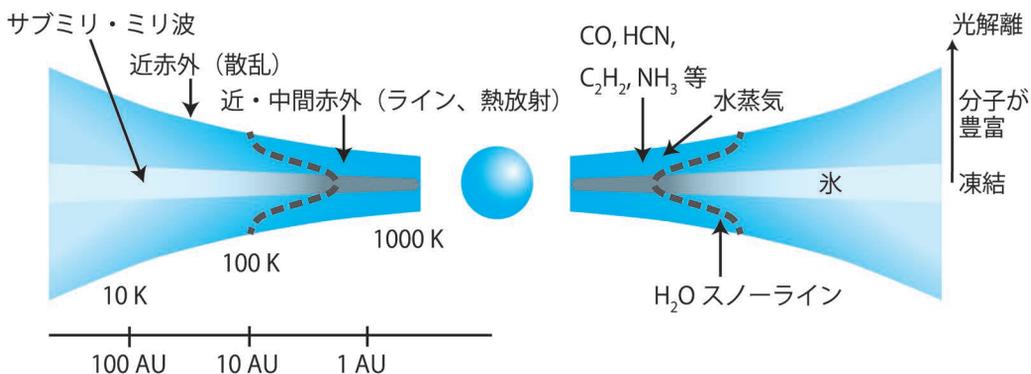


図4 原始惑星系円盤の模式図。ALMAは赤道面付近や星から離れた低温の領域を調べるのに適している。一方、TMTは円盤上層や、星からおよそ10 AU以内の高温領域の情報をもたらす。太陽程度かそれより軽い星の場合、スノーラインやハビタブルゾーンは10 AU以内に存在すると考えられる。TMTにより、スノーラインのすぐ外側での巨大ガス惑星成長や地球型惑星の形成活動の様子、また、氷・水蒸気や有機分子の空間分布などが明らかになるだろう。

が得られるとすると、それは距離 140 pc の円盤に対して 1 ミクロンで約 1 AU (10 ミクロンで約 10 AU) であり、30 AU 内の構造を撮像で直接分解することが可能だ。また、近・中間赤外域には、CO や水蒸気をはじめ、HCN, C₂H₂, メタンなどの有機分子が出すラインも豊富に見られる。もし 5 ミクロンから中間赤外域で波長分解能 10 万 (速度分解能 3 km/s) の観測ができるなら、輝線のプロファイルを用いて (円盤がケプラー回転していることを利用し) 放射ガスの空間分布を力学的に分解できる。さらに、スペクトロ・アストロメトリーの手法を用い、回折限界未満の構造を調べられることも可能である⁸⁾。

TMT で最も重要視される観測の一つは、間違いなく系外惑星そのものの検出だろう (次記事に詳しく述べられている)。特に高コントラスト装置 (PFI, SEIT) の稼働後は、惑星検出数が増大する可能性がある。この、惑星と円盤とのリンクが議論できるようになる時期が待ち遠しくない研究者はいない。

なお、ALMA と、2018 年打ち上げ予定のアメリカの近・中間赤外スペース望遠鏡 James Webb Space Telescope (JWST) は、TMT とたいへん相補性が高い。TMT の稼働までに、ALMA によって原始惑星系円盤の理解は著しく前進するに違いない。しかし ALMA はサブミリ波干渉計であるから、得意とするのは円盤外側の冷たい領域の観測である (図 4)。JWST は感度や観測可能波長域の点で優れているが、TMT は解像度や (搭載されれば) 赤外高分散分光機能の点で上回るため、例えば JWST で検出された分子ガスが円盤内のどこに存在するかを TMT で特定するような観測ができるだろう。

3.1 惑星が作る円盤構造

誕生したばかりの惑星は、周囲の円盤物質との力学的相互作用によって、円盤内に特徴的な構造を作る。例えばガスが豊富に残る円盤中では、惑星の質量に応じて、惑星軌道に沿う溝 (ギャップ)

や、惑星付近を起点としたスパイラル構造が生じると理論的に予測されている。実際に、すばるなどの 8メートル級望遠鏡を用いたダスト散乱光をとらえる近赤外観測において、そのような構造が検出されている⁹⁾。ただし解像度は 10 AU 程度であり、中心星から数十 AU 以遠しか観測できていない。また、最近これら 8メートル級望遠鏡でいくつかの新しい高コントラスト装置が立ち上がりつつあるが、ほとんどの若い低質量星 (Tタウ型星) は、残念ながらそれらの補償光学装置で観測するには可視で暗すぎる。

惑星が作る構造としてスパイラル・アームを例にとると、その空間的な大きさはおおよそ円盤ガスのスケールハイト (鉛直方向の高さ) になる。すると、半径と高さの比が 0.1 の円盤について 30 AU に位置するスパイラルを見分けるには、距離が 140 pc ならば 0.01 秒角が欲しい、ということになる。これは TMT のような 30メートル級の望遠鏡口径と補償光学の組み合わせで、初めて実現できる。図 5 は、惑星をもつ円盤がダストによる近赤外線散乱光でどう見えるかをシミュレーションしたものであり、TMT を用いて 140 pc の円盤を撮像すると、星から約 10 AU の場所で 0.1 木星質量程度の惑星が作るギャップやスパイラル構造が見えてくるのがわかる。PFI や SEIT といった高コントラストコロナグラフ装置があれば、内側をより調べやすくなる。また、さらに星の近傍を探るには、星自身が暗くなる中間赤外線円盤ダストの熱放射を捉える方法がある。TMT ならば 10 ミクロン帯の回折限界は約 0.07 秒角であり、経験的にその 3分の1程度のサイズまで議論可能だと思うと、0.02 秒角、つまり 140 pc で 3 AU 以上の空間スケールをもつリングの存在や非軸対称性がわかるかもしれない。

惑星由来の構造であれば、惑星の軌道運動に従った時間変化が期待できることから、時間変動を追う観測もおもしろい。例えば検出されたスパイラル・アームが惑星の作る密度波ならば、アー

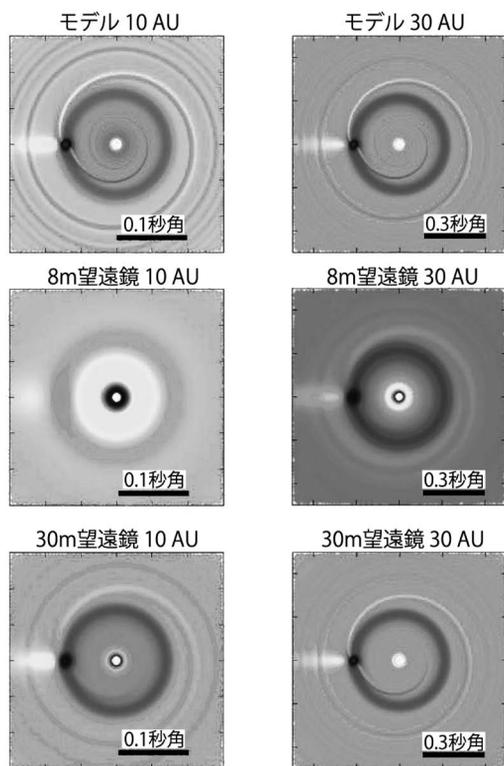


図5 0.1木星質量の惑星が原始惑星系円盤に作るギャップやスパイラルのモデル画像(武藤らによる計算, TMT DSC 2014から引用). 波長1.6ミクロンの円盤ダストによる散乱光強度を表している. 円盤は鉛直方向と動径方向のサイズ比が0.05のものを仮定し, 構造は2次元流体力学シミュレーションで計算してある. 天体までの距離は140 pcと仮定している. 左図は10 AU, 右は30 AUに惑星が存在する場合で, 中段の2図は8メートル, 下段は30メートル望遠鏡の回折限界像と同じ半値全幅をもつガウス関数を畳み込んだである.

ムはその場所のケプラー速度ではなく, 惑星が存在する場所でのケプラー速度で回転するはずである. TMTで円盤のより内側, すなわちより速く回転する領域が高い解像度で見えるようになると, 人間が十分我慢できる時間間隔(10 AUのケプラー回転を見分けるためには数年)でモニター観測を行えるようになる.

3.2 惑星の成長

原始惑星系円盤のガスの運動は, 重力源が中心

星のみであれば(ほぼ)ケプラー回転である. ところが重い惑星が円盤内で誕生すると, 惑星の付近ではケプラー回転からのずれや, ずれの時間変化が起こる可能性がある. 例えば, 円盤からの比較的強いガス輝線として知られる4.7ミクロンのCO輝線を利用し, なるべく高分散(~ 3 km/s)の分光を行えば, ケプラー回転からのずれが検出できると予測する計算結果もある¹⁰⁾. また, 惑星自身の周りに, その衛星の元となる周惑星円盤が形成され, この円盤を通した惑星への質量降着で水素原子の再結合線放射が生じるであろうことも予想されている¹¹⁾. これら, ケプラー速度からのずれや, 惑星への降着に着目した観測はすでに既存の大口径望遠鏡やALMAで始まっているが, 感度や解像度の点から, TMTで本格的に進むのではないかと考えられる. つまり, TMTは広帯域フィルタを使った撮像で惑星からの熱放射や反射を検出するだけでなく, 若い惑星が円盤ガスを集めて成長しつつある様子も調べることができる.

ガス惑星形成のシミュレーションの結果として, 論文や研究会で頻繁に登場する図がある. 円盤と, 生まれたての1個の巨大惑星と, その軌道に沿った円盤ギャップ, そしてギャップを横切る惑星へのガス降着を示すものである. しかしこの構図を観測で明確に捉えた例は, まだない. TMT(場合によってはALMAとの組み合わせ)でそのようなスナップショットが現実存在することがわかったなら, ギャップの幅・深さと惑星へのガス降着率の測定により, 角運動量輸送に関する制限が得られることになり, 惑星の最終的な質量や軌道進化を予言できるようになると期待される.

円盤ガスの散逸後も, 岩石惑星や衛星の形成を観測できる可能性がある. 最近のスペース赤外線衛星による赤外超過の測定から, 1-10 AUに暖かいダスト(太陽系における小惑星帯に相当)をもつ主系列星が多数存在することがわかっており, 天体衝突, つまり地球型惑星形成・成長の証拠で

はないかと考えられている。若い主系列星であれば、近傍星形成領域よりもわれわれに近い場合、2ミクロンや10ミクロン帯で星からおよそ1 AUの領域を空間的に分解することができる。ダスト帯の形状等から、惑星の存在や惑星形成活動に関する情報が得られるだろう。

3.3 スノーライン

円盤の温度は、主に中心星からの輻射（と、星近傍の赤道面付近については星への粘性降着）が加熱源となって決まる。つまりごく単純には、星に近いほど、また星からの輻射を直接受け取れる円盤上層ほど、温度が高い。このような温度勾配の中で、ガスとして存在できる温度の場所と、低温で氷になる場所との境界ができ、これをスノーライン（雪線）と呼ぶ。COやCO₂に対しても定義できるが、より重要かもしれないのは、それらよりも内側にスノーラインをもつH₂Oだろう。惑星形成の標準理論と言われてきたコア集積モデルでは、スノーラインのすぐ外側であれば固体の絶対量が多く、巨大惑星のコアを作りやすい。ただし円盤の温度分布は、円盤の進化とともに変わる。例えば太陽系のスノーラインは3 AU程度に位置するが、若く、ダストが豊富な原始惑星系円盤のスノーラインは、もっと内側（<1 AU）に位置する可能性がある¹²⁾。そのため、さまざまな進化段階の円盤でスノーラインを見いだすことは、惑星形成だけでなく、地球型惑星への水の供給という観点からも重視される課題である。

近・中間赤外域では、高分散分光により円盤上層の水蒸気の空間分布を調べ、モデリングを介して赤道面上のスノーラインの位置を推定することができる。現在、そのような試みが行われているのは近傍のごくわずかの円盤にすぎず、TMTでサンプル数を大幅に増やせるだろう。また、ダストの散乱光に対して円盤の各場所で低分散スペクトルを取得し、3.1ミクロンの氷の吸収が存在するかどうかを調べるといった方法もある¹³⁾。光学的に厚い原始惑星系円盤であれば、散乱光は円盤

上層で発生していると考えられ、この場合は赤道面ではなく表層のスノーラインを求められる。

3.4 有機分子

炭素、水素、酸素、窒素、リン、硫黄という（われわれが知る）生命に必要な元素がどのくらいの量、どのように惑星にもたらされるかは、原始惑星系円盤の化学進化や、円盤内での物質の輸送と深く関わるはずである。例えば、スノーラインの外側では酸素の多くが氷として固体のダストや微惑星等に取り込まれるため、気相のC/O比が円盤全体の平均より高くなる。一方で、円盤のガスは徐々に星へ向かって降り、また、固体はその大きさ（ダスト、微惑星、原始惑星）に応じて、円盤ガス等と相互作用しながら円盤内を移動する。スノーラインの外側から内側にやってくる固体があれば、ラインをまたいだ時点で氷が蒸発して内側のガスに酸素を供給し、そこでのC/O比、したがって化学反応や、結果としての有機分子量等に影響を与える可能性がある¹⁴⁾。

星から1-10 AUの暖かい領域にはさまざまな有機分子が存在すると考えられ、実際、スピッツァー宇宙望遠鏡などによって、低質量星の複数の円盤からHCN、C₂H₂などの分子が検出されている¹⁵⁾。（ちなみに、多くのラインは地上からでも検出可能である。）この暖かい領域のガスは、スノーラインを越えてきた氷が気化したばかりの状態かもしれない。つまり、それを観測することで、惑星形成領域の化学組成と同時に、ダスト表面における分子生成反応の検証に有用な情報も得られると期待される。

TMTを使った波長3-14ミクロンの中・高分散分光は、この分野の進展に大きく寄与するだろう。TMTは従来の地上望遠鏡に比べて感度が高いため、その利点として、まずは観測対象となる天体数が飛躍的に増えることが挙げられる。実はスピッツァーで検出されている近傍星形成領域の若い星のうち、既存の装置で10ミクロン帯の高分散分光ができる明るさをもつものは、わずか一

握りである。しかしTMTであれば、100–1,000個のさまざまなスペクトル型をもつ天体を観測できるようになる。さらに、感度が上がれば、これまで検出されたことのない分子種が見つかる可能性がある。また、単に検出するだけでなく、波長分解能10万程度の高分散分光によって輝線の出ている場所を力学的に分解し、数AU（あるいはそれ未満）のスケールで有機分子の空間分布を明らかにできるだろう。

参考文献

- 1) Krumholz M. R., 2014, arXiv: 1402.0867
- 2) Bastian N., Covey K. R., Meyer M. R., 2010, ARA&A 48, 339
- 3) Lu J. R., et al., 2013, ApJ 764, 155
- 4) Baraffe I., et al., 2003, A&A 402, 701
- 5) Duchene G., Kraus A., 2013, ARA&A 51, 269
- 6) Tan J. C., et al., 2014, Protostars & Planets VI, arXiv: 1402.0919
- 7) Peña Ramírez, K., et al., 2012, ApJ 754, 30
- 8) Pontoppidan K. M., et al., 2008, ApJ 684, 1323
- 9) Muto T., et al., 2012, ApJL 748, L22
- 10) Regály Z., Király S., Kiss L. L., 2014, ApJL 785, L31
- 11) Zhou Y., et al., 2014, ApJL 783, L17
- 12) Garaud P., Lin D. N. C., 2007, ApJ 654, 606
- 13) Honda M., et al., 2009, ApJL 690, L110
- 14) Najita J. R., et al., 2013, ApJ 766, 134
- 15) Pascucci I., et al., 2013, ApJ 779, 178

Star and Planet Formation Science with TMT

Misato FUKAGAWA

Department of Earth and Space Science, Graduate School of Science, Osaka University, 1-1 Machikaneya, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

Abstract: One of the central questions on star formation is the origin of the stellar IMF. TMT will enable us to spatially resolve individual stars in distant young clusters not only in the Milky Way but also in the Local Group galaxies, providing the IMFs in a wide range of environments. In the field of planet formation, significant progress is expected with TMT for the inner 10 AU of proto-planetary disks where the habitable zones reside. TMT will reveal growing planets interacting with disks as well as the spatial distribution and composition of disk material including water and organic molecules.