

太陽系外の惑星形成はどこまでわかったか？

(1) 続く観測天文学の挑戦

長谷川 哲夫*

1. はじめに

自らの過去を振り返り未来を展望することは、人類の最も基本的な知的活動である。そのとき扱う時間軸の範囲の広さは、おそらくその文化の進展の程度を示すパラメーターのひとつであろう。私たちは自分の経験を省み、家系をさかのぼって祖先の人々と自分とのつながりを感じ、あるいは歴史を学んでその中に現代を位置づけようとする。また古生物の化石に生命の誕生と進化を追い、さらに地層の奥深くたまたみ込まれた情報から原始地球の姿を再構築しようとする。いまから約46億年前と言われる地球の誕生は、また太陽そして太陽系の誕生の時でもあった。こうして私たちの認識の時間軸は宇宙の始まりと進化という大きな時間の流れに合流する。

1980年代に大きな展開をみせた星の誕生プロセスの観測・理論両面の研究は、太陽系の誕生という私たちの「個人的な」過去を銀河の中で次々に起こる星の誕生という一般的現象の中に位置づけようとしている。太陽という恒星のまわりに地球をはじめとする惑星系が誕生したことが、決して希なできごとや奇跡のたぐいでないことが、現代の観測および理論的研究によって明らかにされようとしている。本稿では、野辺山で展開されている電波観測を中心に、観測の現状を紹介したい。

2. 分子ガス円盤と双極分子流

1980年代の星生成研究においては、若い星の近くから吹き出す双極分子流とその星を取り巻く分子ガス円盤の研究が精力的に進められた。

若い星の周辺から秒速数10 kmの超音速（音速は典型的に0.1 km/sのオーダー）で分子ガスが吹き出しているらしいことに初めて気づいたのは、1976年オリオン星雲の電波スペクトル線を観測していたアメリカの天文学者たちである。当時この観測データをどう説明するかは学界の大きな謎であった。1980年代に入ると、オリオン KL 天体ほど高速ではないが、幅広い裾をひいたCO電波スペクトル線がいくつかの分子雲で観測されるようになった。それらは若い星が多数見つかる星生成領域にあり、たいてい分子雲に埋もれた赤外線天体の

方向に見つかったので、高速の分子ガスと星の誕生との間には何か関係がありそうに思われた。特に世界の研究者を驚かせたのは、おうし座の暗黒星雲 L1551 とケフェウス座A分子雲で相次いで発見された特異な速度構造であった。高速分子ガスは等方的に広がって行くのではなく、二方向に絞込まれた双極ジェットを形成していたのである。双極分子流と名付けられたこのような分子流の構造は、その後オリオン KL 天体をはじめとする他の天体でも続々発見された。

そのような時期に世界最高の分解能を持って登場したのが、野辺山宇宙電波観測所の45 m電波望遠鏡である。1982年から始まった45 m望遠鏡の共同利用観測では、国内外の研究者が競って星生成領域を観測してその隠された構造を描き出していった。なかでも星の誕生プロセスの解明に大きな方向付けを与えたのは、赤外線天体のまわりに発見された分子ガスの円盤である(図1)。1983年にオリオン KL とおうし座暗黒星雲 L1551 で相次いで発見された分子ガス円盤は、それぞれの天体とともに分子流を伴う誕生しつつある星の典型例であり、世界の研究者の注目を集めた。オリオン KL 天体は25ないし50太陽質量という大質量の星が誕生している場所であり、他方のL1551暗黒星雲中の赤外線星 IRS5は太陽と同程度の質量の星になると推定されている。その両方に分子ガス円盤が発見されたことは、誕生する星の質量にかかわらず、そのまわりに分子ガス円盤が存在し得ることを示している。

さらに研究者を驚かせたのは、どちらの円盤もゆっくりと回転していたことである。原始星から約1天文単位の距離で測定された回転速度は、オリオン KL 天体の場合1~2 km/s、L1551、IRS5の場合100~200 m/sである。この場所でこのスピードでは原始星の回りを一周するのに数十万年かかってしまうが、空間的な広がり観測限界以下になる原始星にごく近い場所では、回転ももっと早く、一周にかかる時間もずっと短いことが予想される。それは太陽系形成の理論において初めに原始太陽のまわりを回転していたとされる原始太陽系雲を連想させた。

ガス円盤と双極流をもつこのような軸対称の構造は、誕生しつつある星に共通して見られる普遍的な現象であるらしい。というのも、その後45 m望遠鏡や野辺山ミリ波干渉計、そして海外のミリ波、サブミリ波望遠鏡な

* 東大理 Tetsuo Hasegawa: Formation of Planetary Systems other than the Solar System (1) Observational Challenges

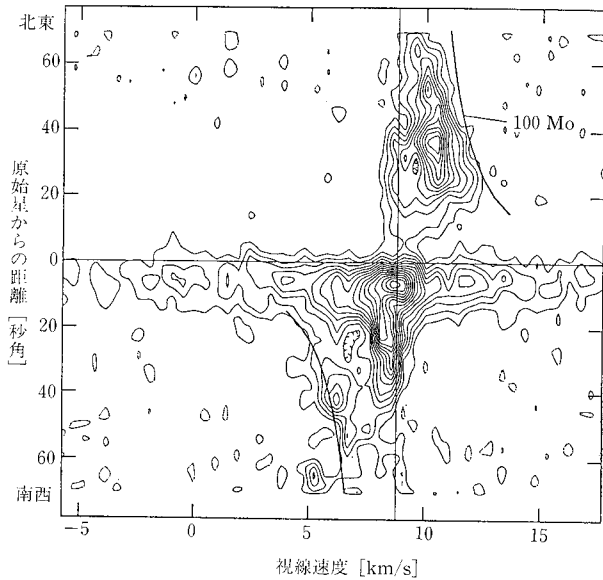
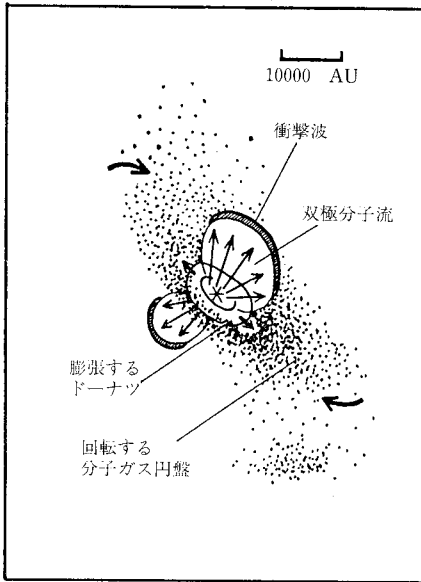


図 1 原始星オリオン KL のまわりの状況 (左; Hasegawa et al. 1984, Ap. J., 283, 117) と分子ガス円盤の回転を示す CS(J=1-0) 輝線の位置-速度図 (右; Murata 1991, PhD thesis).

どを使って精力的に観測が進められた数多くの星誕生の現場では、対称性の程度には差があるにせよ、このような軸対称性の片鱗が必ずと言ってよいほど見つかったのである。

3. 原始星の進化と分子ガスの散逸

このように、誕生しつつある星はゆっくりと回転する分子ガス円盤に囲まれ、その円盤から降り積もるガスで質量を増しながら育ってゆく。降り積もるガスが解放する重力エネルギーによって赤外線で見えるこの段階の星を原始星と呼ぶ。回転する分子ガス円盤から原始星へ降り積もるガスは、その角運動量によって原始星の近くに降着円盤を作る。遠赤外線連続スペクトルの観測結果から、この降着円盤は半径が 100 天文単位のオーダーであろうと推定される。それは外側の分子ガス円盤の半径に比べると、およそ 100 分の 1 の大きさになる。これこそ惑星系形成の場所、原始惑星系系雲と呼ぶべきものである。

原始星はその後、何らかの理由で質量降着のスピードを大きく落して T-タウリ型星になり、またまわりの巨大な分子ガス円盤は何らかの理由で散逸して、それまで分子ガスに埋もれていた原始星は、降着円盤を伴った古典的な T-タウリ型星として可視光でも観測されるようになる。

では、何が質量降着を止め、何が外側の分子ガス円盤を散逸させるのだろうか？

現在我々はこれらの問題に対する回答を模索している

段階である。質量は、(外側の)分子ガス円盤→降着円盤→原始星、という順に流れるから、分子ガス円盤の散逸が原始星への質量降着率をコントロールしているであろうことは想像に難くない。分子ガス雲の散逸の様子を調べるために、私たちは野辺山の 45 m 望遠鏡をおうし座の若い星々に向けて星のまわりの分子ガスの量を測定した (図 2)。原始星から T-タウリ型星への進化の指標の一つとされる中間赤外域の「色」(12 μ m と 25 μ m の強度比)と、測定された分子ガスの量とを比較すると、中間赤外で「赤く」可視光で見えない、大量の分子ガスを伴った星 (おそらく原始星) から、「青く」可視光でも見える、分子ガスの乏しい星 (T-タウリ星に近い) へ至る系列が浮かび上がった。これは、原始星から T-タウリ星への進化、特におそらく降着円盤の成長と、分子ガスの散逸が同時に進行することを示唆している。

では、散逸のメカニズムは何だろうか？ この間の答えもわかっていない。しかし、双極分子流に取り込まれて運び出される質量が原始星のまわりの分子雲コアの質量と同じオーダーになっていることは、分子流が重要な役割を果たすとする考えを支持するように思われる。

4. 期待される降着円盤の観測

それでは原始星を取り囲む降着円盤はどのような姿をしているのであろうか？ 前述の回転する分子ガス円盤は、この降着円盤の外側にひろがる半径が数十倍の構造である。45 m 望遠鏡をはじめとする最先端の大口径ミリ波・サブミリ波望遠鏡をもってしても、内側の降着円

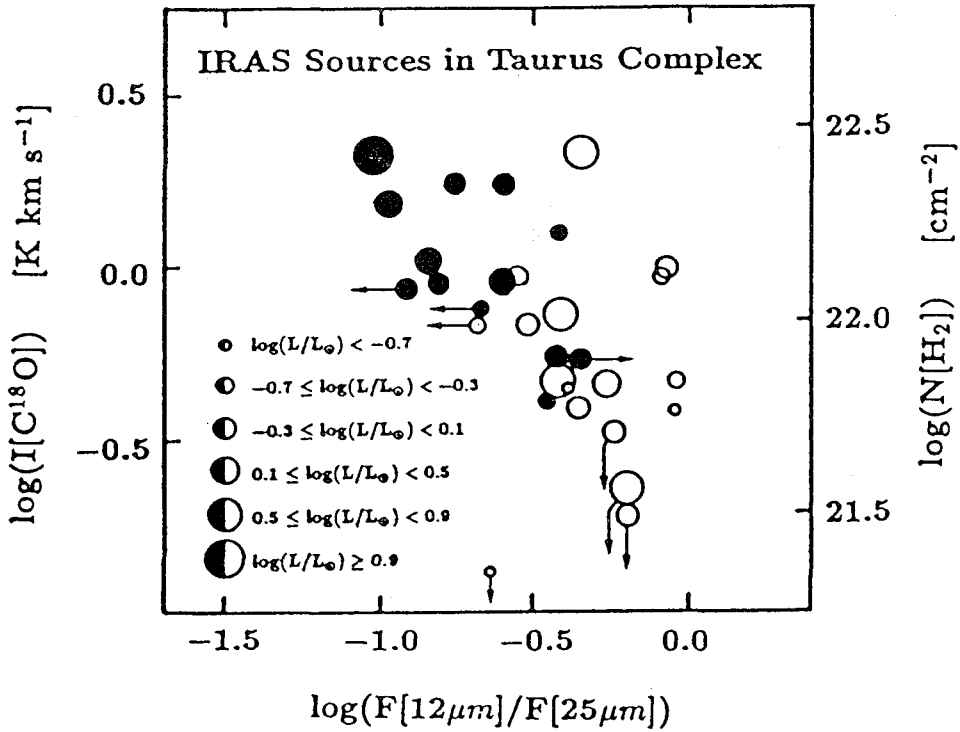


図 2 おうし座暗黒星雲内に誕生しつつある星の中間赤外での色 (横軸) と、まわりの分子ガスの量 (縦軸) の比較. 原始星の進化, 特に降着円盤の成長に伴い, 中間赤外の色が青い方 (右の方) にずれ, 同時にまわりの分子ガスの散逸が進んで, それまで可視光で見えなかった星 (黒丸) が見える (白丸) ようになる (Hayashi et al. 1991, Ap. J., submitted).

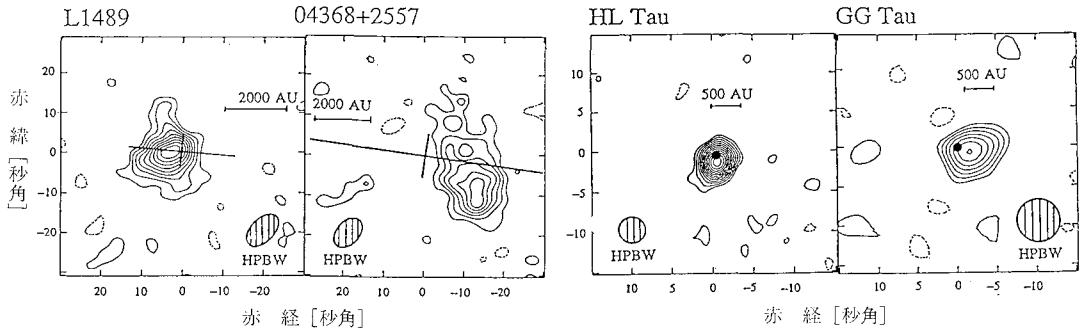


図 3 野辺山のミリ波干渉計がとらえたおうし座の若い星たち. 可視光で見えない赤外線天体 (左の 2 つ) では, CS(J=2-1) 輝線で分子ガスの集中が見られるのに対し, 可視光で見える T-タウリ型星 (右の 2 つ) では 98 GHz 連続波でよりコンパクトなダストの集中が見える. 左と右で像のスケールが違うことに注意 (Ohashi et al. 1991, Ap. J., submitted).

盤を描き出すには分解能がまだ不足している.

ミリ波の観測装置として現在世界最高の分解能を持つ野辺山宇宙電波観測所の 5 素子干渉計が, 原始星候補や T-タウリ型星に向けられた (図 3). 分解能は 3"~9" (400~1200 天文単位), 45 m 望遠鏡のおよそ 5 倍ではあるが, 降着円盤の構造にはまだ手が届かない. しかし, 高い分解能を生かした, 原始星候補天体のまわりの

分子ガスからの CS 輝線スペクトルや, T-タウリ型星のまわりに集中した星間塵からのミリ波連続スペクトルの観測から, 意外な事実が明らかにされた. 分子ガスの集中が見られた原始星候補のグループでは, 集中した星間塵からの連続波が検出されず, 逆に星間塵が検出された T-タウリ型星のグループでは, 集中した分子ガスが見られないのである. これは, 星誕生のプロセスにおい

て、降着円盤の成長とそれを取り巻く分子ガスの散逸が同時進行することを示す貴重な証拠となったのである(註: 野辺山のミリ波干渉計による観測結果については「天文月報」1991年1月号8ページの記事にも解説がある)。

5. 星誕生のシナリオ

こうして調べられた誕生しつつある星の構造の変化についての現在の仮説は以下のようになる。

〔第1段階〕 まず、分子雲コアの中心で、重力がそれまで拮抗していたガスの圧力や磁場に打ち勝つと、ガスは重力収縮を開始して中心に原始星が誕生する。ガスは角運動量を保存しながら原始星に降りつもろうとするので、原始星のまわりに回転する降着円盤ができる。この降着円盤は、半径が約100天文単位にまで広がって、その外縁はまわりの分子雲とつながっていると考えられる。この時期はまた、双極分子流が発生する時期とも重なっているのであろう。

〔第2段階〕 まわりからガスが降りつもるにしたがって、原始星は数十万年かけて成長する。原始星の質量が大きくなると、降りつもるガスが解放する重力エネルギーで暖められた降着円盤は、ぶくぶくと煮えたぎるような乱流状態になって強い赤外線を放射する。分子流はますます強くなる。

〔第3段階〕 おそらく分子流の作用などにより分子雲コアが散逸して中心星が近赤外線や可視光で見えはじめる頃になると、まわりの分子雲から降着円盤へのガスの供給がほとんどストップし、中心星への質量降着率は数十分の1に減少する。その結果、中心星はそれまでの動的進化から準静的な収縮の段階、いわゆる林フェイズにはいる。ガスの降着が弱まったため乱流がおさまり静かになった円盤では、それまでガス中に一緒に混ざっていた星間塵が、円盤の赤道面にむかってゆっくりと沈殿しはじめる。

〔第4段階〕 中心星は降着円盤からのゆっくりした質量降着を受けてさまざまな活動性を示しながら、約100万年かけて徐々に温度を上げてゆき、ついに中心で始まった水素核融合によるエネルギー発生とつりあった構造に落ち着く。0歳の主系列星の誕生である。円盤の赤道面に沈殿した星間塵は、その間に微惑星、そして条件が整った場合には惑星を形成してゆく。

6. 多様性をもたらすもの

上に述べたのは、太陽と同程度の質量を持つ孤立した(連星でない)星の誕生のシナリオとして現在私達が抱えている作業仮説である。言うまでもなく、この仮説はまだ観測事実や理論による裏付けが必要な箇所がたくさん

あり、また明らかな単純化も含まれている。これらの精密化の多くは今まさに手が届くところにあり、1990年代前半の重要なテーマである。

他方、私たちは、星の質量には太陽の十分の1足らずから数十倍にわたる三桁近いスペクトルがあることを知っている。また、星の存在形態としては孤立した恒星というのは小数派であり、むしろ二重星や三重星などの連星系をなしている方が一般的であることもわかってきた。恒星のこのような多様性は、現在私たちが描いている星生成のシナリオでは説明できない。

星の質量は何によって決めるのだろうか? 連星系はどのようにして誕生するのだろうか? 連星をなす星のまわりの降着円盤はどのように進化するのだろうか? そこでも惑星系は形成され得るのだろうか? これらの間に答えてゆくには、原始星・T-タウリ型星のはるかに大きいサンプルによる統計的観測や、赤外線やミリ波・サブミリ波による降着円盤の超高分解能イメージング観測が必要であろう。休みなく改良、拡張を続ける野辺山の電波望遠鏡群、そして建設を開始した大型光学赤外線望遠鏡を持つ日本の研究に対する世界の期待は大きい。そして、極度に進歩した計算機および計算技術を背景にした組織化された理論研究が、個々の観測事実を結びあわせることになる。

今から10年後の2001年に、これらの問題に対する具体性をともなった仮説が、私たち日本の研究者の手中にあるチャンスは、極めて高いのである。

学会だより

天体写真スライド集「遙かなる宇宙へ」の申し込み

このスライド集は、当初の予想を上廻る申込みがあり、今年4月までに700部の頒布を終了致しました。

当初の爆発的な申込みはなくなりましたが、現在も問い合わせがありますので、今年度は200部を追加製作することにしております。

第1回目(100部)の製本が6月初旬の予定ですので、ご希望の方には予約受付することにしました。

お問い合わせ: 日本天文学会

0422-31-1359 (FAX 兼用)

0422-41-3648

☆ ☆ ☆