

特集 「原始惑星系円盤」

電波干渉計が切り開く原始惑星系円盤の研究

大橋永芳¹

1. はじめに

「あの一、実はお願いがあるんですけど...」。こう神戸大学の中川さんに話しかけられたのは、今年7月台湾で行われた星形成に関するワークショップの開催中だった。なんでも、原始惑星系円盤に関する特集を遊・星・人で企画しているのだから、記事を書いて欲しいとのこと。あまり深く考えずに、二つ返事で了解してしまった。思い起こせば、林正彦氏により遊・星・人で原始惑星系円盤に関する研究が紹介されたのは、もう3年も前のことになる。時の流れは早いもので、3年の月日が流れるのは実に早い。しかしながら、その3年間に実に多くの進展が原始惑星系円盤の分野では見られた。私自身もそれら全てをフォローできていないが実状だ。その中でも特に、電波干渉計を用いて得られた結果には特筆すべきものが多い。皆さんも良くご存じの通り、原始惑星系円盤は大変コンパクトである。推定される半径は高々100天文単位(1天文単位=1億5千万km)しかない。この100天文単位というサイズは、我々に最も近い星(惑星)形成領域である、おうし座ですら1秒角に満たない。1秒角がどの程度小さいかというと、高度1万メートルの上空から、地上にある直径5cm程度のクッキーを探すようなものだ。この様な高い角分解能を電波の領域で達成するためには電波干渉計を用いるしかない。それゆえ、原始惑星系円盤の観測的研究には電波干渉計が欠かせないのである。そこ

で今回は、最近の電波干渉計による原始惑星系円盤の観測結果について、いくつか紹介することにする。あらかじめお断りしておくが、原始惑星系円盤中の分子ガスからの放射により観測される円盤を「原始惑星系ガス円盤」、ダストから放射される連続波により観測される円盤を「原始惑星系ダスト円盤」と呼ぶことにする。なお、原始惑星系円盤に関する基本的性質等に関しては、前回の林正彦氏の記事[1]で詳しく述べられているので、そちらを参照していただきたい。

2. GG Tau の周囲の原始惑星系ガス円盤

前回の林氏の記事では、GG Tau という T タウリ型星(生まれて間もない星)の周囲に発見された、原始惑星系ガス円盤について詳しく紹介されていた。今回は、まずその続報から紹介することにしよう。これまで既にいくつかの T タウリ型星(例えば HL Tau)の周囲には1000天文単位以上に広がったガス円盤が発見されていたが、これらの T タウリ型星は広がった(おそらく扁平な)円盤のような形をしたエンベロープ(中心星を形成した母胎の分子雲コア)を伴っているため、そのエンベロープからのガス放射と、原始惑星系円盤からのガス放射の区別が難しかった。それに対して、GG Tau の周囲には広がったエンベロープが存在しないため、原始惑星系円盤に付随するガス成分を直接観測することができる。原始惑星系円盤の研

¹Harvard-Smithsonian, Center for Astrophysics

究にとっては、まさに格好のターゲットである。そんな訳で、このガス円盤の発見後、世界中の電波干渉計がこの円盤の観測を開始した。

野辺山宇宙電波観測所でも5素子ミリ波干渉計(現在6素子)を用いて観測を行った[2]。観測した分子線は、野辺山45m電波望遠鏡で観測したのと同じ、一酸化炭素の回転励起線($^{12}\text{CO}(J=1-0)$)である。この観測の空間分解能は $10'' \times 6''$ で、45m鏡と比べると約2倍分解能が高いことになる。図1に得られたマップを示す。左に示した積分強度図(検出された分子線を速度方向に足しあわせたもの)が、GG Tau周囲のガス円盤の全体像である。45m鏡の観測から予想されたとおり、半径が500天文単位程度のガス成分がGG Tauに付随していることが確認された。この積分強度図を見ると、北西(右上)から南東(左下)にかけてやや伸びる構造があることがわかるが、全体としては「平らで薄い円盤」というより、むしろ丸い形に近い。これは我々が円盤を比較的眞上から観測しているためである。検

出された ^{12}CO の積分強度から、 ^{12}CO が光学的に薄いこと、また ^{12}CO に対する水素分子の存在量が星間空間と同じ 10^4 であることを仮定して推定される円盤の質量は、 1.0×10^{-4} 太陽質量である。これはダスト放射からガス/ダスト比100を仮定し推定される円盤質量の1000分の1の質量しかない。この矛盾については、後に紹介するIRAM観測所の観測結果と合わせて、解説することにする。

次にこのガス円盤の運動について見てみよう。図1bに示したのはこのガス円盤の速度構造である。この図を見ると、速度が 5.7km/s から 7.3km/s へと大きくなるにつれて、ガスの分布が東から西へと移動していくのがわかる。この3つの速度成分の内、 6.5km/s の速度成分はほぼこの円盤の中心速度成分である。それゆえ、 5.7km/s の速度成分は我々に対して近づいていて(青方偏移)、 7.6km/s の成分は遠ざかっている(赤方偏移)ことになる。このような速度構造は円盤の回転として自然に理解できる。青方偏移した成分、赤方偏移した成分ともに、中

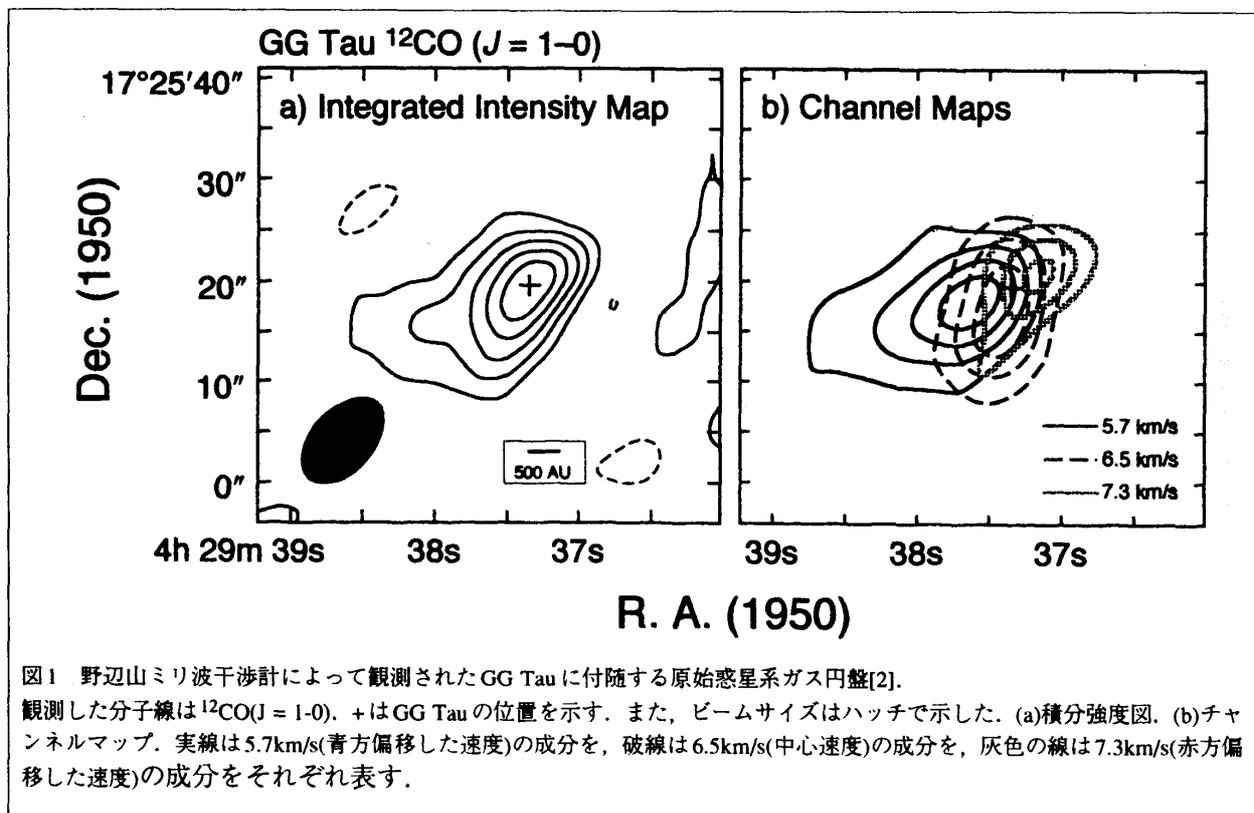


図1 野辺山ミリ波干渉計によって観測されたGG Tauに付随する原始惑星系ガス円盤[2].

観測した分子線は $^{12}\text{CO}(J=1-0)$ 。+はGG Tauの位置を示す。また、ビームサイズはハッチで示した。(a)積分強度図。(b)チャンネルマップ。実線は 5.7km/s (青方偏移した速度)の成分を、破線は 6.5km/s (中心速度)の成分を、灰色の線は 7.3km/s (赤方偏移した速度)の成分をそれぞれ表す。

心星から約500天文単位離れている。半径500天文単位で約1km/sの回転というのは、ケプラー回転と大きく矛盾しない。以上のことから、GG Tauの周囲には半径500天文単位のケプラー回転する円盤が存在するといつて良い。以上のように、シングルディッシュの観測からは明らかにならない円盤の詳細な特徴が、干渉計を用いることによってこのように明らかにされた。原始惑星系円盤の観測的研究にとって、干渉計がいかに大きな役割を果たすかが、お分かりいただけるだろう。

さて、この章の初めにも述べたように、この円盤の発見後、世界中の電波干渉計がこのガス円盤を観測した。アメリカのキャルテクが運営する、オーウエンズヴァレー観測所では、D. Koernerらによって観測が行われた[3]。彼らは $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ とさらに、励起順位の高い $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ の観測を行った。 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ の結果は野辺山の結果と矛盾するところがなかったのだが、 $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ の結果は野辺山の結果とは違っていた。彼らの積分強度図では、ガス円盤全体が南北に約20"にわたって伸びているのである。当然どちらが正しいかで大論争となった。この大論争は1992年10月に箱根で行われた、IAUコロキウムで頂点に達した。この会議では野辺山の結果を林正彦氏が報告し、オーウエンズヴァレーの結果をA. Sargent女史が報告したのだが、報告後の質疑応答がすごかった。林正彦、A. Sargent両氏ともに随分興奮しお互い一步も譲らず、議論は紛糾(生の興奮をお伝えできないのが残念だ)。結局フォローアップの観測が必要だ、ということでその場は落ちついた。

そのフォローアップの観測はヨーロッパのIRAM観測所によって行われた[4]。彼らの干渉計は野辺山観測所やオーウエンズヴァレー観測所の干渉計に比べると口径が1.5倍大きく、コンパクトな天体に対する感度では今の所、世界一を誇っている。その感度を余すところなく生かし素晴らしいマップ

が得られた。彼らの結果を図2に示す。コントアで示した ^{13}CO の分布は、野辺山の結果(図1b)と矛盾しない、円盤の回転を描き出している。一方、彼らの積分強度図ではKoernerらのマップに見られた、南北に20"程伸びる構造は現れていない。注意

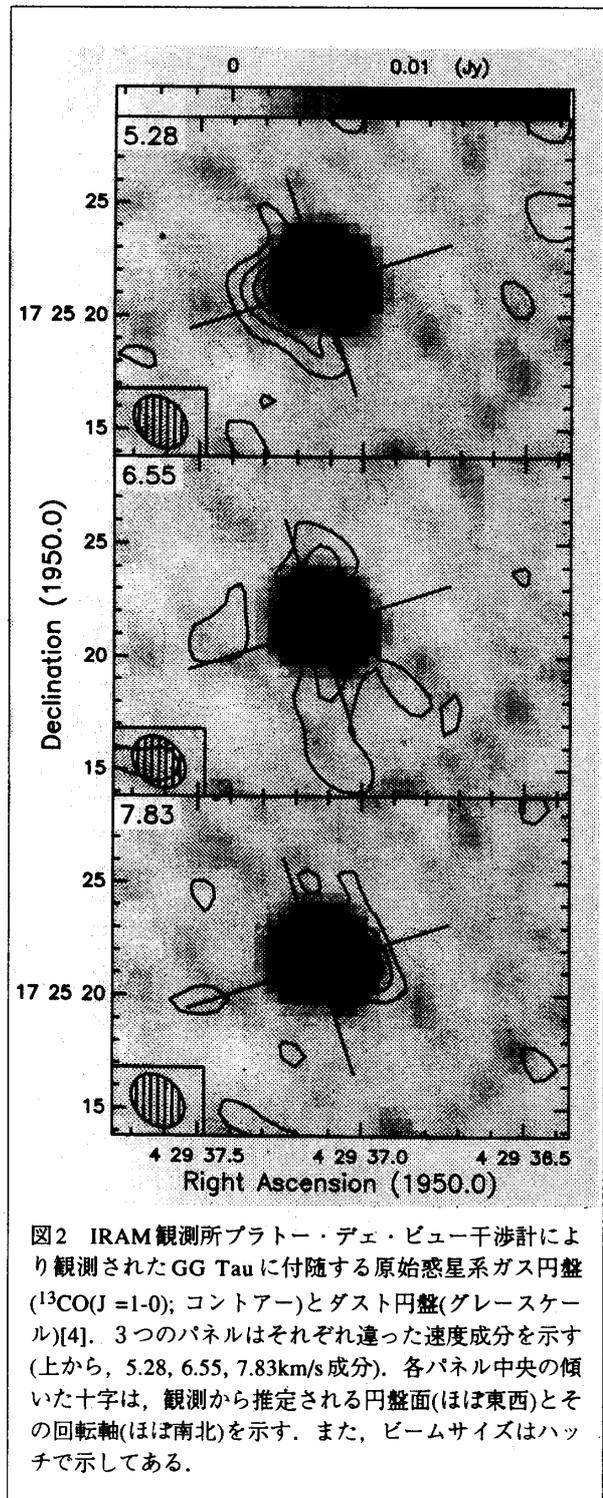


図2 IRAM観測所プラトー・デェ・ビュー干渉計により観測されたGG Tauに付随する原始惑星系ガス円盤($^{13}\text{CO}(J=1-0)$; コントア)とダスト円盤(グレースケール)[4]。3つのパネルはそれぞれ違った速度成分を示す(上から、5.28, 6.55, 7.83km/s成分)。各パネル中央の傾いた十字は、観測から推定される円盤面(ほぼ東西)とその回転軸(ほぼ南北)を示す。また、ビームサイズはハッチで示してある。

していただきたいが、図2の内、中央のパネル(6.55 km/s成分)は南北に伸びる構造を示しているが、これは我々が円盤を比較的眞上から観測しているためであって、円盤全体が南北に伸びているわけではない。

^{13}CO の強度から、 $\text{H}_2/^{13}\text{CO}$ 比が星間空間と同じだと仮定して推定される円盤の質量は、 10^{-3} 太陽質量である。これは先ほどの ^{12}CO から見積もられた円盤質量よりも10倍重たいが、ダスト放射から見積もられた質量と比べると、まだ100分の1小さい。 ^{12}CO と ^{13}CO の結果の食い違いは、 ^{12}CO が ^{13}CO に比べて光学的に厚いためと考えられるが、 ^{13}CO とダストの結果の食い違いは、 ^{13}CO が光学的に厚いためではない。なぜなら ^{13}CO から見積もられた質量は、 ^{13}CO よりもさらに光学的に薄い、 C^{18}O の観測から推定される円盤質量の上限値とほぼ一致するからだ。それゆえ、 ^{13}CO から見積もられる質量とダストから見積もられる質量の食い違いを説明するには、一酸化炭素分子がダスト表面に吸着された結果、ダストに対する一酸化炭素分子の存在量が減少していると考えざるを得ない。円盤の外側の領域では、ガスの温度は約10K程度と考えられる。そのような低温領域に於いては、一酸化炭素分子がダスト表面に吸着されるという、理論的結果も得られている[5]。

ここまでなら、“素晴らしいマップ”とは言わないが、彼らはさらに、円盤の中心に穴があることを見いだした。少々見づらいかもかもしれないが、グレースケールで示したダスト連続波のマップを見ると、連続波の強度が中心星の方向で弱くなっていることがわかる。通常、円盤の面密度分布は半径の1-2乗に反比例して大きくなる。従って、中心星の場所で最も強く連続波が検出されるはずである。ところが、彼らの連続波マップでは中央で連続波の強度が弱くなっている、即ち、穴があいているのである。穴の半径は150天文単位とかなり

大きい。GG Tauは35天文単位離れたところに伴星を持つ、連星系である。その連星系に起因する潮汐力によりこのような穴が形成されたと考えられる。最近のスペックル観測によると、実に40%ものTタウ型星が連星系であるという。それらの周囲の円盤にもこのような穴があいているのかもしれない。実際、最近の1.3mmダスト放射の観測によると、連星系であるTタウ型星は、孤立したTタウ型星よりもダスト放射が弱いことが報告されている[6]。1.3mmダスト放射の強度は円盤の質量にほぼ比例すると考えて良いので、伴星を伴うTタウ型星周囲の円盤の質量は孤立したTタウ型星よりも軽いことを意味する。この質量の違いは上に述べたような円盤の質量分布の違いで説明できるのかもしれない。いずれにせよ、“連星”というファクターが原始惑星系円盤に与える影響は結構大きいようだ。

このGG Tauの観測を契機に、野辺山観測所では45m鏡を用いた大がかりなTタウ型星周囲の原始惑星系ガス円盤探査が、国立天文台の観山氏を中心として開始された。2年間にわたる探査の結果、DM TauというTタウ型星の周囲にもコンパクトなガス円盤が存在することが明らかとなった[7]。当然のごとくDM Tauも野辺山干渉計を用いて詳しく観測がなされた。これらの結果については、また改めて紹介することにする。一方、干渉計を用いた原始惑星系ガス円盤の探査も行われ始めている。なぜならば、シングルディッシュによる探査の場合、いくら大口径のシングルディッシュでも、探査の対象となるTタウ型星が「エンベロープを伴わないTタウ型星」に限られるからである。その点、干渉計は広がったエンベロープに対する感度が低いため、コンパクトなガス円盤の存在を調べることが可能なのである。第3、第4のGG Tauが見つかる日もそう遠くはないであろう。

3. 原始惑星系円盤の形成

原始星(Tタウ型星よりもさらに若い, 形成されつつある星)は周囲のエンベロープが中心へと重力収縮する事により形成され, やがて可視光で観測可能なTタウ型星へと進化していく. このような原始星の進化の過程で, 原始惑星系円盤も形成されていくと考えられる. それゆえ, エンベロープの重力収縮, 即ち動的質量降着を観測的に研究することは原始惑星系円盤の研究にとっても大変重要である. ここでは, 若いTタウ型星, HL Tauの周囲に最近発見された質量降着エンベロープと, それから予想される原始惑星系円盤の形成について紹介しよう.

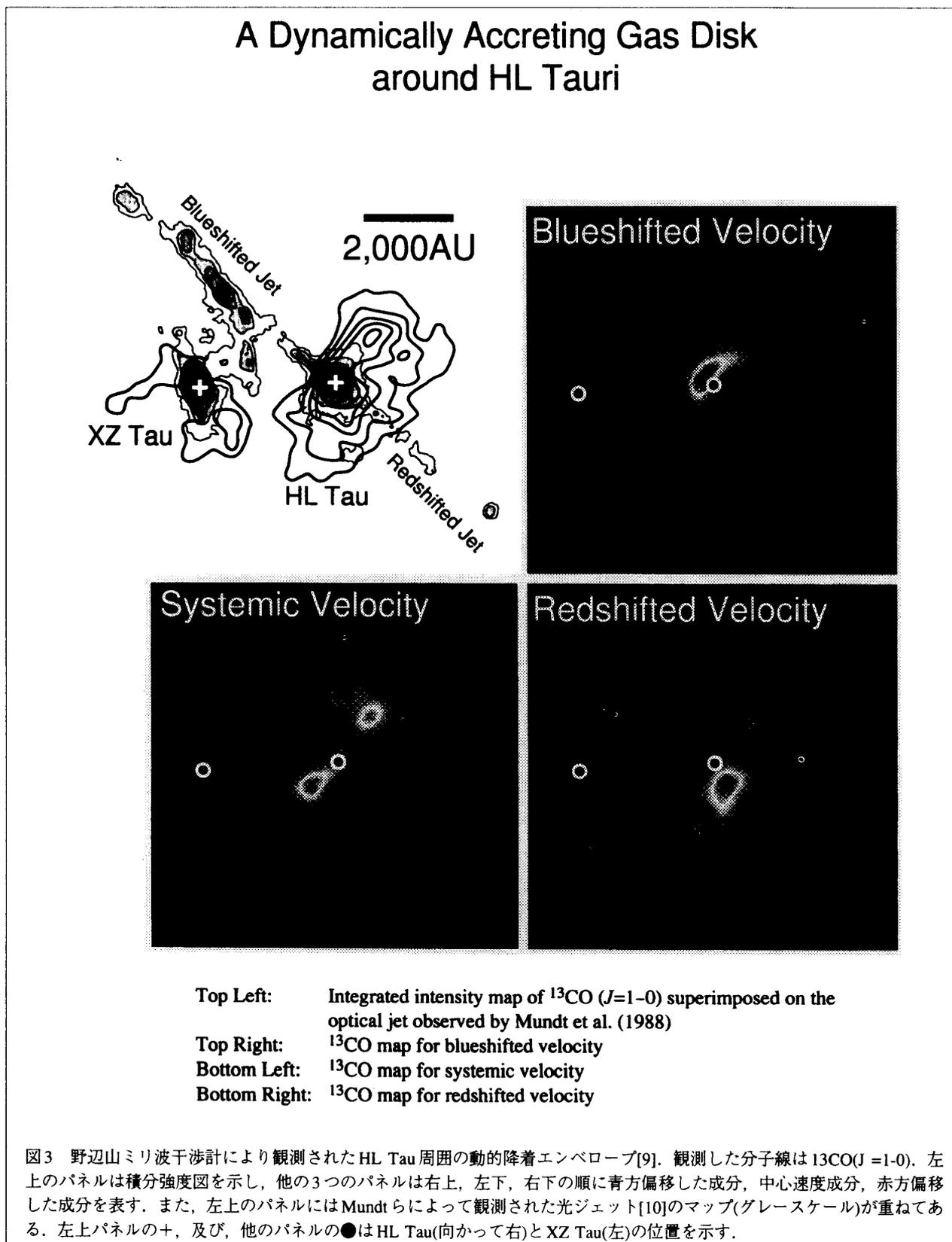
HL Tau周囲のガス成分はもう随分も前から Sargentらによって観測されており, 数1000AUにも及ぶ, “円盤状”の構造があることが報告されていた[8]. 彼女らはその円盤状の構造をケプラー回転する円盤と解釈したが, 半径が数1000天文単位のケプラー円盤というのはちょっと信じ難い. それゆえ, この円盤状の構造がなんであるかは, 長い間, 謎であった. そのHL Tauを野辺山ミリ波干渉計で $^{13}\text{CO}(1-0)$ を用いて観測したところ, その円盤状の構造は動的収縮中のエンベロープであることがわかった[9]. 図3に得られた結果をまとめる. 左上のパネルは ^{13}CO の積分強度図, 他の3枚のパネルは右上, 左下, 右下の順に, 青方偏移した速度を持つガス成分, 中心速度を持つガス成分, 赤方偏移した速度を持つガス成分の分布(これをチャンネルマップという)を表す. また, 左上の積分強度図にはMundtらによって観測された, 光ジェット分布が重ねてある[10]. 積分強度図を見ると, HL Tauの周囲にはSargentらによって観測されたのと同じ, 円盤状のガスが存在することがわかる. この円盤状の構造の長軸はほぼ光ジェットに直交する. このことから, この円盤状の構造はHL Tau

を取り囲むガス円盤と考えるのが最も自然である. 円盤の半径は約1400天文単位である. また, 円盤の質量は ^{13}CO の積分強度から, 0.03太陽質量と見積もられた.

さて, 次に円盤の傾きについて見てみよう. 光ジェットの速度をみると北東側(左上)が青方偏移, 南西側(右下)が赤方偏移している. つまり, 北東側のジェットは我々の方に近づいていて, 一方, 南西側のジェットは我々から遠ざかるように運動している. このことから, 円盤の北東側が我々から見て遠方に位置し, 南西側が手前に位置することがわかる(1). このことを頭の隅に置いて, この円盤の速度構造を見てみよう. 3枚のチャンネルマップを見ると, 速度が青方偏移から, 中心速度, 赤方偏移と変化するにつれて, (円盤状の)ガスの分布が北東から南西へと中心星をはさんで変化する様子がわかる. ここで先ほどの円盤の傾きを思い出していただきたい. 円盤の北東部分, 即ち, 円盤の遠方側が青方偏移(我々に近づいている)していて, 円盤の南西部分, 即ち手前側は赤方偏移(我々から遠ざかっている)のである. これは円盤が中心に向かって収縮していることを示唆する. 注意していただきたいが, このような速度構造を示すからといって, 即座に円盤の収縮と結論できるわけではない. 分子流の可能性も否定できないからである[11]. しかしHL Tauの場合重要なのは, 3枚のチャンネルマップがすべて, ジェットに垂直な円盤状のガス分布を示していることである. 分子流がジェットに垂直な構造を持っているとは一般的には考えにくい. さらに, この速度構造を円盤の収縮と考えた場合, 収縮速度は半径700天文単位の位置で約1km/sとなる. この速度は, 中心星の質量が0.55太陽質量である時の自由落下速度と矛盾しない. 以上のことから, HL Tau周囲の円盤は動的に収縮していると言って良いであろう.

動的に収縮しているという点から言えば, 今回

(1) わかりにくい方は, コンパクトディスクなどで実際に試していただきたい. HL Tauの円盤は, コンパクトディスクの右上を持ち上げたように傾いている.



観測されたガス成分はむしろ、“円盤状エンベロープ”と呼んだ方がふさわしいのかもしれない。こ

の円盤状エンベロープはわずかながら回転運動も示している。その回転速度は半径700天文単位

位置で約0.2km/sである。これは先ほどの半径700天文単位における収縮速度と比べる明らかに小さい。つまり、この円盤状エンベロープは回転で支えていないのである。このことは、このエンベロープが動的に収縮していることと矛盾しない。さて、ゆっくりと回転しながら動的にエンベロープが収縮していくと、やがて中心に回転で支えられたコンパクトな円盤が形成されることが容易に想像できる。つまり、エンベロープが収縮するにつれて、その収縮速度は半径の平方根に反比例して増加していくのに対し、回転速度は半径に反比例して増加していくので、やがては収縮速度と回転速度が一致し、回転で支えられるようになるのである。今回の結果から、回転で支えられる円盤、即ち原始惑星系円盤の半径を推定すると約30天文単位となる[12]。これは最近測られた、HL Tau周囲のコンパクトなダスト円盤の半径と良く一致する(次章参照)。他のTタウ型星の周囲に見られるコンパクトな原始惑星系円盤も、このようにゆっくりと回転するエンベロープが動的に収縮することによって形成されたのであろう。

4. 分解されつつある原始惑星系ダスト円盤

初めにも紹介したように、GG Tauの周囲の原始惑星系ダスト円盤は見事に分解して観測されたが、これは例外中の例外で、他の原始惑星系ダスト円盤は依然として分解するのが難しい。ダスト円盤を分解するには1秒角を切る空間分解能が要求される。この分解能を達成するには技術的にまだまだ多くの困難がある。この様に書くと、読者の方々は全く望みがないように思われるかもしれないが、そうではない。以下に紹介するように、サブミリ波干渉計によってダスト円盤は分解されつつある。ご存じの通り、ミリ波・サブミリ波帯のダスト放射は、周波数の2-4乗に比例してその強度が強くな

る。例えば波長3ミリでは高々100mJy⁽¹⁾しかないようなダスト放射が、波長870マイクロンでは10倍以上強くなるのだ。それゆえ、ダスト円盤を観測するにはミリ波よりもサブミリ波の方が圧倒的に有利である。このような観点から、サブミリ波干渉計がダスト円盤を観測するには最も有利と考えられる。注意していただきたいが、波長が短ければいいかということ必ずしもそうではない。波長が100マイクロンぐらまで短くなると、今度はエンベロープのダスト放射が光学的に厚くなってしまい、円盤の中心部を観測できなくなってしまうからである。

サブミリ波のシングルディッシュ望遠鏡はいくつか存在するが、サブミリ波干渉計と呼ばれるものは、これまでまだ存在しなかった。実際には、現在私の所属するスミソニアン天文台がハワイのマウナケア山頂にサブミリ波干渉計を建設中であるが、完成は1997年である。その完成を待ちきれない人々が、マウナケア山頂に既にある2台のサブミリ波シングルディッシュ望遠鏡、即ち、キャルテックサブミリ波望遠鏡(CSO)とジェームズ・クラーク・マックスウエル望遠鏡(JCMT)を干渉計にしまえ、とって世界で初のサブミリ波干渉計を作ってしまった。これがCSO-CMT干渉計である。この干渉計は望遠鏡が2台しかいないため、天体の美しいイメージを作るところまではいかないが、得られたヴィジビリティデータ(一種の干渉縞)に対してモデルフィットを行うことで、観測天体のサイズ等を推定することが可能である。彼らは原始惑星系円盤を持つ代表的な天体HL Tauを、波長870マイクロンで観測した。その結果、HL Tauの周囲のダスト円盤がもの見事に分解された[13]。モデルフィットの結果によると、円盤の半径は約60天文単位である。しかし、円盤の短軸方向にはまだ分解されていない。

読者の中には、イメージも得られていないのに

(1) Jy (ジャンスキー) は宇宙電波の強度を測る単位で、単位時間、単位面積、単位周波数幅あたりの電波のエネルギーを表す。
 $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W} / [\text{m}^2/\text{Hz}]$.

分解したとは良く言うものだ、と思われる方も多
いだろう。確かにその通りで、これが円盤だ、と
言って分解されたイメージを見るまでは、私も納
得がいかない。残念なことにイメージを作るとな
ると、なかなか簡単にはいかない。最大の問題は、
観測される電波の位相のふらつきをどう克服する
かである。ご存じの通り、電波干渉計は受信され
た電波の位相データを電波源の位置の情報として
して用いてイメージを作り出す。しかしながら、
我々は地球大気を通して観測を行うため、地球大
気揺らぐこと(シンチレーション)により、観測さ
れる電波の位相も多少ふらつく。1秒角を切る分解
能を達成しようとする際には、その多少のふらつ
きが問題となる。現在、野辺山観測所も含め各国
の観測所ではこの位相のふらつきを克服する研究
が精力的に進められている。これらの研究の進展
と、マウナケア山頂に建設中のスミソニアン・サ
ブミリ波干渉計の完成、さらには国立天文台が計
画している大型ミリ波・サブミリ波干渉計の実現
とが相まって、見事に分解された原始惑星系円盤
のマップが見られるものと、私は確信している。

5. 今後の原始惑星系円盤の研究

以上、3年間におこった出来事の中から、干渉計
の結果を中心にざっと紹介したが、これ以外にも
興味深い成果がまだまだある。3年間という短い
間に良くもこれだけ進むものだと感心してしまう(感
心ばかりはしてられないが)。これもすべて、数
多くの天文学者が精力的に原始惑星系円盤の研究
に取り組んでいるためである。それほどこの分野
は、今ホットなのだ。だが一方で、まだまだ解明
されていない問題が山のようにあることも事実だ。
今後数年間で原始惑星系円盤の統計的研究が急速
に進むと、私は予想している。それらの研究を通
して、原始惑星系円盤の進化や、円盤中のダスト
粒子の成長といった、惑星系形成に深く関わる議

論も展開されるだろう。さらには、ここ数年間に
できあがってくるスミソニアン・サブミリ波干渉
計、国立天文台のすばる望遠鏡、またヨーロッパ
の打ち上げる赤外線衛星(ISO)によって、今はまだ
見えていない、原始惑星系円盤の素顔が見える日
も近い。原始惑星系円盤の研究からはまだまだ目
が離せそうにない。

参考文献

- [1] 林 正彦. 1992: 日本で進む原始惑星系円盤
の研究. 遊・星・人, 1, 10-17.
- [2] Kawabe, R., Ishiguro, M., Omodaka, T.,
Kitamura, Y., and Miyama, S. M. 1993:
Discovery of a Rotating Protoplanetary Gas
Disk around the Young Star GG Tauri.
Astrophys. J. (Letter), **404**, L63-L66.
- [3] Koerner, D. W., Sargent, A. I., and Beckwith,
S. V. W. 1993: Gas and Dust in the Pre-main-
sequence Multiple System GG Tauri. *Astrophys.
J. (Letter)*, **408**, L93-L96.
- [4] Dutrey, A., Guilloteau, S., and Simon, M. 1994:
Images of the GG Tau Rotating Ring. *Astron.
Astrophys.* **286**, 149-159.
- [5] Aikawa, Y., Miyama, S. M., Nakano, T., and
Umebayashi, T. 1995: Evolution of the
Molecular Abundance in Protoplanetary Disks:
Depletion of CO Molecules. submitted to
Astrophys. J.
- [6] Osterloh, M., and Beckwith, S. V. W. 1995:
Millimeter-wave Continuum Measurements of
Young Stars. *Astrophys. J.*, **439**, 288-302.
- [7] Handa, T. et al. 1995: Detection of a
Circumstellar Gas around DM Tauri: A
Protoplanetary Disk around a Single Star?
Astrophys. J., **449**, 894-899.
- [8] Sargent, A. I., and Beckwith, S. 1987:

- Kinematics of the Circumstellar Gas of HL Tauri and R Monocerotis. *Astrophys. J.*, **323**, 294-305.
- [9] Hayashi, M., Ohashi, N., and Miyama, S. 1993: A Dynamically Accreting Gas Disk around HL Tauri. *Astrophys. J.(Letter)*, **418**, L71-L74.
- [10] Mundt, R., Ray, T. P., & Burke, T. 1988: A Close Association of Five Jet and Outflow Sources in the HL Tauri Region. *Astrophys. J.(Letter)*, **333**, L69
- [11] Cabrit, S., Guilloteau, S., Andre P., Bertout, C., Montmerle, T., and Schuster, K. 1995: Plateau de Bure Observations of HL Tau: Outflow Motions in a Remnant Circumstellar Envelope. *Astron. Astrophys.*, in press
- [12] Lin, D. N. C., Hayashi, M., Bell, K. R., and Ohashi, N. 1994: Is HL Tauri an FU Orionis System in Quiescence? *Astrophys. J.*, **435**, 821-828.
- [13] Lay, O. P., Carlstrom, J. E., Hills, R. E., and Phillips, T. G. 1994: Protostellar Accretion Disks Resolved with JCMT-CSO Interferometer. *Astrophys. J. (Letter)*, **434**, L75-L78.