

日本で進む原始惑星系円盤の研究

林 正彦¹

1. はじめに

古来、惑星というのは天文学の主たる対象であった。初めて望遠鏡で木星を見たガリレイは、4個の衛星が木星の周りを回っているのを見て、地動説を思い当たったという。最も基本的な物理法則のひとつである万有引力の法則は、ニュートンが惑星や衛星の運行を説明するために導入し、後に天体力学として大成功を収めた。

それがどうであろうか、今や惑星まで行ってサンプルを回収してくることさえ可能となった。ひとたびサンプルが手にはいれば、あとは天文学の精度とは桁違いの物質科学の世界である。確かに惑星などの太陽系天体は現在でも天文学の重要な研究対象ではあるが、惑星科学から見れば天文学的手法はその一部に過ぎない。そんな状況のなかで、まさか天文学的手法によって惑星系形成を観測できる時期がこんなに早く来ようとは、私自身思いもよらなかった。

1980年代後半の天文観測によって、T Tauri 型星の周囲に原始惑星系円盤が存在することがほぼ確実となってきたのである。天文学が惑星系形成の理解に大きく貢献できることが分かってきた。ちょうどこの時期に、日本惑星科学会が設立されたことは実に良いタイミングだった。学会設立後最初に出るこの学会誌で、最近の興奮冷めやらぬ天文観測を紹介できるのは、天文学を専門とする私にとって何よりもうれしいことである。ここでは、野辺山宇宙電波観測所で最近検出に成功した、原始惑星系円盤のガス成分について述べたいと思う。

2. 原始惑星系円盤

最初に、天文観測で見つかった原始惑星系円

盤の概略を紹介しよう。なお原始惑星系円盤の存在を示唆する証拠や、その物理的な性質についての詳細は観山、林(1992)[1]を参照されたい。

原始惑星系円盤をともなっている T Tauri 型星とよばれる星は、50年も前から知られた変光星である。しかしこの星が、まだ中心核で水素の核融合を起こしていないような、誕生して間もない若い星だという考えが確立したのは、1970年代になってからである。その後、星は分子雲中に深く埋もれてその質量を増加させている段階、すなわち「原始星」の段階を経て、最終的に光で見える T Tauri 型星として出現するのだということが、1980年代の研究を通して理解されてきた。

1983年に打ち上げられた赤外線天文衛星 (IRAS) は、原始星や T Tauri 型星が遠赤外線でも明るく輝いていることを発見した。原始星はその周囲(半径 10,000 天文単位程度)に多量のガスとダストをまとっているため、中心部(原始星コア)で解放されたエネルギーはすべて外層部のダストから赤外線放射の形で解放される。しかし可視光で見える T Tauri 型星の場合には原始星のように広がった外層部はないので、もっと星の近くに赤外線を出すダストが存在していなくてはならない。

IRAS のデータなどをもとに、原始星と T Tauri 型星について模式的なエネルギー・スペクトルを描くと図1のようになる。原始星では冷たい外層部のダストから出る遠赤外線の放射が最も強いが、若い T Tauri 型星 (CTTS: 古典的 T Tauri 型星) では近赤外線から遠赤外線にかけてまんべんなく強い放射が出ている。星の表面から出ている黒体放射と比べてみると、赤外線放射がいかに強いものであるかが分

¹ 東京大学理学部天文学教室

かと思う。このエネルギースペクトルは、星の周囲にあるダストの温度が 1,000 K (近赤外線) から

20 K (遠赤外線) 程度の、広い温度範囲にわたっていることを示している。

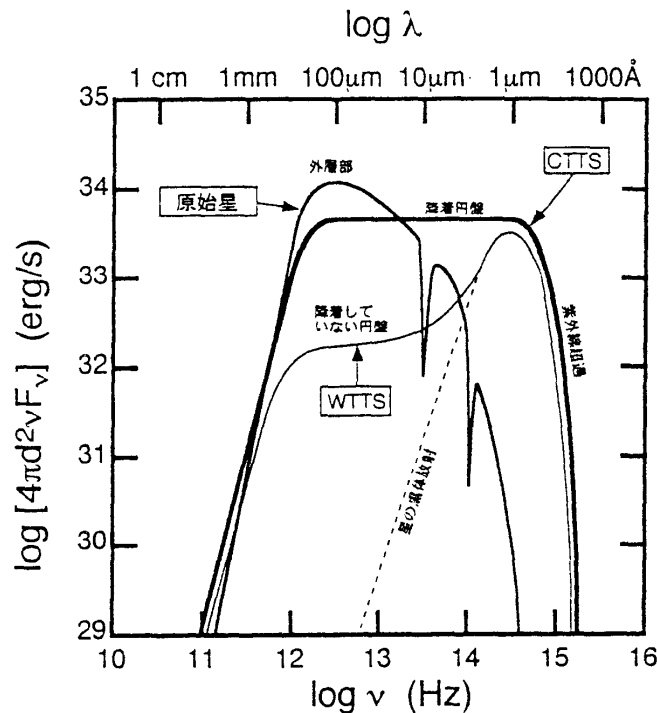


図 1. 原始星、昔から知られていた若い T Tauri 型星 (CTTS)、X 線で発見された T Tauri 型星 (WTTS) のそれぞれについて、エネルギースペクトルを模式的に示した。

遠赤外線よりも波長が長いサブミリ波やミリ波になると、エネルギースペクトルは急激に弱くなっていく。その弱まり方は、黒体放射の Rayleigh-Jeans 側に比べてより急である。これは放射が光学的に薄くなるため、いわばすべてのダスト粒子からの放射を見通していることに相当する。このような場合にはダストの総量を求めることができる。Beckwith *et al.* (1990)[2] は、波長 1.3mm でおうし座にある 86 個の T Tauri 型星を観測し、星の周囲にあるダストの質量として 10^{-5} – $10^{-2} M_{\odot}$ (太陽質量) を得ている。

図 2 は国立天文台野辺山宇宙電波観測所の 5 素子ミリ波干渉計を用いて、Ohashi *et al.* (1991)[3]

が波長 3mm で観測した T Tauri 型星からのダスト放射である。誤解しないでいただきたいのは、ダスト放射がいろいろな形をしているのは観測したビームの形状によるものであり、実際には観測した分解能 3 秒角 (500 天文単位) 程度に比べてダスト放射は広がりのない点源として観測される。つまり、ダスト放射は星の近傍 100 天文単位程度以内に局在してはならない。

半径 100 天文単位以内に 10^{-5} – $10^{-2} M_{\odot}$ のダストが球対称で一様に分布していると、中心の T Tauri 型星は可視光では見えなくなってしまうはずである。実際には星が可視光で見えるので、星の周囲のダスト分布は球対称とは考えがたい。

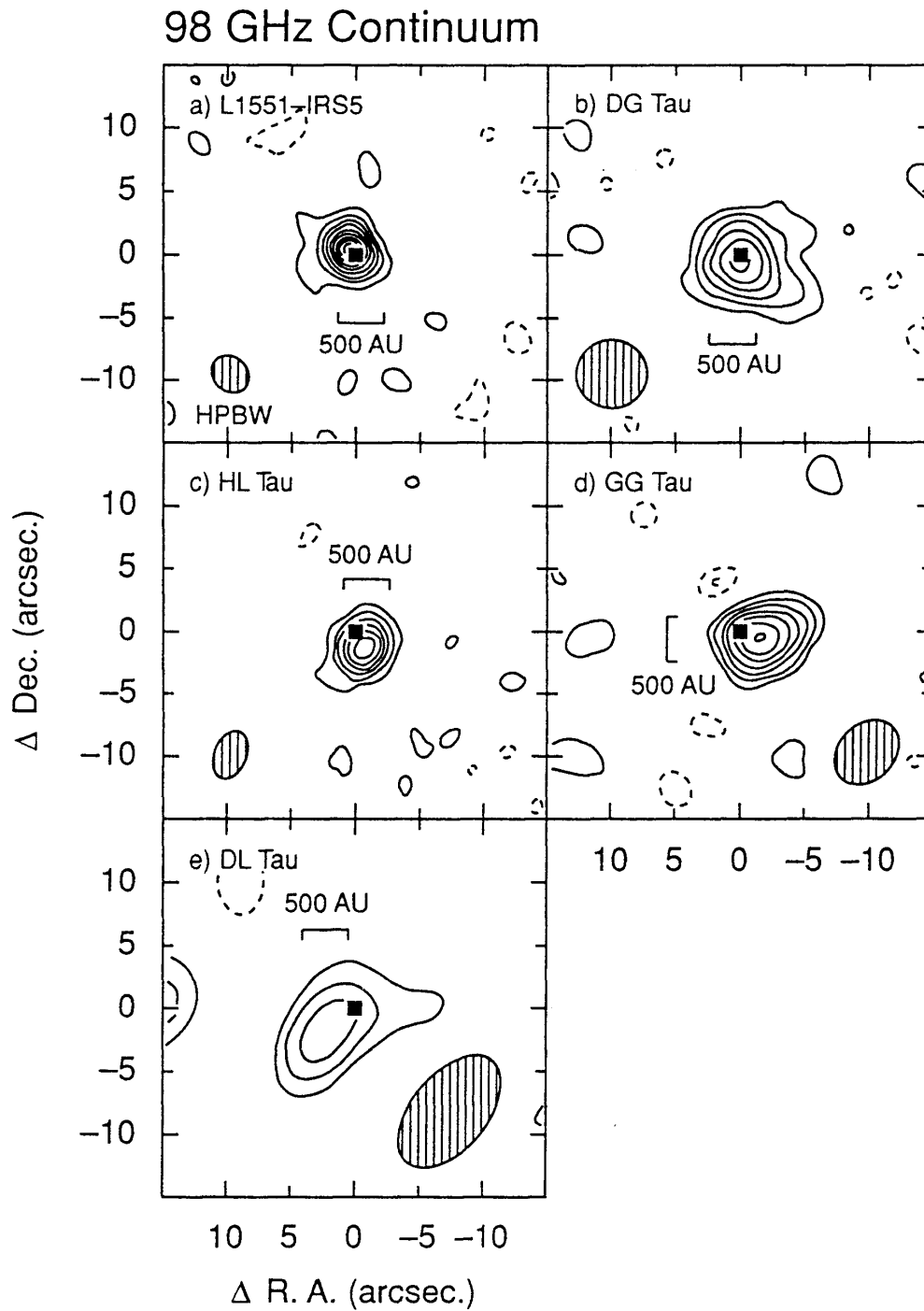


図 2. T Tauri 型星の原始惑星系円盤からのダスト放射. Ohashi *et al.* (1991)[3] が野辺山 5 素子ミリ波干渉計を用いて波長 3mm で観測したもの. 観測したビームの形 (ハッチをほどこした楕円) が違うためにいろいろな形に見えるが, 実際はどの天体も広がりビームより十分小さく, 原始惑星系円盤のダスト放射は半径 100 天文単位以内に集中している.

星周ダスト分布が幾何学的に薄い板状でなければならぬことは、酸素原子の出す波長 6300\AA の禁制線の観測から示唆される。T Tauri 型星の特徴のひとつとして、水素のバルマー線などが輝線で見えるが、これらの許容遷移輝線は星の視線速度に対して青方偏移側も赤方偏移側もほぼ 200km/s のドップラー幅をもっている。ところが酸素の禁制線は、星の速度に対して青方偏移した成分しか観測されないのである。バルマー線は星の表面近くの高密度プラズマから放射されると考えられている。これに対して禁制線は、星から双極的または球対称的に吹き出している星風の中で、星からかなり離れた低密度領域から出ると考えられる。したがって、青方偏移した禁制線すなわち星風しか見えないことは、観測者から遠ざかる方向に出ていて赤方偏移している星風が遮られていることを意味する。T Tauri 型星の周囲に存在している円盤が、星風の青方偏移側と赤方偏移側とを完全に分離しているというモデルが、観測された禁制線の形を最も良く説明できる。

今では以上で説明してきたこと以外にも、偏光やスペckル観測など多くの観測により T Tauri 型星の周囲に円盤があることが示唆されている。もはや T Tauri 型星の周囲に大きさ 100 天文単位程度の円盤が存在していることを疑う余地はなさそうだ。

蛇足ではあるが、そもそも「原始惑星系円盤」という術語は、あまり耳慣れない言葉であろう。通常使われている「原始太陽系星雲」という術語を使えばなじみやすいものを、と思うにちがいない。しかし、「太陽系」と言わずにあえて「惑星系」と言うのは、「いよいよ太陽系以外の惑星系の形成が観測できるようになってきたぞ」という天文学者の意気込みの現われだと私は思っている。また「原始惑星系星雲」と言わずに「原始惑星系円盤」と言うのは、前者が「原始惑星状星雲」(Protoplanetary Nebula) という惑星系とは全く関係ない天体と混同される恐れがあるからだ。そんなわけでこれからは「原始惑星系円盤」という術語を使っただけならば、と考えている。

3. 原始惑星系円盤の質量

惑星系形成では原始惑星系円盤の質量は非常に重要なパラメータとなる。円盤からのダスト放射を、ミリ波やサブミリ波で観測することによって、ダストの質量が 10^{-5} – $10^{-2} M_{\odot}$ と求まることはすでに説明した。ではガスも含めた円盤の総質量はどの程度なのだろうか。

ガスの質量を求めるためには、当然ガスからの放射を観測するのが望ましい。しかし後に述べるようにこれは非常に難しいので、現状ではダストの質量に星間空間で測定されているガス/ダストの質量比 100 を掛けて原始惑星系円盤の総質量としている。すなわち円盤の質量として、 10^{-3} – $1 M_{\odot}$ という値が得られている [2]。この質量は、京都モデルのいわゆる minimum mass solar nebula の質量 $0.01 M_{\odot}$ と比較して、(天文学的見地からすると) 比較的良く一致していると考えてよいだろう。

しかし星間空間でのガス/ダスト比を仮定して原始惑星系円盤の総質量を見積るなどとは、確かに乱暴な方法ではある。そんなわけで、T Tauri 型星に円盤があると分かってから円盤のガス成分を検出する試みが続けられている。

ガス成分として最も検出しやすいのは、存在度の高い $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ の回転輝線であろう。たとえば距離 140pc のおうし座分子雲近傍に、半径が 100 天文単位で平均温度が 20K の円盤があったとしよう。これを国立天文台野辺山宇宙電波観測所の 45m 電波望遠鏡で観測したとすると、波長 2.6mm の $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 輝線はアンテナ温度で 0.05K 程度の強さに受かるはずである。電波天文関係者以外にはこれがどれくらい弱いかぴんとこないと思うが、0.05K というのは 45m 鏡で 20 時間観測してようやく 3σ で検出される強さである。しかしこれは決して非現実的な観測ではない。ただし、口径が小さくて空間分解能の悪い望遠鏡で観測する場合には、原始惑星系円盤のガスを検出できる可能性はほとんどなくなる。原始惑星系円盤のような点源に対しては、アンテナ温度

は分解能の2乗に逆比例して弱くなってしまうからである。ミリ波帯で最も高い分解能をもつ野辺山45m鏡は、原始惑星系円盤のガス放射に対して世界で最も感度が高い望遠鏡なのである。

実はもっと困った confusion の問題がある。T Tauri 型星の特徴のひとつとして、この星は暗黒星雲に付随して観測されるというのがあるが、暗黒星雲の $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ はアンテナ温度3K程度で輝いている。T Tauri 型星方向にある暗黒星雲に対して、原始惑星系円盤は約1/100の強度しかないのである。幸いなことに原始惑星系円盤は回転しており、そこから放射される輝線は数km/sの速度幅を持つが、暗黒星雲から放射される輝線の速度幅はこれより狭い。したがって、T Tauri 型星方向で非常に弱くて速度幅の広い分子輝線が検出できれば、原始惑星系円盤からの放射である可能性が強いと言える。その場合でも、原始惑星系円盤からのガス放射を捕えたと断定することはできない。

原始惑星系円盤からのガス放射を検出したという報告が、昨年1件だけあった。これは、Sargent and Beckwith (1991)[4]がオーウェンズパレーミリ波干渉計を使って、HL TauというT Tauri 型星からの $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ を検出したというものである。HL Tauは、おうし座分子雲にあるT Tauri 型星のなかでは波長1.3mmで最も明るい天体である。すなわち、ダスト円盤の質量が最も大きいと考えられる。しかし、HL Tauは分子雲中に埋もれており、また1,000天文単位以上に広がった原始星ガス円盤も伴っているため、Sargent and Beckwithの検出したガス成分が本当にダスト放射で見えている原始惑星系円盤からのものなのかどうかは確認できていない。この観測などは、野辺山ミリ波干渉計を使えば直ちに確認ができるはずである。

4. GG Tauの原始惑星系円盤からのガス放射

おうし座分子雲に付随しているT Tauri 型星で、波長1.3mmのダスト放射がHL Tauに次いで2番目に強いのがGG Tauである。今年の3月に

Strom (Five College Radio Astronomy Observatory, FCRAO)らが、名古屋大学などとの共同観測で、野辺山の45m電波望遠鏡を用いてGG Tauの原始惑星系円盤から $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ を検出した。これはきわめて確実な検出であったので、以下にそれを説明しよう。

GG Tauの原始惑星系円盤はミリ波で明るくだけあって、その総質量はガス/ダスト比100を仮定して $0.16 M_{\odot}$ (Ohashi *et al.* 1991)– $0.29 M_{\odot}$ (Beckwith *et al.* 1990)と求められており、HL Tauと並んで円盤からのガス放射を検出するのに絶好の対象である。また幸いなことに、GG Tauは暗黒星雲から完全に隔離している。つまり電波望遠鏡をGG Tau方向に向けても、これまで $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ は全く検出されていなかったのだ。FCRAO14m電波望遠鏡(おうし座分子雲で分解能7000天文単位)での観測結果によると、GG Tau方向では $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ のアンテナ温度の上限値は0.05Kである。このT Tauri 型星なら、分解能2000天文単位の45m電波望遠鏡で観測して $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ が0.05K以上に検出できれば、少なくともGG Tau方向に集中したガスがあることは分かる。このような可能性にもとづいて、Stromらは45m電波望遠鏡を用いてGG Tauを観測した。その結果、予想していたよりもはるかに強く、アンテナ温度で0.4Kという $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 輝線を検出した。

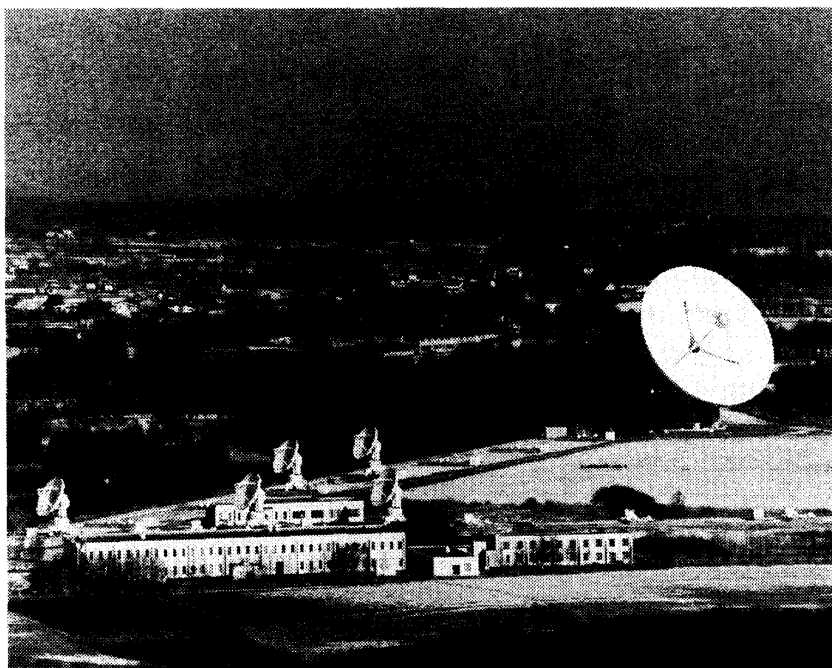
検出された $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 放射が広がった分子雲からのものではないことは、上で説明したように明らかである。また $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 輝線は速度幅2.5km/sでふたつのピークを示すが、これは回転するガス円盤のモデルでよく説明できる。ここで重要なことは、この輝線が分解能7,000天文単位の望遠鏡では検出できなくて、分解能2,000天文単位の望遠鏡では検出できたことである。このようなことが起こるためには、検出された $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ の分布が45m鏡の分解能である2,000天文単位に比べて小さくなくてはならない。この条件が成り立つ場合には、45m鏡では0.4Kでも、14m鏡では0.04Kの強度しかなくなる。0.04Kという値はStromらが14m鏡でGG Tauを観測し

たときの上限值より小さいので、14m 望遠鏡では検出できなかったのだ。つまり GG Tau 方向で検出された $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ は星から半径数百天文単位以内に存在してはならず、その放射に寄与できるものはすでにダストで検出されている原始惑星系円盤に他ならない。

さて、半径 100 天文単位で平均温度 20K のガス円盤は、45m 鏡で観測すると 0.05K 程度のアンテナ温度を持つはずだと前に述べた。ところが実際 GG Tau で受けてみると、その 10 倍近い 0.4K という非常に高い強度で検出できたではないか。これには私も驚いた。強度が予想より 10 倍強かったことは、単純に考えるとガス円盤の平均温度が予想値 20K の 10 倍か、あるいはガス円盤の半径が予想値 100 天文単位の 3 倍であることを意味する。原始惑星系円盤の温度分布は図 1 で示したエネルギースペクトルの赤外部から精度良く決定できる。Beckwith *et al.* (1990) の値を参考にする、GG Tau の場合半径 100 天文単位の場所で温度は 18K であり、誤差

を考慮しても 10K から 30K の範囲には収まるだろう。そうすると、ガス円盤の半径が 300 天文単位くらいの大きさを持つとしか考えられない。

300 天文単位という半径は、GG Tau のダスト放射から求めたダスト円盤の半径の上限值 100 天文単位 (図 2 参照) と矛盾するかのように見える。しかし、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ 放射はダスト放射に比べてより低密度の領域からでも検出できるので、円盤の面密度が外側に向かって減少している場合には、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ で見える円盤の方がダスト放射で見える円盤に比べて広がっていても矛盾はないのである。少し詳しくなるが、ダスト放射が検出できるためには、天体までの視線に沿って $1/\text{cm}^2$ あたり水素原子換算で 10^{23} 個以上の面密度 (これを柱密度と言う) が必要なのに対して、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ では $10^{21}/\text{cm}$ の柱密度があれば検出可能になる。たとえば円盤の面密度分布が半径の -1.5 乗に比例してしている場合を考えると、ダスト放射で見える円盤の半径は $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ で見える円盤の半径の 20 倍程度に広がっていてもかまわない。



Nobeyama Radio Observatory · Photo by Takizawa

図 3. 国立天文台野辺山宇宙電波観測所の 5 素子ミリ波干渉計 (左) と 45m 電波望遠鏡 (写真提供: 滝沢鉄児氏).

ただし実際には、円盤外域で低密度になると星間紫外線によって CO 分子が解離されてしまう効果なども考慮する必要があるので、話はさほど単純ではないだろう。

最近発表された野辺山ミリ波干渉計による GG Tau の観測によると、 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ で見える円盤の半径は数百天文単位に広がっていることが確認され、さらに円盤の回転も見えているらしい。この画期的な発見の詳細については、いずれまた報告できると思う。

5. 円盤の本当の質量は?

さて Strom らが野辺山 45m 鏡で行なった GG Tau の観測のなかで、もうひとつ重要なことは $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ の同位体である $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ が検出されなかったことである。これから円盤内に存在する $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ の総質量が $10^{-7} M_{\odot}$ 以上 $10^{-6} M_{\odot}$ 以下であることが導ける。星間分子ガスで求められている水素分子の一酸化炭素分子に対する個数比 10^4 を仮定すると、円盤内の水素分子ガスの総質量として 10^{-4} – $10^{-3} M_{\odot}$ が求まる。

この結果は前に説明したダスト放射から求めた GG Tau の原始惑星系円盤の質量 (0.16 – $0.29 M_{\odot}$) と完全に矛盾する。これは、ダスト放射あるいは CO 分子の量から円盤の質量を求めるときにおいた仮定のうち、少なくともどちらか一方は正しくないことを意味している。用いた仮定の中で最も信頼性に欠けるのが、ダスト放射から総質量を求めるときのガスとダストの質量比 100 と、CO 放射から総質量を求めるときの水素分子と一酸化炭素分子の個数比 10^4 である。

天文学になじみのない方は、このふたつともんでもない仮定だと思われることだろう。確かにその通りである。このような変換係数の不確定さが、最終的な物理量の不確定性を決めていることは観測天文学では日常茶飯事と言っても過言ではない。そうは言うものの、上記のふたつの怪しげな仮定のうちどちらがより正しいかさえ判断できないのが現状で

ある。しかしここではもう少し深くこの仮定について考えてみよう。

最初に、原始惑星系円盤内でのガスとダストの質量比に星間分子雲と同じ 100 を仮定することの意味を考えてみよう。このことは、以下の二つの可能性の両方を否定している。すなわち、

- (a) 円盤からガスが選択的に消失し、ダストだけがとり残された。
- (b) 円盤の主成分ガスである水素分子の大部分がダストに吸着された。

また水素分子と一酸化炭素分子の個数比 10^4 を仮定することは、以下の可能性を否定している。

- (c) 円盤内で、水素分子に対して一酸化炭素分子が選択的にダスト上に吸着された。

さて、(a) の可能性は否定しても良いか? 私は Yes と答えたい。GG Tau のような古典的な T Tauri 型星は強いパルマー輝線で特徴づけられことは前にも述べたが、この輝線は回転する円盤から星へとガスが落ち込むときにできる境界層から出ると解釈されている。このようにガスが星へと落ち込む運動(降着という)をするときには、ガスは乱流状態にあるはずで、ガスとダストは良く混じりあい、両者の間には大きな摩擦が働いているであろう。そんな条件下でガスだけ選択的に消失するのは困難である。

次に (b) と (c) だが、これは要するに CO だけがダストに吸着されたのか、あるいは CO も H_2 も同程度にダストに吸着されたのか、という問題である。いずれの場合でも (a) の可能性を別にすれば、大部分の CO がダスト上に吸着されていることは間違いない。これは観測から確実に結論できることである。なぜなら星間分子雲中では、CO ガスとダストの質量比は 0.1 程度だが、GG Tau の原始惑星系円盤ではダストおよび CO 放射の観測からこの比が 10^{-3} 以下だからである。すなわちダストに対する CO ガスの質量比は、星間分子雲に比べて 2 桁も小さくなっている。

CO と H_2 とでは H_2 の方がダストに吸着されにくい。しかしこれを定量的に扱うとなると難しい。た

例えば GG Tau のガス円盤の温度は 10K から 30K くらいの間になるだろうと前述したが、10K と 30K では吸着量が全く違う。また原始惑星系円盤内でのガスの吸着については、理論的にもまだ十分に確立されてはいないらしい。もし水素分子ガスもダスト上に吸着されているとしたら、つまり CO 放射から求めた円盤の総質量が正しいとすれば、少なくとも GG Tau の原始惑星系円盤内では多量の大気を持った木星型惑星の形成は不可能であろう。

ただし、GG Tau はもっと深刻な別の問題をかかえている。近赤外線での高分解能観測から、GG Tau には天空上で 0.25 秒角 (35 天文単位) 離れたところに伴星が存在するのだ (Leinert *et al.* 1991)[5]。これは天空上に射影した距離だが、たとえ実距離がこの 10 倍だったとしても、伴星の影響により円盤は不安定になってしまい存在できなくなる。この問題に答えられる人は今はまだいないはずだ。

6. おわりに

GG Tau の原始惑星系円盤からのガス放射の発見を中心にいろいろと述べてきたが、この分野では何か発見があると新しい問題が山ほど生じてくるのが現状であり、分からないことだらけである。しかも日本での観測によってこれらの重大な発見がなされてきており、今後この分野では日本の研究が世界をリードして行くものと期待できる。ここで述べてきたいろいろな問題点も、日本での観測および理論的研究を通して近いうちに理解されていくであろう。特に、野辺山宇宙電波観測所の 45m 電波望遠鏡やミリ波干渉計を使った、T Tauri 型星や原始星のサーベイ観測は非常に重要であり、現在他の国においては決してなしえないことである。また日本の電波天文学分野の将来計画として挙げられている大型ミリ波干渉計 (LMA) は、原始惑星系円盤の構造を 10 天文単位という高い分解能で見分けることができるすごい装置である。さらにはいよいよハワイ島に建設が始まった「すばる」望遠鏡による、近赤外

から中間赤外にかけての高空間分解能観測にも期待できる。また原始惑星系円盤を研究対象とできるような T Tauri 型星の数は現在では 100 個程度に限られているが、宇宙研、国立天文台、および各大学によって計画されている赤外線サブミリ波サーベイ衛星により、その数は 10-100 倍へと増えるだろう。将来期待されるこれらの装置を建設して、これからの原始惑星系円盤の研究を推進していくためには、より多くの方々に原始惑星系円盤の天文観測に興味を持ってもらう必要がある。特に、惑星系形成に興味を持っている大学院生や学部学生に知ってもらいたいのは、今や惑星系形成は天文学的手法によっても実証される範囲に入ってきており、将来日本が作る大型観測装置によって、まちがいに実証されていくだろうということである。

参考文献

- [1] 観山正見, 林正彦. 見えてきた惑星系形成の現場, *科学*, **62**, 84-91, 1992.
- [2] Beckwith, S.V.W, Sargent, A.I., Chini, R.S., and Güsten, R., A Survey for Circumstellar Disks around Young Stellar Objects, *Astron. J.*, **99**, 924-945, 1990.
- [3] Ohashi, N., Kawabe, R., Hayashi, M., and Ishiguro, M., Observations of 11 Protostellar Sources in Taurus with Nobeyama Millimeter Array: Growth of Circumstellar Disks, *Astron. J.*, **102**, 2054-2065, 1991.
- [4] Sargent, A.I. and Beckwith, S.V.W., The Molecular Structure around HL Tauri, *Astrophys. J.*, **382**, L31-L35, 1991.
- [5] Leinert, Ch., Haas, M., Richichi, A., Zinnecker, H., and Mundt, R., Lunar Occultation and Near-Infrared Speckle Observations of DG Tauri, FV Tauri, FW Tauri and GG Tauri, *Astron. Astrophys.*, **250**, 407-419, 1991.