

見えます見えます, おうし座 DM 星の原始惑星系ガス円盤

半田 利弘

〈東京大学理学部天文学教育研究センター 〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: handa@ghz.mtk.ioa.s.u-tokyo.ac.jp

地球そして我々の太陽系がどのように形成されたかを知ることは人類共通の重要な研究テーマのひとつである。恒星の形成の観測的研究が進むにつれて、形成途上にある他の太陽系を検出できる可能性が高くなってきた。我々は野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いておうし座暗黒星雲を探索し、原始惑星系と思われるガス円盤を発見した！ 発見のいきさつとその背景・影響について紹介する。

1. 発見への長い道

この地球がどのように形成されたかは太古より多くの人々の関心と呼ぶ疑問であった。多くの神話が様々な「仮説」を示してきた。現代科学も複数の仮説を提示しているが、神話と異なるのは、「科学的にチェックする」すなわち「実験・観測の結果と矛盾しないか確かめる」という洗礼を受けなければならない点である。

このような意味で現在生き残っている科学的な太陽系・惑星系の形成モデルはキャメロン¹⁾によって提唱されたガス円盤の分裂モデルと京都大学の林グループやサフロノフによって提唱された塵円盤の分裂モデル^{2),3)}である。これらは、主として、この太陽系の現在の姿に基づいてモデルを作り上げている。進化の過程について物理学的に既知の実験結果との矛盾がないようなモデルになっているが、天文学においてしばしば行われる、進化段階が異なる類似天体との比較はなされていなかった。他に太陽系が見つかっていなかったからだ。

波長数ミリメートルの電波（ミリ波）による分子ガス輝線という新しい観測手段が使用可能になった結果、1980 年代になって恒星の形成過程についての研究が大幅に進展した。野辺山、キットピーク、FCRAO などの電波望遠鏡による観測から、恒星誕生の段階において原始星の周りを回転する

ガス円盤が発見された。この原始星ガス円盤は「原始惑星系星雲」を思わせたが、太陽系のような惑星系を形成すると考えるには大きさや質量が桁違いに大きすぎたため、これが直ちに原始惑星系ガス円盤の発見であると考えられる者は少数であった。

つづいて、赤外線による観測が可能となり、原始星やおうし座 T 型星の観測が盛んに行われるようになった。この結果、多くのおうし座 T 型星が、赤外線超過を示すこと、即可視光の明るさから予想されていたよりも遙かに明るく輝いていたことが判明した。これを説明できる最もうまいモデルは、おうし座 T 型星の周りを星間塵が円盤状に取りまいており、これが星に暖められて赤外線を放射しているというものであった。赤外線天文衛星 IRAS によって、このような赤外線超過を示す星は、もっとありきたりの星＝主系列星でもいくつか発見されるようになった。七夕でお馴染みの織女星ベガがこの代表と考えられ、ベガ型星と通称される。ベガ型星のうち最も衝撃的だったのは、がく座ベータ星であろう。星本体を隠して、この星のすぐそばを撮像してみたところ、そこには円盤を横から見たような細長い塵の分布が見られたのである（図 1）^{4),5)}。

星間空間では、一般に塵はガスと混在しており、ガスが特に濃い領域である分子ガス雲と塵との分布はよく似ている。分子ガスと塵との質量比は、

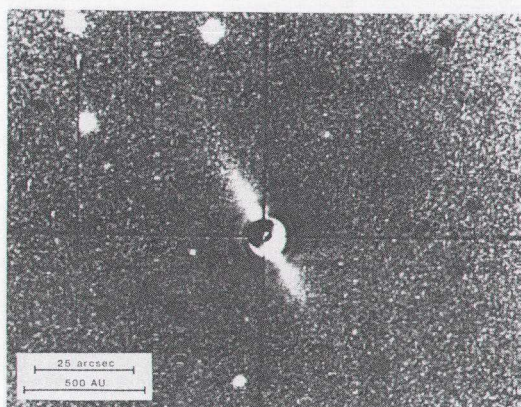


図1 がが座ベータ星で見つかった塵円盤。中央の十字でがが座ベータ星自体を隠している。

典型的には 100 : 1 とされている。地球型の惑星は質量の大部分を岩石が占めているが、その起源は星間塵であると考えられている。京都モデルでは星間ガス+塵が恒星の周りに円盤状に集まった後に、塵とガスとの分離が起こり、密度のより大きな塵が円盤の赤道面により強く集中することで、塵の薄い円盤が形成されると考えている。塵の沈殿である。しかる後に何らかの理由によりガスが円盤から吹き飛ばされ、塵の円盤のみが残り、そこから固体の惑星が形成されるという説だ。おうし座T型星やベガ型星ではガスはどうなっているのか？ 既に吹き飛ばされてしまったのか、まだガスも存在するのか？

2. 発見—それには準備が大事

こうした状況の下、どうやってガス円盤を見つけだすかについては、2つの戦略があった。1つは、ガス密度の濃い原始惑星系円盤を探すには特にガス密度の濃いところだけから発せられる分子輝線で探すのがよいというものであり、もう1つは、大きさが小さく輝線強度が弱いと考えられるからなるべく強度が強くなるように低密度のガスからでも発せられる分子輝線で探すのがよいというものである。原始惑星系ガス円盤が存在すると考えられる、おうし座T型星は、星の母胎とな

った分子ガス雲が残っており、これとの区別のためには前者の方法がよりよいと考える者が多かった。しかし、それを検出するためには、より高い感度・長い観測時間が必要である。検出することが第一であると考えた私たちは後者の戦略を採用することにした。

その手始めとして、ベガ型星6個を野辺山45m電波望遠鏡により一酸化炭素(CO)輝線で観測してみた。十分な感度に達するまで観測を続けたにも関わらず、輝線は観測されなかった。この結果、少なくとも1つの星=エリダヌス座イプシロン星では、通常の星間ガスに比べて塵の含有量が多いことが判明した⁶⁾。母胎となる星間分子雲から離れている主系列星では、星周囲の円盤からの輝線を覆い隠してしまうような強い分子輝線がないこと、および、ベガ型星は太陽のごく近傍十数pc(=数十光年; 1pc=3.26光年)に適当天体があることがポイントだった。

いよいよ本命のおうし座T型星への挑戦である。おうし座T型星が豊富に存在する最も近い天体は、おうし座分子雲である。しかし、そこまでは距離が140pc(=460光年)もあり、期待される分子輝線強度は弱く検出が困難となる。しかも、星間分子雲に埋もれているおうし座T型星は、分子雲からの輝線と原始惑星系ガス円盤からの輝線との分離が困難であると考えられた。ところが、原始惑星系ガス円盤は高速でケプラー回転しているため、星間分子雲よりもドップラー効果による視線速度の広がりが大きく、輝線の形状=プロファイルが大きく異なる。これを手がかりにガス円盤と分子ガス雲とは分離できるとのシミュレーションを鹿児島大学のグループが示した⁷⁾。これに意を強くした我々は野辺山45m電波望遠鏡の観測申込を行ったのだが、残念ながら初年度は観測時間を獲得できなかった。観測成功の見込みに対する説得力が不十分なため、他の観測の方が有望と判断されたためだったようだ。

こうしているうちに、米国の研究者がおうし座

での星形成の詳細過程の研究を行う途上で、おうし座 GG 星で従来にないほど小さく高速で回転しているガス円盤を発見した⁸⁾。輝線は見事な 2 峰形状を示し、ケプラー回転している小さなガス円盤の特徴を示していた。原始惑星系ガス円盤であるとして輝線形状を解釈すると、ガス質量 0.003 $M_{\odot}$ 、半径 900 AU (1 AU = 1 億 5000 万 km) と見積もられた⁹⁾。この観測も CO 輝線によって行われていた。おうし座 GG 星の場合、同一視線に見える分子ガス雲と視線速度が数 km s^{-1} 程度異なっていたことが幸いしたのだ。

こうして新たな対象選びの基準が発見された。星の同一視線上に分子ガス雲があっても、視線速度が十分異なっていれば観測対象となるのである。新たな指針を得た我々は、おうし座 GG 星の観測に成功した米国グループや国内で原始惑星系ガス円盤の理論的研究を続けてきた国立天文台のグループとの大連合チームを結成し、前回不十分だった事前調査を十二分に行い、再び野辺山 45 m 電波望遠鏡の観測申込を行い、今度は観測時間を認めてもらうこととなった。

3. 発見の興奮、科学の醍醐味！

野辺山での観測に先立って、恒星の視線速度や赤外線データから塵が豊富であることが判っているおうし座 T 型星について、FCRAO 14 m 電波望遠鏡や名古屋大学 4 m 電波望遠鏡を用いて、周囲の星間分子雲からの強い輝線が同一速度にはないと確認できた有力候補を十数個選びだした。この候補リストが我々の“虎の巻”である。観測を開始して 1～2 週間、これだという輝線はなかなか発見されなかった。おうし座 DM 星を見るまでは…¹⁰⁾。

観測開始早々に周囲の分子雲からの輝線は視線速度 9 km s^{-1} にはっきりと見えていたのだが、これとは別に 6 km s^{-1} にも弱い輝線が見え始めてきた。可視光の観測から得られている、おうし座 DM 星の視線速度も 6 km s^{-1} 。「お、出てきたぞ！」気

の早いメンバーの声。「まだ確かじゃないよ」といながらも皆の目が期待に輝く。積分時間を重ねるにつれて、デジタル処理された観測データは雑音が平均化され、天体からの信号が弱いもののまではっきりと見えてくる。3 時間半あまりの積分を重ねた時点で、誰の目にもはっきりとわかるだけの明瞭さで 6 km s^{-1} の輝線が確認できるようになった。

だが、CO 輝線 1 つだけでは円盤のガス質量などを求めるには不十分である。受信機を再調整し、 ^{13}CO の発する電波、および C^{18}O の発する電波が受信できるようにして再び積分を開始した。CO 輝線の検出から ^{13}CO 輝線が検出されることは間違いないとの見通しがあるので躊躇なく長時間積分を実行できる。10 時間余りの積分の後、 ^{13}CO の輝線検出に成功する。おうし座 GG 星で見られたような 2 峰の輝線を示している(図 2)。 C^{18}O は輝線が検出されていないが、これだけの感度で検出できなかったということは、それだけでガス円盤の性質を考慮する上での大きな手がかりとなる。

果たしてガスは星のごく周囲にしかないのか？これが次のポイントである。星の近くにも観測点を設けて、積分を始めた。野辺山新開発のマルチビーム受信機が威力を発揮する。「やっぱり！」星の周りの観測点からは、輝線の兆候が見られない(図 3)。野辺山 45 m 望遠鏡は 14 秒角の角分解能を誇るが、それでも、おうし座分子雲の距離では 2000 AU にも相当する。80 AU 程度の広がりしか持たない我々の太陽系に対応する天体であるならば、広がりが見えない天体でなくてはならない。

観測された輝線の強度は CO で 0.5 K km s^{-1} 、 ^{13}CO で 0.21 K km s^{-1} 。 ^{13}CO の 2 峰の間隔は 1.0 km s^{-1} であった。 C^{18}O の輝線は、雑音に埋もれているためにはっきりとわからないと考えると、その強度は 0.08 K km s^{-1} 以下でなければならない。

4. ガス円盤の身体測定

こうして発見された輝線を発している天体はどのようなものなのか？ ここからは、モデルを考え、推定していく作業にはいる。

まず、円盤の大きさを推定してみよう。輝線の強度から、それを発しているガス塊の大きさが推定できる。天体が大きければ、より明るく見えるという簡単なモデルである。分子ガスの温度を 20 K、内部の乱流運動の速度を 0.5 km s^{-1} と仮定すると、大きさは 760 AU 程度。形状を傾いた円盤と考えると、傾き 30 度（真正面を向いているとき、傾き 0 度とする）ならば、円盤の直径は 820 AU となる。星の重力と回転の遠心力の釣り合いからもガス円盤の大きさが推定できる。分子輝線の幅は、おうし座 DM 星の周りの回転運動によるドップラー効果のためと考えることができる。 ^{13}CO のプロファイルが示す、2 峰の間隔がガス円盤の最も外側に対応すると考えると、星本体の観測から推定されるおうし座 DM 星の質量 $0.48 M_{\odot}$ を用いて、円盤の直径は 3400 AU 以下、円盤の傾きを 30 度とすると 860 AU となる。したがって、ガス円盤の大きさは 800 AU 程度と推定される。これは、我々の太陽系の直径 80 AU よりも一桁程度大きい、これまで知られていた原始星ガス円盤に比べると、十分に小さなもので、原始惑星系ガス円盤といってよい大きさである。

次に、分子輝線の強度から円盤のガス質量が推定できる。ガスの量が多ければ、それだけ輝線強度も強いという理屈である。この場合、CO は既に十二分に強くては物量を反映していない（光学的に厚い）ので質量の見積もりには使えない。そこで、 ^{13}CO での値と C^{18}O の上限値を用いて推定してみることにす

る。 ^{13}CO と水素分子、 C^{18}O と水素分子の存在比をそれぞれ 9×10^5 、 4×10^6 という他の天体で得られている値と変わらないと仮定すると、円盤に含まれるガスの質量は $7 \times 10^{-4} M_{\odot}$ ないし $1 \times 10^{-3} M_{\odot}$ 程度となる。京都モデルでは、我々の太陽系の諸惑星を形成するために最低限必要なガス質量を見

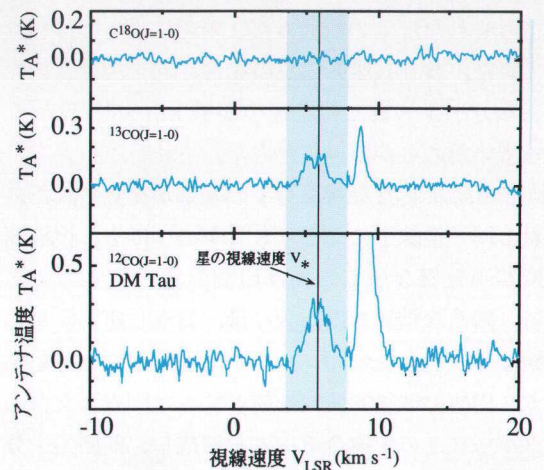


図2 野辺山45m電波望遠鏡によって、おうし座DM星方向で検出された一酸化炭素分子輝線のプロファイル。上からCO、 ^{13}CO 、 C^{18}O 。水色で示した帯状の部分は可視光の観測から決まった、おうし座DM星本体の視線速度範囲。CO、 ^{13}CO では、対応する速度に輝線が明瞭に見え、特に ^{13}CO は2峰を示していることがわかる。

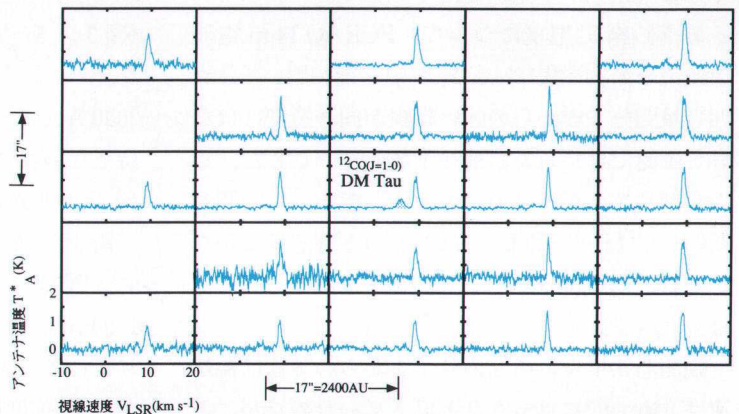


図3 おうし座DM星周りのCO輝線の様子。1つずつの枠の間隔は17秒角。おうし座分子雲の距離では2400AUに相当する。おうし座DM星の方向は図の中央。水色に塗られた輝線は中心の枠でのみ見られることから、おうし座DM星に付随していると推定される。

積もっている。その値は $0.01 M_{\odot}$ である。一方、
 キャメロンの提唱するモデルでは中心星の重力場
 のもとで惑星状にガス円盤が分裂するためには、
 円盤自体が主星程度の質量を持つ必要がある。
 我々の結果は、キャメロンのモデルよりも3桁近
 く小さい。京都モデルと比べてもさらに1桁程度
 小さな質量ではあるが、どうやら京都モデルに軍
 配を挙げているようである。京都モデルが存在を
 仮定していた原始惑星系円盤が発見されたといっ
 てよいだろう。

分子ガスの場合と同様に、塵が発するミリ波電
 波連続波強度から円盤に含まれる塵の量を推定す
 ることができる。この方法では効率的にミリ波電
 波連続波を発する高温の領域すなわち恒星の近傍
 数十 AU に存在する塵の量から円盤全体の塵の
 量を推定することになる。波長 1.3 mm の観測結
 果から、おうし座 DM 星には $3.4 \times 10^{-4} M_{\odot}$ の塵が
 存在すると推定されていた¹¹⁾。星間分子雲でのガ
 ス塵の典型的な存在比 100 が原始惑星系ガス円盤
 でも同じならば、 $0.034 M_{\odot}$ のガスが存在すること
 になる。先に求めた我々の結果の30倍あまりの量
 である。どこかの仮定がおかしいことを意味して
 いる。いまのところ、考えられることは以下の3
 つである。

- (1) 原始惑星系円盤では典型的な星間分子雲に比べ
 てガスに対する塵の量が多い。
- (2) 原始惑星系円盤では密度が高いために化学変化
 を起こすなどして、ガスの中に占める CO 分子
 の比率が典型的な星間分子雲に比べて減少して
 いる。
- (3) 原始惑星系円盤の質量分布は従来考えられてい
 た $r^{-1.5}$ とは異なり、より中心集中が激しい。

これらの仮説のいずれが正しいかについては
 $C^{18}O$ で輝線が検出できればある程度判定ができ
 る。(1)の仮説が正しいことが検証されれば、原始
 惑星系円盤では、ガスに対して塵の濃縮が起こっ
 ていることになり、京都モデルが予測している過
 程が進行していることを直接示すことになる。

我々はそうであることを期待しつつ、「そうなんでも
 理論モデルどおりにはいかないものさ」との期
 待も持っている。この決着は新たな観測結果につ
 けてもらいたい。

5. クローズアップ作戦

我々の観測結果を受けて、即座に野辺山ミリ波
 干渉計による撮像観測が実行されることになっ
 た。現在のミリ波干渉計は分解能は 45 m 鏡を遙
 かにしのぐが残念ながら感度では劣っている。し
 たがって、 45 m 鏡で検出が確認できた天体でない
 と安心して長時間の観測時間を掛けることができ
 ない。一流の望遠鏡は観測申込が多数あり、見込
 みのありそうな観測ほど優先されるためだ。まる
 ひと冬かけた観測の結果、回転円盤と考えられる
 ような速度差を持つ天体が CO 輝線で観測できた
 (図4, 表紙)¹²⁾。速度分解能をさらにあげた図を作
 ると円盤はケプラー回転しているとする予測と一
 致することがわかった。これにより、おうし座 DM
 星周りのガスは原始惑星系ガス円盤であるとの確
 信を持つにいたった。図4から求められた円盤の
 直径は 700 AU 、円盤の傾きは 29 度であり、 45 m
 鏡の結果から大雑把に見積もった大きさが正しか
 ったことも確認できた。

6. 明日への期待, そして新たなる発見へ。

おうし座 DM 星は伴星を持たない単独星であ
 る。多くの恒星がそうであるように、おうし座 T
 型星にも伴星を持つものが多い。米国グループに
 よってガス円盤が発見された、おうし座 GG 星も
 複数の伴星を持ち、多重星系をなしていることが
 知られていた。ことに赤外線スペckル観測から
 は 36 AU 程度しか離れていない伴星の存在が知
 られていた¹³⁾。これでは円盤は安定な軌道を描く
 ことが困難で、惑星系を形成するのは難しいかも
 しれない。実際、我々の太陽にも伴星は存在して
 いない。案の定、IRAM 干渉計の観測によって、

おうし座 GG 星の周りのガス円盤は中心に穴が空いているらしいことがわかった¹⁴⁾。一方、おうし座 DM 星は、伴星を持たないので我々の太陽系と直接比較することができる。今後は、このようなサンプルをより多く見つけ、統計的にどのような傾向があるかを調べ、京都モデルなどの理論モデルが予測している進化過程が正しいかを実証的にチェックしていく必要がある。今回の観測結果は、その第一歩となるべきものだ。

しかし残念ながら、性能の限界から現状の装置のままで直ちにどしどし結果が出てくるというわけには行かない。それを打開すべく野辺山を始め多くの天文台で新しい高性能観測装置が開発されつつある。また、分解能が不十分な望遠鏡での観測結果から天体の空間的構造を推定するのは、可能ではあるが、時として全くの誤解を生むこともある。ちょうど、電話で写真の内容を聞き取るのに似ている。電話の代わりにファックスを用いれば一目瞭然であるように、天文学でも十分な分解能と十分な感度を合わせ持つ装置で観測するに越したことはない。ハッブル宇宙望遠鏡によって、それまで推測するしかなかった天体の構造がはっきりと示されたことによる衝撃を多くの天文学者・天文愛好者が感じていることだろう。原始惑星系円盤の研究についても全く同様のことがいえる。現在、日本の電波天文学者の間で建設が検討されている大型ミリ波・サブミリ波干渉計(LMSA)が建設されれば、観測可能な天体の数が飛躍的に増え、原始惑星系の進化がどのように進むのかについて、明確な回答が得られることとなるだろう。その日が来るのが一日も早くなるよう、我々も協力を惜しまないつもりである。原始惑星系円盤の観測は、今まさに、夜明けの時代を迎えているのだ。

参考文献

- 1) Cameron A. G. W. 1962, *Icarus* 1, 13
- 2) Hayashi C. 1972, Report of 5th Lunar Planet. Symp. ISAS, Tokyo, 13
- 3) Safronov V. S. 1969, Evolution of the protoplanetary cloud and formation of the earth and planets (Moscow, Nauka Press)
- 4) Smith B. A., Terrile R. J., 1984 *Sci* 226, 1421
- 5) 中野武宣 1992, 天文月報 85(12), 584
- 6) Yamashita T., Handa T., Omodaka T., Kitamura Y., Kawazoe E., Hayashi S. S., Kaifu N., 1993, *ApJ* 402, L65
- 7) Omodaka T., Kitamura Y., Kawazoe E., 1992, *ApJ* 396, L87
- 8) Skrutskie M. F., et al., 1993, *ApJ* 409, 422
- 9) Kitamura Y., Omodaka T., Kawabe R., Yamashita T., Handa T., 1993, *PASJ* 45, L27
- 10) Handa T., Miyama S. M., Yamashita T., Omodaka T., Kitamura Y., Hayashi M., Onishi T., Snell R. L., Strom S. E., Strom K. M., Skrutskie M. F., Edwards S., Ohashi N., Sunada K., Saito M., Fukui Y., Mizuno A., Watanabe J. -I., Katata H., 1995, *ApJ* 449, 894
- 11) Beckwith S. V. W., Sargent A. I., Chini R. S., Güsten R., 1990, *AJ* 99, 924
- 12) Saito M., Kawabe R., Ishiguro M., Miyama S. M., Hayashi M., Handa T., Kitamura Y., Omodaka T., 1995, *ApJ* 453, in press
- 13) Leinert Ch., Haas M., Richichi A., Zinnecker H., Mundt R., 1991, *A & A* 250, 407
- 14) Dutrey A., Guilloteau S., Simon M., 1994, *A & A* 286, 149

A protoplanetary disk around DM Tauri, we find it!

Toshihiro HANDA

*Institute of Astronomy, University of Tokyo
Osawa 2-21-1, Mitaka, Tokyo 181*

Abstract: It is one of the most important problem how the solar system was formed. After progress in the star formation study we know how to find out other solar systems where planets are being formed. We find a protoplanetary gas disk around DM Tauri using the Nobeyama 45-m radio telescope. In this report the story of discovery and background of this topic are present.