

星の「たまご」の形成を探る

大西 利和

〈名古屋大学理学部物理学教室 〒464-01 名古屋市千種区不老町〉
 e-mail: ohnishi@a.phys.nagoya-u.ac.jp

星形成の研究は、双極分子流として見える「赤ちゃん星」が多数発見されて大きく進展してきました。しかし、「赤ちゃん星」形成以前の星の「たまご」の段階については、まだまだ研究が始まったばかりです。最近、私たちは名古屋大学の電波望遠鏡を用いて、星の「たまご」の「温床」と考えられる高密度ガスの観測を行いました。観測の対象はおうし座暗黒星雲で、高密度分子ガスの全体像が初めて明らかになりました。そして、この観測データを用いて、「分子ガスがどのような条件を満たせば星形成が始まるのか」を調べました。ここではその結果について紹介します。

1. 星形成の現場をさぐる

夜空に輝く無数の星は、星々の間に漂っているガスから作られます。この星間ガスが自己の重力により収縮し、星が形成されます。一方、磁場、ガスの乱流、回転等はその収縮を妨げようとします。そして星間ガスの自己の重力が優勢になった時に星が形成されます。分子雲から星が形成される過程を解明することは、これらの力のバランスがどのような条件で、どのように破れるのかを明らかにすることにほかなりません。しかし、現状ではこれらのメカニズムは、まだ十分に明らかにはなっていません。星間ガスは、サイズにして1億分の1以上収縮し、密度は約24桁も高くなります。また、星が形成されるまでには約百万年の年月を要します。これは、太陽程度の質量を持った小質量星の年齢、100億年と比較するとほんの一瞬ですが、人間の一生に比べれば非常に長い時間です。このような星間ガスが収縮する様子を人間の一生の間に観測することは不可能です。そこで、様々な進化段階にある天体を数多く観測することにより、

それぞれの段階の天体がどの程度の年齢であるかを「統計的」に推測します。ある段階の天体の数が多いということは、その段階に滞在している時間が長いということが推測できます。我々の目標は、

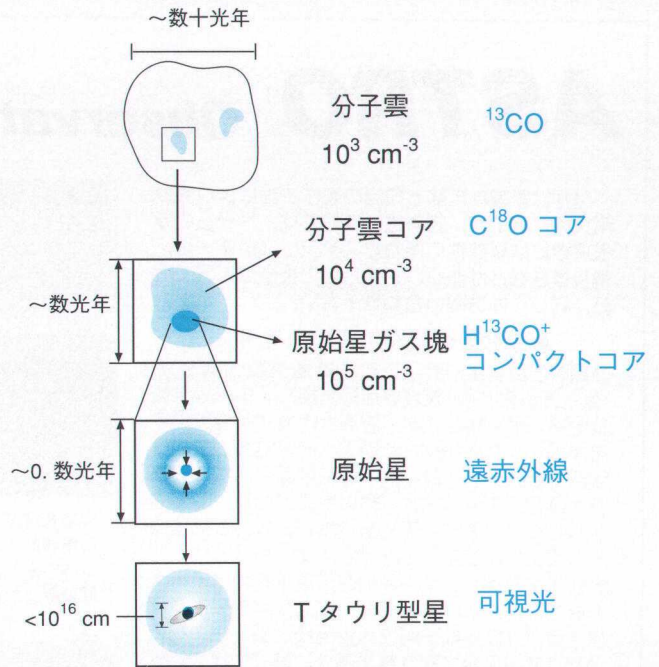


図1 分子雲からTタウリ型星までの進化の様子。右の青い文字は、観測手段を示しています。

様々な進化段階にある天体の観測データを均一に数多く得て、ガスから星へ進化する様子を「統計的」に解明することにあります。

本研究のターゲットであるおうし座暗黒星雲は、活発な小質量星形成領域です。星の形成の過程を調べるためには、その進化が遅く、周りへの影響が少ない質量の小さい星のほうが好都合です。また、この暗黒星雲は、我々から約 500 光年と非常に近い距離にあり、比較的小さな望遠鏡でも十分な空間分解能で観測することができます。そして、この領域では、主系列以前の「若い星」の観測が、可視、赤外線で全領域にわたって数多く行われてきています。一方、星のもととなる星間ガス、特に星が形成されている場所である、密度の高い「分子ガス」のミリ波による観測は、非常に遅れていました。十分な空間分解能で行われたのは、限られたごく一部の領域だけでした。これは、ミリ波の観測に用いる受信器の性能が、不十分なためでした。

そこで、我々は、このおうし座分子雲において、名古屋大学の 4 メートル電波望遠鏡を用いて観測を行いました。この望遠鏡には、超高感度の超伝導受信器が搭載されており、短時間で広範囲の分子ガスの分布を明らかにすることができます。そして、水素分子ガスの密度が 1 cm^3 あたり数千個から数万個の分子ガスの様子が、おうし座分子雲全体に渡って十分な空間分解能で初めて明らかになりました。この観測により、数多くの分子雲のサンプルが得られ、初めて「統計的」にガスの進化の様子を研究することができるようになりました。

本紙、1994 年 10 月号に星形成直前の段階にある高密度ガス塊＝星の「たまご」の検出について掲載しました¹⁾。これは、上記のような完全なサンプルを得ることにより初めて可能になったものです。では、このような星の「たまご」は、どのように形成されるのでしょうか？この間に答えるためには、この星の「たまご」だけではなく、「分子雲コア」の完全なサンプルも得る必要があります。この

「分子雲コア」は、分子雲の中でも密度の高い領域であり、その中で星形成が実際に行われていると考えられています。そこで、今回は、これらの観測データをもとに、おうし座分子雲において、その分子雲コアがどのような条件になったときに、星の「たまご」、つまり、それに続く原始星が形成されるのか、について最新の観測結果を紹介します。

2. 星形成の現場＝分子雲コア

星間空間のガスの平均密度は 1 cm^3 の中に水素原子が 1 個ぐらいです。星が形成されるような場所では、水素は分子の形で存在していて、その密度は 1 cm^3 あたり 100 個～10,000 個程度になっています。この「分子雲」は、夜空の星が黒く抜けている場所、つまり暗黒星雲として観測されてきました。これは、分子雲の中に含まれる塵が背後の星からの光を遮っているためです。しかし、1970 年代になって分子から放出されるミリ波のスペクトル線が観測されるようになると、直接分子雲を観測できるようになりました。存在量の違う同位体や様々な分子のスペクトルを観測することによって、密度の異なるガスを観測することができます。特に、一酸化炭素(CO)から放出される波長 2.6 mm の電波の観測は、分子雲の質量を求めるのに適しています。

星は、分子雲の中でもさらに密度が高い「分子雲コア」と呼ばれる場所で生まれています。それらの密度は $10,000 \text{ cm}^{-3}$ 程度と高く、大きさが約 1 光年程度です。これらの分子雲コアの先駆的な研究がマイヤースらによって 1980 年代前半から行われてきました²⁾。彼らは、光学写真で黒く抜けている場所に電波望遠鏡を向け、分子雲コアの観測を行いました。そして、その分子雲コアの少なくとも半分で星形成が起こっていることがわかりました。これは、分子雲コアが星形成の現場＝「温床」であることを示唆しています。しかし、その分子雲コアからどのように星形成が起こるのかということは、十分明らかにすることができませんでした。その最

大の原因は、ミリ波の受信器の性能が十分でなかったことにあります。そのため、サンプル数が十分ではなく統計的に議論することが難しかったのです。星形成の極めて初期の段階では、可視光や赤外線で輝く天体は見られないはずで、そのような段階の天体を探し出すには、電波観測によって広い領域を探すよりほかに有効な手段がないのです。

3. 星の「温床」の探査

星の「温床」である分子雲コアを統計的に調べるためには、そのサンプルをできるだけ公平に集めることが必要です。そこで我々は、名古屋大学の4メートル電波望遠鏡を用いて、おうし座での分子雲探査を始めました。この4メートル鏡には、雑音が理論的な量子限界に迫る高感度超伝導受信器が搭載されており、その他の望遠鏡と比較して、非常に短い時間で広い領域を観測することができます。また、その角分解能は約3分角であり、近傍の星形成領域の分子ガスの分布を明らかにするためには、ちょうど適当な大きさです。例えば、おうし座分子雲の距離では空間分解能が0.3光年に相当し、分子雲コアの典型的なサイズである数光年を十分に分解できます。

そして我々は、一酸化炭素分子の同位体 ^{13}CO と C^{18}O 分子の回転遷移($J=1-0$)スペクトルを用いて観測を行いました。 ^{13}CO は、密度数千個 cm^{-3} のガスの分布を調べるのに適した分子です。 C^{18}O は、 ^{13}CO と比較して存在量が約5分の1と少なく、そのため10,000個 cm^{-3} 程度のガスの分布を調べるのに適しています。しかし、その分電波強度も弱く観測に時間がかかります。そこでまず、電波強度の強い ^{13}CO スペクトルを用いて、おうし座分子雲の全貌を0.3光年の分解能で初めて明らかにしました³⁾。その後、この観測結果をもとに、 C^{18}O スペクトルでの観測を行いました⁴⁾。このような観測方法を取るにより、きわめて効率的にかつ見落とすことなく高密度ガスを検出することができました。

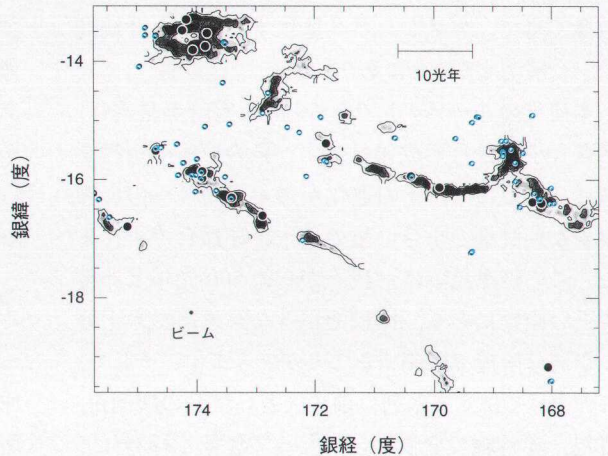


図2 おうし座分子雲の C^{18}O での積分強度図。黒丸は、遠赤外線点線、青丸は可視光で観測できるTタウリ型星を示しています。

初めから C^{18}O を用いて分子雲全体を観測すると時間がかかりすぎるのです。

図2に、 C^{18}O スペクトルの積分強度図を示します。この様におうし座分子雲全体で、初めて密度10,000個 cm^{-3} 程度の高密度な分子ガスの分布の様子が明らかになりました。総観測点数は約7,200点で、2分角の間隔でデータを取得し、約8平方度をカバーしています。黒丸は、生まれたばかりの星と考えられる遠赤外線点源、青丸はTタウリ型星を示しています。遠赤外線点源は、 C^{18}O の電波強度の高いところに存在することがよくわかります。これは、密度10,000個 cm^{-3} 程度の場所が星形成の現場であることを示しています。そして、我々は C^{18}O の電波強度が高くなっているところを C^{18}O コアと呼び、40個同定しました。その平均質量は太陽の20倍程度、密度は8,000個 cm^{-3} 、大きさは0.7光年でした。図から、電波強度が強い C^{18}O コアほど、遠赤外線点源が付随している傾向にあることがわかります。しかし、観測データをよく見ると、電波強度が強いにもかかわらず、若い星が付随していない C^{18}O コアもあることがわかりました。このようなコアでは、星形成は起こっていないのでし

ようか？それとも、我々が、より若い天体を見逃しているだけなのでしょうか？そこで、より密度の高い、星形成がまもなく起こるであろうと思われる天体を探すことにしました。このような天体は、サイズが小さいため、さらに空間分解能の高い望遠鏡で観測する必要があります。そこで国立天文台野辺山の45メートル電波望遠鏡を用いて観測しました。しかし、空間分解能が高いということは、広い領域を観測するには時間がかかることを意味しています。そこで、我々は $C^{18}O$ の観測結果をもとにして観測を行いました。これは、 $C^{18}O$ の観測を ^{13}CO の観測をもとにして行った、というのと同じ方法です。

4. 星の「たまご」の探査

さきに述べたとおり、以前の月報で、星形成直前の段階にある高密度ガス塊＝星の「たまご」の検出についてその第一報を紹介しました。この章では、その簡単なおさらいと、それ以後の観測の結果について紹介したいと思います。

観測にはホルミルイオンの同位体分子 ($H^{13}CO^+$) を用いて行いました。この分子は、ガスの分子個数密度がおおよそ $100,000 \text{ 個 cm}^{-3}$ を超えないと電波を放出しません。そのため、密度が局所的に非常に高くなっている星形成直前の分子雲コアを検出する目的には最適の分子スペクトルの一つであると考えられます。また、野辺山の45メートル鏡の角度分解能は約20秒角、約0.03光年に相当しています。

そして、 $C^{18}O$ の観測をもとに1分角グリッドで

	$C^{18}O$	$H^{13}CO^+$ 星なし	$H^{13}CO^+$ 星あり
質量(M_{\odot})	20	6	3
半径(光年)	0.6	0.2	0.1
密度(個/cc)	8×10^3	1×10^5	5×10^5

表1 コンパクトコアの平均的な物理量。
 $C^{18}O$ は比較のため。

約2,900平方分角の観測を行いました。これで、 $C^{18}O$ の積分強度 1.4 K km/s (水素分子柱密度で、約 1×10^{22} 個 cm^{-2} に相当します) 以上の領域については全て観測を行ったことになります。この観測により、おうし座領域の高密度分子ガスの分布がほぼ完全に明らかになりました。観測の結果、約40個の $H^{13}CO^+$ のコンパクトなコア(以後コンパクトコアと呼びます)を検出しました。そのうち9個は、赤外線点源の付随しているコンパクトコアでした(以後「星のある」コンパクトコアと呼びます)。つまり、約30個の「星のない」コンパクトコアを検出したことになります。このような天体は、電波で広い領域を観測するしか検出方法がなく、4メートル鏡、45メートル鏡を駆使して初めて得ることができるようになったのです。表1に「星のある」コンパクトコアと「星のない」コンパクトコアの平均的な物理量をまとめておきます。これらの結果、ほぼ全てのコンパクトコアを検出した段階においても、「星のある」コンパクトコアは、「星のない」コンパクトコアと比較して、ほぼ例外なくサイズが小さく、密度が高くなっていることがわかりました。これらの結果は、高密度分子ガス塊が収縮しながら



図3 「星のない」コンパクトコアの観測例。等高線は、いずれの図も同じレベル。

ら、その中心に原始星を形成する様子を初めて観測的に明らかにしたものであるといえます。

「星のない」コンパクトコア ＝星の「たまご」

では、我々の検出した「星のない」コンパクトコアはどのような天体なのでしょう？「星のない」コンパクトコアには、赤外線や可視光で検出できる若い星が存在せず、現在は星形成の兆候がないように見えます。しかし、これらのコンパクトコアは、サイズが小さくかつ密度が高く、自己の重力によって束縛されていることがわかっています。また、おうし座分子雲では、最近約200万年の間、ほぼ一定の割合で100個以上の星を形成しています⁵⁾。つまり、現在でも相当数の星が形成されつつあるはずですが、これらの結果から、ほぼ全ての「星のない」コンパクトコアは、これから星形成を起こす“星の「たまご」”である可能性が非常に高いと考えられます。また、個数比から統計的に求めた「星のない」コンパクトコアのタイムスケールは、約20–40万年でした。つまり、“星の「たまご」”が形成されて、20–40万年経過すると、「星のある」コンパクトコアのようにサイズが小さく、密度が高くなり、中心に星が形成されると考えられます。

5. 分子雲コアと若い星

上で述べたように、これまでの観測で、密度10,000個 cm^{-3} 程度の分子雲コア、100,000個 cm^{-3} 以上の高密度ガス塊のほぼ完全なサンプルが得られたこととなります。また、高密度分子雲ガスが収縮して星が形成される様子、つまり「星のない」コンパクトコアから「星のある」コンパクトコアへの進化の様子についても観測的に少しずつ明らかになってきました。では、より密度の低い分子雲コア、つまり C^{18}O 分子雲コアから、星はどのように形成されるのでしょうか？ C^{18}O 分子雲コアの中には複数個の若い星があることから、この C^{18}O コアが星形成の最小単位ではないことは明らかです。

C^{18}O コアが何らかの条件を満たしたときに、その一部分が収縮して、星が形成されるはずですが。

そこで、 C^{18}O コアと「星のない」コンパクトコア、赤外、可視で見える若い星との位置相関を調べてみましょう。前の章で、遠赤外線点源は C^{18}O の強度の強いところに存在する傾向にある、と述べましたが、 C^{18}O コアの中には強度が強いにもかかわらず、若い星が付随していないものがあります。このようなコアでは星形成は起こっていないのでしょうか？実は、このようなコアには、 H^{13}CO^+ のコンパクトコアが付随することがわかってきました。つまり、そのような C^{18}O コアには遠赤外線観測できるような若い原始星はまだできていないのですが、じつは星の「たまご」が存在し、現在まさに星を形成しようとしているところなのです。このことから、 C^{18}O コアの中でどのように星形成が起こっているかを調べるためには、若い星との相関を調べるだけではなく、「星のない」コンパクトコアとの相関も調べる必要があったわけです。

表2に、比較する天体の分類を示します。 C^{18}O と比較する天体である若い星として、冷たい（若い）アイラス点源、温かいアイラス点源、遠赤外放射を示さないTタウリ型星に加え、コンパクトコア、の4つに分類しました。ここで言うアイラス点源というのは、赤外線天文衛星アイラスによって観測された赤外線点源のうち、若い星であると思われる天体です。「冷たい」、「温かい」というのは、その赤外線のスペクトルの性質を示しています。冷たいアイラス点源とは、それらの点源のうち、遠赤外線の放射が強いもの、すなわち中心の天体の周りにまだたくさんガスや塵が残っている天体を示しています。つまり、アイラス点源の中でもより若く、現在質量降着によって星を形成しつつある原始星の可能性が高い天体です。現在の天文学の理解では、これらの天体の周りのガスや塵が散逸し、温かいアイラス点源として観測され、最後に遠赤外線では観測できないようなTタウリ型星になると考えられています。そして、これらの天体と C^{18}O

表 2

	名前	特徴	個数
分子雲コア	$C^{18}O$ コア	$n(H_2) \sim 10^4 \text{cm}^{-3}$	40
	$H^{13}CO^+$ コンパクトコア	原始星ガス塊 $n(H_2) \sim 10^5 \text{cm}^{-3}$	30
冷たい天体	冷たいアイラス点源	原始星候補天体 $\log(F_{12}/F_{25}) < -0.5$	15
若い星	温かいアイラス点源	T タウリ型星 $\log(F_{12}/F_{25}) > -0.5$	25
温かい天体	遠赤外放射を示さない T タウリ型星		50

コアとの位置相関を調べました (図 4)。ここで、我々は、コンパクトコア、冷たいアイラス点源 (ここではそのスペクトルの性質から、この2つをあわせて「冷たい天体」と呼びます) の付随している $C^{18}O$ コアに注目しました。これらのコアは、その中で現在まさに星形成が起ころうとしている、もしくは星が形成されつつあるコアであると言えます。このような「冷たい天体」の付随している $C^{18}O$ コアとそれ以外の $C^{18}O$ コアとを比較することによって、 $C^{18}O$ コアがどのような物理的条件になったときに星形成が起きるのかを調べることができます⁶⁾。

柱密度と星形成

まず最初に、「冷たい天体」の付随している $C^{18}O$ コアとそれ以外のコアとの柱密度を比較してみましょう。図 4 に、典型的なそれらのコアの積分強度図、図 5 に平均柱密度のヒストグラムを示します。これらの図から、「冷たい天体」の付随している $C^{18}O$ コアは、明らかに柱密度が高いことがわかります。また、逆に柱密度が、 8×10^{21} 個 cm^{-2} を超えているものについては、例外なく「冷たい天体」が付随しているこ

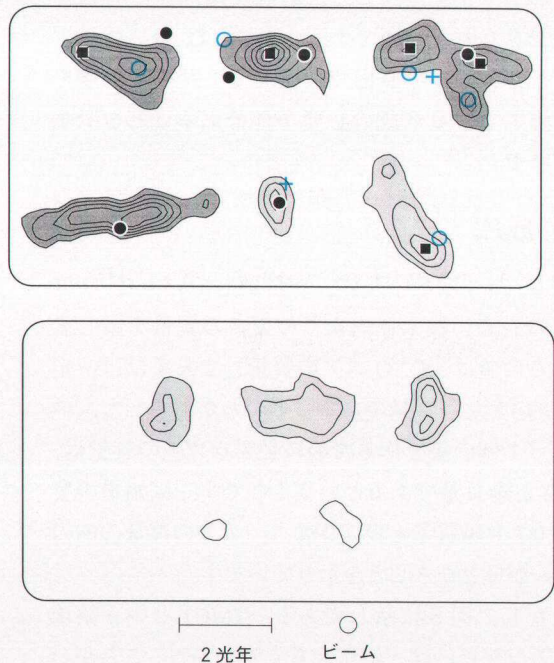


図 4 「冷たい天体」の付随している典型的な $C^{18}O$ コア (上) と付随していないコア (下)。四角はコンパクトコア、黒丸は冷たいアイラス点源、白丸は温かいアイラス点源、十字は遠赤外放射を示さない T タウリ型星を示す。一番濃いグレーは、柱密度が 8×10^{21} 個 cm^{-2} を超えているもの、薄いのは、 6×10^{21} 個 cm^{-2} を超えているものを示す。

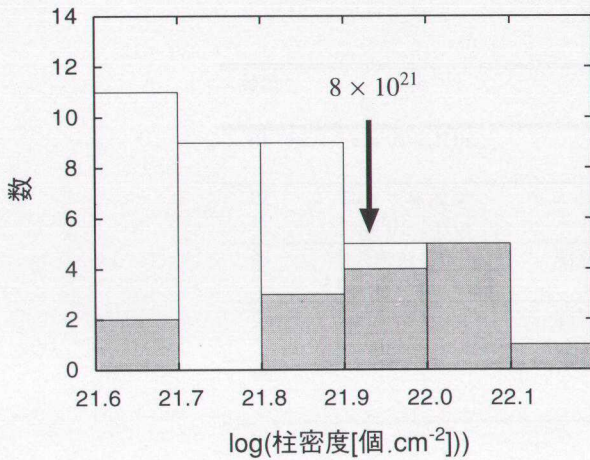


図5 C¹⁸O コアの柱密度のヒストグラム。グレーは、「冷たい天体」の付随しているコアを示す。

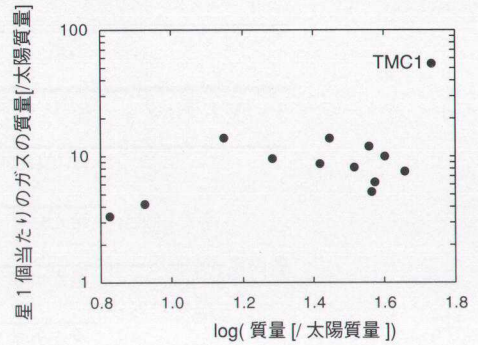


図6 「星」1個当たりのガスの質量

とがわかりました。この、明確な傾向は、特に柱密度で見られるものです。このことは、C¹⁸O コアの一部が何らかの原因で収縮して上記の柱密度を超えることが星形成の必要条件であることを示唆しています。

星形成率

図6に、「冷たい天体」が付随しているC¹⁸O コアでの、若い星1個当たりのガスの質量を示します。この値は、C¹⁸O コアの質量によらずほぼ一定で、約12太陽質量であることがわかりました。つまり、1個の星を作るために必要なガスの質量は、約12太陽質量であるということです。原始星の質量を0.7太陽質量と仮定すると、ガスの質量の内の約6%が星となることを示しています。

ただし、図6に示してある、TMC1という領域にあるコアだけは、値が大きすぎてることがわかります。ここには、他の場所では見られないような質量の非常に大きなH¹³CO⁺ コアが存在しています。その特異さのために、値が大きすぎていないのかもしれませんが。

6. 分子雲コアから原始星へ(まとめ)

上で述べてきた、4メートル鏡と45メートル鏡を用いた観測で明らかになってきた、おうし座領域での分子雲コアから原始星までの進化の様子を要約してみましょう。まず、¹³COで観測されるような薄い分子雲の一部が、何らかの影響で、C¹⁸Oで観測できるような密度の高い(～10,000個cm⁻³)分子雲コアになります。そのC¹⁸O コアの柱密度がある値を超えると、その中ですぐに、高密度原始星ガス塊=星の「たまご」、が形成されます。そして、質量の大きいC¹⁸O コアほどたくさんの星を形成し、ガスの質量の内約6%が星となります。C¹⁸Oの中で形成された星の「たまご」は、2-4×10⁵年程度経過すると、密度勾配が大きくなりながら収縮し、その中心で、遠赤外線で見られるような原始星が生まれることとなります。

7. 残された問題点と今後の研究

これらの観測により、密度10,000個cm⁻³程度の分子雲コアからどのように星形成が起こるかについて、簡単なイメージを得ることができました。しか

し、我々はコンパクトコアの進化について、より正確な理解を得る必要があります。特に、我々の求めた質量は、コンパクトコアの内部運動のエネルギーと重力エネルギーがつりあって平衡状態にあるとして求めた運動学的質量です。この質量から、平均密度を求めたにすぎません。それぞれのコンパクトコアの進化段階を位置づけるためには、その中心の正確な密度、密度勾配を調べる必要があります。そのため、我々は、より高励起の分子スペクトルや連続波での観測を計画しています。また、干渉計による高分解能観測も計画しています。これらの観測により、それぞれのコンパクトコアの、密度構造等が明らかになり、コンパクトコア自身の進化の様子をより詳細に解明することができます。

また、「星のない」コンパクトコアの中には、実は星形成は始まっているが、形成された原始星コアの質量が十分大きくないために、今までの赤外線検出器の感度では検出できていないものもあるかも知れません。もし、そのような非常に若い原始星が検出できれば、動的な収縮が始まったばかりの天体の状態を調べる上で重要な意味を持ちます。また、コンパクトコアがどのような状態になった時に、それらの天体が検出されるのかを調べることは、コンパクトコアの進化を研究する上で重要です。

今回観測を行ったおうし座分子雲には、周りに電離領域や超新星残骸などが存在せず、周りの影響を受けない星形成を研究することができます。そのため、理論との比較が比較的行きやすい領域であるといえます。しかし、すべての星形成領域がこの様な環境にあるとは限りません。むしろ、周りに様々な影響を与える天体が存在する方が普通です。そこで、様々な星形成領域で同様の観測を行うことにより、環境による星形成の違いを調べることが重要となってきます。北天で観測できる星形成領域では、我々に近いものとしてへびつかい座分子雲等が上げられます。また、我々の研究室では、4メートル電波望遠鏡をチリのラスカンパナス天文台に移設しました。96年中には観測が始ま

る予定で、カメレオン座、おおかみ座分子雲等の詳細で広範囲な観測が期待されます。

分子雲からどのようにして原始星が形成されるか、という問題にはまだまだ解決すべき点が数多く残っています。この研究は、この問いを観測的に解明しようとして行われてきたものです。さらに、観測、研究を進める必要があります。

謝 辞

この原稿を執筆するにあたり、指導教官でもある福井康雄氏から貴重な助言をいただきました。また、この研究は、水野 亮氏をはじめ名古屋大学理学部天体物理学研究室の皆様の協力により行われたものです。ここにお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Mizuno A. et al., 1994, Nat 368, 719
- 2) Myers P. C., Linke R. A., Benson P. J., 1983, ApJ 264, 517
Benson P. J., Myers P. C., 1989, ApJS 71, 89 等
- 3) Mizuno A. et al., 1995, ApJ 445, L161
水野亮, 大西利和, 1994, 天文月報 87(10), 429
- 4) Onishi T. et al., 1996, ApJ 465, 815
- 5) Kenyon S. J., Hartmann L., 1995, ApJS 101, 117
- 6) Onishi T. et al., 1996, ApJ, submitted

Investigation of the formation of protostellar condensations

Toshikazu ONISHI

Department of Astrophysics, Nagoya University,
Nagoya

Abstract: The detection of proto-stars, which are mostly observed with bipolar outflows, progressed the study of star formation. The study of earlier stages, protostellar condensations, has just started. We made systematic surveys for dense cloud cores which are considered as the birth site of stars with the Nagoya 4m telescope in the Taurus molecular cloud. This observation revealed the whole structure of the dense gas in Taurus for the first time. We investigated the physical properties of the dense gas needed for star formation. We introduce the results here.