

おうし座における 「星のない分子雲コア」の観測的研究

大西 利和

〈名古屋大学大学院理学研究科 〒464-8602 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、双極分子流を伴う原始星が多数発見されて大きく進展してきました。しかし、原始星形成以前の分子ガス塊の進化の研究には、まだより数多くの課題が残っています。私たちは名古屋大学の4 m 鏡、野辺山の45 m 鏡、CSO10.4 m 鏡を用いて、星形成以前の様々な進化段階にある分子ガス塊の探査を進めてきました。観測の対象はおうし座暗黒星雲です。そして、この観測データを用いて、分子ガス塊の進化の統計的な研究を行い、いくつかの重要な知見を得ることが出来ました。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、約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時間を追って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されます。我々の目標は、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。

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100個～10,000個 cm^{-3} 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

位体や臨界密度 (critical density) が異なる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。

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、約1万個 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¹⁾。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を示しました。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、これら的高密度領域をトレースすることのできる分子スペクトルの強度が弱く、かつ、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。特に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、さらにそのサイズも小さいため、そのような段階の天体を探し出すには、電波で広い領域を探すよりほかに有効な手段がないのです。

3. 研究戦略

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^{2), 3)}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⁴⁾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、赤外線ですべての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、限られたごく一部の領域に集中していました。

密度が数万個 cm^{-3} を超える高密度領域をトレースすることのできる分子スペクトルはその強度が弱く、現存するどの望遠鏡を持ってしても、おうし座領域全域をカバーすることは出来ません。そこで我々は、最初にスペクトル強度が比較的強い ^{13}CO ($J=1-0$) スペクトルで、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、おうし座領域全域の水素分子個数密度数千個 cm^{-3} のガスの分布を初めて明らかにしました⁵⁾。さらに密度の高い領域の観測はこのデータを参考に行っています。つまり、この ^{13}CO スペクトルの強度が一定の値を超える領域を全て、 C^{18}O ($J=1-0$) スペクトルで観測を行い、密度約1万個 cm^{-3} のガスの分布を明らかにしました。さらにこのデータをもとにして野辺山の45 m 鏡を用いて H^{13}CO^+ ($J=1-0$) の観測により、密度数十万個 cm^{-3} のガスの分布を明らかにし、さらにそのデータをもとにして高励起の H^{13}CO^+ 観測

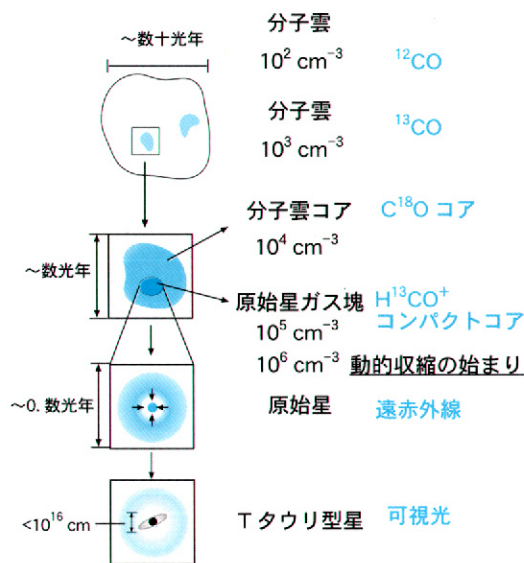


図1 分子雲からTタウリ型星までの進化の様子。右の青い文字は、その段階の天体の典型的な観測手段を示しています。

により、密度約百万個 cm^{-3} のガス塊を見つけました。このような観測手法をとることにより（図1参照）、様々な密度段階の天体を現実的な観測時間で効率的に見つけることが出来ました。また、全ての観測はおうし座領域の全面観測をもとにして行っており、それぞれの進化段階の天体をほぼ全て検出することができた事になり、統計的に分子雲の進化を取り扱うことができるようになりました。

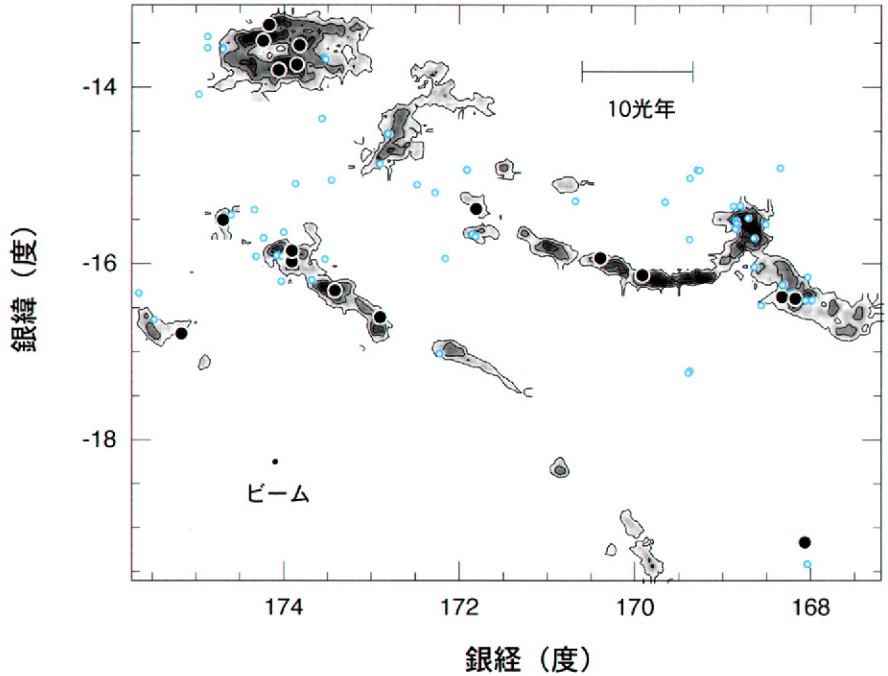


図2 おうし座分子雲の C^{18}O での積分強度図。黒丸は、遠赤外線点源、青丸は可視光で観測できるTタウリ型星を示しています。

4. C^{18}O コア（密度 1 万個 cm^{-3} ）：星形成の現場

一酸化炭素分子の同位体 C^{18}O の回転遷移 ($J=1-0$) スペクトルは、密度約 1 万個 cm^{-3} のガスの分布を調べるのに適しています。我々は上で述べたように、 ^{13}CO スペクトルの結果を参考に、名古屋大学の 4 m 電波望遠鏡を用いて観測を行いました⁶⁾。その角度分解能は約 3 分角で、おうし座の距離では空間分解能が 0.3 光年に相当し、分子雲の典型的なサイズ～数光年を空間的に十分分解することが可能です。図2に、 C^{18}O スペクトルの積分強度図を示します。このようにおうし座分子雲全体で、密度 1 万個 cm^{-3} 程度の高密度な分子ガスの分布の様子が初めて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。そして、我々は C^{18}O の電波強度が強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} 、半径は 0.7 光年でした。また、 C^{18}O の光度とピリアル質量との比較から、ほとんどの C^{18}O コアは重力的に束縛されていることがわかりました。

この観測から明らかになったこととして、 C^{18}O コアは星形成の活発さの指標として非常に優れている、という点が挙げられます。例えば、図2の黒丸は、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、 ^{13}CO と比較しても C^{18}O の電波強度のより強いところに存在することがよくわかります。また、 C^{18}O コアの柱密度が在る値を超えるとその中で必ず星が形成されるという「しきい値」の様なもの存在することが初めて明らかになりました⁷⁾（図3）。この「しきい値」の存在は、最近の理論計算によっても示唆されており⁸⁾、密度約 1 万個 cm^{-3} のガスの塊の性質が、そこで

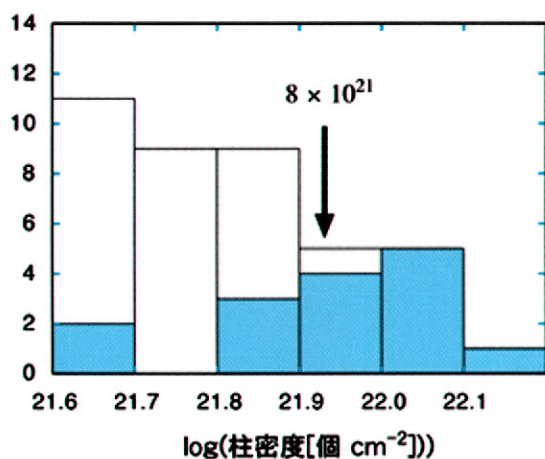


図3 C¹⁸O コアの柱密度のヒストグラム。グレーは、星が形成されているコアを示しています。柱密度が $8 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ を超えているコアでは全て星が形成されます。

の星形成を規定しているということを示しています。また他の星形成領域の観測においても、C¹⁸O の強度、柱密度は、星形成の活発さの指標として非常に優れているということが明らかになってきています。

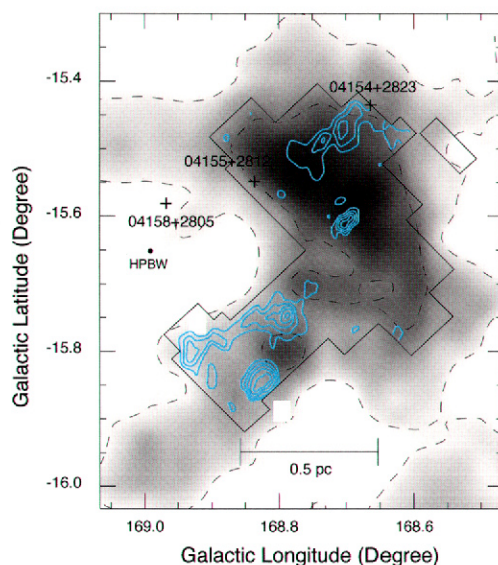


図4 L1495 領域の H¹³CO⁺ コンパクトコアの分布 (青色の等高線)。グレースケールと黒色の等高線は、C¹⁸O の積分強度図を示しています。密度約 1 万個 cm⁻³ 程度の分子ガス雲の中に、密度約 10 万個のコンパクトコアが点在している様子が解ります。

5. H¹³CO⁺ コア (密度 10 万個 cm⁻³) : 星形成直前的高密度ガス塊 (「星のたまご」)

上で述べた C¹⁸O コアの観測でわかったことは、個々の C¹⁸O コアが 1 個の星形成に対応するわけではないが、その (柱) 密度がそこでのフラグメンテーション (分裂) = 星形成の可能性を決めている、という事でした。それでは、星形成に直接 1 対 1 で結びつくガス塊はどのような性質を持っているのでしょうか？

さらに密度が高く星形成の段階に近い天体を検出するために、C¹⁸O による観測をもとに、ホルミルイオンの同位体、H¹³CO⁺ の回転遷移 (J = 1-0) スペクトルを用いた観測を行いました。この分子は、ガスの分子個数密度がおおよそ 10 万個 cm⁻³ を超えないと観測することが出来ません。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、観測に用いた野辺山の 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。C¹⁸O 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いました。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^{9), 10)}。観測の結果、55 個の H¹³CO⁺ 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 (図 4 参照)。

これらのコンパクトコアは、大きく 3 つの種類に分けることが出来ます。原始星が付随しないもの (「星のない」コンパクトコア)、原始星が中心に付随しているもの (「星のある」コンパクトコア)、原始星の方向のみ強度が弱くなっているもの、の 3 つです。大きな特徴として、「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 (0.2 光年 ⇒ 0.1 光年)、密度が高く (10 万

個 $\text{cm}^{-3} \Rightarrow 50$ 万個 cm^{-3}) になっていること、
 があげられます。この結果は、高密度分子
 ガス塊が収縮しながら、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。さらに「星のな
 い」コンパクトコアで、「星のある」コンパ
 クトコアのような性質を持った物が存在し
 ていることから、この観測で検出された「星
 のない」コンパクトコアは、星形成直前のガ
 ス塊であることがわかります。

5.1. 「星のない」コンパクトコアの タイムスケール

それでは、これらの「星のない」コンパ
 クトコアのタイムスケールはどの程度なの
 でしょうか？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
 よって束縛されており、自然にガスの密度
 が小さくなって散逸する可能性は少ないと
 考えられます。また、その質量は「星のあ
 る」コンパクトコアと同程度、つまり、こ
 の「星のない」コンパクトコアは、さら
 に分裂することなくその中心で星が生ま
 れることが期待されます。つまり、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。おうし座では分子雲、最近約 200 万
 年の間、ほぼ一定の割合で 200 個以上
 の星を形成しています¹¹⁾。定常的に星が
 形成されているとすると、先に述べた「個
 数 \propto タイムスケール」の関係をタイムス
 ケールの推定に使用することが出来ます。つ
 まり、おおよそ 1 個 \sim 1 万年に相当しま
 す。「星のない」コンパクトコアは 44 個
 ですから、この議論を適用すると「星のな
 い」コンパクトコアのタイムスケールは、
 約 40–50 万年程度となります。

典型的な「星のない」コンパクトコアの
 物理量、温度 10 K、密度 10 万個 cm^{-3} 、
 のガスのダイナミカルなタイムスケール
 (free-fall time) は、約 10 万年ですから、
 これらのコンパクトコアは重力的にダイナ
 ミカルな進化をしているわけではないことが
 わかります。また、完全に磁場に凍結さ
 れ、磁場が重力に勝っているガス塊で、
 ambipolar diffusion により中性粒子が
 すり抜けるタイムスケールは、free-fall
 time の 10 倍以上¹²⁾で、今回求めた
 タイムスケールと比較してかなり長いこと
 がわかります。また、内部乱流のみ(磁
 場的に super-critical)によって支えら
 れたガス塊が乱流の散逸によって収縮す
 るタイムスケールは、free-fall time の
 4–5 倍¹³⁾、今回のタイムスケールとほ
 ぼ同じです。この結果は、「星のない」コ
 ンパクトコアの進化のタイムスケールが、
 主に内部乱流の散逸によって決まってい
 る可能性を示唆しています。

5.2. 「星のない」コンパクトコアの質量関数

一般的に分子雲、分子雲コアの質量スペ
 クトルのべき α ($dM/dN \propto M^\alpha$) は、お
 およそ -1.6 程度^{14), 15)}で、星の初期
 質量関数 (IMF) のべき、 -2.7 ^{16), 17)}、
 と比較してなだらかであることが知られて
 います。この

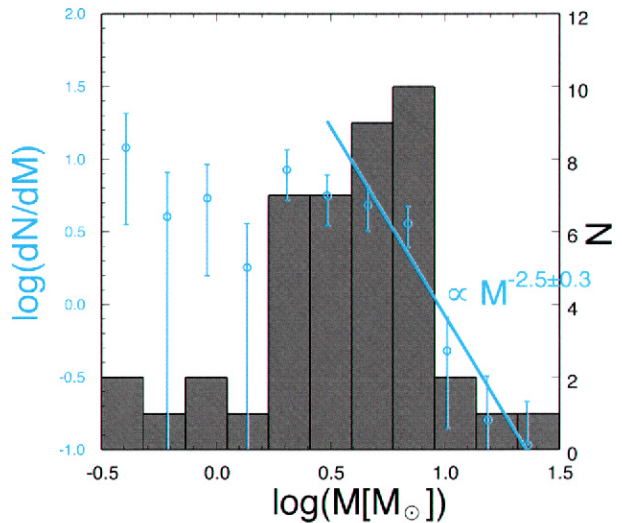


図5 「星のない」コンパクトコアの質量ヒストグラムと質量関数。

IMFのべきはいつ決定されるのでしょうか？

図5に今回検出された「星のない」コンパクトコアの質量関数を示しました。そのべきは明らかに一般的な分子雲、分子雲コアとは違いべきが大きく(-2.5), 星のIMFとよく似ていることがわかります。このべきの大きさは、「星のない」コンパクトコアの質量のダイナミックレンジが小さく、ほとんどが3太陽質量程度の質量であることを反映しています。上で述べた通り、 H^{13}CO^+ で検出できる密度 10 万個 cm^{-3} 以上のガスの塊は、大体3太陽質量程度以下にさらに分裂することなく、星形成と1対1対応しています。そのような状況の下で、「星のない」コンパクトコアの質量関数と、星のIMFが酷似しているこ

とは非常に興味深い事実です。このコンパクトコアの質量関数が星のIMFを決定しているとする、より大きく密度が低い分子雲 ($\sim \text{C}^{18}\text{O}$ コア) から密度 10 万個 cm^{-3} のガス塊への分裂の仕方が星のIMFを決めていることとなります。

ところで、ダストのミリ波・サブミリ波放射の観測においても、高い密度のダスト雲の質量関数のべきが-2.5程度という結果が出ており^{18), 19)}, 密度 10 万個 cm^{-3} 程度のガス塊の性質が星のIMFを決定していると言うことが示唆されてきています。しかし、ダスト放射観測の問題点は、観測されたダストコアの力学的状態が重力的に束縛されているのかどうかがよくわからず、コアの力学的な実体をみているのかどうかは未だ議論の余地があります。本研究ではほぼ全てのコンパクトコアが重力的に束縛されていることが、分子スペクトルの速度情報から得られており、このようなサンプルをもとにしたガス塊の質量関数の導出は初めてです。

6. 動的収縮の始まり (密度 100 万個 cm^{-3})

それでは、ガスはいつ動的に収縮しはじめるのでしょうか？ 上のタイムスケールの議論によると、密度 10 万個 cm^{-3} の段階ではまだダイナミカルな収縮は始まっていません。そこで、コンパクトコアの中心部の

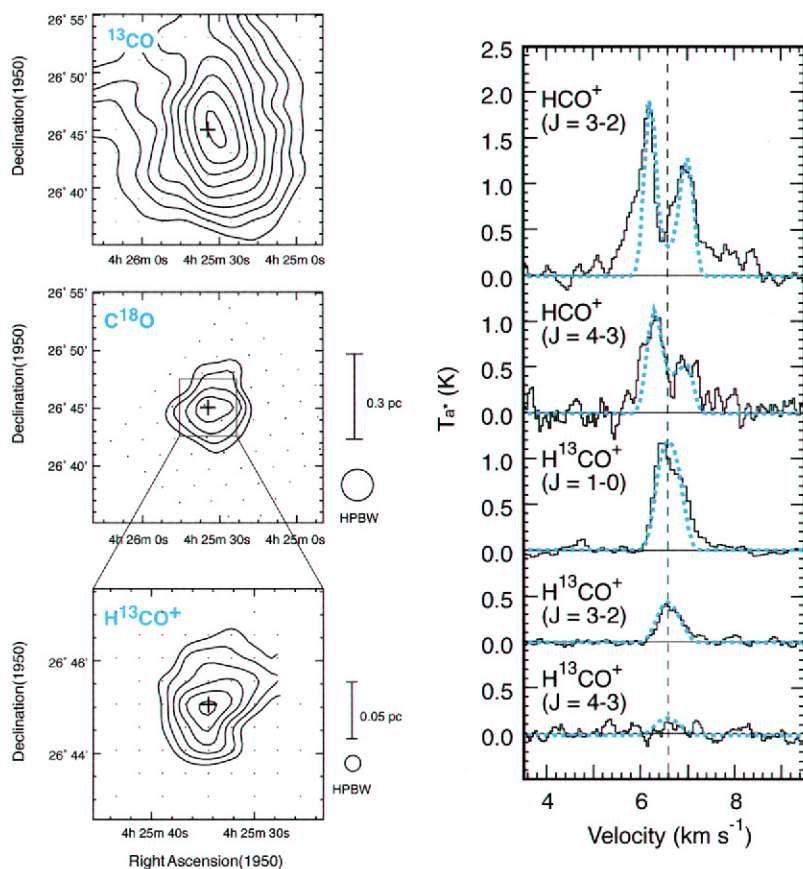


図6 MC27の ^{13}CO , C^{18}O , H^{13}CO^+ ($J=1-0$)による積分強度図(左)と、中心方向のスペクトル(右)

密度を正確に見積もるために、 HCO^+ 、 H^{13}CO^+ ($J = 3-2, 4-3$) の観測を行いました。観測には、CSO (Caltech Submillimeter Observatory) の 10.4 m 鏡を用いました。LVG 計算から求めた分子ガスの密度は、ほとんどの「星のない」コンパクトコアで 10 万個 cm^{-3} 程度でした。この値を用いて「星のない」コンパクトコアの質量を求め直すと、やはりピリアル質量程度となり、これらが重力的に束縛されていることが再確認できました。

しかし、コンパクトコアのカタログの 27 番目、MC27、の方向のこれらのスペクトルは、他の「星のない」コンパクトコアとかなり異なるものでした。その特徴として、(1) 光学的に薄いライン H^{13}CO^+ ($J = 3-2$) の強度が最も強い、(2) 光学的に厚いラインである、 HCO^+ ($J = 3-2, 4-3$) がブルー側の強い非対称ダブルピークの形状で、中心部のみで線幅が大きい、が挙げられます (図 6)。 (1) の結果は、MC27 の密度が「星のない」コンパクトコアの中で最も高く、 100 万個 cm^{-3} 程度であることを示しています。密度を進化の指標であるとすると、MC27 は「星のない」コンパクトコアの中で最も進化している天体であるということになります。また、(2) の結果は、分子ガスが $0.2-0.3 \text{ km s}^{-1}$ 程度で落ち込んでいることを示しています。輻射輸送、励起のモンテカルロシミュレーション解析の結果、観測されるプロファイルの説明するためには、中心から $2000-3000 \text{ AU}$ の距離のガスが $0.2-0.3 \text{ km s}^{-1}$ で中心部に落ち込んでいる必要があることが解りました。このことは、動的収縮は原始星コア形成以前から起きていることを示唆しています。ところで、この自己吸収のプロファイルはガス塊の形状に大きく依存します。MC27 は図 6 で示す通り、球対称的構造を持っており、上記で示したようなモデルとの比較が非常にしやすい天体です。また、光学的に厚いラインが中心 (30 秒角以内) のみで線幅が大きく、光学的に薄いラインの線幅が変わらないということは、非常にコンパクトなアウトフロー的な現象が存在していることを示唆しています。

MC27 の様な天体がおうし座領域で 1 個だけしか見つからなかった、と言う事実は、MC27 に相当する進化段階のタイムスケールが短く、1 万年程度である事を示唆しています。密度 100 万個 cm^{-3} のガスの free-fall time は数万年であり、動的に進化していることを示唆しています。このことは、光学的に厚いラインのプロファイルがガス塊の収縮で説明できると言うこと、非常にコンパクトなアウトフロー的な現象が見られるということ、とも全く矛盾しません。つまり、MC27 はおうし座の中で星形成の瞬間に最も近い、つまり、原始星コア形成の瞬間の前後 1 万年以内の天体であることがわかります²⁰⁾。また、分子ガス塊の密度が 100 万個 cm^{-3} を超えた辺りで動的な収縮が始まること、原始星が形成される以前からガスの動的収縮が始まっている、ということも明らかになりました。

7. 最後に

以上で、おうし座分子雲における統計的な手法を用いた分子ガスから星形成への進化の研究について紹介いたしました。星形成という現象は、空間的、密度的、時間的に非常にダイナミックレンジの大きな現象で、その進化を順番に追うためには、様々な空間分解能をもつ望遠鏡を用いて、さらに様々な密度領域を見ることのできるトレーサーを用いて統計的な観測研究を行うことが非常に重要だということがわかります。本研究は、大望遠鏡と比べると比較的空間分解能の粗い 4 m 電波望遠鏡による広域観測が最も基礎であり、この観測があったからこそさらに大口径望遠鏡の観測の意味が大きくなりました。

これからの世界の高性能ミリ波・望遠鏡はチリのアタカマ高地に集中します。ここには、ALMA を初めとして NANTEN2, ASTE, APEX 等の望遠鏡が全て近未来に稼働することになっており、まさしく上に述べた研究が様々な星形成領域で可能となります。我々のグループでは、既にラスカンパナス天文台に設置された NANTEN 望遠鏡を用いて、おおかみ座、カメレオン座を初めとする小質量星領域、カリーナ腕、ケンタウ

ルス腕を初めとする大中質量星形成領域の $C^{18}O$ ($J = 1-0$) スペクトルによる分子雲コア探査を行っています。これらのサンプルは、将来アタカマにある様々な望遠鏡での観測に有効に利用することが可能であり、おうし座分子雲のみの観測ではわからなかった、紫外線等の周りの環境が星形成に及ぼす影響なども研究することが可能となります。

この研究は、福井康雄先生を初めとする名古屋大学天体物理学研究室の皆さまのご協力によって実行することが出来ました。また、野辺山の 45 m 鏡を用いたコンパクトコアの探査は、名古屋大学、東大天文センター、国立天文台の方々の共同研究として始まったものであり、非常に多くの方のご協力がありました。この場を借りましてお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Myers P. C., Linke R. A., Benson P. J. 1983, ApJ 264, 517 等
- 2) Cohen M., Kuhl L. V. 1979, ApJS 41, 743
- 3) Herbig G. H., Bell K. R. 1988, Lick Obs. Bull. Ser. No. 1111
- 4) Elias J. H. 1978, ApJ 224, 857
- 5) Mizuno A., Onishi T., Yonekura Y., Nagahama T., Ogawa H., Fukui Y. 1995, ApJ 445, L161
- 6) Onishi T., Mizuno A., Kawamura A., Ogawa H., Fukui Y. 1996, ApJ 465, 815
- 7) Onishi T., Mizuno A., Kawamura A., Ogawa H., Fukui Y. 1998, ApJ 502, 296
- 8) Pudritz R. E. 2002, Sci 295, 68
- 9) Mizuno A., Onishi T., Hayashi M., Ohashi N., Sunada K., Hasegawa T., Fukui Y. 1994, Nature 368, 719
- 10) Onishi T., Mizuno A., Kawamura A., Tachihara K., Fukui Y. 2002, ApJ 575, 950
- 11) Kenyon S. J., Hartmann L. W. 1995, ApJS 101, 117
- 12) Lizano S., Shu F. H. 1989, ApJ 342, 834
- 13) Nakano T. 1998, ApJ 494, 587
- 14) Yonekura Y., Dobashi K., Mizuno A., Ogawa H., Fukui Y. 1997, ApJS 110, 21
- 15) Kawamura A., Onishi T., Yonekura Y., Dobashi K., Mizuno A., Ogawa H., Fukui Y. 1998, ApJS 117, 387 等
- 16) Scalo J. M. 1998, in *The Stellar Initial Mass Function*, ed. G. Gilmore & D. Howell (San Francisco; ASP), 201
- 17) Kroupa P. 2001, MNRAS 322, 231
- 18) Motte F., André P., Neri R. 1998, A&A 336, 150
- 19) Testi L., Sargent A. I. 1998, ApJ 508, L91

Observational Study of Starless Cores in Taurus

Onishi, TOSHIKAZU

Department of Astrophysics, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, JAPAN

Abstract: A study of star formation has been largely progressed by detections of protostars accompanying outflow phenomenon. However, there still remain a number of unresolved problems in a study of molecular condensations before protostar formation. We have carried out molecular-line observations of starless condensations in various stages in Taurus by using the 4-m telescope of Nagoya University, 45-m telescope at NRO, and 10.4m CSO telescope. In this paper, we present the important findings on the evolution of starless condensations by the statistical investigations of the observed data.