

特集 「原始惑星系円盤」

恒星と惑星系の材料 「分子雲コア」

立松健一、梅本智文¹

1. はじめに

恒星と惑星系の材料とも言うべき「分子雲コア」とはどのようなものかを説明し、また我々自身が行なってきた観測についてご紹介します。恒星と恒星の間に存在する「星間ガス」は、自己重力による収縮・分裂を通じて、様々な構造を作りだします。銀河系で平均した「星間ガス」の密度（水素の数密度で表します。以下同じ。）は、 1 cm^{-3} のオーダーです。銀河系の星間ガスの全質量のうち約半分は「分子雲」と呼ばれる H_2 分子を主成分とした比較的密度の高い（ $> 10^2 \text{ cm}^{-3}$ ）雲状の天体の中に含まれます。 H_2 分子は電気双極子モーメントをもたないので、電波領域で観測することできません。電波天文学では、より量的には少ないCO（一酸化炭素）やCS（一硫化炭素）といった分子の回転遷移を観測することによって、分子雲の構造や物理状態を調べます（因に、COとCSの存在量は、 H_2 を1としてそれぞれ 10^{-4} と 10^{-9} のオーダーです）。様々な分子の様々な回転遷移を観測することにより、異なった密度の部分の情報を得ることができます。分子雲の中の特に高密度の部分「分子雲コア」と呼びます。分子雲コアは、CSや NH_3 （アンモニア）等の高密度ガスに敏感な輝線で観測される構造です。サイズが0.1pc（ 3×10^{17} cm）程度で、密度は 10^4 - 10^5 cm^{-3} 程度です。高密度ガスと言っても、我々の感覚から言えば限りなく真空に近いのですが。

「分子雲コア」の研究の歴史を簡単に振り返ります。Myersらは、パロマー写真星図で背景の星を隠している小さく濃い暗黒雲を選び、電波望遠鏡で観測してその物理的性質を調べました(1, 2, 3)。Myersらのグループの観測した天体を「暗黒星雲中の分子雲コア」、あるいは、「暗黒星雲コア」とよびます。その後、赤外線天文衛星IRASが打ち上げられ、Myersらが研究していた暗黒星雲コアのじつに半分がIRAS衛星で観測された点源を伴っていることが明らかになりました(4)。これにより、暗黒星雲コアがまさに星の材料であることが明確にされました。暗黒星雲コアに付随するIRAS点源は、比較的質量が小さい（典型的には1太陽質量程度）生まれたての若い星です。暗黒星雲コアの質量は10太陽質量オーダーであり、非常に大雑把に言ってその質量の10%程度が星になるわけです。「暗黒星雲コア」の典型的なサイズ0.1pcは、星間ガスにおいて2つの重要な意味をもちます。第1に、そのサイズがJeans長（無限遠に広がる一様媒質の自己重力による不安定性に対する臨界波長）程度であることです。Jeans長は密度（つまり場所）によって変わるので、正確に言えば、星間ガスの大きな（ $> 0.1 \text{ pc}$ ）構造では一般に構造のサイズが（構造の密度に対する）Jeans長を上回っていますが、0.03-0.1 pc程度ではサイズがJeans長程度になるということになります(5)。第2に、大きなスケール（ $> 0.1 \text{ pc}$ ）では自己重力に拮抗する力として非熱的なサポート（乱流、もしくはAlfven波のよ

¹国立天文台野辺山, ²国立天文台三鷹

うなものと考えられている)が支配的ですが、このスケール以下では熱的なサポートが取って代わるというように、0.1 pcあたりを境にしてサポートの主な担い手がかわることで。

星間ガスにおける Jeans 長の意味が最近全く異なった側面から指摘されました。Larson は、おうし座の生まれたての若い星の天球上での空間分布を研究し、自己相似的 clustering をしていることを示しました(図1)(6)。使用した観測データは、月の掩蔽を利用した連星間距離の測定、近赤外線のスเปックル干渉観測、そして近赤外線2次元撮像観測のデータです。横軸は星の間の角距離 θ で、縦軸は頻度 Σ です。角度 0.017 deg (これは距離 0.04 pc に相当) を境にして、星の分布の自己相似性が明らかに変化しています。0.04 pc 以上の星の分布の自己相似性は分子雲の構造の自己相似性(フラクタル性あるいは階層性)を反映し、それ以下での自己相似性は連星系の形成メカニズムの反映だと Larson は解釈しました。因に誕生したての星の星の約 2/3 は連星として生まれているらしく(7)、Larson の統計では半径 0.04 pc 内に典型的には1つの伴星があることとなります。つまり、3重星以上

ではなく、2重星が多いということです。分子雲コア(Jeans 長)以上のスケールでは、構造はほぼ virial 平衡であることが知られており(8,9)、いわば準静的に進化しているのではないかと考えられています。また、構造は Jeans 波長以上の大きさを持つので、自己重力による不安定性が生じます。分子雲コアのスケール以下では、自己重力のみによる不安定性は生じなくなるので他の助け、例えば回転、が重要となってきます。

暗黒星雲コアの形状と運動はどうなっているのでしょうか。Myers らは、コアの形状を3つの輝線を用いて観測し、平均的な軸比が 0.5-0.6 であること、oblate (円盤型)ではなく prolate (ラグビーボール型)であると考えられることを示しました(10)。Goodman らは、暗黒星雲コアの速度場を調べ、コアの長軸と回転軸の間には何の相関もないことを示しました(11)。回転の速度勾配は、1 pc ($=3 \times 10^{18}$ cm)あたり 0.3 ないし 4 km s⁻¹ 程度です。形状と速度場の研究から、コアの elongation には回転運動による遠心力の効果は効いていないことが明らかになりました。

このような研究を通じて、分子雲の(準静的)収

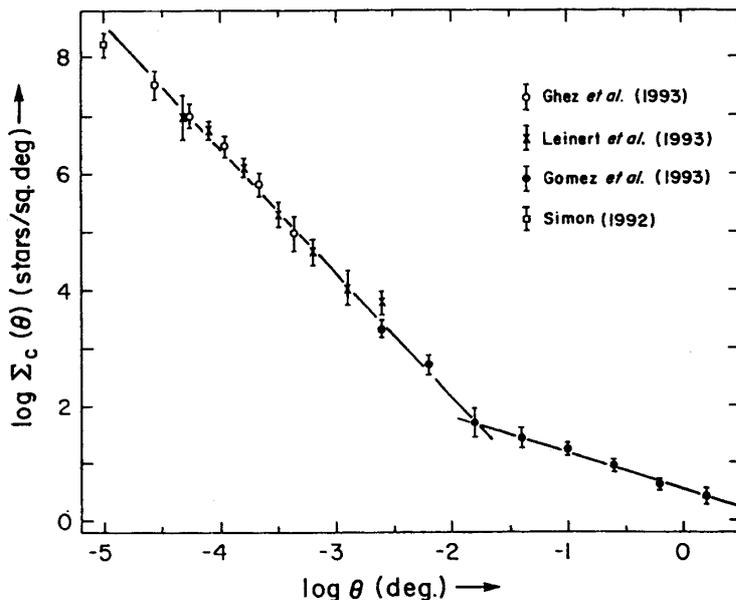


図1

縮・分裂のもとにできた「分子雲コア」が、恒星・連星系の直接の材料であることがわかってきました。そしてその物理状態、つまり、星生成の初期状態が研究されつつあります。

2. 誕生する星の質量

さて、「分子雲コア」が恒星の材料であるならば、「分子雲コア」の性質とそこから誕生する星・惑星系の性質に何か関係がある可能性があります。恒星の質量は、軽いものは太陽質量の0.1倍、重たいものは100倍近くになりますが、どの質量の恒星がどのような頻度で誕生しているのか、つまり、星の初期質量関数(Stellar Initial Mass Function, 略してIMFと呼ぶ)は何が決めているのかは、現代天文学の重要な未解決問題です。

「分子雲コア」の性質とそこから誕生する星の質量の間の関係を明らかにする1つの方法として、重たい星が生まれている領域とそうでないところを比較研究することが考えられます。実は、「分子雲」には、(極めて大雑把に言えば)「巨大分子雲」と「暗黒星雲」の2種類があります。前者は、質量が 10^5 太陽質量のオーダーで、後者は 10^3 太陽質量のオーダーです(もちろんdiscreteに別れているわけではなく、多少便宜的に分けたものです)。星生成における違いは、前者では大質量星が誕生しており、後者ではそうではありません。そうです、もし分子雲コアの何らかの性質が星の質量の決定に関係しているのであれば、「巨大分子雲」と「暗黒星雲」の分子雲コアの比較研究を行えばいいわけです。もう1点、巨大分子雲の分子雲コアの研究の重要性を指摘しなければなりません。恒星の約90%は、「巨大分子雲」で生まれると考えられています。よって、「巨大分子雲」の分子雲コアの統計的性質というのは、銀河系での星生成を理解するうえで欠くべからざる基本情報と考えられるのです。

Myersらの観測したのは、「暗黒星雲」の分子雲コアです。暗黒星雲の代表的なもの、「おうし座分子雲」、「へびつかい座分子雲」は我々から約150 pcと近くにあり、中小口径の電波望遠鏡の空間分解能(同じ周波数の電波に対しては、望遠鏡のビーム幅は口径に反比例します)でも0.1 pcの大きさの分子雲コアの研究が可能でした。しかしながら、巨大分子雲は我々にもっとも近い「オリオン座分子雲」でも距離が450 pcと3倍も遠いために、中小口径の電波望遠鏡ではその中の分子雲コアは観測できません。しかも、暗黒星雲は雲が比較的薄いので、Myersらがやったように写真星図上で分子雲コアの候補を探せますが、巨大分子雲は雲が厚いので、写真星図上で候補を探すことができません。このような状況で、巨大分子雲の分子雲コアの統計的研究を行なうためには、巨大分子雲全体を分子雲コアの検出に適当な輝線を用い、十分な角度分解能で観測することが唯一の方法だと思われました。

3. オリオン座での分子雲コアのサーベイ観測

我々のグループは、重要な分子輝線の集まるミリ波(波長が1-10 mmの電波)帯で世界最大口径を誇る国立天文台野辺山宇宙電波観測所の45m電波望遠鏡を用いて、オリオン座での分子雲コアのサーベイを行ないました(12,13)。45m電波望遠鏡のCS(1-0)輝線の周波数でのビーム幅は直径36秒角(オリオン座分子雲の距離で0.08 pcに相当)であり、長さ4度角(約40 pc)のオリオン座分子雲をマッピング観測するためには、1万点オーダーの観測が必要です。電波望遠鏡は、通常の受信機では、1度に1点の電波スペクトルを取るのが精一杯であり、非常に大規模な観測となります。このような観測が可能になった背景には、超伝導素子を用いたSIS受信機により超低雑音が達成されたこ

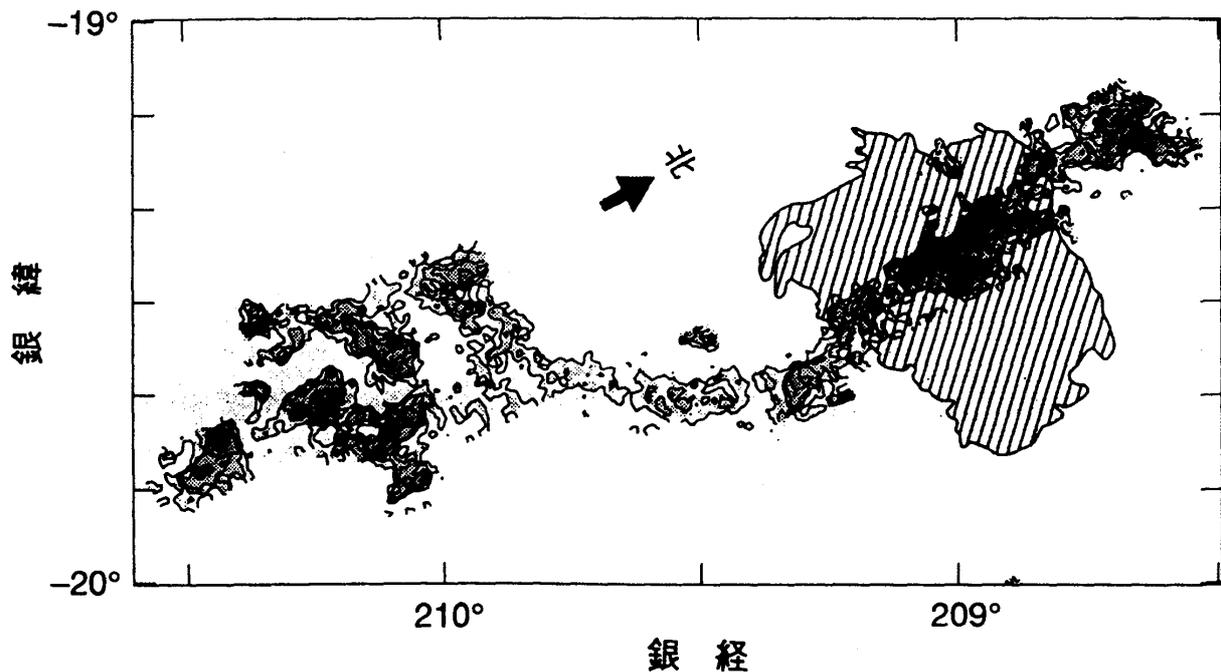


図2

と、また、望遠鏡の運用に長期プロジェクトがもりこまれ、かなり大掛かりな観測が可能になったことがあります。我々は、CS分子の $J=1-0$ 回転遷移を用いて、「オリオン座分子雲」全体を観測しました。図2に、我々の観測の結果得られた電波地図のうちの一部、オリオンの大星雲付近を示します。小さな「つぶつぶ」が星の材料「分子雲コア」です。オリオンの大星雲は、トラペジウムと呼ばれる4つの星からの紫外線で電離されたガス雲ですが、トラペジウムもこのフィラメント状分子雲から誕生したのです。

サーベイ観測の結果、合計227個の分子雲コアを検出しました。もちろん、このような大規模な観測は世界ではじめて行なわれたものであり、ほとんどすべてのコアはこれまでに知られていなかったものです。

観測されたオリオンの分子雲コアの半径(FWHMサイズの半分)の平均値は0.16 pcでした。同じCS輝線で観測した暗黒星雲コアの半径の平均は0.14 pcですから、ほぼ同じ階層の構造「分子雲

コア」を観測していることが確認できました。注目すべき点は、暗黒星雲コアの場合に比べ、系統的にライン幅が大きいことです。ライン幅というのは、輝線で観測されるドップラー幅で、オリオンのコアでは約1 km/s、暗黒星雲コアでは平均0.2-0.5 km/sでした。コアでの音速が0.2 km/s程度ですから、オリオンのコアでは非熱的な運動がまだ結構効いていることがわかりました。

オリオン座分子雲は全体的にはフィラメント状の細長い構造をしています。観測された分子雲コアは、暗黒星雲コアの場合と同様に0.5程度の軸比を持つ細長い形をしています。われわれは、フィラメント状分子雲のelongationの方向とコアの長軸の方向の相関をとりました。その結果、コアの長軸がフィラメントに沿う傾向があることがわかりました。コアのelongationの整列性から考えると、フィラメント状分子雲で重力不安定性によりコアが形成されるプロセス(重力不安定性によるソーセージ・タイプの分裂とそれに引き続く階層構造の形成?)にelongationの原因がある、あるいは、

グローバルに整列した磁場がコアの elongation に効いている、という可能性が考えられます。

オリオン分子雲のなかには、若い星が集団で生まれている「クラスター」が観測されています。また、クラスターは、暗黒星雲にはあまり見られなくて、巨大分子雲での星生成の特徴でもあります。我々の観測の結果、クラスターは、大質量 ($> 100 M_{\odot}$) の分子雲コアから誕生していることがわかりました(13)。その例として、オリオンの OMC-2 および L1641-North 領域での分子雲コア (等高線) とクラスターの若い星 (黒丸) の関係を図3に示します(14)。

我々が観測した分子雲コアの質量を足し合わせると、オリオン座分子雲の全質量の約15%になります。コアの力学的な釣り合いを調べたところ、暗黒星雲コアの場合と同様に、オリオン座の分子雲コアもビリアル平衡に近いことがわかりました。オリオンのコアのうち、「生まれたての星」(より詳しく言うと双極分子流という若い星に特有の現象を示す天体や低温 IRAS 点源) を伴う率は、10-20% でした。「星のないコア」は、星を生まないという

わけでは必ずしもありません。ここでは、簡単のためにすべてのコアは最終的に星を生み、星のないコアは進化の前段階であると仮定します。「生まれたての星」として観測されるタイムスケールは 10^{4-5} 年です。分子雲コアが重力に拮抗する力を失ったときに自由落下するタイムスケールは計算から 10^5 年程度で、コアが準静的に収縮するとすればタイムスケールは数倍のびて 10^{5-6} 年程度になると考えられます。よって、「生まれたての星」を伴う率 10-20% は進化のタイムスケールの違い、すなわち、コアの進化時間の最後の 10-20% で「若い星」の形成がおこると考えてよさそうです (もちろん極めて大雑把な話ですが)。ちなみに、最終的に星を生まないコアがどれくらいあるのかはよくわかっておらず、今後の研究待ちです。

さきに、オリオンのコアは暗黒星雲コアに比べ、ライン幅が大きいと書きましたが、図4に輝線のライン幅 Δv とコア半径 R の間の関係 (ライン幅-サイズ関係) を示します。黒い記号は、暗黒星雲コアでの観測結果で、 NH_3 , CS , $C^{18}O$ でのデータを示します (15)。直線は、暗黒星雲コアのデータを

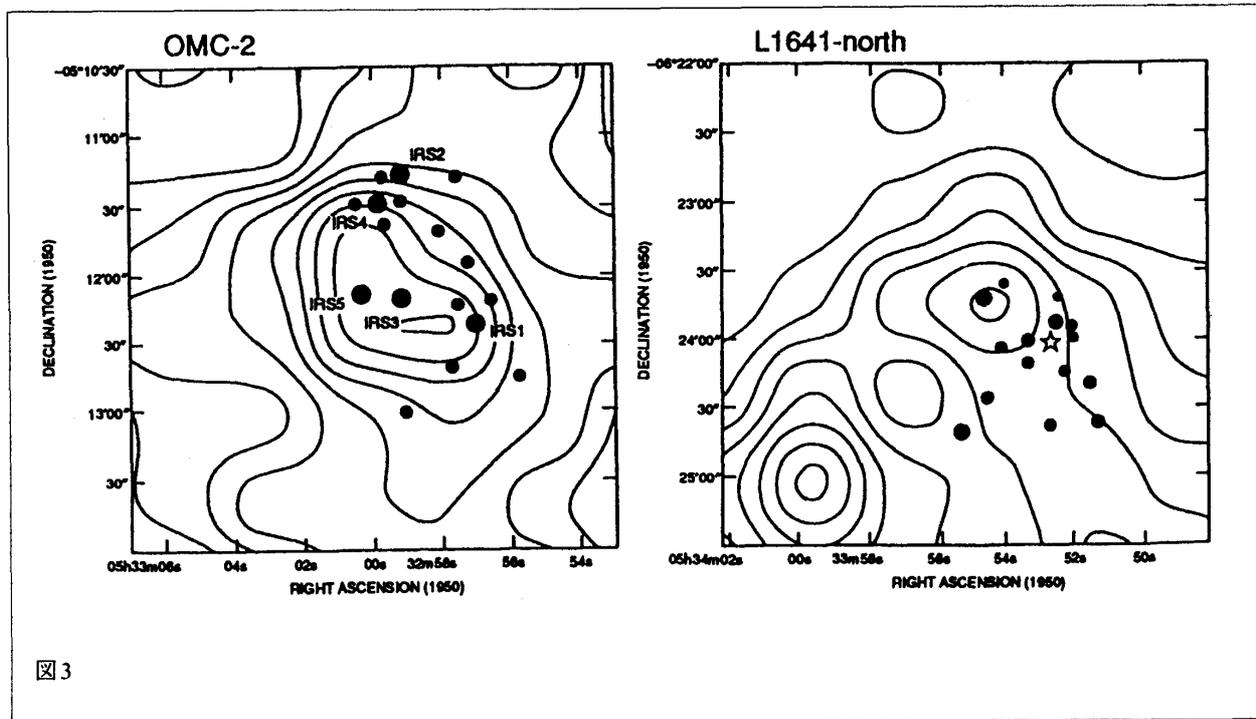


図3

最小自乗法でフィットしたもので、 $\Delta v \propto R^{0.44}$ の関係を示しています。白抜き三角は、オリオン座の分子雲コアのデータです。白抜き三角は、我々がCS輝線をもちいたサーベイで見つけた分子雲コアのデータで、全部をプロットすると混み合ってしまうので、平均値を記号で標準偏差を「エラー・バー」で示しています。NH₃分子輝線で観測されたオリオンの分子雲コア(16)は、数的には8個と少ないですが、一緒にプロットしてあります(白丸と標準偏差を表すエラー・バー)。この図から明らかなのは、オリオンの分子雲コアは、暗黒星雲コアで求められた「ライン幅-サイズ関係」に乗っておらず、上方に平行移動しているようにみえます。「ライン幅-サイズ関係」は、(ほぼビリアル平衡にある)分子雲コアにおいて、自己重力に拮抗する力がどう働いているかの指標になります。関係式の違い、正確には $\Delta v \propto R^{0.44}$ 関係の係数の違いは、暗黒星雲コアに比べ、オリオンのコアがより高い外圧下(17)にあるか、あるいはより強い磁場(18)に支えられているのか、であれば理論的に係数が大きくなること示されている

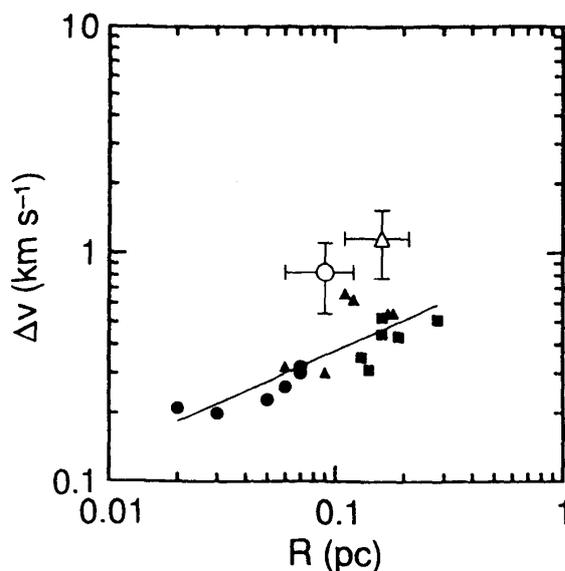


図4

ので、そのようなコアの環境の違いを示していると言えそうです。そして、コアの環境の違いが、原始星へのより高い質量降着率、言い換えれば、原始星の太り方の速さ、に結び付いていると考えられます。理論では、質量降着率はライン幅(あるいは、非熱的サポートの分も含めた実行的音速)の3乗に比例することが示されています(19)。

「ライン幅-サイズ関係」の違いが誕生する星の質量の違いに効いているのでは、というのがひとつの見方ですが、別の考え方も可能です。そもそも、材料である分子雲コアが重ければ誕生する星も重たいだろうというものです。暗黒星雲では100太陽質量以上のコアというのは非常にまれですが、オリオンではそれほどめずらしくはありません。この違いが、オリオン座分子雲を大質量星生成領域にしているというわけです。Nakanoらは、「生まれたての星」からの星風や紫外線で分子雲コアが壊されて、原始星への質量降着が止るというモデルを用い、我々の観測したオリオン座の「分子雲コア」の質量の頻度分布(コアの質量スペクトルと呼びます)から恒星の質量の分布を予測し

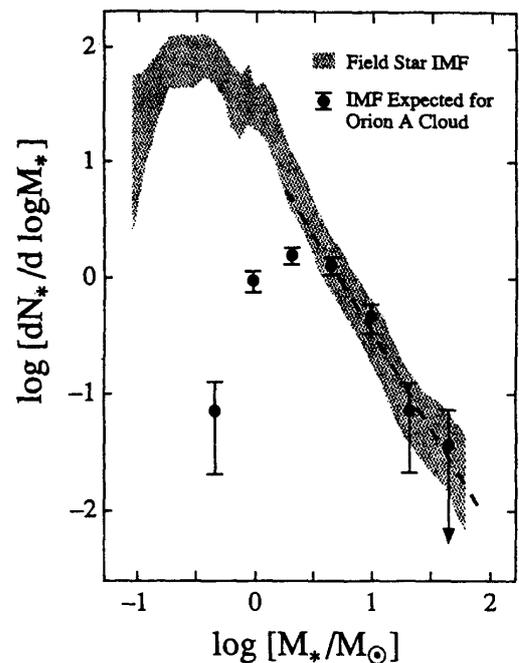


図5

ました(20). 図5に, IMF (ハッチ部分) との比較を示します. $4M_{\odot}$ (太陽質量) 以上では, 予測された星の質量頻度分布がIMFと非常に良くあっていることがわかります. $4M_{\odot}$ 以下では, 予測値とIMFの間に大きなずれがあります. オリオン座の分子雲コアのサーベイには検出限界 (質量の小さな星を生むような質量の小さなコアを検出できない) があり, $30M_{\odot}$ 以下の分子雲コアでは検出率が悪いというのが, その理由と考えられます. ともかく, かなり単純化したモデルですが, 巨大分子雲の典型例である「オリオン座分子雲」の分子雲コアの質量スペクトルからIMFが導出できたわけです.

4. 最後に

我々の観測結果と簡単な考察から, 「分子雲コア」の性質が星の質量を決めているのではないかと書きましたが, あるいは, モデルを紹介しましたが, 正直なところ問題への解答の入り口付近にいるという感じです. 分子雲コア (Jeans長) 以下のスケールでの物理がはっきりと解明されることが必要です.

また, 分子雲コアの質量スペクトルがIMFを決めているのではないかという話を紹介しましたが, コアの質量スペクトルがどのように決まっているのかも良くわかっておらず, こちらも今後の課題です.

分子雲コア以下のスケールでは, 回転が極めて重要な役割を果たします. 原始星のまわりの回転する「原始惑星系円盤」の存在が予測されていたのですが, 最近の観測結果によりその物理的描像や, 進化についての知見が得られてきました(21,22). 今後の研究により, 分子雲コアから恒星, 連星, そして惑星系がどう誕生するのかが明らかにされていくことでしょう. 例えば, Larsonが示した 0.04 pc 以下での若い星の空間分布に見られる自己相似

性 (図1) が明確に説明されていくはずですが.

参考文献

- [1] Myers, P. C., Linke, R. A., & Benson, P. J. 1983, "Dense Cores in Dark Clouds. I. CO Observations and Column Densities of High-Extinction Regions," *Astrophys. J.*, **264**, 517
- [2] Myers, P. C., & Benson, P. J. 1983, "Dense Cores in Dark Clouds. II. NH_3 Observations and Star Formation," *Astrophys. J.*, **266**, 309
- [3] Benson, P. J., & Myers, P. C. 1989, "A Survey of Dense Cores in Dark Clouds," *Astrophys. J. Suppl.*, **71**, 89
- [4] Beichman, C. A., Myers, P. C., Emerson, J. P., Harris, S., Mathieu, R., Benson, P. J., & Jennings, R. E. 1986, "Candidate Solar-Type Protostars in Nearby Molecular Cloud Cores," *Astrophys. J.*, **307**, 337
- [5] Scalo, J. M. 1985, "Fragmentation and Hierarchical Structure in the Interstellar Medium," in *Protostars & Planets II*, ed. D. C. Black & M. S. Matthews (Tucson: University of Arizona Press), 201
- [6] Larson, R. B. 1995, "Star Formation in Groups," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **272**, 213
- [7] Mathieu, R. D. 1994, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **32**, 465
- [8] Larson, R. B. 1981, "Turbulence and Star Formation in Molecular Clouds," *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **194**, 809
- [9] Myers, P. C. 1983, "Dense Cores in Dark Clouds. III. Subsonic Turbulence," *Astrophys. J.*, **270**, 105
- [10] Myers, P. C., Fuller, G. A., Goodman, A. A., & Benson, P. J. 1991, "Dense Cores in Dark Clouds. VI. Shapes," *Astrophys. J.*, **376**, 561

- [11] Goodman, A. A., Benson, P. J., Fuller, G. A., & Myers, P. C. 1993, "Dense Cores in Dark Clouds. VIII. Velocity Gradients," *Astrophys. J.*, **406**, 528
- [12] Tatematsu, K., et al. 1993, "Molecular Cloud Cores in the Orion A Cloud. I. Nobeyama CS (1-0) Survey," *Astrophys. J.*, **404**, 643
- [13] Umemoto, T., et al. 1995, in preparation
- [14] Tatematsu, K., & Umemoto, T. 1991, "Molecular Cloud Cores in the Orion A Cloud," *Mem. Soc. Astron. Ital.*, **62**, 813
- [15] Fuller, G. A., & Myers, P. C. 1992, "Dense Cores in Dark Clouds. VII. Line Width-Size Relations," *Astrophys. J.*, **384**, 523
- [16] Harju, J., Walmsley, C. M., & Wouterloot, J. G. A. 1991, "Young Ammonia Clumps in the Orion Molecular Cloud," *Astron. and Astrophys.*, **245**, 643
- [17] Chièze, J. P. 1987, "The Fragmentation of Molecular Clouds I. The Mass-Radius-Velocity Dispersion Relations," *Astron. and Astrophys.*, **171**, 225
- [18] Myers, P. C., & Goodman, A. A. 1988, "Magnetic Molecular Clouds: Indirect Evidence for Magnetic Support and Ambipolar Diffusion," *Astrophys. J.*, **329**, 392
- [19] Shu, F. H. 1977, "Self-Similar Collapse of Isothermal Spheres and Star Formation," *Astrophys. J.*, **214**, 488
- [20] Nakano, T., Hasegawa, T., & Norman, C. 1995, "The Mass of a Star Formed in a Cloud Core: Theory and Its Application to the Orion A Cloud," *Astrophys. J.*, **450**, 183
- [21] Ohashi, N., Kawabe, R., Hayashi, M., Ishiguro, M. 1991, "Observations of 11 Protostellar Sources in Taurus with Nobeyama Millimeter Array: Growth of Circumstellar Disks," *Astron. J.*, **102**, 2054
- [22] 観山正見 1993, 「見えてきた太陽系外の惑星形成現場」, 物理学会誌, Vol 48, No 7, 513