

分子雲の中で誕生し得る一番明るい星 ～星の初期質量関数解明へのヒント～

土橋 一 仁

〈東京学芸大学教育学部地学科 〒184-8501 東京都小金井市貫井北町 4-1-1〉

e-mail: dobashi@u-gakugei.ac.jp

文献から集めた約 500 個の分子雲データをもとに、分子雲の中で誕生し得る一番明るい星の光度と母体分子雲の質量の関係を調べました。その結果、星の最大光度は母体分子雲の質量とともに増加することや、高圧の電離水素領域中にある分子雲ほど明るい星を形成していることが明らかになりました。ここでは、得られた星の最大光度と母体分子雲の質量の関係について紹介した後、両者の関係から示唆される巨視的な星形成モデルについて述べます。

1. 星の最大光度と光度分布関数

星間分子雲の中では、大小様々な星が誕生します。分子雲の質量と、その中で誕生しつつある星のうちで最も明るい星（つまり一番大きな星）の光度の間には、ある一定の関係がありそうだ、ということを経験的に指摘したのは Larson でした¹⁾。その関係は、星の最大光度を L_{MAX} 、母体分子雲の質量を M_{CL} とすると、

$$\left(\frac{L_{MAX}}{L_{\odot}}\right) = 2.2 \times 10^{-2} \left(\frac{M_{CL}}{M_{\odot}}\right)^{1.5} \quad (式 1)$$

という式で表されます ($M_{\odot} \cdot L_{\odot}$ はそれぞれ太陽の質量・光度です。これ以降、質量・光度の単位として使います)。つまり、「一つの分子雲で誕生する星の最大光度は、母体分子雲の質量の 1.5 乗に比例する」ということです。数年前、私は白鳥座にある太陽系近傍の 150 個ほどの分子雲（地球からの距離 ≤ 3000 光年）の研究を通して、この Larson の関係を検証しました^{2), 3), 4)} (図 1)。その後、ケフェウス座・カシオペア座などの領域でも、式 1 と同様の関係が確かめられました⁵⁾。どうやら式 1 は、多くの星形成領域で一般的に成り立つ経験則であることが分かってきました。

一方、この近傍分子雲の研究では、星の初期光度関数 ($L \sim L + dL$ の光度を持つ星がいくつあるか? という分布関数 $\rightarrow dN / dL$) と母体分子雲の質量の関係についても調べ、平均的には

$$\frac{dN}{dL} = 5.8 \times 10^{-3} \left(\frac{L}{L_{\odot}}\right)^{-1.6} \left(\frac{M_{CL}}{M_{\odot}}\right)^{0.9} \quad (式 2)$$

という経験式でよく近似できることを明らかにしました。この経験式と Larson の式には、実は面白い関係があります。式 2 の両辺を、 $N = 1$ 個となるようなある光度 (L_{MAX}) から無限大まで積分してみてください。係数は多少異なりますが、式 1 に良く似た $L_{MAX} \cdot M_{CL}$ 関係が得られます。これは、独立して得られた式 1・2 が本質的には同じものであることを示唆しています。つまり分子雲内部では、式 2 で決まる確率に従って星が誕生しているのかもしれない。

天文学の古くて新しい大問題の一つに、「星の初期質量関数」というものがあります。これは、分子雲で誕生する星の質量 m の分布関数 (dN / dm) のことです。英語では stellar Initial Mass Function と書くので、天文学者は通常 IMF と略して呼びます。この IMF の精密な測定は、単に分子雲内の星形成プロセスの解明に役立つだけでなく、銀河系内

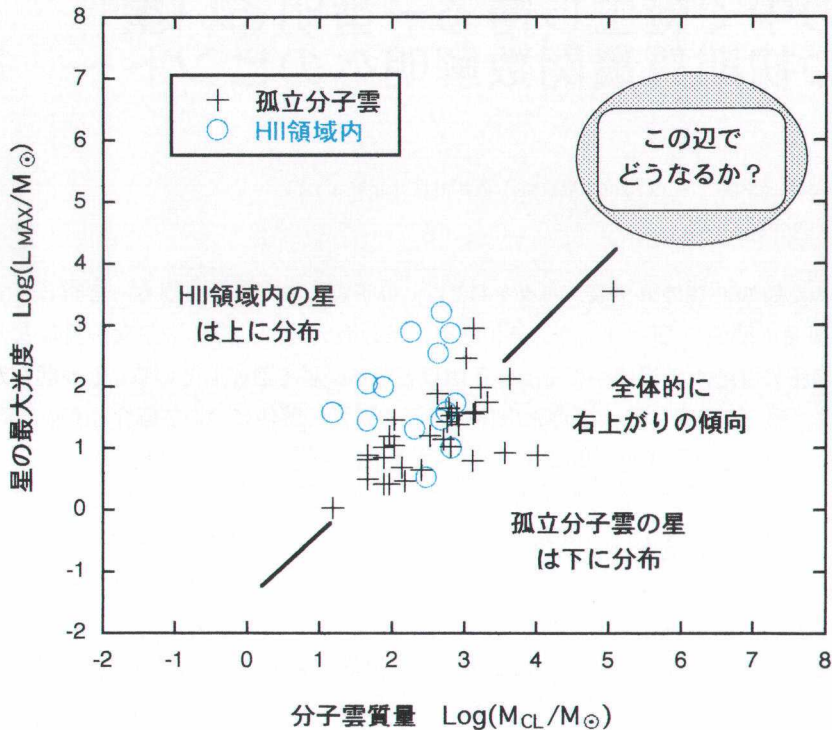


図1：研究の出発点となった星の最大光度 L_{MAX} と母体分子雲の質量 M_{CL} の相関図（白鳥座領域の分子雲；Dobashi et al. 1996, ApJ, 466, 282）。縦軸・横軸は、太陽の光度 (L_{\odot}) と質量 (M_{\odot}) を単位とした $L_{\text{MAX}} \cdot M_{\text{CL}}$ の値です（対数）。電離水素領域（HII 領域）中の分子雲を青色の○印で、それ以外のものを+印で示します。全体的に右上がりであり、かつ HII 領域中の分子雲の方がより明るい星を形成していることが分ります。これらの傾向は、 $1 < \log(M_{\text{CL}}/M_{\odot}) < 4$ の質量をもつ分子雲で見られます。本研究では、特に大きな質量 ($M_{\text{CL}} \sim 10^6 M_{\odot}$) を持つ分子雲に注目しつつ、この $L_{\text{MAX}} \cdot M_{\text{CL}}$ 関係をより広い分子雲質量範囲で調べます。

での物質の輪廻を考えたり、宇宙の質量の大部分を占める光りでは見えない物質（ダークマター）の起源を解明する上で重要な情報をもたらすはずで。このための、現在までに様々な分子雲で IMF が測られてきました。種々の測定結果を総合すると、 dN/dm はおおむね m の -3 乗程度のべきに比例することが分かってきました⁶⁾ ($dN/dm \propto m^{-3}$)。式2に誕生しつつある星の光度 L と質量 m の関係を与えれば、ただちに IMF を導くことができます。形成途上の星の質量・光度関係は複雑ですが、仮に、よく分かっている主系列星での関係⁷⁾ ($L \propto m^{3.45}$) を式2に代入すれば、 $dN/dm \propto m^{-3.1}$ という、これ

までの測定結果と一致する IMF が得られます。さらに、式2から導かれる IMF には母体の分子雲の質量 M_{CL} に関する情報が含まれています。これにより、分子雲の星形成効率（誕生する星の総質量が母体分子雲の質量に占める割合、英語の Star Formation Efficiency の頭文字を取って SFE と略します）の研究などに、新しい知見を得ることが出来ました^{4), 5)}。

しかしながら、これまでの太陽系近傍の分子雲の研究では、経験式1・2を検証・測定できたのは分子雲の質量で $10 < M_{\text{CL}}/M_{\odot} < 10^4$ の範囲に限られていました。もっと大きな分子雲での $L_{\text{MAX}} \cdot M_{\text{CL}}$

関係や星の初期光度関数はどうなっているのでしょうか？ 安定に存在できる星の質量には上限があります。その値は $100 M_{\odot}$ 程度で⁸⁾、これは光度に換算すれば約 $10^7 L_{\odot}$ に相当します。Larson の式 (1) や近傍分子雲での調査結果 (図 1) からは、この程度の光度を持つ星は $10^{6-7} M_{\odot}$ の質量を持つ非常に巨大な分子雲の中でのみ誕生することが予想されます。この予想は正しいのでしょうか？ さらに、図 1 から分るように、HII 領域 (水素ガスが強烈な紫外線により電離している領域) に付随する分子雲では、そうでない孤立分子雲よりも明るい星が誕生しています。これは、HII 領域の高い圧力が分子雲内部での星形成を促していることを示唆していますが、測定した分子雲の質量範囲が狭いために、どの程度の質量をもつ分子雲までこの関係が成り立っているのか分かりませんでした。

これらの疑問の答えを探すために、私は大小様々な質量をもつ分子雲のデータを文献から集めました。特に大きな質量をもつ分子雲サンプルに重点をおいてデータ収集を行った結果、 $1 < M_{CL} / M_{\odot} < 10^6$ という格段に広い分子雲の質量範囲で $L_{MAX} \cdot M_{CL}$ 関係を描き出すことができました。次章以降では、この新たに求めた $L_{MAX} \cdot M_{CL}$ 関係と、そこから垣間みることのできる分子雲スケールでの星形成のメカニズムについて述べたいと思います。

2. 分子雲サンプルの収集

研究に必要な分子雲のサンプルは、主に文献を使って収集しました。以前の研究で得られた白鳥座・ケフェウス座・カシオペア座の太陽系近傍の分子雲は、比較的小さな質量しかもっていません (分子雲質量は $10 \sim 10^4 M_{\odot}$)。しかし、分子雲は大きなものほど数が少ないので、太陽系近傍の狭い領域では、大きな分子雲のサンプルがなかなか手に入りません。そこで私は、まず銀河系外縁部の Outer Arm に属する大きな分子雲を調べました^{9), 10), 11)}。この調査により、 $10^4 \sim 10^5 M_{\odot}$ の質量を持つ分子雲サンプルが手に入りしました。さらに大きな分子雲の

探査は、我々から最も近い系外銀河である大マゼラン星雲で行いました。大マゼラン星雲全体の分子雲の分布は、コロンビア大学の 1.2 m 電波望遠鏡によって 1980 年代に観測されています¹²⁾。また、「毒蜘蛛星雲」と呼ばれる活発な星形成領域については、SEST 15 m 電波望遠鏡による詳しい観測データが、近年公表されました^{13), 14)}。これらのデータを集めることにより、 $10^4 \sim 10^6 M_{\odot}$ の質量をもつ大きな分子雲のサンプルを入手することができました。最後に、高温・高圧の HII 領域に確実に付随している分子雲のサンプルとして、bright-rimmed cloud のカタログを調べました^{15), 16), 17)}。bright-rimmed cloud とは、HII 領域の中や周辺にあり、HII 領域からの衝撃波により縁が輝いて見える分子雲のことです。これらの探査によって、 $1 \sim 10^6 M_{\odot}$ の質量をもつ合計 499 個の分子雲サンプルが得られました。

次に、上記の文献探査によって得られた分子雲 1 つ 1 つについて、内部で誕生しつつある星を調べました。誕生しつつある若い星は、周囲を厚く覆っている塵が赤外線を放射するため、しばしば赤外線点源として観測されます。そこで、星の探査には赤外線点源のカタログ (IRAS Point Source Catalog) を用いました¹⁸⁾。その結果、499 個のうち、243 個の分子雲で形成されつつある星であると考えられる赤外線点源が見つかりました。赤外線点源の光度を計算し、それぞれの分子雲内で誕生している星の中で一番明るいものを選び出しました。

以上に述べた一連の分子雲・星の探査結果を、用いた文献とともに表 1 にまとめます。

3. 新たに得られた $L_{MAX} \cdot M_{CL}$ 関係

図 2 は、文献探査で得られた 243 個の分子雲の質量 M_{CL} と、各々の分子雲内部で形成されている星の中で最も明るいものの光度 L_{MAX} の関係をプロットしたものです。付随する HII の有無によってプロットを区別してあります。図から明らかなように、同じ M_{CL} を持つ分子雲であれば、高圧下の

表 1. サーベイした領域・文献

領域名等	分子雲質量範囲	観測に用いた分子輝線	望遠鏡	分子雲総数	星付分子雲数
1. 太陽系近傍の分子雲 (Cyg, Cep, Cas)	$1.2 < \log(M_{CL} / M_{\odot}) < 5.1$	$^{13}\text{CO} (J=1-0)$	名古屋大学 4 m 鏡	345	118
2. 銀河系内の巨大分子雲 (Outer Arm)	$4.1 < \log(M_{CL} / M_{\odot}) < 5.4$	$\text{CO} (J=1-0)$	NRAO11 m 鏡	27	17
3. マゼラン星雲 LMC (高角分解能観測)	$4.6 < \log(M_{CL} / M_{\odot}) < 5.9$	$\text{CO} (J=1-0)$	SEST15 m 鏡	21	12
4. マゼラン星雲 LMC (低角分解能観測)	$4.6 < \log(M_{CL} / M_{\odot}) < 6.1$	$\text{CO} (J=1-0)$	Columbia1.2 m 鏡	30	20
5. HII 領域中の分子雲 (Bright-Rimmed Clouds)	$-0.3 < \log(M_{CL} / M_{\odot}) < 3.8$...	PSS / ESO-R (光学写真のデータ)	76	76

[領域別参考文献]

- Dobashi et al. 1994, ApJS, 95, 419; Dobashi et al. 1995, PASJ, 47, 837; Dobashi et al. 1996, ApJ, 466, 282; Yonekura et al. 1997, ApJS, 110, 21 (以前の研究によって得られた太陽系近傍の分子雲サンプル. ほとんどの分子雲の質量は $10^4 M_{\odot}$ 以下.)
- Kutner & Mead 1981, ApJ, 249, L15; Mead 1988, ApJS, 67, 149; Mead & Kutner 1988, ApJ, 330, 399 (銀河系外縁部の Outer Arm に属する巨大分子雲)
- Kutner et al. 1997, A&AS, 122, 255; Caldwell & Kutner 1996, ApJ, 472, 611 (30 Doradus Complex 内の分子雲と N11 領域内の分子雲についてのサンプル)
- Cohen et al. 1988, ApJ, 311, L95 (30 Doradus Complex 内の未分解の分子雲と N11 に相当する未分解の分子雲を除く. CO スペクトルの積分強度から求めた Cohen 等の分子雲質量は, 当時より高い精度で測られている CO/H_2 変換係数 2.3×10^{20} を用いて計算し直した. Chin et al. 1997, A&A, 317, 548 ; Johansson et al. 1998 A&A, 331, 857)
- Sugitani et al. 1991, ApJS, 77, 59; Sugitani & Ogura 1994, ApJS, 92, 163 (HII 領域との強い相互作用が認められる分子雲のリスト. 光学写真から同定した分子雲. 高圧下の HII 領域中の分子雲サンプルとしてピックアップした. オリジナルのカタログには 89 個の分子雲がリストされているが, 質量の見積もりが不確かな 13 個の分子雲を除外した.)

HII 領域中に置かれた分子雲の方が HII 領域から孤立した分子雲よりも明るい星 (すなわち大きな星) を形成していることが分ります. HII 領域に付随した小さな分子雲 ($100 M_{\odot}$ 程度以下) では比較的大きな星が形成されるという事実は, 他のグループの研究ですでに明らかにされていましたが¹⁵⁾, どうやら非常に大きな分子雲 ($100 \text{万 } M_{\odot}$) でも同じ傾向が見られるようです. また, 調べた全分子雲質量範囲 $1 < M_{CL} / M_{\odot} < 10^6$ において, L_{MAX} は HII 領域の有無に関わらず M_{CL} とともに増加しています. 大きな星を作るためには, やはり, 母体の分子雲も大きくなければならない, ということです.

図 2 には他にも注目すべき点がいくつかあります. まず, L_{MAX} の分布にははっきりとした上限があ

ります (図 2 中, A とラベルをつけた実線). この上限は, 分子雲質量 M_{CL} のべきでフィットすると, $L_{MAX} \propto M_{CL}^{0.8}$ と表されます. さらに, 上限ほど明確ではありませんが, L_{MAX} の分布には, どうやら下限もあるようです (実線 B). 上限と同様にべきでフィットすると, 式 1 の関係と近い $L_{MAX} \propto M_{CL}^{1.5}$ となります. 下限に関しては, 使用した赤外線点源のカタログの検出限界を調べなければなりません. ひよっとすると, この下限は赤外線点源カタログの検出限界を反映しているにすぎないかもしれないからです. 調査の結果, 収集した多くの分子雲では, このカタログは実線 B で示される光度より数十倍程度暗い星まで検出し得る感度をもっていることが分りました. 赤外線点源が見つからなかった

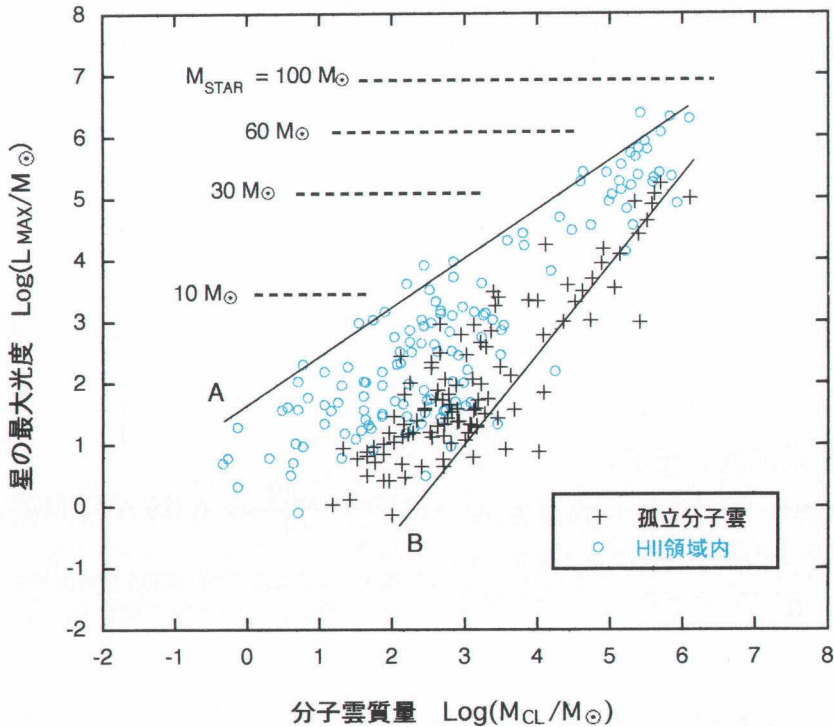


図2：収集したサンプルの $L_{\text{MAX}} \cdot M_{\text{CL}}$ 関係。データの分布範囲には、どうやら上限と下限が存在しそうなことが分りました（実線A・B）。これらの上限・下限は、それぞれ、 $L_{\text{MAX}} \propto M_{\text{CL}}^{0.8}$ および $L_{\text{MAX}} \propto M_{\text{CL}}^{1.5}$ というべきで表されます。星の質量 = 10・30・60および100 M_{\odot} に対応する光度を破線で示します ($L \propto M^{3.45}$ とした)。プロットに使用している記号は、図1と同じです。

分子雲で星が誕生しているとすれば、当然そのような分子雲のプロットは実線Bより下にくるはずですが、しかし、少なくとも、収集した500個近くの分子雲の大雑把に半数が実線AとBで決められた範囲に集中していることは確かです。

さらに、安定に存在できる星の質量の上限 (100 M_{\odot}) に相当する光度 (10⁷ L_{\odot}) 以上に明るい星は、この研究では見つかりませんでした。これは予想通りの結果です。一方、質量が10⁶ M_{\odot} を大きく超えるような分子雲 (例えば10⁷ M_{\odot}) も見つかりませんでした。研究を開始する前、私は $M_{\text{CL}}=10^6 M_{\odot}$ 程度までは L_{MAX} は M_{CL} とともに増加するが、それ以上では L_{MAX} は横這いになる、と想像していました。しかし実際には、集めたサンプルが不十分なのかもし

れませんが、10⁶ M_{\odot} を大きく超える質量をもつ分子雲そのものが見つかりませんでした。これはなぜでしょう？ 図2によると、上限に近い質量の星を形成することのできる分子雲のうち最大の質量を持つものはHII領域外に存在する孤立分子雲で、その質量は10⁶ M_{\odot} ~ 10⁷ M_{\odot} 程度です。HII領域は分子雲内部で生まれた大質量星が周囲のガスを電離することにより形成されます。よって孤立分子雲は、大質量星を形成する前か、あるいはその直後の状態 (電離ガスが大幅に膨張していない状態) にある年令の若い分子雲であると考えられます。仮に、希薄な星間ガス (原子ガス) が自己重力により収縮を開始し、10⁶ M_{\odot} を大きく超えるような分子雲 (例えば10⁷ M_{\odot}) を形成するものとした。

形成初期の分子雲はガス密度が低いので、星はほとんど生まれません。このような分子雲のプロットは、実線 B よりずっと下の方にきます。やがて重力収縮が進んで、密度がどんどん高くなる（平均密度で $n[\text{H}_2] > 10^{23} \text{ cm}^{-3}$ ）と、やがて定常的な星形成が始まるでしょう。この分子雲内で誕生する星のうち一番大きな星は、図2の孤立分子雲のプロットからは、安定に存在できる星の質量の上限に達します。このような星は直ちに超新星となり、母体分子雲を破壊してしまうはず。おそらくこのような理由で、 $10^6 M_\odot$ を大きく超える質量を持つ分子雲が見つからないのだ、と私は考えています。

4. 巨視的な星形成のモデル

ここでは、図2に見られる特徴を説明するための星形成の簡単なモデルを紹介します。まず、分子雲内の星形成に関して、以下の①～③を仮定します。

① 星の初期光度関数 dN/dL は、星の光度 L 、母体分子雲の質量 M_{CL} 、および母体分子雲を取り巻く外圧 P_{EXT} の関数である。 dN/dL は L については変数分離が可能であるとし、以下の形で表せるものとする。

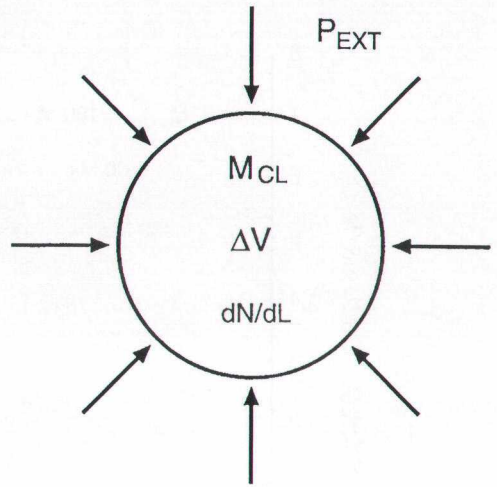
$$\frac{dN}{dL} = \phi(L) g(M_{\text{CL}}, P_{\text{EXT}}) \quad (\text{式3})$$

ここで $\phi(L)$ は、真空中に置かれた単位質量の分子雲で形成される星の初期光度関数であり、 $P_{\text{EXT}} = 0$ 、 $M_{\text{CL}} = 1 M_\odot$ のとき $dN/dL = \phi(L)$ であるとする。

② $\phi(L)$ をスケールアップするファクター $g(M_{\text{CL}}, P_{\text{EXT}})$ は、個々の星へ単位時間あたりに到達できる物質の量、すなわち星への質量降着率であり、分子雲内のガスの速度分散の3乗 ΔV^3 に比例する。つまり、 $g(M_{\text{CL}}, P_{\text{EXT}}) \propto \Delta V^3$ であるとする。

③ 分子雲は静水圧平衡（ビリアル平衡）にあり、 ΔV は M_{CL} および P_{EXT} によって決まるものとする。

以上の3つの仮定の概念を、図3に示します。



$$\frac{dN}{dL} \propto \phi(L) \Delta V^3 (M_{\text{CL}}, P_{\text{EXT}})$$

図3：分子雲内での巨視的な星形成モデルの概念図。誕生する星の初期光度関数 dN/dL は、真空中に置かれた単位質量の分子雲内で達成される初期光度関数 $\phi(L)$ が、分子雲内部の速度分散の3乗 ΔV^3 に比例してスケールアップされたものである、と仮定します。また、分子雲は静水圧平衡にあり、 ΔV は分子雲質量 M_{CL} および分子雲の外圧 P_{EXT} によって決まるものとしします。

これらの仮定から出発すると、星の初期光度関数は以下のように導かれます。

$$\frac{dN}{dL} \propto \phi(L) \Delta V^3 \propto \phi(L) M_{\text{CL}}^{q'} (C_1 C_2 P_{\text{EXT}} M_{\text{CL}}^S + 1)^{3/2} \quad (\text{式4})$$

ここで、 C_1 は定数で、 $C_1 = 20 \pi / 3G$ (k , G はボルツマン定数と万有引力定数) です。 q' , S , 及び C_2 は分子雲の形状因子 χ と密度 n ($M_{\text{CL}} = nR^3$; R は分子雲の半径) によって決まり、 $q' = (3/2)(1-1/\chi)$, $S = -2 + 4/\chi$ 及び $C_1 = n^{-4/\chi}$ となります。

ここで式4に具体的な数値を入れてみます。 χ は2～3の値を取ることが報告されていますが、以前の研究で収集した近傍分子雲のデータ（白鳥座の分子雲）では2.4となりますので、 $q' = 0.88$ および $S = -0.33$ となります。 n は、 $M_{\text{CL}} \cdot R$ の単位を

$M_{\odot} \cdot \text{pc}$ としたときに, 107.3になりました. 真空中に置かれた単位質量をもつ分子雲で初期光度関数 $\phi(L)$ を実測したり, 完全な理論モデルを構築するのは大変難しい作業です. ここでは, とりあえ

$$\frac{dN}{dL} = 5.8 \times 10^{-3} \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right)^{-1.6} \left(\frac{M_{\text{CL}}}{M_{\odot}} \right)^{0.87}$$

$$\left[3.94 \left(\frac{P_{\text{EXT}} / \text{k}}{10^4 \text{ K cm}^{-3}} \right) \left(\frac{M_{\text{CL}}}{M_{\odot}} \right)^{-0.33} + 1 \right]^{1.5} \quad (\text{式 5})$$

ず経験式2で $M_{\text{CL}} = 1 M_{\odot}$ の場合の初期光度関数を $\phi(L)$ とします. つまり, $\phi = 5.8 \times 10^{-3} (L/L_{\odot})^{1.6}$ とします. これらの値を式4に代入すると, という初期光度関数が得られます. この式は, $P_{\text{EXT}} \rightarrow 0$ の極限で式2と良く一致します(式2・

5の M_{CL} への依存性に注意してください). また, 高圧下の分子雲ほど大きな星が形成されることを示唆しています. 式5より最大光度 L_{MAX} を M_{CL} と P_{EXT} の関数として計算した結果を, 実際のデータとともに図4に示します. 実測データの分布の下限は, 分子雲の外圧を $P_{\text{EXT}} = 0$ とした場合のモデル計算と良く一致します. また上限の方は, $\sim 10^{5.5} \text{ K cm}^{-3}$ よりも少し大きい外圧のときの計算値に合いそうです. 後者の圧力は, 実際のHII領域内の熱的な圧力と矛盾しません. これらの一致は, 式5を導出する際に用いた仮定が, 少なくとも巨視的には正しいことを示唆しています.

分子雲内での星形成に関する適当な仮定から出発し, 結果的に分子雲に加わる外圧の効果を盛り込んだ初期光度関数に到達することができました. そして, 実際のデータ分布は, その初期光度関数

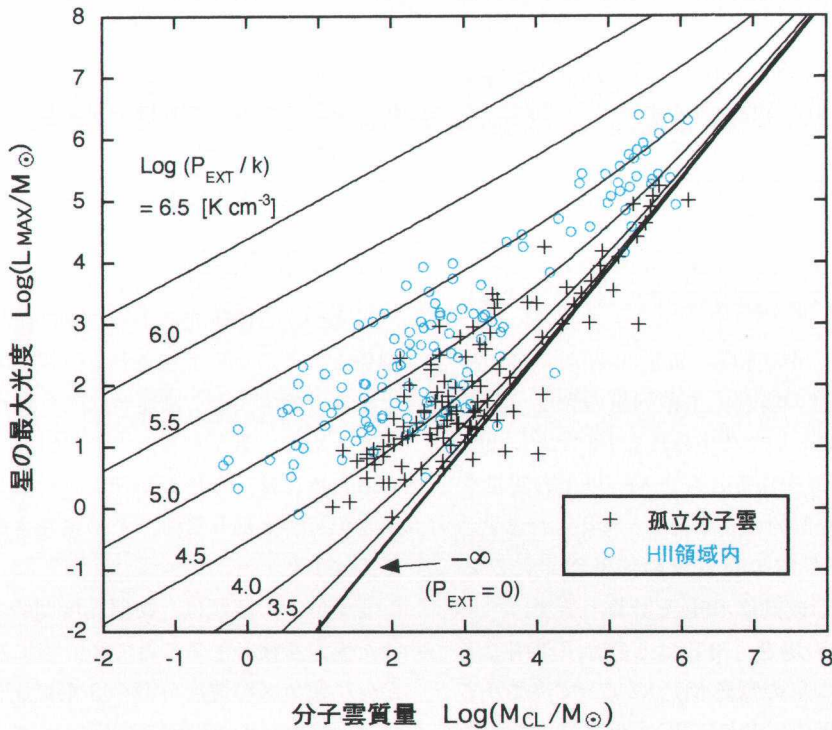


図4: モデルとデータの比較. 質量 M_{CL} の分子雲内部で誕生する星のうち, 最も明るい星の光度 L_{MAX} を計算しました(実線). 分子雲に加わる外圧 P_{EXT} をパラメータとしています. 実線に添えた数字は, K cm^{-3} 単位での圧力の対数値 $\log(P_{\text{EXT}} / \text{k})$ です. 実測データの分布の下限・上限は, それぞれ $P_{\text{EXT}} \sim 0$ および $P_{\text{EXT}} \sim 10^{5.5} \text{ K cm}^{-3}$ の場合の計算値に一致します.

でよく説明できます。これが、以前の近傍分子雲での研究で得られた経験式(式2)から、式5が一步前進した点です。

5. 星の初期質量関数と 星形成効率

ところで、図4の $L_{MAX} \cdot M_{CL}$ 分布にはなぜ上限があるのでしょうか ($P_{EXT} = 10^{5.5} \text{ K cm}^{-3}$ で決まる線付近。図3では実線A)。もし分子雲内での星の誕生が式5で決まる確率に従うのであれば、非常に高い外圧 ($P_{EXT} \gg 10^{5.5} \text{ K cm}^{-3}$) が与えられれば、さらに大きな星が誕生するのでしょうか？ 答えはおそらく「ノー」だと思います。その根拠を以下に述べます。

誕生しつつある星の質量・光度関係を与えれば、式5に示した初期光度関数は、星の初期質量関数 IMF へ変換することができます。先に述べた主系列星での質量・光度関係を用いれば、式5から導かれる IMF は以下ようになります。

$$\frac{dN}{dM_{STAR}} = 2.0 \times 10^{-2} \left(\frac{M_{STAR}}{M_{\odot}} \right)^{-3.1} \left(\frac{M_{CL}}{M_{\odot}} \right)^{0.87}$$

$$\left[3.94 \left(\frac{P_{EXT} / k}{10^4 \text{ K cm}^{-3}} \right) \left(\frac{M_{CL}}{M_{\odot}} \right)^{-0.33} + 1 \right]^{1.5} \quad (\text{式6})$$

誕生しつつある星の光度・質量関係は、 $10L_{\odot}$ 程度以上の明るい星の場合、主系列星の光度・質量関係とだいたい等しいと考えられますので¹⁹⁾、上式で表される IMF は少なくとも $2 M_{\odot}$ 以上の質量をもつ星に対して近似的に成り立つと考えられます。

式6から、分子雲の総質量の何%が星になるか？ という星形成効率 SFE を計算します。ベキで表される IMF の場合、SFE はその分子雲内で誕生する一番小さな星の質量 M_{MIN} によって決まります(式6に従う星の質量の下限)。大小様々な質量をもつ分子雲内での M_{MIN} の測定は、現在のところ非常に難しいのですが、仮に $M_{MIN} = 0.25M_{\odot}$ という一定の値をとるものとする⁶⁾、図4で $P_{EXT} = 0$ で

決まる線では $SFE = 2 \sim 5\%$ 程度となります。これは、よく研究されているオリオン座やおうし座などの分子雲で報告されているのもと同程度の値です。一方、 $L_{MAX} \cdot M_{CL}$ 分布の上限付近 ($P_{EXT} = 10^{5.5} \text{ K cm}^{-3}$ で決まる線) では、 $SFE = 30 \sim 90\%$ という非常に高い値が得られます。球状星団の形成にはこの程度の高い SFE が必要だとされています。 $L_{MAX} \cdot M_{CL}$ 分布の上限付近に位置する巨大な分子雲 ($M_{CL} \sim 10^6 M_{\odot}$) では、ひょっとすると球状星団の素となる星たちが誕生しつつあるのかもしれない。

母体分子雲に関係なく $M_{MIN} =$ 一定とした仮定は、あまり現実的ではないと思われます。しかしながら、 $L_{MAX} \cdot M_{CL}$ 分布の上限付近で得られる非常に高い SFE の概算値は、 $L_{MAX} \cdot M_{CL}$ 分布になぜ上限があるか？ という問題に、明解な解答を与えていると言えます。つまり、この上限付近では SFE が非常に高く、母体分子雲を構成する物質のほとんどが星になってしまいます(いくら大きな P_{EXT} を与えても、これ以上星を生み出す材料がない状態にあります)。 $L_{MAX} \cdot M_{CL}$ 分布の上限は、たぶん、このようにして決定されているのだと思います。

6. 今後の課題

以上が、この研究によって得られた $L_{MAX} \cdot M_{CL}$ 関係と、そこから示唆される巨視的な星形成のメカニズムです。ここに述べた内容は現在学術論文にまとめているところですが、研究の完成度を高めるためには、今後、解決しなければならない課題がいくつかあります。その主なもの2点について述べます。

まず第一の課題は、初期光度関数を導くのに用いた仮定を検証することです。特に初期光度関数が分子雲ガスの速度分散の3乗に比例してスケールアップするという仮定②については、観測による十分な裏付けが必要です。現在、このための具体的な観測計画を進めています。うまくいけば、今後1年以内に答えが出せると思います。第二の

課題は、最後の星形成効率の計算のところで述べた星の最小質量 (M_{MIN}) の問題です。ここではとりあえず $M_{\text{MIN}} = \text{一定}$ としましたが、 M_{MIN} も母体分子雲の性質 (質量, 速度分散, 外圧など) に影響されていると考えられます。 M_{MIN} をモデル化するためには、十分な観測データの蓄積が必要です。これには、大型望遠鏡による分子雲の高感度観測が必要です。ハワイで活動を開始した「すばる」の活躍を特に期待しています。

謝辞

この研究を進めるにあたり、ケフェウス座・カシオペア座の分子雲データを米倉覚則氏からお借りしました。この場を借りてお礼を申し上げます。また、議論におつき合い下さった佐藤文男氏、J. P. Bernard 氏、梅本智文氏に感謝致します。この研究は私の学位論文 (平成 6 年; 名古屋大学) に端を発しています。研究を始める良いきっかけをくださった同大学の皆様に感謝いたします。この研究は、文部省科学研究費補助金 (10147204, 11740122) および笹川科学研究助成 (No. 10-082) による資金的なサポートを受けました。ここに感謝致します。

参考文献

- 1) Larson R. B., MNRAS, 200, 159
- 2) Dobashi K., Bernard J. P., Yonekura Y., Fukui Y., 1994, ApJS, 95, 419
- 3) Dobashi K., Bernard J. P., Yonekura Y., Nozawa S., Morimoto S., Abraham P., Kumai Y., Hayashi Y., Fukui Y., 1995, PASJ, 47, 837
- 4) Dobashi K., Bernard J. P., Fukui Y., 1996, ApJ, 466, 282
- 5) Yonekura Y., Dobashi K., Mizuno A., Ogawa H., Fukui Y., 1997, ApJS, 110, 21
- 6) Scalo J. M., 1986, Fund. Cosmic Phys., 11, 1
- 7) Allen C. W., 1972, Astronomical Quantities (London: Athlone)
- 8) Maeder A., Conti P. S., 1994, ARA & A, 32, 227
- 9) Kutner M. L., Mead K. N., 1981, ApJ, 249, L15
- 10) Mead K. N., 1988, ApJS, 67, 149
- 11) Mead K. N., Kutner M. L., 1988, ApJ, 330, 399
- 12) Cohen R. S., Dame T. M., Garay G., Montani J., Rubio M., Thaddeus P., 1988, ApJ, 331, L95
- 13) Kutner M. L., Rubio M., Booth R. S., Boulanger F., de Graauw T., Garay G., Israel F. P., Johansson L. E. B., Lequeux J., Nyman L. A., 1997 A & AS, 122, 255
- 14) Caldwell D. A., Kutner M. L., 1996, ApJ, 472, 611
- 15) Sugitani K., Fukui Y., Mizuno A., Ohashi N., 1989, ApJ, 342, L87
- 16) Sugitani K., Fukui Y., Ogura K., 1991, ApJS, 77, 59
- 17) Sugitani K., Ogura K., 1994, ApJS, 92, 163
- 18) RAS Point Source Catalog 1988, Joint IRAS Science Working Group (Washington, DC:US GPO)
- 19) Leveault R. M., 1988, ApJ, 330, 897

The Most Luminous Protostars in Molecular Clouds: A Hint to Understand the Stellar Initial Mass Function

Kazuhito DOBASHI

Department of Astronomy and Earth Sciences, Tokyo Gakugei University, Koganei, Tokyo 184-8501, Japan

Abstract: The maximum luminosity of protostars forming in molecular clouds is investigated as a function of the parent cloud mass, on the basis of a rich cloud sample searched for in the literature. In total, about 500 molecular clouds are collected among the published data, about one half of which are associated with protostellar candidates selected from the IRAS point source catalog. Some interesting features are found in the relation between the maximum stellar luminosity and the parent cloud mass, which is shown in this article. This article also introduces a simple model for cloud-scale star formation that can naturally account for the features.