

分子雲衝突による大質量星形成

井上 剛志

〈国立天文台理論研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢2-21-1〉

e-mail: tsuyoshi.inoue@nao.ac.jp



分子雲同士の高速衝突によって大質量星形成が誘起されることが近年観測的に強く示唆されている。本研究では国立天文台 CfCA のスーパーコンピュータ「アテルイ」を用いた高速分子雲衝突の3次元磁気自己重力流体シミュレーションの結果を報告する。磁場の効果を見逃した過去の類似のシミュレーション結果と異なり、衝突で生じた圧縮層が強い磁場を帯びた乱流状態となることによって大質量星形成の直前段階に相当する、数百太陽質量にも及ぶ大質量分子雲コアが形成されることが明らかとなった。

1. 分子雲衝突と大質量星形成

質量がおおむね太陽の10倍以上の星は大質量星と呼ばれている。大質量星はその強烈な輻射や恒星風によって星間媒質へ各種のエネルギーを供給するのみならず、その寿命の最後には華々しく爆発し、中性子星やブラックホールといった天体を残していく天文学的に極めて重要な天体である。天文学者は間接的なものまで含めるとその大半が大質量星を研究していると言っても過言ではないだろう。しかしながら、星が生まれる現場である分子雲の中で大質量星がどのような物理的プロセスを経て形成されるのかについては理解されているとはいえない状況にある。

観測的には大質量星を形成する直前の状態と考えられている太陽の数十倍から数百倍の質量をもった大質量分子雲コアが多数発見されている¹⁾。理論的な話をするところからは見かけ上ひどく不安定な天体であり、単純にシミュレーションで大質量コアを再現するとジーンズ不安定と呼ばれる自己重力不安定によってあっという間に数百個に分裂してしまう²⁾。これは水素分子数密度10,000個/cc、温度10 K程度の分子雲コアと呼ばれる分

子雲の高密度領域ではジーンズ質量と呼ばれるジーンズ不安定の典型的質量が1太陽質量ほどになるからであり、本来その程度の質量に分かれて存在するのが自然だからである。これは太陽程度の重さの星が銀河内で最も数多く存在する理由でもある。ジーンズ質量は分子ガスの数密度と音速を用いて $M_J \approx 3 M_\odot (n/10^4 \text{ cm}^{-3})^{-1/2} (c_s/0.2 \text{ km s}^{-1})^3$ と書くことができる。ここでなぜ音速が関係するのか？ ジーンズ不安定は重力によりガスが収縮しようとする力に対しガスがもつ圧力が耐えきれなくなったときに発生する。つまり、音速という物理量はガスがもっている圧力の指標であり、音速が速いほど圧力で多くの質量を重力に対抗して支えることができる。

上の式で用いている音速 c_s は分子ガスの温度を用いて $c_s \approx 0.2 \text{ km/s} (T/10 \text{ K})^{1/2}$ と表される。したがって、もし分子雲の温度を大幅に上昇させることができればジーンズ質量が大きくなって大質量星の形成に有利な環境となる。10 K という分子雲の典型的温度は主に周辺の星からの輻射加熱効果と、ガスが放出する一酸化炭素の輝線放射による冷却効果の釣り合いで決まっている*1。主にシミュレーションを用いた理論的研究から、いっ

たん観測されるような $M_1 \approx 100 M_\odot$ の大質量分子雲コアができたならば、コアの中心部で生まれる原始星からの放射がコア全体を暖めてジーンズ不安定を抑えることが知られている⁴⁾。しかしながら、大質量コア自体は当然温度が上昇する前に形成する必要があり、どのように何百ジーンズ質量にも及ぶガスを集めて大質量コアが形成されるのかに関しては筆者が知る限り何の具体的シナリオもないのが現状である。

このように、理論的に大きな謎に包まれた大質量星形成であるが、最近観測的に大きな前進が始まっている。NANTEN2望遠鏡を擁する名古屋大学の観測チームが大質量星の近傍には分子雲同士の間衝突の痕跡が見られることを多数報告し始めたのである⁵⁾⁻⁷⁾。特に面白いのは衝突の典型的相対速度が 20 km/s 程度と非常に大きいことにある。分子雲の一般的な温度である 10 K のガス中では音速は 0.2 km/s 程度であるので 20 km/s という衝突速度はマッハ数で 100 にも達する値であり、このような高速衝突で何が起きるのかについてはこれまでに研究例がない。

2. シミュレーション

そこで本研究では観測が示唆する高速度での分子雲衝突を、高精度の3次元磁気自己重力流体シミュレーションで再現することによって大質量星形成機構の理解を目指した⁸⁾。設定としては平均数密度 300 個/cc で温度 15 K の等温分子ガスを初期条件として用意する。分子雲には超音速の乱流が常に観測されるため、その効果で分子雲は非一様な密度構造をもつ⁹⁾。そのような密度の非一様性を考慮するためにベキ分布するパワースペクトルをもった揺らぎを初期の密度場に加えてある。また、分子雲は磁化した天体であることが知られているため、20 μ Gauss の磁場を衝突方向とは垂

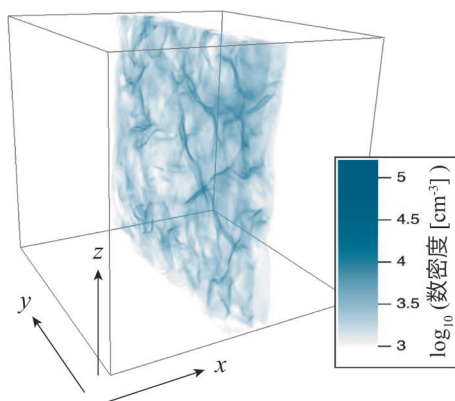


図1 分子雲衝突によって生成された圧縮層の数密度構造。非一様な分子ガスを左右から x 軸に沿って流し込むことで衝突させ、圧縮層を作り出している。分解能は $1,024^3$ 。一辺 8 pc。

直な方向にかけた。衝突は観測が示唆する速度に合わせて相対速度を 20 km/s とした。シミュレーションを行う領域は一辺が 8 pc の立方体とし、その領域を $1,024^3$ 個の有限要素に分割して Godunov 法と呼ばれる高精度衝撃波捕獲スキームで計算を行った。磁場に関しては $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ を保証し、かつ数値不安定を含まない CMOC-CT 法で解き、自己重力ポテンシャルは多重格子法を用いて求めている。

図1にこのような設定で行ったシミュレーションの結果を示す。ガスは x 軸に沿って高速で流れ込み、衝突は計算領域中心の $y-z$ 面で発生し、その辺りに強い衝撃波を両端に伴った高密度圧縮層が生成されるが、図中ではこの圧縮層が強調されるような色設定で示している。衝突によって分子雲がどの程度圧縮されるのかは等温磁気流体衝撃波によって決定されるが、衝撃波のジャンプ条件を解くと下流の平均密度は 5,000 個/cc、平均磁場強度は 300 μ Gauss と算出される。ただし、衝突する分子雲は非一様な密度構造をもっているため、上の値は平均値としては正しいが局所的には

*1 種族 III 型星と呼ばれる宇宙の最初期に形成される星は、重元素がほとんどなく輝線放射冷却効果が弱い高温のガスから形成される。そのため種族 III 型星は大質量星であると考えられている³⁾。

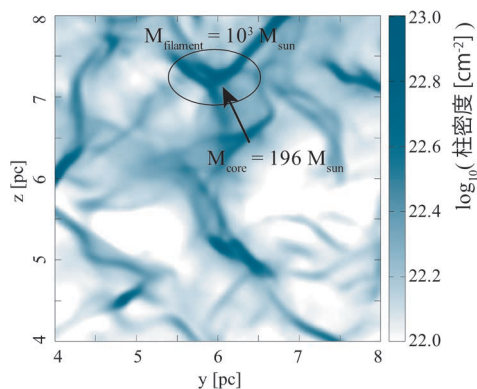


図2 分子雲圧縮層の柱密度構造。楕円で囲った領域に存在するフィラメント全体の質量は約1,000太陽質量。この領域の中心部では重力崩壊が始まっており、ビリアル解析による重力的束縛コアの質量は約200太陽質量にもなっている。

非常に密度の高いフィラメント構造が形成されている。なぜフィラメント構造が形成されるのかについては文献^{8), 10)}に詳しい解説があるが、周辺よりも密度が高いクランプと衝撃波の相互作用を起因とする磁力線に沿った収束流によって形成されることがわかっている。

図2に x 軸に沿って密度を積分した柱密度の座標 $y=6$ pc, $z=6$ pc周辺の構造を示す。この領域は圧縮層全体の中でもとりわけ濃密な場所であり、特に図中の楕円で囲った領域に存在する複雑に折り重なったフィラメント全体の質量は約1,000太陽質量もある。この領域の中心部では重力崩壊が始まっており、ビリアル解析によって中心付近の重力的に束縛された領域の質量を求めると約200太陽質量にもなっていることがわかった。

3. なぜ大質量になったのか？

本稿の始めに書いたように、典型的な分子雲の中のジーンズ質量は1太陽質量程度であり、これを大きく超える質量をもった物体はジーンズ不安定によって分裂してしまう。ではなぜ分子雲衝突

でできたフィラメントの中の重力束縛コアの質量は200太陽質量にもなったのか？以下で解説するように、その理由は過去の研究で考慮されてこなかった高速衝突と磁場にある。ジーンズ不安定は重力によりガスが収縮しようとする力に対してガスのもつ圧力が耐えきれなくなったときに発生する。通常の分子雲では温度10 Kの分子ガスがもつ熱的圧力が重力に対抗する圧力の正体である。一方で高速衝突した分子雲では、通常環境とは異なる強烈な圧縮に伴う磁場増幅が顕著に見られ、圧縮層ではガスの熱的圧力よりも磁場もっている反発力（ローレンツ力）がはるかに大きくなっている。このことによって重力に耐えきれなくなる限界点が大幅に高まり、重力崩壊を始めるときの質量が大きくなっていったのである。本稿の始めの方で音速が圧力の指標であると書いたが、今の場合にはアルフェン速度という磁気波動の速度が音速に変わる指標になる。今解説している大質量コアの内部ではその速度は数km/sと音速よりも大幅に大きい。このようなメカニズムが正しいかどうかを確かめるために、文献8では磁気圧が支配的な場合のジーンズ質量が衝突前の分子雲の密度や衝突速度、磁場強度の関数としてどのように応答するのかを調べており、実際に上の説明に基づいた理論どおりにコア質量が応答することを確認している。

4. まとめと今後の課題

本稿では、最近観測的に指摘されている分子雲衝突による大質量星形成を、高分解能な3次元磁気自己重力流体シミュレーションによって調べた結果を示した。これまで考慮されてこなかった高速衝突と磁場の効果により、衝突でできた圧縮層の内部には大きな実効的ジーンズ質量をもった大質量コアが形成されることが明らかになった。観測が大質量星が形成される新たな条件（高速分子雲衝突）を発見し、アテルイを用いた高分解能シミュレーションが大質量コアの形成メカニズム

を明らかにするという観測と理論がうまく連携した仕事を行うことができたのではないだろうか。本稿を通じて、天文学には観測と同時にスパコンによるシミュレーションを通じた理論的理解も必要不可欠であるということを読者に実感していただければ幸いである。

本研究では大質量コアの形成メカニズムを明らかにしたが、大質量星形成に対する研究はこれですべて明らかになったというわけではない。磁力線に沿っては磁場は圧力をもたないので、形状や密度分布によっては磁場が強いコアは結局は分裂してしまうという指摘もあり¹¹⁾、今回のシミュレーションで得られたフィラメント状コアを出発点とした重力崩壊段階に関する研究を今後も行っていく必要がある。ここ数年で活躍しだしたALMAによる大質量コアの観測は今回のシミュレーションと同様のフィラメント形状をしており、さらにそのフィラメントが重力中心に向かって降着する様子が報告されている¹²⁾。このようなコアの超高分解能観測と今後のシミュレーションを比較することで大質量星形成過程がさらに詳しく明らかになっていくだろう。

謝 辞

分子雲衝突による大質量星形成という興味深い天文現象へと筆者を導いてくださった共同研究者の福井康雄教授（名古屋大学）に感謝いたします。また、本研究の成果は科学研究費補助金（課題番号23740154）によるサポートの結果得られたものです。

参考文献

- 1) Motte F, et al., 2007, A&A 476, 1243
- 2) Dobbs C. L., Bonnell I. A., Clark P. C., 2005, MNRAS 360, 2
- 3) Omukai K., et al., 2005, — 626, 627
- 4) Krumholz M. R., Klein R. I., McKee C. F., 2007, ApJ 656, 959
- 5) Furukawa N., et al., 2009, ApJ 696, L115
- 6) Torii K., et al., 2011, ApJ 738, 46
- 7) Fukui Y., et al., 2014, ApJ 780, 36
- 8) Inoue T., Fukui Y., 2013, ApJ 774, L31
- 9) Kowal G., Lazarian A., Beresnyak A., 2007, ApJ 658, 423
- 10) Vaidya B., Hartquist T. W., Falle S. A. E. G., 2013, MNRAS 433, 1258
- 11) Hennebelle P., et al., 2011, A&A 528, 72
- 12) Pretto N., et al., 2013, A&A 555, 112

Formation of Massive Molecular Cloud Cores by a Cloud Collision

Tsuyoshi INOUE

Division of Theoretical Astronomy, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Formation of massive molecular cloud cores that provides the initial condition for realistic massive star formation is studied using three-dimensional magnetohydrodynamics simulations with the effect of self-gravity. We show that intensive cloud collision suggested by the recent observations of massive star forming regions results in a formation of massive filaments behind shock wave. The massive filament have large effective Jeans mass $\sim 200 M_{\odot}$ owing to strong magnetic field.