

天体物理学

Star formation branches out

枝を広げる星形成

Ralph E. Pudritz

Nature Vol.457(37-39)/1 January 2009

星形成は、乱流状態の高密度ガスからなる分子雲の中で起こる。科学者たちは、この複雑な過程を解明しようと努力を続けてきた。このほど、樹形図を利用する革新的な手法により、新たな洞察がもたらされた。

恒星は冷たい分子ガス雲の中で形成されるが、その過程の解明は進んでいない。これは、分子雲の複雑さのためである。星形成過程を解明するためには、さまざまなスケールにわたって重力の効果を追跡しなければならない。特に重要なのは、こうしたガス雲のような大きなスケールでの効果である。Nature 2009年1月1日号の63ページで、Goodmanら¹は、階層的な樹形図（デンドログラム）を利用して、さまざまなスケールでガスをまとめている重力的な結びつきを解明する方法を示した。

分子雲の中でのガスの運動はスペクトル線のずれ（シフト）によって測定できる。あるガス塊が観測者に近づくように動いているか、遠ざかるように動いているかによって、一酸化炭素などの分子から放射されるミリ波の波長は、短波長側にシフト（青方偏移）したり、長波長側にシフト（赤方偏移）したりする。空の各点でこれらのドップラー偏移を測定することにより、分子雲の中のガス塊の視線方向の相対速度を決定することができる。その結果、分子雲の中のガスは主として超音速で運動していることがわかった。コンピュータ・シミュレーション²からも、分子雲の中に見られる高密度のフィラメント状構造のネットワークが、こうした超音速のガス流に直接由来しているらしいことが示されている（図1）。

しかし、多くの天文観測と同様、地球から天体（この場合はガス）までの距離を知るためには、さらに骨の折れる手法で観測を行わなければならない。分子雲の観測では、空の各点で放射されているすべてのガスの2次元的な位置しか測定することができない。ここで具体的に測定されるのは、2つの座標（地球表面における緯度と経度のようなもの）と、その位置でのガスの相対速度である。したがって、分子雲の地図を作成する際には、分子雲の全体にわたってガスの位置・位置・速度（ $p-p-v$ ）を測定していくことになる。しかし、ガ

ス雲の全体を3次元的に観測することができないなら、その真の構造を推論するにはどうすればよいのだろうか？さらには、恒星がいつ、どこで形成されるかを制御するさまざまな力の強さを推論するにはどうすればよいのだろうか？

この問題に取り組む際には、CLUMPFINDというコンピュータ・プログラムを使って、不規則な形をしたガス雲を小さく分割してクランプとよばれる構造の集合体として扱うのが普通である。こうして得られるガス雲の地図は、山脈の起伏地図に似たものになる。典型的な地図には、尾根により結ばれた峰や単独でそびえる峰のほか、同じ高さの点を結ぶ等高線が記入されている。こうした「山脈」を離散的な「山」に分解するときには、峰を特定し、さまざまな高さの等高線を使って、小さな高まりがいずれかの山の一部であるか、独立の構造であるかを決めようとするだろう。分子雲の $p-p-v$ 地図で、この山脈の起伏地図に相当するのは、ガス柱密度（特定の視線方向に特定の速度で運動する、すべてのガス塊からの放射の和）の等高線とピークである。

ところが、この結果を利用して星形成過程について考えようとしたとたん、問題が生じてくる。例えば、ガス柱密度からはクランプの質量が測定できる。そうすれば、特定の質量をもつクランプの数を数えることができる。こうして得られたクランプの質量の分布は、星形成の仕組みを考えるのに利用される^{3,4}。CLUMPFINDに似たプログラムを使ってこのデータを解析すると、クランプの質量の分布が、恒星の質量の分布とよく似ていることがわかる。ここから、恒星の質量はクランプを作った乱流過程に直接由来しているのかもしれないと推測されるため、この点をめぐって議論になっている。

けれどもGoodmanら¹は、この地図の等高線につき異なる閾値を採用すると、ガス柱密度の分布が変わってしまうことを示した（Supplementary Informationの図1を参照）。

これは山脈の起伏地図の場合と同様である。すなわち、山々や、それよりも小さな高まりを記述するのにどのような閾値を選択するかで、山々とその性質のリストは変わってしまうのである。これでは落ち着かない。このアプローチは、ガス柱密度の実際の分布を測定するための完全に客観的な方法にはならないのである。

ここで、Goodmanら¹が提案するデンドログラムの手法の出番になる。彼らは p - p - v データを主観的・直観的に明らかな構造に分割する代わりに、構造に内在する階層（構造の中の構造）を敏感に検出する方法を利用したのである。データは「葉」「枝」および「幹」に分類される。「葉」はガス柱密度地図における十分に強いピークであり、「葉」どうしは「枝」（「葉」を取り巻く環境）によって結ばれている。物理的に関連する「枝」の集まりが「幹」である。

デンドログラム上の各点は、地図上の閉じた「等値面」に対応しており、この等値面は1つ以上のガス柱密度ピークを内包している (*Nature*2009年1月1日号64ページの図2を参照)。著者らはそこで、いかにして物理的性質の起源をこれらの等値面内の領域に帰することができるかを示した。特に重要な性質は、ガスの運動エネルギー（その領域中のガスの速度に依存）と重力エネルギー（その領域の質量とサイズに依存）の比、すなわちビリヤード比である。この比が十分に小さければ、その領域中のガスは、自己重力により凝縮して恒星を形成しようとする。こうして、デンドログラムはガス雲の全体にわたる重力の相対的な強さをなぞることになるのだ。

デンドログラムの手法をガス雲 L1448 の観測に応用した結果と、乱流のみを考慮する（自己重力は考慮に入れない）コンピュータ・シミュレーションに応用した結果の間には矛盾がある。すなわち、シミュレーションでは、すべての空間スケールにおいてガスの大半が自己重力により凝縮していくという結果になったのに対して、観測では、大きなスケールではガスの大半が自己重力により凝縮するが、小さなスケールでは自己重力により収縮するガスはほとんどないという結果になったのである。

興味深いことに、Goodmanらのデンドログラムでみられるガス柱密度の局所的な強いピーク（これは、星形成が観察される高密度のガスの「コア」に相当する）は、CLUMPFIND アルゴリズムでみられるものよりもまばらであり、自己重力により凝縮する大きなガス領域にあることがわかった。これは非常に興味深い。10年近くにわたり星形成理論をにぎわしてきたのは、恒星がいかにして質量を獲得したかという論争だった⁵。コアは比較的孤立して存在しており、そこにガスが降着していくのだろうか？ それとも、

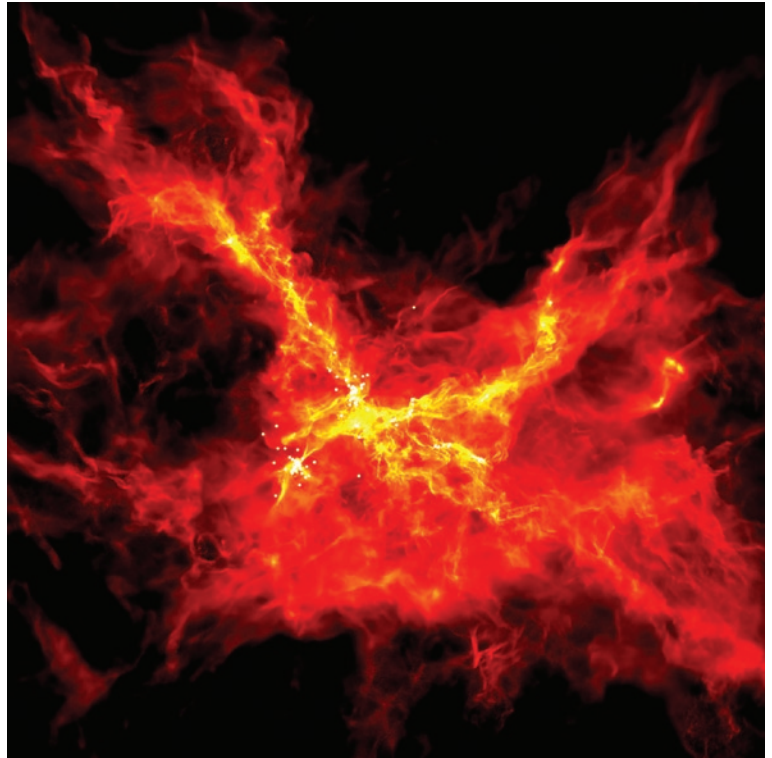


図1 星のゆりかご。画像は、乱流状態のガス雲が自己重力により凝縮している中で、恒星が形成されるようすを示すコンピュータ・シミュレーション²。星団を生み出すこのガス雲の最初の重量は太陽質量の500倍である。ガス雲は一様密度の球体としてモデル化されており、その半径は8万3300天文単位（1天文単位は地球から太陽までの平均距離）、温度は10ケルビンである。超音速乱流はガスを圧縮し、多くのフィラメントや、より小さい高密度領域を作り出す。シミュレーションは1自由落下時間（ガス塊が自由に落ち込んで、ガス雲の中心に到達するまでの時間）が経過した後の状態であり、このシミュレーションのパラメータでは 1.9×10^5 年に相当する。白い点は小さくて高密度のガスからなる「コア」であり、これが崩壊して個々の恒星を形成する。物理的には、Goodmanらの論文¹の図1（63ページ）で、ビリヤードの球として描かれているものに相当する。

コアはより広い重力ポテンシャルの中を動き回りながら、同じように重力的に束縛された領域の中のほかの高密度領域と競争しながら質量を増やしていくのだろうか⁶（「競争的降着」理論）？ どちらの仮説も観測により決定的な証拠を得るのは困難であるが、Goodmanらが開発したデンドログラムの手法は、この質問に答えて、実際の星形成の条件を特定できる可能性がある。

Ralph E. Pudritz、マクマスター大学（カナダ）。

1. Goodman, A. A. et al. *Nature* **457**, 63-66 (2009).
2. Bate, M. R. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* (in the press); preprint at <http://arxiv.org/abs/0811.0163> (2008).
3. Motte, F., Andre, P. & Neri, R. *Astron. Astrophys.* **336**, 150-172 (1998).
4. Johnstone, D. et al. *Astrophys. J.* **545**, 327-339 (2000).
5. McKee, C. F. & Ostriker, E. C. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **45**, 565-687 (2007).
6. Bonnell, I. A. & Bate, M. R. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **370**, 488-494 (2006).