

●●●●あの論争は…いま？ (1) ●●●●

大質量星の起源—降着説 vs. 合体説—

Origin of the Massive Stars—Accretion vs Merging—

細川 隆 史

〈国立天文台理論部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: hosokawa@th.nao.ac.jp

論争の種：太陽の 8-100 倍程度の質量の恒星の形成

論争のはじまりとおわり：1990 年代後半から現在まで

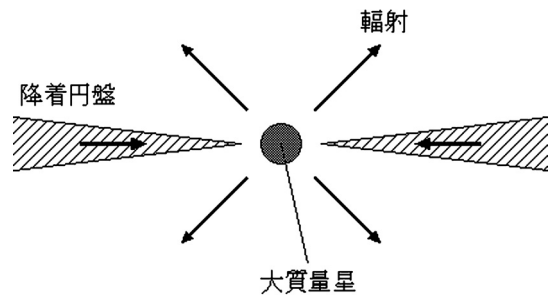
主な対立説：降着説（降着円盤を通じた質量降着による形成）、合体説（多数の低質量星の合体による形成）

現在有望な説：少なくとも降着はある程度効いているらしいが、合体とどちらが支配的かは不明.

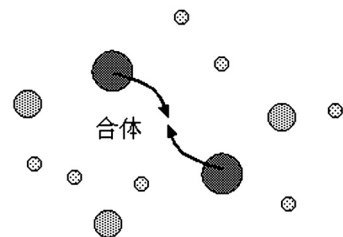
星形成は天文学の最も基本的な分野の一つであり、古くから研究が行われてきました。しかし、一般に思われているほど、星形成のプロセスは理解されていません。これまでに形成の標準シナリオが確立しているのは、せいぜい太陽質量星程度の単独星が形成される場合だけで、連星、星団、そして大質量星の形成過程については不確定要素が多く残されています。特に重要なことに、銀河系の恒星のほとんどは大質量星が付近に存在するような星団中に連星として形成されるのです。今回はこのうち、大質量星の形成過程について、これまでの論争の歴史と現状、そして今後の展望についてまとめます。

大質量星の定義はいろいろありますが、ここでは太陽の 8-100 倍程度の質量の恒星とします。これらの重い星は少数ですが、星間空間ではとても重要な役割を果たします。強力な紫外線や星風、そして最期を迎えた際の超新星爆発などのフィードバック効果は周囲の星形成を抑制あるいは誘発し、星形成率を決める重要な要素の一つになります。さらに最近では、関連分野の発展に伴って、宇

(a) 降着説



(b) 合体説



降着説，合体説の模式図。

宙論的な重要性も増しています。金属量や紫外線強度等の環境に対して、形成される星の性質がど

のように変わるかは、重要かつとても興味深い問題です。しかし、現実はなかなか厳しく、以下でみるように観測のたくさんある近傍の大質量星でさえも、その形成シナリオはいまだ確立していません。

大質量星の話に入る前に、まず標準シナリオのある太陽程度の星形成について触れましょう。星形成は分子雲内の密度の濃い領域（分子雲コア）が重力崩壊することから始まります。中心部の密度の高い領域は速やかにつぶれて、ある程度光学的に厚くなったところで崩壊が抑えられて原始星ができます。その後、周囲からガスが原始星に降着して星の質量が大きくなっていきます。このとき、降着してくるガスには多少なりとも角運動量があるため、降着円盤を通じて中心星への降着が起こります。星はゆっくりと収縮しつつ中心の温度が上がり、約1千万度になると核融合反応が始まって、いわゆる主系列星になります。一人前の星の誕生です。このシナリオがほぼ確立しているのは、観測的な支持があるためです。太陽系近傍にはおうし座分子雲と呼ばれる有名な低質量星の形成領域があり、ここでは上のシナリオが予想する前主系列段階の若い星が多数見つかっています。逆に、大質量星の場合、このような理想的な形成領域が近くに少ないことが困難の一つになっています。

大質量星の場合、低質量星と同じシナリオではうまく星が形成されないことは早くからわかっていました¹⁾。困難の一つはその強い輻射によるものです。星に降着するガスに含まれる塵粒子に輻射による圧力が加わり、降着してくるガスをはね返してしまうのです。これに加えて、時間の問題があります。上のシナリオでは降着率はおよそ1年当たり 10^{-6} 太陽質量程度になるのですが、このペースでは大質量星は作れません。なぜなら、重い星はそもそも寿命が短く、100–1,000万年で超新星爆発を起こしてしまうからです。観測されているような数十太陽質量の星を作るためには、

大きな降着率が必要になります。これらの困難に対して、主に二つの説が唱えられてきました。一つが降着説、そしてもう一つが合体説です。

降着説は、基本的には低質量星の場合のシナリオに沿ったものです。大質量星形成の困難が指摘された当初は、形成過程が球対称の仮定の下で調べられていたのに対して、降着円盤を通じたより現実的な降着プロセスを考えると、自然に困難は解消されるという考えです²⁾。円盤を通じた降着では、円盤内部で星からの輻射が遮蔽されるので、輻射圧の問題はクリアできます。塵粒子が蒸発するような星の近傍までガスを持ち込めれば、後は中心星まで降着できるというわけです。ただし、この説では大きい降着率は必ずしも保証されるものではありません。降着率は重力崩壊の始まる領域の物理状態によるので、高い降着率のためには、それが実現される状況が前もって用意されている必要があります。

合体説は、低質量星と大質量星では形成プロセスが根本的に異なるとする立場に立っています。これは、大質量星は大抵単独でなく、星団の中心付近で形成されるという観測事実に基づいた考えです。星団内では星同士が混み合って存在しているので、それらの合体によって大質量星を一気に作れば、輻射圧の問題は関係しません³⁾。

これら2説の対立軸ができて10年近く経ちますが、いまだ二つの説ともに生き残っており、今なお続く論争を楽しむことができます。

最近の観測は、やや降着説を支持しているように感じられます。まず、いくつかの大質量原始星の周囲に降着円盤とおぼしき構造が観測されています。これについては、日本のすばる望遠鏡も大きな成果を上げています⁴⁾。これが実際にケプラー回転的な円盤なのか、単なるトーラス状構造なのかはさらに速度構造を詳しく調べることで明らかになるはずですが、また、低質量星でしばしば見られるように、非常に細く絞られたアウトフローをもつ候補天体もあります。アウトフローは

大質量星形成領域でも非常にありふれており、質量放出率が $10^{-3}\sim^{-4}$ 太陽質量/年と大きいことも降着説を支持しています。形成の初期条件に相当するかのような、大質量星なし分子雲コアの候補も見つかっています。

理論的には降着説、合体説ともに数値計算を用いた研究が行われています。降着説では回転している分子雲コア崩壊の時間発展が計算されています。この際、中心星からの放射によるフィードバック効果が重要になることから、放射輸送とダイナミクスを同時に解く必要があり、これが計算を難しくしています。現在、3次元計算が初めて行われつつある段階ですが、40 太陽質量以上の星でも形成可能であることがわかってきました⁵⁾。一方、合体説は多体計算などによって検証されており、実際に現在観測されているいくつかの星団では有意に合体過程が効く可能性が指摘されています⁶⁾。ただし、星団の形成過程の計算⁷⁾に関しては、やはりフィードバックの組み込みなどの課題が多く残されています。

以上、簡単に大質量星形成に関する降着説、合体説間の相克について概観してきました。大質量

星形成は星団の形成過程とも密接な関係にあり、まさに星形成分野におけるフロンティアです。遠方にあり、かつ複雑な構造をもつ大質量星形成領域は観測が困難でしたが、これらは最近改善が進み、ALMA ができれば状況は一変するはずですが、将来的には計算量の多さがネックになっています。理論的には超コンパクト HII 領域やホットコア、レーザーなどの観測と計算による動的進化の対応が重要になってくるでしょう。まだ当分論争は続きますので、自分を含めて数多くの方々が参戦されるのを楽しみにしています。

参考文献

- 1) Wolfire M. G., Cassinelli J. P., 1987, ApJ 319, 850
- 2) Nakano T., 1989, ApJ 345, 464
- 3) Stahler S. W., Palla F., Ho P. T. H., 2000, in Protostars and Planets IV, p. 327
- 4) Jiang Z., et al., 2005, Nature 437, 112
- 5) Krumholz M. R., Klein R. I., McKee C. F., astro-ph/0510432
- 6) Portegies Zwart S. F., Makino J., McMillan S. L. W., Hut P., 1999, A&A 348, 117
- 7) Bonnell I. A., Vine S. G., Bate M. R., 2004, MNRAS 349, 735

新シリーズをはじめるとあって

科学の進歩の源は、「論争」にあります。天文学は特に直接実験で確かめられない現象も多く、観測事実をどう説明するかという「論争」が多くあります。そのうち、いくつかは収束し、「定説」が生まれたり、また時には「定説」が新たな観測事実や理論的研究により危うくなることもあります。

何十年も続いている論争もあれば、一時期専門家の間で大論争になったものの、一般には知られていない論争もあるでしょう。この新シリーズではそういった広い意味での天文学上の「論争」を毎回一テーマずつ取り上げ、各分野の専門家にわかりやすく解説していただきます。読者からのリクエストも歓迎します。

(天文月報編集長)