

大質量星・連星形成の理解に向けて

Keyword: 大質量星形成

1. 重力波検出の突き付けた課題

Advanced LIGO による重力波の直接検出 (GW150914) は言うまでもなくそれ自体が物理学の歴史に残る大発見であるが、同時に天文学・宇宙物理学にも改めて大きな課題を突き付けた。即ち、36太陽質量+29太陽質量もの大質量の連星ブラックホールの起源である。この問いに対して決定的な答えはまだないが、本稿ではこれに関連して連星系を含む大質量星形成研究の現状を簡単に紹介したい。

2. 大質量星形成と低質量星形成

星は宇宙空間を漂う主に水素分子からなる分子雲から形成される。分子雲内の特に高密度の塊 (典型的な数密度は $n > 10^4 \text{ cm}^{-3}$) を分子雲コアと呼び、これが個々の星または連星系形成の初期条件と考えられている。このコア質量のうち 20–40% 程度が星に変換されると観測は示唆している。^{*1} 低質量星 (太陽程度以下のものを指す) では主に磁場によって駆動されるアウトフローが最終的な星質量の決定に重要な役割を果たすことが知られており、多次元磁気流体計算により観測と整合的な結果が得られている。¹⁾

比較的よく理解されている低質量星形成と比べると大質量星形成領域は遠方にしか存在しないため観測が難しく謎が多い。しかし大質量星は超新星爆発や強力な輻射により周囲の環境に多大な影響を及ぼし、超新星爆発により重元素を生成して宇宙全体の化学進化の中心的役割を果たすため、その形成を理解することは極めて重要である。大質量星形成と低質量星形成の最も顕著な違いは中心星からの輻射の重要性である。即ち、大質量星は形成途中から非常に大きな光度を持つために、輻射によってガスの降着を抑制する。古典的な球対称の理論²⁾では輻射によって一定以上の質量への成長が妨げられる輻射圧障壁の存在が指摘され、これを回避することが大質量星形成研究の長年の課題であった。

形成中の大質量星の顕著な特徴の一つは非常に大きい降着率である。低質量星の場合典型的に $10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$ 程度 ($M_{\odot}$ は太陽質量) に対し、大質量星は様々な観測的指標から $10^{-4} M_{\odot}/\text{yr}$ 以上の高い降着率が示唆されている。降着率が十分に高ければ中心星の輻射に打ち勝って降着することができるため大降着率は大質量星形成に好都合であり、また大質量星は寿命が短いため短時間で形成しなければならないという点とも整合的である。分子雲コアの重力収縮では降着率はジェーンズ質量 M_J と自由落下時間 t_{ff} でおよそ決まり、 $\dot{M} \sim M_J/t_{\text{ff}} \sim c_s^3/G \sim 10^{-6} [c_s/(0.2 \text{ km/s})]^3 M_{\odot}/\text{yr}$

(G は万有引力定数、 c_s は音速) となる。大質量星形成領域の温度は低質量星形成領域とあまり変わらないため大降着率を説明するには不十分だが、磁場や乱流による非熱的な効果を含む有効音速を考えればこの問題は解決する。大質量星形成領域では有効音速 1 km/s 以上に相当する強い乱流が観測されており、乱流で支えられた大質量の分子雲コアが一気に重力崩壊を起こすことで高い降着率が実現される。

このような乱流や輻射を含む複雑な系の取り扱いには困難だが、近年では計算機技術の発展により乱流や中心星放射を含む多次元輻射流体計算が可能となった。回転や乱流を含む系では遠心力により必然的に星周円盤が形成される。その結果、中心星からの輻射がガス密度の低い円盤の回転軸方向に抜けることで上下方向からの降着を抑制するものの、高密度の星周円盤を通した降着は依然として可能であることが分かった。³⁾ これにより「大質量星形成が可能かどうか」という定性的な輻射圧障壁問題は解決され、「どの程度質量降着を抑制するのか」という定量的な問題になった。更に最新の磁場や非理想磁気流体効果による磁場の散逸などまで含めた高度な輻射磁気流体計算によれば、実は大質量星でも磁場の効果は支配的であり、降着を抑制する機構として磁場で駆動されるアウトフローが輻射と同等以上に重要であるという描像が見えてきた。観測的にも大質量星と低質量星のアウトフローの性質には共通点があり、質量に依らず同じ物理過程で駆動されている可能性を示唆している。最近の多次元輻射磁気流体計算では $100 M_{\odot}$ 前後までの大質量星形成が可能であることが示されている。

これは極端に言えば、これまで質的に異なると考えられてきた大質量星形成が低質量星の拡大版として理解できるということの意味する。今後系統的な研究が進めば全ての質量を統一的に説明する理論が構築できると期待している。

3. 連星系形成

太陽は単一星であるが、多くの星が連星あるいは多重星として形成される。連星系の性質は形成過程を反映するため星形成を理解する手がかりとなる。一方、連星は分子雲コアと星質量の対応関係を決める上でも重要であり、その形成を理解することは星形成研究の大きな課題の一つである。

銀河系内の「フィールド」(星形成領域ではない通常の空間) の連星の統計的性質は観測的によく調べられており、主星の質量が大きいほど連星が多いことが知られている。⁴⁾ 太陽質量程度の G 型星ではおよそ半分、O 型星 (15 太陽質量以上) では 80% 以上が連星であり、形成後の進化

で連星が破壊される可能性を考慮すれば、大質量星は形成時にはほぼ全て連星ないし多重星であったと推測される。

連星系を特徴づけるパラメータとしては主星と伴星の質量比や軌道長半径(周期)などがある。フィールドの連星系は既に進化を経て形成直後の情報を必ずしも保持していないが、それでも形成過程を調べる上での手掛かりとなる。例えば、大質量星では主星と伴星の質量比はほぼランダムであるのに対し、低質量星では等質量に近いものが多くなる。一方、軌道周期の分布は主星質量に依存して様々であり、低質量星では幅広い領域に広がっているのに対し、大質量星では顕著に短周期の連星が多く、数日程度の軌道周期にピークがあることが知られている。

連星系の形成機構として以下の四つが考えられてきた：

(1) 力学的な多体反応による捕獲、(2) 星の回転不安定性による分裂、(3) 星周円盤の重力不安定による分裂、(4) 分子雲コアスケールでの乱流等による分裂。このうち(1)は発生確率が低く、高密度な星団の中心部などの特殊な環境以外では働かない。(2)の回転不安定性の結果は連星ではなく円盤になると考えられており、近年は連星形成機構としては重視されていない。残る円盤の重力不安定と、コアスケールでの乱流等による分裂が現在の主流である。(3)は円盤質量が十分大きくなると重力で分裂するものであり、Toomreの理論でよく理解されている。一方(4)の乱流による分裂は、分子雲コアの初期段階に仕込まれた大振幅の揺らぎが連星の種となるという描像である。円盤分裂は必然的に円盤サイズで制限されるため比較的短周期の連星を好むのに対し、乱流によるコア分裂は様々なスケールの連星を生み出す。円盤分裂は等質量に偏った質量比分布を予言するのに対し、コア分裂では多様な質量比を取ることが予測される。降着率が高い環境では円盤質量が大きくなるため重力不安定になりやすいが、一方で大質量星形成領域は乱流が強くまた密度が高いためコアの分裂も起こりやすく、どちらの機構も大質量星の高い連星率を説明できる。この二つは排他的ではなく、短周期のものは主に円盤分裂で、長周期のものは主にコアの分裂で形成されると推測される。集团的星形成の流体計算によりこれらの傾向は再現されている⁵⁾が短周期連星を分解するには計算の空間解像度がまだ十分ではなく、より精密な計算による検証が待たれる。

4. 大質量星形成と金属量

大質量星が高密度で乱流の強い環境で形成されることは既に述べた。これ以外にも様々な要素が影響するが、重要な環境の効果として金属量が挙げられる。低金属量環境ではオパシティ(不透明度)が下がるため中心星の輻射の影響

が弱くなり、より大質量の星が形成され得る。一方でオパシティが下がると輻射冷却により円盤の温度が下がるため、分裂を起こしやすくなり低質量の星が増える。低金属量は大質量星形成の必要条件ではないが、最大質量という点では低金属量環境の方が有利である。事実、銀河系内で発見された最大の星は $150 M_{\odot}$ 程度であるが、低金属量の大マゼラン雲では $300 M_{\odot}$ もの大質量星も見つかっている。

5. 大質量ブラックホール連星の形成

以上を踏まえて、重力波イベントGW150914の大質量ブラックホール連星を星形成の立場から説明できるかというのは興味深い問題である。現時点では「定性的には可能だろうが定量的な予言は困難」というのが無難な答えであろう。^{*2} ブラックホール合体の初期条件に必要な非常に短周期の連星の形成は理論的にも観測的にも可能と考えられるが、より精密な高解像度数値計算による検証が必要である。金属量が高いと星進化の最終段階で多くの質量を放出してしまい大質量のブラックホールを形成できないため低金属量環境が好まれるが、太陽の半分から数分の一以下であれば十分説明できるため極端な低金属量環境である必要はない。形成された連星系が連星間の質量輸送や超新星爆発による軌道進化を経て合体できるのか、観測と合致した合体頻度が得られるのかは不定性が大きい。大質量ブラックホールの合体は珍しい事象なので、星団の中心のような特別な環境で発生するという解釈も可能であり必ずしも星形成の文脈で説明する必要もない。形成機構の理解には電磁波対応天体の観測による母天体と環境の同定が不可欠である。

連星系、特に短周期の近接連星の形成過程は以前は活発に研究されていたのだが近年はやや流行から外れていた。重力波の直接検出に触発されてこの分野が再び注目を集め、今後飛躍的に発展することを期待したい。

参考文献

- 1) M. N. Machida and T. Hosokawa: Mon. Not. R. Astron. Soc. **431** (2013) 1719.
- 2) M. G. Wolfire and J. P. Cassinelli: Astrophys. J. **319** (1987) 850.
- 3) M. Krumholz, *et al.*: Science **323** (2009) 754.
- 4) G. Duchene and A. Kraus: Annu. Rev. Astron. Astrophys. **51** (2013) 269.
- 5) M. R. Bate: Mon. Not. R. Astron. Soc. **419** (2012) 3115.

富田賢吾(大阪大学大学院理学研究科 tomida@vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp)

(2016年9月25日原稿受付)

^{*1} これは単純化した描像であり、単純な対応関係は存在しないという説もある。ここではその詳細に立ち入らず、星質量を決める物理に着目する。

^{*2} 本記事全編を通じてこのような歯切れの悪い表現が多くて恐縮だが、筆者の科学的誠実さから来るものとして御容赦頂きたい。