

大質量星形成：複合的フィードバックの影響

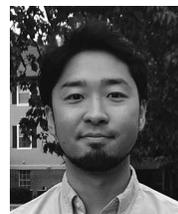
田 中 圭¹⁻³

〈¹ フロリダ大学 天文学科 / Department of Astronomy, University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA〉

〈² 大阪大学 大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻 〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町 1-1〉

〈³ 国立天文台 チリ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: ktanaka@vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp



大質量星は星間物質に多大な影響を与え、その死後にはブラックホールへと姿を変える天文学的に重要な天体です。しかし、大質量星形成過程にはまだ多く謎が残されており、特に観測されている100太陽質量を超えるような重たい星は自身から放たれる輻射のフィードバックによって形成が困難だと考えられてきました。私たちは複数のフィードバック過程を統合的に組み込んだ理論モデルを構築し、大質量分子雲コア崩壊から円盤降着を介した降着過程を計算することで、少なくとも500太陽質量程度の大質量星は形成可能であることを示しました。また計算の結果、輻射による影響はこれまで考えられていたより弱く、磁気流体的アウトフローが最も強力なフィードバックであることもわかりました。これらの結果はこれまで質的に異なると思われていた大質量星と小質量星の形成過程が実はよく似ていることを示しています。

1. はじめに

本稿の主役となる天体は太陽のおよそ10-数百倍の質量をもつ恒星「大質量星」です。大質量星の数は恒星全体の1%程度と少ないのですが、その一つひとつは非常に明るく、光度としては全体の約90%を担う重要な天体です。また、大質量星はその強烈な輻射と恒星風により星間空間に大量のエネルギーを供給し、その寿命が尽きるときには超新星爆発により重元素を生成することで宇宙史を通じた星間物質の物理的・化学的進化に多大な影響を与えます。多くの星・惑星は星団内で大質量星の影響を受けながら誕生するため、大質量星の形成過程や形成条件を理解することはとても重要と言えます。特に近年では重力波源となる連星ブラックホール／中性子星の起源としても、大質量連星の形成には注目が集まりつつあります。

これらの重要性があるにもかかわらず、大質量星の形成過程はこれまで天文学における重大な謎の一つとされてきました。これはよく知られている小質量星（1太陽質量程度の恒星）の標準的な形成シナリオを大質量星形成に適用しても、輻射圧によって降着する前にガスが吹き飛ばされてしまい観測されているような100太陽質量を超える大質量星を作ることはできないと考えられてきたからです。このようなガス降着を抑制する機構は「フィードバック」と呼ばれ、大質量星形成における重要な問題と認識されてきました。しかし、私が大学院で研究を始めた10年ほど前と比べると、大質量星形成研究、特にフィードバック問題に関しては大きな進展が見られ、大質量星形成シナリオの確立も近づいていることがわかります。そこで本稿では、これまで盛んに議論されてきた大質量星形成のフィードバック問題をまとめたうえで、本題である私たちが行った複数フィード

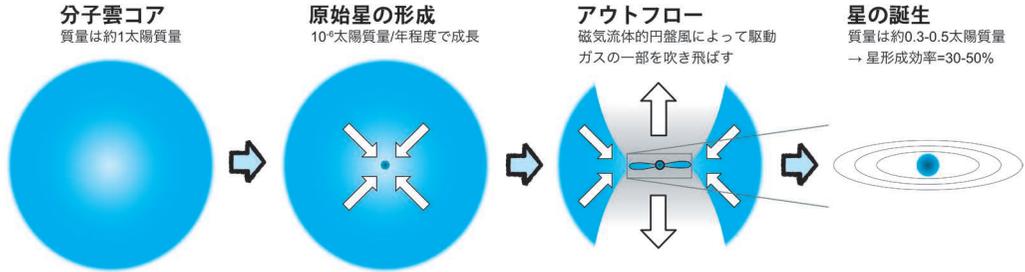


図1 小質量星形成の概略図。小質量星形成は分子雲コアの自己重力崩壊から始まり、原始星への質量降着、円盤風駆動によるアウトフローのフィードバックを受け、最終的に星は母体・分子雲コアの約30-50%の質量をもって誕生します（最終的に惑星系をもつことがありますが、本稿では中心星に注目し惑星形成には踏み込みません）。

バックの理論研究¹⁾を紹介し、最後に残された課題と今後の展望について触れていきたいと思います。

2. 大質量星形成とフィードバック問題

恒星の最も基本的な単位は「誕生時の星質量」で、それを決定づける重要な物理過程は質量降着とそれを阻害するフィードバックです。特に大質量星形成ではフィードバックが強力かつ複雑になると考えられていて、長年、さまざまな研究はなされてきましたが、複数のフィードバックを総合的に取り入れた研究はこれまでなされていませんでした。ここでは研究背景の紹介として、まず小質量星形成の標準シナリオについて解説をしたうえで、大質量星形成におけるフィードバック問題の現状について述べていきます。

2.1 小質量星形成の標準シナリオ

図1に小質量星形成の概略図を示しました。小質量星形成は分子雲内の「分子雲コア」と呼ばれる高密度ガスが自己重力で崩壊することにより開始します。材料となる分子雲コアの総質量は約1太陽質量で、これはコア自身の密度 10^4 cm^{-3} と温度10 Kから見積もられるジーンズ質量（自己重力崩壊に必要な最小質量）とほぼ同程度です。重力崩壊の結果コアの中心付近に星の赤ちゃん「原始星」が誕生します。誕生時の原始星は約 10^{-3}

太陽質量と非常に軽いのですが、周囲に残された分子雲コアのガスが降着することで、およそ 10^{-6} 太陽質量/年の割合でその質量を増やしていきます。

ただし、母体となる分子雲コアのガスすべてが原始星に降り積もることができるわけではありません。アウトフローによるフィードバックによって、降着する前のガスが星間空間へと放出されてしまうからです。ガスは角運動量をもっているため、原始星の周りには回転しながら徐々に降着する円盤が作られます。この円盤には磁場が刺さっており、磁場が円盤回転運動により振り回され、ガスが磁力線に沿って遠心力で加速されることにより回転軸方向に「円盤風」が噴出します。この磁気流体的円盤風は周囲のガスを巻き込みアウトフローとなり、大量のガスを重力圏外へと吹き飛ばしてしまいます。このフィードバック過程により最終的に誕生する星の質量は初期コア質量の約30-50%になると観測・理論の両面から考えられています^{2), 3)}。この初期コア質量に対する誕生時の星質量の割合は「星形成効率」と呼ばれ、フィードバック過程は星形成効率を決める重要な役割を果たします。

2.2 輻射圧問題

では、この標準シナリオを大質量星形成に当てはめるとどのような問題が起こるのでしょうか？大質量星形成と小質量星形成の最も顕著な違いは

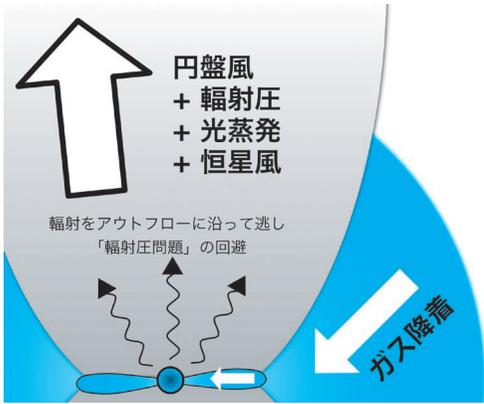


図2 大質量星形成におけるフィードバックの概略図。小質量星形成と同様に円盤が形成され(図1参照), 輻射を密度の薄い円盤軸方向に逃すことで輻射圧問題を回避できます。しかし, 円盤軸方向には, 円盤風, 輻射圧, 光蒸発, 恒星風といった小質量星の場合よりも多くのフィードバックがかかりガス降着が阻害されます。最終的に誕生する星の質量は, ガス降着とフィードバックのせめぎ合いで決まることとなります。

「輻射圧」であると考えられてきました。古典的な球対称降着の議論では, 原始星質量が約20太陽質量を超えた時点で, ダストを介した輻射圧が重力を上回り質量降着を止めてしまうというのです^{4)~6)}。これでは観測されているような100太陽質量を超える非常に重い星の存在を説明できません。この輻射圧問題は長年, 大質量星形成における最大の課題とされ, その克服のため「小質量星合体による大質量星形成」など標準シナリオとは根本的に異なる形成モデルすらも提案されてきました⁷⁾。

しかし, ここ10年間での理論研究の進展は目覚ましく, 特に計算機技術の発展により輻射流体力学シミュレーションが実行できるようになったことで, この輻射圧問題にも解決の兆しが見えてきました^{8), 9)}。現実的には降着流は球対称ではなく, 小質量星形成と同様に角運動量保存から降着

円盤が必然的に形成されます。図2に示すように, このような非球対称降着流構造では, 中心星からの強力な輻射を密度が薄い円盤の回転軸方向に逃しながら, 円盤を介したガス降着は継続可能であることがわかってきたのです^{10), 11)}。この場合でも軸方向のガスは輻射圧で吹き飛ばされるため, 輻射圧が完全に無視できるわけではないのですが, 最大質量の問題は回避できることとなります。また時期を同じくして, 観測からも大質量原始星の周囲に円盤が発見¹²⁾されるようになったことで, 円盤降着による輻射圧問題の回避は広く受け入れられるようになりました。

2.3 さらになるフィードバック過程

輻射圧問題は解決に向かっていますが, 大質量星形成において重要となるフィードバックは輻射圧だけではありません。大質量星は光度だけでなく, その表面温度も高いため大量の紫外線を放出します。密度が薄い円盤上下面のガスは紫外線により電離加熱されることで, 蒸発するように散逸を始めてしまいます。このフィードバック過程は「光蒸発」と呼ばれ, 近年, ダストが存在しない初期宇宙での初代星形成の文脈で特に注目を浴びてきました。典型的な初代星形成の場合, 初期コア質量が1,000太陽質量ほどあったとしても, 光蒸発によって約50-150太陽質量でガス降着が止められてしまうと言われていました^{13), 14)}。ダストが存在する現代の大質量星形成においても同様の物理過程が起こる可能性は十分にあるのですが, これまで十分な研究はなされていませんでした*1。

大質量星形成において考慮する必要があるフィードバックはまだあります。「恒星風」は大質量星進化においてその質量を大きく変化させることがよく知られていますし¹⁵⁾, また, 小質量星形成で紹介した磁気流体円盤風によるアウトフローが大質量星形成でも重要になることが最近わかってきました¹⁶⁾。しかし, 過去の研究はどれ

*1 実は球対称降着では電離領域は星表面付近に抑え込まれ, 光蒸発は起こらないと考えられていました。しかし, 輻射圧の克服のために円盤降着が不可欠となったことで, 今度は光蒸発が問題となる可能性がでてきたのです。

も個別のフィードバック過程に注目したものばかりで、現実的な複数のフィードバックが同時に働く状況はこれまで考慮されてきませんでした。

3. 複数フィードバックを考慮した大質量星形成

このような研究背景のもと、私たちは磁気流体的円盤風（以下、円盤風）、輻射圧、光蒸発、恒星風の四つのフィードバックを考慮した大質量星形成の理論的モデルを初めて構築し、初期コア質量に対する誕生時の星質量の割合「星形成効率」を求める研究¹⁾を行いました。これまで強力かつ複雑な輻射フィードバックのため大質量星の形成過程は小質量星形成とは質的に異なるだろうと言われてきましたが、今回の研究から実は両者はよく似ている可能性が高いことがわかってきました。

3.1 大質量分子雲コア

典型的な分子雲コアでは1太陽質量程度のガスしかなく、大質量星を作るには材料が足りません。しかし、約10-100太陽質量にもなる重たい分子雲コアも観測されています^{17), 18)}。これらの大質量分子雲コアは超音速乱流と強磁場の非熱的効果により支えられており、典型的ジーンズ質量をはるかに上回っても分裂を免れていると考えられています¹⁹⁾。大質量分子雲コアが自己重力崩壊を起こすと、原始星への質量降着率が標準シナリオより2桁以上も高い 10^{-4} - 10^{-3} 太陽質量/年となることが理論的に見積もられていて、これはまた観測²⁰⁾とも整合的な値となっています*2。このような小質量星形成の標準シナリオの拡張版の大質量星形成モデルを“コア降着シナリオ”と呼びます。

私たちはこのコア降着シナリオの下で、大質量分子雲コアからの大質量星の誕生過程を調べまし

た。初期パラメータとしてはコア質量とクランプ面密度を用います。コア質量は原始星の材料となる分子雲コアの総質量で、今回は10-3,000太陽質量の範囲を調べました。クランプ面密度は、分子雲コアを包む星団を生む大きなガス雲の面密度で、大質量分子雲コアが存在する領域では観測的にも理論的にも典型的に 1 g/cm^2 程度あると言われています^{19), 21)}（小質量星形成領域は約 0.03 g/cm^2 ）。そこで、私たちはクランプ面密度 0.1 - 3 g/cm^2 の範囲の計算を行いました。コア質量とクランプ面密度を与えると力学平衡から分子雲コアの半径は 0.01 - 1 パーセク程度と決まり、これも観測と整合的な値となっています。このような、大質量分子雲コアの自己重力崩壊による大質量星の形成過程を調べていきます。

3.2 四つのフィードバック

分子雲コア崩壊により誕生する原始星に、周囲からガスが降り積もることで星は最終的な質量まで成長します。その間に周囲のガスの一部は複数のフィードバック過程によって星間空間へと吹き飛ばされ、その降着は抑制されます（図2）。私たちは四つのフィードバック過程を整合的に取り扱うことで、各フィードバックの影響力と最終的に誕生する星質量がどの程度であるかを調べました。

フィードバック過程として、まず「円盤風」と「輻射圧」の二つを合わせて考えます。円盤風は、円盤表面のガスが磁力線に沿って円盤回転運動から遠心力を受けることで加速し噴出します。この円盤風は周囲の降着流に外向きの運動量を与え、大きなアウトフローとなり大量のガスを吹き飛ばします²²⁾。一方、輻射圧によるフィードバックでは、光のもつ外向きの運動量を降着流に含まれるダストを介してガスに与えて、アウトフローを作ります⁹⁾。私たちは両者の合計運動量をもと

*2 かつては球対称の議論から 10^{-3} 太陽質量/年の高降着率は輻射圧克服の必要条件と言われていました。円盤降着ではここまで高い降着率は必要ないのですが、観測的にも理論的にも大質量コア崩壊ではこの程度の降着率が実現されると考えられています。

に、二つのフィードバックから生まれるアウトフローの開口角の時間変化を計算しました。開口角が大きくなるにつれて、星・円盤へ降着できるガスの割合が減っていくことになります(図2)。

「光蒸発」は運動量ではなく加熱によるフィードバックです。中心星から放射される紫外線によって電離加熱されたガスは、ガス圧によって加速されて蒸発するように中心星重力圏から脱出します²³⁾。特に大質量星は表面温度が高いため大量の紫外線を放出することが知られており、光蒸発の影響が強くなるのが予想されています。特に初代星形成の分野では、光蒸発が最終的に誕生する星質量を100太陽質量程度に抑えることがよく知られています^{13), 14)}。

降着流にかかるフィードバックとは異なり、「恒星風」は星自身の表面からガスが吹き出すことで星質量を直接減少させる効果をもたらします。恒星風による質量損失率も、輻射圧の強い大質量星では大きくなると考えられていて、例えば60太陽質量の大質量星の場合、その寿命400万年の間に半分以上の質量を恒星風で失ってしまいます²⁴⁾。しかし、形成段階における恒星風の影響はこれまで研究されていませんでした。

ここで紹介した四つのフィードバック過程の強度は光度、半径や表面温度といった大質量星自身の性質と密接にかかわっています。また形成中の原始星進化は質量降着率に依存することが知られています²⁵⁾。そこで私たちは大質量分子雲コアの崩壊からフィードバックの影響を考慮した質量降着率変化とともに、原始星進化も整合的に計算することで、各フィードバックの影響と最終的に誕生する星の質量を調べました。

3.3 ガス降着 vs. 複合フィードバック

それでは、大質量分子雲コア崩壊による大質量原始星へのガス降着とフィードバックの影響を説明していきましょう。1例として初期条件がコア質量1,000太陽質量、クランプ面密度1 g/cm²の場合の質量降着率と原始星質量の時間進化を図3

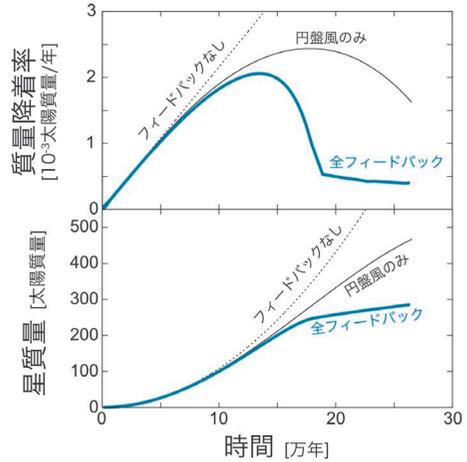


図3 質量降着率と星質量の時間変化の一例。フィードバックを増やすと降着率が下がり、最終的に誕生する星の質量は小さくなるのがわかります(この場合、円盤風のみは470太陽質量、全フィードバックを考慮すると290太陽質量)。

に示します。フィードバックを無視した場合には、高い質量降着率を維持したまま約30万年程度ですべてのガス(1,000太陽質量)が原始星に降り積もることになります。ここに円盤風によるフィードバックを考慮すると、質量降着率は17万年程度でピークを迎えその後は滑らかに下降して最終的には原始星質量が470太陽質量のところで質量降着は終了しました。四つすべてのフィードバックを考慮した場合には、質量降着率はさらに急激に低下し原始星が290太陽質量でガス降着は終了しました。このようにフィードバック過程が増え強力になることで、原始星に降着できるガスの割合「星形成効率」は減少します(この場合には初期コア質量が1,000太陽質量なので100→47→29%と減少)。

3.4 フィードバックでは最大質量は決まらない

同様の計算をさまざまな初期条件に対して行い、得られた星形成効率を誕生時の星質量の関数として示したものが図4です。まずグラフは全て右下がり傾向、つまり星質量が重くなるほど星形成効率は低くなるのがわかります。これは重い

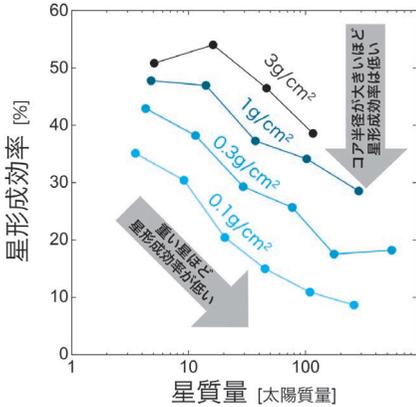


図4 星形成効率と誕生時の星質量の関係(線の違いは異なるクラump面密度の結果)。重い星ほど星形成効率低くなりますが、急激な減少はなく最大質量はフィードバックでは決まることがわかります。また、低クラump面密度ほどコア半径が大きく、星形成効率が低くなりました。

星ほど輻射によるフィードバックが強くなるため、円盤風のみで決まる小質量星形成の場合には見られなかった傾向です。観測最大級である100太陽質量の星を作るためには、その材料として400-1,000太陽質量もの大質量分子雲コアが必要となることもわかりました。

ここで一つ重要な結果は、フィードバックでは形成可能な星の最大質量は決まらないということです。われわれの銀河の中心付近にある比較的若くて重い星団アーチーズを観測すると100太陽質量程度の星は見つかるのですが、150太陽質量を超える星は一つも発見されないという報告から²⁶⁾「150太陽質量が恒星の最大質量である」という議論がなされることがあります。一方、今回の私たちの計算結果によると、星形成効率は星質

量増加と共に徐々に下がってはいきませんが、しかし150太陽質量で急激に落ちることはありませんでした。つまり、材料となる重い分子雲コアさえあれば、少なくとも500太陽質量程度の星までは作れることを示しています。この結果は必ずしも観測と矛盾するものではありません。これは分子雲コアに最大質量が存在する、もしくはアーチーズ星団の年齢200-400万年の間の質量変化(恒星風による質量損失や連星間での質量交換)が影響している²⁷⁾、あるいは150太陽質量超の星がすでに寿命を迎えている可能性を示唆しています。実際、より若くより重い星団をもち、高星形成率を誇る隣の銀河・大マゼラン雲内には200-300太陽質量を超える大質量星も存在することが知られており²⁸⁾、「最大質量=150太陽質量」という通説は改めて広く検証していく必要があると言えるでしょう^{*3)}。

3.5 面密度が低いコアほど星形成効率は低い

次にクラump面密度ごとの星形成効率に注目して図4をみてみましょう。クラump面密度が低いほど星形成効率が低いことがわかります。これは低クラump面密度のとき、初期コア半径が大きく同質量で比較すると重力束縛が弱いことが原因です。この結果は、コア降着シナリオによる大質量星形成を支持するものと言えます。対をなす“競合的降着シナリオ”では、大質量分子雲コアからではなく、星団内で誕生した小質量星に、重力束縛していない遠い領域から大量のガスを引きずり込むことで大質量星が誕生すると考えられています²⁹⁾。しかし、フィードバックの影響を考慮すると、今回の結果でも示したように、より遠い領域からガス降着させることは非効率的です^{*4)}。実

*3 大マゼラン雲の金属量は太陽系内の約4分の1と低いことが最大星質量に影響を与えている可能性もありますが、フィードバックを含め星形成過程の金属量依存性についてはまだ余り理解が進んでいないのが現状です(4章参照)。

*4 しばしばコア降着シナリオと比較されることのある競合的降着シナリオは、星団形成の文脈での価値が高く、個々の天体からのフィードバックには弱い側面があります。逆にコア降着シナリオでは、前提として大質量分子雲コアの存在を仮定しており(観測的にもその存在は示唆されているものの)、星団形成とともにどのように分子雲コアが作られているのかまでは議論が及んでいません。今後は、両シナリオをより洗練することで、大質量星形成と星団形成の両面をより整合的に研究していく必要があると言えます。

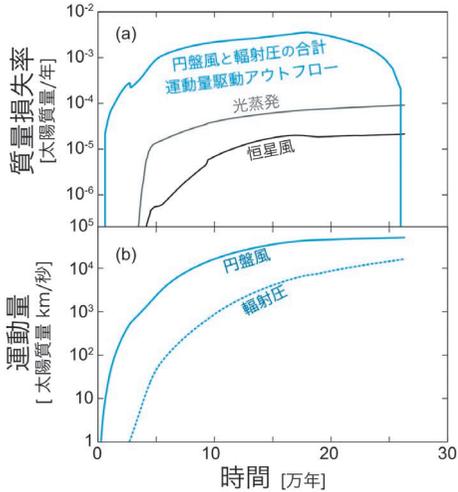


図5 フィードバックの比較。(a) 各フィードバックによる質量損失率と (b) 円盤風と輻射圧の運動量の時間変化。運動量駆動アウトフローが最大の質量損失を生んでいます。そして、その運動量の約9割は、円盤風から供給されています。

際には、分子雲コアの外からもある程度のガス降着が継続することもあると考えられますが、重い星ほどフィードバックが強く星形成効率が下がるため、100太陽質量を超えるほどの大質量星を形成するためにはやはり初期にかなり重く小さな高密度大質量分子雲コアの存在が不可欠だと考察されます。

3.6 最強のフィードバックは磁気流体的円盤風

ここからは四つのフィードバックを比較して、どの過程が最も強力だったのかランキングをつけていきたいと思います。図5(a)に初期条件がコア質量1,000太陽質量、クランプ面密度1g/cm²で全フィードバックを考慮した場合の各物理過程による質量損失率の時間進化を示しました(図3の降着率進化と対応)。一点、この段階では磁場によって駆動される円盤風と輻射圧を区別できないことに注意してください。これは両者を合計した運動量から「運動量駆動アウトフロー」による質量損失を計算しているためで(3.2節)、この二つの比較は次段落で行います。すぐわかるよう

に、この運動量駆動アウトフローがおおむねすべての時間帯において最大の質量損失過程であり、つづいて光蒸発、恒星風の順で重要度が下がっていきます。特に恒星風はガス降着が終了した後の恒星進化には影響を与えるのですが、形成段階では無視できることがわかりました。

次に最大の質量損失を生むアウトフローを駆動する運動量として、円盤風と輻射圧どちらの寄与が大きいかを比較したものが図5(b)になります。円盤風が輻射圧よりも約1桁程度大きい運動量をもっていることが見て取れるかと思います。つまり長年、混乱の根源であった輻射圧は、現実的には円盤風によるアウトフローの質量損失率を少し大きくする程度の役割を担うに過ぎなかったのです。このように輻射圧の効果が過去の予想よりも大きく弱まったのは、円盤風によって開けられたアウトフローの空洞を通して輻射が効率的に逃がされたことが一因です。この物理過程は懐中電灯効果(flashlight effect)としても知られていましたが¹⁰⁾、この効果がどの程度、星形成効率に影響を与えるかは本研究までよくわかっていませんでした。

最終的なフィードバック強度ランキングは1位が円盤風、2位に輻射圧、3位が光蒸発、そして最下位が恒星風となりました。これまでさまざまな議論がなされてきた大質量星形成においても、実は小質量星形成でよく研究が進められていた磁気流体力学的な円盤風が最重要フィードバックであったのです。

3.7 ダスト吸収による光蒸発率制御

3位となった光蒸発に関してもう少し議論を深めておきたいと思います。先にも述べたように、光蒸発は初期宇宙における初代星形成では絶大な影響を發揮する重要なフィードバック過程です。それが何故、現代の大質量星形成ではあまり有効でなかったのでしょうか？ 実はその原因はダストにあります。図6にダストによる紫外線吸収を考慮した場合と無視した場合の光蒸発率の比較を

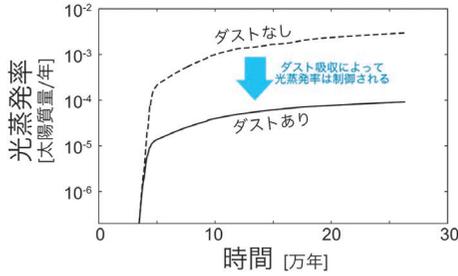


図6 ダスト吸収が光蒸発率に与える影響。ダストを考慮した場合としない場合の光蒸発率の時間進化を示しています。ダスト吸収によって光蒸発率が1桁以上も制御されていることがわかります。

示します。光蒸発率が約 10^{-5} 太陽質量/年以下ではダストのありなしが余り影響しませんが、それを超えるとダスト吸収を考慮した場合のほうが1桁以上も低い蒸発率になっています。これは光蒸発率が 10^{-5} 太陽質量/年程度になった時点で、蒸発流が紫外線に対して光学的に厚くなったためです。ダスト吸収により紫外線が広域まで効率的に届かなくなったことによって、光蒸発率は1桁以上も制限されたことがわかりました。ダストが存在する以前の初代星形成だったからこそ、光蒸発率はガス降着を止めるほど強力なフィードバックとなりえたのです。

4. まとめと今後

本稿では、大質量分子雲コアの自己重力崩壊による大質量星形成過程を、複数のフィードバックを統合的に取り入れた理論モデルにより調べた結果を紹介しました。まず、フィードバックを考慮しても、円盤降着により500太陽質量にもなる重たい星の形成が可能であることがわかりました。次に、これまで最大の困難と考えられていた輻射圧ではなく、磁気流体的円盤風によって駆動されるアウトフローが最も強力なフィードバックであることを明らかにしました。この点から見れば、大質量星形成過程も小質量星形成の標準シナリオとよく似ているといえます。

私たちの研究グループでは、このような理論研究だけではなく、コア降着シナリオの観測的検証のためSOFIA, ALMA, VLA等の観測機による大質量原始星の多波長観測も進めています³⁰⁾。その際には、ここで紹介した理論モデルも重要な役割を担っています。理論モデルを模擬観測し、実際の観測データと直接比較することで、複雑な降着流構造とその中に埋もれた大質量原始星の姿に迫ることができるのです³¹⁾⁻³³⁾。このように大質量星形成シナリオ確立のためには、観測・理論からのアプローチが今後も不可欠となるでしょう。

本研究では大質量分子雲コアの性質については初期条件として仮定しています。実際にこのような重いコアがいつ・どこで・どのように形成されるかは、これまでよくわかっていませんでした。近年、名古屋大学のグループを中心に分子雲衝突による大質量分子雲コア形成の重要性が明らかにされつつあります^{34), 35)}。今後はコア形成を含めた、より高度な大質量星形成シナリオへと発展していくことが見込まれます。

最後に、本稿で述べた銀河系内での大質量星形成と、初期宇宙など異なる環境での星形成の重要な関連について触れておきましょう。初代星は典型的に数十～数百太陽質量もあったと言われています³⁶⁾。また、遠方のスターバースト銀河等から届く光はほぼ大質量星から放たれたものと思われる。しかし、それら遠方での個別の星形成過程や初期質量関数は直接観測することは難しく、銀河系内の情報を外挿することしかできません。そのため、大質量星形成過程の環境依存性、例えば金属量依存性を理論的に明らかにすることは非常に重要となるのです。近傍にもマゼラン雲のように次世代観測機であれば詳細に観測できる異なる星形成環境も存在するので、これに先駆けた理論モデルの構築が不可欠と考えられます。

謝辞

本稿で紹介した内容は私が共同研究者Jonathan

C. Tan氏, Yichen Zhang氏とともに2017年に発表した査読論文¹⁾に基づいています。両氏には大質量星形成に関する多彩な知識と適切な助言をいただき深く感謝いたします。中本泰史氏, 大向一行氏には私が大学院生時代より丁寧かつ熱心なご指導をいただき, また本研究の基盤となる研究を共にさせていただきました。ここに心より感謝し, 敬意を表します。また, 細川隆史氏, Jan E. Staff氏, 黒川宏之氏, 稲吉恒平氏には膨大な時間を私との議論に費やしていただき, それらから生まれた考えをもとに本研究は進められました。この場を借りて御礼申し上げます。最後に執筆の機会を与えてくださり, 原稿に有益なコメントをくださった富田賢吾氏に心から感謝いたします。

参考文献

- 1) Tanaka, K. E. I., et al., 2017, ApJ, 835, 32
- 2) André, P., et al., 2010, A&A, 518, L102
- 3) Machida, M. N. & Hosokawa, T., 2013, MNRAS, 431, 1719
- 4) Larson, R. B., & Starrfield, S., 1971, A&A, 13, 190
- 5) Kahn, F. D., 1974, A&A, 37, 149
- 6) Wolfire, M. G., & Cassinelli, J. P., 1987, ApJ, 319, 850
- 7) Bonnell, I. A., et al., 1998, MNRAS, 298, 93
- 8) Krumholz, M. R., et al., 2009, Science, 323, 754
- 9) Kuiper R., et al., 2010, ApJ, 722, 1556
- 10) Yorke, H. W., & Bodenheimer, P., 1999, ApJ, 525, 330
- 11) Tanaka, K. E. I., & Nakamoto, T., 2011, ApJ, 739, L50
- 12) Kraus, S., et al., 2010, Nature, 466, 339
- 13) McKee, C. F., & Tan, J. C., 2008, ApJ, 681, 771
- 14) Hosokawa, T., et al., 2011, Science, 334, 1250
- 15) Vink, J. S., et al., 2011, A&A, 531A, 132
- 16) Matsushita, Y., et al., 2017, MNRAS, 470, 1026
- 17) Motte, F., et al., 2007, A&A, 476, 1243
- 18) Kong, S., et al., 2017, ApJ, 834, 193
- 19) McKee, C.F., & Tan, J. C., 2003, ApJ, 585, 850
- 20) Zhang, Q., et al., 2005, ApJ, 625, 864
- 21) Plume, R., et al., 1997, ApJ, 476, 730
- 22) Matzner, C. D., & McKee, C. F., 2000, ApJ, 545, 364
- 23) Hollenbach, D., et al., 1994, ApJ, 428, 654
- 24) Maeder, A., & Meynet, G., 1987, A&A, 182, 243
- 25) Hosokawa, T., & Omukai, K., 2009, ApJ, 691, 823
- 26) Figer, D. F., 2005, Nature, 434, 192
- 27) Schneider, F. R. N., et al., 2014, ApJ, 780, 117
- 28) Crowther, P. A., et al., 2016, MNRAS, 458, 624
- 29) Bonnell, I. A., et al., 2001, MNRAS, 323, 785
- 30) De Buizer, J. M., et al., 2017, ApJ, 843, 33
- 31) Tanaka, K. E. I., et al., 2016, ApJ, 818, 52
- 32) Tanaka, K. E. I., et al., 2017, ApJ, 849, 133
- 33) Zhang, Y., & Tan, J. C., 2018, ApJ, 853, 18
- 34) Fukui, Y., et al., 2014, ApJ, 780, 36
- 35) Inoue, T., & Fukui, Y., 2013, ApJ, 774, L31
- 36) Hirano, S., et al., 2014, ApJ, 781, 60

Massive Star Formation under Multiple Feedback Processes

Kei E. I. TANAKA^{*1-*}

^{*1} Department of Astronomy, University of Florida, Gainesville, FL 32611, USA

^{*2} Department of Earth and Space Science, Osaka University, Machikaneyama-cho, Toyonaka, Osaka 560-0043, Japan

^{*3} National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Despite their importance in various fields of astrophysics, the formation of massive stars is not understood well compared to low-mass star formation. Stars with over 100 solar masses have especially been theoretically considered to be hardly formed due to their own radiation feedback even though they do exist. We construct a theoretical model of massive star formation including multiple feedback processes self-consistently, and show that very massive stars with at least 500 solar masses can be formed by collapse of massive molecular cloud cores and accretion through disks. Our results also suggest that, similar to the standard scenario of low-mass star formation, the magnetically driven outflow is the strongest feedback rather than the radiation pressure even in the formation of very massive stars.