

平成30年 5月30日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2017

課題番号：25400232

研究課題名(和文) 新しい星形成シナリオの構築

研究課題名(英文) Star Formation Scenario Suggested by Numerical Simulations

研究代表者

町田 正博 (Machida, Masahiro)

九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：10402786

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：星は宇宙の最小の構成要素であり、宇宙の化学、力学進化を担っている。近年ALMA望遠鏡などによって星が誕生する直前、直後の様子が詳細に観測されるようになってきた。本研究では、大規模数値シミュレーションによって星が誕生する母体である分子雲コアが自己重力によって収縮し、その内部で星が誕生する過程を調べた。また、観測との比較を行い、星形成領域で観測される星周円盤の形成過程、ジェット、アウトフローの駆動機構を解明し、新しい星形成のシナリオを構築した。

研究成果の概要(英文)：Stars are the important constitute of the Universe and play a role in the dynamical and chemical evolution of the Universe. Recent ALMA observations are unveiling the vary early phase of the star formation. Using numerical simulations, this study investigates the the star formation process in molecular cloud cores which are parent of stars. In addition, comparing observations with simulation results, the formation process of circumstellar disks and driving mechanism of outflow and jet are clarified. Finally, a new formation scenario of star is constructed.

研究分野：天文学

キーワード：星形成 惑星形成 原始惑星系円盤 磁気流体力学 ジェット 降着円盤 大質量星

1. 研究開始当初の背景

2012-2014 年にかけて ALMA 望遠鏡が完成した。この研究課題は 2013 年から開始したが、開始直後から ALMA 望遠鏡の成果が発表され始めた。

ALMA 望遠鏡の完成前は、星形成過程の特に若い段階の観測は難しいため理論研究が先行していた。一般に、星形成過程で星周円盤が形成し原始惑星系円盤へと進化し、その中で惑星が誕生すると考えられていた。しかし、2013 年の研究開始時点では、磁気制動という効果によって星の周りで円盤が形成出来るかどうかを理論研究の結果を用いて盛んに議論されていた。これは、磁場の効果によって星形成ガス雲の中心部から角運動量が過剰に抜かれてしまい円盤が出来ないという問題に帰着される。

我々は、当初から高密度領域での磁場の散逸を考えると星形成初期に星周円盤の形成が可能であると主張してきた。他方、他国の同分野の研究グループは、理論上、星周円盤は形成されないと主張していた。このような背景のもとで、我々は、ALMA 望遠鏡の初期観測結果と比較しつつ、理論研究、また数値シミュレーション結果を用いて円盤形成過程、または星形成過程全般を解明することを目的として研究を行った。

2. 研究の目的

上記の様に最新の観測成果とシミュレーション結果を比較して新しい星形成のシナリオを構築することを研究の目的とした。

星形成過程では、原始星の周りに星周円盤が形成し、その円盤からジェットやアウトフローというガスの流出現象が起こる。また、多くの場合、収縮しているガス雲中で分裂が起こり、連星が誕生する。これら全てを矛盾なく説明出来る星形成シナリオを構築することが重要であるが、我々の研究以前には、個々の現象はそれぞれ説明されていたが、星形成過程の枠組みの中で全ての現象を矛盾なく説明出来る星形成シナリオは存在していなかった。

また、上記のように磁気制動によって円盤が形成されないという理論研究から要請された問題も重要な課題として存在した。星周円盤は惑星形成の母体であるため、この問題は惑星形成とも密接に関係してくる。太陽程度の質量の星の場合、惑星は原始惑星系円盤中で普遍的に形成すると考えられている。しかし、原始惑星系円盤がいつ、どのようにして形成して、進化していくのかは惑星形成の枠組みでは解明できず、星形成の枠組みの中で考えていく必要がある。

このような状況下、星形成の母体である分子雲コアから星が誕生し、その周囲での星周円盤、ジェット、アウトフローの駆動などを統一的に説明する星形成シナリオを構築することを研究目的とした。

3. 研究の方法

大規模数値シミュレーションによって星形成過程を最初から最後まで計算し、その結果を観測と比較して星形成シナリオを構築する。過去の観測から星は分子雲コアというガスのかたまりの中で誕生することが分かっている。また、この星形成の母体である分子雲コアは大スケールであるため数多く観測されており、その性質(形状、密度分布、温度、磁場強度、回転の度合い)は良く分かっている。

我々は、この分子雲コアを初期条件として非理想磁気流体力学による数値計算によって、コア中のガスが収縮し星が誕生し、その周囲にガスが降着する過程を計算した。この計算では、初期条件として分子雲コアを仮定する他は何ら数値計算上の仮定はしておらず、計算の中自然に星の周りに円盤が形成して、アウトフローやジェットが駆動する。

星形成の計算では、分子雲コアと原始星は空間スケールで 7 桁、密度で 15 桁程度異なる。また、星周円盤、ジェット、アウトフローは、分子雲コアと原始星の中間のスケールで現れる。この大きく異なる空間スケールを分解するために、多層格子法という数値計算法を使用する。この手法は、原始星や星周円盤などの高い空間解像度が必要な場所をより空間精度の良い格子で多い、分子雲コアやアウトフローなどより大きいスケールを粗い格子で覆うという手法である。この手法により分子雲コアのスケールと原始星のスケールの両方を同時に分解して計算が出来る。この手法を用いて、初期の分子雲コアの磁場強度や回転度合いを観測の範囲内で変えて複数のシミュレーションを行い、計算結果を解釈して星形成シナリオを構築する。

4. 研究成果

(1)上記の様に我々の研究グループは星形成の初期段階で星周円盤が形成することを主張していた。その後、観測グループと共同で行った ALMA 望遠鏡での観測で、非常に若い星の周りで星周円盤を発見した。その発見の後、ALMA 望遠鏡によって若い段階の星の周りに星周円盤が多数観測された。そのため、我々が主張していた若い段階での円盤形成シナリオは妥当であった。他方、他のグループは解析的な研究や数値シミュレーションによって星周円盤が形成出来ないということを示していた。

我々は、他のグループと我々のグループの計算結果においてどの物理過程が重要であるかを解明するために、他グループと同じ設定で計算を行い、各々のグループと同じ結果を導出した。その結果、円盤の母体となる星が誕生する前に形成するファーストコアという天体を十分な空間スケールで分解して、

その内部での磁場の散逸過程を詳細に考慮することが円盤形成において重要であることを示した。

(2)多くの原始星から周期的に高速のガスが放出されていることが観測から分かっている。我々は原始星モデルという手法を用いて、初めて分子雲コアが収縮して原始星が出来、その後の進化の長時間計算を行った。

その結果、円盤の中間領域に磁場の散逸領域が存在し、その散逸領域では、磁気制動やアウトフローによる磁場の効果による角運動量輸送が効率的ではないためにガスが蓄積し、最終的には重力不安定を起し重力トルクによって角運動量が輸送されることを示した。そのため、円盤の面密度が十分高くなるとガスが急速に中心の原始星に落下する。その際に解放される重力エネルギーのエネルギーが磁気エネルギーとなり、さらにジェットの運動エネルギーへと変換される。磁場散逸領域のガスが中心星に降着した後では、磁場散逸領域は安定になるが、時間と共に再び面密度が増加し重力不安定を起し、ガスが中心星に落下しジェットが噴出する。この過程が繰り返されることで周期的ジェットが現れることを示した。

(3)多くの星は太陽質量以下の低質量星として誕生する。しかし、星形成領域には、少数の大質量星が存在する。これらの星の数は少ないが、巨大な光度を持つためにその周囲に多大な影響を及ぼす。また、これらの星はその寿命が尽きる際に超新星爆発を起し、重元素やエネルギーを周囲に放出し環境を大きく変化させる。そのため、これらの星の形成過程を明らかにすることは重要であるが、大質量星がどのようにして出来るのかはほとんど解明されていなかった。これは、大質量星は数が少なく我々太陽系の近傍には存在しないため観測が困難であるということが一因である。しかし、大質量星もアウトフローを駆動している。アウトフローはスケールが大きいために観測することが出来る。

そこで、我々は大質量星形成の数値シミュレーションを行い、数値シミュレーションから求められたアウトフローと観測された大質量アウトフローを比較した。大質量星は質量降着率が高い環境下で誕生すると考えられている。我々は、大質量星が出来る星形成コアの安定性(重力と圧力の比)を変えることで、質量降着率をコントロールし中間質量星から大質量星の形成の計算を行った。その結果、大質量降着率下で誕生する原始星は大質量のアウトフローを駆動することが分かった。また、数値シミュレーションで得られたアウトフローのモーメントフラックス、質量放出率、エネルギー放出率を比較したところ観測と良く一致することが分かった。この研究によって、大質量星も低質量星と同様

に原始星、または、星形成コアの中心部への質量降着によって誕生して進化することを求めた。

(4)上記の研究は、現在の宇宙での星形成過程の研究であるが、過去の宇宙では星形成過程が異なる可能性がある。星形成過程は、星形成コアが重力収縮しその過程で輻射によって冷却することで圧力が低下し、さらなる重力収縮起こる。この冷却は現在、または銀河の我々の近傍領域では、ダストが主な冷却材になる。しかし、ダスト、または重元素は宇宙の進化と共に増加し続けている。ビッグバン後の宇宙では、星形成の材料物質は、ほぼ水素とヘリウムのみで構成されていた。その後、星の中で元素合成が進み、星風や超新星爆発などによって、重元素が撒き散らされ、徐々に星の材料物質として重元素やダストが増加していった。

この研究では、異なる環境下での星形成過程の指標として金属量を用いた、金属量、つまり主たる冷却材の量を変化させて星形成コアの重力収縮の過程を調べた。

その結果、金属量が現在の宇宙の1万分の1程度の時代では、星形成コアが連続して分裂を起し、一つの星形成コア中で星の集団が出来ることが分かった。他方、金属量が現在の宇宙の1/1000程度まで増加すると、多重分裂は起こらず、少数の星、または単星からなる系になることが分かった。

(5)ALMA 望遠鏡で解明された原始星周りの星周円盤の大きさは、天体ごとに大きく異なる。中心星質量がほぼ同じ場合でも10AU以下の円盤を持つ場合もあれば、100AU以上の大きさの円盤を持つ天体も存在する。この多様性を説明する手がかりとして、星が形成する分子雲コアの安定性をパラメータとして計算を行った。初期に分子雲コアが重力的に非常に不安定な場合と安定に近い場合の計算を行った。

その結果、初期に分子雲コアが安定に近い場合には、収縮が緩やかになりその間に磁気制動が効き小さな円盤が、他方、初期に非常に不安定な星形成コア中では大きなサイズの円盤が出来ることが分かった。この結果のみで円盤の異なる大きさを説明出来るかはさらなる研究が必要であるが、円盤の最終的なサイズ、または惑星形成を考える上で重要であると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

Matsushita, Y., Machida, M. N., Sakurai, Y., and Hosokawa, T. (2017) "Massive outflows driven by magnetic effects in

star-forming clouds with high mass accretion rates", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 470, 1026-1049, DOI:10.1093/mnras/stx893, 査読有り

Machida, M. N., Matsumoto, T., and Inutsuka, S.-i. (2016) "Conditions for circumstellar disc formation - II. Effects of initial cloud stability and mass accretion rate", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 463, 4246-4267, DOI:10.1093/mnras/stw2256, 査読有り

Machida, M. N. and Nakamura, T. (2015) "Accretion phase of star formation in clouds with different metallicities", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 448, 1405-1429, DOI: 10.1093/mnras/stu2633, 査読有り

Tomida, K., Okuzumi, S., and Machida, M. N. (2015) "Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Protostellar Collapse: Nonideal Magnetohydrodynamic Effects and Early Formation of Circumstellar Disks", ApJ, 801, 117-, DOI:10.1088/0004-637X/801/2/117, 査読有り

Machida, M. N. (2014) "Protostellar Jets Enclosed by Low-velocity Outflows", The Astrophysical Journal Letters, 796, L17-, DOI:10.1088/2041-8205/796/1/L17, 査読有り

Tanigawa, T., Maruta, A., and Machida, M. N. (2014) "Accretion of Solid Materials onto Circumplanetary Disks from Protoplanetary Disks", The Astrophysical Journal, 784, 109-, DOI: 10.1088/0004-637X/784/2/109, 査読有り

Machida, M. N., Inutsuka, S.-i., and Matsumoto, T. (2014) "Conditions for circumstellar disc formation: effects of initial cloud configuration and sink treatment", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 438, 2278-2306, DOI:10.1093/mnras/stt2343, 査読有り

〔学会発表〕(計 11 件)

1. 樋口公紀, 町田正博, 日本天文学会年会、九州大学、2017年3月17日、「低金属量星形成過程で駆動される原始星ジェットの可能性」

2. 松下祐子, 町田正博, 日本天文学会年会、

九州大学、2017年3月17日、「大質量星形成における角運動量輸送」

3. 樋口公紀, 町田正博, 日本天文学会年会、愛媛大学、2016年9月15日、「宇宙の進化と星形成過程の変遷」

4. 松下祐子, 町田正博, 日本天文学会年会、愛媛大学、2016年9月15日、「大質量降着率における原始星からの磁気アウトフローの駆動条件」

5. 樋口公紀, 町田正博, 日本天文学会年会、首都大学東京、2016年3月15日、「宇宙初期の星形成と磁場の効果」

6. 松下祐子, 町田正博, 日本天文学会年会、首都大学東京、2016年3月15日、「大質量星からのアウトフロー」

7. 町田正博, 日本天文学会年会、甲南大学、2015年9月10日、「磁場と回転の効果による円盤の方向の空間依存性」

8. 町田正博, 日本天文学会年会、大阪大学、2015年3月18日、「星形成初期段階での空間スケールの違いによる角運動量輸送機構」

9. 町田正博, 日本天文学会年会、山形大学、2014年9月12日、「原始星ジェットの進化」

10. 町田正博, 日本天文学会年会、国際基督教大学、2014年3月21日、「星周円盤形成における質量降着率と磁気制動の関係」

11. 町田正博, 日本天文学会年会、東北大学、2013年9月11日、「磁気制動と星周円盤の形成を適切に計算するための条件」

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況 (計 件)

名称：
発明者：
権利者：

種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

町田正博 (MACHIDA, Masahiro)
九州大学・理学研究院・准教授

研究者番号：10402786

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

()