

氏名	柏木 頼我
学位(専攻分野)	博士(理学)
学位記番号	総研大甲第 2476 号
学位授与の日付	2024 年 3 月 22 日
学位授与の要件	物理科学研究科 天文科学専攻 学位規則第6条第1項該当
学位論文題目	Instability and Evolution of Shocked Clouds Formed by Collisions between Filamentary Molecular Clouds
論文審査委員	主査 中村 文隆 天文科学コース 准教授 石井 峻 天文科学コース 准教授 南谷 哲宏 天文科学コース 准教授 井上 剛志 甲南大学 理工学部 教授 富田 賢吾 東北大学 大学院理学研究科 准教授

博士論文の要旨

氏 名： 柏木 頼我

論文題目： Instability and Evolution of Shocked Clouds Formed by Collisions between Filamentary Molecular Clouds

邦題： フィラメント状分子雲同士の衝突により形成された圧縮雲の不安定性と進化

Stars are believed to form through the gravitational collapse of high-density regions within molecular clouds. These dense regions are in the form of elongated filamentary structures, along which protostars are found. Understanding the star formation processes within filaments is therefore crucial for constructing a unified star formation scenario. Moreover, observations suggest that filaments exist not in isolation but in multiples, and active massive star and star cluster formation is often found at their intersections. One of the promising mechanisms for forming the intersections triggering star formation is the collisions of filaments. This study focuses on the instability of compressed clouds formed by the collision of filaments and investigates their subsequent evolution using magneto-hydrodynamical simulations. We assume isothermal filaments in magnetohydrostatic equilibrium states, considering vertical magnetic fields consistent with observations. A model is specified with magnetic field strength, line mass, collision speed, and the angle between the long axes of the filaments. We compare two configurations: head-on collisions with an angle between the filaments of 0 degrees and orthogonal collisions with an angle of 90 degrees. We conducted two-dimensional and three-dimensional ideal magnetohydrodynamic simulations, respectively.

In the case of a head-on collision, the final evolution can be divided into two: the radial collapse mode, where the shocked cloud eventually globally collapses, and the stable mode, where the shocked cloud settles into a stable oscillation with a finite amplitude. The collapse mode occurs when the initial total line mass exceeds the magnetized critical line mass, which is the maximum value of a filament with a lateral magnetic field that can be supported against self-gravity. It is shown that this collapse proceeds in a run-away fashion and is expressed by a self-similar solution. On the other hand, the stable mode is achieved when the total line mass is below this magnetized critical value. The shocked region oscillates stably around a magneto-hydrostatic equilibrium solution. Considering that filaments move at various relative speeds to each other, we investigate how the initial collision speed affects the evolution of the shocked regions by changing the collision speed from approximately the sound speed to about ten times the sound speed. Although we observe that the time taken to reach the phase of runaway contraction varies with the collision speed in the collapse mode,

there are no significant differences in the final evolution mode. Thus, it is concluded that the total line mass determines the time evolution of the shocked regions that are formed by head-on collisions of identical filaments; the shocked region evolves as the collapse mode (stable mode) when the total line mass is higher (lower) than the critical line mass.

Next, in the orthogonal collision model, the evolution can be mainly divided into three: the collapse mode, the stable mode, and the expansion mode. Although the former two modes have similar properties as those found in the head-on collision models, the latter, expansion mode, is only found in the orthogonal collision models. In the collapse and the stable modes, the intersection evolves into an oblate shape flattened along the magnetic field lines, whereas, in the expansion mode, it expands in the collision direction significantly. The results obtained from the orthogonal collision models show that the outcomes depend on the collision speed and field strength. When the collision speed is comparable to the sound speed, the collapse occurs if the total mass of the intersection exceeds the magnetized critical mass, not the magnetized critical line mass. In the cases of supersonic collisions, the results depend on the importance of the magnetic field. For weak magnetic fields, collisions between heavier filaments are required for the collapse mode to occur as the collision speed increases. In the case of a strong magnetic field, the velocity dependence of the outcomes of the orthogonal collisions becomes weak. Compared to head-on collisions, orthogonal collisions are more likely to trigger collapse even from collisions between filaments with smaller line masses. Therefore, in filament collisions with a strong magnetic field, orthogonal collisions are more likely to induce star formation than head-on collisions.

Based on these results, in actual star formation, the impact of collisions between filaments does not depend much on velocity if the filaments are massive and are sufficiently supported by the magnetic field. Therefore, basically, if the mass or line mass of the shocked clouds exceeds a critical value, they will collapse, and star formation can be induced. On the other hand, for relatively light filaments, there are cases where collapse is not evident in supersonic collisions, suggesting the potential for suppressing star formation.

博士論文審査結果

Name in Full
氏 名 柏木 頼我

T i t l e
論文題目 Instability and Evolution of Shocked Clouds Formed by Collisions between Filamentary Molecular Clouds

ハーシェル宇宙天文台による分子雲のフィラメント構造の発見から、近年星形成におけるフィラメント状分子雲の役割の重要性が指摘されてきた。その中で、大質量星形成や星団形成が起こる条件についてはまだ理論・観測とも理解が進んでいない。

本論文では、大質量星や星団が形成される可能性のある高密度構造が2つのフィラメント状分子雲の衝突によって形成される可能性をモデル化し、数値シミュレーションによって詳細に調べている。論文は6章からなる。

まず1章では、星間空間にある分子雲の内部構造には細長く伸びたフィラメント構造が普遍的に存在することなど、本研究で扱う構造について現在得られている知見についてまとめられている。さらに力学平衡にあるフィラメント状分子雲の密度分布を数値的に導出し、その物理的性質が詳細に説明されている。平衡解では、重力収縮を起こす条件を導出した。磁場が存在する場合には、ない場合に比べてより多くの線質量を支えることが可能となり、重力収縮が起こる条件である、臨界線質量を導出した。なお、これら平衡解の数値解については、投稿論文として出版されている。

2章では、2次元および3次元磁気流体力学シミュレーションの初期条件、計算コード、計算モデルの物理的性質が詳細にまとめられている。計算モデルでは1章で扱った無限に長いフィラメント状分子雲の平衡解の性質を用いて、モデルの力学的安定性について触れられている。本論文では、フィラメント衝突の例として、正面衝突と直交衝突の2つのモデルを考えることが述べられている。

3章では、本論文で行なった計算結果がまとめられている。前半ではフィラメントの正面衝突により、高密度フィラメントが形成される様子を2次元磁気流体シミュレーションにより追跡した結果がまとめられている。衝突で形成されたフィラメントの進化は、初期の線質量の違いで重力収縮を続ける場合と力学的に安定な場合に分けられることが示された。また、形成された高密度領域の動径密度分布がフィラメントの平衡解で近似できることも示されている。後半では直交衝突の場合が3次元磁気流体シミュレーションによって追跡され、衝突で高密度のガス塊が形成される様子が示されている。直交衝突の場合、衝突領域で重力的に不安定な高密度ガス塊が形成されるが、衝突速度が速くなると高密度ガス塊が最終的に膨張する場合もあることが示された。

4章では、3章の結果を踏まえ、衝突で形成された高密度領域の進化を決める物理条件についての考察が展開されている。まず、正面衝突で形成される高密度フィラメントが重力収縮するか平衡状態の周りを振動するかは、初期フィラメントの線質量の和で分類できることを平衡解の物理的性質と比較することで示された。さらに2次元モデルでは扱えな

い、高密度フィラメントの軸に沿った分裂の可能性を重力不安定の理論を用いて議論している。直交衝突の場合、磁場が非常に強い場合は大質量ガス塊が形成されるが、効率的に星団や大質量星を形成するためには、さらにガスを集める必要があることから、周りのガスがフィラメントに沿って降着する効果が重要である可能性が指摘されている。さらに以上の結果を実際の大質量星形成領域の条件と比べるなど、数値モデルと星形成モデルの対応についてまとめられている。なお、正面衝突の場合の結果については投稿論文として出版されている。

5章では本論文の内容が簡潔にまとめられ、6章では、今後の展望についてまとめられている。

以上のように、本論文では、2つのフィラメント状分子雲の衝突により、星団や大質量星形成が可能な高密度天体が形成され可能性を数値シミュレーションで調べ、それを平衡解等を用いて物理的に解明しており、大質量星形成可能な領域の形成過程を考察した点は、依然謎の多い、大質量星形成過程の初期条件を探る上で大きな成果と評価できる。よって、審査委員会は本論文が学位の授与に値すると判断した。