

氏 名 富田 賢吾

学位（専攻分野） 博士（理学）

学位記番号 総研大甲第 1479 号

学位授与の日付 平成 24 年 3 月 23 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 Radiation Magnetohydrodynamic Simulations of Star
Formation Processes

論文審査委員 主 査 教授 有本 信雄
教授 大橋 永芳
准教授 梶野 敏貴
教授 犬塚 修一郎 名古屋大学
准教授 町田 正博 九州大学

論文内容の要旨

本研究では星形成の研究に必要とされる多様な物理過程を含む多重格子輻射磁気流体シミュレーションコードを開発し、分子雲コアから原始星コアに至る星形成過程を調べた。更に、その輻射磁気流体計算の結果を基に星形成過程にある若い天体の観測的性質を予測し、理論モデルから観測まで一貫した研究の流れを構築した。本研究は分子雲コアから原始星コアまでを直接3次元輻射磁気流体シミュレーションすることに成功した世界で最初の例である。

星は宇宙の最も基本的な構成要素であり、その形成を理解することは宇宙物理学の最も重要な問題の一つであるため、星形成過程はこれまでに精力的に研究されてきた。星形成は様々な物理過程を含む非線形で複雑な現象であり、また星が形成されつつある場を直接観測することは困難であるため、その研究では高度な数値計算が重要な役割を果たしてきた。最近の進展としては多次元の輻射磁気流体計算が最も重要であると考えられている。電波望遠鏡 ALMA の稼働に合わせて星形成過程の理解は大幅に進展すると期待されており、観測と直接比較することが可能な精密な理論モデルが求められている。本研究の輻射磁気流体シミュレーションはこのような高い需要に応えるものである。

分子雲コアの重力収縮過程では、中心で形成される原始星周辺で解放される重力エネルギーが全体の進化を司る。エネルギーや角運動量の輸送過程において、磁場と輻射輸送、そして高い分解能が必要である。この問題に取り組むため、自己重力・磁場・輻射輸送・化学反応の効果を含む高解像度多重格子シミュレーションコードを開発した。第二章では計算に取り入れた基礎的な物理過程とコードの実装について詳述する。特に輻射輸送については計算量を軽減するための流束制限拡散近似と、輻射と流体のタイムスケールの大きく違う現象を安定に計算するために陰的時間推進法を採用した。更にオーム抵抗による磁場の散逸と、化学反応の効果を含む現実的状態方程式も計算に取り入れた。

以降の章ではこのコードを用いた結果について説明する。まず星形成過程の初期に最初に形成される準平衡天体であるファーストコアについて輻射磁気流体計算を行い、特にこれまでの輻射輸送を解かないバロトロピック近似との違い注目してファーストコアの性質を調べた。輻射輸送は星形成過程の進化を定性的には変えないが、ガスの熱力学的進化を介してファーストコアの力学的な構造に定量的な影響を及ぼすことを見出した。衝撃波及び中心の高温部からの輻射による加熱によりファーストコア中のガスは高いエントロピーを獲得し、結果としてファーストコアは（同じ中心密度で比較すると）バロトロピック近似の場合よりも $1.5 - 2$ 倍程度大きな質量、半径、寿命を持つことを示した。一方、アウトフローの速度や駆動領域等の力学的性質は主に磁場と回転の相互作用で決まるため大きな違いは見られなかった。更に、磁場が弱い場合には磁場による角運動量輸送が二段階で起こりアウトフローが二重構造になることも見出した。

輻射輸送を計算に取り入れたことによりガスの現実的な熱的進化を扱うことができるようになり、このような天体の観測的性質について定量的な議論が可能になった。シミュレーション結果の上で後処理で波長依存性を考慮した輻射輸送を解くことにより、連続波の Spectral Energy Distributions (SED) や Visibility Amplitude Distributions (VAD)、及び将来のイメージング観測について直接予測を行った。また局所熱平衡を仮定しない

Non-LTE 分子線輸送計算の結果を基に ALMA による観測シミュレーションを行い観測可能性を調べた。それらの予測に基づき、ALMA や将来の観測装置によりファーストコアを同定しその力学構造を調べる戦略を提案した。これらの予測は観測との比較や観測の立案に直接利用できることができ、実際に ALMA による観測提案も提出している。

これまでの研究では主に太陽質量程度の星形成過程が注目されてきたが、観測的には低質量の分子雲コアは多数存在するためこのような低質量星の形成過程は興味深い。ファーストコアの最大質量と同程度以下の低質量な分子雲コアでは降着だけではファーストコアはセカンドコラプスに到達せず、輻射冷却による定性的に異なる進化をするのではないかと予測し、実際に輻射流体計算によりこの予想を確かめた。また低質量分子雲コア中では降着が弱いためにファーストコアは太陽質量程度の場合と比べ 5 倍以上の長い寿命を持ち得ることを示した。更にこのようなファーストコアの観測的性質を調べ、ALMA や Herschel 等の装置により十分観測可能性がありかつ星形成過程の他の段階と区別できることを示した。この結果はこのような低質量分子雲コア中のファーストコアがこれまでの予測よりも高確率で観測可能であることを示唆している。

最後に、分子雲コアからファーストコア・セカンドコラプスを経て原始星コアに至る星形成の前期段階全体の（理想/抵抗性）輻射磁気流体シミュレーションを行った。本研究の計算は輻射輸送や状態方程式に幾つかの近似を用いているが、球対称・磁場なしの場合について先行研究と整合的な結果を得た。回転・磁場の存在する場合、理想 MHD モデルでは原始星コアは強い角運動量輸送の結果球対称モデルとほぼ同様の進化をする。一方磁場の散逸がある場合には角運動量輸送が抑制され、回転によって支えられた星周円盤が原始星コア形成直後から発生し成長すること、回転により増幅された磁場の圧力勾配により高速なアウトフローが駆動されることを示した。これは観測されている低速で大開口角のものと高速で細いものからなる二重構造の原始星アウトフローを自然に説明できる。本成果は世界で最初の星形成過程前期段階全体をカバーする三次元輻射磁気流体計算である。

星は宇宙の基本構成要素であり、星形成の理解は宇宙物理学の最も重要な問題の一つである。星形成は様々な物理過程を含む非線形で複雑な現象であるが、星形成現場の直接観測は困難であるため、この分野では高度な数値計算が重要となる。本研究は三次元輻射磁気流体数値計算コードを開発し、分子雲コアから原始星コアまでの星形成前期段階の全容を明らかにした世界で初めての例である。

分子雲コアの重力収縮過程では、原始星周辺で解放される重力エネルギーが進化を決める。エネルギーや角運動量の輸送過程の解明においては、磁場と輻射輸送、そして高い空間分解能が必要である。この問題に取り組むため、出願者は、自己重力・磁場・輻射輸送・化学反応の効果を含む高解像度多重格子数値計算コードを開発した。流束制限拡散近似と陰的時間推進法を採用し、計算の軽減化と安定化を図るとともに、オーム抵抗による磁場の散逸、化学反応の効果を含む状態方程式を取り入れている。

出願者は、まず、星形成過程の最初に形成される準平衡天体（ファーストコア）について輻射磁気流体計算を行い、これまでの輻射輸送を解かない場合（バロトロピック近似）と比較して、輻射輸送はファーストコアの形成を定性的には変えないが、ガスの熱力学的進化を介して力学的な構造に定量的な影響を及ぼすことを見出している。すなわち、衝撃波加熱と中心高温部からの輻射加熱により、ファーストコア中のガスは高いエントロピーを獲得し、輻射輸送を解かない場合よりも1.5~2倍程度大きな質量、半径、寿命を持つ。更に、磁場が弱い場合には、磁場による角運動量輸送が二段階で起こりアウトフローが二重構造になることを見出している (Tomida et al. 2010a, ApJ 714, L58)。

出願者は、次に、上記の数値計算を基に、波長依存性を考慮した輻射輸送を解き、ファーストコアのスペクトル・エネルギー分布や Visibility Amplitude Distributions、電波の強度分布、分子線強度を求め、ALMA や将来の観測装置によりファーストコアを発見しその力学構造を調べる戦略を提案している。

出願者は、次に、星形成領域に多量に存在する低質量分子雲コア（0.1太陽質量）の場合には、ガスの降着だけではファーストコアは次の重力収縮段階であるセカンドコラプスに到達しないことを示している。また降着が弱いためにファーストコアは太陽質量程度の場合と比べ5倍以上の長い寿命を持ち得る。このようなファーストコアはALMA や Herschel 等の装置により十分に観測可能であると考えられ興味深い (Tomida et al. 2010b, ApJ 725, L239)。

出願者は、最後に、分子雲コアからファーストコア・セカンドコラプスを経て原始星コアに至る星形成の前期段階の輻射磁気流体数値計算を行い、回転・磁場が存在する場合、原始星コアは強い角運動量輸送のため球対称モデルとほぼ同様の進化をすることを示し、磁場の散逸がある場合には、角運動量輸送が抑制され、回転によって支えられた星周円盤が原始星コア形成直後から発生し成長すること、回転により増幅された磁場の圧力勾配により高速なアウトフローが駆動されることを示している。これは観測されている二重構造の原始星アウトフローを自然に説明する。本成果は世界で最初の星形成過程前期段階について得られた知見であり、高く評価できる。

本研究で用いられた輻射磁気流体数値計算コードは出願者が中心になって開発したもので

あり、数値計算の遂行から、結果のとりまとめ、議論など、論文作成の一連の過程において、出願者が主体的に行っていることが認められ、その内容は星形成の理解に大きく貢献するものである。したがって、審査委員全員が博士論文として合格であると判断した。