

## 原始星形成過程の抵抗性輻射磁気流体シミュレーション

富田 賢吾(総合研究大学院大学 / 国立天文台理論研究部)

利用カテゴリ SX9MD・XT4MD

原始星形成過程においてファーストコア(星形成の初期に形成される過渡的な準平衡天体)の中心温度が約2000Kに達すると水素分子が解離する。この反応は吸熱反応であり、それによって力学平衡を保てなくなりファーストコアは崩壊する。この過程(セカンドコラプス)は水素分子が完全に解離するまで続き、解離が終了すると再び断熱的となり再び準平衡天体が形成される。これがセカンドコアまたは原始星コアであり、以後周囲からのガス降着で成長する、いわば星の種である。この原始星コアと周囲からの降着流がどのような性質・構造(原始星進化の「初期条件」と「境界条件」)を持つのかはその後の原始星の進化にきわめて大きな影響を及ぼす。しかし、その研究には輻射輸送や化学反応・磁場を含む3次元の高度なシミュレーションコードが必要であり、また計算コストの非常に高い計算であるために、これまでに必要な物理を全て含む計算はなされていなかった。

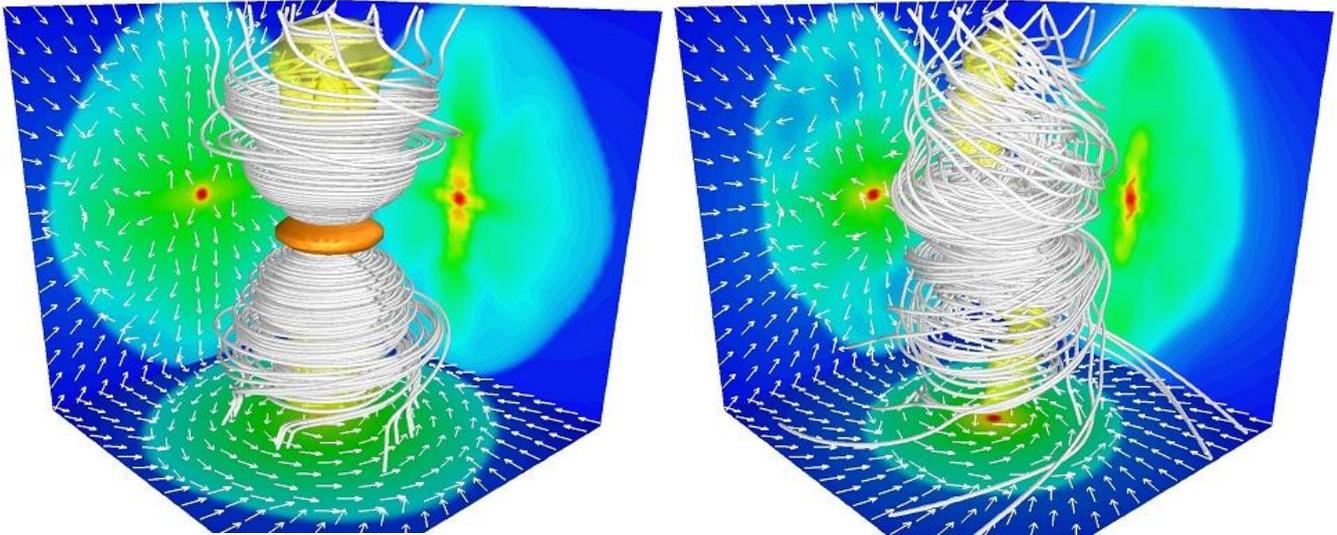
我々の前年度までの研究は水素分子の解離以前のファーストコア段階までに限定されていた。そこで今年度はこれまでのシミュレーションを拡張してこのセカンドコラプス以後の原始星が実際に形成される段階を調べるために、計算コードに新しい物理過程を導入した。その一つ目はセカンドコラプス以後を計算するために必要な化学反応を含む現実的状態方程式である。本研究で興味のある領域は密度が高く化学・熱力学的なタイムスケールが十分短いため、化学・熱力学平衡を仮定し、統計力学的手法に従って分配関数から状態方程式を導出してテーブル化して計算に導入した。

もう一つは非理想MHD効果である。磁場が角運動量輸送を介して星形成過程の進化に大きな影響を及ぼすが、星形成過程ではガスが低温で電離度が低いため種々の非理想MHD効果が働き磁場が散逸することもわかっている。そのため現実的な星形成過程、特にその角運動量輸送を扱うにはこれらの効果を適切に取り入れる必要がある。そこでまずその手始めとしてオーム散逸を計算に実装した。ガスの密度が高くしかし低温な状況では非常に電離度が小さくなり、流体と比べ非常に速いタイムスケールでオーム散逸が働く。このような状況を効率的に計算するため、通常の陽的なオイラー法よりも時間刻みを大きくとることができるSuper-Time-Stepping法(Alexiades+1996)を採用することで計算を加速した。

これら新しい物理過程を導入することにより、星形成過程の研究に必要な物理過程を一通り計算に取り入れることができた。この新しい計算コードにより、世界で初めて分子雲コアから原始星コアに至る星形成過程を直接輻射磁気流体計算することに成功した。理想MHDの計算では磁場による効率の良い角運動量輸送の結果原始星コア

はほぼ無回転であり、星周円盤が形成されない”Magnetic Braking Catastrophe”と呼ばれる問題が先行研究(Li et al. 2011 他)で指摘されていたが、抵抗性MHDでは磁場の散逸により角運動量輸送が抑制され、原始星コア周囲に星周円盤が短時間で形成されることを示した。また同時に回転によってトロイダル磁場が増幅され、その磁気圧勾配によって高速の細いジェットが駆動されることもわかった。この結果、星形成過程ではファーストコアのスケールからは低速で開口角の大きいアウトフロー、原始星コアからは高速で開口角の小さいアウトフローが駆動されるという二重構造が自然に形成される。これは観測されている原始星に付随するアウトフローの構造と整合的な結果である。

並行して、前年度までに引き続いて輻射磁気流体計算の結果から観測的性質の予測を行い、その結果に基づいて観測グループと共同で実際にALMAの初期科学運用やSMAなどに観測提案も提出した。特に国立天文台の大橋教授らのグループと共同で提出した観測提案は9倍の厳しい競争を勝ち抜いて採択され、近く観測結果とシミュレーションを直接比較することが可能になると期待している。



抵抗性輻射磁気流体シミュレーションによる、原始星コアから高速アウトフローが駆動される様子。原始星コア形成直後（左図）と約三ヶ月後（右図）。回転で磁力線（白線）が巻き上げられ、磁気圧によりアウトフローが駆動される。後期には **Kink** 不安定性によりアウトフローが揺らいでいる。左と下のパネルは密度、右のパネルは温度の断面図。