

Boltzmann SPH 法を用いた天体形成過程の研究

釣部 通 (大阪大学)

利用カテゴリ XT4B

本研究では、星と星の集団の形成過程を星間雲の流体力学的な進化に基づいて物理的に理解することを目指して研究を行っている。特に、重力収縮ともなうガス雲の分裂過程と原始星と円盤の成長過程について詳細な計算を行うことによって詳しく調べることにより、最終的には星と星周円盤および連星の形成のメカニズムの解明を目指すものである。

天体物理で多く用いられている SPH 法 (粒子法的流体力学) には (1) 差動回転円盤のような構造では、密度の見積りに問題があること、(2) 高密度の断熱コアが形成された後は、数値流体力学計算の安定性条件の存在のため、時間刻を細かくしなくてはならず、系全体の進化正しく計算することは計算コストが高いことが分かっている。ここでは、(1) を Particle Rezoning (PRM) 法で解決し、(2) の制約に縛られない新しい手法として Boltzmann SPH (BSPH) 法を構築し、その手法を適用することで天体形成の初期段階から完了時までを追跡し、その物理過程を明らかにすることを目指す。以下には、新たに得られた知見について報告する。

(1) PRM 法、BSPH 法における角運動量の保存性の向上

星や星周円盤の形成過程を正しく理解するため、計算では角運動量輸送を正確に解く必要がある。円盤内における数値シアー粘性が大きすぎると、円盤上の揺らぎは成長する前に中心へ落下してしまうなど、分裂が起こる条件に影響を与える可能性がある。また、連星の周りの流れの場合には、主星、伴星のどちらに降り積もるかに影響を与える可能性がある。しかし、強い衝撃波を安定に捕獲し、その上で十分に小さなシアー粘性を正しく記述するということは数値計算上は相反する要求であり改善が望まれる。今年度は、冷たいシアー流において密度エラーを抑えるために開発した PRM 法において、角運動量が従来より高精度に保存する手法を開発した。流体素片が冷たいシアー流により極度に変形すると、近傍の粒子配置から算出される SPH 法の密度は大きなエラーを持つようになる。そこで、流体素片の変形を補填するために、SPH 粒子内の質量の一部を互いの SPH 粒子間で交換し合うことにより、粒子配置を補正することで、密度のエラーを抑えることができる。その過程で、交換する質量ともなって運動量とエネルギーも SPH 粒子間で交換されることになる。これらの交換の定式化は、従来から 2 粒子の重心、運動量、およびエネルギーが丸め誤差の範囲内で完全に保存するように行われていた。今年度、更に角運動量についても保存の精度が上がった。2 体の間で交換する粒子の質量と運動量の量を、2 体の全角運動量が完全に保存するようにとることができることが分かり、その方法を実装してテスト計算した結果、円盤の全角運動量の誤差が修正前の 10 分の 1 程度になった。

(2) 時間幅によらず安定な SPH 法における熱伝導の陽的計算法:

SPH 法を輻射流体力学へと拡張する際に、Flux limiter diffusion のように熱伝導的な近似の方法がある。一つの問題は、熱伝導においては、空間の 2 階微分があるため、安定な計算のために必要な時間刻みに対する制限が厳しく時間幅が細くなりがちである点がある。この点も踏まえ、SPH 法において熱伝導を長い時間幅を用いて安定に計算する方法を開発した。Boltzmann SPH で用いている考え方である、粒子内における仮想分子の自由膨張と緩和の過程において、計算したい熱伝導項に相当する熱交換を考慮することに

よって実現できることが分かった。テスト計算を行い、熱伝導方程式の安定性の限界の時間幅を用いても解析解を再現できることが示された。

(3) 天体形成への応用上記の計算法の改善点の他に、現存のコードを用いて、回転分子雲の収縮については、バロトロピック近似を用いた場合の分裂条件の再検討を行い、原始連星への質量降着問題においては、連星重力への反作用と円盤自己重力を考慮した計算と解析も行っている。