

## 多層星間媒質の時間発展計算と一相近似状態方程式の導出

小林将人 (東北大学/大阪大学)

利用カテゴリ XC-B

### [本研究の背景]

分子雲は星の母天体であり、その形成・成長・破壊過程を理解することは銀河の星形成活動を理解する重要な課題である。分子雲の起源は、超新星爆発や銀河渦状腕によって駆動される超音速衝撃波が、暖かい中性水素原子ガス(WNM)を急激に圧縮し輻射冷却を介して暴走的に冷却し(熱不安定性)、冷たい中性水素原子ガス(CNM)・水素分子ガスを形成する過程にあると考えられている。分子雲に関わる星間媒質の相は、このようにWNM・CNM・水素分子ガスからなる多相構造をしており、銀河の星形成活動を理解するためにこの多相星間媒質の時間発展を解明することが必須である。

先行研究ではこのような圧縮過程を計算し分子雲形成過程を調べるために、星間媒質の衝突流のシミュレーション研究が行われている。その結果分子雲はWNMを超音速衝撃波によって10回-30回程度圧縮することが必要だと示唆されている。このような素過程に基づいて銀河全体の星形成活動を理解することを目的に、本研究では同様の衝突流計算を系統的に実施した。銀河スケールの計算(>10kpc)では熱不安定性の典型的な空間スケール(<0.1pc)を直接空間分解することは難しいため、本研究ではその両者を接続する分子雲スケール(約10pc)に着目してシミュレーションを実行した。特に形成される多相星間媒質が、衝突流の物理的性質や計算の空間分解能にどのような依存性を持つか明らかにしようとした。また多相星間媒質を仮想的に一相の媒質として近似する実効的状态方程式を定式化し、銀河形成・進化シミュレーションへ多相星間媒質の整合的な時間発展モデルを与えることを試みた。

### [計算設定]

まず3次元の計算領域(3辺が20pc, 10pc, 10pc)を用意した。初期にはWNMを用意し圧力平衡を保ちつつKolmogorovスペクトルに従うように密度揺らぎを生成した。計算領域中央で衝突流となるように速度場を設定した。本研究ではその速度は20キロメートル毎秒とし、相対速度が40キロメートル毎秒の設定となっている。境界条件として領域の長辺に沿って超音速WNM流を継続流入させた。この流入するWNMは初期に生成した密度揺らぎと同じものが計算領域外部から流入するものとして与えた。短辺方向には周期境界条件を課した。この設定で計算を行い計算領域中央に衝撃波圧縮層を生成した。上流からWNM流が衝撃波面を通過し下流(すなわち圧縮層)へ流入する際に衝撃波圧縮を経験し、熱不安定性を介してCNM生成が進むことで、圧縮層の中は多相星間媒質となり時間発展する。特にWNM流の流入で圧縮層の質量が増えるに従い、衝撃波面2枚が外向きに伝播する様子を計測した。この伝播速度と圧縮層内の平均密度を組み合わせて、

Rankine-Hugoniot 関係を応用し圧縮層の多相星間媒質全体を一相近似する実効的な状態方程式を得た。圧縮層内部は多相星間媒質が乱流状態にあるため, WNM:CNMの質量比や乱流エネルギーの密度依存性の時間発展も併せて計測した。このような計算・解析を, 密度揺らぎの振幅および計算の空間分解能を変えながらパラメタサーベイを実行した。

計算コードとしては Inoue & Inutsuka 2008 の流体部分を応用した。これは空間・時間方向ともに2次精度で, 512コア並列計算でも非常に良いストロングスケーリングを示しており, XC50上で問題なく計算を実行できた。

## [結果]

図1は流入速度20キロメートル毎秒の時に, 衝撃波面位置の時間発展を追った一例である。ここでは2枚ある衝撃波面位置の平均を縦軸にとっている。異なる色は異なる空間分解能を示している。1冷却時間(おおよそ1Myr)以降はCNM生成率が一定となり, 圧縮層全体の進化も準定常的で膨張速度が概ね一定となる。空間分解能依存性調査の結果, WNMの密度揺らぎの振幅が10%以下の時には熱不安定性の冷却長( $10^{-2}$ pc程度)と同程度の空間分解能を達成しないと衝撃波面位置のようなバルクな性質も収束しないが, それよりも大きな揺らぎがある系では $4 \times 10^{-2}$ pc程度の分解能でもすでに収束している様子が明らかになった。これは大きな揺らぎの系では, 衝撃波面位置が大きいたわみ斜め衝撃波が多数生成されており, 上流の力学的エネルギーが下流に散逸せずに持ち込まれる状況にあるため, そのような衝撃波面のたわみを充分空間分解できれば良いことを示唆していると考えられる。

この膨張速度と圧縮層内部の密度を用いて算出した実効的な状態方程式の指数が図2に示してある。ここでは  $P \propto \rho^\gamma$  の関係を満たす指数 $\gamma$ を縦軸にとっている。この指数が1より小さいこと, すなわち多相星間媒質は等温過程よりも柔らかい進化を遂げていることが明らかになった。またWNM:CNM質量比が1:1程度になることも明らかになった。これらを組み合わせることで銀河進化シミュレーションで分子雲形成を銀河全体の時間発展と整合的に計算する道が拓けると期待される。

乱流場の時間発展の解析も併せて, これらの成果は投稿論文として現在執筆中である。

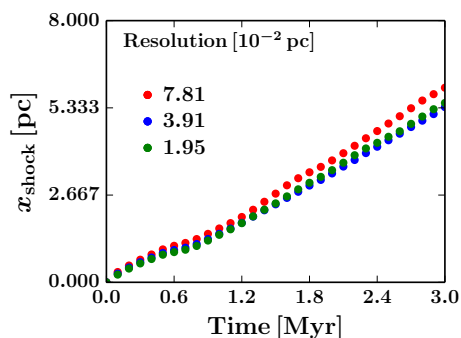


図 1: 衝撃波面位置の時間発展の一例。初期星間媒質の密度揺らぎの振幅が 30% のケース。

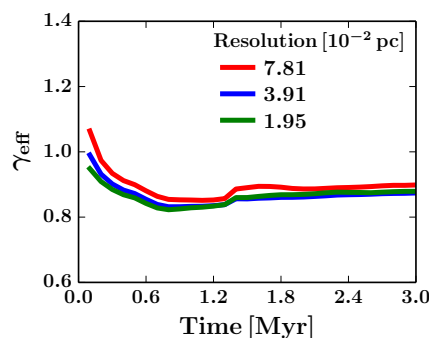


図 2: 図 1 の結果を基に算出した実効的な状態方程式の指数の時間発展。