

大質量星外層の多次元輻射流体計算

仲内 大翼 (東北大学)

利用カテゴリ XC-B

宇宙にあまねく存在する銀河の中心には100万-100億太陽質量を持つ超巨大ブラックホール (Supermassive Black Hole; SMBH)が鎮座している. SMBHがどのように形成されたかは宇宙物理学の問題の一つである. 特に赤方偏移6より遠方で発見されたSMBHの場合, 短時間での質量成長が実現されねばならない. SMBHの起源天体として有力なのは, 宇宙初期に存在した大質量星が寿命を終えたのちに残すBHである.

宇宙初期では, 星形成ガスは金属やダストを含まないので, 水素分子の冷却によりガスの重力収縮が進む. 金属やダストを多量に含んだ現在の星形成ガスに比べて冷却効率が低い結果, 宇宙初期では原始星への質量降着率が大きくなって(10^{-3} 太陽質量/年), 典型的に10-1000太陽質量程度の大質量星が形成される. 特に, 強い紫外線を受けたり, 衝撃波圧縮を経験したりしたガスでは, 水素分子の形成が抑制されるため, 原始星への質量降着率はさらに巨大となる(0.1-1太陽質量/年). 大質量星の寿命は質量によらず100万年程度であるので, この場合 10^5 - 10^6 太陽質量の超大質量星が形成される. 超大質量星は寿命を終えたのちに 10^5 - 10^6 太陽質量程度のBHになる. このようにしてできたBHが現在見られるSMBHの種となる.

以上を背景として, 高い質量降着率下における低金属度星の進化計算が, 原始星から主系列段階, そして後主系列期に至るまで行われている(Hosokawa et al. 2012, 2013). それによれば, 高い質量降着率下では星は, 赤色巨星のように非常に広がった外層構造を持って進化する. また質量が100太陽質量を超えると, 星外層において密度や圧力が外側ほど増加して, 星表面にシェル構造が発生する. 通常の星では外側ほど単調に密度や圧力が減少することを考えれば, これは非常に奇妙で興味ふかい現象である. 密度や圧力が反転したシェル構造が現れるのは, 局所的に星光度がEddington光度を超えるためである. 星の進化計算は一次元静水圧平衡を仮定して行われるが, 超Eddington領域では密度の高いシェル構造が重石となって静水圧平衡を保っているのである.

実際に大質量星の外層構造がどうなるかを知るためには, 上記の仮定を外して, 多次元の輻射流体計算を行う必要がある. 期待される結果として次の3つが挙げられる:

- 1) 密度・圧力反転層では局所的に星光度がEddington光度を超えているので, ガスが輻射により加速されて定常的なアウトフローが発生する.
- 2) 脈動不安定性が成長して非定常的なアウトフローが発生する.
- 3) 密度・圧力反転層は対流不安定である. 対流が発達して外層が非一様な密度構造を持つと, 光は不透明度の低い場所から優先的に抜けていく. つまり, 実効的に不透明度が低下して密度・圧力反転層は消滅する.

本研究では、星外層の多次元輻射流体計算を行うことで、上記の可能性を調べる。

本研究の目標は高い質量降着率下で進化する低金属度星の外層構造の安定性を、多次元輻射流体計算により調べることである。計算は、カリフォルニア大学サンタバーバラ校のYanfei Jiang氏らがAthena++磁気流体計算コードを、輻射輸送方程式も合わせて計算できるよう拡張したコードを用いる(Jiang et al. 2014). Jiang氏はこの多次元輻射流体コードを用いて、現在の大質量星外層構造の安定性を調べた(Jiang et al. 2015).

これまでテスト計算として、80太陽質量を持つ太陽金属度星の、対流不安定な外層構造を調べた。まず初期条件として、輻射フラックスや重力加速度が一定な、平衡平板大気の構造を作る。これを流体計算コードに読み込ませ、静水圧平衡状態が維持されることを確認する。二次元計算では鉛直方向に512 mesh、水平方向に128 meshをとる。また境界条件として、水平方向には流体・輻射ともに周期境界条件、鉛直方向には流体に反射境界条件を課す。初期に小さな擾乱を与えて二次元輻射流体計算を行った。その結果、図1のように対流が発達する様子を確認した。

今後は質量降着率0.1, 1太陽質量/年で成長する低金属度星に対して、100, 10^3 , 10^4 , 10^5 太陽質量の段階で計算を行う。その際、上と同じように並行平板大気の初期状態を作って流体コードに読み込ませたが、計算開始とともに静水圧平衡状態が崩れるという問題が生じた。まずはこの問題を解決する必要がある。

仮に、輻射流体計算により得られる結果が、前節で立てた予想1)や2)に近い場合には、発生したアウトフローにより星の質量成長が抑制されるので、超大質量星の形成は困難となるだろう。一方で予想3)に近い場合には、星の質量獲得は阻害されることなく、超大質量星の形成に至ると考えられる。

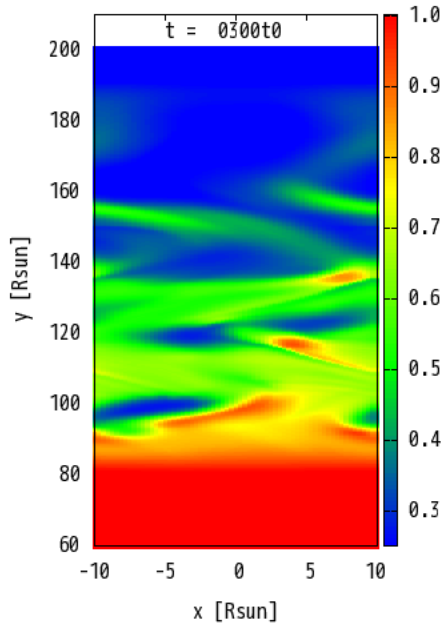


図 1: 二次元計算における密度構造(無次元)のスナップショット。

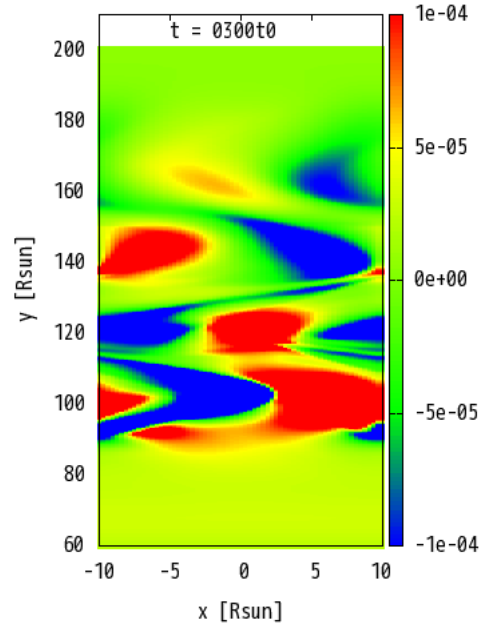


図 2: 輻射のエネルギー・フラックス(無次元)のスナップショット。