

超臨界降着流の大域計算

北木 孝明 (京都大学)

利用カテゴリ XC-B

[研究背景、目的]

X線連星から超巨大ブラックホールまで、様々な質量のブラックホール天体現象を理解する上で、鍵となるのが降着円盤である。特に、超臨界降着流と呼ばれる質量降着率が非常に高い降着円盤では、光子補足効果や外向きのガスの流れであるアウトフローが生じるため、手計算による解析は困難となる。そのため、多次元流体シミュレーションによる研究が行われている (Ohsuga et al. 2005)。この超臨界降着流は、超高光度 X 線源 (Ultra-Luminous X-ray sources, ULXs) のような、エディントン光度以上の光度で輝くコンパクトな天体現象を説明する有力モデルとなっている。超臨界降着流のスペクトル計算は、Kawashima et al.(2012) によって初めて行われ、質量降着率と傾斜角のパラメータを変化させることで超高光度 X 線源の観測された軟 X 線スペクトルをうまく説明することができた。さらに Kitaki et al.(2017) では Kawashima et al.(2012) の計算を改良することで、超臨界降着流の硬 X 線の振る舞いと形成過程を詳細に解明した。またこの結果は、超高光度 X 線源の観測を再現することにも成功している。

超臨界降着円盤の特徴であるアウトフローは、質量の降着や噴出に関するフィードバックに寄与するだけでなく、コンプトン散乱を通して観測されるスペクトルにも大きな影響を及ぼす。しかし、Kitaki et al.(2018) により、これまでに行われてきた超臨界降着流の流体計算のアウトフローは初期条件に依存してしまっていることが明らかとなった。既存のプログラムは一般相対論効果や輻射などを正確に解くために計算コストの制限から、初期トラスをブラックホールの近くに置く必要があった。初期トラスがブラックホール近傍にある場合、その初期トラスからアウトフローが吹くため、この初期トラスをできる限りブラックホールから離すことで正確なアウトフローの描像を解明することが本研究の目的である。本研究を遂行するには、計算コストを下げたプログラムの開発を行い、それを用いて空間的に広い領域で降着円盤の計算を行う必要がある。

[研究方法]

3次元輻射流体計算コードの開発を行う。まず基礎方程式の移流は MUSCL 補間と HLL 法で陽的に解いている。粘性項に関しては supertime stepping 法 (Meyer et al.2014) を用いることで陽解法での 1 ステップごとの時間幅 Δt を大きくし、計算の高速化をしている。ガスと輻射の相互作用は、陰解法で行列反転を用いて解いているが、各グリッドごとで独立に計算しているため並列効率化の低下は起こらないようになっている (Takahashi et al. 2013)。これらを用いることでこれまでの計算コードより高速に広い空間領域を扱うことができる。

[研究結果]

まず、流体部分に関しては HLL 法 (Harten et al.1983) を実装した。衝撃波管問題の解析解と比較を行うことで衝撃波補足が正しく出来ていることを確認した。

次に、粘性項を高速に解くために supertime stepping 法 (Meyer et al.2014) を実装した。これは中間状態にノイマン条件を課さないことで、陽解法でも安定して時間幅を大きく出来る手法である。ガウシアン of 拡散問題やクエット流の解析解と比較することで、粘性項が正しく解けていることを確認した。特に内部エネルギー方程式を解く場合、粘性加熱率の評価が陽的、陰的解法どちらを用いてもトータルエネルギーが保存されないため非物理的現象が起きることを発見した。これに関して解く方程式をトータルエネルギー方程式に変えれば、陽的解法、陰的解法どちらであっても安定に解くことが出来ることを実証した (図 1)。

輻射の移流項に関しては HLL 法を実装した。ただし Sadowski et al.(2013) にあるように、光学的に厚い空間領域では拡散速度を特性速度として採用する処方箋をした。輻射のソース項に関しては、カルデラ問題、ビーム問題、散乱問題のテスト計算を行うことで光の吸収、散乱、伝搬が正しく解けていることを確認した。コンプトン散乱に関しては、陽的解法と陰的解法を用意し、熱平衡問題を実施することで正しく解けていることを確認した。特に、4次元空間でニュートン法で解を探索すると非物理的な解に収束することがあった。これを回避するために、1次元空間で近似解を先に求め、それを初期条件として4次元空間で真の解を探す手法をとった。以上の計算コード開発によりコード自体は完成したと考えられ、現在は降着円盤を対象にした計算の実行段階に移行することができた。

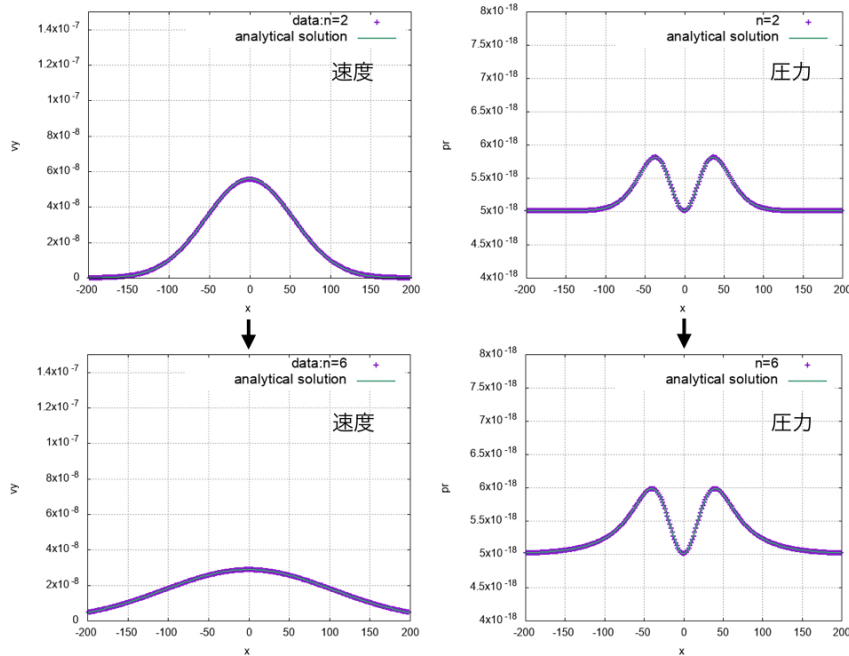


図 1: supertime stepping 法で解いたガウシアン of 拡散問題。速度の拡散と、粘性加熱が正しく解けている。