

一般相対論的輻射磁気流体計算によるブラックホール降着円盤及びアウトフローの研究

General relativistic radiation magnetohydrodynamics simulations of black hole accretion flows and outflows

朝比奈雄太

筑波大学 計算科学研究センター

1. 研究目的

取り巻く降着円盤であると考えられている。降着円盤では、ブラックホールに落下するガスの重力エネルギーが解放されることで、強力な放射やジェット、円盤風が生じる。しかしながら、降着円盤の構造も、ジェットや円盤風のメカニズムも未だ解明されていない。これらの問題の解明には一般相対論的輻射磁気流体力学計算が必要である。具体的な本年度の目標は以下の3つである。

- (1) 歳差運動するブラックホール降着円盤、ジェット、円盤風、光度変動の解明
- (2) 中性子星周囲の降着構造の解明とブラックホール降着流との比較
- (3) OpenACC 及び CUDA を用いた計算コードの GPU 最適化

2. 研究成果の内容

(1) 歳差運動する超臨界降着円盤の三次元計算を実施した。これにより、超大光度 X 線源で観測されている準周期振動を説明できる可能性を示した。さらに初期トーラスのサイズを変えたパラメータサーベイを実施し、初期トーラスが大きい場合には準周期振動の周期が長くなることを示した。

(2) 中性子星への超臨界降着の二次元計算を実施した。これにより、中性子星周囲に形成される降着円盤から大量のガスが噴出すること、またこの噴出流が超高輝度 X 線源で観測されている熱放射を再現できることを示した。3次元計算についても進めている。

(3) 筑波大学計算科学研究センターの小林諒平助教、額田彰教授、朴泰祐教授らとともに Pegasus を用いて UWABAMI の CUDA 化を実施した。これにより、1GPU を用いた単体性能では、従来の CPU base の UWABAMI と比較して 10.7 倍の高速化に成功した。この結果については HPC ASIA 2025 にて報告した。また MPI を用いたマルチ GPU によるコードの最適化についても進行中である。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

本プロジェクトで実施した一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションは、必要メモリにおいても計算時間においても計算コストが高く、小規模クラスタでは実行不可能であるため、本プログラムによる大規模計算が不可欠であった。特に歳差運動する降着円盤の計算では 3次元計算が前提であることに加え、歳差周期が長いいため長時

間計算も必要であるため、本プログラムによる計算が必須であった。

4. 今後の展望

- (1) 歳差運動する超臨界降着円盤のさらなるパラメータサーベイを実施し、トーラスサイズやスピンパラメータに対する依存性を徹底的に調べる。特に準周期振動の振動数や光度変動の幅などを調べていく予定である。
- (2) 中性子星への超臨界降着流の 3 次元一般相対論的輻射磁気流体力学シミュレーションを実施する。結果を観測と比較することで、数値シミュレーションモデルの妥当性を検証する。また、中性子星の自転軸と磁軸が一致しない計算を実施し、軸の不一致が観測量に与える影響も調べる。
- (3) MPI を用いた並列化効率は 2 ノードと比較して 4 ノードで 82%だが、16 ノードと比較すると 66%と低いため、並列化効率の改善を行いつつ、並行してブラックホール降着円盤計算のパラメータサーベイを実施する。特に CPU コードと比較して高速化が可能になった利点を生かして、降着円盤の長時間かつ大域的シミュレーションを実施する。

5. 成果発表

学際共同利用成果リストとして別途提出の通り

使用計算機	使用計算機に ○	配分リソース※		
		当初配分	移行*	追加配分
Cygnus				
Pegasus	○	10000		0
Wisteria/BDEC-01	○	160000		0
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				