

ブラックホール/中性子星周囲の超臨界降着円盤及びアウトフローの数値シミュレーション

Numerical simulations of the super-Eddington accretion disks and outflows around black holes/neutron stars

朝比奈雄太
筑波大学

1. 研究目的

本プロジェクトでは、一般相対論的輻射磁気流体力学計算を実施し、ブラックホール周囲の降着円盤の構造やガス噴出流のメカニズムについて研究する。本年度は、ブラックホール降着円盤の 3 次元計算、中性子星周囲の降着流の 3 次元計算を Miyabi-C を用いて実施する。また、GPU 最適化を進めると共に、Miyabi-G・Pegasus を用いて 2 次元および 3 次元計算を実施する。さらに Open ACC を用いた INAZUMA の GPU 最適化も進める。具体的な目標は以下の 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) Open ACC 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) 歳差運動する降着円盤のトーラス半径

依存性を 3 次元計算により調べた。

トーラス半径が大きくなるほど歳差振動数は小さくなることをシミュレーションで確認できた(図 1 の実線)。また、歳差運動のみでなく章動によっても光度が準周期的に変動する可能性を示した(図 1 の赤四角)。

- (2) 中性子星周囲の降着円盤の 3 次元計算

を実施した。図 2 は密度分布を表している。中性子星の磁場が弱い場合、降着流は比較的軸対称に近い構造を保ちながら中性子星へ落下する。一方

で、磁場が強くなると磁気圏半径が大きくなり、非軸対称な降着中が形成される。角運動量輸送については、磁場による Maxwell stress が重要な役割を果たす。特に、磁力線を介して角運動量が中性子星へ運ばれることが示された。3 次

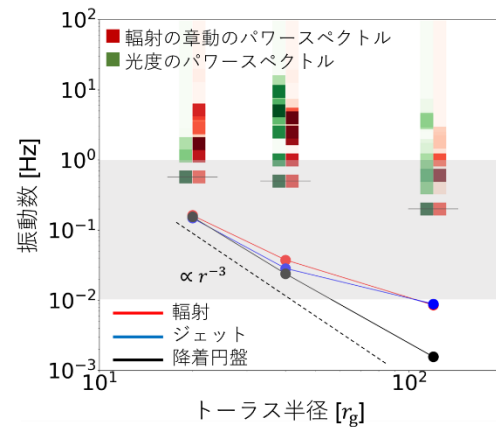


図 1 振動数のトーラス半径依存性。実線は歳差振動数(黒:降着円盤、赤:輻射エネルギー、青:ジェット)。赤四角は章動、緑四角は光度のパワースペクトルを表す。

元計算では、2次元計算よりも中性子星へ輸送される角運動量が大きくなっており、非軸対称構造を含む3次元効果が角運動量輸送に重要であることが分かった。

- (3) GPU を用いた並列計算により、単一 CPU ノードと比較して、2次元計算では約 13 倍、3次元計算では約 39 倍の高速化を達成した。

1GPU に対する並列化効率率は 4GPU で 89%、8GPU で 83%、16GPU で 73%、32GPU で 61%、64GPU で 45%であった。並列化効率の低下は、主に GPU 間・ノード間で必要となる MPI 通信のオーバーヘッドが増えるためである。

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。特に本年度は3次元計算を中心に実施しており、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) さらに長時間計算することにより、章動のより詳細な解析を実施する。また、トラス半径への依存性を明らかにする。さらに質量降着率への依存性を調べ、準周期振動天体の詳細な特徴を調べる。
- (2) 磁場強度を変化させ降着柱の構造の依存性を調べる。また、質量降着率を変えることで磁気圏半径の構造の詳細を調べる。
- (3) 輻射輸送を高精度に解く解法の GPU 最適化を進める。

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

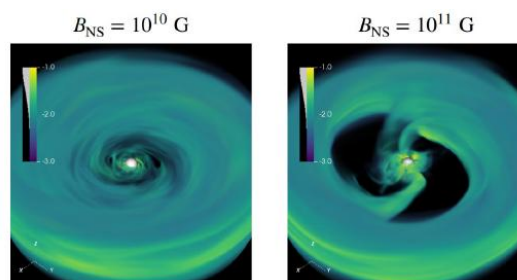


図 2 中性子星周囲のガス密度分布。左が弱磁場、右が強磁場のモデルを表す。

| 使用計算機 | 使用計算機に○ | 配分リソース* | | |
|--|---------|---------|-----|-----------|
| | | 当初配分 | 移行* | 一般利用による追加 |
| Pegasus | ○ | 8800 | | |
| Miyabi-G | ○ | 45000 | | |
| Miyabi-C | ○ | 6400 | | |
| ※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 | | | | |