

一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMA によるブラックホール降着流シミュレーション

Simulations of black hole accretion flows using GR-RMHD code INAZUMA

朝比奈雄太

筑波大学計算科学研究センター

1. 研究目的

超大光度 X 線源などの輻射が強い天体では輻射輸送を解くことは必須であるが、現在多く使用されている輻射輸送の近似解法の 1 つである M1 法では光学的に薄い領域での計算の信用性が低下してしまう問題を抱えている。そこで我々はブラックホール近傍の輻射場をより正確に解くことのできる、輻射輸送方程式を解く一般相対論的輻射磁気流体力学コード INAZUMA を開発してきた。本研究では INAZUMA コードを用いて様々な質量降着率の降着円盤シミュレーションを実施し、ブラックホール近傍のより正確な輻射場構造を明らかにする。また、M1 法と比較することで輻射場にどのような違いが現れるかを調べる。

2. 研究成果の内容

輻射輸送方程式を解く一般相対論的輻射磁気流体力学コード INAZUMA を用いてブラックホール降着流の 2 次元軸対称シミュレーションを実施した。初期トーラスの密度を変えることで様々な質量降着率について 6 モデル計算した。

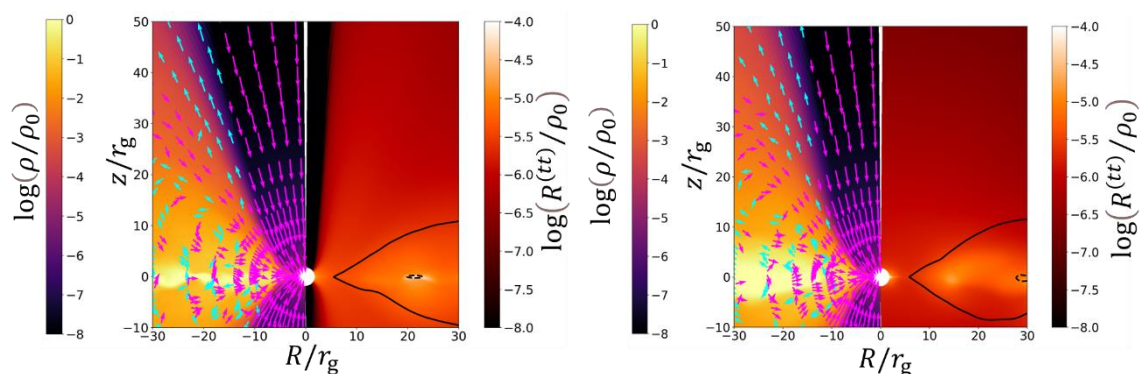


図 1 左図が M1 法の結果、右図が INAZUMA の結果を表している。左側の色は密度、矢印は速度ベクトル、右側の色は輻射エネルギー密度を表している。

図 1 は計算結果の一例である。図の左側は密度分布と速度分布、右側は輻射密度分布

を表している。大局的に見ると流体の物理量は M1 法と INAZUMA の結果で大きな違いは現れなかったが、光学的に薄い回転軸付近では輻射場に違いが現れた。M1 法では輻射が非物理的な衝突を起こすことで、回転軸まで光が到達していない。しかし、INAZUMA では輻射の非物理的な衝突が起きないためこのような問題は起きない。また、質量降着率の異なったモデルにおいても、光学的に薄い領域では輻射の非物理的な衝突によって輻射場に違いが現れることが確認できた。輻射フラックスに関しても数倍程度の違いは見られたが、時間変動による分散の方が大きいため、輻射光度については M1 法と INAZUMA で大きな差は生まれなかった。以上の結果をまとめた論文が *The Astrophysical Journal* から出版された。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

INAZUMA を用いたブラックホール降着流シミュレーションを初期トーラスの密度を変化させることで様々な質量降着率に対して 6 モデル程度実施した。光の方向の分割数を変えた計算を実施し、分割数が 32×16 程度必要になることがわかっている。この分割数での計算は M1 法の十倍以上のコストがかかるため、本共同利用課題の計算リソースにより実現できたと考える。

4. 今後の展望

これまでの計算では初期トーラスの回転半径がブラックホール近傍であることを仮定してきた。そのため、調べることができるのはブラックホールのごく近傍の降着円盤やアウトフローの構造のみであった。そこで、初期トーラスの回転半径をブラックホール遠方にする事で降着円盤やアウトフローの大局的な構造を調べる予定である。また、ブラックホールのスピンパラメータ依存性を調べ、ブラックホールの回転によって超臨界降着流の光度や、ジェットのエネルギーがどのように変化するかを明らかにしたい。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- ① “Variability of Comptonized X-ray spectra of a super-Eddington accretor: Approach using Boltzmann radiation transport”, T. Ogawa, K. Ohsuga, Y. Makino, and S. Mineshige 2021, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 73, 701
- ② “General Relativistic Radiation Magnetohydrodynamics Simulations of Black Hole Accretion Disks: Comparison of Methods Based on Variable Eddington Tensor and Based on M1 Closure”, Y. Asahina and K. Ohsuga 2022, *The Astrophysical Journal*, 929, 93

(2) 学会発表

- ① “一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMA を用いたブラックホール降着流シミュレーションによるスピン依存性”, 日本天文学会秋季年会, Sep. 13-15 2021, オンライン
- ② “GR-RMHD コード INAZUMA によるブラックホール降着円盤シミュレーション：スピン依存性”, 第 34 回理論懇シンポジウム, Dec. 22-24 2021, オンライン
- ③ “輻射輸送方程式を解く一般相対論的輻射磁気流体コード INAZUMA によるブラックホール降着流計算”, ブラックホールジェット・降着円盤・円盤風研究会 2022, Jan. 24-25 2022, オンライン

(3) その他

使用計算機	使用計算機 に○	配分リソース*	
		当初配分	追加配分
Cygnus			
Oakforest-PACS	○	40,500	12,150
※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。			