

2018 年度大規模実行に関する報告書

京都大学 基礎物理学研究所 朝比奈雄太

[研究背景]

X 線連星や活動銀河核 (AGN) 等の降着天体は宇宙ジェットと呼ばれるアウトフローを噴出する場合がある。中心天体近傍で加速および収束されたジェットは衝撃波等を通じて星間ガスの進化に甚大な影響を与えると考えられている。長年にわたりジェットの形成機構についての研究が行われ、ジェットの磁気圧加速 (Kudoh et al. 1998) や輻射圧加速 (Ohsuga et al. 2005) の計算が行われてきたものの、ジェットの形成条件等は、まだよくわかっていない。ジェットの加速には輻射圧、収束には磁場が重要な役割を果たしていると考えられており、ブラックホール近傍の現象であるため一般相対論効果も無視できない。ジェットの形成機構の解明には一般相対論的輻射磁気流体 (GR-RMHD) シミュレーションを実施する必要がある。しかし、一般相対論的時空中で精緻に輻射場を求める GR-RMHD 計算は未だ行われていない。現在、幾つかの先行研究で輻射を計算する際に用いられている 1 次モーメント (M1) 法では、光の方向分布を近似的に扱うため、光の交差や光学的に薄い領域での輻射場を正しく解くことができていない。これらをより正確に扱うためには、光の角度依存性を考慮した輻射輸送計算をしなければならぬ。そこで、ボルツマン方程式を解いて輻射の方向分布を正しく解き、そこから Eddington tensor を求めた上で GR-RMHD シミュレーションを実施する (いわゆる Variable Eddington 法)。これにより、輻射をより正確に取り扱ったジェット加速領域のシミュレーションを実施することができる。近年ボルツマン方程式を用いたコードの開発は活発になっており、グローバルな降着円盤の 3 次元ボルツマン輻射磁気流体シミュレーションも実施されている (Jiang et al. 2017, ArXiv)。しかし、非相対論の範疇にとどまっており、一般相対論効果まで含めた計算は世界初である。

[シミュレーションモデル]

流体の物理量の初期条件として Takahashi et al. (2016) のシミュレーション結果を用い、輻射のエネルギーは十分小さいと仮定した。図 1 は初期の密度分布を表している。スピン 0 の Kerr-Schild 座標系 (r, θ, ϕ) で 2 次元軸対称計算を行った。グリッド数は空間グリッドが 600×600 、光の方向に 64×128 、 32×64 とした。

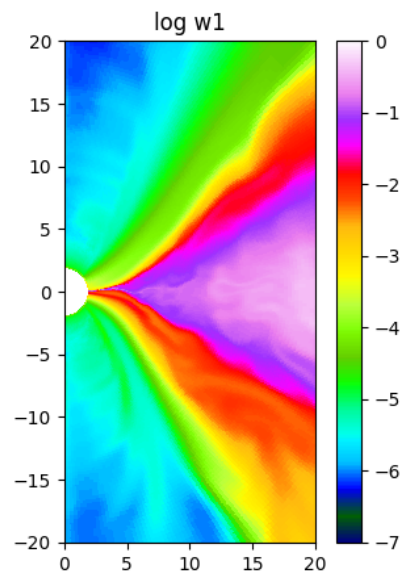


図 1 初期の密度分布。

[シミュレーション結果]

シミュレーションの開始から約 30 分経過したところで、中心部付近から数値振動のような振動が現れてしまった。これはエネルギーの下限値の設定が原因であることが判明したが、デバッグにかなりの時間を費やしてしまったため、止む無くグリッド数を空間 300x300、光の方向に 32x64 とし、流体を固定した計算にスケールダウンさせた。図 2 はシミュレーション結果を表しており、上段は左から右に向かって、輻射のエネルギー密度、輻射フラックスを輻射のエネルギー密度で割ったものの r 成分、 θ 成分、 ϕ 成分である。下段は左から輻射のエネルギー密度をより広域で見たもの、エディントンテンソルの rr 成分、 $\theta\theta$ 成分、 $\phi\phi$ 成分である。図 3 は比較のために後日 XC-B+ で計算した 1 次モーメント法の結果である。

光学的に厚い部分では違いはほとんど見られないが、1 次モーメント法の方が光学的に薄い領域への放射を多く見積もっているということが、輻射フラックスの θ 成分の分布から見て取れる。また円盤の回転軸付近では 1 次モーメント法の方は輻射の非物理的な衝突が起き、エディントンテンソルの rr 成分が大きくなっているが、我々のコードではそのような非物理的な輻射の衝突が起きていないことがわかる。

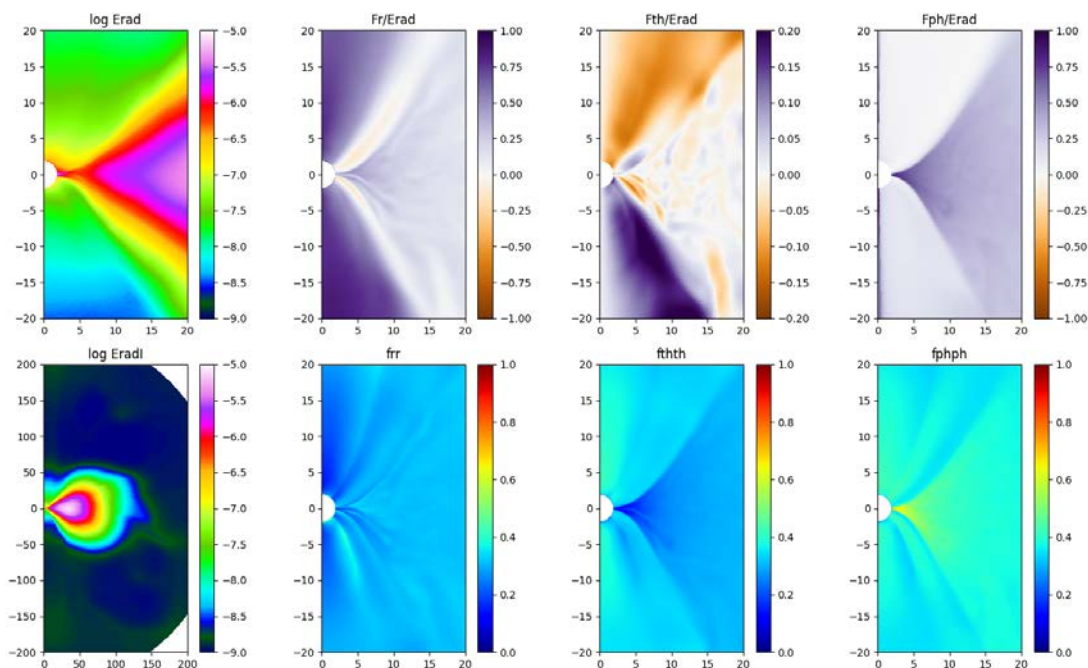


図 2 シミュレーション結果。上段左から右に向かって、輻射エネルギー密度、輻射フラックスを輻射エネルギー密度で割ったものの r 成分、 θ 成分、 ϕ 成分。下段左から右に向かって、輻射エネルギーの広域の分布、エディントンテンソルの rr 成分、 $\theta\theta$ 成分、 $\phi\phi$ 成分。

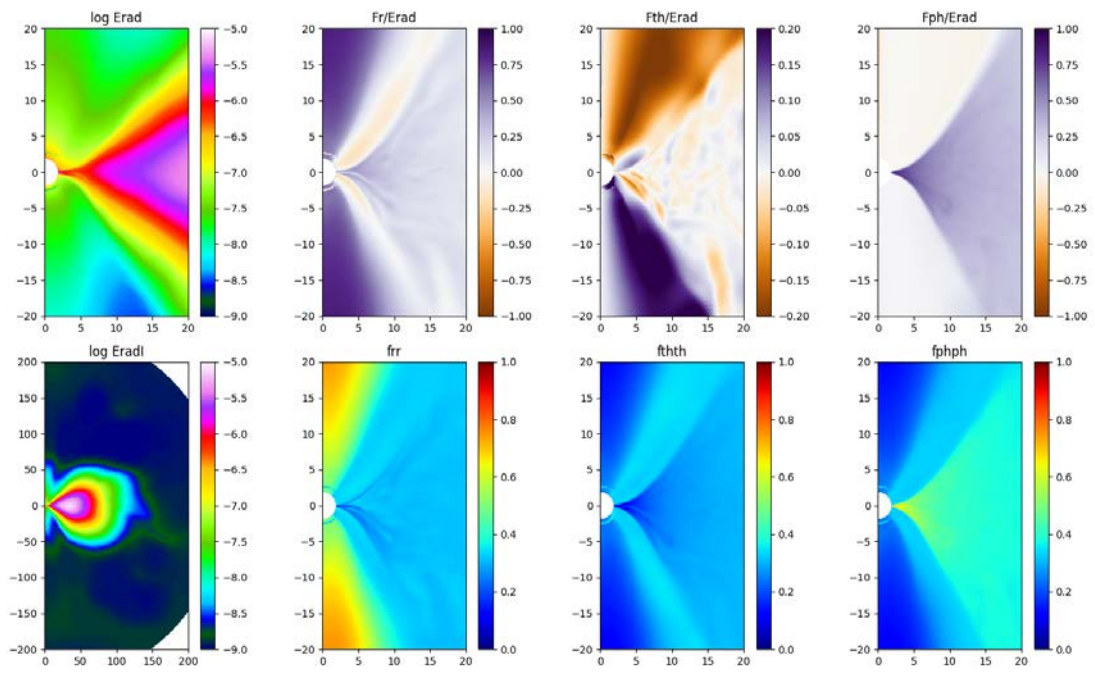


図 3 同様の初期条件を用いて 1 次モーメント法で解いたシミュレーション結果。図の配置は図 2 と同様。