

## 超臨界降着の数値シミュレーション

小川 拓未 (京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

### Abstract

ブラックホールの降着円盤については様々なモデルで数々の数値シミュレーションがなされてきた。中でも最近注目されているのが超臨界降着流である。ブラックホールへの超臨界降着は ULX などエディントン光度よりも明るく輝く天体現象などのモデルの一つである。また大質量ブラックホールの形成モデルとしても注目されており、シミュレーションの重要性は更に上がってきている。

また、超臨界ブラックホールからの噴出流の特性は逆コンプトン散乱など様々な過程により観測量として我々の目に届くため、観測へのアプローチも期待されている。

そこで今回は国立天文台の大須賀氏のシミュレーションで確認された超臨界降着流の特異な性質、特に最近見つかった clumpy outflow について Takeuchi et al (2013) のレビューとして述べる。

## 1 Introduction

ブラックホールへの降着流は宇宙の多くの高エネルギー現象のモデルとなっている。宇宙の高エネルギー現象の解明にはブラックホールまわりのガスの運動の性質の解明が必須事項であると言える。

ブラックホール降着流の中でも近年注目されつつあるのは、エディントン降着量を超えた降着量を持つ超臨界降着流である。これは超大光度 X 線源 (Ultra-Luminous X-ray source, ULX) やマイクロクエーサー、潮汐破壊による突発的増光現象 (Tidal Disruption Event, TDE) など、エディントン光度より明るく光っている天体現象を説明する有力なモデルとして注目されている。また、超臨界降着流は超巨大ブラックホール形成において重要な役割を担うと考えられている。特に恒星質量ブラックホールから超巨大ブラックホールへの成長シナリオに置いては避けられないという指摘もある。

超臨界降着流および噴出流は本質的に 3 次元で非定常なプロセスであり、輻射と物質が複雑に相互作用をするため、そのダイナミクスの解明には数値シミュレーションによる研究が不可欠であり、日本のグループ (大須賀氏ら) を中心にそのような研究がされ始めている。

超臨界降着においては光度がエディントン光度に匹敵するほどまでに輻射が強くなるので大量のガスが輻射によって噴出流として吹き飛ばされる。円盤

から出た低エネルギーの光子が噴出流のガスとの逆コンプトン散乱により叩き上げられスペクトルを硬くするという報告もあり、噴出流の性質それ自体が非常に重要な役割を担っている。

今回レビューする論文 Takeuchi et al (2013) では超臨界ブラックホールの特に遠方の噴出流をターゲットにして広範囲高解像度の輻射流体シミュレーションが行われた。それにより噴出流の新たなタイプの構造が見えてきた。

## 2 Numerical Model

今回行われた数値シミュレーションは彼らの以前の研究 (Ohsuga et al (2009); Ohsuga & Mineshige (2011)) と同様、2 次元の輻射磁気流体シミュレーションである。

Ohsuga et al (2009) や Ohsuga & Mineshige (2011) とほぼ同じモデルでの計算であるが、唯一にして最大の違いはシミュレーション領域の広さである。以前の研究 (Ohsuga et al (2009); Ohsuga & Mineshige (2011)) では  $2r_S \leq R \leq 105r_S, 0 \leq z \leq 103r_S$  であったが、今回は  $2r_S \leq R \leq 514r_S, 2r_S \leq z \leq 514r_S$  の広域のシミュレーションである。グリッドの幅はそれぞれ、 $\Delta R = \Delta z = 0.4r_S$  となっている。これにより噴出流の構造を見ることが今回の狙いである。

### 3 Results

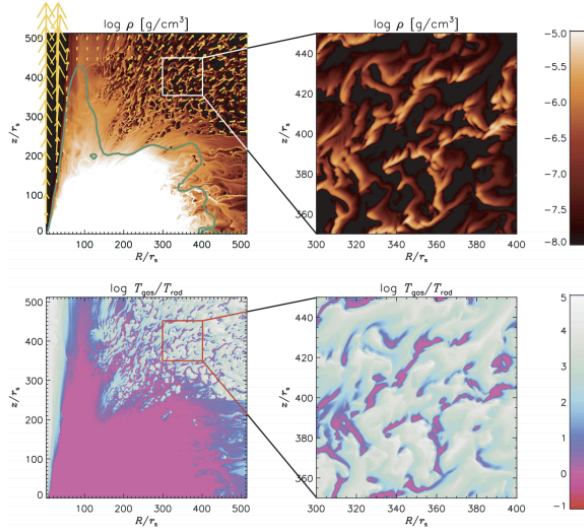


図 1:  $t = 9s$  でのスナップショット。上段は  $\log \rho$  のマップ、下段は  $\log(T_{\text{gas}}/T_{\text{rad}})$  のマップ。

#### 3.1 Overview

図 1 は時刻  $t=9s$  の時のスナップショットである。左上が密度  $\rho$  のマップ、左下が  $T_{\text{gas}}/T_{\text{rad}}$  のマップ、右側がそれぞれの拡大図である。緑の線は外向きの輻射の力が内向きの重力と釣り合う境界でその外側では外向きの輻射の力が卓越している。黄色のベクトルはその点での脱出速度を超えた点の速度場である

図 1 を見ると、今までの超臨界降着流のシミュレーションで見えたような幾何学的・光学的に厚い円盤や輻射で加速され螺旋状の磁場によるローレンツ力で収束されたジェット、非常に広い角度への噴出流などが見えている。それに加えて、 $z \sim 250r_s$  より上空の噴出流につぶつぶ (clump) 状の構造 (今後 clumpy outflow) が今回新たに見つかった。

今後は特にこの clumpy outflow について見ていく。

#### 3.2 Characteristics of Clumpy Outflow

シミュレーションデータを解析することによって clumpy outflow について次のような性質が見つかった。

1. 重力 < 輻射となるところ ( $z \sim 250r_s$  より上空) で clump 構造が現れている。
2. 一つの clump の典型的な大きさは  $10r_s$  程度。これはちょうど光学的厚さ  $\tau \sim 1$  となる大きさ
3. clump 付近では輻射力と密度の逆相関が見られた。
4. 速度は光速の 1 割程度 (cf. jet は光速の半分程度)
5. 速度方向にのびた細長い形をしている
6. clump の中では物質と輻射は良くカップリングしている。 ( $T_{\text{rad}} \sim T_{\text{gas}}$ )
7. clump の密度は  $\rho_{\text{cl}} \sim 10^{-6} \text{ g cm}^{-3}$ , 周囲の薄いガスの密度は  $\rho_{\text{amb}} \sim 10^{-8} \text{ g cm}^{-3}$

特に特徴 1~3 から、clump の形成には輻射が非常に密接に関わっていると予想できる。

## 4 Discussion

### 4.1 Mechanism of Creating Clumpy Outflow

前節で見たように clumpy outflow には幾つの特徴があり、特に特徴 1~3 が形成過程に密接に関わっていると予想できる。

まず、特徴 1 については Rayleigh-Taylor 不安定性のようなものが効いていると予想される。通常、Rayleigh-Taylor 不安定性と言えば重力場中の密度逆転層の間で起こるものであるが、今回は重力に打ち勝った輻射の力が Rayleigh-Taylor 不安定性を駆動させると考えられる。実際、Takeuchi et al (2014) で行われた超臨界降着流における輻射流体不安定性のシミュレーションでも Rayleigh-Taylor 不安定性が確認された。

次に、特徴 2 については Shaviv (2001) や Takeuchi et al (2014) で報告されている輻射流体不安定性であると予想される。単位体積当たりの輻射力  $f_{\text{rad}}$  について、大雑把に  $f_{\text{rad}} \propto \tau^{-1}$  が成り立っており、これにより先ほどの Rayleigh-Taylor 不安定性で生じた密度のムラが更に成長するというメカニズムの不安定性である。これは簡単に言うと、密度が高いところを避けるように輻射が流れ、それにより密度の薄いところが押し広げられて密度ムラが成長すると言い換えることができる。この不安定性で成長しやすいモードはだいたい  $\tau \sim 1$  となる大きさと一致しており、特徴 2 を良く説明できる。

最後に、特徴 3 については Shaviv (2001) の輻射流体不安定性解析で報告された輻射エネルギーとガス密度の逆相関は見られず、代わりに単位質量当たりの輻射力とガス密度の逆相関が見られた。これは今後明らかにしていく必要がある案件である。

補足事項として、上の議論から clump の形成は純粋に輻射流体的な現象からきているため磁場は無関係である。実際、7s において磁場を 0 にしてもその後 clumpy outflow が見えることが確認された。

## 4.2 Comparison with the Observational Fact

ブラックホール天体からの噴出流の X 線観測はいくつも報告されているが、中でも今回注目すべきは ULX や AGN の噴出流において clump 状の構造が観測から予想されているということである。これは clump の構造形成がブラックホール質量に依らないという観測的証拠である。

そこで実際に  $M = 10^8 M_{\odot}$  でも同様のシミュレーションをしてみると  $M = 10 M_{\odot}$  と同様に clump の形成を確認できた。大きさも  $10 r_g (\tau \sim 1)$  であり、やはり clump の形成はブラックホール質量に依らないことが確認できた。

Middleton et al (2011) で行われた NGC5408X-1 という ULX の観測では超臨界降着が起きているとされ、更に clump 状の構造を示唆する数十秒のスペクトルの時間変化が確認された。また、Tombesi et al (2010) ではエディントン光度に近い光度を持つ数例の AGN から Fe K 線の青方偏移が検出され、

Ultra-Fast Outflow(UFO) と呼ばれる  $0.04c \sim 0.15c$  の速度を持つ噴出流の存在が予言された。観測によると UFO のスペクトルの典型的な時間変化は 1 日ほどで clump 状の構造を持っていると予言されている (Tombesi et al (2012))。

今回のシミュレーションで確認された clump は光学的に厚いので観測者の視線を横切る時に光の吸収が起こると予想される。そこで観測との比較のために次の 3 つの量を計算した。

clump をブラックホールを中心とする球面に投影したときにどれだけ clump が球面を覆い尽くしているかを表す spatial covering factor  $\mathcal{C}$ ,

$$\mathcal{C} = 2 \int_{r_{\text{ph}}}^{\infty} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_0^{2\pi} n_{\text{cl}} \left( \frac{\pi \ell_{\text{cl}}^2}{16\pi r^2} \right) r^2 \sin \theta dr d\theta d\phi \quad (1)$$

どれだけ電離されているかを表す photoionization factor  $\xi$

$$\xi = \frac{L_X}{n_{\text{cl}} r^2} \quad (2)$$

clump がどれだけの頻度で観測者の視線方向を覆い隠すかを表す variability time scale  $t_{\text{cl}}$

$$t_{\text{cl}} = \frac{\ell_{\text{cl}}}{v_{\varphi}} \quad (3)$$

ただし、 $n_{\text{cl}}$  は clump の数密度、 $\ell_{\text{cl}}$  は clump の直径、 $r_{\text{ph}}$  は photosphere の  $r$  座標、 $L_X$  は X 線バンドでの光度である。これらを計算した値を用いて観測と比較した。

ULX を恒星質量ブラックホールとした時、ULX の数十秒の長い時間変化を説明することはできなかった。もしもこのメカニズムで時間変化をしているのだとしたら ULX は超大質量ブラックホールでないとならない。

また一方で、X 線観測で確認された AGN の UFO の特徴とは良い一致を示した。しかし、今回のシミュレーションは gray 近似を用いたものであり、より詳しい比較のためにはスペクトルの効果を入れたシミュレーションが不可欠であり、今後の課題となるだろう。

## 4.3 The Origin of Broad-Line Cloud?

AGN には標準的に広輝線領域 (Broad-Line Region; BLD) と呼ばれる領域があるとされている。

BLD は中心のブラックホールと周りの分子雲トラスとの間にあるとされる高い速度分散を持つ領域であり、ブラックホール周りを回転している clump 状のガスを見ているものと予想されている。

観測と比較するために、clump が領域を体積にしてどれくらい占有しているかを表す volume filling factor  $\mathcal{F}$ ,

$$\mathcal{F} = \frac{N_{\text{cl}} (\pi \ell_{\text{cl}}^3 / 6)}{4\pi r_{\text{BLR}}^3 / 3} = \frac{N_{\text{cl}} \ell_{\text{cl}}^3}{8r_{\text{BLR}}^3} \quad (4)$$

を計算した。ただし、 $N_{\text{cl}}$  は clump の個数、 $r_{\text{BLR}}$  は BLR の大きさである。

この  $\mathcal{F}$  の値は BLR の観測から求めた  $\mathcal{F}$  (Peterson (1997)) と良い一致を見た。この  $\mathcal{F}$  の評価では clump が BLR の存在する遠方の ( $r_{\text{BLR}} = 10^5 r_{\text{S}} \sim 1\text{pc}$ ) 領域まで保たれると仮定しているが、これは熱伝導などのタイムスケールを考えると十分あり得る仮定と言える。しかし、clump の安定性について議論するにはより広い領域のシミュレーションをする必要があるだろう。

## 5 Conclusion

超臨界降着ブラックホールの噴出流の構造を見るために広域の 2 次元輻射磁気流体シミュレーションを行った。そして噴出流に関して次の新たな発見が得られた。

- clumpy outflow を発見した。clump は  $z \sim 250r_{\text{S}}$  より上空で見られ、大きさは  $10r_{\text{S}}$  ( $\tau \sim 1$ ) 程度である。単位質量当たりの輻射力と密度は逆相関している。
- clump の形成メカニズムは輻射を重力に見立てた Rayleigh-Taylor 不安定性が密度ムラを作り、それに加えてある種の輻射流体不安定性によって  $\tau \sim 1$  くらいの大きさの clump に成長するというものであると思われる。磁場は clump 形成には効いていないようである。
- spatial covering factor の見積もりから clumpy outflow が中心からの光を周期的に隠す効果は十分に期待できる。また、超大質量ブラックホー

ルからの clumpy outflow を仮定すると  $\xi$  と  $t_{\text{cl}}$  の値は観測と良く一致する。

- clump がパーセクスケールで保たれているとすれば、volume filling factor は BLR の観測と良い一致をし、加えて clumpy outflow 自体の性質も BLR と良い一致をしている。

今回のシミュレーションではかなり効くと思われるコンプトン散乱の効果が考慮されていなかった。より詳しい解析には熱的コンプトン散乱の効果を入れた特殊相対論的輻射磁気流体シミュレーションが必要である。コンプトン散乱を入れると輻射がより強くなるので超臨界降着でなくても clumpy outflow のような輻射優勢円盤特有の現象が見られるかもしれない。これからぜひとも携わりたい課題の一つである。

また、今回はスペクトルを考慮しない輻射シミュレーションであったが、それを考慮することによってどのような構造が見えてくるのかも興味深い。

## Reference

- Takeuchi, S., Ohsuga, K., & Mineshige, S. 2013, PASJ, 65, 88
- Ohsuga, K., Mineshige, S., Mori, M., & Kato, Y. 2009, PASJ, 61, L7
- Ohsuga, K., & Mineshige, S. 2011, Apj, 736, 2
- Takeuchi, S., Ohsuga, K., & Mineshige, S. 2014, PASJ, 66, 48T
- Shaviv, N. J. 2001, Apj, 549, 1093
- Middleton, M. J., Robert, T. P., Done, C., & Jackson, F. E. 2011, MNRAS, 411, 644
- Tombesi, F., Sambruna, R. M., Reeves, J. N., Braitto, V., Ballo, L., Gofford, J., Cappi, M., & Mushotzky, R. F. 2010, ApJ, 719, 700
- Tombesi, F., Cappi, M., Reeves, J. N., & Braitto, V. 2012, MNRAS, 422, L1
- Peterson, B. M. 1997, An Introduction to Active Galactic Nuclei (Cambridge: Cambridge University Press)