

氏 名 小林 弘

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 1984 号

学位授与の日付 平成 30 年 3 月 23 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Three-Dimensional Radiation-Hydrodynamic Simulation of  
Clumpy Outflow and Its Application to Supercritical  
Accretors around Black Holes

論文審査委員 主 査 准教授 柏川 伸成  
教授 亀野 誠二  
助教 秦 和弘  
助教 滝脇 知也  
教授 松元 亮治

We study clumpy outflows from supercritical accretion flow around a stellar mass black hole by means of global three-dimensional (3-D) radiation-hydrodynamic (RHD) simulations. We for the first time solve a full set of the radiation hydrodynamics equations in the 3-D geometry. We consider the electron scattering opacity, and the Rosseland mean free-free absorption opacity, for solar metallicity. The radiation fields are evaluated by adopting the M1-closure method so that the conservation of the total energy and the total momentum of radiation and fluid are guaranteed. To save the computational time, we only solve the outflow part, postulating the presence of an underlying quasi-steady disk of which the mass accretion rate onto the black hole is  $10^2 L_{\text{Edd}}/c^2$ , where  $L_{\text{Edd}}$  is the Eddington luminosity and  $c$  is the speed of light. Numerically, we start calculation from the axisymmetric 2-D simulation data but with small perturbations in the azimuthal direction and we keep the same values for the physical quantities at any times later on as their initial values at the bottom and inner boundaries of the computational domain. Here we note that the perturbation with small wavelength is not so important for the ultimate structure of the clumpy outflow. In a few seconds after the start of the simulation we find that the radiatively driven outflow with the outflow rate of  $\sim 10 L_{\text{Edd}}/c^2$  fragments into many clumps above the photosphere located at a few hundreds of Schwarzschild radius ( $r_s$ ) from the central black hole. Such clumps have a shape of a torn sheet, and are rotating around the central black hole with a sub-Keplerian velocity. We understand that the material is blown away, keeping its angular momentum, since the radiation force in the  $\theta$ -direction is too small to change the angular momentum. It is important to note that significant sub-Keplerian rotation means slow rotation speed, which in turns lead to long variation timescales caused by obscuration of central light by moving clumps. To examine the statistical properties of clump, it is useful to calculate auto-correlation function of the density. The typical clump size is  $30 r_s$  or less in the radial direction and is more elongated in the angular directions,  $\sim$  hundreds of  $r_s$  at most. When discussing the formation mechanism of clumpy outflow, it is instructive to refer to the discussion in the 2-D RHD simulations who summarize the following key features: (i) the clumpy structure appears in the upwardly accelerating layer by radiation force (ii) the optical depth of clump size is around unity (iii) a clear anti-correlation is found between the gas density and the absolute value of radiation force (iv) the cloud temperature varies in a complex fashion. Our 3-D simulation confirms most these features [except item (iv)]. For example, item (i) is obvious from the model setting. We also confirm item (ii) within numerical resolution. That is, from the typical (radial) clump size of  $\sim 30 r_s \sim 10^8$  cm and the typical density  $\sim 10^{-7}$  g cm $^{-3}$ , we find the scattering optical depth to be a few. It is very important to note that this value does not depend on the black hole mass so that we will be able to discuss for the outflow from supermassive black holes. This is

(別紙様式 2)  
(Separate Form 2)

natural consequence of the following scaling relations. One thing that we did not confirm is item (iv) above, due probably to limited numerical resolution. We thus tentatively conclude that the radiation Rayleigh-Taylor instability coupled with some radiation hydrodynamic instability could be a key cause of the clump formation. Another interesting issue is concerning the origin of the torn-sheet clump structure. We conjecture that the asymmetry in the 3-D structure could be understood in terms of the anisotropic radiation field in the sense that radiation flux is super-Eddington only in the radial direction. This results in a torn-sheet structure. Further extensive study is needed to confirm if this conjecture can be justified.

When such clumps pass across the line of the sight of a distant observer, stochastic luminosity variations will be produced. The variation timescales are several seconds for a stellar-mass black hole with mass of ten to several tens of the solar mass and are in rough agreement with the observational results of some ultraluminous X-ray sources (ULXs). Our results thus provide a strong support of a hypothesis that the ULXs are powered by the supercritical accretion onto the stellar mass black hole. In addition, we suggest that our clumpy outflow model may explain some observational features of the ultra-fast outflows and the origin of broad line-emitting clouds in active galactic nuclei.

Summary of the results of the doctoral thesis screening

ブラックホール周辺のガスは光り輝く降着円盤を形成する。降着円盤は、質量降着率によって超臨界降着流（光度[L: エディントン光度]  $> 1$ 、降着率  $> 10$ ）、標準円盤（ $L = 0.01-1$ 、降着率  $\sim 0.1-10$ ）、放射非効率降着流（ $L \ll 1$ 、降着率  $\ll 1$ ）の3つのタイプに分類される。本研究は超臨界降着流からのアウトフローの高解像度3次元輻射流体シミュレーションに初めて成功したものである。その結果、アウトフローがシート状に分裂しクランプ状の構造をとること、回転速度がケプラー速度の30%程度になること、などクランプ状のアウトフローの3次元構造を初めて明らかにした。このシミュレーションの結果を降着円盤天体であるULXs (Ultra-luminous X-ray Sources) やAGNの観測結果と比較し、これらの天体の一部の性質がクランプ状のアウトフローモデルによって説明できることを示した。

2次元軸対称を仮定した輻射磁気流体シミュレーションに基づいた先行研究では、超臨界降着流において輻射優勢場でのレイリーテイラー不安定性から、クランプ状のアウトフローが生じることが示唆されており、輻射力によって噴き出すアウトフローの速度は $\sim 0.1c$ 程度、クランプサイズは $\sim 10rs$  ( $rs$ : シュバルツシルト半径)程度という制限がつけられていた。しかしながら、光学的に厚いクランプが観測者の視線を横切るタイムスケールは $\sim 0.1s$ のオーダーとなり、観測されているULXsの時間変動10 - 50sとは一致しないことが問題となっていた。出願者は、従来の計算で用いていた輻射流体方程式にM1-closureを適用してエネルギーと運動量の保存を保証し、回転軸近傍と円盤赤道面近傍をモデル化し、計算領域をアウトフロー領域に絞ることでこれを3次元に拡張することに成功し、さらに解像度や初期条件もいくつか変化させることで結果の普遍性を確認した。

その結果、噴出速度は $\sim 0.1c$ と従来の結果を確認した上で、回転速度はケプラー速度の30%程度のゆっくりとしたものであること、回転方向のクランプサイズは $\sim 100rs$ であることが導かれた。これら両者から100太陽質量程度のブラックホールを考えれば、光度変化のタイムスケールは25s程度となり、ULXの時間変動を説明できることが示された。

この計算結果は他の天体现象への応用が期待される。UFO (Ultra-Fast Outflow) は青方偏移した吸収線が検出され、光速の数10%もの速度で噴出する高階電離状態のアウトフローを持つことが示唆されているAGNであるが、そのアウトフロー速度や電離パラメータは本計算結果と一致する。同様に、AGNのもつBLR (Broad Line Region) のフィリングファクターは本計算結果と一致することから、BLRのガス雲の起源も自然に説明できる可能性を持っている。一方でNLS1 (Narrow line Seyfert 1) についてはその時間変動を本モデルでは説明することができず、輻射力が卓越しクランプサイズを小さくする可能性を示唆する結果となった。

本成果は世界で最初に、超臨界降着流からのアウトフローの3次元構造を明らかにし、そのクランプが観測者の視線を横切るタイムスケールからULXsの時間変動の物理的成因について解明した上で、その他のAGN現象への発展を示唆したものであり、博士論文として高く評価できる。

本研究で用いられた輻射流体数値計算コードの一部は出願者が中心になって開発したものであり、現実的な実行時間で3次元計算を完了させ物理を解明する境界条件を工夫するこ

(別紙様式 3)

(Separate Form 3)

とに多くの労力と時間を費やした。数値計算の遂行から、結果のとりまとめ、議論など、論文作成の一連の過程において、出願者が主体的に行っていることが認められ、その内容は超臨界降着流の理解に大きく貢献するものである。したがって、審査委員全員が博士論文として合格であると判断した。