

Super-Eddington 降着円盤

総合研究大学院大学
物理科学研究科 天文科学専攻
M2 橋詰 克也

平成 24 年 9 月 23 日

Abstract

超大光度 X 線源 (ULXs : Ultra-luminous X-ray sources) (図 1) はどのようにして強く輝いているのかわかっていない、謎の天体である [1]。この天体の光度を説明するために恒星質量ブラックホール (BH) + Super-Eddington 降着円盤というモデルが考えられている。通常、恒星の様な球対称な系を持つ天体は Eddington 光度を超えて輝けないが、BH 降着円盤では実現しうることが 2 次元の輻射流体計算によって示された。本研究では先行研究による Super-Eddington 円盤モデルを基に、残されている問題点を解決したい。

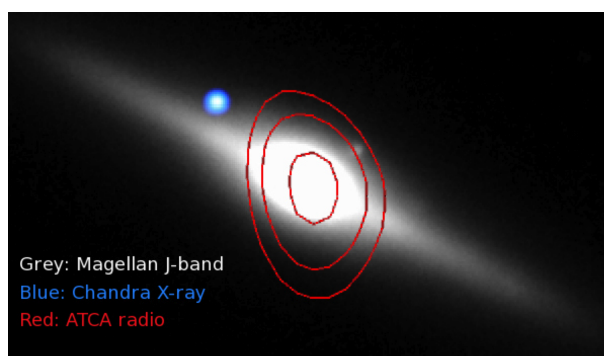


図 1: ESO 243-29 (S0 銀河) に付随する X 線源 HLX-1 は $L_X \sim 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ にも及び、現在最も有力な中質量 BH 候補天体である。

Introduction

近年の X 線観測によって見つかった ULXs は恒星質量 BH の Eddington 光度を超えて輝いている¹($L_X \sim 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$)。しかしその莫大なエネルギーがどのようにして生み出されているのかは、恒星質量 BH + 標準円盤という従来のモデルでは説明がつかない。標準円盤モデルは Eddington 光度を超えられないからである。

現在考えられているシナリオ

現在 ULXs を説明する有力なシナリオには以下の 2 つがあるが、両者とも未だ解決されていない問題を抱えている。

- **中質量 BH + 標準円盤**
100 ~ 1000 M_{\odot} 程度の BH の周りを標準円盤が取り巻いているモデルだが、中質量 BH はまだ見つかっていない。
- **恒星質量 BH + Super-Eddington 円盤**
恒星質量 BH が Eddington 光度を超えて輝くモデルだが、実現可能かわかっていない。

本研究では、Super-Eddington 円盤が実現可能か否かをシミュレーション計算を用いて明らかにしていきたいと考えている。

Super-Eddington 円盤は実現可能か

本来恒星の様な球対称な系では Eddington 光度を超えて光ることはできない。輻射圧が重力よりも大きくなるため、質量の降着が不可能になるからである。しかし、BH 降着円盤のような系は球対称ではないため、Eddington 光度を超える可能性がある。

実際に、先行研究では 2 次元の輻射流体 (RHD: Radiation Hydrodynamics) 計算によって、BH 近傍 500 R_g 以内で定常的に Super-Eddington 円盤を再現することに成功している (Ohsuga et al. 2005)。シミュレーションの結果、ガスの大部分はアウトフローとなって計算領域外に飛ばされていることがわかった。しかし、境界条件があるため計算領域外に出たガスの振る舞いは把握することができない。重力によってガスが系に戻ってくれば全体の構造に影響を与えて状態が変わるかもしれないため、計算領域を拡大してより遠方までのガスの振る舞いを調べ、系が Super-Eddington 状態に落ち着くのか否かを確認したい。

¹典型的には
 $L_{\text{Edd}} = 1.25 \times 10^{39} \left(\frac{M}{10M_{\odot}} \right) \text{ erg s}^{-1}$

Equations

以下では簡単に RHD での方程式を説明する。RHD 計算では、(1) 連続の式、(2) 運動方程式、(3) ガスと放射場それぞれのエネルギー方程式が用いられる。放射を扱うのは放射圧がガスのダイナミクスに影響するためである。さらにアウトフローの噴出が考えられるため、空間多次元の計算が必須となる。

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla p - \rho \frac{GM}{(r - r_s)^2} + \frac{\kappa + \sigma}{c} \mathbf{F}_{\text{rad}} + \rho \mathbf{N} \quad (2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} + \nabla \cdot (e\mathbf{v}) = -p \nabla \cdot \mathbf{v} - 4\pi\kappa B + c\kappa E + \Phi \quad (3a)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot (E\mathbf{v}) = -\nabla \cdot \mathbf{F}_{\text{rad}} + 4\pi\kappa B - c\kappa E - \nabla \cdot \mathbf{v} : \mathbf{P} \quad (3b)$$

ここで、 ρ は密度、 $\mathbf{v} = (v_r, v_\theta, v_\varphi)$ は速度ベクトル、 p はガスの圧力、 e はガスの内部エネルギー密度、 B は黒体放射強度、 E は放射のエネルギー密度、 \mathbf{P} は放射圧テンソル、 κ は吸収係数、 N は粘性による力、 Φ は粘性散逸関数である。

重力ポテンシャルエネルギーが運動エネルギーに変換されることで降着ガスは円盤となって BH 周囲を回転し、さらに粘性によって熱が生じ、ついには放射のエネルギーとなる。ガスと放射場は吸収や再放射による相互作用を伴い、ガスは放射による力を受ける。

Current status

現在までに先行研究の再現をした。計算には国立天文台の XT4 を用いた。先行研究同様に降着円盤が形成され、アウトフローが噴き出している様子を確認した。8sec 以降は質量降着率や光度が Eddington 限界を超え、かつ定常状態になっている (図 2)。

Future work

今後は本格的に計算領域を拡大してシミュレーションを行っていく。計算領域を広げると計算時間は増加する。領域だけでなくシミュレーション内での力学的な時間尺度も大きくなるため多大な計算時間を要する。したがって、計算の解像度を落として計算時間を短縮することを考えている。先行研究と比較してどれだけ解像度を落とせるかは判断基準も含めて試行錯誤しているところである。

また計算領域を最終的にどこまで拡大するかも今後決めていく。

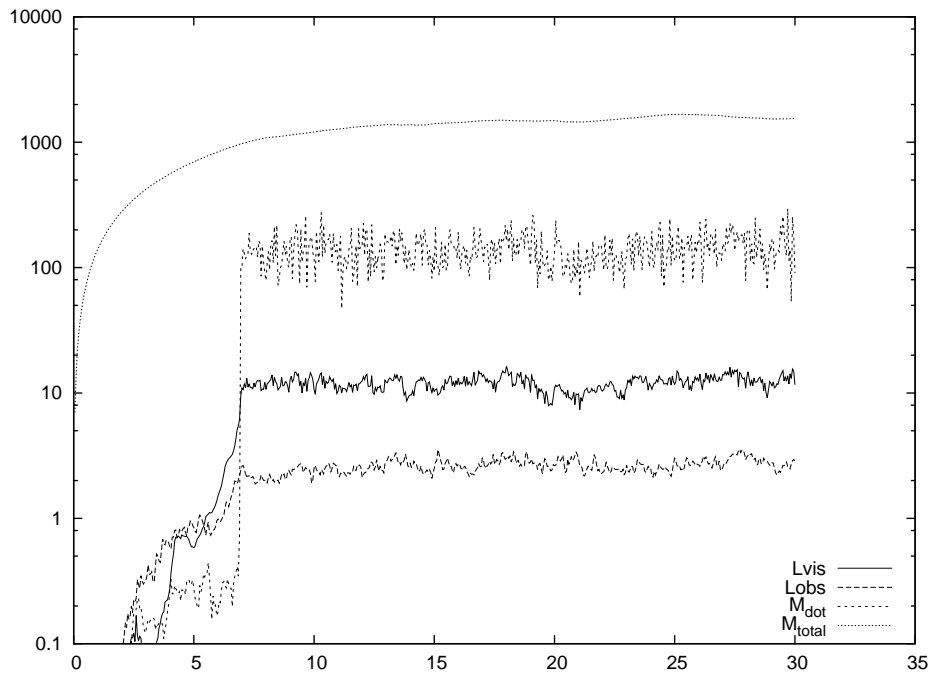


図 2: 質量降着率や光度の時間変化の様子。 M_{total} は計算量域内にある質量を意味する。8sec 以降各パラメータが一定になり定常状態にあることがわかる。

参考文献

- [1] Farrell et al, 73. 2009, Nature, 460
- [2] hsuga et al. 2005, Apj, 628, 368
- [3] hsuga & Mineshige 2007, Apj, 670, L283