

ブラックホール候補天体における熱伝導を考慮した明るいハードステート円盤のモデル

谷田部 紘希 (千葉大学大学院 理学研究科)

Abstract

ブラックホール候補天体には、高温かつ光度が低く光学的に薄いハードステート、低温かつ光度が高く光学的に厚いソフトステートという二つの状態が存在することが知られている。さらに、X 線観測から、ソフトステートとハードステートの間で相互に状態遷移が起きていることも知られており、明るいハードステートと呼ばれる、光度の高いハードステートが存在することが観測されている。この明るいハードステートの光度はエディントン光度の 10%程度であることも観測から知られている。熱平衡な定常解としてのこの明るいハードステートの存在を、理論モデルにより説明する、ということがモチベーションとなり本研究を行った。Abramowicz et al.(1995) による降着円盤の定常モデルでは、明るいハードステートに対応する熱平衡解が得られていなかった。これは、この領域では輻射冷却が粘性加熱を凌駕するためである。しかし、この定常解は、エネルギー方程式において熱伝導項を考慮せずに導かれたものである。高温の円盤コロナからの熱伝導が輻射冷却とつり合えば定常解が存在し得る。熱伝導を考慮した鉛直方向 1 次元定常解を求めた結果、ハードステートからソフトステートへ伸びる、新たな熱平衡解の存在を確認することができた。この新たな熱平衡解の光度がエディントン光度の 10%程度まで大きくなる可能性を示し、明るいハードステートを説明することができることを報告する。

1 Introduction

ブラックホールの周りにできる降着円盤には、ソフトステートとハードステートという二つの状態が存在することが一般的に知られている。ソフトステートは、光学的に厚く、幾何学的に薄い、光度の高い状態であるのに対して、ハードステートは、光学的に薄く、幾何学的に厚い、光度の低い状態であることも知られている。さらに、ブラックホールの周りの降着円盤の X 線観測から、この二つの状態の間で相互に状態遷移を行っていることが知られている。そして、光度がエディントン光度の 10%程度であるソフトステート (明るいハードステート) が存在することも知られている。

Abramowicz et al.(1995) による降着円盤の定常的な理論モデルでは、ソフトステートとハードステートの二つの解が存在することが示されている。しかし、この理論モデルでは熱伝導による効果を見逃している。本研究では、光学的に薄く幾何学的に厚い、ハードステートに対してこの熱伝導を考慮すること

により、明るいハードステートに相当する解の存在を示唆する結果を得ることができた。

2 Models

2.1 Assumption

円筒座標系 (r, ϕ, z) で定常軸対称を仮定する。動径方向は $r = 10r_s$ (r_s はシュバルツシルト半径) で固定し、鉛直方向の変化についてのみ考える。降着円盤は、光学的に薄く幾何学的に厚い、ハードステートを考える。輻射過程については、ハードステート円盤で優勢な制動放射のみを考える。さらに、 α 粘性を仮定し、粘性応力テンソルの $r\phi$ 成分がトータル圧力 p に比例すると仮定する。動径方向では、重力と遠心力が釣り合っていると仮定し、方位角方向についてガスがケプラー回転していると仮定する。さらに、Abramowicz et al.(1995) では考慮されていない熱伝導を本研究では考慮するが、鉛直方向の熱伝導のみを考慮する。

2.2 Basic Equations

質量保存方程式は

$$\dot{M} = -2\pi r v_r \Sigma \quad (1)$$

となり、 r, ϕ, z の各成分の運動方程式は、 ϕ 方向の運動についてケプラー回転を仮定すると

$$v_K = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (2)$$

$$v_r = -\frac{\alpha p}{\rho v_K} \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho \Omega_K^2 z \quad (4)$$

となる。ここで、 α 粘性を仮定し、

$$t_{r\phi} = -\alpha p \quad (5)$$

とした。 $t_{r\phi}$ は粘性応力テンソルの $r\phi$ 成分である。エネルギー保存の方程式は、

$$\rho T \frac{DS}{St} = Q_{vis} - Q_{rad} - Q_{cond} \quad (6)$$

で、 Q_{vis} は粘性による加熱、 Q_{rad} は輻射による冷却、 Q_{cond} は熱伝導による加熱である。左辺の項は、移流による冷却であり Q_{adv} と表すと、

$$Q_{adv} + Q_{rad} + Q_{cond} - Q_{vis} \quad (7)$$

となる。各項はそれぞれ、

$$Q_{adv} = -\xi \frac{p}{r} v_r \quad (8)$$

$$Q_{vis} = \frac{3}{2} \alpha p \Omega_K \quad (9)$$

$$Q_{rad} = \kappa_{ff} \rho^2 T^{1/2} \quad (10)$$

$$Q_{cond} = -\frac{\partial F}{\partial z} \quad (11)$$

と表すことができる。 ξ は、 r 方向の微分を近似的に扱うために生じる 1 のオーダーのファクターである。今、光学的に薄い降着円盤を考えているので、輻射過程の中で光学的に薄い円盤において優勢な制動放射のみを扱い、上のように Q_{rad} と書いた。 Q_{cond} で現れる F は熱伝導フラックスで、

$$F = -\kappa_0 T^{5/2} \frac{dT}{dz} \quad (12)$$

として計算される。 κ_0 は 7.0×10^{-7} 、 κ_{ff} は 6.2×10^{20} である。状態方程式は、理想気体を仮定し

$$p = \frac{R}{\mu} \rho T \quad (13)$$

とする。 μ は平均分子量で $1/2$ 、 R はガス定数で 8.31×10^7 である。

2.3 Initial Condition

前の節の基礎方程式を整理すると、

$$\frac{dF}{dz} = 3\alpha \Omega_K R \rho T - \xi \frac{4\alpha R^2 \rho T^2}{v_K r} - \kappa_{ff} \rho^2 T^{1/2} \quad (14)$$

$$\frac{dT}{dz} = -\frac{F}{\kappa_0 T^{5/2}} \quad (15)$$

$$\frac{d\rho}{dz} = -\frac{\rho \Omega_K^2 z}{2RT} + \frac{\rho F}{\kappa_0 T^{7/2}} \quad (16)$$

となる。 $z = 0$ での F と T と ρ の値を決定する。対称性から、 $z = 0$ で $F = 0$ とする。

T と ρ の二つの初期値をパラメータとして、様々な場合について 4 次のルンゲクッタ法で積分し計算する。温度は、ハードステートからハードステート ($T > 10^9$) とソフトステート ($T \sim 10^7$) の間の状態についてを調べたいので、 $10^8 \sim 10^{11}$ で変化させる。密度についても同様に考えると、調べたい状態の密度が $10^{-2} \sim 10^{-6}$ に相当するので、この範囲内で変化させる。

3 Results

このモデルの数値計算において、ブラックホールの質量は $10M_\odot$ で固定し、エディントン降着率は $\dot{M}_{Edd} = 1.4 \times 10^{19} \text{gs}^{-1}$ である。粘性パラメータの α は 0.1 で固定する。

温度と密度の初期値をパラメータとして様々な場合を計算したが、その様々な場合の一例として、 $T = 1.0 \times 10^8$ 、 $\rho = 1.0 \times 10^{-4}$ を初期値としたときの密度と温度の変化を図 1 と図 2 に示す。この密度と温度での、 Q_{adv} 、 Q_{vis} 、 Q_{rad} 、 Q_{cond} それぞれの鉛直方向についての変化の図を示す。

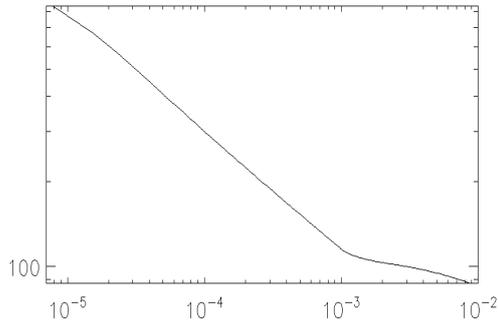


図 1: 鉛直方向の密度の変化 (縦軸: $\log \rho / 10^{-7}$ 、横軸: $\log z / z_0$)

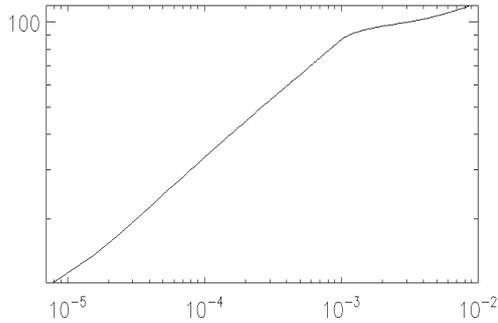


図 2: 鉛直方向の温度の変化 (縦軸: $\log T / 10^7$ 、横軸: $\log z / z_0$)

密度と温度をパラメータとして計算したすべての場合について、

$$\dot{M} = -2\pi r v_r \Sigma \quad (17)$$

$$\Sigma = \int \rho dz \quad (18)$$

より、質量降着率と表面密度を計算し、 $\Sigma - \dot{M}$ 平面にプロットする。これをプロットした図を示す。

4 Discussion

図 1、図 2、の図から、高密度領域において

$$P \sim \text{const.} \quad (19)$$

$$Q_{\text{cond}} \sim Q_{\text{rad}} \quad (20)$$

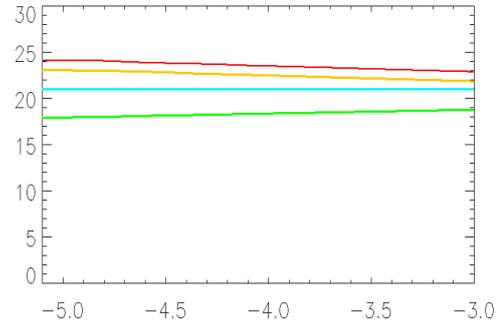


図 3: 鉛直方向についての加熱と冷却の変化 (縦軸: $\log Q$ 、横軸: $\log z / z_0$) : 赤: Q_{cond} , 橙: Q_{rad} , 青: Q_{vis} , 緑: Q_{adv}

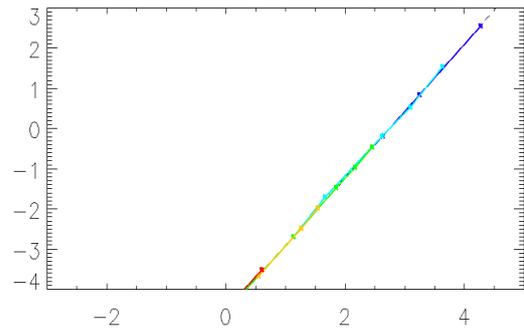


図 4: $\Sigma - \dot{M}$ (縦軸: $\log \dot{M} / \dot{M}_{\text{Edd}}$ 、横軸: $\log \Sigma$) : 直線の色は密度の違い、各点はその密度での温度の違いである。

となっていることがわかる。この二つの条件から数式を変形すると、

$$\log \frac{\dot{M}}{\dot{M}_{\text{Edd}}} = \frac{5}{3} \log \Sigma - 4.36 \quad (21)$$

という Σ と \dot{M} の間の関係式を得ることができる。この理論線を含めた $\Sigma - \dot{M}$ の図を示す。

計算結果と理論線が一致していることから、この部分に明るいハードステートが存在していることを示唆している。様々なパラメータで計算したが、この中にエディントン光度の 10% の光度に相当する部分が存在すれば、明るいハードステートの存在をこ

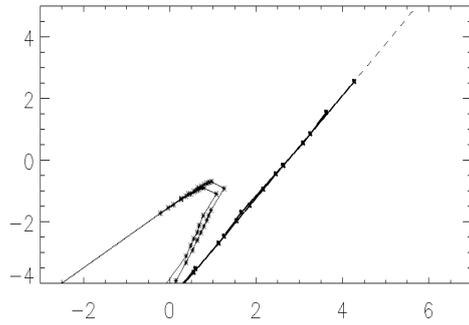


図 5: $\Sigma - \dot{M}$ (縦軸: $\log \dot{M}/\dot{M}_{Edd}$ 、横軸: $\log \Sigma$) : 直線の左側の図は Abramowicz et al.(1995) でも示されているハードステートである。点線は理論線を示している。

のモデルから示すことができたことになる。光度は

$$F_{rad} = \int \kappa_{ff} \rho^2 T^{1/2} \quad (22)$$

$$L = \int 2\pi r F_{rad} dr \quad (23)$$

として、計算することができる。光度を計算した結果、エディントン光度の 10%程度になる部分は、 $(\log \Sigma, \log \frac{\dot{M}}{\dot{M}_{Edd}}) = (3.31, 0.94)$ の部分で、初期値は $\rho_0 = 5.0 \times 10^{-3.5}$, $T_0 = 5.0 \times 10^{9.5}$ の場合であった。

5 Conclusion

以上の結果から、このモデルから観測では発見されていたが、Abramowicz et al. (1995) では示されていないが、明るいハードステートの存在を示すことができる。しかし、このモデルでは時間発展を追っていないので安定か不安定かの議論は、現段階ではできない。さらに鉛直方向一次元での計算なので、動径方向も含めた二次元の時間発展を考慮したシミュレーションを行う必要がある。

Reference

Abramowicz et al. 1995. ApJ