

ブラックホール降着流における輻射場の効果

佐塚 達哉 (大阪大学大学院 理学研究科)

Abstract

今回の発表は Barai P., Proga D. and Nagamine K. (2012) のレビューである.

本論文の研究では活動銀河核 (AGN) 周辺の光学的に薄いガスに対し, 輻射として中心からの等方的な X 線のみを考え, それによる加熱, 冷却, 輻射圧の効果を取り入れ, 中心からの X 線の光度 L_X とエディントン光度 L_{Edd} の比 L_X/L_{Edd} をパラメータとして 3DSPH シミュレーションを行った. $L_X/L_{Edd} = 0.01$ の場合には, 高温低密度のインフローと低温高密度のフィラメント状のインフローが現れた. この結果は加熱と冷却の釣り合いが不安定であることによって起きる熱的不安定 (TI) によって形成されたと考えられる. また, $L_X/L_{Edd} = 0.05$ の場合には等方な低温高密度のアウトフローと非等方な高温低密度のアウトフローが現れた. 等方なアウトフローは, 高い L_X によって加熱されたガスの圧力によって駆動され, 非等方なアウトフローは TI によって生まれた高温低密度のガスが浮力によって押し出されていると考えられる.

1 イントロダクション

AGN から $10 - 1000 \text{ pc}$ 離れた領域にあるガス片が中心からの放射を吸収することによって, 紫外線や X 線領域に幅の狭い吸収線 (NAL) を形成する. この NAL のほとんどが青方偏移していることが観測的に知られている. これにより AGN 周辺のガスがアウトフローしていることが示唆される. これは AGN の中心にある超大質量ブラックホール (SMBH) 周辺からの輻射が起因すると考えられている. このアウトフローは銀河の進化や宇宙の金属汚染などに非常に重要な影響を与えると考えられ, アウトフローのメカニズムに関して活発な研究がなされている.

本論文の研究では, SPH と呼ばれる手法を用いた 3D シミュレーションによって, このアウトフローのメカニズムを解明することを目指している.

2 モデル

2.1 基礎方程式

基礎方程式は以下の通り.

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

$$\rho \frac{D\mathbf{v}}{Dt} = -\nabla P - \rho \frac{GM_{BH}}{r} \quad (2)$$

$$\rho \frac{D}{Dt} \left(\frac{e}{\rho} \right) = -P \nabla \cdot \mathbf{v} + \rho \mathcal{L} \quad (3)$$

ここで \mathbf{v} , ρ , P はそれぞれガスの速度, 質量密度, 圧力, e は単位体積あたりのガスの内部エネルギー, $M_{BH} = 10^8 M_\odot$ は中心のブラックホールの質量である. \mathcal{L} は net cooling rate と呼ばれるもので, 各過程の加熱と冷却の和である. \mathcal{L} は温度 T と電離パラメータ

$$\xi \equiv \frac{4\pi F_X}{n} = \frac{L_X}{r^2 n} \quad (4)$$

の関数として表される. 本論文の研究では, 輻射がガスに与える加熱と冷却の効果としてコンプトン散乱, 制動放射, 光イオン化を考えた (Blondin J. M. (1994)). すなわち

$$\rho \mathcal{L}(\xi, T) = n^2 (G_{Compton} + G_X - L_b - L_l) \text{ ergs cm}^{-3} \text{ s}^{-1} \quad (5)$$

ここで G_X は光電離による項で, 以下のように表される.

$$G_X = 1.5 \times 10^{-21} \xi^{1/4} T^{1/2} (1 - T/T_X) \text{ ergs cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad (6)$$

ここで $T_X = 1.16 \times 10^8 \text{ K}$ とした. また, $G_{Compton}$ はコンプトン散乱による項で,

$$G_{Compton} = 8.9 \times 10^{-36} \xi (T_X - 4T) \text{ ergs cm}^3 \text{ s}^{-1} \quad (7)$$

である。 $L_{b,l}$ は制動放射と輝線冷却を表し、以下のよう
に書ける。

$$L_{b,l} = 3.3 \times 10^{-27} T^{1/2} + [1.7 \times 10^{-18} \exp\left(\frac{-1.3 \times 10^5}{T}\right) \xi^{-1} T^{-1/2} + 10^{-24} \delta \text{ ergs cm}^3 \text{ s}^{-1}] \quad (8)$$

第一項が制動放射、第二項が吸収による冷却を表して
いる。また光学的に薄い極限では、 $\delta = 1$ である。

2.2 境界条件

本論文の前段階として、彼らは式 (1), (2), (3) を球
対称の元で数値計算し、流れが定常化することを確認
めた。(Barai P., Proga D. and Nagamine K. (2011)).
本論文ではこの結果を初期条件として用いている。
各パラメータは以下を用いて： $\gamma = 5/3$, $r_{in} =$
 0.1 pc , $r_{out} = 200 \text{ pc}$, $\rho_{out} = 10^{-23} \text{ g cm}^{-3}$, $T_{out} =$
 10^5 K . なお、 r_{in} に達したガス粒子は中心の BH に
影響を与えることなく消滅する。

上の境界条件のもとで、中心天体からの X 線による
加熱と冷却を取り入れた流体の基礎方程式 (1), (2),
(3) を SPH 法を用いて 3D シミュレーションを行い、
ガスの振る舞いのパラメータ L_X/L_{Edd} に対する依存
性を調べた。

3 結果、考察

3.1 $L_X/L_{Edd} = 0.01$

L_X が小さい場合、中心から 30 pc の領域にあるガ
スは高密度低温のインフローと、低密度高温のインフ
ローの 2 層構造を形成し、低密度高温の流れはフィラ
メント状の構造を形成した (図 1)。この構造は中心か
らの輻射による加熱と冷却によって TI が起こり、高
温高圧のガスによって低温低圧のガスが圧縮されて
形成されたと考えられる。図 3 と式 (8) より、 T_{rad} より
高温の領域は冷却優勢、 T_{rad} より低温の領域は加
熱優勢である。例えば点 P にいた粒子が $\Xi = const$
を保って、すなわち青い破線上を右上に進むと、粒子
はさらに加熱され点 R で安定となる。逆もまた同じ
であるので、ガスは点 Q と点 R に集まり、高温低密

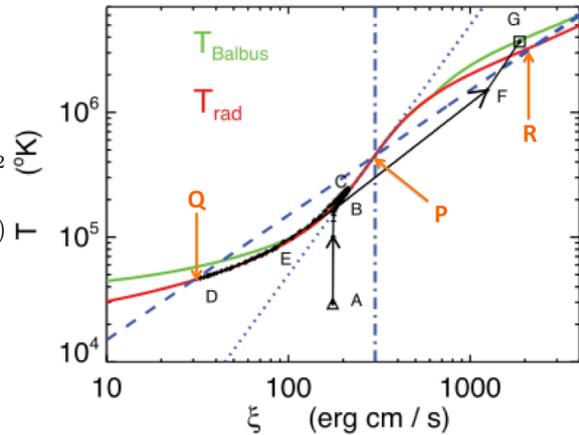


図 3: ガスの中の一つの粒子が横軸 ξ , 縦軸 T の中
でどのように動くか表した図。赤い線では加熱と冷却が釣
り合っている。青い破線は $\xi = const$, 青い一点鎖線
は $\Xi \equiv \frac{L_X}{4\pi r^2 c p} = const$, 青い点線は断熱過程をそれぞ
れ表している。黒い線は一つの粒子の軌跡を表し、A は
 $t = 1.4 \text{ Myr}$, G は $t = 1.8 \text{ Myr}$ の点である。

度な流れと低温高密度な流れの 2 層構造となる。こ
れを熱的不安定 (TI) と呼ぶ。図 3 中の点 E にいた粒
子は、数値計算によって生まれた摂動によって輻射平
衡の点からわずかに外れ、その摂動が TI によって成
長し、点 G に達したと考えられる。

3.2 $L_X/L_{Edd} = 0.05$

L_X が大きくなると、ガスは対称な高密度低温のア
ウトフローと、非対称な低密度高温のアウトフロー
が形成された。式 (4), (6), (7), (8) より、 L_X が大き
くなると加熱がより強くなるのが分かる。これによ
ってガスはより高温になり、ガス圧によってアウト
フローする。また、前述したように TI によって高温
低密度の流れも形成される。この高温低密度のガス
は浮力によってアウトフローし、ジェットのような構
造を形成する。このアウトフローによって銀河中の
ガスを宇宙空間に放出し、銀河の進化や宇宙の金属汚
染に重要な影響を及ぼすと考えられる。(Di Matteo
T., Springel V., Hernquist L. (2005))

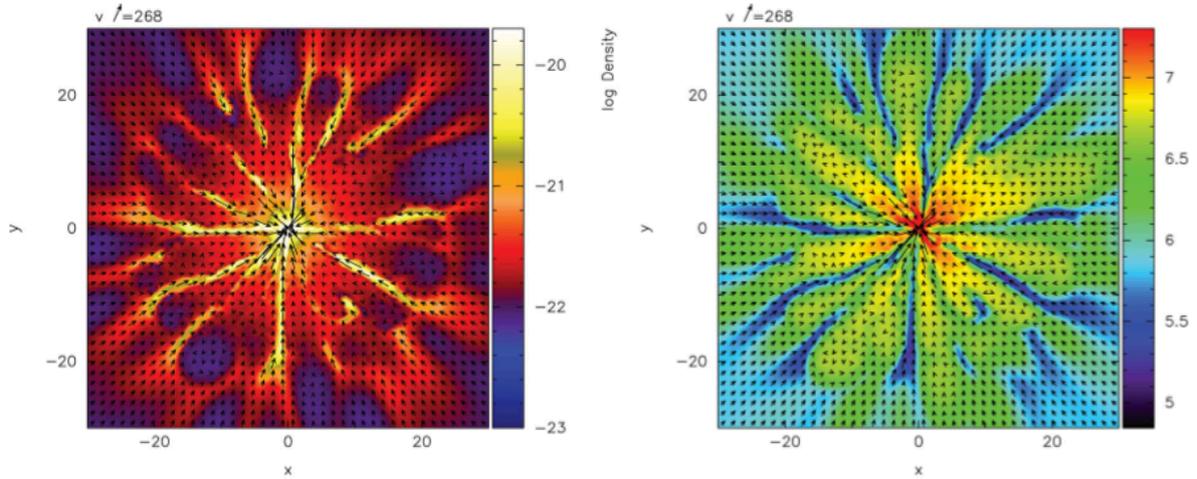


図 1: $L_X/L_{Edd} = 0.01$ における $t = 2.047$ Myr の時の, 中心から 30 pc の領域の断面図. 左図は ρ の分布を, 右図は T の分布をそれぞれ表している. 矢印の向きは速度の方向を表し, 長さは速度の大きさを表している.

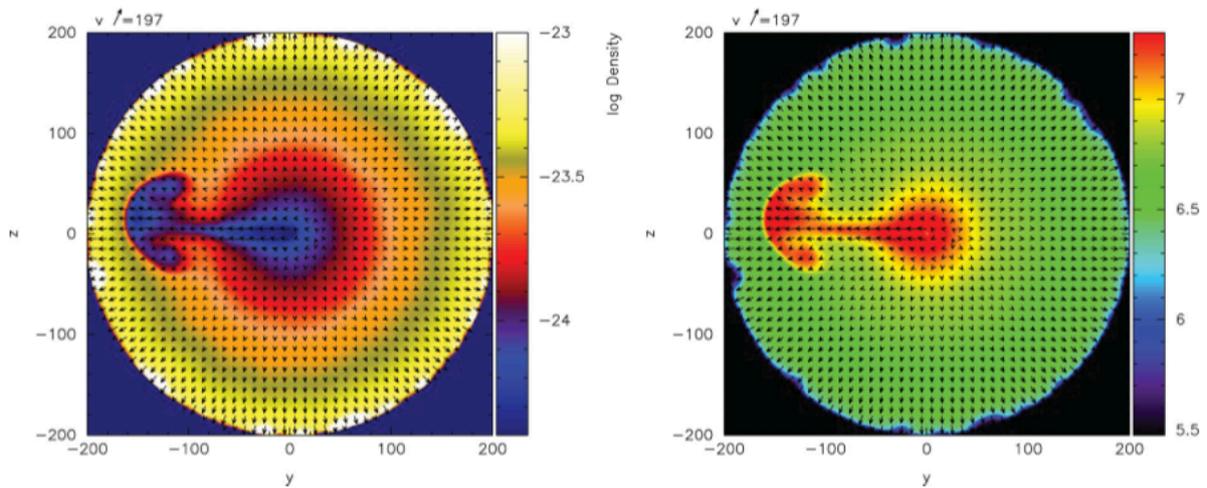


図 2: $L_X/L_{Edd} = 0.05$ における $t = 3.0$ Myr の時の, 中心から 200 pc の領域の断面図. 左図は ρ の分布を, 右図は T の分布をそれぞれ表している. 矢印の向きは速度の方向を表し, 長さは速度の大きさを表している.

4 まとめ

本論文の研究では, AGN からの輻射が周りのガスに与える影響を考えるために, 中心からの等方的な X 線を考え, 加熱と冷却の効果として X 線による光電離, 輝線冷却, コンプトン散乱, 制動放射考え, 光学的に薄いガスの振る舞いを調べた.

L_X が小さい時には, 高温低密度のインフローと低温高密度のフィラメント状のインフローが現れた. この 2 層構造は TI によって形成され, 高温高压のガス

圧によってフィラメント状の構造が生まれたと考えられる.

また L_X が大きい時には, 非対称な高温低密度のアウトフローと対称な低温高密度のアウトフローが現れた. この高温低密度のアウトフローは, TI によって生まれた高温低密度なガスが浮力によって外側へ押し出されたものであると考えられる.

5 今後の展望

今回のシミュレーションでは光学的に薄いという仮定をしているために、中心天体の輻射圧は入っていない。輻射圧は光子がガスに吸収された反作用で生まれるので、電離していない低温領域において重要になってくる。 L_X が小さい場合には、高温のインフローと低温のアウトフローが形成されることが予想される。また、ガスが回転していれば回転軸方向に指向性のあるアウトフローが生まれると考えられる。

Reference

- Barai P., Proga D. and Nagamine K., 2012, MNRAS, 424, 728
- Blondin J. M., 1994, ApJ, 435, 756
- Barai P., Proga D. and Nagamine K., 2011, MNRAS, 418, 591
- Di Matteo T., Springel V., Hernquist L., 2005, Nat, 433, 604