

## 宇宙初期における超大質量ブラックホール形成

竹尾 英俊 (京都大学 宇宙物理学教室 M1)

### Abstract

超大質量ブラックホールは、宇宙初期には、すでにすでに存在していたことが、観測により知られている。しかし、その形成過程はよくわかっていない。有力な説として、初代星が重力崩壊してできたブラックホールに、エディントン限界を超える (超臨界) 球状降着が起こり、超大質量ブラックホールが形成されたとするものが知られている。しかし、この説には難点がある。降着に伴ってブラックホール近傍から生じた放射が、降着ガスを加熱する。降着率は、温度の $-3/2$ 乗に比例するため、加熱によって、降着率が下がり、ブラックホールの成長時間が極めて長くなり、宇宙初期に超大質量ブラックホールに成長することは困難であるとされている (Wang et al. 2006)。我々は、降着流内で、流体不安定が起こり、密度ムラが発生することに着目した。密度ムラが生じると、密度の濃い部分は、内部からの放射を遮り、その外側のガスの加熱が鈍る。すると、その部分では降着率の低下が妨げられ、密度はさらに高くなる。これが繰り返されることで、降着が促進され、超臨界降着が継続する可能性がある。しかし、これが超臨界降着に結びつくか否かは、自明でなく、数値シミュレーションによって定量的に分析する必要がある。本講演では、Wang et. al (2006)などを踏まえて、研究の動機・目的を説明した上で、研究の経過について報告する。

### 1 イントロダクション

これまでの観測により、宇宙年齢 $\sim 1\text{Gyr}$ 頃には、すでに超大質量ブラックホール (Supermassive black hole, SMBH) が存在していたことがわかっている。発見された中で、最も質量の大きなブラックホールは、赤方偏移 $z \sim 6.30$ 、質量 $\sim 1.2 \times 10^{10} M_{\odot}$ とされている。宇宙初期にこうした超大質量ブラックホールが存在したという事実は、大質量の天体が急速に成長したことを意味し、その形成過程に強い制限を課すものである。形成過程については、これまでに、いくつかのモデルが提唱されているが、まだ定説は存在しない。

ここでは、ガス降着による超大質量ブラックホールの形成に着目する。

この説によると、宇宙初期には、初代星が重力崩壊して形成された $\sim 10^2 M_{\odot}$ 程度のブラックホールが多数存在したとされる (ただし、質量や、数、時期など、様々な不定性がある)、このブラックホールに、周囲のガスが降着することで、ブラックホールが成長したとされている。

ブラックホールの成長時間は、その降着率によって大きく左右される。ブラックホールの質量が増加

するにつれて、重力も増大するため、ブラックホールは指数的に成長する。ブラックホールの質量は、

$$M_{\text{BH}} = M_0 \exp\left(\frac{1-\eta}{\eta} \frac{\dot{m}t}{0.45\text{Gyr}}\right) \quad (1)$$

で与えられる (Shapiro S. L. 2005)。 $M_{\text{BH}}$  はブラックホールの質量、 $t$  は降着開始からの時間、 $\eta$  は放射効率、 $\dot{m}$  はエディントン限界で規格化した降着率である。エディントン限界とは、天体への球対称降着において、重力と、降着に伴う放射力とが釣り合うときの降着率であり、球対称降着に上限を与えるものである。その降着率は、

$$\dot{M}_{\text{Edd}} = \frac{4\pi G M_{\text{BH}} m_{\text{H}}}{\sigma_{\text{T}} c \eta} \quad (2)$$

で与えられる。 $(\sigma_{\text{T}}$  はトムソン散乱の断面積、 $m_{\text{H}}$  は水素原子の質量、 $G$  は万有引力定数である。) ただし、球対称を仮定しなければ、この上限を超えることができる。そのような降着を超臨界降着という。

これより、ずっとエディントン限界で降着し続けるとすれば、ぎりぎり $\sim 1\text{Gyr}$ で $M_{\text{BH}} \sim 10^{10} M_{\odot}$ まで成長できることがわかる (ただし、 $\eta = 0.1$ とした)。

以下では、赤方偏移 $z \sim 20 - 24$ 程度の時期、ダークハロー中心に位置するブラックホール (質量

～  $10^2 M_{\odot}$ ) にガスが Bondi 降着する場合を考える (Wang et al. 2006)。Bondi 降着とは、球対称で、定常なガス降着のことであり、その降着率は、

$$\dot{M} \sim \frac{4\pi G^2 M_{\text{BH}}^2 \rho}{c_s^3} \quad (3)$$

と書かれることが知られている。

ダークハロー中に存在するガスは、重力により収縮していくが、角運動量を持っているために、回転で支えられ、円盤を形成するとされている。この円盤は十分厚く、中心に存在するブラックホールの近傍では、ガスの密度や温度はほぼ一定であるとみなせるとする。ここでは、円盤中心でのガス数密度を  $n_0 \approx 6 \times 10^4 \text{cm}^{-3}$ 、温度を  $T_0 \approx 10^4 \text{K}$  程度とする。この様なガスが、ブラックホールへ Bondi 降着したとすると、

$$\frac{\dot{M}}{\dot{M}_{\text{Edd}}} \sim 1 \quad (4)$$

となる。

これより、放射がなければ、超臨界降着が実現することがわかる。

しかし現実には、降着ガスは角運動量をもっているため、ブラックホール近傍に円盤を形成する。粘性の効果で円盤は放射を出す。その光度は、今の場合、

$$L \sim 10^{39} \text{ergs}^{-1} \quad (5)$$

となるとされる。(Wang et al.(2006) の議論に基づく。ここでは、円盤は slim disk を仮定しており、光度は slim disk の自己相似解 (Wang & Zhou 1999) から求めたものである。なお、降着率は式 4 であるとしている。)

円盤から放出された光子は、降着ガスをコンプトン散乱によって加熱し、ガス温度を最大  $\sim 10^6 M_{\odot}$  まで上昇させる。

Bondi 降着率は、温度の  $-3/2$  乗に比例するため、加熱によって降着率は低下し、

$$\frac{\dot{M}}{\dot{M}_{\text{Edd}}} \sim 10^{-5} \quad (6)$$

にまで低下する。

これはエディントン限界を大きく下回る数値であり、よって、 $\sim 1 \text{Gyr}$  では、 $M_{\text{BH}} \sim 10^{10} M_{\odot}$  の超大質量ブラックホールを形成することは困難であると言える。

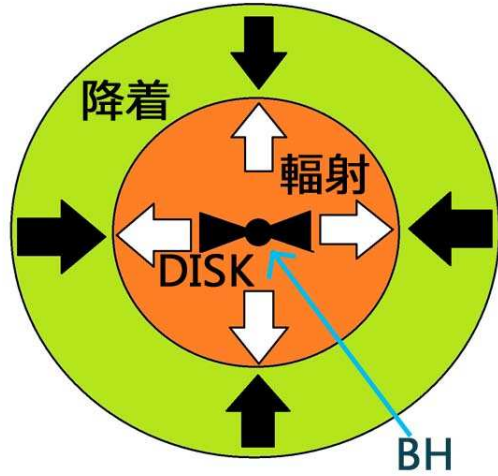


図 1: 降着の模式図

## 2 研究

### 2.1 基本的なアイデア

このことから、ブラックホールを急成長させるには、放射による加熱を回避することが必要であるとわかる。

ここで、我々は流体不安定による、密度ムラの発生に着目した。降着流中で密度ムラが生じると、密度の濃い部分は光学的に厚いため、中心からの放射が遮られ、ガスの加熱が抑えられる。するとその部分では降着率が下がらず、さらに密度が上昇する。このプロセスが繰り返されることで、密度ムラが成長していく。すると、降着流は球対称でなくなり、放射が優勢な部分と、降着が優勢な部分とに分かれ、放射の回避が実現することが期待される。この結果、降着率は、式 6 よりも大きな値になる可能性がある。ただし、実際に超臨界降着が実現するか否かは自明でなく、放射流体シミュレーションによって、定量的な分析を行う必要がある。

なお、このような現象が起こるためには、流体不安定がまず起こらなければならない。

今回、我々は、Rayleigh-Taylor (RT) 不安定に着目した。RT 不安定とは、密度の異なる 2 層流体の境界で起こる不安定である。密度の異なる 2 層流体に対して、密度の高い方から低い方へ有効重力場がかか

る場合、密度の高い層が、低い層へ潜り込むように不安定が成長することが知られている。今考えているブラックホールへの降着流では、高密度な内部から、低密度な外部に向けて輻射力が働いており、輻射 RT 不安定が起こる可能性がある。

輻射優勢な状況でも、流体不安定が起こることは、(Takeuchi et al. 2014) が、平行平板な系において、輻射流体計算を用いて確認している。

## 2.2 研究計画

ここでは、研究の現状を報告する。

我々の研究について、当面の目標は、球状な降着流中でも輻射 RT 不安定の発生を確認することである。現在、シミュレーションコードを作成する途中にある。便宜上、研究をいくつかのステップに分けている。おおまかには、

1. 加熱・冷却なしの 1 次元球対称 (Bondi) 降着を再現する
2. コンプトン加熱を考慮する
3. 多次元の輻射流体シミュレーションを計算する

という流れであり、それぞれの段階で、テスト計算を行う。これらを踏まえたうえで、超臨界降着出現の可能性を評価することが、長期的な目標である。

## 3 研究の現状

### 3.1 Bondi 降着

#### 3.1.1 手法

テスト計算として、Bondi 降着を 1 次元流体計算で再現することを考える。

ここでは、加熱冷却はないものとする。

初期条件としては、とりあえず、Wang et al.(2006) にしたがって、 $z \sim 20 - 24$  のダークハロー中で、質量  $M_{\text{BH}} \sim 10^3 M_{\odot}$  のブラックホールに、一様なガス (数密度  $n \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ 、温度  $T \sim 10^4 \text{ K}$ 、遠方で静止しているとする) が球対称降着する場合を考える。

ガスの自己重力は無視し、ニュートン重力を仮定した (ブラックホールの重力だけ考慮した)。

また、初期にガスはポリトロップ関係式を満たしているとした ( $P \propto \rho^\gamma$ ,  $\gamma = 4/3$ )。

Bondi 降着流は、Bondi 半径 ( $R_B = GM_{\text{BH}}/2c_{\text{sc}}$ ,  $c_{\text{sc}}$  は Bondi 半径での音速) で遷音速 (降着速度がガスの音速を追い越すこと) になることが知られている。

計算結果を確認する上で、降着が定常になること、降着率の値、遷音速になっているか否かの 3 点に着目した。

#### 3.1.2 結果・考察

図 2 は、内側境界での降着率の変化を表している。降着率が定常に向かっていくことがわかる。また、

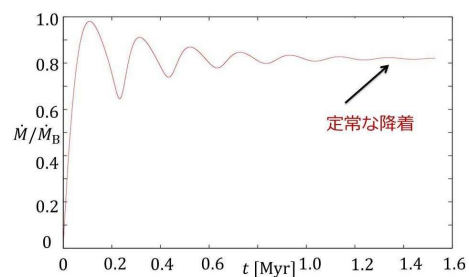


図 2: 降着率の時間変化

図 3 は、終状態 (降着開始から  $\approx 1.53 \times 10^6 \text{ yr}$ ) での降着率の空間分布である。半径  $r$  によらず一定である。また、理論値と比較すると、 $\dot{M} \approx 0.82 \dot{M}_{\text{B}}^{\text{theory}}$  であった。図 4 は、終状態における降着速度と音速と

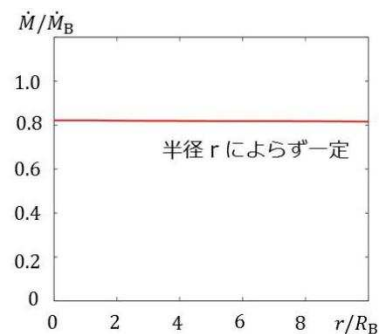


図 3: 終状態の降着率

の関係を表している。遷音速になっていることがわ

かる。Bondi 半径とそこでの音速は、理論値と比較して、 $R_B \approx 1.2R_B^{\text{theory}}$ 、 $c_{sc} \approx 1.3c_{sc}^{\text{theory}}$  であった。

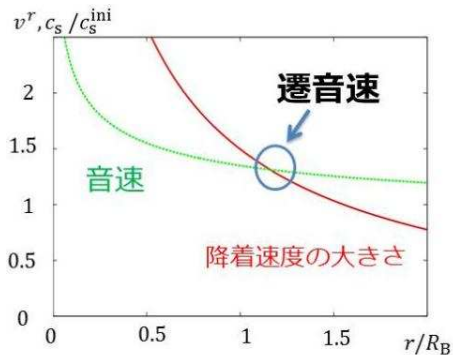


図 4: 終状態の降着速度・音速

これらの誤差は、外側境界の半径が有限であるために生じたものである。

## 3.2 コンプトン加熱

### 3.2.1 手法

初期状態を加熱・冷却のない Bondi 降着流とし、ある時刻から、コンプトン加熱を入れ、降着率がどう変化するかを確認した。簡単のため、放射の光度は  $L = 10^{40} \text{ergs}^{-1}$  のままであるとした。

また、ガスは光学的に十分薄いとし、放射のエネルギー密度を、

$$E_{\text{rad}} = \frac{L}{4\pi r^2 c} \quad (7)$$

とした。簡単のため、ガスによる放射エネルギーの吸収・放射の影響は無視している。光子一つの平均エネルギーは 1keV とし、さらに簡単のため、途中で、ガスに吸収されたり、散乱でエネルギーが変化する効果は考慮していない。

### 3.2.2 結果

ここでは、結果の一部を掲載する。

降着率の変化は、図 5 のとおりである (内向きに降着する場合を正とした)。半径の小さいところから降着率が低下した。これは、内側のほうがより加熱が効きやすく、外側より速くガス圧、ガス温度が上昇

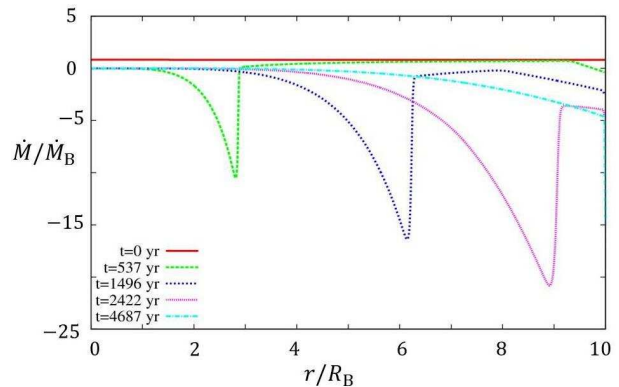


図 5: コンプトン加熱に伴う降着率の変化

するためである。さらに、ガス圧の上昇により、内側から外側へガスが掃き出されていくことも確認された。

## 4 当面の課題

テスト計算として、Bondi 降着を 1 次元で再現し、コンプトン加熱を加えて、降着率の変化を見た。直近の課題は、加熱を入れたシミュレーションの結果を更に考察することである。また、次のステップとして、多次元で同様のシミュレーションを行う予定である。

## Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号: YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします。

## Reference

- Wang, J.-M., Chen, Y.-M., & Hu, C. 2006, ApJ, 637, L85-L88
- Wang, J.-M., & Zhou, Y.-Y. 1999, ApJ, 51, 420
- Takeuchi, S., Ohsuga, K., & Mineshige, S. 2014, PASJ, 66, 48
- Shapiro, S. L. 2005, ApJ, 620, 59-68
- Wu, X.-B. et al. 2015, Nature, 518, 512515