

## 初期宇宙における超大質量ブラックホールの種形成

鄭 昇明 (東京大学大学院 宇宙理論研究室)

### Abstract

近年遠方の宇宙が次第に観測されるようになり、非常に初期の宇宙 ( $\sim 8000$  万年) においてすでに非常に大質量 ( $\sim 10^9 M_\odot$ ) の超大質量ブラックホール (SMBH) が存在する事が分かった。このブラックホールの形成シナリオの1つとして「Direct Collapse シナリオ」が提唱されている。「Direct Collapse シナリオ」とは初期宇宙における  $10^5 M_\odot$  の質量の大質量星形成を経て、SMBH の種が形成されるというシナリオである。本研究では宇宙論的 N 体シミュレーションと流体シミュレーションを組み合わせる事で、このような Direct Collapse が起こりうるかどうかを調べる。

### 1 Introduction

近年遠方の宇宙が次第に観測されるようになり、非常に初期の宇宙 ( $\sim 8000$  万年) においてすでに非常に大質量 ( $\sim 10^9 M_\odot$ ) の SMBH が存在する事が分かった(?)。このような短い時間の間に大質量の天体を形成する物理過程は観測的にも理論的にも知られていない。

一方、近年になって初期宇宙において超大質量星 ( $10^4 M_\odot \sim 10^6 M_\odot$ ) を生成する物理過程が存在する事が明らかになった(?)。このような重たい星が寿命を終えてどのような物理過程を経るかはまだ分かっていないが、直接ブラックホールに崩壊する事が期待されている。これが事実であれば、 $10^4 M_\odot \sim 10^6 M_\odot$  の質量を持ったブラックホールがいきなり形成される事になり、SMBH 形成に至るのに必要な条件がいくらか緩和される事となる。つまりより重たいブラックホールの種から出発する事が出来るので、通常の Pop III star の残骸から出発したときよりも時間的に余裕を持って観測されたような SMBH を作る事が出来る。このように、初期宇宙における始原的ガス雲が超大質量星を経て  $10^4 M_\odot \sim 10^6 M_\odot$  のブラックホールを形成する過程の事を Direct Collapse(DC) と呼ぶ。

Direct Collapse が起きるような状況はいくつか考えられる。その中でも紫外線輻射場による Direct Collapse は最もよく研究されている。?は水素分子冷却が非効率になるのに必要な臨界的な輻射場の強さを計算した。?らはこのような強い輻射場の下では大

質量星が形成される事を示した。このような Direct Collapse に至るようなガス雲は宇宙でどの程度実現されているのであろうか??らはモンテカルロ計算により、DC を起こすのは始原的ガス雲のうち  $10^{-8}$  程度と非常に稀にしか存在しないと結論した。その後、?らのシミュレーションにより、Direct Collapse のための条件は幾分か緩和され  $10^{-4}$  程度の割合の始原的ガス雲が DC を起こしうるという事が分かった。しかし構造形成の進んでいない初期宇宙においてはハローの数自体が少ないため、DC を起こすガス雲は  $\sim (5\text{Mpc})^3$  あたりに 1 つ程度しか存在しないと考えられる。

本研究においては、Gadget3 と呼ばれる宇宙論的流体シミュレーションコードを用いて (1) 宇宙論的なスケールで DC を起こすと考えられるハローを特定し、(2) 実際にそのハローにおけるガス雲が DC で予想されるような温度・密度進化を辿るのかを調べる。これにより、宇宙論的な状況下で本当に Direct Collapse は起こるのか、また DC を起こした場合そのハローの持つ統計的な性質を調べ、最終的には超大質量星を形成してブラックホールに崩壊する過程まで追う事を目標とする。

本研究を通して、宇宙論パラメータは PLANCK に基づいて、 $\Omega_m = 0.3086$ 、 $\Omega_\Lambda = 0.6914$ 、 $\Omega_b = 0.048$ 、 $\sigma_8 = 0.8288$ 、無次元化されたハッブル定数  $h = 0.6777$  の値を用いる。

## 2 Simulation

本研究では Tree-PM 法を用いた宇宙論的 N 体計算コード Gadget2 と始原的化学反应ネットワークを実装した宇宙論的 N 体計算+流体計算コードの Gadget3 を用いる。本研究では一貫して、 $20h^{-1}\text{Mpc}$  のシミュレーションボックスを用いる。

### 2.1 N-body simulation

本研究ではまず、 $256^3$  の解像度を持った計算を行う。初期条件は  $z=99$  において、MUSIC を用いて生成する。 $z=10$  までシミュレーションを走らせ、FOF アルゴリズムを用いてハローを特定する。次に最も重いハロー周辺の領域  $(1.2h^{-1}\text{Mpc})^3$  (以下、ZoomIn 領域と呼ぶ) を実質的に  $8192^3$  の解像度を持つような初期条件を生成し、部分的な高解像度の ZoomIn 計算を行う。この計算では、ZoomIn 領域内の粒子質量は  $1.2 \times 10^3 M_\odot$  であり、PopIII 形成の起こると考えられている  $10^5 M_\odot$  のミニハローを 100 粒子で分解することができる。この ZoomIn 計算を再び  $z=10$  まで行う。

#### 2.1.1 Construction of merger tree

ZoomIn 計算に際して、10Myr 間隔でスナップショットを書き出し各スナップショットにおけるハロー分布を特定する。ここで unbound な構造をハローと見做さないために、SUBFIND を用いて各ハローにおける束縛された構造体である sub ハローを特定する。この sub ハローは 100 粒子以上で構成されている。以下では、この sub ハローの事をハローと呼ぶ事にする。スナップショット間のハローに含まれる粒子の分布を追跡する事で、ハローの merger tree を構築する。詳細は、Springel et al. (2005) に従った。Fig.(1) は構築した merger tree から得られた  $10^8 \sim 10^9 M_\odot$  のハローのプロジェニターの質量分布関数である。

#### 2.1.2 formation of PopIII star and metal enrichment

PopIII star 形成時の主な冷却剤は  $\text{H}_2$  分子である。この  $\text{H}_2$  分子による冷却はガス雲の温度が 2000K を

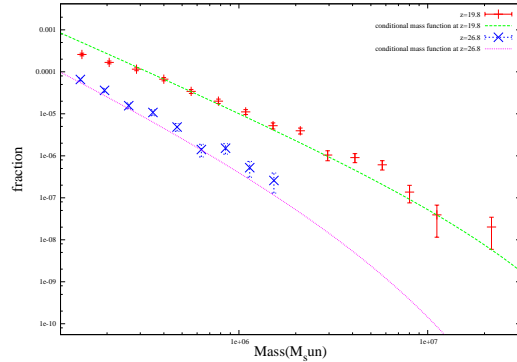


図 1: 構築した merger tree から得られたプロジェニターの質量分布関数と extended Press-Schechter から得られる質量分布関数を比較した図。

超えると有効になる。よって、ハローのピリアル温度が 2000K を超えるとそのハローでは  $\text{H}_2$  冷却によってガス雲の収縮が引き起こされ、PopIII star 形成に至ると考えられる。この星が寿命を迎えた後、超新星爆発によりそのハロー全体は重元素で汚染される。ここでは、未だ過去に PopIII star を形成しておらず、従って重元素汚染を免れているハローを「始原的」ハローと呼ぶ。形成される PopIII star の質量は典型的な値である  $100 M_\odot$  を用いる。

#### 2.1.3 formation and evolution of PopII galaxy

PopIII star 形成を経て重元素汚染されたハローにおいては、Salpeter IMF に従った星形成が起こると考えられる。一方で、ハローの質量が十分に重くないとできた星の爆発等によるエネルギーにより、ハロー内部のガスはハロー外部へ掃き出されてしまう。ハローが  $M_{\text{SF}} = 10^8 M_\odot$  程度まで成長すると、ガスをとどめられる程ポテンシャルが深くなり、断続的な星形成が可能になる。以下では、ハローの質量が  $M_{\text{SF}}$  を超えた時点でハローにおける PopII star 形成が始まると考える。

ハローの merger tree を用いて、星形成を準解析的にモデル化する。ここではハローにおけるバリオンガスが、ハローのピリアル温度程度の”hot gas”、星形成を行う”cold gas”の 2 成分からなるモデルを用いる。

1. accretion of the hot gas ハローが  $\Delta M$  の質量を得た時、 $f_b \Delta M$  の hot gas がハローに流入する と考える。ここで  $f_b = \Omega_b / \Omega_0 \sim 0.16$  である。
2. cooling process  
”hot gas”はハローの dynamical time( $t_{dyn}$ ) 程度のタイムスケールで”cold gas”に落ち着く。
3. star formation process  
以下のような Kennicutt-type star formation law を仮定する。

$$\dot{M}_{\text{star}} = \frac{f_{\text{SFE}}}{0.1 t_{\text{dyn}}} M_{\text{cold}} \quad (1)$$

$f_{\text{SFE}}$  は星形成効率であり、ハロー全体のバリオンに対する星形成に寄与するバリオンの割合である。

4. SN feedback process

形成された星の一部は超新星爆発を起こしてハロー内部の cold gas をハローの外に吹き飛ばすと考えられる。このとき、 $\dot{M}_{\text{out}} = \epsilon \omega_{\text{SN}} \dot{M}_{\text{star}} / V_c^2$  と評価できる。ここで、 $\epsilon$  は爆発エネルギーが cold gas を暖めるのに使ったエネルギーの割合で、 $\omega_{\text{SN}}$  は単位星生成質量あたりの爆発エネルギーで Salpeter IMF のもとでは  $\omega_{\text{SN}} \sim 10^{49} \text{erg}/M_{\odot}$  である。よって、

$$\dot{M}_{\text{out}} = 1.6 \left( \frac{\epsilon}{0.03} \right) \left( \frac{V_c}{110 \text{km/s}} \right)^{-2} \dot{M}_{\text{star}} = \gamma \dot{M}_{\text{star}} \quad (2)$$

と表せる。

以上を合わせると、

$$\dot{M}_{\text{hot}} = f_b \dot{M}_{\text{acc}} - \frac{M_{\text{hot}}}{t_{\text{dyn}}} \quad (3)$$

$$\dot{M}_{\text{cold}} = \frac{M_{\text{hot}}}{t_{\text{dyn}}} - (1 + \gamma) \frac{f_{\text{SFE}}}{0.1 t_{\text{dyn}}} M_{\text{cold}} \quad (4)$$

$$\dot{M}_{\text{star}} = \frac{f_{\text{SFE}}}{0.1 t_{\text{dyn}}} M_{\text{cold}} \quad (5)$$

となる。この連立微分方程式を  $\Delta t = 0.1 \text{Myr}$  刻みで陽的オイラー法を用いて解く。最も重たいハロー周辺の  $(5.5 h^{-1} \text{Mpc})^3$  の領域における星形成率密度をプロットしたのが figure.2 である。

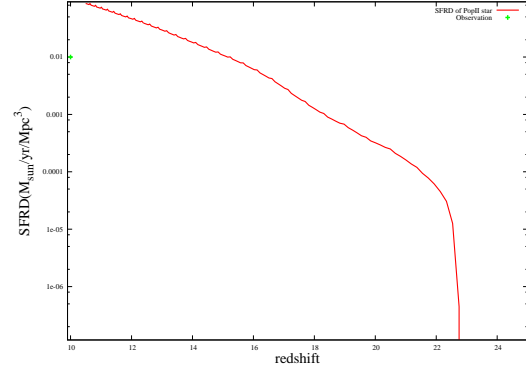


図 2: merger tree から準解析的に星形成をモデル化した時の、各赤方偏移における星形成率密度。

#### 2.1.4 Lyman-Werner radiation field

形成された星から放出される、11.02 ~ 13.6eV のエネルギーを持つ光子は  $\text{H}_2$  を解離する。このような光子を、Lyman-Werner(LW) 光子と呼ぶ。シミュレーションボックス内における LW 輻射場の強さを次のようにして求める。

$$J_{\text{LW}} = \sum_i \frac{f_{\text{esc}}}{\pi \Delta \nu_{\text{LW}}} \frac{\dot{E}_i}{4\pi r^2} \quad (6)$$

$i$  は全ての star forming galaxy を走る。ここで、

$$\dot{E} = \int \frac{dm_{\text{star}}}{dt}(t') \dot{E}_{\text{st99}}(t-t') dt' \quad (7)$$

と表せる。 $\dot{E}_{\text{st99}}(t-t')$  は瞬間的に単位質量の星が生成したときの、LW 輻射場の時間変化を表している。(2) (STARBURST99 を用いて計算)

#### 2.1.5 Direct Collapse black hole

Direct Collapse は以下の 3 つの条件で起こると考えられている。

- 始原的で、
- 非常に強い輻射を受けている ( $J_{\text{LW}} > J_{21,\text{crit}}$ )、
- atomic cooling halo ( $T_{\text{vir}} > 8000\text{K}$ )

merger tree を用いて、金属汚染の進行、輻射強度の分布をモデル化し上記の 3 つの条件を満たすようなハローを探索する。このようなハローを、Direct Collapse 候補ハロー (DC 候補ハロー) と呼ぶ。

### 3 Results

以上の設定のもと、シミュレーションボックス内において DC 候補ハローを探索する。Fig.3 は  $z=12$  における始原的ハローでの輻射場の強度分布をプロットしたものである。図より、非常に強い輻射場を受けている始原的ハローが存在する事が分かる。このようなハローでは水素分子の解離により、PopIII star の形成が抑制される。よって、このような強い輻射場にさらされたハロー同士が激しく合体を繰り返して成長すると、DC 候補ハローになると考えられる。

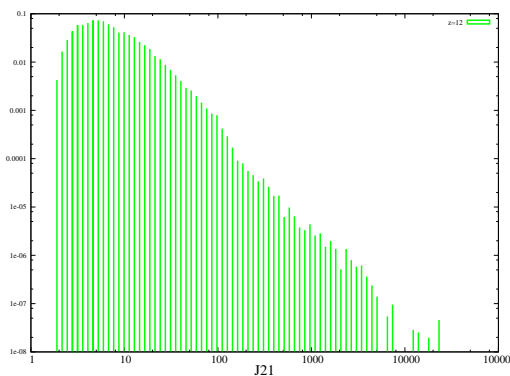


図 3:  $z=12$  における始原的ハローにおける、輻射場の強度分布

#### 3.1 DC 候補ハロー

計算の結果、シミュレーションボックス内に 3 つの DC 候補ハローが見つかった。現在これらのハローで実際に超大質量星が形成されるかどうかを流体計算を行って検証中である。

### 4 Discussion

以上で  $20h^{-1}\text{Mpc}$  の計算領域に 3 つの DC 候補ハローが見つかった。一方現在までに観測されている、 $z > 6$  における SMBH の数密度は  $1 \sim 10\text{Gpc}^{-3}$  である。よって DC 候補ハローの数は観測されている SMBH の数より遥かに多く存在している。事実、DC 候補ハローにおいて必ずしも大質量星形成は起こらないと考えられる。これには以下のような原因が考えられる。

#### 4.1 the star formation time scale

前章の準解析的なモデル計算では、DC 候補ハローの条件が満たされると一瞬にして超大質量星が形成されると考えた。しかし、実際には星形成のタイムスケールを考える必要がある。Fig.4 は輻射場の存在下でのガス雲のコア領域の密度の時間発展をプロットした図である。ガス雲の崩壊が進行するためには、10Myr 程度の時間が必要である。この間に重元素汚染されたハローと合体してしまうと、DC 候補ハローであるための条件を満たせなくなってしまう。

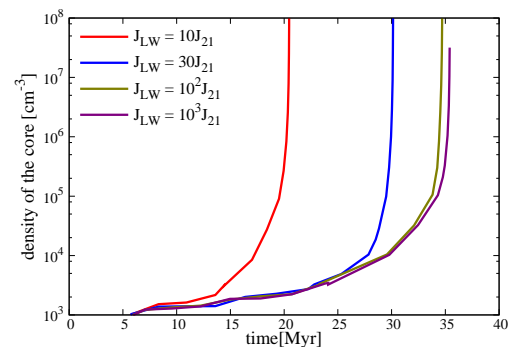


図 4: 異なる輻射強度のもとでの、ガス雲の密度進化をプロットしたもの。輻射強度が強くなるにつれて、ガス雲の崩壊が遅れている事が分かる。

### 5 Conclusion

本研究では宇宙論的 N 体シミュレーションと流体シミュレーションを組み合わせる事で、このような Direct Collapse が起こりうるかどうかを調べた。結果として、宇宙論的 N 体シミュレーションから 3 つの DC 候補ハローが見つかった。目下このハローが実際に DC を起こすか調べているところである。