

初期宇宙における巨大ブラックホール形成

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 (~ 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 (~ 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 (Mortlock et al., 2011)。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 (Bromm & Loeb, 2003)。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。Omukai(2001) 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。Bromm & Loeb (2003) では

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だろうか? Dijkstra et al. (2008) らはモンテカルロ計算により、DC を起こすのは始原的なガス雲のうち 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、Shang et al. (2010) 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 を起こす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 粒子で分解する事ができる。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。

2.1.2 formation of PopIII star and metal enrichment

PopIII star 形成時の主な冷却剤は H_2 分子である。この H_2 分子による冷却はガス雲の温度が 2000K を超えると有効になる。よって、ハローのビリアル温度

が 2000K を超えるとそのハローでは 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 $100M_{\odot}$ 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 $M_{\text{SF}} = 10^7 M_{\odot}$ 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_{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、ハローのビリアル温度程度の”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。

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 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。

$$J_{LW} = \sum_i \frac{f_{\text{esc}}}{\pi \Delta \nu_{LW}} \frac{\dot{E}_i}{4\pi r^2} \quad (1)$$

i は全ての star forming galaxy を走る。ここで、

$$\dot{E} = \int \frac{dm_{\text{star}}}{dt}(t') \dot{E}_{\text{st99}}(t-t') dt' \quad (2)$$

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。(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

3.1 LW 輻射場の時間進化

図 1 は、LW 輻射場の時間進化 (上段) と各赤方偏移での強度分布を示した図 (中段・下段) である。図より PopIII による輻射場は時間とともに減衰するのに対し、PopII 由来の輻射は低赤方偏移で大きくなっている事が分かる。これは時間とともに金属汚染が進み PopIII の形成率が下がるのに対し、PopII の形成は構造形成が進むことでより活発になるためである。また、中段・下段の図より PopIII 由来の輻射が臨界値を超える事が無いのに対して、PopII による輻射場は臨界値を超えるような大きな値が実現していることがわかる。

3.2 DC ハローの性質

計算の結果、シミュレーションボックス内に 36 個の DC 候補ハローが見つかった。図 2 (上段) は DC ハロー形成時の赤方偏移分布を表した図である。これより DC ハローは $z = 15$ を中心に分布している事が分かる。これは $z > 15$ では始原的ハローの形成率が大きいため時間とともに DC がおきやすくなる傾向にあるのに対し、 $z = 15$ を過ぎると始原的ハロー

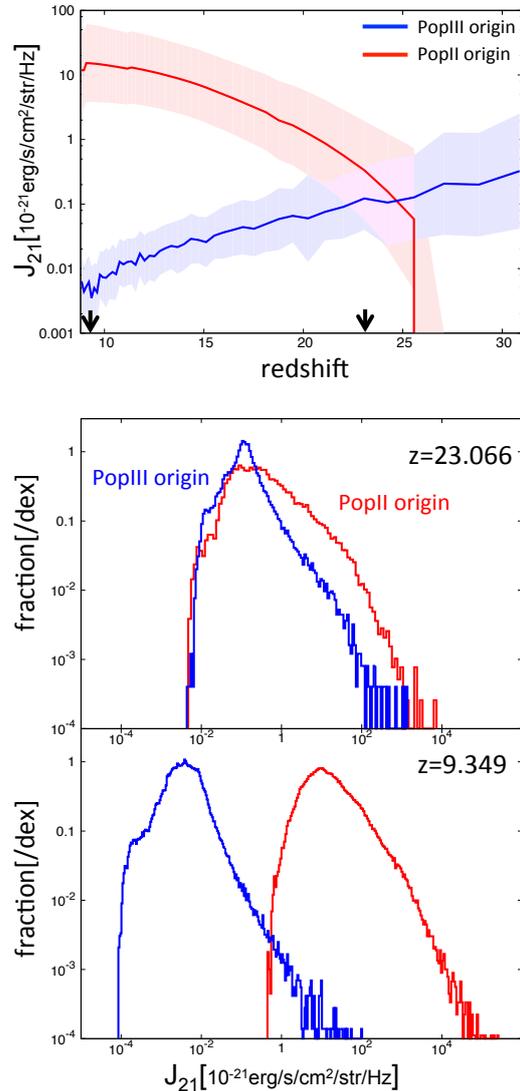


図 1: 上段: 始原的ハローにおける LW 輻射場の時間進化。中段・下段: $z=23.066$ と $z=9.349$ における LW 輻射場の強度分布を表した図。

の形成率が減少することで DC が起こりにくくなるためである。

3.3 DC 候補ハローにおけるガス雲の崩壊

今回は見つかった 36 個の DC ハローのうち 20 個のハローに対して流体計算を行い、実際に超大質量星が形成されるかを調べた。結果として、20 個中 1 つのハローについては DC が起こり残りの 19 個につ

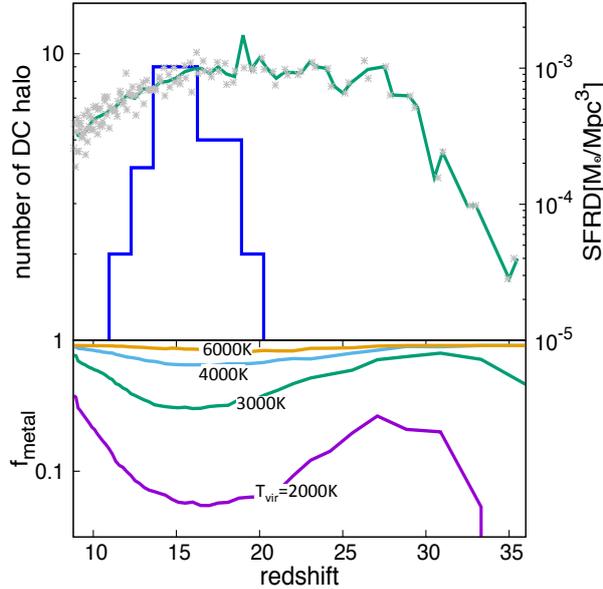


図 2: 上段: PopIII の星形成率 (緑) と DC ハロー形成時の赤方偏移分布 (青) を表した図。下段;

いてはハロー中のガス雲は崩壊せず星形成は起こらなかった。DC が起こらなかった原因としては、光源ハローからの強い潮汐力、光源ハロー周辺のガスによる ram pressure stripping などの効果によりガス雲の密度上昇が妨げられた事が考えられる。

4 Discussion

以上で $20h^{-1}\text{Mpc}$ の計算領域に 36 個の 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 光源ハローからの潮汐力

DC ハローは光源ハローからの重力場によって、潮汐力を受ける。この潮汐力が及ぶ範囲、 r_{tid} は以下の

ように評価できる。

$$r_{\text{tid}} = \sqrt[3]{\frac{m_{\text{halo}}}{3M_{\text{source}}}} R_{\text{dist}} \quad (3)$$

ここで R_{dist} は光源からの距離、 M_{source} は光源ハローの質量、 m_{halo} は DC ハローの質量である。N 体計算の結果をもとに潮汐半径の時間進化を見積もったところ、ほとんどのハローにおいて DC から 2000 万年後には潮汐半径がビリアル半径を下回る事が分かった。これはビリアル半径内の物質が潮汐力によってはぎ取られてしまう事を意味する。

以上の潮汐半径の見積もりは近似的なものでより詳細には、DC ハローと光源ハローのプロファイルや球対称からのずれが重要となってくる。このため、実際に潮汐力によりガス雲の崩壊が阻害されるか否かを結論付けるには 3 次元的な計算が必要である。

4.2 光源ハロー周辺のガスの ram pressure による破壊

DC ハローは時間とともに光源ハローの重力により引きつけられるが、この際 IGM からの動圧 (ram pressure) を受ける。動圧によりガス雲が破壊されるかどうかは動圧が重力の兼ね合いにより決まる。

$$\rho_{\text{IGM}} V^2 > \frac{GM(< R)}{R} \rho_{\text{halo}} \quad (4)$$

高赤方偏移では宇宙の平均密度が高いため、ram pressure stripping がより効きやすいと考えられる。

5 Conclusion

本研究では宇宙論的初期条件から始まって Direct Collapse が実現しうるかを調べた。結果として $20\text{Mpc}/h$ の領域において 36 個の DC 候補ハローを見つけた。一方でこのうち 20 個について流体計算を行ったところ、実際に大質量星形成に至ったサンプルは 1 つだけであった。これは DC ハローにおけるガス雲が光源ハローとの複雑な相互作用により、破壊、または崩壊が阻害されてしまうためである。特に光源ハローの質量が大きくなる低赤方偏移側では潮汐力が、ガスの平均密度の大きい高赤方偏移では ram pressure stripping が効いていると考えられる。