

# 早期宇宙における巨大ブラックホール種の形成シミュレーション

長峯 健太郎

大阪大学 大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻

## 1. はじめに

天文学者は古来より遠くの宇宙を観測し、遠方に存在する暗い天体を観測することでフロンティアを広げてきた。光の速さが限られているため、遠方の天体を観るということは、ずっと昔に放たれた光がようやく地球に到達しているものを見ていることになり、即ち若い宇宙を見ているのと同じことである。つまり、我々は宇宙そのものをタイムマシンのように利用して、観測的宇宙論の研究を遂行している。

そのような最近の天文観測によって、ビッグバンから数億年経ったばかりの宇宙にも巨大ブラックホール(Supermassive black hole; SMBH)が存在することが示唆されている。これらの SMBH は、通常クエーサー(quasar)と呼ばれる非常に明るい天体で、ジェットを吹き出していると考えられており、そのジェットが我々の方を向いていると、非常に遠くの宇宙でもその存在を確認することができる。しかし、ビッグバン膨張宇宙論において、宇宙が始まってから 10 億年程度の(宇宙論的な視点からは)短い時間で、非常に重い SMBH を作ることが実際に可能なのであろうか。

## 2. 宇宙論的な構造形成と SMBH

現在、我々は宇宙の標準モデルともいべき理論的枠組みを手に入れている。それは、ビッグバンと呼ばれる温度と密度が無限大の状態から時空が生まれ、その後ずっと膨張し続ける中で銀河などの様々な構造が成長していくという「ビッグバン膨張宇宙モデル」である。宇宙全体のエネルギー密度を 100% とすると、普通の物質(いわゆるバリオンと呼ばれる水素、ヘリウムなどの我々がよく知る元素)が約 5%、暗黒物質(ダークマター)が約 25%、残りの約 70%

がダークエネルギーと呼ばれる未知のエネルギーによって占められている、一見奇妙な宇宙である。

これは様々な観測データ(宇宙背景放射の温度揺らぎ、Ia 型超新星への距離、銀河団の個数密度など)を組み合わせた多角的な解析の結果であり、結果の信頼性は非常に高く、現在の宇宙年齢は約 138 億年と見積もられている。ダークエネルギーは、元々アインシュタインが宇宙項 $\Lambda$ (ラムダ)としてアインシュタイン方程式に導入したもので、またダークマターの最有力候補は、質量が重くて衝突断面積の小さい「冷たい暗黒物質(Cold dark matter; CDM)」であり、この二つによって占められた宇宙は $\Lambda$ CDM モデルと呼ばれている。

このダークマターとダークエネルギーによって支配された $\Lambda$ CDM モデルでは、まずダークマターが互いの重力によって引き合い、小さな密度揺らぎが次第に大きく成長していくことで構造が生まれていく。 $\Lambda$ CDM モデルの密度揺らぎパワースペクトルによれば、小さな塊が最初に生まれて、その後それらが合体集積していくことで「ダークマターハロー」と呼ばれる大きな天体に成長していく。

このような $\Lambda$ CDM モデルをベースに、スパコンを使用して宇宙の構造形成の過程を解くことが可能であり、この 20 年ほどの間に「数値計算宇宙論(Numerical Cosmology)」という分野が急速に発展してきた。

図 1 (top panel)に示すように、まずダークマターが寄り集まって構造形成が始まり、中心に見られるようなダークマターハローが作られる。このシミュレーションでは、zoom-in 手法を用いており、実際には top panel に示している領域の周辺の、より大規模な構造も粗い解像度で解いているが、ここに示して

いるのは高分解能領域のみである。

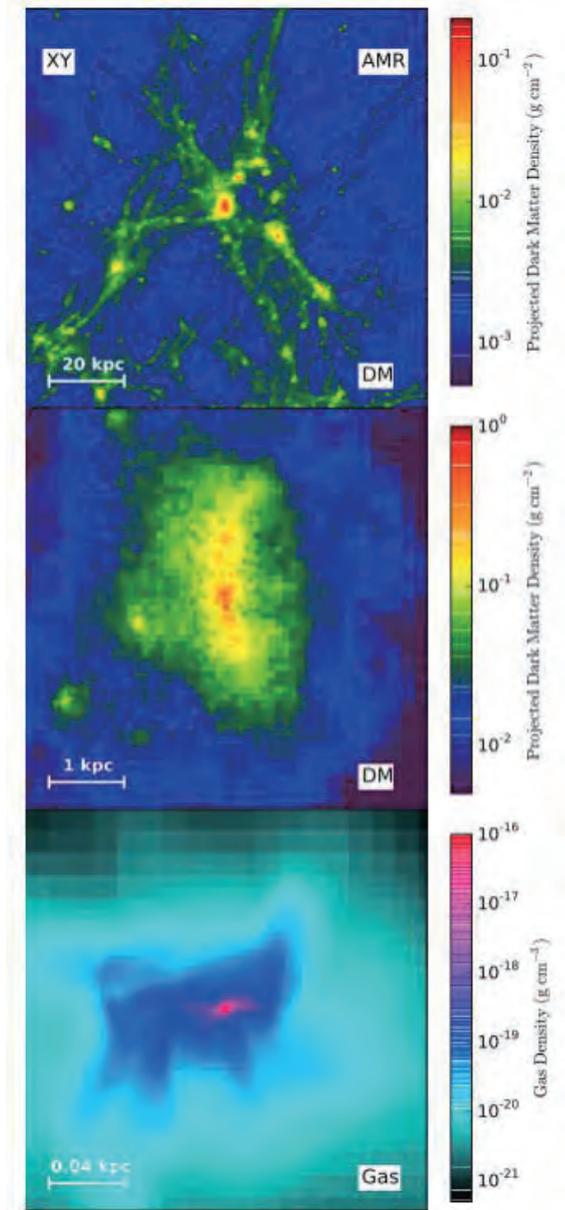


図1 Top panel: 約30万光年にわたる領域のダークマター分布。このように宇宙論的な初期条件からSMBHの種が誕生する環境をシミュレーションして、DCシナリオを検証している。Middle panel: 約1万光年の領域中心を示しており、ダークマターハローにガスが次第に降着している様子を示している。Bottom panel: ダークマターハローの中心部分で、約300光年の領域にガスが等温的に直接崩壊している状態を示している [3]。

ダークマターハローのポテンシャル井戸にガスが放射冷却しながら落ち込んでいって、まず銀河が形成

される。その銀河形成の過程において、超新星爆発後に星質量程度の小さなブラックホール(BH)が生まれ、それがガスを吸い込んでSMBHに成長していくと、かつての理論では考えられていた[1]。

しかし、ビッグバンから10億年ほどの間に太陽質量( $M_{\odot}$ )の100億倍の質量( $10^{10} M_{\odot}$ )にまで成長させるのは、如何にスケールの大きな宇宙物理学的観点から見てもいくつかの問題が存在する。第一に、それほど重たいSMBHを作るには時間が足りないのではないかという疑問である。LIGOの重力波観測[2]によって確実にされた星質量BH( $\leq 200 M_{\odot}$ )は、ビッグバンから数億年経った頃から初代銀河の形成と共に生まれ始めると考えられているが、それらを $10^{10} M_{\odot}$ にまで成長させるには、1億倍以上の成長を実現しないとイケないわけである。そのためにはBH質量を指数関数的に増加させ続ける必要があるが、輻射やジェットによるフィードバックを考えると容易ではない。

第二の問題は、熱力学的・流体力学的な問題である。ガスを小さな領域に押し込めようとする断熱圧縮で加熱するので、効率良く外部に輻射を逃がして冷却しない限り、ガスは高密度になっていかない。その輻射が外に出て行こうとする際に外向きの輻射圧を及ぼし、BHの重力と拮抗して降着が停止してしまうエディントン限界という臨界降着率が存在する。また降着するガスは往々にして回転しており、角運動量も保存しないとイケないので、外部への角運動量輸送も同時に効率良く行われないと、たくさのガスを指数関数的かつ継続的にBH種に降着させることは難しい。

### 3. ダイレクトコラプスシナリオ

上記のようなSMBH形成に関する幾つかの問題点を解決するために、最近注目されているのがダイレクトコラプス(Direct Collapse; DC)シナリオと呼ばれる形成モデルである。これは星質量のBHを作るのではなく、ガス球を直接崩壊させて最初から $10^4$ - $10^5 M_{\odot}$ の中間質量BHを作ってしまうというアイデアである。筆者は平成25年度秋から大阪大学

国際共同研究促進プログラム[4]の助成を受けて、米国ケンタッキー大学のシュロスマン教授と DC シナリオについて国際共同研究を推進している[5]。

我々は、宇宙論的流体力学コード Enzo AMR (adaptive mesh refinement) code [6]を主に用いて、実際に DC シナリオが早期宇宙において実現して BH 種が生まれるかどうかを検証している。図 1(top panel)に示したように宇宙論的な初期条件を用いて、ダークマターおよびガスの物質分布や相互作用を重力と流体力学の法則を用いて、阪大サイバーメディアセンターのスパコンも利用し並列計算を行っている。実際に宇宙論的初期条件から構造形成をシミュレーションすると、ダークマターハローの多くは回転楕円体のような歪んだ形をしていて、微小回転をしていることがわかる。そのダークマターハローが重力トルクをガスに及ぼし、角運動量を効率良く引き抜き、ガスがハローの奥深く (<0.001 光年の小スケール) まで落ち込むことが可能であることが最近の我々の研究により明らかになってきた[3, 7]。この時、ガスは水素とヘリウムの輝線による放射冷却によってほぼ等温的に 8000 Kelvin 程度の温度を保ちつつ、崩壊していく (図 2 参照)。

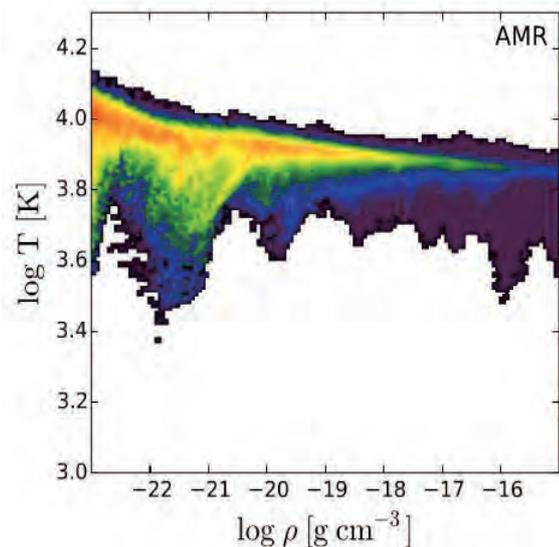


図 2 : ダークマターハロー内部のガスの密度と温度分布。色は質量分布を反映している。ほぼ等温的に ~8000 K の温度を保ちつつ、崩壊して密度が高くなっている様子がわかる。

最終的にガスの数密度が  $n \sim 10^{10}/\text{cc}$  にまで達していることがわかる。このようなシミュレーションでは中心部分が次第に高密度になっていき、タイムステップがより限られた領域において短くなっていくので、並列計算の load balance が難しく、1 万コアを同時に効率よく使用するのは無理である。そのため、実際に各シミュレーションで使用しているのはせいぜい数百コア程度である。一方、大規模な宇宙論的 N 体計算ならば多くのコア数を効率よく使用することが可能である。

我々はさらに中心領域の構造を詳細に吟味して、図 3 のような入れ子状になったガス円盤ができていることを発見した[7]。

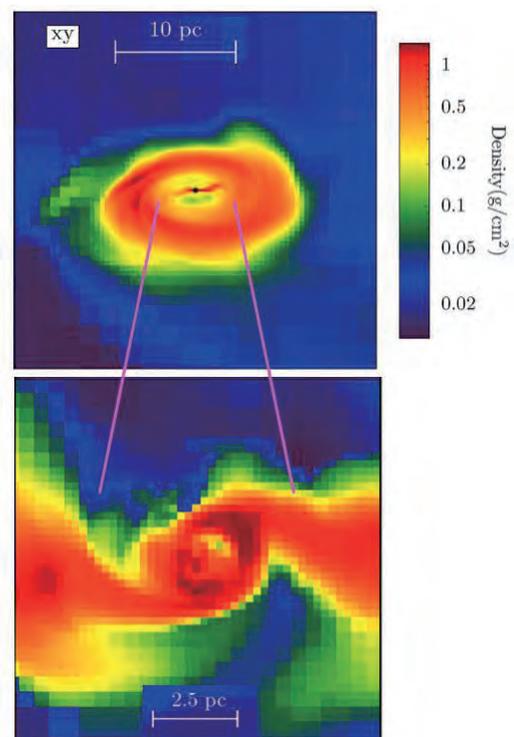


図 3 : ダークマターハローの中心部分にできた入れ子状のガス円盤。上のパネルは約 10 パーセク (約 33 光年) の大きさのガス円盤を示し、下のパネルは ~2.5 pc の円盤に二つの渦巻き状のアームが繋がっていて、 $m=2$  モードが励起されていることがわかる。

角運動量が徐々に外側のダークマターハローとの相互作用によって抜かれてガスが中心に向かって落ちていくが、それにも限界があり最終的には円盤が中

角運動量が徐々に外側のダークマターハローとの相互作用によって抜かれてガスが中心に向かって落ちていくが、それにも限界があり最終的には円盤が中心に形成される。そして、二つの太いフィラメントが中心の円盤に繋がっていて、フーリエ解析により  $m=2$  の不安定モードが励起されているのが分かる。図3のシミュレーションにおいては、中心にできる大質量天体 (BHになる以前の種) をシンク粒子として扱い、ビッグバンから3-4億年の間にその種が  $10^5 M_{\odot}$  にまで成長することを確認した。

#### 4. まとめと今後

本稿では、SMBHの種を形成するDCシナリオに絞って紹介したが、SMBHに関してはその誕生メカニズム以外にも大きな謎がいくつもある。その一つは、各銀河の中心に観測されるSMBHが、なぜかホスト銀河の星質量(特にバルジと呼ばれる球状部分)の約0.1%の質量を持っていて、SMBH質量と銀河質量に正の相関があるということである。つまり、SMBHはなぜか自分が住んでいるホスト銀河の質量をよく知っていて、銀河とSMBHが何らかの形で「共進化」してきたと考えられている。より具体的には、BHにガスが降着する過程でジェットや放射が噴出し、周囲のガスを加熱し影響を与える。このフィードバック効果により銀河内の星形成とSMBH進化が互いに自己制御しあいながら、ホスト銀河とSMBHが手に手を携えて成長してきたと推測されている。しかしその詳細は未解明で、今後さらなる研究が待たれるところである。

我々は上述のSMBHによるフィードバック効果を解明するという目的に向けて、まず次の一手としては、放射輸送の効果をDCシミュレーションに取り入れて、中心部分におけるガスのダイナミクスが放射によってどのような影響を受けるのかを調べていく予定である。

#### 参考文献

[1] “Formation of supermassive black holes” Volonteri, M., 2010, *The Astronomy & Astrophysics Reviews*,

Volume 18, Issue 3, pp.279-315

- [2] “Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger” Abbott, B. P., et al. (LIGO Collaboration and Virgo Collaboration), 2016, *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (doi: 10.1103/PhysRevLett.116.061102)
- [3] “Direct collapse to supermassive black hole seeds: comparing the AMR and SPH approaches” Luo, Y., Shlosman, I., Nagamine, K., 2016, *MNRAS*, 459, 3217 (doi: 10.1093/mnras/stw698)
- [4] 大阪大学国際共同研究促進プログラム [http://www.osaka-u.ac.jp/ja/research/researcher\\_sp/international\\_joint](http://www.osaka-u.ac.jp/ja/research/researcher_sp/international_joint)
- [5] Research Highlight, Research at Osaka (ResOU), リソウ <http://resou.osaka-u.ac.jp/en/en/highlight/2016/20160318>
- [6] “ENZO: An Adaptive Mesh Refinement Code for Astrophysics” Bryan, G., et al. 2014, *ApJS*, 211, 19 (doi: 10.1088/0067-0049/211/2/19)
- [7] “Supermassive black hole seed formation at high redshifts: long-term evolution of the direct collapse” Shlosman, I., Choi, J.-H., Begelman, M.C., Nagamine, K., 2016, *MNRAS*, 456, 500 (doi: 10.1093/mnras/stv2700)