

超巨大ブラックホールの謎



研究ノート

長 峯 健 太 郎*

The Mystery of Supermassive Black Hole

Key Words : Black hole, Cosmology, Universe, Astronomy, Astrophysics

はじめに：

ブラックホール (black hole; BH) は、宇宙物理学者にとっては比較的身近な存在である。質量の大きい星が超新星爆発で死ぬと、その後星質量程度のBHが生まれることは、ある程度の理論的現実性を持って予言されていた。また、2015年9月にアメリカのLIGOプロジェクトによって重力波が初めて直接検出されて、そのような星質量BHがペアになって回っているBH連星系が存在することも実証された [1]。しかし、皆さんは宇宙に漂うほぼ全ての銀河の中心に超巨大BH (Super Massive Black Hole; SMBH) が存在することをご存知だろうか。これらのSMBHはX線や可視光で明るく光って活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) として観測されたり、光速に近い速度でプラズマのジェットを吹き出ししたりしている。SMBHは天文学者にとっても非常に不思議な存在であり、その成長過程は未だに大きな謎である。本稿ではSMBH形成に関連する最先端研究について、筆者の研究成果を交えて簡単にご紹介したい。

宇宙論的な構造形成と超巨大ブラックホール：

この数十年間に天文観測の規模と精度は、CCDの進歩と望遠鏡の大型化が相まって飛躍的に進展し、そのデータ解析の成果により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、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4%、暗黒物質 (ダークマター) が約22%、残りの約74%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い。

この宇宙の標準模型をベースに、宇宙の構造形成過程をスパコンを使って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)」という分野が確立されてきた。図1に示すように、まずダークマターによって構造形成

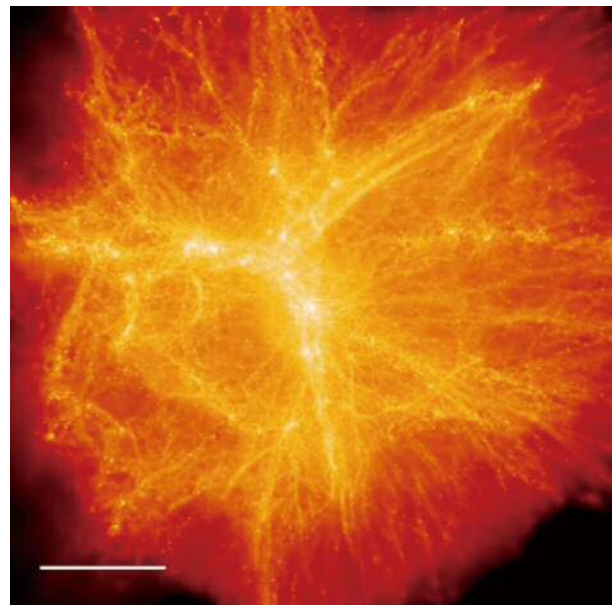


図1：ビッグバンから約7億年ほど経った宇宙におけるダークマターの物質分布。白く明るい部分がダークマターハローと呼ばれる密度の高い部分で、その中で銀河形成が起きる [2]。



* Kentaro NAGAMINE

1973年10月生
 プリンストン大学 物理学科 (2001年)
 現在、大阪大学 大学院理学研究科
 宇宙地球科学専攻 宇宙進化グループ
 教授 Ph.D. 宇宙物理学、宇宙論と構造形成
 TEL : 06-6850-5481
 FAX : 06-6850-5480
 E-mail : kn@vega.ess.sci.osaka-u.ac.jp

が始まり、ダークマターハローと呼ばれるダークマターの集合体がつくるポテンシャルにガスが輻射冷却しながら落ち込んでいって銀河が形成される。その銀河形成の過程において、SMBHも同時にガスを吸い込みながら成長していき、ビッグバンから10億年ほどの間に太陽の100億倍の質量を持ったSMBHができると考えられている。

しかし、太陽の100億倍の質量というのは、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、それほど重いSMBHをつくるには10億年弱では時間が足りないのではないかという疑問がある。LIGOの観測によってより確実に became 星質量BHは、ビッグバンから数億年経った頃から宇宙に生まれ始めると考えられているが、せいぜい100太陽質量のBHを100億太陽質量にまで成長させるには、1億倍の増加を実現しないとイケないわけである。そのためにはBH質量が指数関数的に増加するようにガスが継続してBHに降着し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、それは容易ではない。

第2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と、当然断熱圧縮で加熱するので、効率良く外部に輻射を放つこと（放射冷却）をしない限りガスは高密度になっていかない。その輻射が領域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、角運動量輸送も同時に効率良く行われないと、たくさんのガスをBHに降着させることは難しい。

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モデルである。これは、星質量のBHを作るのではなく、最初から太陽質量の10万倍から100万倍のガス球を直接崩壊させて、一気に中間質量BHを作ってしまうというモデルである。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 [3] 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モデルについて国際共同研究を推進している [4]。

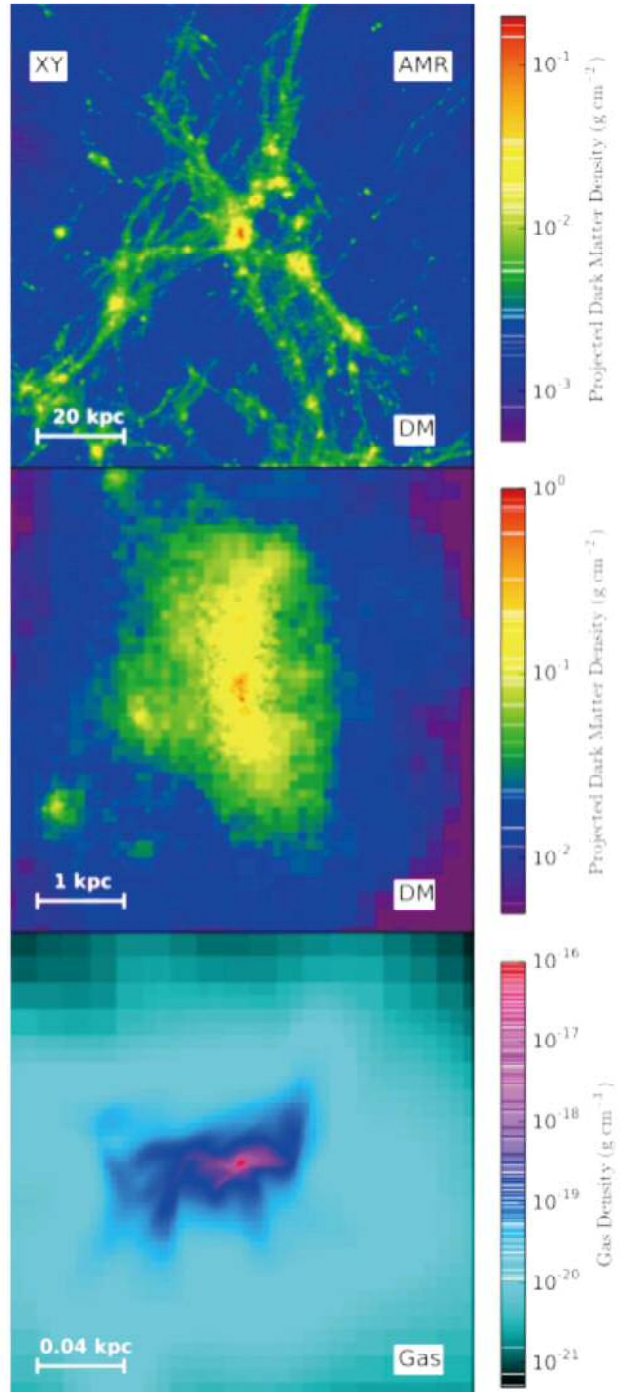


図2：Top panel: 約30万光年にわたる領域のダークマター分布。このように宇宙論的な初期条件から直接SMBHが誕生する環境をシミュレーションして、DCシナリオを検証している。
Middle panel: 領域中心にあるダークマターハローで、約1万光年の大きさ。
Bottom panel: 着目しているダークマターハロー内部のガス分布で、約300光年の領域を示す [6]。

我々は、宇宙論的流体力学コード Enzo [5] を用いて、早期宇宙において実際に DC シナリオが実現して種 BH が生まれるかどうかを検証している。図 2 に示すように宇宙論的な初期条件から始めて、ダークマターおよびガスの物質分布や相互作用を宇宙膨張の効果を考慮しながら重力と流体力学の法則を用いてスパコンで並列計算をしながら解くのである。このように宇宙論的初期条件で構造形成を調べると、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。そのダークマターが重力トルクを及ぼし、ガスから角運動量を効率良く引き抜き、ガスがハロー内部の奥深く (<0.001 光年の小スケール) まで落ち込むことができることがわかってきた [6, 7]。

まとめと今後：

本稿では、種ブラックホールのダイレクトコラプスシナリオによる形成に絞ってご紹介したが、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、近傍銀河において観測される SMBH は、その銀河の星質量 (特にバルジと呼ばれる球状に星が分布している部分) のほぼ 0.1% の質量を持っていて、SMBH 質量と銀河質量には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銀河の質量を知っていて、そのためには銀河と SMBH が何らかの形で『共進化』してきたと考えるのが自然である。より具体的には、BH にガスが降着する過程で、そこからジェットや輻射が噴出し、周囲のガスにフ

ィードバックを引き起こす。これが AGN フィードバックと呼ばれている現象であり、このフィードバックにより銀河内の星形成史と SMBH 進化が互いに自己制御しながら、銀河と SMBH は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。

参考文献：

- [1] Abbott, B. P., et al. (LIGO Collaboration and Virgo Collaboration), 2016, Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (doi: [10.1103/PhysRevLett.116.061102](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102))
- [2] Yajima, H., Shlosman, I., Romano-Diaz, E., Nagamine, K., 2015, MNRAS, 451, 418 (doi: [10.1093/mnras/stv974](https://doi.org/10.1093/mnras/stv974))
- [3] 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
- [4] Research Highlight, Research at Osaka University (ResOU), リソウ
<http://resou.osaka-u.ac.jp/en/en/highlight/2016/20160318>
- [5] Bryan, G., et al. 2014, ApJS, 211, 19 (doi: [10.1088/0067-0049/211/2/19](https://doi.org/10.1088/0067-0049/211/2/19))
- [6] Shlosman, I., Choi, J.-H., Begelman, M.C., Nagamine, K., 2016, MNRAS, 456, 500 (doi: [10.1093/mnras/stv2700](https://doi.org/10.1093/mnras/stv2700))
- [7] Luo, Y., Shlosman, I., Nagamine, K., 2016, MNRAS, 459, 3217 (doi: [10.1093/mnras/stw698](https://doi.org/10.1093/mnras/stw698))

