

銀河と銀河中心超大質量ブラックホールの共進化の宇宙論的シミュ

レーション

Cosmological simulations of coevolution between galaxies and their central supermassive black holes

岡本 崇
北海道大学

1. 研究目的

ほぼ全ての銀河の中心には超大質量ブラックホール (SMBH) が存在している。SMBH の中には太陽の 10^9 倍以上の質量をもつものもあり、どのようにしてこのような大質量のブラックホールが形成されたのかは宇宙物理学における大きな謎となっている。また SMBH の質量はその母銀河のバルジの星質量・速度分散と強い相関があることが知られており、(1) バルジ形成と SMBH への質量供給機構に関係がある、(2) SMBH へガスが降着する際にその重力エネルギーを輻射やジェットとして放出する現象が活動銀河核 (AGN) として知られているが、このエネルギー放出現象 (AGN フィードバック) がバルジでの星形成を終了させているという主に 2 つの共進化シナリオが提唱されている。また、AGN フィードバックは大質量銀河の星形成を終焉させるメカニズムとしても有望視されており、銀河形成を理解する上でも共進化を理解することは重要である。本研究では SMBH の進化と AGN フィードバックを **self-consistent** に取り入れた宇宙論的銀河形成シミュレーションを行い、SMBH 成長と銀河形成どのように相互作用して現在の宇宙の姿が出来上がったのかを明らかにする。

2. 研究成果の内容

シミュレーションには **Meshfree Finite Mass (MFM)** 法という **Lagrange** 的な流体法を用いている。まず MFM のもとで、ガスの自己重力分裂がどのように進み、それが数値分解能にどう依存するかを調べた。その結果、MFM では、ジーンズ波長が分解できていない場合でも、メッシュ法において発生することが知られている **artificial fragmentation** は起こらず、安定な摂動は振動するだけで成長しないことが明らかになった。我々は、**artificial fragmentation** は SPH や mesh-free 法のような **Lagrange** 的な方法では一般的に起こらないことを示した。また、成長モードに対しては、その波長を十分に分解できていない場合、**Jean** 波長に近い波長の摂動は成長できないこと、**Jeans** 波長よりも十分に大きな波長の摂動は成長するが、その成長は解析解よりもずっと遅れることも分かった。この結果は、銀河形成シミュレーション

ョンにおいて、星形成を実装する上で重要な知見を与える。

次に、銀河形成シミュレーションにおける超新星フィードバックの標準的な実装では、ガスに与えたつもりのエネルギーよりもずっと大きな運動エネルギーを与えていたため、ガスに与えるエネルギーの上限が厳密に超新星爆発によって放出されたエネルギーとなる実装を考案した。その結果、フィードバックの効果は弱くなったが、より数値分解能に依存しないものとなった。また、従来の実装ではフィードバックの効果を過大評価していることも明らかとなった。

3. 学際共同利用が果たした役割と意義

共進化をシミュレーションするために銀河が形成される領域を含む大きな宇宙論的な体積と、銀河よりも空間的に 10 桁以上小さい SMBH を同時に扱わねばならない。このようなダイナミックレンジの大きなシミュレーションを複数モデル行うには学際共同利用による大規模計算が必要不可欠であった。第一原理的に扱えるモデルではないため、多くのパラメータを試す必要があり、そのようなことも学際共同利用でなければ困難であった。

4. 今後の展望

星形成、フィードバックの実装がかたまったので、SMBH の成長及び、AGN フィードバックのモデルと合わせ、共進化のシミュレーションをすすめる。成果発表

(1) 学術論文

- ① Yamamoto, Yasuyoshi, Okamoto, Takashi, Saitoh, Takayuki R., 2021, “Testing the effect of resolution on gravitational fragmentation with Lagrangian hydrodynamic schemes”, MNRAS, 504, 3986-3995

(2) 学会発表

- ① 堀江秀、岡本崇「分子雲の乱流状態に基づく星形成モデルと銀河シミュレーション」日本天文学会 2021 年秋季年会、京都産業大学（オンライン）、2021/9/13-15
- ② 堀江秀、岡本崇、羽部朝男「分子雲衝突による星形成と銀河シミュレーション」日本天文学会 2022 年春季年会、広島大学（オンライン）、2022/3/2-5

(3) その他

使用計算機	使用計算機 に○	配分リソース*	
		当初配分	追加配分
Cygnus			
Oakforest-PACS	○	255,000	0
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			