

銀河と銀河中心超大質量ブラックホールの共進化のため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 109 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

SMBH は主に周囲のガスの降着によってその質量を増加させる。そのため、SMBH をエンジンとする AGN フィードバックだけでなく、星形成に起因する超新星爆発も SMBH へのガス供給を決定する上で、銀河中心へと供給されるガスの量をコントロールするという意味で重要な役割を果たす。また、現在は巨大な銀河もその形成初期には小さな銀河であったため、AGN フィードバックよりも超新星フィードバックの方が銀河の進化に重要な役割を果たしたはずである。そこで、この超新星フィードバックを銀河形成シミュレーションで適切に扱うための方法を開発し、実装した。具体的には 1 次元の超新星爆発残骸のシミュレーションを元に 1 つの超新星爆発が周囲のガスに与える運動量を計算し、その上で星粒子と周囲のガスの相対運動や、1 つのガス要素に複数の星粒子から運動量が注入された場合などに、標準的な方法ではガス要素が非物理的な大きな運動エネルギーを持つ問題を解決する方法を開発した。この銀河形成シミュレーションでは分解できないスケールの物理にもとづいた実装のもとで、シミュレーション結果は数値分解能に依存しないものとなり、より信頼性の高い

シミュレーションが可能となった。また、標準的なダークマターのモデルである CDM と異なり、ダークマター同士が非重力的な相互作用をする SIDM を用いたシミュレーションを行い、**gravo-thermal model** にもとづく解析的な取り扱い方法を提案した。

3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

開発した超新星フィードバックの振る舞いを調べるためには様々な分解能で、長波長成分は同じ位相を持つ初期密度揺らぎを初期条件とした銀河形成シミュレーションを行う必要があり、また観測と比較して検証するために、様々な質量の銀河の形成を調べる必要があった。このようにシミュレーションを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。モデルにはいくつか第一原理的には決定できないパラメータが含まれており、その調整も学際共同利用でなければ困難であった。

4. 今後の展望

今回開発した超新星爆発のモデルと SMBH の成長、AGN フィードバックのモデルを 1 つのコードに実装し、共進化のシミュレーションを行いたい。

5. 成果発表

(1) 学術論文

- ① Shirasaki M., Okamoto T., Ando S. “Modelling self-interacting dark matter substructures - I. Calibration with N-body simulations of a Milky-Way-sized halo and its satellite”, *The Astrophysical Journal*, 2022, 936, 2022, 38

(2) 学会発表

- ① 清水達生、大木平、岡本崇、長島雅裕、榎基宏「MBH 質量—バルジ質量関係の赤方偏移進化」日本天文学会 2023 年春季年会、2023 年 3 月
- ② 岡本崇「厳密なエネルギーの制限を課した超新星フィードバックの実装とその効果」日本天文学会 2022 年秋季年会、2022 年 9 月

(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			
Wisteria/BDEC-01	○	780000	
※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。			