

# 銀河系中心におけるバブル構造の形成機構：AGN フィードバックの役割と宇宙論的シミュレーションによる検証

西濱 大将 (大阪大学大学院 理学研究科)

## Abstract

天の川銀河には、eROSITA/Fermi バブルと呼ばれる銀緯南北方向に伸びる泡状構造が存在する。この泡構造の物理的起源は未だ分かっておらず、長年議論されてきた。この泡構造の発見後、理論モデルがいくつか提唱された。1つがスターバースト銀河のような銀河系中心で起こる強い星形成の活動によるモデルである。もう一方が、活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) からの AGN から噴き出すアウトフローによるモデルである。本研究では、宇宙論的シミュレーション CROCODILE を用いて、AGN フィードバックを除いたシミュレーションと比較することで、AGN フィードバックがバブル進化に与える影響について議論する。

## 1 Introduction

X 線望遠鏡 eROSITA による全天サーベイによって、天の川銀河の中心に eROSITA バブルと呼ばれる大きな砂時計型の構造が発見された (Predehl et al. 2020)。eROSITA のマップでは、南天にも同様に巨大な準円形環状構造からの X 線放射が観測されており、これらは銀河中心から出現しており、14 kpc にも達するほど巨大な銀河 X 線バブルを形成している。

eROSITA が中エネルギー帯 (0.6–1.0 keV) で観測した大規模な X 線放射は、バブルの本質的な大きさが数 kpc であることを示している (Predehl et al. 2020)。eROSITA のバブルは、Fermi 衛星によって  $\gamma$  線で検出された Fermi バブルと顕著な形態の類似性を示すが、より大きく、より高エネルギーである (Su et al. 2010)。Fermi バブルと eROSITA バブル (まとめて「銀河バブル」と呼ぶ) の起源については多くの議論がされてきた (Yang et al. 2018)。特に銀河系中心部で起こる強力な星形成からの恒星フィードバックの結果なのか (Yusef-Zadeh et al. 2009; Nogueras-Lara et al. 2020)、中心の超大質量ブラックホール (SuperMassive Black Hole; SMBH) によるものなのかは現在も未解決である (Genzel et al. 2010)。

宇宙論的シミュレーション TNG50 では、198 個の天の川銀河やアンドロメダ銀河に類似する (Milky Way-like, MW-like) 銀河の 3 分の 2 では、天の川銀河で観測されるような銀河バブルが見つかった。さらには TNG50 では、バブルガスは銀河中心の SMBH から、低いエディントン比で降着する風のような、運動エ

ネルギー注入の現れであることが分かった (Pillepich et al. 2021)。一方で、2023 年にははずく衛星を用いて eROSITA バブルの熱的・化学的性質を調べた結果、バブル形成の起源が恒星フィードバックであることを示唆する報告がされた (Gupta et al. 2023) が、未だ議論の余地がある。

本研究では宇宙論的流体シミュレーションコード GADGET4-Osaka を用いた CROCODILE (Oku et al. 2023) を解析し、AGN フィードバックがバブル進化に与える影響について議論する。

## 2 Methods

CROCODILE (Oku et al. 2023) のデータセットには通常の Fiducial と AGN フィードバックを除いた NoBH のデータセットがあり、AGN フィードバックの寄与・影響を比較することが可能である。ただし、先行研究に使われている TNG50 と比較して、シミュレーションの解像度の指標の 1 つとなる Gravitational softening length は CROCODILE が 746 pc であり、TNG50 が 72 pc である (Oku & Nagamine 2024; Pillepich et al. 2019)。CROCODILE の方が TNG50 に比べて 10 倍ほど解像度が悪い。そのためバブルそのものを議論するのではなく、銀河全体への寄与を踏まえ解析を行う。

## 2.1 MW-like 銀河の選別

MW-like 銀河は赤方偏移  $z = 0$  で、なおかつ次の条件を満たすものとする (Pillepich et al. 2023).

- (i) 恒星質量：銀河の恒星質量が次の範囲内である：  
 $M_*( < 30\text{kpc} ) = 10^{10.5-11.2} M_\odot$
- (ii) 恒星の形態：以下の基準のどちらか一方を満たすこと：
  - A. 銀河の恒星質量分布の短軸と長軸の比が 0.45 より小さい。恒星質量分布は恒星の半質量半径の 1 倍から 2 倍の間。
  - B. 銀河の edge-on と face-on のプロジェクションの 3 バンド画像を目視し、円盤が見え、渦巻き状の腕が見える。
- (iii) 周囲の環境：恒星質量が  $10^{10.5} M_\odot$  を超える銀河が 500 kpc 以内に存在せず、ホストハローのビリアル質量  $M_{200c}(\text{host}) < 10^{13} M_\odot$  である。

Pillepich et al. (2023) では A を満たすものは 173 個、B を満たすものは 180 個、A かつ B を満たすものは 155 個で、合計 198 個を選別することができた。しかし、CROCODILE で (ii) の条件を課すと、A の条件を満たすものが Fiducial のデータセットでは 2 個と非常に少ない。そのため、(i) の条件と (iii) のみを適用する。これにより Fiducial のデータセットでは 64 個、NoBH のデータセットでは 80 個の銀河を用意することが出来た。また、短軸  $c$  と長軸  $a$  の比  $c/a$  を計算する際は式 (1) の形状テンソル (Zemp et al. 2011) を使用した。

$$S_{ij} = \frac{\sum_k m_k r_{ik} r_{jk}}{\sum_k m_k} \quad (1)$$

この固有値は  $a \geq b \geq c$  で  $a^2/3$ ,  $b^2/3$ ,  $c^2/3$  で与えられる。

## 2.2 エントロピーの半径プロファイル

平均分子量  $\mu$  は

$$\mu = \frac{4}{1 + 3X_H + 4X_H x_e} \quad (2)$$

で与えられ、数密度  $n$  は  $n = \rho / (\mu m_p)$  で与えられる。これらを用いてエントロピー  $K$  は

$$K = k_B T n^{-2/3} \quad (3)$$

で与えられる。  $X_H$  は水素質量分率で 0.76 を採用する。  $x_e$  は総水素数密度に対する電子の分数密度、  $\rho$  は密度、  $m_p$  は陽子の質量である。

Fiducial と NoBH のデータセットはどちらも同じ初期条件の下で実行されている (Oku & Nagamine 2024)。そのため大凡同じ位置に、同じ銀河が存在する。しかし AGN フィードバックが存在しないことにより、位置に  $\sim 70$  kpc のずれが生じている。そのため MW-like 銀河の条件 (i), (iii) を満たす銀河のうち、ポテンシャルが最小の位置を中心と定め、そこから半径をとる。また条件を満たした銀河のデータをスタッキングすることで、個々の特徴は均されることになる。また (iii) の条件により、衛星銀河や矮小銀河をデータ内から排除することが大まかにできる。

## 3 Results

エントロピーの半径プロファイルを図 1 に示す。MW-like 銀河においては AGN フィードバックの寄与は  $< 10$  kpc,  $30$  kpc  $<$  において、Fiducial と NoBH の間で差異は見られなかった。しかし、約 20 kpc では AGN の寄与が大きいことが分かった。

質量流束の半径プロファイルを図 2 に示す。全体的に  $\dot{M}_{\text{inflow}}$  も  $\dot{M}_{\text{outflow}}$  も NoBH の方が Fiducial よりも高く、20 kpc 付近では顕著に NoBH の方が高かった。また質量流束 (Mass flux) は

$$\dot{M} = 4\pi r^2 \rho \dot{r} \quad (4)$$

を用いて求めた。また温度の半径プロファイルを図 3 に示す。温度の半径プロファイルはエントロピーの半径プロファイルと同様に、AGN フィードバックの寄与は  $< 10$  kpc,  $30$  kpc  $<$  において、Fiducial と NoBH の間で差異は見られず、約 20 kpc では AGN の寄与が大きいことが分かった。

## 4 Discussion

図 1 に示すエントロピーの半径プロファイルから、MW-like 銀河の中心部においては AGN フィードバックの寄与は極めて小さいと言える。その一方で  $R = 20$  kpc 付近、つまり銀河外縁付近もしくはバブル構造に対しては AGN フィードバックの寄与があるこ

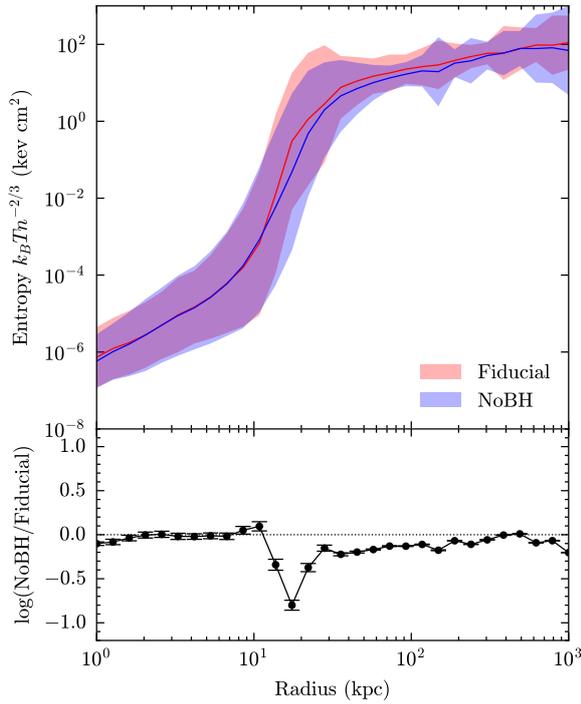


図 1: MW-like galaxies のエントロピーの半径プロファイルの比較. Fiducial は 64 個の銀河を, NoBH は 80 個の銀河をスタッキングし, 対数上で 30 区間に等分割し, それぞれの平均値と標準偏差を計算している. 上段の誤差は  $1\sigma$  を表し, 下段は  $\log \text{NoBH} - \log \text{Fiducial}$  を表し, 誤差は信頼区間 95%を表す.

とが分かる. また質量流束に注目すると  $\dot{M}_{\text{outflow}}$  と  $\dot{M}_{\text{inflow}}$  ともに NoBH の方が大きくなる.  $\dot{M}_{\text{inflow}}$  は AGN によるアウトフローによる寄与が少なくなるため NoBH の方が高くなると考えられ,  $\dot{M}_{\text{outflow}}$  に関しては流入率が高くなったことで, その分内部での星形成がより活発になったと考えることができる. ここで累積星形成率の半径プロファイルを図 4 に示す. MW-like 銀河の星形成率は, Fiducial では  $5.55 M_{\odot}/\text{yr}$  で NoBH では  $16.00 M_{\odot}/\text{yr}$  であった. また図 4 から分かる通り, 大凡 10 kpc 以内つまり銀河内の星形成率のみで差は開いていることも分かる.

## 5 Conclusion

本研究では AGN フィードバックがバブル進化に与える影響を CROCODILE を用いて解析を行った.  $z = 0$  における MW-like 銀河を選別し, AGN フィー

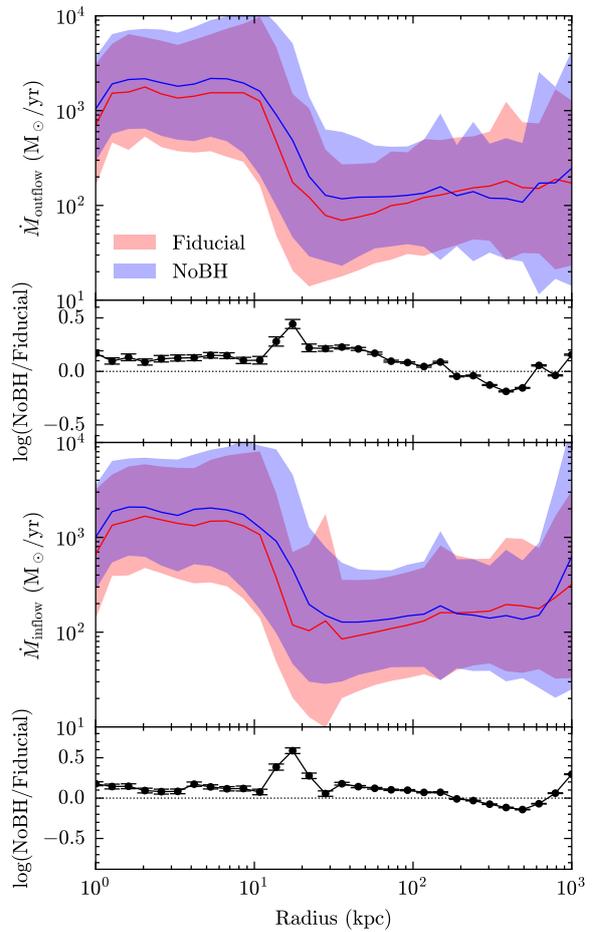


図 2: MW-like galaxies の質量流速  $\dot{M}$  の半径プロファイルの比較. Fiducial は 64 個の銀河を, NoBH は 80 個の銀河をスタッキングし, 対数上で 30 区間に等分割し, それぞれの平均値と標準偏差を計算している. 一番上を 1 段目, 一番下を 4 段目とすると 1 段目と 3 段目の誤差は  $1\sigma$  を表し, 2 段目と 4 段目は  $\log \text{NoBH} - \log \text{Fiducial}$  を表し, 誤差は信頼区間 95%を表す. 1・2 段目は  $\dot{M}_{\text{outflow}}$ , 3・4 段目は  $\dot{M}_{\text{inflow}}$

ドバックが MW-like 銀河に与える影響を調べた. その結果, 以下のことが分かった.

- MW-like 銀河の中心部においては AGN フィードバックの寄与は極めて小さく, 20kpc 付近, つまり銀河外縁付近やバブル構造に対しては AGN フィードバックの寄与が見られた.
- $\dot{M}_{\text{outflow}}$  と  $\dot{M}_{\text{inflow}}$  ともに NoBH の方が大きい.  $\dot{M}_{\text{inflow}}$  は AGN によるアウトフローによる寄与が少なくなるため NoBH の方が高くなると考え

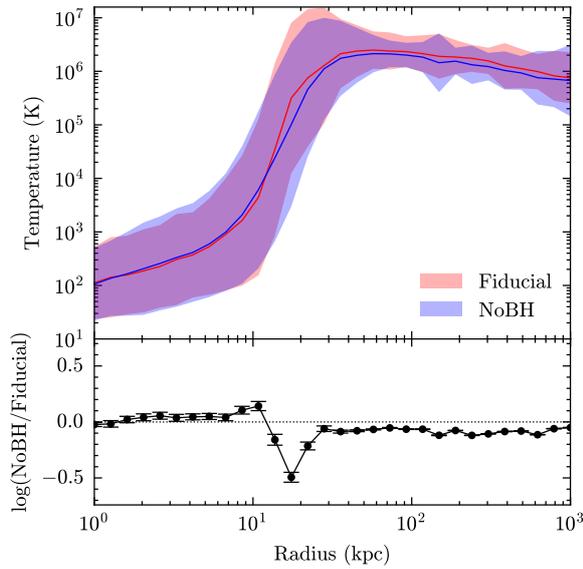


図 3: MW-like galaxies の温度の半径プロファイルの比較。Fiducial は 64 個の銀河を、NoBH は 80 個の銀河をスタッキングし、対数上で 30 区間に等分割し、それぞれの平均値と標準偏差を計算している。上段の誤差は  $1\sigma$  を表し、下段は  $\log \text{NoBH} - \log \text{Fiducial}$  を表し、誤差は信頼区間 95% を表す。

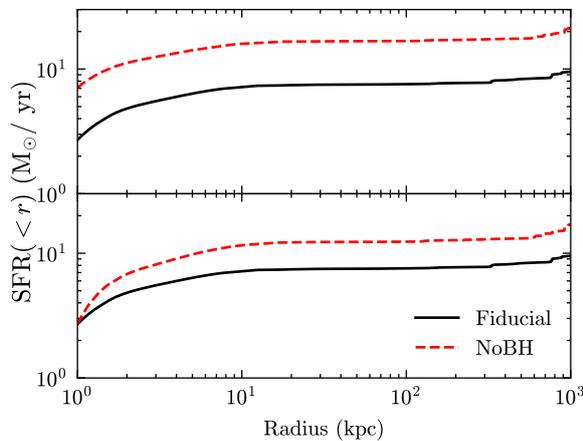


図 4: 累積星形成率の半径プロファイルの比較。黒線が Fiducial, 赤点線が NoBH でそれぞれの平均値を表している。上段は星形成率をそのまま描き、下段は  $10^0$  kpc 時の差分を差し引いた。

られ、 $\dot{M}_{\text{outflow}}$  に関しては流入率が高くなり、その分内部での星形成がより活発になった可能性がある。

- MW-like 銀河の星形成率は、Fiducial では 5.55

$M_{\odot}/\text{yr}$  で NoBH では  $16.00 M_{\odot}/\text{yr}$  と 3 倍近く星形成が活発であった。

今後より詳細な解析を行い、AGN がもたらす化学汚染などについても調査していく。

## Reference

- Genzel, R., Eisenhauer, F., & Gillessen, S. 2010, *Reviews of Modern Physics*, 82, 3121, doi: [10.1103/RevModPhys.82.3121](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.82.3121)
- Gupta, A., Mathur, S., Kingsbury, J., Das, S., & Krongold, Y. 2023, *Nature Astronomy*, 7, 799, doi: [10.1038/s41550-023-01963-5](https://doi.org/10.1038/s41550-023-01963-5)
- Nogueras-Lara, F., Schödel, R., Gallego-Calvente, A. T., et al. 2020, *Nature Astronomy*, 4, 377, doi: [10.1038/s41550-019-0967-9](https://doi.org/10.1038/s41550-019-0967-9)
- Oku, Y., & Nagamine, K. 2024, *Osaka Feedback Model III: Cosmological Simulation CROCODILE*, doi: [10.48550/arXiv.2401.06324](https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.06324)
- Oku, Y., Tomida, K., Nagamine, K., Shimizu, I., & Cen, R. 2023, 373, 181, doi: [10.1017/S1743921322004860](https://doi.org/10.1017/S1743921322004860)
- Pillepich, A., Nelson, D., Truong, N., et al. 2021, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 508, 4667, doi: [10.1093/mnras/stab2779](https://doi.org/10.1093/mnras/stab2779)
- Pillepich, A., Nelson, D., Springel, V., et al. 2019, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 490, 3196, doi: [10.1093/mnras/stz2338](https://doi.org/10.1093/mnras/stz2338)
- Pillepich, A., Sotillo-Ramos, D., Ramesh, R., et al. 2023, *Milky Way and Andromeda analogs from the TNG50 simulation*, arXiv, doi: [10.48550/arXiv.2303.16217](https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.16217)
- Predehl, P., Sunyaev, R. A., Becker, W., et al. 2020, *Nature*, 588, 227, doi: [10.1038/s41586-020-2979-0](https://doi.org/10.1038/s41586-020-2979-0)
- Su, M., Slatyer, T. R., & Finkbeiner, D. P. 2010, *The Astrophysical Journal*, 724, 1044, doi: [10.1088/0004-637X/724/2/1044](https://doi.org/10.1088/0004-637X/724/2/1044)
- Yang, H.-Y. K., Ruszkowski, M., & Zweibel, E. G. 2018, *Galaxies*, 6, 29, doi: [10.3390/galaxies6010029](https://doi.org/10.3390/galaxies6010029)
- Yusef-Zadeh, F., Hewitt, J. W., Arendt, R. G., et al. 2009, *The Astrophysical Journal*, 702, 178, doi: [10.1088/0004-637X/702/1/178](https://doi.org/10.1088/0004-637X/702/1/178)
- Zemp, M., Gnedin, O. Y., Gnedin, N. Y., & Kravtsov, A. V. 2011, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 197, 30, doi: [10.1088/0067-0049/197/2/30](https://doi.org/10.1088/0067-0049/197/2/30)