

宇宙論的シミュレーションデータベース  
Illustris-TNG を用いた銀河周辺物質の速度と元  
素分布構造の解明

埼玉大学理学部物理学科  
宇宙物理実験研究室

20RP021 西濱大将

2024/02/xx

## 概要

# 目次

第 1 章	はじめに	2
1.1	IllustrisTNG . . . . .	4
1.2	ビリアル半径 . . . . .	4
1.3	outflow に関して . . . . .	4
第 2 章	手法	5
2.1	IllustrisTNG のデータの取り扱い . . . . .	5
2.2	face-on と edge-on の導出 . . . . .	6
2.3	ビリアル半径 $R_{\text{vir}}$ . . . . .	6
2.4	outflow の計算 . . . . .	7
第 3 章	議論	8
第 4 章	まとめ	9
	謝辞	10
	参考文献	12

# 第 1 章

## はじめに

宇宙背景放射を観測した最新の人工衛星 Planck のデータを解析すると、宇宙のエネルギー密度は、通常物質 (バリオン) が  $4.93 \pm 0.04\%$  (68% CL)、ダークマターが  $26.43 \pm 0.04\%$  (68% CL)、ダークエネルギーが  $68.64 \pm 0.04\%$  (68% CL) であることがわかっている ([Aghanim et al. 2020](#))。このことから宇宙の大局的構造進化は、ダークエネルギーとダークマターが担っていると言われている。しかし、バリオンは元素の元となり、天体形成、超新星爆発やブラックホールなど、宇宙のさまざまな事象を引き起こす主役であり、宇宙の構造形成と進化を理解する上で我々が現在のところ直接観測できるのはバリオンだけである。

低赤方偏移宇宙における観測されたバリオンの量は不正確である。銀河や大規模構造の形成、星の形成からの電離放射線、金属、そしてアウトフローによるフィードバックによって複雑化しているからである ([Shull et al. 2012](#))。そのため、このバリオンの大半が未発見である。この問題は「ミッシングバリオン問題」と呼ばれ、宇宙物理学上に残された重要な問題の一つである。

低赤方偏移で観測されたバリオンは、電離放射線、銀河形成、星形成といった大規模な構造によって推定が非常に難しく、不正確になる。そのため、このバリオンの大半が未発見である。この問題は「ミッシングバリオン問題」と呼ばれ、宇宙物理学上に残された重要な問題の一つである。

銀河サーベイによってバリオンの約 10% が銀河、銀河群、銀河団などの崩壊した天体に存在することがわかり、特に過去 15 年間で、銀河間物質 (the InterGalactic Medium, IGM)、銀河ハロー、銀河周辺物質 (the CircumGalactic Medium, CGM) にかなりの量のガスが存在することがわかった。残りの 80%–90% のうち約半数は、IGM や中高温銀河間物質 (Warm-Hot Intergalactic Medium, WHIM) に存在すると言われている ([Shull](#)

et al. 2012; Danforth & Shull 2008)。

宇宙の構造形成を明らかにするためには、各階層でのバリオンの分布を定量的に調べる必要がある。私はこの中でも、我々の銀河系のような渦巻き銀河や楕円銀河周辺の物質構造について着目している。これらは特に、Circum Galactic Medium (CGM) と呼ばれ、可視光や電波でのスタッキング観測も報告されているが (ex., Tanimura et al. MNRAS, 2019)、ガス構造や元素分布の解明には至っていない。特に、銀河内で生成された元素がどのように銀河間空間に供給されたのか、そのメカニズムに私は着目している。最近、我々の銀河系内の X 線観測から、eROSITA バブルと呼ばれる銀河中心方向から延びる X 線で明るい構造において、アルファ元素の比率が太陽組成よりも高いという報告もなされている (Gupta et al. Nature Astro., 2023)。この結果は、一般に銀河風と呼ばれる大量の重力崩壊型超新星爆発により銀河内の (元素を含む) ガスが銀河間空間に放出される現象を示唆しているが、系統誤差も多く結論づけるには尚早である。一方で、銀河中心にある超巨大ブラックホール (活動銀河中心核: AGN) によるジェットに付随するような構造であれば、ガスの速度構造や元素の組成が太陽組成に近いことなどが予想される。

上記議論に決着をつけるためには、CGM の X 線直接観測が必須であるが、次世代衛星での観測を待つ必要がある。しかし、近年進歩が著しい宇宙論的シミュレーションデータベースを用いて予測することは可能である。宇宙論的シミュレーションは全世界に公開されているものも多く、Illustris-TNG(Phillepich et al. 2018) は次世代衛星の検出器感度の評価にも多く使われている。私は、Illustris-TNG のスナップショットデータの近傍渦巻き銀河のカタログを用いて、渦巻き銀河の周りのガスの速度と元素組成を系統的に調べることを考えている。データ容量も大きいですが、独自にメモリ展開手法などを開発して解決しており、これまで行ってきた私のコード開発の経験を活かしデータ解析を進めている。また、光学的に薄いプラズマモデルを過程して、シミュレーションデータをもとにした模擬 X 線スペクトルを作成し、実際にどのように将来衛星で観測するべきかの観測戦略の検討もすることを考えている。2023 年には高いエネルギー分光能力を実現する X 線分光撮像衛星「XRISM」の打ち上げが予定されており、我々の銀河系に付随するガスの高精度の分光観測データとの比較も行いたいと考えている。

- 1.1 IllustrisTNG
- 1.2 ビリアル半径
- 1.3 outflow に関して

## 第 2 章

# 手法

### 2.1 IllustrisTNG のデータの取り扱い

Illustris-TNG は、銀河形成をシミュレーションする大規模な磁気流体力学シミュレーションのシリーズで、2017 年に発表された Illustris プロジェクトの後継として、より高解像度とより正確な物理モデルを備えている。

Illustris-TNG は、暗黒物質、ガス、星の 3 つの物質成分をシミュレートします。暗黒物質は、銀河の重力を支配する仮説上の粒子で、ガスは銀河の星形成の材料となり、星は銀河の光源となります。

Illustris-TNG は、銀河の形成と進化のさまざまな側面をシミュレートします。具体的には、以下のようなことをシミュレートします。

\* 銀河の形成と進化\* 銀河の構造と組成\* 銀河の相互作用\* 銀河の進化の歴史

Illustris-TNG は、銀河形成の理解を深めるために重要なツールです。シミュレーション結果は、銀河の観測結果と比較することで、銀河形成の物理モデルを検証し、改善するために使用できます。

Illustris-TNG は、3 つの異なる解像度で実行されています。

\* TNG50：50 億パーセク（約 160 億光年）の体積を、約 5000 万個の粒子でシミュレートします。\* TNG100：100 億パーセク（約 320 億光年）の体積を、約 10 億個の粒子でシミュレートします。\* TNG300：300 億パーセク（約 960 億光年）の体積を、約 100 億個の粒子でシミュレートします。

Illustris-TNG のデータは、一般に公開されています。このデータは、銀河形成の研究を行う研究者や学生が使用できます。

## 2.2 face-on と edge-on の導出

## 2.3 ビリアル半径 $R_{\text{vir}}$

赤方偏移  $z$  においてビリアル平衡に達したダークマターハローの平均密度は：

$$\rho_{\text{vir}}(z) = \rho_{\text{cr}} \Delta_{\text{vir}} \quad (2.1)$$

$$\simeq 1.8 \times 10^{-27} \left( \frac{\Delta_{\text{vir}}}{200} \right) \left( \frac{h}{0.7} \right)^2 E^2(z) \text{ g cm}^{-3} \quad (2.2)$$

ここでビリアル半径内の全質量 (ビリアル質量) を  $M_{\text{vir}}$  を用いると

$$R_{\text{vir}} = \left( \frac{3M_{\text{vir}}}{4\pi\rho_{\text{vir}}(z)} \right)^{1/3} \quad (2.3)$$

$$\simeq 2.1 \left( \frac{M_{\text{vir}}}{10^{15} M_{\odot}} \right)^{1/3} \left( \frac{\Delta_{\text{vir}}}{200} \right)^{-1/3} \left( \frac{h}{0.7} \right)^{-2/3} E^{-2/3}(z) \text{ Mpc} \quad (2.4)$$

となり、観測される銀河団のサイズと質量等の関係を近似的に再現する。

ここでは近傍宇宙を考えているので、 $z = 0$  では  $E(z) = 1$  であり、 $\Delta_{\text{vir}} = 200$  のときのビリアル半径を  $R_{200}$  とすると

$$R_{200} \simeq 2.1 \left( \frac{M_{\text{vir}}}{10^{15} M_{\odot}} \right)^{1/3} \left( \frac{h}{0.7} \right)^{-2/3} \text{ Mpc} \quad (2.5)$$

**function** SOLVE\_VIRIAL\_MASS(radius, mass, density\_DM, density\_total)

valid\_indices  $\leftarrow$  indices of radius where total\_mass is not  $\infty$

radius  $\leftarrow$  radius[valid\_indices]

total\_mass  $\leftarrow$  total\_mass[valid\_indices]

sorted\_radius, sorted\_total\_mass  $\leftarrow$  sort radius, total\_mass based on radius

cum\_mass  $\leftarrow$  cumulative sum of sorted\_total\_mass

$h \leftarrow 0.6774$

virial\_radius  $\leftarrow 2.1 \times \left( \frac{\text{cum\_mass} \times 10^{10}}{10^{15}} \right)^{\frac{1}{3}} \times \left( \frac{h}{0.7} \right)^{-\frac{2}{3}}$

min\_index  $\leftarrow$  index of the element in radius

with the smallest value of  $(\text{radius} - \text{virial\_radius})^2$

$r_{200} \leftarrow \text{radius}[\text{min\_index}]$

**return**  $r_{200}$

**end function**



## 2.4 outflow の計算

## 第 3 章

## 議論

## 第 4 章

### まとめ

# 謝辭

# 参考文献

- Ade, P. a. R., Aghanim, N., Alves, M. I. R., et al. 2014, *Astronomy & Astrophysics*, 571, A1, doi: [10.1051/0004-6361/201321529](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201321529)
- Ade, P. a. R., Aghanim, N., Arnaud, M., et al. 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 594, A14, doi: [10.1051/0004-6361/201525814](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201525814)
- Aghanim, N., Akrami, Y., Ashdown, M., et al. 2020, *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6, doi: [10.1051/0004-6361/201833910](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910)
- Danforth, C. W., & Shull, J. M. 2008, *The Astrophysical Journal*, 679, 194, doi: [10.1086/587127](https://doi.org/10.1086/587127)
- Gupta, A., Mathur, S., Kingsbury, J., Das, S., & Krongold, Y. 2023, *Nature Astronomy*, doi: [10.1038/s41550-023-01963-5](https://doi.org/10.1038/s41550-023-01963-5)
- Komatsu, E., Smith, K. M., Dunkley, J., et al. 2011, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 192, 18, doi: [10.1088/0067-0049/192/2/18](https://doi.org/10.1088/0067-0049/192/2/18)
- Nelson, D., Springel, V., Pillepich, A., et al. 2021, *The IllustrisTNG Simulations: Public Data Release*, arXiv, doi: [10.48550/arXiv.1812.05609](https://doi.org/10.48550/arXiv.1812.05609). <http://arxiv.org/abs/1812.05609>
- Pillepich, A., Nelson, D., Truong, N., et al. 2021a, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 508, 4667, doi: [10.1093/mnras/stab2779](https://doi.org/10.1093/mnras/stab2779)
- . 2021b, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 508, 4667, doi: [10.1093/mnras/stab2779](https://doi.org/10.1093/mnras/stab2779)
- Planck Collaboration, Aghanim, N., Akrami, Y., et al. 2021, *A&A*, 652, C4, doi: [10.1051/0004-6361/201833910e](https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910e)
- Sato, K., Yamasaki, N. Y., Ishida, M., et al. 2022, *Journal of Low Temperature Physics*, 209, 971, doi: [10.1007/s10909-022-02910-w](https://doi.org/10.1007/s10909-022-02910-w)
- Schumann, M. 2014, *Brazilian Journal of Physics*, 44, 483, doi: [10.1007/](https://doi.org/10.1007/)

[s13538-014-0222-x](#)

Shull, J. M. 2003, 281, 1, doi: [10.1007/978-94-010-0115-1\\_1](#)

Shull, J. M., Smith, B. D., & Danforth, C. W. 2012, The Astrophysical Journal, 759, 23, doi: [10.1088/0004-637X/759/1/23](#)

Simionescu, A., Ettori, S., Werner, N., et al. 2021, Experimental Astronomy, 51, 1043, doi: [10.1007/s10686-021-09720-0](#)

Springel, V., White, S. D. M., Tormen, G., & Kauffmann, G. 2001, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 328, 726, doi: [10.1046/j.1365-8711.2001.04912.x](#)

Tristram, M., Banday, A. J., Douspis, M., et al. 2023, Astronomy & Astrophysics, doi: [10.1051/0004-6361/202348015](#)

Walker, S., Nagai, D., Simionescu, A., et al. 2019, Bulletin of the AAS, 51