

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	3
1.2	ビリアル半径	3
1.3	outflow に関して	3
第 2 章	手法	4
2.1	IllustrisTNG のデータの取り扱い	4
2.2	face-on と edge-on の導出	6
2.3	ビリアル半径 R_{vir}	7
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%、ダークマターが 26.43%、ダークエネルギーが 68.64% 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」と呼ばれている。

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 (Inter Galactic Medium, IGM)、銀河ハロー、銀河周辺物質 (Circum Galactic Medium, CGM)^{*1}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)。WHIM はほとんど完全電離した $10^5 - 10^7$ K で非常に希薄なガスであり、遠紫外線や軟 X 線を出す、観測で捉えるのが非常に難しい。それゆえ、未発見のバリオンの大部分が存在すると考えられている。WHIM は、個々の銀河

^{*1} 銀河周辺物質 (Circum Galactic Medium, CGM) には銀河から吹き出された物質のことを指す場合や、ビリアル半径内の物質のことを指す場合など文脈によって複数の意味を持つ。

周辺 (~ 10 kpc), 銀河の大集団である銀河団周辺 (~ 1 Mpc), 銀河団をもつなぐ宇宙の大規模構造 (~ 100 Mpc)、と宇宙の各階層構造に広く分布していると考えれ、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。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、そのメカニズムに着目してその解明を目指す。

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 Volker Springel が率いて作られた最先端の宇宙論的銀河形成シミュレーションで、銀河形成を促進する様々な物理過程を考慮しながら、ビッグバン直後から現在までの模擬宇宙の広い範囲をシミュレーションしている。シミュレーションデータは TNG50, TNG100, TNG300 の 3 つが存在し、それぞれ空間体積が 50 Mpc, 100 Mpc, 300 Mpc の立法体内でシミュレーションを行っている。最も大きい TNG300 は、銀河団などの珍しい天体の解析が可能であり、最大の銀河サンプルが得られる。一方、体積の小さい TNG50 では、希少天体のサンプリングは比較的限定されるが、TNG300 に比べ質量分解能は数百倍高く、銀河の構造的性質、銀河周辺のガスの詳細な構造、物理モデルの収束性などをより詳細に調べることができる。そこで本研究では TNG50-1 を利用して解析を行う。

Illustris プロジェクトのシミュレーションを含め、Illustris-TNG プロジェクトのシミュレーションデータは以下の通りが公開されている。

L205n1250TNG	L75n1820TNG	TNG300-2
L205n1250TNG_DM	L75n1820TNG_DM	TNG300-2-Dark
L205n2500TNG	L75n455TNG	TNG300-3
L205n2500TNG_DM	L75n455TNG_DM	TNG300-3-Dark
L205n625TNG	L75n910TNG	TNG50-1
L205n625TNG_DM	L75n910TNG_DM	TNG50-1-Dark
L35n1080TNG	TNG100-1	TNG50-2
L35n1080TNG_DM	TNG100-1-Dark	TNG50-2-Dark
L35n2160TNG	TNG100-2	TNG50-3
L35n2160TNG_DM	TNG100-2-Dark	TNG50-3-Dark
L35n270TNG	TNG100-3	TNG50-4
L35n270TNG_DM	TNG100-3-Dark	TNG50-4-Dark
L35n540TNG	TNG300-1	
L35n540TNG_DM	TNG300-1-Dark	

シミュレーションデータのディレクトリ下には次のようなディレクトリとファイルが存在する：output/, processing/, simulation.hdf5

output/ディレクトリ下には、グループカタログ、スナップショット、Subbox などのデータが存在する。グループカタログには Halo(銀河団) カタログや Subhalo(銀河) カタログが存在する。スナップショットには宇宙誕生を 0 として、現在を 99 として 100 個のスナップショットファイルが存在する。例えば TNG50-1 の場合、宇宙誕生から 0.179 Gyr をスナップショット 0 として 13.803 Gyr をスナップショット 99 としている。ディレクトリ「groups_*」、「snapdir_*」の*には 3 桁でスナップショット番号が入る。現在の宇宙 (スナップショット 99) を使用したい場合は、ディレクトリ「groups_099」、「snapdir_099」を見れば良い。

そのディレクトリ下には、グループカタログやスナップショットのデータは大きいため、複数のファイルに分割されていて、これをチャンクファイルという。グループカタログのチャンクファイルは「fof_subhalo_tab_*」もしくは「groups_*」のファイル名で定義され連番表記されている。

各スナップショットには、FoF と Subfind オブジェクトの両方を含むグループカタログが 1 つずつ関連付けられています。グループファイルは、生のスナップショットと同様に、少数のサブファイルに分割されます。TNG では、これらのファイルは "fof_subhalo_tab_*" と呼ばれていますが、オリジナルの Illustris では "groups_*" と呼ばれていました（それ以外は基本的に同じです）。すべての HDF5 グループカタログは次のグループを含む：Header, Group, Subhalo. 各グループ/サブグループのメンバー粒子の ID は、グループカタログファイルには格納されていません。むしろ、スナップショットファイル内の粒子/セルは、グループメンバーシップに従って並べられます。

混乱を避けるため、異なるタイプのオブジェクトを指す場合は以下の用語を使用します：

”Group”、”FoF Group”、”FoF Halo ”はすべてハローを指す。「サブグループ」, ”サブハロ”, ”サブファインドグループ”は全てサブハロを指す。各ハローの最初の（最も質量の大きい）サブグループは、”プライマリー・サブグループ”または”セントラル・サブグループ”です。同じハロー内の他のサブグループはすべて「セカンダリーサブグループ」または「サテライトサブグループ」です。

2.2 face-on と edge-on の導出

図 2.1 のように、銀河の回転面の上方または下方から見ているとき、その銀河を face-on galaxy と呼び、銀河の回転面を横から見ているとき、その銀河を edge-on galaxy という。シミュレーション上に作られた銀河は任意の方向から見ることができ、回転も自由に行うことができる。

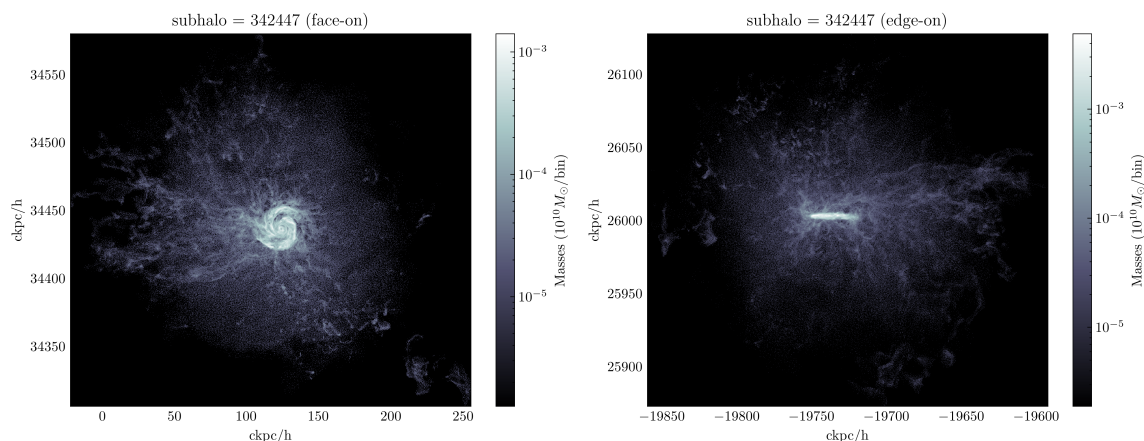


図 2.1

face-on の方向は質量分布が最も安定する方向と見ることもでき、その向きへの回転行列は次のように計算を行うことができる。粒子 i の座標・質量を添字 i を用いて慣性モーメントテンソル I は

$$I = \sum_i \begin{pmatrix} m_i(y_i^2 + z_i^2) & -m_i y_i x_i & -m_i z_i x_i \\ -m_i x_i y_i & m_i(x_i^2 + z_i^2) & -m_i z_i y_i \\ -m_i x_i z_i & -m_i y_i z_i & m_i(x_i^2 + y_i^2) \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

で与えられる。慣性モーメント I の固有値 λ_j (ただし $\lambda_0 < \lambda_1 < \lambda_2$)、固有ベクトル

χ_j ($j = 0, 1, 2$) を求めると、回転行列は $[\chi_0, \chi_1, \chi_2]$ となる。また edge-on はさらに x 軸に対して 90° 回転すればよい。

2.3 ビリアル半径 R_{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：

$$\rho_{\text{vir}}(z) = \rho_{\text{cr}} \Delta_{\text{vir}} \quad (2.2)$$

$$\simeq 1.8 \times 10^{-27} \left(\frac{\Delta_{\text{vir}}}{200} \right) \left(\frac{h}{0.7} \right)^2 E^2(z) \text{ g cm}^{-3} \quad (2.3)$$

と表せる。

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

$$R_{\text{vir}} = \left(\frac{3M_{\text{vir}}}{4\pi\rho_{\text{vir}}(z)} \right)^{1/3} \quad (2.4)$$

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

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} とすると次の式が成り立つ：

$$R_{200} \simeq 2.1 \left(\frac{M_{\text{vir}}}{10^{15} M_\odot} \right)^{1/3} \left(\frac{h}{0.7} \right)^{-2/3} \text{ Mpc} \quad (2.6)$$

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