

Identificación de subestructura en simulaciones de materia oscura

Martín Alejandro Paredes Sosa

Una tesis presentada para obtener el título de

Maestría en Ciencias (Física)

bajo la dirección de Carlos Antonio Calcáneo Roldán



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**

División de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Investigación en Física
Universidad de Sonora
Hermosillo, Sonora

Mayo de 2022

Dedicatoria

Identificación de subestructura en simulaciones de materia oscura

Martín Alejandro Paredes Sosa

Tesis presentada para el título de Maestría en Física

Mayo de 2022

Resumen

El modelo cosmológico actual asume que vivimos en un Universo “críticamente lleno”. Esto significa que la densidad del Universo es exactamente aquella necesaria para mantenerlo abierto y sin curvatura. La manera mas exitosa para estudiar la cosmología en los últimos 50 años han sido las simulaciones cosmológicas, las cuales apuntan a un Universo dominado por una componente no material con aproximadamente un tercio de su contenido constituido por materia oscura $\Omega_0 \approx \Omega_\lambda + \Omega_M \approx 0.7 + 0.3$. La distribución de la materia en estas simulaciones nos da un mecanismo para contrastar estos valores de densidad con la observada.

En este trabajo estudiamos la subestructura en simulaciones cosmológicas como posibles indicadores de los parámetros cosmológicos.

Declaración

Este escrito es resultado de un ejercicio de revisión, investigación, resolución y síntesis llevado a cabo en el grupo de Física Fundamental de la Universidad de Sonora. Aunque algunos aspectos del trabajo pudieran haber sido ya presentados en congresos o publicaciones independientes, ninguna parte de este trabajo, en su forma actual, ha sido presentada para la obtención de algún grado en otra institución o con fines no académicos. El trabajo, incluida la redacción del texto, es producto exclusivo de los esfuerzos del autor, excepto cuando se señale explícitamente en el texto alguna cita.

; 2022 por Martín Alejandro Paredes Sosa.

“Este documento se libera al público por su autor bajo una licencia *creative commons* Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-SA 4.0). Se puede reproducir en todo o en parte, redistribuir y adaptar por cualquier medio. Lo anterior está condicionado a que cualquiera de sus derivados deberán liberarse bajo las mismas condiciones y ha que se haga referencia al original (una versión completa de la licencia se puede encontrar en: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.es>) ”

Agradecimientos

Índice general

Resumen	III
Declaración	IV
Agradecimientos	v
Introducción	1
1. Materia Oscura	2
1.1. Materia y Energía en el Universo	2
1.2. Evidencia astrofísica de la Materia Oscura	5
2. Simulaciones Cosmológicas	7
2.1. Grandes Simulaciones	7
2.2. GADGET-4	8
3. Aproximación a las órbitas alrededor de un agujero negro	9
3.1. Condiciones iniciales del centro Galáctico	9
3.2. Cúmulo proyectado sobre el plano de S2	9
Conclusiones	10
Bibliografía	11

Índice de figuras

Índice de tablas

Introducción

Breaking News: LIGO just announce they found the gravitational wave,
February 11 2016 9:43 a.m. :)

Capítulo 1

Materia Oscura

Existe una gran cantidad de evidencia de que el Universo esta compuesto de una “*materia oscura*” no luminosa y este material no es la materia bariónica habitual de la vida cotidiana (protones, electrones, neutrones, etc.) sino alguna partícula con propiedades desconocidas. Determinar la naturaleza de la materia oscura es uno de los mas importantes problemas sin resolver en la cosmología moderna.

Muchas escalas se han probado en la busca de evidencia de materia oscura: desde la escala cosmológica o la escala global del Universo hasta la escala local de las galaxias. Recientemente, el segundo de estos métodos se encontró como el mas favorable debido a que es relativamente sencillo extraer información de la dinámica de sistemas cercanos. Experimentos en la escala cosmológica (e.g. WMAP [1], Misión Planck [2], o The Supernova Cosmology Project [3]) hacen posible medidas detalladas de muchos parámetros cosmológicos.

1.1. Materia y Energía en el Universo

La cantidad y composición de materia y energía en el Universo es de fundamental importancia en la cosmología. Por simplicidad, todas las formas de materia y energía se pueden escribir como la fracción de la densidad de energía crítica:

$$\Omega_o \equiv \frac{\rho_{tot}}{\rho_o} = \Omega_{rad} + \Omega_M + \Omega_\Lambda$$

donde los subíndices “ o ” denotan el valor de la época actual, $\rho_o = 3H_o^2/8\pi G \approx 1.88h^2\text{gcm}^{-3} \approx 278h^2\text{M}_\odot\text{kpc}^{-3}$ (en estas expresiones $H_o = 1000h\text{kms}^{-1}\text{Mpc}^{-1}$ es la constante de Hubble y h es un numero en el rango de 0.5 a 1 - donde $h \sim 0.7$ es el valor mas aceptado [4]). En la presente discusión descompondremos la densidad de materia/energía en tres componentes: la fracción aportada por la radiación (o especies relativistas) Ω_{rad} , la componente de materia Ω_M y una contribución suave Ω_Λ . (No hay razón a priori para considerar solo estas componentes, esta elección trata de reflejar los valores medidos actuales, donde la materia y la radiación son componentes evidentes).

Una de las observaciones mejor definidas en la cosmología (con una precisión de 0.05 %) es que la radiación cósmica de fondo radia como cuerpo negro de temperatura $T_o = 2.7277\text{ K}$. Esto significa que la contribución de los fotones a la densidad total de energía del Universo puede calcularse con precisión a ser $\Omega_\gamma h^2 = 2.48 \times 10^{-5}$. Si los neutrinos no tienen masa o son muy ligeros, entonces su densidad de energía tambien es muy conocida porque está relacionada con la de los fotones $\Omega_\nu h^2 = 6 \times \frac{7}{8} (4/11)^{\frac{4}{3}} \Omega_\gamma$ (considerando que hay 6 especies de neutrinos). La nucleosíntesis del Big Bang (BBN) restringe la cantidad de especies relativistas adicionales menos que se hayan producido después de la época de BBN [5].

Debido a que la contribución de la radiación a la densidad total de energía en el Universo es pequeña, podemos continuar la discusión tomando en cuenta solamente las otras dos componentes Ω_M y Ω_Λ

La temperatura de la Radiación Cósmica de Fondo (CMB de sus siglas en Ingles) es casi isotrópico en todo el cielo. Esta es evidencia de que el Universo inició en un estado de densidad infinita. Pero, a una menor escala de prueba, el CMB presenta una anisotropía en la temperatura de $\Delta T/T \approx 10^{-5}$. Estas fluctuaciones se pueden utilizar para determinar el valor de Ω_o .

En el estado caliente y denso del Universo temprano todas las partículas estaban ligadas. Esto incluye fotones y bariones (electrones y iones). Conforme el Universo se enfrió, llegó un punto donde los fotones se dispersaron de los bariones. El CMB que observamos esta compuesto de fotones que provienen de la superficie de esta última dispersión. A medida que los bariones se acumulaban en los pozos de potencial de

materia oscura, la presión de los fotones que actuó como una fuerza de restauración y esto resultó en una oscilación acústica impulsadas por la gravedad. Estas oscilaciones se pueden descomponer en sus modos de Fourier, las amplitudes multipolares C_{lm} de la anisotropía del CMB están determinados por aquellos modos con $k \sim lH_o/2$. La última dispersión ocurrió por un pequeño periodo de tiempo, esto hace al CMB una foto del Universo en el momento de la última dispersión donde cada modo se puede “ver” en una fase bien definida de su oscilación. Los modos atrapados en la máxima compresión o rarefacción conducen a la anisotropía de la temperatura más grande, que resulta en una serie de picos acústicos. La posición del primer pico depende del valor de Ω_o (De hecho: $l \approx 200/\sqrt{\Omega_o}$) [6]. Observaciones recientes del CMB [1, 2], permiten restringir la ubicación del prime pico ($l = 200 \pm 8$ [7]) que a su vez fija el valor de la densidad total de materia/energía del Universo: $\Omega_o = 1 \pm 0.1$.

La abundancia primitiva predicha de ^4He ($\approx 25\%$) fue el primer éxito del BBN. La consistencia de las predicciones de BBN para las abundancia de estos elementos ligeros (D, ^3He , ^4He y ^7Li) con sus abundancias primitivas inferidas ha sido una prueba importante del modelo Big-Bang en los primeros tiempos. De todos los elementos ligeros, el deuterio proporciona la mejor medición de la densidad de bariones en el Universo. Esto se debe a que la abundancia primitiva de deuterio es más sensible a la densidad de bariónica ($\propto 1/\rho_{baryon}^{1.7}$) y su evolución desde el Big-Bang es simple (las estrellas solo la destruyen).

Mediciones locales, donde alrededor de la mitad del material proviene de las estrellas, no refleja directamente las abundancias primordiales. Las líneas de Lyman del deuterio en el espectro de absorción de tres cuásares con alto corrimiento al rojo ($z > 2$) han permitido una determinación precisa de las abundancias primordiales del deuterio $\rho_D/\rho_H = (3.0 \pm 0.2) \times 10^{-5}$ [8]. Esto nos conduce al valor de la densidad de bariones del Universo de $\Omega_{baryon}h^2 = 0.02 \pm 0.002$ [8]. Mediciones actuales del CMB también proveen un límite de $\Omega_{baryon}h^2 > 0.019$ [7] que es consistente con los resultados anteriores.

Otra forma para medir la densidad de masa/energía total, es a través del parámetro de desaceleración.

$$q_o \equiv -\frac{(\ddot{R}/R)_o}{H_o^2} = \frac{\Omega_o}{2} [1 + 3p_o/\rho_o]$$

el cuál cuantifica la desaceleración de la expansión debido a la gravedad.

Este método depende de un conocimiento preciso de la distancia luminosa(d_L) para un objeto que, con un corrimiento al rojo bajo z , está relacionado con q_o mediante

$$d_L H_o = z + z^2(1 - q_o)/2 + \mathcal{O}(z^3) \quad (1.1)$$

por lo tanto, la precisión de las mediciones del flujo, \mathcal{F} , de objetos con luminosidad conocida, L , se puede usar para determinar q_o . (La distancia luminosa de un objeto se puede inferir de la ley del cuadrado inverso $d_L \equiv \sqrt{L/4\pi\mathcal{F}}$).

Dos grupos (Supernova Cosmology Project y the High-z Supernova Team) usan mediciones precisas del flujo de objetos con luminosidad bien definida (Supernova tipo Ia - SNeIa) para concluir que la expansión del Universo se esta acelerando en lugar de desacelerarse, es decir $q_o < 0$ [9, 10]. Esto implica que gran parte de la energía en el Universo es una componente desconocida que presión negativa. La explicación mas popular para esta nueva componente es la existencia de una constante cosmológica, $\Omega_\lambda \neq 0$.

Por lo tanto, combinando observaciones modernas del CMB [1, 2] , con recientes observaciones de supernovas [3, 11], el paradigma favorecido actualmente es un Universo en donde el contenido de materia corresponde aproximadamente a un tercio de la densidad total, es decir $\Omega_M \approx 0.3$ y existe una componente extra suave de energía oscura que contribuye $\Omega_\lambda \approx 0.6$. Actualmente se esta debatiendo la realidad y la naturaleza física de esta componente, pero por lo general es aceptada.

También es claro que el valor pequeño para la fracción de bariones en el Universo sugiere que la mayor parte de la materia ($\sim 90\%$) tiene que ser una forma de algún material no barionico desconocido.

1.2. Evidencia astrofísica de la Materia Oscura

En 1932, Oort analizo números y velocidades de estrellas cercanas al sol y concluyó que la cantidad de materia gravitante implicada por estas velocidades era 30 % a 50 % superior a la que debía por las estrellas visibles. Después, en 1993, Zwicky concluyó que la velocidad de dispersión en cúmulos ricos de galaxias requieren de

10 a 100 veces mas masa para mantenerlos unidos de lo que podrían explicar las galaxias luminosas mismas.

No es simple concluir de estos ejemplos que la evidencia de alguna materia exótica, pero si ilustran como la dinámica de las estrellas, galaxias y cúmulos sirven como una sonda para el contenido de materia en el Universo.

Más pruebas de la existencia de materia oscura provienen de la dinámica de sistemas galácticos, las curvas de rotación de galaxias espirales o la velocidad dispersión de enanas esferoidales. No se observa suficiente materia luminosa en las galaxias para explicar la cinemática observada, es decir, cuando las velocidades de galaxias espirales son medidas, generalmente se observa que al medir la velocidad de rotación lejos del centro, esta incrementa hasta alcanzar un valor constante. Esto contrasta con lo que se espera de una distribución de materia que corresponde a la materia luminosa (estrellas + gas) en la galaxia.

La escala mas pequeña, en la cual existe evidencia de materia oscura son las enanas esferoidales del Grupo Local. Observaciones de las velocidades de dispersión en la mayoría de estos sistemas [12], han soportado por un largo tiempo que son dominadas por materia oscura con proporciones de masa/luz en los rangos de 10-100.

Capítulo 2

Simulaciones Cosmológicas

Las simulaciones cosmológicas son una herramienta esencial para el estudio del Universo. Es el único experimento con el que contamos con el que podemos reproducir su evolución. Las simulaciones numéricas nos permiten un estudio detallado de formación de estructura no lineal y nos permite hacer conexiones con un Universo simple con alto corrimiento al rojo, con uno complejo como el que se observa en la actualidad.

El trabajo que se realiza va desde el estudio del agrupamiento gravitacional no lineal de materia oscura, formación de grupos de galaxias, interacción de galaxias aisladas y la evolución de gas intergaláctico. Su desarrollo ha permitido un inmenso avance en estas áreas, el cual no podría ser posible [13].

Con la rápida evolución en el rendimiento de las computadoras y algoritmos numéricos, han nacido múltiples códigos que simulan la formación de estructura del Universo. Muchos de estos códigos se han hecho públicos y libres, lo que ha permitido que el estudio sea mas sencillo para nuevos investigadores o grupos de investigación [14]. El futuro de las simulaciones numéricas esta en hacer mejoras en la precisión y en la fidelidad en la física de las técnicas de modelado.

2.1. Grandes Simulaciones

El desarrollo de códigos y el avance en el hardware de las maquinas modernas, has surgido grandes colaboraciones con la intención de realizar simulaciones cada vez mas grandes.

Milenium Simulation

Eagle Simulation

El proyecto EAGLE (Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments) es una colaboración de The Virgo Consortium, la cual es una simulación hidrodinámica de gran escala de un Universo de Λ CDM, el cual tenía como objetivo entender como las galaxias se forman y evolucionan. La mas grande de las simulaciones se realizo con 6.8 billones de partículas, en un volumen de 100 Mpc por lado, conteniendo al menos 10,000 galaxias del tamaño de la vía láctea, la cual tardo mas de un mes y medio de tiempo de computo y una de la mas grandes supercomputadoras con 4000 núcleos de procesamiento usando una versión modificada del código de simulación GADGET-2 [15, 16].

La simulación empieza en un Universo todavía muy uniforme (sin formación de estrellas o galaxias) usando parámetros motivados por las observaciones del satélite Planck y del CMB [1, 2].

2.2. GADGET-4

Los códigos GADGET han sido uno de los mas utilizados en el estudio de formación de estructura y estudio de la materia oscura.

Capítulo 3

Aproximación a las órbitas alrededor de un agujero negro

3.1. Condiciones iniciales del centro Galáctico

3.2. Cúmulo proyectado sobre el plano de S2

Conclusiones

En este trabajo estudiamos el problema de tres cuerpos restringido y los puntos Lagrangianos del sistema Tierra-Luna. Al adoptar un sistema de referencia no i

Bibliografía

- [1] C. L. Bennett, D. Larson, J. L. Weiland, N. Jarosik, G. Hinshaw, N. Odegard, K. M. Smith, R. S. Hill, B. Gold, M. Halpern, E. Komatsu, M. R. Nolta, L. Page, D. N. Spergel, E. Wollack, J. Dunkley, A. Kogut, M. Limon, S. S. Meyer, G. S. Tucker, and E. L. Wright, “Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results,” *ApJS*, vol. 208, p. 20, Oct. 2013.
- [2] Planck Collaboration, N. Aghanim, Y. Akrami, F. Arroja, M. Ashdown, J. Aumont, C. Baccigalupi, M. Ballardini, A. J. Banday, R. B. Barreiro, N. Bartolo, S. Basak, R. Battye, K. Benabed, J. P. Bernard, M. Bersanelli, P. Bielewicz, J. J. Bock, J. R. Bond, J. Borrill, F. R. Bouchet, F. Boulanger, M. Bucher, C. Burigana, R. C. Butler, E. Calabrese, J. F. Cardoso, J. Carron, B. Casaponsa, A. Challinor, H. C. Chiang, L. P. L. Colombo, C. Combet, D. Contreras, B. P. Crill, F. Cuttaia, P. de Bernardis, G. de Zotti, J. Delabrouille, J. M. Delouis, F. X. Désert, E. Di Valentino, C. Dickinson, J. M. Diego, S. Donzelli, O.é@, M. Douspis, A. Ducout, X. Dupac, G. Efstathiou, F. Elsner, T. A. Enßlin, H. K. Eriksen, E. Falgarone, Y. Fantaye, J. Fergusson, R. Fernandez-Cobos, F. Finelli, F. Forastieri, M. Frailis, E. Franceschi, A. Frolov, S. Galeotta, S. Galli, K. Ganga, R. T. Génova-Santos, M. Gerbino, T. Ghosh, J.ález-Nuevo@, K. M. Górski, S. Gratton, A. Gruppuso, J. E. Gudmundsson, J. Hamann, W. Handley, F. K. Hansen, G. Helou, D. Herranz, S. R. Hildebrandt, E. Hivon, Z. Huang, A. H. Jaffe, W. C. Jones, A. Karakci, E.änen@, R. Kesitalo, K. Kiiveri, J. Kim, T. S. Kisner, L. Knox, N. Krachmalnicoff, M. Kunz, H. Kurki-Suonio, G. Lagache, J. M. Lamarre, M. Langer, A. Lasenby, M. Latanzi, C. R. Lawrence, M. Le Jeune, J. P. Leahy, J. Lesgourgues, F. Levrier,

- A. Lewis, M. Liguori, P. B. Lilje, M. Lilley, V. Lindholm, M. López-Caniego, P. M. Lubin, Y. Z. Ma, J. F. Macías-Pérez, G. Maggio, D. Maino, N. Mandolesi, A. Mangilli, A. Marcos-Caballero, M. Maris, P. G. Martin, M. Martinelli, E. Iñez-González, S. Matarrese, N. Mauri, J. D. McEwen, P. D. Meerburg, P. R. Meinhold, A. Melchiorri, A. Mennella, M. Migliaccio, M. Millea, S. Mitra, M. A. Miville-Deschênes, D. Molinari, A. Moneti, L. Montier, G. Morgante, A. Moss, S. Mottet, M. Münchmeyer, P. Natoli, H. U. Nørgaard-Nielsen, C. A. Oxborrow, L. Pagano, D. Paoletti, B. Partridge, G. Patanchon, T. J. Pearson, M. Peel, H. V. Peiris, F. Perrotta, V. Pettorino, F. Piacentini, L. Polastri, G. Polenta, J. L. Puget, J. P. Rachen, M. Reinecke, M. Remazeilles, C. Renault, A. Renzi, G. Rocha, C. Rosset, G. Roudier, J. A. Rubiño-Martín, B. Ruiz-Granados, L. Salvati, M. Sandri, M. Savelainen, D. Scott, E. P. S. Shellard, M. Shiraishi, C. Sirignano, G. Sirri, L. D. Spencer, R. Sunyaev, A. S. Suur-Uski, J. A. Tauber, D. Tavagnacco, M. Tenti, L. Terenzi, L. Toffolatti, M. Tomasi, T. Trombetti, J. Valiviita, B. Van Tent, L. Vibert, P. Vielva, F. Villa, N. Vittorio, B. D. Wandelt, I. K. Wehus, M. White, S. D. M. White, A. Zacchei, and A. Zonca, “Planck 2018 results. I. Overview and the cosmological legacy of Planck,” *A&A*, vol. 641, p. A1, Sept. 2020.
- [3] S. Perlmutter, G. Aldering, G. Goldhaber, R. A. Knop, P. Nugent, P. G. Castro, S. Deustua, S. Fabbro, A. Goobar, D. E. Groom, I. M. Hook, A. G. Kim, M. Y. Kim, J. C. Lee, N. J. Nunes, R. Pain, C. R. Pennypacker, R. Quimby, C. Lidman, R. S. Ellis, M. Irwin, R. G. McMahon, P. Ruiz-Lapuente, N. Walton, B. Schaefer, B. J. Boyle, A. V. Filippenko, T. Matheson, A. S. Fruchter, N. Pagnia, H. J. M. Newberg, W. J. Couch, and T. S. C. Project, “Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae,” *ApJ*, vol. 517, pp. 565–586, June 1999.
- [4] D. J. Croton, “Damn You, Little h ! (Or, Real-World Applications of the Hubble Constant Using Observed and Simulated Data),” *PASA*, vol. 30, p. e052, Oct. 2013.
- [5] S. Burles, K. M. Nollett, J. W. Truran, and M. S. Turner, “Sharpening the

- Predictions of Big-Bang Nucleosynthesis,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 82, pp. 4176–4179, May 1999.
- [6] M. S. Turner, “Dark Matter and Dark Energy in the Universe,” in *The Third Stromlo Symposium: The Galactic Halo* (B. K. Gibson, R. S. Axelrod, and M. E. Putman, eds.), vol. 165 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, p. 431, Jan. 1999.
- [7] W. Hu, M. Fukugita, M. Zaldarriaga, and M. Tegmark, “Cosmic Microwave Background Observables and Their Cosmological Implications,” *ApJ*, vol. 549, pp. 669–680, Mar. 2001.
- [8] S. Burles, K. M. Nollett, and M. S. Turner, “Big Bang Nucleosynthesis Predictions for Precision Cosmology,” *ApJ*, vol. 552, pp. L1–L5, May 2001.
- [9] S. Perlmutter, G. Aldering, M. della Valle, S. Deustua, R. S. Ellis, S. Fabbro, A. Fruchter, G. Goldhaber, D. E. Groom, I. M. Hook, A. G. Kim, M. Y. Kim, R. A. Knop, C. Lidman, R. G. McMahon, P. Nugent, R. Pain, N. Panagia, C. R. Pennypacker, P. Ruiz-Lapuente, B. Schaefer, and N. Walton, “Discovery of a supernova explosion at half the age of the Universe,” *Nature*, vol. 391, pp. 51–54, Jan. 1998.
- [10] B. P. Schmidt, N. B. Suntzeff, M. M. Phillips, R. A. Schommer, A. Clocchiatti, R. P. Kirshner, P. Garnavich, P. Challis, B. Leibundgut, J. Spyromilio, A. G. Riess, A. V. Filippenko, M. Hamuy, R. C. Smith, C. Hogan, C. Stubbs, A. Diercks, D. Reiss, R. Gilliland, J. Tonry, J. Maza, A. Dressler, J. Walsh, and R. Ciardullo, “The High-Z Supernova Search: Measuring Cosmic Deceleration and Global Curvature of the Universe Using Type IA Supernovae,” *ApJ*, vol. 507, pp. 46–63, Nov. 1998.
- [11] A. Conley, G. Goldhaber, L. Wang, G. Aldering, R. Amanullah, E. D. Commins, V. Fadeyev, G. Folatelli, G. Garavini, R. Gibbons, A. Goobar, D. E. Groom, I. Hook, D. A. Howell, A. G. Kim, R. A. Knop, M. Kowalski, N. Kuznetsova, C. Lidman, S. Nobili, P. E. Nugent, R. Pain, S. Perlmutter, E. Smith, A. L. Spadafora, V. Stanishev, M. Strovink, R. C. Thomas, W. M. Wood-Vasey, and

- Supernova Cosmology Project, “Measurement of Ω_m , Ω_Λ from a Blind Analysis of Type Ia Supernovae with CMAGIC: Using Color Information to Verify the Acceleration of the Universe,” *ApJ*, vol. 644, pp. 1–20, June 2006.
- [12] M. Aaronson and E. W. Olszewski, “Dark Matter in Dwarf Galaxies,” in *Large Scale Structures of the Universe* (J. Audouze, M. C. Pelletan, A. Szalay, Y. B. Zel’dovich, and P. J. E. Peebles, eds.), vol. 130, p. 409, Jan. 1988.
- [13] V. Springel, N. Yoshida, and S. D. M. White, “GADGET: a code for collisionless and gasdynamical cosmological simulations,” *New A*, vol. 6, pp. 79–117, Apr. 2001.
- [14] V. Springel, R. Pakmor, O. Zier, and M. Reinecke, “Simulating cosmic structure formation with the GADGET-4 code,” *MNRAS*, vol. 506, pp. 2871–2949, Sept. 2021.
- [15] R. A. Crain, J. Schaye, R. G. Bower, M. Furlong, M. Schaller, T. Theuns, C. Dalla Vecchia, C. S. Frenk, I. G. McCarthy, J. C. Helly, A. Jenkins, Y. M. Rosas-Guevara, S. D. M. White, and J. W. Trayford, “The EAGLE simulations of galaxy formation: calibration of subgrid physics and model variations,” *MNRAS*, vol. 450, pp. 1937–1961, June 2015.
- [16] J. Schaye, R. A. Crain, R. G. Bower, M. Furlong, M. Schaller, T. Theuns, C. Dalla Vecchia, C. S. Frenk, I. G. McCarthy, J. C. Helly, A. Jenkins, Y. M. Rosas-Guevara, S. D. M. White, M. Baes, C. M. Booth, P. Camps, J. F. Navarro, Y. Qu, A. Rahmati, T. Sawala, P. A. Thomas, and J. Trayford, “The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments,” *MNRAS*, vol. 446, pp. 521–554, Jan. 2015.