

ARTÍCULO - Tesis Premiadas Convocatoria de Premios RADE 2025

SIMULACIONES NUMÉRICAS PARA DESCIFRAR LA FORMACIÓN DE ESTRUCTURAS COSMOLÓGICAS

Numerical simulations to unravel cosmological structure formation

David Vallés Pérez*

Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Bologna. Italia

david.vallesperez@unibo.it

RESUMEN

La formación de estructuras en el Universo es un proceso dinámico y no lineal, gobernado por flujos de materia que conectan regiones de propiedades físicas y escalas muy diversas. En el marco del modelo cosmológico concordante, pequeñas inhomogeneidades primordiales evolucionan a lo largo del tiempo cósmico, hasta dar lugar a una compleja red de galaxias, cúmulos, filamentos y vacíos, conocida como la telaraña cósmica. Comprender estos procesos requiere de, no solo simulaciones numéricas cada vez más realistas, sino también herramientas de análisis capaces de extraer información física relevante de datos altamente complejos. Este artículo presenta un resumen global de cómo la Cosmología Computacional permite estudiar el ensamblaje jerárquico de las estructuras, con especial atención a las mayores estructuras del Universo, los cúmulos de galaxias. Se revisa el papel de los flujos de materia en su crecimiento, la generación de turbulencia y ondas de choque en el medio intracumular, y sus consecuencias físicas y observacionales. Finalmente, se aborda también el estudio de los vacíos cósmicos, como el extremo opuesto de esta telaraña cósmica, mostrando que su dinámica es más compleja de lo que sugiere la imagen tradicional. En conjunto, estos resultados refuerzan una visión unificada de la formación de estructuras como un proceso continuo de redistribución de materia a lo largo del Universo.

PALABRAS CLAVE: Astrofísica, cosmología, astrofísica computacional, simulaciones cosmológicas, estructura a gran escala del Universo, cúmulos de galaxias.

ABSTRACT

The formation of structures in the Universe is a dynamic and intrinsically non-linear process, governed by matter flows that connect regions spanning a wide range of physical properties and spatial scales. Within the framework of the concordance cosmological model, small primordial inhomogeneities evolve over cosmic time into a complex network of galaxies, clusters, filaments, and voids; commonly referred to as the cosmic web. Understanding this evolution requires not only increasingly realistic numerical simulations, but also analysis tools capable of extracting physically meaningful information from highly complex data. This article provides an overview of how Computational Cosmology enables the study of the hierarchical assembly of cosmic structures, with particular emphasis on galaxy clusters as the most massive bound systems in the Universe. We review the role of matter flows in their growth, the generation of turbulence and shock waves in the intracluster medium, and the resulting physical and observational implications. Finally, we also address the study of cosmic voids as the opposite end of the cosmic web, showing that their dynamics are more complex than suggested by the traditional picture. Taken together, these results support a unified view of structure formation as a continuous process of matter redistribution throughout the Universe.

KEYWORDS: Astrophysics, Cosmology, Computational Astrophysics, Large-Scale Structure of the Universe, Galaxy Clusters.

* El autor fue galardonado con el Premio Ciencias Experimentales y Tecnológicas en la Convocatoria de Premios a la Investigación RADE 2025 a la mejor tesis doctoral por su tesis *Unravelling the complexity of cosmic flows: strong gradients, shock waves and turbulence*.

1. EL UNIVERSO CONCORDANTE: CONTENIDO Y DINÁMICA

En las últimas décadas, la cosmología ha alcanzado un notable avance en la descripción del Universo en sus más grandes escalas, pasando de ser una descripción de órdenes de magnitud a una ciencia capaz de realizar predicciones precisas (y ponerlas a prueba). Bajo el llamado modelo cosmológico concordante, o Λ CDM (por sus siglas en inglés: Λ , representando a la energía oscura; y CDM, referido a la materia oscura fría), el Universo se entiende como un sistema homogéneo (equivalente en todo punto) e isótropo (similar en todas direcciones) en expansión acelerada, cuya dinámica viene regida por la Relatividad General [1].

En este escenario, la materia ordinaria (de la que galaxias, estrellas, planetas y nosotros mismos estamos formados; constituida por las partículas del Modelo Estándar) representa solo una pequeña fracción (inferior al 5%) del contenido energético total del Universo, pero es responsable de (casi) todos los procesos astrofísicos observables. El resto del contenido energético corresponde a la elusiva materia oscura, que desde los años 30 ([2]; aunque con más fuerza desde el estudio de las curvas de rotación de las galaxias espirales por Vera Rubin, [3]) detectamos debido a su influjo gravitatorio, pero cuya naturaleza fundamental todavía desconocemos; y la, si cabe, más misteriosa energía oscura, responsable de la expansión acelerada del Universo.

Este marco se ha consolidado gracias a la convergencia de diversas pruebas observacionales que estudian el Universo en épocas y regímenes físicos complementarios. La expansión cósmica se estableció hace ahora casi un siglo, tras las observaciones espectroscópicas de E. Hubble [4] que revelaban que las galaxias se alejan de nosotros a velocidades mayores cuanto más lejanas son. En los años 60, el descubrimiento de la radiación de fondo de microondas, liberada cuando el Universo tenía menos de 400 000 años de edad, proporcionó una imagen precisa del Universo primitivo y de las condiciones a partir de las cuales surgirían las estructuras [5]. Ya entrados los años 80 y 90, los grandes cartografiados de galaxias han permitido caracterizar la distribución de materia a gran escala [6]; mientras que las observaciones de supernovas de tipo Ia revelaron la expansión acelerada del Universo [7]. La consistencia entre estos sondeos ha sido clave para el establecimiento del modelo concordante como nuestra descripción más robusta, hasta la fecha, del Universo a gran escala.

A pesar de sus éxitos, el modelo concordante presenta problemas abiertos que se manifiestan, principalmente, en las escalas más pequeñas, donde la materia ordinaria juega un papel dominante. Aunque estas pequeñas discrepancias podrían revelar deficiencias en el modelo Λ CDM, activamente investigadas, es igualmente posible que queden resueltas dentro de este marco mediante una comprensión más profunda de la física de los bariones. En este régimen, procesos como la acreción anisotrópica de materia y la consiguiente aparición de flujos cósmicos altamente no lineales (es decir, que no podemos resolver con

lápiz y papel, o *analíticamente*) desempeñan un papel clave en la formación y evolución de las estructuras. Su estudio constituye el contexto en el que se enmarca el trabajo de la Tesis que ha sido premiada por la RADE, titulada “*Unravelling the complexity of cosmic flows: strong gradients, shock waves and turbulence*” [8], y supervisada por los Profs. Susana Planelles y Vicent Quilis en la Universitat de València.

2. DE LA HOMOGENEIDAD A LA TELARAÑA CÓSMICA: LA FORMACIÓN DE ESTRUCTURAS

En este marco, la formación de estructuras tiene lugar debido a la evolución, durante miles de millones de años, de pequeñas inhomogeneidades presentes ya en el Universo primitivo, cuyo origen se remonta a las primeras sextillonésimas de segundo (10^{-36} s) tras el llamado *Big Bang* [9]. Estas perturbaciones, inicialmente de amplitud muy pequeña, crecen con el tiempo debido a la inestabilidad gravitatoria; esto es, el hecho de que las regiones ligeramente más densas atraigan, progresivamente, más materia, amplificando así las diferencias iniciales a medida que el Universo evoluciona.

El resultado de este proceso es la aparición de una compleja red de estructuras, conocida popularmente como la *Telaraña Cósmica*, que fue estudiada teórica y computacionalmente desde los años 70 y confirmada, solo hace unas pocas décadas, mediante observaciones de grandes cartografiados de galaxias [10]. Esta red está compuesta por filamentos (con extensiones típicas de decenas de millones a un centenar de millones de años-luz) que conectan regiones de alta densidad, los cúmulos de galaxias situados en los nodos de esta red; así como paredes o láminas de materia muy difusa, y regiones extensas de muy baja densidad, denominadas vacíos cósmicos. La telaraña cósmica constituye el marco topológico en el que se desarrolla la formación de estructuras, y refleja de manera directa la dinámica y la evolución no lineal del colapso gravitatorio.

3. LA COSMOLOGÍA COMPUTACIONAL: SIMULAR UN UNIVERSO NO LINEAL

El problema en cuestión es, tal y como hemos revisado, profundamente no lineal. Solo las primeras etapas de la evolución de las estructuras en el Universo se pueden describir mediante las llamadas *teorías perturbativas*, pudiéndose alcanzar una comprensión analítica de las mismas. Estas aproximaciones dejan de ser aplicables cuando las regiones más densas colapsan gravitatoriamente, las perturbaciones dejan de ser matemáticamente “pequeñas”, y los flujos de materia se vuelven complejos. En este contexto, la formación de estructuras cósmicas se debe abordar como un *problema de valor inicial*: dadas unas condiciones iniciales y las leyes que gobiernan la evolución física del sistema, se sigue dicha evolución mediante simulaciones numéricas, donde el espacio (un determinado volumen de

un universo, supuesto estadísticamente equivalente al nuestro) y el tiempo (desde dichas condiciones iniciales, hasta el instante actual) se discretizan, esto es, se representan con un número finito de elementos (en contraste con nuestra experiencia cotidiana, donde estas son variables aparentemente continuas).

Las simulaciones cosmológicas modernas permiten modelizar, de forma conjunta, la dinámica de la materia oscura y la ordinaria. La primera puede describirse como un fluido sin colisiones, es decir, que evoluciona regido únicamente por la gravedad. Los bariones, sin embargo, interactúan frecuentemente consigo mismos, ejerciendo presión al tratar de ser comprimidos, de forma análoga a lo que ocurre cuando empujamos el émbolo de una jeringuilla llena de aire. Esta naturaleza *colisional* de la materia ordinaria complica de forma notable el problema, ya que introduce fenómenos como las ondas de choque, nuevos modos para el intercambio y disipación de energía y, en términos generales, una evolución gobernada por la termodinámica, que se añade a la ya compleja dinámica gravitatoria.

Sin embargo, la simulación numérica no es, en sí misma, una solución completa al problema. Existen numerosas herramientas y códigos numéricos de gran complejidad, basados en técnicas y aproximaciones distintas, desarrollados para abordar este problema desde perspectivas complementarias. Entre ellos, se encuentra el código cosmológico MASCLÉT [11], desarrollado en la Universitat de València, que constituye la base de una parte sustancial de los resultados que aquí se resumen. Cada una de estas simulaciones puede requerir millones de horas de cómputo en paralelo en algunos de los superordenadores más potentes del mundo, así como espacios de almacenamiento centenares o miles de veces superior al de un ordenador doméstico. Aun así, la capacidad computacional impone, por ejemplo, límites a la resolución (es decir, cómo de finamente podemos describir nuestro sistema), y hacen necesario el uso de aproximaciones fenomenológicas para describir los procesos que ocurren a escalas más pequeñas. Por ello, el estudio de la formación de galaxias y cúmulos de galaxias no solo requiere simulaciones cada vez más complejas; sino también el desarrollo de métodos de análisis capaces de extraer la información física que nos permita comparar estos universos simulados con las observaciones del Universo real.

4. LA NECESIDAD DE NUEVAS HERRAMIENTAS PARA UN PROBLEMA COMPLEJO: EL PAPEL DE LA CIENCIA ABIERTA

Estos métodos de análisis plantean retos complejos, que derivan de la complejidad de procesos físicos y de escalas que se acoplan en la descripción de las estructuras cósmicas. Por ejemplo, fenómenos que ocurren a escalas por debajo del año-luz (como la formación estelar) pueden tener efectos de gran calado sobre las escalas de los cúmulos de galaxias, de millones de años luz. Las magnitudes que obtenemos de las simulaciones (densidades de distintos tipos de materia, velocidades, temperaturas del plasma, etc.) contienen una

descripción completa, bajo las hipótesis del modelo, de las estructuras en cuestión; sin embargo, identificar y aislar los procesos físicos en juego o las señas que nos permitirán comparar con observaciones del Universo real no es, en absoluto, una tarea trivial.

En este contexto, se hace necesario el desarrollo de herramientas capaces de descomponer y caracterizar campos físicos altamente complejos, como la velocidad que describe el movimiento del gas en un cúmulo de galaxias. En esta Tesis, se han desarrollado métodos específicos para separar y analizar distintas componentes del flujo en distintos tipos de simulaciones, permitiendo por ejemplo aislar aquellos procesos que comprimen y calientan el gas, de aquellos que lo hacen rotar (i.e. que lo *remueven*, tanto a gran como a pequeña escala, generando así flujos turbulentos; [12, 13]).

A un nivel todavía más fundamental nótese que, en un universo complejo y jerárquico, la definición de estructuras como galaxias, cúmulos o vacíos cósmicos no es unívoca, y dependen de criterios físicos y algorítmicos. Esta ambigüedad motivó, en el curso del trabajo que aquí se reseña, la revisión crítica y el desarrollo de métodos específicos para su identificación, tanto en simulaciones como en observaciones [14, 15].

Esta complejidad metodológica puede dificultar la reproducibilidad y la transparencia del progreso científico en el campo, a no ser que las herramientas utilizadas puedan ser comprobadas y contrastadas por otros científicos. En este sentido, la Ciencia Abierta permite avanzar hacia una comprensión más robusta de los problemas en cuestión, aunque no sea siempre la práctica dominante. Las herramientas desarrolladas durante esta Tesis han sido siempre puestas a disposición de la comunidad científica en repositorios abiertos.

5. EL ENSAMBLAJE DE LOS CÚMULOS DE GALAXIAS EN EL UNIVERSO JERÁRQUICO

Los cúmulos de galaxias son las estructuras gravitacionalmente ligadas más masivas del Universo, conteniendo masas de centenares a miles de billones de veces la del Sol, extendiéndose a lo largo de millones de años luz. Como en el Universo al completo, la mayor parte de su masa es oscura; y, por lo que respecta a la bariónica, su mayoría no se encuentra en forma de las galaxias que observamos con luz visible, sino que constituye un plasma calentado a decenas de millones de grados, que conocemos como medio intracumular (o ICM por sus siglas en inglés) y que observamos con satélites de rayos X. Su posición singular como los objetos más masivos, en la cima de la jerarquía de estructuras cósmicas, los convierten en objetos de gran interés para la cosmología; y, simultáneamente, en laboratorios astrofísicos donde poder estudiar la interacción entre galaxias, las propiedades microfísicas de plasmas en condiciones extremas, etc.

Los cúmulos no se forman como objetos aislados ni en un único episodio, sino que crecen de manera extendida en el tiempo (pero intermitente y episódica) a lo largo de los casi 14 mil millones de años de historia cósmica, mediante una compleja combinación de procesos. La materia de las regiones menos densas del Universo es poco a poco incorporada (en la jerga astrofísica, *acretada*) de manera suave hacia los cúmulos, mientras que los filamentos de la estructura a gran escala actúan a su vez como “autovías” de ingentes cantidades de gas. A pesar de eso, tal y como se estudió en la Ref. [16], la mayor parte de su masa se ensambla en los fenómenos más energéticos del Universo: las fusiones de cúmulos de galaxias, donde la estructura de los mismos se puede ver modificada de forma drástica.

El estudio de estos procesos presenta un reto fundamental: cuando observamos un cúmulo, lo estamos viendo en un instante determinado de su historia, y no tenemos acceso (como sí es posible mediante simulaciones) a su evolución temporal completa. Dos cúmulos de tamaños, masas y temperaturas similares en el presente pueden haber seguido trayectorias evolutivas muy distintas, e inferir su historia a partir de observables es una tarea ardua. Esta limitación nos llevó a estudiar y desarrollar, mediante nuestras simulaciones, indicadores capaces de capturar, de forma indirecta, la huella que estos eventos de formación dejan a lo largo del tiempo, permitiéndonos clasificar los cúmulos según su estado dinámico y reconstruir, parcialmente, su historia [17, 18, 19].

6. TURBULENCIA EN EL MEDIO INTRACUMULAR: ORIGEN, NATURALEZA Y CONSECUENCIAS

El medio intracumular es un gas ionizado (esto es, un *plasma*, donde los electrones y los núcleos atómicos se han desligado), caliente (con temperaturas que rebasan las decenas de millones de grados) y difuso (con densidades de entre decenas y decenas de miles de partículas por metro cúbico; esto es, un cuadrillón de veces menos denso que el agua, o mil trillones de veces menos denso que el aire en condiciones normales), que no se encuentra en reposo, sino que presenta movimientos, tanto ordenados y a gran escala (asociados la formación y el colapso de las estructuras mismas) como irregulares y a pequeña escala, que suelen definirse como turbulencia. Resolver y caracterizar estos flujos turbulentos en objetos virtuales, recreados mediante simulaciones cosmológicas, es una tarea computacionalmente ardua y constituye una avenida actual de investigación [20].

En un contexto cosmológico, la turbulencia en el ICM se genera de manera natural a consecuencia de su ensamblaje jerárquico. Las fusiones entre cúmulos liberan grandes cantidades de energía, parte de la cual se transfiere al gas en forma de agitación cuasi-caótica, produciendo movimientos desordenados que se van fragmentando, cada vez, en escalas menores [21].

La presencia de turbulencia tiene consecuencias físicas y observacionales de gran calado. Por un lado, contribuye a oponerse a la atracción gravitatoria del cúmulo. Por tanto, obviarla puede introducir sesgos en las medidas e inferencias que hagamos a partir de datos observacionales, como por ejemplo estudiamos en la Ref. [22]. Por otro lado, el estudio de la turbulencia nos ofrece una ventana única a la microfísica del gas, conectando directamente los movimientos a escalas de millones de años luz con las propiedades que rigen su comportamiento a escalas mucho más pequeñas. Así, el estudio de la turbulencia nos permite usar los cúmulos como laboratorios naturales donde estudiar procesos propios de los plasmas, como su viscosidad [23]. Estas conexiones subrayan la importancia de comprender, en el plano fundamental, la turbulencia como una componente indispensable en la descripción física de los cúmulos.

7. ONDAS DE CHOQUE Y SUS HUELLAS OBSERVACIONALES

Las ondas de choque son una consecuencia natural de la formación de estructuras cosmológicas. A medida que la materia cae hacia regiones más densas, los flujos de gas pueden alcanzar velocidades supersónicas, es decir, superiores a la velocidad con la que el gas es capaz de comunicar las perturbaciones a su entorno inmediato. En estas condiciones, la información no se puede transmitir de forma suave y gradual, y se producen transiciones abruptas de las propiedades del gas, que llamamos ondas de choque (un fenómeno del todo equivalente al que genera un avión supersónico a su paso por la atmósfera). Estos choques juegan un papel crucial en disipar la energía de los flujos cósmicos y calentar el gas, y han sido objeto de estudio teórico y numérico desde los primeros trabajos sobre la compleja dinámica del medio intracumular [24, 25].

En el contexto de los cúmulos de galaxias, los choques de acreción se forman cuando el gas procedente de las regiones más difusas de la telaraña cósmica (los vacíos) es acelerado por el potente campo gravitatorio del cúmulo. Aunque su detección observacional directa es, actualmente, muy compleja, estos choques contienen información privilegiada sobre la gravedad generada por el cúmulo y, por tanto, sobre su masa (tanto bariónica, como oscura). Como demostramos en la Ref. [26], la observación futura de estos choques podría proporcionar un método independiente para “pesar” los cúmulos de galaxias y, por tanto, para ofrecer una prueba adicional de la presencia de materia oscura, conectando así la dinámica del gas con el esqueleto invisible del Universo.

8. VACÍOS CÓSMICOS: EL OTRO EXTREMO DE LOS FLUJOS CÓSMICOS

Los vacíos cósmicos son regiones de baja densidad, inferior al promedio global del Universo, que ocupan la mayor parte de su volumen, y que pueden entenderse como la componente

complementaria a las estructuras densas de la telaraña cósmica (cúmulos y filamentos). A medida que el Universo evoluciona, estas regiones tienden a expandirse, mientras la materia circundante colapsa para formar paredes, filamentos y cúmulos. En concierto con esta imagen, los vacíos han sido interpretados como sistemas dominados por el flujo de materia saliente, es decir, sistemas que evacúan masa hacia estructuras más densas. Esto conduce a esperar que, en estas regiones, el gas sea prístino, muy similar en sus propiedades (termo)químicas a aquel del Universo primordial.

Sin embargo, un análisis detallado de los flujos de materia a través de las fronteras de los vacíos ha revelado un comportamiento más complejo. Como mostramos en la Ref. [27], una fracción significativa del gas presente en los vacíos en la actualidad puede provenir de regiones más densas, y haberse desligado de las mismas mediante diversos procesos. Esta materia expulsada puede llegar a regiones muy centrales de los vacíos, y por tanto alimentarlos con gas ya procesado química y térmicamente. Este descubrimiento, que ha sido posteriormente confirmado por estudios independientes [28, 29], abre nuevos paradigmas para el estudio de la formación de galaxias en entornos de baja densidad.

9. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

A lo largo de este trabajo, se ha mostrado que la formación de estructuras en el Universo es un proceso intrínsecamente dinámico y no lineal, gobernado por flujos de materia que conectan regiones de distintas densidades, estados dinámicos y escalas. Desde la expansión y evolución de los vacíos cósmicos, hasta el ensamblaje de los cúmulos de galaxias, con toda la complejidad de fenómenos bariónicos que estos procesos conllevan, estos fenómenos pueden entenderse como manifestaciones complementarias de los flujos cósmicos.

La Cosmología Computacional, apoyada en simulaciones numéricas y en complejas herramientas de análisis, nos permite reconstruir esta compleja interacción entre entornos y escalas, y avanzar hacia una interpretación más global y coherente de la formación de estructuras.

De cara al futuro, el estudio detallado de los flujos cósmicos ofrece un marco prometedor para conectar modelos teóricos con observaciones cada vez más precisas. Las próximas décadas, de consolidarse un apoyo ambicioso y sostenido en el tiempo para la ciencia fundamental, nos traerán una nueva generación de infraestructuras observacionales a lo largo del espectro electromagnético (como la matriz de radiotelescopios SKA; o el telescopio espacial de rayos X NewAthena; entre muchos otros), que permitirán explorar la dinámica del gas en el Universo con un nivel de detalle y profundidad sin precedentes.

Estas observaciones abrirán la puerta a utilizar fenómenos como la turbulencia y los choques como trazadores de las propiedades del plasma cósmico y de la estructura a gran escala, y ofrecerán nuevas vías para estudiar la formación de estructuras cósmicas, contrastar la naturaleza fundamental de la materia oscura y profundizar en la comprensión de la micro- y la macrofísica de galaxias y cúmulos de galaxias.

Más allá de su interés intrínseco (para la astrofísica y la cosmología) y el desarrollo tecnológico que puede producir (por ejemplo, las técnicas hidrodinámicas que se utilizan en las simulaciones astrofísicas no son muy distintas de las que se emplean en otros campos, como la aeronáutica), este esfuerzo se inscribe en una empresa intelectual más amplia: la de ampliar nuestro conocimiento sobre la naturaleza. Precisamente en este sentido, como subrayaba el astrofísico, divulgador y humanista Carl Sagan, la investigación fundamental forma parte del esfuerzo colectivo mediante el cual el Cosmos, a través de la actividad científica, llega a conocerse a sí mismo.

10. AGRADECIMIENTOS

La Tesis Doctoral en la que se basa el presente artículo fue financiada por el Vicerrectorat d'Investigació de la Universitat de València mediante un contrato predoctoral Atracció de Talent. Los resultados de los que aquí se da cuenta fueron adicionalmente financiados por la Agencia Estatal de Investigación española (proyectos AYA2016-77237-C3-3-P, PID2019-107427GB-C33, PID2022-138855NB-C33), por el Ministerio de Ciencia e Innovación en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia del Gobierno de España (ASFAE/2022/001) con fondos de la Unión Europea NextGenerationEU (PRTR-C17.I1), y por la Generalitat Valenciana (PROMETEO/2019/071, CIPROM/2022/49). En el momento de escribir este artículo, el autor se encuentra apoyado por el proyecto BELOVED (Consolidator Grant del European Research Council, GA n. 101169773). El autor también desea agradecer a J. Gallego, S. Planelles y N. Vallés por la lectura de un borrador de este manuscrito y por sus comentarios para mejorar la presentación del mismo.

11. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J.-Ch. Hamilton (2014). What have we learned from observational cosmology? *Stud. Hist. Philos. Mod. Phys.*, 46, 70–85, doi:10.1016/j.shpsb.2013.02.002
- [2] F. Zwicky (1933). Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. *Helv. Phys. Acta*, 6, 110–127, doi:10.5169/seals-110267
- [3] V. C. Rubin, W. K. Ford Jr. (1970). Rotation of the Andromeda Nebula from a Spectroscopic Survey of Emission Regions. *Astrophys. J.*, 159, 379–403, doi:10.1086/150317

- [4] E. P. Hubble (1929). A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 15, 168–173, doi:10.1073/pnas.15.3.168
- [5] A. A. Penzias, R. W. Wilson (1965), A measurement of excess antenna temperature at 4080 Mc/s. *Astrophys. J.*, 142, 419–421, doi:10.1086/148307
- [6] V. de Lapparent, M. J. Geller, J. P. Huchra (1986). A slice of the universe. *Astrophys. J. Lett.*, 302, L1, doi:10.1086/184625
- [7] A. G. Riess, A. V. Filippenko, P. Challis, *et al.* (1998). Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant. *Astron. J.*, 116, 1009–1038, doi:10.1086/300499
- [8] D. Vallés-Pérez (2024). Unravelling the complexity of cosmic flows. Universitat de València. Tesis doctoral, disponible en Roderic: handle 10550/101072
- [9] A. H. Guth (1981). Inflationary universe: a possible solution to the horizon and flatness problems. *Phys. Rev. D*, 23, 347–356, doi:10.1103/PhysRevD.23.347.
- [10] J. R. Bond, L. Kofman, D. Pogosyan (1996). How filaments are woven into the cosmic web. *Nature*, 380, 603–606, doi:10.1038/380603a0.
- [11] V. Quilis (2004). A new multidimensional adaptive mesh refinement hydro + gravity cosmological code. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 352, 1426–1438, doi:10.1111/j.1365-2966.2004.08040.x.
- [12] D. Vallés-Pérez, S. Planelles, V. Quilis (2021). Unravelling cosmic velocity flows: a Helmholtz-Hodge decomposition algorithm for cosmological simulations. *Comput. Phys. Commun.*, 263, 107892, doi:10.1016/j.cpc.2021.107892
- [13] D. Vallés-Pérez, S. Planelles, V. Quilis, F. Groth, T. Marin-Gilabert, K. Dolag (2024). vortex-p: a Helmholtz-Hodge and Reynolds decomposition algorithm for particle-based simulations. *Comput. Phys. Commun.*, 304, 109305, doi:10.1016/j.cpc.2024.109305
- [14] D. Vallés-Pérez, S. Planelles, V. Quilis (2022). The halo-finding problem revisited: a deep revision of the ASOHF code. *Astron. Astrophys.*, 664, A42, doi:10.1051/0004-6361/202243712.
- [15] Ó. Monllor-Berbegal, D. Vallés-Pérez, S. Planelles, V. Quilis (2025). AVISM: Algorithm for Void Identification in coSMology. *Astron. Astrophys.*, 704, A24, doi:10.1051/0004-6361/202554513.
- [16] D. Vallés-Pérez, S. Planelles, V. Quilis (2020). On the accretion history of galaxy clusters: temporal and spatial distribution. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 499, 2303–2318, doi:10.1093/mnras/staa3035
- [17] D. Vallés-Pérez, S. Planelles, Ó. Monllor-Berbegal, V. Quilis. (2023). On the choice of the most suitable indicator for the assembly state of dark matter haloes through cosmic time. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 519, 6111–6125, doi:10.1093/mnras/stad059
- [18] D. Vallés-Pérez, S. Planelles, V. Quilis (2025). The eventful life journey of galaxy clusters: I. Impact of dark matter halo and intracluster medium properties on their full assembly histories. *Astron. Astrophys.*, 699, A1, doi:10.1051/0004-6361/202453483
- [19] D. Vallés-Pérez, S. Planelles, V. Quilis (2026). The eventful life journey of galaxy clusters. II. Impact of mass accretion on the thermodynamic structure of the ICM. *Astron. Astrophys.*, 706, A23, doi:10.1051/0004-6361/202557496
- [20] F. Groth, M. Valentini, U. P. Steinwandel, D. Vallés-Pérez, K. Dolag (2025). Turbulent pressure support in galaxy clusters: Impact of the hydrodynamical solver. *Astron. Astrophys.*, 693, A263, doi:10.1051/0004-6361/202451803
- [21] D. Vallés-Pérez, S. Planelles, V. Quilis (2021). Troubled cosmic flows: turbulence, enstrophy, and helicity from the assembly history of the intracluster medium. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 504, 510–527, doi:10.1093/mnras/stab880

- [22] I. Barranco-Llorca, D. Vallés-Pérez, S. Planelles, V. Quilis (2026). The signature of major mergers on the hydrostatic mass bias of galaxy clusters. *Astron. Astrophys.*, 705, A101, doi:10.1051/0004-6361/202556598
- [23] T. Marin-Gilabert, U. P. Steinwandel, M. Valentini, D. Vallés-Pérez, K. Dolag (2024). Density fluctuations in the intracluster medium: an attempt to constrain viscosity with cosmological simulations. *Astrophys. J.*, 976, 67, doi:10.3847/1538-4357/ad8127
- [24] H. Kang, D. Ryu, T. W. Jones (1996). Cluster accretion shocks as possible acceleration sites for ultra-high-energy protons below the Greisen cutoff. *Astrophys. J.*, 456, 422, doi:10.1086/176666
- [25] V. Quilis, J. M. Ibáñez, D. Sáez (1998). On the role of shock waves in galaxy cluster evolution. *Astrophys. J.*, 502, 518, doi:10.1086/305932
- [26] D. Vallés-Pérez, V. Quilis, S. Planelles (2024). Cosmic accretion shocks as a tool to measure the dark matter mass of galaxy clusters. *Nat. Astron.*, in press, doi:10.1038/s41550-024-02303-x
- [27] D. Vallés-Pérez, V. Quilis, S. Planelles (2021). Void replenishment: how voids accrete matter over cosmic history. *Astrophys. J. Lett.*, 920, L2, doi:10.3847/2041-8213/ac2816
- [28] H. M. Courtois, R. van de Weygaert, M. Aubert, *et al.* (2023). Sociology and hierarchy of voids: A study of seven nearby CAVITY galaxy voids and their dynamical CosmicFlows-3 environment. *Astron. Astrophys.*, 673, A38, doi:10.1051/0004-6361/202245578
- [29] N. Schuster, N. Hamaus, A. Pisani, *et al.* (2025). Why cosmic voids matter: pristine evolution. arXiv e-prints, arXiv:2509.07092, doi:10.48550/arXiv.2509.07092