

EAGLE: SIMULACIONES COSMOLÓGICAS

El pasado 14 de enero, la Royal Astronomical Society anunció los ganadores de los premios de astrofísica y geofísica del 2022. El equipo del proyecto de simulaciones cosmológicas EAGLE (Universidad de Durham, Universidad John Moores de Liverpool y Universidad de Leiden) recibió este prestigioso galardón de astrofísica, motivado por el impacto de sus simulaciones en el campo de la formación y evolución de galaxias. El viaje comenzó hace diecisiete años y aún no ha terminado.

Fotografía: Ana Esteban Gutiérrez



Claudio Dalla Vecchia
Instituto de Astrofísica de Canarias
caius@iac.es

El anuncio de los premios se hizo público en la Reunión Ordinaria de la Royal Astronomical Society (RAS) celebrada el viernes 14 de enero de 2022. El premio más prestigioso es la Medalla de Oro, otorgada por primera vez en 1824. Los ganadores anteriores incluyen a Albert Einstein, Edwin Hubble, Arthur Eddington y Stephen Hawking. El ganador de este año ha sido George Efstathiou, uno de los padres del modelo cosmológico Λ -CDM y pionero de las simulaciones por ordenador de la estructura a gran escala del universo. Se han otorgado otros premios individuales a investigadores destacados en el campo de la astrofísica y la geofísica¹.

El equipo del proyecto EAGLE recibió el premio grupal en astrofísica con la siguiente motivación²:

EAGLE (Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments) is a suite of cosmological gas-dynamical simulations that follow the formation and evolution of over 10,000 galaxies in a representative volume of a Λ -CDM universe. EAGLE's flagship simulations were the first to yield a population of galaxies whose properties closely resemble those of real-world counterparts.

The impact of the simulations is demonstrated by the impressive citation rates of the reference papers (including the second most-highly cited MNRAS paper for the decade 2010–2019), and the large number of papers and spin-off projects that have made direct use of the results. Studies based on EAGLE data have explored areas including (but not limited to) the growth of galaxies, black holes, and cosmic large-scale structure; the origin of the Hubble sequence; the relationship between galaxies and the gaseous cosmos; predictions for gravitational-wave events; and both direct and indirect dark-matter detection experiments.

The project has also had notable impact outside academia. Visualisations of EAGLE results were featured in the IMAX feature film Voyage of Time, and at the UK's Lumiere festival in both 2015 and 2017 (~200,000 visitors). EAGLE was the centrepiece of the popular Galaxy Makers interactive exhibit at the 2016 Royal Society Summer Science Exhibition (~15,000 visitors), an adapted version of which, titled "Your place in the Universe", features in the 2021 online version of the Exhibition.

For these reasons, the EAGLE team is awarded the Group Achievement award in Astronomy.

El premio llega después de casi dos décadas de trabajo en el campo de la astrofísica numérica de un grupo de investigadores que forman parte del *VIRGO Consortium for Cosmological Supercomputer Simulations*³.

EL PRINCIPIO

En 2005, me uní, con un contrato postdoctoral, al grupo liderado por Joop Schaye en el Observatorio de Leiden en los Países Bajos. Fui parte de un pequeño grupo de investigadores dentro del Consorcio VIRGO que inició el desarrollo del proyecto *Overwhelmingly Large Simulation* (Simulación abrumadoramente grande, OWLS por sus siglas en inglés), un ambicioso proyecto para estudiar el medio intergaláctico en un volumen cosmológico que forma galaxias.

Sobre la base de lo que se consideraba lo más avanzado en modelado numérico en ese momento, la colaboración diseñó y mejoró algoritmos para simular los procesos físicos más relevantes que dan forma a las galaxias. Estos fueron los modelos para formación estelar⁴, enfriamiento de gas⁵, evolución estelar⁶ y retroalimentación⁷, y crecimiento y retroalimentación de agujeros negros⁸. En particular, el tratamiento del enfriamiento del gas tuvo en cuenta el efecto del fondo ultravioleta sobre la temperatura de equilibrio del medio intergaláctico, hasta entonces despreciado, y el efecto de la abundancia relativa de elementos pesados sobre la forma de la función de enfriamiento del gas, hasta entonces calibrada a las abundancias solares.

El proyecto aprovechó el superordenador de la colaboración LOFAR, el IBM Blue Gene/L instalado en los Países Bajos para procesar el flujo continuo de señales de radio de antenas repartidas por los Países Bajos y Europa. Como la instalación de las antenas se retrasó, la colaboración tuvo acceso a un tiempo de cómputo considerable. Se ejecutaron más de sesenta variaciones del modelo, lo que proporcionó la visión más profunda en ese momento de la interacción de los procesos físicos que dan forma a la historia de formación estelar del universo⁹. A lo largo de los años, se publicaron más de cien artículos científicos que utilizan los datos de estas simulaciones. OWLS elevó el estándar de las simulaciones cosmológicas e hidrodinámicas, y todos los proyectos numéricos posteriores tuvieron que adaptarse. Además, la exploración del espacio de parámetros ya no es-

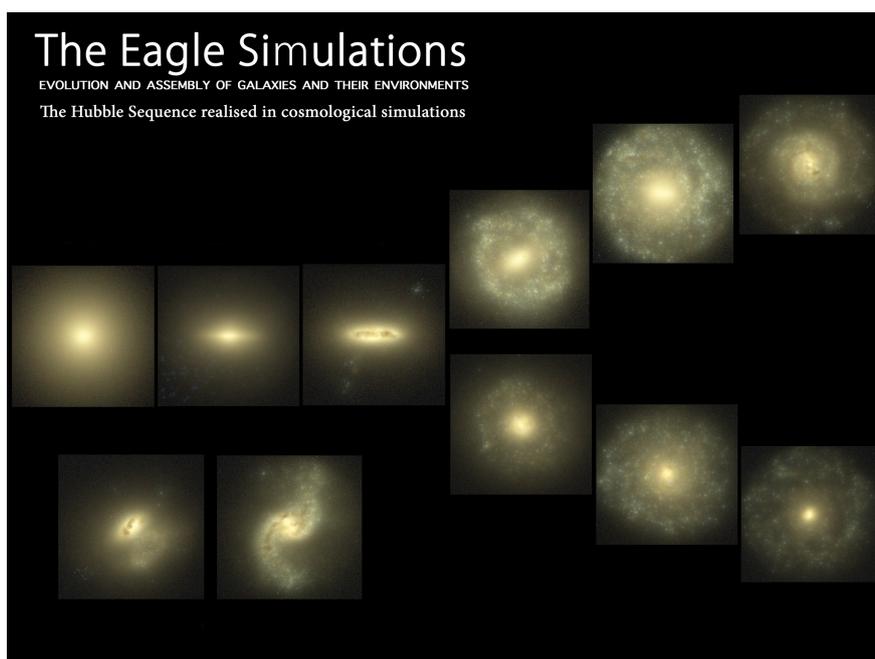
taba restringida al modelado semianalítico, con la ventaja de la información temporal y dinámica inherente a las simulaciones cosmológicas.

EAGLE

Poco después de publicar el primer artículo de OWLS, el equipo comenzó el desarrollo del proyecto *Evolution and Assembly of GaLaxies and their Environments* (Evolución y ensamblaje de galaxias y sus entornos, EAGLE por su signa en inglés). Los conocimientos adquiridos sobre el modelado de la historia de la formación estelar del universo se emplearon para diseñar la primera simulación que podía reproducir la función de masa estelar de las galaxias a $z=0$. Se trataba de calibrar la retroalimentación de agujeros negros y estrellas para regular la formación estelar en galaxias masivas y de baja masa, respectivamente, junto con controlar la estabilidad numérica cuando se inyectaba energía. Con este fin, la falta de conservación de la energía de retroalimentación debido a una integración temporal deficiente estaba sesgando cualquier prueba de calibración¹⁰. Por último, pero no menos importante, fue la actualización del algoritmo de hidrodinámica para mejor tratar las discontinuidades de contacto y favorecer la mezcla de fases gaseosas en el medio interestelar e intergaláctico¹¹.

Hacer coincidir la función de masa estelar de la galaxia fue más fácil de lo esperado. También fue más degenerado de lo esperado, siendo la función de masa cercana a la observada independientemente del modelo de retroalimentación estelar empleado¹². ¿Qué más se necesitaba para romper la degeneración? Las galaxias simuladas tenían la masa correcta con respecto al halo de materia oscura en el que vivían, pero su tamaño, medido cómo el radio que contiene la mitad de la masa estelar, fluctuaba en gran medida al cambiar el modelo de retroalimentación estelar. Luego se agregó el tamaño de las galaxias a la calibración.

Se cree que la formación estelar en galaxias masivas y gigantes está regulada por la actividad de sus agujeros negros supermasivos centrales. Aún se desconoce en gran medida cómo la producción de energía de estos agujeros negros se acopla con el medio intergaláctico y el medio intra-cúmulo. Sin embargo, la correlación entre la masa del agujero negro y la masa estelar o la dispersión de la velocidad estelar es bien conocida por observación¹³. Este fue el tercer y último elemento de calibración.



Una selección de galaxias simuladas en la simulación de EAGLE ordenadas por tipo morfológico. Las galaxias simuladas reproducen la variedad de morfologías observadas y representadas por el diagrama de Hubble.

El primer análisis de los datos simulados demostró la eficacia del modelo. No sólo se reprodujeron propiedades de galaxias en $z = 0$ que no habían sido objeto de calibración, sino que se obtuvo la correcta evolución de las relaciones observadas a lo largo de la historia del universo¹⁴.

Debido a la resolución espacial y temporal finita de las simulaciones cosmológicas, los modelos numéricos para los procesos físicos a menudo simulan el comportamiento macroscópico de la física no resuelta subyacente. Los modelos se adaptan a una gama de resoluciones donde son aplicables. Fuera de ese rango, el modelo ya no representa un comportamiento macroscópico o pierde procesos físicos adicionales que son relevantes en esa resolución. Incluso dentro del rango permitido, los modelos numéricos no convergen en una solución al aumentar la precisión del cálculo, es decir, la resolución de la simulación. Esto se debe al comportamiento altamente no lineal de los procesos físicos como, por ejemplo, el enfriamiento del gas. En términos prácticos, los parámetros numéricos establecidos para calibrar la simulación en alguna resolución no son una buena opción en una resolución diferente. Al cambiar la resolución se tiene que recalibrar el modelo para alcanzar continuidad con los resultados previos. Este ha sido el cambio radical de

metodología y filosofía introducido por EAGLE. Afortunadamente, sólo se necesita variar un par de parámetros numéricos para ajustar la retroalimentación y reproducir los resultados a una resolución diferente¹⁵.

El primer artículo de EAGLE, publicado en 2015, ha recogido más de 2100 citas hasta la fecha, siendo uno de los artículos más citados de la última década. Más de 200 trabajos científicos publicados han hecho uso de los datos de simulaciones de EAGLE, y varios proyectos derivados se han sumado^{16, 17}.

EL FUTURO

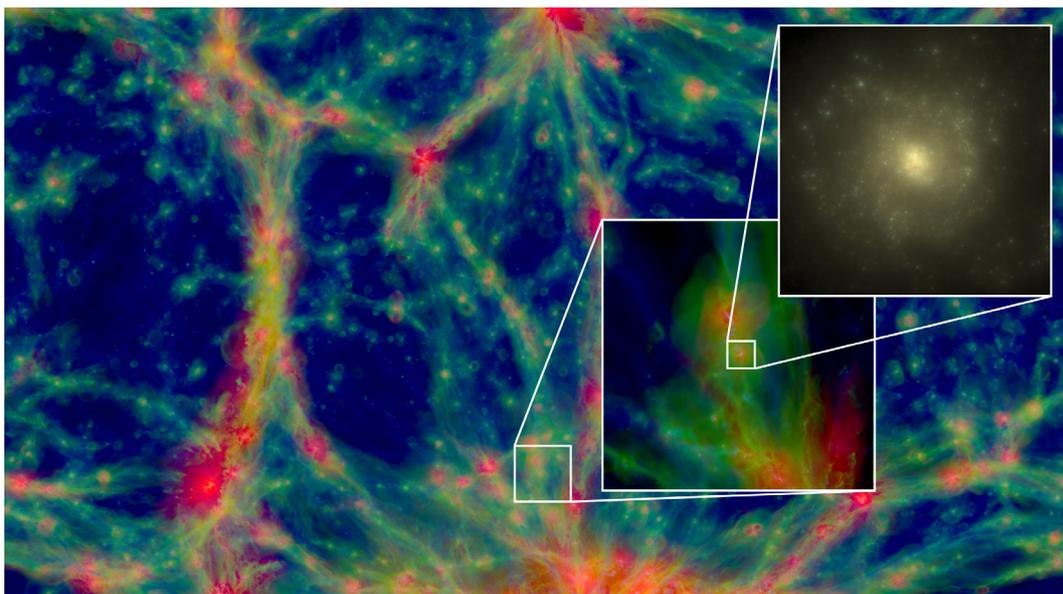
El proyecto EAGLE ha proporcionado simulaciones cosmológicas realistas que ampliaron nuestra comprensión de la formación y evolución de las galaxias. Sin embargo, solo rascó la superficie de lo que será el siguiente paso: describir la estructura interna de centenares de galaxias (la naturaleza multifásica del medio interestelar, discos y barras estelares, etc.) dentro de una gran simulación cosmológica. Esto se intentará con el próximo proyecto, COLIBRE, y será el resultado de más de cinco años de desarrollo.

El premio de la RAS se otorgará oficialmente al equipo EAGLE en la Reunión Nacional de Astronomía del Reino Unido en Warwick el 14 de julio

NOTAS

- ¹ Los premios de geofísica se otorgaron por primera vez en 1964.
- ² [https://ras.ac.uk/sites/default/files/RAS_Group_Award_\(A\)_-El_equipo_EAGLE.pdf](https://ras.ac.uk/sites/default/files/RAS_Group_Award_(A)_-El_equipo_EAGLE.pdf)
- ³ <https://virgo.dur.ac.uk/>
- ⁴ Schaye & Dalla Vecchia 2008, On the relation between the Schmidt and Kennicutt-Schmidt star formation laws and its implications for numerical simulations, MNRAS, 383, 1210.
- ⁵ Wiersma, Schaye, & Smith 2009, The effect of photoionization on the cooling rates of enriched, astrophysical plasmas, MNRAS, 393, 99.
- ⁶ Wiersma et al. 2009, Chemical enrichment in cosmological, smoothed particle hydrodynamics simulations, MNRAS, 399, 574.
- ⁷ Dalla Vecchia & Schaye 2008, Simulating galactic outflows with kinetic supernova feedback, MNRAS, 387, 1431.
- ⁸ Booth & Schaye 2009, Cosmological simulations of the growth of supermassive black holes and feedback from active galactic nuclei: method and tests, MNRAS, 398, 53.
- ⁹ Schaye et al. 2010, The physics driving the cosmic star formation history, MNRAS, 402, 1536.
- ¹⁰ Durier & Dalla Vecchia 2012, Implementation of feedback in smoothed particle hydrodynamics: towards concordance of methods, MNRAS, 419, 465.

- ¹¹ Schaller et al. 2015, The EAGLE simulations of galaxy formation: the importance of the hydrodynamics scheme, MNRAS, 454, 2277.
- ¹² Crain et al. 2015, The EAGLE simulations of galaxy formation: calibration of subgrid physics and model variations, MNRAS, 450, 1937.
- ¹³ Magorrian et al. 1998, The Demography of Massive Dark Objects in Galaxy Centers, AJ, 115, 2285.
- ¹⁴ Furlong et al. 2015, Evolution of galaxy stellar masses and star formation rates in the EAGLE simulations, MNRAS, 450, 4486.
- ¹⁵ Crain et al. 2015, The EAGLE simulations of galaxy formation: calibration of subgrid physics and model variations, MNRAS, 450, 1937.
- ¹⁶ Schaye et al. 2015, The EAGLE project: simulating the evolution and assembly of galaxies and their environments, MNRAS, 446, 521.
- ¹⁷ Barnes et al. 2017, The Cluster-EAGLE project: global properties of simulated clusters with resolved galaxies, MNRAS, 471, 1088.
- ¹⁸ Bahé et al. 2017, The Hydrangea simulations: galaxy formation in and around massive clusters, MNRAS, 470, 4186.



Una región del volumen cosmológico simulado en EAGLE. La densidad del gas está representada por la luminosidad en la imagen mientras el color es su temperatura, de más alta (rojo) a más baja (azul). Los recuadros son aumentos de una porción de la imagen que enseñan el entorno de formación de una galaxia espiral (primer aumento) y la imagen sintética de la galaxia (segundo aumento).