



Nassio Bayarri. *Sortida a l'espai*, 2009. Acrílic i cartró sobre taula, 195 x 225 cm.

CREANT UNIVERSOS VIRTUALS

SUPERCOMPUTACIÓ EN ASTROFÍSICA

José María Ibáñez, Miguel Ángel Aloy i Vicent Quilis

Creating Virtual Worlds. Supercomputing in Astrophysics.

Astrophysics and Cosmology are disciplines in which we cannot reproduce the phenomena studied in the laboratory. For a long time, this limitation has constrained the development of these fields of physics, which are unable to apply the scientific method based on theoretical models compared with experimental results. However, this panorama has changed considerably in recent decades due to the emergence of supercomputing in Astrophysics and Cosmology. This article summarizes the recent developments and contributions of this new scientific discipline, whose future prospects are bound to hold the key to our understanding of the Universe.

L'ús del telescopi per Galileu, ara fa 400 anys, va fer possible que foren les observacions astronòmiques les que es feren servir per tal de validar o rebutjar una hipòtesi, en lloc de les prescripcions teològiques. Actualment, les observacions en els camps de l'astrofísica i la cosmologia no són molt diferents, en esperit si més no, a les rudimentàries de Galileu. En ambdós casos ens fem preguntes, obtenim dades observacionals i, finalment, validem o rebutgem una hipòtesi inicial, és a dir, apliquem el mètode científic en aquests àmbits, amb la diferència que ens trobem davant ciències observacionals i no experimentals. En contrast amb les darreres, en les primeres no és possible dissenyar experiments per tal de posar a prova una hipòtesi. En lloc d'això, fem observacions addicionals, normalment amb major precisió, per tal de distingir les explicacions correctes de les que no ho són.

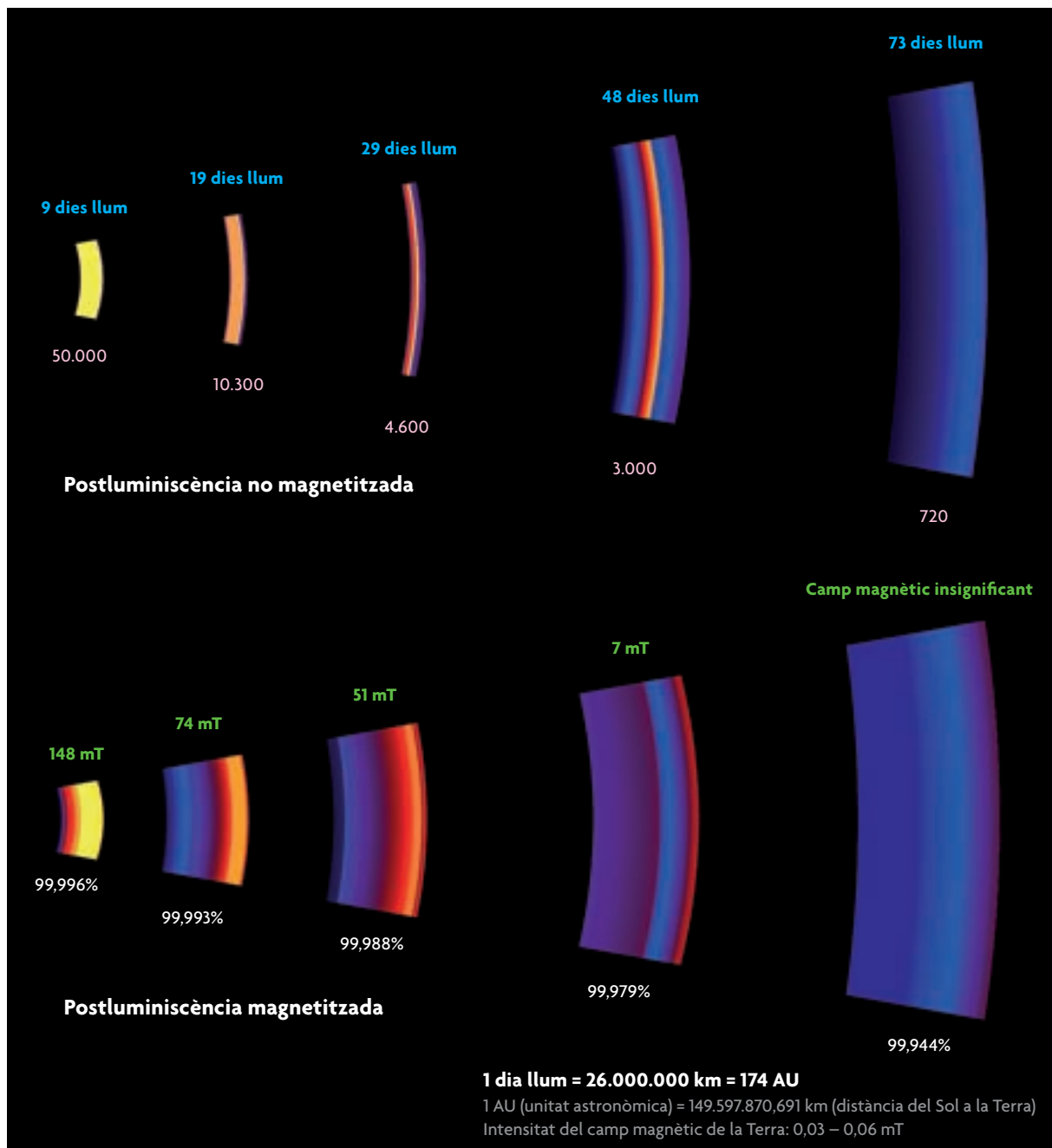
Una conseqüència inevitable en les ciències observacionals és la multiplicitat de models. Cada vegada que descobrim un nou fenomen astrofísic, apareixen un gran nombre de models teòrics que tracten d'explicar-lo. Les erupcions de raigs gamma en són un exemple paradigmàtic: a final dels anys vuitanta, el nombre de models proposats era superior al centenar, molts dels quals eren excloents entre si. Davant d'una situació com aquesta ens sobta una pregunta fonamental: és possible minimitzar els

errors continguts en els models teòrics en astrofísica i cosmologia i amplificar el poder revelador de les observacions?

La resposta és afirmativa. En aquest article explicarem com la supercomputació pot considerar-se com l'analogia moderna i virtual del telescopi de Galileu. La supercomputació ens permet provar de convertir la naturalesa observacional de l'astrofísica i la cosmologia en una altra de tipus experimental. La simulació numèrica no sols s'ha convertit en un dels tres pilars bàsics de l'avenç de la ciència i l'enginyeria juntament amb observació/experimentació i teoria, sinó que en alguns aspectes lidera la generació de coneixement perquè permet explorar aspectes que són fora de l'abast de qualsevol altre mètode.

Des que el diari *New York World* va fer servir el terme *supercomputació* per fer referència a màquines dissenyades per preparar el cens dels EUA, els camps científics i tècnics que s'han beneficiat del càlcul d'altres prestacions han estat múltiples. Entre les grans fites de la supercomputació podem trobar (o trobarem aviat) la seqüenciació del genoma humà, el desenvolupament de biocombustibles, la predicció meteorològica, el càlcul de riscos i efectes dels desastres naturals, l'estudi del naixement, evolució i mort dels estels, o de l'evolució de l'univers des de prop del *big bang* fins als nostres dies.

**«LA SUPERCOMPUTACIÓ
ENS PERMET PROVAR DE
CONVERTIR LA NATURALESA
OBSERVACIONAL DE
L'ASTROFÍSICA I LA
COSMOLOGIA EN UNA ALTRA
DE TIPUS EXPERIMENTAL.»**



© M. A. Alcy

Evolució d'una postluminiscència magnetitzada i no magnetitzada. L'ejecció es modelitza com una porció de fluid d'alta densitat amb forma esfèrica i simetria radial, que inicialment es mou a una velocitat semblant a la de la llum (la llegenda blanca sota les figures mostra la velocitat de l'ejecció en percentatge de la llum al buit). La part alta de la figura mostra diferents instants per al cas no magnetitzat, mentre que la part baixa mostra el cas magnetitzat. La posició en cada fase no està a escala. Damunt dels panells indiquem la distància recorreguda per l'ejecció en cada instant (en dies llum; color cian). Com que la velocitat del fluid és propera a la de la llum, l'escala es pot llegir en dies també. Baix de les imatges del cas no magnetitzat, s'indica la densitat màxima de l'ejecció en unitats de la densitat del medi ambient (en rosa). Damunt de les imatges del cas magnetitzat, mostrem la intensitat del camp magnètic màxima (en mili-Tesla, color verd). Per tal de tenir una referència, el valor típic del camp magnètic de la Terra es dona baix a la dreta. Al llarg de l'evolució, l'ejecció es frena per la interacció amb el medi interestel·lar. Com a resultat d'aquesta interacció, es formen ones de xoc en el medi i de xoc o rarefaccions en l'ejecció, depenent de l'existència o no de camp magnètic a l'ejecció. Les diferents propietats de l'emissió d'aquestes postluminiscències produïdes a les erupcions de raigs gamma depenen d'aquestes estructures i, com demostren les nostres simulacions, les diferències poden estar motivades per la intensitat del camp magnètic de l'ejecció. Cadascun dels models necessita més d'una setmana de càlcul fent servir 1.024 processadors al superordinador Mare Nostrum.

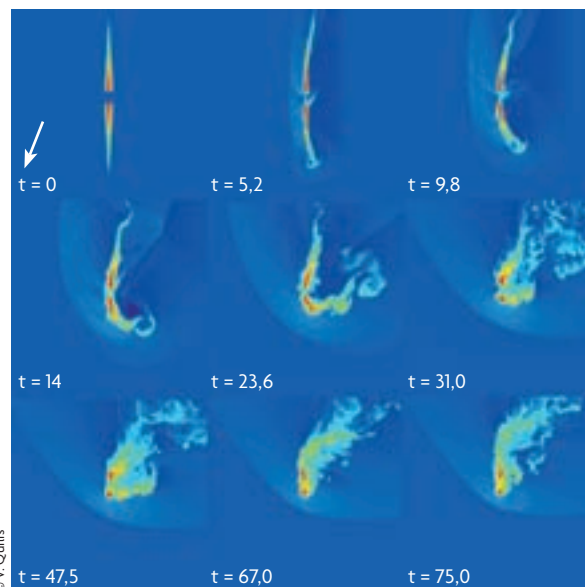
Els superordinadors són computadors amb prestacions molt superiors a les habituals dels ordinadors personals d'ús domèstic i es fan servir per simular o modelar processos que demanden una gran quantitat d'operacions o la manipulació d'un gran volum de dades. Ara per ara, els supercomputadors es componen d'un gran nombre de processadors capaços d'operar en paral·lel. Seguint la llei de Moore, que diu que el nombre de transistors al si d'un xip es duplica cada 18 mesos aproximadament, els superordinadors ens han ofert un creixement exponencial de prestacions. El creixement de la capacitat de càlcul en els darrers seixanta anys ha estat tan important que podem fer un paral·lelisme com el següent: els primers ordinadors, com el Harvard Mark I, són a la construcció senzilla de cristalls, ben polits per Galileu, com els més potents superordinadors actuals (com el Roadrunner QS22) al Gran Telescopi de Canàries.

■ PER QUÈ ÉS NECESSÀRIA LA SUPERCOMPUTACIÓ?

La major part de les simulacions numèriques són dissenyades per estudiar el comportament dinàmic complex contingut al si d'un model teòric i, com a objectiu final, reproduir observacions. Així mateix, les simulacions tenen un avantatge sobre les observacions, ja que el nivell de detall aconseguit és molt més gran, si es fan servir els algorismes adients i la potència de càlcul dels superordinadors.

Una de les troballes teòriques més importants del segle passat va ser entendre que gran part dels objectes astrofísics, així com el medi interestel·lar i intergalàctic, i el mateix univers com un tot, poden ser modelitzats com fluids en un grau d'aproximació més que suficient. Per tal de resoldre numèricament problemes que involucren medis continus és necessari fer-ho mitjançant una col·lecció finita de punts, que han de ser representatius de les diferents variables que defineixen el sistema (pressió, temperatura, densitat, camp de velocitats...). Cada punt canvia el seu estat d'acord amb les equacions que governen el model. Com més gran siga el nombre de punts que fem servir per modelitzar el sistema, més exacte serà el model. En la pràctica, són necessaris molts i molts punts per resoldre correctament les escales d'interès del problema. Una estimació molt senzilla ens diu que, per tal de realitzar un càlcul típic en tres dimensions, necessitaríem

**«UNA ESTIMACIÓ MOLT
SENZILLA ENS DIU QUE,
PER TAL DE REALITZAR
UN CÀLCUL TÍPIC EN
TRES DIMENSIONS,
NECESSARÍEM MESOS DE
CÀLCUL EN UN ORDINADOR
CONVENCIONAL.»**



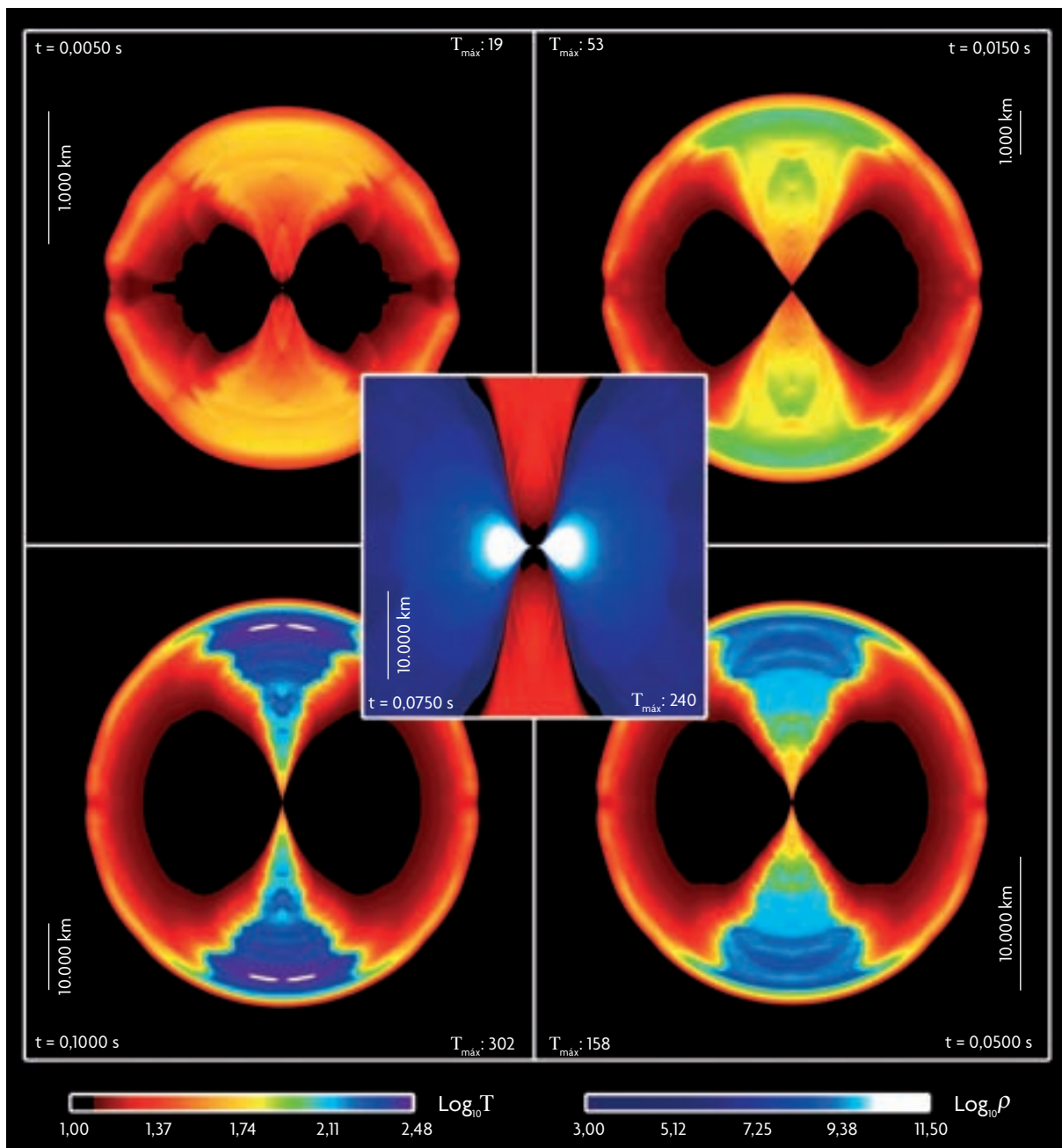
Evolució temporal en milions d'anys del disc de gas d'una galàxia espiral (vista de perfil) en interaccionar amb el medi intracúmulo. Després d'un centenar de milions d'anys la galàxia ha perdut quasi la totalitat del seu gas i s'ha quedat sense combustible per a la formació estel·lar. De la mateixa manera que el gas, les altres components de la galàxia (no mostrades en la figura), també han sofert alteracions notables, quedant al final del procés un sistema amb una morfologia d'una galàxia S0.

mesos de càlcul en un ordinador convencional.

Clarament, el nostre ordinador de taula no és suficient, i més encara si, per tal de realitzar el nostre estudi, hem de recórrer l'espai de paràmetres, de manera que hem de repetir els càlculs nombroses vegades, depenent de la dimensió d'aquest espai que volem explorar. Es fa, doncs, imprescindible l'ús de superordinadors i de molts processadors en paral·lel.

Un càlcul de mesos en un ordinador es pot fer en un dia en un superordinador, mentre que l'espai de paràmetres d'interès es pot recórrer en poques setmanes.

De manera genèrica, podem classificar les simulacions numèriques en dos grans grups: simulacions numèriques directes i simulacions numèriques paramètriques. Mentre que les primeres pretenen obtenir resultats a partir de lleis bàsiques, primers principis i un conjunt reduït de paràmetres, les segones posen en joc models teòrics elaborats que, generalment, depenen de molts paràmetres. Les primeres tenen un alt poder predictiu i donen respostes clares als problemes.



© M. A. Alty

Diversos instants de les fases inicials de la propagació d'un doll ultrarelativista produït després de la fusió de dos estels de neutrons. Tal com es mostra en el panell central, després de la fusió de dos estels de neutrons es genera un disc gros d'acreciment amb forma toroidal (la regió més blanca i blavosa del centre de la figura) que orbita al voltant d'un forat negre central. Un canal de molta baixa densitat es forma al voltant de l'eix de rotació del forat negre, on es deposita tal quantitat d'energia que es genera un flux ultrarelativista. Aquest doll de plasma assoleix velocitats superiors al 99,995% de la velocitat de la llum (tons rogencs en el panell central i pintat, segons l'escala de color situada en la part inferior esquerra de la figura, referida al factor de Lorentz relativista). La ulterior propagació i l'expansió lateral es mostren en els quatre panells marcats amb temps d'evolució, respectivament, 0,005 s, 0,0150 s, 0,05 s, i 0,1 s. En menys d'una desena de segons dos dolls, movent-se en direccions oposades al llarg de l'eix de rotació del sistema, assoleixen factors de Lorentz superiors a 300 (vegeu el panell inferior esquerre) en escales espacials inferiors als 10.000 km (des del forat negre central). Les dades necessàries per a confeccionar aquesta figura van exigir de l'orde de 10.000 hores de càlcul amb els superordinadors del centre de càlcul de la Societat Max-Planck a Garching (Alemanya).

No obstant això, la nostra comprensió teòrica del món físic és insuficient per tal de reduir a primers principis totes les qüestions. A més, les simulacions directes necessiten grans recursos computacionals per tal de fer prediccions macroscòpiques perquè s'adrecen a escales espacials i temporals extremadament petites. Açò justifica l'ús de les simulacions paramètriques com a metodologia per obtenir un coneixement raonable. Tenen un poder predictiu més limitat i es fan servir generalment per tal de validar models teòrics existents o per estendre'ls al règim no lineal, on els càlculs analítics són impossibles.

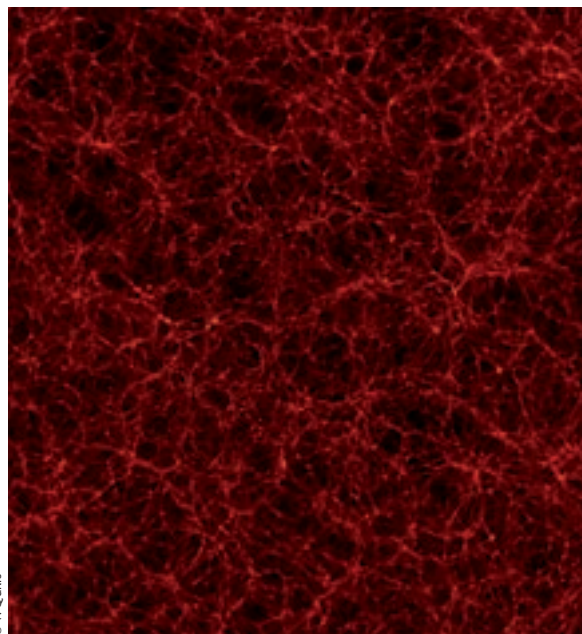
Tant l'astrofísica com la cosmologia modernes han bastit nivells de sofisticació i precisió tals que és imprescindible l'ús de la supercomputació per tal de construir models teòrics que expliquen les dades observacionals obtingudes gràcies als instruments més moderns. Sense pretendre ser exhaustius, analitzarem, tot seguit, alguns dels escenaris astrofísics i cosmològics en què les simulacions numèriques s'han convertit en un laboratori virtual per excel·lència per als científics.

■ SUPERCOMPUTACIÓ EN ASTROFÍSICA

L'extraordinari avenç en la teoria moderna de l'evolució estel·lar seria impensable sense resoldre numèricament les equacions d'estructura i evolució dels estels, incorporant-hi els avenços de la física nuclear. Això ens permet, en l'actualitat, no sols entendre les propietats fonamentals dels estels, sinó també predir-ne l'evolució, en funció d'uns pocs paràmetres. La consistència, en línies generals, entre les prediccions de la teoria i les observacions permet disposar d'un quadre general coherent i precís. Cal destacar, en particular, les contribucions que ha fet la supercomputació per entendre les fases terminals dels estels, com en el cas de les explosions de supernova. Els càlculs més detallats inclouen l'acoblament entre neutrins i matèria (necessari en les supernoves hidrodinàmiques) o l'estudi de la propagació de flames al si dels nans blancs (en les supernoves termonuclears).

Les observacions recents del nostre Sol amb el satèl·lit japonès HINODE han pogut ser parcialment explicades en termes de complexos fenòmens magnetoconvectius, gràcies a sofisticades simulacions magnetohidrodinàmiques.

«TANT L'ASTROFÍSICA COM LA COSMOLOGIA MODERNES HAN BASTIT NIVELLS DE SOFISTICACIÓ I PRECISIÓ TALS QUE ÉS IMPRESCINDIBLE L'ÚS DE LA SUPERCOMPUTACIÓ PER TAL DE CONSTRUIR MODELS TEÒRICS»



Estructura a gran escala de la distribució de matèria a l'univers obtinguda mitjançant una simulació de n-cossos.

La presència de fluxos relativistes a l'univers és un fenomen comú en els microquàsars, en les explosions de raigs gamma i en les galàxies amb activitat nuclear. Han estat les simulacions numèriques realitzades amb codis (magneto-)hidrodinàmics relativistes les que han permès entendre aspectes morfològics i dinàmics d'aquests objectes. Més encara, s'han fet prediccions, confirmades per les observacions, sobre detalls fins com són l'estructura de xocs al seu si, l'origen (magne-

to-)hidrodinàmic del fenomen o, més recentment, els mecanismes que operen als llocs progenitors.

Aquest segle veurà el naixement i maduresa de l'astronomia d'ones gravitatòries, la nova finestra a l'univers, complementària a les que ja tenim: l'electromagnètica, la dels neutrins i la radiació còsmica. Les estratègies dissenyades per detectar aquesta mena de senyal extremadament feble i difícil de detectar exigeixen disposar de patrons precisos sobre el que s'espera detectar amb antelació. Tot i que la teoria analítica hi està molt desenvolupada, aquests patrons només poden ser proporcionats per simulacions numèriques. Els patrons sintètics generats constitueixen preciosos catàlegs per als experts en l'anàlisi de senyals als detectors

d'ones gravitatòries (per exemple, el futur interferòmetre espacial LISA). Els propers anys són prometedors en aquest aspecte i posaran a prova la capacitat predictiva de les simulacions numèriques.

Tot i que no es poden incloure com a simulacions restringides a l'àrea de l'astrofísica, la nova generació de simulacions directes en el camp de la física de plasmes ens han permès començar a entendre com es generen i comporten certes ones de xoc, conegudes com *xocs no col·lionals*, molt freqüents en astrofísica. Aquestes simulacions han predit de manera precisa l'espectre d'energies de les partícules accelerades en els xocs, el que és fonamental per a estudiar la radiació de les fonts astrofísiques. Més encara, aquestes simulacions són importants perquè totes les estimacions i resultats provenen de primers principis i possiblement representen la base de nous models d'emissió radiativa generals, aplicables a escenaris ben diferents.

■ SUPERCOMPUTACIÓ EN COSMOLOGIA

La cosmologia és una de les branques de la ciència que millor exemplifica la importància de la simulació numèrica. Durant molt de temps, i fins l'arribada del que coneixem com cosmologia de precisió, era una disciplina més propera a la metafísica que a la física. A les dificultats intrínseques de l'estudi de qualsevol escenari físic complex, s'hi afegia la quasi total manca de mitjans observacionals capaços de generar dades i l'absència d'un model teòric establert. En aquesta conjuntura, les primeres simulacions numèriques cosmològiques van explorar múltiples escenaris possibles i van permetre construir una descripció de l'univers com un tot. En alguns casos, les simulacions van llançar idees, considerades destrellatades en el seu moment i que, no obstant això, són totalment acceptades en l'actualitat, com, per exemple, l'existència d'una component de matèria fosca absolutament dominant en tota estructura cosmològica.

El desenvolupament de la supercomputació ha permès que les simulacions cosmològiques capdavanteres s'hagen sofisticat, no solament per tenir accés a un major poder de càlcul, sinó també a un major detall físic en els models i en els nous algorismes. Cal afegir-hi el desenvolupament de la instrumentació astronòmica,

que ha permès obrir les portes a l'univers més profund i comparar els universos sintètics dels superordinadors amb l'univers real que ens mostra la nova generació de grans instruments.

Actualment, el model cosmològic acceptat ens presenta un univers en què només al voltant d'un 4% del seu contingut material correspon a la matèria ordinària de què és constituït el món que veiem. D'altra banda, se'ns plantegen grans incògnites com l'existència d'una enigmàtica energia fosca, o la naturalesa d'una fugissera i indetectable matèria fosca. Tot i que en són molts els esforços adreçats a obtenir informació sobre aquests temes mitjançant nous experiments i observacions, les simulacions continuen tenint un paper imprescindible en la cosmologia moderna.

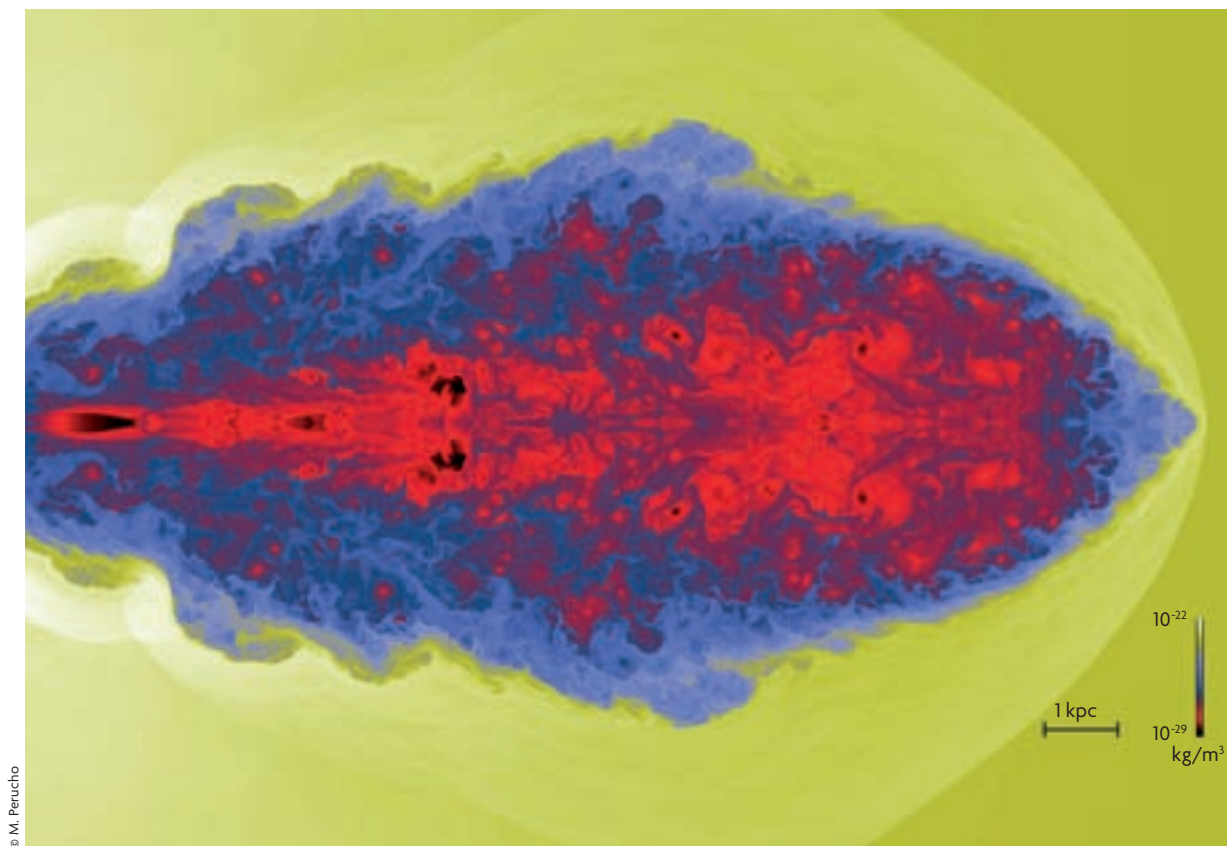
■ FUTUR

La llei de Moore prediu que la potència computacional dels processadors es veurà limitada en els propers anys; per tant, els supercomputadors continuaran basant-se en arquitectures multiprocessador amb milers d'aquests elements. Tot i això, amb les millores tècniques esperades, les simulacions podrien ser de l'orde de cent vegades més precises per dimensió espaciotemporal que en l'actualitat. Per exemple, seria possible calcular l'evolució d'un estel en tres dimensions espacials; o fer simulacions que permeten calcular l'evolució d'un fluid relativista acoblat al transport de la radiació que s'hi genere, el que requereix cinc dimensions (tres d'espacials, una per a l'energia i el temps), amb aplicacions als dolls extragalàctics o les explosions de raigs gamma. Els avenços encara no ens permetran fer les simulacions directes a escala macroscòpica,

ni simulacions paramètriques amb capacitat de resoldre les escales més petites (on es desenvolupa la turbulència o els fenòmens no ideals com la reconexió del camp magnètic). No obstant això, aquesta millora permetrà reduir la distància entre els mons macroscòpic i microscòpic en l'astrofísica i la cosmologia, i es podran fer servir de manera sinèrgica els resultats de les simulacions directes en les simulacions de gran escala mitjançant models *subxarxa*.

És molt possible que les futures aplicacions computacionals ens permeten explorar nous mètodes de

**«TOT I QUE EN SÓN
MOLTS ELS ESFORÇOS
ADREÇATS A OBTENIR
INFORMACIÓ MITJANÇANT
NOUS EXPERIMENTS I
OBSERVACIONS, LES
SIMULACIONS CONTINUEN
TENINT UN PAPER
IMPRESINDIBLE EN LA
COSMOLOGIA MODERNA»**



© M. Perucho

Imatge final d'una simulació de l'evolució d'un doll relativista en una galàxia activa després de més de set milions d'anys. El doll és format per parelles electró-positró i el medi ambient reproduceix la densitat d'una galàxia el·líptica, fent servir l'hidrogen com a gas predominant. Aquesta simulació mostra com el doll s'eixampla prop de l'origen en sortir de la galàxia progenitora i com, després d'un fort xoc intern, és destruït per inestabilitats. A la figura s'aprecia una forta ona de xoc davantera en forma d'arc, una regió, en groc diluït, de medi ambient que ha rebut l'impacte d'aquesta ona i la barreja turbulenta (fins l'escala que resol la simulació) amb el material del doll, en blaus-morats i rojos. A l'eix de simetria de la figura trobem el doll, difícilment diferenciable del medi que l'envolta, a partir del fort xoc intern dintre dels primers 2 kiloparsecs (kpc). El càlcul ha servit per provar que aquests xocs interns poden ser clau en l'evolució a llarg termini dels dolls extragalàctics i que, fins i tot per a les radiogalàxies menys potents, hauríem d'observar, en raigs X, ones de xoc en forma d'arc quan aquests dolls són encara relativament joves, com realment s'ha aconseguit a les radiogalàxies Centaurus A i NGC 3801. La simulació va necessitar 5.000 hores de càlcul als ordinadors del departament d'Astronomia i Astrofísica de la Universitat de València.

simulació diferents als actuals. Fins ara, els problemes numèrics han estat tractats amb codis més o menys complexos que resolen un conjunt d'equacions i es limiten a un rang d'escala dinàmiques relativament petit. Un dels camins més prometedors a explorar és el dels models *multiescala* i *multifísica*, on cada escala faça servir mètodes numèrics i aproximacions diferents i el repte siga acoblar les peces al si d'un únic codi que capture de manera adient la interacció entre elles.

Evidentment, si a mig termini les tecnologies basades en la computació quàntica abasten la maduresa, molt possiblement les nostres previsions més optimistes restaran curtes i, potser, serà possible fer un salt quantitatiu molt major en la nostra capacitat de càlcul i, per tant, en la nostra comprensió de l'univers. ☺

BIBLIOGRAFIA

- CENTRE FOR ASTROPHYSICS AND SUPERCOMPUTING, 2009. Swinburne University of Technology. Melbourne. URL: <<http://astronomy.swin.edu.au/>>.
- HELLEMANS, A. i M. MUKERJEE, 2004. «Computing the cosmos». *IEEE Spectrum*, 41: 22 – 28.
- LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORY, 2008-2009. URL: <<http://www.lanl.gov/discover/computing>>.
- NELSON, A. H., 2000. «Supercomputing in Astrophysics». *Reports on Progress in Physics*, vol. 62, 11: 1851-1892.
- STELLAR HYDRODYNAMICS RESEARCH GROUP. Max-Planck-Institut für Astrophysik. URL: <<http://www.mpa-garching.mpg.de/hydro/index.html>>.
- THE VIRGO CONSORTIUM, 2009. URL: <<http://www.virgo.dur.ac.uk/>>.
- VAGNETTI, F. (ed.), 1988. *Super-computing in Astrophysics. Proceedings of a Workshop, held at Osservatorio Astronomico di Roma, March 10-11, 1988*. Osservatorio Astronomico, Comitato. Roma.

José María Ibáñez. Catedràtic d'Astronomia i Astrofísica, Universitat de València.

Miguel Ángel Aloy. Investigador del Departament d'Astronomia i Astrofísica, Universitat de València.

Vicent Quilis. Professor titular del Departament d'Astronomia i Astrofísica, Universitat de València.