

LA MACROESTRUCTURA CÒSMICA

Vicent J. Martínez*

THE COSMIC MACROSTRUCTURE. THE AUTHOR COMMENTS ON STUDIES CONCERNING THE LARGE-SCALE STRUCTURE OF THE UNIVERSE, WHICH IS ONE OF THE MOST ACTIVE FIELDS IN CONTEMPORARY ASTRONOMY. THE LAST TWO DECADES HAVE SEEN THE DEVELOPMENT OF A COSMOGRAPHY BY MEANS OF MAPS OF THE DISTRIBUTION OF GALAXIES IN THE UNIVERSE, PROVIDED BY THE REDSHIFT CATALOGUES. ENORMOUS STRUCTURES LIKE VOIDS, FILAMENTS AND WALLS ARE OBSERVED IN OUR LOCAL NEIGHBOURHOOD SHOWING A FRACTAL-LIKE PATTERN. HOWEVER AT GREATER DISTANCES TRACES HAVE BEEN FOUND OF THE TRANSITION TO HOMOGENEITY POSTULATED BY THE COSMOLOGICAL PRINCIPLE.

La cosmologia ha experimentat un desenvolupament espectacular en la darrera dècada. La raó d'aquesta renaixença cal trobar-la en les extraordinàries observacions que contínuament aporten dades fonamentals sobre l'origen i l'evolució de l'univers. L'estudi de l'estructura de l'univers a gran escala és un dels camps més actius de l'astronomia contemporània. Les dades de satèl·lits com el COBE ens han permès conèixer el mapa de com era l'univers primitiu. Les fluctuacions de temperatura observades en aquests mapes són molt petites, d'una part de 100.000, però constitueixen l'empremta de les llavors que han esdevingut les grans estructures còsmiques. El telescopi espacial Hubble i el telescopi Keck de Hawaii, de 10 metres de diàmetre, han captat imatges de com eren les galàxies quan l'edat de l'univers era només un 10% de l'edat actual. Els mapes tridimensionals de la distribució de galàxies a gran escala, allò que anomenem la macroestructura còsmica, ens mostren un univers on les galàxies s'agrupen en cúmuls i formen estructures més grans en forma de parets i filaments. Com es construeixen aquests mapes?

L'any 1929, l'astrònom americà Edwin Hubble va demostrar que les galàxies que observem van allunyant-se a una velocitat que és proporcional a la distància que les separa de l'observador. Aquesta relació, coneguda com a llei de Hubble, ens permet estimar les distàncies a les galàxies a partir de la constant

de proporcionalitat i de la seua velocitat de recessió. La constant de proporcionalitat H_0 no és encara coneguda amb precisió, però cada vegada hi ha més acord entre la comunitat científica que el seu valor es troba al voltant de 73 km/s/Mpc, això vol dir que per cada 3,26 milions d'anys llum que ens allunyem, la velocitat de recessió de les galàxies que trobem s'incrementa en 73 km/s (262.800 km/h).

La velocitat de recessió de les galàxies es mesura bàsicament fent ús de la mateixa tècnica que utilitza la policia per mesurar la velocitat dels cotxes en les carreteres. Aquesta tècnica està basada en l'anomenat efecte Doppler. La llum visible està constituïda per ones semblants a les ones de la ràdio, la diferència és que la distància entre dues crestes consecutives de l'ona de llum, la longitud d'ona, és molt més petita que en el cas de les ones de ràdio. Hubble

observà que la longitud d'ona de la llum provinent de les galàxies llunyanes era més llarga que la de la llum emesa. Aquesta diferència s'anomena desplaçament cap al roig, ja que en la descomposició espectral de la llum visible, les longituds d'ona corresponents al color roig són més llargues que no les corresponents al color blau.

L'expansió de l'univers és, però, una expansió de l'espai, no una expansió de les galàxies en l'espai tridimensional, és a dir, a mesura que l'espai es va expandint, va arrossegant les galàxies amb ell. En aquest sentit cal interpretar el desplaçament cap al

**«L'EXPANSIÓ DE L'UNIVERS ÉS,
PERÒ, UNA EXPANSIÓ DE L'ESPAI,
NO UNA EXPANSIÓ DE LES GALÀXIES EN
L'ESPAI TRIDIMENSIONAL.»**

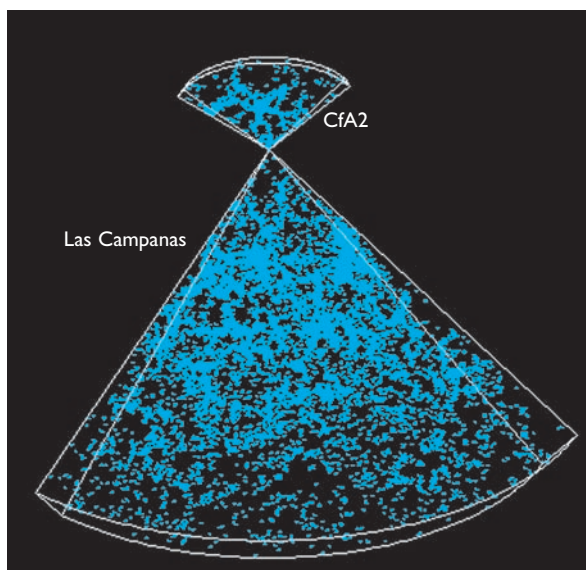


Figura 1: La distribució de 13.000 galàxies en aquestes dues llesques tracen les estructures més grans que s'observen en l'univers avui. (Reproduït amb autorització de *Science*, 284, 445; Copyright 1999, American Association for the Advancement of Science).

roig de la llum que ens arriba de les galàxies com un estirament de la seua longitud d'ona que creix a mesura que l'espai s'expandeix. La llum de les galàxies més llunyanes ha trigat més temps a arribar a nosaltres que no la de les galàxies properes i, per tant, la seua longitud d'ona ha hagut d'estirar-se més.

Cal assenyalar que l'expansió es veu frenada per la força gravitacional exercida per tota la matèria còsmica en el seu conjunt.

Serà aquesta força suficient per frenar l'expansió? Això depèn de la quantitat de matèria continguda a l'univers. Si la densitat de l'univers sobrepassa un determinat valor crític, la gravetat

guanyarà a l'expansió, aquesta s'anirà frenant fins que s'ature i l'univers començarà a contraure's. En altre cas l'expansió durarà per sempre. La densitat crítica és només d'uns pocs àtoms d'hidrogen per metre cúbic. És, doncs, un valor extremadament petit, la densitat de l'aire és 100 bilions de bilions més gran que aquest valor. Malgrat això l'univers està tan buit que amb la matèria visible de tots els estels i les galàxies no sobrepassem l'1% del valor de la densitat crítica. Sabem, però, que existeix la matèria obscura i que la contribució d'aquesta podria ser suficient per

fer que la densitat total de l'univers arribara a la densitat crítica. El paràmetre, directament relacionat amb la densitat de l'univers, que quantifica l'alentiment de l'expansió s'anomena paràmetre desaccelerador i es representa per q_0 . L'any 1970 Allan Sandage va escriure un article en què descrivia la cosmologia observacional com la recerca de dos nombres, H_0 i q_0 . Observacions molt recents de supernoves han fet ressuscitar un tercer paràmetre, l'anomenada constant cosmològica, introduïda per Albert Einstein el 1917 per tal que les seues equacions de la relativitat general proporcionaren un univers estàtic. Sense aquest terme, les equacions porten a un univers que o bé es va expandint o bé es va col·lapsant. Però el fet d'un univers canviant amb el temps no era conceptualment acceptable per a Einstein. Anys després el mateix Einstein afirmava que la introducció de la constant cosmològica va ser el major error de la seua vida científica. Va perdre l'oportunitat de predir amb arguments teòrics l'expansió de l'univers descoberta pel Hubble dotze anys després.

Les supernoves són estels que esclaten catastròficament i llavors produeixen una quantitat d'energia tal que la seua brillantor pot superar la de tota una galàxia formada per milers de milions d'estels. L'observació d'esclats de supernoves de tipus Ia en galàxies que es troben al voltant de 6.500 milions d'anys llum de distància semblen suggerir que l'expansió còsmica va accelerant-se. Hi hauria una forma d'energia exòtica que a escales suficientment grans actuaria com ho fa la constant cosmològica, i que exerciria una força gravitacional repulsiva que acceleraria l'ex-

pansió, i per tant que proporcionaria un valor negatiu al paràmetre de desacceleració.

Amb els valors dels paràmetres cosmològics podem determinar les propietats bàsiques del nostre univers, en parti-

cular la grandària i l'edat. A més a més, coneixent-ne els valors i mesurant el corrent cap al roig de les galàxies podem estimar les distàncies a què es troben. Com a primera aproximació podem considerar les distàncies directament proporcionals al desplaçament cap al roig. Això és el que s'ha representat en la Fig. 1, on podem observar la distribució de les galàxies en dues llesques de pocs graus d'amplària, una a l'hemisferi nord celest, la del Center for Astrophysics (CfA) realitzada des de Tucson, a Arizona, i l'altra a l'hemisferi sud, realitzada des de l'observatori de Las

**«LA VISIÓ D'AQUESTES ESTRUCTURES
VA FER QUE MOLTS COSMÒLEGS
COMENÇAREN A PARLAR DE
L'ESTRUCTURA FRACTAL DE L'UNIVERS.»**

Campanas, a Xile. La Terra es troba al vèrte0x de les dues llesques. Hi ha més de 13.000 galàxies en aquest mapa. La mostra del CfA té una profunditat de 645 milions d'anys llum, la de Las Campanas és pràcticament quatre vegades més profunda. La llesca del CfA va sorprendre la comunitat dels cosmòlegs quan va ser publicada l'any 1986. S'hi observen estructures més grans que les esperades, grans zones pràcticament buides de galàxies amb un diàmetre que arriba en alguns casos a 100 milions d'anys llum. S'observen també parets i filaments on s'agrupen les galàxies. Un model que es va proposar aleshores era l'anomenat univers de bombolles, com si les galàxies foren partícules de talc salpicades sobre bombolles com les que fa l'escuma del bany. La visió d'aquestes estructures va fer que molts cosmòlegs començaren a parlar de l'estructura fractal de l'univers. Un fractal és un objecte geomètric semblant a ell mateix en moltes escales (vegeu MÈTODE, núm. 14, pàg. 21 per a una introducció més completa). Les costes naturals en són un bon exemple. Fent ampliacions de les costes d'una península dibuixada en un paper no seria difícil trobar altres petites penínsules semblants a la inicial. En la Fig. 2 hem representat un

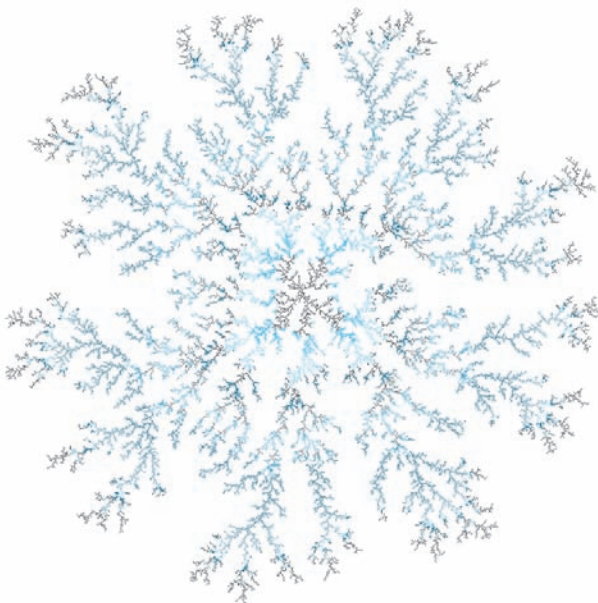


Figura 2: Fractal generat mitjançant el procés d'agregació per difusió limitada.

**«ANEM ACOSTANT-NOS “AL PRINCIPI DEL FINAL”,
ON ES POSA DE MANIFEST
LA TRANSICIÓ A L'HOMOGENEÏTAT POSTULADA
PEL PRINCIPI COSMOLÒGIC.»**

fractal que es genera per un procés anomenat agregació per difusió limitada, molt conegut en la física de l'estat sòlid. Una de les característiques d'aquesta estructura és que la densitat decreix amb el radi segons una llei de potències. En funció de l'exponent negatiu d'aquesta llei se'n pot definir la dimensió fractal, que en aquest cas és 1,7. Aquest valor seria 2, la dimensió del pla, si la distribució de les partícules en l'agregat fóra uniforme.

Tornem ara al mapa tridimensional de galàxies mostrat en la Fig 1. La densitat de galàxies també decreix segons una llei de potències, això ens

permet parlar d'una dimensió fractal per a la distribució de les galàxies, però a diferència del que passa per a l'agregat de la Fig. 2, a partir d'aproximadament 100 milions d'anys llum, l'exponent creix tot tendint a zero i per tant, la densitat s'acosta a un valor constant, propi d'una distribució homogènia amb dimensió 3. Observant la mostra més profunda de la Fig. 1, la de Las Campanas, apreciem estructures similars a les del CfA, repetint-se a diferent profunditat, però no s'observen estructures i buits més grans com caldria esperar si la interpretació d'un fractal sense límit fóra certa. Anem, doncs, acostant-nos “al principi del final”, on es posa de manifest la transició a l'homogeneïtat postulada pel principi cosmològic. Aquest principi, formulat per Einstein, encara que el terme va ser encunyat per E. A. Milne, afirma que l'univers a gran escala és homogeni i isòtrop. Quan es va postular el principi era necessari assumir moltes coses encara desconegudes per tal de poder progressar. Les observacions actuals ens permeten confirmar que allò que va ser postulat es verifica realment.

L'estudi de la macroestructura còsmica traçada per la distribució de galàxies i cúmuls, i pels mapes de fluctuacions de temperatura en la radiació de fons de microones, la seua descripció en termes estadístics, utilitzant els fractals i altres tècniques són alguns dels temes de recerca a què es dedica l'autor d'aquest article. La massa i l'extensió dels halos de matèria fosca al voltant de galàxies el·líptiques és un dels projectes observacionals que es desenvoluparà en un futur immediat. L'autor espera poder, de tant en tant, explicar com van aquests treballs des de les pàgines de MÈTODE.



*Departament d'Astronomia i Astrofísica, Universitat de València.