

UN UNIVERS MISTERIÓS

DESVELANT LES LLUMS I LES OMBRES DEL COSMOS

SUSANA PLANELLES I VERONICA BIFFI

Per què el nostre univers és com l'observem? Serà sempre de la mateixa manera? Comprendre la naturalesa dels principals components de l'univers és essencial per a obtenir una descripció precisa del procés que l'ha portat fins al seu estat actual. Avui dia, moltes observacions independents abonen la idea que el contingut de matèria de l'univers es divideix en un component bariònic ordinari i observable (~5%) i la matèria fosca invisible (~23%). El ~72% restant del contingut de l'univers està en la forma d'un camp d'energia fosca absolutament misteriosa. Aquesta composició remarca que, encara que continuem desconeixent un ~95% del nostre univers, fins i tot la contribució minoritària de matèria normal, i aparentment coneguda, comporta importants reptes per als cosmòlegs.

Paraules clau: cosmologia, astrofísica, barions, matèria fosca, energia fosca.

■ NOMÉS MATÈRIA O ALGUNA COSA MÉS?

La nostra comprensió de l'univers ha canviat dràsticament en els últims cent anys. Al començament del segle passat es creia que la nostra galàxia, la Via Làctia, era el centre de l'univers. Més enllà de l'extensió de la nostra galàxia, tot era incert. En aquell moment, ja s'havien observat algunes nebuloses, però es pensava que eren grups d'estels no resolts de la nostra galàxia. El 1924, Edwin Hubble va calcular la distància a algunes d'aquestes nebuloses i va demostrar que, de fet, eren galàxies allunyades dels límits de la Via Làctia. Es confirmava així l'existència de l'univers extragalàctic.

Uns anys abans, el 1915, Albert Einstein havia presentat la seua teoria de la relativitat general, una descripció unificada i revolucionària de la gravetat com a propietat de l'espai-temps. Quan, el 1925, Alexander Friedmann va resoldre les equacions d'Einstein en condicions d'homogeneïtat i isotropia a gran escala, la solució descrivia un univers en expansió! Només quatre anys més tard, Hubble va descobrir una interessant correlació mentre analitzava el moviment de les galàxies pròximes: com més allunyades estaven entre elles, majors eren les seues velocitats de recessió. Com que

les galàxies no es movien al voltant d'un centre, el resultat suggeria que, en el passat, totes havien estat més prop les unes de les altres i que, per tant, tenien un origen comú. Aquestes observacions van ser la primera confirmació d'un univers que s'expandeix a partir d'un punt de partida comú, el Big Bang.

El model cosmològic estàndard actual, basat en la teoria del Big Bang, es va definir de manera definitiva com una descripció vàlida del nostre univers el 1965, quan Arno Penzias i Robert Wilson van descobrir la primera llum emesa per l'univers després del Big Bang, la radiació de fons de microones, detectada com una emissió isotròpica i no polaritzada que omplia tot l'espai.

La teoria del Big Bang ens serveix per a explicar moltes proves observacionals (Hamilton, 2013). D'acord amb aquest model, el nostre univers i, per consegüent, l'espai-temps, van començar després del Big Bang fa uns 13.700 milions d'anys. Al començament, tota la matèria, l'energia i la radiació estaven comprimides en un plasma molt calent i dens. A causa de l'alta temperatura, la matèria estava completament ionitzada i la interacció entre fotons i electrons era forta. A mesura que l'univers s'expandia, es va refredar fins a assolir una temperatura en què els electrons quedaven captu-

«LA NOSTRA COMPREENSIÓ DE L'UNIVERS HA CANVIAT DRÀSTICAMENT EN ELS ÚLTIMS CENT ANYS. AL COMENÇAMENT DEL SEGLE PASSAT ES PENSAVA QUE LA VIA LÀCTIA ERA EL CENTRE DE L'UNIVERS»

rats pels nuclis atòmics per a formar els primers àtoms, principalment d'hidrogen.

La primera llum emesa per l'univers primordial, calent i dens i en el qual la matèria i la radiació estaven acoblades, es pot detectar en la radiació de microones que omple el cel de manera uniforme, el fons còsmic de microones. Aquesta radiació, emesa quan l'univers tenia uns 375.000 anys, dibuixa un medi homogeni amb una temperatura extremadament uniforme pertot el cel, en el qual només es poden mesurar petites fluctuacions. De fet, en els últims trenta anys, gràcies a satèl·lits espacials com COBE, WMAP o, més recentment, Planck, hem pogut calcular les anisotropies de temperatura del fons còsmic de microones amb una precisió sorprenent (figura 1). Aquestes anisotropies, resultat de les petites fluctuacions de densitat de l'univers primordial, representen les llavors de formació d'estructures còsmiques: gràcies a l'acció de la

gravetat, aquestes sobredensitats inicials van donar lloc als sistemes més grans que observem en l'actualitat.

Investigant les fluctuacions de temperatura del fons còsmic de microones, els cosmòlegs tracten de respondre una de les qüestions més fonamentals: com va arribar a ser el nostre univers tal com l'observem? Aquestes i moltes observacions més han revelat un fet realment sorprenent: la major part de la matèria de l'univers no és observable en el sentit clàssic, sinó fosca, ja que no emet ones electromagnètiques. No obstant això, aquesta matèria fosca es pot observar indirectament gràcies als seus efectes i interacció amb les estructures visibles. A més de matèria, sabem que l'univers també està compost de radiació. Tot això, però, és només una petita fracció del contingut actual de l'univers. Encara que la densitat energètica dels diferents components de l'univers canvia amb el temps, en l'actualitat, mentre l'observem, el component

«EL MODEL COSMOLÒGIC ESTÀNDARD ACTUAL, BASAT EN LA TEORIA DEL BIG BANG, ES VA DEFINIR DE MANERA DEFINITIVA COM UNA DESCRIPCIÓ VÀLIDA DEL NOSTRE UNIVERS EN 1965, QUAN ES VA DESCOBRIR LA RADIACIÓ DE FONS DE MICROONES»

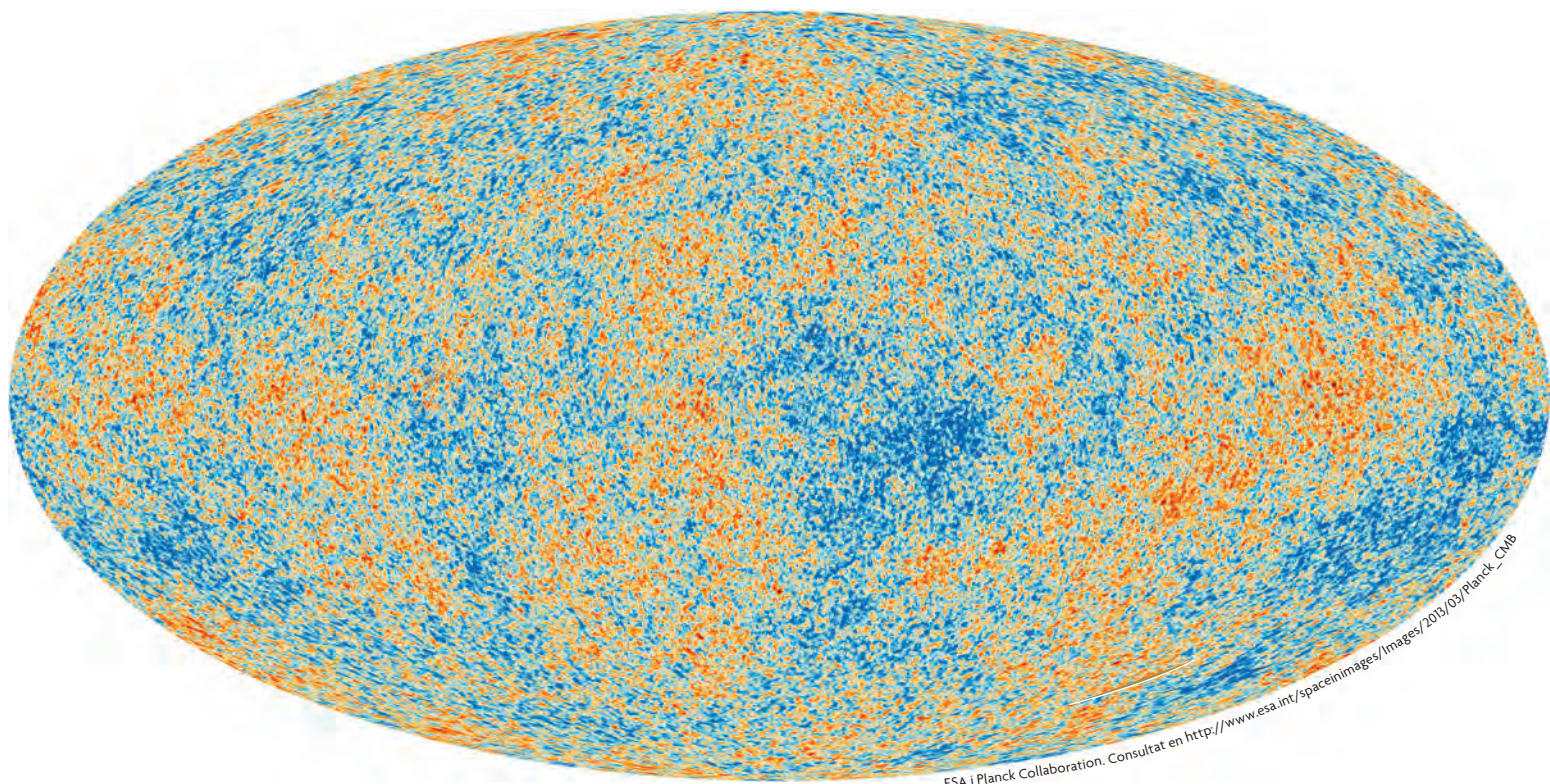


Figura 1. Distribució de les fluctuacions de temperatura del fons còsmic de microones segons les observacions del satèl·lit Planck. Aquest mapa representa una imatge de la llum emesa per l'univers primerenc, quan tenia uns 380.000 anys. Els tons més rojos corresponen a les regions més calentes i, per tant, més denses de l'espai, que representen les llavors per a la formació de les estructures còsmiques que observem avui.

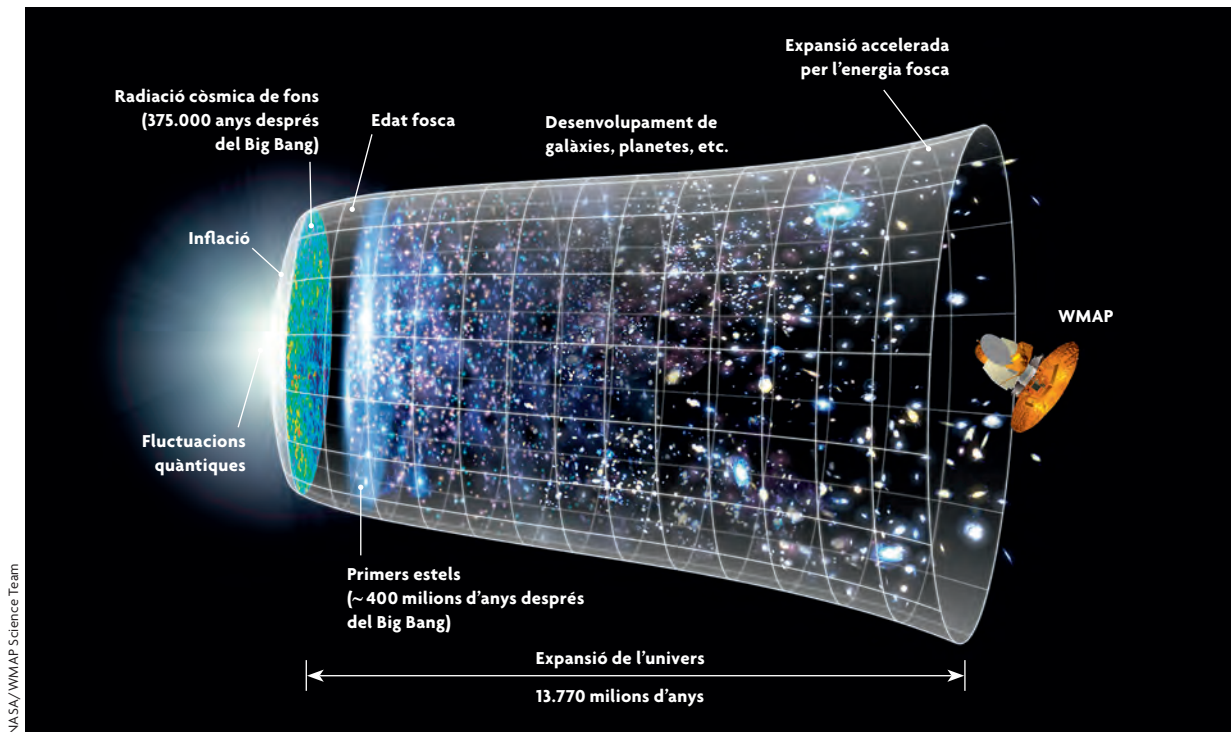


Figura 2. Diagrama il·lustratiu que resumeix el model cosmològic estàndard acceptat actualment. La imatge mostra l'evolució de l'univers des del Big Bang, fa uns 13.770 milions d'anys, fins a l'actualitat.

dominant de la densitat d'energia pren la forma d'un camp misteriós i desconegut d'energia fosca.

Recentment, al setembre de 2015, els observatoris LIGO van detectar ones gravitatòries (és a dir, onades en l'espai-temps generades, en aquest cas, per la fusió entre dos forats negres), el que confirma la predicció realitzada fa quasi un segle per la teoria de la relativitat general i reforça el nostre model cosmològic actual (figura 2).

■ MATÈRIA ORDINÀRIA. TRAÇANT L'UNIVERS VISIBLE

Les observacions astronòmiques han revelat un univers en què les estructures còsmiques creixen i evolucionen de manera jeràrquica, la qual cosa dona lloc a un gran nombre d'objectes de diferents masses i escales. Durant l'evolució còsmica, l'atracció gravitatòria fa que els estels formen galàxies i aquestes al seu torn formen cúmuls. Aquesta estructura a gran escala de l'univers es completa amb una xarxa de filaments menys densos que connecten els cúmuls de galàxies, així com amb regions quasi sense matèria anomenades «buits». Grans catàlegs de galàxies, com l'Sloan Digital Sky Survey, han confirmat aquesta distribució amb una precisió sense precedents (per exemple, Bull et al., 2016; Olmo, 2012).

Els mesuraments de les anisotropies del fons còsmic de microones i de la nucleosíntesi primerenca han revelat que la matèria ordinària dóna compte del 5% del contingut total de massa i energia de l'univers primerenc. Els estels, els planetes, els núvols de gas i la pols estan formats per aquesta matèria bariònica, composta d'àtoms i ions ordinaris i que podem observar gràcies a la seua emissió de radiació en un ampli interval d'energies. No obstant això, una incògnita en relació amb aquest component ordinari és que, quan els astrònoms sumen tota la matèria visible en l'actualitat, falta una fracció de més de la meitat de barions. Concretament, al contingut bariònic present de l'univers contribueixen les galàxies (~10%), el gas temperat de l'espai (~10%) i els núvols de gas fred del medi intergalàctic (30%). El ~50% restant no s'ha pogut detectar fins al moment (figura 3).

Les simulacions cosmològiques suggereixen que una gran part dels barions restants resideixen en un medi intergalàctic temperat-calent distribuït al llarg dels filaments de la xarxa còsmica. Aquest plasma calent i difús, format per material altament ionitzat, és difícil de detectar amb les instal·lacions d'observació actuals. No obstant això, recents observacions en raigs X dels filaments associats amb el cúmul massiu de galàxies Abell 2744 semblen abonar l'escenari suggerit per les simulacions (Eckert et al., 2015). Al mateix temps,

X-ray: NASA/CXC/CFR/M.M.Marikevitch et al.; Mapa de lent gravitatoria: NASA/STScI; ESO WFI: Magellan/UT-Arizona/D.Clowe et al. Optical: NASA/STScI; Magellan/UT-Arizona/D.Clowe et al.

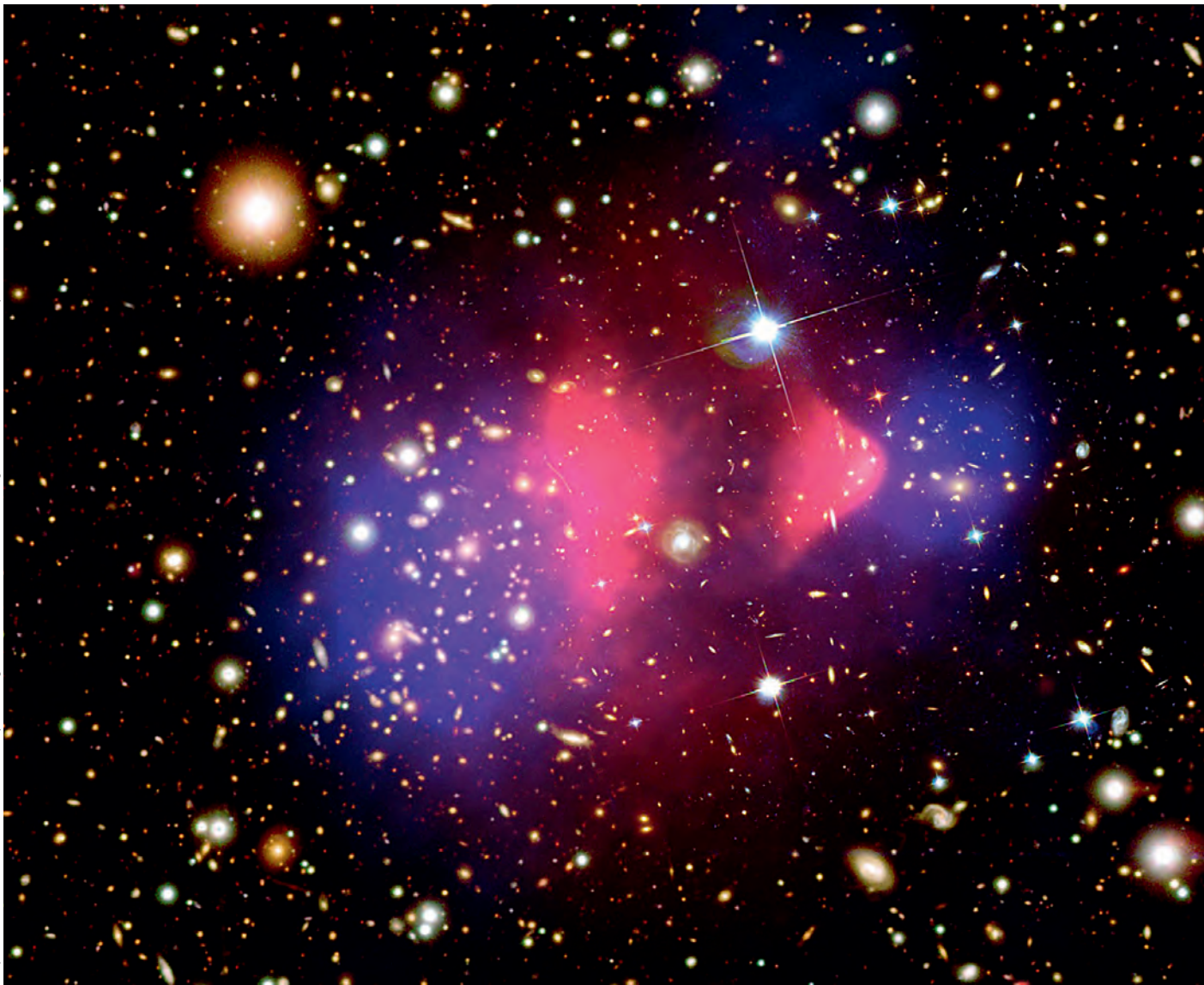


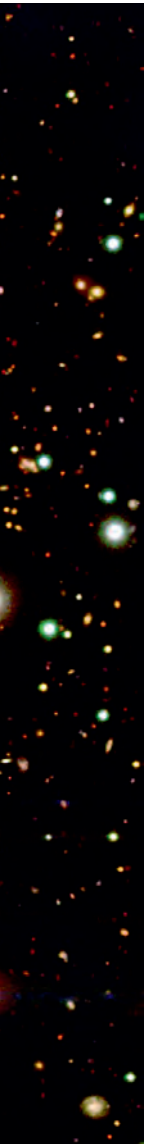
Figura 3. Distribució de matèria en el cúmul galàctic 1E 0657-56, conegut com el cúmul Bala. Aquesta estructura resulta de la col·lisió entre dos subcúmul. El més petit, a la dreta en la imatge, es coneix com la «bala» que acaba de travessar el subcúmul gran. El contingut bariònic d'aquest cúmul es distribueix entre galàxies individuals, observades en la banda òptica, i el gas calent intracúmul, que emet en raigs X i està representat ací mitjançant les distribucions en rosa. Gràcies a l'efecte de lent gravitòria de les galàxies de fons, sabem que la major part de la matèria d'aquest cúmul pren la forma de matèria fosca, representada en la imatge pels núvols blaus. La diferència entre les distribucions de gas i de matèria fosca, que només interactuen de manera gravitòria, és una prova clara de l'existència de la matèria fosca.

una anàlisi de les distorsions experimentades per la radiació del fons còsmic de microones quan travessa les galàxies centrals identificades per l'Sloan Digital Sky Survey sembla haver detectat tots els barions restants en l'interior i al voltant de les galàxies (Hernández-Montegudo et al., 2015). Aquests resultats indiquen que el misteri dels «barions perduts», a pesar d'estar prop de ser resolt, continua essent controvertit. Encara que la fracció de barions que no detectem és consistent amb models raonables sobre l'impacte dels vents galàctics en el model cosmològic estàndard,

detectar aquest component continua essent un repte important per a comprendre la composició del nostre univers i com aquest va arribar a ser el que avui dia observem.

■ MATÈRIA FOSCA. BUSCANT L'INVISIBLE

Les observacions del fons còsmic de microones preduen que prop d'un 80 % de la matèria de l'univers és invisible als nostres telescopis i detectors. No podem observar aquest component de «matèria fosca», però



n'inferim l'existència per la seua interacció gravitatòria amb la matèria normal (vegeu Bull et al., 2016).

El 1933, gràcies a una anàlisi de la dinàmica de les galàxies en el cúmul de Coma, l'astrònom Fritz Zwicky es va adonar que la massa total en galàxies lluminoses era molt menor que la massa gravitatòria total del cúmul. Per explicar aquesta discrepància, va suggerir la presència d'una matèria fosca dominant, no detectada i invisible que ompliria l'espai entre galàxies.

No obstant això, l'existència de matèria fosca no es va acceptar de manera general fins més de quaranta anys després, quan Vera Rubin i els seus col·laboradors van obtenir resultats semblants observant les corbes de rotació de les galàxies espirals. Contràriament al que ocorre en un univers newtonià pur, van observar una velocitat estel·lar constant en les regions exteriors de les galàxies, la qual cosa confirmava l'existència de matèria fosca que omplia el potencial galàctic i lligava els estels a les galàxies fins i tot a gran distància del centre galàctic.

L'existència de matèria fosca també s'ha confirmat mitjançant l'efecte de lents gravitatòries. D'acord amb la relativitat general, la trajectòria de la llum es corba quan passa prop d'un objecte massiu. Com a resultat, quan la llum emesa per galàxies llunyanes viatja a través de sistemes més massius, com els cúmuls de galàxies, obtenim imatges galàctiques allargades i distorsionades. La magnitud d'aquest efecte depèn de la massa total del cúmul que actua com a lent i proporciona una de les estimacions més precises de la massa dels cúmuls (figura 3).

Des de 1980, nombroses observacions independents addicionals, com les de les anisotropies del fons còsmic de microones o les de raigs X del gas intracúmul calent, van confirmar la presència d'una quantitat significativa de matèria fosca en l'univers.

La detecció de matèria fosca a partir de diferents efectes gravitatoris proporciona importants pistes sobre les seues propietats principals. Fins ara no s'ha observat que la matèria fosca interactue amb els barions o amb la llum —a part de fer-ho mitjançant la interacció gravitatòria—. Per consegüent, deu ser fosca, en el sentit que no emet ni absorbeix llum. A més, la matèria fosca deu ser freda (o tenir una velocitat molt baixa), per a poder col·lapsar i permetre la formació d'objectes amb interacció gravitatòria. Les proves observacionals suggereixen que la matèria fosca hauria de prendre la forma de matèria sense col·lisions. Encara que hi ha diverses solucions que satisfan aquests requisits, el con-

sens general és que, si la matèria fosca existeix, deu ser una nova partícula que encara no incloem en el model estàndard de la física de partícules.

Actualment, hi ha una sèrie d'experiments que intenten detectar la matèria fosca des de diferents canals. Per exemple, els experiments de l'LHC (Gran Col·lisionador d'Hadrons, en les seues sigles en anglès), el major accelerador de partícules, tracten de produir candidats a la matèria fosca fent col·lidir partícules a diferents energies. Com que la matèria fosca hauria de ser estable i interactuar només de manera dèbil amb la matèria normal, els detectors només poden calcular la pèrdua energètica després de la col·lisió. D'altra banda, al contrari que la matèria normal, com que les partícules de matèria fosca haurien d'arribar contínuament al nostre planeta i creuar-ne la superfície sense a penes interacció, s'han construït una sèrie d'experiments sub-

terranis amb aquest fi. No obstant això, de moment, cap d'aquests canals ha donat resultat.

S'hi sumen els experiments de detecció indirecta dels processos d'aniquilació de matèria fosca que produeixen fotons altament energètics, com els de raigs gamma. Regions amb altes concentracions de matèria fosca, com el centre de la nostra galàxia o les galàxies nanes, són els llocs perfectes per a detectar aquests successos. A

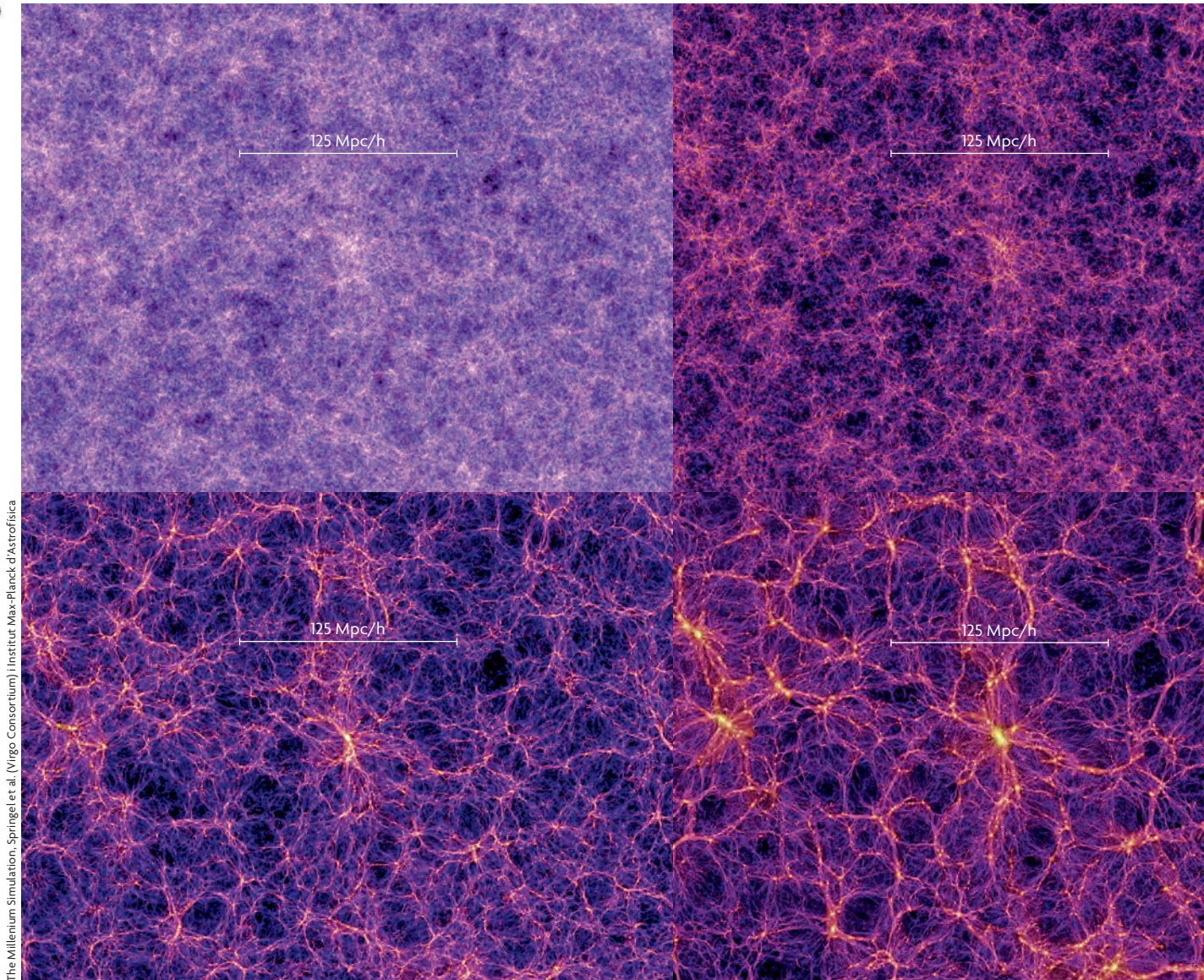
pesar del nombre de successos de raigs gamma recollits des de 2008 pel Telescopi Espacial de Raigs Gamma Fermi, no tenim cap confirmació clara d'aquests processos.

Les simulacions numèriques, que resolen l'evolució gravitatòria de milers de milions de partícules de matèria fosca, confirmen que el model de matèria fosca freda és consistent, almenys a gran escala, amb la distribució d'estructures còsmiques proporcionada pels grans catàlegs de galàxies (figura 4). A escales més petites, però, apareixen una sèrie de tensions entre el model acceptat i les observacions, que fan necessari simular de manera més precisa alguns dels processos físics involucrats, especialment rellevants a escala galàctica (vegeu Bull et al., 2016). En aquest sentit, la millora de les simulacions numèriques actuals —en termes físics i de resolució— serà essencial per a aprofundir en la nostra comprensió de l'univers i dels seus principals components.

■ ENERGIA FOSCA. ENDEVINANT EL DESCONEGUT

Sorprenentment, la immensa majoria del contingut energètic de l'univers no el representen la radiació i

**«LA MAJOR PART DE
LA MATÈRIA DE L'UNIVERS
NO ÉS OBSERVABLE
EN EL SENTIT CLÀSSIC,
SINÓ FOSCA, JA
QUE NO EMET ONES
ELECTROMAGNÈTIQUES»**



The Millenium Simulation, Springel et al. (Virgo Consortium) | Institut Max-Planck d'Astrofísica

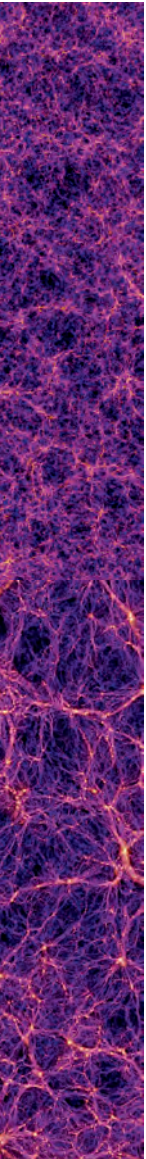
Figura 4. Distribució del camp de densitat de matèria fosca simulat en una regió petita de la Millenium Simulation. Aquesta simulació va resoldre l'evolució de més de 10.000 milions de partícules de matèria fosca en una regió cúbica de l'univers d'aproximadament 10^{21} quilòmetres de costat. En el sentit de les agulles del rellotge, començant per la imatge superior esquerra, el mapa en 2D mostra la distribució de matèria fosca quan l'univers tenia, respectivament, 210, 1.000, 4.700 i 13.600 milions d'anys d'edat. Aquestes imatges exemplifiquen l'evolució jeràrquica de les estructures còsmiques. A mesura que avança l'evolució, la distribució de matèria passa d'una xarxa pràcticament homogènia de regions superdenses, filaments i buits, a un patró menys homogeni en el qual es distingeixen clarament les grans regions superdenses (en groc). La línia recta en totes les imatges proporciona l'escala, en la qual 125 Mpc/h equivalen a més de 10^{19} quilòmetres.

la matèria, ni la lluminosa ni la fosca, sinó que consisteix en una forma poc coneguda d'energia, l'anomenada «energia fosca». La seua característica principal és que, a diferència de qualsevol altra forma coneguda de matèria o energia, té una pressió negativa, per la qual cosa actua com a força de repulsió (vegeu Bull et al., 2016).

La confirmació va arribar a finals dels anys noranta, quan dos equips independents van trobar proves ob-

servacionals d'una expansió accelerada de l'univers. La importància d'un descobriment tan crucial els va valdre a Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt i Adam G. Riess un Premi Nobel en 2011.

Ambdós grups van investigar supernoves tipus Ia, explosions estel·lars particularment energètiques que marquen la mort d'un petit estel compacte, pertanyent a un sistema binari d'estels, amb una enorme descàrrega d'energia. Totes les supernoves brillen amb una



llum intrínseca semblant, així doncs, depenent de l'atenuació que s'observe, es poden utilitzar per a mesurar distàncies en l'univers i, per tant, la seua expansió amb el temps. Els dos grups van descobrir de manera independent que el nostre univers no s'està frenant per efecte de l'atracció gravitatòria de la matèria que conté, sinó que s'expandeix cada vegada més ràpidament. Com que aquest resultat no es pot explicar únicament amb les formes de matèria i energia que coneixem, se suggereix l'existència d'una energia fosca dominant responsable d'aquest efecte. En combinar aquesta idea amb l'observació proporcionada pel fons còsmic de microones d'un univers pla, la quantitat de matèria fosca necessària per a explicar les observacions actuals seria d'un ~72% del contingut energètic total.

En una de les interpretacions més senzilles, l'energia fosca es pot relacionar amb una energia de buit, és a dir, l'energia associada a l'espai buit, ben representada pel que es coneix com constant cosmològica. La constant cosmològica va aparèixer per primera vegada en la formulació d'Einstein de les equacions que descriuen el nostre univers. Tot i que en realitat no es coneixia el seu significat físic, aquest concepte es va introduir com una manera de compensar la força de la gravetat i de construir un univers «estàtic», que ni s'expandia ni es contraïa amb el temps, tal com suggeria el model acceptat en l'època. Aquesta imatge, però, es va abandonar després que Hubble trobara proves observacionals d'un univers en expansió i eliminara la necessitat de la constant cosmològica.

No obstant això, des de finals dels noranta, les diferents proves de l'expansió accelerada de l'univers van fer que l'energia fosca entrara a formar part del model cosmològic estàndard (figura 2). Per simplicitat, el model acceptat inclou l'energia fosca en forma d'una constant cosmològica, però assolir una comprensió més profunda de la seua naturalesa continua sent tot un repte. De fet, a pesar de la seua efectivitat, representa inconvenients tant teòrics com observacionals. D'una banda, encara que s'estima que el valor d'aquesta energia de buit és positiu, és tan increïblement petit que és difícil d'explicar de manera natural des del punt de vista de la física de partícules. D'altra banda, les proves observacionals de l'existència de l'energia fosca són només proves indirectes de la seua pressió negativa obtingudes a partir de l'expansió accelerada de l'univers.

A més, respecte a la densitat crítica del nostre univers, l'energia fosca va començar a dominar (per damunt de la matèria i la radiació) el total d'energia de l'univers i a ser responsable de la seua expansió accelerada només molt recentment en la història d'aquest univers. Per què només ara? Aquest fet també planteja un interrogant incòmode per als cosmòlegs.

■ QUÈ HI HA DARRERE DE L'ENERGIA FOSCA?

Tota una branca de la cosmologia es dedica a investigar la naturalesa de l'energia fosca, tant observacionalment com teòricament i, a més de la constant cosmològica, s'han proposat molts models per a explicar l'alta precisió de les dades cosmològiques. Com triar entre totes aquestes dades? Si existeix més d'un model que representa amb èxit part de les propietats observades de l'univers, com podem discriminar? Els científics solen invocar el criteri de simplicitat i naturalitat. Aquesta és la raó principal per la qual la constant cosmològica continua sent el paradigma preferit.

Entre les diferents alternatives, hi ha teories molt complexes i ambicioses que tracten d'interpretar la matèria i l'energia fosques com dos aspectes d'un mateix fenomen que modifiquen la gravetat a diferents escales espacials. La idea és que, o bé el ~72% de l'univers és compost de la misteriosa energia fosca, o la relativitat general s'ha de reemplaçar per una nova forma de gravetat a escales còsmiques. Alguns teòrics

advoquen per aquesta última interpretació, considerant que tant l'energia fosca com l'acceleració còsmiques són fallades de la relativitat general a escales superiors als supercúmuls (és a dir, grans agrupacions de cúmuls de galàxies). No obstant això, la majoria d'intents de modificar la relativitat general amb aquest fi han resultat incompatibles amb moltes dades observacionals i, en conseqüència, s'han bandejat.

Recentment, una nova campanya d'observacions de supernoves de tipus Ia ha afegit càlculs molt precisos del ritme d'expansió de l'univers i ha mostrat una certa tensió amb el valor obtingut en les dades de la radiació del fons còsmic de microones (Riess et al., 2016; Moskowitz, 2016). Així, l'escenari es complica: segons sembla, l'univers s'expandeix encara més ràpidament que no ens pensàvem. Potser l'energia fosca –si és que existeix– es comporte de manera diferent del que s'es-

**«PROP D'UN 80% DE
LA MATÈRIA DE L'UNIVERS
ÉS INVISIBLE ALS NOSTRES
TELESCOPIS I DETECTORS.
NO PODEM OBSERVAR
AQUEST COMPONENT
DE "MATÈRIA FOSCA", PERÒ
N'INFERIM L'EXISTÈNCIA
PER LA SEUA INTERACCIÓ
GRAVITATÒRIA AMB LA
MATÈRIA NORMAL.»**



Aurora Valero. *Explosions*, 2016. Tècnica mixta, collage sobre paper, 25 x 35 cm.



peculava. Això, per exemple, abonaria la idea d'una energia fosca dinàmica que canvie en l'espai i el temps, tal com proposen els anomenats models de «quinta essència».

En aquest context, les sofisticades simulacions cosmològiques realitzades amb avançats superordinadors, capaços de resoldre complexos càlculs numèrics de manera massiva, juguen un paper fonamental. Aquestes simulacions permeten canviar la descripció gravitatòria de l'univers i la història de la seua expansió per a obtenir propietats mesurables de les estructures numèriques resultants, com per exemple el nombre de sistemes que s'esperen a qual-sevol escala de massa, i per a poder comparar, en última instància, les observacions. Aquesta és una manera molt útil de provar les prediccions d'aquestes teories i fins i tot descartar-ne alguna.

En termes d'observació, buscar un element invisible i desconegut com l'energia fosca sempre representa un repte emocionant. Per a abordar aquesta tasca tan ambiciosa, en els últims anys s'han planejat grans programes de sondeig dissenyats per a observar una gran quantitat de galàxies i supernoves a grans distàncies. Entre aquests, el Dark Energy Survey i la missió Euclid pretenen sondejar la geometria i l'expansió de l'univers observant els detalls de la distribució a gran escala de les galàxies i calculant els petits efectes de lent gravitatòria provocats per la distribució de la matèria fosca. Aquestes observacions comprendran el període còsmic en què l'energia fosca va començar a provocar l'acceleració còsmica. Per consegüent, oferiran més informació sobre la naturalesa intrínseca de l'energia fosca i ajudaran a respondre moltes de les qüestions obertes: és l'energia fosca una constant en el temps? Per què només va començar a ser dominant recentment? Què és? Existeix realment o hem de canviar la nostra comprensió de la gravetat?

■ MIRANT AL FUTUR

En menys d'un segle, gràcies a la combinació d'avenços observacionals, numèrics i teòrics, s'ha fet un gran progrés en la nostra comprensió de l'univers. A pesar dels notables èxits, la cosmologia continua sent un camp fèrtil i òptim per a l'aparició de noves teories i models alternatius, que de vegades es converteixen en qüestions filosòfiques però que sempre impulsen el progrés científic. De fet, cada teoria reeixida i cada

descobriments observacionals sempre comporta nous reptes i noves finestres obertes a l'univers. Afegir petites peces al trencaclosques global és crucial, no sols per a entendre l'univers que observem avui dia sinó, principalment, per a aprofundir en la nostra comprensió del seu origen i del seu destí últim.

En el moment en què escrivim aquest article, s'ha detectat un segon senyal d'ona gravitatòria. Es confirma així un nou canal molt potent per a l'exploració del nostre univers. Aquest fet, combinat amb les impressionants instal·lacions d'observació futures, com l'Square Kilometre Array, ens proporcionarà pistes crucials per a afrontar algunes de les preguntes que continuen obertes. El que

aprenuem d'aquesta nova finestra a l'univers continua sent un misteri. En canvi, tenim la certesa que el més emocionant seran les noves qüestions i reptes que sorgesquen. ☺

«EN MENYS D'UN SEGLE, GRÀCIES A LA COMBINACIÓ D'AVENÇOS OBSERVACIONALS, NUMÈRICS I TEÒRICS, S'HA FET UN GRAN PROGRÉS EN LA NOSTRA COMPENSIÓ DE L'UNIVERS»

REFERÈNCIES

- Bull, P., Akrami, Y., Adamek, J., Baker, T., Bellini, E., Beltrán Jiménez, J., ... Winther, H. A. (2016). Beyond Λ CDM: Problems, solutions, and the road ahead. *Physics of the Dark Universe*, 12, 56–99. doi: [10.1016/j.dark.2016.02.001](https://doi.org/10.1016/j.dark.2016.02.001)
- Eckert, D., Jauzac, M., Shan, H., Kneib, J. P., Erben, T., Israel, H., ... Tchennin, C. (2015). Warm-hot baryons comprise 5-10 per cent of filaments in the cosmic web. *Nature*, 528, 105–107. doi: [10.1038/nature16058](https://doi.org/10.1038/nature16058)
- Hamilton, J. Ch. (2013). What have we learned from observational cosmology? *Studies in History and Philosophy of Science Part B: Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 46(A), 70–85. doi: [10.1016/j.shpsb.2013.02.002](https://doi.org/10.1016/j.shpsb.2013.02.002)
- Hernández-Monteagudo, C., Ma, Y.-Z., Kitaura, F. S., Wang, W., Génova-Santos, R., Macías-Pérez, J., & Herranz, D. (2015). Evidence of the missing baryons from the kinematic Sunyaev-Zeldovich effect in Planck data. *Physical Review Letters*, 115(19). doi: [10.1103/PhysRevLett.115.191301](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.115.191301)
- Moskowitz, C. (2016, April 11). Cosmic speed measurement suggests dark energy mystery. *Scientific American*. Consultat en: <http://www.scientificamerican.com/article/cosmic-speed-measurement-suggests-dark-energy-mystery/>
- Olmo, G. J. (2012). *Open questions in cosmology*. Rijeka: InTech. doi: [10.5772/45746](https://doi.org/10.5772/45746)
- Riess, A. G., Macri, L. M., Hoffmann, S. L., Scolnic, D., Casertano, S., Filippenko, A. V., ... Foley, R. J. (2016). A 2.4% determination of the local value of the Hubble constant. *The Astrophysical Journal*, 826(1). doi: [10.3847/0004-637X/826/1/56](https://doi.org/10.3847/0004-637X/826/1/56)

Susana Planelles. Investigadora postdoctoral en la Universitat de València (Espanya), on també va obtenir el seu doctorat en 2011. Els seus interessos científics se centren principalment en el camp de la cosmologia computacional. En particular, una part important de la seua investigació es dedica a analitzar i interpretar la formació i evolució de cúmuls de galàxies en grans simulacions cosmològiques.

Veronica Biffi. Investigadora postdoctoral en la Universitat de Trieste i associada a l'Observatori de l'INAF a Trieste (Itàlia). A partir del seu doctorat a Munic, el seu treball s'ha centrat principalment a investigar la física dels cúmuls de galàxies, mitjançant simulacions cosmològiques i la comparació amb observacions sintètiques de raigs X del medi intracúmulo.