

Estat actual de la cosmologia física

Eduard Salvador Solé *

Departament d'Astronomia, Astrofísica i Meteorologia. Universitat de Barcelona

Introducció

Al llarg d'aquest segle la cosmologia ha escapat del marc purament filosòfic i teològic per esdevenir una ciència de la natura. Aquesta cosmologia científica s'ha desenvolupat al si de la Física, primer, a un nivell exclusivament teòric i més tard, i cada cop més, a nivell també empíric. En poc temps s'ha passat d'un model embrionari d'univers de caràcter gairebé lúdic, a un model seriós i sòlidament establert en el qual nombrosos fets observacionals hi troben una explicació natural, donant lloc, fins i tot, a prediccions teòriques profundes, confirmades experimentalment. Podríem dir que l'època clàssica de la cosmologia física va culminar, però, fa uns quants anys i que, actualment, s'ha entrat en una etapa més aviat barroca. Efectivament, la situació actual, molt més complexa i de detall, està caracteritzada pel fet que els punts que romanen oberts de la teoria requereixen hipòtesis aparentment agoserades i que les observacions, cada cop més fines i precises, no sempre donen el resultat esperat d'antuvi en el marc de les hipòtesis avançades. Així doncs, tot sembla indicar que el model d'univers de la Gran Explosió Calenta és a punt de fer un nou gran pas endavant, sobretot pel que fa als dos punts següents: Quin és l'origen de les galàxies i d'altres inhomogeneïtats de l'univers? Quina quantitat de massa fosca hi ha i quina és la seva composició?

És precisament en aquest marc que s'inscriuen els recents descobriments realitzats mitjançant el satèl·lit COBE. Passada l'eufòria inicial de la detecció tan esperada de fluctuacions en la radiació de fons de microones, queda avui la caparra d'uns fets observacionals fins a un cert punt desconcertants i sobre els quals els teòrics es precipiten per tal d'intentar extreure'n les implicacions correctes. En aquest article intentarem resumir el camí seguit per la cosmologia física fins al seu estat actual, tot explicant el significat dels nous descobriments i les seves possibles conseqüències.

Breu història del model de la Gran Explosió

El descobriment de noves galàxies per Hubble entre 1918 i 1924 només va ser interpretat, inicialment, com eixamplant, notablement això sí, l'horitzó de l'univers conegut

*Eduard Salvador Solé (Barcelona, 1953) va fer el doctorat en Física (1980) al Groupe d'Astrophysique Relativiste de Meudon (França). Actualment és catedràtic d'Astrofísica a la Universitat de Barcelona

o, dit d'una altra manera, com obrint pas al que més tard s'anomenaria astrofísica extragalàctica. Fins i tot el descobriment, l'any 1929, del mateix astrònom americà, l'anomenada llei de Hubble, segons la qual com més lluny és una galàxia més gran és el desplaçament cap al vermell (*redshift*) experimentat per l'espectre de la seva llum, no va ser valorat, en un bon principi, en la seva justa mesura. De fet, els primers passos realitzats conscientment en el terreny de la cosmologia física els va donar Einstein totalment despreocupat de qualsevol avenç observacional. Recollint una de les novetats de la seva teoria de la relativitat general, concretament el fet que aquesta permetia d'abordar rigorosament, per primer cop, l'estudi dinàmic d'un univers ple de matèria per tot arreu, Einstein va proposar, l'any 1917, un model força senzill d'univers. Aquest model suposava que l'univers era estàtic i ple d'estels –i no pas de galàxies!– repartits homogèniament. Atès que la força de la gravetat mai es cancel·la i que té un abast infinit, un univers homogeni com el suposat difícilment podia ser estàtic tret d'incloure-hi alguna força repulsiva suplementària que equilibrés l'atracció de les partícules materials entre si. Per aquest motiu, Einstein va introduir en les equacions de camp de la seva teoria gravitatòria una constant que, per motius obvis, va anomenar “cosmològica”, amb els efectes apropiats. Val a dir que la teoria podia incloure, efectivament, una constant d'aquesta mena; tan sols cal que el seu valor sigui prou petit per tal de no tenir efectes apreciables en el límit newtonià. Aquest model d'univers estàtic va ser el principi d'un seguit de models teòrics d'univers proposats en el marc de la relativitat general, l'interès dels quals era el d'estudiar les conseqüències més o menys sorprenents, de vegades aberrants, de les diferents hipòtesis emprades i no pas de procurar una descripció realista de l'univers.

Entre aquests models n'hi va haver un, proposat independentment per Friedmann l'any 1922 i Lemaître l'any 1927, que suposava l'univers espacialment homogeni però no necessàriament estàtic (l'homogeneïtat espacial a cada instant de temps requereix, a més, la isotropia en qualsevol punt). La diferència principal amb el model anterior és que, en no demanar-se l'estaticitat, ja no calia introduir cap constant cosmològica per tal d'aturar l'evolució. La versió origi-

nal d'aquest model també suposava que les partícules que omplien l'univers eren de massa no nul·la, com ara les galàxies, i que tenien velocitat d'agitació negligible (aproximació de gas de pols) també vàlida per a les galàxies; cal, no obstant això, relaxar aquestes dues hipòtesis simplificatives si es vol descriure l'evolució de l'univers en una època primitiva. Òbviament, el moviment de la matèria en aquest model és el mateix per tot arreu: la distància (si és prou petita per tal que aquesta noció coincideixi amb l'euclidiana habitual) entre qualsevol parella de punts creix o decreix a un mateix ritme. Això produeix, automàticament, un desplaçament en l'espectre, observat des de qualsevol punt, de la llum emesa per qualsevol altre, proporcional (en primera aproximació) a la seva separació. És a dir, es pot retrobar la llei empírica de Hubble per a unes condicions inicials adequades. Aquest fet va comportar que el nou model passés a ser considerat seriosament i que Einstein reconegués que la inclusió de la constant cosmològica en les equacions de camp de la relativitat general havia estat "l'error més greu de la seva vida"...

Les condicions inicials que determinen la correcta cinemàtica del model de Friedmann-Lemaître, per a una equació d'estat de la matèria que omple l'univers com ara la de gas de pols, són ben simples. La velocitat relativa entre dos punts qualsevol de l'espai (separats per una certa distància, com sempre suposada prou petita com perquè les nocions newtonianes de distància i de velocitat relativa entre dos punts de l'espai tinguin sentit) fixa el ritme d'expansió H de l'univers en l'instant considerat. Aleshores, coneguda la seva densitat ρ en aquell instant, les equacions de camp de la relativitat permeten de conèixer el ritme d'expansió i tota magnitud mètrica i estructural (com ara les distàncies, els volums, la densitat, etc.) en qualsevol altre. L'evolució d'aquest univers depèn, doncs, dels valors de la densitat i del ritme d'expansió en un temps donat arbitrari, de fet, exactament com l'evolució, després d'una explosió, del conjunt de fragments que en surten expellits, movent-se en el si del seu propi camp gravitatori —d'aquí el nom amb què es coneix aquest model—. Com en el cas d'una explosió, retrocedint en el temps s'hauria de trobar que la distància entre qualsevol parella de punts es fa zero en algun instant, o dit d'una altra manera, que s'arriba a una singularitat en la qual la densitat es fa infinita. Ha corregut molta tinta, i de ben segur encara en correrà, sobre si l'univers ha tingut o no una singularitat inicial d'aquesta mena. Actualment, aquest és un punt que no preocupa gaire als cosmòlegs, ja que la discussió es basa en extrapolar cap al passat unes equacions gravitatòries clàssiques, que de ben segur deixen de ser vàlides en algun instant de l'univers primitiu. El que sí preocupa, perquè s'hauria de poder determinar i perquè té importants implicacions en molts aspectes de la teoria, és la fi de l'univers. Com en el cas de l'explosió, l'expansió con-

tinuarà indefinidament, o acabarà per aturar-se i donar pas a una fase de col·lapse segons que l'atracció gravitatòria, o equivalentment el valor de ρ en un instant arbitrari, sigui suficient com per acabar vençant la velocitat d'expansió que tenia en aquell instant, proporcional al valor de H . El valor crític de la densitat que fixa el límit entre aquests dos comportaments extrems és

$$\rho_c = \frac{3H^2}{8\pi G}.$$

Empíricament coneixem el valor de H a l'instant actual perquè és la constant de proporcionalitat H_0 trobada per Hubble entre la velocitat d'allunyament de les galàxies, mesurada a partir del *redshift*, i la seva separació¹. Però, el valor de la densitat ρ del nostre univers és una incògnita, ja que només tenim accés a la matèria visible. És, doncs, difícil de pronosticar si aquesta densitat és més gran o més petita que el valor crític o, de forma equivalent, si la raó $\Omega = \rho/\rho_c$ entre ambdues és més gran o més petita que 1. Convé dir que aquesta incertesa no només afecta el futur de l'univers, sinó que, atesa la relació íntima existent entre geometria de l'espai-temps i contingut en massa i energia, també afecta l'extensió espacial de l'univers: segons que Ω sigui més gran o més petita que 1, l'univers resulta espacialment finit o infinit. Per a Ω exactament igual a 1, l'univers també és infinit i en expansió indefinida, l'única diferència amb el cas de $\Omega < 1$ és que en el primer cas l'univers és, a més, espacialment pla, mentre que, en el segon, té curvatura negativa.

Aquest model de la Gran Explosió, tot i ser un bon candidat per a la descripció de l'univers a gran escala, no va ser acceptat fàcilment. Va caldre esperar fins a l'any 1964 perquè un descobriment casual mostrés que realment es tracta d'un bon model. Aquell any, dos enginyers de la Bell Telephone, Penzias i Wilson, posant a punt una radioantena, van detectar sense esperar-s'ho una radiació fòssil de l'univers primitiu, predita anteriorment en el marc del model de la Gran Explosió. En efecte, Gamow i Alpher havien mostrat l'any 1948 que si l'univers hagués estat prou calent, s'hauria format heli i altres elements lleugers en les abundàncies còsmiques observades, difícilment explicables d'altra manera. Seguint l'evolució de l'univers segons el model de la Gran Explosió a partir de les condicions de densitat i temperatura adequades per retrobar les bones proporcions d'aquells isòtops, Gamow i Alpher havien arribat a la conclusió que, avui, hauria d'haver-hi una radiació omplint l'univers a una temperatura d'uns 10 K. Efectivament, en refredar-se el plasma inicial i caure la temperatura per sota del valor d'ionització de l'hidrogen (uns 4000 K), l'isòtop molt més abundant, la

¹A causa de la incertesa en les distàncies extragalàctiques, aquesta constant només es coneix amb una precisió d'un factor 2, concretament, $50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \leq H_0 \leq 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

radiació es va desacoblar de la matèria² aquesta havia de mantenir el seu espectre de cos negre inicial tot i que corregut cap a una temperatura cada cop més baixa, a causa de l'expansió de l'univers. La radiació detectada per Penzias i Wilson en ones mil·limètriques era altament isotròpica com calia i els pocs punts de l'espectre que s'havien pogut mesurar apuntaven cap a una temperatura d'uns 3 K. Càlculs posteriors més acurats realitzats per Peebles, primer, i per Wagoner, Fowler i Hoyle, més tard, van confirmar plenament les prediccions de Gamow i Alpher, donant una temperatura prevista per a la radiació fòssil actual en ple acord amb la detectada. Era la primera predicció teòrica confirmada del model de la Gran Explosió, a la qual calia afegir, per aquest motiu, el qualificatiu de Calent. Aquesta predicció requeria, tanmateix, que només hi haguessin tres famílies leptòniques. En aquells instants se'n coneixien dues, però tot feia suposar que n'hi havien més... Doncs bé, recentment també s'ha pogut confirmar experimentalment aquest darrer punt: les úniques famílies leptòniques són les associades a l'electró, el muó i la partícula τ ! És la segona gran predicció del model estàndard de la Gran Explosió. Però aquí no acaba tot. Amb la precisió que avui dia coneixem les abundàncies còsmiques dels elements lleugers i la temperatura de la radiació de fons de microones (vegeu-ho més endavant), la nucleosíntesi primordial permet de fer una tercera predicció, encara no empíricament confirmada, com és que la densitat de l'univers en barions és inferior a 0.1 vegades la densitat crítica, el seu valor exacte dependent de H_0 . Això vol dir que si no existís a l'univers algun tipus de matèria no bariònica amb densitat suficient, aquest seria espacialment corbat i infinit, i en expansió indefinida.

Estructura de l'univers a gran escala

Però quina prova empírica tenim de la hipòtesi fonamental del model, és a dir, de l'homogeneïtat de l'univers a gran escala? Si existeixen inhomogeneïtats òbvies com les galàxies també en poden existir de més i més grans... L'homogeneïtat de l'univers és, en realitat, molt difícil de comprovar directament. En ser la velocitat de la llum finita, com més lluny mirem més cap al passat observem i, atès que l'univers evoluciona, la densitat d'objectes que s'hi troba és diferent a la que hi ha ara al nostre voltant. (L'observació permet d'excloure, això sí, que l'univers sigui estàtic o estacionari.) De fet, la pròpia lluminositat típica d'objectes d'una certa mena no té perquè ser la mateixa en el passat, la qual cosa impedeix d'utilitzar la densitat numèrica aparent d'objectes a diferents distàncies per determinar l'evolució en el temps de l'univers. No obstant això, el recompte de galàxies

segons la seva magnitud, per magnituds moderades de manera que els efectes evolutius de les galàxies incloses no siguin gaire importants, és consistent amb un univers homogeni en expansió. Aquest test té un abast, típicament, d'uns 500 Mpc de radi (totes les distàncies donades en aquest article suposen H_0 igual a 100 km s⁻¹ Mpc⁻¹; si el valor d'aquesta constant fos la meitat caldria doblar-les). Això ens du a comentar un fet, si més no, interessant: el recompte de galàxies resulta també compatible amb un univers espacialment pla. Això no vol dir que, necessàriament, Ω sigui igual a 1; perquè també podria ser que no arribéssim a veure-hi prou lluny (tot espai corbat és localment pla). No obstant això, resulta sospitosos que no hi hagi cap indicatiu observacional de la possible curvatura espacial de l'univers. La Terra, per exemple, sembla plana; tanmateix, quan mirem l'horitzó des d'un vaixell enmig de l'oceà, apreciem una lleugera curvatura i el que primer veiem d'una illa són les seves muntanyes...

A aquesta dificultat, podríem dir previsible, cal afegir-ne una altra de més preocupant. Les galàxies del nostre voltant també s'agrupen, efectivament, en estructures superiors com ara els grups, els cúmuls i els supercúmuls de galàxies. I la densitat d'aquests últims també mostra variacions significatives d'un lloc a l'altre, fins on podem mesurar-ho. No fa més de cinc anys es creia que calia amitjanar la distribució de galàxies en volums d'uns 100 Mpc de diàmetre per tal d'obtenir la desitjada homogeneïtat en molt bona aproximació. Però, a mesura que s'han anat determinant més i més distàncies galàctiques —la qual cosa és força laboriosa— i que s'ha pogut anar aixecant mapes tridimensionals detallats del nostre entorn immediat, han anat apareixent estructures de dimensions cada cop més grans. Això queda palès, per exemple, en el mapa d'una capa fina d'univers de la figura 1, obtingut per un grup d'astrònoms americans l'any 1988. Aquest cèlebre mapa mostra que les galàxies es troben concentrades en agrupaments de diferents mides (l'agrupament més ric present en el mapa és el cúmul de Coma: l'estructura central aparentment allargada) que deixen grans zones buides en forma de bombolles de fins a 50 Mpc de diàmetre. Totes aquestes inhomogeneïtats alteren localment la dinàmica del fluid de galàxies que, en conseqüència, s'aparta lleugerament de la simple expansió de Hubble. La nostra pròpia galàxia no està totalment en repòs respecte al sistema de referència que segueix l'expansió de l'univers a gran escala. Aquesta velocitat peculiar de la Via Làctia repercuteix en una molt lleugera desviació dipolar en la isotropia de la radiació de fons de microones o en la pròpia llei de Hubble. És a dir, cal corregir la component del nostre moviment peculiar per tal de poder mesurar acuradament la isotropia d'ambdues propietats. En particular, cal corregir la rotació de la Terra, el moviment de translació

²A més de nuclis i electrons que, en ser carregats, interaccionen amb els fotons, també podria haver-hi altres partícules massives dèbilment interactuants amb la resta del gas i, per tant, que s'haurien desacoblat amb anterioritat. És l'anomenada matèria fosca de la qual parlarem més endavant

CfA REDSHIFT SURVEY SLICES

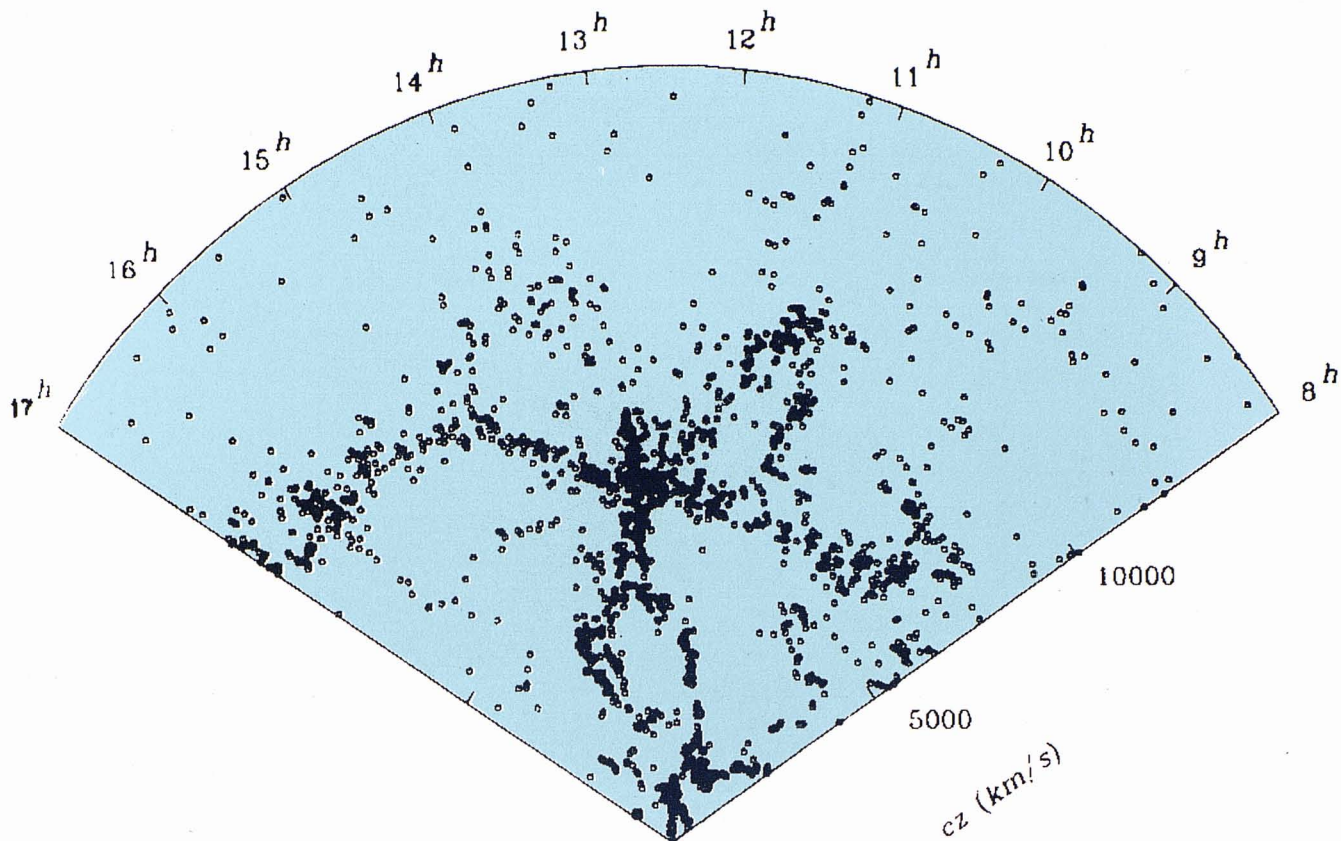


Figura 1: Posició de les galàxies en una tallada de cel en la direcció del cúmul de Coma. La distància de les galàxies a nosaltres (vèrtex inferior) ha estat deduïda a partir del seu redshift, atenent a la llei de Hubble. S'observen diferents estructures i grans zones buides. (Catàleg CfA, per gentilesa de M.J. Geller i J. Huchra del Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics.)

de la Terra al voltant del Sol i d'aquest a l'interior de la galàxia, de la Via Làctia a l'interior del Grup Local i del Grup Local caient cap al cúmul més proper, anomenat de Virgo. Doncs bé, com es desprèn de l'anisotropia dipolar residual en la radiació de fons (vegeu-ho més endavant) i la llei de Hubble un cop corregits tots aquests moviments, sembla que encara hi ha almenys una inhomogeneïtat de més gran escala que ens atreu conjuntament amb tot el supercúmul de Virgo. Efectivament, la figura 2, obtinguda per Lynden-Bell i col·laboradors (els Set Samurais) l'any 1988, mostra com la distribució de velocitats radials de les galàxies al nostre voltant no és absolutament simètrica, la qual cosa posa de manifest l'existència d'una gran concentració de galàxies, anomenada Gran Atractor, d'uns 80 o 90 Mpc de diàmetre situada cap als cúmuls d'Hydra i Centaurus i amagada, en part, pel pla galàctic. Fins i tot hi ha indicis de l'existència d'inhomogeneïtats més grans. Això no és, ara per ara, dramàtic. Pel que hem vist més a dalt, el recompte de galàxies de diferents magnituds indica que l'univers és realment homogeni a molt gran escala. Tanmateix, no estaria de més tenir-ne una confirmació directa, a partir d'un cartografiat detallat a tres dimensions.

Les inhomogeneïtats de diferent escala també es poden estudiar estadísticament. A partir de la distribució

observada de galàxies sobre la volta celest, es pot determinar, per exemple, l'autocorrelació de les fluctuacions de densitat projectada, la qual es pot invertir per retrobar l'autocorrelació de les fluctuacions de densitat a tres dimensions

$$\xi = \frac{\delta n}{n} * \frac{\delta n}{n}$$

on $\delta n(s) = n(s) - n$ són les fluctuacions en la densitat numèrica de galàxies respecte al valor mitjà n . La determinació d'aquesta autocorrelació és molt important, no solament pel fet que si ξ és diferent de zero, això implica l'existència de fluctuacions estadísticament significatives o, dit d'una altra manera, d'inhomogeneïtats reals, sinó pel fet que la transformada de Fourier de ξ és igual al quadrat de l'amplitud de les fluctuacions de diferents longituds d'ona (l'espectre de potència de les fluctuacions). Les estimacions més recents, obtingudes a partir dels catàlegs APM (Madox, 1990) i QDOT-IRAS (Saunders, 1992), també coincideixen a assenyalar que hi ha correlació apreciable fins a escales més grans del que es pensava. Afortunadament, altres anàlisis estadístiques, en aquest cas de tipus multifractal, de la mateixa distribució de galàxies sobre la volta celest també confirmen que la jerarquia d'estructures observades al nostre voltant no continua indefinidament.

Com dèiem, els moviments peculiars de les galàxies són indicatius de les fluctuacions de densitat al seu

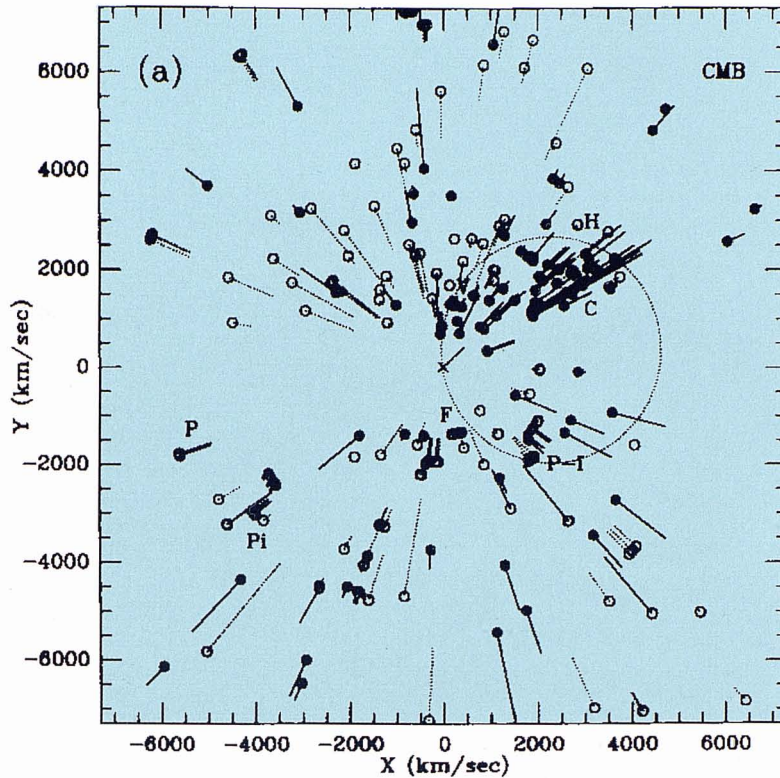


Figura 2: Velocitats radials de galàxies al nostre entorn. La llargada de les ratlles amb origen en la posició de cada galàxia indica la velocitat mesurada; segons que la velocitat sigui d'allunyament o d'apropament, les ratlles apunten cap a nosaltres (al centre del quadrat) o cap a l'exterior. La majoria de les galàxies de la meitat esquerra s'apropen mentre que, a la meitat dreta, s'allunyen. Estudiant aquesta asimetria es dedueix la posició del Gran Atractor assenyalat amb un gran cercle. (Per gentilesa de D. Lynden-Bell i R. Terlevich de l'Institute of Astronomy de la Universitat de Cambridge.)

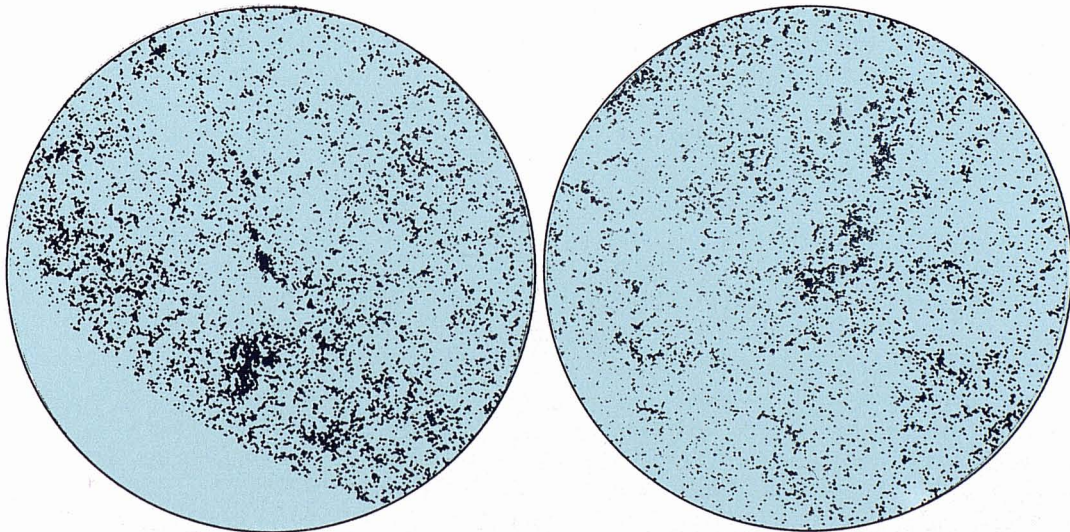


Figura 3: A la dreta, aparença a dues dimensions de l'univers real a partir de la posició de les galàxies fins a la magnitud 15,5 (la petita regió buida correspon a la zona d'exclusió deguda al nostre pla galàctic). A l'esquerra, visió de l'univers que resulta de simulacions numèriques d' N -cossos de la formació de galàxies i altres inhomogeneïtats a gran escala segons l'escenari de matèria fosca freda (CDM), per a $\Omega = 1$ i $b = 2,5$. (Per gentilesa de S.D.M. White i C. Frenk de l'Institute of Astronomy de la Universitat de Cambridge i del Departament de Física de la Universitat de Durham, respectivament.)

voltant. Això és força interessant perquè permet d'estimar-ne les masses, i, comparar-les amb les que es deduirien de les galàxies que contenen, atenent a la seva raó massa/lluminositat típica. D'aquesta manera es pot estimar la quantitat de massa fosca present en aquelles fluctuacions i, suposant que la seva proporció es manté a escales superiors, es pot determinar el valor de Ω total –i no pas únicament bariònica– de l'univers. Doncs bé, aquesta mena d'anàlisis dinàmiques permeten de concloure que hi ha molta massa fosca a l'univers, tot i que no està clar quanta exactament. En efecte, el valor de Ω que es dedueix és, en tots els casos, almenys tan gran com el valor màxim –exclusivament bariònic– deduït a partir de la nucleosíntesi primordial. Es troba, però, una lleugera diferència segons l'escala de la regió analitzada. Per inhomogeneïtats de petita escala (i gran amplitud) com els grups i els cúmuls de galàxies, el valor de Ω resultant és entre 0,1 i 0,3, mentre que a grans escales (camp de fluctuacions en règim lineal dins de regions d'uns 100 Mpc de radi) s'arriba fàcilment a 1. Si són correctes totes aquestes estimacions, això implicaria que, contràriament al que s'ha suposat, la proporció de massa fosca no és constant. Concretament, la distribució de masses que es dedueix a partir de la distribució observada de galàxies seria *esbiaixada*, sent la massa visible més concentrada que la massa fosca. (En particular, les bombolles buides de galàxies de la figura 1 no estarien tan buides de massa fosca.) Si definim el paràmetre de biaix b com el quocient entre les fluctuacions en densitat massica $\delta\rho/\rho$ i les fluctuacions en densitat numèrica de galàxies $\delta n/n$ a qualsevol escala,

$$\frac{\delta n}{n} = b \frac{\delta\rho}{\rho},$$

on $\delta\rho(s)$ es defineix de forma semblant a $\delta n(s)$ atenent el camp de densitat massica $\rho(s)$ i no pas de densitat numèrica de galàxies $n(s)$, les estimacions anteriors suggereixen que b és significativament més gran que 1. És a dir, les fluctuacions de matèria visible són més accentuades que les de massa total. Estrictament, resulta difícil trobar un valor de b que faci compatibles entre si totes les anàlisis dinàmiques realitzades a diferents escales. Atenent a les estimacions més segures s'obté un valor de b al voltant d'1,5, la qual cosa du a un valor de Ω de l'ordre d'1! Tanmateix, els descobriments recents de grans velocitats a molt gran escala semblen suggerir un valor de b proper a 1 si Ω és realment igual a la unitat. Això podria voler dir que el biaix no és independent de l'escala com s'ha suposat i que la situació real és molt més complexa.

Sobre l'origen de les galàxies i altres inhomogeneïtats

Si bé el model de la Gran Explosió està pensat per descriure l'univers a molt gran escala, no hauria de ser,

però, incompatible amb l'existència d'estructura a escales més reduïdes. És més, aquesta hauria de trobar una explicació natural en el marc del model de la Gran Explosió, com la hi ha trobat l'existència d'isòtops de diferents menes. Doncs bé, per bé que darrerament s'han fet grans esforços per tal de comprendre l'origen de les galàxies i altres inhomogeneïtats en un univers com el de la Gran Explosió, no s'ha trobat encara una solució totalment satisfactòria. Segons l'escenari més simple i natural de tots els proposats, l'estructura apareixeria per inestabilitat gravitatòria a partir d'un camp gaussià de petites fluctuacions quàntiques primordials de densitat. La física de partícules ens diu que aquestes fluctuacions primordials haurien de ser adiabàtiques, és a dir, amb una raó uniforme entre densitat de partícules i densitat de fotons. Doncs bé, després del desacoblament radiació-barions a l'origen de la radiació de fons de microones, l'amplitud de les fluctuacions de densitat en règim lineal només pot haver crescut, com a molt (per Ω gran), de forma inversament proporcional a la temperatura d'aquesta radiació, és a dir, en un factor aproximat de 1.000. Això representa que les fluctuacions $\delta\rho/\rho$, que en desenvolupar-se han donat lloc a les inhomogeneïtats actuals d'escala més petita o igual que els cúmuls de galàxies (és a dir, d'escales inferiors a uns 10 Mpc), haurien de tenir, en aquells instants, una amplitud d'almenys 10^{-3} . Ara bé, atesa l'adiabaticitat de les fluctuacions, també s'hauria de tenir fluctuacions en la densitat de fotons, és a dir, en la temperatura de la radiació de fons de microones d'amplitud igual a

$$\Delta T/T = 3\delta\rho_b/\rho_b \simeq 3 \times 10^{-3}$$

on $\delta\rho_b/\rho_b$ són les fluctuacions en la densitat massica de barions, a les escales angulars corresponents, és a dir, d'uns pocs minuts d'arc ($1' \simeq 1$ Mpc actual), la qual cosa està en contradicció amb els límits ben establerts de l'anisotropia de la radiació de fons de microones: $\Delta T/T < 10^{-4}$, a qualsevol escala angular per sobre de $40''$. En realitat, a escales angulars de menys de 10 minuts d'arc, tota fluctuació en la radiació de fons és esborrada per la viscositat dels fotons en el moment del desacoblament³. Però, a escales angulars lleugerament més grans les fluctuacions es mantenen i l'amplitud predita continua sent netament superior a les cotes màximes donades per l'observació.

Ens veiem, doncs, abocats a haver d'admetre que, o bé les fluctuacions de densitat de barions abans del desacoblament no eren adiabàtiques (potser eren fluctuacions isoterms, és a dir, el medi tenia una temperatura uniforme, o, el que és pràcticament el mateix, fluctuacions d'isocurvatura), la qual cosa va en contra

³Mentre dura l'acoblament dels fotons amb la matèria, els fotons tenen un lliure recorregut mitjà finit que esdevé, de mica en mica, gens negligible. Això fa que transportin moment i energia d'un element de volum a un altre i que tendixin a esborrar tota fluctuació d'escala més petita

del seu origen més natural suposat, o bé les fluctuacions a l'origen de les estructures observades avui dia no eren tan barioniques com de matèria fosca. En efecte, en el període anterior al desacoblament radiació-barions, la pressió de radiació mantenia congelada l'amplitud de les fluctuacions de densitat numèrica de les partícules acoblades a la radiació dins l'horitzó de partícules de cada punt⁴. Però, en estar les suposades fluctuacions de matèria fosca desacoblades de la resta del gas (només interaccionaven gravitacionalment), haurien anat creixent, de manera que, tot i sent inicialment adiabàtiques, en el moment del desacoblament radiació-barions tindrien una amplitud molt superior a la de la resta del gas. Així, podria fàcilment ser que en aquells instants les fluctuacions de massa fosca haguessin estat prou desenvolupades com per haver tingut temps de col·lapsar avui dia, induint de passada el col·lapse dels barions, sense que això impliqués unes fluctuacions de temperatura i de barions prou grans que possessin en contradicció els límits a l'anisotropia de la radiació de fons.

Segons que la massa de les partícules que componen la matèria fosca fos més o menys gran⁵ la formació subsegüent de les grans estructures seria molt diferent. Durant el règim relativista, en no interactuar amb la resta del gas, les partícules de massa fosca tenen un lliure recorregut mitjà igual al radi de l'horitzó de partícules. Això fa que, una mica com en el cas dels fotons més tard en desacoblar-se dels barions, s'esborrin totes les fluctuacions d'escala més petita que aquest recorregut lliure mitjà. Com que l'horitzó de partícules creix amb el temps, l'escala de les fluctuacions esborrades en el cas CDM hauria estat molt més petita que en el cas HDM. En el primer cas, aquesta escala seria totalment irrellevant en el procés posterior de formació de les grans estructures, mentre que en el segon seria molt més gran i tindria repercussions notables en aquella formació. Per exemple, en el cas de HDM de neutrins d'uns 10 eV, s'haurien esborrat totes les fluctuacions d'escala més petita que els supercúmuls. Cal tenir ben present que, per no contradir l'homogeneïtat de l'univers a gran escala, l'espectre de les fluctuacions ha de ser, en tots els casos, decreixent a petites longituds d'ona. Per tant, les primeres estructures en col·lapsar són sempre les d'escala més petita que hagin sobreviscut al pas del temps. Així és que, en el cas de CDM, s'haurien format primer les galàxies, en un temps tal que hauria de ser rar veure'n amb *redshifts* superiors a 2 o 3 i, posteriorment, per reagrupament successiu, s'haurien format els grups i els cúmuls de galàxies, mentre que en el cas HDM es formarien primer grans estructures gasoses de

la mida dels supercúmuls i després, per fragmentació radiativa, apareixerien les estructures més petites. Així, les galàxies haurien aparegut tan tard que els *redshifts* típics serien de l'ordre d'1. Aquest últim fet entra en conflicte amb el *redshift* observat de moltes galàxies. Per tant, sembla que l'única possibilitat natural i "simple", és a dir, d'una sola mena de partícules fosques, quedi reduïda a l'escenari CDM.

L'espectre de les fluctuacions de CDM és ben conegut (està totalment determinat llevat d'un factor d'escala) i es pot simular numèricament la formació de galàxies en aquest escenari. El resultat retroba, efectivament, les bones propietats estadístiques de la distribució de galàxies i les seves velocitats peculiars a petites escales per Ω igual a 1 sempre i que hi hagi un biaix relativament important com l'esmentat més a dalt. Això queda il·lustrat a la figura 3, la qual mostra una visió projectada a dues dimensions de l'univers tal com resulta d'aquestes simulacions, comparat amb una visió de l'univers real. Malauradament, hi ha dificultats en retrobar, al mateix temps, les grans estructures descobertes recentment (o, de manera equivalent, l'elevada amplitud de l'autocorrelació de les fluctuacions de densitat de galàxies a grans escales) i les elevades velocitats peculiars a aquestes escales. Com dèiem, això sembla requerir un biaix de l'ordre d'1. Quan encara s'estava discutint la situació aparentment conflictiva a la qual s'havia arribat com a conseqüència d'aquests nous descobriments, han arribat els resultats del COBE...

Els resultats del COBE i les seves implicacions

El satèl·lit COBE (*Cosmic Background Explorer*) va ser llançat el 18 de novembre de 1989 amb la intenció de mesurar acuradament la forma de l'espectre de la radiació de fons de microones (instrument FIRAS), les possibles anisotropies d'aquesta radiació (DMR) i el fons còsmic en infraroig (DIRBE) —vegeu figura 6. En el cas de l'espectre, s'ha pogut confirmar que respon al d'un cos negre a $2,736 \pm 0,017$ K de temperatura (vegeu la figura 4) per a longituds d'ona entre 0,5 mm i 1 cm. Aquest resultat es coneix ja des de fa uns dos anys. Però el resultat que més s'esperava del COBE era el referent a la possible detecció d'algun nivell d'anisotropia en la radiació de fons de microones. Efectivament, tant si les fluctuacions de densitat a l'origen de l'estructura de l'univers a gran escala haguessin estat barioniques i isoterms, com si haguessin estat, com es creia, de massa fosca freda, hauria d'haver-hi una lleugera anisotropia en la radiació deguda a moviments de la matèria entorn a les inhomogeneïtats (efecte Doppler) i a les pròpies fluctuacions del potencial (*redshift* gravitatori) a l'època del desacoblament. La primera mena de fluctuacions hauria de dominar en el rang d'escales angulars entre algunes desenes de minuts d'arc i dos o tres graus —l'escala de l'horitzó de partícules en aquells moments—,

⁴L'interior de l'horitzó de partícules d'un punt és la regió connectada causalment amb aquest punt

⁵En funció de la seva massa, les partícules es desacoblen de la resta del gas més o menys aviat i, en dependre la seva temperatura actual del moment del seu desacoblament, es parla de matèria fosca freda (CDM) o calenta (HDM), respectivament

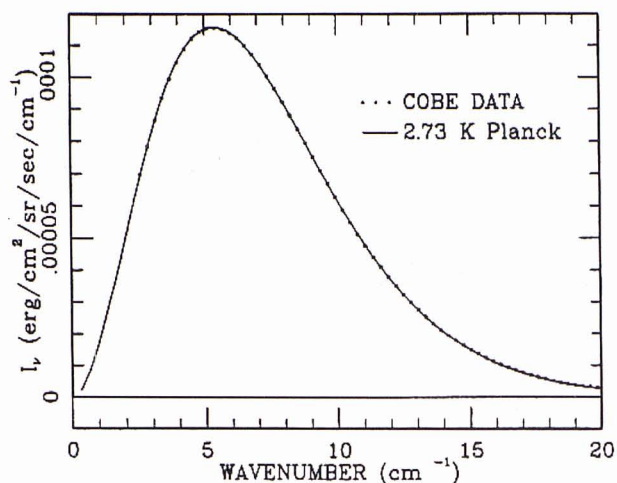


Figura 4: Espectre de la radiació de fons de microones, mesurat pel COBE l'any 1990 (símbols quadrats) comparat amb l'espectre teòric de Planck corresponent a una temperatura de 2,736 K (línia contínua). (Per gentilesia de J.C. Mather del Laboratory for Astronomy and Solar Physics, NASA-Goddard Space Flight Center.)

mentre que la segona seria l'única existent a més grans escales angulars. La resolució de les radioantenes del DMR permetien d'estudiar l'anisotropia a escales superiors a uns 8° (la qual cosa correspon a longituds actuals d'uns 500 Mpc) i, per tant, s'esperava detectar la darrera mena de fluctuacions. L'escenari CDM estàndard convenientment normalitzat permet de fer prediccions molt acurades sobre l'amplitud de les fluctuacions i el seu espectre. Segons aquestes prediccions l'amplitud esperada de les fluctuacions en la temperatura de la radiació de fons era inferior a les cotes màximes a les quals s'havia arribat però superior, de poc, al nivell de detecció del DMR a bord del COBE. Així és que el resultat d'aquest experiment era esperat amb impaciència i un cert punt de nerviosisme...

Val a dir que aquesta amplitud esperada era tan petita que per tal d'obtenir un resultat significatiu calia integrar les dades durant llarg temps. Els primers resultats publicats corresponen a la integració durant el primer any de servei del DMR i, actualment, s'estan processant els resultats del segon any. La raó senyal/soroll de les primeres dades és encara molt pobre, de manera que no permet de donar significació estadística a les fluctuacions individuals que mostren diferents direccions del cel (sembla que amb la integració del segon any això ja és possible). Només l'estudi estadístic, mitjançant l'autocorrelació del senyal, permet de detectar l'existència d'anisotropies i d'extreure'n la seva ampli-

tud. Bé, en realitat, sí que hi ha una fluctuació individual significativa, la corresponent a escales angulars de 180° , és a dir, l'anisotropia dipolar de la qual parlàvem, deguda a la velocitat peculiar de l'observador. Referit al Grup Local⁶, aquest dipol té, segons el COBE, una amplitud de $3,16 \pm 0,02$ mK i una direcció totalment consistent amb el dipol obtingut a partir de l'anisotropia de la llei de Hubble. Òbviament, calen les dades d'aquesta anisotropia dipolar i de molts altres efectes, com la contribució de la mateixa Via Làctia, per tal de mesurar acuradament les anisotropies de menor escala angular (vegeu la figura 5).

Doncs bé, el resultat del COBE és el següent: la forma de l'espectre de potència de les fluctuacions de temperatura és l'esperat. No obstant això, l'amplitud típica de les fluctuacions, $(\Delta T)_{\text{rms}} = 30 \pm 5 \mu\text{K}$ a 8° , equivalent a una variació relativa $\Delta T/T \simeq 6 \times 10^{-6}$ a 2° , és un factor 1,4 més gran que el previst en l'escenari CDM estàndard normalitzat⁷. La diferència seria tan més gran com més important fos el biaix. De fet, l'acord observació-teoria hauria estat total si b fos igual a 1, com suggereixen les recents observacions de l'estructura i cinemàtica de l'univers a gran escala. Malauradament, això entraria, aleshores, en contradicció amb els resultats de les simulacions numèriques o de les anàlisis dinàmiques en estructures d'escala més petita. Així doncs, aquest resultat ve a confirmar que hi ha problemes amb l'escenari CDM estàndard normalitzat a petites escales. Val a dir que un desacord de només un factor 1,4 no és tampoc dramàtic, atesa la gran incertesa que acostuma a acompanyar moltes magnituds astronòmiques. Queda, no obstant això, la recança de no haver pogut enllestir definitivament el problema de l'origen de les galàxies. Una cosa sí que ha quedat clara: l'univers és, com estava previst, pràcticament homogeni a molt gran escala.

Diversos autors s'han precipitat a assenyalar que l'única manera que sembla haver-hi de fer compatibles totes les mesures sobre l'estructura i cinemàtica de l'univers a les diferents escales estudiades i la radiació de fons de microones amb un escenari natural de formació de galàxies és que Ω sigui igual a 1 —i $H_0 \simeq 50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ —, el biaix pràcticament absent, però una composició de la matèria menys simple del que es pensava. Concretament, cal que hi hagi aproximadament un 69 % en massa de matèria fosca freda (CDM), un 30 % de matèria fosca calenta (HDM) —la qual cosa representa un tipus de neutrins de 7 eV de massa— i un 1 % de barions, com demana la nucleosíntesi primordial, perquè tot quadri. Tanmateix, no es pot ex-

⁶És a dir, després de corregir tots els efectes de moviment excepte el del Grup Local

⁷El factor de normalització es fixa de manera que es trobi l'espectre de potència de les fluctuacions observades en la densitat numèrica de galàxies a petites escales (al voltant de 10 Mpc) i suposant $b = 1,5$

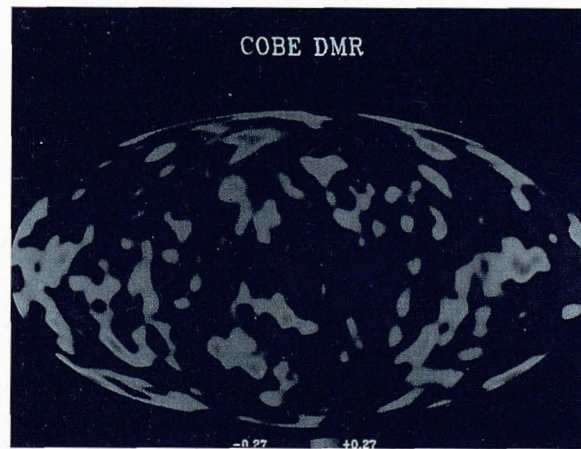
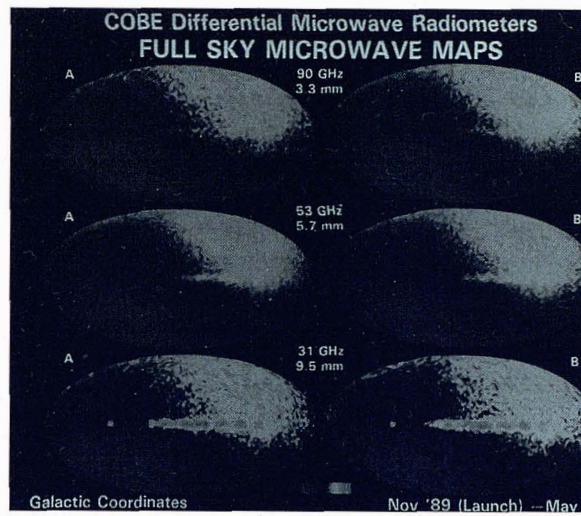
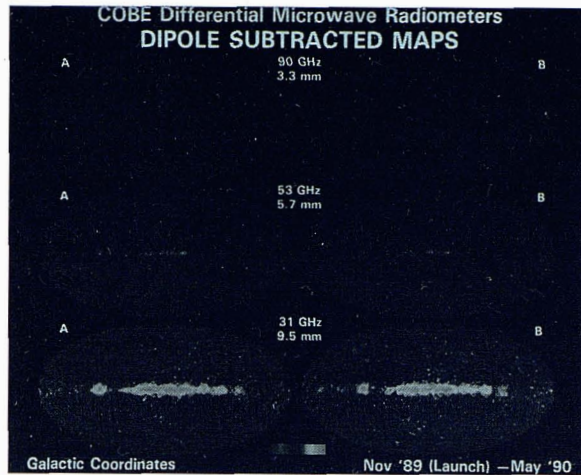


Figura 5: Mapa del cel de la temperatura de la radiació de fons de microones mesurada pel COBE amb una resolució angular d'uns 10° , la qual cosa equival a uns 1.000 Mpc actuals. Les taques vermelles i blaves (vegeu l'ampliació en color de la tercera fotografia a la coberta) representen, respectivament, regions més fredes o més calentes que el valor mitjà. A dalt, abans de corregir el dipol; al centre, després d'aquesta correcció però sense corregir l'emissió galàctica, i a baix, el resultat final després de totes les correccions. (Per gentilesia de G.F. Smoot del Lawrence Berkeley Laboratory and Space Science Laboratory de la Universitat de Califòrnia a Berkeley.)



Figura 6: Visió en infraroig de la nostra galàxia, en la direcció del seu centre, obtinguda pel detector DIRBE a bord del satèl·lit COBE. L'emissió galàctica a freqüències ràdio és una de les fonts més importants de soroll en la mesura de l'anisotropia de la radiació de fons de microones

cloure que la situació real sigui molt més complicada. Per exemple, que el biaix depengui de l'escala, que la constant cosmològica no sigui idènticament nul·la, o que, al cap i a la fi, la formació de galàxies no sigui un procés tan natural... Caldrà, doncs, seguir de prop els futurs esdeveniments en aquesta branca de la física en tanta efervescència com és la cosmologia per veure com acaba aquest problema.

Bibliografia recomanada

Les quatre primeres referències tracten el tema a fons:

DAVIS, M., SUMMERS, F. J. i SCHLEGEL, D., *Nature*, **359**, 393 (1992).

TAYLOR, A.N. i ROWAN-ROBINSON, M., *Nature*, **359**, 396 (1992).

PEEBLES, P.J.E., *Physical Cosmology*, Princeton Series in Physics, Princeton (Princeton, 1971).

PEEBLES, P.J.E., *The Large-Scale Structure of the Universe*, Princeton Series in Physics, Princeton (Princeton, 1980).

WEINBERG, S., *Gravitation and Cosmology*, Wiley & Sons, (Nova York, 1972).

A un nivell de divulgació caldria esmentar també:

SALVADOR E., *L'univers conegut*, Barcanova (Barcelona, 1992).

WEINBERG S., *Los tres primeros minutos del universo*, Alianza Editorial (Madrid, 1982).

HAWKING S., *La història del temps*, Crítica (Barcelona, 1988).

Agraïment

Agraeixo la col·laboració dels diferents grups per permetre la publicació de figures de treballs seus i, molt especialment, al COBE Science Working Group per l'eficient provisió de còpies de gran qualitat de les seves fotografies i dades.

XII Jornades
sobre recerca experimental en física i química
als Països Catalans

UNIVERSITAT CATALANA D'ESTIU
Prada del Conflent, Estiu 1993



Les Societats Catalanes de Física i Química (filials de l'Institut d'Estudis Catalans) organitzen les jornades d'enguany per tractar el tema:

SENSORS QUÍMICS I BIOLÒGICS