

**28 ANYS DESPRÉS DEL SEU DESCOBRIMENT, LA RADIACIÓ
CÒSMICA DE FONTS HA TORNAT A SER MOTIU
D'UN PREMI NOBEL DE FÍSICA**

RESUM

El Premi Nobel de Física 2006 s'ha concedit a dos astrofísics, John C. Mather i George F. Smoot, «pel seu descobriment de la forma de cos negre i l'anisotropia de la radiació còsmica de fons». És la segona vegada a la història que contribucions sobre la radiació còsmica de fons són premiades amb aquest distingit guardó. El primer cop se'n va premiar el descobriment. Ara s'ha premiat la caracterització detallada de les seves propietats, que confirmen plenament el model cosmològic del Big Bang, segons el qual l'Univers va tenir un inici temporal.

PARAULES CLAU: cosmologia, gravitació, radiació còsmica de fons, formació d'estructures, espectre de la radiació còsmica de fons, anisotropies de la radiació còsmica de fons, matèria fosca, energia fosca.

ABSTRACT

The 2006 Nobel Prize in Physics was awarded to two astrophysicists, John C. Mather and George F. Smoot, «for their discovery of the black body shape and anisotropy of the cosmic background radiation». This is the second time in history that contributions on the cosmic background deserve such a distinguished award. The reason for the first prize was its discovery. Now it has been the detailed characterization of its properties. These properties fully confirm the Big Bang cosmological model, according to which the Univers had a starting time.

KEY WORDS: cosmology, gravitation, cosmic background radiation, structure formation, spectrum of the cosmic background radiation, anisotropies of the cosmic background radiation, dark matter, dark energy.

El Premi Nobel de Física d'enguany ha estat concedit als astrofísics nord-americans John C. Mather, nascut el 1946, del Godard Space Flight Center de la NASA, i George F. Smoot, nascut el 1945, del Lawrence Berkeley Laboratory, a la Universitat de Califòrnia. Es tracta d'un premi que es donava per segur dins el camp de la cosmologia. L'únic que no se sabia és quan s'esdevindria. El fet que el passat mes d'agost John Mather i l'equip de George Smoot rebessin el Premi Gruber de cosmologia era un clar indicatiu que havia arribat el moment.

Tal com ha fet públic la Reial Acadèmia Sueca de Ciències, el motiu del màxim guardó ara concedit és «el descobriment de la forma de cos negre i l'anisotropia de la radiació còsmica de fons». Aquest descobriment va tenir lloc fa uns

13



FIGURA 1. Els premiats: John C. Mather, del Godard Space Flight Center de la NASA (esquerra), i George F. Smoot, del Lawrence Berkeley Laboratory, a la Universitat de Califòrnia.

quinze anys, gràcies a les dades aconseguides mitjançant el satèl·lit astronòmic *COBE* (Cosmic Background Explorer). Concretament, la comprovació que la radiació còsmica de fons, d'ara endavant la RCF, tenia un espectre de Planck o espectre de cos negre a una temperatura d'uns 2,73 K va ser feta el mateix any del llançament del satèl·lit, el 1989, mentre que els resultats definitius sobre l'anisotropia d'aquella temperatura no es van tenir fins després de quatre anys d'acumular dades, si bé al cap d'un parell d'anys ja hi havia la certesa de la seva detecció.

Un aspecte remarcable del Premi Nobel de Física d'enguany és que la temàtica que l'ha originat ja havia estat objecte del mateix guardó en una edició anterior. En efecte, l'any 1978 els enginyers de telecomunicacions Arno Penzias i Robert Wilson van obtenir el Premi Nobel «pel descobriment de la RCF». Com es pot veure, la diferència entre ambdues contribucions és més aviat subtil. Què justifica, doncs, aquesta mena de repetició? La resposta és ben senzilla: els descobriments produïts entorn de la famosa radiació de fons han marcat el desenvolupament de la cosmologia moderna i, per tant, han estat decisius en l'elaboració de la nostra concepció actual de l'Univers, no exempta, com veurem, de notables sorpreses. El descobriment d'aquesta radiació, a mitjan anys seixanta del segle passat, va assentar el model cosmològic avui dia vigent, el cèlebre model del Big Bang, mentre que la caracterització de les seves propietats mitjançant el satèl·lit *COBE* als anys noranta i altres satèl·lits posteriors han confirmat plenament la seva validesa i han permès de determinar amb gran precisió detalls del model que fan referència a l'origen de l'estructura que mostra actualment l'Univers, així com l'existència de grans quantitats de massa i energia fosques.

Tenir una idea clara d'on som, d'on venim i cap on anem és una vella aspiració de la humanitat. De fet, l'interès per aquesta mena de preguntes és el que ha conduït la ciència moderna, la qual és sens dubte una eina indispensable per tal de comprendre i controlar en la mesura que es pugui la realitat que ens envolta. Tanmateix, fins no fa gaire la resposta a aquelles preguntes fonamentals sobrepassava les possibilitats de la ciència, per la qual cosa calia buscar-la més aviat en el camp de la filosofia o la religió. Avui dia, en canvi, la cosmologia física forma part de la nostra vida quotidiana. Qui no ha sentit parlar del model del Big Bang i de l'expansió de l'Univers? Aquest model cosmològic ha esdevingut tan cèlebre que la gent el dona per segur tot i ignorar en què es basa i què ha fet que s'acabés imposant. Doncs bé, cal dir que no ha estat gens fàcil que fos acceptat per la comunitat científica. El motiu d'aquesta reticència rau en el fet que, segons aquest model, l'Univers tindria una edat finita, la qual cosa resulta absolutament incòmoda per a un científic, no ja d'avui dia sinó de qualsevol època. El concepte d'un Univers amb edat finita només pot ser acceptat si no queda més remei, si l'observació astronòmica i la teoria física ho fan palès de manera indiscutible, i això és exactament el que ha succeït gràcies als descobriments realitzats al voltant de la radiació còsmica de fons (RCF).

UNA BELLA IDEA QUE NO ACABAVA DE FUNCIONAR

Com és ben sabut, la ciència moderna té les arrels en el pensament grec de l'antiguitat. Els grecs van ser els primers a aplicar la racionalitat a l'hora d'intentar explicar el món que ens envolta. Un fet que resulta ara evident, sobretot per als científics, però que fins en aquell moment havia passat desaperce-

but per tothom, és que la ment humana és tan ben adaptada al món en què es mou. Això fa que les millors explicacions sobre els fets naturals siguin sempre les més simples i belles. Així, doncs, aplicar el raonament deductiu lògic a principis induïts —intuïts— a còpia de cercar la màxima simplicitat i bellesa va ser tota una troballa que marcaria el futur de la humanitat. Aquest mètode racional, que va permetre als grecs, per primer cop a la història, de comprendre el món sense necessitat d'apel·lar a la mitologia i la religió, plenes de prejudicis inamovibles, va tenir un èxit desbordant. En pocs segles es va avançar més en la comprensió de la natura que en tots els mil·lennis precedents. De fet, si no es va avançar encara més va ser perquè, a la fi de l'Imperi romà, la ciència va caure de nou sota la influència de la religió, que va tornar a imposar idees basades més en el cor que no pas en l'intel·lecte. Amb el retrobament del pensament grec, que duria al Renaixement, la ciència va reprendre el bon camí de la racionalitat deslligada de la religió i la mitologia. És en aquest moment quan es van establir les bases per a la construcció d'un veritable model científic d'Univers. Paradoxalment, va ser l'èxit del pensament racional deslligat dels prejudicis religiosos el que acabaria retardant, però, l'aparició del model cosmològic actual.

Nicolau Copèrnic va posar cada cosa al seu lloc en comprendre que la Terra no era pas el centre de l'Univers, limitat en aquell temps al Sistema Solar sobre el teló de fons immutable que conformaven els estels (vegeu la figura 2). Copèrnic va descobrir que si hom situava el centre de l'Univers al Sol i no pas a la Terra, el moviment de tots els astres quedava perfectament explicat amb òrbites circulars, sense requerir la complicada teoria dels epicicles. L'Univers tornava a ser bell i senzill com creien els grecs. Copèrnic va ser, doncs, el millor o, si més no, el darrer aristotèlic de la història.

El cercle era efectivament la corba perfecta per a des-



FIGURA 2. Representació de l'Univers segons la concepció que se'n tenia abans de la revolució copernicana, on l'artista fa palesos els problemes que ocasionava la creença en un Univers finit en el qual els estels no eren més que un teló de fons.

criure l'òrbita dels astres. Tots els seus punts són iguals i el moviment s'hi pot donar eternament, sense que res no canviï, tal com es desprèn de l'harmonia del cel. Evidentment, si la perfecció del cercle consistia en el fet que no tenia punts privilegiats, i si la Terra deixava de ser el centre de l'Univers, tot apuntava que el Sol tampoc no ho era. Com havia defensat pocs anys abans Giordano Bruno, i ho va pagar amb la pròpia vida, els estels eren molt probablement astres lluents similars al Sol, tan sols molt més allunyats de nosaltres. Així, doncs, la idea d'un Univers ple d'astres lluents com el Sol era considerada molt seriosament per tots els científics de l'època. Isaac Newton mateix ho feia, sens dubte, en definir els sistemes de referència inercials com aquells que es mantenen amb velocitat uniforme respecte als estels «fixos». Perquè els estels poguessin ser fixos malgrat l'atracció gravitatòria que ells mateixos generaven, tal com Newton en persona preconitzava, calia que omplissin l'Univers amb densitat uniforme. Malgrat

tot, Newton no es va atrevir mai a elevar aquesta idea tan simple i bella, és a dir, tan grega, al rang de model cosmològic. És cert que aquesta era l'única configuració possible capaç de mantenir els estels fixos, encara que inestable. A més, hi havia el problema que ja havia notat Kepler uns anys abans, segons el qual, si els estels omplissin uniformement l'Univers, aleshores el cel hauria de ser infinitament lluent.

Aquesta contradicció, que avui dia coneixem per paradoxa d'Olbers-Chesseaux, neix de suposar l'espai i el temps no solament homogenis, és a dir, iguals en tots els punts, sinó il·limitats. Això fa que, mirant en qualsevol direcció, acabem copsant un nombre infinit de fonts lluminoses. Si, per contra, l'espai o el temps tinguessin fronteres, si hi hagués un horitzó, aquella paradoxa ja no es donaria. Però ni Newton, ni Einstein uns quants segles més tard, ni cap altre científic amb cara i ulls hauria pogut acceptar mai que l'espai i el temps poden tenir fronteres. La idea d'un espai i un temps sense fronteres es remuntava als grecs mateixos: això els havia permès d'escapar de les incòmodes preguntes de «què hi havia abans» o «què hi ha més enllà». Si haguessin conegut les geometries corbades, de ben segur que els grecs haurien acceptat sense cap problema la idea d'un espai homogeni i *finit*, encara que *il·limitat*, com la superfície d'una esfera a dues dimensions. El que mai no haurien pogut acceptar, de cap de les maneres, és que el temps pogués ser finit. De què haurien servit llavors les òrbites circulars perfectes si no es poguessin recórrer eternament tant cap al futur com cap al passat. Cal notar, a més, que si les línies temporals fossin homogènies i finites però il·limitades com els cercles, de manera que no hi hagués ni inici ni fi en el temps, els problemes que hi hauria llavors de manca de causalitat serien encara més greus.

Com dèiem, ni Einstein mateix podia acceptar la idea d'un inici en el temps. Per aquest motiu, quan a principis del segle XX Einstein va desenvolupar la relativitat general, gràcies a la seva fina intuïció basada en la simplicitat i bellesa de la natura, i va aplicar-la en el que havia de ser el primer model cosmològic de la història proposat des del camp de la física, no va dubtar a suposar l'Univers espacialment homogeni¹ i alhora estàtic, exactament com hauria fet Newton si s'hi hagués atrevit. El que feia possible que Einstein pogués proposar aquest model i no pas Newton era el fet que la relativitat general, a diferència de la teoria de la gravitació universal, permetia imposar l'estaticitat d'un univers homogeni que garantia alhora la seva plena estabilitat a còpia d'introduir una constant no nul·la a les equacions. Aquesta constant, que per aquest motiu rebria el nom de *constant cosmològica*, produïa una repulsió d'origen geomètric que, si s'escollia adequadament, podia equilibrar l'atracció gravitatòria de la massa i energia que poblen l'Univers. Malgrat tot, el model cosmològic d'Einstein tampoc no aconseguia resoldre la paradoxa d'Olbers-Chesseaux, la qual cosa no semblava preocupar gaire el geni, poc acostumat com era a les observacions astronòmiques.

Així, doncs, el model d'Einstein, tot i ser bell i simple, tampoc no acabava de ser plenament satisfactori. Sí que ho era en canvi el model que el matemàtic i meteoròleg rus Alexander Friedmann² va proposar poc després, utilitzant la mateixa re-

1. Més precisament, l'Univers d'Einstein —i de Newton— seria espacialment homogeni, és a dir, igual en tots els punts, i isotròpic, és a dir, igual en totes les direccions. Aquesta precisió és necessària perquè, tot i sent homogeni, l'espai podria mostrar una mateixa direcció privilegiada a tot arreu, la qual cosa seria igualment injustificada.

2. El cognom d'aquest científic rus acostuma a aparèixer, als llibres de text, amb grafia anglesa, és a dir, acabat amb una sola ena. No

lativitat general d'Einstein. Aquest nou model també suposava l'Univers espacialment homogeni —i isotròpic— però no exigia que fos estàtic. Per aquest motiu no calia cap constant cosmològica per a aturar el moviment de l'Univers. Simplement, l'Univers es movia, o més concretament, s'expandia des d'un instant inicial en el qual hauria tingut densitat infinita. El fet que el temps tingués un inici arreglava automàticament la vella paradoxa d'Olbers-Chesseaux. Tanmateix, Einstein no va acceptar mai un model cosmològic amb un inici temporal. De fet, ni l'astrònom americà Edwin Hubble, autor del descobriment que la llum de les galàxies està desplaçada cap al roig, com s'esperaria per efecte Doppler en el cas que s'allunyessin de nosaltres com si l'Univers s'expandís, podia acceptar el model cosmològic de Friedmann. No podia ser de cap de les maneres que l'Univers tingués un origen en el temps. Això trencava amb la idea més fermament arrelada en el pensament racional grec d'un Univers sense principi ni fi.

La resistència a acceptar el model de Friedmann va fer que, durant els quaranta anys següents, el model cosmològic vigent fos el proposat per Hoyle, Bondi i Tolman, segons el qual l'Univers era, com de costum, homogeni —i isotròpic— però estacionari. Així, no era estàtic com havia proposat Einstein sinó que s'expandia com suggerien les observacions de Hubble, però la disminució en la densitat causada per l'expansió era compensada per una creació contínua de matèria, de manera que tant la densitat com qualsevol altra magnitud mesurable no variava al llarg del temps. Però aquesta vella idea del món etern i immutable que tothom es resistia a abandonar va quedar sobtadament arraconada quan, el 1965, es va detectar la RCF.

obstant aquest fet, el significat del mot, escrit originalment en ciríl·lic, és clarament germànic i per tant és més apropiat escriure'l amb dues enes.

Aquesta radiació havia estat predita als anys cinquanta pels físics nuclears Gamow, Alpher i Hermann. Aquests científics havien demostrat que els diferents isòtops de l'hidrogen, l'heli, el liti podien haver-se format, amb les abundàncies còsmiques observades, en una fase molt primitiva de l'Univers canviant de Friedmann. Com havia ressaltat George Lemaître, en la seva fase inicial prop de l'instant zero, l'Univers de Friedmann havia de tenir densitats nuclears, és a dir, el fluid còsmic havia de ser una mena de sopa de protons i neutrons. En expandir-se i refredar-se, aquests nucleons s'haurien condensat en petits nuclis que els fotons, amb menor energia, ja no haurien pogut desintegrar. Una conseqüència inesperada d'aquesta idea de Gamow i col·laboradors era la predicció d'una radiació fòssil que ompliria avui dia l'Univers. Efectivament, en continuar expandint-se i refredant-se l'Univers, els nuclis haurien acabat per combinar-se amb els electrons lliures i formar àtoms neutres que els fotons ja no haurien pogut ionitzar. Llavors els fotons haurien deixat d'interaccionar amb la matèria, s'haurien desacoblat, i haurien anat refredant-se de mica en mica pel seu compte fins a una temperatura actual d'uns pocs Kelvin.

Aquesta predicció no va ser escoltada, però. D'una banda, els detectors existents a l'època no podien mesurar-la. D'una altra, la teoria no era del tot satisfactòria en si mateixa, en el sentit que només explicava les abundàncies còsmiques dels elements lleugers i no pas la de tots els elements naturals. Tanmateix, al llarg del temps aquesta teoria aparentment incompleta i basada en un model cosmològic heterodox aniria guanyant interès i versemblança. En efecte, l'any 1957, el matrimoni Burbidge, juntament amb Fowler i Hoyle van mostrar que els elements pesants es podien produir amb les abundàncies còsmiques observades a través de reaccions nuclears

que tenen lloc a l'interior dels estels a partir d'hidrogen i heli. El 1964, Zel'dovich i, independentment, Hoyle i Taylor varen notar que les reaccions anteriors no podien explicar, però, les abundàncies dels elements lleugers, els quals haurien hagut de formar-se en alguna fase prèvia a la formació dels estels. Això apuntava clarament cap a la vella idea de Gamow i col·laboradors. De fet, com va observar Doroshkievic, en aquella època ja existia la tecnologia adequada per intentar detectar la RCF, la qual, segons aquells científics, havia d'acompanyar la nucleosíntesi primordial dels elements lleugers. Dit i fet, un grup a la Universitat de Princeton, dirigit per Dicke i en el qual participaven Peebles i Wilkinson, es va posar a construir una radioantena capaç de comprovar si existia realment la RCF. Però just quan eren a punt de fer-ho, els enginyers del Bell Laboratory, Penzias i Wilson, van detectar per casualitat la cèlebre radiació.

El descobriment d'aquesta radiació va fer que el model de Friedmann-Lemaître, anomenat sorneguerament per Hoyle com el *model del Gran Espetec* (Big Bang), acabés sent acceptat. Aquest nou gir copernicà de la nostra concepció de l'Univers va quedar escenificat l'any 1978 quan Penzias i Wilson van rebre el Premi Nobel pel descobriment de la RCF. Tanmateix, el model del Big Bang encara era, en aquells temps, a la corda fluixa. L'única base empírica sobre la qual se sustentava era l'edat finita de les galàxies, no gaire llunyana de la predita amb gran incertesa encara pel model, i l'existència de la RCF. Aquesta radiació tenia doncs un paper crucial. Malgrat tot, encara no estava del tot clar si era isotròpica i si el seu espectre era realment el d'un cos negre a 3 K com predeia la teoria. Ambdós aspectes eren molt difícils de comprovar perquè la radiació a la freqüència de microones com correspon a la temperatura d'uns pocs Kelvin és fortament absorbida per l'atmosfera terrestre. Per aquest motiu, el mateix any que l'Acadèmia sueca premiava Penzias i Wilson,

Mather i Smoot es proposaven de tirar endavant un projecte espacial a fi d'intentar comprovar de manera fefaent si la RCF tenia veritablement les propietats esperades en el marc del model del Big Bang.

L'ESPECTRE I LES ANISOTROPIES DE LA RCF

Com tot projecte espacial, el satèl·lit capaç de fer aquestes mesures encara trigaria deu anys a ser llançat. Deu anys són molts anys per a la ciència i la tecnologia a la nostra època, de manera que els coneixements teòrics van avançar molt i els detectors van millorar espectacularment les seves prestacions durant aquest temps.

A finals dels anys noranta, ja se sabia que la radiació de fons no podia ser perfectament isotròpica per dos motius. En primer lloc, la Terra no roman quieta sinó que gira al voltant del Sol, aquest gira al voltant del centre de la Via Làctia, la Galàxia cau cap a la seva companya Andròmeda, tot el grup local de galàxies ho fa cap al cúmul de Virgo, etc. És a dir, la Terra es mou respecte al sistema de referència en què la radiació hauria d'aparèixer com a isotròpica. Per tant, per efecte Doppler, la temperatura aparent de la RCF hauria de ser més alta cap on apunta el nostre moviment i més baixa en el sentit oposat. S'esperava doncs una anisotropia dipolar, amb una amplitud $\Delta T/T$ de $\sim 10^{-3}$ i una direcció també ben determinada. D'altra banda, l'Univers no és absolutament homogeni, presenta estructura a «petites» escales: galàxies, cúmuls de galàxies, etc. Segons les teories més simples i per tant més versemblants, aquesta estructura s'hauria desenvolupat, per inestabilitat gravitatòria, a partir de petites fluctuacions de densitat primordials, d'origen quàntic, originades en el moment que van aparèixer les partícules subatòmiques. Per tant, quan la RCF va aparèixer, 380.000 anys després de l'instant zero,

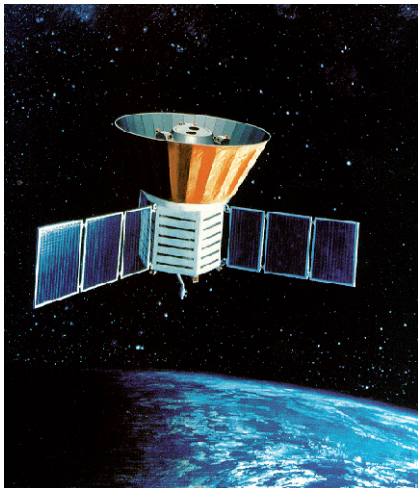


FIGURA 3. Representació artística del satèl·lit *COBE* operant en òrbita. Al centre de la pantalla protectora dels rajos solars es poden veure els diferents instruments a bord: el FIRAS (Far Infrared Absolute Spectrophotometer) per a mesurar l'espectre, el DIRBE (Diffuse Infrared Background Experiment) per a mesurar l'emissió infraroja de la galàxia i les dues banyes del DMR (Differential Microwave Radiometer) per a mesurar les anisotropies de la RCF de forma diferencial. Cortesia de NASA/COBE Science Team.

ja havia d'haver-hi unes petites fluctuacions de densitat gairebé imperceptibles però no nul·les que havien d'afectar la temperatura de la RCF. Concretament, les prediccions eren que la RCF havia de mostrar petites fluctuacions de temperatura en totes les direccions, d'una amplitud $\Delta T/T$ al quadrupol de $\sim 10^{-3}$, en el cas que la densitat actual de l'Univers fos dominada per partícules ordinàries, és a dir, bàsicament neutrons i protons, o de $\sim 10^{-5}$, en el cas que estigués dominada per matèria no ordinària, l'anomenada *matèria fosca freda*, com suggerien altres observacions.

D'altra banda, a escala observacional, ja es començava a perfilar l'espectre de la RCF, el qual semblava apartar-se

lleugerament de la forma de Planck, tot i que no estava clar si les desviacions eren conseqüència de l'emissió de la Via Làctia o d'altres efectes extragalàctics no lligats a l'evolució de l'Univers. Però la situació més punyent era, sens dubte, la referent a les anisotropies. L'anisotropia dipolar ja s'havia confirmat, però la quadrupolar restava encara per detectar malgrat la sensibilitat de 10^{-4} d'alguns instruments emprats, com els situats a bord del satèl·lit soviètic Relict-1. En poques paraules, si a la sensibilitat de 10^{-5} a què arribaven els detectors a bord del satèl·lit *COBE* (Cosmic Microwave Background Explorer) dissenyat per Mather, Smoot i col·laboradors (vegeu la figura 3) tampoc no es detectés cap senyal, la idea que es tenia en aquells moments sobre l'origen de l'estructura a l'Univers i probablement també, de retruc, el mateix model del Big Bang haurien d'abandonar-se! Així és que els resultats del satèl·lit *COBE* llançat per fi el 1989 eren esperats amb impaciència. Passés el que passés, de ben segur que acabarien en un altre Premi Nobel.

25

LES OBSERVACIONS DEL SATÈL·LIT *COBE* I LES SEVES CONSEQÜÈNCIES

El lector ja es deu imaginar, a hores d'ara, la resta de la història. Això no obstant, val la pena d'insistir en alguns detalls força interessants. Per exemple, només nou minuts després de començar-se a rebre les dades del *COBE* ja es tenia la confirmació que l'espectre de la RCF era el d'un cos negre gairebé perfecte; de fet, molt més perfecte que el de qualsevol font de radiació coneguda, a una temperatura mitjana de 3,724 K, tal com es pot veure a la figura 4. Aquest primer descobriment va quedar immortalitzat en un fax enviat per l'equip de científics encarregats de l'experiment al congrés de l'American Astronomical Society, corrents, abans no es tanqués el termini de presentació dels treballs. Pel que fa a l'anisotropia, després

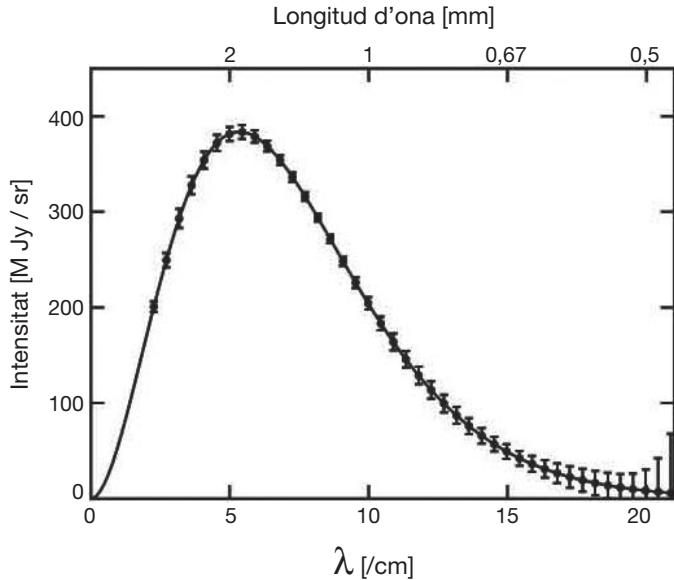


FIGURA 4. Espectre de la RCF detectat pel FIRAS, un dels instruments instal·lats al *COBE* (punts experimentals i barres d'error augmentades en un factor 400 per tal que es puguin apreciar), ajustat per un espectre de Planck teòric (corba contínua) corresponent a una temperatura de 2,725 K. Cortesia de NASA/COBE Science Team.

d'acumular dades durant quatre anys, de corregir la contribució dipolar i l'emissió de la nostra galàxia, per fi es va poder contemplar, amitjanant a escales angulars de 7° , unes lleugeríssimes fluctuacions distribuïdes gairebé a l'atzar però amb una desviació quadràtica mitjana de 47 mK, just lleugerament per sobre del soroll, com es pot veure a la figura 5. Per fi s'havia detectat la famosa anisotropia quadrupolar, amb una amplitud de 17 mK, tal com predeien els models de formació d'estructura en un Univers dominat per matèria fosca freda. I encara més important, el *COBE* confirmava definitivament el model del Big Bang segons el qual l'Univers tenia un principi en el temps.

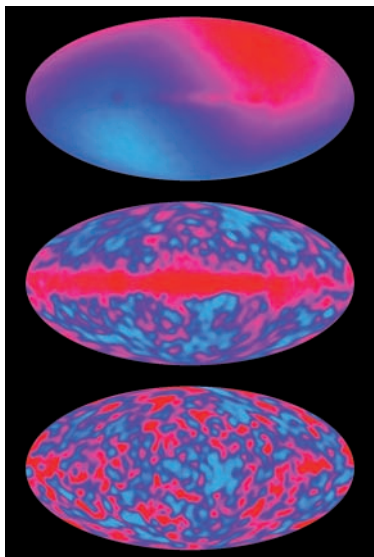
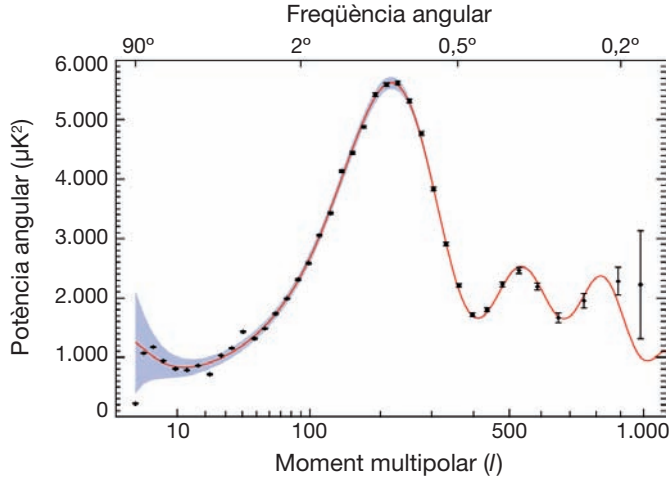


FIGURA 5. Mapa de la temperatura de la RCF amitanjada en un angle sòlid de 7° obtingut pel DMR. Al plafó superior es representen les dades brutes i el plafó central recull les dades corregides de l'anisotropia dipolar, mentre que al plafó inferior es pot veure el resultat final després de corregir també l'emissió de la nostra galàxia. Cortesia de NASA/COBE Science Team.

Però això no és tot. El *COBE* va mostrar que era possible d'analitzar amb gran precisió la intensitat de la RCF a diferents escales angulars, fet que es coneix per *espectre de potència angular*. Aquest espectre guarda una informació valuosíssima sobre les propietats de l'Univers i la seva evolució, que supera de llarg la que es pot extreure de qualsevol altra mena d'observacions astronòmiques. En efecte, la teoria de la formació d'estructura predeia que l'espectre de potència angular de la RCF havia de mostrar unes oscil·lacions molt pronunciades, anomenades *pics Doppler*, l'alçada i la posició de les quals depenen dels valors concrets de tots i cadascun dels diferents paràmetres que fixen el model del Big Bang, com ara la densitat total de matèria, la densitat de matèria ordinària, és a dir, bàsicament protons i neutrons, el ritme d'expansió de l'Univers o constant de Hubble, el valor de la constant cosmològica també anomenat *densitat d'energia fosca*, etc. Aquestes escales an-



28

FIGURA 6. Espectre de potència angular de la temperatura de la RCF obtingut pel WMAP (punts amb barres d'error) en què es poden apreciar els pics Doppler, l'ajust dels quals (corba contínua) permet de determinar les propietats globals de l'Univers amb precisions del centèsim. En abscisses superiors, l'escala en graus corresponent de la freqüència angular; en abscisses inferiors, el corresponent moment multipolar del desenvolupament en harmònics esfèrics. Cortesia de NASA/WMAP Science Team.

gulars privilegiades corresponen a les escales espacials, vistes des de la nostra posició actual, en les quals el fluid còsmic previ a l' instant de desacoblament de la radiació de fons es movia a una velocitat més gran, positiva o negativa, arrossegada pels barions que queien i rebotaven empesos per la pressió de radiació dins dels pous de potencial de la matèria fosca aleshores dinàmicament dominant. Ajustar tota la sèrie d'oscil·lacions a còpia d'escollir els valors apropiats dels paràmetres cosmològics hauria, doncs, de permetre determinar els valors d'aquests paràmetres amb gran precisió (vegeu la figura 6).

No és, doncs, estrany que després del *COBE* ja s'hagin programat dos satèl·lits més amb la intenció de mesurar les anisotropies de la RCF a altres escales angulars amb gran sen-

sibilitat a fi i efecte de traçar nítidament els pics Doppler. M'estic referint als satèl·lits *WMAP* (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) i *Planck*. El primer, llançat també per la NASA l'any 2003, va permetre de determinar, fins a una precisió d'un *centèsim*, el valor dels paràmetres cosmològics, una precisió fins en aquell moment gairebé inimaginable. El segon, que l'ESA preveu llançar el 2008 o a tot estirar el 2009, permetrà d'avançar en els detalls de la formació d'estructura a l'Univers i la seva connexió amb l'aparició de les partícules subatòmiques. En poques paraules, amb el satèl·lit *COBE* va començar una nova època per a la cosmologia, l'era de la cosmologia de precisió.

Els resultats d'aquesta nova línia de recerca han estat tan espectaculars com sorprenents. D'una banda s'ha pogut confirmar que hi ha al voltant de set vegades més de matèria fosca de composició desconeguda que de matèria bariònica ordinària. Això era quelcom que ja es despenia dels primers resultats del *COBE*. Els nous resultats ho confirmen amb gran certesa. Però el que ha estat més sorprenent és que la constant cosmològica no és nul·la, com s'havia tornat a creure després que Einstein reconegués que el seu model estàtic havia estat l'error més gran de la seva vida. Les mesures del *WMAP* indiquen que el seu valor fins i tot supera el que equilibraria l'atracció de la matèria que omple l'Univers, la qual cosa confirma els resultats d'altres observacions mitjançant supernoves³ distants. Aquesta constant cosmològica no nul·la, també anomenada *energia fosca*, fa que l'expansió de l'Univers hagi entrat «recentment» en una fase d'expansió accelerada. Què origina aquesta energia fosca o, el que és equivalent, aquesta

3. Una supernova és l'explosió amb la qual alguns estels massius acaben la seva vida. Aquestes explosions són tan lluminoses que s'observen des de distàncies cosmològiques, és a dir, distàncies recorregudes per la llum amb una fracció apreciable de l'edat de l'Univers. La seva utilització ens informa doncs de l'evolució de l'Univers.

expansió accelerada de l'Univers és avui dia tot un misteri, un misteri tan o més gran que el que fa referència a la massa fosca abans esmentada.

CONCLUSIONS

De tot el que acabem de dir es desprèn que el treball de Mather i Smoot ha donat lloc a una nova era en l'estudi de l'Univers i la formació de l'estructura que conté: l'era de la cosmologia de precisió. Això ha permès de comprovar que l'Univers està dominat per una gran quantitat de massa i d'energia fosques el significat de les quals no sabem encara interpretar, i avui dia és objecte de la recerca més avançada en el camp de la física de partícules i les interaccions fonamentals de la matèria. Ara bé, la conseqüència d'aquests descobriments amb una implicació filosòfica més transcendental sens dubte ha estat haver confirmat que l'Univers té una edat finita. Ara només resta comprendre què vol dir exactament això.

BIBLIOGRAFIA

- HINSHAW, G. [*et al.*] (2003). «First-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) observations: the angular power spectrum». *Astrophysical Journal Supplement Series*, núm. 148, p. 135-149.
- MATHER, J. C. [*et al.*] (1990). «A preliminary measurement of the cosmic microwave background spectrum by the Cosmic Background Explorer (COBE) satellite». *Astrophysical Journal*, núm. 354, L37-L40.
- SMOOT, G. F. [*et al.*] (1992). «Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps». *Astrophysical Journal*, núm. 396, L1-L5.

PER SABER-NE MÉS

1. Articles de divulgació o explicació general del tema (tipus *Scientific American*)
2. Llibres de divulgació o explicació general del tema

MATHER, J. C.; BOSLOUGH, J. (1996). «The very first light: the true inside story of the scientific journey back to the dawn of the Universe». Nova York: Basic Bookhouse.

SMOOT, G.; DAVIDSON, K. (1994). *Arrugas en el tiempo*. Barcelona: Plaza & Janés.

WEBS

<<http://www.nobelprize.org>>

<<http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/cobe>>

<<http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current>>

<http://map.gsfc.nasa.gov/m_uni.html>

<<http://www.aip.org/history/cosmology>>

<<http://astro.berkeley.edu/~jcohn/cosmo.html>>