

# El Big Bang

Manuel Sanromà

L'edició d'aquesta obra ha comptat amb el suport del Departament de Cultura de la Generalitat de Catalunya.

Coordinació editorial: Lluís López

Edició: Jordi Pérez Colomé

Direcció editorial: Lluís Pastor

Disseny del llibre i de la coberta: Natàlia Serrano  
La UOC genera aquest llibre amb tecnologia XML/XSL.

Primera edició en llengua catalana: maig 2007

© Manuel Sanromà, del text

© Editorial UOC, d'aquesta edició

Rambla del Poblenou, 156. 08018 Barcelona

[www.editorialuoc.com](http://www.editorialuoc.com)

Impressió: Reinbook

*Aquesta obra està subjecta –si no s'indica el contrari– a una llicència Creative Commons de Reconeixement-No Comercial-Sense obra derivada 3.0 Espanya. Poden copiar, distribuir i comunicar públicament, sempre que reconeguen els crèdits de l'obra (autoria, Editorial UOC) de la manera especificada pels autors i l'Editorial que la publica. No poden fer ús comercial ni obra derivada sense el permís de l'Editor i dels autors. La llicència completa es pot consultar a <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/deed.ca>*

## Què vull saber

Lectora, lector, aquest llibre li interessarà si vostè vol saber:

- Com ha evolucionat l'estudi de l'Univers al llarg de la història.
- Quines han estat les aportacions de científics com Kepler, Galileu, Einstein o Hubble.
- Què explica la teoria del Big Bang.
- Què ens permet saber sobre l'origen de l'Univers.
- Què és tot el que ens queda per saber.
- Quan ho sabrem, si ho descobrim algun dia.

## Índex de continguts

<b>Què vull saber</b>	3
<b>Una teoria impressionant i sòlida</b>	6
<b>LA COSMOLOGIA PRECIENTÍFICA</b>	7
El cosmos abans de Copèrnic	7
De la revolució copernicana a la científica	14
La ciència newtoniana	25
<b>LA COSMOLOGIA ESDEVÉ CIÈNCIA</b>	35
La importància d'Einstein	35
I va fer bang!	44
<b>LA TEORIA DEL BIG BANG</b>	52
Com explicar tres problemes	52
La massa fosca	56
L'energia fosca	60
<b>LES BASES OBSERVACIONALS</b>	65
La radiació de fons	65
L'estructura de l'Univers a gran escala	66

Les lents gravitatòries	67
Les supernoves	68
El bosc Lyman-Alpha	69
Noves observacions	69
Acceleradors de partícules	70
<b>UNA HISTÒRIA DE L'UNIVERS</b>	71
Mirar enrere cap endavant	71
El model concordant	81
Més enllà del Big Bang	84
<b>Bibliografia</b>	87

## **Una teoria impressionant i sòlida**

Les preguntes sobre els orígens són les més antigues i a la vegada les més profundes que es plantegen els humans. L'origen de l'home, de la vida i de l'Univers ha estat sempre en el centre de l'interès humà, i d'això en són prova les explicacions mítiques i religioses que apareixen en totes les cultures. Però només en els darrers cent anys han estat a l'abast de la recerca científica que ens ha permès començar a descobrir-ne les claus. La cosmologia, combinant els avenços teòrics i experimentals de la física de partícules amb els espectaculars avenços observacionals de l'astronomia, no només ens ha descobert un Univers d'unes dimensions inimaginables sinó que ha estat capaç d'esbrinar quin ha estat l'origen i evolució d'aquest Univers. La teoria del Big Bang és actualment una de les construccions més impressionants de l'intel·lecte humà i constitueix un dels models científics més sòlids de la ciència del nou mil·lenni.

## **LA COSMOLOGIA PRECIENTÍFICA**

La cosmologia és tan vella com la cultura humana. Com a disciplina científica comença amb Einstein. Però entre les cosmologies animistes dels primers homes que observaven el cel estrellat i el món que els envoltava, i el Big Bang inflacionari que representa el nostre coneixement de l'Univers en ple segle XXI, hi ha una història del pensament que té un primer salt quàntic en el pas del mite al logos amb els filòsofs presocràtics. La tradició dels filòsofs milesis i dels pitagòrics, recollida per Aristòtil, va configurar un primer model racional del món.

### **El cosmos abans de Copèrnic**

Aristòtil (384-322 aC) va desenvolupar un sistema del món en què la Terra era esfèrica i es trobava immòbil en el centre de l'Univers, mentre que el cel, amb tots els seus astres, girava al seu voltant. Més encara, va postular una diferència fonamental entre els cossos terrestres i els celestes. Segons Aristòtil, els cossos terrestres estaven formats pels quatre elements fonamentals presocràtics, els quals posseïen moviments naturals propis: la terra i l'aigua cap al cen-

tre de la Terra, l'aire i el foc en sentit contrari. Cada element tenia com a lloc natural una esfera (encara avui parlem de litosfera, hidrosfera i atmosfera).

Pel que fa als cossos celestes, Aristòtil fa una contribució original i introdueix una cinquena substància, l'èter, incorruptible i immutable, del qual estan formats els cossos celestes, que tracen un moviment natural de forma circular. Aristòtil considerava que el Sol, la Lluna i els planetes estaven fixats sobre les seves esferes corresponents. Les estrelles, al seu torn, es trobaven fixes sobre una esfera que girava al voltant de la Terra i corresponia a la frontera de l'Univers. Però, què hi havia més enllà de l'esfera estel·lar? Aquí, Aristòtil va haver de recórrer a diversos jocs de mans filosòfics per explicar que, més enllà, no hi havia res, però que aquest no-res no equivalia a un buit en extensió; tot plegat per dir que l'Univers s'acabava "realment" en l'esfera celeste.

Si hi ha un pensador que va contribuir a configurar la cultura occidental, aquest és Aristòtil. La seva influència s'ha deixat sentir durant més de dos mil·lennis, tant a través de la cultura judeocristiana com de la musulmana, i fins a la revolució científica pràcticament ningú no va gosar qüestionar les seves aportacions en tots els camps del pensament. Així no és estrany que el cosmos aristotèlic fos gairebé article de fe o model intocable i que marqués la història del pensament occidental.



Les característiques bàsiques del seu model han configurat el pensament cosmològic d'una manera sovint poc explícita però tremendament influent. Així, mentre que va adoptar els quatre elements bàsics dels presocràtics, no va fer el mateix amb la idea de Leucip i Demòcrit de que tota la matèria estava formada per unes unitats bàsiques indivisibles anomenades àtoms. Això va provocar, d'una banda, que aquesta idea atomista fos pràcticament inexplorat durant dos mil anys i, de l'altra, que el microcosmos quedés relegat implícitament als models cosmològics, que van passar a ser un camp d'estudi més lligat a l'astronomia, i per tant al macrocosmos, que no pas a la física: de fet no ha estat fins al segle XX, amb el model del Big Bang, quan la física de partícules ha començat a interessar-se per la cosmologia.

A més, amb la introducció de l'èter, o quinta essència, Aristòtil també separava el microcosmos de la Terra (format pels quatre elements clàssics) del macrocosmos dels cels, permanents i incorruptibles. Aquesta separació va tenir una gran influència tant des del punt de vista religiós com científic. De fet no és fins al segle XIX, amb l'espectroscòpia, quan la ciència va poder demostrar que la composició dels objectes celests era exactament la mateixa que la matèria terrestre. I no és fins a la teoria de la relativitat del segle XX quan l'èter passa a la història dels conceptes innecessaris o inexistents. Finalment, les esfe-

res i els moviments circulars, introduïts per Plató i Èudox, recollits per Aristòtil i consagrats en el model matemàtic de Ptolomeu, van conformar l'Univers hel·lenístic i medieval que, després de ser adoptat per les grans religions monoteistes, sobreviurà fins la revolució científica no solament entre els estudiosos sinó també en l'imaginari popular.

### **Alexandre Magno i Ptolomeu**

Un macedoni, deixeble d'Aristòtil, va estendre la influència grega per tot el món conegut. Alexandre Magne és sens dubte un dels personatges reals que han assolit gairebé el nivell del mite en la història. No endebades, amb les seves conquestes, va unir la civilització grega amb Egipte i l'Orient fins a l'Índia. En termes actuals podríem dir que va protagonitzar la primera globalització, ja que va ser el creador de l'anomenada cultura hel·lenística.

Alexandria, la capital de la dinastia dels Ptolomeus, successors d'Alexandre, es va convertir en el centre d'aquesta cultura, punt de trobada entre l'est i l'oest, per on fluïen les idees i les creences en una i altra direcció. Allí hi trobem el primer centre de recerca de la història, fomentat i mantingut pel poder polític: la mítica Biblioteca d'Alexandria. Al seu voltant van sorgir un seguit de científics que, aplicant el raonament i l'observació, van contribuir a canviar radicalment la visió del món i a establir les bases sobre

les quals, més de mil anys després, es produiria la revolució científica.

Aristarc, Eratòstenes, Hiparc i Ptolomeu són des de tots els punts de vista precursors (de la mateixa importància) de Copèrnic, Kepler, Galileu i Newton. No podem estar de preguntar-nos què hauria passat si no hi hagués hagut un trencament de més d'un mil·lenni entre la ciència alexandrina i la represa renaixentista. En qualsevol cas, el fet és que les recerques d'aquests quatre científics alexandrins van donar pas a una nova visió, basada en observacions i càlculs acurats, d'un món inimaginablement més gran que el de la nostra realitat diària.

La ciència astronòmica hel·lenística culmina amb Ptolomeu d'Alexandria (ca. 90 - ca. 168 dC). A banda d'escriure sobre geografia, astrologia i música, Ptolomeu va compilar en el seu històric tractat l'*Almagest* tot els coneixements astronòmics acumulats fins al moment en un model coherent que estarà en la base de la cosmovisió occidental fins la revolució copernicana i de fet, com a model cosmològic, fins a Newton. Des del punt de vista cosmològic, Ptolomeu recull l'Univers aristotèlic, però, sobre la base de la ciència hel·lenística, introdueix un model més sofisticat que les esferes de Plató i Èudox per explicar el moviment dels planetes.

El model dels epicicles (cercle que es mou en un altre cercle, anomenat deferent), introduït origi-

nalment per Apol·loni de Perge, serveix per explicar el moviment retrògrad observat en els planetes, com també la variació de la seva distància (i per tant, de la seva lluminositat). El centre del deferent no es troba a la Terra sinó que n'està lleugerament separat (un fenomen que s'anomena excentricitat). A més, Ptolomeu va introduir l'equant, o punt lleugerament allunyat del centre del deferent, al voltant del qual es produeix el moviment uniforme de l'epicicle (d'altre manera no es podia explicar la variació en el moviment retrògrad dels planetes).

El model de Ptolomeu va ser el primer model matemàtic de l'Univers amb capacitat predictiva, ja que era capaç de predir amb força exactitud la posició dels planetes sobre la volta celeste. A aquests efectes calia introduir un nombre variable d'epicicles (epicicles dintre el epicicle) segons el planeta; tot plegat configurava un model força elaborat que, per tal d'ajustar-se a les observacions, trencava amb la perfecció de les esferes platòniques i aristotèliques.

Com a instrument purament matemàtic la capacitat predictiva del model heliocèntric que plantejaria Copèrnic catorze segles més tard, no era millor que la del model geocèntric de Ptolomeu i tant l'un com l'altre en molts casos van ser considerats pels seus partidaris simples models per efectuar càlculs, i no representacions del funcionament real del cosmos. El gran avantatge del model heliocèntric va ser, inicial-

ment, la seva simplicitat. En qualsevol cas, el pensament aristotèlic i la matemàtica hel·lenística combinades en l'*Almagest* van solidificar en un model cosmològic que va sobreviure durant catorze segles.

Sovint sembla que entre l'*Almagest* de Ptolomeu i el *De revolutionibus* de Copèrnic ens separin catorze segles de foscor intel·lectual pel que fa a la visió del món. Deixant de banda que això seria gairebé impossible (les revolucions necessiten un brou de cultiu), el fet és que sovint passa desapercebut que, en els primers segles del cristianisme, es produeix un canvi molt significatiu en la cosmovisió, el qual tindrà un gran impacte en el debat cosmològic posterior. Dos pensadors cristians, Tertul·lià de Cartago (ca. 155 - 230) i Agustí d'Hipona (354-430), introduiran la idea de la *creatio ex-nihilo*, que fins aleshores havia estat absent en totes les consideracions cosmogòniques o cosmològiques. Efectivament, tant en les cosmogonies mítiques com en el cosmos naturalista presocràtic (recollit per Aristòtil), la matèria és preexistent. El demiürg platònic no crea la matèria sinó que hi treballa; els epicuris negaven explícitament la possibilitat de la creació del no-res; el Gènesi no diu explícitament que Déu creés el cel i la terra del no-res.

La idea de la creació a partir del no-res, introduïda originalment per Tertul·lià, es consolida gràcies a la figura de sant Agustí, un dels pares i doctors de l'Església de major influència. Formulada per un pen-

sador del seu prestigi, en els mateixos moments en què l'emperador Teodosi convertia el cristianisme en la religió oficial de l'Imperi romà i quan s'estava produint la transició del món antic al medieval, la idea d'un món creat del no-res quedarà lligada a l'Univers aristotèlic i ptolemaic en un sòlid edifici, defensat fermament pels poders eclesiàstic i polític, que no trontollarà fins a Galileu.

Des de sant Agustí, el cel del cosmos és el cel creat per Déu, la Ciutat de Déu. Així serà durant més de mil anys i quan Galileu defensi la realitat del model heliocèntric de Copèrnic, els teòlegs de Roma li preguntaran com explica, doncs, que Josuè aturés el Sol per guanyar la batalla de Jericó.

### **De la revolució copernicana a la científica**

Nicolau Copèrnic (1473-1543), un erudit renaixentista polonès que entre les seves múltiples activitats va incloure l'astronomia, és l'autor d'un dels llibres més influents de la història: *De revolutionibus orbium coelestium*. Publicat poc després de la seva mort, va desfermar la revolució científica que culminaria amb els *Principia* de Newton. En el seu llibre, resultat de dècades de treball, Copèrnic exposa les seves tesis. La Terra no és el centre de l'Univers i aquest està prop del Sol. La distància de la Terra al Sol és molt petita comparada amb la distància que hi ha fins a les estrelles. La rotació diària de la Terra és el que causa el mo-

viment aparent de les estrelles sobre la volta celeste. El moviment de la Terra al voltant del Sol és la causa del seu moviment aparent entre les estrelles i també la causa de les estacions. El moviment dels planetes entre les estrelles és causat per la combinació del seu moviment al voltant del Sol i de la mateixa Terra al voltant d'aquell.

## Les distàncies en astronomia

Mentre que en la nostra vida diària el metre i els seus múltiples (quilòmetres) i submúltiples (centímetres i mil·límetres), són unitats útils i familiars per mesurar distàncies, per a l'Univers a gran escala s'han adoptat altres unitats més grans, ateses les dimensions implicades. La Terra és aproximadament una esfera de 12.732 quilòmetres de diàmetre, la Lluna està a uns 380.000 quilòmetres i el Sol a uns 150 milions. La distància del Sol al seu planeta més llunyà és d'uns 4.500 milions de quilòmetres i a partir d'aquí el sistema mètric deixa de ser una eina útil.

Per a les immenses distàncies implicades en l'estudi de l'Univers, utilitzem unitats més grans i més entenedores. Per fer-ho, ens aprofitem del fet que la velocitat de la llum és una constant universal i molt gran (per als estàndards humans), d'aproximadament 300.000 km/s. Si utilitzem com a unitat de distància el que recorre la llum en un interval de temps (per exemple 1 segon-llum seran 300.000 quilòmetres; un any llum aproximadament 10 bilions de quilòmetres) tindrem eines de mesura molt més útils. La distància del Sol a la estrella més propera és d'uns 4 anys llum, el diàmetre de la nostra galàxia és d'uns 100 mil anys llum i les galàxies del nostre Grup Local estan separades per distàncies típiques d'uns milions d'anys llum. Els astrònoms utilitzen un múltiple de l'any llum, anomenat parsec, equivalent a 3,26 anys llum. El parsec és la distància a la qual el radi de l'òrbita de la Terra al voltant del Sol té una paral·laxi d'un segon d'arc (veure "Com mesurar les distàncies astronòmiques").

Copèrnic va desenvolupar la seva teoria heliocèntrica unes dècades abans de la seva publicació, però era tant revolucionària que es va resistir a donar-la a conèixer. Fins i tot en el pròleg de la primera edi-



ció (escrit pel teòleg Andreas Osiander) s'especificava que el model que es descrivia en el llibre no volia ser una descripció de com era l'Univers real sinó simplement un estri per simplificar el càlcul del moviment dels planetes. I la veritat és que la controvèrsia que va desfermar el llibre va ser de caràcter més científic que filosòfic.

Val a dir que, a efectes pràctics, la teoria de Copèrnic, que pretenia una major simplicitat que la de Ptolemeu, no ho era tant com ell desitjava, atès que, per tal de mantenir les òrbites circulars perfectes també havia de recórrer als epicicles ptolemaics. A més, no hi havia cap evidència observacional en favor del model de Copèrnic: aquesta hauria d'esperar a les observacions telescòpiques de Galileu de les fases de Venus. Un dels arguments contundents contra el sistema heliocèntric és que les estrelles no mostraven cap paral·laxi. Avui dia sabem que aquest efecte existeix, però que no podia ser mesurat amb les tècniques renaixentistes: la primera mesura d'una paral·laxi es va realitzar ben entrat el segle XIX. Copèrnic va argumentar (i encertar!) que això podia ser degut a les enormes distàncies estel·lars, però no va abandonar l'esfera celeste sobre la qual les estrelles es trobaven a una distància enorme però finita: l'Univers copernicà tenia la mateixa grandària que el ptolemaic.

### **Com mesurar les distàncies astronòmiques**

Mesurar les distàncies dels objectes astronòmics no és una tasca senzilla. Les primeres mesures dels objectes més propers, com la Lluna i el Sol, les van dur a terme els astrònoms alexandrins a partir de l'estudi dels eclipsis i de les posicions relatives d'aquests astres en el cel. Per a objectes més llunyans cal recórrer a mètodes específics. En els objectes més propers, la distància es pot conèixer mesurant l'anomenada paral·laxi. Efectivament, observant un mateix objecte des de dos punts separats per una gran distància, es pot mesurar el desplaçament de l'objecte sobre el fons d'estrelles més llunyanes (paral·laxi) d'una manera tan precisa com els instruments d'observació. Tenint en compte que l'òrbita de la Terra al voltant del Sol ens permet observar des de posicions separades pel diàmetre de l'òrbita (de l'ordre de 300 milions de quilòmetres) i amb l'actual precisió dels telescopis, amb aquest mètode s'arriba a distàncies d'uns quants centenars d'anys llum.

Aquest mètode és doncs clarament insuficient per a la majoria de mesures galàctiques i, encara més, per a les extragalàctiques. Tot i que hi ha diferents mètodes en circumstàncies concretes (segons el tipus d'objecte observat), l'únic mètode general de mesura de grans distàncies és el de les candelas patró, que veurem més endavant.

A Giordano Bruno (1548-1600) correspon el mèrit d'haver eixamplat l'Univers copernicà: "Hi ha un nombre innumerable de sols, i un nombre infinit de terres que giren al voltant d'aquests sols", va gosar afirmar (la idea ja havia estat defensada per Lucreci el segle I aC. i per Nicolau de Cusa el segle XV). No obstant això, Bruno va arribar a aquestes conclusions

a partir d'especulacions metafísiques que poc tenien a veure amb un mètode científic. La seva visió del món és, en realitat, animista, i s'acosta més al panteisme que a la ciència moderna. I si va posar el Sol en el centre del sistema solar, no va ser per raons astronòmiques, sinó perquè li assignava a aquest astre propietats vitalistes, a l'estil de la filosofia hermètica de la seva època. De totes maneres, les idees de Bruno li van valer ser acusat d'heretge i morir en una foguera de la Inquisició romana, just quan s'iniciava el segle XVII, la qual cosa el va convertir en un màrtir del lliure pensament.

### **Les harmonies de Kepler**

Un segle després de Copèrnic, el gran astrònom alemany Johannes Kepler (1571-1630) es va proposar trobar les "harmonies" que regeixen el moviment dels planetes. Convençut que el Sol és el centre de l'Univers, Kepler va dedicar llargs i penosos anys a estudiar les dades observacionals, recopilades pel seu mestre Tycho Brahe (1564-1601), amb l'esperança de trobar algunes de les lleis simples que regien amb tota precisió el curs dels planetes. La seva recerca no va ser en va; Kepler va descobrir les famoses tres lleis que ara duen el seu nom.

De cop, es va enfonsar el sistema dels epicicles, del qual ni Copèrnic havia pogut alliberar-se, per deixar lloc a la inesperada simplicitat de les el·lipses: Ke-

pler acaba amb dos mil·lenis de cercles com a figures perfectes que representen el moviment dels astres. D'altra banda, a Kepler li desagradava la idea d'un Univers infinit. Considerava que la qüestió de la finitud o la infinitud del món era aliena a l'experiència humana. Però, a més, va trobar un argument per demostrar que el Sol era molt diferent de les estrelles. Abans que s'inventessin els telescopis, es creia que la grandària aparent de les estrelles corresponia a la seva grandària real.

Kepler va demostrar que si les estrelles es troben tan distants com implicava el sistema de Copèrnic, el diàmetre real d'una estrella típica hauria de ser major que l'òrbita terrestre. Més encara, el cel vist des d'una estrella tindria una aparença molt diferent de la que té des de la Terra: les estrelles es veurien com grans boles de llum i no com petits punts lluminosos. Avui dia, sabem que la grandària aparent d'una estrella és només un miratge produït per l'atmosfera terrestre, que eixampla la seva imatge, però aquest fenomen era desconegut en temps de Kepler, per la qual cosa el seu argument semblava perfectament sòlid.

## **Les estrelles**

Una estrella és una esfera de matèria, formada per l'atracció gravitatòria del seu material, que genera energia en el seu centre com a conseqüència de les reaccions nuclears que s'hi produeixen. La gravetat de la matèria que constitueix la estrella governa del tot la seva evolució i el control de les reaccions nuclears que li permeten produir una gran quantitat d'energia i brillar. Com més massa té una estrella, més ràpida n'és l'evolució, és a dir, consumeix més ràpidament el combustible nuclear. Aquesta massa pot mesurar entre una desena part de la massa del Sol i unes cent vegades aquesta. Les estrelles de més massa tenen una vida d'uns pocs milions d'anys, comparats amb els 10 mil milions d'anys que pot viure una estrella com el Sol.

Els últims estadis de la vida de les estrelles marquen les diferències més rellevants en el seu comportament. Durant gran part de la seva vida, les estrelles produeixen elements químics a partir de la fusió de nuclis d'hidrogen. Una vegada consumit l'hidrogen, i en funció de la seva massa i també del seu entorn, l'estrella entra en fases diferenciades. Algunes s'acaben consumint lentament. Altres s'acaben en processos explosius que desprenen immenses quantitats d'energia, coneguts com a supernoves. Les supernoves i algunes estrelles variables constitueixen veritables fars, visibles a gran distància, que ens permeten deduir informació sobre l'Univers a gran escala.

## **Arriba Galileu**

Però el gran impulsor de l'Univers copernicà i un dels primers científics moderns és Galileu Galilei (1564-1642). Potser Galileu no va ser el primer home que va mirar el cel a través d'un telescopi, però sí que va ser el primer a fer-ho sistemàticament, a in-

terpretar les seves observacions i, sobretot, a divulgar els seus descobriments i fer-los accessibles a un cercle més ampli que el dels erudits versats en llatí. Galileu fou un apassionat defensor de Copèrnic, i les seves observacions astronòmiques van confirmar les seves conviccions. Però sota la pressió dels aristotèlics que dominaven la vida cultural d'aquella època, l'Església romana ja havia pres partit pel sistema geocèntric, per suposades congruències amb la narració bíblica. Amb proves objectives, Galileu es va proposar convèncer els alts prelats de l'Església que Copèrnic tenia raó; però després d'insistir diversos anys, només va obtenir una prohibició oficial d'ensenyar el sistema heliocèntric.

Malgrat tot, el 1632, Galileu va publicar el *Diàleg sobre els dos principals sistemes del món*, llibre en el qual confrontava, d'una manera suposadament imparcial, les doctrines d'Aristòtil i de Copèrnic. Però ningú podia enganyar-se amb les simpaties de l'autor: l'heroi del llibre era Salviati, defensor de Copèrnic, qui refutava d'un en un els arguments del seu contrincent, el filòsof peripatètic Simplicí, maldestre defensor d'Aristòtil. El *Diàleg* va ser escrit originalment en italià i pretenia ser un llibre de divulgació més que un text científic. Del sistema de Copèrnic, només apareixia la idea heliocèntrica, sense els detalls matemàtics de la teoria. No tots els arguments de Galileu eren clars, ni tan sols veritables: al final del llibre, per exem-

ple, apareix una teoria de les mareas, totalment errònia, amb la qual pretenia demostrar el moviment de la Terra. Més encara, no es diu ni mitja paraula sobre els descobriments de Kepler, que Galileu no va poder valorar correctament. Però malgrat les seves limitacions, el Diàleg va tenir l'efecte suficient per causar revolada en el mitjà científic i religiós. Tot just publicat, va ser vetat per l'Església, i Galileu va ser jutjat i condemnat a retractar-se de les seves conviccions.

Les observacions realitzades amb el seu telescopi li van permetre acumular arguments contra el model ptolemaic i a favor del model copernicà. Va observar muntanyes a la Lluna i taques variables al Sol, amb la qual cosa semblava clar que els cossos celestes no eren immutables i no estaven formats per una substància diferent a la de la Terra. Va descobrir quatre satèl·lits del planeta Júpiter (els més grans, que avui s'anomenen galileans), la qual cosa posava en entredit el model geocèntric; i també fases en el planeta Venus, impossibles d'explicar amb aquell i en canvi perfectament explicables amb el model heliocèntric. I a més va descobrir que la Via Làctia està formada per una infinitud de petites estrelles que no es poden distingir si no és amb un telescopi: així s'aclaria el misteri d'aquesta banda lluminosa del cel que tant havia despertat la imaginació dels filòsofs i els poetes.

Galileu també va descobrir que el telescopi reduïa la grandària aparent de les estrelles. Va sospitar que

aquesta grandària era una il·lusió òptica i la va atribuir al mecanisme de visió de l'ull. No obstant això, va continuar pensant que el diàmetre aparent no era totalment il·lusori i va calcular que una estrella molt dèbil devia trobar-se a 2.160 vegades la distància del Sol. Encara que erroni, aquest valor permetia considerar seriosament que les estrelles són semblants al nostre Sol, al contrari del que mantenia el seu contemporani Kepler. Quant a la grandària de l'Univers, Galileu es va mostrar excepcionalment caut. "És encara incert (i crec que ho serà sempre per a la ciència humana) si el món és finit o, al contrari, infinit", va arribar a afirmar i amb certa raó, atès que qualsevol altra posició basada en els coneixements de la seva època hagués estat una simple especulació.

En anys posteriors a Galileu, dos astrònoms, l'holandès Christian Huygens (1629-1695) i l'escocès James Gregory (1638-1675), van engrandir les estimacions de les distàncies a les estrelles, el primer en un factor 10 i el segon encara en un altre factor 4 (i encara es va quedar curt en un factor 5!). En qualsevol cas ens trobàvem davant d'un Univers d'unes dimensions fabuloses. Huygens va escriure admirat: "Una bala de canó tardaria centenars de milers d'anys a arribar a les estrelles". Es quedava curt.



## La ciència newtoniana

Les lleis de Kepler, basades en les dades observacionals de Brahe i les observacions i els experiments físics de Galileu, van obrir la porta a l'obra científica del que molts consideren el científic més gran de la història: Isaac Newton (1643-1727). Abans de Newton no s'havia establert cap relació entre la caiguda dels cossos a la Terra i el moviment dels planetes al cel. Ningú no havia refutat la doctrina d'Aristòtil que els fenòmens terrestres i els celestes són de naturalesa totalment diferent, i que els successos més enllà de l'òrbita lunar no poden entendre's sobre la base de les nostres experiències mundanes.

La situació va canviar dràsticament quan Isaac Newton va descobrir que la gravitació és un fenomen universal. Tots els cossos de l'Univers, ja siguin pomes, planetes o estrelles, s'atreuen entre si; i la força d'atracció (F) entre dos cossos és proporcional a les seves masses (M1 i M2) i inversament proporcional al quadrat de la distància (D) que els separa:

$$F = \frac{GM_1M_2}{D^2}$$

on G és una constant

Segons una popular llegenda, Newton va arribar a aquesta conclusió un dia que, mentre meditava so-

bre l'atracció que mantenia la Lluna unida a la Terra, va veure caure una poma. La realitat és més prosaica: Newton va deduir la seva llei a partir de les lleis de Kepler. Aquestes li van donar la pista que el moviment dels planetes al voltant del Sol (i de la Lluna al voltant de la Terra) es podia explicar a través d'una única llei universal que regia l'atracció dels cossos. A aquests efectes Newton va utilitzar els mètodes matemàtics que havia inventat quan era més jove: ell va ser l'inventor, amb Leibnitz, del càlcul infinitesimal. Juntament amb els seus estudis sobre la mecànica dels cossos, basats en els de Galileu, va publicar tots els seus resultats l'any 1687 en la seva obra monumental *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*.

L'existència de la gravitació universal implica que les estrelles han d'estar molt allunyades per tal de no influir sobre el Sol i els seus planetes. El mateix Newton va refinar els càlculs de Gregory i va obtenir unes estimacions força aproximades de les distàncies a les estrelles més properes. Però, encara que molt petita, aquesta atracció no pot ser totalment nul·la: un conglomerat d'estrelles acabaria per col·lapsar sobre ell mateix a causa de l'atracció entre les seves parts, i aquesta seria la destinació d'un Univers finit. Newton va arribar a la conclusió que, perquè això no succeeixi, l'Univers ha de ser infinit i uniforme; només petites regions poden col·lapsar sobre elles mateixes per for-

mar regions més denses, i és potser així com es formen les estrelles.

En qualsevol cas, amb l'aparició de la física newtoniana va quedar liquidada definitivament la física aristotèlica, amb les esferes celestes i les regions formades per diferents elements. No quedava dubte: el nostre sistema solar és tot just un punt en l'espai i les estrelles són els veritables components de l'Univers. De fet alguns autors han volgut veure una base científica per al racionalisme i l'empirisme en les dues grans obres de Newton, respectivament els *Principia* i l'*Òptica*. La primera és un gran sistema matemàticoductiu, mentre que la segona té un caràcter més obert, experimental i hipotètic.

La magnitud de l'obra de Newton i el seu prestigi van posar les bases per a les idees de la Il·lustració i van influenciar les generacions posteriors de pensadors i científics, tant teòrics com experimentals. Locke i Voltaire van aplicar els conceptes de llei natural als sistemes polítics, Adam Smith va aplicar-les a l'economia. D'altra banda, el seu mateix prestigi també va recolzar una visió teista del cosmos. Efectivament, Newton va prevenir contra una utilització de les seves lleis per formular un cosmos com si fos un gran rellotge.

## **Kant i la infinitud de l'Univers**

Va ser precisament una de les grans lluminàries de la Il·lustració, el filòsof alemany Immanuel Kant (1724-1804) qui va abordar el problema de la finitud o infinitud de l'Univers des d'un punt de vista filosòfic. Però encara que les seves especulacions en aquest aspecte es van tornar obsoletes a mesura que avançava la ciència, altres especulacions seves sobre cosmologia acabarien sent immortals.

Kant coneixia el model de Wright de l'Univers planar i la teoria de la gravitació universal de Newton, i es va adonar que eren incompatibles. El problema fonamental era mantenir l'estructura de la Via Làctia sense que es col·lapsés sobre ella mateixa. Kant va trobar la clau del problema en el Sistema Solar: els planetes són atrets pel Sol, però no li cauen a sobre pel fet que giren al seu voltant i la força centrífuga compensa l'atracció gravitacional.

De la mateixa manera, la Via Làctia podria mantenir-se estable si les estrelles estiguessin distribuïdes, no en un plànol infinit, sinó en un disc en rotació. Les estrelles descriurien gegantesques òrbites al voltant del centre de la Via Làctia i la seva força centrífuga impediria el col·lapse.

Encara no prou satisfet amb una hipòtesi tan audaç, Kant va donar un segon pas encara més espectacular. Si la Via Làctia és un conglomerat de milions

d'estrelles amb forma de disc, ¿no podrien haver-hi altres Vies Làcties, semblants a la nostra i tan llunyanes d'ella com les estrelles ho són dels planetes? Aquests conglomerats es veurien com simples taques lluminoses a causa de les seves enormes distàncies i les seves formes serien circulars o el·líptiques. I justament aquesta mena d'objectes ja havien estat observats, va assenyalar Kant: eren les anomenades estrelles nebuloses, o almenys una classe d'aquestes, taques lluminoses només visibles amb un telescopi, la naturalesa de les quals era un misteri en la seva època.

El gran astrònom britànic d'origen alemany William Herschel (1738-1822) va arribar a conclusions semblants, però a partir d'observacions directes. Herschel va construir el que va ser el major telescopi de la seva època, i amb ell va estudiar la configuració de la Via Làctia. Suposant que l'extensió d'una regió sideral és proporcional al nombre d'estrelles que s'hi veuen, Herschel va concloure que el nostre sistema estel·lar té una forma aplanada, de contorns irregulars i amb el Sol en la regió central. Herschel també va descobrir nombroses nebuloses i es va preguntar, igual que Kant, si no serien conglomerats d'estrelles molt llunyans. Sembla que aquesta era la seva opinió, fins que un dia va descobrir una nebulosa amb forma d'anell i una estrella situada en el seu centre, associada sens dubte a la nebulosa; no podia ser un "univers-illa", sinó matèria circumdant de l'estrella.

Mentre pensadors com Kant o astrònoms com Herschel assentaven les bases del que seria una nova revolució en les nostres concepcions sobre l'Univers, la física anava fent passos de gegant en el nostre coneixement tant del microcosmos com del macrocosmos i confirmant-se com a ciència per excel·lència. Durant el segle XVIII la mecànica establerta sòlidament per Newton va tenir un gran desenvolupament, fonamentalment de la mà de matemàtics com Leonard Euler (1707-1783), Louis Lagrange (1736-1813) i Pierre Laplace (1749-1827). Aquest darrer és particularment significatiu perquè en la seva *Mécanique céleste*, que molts autors consideren una reformulació dels *Principia* en termes estrictament matemàtics, Laplace va plantejar un Univers amb una visió absolutament oposada a la de Newton. L'Univers de Laplace era un rellotge mecànic en el qual les lleis de Newton eren capaces de preveure la posició i el moviment de cada una de les seves partícules un cop estava en moviment. A més, Laplace va recollir la hipòtesis nebular de Kant i li va donar forma en el seu llibre de 1796, *Exposition du système du monde*, en el qual plantejava l'origen del sistema solar per la condensació d'una esfera de gas que donaria origen a un disc en rotació i aquest, a partir d'una condensació central al Sol i de condensacions locals, a la resta de planetes.

## El nou concepte de ciència

Si el segle XVIII va representar la consolidació de la física matemàtica, el segle XIX és el moment en què la física pren un caràcter propi com a model de ciència: els conceptes actuals de ciència i de científic neixen en aquest segle. Es desenvolupen plenament dues noves branques que tindran una importància fonamental en el nostre coneixement del microcosmos. D'una banda l'electromagnetisme, obra de diversos científics com Faraday, Ampère, Oersted i altres, que culminarà James Clerk Maxwell (1831-1879) amb la seva obra magna, *A treatise on electricity and magnetism* (1873), un veritable monument de la física matemàtica. Maxwell hi va condensar en quatre equacions diferencials el comportament dels camps elèctric i magnètic i la seva interacció amb la matèria. A més, va predir l'existència d'ones electromagnètiques i la seva velocitat, independent de l'observador. La primera predicció, comprovada experimentalment l'any 1887 per Herz, produirà desenvolupaments tecnològics que avui son obvis per a tothom. La segona serà una de les bases sobre les quals Einstein construirà trenta anys més tard la seva teoria de la relativitat especial.

El segon gran desenvolupament de la física del segle XIX és la teoria de la calor o termodinàmica. Obra d'un conjunt de físics, entre els quals cal desta-

car Joule, Clausius, Kelvin, Gibbs, Helmholtz, Boltzmann i el mateix Maxwell, entre d'altres, va introduir dos conceptes que des d'aleshores han estat centrals en ciència i tecnologia: l'energia i l'entropia. Són dues quantitats que es poden calcular matemàticament a partir de les variables observables d'un sistema, la primera de les quals es conserva en tots els processos físics (Primera llei de la termodinàmica) mentre que la segona sempre creix (Segona llei de la termodinàmica).

És important remarcar la influència d'aquests conceptes, introduïts el segle XIX, per a la nostra concepció del món material. Quan la teoria de la relativitat especial d'Einstein demostrí l'equivalència entre massa i energia, aquests dos conceptes, el primer clarament associat a la matèria i el segon més abstracte, quedaran lligats. D'altra banda, l'entropia, concepte també abstracte, està íntimament relacionat amb el temps físic; el creixement de l'entropia s'associarà a la fletxa del temps del passat cap al futur.

El segle XIX, a més d'assistir al desenvolupament de la física com a ciència per excel·lència, també és testimoni d'una de les altres grans revolucions científiques: ens referim, lògicament, a la teoria de l'evolució de les espècies de Charles Darwin. L'impacte del darwinisme en la visió moderna del món és un altre salt copernicà: no solament la Terra no és el centre de l'Univers sinó que l'home deixa de



tenir un paper central i singular entre les espècies viues. Estudiar els orígens (de l'Univers, de l'home) es convertia en un terreny abonat per a la ciència.

En qualsevol cas, al final del segle XIX, la física i l'astronomia eren ciències que es refiaven plenament dels seus èxits. Les lleis de Newton, les lleis de Maxwell i les lleis de la termodinàmica configuraven un coneixement matemàtic detallat del funcionament del món. D'altra banda, la imatge d'un Univers format per sistemes planetaris semblants al nostre i regits per les lleis de la mecànica celeste, el conjunt dels quals constituïa un immens sistema conegut com a galàxia, en el centre del qual estava el nostre Sol, era un model consolidat i que de fet perduraria fins ben entrat el segle XX.

La satisfacció era generalitzada; la calma era absoluta. La perspectiva científica era anar aprofundint en aquest model. Segons una famosa frase, atribuïda al físic nord-americà Albert Michelson l'any 1894, el futur de la física era qüestió "d'anar afegint decimals". Tot estava a punt per a la revolució.

## L'efecte Doppler

Tothom que ha anat en moto o en cotxe sap que, a una velocitat constant, el to del soroll del motor és sempre el mateix. En canvi, quan som prop de la carretera (sobretot en curses de motos o de cotxes, en què les velocitats són molt grans) i sentim un d'aquests vehicles que s'acosta, el to del soroll és més agut i, quan ha passat i s'allunya, el so es fa més greu. Avui en dia podem experimentar aquest fenomen quotidianament en el soroll dels vehicles que s'acosten i allunyen a gran velocitat, o en la sirena d'una ambulància o cotxe de bombers.

El canvi en la freqüència de les ones (tant les sonores com les electromagnètiques) és proporcional a la velocitat, amb una dependència matemàtica descoberta per Doppler l'any 1842: si coneixem la freqüència d'emissió i la de recepció, podem calcular la velocitat de l'emissor. Aquesta efecte és una benedicció en astronomia, on els objectes són tan llunyans que no podem observar-ne la velocitat sobre la volta celest; en canvi, sí que podem saber si s'allunyen o s'apropen, i a quina velocitat. Estudiant l'espectre de la llum d'un objecte i identificant-hi les línies d'emissió o d'absorció dels diferents elements químics, podem conèixer la velocitat d'allunyament o apropament dels cossos comparant la freqüència d'aquestes línies amb les obtingudes en el laboratori. Així, l'espectre d'una estrella o d'una galàxia no solament ens informa de la seva constitució, sinó també de la seva dinàmica.

## LA COSMOLOGIA ESDEVÉ CIÈNCIA

La cosmologia és una de les ciències més joves: podem datar l'acta de naixement de la cosmologia en un article d'Einstein publicat l'any 1917, després d'haver establert la teoria general de la relativitat. Vist en perspectiva, no és estrany que nasqués en les tres primeres dècades del segle XX, l'època en què el pare del Big Bang, George Gamow, va qualificar en un llibre com "*thirty years that shook physics*" (trenta anys que van capgirar la física).

### La importància d'Einstein

Poques vegades les dates rodones marquen el final d'una era i el començament d'una altra com l'any 1900 en el camp de la física. Aquell any William Thompson, Lord Kelvin (1824-1907), mestre de Maxwell i un dels grans físics del segle XIX, va fer una conferència en la qual plantejava un futur lluminós a la física només enfosquit per dos "núvols": la radiació del cos negre i l'experiment de Michelson-Morley.

Avui sabem que l'explicació a aquests dos "núvols" donaria origen a la teoria quàntica i a la teoria de la relativitat que van revolucionar la visió del món. I

de fet el desembre d'aquell mateix any el físic alemany Max Planck (1858-1947) presentava en una altra conferència la seva hipòtesi quàntica que desfermaria la revolució.

### **Els núvols de Kelvin**

Els dos problemes que provocaven ombres en la física del segle XIX van donar origen a les dues grans revolucions de la física del segle XX. El cos negre es un objecte teòric, introduït per Gustav Kirchoff l'any 1860, que absorbeix tota la radiació que li arriba i la remet (no en reflecteix gens). L'estudi de la radiació d'aquest objecte havia trobat dificultats teòriques insuperables per fer quadrar les prediccions de la termodinàmica amb les observacions, fins que el 1900 Planck va introduir la hipòtesi que la radiació no s'emet en forma continua sinó en paquets coneguts com a *quanta*, la qual cosa va donar origen a la teoria quàntica.

Els físics nord-americans Albert Michelson i Edward Morley van fer un experiment l'any 1887 en el qual pretenien demostrar l'existència de l'èter, el mitjà en el qual es propagaven les ones electromagnètiques (es pensava que qualsevol ona necessitava un mitjà de propagació). Els resultats negatius de l'experiment, difícils d'explicar en el marc de la física clàssica, van trobar una explicació natural en la nova teoria de la relativitat d'Einstein.

Les tres primeres dècades del segle XX van representar una veritable i contínua revolució en les ciències físiques i, de fet, és el moment en què es pot parlar del naixement de la cosmologia científica. D'una banda, la teoria quàntica va permetre el coneixement de l'estructura interna de la matèria, una visió del micro-

cosmos que mai abans s'havia assolit. D'altra banda, la teoria de la relativitat va abordar l'estudi del temps i de l'espai, de la massa i l'energia, i de les seves relacions, i va ser capaç de formular per primera vegada un model matemàtic de l'Univers que anava més enllà del coneixement limitat per les observacions. Va ser durant aquestes dècades quan es va establir la nova visió del cosmos que ha sobreviscut en gran mesura fins a l'actualitat.

I en aquesta visió, sens dubte hi ha un nom propi que destaca sobre els altres: Albert Einstein (1879-1955). Aquest científic alemany, probablement el més popular de tots els temps, va contribuir a les dues revolucions de la física del segle XX, però va ser l'autor i impulsor en solitari d'una de les dues, la teoria de la relativitat, que va marcar un abans i un després en la cosmologia.

L'any 1905 Einstein va publicar els resultats sobre els seus estudis al voltant de la propagació de la llum. Tenint en compte els resultats de l'experiment de Michelson i Morley que implicaven la constància de la velocitat de la llum independentment de l'observador, i aplicant el principi galileià que dos observadors en moviment relatiu constant l'un respecte a l'altre han d'obtenir els mateixos resultats en els experiments, va arribar a la conclusió que el temps i l'espai depenien de cada observador i que eren dues facetes d'una mateixa realitat, anomenada espai-temps. En un al-

tre dels seus articles, encara aprofundia més en aquest plantejament revolucionari i arribava a la conclusió de l'equivalència entre massa i energia, formulada en l'equació més famosa de la història:

$$E = mc^2$$

$c$  és la velocitat de la llum, que és una constant universal. Així doncs podem parlar de massa-energia com una mateixa realitat que es manifesta de dues formes diferents. Val a dir que tots els aspectes de la teoria de la relativitat especial o restringida concorden amb tots els experiments realitzats fins ara i constitueix una de les bases més sòlides de la física moderna.

La teoria especial de la relativitat només s'aplicava als cossos en moviment relatiu a velocitat constant. Per estendre-la als cossos amb moviment accelerat, Einstein va fer un monumental *tour-de-force* matemàtic que va culminar amb la publicació l'any 1915 de la teoria general de la relativitat. En ella Einstein geometritza la força de la gravetat: la geometria de l'espai-temps està determinada per la massa-energia. En una famosa i afortunada frase d'un dels grans físics del segle XX i deixeble d'Einstein, John A. Wheeler (nascut el 1911) diu: "La matèria li diu a l'espai-temps com s'ha de corbar; l'espai-temps li diu a la matèria com s'ha de moure." En la seva teoria general, Einstein lligava els dos nous conceptes que havia introduït amb la teoria especial, i li atorgava a la gravetat, força que

domina tot l'Univers, el caràcter determinant de la seva geometria.

No és estrany que Einstein es plantegés ben aviat (el 1917) la tasca d'aplicar les equacions de la teoria general de la relativitat a l'Univers en el seu conjunt: s'enfrontava a una tasca monumental que donaria origen a la cosmologia com a ciència. El problema conceptual que Einstein afrontava era el de compatibilitzar les seves equacions amb la imatge preconcebuda d'un Univers estàtic. Aquesta imatge estava tan arrelada que Einstein no va gosar posar-la en dubte i no es va veure en cor d'acceptar allò que resultava una conseqüència evident de les seves equacions: l'Univers havia de ser dinàmic, o bé en expansió o bé en contracció.

Per evitar aquest comportament, Einstein va afegir en les seves equacions un nou terme, anomenat constant cosmològica: la seva missió, *ad hoc*, era contrarestar l'atracció gravitatòria. En termes newtonians, podríem dir que seria una força repulsiva, introduïda *ad hoc*. Així doncs, el primer model cosmològic matemàtic era un model estàtic en el qual s'introduïa la constant cosmològica per contrarestar l'atracció de tota la matèria de l'Univers.

El mateix any, l'astrònom holandès Willem de Sitter (1872-1934) va publicar un altre model cosmològic basat en les solucions de les equacions d'Einstein en el qual, en cas de no tenir en compte els efectes

de la matèria, obtenia un model en expansió. Cap dels dos sabia que un matemàtic i meteoròleg rus, Alexander Friedman (1888-1925), comprovava que, sense introduir la constant cosmològica, les equacions d'Einstein tenien una solució que generava un Univers en expansió.

Abans de seguir endavant, cal aturar-nos un moment en la constant cosmològica, perquè tornarà a sortir més endavant. Una vegada Einstein va conèixer el model de Friedman i els resultats observacionals de Hubble, es va penedir d'haver introduït la constant cosmològica: de fet va dir que havia comès la "pífia" més gran de la seva vida. I és que certament no calia introduir un terme addicional repulsiu en un Univers en expansió. Però la veritat és que aquest terme no ha estat mai totalment abandonat pels cosmòlegs (ja sigui per tradició, pel prestigi d'Einstein o per la comoditat de tenir un terme a mà per jugar en les equacions) i recentment ha fet una reaparició estel·lar.

### **Els grans telescopis i Hubble**

En qualsevol cas, aquests esdeveniments teòrics es produïen lluny del lloc on l'observació astronòmica estava a punt de fer un salt extraordinari en el coneixement de l'Univers. Gràcies als diners d'alguns filantrops, enriquits pel desenvolupament econòmic produït per l'expansió americana cap al oest, van construir a Califòrnia els telescopis més grans con-



guts fins aleshores, i també tenien prou diners per contractar els millors astrònoms del moment. Aquí és on entren en la història dos d'aquests astrònoms, Harlow Shapley i Edwin Hubble. Shapley (1885-1972) és un cas molt interessant en la història de la visió de l'Univers. D'una banda va contribuir a un nou salt copernicà en treure el sistema solar del centre de la galàxia; a aquests efectes, va utilitzar les estrelles Cefeides com a indicador de distància per demostrar que el Sol estava a uns 26.000 anys llum del centre. Però, en canvi, va errar en les conclusions sobre la naturalesa de les nebuloses: Shapley va defensar la idea que aquests eren objectes de la nostra galàxia.

### **Candeles patró: les supernoves de tipus I**

Una candela patró és una font de llum de la qual coneixem la lluminositat intrínseca: la relació entre aquesta i la lluminositat observada ens permet calcular la distància a la qual es troba, atès que, d'acord amb el principi de conservació de l'energia, aquesta decau amb el quadrat de la distància. Les estrelles Cefeides mostren una variació periòdica de la seva lluminositat en escales de temps de pocs dies. El que les fa tant importants i útils com a candeles patró és que s'ha pogut establir una relació matemàtica precisa entre aquest període i la lluminositat absoluta (intrínseca), la qual cosa ens permet inferir aquesta darrera mesurant el període de variabilitat. El fenomen de les variables Cefeides correspon a la variabilitat en lluminositat i grandària d'estrelles supergegants (de 5 a 20 vegades la massa del Sol). S'anomenen així perquè la primera d'aquest tipus que es va descobrir va ser una estrella de la constel·lació de Cefeü. Amb l'observació del període de les Cefeides podem arribar a distàncies de l'ordre dels 60 milions d'anys llum (suficient per a la nostra galàxia i les galàxies més properes).

Mentre que Albert Einstein va establir el començament de la cosmologia científica, va ser Edwin Hubble (1889-1953) qui li va donar carta de naturalesa observacional. Durant els anys vint del segle passat va fer una sèrie d'observacions que van canviar radicalment la visió de l'Univers. Gràcies al seu descobriment d'estrelles Cefeides en algunes nebuloses, va poder concretar la seva distància i, com a conseqüència, determinar que aquestes nebuloses eren objectes externs a la nostra galàxia i, per tant, galàxies en elles

mateixes. Només amb això ja s'hagués fet un nom en la història de la cosmologia, ja que va contribuir a dibuixar un Univers molt diferent al que s'havia dibuixat fins aleshores. Però encara va fer més.

Des de la segona dècada del segle passat, l'astrònom nord-americà Vesto Melvin Slipher (1875-1969) havia anat acumulant observacions espectrals de nebuloses en les quals semblava produir-se un desplaçament sistemàtic cap al vermell en les ratlles del seu espectre: això indicava que aquests objectes s'estaven allunyant. En establir-se la naturalesa extragalàctica d'aquestes nebuloses, aquesta observació adoptava una importància particular. Gràcies a les seves observacions i al càlcul de les distàncies utilitzant les variables Cefeides, Hubble va poder establir una relació entre la velocitat d'allunyament d'aquestes galàxies i la seva distància. I en un article publicat l'any 1929, va demostrar que aquesta relació era lineal

$$\mathbf{V = H D}$$

és a dir, que la velocitat d'allunyament de les galàxies ( $V$ ) és proporcional a la distància  $D$  ( $H$  és una constant anomenada de Hubble en honor al seu descobridor). Aquesta relació, que ha estat confirmada des d'aleshores, posa en evidència que l'Univers, el component fonamental del qual són les galàxies, està en expansió. Amb aquesta frase es pot resumir la gran contribució de Hubble.

### **Què és una galàxia**

Les galàxies són conglomerats de milions (les més grans tenen centenars de milions) d'estrelles que són els constituents bàsics de l'Univers observable. Es calcula que n'hi ha diversos centenars de milers de milions. La seva grandària varia entre milers i centenars de milers d'anys llum. D'aquests immensos sistemes, només quatre són observables a ull nu. El primer, i més gran, és la nostra pròpia galàxia: el magnífic espectacle que ofereix en una nit fosca la banda lluminosa que creua la volta celest i que gràficament va ser anomenada Via Làctia pels romans. Avui sabem que és la nostra galàxia vista des de dintre, un immens sistema format per uns quants centenars de milers de milions d'estrelles que adopta una forma de disc amb estructura espiral amb un diàmetre d'uns 100.000 anys llum i un gruix d'uns 1.000 anys llum.

Per poder identificar els altres tres sistemes, es va haver d'esperar als anys vint del segle passat, quan es van poder utilitzar els millor telescopis del moment. Mentre que l'absoluta majoria dels punts lluminosos que veiem a ull nu de nit són estrelles, n'hi ha tres que no ho són. A l'hemisferi nord, a la constel·lació d'Andròmeda, hi ha una petita estrella molt dèbil que en realitat és una immensa galàxia situada a uns 2,5 milions d'anys llum i amb una grandària relativament semblant a la nostra. Per la seva banda, a l'hemisferi sud hi ha dues nebulositats perfectament visibles a ull nu conegudes com a Núvols de Magallanes, que resulten ser dues galàxies més petites que la nostra situades a distàncies relativament curtes.

### **I va fer bang!**

Així doncs, l'expansió no solament es podia detectar en els models teòrics sinó que era una realitat

observacional inqüestionable. I aquí entra l'actor que combina totes les peces del trencaclosques amb una idea seminal que donaria origen al model cosmològic actualment acceptat. Es tracta del físic i astrònom belga, a més de capellà catòlic, Georges Lemaître (1894-1966). L'any 1931 va publicar a *Nature* un article on plantejava la seva "hipòtesi de l'àtom primordial", segons la qual l'expansió de l'Univers hauria començat a partir d'una singularitat inicial, una gran concentració de matèria que en explotar hauria produït l'expansió posterior. En les seves xerrades públiques sobre el seu model, Lemaître acostumava a utilitzar la imatge d'un "ou còsmic que explota en el moment de la creació". Això va facilitar el nom que posteriorment li donaria a aquest model un dels seus principals opositors, Fred Hoyle, que va anomenar-lo Big Bang, amb un to no tan despectiu com irònic.

La idea de Lemaître permetia encaixar tant les dades observacionals, l'expansió, com les teòriques, la relativitat general. Però com a hipòtesi científica li mancava capacitat predictiva. De fet, fins i tot les primeres estimacions sobre la possible edat de l'Univers extretes de les dades obtingudes per Hubble, donaven un valor molt per sota de l'edat de les roques més antigues de la Terra, amb la qual cosa semblava que el model no s'aguantava gaire: no va ser fins als anys cinquanta del segle passat que el refinament d'aquestes estimacions va fer desaparèixer el problema.

En qualsevol cas, la possibilitat de fer càlculs sobre "l'àtom primordial" quedava mancada d'un coneixement profund de l'estructura del nucli atòmic, atès que a l'inici la matèria hauria d'haver estat concentrada amb unes densitats que només coneixem en el nucli atòmic. Però aquest coneixement estava a punt de produir-se durant els anys trenta amb el desenvolupament de la física nuclear: l'any 1932 es descobria el neutró i començava l'estudi del nucli i de les reaccions nuclears.

I és aquí on apareix el pare real de la teoria del Big Bang. George Gamow (1904-1968), un físic ucraïnès, havia estat alumne d'Alexander Friedman a Leningrad durant un temps. Al final dels anys vint va estudiar amb Bohr a Copenhaguen, on va conèixer tots els grans protagonistes de la revolució quàntica. L'any 1933 es va exiliar als Estats Units, on va començar a treballar en física nuclear. L'any 1948 va publicar, juntament amb els seus estudiants Ralph Alpher (nascut el 1921) i Robert Herman (1914-1997), uns articles en els quals calculaven les reaccions nuclears que es produïrien en un model com el de Lemaître. Una de les prediccions d'aquest model era que les proporcions dels elements químics més elementals (hidrogen i heli) s'ajustaven amb una aproximació notable a les proporcions observades en l'Univers. L'altra predicció, que a la llarga seria decisiva per establir el model com a nou paradigma, era que l'Univers havia de conservar

una temperatura residual producte d'aquest fenomen explosiu inicial. La veritat és que, en el seu moment, aquests articles van passar sense pena ni glòria, i com veurem, els científics que van detectar aquesta temperatura residual, ho van fer sense buscar-la.

El mateix any en què Gamow publicava els seus resultats, a Cambridge (Anglaterra) es publicava una altra teoria sobre com podria explicar-se l'expansió que a aquestes alçades tothom considerava un fet evident. Aquesta teoria va rebre el nom de teoria de l'estat estacionari, segons la qual l'Univers no havia tingut un principi, com en el Big Bang: era doncs infinitament vell i havia tingut sempre el mateix aspecte, encara que estava expandint-se. Per fer compatible ambdues coses, cal que es creï matèria constantment per omplir l'espai que va quedant buit entre les galàxies.

La proporció de matèria que cal crear per contrarestar l'expansió és tant petita (aproximadament un àtom d'hidrogen per any i per metre cúbic; molt menor que el millor dels buits que es pot crear en un laboratori) que fa molt difícil la seva detecció. La teoria va ser obra de Fred Hoyle (1915-2001), Hermann Bondi (1919-2005) i Thomas Gold (1920-2004), amb aportacions posteriors de l'astrofísic hindú Jayant Narlikar (nascut el 1938).

La controvèrsia entre els dos models va contribuir de manera notable a la transformació de la cos-

mologia científica que, de ser una disciplina fonamentalment matemàtica, va passar a ser una branca de la física, en la qual la confrontació dels models teòrics amb les observacions tindria un paper fonamental, ja que les dues teories alternatives podien, en principi, ser validades per observacions astronòmiques. Certament, a finals dels anys quaranta, les prediccions d'aquests models semblaven difícilment contrastables. Però una nova branca observacional de l'astronomia, la radioastronomia, que estava desenvolupant-se en aquells anys (en gran mesura a partir de l'experiència en el radar durant la Segona Guerra Mundial), va tenir un paper fonamental.

Les primeres evidències observacionals en contra de la teoria de l'estat estacionari van provenir precisament de radioastrònoms britànics. Observant fonts llunyanes d'ones de ràdio, i per tant l'Univers primitiu, van posar en evidència que la seva distribució era diferent que les de les més properes, i per tant d'aquí inferien que hi havia una evolució en l'Univers: això concordava molt millor amb el Big Bang que amb l'estat estacionari. El debat va ser dur, des de tots els punts de vista, durant anys. Però el cop de gràcia, a favor del Big Bang, el va fer també la radioastronomia, aquest cop a l'altre costat de l'Atlàntic.



## El gran descobriment

El descobriment que va marcar un punt d'inflexió en la cosmologia és, per moltes raons, un dels moments més interessants de la història de l'astronomia. En primer lloc és un dels exemples clàssics de serendipitat: trobar alguna cosa inesperadament quan se n'està buscant una altra. A més és un dels primers grans descobriments fets en astronomia en longituds d'ona no visibles; de fet el fenomen només pot ésser observat en ones de ràdio. Si el model del Big Bang és correcte, constitueix la relíquia més antiga de l'Univers, atès que correspon a un moment (al voltant d'uns 300 mil anys després del Big Bang) en què la matèria i la radiació es van desacoblar per primer cop. I, *last but not least*, ja ha donat dos Premis Nobel de Física, els anys 1978 i 2006.

La realitat és que la predicció de Gamow i els seus estudiants, segons la qual si es va produir una gran explosió inicial, hi hauria hagut d'haver una temperatura romanent, va passar desapercibuda durant més d'una dècada. Curiosament, els únics astrònoms que van fer cas a aquestes prediccions, estaven començant a buscar-la experimentalment a Princeton, a unes desenes de quilòmetres d'on es va fer el descobriment. Sigui com sigui, el cas és que l'honor ha quedat per a Arno Penzias i Robert Wilson, dos físics que l'any 1964 estaven treballant en una nova antena de comunicaci-

ons per als Laboratoris Bell de Nova Jersey. Després de molt temps identificant les diferents fons de radiació que podien afectar les comunicacions (turmentes, motors elèctrics, el Sol, la galàxia), els restava una font de radiació d'origen no identificat, que no depenia de l'orientació de l'antena i que era equivalent a una temperatura d'uns tres graus. Sense saber el significat del que havien trobat van comentar el fet a un col·lega que sí que coneixia la predicció de Gamow, i aquest els va posar en contacte amb el grup de Princeton, que sabia el que buscava. Finalment van decidir publicar en paral·lel dos articles, que van aparèixer l'any 1965, en els quals es comunicava al món el descobriment. L'any 1978, Penzias i Wilson van rebre el Premi Nobel de Física.

Les conseqüències per al debat entre el Big Bang i l'estat estacionari van ser immediates. Un model que podia explicar l'expansió, que podia explicar l'abundància dels elements més importants de l'Univers i que, a més, feia una predicció que acabava observant-se era un excel·lent candidat a nou model. Les poques esperances dels escassos partidaris de l'estat estacionari es van esfumar: la seva teoria podia explicar l'expansió i, fent mans i mànigues, l'abundància d'elements, però no havia previst en absolut la radiació de fons. De poc va servir que Hoyle i Narlikar adduïssin que hi havia explicacions alternatives per a la radiació de fons. Pocs han estat des

d'aleshores els estudiants que han volgut arriscar les seves carreres apostant per un altre model que no fos el Big Bang: després de 1965 les alternatives es van anar quedant sense públic.

## **LA TEORIA DEL BIG BANG**

Com a tota bona teoria científica, el model del Big Bang es va construir a partir d'hipòtesis que es generen per explicar observacions o experiments i que a la vegada generen prediccions que s'han de contrastar per mitjà de l'observació. No va ser un procés lineal, i la idea primitiva d'una explosió inicial amb una expansió posterior en la qual es van anar formant les estructures que avui coneixem no tenia prou consistència com per fer front al nombre creixent de dades observacionals que anava proporcionant l'astronomia moderna. El que avui anomenem Big Bang és un model més sofisticat i també sorprenent, en el qual la teoria i l'observació s'entrellacen.

### **Com explicar tres problemes**

A partir de la dècada dels setanta del segle passat, el model del Big Bang es va convertir en el paradigma en el marc del qual treballen els cosmòlegs. En els quaranta anys posteriors a la seva consagració, el model ha estat sotmès a un cúmul de noves dades observacionals que afluïxen dels nombrosos telescopis operatius. La primera gran "operació de ci-

rurgia" que va haver de patir el model per adaptar-se a les noves observacions porta el nom d'inflació i va ser introduïda l'any 1981 pel físic nord-americà Alan Guth (nascut el 1947). Durant els anys 70, un creixent nombre de cosmòlegs es va adonar que un model senzill com el Big Bang necessitava unes condicions inicials molts rebuscades (i per tant improbables) per explicar tres problemes: el problema de l'horitzó, el problema de la planor de l'Univers i el problema dels monopols.

El problema de l'horitzó és senzill de formular. En el model del Big Bang hi ha regions de l'Univers que no han estat mai en contacte entre si; en canvi, quan observem en diferents direccions veiem un Univers amb les mateixes propietats. ¿Com és possible que regions que no han estat en contacte "es posin d'acord" per tenir les mateixes condicions o condicions semblants?

El problema de la planor és una mica més complex. S'observa que la densitat mitjana de l'Univers és molt propera a la densitat que hauria de tenir si fos perfectament pla (recordem que en la teoria de la relativitat general la massa-energia determina la geometria): és molta casualitat, atès que es pot demostrar que en un Univers en expansió la densitat s'hauria d'allunyar d'aquest valor, a no ser que inicialment fos exactament igual a aquesta densitat crítica.

El tercer problema és encara més sofisticat i prové dels coneixements desenvolupats per la teoria quàntica al llarg del segle XX: la idea fonamental és que si aquesta teoria és correcta en l'Univers primitiu, a altíssimes densitats i temperatures, s'haurien d'haver produït un nombre elevat de partícules anomenades monopols que, simplement, no s'observen.

Guth va poder solucionar els tres problemes d'una sola tacada. Si suposéssim que en els seus primers instants l'Univers hagués estat sotmès a un petit interval d'expansió molt accelerada (la inflació), tot encaixaria. En realitat, el "truc" és que tot l'Univers observable va estar en contacte en un moment determinat (la qual cosa soluciona el problema de l'horitzó); una conseqüència de la inflació és que l'Univers té una densitat crítica (la qual cosa soluciona el problema de la planor), i a més en el procés inflacionari els monopols que poden haver-se format es destrueixen. L'"operació" de Guth va arreglar els tres problemes de cop i va ser ben rebuda per la comunitat cosmològica. A més, va marcar el maridatge definitiu entre l'estudi del microcosmos i del macrocosmos, dues disciplines que havien conviscut divorciades des de Aristòtil: des d'aleshores la cosmologia és un terreny d'interacció natural entre la física de partícules i l'astronomia.

Val a dir que, malgrat que es va introduir la idea que l'Univers va experimentar una època inflacionària

(que va durar un interval de temps minúscul) per tal de solucionar els problemes observacionals que presentava el senzill model d'explosió inicial i expansió posterior, la teoria també té una justificació física. Sabem que la matèria, en passar entre els seus diferents estats (sòlid, líquid, gas), experimenta el que es coneix com a transició de fase: mentre que els canvis en les diferents variables físiques (temperatura, pressió, etc.) són continus al llarg de l'evolució dins un mateix estat, en produir-se el canvi d'estat hi ha propietats físiques que experimenten canvis bruscs.

El mecanisme de la inflació còsmica correspondria a una transició de fase, encara que no de la matèria tal com la coneixem en l'actualitat sinó de la sopa quàntica que constituïa l'Univers després de l'instant inicial: al final d'aquest canvi de fase l'Univers passa a un nou estat que és el que coneixem actualment. La idea inicial de Guth va ser refinada posteriorment pels físics nord-americans Andreas Albrecht i Paul Steinhardt i pel rus Andrei Linde.

Així doncs, el model, a més de solucionar els problemes esmentats, és capaç de fer prediccions observables sobre com seran les fluctuacions que haurien donat origen, per col·lapse gravitatori posterior, a les estructures que observem actualment i que haurien deixat la seva empremta en la radiació de fons. En aquest sentit, el model inflacionari ha anat superant tots els tests observacionals que s'han dut a terme fins

ara i forma una part sòlida del paradigma cosmològic acceptat.

### **La massa fosca**

Un preu significatiu que s'ha pagar per "arreglar" els problemes del Big Bang amb la introducció de la inflació, és que en el nou Big Bang inflacionari la densitat de massa-energia de l'Univers ha de ser exactament igual a una quantitat perfectament calculable en la relativitat general, la densitat crítica. Així doncs tenim una primera predicció del model que s'enfrontava a alguns problemes.

Quan es va plantejar la inflació, la matèria observada en l'Univers estava lluny (en un factor proper a 100) de poder donar compte de tota la massa necessària per obtenir la densitat crítica. Però val a dir que això no semblava preocupar la majoria d'astrònoms, perquè des de feia molts anys se sabia que hi havia una gran quantitat de matèria que no es podia observar però que hi havia de ser per mantenir lligades les grans estructures galàctiques.

Ja en els anys trenta del segle passat, l'astrònom nord-americà d'origen suís Fritz Zwicky (1898-1974) havia posat en evidència que, en alguns cúmuls, les galàxies anaven massa de pressa perquè el cúmulo fos estable, si només teníem en compte la massa observada en aquest. Tant si és perquè Zwicky era un personatge una mica excèntric com perquè ningú no va



voler argumentar en contra ni pensar en les implicacions, el fet és que no se li va prestar massa atenció i no va ser fins als anys setanta que algú va recordar que "Zwicky ja ho havia dit". Sigui com sigui, el problema de la "massa fosca" havia estat plantejat abans que els cosmòlegs en fessin esment.

A més, aquest efecte també havia estat posat en evidència per Vera Rubin (nascuda el 1928), una astrònoma encantadora de la que ningú podia dir que tenia el mal caràcter de Zwicky. Durant els anys setanta, Rubin va anar acumulant evidències del fet que les galàxies espirals tenien una rotació massa ràpida per ser estables gravitatòriament, a no ser que continuessin més massa de la que observàvem. En el mateix problema que havia plantejat Zwicky però ara en més casos i en un entorn més conegut com eren les galàxies espirals (com la nostra). També van ser majoria els que van mirar cap a un altre costat. El problema de la massa fosca començava a ser inquietant.

Curiosament, van ser els teòrics (i no els observadors) els que van fer vessar el got. James Peebles (nascut el 1935) i Jeremiah Ostriker (nascut el 1937), dos dels cosmòlegs més prestigiosos i encara en actiu actualment, van publicar l'any 1973 un article en el qual demostraven matemàticament que els discs de les galàxies espirals no podien ser estables gravitatòriament, a no ser que hi hagués un halo esfèric de matè-

ria que els envoltés i contribuís a aquesta estabilitat. La massa fosca era necessària.

Així doncs, quan la inflació que va apuntalar al Big Bang va necessitar més massa de la que s'observava, tothom va estar disposat a escoltar i a acceptar que la diferència entre la densitat de matèria observada i la densitat crítica (predicció de la inflació) era deguda a la massa fosca. De manera que la majoria dels cosmòlegs accepten com un fet que la densitat de l'Univers és la crítica i que hi ha d'haver massa fosca. La naturalesa d'aquesta massa fosca és, però, desconeguda.

En les dues darreres dècades són moltes les cerques que s'han fet, tant en observacions astronòmiques com en laboratoris terrestres, per trobar candidats a aquesta massa fosca. La situació actual és que és pràcticament segur que aquesta massa fosca no correspon a matèria bariònica, i per tant ha de ser matèria "exòtica" d'algun tipus encara no descobert (els barions, del grec "pesat", són les partícules que formen la matèria atòmica que coneixem).

Segons les estimacions actuals la quantitat d'aquesta matèria exòtica representa el 22 per cent de l'Univers, mentre que la matèria bariònica és només del quatre per cent. El mateix model del Big Bang posa un límit molt estricte a la quantitat de matèria bariònica que hi pot haver en l'Univers i que no pot superar el quatre per cent de la matèria total. Altrament

no es podria explicar la producció dels elements químics originals, en particular d'un isòtop de l'hidrogen anomenat deuteri. La quantitat observada de deuteri és una de les limitacions observacionals en qualsevol joc de paràmetres del Big Bang.

Els cosmòlegs distingeixen entre tres tipus de matèria fosca exòtica, segons la velocitat de les seves partícules. Si aquesta és ultrarelativista (velocitats properes a la de la llum) l'anomenen calenta (HDM, per Hot Dark Matter); si és elevada, encara que clarament per sota de la velocitat de la llum, l'anomenen tèbia (WDM, per Warm Dark Matter); i si les velocitats són baixes l'anomenen freda (CDM per Cold Dark Matter). Hi ha diferents candidats per a cada una de les categories, algunes ja observades com el neutrino (que seria HDM) i altres com el fotino, el gravitino (WDM) o el neutralino (CDM), que no s'han observat encara però que son previstes per algunes teories de partícules. Les observacions i els resultats de les simulacions en supercomputadors semblen decantar-se cap a la CDM, però no hi ha res tancat.

Hem dit que el quatre per cent del contingut de l'Univers és matèria "normal", i el 22 per cent és matèria "exòtica". ¿I l'altre 74 per cent? Aquesta és una de les altres sorpreses dels darrers anys.

## L'energia fosca

La quantitat de matèria de l'Univers determina la seva geometria. Per tant, estudiant-ne una es pot tenir informació sobre l'altra. Per aquesta raó, durant la segona part dels anys noranta dos equips internacionals d'astrònoms van endegar sengles programes per mesurar les majors distàncies obtingudes fins al moment a través de les supernoves de tipus I.

El seu objectiu era poder mesurar el nivell de desacceleració de l'expansió de l'Univers al llarg de la seva història: l'expansió s'hauria d'anar desaccelerant per efecte de l'autogravitació de tota la matèria de l'Univers. Per dur-ho a terme, cal arribar a distàncies molt llunyanes (i, per tant, temps passats en la història de l'Univers). El 1998 es van publicar els resultats i la sorpresa va ser majúscula: no solament no observaven desacceleració, sinó que l'Univers s'estava accelerant! Vet aquí que reapareix la constant cosmològica que Einstein havia qualificat de "pífia".

### **Candeles patró: les supernoves de Tipus I**

Una supernova és una explosió que marca el final de la vida d'una estrella. Segons el fenomen que dóna origen a aquesta explosió, les supernoves es classifiquen en dos tipus, coneguts com a I i II i diferenciables a partir de l'espectre de la llum. En les supernoves de tipus I l'estrella original és una nana blanca que té una companya gegant vermella de la qual va acretant material fins que supera un límit en el qual la força de la gravetat és fa més forta que totes les altres i l'estrella col·lapsa literalment i desferma unes reaccions nuclears que provoquen deflagració que destrueix l'estrella i produeix tanta energia com la d'una galàxia sencera en qüestió de dies o setmanes. En les supernoves de tipus II el procés es produeix a partir d'una estrella amb molta més massa que el Sol, en la qual és la seva gravetat la que venç totes les altres forces i acaba produint una deflagració d'una magnitud similar a la d'una supernova de tipus I. La importància de les supernoves de tipus I, com a candeles patró, rau en que en un subtipus de les mateixes (les anomenades Ia) s'ha pogut determinar que hi ha una relació matemàtica precisa entre el temps del seu decaïment i la seva lluminositat absoluta. El gran avantatge de les supernoves és la seva gran lluminositat, la qual cosa ens permet observar-les fins a distàncies molt més grans que les Cefeides. El gran desavantatge és que mentre que les Cefeides són objectes coneguts i estables en escales humanes, les supernoves són imprevisibles en aquestes escales i calen programes observacionals molt sofisticats per detectar-les i fer-ne el seguiment.

En aquests moments, nou anys després d'aquesta sorprenent troballa, ningú no sap què és aquesta "energia fosca" (així se l'ha anomenat) que té l'efecte d'una força repulsiva. Se sap quanta n'hi ha d'haver per tal que el model del Big Bang sigui coherent: el

74 per cent del contingut energètic total de l'Univers. És a dir, gràcies a la inflació, el model del Big Bang té bona salut, ha estat d'acord amb les dades dins dels límits observacionals i ha anat superant tota la munió de dades d'interès cosmològic que proporcionen els nombrosos i sofisticats instruments disponibles en l'actualitat. Tot això al preu de no saber en què consisteix el 96 per cent de l'Univers!

### **Sabem algunes coses**

La veritat, però, és que sabem algunes coses sobre aquesta energia fosca. Sabem que ha de tenir una distribució força homogènia en tot l'Univers, que no és massa densa i que només interacciona a través de la gravetat. Les últimes dues propietats fan que sigui molt difícil detectar-la en experiments de laboratori. Qual-sevol altra consideració és, a hores d'ara, especulativa. De moment, però, s'han plantejat dues explicacions alternatives.

Una seria que l'energia fosca és perfectament equivalent a la constant cosmològica introduïda, recordem-ho, de forma *ad hoc* per Einstein en les seves equacions per descriure l'Univers. Això equival a dir que és una energia associada a la mateixa existència de l'espai; per això, de vegades, es parla també d'energia del buit. Aquesta energia del buit exerceix una pressió negativa i per aquesta raó provoca una força repulsiva que seria la causant de l'acceleració en l'expansió.

El motiu pel qual la pressió és negativa és fàcil d'entendre amb una analogia termodinàmica d'un gas clàssic. Si tenim gas en un recipient ocupant un volum, aquest gas exerceix una pressió positiva que tendeix a fer augmentar el volum refredant el gas, per la qual cosa aquest perd energia. Però si el que tenim és el buit i aquest té energia, un augment del volum farà augmentar l'energia continguda; si un augment de volum suposa un increment de la energia interna, això vol dir que la pressió ha de ser negativa. Val a dir que el concepte d'energia del buit no és estrany a la teoria quàntica: aquesta preveu l'existència de fluctuacions de matèria-energia en el buit. El problema és que l'energia del buit associat a aquestes fluctuacions hauria de ser d'un ordre de magnitud extraordinàriament més gran que l'observat en l'energia fosca: ni més ni menys que un 1 seguit de 120 zeros vegades més gran!

Algunes teories permeten establir que la constant cosmològica predita per la teoria quàntica sigui exactament zero, cancel·lant de manera exacta l'energia del buit associada a les fluctuacions quàntiques, però a data d'avui ningú sap com explicar que no sigui exactament zero sinó 120 ordres de magnitud menor que les prediccions de la teoria (molts físics consideren aquest desacord com el més escandalós que s'ha produït mai entre teoria i observació o experiment). Val a dir, en qualsevol cas, que si l'energia fosca és

deguda a una constant cosmològica, la seva equació d'estat (relació entre la pressió i la densitat) seria constant i homogènia en tot l'Univers.

Si la constant cosmològica és una explicació senzilla però difícil d'acomodar amb el model estàndard de la física de partícules, l'altra alternativa que es planteja és l'anomenada quinta essència (en record de l'èter aristotèlic). La quinta essència és un camp d'energia que es pot descriure per una equació d'estat amb una pressió negativa (i per tant una força repulsiva), però en aquest cas l'equació d'estat varia en l'espai i en el temps.

Encara són poques les dades experimentals que es tenen a l'abast per delimitar l'equació d'estat de l'energia fosca però els primers indicis apunten a la constant cosmològica, i per tant a la reivindicació de la "pífia" d'Einstein. Com que aquesta constant cosmològica s'acostuma a designar pel símbol de la lletra grega majúscula lambda, el model de Big Bang inflacionari que compta amb un major predicament avui dia és el *lambda*-CDM (és a dir amb matèria fosca freda i constant cosmològica) també conegut amb el nom de model concordant.



## **LES BASES OBSERVACIONALS**

El descobriment de la radiació de fons de microones va ser l'observació que va consagrar el Big Bang com a model de la cosmologia científica. L'estudi d'aquesta radiació continua sent en gran mesura la peça clau per anar refinant i consolidant el model, però les tècniques astronòmiques modernes han anat aportant altres observacions, que constitueixen peces bàsics en els tests a què està sotmès el Big Bang.

### **La radiació de fons**

Després de les primeres observacions amb antenes que operen a freqüències determinades, la constatació que l'espectre de la radiació era exactament el d'un cos negre i, per tant, encaixava amb les prediccions del Big Bang, va haver d'esperar el satèl·lit COBE (Cosmic Background Explorer, 1989-1996), que va demostrar que l'ajust amb un cos negre a una temperatura de 2,725 graus era perfecte.

El segon gran resultat del COBE va ser que aquesta radiació presentava variacions al llarg de la volta celest, de l'ordre d'una part entre cent mil, que corresponien a les fluctuacions en el moment de la re-

combinació. Aquestes petites inhomogeneïtats donarien origen posteriorment a les estructures que observem actualment (galàxies i cúmuls de galàxies). L'èxit va ser tant aclaparador que va proporcionar als seus investigadors el Premi Nobel de Física de l'any 2006.

Un segon satèl·lit més precís, WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2001) va confirmar les troballes del COBE i, a més, els seus resultats corroboren les prediccions dels models inflacionaris, tant pel que fa a les fluctuacions inicials, com a les estimacions d'una edat de l'Univers de 13.700 milions d'anys (amb un error possible de més o menys 200 milions d'anys) i la composició percentual dels tres grans components de matèria ordinària, fosca i energia fosca.

El 2008 es llançarà un tercer satèl·lit, anomenat Planck, que s'espera que porti noves claus per posar a prova els models més precisos. Quaranta anys després del seu descobriment, la radiació de fons continua sent el banc de proves clau de la cosmologia moderna.

### **L'estructura de l'Univers a gran escala**

Les galàxies s'agrupen formant grups i cúmuls que van des d'uns pocs membres a uns quants milers: són estructures d'una grandària entre milions i desenes de milions any llum, que constitueixen els objectes gravitatoriament lligats més grans de l'Univers.

Aquests cúmuls es presenten agrupats formant supercúmuls, que determinen una estructura filamentosa de l'Univers observable a gran escala, amb grans arestes i parets de centenars de milions d'anys llum de grandària, buits immensos d'aquesta mateixa grandària on gairebé no s'hi troben galàxies i vèrtexs en els quals trobem els grans cúmuls amb milers de galàxies.

Aquesta estructura és una relíquia del procés de formació de les galàxies a partir de les primeres inhomogeneïtats i per tant el seu estudi té un elevat valor cosmològic com a dada observacional de primer nivell per contrastar tant la teoria com les simulacions de l'evolució de l'Univers que es realitzen en supercomputadors. Els *surveys* que actualment estan en marxa (com ara l'Sloan Sky Digital Survey) permeten conèixer l'estructura detallada en tres dimensions d'una porció significativa de l'Univers observable a partir de la determinació del *redshift*, i per tant de la distribució de més d'un milió de galàxies.

### **Les lents gravitatòries**

Des de la relativitat general d'Einstein sabem que la gravetat corba l'espai-temps i per tant que la llum d'objectes llunyans pots ser desviada en el seu camí per grans quantitats de matèria; és el fenomen conegut com a lent gravitatòria, predit pel mateix Einstein, però que no va ser observat en la pràctica fins a finals

dels anys setanta del segle passat. Actualment és una de les eines fonamentals per detectar grans quantitats de matèria fosca. Observant els objectes més massius de l'Univers (els cúmuls rics amb milers de galàxies) es pot veure la distorsió de la llum de les galàxies de fons que passa a través del cúmul formant imatges distorsionades d'aquestes galàxies de fons. Això ens permet no solament estudiar-les sinó deduir la massa fosca continguda en els cúmuls i la seva distribució.

### **Les supernoves**

Ja hem vist la importància que té l'observació de les supernoves com a veritables fars que ens informen sobre les distàncies entre les galàxies i, com a conseqüència, d'un resultat tan inesperat com l'acceleració en l'expansió de l'Univers. L'observació sistemàtica d'un gran nombre de supernoves hauria de permetre estudiar l'evolució de la densitat de l'Univers i aportar claus sobre la naturalesa de l'energia fosca. Però per això cal un projecte com el futur satèl·lit SNAP (SuperNova Acceleration Probe) que podrà observar milers de supernoves i que a hores d'ara encara està en fase de projecte.

Actualment l'observació de supernoves en galàxies llunyanes, pel seu caràcter impredecible, requereix una complicada coordinació logística que en la pràctica limita les observacions a una dotzenes l'any.

## El bosc Lyman-Alpha

L'emissió que rebem dels quàsars, que són "objectes d'interès cosmològic", passa través del mitjà intergalàctic i, per tant, dels núvols d'hidrogen neutre que hi abunden. En l'espectre d'aquesta radiació hi podem trobar les ratlles d'absorció per hidrogen. Com que aquests núvols es troben a diferents distàncies (i *redshifts*) aquestes ratlles d'absorció formen un "bosc" en l'espectre de la radiació dels quàsars.

La posició i la grandària d'aquestes ratlles ens proporcionen informació sobre la distribució de matèria a gran escala de l'Univers i la seva evolució. Els quàsars ens proporcionen així una eina cosmològica de gran valor per estudiar l'evolució de l'Univers i la distribució de matèria.

## Noves observacions

Els nous instruments, les noves tècniques observacionals i la imaginació dels astrònoms proporciona contínuament noves observacions i tests als quals se sotmet el Big Bang. Algunes de les més recents són l'observació de l'hidrogen neutre primordial (anterior a la formació d'estrelles i galàxies, en l'anomenada Edat Fosca) i els experiments proposats amb ones gravitatòries. Aquestes tècniques i observacions estan avui encara en el límit del que es pot assolir però sens

dubte aniran obrint noves finestres del coneixement en un futur proper.

### **Acceleradors de partícules**

Segurament una de les partides més interessants i significatives per al futur del Big Bang i de la física en general es jugarà en el món del microcosmos. Les mirades de tota la comunitat científica estan posades en el nou *Large Hadron Collider* (LHC), que entrarà en servei l'any 2008 a Ginebra.

A més de posar a prova les parts més especulatives del model estàndard, són molts els físics que pensen que el LHC pot aportar claus definitives per al coneixement de la matèria fosca i tal vegada també de l'energia fosca. Qualsevol avenç en aquesta direcció, com també en la unificació de la gravetat amb les altres forces, pot proporcionar informació molt valuosa per al coneixement sobre l'origen i l'evolució de l'Univers.

## UNA HISTÒRIA DE L'UNIVERS

Com a model científic, el Big Bang té capacitat predictiva i per tant de les observacions i dels models teòrics podem extrapolar el passat i el futur per delinear com ha estat la història de l'Univers des de l'instant inicial, saber què podem observar avui i predir quin serà el seu destí.

### **Mirar enrere cap endavant**

El coneixement actual de la física de les partícules i les seves interaccions permet esbrinar la història de l'Univers des d'una fracció de temps extraordinàriament minúscula després del Big Bang fins a l'època actual.

Durant el segle passat, la física va anar acumulant evidències que totes les interaccions (forces) de la natura es redueixen a quatre tipus. Dues d'aquestes interaccions les experimentem en la vida diària i ja eren conegudes al segle XIX, la gravitatòria i l'electromagnètica, la primera estudiada per Newton i posteriorment per Einstein en la relativitat general, i la segona producte del geni de Maxwell en conjugar

els fenòmens elèctrics i magnètics en una formulació unificada.

Les altres dues, descobertes durant el segle XX, són forces nuclears i per tant alienes a la nostra experiència diària: són la força forta, responsable de les interaccions que mantenen unit el nucli atòmic amb protons i neutrons, i la força dèbil, responsable de la desintegració radioactiva espontània. Val a dir que el procés d'unificació de les interaccions iniciat per Newton (la força que manté lligada la Terra a la Lluna és la mateixa que fa caure una poma) i continuada per Maxwell amb la força electromagnètica, va continuar al llarg del segle XX: avui sabem que la força electromagnètica i la dèbil són manifestacions d'una única interacció (anomenada electrodèbil) i el mateix model estàndard ofereix un marc d'unificació també amb la força nuclear forta. Però avui encara ens manca una formulació unificada d'aquestes tres forces amb la gravetat: les primeres, en el model estàndard, són objecte de la teoria quàntica i la darrera de la relativitat general i encara no s'ha arribat a una teoria quàntica de la gravetat.

A més de les interaccions, la física de partícules ha assolit també un marc unificat per a la matèria ordinària que forma l'Univers conegut (i que en el model del Big Bang, recordem-ho, és només el 4 per cent del contingut total de l'Univers). Segons el model estàndard hi ha bàsicament dos tipus de matèria: els quarks



i els leptons. Els primers constitueixen les partícules pesades que formen el nucli atòmic, els protons i els neutrons, mentre que els segons són els coneguts electrons, però també altres tipus de partícules més exòtiques com ara els neutrins.

El model estàndard, completat a començaments dels anys setanta del segle passat com a culminació de dècades de treballs teòrics i descobriments experimentals, forma un tot coherent però incomplet de l'estructura de la matèria coneguda i les seves interaccions. Coherent perquè és capaç d'explicar gairebé tots els processos físics i químics coneguts i ha assolit grans èxits amb prediccions que s'han confirmat en sofisticats experiments; incomplet perquè a més de la manca esmentada d'inclusió de la gravetat en l'esquema hi ha moltes altres raons teòriques i observacionals (aquestes provinents bàsicament de la cosmologia dins el model del Big Bang) que ens indiquen que el model estàndard encara no és la TOE (acrònim de *Theory of Everything*, teoria total) que cerquen els físics.

### **Tres grans períodes**

En qualsevol cas, amb el model estàndard i en el marc del Big Bang, podem anar molt enrere en els càlculs (i fins i tot especulacions) de com ha evolucionat l'Univers des de l'inici. En la pel·lícula d'una expansió continuada que va refredant la gran explosió

inicial, podríem distingir tres grans períodes que anomenarem primitiu, físic i astronòmic. Aquests noms són arbitraris però volen reflectir el nostre coneixement.

El període primitiu, que va des de l'instant inicial fins al final de la inflació, descansa gairebé exclusivament en l'àmbit de l'especulació i és més el que desconeixem que el que podem assegurar que va succeir: coneixem els grans trets però no els detalls. El segon, que arriba fins al moment en què comencen a formar-se les primeres estructures astronòmiques conegudes, es basa en la física coneguda dins del model estàndard i per tant hi ha proves teòriques i observacionals sòlides que recolzen la història que s'hi explica. El tercer, que arriba fins al present, es troba fonamentat en les observacions cada vegada més nombroses i sofisticades que ens proporcionen els instruments astronòmics actuals i en models i càlculs sòlids sobre l'evolució estel·lar i la física gravitatòria que formen part del coneixement astronòmic actual.

La física actual encara no ens permet conèixer què és el que va succeir exactament en el període primitiu, que va durar un instant de temps inimaginablement petit (una centèsima de quintilionèsima de segon, o el que és el mateix, una xifra que s'expressa en segons amb un 1 precedit per 32 zeros!). Però podem especular.

Primerament va tenir lloc l'anomenada època de Planck (només deu bilionèsimes parts del període primitiu: un 1 precedit per 43 zeros) en què les quatre forces conegudes (també la gravetat) van ser una de sola. Quan tinguem una Teoria Quàntica de la gravetat hauríem de ser capaços d'aixecar aquest darrer "vel" que ens hauria de deixar veure el moment mateix del "part" del nostre Univers (tal vegada des d'una altra dimensió?).

A continuació tindriem l'època GUT (acrònim de Grand Unified Theories), que dura fins a un 1 precedit de 35 zeros, i que comença amb la separació entre la gravetat i les altres tres forces i acaba amb la separació de la força forta de l'electrodèbil.

La tercera època d'aquest període és precisament la inflació: un període molt petit de temps (de tota manera representa pràcticament el 99,9 per cent de tot el període primitiu) en el qual l'Univers creix en grandària uns trenta ordres de magnitud. Per fer-nos una idea del que això significa, és com si en aquest ínfim interval de temps un pèsol creixes fins als extrems de la nostra galàxia. Com hem vist més amunt, aquest sensacional esdeveniment es capaç d'explicar tot el que observem a continuació.

Una vegada acabada la inflació tenim un Univers en expansió format per un plasma de quarks, leptons i gluons (les partícules que trameten la força nuclear forta) que interactuen els uns amb els altres. El

període físic, en el qual podem seguir esdeveniments coneguts en els nostres models i laboratoris, comença amb l'anomenada època electrodèbil, al final de la qual (només ha transcorregut una bilionèsima de segon des de l'inici) se separen la força electromagnètica i la dèbil i per tant les quatre forces conegudes adopten la seva configuració actual.

Segueix l'època dels quarks (fins a una milionèsima de segon des de l'inici) en la qual dominen aquestes partícules que en l'Univers actual no es troben aïllades sinó formant part de partícules com el protó i el neutró. Això és el que succeeix en l'època hadrònica (fins a 1 segon des de l'inici) en què els quarks s'agrupen amb els gluons i formen els hadrons, les partícules que experimenten la força nuclear forta; en aquesta època també es produeix un altre esdeveniment significatiu com és el desacoblament (deixen d'interactuar amb les altres) d'unes partícules molt importants en diversos fenòmens astrofísics, els neutrins. Els neutrins no experimenten cap altra interacció que la dèbil i en conseqüència són extremadament difícils de detectar. L'època que va entre 1 i 3 segons després de l'instant inicial es coneix com a època leptònica, dominada per aquest tipus de partícules.

Les dues darreres èpoques del període físic concentren molts dels esforços dels cosmòlegs actuals, atès que és on es configura la matèria i els objectes astronòmics tal com els coneixem avui dia. La prime-

ra d'aquestes èpoques és l'anomenada fotònica, ja que està dominada per aquestes partícules que trameten la força electromagnètica i va des dels 3 segons fins uns 380.000 anys després del Big Bang. Durant els primers 3 minuts d'aquesta època es produeix la nucleosíntesi primordial, és a dir, la formació dels primers nuclis atòmics tal com els coneixem avui en dia, bàsicament hidrogen (en els seus isòtops proti i deuteri), heli (isòtops 3 i 4) i una mica de liti.

Després d'aquests minuts inicials l'expansió ha refredat l'Univers fins a un punt en què ja no es pot produir més nucleosíntesi: la resta de tots els elements que formen la matèria coneguda s'haurà de formar en l'interior de les estrelles, en les explosions de supernoves o en processos puntuals de xocs de raigs còsmics en el mitjà interestel·lar. Així doncs, gairebé el 98 per cent dels nuclis que constitueixen la matèria coneguda (aquesta és l'abundància de l'hidrogen, 74 per cent, i l'heli, 24 per cent, en l'Univers) s'han format només 3 minuts després del Big Bang. Val a dir que aquests primers càlculs (per bé que no amb el refinament proporcionat pels coneixements actuals) ja van ser efectuats per Gamow, Alpher i Herman i van significar un primer èxit del primitiu model del Big Bang.

A partir d'aquest moment l'Univers està compost per una sopa de nuclis dels elements més senzills, com també de leptons i de fotons. Es comencen a for-

mar àtoms a partir d'aquest nuclis tot i que els fotons interactuen contínuament amb aquests, fent saltar els electrons que, al seu torn, tornen a formar àtoms amb altres nuclis: la matèria i la radiació es diu que estan "acoblades". El desacoblament, també conegut com a recombinació, es produeix al final de l'època fotònica, uns 380 mil anys després del Big Bang. És un moment particularment important de la nostra història, perquè a partir d'aquell moment els fotons viatgen lliurement i formen una "instantània" de com era l'Univers en el moment de la recombinació, o dit d'una altra manera, de com eren les llavors del que posteriorment, gràcies a la gravetat, serien les primeres estrelles i/o galàxies. Aquesta instantània la podem estudiar a través de la radiació de fons de microones, la imatge més antiga a què podem accedir de la història de l'Univers.

### **L'edat fosca**

La darrera època del període físic és coneguda molt il·lustrativament com a edat fosca. Sabem que després de la recombinació s'han d'haver format les primeres estructures autogravitants, però fins que aquestes no "s'encenen" (no es produeixen les primeres reaccions nuclears en el si de les estrelles) no coneixem cap altra manera de detectar-les que l'emissió d'hidrogen neutre. Aquest és un procés físic conegut en el qual l'àtom més senzill de l'hidrogen (un protó i un electró) experimenta una transició energètica ex-

tremadament improbable (en un àtom succeeix una vegada cada 10 milions d'anys), però que per les grans quantitats d'hidrogen present en l'Univers primitiu ha de ser en principi observable.

A través d'aquestes observacions podríem arribar a saber com evolucionen les llavors inicials ("congelades" en la informació de la radiació de fons). L'edat fosca acaba al voltant dels 500 milions d'anys després del Big Bang quan s'encenen les primeres estrelles i galàxies.

El darrer període de la nostra història, el que hem anomenat astronòmic, està dominat pels objectes coneguts de la nostra experiència astronòmica: les estrelles i les galàxies. Actualment encara no tenim una teoria ben establerta de la seva formació primordial. D'una banda hi ha evidències que hi ha d'haver hagut una generació primordial d'estrelles, l'anomenada "població III". Les galàxies que observem estan formades per estrelles, gas i pols (a més, és clar, de massa fosca).

Aquestes estrelles són de dos grans tipus, les anomenades poblacions I i II: la primera està constituïda per estrelles joves formades a partir de material processat anteriorment en l'interior d'altres estrelles, mentre que la segona està formada per estrelles velles i, per tant, formades amb material primordial. Però fins i tot aquestes tenen una certa "metal·licitat" (és a dir, una certa quantitat d'elements químics elaborats

que no es va poder produir en la nucleosíntesi primordial i ha de ser el producte de l'evolució estel·lar): així doncs sembla clar que ha d'haver existit una població més antiga que encara no ha pogut ser observada directament. Segurament va ser una generació d'estrelles supermassives de pocs milions d'anys de vida que, en extingir-se en extraordinàries explosions de supernova, van enriquir l'Univers amb elements químics més elaborats que els produïts en els tres primers minuts.

Les primeres galàxies, al seu torn, haurien format per col·lapse gravitatori el que observem actualment com a quàsars (acrònim de *quasi stellar radiosources*) que es creu que són nuclis actius de galàxies joves en l'interior dels quals hi rau un forat negre de gran massa. Aquesta època en què es formen les primeres estrelles i galàxies és coneguda com la època de la reionització, perquè l'energia generada ionitza (fa que els electrons es separin del nucli) i dura uns cinc cents milions d'anys, fins aproximadament uns mil milions d'anys després del Big Bang.

A partir d'aquest moment la història de l'Univers és menys espectacular i la gravetat va fent que es formin les galàxies, que s'agrupen en grups i cúmuls, i al seu interior es formen les estrelles. Una estrella jove com el nostre Sol, per exemple, es va formar entre 8 i 9 mil milions d'anys després del Big Bang. 13.700 milions d'anys després del Big Bang nosaltres observem



tots aquests fenòmens i mirem d'encabir-los dins d'un tot coherent.

Aquest mateix model que ens permet explicar el passat, també ens permet predir el futur. Avui, si realment l'Univers es pla i l'energia fosca equival a la constant cosmològica, podem predir que el futur de l'Univers és una expansió accelerada que produirà la disgregació progressiva dels supercúmuls, dels cúmuls i de les mateixes galàxies. Però més que predir el futur o estudiar el passat, als cosmòlegs els interessa ajustar ben bé un model, la capacitat predictiva del qual s'haurà de posar a prova necessàriament en els propers anys.

### **El model concordant**

Tot i que en aquests moments, en el 2007, encara no se sap què és la massa fosca i molt menys encara l'energia fosca –és a dir, el 96 per cent de l'Univers–, a causa de la concordança del model del Big Bang inflacionari amb les observacions, la comunitat cosmològica té la confiança que aquests enigmes s'aniran resolent i que els trets bàsics del model es confirmaran. Això ha portat als més optimistes (que són majoria entre la comunitat) a parlar del model concordant, en analogia amb el model estàndard de la física de partícules.

El model concordant (o Big Bang inflacionari amb *lambda*-CDM), és el paradigma acceptat per la

comunitat cosmològica. De fet, segons alguns dels membres més actius i optimistes d'aquesta comunitat, aquesta ciència ha entrat en un estadi que anomenen cosmologia de precisió en el qual, a l'espera del descobriment final de la naturalesa de la massa i l'energia fosca, el que cal fer és refinar el model i afinar el valor de les constants.

El fet és que en aquesta darrera dècada, des del descobriment de l'acceleració de l'expansió i la necessitat d'introduir un tercer component al contingut de l'Univers (l'energia fosca), els paràmetres fonamentals del model del Big Bang han anat convergint tot i que hi ha tècniques observacionals cada vegada més sofisticades i variades.

Prenguem per exemple el que segurament és el paràmetre més important del model, la constant de Hubble  $H$ , que es mesura en unitats de velocitat per unitat de distància. Fins ben entrada la darrera dècada del segle passat els cosmòlegs no es posaven d'acord pel que fa al seu valor. Dues escoles defenien valors molt diferents: per a uns  $H$  es movia al voltant dels 50 quilòmetres per segon i per megaparsec (milions de parsecs); per a altres era més aviat de l'ordre dels 100 quilòmetres per segon i per megaparsec (això vol dir que, a causa de l'expansió de l'Univers, dues galàxies separades per un milió de parsecs, o 3,26 milions d'anys llum, se separen a 50 o 100 quilòmetres per segon).

La discrepància no era només acadèmica. Per al valor més alt, i segons els valors de la densitat de matèria coneguts en aquells moments, l'Univers resultaria ser més jove que alguna de les estrelles que s'hi observen, la qual cosa seria òbviament un greu contratemps per al model del Big Bang. Als principis de la dècada dels noranta hi havia més observadors que afavorien valors alts de  $H$ , i per tant una edat jove de l'Univers; la cosa comportava problemes per al model. El descobriment de l'acceleració i de l'energia fosca va actuar com un bàlsam. D'una banda permetia "allargar" l'edat de l'Univers; de l'altra afavoria un Univers pla com el que havia predit la inflació.

Des d'aleshores s'han completat al menys tres experiments diferents que han permès mesurar  $H$  amb una precisió que mai abans no s'havia assolida. L'anomenat Hubble Key Project va utilitzar durant vuit anys el telescopi espacial Hubble per mesurar distàncies a galàxies properes utilitzant estrelles Cefeides (com va fer l'il·lustre pioner que dona nom al telescopi, però lògicament amb una precisió extraordinàriament més gran): el resultat va ser un valor de 72 quilòmetres per segon i per megaparsec (amb un possible error de més o menys vuit).

Altres estudis han utilitzat l'anomenat efecte Zuynev-Zeldovich, que no és més que la distorsió de la radiació de fons de microones quan travessa el mitjà intergalàctic en els cúmuls i que es pot utilitzar com

un estimador de la distància fins als cúmuls: el valor obtingut per a  $H$  és de 71 (sempre en les mateixes unitats), amb un error de 5.

Finalment, el satèl·lit WMAP, que va estudiar l'estructura de les fluctuacions de la radiació de fons de microones, ha permès obtenir un valor de 70 amb un error de 3. Els valors anteriors són tots compatibles (tenint en compte els errors) però cada cop més precisos. Aquest, i altres exemples amb altres paràmetres, permeten als astrònoms parlar d'una cosmologia de precisió.

La determinació amb precisió de la constant de Hubble i el model concordant (Big Bang inflacionari amb massa fosca freda i constant cosmològica) permeten establir una edat força ajustada del nostre Univers: 13.700 milions d'anys, amb un error possible de 200 milions d'anys. Aquesta xifra encaixa amb el nostre coneixement actual sobre estrelles i galàxies, atès que deixa temps suficient perquè es formin les estrelles més antigues que es coneixen (els models d'evolució estel·lar són totalment acceptats per la comunitat astronòmica atès que estan basats en càlculs que utilitza la física nuclear).

### **Més enllà del Big Bang**

El Big Bang inflacionari, lluny de ser un model tancat, obre unes possibilitats immenses per a nous descobriments potencialment revolucionaris. D'una

banda, si el model és correcte estem a les portes de grans descobriments (sempre és difícil dir si d'aquí a uns anys o dècades): saber de què està format el 96 per cent de l'Univers, allò que ara anomenem matèria fosca i energia fosca, la naturalesa de les quals desconeixem totalment. Pel que fa a aquest punt, són molt il·lustratives les paraules del professor Per Carlson, president del Comitè que va atorgar el premi Nobel de Física l'any 2006, precisament per les observacions sobre la radiació de fons que van donar un significatiu suport al model del Big Bang inflacionari. En l'entrevista posterior a l'anunci del Premi, quan li van preguntar quan hi hauria un Premi Nobel relacionat amb la matèria i l'energia fosques va dir "*sobre la matèria fosca no saben res, sobre l'energia fosca sabem menys que res.*".

Aquests descobriments seran, doncs, històrics i sense precedents en la història de la ciència. Perquè de ben segur que també ens obriran la possibilitat d'anar més enllà del model estàndard de la física actual, començar a desvetllar com va ser el període primitiu, l'origen del nostre Univers. Especulacions ben raonables (però especulacions de moment) ens diuen que podem albirar una Teoria del tot i tal vegada també l'existència d'un Univers de més dimensions (un multivers) o altres universos. Especulacions més agosarades ens diuen que, de la mateixa manera que la humanitat ha pogut treballar fins ara amb la matèria i

l'energia que constitueix l'Univers, tal vegada aquests descobriments ens portin a comprendre (o manipular) la mateixa fàbrica de l'espai-temps.

Especulacions en una altra direcció (més aviat sociològica en aquest cas) ens adverteixen que l'estat actual del Big Bang recorda un cert *dejà vu* en la història de la ciència. Efectivament, de la mateixa manera que Lord Kelvin no podia imaginar les revolucions quàntica i relativista només uns anys abans que es produïssin, quan parlava dels "núvols" de la física a les portes del segle XIX, tal vegada la matèria fosca o l'energia fosca siguin nous núvols que ens portin a avenços ni tant sols imaginables en aquests moments.

De tota manera és més que probable que, sigui com sigui, de la mateixa manera que la física quàntica i la relativista no van invalidar sinó que van superar (i en gran mesura incloure) la física newtoniana, la cosmologia de les properes dècades no invalidarà el camí obert pel Big Bang. I en el que tothom està d'acord és en una altra de les sàvies frases de John A. Wheeler: "*Els millors descobriments encara han d'arribar*".

## Bibliografía

- **Ferguson, K.** (2000). *La medida del universo*. Barcelona: Ediciones Robinbook.
- **Freeman, K.; McNamara, G.** (2006). *In search of dark matter*. Berlin: Springer.
- **Guth, A.H.** (1997). *The inflationary universe*. Reading MA: Addison-Wesley.
- **Harrison, E.** (2003). *Cosmology the science of the universe*. Cambridge UK: Cambridge University Press.
- **Hooper, D.** (2006). *Dark cosmos: in search of our universe's missing mass and energy*. New York: Harper Collins.
- **Kirshner, R.P.** (2006). *El Universo extravagante: estrellas explosivas, energía oscura y cosmos*. Madrid: Ediciones Siruela.
- **Kragh, H.** (1996). *Cosmology and controversy*. Princeton NJ: Princeton University Press.
- **Greene, B.** (2004). *The fabric of the Cosmos*. London: Penguin Books.

- **Martinez, V. J.** (2006). *Mariners que solquen el cel: l'aventura de descobrir l'univers*. València: Universitat de València.
- **Martínez, V.J.; Trimble, V.; Pons-Bordería, M.J. (eds.)** (2001). *Historical development of modern cosmology*. San Francisco CA: Astronomical Society of the Pacific.
- **Rees, M.** (2001). *Seis números nada más. Las fuerzas que ordenan el universo*. Madrid: Debate.
- **Silk, J.** (2006). *The infinite cosmos: questions from the frontiers of cosmology*. New York: Oxford University Press.
- **Smith, R.W.** (1993). *El universo en expansión*. Madrid: Alianza.
- **Smoot, G.; Davidson, K.** (1994). *Arrugas en el tiempo*. Barcelona: Plaza & Janés.
- **Smolin, L.** (2006). *The Trouble with Physics*. Boston MA: Houghton Mifflin.
- **Susskind, L.** (2007). *El paisaje cósmico*. Barcelona: Editorial Crítica.
- **Vilenkin, A.** (2006). *Many worlds in one: the search for other universes*. New York: Hill & Wang.