

VICENT J. MARTÍNEZ

## L'ORIGEN I L'EVOLUCIÓ DE L'UNIVERS

La nostra presència en l'Univers pot, d'alguna manera, justificar i determinar la seva evolució. Aquesta sentència, tan vagament enunciativa i al mateix temps aparentment tan poc científica, és la base d'allò que el físic anglès Brandon Carter anomenà *principi antròpic*. Aquest controvertit principi ens diu que l'evolució de l'Univers ha estat aqueixa que necessàriament havia de ser per tal que existírem els observadors. No deixa, però, de ser sorprenent que un moment en el qual la ciència pot explicar molts dels complexos fenòmens que es troben a la natura, físics tan prestigiosos com Carter o Hawking facen ús de postulats que poden aparentment semblar pre-copernicans. Cal, però, no simplificar les raons que han dut a enunciar-lo i assenyalar que la idea que hi ha a sota és determinada per la impossibilitat que encara troba la física actual per a encaixar totes les peces del trencaclosques cosmològic, és a dir, donar una explicació satisfactòria de totes les etapes de l'evolució de l'Univers.

Malgrat el que hem dit en el paràgraf anterior, la cosmologia ha estat una de les branques del coneixement científic que més espectacularment s'ha desenvolupat en els darrers anys. L'espenta que aquesta disciplina ha experimentat es deu fona-

mentalment a la simbiosi entre els cosmòlegs, físics que es preocupen d'allò que ocorre en l'Univers a les escales més grans i els físics de les partícules elementals, que estudien els fenòmens que es produeixen a les escales més petites. D'aquesta interacció i els seus resultats en parlarem al llarg d'aquest article. on presentarem l'estat actual de la teoria estàndard que explica l'origen i l'evolució de l'Univers: «*The hot big bang*.»

Fins als anys vint, els científics pensaven que l'Univers es reduïa bàsicament a la nostra pròpia galàxia, la Via Làctia, i que aquest era globalment estàtic, és a dir, malgrat l'activitat estelar que es produïa al seu si, el conjunt romanía inalterable al llarg del temps.

Els treballs teòrics realitzats per Albert Einstein en el desenvolupament de la teoria general de la relativitat estaven en contradicció amb aquest fet. les seves equacions predeïen que l'espai-temps evolucionava de manera dinàmica en el temps. Einstein participava també de la imatge de l'Univers estàtic que imperava aleshores i per això va introduir *ad hoc* un terme en les seves equacions, anomenat *constant cosmològica*, que assegurava el caràcter estàtic de l'Univers; anys després reconeixia que aquesta havia estat l'errada més gran comesa en la seva activitat científica.

Les equacions proposades per Einstein varen ser magistralment resoltes pel físic rus Alexander Friedmann l'any 1925. El conjunt de solucions que presentà són encara avui la base matemàtica on recolza la teoria del *big bang*. Els models de Friedmann, partint d'una singularitat inicial on la densitat i la temperatura són infinites, presenten dos possibles tipus d'evolució: expansió per sempre cap a estats de menor densitat, aquest cas es donarà si el contingut material de l'Univers és inferior a una certa quantitat crítica; o, al contrari, es donarà un segon tipus d'evolució consistent en una primera etapa d'expansió i una altra de contracció, a causa que l'atracció gravitacional de la matèria que constitueix l'Univers és suficient per a frenar l'expansió en un determinat moment i produir un col·lapse de tot l'Univers altra volta cap al punt de partida. Aquesta segona possibilitat es produirà en el cas que la densitat mitjana de l'Univers supere un cert valor anomenat *densitat crítica*. La qüestió que acabem de presentar encara no està resolta amb les observacions de què avui disposem i, per tant, qualsevol dels dos models d'evolució podia ben bé ser cert.

Paral·lelament a aquests treballs teòrics, durant la dècada dels vint, varen ser instal·lats telescopis de gran envergadura a

les muntanyes de Califòrnia: Mount Wilson i Mount Palomar. La imatge del cel que les noves observacions varen presentar canvià completament els conceptes que tenien els astrònoms sobre les dimensions de l'Univers. S'adonaren que la Via Làctia no era més que una galàxia entre tantes altres que ja podien ser observades. Aquests telescopis varen fer «créixer» l'Univers enormement. La nostra galàxia resultava ser una estructura bastant aplanada, el diàmetre major de la qual és de 100.000 anys llum (un any llum és la distància que recorre la llum en un any, 9,46 bilions de km). La llum tarda aproximadament 8 minuts a arribar a la Terra des del Sol. L'estel més pròxim, que es coneix amb el nom de Pròxim del Centaure, es troba a una distància de 4,2 anys llum, i l'estel més brillant, Sírius, a 8,6 anys llum. Les galàxies més pròximes a la Via Làctia són els Núvols de Magalhães, situats a 170.000 anys llum. Aquestes són galàxies de tipus irregular bastant petites. La galàxia d'Andròmeda (M31) és l'estructura pròxima més semblant a la mateixa Via Làctia i l'única que podem vagament apreciar a simple vista. Té un diàmetre de 150.000 anys llum i es troba a una distància de 2,2 milions d'anys llum. Tant Andròmeda, com els Núvols de Magalhães, com la Via Làctia es troben integrats en un conjunt d'una vintena de galàxies, anomenat Grup Local. La distribució espacial de les galàxies és, si més no, ben poc uniforme; hom troba grans concentracions de galàxies, anomenades cúmuls, formats en ocasions per més de mil galàxies, al mateix temps que altres regions de l'espai són aparentment buides de matèria lluminosa. La concentració de galàxies, anomenada Cúmul de Virgo, és una de les més grans conegudes, i tot i que es troba a una distància de 50 milions d'anys llum, donada la seva densitat, té una notable influència d'atracció gravitatòria sobre les galàxies del Grup Local.

L'any 1929, l'astrònom americà Edwin Hubble enuncïa un resultat empíric que ve a dir que les galàxies s'allunyen constantment les unes de les altres. En particular Hubble constatà que les galàxies que observem des de la Terra s'allunyen de nosaltres a una velocitat que és proporcional a la distància que les separa de la nostra pròpia galàxia. Si l'Univers és homogeni, aquesta ha de ser una constatació que hom puga fer des de qualsevol altra galàxia, és a dir, un observador situat en qualsevol punt de l'Univers observaria el mateix efecte que Hubble observà amb el telescopi de 2,5 m de Mount Wilson: les galàxies se separen d'ell amb una velocitat que és més gran com més lluny ens trobem del punt on l'hem situat. Ara bé, Hubble

només tenia la llum de les galàxies que observava, com podia saber que s'estaven allunyant? La llum és la propagació de pertorbacions electromagnètiques en forma d'ona. En una ona clàssica, la distància entre dues crestes és la *longitud d'ona*, que se sol representar amb la lletra grega  $\lambda$ ; considerant la variació de longitud d'ona, podem obtenir tot l'espectre de radiació electromagnètica, que va des de les longituds més petites que l'ultraviolada fins a longituds més grans que l'infraroig; les longituds d'ona observables per l'ull humà, allò que se'n diu la franja del visible, són només una petita proporció. L'efecte Doppler explica què passa amb la longitud d'ona que rep un observador provinent d'una font en moviment relatiu respecte a aquest. De la mateixa manera que el so del xiulet d'un tren que s'allunya es fa més greu, mentre que per al maquinista el to no canvia, la llum que rebem de la majoria de les galàxies té una longitud d'ona més gran que l'emesa, està desplaçada cap al vermell i això és l'indicatiu que la galàxia s'allunya. El desplaçament cap al vermell (*redshift*) es representa per la lletra  $z$  i és igual a  $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$ , on  $\lambda$  és la longitud d'ona observada, mentre que  $\lambda_0$  és la longitud d'ona emesa.

Hubble observà que el corriment cap al roig era més gran quan la distància que separava la galàxia de nosaltres era més gran, és a dir, que la velocitat de recessió de les galàxies  $v$  era directament proporcional a la distància a què es trobaven,  $r$ . Aquesta constant de proporcionalitat és un dels paràmetres de l'Univers i és representat per  $H$ . La llei de Hubble diu, doncs,

$$v = Hr \quad (1)$$

Si l'expansió de l'Univers és determinada per aquesta expressió lineal, això implica que, si invertíem teòricament el procés d'allunyament de les galàxies durant un temps igual a l'edat de l'Univers, arribaríem a l'estat inicial en què totes les galàxies es trobarien al mateix lloc (singularitat). Així mateix, ens dona la imatge d'un Univers en constant evolució, la dinàmica del qual, dominada per la gravetat, pot ser modelitzada dins el marc de la teoria de la relativitat d'Einstein. Per a fer-ho, cal un paràmetre que caracteritzi el model homogeni i isotrop, el factor còsmic d'escala  $R(t)$  o factor d'expansió, que representa la separació de dos punts d'acord amb el temps còsmic, és a dir, si  $R(t)$  augmenta en el temps vol dir que l'Univers s'expandeix, si  $R(t)$  disminueix vol dir que es contrau, si  $R(t)$  no canvia estem davant un Univers estàtic.

La constant de Hubble  $H_0$  apareix com el quocient entre la velocitat de recessió d'una galàxia qualsevol i la distància  $r$  a la qual es troba:  $H_0 = \frac{v}{r}$ . Si la velocitat hagués estat sempre constant, l'invers d'aquesta constant ens donaria l'edat de l'Univers; d'aquest temps en diem temps de Hubble:  $H_0^{-1}$ .

L'edat de l'Univers ha de ser, per tant, menor que el temps de Hubble. És, doncs, molt important conèixer el valor d'aquest paràmetre. El primer càlcul fet pel mateix Hubble als anys trenta donà un valor d'uns  $526 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . A aquest valor li correspon una edat de l'Univers de 2.500 milions d'anys, que és la meitat del temps de vida d'alguns isòtops radioactius que trobem a la Terra. Aquesta terrible contradicció («la Terra és més vella que l'Univers») posava en dubte la mateixa teoria del *big bang*. Càlculs més actuals que van fer dos grups independentment donen els valors següents:

$$\text{Sandage i Tamman: } 55 \pm 5 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

$$\text{De Vaucouleurs: } 100 \pm 10 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$$

L'edat de l'Univers corresponent a aquests valors és, respectivament, de  $19 \times 10^9$  anys i de  $10 \times 10^9$  anys. Càlculs de l'evolució estel·lar i de l'edat de diferents elements radioactius estan d'acord quant a la magnitud de l'edat obtinguda per la llei de Hubble. La desconexió evident entre aquests tres tipus de càlculs va ser un altre èxit de la teoria del *big bang*.

No cal dir que el suport més important que va rebre la teoria del *big bang* per a esdevenir un paradigma científic va ser el descobriment que Penzias i Wilson van fer l'any 1964. Aquests radioastrònoms, fent servir una antena dels laboratoris Bell, trobaren un *soroll paràsit* que resultà ser un fons de radiació de microones amb un espectre corresponent a un cos negre, a una temperatura  $2,7^\circ \text{K}$  (Kelvin).

La radiació havia estat predita per Gamow i els seus col·laboradors l'any 1946 i durant el temps en què es descobrí, el grup de Princeton (Peebles *et. al.*) sense conèixer el treball de Penzias i Wilson parlaren de la possibilitat de l'existència en tot l'Univers d'una manca de radiació d'origen cosmològic a una temperatura equivalent de  $10^\circ \text{K}$ . El fet que aquesta radiació es detectàs amb absoluta independència de la direcció i del moment en què es mesurava, posà de manifest el seu caràcter cosmològic. No podia ser radiació d'emissió galàctica, perquè en aqueix cas s'observarien importants variacions degudes a la distribució espacial de les galàxies.

Quin és l'origen d'aquesta radiació? Se suposa que a l'inici de l'Univers les temperatures són tan altes que els àtoms es troben dissociats en nuclis i electrons; la dispersió de fotons per electrons lliures mantenia l'equilibri tèrmic (efecte Compton). Quan la temperatura davallà devers  $4.000^\circ\text{K}$ , els nuclis es podien lligar als electrons per donar àtoms estables; aquest moment es coneix amb el nom d'*era de recombinació*. La radiació deixa d'interaccionar amb la matèria i conserva l'espectre de radiació d'un cos negre per a una temperatura de  $4.000^\circ\text{K}$ . La longitud d'ona dels fotons deguda al corriment cap al roig cosmològic s'estira a mesura que l'Univers s'expandeix; com que la temperatura de radiació d'un cos negre és inversament proporcional a la longitud, minvarà a mesura que l'Univers s'expandesca. Actualment els mesuraments més recents indiquen que és aquesta:  $T = 2.747 \pm 0.024^\circ\text{K}$ , amb una increïble isotropia.

L'evolució temporal de la temperatura de la radiació de fons es pot expressar en funció del corriment cap al roig:

$$T_0 = \frac{T_r}{1 + Z} \quad (2)$$

on  $T_0$  és la temperatura mesurada actualment i  $T_r$  és la temperatura en l'instant en què l'Univers esdevé transparent a causa d'aquesta radiació. Donat que  $T_0 = 2,7^\circ\text{K}$  i  $T_r = 4.000^\circ\text{K}$ , la fórmula anterior ens indica que la radiació de fons fou produïda en una època corresponent a  $Z = 1.500$ . Si considerem que els objectes més allunyats que avui s'han detectat (alguns *quasars*) presenten un desplaçament cap al roig  $Z \sim 4$ , és evident que aquesta radiació és la relíquia més antiga del nostre Univers que fins ara s'ha detectat.

Les abundàncies actualment observades dels elements més lleugers, com ara l'hidrogen i l'heli, i sobretot la invariança d'aquestes proporcions independentment de la direcció cap on s'observa (isotropia de la distribució) van fer pensar que la síntesi d'aquests elements tingué lloc en els primers instants de la història de l'Univers. Efectivament, en el model estàndard es coneix com a nucleosíntesi primordial el procés pel qual es formen aquests elements en els primers minuts després del *big bang*. Les proporcions romandran després pràcticament constants fins als nostres dies; per tant, cal trobar un model que siga capaç d'explicar l'abundància que s'observa avui.

Tres minuts després del *big bang*, la temperatura de l'Uni-

vers ha baixat a  $0,5 \times 10^{10}^\circ\text{K}$ . L'Univers és una sopa còsmica formada per protons, neutrons, electrons, neutrins i fotons. El balanç neutró-protó és del 13% i 87% respectivament. La nucleosíntesi primordial té lloc en el precís moment en què els neutrons, prèviament en equilibri amb els protons, comencen a patir la desintegració  $\beta$  i es converteixen en protons amb l'emissió d'electrons i antineutrins.



La formació de deuteró en aquest moment és més estable, és a dir, les unions d'un protó i un neutró, que anteriorment eren desfetes per fotons, ara duren més. Els deuterons comencen a caçar protons i neutrons i a combinar-se entre ells formant combinacions de 3 ( $^3\text{He}$ ,  $T$ ) i 4 nucleons ( $^4\text{He}$ ). Transcorregut aquest estadi d'intensa activitat nuclear, la temperatura baixa per sota dels mínims necessaris perquè continuen aquestes reaccions, i l'Univers s'estabilitza.

En el moment en què es començaven a desenvolupar els models cosmològics es pensava que les reaccions continuarien formant cada vegada elements més pesants, fins a obtenir tota la taula periòdica amb les proporcions avui observades. Açò no és cert. L'Univers, després d'aquesta etapa, fixa el seu contingut, i serà necessari que, una volta formats els estels, les temperatures generades en el seu interior permeten de començar una altra vegada, però ara en el seu si, les reaccions termonuclears que formaran els elements més pesants, i aleshores podrà continuar l'evolució.

Durant la nucleosíntesi, pràcticament tots els neutrons que trobem en aqueix moment queden lligats a l'heli. Com que aquest és format per dos protons i dos neutrons, la proporció del pes de l'heli després de la nucleosíntesi serà senzillament el doble de la proporció de neutrons entre les partícules elementals.

Les proporcions actuals d'heli i hidrogen, 26% i 74% respectivament, són bàsicament les que resulten de la nucleosíntesi; això justifica el seu origen cosmològic.

El model del *big bang* presentà però alguns problemes, que han estat resolts en la dècada dels vuitanta. El primer es coneix com el problema de l'homogeneïtat i l'horitzó. Hom suposa que a escales grans l'Univers és bastant homogeni. Els mesuraments del corriment cap al roig són pràcticament independents de la direcció d'observació. Això dona suport a la isotro-

pia que per a l'Univers postula el principi cosmològic. Si l'Univers és isòtrop al voltant de totes les galàxies, com sembla que ho és al voltant de la nostra, és evidentment homogeni. L'enorme isotropia de la radiació de fons de microones encara reforça més la idea d'un Univers extremament homogeni en un principi. Ara bé, el fet de suposar l'Univers homogeni, per exemple en el moment de la recombinació:  $t_R = 10^6$  anys, ens durà un altre dels problemes del model estàndard. No hi ha raons per a creure que l'Univers era homogeni *ab initio*. És més natural pensar que la situació inicial és un estat caòtic, amb condicions inicials diferents d'un lloc a un altre, i que abans de la recombinació tindria lloc algun procés uniformador. La velocitat d'aquest procés no pot pas ser superior a la de la llum; aleshores, les zones que han pogut ser homogeneïtzades tindran una extensió limitada, donat que el temps transcorregut des del *big bang* és  $t_R$ . Aquesta extensió serà de l'ordre de  $10^6$  anys llum, mentre que les dimensions de l'Univers actualment visible eren aleshores de  $10^8$  anys llum; per tant, existien regions casualment desconnectades. Com és que aquestes regions entre les quals no hi ha hagut interacció són tan semblants? Aquest ha estat un problema no resolt fins als primers anys d'aquesta dècada.

Un segon problema molt evident és el de la formació de les galàxies. És clar que en l'Univers existeix estructura: des dels grans cúmuls i possiblement supercúmuls de galàxies fins als àtoms, passant per les galàxies, cúmuls globulars, estels, planetes i tot allò que observem al nostre entorn. D'on ve aquesta matèria? Si la radiació de fons de cos negre que avui s'observa és tan extraordinàriament isòtropa, les irregularitats o les fluctuacions de la densitat que en el temps de la recombinació podem trobar han de ser molt petites per a no contradir-ne les observacions. Ara bé, hom suposa que només gràcies a aquestes fluctuacions i a llur creixement per efecte gravitacional s'han pogut formar les galàxies: és a dir, que les regions amb densitat més gran atrauen la matèria d'aquelles menys denses i n'accentuen les fluctuacions. Aquest procés ha d'ocórrer necessàriament després de la recombinació.

És a dir, per una banda les fluctuacions de densitat han de ser prou grans per a explicar l'origen de l'estructura observada, i per l'altra prou petites per a no contradir la isotropia del fons de radiació de microones. A més a més, si fossen molt grans s'haurien transformat en zones extraordinàriament denses, com ara els forats negres. El valor d'aquestes fluctuacions ha de ser

$\frac{\delta\rho}{\rho} = 0,0001$ , és a dir, hi ha llocs on la densitat és 0,0001 vegades més gran que la mitjana. Aquest valor no és explicat d'una manera evident en el model estàndard.

La solució a aquest i altres problemes de la teoria del *big bang* ha vingut de la interacció entre els físics d'altres energies i els cosmòlegs, com hem esmentat abans. Els primers segons després de la gran explosió són importantíssims a l'hora de determinar la posterior evolució de l'Univers. Les temperatures a què es troba el plasma còsmic inicial són tan elevades que mai no podran ser reproduïdes en un laboratori; d'aquesta manera l'Univers primitiu esdevé l'únic *laboratori* on els físics de partícules d'altres energies poden tractar de provar les seves teories. Si aquestes són certes, s'ha de poder explicar l'evolució posterior de l'Univers a partir de les hipòtesis que elles aporten per als primers instants. Les interaccions entre els diferents components de la matèria són de quatre tipus: la força gravitatoria que ens manté sobre la superfície de la Terra; la interacció forta que manté l'estabilitat dels quarks dins els protons; la interacció feble responsable de la desintegració  $\beta$ , de la qual ja hem parlat; i la força electromagnètica que manté l'electró girant al voltant dels nuclis atòmics. Aquestes quatre formes d'interacció actuen a escales distintes, però podrien ser quatre manifestacions distintes d'una única interacció, de la mateixa manera que el gel, l'aigua i el vapor són manifestacions distintes del mateix objecte químic. En aquest cas una teoria unificada explicaria tots els tipus d'interaccions. En aquesta idea va estar treballant infructuosament A. Einstein durant els darrers trenta anys de la seva vida; poc després de la seva mort, els plantejaments teòrics que portaven a la unificació de la força electromagnètica i la feble estaven enllestits. Calia, però, esperar les comprovacions experimentals. Aquestes vingueren a corroborar la teoria més de vint anys després, quan en els acceleradors de partícules del CERN a Ginebra descobriren els bosons  $W$  i  $Z$ , que transporten la interacció feble. Darrerament es treballa en les teories que tracten d'incorporar la interacció forta a la mateixa teoria, que es coneix amb el nom de *gran unificació*. Si suposem que abans de l'instant  $10^{-35}$ , segons després del *big bang*, quan la temperatura era superior a  $10^{28}K$ , la gran unificació és certa i explica com eren les interaccions de les partícules que conformen aqueixa sopa còsmica extraordinàriament calenta, podem estudiar la seva evolució posterior. Ara bé, avui s'observen les diferents forces dissociades, ¿com es passa d'un estat unificat a allò que obser-

vem avui? Això rep el nom de *transició de fase*, i es produeix en instants determinats quan la temperatura baixa, de la mateixa manera que en baixar la temperatura el vapor d'aigua es liqua, i en baixar molt més es converteix en gel. Cada estat és menys simètric que l'anterior i en cada transició de fase s'ha produït un trencament de simetria. En l'Univers, el moment en què es produeix el trencament entre la força forta i la feble és de vital importància per a la seva evolució posterior, l'equació d'estat en aquest moment, juntament amb les equacions de Friedmann, donen com a resultat uns instants on l'Univers s'expandeix exponencialment. Això vol dir que durant un període de temps molt curt, però decisiu, que rep el nom d'*inflació*, el factor d'expansió  $R(t)$  que mesura les distàncies entre dos punts de l'Univers creix seguint una llei exponencial en funció del temps i no pas com una potència fraccionària (i menor que 1) del temps, com ho farà després. Per tant, tot l'Univers observable avui,  $10^{10}$  anys llum, estaria contingut en una petita regió uniforme i connectada casualment abans de la inflació. Això resol el problema de l'homogeneïtat i l'horitzó.

La inflació també resol el problema de la formació de les galàxies. Alguns dels models inflacionaris preveuen d'una manera natural l'origen de les fluctuacions de densitat necessàries per a produir, mitjançant llur posterior evolució gravitacional, la formació d'estructures i l'agrupament de la matèria.

La inflació no és però un afegit *ad hoc* a la teoria estàndard del *big bang*. La física que la produeix es desenvolupa en una època anomenada *era quàntica*, que va des del mateix instant del *big bang* fins a  $10^{-43}$  segons. Aquest període, fins fa poc absolutament desconegut, és objecte en l'actualitat d'importants estudis: la cosmologia quàntica podria explicar la creació de l'Univers inflacionari. A nivell teòric un repte queda plantejat: unificar la mecànica quàntica de Bohr i la teoria general de la relativitat d'Einstein. Aquest objectiu no és encara assolit, però ja existeixen teories com ara la teoria de *supercordes*, que es poden considerar bones candidates per a desenvolupar una teoria unificada coherent.

## LA INDÚSTRIA EDUCATIVA

La continuïtat de la institució docent amaga un canvi profund de la seva significació social, que pot explicar en bona part la seva crisi general observable en els nostres països. Les reformes successives vistes en una perspectiva de temps es revelen prou convergents en la seva incapacitat: responen a una pressió social, però un poc a les palpentes, perquè no s'acaben de confessar la seva destinació, no accepten la gran ruptura, tanmateix objectiva, amb els principis humanistes de l'educació.

Deixem de banda els segles d'ensenyament dit elitista, en què una fracció dels infants solament anava a escola, però no perdem de vista que, fins i tot en aquell moment, la institució docent responia a un imperatiu de la societat: el de fabricar persones aptes a les professions liberals i al funcionament de les administracions. Partim simplement, a França, de Jules Ferry i les seves lleis sobre l'escola primària obligatòria, al darrer quart del segle XIX. L'escola va ser aleshores un poc com un hostel espanyol: cadascú hi trobava el que hi aportava. La indústria, en plena expansió, reclamava un personal capaç de llegir (almenys les instruccions) i de comptar (almenys les peces). Calia que els obrers fossin mínimament espavilats per a