

(ciència)

L'Odissea de l'univers

Jean Audouze

Què va passar en els primers instants de la formació de l'univers? La felicitat aportada de la física de les partícules i de la física nuclear permet als astrofísics reconstruir els esdeveniments immediatament posteriors al Big Bang amb una precisió molt notable. Aquest article examina la microfísica del Cosmos alhora que fa una breu ullada a una nova teoria que promet aixecar molta polseguera: el principi antròpic, que explica l'existència de l'univers a través de la nostra presència.

Introducció

Nombrosos investigadors viuen en l'actualitat una època particularment exaltada que probablement anirà a més. Raons no en falten: els biòlegs penetren a la part més profunda del nucli de les cèl·lules, els arqueòlegs recuperen la història de la humanitat... I en el terreny de la física, dues disciplines coneixen avui una sèrie de commocions molt profundes: es tracta de la física de les partícules, que a poc a poc aconsegueix desxifrar la naturalesa íntima de la matèria, i de l'astrofísica que, a hores d'ara, té la possibilitat d'observar l'univers en un àmbit molt ampli, des de les ones de ràdio fins a les radiacions gamma més energètiques.

Aquestes dues disciplines tenen molts punts en comú (així com també, d'altra banda, la física nuclear). Utilitzem instruments a la vegada pesants, complexos i costosos (pensem, per exemple, en els acceleradors de partícules, els grans telescopis, o les missions espacials complicades) i considerem l'univers com el laboratori suprem on la na-

tura sap, amb poc esforç, realitzar experiències inaccessibles a la Terra: buits inimaginables regnen en els medis intergalàctics i interestel·lars; els estels de neutrons (pulsars) i els nans blancs constitueixen mostres de matèria superdensa; la fusió controlada és un procés realitzat normalment en els estels de l'univers; en fi, com veurem, en les fases primordials de l'univers, hom considera que l'acció d'uns acceleradors de partícules especialment eficaços permeten "unificar" les interaccions fonamentals de la física que són la gravitació, l'electromagnetisme, la interacció nuclear anomenada forta (que és la causant de la cohesió dels nuclis dels àtoms) i la interacció nuclear feble (que és l'origen, per exemple, de la desintegració β).

Els astrofísics, per la seva banda, s'adonen que l'única manera de comprendre la naturalesa i la història de l'univers és incorporar als seus esquemes i teories els avenços més recents de la física nuclear i la física de les partícules. No és pas casualitat que un dels premis Nobel de física de l'any 1983 (el professor

W. A. Fowler) sigui un físic nuclear que ha esdevingut després astrofísic.

Gràcies a la microfísica, som capaços, en principi, de reconstituir el que ha passat en el naixement de l'univers, de comprendre la seva evolució i de predir-ne el futur; fins i tot la seva mort. Aquest és la història que volem explicar aquí. Abans de fer intervenir els actors principals del drama que transcorre des de fa uns quinze mil milions d'anys, i que són les diferents partícules elementals i els nuclis dels àtoms de la matèria observable, hem d'esmentar les principals "proves de convicció" sobre les quals es basa la nostra investigació cosmològica.

El principi antròpic

L'univers posseeix la propietat d'aparèixer isòtrop a gran escala: és a dir, que sembla que no hi hagi direccions privilegiades al cel, tot i que, molt recentment, s'hagin descobert grans regions del firma-

ment desproveïdes de tot astre. Ja Edwin Hubble, en els seus treballs sobre l'expansió de l'univers, havia remarcat una gran homogeneïtat en la repartició dels objectes que el constitueixen. Per constatar-ho va comptar el nombre de galàxies en diverses direccions diferents i en volums desiguals del cel. I avui, els treballs més recents han confirmat aquesta repartició de les galàxies.

D'altra banda, l'univers és jerarquitzat: és a dir, que es passa de l'àmbit de les partícules elementals als nuclis dels àtoms, als mateixos àtoms (que s'assemblen extraordinàriament a petits sistemes planetaris), als grans de pols, als virus, als bacteris, a éssers de la nostra mida, a planetes, a estels, galàxies i cúmuls de galàxies (el concepte de cúmul de galàxies encara no ha

estat provat). Com ja hem dit, l'univers és un laboratori gegantí que ens limita i que, per tant, ha de posseir les propietats de conduir les nostres pròpies existències.

**L'univers és el
laboratori suprem on la
naturalesa sap fer
experiències
inaccessibles a la Terra**

La constatació d'aquestes particularitats del nostre univers ha portat a la formulació de l'anomenat "principi antròpic". Tot i tractar-se d'una teoria complexa i llarga de desenvolupar, intentarem tot seguit de donar-vos una idea global d'aquest concepte.

Segons aquest principi, les propietats i les lleis de l'univers existeixen perquè nosaltres hi som presents per observar-les. O dit d'una altra manera: la presència de la vida, la presència d'observadors intel·ligents és el que explica i determina l'existència del nostre entorn. Aquest principi resulta extraordinàriament sorprenent avui, ara que semblava que havien quedat absolutament relegades (després de Copèrnic) aquelles idees que adjudiquen a l'home un paper privilegiat en el gegantí univers. Quin raonament ha portat alguns astrofísics, gent seriosa, a elaborar aquest concepte?

En l'inici d'aquesta idea trobem Paul Adrien Dirac, físic anglès cèlebre per la seva descoberta de l'antimatèria, i que va treballar en la construcció de diversos grans nombres a partir de diverses constants físiques. Concretament, va calcular un nombre, que anomenarem N , que era l'invers de la constant gravitacional, igual a 10^{39} . N_2 es va obtenir fent la relació entre una magnitud còsmica, la grandària de l'univers observable, i una longitud microscòpica, la grandària del protó, i és igual a 10^{40} . N_3 , finalment, és la relació entre la massa de l'univers observable i la massa del protó. $N_3=10^{80}$. Dirac va sentir-se sorprès per la curiosa relació que expressen aquests nombres: $N_3 = N_1^2 = N_2^2$, però tampoc no es va donar gaire importància a aquestes coincidències. Segurament responien a algun lligam casual desconegut.

Va ser un físic de la Universitat de Princeton, Robert Dicke, qui va treure de l'oblit aquestes sorprenents coincidències. El 1961, Dicke va proposar una teoria concernent a aquests grans nombres de la qual es desprèn la constant de gravitació i l'edat de l'univers és simplement la conseqüència de la presència d'éssers vius a l'univers. Aquesta coincidència no es presenta fins que es reuneixen les condicions físiques necessàries per a la nostra existència. I, de forma més general, aquesta coincidència és una característica de tot univers que albergui observadors i sigui susceptible d'ésser observat i estudiat per ells.

Fig. 1

Per a alguns astrofísics, la presència d'observadors intel·ligents explica i determina l'existència de l'univers.

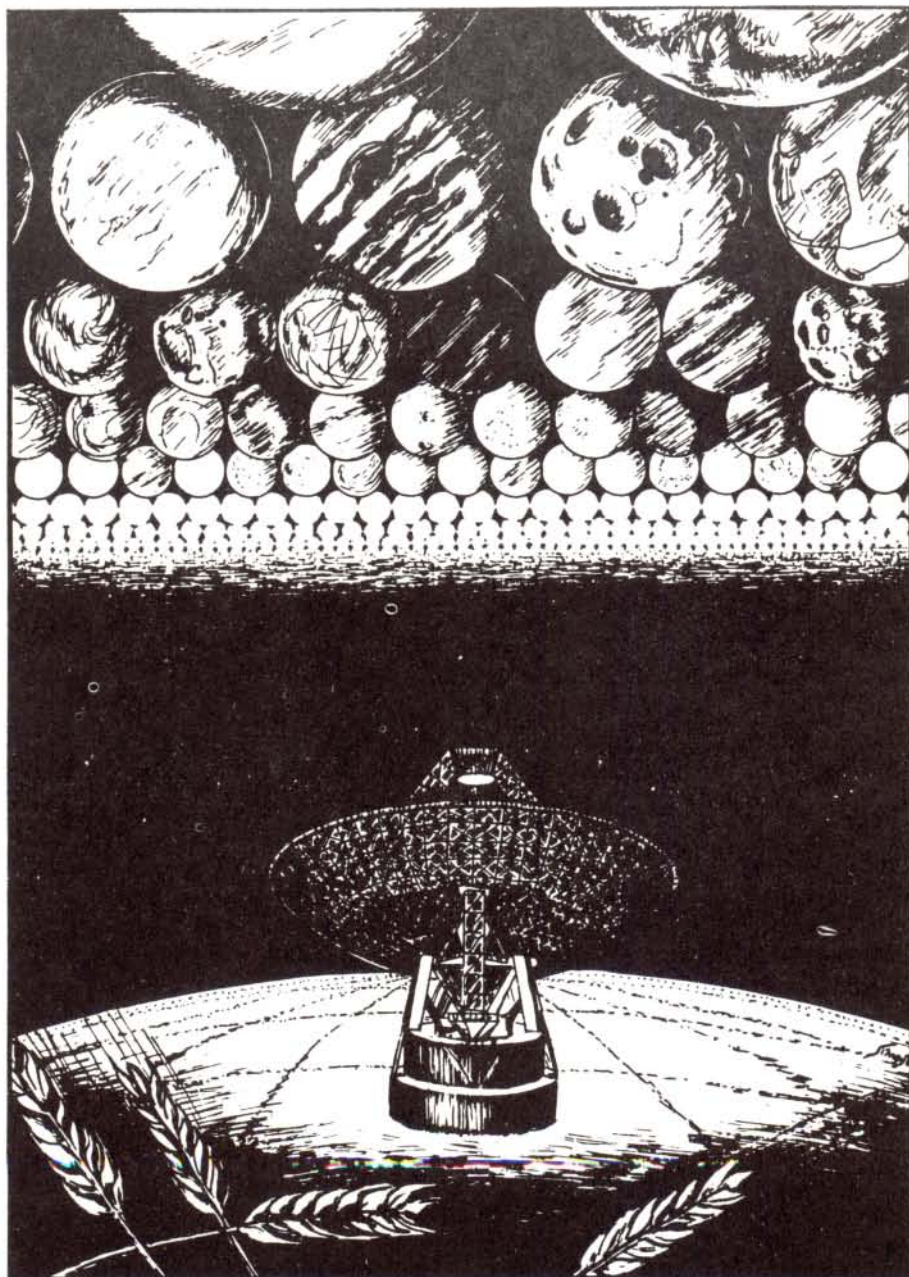


Fig. 2
Nebulosa M 42, d'Orió.

El raonament que porta a aquesta sorprenent conclusió és el següent: sabem que la vida es constitueix a partir de molècules orgàniques molt complexes formades per àtoms de carboni. El carboni és un element pesant que no s'ha pogut formar (com, per exemple, l'heli) en els primers moments de l'univers, en la nucleosíntesi inicial. El carboni és un producte de la nucleosíntesi estel·lar, concretament és un producte de les supernoves que quan exploten alliberen el carboni que havien sintetitzat en el seu interior. Altrament dit, donat que nosaltres som aquí, l'univers ha de ser suficientment vell perquè nosaltres hàgim tingut temps d'aparèixer. Quins són els límits d'edat del nostre univers perquè es pugui produir la nostra aparició? El límit inferior és representat per l'edat dels estels més voluminosos i el límit superior és representat pels estels menys voluminosos, que són els que duren més temps, car, al món estel·lar, a dimensions més petites corresponen temps de vida més llargs. Només estels d'aquest tipus (ens referim als que tenen aproximadament la grandària del nostre Sol) viuen temps suficient per a oferir condicions prou hospitalàries per a l'eventual aparició de la vida.

**Segons el principi
antròpic a presència de
la vida explica i
determina el nostre
Univers.**

El 1974, Brandon Carter, físic anglès que treballa a l'observatori de Meudon, va sistematitzar aquestes idees i els va donar el nom de principi antròpic. El seu enunciat diguem-ne feble estipula que la presència d'observadors dins l'univers imposa certes obligacions sobre la posició temporal d'aquests darrers. En una forma més extremada, el principi diu que la nostra presència imposa obligacions no solament en el temps sinó també en el conjunt



de propietats i característiques de l'univers.

Per altra part, és ben clar que, per diverses raons, el nostre univers és altament inversemblant. En les teories dels astrofísics trobem molts aspectes per resoldre; per exemple, hi ha l'aparent contradicció que separa l'estat inicial de l'univers, heterogeni, de l'estat actual, homogeni. Com explicar-ho? De l'una banda, si les constants que regeixen les quatre interaccions físiques bàsiques, ja esmentades, fossin lleugerament diferents, l'univers no podria albergar vida. I tanmateix existeix. De l'altra, sembla bastant lícit dir: "nosaltres existim, per tant l'univers ha de posseir aquesta o aquella propietat".

Bàsicament, el valor d'aquesta teoria és indicatiu; com assenyala l'astrofísic Hubert Reeves, representa un nou enfocament extraordinàriament interessant i suggeridor; i que podríem dir que s'emmarca

dins de les noves tendències globalitzadores interdisciplinàries i de síntesi de tot l'àmbit científic actual.

L'expansió de l'univers

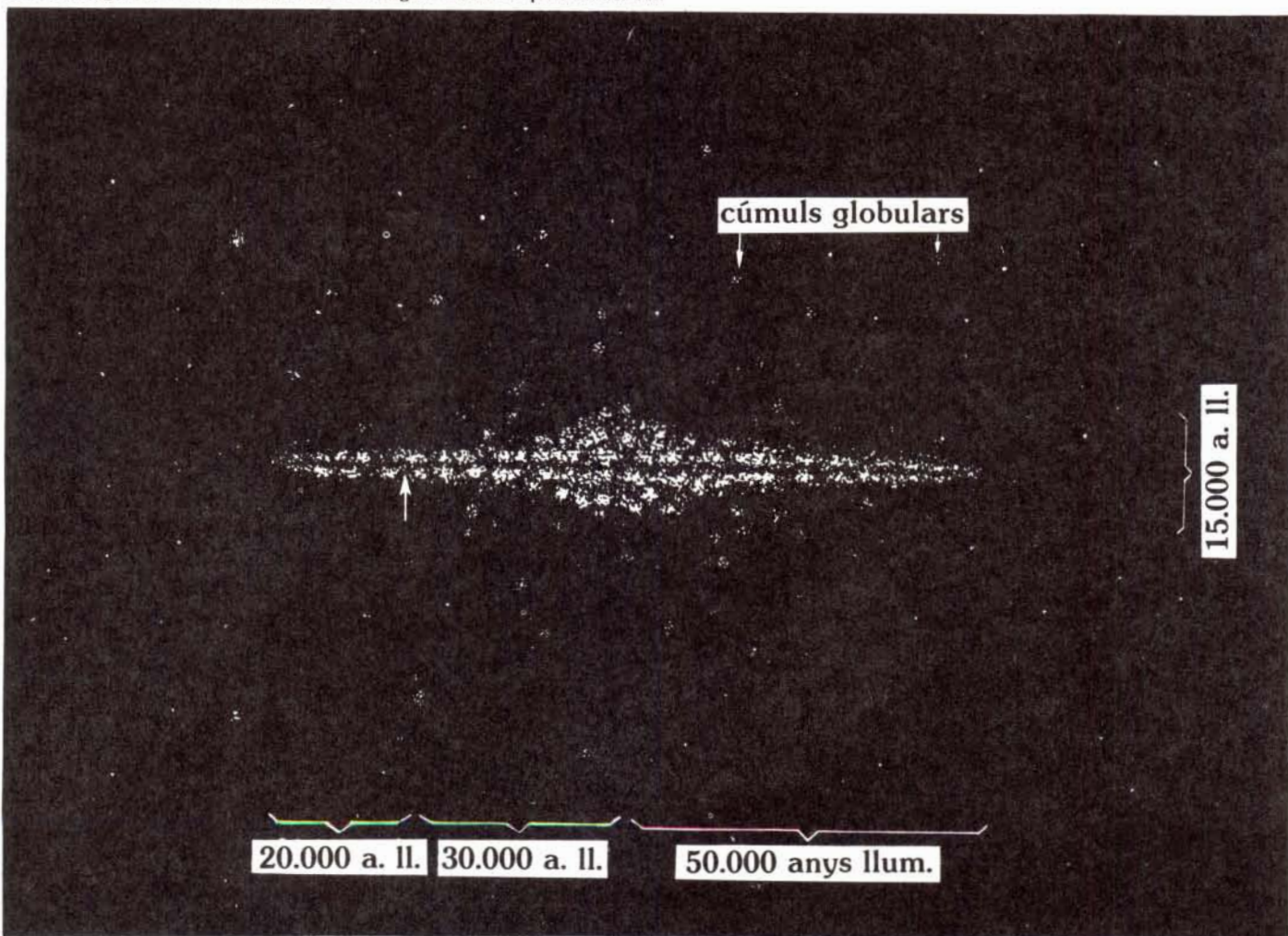
Després d'aquest breu recorregut per la teoria antròpica, bo serà el retorn al macrocosmos i que comencem per parlar d'alguns dels fets cosmològics més notables. En primer lloc parlarem de l'expansió de l'univers que pot provar-se almenys de tres maneres. La negror de les nostres nits és una prova indirecta però indiscutible del moviment de fuga a gran escala dels objectes astronòmics, els uns amb relació als altres: en efecte, llur velocitat d'allunyament desplaça cap al vermell la llum emesa per aquests astres i redueix llur radiació visible. Aquesta constatació es coneix amb el nom de paradoxa d'Ol-

bers-Cheseaux. Hi ha un dèficit en la densitat observada de fonts de ràdio (galàxies, quàsars) intenses en relació amb aquelles que són menys importants. Aquest dèficit es deu també a l'expansió de l'univers. En fi, al llarg dels anys trenta, Edwing Hubble, el pare del telescopi de 5 metres del Mont Palomar, demostrà que les galàxies s'allunyen les unes de les altres a una velocitat relativa més gran com més lluny són. L'estudi detallat d'aquest moviment de fuga sistemàtica ens permet de datar l'origen de l'univers entre quinze i vint mil milions d'anys. Recordem també que el 1965, dos físics de Belle Lab, a Hondel (Nova Jersey), A. Penzias i R. Wilson (premi Nobel de física 1978) descobriren una radiació tèrmica perfectament isòtropa (amb un error màxim de deu mil) la màxima intensitat de la qual se situa en l'àmbit mil·limètric i que correspon, per aquest fet, a una temperatura de 2,7 K. George Gamow, que, amb Georges Lemaitre, era el principal defensor del Big Bang, havia predit l'existència



Fig. 3 La nostra galàxia vista de costat. La sageta indica la posició del sol.

Fig. 4 La nostra galàxia vista frontalment. La sageta indica la posició del sol.



d'una radiació d'aquests tipus. Efectivament, aquest descobriment assegurarà la victòria del Big Bang, contra la hipòtesi de la creació contínua, cap al 1965.

Per importants que siguin, aquests descobriments no ens permeten de remuntar al temps zero (o quasi zero). En efecte, en el moment que l'univers tenia prop d'un milió d'anys d'existència, que és quan es produí la transició entre l'època en què la radiació dominava la física de l'univers i la que encara dura ara, en la qual el rol dominant el té la matèria ordinària, es produí un fenomen que conduí a una mena d'"horitzó" cosmològic": en aquell moment, l'univers tenia

una temperatura d'uns deu mil graus, que corresponen al moment en què l'opacitat disminueix brutalment. La formació dels elements químics, com el deuteri, que és l'isòtop pesant de l'hidrogen, els dos isòtops de l'heli i el liti 7, s'ha de produir uns dos o tres minuts després de l'explosió original. L'estudi d'aquests processos permet, doncs, de remuntar de manera gairebé directa a un període molt més proper a l'origen del nostre univers, i de predir com ha d'evolucionar l'univers en el transcurs d'un llarg espai de temps. També ens permet de definir algunes característiques dels neutrins, aquestes partícules molt lleugeres que acompanyen els elec-

trons (i altres partícules d'aquest tipus que anomenem leptons) i que gairebé res no les detura perquè són regides per la interacció feble.

El primer segon després del Big Bang

Però abans d'evocar el que ha succeït dos o tres minuts després de l'explosió inicial, ens hem d'interessar pels moments immediatament anteriors al nostre univers.

El primer segon de l'univers després del Big Bang (o Gran Bum) és una època molt curta per la seva durada, però molt rica quant als processos que s'hi produeixen. Per a descriure aquest moment únic, suposem que les lleis de la física que coneixem s'apliquen al conjunt de l'univers. En especial, la mecànica quàntica ens ensenya que existeixen relacions d'incertesa (anomenades relacions d'Heisenberg) entre el producte de la posició i de la velocitat d'un sistema de l'una banda, i entre el producte del temps i de l'energia de l'altra. És per això que l'inici de l'univers no pot definir-se millor que com un temps de l'ordre de 10^{-43} (1) segons anomenat temps de Planck, que correspon a una temperatura de 10^{32} K (2) o 10^{19} GeV (on 1 GeV representa mil milions d'electrons-volts i és també l'equivalent en energia de la massa d'un protó). Fins a una temperatura de 10^{27} K (o 10^{14} GeV), és a dir, un temps comprès entre 10^{-43} i 10^{-35} s; el conjunt de les interaccions fonamentals (la interacció nuclear forta, la interacció feble, i la interacció electromagnètica com a mínim) (3) s'unifiquen mitjançant unes partícules que obeeixen les mateixes lleis físiques que els fotons i que anomenem bosons X (que tenen una massa de l'ordre de 10^{14} GeV). Les partícules com els electrons i els quarks a partir de les quals es formen els nucleons (neutrons i protons) poden intercanviar-se lliurement. Aquest estat paradisiac acaba 10^{-35} s després de l'inici de



Fig. 5
Estrella pulsar. És una estrella de massa 2,25 vegades més gran que la del nostre sol, que es troba cap a la fi de la seva vida.



Fig. 6
Nebulosa en la constel.lació del Cigne.

l'univers, en el moment que la temperatura de l'univers ja no és suficient per a mantenir l'existència dels bosons X. Aquesta fase s'acompanya potser d'un fenomen anàleg a la fusió del glaç que s'anomena transició de fase: després d'una gran absorció d'energia que correspon al trencament de la simetria (o el fet que les interaccions esmentades anteriorment es distingeixin les unes de les altres), l'univers ha pogut contreure's i, més endavant, pel rescalfament que segueix la fi de la transició de fase, l'univers es dilata una altra vegada molt ràpidament. Aquest model, anomenat "model d'inflació", permet evitar la dificultat que se'ns presenta quan imaginem que, a la seva naixença, l'univers podia ser molt gran al principi, haver-se contractat en el moment de la transició que va permetre a la interacció nuclear de distingir-se de les altres, i després dilatar-se una altra vegada. En l'expansió de l'univers, constatem la conseqüència d'aquesta dilatació.

Després de 10^{-35} s l'univers és constituït de quarks (partícules de càrregues elèctriques $-1/3$, $-2/3$ a partir de les quals es fabricaran els nucleons i els mesons pi), de leptons (electrons, muons, neutrins) i de fotons. La interacció feble i la interacció magnètica són encara

El primer segon de l'univers és una època molt curta però molt rica quant als processos que s'hi produeixen

una única i mateixa interacció (predita per Glashow, Weinberg i Salam, tots tres premi Nobel 1979). Els electrons, els muons i els neutrins es transmuten els uns en els altres tot intercanviant partícules anomenades bosons W i Z (recordeu que els bosons han estat descoberts aquest any a CERN). Aquestes dues forces deixen d'estar unificades quan la temperatura de l'univers és de 10^{15} K (energia 100 GeV) que correspon a la massa dels bosons W i Z i un temps de l'ordre de 10^{-10} s (aproximadament) i l

segon, els leptons són els actors que representen el paper principal de l'univers (ens trobem a l'era leptònica). En aquest moment, electrons (i positrons), muons i neutrins estan en equilibri amb el nucleons.

Abans d'abandonar aquest primer segon, cal indicar que les teories presentades aquí sobre la gran unificació de les interaccions predeuen que els protons tenen una durada de vida de 10^{31} anys i que la matèria ha de dominar l'antimatèria (que només existeix, doncs, de manera insignificant) dins el nostre univers.

En el temps d'un segon, l'univers té una temperatura de l'ordre de sis mil milions de graus. En aquest moment, els leptons deixen d'estar en equilibri entre ells i comença l'era radioactiva, que durarà un milió d'anys, durant la qual són els fotons els que dominen la física de l'univers.

Quan cessa aquest equilibri, els neutrons comencen a desintegrar-se en protons, electrons i anti-neutrins. En aquest moment, en un temps de l'ordre de 100 segons i una temperatura inferior a mil milions de graus (però de l'ordre d'a-

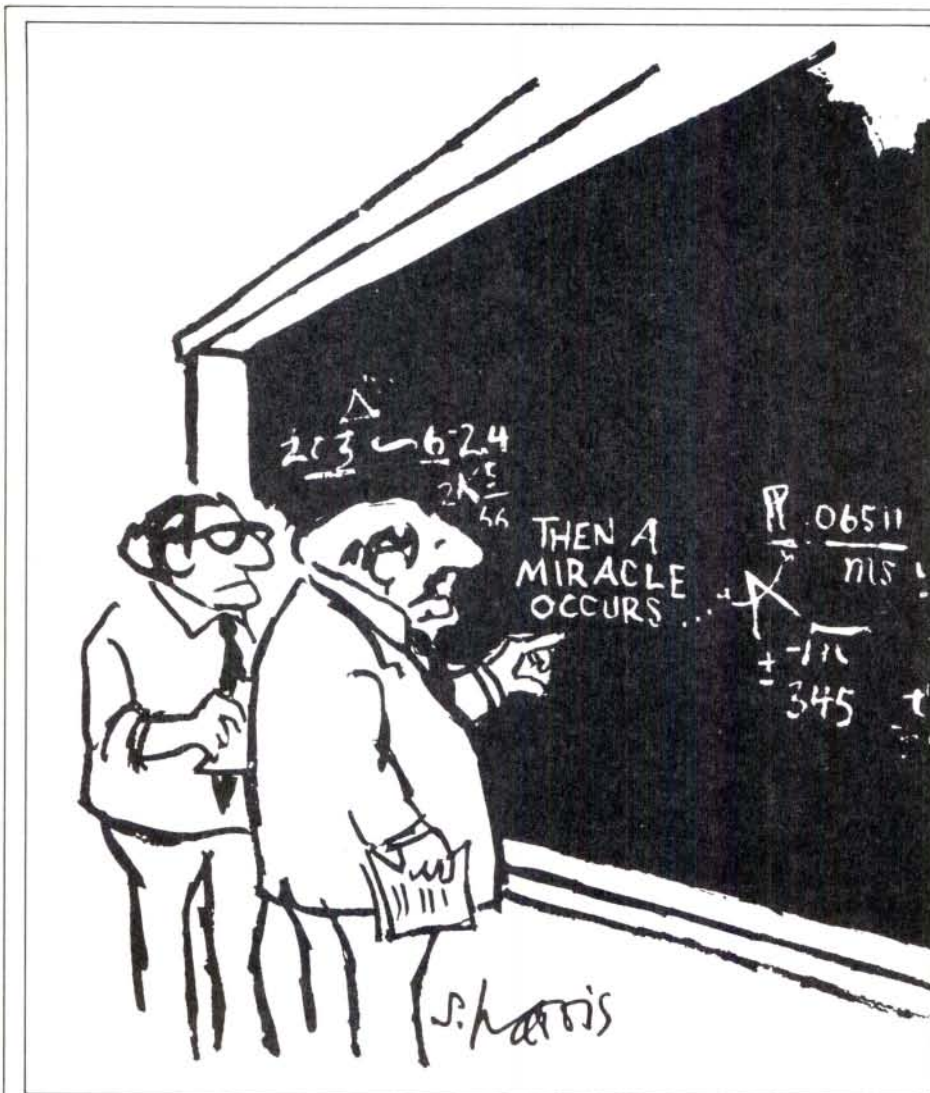


Fig. 7

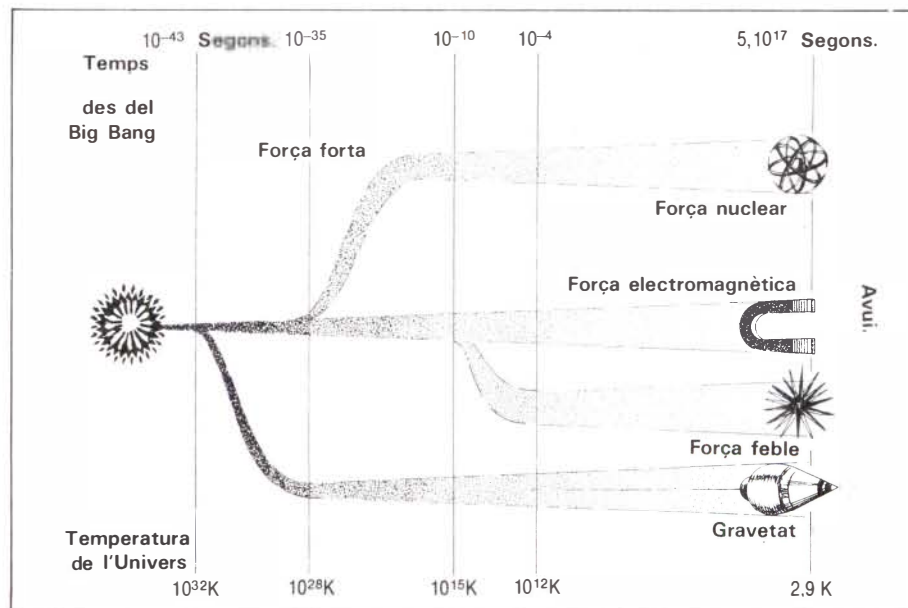
"Crec que hauríeu de ser més explícit en el segon pas" (Sidney Harris, American Scientist Magazine).

questa xifra), se situa la formació dels elements com el deuteri, els dos isòtops de l'heli (l'heli₃ i l'heli₄) i el liti₇. Aquest procés de formació comença per l'absorció dels neutrons per part dels protons, la qual cosa dóna lloc al deuteri, i es prolonga amb la síntesi dels elements que acabem d'esmentar. S'han dedicat moltes hores de feina a aquests processos de nucleosíntesi primordial. Les dues conclusions més importants que podem treure d'aquesta nucleosíntesi són que l'univers ha de tenir una densitat mitjana més aviat feble, de tal manera que no parará de dilatar-se; i que si els neutrins tenen una massa de

Fig. 8

A partir de la teoria del Big Bang, hom representa les quatre forces fonamentals.

l'ordre de 100 electrons-volts (és a dir, 5.000 vegades més feble que la de l'electró), llur gran nombre fa que per ells mateixos puguin fer molt elevada la densitat total de l'univers. En aquestes condicions, aquest es contrauria després d'haver-se dilatat. Els resultats actuals



pel que fa a la massa dels neutrins, però, no semblen afavorir una hipòtesi com aquesta. A més, a partir de les observacions de l'heli deduíem que només poden existir les famílies de leptons i de neutrons que ja han estat trobades pels físics de les partícules, a saber, l'electró (i el positró) el muó i el tau. Si se'n troben d'altres, el model de nucleosíntesi primordial s'ha d'abandonar amb la qual cosa es posa en perill la fràgil construcció aquí exposada.

La formació de les galàxies

Hem dit que a l'edat d'un milió d'anys l'univers deixà d'ésser opac. Aleshores, glòbuls de matèria començaren a aïllar-se. Dues teories s'encaren pel que fa a les dimensions d'aquests glòbuls: l'escola soviètica (dirigida per Y. Zeldovich) proposa que els glòbuls tenen una massa molt gran (superior a 10^{15} masses solars) i formen "crespons", és a dir, estructures aplanades que després donaran lloc a cúmuls de galàxies, etc. Una escola concurrent (principalment als Estats Units i a la Gran Bretanya) suggereix que els glòbuls originals són de mida més modesta (aproximadament 10^6 masses solars), que corresponen a cúmuls d'estels que es fusionen per donar lloc a les galàxies. És difícil de dir qui té la raó en aquesta discussió; hi ha una bona quantitat de treballs que tracten sobre l'una i l'altra d'aquestes hipòtesis, i sembla que l'opinió dels cosmòlogistes es decanta més aviat

vers la teoria dels crespens russos (o blinis!).

Les galàxies es formen doncs, en un espai de temps que dura entre uns quants milions i mil milions d'anys. A l'interior de cadascuna d'elles, tant si són elíptiques, espirals o irregulars, neixen miríades d'estels (dos-cents mil milions aproximadament, en el cas de la nostra galàxia). Al voltant de molts d'aquests estels, es posen en òrbita sistemes planetaris que, almenys no en un cas, alberguen éssers vius alguns dels quals evolucionen fins a interessar-se per l'univers en el seu conjunt.

Segons els càlculs de l'edat de l'univers basats en l'examen de la recessió de les galàxies i la datació d'alguns elements químics radioactius com el tori i l'urani o la dels cúmuls d'estels més antics (que són els cúmuls globulars), han transcorregut des del seu inici uns quinze mil milions d'anys.

L'astrofísic no està qualificat per a parlar del nostre esdevenidor immediat. Simplement, pot predir que d'aquí a cinc mil milions d'anys, el Sol esdevindrà un gegant vermell i que llavors la Terra formarà part del mateix Sol. I que mil milions d'anys més tard, haurà esdevingut un nan blanc que ràpidament deixarà d'irradiar.

Si la teoria de la gran unificació és correcta, d'aquí a uns 10^{32} anys els nucleons s'hauran transformat en radiació o en unes altres partícules.

Pel que fa al futur molt llunyà del nostre univers, han sorgit d'altres idees en la ment dels astrofísics com J. N. Islam, el qual descriu magníficament, en el seu llibre *The Ultimate Fate of the Universe*, que l'univers pot esdevenir un forat negre gegantí d'aquí a 10^{106} anys aproximadament!

Una part de la història que, massa ràpidament, hem contat aquí, pertany a l'àmbit de la conjectura: principalment, es tracta de tot allò que es produeix més enllà de la desaparició del Sol. No obstant això, els físics i els astrofísics són molt optimistes. Recordem que, fa només vint anys no coneixíem els

pulsars ni la radiació a 3 K, i que l'aventura espacial tot just havia començat. El món dels investigadors viurà grans aventures els anys vinents: el telescopi espacial aixeca-

**(D'aquí a cinc mil
milions d'anys el Sol
esdevindrà un gegant
vermell i la Terra en
formarà part)**

rà el vol cap a l'any 1986 i ens permetrà, potser, d'acostar-nos a l'horitzó cosmològic; s'haurien de mesurar, en un futur proper, la durada de la vida del protó i la massa del neutrí (fins aquest any no s'han descobert els bosons W i Z!). I com en tots els àmbits de la recerca, els

investigadors seguiran nous camins (la teoria revolucionària de la inflació de l'univers, deguda a A. Guth i Linde data només de dos o tres anys).

Amb aquestes remarques deixarem el lector. Esperem que vulgui perdonar l'esforç que li hem demanat de jugar amb les potències de deu i les partícules. La física de les partícules i la física nuclear influeixen sobre l'evolució del nostre univers i, doncs, la comprensió que nosaltres en tenim.

1 És a dir, 1 dividit per un nombre de 43 zeros.

2 I seguit de 32 zeros.

3 La unificació de la gravetat amb les altres forces fonamentals exigeix la intervenció d'altres teories de supersimetria que encara són més generals que les de la gran unificació i permeten la transformació de partícules semblants als fotons en partícules semblants als electrons.

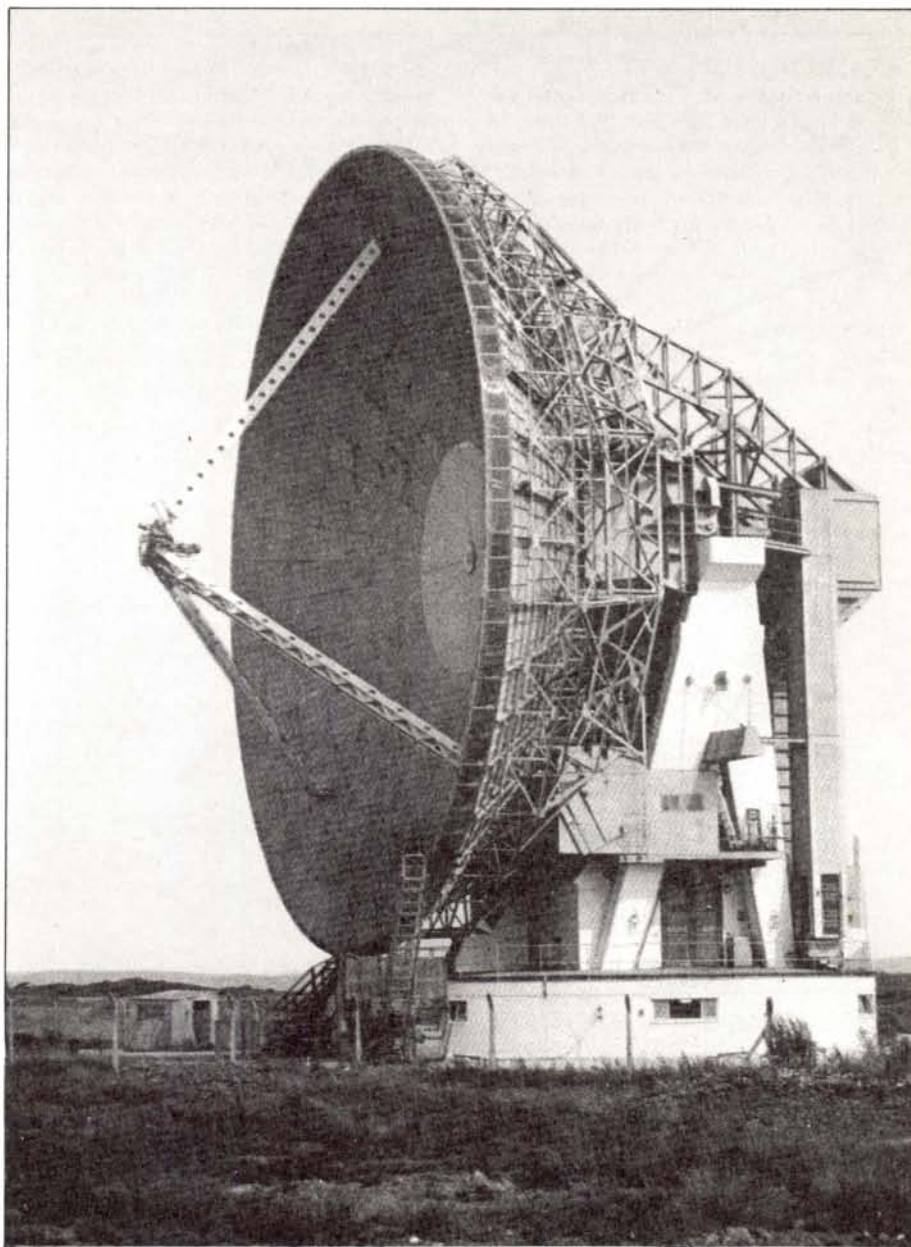


Fig. 9
Radiotelescopi de Goonhilly Powm (Cornwall).

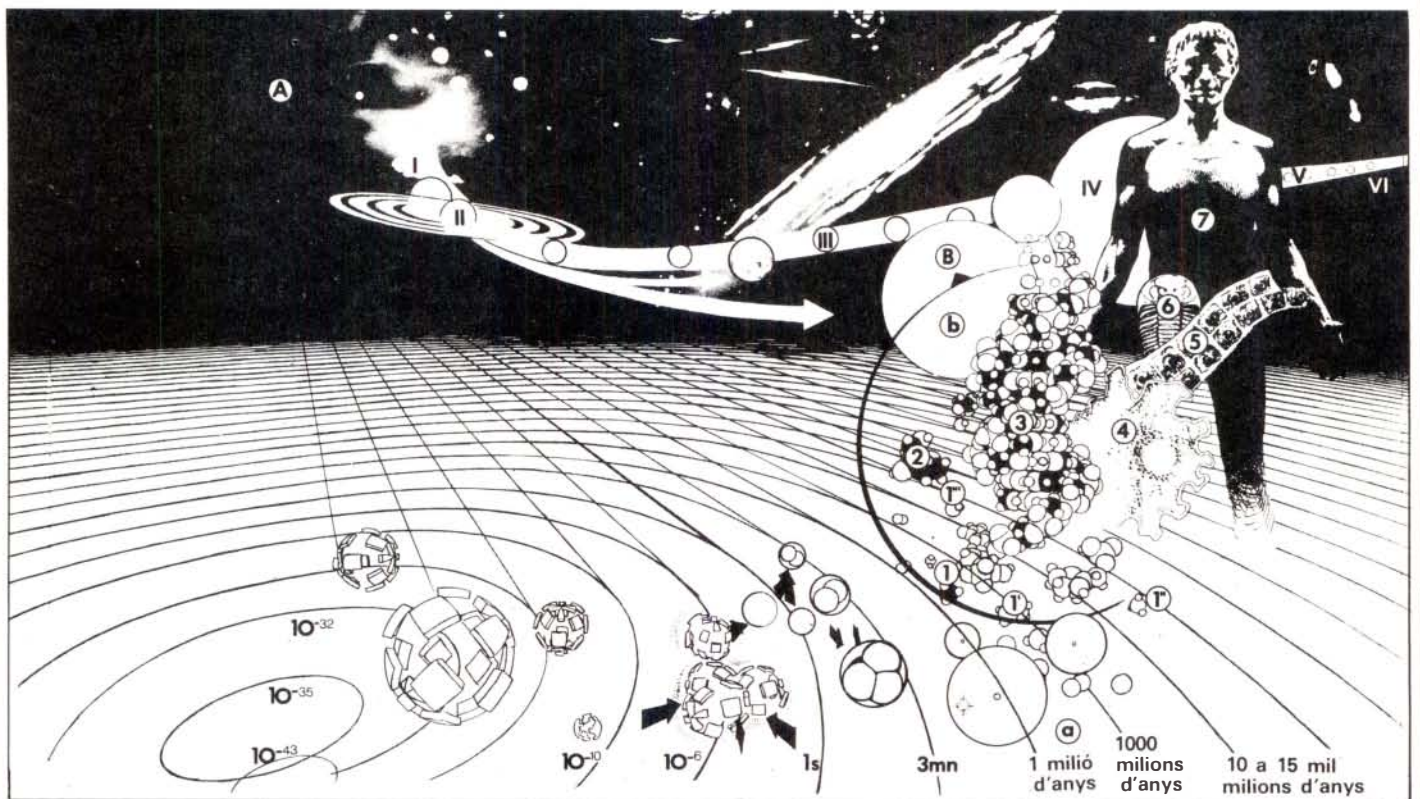


Fig. 10

En aquest esquema, hem representat l'evolució de l'univers des del Big Bang (a baix a l'esquerra). A les abscisses, el temps és indicat segons una escala exponencial. La "història" de l'univers comença al "temps de Plank", als 10^{-43} segons. Fins als 10^{35} segons regnen els introbables (fins ara) bosons X de la gran unificació, més endavant la temperatura baixa fins al punt de no permetre que sobrevisquin. Tot i així, la temperatura és de 10^{27} graus Kelvin, i l'univers és envaït de quarks, de la mida d'una taronja.

Als 10^{-10} segons, ja té la temperatura d'un petit planeta, els quarks es fusionen i donen els protons, els neutrons i els mesons pi. A un segon, la temperatura és de sis mil milions de graus. L'equilibri entre els leptons, electrons i muons es trenca i comença l'era radioactiva. Als tres minuts, la densitat de l'univers és considerable. La temperatura assoleix un milió de graus. Nogensmenys, la temperatura i la pressió són prou baixes per a permetre la formació dels primers àtoms d'heli i d'hidrogen.

Al cap d'un milió d'anys, l'univers esdevé transparent i els fotons circulen lliurement. Passen encara mil milions d'anys més: la matèria adquireix el seu aspecte "tradicional". Ens trobem al punt a. Encara han de passar 15 mil milions d'anys per arribar als nostres dies. Més endavant ens interessarem pels inicis de la vida.

Passem de a a A per a comprendre l'evolució estel·lar. La matèria s'acumula en masses, després en galàxies, en el si de les quals neixen els estels (I). Llavors poden formar-se sistemes planetaris (II); com, per exemple, el nostre, tal com el coneixem avui, després de cinc mil milions d'anys d'existència (III). Més tard, d'aquí a cinc mil milions d'anys més, el Sol haurà cremat la major part de la seva energia i esdevindrà un gegant vermell (IV), els raigs del qual arribaran a l'òrbita de Mart. La continuació

de la seva evolució és incerta. Potser esdevindrà un nan blanc (V), i després una massa de matèria freda i inerta.

Tornem a l'aventura de la vida. Versemblantment, aquesta només pot néixer en condicions específiques a planetes temperats (B). Passem a b en l'escala microscòpica. Ja a l'espai, té lloc la síntesi molecular elemental. Apareixen les molècules simples: el metà CH_4 (1), l'età C_2H_6 (1'), l'amoniac NH_3 (1''), i finalment l'aigua H_2O (1''').

Algunes situacions favorables permeten la formació de les primeres glucoses com la desoxiribosa (2), i després, la de la doble espiral dels aminoàcids (3). Són necessaris centenars de milions d'anys perquè neixin els primers éssers unicel·lulars (4) i més endavant s'estableixin en colònia (5). Més tard vénen els éssers multicel·lulars organitzats, com els trilobits (6) i en darrer lloc, al final de la cadena evolutiva, l'home (7).

Petit "Bestiari" de les partícules elementals

Barions: Partícules com el protó el neutró (és a dir, els nucleons), que només interactuen sota l'acció de la interacció nuclear forta.

Bosons: Conjunt de partícules que inclou el fotó, els bosons W i Z de la interacció feble i electromagnètica i el bosó X de la gran unificació, i que es caracteritzen pel fet que un nombre tan gran com es vulgui d'aquestes partícules poden estar en el mateix estat físic.

Fermions: Conjunt de partícules que inclou, particularment, la família dels electrons i neutrins (leptons) i els quarks. Aquestes partícules són d'una manera que

no podem trobar-ne dues en el mateix estat les quals està prohibida la interacció forta. La família comprèn els electrons, els muons i els taus, que són electrons pesants, i els neutrins (i antineutrins) corresponents.

Neutrins: Partícules de massa molt feble (fins i tot nul·la) i de càrrega nul·la que acompanyen els electrons, muons i taus. Els neutrins són, doncs, leptons i fermions. Només interactuen de manera molt feble amb la matèria ordinària.

Quarks: Partícules a partir de les quals es formen els nucleons i els pions. Llur càrrega elèctrica és igual a $\pm 1/3$ o $\pm 2/3$ vegades la de l'electró.

* Director de l'Institut d'Astrofísica de París.