

L'origen còsmic de la taula periòdica

The cosmic origin of the periodic table

David Jou / Universitat Autònoma de Barcelona. Departament de Física / Institut d'Estudis Catalans



resum

La física nuclear, l'astrofísica i la cosmologia presenten una història dels elements químics, formats per fusió nuclear abans de les galàxies (hidrogen i heli), en estrelles (de l'heli fins al ferro) o en explosions de supernoves (més enllà del ferro). Així, la taula periòdica adquireix una profunda dimensió temporal. Però en la majoria dels universos imaginables no hi hauria matèria, sinó només llum, o bé la taula periòdica estaria reduïda a pocs elements. Acabem l'article analitzant algunes qüestions filosòfiques sobre la matèria.

paraules clau

Taula periòdica, nucleosíntesi, origen dels elements, cosmologia, estrelles.

abstract

Nuclear physics, astrophysics and cosmology describe a history of the chemical elements, formed by nuclear fusion before galaxies (hydrogen and helium), in stars (from helium to iron), or during big explosions of supernovae (beyond iron). With this in mind, the periodic table gains a deep temporal dimension. However, in most of the conceivable universes, matter would not exist, but only radiation, or the periodic table would be reduced to a handful of elements. We close with a few philosophical reflections on matter.

keywords

Periodic table, nucleosynthesis, origin of the elements, cosmology, stars.

Introducció

La cosmologia dona una profunditat temporal, històrica, de milers de milions d'anys, a la taula periòdica. En certa manera, la cosmologia fa respecte de la taula periòdica dels elements el que féu Darwin respecte de la classificació de Linné de les espècies: preguntar-se pels orígens, establir genealogies, explicar històries, proposar mecanismes evolutius que posen el temps al cor mateix de la vida i la il·luminen amb un sentit nou, dinàmic, alhora que explicatiu i sorprenent.

Acostumem a veure la taula periòdica com una classificació especialment reeixida dels diversos elements químics que posa de manifest regularitats en

les seves propietats físiques i químiques. La física atòmica (combinació d'electromagnetisme i física quàntica) explica (*a posteriori* i amb unes dificultats considerables) aquestes regularitats. Podria semblar que la física nuclear hauria d'estar-se callada respecte de la taula periòdica, amagada al fons del nucli diminut i químicament inoperant, tret d'alguns detalls relativament menors referents a la massa dels diversos isòtops, algunes subtiltats de les ratlles espectrals i les característiques radioactives (no químiques) respectives.

Però no és així: la física nuclear, l'astrofísica i la cosmologia irrompen a la taula periòdica, li atorguen una nova dimensió temporal i situen la seva genealo-

gia en els espais celestes. En aquest article explicarem breument les principals idees de la formació dels elements de la taula periòdica, la limitació del nombre d'elements estables a causa de les lleis físiques i les implicacions filosòfiques de l'existència de la matèria.

Història tèrmica de l'univers

La cosmologia moderna proporciona una imatge de com s'ha format la matèria i obre, alhora, interrogants respecte del contingut material de l'univers. En el model estàndard del Big Bang ('gran explosió'), l'inici de l'univers estaria caracteritzat per una temperatura i una densitat infinites. A mesura que la temperatura de l'univers va davallant

a causa de l'expansió, el seu contingut va canviant. La connexió entre el contingut de l'univers i la seva evolució fa que la física de partícules elementals i la cosmologia (les teories físiques del més gran i del més petit) conflueixin de forma natural i que les observacions cosmològiques constitueixin un dels bancs de proves de les teories més avançades i especulatives de partícules elementals. Però aquí no entrarem en els detalls de les partícules elementals i les interaccions bàsiques, sinó que enfocarem l'anàlisi en els elements químics.

Vegem una síntesi concisa de les principals etapes de la història tèrmica de l'univers, abans d'examinar-ne algunes en detall. Inicialment, el contingut de l'univers degué ésser una mescla de radiació i partícules de tota mena de masses, amb predomini de partícules desconegudes de gran massa. La seva desintegració donà lloc a quarks i leptons, els constituents elementals de la matèria (la diferència entre ells és que els quarks estan sotmesos a la interacció nuclear forta i els leptons, no). En continuar-se refredant l'univers, els quarks s'agruparen de tres en tres o de dos en dos per donar lloc als hadrons (barions i mesons, respectivament).

En reduir-se encara més la temperatura, la majoria dels hadrons i leptons anà desapareixent i quedaren tan sols els hadrons i leptons de vida més llarga (protons, neutrons, electrons), que s'anaren agrupant i donaren lloc als nuclis més lleugers (hidrogen, deuteri, heli, liti). En continuar el refredament i arribar a uns tres mil graus Kelvin, els electrons i els nuclis positius anaren formant àtoms neutres. A partir d'aquest moment, la radiació deixà d'interaccionar amb la matèria i es començaren a formar galàxies.

En elles s'anaren condensant les estrelles, en el si de les quals s'anaren formant nuclis atòmics cada vegada més pesants. En explotar la primera generació d'estrelles, grans i de durada breu, llançaren a l'espai aquests nuclis, que permeteren que la pols interestel·lar i les estrelles de segona generació que es formaren a partir d'ella poguessin estar acompanyades de planetes compostos per elements pesants.

Vegem ara les principals etapes de la història còsmica dels àtoms.

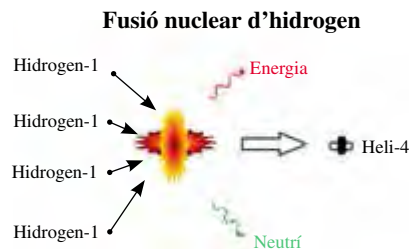


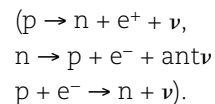
Figura 1. Esquema simple de la fusió nuclear d'hidrogen tot donant heli 4 (les reaccions reals són molt més complicades). Aquesta reacció es produï abundantament durant els tres primers minuts de l'univers, al final dels quals hi havia un 25 % d'heli i un 75 % d'hidrogen.

La matèria primordial: hidrogen i heli

Entenem com a *matèria primordial* la d'origen anterior a les galàxies més antigues. Aquesta matèria es formà durant els tres primers minuts de l'univers i consta de tres quartes parts d'hidrogen i una quarta part d'heli (fig. 1). Aquest resultat observacional concorda amb les prediccions que se segueixen del model del Big Bang en combinació amb la física nuclear. Les etapes més rellevants són les següents:

a) Formació de nucleons. Per sota de la temperatura de mil bilions de graus, els quarks tendeixen a agrupar-se tot donant hadrons, la major part dels quals són inestables. Els hadrons s'anaren desintegrant fins que

quedaren només els nucleons més estables: el protó, que és estable a tots els efectes pràctics, i el neutró, que té una vida mitjana d'uns divuit minuts fora del nucli i una durada pràcticament infinita al seu interior. Mentre la temperatura és prou elevada, hi ha equilibri entre protons i neutrons, segons una sèrie de reaccions nuclears



Aquestes reaccions, mitjançades per les interaccions nuclears febles, fan que els neutrons que es van desintegrant siguin refets a partir de protons més electrons, de manera que el sistema està en equilibri.

b) Formació de nuclis lleugers. Per sota dels cent bilions de graus, hi ha una anihilació gegantina d'electrons i positrons i les reaccions que mantenen en equilibri protons i neutrons deixen d'actuar. Atesa la reducció dràstica del nombre d'electrons (i la desaparició total dels positrons), els neutrons que es desintegren ja no poden ser substituïts i la seva única possibilitat de supervivència és combinar-se amb els protons per formar nuclis lleugers. I atesa la inestabilitat del deuteri, això només és possible quan la temperatura disminueix per sota de l'energia característica de desintegració d'aquest nucli. Segons la mecànica estadística, aquesta temperatura duu a una proporció de set protons per cada neutró. Si suposem que pràcticament tots els neutrons es combinen amb protons, arribem a una proporció en massa del 75 % d'hidrogen i gairebé el 25 % d'heli 4 (el nucli del qual està constituït per dos protons i dos neutrons), i una petita proporció d'altres nuclis lleugers, com l'heli 3 i el liti. En efecte, per cada dos protons que s'unissin

Entre els tres minuts i els tres-cents mil anys, l'univers està format majoritàriament per nuclis positius d'hidrogen i d'heli, electrons, neutrins i per una gran quantitat de fotons

amb dos neutrons per formar un nucli d'heli, restarien dotze protons lliures. Tindriem, així, que per cada quatre unitats de massa corresponents a l'heli, n'hi hauria dotze corresponents a l'hidrogen.

Per poder dur a terme aquestes reaccions de fusió nuclear que permeten passar de protons i neutrons als elements lleugers esmentats, cal una temperatura superior a uns quinze milions de graus (que és aproximadament la temperatura que hi ha a les regions interiors del Sol, on també té lloc la fusió nuclear de l'hidrogen tot donant heli) i una densitat elevada. Aquesta temperatura tan elevada és necessària per tal que dos protons puguin superar la força de repulsió electrostàtica mútua i arribar pràcticament a tocar-se, que és quan començarà a actuar la interacció nuclear forta que els mantindrà units i provocarà que un d'ells, a conseqüència de la interacció nuclear feble, es transformi en neutró.

Aquestes prediccions del model del Big Bang concorden amb les dades observacionals i constitueixen un dels arguments a favor d'aquest model d'origen de l'univers. Les proporcions (ínfimes) de liti, heli 3 i beril·li són molt sensibles a la quantitat d'hadrons presents a l'univers i desenvolupen un paper important a l'hora de fixar límits a la quantitat total de matèria normal present a l'univers. L'hidrogen i

l'heli (les dues puntes superiors de les taules periòdiques convencionals) són, doncs, pràcticament els únics elements que hi havia a l'univers quan tenia tres minuts (i, de fet, els únics elements que hi hagué a tot l'univers durant ben bé uns mil milions d'anys, quan, ja formades les galàxies primitives, les estrelles comencaren a tenir reaccions nuclears i a formar nuclis més pesants). A partir d'aquell moment, l'univers se seguí expandint i refredant. Però com es formaren els altres elements?

La formació dels elements a les estrelles: de l'heli al ferro

Entre els tres minuts i els tres-cents mil anys, l'univers està format majoritàriament per nuclis positius d'hidrogen i d'heli, electrons, neutrins i per una gran quantitat de fotons. Els electrons negatius i els nuclis positius no estan lligats entre si, ja que les energies mitjanes de les partícules de l'univers són molt superiors a l'energia d'ionització dels àtoms. Durant aquest temps, l'univers es va expandint i refredant sense que s'esdevingui res de remarcable.

Quan l'univers arriba als tres mil graus Kelvin, aproximadament en atènyer els tres-cents vuitanta mil anys d'edat, la proporció d'electrons que queden lligats als nuclis positius per donar lloc a àtoms neutres és prou gran perquè els fotons, que interaccionen molt menys eficaçment amb la matèria neutra que amb la matèria carregada elèctricament, deixin d'interaccionar amb la matèria. A partir d'ara, la radiació i la matèria seguiran les seves pròpies evolucions per separat: amb l'expansió, la radiació s'anirà refredant i avui constitueix una radiació de fons de microones, a uns dos graus i mig (en l'escala absoluta de temperatura), que omple tot l'univers.

Alliberada de la pressió de la radiació, la matèria s'anà agru-mollant sota l'acció de la gravitació, que exerceix una força atractiva entre les masses de l'univers i tendeix, doncs, a unir-les. Així començà la formació de les galàxies, que inicialment foren grans núvols de gas cada vegada més dens en el si dels quals s'anaren formant estrelles. Efectivament, la massa necessària per tal que predominin els efectes atractius de la gravitació per sobre dels dispersius de la pressió és de l'ordre de la massa de les galàxies, molt superior a la de les estrelles. Les petites fluctuacions de densitat que van actuar com a centre d'agregació de les galàxies primitives són observades actualment, gràcies als satèl·lits COBE (1992), WMAP (2002) i Planck (2013), com a minúscules fluctuacions de temperatura de la radiació còsmica de fons abans esmentada.

A mesura que la matèria (hidrogen i heli) es va compactant sota l'acció de la gravetat per donar estrelles, l'energia potencial gravitatòria esdevé energia tèrmica del gas i energia de radiació. El gas es va escalfant fins a arribar a una temperatura en què les col·lisions entre nuclis són prou violentes per produir reaccions de fusió nuclear, en què nuclis lleugers s'uneixen per formar-ne un de més pesant i alliberen grans quantitats d'energia, la qual escalfa prou el gas perquè la seva pressió ex-

A mesura que la matèria (hidrogen i heli) es va compactant sota l'acció de la gravetat per donar estrelles, l'energia potencial gravitatòria esdevé energia tèrmica del gas i energia de radiació

pansiva contraresti la de la gravetat, que tendeix a comprimir l'estrella.

En una primera etapa, quatre nuclis d'hidrogen en formen un d'heli (dos protons i dos neutrons). El procés no és simple i hi ha dues cadenes de reaccions que permeten aquest procés. Aquí, però, no entrarem en aquests detalls, molt interessants però especialitzats.

Acabat l'hidrogen, l'estrella es contrau sota l'acció de la gravetat i s'escalfa fins que la temperatura arriba a un punt en què tres nuclis d'heli poden donar-ne un de carboni. Per a això cal una temperatura unes quatre vegades més elevada (com a mínim) que per passar d'hidrogen a heli, ja que els nuclis d'heli tenen una càrrega elèctrica doble respecte de la de l'hidrogen. Això produeix, durant un temps, una nova expansió de l'estrella, fins que s'acaba l'heli. Això és el que passarà amb el Sol d'aquí a uns

cinc mil milions d'anys: en començar la combustió d'heli (a cent milions de graus), la seva grandària augmentarà fins que engolirà Mercuri i Venus i elevarà moltíssim la temperatura de la Terra. Uns mil milions d'anys abans, ja s'haurà acabat la vida a la Terra a causa de l'evaporació dels mars, llacs i rius.

A continuació, si l'estrella és prou gran, s'inicia la ignició del carboni (a uns cinc-cents milions de graus) per donar silici i altres elements, i així successivament fins a arribar al ferro, que és el nucli més estable (fig. 2). Els detalls dels processos són força especialitzats. Indicarem només algunes reaccions: dos nuclis de carboni 12 poden donar magnesi 24 més un raig gamma o bé sodi 23 i un protó; la fusió de dos nuclis d'oxigen (cadascun d'ells format en la fusió d'un nucli de carboni i un d'heli), a més de mil milions de graus, pot donar sofre 32 més un raig gamma o bé silici 28 més

un nucli d'heli 4; finalment, la fusió de dos nuclis de silici, a més de mil cinc-cents milions de graus, dona ferro 56, que, tal com hem dit, és l'isòtop més estable. Podríem indicar moltes altres reaccions que donen els diversos elements de nombre màssic inferior al del ferro 56, però seria molt complex. L'abundància relativa dels diversos elements químics està relacionada amb l'estructura interna de les estrelles on s'han format els elements. Les estrelles grans acostumen a tenir una estructura de capes concèntriques, com una ceba. En les més externes hi ha els nuclis lleugers (hidrogen, heli) i, a mesura que es va entrant dins l'estrella, hi ha nuclis més pesants, a temperatures i pressions més elevades. A les parts més externes, també poden intervenir-hi raigs còsmics d'energies elevades, la qual cosa contribueix a la formació addicional d'elements lleugers (de fet, aquest darrer procés continua a les atmosferes planetàries, on els raigs còsmics van produint en petites proporcions isòtops inestables, com ara el carboni 14 a partir del nitrogen).

Elements pesants i supernoves: més enllà del ferro

Ara bé, com es formen els nuclis més pesants que el ferro? Com surten els nuclis pesants de les estrelles on s'han format per poder formar planetes?

Si les estrelles són prou grans, en acabar el combustible nuclear (és a dir, en la reacció que porta del silici al ferro, que és molt ràpida), la part interna es col·lapsa a gran velocitat. Això fa que les capes externes caiguin sobre el nucli intern, hi rebotin i surtin amb molta energia cap a l'exterior, en forma de supernova (fig. 3). Aquesta explosió dispersa el seu contingut a l'exterior. A més, en aquests processos



Figura 2. Les estrelles molt grans tenen una estructura distribuïda en capes. A mesura que es va passant a capes més interiors, hi ha nuclis més pesants.

Taula 1. Algunes fites bàsiques de la història tèrmica de l'univers

10^{-12} segons	Els quarks es combinen tot donant hadrons, entre els quals hi ha protons i neutrons.
10^{-6} segons	Anihilació massiva de protons i antiprotons. Només queda un de cada cent milions de protons anteriors, que s'anihilen amb cent milions d'antiprotons.
10^{-4} segons	Anihilació massiva d'electrons i antielectrons. S'inicia la nucleosíntesi primordial d'heli a partir d'hidrogen.
3 minuts	Acaba la nucleosíntesi primordial (hidrogen, heli 4 i, en quantitats minúscules, deuteri, liti i heli 3).
3×10^5 anys	Es formen els primers àtoms (nuclis d'hidrogen i d'heli capturen electrons i passen a forma atòmica).
10^7 anys	Les galàxies es comencen a formar. A l'interior de les estrelles es comencen a formar els elements químics diferents de l'hidrogen i l'heli.

extremament violents (en què en pocs minuts s'allibera tanta energia com la que ha emès el Sol al llarg de tota la seva història), es formen nuclis més pesants que el

ferro, com ara la plata, l'or, el plom o l'urani. Calcular l'abundància relativa d'elements pesants produïts per l'explosió d'una estrella és una tasca encara

no realitzada en detall a causa de la complexitat dels factors que hi intervenen. Tot i que la major part dels elements més pesants que el ferro es formen durant les

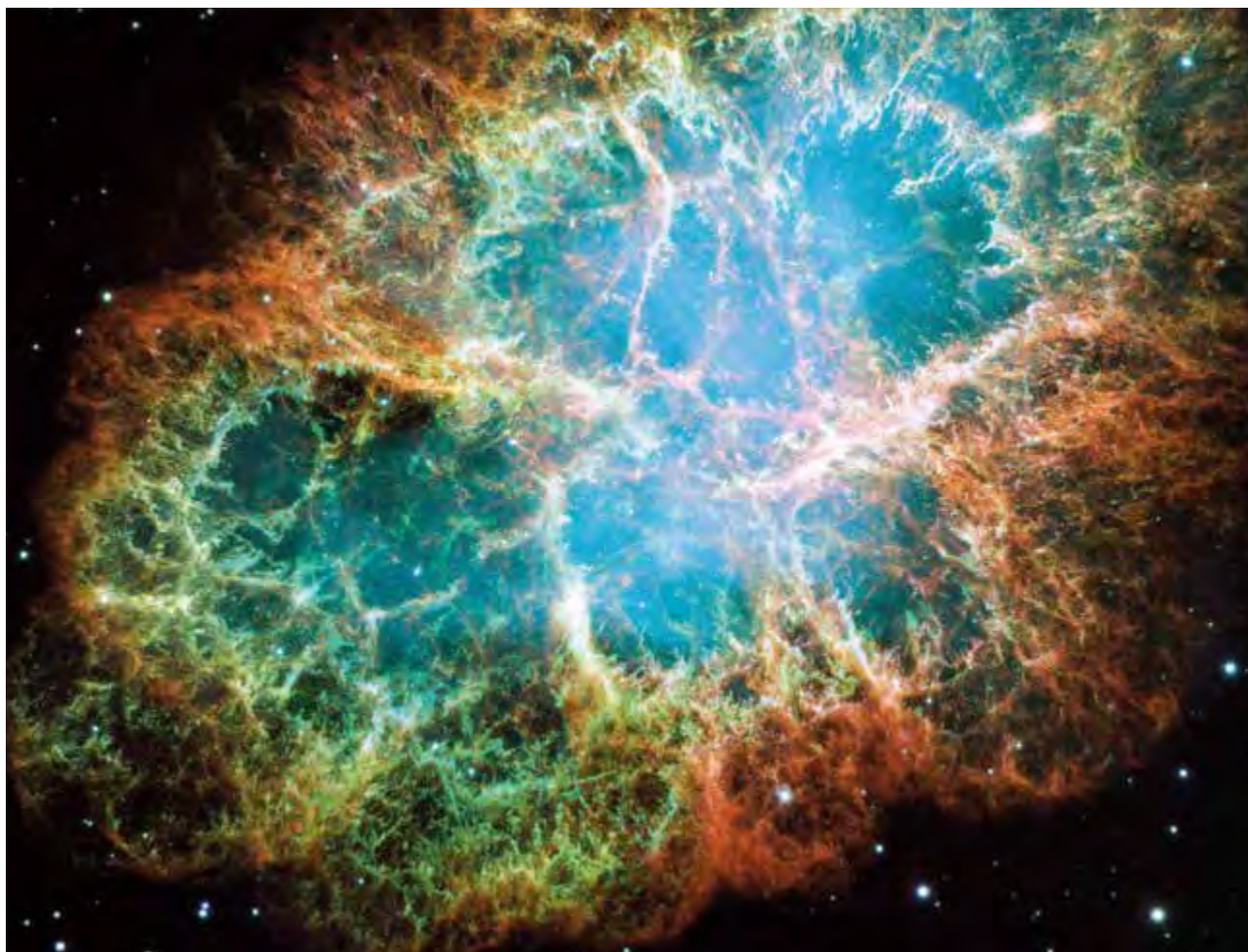


Figura 3. Els nuclis formats a les estrelles són dispersats a l'espai galàctic durant les grans explosions de supernoves. A més, en aquestes explosions es formen els nuclis més pesants que el ferro.

grans explosions, alguns d'ells també es poden formar, en proporcions més petites, a l'interior d'estrelles molt grans, abans d'explotar.

Però no es poden formar nuclis indefinidament grans. En efecte, el nombre d'elements estables és limitat, tot i que la fabricació de nuclis encara més pesants dels que coneixem és una tasca de recerca força interessant en física nuclear, malgrat que aquests nuclis siguin molt inestables. El límit superior al nombre d'elements estables és una conseqüència del fet que la repulsió electrostàtica entre els protons és de llarg abast, mentre que la força nuclear forta que manté la cohesió del nucli és de molt curt abast i només actua, pràcticament, entre nucleons continguts (*nucléol* és un nom comú que designa tant protons com neutrons). Per això l'energia de repulsió electrostàtica creix aproximadament com el quadrat del nombre atòmic (nombre de protons), mentre que l'energia de cohesió creix de manera aproximadament proporcional al nombre màssic (nombre de protons més neutrons). Així, per a nombres atòmics prou grans, els nuclis dels elements són inestables, tot i que alguns poden tenir semivides força llargues (*semivida* és el temps que una població de nuclis radioactius d'un determinat tipus triga a reduir-se a la meitat).

El resultat d'aquesta explosió és que l'espai proper a les estrelles primitives queda enriquit de materials pesants que permetran que les estrelles de segona i tercera generació (com ara el Sol) que es formin a partir d'ells puguin tenir sistemes planetaris amb àtoms pesants i planetes sòlids (com ara la Terra). Alguns d'aquests àtoms arribaran a constituir matèria viva. La cosmologia

moderna ens ha descobert, doncs, que estem fets de pols d'estrelles, i no de manera metafòrica, sinó ben literal.

Tal com veurem tot seguit, això té conseqüències filosòfiques molt interessants sobre la relació de la vida amb l'univers.

En principi, l'univers hauria de contenir la mateixa quantitat de partícules que d'antipartícules, ja que la simetria entre matèria i antimatèria és una condició de consistència entre física quàntica i relativitat especial

Quatre qüestions científiques, gairebé filosòfiques

Acabem de veure que, rere els elements de la taula periòdica, hi ha una història còsmica feta de fusions nuclears i d'explosions de supernoves d'on han sortit els àtoms que ens formen. Ara bé, la nostra realitat és molt més complexa i sorprenent del que hem dit, de forma que la majoria dels universos imaginables des de la física o bé no tindrien matèria, sinó tan sols llum, o bé estarien formats només d'hidrogen (o d'hidrogen i heli), sense cap altre element. La taula periòdica qüestiona, de fet, tota l'estructura matemàtica de les lleis físiques fonamentals de l'univers. Vegem quatre aspectes d'aquesta idea sorprenent.

L'asimetria entre matèria i antimatèria

En principi, l'univers hauria de contenir la mateixa quantitat de partícules que d'antipartícules, ja que la simetria entre matèria i antimatèria és una condició de consistència entre física quàntica i relativitat especial. Si hagués

estat així, però, matèria i antimatèria s'haurien anihilat en les primeres mil·lèsimes de segon de l'univers i només hi hauria quedat llum (radiació electromagnètica, si volem ser més precisos però menys poètics). Així, doncs, no és obvi que un univers hagi de contenir matèria. Que contingui matèria depèn, probablement, d'una ruptura molt lleugera de la simetria entre matèria i antimatèria en alguns pocs processos molt particulars: la desintegració de mesons neutres. Ara bé, la petita ruptura de simetria observada fins ara (és un dels temes de recerca notables del CERN, a Ginebra) tot just permetria que a l'univers hi hagués deu o quinze galàxies, en lloc de cent mil milions. La magnitud del desconeixement sobre aquest tema és, doncs, molt gran, ara com ara.

Les condicions matemàtiques per a l'existència dels elements químics

Que en un univers hi hagi matèria no garanteix de cap manera que hagi de contenir tants elements químics com hi ha en el nostre. Tot i que l'existència d'aquests àtoms ens sembla força natural, un estudi més detallat de les condicions necessàries per a la seva formació porta a sorpreses considerables. Càlculs detallats revelen que aquests àtoms no existirien si els valors de les constants físiques (com ara la constant de la gravitació, la càrrega o la massa de l'electró, la constant de la interacció nuclear feble, etc.) fossin lleugerament diferents del que són.

Per exemple, si la constant de la gravitació fos lleugerament inferior o superior, l'univers s'hauria expandit massa ràpidament perquè s'hi haguessin format galàxies, o bé s'hauria tornat a contraure abans que s'haguessin pogut formar galàxies, estrelles i nuclis pesants, o bé

l'existència de vida), la taula periòdica no hauria arribat al carboni, és a dir, tindria tan sols cinc elements, com a màxim.

La immensitat de l'univers, condició necessària per a la vida

La contemplació del cel nocturn ens fa sentir esbalaïts davant la immensitat del cosmos. L'observació científica fa encara més gran aquesta immensitat i porta el radi de l'univers fins a uns valors d'uns tretze mil vuit-cents milions d'anys llum. Però aquesta immensitat és una condició necessària per a l'existència de vida intel·ligent. En efecte, per tal que hi hagi un simple bacteri (format en bona part de carboni, nitrogen i oxigen), cal que abans hi hagi hagut una generació de grans estrelles on s'hagin pogut formar aquests elements. A continuació, les estrelles han d'haver explotat i escampat els seus nuclis pesants per l'espai galàctic. Després, s'ha d'haver format una nova estrella amb un sistema planetari que contingui algun planeta adient per a la vida, alhora que hi ha d'haver hagut una evolució prebiòtica que dugués fins a les primeres cèl·lules. Mentre es van desenvolupant aquests processos (uns set mil milions d'anys, aproximadament), el límit de l'univers visible es va expandint a la velocitat de la llum. Per tant, l'existència d'un bacteri necessita un univers de set mil milions d'anys llum de radi. Naturalment, aquesta relació entre dues magnituds tan diferents no tindria cap sentit si no fos a través de la història de la matèria.

L'envelliment de les galàxies i la fi de la vida al cosmos

El procés de formació de nuclis pesants va actuant a les estrelles. Això fa que, de mica en mica, la proporció dels elements a les galàxies vagi variant, des

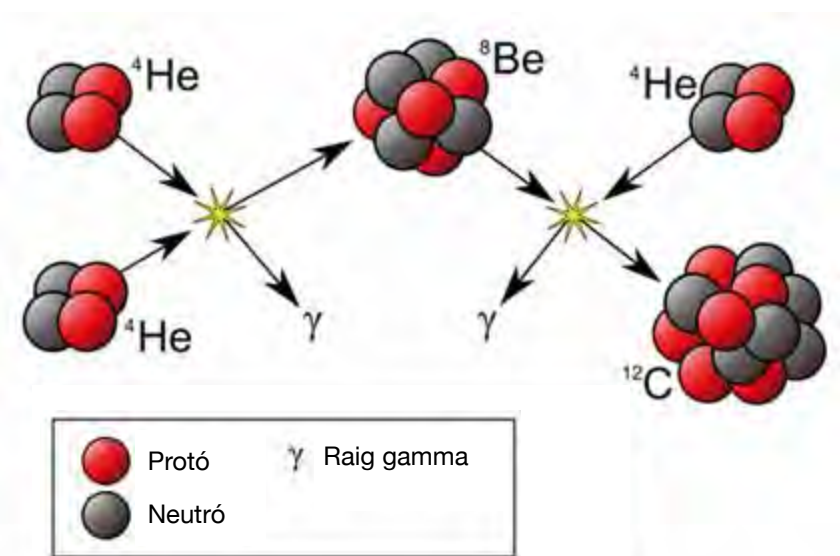


Figura 4. El carboni es forma per fusió nuclear de tres nuclis d'heli. Primer, dos nuclis d'heli en formen un de beril·li i, posteriorment, un altre nucli d'heli es fusiona amb el de beril·li. El rendiment final d'aquestes reaccions depèn crucialment d'uns nivells energètics concrets del beril·li i el carboni, que depenen dels valors de les constants físiques universals, que han d'estar molt ben sintonitzats. Altrament, gairebé no hi hauria carboni.

les estrelles cremarien massa ràpidament o massa lentament. Si la càrrega de l'electró fos lleugerament inferior o superior, la força dels enllaços químics seria inferior o superior de la que és, la qual cosa faria que o bé les molècules formades per aquests elements fossin molt inestables, o bé que fossin massa rígides i sense cap versatilitat. Si la constant d'interacció feble fos diferent, les estrelles haurien explotat en una fase molt inicial, sense que hi hagués hagut temps de formar oxigen ni nitrogen.

En particular, la formació dels nuclis de carboni per combustió nuclear de l'heli és especialment delicada, ja que depèn crucialment de l'existència d'un nivell d'energia del nucli de carboni lleugerament superior a l'energia del nucli de beril·li més el d'heli, i lleugerament inferior al de l'oxigen. En efecte, el carboni no es forma directament en la fusió simultània (molt improbable) de tres nuclis d'heli, sinó que dos nuclis d'heli en formen un de beril·li, amb el qual posteriorment es fusiona un altre nucli d'heli

per formar carboni (fig. 4). El rendiment del procés depèn, doncs, de l'estabilitat relativa del beril·li. Si és massa inestable, dura massa poc, i si és massa estable, la majoria dels nuclis d'heli que xoquin amb ell rebotaran sense fusionar-s'hi (per tant, la quantitat de carboni que es produiria seria molt petita). D'altra banda, el carboni, un cop format, pot incorporar per fusió un altre nucli d'heli i passar a formar oxigen. Si aquesta reacció fos molt eficaç, quedaria molt poc carboni. Per això la quantitat de carboni produïda depèn en gran mesura d'unes característiques nuclears que fan intervenir una sèrie de nivells nuclears d'energies ben sintonitzades no tan sols del carboni, sinó també del beril·li i l'oxigen. L'existència d'aquests nivells nuclears concrets depèn d'una sintonització força fina dels valors de les constants físiques fonamentals. Sense aquesta sintonització de valors (encara no explicada per la física actual, tret que suposi infinits universos i que per força hem d'estar en un que permeti

ANNEX

La taula periòdica

Mireu-los: a la dreta, els gasos nobles —en vermell, com els diumenges, com els dies de descans, perquè refusen combinar-se i són tranquils i desvagats—;

dalt de tot, com dues torres isolades, l'hidrogen i l'heli, els grans dominadors del contingut de l'univers —potser fóra més lògic posar-los com a arrels que com a cúpules, ja que són això: origen, fonament, arrel celest—;

sota d'ells, sis pisos més i, com dos soterranis, els lantànids i els actínids;

al sisè pis, les oficines de la vida —el carboni, el nitrogen i l'oxigen, tan fecunds: boscos i atmosferes, energies enterrades—;

al cinquè —seguim baixant—, tota la sorra de les platges i els deserts —el silici— i la sal de tots els mars —el clor, el sodi i el magnesi—;

al quart pis, el calci i el potassi —que amb el sodi del cinquè flueixen en els nervis com els somnis— i també, com una porta infranquejable, el ferro.

A partir d'ell, tot s'ha format amb violència, en grans explosions de supernoves: el coure del quart pis, la plata del tercer i, en el segon, l'or i el mercuri —fascinants— i el plom i el bari, tan densos.

Al primer pis, la brasa encara crema: el radi —i l'urani en el seu soterrani—, radioactius, com si volguessin recordar-nos el tumult eixordador del seu origen.

Al darrer soterrani predomina l'artifici: els àtoms són molt breus, un joc d'enginy que dura el temps de guanyar un nom i que es desfà —ja no fan cap falta: són una fatiga que el món no sap ben bé com suportar.

Mireu-los: aquí, els maons del món, arrenclerats en pisos, en prestatges, repetint regularment propietats, delatant una estructura més profunda,

ja no pas matèria eterna i immutable, sinó història en els estels, rastres de tempteigs, edificis de nivells i subnivells, núvols d'incerteses, flors combinatòries.

Venim de més enllà d'aquestes peces, anem no sabem on, però quin goig haver pogut comprendre rere d'elles la bellesa d'una lògica del món!

David Jou (*L'èxtasi i el càlcul*, 2002)

Gènesi

Els àtoms, creixent lentament en el ventre calent dels estels, reunint els protons i neutrons necessaris per ser no ja hidrogen tan sols, sinó heli, carboni, nitrogen, metalls pesants, cada cop més pesants, fins a ser pols projectada, expansiva en esferes creixents, pols molt estranya en oceans de buit i d'hidrogen...

Ah, quanta llum, quanta calor en els orígens d'aquesta matèria, ara palpable amb la mà, fins i tot ara mà que palpa, que estreny, que colpeja, que esquinça! Ara, a l'abast, restes d'estels primitius, antiquíssims...

David Jou (*L'èxtasi i el càlcul*, 2002)

d'un 75 % en massa d'hidrogen i un 25 % d'heli 4, i pràcticament un 0 % d'elements més pesants, fins a una situació en què la proporció d'hidrogen serà més petita i la dels altres elements, més gran. Això farà que la formació d'estrelles noves sigui cada vegada més difícil, menys freqüent, ja que, com més pesants són els nuclis, més protons tenen i més gran és

la força electrostàtica de repulsió entre si, la qual cosa demana més pressió per poder formar l'estrella. De fet, es calcula que a la nostra galàxia el ritme de formació actual de noves estrelles és unes cent vegades inferior al que era fa uns cinc mil milions d'anys. Aquest envelliment de les galàxies posarà fi a la vida a l'univers d'aquí a uns seixanta

mil milions d'anys, aproximadament, ja que les estrelles actuals s'aniran apagant o aniran explotant i no se'n formaran de noves.

Comentaris finals: matèria fosca i energia fosca

Tota la matèria de què hem parlat fins ara està composta per protons, neutrons i electrons: la

matèria que coneixem a la Terra. És aquesta, també, la matèria que omple l'espai exterior? Fins a quin punt podem suposar que tot l'univers està format per aquesta matèria? Fins fa relativament poc, se suposava que això era així: les línies espectrals que procedeixen de les diverses galàxies indiquen, efectivament, que els àtoms que les formen són com els de la Terra. Ara bé, s'han anat acumulant indicis del fet que la matèria que coneixem només forma, com a màxim, el 4 % de l'univers. La resta està constituïda per un 26 % de matèria fosca i un 70 % d'energia fosca, aproximadament.

La matèria fosca només estaria sotmesa a la interacció gravitatòria, però no a les altres tres. Per això, en no estar vinculada a la interacció electromagnètica, no emet cap mena de radiació lluminosa. I es creu que ha tingut un paper rellevant en la formació de les galàxies, les quals, sense l'atracció de la matèria fosca, no s'haurien pogut formar en tan sols tretze mil milions d'anys. També podria ser que estigués formada per partícules supersimètriques, les quals s'estan buscant activament al CERN i en altres laboratoris.

L'energia fosca, que acumula la major part de l'energia actual de l'univers, té una interacció repulsiva, en lloc d'atractiva com la gravitació. Per això la seva acció fa que el ritme d'expansió de l'univers es vagi accelerant, en lloc d'anar-se alentint, que és el que passaria si l'univers estigués dominat per la gravitació. Efectivament, el 1998, observacions de supernoves en galàxies molt llunyanes dugueren a la conclusió que en l'actualitat l'expansió de l'univers s'estaria accelerant, en lloc d'estar-se frenant. No sabem en què consisteix l'energia fosca. Podria ser el buit quàntic, en què la pressió és igual però de signe oposat a la densitat d'energia,

o cordes còsmiques, o altres tipus de constituents exòtics.

Conclusions

El materialisme clàssic considerava la matèria com a realitat única i definitiva, eterna, immutable des de l'inici de l'univers: la protagonista de la realitat. Aquesta visió ha canviat en la cosmologia moderna en diversos aspectes importants. La cosmologia indica que la matèria tingué un inici concret i una evolució que ha dut a un creixement de la complexitat pel que fa a la diversitat de nuclis atòmics.

El materialisme considerava la matèria com a realitat necessària, però l'existència d'una bona part de la matèria (el carboni i els nuclis encara més pesants) és extremament contingent i depèn molt sensiblement dels valors de les constants físiques fonamentals.

La matèria coneguda, que, segons el materialisme, era l'única realitat, passa a ser, com a màxim, el 4 % del contingut de l'univers, que podria estar dominat per una matèria fosca (amb interacció gravitatòria, atractiva) i una energia fosca (amb interacció repulsiva), totes dues encara desconegudes però molt més abundants que la matèria.

Enllà d'aquestes idees generals, hem vist com la cosmologia descriu la història dels diversos elements. El fet d'estudiar els processos concrets que porten a cadascun d'ells, les abundàncies relatives actuals i les abundàncies relatives futures són temes tractats per l'anomenada *nucleosíntesi estel·lar*. La química, tal com l'entendem, és a dir, protagonitzada per nivells electrònics als nuclis i per enllaços entre àtoms per formar molècules, no començà fins ben bé un milió d'anys després de l'inici de l'univers, quan la seva temperatura perme-

té que l'enllaç entre dos àtoms d'hidrogen per formar una molècula d'hidrogen no es trenqués immediatament. Per poder tenir molècules una mica més complicades, caldria esperar encara un parell de milers de milions d'anys, fins que va haver-hi àtoms (no tan sols nuclis) d'elements més pesants. La química, doncs, és força més jove que la física, si ens la mirem des d'una perspectiva còsmica.

Bibliografia

- CROSWELL, K. (1996). *Alchemy of the heavens*. Nova York: Anchor.
- HAWKING, S.; MLODINOW, S. (2010). *El gran disseny*. Barcelona: Columna.
- JOU, D. (2006). *El laberint del temps, la simfonia de la matèria*. Barcelona: Viena.
- (2008). *Reescribiendo el Génesis*. Barcelona: Destino.
- (2012). *Iniciación al mundo cuántico: De la danza de las partículas a las semillas de las galaxias*. Barcelona: Pasado y Presente.
- REES, M. (2011). *Seis números nada más: Las fuerzas profundas que ordenan el universo*. Madrid: Debate.



David Jou i Mirabent

És catedràtic de física de la matèria condensada a la Universitat Autònoma de Barcelona. La seva recerca està dedicada a la física fora de l'equilibri. Ha publicat uns dos-cents articles de recerca i sis llibres de física. És autor d'una àmplia obra poètica i assagística i membre de la Secció de Ciències de l'Institut d'Estudis Catalans.
A/e: david.jou@uab.cat.