

# Aprendre química amb els meteorits

Jordi Llorca

Departament de Química Inorgànica, Universitat de Barcelona, a/e: jordi.llorca@qi.ub.es

Els meteorits són sòlids naturals que ens arriben de l'espai i que ens donen l'oportunitat d'estudiar reaccions químiques que tenen lloc fora de la Terra i també els processos químics que van determinar la distribució dels elements a l'entorn on vivim. A l'interior dels meteorits es troben aliatges metàl·lics, silicats, sulfurs, fullerenes, molècules orgàniques i moltes altres espècies químiques força interessants que ens mostren que la química és, talment, una ciència universal.

Meteorites are natural solids that enter the Earth's atmosphere from space. They offer the opportunity to investigate chemical reactions outside the Earth and to examine chemical processes that determined the distribution of the elements in our environment. Metallic alloys, silicates, sulfides, fullerenes, organic molecules and many other interesting chemical species are found in the interior of meteorites and show us that chemistry is, in a very real sense, an universal science.

*És ben conegut que el gas hidrogen volatilitza el ferro. Si aquest gas forma núvols de vàries lligües d'alçada a l'atmosfera i una descàrrega elèctrica l'encén, el ferro dissolt es reuneix i forma una massa sòlida que cau en forma de bola de foc*

ALEXANDER VON HUMBOLDT, 1799

**E**l nostre entorn natural conté moltes espècies químiques diferents. Malgrat que només nou elements químics (oxigen, silici, alumini, ferro, magnesi, calci, sodi, potassi i titani) representen més del 99 % de tots els que tenim a l'abast, la resta d'elements també són presents en nombrosos minerals (hi ha més de quatre mil minerals diferents) i a l'atmosfera, i alguns concentrats de manera particular en els éssers vius per la funció que hi fan (com, per exemple, en els enzims). Però, a més de disposar d'un ampli ventall d'espècies químiques força diferents i interessants al nostre estimat planeta, també disposem de mostres que sovint ens arriben directament de l'espai i ens ajuden a comprendre la química que hi ha més enllà del nostre entorn: els meteorits.

No va ser fins al tombant del segle XIX que els meteorits van ser reconeguts com a mostres molt valuoses per a la ciència, gràcies a la seva procedència. En un principi, personatges tan il·lustres com Lavoisier (1743-1794) pensaven que els meteorits no eren més que roques sacsejades per llamps. D'altres, com Laplace (1749-1827), Biot (1774-1862) i Poisson (1781-1840), creien que els meteorits es formaven per fenòmens de coagulació de l'atmosfera (i ja hem vist què va escriure Humboldt el 1799!). Però els estudis sistemàtics de Chladni (1756-1827) a Alemanya —publicats en un llibre a Riga el 1794— i les anàlisis químiques meticuloses d'E. C. Howard (1774-1816) i de J. L. de Bournon (1751-1825) a Anglaterra —publicades a *Phil. Trans. Roy. Soc. London* el 1802— van fer que els científics s'adonessin que el que

en realitat tenien a les mans eren mostres molt més valuoses, sòlids que provenien directament de l'espai. Estudiar meteorits era estudiar altres mons i, alhora, saber més coses del nostre.

Avui sabem que la majoria dels meteorits provenen d'asteroides —aquest conjunt de cossos que mai van formar part de cap planeta i la majoria dels quals es troben situats entre Mart i Júpiter—, tot i que també en tenim algunes desenes que provenen de la Lluna i Mart. Des que es van començar a trobar a l'Antàrtida i d'altres deserts de manera abundant ara fa uns vint-i-cinc anys, ara com ara tenim més de trenta mil meteorits classificats arreu del món. Per cert, molt recentment, el

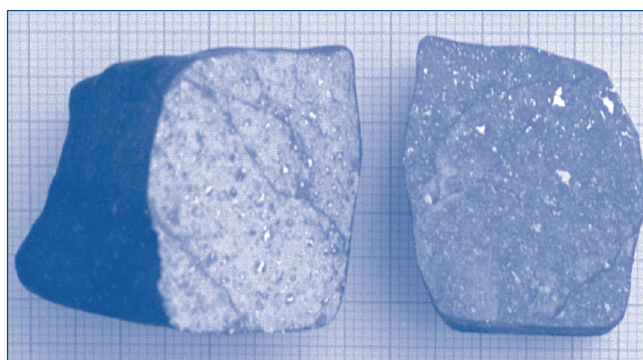


FIGURA 1. Fotografia d'un dels meteorits que van caure al nord de Palència el dia 4 de gener de 2004. Es tracta d'un meteorit constituït de manera majoritària per  $(\text{Fe}_{0,48}\text{Mg}_{1,52})\text{SiO}_4$ ,  $(\text{Fe}_{0,2}\text{Mg}_{0,8})\text{SiO}_3$ , FeS i aliatges metàl·lics de Fe,Ni. En travessar l'atmosfera, els meteorits resten coberts per una capa fosca de vidre i  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , que s'origina per l'oxidació amb l'aire durant el seu descens a gran velocitat.

4 de gener de 2004, en va caure un a Palència (figura 1). Els meteorits poden ser microscòpics o pesar milers de quilograms, però tots tenen una cosa en comú, són els sòlids més antics que coneix l'ésser humà. Les seves edats arriben fins als gairebé 4.600 milions d'anys (segons datació isotòpica de  $^{87}\text{Sr}$ - $^{87}\text{Rb}$ ), és a dir, tot just es començaven a formar les primeres fases químiques de la Terra a partir d'un núvol de gas calent.

Malgrat que els meteorits no saben res de la divisió de la ciència en disciplines i parcel·les, la veritat és que l'estudi d'aquests desperta avui l'interès tant de químics com de físics i geòlegs. Des del punt de vista de la física, els meteorits són interessants perquè permeten reconstruir molts episodis de la formació i l'evolució del sistema solar. Per a la geologia els meteorits representen roques que s'han format i transformat d'una manera molt diferent de com ho fan les roques a la Terra i, per tant, permeten saber com són uns altres planetes. Finalment, per a la química l'estudi dels meteorits permet entendre la distribució dels elements químics al nostre entorn i estudiar reaccions químiques i la formació d'espècies químiques en condicions extremes de temperatura, pressió, redox, etc. Molts químics il·lustres, com ara Lavoisier, Proust, Berzelius, Vauquelin, Berthelot, Wöhler i Urey, per citar-ne alguns, van dedicar-se a estudiar meteorits, i llurs resultats van ser discutits i publicats a les societats científiques i revistes de l'època. Alguns treballs emblemàtics —a més dels de Chladni i Howard— són els que van publicar Lavoisier el 1777 a *Jour. de Phys.*, que representa la primera anàlisi química coneguda d'un meteorit (en concret, va analitzar el meteorit de Lucé, caigut a França el 1768); Proust, el 1799, també a *Jour. de Phys.*, sobre la composició química d'un meteorit de 30 tones trobat a Amèrica pels exploradors espanyols al segle XVI, i Berzelius, el 1824, a *Ann. Phys. Chem.*, on va descriure per primer cop l'existència de molècules orgàniques en un meteorit (en aquest cas, en el meteorit d'Alais, caigut a França el 1806). Avui la química continua estudiant a fons els meteorits, els quals segueixen sent una font rica i actual de nous coneixements. A continuació en veurem uns quants exemples.

## De què estan fets els meteorits?

Per començar a parlar dels meteorits des del punt de vista de la química, cal saber molt bé quina és la seva composició. És el que sempre fem els químics davant una mostra desconegu-

da: agafar una alíquota representativa i analitzar-la amb totes les eines de què disposem. Això ho podem fer en dues etapes. Primer podem parlar de la seva composició elemental i després discutir quines són les fases químiques que hi són presents, és a dir, com es troben enllaçats els àtoms entre si. El que passa, però, és que els meteorits són mostres naturals que provenen de llocs diferents i que no sempre han experimentat els mateixos processos químics, de manera que escollir una mostra representativa de tots no és fàcil, per no dir impossible. Per això els meteorits se'ls classifica en tres grans famílies, segons la quantitat d'elements químics en estat d'oxidació zero que contenen, i es tracta cadascuna per separat. Es poden dividir en: rocosos (< 10 % de metall lliure), metàl·lics (> 90 %) i metal·lorocosos (~ 30 %-50 %). Ara, com a mínim, tots els membres de la mateixa família s'assemblen entre si. No és l'objecte d'aquest article discutir sobre el significat de les famílies ni la seva subsegüent classificació en més grups (n'hi ha més de quaranta), això ja forma part d'altres disciplines. Cal dir que la majoria dels meteorits no s'assemblen en res amb els espectaculars trossos de metall irregulars i pesants que llueixen a molts museus d'història natural i en llibres de text (la família dels meteorits metàl·lics). De manera aproximada, el 95 % de tots els meteorits que cauen a la superfície de la Terra pertanyen a la família dels meteorits rocosos, mentre que només el 5 % restant corresponen als metàl·lics (~ 3,5 %) i metal·lorocosos (~ 1,5 %).

En la figura 2 es mostren la composició elemental i les fases químiques predominants dels meteorits rocosos i metàl·lics. Els meteorits rocosos —de bon tros els més abundants— estan

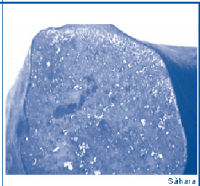
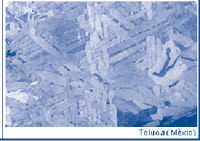
	Composició elemental	Fases químiques	
Meteorits rocosos	O	34,5	<p><i>Meteorit de Sahara</i></p> 
	Fe	29	
	Si	16	
	Mg	14	
	Ni	1,7	
	S	1,4	
	Ca	1,1	
	Al	1,0	
	Na	0,7	
	Cr	0,3	
	Mn	0,2	
	Co	0,1	
Meteorits metàl·lics	Fe	90,5	<p><i>Meteorit de Tolosa (Mèxic)</i></p> 
	Ni	8,0	
	S	0,7	
	Co	0,5	
	P	0,2	
	C	0,1	

FIGURA 2. Composició química elemental mitjana i fases químiques més abundants (tant per cent en pes) dels meteorits rocosos i metàl·lics. Es mostra també una fotografia representativa de l'interior d'un meteorit de cada família.

constituïts de manera majoritària per silicats, per això els elements que hi predominen són ferro, magnesi, silici i oxigen. Els silicats més comuns presenten estructures cristal·lines senzilles, com ara grups  $\text{SiO}_4^{4-}$  aïllats —de fórmula general  $(\text{Fe,Mg})_2\text{SiO}_4$ — i grups  $\text{SiO}_4^{4-}$  formant cadenes —de fórmula general  $(\text{Fe,Mg,Ca})\text{SiO}_3$ . Les següents fases químiques més abundants en els meteorits rocosos són aliatges metàl·lics constituïts per ferro i níquel — $\text{Fe}_{0,8-0,95}\text{Ni}_{0,05-0,2}$ —, sulfur de ferro(II) — $\text{FeS}$ — i un òxid doble de ferro(II) i crom(III) — $\text{FeCr}_2\text{O}_4$ . A més, en alguns hi ha tot un reguitzell d'altres fases químiques que, tot i ser minoritàries, són força interessants des del punt de vista de la química per la informació que proporcionen. D'entre aquestes destaca la presència de perovskita — $\text{CaTiO}_3$ —, ful·lerens i, fins i tot, nombroses molècules orgàniques (aminoàcids, hidrocarburs, bases nitrogenades, sucres...).

Pel que fa als meteorits metàl·lics, els elements majoritaris són el ferro i el níquel, mentre que el cobalt, carboni, fòsfor i sofre hi són elements minoritaris. Els elements traça més importants són coure, germani, crom i gal·li. Gairebé tots els meteorits metàl·lics estan constituïts per aliatges de ferro i níquel com els que hi ha als meteorits rocosos. Unes altres fases químiques comunes són el grafit i compostos binaris de ferro, com ara  $\text{Fe}_3\text{P}$ ,  $\text{Fe}_3\text{C}$  i  $\text{FeS}$ . Els meteorits metal·lorocosos tenen una composició intermèdia entre els rocosos i els metàl·lics.

## Oxidant o reductor?

L'espai, és oxidant o reductor? Les condicions redox naturals del nostre entorn, sabem molt bé que, en general, són oxidants (de manera molt localitzada es donen condicions reductores provocades per microorganismes o en ambients volcànics), per això molts metalls s'extreuen d'òxids, òxids hidratats i carbonats, com ara el ferro (a partir de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{FeO}(\text{OH})$  i  $\text{FeCO}_3$ ), el manganès (a partir de  $\text{MnO}_2$ ), el titani (a partir de  $\text{TiO}_2$  i  $\text{FeTiO}_3$ ), l'estany (a partir del  $\text{SnO}_2$ ), etc. Però això no sempre ha estat així. La nostra atmosfera no sempre ha tingut un 20 % d'oxigen, aproximadament. De fet, la presència d'oxigen a l'atmosfera de la Terra és un fet molt particular: és la conseqüència de l'existència de vida a la Terra. Ara fa uns tres mil milions d'anys els organismes fotosintètics van canviar l'atmosfera primitiva de la Terra —llavors dominada per  $\text{CO}_2$  i  $\text{N}_2$ , com ho són encara els nostres plane-

tes veïns Venus i Mart— en assimilar  $\text{CO}_2$  per al seu metabolisme i alliberar  $\text{O}_2$ . Va ser tot un canvi climàtic autèntic i dràstic. Llavors, quines condicions redox regnaven a la superfície del planeta abans que no hi hagués oxigen a l'atmosfera? Quines espècies químiques dominaven l'entorn? La resposta la trobem en els meteorits.

Ja hem vist que el criteri per a classificar els meteorits en famílies es basa en la quantitat de metall lliure que contenen. Després de milers de milions d'anys badant per l'espai, el fet que els meteorits continguin quantitats importants de metall en estat d'oxidació zero indica, sens dubte, que l'espai és un medi reductor. De fet, malgrat que les densitats a l'espai són extraordinàriament baixes (per sota de  $1.000 \text{ àtoms}\cdot\text{cm}^{-3}$ ), la seva composició està dominada per  $\text{H}_2$  i, en menor proporció,  $\text{CO}$ , dues espècies químiques reductores ben conegudes. La Terra també s'ha format a l'espai a partir dels mateixos materials que avui trobem en els meteorits rocosos. Per tant, les condicions inicials al nostre planeta eren reductores i les fases químiques, les mateixes que avui veiem en els meteorits rocosos més antics.

## Un exercici de condensació: les primeres fases químiques a l'espai

Entendre com es formen els sòlids a l'espai és el mateix que entendre com se separa el nitrogen, l'oxigen i l'argó de l'aire. En la indústria el que es fa és liquar aquests tres components de l'aire a 73 K i després se sotmet la mescla a una destil·lació fraccionada, de manera que a 77,2 K bull i se separa el nitrogen, a 87,1 K, l'argó i a 90 K, l'oxigen. Doncs a l'espai passa una cosa semblant, a partir del refredament d'un núvol de gas calent es formen i se separen els sòlids segons la seva temperatura de condensació. Si el que volem és reproduir la seqüència de condensació dels sòlids a partir del núvol de gas que va originar la Terra, el que hem de fer primer és definir la seva composició elemental inicial. Tenint en compte que el Sol representa més del 99 % de la massa del sistema solar, podem considerar que la seva composició és prou representativa del núvol que el va originar. Aquesta suposició rep també el suport per part dels meteorits. En comparar la composició elemental del Sol i la dels meteorits més antics, és a dir, aquells que no han patit transformacions químiques importants des que es van formar, es veu que ambdues composicions són

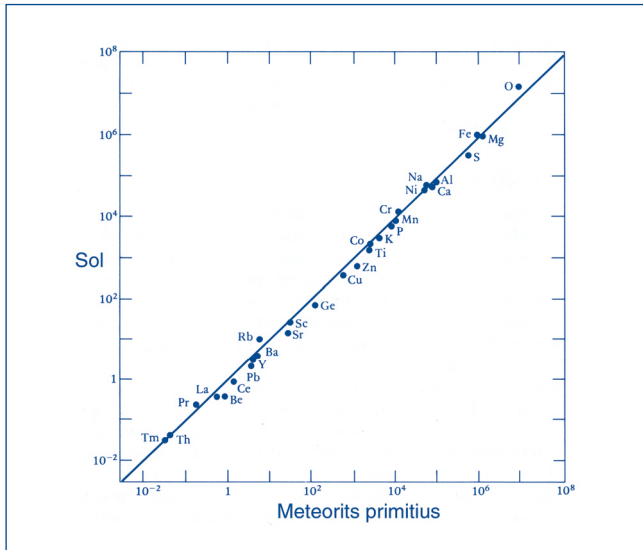


FIGURA 3. Comparació de les abundàncies dels elements químics en el Sol i en els meteorits rocosos més primitius. Totes les dades estan normalitzades a  $10^6$  àtoms de Si. L'abundància d'un determinat element és la mateixa en ambdós llocs si es troba a sobre de la línia diagonal.

gairebé idèntiques (figura 3), a excepció, és clar, dels elements més lleugers, com l'hidrogen i l'heli, que només poden quedar retinguts en cossos amb molta gravetat, com el Sol. La composició elemental del Sol es mesura en l'espectre d'absorció de la fotosfera. Si comparéssim la composició elemental del Sol amb la de qualsevol altre objecte del nostre entorn, veuríem que no es manté la proporcionalitat, ja que la Terra i la resta dels planetes han experimentat múltiples processos químics que han fet que els elements s'hagin redistribuït a escala global, com veurem més endavant.

Si ara agafem un gas amb la composició del Sol i el comprimim i refredem a poc a poc, el que obtenim, a grans trets i en condicions d'equilibri termodinàmic, és el següent (figura 4):

1. Els primers sòlids que es formen són aliatges de Re, Os, Zr i W per sobre de 1.700 K. A uns 1.600 K condensen l'alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), la perovskita ( $\text{CaTiO}_3$ ) i un silicat doble d'alumini i calci,  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ . Poc després condensa l'espinel·la  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ . Totes aquestes fases són molt refractàries.
2. A uns 1.390 K apareix un altre silicat,  $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ , i aliatges de Fe, Ni i Co. Poc després, a 1.370 K condensa el silicat  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ , i més tard  $\text{MgSiO}_3$ .

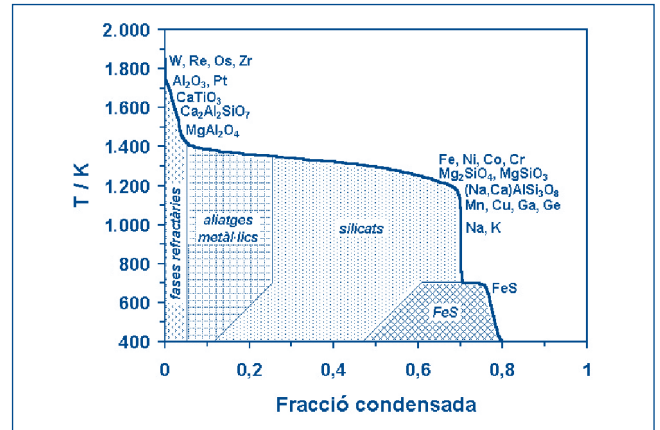


FIGURA 4. Seqüència de la formació de fases químiques a l'espai a partir del refredament d'un gas amb composició solar. Tant les fases químiques que en resulten com el seu ordre d'aparició coincideixen amb les dels meteorits més primitius.

3. Per sota de 1.250 K condensen el Mn, Cu, Ge i Ga, els quals formen solucions sòlides en les fases metàl·liques preexistents. Després, a uns 1.000 K, condensen el Na i K que, igual que el Fe, entren a formar part de solucions sòlides en els silcats.
4. Finalment, a uns 750 K es forma el FeS, i per sota condensen altres espècies químiques més volàtils.

Com podem saber si això va passar certament d'aquesta manera? Només hem de tornar a examinar els meteorits més antics, aquells la composició elemental dels quals hem vist que coincideix amb la del núvol de gas inicial i que, per tant, representen un sistema tancat. Com que els meteorits són mostres sòlides que podem analitzar molt bé al laboratori, no només es poden realitzar anàlisis químiques elementals i identificar les fases químiques que hi són presents, sinó que també es pot estudiar l'estructura d'aquestes fases químiques, així com realitzar anàlisis isotòpiques per a determinar-ne l'edat, és a dir, en quin ordre van aparèixer. Doncs bé, les fases químiques més antigues dels meteorits rocosos són uns agregats refractaris rics en Ca, Al i Ti i petites quantitats de metalls de transició del grup del platí. Aquests elements es troben bàsicament en forma d'alúmina, perovskita i  $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{SiO}_7$ , que són exactament les primeres fases sòlides a formar-se a l'espai, segons prediu el model de condensació que hem explicat. A més, alguns dels agregats rics en Ca, Al i Ti mostren estructures concèntriques com si fossin cebes, on les fases amb temperatura de condensació menor han crescut al voltant

de les de més temperatura de condensació. Segons això, podem dir que els nostres models de formació de fases químiques a l'espai són bons. Hi ha, però, algunes petites excepcions. En aquests mateixos meteorits rocosos primitius també s'ha trobat fases químiques —com grafit, diamant, ful·lerens, SiC— amb una composició isotòpica que indiquen que provenen directament d'unes altres estrelles. En explotar o dispersar el seu contingut a l'espai, aquests sòlids es van incorporar des de les estrelles al nostre núvol de gas calent i van sobreviure!

## Ful·lerens naturals i ful·lerens sintetitzats al laboratori

El 1996 Curl, Kroto i Smalley van rebre el premi Nobel de Química per haver descobert els ful·lerens el 1985. Els ful·lerens són molècules de carboni en les quals els àtoms es troben enllaçats tot definint una estructura tridimensional tancada. El nombre d'àtoms de carboni de l'estructura pot variar, per la qual cosa el nombre de ful·lerens que es coneixen és gran; el més conegut és el  $C_{60}$ , que té l'estructura d'un icosaèdre truncat (dotze pentàgons i vint hexàgons, la mateixa que té una pilota de futbol i la cúpula geodèsica inventada per l'arquitecte Buckminster Fuller, de qui prové el nom d'aquestes molècules). No cal dir que avui existeix una química molt àmplia relacionada amb la síntesi de nous ful·lerens i els seus derivats (se'n coneixen més de deu mil), així com les seves possibles aplicacions, però el que ens interessa ressaltar aquí és que en els meteorits també s'han trobat ful·lerens. De fet, la descoberta dels ful·lerens va ser casual i va tenir molt a veure amb l'espai. Kroto volia assignar les bandes dels espectres rotacionals i vibracionals que s'obtenien de l'espai a molècules concretes, que pensava que havien de ser cadenes lineals de carboni i nitrogen. D'aquesta manera, va cercar l'ajut de Curl i Smalley, especialistes en química de clústers, que havien dissenyat i construït un aparell per vaporitzar i formar un plasma d'àtoms de qualsevol substància, i després estudiar la naturalesa i distribució dels clústers que se'n formaven en refredar. El primer que van fer els tres investigadors va ser estudiar la vaporització del carboni, i van obtenir el  $C_{60}$  (majoritari) i el  $C_{70}$ . La gran estabilitat del  $C_{60}$  (avui en dia aquest i altres ful·lerens es venen comercialment) va fer que els investigadors proposessin l'estructura d'un icosaèdre truncat per a aquesta molècula.

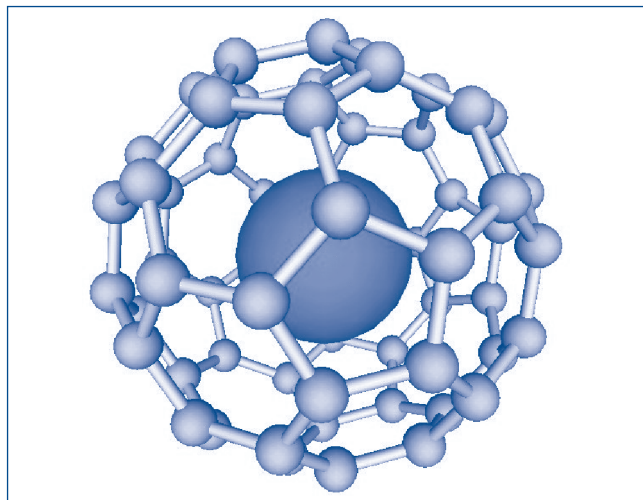


FIGURA 5. Estructura del ful·lerè  $C_{60}$ . Dins dels ful·lerens que hi ha en els meteorits es troben capturats àtoms de He o Ar, amb una distribució d'isòtops que demostra que els ful·lerens es van sintetitzar a l'espai.

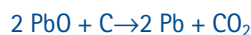
Poc després, el 1990, es va poder aïllar i, per tant, confirmar l'estructura del  $C_{60}$ .

Després de la descoberta dels ful·lerens al laboratori, va començar la recerca de ful·lerens arreu. Fora del laboratori, la síntesi de ful·lerens a la Terra és difícil, ja que l'oxigen i el nitrogen de l'aire n'impedeixen la formació. En canvi, a l'espai això no passa. La quantitat de ful·lerens que hi ha en alguns meteorits és certament petita, d'unes 20 ppb, però suficient per poder-los estudiar a fons. Una de les característiques més notables dels ful·lerens és que, a causa de l'estructura tancada, tenen una cavitat interna prou gran que pot ser ocupada per altres espècies químiques, com ara gasos nobles i molècules petites (figura 5). Les espècies encapsades no poden sortir del ful·lerè sense que es trenquin enllaços C-C. A l'espai, els ful·lerens també capturen els gasos nobles que hi ha al seu voltant en el moment que es formen, de manera que els ful·lerens que es troben en els meteorits contenen He (és el segon element més abundant de l'Univers després de l'hidrogen) i, en menor proporció, Ar. La proporció dels isòtops d'heli  $^3\text{He}/^4\text{He}$  dels ful·lerens dels meteorits és entre dues i tres vegades superior a la que hi ha a la Terra, cosa que demostra, sens dubte, que aquests ful·lerens es van formar a l'espai (on hi ha força  $^3\text{He}$ , un dels productes del Big Bang). Després, aquests ful·lerens naturals van sobreviure en el núvol de gas, des d'on van condensar els sòlids del nostre entorn i, finalment, van quedar atrapats intactes en alguns meteorits.

## Un gresol molt gran

Com és que les espècies químiques del nostre entorn són avui tan diferents als meteorits si tot ha sortit del mateix núvol de gas? Què ha passat amb les fases químiques que es van formar a l'espai i van originar la Terra? Quins processos químics són els responsables de la distribució dels elements químics al nostre planeta? Saber la resposta a aquestes preguntes ens permet entendre quines espècies químiques són les matèries primeres dels elements químics al nostre entorn.

Discutir sobre la distribució dels elements químics a la Terra és una cosa semblant a discutir un procés metal·lúrgic. Als laboratoris de pràctiques de química sovint es fa una experiència molt il·lustrativa: s'agafa PbO i carbó, se'ls barreja bé i se'ls afegeix un font, com ara NaCl. La mescla sòlida s'introdueix en un gresol i s'escalfa amb el bec de Bunsen al roig. Després d'una estona es deixa refredar el gresol i al fons apareixen uns botons metàl·lics de Pb. Senzillament, el carbó ha reduït l'òxid de plom a plom metàl·lic, el qual s'ha enfonsat al fons del gresol perquè té una densitat més gran que la resta de la mescla:



A la Terra ha passat una cosa semblant. Mentre aquesta s'estava acabant de formar a partir del núvol de gas calent i gràcies també a l'energia alliberada durant la desintegració radioactiva d'isòtops inestables com  $^{235}\text{U}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  i  $^{87}\text{Rb}$ , principalment, els elements químics es van distribuir a partir de les seves característiques redox, densitats i afinitats químiques. A diferència de la pràctica amb el PbO, l'agent reductor que va determinar la distribució dels elements químics a la Terra no va ser el carboni sinó el ferro, una espècie química molt abundant en el núvol de gas inicial, tal com veiem en els meteorits. D'aquesta manera, en el gran forn que era la Terra, els cations dels elements químics amb potencials redox estàndards més grans que el ferro ( $E^\circ(\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}) = -0,43 \text{ V}$ ) es van reduir a l'estat metàl·lic i, en fer-ho, van formar aliatges amb l'excés de ferro metàl·lic. Aquests aliatges eren molt més densos que les fases químiques del voltant i es van anar enfonsant fins a formar el que seria el nucli del nostre planeta. Així, elements relativament abundants inicialment, com el níquel ( $E^\circ(\text{Ni}^{2+}/\text{Ni}) = -0,25 \text{ V}$ ) i el cobalt, i d'altres no tan abundants, com el platí, el ruteni i l'iridi, es van concentrar al nucli de la Terra i la seva abundància a l'escorça —que és d'on extraiem

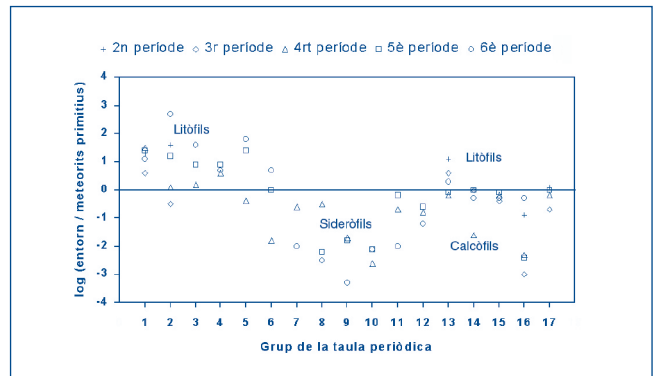
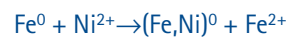


FIGURA 6. Relació entre les abundàncies dels elements químics a l'escorça de la Terra i en els meteorits rocosos més primitius, que és aproximadament la mateixa que la del conjunt de la Terra. En l'eix d'abscisses s'han ordenat els elements químics segons la seva posició en la taula periòdica. Es veu com l'escorça està enriquida d'elements dels primers grups de la taula periòdica, elements litoòfils. En canvi, l'escorça està empobrida d'elements de transició, perquè aquests, elements sideròfils, s'han concentrat al nucli de la Terra. El mateix passa amb alguns elements calcòfils del bloc *p*.

els metalls amb processos químics— va minvar de manera molt important (figura 6):



Goldschmidt va ser el primer a anomenar, el 1923, aquests elements químics *elements sideròfils* —'que estimen el ferro'—, a causa del seu comportament químic. Aquesta classificació dels elements químics continua amb els elements anomenats *litoòfils* —'que estimen l'oxigen'—, elements *calcòfils* —'que estimen el sofre'—, elements *atmòfils* i elements *biòfils*. Els elements litoòfils tenen potencials redox estàndards més petits que el ferro i formen els òxids, silicats i altres fases químiques de l'escorça terrestre que no van formar part de la formació del nucli en no poder ser reduïts pel ferro, per exemple, sodi, potassi, calci i alumini. Els elements calcòfils són aquells que trobem amb facilitat en forma de sulfurs al nostre entorn, com coure, plom, zinc, mercuri, arsènic, i també el ferro (alguns elements químics formen part de més d'una família); segons el concepte *àcid base* de Pearson, els seus cations són àcids tous que prefereixen formar enllaç químic amb una base tova com el  $\text{S}^{2-}$  en lloc d'una base dura com  $\text{O}^{2-}$ . Finalment, els elements químics atmòfils són aquells que es troben sense formar enllaços químics amb altres elements a l'atmosfera, com ara l'oxigen, el nitrogen i els gasos nobles, i els elements biòfils es troben concentrats en els éssers vius.

I què té a veure això amb els meteorits? Ja hem dit que la gran majoria dels meteorits són roques primitives dominades per silicats i fases metàl·liques (el resultat de la condensació del núvol de gas inicial), però també hem vist que n'hi ha de metàl·lics. La composició dels meteorits metàl·lics està dominada de manera gairebé exclusiva per aliatges de ferro i níquel i petites quantitats d'altres elements sideròfils. Només dos són els aliatges que hi predominen, l'un amb empaquetament cúbic centrat al cos i pobre en níquel, l'altre amb empaquetament cúbic centrat a les cares i ric en níquel. En entrar en contacte els dos aliatges, té lloc una reacció en estat sòlid, els àtoms de níquel es difonen des de l'aliatge ric en níquel cap a l'aliatge pobre en níquel. La mesura del grau de difusió del níquel a la interfície dels dos aliatges depèn de la velocitat de refredament de la mescla i ens diu que els meteorits metàl·lics són mostres del nucli d'asteroides grans que també s'han comportat com forns, com la Terra i el nostre gresol que contenia botons de Pb metàl·lic. En els diferents tipus de meteorits tenim la prova tangible de com es van distribuir els elements químics a la Terra i quines fases químiques es van formar inicialment. Així, mentre que els meteorits rocosos més antics representen el material a partir del qual es va formar el nostre planeta, els meteorits metàl·lics són el resultat de la distribució dels elements químics al seu interior. En particular, aquests meteorits —dominats per Fe, Ni, Co i S— representen mostres del nucli del nostre planeta. Els meteorits metal·lorocosos —el tipus menys freqüent— representen zones de transició entre el nucli i les zones més externes.

## L'extinció dels dinosaures i els metalls de transició

Ara fa uns seixanta-cinc milions d'anys els dinosaures i moltes altres espècies vives van desaparèixer de manera sobtada de la Terra. Això ho hem sentit dir moltes vegades, i també que la causa d'aquesta gran extinció va ser l'impacte d'un meteorit d'uns 10 km de diàmetre (d'aquests n'hi ha encara uns quants centenars propers a nosaltres). Però per què un meteorit? No hi ha cap altra explicació, diguem-ne, menys rebuscada? La raó ens la dona la química. Segons el que hem dit fins ara, els meteorits rocosos són el resultat de la condensació del núvol de gas inicial, de manera que la distribució dels elements químics que presenten és la que hi havia al gas. D'altra banda, a la Terra, els elements sideròfils es van

concentrar al seu nucli, mentre que els elements litòfils ho van fer a les zones més externes, per això la concentració d'elements sideròfils al nostre entorn és més baixa que no pas en els meteorits. Doncs bé, resulta que just en els sediments d'arreu que corresponen al moment de l'extinció dels dinosaures i d'altres espècies, hi ha una concentració anormalment elevada d'alguns metalls de transició que a l'escorça de la Terra són especialment escassos. Parlem, per exemple, de l'iridi i l'osmi. Aquests i uns altres metalls de transició tenen una concentració dos ordres de magnitud superior que la que hi ha a qualsevol altre sediment. No hi ha cap procés químic o físic capaç de concentrar un sediment en aquests elements arreu del món. L'única explicació possible és que aquests elements sideròfils hagin vingut directament d'un meteorit. I per si algú encara té dubtes, a més d'haver-se trobat un cràter de cent vuitanta quilòmetres de diàmetre provocat per un meteorit fa exactament seixanta-cinc milions d'anys a la península de Yucatán (Mèxic), en els sediments corresponents a l'extinció també s'han trobat ful·lerens que contenen heli encapsat amb la mateixa proporció isotòpica  $^3\text{He}/^4\text{He}$  que la dels ful·lerens dels meteorits! En aquest cas, conèixer la composició química dels meteorits ens ha ajudat a desgranar alguns dels episodis més sorprenents de l'evolució de la vida a la Terra.

## El níquel de Sudbury

Ja hem dit que el níquel és un element químic sideròfil i que, per tant, es troba concentrat de manera preferent al nucli metàl·lic de la Terra. Així, el núvol de gas inicial tenia un contingut en níquel del 2 % en pes, aproximadament, mentre que a l'escorça té una concentració de només 75 ppm. Potser per això es va descobrir tardanament; va ser Axel Cronstedt, a Suècia, el 1751, però llavors no es va pensar que fos un element químic nou sinó una aparença diferent del ferro. No va ser fins al 1796 que es va reconèixer el níquel com un element químic més.

Inicialment, l'extracció del níquel es va dur a terme a diversos llocs del planeta, però l'any 1883 va tenir lloc un esdeveniment inesperat que faria canviar completament aquest escenari: els treballadors de la Canadian Pacific Railway van descobrir una gran mina de metalls mentre construïen un ferrocarril a l'oest del Canadà. Les mines de Sudbury, a uns 400 km al nord de Toronto. A partir d'aquell moment es van

començar a excavar quilòmetres i quilòmetres de túnels i a extreure tones i tones de minerals molt rics en níquel i que també contenien quantitats importants d'altres metalls, com coure, plata, or i altres elements de transició del grup del platí. Les fases químiques eren, essencialment, sulfurs:  $(\text{Cu,Fe,Ni})\text{S}_2$ ,  $(\text{Fe,Ni})_9\text{S}_8$  i  $(\text{Fe,Ni})_{1-x}\text{S}$ . La indústria del níquel emergia així a Sudbury i gairebé tot el níquel del món s'obtenia d'aquest indret. A partir del 1912 el seu ús en la fabricació de l'acer inoxidable es va fer extensiu i va començar a haver-hi una demanda cada cop més important d'aquest element (l'acer inoxidable conté al voltant del 8 % de níquel). Avui en dia, a més de l'acer inoxidable i d'altres aliatges, el níquel té també un mercat molt important en la indústria electrònica i en la preparació de catalitzadors. Actualment, i després d'haver-se foradat més de 5.000 km de túnels (és a dir, més que la distància que separa Barcelona de Moscou), un 30 % de la producció mundial de níquel continua obtenint-se de Sudbury.

El que poca gent sap és que les mines de Sudbury tenen el seu origen en un cràter de 250 km de diàmetre originat per la caiguda d'un meteorit ara fa uns mil vuit-cents milions d'anys, un com el que va provocar l'extinció dels dinosaures. Tot i que els meteorits són rics en aquest element químic, el níquel de Sudbury no prové del meteorit que va caure sinó que és el resultat indirecte de la formació del cràter. Els meteorits viatgen a l'espai amb velocitats de desenes de milers de quilòmetres per hora. Els meteorits petits es desacceleren per fricció amb l'atmosfera, però els grans —com el que va originar el cràter de Sudbury— no, cosa que fa que el xoc amb la Terra sigui molt violent i, per tant, es desprengui una gran quantitat d'energia. El resultat és doble, d'una banda es vaporitza la major part del meteorit i d'una altra, es crea un cràter. El cràter de Sudbury és tan gran que va desestructurar el sòl i es van formar els dipòsits minerals durant els anys següents. Per tant, el níquel de les mines d'aquest element més importants del món no prové directament d'un meteorit —com es pot llegir de manera errònia en algun llibre— sinó que és el resultat indirecte i fortuït del xoc d'un meteorit, perquè si el mateix esdeveniment hagués tingut lloc en un altre lloc del planeta segurament no s'haurien format mai dipòsits minerals de níquel com els de Sudbury! Per cert, a les mines de

Sudbury també s'ha trobat ful·lerens amb una proporció d' $^3\text{He}/^4\text{He}$  elevada...

La caiguda d'un meteorit encara és un fenomen sorprenent i poc habitual, però alhora també és la manera de poder disposar fàcilment (i gratuïta) de mostres químiques que provenen de l'espai. Gràcies al seu estudi al laboratori avui podem relacionar coses amb una aparença tan dispar com la síntesi de sòlids sota condicions extremes, la distribució dels elements químics al nostre entorn i les extincions massives d'éssers vius. De tot això els meteorits n'han guardat bona memòria. A nosaltres ens toca continuar fent-los bones preguntes.

## Bibliografia

- BECKER, L.; POREDA, R. J.; BUNCH, T. E. (2000). «Fullerenes: An extraterrestrial carbon carrier phase for noble gases». *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 97, núm.7, p. 2979–2983.
- COWLEY, C. R. (1995). *An Introduction to Cosmochemistry*. Cambridge University Press.
- FERGUSON, J. E. (1982). *Inorganic Chemistry and the Earth*. Pergamon Press.
- HENDERSON, P. (1982). *Inorganic Geochemistry*. Pergamon Press.
- LORCA, J. (2000). «Química dels orígens». *Revista de la Societat Catalana de Química*, vol. 1, p. 15–20.
- (2003). *Pedres que cauen del cel: L'impacte dels meteorits en la història i la ciència*. Pagès Editors.
- MASON, S. F. (1991). *Chemical Evolution*. Clarendon Press.

## Autor

Jordi Llorca i Piqué és investigador del Departament de Química Inorgànica de la Universitat de Barcelona, on es doctorà el 1995. Ha estat investigador de l'Institute of Meteoritics (Estats Units) i de l'Institut de la Recherche sur la Catalyse (França) i ha rebut la Distinció per a la Promoció de la Recerca Universitària de la Generalitat de Catalunya. El 2003 va ser guardonat amb el Premi Humbert Torres de literatura científica amb el llibre *Pedres que cauen del cel: L'impacte dels meteorits en la història i la ciència*.