

La vertadera pedra filosofal

Miguel Angel Sanchis Lozano

Departament de Física Teòrica i Institut de Física Corpuscular CSIC-UV

Roger Sanchis Gual

Institute for Robotics and Intelligent Systems, ETH-Zurich (Suïssa)

El desig insaciable per aconseguir or, a qualsevol preu i manera, ha sigut una constant en la història de totes les civilitzacions en qualsevol època. L'Edat Mitjana no va ser una excepció i, durant segles, els alquimistes van intentar descobrir o produir una substància llegendària anomenada *la pedra filosofal*, capaç de transformar un metall comú (com ara, el plom o el ferro) en or o plata. Sovint, es pensava que la pedra (no necessàriament un sòlid) filosofal podria ser també un poderós elixir de vida, per a rejuvenir o inclús assolir la immortalitat. Així doncs, pagava la pena intentar-ho una vegada rere una altra sense perdre l'esperança.

Ara bé, és possible aconseguir la transmutació entre elements químics mitjançant processos purament químics, com els alquimistes assajaven de manera heurística i guiats per llegendes i mites? D'això tractem en aquest article.

Estructures i enllaços químics

La matèria ordinària tal i com es presenta en el nostre entorn està formada per estructures macroscòpiques molt diverses: muntanyes, roques i sorra, mar, llacs i rius, l'atmosfera, núvols i pluja. Examinades amb més detall, aquestes estructures són agregats de molècules formades, al seu torn, per àtoms units per forces d'atracció de distintes intensitats i naturalesa. Si les observem amb encara més detall (per exemple, mitjançant un accelerador de partícules), els àtoms estan constituïts per partícules més menudes com són protons i neutrons (conjuntament designades com a nucleons) i electrons... Els mateixos nucleons estan formats per entitats més elementals anomenades quarks.

Com és ben conegut, l'existència dels àtoms (originalment suposats indivisibles) va ser postulada (utilitzant un raonament purament intuïtiu) a l'escola atomista de l'antiga Grècia, a la primeria del segle V aC per **Leucip**, després desenvolupada per **Demòcrit** i **Epicur**. Cal dir que la interpretació atomista de la matèria no va ser el corrent dominant dins de la filosofia natural durant els dos mil·lennis següents, sinó que va prevaldre la suposició de l'*horror vacui* aristotèlic, que considerava la matèria com a continua. Hem d'esperar fins a **John Dalton** i la seua hipòtesi atomista, basada en dades científiques, per a explicar les lleis de l'estequiometria, és a dir, la proporcionalitat definida de masses entre els elements en les reaccions químiques. No obstant això, en aquell moment no hi havia cap teoria que poguera explicar, ni tan sols qualitativament, les afinitats d'uns elements per altres.

D'altra banda, el descobriment de l'electró per **J. J. Thomson**, el 1897, mentre investigava els raigs catòdics, i els experiments d'electròlisi previs realitzats per **Humphry Davy**, **Jacob Berzelius**, **Michael Faraday** i **Hermann von Helmholtz**, entre altres, van ser fonamentals per a l'avanç definitiu cap a la comprensió de l'estructura de la matèria i les forces de la natura. A més a més, **Henry Becquerel** a finals del segle XIX, analitzant unes imatges de plaques fotogràfiques enfosquides per la radioactivitat d'una sal d'urani, es va adonar que el mateix àtom no és una estructura simple com s'havia postulat, sinó que es pot descompondre i decaure. Finalment, els models de Thomson i **Ernest Rutherford**, en els quals l'electró és un constituent elemental de la matèria, van donar un gran impuls i un marc teòric sòlid a les investigacions electroquímiques heurístiques prèvies.

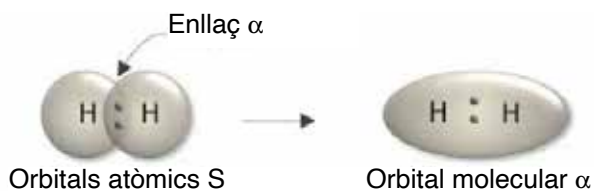
Com ja hem comentat en un article anterior de DAUALDEU, el model de **Bohr-Sommerfeld** basat en òrbites circulars i el·líptiques intentava explicar l'estabilitat de l'àtom i els espectres d'emissió. Però aquesta proposta semiclassical era massa simplista i, llavors, el concepte d'orbital va ser introduït cap al final dels anys vint del segle passat: els orbitals no representen una posició concreta d'un electró al voltant d'un àtom (o molècula), sinó que delimiten una regió de l'espai on la probabilitat de trobar l'electró és elevada. Segons la interpretació habitual de la Mecànica Quàntica, a nivell subatòmic no hi ha més remei que renunciar al concepte de *trajectòria* (clàssica) d'un electró, i només podem donar-li un significat estadístic o probabilístic. D'una altra banda, els electrons de l'escorça atòmica es distribueixin omplint orbitals com si foren capes d'una ceba a mesura que ens desplaceim al llarg del sistema periòdic dels elements.

Ara bé, cal entendre la formació de compostos de la matèria segons el model de capes i els corresponents orbitals del àtom aïllat, és a dir, com l'enllaç entre diferents elements químics crea estructures més complexes. En particular examinem la formació de molècules a partir dels àtoms amb certes regles i proporcions ben definides. El 1916, **Albrecht Kossel** i **Gilbert Lewis** assenyalaren independentment que la configuració dels gasos nobles separava *de facto* les propietats d'un element alcalí de les d'un element halogen. Tot i utilitzant un model simplificat de l'àtom, els gasos nobles completaven una capa de huit electrons (excepte l'heli, amb dos) de l'escorça electrònica, la qual cosa els proporcionava una gran estabilitat química, atés que pràctica-

ment eren inerts. Una vegada entès el perquè de la configuració estable dels gasos nobles, encara faltava explicar la formació dels enllaços entre la resta d'elements.

Alguns metalls i alguns no-metalls formen estructures tridimensionals en formar-se ions de càrrega positiva (cations) els primers i negativa (anions) els segons, i això per intercanvi d'electrons entre ells, com es el cas típic de la sal comuna NaCl. Aquest tipus d'enllaç, fonamentalment de caràcter electrostàtic (en aquest cas, entre els ions Na^+ i Cl^-), s'anomena consegüentment iònic. Com que l'abast de la força electrostàtica no es limita als ions més veïns, no es deu parlar de molècules individuals, sinó de xarxes cristal·lines on els anions i els cations es distribuïsquen de manera regular. Per exemple, el NaCl cristal·litza al sistema cúbic.

Ara bé, hi ha molts compostos que no es poden considerar de caràcter iònic. Per exemple, les molècules diatòmiques homonuclears com H_2 , O_2 , N_2 , ... que presenten enllaços molt forts entre àtoms de la mateixa electronegativitat (la capacitat d'un àtom d'atraure els electrons d'enllaç). En aquestes molècules el moment dipolar elèctric és nul i això indica que la càrrega es troba repartida simètricament entre els dos nuclis. La formació i estabilitat d'aquestes molècules està associada a una repartició equitativa dels electrons de valència. És el que s'anomena *compartició d'electrons* o enllaç covalent.



L'enllaç covalent consisteix bàsicament en compartir electrons en un orbital comú anomenat enllaçant, com es mostra esquemàticament en la figura. Al formar-se la molècula s'allibera una energia de 436 kJ/mol, o equivalentment 4,52 eV per molècula individual.

Malgrat que l'origen de l'enllaç covalent és de tipus mecanoquàntic (i per tant, complicat), es pot entendre prou intuïtivament. Segons la teoria dels orbitals moleculars, els electrons no estan assignats a enllaços individuals entre àtoms, sinó que prenen un moviment que està sota la influència dels nuclis de tota la molècula. Segons aquesta teoria, cada molècula té un grup d'orbitals moleculars, i s'assumeix que la funció d'ona de l'orbital molecular està escrita com una simple suma entre els orbitals atòmics constituents. No és lloc ací per a descriure l'eina matemàtica aplicada per **Walter Heitler** i **Fritz London** el 1927 a la molècula d'hidrogen, H_2 , que va ser estesa per **Linus Pauling** i **John Slater** a la formació de molècules complexes.

A banda dels enllaços iònic i covalent (amb una gradació entre tots dos, com ara, les molècules polars com l'aigua) trobem altres tipus d'agregació de la matèria, per exemple, causat per l'enllaç metàl·lic que es dona entre elements amb baixa

«La interpretació atomista de la matèria [realitzada per Leucip i Democrit] no va ser el corrent dominant dins de la filosofia natural durant els dos milennis següents»

«La diferència d'energia entre els enllaços químics i els dels nucleons al nucli deguda a la interacció forta és tan gran que es pot deduir que mai no es podrà aconseguir una transmutació entre elements utilitzant només reaccions purament químiques»

electronegativitat i orbitals de nivells energètics pròxims desocupats. Formen xarxes cristal·lines i la seua estabilitat es deu a l'atracció electrostàtica entre el núvol d'electrons i els ions positius fixes de la xarxa. Amb temperatures de fusió elevades dels metalls, aquest tipus d'enllaç es pot qualificar com a fort. No obstant això, per exemple en el cas del ferro, la calor de sublimació, que representa l'energia per a trencar tots els enllaços de la xarxa, $\text{Fe}(s) \rightarrow \text{Fe}(g)$, té un valor de 368 kJ/mol. És a dir, l'escala d'energia per ió metàl·lic és del ordre de l'eV, prou semblant als valors examinats anteriorment per a altres enllaços (l'eV es una unitat d'energia utilitzada en física igual a l'energia d'un electró sotmès a una diferència de potencial d'un volt, equivalent a $1,6 \times 10^{-19}$ J, aproximadament).

Però, on la interacció entre constituents és veritablement forta és en el nucli atòmic, que passem a descriure breument.

El nucli atòmic

Ara examinem el nucli de l'àtom format per un cert nombre de protons (nombre atòmic) i de neutrons (segons l'isòtop) en una regió de l'espai moltíssim més menuda que el volum de l'àtom. Com és possible, doncs, que puguem dos protons romandre dins del nucli tan pròxims, amb una força de Coulomb repulsiva extraordinàriament intensa? La resposta és que hi ha una altra força encara molt més intensa, la interacció forta o nuclear que els manté units.

Segons la interpretació quàntica habitual, la interacció forta entre nucleons en el nucli atòmic es pot considerar mitjançant l'intercanvi de pions, unes partícules elementals amb una massa d'aproximadament la dècima part del protó, introduïdes teòricament per **Hideki Yukawa** el 1935, i descobertes per **Cecil F. Powell** quan estudiava els raigs còsmics el 1947. D'alguna manera es podria dir que els pions són compartits pels nucleons dins del nucli atòmic, com els electrons son compartits entre nuclis en un enllaç covalent. Això no obstant, convé aclarir que els mecanismes físics subjacents i la intensitat són molt diferents

De l'alquímia a la química i la física nuclear

L'energia de lligam de la molècula d'hidrogen és de 436 kJ/mol, que es correspon amb 4,52 eV per molècula. Per tant, per a separar individualment els dos àtoms d'hidrogen d'una molècula de H_2 es requereix una energia de 4,52 eV, coneguda com a l'energia de lligam de la molècula. En general, l'energia de lligam d'una molècula (fins i tot, més complexa que el H_2) es correspon amb l'energia que cal proporcionar per a separar completament els seus components atòmics.

És interessant recordar que l'energia de lligam de l'electró a l'àtom d'hidrogen és de 13,6 eV, bastant semblant numèricament a l'energia de lligam molecular del H_2 , la qual cosa no es sorprenent. Estem parlant, per tant, d'energies típiques, molt baixes a nivell atòmic, especialment, si les comparem amb l'escala d'energies de lligam dels nucleons dins del nucli atòmic com veurem a continuació.

De fet, l'energia mitjana de lligam de nucleons (protons i neutrons) als nuclis atòmics resulta ser de l'ordre de 8 MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$) per nucleó. En el cas del deuteri en particular, separar el protó del neutró al nucli requereix d'una energia de 2 MeV, aproximadament un milió de vegades més gran que l'energia de lligam dels dos protons de la molècula H_2 mitjançant l'enllaç covalent químic!



Il·lustració del físic George Gamow per a explicar la força entre dos nucleons (representats pels dos gossos) al nucli atòmic i per què romanen units, mitjançant l'intercanvi (o compartició) d'un os (un pió en el cas de la interacció nuclear). Aquesta suggerent imatge es podria traslladar, amb totes les precaucions degudes, a la compartició d'un electró entre dos nuclis atòmics, com en la molècula H_2 . L'efecte és que la massa de l'objecte, siga un nucli o una molècula, resulta ser menor que la suma de les masses dels constituents, i per a separar-les es necessita proporcionar energia per a trencar l'enllaç.



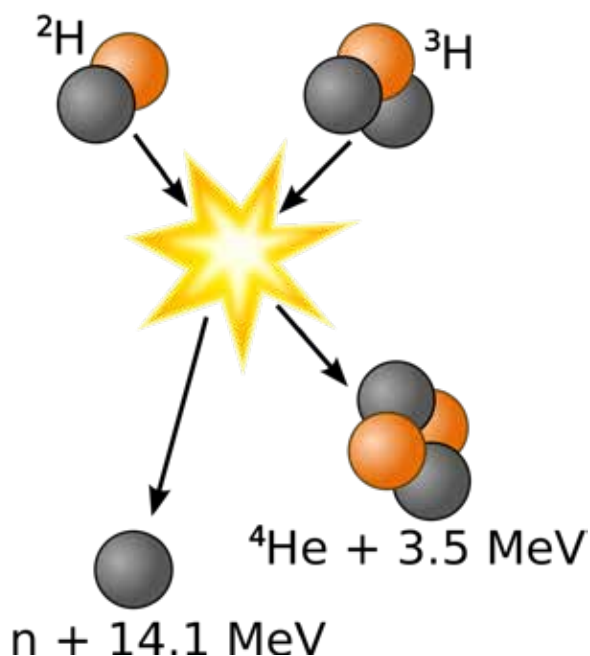
L'alquimista i la recerca de la pedra filosofal, pintat per Joseph Wright of Derby el 1771. Representa en realitat el descobriment d'un element químic, el fòsfor, per Hennig Brand el 1669. Un exemple de serendípia: troballa d'un resultat inesperat... però finalment útil en un altra àrea del coneixement.

Aquesta diferència d'energia entre els enllaços químics i els dels nucleons al nucli, causada per la interacció forta, és tan gran que se'n pot deduir que mai no es podrà aconseguir una transmutació entre elements utilitzant només reaccions purament químiques; però els alquimistes no ho sabien.

L'alquímia es va desenvolupar principalment a Europa durant l'Edat Mitjana, inclús durant els segles posteriors (el mateix **Isaac Newton**, al segle XVII, va dedicar molt de temps i esforç a l'alquímia, la càbala i la teologia), dins d'una atmosfera mística, semblant a l'astrologia, on els conceptes científicotècnics estaven influïts per la religió. Com a pseudociències que eren, cap de les dues no es podia deslligar aleshores de la concepció científica actual de la química i de l'astronomia, que d'alguna manera són les seues hereves. De fet, a causa del procediment heurístic i empíric (i no teòric) de l'alquímia, es van produir troballes inesperades, però a la llarga útils tècnicament i científica (serendípia). És el cas de l'element fòsfor, descobert per l'alemany **Hennig Brand** l'any 1669 a partir del residu de l'orina (pel seu color daurat com l'or, com a motivació!). Per la seua brillantor en la foscor i per la combustió espontània a l'aire emetent una flama brillant, el va anomenar: *phos phoros* ("portador de llum" en grec). Evidentment, el descobriment d'aquest element químic no va significar cap avanç cap a la impossible pedra filosofal, però el fòsfor és vertaderament un element químic fonamental per a la vida.

Rutherford va ser el primer científic que va produir la transmutació artificial d'elements químics l'any 1919. Ho va aconseguir mitjançant el bombardeig d'àtoms de nitrogen amb partícules alfa (que són nuclis d'heli) procedents d'una font radioactiva, produint un isòtop de l'oxigen i un protó com a resultat final. Això va ser possible perquè l'energia cinètica de la partícula alfa és prou per a superar la barrera repulsiva de **Coulomb** i acostar-se al nucli de nitrogen a l'abast de la interacció forta dels nucleons del blanc. Cal destacar que el 1980, **Glenn Seaborg** va produir or (uns milers d'àtoms, no més) a partir de bismut en el reactor nuclear del Lawrence Berkeley Laboratory, als Estats Units, emulant la pedra filosofal però sense aplicacions pràctiques. Comparem ara les escales d'energies implicades en les reaccions químiques i nuclears i traiem-ne conclusions.

L'energia alliberada en una reacció química (exotèrmica) es pot estimar com la diferència entre l'energia aportada per a trencar tots els enllaços dels reactius inicials, i l'energia alliberada en formar-se els enllaços dels productes finals. Com hem vist, l'escala fonamental dels enllaços químics és de l'ordre de l'eV per àtom o molècula, i per tant, és clar que l'escala de la reacció química ha de ser del mateix ordre. Així, la calor de combustió de l'hidrogen molecular: $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O$ és de 285,5 kJ/mol (per la qual cosa es considera com a un prometedor combustible de l'automòbil del futur), corresponent a aproximadament 3 eV alliberats per reacció individual.



Reacció nuclear exotèrmica per produir energia en un futur reactor de fusió a partir de dos isòtops de l'hidrogen: deuteri, 2H i triti, 3H . L'energia alliberada per cada reacció es de 17,6 MeV, aproximadament un milió de vegades l'energia de l'enllaç de l'electró a l'àtom d'hidrogen.

«La pedra filosofal, basada en l'alquímia, és un somni absolutament impossible, segons la química actual i la física nuclear. La verdadera pedra filosofal són les reaccions nuclears, especialment aquelles que es produeixen en les estrelles com el nostre Sol o més massives.»

En canvi, en una reacció de fusió entre un nucli de deuteri (format per un protó i un neutró) i un de triti (format per un protó i dos neutrons) s'alliberen 15,7 MeV per reacció individual, més d'un milió de vegades superior. A més, cal afegir que per fer possible la fusió d'aquests dos isòtops de l'hidrogen és necessita augmentar la temperatura del plasma fins a més de 100 milions de graus Celsius que representa una energia de 8 MeV aproximadament.

Ara bé, el 1989 va saltar als medis de comunicació una notícia sorprenent: la fusió nuclear "freda" entre nuclis de deuteri durant l'electròlisi d'aigua pesada (formada per deuteri i oxigen) absorbits en un electrode de pal·ladi amb una densitat tal que seria possible que els nuclis s'aproparen suficientment com per aconseguir que una reacció nuclear entre ells tinguera lloc. La realitat és que, malgrat nombrosos esforços posteriors en altres laboratoris, no s'ha aconseguït mai reproduir els resultats que hui, majoritàriament, es consideren un *fake* científic.

La verdadera pedra filosofal es troba a les estrelles

En resum, de cap manera es pot produir una transmutació entre elements químics mitjançant reaccions químiques, perquè l'escala d'energia disponible està prou lluny de la requerida per acostar els nuclis atòmics fins que la interacció forta pugui actuar. Llavors, la pedra filosofal, basada en l'alquímia, és un somni absolutament impossible segons la química actual i la física nuclear. La verdadera pedra filosofal són les reaccions nuclears, especialment aquelles que es produeixen en les estrelles com el nostre Sol, o més massives. En particular l'or, i els elements més pesats que el ferro, tenen el seu origen en les explosions de supernoves i, segons les darreres investigacions, en les col·lisions entre estrelles de neutrons, que els varen escampar per tot arreu de l'univers, fins arribar a la nostra Terra primitiva. Com deia **Carl Sagan**, som pols d'estrelles... l'or inclòs.