

# La fusió freda

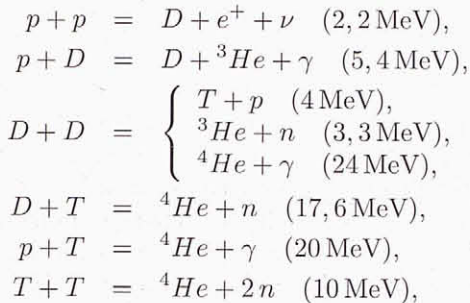
Alfred Molina\*

Departament de Física Fonamental, Universitat de Barcelona i  
Societat Catalana de Física (I E C)

## Introducció

La fusió és un procés en què dos nuclis d'àtoms amb nombre atòmic baix s'ajunten per formar-ne un de sol que té una massa més petita que la suma de les masses inicials. La massa residual es transforma en energia segons la fórmula d'Einstein  $E = mc^2$ .

Per als nuclis més elementals les següents reaccions són les més importants



On  $p$  és el protó,  $e^+$  és el positró (antipartícula de l'electró),  $n$  és el neutró,  $D$  és el nucli de deuteri,  $T$  el nucli de triti,  $\nu$  és el neutrí i  $\gamma$  és el fotó. Els nombres de la dreta indiquen l'energia alliberada en unitats de  $10^6$  electró-volts.

Per tal de començar la fusió cal apropar els nuclis que han de fusionar fins a distàncies prop dels 10 f, que és quan comencen a entrar en joc les forces nuclears que en són responsables. Així doncs, per iniciar aquestes reaccions, cal superar la repulsió electrostàtica deguda a la càrrega elèctrica del mateix signe dels nuclis atòmics i el problema principal rau a poder superar aquesta barrera electrostàtica.

Fins ara només s'ha aconseguit produir aquestes reaccions de manera significant i autoalimentada en les bombes d'hidrogen, on per vèncer la barrera s'utilitzen les temperatures grans que es produeixen mitjançant una bomba de fissió com a detonador.

La majoria de les persones, incloent-hi els científics, estan convençudes que per aconseguir la fusió en el laboratori són necessaris imants enormes, làsers molt potents i plasmes amb concentracions i temperatures com les que hi ha a les estrelles.

\*Alfred Molina (Talarn, 1948) és doctor en Física per la Universitat de Barcelona (1976) i actualment és professor titular a la Facultat de Física de la mateixa Universitat

Segurament no és tan conegut el procés de fusió freda, anomenat així perquè és una reacció de fusió que té lloc a temperatures corrents, que van des d'uns pocs K als milers de K.

Hi ha només una manera comprovada sense discussió de produir la fusió freda i es coneix amb el nom de catàlisi muònica. Aquest procés fou postulat l'any 1947 per F.C. Frank i observat per primer cop i sense buscar-ho, car no coneixia ni el treball abans esmentat ni altres de posteriors, l'any 1957 per L.W. Alvarez, el qual en rebre el premi Nobel comentà: "Pensavem que havíem resolt tots els problemes d'energia de la humanitat fins a la fi dels temps".

## Fusió freda catalitzada per muons

Són els muons unes partícules que poden tenir càrrega positiva i negativa. El muó negatiu té unes propietats molt semblants a les de l'electró però té una massa que és 207 vegades més gran. Una diferència important entre l'electró i el muó negatiu és que aquest darrer és inestable i es desintegra en electrons i neutrins. A causa d'aquest fet encara que se'n produeixen al xocar els raigs còsmics amb l'atmosfera acaben desintegrant-se en mitjana després de  $2 \cdot 10^{-6}$  s de ser emesos i per a tenir-ne al laboratori fa falta produir-los fent xocar ions accelerats amb nuclis de nombre atòmic baix, creant pions que en desintegrar-se donaran muons, i reproduir així el procés que té lloc a l'alta atmosfera, però això suposa gastar una energia important per tal de tenir muons al laboratori.

Si hem parlat d'aquesta partícula és perquè pot substituir un electró d'una capa atòmica, amb el que els radis de les "òrbites" (el radi del volum on és més probable que es trobi la partícula) disminueixen uns 200 cops, car els radis són inversament proporcionals a la massa de la partícula.

Aquest àtom que té un muó en lloc d'un electró s'anomena muònic i pel que hem dit és molt més petit que un àtom ordinari.

Els primers processos de fusió freda es realitzaren amb àtoms d'hidrogen muònic. Si en lloc d'hidrogen hi ha deuteri o triti, la reacció és la mateixa i s'acaba formant un àtom amb el deuteri o el triti i finalment molècules on els nuclis estan molt propers, uns 200 cops



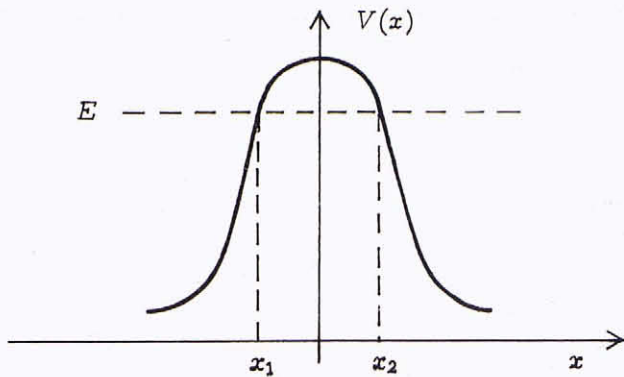


Figura 1: Barrera de potencial

més a prop que en les molècules ordinàries.

Potser fora bo ara parlar breument del fenomen quàntic que fa possible les reaccions de fusió, on una partícula passa a través d'una barrera de potencial, l'efecte túnel.

A la física clàssica quan es té un potencial com el de la figura 1, si tenim una partícula a l'esquerra amb una energia menor que la del màxim del potencial  $V(x)$  mai no la tindrem en el costat dret car el potencial la frenarà i finalment tornarà enrera. En canvi a la física quàntica és possible, amb una probabilitat que depèn de l'altura i l'amplada de la barrera (de fet també depèn de la forma de la barrera), trobar-la al costat dret.

En una aproximació bona per resoldre molts problemes i coneguda com aproximació W.K.B. el coeficient de transmissió que ens dona la probabilitat de trobar-la a l'altre costat de la barrera ve donat per

$$T = \exp\left(\frac{-2}{\hbar} \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(V(x) - E)} dx\right)$$

on  $x_1$  és el punt de retorn clàssic que dependrà de  $E$  i  $m$  la massa de la partícula. Això també pot escriure's

$$T = \exp\left(\frac{-2}{\hbar} \sqrt{2m\bar{V}}(x_2 - x_1)\right)$$

on  $\bar{V}$  és una mena de mitjana de l'altura de la barrera i  $x_2 - x_1$  n'és l'amplada. Veiem així que és essencial el coneixement amb molta precisió d'aquesta amplada per tal de determinar la probabilitat de transmissió car hi depèn de forma exponencial.

Quan es tracta de dues partícules apareixen expressions molt semblants però ara en comptes de la coordenada  $x$  del problema unidimensional apareix el mòdul de la coordenada relativa  $r$  i la integral s'ha de fer entre el radi de retorn clàssic i l'origen.

Si pel motiu que sigui, en algun cas, s'aconsegueix que els nuclis estiguin més a prop es produiran moltíssimes més reaccions i hi haurà un gran nombre de fusions. Així veiem que en les molècules d'hidrogen muòniques a causa del fet que els nuclis estan molt més a

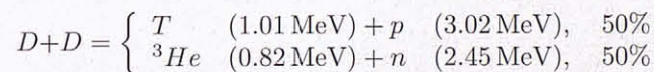
prop o, allò que és el mateix, que l'amplada de la barrera electrostàtica de potencial és més petita, es produeix un percentatge més gran de reaccions de fusió freda per parell de nuclis de deuteri que en les molècules ordinàries d'hidrogen. Malgrat això encara no se'n produeixen prou perquè hi hagi suficient energia per automantenir la reacció i tenir d'aquesta manera una font d'energia interessant, car els muons es desintegren abans d'haver catalitzat tantes fusions com caldria i finalment fa falta més energia per produir els muons que la que s'obté en els processos de fusió.

En els primers experiments, cada muó només catalitzava una reacció de fusió abans de desintegrar-se, actualment augmentant la temperatura i emprant uns compostos molt especials de deuteri i triti, on es produeix un fenomen de ressonància, s'ha augmentat considerablement el nombre de reaccions catalitzades per cada muó sense arribar, però, al nombre de fusions necessari per tal de tenir un procés aprofitable energèticament. Així gairebé tothom està convençut que aquest procés no pot ser considerat com una possible font d'energia.

### “Nous mecanismes” de fusió freda

Un altre procediment ja assajat fa més de 70 anys i lligat essencialment a un intent de produir heli consisteix a introduir deuteri en matrius de palladi. En les versions modernes, de l'any 1989, també s'utilitzen matrius de titani i en els experiments s'afirmava haver observat reaccions de fusió. Pel que hem dit no hi ha una impossibilitat teòrica car “només” fa falta disminuir mitjançant algun procediment astut l'amplada de la barrera de potencial electrostàtic entre els nuclis de deuteri. Cal però tenir en compte que les energies en joc en els processos químics són de l'ordre dels electró-volts enfront de les energies nuclears que intervenen en els processos de fusió de l'ordre dels megaelectró-volts ( $10^6$  cops més grans).

Les reaccions nuclears que tindrien lloc en aquest cas són



El motiu d'emprar palladi o titani és la facilitat amb què aquests absorbeixen l'hidrogen o els seus isòtops, fins al punt que el palladi s'utilitza com a recipient per emmagatzemar-los. El cas del titani no és tan clar car acaba perdent l'estructura cristal·lina si afegim molt d'hidrogen o algun dels seus isòtops.

Ningú no pot ignorar la importància que tindria un tal descobriment car tindríem al nostre abast una font d'energia inexhaurible. No obstant això en la majoria dels experiments anteriors als de l'any 1989 la principal preocupació fou trobar una manera de produir heli.

Hi ha d'altres motius per buscar la fusió freda, malgrat que el procés no es produís amb la freqüència



suficient per emprar-lo com a font energètica, com per exemple les teories que consideren possible que la fusió freda sigui la font de l'excés de  ${}^3\text{He}$  que hi ha a l'atmosfera de la Terra, així com també n'hi ha d'altres que atribueixen a processos d'aquesta mena l'excés d'energia interna en alguns planetes que no assoleixen les temperatures i pressions de les estrelles, per exemple l'energia radiada per Júpiter és dues vegades més gran que la que rep per radiació del Sol. De fet aquests foren els motius per què S.E. Jones es dedicà, a partir de l'any 1986, a estudiar la possibilitat que hi hagués fusió freda en alguns processos electrolítics.

Podríem classificar els treballs publicats en dos grups: els de fusió tèbia i els de fusió freda.

Els de fusió tèbia són els experiments en què es bombardejaven matrius de titani carregades de deuteri amb agregats d'uns centenars de molècules d'aigua pesant ionitzats i accelerats fins a energies d'uns centenars de milers d'electró-volts. Se'ls anomena així perquè les energies en joc ja són importants en haver d'accelerar aquestes macromolècules fins a energies tan altes. En aquests la pressió intensa produïda en un curt temps de col·lisió podria ser el motiu d'aproximació entre els nuclis que han de fusionar-se. Encara que tampoc no està clar que s'hagin observat aquests processos de fusió tèbia, al menys amb la intensitat que afirmen R.J. Beuhler et al. (1989), no en parlarem car no són els que van omplir les pàgines de la premsa i gairebé només són coneguts per gent propera al tema.

Entre els experiments de fusió freda també podem fer-ne dos grups: els que introduïren el deuteri dins de les matrius metàl·liques electrolíticament i els que introduïren el deuteri a pressió. Els processos electrolítics foren els primers i els més divulgats.

L'any 1989 després de molt de temps de silenci sobre aquest tema els primers en publicar resultats experimentals positius foren M. Fleischmann, S. Pons i "M. Hawkins" (1989). Aquest darrer nom el poso entre cometes perquè fou "oblidat" pels altres dos amb les presses per publicar el primer article. En aquest treball s'utilitzen elèctrodes de palladi de formes diverses per descompondre el deuteri d'una dissolució electrolítica de  $\text{LiOD}$  en aigua pesant.

En el seu article donen mesures d'augment de la temperatura no atribuïbles al procés electrolític. També mesuren un excés important de raigs  $\gamma$  que podrien atribuir-se a la captura de neutrons de 2,45 MeV d'energia si aquest pic estigués situat en els 2,2 MeV. Quan es presentà el treball a Harwell abans de la seva publicació el pic estava situat en els 2,5 MeV i en aquella conferència M. Fleischmann va aprendre que el pic que indicava la captura de neutrons per hidrogen havia d'estar en els 2,2 MeV i així aparegué en l'article en la posició correcta però no amb la forma del pic adequada. També detectaren un excés de triti. Aquestes observa-

cions es podrien explicar si s'haguessin produït reaccions de fusió a raó de  $10^{-19}$  per segon i parella d'àtoms de deuteri presents.

Aquesta fusió freda necessita d'algun mecanisme desconegut que apropi els nuclis de  $D$  uns deu cops més del que estan en l'estat normal en les molècules de  $D_2$  o, el que ve a ser el mateix, que els electrons que les lliguen tinguin una massa 10 cops més gran. Això fent servir els càlculs que donen una raó de fusió per parella d'àtoms de deuteri més gran que són els de S.E. Koonin i M. Nauenberg (1989).

Un altre resultat experimental positiu és el de S.E. Jones et al. (1989) que fan servir elèctrodes de palladi o titani i una barreja de sals molt curiosa dissolta en aigua pesant. Aquesta mescla intenta reproduir els elements que hi ha en el magma terrestre, però emmascara molt l'experiment.

Detecten neutrons en una quantitat tal que fa falta que es produeixi fusió a una raó de  $10^{-23}$  reaccions per segon i parella de nuclis de deuteri, si considerem que poden tenir lloc en tot el volum del metall emprat palladi o titani segons el cas.

Igual que en el cas anterior hi ha necessitat d'algun mecanisme que faci que els nuclis de deuteri estiguin unes 3,4 vegades més a prop del que estan en el seu estat normal en la molècula de  $D_2$ .

A més d'aquesta mena d'articles, n'aparegueren altres com per exemple De Ninno et al. (1989), on es detectaven excessos de neutrons introduint el deuteri gasós dins del titani a pressió, augmentant-la successivament fins a uns 50 bars i, un cop assolida aquesta pressió, fent disminuir la temperatura fins als 77 K i aleshores detectaren unes descàrregues que donaven 10 cops menys neutrons que l'experiment de S.E. Jones et al., però així i tot molt per sobre del que s'espera teòricament pels mecanismes usuals.

Més tard, el mateix any 1989 i també el 1990 aparegueren alguns articles on s'intentava reproduir aquests experiments sense èxit; com en els treballs de P.B. Price et al. (1989), M.Gai et al. (1989), V.B. Brudanin et al. (1990) i R. Aleksan et al. (1990) per exemple, on es donen cotes sobre la màxima producció de neutrons en aquests experiments molt per sota dels resultats abans esmentats.

Excloent els articles de M. Fleischmann, S. Pons i M. Hawkins per les raons ja esmentades, sembla clar que si s'han produït fenòmens de fusió freda que no sigui la catalitzada per muons en algun experiment, no se sap com reproduir-los car no tots els que el fan observen el mateix. Fins i tot, els que han observat fenòmens atribuïbles a reaccions de fusió un cop no han estat capaços de reproduir els experiments de forma sistemàtica i voluntària.

Una possible explicació fóra la dificultat que hi ha per aïllar un experiment del fons, on s'hi poden trobar



qualsevol mena de partícules, especialment les que són neutres com els neutrons. No hem d'oblidar que en la detecció acurada dels neutrons es basen la major part de les proves de fusió esmentades. A més alguns detectors de neutrons, que foren emprats en algun dels experiments citats, els comptadors de  $B F_3$  no distingeixen la detecció de calor de la de neutrons, i per tant, pot semblar que s'han detectat neutrons quan el que s'ha mesurat és calor.

Una altra dificultat rau en el fet que en qualsevol laboratori hi ha molts neutrons, a més d'energies al voltant dels 2,45 MeV procedents dels raigs còsmics o acceleradors i reactors nuclears que, encara que estiguin lluny, constitueixen un fons difícil d'eliminar i que pot ser de l'ordre del detectat per S.E. Jones et al. A més d'aquestes fonts de neutrons conegudes, pot haver-n'hi d'altres més difícils d'imaginar i, per tant, de restar o eliminar d'entre els que són atribuïts a fusions.

Per exemple, l'aigua pesant pot ser una font de neutrons per fotodesintegració del deuteró per raigs  $\gamma$  d'energies superiors als 2,23 MeV o bé les reaccions iniciades amb partícules  $\alpha$  procedents del radó i els seus productes de desintegració presents a l'aire.

Com podem veure encara no estan clars ni els resultats experimentals ni una possible teoria que expliqui la disminució de l'amplada de la barrera per algun motiu físic, hi ha treballs on s'acota el possible efecte de la xarxa com a causa de l'apropament dels nuclis, A.J. Leggett i G. Baym o F. Marchesoni et al. De totes maneres, podria existir algun defecte local, per exemple fractures no controlades o defectes importants en la xarxa, que donessin lloc a camps intensos i de moment no reproduïbles a voluntat. En relació amb aquest fet cal citar els treballs de B.V. Derjaguin et al. que han trobat excessos de neutrons en mostres de titani carregat amb deuteri i en mostres de *Li D* en sotmetre-les a vibracions mecàniques intenses. Aquests neutrons s'han atribuït a processos de fusió, anomenats fusió per fractura, però encara que així fos no pot dir-se que es tracti de fusió freda car les energies en joc ja són importants.

Cal assenyalar que el nombre de treballs negatius publicats només és uns nou cops superior al dels que troben efectes atribuïbles a la fusió freda, però això pot ser molt enganyós car moltíssims laboratoris, per no dir gairebé tots els que estaven en disposició de fer aquests experiments, que en ser tan elemental són abundantíssims, els han fet i en no obtenir res d'anòmal han callat i han seguit treballant en les seves línies d'investigació.

En la meva opinió no està clar que s'hagi observat un sol cas de fusió freda amb un nombre important de reaccions per parella de deuteris i que no sigui la induïda per muons. Així doncs, cal treballar molt més, especialment al laboratori per tal de controlar millor tant les mostres de pal·ladi i titani com el fons de partícules present, i

així obtenir els únics resultats experimentals que poden acceptar-se, és a dir, aquells que són reproduïbles, dins dels marges d'error raonables, per tothom que fa el mateix, en qualsevol lloc i moment.

Aquesta polèmica, però, ha tingut un efecte positiu en el fet de replantejar la limitació dels estudis sobre fusió nuclear a les grans màquines productores de grans temperatures-densitats i molt probablement, encara que no sigui possible produir fusió freda per aquest procediment aparegui algun resultat interessant inesperat en camps com l'electròlisi o els defectes en cristalls en l'estat sòlid. També, si es confirmen els resultats de S.E. Jones et al., podem tenir una explicació de l'excés de  $^3He$  a la Terra.

Alguns aspectes que cal fer notar són: en primer lloc, la "coincidència" en el temps, després de 60 anys d'absència de cap treball sobre el tema de la fusió per electròlisi en un parell de mesos se'n publiquen dos, i en l'espai, els laboratoris de M. Fleischmann et al. i el de S.E. Jones estan a menys de 50 km l'un de l'altre i en universitats que podríem dir que tenen rivalitats ben conegudes. I en segon lloc que, poc més tard, en menys d'un any, apareixen com a bolets uns articles donant uns resultats que podríem qualificar de dubtosos i poc després l'any 1991 ja no en queda gairebé res. És això un efecte de la competitivitat? Si ho és caldria tenir molta cura a l'hora de cantar-ne les excel·lències com a forma de progrés científic. Si no cal preguntar-se: A què són degudes aquestes presses a publicar? o aquesta poca cura a obtenir uns resultats?

Un altre tema interessant d'estudi en el camp de la sociologia de la ciència i dels comportaments dels científics fóra l'estudi d'aquesta mena de fenòmens que es produeixen en casos com aquest de canvi d'activitat d'una part de la comunitat científica de forma absolutament incontrolada, dedicant tots els esforços tant els humans com els materials assignats a altres projectes per estudiar un problema important, però amb poques probabilitats d'èxit i finalment que en quedi tan poca constància del que s'ha estat fent. Mostra això una inquietud científica sana i desitjable per a l'avenç científic? o, ans al contrari, demostra una poca maduresa i una gran ambició dels membres de la comunitat científica?

Probablement la resposta no és netament cap de les dues i caldria matitzar-la força més, però no fóra gens estrany que entre les dues pesin el suficient per entendre aquest fenomen que s'ha produït en el camp de la fusió freda.

### Bibliografia recomanada

- BRIAND, J. P. i FROMENT, M., "La Fusión "fria" veinte meses después", *Mundo Científico*, 10, n° 108, 1264 (1990).
- CLOSE, F., *To hot to handle (The race for cold fusion)*, Princeton U.P., Princeton (1991).