

L'ESDEVENIDOR

per Antoni Lloret i Orriols

22 (174/Volum 2/març 1982

ciència 14)

L'energia nuclear continua essent una expectativa pel que fa a la crisi de font d'energia. És clar que les centrals nuclears de fissió no poden resoldre la manca de recursos a què el món es veu abocat, sobretot des de l'any 1973 en què es va comprendre que no era possible continuar explotant-los de forma lineal. Antoni Lloret ens planteja l'estat actual de la recerca en un camp encara verge per a la indústria, l'energia nuclear de fusió. Segurament, en un termini relativament breu, l'energia de fusió començarà a poder ésser aprofitada. Ilya Prigogine, a l'entrevista que (ciència) li va fer en el número vuit, expressava una gran esperança en aquesta nova manera d'aconseguir energia. L'autor d'aquest article sosté una opinió força diferent.

Antoni Lloret i Orriols (Barcelona, 1935) és físic, llicenciat a Barcelona l'any 1959 i doctorat el 1963. Ha desenvolupat gran part de la seva vida professional a París, on resideix actualment. Ha escrit nombrosos treballs de divulgació científica, la major part d'ells a Catalunya. El darrer està en premsa i el seu títol és: *Per què les coses són com són*. Ha col·laborat a (ciència) als números 3 i 7.

INTRODUCCIÓ

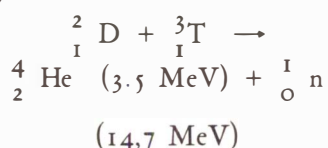


Certes reaccions nuclears tenen la particularitat d'alliberar energia. Les reaccions de fissió i de fusió són dos exemples de reaccions exotèrmiques ben conegudes per tothom gràcies a les seves aplicacions militars respectives: la bomba atòmica i la bomba d'hidrogen. Les reaccions de fissió en les quals un nucli atòmic es divideix sota l'acció d'un neutró incident poden ésser controlades correctament en els reactors nuclears, i si hi ha problemes per a la utilització de l'energia que proporcionen aquestes reaccions és a causa de dificultats que hom troba a harmonitzar la industrialització i la difícil protecció contra la radioactivitat originada pels productes de fissió i altres materials actius. En canvi, per a les reaccions de fusió encara

no se sap avui dia controlar les reaccions, ni recuperar l'energia produïda. I això malgrat un immens esforç de recerca on la invenció i la imaginació científica i tècnica han assolit com veurem més endavant un dels nivells més elevats.

Però abans de tot ens cal comprendre aquesta famosa fusió termonuclear. Es tracta d'una reacció en la qual dos nuclis atòmics lleugers en col·lisionar brutalment s'uneixen, o "fusionen" i formen així un nucli més pesant alhora que es produeixen nucleons (protons o neutrons) de certa energia. Aquestes reaccions originen l'energia que prové del sol i de moltes altres estrelles. Domesticar aquesta energia significa, doncs, fer funcionar una central elèctrica amb un petit sol en el seu interior.

Pel que fa a les possibilitats de controlar aquesta energia només hi ha, en realitat, una sola reacció de fusió interessant i és la reacció deuteritriti (D-T) en la qual es formen nuclis d'heli (anomenats també alfas) i neutrons. Aquesta reacció es pot escriure de la manera següent (indiquem entre parèntesis l'energia dels productes finals):



Els números superiors ens indiquen el nombre de nucleons i els inferiors el de protons per a cada nucli que intervé en la reacció. El resultat de la reacció és, doncs, una radiació de raigs alfa i de neutrons de considerable energia. El deuteri D i el triti T són dos isòtops de l'hidrogen. Són anomenats isòtops els nuclis que contenen el mateix nombre de protons però que tenen un nombre diferent de neutrons. L'hidrogen no té cap neutró mentre que el deuteri i el triti en tenen un i dos respectivament. Tots tres tenen les mateixes propietats químiques i són els elements més lleugers de la naturalesa. El triti té la particularitat d'ésser radioactiu. Es desintegra i emet una radiació beta en un període de 123 anys. Per a produir el triti cal recórrer a reaccions nuclears de fissió de liti, problema complex però que no ofereix limitacions de producció, ja que el liti és relativament abundant en la naturalesa. El deuteri pot ésser fàcilment obtingut per extracció del que existeix en l'aigua de mar. El seu proveïment no constitueix, doncs, cap problema fonamental. La producció d'energia electronuclear de fusió consisteix, doncs, a realitzar

- 1) La reacció de fusió D-T controlada.
- 2) La recuperació de l'energia de la radiació emesa i la seva transformació en electricitat.
- 3) La producció de triti a partir de reac-

DE L'ENERGIA NUCLEAR DE FUSIÓ

cions de fissió de liti produïdes amb els neutrons mateixos provinents de la fusió D-T.

La regeneració de triti és teòricament més abundant que el que es "crema" en la fusió. Aquest fet fa aparèixer la possibilitat d'obtenir una energia pràcticament il·limitada ja que només es necessita consumir deuteri i liti i els dos són com hem dit particularment abundants. L'energia produïda pot ser molt superior a la gastada i hom comprèn, doncs, fàcilment l'interès que suscita la fusió com a font controlable d'energia.

Malauradament les dificultats en què es troba la tecnologia per a assolir les tres etapes que hem esmentat són immenses. La reacció D-T no és gens senzilla de realitzar d'una manera controlada. Perquè els dos nuclis fusionin cal que col·lisionin amb una gran energia. Això és equivalent a exigir que un gas de nuclis de deuteri i triti es trobi a una temperatura molt elevada, de l'ordre d'un centenar de milions de graus. Cal reconèixer que assolir aquestes condicions no és gens fàcil i no és, doncs, estrany que hom trobi tantes dificultats per a controlar la fusió. Els altres dos processos tampoc no són fàcils i plantegen avui dia grans problemes. El disseny d'una central electronuclear de fusió amb regeneració de triti encara està a les beceroles, de tant gran com és el nombre de qüestions no resoltes. Explicarem tot seguit quins són alguns dels principals problemes referents al control de la fusió i a la concepció d'una central electronuclear de fusió, i acabarem amb una anàlisi de les pol·lucions i perills possibles que pot representar aquesta tecnologia.

EL CONTROL DE LA FUSIÓ

Com ja hem dit tot consisteix a escalfar en bones condicions un gas format per nuclis de deuteri i triti, fins a temperatures superiors als 80 milions de graus, cosa que expressada amb unitats energètiques

representa uns 7 KeV (1 KeV = 11,6 milions de graus). De gasos formats per nuclis, ja en sabem fer. Es tracta dels plasmes i s'obtenen ionitzant els àtoms, és a dir arrencant-ne els electrons. Els plasmes que es necessiten no poden ésser qualssevol. Han de tenir una densitat n i un temps de confinament de l'energia t determinats. Teòricament s'ha comprès que els plasmes termonuclears o plasmes en els quals es podran desenvolupar reaccions de fusió, han de satisfer el *criteri de Lawson* $nt \geq 10^{14} \text{ cm}^{-3} \cdot \text{s}$ a més de la condició de temperatura que ja hem esmentat

$$T \geq 8 \cdot 10^7 \text{ K}$$

Assolir aquests dos objectius és tota l'ambició de la recerca sobre la fusió que va iniciar Lyman Spitzer el 1951 als EUA amb la construcció d'un original aparell anomenat "stellerator". Tot consisteix, doncs, a escalfar i confinar un plasma calent, i per a això hi ha dos procediments interessants.

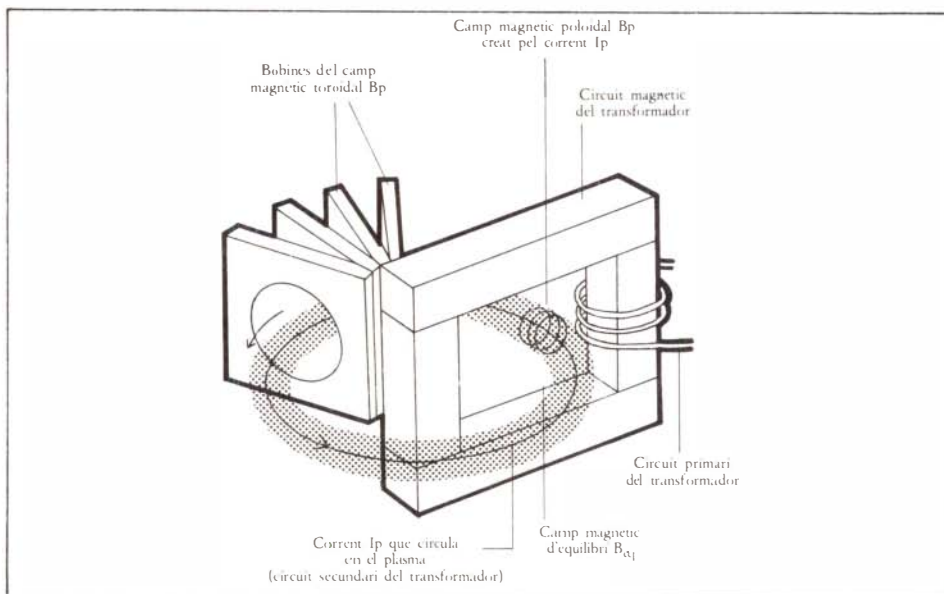
1) *La fusió lenta* o amb confinament magnètic. Segons aquest mètode hom intenta augmentar t fins a valors de l'ordre d'1 segon. El confinament es realitza aleshores amb un camp magnètic que manté les partícules carregades del plasma a l'interior d'una regió. La calefacció és obtinguda amb diferents mètodes com són l'efecte Joule i la injecció de feixos o d'ones electromagnètiques.

2) *La fusió ràpida* o amb confinament inercial. En aquest cas s'intenta obtenir valors de la densitat n tan elevats com sigui possible mitjançant una "implosió". Ja veurem més endavant en què consisteix aquesta "implosió". El temps de vida t és aleshores molt breu i depèn de la dinàmica de la implosió.

a) *La fusió lenta* o amb confinament magnètic

Històricament ha estat la primera via estudiada. Des del 1950 els EUA, la Gran Bretanya i la Unió Soviètica comencen a atacar el problema del confinament magnètic amb un gran optimisme. Així a Princeton (EUA) es conceben i es construeixen els "stellerators", els primers aparells amb un confinament magnètic

de plasmes d'alta temperatura. Alhora s'estudia la manera d'utilitzar l'efecte d'"estricció" per al confinament magnètic, a Gran Bretanya, a los Alamos i en particular a Harwell, on es construeix la cèlebre "màquina" Zeta. El principi de l'efecte d'estricció és el següent: les forces electromagnètiques que atrauen dos conductors paral·lels recorreguts per corrents amb el mateix sentit, es manifesten en una descàrrega gasosa de forta intensitat per una pressió que comprimeix el plasma donant-li la forma d'un cordó i s'obté així el seu confinament. Tots aquests estudis, tot i que han permès la comprensió de molts problemes, no han assolit de resoldre el problema del confinament magnètic. El gran obstacle ha estat el de la gran inestabilitat dels plasmes dintre de les ampolles magnètiques. Cap a l'any 68 es produeix un esdeveniment important. Els científics de l'Institut de Kurxatov a la Unió Soviètica obtenen un èxit sense precedents amb una màquina anomenada *Tokamak*, que va ésser imaginada pels físics I. Tamon i A. Sahkarov, el 1950, i desenvolupada per L. Artsimovitch. La paraula Tokamak és un acrònim construït a partir del rus: Tok (corrent) Kamera (cambra) Mak (magnètic). Un tokamak és un aparell on es crea una configuració magnètica tancada particularment enginyosa on es confina i s'escalfa el plasma d'elements de fusió. La cambra de confinament té una forma toroidal (la forma d'un pneumàtic) i és envoltada de tot un sistema de bobines o electroimants que han de realitzar el confinament magnètic. Aquest es produeix quan els nuclis del plasma només poden desplaçar-se seguint trajectòries que no trobin les parets de la cambra. La trajectòria d'una partícula en un camp magnètic és una hèlice que té com a eix les línies de força magnètica. Tot consisteix, doncs, a definir una configuració magnètica amb unes línies de força que es mantinguin a l'interior del tor. Un simple solenoide toroidal no permet confinar un plasma correctament ja que es produeixen moviments de deriva vertical que obliguen les partícules del plasma a



sortir de la configuració al cap d'un temps massa curt si el comparem amb el necessari per a satisfer el criteri de Lawson. La gran troballa dels tokamaks consisteix a superposar a aquest camp magnètic *toroidal* un altre camp magnètic dit *poloidal* situat en un pla meridiana i obtingut gràcies a un corrent que circula en el centre del plasma seguint el tor.

El camp magnètic toroidal defineix d'una banda el volum on resideix el plasma. D'altra banda el corrent poloidal produeix línies magnètiques circulars axades en la direcció del corrent. La superposició dels dos camps magnètics toroidal i poloidal produeix línies magnètiques que s'enrosquen en diferents tors concèntrics. Aquestes no surten del volum de confinament i en conseqüència tampoc no poden sortir-ne les partícules del plasma. El corrent que origina el camp poloidal és induït en el plasma per un bobinatge exterior format per espirals toroidals. Tot passa com en un transformador on l'esmentat bobinatge representa el circuit primari i el plasma toroidal el secundari. L'anàlisi de les forces que apareixen en el plasma ens indica que no és possible d'obtenir unes condicions d'equilibri amb un sol camp poloidal si no s'hi aplica a més a més un altre camp magnètic que compensi la tendència que té el plasma toroidal d'augmentar el seu radi. Veiem, doncs, que per a obtenir el confinament tokamak són necessaris tres camps magnètics simultanis: *el camp toroidal el camp poloidal i el camp d'equilibri*. Els primers tokamaks soviètics van assolir ràpidament un valor

$$nt = 10^{12} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$$

amb què es van acostar considerablement al valor del criteri de LAWSON.

Un dels avantatges dels Tokamaks és que el corrent toroidal, necessari com hem vist per a confinar el plasma, permet al mateix temps d'escalfar-lo per efecte Joule. Tot passa com si produïssim calor fent passar corrent per una resistència. En el cas del plasma hi ha el problema que més enllà d'una temperatura de 2 KeV el plasma és tan conductor que ja no hi ha pràcticament dissipació Joule.

Cal aleshores recórrer a sistemes auxiliars per a la calefacció com poden ser la injecció de feixos neutres ràpids i l'excitació amb ones electromagnètiques. La injecció d'àtoms ràpids és avui dia l'únic mètode de calefacció auxiliar completament operacional. Ha estat particularment estudiat a França, a Gran Bretanya i als EUA. El rècord de potència injectada ha estat assolit recentment a Princeton amb una potència de 800 KW. El principi d'aquest sistema de calefacció és el següent: hom obliga a travessar un volum gasós (anomenat neutralitzador) un feix de ions de gran energia. Aquest esdevé neutre gràcies a reaccions d'intercanvi de càrrega i s'injecta aleshores en el plasma toroidal. Tan bon punt hi és introduït, es ionitza sota l'efecte de les col·lisions internes i aleshores queda confinat. Al mateix temps es produeix una termalització que té com a efecte un augment de la temperatura del plasma, més o menys important segons ho sigui l'energia dels neutres injectats.

L'èxit inicial soviètic dels tokamaks va incitar molts països a adoptar aquesta tecnologia. Avui dia les màquines més importants són: el TER (Tokamak de Fontenay-aux-Roses, França), l'Alcator del MIT de Boston, el PLT de Princeton, i el T10 de Moscou. A Europa es treballa amb grans Tokamaks a Culham, (Gran Bretanya) i Frascati, (Itàlia). El rècord sobre el criteri de Lawson va ser assolit el 1979 per l'Alcator del MIT amb el valor

$$nt = 3 \times 10^{13}$$

En realitat perquè el problema pugui ser confortablement resolt cal encara obtenir un valor 100 vegades més gran i trobar la solució de tot un seguit d'importants problemes com són els deguts als fenòmens de transport de l'energia i de les partícules, a la dinàmica de les impureses en el plasma i als mecanismes de certes inestabilitats anomenades "disrupcions". Per tal de fer un pas endavant, a partir del 1970 es va començar a preparar un gran projecte europeu anomenat JET (Joint European Torus). L'acord per a aquesta realització de la comunitat euro-

pea (Euratom) va ésser decidit el 1978 i es va escollir l'emplaçament del laboratori britànic de Culham. Els europeus, però, no es queden pas sols en aquest camp. No solament els americans tenen dos grans projectes: el Doublet III i el TFTR sinó que fins i tot els japonesos intervenen en la cursa amb la realització del gran projecte JTGO. A més a més hom parla d'un projecte mundial en el qual els EUA, la Unió Soviètica, el Japó i la Comunitat Europea construïrien una màquina que ja ha estat batejada amb el nom d'INTOR.

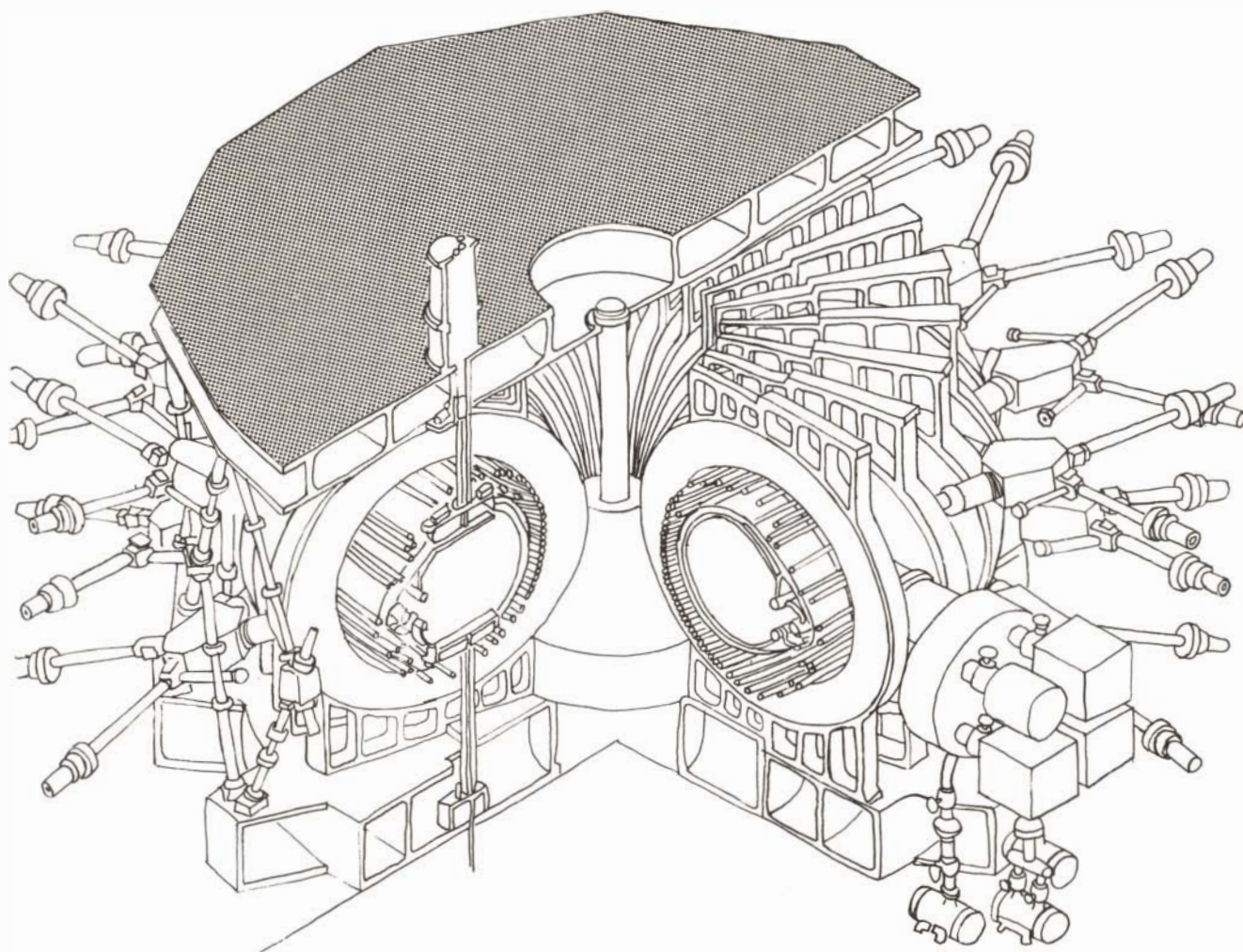
Ara per ara el projecte JET és el més esperançador i hom considera que assolirà un valor acceptable pel criteri de Lawson.

La recerca segons la via de la fusió lenta en tokamaks té encara una feina considerable per controlar la fusió però hi ha indubtablement certes possibilitats d'èxit. Cal no oblidar que hi ha en el món, avui dia, més de vint tokamaks construïts.

b) La fusió ràpida o amb confinament inercial

En el marc de la recerca sobre la fusió termonuclear controlada, paral·lelament al mètode del confinament magnètic, el confinament inercial apareix com una possibilitat molt prometedora i ha tingut un important desenvolupament durant aquests últims deu anys.

Vegem en què consisteix aquest procediment. Per tal de satisfer el criteri de Lawson hom proposa d'obtenir mitjançant una implosió un gran valor de la densitat del plasma malgrat que es produeixi en un temps molt curt. Tot consisteix doncs a comprimir brutalment el combustible de fusió (deuteri i triti) fins a densitats molt elevades. Una possibilitat per a obtenir aquesta extraordinària compressió va ésser proposada el 1972 per investigadors americans del Lawrence Livermore National Laboratory. Es tracta d'escalfar brutalment la perifèria d'una boleta que conté el combustible. L'escalfor produeix una expansió de la zona perifèrica i per reacció es comprimeix el centre de la boleta on es troba la mescla D-T. Així es produeix una im-



plosió. El combustible assoleix una temperatura elevada. Es manté per inèrcia un cert temps comprimida, un temps prou llarg per realitzar la reacció de fusió. Després explota i tot es dispersa. Aquest és el principi de la fusió inercial. Naturalment aquesta operació ha de respectar imperiosament el principi que l'energia gastada per a inflamar la mescla D-T ha d'ésser més petita que la que pot produir la fusió.

Hem precisat que les boletes de combustible han d'ésser escalfades brutalment i per això hom proposa avui dia dues solucions:

1) la utilització del raig d'un laser de

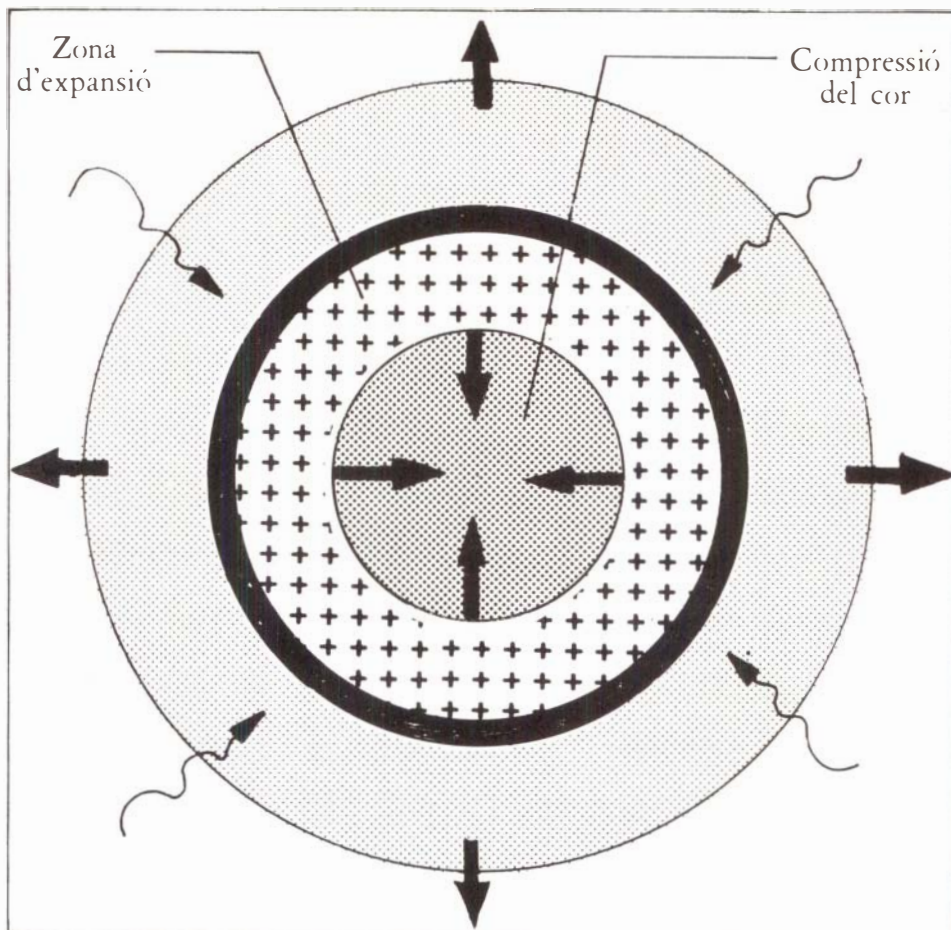
potència o

2) la utilització de feixos energètics de partícules carregades.

D'altra banda, per a assolir una implosió les boletes de combustible han de tenir una estructura especial. Es tracta de microboletes d'1 mm (o menys) de diàmetre fetes amb dues closques o esferes concèntriques. L'esfera interior, de vidre i metall, conté el D-T. L'esfera exterior és de vidre, metall i plàstic. Entre les dues closques hi ha una zona pràcticament buida. La boleta ha de rebre una radiació molt intensa com per exemple una radiació laser d'uns 10^{15} W. cm^{-2} . La mescla D-T com a resultat de la implosió asso-

leix, en aquestes condicions, una densitat deu mil vegades més gran que la densitat de l'estat líquid i la temperatura s'eleva fins a uns 11 milions de graus. Així es realitza la inflamació del combustible termonuclear, operació correntment coneguda amb l'expressió anglesa "break-even".

Avui dia s'han assolit en aquest camp èxits considerables. Així, per exemple, ja s'ha produït una implosió de microboletes de vidre de 100 micres de diàmetre plenes d'un gas de deuteri i triti a 10 atmosferes de pressió. Les experiències d'implosió han demostrat la possibilitat d'escalfar el D-T fins a temperatures



Implosió d'una microbota.

d'alguns KeV (1 KeV = 11.6 milions de graus) o d'obtenir densitats cent vegades més elevades que les de l'estat líquid. El principal obstacle amb què es troba aquest procediment per a controlar la fusió és que no existeixen lasers prou potents o feixos de partícules adequats. Hom necessita lasers que donin energies d'alguns megajoules i que tinguin una petita longitud d'ona i una gran freqüència de tir. Als EUA es treballa actualment en la construcció de dos lasers superpotents: el NOVA a Livermore (energia 300 Kjoules, potència 300 teravatts) i el laser ANTARES a los Alamos (energia 100 kjoules, potència 200 teravatts). Un teravat equival a un bilió de vats.

Pel que fa als feixos de partícules les condicions necessàries són: una potència elevada, una focalització en una superfície petita i un bon transferiment energètic. Avui dia no existeix cap feix d'electrons, protons o ions que reuneixi aquestes condicions esmentades. Es tracta d'una recent possibilitat que encara està poc estudiada. El problema que presenta més dificultat és el del transferiment energètic que consisteix a dipositar la màxima energia possible del feix en el fitó on s'ha de produir el "breakeven".

Les limitacions amb què es troba la recerca segons aquesta via no són únicament degudes a la potència necessària de la matèria, com es dipositen l'energia incident i la hidrodinàmica i l'estabilitat de les implosions. La recerca en el camp de la compressió laser és molt més important que la referent als feixos de partícules. Els EUA mobilitzen un miler d'investigadors amb un pressupost de 100 milions de dòlars. A la Unió Soviètica hi ha un esforç similar i també s'hi interessen altres països com Alemanya, Gran Bretanya, França i Japó. Molta part d'aquesta recerca sobre lasers és secreta i en tot cas concentrada en grans laboratoris a causa de les aplicacions militars dels lasers de potència.

LES CENTRALS ELECTRONUCLEARS DE FUSIÓ

Avui dia és lògic de pensar que si un dia es construeix una central elèctrica de fusió hom controlarà les reaccions nuclears segons un dels dos mètodes, el de la fusió lenta o el de la fusió ràpida. Les centrals que utilitzaran un o altre sistema no seran idèntiques malgrat que les operacions fonamentals siguin molt semblants. El confinament magnètic de la fusió lenta planteja per exemple problemes d'enginyeria que no planteja el confinament inercial de la fusió ràpida.

Com és fàcil de comprendre vist l'estat actual de la tecnologia sobre el control de la fusió, els projectes no són estudiats amb detall. Malgrat tot, tenen el mèrit essencial de permetre una visió dels problemes i dificultats que s'hauran de resoldre.

Les centrals nuclears de fusió han d'ésser regeneradores, és a dir que han de produir el triti necessari per a realitzar la fusió D-T. Al mateix temps han de transformar l'energia de la radiació que apareix en la fusió en energia elèctrica. Com hem explicat, aquesta radiació és constituïda per partícules alfa de 3.5 MeV d'energia i neutrons de 14.7 MeV. En el cas que existeixi un confinament magnètic només és possible emprar la radiació dels neutrons, ja que els alfas, pel fet de posseir una càrrega elèctrica, són molt difícils d'extreure amb eficàcia. El mateix problema es planteja en els reactors de fusió ràpida, ja que els alfas són fàcilment deturats en travessar un

petit gruix de matèria i no es veu la manera d'extreure'ls de la cambra de combustió. Així, ara per ara, hom es planteja només el problema de recuperar l'energia dels neutrons.

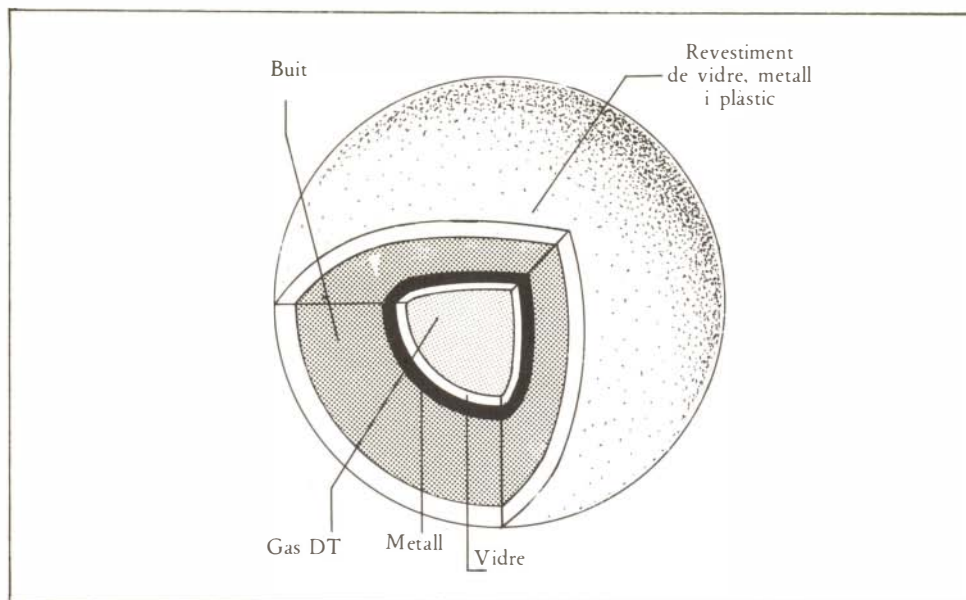
1- El manteniment de la fusió

El reactor electronuclear de fusió ha de produir electricitat d'una manera continuada. Segons es tracti d'un reactor de fusió lenta o ràpida, el procediment, i naturalment les dificultats, són diferents. En el cas d'un reactor amb fusió lenta amb confinament magnètic les principals operacions són les següents:

- 1) Alimentar el reactor amb combustible
- 2) L'encesca del plasma mitjançant el corrent toroïdal i els sistemes auxiliars
- 3) La conversió de l'energia termonuclear en energia elèctrica.
- 4) L'eliminació de les "cendres" del plasma.
- 5) La producció de triti.

Per alimentar el reactor amb el combustible termonuclear, s'injecta la mescla D-T a la cambra de combustió. La injecció ha d'ésser contínua i s'ha de fer amb una gran velocitat. Les velocitats d'injecció necessàries són efectivament molt grans, de l'ordre de 10^{14} m³/s. Si no és així les reaccions de fusió disminueixen ràpidament. Els estudis que s'han fet fins ara per assolir aquestes velocitats han permès d'obtenir 10^{13} m³/s com a màxim. El problema de la injecció no està doncs encara resolt.

L'altra qüestió relativa al manteniment del funcionament del reactor és la purificació del plasma. En efecte, durant el funcionament del reactor apareixen impureses en el plasma que provoquen el seu refredament i impedeixen les reac-



Estructura d'una microboleta

cions termonuclears. Hi ha dos tipus d'impureses: les que provenen d'una neteja insuficient de la cambra de combustió i de l'erosió de les parets i les constituïdes pels nuclis d'heli o d'altres elements. Aquestes impureses constitueixen les "cendres" de la combustió termonuclear. La producció d'heli és tan important (pot arribar a representar un 10%) que al cap de pocs segons de funcionament produeix una intolerància fatal. Purificar el plasma significa extreure'l, i per això s'ha imaginat un complicat sistema d'extracció anomenat "divertor". Encara no es té cap seguretat que aquest procediment sigui operacional en el cas de reactors de potència. Un cop extret, el combustible pot ésser purificat amb diferents mètodes. Un d'ells consisteix per exemple a utilitzar un sistema de separació fet amb membranes de pal·ladi i plata. L'eliminació de les impureses provinents de l'erosió és molt complicada, i malgrat els estudis actuals, encara no s'ha assolit cap resultat esperançador.

En el cas del reactor de fusió ràpida amb confinament inercial les operacions de funcionament són:

- 1) Preparació i injecció del combustible
- 2) Inflamació del combustible amb un laser o un feix de partícules
- 3) Conversió de l'energia termonuclear en electricitat
- 4) Producció de triti

En un reactor de fusió ràpida la combustió s'ha de fer amb una freqüència apropiada, que es considera que és entre 1 i 10 vegades per segon. Tot depèn de la quantitat de combustible injectat i la potència del reactor. El combustible, com ja hem explicat, es presenta en la forma de microboletes que contenen la mescla D-T. La preparació i la injecció d'aquestes constitueixen problemes complexos encara no resolts satisfactoriament.

II- La conversió energètica i la producció de Triti

Tots dos problemes estan molt relacionats. Hom imagina envoltar el reactor amb un mantell de liti líquid que no solament ha de permetre la conversió de

l'energia de radiació dels neutrons en calor sinó també la producció de triti gràcies a les reaccions de fissió del liti pels neutrons. El liti captura, doncs, els neutrons. Llur energia cinètica es transforma aleshores en calor. A partir d'aquí, si es desitja produir electricitat només ni ha un procediment: el vell sistema de fer funcionar turbines amb el vapor escalfat en un bescanviador. D'altra banda quan el liti és bombardejat amb neutrons es produeixen reaccions nuclears de fissió que proporcionen triti, heli i altres neutrons.

La implantació d'un mantell de liti sembla, doncs, una solució fonamental. Malauradament els problemes són immensos. Examinem-ne els més importants des de la perspectiva de la fusió lenta.

a) Els materials

Cal disposar en primer lloc d'una cambra de reacció feta amb uns materials que satisfacin moltes exigències, com són: no absorbir els neutrons impeding que arribin al mantell perquè provocarien un augment excessiu de la temperatura de la cambra, tenir un punt de fusió elevat, unes bones propietats químiques, per exemple, respecte a llur permeabilitat al triti i unes bones condicions de resistència mecànica. Al mateix temps, i sobretot, han de resistir la irradiació. Ja des d'ara, sabem que no hi ha cap material que pugui resistir els efectes de totes aquestes agressions durant el temps que hom imagina que pot durar reonablement la vida de la central. Per consegüent, hom no té altre remei que preveure com a única solució una construcció modular del reactor de manera que es puguin extreure els mòduls irradiats per substituir-los per uns de nous. Aquests mòduls comprenen com a mínim la paret de la cambra de combustió i tot el sistema que constitueix el mantell i esdevenen tan radioactius que en llur substitució no hi pot haver cap intervenció humana directa i s'ha de realitzar amb sistemes de manipulació a distància. Així, doncs, després d'un cert període de funcionament, no se sap la seva durada, però se suposa que serà d'uns 4 o 5 anys, caldrà

que uns robots reconstrueixin el reactor. Com és fàcil d'imaginar, es tracta d'un problema força complicat. Cal no oblidar, a més a més, que serà necessari tractar aquestes deixalles particularment radioactives.

b) El mantell de liti

El disseny del mantell de liti ha de permetre una bona evacuació de la calor i una extracció contínua del triti produït. El liti és encara un material poc estudiat i encara no se sap quina forma és la més adequada, la líquida o la sòlida. Un dels grans inconvenients del liti metàl·lic és la seva deterioració quan és sotmès a un camp magnètic. Això presenta, doncs, una greu dificultat per als reactors de fusió lenta. La refrigeració del mantell de liti no es pot fer senzillament amb aigua. En efecte, la possibilitat d'una contaminació accidental de l'aigua refrigerant amb triti constitueix un perill molt greu. Hom proposa, doncs, emprar altres fluids caloportadors com, per exemple, l'heli. El liti líquid té la propietat interessant de permetre la recuperació contínua del triti establint una circulació lenta del liti del mantell.

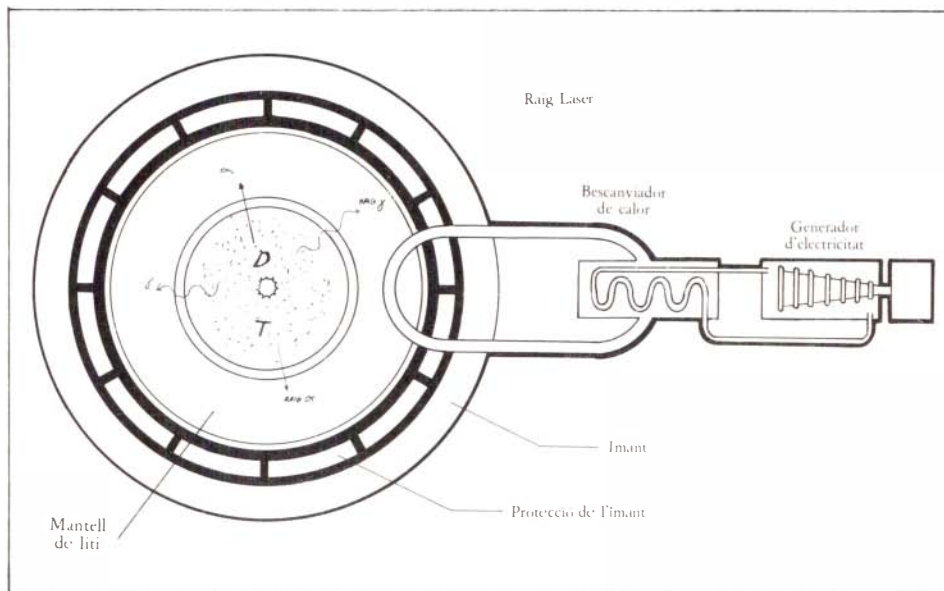
c) La recuperació del triti

Els procediments de recuperació del triti no són els mateixos si s'empra liti sòlid que si se n'empra de líquid. En la situació del liti metàl·lic líquid, un dels mètodes consisteix a barrejar amb el liti clorurs o fluorurs de liti que tenen la propietat de fixar el triti, el qual pot ésser extret després per electròlisi. El liti sòlid es presenta en la forma de composts. En aquest cas es preveu d'extreure el triti aprofitant la seva gran facilitat de difusió en un sòlid a temperatura elevada.

La primera proposició esmentada és molt complexa sobretot si es vol fer a gran escala. La segona és ara per ara completament hipotètica.

III) Els perills dels reactors de fusió

Els perills de l'energia electronuclear de fusió, tal com avui dia es pot preveure, són considerables. Provenen essencialment de la naturalesa dels materials emprats i de l'activació induïda pels neu-



Esquema d'una central electrònica de fusió D-T

trons en els diferents materials utilitzats en la construcció del reactor.

El triti és un element radioactiu particularment delicat. Es desintegra emetent una radiació beta amb un període de 12.3 anys. Tots els éssers vivents absorbeixen el triti a través de la pell, per respiració o per ingestió. En el cas dels éssers humans únicament l'absorció per respiració o ingestió constitueix un perill biològic. D'altra banda, el triti en l'aigua és considerablement més perillós que no pas en forma gasosa. Això fa difícil utilitzar aigua com a refrigerant. Cal pensar que una contaminació de triti en l'aigua, produïda d'una manera accidental, pot ésser catastròfica. Igualment, en cas d'una fuga cap a l'exterior que tingui com a conseqüència la pol·lució de l'aigua dels rius o en general de tota aigua emprada pels éssers vivents. Químicament el triti pot substituir-se a l'hidrogen de les molècules orgàniques i la pol·lució pot afectar totes les cadenes tròfiques. La gran dificultat és que avui dia no es coneix cap procediment per a eliminar una contaminació de triti, ja que té una massa atòmica de les més petites i no es pot filtrar. En l'actual cicle del combustible de les centrals nuclears de fissió es produeix també una contaminació atmosfèrica de triti inevitable. L'única defensa és, ara per ara, controlar que les fugues no sobrepassin els valors estipulats per la llei. El triti és, doncs, un producte potencialment molt perillós i això planteja un importantíssim problema per als reactors de fusió que empenen triti en grans quantitats. Naturalment, els actuals projectes d'enginyeria preveuen aquesta dificultat i proposen un mínim de tres barreres de protecció, però la falta d'experiència en aquest domini no permet d'estimar-ne l'eficàcia.

Una altra dificultat important que planteja el triti és que és absorbit molt fàcilment per tots els materials a la superfície, i aleshores queden contaminats radioactivament. Així es trobaran naturalment contaminades peces com per exemple juntes o bombes que s'hauran de canviar amb certa freqüència.

Les intervencions humanes en zones contaminades amb triti són difícils i perilloses, ja que el triti s'introdueix per tot arreu i no es coneix cap combinació de protecció dels operadors que elimini tot perill. En les millors condicions un operari ben protegit només pot romandre en una zona afectada del triti uns 20 minuts com a màxim.

El triti ofereix, doncs, unes enormes dificultats per a les quals encara hom no ha imaginat solucions raonables.

Els materials sotmesos a una forta radiació neutrònica esdevenen radioactius. La radioactivitat induïda en un reactor de fusió és molt gran. Així, a causa de la necessitat de substituir sovint el material gastat, hom preveu una quantitat important de deixalles radioactives amb l'agreujant que moltes d'elles estaran a més a més contaminades amb triti.

L'existència del plasma i del sistema electromagnètic del confinament poden ésser l'origen d'accidents greus. Les inestabilitats del plasma (disrupcions) són molt freqüents en els tokamaks i poden produir escalfaments importants. Els camps magnètics poden ocasionar accidents en particular si es produeix una pèrdua de refrigerant. Un accident de gravetat tot produir-se també si l'energia magnètica no es descarrega normalment a causa, per exemple, d'un curt circuit o de la ruptura d'un cable.

Naturalment, hom preveu tot un seguit de possibilitats d'accidents greus al mantell de liti que presenten certa similitud amb els que es poden produir en els reactors nuclears de fissió. Es tracta, per exemple, de fugues de fluid caloportador tant al circuit primari com al secundari, d'un transitori de potència etc...

Finalment, per a ésser una mica complets, cal citar els perills clàssics com l'incendi, l'explosió, els terratrèmols, les inundacions, els atemptats, etc... Tots ells poden provocar estralls de gravíssimes conseqüències. L'ús de liti metàl·lic, per exemple, constitueix un perill d'incendi i d'explosió, ja que, com el sodi, reacciona amb violència en contacte amb l'aire o l'aigua.

CONCLUSIONS

En els medis més optimistes es creu que cap a l'any 2000 funcionarà un reactor experimental de fusió! Aquesta previsió sembla particularment exagerada. Com hem assenyalat, els problemes tecnològics són immensos. Primer caldrà controlar la fusió: queda encara molta feina per fer; després, i això és encara més difícil, serà necessari dissenyar i construir un reactor que permeti de recuperar l'energia produïda. L'actitud d'alguns dels principals responsables i especialistes americans, com per exemple, el prou conegut professor M.N. Rosenbluth de Princeton és de considerar que no serà possible opinar sobre el futur de l'energia de fusió abans de l'any 2000. Fins aleshores, no es podrà preveure, tenint en compte el progrés assolit, el futur ni tampoc no es podrà comprendre si val o no la pena de prosseguir aquest tipus de recerca.

Des del punt de vista de la política energètica, la fusió apareix avui dia com una possibilitat molt llunyana, tan remota que, suposant amb optimisme que es pugui realitzar sense un risc inacceptable, no pot ésser considerada com l'energia de substitució de l'energia nuclear de fissió. No és, doncs, correcte l'argument tan habitual en certs medis polítics que l'energia de fissió actualment iniciada amb tants conflictes és una solució provisional abans no arribi l'energia de fusió, que en un esdevenidor pròxim ha de resoldre d'una manera pràcticament total el problema de l'energia.

Tampoc no és cert, com el lector ha pogut constatar per ell sol, que l'energia de fusió no planteja problemes deguts a la radioactivitat. No solament aquests problemes existeixen sinó que ara per ara semblen molt més importants i difícils de resoldre que els que planteja avui dia la producció industrial de l'energia electrònica de fissió.

(Antoni Lloret)