

## La Fusió nuclear: un vell somni a l'abast de la mà?

Encara estem molt lluny del dia —històric— en què es posarà en funcionament la primera central nuclear de fusió amb finalitat industrial, però tot sembla indicar que aquesta font d'energia ha de constituir el principal recurs energètic del futur. El combustible és inesgotable, la contaminació inexistente, però les dificultats són tant nombroses que el domini d'aquesta font energètica es considera "un dels principals reptes que mai la humanitat hagi hagut d'enfrontar."

### Projecte d'avui, energia del segle XXI

Si es pogués controlar la fusió termonuclear, els seus considerables avantatges (com per exemple les reserves quasi inesgotables del combustible) podrien fer que la humanitat entrés en la tercera edat del seu desenvolupament: la de l'energia abundant, barata, poc contaminant, fiable i segura... i sense risc de proliferació nuclear per a ús militar. El problema del tractament o emmagatzematge de residus radioactius de llarga durada ja no existiria.

El principi fonamental és el següent: es tracta de produir energia mitjançant la fusió de dos nuclis d'isòtops d'hidrogen, que produeixen l'heli. Aquesta transformació s'acompanya d'un considerable alliberament d'energia. Només cal doncs recrear tot aquest procés natural des d'on parteix el funcionament del Sol i dels estels al laboratori. Però les dificultats són tan nombroses que el domini d'aquesta font energètica es considera com "un dels reptes més importants que mai la humanitat hagi hagut de superar". Aquesta conquesta va començar poc després de la Segona Guerra Mundial amb la fabricació de la bomba anomenada "d'hidrogen". Però aquesta és una fusió termonuclear no controlada.

De tota manera, d'ençà dels anys 50, s'ha intentat controlar-la, dins uns reactors apropiats, amb diferents possibilitats. Encara que no s'ha aconseguit, l'actual generació de màquines grans, els Tokamaks<sup>1</sup>, deixa entreveure una possible solució cap als

anys 1.990. Aquesta decisiva etapa s'anomena "demostració de factibilitat". Després, caldrà posar a punt el reactor de prova, i més tard el pre-prototipus de producció d'energia. Una vegada engegat, el pas a l'etapa següent plantejarà encara enormes dificultats tecnològiques que, això no obstant, s'espera haver resolt cap a principis de segle. Tanmateix, els esforços esmerçats fins ara hauran valgut la pena, donat que, al segle XXI, aquesta podria ser una de les possibles solucions al greu problema de l'energia.

### Dificultats complexes, avenços encoratjadors

El problema fonamental resideix en el fet que s'ha d'escalfar el medi reactiu, anomenat plasma, fins a aconseguir una temperatura superior als 50 milions de graus, i això si es tracta de la reacció més fàcil, és a dir, la que fa intervenir la fusió del deuteri i del triti. Per tal d'engegar el procés s'han de satisfer les condicions del criteri de Lawson (que indica que el producte del temps de confinament per la densitat del medi ha de ser superior a  $10^{14}$  segons/cm<sup>3</sup> per a una temperatura de l'ordre dels 60 milions de graus). La primera dificultat que s'ha de resoldre és com obtenir el "break even", és a dir, que l'energia alliberada per la fusió sigui, com a mínim, igual a la que necessita l'engegament del procés. Aquesta etapa decisiva condiciona la "factibilitat", i és

el principal objectiu de les actuals investigacions. S'espere que amb l'actual generació de Tokamaks, i en concret amb el JET (Joint European Torus) construït per Europa a Culham (Gran Bretanya) i que va funcionar per primera vegada el juny de 1983, es podrà aconseguir. Es podria aconseguir el "break even" cap a 1988-1990 amb el cicle de reacció deuteri-triti. Una altra màquina comparable és el TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) de Princeton, als Estats Units, que va començar a provar-se el 24 de desembre de 1982. Arreu del món en podem trobar d'altres, com el T15, a la URSS, o el JT60, al Japó, però no compleixen les condicions d'ignició.

**Tots els avenços humans han estat lligats a la conquesta de noves fonts d'energia.**

Els avenços aconseguits aquests darrers deu anys són molt substancials i força encoratjadors, però manca guanyar encara un factor prop del 10% superior per arribar a les condicions d'ignició, la qual cosa s'espera aconseguir amb l'actual generació de grans màquines. Una dificultat important ve donada pel fet que l'escalfament del plasma exigeix uns mitjans auxiliars, com ara la injecció de partícules neutres d'alta energia, l'escalfament per ones electromagnètiques de

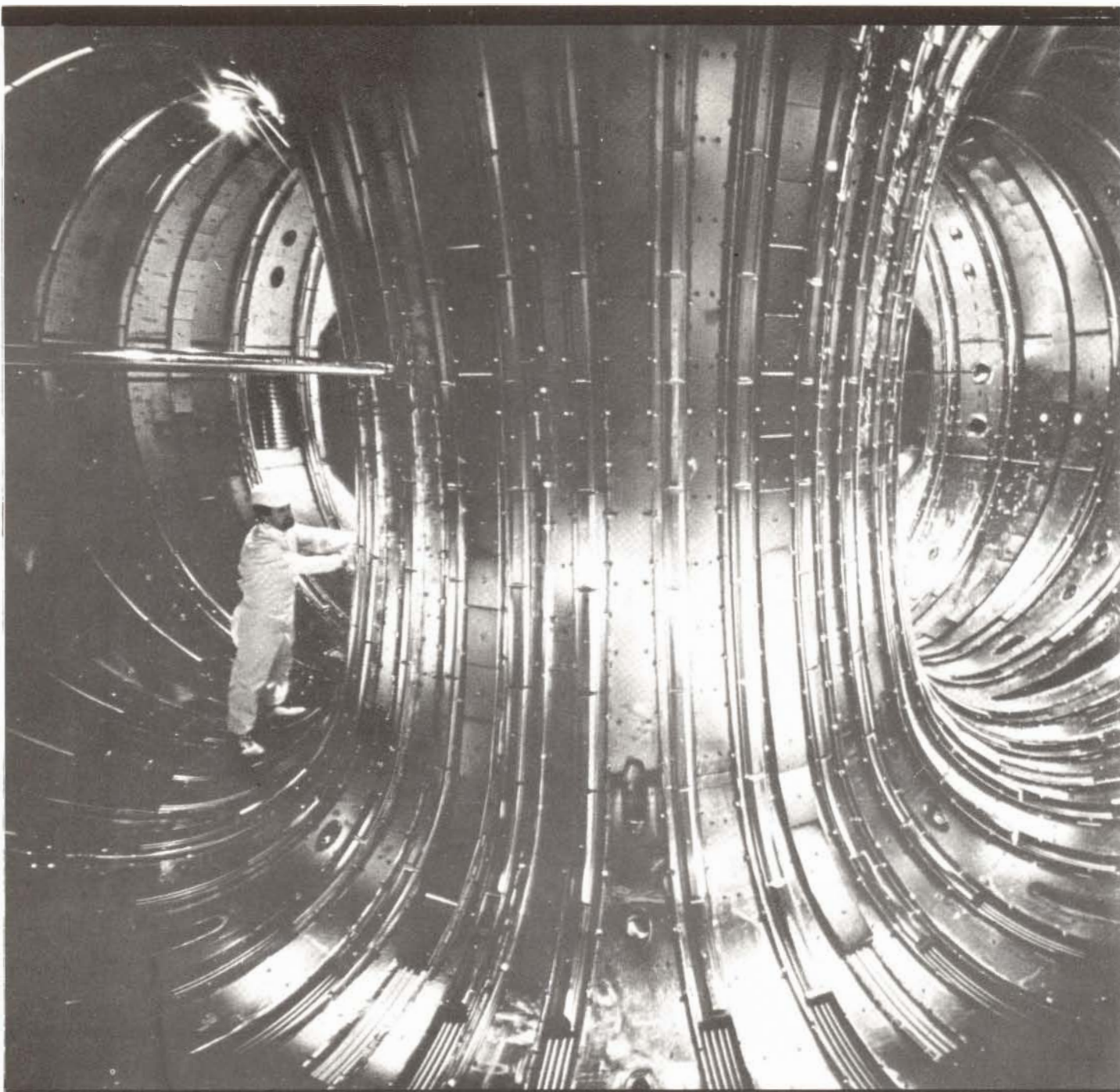


Fig. 1

Vista de l'interior del reactor anomenat "JET" amb la seva característica forma toroidal.

gran freqüència i d'altres mètodes. A una temperatura elevada, el medi plasma presenta inestabilitats i efectes no lineals que encara són difícils de controlar, donat que són molt complexos d'estudiar i encara no s'han comprès completament. Altres qüestions que també s'han de resoldre fan referència al paper de les impureses (factor important en les pèrdues d'energia), els efectes de les radiacions sobre el comportament dels materials, el control del cicle del combustible (en un primer moment, cal utilitzar triti, que és radioactiu), l'extracció d'energia i uns altres problemes més o

menys complexos. Aquest és el motiu per què s'ha hagut de prendre una estratègia consistent a operar per etapes successives, cadascuna de les quals és pensada per resoldre un seguit de problemes específics, la qual cosa permet de passar a la següent.

### Dos camins diferents porten a la Fusió

**E**n aquests moments, s'estan explorant, essencialment, dues vies: la fusió lenta, o amb confinament magnètic, i la fusió ràpida, o amb confinament inercial<sup>2</sup>. En aquest segon cas, el "break even" podria tenir lloc dins els propers anys gràcies a la

nova generació de làsers de potència, tipus Nova, que s'estan construint als Estats Units i a la URSS, o gràcies als feixos d'electrons relativistes. Però sembla que aquest camí difícilment podrà posar a punt una instal·lació industrial de producció d'energia, donades les seves condicions de funcionament, que, en les actuals circumstàncies, semblen poc realistes. Encara que hi ha uns quants projectes nord-americans, hom no és gaire optimista pel que fa a llur operacionalitat. És clar que un triomf tecnològic sempre és possible.

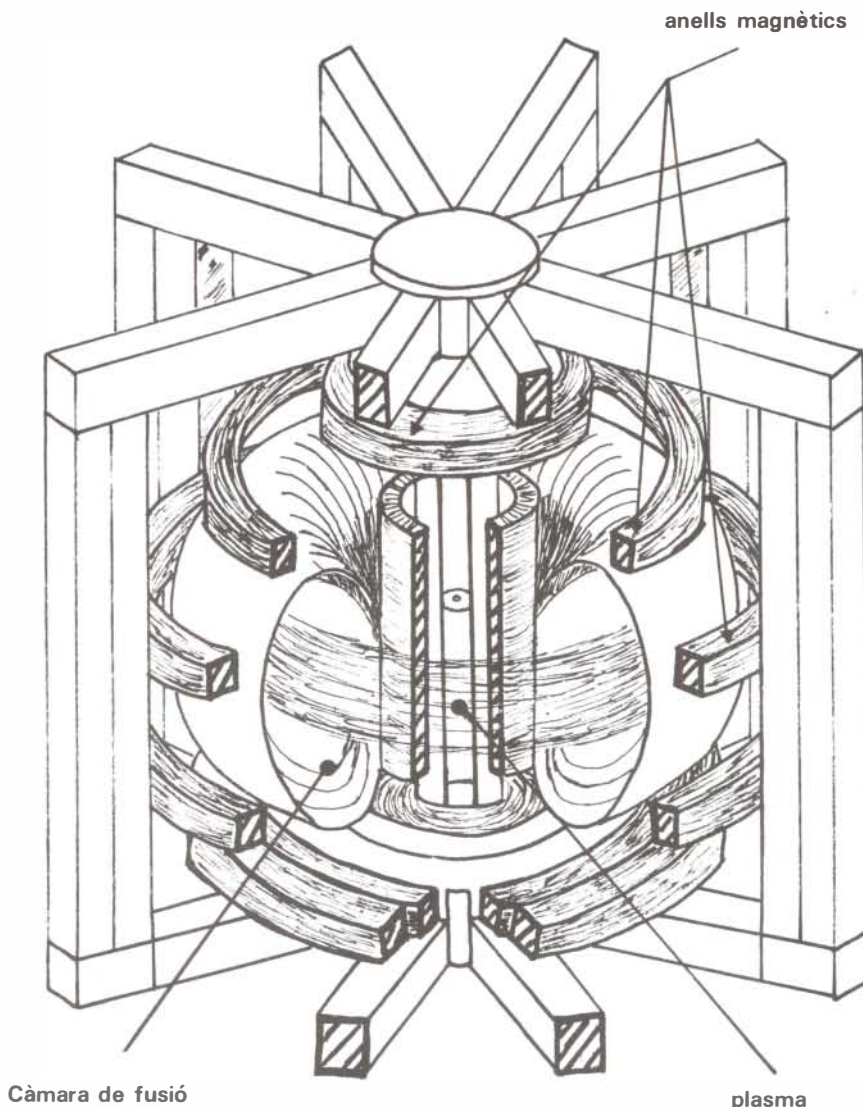
Quant al primer camí, el del confinament magnètic, sembla, com havia dit abans, el més prometedor. Tornant als Tokamaks, que són les màquines més desenvolupades i que ofereixen més possibilitats, val a dir que

Fig. 2

Mantenir el plasma confinat a enormes temperatures és un greu problema. El disseny Tokamak (el més exitós) ho aconsegueix mitjançant potents camps magnètics.

no són les úniques. Després de la demostració de factibilitat hauria de venir l'etapa "Next Step", que té com a principal objectiu estudiar els problemes tecnològics essencials i l'enginyeria necessària per a la realització d'un prototipus. S'haurà de perllongar fins, aproximadament, mitjans del segle vinent, o potser una mica menys si els resultats ho permeten i els esforços són suficients. Després vindrà la fase anomenada "DEMO", que s'acabaria amb la creació d'un preprototipus de producció d'energia: alguns centenars de megawatts elèctrics. S'hauria de controlar definitivament el cicle del combustible com també els problemes tecnològics necessaris per tal de poder passar a la fase industrial. S'hauria d'acabar vers els anys 2020-2030, moment en què començaria realment l'era de l'energia de fusió termonuclear. És evident que les dates són aproximatives i susceptibles de variar en un marge relativament petit. Els estudis que tenen a veure amb les màquines que s'han de fabricar ja han començat; tenim, per exemple, els projectes europeus NET o INTOR (International Torus) per a l'etapa Next Step, els projectes UWMAK, NUWMAK (Estats Units) o MARK II B (Europa) per a l'etapa DEMO i d'altres que no són tan importants. Cal esmentar, també, el projecte STAR-FIRE (Estats Units), molt elaborat i destinat a l'estudi de totes les qüestions que pugui plantejar la instal·lació comercial de producció d'energia de fusió.

Però, a hores d'ara, no hi ha res que recolzi la idea que seran els Tokamak els qui donaran la solució. Tampoc no



hi ha res que, si tenen èxit, ens mostri que el reactor tipus DEMO s'assemblarà a un Tokamak actual. És per això que s'estan estudiant altres vies de fusió per confinament magnètic, com els miralls tàndem, spheromax, stellerator, les constriccions de camp invertit, ignitor, etc.

**Segons els índexs de consum previstos, hi ha reserves de combustible suficients per a mil milions d'anys.**

Una d'aquestes, l'estructura de miralls tàndem, és també molt promete-

dora. Els Estats Units estan construint una gran màquina MFTF. B (Mirror Fusion Test Facility) que s'haurà de començar a provar cap a l'any 1985 i que posseirà capacitats anàlogues a les dels actuals Tokamak. Presenta uns quants avantatges, entre els quals destaca que pot permetre la realització de la reacció de fusió deuteri-deuteri, avantatge essencial perquè es podria eliminar l'ús del triti radioactiu. A més, la solució del combustible, a llarg termini és la del deuteri<sup>3</sup> del qual, segons l'índex de consum mundial previst per a l'any 2000, hi ha unes reserves suficients per a mes de mil milions d'anys. També són possibles altres tipus de reaccions.

En definitiva, cal tenir en compte que es poden ben produir alguns triomfs tecnològics i que potser ens obriran noves possibilitats.

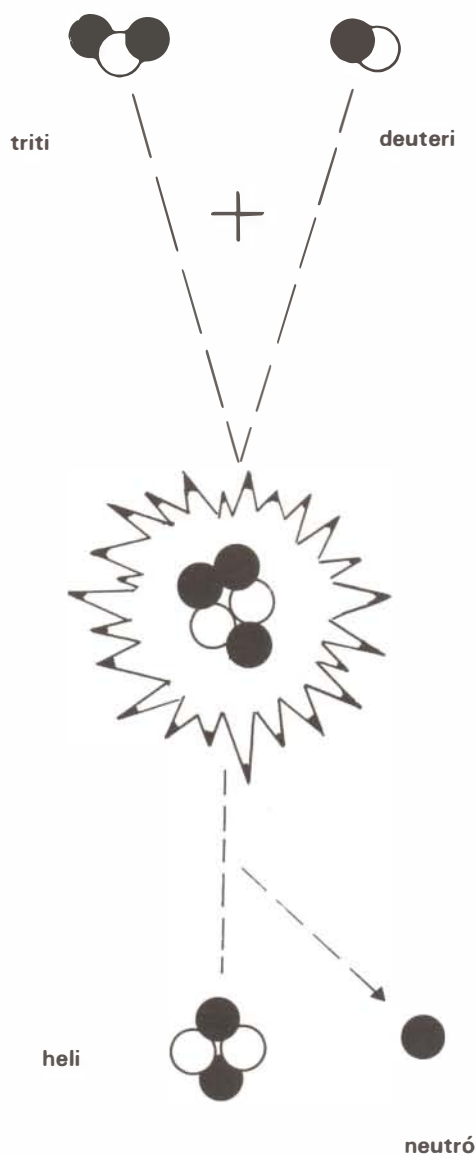


Fig. 3

Perquè dos nuclis es fusionin han de vencer la força de repulsió electrostàtica que actua entre ells, fins a situar-se a molt curta distància (de l'ordre de una bilionèsima de centímetre) a on actua la força d'atracció nuclear. Això només s'aconsegueix si el plasma assoleix temperatures d'uns 50 milions de graus. En aquest esquema s'il·lustra la fusió entre els isòtops deuteri i triti, tot desprenent gran quantitat d'energia ( $28,2 \times 10^{-13}$  joules) i originant un àtom d'heli i un neutró.

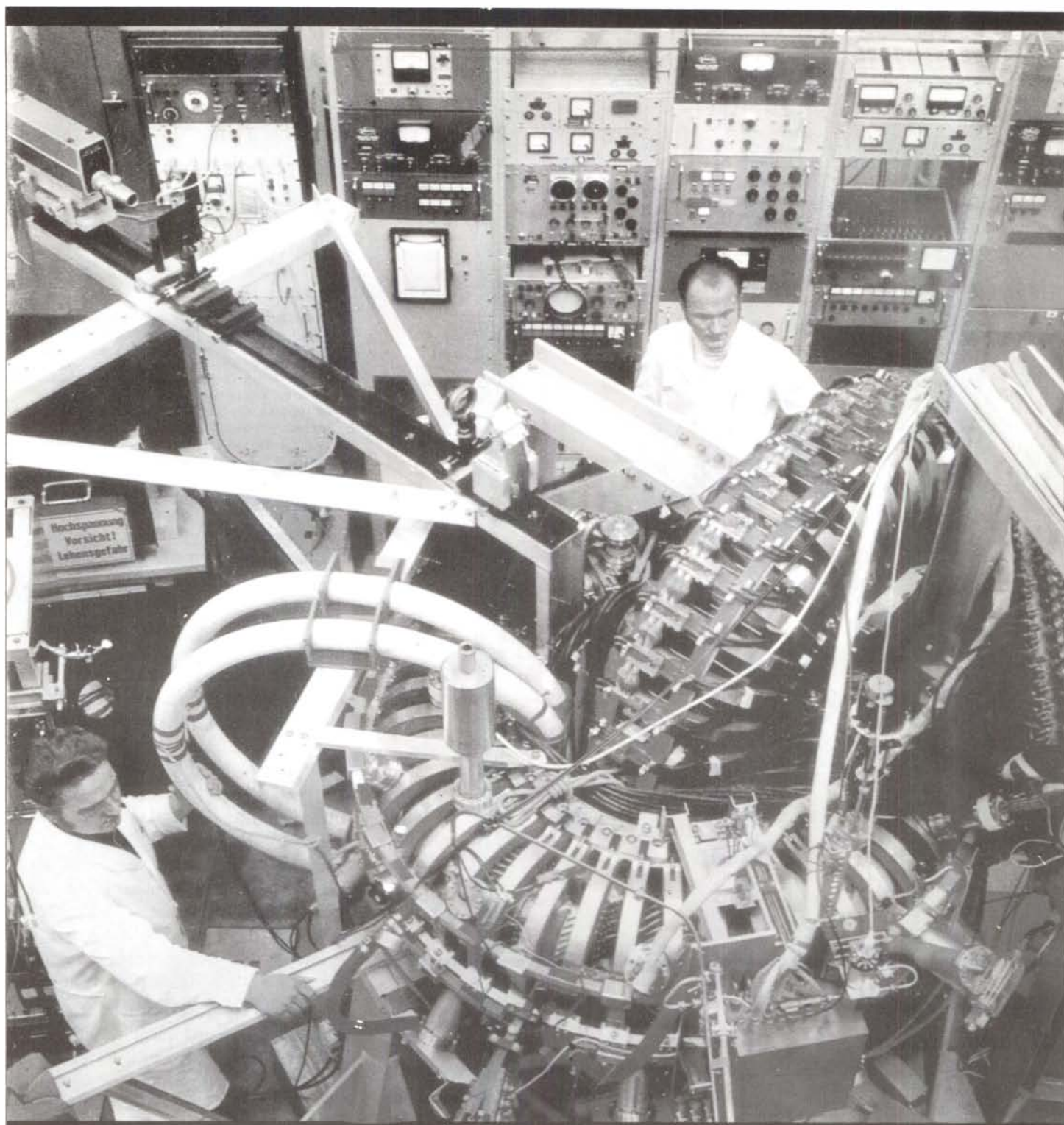
els responsables polítics dubtin a l'hora de comprometre grans mitjans en una via de la qual encara no s'ha demostrat la seva factibilitat. I més, quan, en aquests moments, les màquines que s'utilitzen són instruments de laboratori extremadament complexos i que espanten una mica els responsables dels programes energètics. Però és probable que, a partir del moment que s'hagi aconseguit el "break even", la situació evolucioni més favorablement. La Llei "Mac Cormark", discutida als Estats Units l'any 1981 a finals del mandat del president Carter, havia fet de la producció d'energia per fusió amb confinament magnètic un dels grans objectius per a principis del proper segle. Però, de fet, el president Reagan no ha seguit aquesta línia, concretament en no concedir els crèdits que s'havien previst. A la Unió Soviètica, els principals esforços s'han concentrat a la fusió per confinament inercial, probablement per motius militars. El Tokamak T 15 és modest en relació amb els seus homòlegs occidentals. A Europa, el programa JET evoluciona normalment; i ja és considerat com un dels més evolucionats del món. Però, en les altres vies, l'absència quasi total d'Europa podria arribar a ser dramàtica. Ara bé, finançament del JET representa quatre dies de consum de petroli a tota Europa!... França també s'esforça, especialment amb la construcció del gran Tokamak, anomenat "Tore Supre", que anirà equipat d'imants supraconductors i que Europa financia parcialment. Però hi ha problemes, particularment en la col·laboració CEA-CNRS Universi-

### Actituds dels governs davant la costosa recerca

A l'actualitat hi ha tres països, els Estats Units, la Unió Soviètica i el Japó, i Europa (Associació EURATOM) que treballen activament en aquest terreny. Això representa un efectiu d'uns 4.000 investigadors i físics arreu del món, amb un pressupost total, l'any 1984, prop dels dos mil milions de dòlars. Aquesta quantitat és a la vegada poc i molt. Poc si considerem que posar a punt una filera energètica s'ha calculat que costa pels volts de quinze o vint mil milions de dòlars. De la mateixa manera, caldrà esperar, donat el ritme actual, i tenint compte de les incerteses, bastant de temps per aconseguir-ho. Molt si tenim en compte la dispersió necessària; comprovarem que algunes

recerques són necessàriament improductives, però, com podíem saber-ho abans d'haver-les explorat i córrer el risc a priori? És evident que hauria d'haver-hi una major cooperació internacional, però encara que existeix, no pot ser-ho més degut almenys a dues raons molt importants: d'una banda, els costos econòmics són colossals (i el Japó, que té un programa molt ben estructurat, n'és plenament conscient), i, d'altra banda, les implicacions militars són considerables, sobretot pel que fa a la via per confinament inercial. És una base fonamental de recerca per a la nova generació d'armes anomenades "d'energia dirigida" que empra els làsers de potència (diferents als que es fan servir per a la fusió) i els feixos intensos de partícules relativistes.

Tenint en compte les incertituds que encara subsisteixen, és normal que



tat, pel que fa a les investigacions, cosa que no passa als altres països. Només el Japó té un programa ben estructurat, en projecte, amb una nova generació de màquines cada cinc o set anys: el projecte EPR (Experimental Power Reactor) ja està previst per als anys 1995-2000. Val a dir que també cal tenir cura de la formació dels homes, llarg problema que no sempre és fàcil de resoldre, ja que no n'hi ha una sobreabundància.

Es pot deduir, doncs, que, en les actuals circumstàncies, i per manca de col·laboració internacional, excepció feta dels països europeus, caldria augmentar els mitjans humans i financers

un cop aconseguits els primers resultats decisius, és a dir, d'aquí a 1990. A més, Europa hauria de començar a diversificar els camps d'investigació el més aviat possible.

### La Fusió i el desenvolupament de la humanitat

**E**n el pla material, la supervivència i el desenvolupament de la humanitat. exigeixen, abans de res, el

control de tres problemes fonamentals: els recursos alimentaris i matèries primeres, la tecnologia i, finalment, l'energia per poder explotar els dos primers. Resoldre el tercer mitjançant la fusió termonuclear suposaria un guany molt important per al futur. Actualment, només coneixem tres solucions energètiques al llarg termini: la solar, el superregenerador i la fusió.

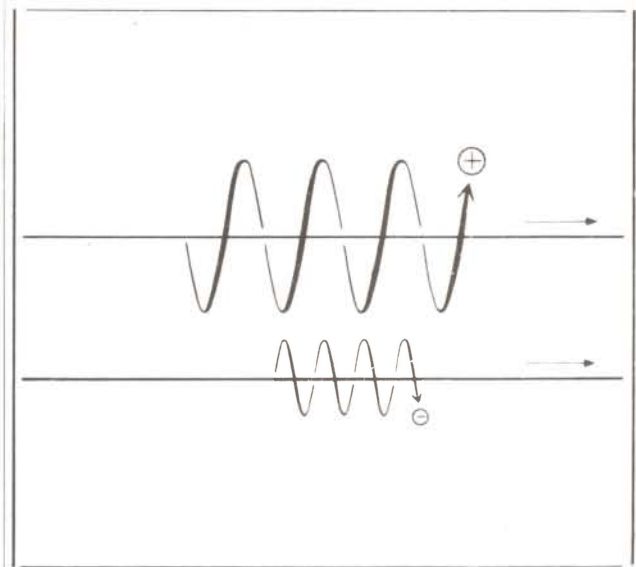
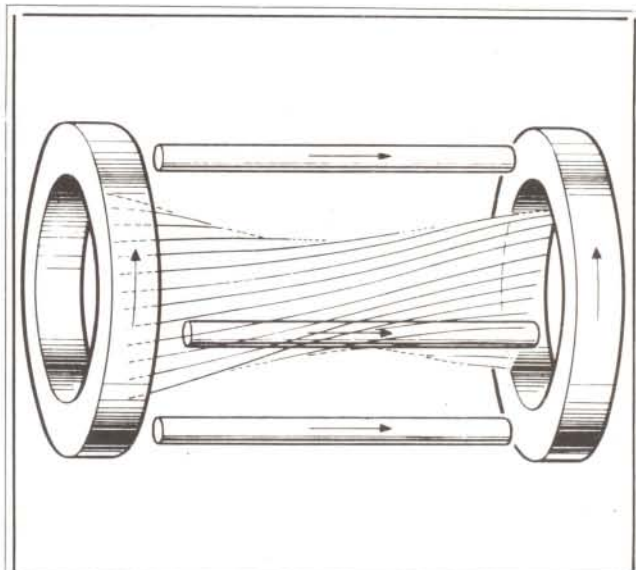
La primera només pot ser aplicada a petita escala malgrat que alguns somniïn en societats descentralitzades... La veritable instal·lació de l'home en l'espai, l'explotació dels seus recursos i possibilitats quasi infinites, però també la preservació eco-

◀ Fig. 4

Aparell destinat a experimentar amb el plasma per intentar resoldre la dificultat d'estabilització que les altes temperatures comporta.

Fig. 5 ▶

A dalt, configuració del camp magnètic que ha permès resoldre els problemes de confinament del plasma. A baix, moviment de les partícules carregades (plasma) en un camp magnètic.



lògica del nostre planeta, la seva explotació racional i l'eventual prevenció de grans catàstrofes, ja siguin naturals o no, exigiran necessàriament disposar d'una font d'energia molt abundant, potent, compacta, fiable, segura i poc contaminant. Contràriament a una opinió molt generalitzada, no ens vindrà ni del Sol ni de la informàtica. La segona, el superregenerador es podria arribar a controlar perfectament, però té uns inconvenients substancials, com, per exemple, els residus radioactius de llarga vida, els riscos d'accidents i el rebuig social.

**La supervivència de la humanitat demana el control de tres problemes bàsics: els recursos alimentaris i les matèries primeres, la tecnologia, i l'energia per a poder explotar els dos primers.**

Constatem, de la mateixa manera, que l'energia representa, amb tot, l'activitat econòmica més important de totes les de la humanitat: de l'ordre de 800 mil milions de dòlars l'any (en segon lloc trobem l'armament amb uns 600 mil milions de dòlars l'any). L'evolució de la història de la humanitat ens demostra, d'una manera quasi irrefutable, que aquesta situació tan excep-

cional no es modificarà fins dintre d'unes quantes generacions. *Recordem que tots els avenços han estat íntimament lligats a la conquesta per part de l'home d'una nova font d'energia.* Encara no hem vist res que ens demostrï que aquesta evolució constant hagi o pugui canviar. El desenvolupament energètic sempre ha anat al costat de la densificació i lligat a l'augment del consum. Potser la novetat estaria en el fet que, per als usos corrents, es pogués associar, a llarg termini, la fusió termonuclear amb l'energia solar.

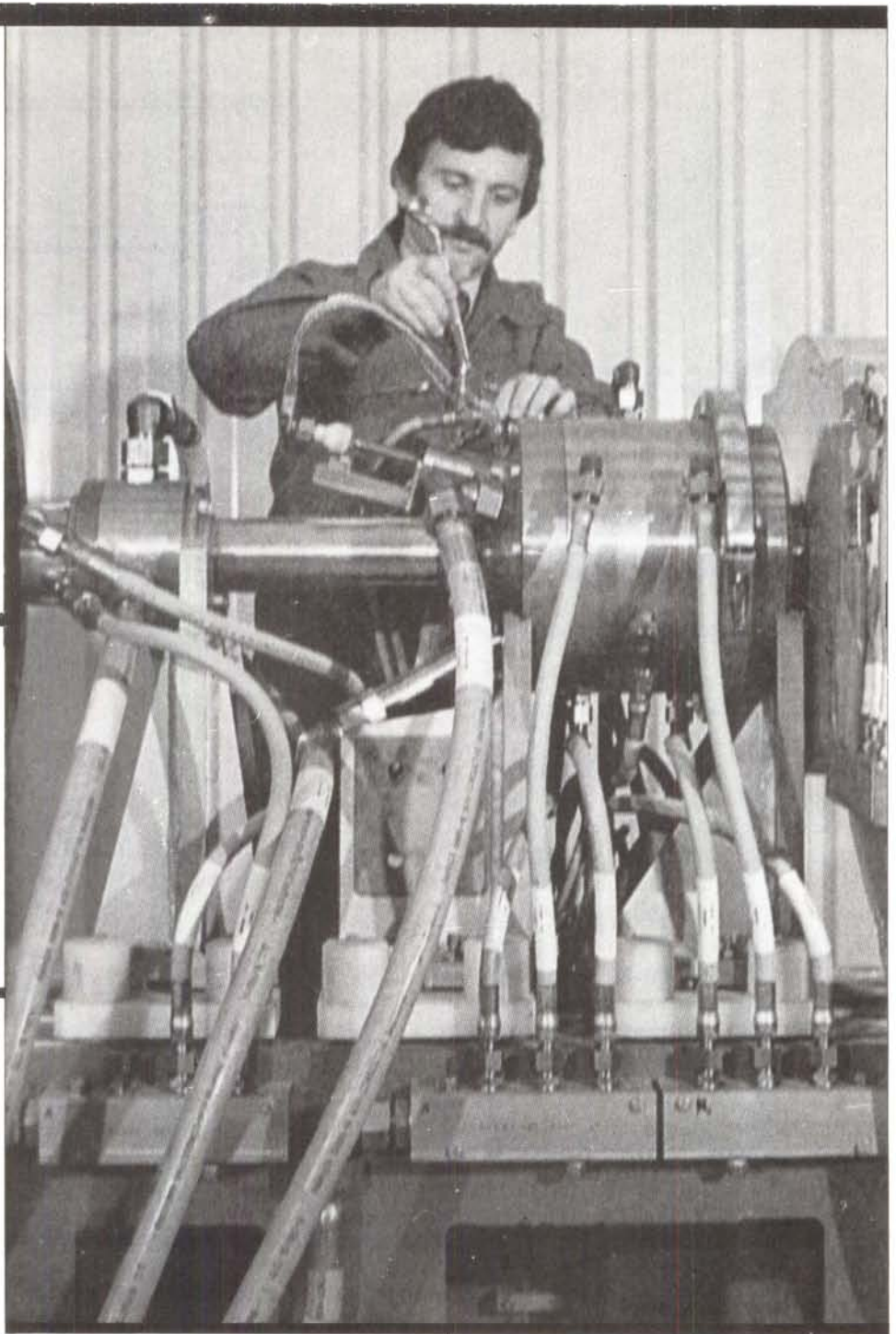
### La difícil situació del Tercer Món

**E**l Tercer Món suposa un problema que, fins que no s'hagi tro-

bat un nou ordre econòmic internacional, continuarà sent greu i sense possibilitats reals de solució. La construcció d'aquest nou ordre exigeix, en primer lloc, garantir la pau. Més tard, caldrà formar els homes i adaptar les estructures econòmiques, polítiques i socials a la revolució tecnològica que s'està gestant. I, finalment, és indispensable de preservar la diversitat cultural i de considerar les especificitats ètniques necessàries per al futur desenvolupament de la humanitat. És així que l'energia solar podria arribar a tenir un paper important en els països en vies de desenvolupament, ja que sovint, gaudeixen, del trumf d'un millor assoliment que els actuals països industrialitzats. Però també és cert que el problema fonamental de les transferències de tecnologia, i del desenvolupament de tecnologies espe-

Fig. 6

A part de la fusió, el plasma té diverses utilitats. Per exemple, aquí podeu veure un aparell destinat a tractar deixalles perilloses com són els hidrocarburs policlorats, tot utilitzant un flux de gas ionitzat a alta temperatura produït per un arc elèctric.



cífiques, és un problema global i no sectorial o puntual. I aquest és, precisament, un dels grans reptes del futur.

Encara hi ha moltes qüestions que no s'han pogut contestar i la de la rentabilitat econòmica és, possiblement la més crítica. Si tenim en compte la densitat de potència, una central de fusió haurà de ser lògicament molt complexa, molt automatit-

**El confinament inercial té considerables implicacions militars per a la nova generació d'armes "d'energia dirigida" i això dificulta la cooperació internacional.**

zada i, per aquest motiu, molt informatitzada; per això, no serà d'un dia per l'altre que veurem proliferar instal·lacions d'aquest tipus. Malgrat tot, la conquesta de l'espai exigirà esforços molt grans per tal de fer que aquestes fonts d'energia siguin el més compactes possible.

**Si un dia la fusió substitueix la fissió, que passarà amb el Super Phenix?**

**S**empre se'n podria fer un museu que ensenyés a les properes gene-

racions tot el que han treballat i s'han esforçat els homes per resoldre un dels problemes més importants que se'ls ha plantejat pel que fa a la supervivència i al desenvolupament de les seves societats. L'exemple de ZOE, primera "pila nuclear" francesa, és una mostra significativa dels prodigiosos recursos de l'esperit humà quan s'enfronta a la necessitat. Recordem que la clau del futur és, abans que res, la del desenvolupament de l'educació de les generacions que pugen i de les que vindran.

