



CONSORZIO RFX
Ricerca Formazione Innovazione

Fisica e ingegneria della fusione:
la ricerca verso una nuova fonte di energia

Consorzio RFX

Associazione Euratom-ENEA sulla Fusione

Soci: CNR, ENEA, Università di Padova, INFN, Acciaierie Venete S.p.A.

Corso Stati Uniti, 4 – 35127 Padova, Italy

Tel +39 049 8295000-1 - Fax +39 049 8700718 - Email direzione@igi.cnr.it - www.igi.cnr.it

Prima edizione: marzo 2001
Seconda edizione: settembre 2007

© Copyright 2007 by Consorzio RFX

Tutti i diritti di traduzione, riproduzione e adattamento,
totale o parziale, con qualsiasi mezzo (comprese
le copie fotostatiche e i microfilm) sono riservati.

Stampato presso la **Graficamontaggi**
Viale Palladio,9 - Vigorovea (PD)
Tel. 049 5840343 - www.graficamontaggi.com

Disegno in copertina di Federica Osgualdo

Indice

| | |
|---|--------|
| Introduzione | pag. 5 |
| 1 - Breve storia della ricerca sulla fusione a Padova | 7 |
| <hr/> | |
| 2 - Sintesi storica delle ricerche sull'Energia da Fusione Nucleare | 13 |
| 3 - "Difetto di Massa": il principio fisico della fusione e della fissione nucleare | 15 |
| 4 - Un semplice modello per la comprensione del fenomeno della fusione nucleare | 17 |
| 5 - I quattro stati della materia | 18 |
| 6 - Il Criterio di Lawson | 20 |
| <hr/> | |
| 7 - Modalità di Confinamento dei Plasmi | 23 |
| 8 - Accensione della corrente di plasma e scarica | 28 |
| 9 - Riscaldamento del plasma | 29 |
| <hr/> | |
| 10 - Il Tokamak | 33 |
| 11 - Il Joint European Torus (JET) | 34 |
| <hr/> | |
| 12 - L'International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) | 37 |
| 13 - La centrale a fusione per la produzione di energia | 43 |
| <hr/> | |
| 14 - Il Reversed Field Pinch (RFP) – Il Reversed Field eXperiment (RFX) | 47 |
| 15 - Sviluppi tecnologici e applicazioni industriali | 56 |
| <hr/> | |
| - Conclusioni | 59 |
| - Appendice: la fusione nel futuro dell'energia | 60 |
| - Bibliografia | 70 |
| - Tabella di conversione delle unità di energia | 72 |
| - Glossario, abbreviazioni e unità | 73 |
| - Cronologia della fusione | 78 |
| - Per saperne di più: siti internet | 82 |

La ricerca di nuove fonti di energia è un argomento importante e di grande attualità, che giustamente attira l'attenzione dell'opinione pubblica perché la produzione e il consumo di energia da un lato sono necessarie alla vita, dall'altro provocano un forte impatto ambientale.

Questo opuscolo intende mettere a disposizione dei lettori alcuni concetti di base che, cinquant'anni o sono, hanno acceso l'interesse di alcuni ricercatori in Padova e di un assai più numeroso gruppo di studiosi nel mondo attorno a un obiettivo specifico: la produzione di energia da processi di fusione termonucleare controllata.

Tra i possibili lettori, ci sono particolarmente cari gli studenti che oggi frequentano le Scuole Superiori e che, in un futuro non lontano, dovranno dedicare attenzione al problema delle risorse energetiche e del loro razionale utilizzo, in un contesto forse ancor più difficile dell'attuale.

La prima parte del fascicolo riassume la lunga storia della ricerca che ha condotto gli studiosi, già nei primi decenni del 1900, alla scoperta dell'energia liberata dalla reazione di fusione di nuclei di elementi leggeri.

La seconda parte del fascicolo presenta le due linee di ricerca lungo le quali operano coloro che intendono utilizzare per scopi pacifici le reazioni di fusione che avvengono nella materia allo stato di "plasma", quando sia portata a temperature vicine a quelle del sole e delle stelle: la linea della **fusione inerziale** e la linea della **fusione a confinamento magnetico**.

La terza parte del fascicolo è dedicata alle macchine per ricerche sperimentali sul "plasma" confinato da intensi campi magnetici; attenzione particolare è dedicata alla maggiore macchina europea JET.

La quarta parte del fascicolo guarda al futuro della fusione a confinamento magnetico: il progetto del primo reattore sperimentale, ITER, la cui costruzione

è iniziata di recente, e gli studi sul reattore a fusione commerciale.

Infine, l'ultima parte del fascicolo descrive caratteristiche e risultati della macchina realizzata a Padova, RFX, e illustra gli studi sulle applicazioni industriali e tecnologiche dei plasmi, che vengono svolti presso il Consorzio RFX.

Il fascicolo è completato da un'appendice sul possibile ruolo della fusione negli scenari energetici del XXI secolo.

Nell'augurarmi che questo libretto susciti la vostra curiosità per una delle più difficili sfide scientifiche e tecnologiche che avete davanti a voi, desidero soffermarmi brevemente sull'attività delle persone che fanno parte del cosiddetto **Gruppo di Padova per Ricerche sulla Fusione Termonucleare Controllata**.

Oggetto del nostro studio è, dunque, un plasma, cioè un gas fortemente ionizzato e portato ad elevatissime temperature. Nel nostro esperimento, **RFX**, abbiamo prodotto plasmi in gas idrogeno, percorsi da correnti fino ad oltre un milione di Ampère e riscaldati fino ad alcuni milioni di gradi centigradi. In queste condizioni abbiamo studiato, con l'ausilio di raffinati strumenti di misura, la capacità dei campi magnetici di "confinare" la ciambella di plasma, ovvero di isolarla termicamente rispetto al contenitore. Abbiamo scoperto nuovi fenomeni fisici, abbiamo imparato come controllare questo fluido caldissimo e perciò instabile, abbiamo sviluppato nuove tecnologie con possibili applicazioni anche in campi del tutto diversi.

Lo scopo ultimo della ricerca sulla fusione è la realizzazione di un reattore, cioè di una macchina nella quale avvengono reazioni di fusione nucleare in un numero tale da produrre quantità di energia molto superiori a quelle necessarie per sostenerle, con un processo compatibile con la salvaguardia del nostro ambiente. Gli esperimenti padovani su RFX sono ben lontani da questi traguardi che richiedono macchine molto più grandi e complesse; ciò nonostante, le ri-

cerche di fisica del plasma condotte su RFX sono sostenute e finanziate dall'Unione Europea perché contribuiscono ad approfondire le conoscenze di fenomeni che avvengono in quel plasma che costituirà il cuore del reattore a fusione.

E poichè è finalmente iniziata a Cadarache (Francia) la realizzazione del primo reattore sperimentale a fusione - ITER - il nostro gruppo di ricerca sta attivamente partecipando al progetto. In particolare, realizzeremo a Padova un laboratorio di prova per il sistema di riscaldamento del plasma basato sull'iniezione di fasci di particelle ad alta energia. Siamo perciò convinti che il Consorzio RFX costituisca per la nostra città una preziosa realtà scientifica e tecnologica, che concorre a risolvere uno dei problemi fondamentali per le prossime generazioni.

Confidiamo che questa lettura convinca anche voi della necessità di proseguire con determinazione sulla strada intrapresa.

Desidero infine ringraziare calorosamente la dott.ssa Margherita Basso, il dott. Sergio Costa e il dott. Gianluca Spizzo ai quali si deve gran parte del merito per la realizzazione di quest'opera. Ringrazio anche il Prof. Giampaolo Casini, che ha contribuito in modo sostanziale e con grande entusiasmo alla stesura dei capitoli su ITER, sulla centrale a fusione per la produzione di energia, e sui problemi energetici del futuro. Le loro competenze e il loro impegno, fusi in cordiale collaborazione, hanno dato origine a questo libretto, che spero possa offrire argomenti stimolanti in una forma accessibile a voi tutti. Buona lettura.

Francesco Gnesotto
Direttore del Consorzio RFX

1 - Breve storia delle ricerche sulla fusione a Padova

Ricerche sui gas ionizzati o plasmi [1] iniziarono a Padova nel 1958/59, presso l'Istituto di Elettrotecnica della Facoltà di Ingegneria (allora diretto dal prof. Giovanni Somenza), con il sostegno e la collaborazione dell'Istituto di Fisica (allora diretto dal prof. Antonio Rostagni).

I primi esperimenti riguardavano scariche elettriche in tubi rettilinei, in gas a bassa pressione, prodotte o fra due **elettrodi** posti alle estremità del tubo (Zeta-Pinch) o da un **induttore** anulare, esterno al tubo stesso (Theta-Pinch). Su tali scariche si effettuarono le prime osservazioni e misure.

A Padova gli studi con macchine toroidali, in cui il riscaldamento del plasma si otteneva per compressione o strizione del gas, "effetto Pinch", vennero avviati nei primi anni '70, nel quadro del primo contratto di Associazione fra EURATOM e CNR; le ricerche presso il Centro di Studio sui Gas Ionizzati di Padova – struttura di ricerca del CNR e dell'Università di Padova - diventavano così parte del Programma Europeo sulla Fusione. Gli studiosi ricercavano allora una configurazione magnetica "spontanea", che poi sarà chiamata "**Reversed Field Pinch**" (RFP) e che alcuni anni prima era stata osservata casualmente in taluni degli ultimi esperimenti sulla macchina ZETA (Zero Energy Thermonuclear Assembly), macchina operativa fra il 1954 e il 1958 ad Harwell (UK), (fig. 1.1) nella quale era previsto il riscaldamento del plasma grazie all'effetto di strizione. Nei primi anni '70 nel Laboratorio di Culham, vicino

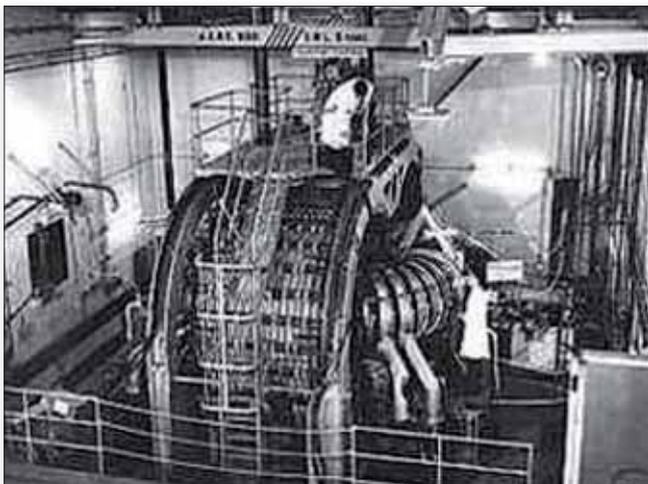


Fig. 1.1 ZETA /1954-1958)

ad Oxford (UK), si iniziò la costruzione della macchina HBTX-1, nella quale si intendeva realizzare la configurazione poi detta RFP mediante rapido controllo dei circuiti esterni .

Al gruppo di Padova venne affidato il progetto ETA-BETA I, dedicato alla stessa configurazione RFP. Al progetto fu riconosciuto il livello prioritario nell'ambito del programma europeo sulla fusione, il che comportava un finanziamento dalla Comunità Europea per il 45% delle spese di investimento.

Nel 1974, a Tokyo, alla Conferenza mondiale sulla Fusione Nucleare, organizzata dalla **International Atomic Energy Agency (I.A.E.A.)**, organo delle Nazioni Unite con sede a Vienna, il fisico teorico di Culham B. Taylor dimostrava che, in un plasma riscaldato per effetto pinch, la configurazione RFP corrisponde ad uno stato di "quasi minima energia" e quindi tendeva a formarsi e a rigenerarsi spontaneamente, senza specifici interventi dall'esterno.

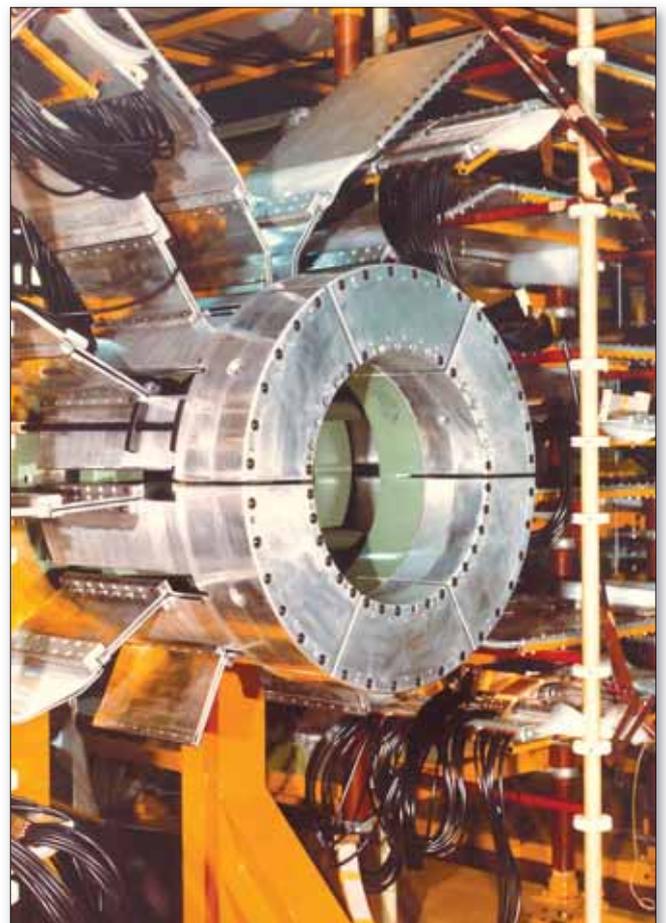


Fig. 1.2 ETA-BETA I (1974-1978)

Nella conferenza I.A.E.A. del 1976 a Berchtesgaden gli esperimenti su ETA-BETA I (fig. 1.2), assieme ai risultati presentati da altri laboratori, offrirono conferme sperimentali della teoria di Taylor.

Ma fu l'esperimento padovano ETA-BETA II (fig. 1.3) (anche questo prioritario in ambito europeo) a riprodurre nel 1979, per la prima volta, la cosiddetta **"fase quiescente"**, che ventidue anni prima era comparsa, inaspettata, nella macchina ZETA e nessuno degli esperimenti successivi era riuscito a riprodurre (fig. 1.4).

La comunicazione ufficiale venne data alla 9th European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, a Oxford nel settembre 1979.

Questo risultato diede nuovo impulso alla ricerca



Fig. 1.3 ETA-BETA II (1979-1989)

sugli RFP e nuove macchine entrarono in operazione presso laboratori Americani (Los Alamos, San Diego, Madison), Giapponesi (Tokyo, Tsukuba) ed Europei (Culham e Stoccolma).

Tra la fine degli anni '70 e l'inizio degli anni '80 si consolidava la convinzione che una significativa indagine delle prospettive termonucleari della configurazione RFP dovesse svolgersi con esperimenti in una macchina molto più grande e a livelli di corrente molto più elevati di quelli consentiti dai dispositivi fino allora impiegati.

Venne allora decisa: negli USA la costruzione di MST

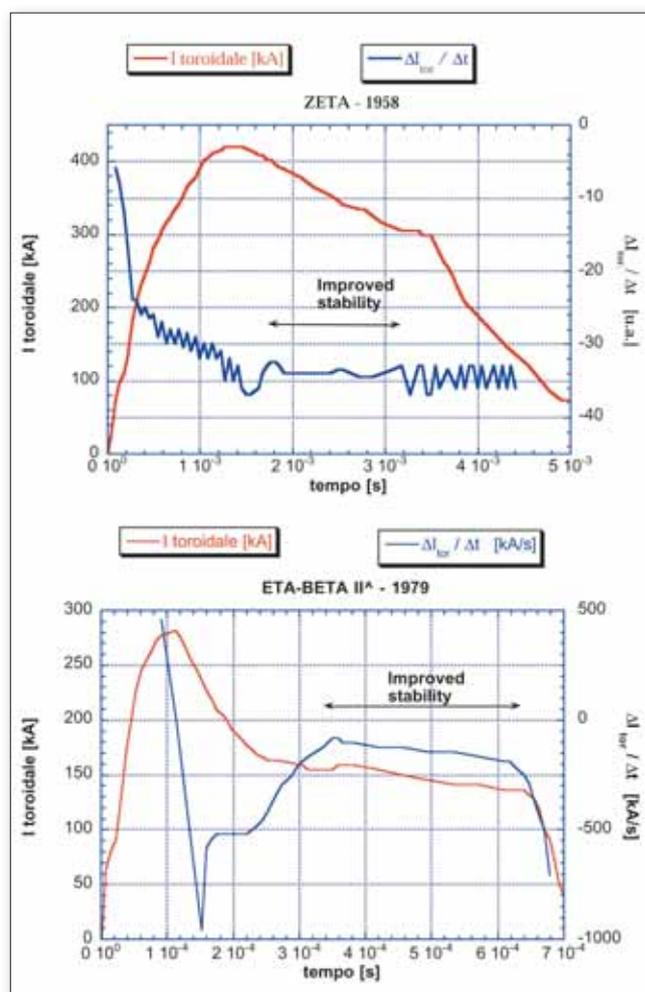


Fig. 1.4 Correnti di plasma (in linea rossa) e variazioni nell'unità di tempo delle correnti stesse negli esperimenti ZETA ed ETA BETA II

a Madison, con corrente fino a 500 kA; in Europa la costruzione di RFX (descritto nel cap.14), con corrente fino a 2 MA; in Giappone, a Tsukuba, la costruzione di una macchina con corrente fino a 1 MA.

Nell'ambito della International Energy Agency (I.E.A.), operante presso l'O.C.S.E. a Parigi, venne formalizzato nel 1990 un "Trilateral Implementing Agreement on RFP's" fra USA, Europa e Giappone, per favorire la collaborazione tra i laboratori europei, americani e giapponesi.

Il progetto RFX, inizialmente proposto dal laboratorio di Culham, venne poi sviluppato in collaborazione con i laboratori di Los Alamos e di Padova ed infine affidato nel 1984 al gruppo di Padova, composto da personale messo a disposizione dal CNR (Istituto Gas Ionizzati), dall'Università di Padova (Centro Ricerche Fusione), dal Culham Laboratory e successivamente dall'allora Ente Nazionale per l'Energia Atomica (ENEA). I finanziamenti per la costruzione furono assicurati da ENEA per il 55% e da Euratom per il 45%. La costruzione dell'impianto RFX (fig. 1.5) ha com-



Fig. 1.5 Foto aerea degli edifici che ospitano l'esperimento RFX, situato all'interno dell'Area di Ricerca del CNR di Padova

portato spese complessive di investimento per circa 100 Miliardi di Lire, in ottimo accordo con le previsioni iniziali.

La fase degli esperimenti sull'impianto RFX è cominciata nel 1992. Nel 1999 un incendio ha distrutto una parte rilevante degli impianti elettrici di alimentazione di RFX.

Nel dicembre 2004, dopo una intensa fase di ricostruzione delle alimentazioni e di miglioramento e modifica della macchina, che pertanto ora si chiama RFX-mod, è ripresa l'attività sperimentale; i nuovi e promettenti risultati sono stati presentati alla 21ª Conferenza dell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA) a Chengdu, in Cina, nell'ottobre 2006.

In parallelo con le ricerche su RFX, il gruppo di ricerca di Padova ha sviluppato importanti collaborazioni scientifiche e tecnologiche con numerosi laboratori europei, statunitensi e giapponesi. A partire dalla fine degli anni '90, il Consorzio RFX ha fornito un contributo sostanziale alla ricerca sulla macchina JET (vedi cap. 11), gestita in collaborazione tra tutti i labora-

tori fusione europei. Infine, da circa un decennio il gruppo di ricerca collabora al progetto ITER (vedi cap. 12) con impegno progressivamente crescente. Nel 2006 è stata affidata al Consorzio RFX la realizzazione, in collaborazione con alcuni altri laboratori europei e giapponesi, di uno dei sistemi di riscaldamento del plasma di ITER (**gli iniettori di fasci di particelle neutre**).

A conclusione di questo breve cenno storico, è importante mettere in rilievo come, in tutto il suo sviluppo, la ricerca padovana sui plasmi sia sempre stata fortemente integrata nel programma europeo sulla fusione e abbia tratto profitto da intensi rapporti scientifici con i laboratori americani e giapponesi che conducono ricerche analoghe.

L'integrazione fra laboratori in vari Paesi del mondo è molto importante sia per la massima efficienza delle ricerche, sia per una costante verifica, a livello internazionale, dei risultati raggiunti: questo è considerato un vero punto di forza della nostra ricerca.

In figura 1.6 sono mostrati i principali Laboratori eu-

ropei che ospitano esperimenti per lo studio di fenomeni associati alla fusione nucleare.

Nei prossimi capitoli cercheremo di spiegarvi che

cos'è la fusione termonucleare controllata e come potrà essere utilizzata per scopi pacifici.



Fig. 1.6 Laboratori Europei che ospitano esperimenti per la fusione nucleare

| | | |
|---|----------------------|--|
|  | Grecia | Association Euratom Greece National Technical University of Athens, Dep. Electrical and Computer Engineering Div. Electromagnetics, Electrooptics and Electronic Materials, Atene |
|  | Bulgaria | Association Euratom/ INRNE Institute of Nuclear Research and Nuclear Energy Bulgarian Academy of Sciences, Sofia |
|  | Romania | Association Euratom – MedC Ministry of Education and Research Institute of Atomic Physics, Bucarest |
|  | Slovenia | Association Euratom – MHST Jozef Stefan Institute, Lubiana |
|  | Ungheria | Association Euratom HAS KFKI - Research Institute for Particle and Nuclear Physics, Budapest |
|  | Slovacchia | Association Euratom/ CU Faculty of Mathematics, Physics and Informatics Comenius University, Bratislava |
|  | Rep. Ceca | Association Euratom IPP-CZ Institute of Plasma Physics Academy of Sciences of the Czech Republic, Praga – Esperimento: COMPASS |
|  | Polonia | Association Euratom – IPPLM IPPLM, Varsavia |
|  | Lituania | Association Euratom/ LEI Lithuanian Energy Institute, Kaunas |
|  | Lettonia | Association Euratom/University of Latvia Institute of Solid State Physics, University of Latvia, Riga |
|  | Finlandia | Association Euratom TEKES VTT Processes, Espoo |
|  | Svezia | Association Euratom – VR The Alfvén Laboratory The Royal Institute of Technology, Stoccolma – Esperimento: EXTRAP T2R |
|  | Danimarca | Association Euratom RISØ Risø National Laboratory, Roskilde |
|  | Olanda | Association Euratom – FOM FOM-Instituut voor Plasmafysica “Rijnhuizen”, Nieuwegein |
|  | Germania | Association Euratom – IPP, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching – Esperimento: ASDEX UPGRADE Association Euratom - IPP, Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Greifswald – Esperimento: Wendenstein 7-X Association Euratom – FZJ, Forschungszentrum Jülich GmbH, Institut für Plasmaphysik, Jülich – Esperimento: TEXTOR Association Euratom – FZK, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe |
|  | Austria | Association Euratom – ÖAW Technische Universität Wien Institut für Allgemeine Physik, Vienna |
|  | Svizzera | Association Euratom - Confédération Suisse EPFL SB CRPP, Losanna – Esperimento TCV |
|  | Belgio | Association Euratom - Etat Belge Research Unit ULB, Université Libre de Bruxelles, Bruxelles Research Unit SCK/CEN, Studiecentrum voor Kernenergie, SCK/CEN, Mol (Belgio) Research Unit ERM/KMS, Ecole Royale Militaire, Bruxelles |
|  | Francia | Association Euratom CEA Département de Recherches sur la Fusion Contrôlée, CEA – Cadarache – Esperimento TORE-SUPRA |
|  | Spagna | Association Euratom – CIEMAT Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Madrid – Esperimento : TJ II |
|  | Portogallo | Association Euratom – IST Centro Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Lisboa – Esperimento: ISTTOK |
|  | Irlanda | Association Euratom – DCU Plasma Research Laboratory Dublin City University - Dublino |
|  | Gran Bretagna | Association Euratom – UKAEA UKAEA Fusion, Culham Science & Engineering Centre – Esperimenti: JET e MAST |
|  | Italia | Association Euratom – ENEA Centro Ricerche Energia Frascati (Roma) – Esperimento: FTU Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Fisica del Plasma “Piero Caldirola”, Milano Consorzio RFX, Padova – Esperimento: RFX-mod |

2 - Sintesi storica delle ricerche sulla Fusione Nucleare

La reazione di fusione nucleare permette di ricavare energia grazie al fenomeno naturale conosciuto come "Difetto di Massa". Per comprendere come si possa ottenere energia da fusione è indispensabile approfondire il fenomeno del "Difetto di Massa".

Nei primi anni del secolo XIX, benché le conoscenze fisiche e chimiche fossero già ben avanzate, gli studiosi conoscevano pochissimo della fisica dell'atomo, ritenuto "indivisibile"

($\alpha - \tau\epsilon\mu\nu\omega$), come ritenevano Democrito e Lucrezio. Un chimico inglese, William Prout [2], misurando il peso atomico dei pochi elementi allora noti, si accorse che la massa di detti elementi era con buona approssimazione un multiplo intero della massa dell'atomo di Idrogeno. Concettualmente in contrasto con l'ipotesi di indivisibilità atomica, egli avanzò l'idea che ogni atomo fosse l'aggregazione di più atomi di Idrogeno. Per ovvie ragioni questa sua teoria fu aversata dai suoi contemporanei, anche perché essi avevano osservato, come lo stesso Prout del resto, che la massa di ogni elemento era sempre inferiore, sia pure di poco, alla massa dell'atomo di Idrogeno moltiplicata per un numero intero. Ecco il "Difetto di Massa"; ma nessuno scienziato ne poteva prendere coscienza in quanto la struttura dell'atomo era ignota.

Si ricordi che solo nel 1869 - 1871 Mendeleev propose la sua Tavola Periodica [3].

La Teoria della Relatività Ristretta di Einstein provò, nel 1905, l'equivalenza tra massa ed energia e stabilì la relazione:

$$E = \Delta m c^2$$

(fig. 2.1)

che significa: se in una trasformazione nucleare si ha una riduzione della massa Δm , viene liberata

PRINCIPIO DI EINSTEIN

$$E = \Delta m c^2$$
$$E_{\text{Joule}} = \Delta m_{\text{kg}} \left[3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]^2$$

Fig. 2.1 Equivalenza fra massa ed energia secondo la teoria della Relatività di Einstein

un'energia pari al prodotto di tale riduzione Δm per il quadrato della velocità della luce c^2 . È chiaro quindi che, anche se questa quantità Δm è piccolissima, essa viene moltiplicata per un numero enorme, dando alla fine una quantità apprezzabile di energia. Tuttavia, rimaneva ancora altra strada da percorrere per la comprensione del Difetto di Massa e l'intuizione della possibilità di ricavarne energia.

Erano necessari due passi fondamentali. Il primo fu la scoperta dell'elettrone, la misura della sua carica e della sua massa da parte di J.J.Thomson nel 1907, che propose pure un modello di atomo "divisibile" (Thomson scoprì anche l'esistenza degli Isotopi dei

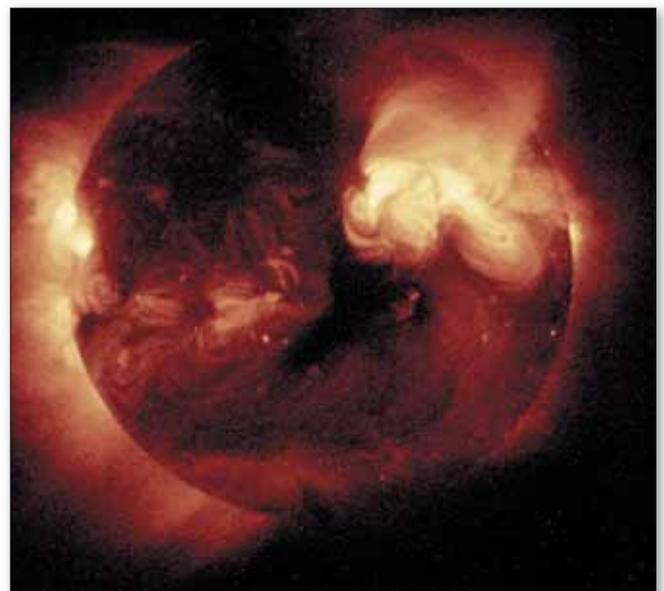


Fig. 2.2 Fotografia ai raggi X della Corona Solare

vari elementi della Tavola di Mendeleev, la cui importanza potremo fra poco apprezzare). Il secondo fu la proposta da parte di Rutherford, nel 1913, del modello di tipo planetario dell'atomo [2].

Queste conquiste della conoscenza consentirono a Eddington, astronomo, di intuire e proporre nel 1920, l'ipotesi che il Fuoco Solare (fig. 2.2), cioè l'energia irradiata dal sole, fosse effetto di fusione nucleare.

Ecco infine l'ultimo passo in questa lunga ricerca: J. Chadwick, allievo di Rutherford, nel 1932 scoprì il neutrone e completò la costruzione di uno dei mo-

delli più moderni dell'atomo, modello di cui ci serviremo nella nostra descrizione.

Il nuovo modello atomico consente di immaginare l'atomo formato da un **nucleo**, i cui costituenti, detti nucleoni, sono i **protoni**, aventi carica elettrica positiva, e i **neutroni**; attorno al nucleo ruotano gli **elettroni**, con carica elettrica negativa. La carica elettrica complessiva dell'atomo è nulla perché il numero di elettroni è uguale a quello dei protoni. Vediamo allora la composizione degli atomi di alcuni elementi:

- l'atomo di Idrogeno, H^1_1 , è formato da un protone e un elettrone;
- l'atomo di Deuterio, isotopo dell'idrogeno, H^2_1 , è formato da un protone, un neutrone e un elettrone;
- l'atomo di Trizio, isotopo radioattivo dell'Idrogeno, H^3_1 , è formato da un protone due neutroni e un elettrone;
- l'atomo di Elio, He^4_2 , è formato da due protoni, due neutroni e due elettroni;
- l'atomo di Litio, Li^6_3 , è formato da tre protoni, tre neutroni e tre elettroni;
- e così via.



Fig. 2.3 Modello di Rutherford dei nuclei dei tre isotopi dell'idrogeno

È opportuno ricordare che si dicono **isotopi** di un elemento della Tavola di Mendeleev gli atomi che occupano la stessa casella della Tavola di Mendeleev, che hanno cioè lo stesso numero atomico Z, e quindi uguale numero di protoni e di elettroni, ma un nu-

mero di neutroni differente gli uni dagli altri, e quindi un diverso numero di massa atomica A. Per esempio, nel caso degli isotopi dell'Idrogeno (fig. 2.3) il Deuterio ha un neutrone nel proprio nucleo, oltre il protone; il Trizio ha due neutroni.

3 - "Difetto di Massa": il principio fisico della fusione e della fissione nucleare

Proponiamoci un *esperimento ideale*.

Trasformiamo un atomo di Deuterio = H^2_1 e uno di Trizio = H^3_1 in un atomo di He^4_2 e un neutrone [4] (fig. 3.1):



La massa atomica del Deuterio è $3.3432 \cdot 10^{-24}$ g;
 la massa atomica del Trizio è $5.0066 \cdot 10^{-24}$ g;
 la massa atomica dell' He^4_2 è $6.6443 \cdot 10^{-24}$ g;
 nel bilancio resta un neutrone, la cui massa è $1.6749 \cdot 10^{-24}$ g.

La somma delle masse dei reagenti è $8.3498 \cdot 10^{-24}$ g; la somma delle masse dell' He^4_2 e del neutrone è $8.3192 \cdot 10^{-24}$ g. Nella costruzione dell' atomo di He^4_2 , partendo da Deuterio e Trizio, sono spariti $0.0306 \cdot 10^{-24}$ g di materia, che, secondo il principio di Einstein, sono diventati $2.74 \cdot 10^{-12}$ Joule di energia. Essa si manifesta come energia cinetica dell'atomo di He^4_2 , che porta con sè $0.54 \cdot 10^{-12}$ J di energia, e del neutrone, che porta con sè i rimanenti $2.2 \cdot 10^{-12}$ J.

Ricordiamo che il nucleo He^4_2 , si chiama **particella "alfa"**.

Si potrebbe obiettare che questo esperimento è solo teorico e che la reazione di fusione può avvenire solo nelle stelle, dove esistono, grazie alle loro dimensioni, condizioni non riproducibili sulla Terra di pressione, di temperatura e di forza gravitazionale, che tiene unita la materia presente.

Nella nostra realtà si può realizzare la fusione?

La prova sperimentale più nota che tale fenomeno si

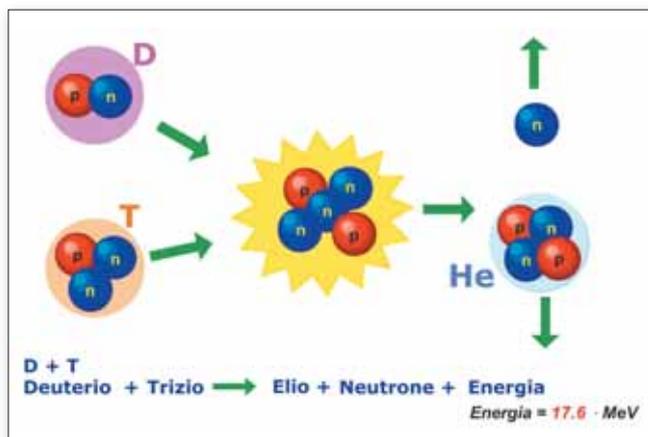


Fig.3.1 Modello della reazione di fusione termonucleare tra un nucleo di Deuterio e uno di Trizio

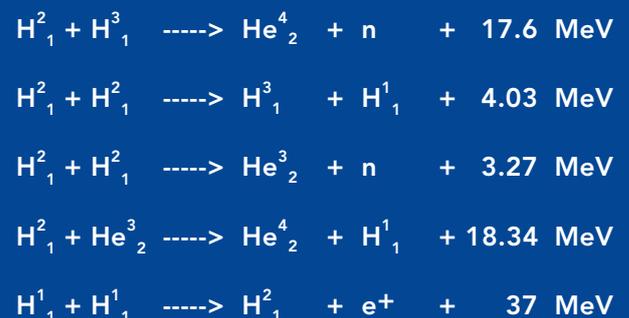
realizza nelle modalità sopra descritte, con produzione di energia ed in grande quantità, è la bomba all'idrogeno, sperimentata per la prima volta in U.S.A. nel novembre 1952.

Nel nostro Laboratorio e in molti altri Laboratori nel mondo intero si conducono studi il cui fine ultimo è l'utilizzazione di tale forma di energia in maniera controllata, per scopi pacifici.

Abbiamo affrontato per la prima volta il calcolo dell'energia prodotta da una reazione di fusione fra due atomi. Abbiamo calcolato l'energia in Joule, l'unità di misura dell'energia nel Sistema Internazionale. In tale unità di misura l'energia associata ad una singola reazione fra due atomi è un numero assai piccolo. È conveniente perciò introdurre una unità di misura più comoda, **l'elettronvolt (eV)**. Che cos'è l'eV?

È l'energia acquisita da un elettrone (la cui carica elettrica è $1.6021 \cdot 10^{-19}$ C) accelerato dalla differenza di potenziale di 1 V: donde il nome ed anche l'equivalenza $1 \text{ eV} = 1.6021 \cdot 10^{-19}$ Joule. Pertanto l'energia prodotta dalla reazione considerata, $2.754 \cdot 10^{-12}$ Joule, è pari a 17.6 milioni di elettronvolt (MeV), di cui 14.1 MeV (80%) associati al neutrone e i rimanenti 3.5 MeV (20%) alla particella Alfa. Questo artificioso cambio di unità di misura ci consente di usare numeri ugualmente corretti, ma "più maneggevoli", per esprimere le medesime quantità di energia prodotta. Abbiamo considerato la reazione tra Deuterio e Trizio, perché, allo stato attuale della tecnologia, essa è la reazione di fusione che si ottiene con maggiore facilità. È tuttavia opportuno tenere presente che ci sono numerose altre reazioni di fusione di grande interesse energetico.

Richiamiamo la precedente e citiamone alcune altre:



dove H^1_1 è un nucleo di idrogeno (=un protone) ed e^+ è un positrone, cioè una particella la cui massa è uguale a quella dell'elettrone ma la sua carica è positiva.

Le reazioni Deuterio-Deuterio sono due, e hanno eguale probabilità di verificarsi. La terza dall'alto ha il vantaggio, rispetto alla reazione Deuterio-Trizio, di produrre neutroni con energie più basse, e quindi più facili da assorbire e schermare in un ipotetico reattore (vedi capitolo 13): tuttavia ha una probabilità molto più bassa di verificarsi, e quindi richiede densità e temperature ancora più alte della reazione Deuterio-Trizio. Si noti infine che le energie prodotte da ciascuna reazione di fusione sono dell'ordine di milioni di elettronvolt, cioè milioni di volte maggiori di una reazione chimica.

Il Difetto di Massa è il fenomeno che consente di ricavare energia dalla Fusione anche dalla fissione nucleare. E' noto che l'energia di legame nucleare di ciascun atomo, divisa per il numero dei suoi nucleoni, cioè dei neutroni e protoni presenti nel nucleo dell'atomo considerato, è una quantità che varia con il numero atomico in maniera continua (vedi fig. 3.2): è decrescente per numeri atomici inferiori a 50, e mostra un minimo per elementi con $Z = 50$ (Stagno = Sn^{118}_{50}).

Essa aumenta invece per elementi di numero atomico superiore a 50. Si definisce "Difetto di massa" la differenza tra la massa dei nuclei reagenti e la massa dei prodotti della reazione. Diviso per il numero dei nucleoni, si ottiene al "densità di Difetto di massa". La "densità di Difetto di massa" è positiva per reazioni che diminuiscono il numero atomico, purchè esso sia superiore a 50 (fissione nucleare); è ancora positiva per reazioni che aumentano il numero atomico, perchè esso sia inferiore a 50 (fusione nucleare).

Proponiamoci ora un nuovo *esperimento ideale*. Supponiamo di essere in grado di spezzare un atomo di Uranio U^{235}_{92} utilizzando come proiettile un neutrone, particella neutra non interagente con le cariche dei protoni e degli elettroni [5]. Il processo di rottura dell'atomo è detto Fissione Nucleare, dal latino "fissio - onis = rottura". Gli atomi risultanti avranno numeri atomici più bassi: potrebbero essere Ba^{140}_{56} e Kr^{93}_{36} con il resto di tre neutroni:

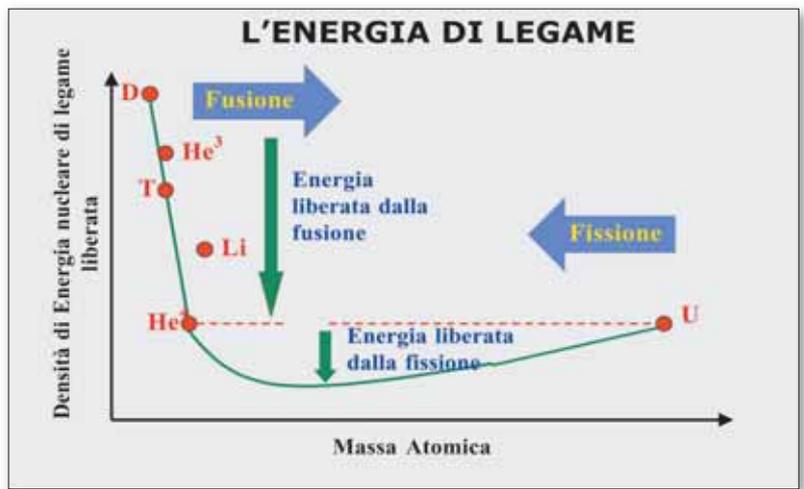


Fig. 3.2 Diagramma della densità di energia di legame nucleare espresso in funzione della massa atomica degli elementi.



La somma delle masse dell'Uranio e del neutrone iniziale è $3.9196 \cdot 10^{-22}$ g; la massa del Bario è $2.3225 \cdot 10^{-22}$ g; la massa del Kripton è $1.5427 \cdot 10^{-22}$ g; la massa dei tre neutroni è $5.0232 \cdot 10^{-24}$ g; la massa totale dei prodotti della Fissione atomica è $3.9154 \cdot 10^{-22}$ g, che è minore della massa dell'Uranio e del neutrone di $4.168 \cdot 10^{-25}$ g. Questo "Difetto di Massa" corrisponde, secondo il principio di Einstein, a $2.76 \cdot 10^{-11}$ Joule, cioè a 172 MeV, energia che rimane associata, come energia cinetica, alle particelle prodotte della Fissione. Ma questo esperimento teorico è realizzabile? La risposta è senz'altro sì: il processo di fissione proposto è uno dei numerosi tipi di fissione che si verificano allorché si bombardano gli atomi di U^{235}_{92} con dei neutroni (fig. 3.3) sia nelle bombe atomiche, sia nelle centrali nucleari per la produzione di elettricità.

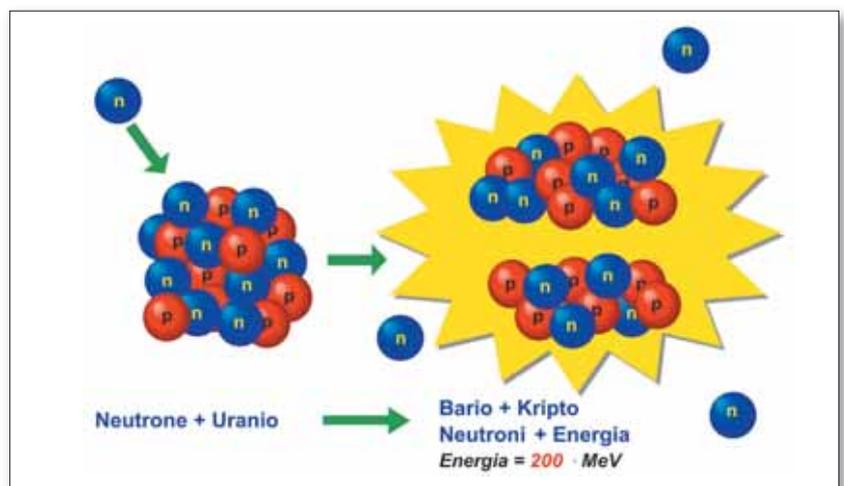


Fig. 3.3 Modello della reazione di Fissione atomica prodotta da un neutrone su un nucleo di U^{235}_{92}

4 - Un semplice modello per la comprensione del fenomeno della fusione nucleare

Il modello atomico di Rutherford descrive l'atomo come costituito da un mantello di elettroni di carica negativa, i quali ruotano attorno ai nucleoni: i protoni, con carica elettrica positiva, ed i neutroni.

Per trasformare un atomo in un atomo diverso (il sogno degli alchimisti che volevano trasformare il Piombo = Pb^{207}_{92} in Oro = Au^{197}_{79}) è necessario variare il numero dei suoi nucleoni. Per realizzare la Fusione di atomi di Deuterio e di Trizio in atomi di Elio è necessario legare assieme i rispettivi nuclei. Poiché i nuclei hanno entrambi carica positiva si deve compiere un "Lavoro" per superare la loro naturale repulsione elettrostatica (Legge di Coulomb) (fig. 4.1). Questa repulsione è tanto più energica quanto maggiore è la vicinanza di cariche dello stesso segno:

$$F=k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{d^2}$$

Dalla relazione sembra che al tendere a zero della distanza d fra i nuclei la forza diventi infinita e altrettanto l'energia necessaria per vincerla. È invece provato sperimentalmente che, per distanze d minori di $5 \cdot 10^{-15}$ m, la forza di repulsione elettrostatica è vinta dalle forze nucleari di attrazione. Queste forze nucleari sono quelle che permettono ai protoni di rimanere uniti nel nucleo, nonostante abbiano la stessa carica elettrica; tali forze permettono quindi ai nuclei di fondersi. Alla distanza $d=R_0$, assunta come limite, si dice che è presente la "Barriera di Coulomb" (fig. 4.2). È importante conoscere l'energia che devono possedere i nuclei di Deuterio e Trizio per superare tale barriera:

l'energia è di 280 keV, una energia enorme!

In quale modo si può fornire a ciascuna coppia di nuclei da fondere tanta energia?

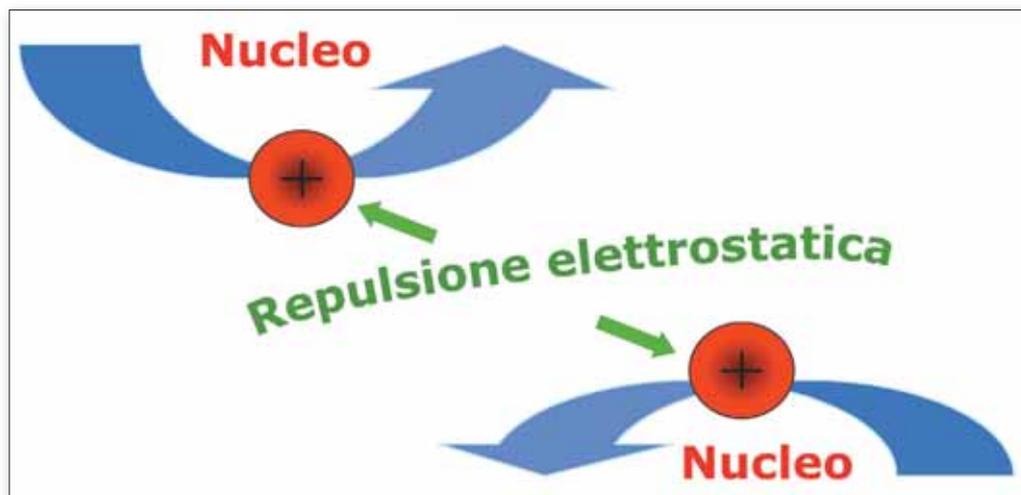


Fig. 4.1 Schema rappresentativo della Forza Repulsiva di Coulomb fra cariche di uguale segno

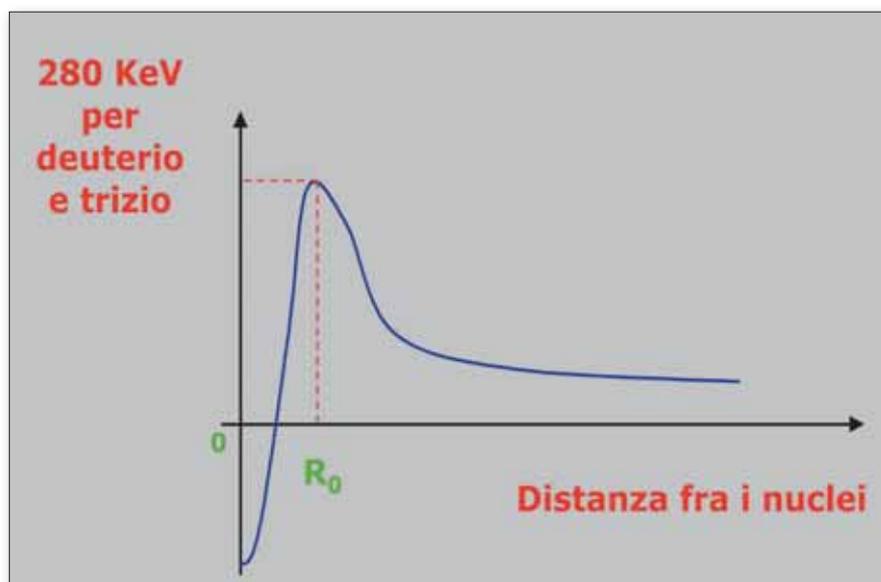


Fig. 4.2 Distribuzione dell'energia di repulsione (positiva) e attrazione (negativa) fra nuclei atomici; barriera di Coulomb

5 - I quattro stati della materia

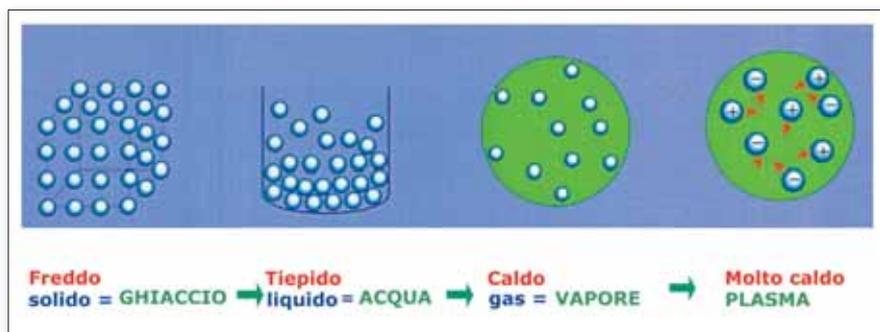


Fig. 5.1 I quattro stati della materia: esempio dell'acqua

La Materia di cui siamo fatti e nella quale viviamo si presenta solitamente in tre stati: solido, liquido, aeriforme: una medesima sostanza può assumere il primo o il secondo o il terzo stato a seconda dell'energia da essa posseduta, ovvero della temperatura a cui la sostanza si trova (fig. 5.1).

Consideriamo l'acqua e supponiamo di trovarci in condizioni di normale pressione atmosferica. A temperatura inferiore a 0°C essa è solida, ghiaccio; sopra gli 0°C e fino a 100°C , essa è liquida; sopra i 100°C essa è gassosa.

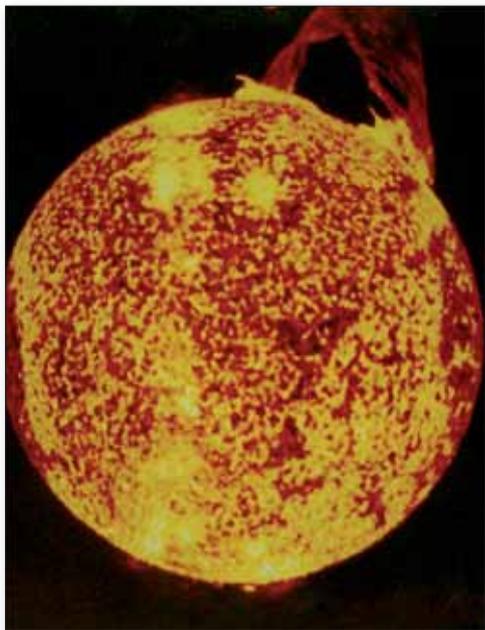


Fig. 5.2 Fotografia del Sole, nel quale la materia è permanentemente nel quarto stato

Allorché l'energia presente nella materia raggiunge valori ancora più elevati, come per esempio nelle fiamme, nelle torce di saldatura, nei jet degli aerei, nelle stelle (fig. 5.2), la materia assume un nuovo stato, il quarto, detto "plasma". La presenza di questo quarto stato richiama così alla mente i quattro

elementi del filosofo greco Empedocle: terra, acqua, aria, fuoco.

Nel passaggio da uno stato all'altro, anche la densità tende a variare: per esempio, la densità del ghiaccio è 0.917 g/cm^3 e corrisponde a $3.07 \cdot 10^{28}$ molecole/ m^3 ; la densità del liquido è di 1 g/cm^3 e corrisponde a $3.34 \cdot 10^{28}$ molecole / m^3 ; la densità del vapore a 100°C è di 0.6 mg/cm^3 e corrisponde

a $2 \cdot 10^{25}$ molecole/ m^3 . Nel plasma, la densità può essere anche più bassa che nel vapore d'acqua. Storicamente, una delle prime prove della natura elettrica di scariche nei gas fu il leggendario esperimento di Benjamin Franklin, che nel giugno 1752 a Philadelphia dimostrò la natura elettrica del fulmine (vedi fig. 5.3). Egli usò come dispositivo un aquilone, pensando giustamente che esso si sarebbe avvicinato sufficientemente alle nuvole durante un temporale; per attirare le cariche elettriche usò una chiave metallica, posta all'altra estremità di un filo metallico collegato all'aquilone. Per proteggersi le mani, usò un nastro di seta isolante collegato alla chiave, con cui poteva anche tendere il filo dell'aquilone. Alle prime scintille, segno che la chiave accumulava carica elettrica, Franklin seppe che il fulmine aveva un'origine elettrostatica.

Il nome "plasma" fu coniato più tardi, intorno al 1920 dallo scienziato americano Irving Langmuir, premio Nobel per la chimica nel 1932, mentre studiava le proprietà di scariche in vapori di mercurio. Alcuni



Fig. 5.3 Il fulmine è un esempio di scarica elettrica in un mezzo gassoso, che produce un plasma a una temperatura di circa $10,000\text{ K}$. Fotografia del Dr. Fernando D'Angelo

suoi colleghi che lavorarono con lui ai laboratori della General Electric suggeriscono che questo nome nascesse in riferimento al plasma del sangue; un'altra versione della storia dice invece che il termine provenisse dal verbo greco corrispondente all'italiano "plasmare", in quanto il plasma sembrava assumere la forma del recipiente che lo conteneva [6].

La scoperta dei primi plasmi in laboratorio è la conseguenza dell'applicazione delle prime pompe da vuoto, tra la fine del 1800 e gli inizi del 1900. Gli antenati degli attuali esperimenti sui plasmi erano i **tubi di Crookes**: si trattava di tubi di vetro o quarzo, chiusi alle estremità con due **elettrodi**, nei quali veniva creato il vuoto, di circa 10^{-5} bar.

Si immetteva poi nel tubo una piccola quantità di gas (qualche milligrammo). Applicando una tensione sufficientemente elevata ai due elettrodi, il gas subiva una improvvisa transizione, diventando luminoso (vedi fig. 5.4). Questo fenomeno, chiamato "**scarica**", è simile alla scarica elettrica che avviene naturalmente nei fulmini, e rappresenta il passaggio, riprodotto in laboratorio, fra lo stato gassoso e lo stato di plasma. Scariche in Neon sono ancor oggi utilizzate per le lampade delle insegne luminose o per l'illuminazione interna di ambienti.

Qual'è la differenza principale fra un gas e un plasma? Nel plasma le molecole sono dissociate in atomi e gli atomi sono in massima parte ionizzati, ovvero i nuclei sono separati dagli elettroni.

Il plasma è quindi una miscela di ioni, di elettroni e di atomi neutri, che a differenza dei gas (composti quasi solamente di particelle neutre) è estremamente sensibile all'applicazione di campi elettrici e magnetici. La nostra esperienza delle condizioni nelle quali noi viviamo sulla Terra ci induce a ritenere il plasma uno stato eccezionale della materia. È comunque da sottolineare che nell'aria, per effetto dei raggi cosmici e della radiazione solare, è sempre presente una piccola frazione ionizzata.

I cosmologi [7] invece affermano che nell'Universo oltre il 99% della materia esiste allo stato di plasma. Pensiamo al nostro Sistema solare dove ben nove pianeti, i rispettivi satelliti e numerosi asteroidi sono



Fig. 5.4: Un esperimento lineare su plasmi freddi ("Mellatron") simile ai primi esperimenti sui plasmi: la colonna luminosa è un plasma di Argon

tenuti assieme per gravitazione dalla enorme massa di plasma del sole.

Quanti tipi di plasma si conoscono? Vi sono innumerevoli tipi di plasma con densità e temperatura estremamente varie (fig. 5.5): si va dal sole, alla ionosfera, alle lampade al neon, alle scariche (archi) per le saldature industriali. Le manifestazioni naturali dei plasmi sono i fulmini e le aurore boreali.

Torniamo alla fusione nucleare. E' chiaro che, se vogliamo fornire ai singoli atomi di Deuterio e di Trizio abbastanza energia da superare la Barriera di Coulomb e raggiungere la fusione, dobbiamo riscaldarli molto e quindi creare un plasma di Deuterio e Trizio.

Quali caratteristiche dovrà avere tale plasma?

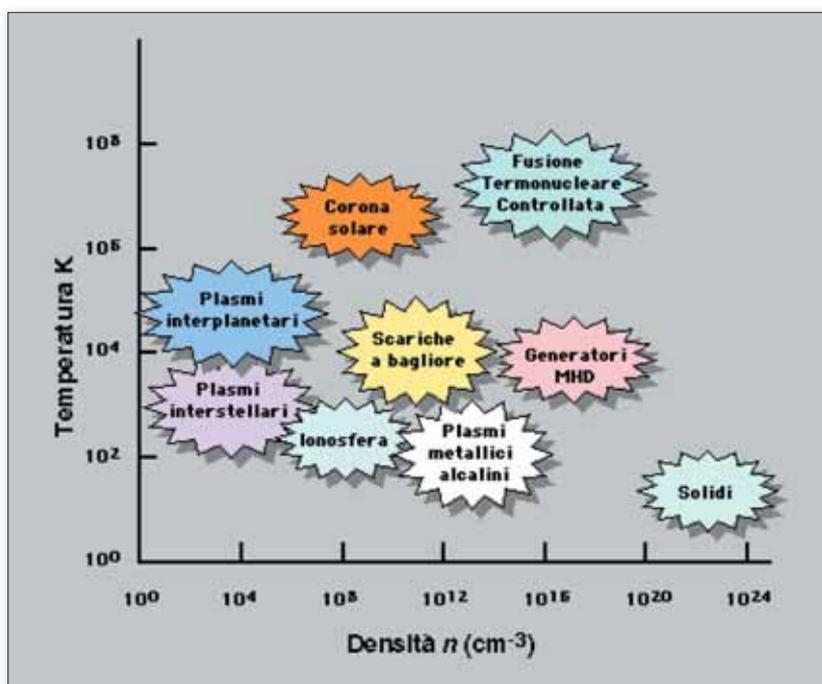


Fig. 5.5 Densità e temperature tipiche di vari plasmi

6 - Il Criterio di Lawson

Il criterio di Lawson nasce da una domanda fondamentale per il progetto di un reattore, e per le fonti di energia in generale: *il mio sistema produce più energia di quella che devo immettere per mantenere attiva la reazione?*

Nel 1957 l'ingegnere John D. Lawson, dei laboratori di Harwell (UK) calcolò le condizioni da raggiungere [4] affinché un plasma di Deuterio e Trizio portasse alla produzione netta di energia da Fusione (fig. 6.1):

$$nT_E \geq 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}$$

Temperatura ionica $\approx 230.000.000^\circ\text{C}$

con:

n , densità di nuclei di Deuterio e Trizio;

τ_E , "tempo di Confinamento dell' Energia".

Queste condizioni devono essere verificate contemporaneamente. La densità è il numero di nuclei presenti in un m^3 .

Il tempo di confinamento dell'energia τ_E misura l'intervallo di tempo durante il quale il plasma trattiene l'energia immagazzinata prima di disperderla attraverso uno dei numerosi meccanismi di perdita possibili: conduzione, convezione, emissione di radiazione, ecc. [8]

Per meglio chiarire, Lawson nella prima relazione trova quanto segue: affinché le coppie di nuclei dei gas suddetti si fondano in un numero sufficiente perché l'energia prodotta dalla Fusione sia maggiore di quella fornita per attivare il processo medesimo, deve essere presente un numero abbastanza consistente di nuclei per m^3 e i nuclei stessi devono conservare l'energia loro fornita per un tempo τ_E tale che il prodotto $n \tau_E$ sia maggiore o uguale al valore indicato: se diminuisce n deve crescere τ_E e viceversa.

Nella seconda relazione, Lawson aggiunge che ciascuna coppia di detti nuclei deve mediamente possedere una temperatura di almeno 230 milioni di $^\circ\text{C}$, che, espressa in elettronvolt, corrisponde a 20 keV. Si noti che quest'ultima energia, benché tanto elevata, è comunque 14 volte inferiore all' energia della "Barriera di Coulomb", di 280 keV. Infatti, poiché la

temperatura è correlata con l'energia cinetica *media* delle particelle, esiste comunque una frazione adeguata di nuclei di Deuterio e Trizio che hanno un'energia superiore alla Barriera di Coulomb, e che possono quindi fondere.

È opportuno far osservare che per le enormi temperature presenti nei plasmi è stato utile introdurre una unità di misura della temperatura più maneggevole dei Kelvin o dei gradi centigradi, l'**elettronvolt (eV)**, unità di misura già presentata a proposito dell'energia. La temperatura è infatti associabile all'energia termica mediamente posseduta dalle singole particelle di un corpo.

La relazione:

$$1 \text{ eV} = 11605 \text{ K}$$

consente tale semplificazione.

Può sembrare però impossibile che in un plasma si possano raggiungere le temperature estreme di centinaia di milioni di gradi. Si tenga conto a questo proposito che il plasma è generalmente molto rarefatto, e che la densità di un plasma confinato magneticamente e che soddisfa il criterio di Lawson è comunque 10.000 volte inferiore a quella dell'aria: in questo modo, anche se la temperatura è molto elevata, la quantità di calore posseduta dal plasma è piccola. Questo risultato si può verificare usando la formula per la quantità di calore posseduta da un gas perfetto:

$$E = 3 / 2 \cdot n \cdot T \cdot V$$

dove V è il volume e T è espressa in eV, usando l'equivalenza (vedi capitolo 3) $1 \text{ eV} = 1.6021 \cdot 10^{-19}$ Joule.

Facciamo degli esempi: il plasma di ITER, il protoreattore che è in costruzione a Cadarache, in Francia (capitolo 12) con un volume di 840 m^3 avrà una energia totale di 400 Mega-Joule (MJ, cioè circa 90.000 kcal), quanto l'energia di 8 litri di gasolio. Il plasma di JET (capitolo 11) ha l'energia di 16 MJ; il plasma di RFX, l'esperimento padovano che descriveremo nel capitolo 14, ha l'energia di 33 kJ (8 kcal), quanto una

caramella dietetica!

In termini di energia totale, il criterio di Lawson non è quindi impossibile da realizzare, anche se alte temperature richiedono comunque dei materiali adeguati e un metodo di confinamento, come vedremo nel capitolo successivo.

Il principio di Lawson può essere espresso anche con un grafico, nel quale in ascissa compare la temperatura (in keV) e in ordinata il prodotto $n\tau_E$: il minimo di questa curva (verde in fig. 6.1) corrisponde a 20 keV, che è il numero che compare nella seconda relazione di Lawson. Immaginando di trovarsi nelle condizioni del minimo di questa curva, la relazione di Lawson può essere espressa in modo sintetico in termini del cosiddetto **prodotto triplo**, cioè del prodotto densità per temperatura per tempo di confinamento, nel modo seguente:

$$n T \tau_E \geq 1.2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}$$

Nelle ricerche attuali sulla fusione controllata il criterio di Lawson ha più che altro un interesse storico, mentre si tende a esprimere i parametri caratteristici di un plasma in funzione del *fattore di guadagno della fusione*, definito come:

$$Q = \frac{\text{potenza prodotta da fusione}}{\text{potenza immessa dall'esterno}}$$

Per esempio, la condizione di *pareggio*, o di *breakeven*, che è quella in cui la potenza immessa nel plasma è uguale alla potenza prodotta da reazioni di fusione, corrisponde a $Q=1$ (curva azzurra in figura 6.1). La situazione in cui il plasma si autosostiene, senza la necessità di immettere potenza dall'esterno, è detta di *ignizione*, e corrisponde a Q uguale a infinito (curva rossa in figura 6.1).

In termini di Q , la condizione di Lawson è intermedia, e corrisponde a un valore $Q=3$. Ovviamente un plasma, per produrre energia netta, deve andare oltre la condizione di pareggio $Q=1$, in cui la potenza immessa viene completamente trasformata in potenza da fusione: questo perché, come detto sopra, parte dell'energia viene persa in modo irreversibile.

Per mantenere il controllo totale della reazione, è peraltro opportuno non portare Q a infinito, ma mantenerlo a un valore tra 10 e 100. Il plasma opererebbe così come un amplificatore di potenza con "guadagno" pari a Q .

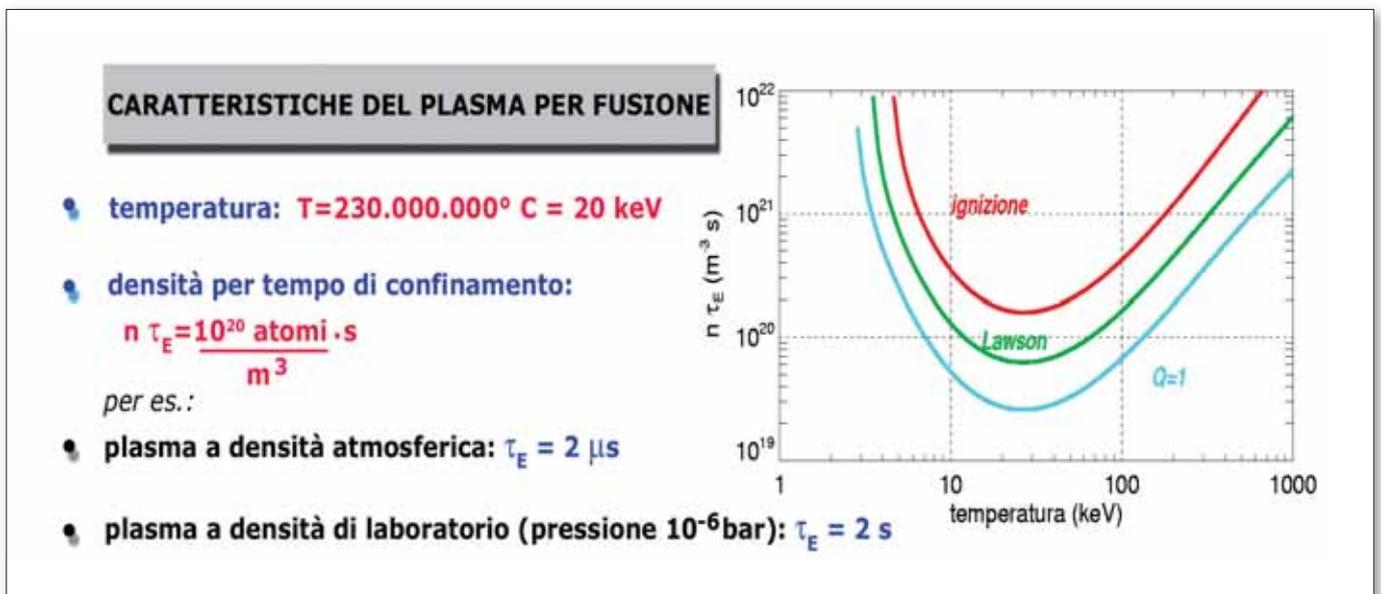


Fig. 6.1 Criterio di Lawson: condizioni affinché una plasma di Deuterio e Trizio fornisca energia netta. In termini del "fattore di guadagno" della fusione, il criterio di Lawson equivale a $Q \geq 3$

7 - Modalità di Confinamento dei Plasmi

La materia nello stato di plasma da Fusione si trova, in natura, nel Sole e nelle Stelle, come intuito da Eddington già nel 1920.

Nei plasmi dei nostri laboratori l'enorme quantità di energia necessaria ad ogni singolo nucleo della materia per raggiungere le condizioni di Fusione ha imposto due condizioni di lavoro:

- a - fornire l'energia disponibile soltanto a piccole quantità di materia;
- b - realizzare un sufficiente isolamento termico tra la materia energizzata e il suo contenitore sia per non disperdere sul contenitore medesimo l'energia fornita, sia per non danneggiare il contenitore con così elevate densità di energia.

Per non disperdere energia è necessario che il plasma non vada a contatto con il recipiente, che il plasma cioè venga "**confinato**".

Nelle Stelle il plasma da Fusione non ha contenitori; esso rimane raccolto per la legge di gravità o di attrazione reciproca della materia:

$$F = G \frac{M_1 \cdot M_2}{d^2}$$

dove: $G = 6.672 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$ = costante gravitazionale di Cavendish;

M_1, M_2 = masse gravitazionali in kg;

d = distanza fra i corpi in metri.

Ciascuna particella, di massa M_1 , che cercasse di "sfuggire", verrebbe riattratta nella stella dalla forza dovuta all'enorme massa M_2 di tutte le altre particelle della stella.

Nei plasmi di laboratorio il confinamento gravitazionale è trascurabile.

Altri tipi di confinamento devono perciò essere realizzati. Si stanno studiando, in alternativa, (fig. 7.1):

a - il *Confinamento Inerziale*;

b - il *Confinamento Magnetico*.

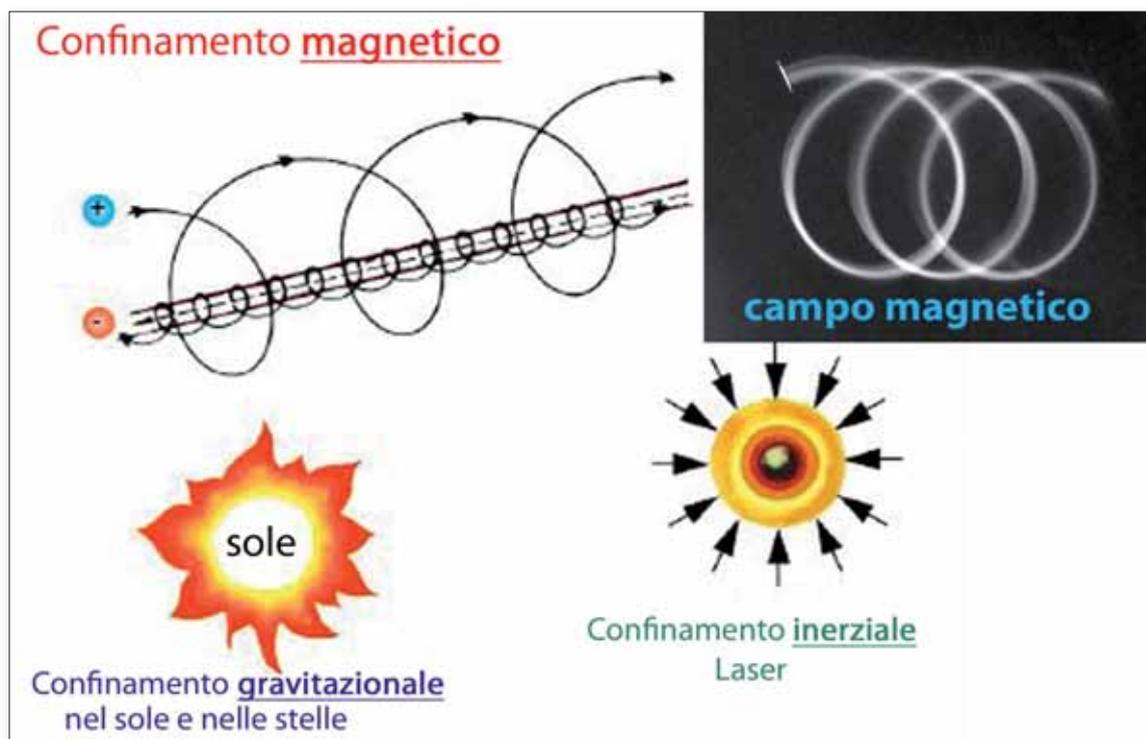


Fig. 7.1 I possibili modi di realizzare il confinamento di un plasma da fusione

7a - Il Confinamento Inerziale

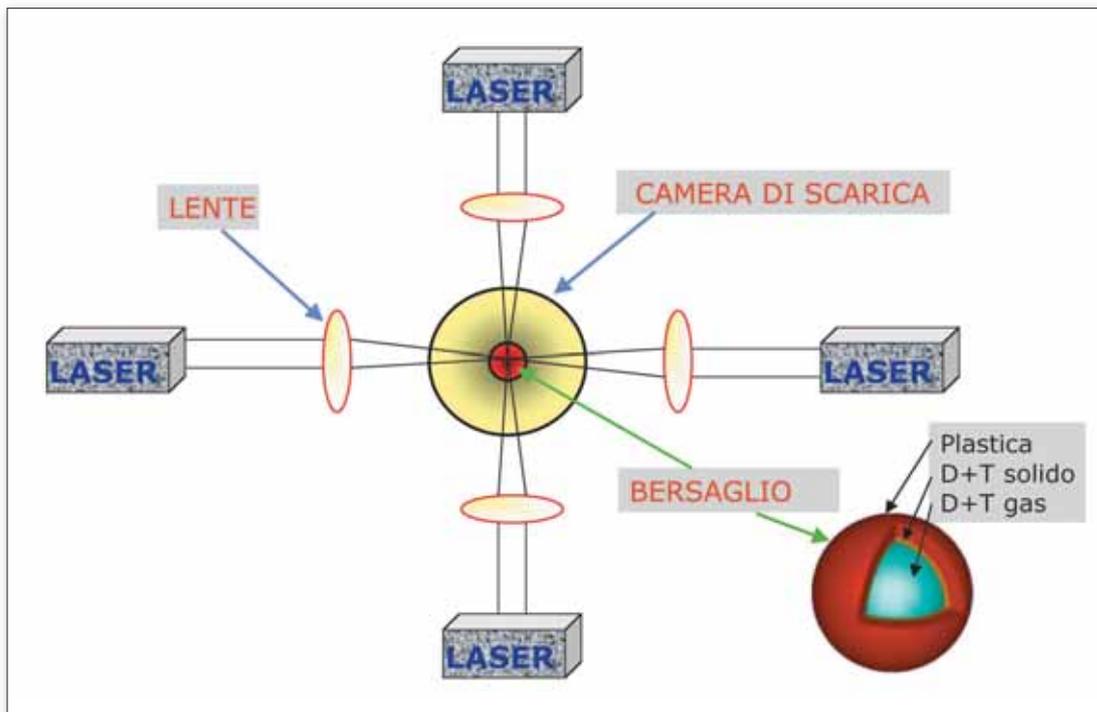


Fig. 7.2 Fusione inerziale: schema di principio, con sezione della capsula-bersaglio contenente Deuterio e Trizio

I plasmi a Confinamento Inerziale sono ottenuti impiegando o fasci di particelle o particolari fasci di luce, i Laser.

Ai fini della Fusione il modo di impiego dei due tipi di fascio è il medesimo.

Noi ci riferiremo ai più noti Laser. Quelli impiegati per la Fusione Inerziale sono di enorme potenza, già sviluppati per scopi militari quali le "guerre stellari" e coperti anche da segreto militare.

Per produrre plasmi a Confinamento Inerziale si usano piccole sferette, con diametro di circa 2 mm. Esse sono capsule tipicamente costituite da un contenitore di materiale plastico (p.es. CH + Br + O₂), (fig. 7.2) contenente una sferetta cava di miscela di D-T solida, dentro la quale stanno meno di 0.1 mg di miscela di D-T gassosa. La sferetta è guidata dentro la camera di scarica in alto vuoto. Più fasci di un medesimo Laser di grande potenza, con contemporaneità assoluta, colpiscono la sferetta da più direzioni producendo un'evaporazione delle calotte del contenitore di plastica, detto "Ablator": ne consegue una spinta come se si trattasse di un razzo sferico (fig. 7.3).

Il D-T, spinto verso il centro geometrico della sferetta, raggiunge, nel centro della sfera, densità elevatissime.

Il tempo τ che il materiale impiega per attraversare il millimetro di raggio è il tempo di confinamento ed è molto breve, ma sufficiente perché il prodotto $n\tau_e$ sia compatibile con il valore previsto da Lawson. La compressione sviluppa anche una temperatura che si accorda con la seconda condizione di Lawson.

Per avere un'idea delle prestazioni dei Laser utilizzati, diamo le caratteristiche principali di tre impianti sperimentali:

1 - al Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL, U.S.A.) il Laser NOVA ha energia di 50 kJ, che scarica in 1 ns, alla lunghezza d'onda di 0.35 μm ; esso sviluppa una potenza di $50 \cdot 10^{12}$ W ed è suddiviso in 10 fasci;

2 - in Giappone il Laser GEKKO XII della Università di Osaka ha una energia di 15 kJ, che scarica in 1 ns, alla lunghezza d'onda di 0.35 μm con potenza di $15 \cdot 10^{12}$ W ed è suddiviso in 12 fasci

3 - in Francia, a Bordeaux, il Laser Megajoule è progettato per sviluppare 2 MJ di energia in 9 ns, con 240 fasci alla lunghezza d'onda di 0.35 μm .

Si stima che nei reattori a confinamento inerziale si dovranno usare laser con potenza di alcune centinaia di Tera-watt (1 TW = 10^{12} W).

I plasmi così ottenuti possono raggiungere le condizioni di Fusione, se la compressione avviene corret-

tamente. Ma se, per esempio, una parte della calotta della sferetta viene sfondata da uno dei fasci del Laser, l'intero effetto di compressione cessa e la reazione si blocca.

Un reattore a fusione inerziale sarebbe in qualche modo simile a un motore a scoppio: si dovrebbero iniettare e bruciare sferette di D-T una dopo l'altra a elevata frequenza: una specie di "raffica" di mini-bombe H.

Le ricerche sulla fusione inerziale, pur molto interessanti e promettenti, sono fortemente intrecciate con le ricerche di interesse militare e perciò l'Unione Europea ha fin dall'inizio privilegiato l'altra linea di ricerca, che si basa sul confinamento magnetico a cui sono dedicati i prossimi capitoli.

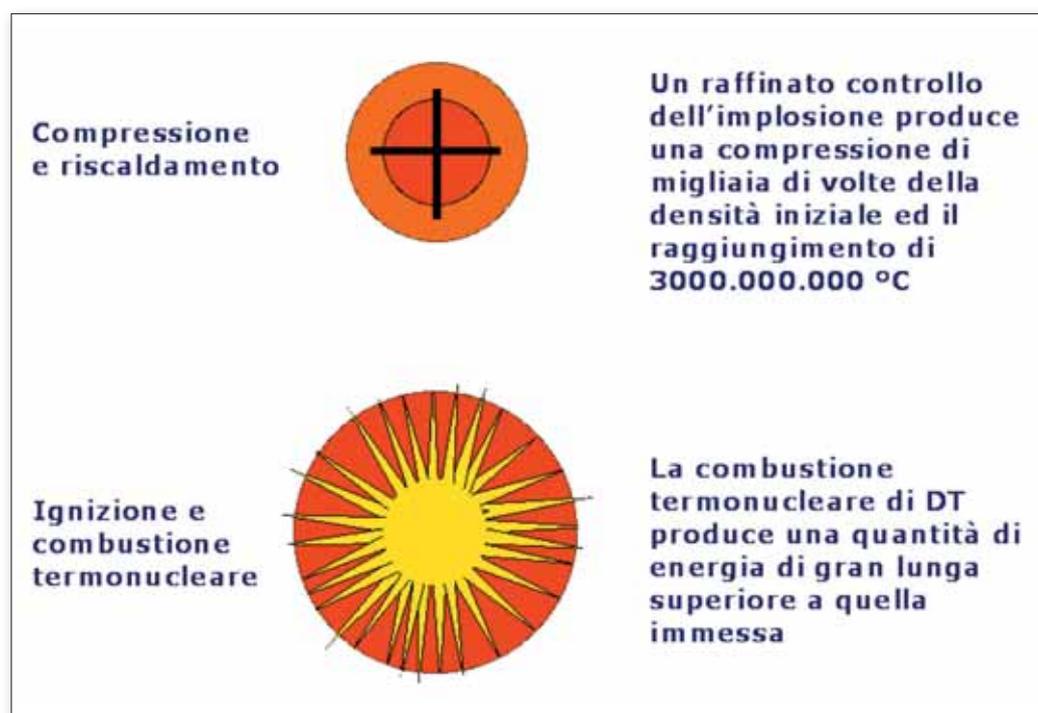


Fig. 7.3 Le due fasi del processo di fusione inerziale

7b - Il Confinamento Magnetico

I plasmi, che sembrano essere più promettenti ai fini della realizzazione di un Reattore Nucleare di interesse industriale, utilizzano il cosiddetto Confinamento Magnetico.

Abbiamo già visto (cap.5) che, quando ad un gas si fornisce un'energia sufficiente, le molecole si trasformano in atomi (dissociazione) e gli atomi in ioni (ionizzazione) e si ottiene un plasma.

La Legge di Lorentz:

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

q = carica dello ione o dell'elettrone

v = velocità dello ione o dell'elettrone

B = campo magnetico

α = angolo tra le direzioni di v e B

mostra che una particella carica, cioè nel nostro caso uno ione o un elettrone, in presenza di campo magnetico è sottoposta ad una forza proporzionale alla sua carica, alla sua velocità (che a sua volta è legata alla sua energia termica) e all'intensità di campo magnetico. La forza di Lorentz ha direzione sempre perpendicolare sia alla direzione della velocità della particella che alla direzione del campo magnetico B ; essa non modifica la velocità iniziale, ma impone alla particella carica un movimento elicoidale attorno alla linea di forza del campo magnetico. L'equilibrio fra forza di Lorentz e forza centrifuga, agenti sulla singola particella, determina una traiettoria elicoidale di raggio r tale che:

$$q \cdot B \cdot v \cdot \sin \alpha = \frac{m v^2}{r}$$

con:

v = velocità della particella

m = massa della particella

r = raggio di rotazione della particella

Le particelle perciò si muovono lungo traiettorie elicoidali attorno alle linee di forza del campo magnetico. I raggi di rotazione sono diversi, perché le masse sono diverse (vedi fig. 7.4), ma l'unica direzione in cui il moto della particella è libero (e dipende quindi solo dalla velocità iniziale) è quella parallela al campo magnetico. La particella è quindi costretta a seguire la linea di campo, come un treno segue i binari di una ferrovia. Questo avviene indifferentemente, per ioni ed elettroni.

Nell'ambiente in cui si desidera produrre un plasma viene generato, per mezzo di un **solenoid**, un opportuno campo magnetico B , con linee di forza parallele all'asse del contenitore. Detto campo cattura gli ioni e gli elettroni presenti e li tiene vincolati alle sue linee di forza (fig. 7.4), lungo le quali essi corrono con moto elicoidale.

Se la camera di contenimento del plasma è cilindrica, le particelle non vengono disperse radialmente gra-

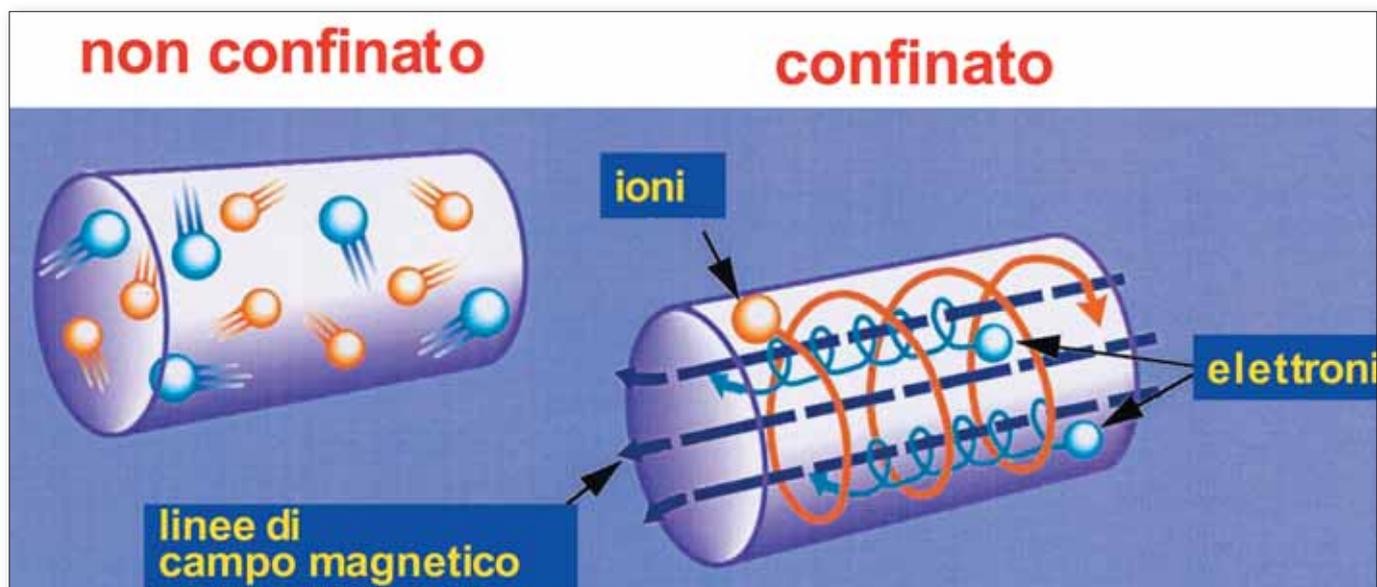


Fig. 7.4 Effetti della assenza e della presenza di un Campo Magnetico in un gas ionizzato

zie alla forza di Lorentz, ma vanno comunque a bombardare le due estremità del contenitore; perdono così la loro energia e il plasma si raffredda.

A tale problema si è cercato di ovviare creando un effetto di "specchio magnetico" tramite intensificazione del campo alle estremità del contenitore (fig. 7.5), ma senza risultati apprezzabili. Per questo caso si usa spesso parlare di "bottiglia magnetica".

Un successo decisamente maggiore ha avuto l'idea di chiudere il contenitore su se stesso, costruendo quindi contenitori **toroidali**, e di creare il campo ma-

gnético mediante **solenoidi** anch'essi toroidali; dentro tali strutture anulari, le particelle dovrebbero potersi muovere senza incontrare mai le pareti (fig. 7.6). Purtroppo la curvatura delle linee di campo determina una **deriva delle particelle** nella direzione dell'asse del toro; inoltre, gli urti fra particelle determinano un movimento di diffusione radiale che le spinge comunque contro le pareti in numero maggiore o minore a seconda della capacità di confinamento propria della macchina.

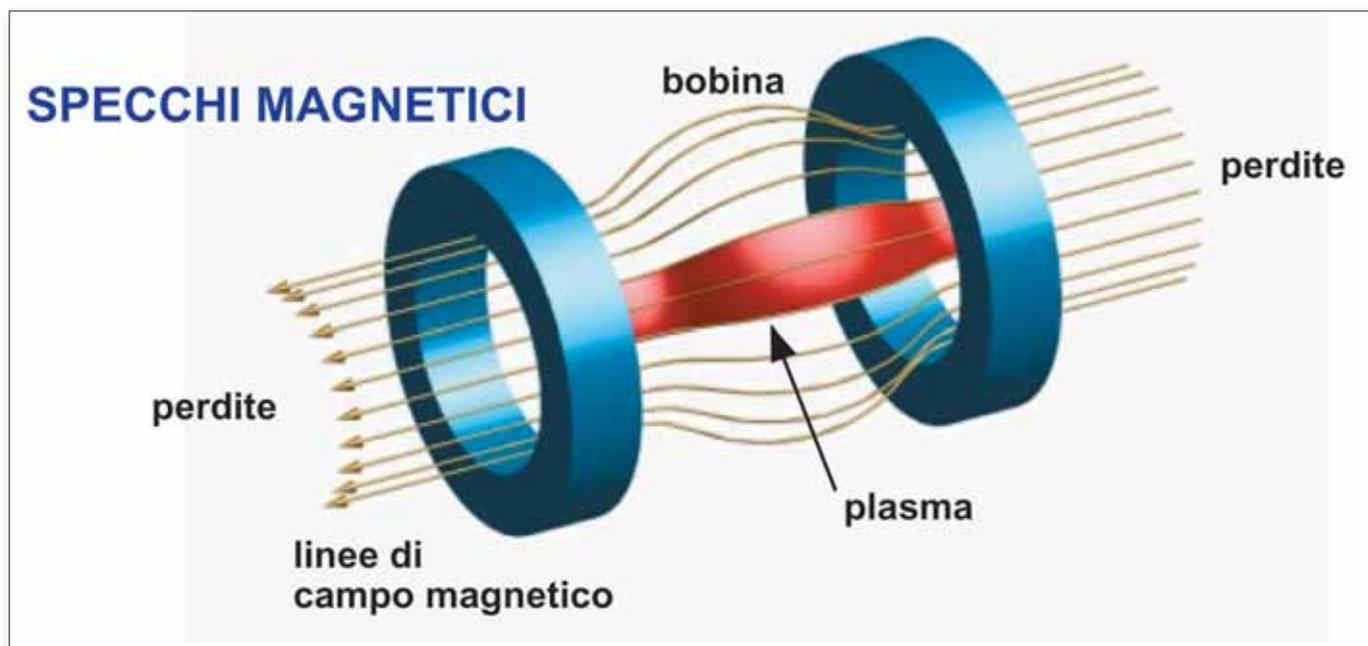


Fig. 7.5 Confinamento di un gas ionizzato con Specchio Magnetico

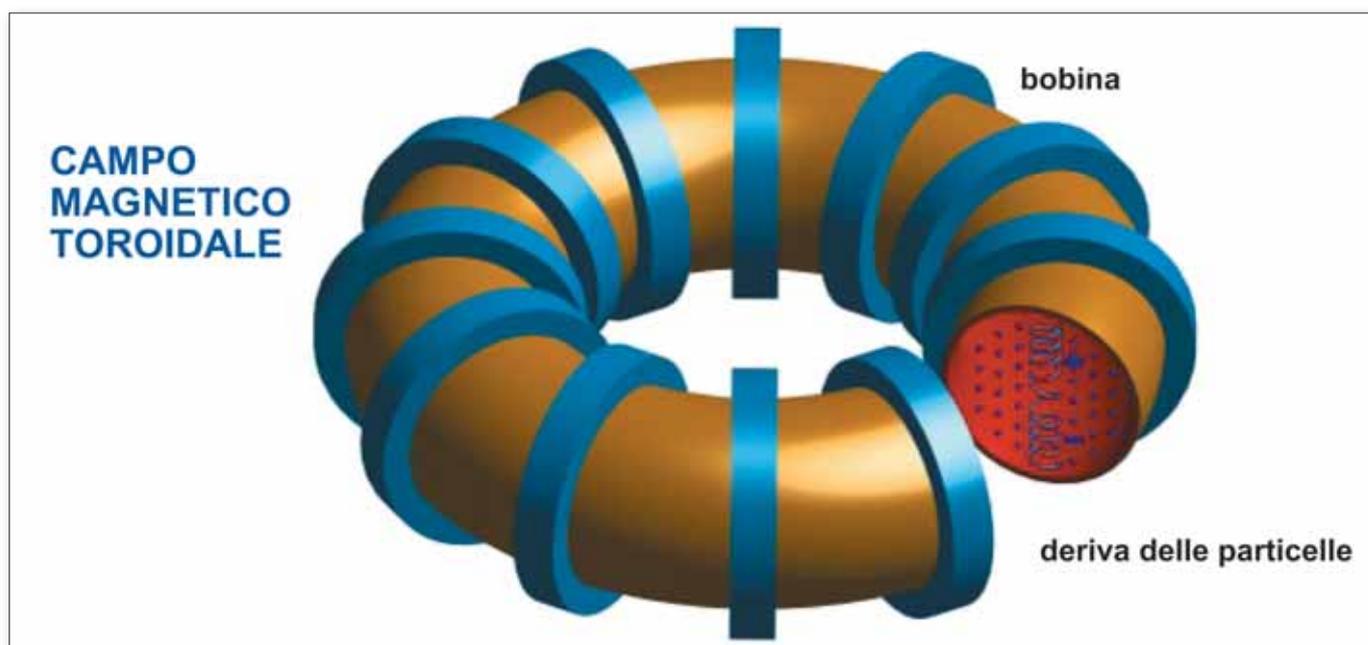


Fig. 7.6 Confinamento di un gas ionizzato in un contenitore toroidale

8 - Accensione della corrente di plasma e scarica

Le numerose macchine per la produzione di plasma utilizzano differenti tipi di configurazioni magnetiche. Citiamo alcune configurazioni in uso: Z-Pinch lineari; Theta-Pinch lineari; Specchi Magnetici; Stellarator; Tokamak; Reversed Field Pinch.

Porremo attenzione alle configurazioni chiamate **Tokamak** e **Reversed Field Pinch (RFP)**, la prima perché è quella che finora ha dato i migliori risultati dal punto di vista fusionistico, la seconda perché è quella studiata a Padova.

Entrambi i tipi di macchine sono essenzialmente costituite da un anello toroidale che circonda un "circuito magnetico" (fig. 8.1), detto nucleo. Attorno al nucleo sono avvolti le spire di un solenoide ed il toro. Il solenoide centrale e il toro sono rispettivamente il circuito primario ed il circuito secondario di un trasformatore: come esempio si pensi al trasformatore di un caricabatterie. Attorno al toro sono avvolte le spire di altri solenoidi per gli scopi che diremo.

Ricordiamo brevemente il funzionamento di un trasformatore.

Si manda corrente nel circuito primario; la corrente sviluppa nel circuito magnetico un flusso di induzione magnetica Φ .

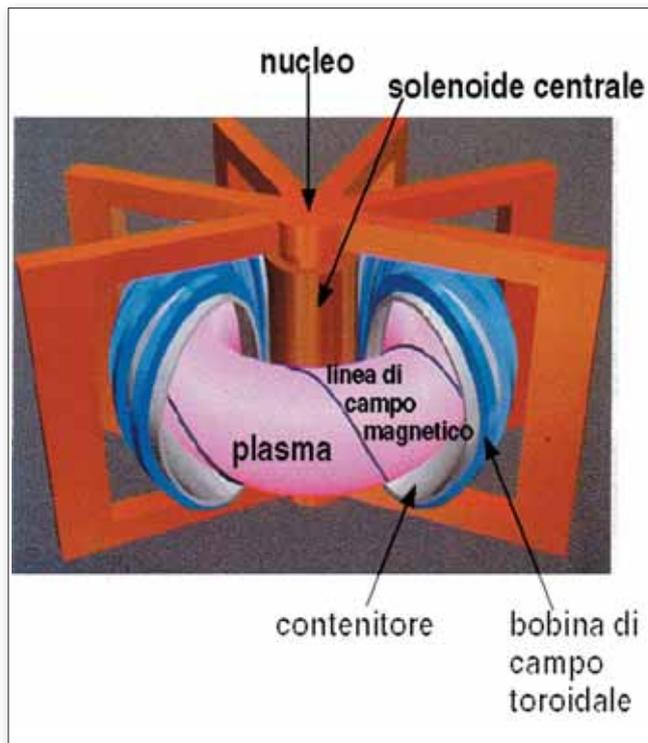


Fig. 8.1 Circuiti primario e secondario (= il toro) di trasformatore con nucleo in ferro

Una variazione di corrente nel circuito primario genera una variazione del flusso concatenato $\Delta\Phi$, e la creazione di una Forza Elettromotrice E lungo il circuito secondario (Legge di Faraday-Neumann):

$$E = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

dove Δt è l'intervallo di tempo in cui la variazione è avvenuta.

Se nel circuito secondario (cioè, nel toro) sono presenti cariche elettriche libere, esse vengono accelerate e nel secondario fluisce una corrente elettrica. L'accensione della corrente di plasma all'interno di un contenitore toroidale avviene in quattro tempi:

- si immette corrente nelle bobine di campo toroidale che avvolgono il toro, creando il campo magnetico toroidale B_T ;
- si immette la quantità di gas prevista nella camera di scarica; talvolta una sorgente ionizzante (per esempio il filamento di tungsteno di una lampadina senza bulbo di vetro) produce nel gas elettroni;
- si immette corrente nel circuito primario del trasformatore, creando il flusso Φ nel nucleo;
- la corrente nel primario è fatta rapidamente calare, cosicché il flusso Φ nel nucleo diminuisce. Nell'anello toroidale, secondario del trasformatore, per effetto della variazione di flusso, si crea una forza elettromotrice E . Grazie ai pochi elettroni preesistenti o prodotti nel gas dalla sorgente ionizzante, si accende una scarica con elettroni via via più numerosi per effetto degli urti fra elettroni e atomi neutri e la corrente diventa via via più intensa: ecco il Plasma.

Tutto o gran parte del gas presente nella camera viene ionizzato e la corrente elettrica, per **effetto Joule**, riscalda il plasma stesso.

In assenza di perdite la scarica potrebbe conservarsi all'interno dell'anello toroidale. Purtroppo insorgono varie cause di perdita di energia del plasma, che richiedono di continuare a fornire energia per il riscaldamento del plasma durante tutta la durata della scarica.

9 - Riscaldamento del plasma

La corrente generata nella scarica riscalda il plasma per la **legge di Ohm** (ed è quindi chiamato riscaldamento ohmico).

La potenza P trasferita al plasma è:

$$P = R I^2$$

con R = resistenza del plasma in quanto conduttore,

I = corrente nel plasma.

La resistenza del plasma diminuisce al crescere della temperatura del plasma. Per una scarica in plasma di Deuterio lunga l e di sezione S possiamo scrivere con buona approssimazione:

$$R = 3 \cdot 10^{-5} \times \frac{1}{T \sqrt{T}} \cdot \frac{l}{S}$$

essendo T espressa in eV ed R in Ω .

Perciò con l'aumento della temperatura la potenza ohmica riscaldante diminuisce. Un plasma alle temperature di una macchina per fusione è un ottimo conduttore di corrente, e ha una resistenza paragonabile a quella di un filo di rame a temperatura ambiente.

È stato però chiaro sin dall'inizio dello studio dei plasmi a confinamento magnetico che il riscaldamento ohmico, in particolare nei Tokamak, sarebbe stato insufficiente a fornire ai nuclei di D e T abbastanza energia per raggiungere la fusione.

È perciò necessario provvedere ad un ulteriore riscaldamento del plasma con sistemi detti "ausiliari" (cioè aggiuntivi) molto sofisticati e che assorbono molta energia.

I riscaldamenti ausiliari più impiegati sono di due tipi:

a- *riscaldamento a radioonde;*

b- *riscaldamento con fasci di neutri ad alta energia.*

Le potenze di riscaldamento nelle grandi macchine sono dell'ordine di alcuni milioni di watt (Mega Watt o MW).

9a - Il riscaldamento a radioonde

Abbiamo visto che nel plasma elettroni e ioni ruotano con moto elicoidale attorno alle linee di forza del campo magnetico.

Dal punto di vista macroscopico il plasma è elettricamente neutro, cioè in un m^3 sono sempre presenti un numero eguale di cariche positive e negative. Nel plasma gli elettroni si muovono con grande velocità, gli ioni con minore velocità, data la loro massa.

Accade così che nel plasma si creino e si distruggano, con una periodicità legata alla frequenza di rotazione degli elettroni, campi elettrici oscillanti, dovuti a separazioni locali e temporanee di particelle di segno opposto. Inoltre gli elettroni e gli ioni in moto creano correnti elettriche che generano attorno a sé anche campi magnetici oscillanti nel tempo. Una combinazione di un campo elettrico e magnetico oscillanti è un'onda elettromagnetica.

Pertanto, per riscaldare il plasma si collocano, nella periferia più prossima al plasma, speciali generatori di onde elettromagnetiche. Essi, attraverso antenne, inviano nel plasma onde elettromagnetiche che, se hanno frequenza opportuna, vengono assorbite dal plasma perché tendono o ad esaltare fenomeni oscillatori in esso già presenti o a provocare nuove possibili oscillazioni.

In altri termini, se nel plasma sono presenti o sono possibili fenomeni oscillatori di frequenza uguale o molto vicina alla frequenza dell'onda irradiata dal generatore, l'onda irradiata esalta il fenomeno - "risonanza" - e cede, nella regione di risonanza, la propria energia, che diventa energia cinetica delle particelle coinvolte.

L'esempio più vicino alla nostra esperienza quotidiana che assomiglia al riscaldamento a radioonde di un plasma è il forno a microonde: in esso un'antenna produce un'onda elettromagnetica che causa per risonanza l'eccitazione di oscillazioni nelle molecole d'acqua presenti nei cibi, scaldandoli.

Vediamo ora i singoli metodi di riscaldamento [8].

Nella fisica del plasma i metodi di riscaldamento a Radiofrequenza sono distinti in: riscaldamento con risonanza ciclotronica elettronica; riscaldamento con risonanza ciclotronica ionica; riscaldamento mediante risonanza "ibrida inferiore".

Risonanza ciclotronica elettronica (ECRH).

La frequenza di rotazione degli elettroni attorno alle linee di forza è:

$$f_{ce} = 2.8 \cdot 10^{10} \cdot B$$

con f_{ce} in Hz e B in Tesla.

B può essere funzione del raggio ed è dell'ordine di alcuni Tesla.

L'onda trasmessa dal generatore risuona con quella elettronica solo se la sua frequenza è uguale o prossima a quella di rotazione degli elettroni.

I generatori devono dunque produrre onde con frequenze di decine di GHz e con potenze di MW. Sono stati recentemente realizzati con successo generatori idonei (gyrotron) (fig. 9.1) e speciali guide d'onda (fig. 9.2a-b).

Risonanza ciclotronica ionica (ICRH).

La frequenza di rotazione degli ioni attorno alle linee di forza (frequenza di ciclotrone) dipende dalla carica e dalla massa dello ione, secondo la formula:

$$\omega_c = \frac{ZeB}{m}$$

Supponiamo che si tratti di un plasma di solo Deuterio, allora la formula si semplifica come:

$$f_{ci} = 7.7 \cdot 10^6 \cdot B$$

con f_{ci} in Hz e B in Tesla.

Le onde che i generatori esterni devono produrre hanno dunque frequenze dell'ordine delle decine di MHz. Generatori di dette frequenze e capaci di produrre potenze di qualche MW esistono già da diversi anni.

Questo metodo di riscaldamento ausiliario è molto usato e sembra il più promettente.

Risonanza ibrida inferiore (LHRH).

All'interno del plasma la condizione di neutralità elettrica è macroscopicamente conservata.

A livello locale accade però che vi siano separazioni, variabili nel tempo, fra cariche elettriche positive e cariche negative.

Detti fenomeni sono chiamati "Onde di plasma ioniche" e la loro frequenza, supponendo il plasma di Deuterio, è:

$$f_{pi} = 0.15 \cdot \sqrt{n_i}$$

f_{pi} in Hz e n_i densità ionica in m^{-3} .

Anche n_i è funzione del raggio ed è tipicamente qualche $10^{20} m^{-3}$.

La sorgente di onde deve perciò irradiare nell'intervallo di frequenza $1 \div 4$ GHz, nel quale esistono generatori con potenza sufficiente.

È consueto individuare tale intervallo di frequenza con l'espressione "risonanza ibrida inferiore".



Fig. 9.1 Vista d'insieme di un Gyrotron costruito per il Tokamak di Frascati FTU



Fig. 9.2 a-b Assemblaggi di guide d'onda per i Gyrotron di FTU



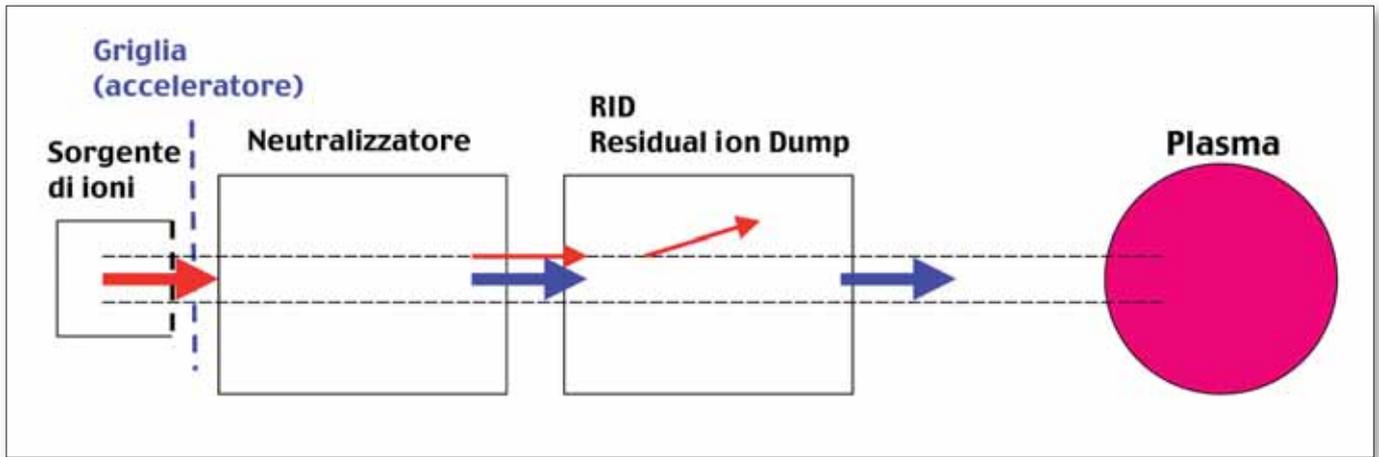


Fig. 9.3 Schema di principio di un iniettore di neutri. La corrente di ioni è indicata dalle frecce rosse, il fascio di neutri uscente dall'acceleratore è indicato con la freccia blu

9b - Il riscaldamento con fasci di atomi neutri

La tecnica di produzione di fasci di atomi neutri ad alta energia è ormai affermata e di largo impiego nelle macchine di interesse fusionistico. Consideriamo ad esempio le caratteristiche di uno dei generatori di fasci di neutri di JET (schema di principio, fig. 9.3, e foto dell'apparato, fig. 9.4).

In una struttura alta 7 m è prodotto un fascio di ioni di Deuterio, D^+ , che sono fortemente accelerati, tramite una tensione elevatissima (160 kV) applicata a una griglia (acceleratore, vedi fig. 9.3). Il fascio di ioni attraversa una camera, il "neutralizzatore", all'interno della quale è presente gas Deuterio molecolare: il prodotto pressione per lunghezza del percorso è mantenuto a $4 \cdot 10^{-6}$ bar · m. Il fenomeno di scambio carica, cioè di cattura da parte degli ioni Deuterio di un elettrone in seguito ad un urto con le molecole D_2 senza perdita di energia da parte degli ioni stessi, consente che il 24% del fascio ionico entrato nel neutralizzatore esca neutro. Il 76% rimanente, ancora carico, viene deviato e disperso, tramite un dispositivo chiamato RID, che è un deflettore di ioni residui (Residual Ion Dump, vedi ancora fig. 9.3). Dal generatore di neutri esce una "corrente" di 30 A di particelle accelerate a 160 kV, cioè di circa 5 MW di potenza.

(La parola "corrente" è qui usata in modo improprio, poiché i neutri non sono particelle cariche).

Poiché le particelle così iniettate sono atomi senza carica, esse sono insensibili ai campi magnetici ed

elettrici e procedono con traiettoria rettilinea fino a che non subiscono urti con gli ioni del plasma, cedendo loro la propria alta energia: si ha così il riscaldamento degli ioni del plasma. Nell'urto gli atomi neutri del fascio perdono l'elettrone e diventano essi stessi ioni del plasma medesimo.

La potenza iniettata nel plasma è solo una piccola frazione dell'intera potenza necessaria al generatore per produrre il fascio di neutri: questo fatto è peraltro un limite per tutti i metodi di riscaldamento ausiliario, e influisce in modo non indifferente sul fattore di guadagno Q di un reattore (vedi cap.6).

Nel capitolo 12 si descriverà l'iniettore di neutri di ITER, che verrà progettato e provato a Padova, nell'ambito del Consorzio RFX.



Fig. 9.4 Un iniettore di neutri di JET

Il **Tokamak** è una macchina toroidale ideata nel 1950 da A. Sakharov e I. Tamm all'Istituto di Fisica Atomica di Mosca, oggi Istituto "Kurchatov". È quindi macchina russa e Tokamak è acronimo di parole russe, "TOroidal - KAmara - MAgnit - Katushka", il cui significato è trasparente tranne per l'ultima parola che significa "**sole-noide**". Nello stesso periodo in U.S.A. Lyman Spitzer, ai laboratori di Princeton (PPPL), studiava invece la configurazione nota come "Stellarator".

Nel 1956 una delegazione Sovietica guidata da Nikita Krusciov visitò i laboratori di Harwell (UK), e nel 1958 l'Unione Sovietica decise di togliere il segreto alle ricerche effettuate in URSS sulle macchine per plasmi a confinamento magnetico.

Il Tokamak ha permesso di raggiungere i più elevati valori di $n\tau_E$ e di temperatura ionica. Nel Tokamak la corrente di plasma I_p , che fluisce parallelamente al campo toroidale B_T prodotto da un solenoide toroidale (vedi cap. 8) genera un campo poloidale B_θ secondo la legge di Ampère:

$$B_\theta = \mu_0 \frac{I_p}{2\pi r}$$

dove r è il raggio minore della colonna di plasma e le linee di forza del campo poloidale B_θ sono circonferenze che avvolgono la colonna stessa.

La risultante dei due campi magnetici B_T e B_θ , con B_θ variabile con il raggio r , è un campo le cui linee di forza si avvolgono a spirale lungo l'anello di plasma. Per evitare l'insorgere di instabilità che portano al degrado delle proprietà di confinamento della scarica, è necessario che il passo di questa spirale sia molto maggiore della lunghezza della ciambella (fig. 10.1). Per ottenere questo, è necessario che il campo poloidale B_θ sia molto meno intenso di quello toroidale B_T .

Non essendo possibile produrre campi magnetici B_T superiori a 5 - 10 Tesla, la corrente di plasma I_p , che genera B_θ , non può superare certi limiti. Il riscaldamento tramite la legge di Ohm è così insufficiente e bisogna ricorrere ai riscaldamenti ausiliari di cui si è trattato nel capitolo 9.

L'esemplare più noto di Tokamak è il Joint European Torus (JET), realizzato a Culham, vicino a Oxford, nei primi anni '80.

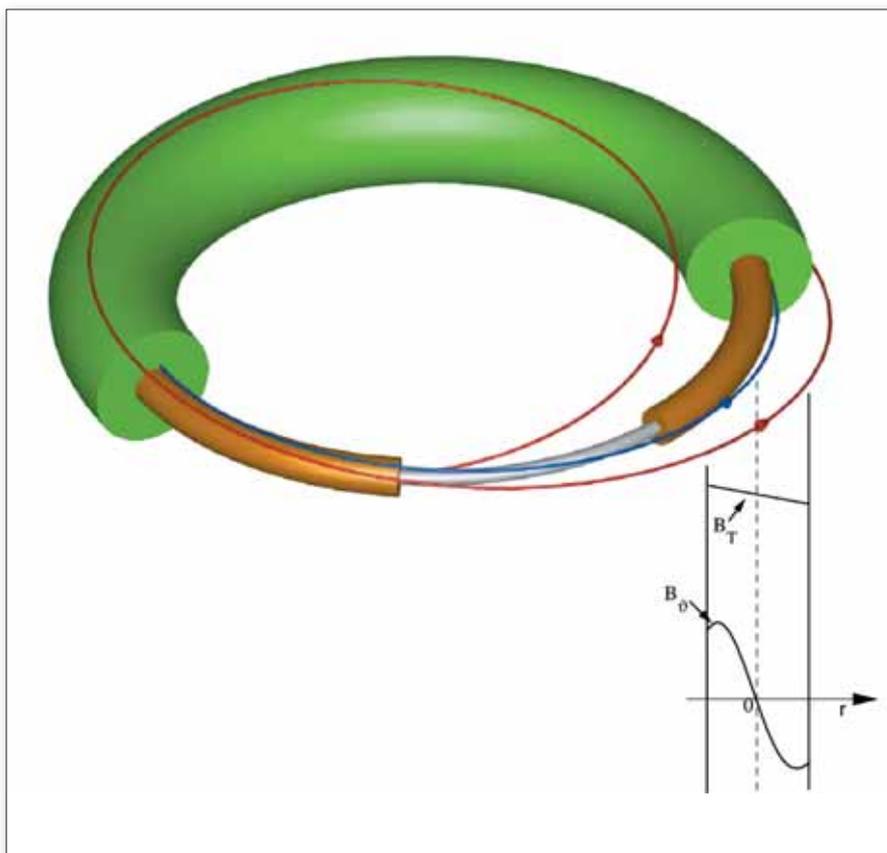


Fig. 10.1 Tokamak: linee di forza dei campi magnetici su varie superfici; profilo radiale dei campi magnetici toroidale e poloidale

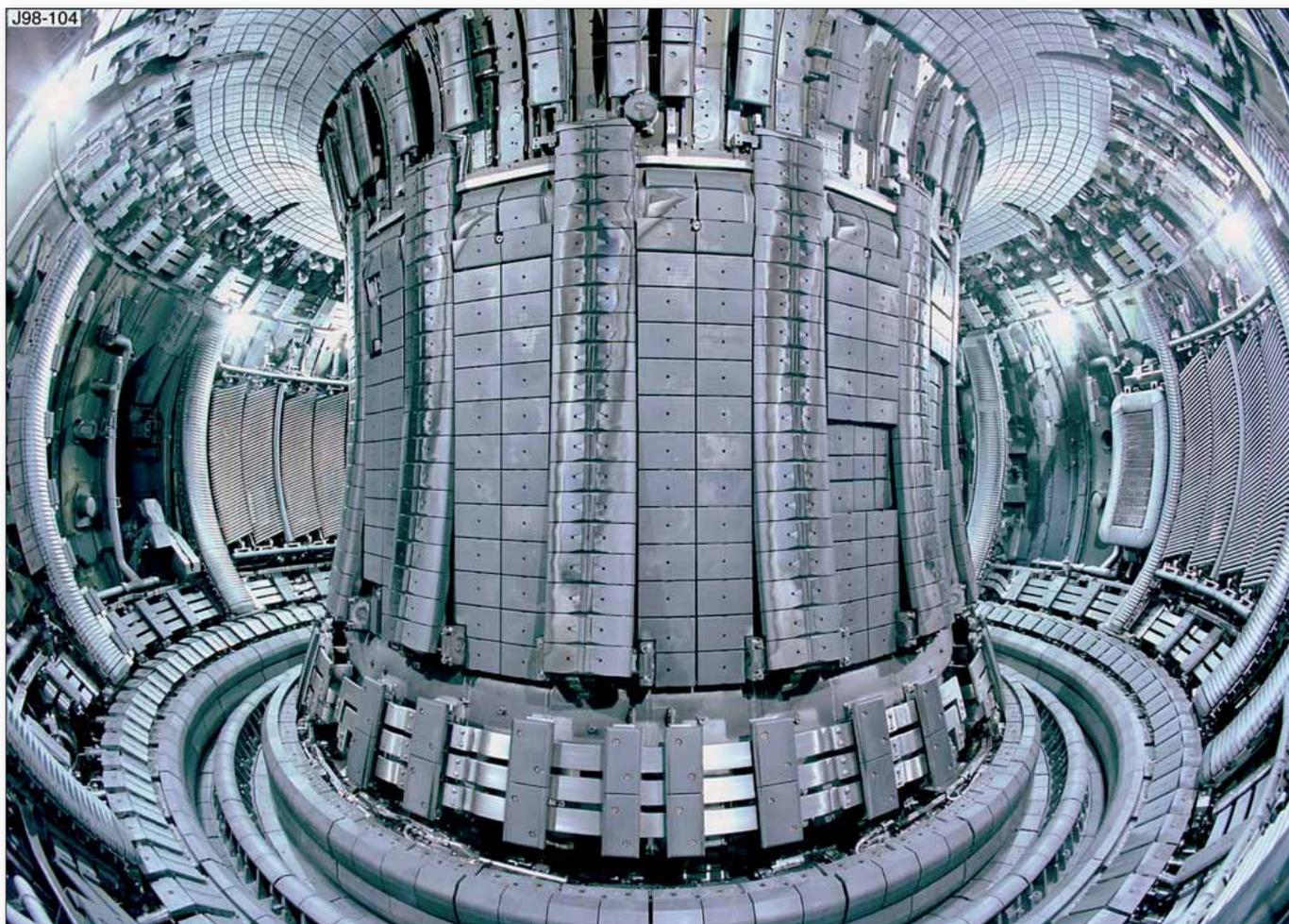


Fig. 11.1 Vista dell'interno del JET

Nel 1973 lo European Council of Ministers decise di perseguire lo studio di fattibilità e la realizzazione di prototipi di reattori in vista di una possibile utilizzazione industriale dell'energia da fusione. Tali prototipi sarebbero dovuti essere: JET (Joint European Torus); NET (Next European Torus); DEMO (Demonstration Reactor).

La costruzione di JET è stata completata nel 1983. JET (fig. 11.1) nasce con il preciso scopo di definire i parametri, le dimensioni e le condizioni di lavoro del futuro Reattore a Fusione.

Il raggiungimento di questo obiettivo passa attraverso lo studio:

- a- delle **leggi di scala** del comportamento del plasma in condizioni che si avvicinano al reattore;
- b- delle interazioni plasma-parete in tali condizioni;
- c- del riscaldamento del plasma;
- d- della produzione delle particelle α , cioè dei nuclei

di Elio, del loro confinamento e del conseguente riscaldamento del plasma.

JET inizia ad operare nel 1983 e raggiunge e supera le condizioni previste dal progetto. Esso costituisce un grande successo della ricerca europea.

Nel 1991 si decide perciò l'impiego di miscele di Deuterio e di Trizio. Essendo il Trizio radioattivo, questo comporta l'uso di sistemi robotizzati per interventi remoti, cioè senza la presenza umana, sulla macchina, data la presenza di una debole radioattività nell'ambiente. Comporta pure una sperimentazione dei sistemi di sicurezza per l'uso, il recupero e il riciclaggio del Trizio. Sia l'esperienza robotica sia quella relativa all'uso del Trizio hanno avuto esito ampiamente positivo.

Con una potenza di riscaldamento addizionale di 22 MW di fasci di neutri e di 3 MW di radioonde, nel

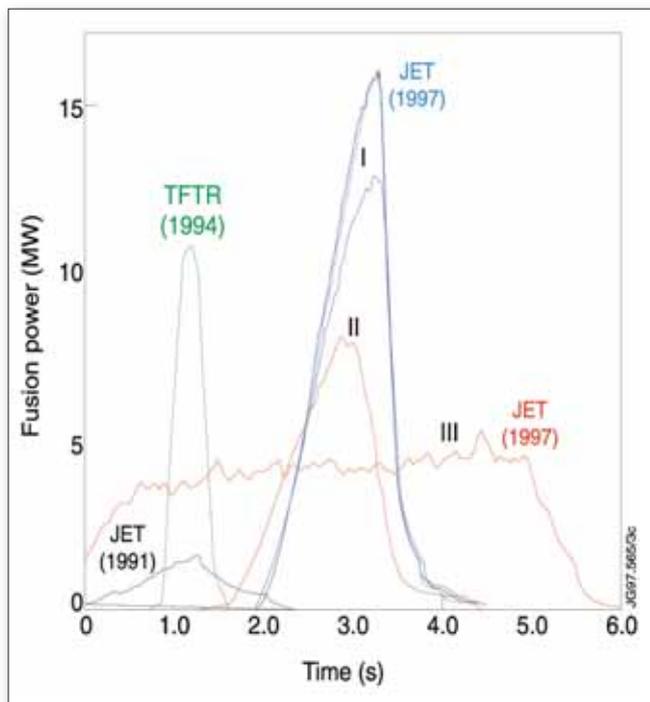


Fig. 11.2 Progressi nella produzione di energia da fusione D-T in TFTR e in JET. Tratta da J. Jacquinot and the JET team, *PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED FUSION*, Vol. 41, A13 (1999)

1997 sono stati ottenuti 16 MW di potenza in uscita ricavati dalla Fusione, equivalenti quindi a un fattore di guadagno della fusione $Q \sim 0.6$ (vedi fig.11.2). Simili risultati erano stati ottenuti nel 1994 nell'esperimento tokamak americano TFTR, presso il PPPL di Princeton (anche se per una durata minore).

Si è quindi quasi raggiunta la condizione di pareggio tra la potenza immessa nella macchina per scaldare il plasma e quella prodotta dalle reazioni di Fusione.

Abbiamo visto nel capitolo 3 che l'energia prodotta dalle reazioni di Fusione si manifesta come energia cinetica del neutrone e della particella α . Queste due particelle si comportano in modo completamente diverso: il neutrone non possiede carica elettrica e quindi, una volta prodotto, non è confinato dal campo magnetico ed esce dalla camera di reazione (vedi capitolo 13); la particella α possiede carica elettrica positiva, è catturata dal campo magnetico, rimane nel plasma e la sua energia contribuisce ad aumentare l'energia del plasma.

Nel 1994 viene decisa la costruzione di un **divertore**, che è un sistema di pompaggio dell'elio prodotto dalle reazioni di fusione e delle impurezze provenienti dalle pareti. Il divertore è interno alla camera di scarica ed è posto all'estremità inferiore della stessa. Esso, più volte modificato nel corso degli anni, ha consentito di consolidare i primati di JET nel mondo della Fusione, grazie ai quali detta macchina è oggi un riferimento per il progetto dei futuri reattori sperimentali. Anche ITER, il proto-reattore che si può considerare come la macchina successiva a JET (vedi capitolo 12) sarà equipaggiato con un sistema di pompaggio a divertore. La figura 11.3 mostra lo schema del divertore denominato MARK II, attualmente in funzione al JET: si tratta di una struttura a "V", composta da due piastre contrapposte, sulla cui superficie vengono depositate le particelle fuoriuscenti dal plasma. Il progetto del divertore di ITER è in linea di principio molto simile a quello del JET (vedi capitolo 12).

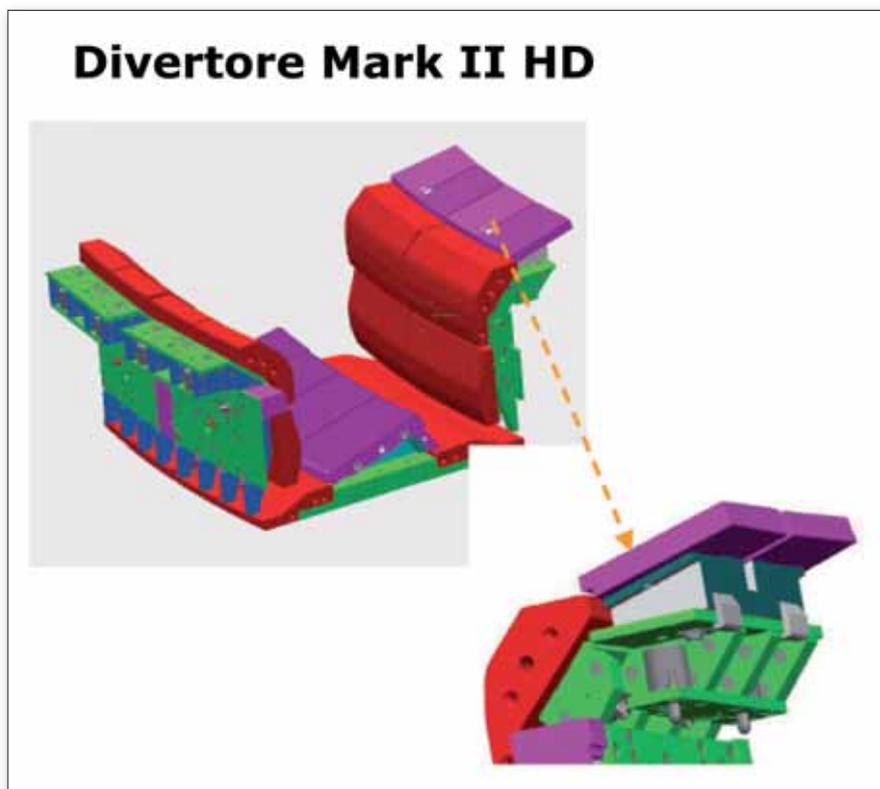


Fig. 11.3 Schema di principio del divertore del JET: si tratta di un dispositivo a forma di V, posto nell'estremità inferiore della camera da vuoto. Sono indicate in viola le "piastre" del divertore, cioè la regione su cui si depositano le particelle pompate dall'interno del plasma

I parametri più importanti e i migliori risultati di JET, ottenuti fino al 2006, sono i seguenti:

| | | |
|---|---|---|
| raggio maggiore del toro, R | = | 2.96 m |
| raggio minore del toro, a x b | = | 1.25 x 2.10 m |
| volume del plasma | = | 85 m ³ |
| corrente di plasma | = | 5 MA |
| durata della corrente | = | 20 s |
| campo Toroidale B _T | = | 3.5 T |
| potenza risc.addiz. da iniezione neutri | = | 25 MW |
| potenza risc. addiz. da microonde | = | 32 MW |
| densità | = | 4·10 ²⁰ atomi/m ³ |
| temperatura ionica | = | 30 keV |
| tempo di confinamento dell'energia τ _E | = | 1.8 s |

È interessante confrontare i risultati ottenuti da JET sia in scariche ottimali, sia in condizioni normali, con le prestazioni attese dal Reattore a fusione futuro:

| Parametro | Valore Ottimale di JET | Valore normale di JET | Valore desiderato del reattore |
|--|------------------------|-----------------------|--------------------------------|
| n _i [m ⁻³] | 4×10 ²⁰ | 4×10 ¹⁹ | 1×10 ²⁰ |
| T _{ion} [keV] | 30 | 18 | 20 |
| τ _E [s] | 1.8 | 1.2 | 1.5 |
| n _i T _{ion} τ _E [m ⁻³ keV s] | 1×10 ²¹ | 9×10 ²⁰ | circa 3×10 ²¹ |

Questi valori mostrano che JET ha già funzionato in condizioni simili a quelle previste per un reattore. La figura 11.4, che illustra le prestazioni ottenute dalle diverse macchine di tipo Tokamak, in termini di temperatura ionica T_i e di **prodotto triplo** n_i T_i τ_E, mostra che JET può essere ritenuta la macchina leader nei programmi mondiali della fusione.

È inoltre da sottolineare come, in generale, il **prodotto triplo** n_i T_i τ_E sia stato migliorato di un fattore superiore a 1000 in soli 25 anni.

Dall'anno 2000, l'esperimento JET è gestito direttamente dai laboratori europei che partecipano al programma Fusione, nell'ambito di un accordo (EFDA, European Fusion Development Agreement) che contribuisce anche al progetto congiunto della prossima macchina, ITER (vedi capitolo 12).

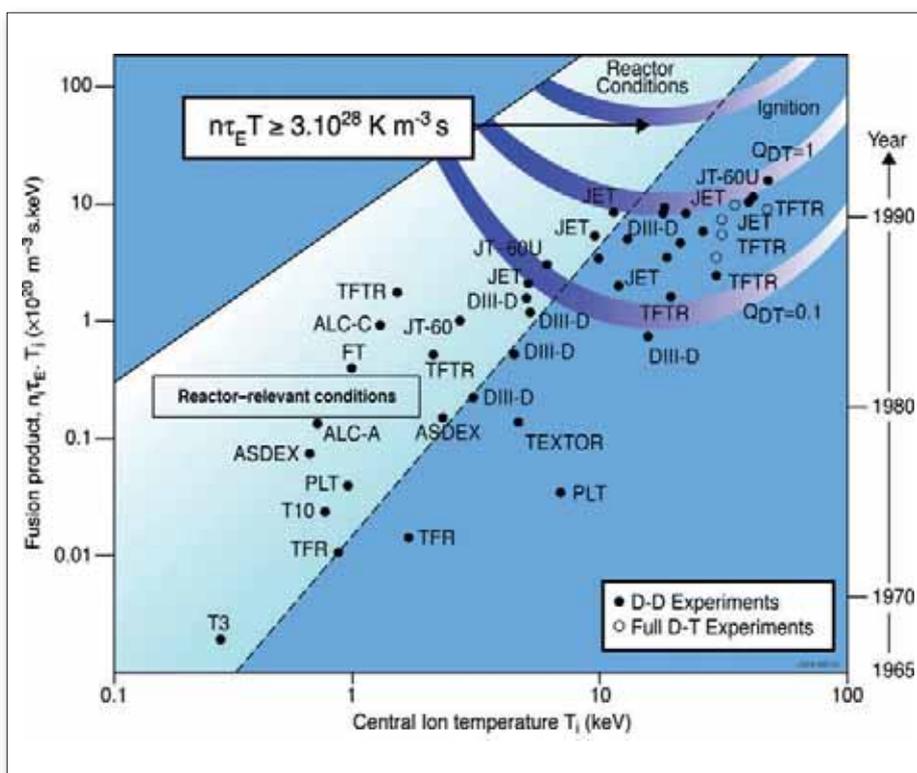


Fig. 11.4 Prestazioni, dal punto di vista fusionistico, dei Tokamak e valori raggiunti da JET: prodotto n_i τ_E T_i espresso in funzione di T_i

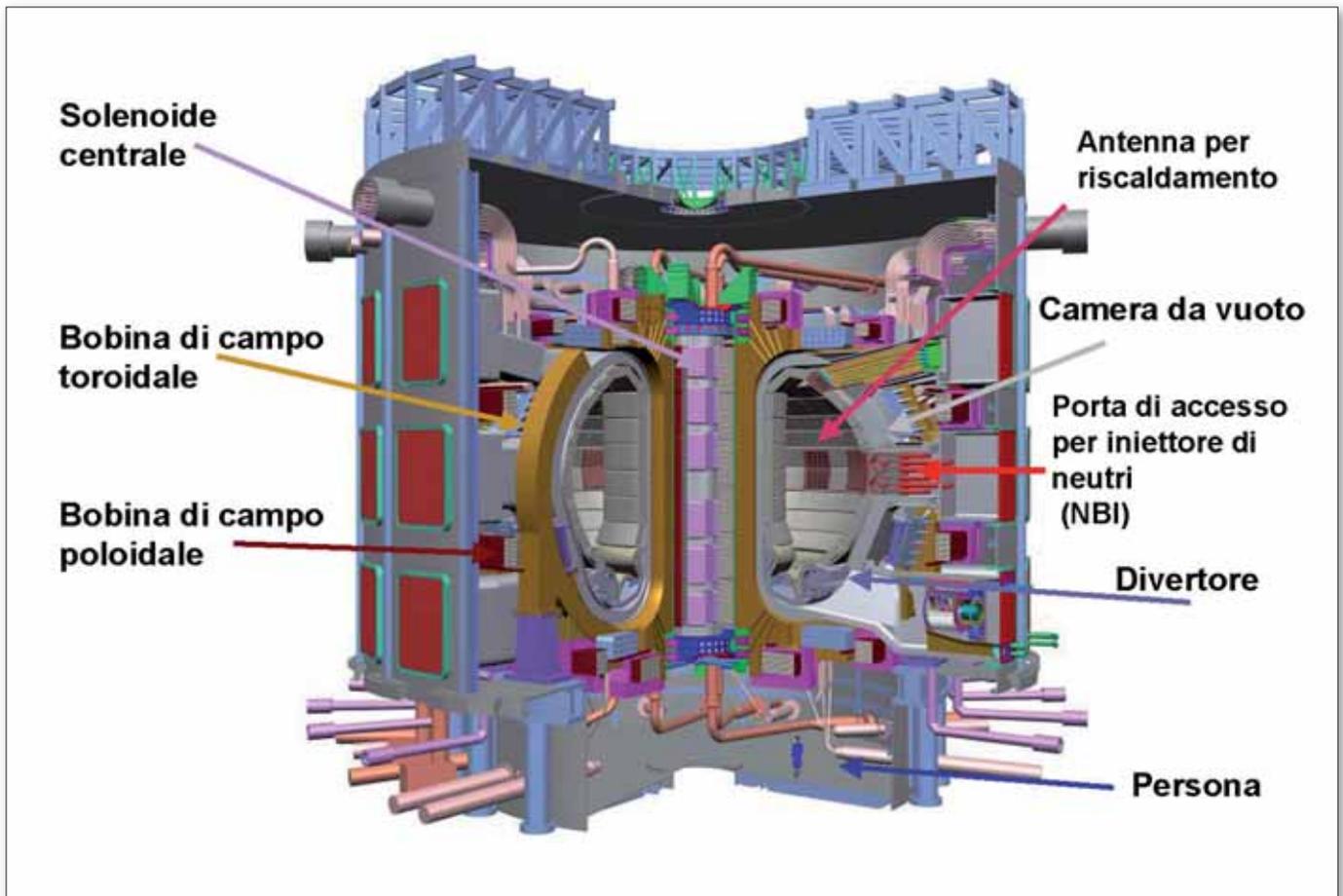


Fig. 12.1 Nucleo centrale di ITER: sono indicati il sistema magnetico (toroidale – TF e poloidale – PF); il solenoide centrale; il contenitore primario del vuoto (camera da vuoto); il divertore; i portelli per i sistemi di riscaldamento ausiliario (radiofrequenza e iniettori di neutri)

ITER (in latino: la via) è la macchina che rappresenta il passaggio fra gli studi eseguiti fino ad ora sugli aspetti fisici e tecnologici della fusione e la centrale futura di potenza per la produzione di energia da fusione [9].

L'accordo per la costruzione di ITER è stato firmato ufficialmente a Parigi il 21 novembre 2006 dai Ministri dei sette Paesi partecipanti al progetto (Unione Europea, Stati Uniti d'America, Federazione Russa, Giappone, Cina, Corea e India). Il sito scelto per la costruzione è Cadarache, nel sud della Francia. Va sottolineato che, come dimensioni dei partecipanti a un progetto scientifico, ITER non ha precedenti, in quanto i Paesi partecipanti rappresentano più della metà della popolazione mondiale. È previsto che ITER entri in funzione nel 2016.

La macchina opererà con plasmi dapprima di deuterio e successivamente di Deuterio-Trizio (D-T). Sarà basata sulla configurazione Tokamak. ITER fornirà una potenza di fusione di circa 500 MW che non verrà

trasformata in potenza elettrica, poiché la tecnologia della conversione da energia termica a energia elettrica è già oggi ben consolidata (vedi Appendice). La parte centrale della macchina (reattore) sarà per molti aspetti simile a quella di una centrale a fusione, come verrà descritto nel prossimo capitolo. La differenza principale è la ridotta quantità di litio nel mantello che circonda il plasma e quindi la ridotta produzione di trizio nel mantello stesso.

Gli obiettivi di ITER sono dunque i seguenti:

- dimostrare la possibilità di operare con plasmi aventi caratteristiche vicine a quelle richieste dalla centrale a fusione, con lunghi tempi di combustione e con lo scopo finale di mantenere acceso il plasma per un tempo indefinito (operazione stazionaria);
- dimostrare la fattibilità e il funzionamento dei componenti principali del nucleo centrale dell'impianto che non dovranno essere mai rimossi durante l'intera operazione (sistema magnetico e strutture di contenimento), e dei componenti in-

terni destinati invece a essere rimpiazzati durante la vita della centrale (prima parete, mantello e divertore);

- dimostrare l'efficacia dei sistemi per la rimozione e sostituzione a distanza dei diversi componenti della centrale (telemanipolazione);
- provare i sistemi per l'introduzione del combustibile nella camera del plasma e i sistemi di riscaldamento del plasma (iniezione di neutri e antenne a radiofrequenza);
- verificare i processi per il trattamento dei prodotti della reazione (**particelle alfa** e **impurezze**) e il recupero del trizio;
- determinare con prove integrali a scala ridotta le prestazioni di diversi tipi di moduli di mantello fertilizzante del trizio di interesse per il reattore DEMO.

Il nucleo centrale dell'impianto è mostrato in fig.12.1. Nella Tabella 12.2 sono indicati i parametri principali di ITER. Nel seguito sono descritte le principali caratteristiche dell'impianto.

| | | |
|------------------------------|----------------|------|
| Raggio maggiore del plasma | m | 6.2 |
| Raggio minore del plasma | m | 2.0 |
| Volume del plasma | m ³ | 840 |
| Corrente del plasma | MA | 15.0 |
| Campo toroidale sull'asse | T | 5.3 |
| Potenza di fusione | MW | 500 |
| Durata dell'impulso | s | >400 |
| Amplificazione della potenza | Q | >10 |

Tabella 12.2: principali parametri di ITER.
Fonte EFDA sul sito di ITER [9].

12a - Il sistema magnetico

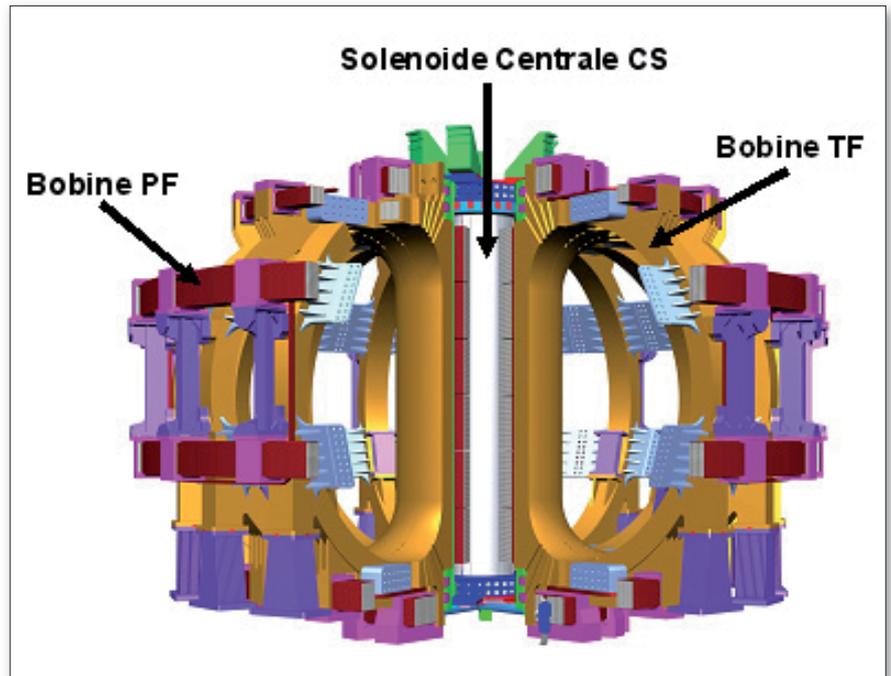


Fig. 12.3 il sistema magnetico di ITER, con le bobine toroidali (TF), le bobine poloidali (PF) e il solenoide centrale (CS)

Il sistema magnetico è costituito da quattro sottosistemi, tutti di bobine **superconduttrici** (fig. 12.3). In particolare:

- 18 bobine a forma di D che producono il campo toroidale (TF). Ciascuna bobina è costituita da molte spire composte da fili di una lega di niobio-stagno;
- 6 bobine del campo poloidale (PF) per controllo della posizione e della forma del plasma. Le bobine sono formate da conduttori di niobio-titanio;
- un **solenoid**e centrale (CS) per l'induzione della corrente nel plasma, con conduttori a sezione quadrata di niobio-stagno;
- bobine di correzione (CC) per il controllo del campo e la stabilizzazione del plasma.

Tutte le bobine sono raffreddate con elio liquido circolante a temperatura di poco superiore allo zero assoluto (-273.15°C) per mezzo di pompe criogeniche. Le bobine TF forniscono la struttura principale del sistema magnetico e del nucleo centrale della macchina a cui il contenitore del vuoto e le bobine PF sono connesse attraverso due anelli coassiali.

12b - Contenitore primario del vuoto, mantello e divertore

La camera di combustione consiste di un contenitore a vuoto spinto che sostiene al suo interno i componenti destinati a essere rimpiazzati durante la vita della macchina, cioè i moduli del mantello e del divertore (fig. 12.4, sinistra).

La camera da vuoto, formata da 9 settori toroidali saldati in sito, è un guscio a doppia parete realizzato con una lega di nickel ad alta resistenza in cui si aprono gli accessi per la rimozione dei moduli interni, per il riscaldamento ausiliario e il controllo del plasma (fig. 12.4, a destra).

Il **mantello (blanket)** che circonda il plasma è formato da 440 moduli. Ognuno di questi moduli, raffreddati ad acqua, è costituito da una prima parete in acciaio attaccata a un blocco pure d'acciaio che fa la funzione di **schermo neutronico**, fissato da lontano al contenitore del vuoto attraverso dei fori d'accesso nella prima parete.

La prima parete presenta dal lato plasma una prote-

zione in berillio su un substrato di rame raffreddato ad acqua, montato su un supporto d'acciaio. La prima parete è staccabile dal resto del modulo, per effettuare manutenzione.

Il **divertore** è costituito da 54 moduli disposti nella parte bassa del contenitore primario (fig. 12.4).

La zona bersaglio del flusso di particelle uscenti dal plasma e la base portante del divertore formano una V che trattiene gli atomi neutri conseguenti all'interazione plasma-parete in una specie di nuvola, proteggendo così il bersaglio, senza impedire la rimozione dell'elio prodotto dalle reazioni di fusione. Il bersaglio è costituito da grafite e tungsteno montati su un substrato di rame raffreddato ad acqua all'interno di una struttura d'acciaio.

Il calore, depositato dai **neutroni** e dalla radiazione elettromagnetica nei componenti interni ed estratto attraverso i rispettivi circuiti di raffreddamento, viene raccolto assieme a quello prodotto dagli altri sistemi ausiliari e disperso nell'ambiente attraverso un impianto a torri di raffreddamento (8 celle di raffreddamento).

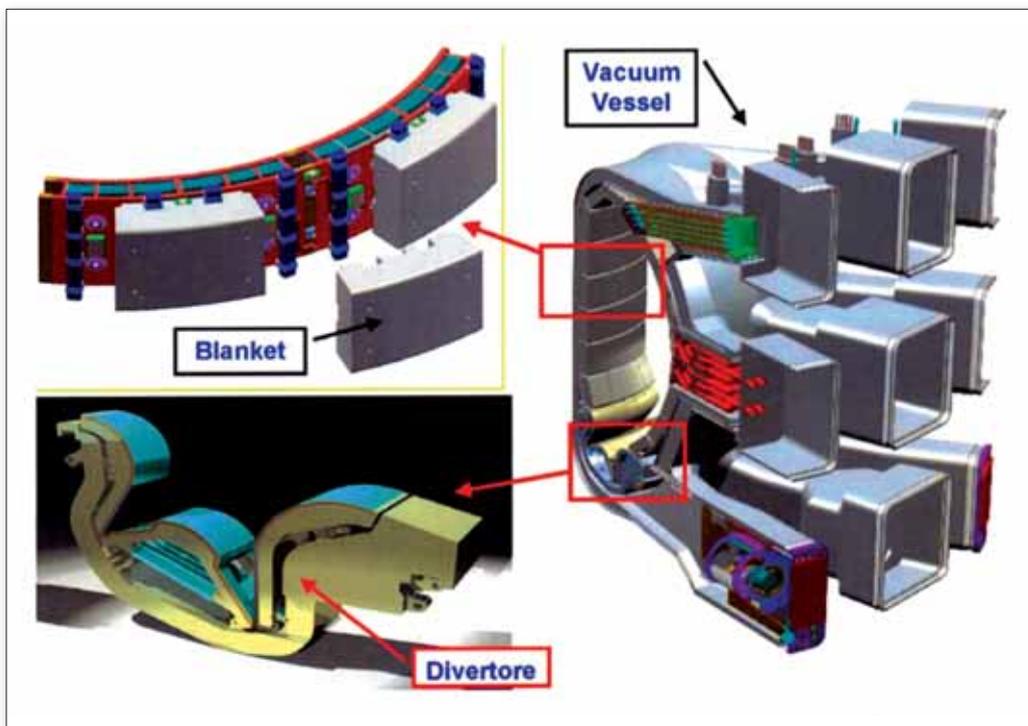


Fig. 12.4 Schema di un settore della camera da vuoto (in inglese, vacuum vessel): si vede come vengono montati i moduli del mantello (blanket) e il divertore

Sono previste 17 aperture sul piano equatoriale per le varie funzioni d'accesso al plasma, precisamente:

- antenne per il riscaldamento a radiofrequenza,
- condotti per il riscaldamento con neutri,
- moduli di prova di mantello fertilizzante,
- diagnostica e operazioni a distanza per il rimpiazzo dei componenti interni (prima parete e divertore).

Le operazioni di attacco e distacco dei componenti radioattivi è fatta con telemanipolatori.

Questi componenti vengono quindi rimossi entro contenitori a tenuta stagna che si agganciano ai portelli d'accesso e permettono il trasporto verso le celle calde e il rimpiazzo con nuovi componenti.

12c - Sistemi per il ciclo del combustibile

L'iniezione del combustibile (deuterio e trizio) nel plasma viene fatta attraverso immissione di piccoli proiettili a temperatura criogenica e soffiando gas al bordo del plasma stesso.

L'impianto di trattamento del gas combusto comprende l'estrazione per pompaggio dalla camera del plasma, il suo processamento per separare dalle impurezze gli isotopi dell'idrogeno, la distillazione criogenica per separare il deuterio e il trizio, da riutilizzare come combustibile, e infine il sito per il deposito del trizio.

12d - Sistemi di riscaldamento e mantenimento della corrente

ITER utilizzerà una combinazione di vari sistemi per il riscaldamento e il sostegno della corrente (current drive), basati sull'immissione diretta di fasci di atomi neutri nel plasma e sulla radiofrequenza. La configurazione iniziale richiederà due fasci di neutri e i sistemi a radiofrequenza ciclotronica di elettroni e ioni. Tuttavia il sistema è progettato in modo da permettere varie combinazioni di metodi a radiofrequenza e l'aggiunta di un terzo fascio di neutri in modo da ottenere una potenza totale di circa 100 MW.

Siccome la potenza immessa (per es., con l'iniettore di neutri) entra nel bilancio energetico globale del reattore (cioè, più grande è, più abbassa il valore del "fattore di guadagno" della fusione Q , visto nel cap.6), è necessario che essa sia più piccola possibile. Questo richiede di sfruttare regimi avanzati di confinamento del plasma, in cui parte della corrente di plasma sia prodotta spontaneamente, senza nessuna tensione applicata, per esempio attraverso l'**effetto bootstrap**.

Il sistema di riscaldamento e mantenimento della corrente con fasci di neutri è costituito da tre iniettori che forniranno ciascuno un fascio di atomi neutri di Deuterio ottenuti a partire da un fascio di ioni negativi D- accelerati a 1 MeV, e successivamente neutralizzati. La potenza depositata dal fascio è di 16.4 MW con una efficienza totale del sistema iniettore del 34%.

La produzione e l'accelerazione del fascio di neutri richiede che la sorgente sia sistemata lontano dal plasma in una cella separata. Un condotto sotto vuoto conduce di lì alle aperture sul piano equatoriale. Il contenitore degli iniettori è un'estensione della camera da vuoto ed è quindi parte della prima barriera di contenimento della macchina. Il sistema di iniezione dei neutri è descritto in dettaglio nel successivo paragrafo 12e.



Fig. 12.5: Nella camera da vuoto di ITER sarà contenuto l'equivalente in deuterio di due fialette di acqua pesante (D_2O)

12e - Il sistema di iniettori di neutri

Descriveremo ora con maggiore dettaglio l'iniettore di fasci di neutri di ITER, perché esso verrà progettato da un gruppo di ricercatori europei e giapponesi, nel quale il Consorzio RFX avrà un ruolo molto importante e soprattutto verrà sviluppato e collaudato a Padova prima dell'installazione su ITER.

Come anticipato più sopra, ITER avrà bisogno di 3 sistemi di **iniettori di neutri (Neutral Beam Injector=NBI)**, per una potenza totale iniettata nel plasma di 50 MW.

Una novità degli iniettori di ITER è, come anticipato, il fatto che lavoreranno con *ioni negativi* (di idrogeno, H⁻, o di deuterio, D⁻) in modo da massimizzare l'efficienza del processo di scambio carica nel neutralizzatore (vedi paragrafo 9b).

I parametri di ciascun iniettore sono indicati nella Tabella 12.6

| | |
|---|-------------|
| Potenza del fascio | 16.5 MW |
| Corrente di fascio all'uscita dell'acceleratore | 40 A |
| Tensione applicata | 1 MV |
| Durata massima dell' impulso | 3600 s |
| Dimensioni del fascio all'uscita | 0.6 x 0.8 m |

Tabella 12.6 Principali caratteristiche dell' iniettore di neutri di ITER

Come si vede, i parametri richiesti dal NBI di ITER sono impegnativi: 16.5 MW di potenza (al confronto dei 5 MW dell' iniettore di JET, vedi paragrafo 9b); 1 MV di tensione (160 kV in JET), 40 A di corrente (30 A in JET), ma soprattutto una durata del fascio di un'ora, invece di alcuni secondi in JET. L'operazione del NBI dovrà inoltre garantire un'alta efficienza globale, che, come indicato nel capitolo 6, andrà a incidere sul parametro globale di guadagno della Fusione, Q.

Lo schema di progetto dell'iniettore che sarà svilup-

pato a Padova è mostrato in figura 12.7. Sono indicati i componenti principali: la sorgente di ioni, l'acceleratore, il neutralizzatore, e il deflettore di ioni residui (RID). Molti aspetti di fisica e tecnologia sono oggetto di intensa attività di ricerca e sviluppo (e più lo saranno nei prossimi anni). Ne individuiamo alcuni.

a) Produzione di ioni negativi

Per quanto riguarda la sorgente, essa dovrà assicurare elevata intensità di corrente, buona uniformità, e grande durata di emissione (1 ora).

Attualmente si stanno confrontando sorgenti basate su due principi: arco con filamenti, e radio-frequenza.

b) Accelerazione e ottica del fascio

L'acceleratore è costituito da griglie metalliche, che vengono sottoposte a una tensione elevatissima (1 MV). A tali tensioni, occorre garantire che il fascio di ioni negativi rimanga ben collimato. Attualmente si stanno confrontando due sistemi, uno con 5 griglie, e uno con 2 griglie. Il problema maggiore è lo smaltimento di energia depositata sulle griglie da elettroni che vengono accelerati assieme agli ioni.

c) Neutralizzatore

Il neutralizzatore è una camera aperta alle due estremità per fare entrare e uscire il fascio, nella quale viene immesso gas Deuterio molecolare, D₂. Esso ha lo scopo di neutralizzare il fascio di ioni Deuterio negativi in uscita dall'acceleratore. Ciò avviene attraverso un processo di scambio carica, cioè di perdita di un elettrone da parte degli ioni D⁻ che collidono con il Deuterio molecolare D₂ secondo la reazione:



Nel processo lo ione D⁻ che si trasforma in un neutro D⁰ conserva la sua energia cinetica: questo è il principio-base dell'iniettore.

Uno dei problemi maggiori del neutralizzatore è il calore che si deposita sulle pareti della camera, principalmente dovuto ad elettroni residui.

d) Sistema di deflessione di ioni residui (RID)

Una volta che il fascio di ioni passa attraverso il neutralizzatore, e diventa neutro per scambio-carica, tutti gli ioni residui (positivi e negativi) che rimangono nel fascio vanno eliminati, prima che il fascio entri nel condotto che porta al plasma.

Per il RID si può usare la deflessione magnetica, che

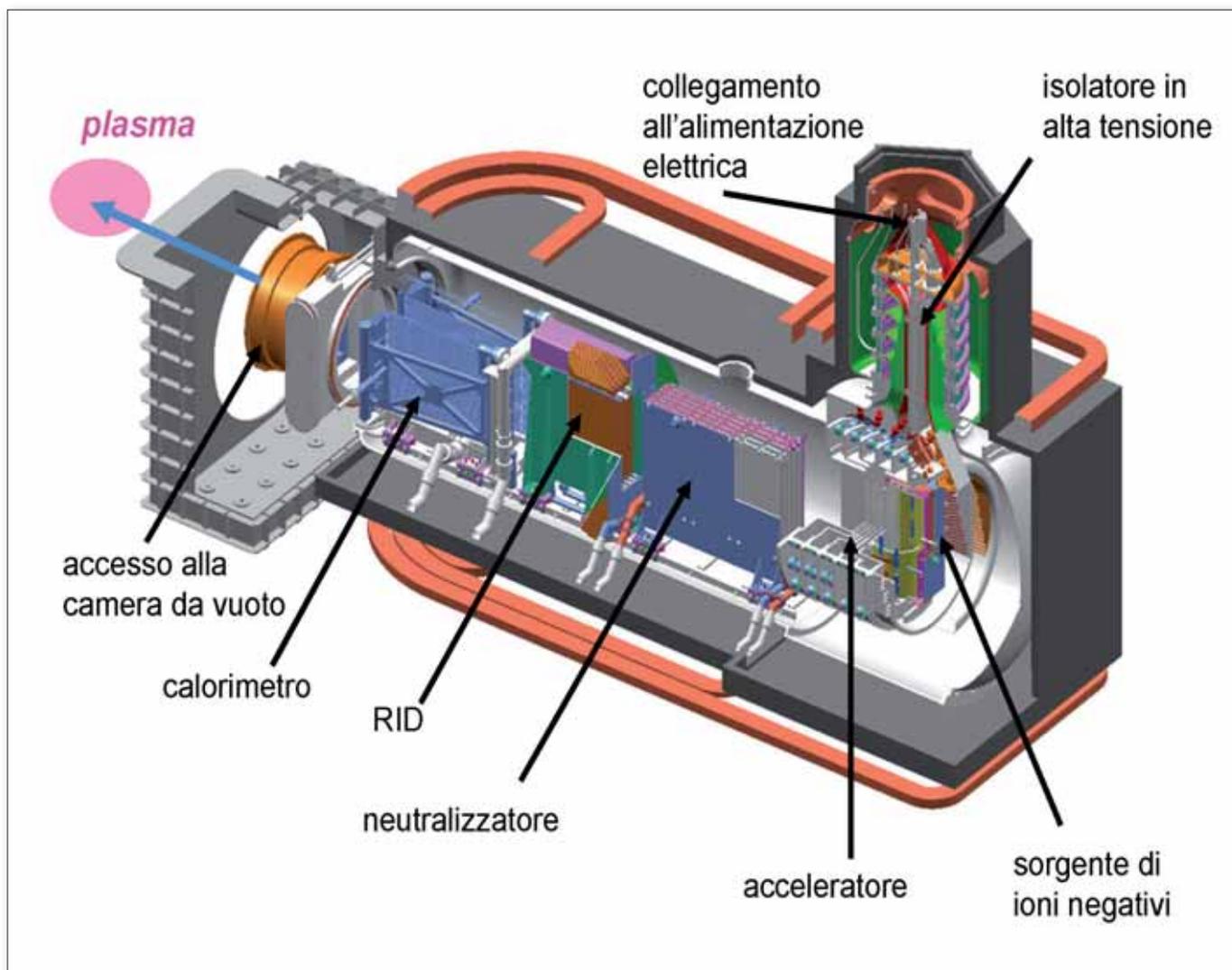


Figura 12.7 Schema dell'iniettore di neutri di ITER che sarà sviluppato e provato a Padova

è normalmente usata negli acceleratori di particelle (si pensi al ciclotrone), oppure la deflessione elettrostatica (si pensi alla deflessione del fascio elettronico nel tubo catodico di un televisore tradizionale).

e) Isolamento elettrostatico

Uno dei problemi tecnologici maggiori del NBI di

ITER è l'isolamento elettrostatico a 1 MV. La tenuta della tensione deve essere garantita in vuoto o in gas inerte, in presenza di radiazione e di campi magnetici e per tempi lunghi.

Lo sviluppo di queste ed altre tecnologie costituisce una grande sfida, che dovrà essere vinta in meno di 10 anni.

13 - La centrale a fusione per produrre energia

Come accennato nell'Introduzione, lo scopo finale delle ricerche attuali sulla fusione è quello di acquisire la conoscenza necessaria per realizzare una centrale per la produzione di energia [10].

Sulla base dei risultati ottenuti fino ad oggi ed illustrati nei capitoli precedenti, si può affermare che le prime centrali per produzione di energia saranno quelle basate sul ciclo deuterio-trizio (D-T) e probabilmente sul confinamento magnetico e configurazione del plasma del tipo Tokamak, descritto nel capitolo 10.

Come si presenterà e come opererà questo tipo di centrale di produzione di energia da fusione? Uno schema generale del sistema e dei processi principali coinvolti è mostrato in figura 13.1.

13a - Principio di funzionamento della centrale

La miscela D-T, che costituisce il combustibile della centrale, completamente ionizzata (**plasma**), è contenuta all'interno della camera da vuoto e viene ri-

scaldata ad una temperatura tale da produrre le reazioni di fusione necessarie per ottenere la potenza richiesta della centrale.

I prodotti della reazione di fusione, **particelle alfa** e **neutroni** seguono percorsi diversi.

Le particelle alfa, con un'energia che è il 20% del totale della reazione, restano confinate dal campo magnetico nel volume del plasma e cedono, rallentando a seguito delle collisioni, la loro energia al plasma, in modo da sopperire alle inevitabili perdite di energia del plasma stesso per radiazione elettromagnetica, conduzione e convezione del calore.

I neutroni, invece, con un'energia pari all'80% del totale, non essendo soggetti al campo magnetico, lasciano il plasma e depositano la loro energia cinetica come calore in un **mantello (blanket)** che circonda il plasma. Qui avviene l'estrazione del calore trasportato dai neutroni attraverso un sistema di raffreddamento che rappresenta il *circuito primario* della centrale di produzione dell'energia. Nel caso di produzione di elettricità questo calore viene convertito in energia elettrica secondo gli schemi classici delle centrali termoelettriche, cioè il riscaldamento di

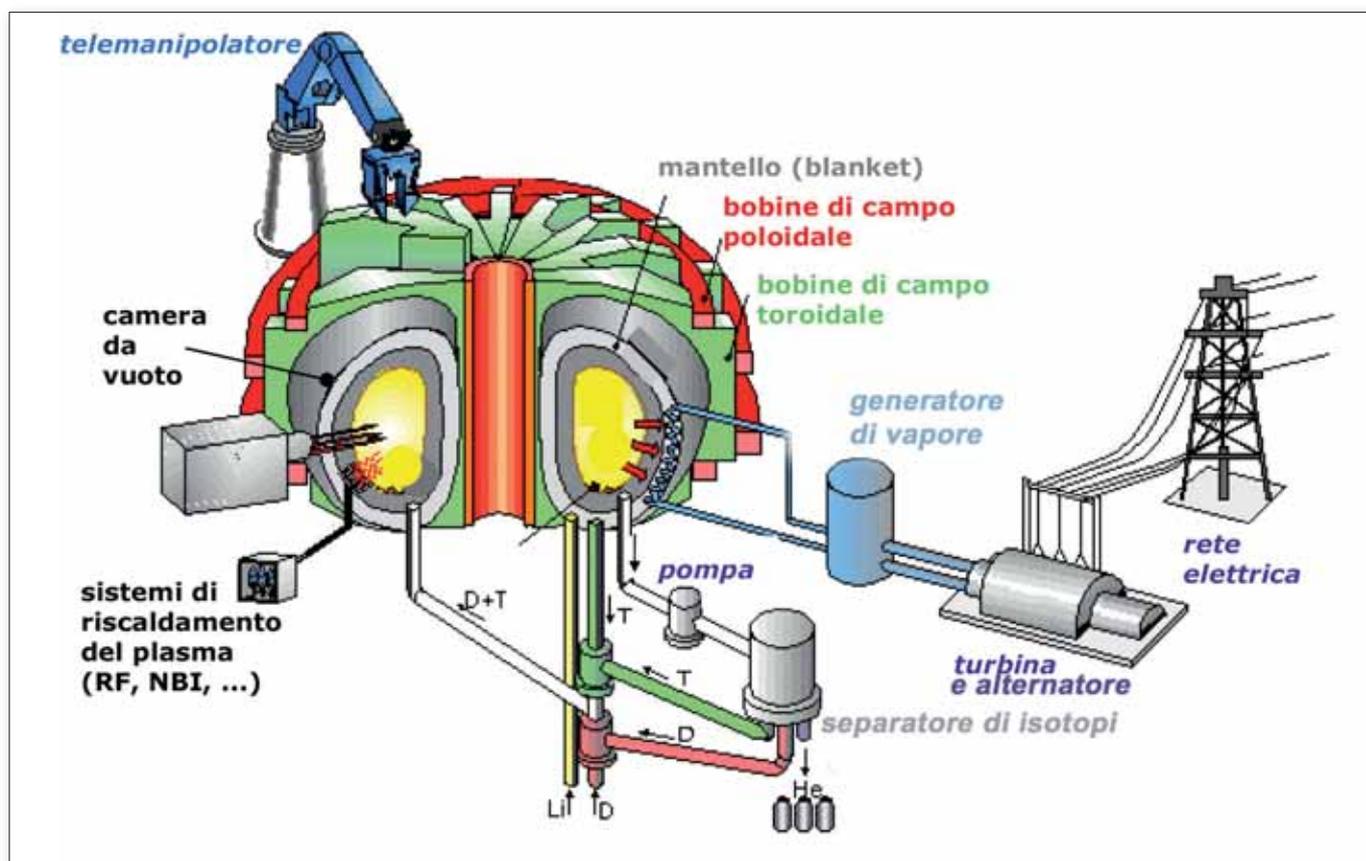
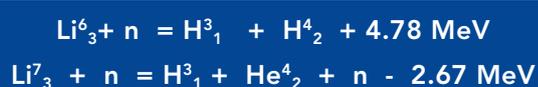


Fig. 13.1 Schema della centrale a fusione per la produzione di energia

acqua, la generazione di vapore e la conversione in energia elettrica tramite una turbina e un alternatore. Una centrale come questa potrà anche essere utilizzata per la produzione di **idrogeno**, che forse in futuro costituirà, assieme all'elettricità, il principale "vettore" di energia, cioè il canale attraverso cui l'energia prodotta dalle centrali verrà distribuita agli utilizzatori di energia (in particolare i veicoli per il trasporto su strade).

Il mantello che circonda il plasma contiene un materiale a base di litio in quanto i neutroni in uscita dal plasma, reagendo con i suoi isotopi (Li-6 e Li-7), producono il trizio, secondo le reazioni seguenti:



Per questo si parla di mantello o copertura *fertilizzante*. Il mantello è progettato in modo tale che la quantità di trizio in esso prodotto, una volta estratto dal mantello e introdotto nel plasma eguagli il trizio "bruciato" nelle reazioni di fusione.

Da questo consegue che le *materie prime* necessarie per il combustibile delle centrali a fusione saranno il **deuterio** e il litio, entrambi abbondantissimi in natura: non ci saranno più guerre per garantirsi gli approvvigionamenti energetici!

Le "ceneri della combustione", cioè le particelle alfa, la parte della miscela D-T che non ha reagito e le impurezze derivanti dall'interazione del plasma con la prima parete che lo circonda, restano nella ciambella del plasma e vengono estratte all'esterno attraverso il divertore (vedi il capitolo 11). Il flusso di particelle uscente è neutralizzato su un bersaglio e il gas avviato attraverso un sistema di pompaggio in un impianto di separazione delle impurezze contenute e in un secondo impianto ove avviene la separazione del deuterio dal trizio e il recupero del trizio.

Nei progetti attuali delle centrali di produzione di energia la copertura fertilizzante e il divertore ma-

gnético sono posti all'interno della camera da vuoto. Quindi la prima parete, cioè la parete che si affaccia al plasma, è rappresentata dalla parete interna del mantello fertilizzante e dalle strutture del divertore che vedono il plasma stesso.

I materiali di questi due componenti sono quindi quelli maggiormente esposti agli effetti dell'irraggiamento dovuto ai **neutroni** e ai raggi gamma prodotti nelle reazioni corrispondenti, e, per quanto riguarda il divertore, anche agli effetti dell'intenso flusso di particelle cariche provenienti dal plasma. Il bombardamento neutronico porta in generale a un degrado delle proprietà meccaniche ed elettriche dei materiali, detto *danno da radiazione*. Questo fatto richiede di rimpiazzare con una certa frequenza durante la vita del reattore i componenti all'interno della camera da vuoto, cioè il **mantello fertilizzante**, con la sua **prima parete**, e il **divertore**.

Immediatamente all'interno della camera da vuoto e all'esterno del mantello fertilizzante viene disposto uno schermo al flusso di neutroni residui (**schermo neutronico**) in modo da ridurne di molto l'intensità e così evitare, durante l'intera vita della centrale, la sostituzione della camera da vuoto stessa e dei magneti.

Nella centrale a fusione il campo magnetico necessario per il confinamento e il controllo del plasma sarà prodotto da **magneti superconduttori** in quanto con conduttori normali la perdita di energia per **effetto joule** sarebbe troppo elevata se confrontata con l'energia prodotta dalla fusione.

L'insieme delle parti della centrale comprendenti la camera da vuoto, i suoi componenti interni (mantello fertilizzante, divertore e schermo) e il sistema magnetico con il criostato associato, viene chiamato reattore a fusione.

Il trizio prodotto nel mantello e quello rimasto nella parte di miscela D-T non bruciata vengono purificati all'esterno del reattore e immessi di nuovo nella camera di combustione del reattore.

13b - Operazione e arresto della centrale

A differenza delle macchine sperimentali, che hanno un funzionamento impulsato, il funzionamento della centrale a fusione sarà quasi certamente stazionario. Per realizzare queste condizioni occorrerà fornire di continuo una potenza dall'esterno, chiamata potenza ausiliaria. Non si raggiungerà quindi l'ignizione. Le tecniche di alimentazione di questa potenza sono quelle sviluppate nelle grandi macchine attuali, come il JET e sono già state descritte in precedenza nel capitolo 9 (iniezione di neutri e radiofrequenza). Per rendere competitivo il costo della fusione con quello delle altre centrali di produzione dell'energia sarà comunque necessario operare a valori elevati del fattore di guadagno Q (vedi capitolo 6), e cioè $Q \approx 30$.

La presenza nel combustibile del trizio, che è un elemento radioattivo, e la presenza dei neutroni prodotti dalle reazioni di fusione rendono radioattive le strutture dei componenti interni della centrale, in particolare il mantello fertilizzante e il divertore. Ciò richiede che nel corso della vita della centrale tutte le operazioni di manutenzione e sostituzione dei componenti interni vengano fatte a distanza (telemanipolazione).

All'arresto della centrale questi componenti resteranno depositati in loco per un periodo dell'ordine di 50-100 anni (deposito temporaneo). Successivamente verranno smantellati e le scorie così prodotte saranno suddivise a seconda del grado di radioattività rimasto. Una parte di esse potrà essere riutilizzata liberamente, mentre il resto potrà essere riciclato di nuovo nell'industria nucleare mediante lavorazione a distanza o essere depositata in siti superficiali di deposito radioattivo già esistenti. In ogni caso è esclusa la necessità di predisporre siti profondi di tipo geologico (depositi permanenti) per le scorie da fusione.

13c - La sicurezza della centrale

La presenza nel combustibile del Trizio, che è un elemento radioattivo di tipo β con tempo di dimezzamento di 12.33 anni, e degli altri elementi radioattivi prodotti dall'irraggiamento neutronico, impongono

di prevedere successive barriere per il loro contenimento nel progetto della centrale a fusione. Le analisi fin qui svolte hanno mostrato quanto segue:

- durante l'operazione ordinaria i livelli di radioattività all'interno e all'esterno della centrale possono essere mantenuti al di sotto dei valori massimi accettabili;
- in caso di incidente, non è possibile che le strutture interne della macchina fondano anche in caso di perdita totale di refrigerante; non è necessario quindi un sistema di emergenza per il raffreddamento.

Il massimo incidente prevedibile di origine interna alla centrale non potrà portare a rotture della barriera esterna di contenimento e la massima dose di radiazione in uscita condurrà a valori di esposizione della popolazione residente vicino alla centrale tali da non richiederne l'evacuazione.

13d - Stato d'avanzamento degli studi e ricerche

Gli studi concettuali di progetto delle centrali di produzione di energia da fusione, e in particolare quelli per produzione di energia elettrica, hanno avuto un grosso incremento a partire dalla seconda metà degli anni '90. Questo ha permesso di identificare i problemi ancora aperti sia dal punto di vista fisico, sia tecnologico, nonché di meglio definire gli aspetti legati alla sicurezza e alla protezione dell'ambiente.

Dal punto di vista del plasma gli scenari proposti dovranno permettere, come si è visto, un funzionamento di tipo stazionario della macchina. Per quanto riguarda i materiali strutturali della prima parete e del mantello fertilizzante, gli **acciai ferritici-martensitici a bassa attivazione radioattiva** sono quelli considerati come i più interessanti per la prima generazione di centrali a fusione. Per il futuro più lontano, le leghe refrattarie al vanadio e i materiali compositi a base di carburo di silicio, appaiono come i più interessanti.

I ricercatori si concentrano invece sul tungsteno e le sue leghe per la realizzazione del divertore. Il materiale fertilizzante sarà una lega metallica liquida litio-piombo e un materiale ceramico, tipo silicato di litio, in forma di cartucce o microsfele, con berillio incorporato per

raggiungere la produzione di trizio necessaria per l'autoalimentazione del reattore, così da evitare qualunque trasporto di Trizio (salvo la prima carica).

La scelta dei refrigeranti tende a privilegiare l'elio come gas o lo stesso metallo liquido litio-piombo usato per la fertilizzazione del trizio, in modo da realizzare in ogni caso cicli termodinamici ad alto rendimento.

13e - Il cammino della fusione verso la commercializzazione

Alla luce delle ricerche attuali, il cammino verso la commercializzazione della fusione passa attraverso le tappe seguenti:

- la realizzazione di **ITER** (vedi cap.12), un impianto che, pur senza produrre energia elettrica, permetterà di provare la fattibilità e le condizioni operative della maggior parte dei componenti della centrale.
- La realizzazione di una centrale di dimostrazione (**DEMO**) che provi la produzione netta di elettricità e possa anche rappresentare un credibile prototipo della centrale commerciale, anche se non ancora ottimizzata dal punto di vista economico.

Uno dei problemi più importanti per il progetto della futura centrale a fusione è la scelta dei materiali che saranno esposti al flusso neutronico. ITER, a causa del suo carattere ancora sperimentale, non potrà produrre un numero di neutroni comparabile a quello che si avrà in DEMO.

Per questo motivo, in parallelo alla costruzione di ITER, si costruirà una sorgente intensa di neutroni per verificare il comportamento sotto irraggiamento a lungo termine dei materiali della centrale.

Il progetto di questo impianto, chiamato **IFMIF (International Fusion Materials Irradiation Facility)**, è stato già completato a livello internazionale. Si sta ora per avviarne la realizzazione nell'ambito di un accordo tra Unione Europea e Giappone.

La costruzione e l'operazione di ITER richiederanno circa 20 anni. Il progetto esecutivo di DEMO potrà iniziare durante l'operazione di ITER utilizzando anche i dati provenienti dalle prove in IFMIF, e procederà con la costruzione e il collegamento alla rete elettrica della centrale stessa intorno al 2035. Questo sarà il momento della verifica finale sulla capacità della fusione di realizzare centrali elettriche su larga scala; se l'esito sarà positivo, inizierà la commercializzazione di questa forma di energia.

14a - Premessa

I graditi ospiti che verranno in visita al Consorzio RFX avranno l'opportunità di vedere da vicino l'esperimento RFX, una macchina toroidale per la produzione di plasmi, abbastanza simile a quelle descritte nei paragrafi precedenti.

Quali sono gli obiettivi di RFX e qual è il suo ruolo nel cammino verso il reattore a fusione? Innanzitutto chiariamo che RFX non ha l'obiettivo di produrre potenza da fusione (che è invece l'obiettivo di ITER), ma quello di studiare a fondo la fisica del plasma. Come abbiamo già detto (capitoli 12 e 13), per completare questo cammino è necessario non solo risolvere i problemi tecnologici, ma anche capire meglio il comportamento del plasma e imparare a controllarlo completamente.

Questo è il primo obiettivo di RFX, che non è basato su una configurazione **Tokamak** (capitolo 10), bensì **Reversed Field Pinch**. Il secondo obiettivo è di dimostrare che questa configurazione potrebbe consentire la realizzazione di un reattore a fusione più semplice ed economico, grazie all'assenza di magneti superconduttori e alla possibilità di accendere le reazioni di fusione con il solo riscaldamento ohmico (vedi cap.9).

In questo capitolo, dopo una breve spiegazione della configurazione RFP, verranno esposti alcuni dei più recenti risultati della nostra sperimentazione su RFX. Buona visita!

14b - Un po' di storia

Nel 1954 venne costruita in Inghilterra, a Harwell, una grande macchina, il cui fine era di affrontare un grande passo verso la fusione nucleare: Zero Energy Thermonuclear Assembly (ZETA).

In Occidente c'erano vaghe conoscenze delle ricerche russe sui Tokamak, che del resto erano ancora macchine piccole e di scarsa rilevanza.

Il metodo di riscaldamento di ZETA era il "Pinch", cioè il riscaldamento per compressione **adiabatica** del gas.

Il principio dei gas perfetti afferma che un gas sottoposto a variazioni di pressione e di volume in condizioni di adiabaticità, cioè di assenza di scambio di calore con l'ambiente esterno, subisce una trasformazione reversibile conforme alle relazioni:

$$T V^{\gamma-1} = T_0 V_0^{\gamma-1}$$
$$p V^{\gamma} = p_0 V_0^{\gamma}$$

dove p_0 , V_0 , T_0 sono i valori di pressione, volume e temperatura nelle condizioni iniziali e γ è il rapporto fra i calori specifici del gas a pressione e a volume costante:

$$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$$

γ per plasmi in Deuterio è non inferiore a 5/3.

Le relazioni qui riportate mostrano che, con trasformazioni adiabatiche, la temperatura del gas aumenta al diminuire del volume a sua disposizione: cioè che il gas si riscalda quando viene compresso.

Nella camera toroidale dove viene predisposto un campo magnetico toroidale di guida, una volta immesso il gas viene indotta, per mezzo di un trasformatore (vedi figura 8.1), una corrente toroidale che va a ionizzare il gas e quindi a formare il plasma conduttore: i filamenti di corrente, paralleli e concordi, si attirano reciprocamente con conseguente strizione o compressione – il "pinch", appunto. ZETA doveva riprodurre condizioni assai simili a quelle che si riteneva fossero presenti nei gas ionizzati della Corona Solare.

In condizioni ottimali, il plasma sottoposto a pinch nella macchina ZETA, dopo una prima fase turbolenta, giungeva alla cosiddetta "fase quiescente", in cui i campi toroidale B_T e poloidale B_θ , variabili lungo il raggio minore del toro, avevano valore massimo quasi uguale, e B_T si rovesciava alla parete (cioè, la sua direzione al bordo era opposta a quella che aveva al centro). Questa configurazione quiescente ha preso quindi il nome di **"Reversed Field Pinch" (RFP)**.

14c - La configurazione RFP

Nel 1958 Woltjer, astrofisico, aveva dimostrato che plasmi di fusione caratterizzati dall'inversione del campo magnetico si trovavano anche nel cosmo, per esempio nella Corona Solare. Il fatto che l'RFP sia "suggerito dalla Natura" ha incoraggiato e incoraggia un approfondimento della sperimentazione per lo studio delle sue caratteristiche.

Il fenomeno dell'inversione del campo magnetico al bordo può essere compreso con un modello semplice [11]: immaginiamo di inserire un filo flessibile percorso da corrente in un tubo di flusso del campo magnetico, che sia in grado di mantenere costante nel tempo il flusso (per esempio, un cilindro metallico). Il filo è in equilibrio instabile: è cioè facile che si attorcigli, formando un'elica, come mostrato in fig. 14.1.

Di conseguenza, il campo magnetico lungo l'asse (che rappresenta il campo toroidale B_T) aumenta nello spazio vuoto interno all'elica, come all'interno di un solenoide. Al di fuori dell'elica, poiché il flusso totale è conservato, il campo magnetico diminuisce. Se il raggio dell'elica aumenta, alla fine si raggiunge

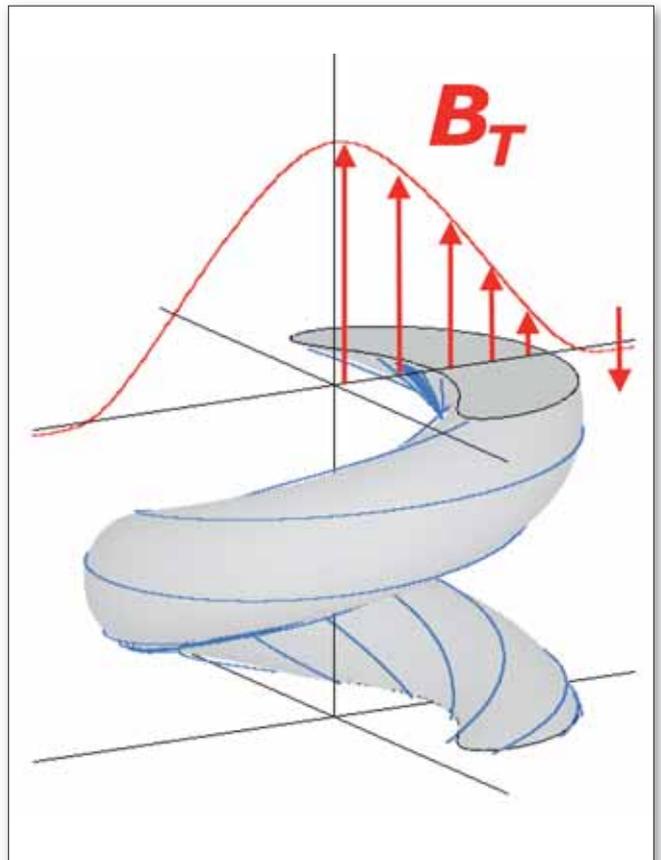


Fig. 14.1 Rappresentazione grafica di un'elica di corrente

una situazione di equilibrio stabile, in cui il campo assiale al bordo è addirittura *rovesciato*.

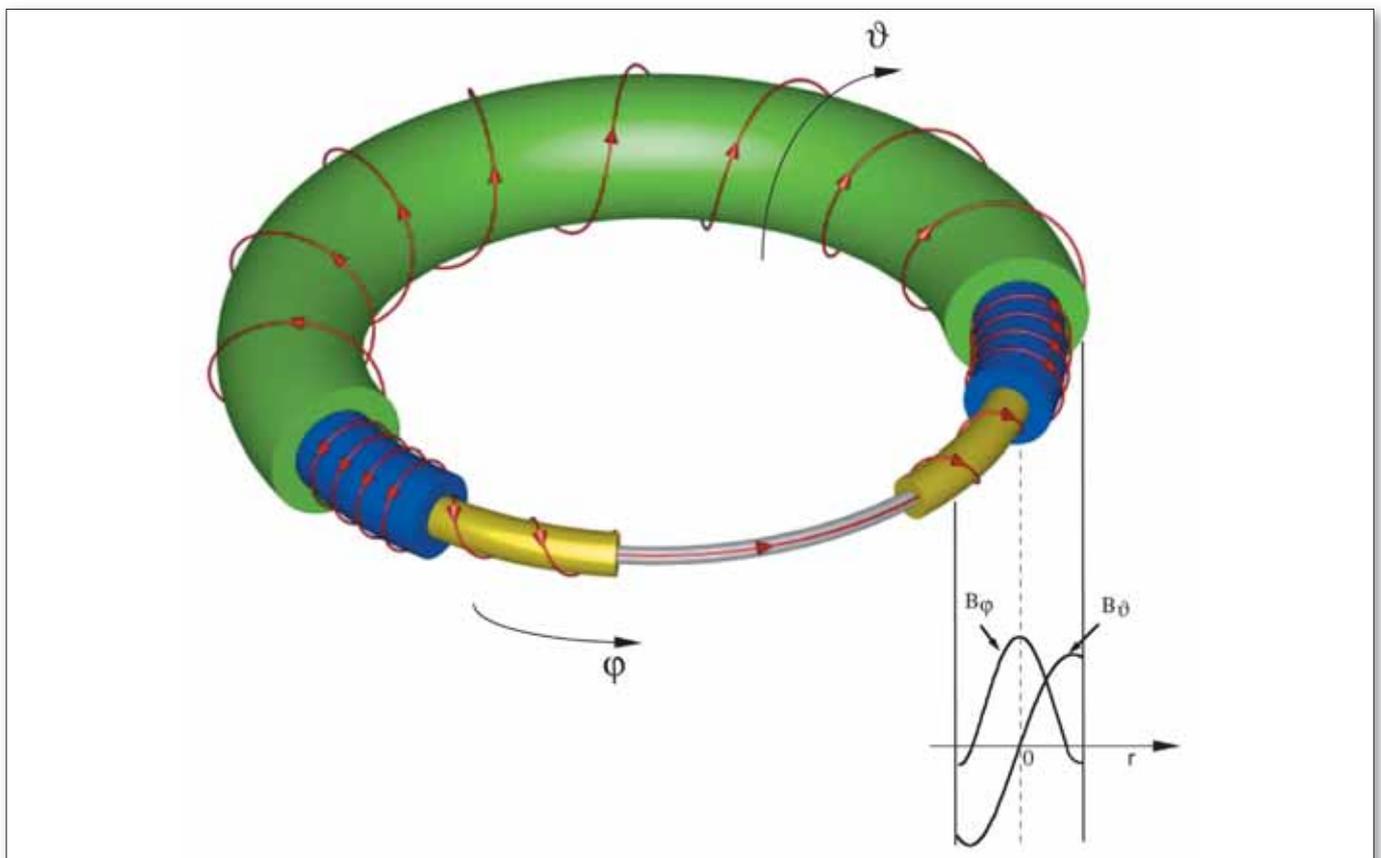


Fig. 14.2 RFP: linee di forza dei campi magnetici su varie superfici. Si osservi il rovesciamento del campo sulla superficie esterna; profilo radiale dei campi magnetici toroidale e poloidale

Il vantaggio tecnologico del RFP rispetto al Tokamak è che, a parità di corrente di plasma, i campi magnetici sono relativamente bassi; a differenza dei Tokamak, non serve che B_T sia molto maggiore di B_θ ; perciò il campo magnetico totale sulle bobine e alla parete è più piccolo e gli sforzi meccanici sono minori.

Ciò suggerisce la possibilità di progettare un reattore meno complesso, di dimensioni inferiori e meno costoso dei reattori già progettati secondo la linea Tokamak.

Abbiamo già detto che le macchine con configurazione tipo RFP hanno struttura assai simile a quella dei Tokamak. Però il fatto che nel RFP i campi toroidale e poloidale siano pressoché uguali in valore assoluto comporta alcune conseguenze.

Immaginiamo il plasma come una "ciambella" dove il campo magnetico forma delle superfici toroidali concentriche, anch'esse a forma di ciambella (chiamate **superfici magnetiche**), incluse l'una nell'altra. Su ciascuna di queste si avvolgono le spire elicoidali del campo B , risultante dei campi B_T e B_θ ivi presenti. Il passo dell'elica va diminuendo nel passare dalle superfici più interne del plasma alle più esterne; sulle più esterne il passo si rovescia e l'elica si avvolge in senso opposto, poiché il campo toroidale è cambiato di segno (fig. 14.2). In sostanza, il RFP è composto da molte eliche simili a quella di fig. 14.1, ma tutte intrecciate le une nelle altre, e tutte di passo diverso.

Un forte intreccio delle linee di forza (oppure, come si dice in inglese, un forte "shear"), ottenuto con campi pur non molto intensi, migliora la stabilità del plasma.

Numerose macchine con configurazione RFP sono attualmente in funzione; la figura 14.3 ne confronta le dimensioni.

I risultati ottenuti dalle macchine RFP, in termini di confinamento, sono inferiori a quelli ottenuti nelle macchine di tipo Tokamak; si deve peraltro tener conto del fatto che nel Tokamak è necessario una grande energia magnetica per mantenere un campo toroidale B_T molto grande. Un bilancio globale si può

quindi effettuare a parità di campo toroidale alla parete.

Possiamo inoltre affermare che le ricerche sperimentali sulle macchine in configurazione RFP hanno consentito di scoprire ed approfondire numerosi fenomeni fisici di grande interesse per la conoscenza del comportamento dei plasmi confinati da campi magnetici.

14d - L'esperimento RFX

RFX (sigla per Reversed Field eXperiment) è l'esperimento sul quale lavorano i ricercatori del gruppo patavino, ed è appunto basato sulla configurazione RFP: anzi, storicamente rappresenta un passo in avanti della configurazione RFP verso correnti di plasma elevate.

È opportuno conoscere le caratteristiche principali della macchina e approfondire l'attività di Ricerca sviluppata in Padova, per comprendere quali sono gli apporti di detto esperimento alle conoscenze fisiche ed ingegneristiche per i futuri Reattori.

RFX è stata costruita fra il 1985 e il 1991. La figura 14.4, con la relativa tabella, ne illustra le principali caratteristiche.

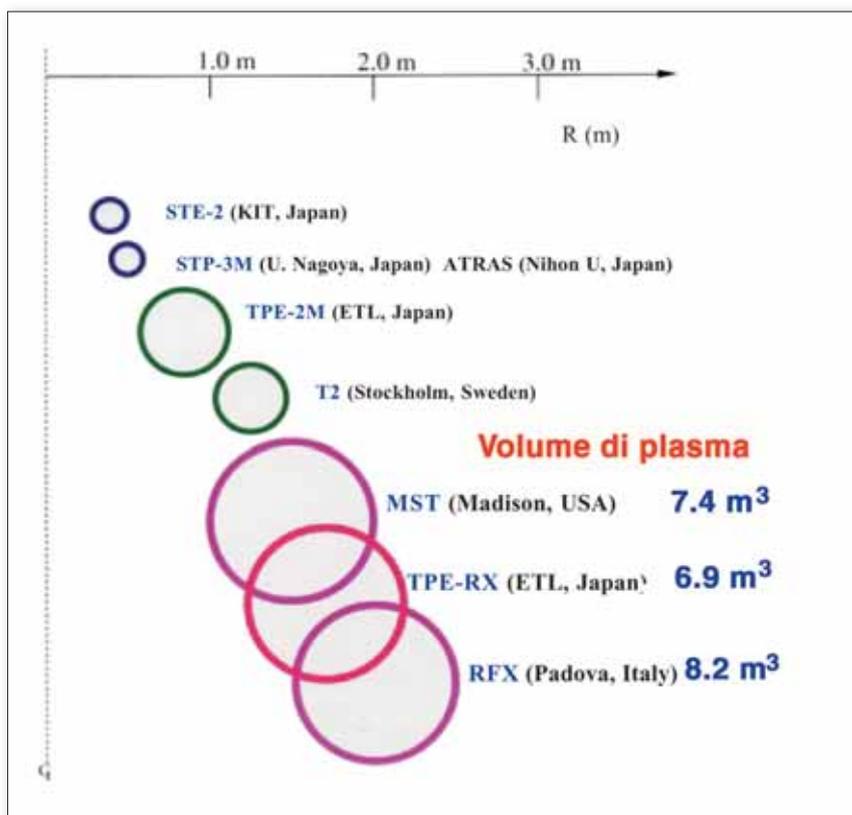


Fig. 14.3 Attuali esperimenti RFP e loro caratteristiche geometriche

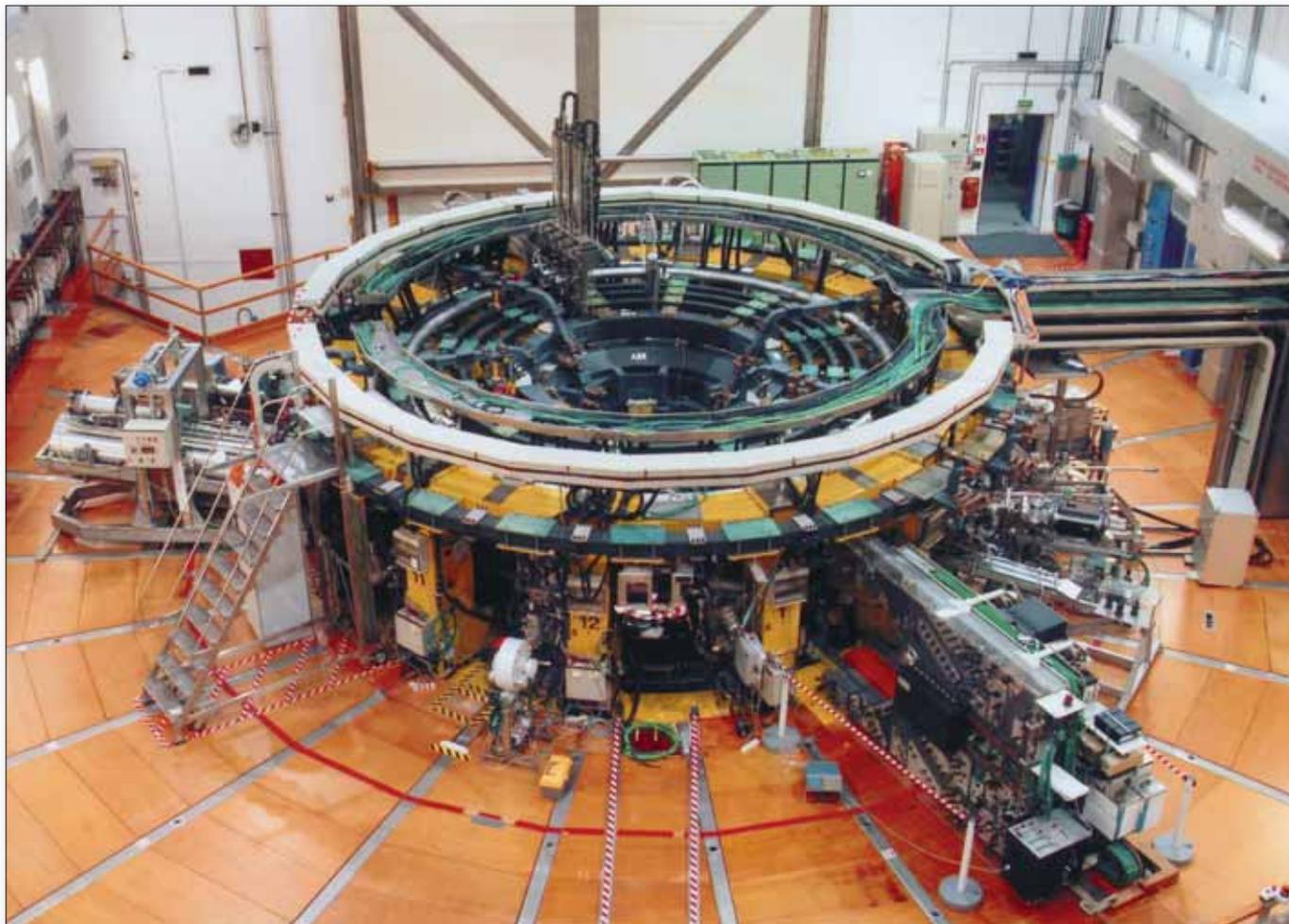


Fig. 14.4a: Fotografia della Sala Macchina di RFX; in evidenza la macchina toroidale e le apparecchiature diagnostiche

| | |
|--|--------------------------|
| materiale del nucleo del trasformatore | aria |
| materiale della camera da vuoto | Inconel (lega di Nickel) |
| materiale della copertura della prima parete (2016 mattonelle) | grafite |
| materiale della scocca (spessore 3 mm) | rame |
| materiale conduttore delle bobine | rame |
| materiale isolante delle bobine | vetroresina + kapton |
| raggio maggiore del toro, R | 2 m |
| raggio minore del toro, a | 0.5 m |
| volume della camera | 10 m ³ |
| massima corrente di plasma | 2 MA |
| massimo campo magnetico toroidale | 0.7 T |
| tempo di salita della corrente | 15 ÷ 50 ms |
| durata massima della scarica | 0.35 s = 350 ms |
| energia induttiva immagazzinata | 72.5 MJ |
| variazione di flusso magnetico | 15 Wb |
| potenza elettrica trasformata ac/dc | 400 MVA |
| livello di vuoto nella camera | 10 ⁻¹² bar |

Fig. 14.4b: I parametri principali di RFX



Fig. 14.5 Fotografia dell'interno di RFX con la copertura in grafite e robot per la manipolazione a distanza

Per quanto riguarda il sistema di contenimento del plasma, esso è costituito dalla camera da vuoto (Inconel, cioè una lega di Nickel) che contiene materialmente il gas che poi viene ionizzato.

La parete interna della camera da vuoto è ricoperta

da mattonelle in grafite (fig. 14.5), che resistono ad alte temperature (la grafite può resistere fino a 3000° C). La camera da vuoto è ricoperta da una ulteriore "guaina" in rame che la avvolge quasi completamente, chiamata scocca. La scocca, grazie alla buona conducibilità elettrica del rame, riesce a ridurre, per tempi dell'ordine di 50 ms, alcune instabilità che nascono nella colonna di plasma. Nel periodo 2001-2004, RFX è stato modificato (RFX-mod) per introdurre il **controllo attivo** su tempi superiori ai 50 ms caratteristici della scocca.

La tabella seguente mostra il confronto fra i parametri di plasma ottenuti sperimentalmente dopo il 2004

in RFX-mod, e quelli massimi attesi.

RFX è la prima macchina di grandi dimensioni, di tipo RFP, che raggiunge correnti di plasma di 1 MA e le sostiene per qualche decimo di secondo.

| Parametro | Valore ottenuto in RFX-mod (OPCD+feedback #19544) | Valore max atteso |
|---|---|------------------------------------|
| corrente di plasma | 1.0 MA | 2 MA |
| durata della scarica | 290 ms | 250 ms |
| temperatura elettronica sull' asse | 0.7 keV | 1 keV |
| densità elettronica | $0.2 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ | $1.4 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$ |
| tempo di confinamento dell'energia τ_E | 2 ms | 10 ms |

È da notare che le modifiche effettuate su RFX, e in particolare, il sistema di **controllo attivo (feedback)** delle deformazioni del plasma, ha permesso di migliorare di molto le prestazioni raggiunte fino al 1999, e per qualche grandezza, di superare i valori

massimi di progetto (per esempio, la durata della scarica).

Cercheremo ora di dare alcuni "flash" delle tematiche scientifiche affrontate con la sperimentazione su RFX.

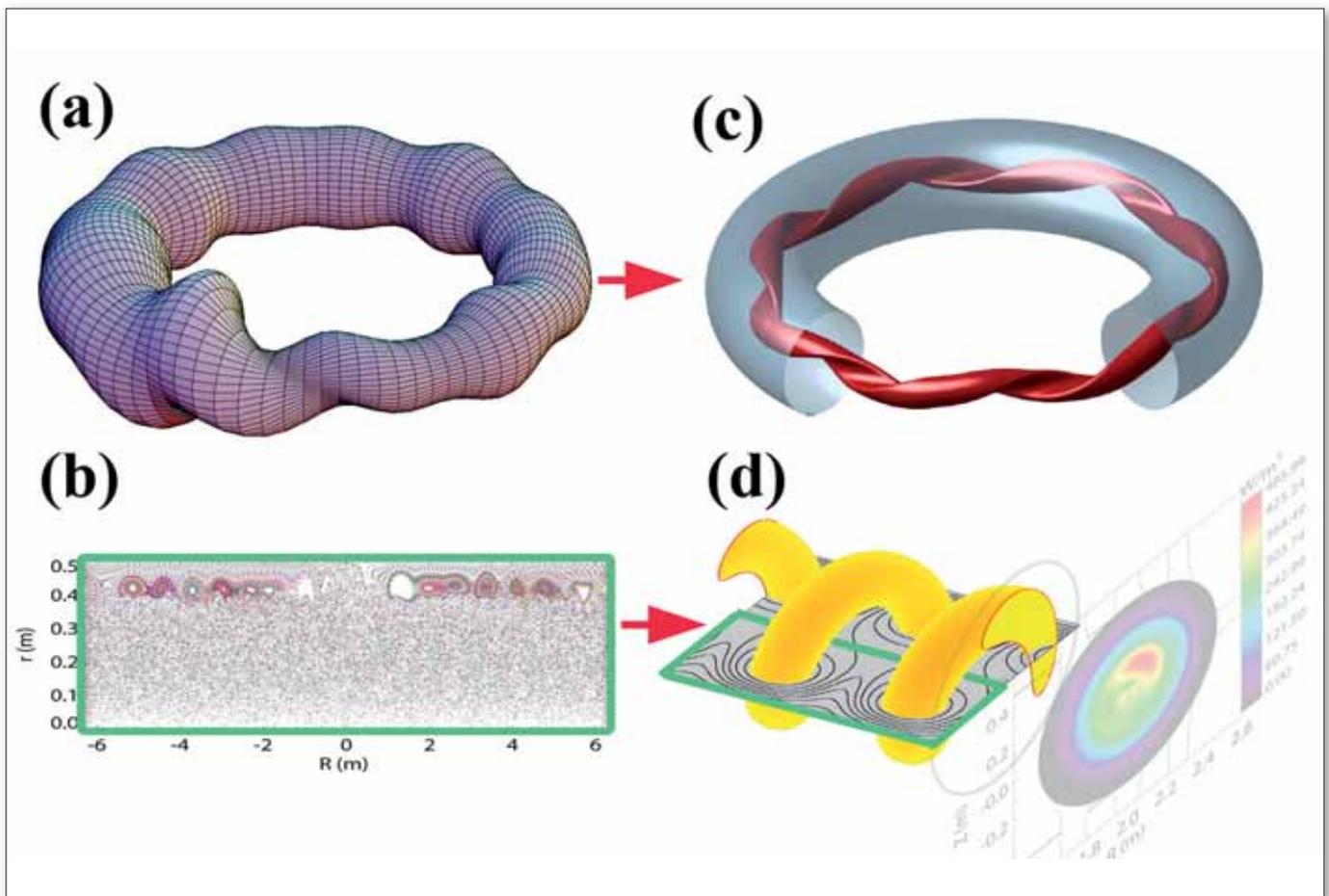


Fig. 14.6 Rappresentazione schematica dei due stati possibili di un RFP: (a) lo stato caotico, corrisponde a varie eliche che tendono a "raggrumarsi" in una posizione particolare (il "grumo" è amplificato di 10 volte in figura); (b) il corrispondente campo magnetico all'interno del plasma (simulazione al computer con il programma ORBIT). (c) l'ordine elicoidale a cui corrisponde (d) una sola elica calda all'interno del plasma

14e - Alcuni risultati sperimentali di RFX

Nel RFP l'elevato "shear" delle linee di forza (vedi paragrafo 14c), cioè il fatto che il passo delle eliche sia sempre più stretto nel passare dalla regione centrale del plasma verso la più periferica fino al rovesciamento della direzione di avvolgimento, rende, conformemente alla teoria, il plasma stabile rispetto alle perturbazioni magnetoidrodinamiche (MHD) del plasma stesso.

La configurazione RFP manifesta inoltre una forte tendenza a modellare l'intera colonna di plasma a forma di elica [fenomeno di auto-organizzazione del plasma, si veda fig. 14.6(c) e (d)] e spesso questa tende a sua volta a collassare "raggrumandosi" (**blocco in fase**) in corrispondenza ad una posizione fissa, decisa da qualche disuniformità del sistema di bobine-contenimento [camera da vuoto e scocca conduttrice, vedi fig. 14.6(a)]. Se la zona investita più

direttamente dal plasma rimane ferma per l'intera durata della scarica, la prima parete può essere investita da potenze termiche dell'ordine di 100 MW/m² e le mattonelle di grafite possono raggiungere temperature dell'ordine di 2000°C (fig. 14.7).

In questa ultima condizione, che può portare danni alle mattonelle, viene danneggiato l'ordine magnetico in buona parte del volume di plasma [fig. 14.6(b)] e dobbiamo contare solo sulla capacità di confinamento data da una zona di ordine magnetico limitata in regioni esterne del plasma: questa zona è costituita dalle piccole strutture rosse (isole magnetiche) di fig. 14.6(b).

I plasmi di RFX oscillano spontaneamente fra condizioni più deformate e caotiche [fig. 14.6(a) e (b)] e condizioni più ordinate e dotate di simmetria elicoidale [fig. 14.6(c) e (d)]. È interessante sottolineare che fenomeni di auto-organizzazione sono tutt'altro che rari in Natura: esempi si trovano in astrofisica per quanto riguarda la struttura dei campi magnetici intorno ai corpi celesti [12].

I ricercatori hanno individuato delle tecniche che attenuano la deformazione di figura 14.6(a) e la pongono in rotazione lungo il toro, in modo da non fermarsi rispetto alla prima parete.

L'attività di ricerca in RFX vede inoltre lo sviluppo di nuove tecniche di intervento attivo per favorire l'evoluzione verso strutture magnetiche ordinate in RFX.

Accenniamo a tre metodi principali: l'OPCD, la QSH, il **feedback**.

Il metodo dell'**Oscillating Poloidal Current Drive (OPCD)** (=Induzione di una corrente oscillante poloidale) è stato messo a punto fin dal 1998 su RFX, ed è oggetto di studio anche in RFX-mod, in combinazione con il controllo attivo.

La tecnica dell'OPCD induce una strizione periodica della colonna di plasma.

Abbiamo visto nel capitolo 8 che con un trasformatore è relativamente facile generare nella camera di scarica una intensa corrente toroidale. Non c'è un mezzo altrettanto semplice ed altrettanto potente per indurre una corrente poloidale sulla superficie esterna del plasma di RFX. Tuttavia per intervalli di tempo assai brevi (circa 5 ms), ripetuti in sequenza (da cui il nome "oscillante"), si lanciano nelle bobine, con le quali si crea il campo toroidale, degli impulsi di corrente di verso opportuno, i quali inducono sul plasma un impulso di corrente poloidale. Questo accorgimento dà buoni risultati. Durante l'OPCD il trasporto delle particelle e la diffusione termica dal

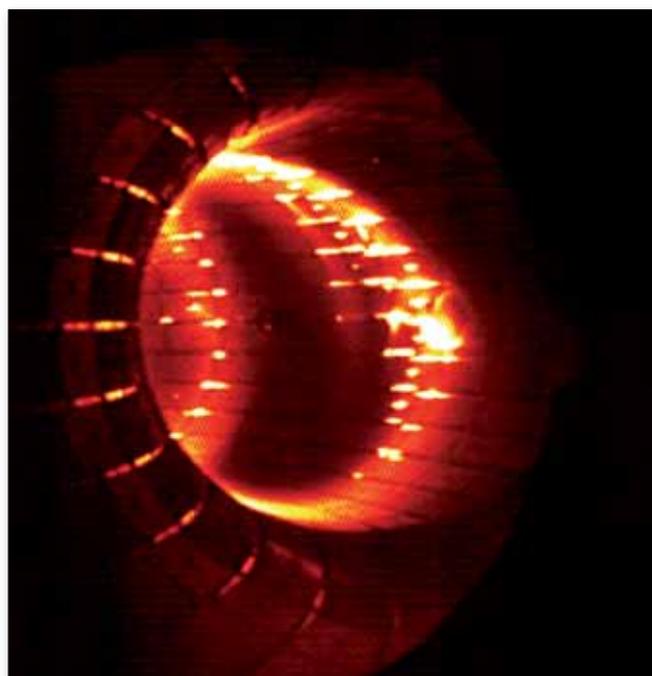


Fig. 14.7 Fotografia della prima parete di RFX in corrispondenza al "grumo" di Figura 14.6(a)

plasma verso l'esterno mostrano una considerevole diminuzione, accompagnata da un aumento della temperatura nella regione centrale del plasma.

Per quanto riguarda la **QSH** si è osservato in RFX che il plasma può raggiungere spontaneamente uno stato in cui la deformazione elicoidale rimane più ordinata: Quasi Singola Elicità (QSH). In queste condizioni, nella parte più interna del plasma si crea una regione calda ad elica [fig. 14.6(d)] che viene osservata da uno strumento che ricostruisce i profili di temperatura con tecniche tomografiche [13]. La QSH può manifestarsi sia spontaneamente sia in conseguenza di un OPCD. Studi teorico-modellistici presso RFX hanno mostrato che ciò corrisponde ad una tendenza intrinseca del plasma e la QSH può pertanto essere perseguita agevolandone la formazione [14].

Un fondamentale passo in avanti è stato compiuto con la realizzazione su RFX-mod, di un sistema di **controllo attivo (feedback)** di instabilità, come parte del programma per ottenere un plasma più ordinato. A questo scopo, RFX-mod è stato dotato di un apparato di 192 bobine a sella, disposte su 4 file poloidali, per un totale di 48 posizioni toroidali (si veda fig. 14.8). Ogni bobina è alimentata e controllata in modo indipendente.

Queste bobine non sono da confondersi con le bobine usate per accendere la corrente di plasma e il campo magnetico toroidale, viste nel capitolo 8: mentre queste ultime servono per creare i campi magnetici di equilibrio, poloidale B_θ e toroidale B_T , le bobine a sella servono per creare un campo radiale B_r , perpendicolare sia a B_θ , sia a B_T , e diretto verso l'interno della ciambella del plasma.

Infatti, l'idea principale del controllo attivo è che le instabilità (cioè, le "eliche") del plasma producono un piccolo campo magnetico radiale B_r , che può essere misurato. Se varie eliche si sommano, come quando si **bloccano in fase** [figura 14.6(a)], questo campo magnetico può essere anche cospicuo: è come se ci fosse un "buco" in una camera d'aria di una bicicletta, che determina la fuoriuscita di aria.

Ma se è possibile misurare il campo magnetico, è possibile anche *agire dall'esterno*, in modo da cancellare il campo magnetico radiale dovuto alle eliche,

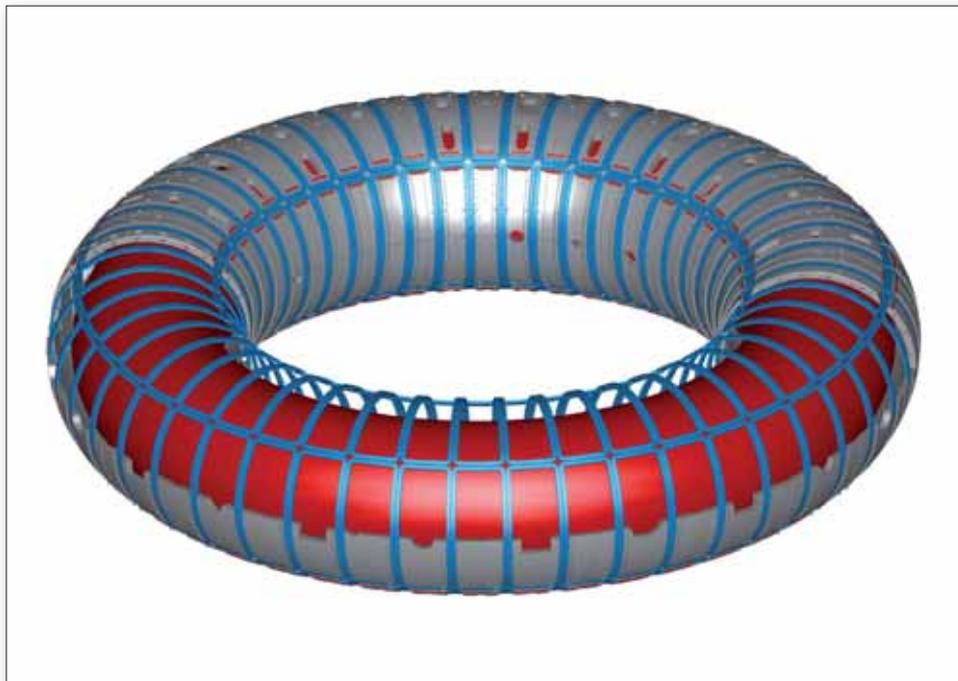


Fig. 14.8 Ricopertura della parete esterna di RFX con le bobine di controllo attivo azzurre ("feedback")

mettendo quindi una "toppa" magnetica alla ciambella di plasma. Questo è più o meno quello che fanno le bobine attive. Tuttavia questa azione, per essere efficace, deve essere anche veloce: si tenga conto che l'azione delle bobine attive in RFX-mod avviene su tempi dell'ordine del millesimo di secondo! Nel corso del 2005 e del 2006 sono stati provati diversi scenari sperimentali, allo scopo di ridurre il più possibile le deformazioni del plasma: questo tipo di sperimentazione è riconosciuto come fondamentale anche in prospettiva, per le operazioni su ITER (vedi capitolo 12), che non potrà fare a meno di un sistema di **controllo attivo** (in feedback) delle instabilità del plasma.

I principali miglioramenti ottenuti con questo sistema in RFX-mod sono così riassumibili:

1. la durata della scarica di plasma è stata triplicata: in RFX-mod si raggiungono facilmente scariche della durata di 0.3 secondi (vedi fig. 14.9);
2. le perturbazioni di campo magnetico al bordo di RFX-mod (dovute alle instabilità di plasma) sono state ridotte di 10 volte (si veda fig. 14.10);
3. il tempo di confinamento dell'energia τ_E è stato raddoppiato.

Il feedback può essere applicato anche in combinazione con studi OPCD e di singola elicità-QSH: a questo proposito, uno dei risultati principali dell'applicazione combinata di OPCD e feedback è

la comparsa sistematica di stati a quasi-singola elicità-QSH.

La presenza contemporanea, in questo tipo di sperimentazione, dei tre scenari principali di miglioramento del confinamento di RFX è un segnale promettente per il futuro.

Scopo fondamentale degli esperimenti in RFX non è solo il raggiungimento di prestazioni sempre migliori, ma anche la caratterizzazione del plasma in un'ampia gamma di condizioni fisiche, che in molti casi ampliano quelle realizzabili nel Tokamak e nello Stellarator. A tal fine sono necessarie precise misurazioni delle caratteristiche del plasma stesso: densità; temperatura; potenza assorbita e dissipata; diffusione termica; trasporto di particelle; interazioni plasma-parete; livello di impurezze presenti. Gli strumenti di misura sono spesso dei piccoli "esperimenti" a sé stanti (detti *diagnostiche*) che richiedono sviluppo, manutenzione e attenzione continui.

Le misure effettuate richiedono poi uno sviluppo pa-

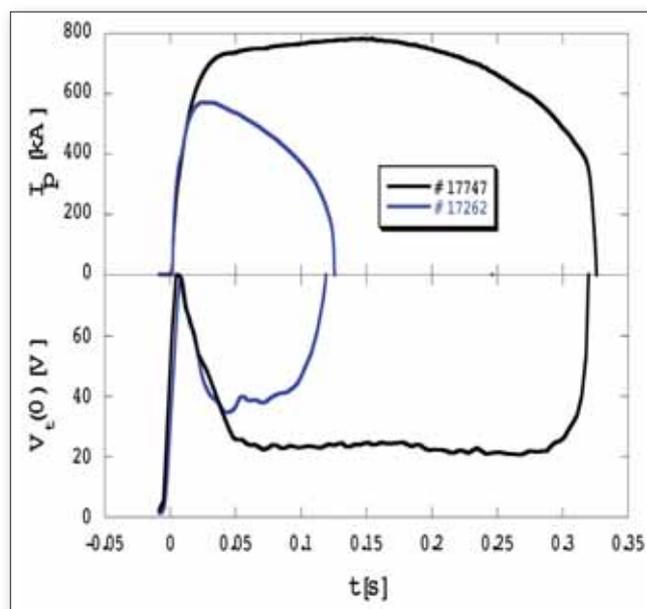


Fig.14.9 Effetti del controllo attivo sulle scariche di RFX: in blu, una scarica non controllata; in nero, una controllata. In alto, la corrente di plasma I_p in funzione del tempo, in basso la tensione applicata al plasma, V_c , nella stessa scala di tempo. Si nota la durata maggiore e la minore tensione applicata per la scarica controllata. La tensione è tanto maggiore quanto maggiori sono le perdite di potenza

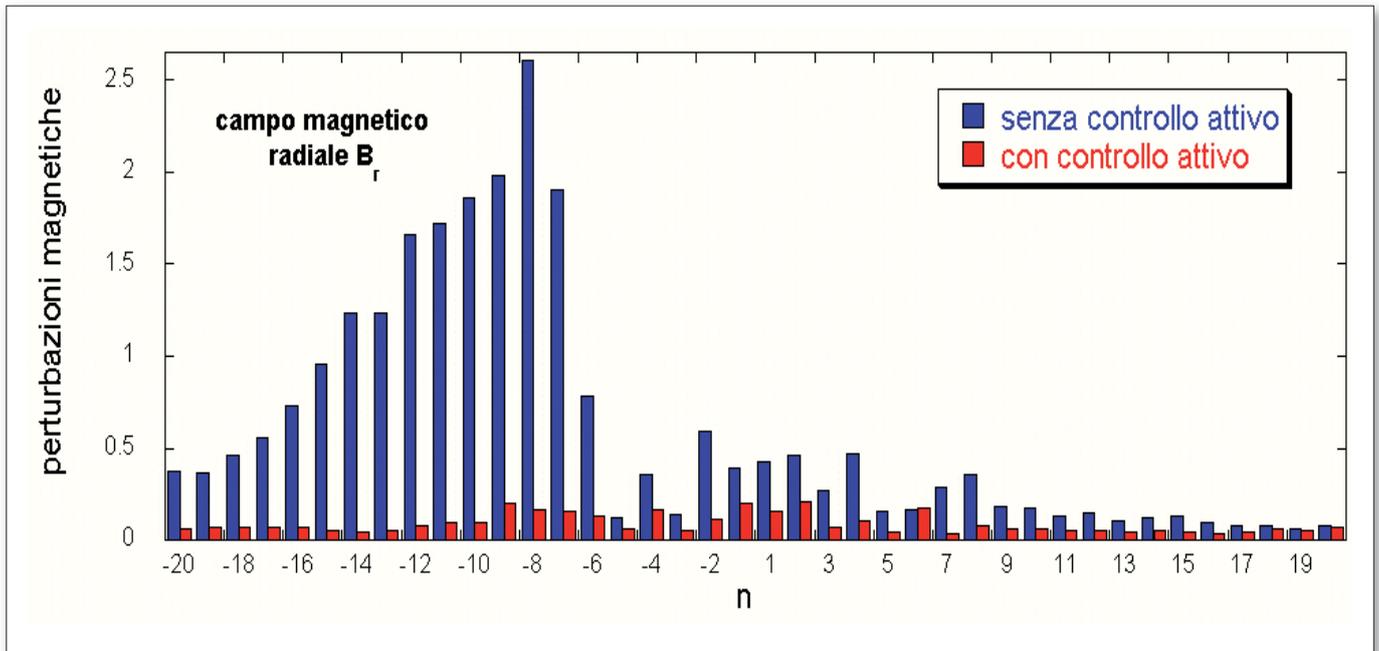


Fig. 14.10 Effetti del controllo attivo sulle scariche di RFX: in blu l'istogramma delle perturbazioni di campo radiale, B_r , senza controllo. In rosso, con il controllo le perturbazioni praticamente spariscono

parallelo di metodologie e di modelli matematici altamente sofisticati, che permettono di determinare le caratteristiche fisiche del plasma con ottima precisione e con elevata risoluzione sia spaziale che temporale. Pensate ad esempio che in RFX si misurano temperature di alcuni milioni di gradi centigradi, che variano

in tempi di millesimi di secondo! (vedi fig.14.11) Le informazioni e le tecnologie acquisite sono di vitale interesse per la conoscenza del comportamento del plasma in generale e per il progresso verso la realizzazione del reattore a fusione.



Fig. 14.11 Esempio di attività di sviluppo su una diagnostica di RFX: ottimizzazione del modulo orizzontale della tomografia a raggi X

Il Consorzio RFX, oltre alla sperimentazione sulla macchina RFX e all' impegno su ITER (vedi capitolo 12) e JET (cap.11), vede i ricercatori di Padova impegnati nello sviluppo di soluzioni tecnologiche innovative e di applicazioni industriali basate sull'utilizzo di plasmi.

Le condizioni fisiche di questi plasmi sono diverse da quelle di un plasma da fusione: per esempio, le temperature elettroniche sono dell' ordine di qualche elettronvolt, invece delle centinaia o migliaia che caratterizzano macchine come RFX (capitolo 14) o il JET (capitolo 11). Inoltre, gli ioni si trovano a temperatura ambiente, e il plasma è debolmente ionizzato, cioè la percentuale di elettroni e ioni liberi (vedi capitolo 5) è più bassa che nei plasmi da fusione (tipicamente, 1 particella ionizzata ogni 10000 particelle neutre). Per questo motivo, per queste applicazioni spesso si parla di **plasmi "freddi"** : tuttavia, molti dei fenomeni e dei problemi che si incontrano nei plasmi da fusione sono gli stessi che si incontrano nei plasmi industriali.

Nei paragrafi di seguito faremo riferimento a tre applicazioni sviluppate a Padova: il **Magnetron**, l'**ago al plasma**, il **motore MPD**.

15a - Il Magnetron

Presso il Consorzio RFX è in funzione un dispositivo di "Magnetron sputtering", nel quale è prodotto un plasma freddo e debolmente ionizzato (vedi fig. 15.1). Questo tipo di plasmi è generato producendo un campo elettrico che ionizza le particelle, e un campo magnetico che ha lo scopo di confinarle (similmente al campo toroidale di un Tokamak o un RFP, vedi capitolo 7).

Il plasma così prodotto può essere utilizzato per scopi applicativi, come la deposizione ("sputtering" da una targhetta) di strati sottili di materiali speciali su supporti di vario tipo. Lo sputtering ha trovato già ampia applicazione in vari settori industriali, come: trattamenti per il miglioramento di proprietà meccaniche (rivestimenti antiusura, indurenti...), ricoperture decorative (occhiali, orologi, bigiotteria, edilizia...); ottica (rivestimenti assorbenti o riflettenti, vetri e

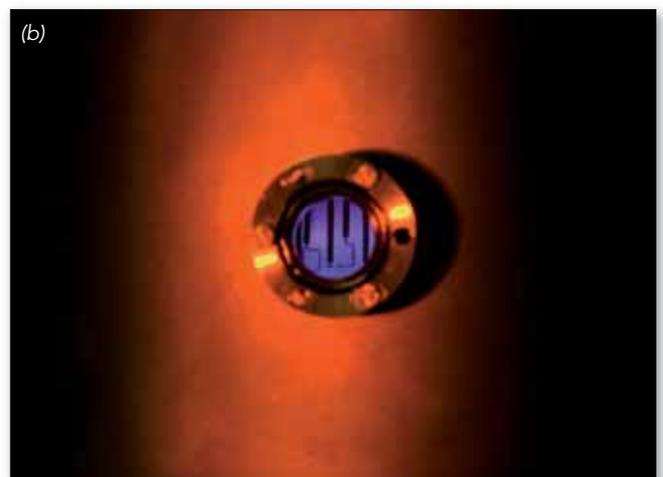


Fig. 15.1 Il Magnetron Sputtering operante a Padova presso il Consorzio RFX: (a) vista esterna della camera da vuoto; (b) foto del plasma del magnetron attraverso uno degli oblò della camera da vuoto

specchi architettonici, vetri selettivi...); chimica (rivestimenti anti-corrosione come nichelature); elettronica (semiconduttori, per es. il chip Pentium di un PC e lo strato di alluminio che ricopre un CD); medicina (protesi bio-compatibili, strumenti chirurgici).

Le proprietà dei materiali ottenuti (per es., durezza, resistenza all'usura, ecc.) e la riproducibilità della deposizione dipendono dalle caratteristiche del plasma prodotto nel dispositivo. Per questo motivo, l'ottimizzazione dei processi di deposizione richiede studi integrati di fisica e tecnologia del plasma, e ottimi sistemi di misura.

In particolare, nell'impianto realizzato a Padova sono stati messi a punto sistemi di **controllo attivo** a retroazione ("feedback") sulla densità di plasma e sulla pressione del gas di processo, in modo da migliorare la riproducibilità del processo di deposizione. Sono inol-

tre in corso studi di fisica di base del plasma di tipo Magnetron, volti a migliorare l'efficienza del dispositivo.

15b - Ago al plasma

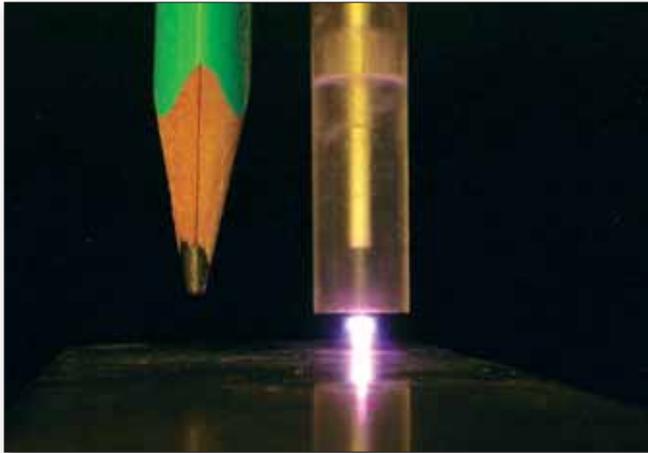


Fig. 15.2 Il dispositivo a bassa potenza ("ago") per applicazioni biologiche. Il plasma è di ridotte dimensioni, ed è prodotto a pressione atmosferica: non è quindi necessaria una camera da vuoto

Presso il Consorzio RFX è stata sviluppata, sulla base dell'esperienza di un gruppo di ricercatori dell'Università di Eindhoven (Olanda), una sorgente di plasma a bassa potenza (< 1 W) e a pressione atmosferica (diversamente dal Magnetron e il motore MPD, che vengono utilizzati in apposite camere da vuoto). Questo dispositivo viene chiamato anche "ago al plasma" (vedi fig. 15.2). Infatti, esso è particolarmente indicato per applicazioni biologiche e sterilizzazione di superfici sensibili (occhi, cavità dentali, ecc.): le basse potenze non producono danni termici ai tessuti. Per questo dispositivo è in corso la procedura di brevetto.

15c - Motori MPD per applicazioni spaziali

Per i futuri viaggi interplanetari di grandi astronavi (missioni verso Marte con pilota) le agenzie spaziali prevedono l'utilizzo di sistemi propulsivi alternativi a quelli esistenti, che sono normalmente basati su processi (chimici) di combustione di enormi quantità di propellente. Il Consorzio RFX, in collaborazione con ALTA-Centrosazio di Pisa e l'Agenzia Spaziale Europea (ESA), si è dedicato allo sviluppo di un propulsore **magneto-plasma-dinamico (MPD)**. In questo propulsore, l'accelerazione del propellente avviene mediante meccanismi di tipo elettromagnetico, in

particolare mediante l'interazione fra una corrente elettrica e un campo magnetico. Richiamiamo infatti qui la formula usata nel capitolo 7 per il confinamento magnetico, e che descrive la forza di Lorentz per unità di volume, quando la densità di corrente J e il campo magnetico B sono perpendicolari:

$$F = J \cdot B$$

Poiché la massa delle particelle cariche è piccolissima, si ottengono in questo modo delle velocità di espulsione del propellente gassoso anche 20 volte superiori a quelle ottenute nei normali propulsori chimici (vedi fig. 15.3).

Questo dovrebbe permettere di inviare a grande distanza nello spazio astronavi capaci di ospitare astronauti, e di ridurre i tempi della missione.

Fin dalla data della loro invenzione, nei primi anni '80, i propulsori MPD hanno però dimostrato bassi livelli di efficienza, il che ha impedito il loro utilizzo in reali missioni spaziali. Lo studio da parte di ricercatori del Consorzio RFX ha permesso di dimostrare come i bassi livelli di efficienza siano dovuti all'instaurarsi di una instabilità MHD [15], del tutto simile a quella che si riscontra per esempio nel plasma di RFX (capitolo 14).

È stato quindi sviluppato un sistema di controllo di tale instabilità che ha portato i propulsori MPD a livelli di rendimento tali da potere essere considerati seriamente per l'utilizzo in future missioni spaziali. Questo dispositivo di controllo si chiama KICO™ (KInk COntroller), ed è stato brevettato a nome del Consorzio RFX.

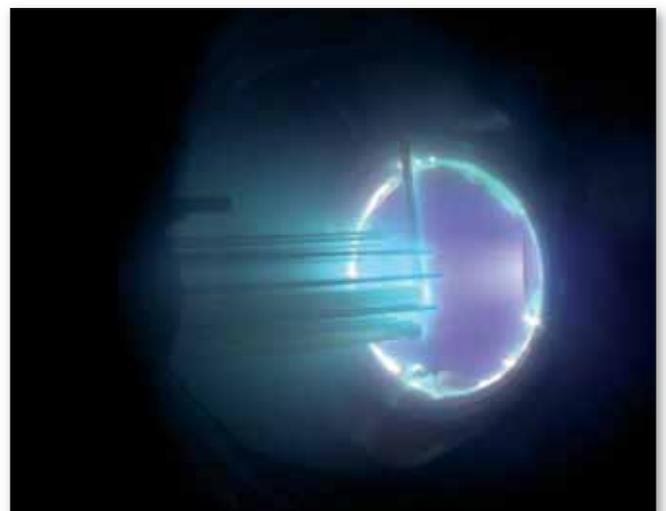


Fig. 15.3 Foto del motore Magneto-Plasma-Dinamico (MPD) operante presso ALTA-Centrosazio di Pisa. Il plasma è l'oggetto colorato blu-rosa, chiamato "pennacchio", che esce ad alta velocità dalla bocca del motore

Siamo arrivati alla fine di questo percorso lungo la storia e le prospettive future delle ricerche sulla fusione termonucleare controllata.

Per ragioni di sintesi abbiamo solo accennato alla storia altrettanto affascinante dei formidabili progressi tecnologici e scientifici che hanno consentito la costruzione di macchine sempre più perfezionate per lo studio della Fusione e che insieme hanno proposto nuovi ardui problemi ancora in fase di studio.

Sono state presentate in maggior dettaglio le macchine che utilizzano due tipi di configurazione magnetica (il Tokamak, capitoli 10-11, e il Reversed-Field Pinch - RFP, capitolo 14).

Nel Tokamak, benché ci sia uno sfruttamento non ottimale dell'energia magnetica a disposizione e si debba ricorrere a intensi riscaldamenti ausiliari (descritti nel capitolo 9), è possibile ottenere in modo riproducibile plasmi a livelli elevatissimi di temperatura e densità. Lo studio del criterio di Lawson (capitolo 6) ci ha evidenziato che temperatura, densità e tempo di confinamento vanno mantenuti elevati per l'intera durata della scarica e contemporaneamente.

La ricerca oggi consiste nell'estendere quanto più possibile i limiti di temperatura, densità, durata della scarica e potenza prodotta dalla fusione. Come risultato di questo intenso sforzo, i Tokamak sono le uniche macchine che, negli anni '90, hanno prodotto una quantità significativa di potenza da fusione (16 MW al JET nel 1997). Per questo motivo, il prossimo passo nel cammino verso la fusione è la costruzione del To-

kamak ITER, il cui nome non a caso significa "la via": esso infatti è un elemento fondamentale nello sviluppo sulla fusione, che avvicina in termini temporali la data del possibile sfruttamento commerciale di un reattore a fusione.

Questa data, se verranno assicurati i necessari finanziamenti, e se i ricercatori avranno successo nel risolvere gli ultimi problemi scientifici e tecnologici ancora aperti, si colloca intorno alla metà di questo secolo. Questa prospettiva è molto importante se teniamo conto del fatto che, dati gli scenari ambientali non rassicuranti che ci vengono prospettati dagli scienziati, lo scenario energetico della seconda metà del secolo è particolarmente preoccupante (vedi Appendice).

Abbiamo visto che il Consorzio RFX partecipa in maniera diretta e attiva a ITER, in particolare tramite il progetto, la costruzione e lo sviluppo di un'importante componente, cioè l'iniettore di neutri per il riscaldamento del plasma (NBI).

Per ottenere l'obiettivo finale sarà in ogni caso necessario approfondire lo studio e la comprensione dei plasmi confinati dal campo magnetico, in modo da permettere la riduzione delle dimensioni e della complessità di una futura centrale di produzione di energia [25].

A questo sforzo contribuiranno anche le macchine che sfruttano altre configurazioni magnetiche (per esempio, lo Stellarator o l'RFP) e quindi un ulteriore aspetto dell'attività del Consorzio RFX sarà la continuazione degli esperimenti attualmente in corso sulla macchina RFX.

A1 - La situazione attuale delle fonti di energia

L'Energia è un concetto insieme nuovo ed antico. Energia ($\epsilon\nu$ $\epsilon\rho\gamma\omega$ = in lavoro) è un termine dotto, introdotto nel linguaggio moderno da D'Alembert nella Encyclopédie alla fine del 1700. Recentemente è diventato vocabolo comune, il cui significato è ben noto, così come è noto che l'energia di un tipo si può trasformare, o tutta o in parte, in altro tipo di energia. In questo senso, nel linguaggio comune (ma anche nel linguaggio tecnico) si parla spesso in modo improprio di *produzione di energia*: tuttavia, l'energia

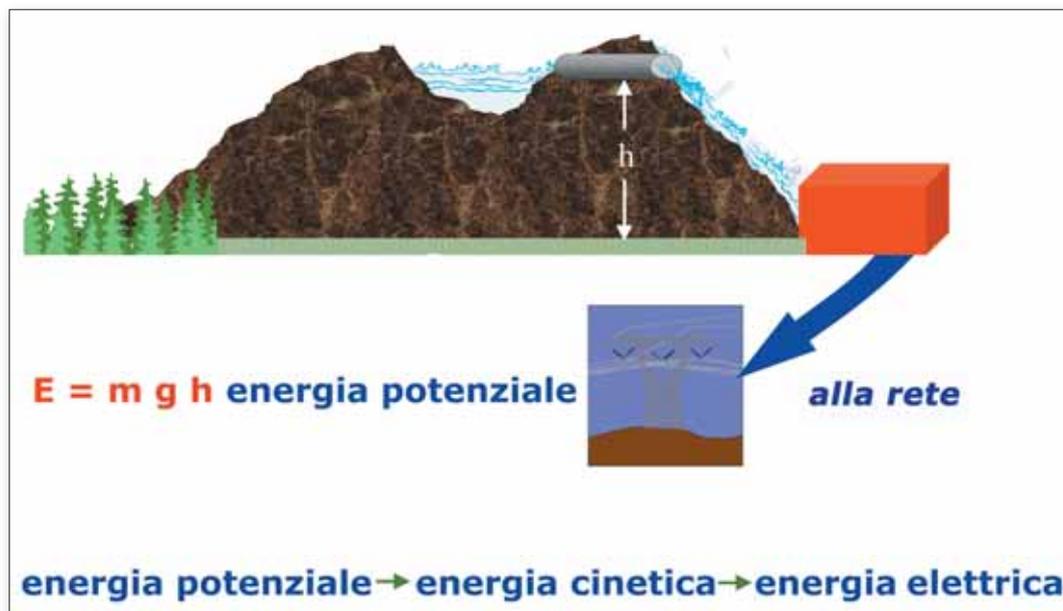


Fig. A.1 Esempio di trasformazioni successive dell'energia

non può essere prodotta, ma solo convertita da una forma più "grezza" a una forma più facilmente utilizzabile dall'uomo. Per esempio, una diga può trasformare l'energia potenziale dell'acqua posta a monte (forma "grezza") in energia cinetica, che è più direttamente utilizzabile dall'uomo, tramite per es. una turbina (vedi fig. A.1).

La conversione di una forma di energia in un'altra implica però sempre una perdita di energia utile, normalmente sotto forma di calore (per esempio, l'attrito del rotore della turbina), o sotto forma di sotto-prodotti di una reazione chimica o nucleare. Non esiste quindi una fonte di energia che abbia solo vantaggi, ma qualsiasi forma di sfruttamento energetico implica anche svantaggi.

Fino a circa un secolo fa anche nel mondo industrializzato, ma ancora oggi in innumerevoli regioni della Terra, le fonti di energia più impiegate sono state l'energia umana e l'energia animale; di largo impiego pure le energie ricavate dall'acqua, dal vento, dalla legna, dal sole.

Oggi, l'evoluzione della società umana richiede un grande apporto di energia per la moderna agricoltura, per la sanità pubblica, i trasporti, l'istruzione (scuola), ecc. Le fonti più utilizzate per la produzione di energia elettrica sono quelle indicate in fig. A.2. Purtroppo la maggior parte dell'energia proviene dall'uso di **combustibili fossili**: la combustione di carbone o metano

o petrolio fornisce energia impiegata per i sistemi di riscaldamento, per il funzionamento di veicoli, aerei, navi, e per la produzione di energia elettrica, che è un tipo di energia che può essere trasferita a grandi distanze con basse perdite ed è di facile impiego. Uno schema di una centrale elettrica che utilizza combustibili fossili è

mostrato in fig. A.3-a: il combustibile viene bruciato in presenza di ossigeno, scalda dell'acqua fino alla produzione di vapore, il quale fluisce attraverso una turbina. La turbina è collegata al rotore di un generatore elettrico, che produce elettricità. Nel mondo, le centrali termoelettriche producono il 63% dell'elettricità mondiale (fig. A.2): tuttavia, la combustione dà come sotto-prodotto l'anidride carbonica (CO_2) assieme a molte altre sostanze inquinanti.

L'**energia idroelettrica** usa l'energia potenziale di acqua posta in alta quota in bacini montani, che cadendo agisce su una turbina e un generatore elettrico, producendo elettricità. Il principio è simile a quello di una centrale termoelettrica: la differenza è che il mezzo che fa girare la turbina è l'acqua, e non

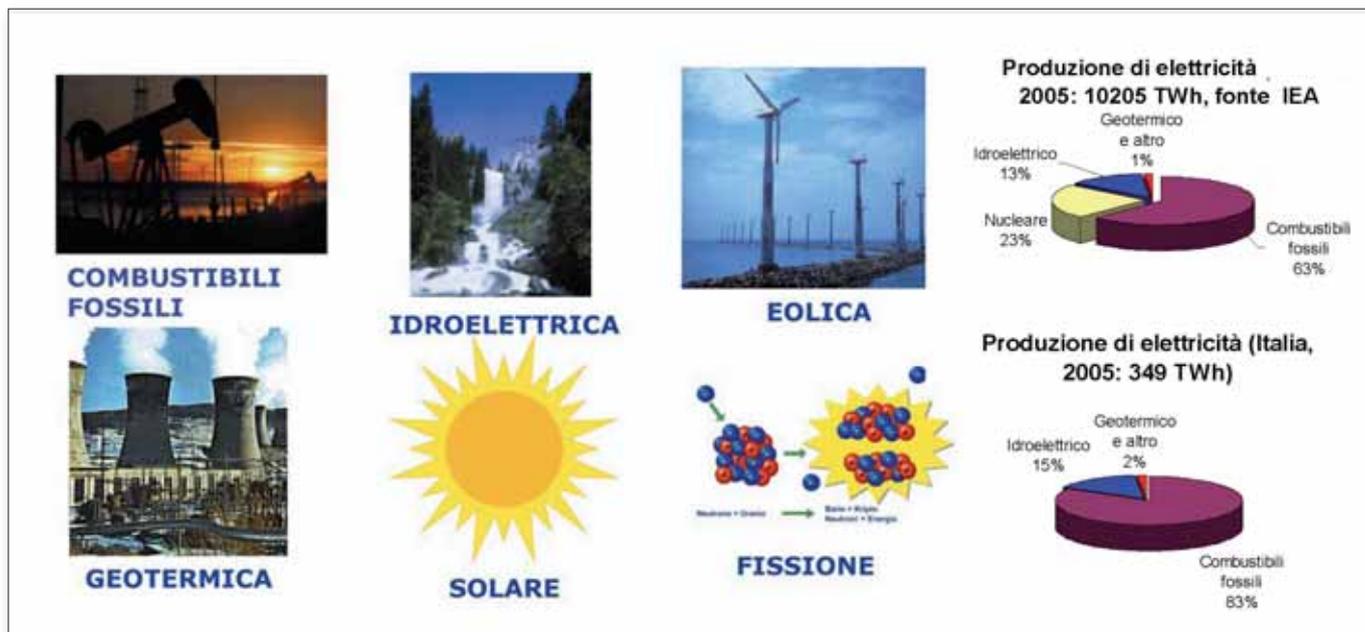


Fig. A.2 Alcune comuni fonti di energia e il loro peso per la produzione di energia elettrica

il vapore (fig.A.3-b).

Per aumentare la potenza prodotta e per produrla solo quando serve, è possibile costruire delle dighe, che accumulano acqua in modo da creare un bacino artificiale. L'acqua viene quindi incanalata in speciali tubi, detti *condotte forzate*, che convogliano l'acqua ad alta velocità verso le turbine. Questi sistemi possono essere molto grandi: la centrale di Itapu, fra il Brasile e il Paraguay, genera 9000 MW elettrici. E' in operazione dal 1984. Attualmente, il 13% dell'elettricità mondiale è di origine idroelettrica: uno degli svantaggi dell'energia idroelettrica però è proprio l'impatto ambientale e sociale della costruzione di dighe, nonché il fatto che può essere utilizzata solo in Paesi montani o che dispongono di grandi salti naturali, come grandi cascate.

L'energia eolica (fig. A.3-c) è una delle fonti di energia più antiche: le navi a vela e i mulini a vento sono stati utilizzati fin dalla notte dei tempi per convertire l'energia del vento in energia meccanica. Nei tempi moderni, le turbine eoliche sono utilizzate per produrre elettricità. Una turbina consiste in un grande rotore con tre pale, che viene messo in azione dal vento (fig. A.3-c). L'energia eolica genera solo lo 0.3% del fabbisogno mondiale di elettricità, ma le sue capacità sono in aumento. Eolica è per il 20% l'elettricità della Danimarca, il 6% in Germania, e il 5% in Spagna. Anche in questo caso, i limiti sono la localizzazione geografica, gli ampi spazi necessari

(circa 490 km² per un impianto da 1000 MW), e l'impatto ambientale (le turbine sono molto rumorose e non tutti gradiscono la loro presenza nel paesaggio).

L'energia geotermica usa il *calore endogeno* della Terra per generare elettricità: la temperatura all'interno della Terra aumenta infatti da 17 a 30°C per 1 km di profondità. Si può pertanto costruire un pozzo, iniettare dell'acqua e recuperare il vapore per azionare una turbina, come nelle centrali termoelettriche (fig. A.3-d). Talvolta il vapore fluisce spontaneamente in superficie come conseguenza di attività vulcaniche residue (vedi gli impianti di Larderello in Toscana e gli impianti geotermici in Islanda). Anche in questo caso, la localizzazione geografica è uno svantaggio notevole, e comunque le potenzialità sono molto limitate.

L'energia solare è in realtà il motore di qualsiasi attività sulla Terra: anche il petrolio è indirettamente energia solare accumulata dalla fotosintesi di antiche piante, il cui materiale organico si ritiene si sia accumulato e trasformato sottoterra durante intere ere geologiche. L'uso diretto dell'energia solare è basato sul fatto che il Sole a perpendicolo all'equatore invia 1000 W per metro quadro (costante solare). E' una quantità di energia enorme: tuttavia, solo una parte può essere convertita in elettricità. Attualmente, l'energia del sole può essere catturata usando il **solare fotovoltaico**: infatti, una cella fotovoltaica al silicio (Photovoltaic Cell-PV) converte fino al 15% di

questa energia. In Europa centrale, questo significa che un pannello solare di 1 m² posto sul tetto di una casa produce 120 kWh all'anno. Questo valore aumenta di molto per es. in Italia meridionale, dove 1 m² di pannello produce dai 180 ai 210 kWh all'anno. Attualmente, il solare fotovoltaico produce solo lo 0.01% dell'elettricità mondiale: uno dei maggiori ostacoli è il costo di un impianto. Tuttavia il solare fotovoltaico è un settore attualmente in fortissima espansione.

Invece di usare celle fotovoltaiche (PV), l'energia del sole può essere utilizzata per produrre energia in un sistema termico (**solare termodinamico**). In questo tipo d'impianto, degli specchi parabolici concentrano la luce diretta del sole su un tubo ricevitore. Dentro il tubo scorre un fluido (detto *fluido termovettore* perché è adatto a trasportare calore), che assorbe l'energia e la trasporta in un serbatoio. Alla fine, il serbatoio è in contatto termico con uno scambiatore di calore, che genera vapore e alimenta una turbina, secondo gli schemi tradizionali già visti per i combustibili fossili e per l'energia geotermica.

Nel **progetto Archimede** dell' ENEA [16] (vedi anche fig. A.3-e), sviluppato in collaborazione con l'ENEL, come fluido termovettore si userà una miscela di sali fusi (60% nitrato di sodio e 40% nitrato di potassio), che permette un accumulo in grandi serbatoi e una

temperatura di esercizio molto elevata (fino a 550°C).

L'energia nucleare da fissione (il cui principio è stato illustrato nel capitolo 3) è attualmente interamente utilizzata per produzione di energia elettrica. Uno schema di una centrale a fissione è indicato in fig. A.3-f: il nucleo centrale (reattore) è costituito da tre componenti principali, il *combustibile* (Uranio, spesso arricchito nell'isotopo U-235), il *moderatore* (prevalentemente acqua o grafite), e il *refrigerante* (acqua o gas). I neutroni prodotti per fissione nel combustibile e rallentati nel moderatore cedono la loro energia cinetica al refrigerante che agisce come fluido primario di una centrale di tipo termoelettrico. Il reattore si dice critico quando i neutroni prodotti eguagliano quelli assorbiti nei vari materiali del nocciolo o sfuggiti all'esterno del nocciolo stesso.

Il controllo di questa condizione viene assicurato attraverso l'uso di barre che assorbono neutroni, dette *barre di controllo*, immerse nel nocciolo del reattore. I prodotti delle reazioni di fissione e delle altre reazioni con neutroni sono radioattivi e quindi le scorie dei materiali della centrale devono essere trattate con tecniche particolari e una parte di esse immagazzinata in siti geologici profondi (*depositi permanenti*). Attualmente le centrali nucleari a fissione producono il 23% dell' energia elettrica mondiale. Per misurare la quantità di energia posseduta da una



Fig. A.3-a Schema di principio dell'impiego di combustibili fossili per la produzione di energia elettrica

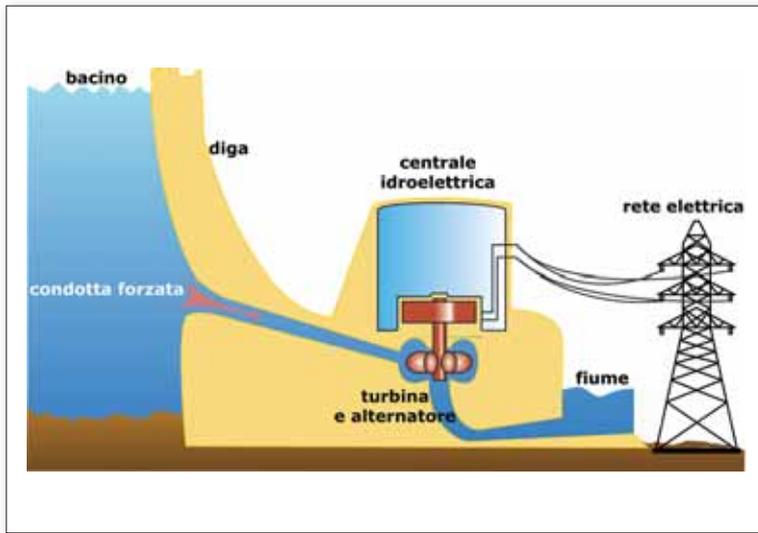


Fig. A.3-b Schema di una centrale idroelettrica



Fig. A.3-c Impianto ad energia eolica

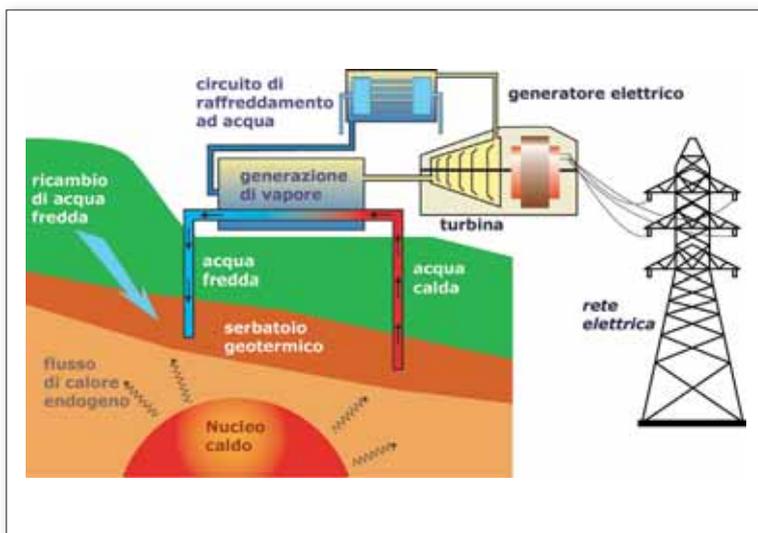


Fig. A.3-d Schema di una centrale geotermica



Fig. A.3-e Impianto ad energia solare (solare termodinamico)

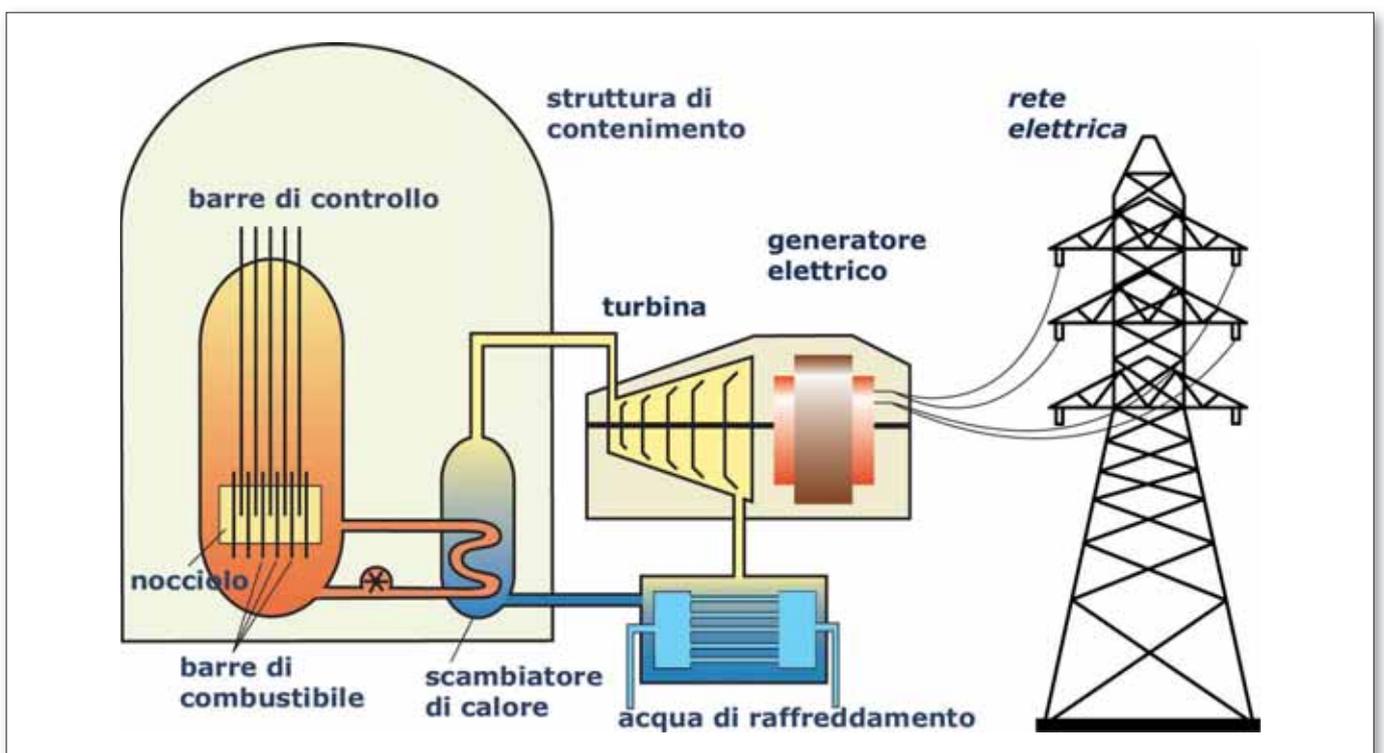


Fig. A.3-f Schema di una centrale nucleare a fissione

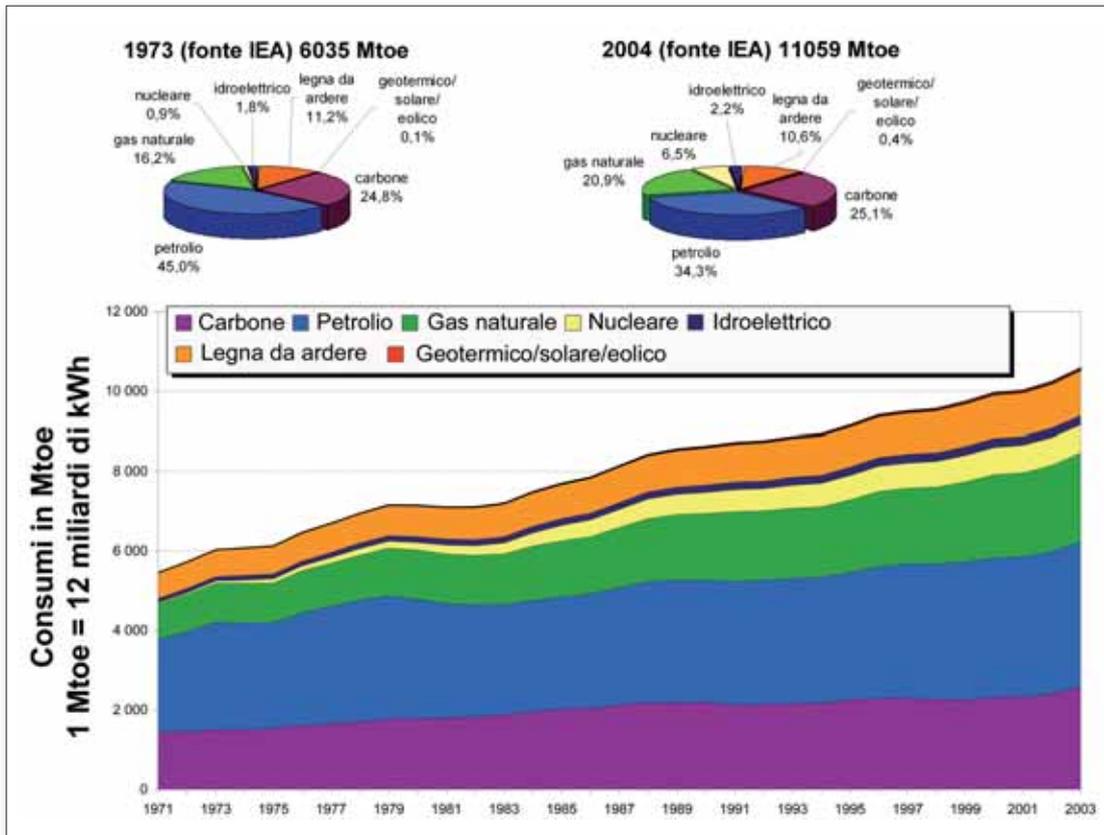


Fig. A.4 Impiego delle fonti di energia tra il 1971 e il 2003. Fonte IEA, Key World Energy Statistics, 2006 [17]

certa sorgente e per poterla confrontare con l'energia prodotta da un'altra sorgente si è introdotta una comoda Unità di Misura internazionale, il "Million Tons of Oil Equivalent" (Mtoe), l'energia equivalente a quella racchiusa in un milione di tonnellate di petrolio. Come equivalente elettrico, 1 Mtoe equivale a 12 miliardi di chilowattora (kWh), cioè a 12 tera-Wattora (TWh).

La figura A.4 mostra l'evoluzione dal 1971 ad oggi del contributo delle varie fonti al bilancio energetico mondiale: è interessante osservare la crescita percentuale dell'energia ottenuta dal gas naturale e dalla fissione, e la diminuzione percentuale dell'energia ricavata dal petrolio. Il consumo totale nel 2004 è stato di circa 11000 Mtoe, cioè 11 Gtoe (1 Gtoe = 1 giga-toe = 1000 Mtoe), così ripartiti: 2.7 Gtoe per il carbone, 3.8 per il petrolio, 2.3 per il gas naturale, 0.7 per il nucleare, 0.2 per l'idroelettrico, 1.1 per la legna da ardere (prevalente-

mente nei Paesi in via di sviluppo), e 0.04 Gtoe per geotermico/solare/eolico.

Le fonti dell'Agenda Internazionale dell'Energia (IEA, un organismo dell'O.C.S.E.) riferiscono che, in uno scenario "normale", per il 2030 il consumo crescerà del 50%, toccando i 16.5 Gtoe. Ovviamente, la stima può essere errata per difetto o per eccesso; è interessante notare

che negli ultimi anni le stime sono state errate per difetto.

La ripartizione dei consumi energetici totali in ciascun Paese è però assai diseguale, come mostrato in fig. A.5: si noti in particolare la crescita percentuale dei consumi di Cina e India, saliti in vent'anni dall'8 al 17%; le previsioni dell'IEA dicono che la sola Cina dovrebbe consumare il 16% dell'energia mondiale

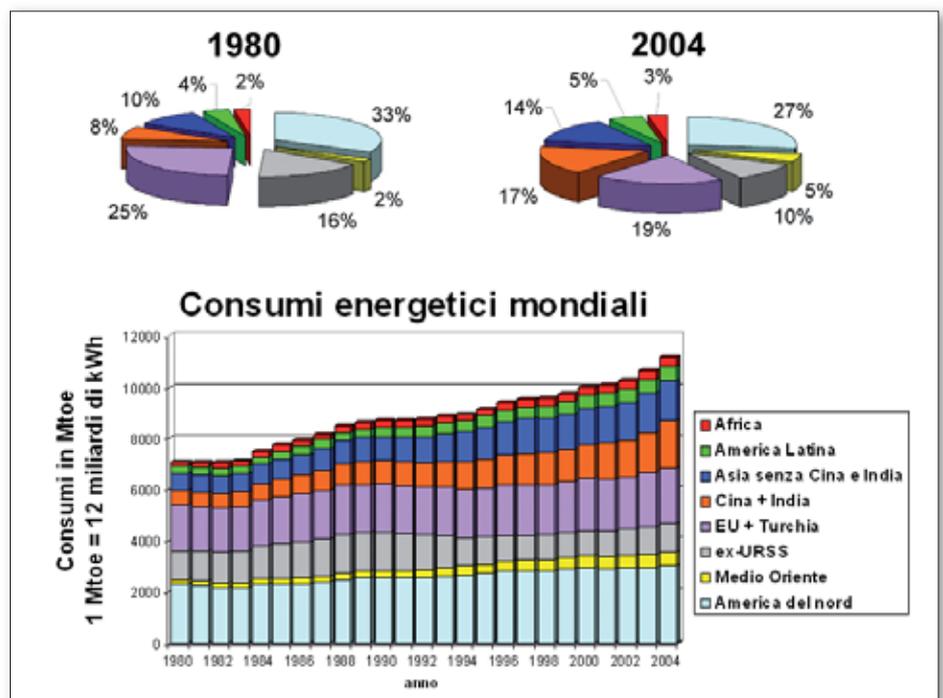


Fig. A.5 Consumi energetici mondiali fra il 1980 e il 2004. Fonte DOE, Dipartimento dell'Energia degli USA [18]

| Riserve (in Gtoe = 1000 Mtoe) | accertate | stimate |
|--|-----------|---------------------------------|
| Carbone 36% Europa; 30% Asia; 30% Nord America | 700 | 3400 |
| Petrolio 65% Medio Oriente; 10% Europa; 10% Centro e Sud America; 5% Nord America | 150 | 300 (+500 non convenzionale) |
| Gas Naturale 40% Europa; 35% Medio Oriente; 8% Asia; 5% Nord America | 150 | 400 |
| Uranio (²³⁵U reattori termici) 25% Asia; 20% Oceania (Australia); 20% Nord America (Canada); 18% Africa (Niger) | 60 | 250 |
| (²³⁸U reattori veloci) | 3500 | 15000 |
| Deuterio | -- | 5×10 ¹¹ |
| Litio terrestre | -- | 21000 |
| Litio (acqua marina) | -- | 4×10 ⁸ |
| Energia Solare per anno | 130000 | -- |

Tab. A.6 Tabella delle disponibilità di fonti di energia. Fonte: World Energy Council, 2004 Survey of Energy Resources, Judy Trinnaman e Alan Clarke (redattori), Elsevier Science (settembre 2004). Per il litio e il deuterio, i dati sono proiezioni

nel 2030. In termini di potenza media utilizzata pro capite, attualmente i consumi energetici della Cina sono sotto la media mondiale: 1.6 kW per persona, da confrontare con i 2.5 kW di media, e gli 8.2 kW per persona nell'OCSE (dati IEA 2004 [17]). È quindi prevedibile un notevole aumento nei prossimi anni.

Questo aumento è inevitabile se si ipotizza che le condizioni di vita degli abitanti dei Paesi attualmente in via di sviluppo possano progressivamente migliorare.

La scelta delle varie forme di energia non è un problema socio-politico semplice: dipende infatti da molti fattori, come la disponibilità di risorse, il suo costo in relazione alle condizioni particolari di un Paese, all'affidabilità della

centrale e alla protezione dell'ambiente [19].

Per quanto riguarda la disponibilità, la tabella A.6 dà un'idea delle risorse disponibili previste, espresse in Gtoe. Tenuto conto del tasso attuale di consumo, mentre per il carbone le disponibilità accertate sono dell'ordine di 200 anni, per il petrolio la disponibilità è limitata: essa è di circa 40 anni secondo le stime attuali, per il cosiddetto "light oil" ("petrolio leggero", cioè quello che si estrae dai normali pozzi petroliferi). Tale disponibilità cresce se si includono anche giacimenti non convenzionali, indicati in inglese come "heavy oil" ("petrolio pesante", cioè fanghi, scisti bituminosi, ecc.) che ora non sono economicamente vantaggiosi, ma che lo potreb-

bero diventare nel caso di crescita consistente del prezzo del petrolio.

C'è poi da dire che, secondo la teoria sviluppata negli anni '50 dal geologo Marion King Hubbert, la produzione di petrolio calerebbe prima che i giacimenti fossero esauriti del tutto, seguendo cioè una

| FONTI DI ENERGIA vantaggi e svantaggi | | |
|--|---|---|
| Combustibili fossili | <ul style="list-style-type: none"> •alta densità di energia •facile trasporto •larga disponibilità | <ul style="list-style-type: none"> •producono CO₂ e altre sostanze inquinanti •limitati geograficamente •soggetti a esaurimento |
| Idroelettrica | <ul style="list-style-type: none"> •senza CO₂ •tecnologia semplice | <ul style="list-style-type: none"> •dighe •limitata geograficamente |
| Eolica | <ul style="list-style-type: none"> •senza CO₂ | <ul style="list-style-type: none"> •ampio spazio •limitata geograficamente |
| Geotermica | <ul style="list-style-type: none"> •senza CO₂ | <ul style="list-style-type: none"> •molto limitata geograficamente |
| Solare | <ul style="list-style-type: none"> •senza CO₂ •disponibile quasi ovunque | <ul style="list-style-type: none"> •basso rendimento •ampio spazio •costosa |
| Fissione | <ul style="list-style-type: none"> •senza CO₂ | <ul style="list-style-type: none"> •scorie •sicurezza |

Tabella A.7 Vantaggi e svantaggi delle varie fonti attuali di energia

curva a campana con un picco massimo di produzione, chiamato "picco di Hubbert". Raggiunto il picco, la produzione cala perché il prezzo cresce: secondo la teoria, il picco corrisponderebbe a circa metà della disponibilità totale di materia prima. Questa teoria rimane però difficile da applicare, in quanto è arduo stimare a priori la disponibilità totale di una materia prima, come il petrolio.

Un altro svantaggio del petrolio rispetto al carbone è l'elevata localizzazione geografica: oltre il 65% delle riserve stimate si trovano in Medio Oriente. Si noti anche per confronto, in tabella A.6, l'enorme quantità di energia che viene inviata dal Sole sulla Terra, pari a 130,000 Gtoe all'anno.

Un modo semplificato di evidenziare i vari aspetti delle fonti di energia è mostrato in Tabella A.7: ogni sorgente di energia è infatti caratterizzata da vantaggi e svantaggi, come spiegato all'inizio del para-

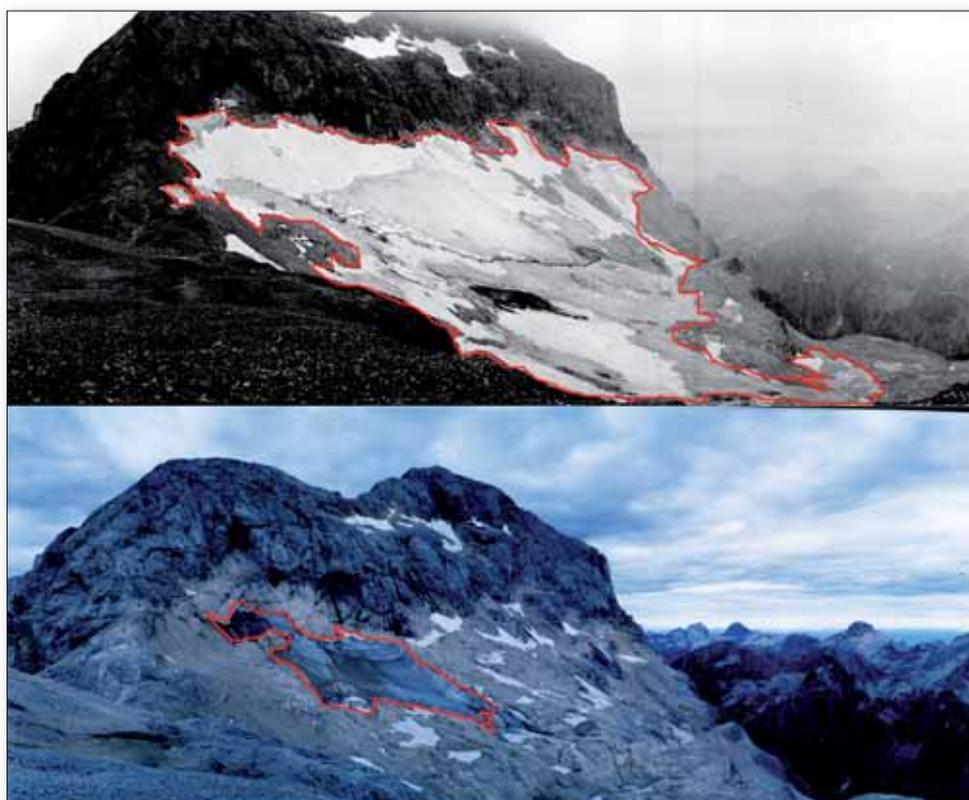


Fig. A.8 Ghiacciaio del Tricorno (Slovenia) in due immagini: quella in alto è stata scattata il 13 agosto 1976, quella in basso il 16 agosto 1998. È evidente la recessione del ghiacciaio (contorno rosso), avvenuta in soli 22 anni. Archivi dell'Istituto Geografico Anton Melik ZRC SAZU, Lubiana (Slovenia). Foto di Jernej Gartner, gentilmente fornita da Mihaela Triglav, Istituto Geodetico Sloveno, Jamova 2, Lubiana

grafo. Per i combustibili fossili, come noto, il grosso problema è costituito dalla produzione di CO₂ i cui effetti sul clima ("effetto serra") sono diventati oggetto di preoccupazione da parte degli scienziati a partire dagli anni '90. Secondo studi effettuati in vari

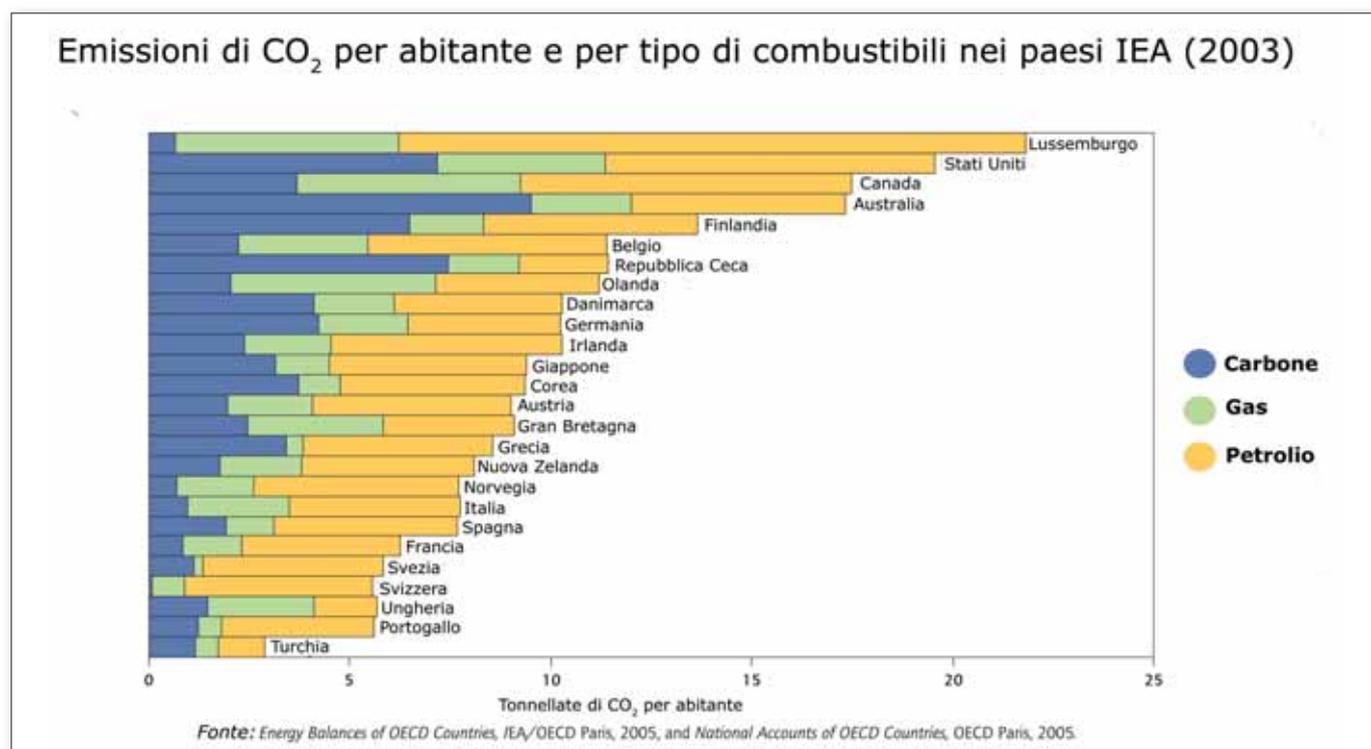


Fig. A.9 Emissioni di anidride carbonica nei paesi dell'OCSE. Dati IEA [17]

Paesi, l'aumento di CO₂ nell'atmosfera causa un piccolo, ma costante, aumento della temperatura della Terra. Varie organizzazioni si interessano di questo fenomeno, fra cui la più importante è la Commissione Internazionale per i Cambiamenti Climatici (IPCC, sito internet <http://www.ipcc.ch/>) che accoglie centinaia di esperti provenienti da oltre 100 Paesi del mondo. E' proprio vero che l'aumento di CO₂ ha un effetto sul clima? Nel XX secolo le temperature medie si sono alzate di 0.6 °C. I dieci anni più caldi dal 1800 ad oggi (cioè, da quando le temperature vengono misurate con i termometri) sono tutti successivi al 1990. I ghiacciai hanno cominciato a ritirarsi: in fig. A.8 è evidente il ritiro del ghiacciaio del Tricorno (Triglav, in Slovenia) dal 1976 al 1998.

In un anno in Italia si produce una quantità di CO₂ pari a circa 7 tonnellate per ogni abitante, tanta quanta è contenuta in 10 milioni di m³ di aria.

E a livello mondiale le cose non vanno molto meglio, con una media di 4 tonnellate per ogni abitante, come mostrato in fig. A.9. In questo modo, negli ultimi 300 anni il contenuto di CO₂ nell'atmosfera è aumentato del 30% rispetto alla quantità costante presente nell'atmosfera fino agli inizi del XVIII secolo. Il contenuto atmosferico di anidride carbonica sta

crescendo rapidamente e gran parte degli esperti sono concordi nel ritenere il fenomeno non più sostenibile dall'eco-sistema.

E' chiaro a questo punto che il modo migliore per bloccare gli effetti nocivi della produzione eccessiva di CO₂ è bloccarne l'emissione in atmosfera: in particolare, guardando la tabella A.7, vanno privilegiate l'energia solare, l'eolico, l'idroelettrico, che sono tutti esempi di fonti di energia che non producono CO₂. Anche nuovi tipi di centrali a fissione nucleare possono fornire una parte della soluzione [20].

Tuttavia, gli investimenti pubblici in campo energetico sembrano essere inconsistenti con le intenzioni politiche dichiarate per esempio nel famoso Protocollo di Kyoto [21]. Infatti, gli investimenti pubblici in ricerca e sviluppo in ambito energetico hanno avuto un picco nel 1981, come effetto dell'impennata dei prezzi petroliferi dovuti alla guerra arabo-israeliana e alla guerra Iran-Iraq, ma sono scesi nel 2002 a 8 miliardi di dollari nei Paesi dell'OCSE (vedi fig. A.10). Come riferimento, gli investimenti medi in ricerca e sviluppo nel settore dell'energia ammontano allo 0.25% del prodotto interno lordo (PIL) dei paesi O.C.S.E, con un massimo dello 0.85% del Giappone e un minimo dello 0.02% per la Turchia. L'Italia si situa

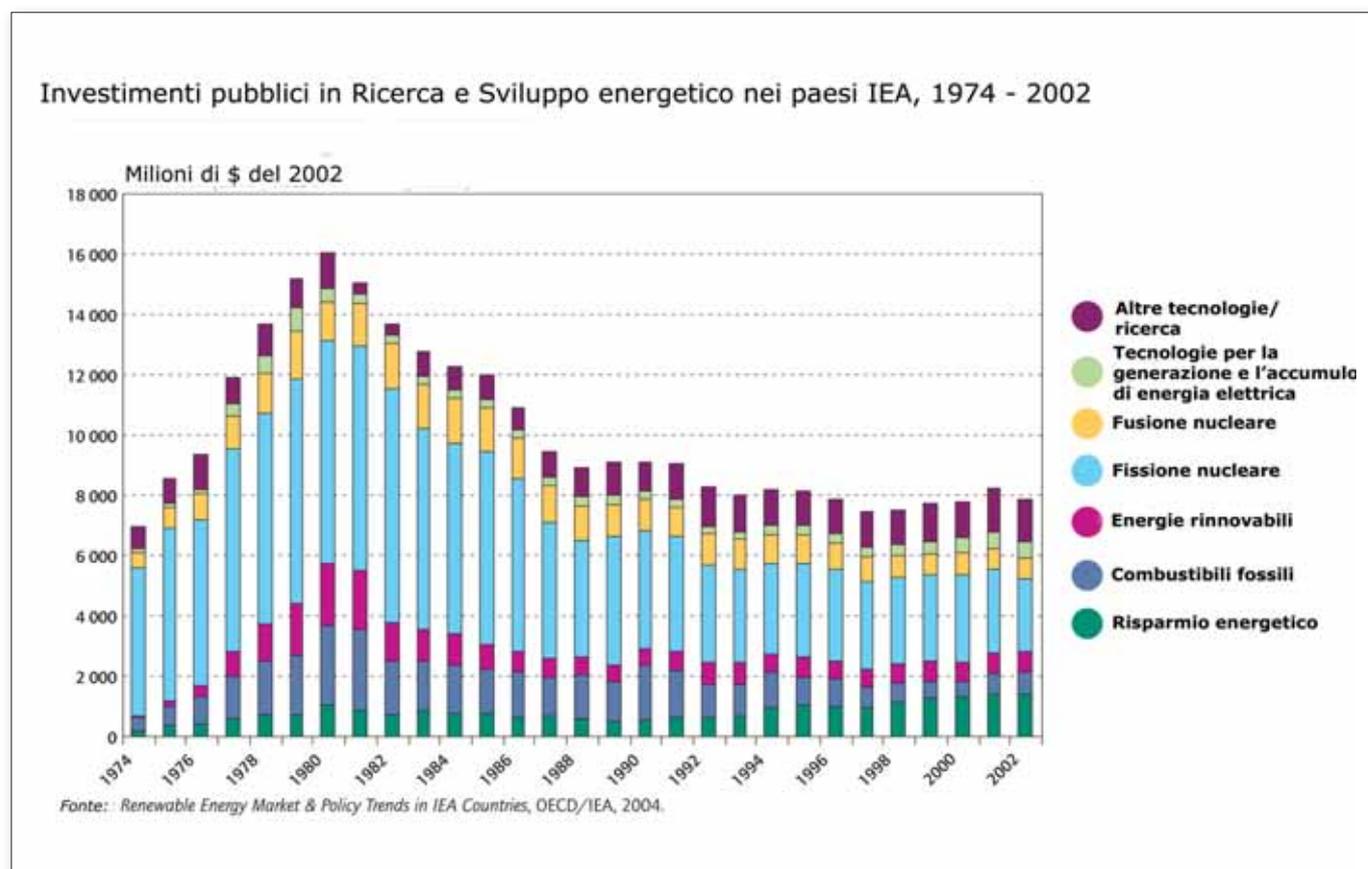


Fig. A.10 Investimenti pubblici in campo energetico dal 1974 al 2002, nei Paesi IEA

nella media, con 0.21% [17].

Per tutti questi motivi, e in particolar modo per sensibilizzare l'opinione pubblica e i governi a un uso più consapevole delle fonti di energia, spesso si parla di costi "esterni" di una fonte di energia, cioè i costi associati ai danni ambientali (per esempio, emissioni di CO₂ e gas inquinanti, disastri ambientali come il naufragio della petroliera Exxon Valdez nel 1989, ...) e a impatti negativi sulla salute. Questi costi non vengono inclusi di solito nelle valutazioni economiche di una fonte di energia (costi diretti) che usualmente contemplano il reperimento e il trasporto dei combustibili, la costruzione e l'esercizio di una centrale, il riciclaggio delle scorie e lo smantellamento della centrale stessa a fine esercizio, il deposito delle scorie e il loro eventuale riciclaggio.

Tuttavia, questi costi esterni non sono piccoli: una stima sicuramente non eccessiva per il carbone e il petrolio fornisce circa 5-6 centesimi di € per kWh prodotto [22], confrontabili quindi col costo convenzionale di un kWh (9 centesimi nel primo trimestre del 2007 [23]). Per il nucleare, idroelettrico, fotovoltaico ed eolico il costo esterno è nettamente più basso, meno di 1 centesimo di € per kWh prodotto.

A2 - Il possibile contributo della Fusione

Come visto nel cap.13, la Fusione potrà entrare nell'ambito della produzione commerciale di energia elettrica a partire dalla seconda metà del XXI secolo. Questa energia primaria potrà essere utilizzata anche per altre applicazioni, come la produzione di **idrogeno** per i trasporti, e altre forme utili per l'industria. È difficile dire oggi come avverrà la penetrazione della fusione nel mercato globale dell'energia. Qui si possono solo sottolineare alcuni fattori che, come visto precedentemente, entreranno nella competizione con le altre fonti di energia primaria appena illustrate.

Come visto in precedenza in questo capitolo, tre sono i fattori principali che determinano la scelta dell'uso di una determinata fonte di energia: disponibilità, protezione ambientale, costi. Consideriamo dapprima la questione della disponibilità. Come abbiamo visto nel capitolo 13, nelle centrali a fusione della prima generazione i combustibili saranno il **deuterio** e il **trizio**. Il deuterio si ricava dall'acqua marina: in 50 litri di acqua ci sono poco meno di 2 g di deuterio, quindi possiamo affermare che i depositi potenziali di deuterio siano di fatto infiniti (si veda la Tabella A.6). La quantità di energia ricavata dai 2 g

di deuterio è confrontabile con: l'energia da combustione di 2 hl di nafta, o di 3 q di carbone, o di fissione di 30 g di Uranio naturale (fig. A.11).

L'altro combustibile, il trizio, è radioattivo e decade β con un tempo di dimezzamento di 12.33 anni, emettendo un elettrone con energia di 18.6 keV. La radiazione emessa dal trizio non penetra la pelle umana, per cui esso è dannoso solo se ingerito o respirato.

Il trizio esiste in natura disperso nell'alta atmosfera in tracce per reazione del-

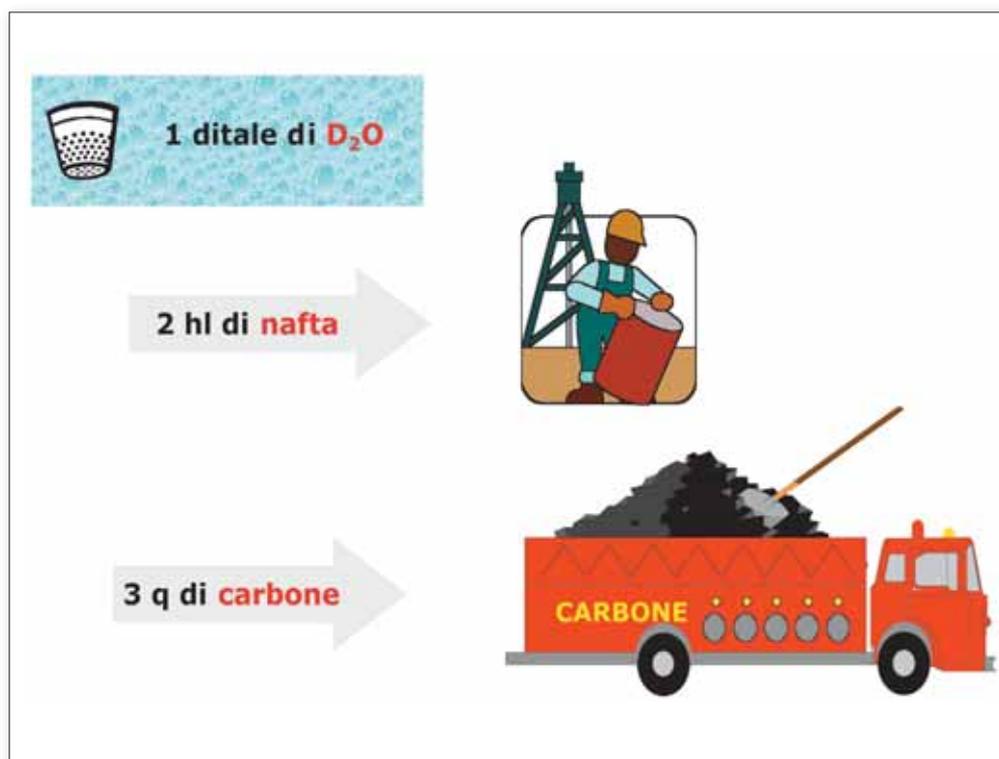


Fig. A.11 Equivalenza in termini di energia sviluppata fra differenti fonti primarie

l'azoto atmosferico con i raggi cosmici [24]:



e come tale non è quindi utilizzabile per l'uso nelle centrali a fusione. Attualmente esistono quantità limitate di trizio come sottoprodotti della produzione delle bombe atomiche e delle centrali a fissione del tipo ad acqua pesante. Ma le quantità di trizio disponibili sono di gran lunga insufficienti se confrontate ai bisogni di una centrale a fusione (consumo di 130 kg di trizio all'anno per una centrale da 1 GW elettrico; sono anche necessari 90 kg di deuterio, ma abbiamo visto che il deuterio è abbondante nell'acqua marina).

Per questo motivo, come illustrato nel cap.13, la centrale a fusione dovrà essere autosufficiente in trizio. Il trizio verrà prodotto continuamente durante l'operazione a partire dalle reazioni dei neutroni con il litio del mantello che circonda il plasma. Quindi il litio costituisce, assieme al deuterio, la materia prima delle centrali a fusione. Per una centrale da 1 GW elettrico il bisogno di litio sarà di circa 30/70 t per anno. Le riserve terrestri stimate di litio corrispondono a $1,2 \cdot 10^4$ t ($2,1 \cdot 10^4$ t Gtoe). Inoltre, il litio è presente nella misura di 0.1 mg/litro nell'acqua di mare, il che corrisponde a $3 \cdot 10^{11}$ t ($4 \cdot 10^8$ Gtoe). Si può quindi concludere che le riserve di combustibile per la fusione siano di fatto illimitate.

Dal punto di vista della sicurezza, nel paragrafo 13c abbiamo visto che un vantaggio della Fusione è che, anche nel caso di incidente all'interno della centrale, le strutture interne del reattore non possono fondere e la barriera di contenimento dei materiali radioattivi non si può rompere. Non è quindi richiesta l'evacuazione della popolazione residente vicino alla centrale. Sempre nel cap.13 si è anche visto che non sarà necessario per le scorie radioattive un sito geologico di deposito permanente, ma solo un deposito transitorio (che potrebbe anche essere la centrale stessa, per un massimo di 100 anni) in vista del loro riciclaggio per l'uso nelle centrali successive.

Ancora dal punto di vista della sicurezza, un importante vantaggio della fusione è il fatto che non è necessario alcun trasporto di materiale radioattivo, né come combustibile, né come scoria.

Oltre a questi vantaggi, bisogna segnalare che la produzione di energia con la fusione non comporta l'emissione di CO₂ in atmosfera. L'insieme di questi fattori ha come conseguenza che, in termini di protezione ambientale, la fusione ha prospettive molto favorevoli.

Le prospettive economiche dipenderanno, da un lato, dal costo delle altre fonti energetiche nella seconda metà del XXI secolo, dall'altra dagli investimenti nel settore nei prossimi decenni.

- 1 - H.A.B. Bodin e A.A. Newton, "Reversed Field Pinch Research", NUCLEAR FUSION, Vol. 20, October 1980, pag. 1255.
- 2 - G. Gamow, "Biografia della Fisica", Mondadori (1974)
- 3 - A. Di Meo, "Storia della Chimica", ETN (1994)
- 4 - P. Caldirola, R. Pozzoli, E. Sindoni, "Il Fuoco della Fusione Termonucleare Controllata", Mondadori (1984)
- 5 - G. Persico, "Gli atomi e la loro energia", Zanichelli
- 6 - G.L. Rogoff, IEEE TRANSACTIONS ON PLASMA SCIENCE, editoriale del Vol.19, December 1991, pag. 989.
Un estratto si trova al sito: <http://www.plasmacoalition.org/what.htm>
- 7 - R.D. Petrasso, "Plasmas everywhere", NATURE, Vol.343, 4 Jan. 1990, pag.21
- 8 - T.J.M. Boyd e J.J.Sanderson, "The Physics of Plasmas", Cambridge University Press, 2003.
- 9 - Informazioni generali al sito di ITER: <http://www.iter.org>
- 10 - European Fusion Development Agreement (EFDA): "A Conceptual Study of Commercial Fusion Power Plants", EFDA-RP-RE-5.0. Disponibile online al sito: http://www.efda.org/eu_fusion_programme/downloads/scientific_and_technical_publications/PPCS_overall_report_final.pdf
- 11 - Il semplice modello del filo è stato suggerito da Dominique F. Escande, e si può trovare nell' articolo "Single helicity: a new paradigm for the Reversed-Field Pinch", PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED FUSION, Vol. 42, December 2000, pag. B243.
- 12 - Si veda per esempio il sito <http://www.cmso.info/>
- 13 - Una descrizione delle tecniche tomografiche di RFX si trova nell' articolo di Paolo Franz, "Soft X-ray tomographic imaging in the RFX reversed field pinch", NUCLEAR FUSION, Vol. 41, June 2001, pag. 695.
- 14 - S. Cappello, "Bifurcation in the MHD behaviour of a self-organizing system: the reversed-field pinch (RFP)", PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED FUSION, Vol. 46, December 2004, pag.B313.
- 15 - M.Zuin e coautori, "Kink instability in applied-field Magneto-Plasma-Dynamic thrusters", PHYSICAL REVIEW LETTERS Vol. 92, June 2004, pag. 225003; Federica Bonomo e coautori, "Ultraviolet tomography of kink dynamics in a magnetoplasma-dynamic thruster", PHYSICS OF PLASMAS Vol. 12, September 2005, pag. 093301.
- 16 - Per il progetto Archimede si veda in rete: <http://www.enea.it/com/solar/index.html>
- 17 - IEA, "Key World Energy Statistics 2006", disponibile anche nel sito <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2006/key2006.pdf>
- 18 - "International Energy Outlook 2006", Report DOE/EIA-0484 (2006), Dipartimento dell' Energia, Washington, USA (2006). Scaricabile al sito <http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/world.html>
- 19 - Mario Silvestri, "Il futuro dell' energia", Bollati Boringhieri, 1988.

- 20 - Per una discussione recente sui temi dell' energia si veda anche E. Bellone, "Svegliamoci dal sonno energetico", LE SCIENZE, novembre 2006, pag.54.
- 21 - Il protocollo di Kyoto è consultabile online: http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php
- 22 - Commissione Europea, Relazione Tecnica finale, progetto ExternE (2005). Online al sito <http://www.externe.info/expoltec.pdf>
- 23 - Dati disponibili al sito dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas: <http://www.autorita.energia.it>
- 24 - E.L.Fireman, "Measurement of the (n,H³) Cross Section in Nitrogen and Its Relationship to the Tritium Production in the Atmosphere", PHYSICAL REVIEW, Vol. 91, 15 Aug. 1953, pag.922.
- 25 - Parte delle conclusioni sono basate sulle osservazioni introduttive del bel libro di Roscoe B. White, "The Theory of Toroidally Confined Plasmas", Seconda edizione riveduta (aprile 2006), Imperial College Press, pag. 2.

Tabella di conversione delle unità di misura dell'energia

L'energia, come spiegato nell'Appendice, può essere utilizzata in svariate forme: energia elettrica per l'illuminazione, energia termica per riscaldare una casa o per cucinare i cibi, energia chimica presente nella benzina di un'automobile, eccetera.

In Fisica l'energia è definita come la capacità di compiere lavoro, e come tale l'unità di misura dell'energia nel **Sistema Internazionale** (SI) è il Joule, corrispondente al lavoro compiuto da una forza di 1 Newton applicata per una distanza di 1 metro.

Il Joule è un'unità molto piccola: equivale a sollevare 100 grammi all'altezza di 1 metro (in pratica, sollevare una mela per un metro). Tuttavia, anche se la grandezza fisica è unica, in quanto tutte le forme di energia si equivalgono (in quanto sono tutte capacità di compiere un lavoro), spesso si usano unità di misura differenti, a seconda della quantità (piccola o grande) di energia da misurare.

Nella Tabella che segue sono riportate alcune unità di misura di energia comunemente usate, e la loro equivalenza in Joule.

| Unità di misura | Equivalenza in Joule | Esempio di applicazione |
|------------------------|---|---|
| 1 Joule = 1 J | 1 Newton × 1 metro | |
| 1 elettronvolt | $1.6 \cdot 10^{-19}$ J | Energia degli elettroni (cap.3-6) |
| 1 erg | 10^{-7} J | |
| 1 caloria = 1 cal | 4.19 J | Calore; energia contenuta nei cibi |
| 1 chilowattora = 1 kWh | 3.6×10^6 J = 3.6 MJ | Consumo energetico di un elettrodomestico |
| 1 toe | 41,870 MJ = $41.87 \cdot 10^9$ J | Fonti primarie di energia (Appendice) |
| 1 Mtoe | $4.19 \cdot 10^{16}$ J = 12 miliardi di kWh | Consumi energetici mondiali (Appendice) |

Acciaio ferritico-martensitico: si tratta di acciai inox con una percentuale variabile di Cromo, Manganese e Molibdeno. L'acciaio martensitico ha una alta percentuale di Cromo (12-14%), non è resistente alla corrosione come l'acciaio ferritico, ma può essere facilmente lavorato. L'acciaio ferritico è più resistente alla corrosione. Entrambi non contengono Nickel, e sono magnetici (a differenza degli acciai austenitici).

Adiabatico: (dal greco, $\alpha\text{-}\delta\iota\alpha\text{-}\beta\alpha\theta\omicron\sigma$, "non scambio calore") si dice di una trasformazione termodinamica in cui il calore scambiato con l'esterno è nullo, o trascurabile. Per estensione, in fisica dei plasmi si intende una trasformazione in cui il momento magnetico si conserva. Il momento magnetico è il rapporto fra energia cinetica delle particelle e il campo magnetico, in sostanza è una specie di "calore" diviso per l'intensità del campo.

Ampère: è l'unità di misura della corrente elettrica nel Sistema Internazionale (SI) delle unità di misura. Equivale al trasporto di una quantità di carica pari a 1 Coulomb in un secondo.

Bar: unità di misura della pressione. Non fa parte del Sistema Internazionale, ma è ampiamente usata nella pratica, soprattutto il suo sottomultiplo, il milli-Bar (mbar). Vale l'equivalenza $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$.

"Blocco in fase": è un fenomeno fisico per cui le fasi di alcune grandezze (perturbazioni, angoli, ecc.), inizialmente libere, poi si allineano su un valore comune a tutte. Un esempio tipico viene dall'astronomia: la Luna, che inizialmente aveva un periodo di rivoluzione intorno alla Terra diverso dal suo periodo di rotazione, sotto l'effetto dell'attrazione gravitazionale terrestre, ora ha i due periodi esattamente coincidenti (circa un mese).

"Campo vettoriale": è il modello matematico più ampiamente usato per descrivere per es. il campo elettrico e magnetico, e cioè come un vettore la cui lunghezza (che possiamo interpretare come l'intensità del campo) e direzione dipendono dalla posizione nello spazio.

Controllo attivo (feedback): sistema elettronico che, sulla base di misure di un sistema fisico, può agire attivamente, tramite degli attuatori, sul sistema, correggendone le deviazioni da un riferimento preimpostato. Esso permette quindi di controllare nel tempo l'evoluzione del sistema fisico.

Criterio di Lawson: è il criterio che si realizza quando la potenza prodotta per Fusione è maggiore o uguale alle perdite di energia da parte del plasma (per radiazione, trasporto di calore, ecc.). Nella sua forma sintetica, coinvolge il cosiddetto "prodotto triplo" $n T \tau_E$, prodotto di densità temperatura e tempo di confinamento dell'energia.

DEMO: è la centrale di dimostrazione che proverà la produzione netta e abbondante di elettricità da fusione nucleare: è il passo successivo a ITER.

"Deriva delle particelle": fenomeno per cui le particelle cariche non sono completamente confinate dal campo magnetico in cui sono immerse, ma tendono a scappare, per effetto della curvatura delle linee di campo, o per il fatto che il campo non è perfettamente uniforme.

Deuterio: è un isotopo pesante dell'idrogeno, che contiene nel suo nucleo sia un protone, sia un neutrone. La reazione di fusione più semplice da ricreare in laboratorio è quella che coinvolge un nucleo di deuterio e uno di trizio (vedi la voce "trizio" poco più sotto).

Divertore: sistema di pompaggio del gas combusto e delle impurezze provenienti dalle pareti della camera di scarica di una macchina di tipo Tokamak. E' basato su una configurazione a X del campo magnetico.

Effetto bootstrap: è un fenomeno dovuto alla curvatura del campo magnetico toroidale in un Tokamak, e che produce una corrente addizionale senza nessuna tensione applicata.

Nel Tokamak, come spiegato nel capitolo 10, esistono due componenti del campo: poloidale e toroidale. Le particelle che seguono le linee di forza poloidali, oscillando lungo delle traiettorie dette "a banana", si dicono "intrappolate"; quelle che seguono le linee di forza toroidali si dicono "passanti".

Fermiamoci a un dato raggio: se esiste un gradiente di densità, ci sono più particelle intrappolate che si muovono parallelamente al campo poloidale, e meno particelle che si muovono antiparallelamente (questo dipende dalla traiettoria a "banana" assunta dalle particelle intrappolate).

Poiché le collisioni, per ogni raggio, equilibrano il numero di particelle intrappolate e passanti, ne consegue direttamente che ci sono più particelle passanti che si muovono parallelamente al campo toroidale: questa è la corrente di bootstrap.

Effetto joule: fenomeno in base al quale un conduttore elettrico assorbe potenza e si scalda al passaggio di una corrente elettrica.

Elettrodi: sono due oggetti metallici, fra i quali viene applicata una tensione elettrica. Un esempio è dato dalla candela di un motore a scoppio: la tensione applicata fra il cilindretto centrale e la linguetta laterale produce la scintilla che causa lo scoppio della miscela aria e benzina.

E.N.E.A. : un tempo CNEN (Comitato Nazionale Energia Nucleare); ora è l'Ente nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, con sede a Roma. Sito internet www.enea.it

EURATOM: è la Comunità Europea per l'Energia Atomica, costituita a Roma contemporaneamente alla C.E.E. nel 1957. Si occupa di coordinamento delle ricerche europee in ambito nucleare.

eV : simbolo per l'elettronvolt. E' l'energia che assume un elettrone (elettron-) sottoposto a una differenza di potenziale di un Volt (-volt). Poiché la temperatura è legata all'energia cinetica media di un gas, esiste la relazione di equivalenza $1 \text{ eV} = 11605 \text{ K}$.

"Fase quiescente": è una fase in cui un sistema fisico riduce spontaneamente le fluttuazioni e la turbolenza.

I.A.E.A.: International Atomic Energy Agency; agenzia internazionale per l'energia atomica, con sede a Vienna, si occupa dello sfruttamento pacifico dell'energia nucleare.

Idrogeno: negli scenari energetici futuri, potrebbe essere una valida alternativa ai carburanti tradizionali, in particolare per il trasporto su strada. È importante sottolineare che l'idrogeno potrà essere solo un vettore energetico (alternativo all'energia elettrica), cioè occorre spendere altrove dell'energia per produrre idrogeno.

I.E.A.: International Energy Agency; agenzia internazionale per l'energia. Agisce come consulente di politiche energetiche in 26 Paesi, tutti appartenenti all'O.C.S.E. Si occupa di sicurezza energetica, sviluppo economico e protezione ambientale. Conduce un programma di ricerca energetica e di analisi statistiche che vengono sintetizzate in pubblicazioni a cadenza mensile (*monthly surveys*) e annuale (*Key world energy statistics* e *World energy outlook*).

IFMIF: International Fusion Materials Irradiation Facility; Impianto internazionale per irraggiamento di materiali per una centrale a fusione, che dovrebbe essere realizzato in collaborazione fra Unione Europea e Giappone.

Impurezze: in una macchina per la fusione, si intendono le tracce di elementi pesanti (Ossigeno, Carbonio, metalli) provenienti generalmente dalla prima parete. Avendo numero atomico superiore all'idrogeno e ai suoi isotopi, danno origine a ioni pesanti, che irradiano molta potenza e contribuiscono in modo sensibile al raffreddamento del plasma. La loro eliminazione dal plasma (per es., attraverso il divertore) è uno scopo primario in ITER e nei grandi Tokamak in genere.

Inconel: è un acciaio speciale, della famiglia delle leghe austenitiche al Nickel, resistente alle alte temperature, alla ossidazione e alle corrosioni.

Induttore: è un componente elettrico che immagazzina energia magnetica, e poi la può trasferire a un altro induttore a cui è accoppiato, tramite la legge di Faraday.

Iniettore di fasci di neutri: vedi N.B.I.

ITER: è la macchina che dovrà dimostrare, dal punto di vista scientifico e tecnologico, la praticabilità della fusione come fonte di energia primaria.

Legge di Ohm: in un resistore elettrico R , è la legge che lega corrente elettrica I e tensione applicata V , secondo la formula $V = R \times I$. Poiché la potenza trasferita al circuito è $P = V \times I$, la potenza che riscalda un resistore può essere anche formulata (legge di Joule) come $P = R \times I^2$

JET: Joint European Torus, è attualmente il più grande esperimento Tokamak di fusione europeo.

È situato nei laboratori di Culham (presso Oxford) dell'ente britannico per l'energia atomica (UKAEA) e gestito dall'UE attraverso EFDA (European Fusion Development Agreement).

"Leggi di scala": in fisica, si dice di un procedimento in cui si descrive per estrapolazione il comportamento di un sistema, in termini di parametri controllabili dall'esterno (per es., nel caso dei plasmi, la corrente, la densità e la temperatura), in una regione non esplorata dei parametri.

Magnetoidrodinamica (MHD): è un modello matematico usato per descrivere e interpretare le interazioni fra un campo magnetico (*magneto-*) e un fluido conduttore (*idro-dinamica*). Il plasma infatti è un fluido conduttore.

Mantello (inglese:blanket): è il guscio che racchiude la parte centrale di un reattore a fusione. Esso conterrà il Litio necessario alla produzione del Trizio.

NBI: Neutral Beam Injector, "iniettore di fasci di neutri", è un sistema di riscaldamento del plasma, basato sull'iniezione di particelle neutre ad alta energia nel plasma.

Neutrone: particella costituente (assieme al protone) il nucleo degli atomi. Ha praticamente la stessa massa del protone, ma non ha carica elettrica (da cui il nome). Non risente quindi dell'effetto di campi elettrici e magnetici, a differenza del protone e dell'elettrone.

O.C.S.E. (in inglese anche **O.E.C.D.**) è l'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico, nata su-

bito dopo la fine della Seconda guerra mondiale con lo scopo di sviluppare forme di cooperazione economica fra Paesi europei. Oggi conta 30 membri, tutte nazioni europee, più Turchia, Australia, Giappone, USA, Canada, Messico, Nuova Zelanda e Corea.

Particella alfa: è un nucleo di Elio, quindi composto da due protoni e due neutroni.

Plasma: il “quarto stato” della materia, in cui una gran parte degli atomi sono ionizzati, cioè sono separati nei loro componenti fondamentali, cioè ioni (nuclei totalmente o parzialmente ionizzati) ed elettroni. Alcuni esempi: il sole e le stelle; le lampade al neon; i fulmini; le aurore boreali; la ionosfera terrestre; e, ovviamente, i plasmi da fusione in laboratorio.

Poloidale: è la direzione del “giro corto” intorno al toro, cioè quello che attraversa il buco della ciambella concatenandolo nel suo cammino.

Prima parete: in un esperimento di fusione, e nei progetti di reattore a fusione, è la superficie materiale direttamente esposta al plasma. Essa, nelle macchine sperimentali, è costituita di materiale resistente ad alte temperature (mattonelle in grafite in RFX, ancora grafite o tungsteno in altre macchine). In ITER la prima parete sarà montata sui moduli fertilizzanti, e presenterà dal lato plasma una protezione in berillio su un substrato di rame.

Prodotto triplo: è il prodotto di densità, temperatura e tempo di confinamento dell’energia $nT\tau_E$ in un Tokamak o nei progetti del reattore a fusione. La condizione che il prodotto triplo sia maggiore di una certa quantità è un modo sintetico di esprimere la condizione perché un reattore a fusione produca più energia di quanta ne riceve (vedi capitolo 6 sul criterio di Lawson).

Progetto Archimede: è un progetto dell’ ENEA (in collaborazione con l’ENEL), sponsorizzato dal Premio Nobel Carlo Rubbia, che prevede l’utilizzo dell’energia solare in un circuito termodinamico, per la produzione finale di energia elettrica. La principale soluzione innovativa è l’uso di sali fusi di sodio e potassio come fluido termovettore.

RF: Radio Frequenza, è uno dei tipi di riscaldamento del plasma, basato sulla generazione di onde elettromagnetiche tramite antenne al bordo del plasma.

RFP = Reversed Field Pinch, “strizione a campo rovesciato”, è una configurazione magnetica per il confinamento di plasmi da fusione, utilizzata nell’ esperimento RFX di Padova.

RFX = Reversed Field eXperiment, “esperimento a campo rovesciato”, è l’esperimento su cui lavorano i ricercatori del Consorzio RFX di Padova.

Scarica (elettrica): è il fenomeno del processo di ionizzazione (breakdown elettrico), quando un gas rarefatto è sottoposto ad alte tensioni applicate, per es. in un tubo in vuoto. Con il nome di “scarica” si intende anche un singolo esperimento impulsato nelle macchine da fusione, per es. RFX o JET.

Schermo neutronico: nello schema di una centrale a fusione per la produzione di energia (ma anche in ITER), è un elemento metallico di protezione, posto immediatamente a ridosso della camera da vuoto (lato plasma), e il cui scopo è di ridurre i danni provocati dall’irraggiamento di neutroni alla camera da vuoto e alle bobine del campo toroidale.

Shear: (inglese, "sforzo di taglio") nel Reversed-field pinch (RFP) si intende la vicinanza nello spazio di linee di campo magnetico elicoidali con passo diverso. Nella teoria del RFP questo fatto è fondamentale nel determinare la stabilità e le proprietà di confinamento di questa configurazione.

Solenoide: è un avvolgimento elettrico di forma a spirale con passo molto breve, usato per creare un campo magnetico quasi uniforme al suo interno.

Strizione: è il fenomeno tipico delle configurazioni per il confinamento dei plasmi noti come *pinches*: un plasma di forma approssimativamente cilindrica viene "strizzato" dal campo magnetico che esso stesso forma. L'esempio più comune a tutti noi è il fulmine: una colonna di plasma viene potentemente compressa dal campo magnetico creato dalla intensa corrente che la attraversa, dando origine al tuono.

Superconduttore: materiale che, al di sotto di una temperatura critica, lascia passare corrente senza alcuna resistenza elettrica. In queste condizioni, la tensione elettrica applicata ai capi del superconduttore è nulla.

"Superfici magnetiche": sono delle superfici ideali, parallele in ogni punto alla direzione del campo magnetico.

Tesla: unità di misura del campo magnetico nel Sistema Internazionale (SI) delle unità di misura.

1 tesla = 1 newton/(1 Ampère × metro). È un'unità molto grande: per esempio, l'intensità del campo magnetico terrestre vicino alla superficie è di solo 0.0001 Tesla.

Tokamak: è la configurazione magnetica più utilizzata per confinare un plasma da fusione. ITER e JET sono due Tokamak.

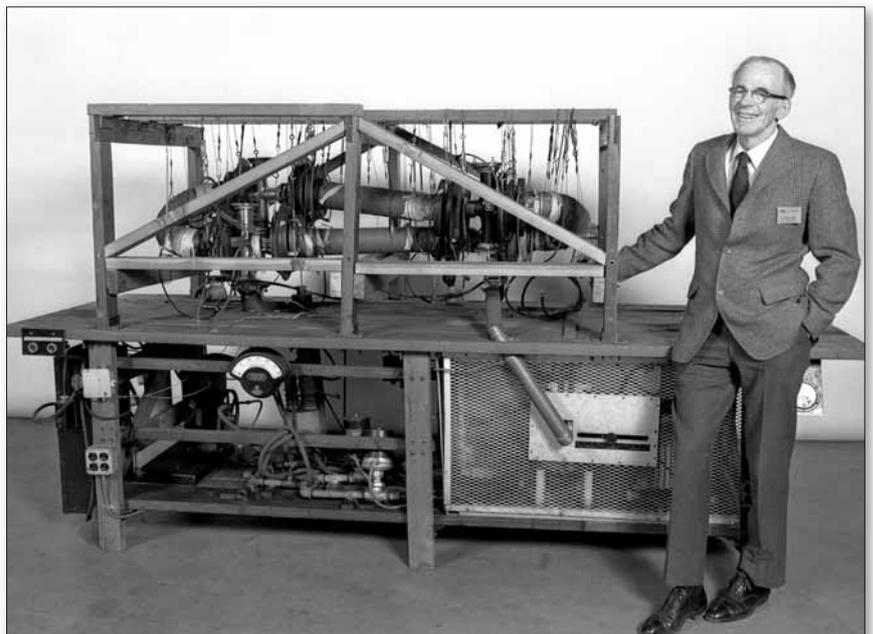
Toro: in geometria, è una superficie chiusa a forma di ciambella.

Toroidale: è la direzione del "giro lungo" intorno al toro, cioè quello che include il buco della ciambella senza mai attraversarlo.

Trizio: è un isotopo pesante e radioattivo dell'idrogeno, con un protone e due neutroni nel suo nucleo. È radioattivo con decadimento di tipo β (cioè, emette un elettrone nucleare), con tempo di dimezzamento di 12.33 anni. La reazione Deuterio-Trizio è la più semplice da riprodurre in un reattore a fusione.

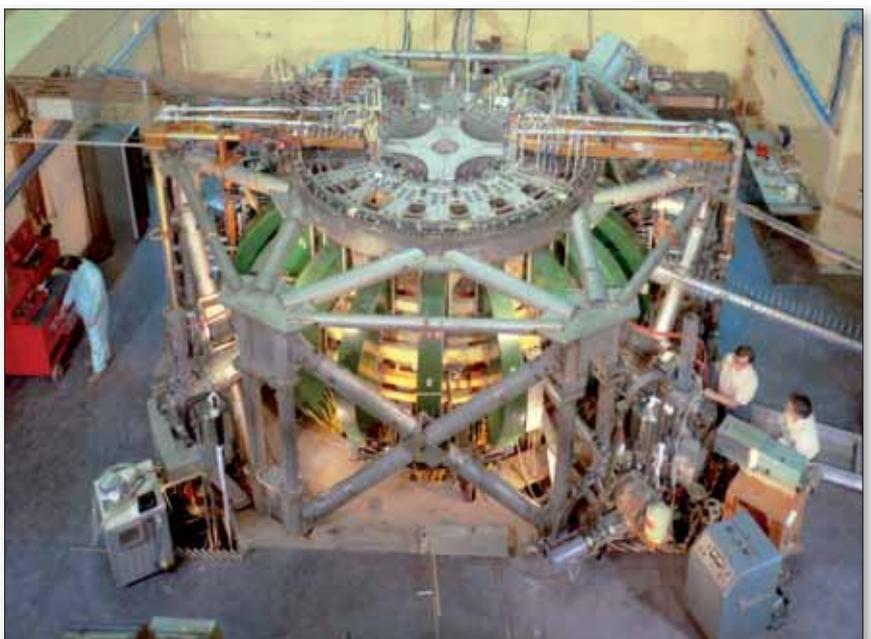
Tubi di Crookes: sono gli antenati dei tubi catodici e degli esperimenti lineari sui plasmi. Sono dei tubi conici di vetro, sviluppati a partire dal 1860 dal fisico inglese William Crookes sulla base del prototipo inventato da Heinrich Geissler, nei quali veniva creato il vuoto. L'applicazione di una tensione agli elettrodi (posti alle estremità del tubo) permetteva di creare una scarica e quindi un plasma. Applicando piccole quantità di materiale su uno degli elettrodi, Crookes individuò nel 1861 un nuovo elemento, il Tallio.

- 1920:** Eddington, astronomo, propone l'ipotesi che l'energia irradiata dal Sole sia prodotta da reazioni di fusione.
- 1929:** Atkinson e Houtermans pubblicano i primi calcoli teorici sulla quantità di energia che si può sviluppare nelle stelle per effetto della fusione nucleare.
- 1939:** viene pubblicata la teoria completa della fusione nucleare, ad opera di Hans Bethe.
- 1947 aprile:** primo plasma con una corrente di 1000 Ampère, creato in una camera di scarica di vetro, a forma di ciambella presso l'Imperial College, a Londra.
- 1950 ottobre:** I fisici russi Andrei Sakharov e Igor Tamm inventano un "reattore a confinamento magnetico" che possa sfruttare in modo pacifico la fusione. È la nascita del Tokamak.
- 1951 marzo:** Il presidente dell' Argentina Juan Perón dichiara di avere realizzato la fusione controllata: la notizia si dimostrerà falsa, ma causa una reazione immediata in USA, URSS e Gran Bretagna.
- 1951 maggio:** Stalin incarica Artsimovich di iniziare lo studio della fusione nell'URSS. Viene fondato quello che poi si chiamerà Istituto Kurchatov a Mosca.
- 1951 7 luglio:** Lyman Spitzer fonda il Progetto Matterhorn a Princeton, nel New Jersey, per lo studio dello "stellarator". A Los Alamos inizia il Progetto Sherwood sui "pinch" lineari. È l'inizio degli studi sulla fusione negli Stati Uniti d'America.
- 1952 1° novembre:** sopra l'atollo di Enewetak, nel Pacifico, viene fatta esplodere la prima bomba all'idrogeno (o bomba H), realizzata secondo gli studi del fisico ungherese (naturalizzato americano) Edward Teller e del matematico polacco Stanislaw Ulam.
- 1953 8 dicembre:** Eisenhower pronuncia il discorso "Atoms for peace" all'Assemblea generale delle Nazioni Unite.
- 1954:** Nei laboratori di Harwell (UK), iniziano gli esperimenti sulla macchina Zero Energy Thermonuclear Assembly (ZETA). Da questi studi prenderà forma l'idea del Reversed Field Pinch (RFP).



Lyman Spitzer con il prototipo dello Stellarator A.
Foto gentilmente fornita da Elle Starkman, Princeton Plasma Physics Laboratory

- 1955 agosto:** prima Conferenza di Ginevra sull'uso pacifico dell'energia atomica ("Atoms for Peace"). Vi partecipano oltre 1500 scienziati, con oltre 1000 articoli di contributo. Spitzer porta alla conferenza un prototipo della macchina che chiama *stellarator*.
- 1957:** **25 marzo** Con i Trattati di Roma viene istituita l'EURATOM
29 luglio Viene istituita l'IAEA, con sede a Vienna.
- 1958:** la ricerca sulla Fusione viene resa pubblica. I Russi pubblicano le ricerche quasi decennali su quattro volumi, redatti da M. Leontovic, dal titolo "Plasma Physics and Problems of Controlled Thermonuclear Reactions". In Occidente si viene a conoscenza degli studi russi sul Tokamak, fino ad allora coperti da segreto militare.
- 1958:** Seconda conferenza di Ginevra sull'uso pacifico dell' energia atomica. Scienziati americani, russi e britannici condividono le ricerche fino ad allora coperte da segreto militare.
- 1968:** Il Tokamak T-3 dei laboratori Kurchatov, a Mosca, raggiunge temperature di 100 eV (1 milione di K) e tempi di confinamento di 20 millisecondi.
- 1973:** Inizia l'epoca dei grandi Tokamak: T-10 a Mosca, Princeton Large Torus a Princeton. Iniziano i primi progetti del Joint European Torus (JET).
- 1974:** Alla Conferenza IAEA di Tokyo, J.B. Taylor presenta la sua teoria secondo la quale il Reversed-Field Pinch è una configurazione stabile, che può essere riscaldata col solo riscaldamento ohmico.
- 1974:** primi risultati di ETA-BETA I a Padova.
- 1977:** il Princeton Large Torus raggiunge temperature di 800 eV.
- 1978:** la Comunità Europea dà il via libera alla costruzione di JET. Il sito scelto è Culham, vicino a Oxford (UK).
- 1979:** primi risultati di ETA-BETA II: viene finalmente riprodotta la famosa "fase quiescente" vista su ZETA nel 1954.
- 1982 settembre:** alla 9ª Conferenza mondiale sulla Fusione Nucleare della IAEA, a Baltimora (USA), vengono presentati i primi risultati sull'uso del divertore sul Tokamak ASDEX.



Il Princeton Large Torus. Foto fornita da Elle Starkman, PPPL

- 1982 25 dicembre:** il Tokamak Fusion Test Reactor (TFTR) di Princeton realizza il suo primo plasma

1983: terminata la costruzione di JET.

1984: il progetto RFX viene affidato al gruppo di Padova.

1985: termina la costruzione del primo grande Tokamak giapponese, JT-60.

1988: Inizia l'attività di progetto di fattibilità di ITER, il passo successivo di JET, TFTR e JT-60. I Paesi partecipanti sono Comunità Europea, Giappone, Unione Sovietica e Stati Uniti. A Cadarache, nel sud della



TFTR nel 1989 (Elle Starkman, PPPL)

Francia, il Tokamak con bobine superconduttrici TORE-SUPRA produce i primi plasmi.

A Princeton, TFTR raggiunge la temperatura record di 3 keV (35 milioni di K).

1990: FTU (Frascati Tokamak Upgrade), dei laboratori dell'ENEA di Frascati, vicino a Roma, produce i primi plasmi.

1991: A Culham START, un Tokamak a bassissimo rapporto d'aspetto (Tokamak sferico), inizia le sue operazioni.

1992: Inizia l'attività di progetto ingegneristico di ITER. I partner sono ancora Comunità Europea, Giappone, Russia e Stati Uniti.

1992: Il progetto RFX di Padova entra in operazione.

1994: TFTR produce 10 megawatt di potenza da fusione.

1996: Viene approvata la costruzione dello stellarator Wendelstein 7X a Garching, vicino a Monaco di Baviera.

A Cadarache, TORE-SUPRA produce un plasma con la durata record di 2 minuti.



Vista dall'alto di FTU (Frascati Tokamak Upgrade)

1997: JET produce 16 megawatt di potenza da fusione, usando una miscela di Deuterio e Trizio, raggiungendo un valore di fattore di guadagno della fusione Q pari a 0.6.

1999: Gli Stati Uniti si ritirano dal progetto di ITER.

12 febbraio viene prodotto il primo plasma nel National Spherical Torus eXperiment (NSTX) a Princeton, con lo scopo di studiare un plasma in configurazione di Tokamak sferico.

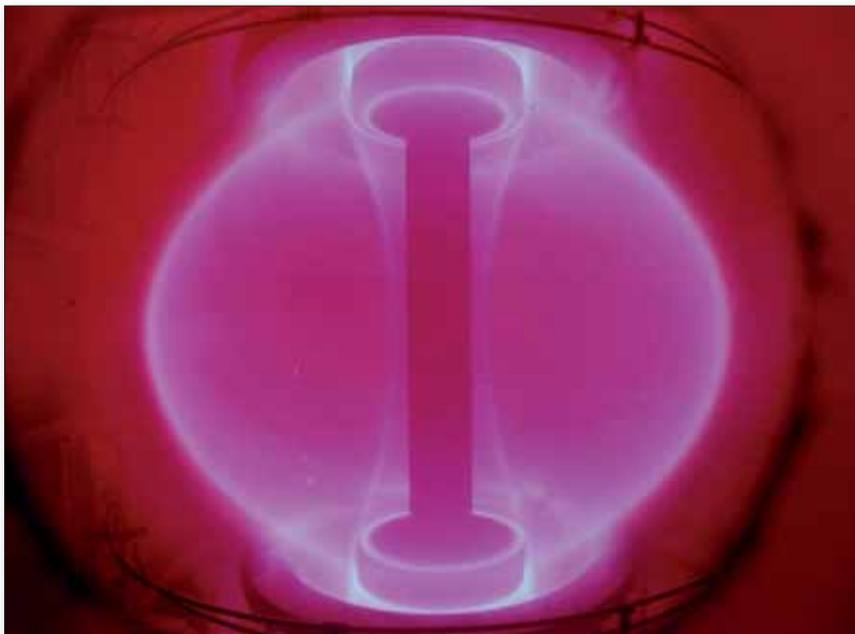


Immagine da Telecamera del plasma di START (cortesia EFDA)

1999: A Culham il Mega Amp Spherical Tokamak (MAST) inizia le operazioni: è una versione in dimensioni più grandi di START.

2001: Iniziano le trattative sullo sviluppo congiunto del progetto ITER: i partecipanti sono Canada, Unione Europea, Giappone e Federazione Russa. La Comunità Europea propone Cadarache e il Giappone propone Rokkasho come siti di realizzazione.

2003: Gli Stati Uniti rientrano nel progetto ITER, il Canada si ritira. Si aggiungono successivamente anche Cina, Corea e India.

2004 dicembre: dopo 4 anni di modifiche, RFX riprende la sua attività col nome di RFX-mod.



Progetto del sito di ITER a Cadarache: in alto, l'edificio che ospiterà ITER; in basso, il sito attuale di TORE SUPRA. Foto ad alta risoluzione scaricabile al sito: <http://www.iter.org/pics/cadarache2.jpg>

2005 28 giugno: si raggiunge un accordo internazionale sul sito di ITER, che sarà Cadarache, nel sud della Francia.

2006 21 novembre: a Parigi, i ministri di Cina, Unione Europea, India, Giappone, Corea, Federazione Russa e Stati Uniti firmano l'accordo finale per la costruzione di ITER.

Comincia la costruzione di ITER nel sito di Cadarache.

1. Breve storia delle ricerche sulla fusione a Padova

ETA-BETA http://www.igi.cnr.it/wwwabout/about_history.html

2. Sintesi storica delle ricerche sull'Energia da Fusione Nucleare

Sito ufficiale della comunità Europea sulla Fusione nucleare:

http://europa.eu.int/comm/research/energy/fu/fu_int/article_1120_en.htm

Network di notizie della Comunità Europea sulla fusione nucleare:

<http://www.fusion-eur.org/>

Siti divulgativi sulla fusione nucleare:

<http://fused.gat.com/> (in inglese, sito della General Atomics, San Diego, USA)

http://www.pppl.gov/fusion_basics/pages/fusion_basics.html (in inglese, laboratori di Princeton, USA)

<http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/pr/fusion21/index.html> (in inglese, Max-Planck-Institut, Monaco, Germania)

http://www.efda.org/fusion_energy/index.htm (in inglese, sito della comunità Europea)

5. I quattro stati della materia

Plasmi in natura:

Aurore boreali: <http://www.northern-lights.no/>

<http://www.pfrr.alaska.edu/aurora/index.html>

il Sole: bellissime immagini nel sito di SOHO...

<http://lasco-www.nrl.navy.mil/index.php>

... e il Sole come è in questo istante!

http://sohowww.nascom.nasa.gov/data/realtime/eit_304/512/

L'esperimento di Benjamin Franklin: <http://fi.edu/franklin/index.html>

Sui tubi di Crookes, è da segnalare la notevole collezione di tubi di Geissler e di Crookes del Museo della Fisica dell'Università di Padova: <http://bagliorinelvuoto.scienze.unipd.it/>

6. Il Criterio di Lawson

Intervista a John D. Lawson nel cinquantenario del criterio che porta il suo nome:

<http://www.jet.efda.org/pages/content/news/2005/yop/dec05.html>

7. Modalità di Confinamento dei Plasmi

7a. Il Confinamento Inerziale

Il sito del Lawrence Livermore National Laboratory: <http://www.llnl.gov/nif/>

Sito di Laser Megajoule: <http://www-lmj.cea.fr/html/cea.htm>

7b. Il Confinamento Magnetico

Come il campo magnetico confina le particelle cariche: un esperimento

<http://www.physics.ucla.edu/plasma-exp/Beam/>

Fisica dei plasmi magnetizzati interattiva (in inglese):

<http://ippex.pppl.gov/>

10. Il Tokamak

Siti degli esperimenti Tokamak europei (oltre a JET)

MAST (UKAEA, Culham, Oxford, UK) <http://www.fusion.org.uk/mast/main.html>

ASDEX (IPP Garching, Germania) http://www.ipp.mpg.de/de/for/projekte/asdex/for_proj_asdex.html

TEXTOR (FZ Jülich, Germania) <http://www.fz-juelich.de/portal/index.php?index=197>

TORUS SUPRA (CEA Cadarache, Francia) <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/gb/accueil/menu.htm>

FTU (ENEA Frascati, Roma) <http://ftu.frascati.enea.it/>

TJII (CIEMAT, Madrid, Spagna) <http://www-fusion.ciemat.es/def-eng.html>

TCV (EPFL, Losanna, Svizzera) <http://crppwww.epfl.ch/tcv/>

ISTTOK (Lisbona, Portogallo) <http://www.cfn.ist.utl.pt/eng/index.html>

CASTOR (Praga, Repubblica Ceca) <http://www.ipp.cas.cz/>

Siti dei maggiori Tokamak americani e giapponesi:

NSTX (PPPL, Princeton, NJ, USA) <http://www.pppl.gov/projects/pages/nstx.html>

DIII-D (General Atomics, San Diego, CA, USA) <http://fusion.gat.com/global/DIII-D>

Alcator C-MOD (MIT, Boston, MA, USA) <http://www.psfc.mit.edu/research/alcator/>

JT-60 (JAERI Naka, prefettura di Ibaraki, Giappone) <http://www-jt60.naka.jaea.go.jp/>

11. Joint European Torus (JET)

Sito ufficiale: <http://www.jet.efda.org/>

12. ITER

Sito ufficiale di ITER: <http://www.iter.org>

Bollettino mensile dell'EFDA (European Fusion Development Agreement) che contiene notizie aggiornate sulla costruzione di ITER:
http://www.efda.org/news_and_events/efda_newsletters.htm

13. La centrale a fusione per produrre energia

Studio concettuale di una centrale commerciale a fusione:
http://www.efda.org/eu_fusion_programme/downloads/scientific_and_technical_publications/SERF_final.pdf

Resoconti della sicurezza e dell'impatto ambientale della Fusione:
http://www.efda.org/eu_fusion_programme/downloads/scientific_and_technical_publications/SEIF_report_25Apr01.pdf
http://www.efda.org/eu_fusion_programme/downloads/scientific_and_technical_publications/SERF_final.pdf

14. Il Reversed Field Pinch

Siti dei principali esperimenti RFP nel mondo:

RFX Padova: <http://www.igi.cnr.it>

MST (Madison, Wisconsin, USA) <http://plasma.physics.wisc.edu/mst/html/mst.htm>

EXTRAP-T2R (Stoccolma, Svezia) <http://www.alfvenlab.kth.se/org/fusion.html>

TPE-RX (Tsukuba, presso Tokyo, Giappone)
http://unit.aist.go.jp/energy/groups/plasmaf_e.htm

15. Applicazioni dei plasmi

Motori al plasma nel mondo:

Università del Michigan: <http://www.engin.umich.edu/dept/aero/ERPS/index.html>

Laboratori di Princeton (USA)
<http://alfven.princeton.edu/>

... e in Italia: Centrosazio-ALTA (Pisa)
<http://www.alta-space.com/MPD.html>

Appendice. La fusione nel futuro dell' energia

Sito dell' Ente Nazionale per le Nuove tecnologie e l'Ambiente: <http://www.enea.it>

Sul picco di Hubbert:
<http://www.peakoil.net/>
http://it.wikipedia.org/wiki/Teoria_di_Hubbert
http://en.wikipedia.org/wiki/Hubberts_peak
<http://www.hubbertpeak.com>

Andamento del prezzo del petrolio dal 1970 al 2005:
<http://www.eia.doe.gov/emeu/cabs/AOMC/Overview.html>

Sul protocollo di Kyoto
http://unfccc.int/kyoto_protocol/items/2830.php

Documento informativo delle Comunità Europee sul problema energetico:
http://www.efda.org/multimedia/downloads/booklets_and_articles/EPYW_english.pdf

Come installare un tetto a pannelli fotovoltaici:
<http://spa.casaccia.enea.it/tetti-fotovoltaici/default.htm>