

Il contributo ENEA alle moderne sfide della fusione nucleare

Imbrigliare l'energia delle stelle, ovvero ottenere una nuova fonte energetica praticamente illimitata e accettabile dal punto di vista ambientale, rappresenta una delle più grandi sfide scientifiche e tecnologiche ancora irrisolte. L'Italia è tra i pionieri nello sviluppo della fisica, tecnologia e ingegneria per la fusione e continua a svolgere, attraverso ENEA, un ruolo di primissimo piano nel complesso ambito europeo e internazionale delle attività R&S sulla fusione. Per il futuro, L'ENEA punta a consolidare le eccellenze maturate nel corso degli anni, perseguendol'obiettivo della commercializzazione dell'energia da fusione entro la seconda metà del secolo

DOI 10.12910/EAI2017-060

di **Antonio Botrugno e Giuseppe Mazzitelli**, ENEA

La fusione nucleare, il processo di trasformazione della massa in energia che alimenta il sole e le stelle, potrebbe soddisfare una delle esigenze fondamentali della civiltà moderna: abbondante produzione di energia elettrica con eccellenti caratteristiche di sicurezza e modesto impatto ambientale. La fusione termonucleare controllata presenta, infatti, notevoli vantaggi rispetto ad altre fonti di approvvigionamento energetico: una produzione sostanzialmente illimitata non soggetta a variazioni stagionali, nessuna emissione di gas a

effetto serra, nessuna produzione di scorie radioattive a lunga vita media, operazioni di reattore a sicurezza intrinseca e nessun rischio di proliferazione nucleare. Ciò rende l'energia da fusione un'opzione estremamente attraente per future strategie energetiche a livello locale e globale.

Le sfide della fusione nucleare

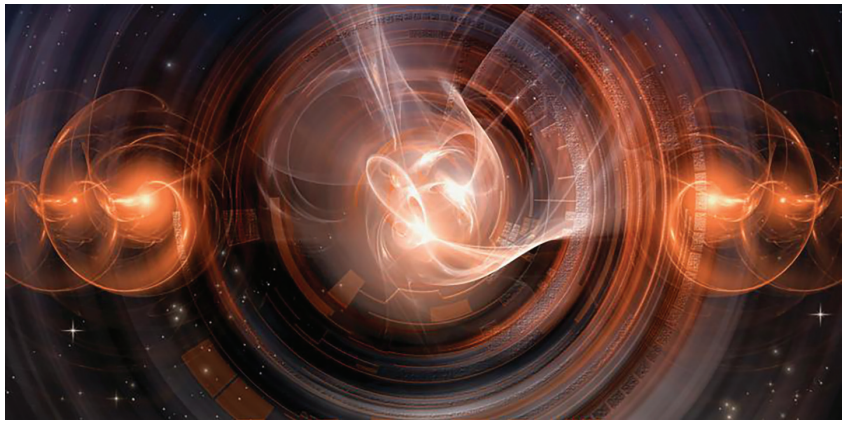
Controllare in un reattore a fusione il meccanismo fisico che alimenta le stelle per produrre energia elettrica rappresenta una delle più grandi sfide scientifiche e tecnologiche anco-

ra irrisolte. Una proficua e continua attività di R&S condotta nei centri di ricerca e nelle università di tutto il mondo ha garantito negli anni un costante progresso in questo ambito aprendo la strada alla possibile commercializzazione dell'energia da fusione nell'arco di questo secolo. La linea scientifica risultata più promettente è caratterizzata da reattori di tipo tokamak di grandi dimensioni. In un tokamak, una miscela di gas di deuterio e trizio è confinata mediante campi magnetici in una camera da vuoto di forma toroidale e poi riscaldata fino a 100-150 milioni di gradi

in modo da avvicinarsi quanto più possibile alla condizione di ignizione di un plasma termonucleare (vedi *box di approfondimento*).

Tuttavia esistono ancora alcune tecnologie da validare, come il mantenimento di un plasma deuterio-trizio stabile ai guadagni di potenza tipici di un reattore, l'utilizzo di materiali in grado di sopportare i carichi termici e di particelle dei componenti affacciati al plasma, la produzione di trizio per garantire l'autosufficienza del ciclo del combustibile da fusione, l'utilizzo di materiali strutturali e funzionali resistenti agli alti flussi neutronici e in grado di minimizzare l'attivazione neutronica per tempi paragonabili alla vita di un reattore e la possibilità di operare il reattore in maniera stazionaria.

Alcune delle tecnologie chiave necessarie per la realizzazione di un reattore a fusione saranno testate con ITER, un progetto da oltre 20 miliardi di euro con sette membri: Cina, India, Giappone, Corea del Sud, Unione Europea (con l'aggiunta della Svizzera), Federazione Russa e Stati Uniti. ITER è in fase di costruzione a Cadarache, nel Sud della Francia, ed è il tokamak più avanzato e più grande al mondo. ITER è progettato per ottenere un guadagno di potenza da fusione Q (il rapporto fra la potenza prodotta e la potenza depositata nel plasma per mantenerlo in condizioni fusionistiche) di almeno 10 e produrre circa 500 MW di potenza termica. Il passo successivo sarà il reattore dimostrativo DEMO previsto nel 2050, una vera e propria centrale nucleare a fusione che dimostrerà la commercializzazione dell'energia fornendo energia elettrica alla rete e aprendo la via allo sfruttamento dell'energia da fusione a scopi civili nella seconda metà del secolo. Esistono anche ipotesi alter-



native alla realizzazione di DEMO come quella di un esperimento pilota, un reattore quanto più piccolo possibile e direttamente scalabile ad una produzione di energia tipica di un reattore commerciale.

Parallelamente ai grandi esperimenti in corso e programmati che definiscono una vera e propria *roadmap* verso lo sfruttamento dell'energia da fusione, ci sono altri esperimenti internazionali che supportano la viabilità del programma come JT-60SA e IFMIF inquadriati nel Broader Approach (il programma di accompagnamento europeo in fisica e tecnologia stabilito tra Europa e Giappone). Esistono, inoltre, molti altri progetti nazionali destinati sia allo studio della fisica che allo sviluppo di tecnologie più tipiche del reattore le cui attività riguardano un ampio ambito di collaborazioni internazionali, come ad esempio i tokamak JET (Joint European Torus, UK), ASDEX-Upgrade (Germania), TCV (Svizzera), DIII (USA), KSTAR (Corea del Sud), EAST (Cina).

Il ruolo dell'Italia

In questo variegato contesto internazionale, è importante rimarcare che

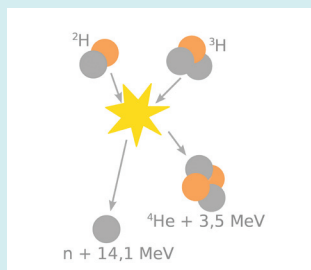
l'Italia è tra i pionieri dello sviluppo della fusione, avendo svolto negli anni una proficua attività R&S nel campo della fisica, tecnologia e ingegneria per la fusione. L'Italia aderì all'EURATOM nel 1960 tramite il Consiglio Nazionale Ricerche Nucleari che è poi divenuto ENEA, ed è stata tra i primi a realizzare nei suoi laboratori grandi impianti per lo studio dei plasmi a confinamento magnetico come il Frascati Tokamak (FT) nel 1971 e il Frascati Tokamak Upgrade (FTU) progettato negli anni 80 e ancora in funzione. FT e FTU sono macchine tokamak ad alto campo magnetico che hanno fatto luce su importanti meccanismi dei plasmi ad alta densità come ad esempio i fenomeni collettivi e le instabilità magnetodinamiche, sui sistemi di riscaldamento addizionale mediante onde elettromagnetiche ad alte frequenze (qualche centinaia di GHz), sull'uso di tecniche diagnostiche per il controllo e lo studio dei plasmi e anche sullo sviluppo dei materiali affacciati al plasma come ad esempio i metalli liquidi.

Attualmente, l'Italia è tra i partner principali di EUROfusion, l'agenzia europea che gestisce il programma europeo sulla fusione, e di Fusion for Energy l'agenzia che svolge il ruolo

Come avviene la fusione nucleare?

La fusione è il processo che alimenta il sole e le stelle. La fusione è una reazione nucleare in cui due nuclei leggeri, grazie alle forze nucleari forti, si fondono per dare origine a un nucleo più pesante, la cui massa è minore della somma delle masse dei nuclei di partenza. Si ha così un difetto di massa (Δm) corrispondente a un rilascio di energia, in base alla nota formula di equivalenza tra massa e energia $E = \Delta m \cdot c^2$.

La fusione termonucleare controllata che avviene nei laboratori sfrutta due isotopi pesanti dell'idrogeno: il deuterio (^2H) e il trizio (^3H). Tra le tante possibili reazioni di fusione, la reazione deuterio-trizio ha la più grande sezione d'urto (cioè la probabilità di una reazione) e il più grande valore Q (cioè l'energia rilasciata durante la reazione). Produce una particella α (o nucleo di ^4He), un neutrone e rilascia 17,6 MeV di energia sotto forma di energia cinetica dei prodotti (3,5 MeV alla particella α e 14,1 MeV al neutrone). Il trizio non esiste in natura perché decade con breve vita media, deve essere prodotto dal reattore stesso a partire dal litio (Li): quindi i combustibili primari di un reattore a fusione sono ^2H e Li.



Schema della reazione di fusione deuterio-trizio

Per ottenere un guadagno di energia proprio di un reattore di potenza sono necessarie tre condizioni principali:

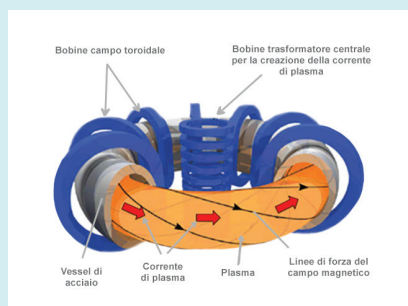
- La **temperatura** deve essere abbastanza alta ($\approx 100\text{-}150$ milioni di gradi) per consentire agli ioni di deuterio e trizio di avere energia cinetica sufficiente a superare la repulsione

coulombiana e fondersi tra loro.

- Gli ioni devono essere confinati ad alta **densità** ($\approx 10^{20}$ particelle/ m^3) per ottenere un'adeguata quantità di reazione di fusione.
- Gli ioni devono rimanere confinati ad alta temperatura con un **tempo di confinamento** abbastanza lungo da bilanciare le perdite energetiche e il raffreddamento.

Per riprodurre queste condizioni, la tecnologia basata sui reattori a confinamento magnetico si è rivelata la più promettente. Gli ioni e gli elettroni in quanto particelle cariche non possono attraversare facilmente un campo magnetico, quindi appropriate configurazioni magnetiche possono mantenere le particelle a un volume determinato riducendo al minimo le perdite. Il tokamak è lo schema di confinamento magnetico più sviluppato dalla comunità scientifica. Si tratta di un contenitore di forma toroidale con un campo magnetico elicoidale che si realizza grazie alla combinazione dei campi magnetici generati da numerose bobine e dalla corrente di plasma.

A causa di temperature estremamente elevate in un tokamak si verifica la transizione di materia allo stato del plasma, chiamato anche "il quarto stato della materia". Il plasma è costituito da un gas completamente ionizzato o parzialmente ionizzato, contenente ioni, elettroni e atomi neutri. Attualmente, la fusione termonucleare è anche la principale area di ricerca nel campo della fisica del plasma.



Schema di una configurazione magnetica di tipo Tokamak

di partner della ITER International Organization per conto dell'Europa. Tutte le attività italiane sulla fusione sono coordinate da ENEA e condotte insieme al Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), l'Istituto Na-

zionale di Fisica Nucleare (INFN), il Consorzio di Ricerca per l'Energia, l'Automazione e le Tecnologie dell'Elettromagnetismo (CREATE) e alcuni tra i più prestigiosi istituti universitari italiani. Ciò garantisce

un ampio spettro di competenze a disposizione e lo svolgimento di attività in grado di fornire contributi rilevanti sia ai principali programmi di ricerca internazionale quali ITER, DEMO e Broader Approach, sia ai

numerosi progetti nazionali basati su accordi bilaterali in vari ambiti del programma fusione.

L'ENEA svolge un ruolo di primissimo piano nel complesso cammino della ricerca nel campo della fusione termonucleare. Le principali attività sulla fusione si svolgono nel Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare, con le sue sedi nei Centri di Ricerca di Frascati, Brasimone, Bologna-Faenza e Casaccia. L'ENEA sviluppa le attività di ricerca scientifica e tecnologica in settori chiave per la realizzazione dell'energia da fusione e con laboratori dedicati a studi specifici. Tra questi, vale la pena citare FTU che supporta lo sviluppo di materiali e componenti affacciati al plasma, lo studio di instabilità del plasma e i metodi di prevenzione e mitigazione degli effetti, lo sviluppo di sistemi diagnostici per il plasma termonucleare. Altra componente fondamentale della ricerca sulla fusione è il Frascati Neutron Generator (FNG), entrato in funzione nel 1992, che grazie alle reazioni deuterio-trizio produce un alto flusso di neutroni a 14 MeV permettendo lo studio del danneggiamento neutronico di materiali strutturali e funzionali per il reattore, lo sviluppo dei database nucleari relativi alle reazioni tra neutroni e i materiali proposti e funziona da complemento per lo sviluppo delle diagnostiche neutroniche. Va citato anche il laboratorio dedicato a studi di superconduttività: il funzionamento di un tokamak si basa su numerosi avvolgimenti elettrici per la produzione dei campi magnetici che confinano e guidano il plasma; nei materiali su-

perconduttori la corrente scorre negli avvolgimenti con resistenza elettrica nulla e ciò permette di generare alti campi magnetici minimizzando la dissipazione termica, garantendo il funzionamento in continua e riducendo i costi di operazione. Inoltre, è condotta un'intensa attività anche nel campo della manutenzione remota, essenziale elemento per la gestione di un impianto nucleare quale un reattore a fusione, e nel campo dello sviluppo di membrane per la separazione in fase gassosa dell'idrogeno e dei suoi isotopi: ciò permette di recuperare il trizio ed eventualmente riutilizzarlo nel ciclo del combustibile. Oltre alle attività svolte nei propri laboratori e al coordinamento delle attività nazionali, l'ENEA partecipa alle campagne sperimentali di altri tokamak come il JET, ASDEX-Upgrade, EAST ed altri.

Nel corso degli anni, l'ENEA ha anche incentivato e supportato il trasferimento tecnologico nel settore fusione in collaborazione con l'industria; le attività sulla fusione hanno originato oltre 50 brevetti negli ultimi 20 anni, con ricadute significative per lo sviluppo e la competitività delle industrie nazionali producendo innovazione e know-how di alto valore tecnologico in settori strategici. Nella realizzazione di ITER, infatti, sono coinvolte molte industrie italiane che si sono aggiudicate commesse per un valore di oltre un miliardo di euro all'interno delle gare per le forniture europee di ITER, ad esempio, per le bobine superconduttrici e la camera da vuoto. Fra queste industrie vi sono Ansaldo Nucleare, ASG Supercon-

ductors, SIMIC, Mangiarotti, Walter Tosto, Delta-ti Impianti, OCEM Energy Technology, Angelantoni Test Technologies, Zanon, CECOM e altre.

Uno sguardo al futuro

Il successo di ITER è l'elemento fondamentale verso la futura realizzazione di un reattore commerciale per la produzione di energia da fusione, proiettando l'umanità verso una rivoluzione energetica, una nuova era per la produzione di energia che permetterà di ridurre drasticamente l'uso dei combustibili fossili. L'ENEA svolge un ruolo di primissimo piano in questo complesso cammino della ricerca nel campo della fusione termonucleare. L'obiettivo per il prossimo futuro è di fornire un contributo chiave per rendere l'energia da fusione una realtà nel più breve tempo possibile. L'ENEA punta a consolidare quelle eccellenze acquisite nel corso degli anni e già riconosciute a livello internazionale, per questo ha recentemente proposto la realizzazione del Divertor Tokamak Test (DTT) Facility (vedi, nel seguito l'articolo "*DTT, un tokamak per lo studio dei carichi termici dei reattori a fusione*"), un grande e ambizioso progetto che permette di riprodurre alcune delle caratteristiche del bordo plasma di DEMO e di fare luce sia sulla problematica dei materiali in grado di sopportare alti carichi termici, sia sul funzionamento del divertore, un componente essenziale per i futuri reattori a fusione.