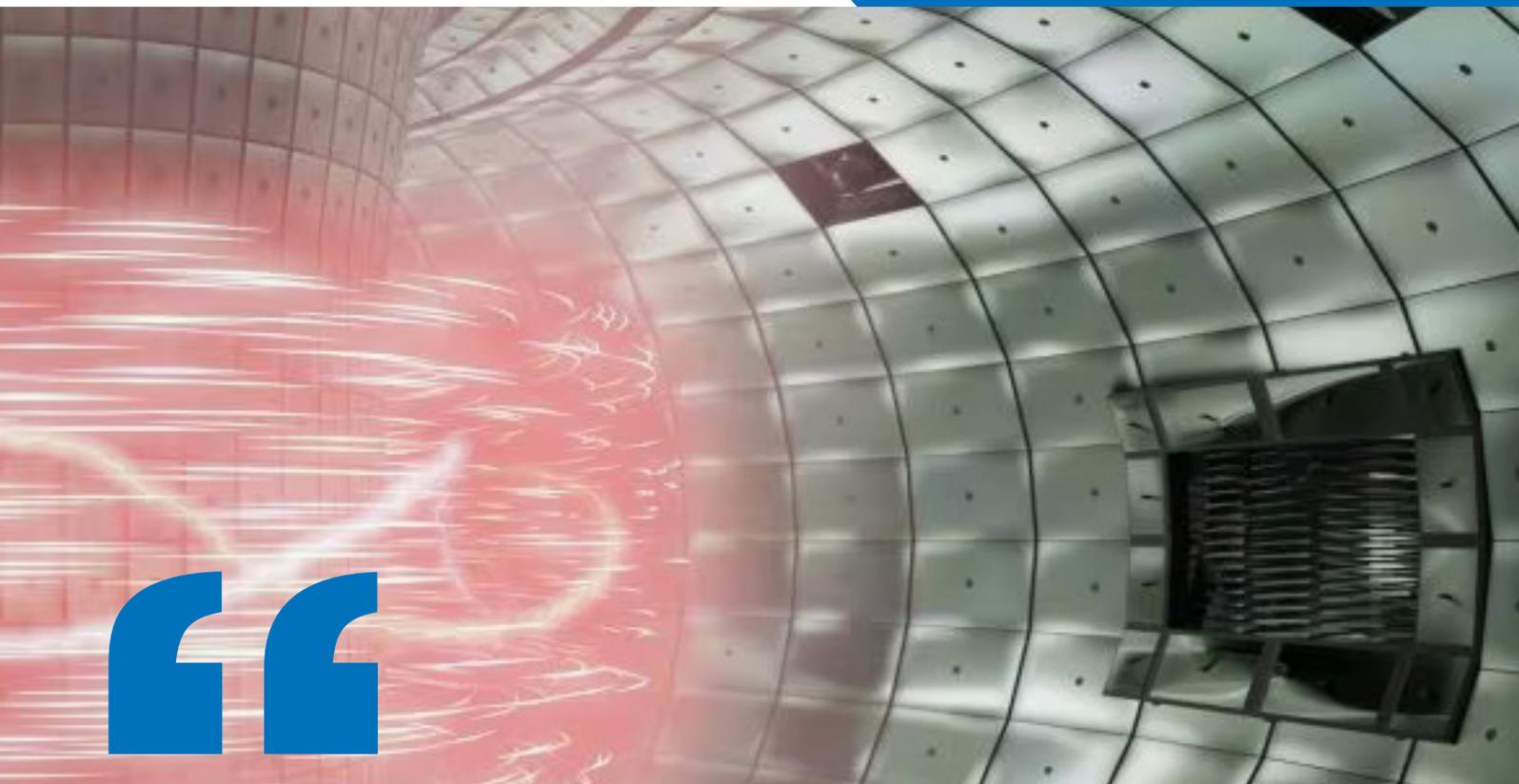


Carlo Di Leo

## ABSTRACT

Il Tokamak è un prototipo di reattore a fusione su cui stanno puntando molti progetti, presenti e futuri. Anzitutto il progetto internazionale ITER, parola che in latino vuol dire “cammino” o “percorso” ma che è anche acronimo di International Thermonuclear Experimental Reactor (reattore sperimentale termonucleare internazionale) a cui partecipano ben 35 nazioni, Italia compresa, la quale non solo mette a disposizione un gran numero di scienziati ed ingegneri, ma che è stata anche incaricata di sviluppare la sorgente e l’iniettore di ITER (presso il consorzio RFX a Padova) ed il divertore di energia di DEMO, il successore di ITER, presso l’ENEA a Frascati. La collaborazione ITER sta costruendo il più grande Tokamak della storia a Chadarache, località posta nei pressi di Marsiglia. Si tratta di un reattore (ancora allo stato dimostrativo in quanto il suo successore DEMO sarà il primo ad immettere energia elettrica in rete) che fonderà



# Con ITER si accende la speranza di un futuro reattore a fusione

deuterio e trizio nella cui reazione si producono un nucleo di elio-4 ed un neutrone. In questo articolo, dopo aver detto almeno per sommi capi come funziona un Tokamak, vedremo come si comporta il plasma di deuterio e trizio a temperature di centinaia di milioni di gradi, come lo si isola dal resto del reattore, ed infine, come un Tokamak potrà trasformare l'energia nucleare in energia elettrica.

## Dalla fissione alla fusione

ITER è il prototipo di reattore a fusione per antonomasia ed è divenuto ormai un punto fisso di riferimento nel settore. At-

tualmente nell'ambito dei più tradizionali (e oggi già disponibili) reattori a fissione vi sono due tipologie molto promettenti: gli "Small Modular Reactor" (SMR) e gli "Advanced Modular Reactor" (AMR) che sono a metà strada tra la terza e la quarta generazione di reattori. Gli SMR sono reattori modulari di dimensione ridotta che producono comunque scorie radioattive a lunga vita. Gli AMR, invece, utilizzano metalli liquidi come refrigeranti che minimizzano i rifiuti a lunga vita prodotti. Attualmente sono due gli impianti SMR al mondo: il primo in Russia è stato montato su una nave che da San Pietroburgo è stata sposta-

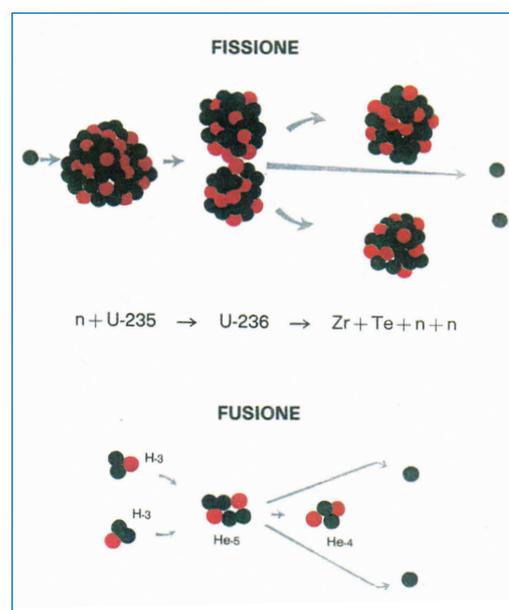


**Attualmente l'energia da fusione sembra avere molti vantaggi rispetto a quella più tradizionale da fissione**

ta in Cukotka ove è situato un importante sito minerario. Visto che è difficile farvi giungere l'energia, dalla nave sono stati collegati cavi elettrici ed un tubo vapore che riscaldano e forniscono energia all'impianto ed ai villaggi vicini. Un secondo impianto, raffreddato a gas, funziona da due anni in Cina. Tuttavia queste due tipologie di reattori, insieme a tutte le altre centrali di terza e quarta generazione oggi in funzione ed in costruzione sono ritenute un passo intermedio verso la costruzione degli impianti a fusione. Attualmente l'energia da fusione sembra avere molti vantaggi rispetto a quella più tradizionale da fissione. Anzitutto lascia molte meno scorie radioattive, e tali scorie hanno un tempo di dimezzamento molto più breve rispetto a quelle della fissione. Inoltre i combustibili (deuterio e trizio) sono più facilmente reperibili ed alla portata di tutti (il deuterio si ricava facilmente dall'acqua di mare che è praticamente alla portata di qualsiasi nazione mondiale) mentre il trizio si può ricavare, meno facilmente del deuterio, dalla terra, per esempio, irradiando il litio, abbondantemente presente sul suolo terrestre, con fasci di neutroni. Un impianto a fusione, inoltre, anche in caso di reazione incontrollata, non produrrebbe mai un fenomeno di "melt-down", con relativa fusione del nocciolo e relative esplosioni incontrollate. Ed infine, inutile dirlo, la fusione (come del resto anche la fissione) non rilascia nell'atmosfera alcun gas tossico. Ma allora, se le centrali a fusione presentano tutti questi inestimabili vantaggi rispetto alle loro concorrenti a fissione, perché non vengono prodotte su vasta scala? La risposta a questa domanda è da ricercarsi nel fatto che sin dalla costruzione del primo prototipo di reattore a fusione, nel lontano 1958, il problema principale è stato quello dell'efficienza. Infatti, l'energia liberata dalla fusione è inferiore a quella consumata per portare il combustibile a centinaia di milioni di gradi, per isolarlo dal resto del

reattore e per alimentare gli impianti di sicurezza. I progetti pubblici come DEMO e STEP promettono un reattore efficiente entro il decennio 2040-2050. È vero che la tecnologia ha fatto passi da gigante nell'ultimo decennio e che sono nati nuovi prototipi che usano combustibili a geometrie diverse, ma è altresì vero che non è stato ancora raggiunto e superato il cosiddetto "punto di pareggio", cioè quella soglia al di sopra della quale la reazione è in grado di autosostenersi, producendo più energia di quanta ne assorba per innescare ed alimentare nel tempo la reazione.

A questo punto vediamo con esattezza quale è la differenza tra fissione e fusione, servendoci anche di qualche esempio grafico. Quando un neutrone urta un nucleo di un atomo pesante (è il caso ad esempio del nucleo di uranio-235) si possono produrre diversi tipi di reazione. Una è appunto la fissione del nucleo atomico. In *figura 1*, in alto si può vedere un esempio di fissione di un nucleo di uranio-235. Nell'immagine sotto si può vedere un neutrone che, dopo aver urtato il nucleo, forma dapprima un nucleo composto in-



*Figura 1 - Esempio di fissione (in alto) e di fusione (in basso).*

stabile (U-236). Successivamente il nucleo si scinde in due grossi frammenti (nel nostro caso tellurio e zirconio) e due piccoli frammenti, costituiti da due o tre neutroni che vanno a colpire e scindere altri nuclei. Si genera così una reazione a catena. Lise Meitner ed Otto Frisch, l'11 febbraio 1939 pubblicarono sulla rivista *Nature* un articolo dal titolo "Disintegration of uranium by neutrons: a new type of nuclear reaction" dove annunciavano che era avvenuta la scissione di un nucleo atomico. Sempre in *figura 1*, ma questa volta nell'immagine in basso si può vedere un esempio di fusione. In questo esempio due nuclei di trizio (ciascuno con un neutrone e due protoni) si uniscono tra loro generando un nucleo di elio-4 (che viene solitamente chiamato particella alfa) e due neutroni. Affinché i due nuclei iniziali possano "fondere" occorre superare la repulsione elettrica fra i protoni. Sotto una certa distanza la coesione tra nucleoni è molto più forte della repulsione elettrica e ciò favorisce il fenomeno di fusione.

Ebbene, mentre in una reazione di fissione si rompe un nucleo atomico in due frammenti, in una reazione di fusione due nuclei atomici si fondono tra loro per formare uno più grande.

Un altro esempio di fusione potrebbe essere quello di un nucleo di deuterio che si unisce al nucleo di trizio per formare un nucleo di elio-4 liberando un neutrone.

La fissione e la fusione sono dunque processi tra loro diversissimi eppure entrambi generano energia. La ragione di ciò è dovuta al fatto che essi hanno in comune la caratteristica che in entrambi i processi si formano legami più forti fra i nucleoni (neutroni e protoni) dei relativi nuclei atomici. E quando si forma un legame si libera energia.

L'energia nucleare da fissione e quella da fusione possono considerarsi energie pulite, nel senso che ne l'una ne l'altra producono anidride carbonica o altri gas ad

effetto serra e non inquinano l'aria. Non si tratta però (almeno per la fissione) di energia rinnovabile, perché i reattori consumano il combustibile nucleare che non viene rigenerato in natura. Inoltre, gli impianti attuali non sembrano essere neppure sostenibili. Tuttavia alcuni dei reattori a fissione di quarta generazione, potendo consumare torio ed anche il combustibile esausto dei reattori di generazioni più vecchie, potranno invece produrre energia per migliaia di anni e saranno quindi sostenibili. Anche in vista del fatto che potranno utilizzare come combustibile le scorie finora prodotte. Per quanto concerne invece il problema della sicurezza è opportuno dire che dalla costruzione del primo reattore a fissione della storia (la famosa pila atomica di Fermi del 1942) vi è stata una continua evoluzione degli impianti volta a migliorarne l'efficienza e la sicurezza. I circa 440 reattori attualmente operativi nel mondo sono reattori di seconda e terza generazione mentre sono in corso di sviluppo i reattori di quarta generazione, ancora più sicuri. Per esempio i reattori di Fukushima erano reattori di seconda generazione ed il disastro del 2011 fu causato da un blackout a sua volta conseguenza di uno tsunami. I cosiddetti "reattori veloci al sodio" di quarta generazione, invece sono disegnati in modo da spegnersi automaticamente in caso di blackout.

In ogni caso anche i reattori nucleari di ultima generazione vengono considerati da molti come un passaggio intermedio verso quello che sarà il nucleare del futuro, cioè il nucleare della fusione controllata.

Secondo il World Meteorological Organization, il 2023 è stato l'anno più caldo della storia dal 1880, da quando cioè abbiamo dati sufficientemente attendibili per valutare la temperatura media della Terra. Anche riuscendo ad annullare l'influenza antropica dell'effetto serra (cosa piuttosto difficile) sarebbe ormai impossibile annullare l'effetto innescato e la sola lotta al riscaldamento climatico non basterà per



**I circa 440 reattori attualmente operativi nel mondo sono reattori di seconda e terza generazione mentre sono in corso di sviluppo i reattori di quarta generazione, ancora più sicuri.**



**Dal secondo dopoguerra la richiesta di energia mondiale è continuata ad aumentare in modo esponenziale**

limitare i danni. Dal secondo dopoguerra la richiesta di energia mondiale è continuata ad aumentare in modo esponenziale. Secondo lo Statistical Review of World Energy 2023 redatto dall'Energy Institute, se nel 1950 il consumo energetico mondiale era di 28 564 TWh nel 2022 è stato di 178 889 TWh. L'Ipcc (organismo scientifico intergovernativo sul cambiamento climatico) ha indicato alcuni scenari che potrebbero rallentare il riscaldamento globale. In tutto viene indicato che un ruolo determinante nella produzione di energia primaria dovrà essere coperto dalle fonti energetiche non fossili, includendo tra queste il nucleare. Attualmente circa il 10% dell'energia prodotta nel mondo proviene da 435 reattori a fissione nucleare, mentre altri 61 sono in costruzione ed altri 110 sono già stati programmati. Questi dati dimostrano che l'energia nucleare sta riacquistando un ruolo non indifferente nell'economia energetica mondiale dopo che gli incidenti di Chernobyl nel 1986 e di Fukushima nel 2011 avevano messo in forse il futuro di questa fonte energetica. L'Unione europea e le altre grandi economie come la Cina, l'India, la Russia ed il Giappone hanno inserito il nucleare a pieno titolo tra le forme meno inquinanti e meno impattanti a livello ambientale.

A parità di energia prodotta per unità di massa, l'emissione di gas serra su tutto il ciclo di vita del nucleare è pari, se non addirittura inferiore a quella di altre fonti rinnovabili come eolico, solare ed idroelettrico. Per di più, aspetto importantissimo che sorprenderà molti, il nucleare risulta essere la sorgente energetica più sicura, paragonabile per non pericolosità al solare e all'eolico. In figura 2 è riportata la foto di un elemento della camera toroidale di ITER prima di essere montato.

### Obiettivo fusione

I reattori oggi in esercizio sono più facilmente gestibili e meno complicati nella progettazione e nel funzionamento rispetto a quelli delle precedenti generazioni. I nuovi reattori modulari SMR (ai quali vanno aggiunti gli AMR) di cui prima si è fatto cenno hanno una flessibilità, una miniaturizzazione e soprattutto tempi di realizzazione ed installazione così brevi che potrebbero dare risposta a due delle domande più frequenti sollevate dai molti scettici e dalle associazioni ambientaliste: la necessità di intervenire con soluzioni immediate nella sostituzione dei combustibili fossili risolvendo al tempo stesso il problema delle scorie. A detta di molti scienziati, il nucleare da fissione con le sue problematiche, legate soprattutto alle scorie radioattive, potrebbe rappresentare una valida alternativa verso uno sviluppo successivo che sarebbe costituito dalla produzione di energia mediante il processo di fusione nucleare. Questa potrebbe risolvere gran parte dei problemi energetici del pianeta in quanto, a parità di massa, la quantità di energia prodotta dalla fusione di due nuclei isotopi dell'idrogeno (deuterio e trizio) sarebbe maggiore di circa dieci volte rispetto a quella prodotta dalla fissione di un nucleo di U-235. La tecnologia della fusione ha però due grandi ostacoli tecnici da superare che la rendono ancora lontana da una sua utilizzazione industria-

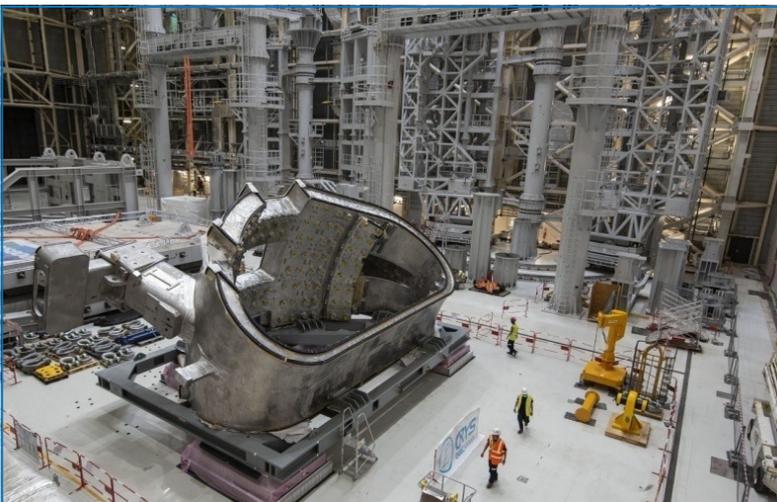


Figura 2 - Elemento della camera di ITER.

le su vasta scala. In primo luogo mentre la fissione deve vincere l'interazione forte che tiene unite le particelle che compongono il nucleo di un atomo massiccio come l'uranio, la fusione deve vincere una forza di repulsione ben più intensa (la forza di Coulomb) tra le particelle che compongono i nuclei di atomi leggeri, come deuterio e trizio. In pratica si tratta di ripetere la stessa reazione che avviene nel Sole e nelle stelle, con la sola grande differenza che in questi corpi celesti la forza di repulsione è vinta grazie alla combinazione di una grande massa, che genera una forza gravitazionale enorme e della temperatura. Nel Sole, per esempio, la forza gravitazionale genera pressioni pari a 260 miliardi di volte quella terrestre e la fusione può avvenire a temperature relativamente basse, corrispondenti a 15 milioni di gradi centigradi. Nei laboratori terrestri, non potendo riprodurre tali pressioni, bisogna agire esclusivamente sulla temperatura che, per fare in modo che due nuclei leggeri si uniscano deve raggiungere i 150 milioni di gradi. È chiara dunque la difficoltà che comporta il processo di fusione: sebbene tale processo sia già una realtà da molti anni nei laboratori, raggiungere lo stato di plasma (cioè il quarto stato della materia in cui elettroni, protoni e neutroni sono liberi di muoversi indipendentemente tra loro), mantenerlo controllato e stabile, trovare materiali adatti a sostenere temperature elevatissime e soprattutto raggiungere il punto in cui l'energia emessa dalla fusione superi quella che abbiamo immesso per innescare la reazione sono le sfide più ardue da vincere.

Tra i numerosi esperimenti in atto, quello più promettente sembra essere il confinamento magnetico che dovrebbe raggiungere la sua massima espressione con la macchina ITER, un ambizioso progetto in fase di costruzione in Francia che a partire dal 2025 dovrebbe avviare il primo plasma. Scopo di ITER (finanziato oltre che

dall'Unione Europea anche da Cina, India, Federazione Russa, Stati Uniti, Giappone e Corea del Sud) sarà quello di testare i materiali ed i macchinari che, a partire dal 2035, andranno a sviluppare la seconda fase del programma il tanto annunciato reattore DEMO che per primo dovrebbe produrre energia elettrica anche se non commercializzata. L'energia prodotta da fusione nucleare non potrà essere quindi disponibile per usi civili se non dopo la metà del secolo. ITER è dunque l'argomento centrale del presente articolo.

ITER fonderà deuterio e trizio, secondo la reazione illustrata in *figura 1* in basso, nella quale vengono prodotti un nucleo di elio-4 ed un neutrone.

In questo articolo scopriamo come funziona un Tokamak, come si portano deuterio e trizio a temperature di centinaia di milioni di gradi, come lo si isola dal resto del reattore, ed infine, come un Tokamak trasforma l'energia termonucleare in energia elettrica. In *figura 3* possiamo vedere un'altra immagine delle fasi di montaggio di ITER.

ITER è il prototipo di reattore a fusione per antonomasia ed è divenuto un punto di riferimento nel settore. Proprio per questo è stato anche oggetto di critiche che vertono principalmente su due punti del progetto.



**ITER**  
 è il prototipo  
 di reattore a  
 fusione per  
 antonomasia  
 ed è divenuto  
 un punto di  
 riferimento  
 nel settore



*Figura 3 - Altra immagine del montaggio di ITER*

Prima di tutto si punta il dito sul costo enorme del progetto, che secondo le stime attuali dei responsabili è di 22 miliardi di euro. Detta cifra però non mette tutti d'accordo. Infatti nel 2018 il Dipartimento per l'Energia degli Stati Uniti (DOE) ha stimato che il costo totale di ITER sarà di 65 miliardi di euro. Per fare un paragone la Stazione Spaziale Internazionale in orbita attorno alla Terra è costata 100 miliardi di euro e costituisce l'oggetto più costoso mai realizzato dall'uomo. Non aiuta poi il fatto che ITER non è stato progettato per immettere energia elettrica nella rete ma solo per sviluppare la fattibilità della fusione. Infatti, come già detto dovrebbe essere DEMO ad allacciarsi alla rete elettrica. L'altra grande critica se si fa ad ITER riguarda il fatto che non è ancora certo se riusciremo a disporre del trizio necessario per alimentare i reattori a fusione che saranno costruiti in seguito.

Possiamo dire quindi che ITER è una grande scommessa con un consistente rischio di fallimento, ma che promette, qualora dovesse riuscire, una ricompensa altissima, ovvero reattori a fusione che risolveranno una volta per tutte il problema dell'approvvigionamento energetico dell'umanità. Sebbene queste critiche siano fondate su obiezioni concrete, è bene dire che ITER è un importantissimo banco di prova che non solo punta a sviluppare uno specifico prototipo di reattore a fusione, ma grazie al quale, la nostra conoscenza di base sulla fusione e sul plasma sta facendo grandi passi in avanti. Infatti, benché la reazione in sé sia nota e non presenti misteri, vi sono ancora numerosi interrogativi aperti sulla fisica del plasma, su come mantenerlo stabile per lungo tempo e sostenere quindi la reazione più a lungo e che non generino scorie radioattive di lunga vita, su come raggiungere temperature e densità più elevate, su come sintetizzare il combustibile in situ, ovvero al momento dell'utilizzo ecc.

Della quantità di ore di ricerca scientifica che centinaia di fisici ed ingegneri hanno dedicato finora allo sviluppo di ITER hanno già beneficiato numerosi altri progetti di reattori a fusione anche se non adottano proprio la stessa tecnologia. Ciò che si impara con un prototipo può essere messo a beneficio di altri. Un esempio significativo di ciò, è rappresentato dai cosiddetti mini-reattori Tokamak ARC del MIT negli Stati Uniti. Il reattore ARC si basa sulla tecnologia sviluppata per ITER con l'aggiunta di recentissime nuove scoperte nel campo dei metalli superconduttori. Potremmo pensare ad ARC come ad un'evoluzione di ITER che punta a risolvere dei problemi principali del progetto internazionale, per esempio riducendo i costi e aumentandone l'efficienza. Ma vediamo più in dettaglio come dovrebbe funzionare ITER.

Non si sa con assoluta certezza da cosa abbia origine la sigla Tokamak. Come asserisce lo scienziato russo Vladimir Mukhovatov, ora funzionario scientifico senior presso l'ITER, il termine Tokamak deriva dalla sigla russa Toroidalnaya Kamera i Magnitnaya Katushka (in italiano vuol dire Camera Toroidale e Bobina Magnetica). Il nome fu proposto per la prima volta dal vicedirettore Igor Golovin del laboratorio in cui si costruì il primo prototipo di Tokamak nel 1958, in quello che oggi si conosce come l'istituto Kurchatov, nei pressi di Mosca. Quale che sia la vera origine del termine, in un Tokamak il confinamento del plasma è raggiunto mediante l'uso di campi elettrici e magnetici in grado di controllare la traiettoria delle particelle cariche nel plasma. Confinare il plasma è fondamentale, perché una volta portato alla temperatura necessaria per innescare la fusione nucleare, se dovesse entrare in contatto con i materiali circostanti o espandersi, si raffredderebbe e la reazione di fusione si spegnerebbe. Il cuore del Tokamak ITER è costituito dalla cosiddetta "camera a vuoto". Trattasi di una cavità



**ITER è una grande scommessa con un consistente rischio di fallimento, ma che promette, qualora dovesse riuscire una ricompensa altissima**

centrale a forma di toroide simile a quella di una ciambella. In *figura 4* è riportato un primo disegno di ITER con in primo piano la camera a vuoto. In questa camera si inietta il plasma di deuterio e trizio, ed ha luogo la fusione.

### I sei passi fondamentali

A questo punto seguiamo i sei passi che portano alla fusione del plasma.

- passo uno: viene fatto il vuoto;
- passo due: si accendono i magneti per confinare il plasma;
- passo tre: si iniettano il deuterio ed il trizio;
- passo quattro: si porta il plasma ad alta temperatura (si può fare con tre tecniche distinte);
- passo cinque: si origina la fusione;
- passo sei: si estrae l'energia dal plasma.

Il **passo uno** consiste nel creare un vuoto il più spinto possibile. Pertanto all'inizio del processo si pompa via l'aria, al fine di creare una condizione di vuoto nella camera nella quale deve essere inserito il plasma. È infatti necessario eliminare ogni impurezza che potrebbe interferire con la reazione di fusione.

Il **passo due** consiste nell'accensione dei magneti. La camera a vuoto è circondata da magneti superconduttori a guisa di D che generano i campi magnetici necessari per confinare il plasma. Non si tratta di magneti permanenti come quelli delle comuni calamite, ma di magneti che possono essere accesi e spenti a comando, grazie al fenomeno dell'induzione elettromagnetica. Il fenomeno, noto come induzione di Faraday fu scoperto in modo indipendente nel 1831 da Michael Faraday e nel 1832 da Joseph Henry. Tornando al Tokamak i magneti a forma di D sono costituiti da bobine di fili metallici superconduttori di niobio-stagno (Nb-Sn) o niobio-titanio (Nb-Ti), all'interno dei quali viene fatta passare una corrente elettrica ogniqua-

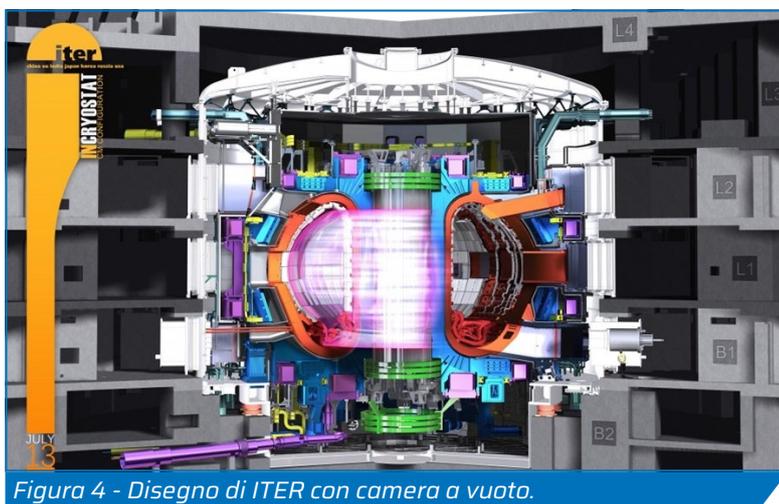


Figura 4 - Disegno di ITER con camera a vuoto.

volta si vogliono generare campi magnetici. Se la corrente viene spenta, i magneti si spengono. Al fine di migliorare prestazioni meccaniche ed elettriche ciascun filo è costituito da numerosi fili metallici superconduttori intrecciati tra loro e con fili di rame, il tutto avvolto in un tubo di acciaio. Viste le enormi dimensioni del progetto, più di 100 000 chilometri di filo metallico superconduttore sono stati prodotti tra il 2008 ed il 2015 per poi essere assemblati nei magneti di ITER. Per avere un'idea delle dimensioni dei magneti e della camera a vuoto di ITER, si tenga presente che il volume interno del toroide è di 840 metri cubi, pari a 10 volte il volume del secondo Tokamak esistente nel mondo ed i magneti a forma di D misurano 17 metri di altezza e 9 metri di larghezza. In *figura 5* si ha uno spaccato del ITER. La figura di una persona (indicata con una freccetta) è stata aggiunta per dare una idea chiara della grandezza dell'impianto.

Il metallo di cui sono fatti i magneti è un superconduttore essendo quest'ultimo un metallo, che a temperatura ambiente è un pessimo conduttore di elettricità, ma che una volta raffreddato a temperature vicine allo zero assoluto (pari a  $-273,15$  °C) acquisisce proprietà quantistiche che permettono il passaggio di supercorrenti, ovvero di correnti ad alta intensità che non disper-



In questa camera si inietta il plasma di deuterio e trizio, ed ha luogo la fusione



L'effetto della ionizzazione è quello di strappare gli elettroni dai nuclei di deuterio e trizio, che perdendo elettroni, si caricano positivamente

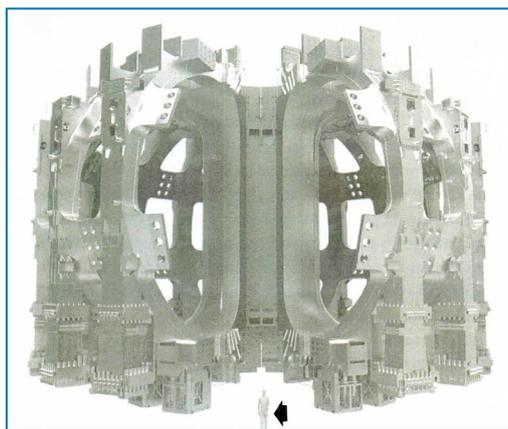


Figura - 5 Confronto tra i magneti ed una figura umana.

dono energia. Questo implica la possibilità di creare dei campi magnetici più intensi e riduce la quantità di energia che andrebbe persa sottoforma di calore. Infatti, quando un filo di rame a temperatura ambiente viene attraversato da una corrente, il filo si riscalda assorbendo in tal modo parte dell'energia. In un superconduttore, invece, non vi è questa dispersione di energia. Per raggiungere il regime superconduttivo, dunque, i magneti di ITER sono costantemente mantenuti ad una temperatura di  $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Il **passo tre** consiste nell'iniettare nella camera il deuterio ed il trizio. Una volta che i magneti sono in funzione, si introduce nella camera a vuoto la miscela di deuterio e trizio che viene subito ionizzata facendo passare scariche elettriche attraverso il gas. L'effetto della ionizzazione è quello di strappare gli elettroni dai nuclei di deuterio e trizio, che perdendo elettroni, si caricano positivamente. Questo gas in cui circolano particelle elettricamente cariche costituisce di fatto il quarto stato della materia o plasma. Si tenga presente che il campo magnetico deve impedire al plasma di toccare le pareti della macchina toroidale. Per capire come ciò possa accadere immaginiamo un nucleo di deuterio, carico positivamente che si muova nel plasma: in assenza di campo magnetico, esso procede in linea retta indisturbato, e a tal

proposito si veda l'immagine o riquadro A della figura 6. Se supponiamo che il riquadro della figura sia la camera a vuoto, la particella prosegue verso l'alto fino ad uscire dalla camera a vuoto.

Accendiamo ora il campo magnetico con le linee di campo disposte in direzione orizzontale e orientate verso sinistra (si veda il riquadro B). Per prevedere come si muoverà la particella carica nel campo, bisogna utilizzare la cosiddetta regola della mano destra. Per far ciò si posiziona il pollice della mano destra lungo la direzione in cui la particella si sta muovendo, ovvero verso l'alto, e l'indice lungo la direzione del campo, ossia verso sinistra. Infine, si posiziona il dito medio a  $90$  gradi rispetto a pollice e indice. Il dito medio indicherà la direzione della forza impressa alla particella dal campo. Il risultato di questa forza è che la particella si muove in circolo (si veda il riquadro B di figura 6). Questo però non corrisponde al caso generale. Infatti

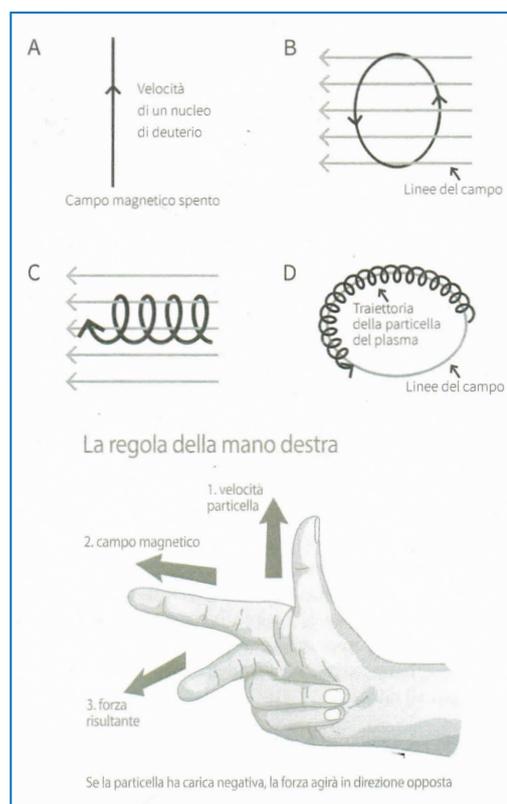


Figura 6 - Alcune importanti immagini.

se la particella inizialmente si sta muovendo in diagonale (per esempio come nel riquadro C di *figura 4*), il campo magnetico la costringerà a muoversi lungo una spirale intorno alle linee del campo. Come si può ben vedere, quando il campo viene attivato, la particella non può più scappare in direzione verticale. Noi vogliamo fare in modo che la particella non abbandoni la camera a vuoto. Ma come impedire che sfugga in direzione orizzontale? La chiave sta nel piegare le linee di campo e di chiuderle per formare un cerchio, in modo che la particella, spiraleggiando intorno alle linee di campo, segua una traiettoria chiusa, come se si stesse muovendo sulla superficie di una ciambella. Quando ITER sarà operativo, ad ogni dato momento la camera a vuoto conterrà meno di un grammo di deuterio e trizio. È un sistema pensato per operare ad impulsi: si carica il combustibile, si realizza la fusione, si estrae il combustibile esaurito e si ripete. Anche se le prime reazioni di fusione dureranno solo cinque minuti, si spera di poter comprendere sempre meglio come domare il plasma e di raggiungere, verso la fine della vita di ITER, cicli della durata di circa 50 minuti.

Il **passo quattro** consiste nel portare il plasma ad alta temperatura. Infatti, per indurre la reazione di fusione, il gas di deuterio e trizio, deve essere portato a 150 milioni di gradi, che è almeno 10 volte la temperatura al centro del Sole. Per capire in che modo si possa raggiungere un simile risultato dobbiamo prima vedere cosa accade a livello microscopico quando si riscalda un oggetto. In cucina, per esempio esistono vari modi per riscaldare un piatto. Potremmo mettere il piatto nel forno a 180 °C per un quarto d'ora, o potremmo usare un forno a microonde a massima potenza per due minuti, o potremmo versare il cibo in una padella e scaldarlo sui fornelli, oppure lasciarlo vicino al fuoco nel caminetto per mezz'ora.

Anche se si tratta di metodologie differenti, ciascuna di esse scalda il cibo. Per esempio, il fuoco nel caminetto irradia il piatto con radiazione elettromagnetica che viene assorbita dalle molecole del cibo. Nel forno, invece, le molecole di aria calda bombardano quelle del cibo, trasferendo loro energia, proprio come avviene quando una palla da biliardo ne colpisce ad alta velocità un'altra che si trova ferma sul tavolo, mettendola va sua volta in movimento. Ma l'energia trasferita al cibo, come si manifesta a livello macroscopico? In pratica risulta che più la temperatura è alta e più atomi e molecole si muovono velocemente: in un gas o in un liquido, si spostano con velocità più alta da un punto all'altro del contenitore; in un solido, invece, gli atomi sono obbligati a permanere in posizioni fisse, per cui a temperature più alte corrisponde una vibrazione più intensa intorno alla loro posizione di equilibrio, proprio come una corda di chitarra che può vibrare debolmente o fortemente, ma sempre intorno ad una posizione di equilibrio. Anche nel plasma in un reattore term nucleare si possono usare diverse tecniche di riscaldamento e, di fatto, si usano tutte e tre contemporaneamente, per aumentare l'efficienza del processo. Esse sono:

- 1 - Tecnica 1 o dei campi elettrici.
- 2 - Tecnica 2 o dei fasci neutri.
- 3 - Tecnica 3 o della radiofrequenza.

Per quanto concerne la prima di queste tre tecniche è bene dire che un campo elettromagnetico non è solo in grado di deviare la traiettoria delle particelle cariche del plasma, confinandole in una determinata regione di spazio, ma può anche accelerare tali particelle. Quindi alcune delle particelle cariche nel plasma subiscono una forza dovuta ai campi elettrici esterni e vengono spinte a velocità sempre più alte. Nel collidere con altre particelle nel plasma, le prime cedono parte dell'e-



**Nel forno, invece, le molecole di aria calda bombardano quelle del cibo, trasferendo loro energia, proprio come avviene quando una palla da biliardo ne colpisce ad alta velocità un'altra che si trova ferma sul tavolo, mettendola va sua volta in movimento**



Per poterli accelerare gli atomi di deuterio devono essere elettricamente carichi, quindi prima di iniettarli nell'acceleratore viene loro aggiunto un elettrone

nergia acquisita alle seconde e l'effetto totale è un riscaldamento del plasma.

Contemporaneamente alla prima tecnica si applica anche la seconda detta tecnica dei fasci neutri. In una zona del reattore, non lontana dalla camera a vuoto si trovano degli acceleratori di particelle che portano nuclei di deuterio (o deutoni) ad una velocità di 10 000 km/sec, mediante impulsi a radiofrequenza. Per poterli accelerare gli atomi di deuterio devono essere elettricamente carichi, quindi prima di iniettarli nell'acceleratore viene loro aggiunto un elettrone. Una volta portati ad alta velocità, i nuclei di deuterio passano per uno stabilizzatore che rimuove la carica negativa in eccesso così da farli ritornare neutri. Questi fasci neutri vengono poi direttamente iniettati nel plasma, ove, per urti successivi, trasferiscono la loro energia alle altre particelle, aumentando la temperatura del plasma. L'Italia riveste un ruolo molto importante nello studio e creazione di fasci neutri per ITER. Il Consorzio RFX di Padova è il centro di ricerca responsabile per lo sviluppo per la sorgente di atomi di deuterio negativi (detta SPIDER) e per l'acceleratore ed iniettore di atomi di deu-

terio (chiamato MITICA). Presso il centro italiano si sono costruiti e si stanno costruendo i prototipi in scala 1:1 che verranno poi collegati a ITER. Un acceleratore di fasci neutri è lungo 25 metri ed alto 9 ed il progetto di ITER ne utilizzerà due o tre. In *figura 7*, si può vedere un modello in 3D di un acceleratore di deuterio.

In questa figura, a sinistra si può vedere uno dei magneti a forma di D per il confinamento del plasma, mentre a destra l'acceleratore, lungo 25 metri ed alto 9. In alto a destra vi è la sorgente di ioni di deuterio ed in basso all'estrema sinistra la figura di una persona in scala per dare una sensazione delle dimensioni del sistema.

La terza ed ultima tecnica è quella della radiofrequenza. Inviando onde ad alta frequenza, la frequenza delle microonde è tale per cui l'energia delle onde corrisponde a ben precisi salti energetici. Il plasma pertanto in un reattore a fusione è in grado di assorbire energia se irradiato con radiazioni di determinate frequenze. Le onde ad alta frequenza riscaldano dunque il plasma. Il **passo cinque** consiste finalmente nella fusione. Una volta che il plasma di deuterio e trizio raggiunge la temperatura di 150 milioni di gradi, i nuclei si muovono così velocemente che un urto frontale può dar luogo alla fusione. C'è però un problema: se un reattore si basasse esclusivamente su questa reazione, le scorte mondiali di trizio si esaurirebbero in pochi anni. Per questo motivo ci si è dovuti ingegnare per risolvere il problema dell'approvvigionamento di combustibile riuscendo a far sì che il reattore stesso lo potesse sintetizzare. Il deuterio, da parte sua, non presenta alcun problema: esistono infatti grandi quantità di deuterio nell'acqua degli oceani. Lo 0,0156% degli atomi di idrogeno nell'acqua del pianeta Terra sono atomi di deuterio, ovvero un atomo ogni 6 420 atomi di idrogeno. La percentuale potrebbe sembrare molto bassa, ma la quantità di acqua presente nei mari è così elevata che

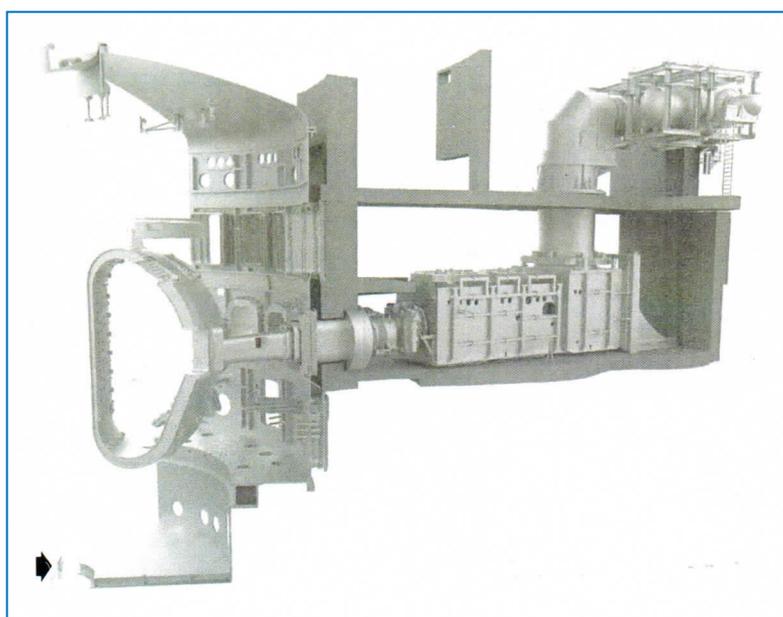


Figura 7 - Modello in 3D di un acceleratore di deuterio.

l'estrazione di deuterio in grandi quantità non è affatto un problema, e difatti esiste già un processo industriale ben collaudato per separare l'acqua pesante (o  $D_2O$ ) dalla comune acqua ( $H_2O$ ) per poi ottenere gas di deuterio tramite elettrolisi. Il problema risiede invece nella scarsità di trizio, che è un isotopo instabile dell'idrogeno e si trasforma in elio-3 con un tempo di dimezzamento di 12,32 anni. Ciò vuol dire che se avessimo a disposizione un chilogrammo di trizio, tra 12,32 anni circa, la metà si sarebbe trasformato in elio tre, lasciando 0,5 kg di trizio. Se aspettassimo ancora 12,32 anni, la metà si trasformerebbe, lasciandoci con 0,25 kg di trizio e così di seguito. Nel giro di 120 anni, del chilogrammo iniziale non resterebbe che un solo grammo di trizio. Per tale ragione diciamo che il nucleo di trizio è radioattivo.

Uno degli obiettivi del progetto ITER è dunque quello di testare la tecnologia della cosiddetta "breeding blanket", consistente in un rivestimento per la sintesi del trizio. Il primo strato di materiale che si affaccia direttamente sul plasma è il cosiddetto "primo muro", che deve resistere ad un flusso di energia di  $4,7 \text{ MW/m}^2$ , e non deve facilmente assorbire particelle di deuterio e trizio dal plasma. Gli esperimenti di laboratorio hanno mostrato che il berillio è il materiale più indicato per costruire il primo muro sul plasma. Dietro lo strato di berillio si trova la "blanket" che contiene pellet di silicati di litio-3, come mostrato in *figura 8*.

Osservando questa immagine, dall'interno verso l'esterno, troviamo la cavità in cui si trova il plasma, la breeding blanket per la sintesi del nuovo trizio (costituita da piastrelle di berillio che si affacciano sul plasma e dietro di esse, da materiale contenente litio-6) ed i magneti superconduttori a guisa di D. Nella zona in basso si trova il divertore. L'apparato funziona come segue: la reazione di fusione deuterio-trizio genera neutroni, che non essen-

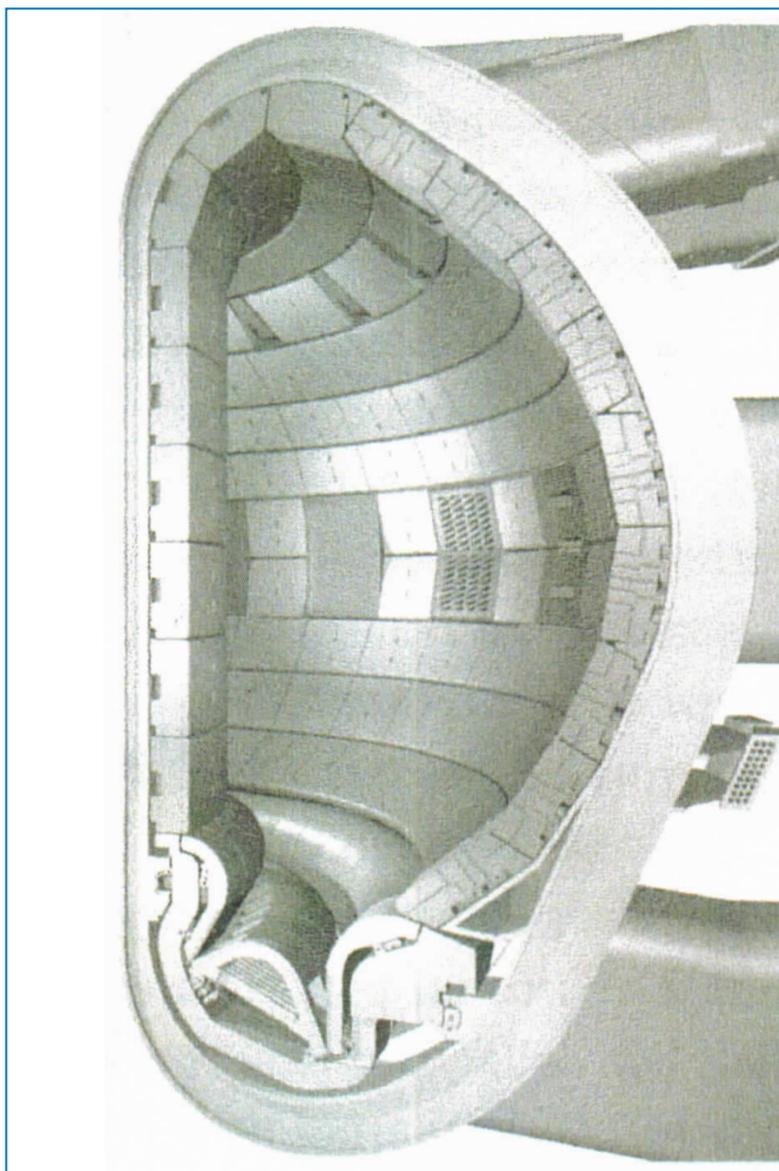


Figura 8 - Sezione della camera a vuoto di ITER.

do elettricamente carichi, possono sfuggire al campo magnetico di confinamento e raggiungere la blanket, dove i neutroni si fondono con i nuclei di litio-6 dando luogo ad un nucleo di trizio e ad uno di elio-4. In tal modo sempre più trizio si accumula nella blanket finché periodicamente, le pellet di silicato di litio vengono rimosse per permetterne l'estrazione.

La parte inferiore della *figura 8* mostra in sezione il cosiddetto "divertore" che, a causa della geometria dei campi magnetici, è la zona della camera a vuoto che riceve il



**Se avessimo a disposizione un chilogrammo di trizio, tra 12,32 anni circa, la metà si sarebbe trasformato in elio tre, lasciando 0,5 kg di trizio**

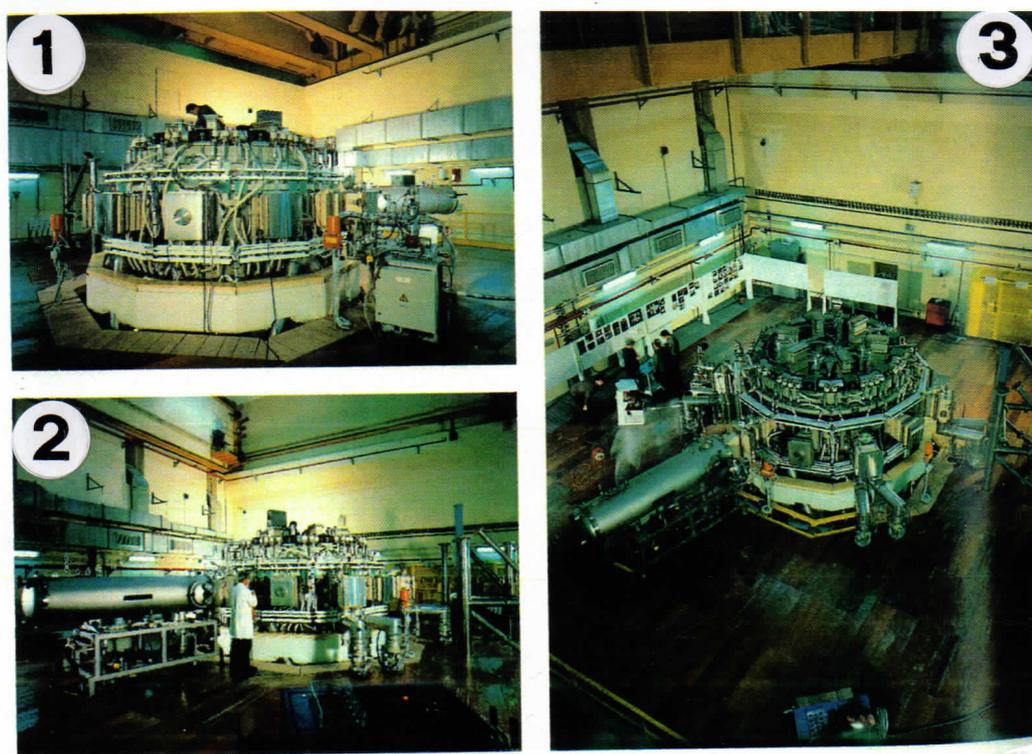


Figura 9 - Tre immagini del Tokamak di Frascati.

più alto flusso di energia che può raggiungere punte di  $20 \text{ MW/m}^2$ . È una potenza dieci volte superiore a quella subita dalle astronavi che rientrano nell'atmosfera e che vengono fortemente riscaldate per attrito con l'aria.

Il materiale usato per il divertore è il tungsteno essendo il metallo con il più alto punto di fusione. Si può pensare al divertore come ad un pozzo di energia, attraverso il quale si estrae l'energia in eccesso e dal quale passano il combustibile esausto e le impurezze create nella fusione. In Italia il progetto DTT (Divertor Tokamak Test) presso l'ENEA di Frascati è stato incaricato di sviluppare, costruire e testare un modello del divertore di DEMO. A tal fine, a Frascati si è realizzato un intero reattore Tokamak con magneti a D e con raggio di 2,3 metri, che riproduce in scala le condizioni previste per DEMO. In figura 9 sono riportate tre immagini del Tokamak di Frascati.

Nell'immagine 1 si vede una prospettiva del piano equatoriale della macchina. La struttura toroidale interna nella quale fluisce la corrente di plasma è circondata dagli avvolgimenti che generano il campo magnetico poloidale. Nell'immagine n. 2 si può vedere l'inserimento di uno dei dispositivi di misurazione, mentre nell'immagine 3, si ha una foto ripresa dal carro ponte mediante la quale vengono montati gli apparecchi collegati agli accessi superiori.

Il **passo sei**, che è il passo conclusivo, consiste nell'estrazione dell'energia dal plasma. Ogni prototipo di reattore usa una tecnica differente per trasformare l'energia liberata dalla fusione in energia elettrica, che poi può essere immessa in rete. Se nella reazione di fusione si producono neutroni, l'energia è asportata naturalmente da questi ultimi perché essendo elettricamente neutri, sfuggono al campo magnetico e possono rilasciare la loro energia cinetica nei materiali circostanti la camera



**I materiale usato per il divertore è il tungsteno essendo il metallo con il più alto punto di fusione**

a vuoto. Proprio per questo motivo, dietro la blanket vi è un sistema di circolazione di acqua di raffreddamento che asporta l'energia depositata dai neutroni. L'acqua è sotto pressione, per evitare che vada in ebollizione e si trasformi in vapore, perdendo la sua ottima capacità di scambiare il calore. In seguito, proprio come avviene in centrali elettriche di altro tipo, questa energia è utilizzata per trasformare acqua in vapore, il quale aziona le turbine che sono a loro volta collegate con alternatori che trasformano l'energia meccanica in energia elettrica.

### Future tappe e note conclusive

Ora che abbiamo visto come funziona un Tokamak alimentato da deuterio e trizio, cerchiamo di vedere quale è l'attuale stato dei lavori di ITER e quando si prevede che avremo un reattore a fusione di questo tipo allacciato alla rete elettrica. A tal proposito viene riportato uno schema delle prossime tappe.

■ 2025 (dicembre). Sarà creato il cosiddetto primo plasma nella camera a vuoto. Non si tratterà di un plasma

deuterio-trizio bensì di un plasma di test a base di idrogeno. Prima di passare al combustibile finale, bisogna infatti studiare come il plasma di ITER reagisce agli stimoli esterni. In questa fase, molte componenti del reattore non saranno nemmeno montate, come il divertore ed alcune parti della blanket;

- 2030-2035. Primo plasma di deuterio, seguito dai primi test in cui si cominciano ad iniettare piccole quantità di trizio mescolate con deuterio;
- 2035. Fusione deuterio-trizio, con l'obiettivo di mantenerla per circa 5-8 minuti e con una potenza termica di circa 500 MW. Via via che si comprenderà meglio il funzionamento del plasma, si spera di poter mantenere la fusione attiva per circa 50 minuti;
- 2040. Inizierà la costruzione di DEMO, con una potenza termica di 2 GW. Il progetto non è stato ancora ufficialmente approvato da Eurofusion;
- 2050 DEMO, allacciato alla rete elettrica, fornirà energia. Sarà il primo reattore del mondo a fusione termonucleare.



**Dietro la blanket vi è un sistema di circolazione di acqua di raffreddamento che asporta l'energia depositata dai neutroni**

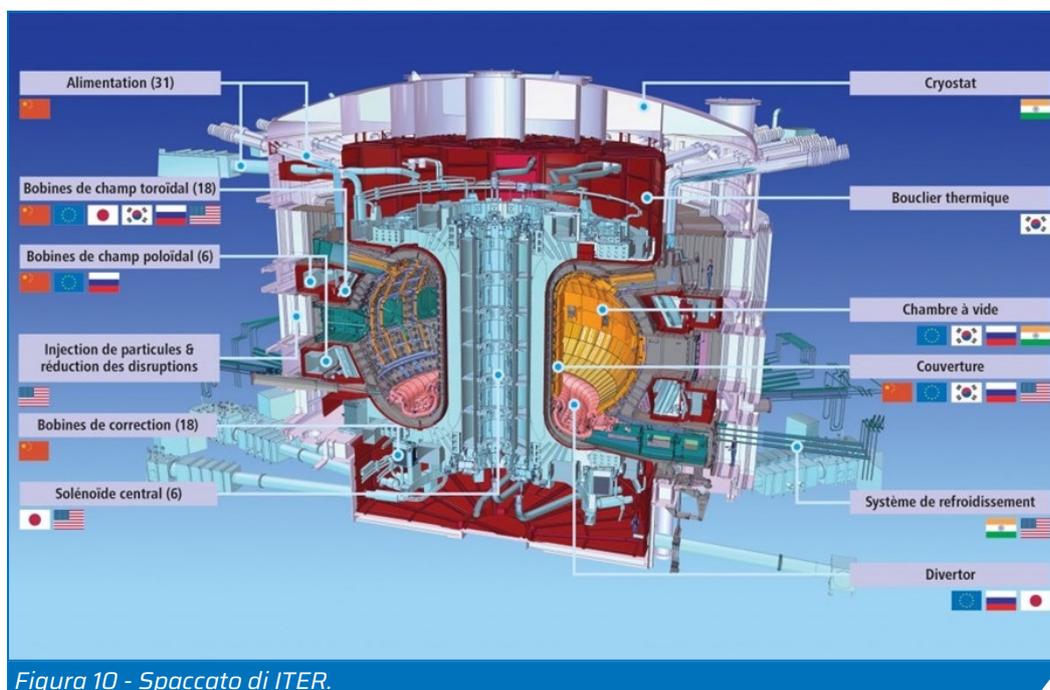


Figura 10 - Spaccato di ITER.



**L'acqua è sotto pressione, per evitare che vada in ebollizione e si trasformi in vapore, perdendo la sua ottima capacità di scambiare il calore**

In *figura 10*, che chiude l'articolo si può vedere uno spaccato di ITER, nel quale sono anche indicati i vari paesi che hanno collaborato al progetto.

### Bibliografia

Tra i testi più moderni, riguardanti in modo specifico la fusione nucleare controllata, si segnalano i seguenti tre:

- Baroni Simone, *La fusione nucleare. Mito o realtà? Una svolta possibile per una nuova energia*. Microscopi Hoepli, Milano 2023.
- Di Leo Carlo e Lucarelli Giorgio, *La fusione nucleare controllata: confinamento magnetico, confinamento inerziale, fusione fredda*. Editoriale Delfino, Milano, 2024 (terza edizione).
- Munoz Garcia Manuel e Ramos Rodriguez Mauricio, *La fusione nucleare: riprodurre l'energia delle stelle. Le frontiere della scienza*, National Geographic, Anno1, Numero 40. Milano, dicembre 2018.

Meno recenti, ma pur sempre ottimi, per quanto concerne la fusione controllata sono i seguenti:

- Artsimovich, *Fisica elementare del plasma*, Editori Riuniti, Roma, 1975.
- Caira Marcoe Cumo Maurizio, *Ingegneria dei reattori nucleari a fusione*, TNTA, Roma, 1991.
- Caldirola Piero, Pozzoli Roberto, Sindoni Elio, *Il fuoco della fusione termonucleare controllata*, EST, Mondadori, Milano, 1984.
- Chiuderi Claudio e Velli Marco, *Fisica dei plasmi*, Springer-Verlag, Milano.2012.
- Golant V. E., Sacharov S.E., Zilinskij A.P. *Fondamenti di fisica dei plasmi*, Edizioni Mir, Mosca, 1983.
- Pozzoli Roberto, *Fisica del plasma*, C.L.U.E.D., Milano, 1984.
- Pucella Gianluca, Segre Giorgio, *Fisica dei plasmi*, Zanichelli, Bologna, 2010.