

Possiamo cambiare marcia per l'energia da fusione in Europa?

Per mantenere la leadership e la competitività tecnologica, e garantire che l'energia da fusione diventi una realtà il prima possibile, l'Europa deve intensificare i suoi sforzi. L'attuale Roadmap per l'energia elettrica da fusione contiene gli elementi principali di un programma orientato ai reattori, e la logica che li collega, ma si basa in gran parte su un approccio sequenziale, da JET a ITER e DEMO, e su presupposti che non sono più validi. Riconoscendo la necessità di procedere il più rapidamente possibile alla dimostrazione della fattibilità commerciale dell'energia da fusione, la comunità europea della fusione e in particolare il Consorzio EUROfusion propongono un approccio leggermente modificato, fissando l'orizzonte temporale per l'entrata in funzione di un impianto di fusione dimostrativo al più tardi alla metà del secolo. Ciò implica una revisione degli obiettivi e dei requisiti specifici e dell'approccio sinergico agli elementi cruciali dell'attuale Roadmap, in primis ITER e DEMO.

DOI 10.12910/EAI2023-057



di **Ambrogio Fasoli**, Direttore dello Swiss Plasma Center presso l'Istituto Federale Svizzero di tecnologia di Losanna (EPFL), Presidente di EUROfusion

La fusione avviene quando nuclei leggeri si combinano per formare nuclei più pesanti. L'energia rilasciata in questo processo alimenta le stelle e può fornire all'umanità elettricità sicura, sostenibile, pulita e priva di emissioni di gas serra. I plasmi di fusione sono caratterizzati da fenomeni multi-scala, determinati dalle dinamiche non lineari derivanti dall'interazione delle particelle cariche con i campi elettrici e magnetici che le particelle stesse contribuiscono a produrre. La comprensione e il controllo di questi fenomeni richiedono un approccio multidisciplinare, comprendente esperimenti sofisticati in dispositivi su larga scala, simulazioni numeriche, scienza dei dati e intelligenza artificiale per il

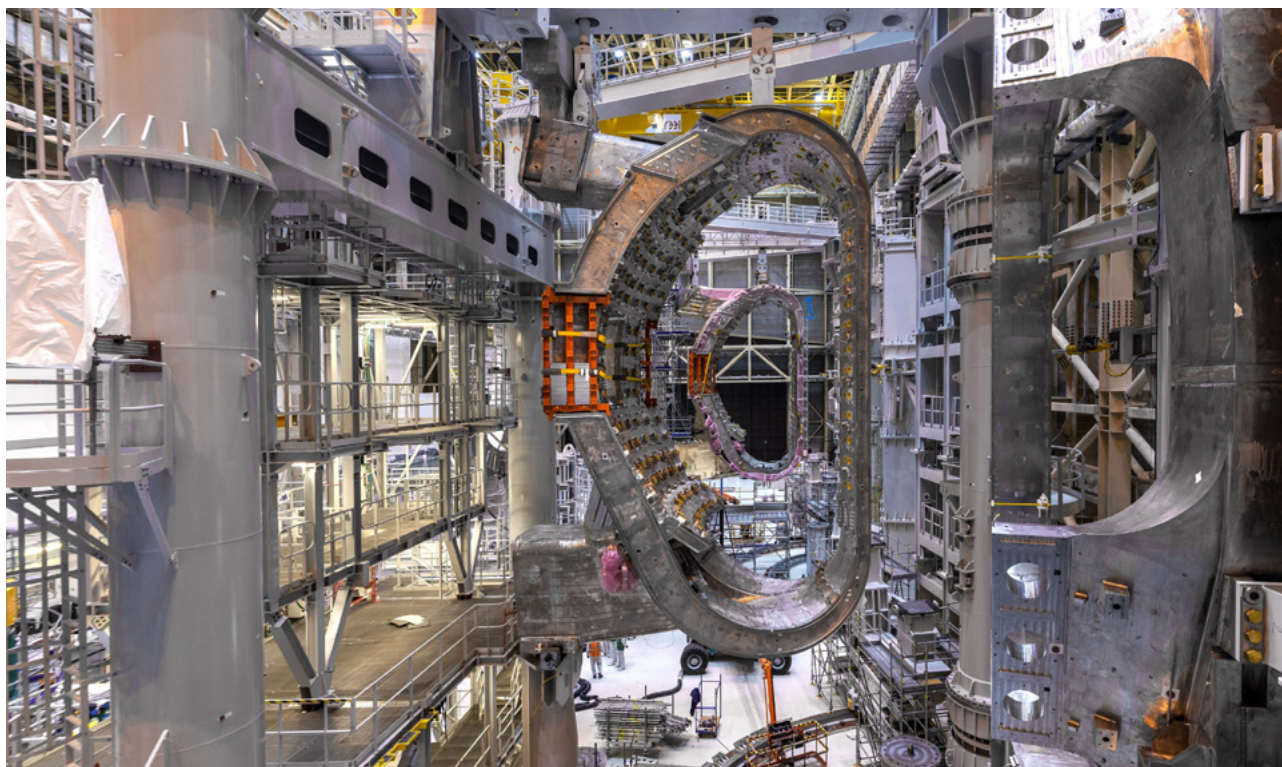
controllo del plasma in tempo reale, e diagnostiche avanzate per tracciare il comportamento del plasma.

Recentemente, è stato ottenuto il record di energia da fusione utilizzando il confinamento magnetico nel tokamak europeo JET, ed è stato raggiunto un bilancio energetico positivo in una capsula di plasma nella fusione inerziale. Nel tokamak cinese EAST è stato mantenuto un plasma stabile fino a 1000 secondi, e nello stellarator W7X è stato raggiunto un turnover di energia di plasma superiore a 1GJ. L'assemblaggio del tokamak ITER sta per essere completato. Grazie a questi risultati, l'interesse per la fusione è cresciuto enormemente, compreso per industrie ed investitori privati.

Combattere il cambiamento climatico e accrescere l'indipendenza energetica

Allo stesso tempo, è cresciuta la percezione dell'urgente bisogno di energia elettrica pulita, **per combattere il cambiamento climatico** e far fronte a condizioni sociali ed economiche in rapida evoluzione. **La guerra in Ucraina ha reso la società desiderosa di sviluppare soluzioni energetiche scevre da una dipendenza eccessiva da singoli Paesi.**

Nonostante i grandi investimenti nelle energie rinnovabili, i combustibili fossili coprono ancora circa l'80% del consumo energetico mondiale. È diventato evidente che le fonti rinnovabili hanno un'ampia impronta geografica e che il loro carattere intermittente richiede uno stoccaggio



su larga scala, ancora costoso e non privo di impatto ambientale. **Le centrali elettriche di base continueranno a essere importanti.**

Per mantenere la sua posizione di leadership e la sua competitività tecnologica, e per garantire che l'energia da fusione diventi una realtà il prima possibile, l'Europa deve intensificare i suoi sforzi. L'attuale Roadmap europea per l'energia elettrica da fusione contiene gli elementi principali di un programma orientato ai reattori, e la logica che li collega, ma si basa in gran parte su un approccio sequenziale, da JET a ITER e DEMO, e su presupposti che non sono più validi. In particolare, tale approccio sequenziale verrebbe fortemente rimandato a causa dei ritardi previsti nell'avvio delle operazioni di ITER.

Riconoscendo la necessità di procedere il più rapidamente possibile

alla dimostrazione della fattibilità commerciale dell'energia da fusione, la comunità europea della fusione e in particolare il Consorzio EUROfusion propongono un approccio leggermente modificato, fissando l'orizzonte temporale per l'entrata in funzione di un impianto di fusione dimostrativo al più tardi alla metà del secolo. Ciò implica una revisione degli obiettivi e dei requisiti specifici e dell'approccio sinergico agli elementi cruciali dell'attuale Roadmap, in primis ITER e DEMO.

Da ITER lezioni cruciali e uniche

Il progetto ITER è la pietra miliare nella ricerca della fusione, in quanto fornirà una dimostrazione della fattibilità scientifica e tecnologica del raggiungimento di un bilancio energetico positivo nel plasma a una scala compatibile con la produzione netta di energia dalla fusione, e della

sua sicurezza. **Da ITER si traggono lezioni cruciali e uniche in tutte le sue fasi, dalla progettazione all'assemblaggio, alle prime operazioni e infine alle campagne a piena potenza con combustibile Deuterio e Trizio.** D'altro canto, DEMO, l'ultima fase di ricerca e sviluppo prima di una piena diffusione commerciale della fusione, dimostrerà che è possibile integrare tutti gli elementi di fisica e tecnologia che consentono la fusione in una centrale elettrica affidabile, disponibile, di lunga durata ed economicamente competitiva.

Per dimostrare la fattibilità commerciale dell'energia da fusione intorno alla metà del secolo è necessario avere come obiettivo l'avvio delle operazioni di DEMO in un arco di tempo di 20 anni dall'inizio del progetto. In Europa, è opinione diffusa che gli obiettivi minimi di DEMO debbano comprendere:

- la dimostrazione delle prestazioni delle tecnologie chiave, ad adeguati livelli di disponibilità ed accessibilità dell'impianto, e la loro integrazione;
- una produzione netta di energia elettrica alla rete dell'ordine di 300-500MWs;
- un ciclo di combustibile autosufficiente;
- un robusto scenario di funzionamento del plasma e un sistema di estrazione dell'energia dalla camera da vuoto (plasma exhaust);
- una dimostrazione della sicurezza intrinseca e di impatto tollerabile degli elementi attivati;

Con questi elementi, sarà possibile valutare le prospettive economiche di una centrale a fusione, consentendo tuttavia ulteriori sviluppi basati sull'ottimizzazione del progetto e sulle innovazioni tecnologiche.

Lacune nelle conoscenze

Sebbene molti dei fondamentali siano oggi ben noti, rimangono ancora alcune lacune nelle nostre conoscenze. Secondo il parere soggettivo dell'autore, le aree più importanti per lo sviluppo della fisica del plasma per una centrale a fusione sono gli scenari del plasma, i transitori, il plasma exhaust, e il regime del burning plasma.

La tecnologia per la fusione magnetica deve essere all'avanguardia in una serie impressionante di campi, dalla manipolazione a distanza alla criogenia, all'equilibrio dell'impianto e alle sorgenti di microonde ad alta potenza, per citarne alcuni.

Sebbene tutti questi aspetti presentino problemi significativi, gli sforzi più urgenti di ricerca e sviluppo sono probabilmente necessari per il blanket, ovvero il sistema che circonda il plasma come un mantello e che garantisce la riproduzione del combustibile, per il quale non esiste ad oggi un concetto definitivo, e per

i materiali. Particolare attenzione deve essere prestata anche ai magneti superconduttori, che hanno un impatto cruciale sul progetto globale e sui costi, e, cosa ancora più importante, alle procedure di licensing che, se non affrontate tempestivamente, possono diventare un ostacolo quasi insormontabile.

Oltre a rinforzare e focalizzare l'intero programma, sarà fondamentale per il nuovo approccio europeo poter trovare un equilibrio tra conoscenze consolidate e innovazioni, ed esplorare soluzioni a più alto rischio e potenziale rispetto a quelle intraprese finora. Un nuovo importante aspetto è il coinvolgimento delle industrie in partenariati pubblico-privati, che consentirà di rendere più efficaci le fasi di progettazione e costruzione di DEMO, che devono essere guidate dall'industria. DEMO dovrà essere costruito con pratiche industriali.

Uno sforzo multidisciplinare a lungo termine

Prospettiamo, inoltre, una parallelizzazione di alcune attività tra ITER e DEMO, ad esempio quelle relative allo sviluppo del blanket, per ridurre il rischio intrinseco a un funzionamento precoce di DEMO e consentire un'introduzione anticipata delle centrali a fusione. È inoltre importante iniziare al più presto la selezione del sito per DEMO, il che consentirebbe di sviluppare l'interazione con il legislatore per procedere in parallelo con la concessione delle licenze. Infine, proponiamo di intensificare gli sforzi per sviluppare soluzioni che possano rendere più attraenti le centrali a fusione, come il concetto di stellarator, i magneti superconduttori ad alta temperatura, i metodi di raffreddamento innovativi e i materiali strutturali avanzati. Per sostenere questo approccio accelerato è necessaria una diffusione su

larga scala delle simulazioni numeriche, che combinino la descrizione in principi primi della regione di plasma del nucleo caldo con quella del bordo più freddo che interagisce con le superfici dei materiali, una descrizione ab-initio delle proprietà dei materiali e codici di sistema sempre più realistici e completi, che beneficino anche dell'**uso dell'intelligenza artificiale** a diversi livelli, compreso per il controllo del plasma. Questo sforzo guiderà non solo la definizione degli esperimenti, l'interpretazione e l'estrapolazione dei dati nei dispositivi al plasma attuali e futuri, ma anche la stessa progettazione di DEMO.

La ricerca sulla fusione è uno sforzo multidisciplinare a lungo termine che richiede esperti in campi quali la fisica del plasma e atomica, la robotica, l'intelligenza artificiale, la scienza dei materiali, l'ingegneria meccanica ed il controllo. **Il carattere transdisciplinare della ricerca sulla fusione alimenta competenze trasversali in numerose altre aree scientifiche e industriali. I plasmi sono utilizzati al di là della fusione in diversi campi, tra cui la propulsione spaziale, le tecnologie a microonde, la riduzione dell'inquinamento per le navi da carico, la sterilizzazione, la dermatologia, l'oncologia e l'odontoiatria, e per metodi innovativi di accelerazione delle particelle per la fisica delle alte energie.**

Questi sviluppi entusiasmanti ed i temi all'avanguardia che il programma di fusione affronta, integrando la fisica del plasma con le tecnologie energetiche, costituiscono un'attrattiva unica e forniscono un ambiente ottimale per la formazione di nuove generazioni di scienziati ed ingegneri - una risorsa cruciale per il successo dell'impresa globale e transgenerazionale che la ricerca dell'energia di fusione rappresenta.