

Memoria audizione 8a Commissione Senato (Ambiente, transizione ecologica, energia, lavori pubblici, comunicazioni, innovazione tecnologica)

Indagine conoscitiva in materia di energia prodotta mediante fusione nucleare

Dott. Stefano Fabris

Direttore del Dipartimento Scienze Fisiche e Tecnologie della Materia
Consiglio Nazionale delle Ricerche

Il record mondiale di energia prodotta da una reazione di fusione nucleare controllata è stato ottenuto a fine 2023 presso l'infrastruttura di ricerca europea JET (Joint European Torus). Questo risultato ha definitivamente dimostrato le potenzialità del combustibile deuterio-trizio che è alla base del funzionamento delle future macchine a fusione come ITER e della centrale elettrica dimostrativa DEMO, il cui scopo è la dimostrazione scientifica e tecnologica della fusione come fonte di energia pulita, sicura e virtualmente inesauribile. È evidente che il panorama internazionale sta subendo rapidi cambiamenti; il settore della fusione ha recentemente registrato un'accelerazione non solo grazie a questi notevoli risultati nella ricerca di frontiera e tecnologica, ma anche grazie all'impulso proveniente da nuovi attori sia privati che pubblici, che manifestano un forte interesse, anche di natura commerciale, per questo campo.

In questo scenario, l'Italia emerge a livello globale come un punto di riferimento nella ricerca scientifica e nello sviluppo tecnologico. Questa posizione di leadership è stata raggiunta grazie alla pluridecennale collaborazione tra Enti Pubblici di Ricerca di ricerca e il sistema universitario, nonché ai partenariati pubblico-privati. Grazie a tali collaborazioni e alle competenze imprenditoriali delle aziende italiane, il nostro paese è un attore chiave nella realizzazione della maggior parte dei componenti dei grandi esperimenti internazionali e del reattore a fusione ITER. L'industria italiana ha infatti ricevuto commesse europee per quasi 2 miliardi di euro relative a ITER.

Il CNR è attivamente impegnato nella ricerca sulla fusione sin dagli anni '60, in stretta collaborazione con i suoi principali partner nazionali, tra cui l'ENEA, il consorzio RFX, le Università di Padova e di Milano-Bicocca, il consorzio DTT e altri ancora. Grazie a questa sinergia, il CNR contribuisce a determinare le politiche strategiche dei maggiori programmi internazionali sulla fusione e partecipa alla realizzazione dei maggiori progetti in questo campo mettendo a disposizione personale, competenze e infrastrutture. Il settore che vede maggiormente coinvolto il CNR è quello della fusione termonucleare controllata a confinamento magnetico, principalmente tramite l'Istituto di Scienza e Tecnologia dei Plasmi, mentre altri Istituti partecipano affrontando aspetti più specifici. L'Ente riveste inoltre un ruolo di primo piano anche nel settore della fusione inerziale, principalmente tramite l'Istituto Nazionale di Ottica. Complessivamente il CNR dedica più di 150 unità di personale alla ricerca nel settore della fusione nucleare.

Nonostante i recenti successi e sviluppi, entrambi gli approcci disponibili per il confinamento del plasma, magnetico e inerziale, sono al momento limitati da sfide scientifiche e tecnologiche complesse che possono essere affrontate solo tramite un approccio basato su collaborazioni internazionali, di cui dirò tra poco. Ritengo qui utile sottolineare il recente cambio di approccio della comunità internazionale riguardo queste sfide: una transizione dalla centralità della ricerca pubblica

degli ultimi decenni verso un modello di partnership strategiche pubblico-privato volto a promuovere un maggior coinvolgimento del settore privato (relazione presentata alle Comunità Europea il 3 Ottobre 2023 *Analysis on a strategic public-private partnership approach to foster innovation in fusion energy*). Come dimostrerò a breve, l'Italia – anche tramite il CNR - si trova già in una posizione favorevole in questo modello di sviluppo. Un aspetto su cui penso sia importante porre attenzione è la tutela della proprietà intellettuale scientifica che è stata sviluppata in Europa sotto l'egida della ricerca pubblica.

Quali sono il ruolo e la strategia del CNR nel settore della fusione nucleare e come si colloca nella roadmap globale?

Come più grande Ente pubblico di ricerca del Paese, il CNR sviluppa una politica che agisce su tre livelli fortemente interconnessi tra loro:

- un solido programma di ricerca scientifica e di sviluppo tecnologico;
- una forte connessione con i grandi progetti collaborativi internazionali e le infrastrutture di ricerca;
- una radicata esperienza nella formazione di giovani talenti nel campo della fusione, in collaborazione con i principali partner accademici.

Ricerca scientifica e sviluppo tecnologico

Nel settore del **confinamento magnetico**, il CNR si focalizza su 5 degli 8 principali pillars che la comunità internazionale ha identificato come linee di sviluppo parallelo verso lo sfruttamento dell'energia da fusione (EUROfusion - *European Research Roadmap to the Realisation of Fusion Energy*; EFDA – *Roadmap to the realization of fusion energy*; UK Department for Energy Security - *Towards Fusion Energy 2023*):

- Regimi di operazione del plasma: Il plasma, lo stato della materia in cui si sviluppa la reazione nucleare, mostra fenomeni fisici complessi e ricchi. Lo studio dei plasmi è quindi fondamentale per far avanzare la tecnologia necessaria allo sviluppo di reattori a fusione. In questo contesto il CNR ha consolidate competenze nello studio dei diversi processi fisici che si verificano nei plasmi di un tokamak, dell'interazione con la radiazione elettromagnetica e nel controllo dei plasmi toroidali; nella fisica e ingegneria delle macchine; nello sviluppo di tecnologie per il riscaldamento del plasma; nella realizzazione di impianti e sistemi di diagnostica del plasma;
- L'estrazione del calore e dei residui delle reazioni nucleari: L'energia per mantenere il plasma alle temperature necessarie per promuovere le reazioni nucleari (150 milioni di gradi) viene concentrata in una regione ristretta della camera a vuoto chiamata divertore, che è evidentemente un elemento critico per i carichi termici a cui deve resistere (~10 MW/m²). La ricerca del CNR punta a identificare e caratterizzare materiali e geometrie per un'efficace estrazione del calore e dei prodotti di reazione, per ridurre al minimo la contaminazione del plasma e proteggere le pareti dai carichi termici e neutronici;
- Materiali: L'interazione plasma-parete è una delle questioni più critiche per quanto riguarda le prestazioni, la sicurezza e la disponibilità dei futuri reattori a fusione. Il CNR è impegnato nell'identificare e testare nuovi materiali per le pareti della camera a vuoto e resistenti alle condizioni estreme di reazione (ad esempio il nuovo acciaio Eurofer-97 o materiali a base di tungsteno). Altri fenomeni su cui si concentrano gli studi riguardano l'interazione della polvere di reazione con i materiali esposti al plasma, l'erosione e la diffusione superficiali, le modifiche

di morfologia e composizione chimica locale, la ritenzione di combustibile e prodotti di reazione, la resistenza ai neutroni e alla contaminazione.

- Il progetto integrato del reattore prototipo DEMO: Il CNR, anche attraverso il Consorzio RFX, riveste ruoli rilevanti nello sviluppo e nel progetto dei sistemi di conversione statica, nei sistemi di riscaldamento addizionale, nei sistemi di controllo, nei sistemi diagnostici;
- Economicità della produzione di energia elettrica: la realizzazione delle centrali a fusione si innesta in un sistema di produzione dell'energia elettrica che è in evoluzione verso la completa eliminazione delle fonti fossili. Gestire questa transizione necessita di studi integrati sia a livello nazionale che europeo. Il CNR, attraverso il Consorzio RFX, riveste un ruolo di leadership europea nel coordinamento di questo settore, oltre a sviluppare modelli di scenari energetici per ottimizzare il paniere delle fonti e il suo sviluppo temporale nel corso del secolo.

La simulazione e la modellazione integrate sono ampiamente riconosciute come un requisito essenziale per il successo della missione sull'energia da fusione. Grazie alla disponibilità di sistemi di calcolo ad alte prestazioni e di nuovi algoritmi di intelligenza artificiale, il CNR sviluppa e utilizza modelli e codici numerici avanzati per ricerche sulla teoria fondamentale dei plasmi, per lo sviluppo di metodi di controllo del plasma, per l'interpretazione dei dati sperimentali, e per la progettazione di dispositivi futuri.

Nel campo del **confinamento inerziale**, le competenze del CNR si concentrano principalmente sull'interazione laser-plasma, sull'accelerazione a plasma con laser ultraintensi e sull'interazione tra laser e materiali avanzati - argomento di primario interesse per l'impiego nelle capsule contenenti il combustibile.

Grandi progetti collaborativi internazionali

Come ho detto precedentemente, la realizzazione della fusione nucleare controllata è un progetto globale e quindi la partecipazione ai grandi progetti collaborativi internazionali risulta fondamentale. Il CNR opera nei programmi europei fin dal 1972, anno in cui è stato stipulato il primo accordo di cooperazione tra CNR e EURATOM. La partecipazione italiana è oggi coordinata da ENEA.

Il CNR partecipa a EUROfusion – il consorzio di laboratori europei che coordina la ricerca sulla fusione nei programmi Horizon 2020 e Horizon-EUROPE e che attua la Roadmap europea sulla fusione (Programma teorico e sperimentale propedeutico a ITER; campagne sperimentali di JET ed altri esperimenti europei (TCV, MAST Upgrade, Asdex Upgrade, Wendelstein); grande esperimento Tokamak JT60-SA, ruoli di coordinamento e realizzazione di impianti e diagnostiche; studi di fattibilità per DEMO, il futuro prototipo di reattore).

Inoltre, il CNR riceve contratti per progetti e realizzazione di componenti e sistemi sia da Fusion for Energy, l'agenzia europea per la costruzione di ITER, sia direttamente da ITER.

Infrastrutture di ricerca

Il CNR, riveste un ruolo di primo piano nell'ambito dello sviluppo di infrastrutture di ricerca nel campo della fusione. Ad esempio a Milano opera la macchina lineare GyM per studi di interazione plasma-materiali. Questo ruolo viene svolto anche tramite la partecipazione ai partenariati pubblico-privati che ho anticipato precedentemente e che realizzano le infrastrutture per lo studio del plasma propedeutiche alla partecipazione italiana ai progetti internazionali.

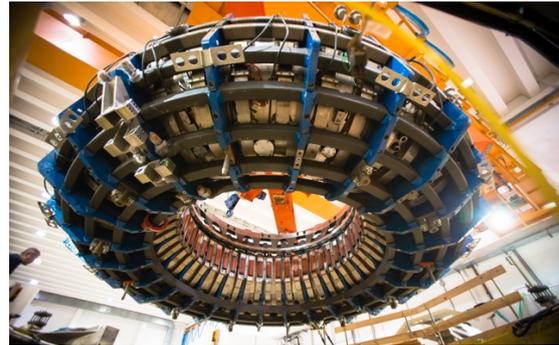
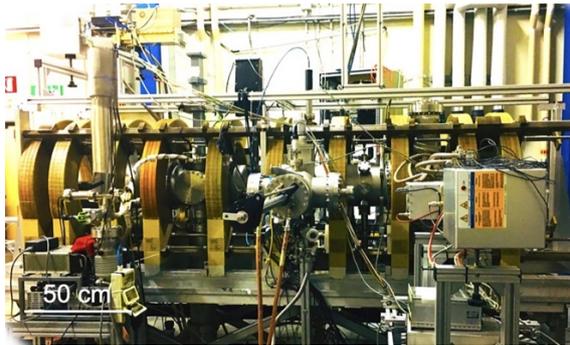
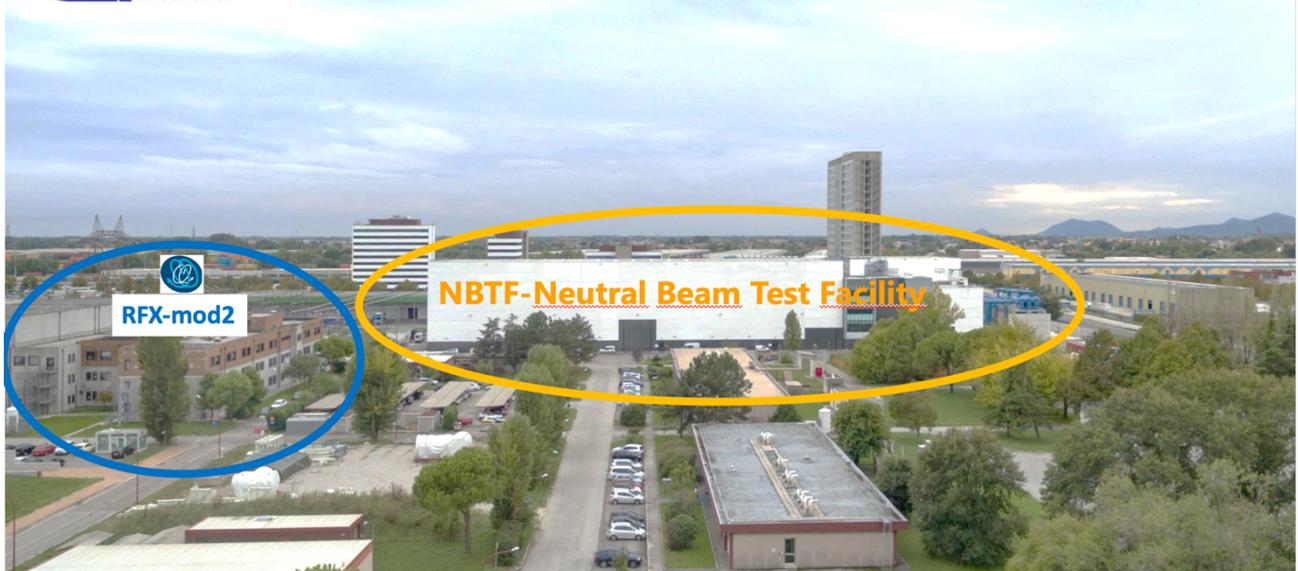


Figura 1. A sinistra: Dispositivo lineare GyM (Gyrotron Machine) che consente studi sperimentali sull'interazione plasma-materiale. A destra: Macchina a confinamento magnetico toroidale RFX-mod2.

Il CNR è socio fondatore del Consorzio RFX, che vede la partecipazione di CNR, Università di Padova, ENEA, INFN e Acciaierie Venete spa e che costituisce un modello di integrazione delle ricerche svolte in ambito delle tecnologie della fusione dai maggiori enti di ricerca italiani, il mondo accademico e la realtà manifatturiera. La sede del Consorzio è ospitata nell'Area della Ricerca CNR di Padova e in esso vi lavorano oltre 180 persone. Il Consorzio ha progettato e realizzato una macchina a confinamento magnetico toroidale, RFX giunta ora al terzo upgrade RFX-mod2, la più grande al mondo nel suo genere. (La sigla è l'acronimo di Reversed Field eXperiment, una configurazione di confinamento magnetico alternativa al più studiato Tokamak da cui differisce per un più alto livello di autorganizzazione del plasma con conseguenti semplificazioni ingegneristiche.) Nel 2021 RFX è stato incluso nella lista delle Infrastrutture di Ricerca ad Alta Priorità nel PNIR 2021-27 ed è stata recentemente potenziata dal CNR tramite il progetto infrastrutturale NEFERTARI finanziato dal PNRR in collaborazione con l'Università di Napoli "Federico II" e l'Università di Padova.



Area della ricerca di Padova



Il Consorzio RFX, con specifico accordo con ITER Organization e con supporto governativo, è impegnato nello sviluppo degli unici componenti di ITER realizzati al di fuori del sito francese. La Neutral Beam Test Facility – realizzata da RFX nell'area della ricerca CNR di Padova – è un'infrastruttura di ricerca per lo sviluppo di iniettori di particelle neutre accelerate a 1 MV per il

riscaldamento del plasma di ITER, dalle prestazioni che non sono mai state realizzate finora. Il direttore di ITER Barabaschi ebbe modo di dire alla Presidente Carrozza in visita a Cadarache: “Non c’è NBTF senza ITER ma non c’è ITER senza NBTF”. Nella NBTF sono ospitati due grandi apparati sperimentali:

- SPIDER, entrato in funzione nel 2018, dedicato a sviluppare la sorgente di ioni negativi di H/D che, una volta estratti, possono essere accelerati fino al valore di energia richiesto.
- MITICA, il prototipo degli iniettori che verranno installati in ITER. In MITICA una sorgente di ioni negativi simile a quella di SPIDER sarà accoppiata ad un sistema di accelerazione elettrostatica a 5 stadi fino all’energia di 1 MV per un totale di 40 MW di potenza.

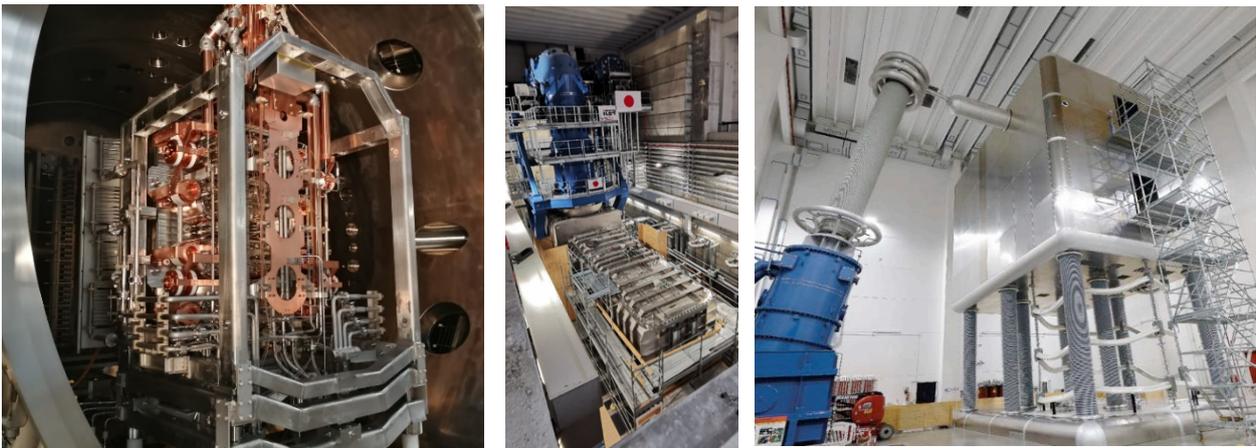


Figure 2. Da sinistra a destra: la sorgente di SPIDER; MITICA; l’iniettore e particolare della cabina da 1 MV.

Il CNR è socio della Scarl DTT, a cui contribuisce ampiamente alla progettazione scientifica e tecnologica, che ha lo scopo di realizzare il maggior esperimento di tipo Tokamak europeo e su cui il Presidente Romanelli ha già riferito in questa sede. Vorrei sottolineare nuovamente come DTTscarl sia attualmente tra i migliori esempi di partnersip pubblico-private del settore.

Un altro esempio in questo contesto è il Joint Research Agreement stipulato da CNR e ENI nel 2019 per attività congiunte di ricerca e sviluppo nel settore della fusione nucleare. L’accordo prevede la costituzione di un centro ricerche ENI-CNR a Gela.

Formazione

Mantenere la leadership globale nella scienza, nelle tecnologie e negli impianti della fusione richiede una particolare attenzione nell’ambito delle collaborazioni tra Enti pubblici, Università e imprese per assicurare una pipeline di scienziati, ingegneri e tecnici altamente qualificati a tutti i livelli di carriera, dallo studente universitario al ricercatore post-dottorato. In questo contesto il CNR ha sviluppato solide competenze in ambito sperimentale, teorico e numerico ed ha una forte tradizione nell’alta formazione, con tesi di laurea, dottorati di ricerca e post-dottorato svolti nelle proprie strutture in collaborazione con le principali Università Partner, con particolare riferimento alle Università di Milano-Bicocca e di Padova, dove risiede dal 2006 l’unico dottorato di ricerca europeo specificatamente destinato a formare fisici ed ingegneri nella fisica e nella ingegneria del plasma.