

La fusione a Frascati: una storia di successi proiettata nel futuro

I laboratori ENEA di Frascati continuano a giocare un ruolo di rilievo nel panorama internazionale e il grande patrimonio impiantistico, strumentale e di competenze presente nel centro trova importanti applicazioni in svariati campi. La scuola di fisica che ha dato vita ai primi studi degli anni 50, è tutt'oggi saldamente presente e attiva in particolare nello sviluppo di modelli avanzati per la descrizione del comportamento dei plasmi e l'analisi delle osservazioni ottenute negli esperimenti. Inoltre, particolarmente significativo è l'impegno nella realizzazione della nuova macchina DTT: dalla progettazione concettuale, alla definizione dei programmi di attività, alla realizzazione di numerose diagnostiche sia tradizionali sia innovative, per l'osservazione del comportamento del plasma e la validazione dei modelli teorici.

DOI 10.12910/EAI2023-056



di Paola Batistoni, Marco Ciotti, Luigi De Dominicis, Antonio Della Corte, Dipartimento Nucleare ENEA

Alla fine degli anni '50, un piccolo gruppo di ricercatori del Consiglio Nazionale di Ricerche Nucleari (CNRN, poi CNEN e oggi ENEA) iniziò un'attività di ricerca su gas ionizzati e fusione nucleare presso l'Università di Roma. Nel 1960 l'attività fu trasferita presso il Centro di Ricerche di Frascati dove era stato costruito un primo edificio per ospitare il nuovo Laboratorio Gas Ionizzati. Nello stesso anno veniva firmato il contratto di associazione tra il CNRN e Euratom che definiva i termini con cui il CNRN avrebbe fornito il proprio contributo "per mezzo dello studio della fisica del plasma e della fusione nucleare controllata nel suo Laboratorio Gas Ionizzati". Nasceva così a Frascati il Programma Fusione Italiano. **Nei primi anni la ricerca fu orienta-**

ta allo studio della fisica dei plasmi di interesse non solo per la fusione ma anche per l'astrofisica. Furono varati due programmi sulla fusione, uno orientato al confinamento magnetico, l'altro al confinamento inerziale con lo studio di plasmi densi e caldi ottenuti con tecniche di compressione magnetica, e dell'interazione di fasci laser di potenza con la materia. In parallelo, venivano sviluppate le diagnostiche necessarie e studi teorici per l'analisi degli esperimenti.

I primi grandi impianti di ricerca e la crescita dei laboratori tecnologici

In seguito ai risultati ottenuti nel 1968 dal Tokamak russo T3, in cui per la prima volta un plasma raggiungeva temperature di 10 milioni di gradi, anche a Frascati si decise di

concentrare le attività sulla linea a confinamento magnetico, e in particolare sulla configurazione tokamak, così come avveniva in altri laboratori europei e americani. Ci si orientò verso una macchina compatta con alto campo magnetico per esplorare regimi ad alta densità e alta corrente di plasma, quindi con più efficace riscaldamento ohmico del plasma. **Il primo tokamak costruito a Frascati, il Frascati Tokamak (FT), aveva un campo magnetico toroidale di 10 T e corrente di plasma di 600 kA. Per il riscaldamento del plasma si utilizzavano onde elettromagnetiche a radiofrequenza (2.45 GHz). Il progetto fu avviato nel 1971, il primo plasma fu ottenuto nell'aprile 1978.** Qualche anno dopo si decise di realizzare un esperimento più ambizioso per estendere i buoni risultati ottenuti con l'utilizzo di maggiori

potenze di riscaldamento a radiofrequenza. La costruzione della nuova macchina, il **Frascati Tokamak Upgrade (FTU)**, richiese circa sette anni a partire dal 1982. Anche FTU era una macchina compatta ad alto campo (corrente di plasma 1.6 MA, campo magnetico 8 T), ma con una superficie di accesso al plasma molto maggiore di FT per permettere un sostanziale riscaldamento del plasma con una potenza totale dei sistemi a radiofrequenza di 9.2MW. Così come FT, l'intera macchina era racchiusa in un criostato e raffreddata con azoto liquido. In FTU sono stati ottenuti plasmi ad alta densità (fino a 8×10^{20} particelle/cm³), temperature ioniche ed elettroniche pari a 15 milioni di gradi, con parametri di plasma molto migliorati rispetto a

quanto previsto dalle leggi di scala semi empiriche. **FTU è stato chiuso nel 2020 per permettere la costruzione del nuovo esperimento Divertor Tokamak Test facility (DTT).** Negli stessi anni venne riavviata la ricerca sulla fusione a confinamento inerziale al fine di mantenere in Italia l'esperienza acquisita in questo campo. L'Impianto ABC, nato nel 1988 e ancora in funzione, è un impianto laser ad alta energia in grado di produrre due potenti fasci di luce infrarossa alla lunghezza d'onda di 1054 nanometri. L'energia viene liberata in tre miliardesimi di secondo su un'area di diametro di 50 micron. Quando l'impulso laser colpisce il bersaglio, nella zona di interazione si forma il plasma. La qualità dell'implosione del bersaglio

è studiata misurando varie caratteristiche del plasma, tra cui la densità, la luce visibile ed i raggi X emessi, le particelle cariche accelerate e le microonde generate dal loro movimento.

Alla fine degli anni '80, crescendo l'interesse verso gli aspetti tecnologici della fusione, fu anche avviata la costruzione di un generatore di neutroni da 14 MeV per studiare l'interazione dei neutroni da fusione con i vari materiali di interesse per il reattore. Il 14-MeV **Frascati Neutron Generator (FNG)**, interamente progettato e realizzato in ENEA, inaugurato nel 1992 ed ancora in operazione, genera fino a 10^{11} neutroni/s tramite la reazione di fusione $D+T=n+\alpha$ accelerando un fascio di deutoni su bersagli triziati.



La realizzazione di FNG fu una felice intuizione: è tuttora uno dei pochissimi generatori di neutroni di intensità medio-alta al mondo per la ricerca sulla fusione, ed è la facility di riferimento in Europa. Oggi la neutronica per la fusione è notevolmente cresciuta rispetto al 1992: in questo progresso FNG ha dato, e continuerà a dare, un contributo fondamentale.

Fin dall'inizio i Laboratori erano dotati al proprio interno di una serie di Servizi Tecnici, necessari per la realizzazione dei vari esperimenti e della relativa strumentazione, perché mancava nell'area circostante un tessuto industriale capace di far fronte alle varie esigenze. L'alto contenuto innovativo e le prestazioni eccezionali richieste fecero rapidamente crescere le competenze dei Servizi Tecnici a livelli di eccellenza, trasformandoli in molti casi in veri e propri laboratori tecnologici. **Quel patrimonio di esperienza è all'origine delle attività tecnologiche per la fusione in cui oggi ENEA è protagonista nel panorama mondiale con importanti contributi alla realizzazione di JT60-SA, ITER, DEMO e DTT, e grazie alle quali può affiancare l'industria con il necessario supporto di conoscenze e know how. Da queste sono fiorite anche molte applicazioni nel campo della sicurezza, della protezione dell'ambiente e del benessere dei cittadini.**

La fusione a Frascati oggi

Oggi i laboratori di Frascati continuano a giocare un ruolo di rilievo nel panorama internazionale. La prestigiosa scuola di fisica che ha dato vita ai primi studi degli anni 50, è tutt'oggi saldamente presente e attiva in particolare nello sviluppo di modelli avanzati per la descrizione del comportamento dei plasmi e

l'analisi delle osservazioni ottenute negli esperimenti. Particolarmente significativo è l'impegno nella realizzazione della nuova macchina DTT: dalla progettazione concettuale della macchina, alla definizione dei suoi programmi di attività, alla realizzazione di numerose diagnostiche sia tradizionali sia innovative, per l'osservazione del comportamento del plasma e la validazione dei modelli teorici.

Nell'ambito del confinamento magnetico si conducono anche esperimenti basati su idee innovative, come il caso della **macchina Proto-Sphera**, dove si ricreano configurazioni magnetiche alternative al tokamak, e anche di interesse astrofisico. L'attività comprende anche lo studio della fusione a confinamento inerziale mediante l'impianto laser ABC che, grazie alla presenza di un completo e raffinatissimo sistema di diagnostiche, unito all'agilità di funzionamento, rende possibile effettuare una larga serie di esperimenti di preselezione delle attività da svolgere su impianti di maggiore potenza.

Il panorama delle attività in corso è completato dalla partecipazione a quasi tutti gli esperimenti nel mondo nel campo della fusione magnetica e inerziale, sia con ricercatori "sul campo" sia con ruoli di rilievo e incarichi di supervisione/coordinatione.

I laboratori di Frascati contribuiscono in modo significativo alla progettazione di ITER e DEMO.

A Frascati è stata messa a punto la tecnologia di giunzione tra materiali diversi (Hot Radial Pressing) necessaria per la fabbricazione del divertore di ITER, il componente affacciato al plasma sul quale sono smaltiti gli alti flussi di potenza prodotta nelle reazioni di fusione. L'integrità di tale componente deve

essere garantita rivestendo gli scambiatori (in rame e raffreddati ad acqua) con tegole di materiali idonei, quali il tungsteno, caratterizzati da alta diffusività termica e resistenza a erosione. ENEA ha realizzato per Ansaldo Nucleare il prototipo in scala 1:1 del divertore di ITER che è stato testato con successo alle condizioni di lavoro attese. Poiché la tecnologia sviluppata per ITER potrebbe non essere estrapolabile a DEMO, si stanno adesso sviluppando soluzioni avanzate per DEMO da realizzare e testare in DTT.

Un punto di forza è costituito dalle competenze nucleari presenti a Frascati, in particolare relative a analisi neutroniche e sviluppo di modelli e codici tra i più avanzati. Inoltre, FNG permette lo studio di effetti della radiazione su materiali e componenti e lo sviluppo di nuovi rivelatori e tecniche di misura. Gli esperimenti condotti a FNG forniscono la validazione sperimentale dei calcoli nucleari di progetto, determinando così i margini di sicurezza. L'attività presso FNG ha contribuito a far crescere in maniera sostanziale l'esperienza "hands-on" nella neutronica per la fusione in Europa.

ENEA è capofila di un consorzio europeo per la progettazione di uno dei maggiori sistemi diagnostici di ITER, la Radial Neutron Camera, che dovrà misurare la potenza di fusione prodotta con requisiti molto spinti di risoluzione spaziale e temporale. Molta esperienza è stata acquisita nelle tecnologie per il ciclo del combustibile, e nei sistemi di iniezione di gas per mezzo di pellet criogenici ad alta velocità.

Di particolare rilevanza è il sistema messo a punto da ENEA denominato IVVS (In Vessel Viewing System) per ITER, che consente di produrre immagini 3D della superficie interna del vessel in condizio-

ni di vuoto, con temperature fino a 120°C, alto campo magnetico, ed elevate dosi di radiazioni ionizzanti. È stato inoltre sviluppato un sistema LIBS (Laser Induced Breakdown Spectroscopy) capace di analizzare gli elementi presenti sulla superficie interna del vessel in modo da monitorarne il possibile danneggiamento e la ritenzione di idrogeno (trizio) nelle pareti. Infine, Frascati detiene la maggiore esperienza in Europa sugli studi di sicurezza degli impianti a fusione e sta partecipando attivamente allo sviluppo della normativa per l'autorizzazione a livello europeo e internazionale.

Grazie all'esperienza decennale nello sviluppo di materiali superconduttori per realizzare cavi per elettromagneti, ENEA ha avuto un ruolo preminente a livello internazionale nello sviluppo dei cavi in Nb3Sn per le bobine dei magneti di ITER, i più grandi (ogni bobina è alta 16 m e larga 10 m) e più potenti (campo magnetico prodotto di 13 T) mai realizzati al mondo. Recentemente è stato progettato l'intero sistema magnetico superconduttivo di DTT ed è iniziata la produzione dei conduttori in Nb3Sn e NbTi per le relative bobine. Parallelamente prosegue lo sviluppo di conduttori che utilizzano nastri superconduttori ad alta temperatura critica (HTS) di ultima generazione in grado di operare in campi magnetici molto elevati. **Quello di Frascati è riconosciuto in tutto il mondo come uno dei gruppi di punta del settore per i suoi contributi di altissimo livello.**

Questo ha consentito la **creazione di un consorzio** con realtà industriali italiane coinvolto nel procurement di tutti i maggiori progetti scientifici che utilizzano superconduttori, non solo nel campo della fusione (ITER, JT-60SA, DTT), ma anche nella fisica delle alte energie (LHC e successivi up-grade), nella piena applicazione della missione dell'ENEA di promozione del trasferimento tecnologico all'industria italiana.

Tecnologie per la sicurezza, la salute e i beni culturali

Infine, il grande patrimonio impiantistico, strumentale e di competenze presente nel centro di Frascati trova importanti applicazioni in svariati campi. Presso il Centro di Frascati è operativo l'impianto **TOP IMPLART** costituito da un innovativo acceleratore lineare di protoni con energia massima di 71MeV per la protonterapia, cioè trattamenti oncologici con utilizzo di fasci di protoni. Il programma, finanziato dalla Regione Lazio e coordinato da ENEA in collaborazione con l'Istituto Superiore di Sanità e l'Istituto Regina Elena di Roma, ha dato vita ad importanti risultati di trasferimento tecnologico verso partner industriali. L'impianto trova anche applicazioni di rilievo nel settore aerospaziale e dei Beni Culturali.

Il Centro Ricerche ENEA di Frascati si caratterizza anche come uno dei più importanti hub di ricerca nazionali nel settore CBRN, cioè, dedicato alle minacce chimiche, biologi-

che, radioattive e nucleari, grazie al coordinamento e partecipazione a numerosi progetti europei e NATO.

Le diverse tecnologie sviluppate sono state con successo trasferite agli operatori istituzionali chiamati a rispondere e gestire tali tipi di emergenze. Di rilievo anche le attività di ricerca legate alla **preservazione e fruizione dei Beni Culturali** grazie allo sviluppo di sensoristica avanzata che è stata con successo dispiiegata in numerosi siti di interesse mondiale quali la Cappella Sistina ed il Colosseo. I dati generati dai sensori ENEA hanno permesso agli esperti di programmare interventi di conservazione e identificare caratteristiche fino a quel momento sconosciute. Importanti sviluppi sono stati ottenuti anche nel dominio della fotonica ed in particolare dei materiali nanocompositi e dei sensori in fibra ottica trovando applicazione in settori quali la diagnostica strutturale di impianti complessi ed infrastrutture.

Le competenze scientifiche e tecnologiche presenti nel Centro di Frascati forniscono un costante e sostanziale supporto al programma di sviluppo della fusione e alla crescita dell'industria italiana promuovendone la partecipazione ai grandi progetti scientifici internazionali. La realizzazione di DTT ne permetterà un ulteriore sviluppo, nella piena applicazione della missione dell'ENEA di promozione del trasferimento tecnologico per lo sviluppo sostenibile del nostro Paese.