

# Le attività di fisica della fusione nei laboratori ENEA di Frascati

Le attività nel campo della fisica svolte dal Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare dell'ENEA toccano un ampio spettro di argomenti di carattere sperimentale e teorico, di modellistica e di simulazione numerica. Un focus specifico riguarda la fisica dei plasmi in macchine a confinamento magnetico di tipo "Tokamak" sulle quali si sta maggiormente concentrando l'impegno europeo senza però abbandonare altre linee di ricerca sulla fisica dei plasmi e approcci alternativi per ottenere la fusione termonucleare

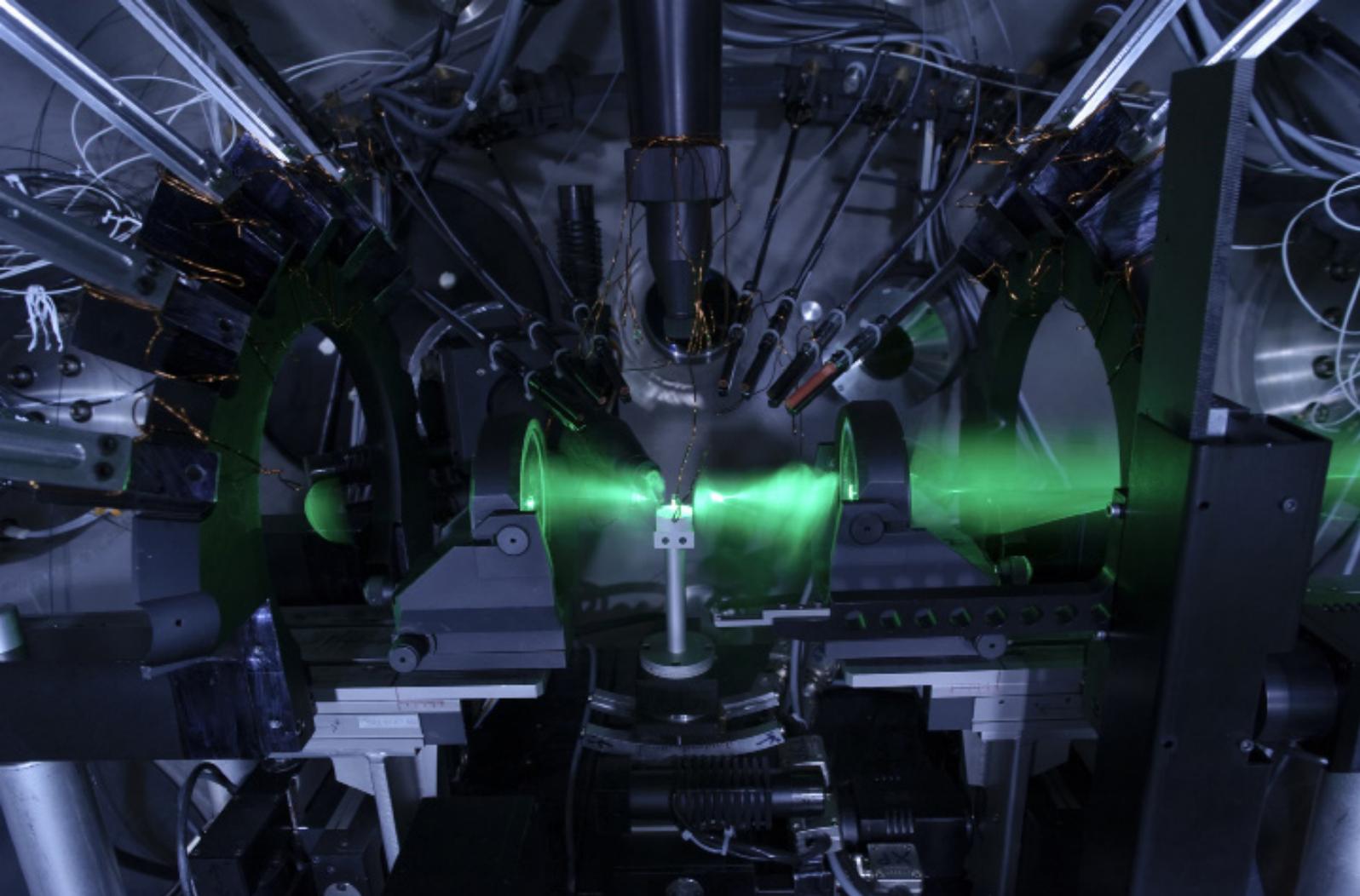
DOI 10.12910/EAI2019-018

di **Lori Gabellieri** e **Gregorio Vlad**, ENEA, Divisione di Fisica della Fusione

**L**e attività di ricerca per lo sfruttamento pacifico dell'energia prodotta da reazioni di fusione nucleare hanno visto la comunità scientifica dell'ENEA di Frascati impegnata fin dall'inizio della fine degli anni 50. Gli interessi e le linee di lavoro si sono, nel corso del tempo, differenziate con l'obiettivo di esplorare e dare un contributo nei settori ritenuti più promettenti, a livello sperimentale, teorico, di modellistica e simulazione numerica. Le collaborazioni in ambito internazionale sono state sempre intense e di grande rilievo per progredire e condividere

il lavoro svolto; le scelte operate e i traguardi raggiunti hanno permesso a questa comunità scientifica di essere presente e protagonista lungo il cammino delineato e, adesso, le consentono di dare il proprio contributo anche nella nuova fase di realizzazione di un prototipo di reattore. **La costruzione e lo sfruttamento da parte di ENEA di esperimenti tokamak di confinamento magnetico sono stati di grande importanza e determinanti nel panorama mondiale. La realizzazione del Frascati Tokamak e Frascati Tokamak Upgrade, ha dato risultati di portata internazionale e contribuito alle**

**scelte di indirizzo per il futuro.** La decisione di non trascurare esperimenti di confinamento magnetico di altra impostazione, come la configurazione sferica del dispositivo PROTO-SPHERA, si è rivelata importante per verificare una configurazione che, sebbene ancora tutta da esplorare in fattibilità, promette un miglior rendimento<sup>1</sup>. La comunità scientifica del Centro di Frascati ha segnato, con le proprie attività, passi importanti su questo cammino. Tuttavia il tessuto indispensabile sul quale si appoggiano tutte le scelte e il coordinamento di queste attività è l'analisi, la modellistica e la predizio-



ne che viene fatta dalla fisica teorica. Gli studi e i risultati ottenuti nel Centro ENEA di Frascati in quest'ambito hanno trasversalmente indirizzato la vita scientifica delle ricerche sulla fusione sia in ambito internazionale, ma anche e soprattutto le decisioni attuate da questa comunità costituendone la trama di supporto.

### **Confinamento magnetico toroidale: Tokamak**

Le scelte che hanno guidato la progettazione dei due impianti sperimentali per la fusione nucleare con confinamento magnetico Frascati Tokamak (FT) e Frascati Tokamak Upgrade (FTU), li hanno resi unici al mondo per l'ampio spettro di parametri accessibile per la sperimentazione. Per questo motivo il loro

contributo al panorama mondiale scientifico ha potuto mantenersi di rilievo e interesse durante tutto il corso della loro esistenza in attività. Il progetto FT (Frascati Tokamak) nasce alla fine degli anni 70 in un periodo nel quale la linea del confinamento magnetico nella configurazione Tokamak si era ormai affermata, assumendo il ruolo di riferimento. Tuttavia, il successo per la fusione nucleare si trovava, comunque, a un bivio di scelte per ottenere alte prestazioni fusionistiche: incrementare le dimensioni oppure accrescere l'intensità del campo magnetico e, di conseguenza, la densità di corrente. FT con la sua forma compatta (raggio maggiore del toro di 0,8 m e raggio minore circa 0,2 m), un campo magnetico di 10 Tesla e corrente di plasma di 1 milione di

Ampere, appartiene alla seconda linea. L'alto campo è raggiunto grazie al raffreddamento in azoto liquido (circa  $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$  sotto lo zero) dei magneti in rame. La combinazione di un alto campo magnetico e delle piccole dimensioni permette di ottenere un'alta densità di corrente.

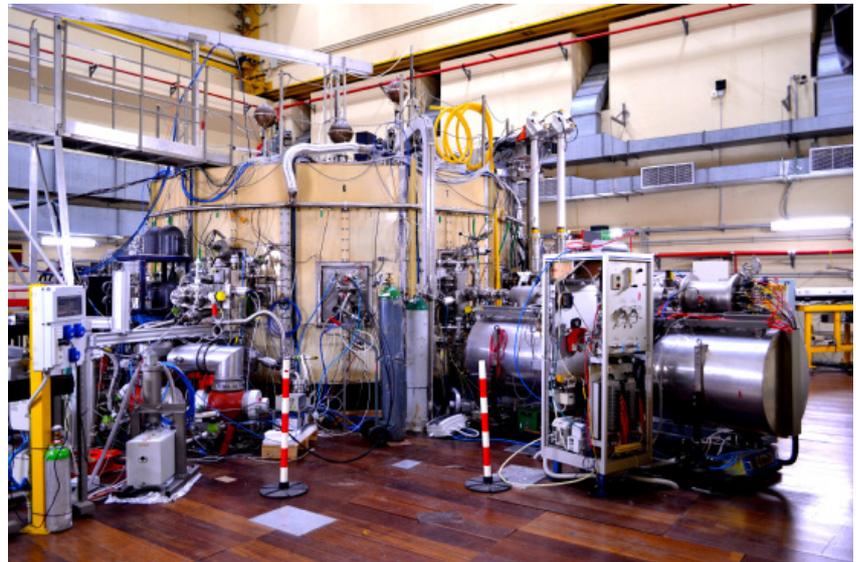
La prima e importante conseguenza di questo è la grande potenza ohmica a esso associata, in altre parole la possibilità di raggiungere alte temperature con il solo riscaldamento indotto dalla corrente del combustibile. Inoltre, la densità di corrente è proporzionale alla densità di particelle per unità di volume e, quindi, questa scelta permette di ottenere alte densità di plasma-combustibile, in altre parole avvicinarsi a un buon rendimento. I sistemi di riscaldamento aggiuntivi di un Tokamak

assumono un ruolo di rilievo cruciale per arrivare al traguardo ambito di ottenere un bilancio positivo di energia e la comunità scientifica di Frascati dota FTU di sistemi di riscaldamento che sfruttano l'assorbimento di onde elettromagnetiche da parte del plasma. I risultati di FTU sono ottimi per quanto riguarda l'esplorazione della capacità di riscaldamento ottenuto con emettitori di Radio Frequenza e ne sono esplorati le capacità di assorbimento e i limiti di densità raggiungibili.

**Agli inizi degli anni 90 diventa operativo il Frascati Tokamak Upgrade (FTU) che apre il secondo periodo d'impegno della comunità scientifica di Frascati in quest'ambito.** Il nuovo Tokamak segue la stessa linea di progetto, una macchina compatta ( $R=0,935$  m e raggio minore circa 0,3 m per  $1,6$  m<sup>3</sup> circa di volume di combustibile) e con un campo magnetico alto (8 T e 1,6 milioni di Ampere di corrente di plasma, raffreddamento all'azoto liquido dei magneti in rame), ma i riscaldamenti sono di gran lunga potenziati in tipologia e potenza per 4,6 MW totali. Le temperature raggiunte (12 keV, ovvero ~100 milioni di gradi) e le densità record ottenute con esperimenti di immissione di "pellet" solidi di combustibile ( $6 \times 10^{20}$  m<sup>-3</sup>) hanno collocato sicuramente FTU al centro delle discussioni scientifiche nel panorama mondiale nel corso della sua esistenza in operazione. Indagini di successo sono state condotte sui meccanismi di interazione tra lo strato periferico della colonna di plasma e il buon rendimento del combustibile del cuore interno caldo e ben confinato. Una cospicua parte delle attività è stata dedicata, con risultati di rilievo, anche agli studi di tecniche di mitigazione per impedire danneggiamenti cruciali nel futuro

reattore. Nel fluido combustibile si possono infatti generare componenti di particelle molto energetiche, che, come un pennello caldo, potrebbero

duttore rettilineo e il trasformatore solenooidale centrali che inducono e sostengono la corrente toroidale nel plasma. Entrambi i conduttori



danneggiare le pareti del contenitore e devono quindi essere tenute assolutamente sotto controllo. Infine, uno degli aspetti decisivi per il buon funzionamento del reattore è costituito dalla scelta ottimale del materiale di prima parete del contenitore del plasma combustibile: la sperimentazione di FTU ha dedicato con successo parte del suo tempo di lavoro allo studio di questi materiali sia in forma solida (acciaio, nickel, molibdeno) e, più recentemente, in forma liquida (litio e stagno).

### **Confinamento magnetico con simmetria sferica**

**PROTO-SPHERA** è un esperimento di confinamento magnetico dotato di simmetria di rotazione, proprio come il Tokamak, ma in questa configurazione sono rimossi i due conduttori metallici centrali: il con-

metallici sono sostituiti da un unico materiale conduttore ben diverso: una scarica centrale di plasma. PROTO-SPHERA è attualmente costruita e funzionante nella sua fase iniziale e ha raggiunto la piena corrente della scarica centrale prevista di 10.000 A. I plasmi prodotti sono densi come quelli tipici dei Tokamak ad alto campo ( $>10^{20}$  particelle/m<sup>3</sup>). Inoltre l'impianto ha prodotto e sostenuto anche i primi tori di plasma. I tori ottenuti sono dotati di un "divertore" che fuoriesce da un punto magnetico a X, ovvero il "ventaglio" di plasma che fa da scarico della potenza dissipata nel plasma toroidale. Il fenomeno che consente la formazione spontanea, da una scarica centrale, di un toro capace di circondarla non è per niente sconosciuto in natura, si chiama "riconnessione magnetica di un plasma" ed è responsabile dello spettacolare

aumento della temperatura del plasma verso l'esterno nella corona solare, dai 6000 °C della sottostante fotosfera solare ai milioni di °C della soprastante corona. Questo risultato fa presumere che le riconessioni magnetiche possano fornire una potenza considerevole per riscaldare il toro di plasma in esperimenti del tipo di PROTO-SPHERA, rendendo probabilmente superfluo qualunque riscaldamento aggiuntivo del plasma oltre a quello dovuto alla corrente indotta nell'anello toroidale.



### Confinamento inerziale con laser

L'attività di ricerca condotta dalla comunità scientifica di Frascati nella linea della fusione nucleare a confinamento inerziale si fonda su una scuola ventennale d'impegno che agli inizi degli anni 70, permette di osservare i primi neutroni prodotti da reazioni di fusione con queste tecniche. Le ricerche sono proseguite con la costruzione

**del laser ABC, ancora oggi il laser con la più alta energia per impulso presente in Italia, e uno dei pochi in Europa.** Nella fusione nucleare a confinamento inerziale si utilizzano fasci laser ad alta energia per irraggiare e comprimere un bersaglio di combustibile nucleare, che è in genere una sfera di deuterio-trizio criogenico. L'interazione del laser con la superficie della sfera genera il fenomeno di "ablazione" e crea plasma. Per il principio di azione e reazione, la parte ancora solida del bersaglio è spinta verso il centro della sfera, formando un'onda d'urto. Tale processo porta infine alla complessiva trasformazione di tutto il bersaglio in un plasma, avente densità massima di oltre 30 volte quella del piombo e temperatura di 100.000.000 °C, condizioni in cui è possibile ottenere l'innesco delle reazioni nucleari di fusione. L'impianto laser ABC produce due fasci di luce infrarossa, con una lunghezza d'onda di 1054 nanometri ed una durata temporale di 3 nanosecondi. I due fasci sono focalizzati sui lati opposti di un bersaglio posto al centro di una camera sferica d'acciaio. Questo schema consente di studiare in configurazione di bersaglio planare i fenomeni fisici prima decritti nel caso di irraggiamento sferico. **Attualmente, le attività di ricerca si sono specializzate anche nello studio delle reazioni di fusione nucleare alternative a quella tra deuterio e trizio, ed in particolare quella tra protone e boro, che produce soltanto elio, senza la presenza di neutroni.** Inoltre un cospicuo investimento è dedicato agli studi sull'interazione del laser con materiali plastici porosi (foam) a bassa densità (10-100 volte minore di quella della plastica) costituiti da membrane o filamenti che separano zone vuote, come avviene

per esempio nel polistirolo. Infatti questi materiali sono in grado di aumentare l'assorbimento del laser sul bersaglio e la relativa uniformità del processo d'interazione.

### La fisica teorica per la fusione nucleare

Le attività di fisica teorica comprendono sia ricerche di natura prettamente analitico-formale, sia attività di simulazione numerica; tra queste due linee di ricerca, si pone idealmente come ponte l'attività di concezione e sviluppo di modelli teorico-numeric. Le stesse attività di simulazione hanno la molteplice caratteristica di essere uno strumento di ricerca teorica, potendo emulare un esperimento in condizioni controllate a priori e a piacere, oltre che di interpretazione e predizione di quanto si osserva o si realizzerà negli esperimenti.

**La ricerca sulla fisica delle onde di Alfvén, e della loro mutua interazione con i diversi tipi di particelle energetiche presenti in un plasma vicino alle condizioni di ignizione, hanno rappresentato da diverso tempo un'eccellenza internazionalmente riconosciuta ai laboratori ENEA sulla fusione termonucleare.** Per poter raggiungere e mantenere le condizioni di ignizione è necessario che il campo magnetico sia sufficientemente intenso da poter *confinare* (cioè mantenere al suo interno per un tempo sufficientemente lungo) le particelle alfa (nuclei di atomi di elio) prodotte nelle reazioni termonucleari tra deuterio e trizio, in maniera da consentire loro di cedere la propria energia cinetica al plasma termico mantenendolo così sufficientemente caldo. In tali condizioni la velocità di propagazione di un particolare tipo di onde Alfvéniche,



le cosiddette onde di Shear Alfvén, si trova a essere dello stesso ordine di quella delle particelle alfa prodotte nella reazione di fusione, nonché di particelle energetiche generate da diversi tipi di riscaldamento aggiuntivo. In tali condizioni, fenomeni risonanti tra onde Alfvéniche e particelle energetiche possono indurre, da una parte, la crescita esponenziale dei modi stessi (cioè una sorta di vibrazioni delle linee di campo magnetico e di diverse altre quantità del plasma stesso, quale velocità e pressione del fluido), e, una volta raggiunta un'ampiezza sufficientemente grande, generare fenomeni di turbolenza che possono avere, come effetto, un trasporto *anomalo* delle particelle energetiche verso la zona periferica del plasma, con conseguente perdita in energia contenuta. In tal modo, l'auto-riscaldamento del plasma da parte delle particelle alfa in esso prodotte può venire meno e, in casi peg-

giori, si può avere il danneggiamento delle pareti di contenimento dell'apparato sperimentale, qualora le particelle energetiche siano espulse dalla colonna di plasma in grandi quantità o in maniera concentrata. L'attività di ricerca in tale ambito ha permesso di formulare una teoria completa della dinamica sia lineare sia non lineare, che è stata alla base anche di progetti europei pluriennali (Enabling Research Projects) di ricerca su tali tematiche. Affiancata a quest'attività di natura analitico-formale, si è sviluppata una attività complementare di modellizzazione e simulazione numerica di tale fenomenologia, che ha permesso di sviluppare strumenti numerici di avanguardia internazionale, che sfruttano le tecniche più avanzate di High Performance Computing (HPC) ad alto parallelismo di calcolo. **Un altro tema teorico particolarmente sviluppato nei laboratori ENEA riguarda la propagazione e**

**l'assorbimento di onde a radio-frequenza, con una particolare attenzione alle cosiddette onde di Lower-Hybrid, un metodo di riscaldamento e conduzione di corrente non induttiva ampiamente utilizzato sui Tokamak sviluppati a Frascati.** Oltre a diverse attività di ricerca più prettamente analitiche quali, p. es., metodi di risoluzione delle equazioni delle onde in particolari regimi di frequenze e in particolari limiti asintotici, tale attività ha permesso di indirizzare la ricerca sperimentale su FTU riguardo al controllo del profilo radiale di densità di corrente, tema assai importante per controllare, p. es., la stabilità magnetoidrodinamica (MHD) di plasmi d'interesse termionucleare. In particolare, predizioni teoriche verificate sperimentalmente su FTU hanno permesso di dimostrare che la penetrazione verso l'interno della colonna di plasma delle onde di

Lower-Hybrid, in regimi di plasma ad alta densità, tipici di un reattore, sia favorita da una temperatura elettronica periferica elevata. Lo studio delle instabilità magnetoidrodinamiche in plasmi ideali e in presenza di una (piccola) resistività elettrica, e lo sviluppo di codici di calcolo di avanguardia in geometria toroidale realistica ha permesso attività di interpretazione degli esperimenti su FTU e su diversi Tokamak internazionali (p. es., JET).

### **Altri ambiti di ricerca e ricadute tecnologiche**

Gli interessi e le necessità, con fini sia di studi sulla teoria dei plasmi sia per scopi diagnostici e tecnologici in generale, conducono a coltivare applicazioni e ricadute che spaziano, oltre gli obiettivi della fusione nucleare, in altri campi di ricerca o in settori di applicazione tecnologica. Tra le attività non direttamente riferibili alla fisica dei plasmi fusionistici, ma con i quali esistono numerose affinità, bisogna ricordare le attività di ricerca sui plasmi astrofisici, quali, p. es., lo studio della stabilità dei dischi d'accrescimento in plasmi dissipativi e la conseguente interpretazione di brillamenti di raggi gamma nella nebulosa del Cancro. La configurazione a simmetria assiale di tali dischi, simile a quella che si ha nei Tokamak, può permettere analogie tra i due diversi sistemi nello studio

dei processi di trasporto. Applicazioni interessanti riguardo all'accelerazione al plasma si hanno anche nell'ambito delle attività legate al Laser ad Elettroni Liberi (Free Electron Laser, FEL), per il quale i laboratori ENEA di Frascati vantano una pionieristica tradizione: a tale proposito, bisogna ricordare il progetto SPARC (Sorgente Pulsata e Amplificata di Radiazione Coerente), una collaborazione tra ENEA, INFN e CNR, e i più recenti progetti europei EuPRAXIA e CompactLight (XLS). Un notevole impegno nel campo delle sorgenti Laser del tipo FEL ha condotto a risultati di rilievo nell'ottimizzazione del fascio emesso. Un ampio patrimonio di sorgenti di questo tipo costituisce un banco di prova diagnostico, unico in genere e caratteristiche, e offre prestazioni specialistiche in altri campi anch'esse di vasta applicazione. **Gli studi sulle sorgenti laser nel dominio THz, finora poco esplorato per motivi storici e di difficoltà di sviluppo tecnologico, si sono dimostrati non solo ricchi di risorse per la diagnostica del plasma-combustibile ma anche con ricadute in numerosi altri campi: dalla biologia, alla salvaguardia e alla conservazione dei beni culturali.**

### **Le collaborazioni europee e internazionali**

**A livello mondiale, nei laboratori**

**che ospitano altri progetti di rilievo per la fusione come ad esempio JET e MAST in Inghilterra, ASDEX e W7X in Germania, TCV in Svizzera, JT60-SA in Giappone, i ricercatori del Centro di Frascati hanno collaborato con proposte, indirizzato programmi scientifici e partecipato alle operazioni delle campagne sperimentali, sugli argomenti di studio e ricerca connessi a quelli in corso nei laboratori di Frascati. Questo ha permesso quell'attività di confronto di parametri e condizioni d'impianto differenti che forniscono la chiave di volta per la comprensione di fenomeni e leggi di scala. I laboratori di KSTAR in Corea e EAST in Cina hanno accolto i nostri progetti su nuovi sviluppi in varie aree di ricerca. Inoltre, diverse attività di teoria e modellistica hanno fatto e continuano a far parte di collaborazioni strutturate all'interno di EUROfusion (Work Packages, Enabling Research Projects) e di partecipazioni internazionali a gruppi nell'ambito delle International Tokamak Physics Activity (ITPA) e di IAEA Technical Meeting, e collaborazioni negli USA e in Cina, anche attraverso un'intensa attività di formazione e addestramento.**

*lori.gabellieri@enea.it  
gregorio.vlad@enea.it*

<sup>1</sup> Il rendimento di un combustibile compresso ad alte densità è esplorato, in un diverso approccio, dalla fusione inerziale che fa impiego di energia da un potente laser per indurre reazioni di fusione