

Perché la BEI investe nella  
ricerca sulla fusione  
di *Dario Scannapieco* p. 11

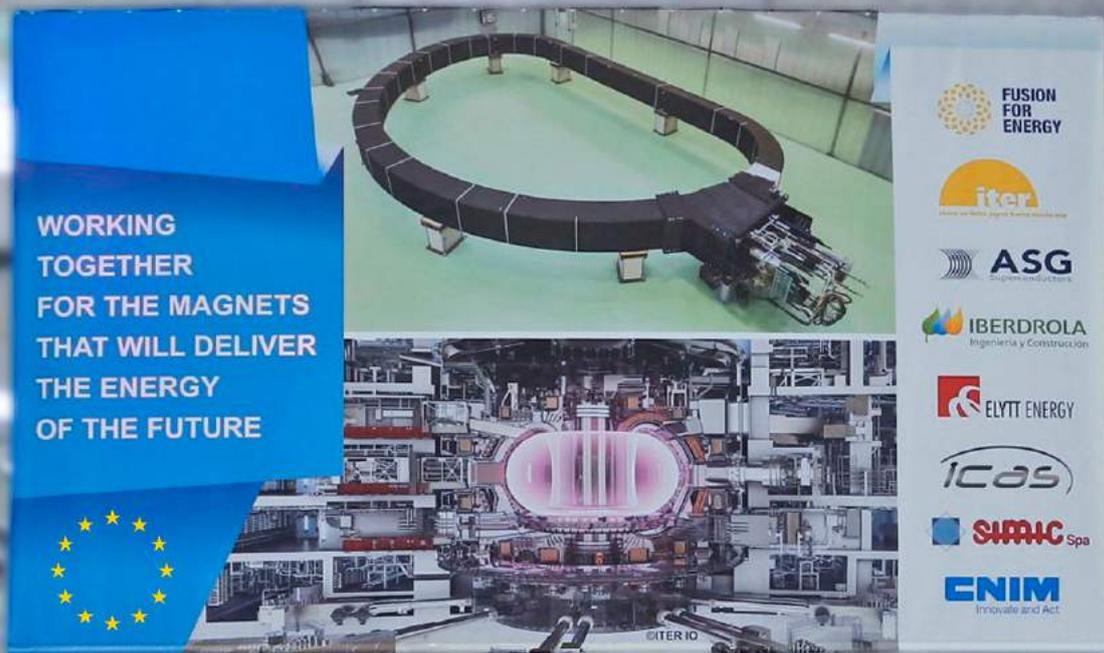
EUROfusion paradigma di  
integrazione europea  
di *Ambrogio Fasoli* p. 19

Rendere l'energia da  
fusione una realtà  
di *Johannes Schwemmer* p. 26

# Energia Ambiente e Innovazione

ENEA magazine  
2/2019  
eai.enea.it

ISSN: 1124-0016



## ENERGIA *dalle* STELLE

*Scenari, opportunità, protagonisti*

**LE INTERVISTE:** Elena Righi-Steele, Gino Cocchi, Marianna Ginola, Davide Malacalza, Luca Tosto



## Le nuove frontiere dell'energia



**di Federico Testa,**

*Professore Ordinario di Economia e Gestione delle Imprese all'Università di Verona – Presidente ENEA*

In un momento di grande fermento dello scenario energetico ed ambientale, l'impegno del mondo della ricerca per sviluppare l'energia da fusione rappresenta non soltanto una sfida sul fronte scientifico e tecnologico per un futuro energetico completamente sostenibile, ma anche un'opportunità per il sistema industriale nazionale in un settore con un potenziale rilevante in termini di crescita economica, nuova occupazione altamente qualificata e di competitività. L'Italia ha contribuito sino dagli albori a questo ambizioso programma, sono trascorsi quasi 60 anni da quando nel 1960 ENEA (allora CNEN) ha firmato il primo contratto di Associazione con EURATOM. Da allora, grazie ad una comunità scientifica di grande valore, ad un continuo supporto istituzionale e alla presenza di un tessuto industriale di eccellenza abbiamo conquistato una posizione di grande rilievo in un contesto che è diventato nel tempo molto competitivo e che vede oramai tutto il mondo impegnato a rendere tangibile e il più vicino possibile l'obiettivo di utilizzare la fusione come fonte di energia pulita, sicura e praticamente inesauribile.

La 'sfida' della fusione ha avuto nel tempo una formidabile evoluzione. Il programma, inizialmente circoscritto agli studi di fisica, si è costantemente ampliato fino ad arrivare oggi a un sistema complesso, articolato, dove scienza, tecnologia, industria ed accademia hanno trovato le giuste sinergie per portare il Paese ai massimi livelli. Ad oggi il nostro Paese è ancora tra i principali protagonisti in questo settore in Europa e nel mondo, grazie a laboratori e impianti di eccellenza, alla capacità di ideare soluzioni tecnologiche innovative e di instaurare rapporti di collaborazione stabili con il mondo delle imprese per la realizzazione dei componenti necessari alla realizzazione dei progetti. L'Italia è stata sin dall'inizio tra i pionieri della ricerca sulla fusione e, già dagli anni '80, il programma Fusione italiano è stato fortemente orientato al trasferimento tecnologico: l'industria è stata pienamente coinvolta nella progettazione, individuazione e realizzazione di impianti di ricerca complessi (FTU, RFX); sono inoltre state sviluppate diverse tecnologie nei settori più rispondenti alla vocazione industriale nel nostro Paese quali meccanica, elettrotecnica, superconduttività, robotica, materiali e ottica. Inoltre, nel decennio

successivo sempre più spesso le soluzioni tecnologiche sviluppate a livello di laboratorio sono passate alla fase di ingegnerizzazione, industrializzazione e produzione. È il caso, ad esempio, del cavo superconduttore (Cable-in-Conduit Conductor, CICC) realizzato da ENEA con Luvata e Tratos Cavi o la tecnologia per il bersaglio in monoblocco di tungsteno, adesso qualificata per il divertore di ITER sviluppata da ENEA e Ansaldo Nucleare o il prototipo di un settore della camera da vuoto e il supporto del divertore ideato da SIMIC e Ansaldo Nucleare. L'avvio di ITER e la nascita dell'Agenzia europea Fusion for Energy incaricata della sua realizzazione, hanno richiesto un ulteriore salto di qualità nell' 'alleanza' fra ricerca e industria: un progetto di tale portata richiede infatti una collaborazione molto stretta fra laboratori di ricerca e imprese per sviluppare soluzioni tecnologiche innovative, progettare e costruire prototipi e componenti, integrarli in sistemi altamente complessi ed effettuare test. Dall'inizio del progetto, ENEA ha lavorato insieme alle imprese nel campo della fusione dotandosi anche di una specifica Unità di Trasferimento Tecnologico all'interno del Dipartimento Fusione con il compito di individuare e valorizzare le tecnologie frutto delle attività di ricerca e di massimizzare il ritorno per il sistema Paese; è stato inoltre costituito un apposito Industry Liaison Officer per favorire la partecipazione delle imprese italiane ai bandi per ITER. Anche grazie a questo approccio, oggi l'industria italiana è estremamente competitiva come dimostra il grande successo nella costruzione di ITER nell'ambito della quale ha avuto assegnate commesse per oltre 1.300 milioni di euro.

È indubbio che oggi l'Italia, con ENEA che coordina le attività italiane del programma fusione europeo di EURATOM e le altre istituzioni quali CNR, INFN, Consorzio RFX, Consorzio CREATE e molte prestigiose Università, ha il programma più qualificante tra tutti i Paesi europei e non solo. Le componenti più importanti di questo programma sono la facility MITICA in corso di realizzazione presso il Consorzio RFX a Padova per lo sviluppo del più importante sistema di riscaldamento del plasma di ITER e la Divertor Tokamak Test facility (DTT), ideata da ENEA con il contributo della comunità scientifica nazionale e in corso di realizzazione a Frascati con l'obiettivo di rendere la fusione sempre più attrattiva anche dal punto di vista dei costi. L'importanza di questo progetto che potrà generare benefici oltre 2 miliardi per il sistema Paese e formare nuove generazioni di giovani ricercatori di alto livello, è confermata dalla decisione della BEI di inserirla fra i progetti bandiera, approvando un prestito agevolato per consentirne la realizzazione.

Vorrei anche sottolineare come l'approvazione dei finanziamenti per realizzare DTT dimostra come, facendo leva su argomenti oggettivamente validi e di indubbia valenza strategica, si possano ottenere risultati a prima vista impossibili. Vorrei anche ringraziare le Regioni italiane che

hanno partecipato al bando per ospitare DTT, pronte a investire risorse considerevoli avendo percepito la valenza di questo progetto che, sono sicuro, avrà ricadute importanti ben oltre il territorio dove verrà realizzato.

Il programma fusione è e continuerà ad essere tra gli elementi più caratterizzanti dell'Agenzia e, sono sicuro, ancora per molto tempo sarà foriero di grandi risultati che aumenteranno il prestigio di ENEA e dell'Italia, un volano di crescita, di occupazione ed anche un contributo ad alcune delle sfide epocali con le quali la ricerca non può non confrontarsi per dare risposte, indicazioni e proposte alla politica: la sfida del cambiamento climatico e la povertà energetica che colpisce ancora oggi miliardi di esseri umani.

Vorrei anche ringraziare tutti coloro che hanno contribuito a questo numero della rivista con articoli di grande interesse sullo stato dell'arte e il futuro del programma fusione. Un ringraziamento va, in particolare, al personale ENEA che si impegna quotidianamente per fare della nostra Agenzia un'eccellenza in questo settore e al Direttore del Dipartimento Fusione e Sicurezza Nucleare ing. Aldo Pizzuto per il lavoro fatto. Dal 1° luglio ha passato il testimone all'ing. Alessandro Dodaro formato alla 'Scuola ENEA' al quale vanno i migliori auguri di buon lavoro.



N. 2 Maggio-Agosto 2019

## Direttore Responsabile

Cristina Corazza

## Comitato di direzione

Ilaria Bertini, Gian Piero Celata, Tullio Fanelli,  
Roberto Morabito, Aldo Pizzuto, Diana Savelli

## Comitato tecnico-scientifico

Paola Batistoni, Marco Casagni, Marco Franza,  
Mario Jorizzo, Chiara Martini, Marcello Peronaci,  
Franco Roca

## Coordinamento editoriale

Giuliano Ghisu

## Revisione lingua inglese

Carla Costigliola

## Progetto grafico

Paola Carabotta

## Edizione web

Antonella Andreini, Serena Lucibello

## Promozione e comunicazione

Paola Giaquinto

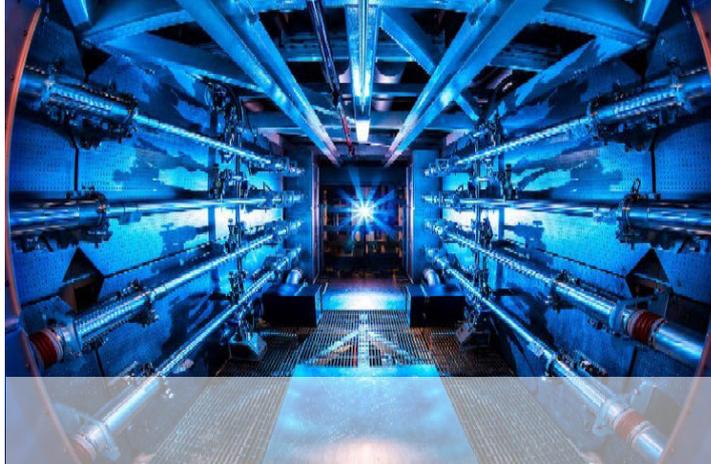
## Stampa

Laboratorio Tecnografico  
Centro Ricerche ENEA Frascati  
Numero chiuso nel mese di agosto 2019

## Registrazione

Tribunale Civile di Roma  
Numero 42/2019 del 28 marzo 2019  
(versione stampata)  
Numero 43/2019 del 28 marzo 2019  
(versione telematica)

In copertina, foto della consegna del primo magnete superconduttore per ITER nello stabilimento ASG Superconductors di La Spezia nel maggio 2017. Fra le personalità in primo piano oltre alle Autorità politiche della Regione Liguria e del Comune di La Spezia, i Direttori di ITER Bernard Bigot, di Fusion for Energy Johannes Schwemmer, del Dipartimento Fusione di ENEA Aldo Pizzuto, l'Amministratore Delegato di ASG Sergio Frattini



## 08 Energia dalle stelle, il cammino fatto e le prospettive

01 Le nuove frontiere dell'energia

di Federico Testa

06 Un'equazione vincente

di Cristina Corazza

## L'INTERVENTO

08 Energia dalle stelle, il cammino fatto e le prospettive

di Aldo Pizzuto

11 Ecco perchè la BEI investirà nella ricerca sulla fusione

di Dario Scannapieco

## GLI SCENARI

15 ITER, sfida dei nostri tempi e opportunità industriale

di Sergio Orlandi

19 EUROfusion, un paradigma unico di integrazione europea per realizzare il sogno della fusione

di Ambrogio Fasoli

26 Fusion for energy: rendere l'energia da fusione una realtà

di Johannes Schwemmer

32 L'esperimento DTT, un laboratorio di innovazione

di Piero Martin

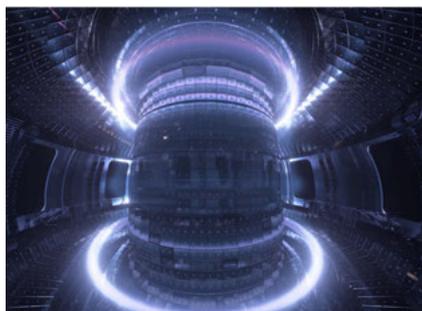
38 I protagonisti della ricerca italiana sulla fusione termonucleare controllata

di Raffaele Martone

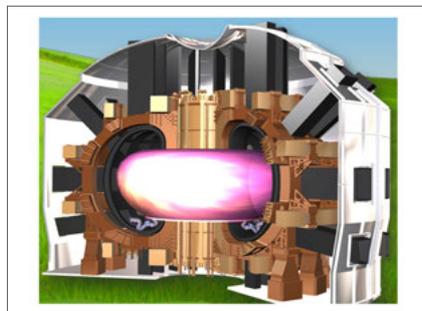
45 Il ruolo del consorzio RFX: 60 anni di ricerca al servizio della fusione

di Francesco Gnesotto

# Sommario



**15** ITER, sfida dei nostri tempi e opportunità industriale



**32** L'esperimento DTT, un laboratorio di innovazione



**74** L'Europa sta già raccogliendo benefici dalla ricerca sulla fusione

- .....
- 48** Dal JET al progetto EAST, le linee strategiche del CREATE per la ricerca sulla fusione  
*di Vincenzo Coccoresse*
  - 50** ISTP - un polo internazionale per la scienza dei plasmi  
*di Maurizio Lontano*
  - 52** La roadmap cinese verso l'energia da fusione  
*di Jiangang Li*
  - 57** Le ricadute economiche e sociali della ricerca sulla fusione: lo studio ENEA-LIUC  
*di Paola Batistoni, Gloria Puliga, Raffaella Manzini*
  - 62** Una cornice giuridica visionaria e una solida cooperazione internazionale per la ricerca europea sulla fusione  
*di Marco Franza*
  - 67** Il ruolo della fusione negli scenari di lungo periodo  
*di Francesco Gracceva, Chiara Bustreo, Yolanda Lechón, Markus Biberacher, Danilo Dongiovanni*

## LE INTERVISTE

- 74** *Elena Righi-Steele*  
L'Europa sta già raccogliendo benefici dalla ricerca sulla fusione
- 77** *Davide Malacalza*  
Vogliamo portare la superconduttività 'dentro' i processi industriali
- 80** *Gino Cocchi*  
Un centro di eccellenza mondiale al servizio della ricerca
- 83** *Marianna Ginola*  
La fusione è un caposaldo del nostro futuro
- 86** *Luca Tosto*  
Lavorare al confine tra ricerca e industria è nel nostro DNA

## FOCUS ENEA

- 88** Prospettive e opportunità delle tecnologie per la fusione  
*di Giuseppe Mazzitelli, Luigi Morici, Mariano Tarantino*
- 94** Le attività di fisica della fusione nei laboratori ENEA di Frascati  
*di Lori Gabellieri e Gregorio Vlad*
- 100** I supercomputer della fusione  
*di Francesco Iannone, Silvio Migliori e Massimo Celino*
- 106** Energia e cambiamento climatico  
*di Gian Maria Sannino*
- 110** Povertà energetica e innovazione tecnologica  
*di Chiara Martini*

## Un'equazione vincente

Lo sviluppo di tecnologie innovative, sostenibili, competitive per soddisfare il fabbisogno di energia di una popolazione mondiale in forte crescita e preservare il nostro Pianeta dal cambiamento climatico è fra le maggiori sfide che abbiamo davanti. Una delle soluzioni più affascinanti cui lavorano migliaia di scienziati in tutto il mondo è la fusione nucleare, l'energia delle stelle, per riprodurre sulla Terra la sorgente che alimenta gli astri e ottenere energia inesauribile, in modo sicuro e rispettando l'ambiente. L'emblema di questa sfida è ITER, un progetto da oltre 20 miliardi di euro che coinvolge in primis l'Unione Europea e altri grandi paesi come Cina, Corea del Sud, Giappone, India, Russia, Stati Uniti, centinaia di università, centri di ricerca e sistemi industriali per realizzare un impianto sperimentale a Cadarache, in Francia. La roadmap europea della fusione indica la metà del secolo per l'avvio dell'impianto-pilota DEMO, tallonata dall'ambizioso programma cinese che si propone lo stesso risultato al 2050-2060.

L'Italia in questo campo ha una leadership riconosciuta, con forti competenze scientifiche e una solida alleanza costruita nel tempo fra comunità della ricerca e l'industria più avanzata. Sono stati vinti da imprese italiane il 60% dei contratti per ITER e sono italiani progetti come **MITICA** in via di realizzazione a Padova o la **Divertor Tokamak Test facility (DTT)**, ideata da **ENEA** in collaborazione con **CNR, INFN, Consorzi RFX e CREATE**; un esperimento di frontiera che creerà oltre 1500 posti di lavoro altamente qualificati e avrà un ritorno stimato di 2 miliardi di euro a fronte di un investimento di 500 milioni di euro, già tutto finanziato.

Ma quali sono ad oggi le criticità da superare per tramutare in realtà il 'sogno' della fusione? E quali sono le prospettive di questa sfida scientifico-tecnologica cui il mondo guarda con estremo interesse e grandi attese? *Energia, Ambiente e Innovazione* lo ha chiesto ad alcuni dei maggiori protagonisti del settore a livello nazionale e internazionale e ai ricercatori dell'ENEA che è pioniere in questo campo sin dagli anni '60.

Oggi l'Agenzia coordina il Programma Nazionale di Ricerca sulla Fusione e dispone di competenze all'avanguardia nella superconduttività, la neutronica, la sicurezza, il *remote handling*, la fisica del plasma e di oltre 50 brevetti negli ultimi 20 anni. Più 500 fra ricercatori e tecnologi dei centri di Frascati e Brasimone lavorano al meccanismo che 'accende' gli astri e alle possibili applicazioni per la protezione dell'ambiente, del territorio, del patrimonio culturale e in campo medicale per produrre radiofarmaci e macchine per terapie oncologiche avanzate.

Ampio spazio è dedicato alle eccellenze industriali del settore - nomi come **Angelantoni Test Technologies, Ansaldo Nucleare, ASG Superconductors, CECOM, CRIOTEC, Consorzio ICAS, Delta Ti, Mangiarotti, OCEM, SIMIC, Walter Tosto, TRATOS, Zanon** per citarne solo alcune - e alle **opportunità** economiche e sociali della fusione. Alcuni dati molto interessanti emergono dallo studio-pilota realizzato da **Paola Batistoni** dell'ENEA con **Gloria Puliga e Raffaella Manzini** Professore Ordinario all'Università Carlo Cattaneo (LIUC) di Castellanza su un campione di aziende impegnate in ITER: tutte evidenziano forti miglioramenti nella capacità di innovazione, nello sviluppo di nuove competenze

tecniche (93%), di nuovi processi (73%) e nuovi prodotti o brevetti (14%). Ed anche a livello europeo come dichiara **Elena Righi Steele, Responsabile dell'Unità Ricerca Euratom della Commissione UE** “stiamo già raccogliendo i benefici in termini di innovazione, know how tecnico-scientifico, nascita di nuovi settori industriali e di figure professionali altamente specializzate. Per un futuro non lontano, con la realizzazione di ITER e la prospettiva di DEMO ci aspettano momenti straordinari”.

Ma parlare di fusione significa anche fare chiarezza a livello scientifico sulla **fondamentale differenza con il 'vecchio' nucleare**: nella fissione, infatti, l'energia viene generata dall'urto fra un neutrone e nuclei di atomi molto pesanti (fissili, quali l'uranio 235) che si rompono in frammenti più piccoli e producono scorie radioattive. L'energia delle stelle, invece, nasce dall'unione di due nuclei di elementi molto leggeri, come alcuni isotopi dell'idrogeno, attraverso un processo sicuro e senza scorie.

Si tratta quindi di una tecnologia che può rivoluzionare gli scenari dell'energia ma non solo, perché può unire in un'**equazione vincente** scienza-innovazione tecnologica-lotta al cambiamento climatico-sviluppo industriale-competitività. E l'annuncio della BEI di un prestito di 250 milioni di euro all'esperimento DTT, poggia anche su queste motivazioni. Nella convinzione che “dobbiamo fare di più per guardare al futuro del Pianeta, concentrandoci sul lungo periodo, senza l'ansia del brevissimo termine che troppo spesso condiziona le scelte sull'allocatione delle risorse finanziarie” come spiega il vice direttore BEI **Dario Scannapieco**.

Prima di concludere, un grazie per il loro contributo ai protagonisti della fusione, il Professor **Ambrogio Fasoli**, Presidente del consorzio europeo **EUROfusion** per lo sviluppo della fusione nucleare e Direttore dello Swiss Plasma Center, il Professor **Jiangang Li** dell'Accademia Cinese delle Scienze, il Direttore Ingegneria e Impianti del Progetto ITER, **Sergio Orlandi**, la Capo Unità Ricerca Euratom della Commissione UE **Elena Righi Steele**, **Johannes Schwemmer**, Direttore di Fusion for Energy, l'Agenzia UE che gestisce il contributo a ITER. Grazie ai presidenti dei Consorzi CREATE **Vincenzo Coccoresse** ed RFX **Francesco Gnesotto**, al Direttore dell'Istituto per la Scienza e la Tecnologia dei Plasmi (ISTP) **Maurizio Lontano**, al **Professor Piero Martin**, membro dell'Executive Board del progetto DTT e al Professor **Raffaele Martone** dell'Università degli Studi della Campania “L. Vanvitelli”. Un ringraziamento va anche a **Gino Cocchi** (OCEM), **Marianna Ginola** (SIMIC), **Davide Malacalza** (ASG Superconductors) e **Luca Tosto** (Walter Tosto) e ad **Aldo Pizzuto**, Direttore del Dipartimento fusione e sicurezza nucleare fino al 1 luglio scorso che ha contribuito a questo numero anche nella scelta dei temi e delle personalità da coinvolgere. Un grazie speciale ai validissimi colleghi del Dipartimento Fusione **Giuseppe Mazzitelli**, **Luigi Morici**, **Mariano Tarantino**, **Lori Gabellieri**, **Gregorio Vlad** e a **Silvio Migliori**, **Francesco Iannone** e **Massimo Celino** della Divisione ICT, a **Marco Franza** dell'Ufficio di Bruxelles, a **Chiara Martini**, esperta di povertà energetica, al climatologo **Gianmaria Sannino** e, infine, a **Francesco Gracceva** e **Danilo Dongiovanni** dell'ENEA per l'analisi sugli scenari energetici realizzata insieme a **Chiara Bustreo** del Consorzio RFX, Yolanda Lechón del CIEMAT in Spagna e di Markus Biberacher Research Studios Austria Forschungsgesellschaft mbH. E un ringraziamento particolare per il grande lavoro fatto alla collega Paola Batistoni. Buona lettura!

**Cristina Corazza**

## Energia dalle stelle, il cammino fatto e le prospettive

Parlare oggi di fusione vuol dire spaziare tra scienza, tecnologia, competitività industriale e alta formazione, ma anche affrontare in modo concreto temi legati alle prospettive socioeconomiche di una fonte di energia a cui il mondo guarda con estremo interesse e grandi attese. In questo contesto, l'Italia sta rafforzando il proprio ruolo anche attraverso progetti come MITICA, in via di realizzazione a Padova presso il Consorzio RFX e alla Divertor Tokamak Test facility (DTT) la cui costruzione è appena iniziata a Frascati. Un risultato possibile grazie al valore riconosciuto a livello internazionale dei nostri ricercatori, tecnologi e ingegneri ed al supporto delle istituzioni per reperire le risorse necessarie

DOI 10.12910/EAI2019-003



di Aldo Pizzuto

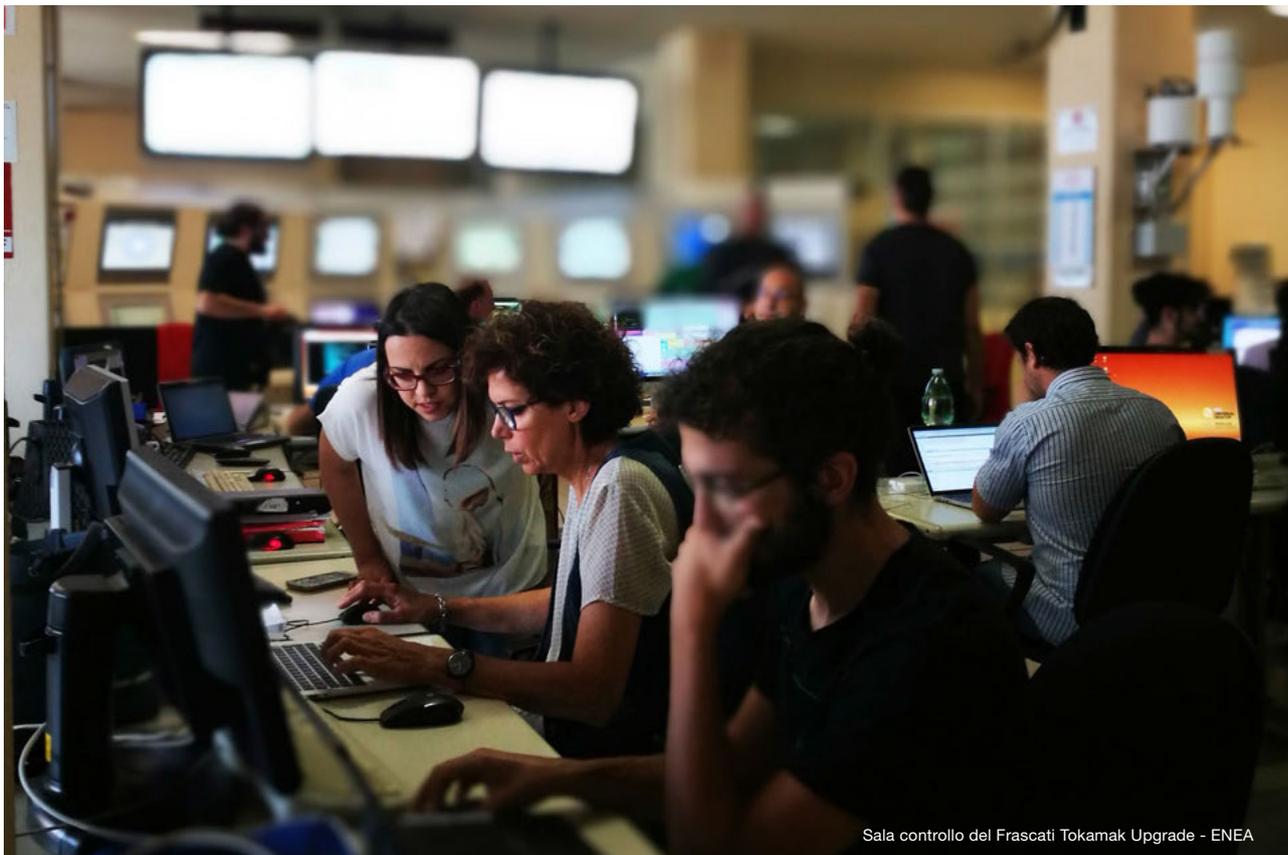
**Parlare oggi di fusione vuol dire non solo spaziare tra scienza, tecnologia, competitività industriale e alta formazione, ma affrontare in modo concreto temi che hanno a che fare con le prospettive socio economiche di una fonte di energia a cui il mondo guarda con estremo interesse e grandi attese.**

Chiariamo subito che se oggi è possibile intravedere l'obiettivo in un futuro non molto lontano, ciò lo si deve ad un lungo cammino. Cammino affrontato sempre con grande determinazione anche se con la consapevolezza che il raggiungimento del traguardo sarebbe stato molto più arduo di quanto previsto inizialmente. Infatti, a incoraggianti successi si sovrapponevano nuove difficoltà che non hanno mai impedito di trovare nuovi stimoli ma, al contrario, hanno reso più affascinante la grande sfida.

Il tutto parte dall'intuizione di eminenti scienziati dell'epoca che già nel 1957 hanno orientato un gruppo di ricercatori del CNRN (poi CNEN ed oggi ENEA) e di Euratom, sulle attività di fisica del plasma inizialmente presso l'Università di Roma e poco dopo trasferita a Frascati.

Già in quel periodo, immediatamente successivo alla declassificazione delle ricerche sulla fusione, si è avuta subito la consapevolezza che una impresa così complessa non poteva che essere condotta attivando le massime sinergie possibili tra tutti i Paesi che già intravedevano nella fusione un potenziale incredibile.

**Nasce così, grazie alla lungimiranza del Prof. Donato Palumbo, il programma europeo sulla fusione, concentrato sull'utilizzo del confinamento magnetico ma che contempla anche attività di 'keep in touch' sul confinamento inerziale.** Il pro-



Sala controllo del Frascati Tokamak Upgrade - ENEA

programma è stato organizzato con contratti bilaterali di Associazione tra Euratom e vari Paesi interessati. L'Italia ha aderito nel 1960, dopo aver operato per due anni nell'ambito del primo contratto tra CEA e Euratom. In poco tempo il numero dei Paesi aderenti è progressivamente aumentati fino a comprendere tutta l'Unione Europea più la Svizzera. Nel 2014, il programma cambia struttura e i vari contratti bilaterali vengono sostituiti da un unico contratto (Grant Agreement) tra Euratom ed il Consorzio europeo EUROfusion che raccoglie gli stessi Paesi con in più l'Ucraina entrata di recente.

#### **Oltre 20 partner nel programma italiano sulla fusione**

**L'ENEA ha il privilegio di coordinare il programma italiano che oggi vede la partecipazione di altri 20 partner tra cui CNR, INFN, Consorzio RFX, Consorzio CREATE, molte Università (Politecnici di Torino e Milano, Università di Roma I-II e III, Milano Bicocca, Cagliari, Catania, Padova,**

**Palermo, Pisa) e anche istituzioni private come Ansaldo Nucleare, Centro Sperimentale Metallurgico (RINA) e LT-Calcoli. Altri partner sono l'Istituto Italiano di Tecnologia, la Società SRS e il CINECA.**

Questo a dimostrazione di come il sistema italiano sia riuscito ad evolversi da una pura attività scientifica confinata in pochi laboratori ad un complesso sistema di ricerche di fisica, tecnologia ed ingegneria che man mano ha coinvolto anche il mondo dell'Università e dell'industria. Grande merito va certamente agli investimenti in infrastrutture come la prima macchina tokamak italiana, il Frascati Torus (FT), a cui è seguito FT Upgrade, l'impianto laser ABC e il generatore di neutroni a Frascati e la realizzazione della più grande macchina tipo Reverse Field Pinch a Padova (Consorzio RFX). Questi esperimenti, insieme a tutti quelli realizzati in Europa, sono stati fondamentali per realizzare un sistema sinergico che ha dato risultati fondamentali per il raggiungimento dell'obiettivo finale.



Nell'frattempo l'Italia ha intrapreso un poderoso programma tecnologico che la vede primeggiare nei campi più strategici: superconduttività, componenti per alti flussi termici, dati nucleari, ciclo del combustibile, materiali, mantello fertile, metalli liquidi, riscaldamenti ausiliari, controlli, elettronica di potenza, oltre agli studi di sistema per la sicurezza e gli impatti ambientale e socio-economico.

### In Italia infrastrutture di eccellenza

La svolta determinante per il programma arriva con la decisione di costruire ITER e di costruirlo in Europa, anche grazie all'impegno politico italiano. ITER sancisce la dimensione mondiale di uno sforzo che a questo punto è orientato definitivamente alla realizzazione dell'energia da fusione. Le opportunità si moltiplicano e l'Italia consolida il suo ruolo con la partecipazione alle attività del Broader Approach, l'accordo Europa-Giappone a margine della scelta del sito di ITER, alle quali contribuisce dando dimostrazione di competenza e capacità organizzative.

**L'aver orientato il programma alla realizzazione dell'energia da fusione ha determinato la necessità di identificare una Road Map europea che guarda al primo reattore dimostrativo DEMO, previsto a cavallo di questo secolo.** La Road Map identifica gli obiettivi, suddivisi in otto linee di attività, che sono prerequisito per trovarsi pronti alla nuova era energetica. La Road Map si prefigge di garantire il successo di ITER, sviluppare le tecnologie ancora da affinare per DEMO, stimolare le idee innovative e la formazione e training delle nuove generazioni.

**In questo periodo anche l'industria italiana conferma la sua grande competitività risultando di gran lunga la prima per numero e valore di contratti high-tech relativi alla costruzione di ITER.** Fa piacere evidenziare come il cuore di ITER parla italiano. I magneti superconduttori e la camera da vuoto, che rappresentano il nucleo nevralgico della macchina, sono fatti in Italia. Altre importanti commesse sono state appannaggio di imprese italiane che fino

ad oggi hanno acquisito contratti per oltre 1200 milioni di euro. Alle attività per il programma fusione si affiancano quelle per l'agenzia europea Fusion for Energy (F4E), incaricata di fornire i contributi a ITER e per la stessa ITER Organization, mentre anche EUROfusion intensifica gli sforzi verso la realizzazione di DEMO. Anche in questi ambiti l'Italia riesce ad avere un ruolo molto importante.

**In questo contesto, l'Italia ha avuto inoltre il grande merito di costruirsi la prospettiva di diventare il Paese più avanzato con la facility MITICA - il sistema di riscaldamento più importante del plasma di ITER - in fase avanzata di realizzazione presso il Consorzio RFX di Padova e la nuova macchina denominata Divertor Tokamak Test facility (DTT), la cui costruzione è appena iniziata a Frascati.** A DTT è demandata una missione strategica, quella di dimostrare che è possibile controllare lo smaltimento della potenza termica del plasma. DTT contribuirà, quindi, a ottimizzare le configurazioni degli impianti a fusione a cominciare da DEMO, riducendone i costi di investimento. **Ospitare in Italia facility di tale portata è stato possibile da un lato grazie al riconoscimento a livello internazionale del valore dei nostri ricercatori, tecnologi e ingegneri e dall'altro al supporto che le istituzioni hanno garantito contribuendo a trovare le risorse necessarie.**

Indubbiamente l'impresa più difficile, anzi considerata inizialmente praticamente impossibile, è stata quello di reperire le risorse per DTT e dimostrare in ambito europeo che ha le prestazioni richieste e la necessaria flessibilità per raggiungere lo scopo. L'impegno di tutta la comunità scientifica italiana che ha elaborato la proposta progettuale e un'azione manageriale efficacissima da parte di ENEA ed in particolare del suo Presidente, hanno reso possibile qualcosa che sa di miracoloso.

Oggi, quindi, possiamo guardare con grande fiducia al futuro con la certezza che saremo all'altezza del compito che ci attende e coscienti del ruolo che siamo chiamati a giocare nella grande e affascinante sfida che porterà l'energia delle stelle sulla Terra.

## Ecco perché la BEI investirà nella ricerca sulla fusione

Se la Banca Europea per gli Investimenti ha deciso di finanziare la ricerca sulla fusione attraverso l'iniziativa DTT, è perché si tratta di un progetto-bandiera, che unisce ambiente e innovazione, con ricadute strategiche per la lotta al cambiamento climatico e la produzione di energia pulita. Siamo convinti che in questi campi occorre fare di più per guardare al futuro del Pianeta con speranza e ottimismo, concentrandosi responsabilmente sul lungo periodo, senza l'ansia del brevissimo termine che troppo spesso condiziona le scelte sull'allocazione delle risorse finanziarie

DOI 10.12910/EAI2019-004



di **Dario Scannapieco**, Vicepresidente della Banca Europea per gli Investimenti (BEI)

Il clima è una priorità globale. Anche nel discorso programmatico dello scorso luglio del nuovo Presidente della Commissione Europea, Ursula Von Der Leyen, le tematiche climatiche hanno avuto una rilevanza cruciale. Gli ambiziosi obiettivi europei, basati sul concetto di responsabilità intergenerazionale – dei quali, da cittadini del vecchio continente dovremmo essere più orgogliosi – richiedono massicci investimenti su più fronti: efficienza energetica, rinnovabili, utilizzo “smart” delle risorse e del territorio, e innovazione, specialmente in relazione a nuove fonti e ad un utilizzo efficiente di quelle già esistenti.

La fusione è un processo che richiede combustibile presente in natura in quantità sostanzialmente illimitata, non emette anidride carbonica, non produce scorie nucleari, ed è sicuro: i futuri impianti non genereranno reazioni a catena e i relativi impianti di

produzione – il reattore nucleare – si potranno facilmente spegnere in caso di incidente o perdita di controllo.

Oggi, la produzione di energia attraverso un processo basato sul mutamento dell'atomo non è materia da alchimisti medioevali, la moderna pietra filosofale per antonomasia, ma un obiettivo serio e concreto su cui anche le istituzioni europee sono impegnate con tutte le loro forze.

**Per questo la Banca Europea per gli Investimenti (BEI) ha investito sul progetto dell'ENEA. Tale progetto è infatti una tappa fondamentale della Eurofusion Roadmap promossa dall'Unione europea nel 2014 e che ha l'obiettivo di produrre su larga scala energia da fusione nucleare entro il 2050.** È un esempio di quello che nel gergo tecnico si chiama “attività di *blending*” (combinazione di più fonti) per il reperimento delle risorse necessarie per

finanziare un progetto. La Commissione dell'Unione europea interviene con le risorse del programma Horizon 2020, mentre la BEI, che è la banca della UE, con un prestito diretto grazie al sostegno dell'Investment plan for Europe (o Piano Juncker).

**Per questo rappresenta un progetto bandiera all'interno di tutta l'Unione europea: per la finalità, cioè energia nucleare pulita entro 30 anni; per le modalità di finanziamento; per le caratteristiche del progetto che sarà realizzato da ENEA e che produrrà ricadute positive sull'indotto; per il fatto che sarà un progetto europeo non solo dal lato finanziario, ma anche per la ricerca, con il coinvolgimento di una pluralità di centri di eccellenza di tutta la UE.**

nisti sono gli Stati membri dell'Unione. I quattro principali sono Italia, Francia, Germania e Regno Unito, con il 16,1% ciascuno. La BEI si finanzia sui mercati internazionali dei capitali con l'emissione di obbligazioni ed eroga prestiti a condizioni favorevoli per progetti che sostengono gli obiettivi dell'UE. Circa il 90% dei prestiti viene erogato all'interno dell'UE. Il denaro non proviene dal bilancio della UE.

Nel 2018 la BEI ha firmato nuove operazioni di finanziamento per circa 64 miliardi di euro a favore di investimenti per progetti in Europa (circa il 90% del totale) e nel mondo. Il valore degli investimenti sostenuti è stato di 230 miliardi.

**L'Italia è storicamente il principale Paese beneficiario della finanzia BEI, con quasi 200 miliardi di**



La sede della Banca Europea per gli Investimenti (BEI) in Lussemburgo

### **La BEI, una banca-istituzione al servizio di imprese e cittadini**

Qualche parola per spiegare che cosa è e che cosa fa la BEI, a un tempo una banca e una istituzione europea. La Banca europea per gli investimenti è il braccio finanziario a medio-lungo termine dell'Unione europea, nato nel 1958 e previsto dai Trattati di Roma istitutivi della UE dell'anno precedente. Azio-

prestiti dal 1958. Nel 2018 in Italia sono state perfezionate 91 operazioni per 8,5 miliardi di nuova finanzia, pari allo 0,5% del PIL. Il valore complessivo degli investimenti sostenuti è stato di 27,1 miliardi, pari all'1,6% del PIL (la BEI finanzia mediamente un terzo del costo dei progetti). Nel corso dell'anno sono state sostenute 77.500 PMI e 897.000 posti di lavoro. Oltre al settore delle PMI, tutti i comparti dell'economia hanno ottenuto finanziamenti, dalle in-



frastrutture all'energia, dall'innovazione all'ambiente. **Nel decennio 2008-2018 i finanziamenti in Italia sono stati 108 miliardi, per 300 miliardi di investimenti sostenuti.**

### **La scommessa dell'Europa sul progetto dell'ENEA**

In fase di studio e valutazione da parte della BEI, lo confesso, i dettagli del progetto mi hanno appassionato. Il Divertor Tokamak Test facility (DTT) che verrà sviluppato da oggi al 2026 presso il centro di ricerche ENEA di Frascati avrà una vita utile di almeno 25 anni e per rispettare le scadenze previste dalla Eurofusion Roadmap è indispensabile che i lavori vengano avviati al più presto. Una volta realizzato, il DTT sarà un cilindro ipertecnologico alto 10 metri con raggio cinque, una sorta di superlaboratorio, dove ricerca e sperimentazione avranno lo scopo di testare diverse configurazioni di quello che in linguaggio tecnico (ho appreso) si chiama "divertore". Si tratta di una delle componenti più critiche del reattore: il suo 'compito', infatti, è quello di riuscire a smaltire l'enorme quantità di calore (150 milioni di gradi centigradi) generata dal processo di fusione per estrarre energia termica che sarà trasformata in vapore che a sua volta alimenterà la turbina per generare energia elettrica.

Mi sono soffermato su questa descrizione non perché voglia sostituirmi agli scienziati, ma perché questo è il lavoro che facciamo alla BEI. Una banca 'anomala', dove un dipendente su sette è o ingegnere o economista-ingegnere. Studiamo i progetti che intendiamo finanziare in tutti gli aspetti tecnici, perché dobbiamo essere certi della validità dell'investimento nel suo complesso, con valutazioni che riguardano anche gli effetti sull'occupazione e la crescita.

**Le risposte a queste valutazioni sono state positive: nel progetto DTT saranno coinvolte 1.500 persone (di cui 500 direttamente); il costo del progetto è di 660 milioni, ma con un effetto leva sull'indotto complessivo di uno a tre. Significa che l'impatto positivo finale sul PIL italiano sarà di quasi due miliardi di euro.** Inoltre l'attività di ricerca sul DTT porterà ulteriori importanti benefici per la collettività. In particolare, il progetto contribuirà:

- (i) al raggiungimento dell'obiettivo di sostegno dell'Italia alla ricerca scientifica (attualmente pari al 1,33% del PIL a fronte di un target del 1,53%);
- (ii) a rafforzare l'eccellenza italiana (che vanta una lunga e prestigiosa storia nel settore) ed europea nell'ambito della ricerca scientifica per la fusione nucleare;
- (iii) a formare nuove generazioni di scienziati e ricer-

catori scientifici coinvolgendo decine di studenti universitari e PhD nella fase di costruzione del DTT e di successiva attività di ricerca;

(iv) consentirà di sviluppare e testare nuove tecnologie e materiali utilizzabili in altri settori industriali non collegati alla fusione nucleare, quali ad esempio, l'industria aerospaziale, la robotica, la superconduttività per la realizzazione di reti di trasmissione elettrica più efficienti e sicure, sistemi evoluti di monitoraggio ecc. **Un impatto quindi non solo finanziario ed economico, ma anche in termini di sviluppo scientifico per il nostro Paese, con importanti riflessi nel mondo accademico e nel tessuto produttivo italiani.**

Per quanto riguarda i principali finanziamenti, Eurofusion contribuirà con 60 milioni a valere sui fondi Horizon, il MIUR con 40 milioni, il MISE con 40 milioni, la Regione Lazio con 25 milioni, l'ENEA e i partner con 50 milioni. L'ammontare del prestito della BEI è di 250 milioni di euro. Dai partner internazionali è previsto un investimento di 30 milioni.

### **La garanzia dell'European Fund for Strategic Investments**

Un aspetto decisivo, è la circostanza che nel finanziamento al progetto dell'ENEA la BEI è stata affiancata dalla Commissione UE. Il prestito ha infatti, come ho detto, la garanzia del cosiddetto Piano Juncker. Di che cosa si tratta? Il nome completo è Investment Plan for Europe (IPE), Piano di investimenti per l'Europa. Varato dal Consiglio Europeo di dicembre 2014, prevede l'attivazione di 500 miliardi di investimento nella UE entro il 2020, come risposta alla lunga crisi. Si basa sull'EFSI (European Fund for Strategic Investments), un fondo di garanzia cofinanziato da Commissione UE e BEI. Grazie a tale strumento la BEI può effettuare operazioni addizionali e più innovative di prestito e garanzia. Braccio operativo ne è appunto la BEI. Il bilancio è decisamente positivo: sino a luglio 2019 erano state approvate più di 1.100 operazioni in tutta Europa per totali 77 miliardi di prestiti e garanzie che attiveranno investimenti per 424 miliardi, pari al 85% dell'intero Piano. L'Italia è tra i principali paesi beneficiari con 167 operazioni, 10,2 miliardi di prestiti e garanzie a sostegno di 66,5 miliardi di investimenti.

A partire dal 2021 lo strumento EFSI sarà unificato con altri numerosi schemi di garanzia con funzionamento analogo. Il nuovo strumento si chiamerà InvestUE e permetterà di scrivere nuovi capitoli della



storia di successo che nasce dalla partnership tra Commissione Europea e BEI.

**In sintesi, il progetto ENEA ha due aspetti fondamentali per l'Europa: innovazione e lotta al cambiamento climatico. Sono entrambi campi in cui dobbiamo fare di più se vogliamo guardare al futuro del nostro pianeta con speranza e ottimismo, concentrandoci responsabilmente sul lungo**

**periodo senza l'ansia del brevissimo termine, che troppo spesso condiziona le scelte sull'allocazione delle risorse finanziarie.**

**Da Italiano impegnato in una istituzione europea sono davvero felice e orgoglioso che questo progetto abbia fatto lavorare insieme due istituzioni prestigiose: l'italiana ENEA e la banca dell'Unione Europea.**

# ITER, sfida dei nostri tempi e opportunità industriale

Il progetto ITER in via di realizzazione a Cadarache in Francia è una sfida scientifica e tecnologica da oltre 20 miliardi di euro che coinvolge le università, i centri di ricerca e i sistemi industriali di Unione Europea, Svizzera, Cina, India, Giappone, Russia, Corea del Sud e Stati Uniti. L'obiettivo è di produrre energia pulita, sicura ed in quantità illimitata per soddisfare le necessità delle generazioni future, ma anche di aprire nuove frontiere di conoscenza e innovazione. Ad oggi, il 60% è stato completato, l'anno prossimo inizierà l'assemblaggio e la previsione è di produrre il primo plasma nel 2025

DOI 10.12910/EAI2019-005



di **Sergio Orlandi**, Direttore del Dipartimento Ingegneria e impianto del Progetto ITER

**P**rodurre energia pulita, sicura ed in quantità illimitata per soddisfare le necessità delle generazioni future, utilizzando elementi disponibili con abbondanza in natura: è questa la *driving force* della ricerca sulla fusione nucleare, il motore propulsivo di ITER, il gigantesco progetto in via di realizzazione a Cadarache in Francia. Sviluppato da un consorzio di cui fanno parte Unione Europea, Svizzera, Cina, India, Giappone, Russia, Corea del Sud e Stati Uniti d'America sulla base di un'eccellente cooperazione internazionale, unica nel suo genere, e di un

investimento di quasi 20 miliardi di euro in 20 anni, il progetto nasce per dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della fusione. Di fatto, la sua realizzazione sarà un *breakthrough* nello sviluppo della fusione per produrre energia a costi di mercato. Ed è proprio questo uno degli aspetti di maggiore interesse della fusione, ovvero di utilizzare un combustibile dalla disponibilità pressoché illimitata, rinvenibile anche nell'acqua di mare, per produrre energia per tutti ed a basso costo. **La posta in gioco, tuttavia, va ben oltre. La produzione commerciale di energia è solo uno degli aspetti di una ricerca di**

**frontiera che comporta ricadute scientifiche e tecnologiche di vastissima portata: ad esempio, solo ITER potrà consentire di esplorare in modo gestibile e controllato il quarto stadio della materia.**

## Una sfida senza precedenti

Dal punto di vista scientifico e tecnologico, ITER prevede la realizzazione di un "burning plasma" in grado di riprodurre le reazioni che avvengono nel Sole e in ogni stella. Per arrivare a questo traguardo mai raggiunto in 60 anni di ricerca sulla fusione nucleare sono necessari campi magnetici di confinamento



Una veduta aerea del sito di costruzione di ITER a Cadarache, in Francia

particolarmente ‘aggressivi’ e un impianto in grado di simulare il fenomeno su grande scala. È un’impresa affascinante, una sfida tecnologica e scientifica molto ambiziosa che richiede a quanti vogliono diventare player vincenti nell’ambito del progetto, di saper fare ricerca applicata, sviluppare processi produttivi di eccellenza e realizzare prodotti di altissima qualità. **Per questi motivi ITER sta diventando la piattaforma di lavoro più ricercata per l’intera Comunità Scientifica della fusione, per le università, i centri di ricerca e i sistemi industriali.**

**Dall’avvio dei lavori nel 2007 ad oggi è stato compiuto circa il 60% del percorso previsto; in particolare, negli ultimi tre anni sono state completate 36 tappe programma-**

**tiche approvate dal Consiglio di ITER (‘Council milestone’):** nell’agosto 2018 Fusion for Energy ha completato la ‘corona’ di cemento armato sulla quale verrà costruito il tokamak e, sempre in agosto, i serbatoi di drenaggio forniti dagli Stati Uniti e i serbatoi di scarico provenienti dalla Cina sono stati collocati dove previsto; la Corea del Sud ha completato all’80% la camera a vuoto e la Russia ha terminato la realizzazione del cavo superconduttivo mentre l’India sta per finalizzare la base del cilindro inferiore del criostato. Nel frattempo, in Europa e in Giappone proseguono i test previsti e il prossimo anno inizierà l’assemblaggio delle parti di maggiori dimensioni. **La scadenza per completare la macchina con chiusura del crio-**

**stato è fissata al novembre 2024, la produzione del primo plasma per il dicembre 2025 e la reazione di fusione nel 2035:** per un progetto partito nel 2007, basato esclusivamente su tecnologie d’avanguardia, si tratta di tempi non trascurabili, ma di certo non ‘ciclopici’ rispetto a quelli di grandi infrastrutture e impianti per la produzione di energia elettrica di tipo convenzionale.

#### **Attività complesse ed esclusive**

ITER è probabilmente la ‘macchina’ più complessa concepita fino ad oggi e rappresenta una delle più altre espressioni della conoscenza scientifica e tecnologica mai raggiunte. Di conseguenza, la sua realizzazione richiede investimenti molto ingenti,

avendo ben presente che i costi di attività “*First of a kind*” come quelle previste sono necessariamente connessi a quelli delle soluzioni tecnologiche e scientifiche che occorre adottare e dei processi per realizzarli. Ciò non significa giustificare eventuali incrementi della spesa prevista – che deve comunque essere attentamente controllata e contenuta con rigorose strategie di *project* e di *contract management*), ma prevedere ‘finestre di flessibilità’ per attività complesse, esclusive e capaci di aprire orizzonti nuovi alla fisica ed alla tecnologia.

Il costo di realizzazione dell’impianto è di circa 20 miliardi di euro da ripartirsi fra i partecipanti al consorzio ITER, ovvero sette colossi che rappresentano oltre l’80% del PIL mondiale. L’Europa finanzia il 45% del totale e il restante 55% è ripartito fra India, Corea del Sud, Stati Uniti, Cina, Giappone e Russia con una quota del 9,09% ciascuno, attraverso un “in kind contribution” tesa a tutelare e valorizzare a l’industria di ogni singolo Paese.

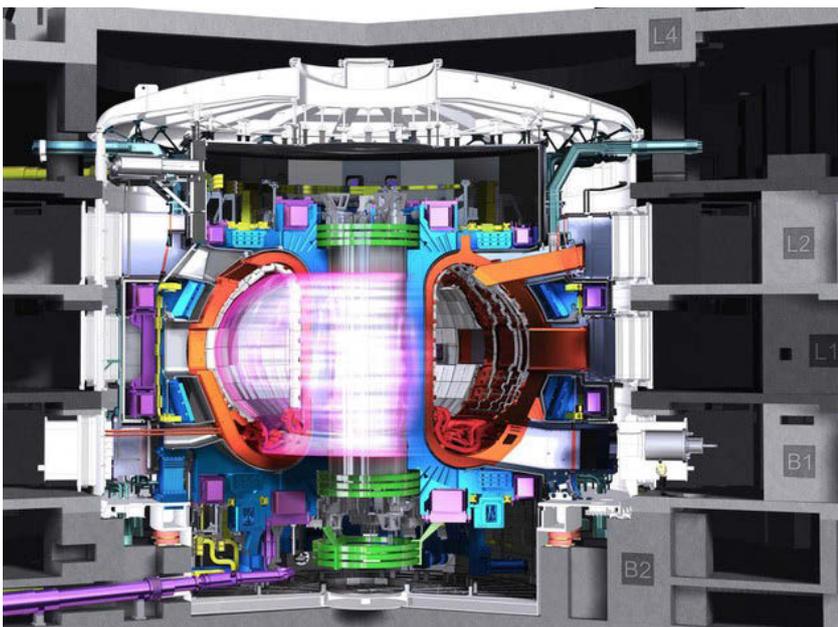
### Gli Obiettivi e la valenza strategica

Obiettivo primario di ITER è dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della produzione di energia da fusione nucleare di atomi leggeri, isotopi dell’idrogeno, grazie alla disponibilità di una fonte di combustibile inesauribile. Di fatto, è questo il motore dello sviluppo di questa tecnologia che consentirebbe di centrare l’obiettivo di produrre energia per tutti ed a basso costo. Oggi gli investimenti richiesti sono molto ingenti, perché si tratta di macchine ancora prototipiche: tuttavia, in futuro, i costi potranno ridursi grazie alle attività per ingegnerizzare ed industrializzare progressivamente il reattore e implementare soluzioni efficaci nelle prestazioni. Ovviamente ITER è anche terreno fertile per lo sviluppo di nuove tecnologie e per lo studio di materiali alternativi che trovano diretta applicazione in altre sfidanti applicazioni industriali come l’aerospaziale (vedi la

tecnologia del vuoto e del criogenico), la medicina e la biologia. È pur vero che l’idea di produrre energia a basso costo, superando il problema della disponibilità di materie prime è un sogno industriale per regalare ricchezza anche ai Paesi più sfortunati. Ma è altrettanto vero che, anche senza il sogno-desiderio di generare energia infinita ed a basso costo attraverso il più naturale dei fenomeni nucleari, la ricerca sulla fusione nucleare sarebbe comunque andata avanti, forse magari senza strappi ed a ritmi più blandi, ma sarebbe inesorabilmente andata avanti. Perché è difficile tarpare le ali alla conoscenza e cercare di imporre il concetto dell’ ‘ignoranza del sapere’, in nome di un modello di economia fatto di ritorni di utili sugli investimenti o di dilapidazione di ricchezze in nome del controllo del debito pubblico.

### Le caratteristiche della Macchina

Con ITER l’energia viene prodotta attraverso il processo fisico della fusione nucleare che consiste nella capacità di aggregare nuclei generalmente di idrogeno (deuterio e trizio) in ambienti ad altissima temperatura (150 milioni di gradi centigradi). Al momento della fusione allo stato plasmatico, questi nuclei generano energia in forma termica convertibile in energia elettrica con accoppiamento ad un vettore refrigerante fatto espandere in turbina accoppiata con generatore elettrico, secondo la più tradizionale e diffusa delle tecnologie correnti per assicurare la formazione del plasma a temperature così elevate mediante confinamento magnetico realizzato da bobine toroidali e poloidali superconduttrici raffreddate a 4 K da elio liquido. Correnti dell’ordine di grandezza pari a 75 kA percorrono



le bobine superconduttrici e permettono di raggiungere campi magnetici pari a 13 T (ordinariamente, a confronto, nella vita quotidiana, si gestiscono al più campi magnetici pari a valori uguali a qualche millitesla). L'energia magnetica che si raggiunge è pari alla energia cinetica associata ad una porta-aerei lanciata ad una velocità di 180 km/ora. La creazione del plasma all'interno della camera a vuoto realizzata in acciaio saldato con uno spessore di 60 mm e il raggiungimento di temperature altissime per garantire la formazione dello stato di plasma sono possibili grazie alla disponibilità di sistemi di 'riscaldamento' a radiofrequenza e all'iniezione di particelle neutre.

### **Il contributo delle imprese italiane**

ITER ha un cuore tricolore perché molta della sofisticata tecnologia necessaria è fornita da aziende ed ingegneri nucleari italiani che lavorano a Cadarache nel Sud della Francia, ad una ora di auto da Marsiglia, in un gigantesco cantiere immerso nel verde della campagna provenzale.

L'industria italiana e centri di ricerca qualificati come l'ENEA hanno svolto e svolgono un ruolo di primo piano nello sviluppo delle tecnologie associate alla ricerca sulla fusione, in primis con riferimento ad ITER. Cinque settori del Vacuum Vessel come pure i grandi magneti capaci di assicurare il confinamento magnetico del plasma sono realizzati da aziende italiane che hanno raggiunto livelli di eccellenza per qualità e capacità di innovazione. Anche il laboratorio di ricerca per la Neutral Beam Test Facility (una infrastruttura in cui sarà provato il sistema di iniezione di particelle neutre che servirà a riscaldare il plasma di ITER) si trova in Italia e precisamente presso l'Università di Padova.

Non è orgoglio nazionale, ma espressione di altissima capacità manifatturiera e capacità di garantire prodotti di altissima qualità nel pieno rispetto dei tempi e senza costi addizionali rispetto ai valori concordati e preventivati. Industrie italiane lavorano con grande soddisfazione nella tecnologia del

Remote Handling, della tecnologia del vuoto, nella realizzazione di componenti criogenici, nei servizi di ingegneria specialistica quali la termoidraulica, la strutturalistica, le simulazioni dinamiche, nelle analisi funzionali per la messa in esercizio degli impianti, e per il training degli operatori. Tutta l'Area di impianto complementare all'Edificio Reattore è realizzata da partner industriali italiani che hanno fatto dell'eccellenza nella qualità la loro bandiera. È l'espressione migliore di un'Italia dinamica, che funziona ed è capace di implementare modelli efficaci ed efficienti.

Sono convinto che si stia tutti restando in un'unica direzione per arrivare al traguardo prefissato: riuscire a produrre energia in modo sostenibile, nel rispetto dell'ambiente ed a basso costo. Ciò significa prima di tutto rispettare l'Uomo e il suo Futuro sul Pianeta. Al Ricercatore è demandato il compito di sviluppare la scienza e la tecnologia. Al Politico è richiesto di estendere e favorire l'applicazione e l'implementazione dei risultati di tale ricerca.

# EUROfusion, un paradigma unico di integrazione europea per realizzare il sogno della fusione

Con 30 organizzazioni di ricerca e università di 26 Paesi europei più Svizzera, Ucraina e oltre 100 entità connesse, il Consorzio *EUROfusion* è uno dei principali protagonisti della ricerca sulla fusione e rappresenta un paradigma unico di integrazione europea. La sua attività si sviluppa attraverso una roadmap dinamica, costantemente aggiornata e molto ambiziosa che integra scienza, ingegneria e tecnologia per arrivare alla produzione commerciale di energia elettrica, riuscendo anche ad attirare interesse, capacità e nuovi talenti dal mondo accademico e industriale

DOI 10.12910/EAI2019-006



di **Ambrogio Fasoli**, *Presidente di EUROfusion, Professore Ordinario di Fisica presso l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), dello Swiss Plasma Center, EPFL, Losanna*

Individuare fonti di energia a basso impatto ambientale, sicure, ben distribuite geograficamente e compatibili con uno sviluppo sostenibile rappresenta una delle sfide più importanti che l'umanità si trova ad affrontare in questo secolo. La fusione può contribuire in modo sostanziale alla soluzione di questa sfida. Un tale potenziale globale giustifica un'intensificazione delle attività di ricerca e sviluppo necessarie per risolvere le questioni multidisciplinari di fisica e tecno-

logia che ancora permangono sulla strada verso un reattore a fusione. L'Unione Europea è impegnata nel progetto ITER del quale è il principale contribuente con il 45% delle spese totali e con la responsabilità di sistemi chiave come la camera da vuoto, un set di bobine magnetiche e le infrastrutture di ingegneria civile. Questo elevato livello di partecipazione dimostra la volontà di assumere la leadership mondiale nella ricerca e sviluppo nel campo della fusione, per arrivare a produrre

energia elettrica nella seconda metà del ventunesimo secolo. Per raggiungere questo obiettivo, l'UE si è dotata di un programma integrato di scienza, ingegneria e tecnologia che oggi appare come forse il più coerente a livello mondiale, ambizioso e pragmatico al tempo stesso.

## La Roadmap della fusione

I laboratori europei hanno una lunga storia di collaborazione nella ricerca congiunta sulla fusione, iniziata ne-



Particolare dell' ASDEX Upgrade, divertor tokamak operativo dal 1991 presso il Max-Planck-Institut für Plasmaphysik a Garching, in Germania. È una delle macchine di media dimensione utilizzate per preparare la base di fisica per i futuri reattori ITER e DEMO

gli anni '70 con la costruzione del *Joint European Torus (JET)*, ancora oggi il più grande tokamak al mondo e l'unico a poter operare con la miscela di deuterio e trizio che verrà usata nei futuri reattori a fusione<sup>1</sup>. La collaborazione in campo scientifico ha riguardato non soltanto la gestione di JET e l'elaborazione dei risultati, ma tutto il resto del programma di ricerca sulla fusione per la parte della fisica e della tecnologia. Un passaggio strategico per il coordinamento fra questi progetti è stata la fondazione, nel 1999, dell'*European Fusion Development Agreement* o EFDA, un accordo tra la Commissione Europea e gli istituti europei impegnati nella ricerca sulla fusione per la conduzione coordinata e congiunta

delle attività. In questo contesto, uno step di rilievo è stata l'elaborazione, nel 2012, di un documento-guida dei ricercatori europei per identificare le priorità nello sviluppo di un reattore per la produzione commerciale di elettricità da fusione e focalizzare le attività di ricerca.

Il documento dal titolo *Fusion Electricity – A roadmap to the realisation of fusion energy* [1] (che in seguito chiameremo semplicemente *Roadmap*) è stato concepito per avere una natura dinamica, ovvero per poter essere adattato allo stato delle conoscenze, all'avanzamento dei principali progetti ed eventualmente alle variazioni delle condizioni politiche globali nel corso degli anni. La *Roadmap* è stata aggiornata nel

2019 [2] confermando quattro elementi cardine: ITER, la sorgente di neutroni per lo sviluppo e la qualifica dei materiali per il reattore, il reattore dimostrativo DEMO, che genererà centinaia di milioni di watt di energia elettrica e produrrà il trizio necessario dimostrando che la fusione può essere sviluppata a livello commerciale e, infine un forte programma di ricerca e innovazione per supportare queste attività. Intorno a questi elementi cardine, si articolano le otto missioni per l'attuazione della *Roadmap* che, in sintesi, mirano a:

- (1) il successo degli esperimenti su ITER e la preparazione delle operazioni in DEMO,
- (2) lo sviluppo e dimostrazione di componenti interni al reattore in

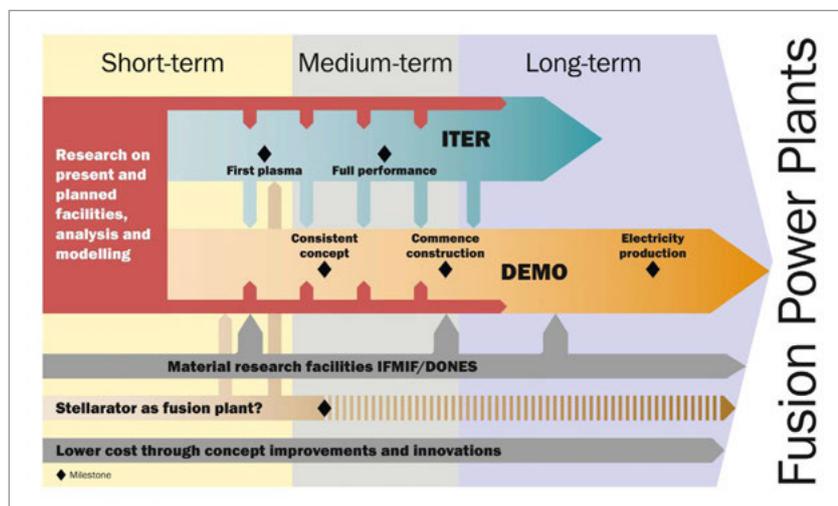


Fig. 1 La Roadmap della fusione

grado di smaltire gli elevatissimi carichi termici previsti, (3) lo sviluppo e la qualifica di materiali resistenti al flusso di neutroni, (4) lo sviluppo di componenti in grado di garantire l'autosufficienza per l'approvvigionamento del trizio, (5) il progetto intrinsecamente sicuro e (6) integrato di DEMO, e (7) lo sviluppo nuove tecnologie per ridurre l'investimento iniziale per DEMO e dimostrare la fattibilità economica della fusione. In parallelo, (8) si continueranno a studiare configurazioni di reattori alternative ai tokamak (stellarator) per portarle ad un livello di maturità che ne permetta una valutazione come soluzione a lungo termine per il reattore.

**Una delle principali sfide della Roadmap è di trovare un equilibrio fra il bisogno di 'congelare' la progettazione di DEMO in tempi sufficientemente brevi per poter sviluppare la macchina e l'infrastruttura necessaria per la metà del secolo, e l'esigenza di incorporare nel progetto i progressi che la comunità scientifica continua a ottenere nella fisica dei plasmi e dei materiali, nelle tecnologie e**

**nella loro integrazione.** È quindi necessario mantenere aperte il più a lungo possibile diverse opzioni e soluzioni tecniche e, al tempo stesso, iniziare la progettazione di DEMO in collaborazione con l'industria e utilizzando gli strumenti più moderni per identificare e definire i problemi ancora da risolvere. Tali problematiche dovranno essere studiate, in parallelo, sia in Europa sia tramite collaborazioni internazionali, esplorando configurazioni di reattori più semplici e meno costosi. Gli sforzi per affrontare le problematiche ancora irrisolte coinvolgono numerose discipline scientifiche e tecnologiche e consentiranno di sviluppare applicazioni innovative anche in altri settori, sia nel pubblico che nel privato.

**Inoltre, il successo della fusione in Europa e il conseguimento degli obiettivi della Roadmap dipenderanno dai finanziamenti disponibili sia a livello comunitario sia nei singoli Paesi europei ed associati, ma anche dalla capacità della comunità scientifica di attirare interesse, capacità e nuovi talenti dal mondo accademico ed industriale.**

## Il Consorzio *EUROFusion*, un paradigma unico di integrazione europea

Un ulteriore salto di qualità nell'organizzazione e nel coordinamento del programma europeo di sviluppo della fusione è stato fatto alla fine nel 2014, quando 29 istituti di ricerca di 26 Paesi membri dell'Unione Europea più la Svizzera hanno dato vita a *EUROFusion*, il Consorzio europeo per lo sviluppo dell'energia da fusione. Il Consorzio include attualmente 30 organizzazioni di ricerca e università di 26 Paesi europei, più Svizzera e Ucraina e oltre 100 entità connesse (linked third parties, in genere università, laboratori, e industrie) e, di fatto, rappresenta un paradigma unico di integrazione europea (Figura 2).

Nell'ottavo programma quadro europeo di ricerca e innovazione noto come *Horizon 2020*, *EUROFusion*, sotto l'egida di EURATOM, ha assunto la responsabilità di coordinare e co-finanziare le attività di fusione condotte in parallelo alla realizzazione di ITER. Infatti, pur non avendo la responsabilità della costruzione di ITER, *EUROFusion* considera la sperimentazione su ITER un punto focale delle sue attività.

Il supporto finanziario fornito da EURATOM è gestito attraverso l'Istituto Max Planck per la fisica dei plasmi, l'IPP di Garching in Germania e consiste in 85 milioni di euro l'anno per le attività comuni, più i contributi degli Stati membri che sono, almeno dello stesso ordine di grandezza, in quanto le attività di *EUROFusion* sono realizzate in co-finanziamento. Inoltre, la Commissione Europea sovvenziona direttamente l'operazione del JET con circa 60 milioni di euro all'anno.

La distribuzione dei fondi all'interno



Fig. 2 Distribuzione geografica dei partner del Consorzio EUROfusion

del Consorzio è decisa dai membri stessi in base alle priorità generali dettate dalla *Roadmap* la cui implementazione fa capo all'Unità di Programma e al suo manager, basati presso l'IPP.

In *EUROfusion* il potere decisionale spetta all'Assemblea Generale composta dai rappresentanti di tutte le unità di ricerca. La declinazione delle missioni della *Roadmap* in programmi specifici viene fatta collettivamente e un ruolo importante nella definizione e nella valutazione del programma scientifico spetta al *Scientific and Technological Advisory Committee* (STAC) che comprende esperti di tutti i campi di ricerca di *EUROfusion*, nominati ad personam (fig. 3).

Dal punto di vista operativo, il programma di *EUROfusion* è organizzato in diversi *work packages*.

Un esempio di *work package* è quello che coordina gli esperimenti nei *Medium Size Tokamaks* (MST), le tre macchine sperimentali che, in parallelo a JET, sono utilizzate per preparare la sperimentazione di ITER e completare la base di fisica per DEMO. Si tratta dell'Asdex Upgrade dell'IPP, del MAST-upgrade dell'UKAEA, l'Agenzia per la ricerca sulla fusione britannica e del Tokamak a Configurazione Variabile, TCV, dello *Swiss Plasma Center* dell'EPFL, il Politecnico Federale di Losanna che rappresentano

l'insieme dei tokamak operati congiuntamente da *EUROfusion*, insieme al JET, ed al JT60-SA<sup>2</sup> (Figura 4). Condurre la ricerca sugli esperimenti MST in maniera congiunta permette di ottimizzare la definizione di un piano sperimentale per la *Roadmap*. Esperti da tutta l'Europa possono non solo partecipare agli esperimenti nei vari siti, ma anche contribuire a migliorare i sistemi di misura e di controllo delle diverse macchine. Ciò consente di svolgere le attività di ricerca in condizioni ottimali, utilizzando le migliori competenze esistenti a livello europeo e installazioni che possono essere mantenute in uno stato di massima produttività scientifica.

### Un programma di sviluppo ambizioso

Il programma DEMO ha l'obiettivo di sviluppare una base scientifica e tecnologica per arrivare in tempi relativamente brevi a completare una prima versione del progetto del reattore che sia compatibile con i criteri industriali per la costruzione,

il mantenimento e lo sfruttamento commerciale [3]. Un tale approccio è validato da una serie di *gate reviews*, nelle quali ogni scelta deve poter essere scrutinata, ammessa o respinta da un gruppo di esperti, comprendente anche esponenti delle *utilities* e della società civile che saranno i beneficiari di DEMO.

Il programma di sviluppo di DEMO è particolarmente ambizioso, perché prevede la realizzazione dell'impianto prima che siano disponibili tutti i risultati degli esperimenti di ITER; resta il fatto che l'esperienza fatta nella progettazione, costruzione e avvio delle prime fasi di ITER consentirà di ottenere informazioni fondamentali per DEMO. Se gli esiti delle campagne sperimentali a piena potenza di ITER daranno indicazioni diverse da quelle raccolte nelle prime fasi di operazione, il design finale di DEMO dovrà essere modificato.

In ogni caso, la scelta europea di procedere ad una definizione del design di DEMO il più rapidamente possibile permette di identificare gli elementi più critici, anche quelli in-

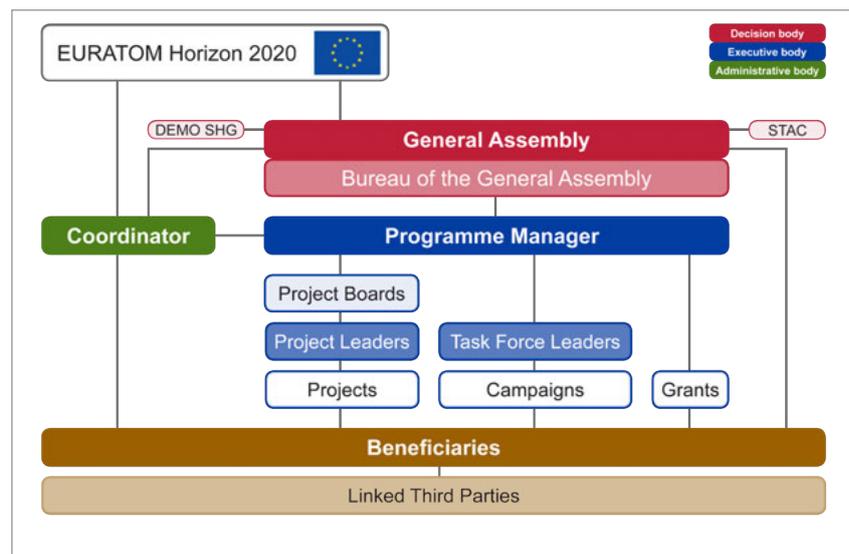


Fig. 3 La struttura del Consorzio EUROfusion

trinsecamente legati all'integrazione globale del reattore.

Per quanto riguarda la comprensione della fisica che regola la dinamica del plasma in un reattore, i punti che richiedono maggiore attenzione in questo momento sono la definizione degli scenari operativi e le metodologie per evitare o mitigare le disruzioni del plasma e le loro conseguenze.

Tra le maggiori sfide per la progettazione del reattore spiccano le soluzioni tecnologiche da adottare per il divertore e per la prima parete, la scelta e la verifica dei materiali strutturali per resistere ai carichi termici e neutronici, i sistemi di produzione di trizio e gestione del ciclo del carburante, gli aspetti di robotica e di sicurezza nucleare e la produzione finale di elettricità ad un costo competitivo. Per far fronte a queste sfide senza perdere di vista gli obiettivi di sicurezza e economicità del reattore, *Eurofusion* si è dotato di un'organizzazione che assicura la partecipazione di tutte le competenze presenti nel consorzio, il loro coordinamento e il coinvolgimento di un gruppo di *stakeholders* comprendente le *utilities* industriali e le altre istanze della fusione ad alto livello. Al tempo stesso, non si trascurano approcci potenzialmente più innovativi con applicazioni su tempi eventualmente più lunghi, ma sempre volti a ottimizzare il progetto di reattore a fusione.

### Il piano di lavoro per *Horizon Europe*

Dopo la prima fase di attività di *EUROfusion*, condotta con successo durante il programma quadro *Horizon 2020* e il recente riadattamento della *Roadmap*, la comunità europea della fusione è impegnata nella preparazione del piano di lavoro per *Horizon Europe*,

### il programma quadro europeo per il periodo 2021-2027.

La struttura globale delle attività è quella dettata dalla *Roadmap* e non subirà variazioni di rilievo anche se si sta valutando un riaggiustamento dell'equilibrio fra i vari capitoli di ricerca, così come la possibilità di aumentare gli investimenti complessivi e il finanziamento dalla Commissione Europea.

esperimenti su JT60-SA, anche in termini di *hardware* per ulteriori migliorie dell'infrastruttura, in particolare per i sistemi diagnostici, in collaborazione con *Fusion for Energy* e in quelli che possono essere considerati i primi esperimenti su un componente di ITER, la *Neutral Beam Test Facility*, NBTF, la cui infrastruttura è stata da poco completata presso i laboratori del

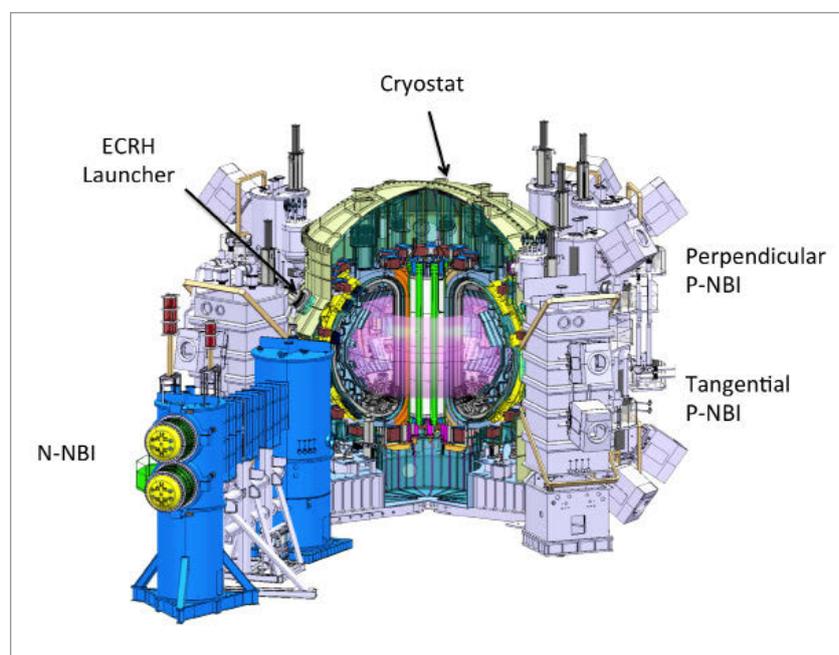


Fig. 4 La macchina tokamak JT-60SA

L'importanza delle attività per DEMO continuerà a crescere così come le ricerche dedicate alla preparazione della sperimentazione su ITER, per la quale *EUROfusion* dovrà assumere un ruolo centrale. In questo ambito dovranno essere gestite le ultime fasi dell'operazione di JET, massimizzando il trasferimento di conoscenze a ITER con gli esperimenti in deuterio-trizio a piena potenza.

I membri di *EUROfusion* saranno direttamente coinvolti negli

Consorzio RFX a Padova.

Nei prossimi anni proseguiranno gli studi della dinamica della zona del "bordo" del plasma, dove occorre smaltire grandi quantità di energia e di particelle, senza danni per le superfici e i materiali circostanti né conseguenze negative sulla performance della regione centrale del plasma. Questi studi consentiranno di ottenere informazioni indispensabili per poter scegliere fra una configurazione convenzionale o "alternativa" del

## La scuola italiana di ricerca sulla fusione: un esempio di eccellenza

L'Italia ed ENEA sono ai primi posti nella classifica dei membri di EUROfusion per volume di attività, secondi solo alla Germania (escludendo JET). Ma il nostro Paese vanta ottime competenze anche per la qualità della sua Scuola di ricerca sulla fusione, considerata tra le migliori al mondo per l'ampio spettro di tematiche coperte. Non a caso, molti scienziati che si sono formati in Italia in questo campo ricoprono ruoli chiave in laboratori e in organismi internazionali. Adesso, con l'avvento del progetto NBTF a Padova e ancor

più con il tokamak DTT a Frascati, la comunità di scienziati e ingegneri italiani ha gli strumenti per mettere il nostro Paese al centro dello scenario, quale sede di infrastrutture strategiche per ITER, DEMO e per la ricerca e sviluppo sulla fusione. Un'opportunità rafforzata dalla presenza di competenze industriali molto valide che, soprattutto nell'ultimo decennio, hanno saputo conquistare spazi importanti a livello europeo e mondiale nell'acquisizione di commesse per la realizzazione di grandi progetti per la fusione. A.F.

divertore ed anche di testare il DTT in condizioni operative più vicine a quelle di DEMO. Una volta conclusi gli studi preparatori, *EUROfusion* potrà partecipare al progetto DTT e contribuire al finanziamento del divertore ed alla successiva sperimentazione.

**Per il 2022-2023 è prevista una *Facilities Review*, ovvero una valutazione del parco delle infrastrutture dei membri di *EUROfusion* e dei miglioramenti necessari per perseguire le linee di ricerca previste dalla *Roadmap*, tanto nella fisica del plasma quanto nella tecnologia del reattore<sup>3</sup>.**

Affinché queste attività sperimentali possano avere un impatto significativo e accelerare l'avanzamento verso DEMO ed il successivo reattore, sarà necessario svilupparle in parallelo agli studi teorici e numerici indispensabili per reperire informazioni richieste. Tutti i dati raccolti dovranno essere sottoposti a un processo sistematico di verifica e validazione.

## Progetti-pilota e giovani talenti

Come ha dimostrato l'esperienza di *EUROfusion* in *Horizon 2020*, affinché i risultati teorici e delle simulazioni possano influire in modo significativo sulle scelte di progetto, è indispensabile accrescere l'impegno coordinato a livello europeo, le risorse umane e l'hardware, assicurando una continuità delle attività su tempi medio-lunghi. Per questo motivo *EUROfusion* ha lanciato di recente alcuni progetti-pilota nell'ambito dell'iniziativa E-TASC (*European Theory and Advanced Simulation Coordination*) con un approccio la cui efficacia sarà valutata in tempi relativamente brevi: se il risultato verrà giudicato positivo, il progetto verrà ampliato e reso stabile nel tempo. Inoltre, risorse computazionali importanti verranno dedicate alle simulazioni, come già avviene con il supercomputer MARCONI, al CINECA di Bologna. In generale, per preservare l'equilibrio fra approccio programmatico (*top*

*down*), e libera iniziativa (*bottom up*) verrà mantenuto il programma di Enabling Research che prevede la possibilità di finanziare progetti di ricerca sperimentali o teorici proposti direttamente dai ricercatori, ispirati alle linee della *Roadmap*, ma non necessariamente legati a progetti specifici o predeterminati.

Il dibattito in corso sembra convergere verso una parziale rivisitazione della ripartizione delle risorse finanziarie del Consorzio. L'obiettivo è di devolvere circa il 55% del totale alle attività R&D di ITER, DEMO e agli stellarator, circa il 30% al design di DEMO e per lo sviluppo della sorgente di neutroni per la qualifica dei materiali del reattore (DONES, *Demo Oriented Neutron Source*, la cui costruzione verrà finanziata tramite meccanismi esterni ad *EUROfusion*), circa il 7% alla gestione delle attività, ed il 7% a educazione e formazione.

**Quest'ultimo capitolo ha un ruolo vitale in *EUROfusion* e nella fusione**

**in generale. EUROfusion fornisce un supporto finanziario alle attività di formazione condotte dai suoi membri, in particolare per dottorati di ricerca e dal 2014 ha elargito circa 150 borse a giovani ricercatori ed ingegneri dei quali una buona parte**

**è rimasta nel campo della fusione.** Questi meccanismi di supporto a livello centrale, insieme alle attività di formazione a livello locale svolte dai membri, accademici e non, in tutti i Paesi associati, accrescono la capacità della comunità europea della

**fusione di attrarre e consolidare la presenza di giovani talenti, elemento fondamentale per una sfida epocale e transgenerazionale quale è l'energia delle stelle.**

*ambrogio.fasoli@epfl.ch*

- <sup>1</sup> JET dispone inoltre di una combinazione di materiali della camera da vuoto identica a quella di ITER, comprendente berillio per la prima parete e tungsteno per il divertore
- <sup>2</sup> Quest'ultimo esperimento, costruito in Giappone nell'ambito della collaborazione fra Giappone ed alcuni membri di EUROfusion, nota sotto il nome di Broader Approach, è un tokamak con bobine super-conduttrici che esplorerà plasmi di lunga durata in regimi avanzati, ovvero con profili di corrente ottimizzati per creare alti livelli di corrente auto-generata e barriere di trasporto all'interno del plasma. JT60-SA entrerà in funzione nel 2020 e sarà operato in maniera concertata fra EUROfusion ed il Giappone, in loco e a distanza, tramite una o più sale di controllo installate presso laboratori europei
- <sup>3</sup> Nel prossimo programma quadro europeo, lo stellarator W7-X potrà essere operato in condizioni stazionarie su lunghe durate della scarica di plasma, grazie all'installazione del divertore attivamente raffreddato. Un grande sforzo sperimentale sarà condotto per validare l'ottimizzazione compiuta nel progettare W7-X, sia per il plasma termico che per le particelle rapide, o sovratermiche, e valutare il potenziale per un reattore della linea degli stellarator

## BIBLIOGRAFIA

1. Romanelli F, Barabaschi P, Borba D, Federici G, Horton L, Neu R, Stork D, Zohm H, 2012, *Fusion electricity: A roadmap to the realisation of fusion electricity* - <https://www.euro-fusion.org/wpcms/wp-content/uploads/2013/01/JG12.356-web.pdf>
2. Donné AJH, 2019, The European roadmap towards fusion electricity. *Phil. Trans. R. Soc. A* 377: 20170432. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2017.0432>
3. Federici G et al., 2016, Overview of the design approach and prioritization of R&D activities towards an EU DEMO, *Fusion Eng. Des.* 109–111 B, 1464–1474. (doi:10.1016/j.fusengdes.2015.11.050)

# Fusion for Energy: rendere l'energia da fusione una realtà

Dall'avvio delle attività nel 2007 al 2018, Fusion for Energy ha stipulato contratti per oltre 4 miliardi di euro con le industrie europee per la progettazione, lo sviluppo e la produzione di tecnologie, sistemi e componenti per ITER. Investimenti altrettanto consistenti sono previsti per il periodo 2021-2027 con l'obiettivo di fare della produzione di energia da fusione una realtà. Le aziende e il mondo scientifico italiano hanno fornito e continuano a fornire un contributo di rilievo alla realizzazione di ITER con ricadute molto positive su crescita e occupazione nei settori hi-tech, grazie alla capacità di innovare sviluppata negli anni, alle caratteristiche del sistema industriale e alla qualità delle istituzioni di ricerca

DOI 10.12910/EAI2019-007



di **Johannes P. Schwemmer**, *Direttore di Fusion for Energy (F4E)*

**F**usion for Energy (F4E) è un'agenzia con sede a Barcellona, istituita nel 2007 in ambito UE con la *mission* di rendere l'energia da fusione una realtà. Di fatto, F4E ha gestito e gestisce il contributo europeo alla realizzazione di ITER attraverso la fornitura di componenti realizzati dalle industrie europee per un controvalore di 6,6 miliardi di euro fra il 2008 e il 2020.

ITER, attualmente in fase di realizzazione a Cadarache, in Francia, è il più grande esperimento di fusione

della storia e futura pietra miliare sul percorso di questa tecnologia; si tratta una partnership scientifica internazionale senza precedenti<sup>1</sup> che unisce metà della popolazione mondiale e l'80% del suo PIL.

Al progetto partecipano Cina, Giappone, India, Repubblica di Corea, Federazione Russa, Stati Uniti e Unione Europea che forniscono un contributo principalmente in tecnologia, ovvero in componenti fabbricati dalle proprie industrie. **L'Europa è responsabile di quasi la metà del progetto, il che in significa molte**

**opportunità per le sue imprese.** Oltre a ITER, F4E supporta lo sviluppo della ricerca scientifica nel settore della fusione attraverso l'accordo *Broader Approach* con il Giappone<sup>2</sup>. F4E sta lavorando insieme alle imprese e agli organismi di ricerca europei per fabbricare migliaia di componenti: ciò implica la realizzazione di molti sistemi tecnologici d'avanguardia e con standard elevati di qualità, in grado di generare nuova conoscenza e di favorire la creazione di futuri spin-off. Investire in questa nuova fonte di energia con-

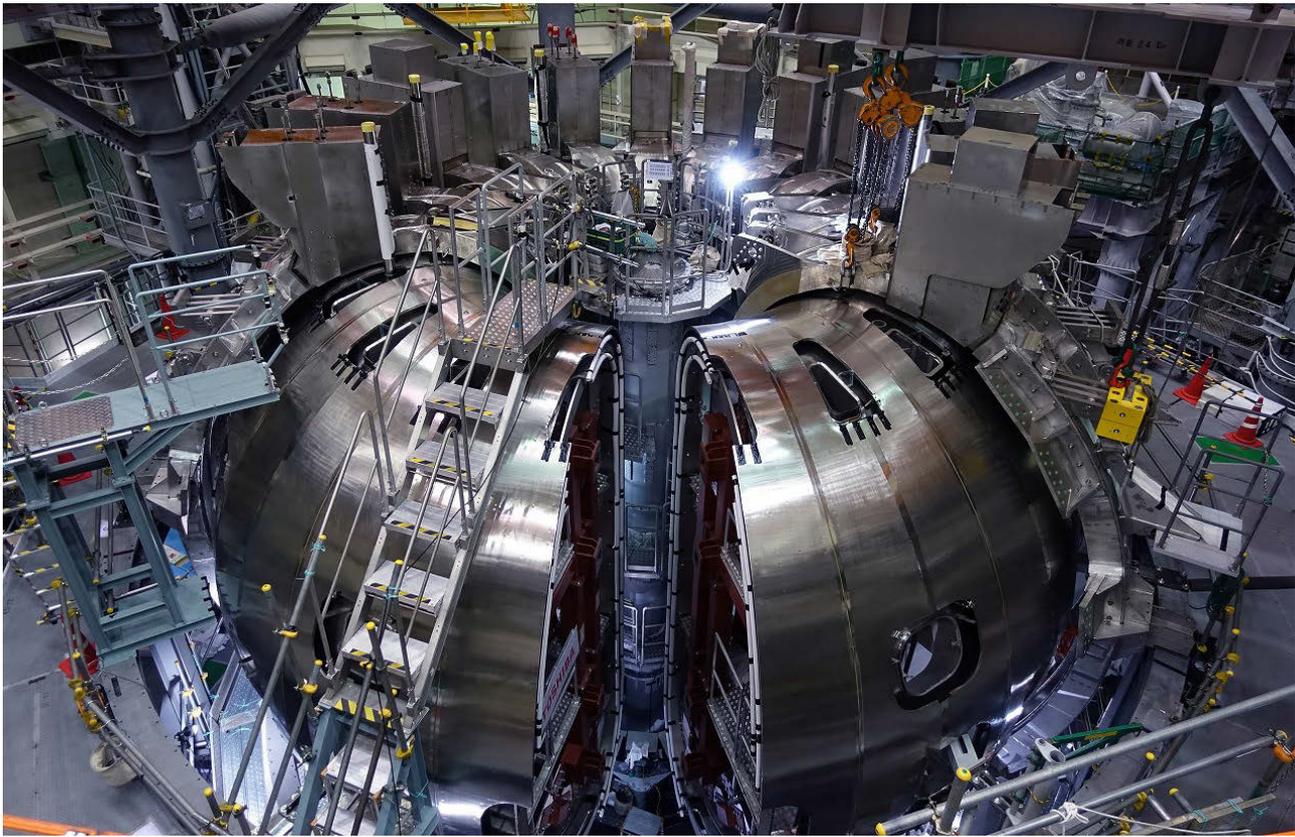


Fig. 1 Il tokamak sperimentale JT-60SA visto dall'alto con la serie di 18 bobine di campo toroidale del superconduttore. Il tokamak è stato realizzato a Naka, in Giappone, nell'ambito di una collaborazione tra Europa e il Paese orientale

sente all'Europa di mantenersi leader nella ricerca sulla fusione nucleare e di diventare protagonista nello sviluppo di un'economia sostenibile. Le aziende europee diventano quindi più competitive e possono offrire più lavori altamente qualificati.

**Dall'inizio delle attività di costruzione di ITER nel 2007 fino alla fine del 2018, F4E ha stipulato contratti per 4.024 miliardi di euro con l'industria europea per lo sviluppo di tecnologie e progettazione, per la produzione di sistemi e componenti e per costruire l'infrastruttura di ITER in accordo con gli impegni europei per il progetto. Le industrie di 24 Paesi membri**

**UE e della Svizzera sono coinvolte in queste attività che costituiscono uno dei più grandi sforzi tecnologici coordinati a livello europeo dalla fine della Seconda Guerra Mondiale. Un ulteriore investimento, pari a circa lo stesso importo, è previsto per il periodo 2021-2027.**

F4E aggiudica la maggioranza dei contratti con le imprese europee a seguito di gare d'appalto su base concorrenziale, selezionando l'offerta migliore secondo specifici criteri tecnico-economici. Tali gare seguono le regole ed i principi della contrattazione pubblica comunitaria, al fine di garantire la non-di-

scriminazione, la correttezza e la trasparenza dell'intero iter di gara.

### **Cluster industriali e storie di successo**

L'industria italiana si è dimostrata molto competitiva nei contratti per ITER. A fine 2018, infatti, le imprese italiane si erano aggiudicate contratti di fornitura e servizi per un valore totale secondo solo a quello della Francia, se si considerano le opere civili e le infrastrutture. Oltre che alla positiva esperienza maturata nelle attività industriali di JET e EFDA, questo successo deriva da alcuni specifici elementi.



Fig. 2 Sistema di protezione del magnete superconduttore fornito dal Consorzio RFX di Padova per il tokamak JT-60SA di Naka, in Giappone

Uno di questi è senz'altro la presenza di una forte industria manifatturiera, la seconda in Europa dopo la Germania, un comparto che rappresenta quasi un quarto dell'intero PIL nazionale mantenendo il quinto surplus commerciale manifatturiero al mondo, con un know-how di eccellenza nell'industria metallurgica, metalmeccanica, delle macchine utensili, dei macchinari e dei sistemi elettromeccanici, tutti settore chiave per la maggior parte dei componenti di ITER.

In molte zone d'Italia esistono cluster di industrie manifatturiere strettamente interconnesse, con una profonda integrazione della filiera produttiva. Tali distretti industriali contribuiscono significativamente alla competitività del settore manifatturiero italiano: sostengono la produttività, danno forte impulso all'innovazione e riducono le barriere di ingresso per nuove imprese.

Alcune delle storie di successo più interessanti sono direttamente connesse ai cluster industriali, ad esempio quello nel settore metallurgico e metalmeccanico nell'area di Schio

(Vicenza), rappresentato da due delle sue realtà imprenditoriali più longeve: De Pretto Industrie (DPI) e Ettore Zanon (EZ). Avvalendosi di una comunità locale di specialisti esperti nella lavorazione e nella saldatura dei metalli, queste due aziende sono state coinvolte nelle attività di realizzazione degli iniettori di fasci di neutri (Neutral Beam Injectors) e delle camere per prove da vuoto (Vacuum Test Chambers) per ITER. Le caratteristiche del cluster consentono un approccio flessibile alla produzione e di identificare 'in loco' le risorse disponibili per soddisfare le diverse esigenze di ITER.

Un secondo elemento a favore dell'industria italiana è la taglia delle aziende: la maggior parte dei sistemi e dei componenti di ITER sono all'avanguardia, con contenuti tecnologici fortemente innovativi e requisiti tecnici senza precedenti; i contratti di fornitura sono spesso molto consistenti e poco adatti per imprese di piccola dimensione che dovrebbero necessariamente individuare altri soggetti con i quali mettere a fattor comune risorse e competenze in

modo da poter affrontare la sfida. La combinazione che ne risulta è spesso difficile da gestire e comporta costi maggiori. D'altro canto, grandi aziende manifatturiere in grado di realizzare i componenti di ITER hanno a volte dimostrato scarso interesse verso queste attività molto lontane dal loro core business, pur avendo a disposizione competenze di valore senza dover ricorrere ad alcun aiuto esterno.

**Di fatto, ITER rappresenta il terreno ideale per le aziende di media dimensione: infatti, i fornitori più attivi e di successo hanno di solito una taglia sufficiente per gestire agevolmente il volume di produzione, un'organizzazione che consente di impegnarsi in lavori altamente specializzati e stabilità finanziaria.** Nei settori tradizionali (ad es. petrolio & gas, automobilistico, energetico, aerospaziale, ecc.), queste società solitamente agiscono come subappaltatori, ma nella filiera di approvvigionamento di ITER operano in prima linea.

Più che in altri Paesi europei industrializzati, una parte significativa delle industrie manifatturiere italiane sono di media dimensione, sono fortemente orientate alle esportazioni e guardano a ITER e alla Big Science come ad un'area importante per la propria strategia di business. **Una delle chiavi del successo italiano nel settore della fusione è proprio la partecipazione di numerose aziende di medie dimensioni come la SIMIC (Cuneo), la OCEM Power Electronics (Bologna) e Angelantoni Test Technologies (ATT, Perugia) che hanno focalizzato la propria strategia di business su prodotti altamente specifici e contribuiscono alla realizzazione di componenti di particolare rilievo come i magneti di campo toroida-**

le (SIMIC) e gli iniettori di fasci di neutri (OCEM e ATT).

### Forte capacità di innovazione e gestione 'familiare'

Un terzo elemento è la gestione familiare: la natura innovativa delle attività di ITER attrae aziende in grado di gestire lavori altamente specifici, interessate a sviluppare capacità trasferibili in altri campi e da valorizzare nel lungo periodo. Le più adatte a questo tipo di sfida sono proprio le imprese a gestione familiare che hanno una strategia di business a lungo termine, la volontà di raggiungere livelli di eccellenza e di generare innovazione. E le aziende familiari italiane corrispondono a questo profilo: sono la spina dorsale dell'economia manifatturiera e hanno un retaggio di eccellenza e di longevità che dura da diverse generazioni.

Un caso emblematico è la **Walter Tosto (WT, Chieti)** che ha individuato nel progetto ITER un campo di apprendimento stimolante e ha dimostrato un forte e stabile interesse per le opportunità che ne possono derivare. Le capacità acquisite per soddisfare i requisiti nel campo della fusione hanno consentito all'azienda di accedere a nuovi mercati e ad avere maggiore visibilità nell'arena mondiale; attualmente Walter Tosto è uno degli attori chiave nella fabbricazione della camera a vuoto di ITER e nella produzione in serie di cassette del divertore.

Ma non solo. **Un ulteriore elemento a favore delle aziende italiane è la capacità di innovazione: i sistemi e i componenti per ITER richiedono infatti l'estensione di tecniche e progetti a un livello mai tentato prima e i fornitori si trovano spesso a dover imparare in corso d'opera, ad assumere dei rischi e operare adeguamenti continui. Le aziende italiane**



Fig. 3 Assemblaggio del quadrupolo a radiofrequenza (RFQ) dell'acceleratore di particelle per la International Fusion Material Irradiation Facility (IFMIF), realizzato da INFN - Laboratori Nazionali di Legnaro - a Rokkasho, in Giappone

**hanno sviluppato nel corso degli anni un'attitudine all'innovazione industriale determinante per il successo in ITER.**

Un esempio di questa forte capacità di innovazione è la **ASG Superconductors (Genova)**, azienda leader nella realizzazione di grandi magneti superconduttori per applicazioni di "Big science" (ad es. ITER e il grande acceleratore di particelle LHC del CERN) che ha imparato a padroneggiare con successo nuove tecnologie e a migliorare quelle esistenti. La sua esperienza e volontà di andare oltre lo stato dell'arte è stata fondamentale per la realizzazione delle bobine di campo poloidale e toroidale, due dei principali sistemi per il confinamento magnetico del tokamak di ITER.

**L'ENEA e il contributo della ricerca italiana ai progetti per la fusione**

**L'ENEA è stata storicamente molto attiva nel fornire supporto scienti-**

**fico all'industria; e la fusione è solo una delle storie di successo. L'intensa collaborazione sviluppata in oltre 25 anni tra il mondo dell'industria e i ricercatori ENEA (e della più vasta comunità italiana della fusione che include CNR, INFN, RFX e molte università) sono state essenziali per la realizzazione in laboratorio di tecnologie promettenti e per il successivo trasferimento alle aziende.**

Molti attori chiave italiani con consolidate relazioni con l'ENEA hanno saputo cogliere con tempestività la sfida di ITER. Un esempio di eccellenza è **Ansaldo Nucleare (Genova)**, una delle aziende leader nel campo della fissione che a metà degli anni Ottanta ha dovuto affrontare il contraccolpo dell'uscita del nostro Paese da questa tecnologia. L'azienda è tuttavia rimasta fortemente coinvolta nella fusione assicurando il proprio supporto alle relative attività di ricerca ENEA, ad esempio per il divertore in tungsteno. Ansaldo è anche stata scelta come una delle

due candidate alla realizzazione dello *European Inner-Vertical Target*, e resta fra le realtà industriali più competitive grazie alle campagne di qualificazione e sviluppo di prototipi, anche in vista della competizione per la futura produzione in serie. **I laboratori italiani di ricerca sulla fusione hanno fornito contributi fondamentali allo sviluppo di diversi sistemi e componenti di ITER.** L'ENEA da sola e insieme ad una rete di università (in particolare le Università di Pisa, Palermo, La Sapienza di Roma e il Politecnico di Torino), è stata storicamente molto attiva nella fusione, soprattutto nelle attività di ricerca e sviluppo e di progettazione relative allo sviluppo del mantello per la produzione di trizio (*breeding blanket, BB*) per DEMO e per il programma europeo di sperimentazione di moduli di mantelli in ITER. Nel campo del riscaldamento del plasma e della trasmissione di corrente, il Consorzio RFX (Padova) ha fornito, nell'ultimo decennio un importante contributo allo sviluppo della Neutral Beam Test Facility (NBTF) di ITER.

In particolare, il team RFX ha sviluppato e progettato in dettaglio la NBTF, a partire dal progetto concettuale ideato dal team di ITER. Inoltre, coordina e gestisce l'intera costruzione e l'avviamento di questo complesso impianto con notevole successo.

Per quanto riguarda il sistema di riscaldamento del plasma, il gruppo di ricerca del CNR di Milano ha progettato, sviluppato e collaudato il simulatore di carico per l'alimentazione delle sorgenti di onde di ciclotrone elettroniche (ECH, Electron Cyclotron Heating) di ITER (gyrotron).

Inoltre, numerose università italiane (Università di Napoli Federico II, Consorzio CREATE, POLITO, Università di Padova, Università

di Palermo, Università di Roma La Sapienza e Tor Vergata) e diverse società private (LTC Calcoli e SRS Engineering Design) sono state ampiamente coinvolte sin dalla fase iniziale in studi di progettazione, analisi e ideazione a supporto di ITER.

### Il contributo ai progetti dell'Accordo Broader Approach con il Giappone

A margine delle trattative per decidere sul sito di ITER, Europa e Giappone hanno firmato l'accordo di collaborazione Broader Approach (BA) con l'obiettivo di accelerare lo sviluppo dell'energia da fusione. I costi sono stati suddivisi al 50% e, oltre al contributo Euratom gestito da F4E, alcuni Paesi UE (Francia, Italia, Spagna, Germania e Belgio) hanno deciso di offrire un ulteriore supporto 'in beni e servizi', evidenziando il valore industriale e strategico dell'Accordo<sup>3</sup>. Il Broader Approach si articola in tre progetti:

- **realizzazione del tokamak sperimentale superconduttore JT-60SA**, il più grande mai costruito prima di ITER, con livelli di performance elevatissimi. Attualmente in fase di assemblaggio finale a Naka, in Giappone, si prevede che genererà i primi impulsi di plasma nel 2020 (Figure 1 e 2);
- **progettazione e costruzione di prototipi per la sorgente intensa di neutroni IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility)** a Rokkasho, in Giappone (Figura 3). L'implementazione di questo acceleratore di particelle è attualmente ad uno stadio avanzato grazie al fondamentale contributo italiano dell'INFN (per i componenti dell'acceleratore stesso) e dell'ENEA con la tecnologia del litio fuso necessaria per i bersagli bombardati;
- **creazione del centro internazionale di ricerca sull'energia da fusione IFERC (International Fusion Energy Research Center)**



Cerimonia inaugurale per l'avvio dell'assemblaggio dei TFCs per il tokamak JT-60SA nell'ambito del progetto Broader Approach con il Giappone

a Rokkasho. Il progetto include una serie di sottoprogetti, tra cui la realizzazione di un supercomputer, la fase di progettazione di DEMO e alcune attività di ricerca e sviluppo ad esso associate.

**Il contributo europeo ai tre progetti, oltre a quello di EURATOM, è stato di circa 500 milioni di euro, soprattutto grazie alla fornitura di beni e servizi così ripartiti: Francia (44%), Italia (23%), EURATOM (16%), Spagna (11%), Belgio (3%) e**

**Germania (3%).** Il supporto italiano è stato fornito da Consorzio RFX (Padova), INFN (Legnaro) ed ENEA<sup>4</sup>.

### **Conclusione**

In collaborazione con i partner ITER e con il Giappone nell'accordo Broader Approach, l'Unione Europea è attualmente coinvolta in una serie di grandi progetti per lo sviluppo della fusione, una fonte di energia, abbondante, sicura e sostenibile per il futuro. Le aziende e il mondo

della ricerca italiano stanno contribuendo a questi impegni in modo significativo grazie alle caratteristiche dell'industria manifatturiera nazionale e alla qualità dei laboratori scientifici. Il costante coinvolgimento del tessuto industriale italiano genera crescita economica e nuova occupazione e incrementa la capacità innovativa e di spin-off, consentendo a tale tessuto di mantenere il massimo livello di competitività nei progetti hi-tech.

<sup>1</sup> ITER consentirà agli scienziati di studiare un gas di idrogeno ad una temperatura di oltre 200 milioni di gradi (plasma) in grado di rilasciare, grazie alle reazioni di fusione, più energia di quanta ne sia necessaria per riscaldarlo e farà affidamento su una gamma imponente di tecnologie fondamentali per la generazione in futuro di energia da fusione

<sup>2</sup> Quest'ultimo include la realizzazione di un esperimento di fusione nucleare con magneti superconduttori, noto come JT-60SA. Successivamente, F4E metterà a frutto le conoscenze e le competenze acquisite con il lavoro su ITER e nell'ambito del Broader Approach per la costruzione di impianti di fusione industriali

<sup>3</sup> Accordi di collaborazione specifici stipulati tra F4E e ciascuno dei Paesi contribuenti definiscono in dettaglio gli obblighi reciproci. In particolare, l'accordo con l'Italia consiste in una serie di attività di ricerca sulla fisica e di sviluppo di tecnologie specifiche

<sup>4</sup> L'ENEA ha contribuito alla realizzazione del progetto IFMIF/EVEDA e dei componenti essenziali di JT-60SA: con la metà dei magneti superconduttori necessari alla formazione del campo toroidale e la fornitura di unità di alimentazione elettrica ad alta potenza. Anche il Consorzio RFX ha dato un importante contributo a JT-60SA, fornendo un sistema di protezione dei magneti superconduttori ed alcuni alimentatori per bobine all'interno della camera a vuoto. Il contributo dell'INFN è stato fornito mediante la realizzazione del quadrupolo di radiofrequenza (RFQ, Radio Frequency Quadrupole) dell'acceleratore di particelle per la sorgente IFMIF costruito a Rokkasho, dove è attualmente in fase di collaudo

# L'esperimento DTT, un laboratorio di innovazione

Una delle principali sfide sulle quali si stanno concentrando sforzi teorici e sperimentali nell'ambito della ricerca sulla fusione in tutto il mondo è lo studio del divertore all'interno dei tokamak. Forte della sua tradizione d'eccellenza nella fisica e nell'ingegneria, l'Italia ha deciso di prendere la guida di questa epocale iniziativa internazionale, proponendo la realizzazione di quello che da Galileo in poi è lo strumento fondamentale della scienza moderna: un esperimento. E non un esperimento da poco, ma la Divertor Tokamak Test facility, vero e proprio 'laboratorio di innovazione' per studiare il divertore che potrà supportare ITER e fare da 'galleria del vento' per ideare e collaudare nuove soluzioni per DEMO

DOI 10.12910/EAI2019-008



di **Piero Martin**, Professore Ordinario di Fisica Sperimentale all'Università di Padova e Fellow dell'American Physical Society. Membro dell'Executive Board del progetto DTT e ricercatore presso il Consorzio RFX

“ Quando calienta el sol aqui en la playa”: sostituite “la playa” con “el tokamak” ed ecco spiegata una delle grandi sfide che i ricercatori devono vincere per rendere la produzione di energia elettrica dalla fusione una realtà, grazie anche ad un innovativo esperimento “made in Italy”: la Divertor Tokamak Test facility, meglio noto come DTT. Prima di parlare di scienza torniamo però un attimo alla spiaggia, o meglio alla “playa”, come cantava nel 1961 un famoso trio di musicisti

cubani, Los Hermanos Rigual. Già, perché se forse più di qualcuno avrà ora in testa il ritornello della canzone tutti si chiederanno perché per parlare di un tokamak cominciamo dalla musica. Il motivo è presto svelato.

## Temperature eccezionali

La radiazione solare riscalda e questo è ben noto, soprattutto se siamo in spiaggia. Immaginiamo di trovarci ora sulla superficie del sole:

non c'è crema protettiva che tenga, ovviamente. E non potrebbe che essere così, dato che i flussi di energia da quelle parti sono dell'ordine delle decine di milioni di Watt per metro quadro, ovvero temperature che nessun materiale può sopportare a lungo. Prendiamo ora un reattore tokamak: parte dell'energia prodotta dalle reazioni di fusione fuoriesce dal plasma sotto forma di neutroni e si distribuisce a trecentosessanta gradi. Un'altra parte viene irradiata mentre una frazione non



La prima bobina superconduttiva TFC-01 realizzata da ENEA grazie ad un appalto a ASG Superconductors a Genova e arrivata in Giappone presso il sito del reattore JT-60SA a Naka

trascurabile viene invece ‘trasportata’ al bordo del tokamak, in una zona detta “Scrape-Off Layer” (il nostro.... “Sol”) e poi convogliata in una regione periferica del tokamak nota come divertore. Ed è lì che sorge il problema. Gli attuali esperimenti, infatti, sembrano dirci che le dimensioni del SOL sono ridotte e che lo saranno ancor più in ITER e in DEMO dove si parla di millimetri per lo spessore del SOL - in pratica le dimensioni di una formica- a fronte di una decina di metri di plasma!! Di conseguenza, i flussi di potenza che si scaricano nel divertore si concentrano su superfici relativamente molto ridotte con carichi termici per unità di superficie pari a quelli alla superficie del sole, se non addirittura maggiori. Ecco quindi che si può ben dire “Quando calienta el sol aqui en el tokamak”.

**Da qualche anno i ricercatori nei laboratori di tutto il mondo hanno colto l'importanza e la complessità del problema che deve essere risolto per poter realizzare un efficiente reattore a fusione. La ricerca italiana, col nuovo esperimento DTT, darà un contributo cruciale alla soluzione. Vediamo come.**

Per ridurre i flussi di potenza nel divertore a valori gestibili, si stanno seguendo tre diverse strategie. Una prima linea di azione punta ad incrementare la quota di energia trasportata dalla radiazione, in modo da ridurre i flussi di energia per unità di superficie e ‘alleggerire’ i carichi termici che il divertore deve sopportare. Per ottenere questo risultato occorre aumentare l'irraggiamento del plasma e ciò si fa provando a “sporcarlo” un po’, naturalmente in maniera

controllata. Il plasma dovrebbe essere composto esclusivamente da idrogeno o suoi isotopi (deuterio e trizio), a seconda delle condizioni in cui si lavora, ma è inevitabile che contenga piccolissime frazioni di “impurezze”, cioè di altri atomi come ad esempio azoto, ossigeno e tungsteno che tipicamente provengono dalle pareti della camera da vuoto o sono residui di ingressi d'aria durante le fasi di manutenzione. Queste impurezze sono in generale indesiderate, ma è stato dimostrato che nella zona del divertore possono essere molto utili per aumentare la radiazione. Sono quindi in corso diversi esperimenti finalizzati all'iniezione controllata di gas nobili, come argon o neon: i risultati sono da un lato incoraggianti perché in effetti la radiazione aumenta - e quindi diminuiscono i carichi termici

sul divertore – ma dall'altro mostrano come sia necessario ancora un lavoro di ottimizzazione: in condizioni di elevata radiazione si osserva infatti che le prestazioni del plasma tendono a degradare, il che va evitato.

### **Fiocchi di neve e metalli liquidi**

La seconda strada comporta una forte sinergia tra le comunità di fusionistica e quelle che si occupano di scienza dei materiali ed è diretta al miglioramento delle proprietà dei materiali esposti al plasma. Tuttavia, anche questa soluzione presenta diverse complessità, in quanto richiede lo sviluppo di nuovi materiali o di nuovi approcci alla progettazione delle superfici del divertore. Negli ultimi anni si sono fatti molti passi in avanti sui componenti di prima parete a metalli liquidi e l'esperimento FTU dell'ENEA di Frascati ne è stato protagonista di prima grandezza: l'idea è quella di far scorrere sulle superfici esposte agli elevati carichi termici dei flussi di metalli liquidi come lo stagno o il litio. Il flusso di questi metalli garantisce il continuo rimpiazzo del materiale che va perso a causa dei carichi di potenza localizzati e, quindi, una sostanziale resilienza all'erosione. È un po' come quando lanciamo un sasso in uno stagno: la superficie dell'acqua si increspa, si formano delle onde, ma dopo un po' la superficie torna liscia.

La terza strada è quella che studia l'ottimizzazione della topologia magnetica del divertore. Proviamo a spiegarla con un paio di esempi. Stiamo viaggiando in automobile, apriamo un finestrino e supponiamo di metter fuori una mano: mi raccomando, pensiamolo solo e non facciamolo, non è per nulla prudente e assolutamente da non fare in nessuna circostanza! Ci è facile immaginare la differenza tra quando mettiamo la mano di taglio

rispetto all'aria o esponiamo il palmo. La forza che sentiamo sulla mano è ben diversa nei due casi, anche se in entrambi la nostra auto si muove alla stessa velocità! Un altro esempio decisamente meno pericoloso viene dalla doccia: in molti casi il getto d'acqua può essere modificato con una semplice ghiera, da stretto e forte fino a una pioggerellina fatta di tanti piccoli getti. Anche in questo caso le sensazioni sono ben diverse, eppure la quantità d'acqua che esce sempre quella è.

In un tokamak può accadere qualcosa di simile. Le particelle cariche che trasportano verso le superfici materiali i flussi di energia scorrono al bordo del plasma lungo le linee di campo magnetico, una sorta di 'autostrada' che termina contro il divertore.

Come nei due esempi sopra citati, anche per i blocchi che costituiscono il divertore, l'ammontare di superficie "bagnata" dalle linee di campo fa una bella differenza: se arrivano in direzione ortogonale alla superficie, il carico termico è molto più elevato rispetto ad un'incidenza radente. E se le stesse linee di campo si "aprono" in prossimità del bersaglio (la "pioggerellina" della doccia) i flussi saranno ben diversi, a parità di potenza trasportata.

Per mettersi nella situazione migliore i ricercatori studiano varie topologie magnetiche ovvero, con parole più semplici, diverse forme delle linee di campo magnetico che possano distribuire l'energia incidente nel modo più uniforme possibile e ridurre le pericolose interazioni localizzate, oltre a favorire la radiazione nel SOL. Definizioni come *super-X* e *fiocco di neve* potrebbero far pensare a super-eroi e coniglietti, ma sono in realtà espressioni gergali – come anche singolo e doppio nullo – con le quali nei laboratori di fusione si descrivono le varie

tipologie di divertore oggi studiate.

### **La Divertor Tokamak Test facility**

**Tre strade principali, e molte altre secondarie. Lo studio del divertore è oggi una delle principali urgenze nella ricerca sulla fusione, sul quale si stanno concentrando sforzi teorici e sperimentali da tutto il mondo. L'Italia, forte della sua tradizione d'eccellenza nella fisica e nell'ingegneria, ha deciso di prendere la guida di questa epocale iniziativa internazionale proponendo la costruzione di quello che, da Galileo in poi, è lo strumento fondamentale per la scienza moderna: un esperimento. E non un esperimento da poco, ma quello che si avvia a diventare il principale tokamak europeo e il più completo e flessibile esperimento al mondo per lo studio del divertore: la Divertor Tokamak Test facility.**

DTT è un concentrato di alta tecnologia concepito nei laboratori ENEA di Frascati e progettato da ricercatori, oltre che dell'ENEA, di Università ed Enti di ricerca italiani e dei consorzi Create e RFX. Il cuore del dispositivo è una ciambella di acciaio di circa sei metri di diametro esterno. Al suo interno si raggiungeranno condizioni di vuoto spinto (inferiore a  $10^{-7}$  mbar, pari a meno di un milionesimo della pressione atmosferica) e si produrrà – ingabbiato da un campo magnetico di sei Tesla, un valore tra i più alti mai raggiunti in un grande tokamak – un plasma che alle massime prestazioni raggiungerà una temperatura di circa settanta milioni di gradi. Un ruolo cruciale in DTT lo ha naturalmente il divertore, anzi i divertori dato che DTT ne può ospitare ben due: quello iniziale, nella parte inferiore del dispositivo e, nella parte superiore, quello che potrà essere installato in un secondo momento. DTT offre quindi

## Nell' "Interim Design Report" ENEA le novità sul Progetto DTT



A quattro anni dalla presentazione del 'Blue Book' con la proposta originaria del Progetto DTT ("DTT - Divertor Tokamak Test facility. Project Proposal"), l'ENEA e i Consorzi CREATE ed RFX hanno pubblicato l'Interim Design Report, una versione aggiornata che accoglie indicazioni e proposte migliorative sviluppati in quest'arco di tempo dal team di esperti coinvolti nell'esperimento e fa il punto sullo stato di avanzamento, le scadenze e la data di avvio (fine 2025) previste. Dal Report emerge che il progetto è stato sensibilmente migliorato nella flessibilità e che diversi componenti sono stati semplificati, resi più efficienti e meno costosi, accogliendo le indicazioni dell'EUROfusion Power EXhaust (PEX) Ad Hoc Group del

luglio 2017 a Frascati. Le ricadute economiche di 2 miliardi di euro circa sul territorio vengono confermate così come l'investimento di 500 milioni di euro già coperto da un prestito BEI per 250 milioni di euro, da fondi italiani ed altri contributi internazionali (fra cui 60 milioni di EUROfusion). Viene inoltre ribadita l'assunzione di personale altamente qualificato e la stretta collaborazione con organismi scientifici nazionali ed europei anche per programmi di formazione, corsi di specializzazione, di laurea e Master.

Ad oggi al progetto DTT lavorano un centinaio di ricercatori provenienti soprattutto da ENEA, CNR, dai Consorzi RFX e CREATE e da diverse università italiane, tra cui Politecnico di Torino e l'università della Tuscia; vi è poi un crescente gruppo di rappresentanti di enti stranieri e, di recente, è stata avviata una campagna di reclutamento e formazione per giovani a vari livelli di competenza. Inoltre, sono state previste alcune posizioni di post dottorato nell'ambito del Programma EUROfusion di supporto alla formazione di una nuova generazione di scienziati e ingegneri per il futuro impianto DEMO. Sul fronte tecnico, la progettazione è coordinata per mezzo di "Technical Coordination Meeting" (TCM) che si tengono circa due volte al mese e dove i responsabili delle differenti "Aree" riferiscono progressi e problematiche. Ogni tre mesi si tiene un Design Review Meeting (DRM) per esaminare l'intero progetto o il design finale di componenti specifici. Tutta la documentazione è raccolta nel Data Management System (DMS) e nel Plant Integration Document (PID) e informazioni aggiornate sono disponibili sul sito Web <http://www.dtt-project.enea.it/>. Il Report, curato da Raffaele Albanese e Raffaele Martone del Consorzio CREATE, da Piero Martin del Consorzio RFX e da Flavio Crisanti e Aldo Pizzuto dell'ENEA è disponibile all'indirizzo [https://www.dtt-project.enea.it/downloads/DTT\\_IDR\\_2019\\_WEB.pdf](https://www.dtt-project.enea.it/downloads/DTT_IDR_2019_WEB.pdf)

la potenzialità di studiare come ripartire tra due divertori la gestione dei carichi termici, un approccio finora assai poco investigato, ma che viene

ritenuto assai promettente. I flussi di potenza in gioco in DTT saranno assolutamente rilevanti per i suoi 'fratelli' maggiori ITER e

DEMO. I 45 milioni di Watt di potenza con i quali viene riscaldato il plasma di DTT vengono prodotti grazie a tre sistemi di riscaldamen-



Uno dei più grandi e complessi magneti mai costruiti è arrivato alla fase finale di lavorazione, con l'ultimazione della bobina, nello stabilimento di ASG Superconductors a La Spezia. Destinazione finale: il reattore ITER in costruzione a Cadarache (Francia)

to: un iniettore di particelle neutre e due lanciatori di onde elettromagnetiche, rispettivamente alle frequenze della risonanza ciclotronica elettronica (circa 170 GHz) e ionica (tra i 60 e i 90 MHz). Anche per questi strumenti la comunità scientifica nazionale ha una competenza notevole: presso i laboratori del Consorzio RFX di Padova – del quale sono soci il CNR, l'ENEA, l'Università di Padova, l'INFN e le Acciaierie Venete – si sta infatti sviluppando il progetto “Neutral Beam Test Facility” (NBTF). La NBTF darà contributi cruciali ad ITER: essa ha infatti l'obiettivo di sviluppare un prototipo in scala 1:1 dell'iniettore di particelle neutre di ITER. Elementi fondamentali della NBTF sono la sorgente di particelle ionizzate e l'acceleratore che trasforma idrogeno e deuterio ionizzati in un fascio con elevatissimi

ma velocità che in ITER, una volta neutralizzato, verrà iniettato nel plasma e lo riscalderà fino alle temperature alle quali avvengono i processi di fusione. E i laboratori dell'ENEA, del CNR di Milano e del Politecnico di Torino, hanno una tradizione di eccellenza nello sviluppo di lanciatori di onde elettromagnetiche che ha permesso ai ricercatori italiani di essere protagonisti in numerose realizzazioni internazionali.

### Italia leader nei magneti superconduttori

Un sistema di magneti superconduttori – altro settore nel quale il nostro Paese non è secondo a nessuno, basti pensare ai contributi dati allo sviluppo degli elementi superconduttori per ITER e JT-60SA – garantisce a DTT impulsi di durata fino a circa

un minuto e mezzo, un tempo sufficientemente lungo per assicurare un completo ed efficiente utilizzo di ogni singolo impulso. Nel progetto di riferimento si usano materiali superconduttori “standard” come il Niobio<sub>3</sub>-Stagno o il Niobio-Titanio già usati per dispositivi esistenti, in particolare ITER. Ma anche qui DTT si propone come un esperimento che guarda al futuro, pronto ad essere un vero e proprio laboratorio di innovazione: all'interno del solenoide centrale, il cruciale insieme di bobine che in un tokamak induce la corrente di plasma e mantiene il campo magnetico poloidale, viene infatti lasciato spazio per l'inserimento di un modulo fatto da superconduttori ad alta temperatura, materiali che oggi sono in fase di studio in sistemi di piccole dimensioni e il perfezionamento di queste tecnologie rappre-

senterà una rivoluzione tecnologica. Le bobine esterne superconduttrici, insieme ad altre di rame collocate a ridosso del plasma, all'interno del recipiente sottovuoto (il cosiddetto "vacuum vessel") consentono a DTT di produrre un'ampia varietà di configurazioni magnetiche per il divertore. Ciò gli garantisce una flessibilità estrema e non disponibile in alcun esperimento esistente o progettato. Questo è un punto di forza di estrema importanza, perché permette a DTT di esplorare – sempre in elevate prestazioni di plasma – non solo lo scenario a "singolo nullo" di ITER, ma un po' tutti gli scenari che oggi sono considerati come valide possibilità da studiare per individuare la soluzione migliore. **Ecco quindi emergere, ancora una volta, la duplice vocazione di DTT: essere una valida 'spalla' di ITER, una piattaforma sperimentale flessibile e 'veloce' che potrà fornirgli supporto e consentire ai ricercatori di validare idee e tecniche in un dispositivo più 'maneggevole'; ed essere la 'galleria del vento' dove ideare e collaudare nuove soluzioni per DEMO.**

### **Un cilindro alto 11 metri e di oltre 1000 tonnellate**

Il peso complessivo di DTT è di mille tonnellate. Il criostato, l'involucro

più esterno che contiene "vacuum vessel" e magneti e che mantiene al suo interno – grazie ad un flusso di elio liquido, la temperatura di -270 °C richiesta per i materiali superconduttori – ha la forma di un cilindro di circa undici metri di altezza ed altrettanti di diametro. Non certo un peso piuma, ma nonostante queste dimensioni l'esperimento italiano è dotato di un'agilità, se così si può definire, inaspettata. Pensiamo ad esempio a suoi sistemi di manipolazione remota, in grado di accedere a qualsiasi componente all'interno della zona di alto vuoto e di sostituirlo senza l'ingresso di persone. Dei robot ad alte prestazioni che effettuano riparazioni, manutenzioni e migliorie fattibili in tempi più veloci e con efficienza. Ma pensiamo anche alle enormi differenze di temperatura che DTT sarà in grado di gestire: dai milioni di gradi a ridosso del bordo del plasma ai -270 °C subito all'esterno del "vessel". E ai sistemi in "feedback" che tengono sotto preciso controllo le proprietà del plasma, altra specializzazione dei ricercatori italiani, che con il loro sviluppo e la loro applicazione hanno ottenuto risultati di grande rilievo in molteplici esperimenti. **Uno di questi risultati – la scoperta degli stati elicoidali in RFX - ha addirittura meritato la copertina della prestigiosa rivista**

### ***Nature Physics.***

**Molto altro si potrebbe dire sulle molteplici tecnologie di punta utilizzate in DTT, ma lo spazio non ce lo permette. Per approfondire gli aspetti tecnologici del nuovo esperimento è disponibile l' "Interim Design Report" pubblicato nell'aprile 2019 con lo stato dell'arte del progetto <https://www.dtt-project.enea.it/index.php/documentation>.**

DTT viene realizzato nei laboratori ENEA di Frascati, dove prende il posto del tokamak FTU ormai prossimo ad una meritata pensione. La scelta del sito di Frascati è il risultato di un processo di valutazione comparativa che ha coinvolto nove regioni italiane: Piemonte, Liguria, Veneto, Emilia-Romagna e Toscana, Lazio, Abruzzo, Campania e Puglia. Queste regioni hanno offerto nove siti in risposta ad un invito dell'ENEA, siti che sono stati valutati in base a dei criteri predefiniti da un'apposita commissione. Una risposta ampia, a testimonianza dell'interesse che un esperimento come DTT – volano di crescita e di sviluppo tecnologico e industriale e opportunità di formazione e occupazione di alto livello - suscita non solo nella comunità scientifica, ma anche nelle realtà locali e nel tessuto produttivo italiano.

<sup>1</sup> DTT raggiungerà valori di potenza specifica – definita come il rapporto tra la potenza uscente dalla superficie di plasma divisa per il raggio maggiore, un parametro comunemente utilizzato per misurare l'entità del problema – come quelli di ITER e DEMO. E lo farà, unico tra gli esperimenti in funzione o attualmente proposti, in scenari nei quali non solo le prestazioni del bordo, ma anche della parte centrale del plasma – dove in un futuro reattore si raggiungeranno le massime prestazioni – del tutto rilevanti per ITER e DEMO

# I protagonisti della ricerca italiana sulla fusione termonucleare controllata

La ricerca italiana nel settore della Fusione Termonucleare Controllata (FTC) ha una lunga storia, caratterizzata da competenze forti e grandi entusiasmi, capaci di sostenere numerose e impegnative iniziative internazionali e di promuovere nuovi progetti di ampio respiro scientifico. I principali soggetti impegnati oggi nel settore della FTC sono, oltre ad ENEA, il CNR, i Consorzi RFX e CREATE, l'INFN e, con intensità diversificate, numerose e qualificate università. Nonostante le risorse limitate, la comunità scientifica italiana e l'industria più avanzata hanno saputo ideare strumenti innovativi e competitivi, riservando grande attenzione anche ai temi della sicurezza e della compatibilità ambientale

DOI 10.12910/EAI2019-009



di **Raffaele Martone**, *Università degli Studi della Campania "L. Vanvitelli"*

La ricerca italiana nel settore della fusione termonucleare controllata (FTC) ha una storia lunga e articolata. Come in altri paesi tecnologicamente avanzati, si avvia alla fine degli anni 50 e si sviluppa, fino ai nostri giorni, in una trama complessa, ben radicata nella cultura scientifica nazionale e, insieme, dotata di un ampio respiro internazionale. Limitate le risorse ma eccellenti i risultati e numerosi i riconoscimenti. La ricerca nella

FTC in Italia si caratterizza per un notevole numero di attori capaci di condividere la missione e i metodi, e di combinare capacità di cooperazione e di costruttiva competizione. **Partecipano enti nazionali di ricerca quali l'Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie, l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile (ENEA), il CNR, i consorzi RFX e CREATE, l'INFN** nonché numerose Università, spesso coordinate in consorzi; partecipano, per la parte

più specificamente votata al trasferimento tecnologico anche varie qualificate aziende di beni o di servizi. L'esigenza di operare in ambienti internazionali competitivi e popolati da attori di grandi dimensioni ha favorito in Italia la collaborazione tra soggetti diversi e la nascita di strutture di coordinamento della ricerca. In questo contesto si inquadra la localizzazione presso le Università di presidi di enti esterni (istituti, unità di ricerca ecc.) e l'istituzione di con-

sorzi tra università e soggetti pubblici o privati interessati alla ricerca. In questo articolo si vuole descrivere l'impegno della comunità scientifica nazionale nel campo della FTC prendendo spunto dai dati storici e dall'analisi dei vari soggetti partecipanti, cercando anche di fornire elementi di valutazione sullo 'stato di salute' della ricerca nel settore e sulle prospettive di sviluppo per il prossimo futuro. Ne emergerà un quadro composito e variegato, caratterizzato da competenze forti e da grandi entusiasmi, capaci di sostenere le numerose impegnative iniziative internazionali e di promuovere nuovi importanti progetti di ampio respiro scientifico.

### Un cenno alla storia

In questa sede l'attenzione è focalizzata specificamente sulla fusione termonucleare a confinamento magnetico; pertanto non si farà riferimento alla ricerca sui plasmi di interesse astrofisico, sulla fusione

inerziale e sulle numerose applicazioni industriali dei plasmi. Inoltre, per la limitatezza di spazio disponibile, possono essere richiamati i soli dati salienti; ulteriori informazioni possono essere cercate in letteratura (si veda ad esempio [1]). **Le ricerche sulla FTC iniziano alla fine degli anni 50 con studi nel campo della fisica fondamentale presso quelli che erano allora i "Laboratori Nazionali di Frascati" e del confinamento magnetico presso l'Università di Padova, a cura principalmente di docenti di Fisica e di Ingegneria Elettrica.**

Dopo un decennio di studi teorici e di esperimenti su piccola scala, negli anni 70 si costruiscono alcune macchine di taglia significativa a Padova (Eta-Beta I, 1973, ed Eta-Beta II, 1980, in configurazione Reversed Field Pinch) a Frascati (Frascati Torus, FT, 1977, in configurazione Tokamak) e a Milano (Thor, 1978, Figura 2). Gli esperimenti di Padova sono progettati e gestiti dall'Istituto Gas Ionizzati (IGI-CNR), struttura

di collegamento tra l'Università di Padova e il CNR, primo importante esempio di coordinamento tra università ed enti di ricerca. Anche il CNR manifesta la sua vocazione alla FTC con la costituzione del Laboratorio di Fisica del Plasma di Milano, evoluto successivamente nell'Istituto di Fisica del Plasma "P. Caldirola" (IFP).

Lo stesso decennio vede la nascita dell'interesse verso la fusione di nuovi soggetti universitari; tra tutti si ricorda l'Università di Napoli che, insieme ad altre Università meridionali, avvia studi teorici e modellazioni numeriche in stretta collaborazione con le altre realtà italiane come Frascati e Padova, e internazionali, tra cui il Joint European Torus (JET), in fase di progettazione in quegli anni. Negli anni successivi, le attività sperimentali si intensificano sia a Frascati, con il potenziamento di FT (FTU, 1989, Figura 3), sia a Padova, con la realizzazione del Reversed Field eXperiment (RFX, 1992) macchina che, in anni più recenti, è

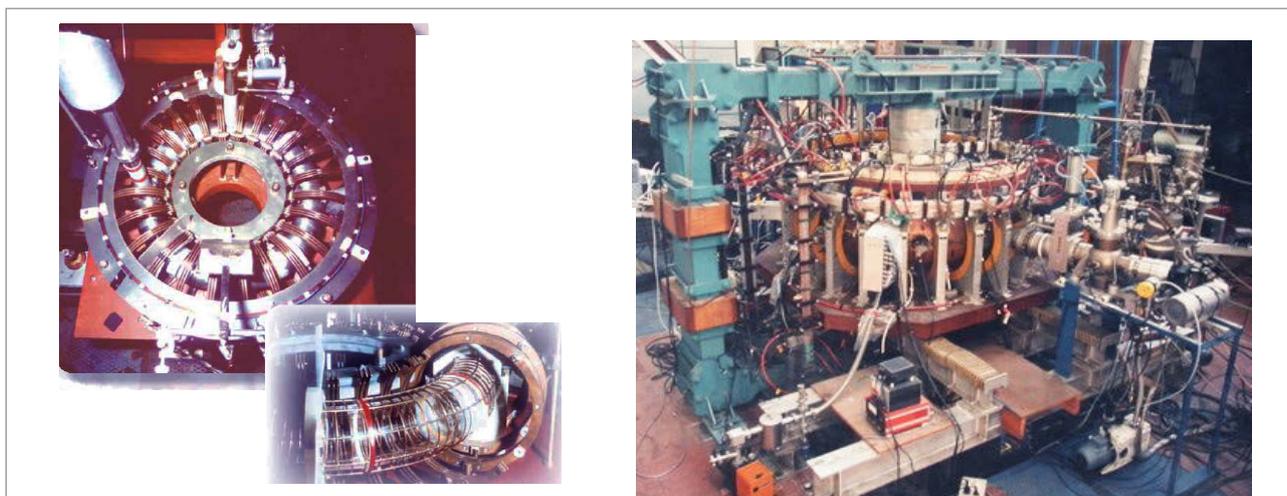


Fig. 1 Il tokamak turbolento di Frascati (TTF), piccolo tokamak costruito nel Centro ENEA di Frascati nei primi anni 70. Ha permesso di fare sperimentazioni sul plasma mentre era in corso la realizzazione del successivo e più grande Frascati Tokamak (FT), entrato in esercizio nel 1977 (cortesia di ENEA, <http://www.enea.it/it/seguici/publicazioni/pdf-volumi/2010/50anni-fusione.pdf> - pag. 24 - 25).

Fig. 2 Esperimento Thor presso IFP (cortesia ISTEP, <https://www.ifp.cnr.it/>)

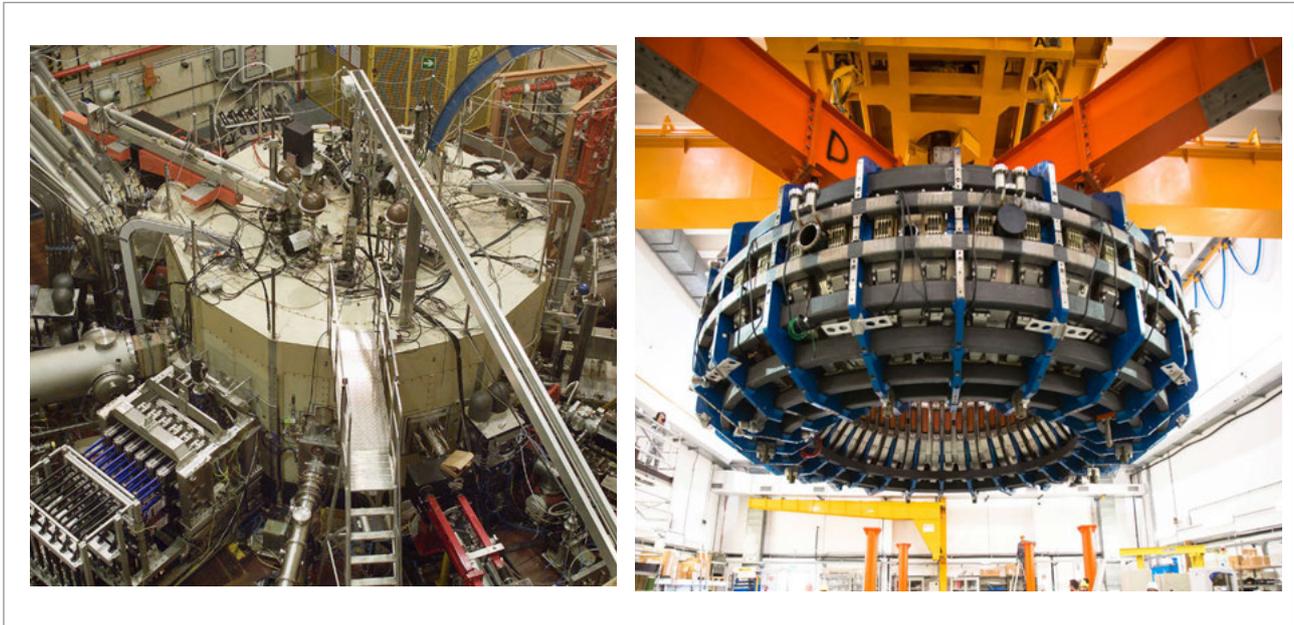


Fig. 3 Frascati Tokamak Upgrade, vista dall'alto. Operativo dal 1989 (cortesia ENEA, [www.fusione.enea.it/FTU/](http://www.fusione.enea.it/FTU/))

Fig. 4 Movimentazione della macchina RFX-mod, realizzata presso l'area di ricerca CNR di Padova. Operativa tra il 2004 e il 2016, sarà sostituita da una nuova versione, RFX-mod2, che entrerà in esercizio nel 2021 (cortesia del Consorzio RFX, [www.ig.cnr.it](http://www.ig.cnr.it))

evoluta in una versione rinnovata e potenziata (RFX-mod, 2004, operativa fino al 2016 - Figura 4). Entrambe le macchine sapranno raggiungere eccellenti risultati scientifici e raccogliere l'apprezzamento unanime della comunità internazionale.

**La fine degli anni 70, con la decisione comunitaria e l'avvio della costruzione del JET (1978), e, più ancora, gli anni 80, con la sua entrata in esercizio (1983), segnano lo spostamento dell'interesse da sperimentazioni di dimensione limitata, su scala tipicamente nazionale, a esperimenti di maggiori dimensioni che, per la mole dei costi, diventano necessariamente internazionali. La tendenza si rafforza con la nascita del progetto ITER (iniziativa promossa nel 1985, realizzazione approvata nel 2006) sotto l'egida di Cina, Corea del Sud, Russia, Giappone, India, Stati Uniti d'America e, prima per**

### **impegno, Unione Europea.**

Sono gli anni della crescita dell'interesse universitario nel settore, che spesso si concretizza in forme di cooperazione tra università o tra università e laboratori nazionali e internazionali del settore. Nasce in questo periodo il **Consorzio di Ricerca per l'Energia, l'Automazione e le Tecnologie dell'Elettromagnetismo (CREATE, 1992)** tra alcune Università centro-meridionali (Seconda Università di Napoli, Università di Cassino e del Basso Lazio, Napoli Federico II e "Mediterranea" di Reggio Calabria<sup>1</sup>) e l'Ansaldo Energia, con una forte vocazione per la ingegneria della fusione. **E, sempre in questi anni, viene fondato il Consorzio RFX (1996) tra CNR, ENEA, Università di Padova, Acciaierie Venete SpA come socio industriale e, nel 2006, INFN.** Nel frattempo cresce l'interesse per la progettazione e la gestione di grandi esperimenti: ne

sono la dimostrazione l'impegno del Consorzio RFX per la costruzione di un prototipo in scala reale (MITICA) dei Neutral Beam Injector (NBI) di ITER e la fornitura di sistemi di protezione dei magneti del Tokamak giapponese JT60SA, così come il supporto del Consorzio CREATE ai grandi progetti internazionali (JET, EAST, ITER ecc.) e la focalizzazione verso le grandi macchine del CNR, il maggior contributore del programma nazionale fusione dopo l'ENEA<sup>2</sup>. Nello stesso contesto si colloca la recente decisione di costruire il Diverter Tokamak Test facility (DTT) che, pur se a fronte di un impegno fondamentalmente italiano, ha un chiaro e profondo respiro internazionale.

### **I protagonisti**

Ad oggi principali protagonisti nel settore della FTC sono oltre ad ENEA, **il Consorzio RFX, il CNR**

(attraverso l'ISTP e lo stesso Consorzio RFX), il CREATE, l'INFN (anche attraverso il Consorzio RFX) e, con intensità diversificate, numerose e qualificate università. Il Consorzio RFX ha circa 150 dipendenti, di cui circa 80 ricercatori. La sua missione, principalmente focalizzata sulla FTC, include la realizzazione dell'ITER Neutral Beam Test Facility (NBTF), la gestione tecnico-scientifica di RFX-mod, la partecipazione a vari progetti internazionali e la formazione di giovani ricercatori. Il CREATE è un consorzio senza fini di lucro, con oltre 60 collaboratori che forniscono un contributo equivalente annuo di circa 40 ppy<sup>3</sup> e coprono una ampia gamma di esperienze e di competenze. Il consorzio è impegnato stabilmente su due programmi pluriennali di ricerca scientifica sulla FTC e sulla robotica. Dal 1996 al 2013 il CREATE ha operato con impegno crescente nell'ambito della Associazione EURATOM-ENEA, partecipando, dal 2014, tramite la sua collaborazione con ENEA alle attività di EURO-

fusion. Da anni, inoltre, collabora attivamente con F4E e con ITER insieme ad altri laboratori italiani e stranieri, in alcuni casi, svolgendo anche il ruolo di coordinatore di progetto. Fra le sue missioni primarie vi è la formazione specialistica nel settore della FTC.

L'Istituto ISTP del CNR, con direzione e amministrazione a Milano, comprende circa 120 dipendenti, di cui circa 80 ricercatori e si articola in tre sezioni. Presso la sede milanese si continuano a coltivare i tradizionali interessi scientifici dell'IFP; il personale di Padova è in gran parte comandato al Consorzio RFX, con il quale condivide l'impegno della gestione del RFX e della progettazione e realizzazione della NBTF; infine a Bari proseguono le storiche attività del Centro per lo Studio della Chimica dei Plasmi, attivo negli anni 70, focalizzato sullo sviluppo di sorgenti di ioni negativi. Attraverso l'Istituto di Fisica dei Plasmi IFP, anche il CNR partecipa tramite la sua collaborazione con ENEA, alle attività EUROfusion. L'INFN è l'Ente

nazionale di ricerca dedicato allo studio della materia e delle sue leggi fondamentali; esso è attivo nella ricerca nella FTC attraverso la partecipazione alle attività del Consorzio RFX ed altre iniziative, principalmente finalizzate alla diagnostica dei materiali sottoposti ad intensi flussi neutronici.

**Oltre alle Università che animano i Consorzi RFX e CREATE, molti altri Atenei coltivano interesse per la FTC e svolgono qualificate attività di ricerca scientifica e di formazione di respiro internazionale in settori differenti: dalla meccanica ai controlli, dalla modellistica del plasma alla progettazione idraulica, dal calcolo delle sollecitazioni elettromeccaniche alla diagnostica e all'interazione plasmamateriali di prima parete, solo per citarne alcuni. Pur nella consapevolezza che l'elenco potrebbe essere esteso ad altre realtà accademiche anche importanti, le più attive nel settore della formazione sono le Università di Cagliari, Catania, Milano Bicocca, Palermo, Pisa, Roma III,**

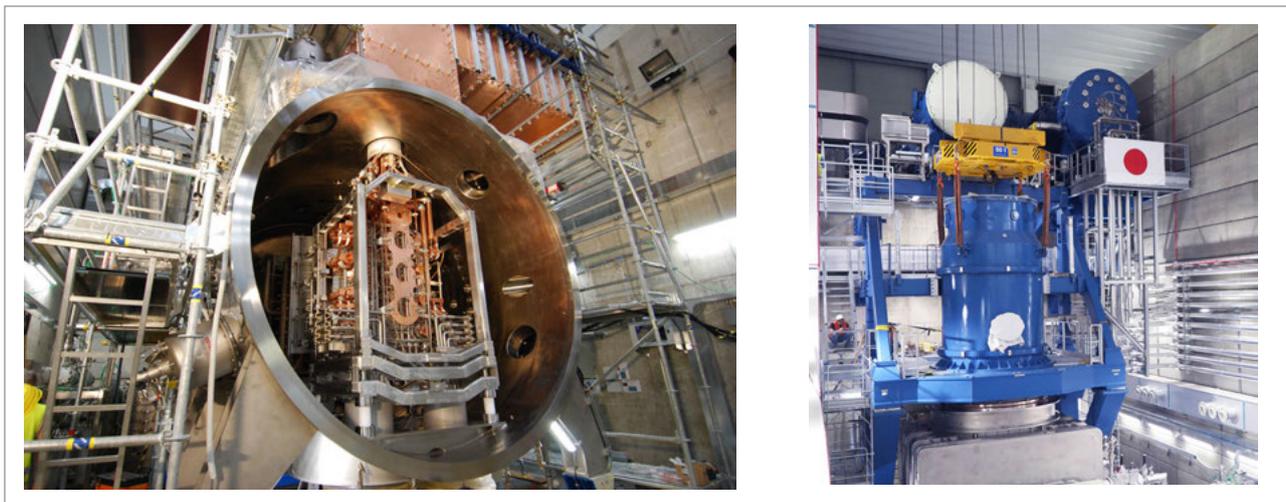


Fig.5 SPIDER, la sorgente di ioni negativi più potente al mondo (cortesia Consorzio RFX)

Fig.6 MITICA, il prototipo dell'iniettore di particelle neutre a 1 MV. Visibili l'High Voltage Bushing e la prima parte della camera da vuoto

### **Roma “Sapienza”, Roma Tor Vergata, Tuscia di Viterbo e dei Politecnici di Milano e di Torino.**

Ultimo, ma non per importanza, va citato il mondo dell'industria italiana operante nel settore della FTC. La sua competenza, la sua capacità di competere in tutti i più qualificati mercati del mondo, la sua capacità di innovare e di trasferire competenze tecnologiche, la sua stessa capacità scientifica sono riconosciuti dappertutto nel mondo. Peraltro, la quota delle gare di forniture europee per ITER nelle quali le aziende italiane sono risultate vincitrici ne è conferma indiscutibile e, insieme, occasione di orgoglio.

### **I programmi scientifici**

**L'attività scientifica italiana si caratterizza per un ampio spettro di interessi<sup>4</sup> e alcuni elementi di carattere generale. Un primo elemento è l'attenzione agli indirizzi generali della politica scientifica europea, a partire dalla “European Research Roadmap to the Realization of Fusion Energy” [2], pubblicata nel 2013 da EFDA e aggiornata nel 2018 da EUROfusion. Il secondo è la buona capacità di coordinamento e cooperazione non solo all'interno degli Enti e dei Consorzi, ma anche tra i vari soggetti. Il terzo è l'attenzione ai grandi esperimenti (quali DIII-D, JET, EAST, AUG, TCV ecc.) e progetti internazionali (quali ITER, JT60SA e DEMO, futuro reattore commerciale dimostrativo) ai quali si dedica grande impegno, spesso ben coordinato tra più soggetti.**

L'ampia e diversificata attività del **Consorzio RFX** si divide tra impegno sperimentale, impegno progettuale-realizzativo, e, non ultimo,

impegno teorico-numerico nella modellistica dei fenomeni della FTC. Oggi, le attività sperimentali si concentrano su SPIDER (la più potente sorgente di ioni negativi al mondo, realizzata in supporto al progetto ITER NBI - Figura 5), su RFX-mod (attualmente in fase di potenziamento verso la versione RFX-mod2), sui laboratori interni di supporto (alta tensione, alimentazioni per sistemi a radiofrequenza ecc.) oltre che nella partecipazione alle campagne sperimentali di JET e di altri tokamak e stellarator europei. Rientrano tra le attività di progettazione e di realizzazione il completamento di MITICA (Figura 6), di RFX-mod2 e di alcuni sistemi di controllo per JT60SA; nella attività di progettazione rientra anche la collaborazione al disegno concettuale di DEMO. Impegnativa è anche l'attività teorica e numerica; tra i molti aspetti trattati si ricordano la modellistica delle sorgenti e dei fasci di ioni e i modelli dei plasmi nelle varie configurazioni RFP, tokamak e stellarator. In stretto collegamento con la sua attività scientifica, il Consorzio si dedica regolarmente alla formazione delle giovani leve della fusione; di particolare rilievo è l'impulso dato al Joint European Doctorate in Fusion Science and Engineering, istituito nel 2008 nel quadro di prestigiose cooperazioni nazionali e internazionali. L'impegno dell'istituto ISTP si concretizza in molte e diversificate attività, svolte in gran parte in cooperazione con gli altri soggetti interessati alla FTC<sup>5</sup>. Significativo anche l'impegno nel settore della formazione di giovani ricercatori, anche in cooperazione con le università.

Il **CREATE** è particolarmente attivo nello sviluppo nella modellazione e progettazione dei principali componenti dei tokamak sotto il profilo

elettromagnetico e meccanico. Di rilievo sono ad esempio lo studio delle configurazioni di plasma e la ottimizzazione delle correnti; la modellistica combinata plasma-strutture conduttrici; l'analisi degli equilibri di plasma e il loro controllo; l'analisi delle correnti indotte nelle strutture passive e le conseguenti sollecitazioni elettromeccaniche; l'analisi e il progetto di strutture meccaniche, specialmente quelle prossime al plasma (prima parete, camera da vuoto e divertore); l'ottimizzazione del breakdown; la modellistica dei fenomeni di disruption e la relativa prevenzione. Nel quadro di specifiche collaborazioni, i suoi modelli (di plasma, di strutture passive, di controllo) sono applicati sia alle principali macchine attualmente operative per le quali si seguono le campagne sperimentali (quali JET, TCV, EAST) e sia a quelle in fase di progettazione (DTT e ITER) o di studio preliminare (DEMO). Ispirata dalla sua composizione in gran parte accademica, il **CREATE** dedica molte energie anche agli studi di base di interesse fusionistico, alla diffusione dei risultati della ricerca (organizzando o sostenendo convegni) e al sostegno della formazione (sostenendo Scuole per allievi di dottorato di ricerca e finanziando borse e assegni di ricerca post-doc).

L'impegno principale dell'**INFN** nel settore della FTC si concretizza sia nel progetto NBTF del Consorzio RFX (modellistica della sorgente e dell'acceleratore, progettazione delle griglie di accelerazione), sia nel contributo al progetto International Fusion Materials Irradiation Facility - Engineering Validation and Engineering Design Activities (IFMIF-EVEDA) per analisi sperimentale di materiali per la fusione. Quanto alle **Università non appartenenti ai cita-**

ti Consorzi, svolgono attività molto diversificate in relazione alle loro specifiche competenze spaziando da applicazioni più teoriche a quelle sperimentali, da impegni di carattere modellistico a quelli numerici<sup>6</sup>.

### **I progetti per il futuro e la sfida del DTT**

Tra le principali attività della ricerca in corso, va segnalato il progetto del Divertor Tokamak Test facility (DTT) ; si tratta di uno tra i principali programmi scientifici europei nel settore della FTC che si propone di affrontare il tema cruciale del Plasma Exhaust, la seconda per importanza delle otto voci delle missioni strategiche individuate dalla European Fusion Roadmap [2]. Nato alcuni anni fa da un'iniziativa ENEA supportata da ricercatori del CREATE e di altri enti di ricerca, il DTT [3] è diventato un impegno prioritario anche di RFX, di ISTP e dell'intera comunità scientifica nazionale; con la recente pubblicazione dell'Interim Design Report [4], il DTT Team ha confermato le sue capacità progettuali e ha dimostrato la capacità di integrare le sue competenze, finalizzandole per progetto comune di vasta portata.

**Molti degli attuali interessi scientifici della comunità italiana della FTC hanno un ampio respiro. Si tratta di programmi spesso pluriennali che comportano aggiorna-**

**menti e approfondimenti continui e che sono chiamati a confrontarsi con le principali macchine operative o in costruzione nel mondo.** I programmi scientifici del passato e del presente costituiscono quindi la base portante della progettazione per il futuro. In particolare, il Consorzio RFX, oltre a proseguire le attività in essere precedentemente illustrate, programma anche di avviare le attività di sperimentazione su RFX-mod2 (dal 2021) e MITICA (dal 2022) e di partecipare alle operazioni di JT60SA (dal 2010). Da parte sua, CREATE programma il proprio impegno su tre principali direttrici: le attività in Horizon Europe nel quadro dei programmi EUROfusion (principalmente l'attività DEMO), il supporto ad ITER e la prosecuzione delle attività progettuali di DTT. Anche CNR e INFN continueranno a coltivare i programmi in essere, a partire dal supporto a ITER e DEMO. **Fra i principali impegni per la comunità italiana della fusione vi è certamente annoverato il progetto DTT. Il notevole impegno finanziario (500 milioni di euro, in gran parte nazionali) e la grande mole di risorse umane necessarie (circa 1000 ppy nei prossimi sette anni di costruzione e circa 3000 per i successivi 25 anni di operazione) ne fanno un elemento primario della programmazione tecnico-scientifica nazionale**

**e un tassello essenziale di quella europea. Ne fanno anche una sfida per l'intera comunità italiana della FTC, chiamata a svolgere un ruolo di guida internazionale su un tema cruciale della ricerca per la realizzazione del futuro reattore commerciale.**

### **Conclusioni**

**La competizione internazionale sul tema energetico di lungo periodo si giocherà principalmente in termini di competenze e di tecnologia. Nonostante le limitate risorse disponibili, la comunità scientifica italiana e l'industria più avanzata dimostrano giorno per giorno di possedere gli strumenti tecnici e organizzativi per fornire un contributo determinante alla utilizzazione commerciale della FTC, con la massima attenzione ai temi primari della sicurezza e della compatibilità ambientale.**

### **Ringraziamenti**

Si ringraziano i molti colleghi degli enti citati nel testo, la frequentazione dei quali è stata la fonte primaria dei dati e dei pareri riportati. In particolare, per i dati forniti e le preziose discussioni si ringraziano Vincenzo Coccoresse, Presidente del CREATE, Francesco Gnesotto, Presidente del Consorzio RFX, e Maurizio Lontano, Direttore dell'ISTP.

- <sup>1</sup> Successivamente entrano nel Consorzio anche le Università della Basilicata e di Napoli “Parthenope”, mentre la Seconda Università di Napoli modifica la sua denominazione in Università della Campania “L. Vanvitelli”
- <sup>2</sup> Nella progettazione e ottimizzazione dei lanciatori di potenza a radiofrequenza per il riscaldamento del plasma ha avuto un ruolo di particolare rilievo l’Istituto per la fisica dei IFP che ha partecipato alla progettazione di diverse diagnostiche per ITER. Nel quadro di una recente riorganizzazione del CNR, è stato costituito l’Istituto per la Scienza e la Tecnologia dei Plasmi (ISTP, 2019) nel quale sono confluiti l’IFP di Milano, l’IGI di Padova e il gruppo P.LAS.M.I. di NANOTEC, operativo a Bari
- <sup>3</sup> La voce “PPY”, acronimo di “professional persons per year” è una unità di misura diffusa nel mondo scientifico per quantificare l’impegno professionale. Corrisponde ad una attività professionale svolta per un anno da una persona
- <sup>4</sup> Per motivi di spazio, i programmi scientifici dei vari attori saranno descritti sinteticamente, rinviando alla letteratura specifica per ogni approfondimento
- <sup>5</sup> In questa sede ci si limita a ricordare l’impegno nella modellistica teorica e numerica dei plasmi a confinamento magnetico; nella progettazione e realizzazione di diagnostiche di neutroni e raggi gamma e di emissione di radiazione millimetrica dai plasmi; nella teoria e nella ottimizzazione di impianti di riscaldamento dei plasmi con onde millimetriche di potenza (Electron Cyclotron Resonant Heating, ECRH); nel supporto alla realizzazione di esperimenti in costruzione (ad esempio NBI e lanciatori di potenza per ITER) o in fase di progettazione (sistemi di riscaldamento addizionale e diagnostiche per DTT); nella partecipazione alla gestione e alla interpretazione dei dati di campagne sperimentali nelle principali macchine attualmente operative (JET, AUG, TCV, WEST, FTU); nel contributo agli studi sul DEMO
- <sup>6</sup> Non essendo possibile fornire in questa sede una descrizione esaustiva e dettagliata di tutte le attività, si rinvia alla letteratura tecnico-scientifica prodotta dai gruppi di ricerca che operano nei vari atenei. Fra i temi di interesse: caratterizzazione, diagnostica e sviluppo di materiali per applicazioni fusionistiche; modelli dei superconduttori per la realizzazione di magneti; sviluppo e progettazione di componenti e sistemi diagnostici di varia natura (per raggi gamma e neutronici, campi elettrici e magnetici ecc.); interazione plasma-parete, con divertori tradizionali o innovativi; sistemi di monitoraggio e controllo del plasma; modellistica dei precursori delle instabilità e sistemi di prevenzione di disruption; trattamento e interpretazione di dati nucleari; remote handling; valutazione di rischio e analisi di sicurezza; modellistica fluidodinamica e progettazione termoidraulica per applicazione ai sistemi di raffreddamento; analisi di carichi neutronici e progettazione di schermi

## BIBLIOGRAFIA

1. P. Batistoni, Ed. “1960-2010, 50 anni di ricerca sulla fusione in Italia”, ENEA, ISBN: 978-88-8286-225-1  
<http://www.fusione.enea.it/EVENTS/eventfiles/50esimo/50anni-fusione.pdf>
2. “European Research Roadmap to the Realization of Fusion Energy”, November 2018  
[https://www.eurofusion.org/fileadmin/user\\_upload/EUROfusion/Documents/2018\\_Research\\_roadmap\\_long\\_version\\_01.pdf](https://www.eurofusion.org/fileadmin/user_upload/EUROfusion/Documents/2018_Research_roadmap_long_version_01.pdf)
3. R. Albanese, F. Crisanti, P. Martin, R. Martone, A. Pizzuto Eds., “DTT Divertor Tokamak Test facility”, Special Section of Fusion Engineering and Design, 2017, 253-294 and e1-e25
4. R. Martone, R. Albanese, F. Crisanti, P. Martin, A. Pizzuto Eds., “DTT Divertor Tokamak Test facility. Interim Design Report”, ENEA ISBN: 978-88-8286-378-4 - [https://www.dtt-project.enea.it/downloads/DTT\\_IDR\\_2019\\_WEB.pdf](https://www.dtt-project.enea.it/downloads/DTT_IDR_2019_WEB.pdf)

# Il ruolo del Consorzio RFX: 60 anni di ricerca al servizio della fusione

Il Consorzio RFX è uno dei laboratori di eccellenza a livello mondiale sulla fusione, che ha come soci CNR, ENEA, INFN, Università di Padova e Acciaierie Venete SpA. Fondato nel 1996, ha raccolto l'eredità della scuola di ricerca padovana sulla fusione che trae le sue origini dalla fine degli anni '50. Oggi RFX è impegnato, fra l'altro, nel completamento della Neutral Beam Test Facility che avrà un ruolo strategico in ITER e partecipa alla realizzazione di DTT. Le sue competenze di fisica e ingegneria si integrano per progredire nello studio del confinamento magnetico del plasma e nella tecnologia della fusione, nel quadro del programma europeo e con particolare attenzione al progetto ITER

DOI 10.12910/EAI2019-010



di **Francesco Gnesotto**, *Presidente del Consorzio RFX di Padova*

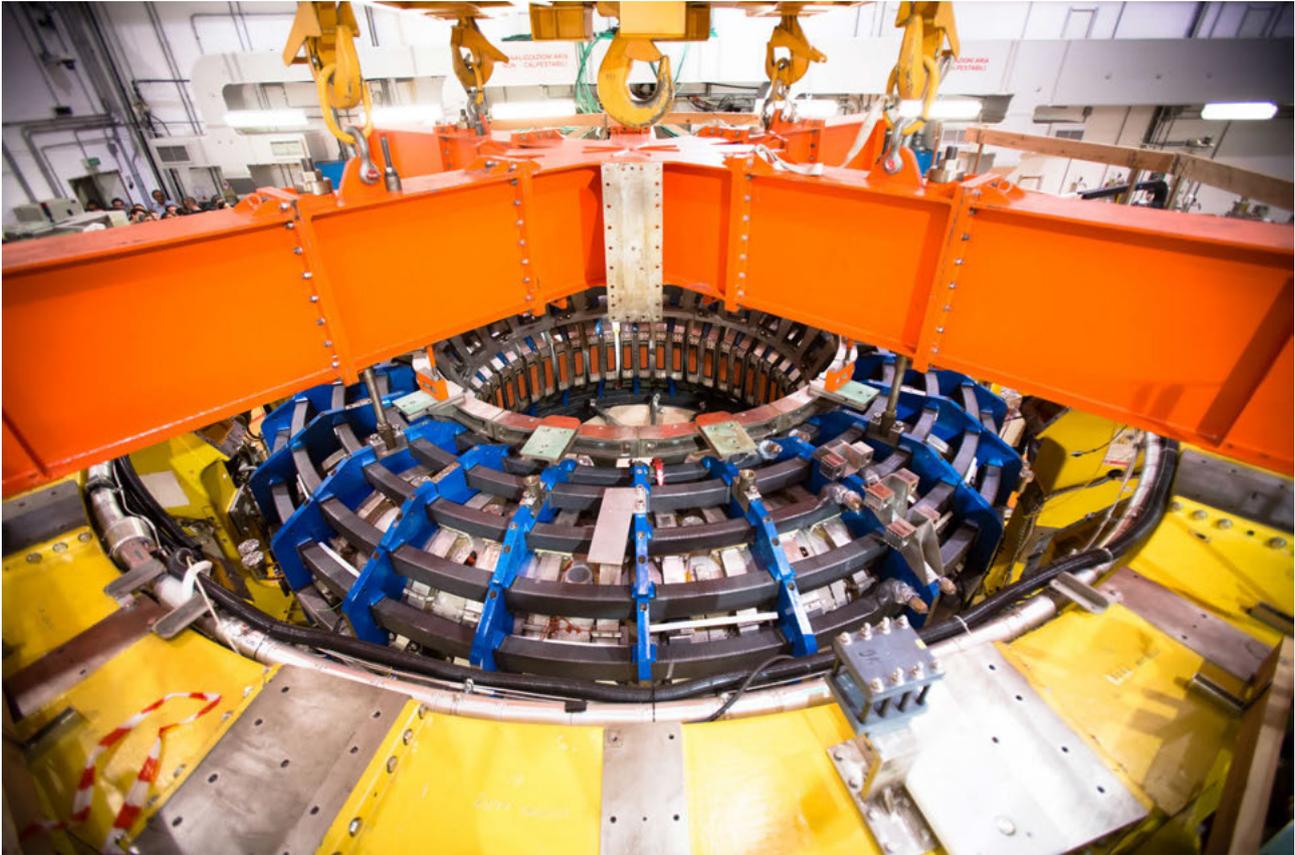
**Il ruolo che il Consorzio RFX vuole giocare nei prossimi decenni, quando la comunità fusionistica dovrà dare la risposta definitiva sulla possibilità di realizzare reattori sostenibili (in termini di sicurezza, impatto ambientale e costi), si fonda sulle competenze acquisite dal gruppo di ricerca di Padova in 60 anni di lavoro.** Agli albori della ricerca sulla fusione per usi pacifici, dopo una fase di studio e orientamento, il gruppo ha deciso di focalizzarsi

su una cosiddetta “linea alternativa” al Tokamak, ossia la configurazione magnetica “Reversed Field Pinch”, costruendo e sperimentando in sequenza tre macchine di dimensioni crescenti: Eta Beta 1, Eta-Beta 2 e RFX.

I risultati sperimentali, con il supporto di solide basi teoriche, portano oggi a ritenere che questa configurazione presenti proprietà di confinamento del plasma inferiori a quelle offerte da Tokamak di equivalenti dimensioni e perciò, nonostan-

te i considerevoli vantaggi potenziali ad esempio in termini di minore intensità di campo magnetico e di geometria più accessibile, essa non è candidabile per costituire il nocciolo di un reattore della generazione di DEMO.

Il motivo di questo forte distacco nelle prestazioni di confinamento si può spiegare abbastanza facilmente: il campo magnetico di minore intensità comporta un'attività magnetoidrodinamica del plasma assai più vivace che nel Tokamak e di conse-



RFX-mod, macchina toroidale che confina il plasma sfruttando la configurazione Reversed Field Pinch, alternativa al Tokamak, basata su campi magnetici di intensità minore e sul solo effetto ohmico per il riscaldamento del plasma. Operativa dal 2004 al 2016, è attualmente in fase di potenziamento verso la versione RFX-mod2

guenza maggiori perdite di energia. **Sulle nostre macchine abbiamo lottato per decenni con l'obiettivo di ridurre questi fenomeni, cercando di controllarli. E qui abbiamo progressivamente sviluppato una vera e propria miniera di competenze:** dai modelli teorici che, applicati sia alla configurazione RFP che a quelle Tokamak e Stellarator, hanno consentito di approfondire la conoscenza delle dinamiche MHD presenti in tutti i tipi di plasmi caldi, agli esperimenti su una macchina (RFX) particolarmente adatta allo studio di un'ampia gamma di fenomeni fisici, agli algoritmi di controllo partico-

larmente evoluti, grazie alla disponibilità del più completo sistema di trasduttori e attuatori magnetici esistente su una macchina per la fusione, alle apparecchiature diagnostiche in molti casi esportate su altre macchine in tutto il mondo.

La necessità di controllare con grande accuratezza e su scale di tempi rapidissime questi fenomeni ha portato a sviluppare una particolare competenza sui sistemi di conversione ed accumulo dell'energia, per i quali RFX ha acquisito una posizione di leadership globale.

È ora in corso una sostanziale modifica alla macchina RFX, che per-

metterà per alcuni anni di produrre risultati scientifici di rilevanza generale, in particolare proprio nel campo della magnetoidrodinamica.

Nel frattempo, il gruppo ha cominciato a lavorare al progetto DTT, facility sulla quale dalla metà del prossimo decennio si concentreranno le attività sperimentali italiane.

**Fin qui non ho accennato ad ITER, che è oggi e sarà per i prossimi decenni il fulcro della ricerca a livello mondiale.** Nei primi anni 2000, durante le accese discussioni sulla scelta del sito, l'Italia ha offerto di ospitare a Padova la Neutral Beam Test Facility nel caso in cui ITER fosse stato

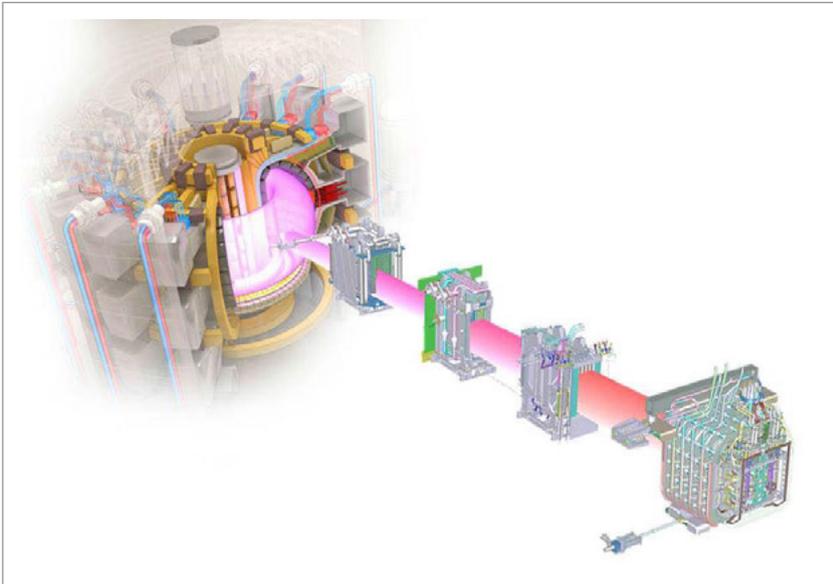


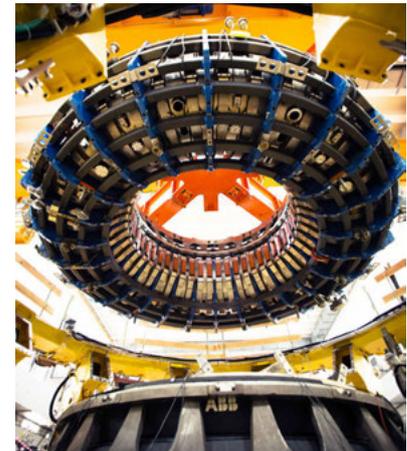
Immagine del prototipo MITICA che spara il fascio nel plasma del futuro reattore sperimentale a fusione ITER. Il prototipo entrerà in funzione nel 2023

costruito in Europa. La necessità di una facility dedicata stava emergendo in modo chiaro, a causa della preoccupante distanza tra le prestazioni offerte dagli iniettori di fasci di neutroni disponibili e quelle necessarie per ITER, considerato che solo con iniettori di neutroni di tali prestazioni si potrà raggiungere la potenza di fusione promessa.

Nel 2006 Cadarache è stata scelta come sito di ITER e la proposta di Padova si è così concretizzata. La (non facile) decisione è stata assunta qualche anno più tardi, grazie alle

competenze offerte dal gruppo RFX, dai vicini Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN e dal laboratorio Alte Tensioni dell'Università di Padova. Gli edifici (finanziati con fondi MIUR, circa 25 milioni di euro) sono stati completati nel 2016 ed è ora in corso l'installazione delle apparecchiature (finanziate dalle Agenzie europea, giapponese e indiana, valore stimato 200 Milioni di euro).

Nel 2018 è stato inaugurato il primo dei due esperimenti previsti, SPIDER; il secondo, MITICA, entrerà in funzione nel 2023. **Questa im-**



Una fase dello smontaggio di RFX-mod nel 2016, in vista della realizzazione di RFX-mod2, che sarà completata a fine 2020 e sarà operativa nel 2021

**presa costituisce dunque il secondo pilastro della strategia del gruppo per gli anni futuri: divenire il riferimento globale per il più importante sistema di riscaldamento del plasma del reattore.** Due pilastri, che affrontano due sfide fondamentali in prospettiva reattoriale, quella del confinamento e quella del riscaldamento del plasma; attorno a questi due pilastri ruotano attività di minore impegno ma di grande importanza strategica, tra cui vorrei almeno citare la partecipazione al progetto concettuale di DEMO e l'intensa attività di formazione di giovani ricercatori.

# Dal JET al progetto EAST, le linee strategiche del CREATE per la ricerca sulla fusione

Nato nel 1992, il CREATE (Consorzio di Ricerca per l'Energia e le Applicazioni Tecnologiche dell'Elettromagnetismo) ha raccolto il testimone dall'omonimo gruppo di ricercatori dell'Università di Napoli che negli anni '70 iniziò ad occuparsi dello studio delle configurazioni di campo magnetico per confinare il plasma dei futuri reattori a fusione. Oggi è un ente senza fini di lucro, partecipato da Ansaldo e da diverse università meridionali che fornisce svariati contributi a ITER; è socio fondatore alla Società Consortile che l'ENEA sta promuovendo per la progettazione esecutiva, la costruzione e la gestione del DTT

DOI 10.12910/EAI2019-011



di **Vincenzo Coccoresse**, *Presidente del Consorzio CREATE*

L'attività del gruppo CREATE affonda le sue radici nella prima metà degli anni settanta, quando uno sparuto gruppo di ricercatori dell'Istituto di Elettrotecnica dell'Università di Napoli iniziò ad occuparsi dello studio delle configurazioni di campo magnetico necessarie per confinare il caldissimo gas ionizzato (detto plasma) dei futuribili reattori a fusione. In effetti in un reattore basato sul

concetto "Tokamak", il campo magnetico costituisce un contenitore immateriale per il plasma, che deve rimanervi il tempo necessario affinché avvengano le reazioni di fusione nucleare. Il problema è che non solo il contenitore non è stagno, ma non è nemmeno stabile. Volendo fare un paragone con la vita di tutti i giorni, è come voler riempire un barile raccogliendo acqua da uno zampillo con un panierino di vimini tenuto in

bilico su un sasso. Le competenze del gruppo si estesero quindi alle tecniche di controllo delle configurazioni magnetiche. Le due linee strategiche così individuate erano fra di loro intimamente connesse e questo costituì uno dei punti principali di forza e di specificità del gruppo CREATE. In questo contesto la complessità dei fenomeni da trattare suggerì da subito l'idea di sviluppare sofisticati modelli numerici implementati

come software specialistico di tipo proprietario.

**La crescita del gruppo iniziale e l'allargamento delle competenze suggerì l'idea, nel 1992, di dare forma organica al gruppo mediante la costituzione formale del Consorzio CREATE (<https://www.create.unina.it/>), ente di ricerca senza fini di lucro, partecipato in misura prevalente da alcune università meridionali: Ansaldo Energia S.p.A., Università degli Studi della Basilicata, Università degli Studi della Campania Luigi Vanvitelli, Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale, Università degli Studi di Napoli Federico II, Università degli Studi di Napoli Parthenope, Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria.**

Accanto alle due linee strategiche prima menzionate se ne aggiunse molto presto una terza, costituita dall'analisi elettromagnetica delle strutture metalliche della macchina, con il calcolo delle forze derivanti dalla interazione con il plasma, soprattutto in caso di improvvisa di-

struzione della intensa corrente elettrica circolante nel plasma. Il codice base sviluppato dal CREATE, noto come CARIDDI, ha lo stesso tipo di complessità numerica dei codici commerciali per l'analisi tridimensionale delle strutture (ad es. ANSYS), ma si rivela molto più efficace a parità di discretizzazione, in quanto specificamente sviluppato per la geometria del tokamak. In ogni caso, i risultati ottenuti possono essere facilmente utilizzati come input per i codici meccanici per la analisi strutturale.

**Infine, negli ultimissimi anni, il CREATE ha attivato una quarta linea strategica, costituita dalla progettazione dei componenti meccanici del tokamak, utilizzando le più avanzate tecniche CAD, ivi compresa la realtà virtuale.**

Il CREATE non ha un laboratorio sperimentale proprietario. Questo oggettivo punto di debolezza ha tuttavia il pregio di potersi agilmente muovere fra i principali tokamak operanti nel mondo, fornendo supporto e consulenza nel proprio cam-

po di competenza. **Dopo un'intensa e proficua presenza al JET, attualmente il CREATE collabora stabilmente con l'esperimento cinese EAST.** Sul versante dei progetti futuri, oltre al progetto concettuale DEMO, inquadrato nell'attività del Consortium EUROfusion, il CREATE fornisce svariati contributi al progetto ITER, mediante contratti di servizio stipulati sia con F4E sia direttamente con ITER, svolgendo in alcuni casi il ruolo di coordinatore di progetto. **Ho volutamente lasciato per ultimo il contributo determinante dato negli scorsi anni alla progettazione preliminare della macchina DTT, facility che costituirà il cuore delle attività sperimentali nel prossimo decennio.** Si tratta di una sfida particolarmente impegnativa per i ricercatori del CREATE. **Il carattere prioritario dell'impegno è attestato dalla decisione di partecipare in qualità di socio fondatore alla Società Consortile che l'ENEA sta promuovendo per la progettazione esecutiva, la costruzione e la gestione di questa 'macchina' italiana.**

# ISTP, un polo internazionale per la scienza dei plasmi

Nato dalla fusione di tre centri di ricerca con una lunga esperienza nella fisica dei plasmi e nella fusione termonucleare controllata, l'Istituto per la Scienza e Tecnologia dei Plasmi (ISTP) del CNR intende diventare un polo di riferimento e un centro di coordinamento per i gruppi nazionali operanti all'interno di Enti e Atenei che si occupano di fisica del plasma fondamentale e delle sue applicazioni. Le attività di ricerca dell'Istituto sono pienamente inserite nei programmi europei ed internazionali sulla fusione

DOI 10.12910/EAI2019-012



di **Maurizio Lontano**, Direttore dell'Istituto per la Scienza e la Tecnologia dei Plasmi (ISTP)

**L**a costituzione dell'Istituto per la Scienza e Tecnologia dei Plasmi (ISTP) si inserisce in un processo strategico di razionalizzazione della rete scientifica del CNR avviato nel 2017 e volto a creare Istituti di grandi dimensioni, con esperienze in settori omogenei in maniera da favorire collaborazioni, aumentare la capacità di progettualità, e in modo da poter offrire un ampio ventaglio di competenze a fronte di bandi competitivi nazionali ed europei.

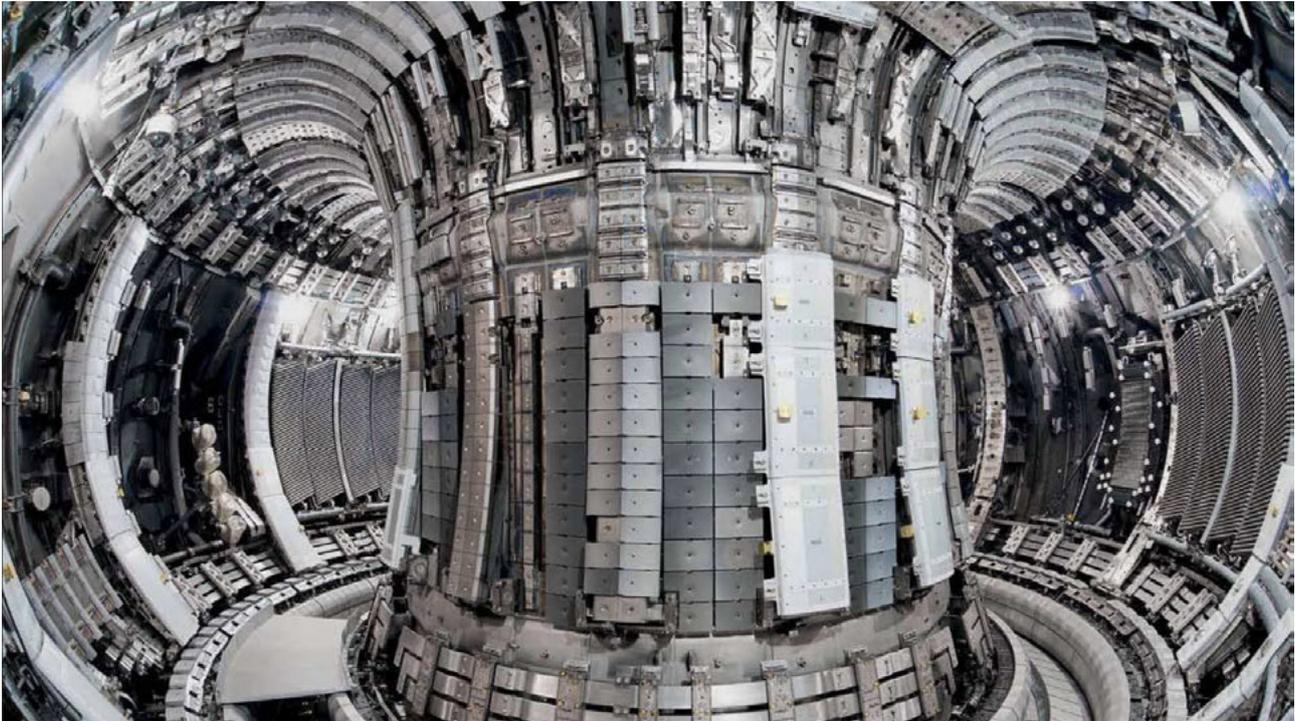
Dal punto di vista operativo, l'ISTP è il risultato della fusione di tre centri di ricerca con una lunga esperienza

nella fisica dei plasmi e sulla fusione termonucleare controllata (FTC): l'Istituto di Fisica del Plasma di Milano, l'Istituto dei Gas Ionizzati di Padova e il P.Las.M.I Lab di Bari. ISTP afferisce al Dipartimento di Scienze Fisiche e Tecnologie della Materia del CNR e conta circa 120 addetti di cui oltre 80 tra fisici ed ingegneri, a cui vanno ad aggiungersi numerosi collaboratori, dottorandi e studenti.

**Obiettivo di questa iniziativa è che l'ISTP diventi nel tempo un polo di riferimento e un centro di coordinamento per i numerosi gruppi nazionali, operanti all'interno di Enti e Atenei che si occupano tradizio-**

**nalmente di fisica del plasma fondamentale e delle sue applicazioni**, incoraggiando sinergie e la condivisione tra le varie anime dell'Istituto di esperienze, metodi di approccio ai problemi, metodologie teoriche e di modellizzazione, tecniche di misura sviluppati per specifiche tipologie di plasmi e che possono essere estesi proficuamente ad altri ambiti.

L'Istituto svolge attività di ricerca nel campo della dinamica dei plasmi sia di laboratorio che naturali. Le tematiche scientifiche di cui l'Istituto si occupa spaziano dalla FTC alla fisica dei plasmi di bassa temperatura, dai plasmi per l'aerospazio ai plasmi



astrofisici, dagli studi sull'interazione dei plasmi con fasci di particelle, radiazione elettromagnetica e materiali all'interazione laser ultraintensi-plasma e alla fisica dei plasmi in condizioni estreme.

Le attività di ricerca di ISTP sulla FTC si inseriscono nell'ambito dei programmi europei ed internazionali, del Consorzio *EUROfusion*, attraverso l'ENEA, dell'agenzia europea *Fusion for Energy* (F4E) e della *ITER International Organization*, e mirano a realizzare il reattore sperimentale ITER e a contribuire al suo successo scientifico, ad elaborare il progetto concettuale del reattore dimostrativo DEMO, e a formare le nuove generazioni di fisici ed ingegneri che dovranno operare le installazioni future. A questi impegni si aggiunge una in-

tensa partecipazione alle campagne sperimentali su numerose macchine per studi sulla fusione, a cui è associata una vigorosa attività di modellizzazione e simulazione numerica interpretativa.

**Più nello specifico, il processo di razionalizzazione ha portato alla creazione di un Istituto con ampie competenze in vari settori della fisica del plasma e delle sue applicazioni: nello sviluppo e realizzazione dei due principali sistemi di riscaldamento ausiliario di potenza di plasmi da fusione, ovvero la *Neutral Beam Injection* (NBI), in stretta collaborazione con il consorzio RFX, e l'*Electron Cyclotron Resonant Heating* (ECRH), che verranno installati nei maggiori impianti in costruzione o di fu-**

**tura realizzazione, ITER, DTT, JT-60SA e DEMO;** nello sviluppo di diagnostiche di plasmi sia di laboratorio, sia per la fusione; nella modellizzazione dei processi fisici che hanno luogo nei plasmi, nella realizzazione di codici numerici basati su principi primi, nel loro utilizzo a scopo interpretativo e predittivo della dinamica di plasmi in un ampio intervallo di parametri fisici e con riferimento ad operazioni di esperimenti di varie taglie.

Infine è importante menzionare che i ricercatori dell'ISTP hanno contribuito sin dall'inizio e continuano a partecipare in maniera importante alla definizione del progetto e alla realizzazione della *Divertor Tokamak Test* (DTT) facility.

# La roadmap cinese verso l'energia da fusione: obiettivo 2050

Nell'ultimo decennio la ricerca sulla fusione in Cina ha compiuto passi in avanti molto significativi. L'adesione a ITER nel 2006 ha segnato un'accelerazione nella roadmap per la produzione di energia elettrica da fusione e realizzare il primo prototipo di centrale (PFPP) tra il 2050 e il 2060. D'altra parte, il contributo cinese all'avanzamento di ITER sta crescendo in qualità e quantità grazie all'apporto della comunità scientifica e dell'industria nazionale impegnata nella fornitura della componentistica. La collaborazione con ENEA

DOI 10.12910/EAI2019-013



di **Jiangang Li**, Professore dell'Università di Scienza e Tecnologia della Cina. Vice Direttore dell'Istituto di Fisica del Plasma, Accademia Cinese delle Scienze – Hefei (Cina)

La ricerca sulla fusione a confinamento magnetico in Cina è iniziata negli anni '60 e ha avuto sin da subito l'obiettivo della produzione di energia elettrica. L'avvio è stato lento e difficile in tutta la prima fase che va fino agli anni 90, contrassegnati da un forte e costante impegno sugli studi della fisica del plasma fondamentale, la formazione di giovani scienziati e da diversi approcci per la costruzione di tokamak di piccole dimensioni, di mirror e di macchine lineari. In una seconda fase, dall'inizio del 1990 fino alla metà del 2000, è stata avviata la realizzazione di magneti superconduttori e di tokamak di

medie dimensioni; in particolare, con il supporto di scienziati russi il tokamak sovietico T-7, provvisto di magneti superconduttori per il campo toroidale, è stato modificato con successo in HT-7 [1] ed è stato dotato di nuovi sistemi di riscaldamento, produzione di corrente e diagnostica. Inoltre, modificando il tokamak tedesco ASDEX è stato realizzato il tokamak HL-2A che ha consentito di fare significativi passi in avanti in termini di parametri di plasma [2-4]. Successivamente è stato costruito EAST, il primo tokamak completamente superconduttore, e il primo plasma è stato realizzato nel 2006 [5]. EAST (Figura 2) è realizzato con

tecnologie simili a ITER<sup>1</sup> e svolgerà un ruolo chiave per la messa a punto delle operazioni di ITER e per la realizzazione del reattore cinese CFETR attesa per il prossimo decennio.

**L'adesione formale al Progetto ITER nel 2006 ha segnato un punto di svolta nel programma fusione in Cina e l'avvio di una terza fase di ricerca (Figura 1), incentrata sulla realizzazione del "Progetto cinese di sviluppo dell'energia nucleare da fusione a confinamento magnetico" (CN-MCF, che include sia le attività nazionali sia la partecipazione a ITER ed è supportato da finanziamenti stabili dal governo centrale).** Il programma nazionale

prevede lo studio della fisica del plasma, approfondimenti della teoria, simulazioni numeriche, esperimenti, sviluppo tecnologico e formazione. Dall'inizio del 2007 le dieci più importanti università cinesi sono state coinvolte nella ricerca di base sulla fisica del plasma e nella formazione; anche i Ministeri della Scienza e della Tecnologia e dell'Educazione, l'Accademia delle Scienze cinese ed il settore della cooperazione nucleare cinese hanno avviato un programma congiunto per formare giovani talenti: i migliori studenti universitari e post doc, vengono selezionati per partecipare a speciali progetti di ri-

cerca con finanziamenti stabili. **Ogni anno, oltre 200 studenti di master e 150 studenti di dottorato sono coinvolti nella ricerca sulla fusione.** A livello universitario, si è deciso di concentrarsi sulla costruzione di piccoli impianti sperimentali per la comprensione della fisica, nuovi sistemi diagnostici, configurazioni di plasma alternative, studi sull'interazione plasma-parete, materiali e sviluppi tecnologici, tutte attività complementari agli studi su EAST e HL-2A. In parallelo, è stato avviato un programma di simulazioni numeriche su larga scala che ricomprende diverse tematiche e si basa su

una forte cooperazione internazionale, sul coinvolgimento di diverse università e di due importanti istituti di ricerca sulla fusione, l'Istituto di Fisica dei Plasmi dell'Accademia delle Scienze (ASIPP) e l'Istituto sud-occidentale di Fisica (SWIP). Il flusso di finanziamenti assicurato dal governo centrale ha consentito di ottenere risultati molto positivi in EAST e HL-2A, in particolare rispetto a questioni chiave per ITER. HL-2A si è concentrato sulla fisica del plasma di bordo e sul controllo delle instabilità magneto-drocinamiche [6-7] mentre EAST si è focalizzato sulla sperimentazione di operazio-

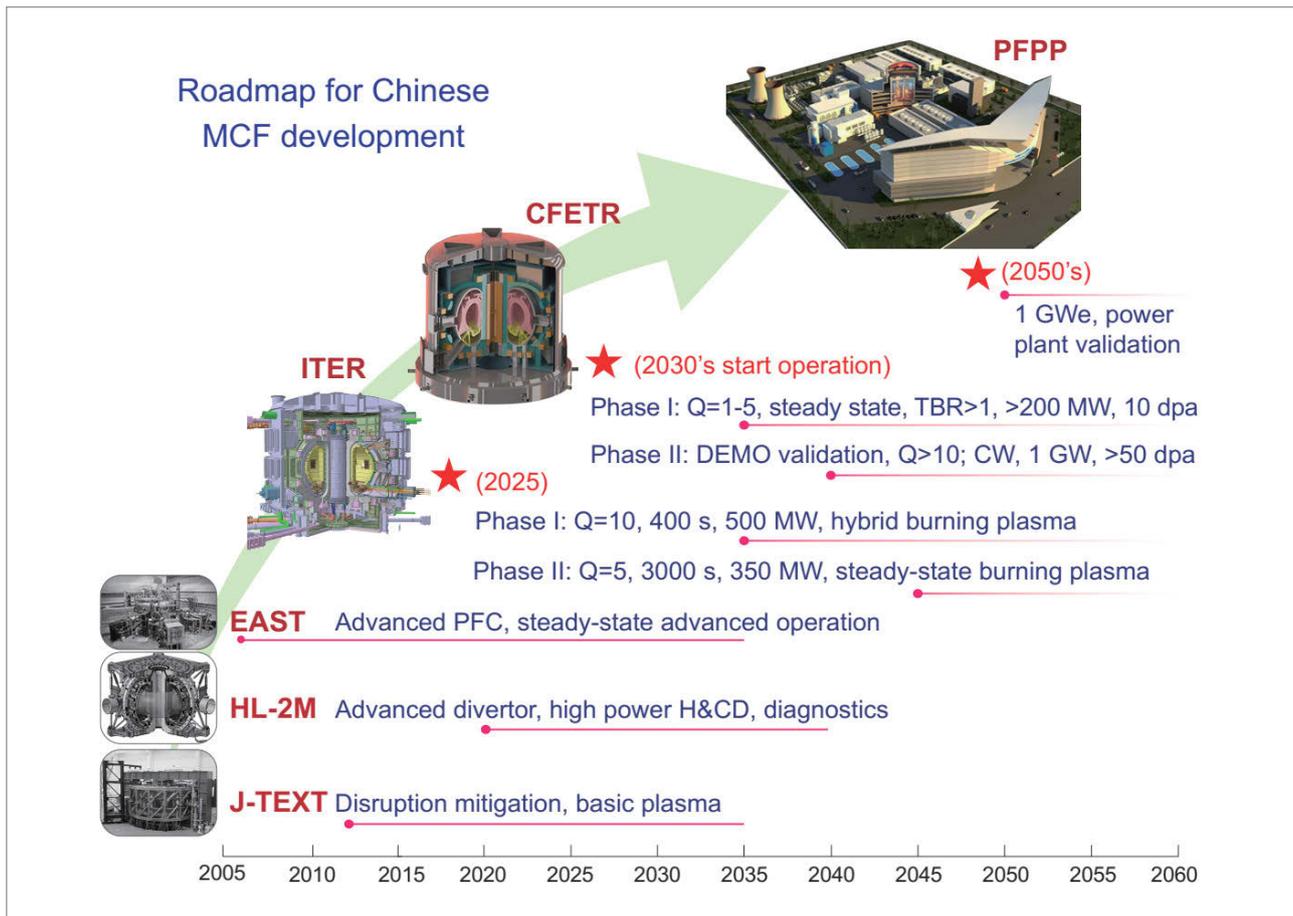


Fig. 1 Roadmap per lo sviluppo dell'energia da fusione a confinamento magnetico in Cina

ni ad alte prestazioni di plasma allo stato stazionario arrivando a produrre scariche di plasma con correnti dell'ordine di milioni di Ampere della durata fino a 400 s. **Le attività di ricerca sviluppate nell'ambito "Progetto cinese di sviluppo dell'energia nucleare da fusione a confinamento magnetico" (CN-MCF) stanno tralasciando la ricerca sui tokamak verso nuove frontiere tecnologiche a livello mondiale con ricadute di rilievo nella produzione scientifica: solo negli ultimi cinque anni sono stati pubblicati in media ogni anno oltre 500 articoli su riviste scientifiche internazionali incluse nel Science Citation Index.**

### Componenti cinesi per ITER

Nel 2007, a seguito dell'adesione cinese a ITER, è stata formalmente istituita **ITER-Cina (CNDA) un'agenzia nazionale che fa capo al Ministero della Scienza e della Tecnologia cinese incaricata della realizzazione dei componenti per ITER.** In questi anni, il programma cinese di produzione di componenti per ITER ha progredito costantemente in stretta collaborazione con l'ITER Organization (ITER IO) sulla base di 12 accordi di fornitura. Grazie allo sforzo congiunto di ITER-CNDA, di ASIPP e di SWIP, ad oggi il materiale conduttore per i magneti toroidali è stato prodotto nel pieno rispetto dei tempi e dei requisiti tecnici stabiliti e lo stesso è previsto per le restanti undici forniture attualmente in via di produzione; di fatto, il 60% delle forniture richieste alla Cina sono state realizzate con successo.

### La roadmap CN-MCF

Dopo tre anni di dibattito, la comunità CN-MCF ha raggiunto un consenso su una roadmap per la

realizzazione di energia da fusione in Cina, indicando i seguenti obiettivi a breve termine: 1) creazione di una piattaforma avanzata (EAST, HL-2M, J-TEXT) per la sperimentazione con il plasma 2) sviluppo di tecnologie strategiche per la costruzione di ITER e del reattore sperimentale China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR), 3) progettazione del CFETR e avvio di attività di ricerca e sviluppo su larga scala. L'avvio della costruzione del CFETR è previsto fra il 2020-2030, con la previsione di concludere fra il 2030-2040. In una prima fase, la potenza di fusione target dell'impianto CFETR sarà intorno ai 200 MW allo stato stazionario e in regime di autosufficienza per il trizio, sviluppandosi in parallelo con l'operazione di ITER a piena potenza ( $Q=10$ ). In una seconda fase, verrà raggiunta una potenza di fusione di oltre 1 GW per poter validare so-

**lizzazione fra il 2050-2060 del prototipo di centrale elettrica a fusione (PFPP).**

### Il China Fusion Engineering Test Reactor

Nella roadmap cinese della fusione, la prossima tappa è il China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR) [10], un impianto sperimentale concepito per colmare il divario tra ITER e il futuro reattore a fusione. La progettazione tecnica di dettaglio è iniziata due anni fa da parte di un team nazionale con oltre 600 persone e, ad oggi, il progetto preliminare è stato completato. L'obiettivo è di riuscire realizzare un impianto con un'operatività elevata, in grado di produrre fino a 1500 MW di potenza di fusione e di raggiungere l'autosufficienza per il trizio. Per il suo funzionamento in regime stazionario è previsto l'uso di un campo magnetico fino a 6,5 Tesla

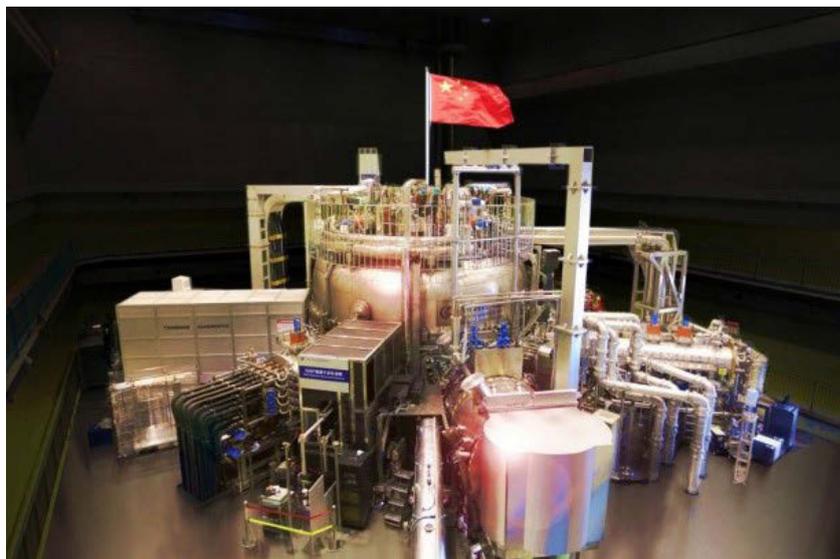


Fig. 2 Il tokamak EAST

luzioni tecnologiche per il reattore dimostrativo DEMO. **Un passo da gigante nella roadmap sarà la rea-**

e di due sistemi di riscaldamento, con onde a radiofrequenza e tramite iniezione di fasci di atomi neutri.

La realizzazione di CFETR prevede anche un vasto programma di ricerca e sviluppo di e tecnologie avanzate quali quelle relative ai magneti superconduttori ad alte prestazioni, inclusi i magneti ad alta temperatura critica, ai nuovi magneti in  $Nb_3Sn$  avanzati, alle sorgenti di onde a radiofrequenza ad alta potenza, ai sistemi stazionari di iniezione di fasci di neutri, di gestione da remoto, al divertore, ai materiali avanzati per la fusione e ai mantelli triziogeni. Tutte queste attività vengono finanziate con fondi governativi. Il programma prevede inoltre la realizzazione di infrastrutture di prova di componenti di CFETR in ambiente non nucleare, quali l'impianto di collaudo dei magneti superconduttori, la camera a vuoto per le simulazioni di installazione e rimozione remota di componenti, l'impianto per il ciclo del trizio e la sorgente di neutroni a 14 MeV per i test sul mantello triziogeno. Il successo di questo programma, unitamente a ulteriori prove ingegneristiche, simulazioni e modellazione su larga scala e esperimenti sui tokamak, fornirà una base più solida per l'avvio della costruzione di CFETR, ITER è un esempio molto positivo di cooperazione internazionale tra numerosi Paesi che rappresentano più della metà della popolazione mondiale. Negli ultimi 10 anni la collaborazione tra i vari partner nazionali e il team centrale è stata un elemento-chiave per il successo del progetto. Con l'ingresso della Cina, ITER ha potuto beneficiare di contributi molto rilevanti sia a livello scientifico-tecnologico sia nelle forniture industriali; d'altra parte, la partecipazione a questo grande progetto di respiro internazionale ha aperto nuove prospettive nell'ambito della ricerca cinese e nuove opportunità per la realizzazione del Reattore spe-



Fig. 3 China Fusion Engineering Test Reactor (CFETR)

rimentale CFETR. Su questo fronte, la collaborazione internazionale è iniziata cinque anni fa con la creazione di team di progettazione congiunti Cina-Stati Uniti e tra i gruppi impegnati nella progettazione del DEMO europeo e di CFETR con risultati molto positivi. E lo stesso vale per il futuro: nel programma CN-MCF è benvenuto ogni partner internazionale che voglia partecipare alle attività di ricerca e sviluppo e alla progettazione per contribuire ad accelerare la realizzazione del CFETR.

Nel campo della fusione la Cina vanta più di venti anni di collaborazione con i grandi player del settore, Stati Uniti, Russia, Giappone e Unione Europea, collaborazione che ha avuto ricadute di vasta portata nel tempo. Negli ultimi cinque anni, il programma congiunto tra Giappone, Corea e Cina ha registrato buoni progressi. Recentemente sono state sviluppate collaborazioni molto strette ed efficaci tra DIII-D (General Atomic, San Diego, USA) ed EAST, tra EAST/HL-2A e WEST (CEA, Ca-

darache, Francia) e ASDEX-U (IPP, Garching, Germania), per le quali sono stati creati specifici gruppi di lavoro congiunti. Per i prossimi 10 anni, questa cooperazione verrà supportata e rafforzata grazie ai finanziamenti di ciascun governo.

In questo stesso periodo di tempo ha preso il via la collaborazione tra ENEA e Cina, che ha già dato risultati interessanti: i team congiunti di EAST-DTT-CFETR hanno organizzato workshop e lavorato a stretto contatto per il controllo del plasma a regime avanzato su EAST, sulla teoria e simulazione, per la progettazione e test di riscaldamento a radio frequenza per EAST e DTT e per la progettazione e lo sviluppo per DTT e CFETR. Lottima sinergia che si è creata tra i team è un elemento propulsivo per i progetti DTT da un lato e CFETR dall'altro. Ed entrambe le parti sono decise a rafforzare in futuro la collaborazione.

## Conclusioni

**Negli ultimi dieci anni il “Proget-**

**to cinese di sviluppo dell'energia nucleare da fusione a confinamento magnetico" (CN-MCF), ha compiuto progressi significativi con un'accelerazione a seguito dell'ingresso della Cina nel progetto ITER. Con il successo nella costruzione e gestione del tokamak superconduttore EAST, la Cina sta svolgendo un ruolo chiave nell'ambito delle operazioni avanzate in stato stazionario per ITER. L'industria cinese ha compiuto progressi significativi nella fornitura dei componenti per ITER: oltre il 60% dei componenti forniti dalla Cina è stato completato.** La comunità CN-

MCF ha elaborato una chiara roadmap per accelerare la realizzazione dell'energia da fusione in Cina. CFETR è il prossimo impianto per il programma CN-MCF che mira a colmare il divario tra l'esperimento di fusione ITER e il futuro reattore a fusione. L'operatività di CFETR avverrà in due fasi: il funzionamento in stato stazionario e l'autosufficienza del trizio saranno i due punti chiave della prima fase con una modesta potenza di fusione di circa 200 MW. La seconda fase mirerà alla validazione del progetto DEMO con una potenza di fusione superiore a 1 GW. Il progetto preliminare di CFE-

TR è stato completato. La ricerca e lo sviluppo su piccola scala sono iniziati 5 anni fa e hanno registrato buoni progressi. Il progetto ingegneristico di dettaglio, la simulazione integrata, la ricerca e lo sviluppo su larga scala continueranno a colmare le lacune ancora esistenti per la costruzione e il funzionamento di CFETR. Con un forte sostegno del governo e sforzi congiunti tra università, istituti di ricerca, industria e partner internazionali, il programma CN-MFC mira a stabilire una solida base tecnica per il successo di ITER e l'inizio della costruzione di CFETR nei prossimi anni.

<sup>1</sup> EAST è dotato di oltre 30 MW di potenza di riscaldamento a radiofrequenza e a fasci di atomi neutri, di più di 80 sistemi diagnostici avanzati, due criopompe interne, un divertore simile a quello di ITER con bersagli realizzati in monoblocchi di tungsteno che permetteranno di studiare plasmi stazionari fino a 400 s, in regimi di confinamento dell'energia migliorato e di ottenere flussi di potenza al divertore comparabili a quelli che si avranno su ITER (10-20 MW/m<sup>2</sup>)

#### BIBLIOGRAFIA

1. Y. Wan, Nucl. Fusion 40, 1057–1068 (2000)
2. X.R. Duan et al., 2010 Nucl. Fusion 50 095011
3. Xu M. et al., 2015 Nucl. Fusion 55 104022
4. B.N. Wan et al., 2005 Nucl. Fusion 45 S132
5. X. Gao, et al., Nucl. Fusion, 47 (2007), p. 1353
6. X.R. Duan et al., 2017 Nucl. Fusion 57 102013
7. W.W. Xiao et al., 2012 Nucl. Fusion 52 114027
8. J.S. Hu et al., 2015 Phys. Rev. Lett. 114, 055001
9. J. Li, H.Y. Guo et al., Nature Phys. 9, 817 (2013)
10. Yuanxi Wan J.Li, Y.Liu et al., Nuclear Fusion 57 (2017)102009

# Le ricadute economiche e sociali della ricerca sulla fusione: lo studio ENEA-LIUC

Partecipare a progetti internazionali di 'Big Science' offre alle imprese coinvolte l'opportunità di confrontarsi con tecnologie di frontiera, conoscenze scientifiche avanzate, standard di qualità molto elevati e non solo. Uno studio realizzato da ENEA e Università Carlo Cattaneo (LIUC) di Castellanza sul caso della fusione valuta per la prima volta l'impatto in termini di benefici economici, sociali, per il territorio, ma anche di strategie, vision e processi innovativi per le aziende coinvolte in ITER

DOI 10.12910/EAI2019-014

di **Paola Batistoni**, *Responsabile Sviluppo e Promozione della Fusione - ENEA*, **Gloria Puliga** e **Raffaella Manzini** - *Professore Ordinario di Ingegneria Economico Gestionale presso la LIUC*

Lo sviluppo dell'energia da fusione pone sfide tecnologiche tra le più complesse che l'umanità debba affrontare, è quindi facile intuire come la ricerca in questo campo comporti ricadute di vasta portata in termini scientifici, tecnologici, economici e di innovazione per il mondo della ricerca, per le imprese e per l'intero sistema paese<sup>1</sup>. **Partendo da questa consapevolezza, già dal 2003, in vista dell'avvio della costruzione di ITER, ENEA si è dotata di una specifica strategia e di un'Unità di trasferimento tecnologico con lo scopo di individuare e valorizzare le tecnologie sviluppate nelle proprie attività di ricerca e di massimizzarne il ritorno per tutto il sistema Paese.** Il programma Fusione italiano era già fortemente orientato al trasfe-

ramento tecnologico fin dagli anni 1980 con un importante coinvolgimento dell'industria, con lo sviluppo di un ampio spettro di tecnologie per la fusione con particolare riguardo a quelle che avevano una maggiore corrispondenza nella vocazione industriale nel nostro Paese (meccanica, elettrotecnica, superconduttività, robotica, materiali e ottica)<sup>2</sup>. La costruzione di ITER ha richiesto l'attuazione di una strategia a più ampio raggio: con la massima diffusione della informazione sul programma fusione e sulle opportunità da esso fornite, con l'individuazione dei settori tecnologici che vedevano le maggiori sinergie tra laboratori e aziende, con il supporto tecnico alle imprese nella comprensione dei contenuti e delle specifiche tecniche

delle gare e, infine, con l'attivazione dell'Industry Liaison Officer per ITER in ENEA. Più in generale, il sistema di relazioni maturato da ENEA nel tempo è risultato fondamentale per la promozione attiva di consorzi di imprese, anche a livello europeo, per la partecipazione alle gare. Grazie a questa strategia di lungo termine, l'industria italiana ha acquisito una parte importante delle commesse europee per la costruzione di ITER (circa il 60% del totale, se si escludono quelle per gli edifici e le infrastrutture), per un valore totale di circa 1,2 miliardi di euro.

## Lo studio ENEA – LIUC

La dimensione della partecipazione italiana alla costruzione di ITER e

al programma internazionale sulla fusione, in termini di numero di aziende coinvolte e di valore dei contratti, è tale da fornire l'opportunità di studiare l'impatto degli investimenti nei grandi progetti scientifici e tecnologici sulla società. Sebbene si tratti di un'operazione complessa per il numero elevato di variabili in gioco e i parametri da considerare, stimare queste ricadute è importante per rendere disponibili ai decision makers elementi oggettivi per valutare l'impatto delle risorse impiegate. **Un recente studio realizzato da ENEA e Università Carlo Cattaneo (LIUC) di Castellanza<sup>3</sup>, fornisce un contributo in questa direzione evidenziando che il programma di sviluppo della fusione, con ITER in primo luogo, genera benefici socio-economici che vanno ben oltre la percezione di breve periodo e of-**

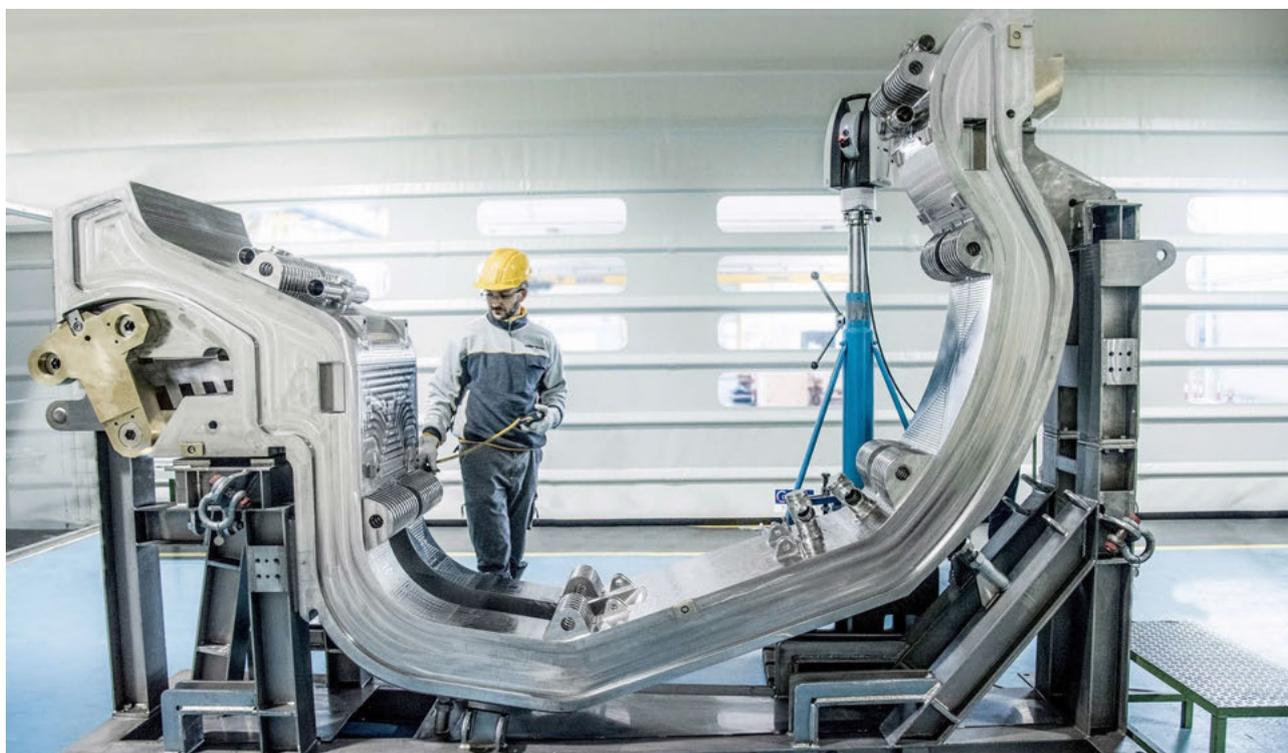
**fre reali opportunità di crescita per il sistema produttivo e la società.**

Lo studio si basa su indicatori nuovi, più ampi e di più lungo periodo rispetto a quelli attualmente utilizzati da MIUR e Agenzia nazionale di valutazione del sistema universitario e della ricerca (ANVUR), più incentrati sui risultati di breve periodo, sulle attività delle università e sul numero di pubblicazioni. **L'analisi si fonda sul presupposto che nei moderni ecosistemi dell'innovazione un elemento particolarmente strategico sta nella capacità delle imprese di creare reti di collaborazione per far fronte alla crescente competizione sul mercato e alla rapida evoluzione tecnologica: collaborare con partner scientifici di alto livello è un potente stimolo per sviluppare processi avanzati, prodotti innovativi, ampliare il**

**proprio network, migliorare la capacità di problem-solving ed anche l'immagine dell'azienda stessa.**

Da questo punto di vista, i progetti di Big Science, come ITER, sono ambienti collaborativi molto vasti dove aziende e mondo della ricerca - università ed enti pubblici- possono condividere infrastrutture altamente complesse, conoscenze e competenze avanzate.

L'indagine parte da un campione di 26 aziende italiane attive nel settore manifatturiero o dei servizi, con sede nel nord o centro Italia che, a partire dal 2007, hanno ricevuto almeno un contratto per ITER; l'80% sono di piccole o medie dimensioni e tutte sono molto diverse per sede territoriale, area tecnologica di competenza, andamento finanziario, e performances. Lo studio ha previsto diversi livelli di approfondimento, intre-



Modulo della struttura di supporto del divertore di ITER (Walter Tosto)

ciando le informazioni acquisite attraverso questionari e interviste ai manager con informazioni tratte dai bilanci, il numero di dipendenti e i brevetti per il periodo 2006–2015. In parallelo, sono stati analizzati dati macro economici per le regioni in cui si trovano le imprese, per controllare la presenza di effetti esogeni quali, ad esempio, la crisi economica. Sono poi stati approfonditi sei casi specifici di imprese con la più lunga partecipazione a ITER.

### Impatto strategico, finanziario e di immagine

**L'impatto economico e finanziario della partecipazione a ITER risulta complessivamente positivo con particolare riferimento alla pianificazione strategica: tutti i manager e i dirigenti intervistati hanno affermato che lavorare al progetto ha comportato una maggiore consapevolezza sulle reali competenze e capacità dell'azienda ed ha modificato in positivo il modo di pensare e le prospettive di sviluppo future. Soprattutto per le PMI, l'aggiudicazione di contratti ITER si è tradotta in una nuova vision aziendale e in un'accresciuta consapevolezza delle proprie capacità di competere anche con aziende più grandi.** Sono inoltre cresciuti gli investimenti in attrezzature, così come le collaborazioni con altri partner, soprattutto con i fornitori anche per progetti diversi da ITER; sono poi nate alleanze con imprese concorrenti e università o istituti di istruzione superiore. Non sembra invece esservi stato un effetto a livello di internazionalizzazione, in quanto la maggior parte delle aziende intervistate è già attiva a livello globale. Quasi il 90% delle imprese ha sostenuto che lavorare per ITER ha note-

volmente migliorato la loro reputazione e il 73% ha affermato di aver acquisito nuovi clienti. Tuttavia, lo sfruttamento commerciale delle nuove competenze non è semplice: solo il 47% delle aziende coinvolte sta entrando (o cercando di entra-



re) in nuovi settori come aerospazio, biomedicina, superconduttività e solo un numero ristretto – in particolare coloro che collaborano con l'ENEA e con ITER già da molto tempo – è riuscita a entrare in nuovi mercati. La sfida appare ancora più difficile per le PMI che vogliono utilizzare le competenze acquisite in nuovi settori: infatti, se le grandi aziende affermano che ITER è stata la porta di accesso per entrare in campi prima inesplorati e ampliare le linee di business, le imprese di dimensioni più piccole spesso non sono in grado di farlo da sole. **Sul fronte finanziario, la partecipazione a ITER sembra aver avuto ricadute positive considerato l'andamento favorevole degli indicatori utilizzati e, in particolare, del rapporto EBITDA/vendite (laddove EBIT sta per utili prima degli interessi, delle imposte, del deprezzamento e degli ammortamenti): l'analisi mostra come il coinvol-**

**gimento nel progetto consenta di ottenere un tasso di variazione del rapporto EBITDA/vendite di +3,86 (con una significatività di 0,042).** Un risultato che diventa ancora più importante se paragonato a quelli delle aziende concorrenti: nel 40%

dei casi, infatti, le aziende analizzate mostrano prestazioni migliori rispetto alla media di settore. Anche il ROA (return on assets: utile corrente ante oneri finanziari diviso totale dell'attivo) mostra un trend positivo soprattutto per le imprese di medie dimensioni, ma solo dopo qualche anno dall'avvio della collaborazione.

### Innovazione, ricadute sociali e 'operative'

**Dalla ricerca emerge che il principale risultato della partecipazione al progetto ITER è un significativo balzo in avanti in termini di innovazione tecnologica: in particolare, il 93% delle aziende dichiara di aver sviluppato nuove competenze tecniche, la maggior parte delle quali relativa a nuovi processi (73%) e, in misura molto inferiore, nuovi prodotti o brevetti (14%). Di fatto, le ricadute riguardano soprattutto**

## Nasce il Network Europeo degli ILO per i grandi progetti di ricerca internazionali

Si chiama PERIIA – Pan European Research Infrastructures ILOs Association ed è l'associazione internazionale nata nel marzo 2019 per creare un network 'ufficiale' fra gli oltre cento Industrial Liaison Officers impegnati nei grandi progetti di ricerca di istituzioni quali CERN, ENEA, ESRF, ESS, ESO, F4E/ITER. L'iniziativa si propone di favorire la diffusione di best practices per accrescere le opportunità di sviluppo tecnologico ed economico dell'industria europea, facendo leva sulla figura dell'ILO, nata una decina di anni fa con il compito strategico di stabilire e facilitare i rapporti fra mondo della ricerca e imprese. Si tratta di ricercatori e tecnologi con spiccate competenze gestionali e di comunicazione istituzionale, oltre ad una specifica formazione nelle relazioni internazionali. Il ruolo degli ILO è molto cresciuto negli ultimi anni, in particolare nel settore della fusione per quanto riguarda il collegamento fra le aziende del settore, Fusion for Energy e ITER anche in ragione della complessità tecnologica,

scientifico e del valore delle forniture. Il network PERIIA nasce in questo contesto, per rafforzare e ampliare i collegamenti tra le imprese (con un focus particolare sulle PMI) e le grandi organizzazioni scientifiche sul fronte di forniture, gare di appalto, trasferimento tecnologico, dell'innovazione e, in generale, per tutti quegli aspetti che possono contribuire a promuovere e rafforzare la creazione di un 'mercato comune' europeo della conoscenza. Il Network potrà anche svolgere una funzione consultiva per Istituzioni comunitarie e organizzazioni internazionali e sarà il luogo dove gli ILOs di vari paesi potranno confrontarsi e scambiare contatti ed esperienze in relazione ai diversi progetti. PERIIA è già stato riconosciuto, insieme alle maggiori infrastrutture di ricerca come uno dei soggetti promotori del BSBF – Big Science Business Forum di Granada dal 6 al 9 ottobre 2020.

di Paolo Acunzo, ENEA - Chair PERIIA Network

**il 'modo' di operare, ovvero la gestione delle procedure aziendali, il processo decisionale e organizzativo.** Ad esempio, molte aziende hanno acquisito nuovi software gestionali e per ottimizzare la gestione delle risorse umane. Da notare che il 67% delle aziende ha adottato nuovi standard non soltanto in relazione ai requisiti di ITER, ma per allinearsi alle direttive europee, alle norme e ai codici industriali.

**Quanto alle ricadute sociali, ovvero ai benefici per l'ambiente e la popolazione, dalle interviste emerge che a seguito di un contratto per ITER molte imprese hanno investito sul territorio, a livello locale o regionale, ad esempio esternaliz-**

**zando alcuni servizi o la realizzazione di componenti. Inoltre, tutte hanno assunto nuovo personale altamente qualificato, prevalentemente ingegneri, che sono stati inseriti in un ambiente di lavoro internazionale di elevatissimo contenuto tecnologico e caratterizzato da requisiti stringenti di gestione del progetto e controllo di qualità.** Si tratta di un dato di rilievo soprattutto se si tiene conto della diminuzione del 25%-30% nelle assunzioni registrato negli stessi settori e nelle stesse regioni delle aziende analizzate. Inoltre, i dipendenti affermano che le loro condizioni lavorative sono particolarmente vantaggiose e con prospettive lavorative superiori

dei loro pari non impiegati nel progetto ITER. Non sembrano invece esserci ricadute in termini di spin-off e start-up: solo un'azienda sulle 26 esaminate ha avviato una nuova start-up a seguito della partecipazione a ITER.

Un aspetto importante dell'impatto sociale può essere misurato attraverso le interazioni delle aziende che partecipano direttamente al progetto con la rete di partner con cui interagiscono. In particolare, si è analizzato<sup>4</sup> **il caso della Walter Tosto (WT) di Chieti** che sta producendo, nell'ambito di un consorzio con Ansaldo Nucleare e Mangiarotti, una parte dei settori della camera a vuoto di ITER. WT (630 dipenden-

ti e oltre 100 milioni di euro di fatturato medio) ha partecipato anche ad altri grandi progetti scientifici ed ha costruito nel tempo una rete molto estesa di partner industriali, subappaltatori (tipicamente PMI), centri di ricerca e università con cui collabora per il reperimento e la formazione di personale altamente qualificato. Le PMI coinvolte nella rete di WT hanno la possibilità di partecipare a progetti internazionali condividendone le regole e la cultura e, fra di loro, è cresciuta nel tempo una fiducia reciproca, basata sulla crescente disponibilità a condividere le proprie risorse, mostrando un comportamento cooperativo. Ad esempio, l'ufficio tecnico di WT è utilizzato da alcuni subappaltatori; inoltre, la presenza di un 'riferimento' forte come WT, ha consentito a alcuni subappaltatori di superare fasi anche molto critiche: un caso emblematico è quello di SIMUTECH, azienda che si trovava sul punto di fallire e sulla quale WT ha deciso di investire quale attore della propria rete, ordinando parti di ricambio per la fornitura di ITER e qualificandola come subappaltatore. Ad oggi, l'azienda è in grado di assumere nuove persone e di essere coinvolta anche in nuovi mercati, applicando le competenze precedenti e quelle maturate grazie alla rete ITER.

Lo stretto legame con le scuole superiori e l'università ha permesso di "costruire" ed educare le risorse umane con le competenze richieste tramite l'attivazione di stage e corsi di master gratuiti, ad esempio sulle tecniche di saldatura, l'attrezzatura per il processo di pressione, la progettazione e la produzione, la gestione delle vendite. Molti degli studenti sono stati direttamente assunti al termine dei corsi. Grazie a ITER è stata creata una nuova divisione che garantisce un lavoro sicuro a circa 60 persone nella zona di Chieti. Inoltre, l'area intorno a WT, in particolare nel distretto di Chieti, ha visto un utilizzo e sviluppo di infrastrutture e servizi, quali ad esempio hotel e aeroporto.

### Conclusioni

**L'Europa è fortemente impegnata nello sviluppo della fusione ospitando ITER in Francia, sostenendone circa la metà dei costi, e finanziando il programma domestico di ricerca e sviluppo attuato dal consorzio Eurofusion. L'obiettivo a lungo termine è quello di realizzare una fonte di energia sostenibile e di ridurre la dipendenza da fonti esterne, di ampliare la base industriale europea per lo sviluppo di una filiera di reattori a fusione e,**

**nel più breve termine, di promuovere lo sviluppo tecnologico e la competitività dell'industria europea attraverso un'impresa scientifica dall'alto contenuto innovativo. Lo studio ENEA-LIUC mostra che tale impresa genera benefici socio-economici che vanno ben oltre la percezione di breve periodo e offre reali opportunità di crescita per il sistema produttivo e la società.**

Tuttavia, uno degli aspetti più critici rilevato dalle imprese che collaborano con la Big Science è quello relativo alla **continuità delle commesse**. Per rimanere competitivi nei mercati high tech, l'industria deve fare investimenti, valutare i tempi del loro ritorno e stimare i rischi potenziali. **Grazie a ITER l'industria ha visto crescere notevolmente il proprio ruolo nella fusione, ma il suo coinvolgimento deve essere assicurato e accresciuto nel lungo termine con l'obiettivo di preparare le basi industriali per la produzione di energia da fusione. In questa prospettiva giuoca un ruolo importante il progetto DTT, l'esperimento italiano la cui costruzione sta iniziando presso il Centro ENEA di Frascati, che costituisce una nuova importante opportunità di crescita e innovazione per il sistema produttivo e per consolidare il coinvolgimento dell'industria nello sviluppo della fusione.**

<sup>1</sup> P. Batistoni, Ricadute e benefici delle ricerche sulla fusione nucleare, Energia Ambiente Innovazione, Vol.2, (2004), pag. 32

<sup>2</sup> P. Batistoni, Energia da Fusione – Stato, prospettive e ricadute industriali, Collana Focus – Sviluppo sostenibile, Ed. ENEA, 2009

<sup>3</sup> G. Puliga, R. Manzini, P. Batistoni, An Industry and Public Research Organization joint effort for ITER construction: Evaluating the impact, Fusion Engineering and Design, (2019) <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.12.015>

<sup>4</sup> G. Puliga, R. Manzini, V. Lazzarotti, P. Batistoni, The social impact of Big Science: the case of the ITER fusion experiment, sottomesso a Industrial and Corporate Change

# Una cornice giuridica visionaria e una solida cooperazione internazionale per la ricerca europea sulla fusione

La comunità scientifica europea nel settore della fusione è considerata una *best practice* della ricerca in ambito UE: un risultato reso possibile da un insieme di fattori, quali sicuramente la qualità dei ricercatori e delle istituzioni di ricerca, ma anche del Trattato Euratom che sin dagli anni 50 ha previsto un'efficace e visionaria cornice giuridica, unita ad una ben strutturata e solida cooperazione internazionale, senza le quali non sarebbe stata possibile l'attuale leadership europea a livello mondiale

DOI 10.12910/EAI2019-015

di **Marco Franza**, ENEA – Servizio Unione Europea e Organismi Internazionali, già esperto nazionale presso la Commissione Europea, Euratom International Agreements

**L**a ricerca europea sull'energia da fusione è una storia di successo a partire dall'istituzione delle Fusion Association passando per l'adozione della *Fusion Roadmap* e la costituzione del consorzio *EUROfusion*. Oggi la comunità europea della ricerca nel settore della fusione è considerata una *best practice*, ossia un concreto esempio di piena integrazione della ricerca europea: un risultato reso possibile grazie da un insieme di fat-

tori, quali sicuramente la qualità dei ricercatori e delle istituzioni europee di ricerca, ma anche da un'efficace e visionaria cornice giuridica, unita ad una ben strutturata e solida cooperazione internazionale, senza le quali non sarebbe stata possibile l'attuale *leadership* europea a livello mondiale nel settore.

**Sin dagli anni '50, la ricerca nel settore della fusione si è sviluppata in un'ottica di collaborazione internazionale, considerata lo strumento indispensabile**

**per riuscire a trovare risposte comuni a problemi globali, aggregando le risorse per metterle a fattor comune.** In tal senso, la cornice giuridica europea è stata essenziale per creare le condizioni a supporto della ricerca in questo specifico settore.

**La pietra miliare è il Trattato Euratom firmato nel 1957 insieme al Trattato che istituiva la Comunità Economica Europea, con l'obiettivo di promuovere il nucleare a fini pacifici, assicurando un alto livello**



Foto scattata in una incontro dello Steering Committee Euratom-China

**di sicurezza.** Nei suoi oltre 60 anni di vita il Trattato è stato il caposaldo che ha consentito di sviluppare le attività nucleari e la produzione di energia elettrica, ma anche una filiera di ricerca di frontiera quale è la fusione. Grazie ad una cornice giuridica visionaria <sup>1</sup>, rimasta sostanzialmente invariata fino ad oggi, i padri costituenti europei hanno fatto della collaborazione internazionale un elemento strategico <sup>2</sup> per lo sviluppo e il rafforzamento delle attività di ricerca, avendo in mente il benessere dei cittadini europei.

#### La cooperazione multilaterale con la IAEA e l'IEA

In Euratom, la cooperazione internazionale sulla fusione si sviluppa a livello bilaterale, nella cornice di accordi governativi, con il contributo del consorzio EUROfusion e, a livello multilaterale, con l'adesione ad organizzazioni internazionali o la partecipazione ad attività sviluppate

nel loro ambito.

Euratom ha un ruolo strategico nella gestione delle relazioni con i partner del progetto ITER<sup>3</sup> – Cina, Giappone, India, Russia, Sud Corea e Stati Uniti – e ne è il maggior contributore con il 45% dei costi totali di costruzione (un quinto dei quali finanziato dalla Francia, in qualità di Paese ospitante e i restanti quattro quinti da Euratom stesso). La quota restante è suddivisa tra gli altri sei partner, con circa il 9% ciascuno.

Un interlocutore di rilievo è l'*International Atomic Energy Agency* (IAEA) che ha avuto un ruolo chiave in particolare nel promuovere e facilitare i negoziati per l'Accordo su ITER e l'avvio delle relative attività di ricerca<sup>4</sup>. L'Agenzia è il forum intergovernativo mondiale per la cooperazione nel settore nucleare e molte delle aree di sua competenza ricadono all'interno del mandato di Euratom. La storica collaborazione fra le due organizzazioni, anche nel settore della fusione, è stata formalizzata con

il *Cooperation Agreement* del 1975 e il *Memorandum of Understanding on Nuclear Safety Cooperation* del 2013<sup>5</sup>. L'Agenzia promuove la collaborazione e il coordinamento nell'area della ricerca sulla fusione attraverso l'*International Fusion Research Council* (IFRC)<sup>6</sup>, un forum consultivo internazionale che riunisce molti degli *stakeholder* del settore. L'IAEA, inoltre, organizza la più importante conferenza internazionale sulla fusione, a cadenza biennale e pubblica il *Nuclear Fusion Journal*.

Euratom ha una lunga e consolidata collaborazione anche con l'*International Energy Agency* (IEA), in considerazione del fatto che l'IEA è stata tra i primi attori internazionali promotori della cooperazione internazionale nella ricerca sulla fusione. In particolare, partecipa alle attività del *Fusion Power Coordinating Committee* (FPCC) che coordina la cooperazione internazionale nell'ambito di otto *Fusion Technology Collaboration*

*Programmes* (TCP)<sup>7</sup> organizzati sotto gli auspici di otto *Implementing Agreements on Fusion Physics and Technology*. Ogni TCP organizza in modo sinergico le attività di ricerca tra i partner internazionali firmatari, in specifici settori. Euratom è parte di tutti e gli otto TCP.

**Di fatto, quindi, la partecipazione di Euratom a queste attività di ricerca in ambito multilaterale rispecchia la visione dei padri costituenti ‘tradotta’ nel Trattato Euratom di aggregare a fattor comune risorse per attività di ricerca con Paesi terzi, al fine di massimizzare i risultati.**

#### **La cooperazione bilaterale e l'accordo Broader Approach con il Giappone**

Per ottimizzare e rafforzare la ricerca europea nel settore della fusione, Euratom ha avviato numerose collaborazioni bilaterali con istituti di ricerca di Paesi terzi partner di *EUROfusion* e stipulato specifici accordi governativi. Fra i più rilevanti, il *Broader Approach Agreement* (BA), firmato nel febbraio 2007 con il Giappone quale sorta di ‘compensazione’ per aver perso la competizione con la Francia come sede di ITER. Il BA disciplina le attività di ricerca e sviluppo da implementare in Giappone, sulla base di tre specifici progetti a supporto del programma sulla fusione, con al centro ITER e la definizione ingegneristica del futuro DEMO. Nell’ottica di aggregare risorse in una prospettiva sinergica internazionale. La prima fase del progetto si è conclusa ed è previsto l’avvio di una seconda fase a partire dal 2020. Il contributo Euratom è stato erogato anche *in-kind* ed è stato fornito principalmente da alcuni Stati

membri su base volontaria (*Voluntary Contributors*) fra cui l’Italia, con un ruolo di rilievo dell’ENEA.

Altri accordi di cooperazione bilaterale di rilievo sono stati sottoscritti con il **Giappone già nel 1988, con gli Stati Uniti – Department of Energy (DoE) nel 2001, con la Russia e l’Ucraina nel 2002, con il Kazakistan nel 2004, la Corea del Sud nel 2006, la Cina nel 2008 (R&D Cooperation Agreement in peaceful Uses of Nuclear Energy), l’India nel 2010 e il Brasile nel 2013.** Si tratta di specifici *Euratom Fusion Cooperation Agreements* (CA) nell’ambito dei quali le parti adottano un *Work Programme* bilaterale, gestito e implementato da un *Coordinating Committee*. Tutte le attività di collaborazione bilaterale sono implementate da EUROfusion, insieme a istituzioni di ricerca e università dei Paesi partner.

Ad esempio la cooperazione con il **Department of Energy degli Stati Uniti (DoE)** riguarda principalmente

ITER e comprende circa duecento attività di ricerca. Le due parti collaborano tra l’altro in tutti e gli otto *Technology Collaboration Programme* della IEA descritti in precedenza. Tale collaborazione bilaterale si inserisce inoltre nell’ambito dell’*EU-US Energy Council* istituito nel novembre 2009 per rafforzare l’impegno UE-USA nella ricerca nel campo della sicurezza energetica e dei cambiamenti climatici e presieduto dall’Alto rappresentante europeo per la politica estera, dal Vice presidente della Commissione per l’Unione dell’Energia, dal Commissario per l’Energia e Clima, dal Ministro degli esteri e dal ministro per l’energia USA. In tale cornice, la fusione è una delle quattro aree prioritarie, tenuto conto del comune obiettivo di Euratom e USA di sviluppare la produzione di energia da fusione quale risorsa sostenibile del futuro.

**L’Accordo bilaterale di cooperazione con l’India** è stato firmato in occasione del decimo summit UE-India del 2009, ma in precedenza erano già state avviate



collaborazioni in aree specifiche. Le due parti collaborano anche in ITER IO e, più di recente, hanno istituito una *task-force* per rilanciare e ottimizzare la collaborazione nell'ambito del JET (*Joint European Torus*).

**Fra i Paesi che più investono nella fusione vi è la Cina, che è diventata un leader indiscusso a livello mondiale per l'ammontare degli investimenti e considera questa tecnologia come particolarmente strategica nell'ambito della propria politica di ricerca. In considerazione delle risorse finanziarie ed umane impiegate nel settore, per il prossimo futuro la Cina potrebbe conquistare la *leadership* in alcune aree della ricerca sulla fusione, scalzando l'Europa.** Per tali ragioni, la Cina è oggi uno dei principali interlocutori di Euratom ma, a differenza di tutti gli altri partner in ITER, non ha firmato uno specifico accordo bilaterale di ricerca sulla fusione con Euratom. Tuttavia, di comune accordo si è deciso di implementare la ricerca nell'ambito dell' "*Agreement between the European Atomic Energy and the Government of the People's Republic of China for R&D*

*Cooperation in the Peaceful Uses of Nuclear Energy"* (*R&D PUNE Agreement*), firmato a Pechino nell'aprile 2008. Per rafforzare la collaborazione, Euratom e Cina hanno anche stipulato una *partnership* strategica nell'ambito della Strategia bilaterale al 2020<sup>8</sup>. Inoltre, a seguito del *R&D Pune Agreement*, le attività in collaborazione sono balzate in pochissimi anni da una dozzina a più di un centinaio.

**Prospettive di interesse possono inoltre derivare dall'accordo di cooperazione firmato con il Brasile che possiede vaste riserve e giacimenti di niobio, un importante materiale per la produzione di magneti superconduttori per la costruzione di future centrali a fusione e persegue il ruolo di attore globale emergente anche nel settore della fusione. Il Brasile non partecipa a ITER ma collabora nell'ambito del JET in attesa di un possibile futuro coinvolgimento nello sfruttamento di ITER.**

## Conclusioni

Quanto fin qui illustrato è conferma che **il successo della ricerca europea nel**

**settore della fusione nucleare è stato possibile grazie, e forse soprattutto, ad un quadro giuridico chiaro e consolidato e ad una solida e ampia cooperazione internazionale, a livello multinazionale e bilaterale.** Di fatto, Euratom ha sviluppato un approccio strategico globale nello scegliere i propri partner e le aree di cooperazione in R&D, tenendo in considerazione l'eccellenza, scientifica e tecnologica, ma anche gli obiettivi di politica esterna dell'Unione, puntando sulla collaborazione internazionale quale strumento principale per affrontare nel modo più efficace le sfide sociali globali. Gli strumenti giuridici che fanno capo al Trattato Euratom hanno permesso, inoltre, di lanciare anche azioni di *science diplomacy*, si pensi all'Accordo di Associazione con l'Ucraina.

Il successo scientifico e tecnologico della ricerca europea nel settore della fusione potrà quindi continuare perseguendo e rafforzando l'approccio sin qui adottato che resta un modello per gli altri settori della ricerca europea, un modello pienamente compiuto dell'Area Integrata della Ricerca Europea.

*marco.franza@enea.it*

- <sup>1</sup> Le basi giuridiche di riferimento sono gli articoli da 4 a 11 del capo I ‘Sviluppo della ricerca,’ e da 101 a 106 del capo 10 ‘Relazioni con l’esterno’ sugli accordi internazionali. A conferma dell’importanza che continua ad essere riservata alla cooperazione internazionale nel settore della ricerca scientifica, la Commissione europea ha dotato nel settembre 2014 una nuova comunicazione ‘Strategia per la cooperazione internazionale nella R&D&I’ che ha confermato l’importanza vitale della cooperazione internazionale nel settore della ricerca. I segnali confermano tale evidenza, infatti la cooperazione internazionale è cresciuta in maniera significativa per tre differenti spinte: l’ascesa di nuovi attori sulla scena globale, l’internazionalizzazione della ricerca e dell’innovazione e l’urgenza di affrontare sfide su scala globale aggregando risorse comuni. Il Programma di Ricerca Horizon 2020, così come il futuro Horizon Europe confermano tale approccio. [https://ec.europa.eu/research/iscp/pdf/policy/com\\_2012\\_497\\_communication\\_from\\_commission\\_to\\_inst\\_it.pdf#view=fit&pagemode=none](https://ec.europa.eu/research/iscp/pdf/policy/com_2012_497_communication_from_commission_to_inst_it.pdf#view=fit&pagemode=none)
- <sup>2</sup> “... la Comunità può impegnarsi mediante la conclusione di accordi o convenzioni con uno Stato terzo, una organizzazione internazionale...”
- <sup>3</sup> ITER International Organization (ITER IO), accordo firmato nel 2006
- <sup>4</sup> Il Direttore Generale dell’IAEA è il depositario del testo originale dell’Accordo
- <sup>5</sup> Il Senior Officer Liaison Committee (SOLC) è l’organo esecutivo del MoU. [https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2013\\_5641\\_f1\\_commission\\_decision\\_en\\_v4\\_p1\\_738743\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2013_5641_f1_commission_decision_en_v4_p1_738743_en.pdf)
- <sup>6</sup> L’IFRC è costituito nella cornice dell’IAEA e sin dal 1971 ha il ruolo di Advisory Body del Direttore Generale su materie oggetto della ricerca nel settore della fusione nucleare
- <sup>7</sup> Environmental, Safety & Economy (ESEFP TCP); Fusion Materials (FM TCP); Nuclear Technology of Fusion Reactors (NTFR TCP); Plasma Wall Interaction (PWI TCP); Reversed Field Pinches (RFP TCP); Spherical Tori (ST TCP); Stellarator-Heliotron Concept (SH TCP); Tokamak Programmes (CTP TCP)
- <sup>8</sup> Dalla Strategia Eu-Cina 2020: [...] “Strengthen cooperation in the multilateral framework of the ITER project and build a strategic bilateral partnership on fusion energy research. Strengthen exchanges and cooperation on nuclear safety, nuclear fuel cycle, nuclear emergency response, nuclear waste management and nuclear security”[...] [https://eeas.europa.eu/delegations/china/15408/travel-eu-china\\_en](https://eeas.europa.eu/delegations/china/15408/travel-eu-china_en)

# Il ruolo della fusione negli scenari di lungo periodo

Gli scenari di lungo periodo mostrano che la fusione, se sarà competitiva dal punto di vista dei costi potrà avere un ruolo significativo nella transizione energetica, in particolare nel caso di traiettorie di decarbonizzazione molto ambiziose. Inoltre, questa tecnologia, seppure ancora lontana, può contribuire a rendere meno complessa la gestione in sicurezza del sistema elettrico del futuro

DOI 10.12910/EAI2019-016

di **Francesco Gracceva**, ENEA, **Chiara Bustreo**, Consorzio RFX, Associazione EURATOM-ENEA sulla Fusione, Padova, Italia, **Yolanda Lechón**, Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas, Madrid, Spain **Markus Biberacher**, Research Studios Austria Forschungsgesellschaft mbH, Salzburg, AUSTRIA, **Danilo Dongiovanni**, ENEA

**N**ella seconda metà del XXI secolo l'energia da fusione può contribuire a soddisfare una quota significativa della domanda elettrica globale. La fusione rappresenta infatti un'opportunità per produrre grandi quantità di energia elettrica con consumi contenuti di combustibile e soprattutto senza emissioni di gas serra. Sebbene si preveda che la fusione non sarà disponibile prima della metà del secolo, ciò non significa che sia prematura la valutazione del suo possibile contributo al sistema energetico del futuro. Questo perché cambiamenti sostanziali

del sistema energetico sono possibili solo nel medio-lungo periodo, perché caratteristiche essenziali di quest'ultimo sono l'inerzia e la *path-dependence* (WEF, 2019). Inoltre, la necessità di una transizione verso un sistema più sostenibile richiede la fissazione di obiettivi energetici e ambientali a medio e lungo termine e l'individuazione di traiettorie di sviluppo del sistema, in termini di combinazione di tecnologie e combustibili, in grado di aiutare a raggiungere tali obiettivi a costi minimi e con il massimo livello di sicurezza energetica. Poiché è impossibile prevedere l'evoluzione di lungo periodo

di un sistema complesso come quello energetico, si è affermato l'utilizzo delle analisi di scenario, che permettono di esplorare le conseguenze che ipotesi diverse sulle variabili chiave (di tipo socio-economico, politico, tecnologico) possono avere sull'evoluzione del sistema.

Il programma di ricerca di EUROfusion prevede al suo interno una attività di ricerca socio-economica (Socio-Economic Studies, SES, <https://collaborators.euro-fusion.org/collaborators/socio-economics/>), al cui centro vi è appunto lo sviluppo di scenari esplorativi finalizzati a investigare il possibile

ruolo delle tecnologie di fusione nel futuro sistema energetico globale.

### Il modello EUROfusion TIMES

I modelli quantitativi del sistema energetico, che rappresentano in modo semplificato il funzionamento del sistema, sono uno dei principali strumenti utilizzati dagli analisti per produrre e valutare scenari alternativi del sistema, sia per attività di ricerca sia a supporto delle scelte di policy. Essi rendono infatti possibile simulare l'evoluzione del sistema sotto diverse ipotesi e vincoli, al fine ad esempio di esplorare le condizioni necessarie perché si sviluppino determinate traiettorie tecnologiche, o di individuare strategie “robuste” rispetto a un insieme di possibili traiettorie alternative.

Il programma SES di Eurofusion ha al suo centro lo sviluppo e l'utilizzo di un modello del sistema energetico globale, il modello ETM (EUROfusion TIMES model), basato sul generatore di modelli TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) sviluppato dal programma Energy Technology Systems Analysis Programme (ETSAP) dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (Loulou et al. 2016). La prima versione del modello ETM fu sviluppata nel 2004 (ORDECSYS, 2004) e da allora le successive modifiche hanno continuato a riflettere i cambiamenti in corso nei mercati dell'energia. Una motivazione importante di questo lavoro sta nel fatto che la fusione è stata finora raramente considerata nella letteratura sugli scenari di lungo periodo del sistema energetico globale. Il modello ETM è un modello dell'intero sistema energetico globale, diviso in 17 regioni, di cui simula l'evoluzione fino al 2100. Esso include una rappresentazione

molto dettagliata delle tecnologie che caratterizzano il sistema energetico, dall'approvvigionamento delle fonti primarie ai processi di conversione, trasporto e distribuzione dell'energia, fino ai dispositivi di uso finale per la fornitura dei servizi energetici (per ogni regione sono descritte più di un migliaio di tecnologie energetiche).

### L'analisi di scenario

La letteratura evidenzia come i sistemi economici, sociali e tecnologici non posseggano le caratteristiche necessarie perché sia possibile costruire modelli che siano *validabili*, per cui qualunque modello utilizzato per prevedere il futuro di questi sistemi è inevitabilmente destinato ad essere *inaccurato* (Hodges e Dewar, 1992). Per aggirare questo limite strutturale si è affermato l'uso delle analisi di scenario. Gli scenari non sono *previsioni*, ma “alternative image of how the future could unfold” (IIASA WEC, 1997), ciascuna delle quali basata su un insieme di ipotesi internamente coerenti circa le variabili chiave del sistema e le relazioni che le legano, ipotesi derivate dall'esperienza storica e dunque corrispondenti allo stato attuale delle conoscenze.

Per questo lavoro l'individuazione degli scenari da esplorare è partito dall'elaborazione di alcune *storylines*, cioè descrizioni discorsive di possibili evoluzioni future del sistema costruite attorno a ipotesi diverse su quattro “incertezze critiche”, cioè fattori che si suppone possano avere un'importanza notevole per lo sviluppo della fusione e che allo stesso tempo sono caratterizzati da un elevato grado di incertezza:

- la stringenza degli obiettivi di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>,

da cui deriva una propensione più o meno marcata alla diffusione delle tecnologie low-carbon;

- la sensibilità e responsabilità ambientale degli attori del sistema economico, da cui deriva una propensione più o meno marcata alla crescita della domanda di servizi energetici;
- la disponibilità degli operatori a prendere decisioni di investimento con un'ottica di lungo piuttosto che di breve periodo, da cui deriva una maggiore o minore propensione all'investimento in tecnologie con tempi di ritorno dell'investimento anche non brevi;
- il grado di interconnessione e cooperazione fra le regioni del mondo, da cui può derivare una maggiore possibilità di minimizzare il costo del raggiungimento di obiettivi climatici stringenti.

La combinazione delle diverse ipotesi relative a queste *incertezze critiche* ha portato alla definizione di tre famiglie di scenari, una delle quali declinata in due varianti:

- *storyline Harmony*: un mondo nel quale viene condivisa una traiettoria di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> molto stringente, coerente con il Representative Concentration Pathway 2.6 dell'IPCC (l'unico in linea con l'obiettivo di contenere l'incremento della temperatura globale ben al di sotto dei 2 °C; Figura 1; IPCC 2014), grazie alla diffusa sensibilità ambientale degli operatori, che li induce ad un'ottica di lungo periodo negli investimenti, e alla cooperazione tra regioni del mondo;
- *storyline Paternalism*: un mondo nel quale l'obiettivo di una forte riduzione delle emissioni è solo parzialmente condiviso da tutta la popolazione mondiale, per cui la sensibilità ambientale è differenziata

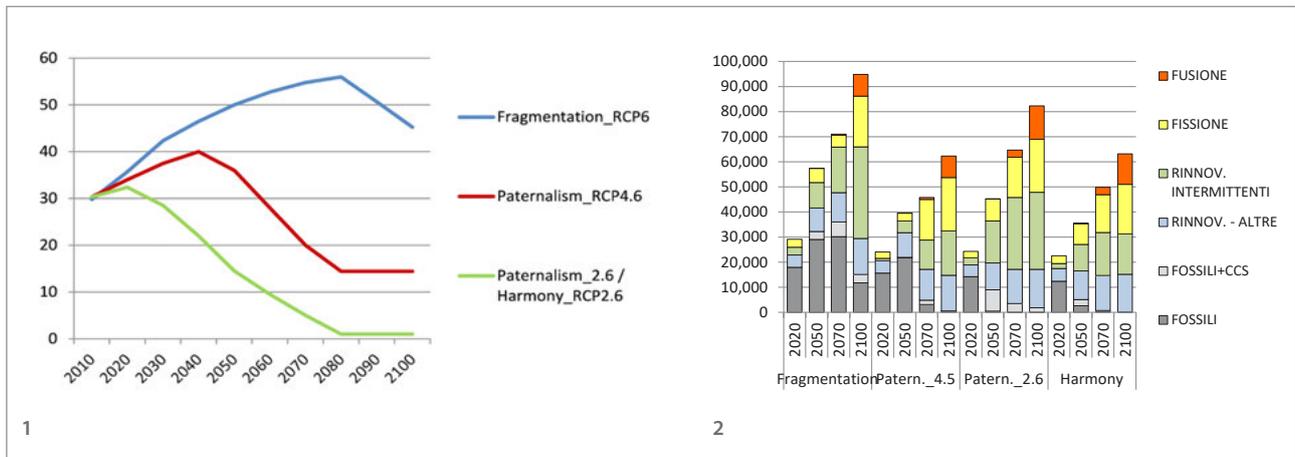


Fig. 1 Traiettorie delle emissioni di CO<sub>2</sub> nelle tre storyline (Gt di CO<sub>2</sub>); Fig. 2 Generazione elettrica nelle diverse storyline (scenario O2)

tra le regioni del pianeta e le decisioni di investimento hanno un'ottica di medio periodo; due varianti sono possibili riguardo alla traiettoria delle emissioni di CO<sub>2</sub>, a seconda della capacità dei decisori di “imporre” ai consumatori cambiamenti non completamente condivisi: una traiettoria corrispondente al RPC 4.5 dell'IPCC e una al RPC 2.6 (Figura 1);

- storyline *Fragmentation*: un mondo caratterizzato da debole sensibilità ambientale, nel quale gli operatori adottano un'ottica di breve periodo nelle loro decisioni di investimento; inoltre, gli obiettivi di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> sono poco stringenti e fissati a livello regionale.

## Risultati

Ogni storyline rappresenta il contesto di riferimento di un ampio numero di scenari (24), costruiti combinando ipotesi diverse circa alcune tecnologie energetiche di particolare rilievo:

- L'effettiva disponibilità o meno della fusione come tecnologia di generazione elettrica entro la fine de secolo, nel primo caso con due

diverse ipotesi riguardo ai suoi costi.

- L'effettiva disponibilità su larga scala di impianti di generazione elettrica con cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>, tenendo conto che secondo la IEA la tendenza attuale è decisamente non in linea con quella del Sustainable Development Scenario (<https://www.iea.org/tcep/power/ccus/>).
- Il potenziale di sviluppo del nucleare a fissione, legato all'accettazione sociale della tecnologia, con ipotesi estreme che vanno dalla realizzabilità di un parco nucleare pari su scala globale a più di cinque volte quello attuale a un parco invece perfino più ridotto dell'attuale.
- L'inclusione dei costi esterni nei costi di investimento e di O&M delle diverse tecnologie di generazione elettrica.

Lo spettro di scenari elaborati permette di esplorare un ampio insieme di possibili traiettorie del sistema energetico globale e di provare individuare alcune possibile condizioni necessarie perché la fusione possa avere un ruolo di rilievo. In tutti gli scenari analizzati la fusione è resa disponibile dal 2050. Tuttavia, la logica di minimizzazione dei costi del sistema fa sì che fino al 2060 la fusione

non vada oltre valori relativamente marginali, per gli elevati costi di investimento dei primi anni.

## La fusione nelle diverse storyline

Il primo risultato dell'analisi è che è possibile descrivere diversi scenari nei quali la fusione può avere una parte significativa del futuro sistema energetico. La Figura 2 mostra come le diverse tecnologie di generazione elettrica partecipano all'evoluzione del fuel mix del sistema elettrico nel tempo nelle tre storyline (una delle quali, Paternalism, nelle due varianti relative alle emissioni di CO<sub>2</sub>). Il confronto è effettuato considerando per ogni storyline lo scenario O2, che prevede la disponibilità della CCS e ipotesi ottimistiche sia sul potenziale del nucleare a fissione sia sui costi della fusione.

La famiglia di scenari *Fragmentation* mostra un mondo nel quale la domanda di elettricità è decisamente più elevata rispetto alle altre famiglie di scenari, sia perché è decisamente maggiore la domanda di servizi energetici, che sconta la scarsa sensibilità ambientale ipotizzata in questa storyline, sia perché sono

minori gli incrementi di efficienza energetica del sistema (penalizzati dall'ottica di breve periodo delle scelte di investimento). A ciò si aggiunge un vincolo molto blando sulla traiettoria di emissioni di CO<sub>2</sub>, che possono continuare a crescere fino al 2080, con la conseguenza di un largo uso di fonti fossili.

Lo scenario *Fragmentation\_02* descrive dunque un sistema elettrico nel quale ancora nel 2070 poco meno della metà della generazione elettrica proviene da fonti fossili, sebbene questa scenda poi rapidamente negli ultimi decenni del secolo, restando tuttavia in termini assoluti su valori ancora significativi. In questa storyline si registra inoltre una significativa produzione di energia da impianti con CCS fin quasi alla fine dell'orizzonte temporale. Le rinnovabili presentano comunque un crescita costante, e sebbene fino al 2070 restino più indietro rispetto alla penetrazione che si registra nelle altre storyline, alla fine dell'orizzonte temporale arrivano a circa 50 PWh, il massimo delle diverse storyline, con una quota della produzione totale superiore al 50%, un valore maggiore di quello che si registra nello scenario 02 delle famiglie *Paternalism\_4.5* e perfino *Harmony* (la famiglia con il più ambizioso obiettivo climatico).

Quanto alla fusione, in questa storyline tende a svilupparsi solo alla fine dell'orizzonte temporale, e l'elevata domanda elettrica fa sì che il suo contributo al mix resti al di sotto del 10%, il valore più basso dei quattro scenari rappresentati in Figura 2. Lo stesso vale per la fissione, che però si sviluppa fino al valore corrispondente all'ipotesi della massima diffusione della tecnologia (pari a circa cinque volte l'attuale). La combinazione di forte crescita della domanda e

di limiti allo sviluppo della fissione spiega dunque la forte crescita delle rinnovabili che nel lungo periodo si registra in questo scenario.

Le due varianti della famiglia di scenari *Paternalism* producono risultati piuttosto diversi tra loro, legati fondamentalmente alla notevole differenza nel tasso di elettrificazione del sistema. Nel caso *Paternalism\_4.5* il vincolo ambientale molto meno stringente riduce infatti la necessità di elettrificazione, cosicché alla fine del secolo la domanda di energia elettrica è dell'ordine dei 60 PWh, mentre nel caso *Paternalism\_2.6* la domanda supera gli 80 PWh (+30%). Nel caso *Paternalism\_4.5* il nucleare a fissione si colloca di nuovo sulla produzione massima ipotizzata nell'analisi, ma grazie alla minore domanda elettrica esso rappresenta ora una quota molto elevata del fuel mix (34%), mentre la produzione da rinnovabili raggiunge il 50% (circa 30 PWh) e la fusione resta al di sotto dei 10 PWh, pur superando comunque alla fine del secolo il 10% del mix. Il caso *Paternalism\_2.6* porta a una produzione da rinnovabili molto maggiore che nel caso precedente (45 PWh, +50%), perché di nuovo la capacità installata del nucleare a fissione raggiunge il potenziale massimo ipotizzato. A beneficiare della combinazione di maggiore elettrificazione e del più stringente vincolo ambientale è anche la fusione, che in questo scenario raggiunge il valore più elevato in termini assoluti (più di 13 PWh), sebbene non in termini relativi. È interessante infine come questo sia anche lo scenario nel quale è maggiore la produzione da impianti con CCS alla metà del secolo (fino a 1/5 del totale), perché in quella fase la forte elettrificazione li rende evidentemente necessari per

superare i vincoli che non permettono incrementi ulteriori della generazione da rinnovabili e da fissione. Dopo il 2070, quando tra l'altro aumenta via via la disponibilità della fusione, gli impianti fossili con CCS sembrano invece non in grado di competere con nessuna delle alternative.

Lo scenario 02 della famiglia *Harmony* è simile allo scenario 02 della famiglia *Paternalism\_2.6*, ma si caratterizza per una produzione di elettricità inferiore, grazie all'ipotesi di forte responsabilità ambientale che, nonostante la spinta all'elettrificazione proveniente dall'ambizioso obiettivo ambientale, riduce la domanda di servizi energetici. Ne beneficia il ruolo del nucleare, sia da fissione sia da fusione, la cui competitività è maggiore rispetto a rinnovabili e CCS: la fissione supera in questo scenario il 30% del mix, sebbene resti al di sotto della produzione massima registrata in altri scenari, mentre la fusione raggiunge in questo scenario il suo massimo in termini di quota sul fuel mix, avvicinandosi al 20%. La storyline *Harmony* è dunque quella in cui, in modo parzialmente controintuitivo, risulta relativamente più bassa la quota di produzione da rinnovabili. La più contenuta domanda elettrica comporta invece che la generazione da nucleare e da rinnovabili sia sufficiente a soddisfare la domanda senza necessità di ricorso alla generazione da fossili con CCS, la quale peraltro, avendo un fattore di emissione di CO<sub>2</sub> non nullo, è incompatibile con la necessità di azzeramento delle emissioni che caratterizza questa storyline.

Il ruolo della fusione nel mix elettrico globale sembra dunque strettamente legato al futuro percorso di decarbonizzazione: quanto più quest'ultimo è ambizioso tanto maggiore

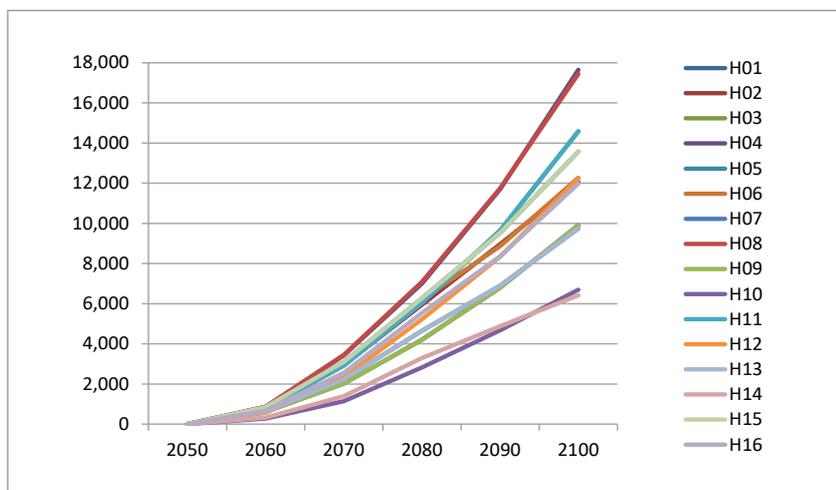


Fig. 3 Generazione elettrica da fusione negli scenari "Harmony" (TWh)

è il ruolo della fusione. Gli scenari 02 dello storyline Harmony e Paternalism\_2.6 implicano l'installazione entro il 2100 di ben più di un migliaio di impianti di nucleare a fusione da 1 GW.

### La fusione negli scenari RCP 2.6

I 24 scenari elaborati per ogni storyline (Figura 3) permettono di valutare anche l'importanza relativa che sul possibile sviluppo della fusione possono avere alcuni altri fattori più propriamente legati all'evoluzione delle tecnologie alternative disponibili in futuro: il costo della fusione, la diffusione della fissione, la disponibilità della CCS, l'inclusione dei costi esterni in tutte le tecnologie di generazione. Infine, l'ipotesi di completa indisponibilità della fusione almeno per tutto l'orizzonte temporale dell'analisi permette di valutare quanto la fusione possa cambiare il fuel mix globale.

Figura 3: Generazione elettrica da fusione negli scenari 'Harmony' (TWh)

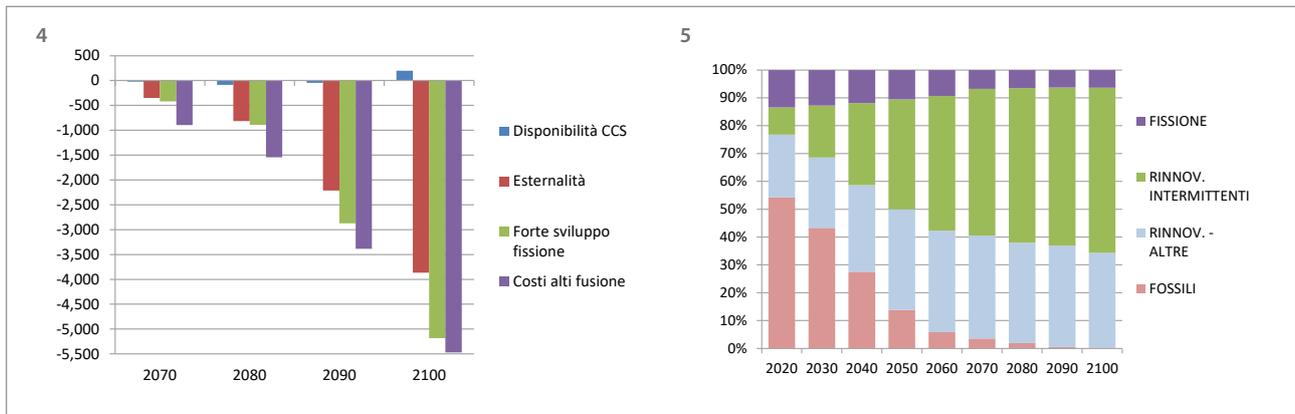
La Figura 3 mostra come la combinazione delle diverse ipotesi,

applicate in questo caso alla storyline Harmony, produca traiettorie di sviluppo dell'elettricità da fusione molto differenziate, con la produzione che alla fine del secolo va da un minimo di 6.000 TWh a un massimo di 18.000 TWh. In termini di importanza relativa, nello scenario meno favorevole (H14) la fusione arriva a rappresentare il 5% del mix nel 2080 e il 10% nel 2100, mentre nei due scenari più favorevoli (H04 e H08) la fusione supera ampiamente il 10% del mix già nel 2080 e a fine secolo si avvicina alla soglia del 30%. La Figura 4 mostra come varia la generazione elettrica da fusione in relazione al variare delle ipotesi sui quattro fattori descritti sopra. Lo scenario che costituisce il punto di partenza dell'analisi è lo scenario H08, come detto uno dei due scenari più favorevoli per la fusione, grazie alle ipotesi di assenza della CCS e di diffusione limitata del nucleare da fissione (in questo scenario la produzione eolica e solare decrescono rapidamente con il progressivo sviluppo della fusione). Dalla Figura 4 emerge chiaramente come il fattore

che ha la maggiore influenza sulle prospettive della fusione sia come prevedibile il costo al quale la fusione stessa sarà disponibile. Nell'ipotesi di costi di investimento maggiori del 30% rispetto all'ipotesi di riferimento, la produzione elettrica da fusione perde più di 5 PWh, con una quota del fuel mix che a fine secolo resta al di sotto del 20% (rispetto al 28% dello scenario H08). A parità di produzione da fissione, vincolata per ipotesi a valori simili agli attuali, il maggior costo di investimento determina infatti la sostituzione di generazione da fusione con eolico e solare.

La rimozione dell'ipotesi di un limite stringente allo sviluppo della fissione mostra come questo sia un altro fattore di rilievo per le prospettive della fusione, sebbene un'indagine più accurata porti a individuare la possibilità che tra fissione e fusione vi possa essere in realtà un rapporto sinergico (vedi oltre).

Anche l'internalizzazione delle esternalità ambientali nei costi delle diverse tecnologie di generazione elettrica può avere un'influenza di rilievo sullo sviluppo della fusione, perché sembra beneficiare l'eolico a scapito della fusione. Ma questo risultato sembra in realtà meno robusto, perché l'influenza di questo fattore risulta molto meno marcata se si cambia la storyline di riferimento. Infine, ha invece un impatto pressoché nullo sulla fusione la disponibilità o meno della CCS, che come si è visto sopra sembra avere un ruolo di rilievo soprattutto nella fase centrale del secolo. Nel lungo periodo, invece, se si accettano le valutazioni più recenti, che prevedono costi di investimento destinati a rimanere elevati (IEA 2016), la necessità di completa decarbonizzazione viene ad essere



soddisfatta pressoché interamente dalla combinazione di forte sviluppo delle rinnovabili e del nucleare a fissione e fusione, anche nell'ipotesi di forte elettrificazione e di stringente obiettivo climatico.

### Rinnovabili intermittenti e fusione

I risultati di quest'analisi di scenario permettono infine di formulare una prima preliminare risposta a un'ultima questione spesso posta riguardo alle prospettive della fusione, cioè quella relativa alla possibilità che, visto l'orizzonte temporale ancora lungo di tale tecnologia, essa possa divenire effettivamente disponibile quando ormai il sistema energetico ha già trovato una configurazione conforme alle necessità della transizione energetica, anche grazie ai miglioramenti nella competitività delle tecnologie rinnovabili.

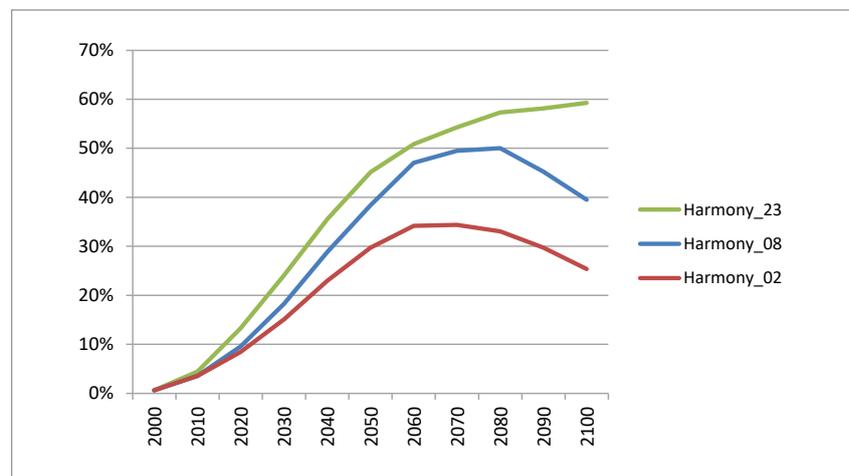
La valutazione dell'insieme degli scenari porta a ritenere che potrebbe trattarsi in realtà di una questione forse non appropriata, perché non coglie alcuni dati di rilievo.

In primo luogo, i risultati mostrano come nel lungo periodo la logica di

minimizzazione dei costi del sistema conduca a includere la fusione nel mix energetico anche nel caso di ampia diffusione della fissione e di disponibilità della CCS.

In secondo luogo, la disponibilità della fusione permette di delineare traiettorie di decarbonizzazione che hanno un impatto più contenuto sulle necessità di flessibilità del sistema elettrico. Nei due scenari più "estremi" dell'analisi qui condotta, gli scenari H23 e H24, che rappresentano un caso nel quale il sistema energetico globale deve raggiungere

una completa decarbonizzazione facendo affidamento pressoché esclusivamente sulle fonti rinnovabili (perché fusione e CCS non sono disponibili, mentre la fissione è limitata per ipotesi ai livelli attuali per ragioni di accettabilità sociale), la quota di elettricità da fonti rinnovabili cresce in modo lineare fino al 2060, e continua a crescere ancora nei decenni successivi, fino a raggiungere il 60% del mix (Figura 5). Questa quota costantemente crescente di produzione da fonti rinnovabili deve essere assorbita



e gestita in sicurezza dal sistema elettrico. Si tratta di una cosa non banale, perché la generazione intermittente “bring a major source of affordable, low-emission electricity into the picture, but create additional requirements for the reliable operation of the system” (IEA, *World Energy Outlook 2018*, p. 23). In questa configurazione del sistema si rende dunque necessaria la disponibilità di una quota di generazione flessibile per garantire la possibilità di gestire in sicurezza il sistema elettrico. Le necessità di flessibilità del sistema elettrico non sono però rappresentate nel modello ETM, nel quale la caratterizzazione del sistema elettrico non include i parametri relativi alle caratteristiche operative di funzionamento del sistema (rampe, tempi di accensione e spegnimento, tempi di permanenza in servizio, ecc...). Ne consegue che

la conclusione circa la fattibilità di un sistema elettrico globale nel quale le fonti intermittenti coprano il 60% della domanda, con punte dell'80% a livello regionale (come avviene nei suddetti scenari H23 e H24), richiede di essere testata analizzandone più in dettaglio l'impatto sul funzionamento operativo del sistema.

Due varianti di questi scenari potenzialmente “critici” mostrano come la fusione, anche se disponibile solo nell'ultima parte del secolo, possa comunque avere un ruolo utile nel sistema energetico del futuro, in particolare laddove può prendere gradualmente il posto della fissione:

- Lo scenario H02, nel quale la fusione è disponibile e la fissione può svilupparsi ben oltre i livelli attuali, descrive infatti una traiettoria del sistema nel quale la trasformazione del sistema elettrico è molto meno

accentuata che negli scenari H23/H24 (Figura 6); la crescita della quota di rinnovabili intermittenti è infatti decisamente più lenta, mentre la fusione, una volta disponibile, tende sostanzialmente a sostituire la fissione, che dunque ha nel corso del secolo un ruolo di “bridge technology”.

- Laddove invece la fissione fosse limitata ai livelli attuali (scenario H08), la crescita delle rinnovabili intermittenti sarebbe fino ad oltre metà secolo simile al caso H02, dunque con le stesse potenziali problematiche legate al cambiamento strutturale del sistema elettrico imposto da questo scenario. Inoltre, negli ultimi due decenni del secolo, con l'accelerazione della penetrazione della fusione, il ruolo delle intermittenti tornerebbe a ridursi drasticamente, dunque con la necessità di un ritorno a un modello del sistema elettrico più simile all'attuale.

## BIBLIOGRAFIA

1. Hodges J., Dewar J., *Is it you or your model talking? A framework for model validation*, 1992, RAND, USA.
2. IEA, *Nuclear power in a clean energy system*, May 2019
3. IEA, *World Energy Outlook 2016*, Paris
4. IEA, *World Energy Outlook 2018*, Paris
5. IASA-WEC, *Global Energy Perspectives*, ed. by Nakicenovic N., Grubler A., McDonald A, 1998, Cambridge University press
6. IPCC, 2014, *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland
7. Loulou, R. et al., *Documentation for the TIMES model*, 2016, Energy Technology Systems Analysis Programme, <http://www.iea-etsap.org/web/Documentation.asp>
8. ORDECSYS, *EFDA World TIMES Model*, Final Report, October 14, 2004, Prepared by, ORDECSYS, KanORS, HALOA, KUL, [https://www.euro-fusion.org/fileadmin/user\\_upload/Archive/wp-content/uploads/2014/12/R37EFDA-final-report\\_oct\\_14.pdf](https://www.euro-fusion.org/fileadmin/user_upload/Archive/wp-content/uploads/2014/12/R37EFDA-final-report_oct_14.pdf)
9. WEF, *Insight Report - Fostering Effective Energy Transition 2019 edition*, <http://reports.weforum.org/fostering-effective-energy-transition-2019/the-scale-and-complexity-of-energy-transition>

# Le interviste

## «L'Europa sta già raccogliendo benefici dalla ricerca sulla fusione»

L'Europa ha conquistato una forte leadership nel settore della fusione e sta già raccogliendone i benefici in termini di innovazione, know how tecnico-scientifico, nascita di nuovi settori industriali e di figure professionali altamente specializzate. E per un futuro non lontano, con la realizzazione di ITER e la prospettiva di DEMO, la aspettano “momenti straordinari”. È quanto afferma una delle principali protagoniste europee della ricerca sulla fusione, Elena Righi-Steele, Responsabile dell'Unità Ricerca Euratom nella Direzione generale Ricerca e Innovazione della Commissione UE



Intervista a **Elena Righi-Steele**

**Nel panorama della ricerca sulla fusione, un posto di rilievo è occupato da Elena Righi-Steele, ricercatrice italiana molto stimata per la sua capacità di ‘collegare’ studi teorici e test operativi, è attualmente la Responsabile dell'Unità Ricerca Euratom nella Direzione generale Ricerca e Innovazione della Commissione UE. Un esempio di successo della ricerca europea, la comunità Euratom sulla fusione, può diventare un modello per tutto il settore anche in vista dell'imminente avvio del Programma Quadro Horizon Europe?**

La comunità scientifica della fusione, con la creazione di EUROfusion, ha dimostrato come un intero settore della ricerca europea può unire le forze verso un unico obiettivo: produrre energia e immetterla in rete, percorrendo, insieme ad Euratom, la roadmap delineata. Mentre un numero crescente di progetti europei viene gestito da agenzie esecutive, il programma Euratom sulla fusione ha evidenziato che esiste una

modalità diversa, in cui è la ‘comunità’ nel suo insieme ad assumersi la responsabilità di raggiungere il traguardo prefissato: questa capacità di unire programmazione e co-finanziamenti è divenuta un paradigma da seguire all'interno e all'esterno di Euratom.

**Quali sono stati i risultati più importanti ottenuti in questi ultimi anni?**

L'elenco dei risultati e degli obiettivi raggiunti è lungo; fra questi vorrei evidenziare, in particolare, la capacità di passare, dall'oggi al domani, da contratti di associazione individuali a un'unica grande partnership, imparando a gestirla a livello operativo senza per questo cessare la produzione di risultati scientifici. Da questo punto di vista, ritengo che EUROfusion sia riuscito a dimostrare le proprie capacità in molte aree della roadmap verso la fusione grazie anche a scelte innovative come la decisione – insieme a Fusion for Energy – di passare da un sistema di raffreddamento

damento del *breeding blanket*<sup>1</sup> a elio, a un sistema ad acqua, allineando così le attività del Test Blanket Module per ITER alla strategia di R&S per DEMO. È stata una scelta coraggiosa che ha consentito all'Europa di mantenere una leadership mondiale in quest'area strategica. Un altro esempio è DONES (Demo Oriented NEutron Source), un'infrastruttura essenziale per qualificare e testare i materiali dei reattori a fusione che ha confermato la capacità della comunità europea della fusione di sviluppare nuove iniziative nel pieno rispetto del Programma Broader Approach e dell'eccellente rapporto con il Giappone. L'IFMIF LI-PAC<sup>2</sup> è in funzione e fornirà risultati fondamentali nei prossimi anni; nel frattempo, gli Stati membri hanno accantonato le divergenze e unito le forze per inserire DONES nella roadmap delle infrastrutture di ricerca di rilevanza europea. Stanno inoltre gettando le basi affinché DONES possa essere realizzato in Europa.

**Il percorso per completare la roadmap sembra ancora molto lungo e complesso, con numerosi passaggi fra i quali la realizzazione di ITER...**

I risultati raggiunti sino ad oggi hanno consentito di gettare buone e solide fondamenta per il futuro. La comunità europea della fusione deve proseguire e consolidare il supporto a ITER che rappresenta un vero e proprio obiettivo intermedio nel percorso verso DEMO: ITER sarà un successo e ha bisogno dell'impegno di tutti. L'Europa è e rimarrà "l'azionista di maggioranza" di questa impresa: abbiamo le risorse, le capacità intellettuali e la creatività per essere leader anche nella fase operativa di ITER. Da questo progetto stiamo già imparando molto e tutto ciò deve diventare parte integrante del lavoro preparatorio per DEMO: per garantire la realizzazione della roadmap nei tempi previsti, dobbiamo rafforzare e concentrare la R&S e la progettazione per DEMO in modo organico e coordinato, per quanto possibile, e dobbiamo riuscire a lavorare di più con l'industria di settore e gli enti normativi. Tra i risultati positivi vorrei citare anche la Neutral Beam Test Facility a Padova, con i suoi banchi di prova SPIDER e MITICA: ci aspettano momenti straordinari!

**Come dovrà essere, a suo giudizio, la progettazione di DEMO?**

Una "provocazione" che vorrei fare, anche rischiando un'eccessiva semplificazione, è che se vogliamo ga-

rantire la fattibilità a livello industriale, la progettazione di DEMO dovrà prevedere sin dall'inizio caratteristiche di standardizzazione e semplificazione. Perché per il prototipo di un reattore a fusione non vanno bene soluzioni complesse e che non si possano gestire con facilità. E questa è senza dubbio una sfida. Alla fine del prossimo Programma Quadro vorrei che il DEMO Project Office presentasse un progetto di pre-fattibilità di DEMO per la prima revisione.

**Intravede criticità?**

Un aspetto che a mio avviso diventerà critico nei prossimi anni è la protezione della proprietà intellettuale: per definizione, la collaborazione scientifica è aperta e le soluzioni nascono in un ambiente creativo, stimolante e collaborativo. Tuttavia, non dobbiamo dimenticare che la roadmap è solo un mezzo per arrivare alla realizzazione di una centrale a fusione per la produzione commerciale di elettricità. La comunità della fusione deve valutare accuratamente come bilanciare il dibattito scientifico con la tutela dei propri interessi.

**È soddisfatta dell'attuale collaborazione internazionale o ritiene che Euratom debba essere più ambiziosa e proattiva in vista delle sfide dei prossimi anni?**

La forza degli accordi Euratom è di essere una cornice di riferimento stabile per identificare le aree di interesse comune fra i principali partner internazionali, anche se i singoli Stati membri possono stipulare, e di fatto stipulano, accordi bilaterali in differenti aree di S&T. Tuttavia, per quanto riguarda la collaborazione internazionale, dovremmo delineare una strategia e iniziare a chiederci "in che modo i nostri partner possono contribuire alla roadmap?", confrontandoci con occhi ben aperti, sapendo sin dall'inizio ciò che vogliamo, negoziarlo e ottenere una soluzione reciprocamente vantaggiosa.

**A suo avviso, quale ruolo avrà DTT nel raggiungimento della roadmap europea?**

Una delle maggiori sfide per DEMO è la gestione del calore residuo e il DTT avrà un ruolo chiave in questa direzione, per testare i materiali esposti al plasma, vari tipi di divertori e arrivare a una soluzione integrata. Come responsabile dell'Unità di ricerca sulla fusione di Euratom, voglio sottolineare l'importanza

Seguirò i progressi del DTT con grande interesse e sono impaziente di vedere il primo plasma e i suoi risultati.

**Un vecchio detto recita “l’energia da fusione è l’energia del futuro e lo sarà sempre”. Battuta a parte, alcuni ritengono che l’elettricità da fusione a confinamento magnetico potrebbe essere la soluzione per tutto ma non contribuirà significativamente alla fornitura di energia almeno fino alla seconda metà del secolo. Qual è la sua opinione?**

Beh, se vogliamo continuare a scherzare, direi che oramai alla fusione mancano solo 30 anni, non 50, visto che ITER diventerà operativo nel 2035 e che la progettazione di DEMO avverrà sulla base dei suoi risultati. Al di là delle battute, dobbiamo essere molto onesti e spiegare con semplicità agli esponenti politici e ai cittadini che abbiamo un piano e sappiamo come realizzarlo, ma che vi sono difficoltà oggettive, perché molto spesso dobbiamo costruire gli strumenti necessari per risolverle, allungando i tempi. Dobbiamo riuscire a spiegare perché è così complicato e impegnativo sviluppare la fusione come fonte di energia, una vera e propria sfida titanica. Quando

dico che il nucleo del sole è a 15 milioni di gradi centigradi, mentre il nucleo di un reattore a fusione è a 150 milioni di gradi, la difficoltà della sfida comincia a essere compresa.

**La fusione potrà a suo giudizio contribuire al raggiungimento degli obiettivi europei per contrastare il cambiamento climatico?**

L’energia da fusione non potrà dare un contributo in questa direzione entro il 2050, ma è senz’altro un pilastro della strategia a più lungo termine per poter produrre energia elettrica sostenibile, senza emissioni di CO<sub>2</sub>. Inoltre, l’assenza di scorie radioattive da smaltire e la sicurezza intrinseca delle centrali a fusione consentiranno di realizzarle dove più sono necessarie, ad esempio per servire grandi città o zone industriali. Nel frattempo, occorre evidenziare ai cittadini e ai rappresentanti politici che l’Europa sta già raccogliendo benefici dalla ricerca sulla fusione, in termini di sviluppo di nuovi e innovativi settori industriali, di know-how e di figure professionali altamente specializzate.

<sup>1</sup> È la copertura interna del ‘contenitore’ del reattore che deve essere in grado di sopportare un intenso flusso di neutroni oltre a temperature estremamente elevate; nelle sperimentazioni per il raffreddamento, si è deciso di sostituire l’Helium Cooled Lithium Lead Test Blanket Module con il Water Cooled Lithium Lead Test Blanket Module

<sup>2</sup> Struttura prevista dal Broader Approach

# «Vogliamo portare la superconduttività ‘dentro’ i processi industriali»

Magneti per acceleratori di ricerca, per l'energia, per applicazioni medicali. E magneti superconduttori per confinare il plasma e realizzare il 'sogno' della fusione nucleare. Da oltre 50 anni è questa la 'specialità' di ASG Superconductors, società della famiglia Malacalza con tre stabilimenti altamente specializzati in Liguria dove si realizzano magneti che vengono poi spediti fino in Giappone per il progetto Broader Approach e verso la Francia per la centrale ITER in costruzione a Cadarache



Intervista a **Davide Malacalza**, *Presidente di ASG Superconductors*

**Magneti per acceleratori di ricerca, per l'energia, per applicazioni medicali. E magneti superconduttori per la fusione nucleare. Da oltre 50 anni è questa la 'specialità' di ASG Superconductors, società della Famiglia Malacalza con tre stabilimenti in Liguria dove si costruiscono magneti, da 10 centimetri fino a 25 metri per 300 tonnellate di peso; sono dell'ASG il magnete più potente al mondo per lo studio del cervello, componenti per il CERN di Ginevra, del Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica di Pavia e dieci dei 19 magneti superconduttori per ITER. Ma come è nato l'interesse di ASG per il mondo della fusione nucleare controllata? Lo abbiamo chiesto al Presidente di ASG, Davide Malacalza**

ASG è da sempre un punto di riferimento mondiale per la progettazione e la realizzazione di componenti superconduttivi dedicati alla ricerca della fusione nucleare e

nel campo della fisica delle alte energie. La superconduttività è la tecnologia indispensabile per la produzione di campi magnetici elevatissimi, come quelli necessari per la fusione nucleare e per raggiungere il "confinamento" del plasma. La realizzazione di questi magneti richiede capacità progettuali e costruttive uniche che abbiamo maturato in oltre 60 anni di storia. Si tratta di un know-how frutto di un'azione combinata tra più punti di forza: gli investimenti nella formazione delle risorse umane di alto profilo scientifico all'interno dell'azienda; la lavorazione di materiali in condizioni termiche, meccaniche ed elettriche estreme e, infine, le capacità logistiche legate al trattamento e movimentazione di oggetti rilevanti per dimensioni, peso e tolleranze in gioco.

**Quale è il contributo che state dando ai grandi progetti in questo settore?**

Per il progetto ITER, in particolare, abbiamo fatto gran-

di investimenti costruendo nel 2012, presso La Spezia, un nuovo stabilimento con 28.000 mq e dotato di *clean area*, spazi e attrezzature di movimentazioni adatte alle grandi dimensioni delle TF Coils. La nuova facility dispone di un immediato accesso alla rete autostradale ed al porto per facilitare la spedizione al sito finale di utilizzo.

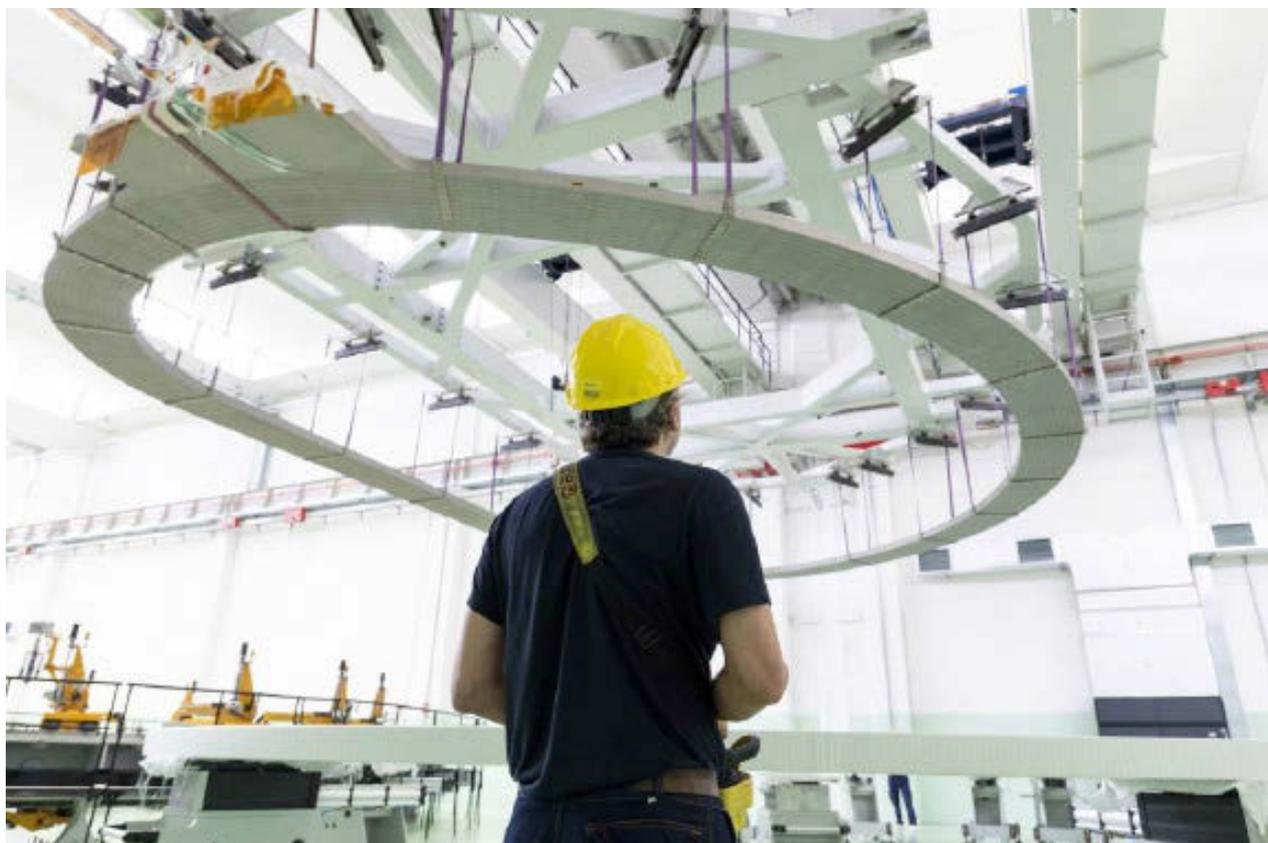
**Qual è stata sin qui la vostra esperienza di collaborazione con il mondo della ricerca a livello nazionale e internazionale?**

È evidente che per ASG la fusione nucleare rappresenta un'opportunità di business nella ricerca scientifica, ma anche una speranza di ulteriore crescita futura. ASG ha contribuito, nel corso della sua storia, alla realizzazione di molteplici esperimenti che hanno gettato le basi scientifiche per l'ideazione e la realizzazione di grandi progetti internazionali come ITER e Broader Approach. In questo lungo percorso, lo scam-

bio culturale e tecnologico con il "mondo della ricerca" è stato non solo virtuoso, ma è cresciuto a tal punto da essere diventato spesso bidirezionale, sia in fase progettuale che realizzativa, attraverso lo scambio di conoscenze e competenze frutto di condivisione tra gli ingegneri di ASG e gli stessi enti di ricerca coinvolti. Ci tengo a sottolineare che questo circolo virtuoso non è solo positivo ai fini dei vari progetti, ma costituisce un patrimonio di conoscenza tutto italiano che continua ad ottenere riconoscimenti tecnologici e industriali a livello internazionale.

**Quali sono gli aspetti più sfidanti di questo percorso per una azienda come ASG?**

Noi non siamo una "grande azienda" per dimensioni, ma crediamo di esserlo, anzi, dobbiamo esserlo, per il livello di competenza e il contributo tecnologico che forniamo alla comunità scientifica e al mondo della ricerca. Essere parte del successo attuale e futuro dei



programmi legati alla fusione nucleare ci sprona ad investire, lavorare e ricercare sempre il migliore bilanciamento tra qualità, capacità ingegneristiche e produttive. In questo contesto non possiamo dimenticare che siamo un'industria privata e dobbiamo riuscire a conciliare un conto economico con la qualità, il mantenimento e lo sviluppo di competenze con un criterio di sostenibilità finanziaria. È chiaro, infatti, che i tempi delle commesse di ricerca internazionali spesso presentano intervalli temporali che poco si conciliano con i conti gestionali annuali. Non a caso hanno abbandonato il settore anche grandi "player", ma noi lavoriamo costantemente per trovare il corretto bilanciamento di tutti questi fattori, il che significa puntare sulla massima efficienza possibile in rapporto ai desiderata progettuali e trovare al tempo stesso applicazioni della superconduttività più vicine al mondo industriale.

#### **Quali effetti ha avuto l'attività nel campo della fusione sulla vostra crescita produttiva e organizzazione interna e quali prospettive di sviluppo per il futuro?**

Come dicevo prima, ASG ha saputo rispondere alle opportunità create da ITER e dai progetti legati alla fusione nucleare come JT60, solo per citarne uno recente, realizzando uno stabilimento, completo di macchinari, robot, attrezzature tecnologiche e trattamento termico dedicato alla realizzazione di bobine toroidali. Di pari passo abbiamo investito in risorse umane e aumentato le nostre competenze progettuali, produttive e di controllo qualità. La nostra strategia è quella di proseguire ad essere il "riferimento" in questo settore e far leva sulle competenze acquisite per generare nuove opportunità di business nel settore industriale, grazie alla progressiva crescita di utilizzo di applicazioni basate sulla superconduttività. Mi riferisco in particolare ai magneti e ai sistemi che li utilizzano per applicazioni legate al mondo energia come gli SMES o i limitatori di corrente o, passando al mondo medicale, ai magneti per la risonanza magnetica, anche ad ultra alto campo.

#### **Un futuro che vi vede sempre più al confine tra ricerca e industria quindi?**

Lavorare per il mondo ricerca fa parte del nostro DNA, la vera sfida è riuscire a coniugare i due mondi riuscendo a portare la superconduttività "dentro i processi industriali", offrendo soluzioni innovative che creino reale valore per i possibili clienti interessati a rendere più efficienti e sicuro il loro business. Mi viene in mente il settore delle utilities e delle rinnovabili che dovranno affrontare importanti sfide tecnologiche. Intendiamo raggiungere questi obiettivi sfruttando le competenze del capitale umano di ASG e non intendiamo porci limiti nell'applicabilità della superconduttività a quelle tecnologie dove vengono combinate l'efficienza energetica e la performance. Abbiamo investito per anni nello sviluppo di un innovativo filo superconduttore "ad alta temperatura" in diboruro di magnesio ( $MgB_2$ ) che, oltre a presentare un interessante rapporto costi-prestazioni, ha raggiunto un completo livello di maturità dal punto di vista della produzione industriale. Poi esiste, come in tutte le aziende, un tema organizzativo: con l'arrivo del nuovo Amministratore Delegato, Sergio Frattini, è stata recentemente varata una riorganizzazione interna dove i 200 dipendenti, in maggioranza tecnici, ingegneri e fisici ad alta specializzazione, si articolano ora in tre unità: la prima dedicata ai magneti e ai sistemi; la seconda allo sviluppo di fili superconduttivi ad alta temperatura in  $MgB_2$  (tecnologia in cui crediamo molto e che ha recentemente guadagnato una commessa al CERN per il progetto Hi-LUMI) e la terza per il settore medicale con i sistemi di imaging a risonanza magnetica (*Magnetic Resonance Imaging, MRI*). Siamo felici di lavorare al confine tra ricerca e industria e sappiamo di non poterci permettere di rallentare, in mancanza di Enti come ENEA non saremmo mai potuti arrivare a questo punto del percorso e guardare avanti con fiducia.

*Per approfondimenti su tecnologie di ASG:  
[www.asgsuperconductors.com](http://www.asgsuperconductors.com)*

## «Un centro di eccellenza mondiale al servizio della ricerca»

Fin dalla sua nascita negli anni '40, l'attenzione al mondo della ricerca è parte del DNA di OCEM Power Electronics, società bolognese specializzata in apparati e sistemi elettronici di potenza per applicazioni speciali. Oggi OCEM è parte del Gruppo Aretè & Cocchi Technology che opera in 92 paesi, genera 150 milioni di euro di ordini ed occupa 500 addetti, l'80% dei quali sono ingegneri e tecnici. Nel campo della fusione opera dagli anni '70, inizialmente con il progetto JET e, successivamente con esperimenti quali FTU ed RFX in Italia, TCV in Svizzera, TORE SUPRA in Francia, JT60 in Giappone. Attualmente è coinvolta nella realizzazione di ITER e del JT-60SA in Giappone



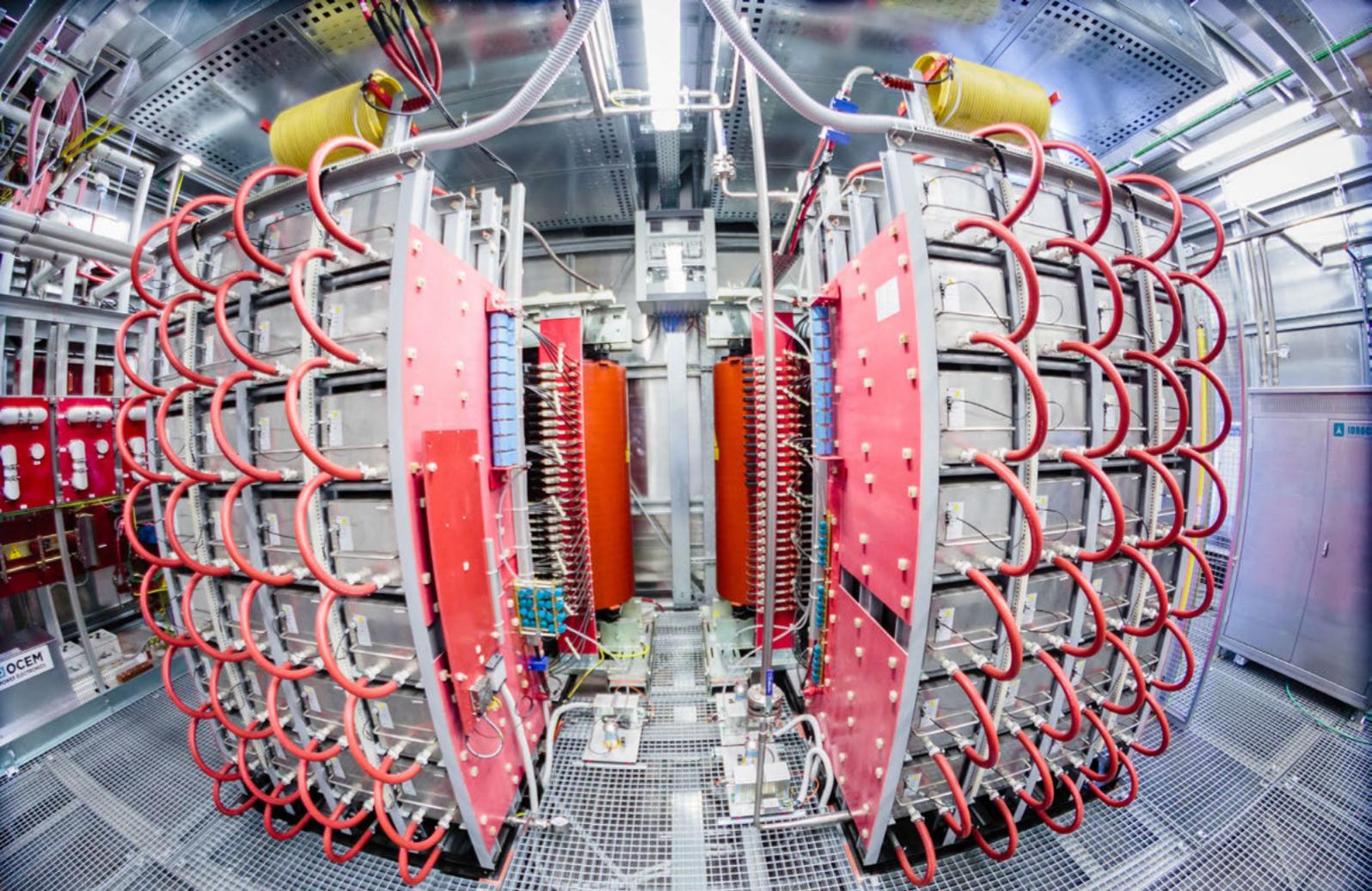
Intervista a **Gino Cocchi**, *Presidente di OCEM*

**Fin dalla sua nascita negli anni '40, l'attenzione al mondo della ricerca è parte del DNA di OCEM Power Electronics, società bolognese specializzata in apparati e sistemi elettronici di potenza per applicazioni speciali. Oggi OCEM è parte di Aretè & Cocchi Technology, gruppo impegnato in settori ad elevato contenuto tecnologico, dall'elettronica di potenza, al broadcasting, al medicale, alle tecnologie applicate agli aeroporti, automazione e packaging per processi industriali che opera in 92 paesi, genera 150 milioni di euro di ordini ed occupa 500 addetti, l'80% dei quali sono ingegneri e tecnici.**

**A Gino Cocchi, fondatore di OCEM Power Electronics e del gruppo Aretè & Cocchi Technology, Professore di Strategia e Gestione di Impresa all'U-**

**niversità di Ferrara abbiamo chiesto come è nato l'interesse per la fusione?**

L'interesse per la fisica del plasma e la fusione risale alla fine degli anni '70, quando in Inghilterra iniziò la realizzazione del reattore sperimentale JET (Joint European Torus). In quegli anni, con l'evoluzione dei dispositivi a stato solido e dei semiconduttori di potenza, l'elettronica rendeva possibili soluzioni impensabili fino a poco prima; le aziende in grado di sfruttare tempestivamente questi sviluppi erano grandi gruppi industriali (realtà come Ansaldo, Siemens, Brown Boveri), o PMI nate dalla passione e dall'ingegno di singoli imprenditori, come è stato nel nostro caso. La realtà che oggi è OCEM si è sviluppata dalle intuizioni del prof. Stefano Basile, docente e direttore dell'istitu-



to di Elettrotecnica dell'Università di Bologna, e dal talento e dalla passione del figlio, Gian Luigi Basile, professore universitario di elettrotecnica e grande esperto di elettronica di potenza.

#### **In che cosa consiste il vostro contributo?**

Il contributo di OCEM al mondo della fusione ha interessato i principali progetti internazionali; il sistema di alimentazione per gli iniettori di neutri del JET negli anni 1970-80 e, in seguito, gli apparati di alimentazione ed i riscaldamenti addizionali per esperimenti quali FTU ed RFX in Italia, TCV in Svizzera, TORE SUPRA in Francia, JT-60 in Giappone. In questo ultimo periodo siamo attivi su grossi progetti quali le alimentazioni dei Neutral Beam Injectors per ITER e per la Test Facility di Padova, le Switching Network Units per JT-60SA in Giappone, e le sorgenti di ioni dell'Istituto di Fisica del Plasma in Germania.

#### **Qual è stata sin qui la vostra esperienza di collabo-**

#### **razione con il mondo della ricerca a livello nazionale e internazionale?**

OCEM Power Electronics è cresciuta a fianco dei principali laboratori di ricerca, in particolare nel campo della fisica del plasma e della fisica delle particelle, contribuendo con soluzioni customizzate a rispondere alle esigenze sempre più stringenti e sfidanti. Oltre alle già citate realizzazioni nel campo della fusione termonucleare, OCEM Power Electronics ha realizzato centinaia di sistemi per i più rinomati laboratori di fisica delle particelle mondiali, come ELETTRA, DAFNE e CNAO in Italia, il CERN in Svizzera, GSI in Germania, DIAMOND in Inghilterra, ESS in Svezia, TRIUMF in Canada, Brookhaven National Laboratories e SLAC negli Stati Uniti, e tanti altri.

Crediamo che ci sia stato uno scambio molto proficuo, che da un lato ha permesso alla nostra azienda di crescere, acquisire know-how e presidiare il fronte più avanzato della tecnologia, dall'altro ha aiutato i laboratori di ricerca a raggiungere i loro obiettivi scientifici.

**Quali effetti ha avuto l'attività nel campo della fusione sulla vostra crescita produttiva e organizzazione interna, e quali prospettive di sviluppo per il futuro?**

Il mondo della ricerca pone sfide sempre nuove. Lo sviluppo di applicazioni per la fusione in particolare richiede una capacità, un coraggio e una dedizione speciali, perché si tratta spesso di realizzazioni uniche, ai limiti della tecnologia attuale, un passo avanti rispetto a quanto precedentemente realizzato a livello internazionale. L'impegno nell'affascinante mondo della ricerca ha aiutato OCEM ad arricchire e sviluppare costantemente le proprie capacità e competenze, che vengono messe a frutto anche in settori e in mercati adiacenti quali il medicale, il ferroviario, l'industriale avanzato e più recentemente l'*automotive*.

**Sono in molti a ritenere che operare nel campo della fusione richieda particolari capacità. Condividi questa analisi?**

I progetti nel campo della fusione sono particolarmente complessi, lunghi e impegnativi: richiedono alle aziende non solo grandi capacità di coordinazione e sviluppo degli aspetti tecnici, ma anche doti gestionali e organizzative non banali e complete su tutti i processi aziendali, debitamente supportate da un sistema di qualità efficace, completo e trasversale a tutte le funzioni aziendali. Questi ultimi anni sono particolarmente

intensi ed eccitanti per il mondo della fusione, con le grandi opportunità del progetto ITER, del Broader Approach, gli studi su DEMO, ed in particolare il progetto DTT, il Divertor Tokamak Test di imminente realizzazione a Frascati: un progetto molto ambizioso che riporta l'Italia sotto i riflettori di tutto il mondo scientifico.

**E per il futuro? Nelle vostre prospettive di sviluppo quale è il 'peso' della fusione?**

Gestire contratti pluriennali di grande valore, come spesso sono quelli nel campo della ricerca, ci permette di guardare al futuro con speranza e fiducia e di individuare la nostra pianificazione su orizzonti di lungo periodo. Va però detto che nella gestione di commesse così complesse non è sempre facile raggiungere un equilibrio nel rapporto tra i grandi investimenti necessari in termini di personale e tecnologie, ed i corrispondenti ritorni economici. Proprio in questi giorni OCEM Power Electronics, con il gruppo Aretè & Cocchi Technology di cui fa parte, ha perfezionato l'acquisizione e una alleanza strategica con l'azienda svizzera **Ampegon**, uno dei principali player di questo difficile mercato, con l'obiettivo di insieme rappresentare un riferimento unico nel mondo delle applicazioni di Power Electronics, costituendo un centro di eccellenza mondiale al servizio del mondo della ricerca, del settore medicale e dell'industria avanzata.

# «La fusione è un caposaldo del nostro futuro»

Nata come azienda specializzata nella progettazione e fabbricazione di apparecchi a pressione, la SIMIC oggi ha fra i suoi clienti multinazionali come BP, ConocoPhillips, Eni, Tecnimont, GE, Alstom, Toshiba e Fincantieri. Con il mondo della ricerca ha iniziato a collaborare negli anni '90 realizzando componenti strategici per Ansaldo, per il CERN e, dopo l'ingresso nel campo della fusione, per Fusion for Energy

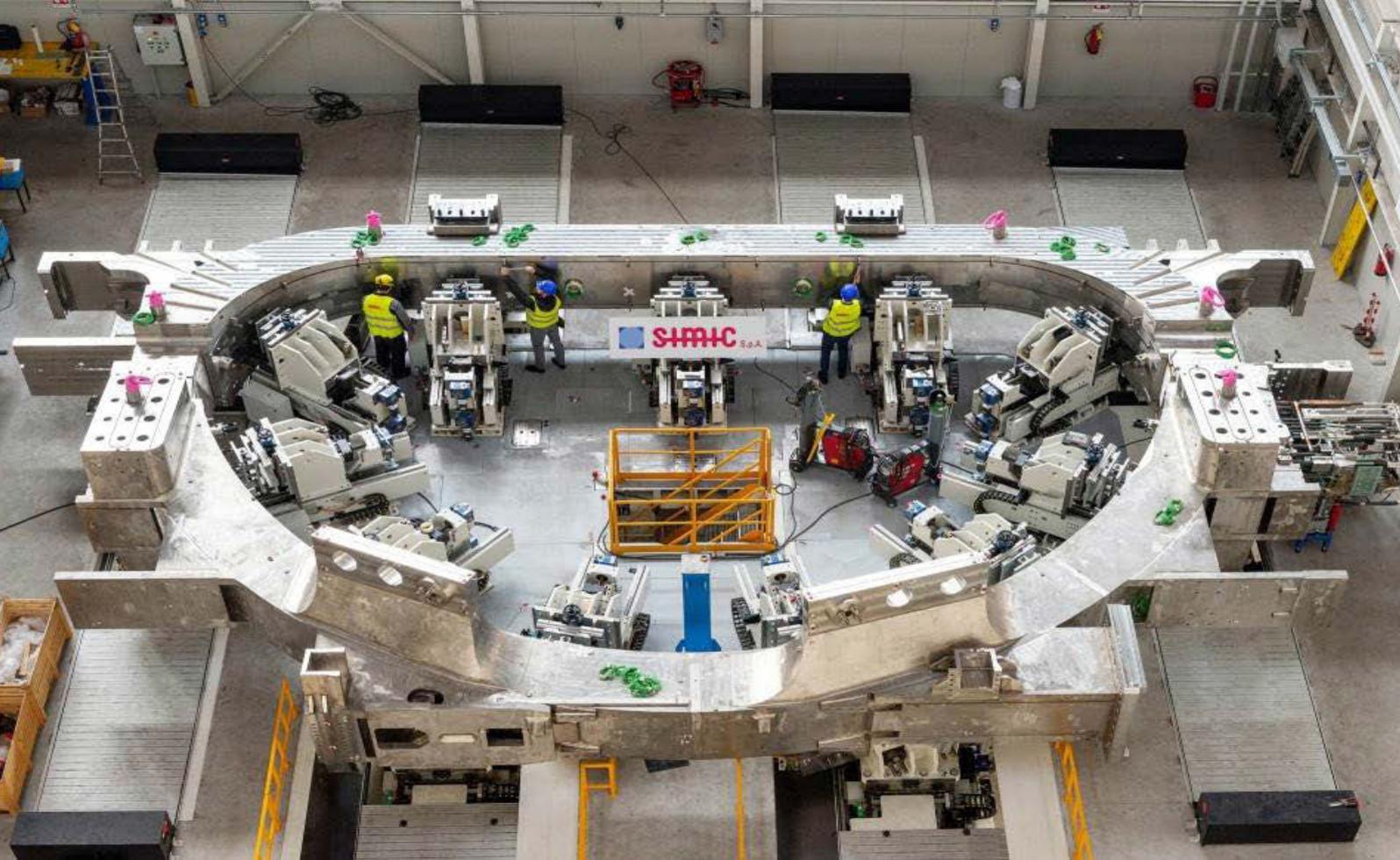


Intervista a **Marianna Ginola**, Responsabile commerciale di SIMIC

**Fondata nel 1975 a Camerana in provincia di Cuneo come società specializzata in carpenteria leggera, montaggi e manutenzioni di impianti industriali, oggi SIMIC è leader a livello internazionale nei settori della criogenia, caldareria, camere da vuoto, nelle lavorazioni meccaniche di precisione e nella progettazione e fabbricazione di apparecchi critici di processo; in Italia ha due stabilimenti a Camerana in Piemonte e a Porto Marghera, in Veneto ed è presente in Francia, Canada, Messico, Brasile, Germania, Romania e Turchia. SIMIC annovera tra i suoi clienti multinazionali come SBM Offshore, BP, ConocoPhillips, Eni, Saipem, Tecnimont, GE, Tengizchevroil, Ferrero, Philip Morris, Alstom, Toshiba, Sanofi, Bracco, Fincantieri, Solvay, CERN, il Max Planck Institute, ITER, Fusion for Energy. In questa intervista abbiamo chiesto a Marianna Ginola, responsabile commerciale di SIMIC e figlia di Giuseppe Ginola, uno dei due fondatori della società insieme a Ferruccio Boveri, di spiegarci**

**quando e come è nato l'interesse di SIMIC al settore della fusione.**

SIMIC è nata come azienda specializzata nella progettazione e fabbricazione di apparecchi a pressione; la collaborazione con il mondo della ricerca ha preso il via alla fine degli anni novanta, con la costruzione di un primo criostato per Ansaldo. Da allora in poi, facendo leva sull'intraprendenza che caratterizza la nostra attività sin dall'inizio, abbiamo deciso di provare a collaborare con altre realtà anche di grandi dimensioni: il passo successivo è stato la collaborazione con il CERN di Ginevra, il maggior laboratorio mondiale di fisica delle particelle per il quale abbiamo realizzato il Criostato ATLAS, 937 camere da vuoto ed oltre 200 moduli criogenici per il progetto LHC, vincendo commesse molto importanti e di durata pluriennale. Nel frattempo abbiamo iniziato a collaborare con Fusion for Energy aggiudicandoci commesse importanti per la fabbricazione di componenti di ITER come il Vacuum Vessel, il Divertore e la Radial Plate,



la struttura di contenimento del cavo superconduttore. tori, come è stato nel nostro caso.

### **In che cosa consiste vostro contributo ai grandi progetti internazionali sulla fusione?**

Sul Progetto ITER siamo molto impegnati: nel 2017, oltre ai componenti già descritti, abbiamo completato la fornitura di 70 Radial Plates con piena soddisfazione del cliente e, attualmente, siamo impegnati nella costruzione di quattro Cassette Bodies del Divertore ed aspiriamo a realizzare la produzione in serie delle Cassette. Una delle commesse e sfide più importanti che abbiamo acquisito sono i test a freddo dei Winding Packs e l'inserimento delle Bobine Toroidali nelle loro cassette, si tratta di dieci magneti destinati a ITER. Ogni bobina pesa oltre 300 tonnellate, è alta circa 14 metri, larga nove e, una volta superati i test, va trasportata via nave dai nostri stabilimenti di Porto Marghera a Cadarache. Un'operazione complessa che prevede l'inserimento del magnete in una gigantesca struttura di acciaio, saldata e lavorata con le tecnologie più avanzate

e impregnata con una speciale resina epossidica per riempire le intercapedini. La cassa contenitiva viene chiusa mediante saldatura robotizzata. Per le dimensioni eccezionali, il peso dei componenti, la criticità dei materiali utilizzati e l'alto profilo tecnologico richiesto, questa commessa rappresenta una prima importante milestone per la produzione di energia da fusione: un successo prestigioso per SIMIC, per Fusion For Energy e per tutta la filiera manifatturiera europea.

### **Qual è stata sin qui la vostra esperienza di collaborazione con il mondo della ricerca a livello nazionale e internazionale?**

Oltre che con ITER e CERN, collaboriamo con altri progetti nazionali e internazionali, con istituzioni e centri di ricerca come INFN, RXF, ESS, Max Planck Institute ed altri ancora. Molti dei contratti che siamo riusciti ad acquisire sono stati vinti anche grazie alla partnership con altre aziende, italiane ed estere. Questo approccio si è rivelato vincente e sarà certamente proseguito e consolidato anche negli anni a venire.

**L'attività nel campo della fusione ha avuto ripercussioni sulla vostra crescita produttiva e l'organizzazione interna?**

Ad oggi siamo già presenti in diversi Paesi e, grazie ai contratti acquisiti nella fusione, SIMIC fa un ulteriore passo avanti nel suo processo di internazionalizzazione, entrando così a far parte dei leader mondiali nel settore manifatturiero ad elevato contenuto tecnologico. Per realizzare questi progetti, abbiamo assunto e formato personale tecnico altamente specializzato e giovani ingegneri. Inoltre, abbiamo ammodernato i nostri stabilimenti, sviluppato nuovi macchinari unici nel loro genere sia per dimensioni che per complessità, ed attrezzature specifiche ad alto contenuto tecnologico.

**Nelle vostre prospettive di sviluppo per il futuro quale è il 'peso' della fusione?**

Grazie ai primi prototipi realizzati, ci siamo impegnati a crescere come azienda e migliorare a livello gestionale e tecnico. I contratti che abbiamo in portafoglio richiedono di confrontarsi con nuove sfide che ci impegneranno almeno per i prossimi 3-5 anni. Siamo contenti di affrontarle anche perché fino ad ora ITER ci ha dato la possibilità di crescere profondamente come impresa; abbiamo l'ambizione di collaborare ulteriormente alla realizzazione di questo progetto, ed anche di altre iniziative come DEMO e, successivamente, ESS, CERN, DTT. Il mondo della ricerca resterà uno dei capisaldi per il nostro futuro.

# «Lavorare al confine tra ricerca e industria è nel nostro DNA»

Dai serbatoi per imprese vinicole e frantoi degli anni '60 al Vacuum Vessel 'cuore' del Progetto ITER. E' il percorso compiuto dalla Walter Tosto, azienda leader a livello mondiale nella costruzione di componenti critici. Entrata nel campo della fusione a metà anni '90, sta realizzando la 'camera da vuoto' del futuro reattore a fusione nell'ambito del Consorzio AMW (Ansaldo, Mangiarotti, Walter Tosto); un'opera che per complessità, dimensioni, quantità di saldatura e grado di precisione necessari è fra le più importanti e tecnologicamente impegnative del progetto ITER



*Intervista a Luca Tosto, amministratore delegato della Walter Tosto*

**Fondata nel 1960 come azienda specializzata nella produzione di serbatoi per le imprese vinicole e i frantoi locali, la Walter Tosto si è progressivamente evoluta in uno dei più importanti costruttori di componenti critici per impianti industriali in tutto il mondo. Dai serbatoi in pressione per GPL/carburante è passata ai componenti critici per i mercati internazionali Oil&Gas, per energia e petrolchimico, a metà anni 90 è entrata nel settore della ricerca e della fusione. Oggi il gruppo ha oltre 500 dipendenti ed è diretto dal figlio del fondatore Walter Tosto, Luca con il sostegno delle sorelle Catia ed Emanuela. A lui abbiamo chiesto come è nato l'interesse dell'azienda per la fusione e quale è il contributo di Walter Tosto in quest'ambito?**

L'interesse per la ricerca ha inizio negli anni 80, pe-

riodo in cui si realizzavano piccoli componenti o parti di impianto senza una piena consapevolezza del loro utilizzo finale. La curiosità però è stata sempre nel nostro DNA, così come la voglia di estendere le nostre conoscenze e competenze. Negli anni 90 abbiamo iniziato a lavorare in maniera più diretta e continuativa nel settore, in modo particolare con l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e la Princeton University. In tale contesto abbiamo iniziato a conoscere un mondo nuovo e stimolante come quello della fusione che combina l'unicità della ricerca ai requisiti stringenti del settore nucleare. Nel corso degli anni sono arrivate moltissime soddisfazioni dal progetto ITER e dal Broader Approach. Walter Tosto è membro del Consorzio AMW (Ansaldo, Mangiarotti, Walter Tosto) che ha in carico la fabbricazione di cinque settori del Vacuum Vessel, il cuore della macchina Tokamak.



Inoltre, dopo aver prodotto il prototipo della cassetta del divertore, l'azienda si è aggiudicata la prima serie di 15 unità. Per di più, diverse sono le collaborazioni avviate per la fabbricazione di componenti di dimensioni inferiori, ma comunque tecnologicamente molto avanzati. Abbiamo anche contribuito al programma JT-60SA fabbricando 20 casse di contenimento delle bobine del magnete toroidale.

**Qual è stata sin qui la vostra esperienza di collaborazione con il mondo della ricerca a livello nazionale e internazionale?**

Nel corso degli anni abbiamo interagito con moltissime organizzazioni attive nella ricerca di soluzioni in ambito scientifico, energetico, medico, aerospaziale ed astronomico. Inoltre, abbiamo sviluppato i progetti in collaborazione con le più importanti università italiane e straniere – Princeton University, MIT, Columbia University, Università di Tor Vergata, Politecnico di Milano, Università della Tuscia, Università dell'Aquila – e i laboratori di ricerca su scala mondiale. Tra le principali organizzazioni possiamo menzionare ITER, Fusion for Energy, QST, ESO, INFN, GMTO, ESS, CERN, Fermilab, KIT, C.S.M. e CEA.

**Quali effetti ha avuto l'attività nel campo della fusione sulla vostra crescita produttiva e organizzazione interna?**

Indipendentemente dalla quota di fatturato, l'unità di business che si occupa della fusione è quella che sta contribuendo maggiormente in termini di crescita dinamica, con effetti positivi anche sulle altre divisioni. I progetti sulla fusione hanno generato una crescita dell'organico aziendale, in modo particolare raddoppiando il numero di ingegneri e tecnici. Le maggiori conoscenze e competenze, acquisite tramite la partecipazione a progetti di ricerca sulla fusione, hanno contribuito a migliorare anche i prodotti dei nostri mercati convenzionali, in termini di qualità, tempo e in qualche caso anche di competitività economica. I progetti di ricerca, inoltre, ci hanno permesso di accedere a macchine e tecnologie innovative difficilmente raggiungibili se si opera esclusivamente nei mercati convenzionali. La partecipazione a tali programmi ha incrementato la nostra visibilità e ha fatto da volano per la qualifica dell'azienda in altri progetti di ricerca o mercati affini come quello nucleare.

**Quali sono le vostre prospettive di sviluppo per il futuro?**

Essendo qualificati con i più importanti enti di ricerca del settore, auspichiamo di mantenere la nostra presenza stabile nei confronti di tali istituzioni anche in futuro, con l'ambizione di poter partecipare in maniera sempre più attiva allo sviluppo tecnologico mediante azioni ad alto impatto positivo sull'ambiente e sulle persone.

# Prospettive e opportunità delle tecnologie per la fusione

La ricerca sulla fusione offre opportunità di sviluppo di tecnologie innovative in molteplici settori, dall'aerospazio all'avionica alla componentistica meccanica di uso industriale, nel campo della salute con la medicina nucleare per indagini e cure di patologie oncologiche, in agricoltura per la tracciabilità dei prodotti e per la tutela del patrimonio culturale. I Centri ENEA di Frascati e di Brasimone sono all'avanguardia in questo campo con infrastrutture di eccellenza e 50 brevetti sviluppati negli ultimi 20 anni

DOI 10.12910/EAI2019-017

di **Giuseppe Mazzitelli**, ENEA, Responsabile della Divisione Tecnologie Fusione Nucleare, **Luigi Morici**, Sezione Superconduttività, **Mariano Tarantino**, Responsabile Divisione Ingegneria Sperimentale

**L**a ricerca sulla fusione dall'inizio degli anni 60 è stata uno dei settori di punta dell'ENEA, prima con i laboratori del Centro di Frascati, dove sono stati progettati e realizzati il Frascati Tokamak (FT) e il Frascati Tokamak Upgrade (FTU), e poi, a partire dagli anni 90, con il Centro Ricerche del Brasimone sull'Appennino tosco-emiliano.

Per rendere l'idea delle sfide tecnologiche da superare per realizzare un reattore a fusione, basti pensare che all'interno di un tokamak si passa,

in pochi metri, dalla temperatura di lavoro dei superconduttori – paragonabile a quella del fondo cosmico di radiazione, cioè la più fredda dell'Universo – a quella del plasma, circa cento volte più alta del nocciolo del Sole, uno dei punti più caldi dell'Universo<sup>1</sup>. Affrontare e superare le sfide scientifiche e ingegneristiche necessarie per progettare un reattore a fusione è stato, quindi, un trampolino di lancio per l'Agenzia verso lo sviluppo di tecnologie innovative applicabili in numerosi settori anche molto differenziati fra loro: dall'aerospazio

all'avionica alla componentistica meccanica di uso industriale, dalla medicina nucleare all'agricoltura alla tutela del patrimonio culturale per citare solo alcuni esempi.

**L'intensa attività ingegneristica e tecnologica legata alla ricerca ENEA sulla fusione ha inoltre portato allo sviluppo di circa cinquanta brevetti negli ultimi venti anni, con una costante azione di trasferimento tecnologico che ha contribuito alla crescita e alla competitività dell'industria nazionale. Oggi nel settore della fusione operano oltre**

un centinaio di imprese ‘tricolori’ che si sono aggiudicate commesse per oltre 1 miliardo di euro per realizzare le parti più importanti di ITER, quello che nel gergo reattoristico è definito come il “core” della macchina.

### Materiali superconduttori

Dal punto di vista scientifico un primo settore di grande interesse nell’ambito della fusione sono i materiali superconduttori. Si tratta di un settore che lascia ampi spazi alla ricerca fondamentale – non essendovi ancora una teoria in grado di prevedere il comportamento di alcuni materiali superconduttori di ultima generazione – e che si arricchisce di anno in anno nella gamma di materiali superconduttori con un ampio ventaglio di possibili prestazioni.

Volendo sintetizzare, non ci si scosta molto dalla realtà affermando che per sostenere una determinata corrente è sufficiente un superconduttore cento volte meno spesso di un corrispondente cavo di rame. La possibilità di convogliare elevate correnti su fili sottili permette la realizzazione di strutture magnetiche compatte, e questo è un ulteriore vantaggio importante offerto dall’impiego dei superconduttori.

Di fatto, se per produrre i campi magnetici necessari in un tokamak

venissero utilizzati materiali tradizionali come il rame, la quantità di energia necessaria sarebbe talmente elevata per sostenere le correnti nel rame, da rendere l’impresa economicamente improponibile. Con i materiali superconduttori, invece, è possibile abbattere di circa cento volte l’energia necessaria per produrre campi magnetici equivalenti. Addirittura, se nella fusione nucleare servissero solo campi magnetici costanti (ed ignorando per ora l’energia necessaria a garantire la bassa temperatura di esercizio del materiale), il superconduttore genererebbe i campi magnetici senza assorbire alcuna energia, cioè gratis. Questo è quanto succede per i magneti impiegati nell’*imaging* a risonanza magnetica, una diagnostica medica per immagini resa possibile su larga scala proprio grazie all’impiego dei superconduttori<sup>2</sup>.

L’ENEA ha sviluppato le competenze sia per condurre ricerca di base sui superconduttori, sia per progettare cavi superconduttori da impiegare in sistemi magnetici ed anche per progettare sistemi magnetici complessi (Figura 1). L’elenco dei progetti internazionali cui ha contribuito o nei quali è coinvolta è lunghissimo. Riguardo al Divertor Tokamak Test facility (DTT), la progettazione del complesso sistema magnetico sarà cu-

rata dall’ENEA, mentre la realizzazione dei magneti coinvolgerà ampiamente l’industria nazionale.

### Progettare componenti complessi

Un’altra attività di ricerca e sviluppo di nuove tecnologie è la progettazione e realizzazione di componenti complessi interni alle macchine tokamak e la caratterizzazione sia dei materiali strutturali che li compongono sia dei materiali che sono esposti al plasma.

Insieme con l’ANSALDO Nucleare, l’ENEA è stato coinvolto direttamente nella costruzione di otto prototipi a piena scala di unità ad alto flusso termico del cosiddetto ‘Inner Vertical Target’ del Divertore di ITER. La tecnologia è stata completamente sviluppata e brevettata presso i laboratori di Frascati (Figura 2). La procedura di giunzione per diffusione (Hot Radial Pressing), eseguita con l’ausilio di un forno speciale progettato in ENEA, permette la “saldatura” dei monoblocchi di tungsteno al tubo in lega di rame. La stessa tecnologia è adesso utilizzata per lo sviluppo del divertore per DEMO.

In questo contesto, un esempio di innovazione tecnologica è rappresentato dal sistema IVVS (In Vessel Viewing System – Figura 3), progettato

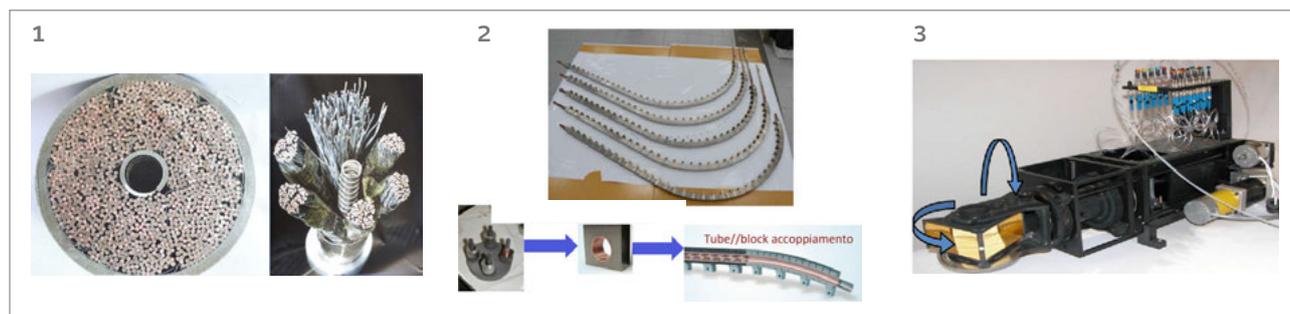


Fig. 1 A sinistra – sezione di un cavo superconduttore. A destra – dettaglio della struttura interna della parte conduttiva del cavo; Fig. 2 Elementi dell’Inner Vertical Target realizzati nei laboratori ENEA di Frascati; Fig. 3 Prototipo del sistema IVVS



Fig. 4 Immagine del Generatore di Neutroni di Frascati

tato e realizzato per "vedere al buio" (senza bisogno di illuminazione) laddove una persona non può entrare, ovvero in un ambiente ostile in cui si hanno contemporaneamente un alto campo magnetico (più di mille volte il campo magnetico terrestre), elevate temperature (centinaia di gradi centigradi), alto vuoto (come nello spazio interstellare), alti flussi di radiazioni ionizzanti (elevata radioattività).

### Tecnologie per la salute e l'ambiente

La principale reazione di fusione su cui sono concentrati gli studi per un futuro reattore produce dei neutroni di elevata energia che, interagendo con i materiali costituenti il reattore, ne modificano le proprietà termomeccaniche. Infatti gli urti neutronici

provocano una dislocazione degli atomi del materiale alterando il reticolo cristallino. Per la progettazione di questi reattori, è essenziale lo studio preventivo di questi effetti, attraverso **macchine acceleratrici in grado di generare neutroni da fusione. L'ENEA ha progettato e costruito il Generatore di Neutroni di Frascati (FNG), operativo da più di 25 anni presso l'omonimo Centro Ricerche (Figura 4). Si tratta di un impianto, tra i più potenti al mondo, che permette attività di ricerca, sviluppo e di possibile trasferimento tecnologico che, oltre la fusione nucleare, sono d'interesse in numerosi ambiti:**

#### Tecnologie per la Fusione:

- sviluppo di diagnostiche per i plasmi in macchine sperimentali per gli studi della fisica della fusione termoneucleare a confinamento magnetico

per la produzione di energia;

- sviluppo di database delle sezioni d'urto di reazione tra neutroni a 14 MeV e i materiali dedicati agli impianti per la fusione.

**Tecnologie per grandi infrastrutture di ricerca internazionali:** rivelatori di neutroni per applicazioni alla fisica di base alla ricerca applicata. Presso l'impianto FNG di Frascati sono stati testati rivelatori per la sorgente di neutroni ad esempio del Rutherford Appleton Laboratory in Gran Bretagna e/o la European Spallation Source in Svezia;

**Tecnologie per la salute:** medicina nucleare con lo studio dei processi di produzione di radionuclidi per la diagnostica per immagini e per la terapia, con particolare riferimento alla diagnostica per immagini tipo SPECT per patologie oncologiche e cardiovascolari per esempio e alla diagnostica per immagini tipo PET

e terapie oncologiche;

**Aerospazio e avionica:** valutazione sperimentale della robustezza all'irraggiamento neutronico dei componenti elettronici utilizzati in satelliti e aerei.

Altri utilizzi strategici dell'impianto, grazie a possibile aumento di potenza e sviluppo di strumentazione ancillare prevista in un prossimo futuro, potranno essere:

**Applicazioni industriali:** sviluppo di tecniche di radiografia neutronica per studio di materiali strutturali e componenti meccanici utilizzati in motori, turbine e componenti meccanici ad uso industriale;

**Beni culturali:** studio della composizione dei materiali in manufatti (specialmente metallici) per informazioni sulla provenienza e per l'individuazione delle tecniche ottimali di restauro e conservazione;

**Progettazione di sorgenti innovative di neutroni ad alta brillantezza:** sviluppo di sistemi di moderazione specifici per neutroni a 14 MeV per lo sviluppo di linee di fasci di neutroni termalizzati per studi in fisica della materia condensata;

**Astrofisica e Cosmologia:** studio di particolari reazioni nella nucleosintesi degli elementi leggeri nelle

fasi di sviluppo dell'Universo subito dopo il Big Bang.

### Produzione d'idrogeno ultra puro

Nell'ambito delle attività di R&D relative al ciclo del combustibile dei reattori a fusione sono stati sviluppati processi e tecnologie a membrana finalizzati alla separazione e purificazione di idrogeno ed isotopi con potenziali applicazioni in diversi comparti quali ad esempio la gestione sostenibile delle acque di vegetazione dei frantoi oleari.

I dispositivi vengono realizzati con tubi in lega di palladio (Pd) e vengono utilizzati per recuperare il trizio – uno degli isotopi dell'idrogeno che costituisce il 'combustibile' della fusione nucleare – nell'ambito delle attività europee sulla fusione (Figura 5). Questi stessi dispositivi a membrana sono stati applicati a processi per la produzione d'idrogeno ultra puro a partire da reazioni di deidrogenazione di alcoli, idrocarburi e biomasse.

La trasformazione dell'energia generata dalla fusione nucleare in energia elettrica così come la produzione del trizio quale combustibile per autosostenere la reazione di fusione, avviene attraverso uno dei sistemi più innovativi e complessi del reattore,

denominato "Breeding Blanket" (BB). L'ENEA, nell'ambito del Consorzio EUROfusion, sta sviluppando il "Water-Cooled Lithium-Lead" Breeding Blanket che rappresenta una delle due opzioni candidate per il reattore a fusione europeo DEMO. Questo concetto prevede l'uso di acqua in pressione come fluido refrigerante della lega eutettica piombo-litio per la generazione e rimozione del trizio e dell'EUROFER (acciaio a bassa attivazione) come materiale strutturale.

Il WCLL-BB è una struttura di circa un metro di spessore che si interpone tra la camera del plasma e il "Vacuum Vessel" che deve proteggere e schermare limitando il più possibile l'irraggiamento neutronico. Al suo interno troviamo la "first wall" o prima parete, che ha il compito di asportare il flusso termico proveniente dalla camera del plasma ed assicurare un ciclo termico del refrigerante primario per una efficiente conversione del calore in energia elettrica. Vi è poi la zona di "breeding", una struttura all'interno della quale fluisce il metallo liquido e contiene i tubi che portano l'acqua di refrigerazione. Il sistema di refrigerazione del WCLL-



Fig. 5 Reattore a membrana sviluppato in collaborazione con CEA per la detritizzazione del JET di Culham in Gran Bretagna

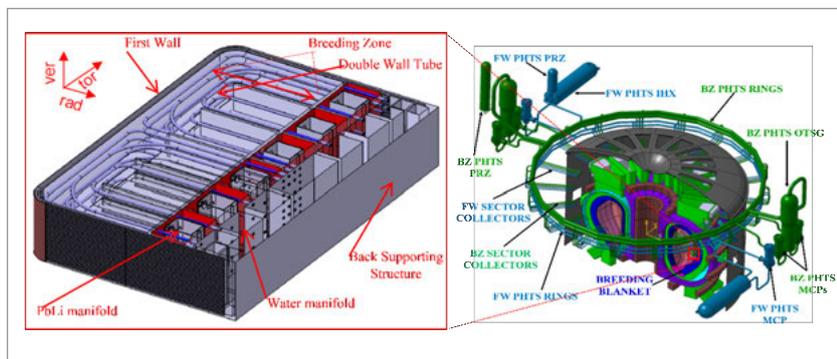


Fig. 6 Vista isometrica di un elemento della zona equatoriale esterna del progetto. WCLL BB 2018 di DEMO (sinistra) e schema del sistema primario ad acqua (destra)

BB è collegato ad un circuito primario che, attraverso 2 generatori di vapore e 2 scambiatori, garantisce la produzione di vapore necessaria per

la generazione di energia elettrica. I collettori di ingresso e uscita del metallo liquido sono collegati ad un circuito ausiliario dove avviene

l'estrazione del trizio prodotto e la purificazione del metallo liquido (Figura 6).

A supporto della progettazione e qualifica sperimentale di tale sistema, presso il Centro Ricerche Brasimone sono stati realizzati una serie di impianti sperimentali che hanno lo scopo di testare i progetti ingegneristici, analizzare i fenomeni fisici e validare i codici di calcolo. Larga parte di questi impianti sono progettati per lo studio della tecnologia dei metalli liquidi per la fusione nucleare, es. scambio termico e fluidodinamica, corrosione (compatibilità) dei materiali, sistemi/tecnologie di estrazione del trizio dal metallo liquido, fenomeni di

### A Vienna il “Nuclear Technology Applications in Italy: From the Past to the Future”

Le applicazioni delle tecnologie nucleari al settore civile, nel campo della salute, dei beni culturali, della protezione del territorio sono al centro di un evento coordinato dalla Rappresentanza Permanente d'Italia presso le Organizzazioni Internazionali a Vienna e da ENEA, in occasione della Conferenza Generale della AIEA “Nuclear Technology Applications in Italy: From the Past to the Future” dal 16 al 20 settembre 2019. Al centro delle quattro giornate di incontri e dibattiti cui partecipano l'autorità di sicurezza, la ricerca italiana, il mondo accademico e l'industria, vengono affrontate molteplici tematiche legate alla tecnologia nucleare ed è previsto uno spazio espositivo congiunto con Unione Europea, Belgio e Finlandia. Sono previsti seminari e incontri dedicati alle ricadute della ricerca sul nucleare in diversi ambiti: lunedì 16 settembre il tema è “Nuclear technologies for sustainable societies: taking care

of the past, present and future” con uno specifico focus sulle tecnologie per beni culturali, la sicurezza alimentare, il monitoraggio e la protezione dell'ambiente. Martedì 17 si parla di “Innovative nuclear systems: R&D for a safer and more sustainable world”, ovvero di sistemi nucleari innovativi, in particolare DTT e fusione e cooperazione internazionale. Mercoledì 18 settembre l'approfondimento riguarda “Medical applications and innovative technologies” e, nello specifico, le tecnologie innovative per la medicina nucleare, inclusa produzione di radioisotopi e protonterapia, in particolare su recenti progetti di ENEA e INFN. Infine, giovedì 19 settembre si affronta il tema “Nuclear applications: past and present — Looking ahead to protect people and the environment”, le cosiddette 3S (Safety, Security, Salvaguardie) e gestione dei rifiuti radioattivi e sul ruolo e attività delle Autorità Competenti, organizzazioni tecnico scientifiche di supporto (TSO) e industria.

di Franca Padovani

interazione tra metallo liquido e acqua, analisi di sicurezza ecc.

Per quanto concerne i materiali strutturali, questi dovranno essere in grado di resistere agli elevati flussi neutronici, agli stress termici generati dal plasma e ai fenomeni di corrosione dovuti al contatto con il metallo liquido. **Attualmente sono in fase di sviluppo acciai a bassa attivazione con nanodispersione di particelle ceramiche e acciai martensitici migliorati con trattamenti termici**

**specifici in grado di ridurre i fenomeni di infragilimento a cui sono soggetti.**

### Conclusione

Da quanto premesso emerge con chiarezza che l'ENEA ha raccolto la sfida della fusione da molti decenni ed ha contribuito in maniera significativa allo sviluppo di questa tecnologia e al trasferimento di know how alle imprese; adesso è pronta ad affrontare nuovi

traguardi, sempre più impegnativi come la progettazione e realizzazione di DTT e del futuro reattore commerciale che verrà dopo ITER e DEMO.

All'articolo hanno contribuito:

*Carlo Neri, Responsabile Laboratorio Ingegneria Elettronica e Elettrotecnica, Antonino Pietropaolo, Laboratorio Tecnologie Nucleari, Silvano Tosti, Responsabile Laboratorio Tecnologie Nucleari, Eliseo Visca, Responsabile Laboratorio Tecnologie Speciali*

- <sup>1</sup> I campi magnetici possono essere usati per confinare il plasma in una regione ben delimitata dello spazio. In altri termini, il plasma può essere costretto a rimanere all'interno di un recipiente dalle pareti magnetiche. A volte viene evocata l'immagine pittorica di "bottiglia magnetica" per illustrare il confinamento del plasma, anche se ovviamente non si deve pensare alle pareti della bottiglia magnetica come a qualcosa di materiale. In ogni caso, affinché la bottiglia magnetica possa funzionare, servono i più intensi campi magnetici che la tecnologia a nostra disposizione possa realizzare. Questi ultimi si realizzano con le correnti elettriche, e per avere campi tanto intensi da confinare un plasma alla temperatura di fusione, servono correnti veramente elevate. Per dare un'idea, i campi magnetici necessari sono centomila volte più forti del campo magnetico terrestre, e le correnti necessarie a produrli sono a loro volta elevatissime, dell'ordine delle decine di migliaia di Ampere
- <sup>2</sup> Oltre a non consumare energia se percorsi da corrente costante, i superconduttori si differenziano dai conduttori ordinari per la capacità di trasportare una ben più elevata densità di corrente. In altri termini, a parità di corrente trasportata, bastano cavi molto più sottili

# 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

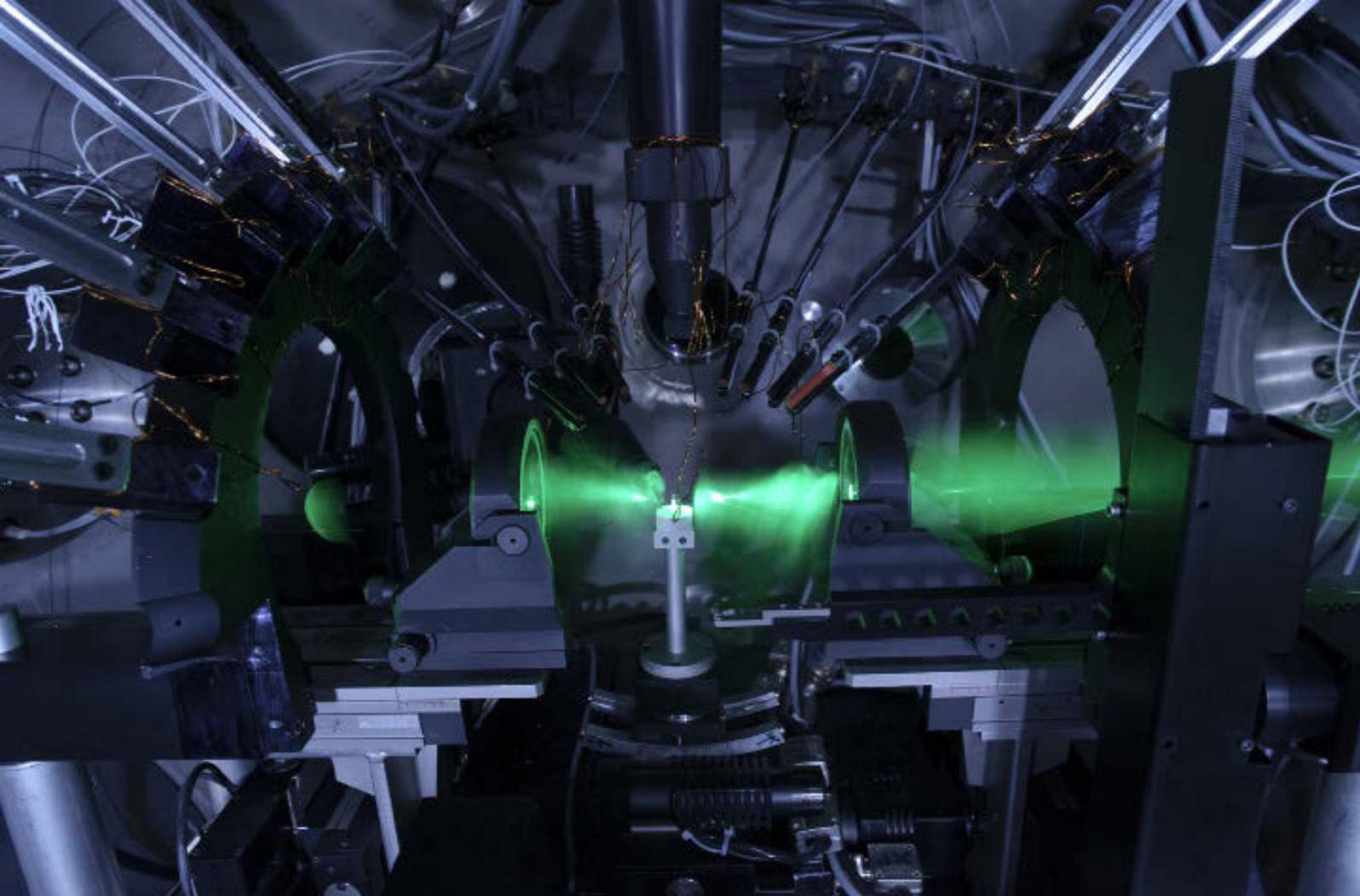
DOI 10.12910/EAI2019-018

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  $-190^{\circ}\text{C}$  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.

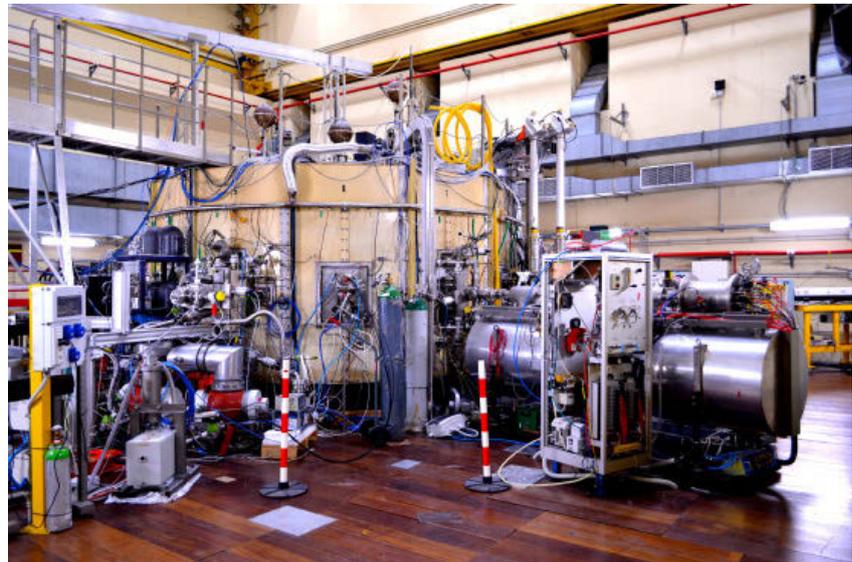
La prima e importante conseguenza di questo è la grande potenza ohmica a esso associata, in altre parole la possibilità di raggiungere alte temperature con il solo riscaldamento indotto dalla corrente del combustibile. Inoltre, la densità di corrente è proporzionale alla densità di particelle per unità 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'innescò 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 term nucleare. 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

# I supercomputer della fusione

Il supercalcolo scientifico (HPC-High Performance Computing), da sempre dominio di scienziati teorici e sviluppatori di computer e software, è diventato uno strumento di ricerca strategico nel campo della fusione termonucleare controllata per simulare fenomeni complessi con un ottimo grado di attendibilità. In questo settore ENEA ha sviluppato solide competenze e, in partnership con Cineca, ha conquistato un ruolo da protagonista a livello europeo per la fornitura dei servizi di calcolo ad alte prestazioni a tutta la comunità della fusione nei prossimi cinque anni

DOI 10.12910/EAI2019-019

di **Francesco Iannone, Silvio Migliori, Massimo Celino**, ENEA, Divisione ICT

**I supercalcolo scientifico (HPC-High Performance Computing), da sempre dominio di scienziati teorici e sviluppatori di computer e software, sta diventando in misura crescente uno strumento di ricerca strategico** per la comprensione e la modellazione di fenomeni fisici complessi riguardanti la fluidodinamica, le interazioni molecolari, i calcoli astronomici e la progettazione ingegneristica, ma anche per migliorare prodotti, ridurre i costi di produzione e accelerare i tempi di sviluppo. L'HPC viene ora frequentemente utilizzato in aree disciplinari quali le fonti rinnovabili, le reti dei social media, la semantica, la geologia, l'archeologia, la pianificazione urbana, la genomica, l'eco-

nomia, oppure le scienze biomedicali quali l'imaging cerebrale. Il calcolo ad alte prestazioni e le sue applicazioni hanno via via assunto un ruolo di crescente rilievo nel campo della fusione nucleare; in ENEA da oltre un decennio gli esperti di ICT lavorano al fianco dei ricercatori e, dallo scorso anno, ENEA insieme a Cineca sono riuscite a vincere il bando Eurofusion per aggiudicarsi la realizzazione, gestione e messa in servizio, almeno fino al 2023, di una infrastruttura HPC per il settore computazionale della fusione europea che lo sfrutterà per le nuove sfide tecnologiche poste dal progetto ITER.

## I supercomputer della fusione

La storia del calcolo ad elevate pre-

stazioni per la fusione è iniziata nel 2008 con una piccola infrastruttura da 1 Tflop/s gestita dall'ENEA nel suo centro di calcolo CRESCO, a Portici. Questa infrastruttura, denominata **Gateway**, è stata utilizzata dalla comunità fusionistica dei ricercatori europei come piattaforma di lancio per supercomputer più grandi come **HPC For Fusion** (HPC-FF), il primo grande supercomputer da 100 Tflop/s realizzato nel 2009 e localizzato presso il Jülich Supercomputing Centre fino al 2012. Dedicato esclusivamente alla fusione, è stato finanziato da Euratom. Successivamente, in base ad un accordo con il Giappone nell'ambito del Progetto ITER, la Francia, attraverso il CEA, ha finanziato nel 2012 **Helios**, un su-



Fig. 1 MARCONI Fusion, l'attuale supercomputer da 8 Pflop/s dedicata esclusivamente alla fusione

percomputer da 1,5 Pflop/s. Grazie all'aggiudicazione di una gara internazionale frutto di una collaborazione fra ENEA e Cineca, attualmente il consorzio EUROfusion sta finanziando **MARCONI Fusion** (Figura 1) un supercomputer costituito da una partizione di MARCONI, il TIER-0 del Cineca, esclusivamente dedicato all'esecuzione di progetti di calcolo selezionati in ambito fusionistico. MARCONI Fusion è stato rilasciato a EUROfusion attraverso una roadmap che ha consentito di utilizzare le più recenti tecnologie di processori Intel. Si è partiti nel luglio 2016 con una partizione da 1 Pflop/s basata su processori Intel convenzionali, denominati Broadwell, a cui si aggiunga una partizione accelerata da 1 Pflop/s basata su processori MIC (Many-In-Core) denominati Knights Landing. Successivamente nel luglio 2017, la partizione Broadwell è stata sostituita da una partizione da 5 Pflop/s basata su processori convenzionali denominati Skylake. Infine, in seguito all'aggiudicazione

di una successiva gara internazionale di EUROfusion, ENEA in collaborazione con Cineca ha espanso la partizione convenzionale di MARCONI Fusion a 8 Pflop/s con oltre 2400 nodi basati su Skylake, aggiunto una infrastruttura di calcolo ad elevate prestazioni da 1 Pflop/s basata su GPGPU Nvidia P100 e realizzato la nuova piattaforma Gateway dedicata allo sviluppo del software rilevante per le future operazioni di ITER. I livelli di servizio formalizzati attraverso un *Project Implementing Agreement*, permetteranno di utilizzare questa infrastruttura di calcolo avanzato in modalità esclusiva fino a dicembre del 2023. **Di fatto, nell'ultimo decennio la comunità scientifica impegnata esclusivamente nella ricerca sulla fusione ha potuto disporre di infrastrutture di calcolo avanzato di dimensioni sempre maggiori** (Figura 2). La R&S europea sulla fusione nucleare per scopi energetici è sempre stata coordinata dall'Euratom, che nel tempo ha utilizzato vari strumenti

operativi, l'ultimo dei quali è il consorzio EUROfusion. È già da circa 10 anni che l'Euratom approva investimenti sulla simulazione numerica della fisica dei plasmi di rilevanza reattoristica attraverso il supporto allo sviluppo dei modelli di calcolo.

Nel periodo 2016-2018 MARCONI Fusion ha reso disponibile oltre 1500 milioni di core-ore di cui circa il 70% utilizzati da centinaia di progetti selezionati rilevanti per la fusione. Nell'ultimo ciclo di allocazione delle risorse di calcolo di MARCONI Fusion la ripartizione per tipologie di codici è mostrata in Figura 3, dove predominano i codici di turbolenza basati sui modelli della fisica cinetica insieme alla pletora di modelli ibridi.

**La collaborazione di ENEA con il Cineca, sviluppatasi in ambito EUROfusion, ha portato al riconoscimento, da parte di quest'ultimo, di ENEA come tier-1 nazionale per i servizi di calcolo ad alte prestazioni.** Operativamente questo si è tradotto nella realizzazione, presso il centro di calcolo CRESCO di ENEA Portici, di un supercomputer da 1,4 Pflop/s di picco, basato sulla stessa soluzione tecnologica di MARCONI. Il supercomputer ENEA, denominato CRESCO6 (Figura 4), segue la lunga evoluzione dei supercomputer CRESCO, operativi presso il centro di Portici dal 2008. Nel novembre 2018 il supercomputer CRESCO6 si è classificato nella lista dei 500 supercomputer più potenti del mondo (al 420° posto) e costituisce dopo il Cineca la maggiore risorsa di supercalcolo a disposizione della comunità scientifica italiana.

I supercomputer dell'ENEA della generazione CRESCO hanno una architettura SMP multicore con una rete di interconnessione a bassa latenza e un filesystem parallelo ad elevate prestazioni. Come tutte

le risorse di calcolo ENEA, anche i supercomputer CRESCO sono integrati nella infrastruttura denominata ENEAGRID basata sulla condivisione dei dati distribuiti geograficamente. **Le risorse di calcolo sono prevalentemente al servizio delle attività progettuali dell'ENEA, ma numerose sono le collaborazioni con Università, Enti di Ricerca Pubblici e soggetti privati che hanno l'opportunità di accedere ai servizi di calcolo ad alte prestazioni avendo a disposizione tutti gli strumenti per lo sviluppo software e un supporto di elevato livello professionale.** Tanto per dare una stima sull'utilizzo delle risorse di calcolo dell'ENEA nell'anno 2018, dove CRESCO6 era operativo per metà della sua potenza di calcolo, ben 42,5 milioni di core-ora sono stati utilizzati dagli utenti. Con un costo standard di circa 0,02 EUR a core-ora sarebbero stati necessari circa 850k € di fondi per coprire le esigenze di calcolo ad elevate prestazioni in ENEA nel solo 2018. **L'ENEA è partner del Centro di Eccellenza europeo EoCoE (Energy Oriented Centre of Excellence) nel settore HPC finanziato dal proget-**

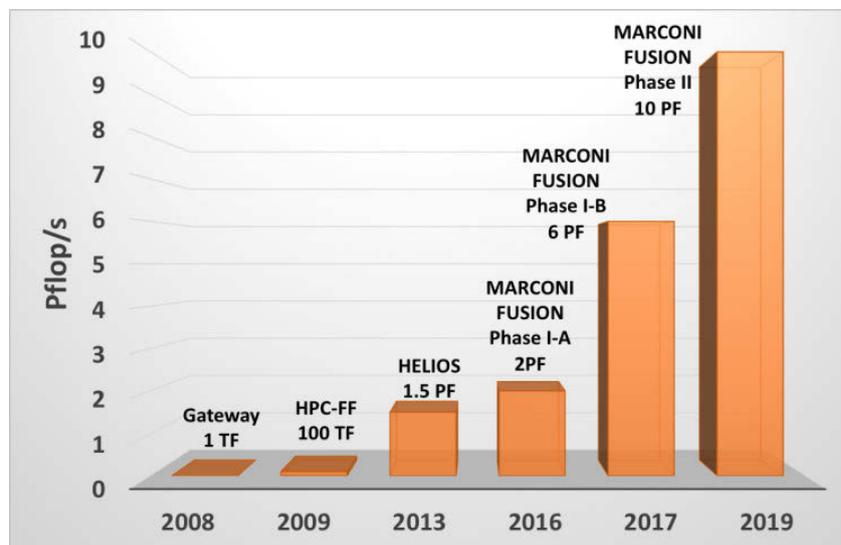


Fig. 2 Infrastrutture di calcolo avanzato disponibili negli anni ad uso esclusivo della ricerca europea sulla fusione

**to H2020 EoCoE-II, finalizzato allo sviluppo e ottimizzazione di applicazioni numeriche in campo energetico per le nuove generazioni di supercomputer exascale, includendo i codici gyro-cinetici rilevanti per i reattori a fusione nucleare[7].** Questi evolveranno in nuove versioni completamente riformulate, con I/O ottimizzato dall'ENEA e nuovi solutori paralleli, per rendere pos-

sibile simulare l'intero tokamak con accuratezza mai raggiunta prima. Inoltre ENEA è *full member dell'European Technology Platform for High Performance Computing (ETP4HPC)* costituito da tutti gli *stakeholder* europei impegnati nel definire i piani di azione evolutiva nel campo del calcolo ad elevate prestazioni. Inoltre, insieme a Cineca e INFN, l'ENEA partecipa all'Associazione *BigData* in progetti di integrazione di infrastrutture digitali federate fornite come servizio capaci di consentire l'accesso a tecnologie ad elevate prestazioni: calcolo, reti e dati, da parte di comunità pubbliche e private. L'integrazione fornirà una piattaforma *open science* in grado di supportare le comunità di ricerca nazionali, lo sviluppo di nuove metodologie computazionali e la partecipazione a progetti congiunti [9].

### Infrastrutture di calcolo dedicate

Ma in che cosa consiste il contributo del supercalcolo alla ricerca sulla fusione? Tutti i fenomeni fundamenta-

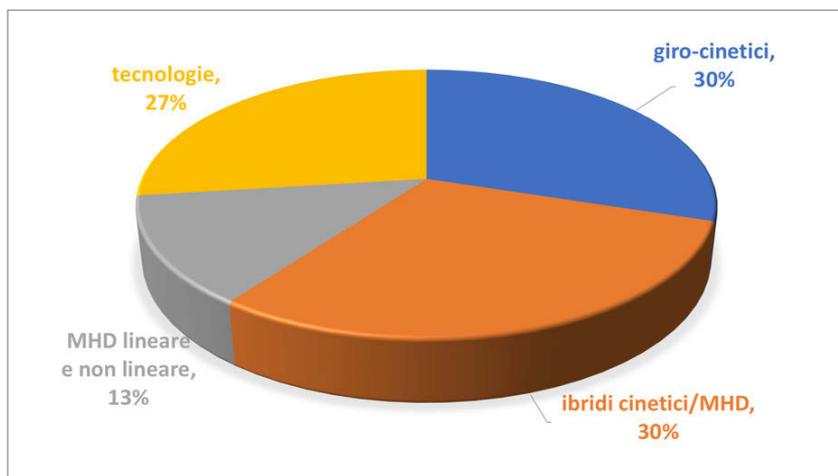


Fig. 3 Ripartizione delle risorse di MARCONI Fusion nell'ultimo ciclo di allocazione (2018)

li della fisica dei plasmi sono dovuti all'interazione di un gran numero di particelle cariche attraverso la forza di Coulomb. Quando il numero di particelle cariche è relativamente grande rispetto ai volumi dello spazio, esse tendono a raggiungere una configurazione di equilibrio di quasi-neutralità sviluppando un comportamento collettivo quasi 'ordinato' che predomina sull'agitazione termica. Talvolta, però il comportamento collettivo può degenerare in fenomeni di instabilità che, di fatto, costituiscono il maggiore ostacolo alla realizzazione di un reattore a

fusione. Le temperature in gioco nel plasma e le velocità con cui si propagano i fenomeni all'interno di esso impongono ai modelli numerici di risolvere equazioni con una accuratezza sia spaziale che temporale altissima, altrimenti ogni piccola incertezza numerica rischia di propagarsi rapidamente e in modo imprevedibile durante le simulazioni, conducendo a conclusioni errate. **I supercomputer in grado di risolvere tali equazioni dinamiche devono avere caratteristiche ben precise in termini di processori, memoria, software, compilatori e reti di co-**

**municazione, tanto che è necessario realizzare infrastrutture di calcolo dedicate.**

### Modelli numerici

I plasmi confinati magneticamente costituiscono la principale linea di ricerca dei reattori a fusione. In essi si possono soprattutto sviluppare processi non lineari attraverso l'interazione di vari fenomeni singoli su larghe scale spazio temporali. A causa di queste enormi scale spazio temporali vengono definiti differenti modelli in cui specifici comporta-

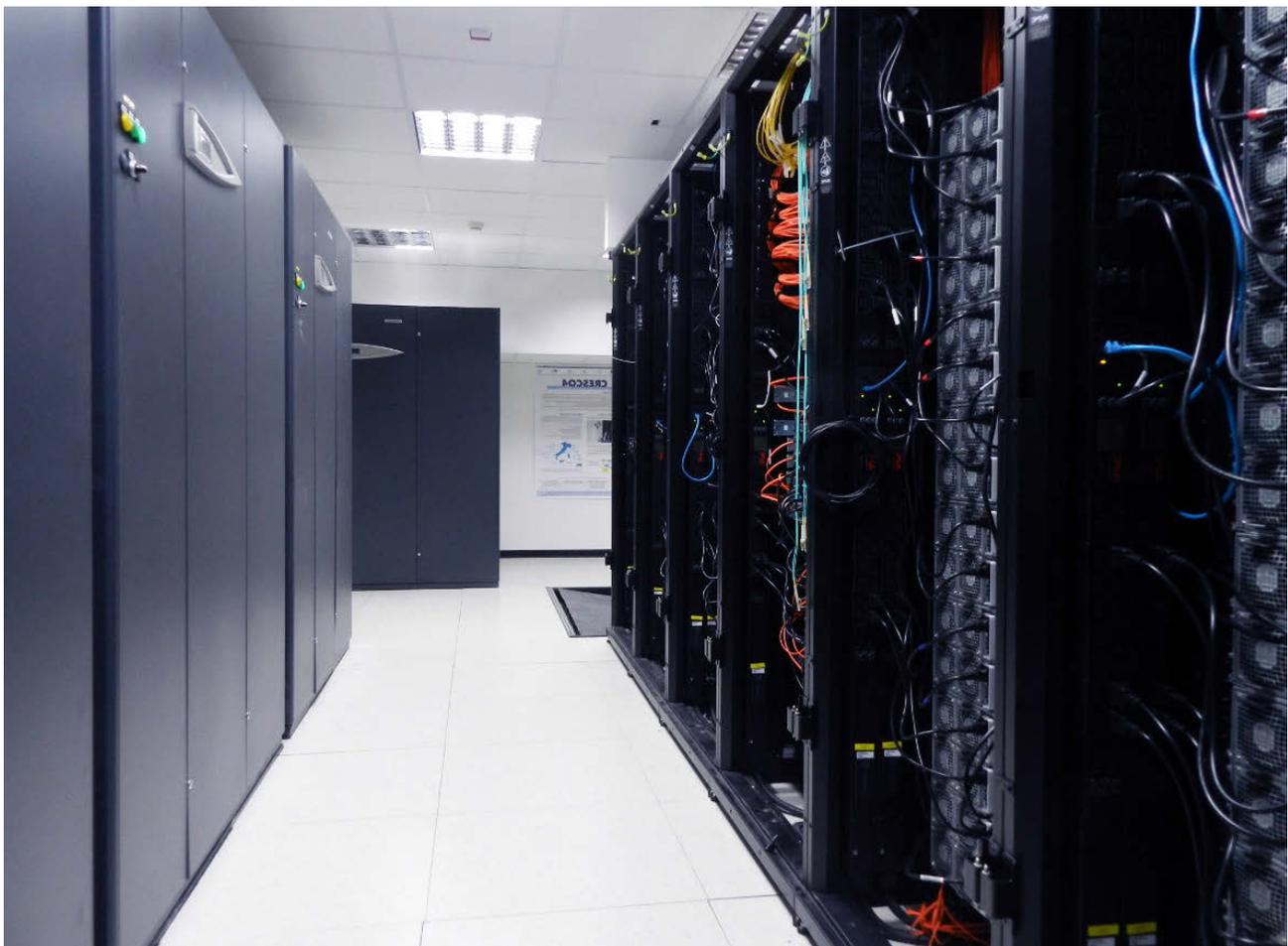


Fig. 4 CRESCO6, il supercomputer ENEA da 1,4 Pflop/s

menti del plasma vengono simulati. Due di questi modelli vengono principalmente usati nel campo della fusione termonucleare controllata a scopi energetici: la magnetoidrodinamica (MHD) e la teoria cinetica. Esiste inoltre una pletora di modelli ibridi che usano approssimazioni di entrambi per studiare i comportamenti del plasma e che non possono essere simulati indipendentemente da ciascuno di essi.

### La magnetoidrodinamica (MHD)

La maggior parte dei fenomeni macroscopici visti dagli esperimenti possono essere descritti dalla MHD. I codici di calcolo dei modelli MHD non sono particolarmente onerosi dal punto di vista computazionale e riescono a simulare le instabilità su larga scala dei plasmi confinati magneticamente. I modelli MHD sono usati sia nella progettazione, sia negli scenari operativi dei plasmi reattoristici sperimentali dei tokamak su cui si basa la configurazione magnetica di ITER. I principali codici numerici adottati eseguono la discretizzazione delle equazioni MHD con metodi alle differenze o agli elementi finiti su architetture a memoria condivisa SMP (Symmetric MultiProcessing) con il parallelismo implementato a livello di compilatore basato sullo standard OpenMP.

La Figura 5 mostra la tipica instabilità “a dente di sega”, ottenuta mediante la simulazione numerica di un modello MHD nella tipica configurazione magnetica dei tokamak. Mentre questa instabilità è ben conosciuta sperimentalmente dal 1975, le sue cause e la dinamica non sono ancora ben conosciute. Per questo le simulazioni numeriche giocano un ruolo determinante nel confrontare i modelli MHD con i dati sperimentali [1-3].

### La teoria cinetica

Mentre la MHD descrive i comportamenti macroscopici dei plasmi, questi, nelle applicazioni reattoristiche, mostrano regimi di

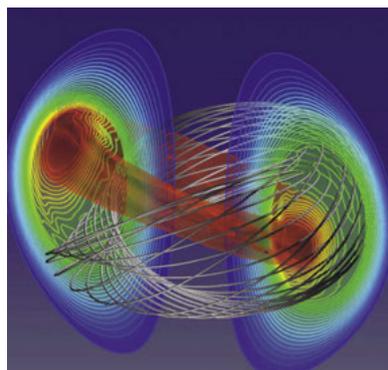


Fig. 5 Instabilità a dente di sega simulata numericamente con un codice numerico MHD ([4] DOE - USA)

turbolenza su scale spazio temporali piccole tanto da richiedere un differente modello per evidenziarne le proprietà (Figura 6). Questo modello si basa sulla teoria della cinetica fisica dove gioca un ruolo fondamentale l'equazione di Boltzmann per la *funzione di distribuzione* nello spazio delle fasi a 6 dimensioni. Nei modelli numerici di plasmi confinati magneticamente rilevanti per i reattori a fusione, di notevole successo rivestono i codici gyro-cinetici, in cui si riduce la complessità utilizzando una rappresentazione dello spazio delle fasi a 5 dimensioni [5]. I modelli della fisica cinetica vengono sempre maggiormente utilizzati nella ricerca sulla fusione nucleare a scopi energetici, grazie alla crescente disponibilità di risorse di calcolo di cui hanno un enorme bisogno. Le attuali architetture di supercomputer si basano su migliaia di nodi SMP di CPU multi-core, interconnessi da

reti ad alte prestazioni con bassa latenza e grandi larghezze di banda.

Alcuni codici gyro-cinetici 5D eseguono grandi simulazioni su supercomputer della classe petascale (milioni di miliardi di operazioni in virgola mobile al secondo), fino a 65k *cores* grazie alla programmazione parallela ibrida MPI (Message Passing Interface) per la comunicazione fra i nodi, e OpenMP per il parallelismo SMP a memoria condivisa. I codici gyro-cinetici sono inseriti nel processo di ottimizzazione per le prossime architetture exascale di supercomputer (miliardi di miliardi di operazioni in virgola mobile al secondo) [7]. Accanto ai modelli deterministici formulati dalle equazioni costitutive introdotte precedentemente, esistono, nel campo della simulazione numerica applicata alla progettazione dei futuri reattori a fusione, codici di calcolo basati sui metodi *Monte Carlo*, quali ad esempio MCNP sviluppato presso i laboratori nazionali di Los Alamos [8]. Dal punto di vista del calcolo parallelo, i metodi *Monte Carlo* presentano una maggiore scalabilità

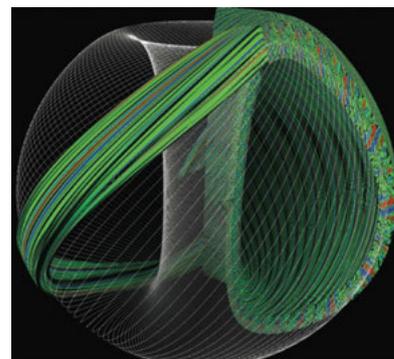


Fig. 6 Simulazione delle turbolenze nei plasmi utilizzando i modelli cinetici ([6] DOE - USA)

nell'ambito della programmazione ibrida MPI+OpenMP, in quanto la comunicazione intra-nodi con MPI è

irrelevante. Questo fa sì che tali metodi possono accoppiarsi agli algoritmi di *deep-learning* utilizzati con eccellenti prestazioni sulle nuove architetture di supercomputer accelerati basati su GPGPU (General Purpose Graphic Processor Unit).

## Conclusioni

**I supercomputer sono uno strumento importante per la ricerca sulla fusione termonucleare controllata, in quanto capaci di simulare fenomeni complessi con un ottimo grado di attendibilità. La**

**collaborazione fra ENEA e il Cineca ha consentito di posizionarsi con un ruolo da protagonisti nell'ecosistema del supercalcolo dedicato alla ricerca sulla fusione nucleare per scopi energetici. Si tratta di una partnership solida che continuerà a fornire i servizi di supercalcolo a tutta la comunità europea della fusione fino al 2023. Le ricadute di questa attività per l'ENEA sono particolarmente importanti, in quanto essa consente di mantenere un ruolo di primo piano nel panorama nazionale del calcolo ad alte prestazioni, e di assicurare importanti risorse**

**computazionali ai gruppi di ricerca ENEA e ai loro partner su un ampio spettro di attività di R&S.**

## Ringraziamenti

Si ringraziano i colleghi del Cineca Carlo Cavazzoni, Elda Rossi, Sanzio Bassini, i colleghi ENEA Aldo Pizzuto e Maria Laura Sansovini e gli ex ENEA Giovanni Bracco e Andrea Quintiliani per il loro contributo alla realizzazione dell'infrastruttura HPC dedicata esclusivamente alla ricerca e sviluppo europea sulla fusione nucleare a scopi energetici.

## BIBLIOGRAFIA

1. F. F. Chen, Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion, 2nd Ed. (Springer, 2010)
2. W. M. Tang and V. S. Chan, "Advances and Challenges in Computational Plasma Science," Plasma Phys. Control. Fusion, 47, R1 (2005)
3. S. Jardin, Computational Methods in Plasma Physics (CRC Press, 2010)
4. A. Parker, "Multigrid Solvers Do the Math Faster, More Efficiently," Science and Technology Review, Lawrence Livermore National Laboratory, December 2003, p. 17
5. M. R. Fahey and J. Candy, "Gyro: A 5-D Gyrokinetic-Maxwell Solver," Proc. ACM/IEEE Conf. on Supercomputing, 6 Nov 04
6. A. Heller, "Simulating Turbulence in Magnetic Fusion Plasmas," Science and Technology Review, Lawrence Livermore National Laboratory, January/February 2002, p. 9
7. EoCoE-II: Energy oriented Centre of Excellence: toward exascale for energy. Progetto triennale H2020-INFRAEDI 2018-2020 (European Data Infrastructure) finanziato con 8,3 milioni di euro e partito a gennaio 2019 (Grant Agreement Number: 824158). Maggiori informazioni su [www.eocoe2.eu](http://www.eocoe2.eu)
8. R. A. Forster, R. C. Little, J. F. Briesmeister, and J. S. Hendricks, "MCNP Capabilities For Nuclear Well Logging Calculations," IEEE Transactions on Nuclear Science, 37 (3), 1378 (June 1990)
9. "SUPER: Supercomputing Unified Platform – Emilia Romagna": progetto finanziato dalla Regione Emilia-Romagna (POR FESR 2014-2020)

# Energia e cambiamento climatico

Tra cambiamento climatico ed energia vi è un legame forte e sempre più allarmante, causato dall'utilizzo delle fonti fossili che provocano il riscaldamento del Pianeta e le sue drammatiche conseguenze. L'unica via d'uscita è cambiare modelli di consumo, introdurre tecnologie per produrre di più con meno, per aumentare l'efficienza energetica nei processi produttivi e per sostituire le fonti fossili con fonti rinnovabili e a bassissima emissione di carbonio. I prossimi anni risultano cruciali sotto questo aspetto; infatti, le analisi scientifiche più recenti (IPCC, 2018) dimostrano che solo se agiamo subito per ridurre drasticamente le emissioni di CO<sub>2</sub> entro i prossimi 10 anni sarà possibile contenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto dei 2° C rispetto alla temperatura media preindustriale

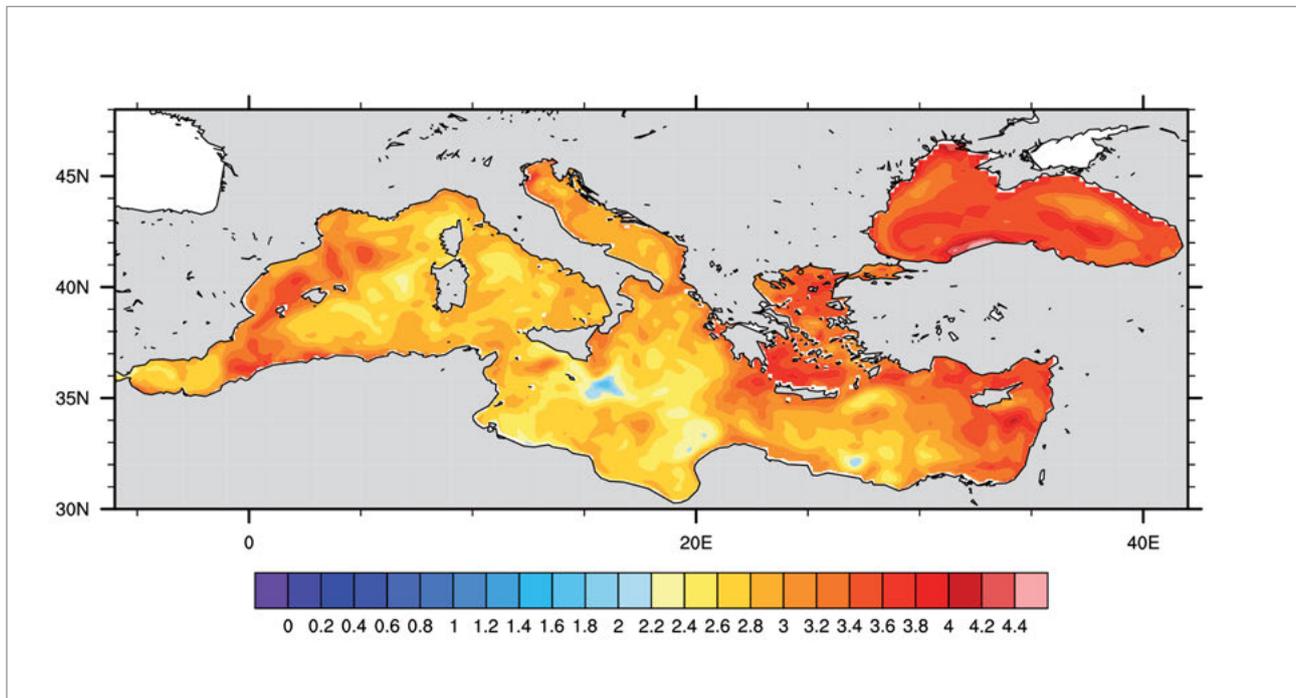
DOI 10.12910/EAI2019-020

di **Gianmaria Sannino**, ENEA, Responsabile del Laboratorio di Modellistica Climatica e Impatti

Il nostro pianeta è una macchina termica che intercetta l'energia solare e la trasforma in calore, movimento dell'aria e dei mari, e ciclo dell'acqua. Un terzo dei raggi solari ricevuti dalla terra è riflesso nell'atmosfera sotto forma di radiazione infrarossa; i restanti due terzi sono assorbiti dagli oceani e dal suolo. I gas naturalmente presenti nell'atmosfera, come l'ozono (O<sub>3</sub>), il vapore acqueo (H<sub>2</sub>O), il protossido d'azoto (NO<sub>2</sub>), il metano (CH<sub>4</sub>) o l'anidride carbonica (CO<sub>2</sub>), impediscono che parte di queste radiazioni fuoriescano nello spazio e le restitui-

scono alla terra, riscaldandola. È l'effetto serra, un fenomeno naturale che agisce come regolatore climatico e permette alla Terra di avere una temperatura media di 15° C. In assenza di effetto serra, la temperatura media sulla superficie del nostro pianeta sarebbe molto più bassa: -18° C. **Dalla rivoluzione industriale ai giorni nostri l'uomo ha modificato questo equilibrio immettendo in atmosfera enormi quantità di gas serra (effetto serra antropico). Principalmente CO<sub>2</sub> (77%), proveniente dall'uso di combustibili fossili (petrolio, carbone, gas), ma anche metano, pro-**

**veniente dall'agricoltura intensiva e dalle discariche a cielo aperto. Anche la deforestazione è causa dell'effetto serra antropico:** quando gli alberi vengono abbattuti o incendiati il potenziale degli ecosistemi di immagazzinare CO<sub>2</sub> è indebolito e, di conseguenza, le nostre emissioni risultano indirettamente aumentate. L'effetto netto della combustione di combustibili fossili e della deforestazione corrisponde attualmente a un rilascio annuo di CO<sub>2</sub> in atmosfera di 40 miliardi di tonnellate. La metà di queste emissioni viene assorbita dalla vegetazione, dal suolo e dagli



Incremento della temperatura (°C) superficiale del Mediterraneo al 2100 rispetto ai valori attuali. Mappa realizzata dal modello climatico ENEA per lo scenario rcp8.5

oceani (che tuttavia reagiscono aumentando la loro acidità). Ma l'altra metà si accumula alle emissioni degli anni precedenti, modificando di fatto la composizione chimica dell'atmosfera. **Dal 1850 la CO<sub>2</sub> in atmosfera è aumentata del 40%. Era 270 ppm (parti per milione) alla fine del XIX secolo. Oggi ha raggiunto e superato l'allarmante valore di 410 ppm, la più alta concentrazione dell'ultimo milione di anni. Nello stesso periodo, la temperatura media superficiale della terra è aumentata più o meno costantemente, raggiungendo nel 2016 il valore più alto mai registrato dal 1850: 1,2 °C in più rispetto al periodo preindustriale.**

La scienza ha ormai dimostrato in maniera inequivocabile come l'aumento progressivo dell'anidride carbonica e del metano in atmosfera sia la causa principale dell'attuale riscalda-

mento globale (IPCC, 2013). Secondo l'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO, 2018) i 20 anni più caldi si sono verificati tutti negli ultimi 22 anni e i primi 4 solo negli ultimi 4 anni. La WMO riferisce inoltre che per il decennio 2006-2015 la temperatura media globale era già aumentata di 0,86 °C rispetto a quella del periodo preindustriale. Per l'ultimo decennio (2009-2018) la temperatura media è stata più alta di circa 0,93 °C, e per gli ultimi cinque anni (2014-2018) la media si è attestata a 1,04 °C al di sopra della media preindustriale.

#### **Il riscaldamento globale sta "disturbando" il clima**

Una delle conseguenze del riscaldamento globale è il cambiamento climatico, i cui effetti più evidenti sono lo scioglimento delle calotte polari,

l'innalzamento del livello del mare - alcune isole del Pacifico stanno già scomparendo e i loro abitanti hanno già in programma di emigrare in altre isole che al momento sono più sicure -, l'aumento della frequenza degli eventi meteorologici estremi, la siccità, gli incendi boschivi, le inondazioni, il degrado degli ecosistemi e la perdita di biodiversità. In altre parole, il riscaldamento globale sta "disturbando" il clima. **È bene sottolineare che il clima non è mai stato stabile; nella storia del nostro pianeta il clima è sempre cambiato, ma l'attuale crisi climatica è unica per velocità, intensità, cause e, soprattutto, conseguenze.**

Il cambiamento climatico antropogenico ha già portato a modifiche sostanziali nelle medie e negli estremi di molte variabili climatiche. Ulteriori cambiamenti climatici sono

ormai inevitabili, ma la velocità e l'entità dipendono dal successo delle politiche globali di mitigazione. Per questo motivo, alla ventunesima Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (di seguito indicata COP21) che si è tenuta a Parigi nel 2015, quasi tutti i Paesi del pianeta (195) hanno deciso di mettere in atto un piano per combattere il riscaldamento globale. I punti principali dell'accordo prevedono che si trovi un equilibrio tra le emissioni e gli assorbimenti di gas serra a partire dal 2050, mantenendo l'aumento della temperatura globale ben al di sotto dei 2° C; che si analizzino i risultati ottenuti ogni cinque anni; che le azioni per il clima a favore dei Paesi in via di Sviluppo siano finanziate con 100 miliardi di dollari all'anno, fino al 2020, con l'impegno a continuare questo finanziamento anche dopo il 2020.

**L'accordo di Parigi suggerisce inoltre che il riscaldamento globale può essere fortemente limitato attraverso l'applicazione di politiche energetiche incisive, come l'aumento dei prezzi dei combustibili fossili in favore di investimenti in tecnologie a bassissima emissione di carbonio. Il messaggio è chiaro: i combustibili fossili appartengono al passato, mentre in futuro l'energia può essere solo a emissione di carbonio nulla.**

Tuttavia, nonostante i buoni propositi della COP21, il sistema energetico mondiale continua ad essere il maggiore emettitore di gas a effetto serra a causa della sua grande dipendenza dai combustibili fossili. **L'accordo di Parigi è stato firmato nel 2015 e da allora le emissioni di CO<sub>2</sub> legate alla produzione di energia sono aumentate del 4%. In particolare il 2018 ha visto crescere il consumo energetico mondiale**

**del 2,3%, quasi il doppio rispetto al tasso medio di crescita registrato negli ultimi dieci anni.** Questa crescita è stata trainata da una solida economia globale, ma anche dalle condizioni meteorologiche estreme che in alcune parti del mondo hanno portato ad un aumento della domanda di riscaldamento e di raffreddamento. La maggiore richiesta di energia è stata soddisfatta principalmente dai combustibili fossili che hanno contribuito per il 77% dell'intera energia prodotta. **Come risultato del maggiore consumo energetico, le emissioni globali di CO<sub>2</sub> legate alla produzione di energia hanno raggiunto la cifra record di 33,1 miliardi di tonnellate, con un aumento rispetto al 2017 dell'1,7%.** (Le Quéré, C. et al., 2018).

### **Il Rapporto Speciale dell'IPCC**

Come evidenziato di recente nel rapporto Speciale sul Riscaldamento Globale di 1,5 °C pubblicato dal Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico (IPCC, 2018), il divario tra aspettative e realtà nella lotta ai cambiamenti climatici rimane significativo. L'incremento delle emissioni di CO<sub>2</sub>, guidato tra l'altro da investimenti miopi nei combustibili fossili, aumenta il rischio che il mondo si allontani sempre più dal percorso delineato dalla COP21. **La relazione chiarisce che è necessaria con urgenza una transizione energetica e che le energie rinnovabili, quelle a bassa emissione di carbonio, l'efficienza energetica e l'elettrificazione sono i pilastri di tale transizione.** Le tecnologie sono già oggi disponibili, sono applicabili su larga scala e sono competitive in termini di costi. A livello internazionale va detto

che l'Unione Europea da diversi anni ha adottato una politica energetica che incoraggia gli Stati membri ad aumentare l'uso di fonti rinnovabili e a ridurre i combustibili fossili. Il Clean Energy Package presentato dalla Commissione nel 2016, sostiene questo approccio e contiene proposte legislative per lo sviluppo delle fonti energetiche rinnovabili e del mercato elettrico, la crescita dell'efficienza energetica e la definizione della governance dell'Unione dell'energia. In particolare, il pacchetto energia-clima fissa tre obiettivi principali da raggiungere entro il 2030: una riduzione di almeno il 40% delle emissioni di gas a effetto serra (rispetto ai livelli del 1990), una quota di almeno il 27% di energie rinnovabili e un miglioramento di almeno il 27% dell'efficienza energetica. Gli obiettivi principali comprendono pertanto l'adozione di misure efficaci sotto il profilo dei costi per raggiungere l'obiettivo a lungo termine e la riduzione delle emissioni dell'80-95% entro il 2050, nonché la necessità di porre le basi per un contributo all'accordo internazionale sul clima, che entrerà in vigore nel 2020.

A livello nazionale, la programmazione del comparto energia si è concretizzata nel 2017 con lo strumento della Strategia Energetica Nazionale (di seguito SEN) che consiste in un piano decennale del Governo volto ad indirizzare e gestire tra l'altro la decarbonizzazione del sistema energetico. La SEN, in particolare, prevede un'accelerazione nella decarbonizzazione del sistema energetico -a partire da un netto taglio dell'uso del carbone dal 2025- e una serie di azioni di semplificazione e razionalizzazione del sistema energetico per ottenere riduzioni sensibili dei costi delle tecnologie rinnovabili. La SEN

definisce inoltre le misure da applicare per raggiungere i traguardi di crescita sostenibile stabiliti dalla COP21. In questo contesto la SEN rappresenta un tassello imprescindibile del Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC) per il periodo 2021-2030, che sarà pubblicato in forma definitiva il 31 dicembre 2019. Tuttavia è da evidenziare che la Commissione Europea, dopo aver valutato la bozza di proposta PNIEC, ha suggerito al nostro paese maggiore ambizione nel piano per assicurare il raggiungimento dei target climatici per il 2030 e la transizione verso un'economia a impatto climatico zero entro il 2050 attraverso un maggior ricorso alle fonti rinnovabili, all'efficienza energetica e, in prospettiva, alla fusione nucleare,

una tecnologia sostenibile, pulita e senza scorie.

### Anni cruciali

**I prossimi anni risultano cruciali; le analisi scientifiche più recenti (IPCC, 2018) hanno dimostrato che solo se agiamo subito, riducendo in maniera drastica le emissioni di CO<sub>2</sub> entro i prossimi 10 anni, saremo in grado di contenere l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto dei 2 °C rispetto alla temperatura media preindustriale.** Ma per raggiungere questo obiettivo è necessaria una revisione profonda delle politiche energetiche a livello internazionale. In altre parole la transizione energetica deve avvenire molto più rapi-

damente di quanto attualmente previsto. Secondo il recente rapporto IRENA (2019) sulla trasformazione del sistema energetico globale, per raggiungere gli obiettivi climatici suggeriti dalla COP21, la diffusione delle energie rinnovabili dovrebbe aumentare di almeno sei volte rispetto agli attuali piani dei maggiori Paesi industrializzati. Se si seguissero gli attuali piani energetici, infatti, le emissioni annue di CO<sub>2</sub> legate alla produzione di energia diminuirebbero solo leggermente entro il 2050, e questo contribuirebbe a far aumentare la temperatura media superficiale del nostro pianeta di almeno 2,6 °C entro il 2050 rispetto al periodo preindustriale, con devastanti ripercussioni sociali, politiche ed economiche.

### BIBLIOGRAFIA

1. Le Quéré, C. et al. (2018). Global Carbon Budget 2018, *Earth Syst. Sci. Data*, 10, 2141–2194, <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>, 2018. <https://doi.org/10.5194/essd-10-2141-2018>, 2018
2. IPCC (2013): *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp
3. IPCC (2018): *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]
4. IRENA (2019), *Global energy transformation: A roadmap to 2050* (2019 edition), International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi

# Povertà energetica e innovazione tecnologica

Nel processo di transizione energetica in atto,   necessario tenere in considerazione anche tematiche complesse come la povert  energetica e l'accesso all'energia che coinvolgono miliardi di esseri umani. Lo sviluppo di tecnologie innovative ed efficienti pu  contribuire a garantire una maggiore equit  dei processi di consumo energetico in attesa che altre soluzioni tecnologiche, come ad esempio la fusione, possano portare a una produzione di energia sostenibile e disponibile su ampia scala

10.12910/EAI2019-021

di **Chiara Martini**, ENEA, Dipartimento Unit  Efficienza Energetica

**L**a necessit  di politiche e misure per la lotta al cambiamento climatico raccoglie un consenso quasi ormai unanime a livello internazionale. L'Unione Europea   stata pioniera nelle iniziative per contenere l'aumento delle temperature, nella promozione delle fonti energetiche rinnovabili e dell'efficienza energetica, introducendo gi  nel 2007 obiettivi molto sfidanti con orizzonte 2020. Tuttavia, nonostante il diffuso consenso sull'esigenza di contrastare il *global warming*, non   stato facile raggiungere un'intesa fra i Paesi UE sul limite massimo per l'innalzamento della temperatura, fissato in 1,5  C dall'Accordo di

Parigi, in linea con le analisi dell'International Panel on Climate Change. A livello politico, infatti,   stato deciso l'obiettivo del contenimento entro i 2  C, un valore meno stringente di quello indicato dalla COP 21 a Parigi.

**Per orientare produzione e consumo di energia verso il raggiungimento di questo target   senza dubbio necessaria una transizione energetica da raggiungere attraverso la decarbonizzazione, la diffusione delle energie rinnovabili e dell'efficienza e, pi  nel lungo termine, esplorando il contributo di soluzioni innovative. Fra queste c'  senz'altro la fusione nucleare, una tecnologia rivoluzionaria che**

**potrebbe consentire di produrre una grande quantit  di energia utilizzando un combustibile a basso costo, disponibile su ampia scala e non inquinante.**

La transizione verso un'economia decarbonizzata ha un valore attuale netto positivo grazie ai benefici multipli associati alle energie rinnovabili e all'efficienza energetica, ad esempio sulla salute e la creazione di nuova occupazione.   per  anche vero che questo processo comporta costi, ad esempio dovuti alle politiche di mercato dirette a incorporare gli impatti ambientali o associati al finanziamento di politiche di incentivazione di fonti energetiche pi  sostenibili. Raggiungere un accordo su



come devono essere ripartiti questi costi, ovvero su quali siano i soggetti che devono sostenerli in misura maggiore o minore, è un processo caratterizzato da non poche difficoltà. Ecco quindi che si pone la questione distributiva associata al raggiungimento degli obiettivi energetici e ambientali di lungo termine, più che mai di attualità e di non facile soluzione.

Prendendo le mosse dalla relazione individuata dall'economista Simon Kuznets sulla disuguaglianza nella distribuzione del reddito, un'ampia letteratura economica ha analizzato l'esistenza di una curva di Kuznets ambientale, cioè di una relazione ad U rovesciata, secondo la quale il progredire della crescita economica implicherebbe un aumento del danno ambientale fino ad un picco massimo oltre il quale si dovrebbe osservare una diminuzione degli impatti ambientali. La validità di una simile ipotesi implicherebbe, in termini di uso dell'energia, la possibilità di un progressivo efficientamento al crescere del reddito.

### **Equità distributiva e produzione sostenibile**

Come mostrato dal monitoraggio dei Sustainable Development Goals delle Nazioni Unite, attualmente quasi un

miliardo di persone non ha accesso all'energia elettrica, e questo indica che, per raggiungere standard di vita analoghi ai nostri, i consumi energetici devono ancora crescere in molti Paesi del mondo. Gli obiettivi di riduzione delle emissioni climateranti e i relativi interventi di policy per la lotta al cambiamento climatico sono quindi da ispirare anche a criteri di equità distributiva e le tecnologie per la produzione sostenibile ed efficiente di energia possono offrire soluzioni promettenti in questo senso. Nei processi di crescita dei Paesi in via di sviluppo, infatti, le tecnologie per l'efficienza, se sostenute dai necessari investimenti, offrono un enorme potenziale: esse potrebbero creare le condizioni, ad esempio, per costruire un parco edilizio, ad uso residenziale e non, più performante, oppure per dotare le famiglie di elettrodomestici a basso consumo energetico.

Anche nei Paesi sviluppati, come il nostro, l'accesso a servizi energetici di base può costituire un problema rilevante: **secondo l'Osservatorio Europeo sulla povertà energetica, nel 2016 circa 45 milioni di persone non sono state in grado di riscaldare adeguatamente la propria casa e 41 milioni hanno riscontrato**

**problemi di morosità con le bollette energetiche.** Questo non fa che evidenziare il ruolo dell'efficienza energetica e, più nel lungo termine, di soluzioni tecnologiche innovative. Confermando la crescente attenzione al problema, il Clean Energy Package cita la povertà energetica in diversi provvedimenti legislativi, come la Direttiva per l'efficienza energetica e la Direttiva sulla prestazione energetica nell'edilizia. Questo pacchetto di riforma ha visto il suo completamento a metà giugno, quando sono stati pubblicati in Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea gli ultimi provvedimenti legislativi, e ora si attende il loro recepimento da parte dei Paesi membri.

Alla base della misurazione e del monitoraggio della povertà energetica c'è la sua definizione, che risulta però complessa vista la natura trasversale del fenomeno. A livello europeo non esiste una definizione univoca e l'Osservatorio propone diversi indicatori di natura soggettiva o oggettiva, come ad esempio l'incapacità di riscaldare adeguatamente la casa o un'elevata quota della spesa energetica sul totale. Questi indicatori possono essere utilizzati in maniera combinata ed anche associati ad indicatori indiretti di povertà energetica, come i prezzi energetici o la classe energetica dell'abitazione. In Italia, la Strategia Energetica Nazionale del 2017 ha introdotto una misura di povertà energetica, adottata anche nella bozza di Piano Nazionale Integrato Energia e Clima (PNIEC), che definisce una famiglia in povertà energetica con riferimento all'incidenza della spesa energetica sul totale e al livello di spesa complessiva inferiore alla soglia di povertà relativa, considerando anche le famiglie con spesa per riscaldamento nulla. **Questa misura permette di valutare le**

**azioni dirette a ridurre l'intensità della povertà energetica: nel nostro Paese esistono diverse misure di policy, alcune di natura sociale, come i bonus elettricità e gas, e altre di natura strutturale, come l'Ecobonus, che con la cessione del credito potrebbe essere caratterizzato da crescenti possibilità di accesso da parte delle famiglie in povertà energetica. In linea con il Clean Energy Package, le misure nuove ed esistenti per contrastare la povertà energetica dovranno essere descritte, oltre che nel PNIEC, nella Strategia di Riquilibrificazione Energetica del Parco Immobiliare Nazionale, per poi monitorarne i risultati e renderle sempre più efficaci.**

### La sufficienza energetica

In anni recenti è emerso il concetto di *sufficienza energetica*, con alcuni aspetti in comune, ma anche alcuni tratti più innovativi rispetto al paradigma dello sviluppo sostenibile, introdotto nel 1987 con il rapporto Brundtland. Come descritto nella *doughnut economy* (economia della ciambella), un approccio ideato da Kate Raworth all'interno della ONG inglese Oxfam, la *sufficienza energetica* è da intendersi come uno spazio dove sono garantiti i servizi energetici di base e i processi di consumo sono attuati all'interno dei limiti definiti dalla sostenibilità ambientale. La *sufficienza energetica* viene così ad affiancarsi all'efficienza per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione nella lotta al cambiamento climatico, orientando le scelte di consumo anche verso soluzioni non tecnologiche, ma associate al cambiamento comportamentale e a una riorganizzazione dell'ambiente urbano. La povertà energetica potrebbe

essere intesa come mancanza di sufficienza, cioè una condizione in cui non è garantito l'accesso ai servizi energetici di base, come il riscaldamento o l'energia elettrica. Sicuramente le interrelazioni tra sufficienza e povertà energetica sono numerose e devono essere analizzate avendo sempre in mente considerazioni di equità distributiva. Ad esempio, è probabile che famiglie in povertà energetica, a fronte di elevati prezzi dell'energia, abbiano sviluppato soluzioni comportamentali di sufficienza energetica, come ad esempio il raffrescamento della casa con la corrente naturale, con la conseguente riduzione di consumi energetici non strettamente necessari. Questi comportamenti potrebbero essere utilmente replicabili presso famiglie in fasce reddituali più benestanti, e disponibili a ridurre il loro elevato livello di comfort per scopi di tutela ambientale. Parallelamente, alle famiglie in povertà energetica potrebbe essere fornito un sostegno per investimenti in efficienza, ridimensionandone così alcuni consumi energetici, liberando risorse economiche da dedicare ad altre voci di consumo, anche energetico, e aumentando così il livello di comfort complessivo. L'identificazione dei bisogni energetici fondamentali è sicuramente una questione aperta e dibattuta, essendo essi influenzati anche dalle norme sociali, caratterizzate da una lenta evoluzione e differenziate a seconda dei Paesi. Analogamente, è un aspetto in evoluzione anche quello relativo alle dimensioni da includere nella misura della povertà energetica: il raffrescamento viene in molti casi considerato una dimensione rilevante mentre i trasporti sono ancora quasi sempre esclusi, anche se in alcuni casi si comincia a considerare la distanza dai

servizi di trasporto pubblico.

**È ancora presto per dire come l'energia del futuro, anche con le prospettive di disponibilità illimitata e a basso costo associabili alla fusione, potrà incidere sui costi dei servizi energetici e sulla questione di equità distributiva dei processi di consumo.** I tempi non sono infatti ancora maturi per identificare questa nuova fonte di energia come possibile soluzione di lungo periodo a un fenomeno come la povertà energetica, le cui dimensioni potrebbero aumentare a causa di variabili come la distribuzione dei costi delle politiche per la lotta al cambiamento climatico la maggiore frequenza di fenomeni climatici estremi. Quale sia il ruolo di un approccio comportamentale e di una rivoluzione negli stili di vita associata al concetto di sufficienza energetica è anch'esso una questione aperta e suscettibile al futuro cambiamento tecnologico, comprensivo anche del possibile *break through* innescato da una tecnologia come la fusione. Quel che è certo è che **la transizione energetica è già in atto e dovrà accelerare per contenere l'aumento di temperatura entro i 2 °C, e in questo processo vanno tenuti necessariamente in considerazione anche l'accesso all'energia e la condizione di povertà energetica. Indirizzare le migliori soluzioni tecnologiche esistenti, ad esempio nell'ambito della riqualificazione energetica degli edifici, verso le famiglie vulnerabili e in condizioni di povertà energetica, rappresenta una promettente soluzione per garantire una maggiore equità dei processi di consumo energetico, in attesa che una soluzione rivoluzionaria come la fusione possa eventualmente portare benefici anche di tipo sociale e sulle fasce più deboli della popolazione.**

NEL PROSSIMO NUMERO PARLEREMO DI:

# Economia circolare: la nuova rivoluzione industriale

L'Italia è prima in Europa nella classifica dell'economia circolare, la nuova 'rivoluzione industriale'.

Ma quali prospettive e opportunità può offrire questo nuovo modello di crescita e sviluppo? Quali ricadute per l'ambiente, l'economia, l'occupazione e la competitività del nostro Paese? E come può influire a livello sociale, in termini di sostenibilità, inclusione, qualità della vita e attenzione al futuro del Pianeta?

Di questi temi, di strumenti concreti, modelli e soluzioni operative, ma anche di policy parleremo sul prossimo numero di Energia Ambiente Innovazione.

Ci accompagneranno esponenti delle Istituzioni, del mondo universitario, delle imprese, esperti nazionali e internazionali e i nostri ricercatori e tecnologi, attraverso laboratori e centri di ricerca ENEA a conoscere tecnologie innovative per il riuso ed il riciclo, per ridurre l'impatto di materiali, prodotti e processi, per la simbiosi industriale, l'urban mining, l'uso efficiente delle risorse, l'edilizia sostenibile, la riduzione degli sprechi alimentari e degli scarti organici domestici.

Non mancherà un approfondimento a livello internazionale sul nostro ruolo in Europa attraverso la Piattaforma ICESP, l'Italian Circular Economy Economy Stakeholder Platform coordinata da ENEA su richiesta UE per diffondere e favorire lo scambio di best practice.

[eai.enea.it](http://eai.enea.it)

Visita il sito!

