
La fusione nucleare controllata e il cambiamento climatico

Danilo Dongiovanni

ENEA, FSN, C. R. Frascati, 00044 Frascati (Roma) Italia

Lori Gabellieri

ENEA, FSN, C. R. Frascati, 00044 Frascati (Roma) Italia

Piero Martin

*Dipartimento di Fisica e Astronomia, Università di Padova, Italia e Consorzio RFX
Consorzio CREATE, Università degli Studi Federico II, Via Claudio 21,
I-80125 Napoli, Italia*

Angelo Antonio Tuccillo

ENEA, FSN, C. R. Frascati, 00044 Frascati (Roma) Italia

Gregorio Vlad

ENEA, FSN, C. R. Frascati, 00044 Frascati (Roma) Italia

Fulvio Zonca

L'energia prodotta dalla fusione nucleare nelle stelle ha reso possibile la vita così come oggi la conosciamo. Probabilmente, sui tempi lunghi, la sopravvivenza delle condizioni ambientali che permettono la vita sul nostro pianeta potrà essere garantita dalla realizzazione di una fonte di energia basata sulla fusione. La sfida è molto complessa e richiede uno sforzo interdisciplinare al limite delle conoscenze attuali. Il nostro paese ha raccolto questa sfida fin dalla declassificazione della ricerca sulla fusione alla fine degli anni '50 del secolo scorso. In questi decenni si è costruita una rete di eccellenze che lega enti di ricerca, università ed industrie ponendo il nostro paese in prima linea nella ricerca sulla fusione per capacità teoriche, sperimentali e realizzative.

Introduzione

Da tempo gli scienziati ci hanno messo in allarme a proposito del clima: siamo prossimi ad un punto critico. Quel momento nel quale azioni che fino ad allora avevano causato cambiamenti impercettibili originano invece una modifica drammatica dello stato del nostro ecosistema. Recentemente la rivista Nature ha pubblicato uno studio di Merritt Turetsky sul permafrost, il terreno perennemente ghiacciato che ricopre circa un quarto delle zone emerse nell'emisfero nord [1]. Esso ha cristallizzato al suo interno piante, animali e microrganismi ed è quindi un enorme serbatoio di gas serra (basti pensare che ne contiene circa il doppio di quelli presenti in atmosfera) ed è rimasto per fortuna finora sigillato grazie alla sua bassa temperatura. L'articolo si sta riscaldando a velocità quasi doppia rispetto al resto del pianeta, il permafrost già comincia a mostrare le prime perdite e Turetsky afferma che siamo di fronte al risveglio di un pericoloso gigante. Un rapido rilascio dei gas serra contenuti

nel permafrost sconvolgerà il clima e renderà assai difficile se non impossibile ottenere il risultato di stabilizzare l'aumento di temperatura del pianeta entro un grado e mezzo rispetto ai livelli pre-industriali. Per invertire la rotta e fermarsi prima del fatidico ultimo passo è necessaria una vera e propria rivoluzione del nostro modo di produrre e consumare e cambiamenti radicali nel settore energetico. La nostra attuale dipendenza dai combustibili fossili ci impedisce infatti una sostanziale riduzione delle emissioni di gas serra. Per affrancarci da questa dipendenza occorre una rapida inversione di rotta verso scenari energetici decarbonizzati. Scenari che sul breve-medio termine includano quindi rinnovabili e nucleare da fissione, ma che sul lungo termine puntino a soluzioni innovative come ad esempio riprodurre in laboratorio il processo di fusione, che alimenta il sole e le stelle. Un processo che libera energia senza emissioni di CO₂, senza le scorie radioattive di lunga durata della fissione e in maniera sicura.

Con la fusione nucleare controllata due nuclei leggeri – idrogeno o suoi isotopi – si uniscono per dare origine a un nucleo più pesante liberando così una notevole quantità di energia che può essere convertita in energia elettrica. Un processo che ricercatori di tutto il mondo stanno cercando di riprodurre in laboratorio. Il sole è letteralmente un esempio lampante del funzionamento della fusione in natura: esso brucia nell'insieme dei suoi processi di fusione nucleare circa 600 milioni di tonnellate di idrogeno al secondo: riprodurli sulla terra è però complicato. Sulla terra gli scienziati utilizzano esperimenti a forma di ciambella (toroidi) al cui interno il plasma, cioè il gas di isotopi dell'idrogeno -combustibile della fusione - viene riscaldato a temperature di decine di milioni di gradi e tenuto in posizione con appositi campi magnetici.

Realizzare questi dispositivi è una sfida complessa anche perché non appena il plasma devia di poco dalle condizioni ottimali il processo si spegne naturalmente. Questo limite è però anche un grande vantaggio essendo alla base della sicurezza intrinseca di un futuro reattore a fusione, che proprio per leggi naturali non potrà quindi mai scappare di mano come invece può accadere per gli attuali reattori a fissione.

La ricerca sulla fusione è iniziata nel secondo

dopoguerra. Nei decenni passati c'è stato talvolta un eccesso di ottimismo che ha alimentato nell'opinione pubblica una certa disillusione, ma i ricercatori sono oggi più prudenti e hanno idee chiare sulla strada da seguire.

L'Europa è in prima linea e ha elaborato una strategia (*Roadmap*) per ottenere elettricità dalla fusione nella seconda metà di questo secolo. Pilastro di questo piano è ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor), un esperimento in costruzione in Francia grazie ad una collaborazione tra Unione Europea, principale partner, e Cina, Corea, India, Giappone, Russia e USA. Con 500 MW di energia dalla fusione ITER dimostrerà la fattibilità del processo. Dopo un inizio travagliato e alcuni ritardi la sua costruzione oggi è in corso e le attività sperimentali inizieranno alla fine di questo decennio, con l'obiettivo di preparare il prossimo passo verso il reattore dimostrativo DEMO, che sarà il reattore a fusione prototipo connesso in rete.

Energia da fusione nel Centro Ricerche ENEA di Frascati

Le attività di ricerca per lo sfruttamento pacifico dell'energia prodotta da reazioni di fusione nucleare hanno visto la comunità scientifica del centro ENEA di Frascati impegnata fin dall'inizio di questo percorso: la fine degli anni '50. Le attività sono state svolte con il coordinamento del Consorzio EUROfusion [2] nel contesto dell'associazione EURATOM. In questo anno 2020 si celebrano 60 anni trascorsi dalla firma del contratto di associazione tra il consorzio europeo e l'ENEA [3]. Il rilievo della ricorrenza sarà sottolineato con una mostra commemorativa ed eventi scientifici.

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 che la comunità ha ritenuto più promettenti, sia di carattere sperimentale, che teorico: di modellistica e simulazione numerica.

Le collaborazioni in ambito internazionale sono state sempre una componente importante e linfa vitale per progredire e condividere il lavoro svolto. Nei laboratori che ospitano altri progetti di rilievo per la fusione in Europa e nel mondo

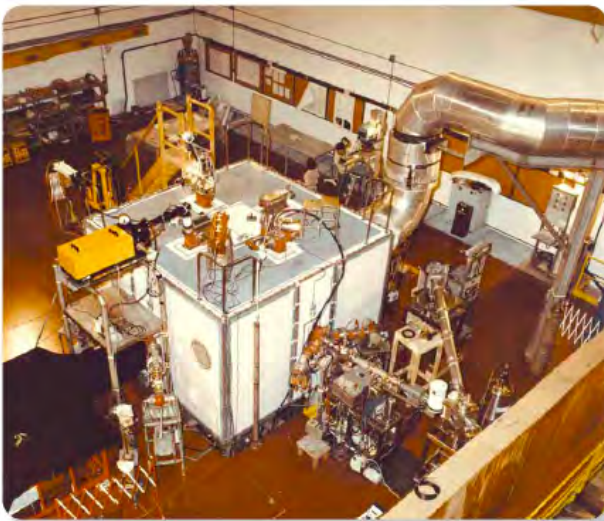
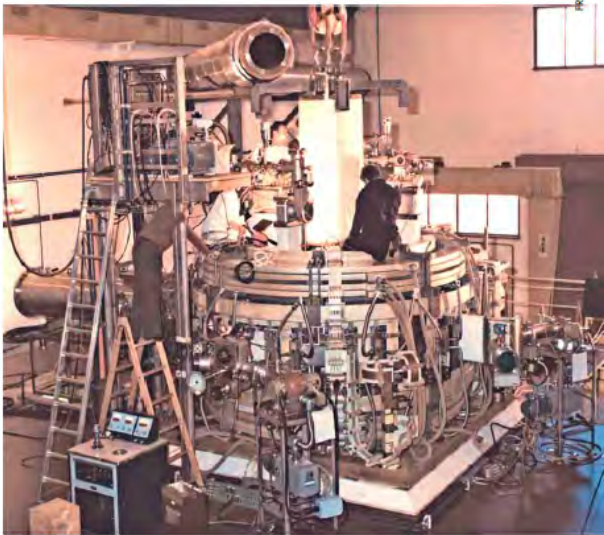


Figura 1: Frascati Tokamak FT: inizia le operazioni nel 1977.

(Francia, Germania, Inghilterra e Svizzera, oltre ad USA, Giappone, Cina e Corea), i ricercatori del Centro di Frascati hanno collaborato e contribuito con progetti e programmi scientifici. Attività di teoria e modellistica hanno fatto e continuano a far parte di collaborazioni strutturate all'interno del Consorzio EUROfusion (Work Packages, Enabling Research Projects) e di partecipazioni internazionali a gruppi nell'ambito della International Tokamak Physics Activity (ITPA [4]) e di IAEA Technical Meeting [5], e collaborazioni negli USA e in Cina, anche attraverso un'intensa attività di formazione e specializzazione. Nonostante la sinergia di collaborazione con le istituzioni nazionali che lavorano in questo stesso settore di ricerca si è mantenuta costante e fruttuosa durante l'intero periodo storico di lavoro. Tra le varie attività, importante ricordare il ruolo

fondamentale svolto dall'esperimento Reversed Field Pinch del Consorzio RFX di Padova. Questa è una configurazione a confinamento magnetico alternativa al Tokamak e questo esperimento per dimensioni è il più grande al mondo di questo genere [6].

La costruzione e lo sfruttamento di esperimenti Tokamak a confinamento magnetico nel Centro ENEA di Frascati hanno avuto un rilievo importante, così com'è avvenuto nel resto del mondo, e i due impianti realizzati (Frascati Tokamak [7] e Frascati Tokamak Upgrade [8]) hanno dato risultati determinanti nel panorama mondiale contribuendo alle scelte di indirizzo per il futuro.

Le scelte che hanno guidato la progettazione dei due impianti sperimentali per la fusione nucleare a confinamento magnetico, Frascati Tokamak (FT) [7] e Frascati Tokamak Upgrade (FTU) [8], li hanno resi unici al mondo per l'ampio spettro di parametri accessibile nella sperimentazione. Per questo motivo il loro contributo al panorama scientifico mondiale ha potuto mantenersi di rilievo e interesse durante tutto il corso della loro esistenza in attività.

Nasce alla fine degli anni '70 il progetto FT (Frascati Tokamak) [7]. In quegli anni la linea del confinamento magnetico nella configurazione Tokamak si era ormai affermata assumendo un ruolo di riferimento.

La via verso 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 (figura 1) appartiene alla seconda linea con la sua forma compatta (raggio maggiore del toro di 0.8m e raggio minore circa 0.2m), un campo magnetico di 10 Tesla e corrente di plasma di 1MA. Le alte correnti necessarie per generare l'alto campo magnetico sono raggiunte grazie al raffreddamento in azoto liquido (circa $-190\text{ }^{\circ}\text{C}$) 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 di plasma.



Figura 2: Frascati Tokamak FTU: inizia le operazioni nel 1989

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, in altre parole di avvicinarsi a un buon rendimento del sistema. FT ha raggiunto una densità di particelle per unità di volume pari a $7.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$, mai ottenuta in altre macchine, un valore record del prodotto della densità per il tempo di confinamento dell'energia di $4 \times 10^{19} \text{ s} \times \text{m}^{-3}$ [9]. I sistemi di riscaldamento addizionale di un Tokamak assumono un ruolo di rilievo cruciale per arrivare al traguardo ambizioso del bilancio di potenza positivo. Per questo la comunità scientifica di Frascati ha dotato FT di sistemi di riscaldamento che sfruttano l'assorbimento di onde elettromagnetiche da parte del plasma. Radiofrequenze nell'intervallo 1-10 GHz (2.45 GHz e 8 GHz in FT) possono trasferire energia e momento alle particelle di plasma [10].

Agli inizi degli anni '90 diventa operativo il Frascati Tokamak Upgrade (FTU) [8] (figura 2) (Tabella 1) che apre una seconda stagione del programma di ricerca della comunità scientifica di Frascati in quest'ambito. Il nuovo Tokamak segue la stessa linea di progetto, una macchina

	FT	FTU
Raggio maggiore (m)	0.2	0.3
Raggio minore (m)	0.83	0.935
Corrente di plasma (MA)	1.0	1.6
Campo magnetico toroidale (T)	10	8
Riscaldamento addizionale (MW)	0.5	4.5
Numero di ports	4	12
Durata della scarica (s)	1.2	1.6
<i>full performance</i>		
Durata della scarica (s) 4T	1.2	4.0

Tabella 1: Parametri dei Tokamaks FT e FTU

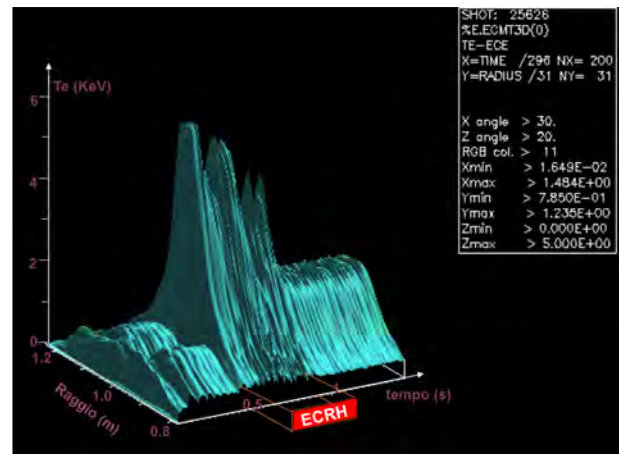


Figura 3: Immissione di riscaldamento EC: profilo di temperatura elettronica misurata con il sistema di misura Electron Cyclotron Emission

compatta (con un volume circa 2 volte e mezzo quello di FT) e con un alto campo magnetico (8T e 1,6MA di corrente di plasma, con magneti di rame raffreddati in azoto liquido), in cui i riscaldamenti sono di gran lunga potenziati in tipologia e potenza per 4.6 MW totali. All'impianto di radiofrequenza Lower Hybrid, alla frequenza 8 GHz su FTU [11, 12, 13], si aggiunge il riscaldamento alla frequenza ciclotronica elettronica ECRH a 140 GHz per 2 MW di potenza totali (figura 3) a cura dell'Istituto del CNR ISTP di Milano [14]. Un lanciatore dotato di specchi orientabili (figura 4) permette di modificare il profilo di deposizione della potenza seguendo le richieste dei programmi sperimentali.

Le temperature raggiunte (12 keV, ovvero 100 Milioni di gradi (figura 5) [15, 16] e le densità record ottenute (di $\approx 7 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$) (figura 6) con l'ausilio di una sistema di immissione di *pellet* solidi di combustibile con velocità di 1.3 Km/s [17]

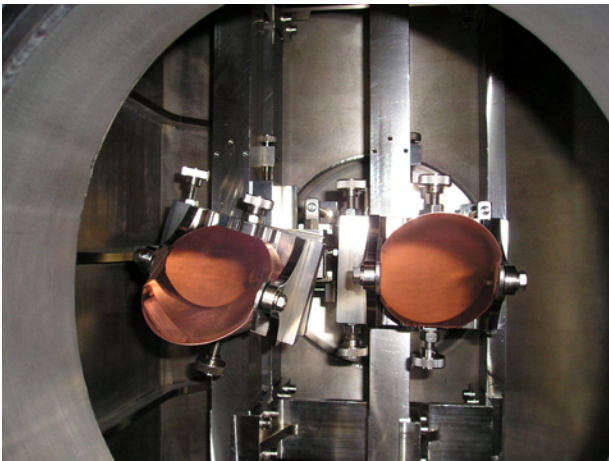


Figura 4: Sistema di lancio di onde Electron Cyclotron di FTU: specchi per trasferire la potenza dalla linea di trasmissione agli specchi di iniezione nel plasma, 4 specchi indipendenti per focalizzare 500 kW di potenza ciascuno. densità di potenza pari a 200 MilioniW/m²

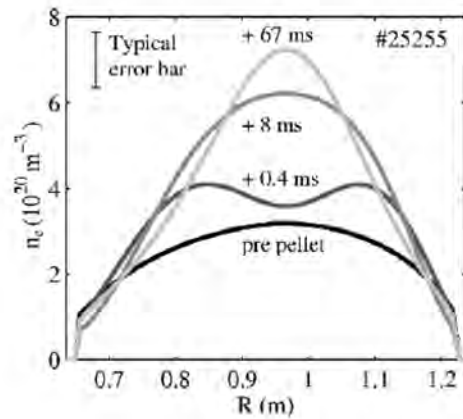


Figura 6: Misura di un profilo della densità degli elettroni di FTU lungo il diametro della sezione poloidale del toro durante esperimenti di iniezione di pellet di combustibile.

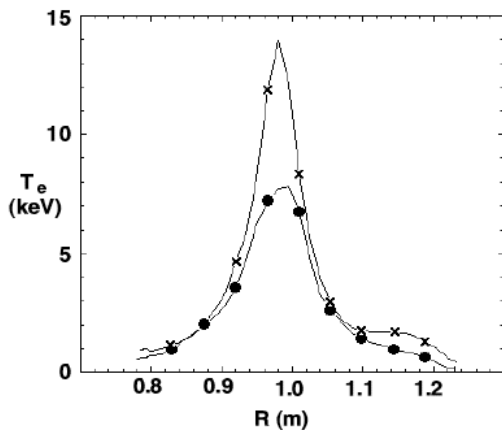


Figura 5: Misura di un profilo della temperatura degli elettroni di FTU lungo il diametro della sezione poloidale del toro durante esperimenti di riscaldamento con radiofrequenza Ciclotronica Elettronica (ECRH). (IAEA Conference, Kyoto (Japan), 1998)

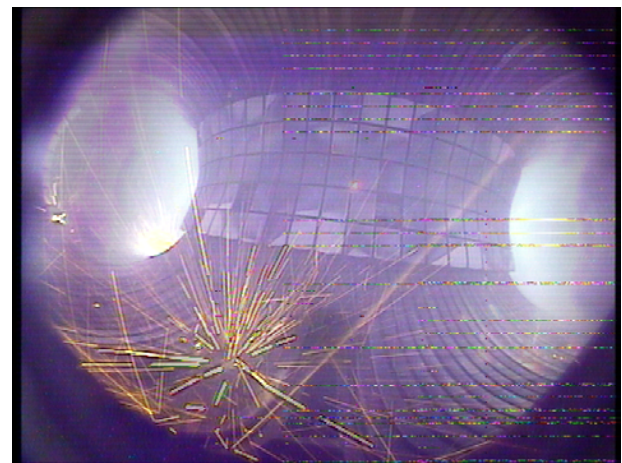


Figura 7: Interno della camera da vuoto di FTU con fasci elettroni runaway

hanno dato a FTU un ruolo centrale nelle discussioni scientifiche della ricerca mondiale sulla fusione termonucleare controllata nel corso della sua esistenza in operazione. Grazie alla versatilità di quest'impianto è stato possibile dedicare una cospicua parte delle attività delle campagne sperimentali allo studio del possibile impatto dei grandi flussi di potenza sulle pareti materiali del reattore; in particolar modo agli studi di tecniche per impedire danneggiamenti delle parti che si affacciano al plasma (figura 7). Infatti, nel fluido

combustibile durante i fenomeni di improvvisa perdita di confinamento e disruzione, i grandi campi elettrici possono accelerare elettroni veloci (generazione primaria) che un fenomeno a valanga può trasformare in grandi correnti di particelle con velocità relativistiche (figura 8), che, come un pennello caldo, possono danneggiare in maniera significativa le pareti della camera da vuoto. FTU ha potuto studiare in maniera estesa i processi di formazione e i modi per mitigare la dannosità di questi fenomeni generati dai fasci di elettroni *runaway* (RE) [18, 19]. In aggiunta alla principale linea di ricerca, la decisione di non trascurare esperimenti a confinamento magnetico di altra impostazione, come la macchina PROTO-SPHERA [20, 21], si è rivelata importante per esplorare configurazioni diverse che pos-

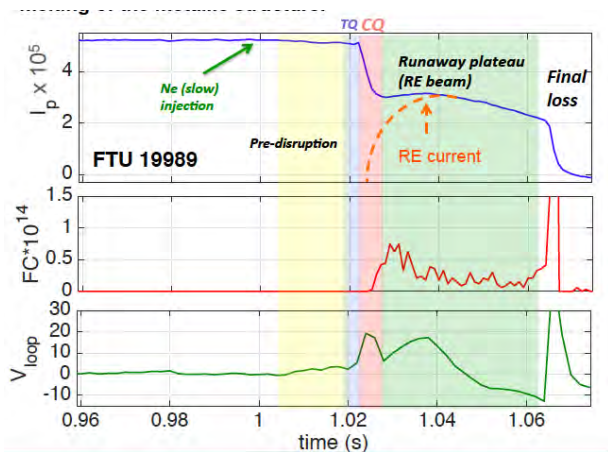


Figura 8: Segnali di una scarica di plasma di FTU: corrente di plasma, U235 camere a fissione e tensione di giro, che mostrano la formazione di corrente di elettroni runaway provocata per mezzo di un'iniezione di gas Neon nella scarica di plasma. D.Carnevale et al., *Runaway electron beam control*, ISSN:014036, PPCF, 2018

sano permettere un miglior rendimento, sebbene ancora da verificare in termini di potenzialità e fattibilità.

Il fenomeno che consente la formazione spontanea, da una colonna centrale di plasma, di un plasma toroidale magnetizzato capace di circondarla è conosciuto in astrofisica come riconnessione magnetica. Gli studi condotti sulla riconnessione magnetica in astrofisica conducono a ipotizzare che questa configurazione di confinamento di plasma realizzata in laboratorio possa fornire una potenza considerevole di riscaldamento, rendendo non necessario il riscaldamento aggiuntivo, come invece avviene nei Tokamak.

Il rendimento di un combustibile compresso ad alte densità è esplorato, con un diverso approccio, dalla fusione inerziale che utilizza l'energia di un potente laser per innescare le reazioni di fusione termonucleare. L'attività di ricerca condotta dalla comunità scientifica di Frascati nella linea della fusione nucleare a confinamento inerziale si fonda su un impegno consolidato, che, agli inizi degli anni '70, ha permesso di osservare i primi neutroni prodotti da reazioni di fusione con queste tecniche. Le ricerche sono proseguite con la costruzione del laser ABC [22]. L'impianto laser ABC dei laboratori di Frascati è, ancora oggi, il laser con la più alta energia per impulso presente in Italia, ma anche uno dei pochi

in Europa con caratteristiche simili. La comunità scientifica del Centro di Frascati ha segnato, con le proprie attività, passi importanti su questo cammino.

La fisica teorica per la fusione nucleare

Il tessuto sul quale si fondano le scelte e il coordinamento di queste attività è l'analisi interpretativa e predittiva dei fenomeni fisici che viene fatta dalla fisica teorica del plasma. Gli studi e i risultati ottenuti nel Centro ENEA di Frascati in quest'ambito hanno accompagnato e indirizzato le attività e le scelte di questo laboratorio, ma anche, in alcuni campi e con un ruolo di rilievo, in ambito internazionale.

Le attività di fisica teorica comprendono sia ricerche di natura prettamente analitico-formale che simulazioni numeriche; tra queste due linee di ricerca, si pone idealmente come ponte la concezione e lo 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 è osservato 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 d'ignizione, hanno rappresentato da diverso tempo un'eccellenza internazionalmente riconosciuta ai laboratori ENEA sulla fusione termonucleare [24, 25].

Per raggiungere e mantenere le condizioni d'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 da favorire nuove reazioni di fusione. 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

Le onde di shear Alfvén nei plasmi termonucleari

Le onde di Alfvén, scoperte da Hannes Alfvén [23] sono oscillazioni elettromagnetiche di bassa frequenza nei plasmi magnetizzati. Le onde di Alfvén si trovano in natura e nei plasmi di laboratorio. As esempio, le onde di Alfvén sono spesso eccitate dalle particelle cariche di alta energia prodotte da tempeste geomagnetiche e dal riscaldamento addizionale nei plasmi. Poiché le onde di Alfvén sono associate a perturbazioni elettromagnetiche, le particelle cariche possono scambiare energia e momento con le onde, producendo accelerazione, riscaldamento e trasporto in direzione trasversale al campo magnetico di equilibrio. Le onde di *shear* Alfvén, come onde trasversali e incomprimibili, sono caratterizzate da un debole smorzamento e risultano facili da eccitare. In particolare modo, la perdita rapida di particelle alfa e ioni di alta energia a causa delle onde di shear Alfvén è una questione rilevante per i plasmi termonucleari come ITER [25, 26].

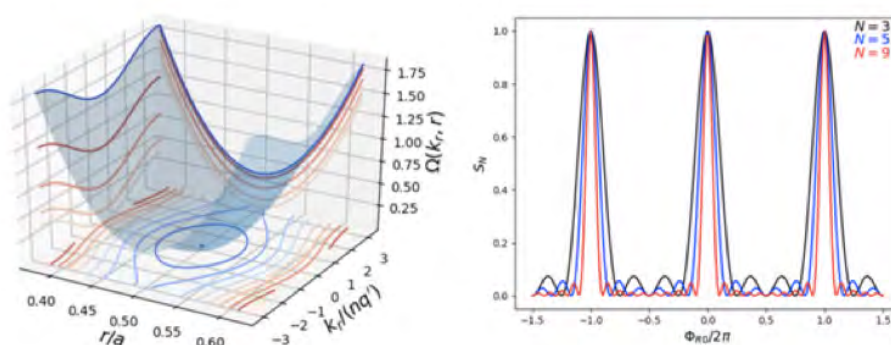


Figura 9: Relazione di dispersione di un pacchetto d'onde shear Alfvén (sinistra) che illustra la frequenza in funzione della posizione radiale e del vettore d'onda. A destra, illustrando l'intensità in funzione del numero di riflessioni all'interno del plasma, si evidenzia la formazione di instabilità per frequenze chiaramente distinte.

nella reazione di fusione, nonché di particelle energetiche generate da diversi tipi di riscaldamento aggiuntivo [26, 27]. In questo contesto, 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 grandezze fisiche del plasma stesso, quale velocità e pressione del fluido) (figura 9), 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 (figura 10). In tal modo, l'auto-riscaldamento del plasma da parte delle particelle alfa in esso prodotte può diminuire e, in casi peggiori, si può avere il danneggiamento

delle strutture materiali che si affacciano al plasma, qualora le particelle energetiche siano espulse 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 che non lineare [26, 27]. Affiancata a quest'attività di natura analitico-formale, si è sviluppata un'attività complementare di modellizzazione e simulazione numerica di tale fenomenologia, che ha permesso di sviluppare strumenti numerici all'avanguardia, che sfruttano le tecniche più avanzate di High Performance Computing (HPC) ad alto parallelismo di calcolo [28].

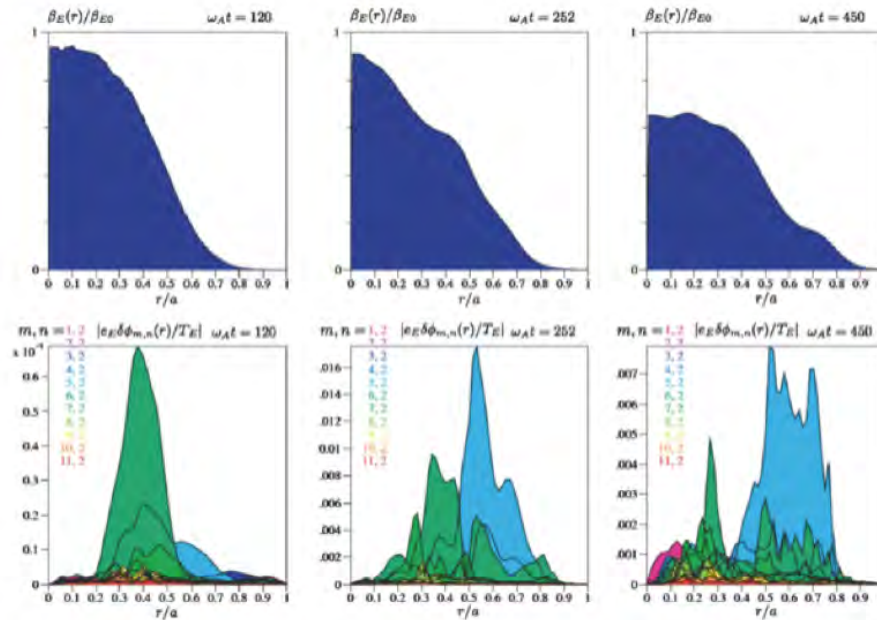


Figura 10: Evoluzione temporale dei profili radiali della densità di energia delle particelle alfa e corrispondente struttura radiale del potenziale scalare fluttuante di un pacchetto d'onde shear Alfvén. La fase di instabilità (sinistra) innesca un effetto valanga (centro) seguito da una saturazione (destra). La normalizzazione della scala temporale è in unità della frequenza angolare di Alfvén inversa. Da Ref. [28].

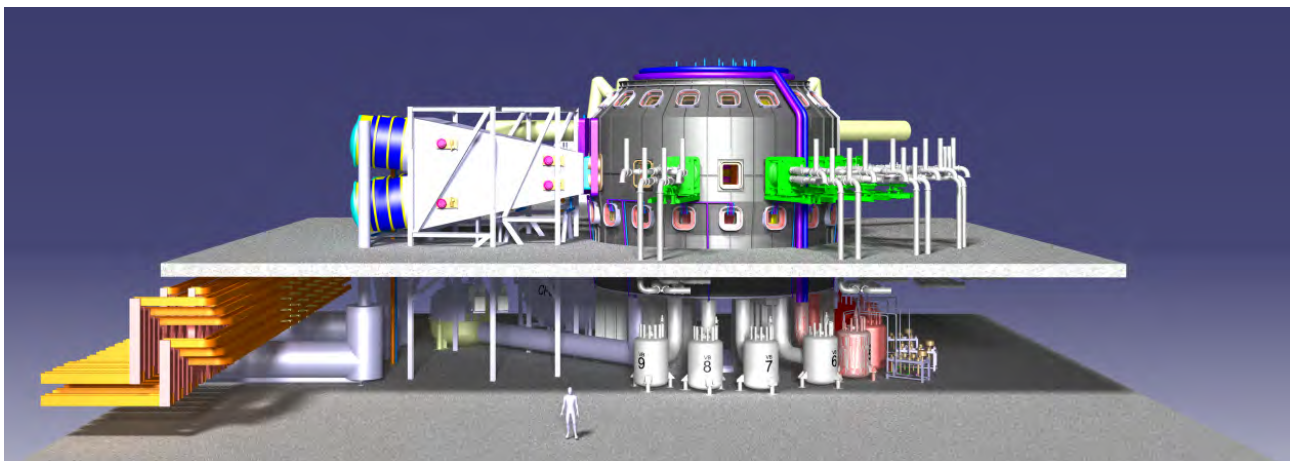


Figura 11: Immagine costruttiva del progetto DTT

Il progetto Divertor Tokamak Test: verso la costruzione del prototipo di reattore

La comunità scientifica fusionistica nazionale si fonda su una storia di rilievo internazionale anche delle altre istituzioni che, in parallelo al Centro di Ricerche dell'ENEA di Frascati, hanno dato contributi importanti, anche lavorando in sinergia tra di loro. In questi giorni inizia, nei laboratori ENEA di Frascati, la realizzazione di un nuovo progetto: Il Divertor Tokamak Test [29]. Il

progetto è stato concepito in ENEA e si avvale della collaborazione delle Università e degli altri Enti di ricerca Italiani che, fondandosi sulla storica collaborazione nazionale, stavolta si trovano uniti su questo comune obiettivo. DTT [29] (figura 11) nasce per affrontare una delle missioni cruciali per la realizzazione del reattore a fusione e questo viene fatto con il supporto e il coordinamento del consorzio EUROfusion che attribuisce a DTT una missione importante a fianco di ITER e di importanza strategica nel cammino verso la realizzazione del prototipo di reattore DEMO.

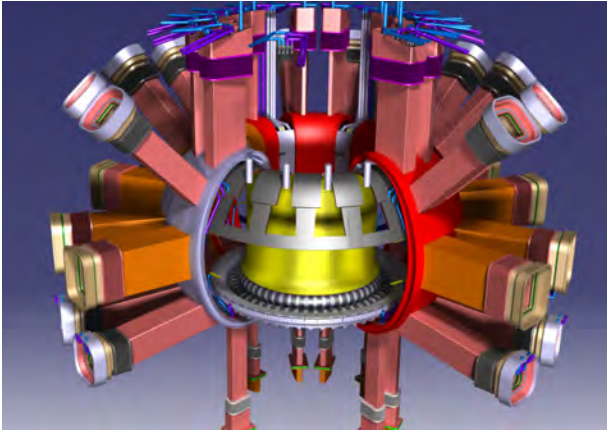


Figura 12: Immagine del divertore di DTT

Nel futuro reattore l'80% dell'energia prodotta dalle reazioni di fusione è trasportata fuori dal plasma dai neutroni prodotti nelle reazioni di fusione Deuterio-Trizio ed è convertita in energia elettrica. Una parte dell'energia prodotta è distribuita in maniera isotropa come radiazione elettromagnetica ed è assorbita dalle pareti materiali del sistema senza picchi di carico. Invece occorrerà gestire il residuo, ma consistente, flusso di calore che si riverserà sulle pareti esterne trasportato dalle particelle cariche sulle superfici periferiche in modo localizzato. Infatti, mentre il confinamento nel reattore sarà il risultato delle linee di campo magnetico che formano un insieme di superfici magnetiche chiuse e annidate una dentro l'altra, alla periferia del plasma una sottile regione (spessore dell'ordine del centimetro) avrà linee di campo magnetico aperte che faranno confluire particelle e calore diritte su di un dispositivo creato per sopportarne il carico: il divertore (figura 12). Questo è un elemento importante che deve essere studiato per poter sopportare questi grandi carichi termici e che potrà essere sostituito se dovesse subire danneggiamenti. Il flusso di calore atteso sul divertore è superiore a 10 MWatt per metro quadrato, confrontabile con quello medio della superficie del Sole. Le soluzioni offerte dalla attuale tecnologia dei materiali non sono in grado di raggiungere questi livelli di flussi di potenza.

DTT avrà la flessibilità necessaria per provare nuove e diverse configurazioni e materiali per il divertore: si lavora per aumentare la parte di energia trasportata dalla radiazione, mentre lo studio dei materiali costituisce uno dei settori di ricerca di maggior rilievo. Inoltre si indaga

nella direzione di una ottimizzazione della topologia magnetica. Ovviamente si dovrà dimostrare che la capacità di smaltimento del calore sarà raggiunta senza degrado significativo del confinamento ottimale del plasma. DTT, unico tra gli esperimenti in funzione o attualmente proposti, potrà fare queste ricerche cruciali per il futuro in scenari nei quali non solo le prestazioni del bordo, ma anche della parte centrale del plasma, quella cioè dove in un futuro reattore si produrranno le reazioni di fusione (figura 13), sono confrontabili con quelle di ITER e DEMO.

	DTT	ITER	EU DEMO
R(m)	2.14	6.2	9.1
a(m)	0.65	2	2.93
A (R/a)	3.3	3.1	3.1
I_p (MA)	5.5	15	19.6
B(T)	6	5.3	5.7
Heating PTOT (MW)	45	120	460
P_{SEP}/R (MW/m)	15	14	17
Pulse Length (s)	95	400	7600

Tabella 2: Confronto parametri DTT, ITER, DEMO

A questo scopo, grazie alla disponibilità di sistemi di riscaldamento addizionale che accoppiano al plasma 45 MWatt, DTT raggiungerà valori di potenza specifica, definita come il rapporto tra la potenza uscente dalla superficie di plasma divisa per il raggio maggiore, paragonabili a quelli di ITER e DEMO (Tabella 2). Il campo magnetico di questo progetto è generato da un sistema di magneti superconduttori (figura 14). La comunità scientifica Nazionale ha una posizione di rilievo mondiale nella ricerca in questo settore, evidenziata dai contributi dati allo sviluppo degli elementi superconduttori per gli esperimenti ITER e JT-60SA [30]. Il progresso della tecnologia della superconduttività sarà cruciale per il buon funzionamento del futuro reattore ed anche in questo caso DTT costituisce una flessibile palestra di ricerca e sviluppo (figura 15). Gli impulsi di DTT saranno di durata fino a circa un minuto e mezzo, tempi sufficientemente lunghi da garantire un completo ed efficiente utilizzo di ogni singolo impulso. Nel progetto DTT si usano materiali superconduttori già usati per dispositivi esistenti, in particolare per ITER, come il Niobio3-Stagno o il Niobio-Titanio. Anche in quest'ambito DTT si propone come un esperi-

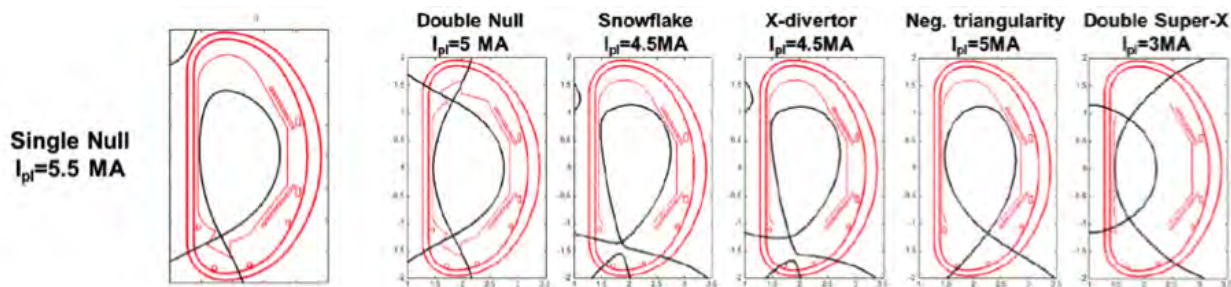


Figura 13: Flessibilità nella topologia magnetica: diversi scenari possibili per DTT

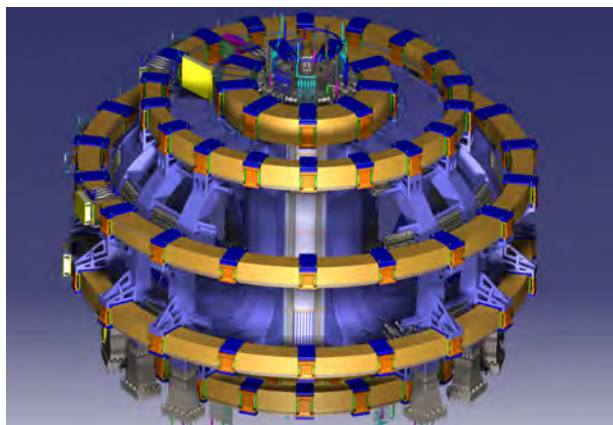


Figura 14: Sistema di magneti superconduttori di DTT: 18 settori toroidali in colore viola, 6 avvolgimenti poloidali in colore giallo, all'interno i 6 settori del solenoide centrale

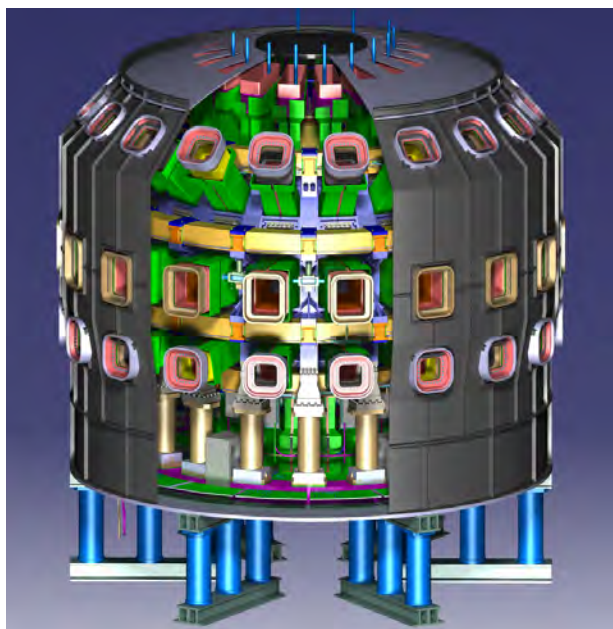


Figura 15: I magneti superconduttori di DTT protetti dal thermal shield (verde) e chiusi nel criostato che li mantiene in vuoto

terno 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 dei quali rappresenterà una vera rivoluzione di innovazione tecnologica.

DTT sarà il più completo e flessibile esperimento al mondo per affrontare e risolvere il problema dello smaltimento della potenza nel reattore a fusione del futuro. La progettazione, costruzione e sfruttamento della struttura sperimentale DTT sono affidate al Consorzio a responsabilità limitata DTT S.c.a r.l., costituito il 10 settembre 2019 per l'adempimento della sua missione legale di realizzazione del progetto. I partner del Consorzio sono: ENEA, ENI e CREATE (Consorzio di ricerca e sviluppo tra industrie e Università italiane). Altri potenziali partner del Consorzio DTT, che hanno già inviato lettere d'intenti o richieste formali sono: INFN e Consorzio RFX, Università degli Studi della Tuscia, Politecnico di Torino e Università degli Studi di Milano-Bicocca. DTT avrà il supporto della Regione Lazio, che lo ospita, oltre al supporto Nazionale, della BEI (Banca Europea per gli Investimenti), di EUROfusion e della Cina.

Questo sarà un progetto di eco e rilievo internazionale, ma, al tempo stesso, è un progetto tutto Italiano e lavorerà a fianco dell'industria italiana nei settori dell'innovazione tecnologica, in sinergia con la ricerca italiana, in particolar modo nei settori delle tecnologie di supporto necessarie agli impianti di fusione nucleare. Inoltre DTT sarà una forza trainante per l'economia locale oltre che per l'industria Nazionale. Il laboratorio DTT accoglierà le generazioni dei giovani ricercatori

mento che guarda al futuro, pronto ad essere un vero e proprio laboratorio di innovazione: all'in-

Italiani, che potranno formarsi insieme con la comunità scientifica internazionale che collaborerà con e sarà parte integrante dei programmi di ricerca del progetto. Il laboratorio sarà una fucina di formazione dove cresceranno i giovani specialisti e professionisti negli ambiti della fisica e dell'ingegneria che proseguiranno le loro carriere, secondo le loro aspettative, nei numerosi ambiti correlati della ricerca o dell'industria.

Il cambiamento climatico e gli aspetti ambientali e socio-economici della fusione

L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) [31] definisce come inequivocabile il riscaldamento del sistema climatico globale e afferma che vi sia una chiara influenza umana su di esso. In particolare, osserva come le emissioni di gas serra di origine antropogenica (principalmente CO₂) abbiano raggiunto i valori più alti nella storia e come sia estremamente probabile che gli effetti di tali emissioni siano stata la causa dominante del riscaldamento osservato a partire dalla metà del XX secolo. I rischi connessi ai cambiamenti climatici di origine antropogenica legati ai predetti fattori sono stati riconosciuti dalla comunità internazionale durante la conferenza sul clima tenutasi a Parigi nel 2015, COP21 [32] e, con l'obiettivo di ridurre l'occorrenza e/o mitigarne significativamente le conseguenze, 195 paesi hanno adottato un accordo finalizzato a limitare l'aumento della temperatura media globale ben al di sotto dei 2 °C sopra i livelli pre-industriali [32]. In una prospettiva di riduzione rischi si sancisce inoltre l'importanza di adoperarsi al fine di limitare detto aumento a 1.5 °C, consapevoli del fatto che molte delle conseguenze fisiche di un cambiamento climatico scalino in modo non lineare rispetto all'aumento della temperatura globale [33]. I *Representative Concentration Pathways* (RCPs) [34] sono scenari ambientali che, includendo anche l'evoluzione temporale di emissioni e concentrazioni di gas serra fino al 2100, supportano la definizione di vincoli alle emissioni di CO₂ compatibili con gli obiettivi di contenimento del riscaldamento globale. RCP2.6 è lo scenario di riduzione più drastico e unico compatibile con l'obiettivo di contenere l'incre-

mento di temperatura globale ben al di sotto dei 2 °C, esso prevede un valore di stabilizzazione dopo il 2100 del forzante radiativo a 2.6 W/m² con concentrazioni CO₂ eq. ~490 ppm al picco prima del 2100 e successivo declino. Similmente si sono definiti scenari meno restrittivi RCP4.5 (CO₂ eq. ~650 ppm dopo il 2100), RCP6 (CO₂ eq. ~850 ppm dopo il 2100).

La principale fonte antropica di gas serra è la CO₂ proveniente dall'uso di combustibili fossili per produzione di energia, trasporti e riscaldamento e [35] indica il settore energetico come il maggior contributore ai gas serra (33.1 Gt CO₂ *energy-related emissions* nel 2018). Ne consegue che ogni realistica strategia di riduzione delle emissioni di gas-serra non può prescindere da una transizione del sistema energetico verso l'utilizzo di tecnologie di produzione a basse emissioni di CO₂ e/o il possibile contributo negativo al bilancio di emissioni dato dall'integrazione di tecnologie di *Carbon Capture and Sequestration* (CCS). Il piano europeo di implementazione di una economia *climate-neutral* prevede inoltre come fattori strategici l'elettrificazione del sistema energetico su larga scala. Si richiede quindi una profonda trasformazione del sistema energetico resa ancor più complessa dall'inerzia del sistema al cambiamento dovuta sia alla sua dimensione e frammentazione che alla forte dipendenza rispetto a scelte passate. In questo contesto di stringenti vincoli alle emissioni di gas serra e in un'ottica di pianificazione sostenibile a lungo termine, è necessario quindi anche pianificare il contributo di ogni fonte di energia disponibile anche in una prospettiva di possibile crescita della domanda di energia elettrica da soddisfare. La fusione nucleare è una fra le nuove possibili fonti disponibili per l'umanità ed ha la potenzialità di fornire grandi quantità di energia con ridotte quantità di combustibile ed assenza di emissioni di gas serra durante l'operazione dell'impianto.

L'uso commerciale della fusione con caratteristiche in grado di competere nel sistema energetico (ad esempio in termini di quantità netta di energia prodotta, disponibilità, costo finale del kWh, ecc.) non è previsto prima del 2050 e la nostra attuale comprensione del potenziale e dell'impatto socio-economico e ambientale della fusione come fonte di energia si basa sulle conoscenze acquisite nelle campagne sperimen-

tali e sullo studio e la progettazione dei sistemi del reattore. Una parte di questi programmi di studio (intorno agli anni 1995-2002) si è focalizzata esclusivamente sulla valutazione degli aspetti ambientali e di sicurezza [36] e aspetti socio-economici del *Fusion Power Plant* (FPP) [37]. Sulla base delle informazioni di progetto disponibili per i vari modelli di reattore, detti programmi hanno svolto analisi integrate tenendo in considerazione l'intero ciclo di vita del reattore: dal consumo di risorse o i rilasci legati alla costruzione dell'impianto (inclusi gli effetti indiretti in termini di CO₂ ad esempio legata al trasporto di materiali per la costruzione), all'impatto dell'operazione e manutenzione dell'impianto (inclusi ipotetici eventi incidentali), fino al suo decommissioning e smaltimento degli eventuali rifiuti radioattivi. I risultati di questi programmi di studio sono stati poi aggiornati nell'ambito di altre analisi più generali sulla definizione concettuale del progetto di FPP come i *Power Plant Conceptual Studies* [38] fino all'ultimo programma EUROfusion per il design di un reattore dimostrativo [39] in prospettiva FPP. Di seguito si propone una sintesi dei principali risultati dei predetti programmi di studio e recenti sviluppi, valide per il reattore di potenza FPP (e non applicabili alle facility di ricerca come DTT).

Sostenibilità ambientale in termini di risorse

Per quanto concerne il ciclo del combustibile, la reazione di fusione nucleare di riferimento per lo sfruttamento energetico prevede l'uso di Deuterio e Trizio in proporzione di 50% e 50%. La disponibilità naturale del deuterio sulla terra è praticamente illimitata costituendo circa lo 0.03% in massa dell'idrogeno presente nell'acqua degli oceani. Il trizio è un elemento naturalmente poco abbondante poiché instabile (decade in ³He con decadimento β ed emivita di circa 12 anni). Esso è presente sulla terra per reazioni in alta atmosfera con raggi cosmici, ma può essere prodotto artificialmente con varie reazioni nucleari fra cui con deuterio (²H(n, γ)³H) e Litio (⁶Li(n, α)³H, ⁷Li(n, α)³H)¹.

A parte un iniziale [40] inventario di trizio necessario per lo *start-up* del reattore inizialmente fornito dagli impianti di fissione in operazione

¹ Altre reazioni con azoto, boro o fissione ternaria di uranio

di tipo CANDU, il ciclo del combustibile prevede la generazione del trizio con reazioni fra il litio presente in un mantello triziogeno insieme con materiali che realizzano reazioni di moltiplicazione di neutroni (Pb e Be) per aumentare l'efficienza risultante del processo di generazione di trizio e i neutroni generati nella reazione di fusione. Quindi, generando il trizio come prodotto di reazioni nucleari del litio, il reattore raggiunge a regime l'autosufficienza in trizio con un ciclo interno. Per questo motivo la sostenibilità in termini di risorse della fusione nucleare come fonte di energia è valutata considerando litio e deuterio come combustibile.

Il fabbisogno annuale di combustibile di un reattore a fusione in grado di produrre 1GWe (assumendo un'efficienza di conversione termica di circa il 33%) dipende da vari fattori tuttora soggetti a forte incertezza, quali: il concetto di mantello triziogeno considerato (ad esempio nel disegno concettuale del DEMO europeo la lega eutettica di LiPb, ovvero ortosilicati di litio Li₄SiO₄ e Berillio), la relativa percentuale in ⁶Li (40%-90%), l'assorbimento neutronico da parte dei materiali nella camera di reazione ed il TBR (*tritium breeding ratio*) risultante (obiettivo attuale intorno a 1.1 per compensare le perdite). In prima approssimazione si stimano necessari meno di 100 kg di Deuterio e 300 kg – 500 kg di Litio. Considerando il fattore di arricchimento, l'efficienza di reazione del litio (variabile a seconda del concetto di mantello) e la necessità di sostituzione ogni 5 anni del mantello durante la vita dell'impianto (circa 40 anni), si sale a qualche decina di tonnellate medie annue di litio naturale. L'attuale stima di risorse naturali di litio pari a circa 80 × 10⁶ tonnellate [41], garantisce la sostenibilità di approvvigionamento di litio per uso fusionistico [42]. Alcune potenziali criticità nel lungo termine potrebbero emergere dall'uso concorrente di litio (batterie) laddove restasse un elemento centrale anche per quelle tecnologie.

La valutazione dell'impatto del reattore a fusione nucleare in termini di sicurezza della popolazione e dell'ambiente è storicamente stata improntata a linee guida, quadro normativo e metodologico definito per i reattori nucleari a fissione. Le analisi di sicurezza si focalizzano quindi sulla gestione e confinamento degli inventari radioattivi al fine di quantificare i limiti

massimi in termini di rilascio e determinarne l'accettabilità in termini di dose da esposizione a radiazioni degli operatori e della popolazione in ogni possibile condizione operativa e incidentale prevista durante l'intero ciclo di vita dell'impianto, incluso il suo decommissioning e smaltimento dei rifiuti radioattivi.

Per quanto concerne le emissioni durante l'operazione dell'impianto abbiamo già ribadito che essa non implica rilasci di CO₂ o altri gas serra ed emissioni possibilmente risultanti in piogge acide. Alcune emissioni serra, come per molti impianti, sono previste in fase di costruzione e considerate come esternalità del sistema.

Il potenziale rilascio di materiale radioattivo (in forma liquida o gassosa) in normale operazione e manutenzione è stato stimato negli studi [38] avere un impatto di massima dose al pubblico di circa 1 μ Sv/anno (inferiore alla dose corrispondente ad una radiografia a un arto). Queste stime sebbene soggette a revisione in linea con il dettaglio del progetto e la verifica di ulteriori possibili percorsi di rilascio [43], hanno ampi margini di sicurezza in relazione ai limiti nazionali (1 mSv/anno al pubblico).

I rilasci in caso di incidente dipendono dagli inventari radioattivi presenti nell'impianto e dalle modalità di loro mobilitazione ad esempio in conseguenza della rottura di strutture di contenimento. I principali inventari radioattivi mobilizzabili sono costituiti da trizio, prodotti di corrosione attivati derivanti dai circuiti di raffreddamento (ad acqua o LiPb in alcuni concetti) e polveri attivate derivanti da disruzioni del plasma e fenomeni di erosione/sputtering sulle strutture che si affacciano alla camera di reazione. Per studiarne la mobilitazione occorre considerare tutte le possibili modalità di perdita del confinamento dovuta ad eventi catastrofici esterni (sisma, etc.) o interni, ad esempio causati dall'effetto sulle strutture delle varie forme di energia associata a componenti dell'impianto (al plasma, ai magneti, etc.) attraverso vari fenomeni (es. disruzioni).

Esiste però una importante differenza fra un impianto nucleare a fusione ed uno a fissione legata alla modalità intrinseca di evoluzione della reazione in situazioni incidentali. Infatti, la reazione di fusione richiede precise condizioni fisiche per il plasma nella camera di reazione che

vengono mantenute in un ristretto dominio operativo grazie a un complesso insieme di sistemi attivi (atti al confinamento magnetico, al pompaggio delle impurezze e gestione del vuoto in camera di reazione, al riscaldamento del plasma, ecc.) al venir meno dei quali essa si esaurisce in pochi ms-s. La reazione di fusione nucleare non può quindi intrinsecamente dare luogo a deriva incontrollata e ciò caratterizza l'impianto con un elemento di sicurezza passiva, cioè basata su evoluzione naturale dei processi e non legata all'intervento di sistemi attivi.

Anche l'innalzamento di temperatura delle strutture di contenimento della camera di reazione dovuto al calore di decadimento (decay heat) è minore e più lento (10 W/kg dopo un giorno) [43] che nella fissione e può potenzialmente essere gestito senza l'immediato intervento di sistemi attivi per evitare di compromettere la struttura di contenimento.

Una estensiva e dettagliata serie di analisi incidentali effettuata per i PPCS [38] hanno dimostrato che la massima dose al pubblico derivante dall'occorrenza postulata delle più severe combinazioni di eventi incidentali concepibili risulterebbe comunque sotto il valore raccomandato per l'evacuazione della popolazione.

Consideriamo infine l'impatto ambientale di lungo termine a seguito del *decommissioning* dell'impianto. A differenza degli impianti a fissione attuali, la reazione di fusione DT non dà luogo intrinsecamente a produzione di elementi radioattivi, in particolare risultano assenti elementi transuranici (ad eccezione di minime quantità derivanti dalle impurezze nei materiali, es. berillio). Il flusso neutronico emergente dal plasma dà però luogo all'attivazione dei materiali di prima parete. Inoltre, viste la quantità e l'alta energia dei neutroni prodotti, sommata ad altri carichi di radiazione e particelle emergenti dal plasma, le grandi strutture che circondano il plasma hanno una breve vita qualificata e richiedono diverse sostituzioni nel corso della vita dell'impianto. Ciò implica potenzialmente grossi volumi di materiali contenenti radionuclidi di cui operare eventualmente lo smaltimento finale. La ricerca è quindi focalizzata sullo sviluppo di opportuni materiali per le strutture della camera di reazione, come gli acciai RAMS (*Reduced-activation martensitic steels*) che oltre ad offrire caratteristiche funzio-

nali di resistenza ai carichi fusionistici rispettino anche stringenti limiti per alcune impurezze (es. Nb, Mo, Ni). Alcuni radionuclidi a lunga emivita (es. ^{94}Nb , ^{14}C) potrebbero infatti contribuire a innalzare la classificazione da *Low Level Waste* (LLW) a *Intermediate Level Waste* (ILW) di ingenti quantità di materiali [51] secondo i criteri di riferimento esistenti per i depositi di smaltimenti dei rifiuti radioattivi provenienti dalla produzione di energia da fissione nucleare.

La contaminazione delle strutture con trizio derivante dalle sue proprietà di permeazione e diffusione nei materiali è un'altra caratteristica del reattore a fusione e sebbene non comporti alcun problema nel lungo periodo (>100 anni) pone dei problemi di accettabilità da parte dei depositi di smaltimento orientando le strategie di gestione verso la massimizzazione del recupero (con benefici anche in termini economici) per riutilizzarlo nel ciclo del combustibile o lo stoccaggio on-site per 50-100 anni [50].

La fusione ha quindi la potenzialità di non lasciare rifiuti radioattivi a lungo-termine (>100 di anni) per le future generazioni e non richiederà il loro stoccaggio in depositi geologici profondi, ma la ricerca in corso sui materiali a bassa attivazione (per eliminare le impurezze non funzionali) e lo sviluppo di procedure di trattamento per il riciclaggio ed il riutilizzo dei materiali funzionali restano fondamentali in prospettiva del reattore a fusione.

Come ultimo aspetto rilevante in termini di accettabilità sociale è infine opportuno menzionare l'assenza di materiali soggetti a trattato di non proliferazione in un reattore a fusione che possano portare allo sviluppo di armi nucleari secondo le attuali conoscenze.

Possibile contributo alla produzione di energia *carbon-free* in scenari di lungo periodo

Abbiamo finora dato una breve panoramica delle caratteristiche della fusione in prospettiva di impatto ambientale. Ci si può ora interrogare su quali condizioni di contesto socio-economico e proprie della tecnologia ne favoriscano o meno la diffusione effettiva nel sistema energetico. Il programma di ricerca EUROfusion prevede una attività di ricerca socio-economica appunto finaliz-

zata ad investigare il possibile ruolo della fusione come tecnologia generatrice di energia elettrica nel futuro sistema energetico globale. Con questo scopo è stato sviluppato a partire dal 2004 e sulla base del generatore di modelli TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) [44], l'EUROfusion TIMES Model (ETM) [45, 46], che integra la fusione fra le tecnologie generatrici di energia elettrica (vedi riquadro **Modello Tecnologia Fusione**).

In accordo con il TIMES Framework, il sistema energetico è modellizzato in termini di una serie di tecnologie agenti in vari settori (industria, agricoltura, residenziale, etc.) e *commodities* (materie prime, servizi energetici, emissioni) legati da una complessa catena di produzione e consumo. Caratterizzate le tecnologie, le *commodities* e relative interrelazioni (anche in modo regionalmente differenziato (EUROPA, AFRICA etc.), il modello fornisce proiezioni dell'evoluzione del sistema globale sull'orizzonte temporale considerato, in termini di una configurazione di equilibrio del sistema energetico tale da massimizzare il surplus economico netto risultante.

L'orizzonte temporale considerato per tale evoluzione parte dalla decade di iniziale disponibilità commerciale della tecnologia (2050) e procede fino al 2100. Su orizzonti così lunghi l'evoluzione di un sistema energetico può essere fortemente influenzata da svariati fattori socio-economici di contesto (accettazione pubblica di una data tecnologia, responsabilità ambientale, quadro normativo, ecc.) che implicino dei vincoli ad esempio sulle emissioni e/o fattori agenti sull'evoluzione della domanda di energia in relazione a *driver* quali la crescita della popolazione o del prodotto interno lordo globale.

Per esplorare l'impatto sull'evoluzione del sistema energetico di questi fattori si è quindi affermato l'uso delle analisi di scenario, ovvero possibili evoluzioni alternative del sistema energetico risultanti da un insieme di ipotesi internamente coerenti riguardanti le variabili principali e loro relazioni storicamente osservate. L'approccio ETM è stato quello di esplorare lo spazio delle possibili condizioni future socio-economiche di contesto, definendo una matrice di scenari originata da diverse *storylines* (descrizioni di futuri possibili) caratterizzati da differenti ipotesi circa l'evoluzione della domanda di energia, il livello

Modello Tecnologia Fusione

Caratterizzazione dei costi del reattore di Fusione nel modello ETM [45, 46]. I costi dell'impianto, in parte corrispondente ai modelli di reattore PPCS AB [38], calano nel tempo evolvendo da un reattore base ad uno avanzato in ragione di una curva di apprendimento tecnologica. I *Fixed Operating and Maintenance cost* (FIXOM), includono anche i costi di *decommissioning*, mentre i *Variable Operating and Maintenance cost* (VAROM), includono i costi di smaltimento dei rifiuti. I costi esterni per la generazione di elettricità, relativamente bassi per la fusione e comparabili con le rinnovabili, quantificano e inglobano nel modello di costo anche fattori quali ad esempio l'impatto ambientale delle minime emissioni in operazione (Trizio), o le emissioni dei trasporti per la costruzione dell'impianto, o degli effetti di lunghissimo termine dei radionuclidi smaltiti (^{14}C , ^{94}Nb) [48].

	Basic dal 2050 (dopo il 2060)	Advanced dal 2070 (dopo il 2080)
Specific Capital (\$ ₂₀₀₅ /kW)	5910 (4425)	4220 (3255)
FIXOM (M\$ ₂₀₀₅ /GWa) (M\$ ₂₀₀₅ /PJ)	65.8 2.16 (1.64)	65.3 2.14 (1.64)
Costi esterni (euro-cents/kWh) EUROcent2017/kWh	0.11	0.09
Efficienza	42	60
Combustibile	Litio arricchito al 90% 0,0045 M\$/PJ	

di responsabilità ambientale, la stringenza degli obiettivi di riduzione delle emissioni serra (in linea con diversi RCP) o la propensione ad accettare ritorni di investimento sul breve o lungo periodo (*hurdle rates*).

È bene ribadire che, basandosi sulla consistenza delle relazioni interne al modello del sistema energetico definite in accordo con la conoscenza attuale, questi strumenti sono utili a migliorare la comprensione dei fattori più rilevanti per l'ingresso della fusione nel *mix* di tecnologie di generazione elettrica, ma non forniscono previsioni validabili in termini assoluti. Ciò premesso, in figura 16 è mostrata la risultante quota di generazione elettrica per gruppi di tecnologie, in due scenari rappresentativi. La fusione acquisisce una quota più significativa della generazione elettrica in scenari caratterizzati da vincoli ambientali più stringenti (RCP2.6) che spingano

verso una forte elettrificazione del sistema. Il relativamente alto costo di investimento iniziale della fusione richiede anche un contesto economico che favorisca l'attitudine all'investimento con ritorno a lungo periodo. Analisi parametriche [49] attuate variando rispetto allo scenario base Harmony- RCP2.6, i costi della fusione (+30%) o includendo nel modello i costi relativi alle esternalità per le varie tecnologie, hanno infatti evidenziato la rilevanza di questi fattori che portano ad una minor quota di generazione elettrica da fusione risultante al 2100 del -31% e -22% rispettivamente. Scenari in cui si esclude la fusione dal sistema energetico e/o si riduce la capacità installabile di impianti a fissione vedono le quote delle rinnovabili intermittenti raggiungere valori fino al 60% del *mix*, rendendo più complessa la gestione della rete. La fusione, anche in chiave di graduale sostituzione della fissione, po-

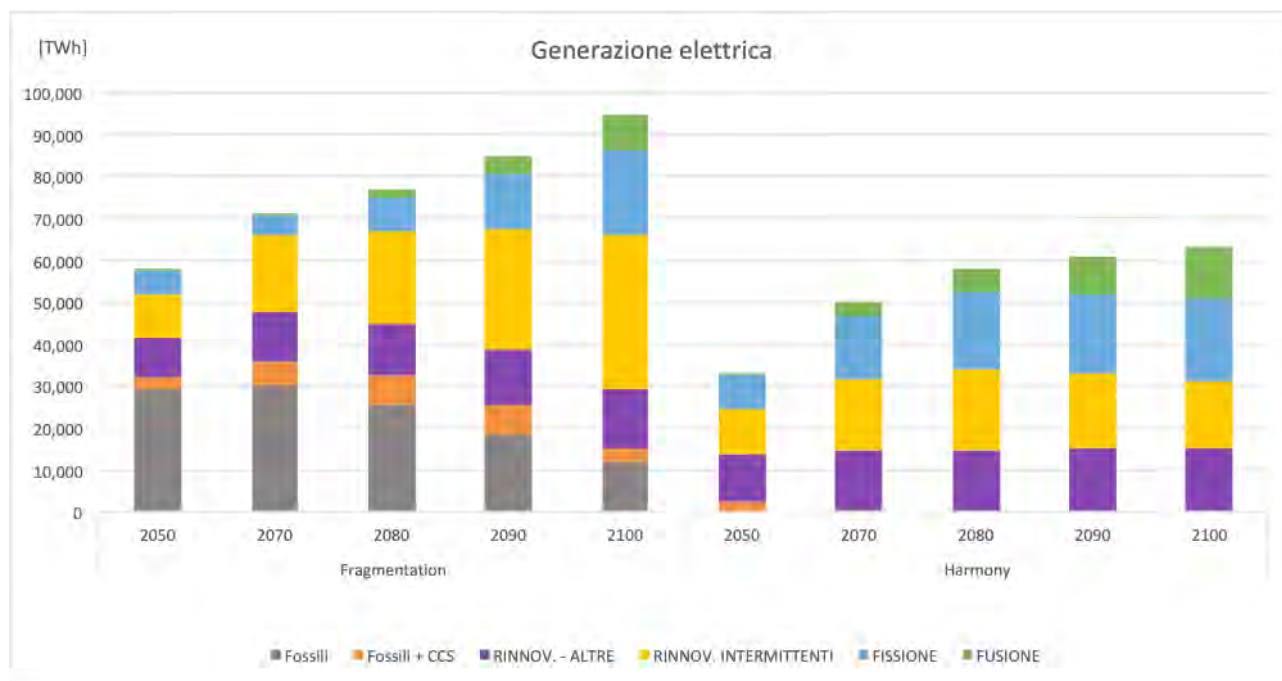


Figura 16: Generazione elettrica nel sistema energetico in due scenari relativi a contesti socio-economici molto diversi. La famiglia di scenari “Fragmentation” è caratterizzata da scarsa responsabilità ambientale, obiettivi meno stringenti di emissioni (RCP6) e con scarsa cooperazione fra le regioni in termini di possibile compensazione delle quote di emissione, un’ottica di breve periodo negli investimenti. La “Harmony” è invece caratterizzata da un contesto di forte responsabilità ambientale, stringenti vincoli alle emissioni RCP2.6 con cooperazione fra le varie regioni e disponibilità all’investimento con un’ottica di lungo termine. Ref. [49], EUROFUSION <https://collaborators.euro-fusion.org/collaborators/socio-economics/>.

trebbe quindi utile contribuire a ridurre le quote di generazione da fonti non programmabili attenuando l’impatto di queste problematiche di gestione.

Uno sguardo al futuro

Con l’Europa che si è prefissata l’obiettivo di diventare entro il 2050 un’economia a zero emissioni nette nell’ambiente (rilevanti per l’effetto serra), è naturale chiedersi quale possa essere il ruolo dell’energia da fusione termonucleare controllata nel prossimo futuro. L’ambizioso obiettivo dell’impatto ambientale netto zero passa per la progressiva sostituzione con fonti rinnovabili a basso impatto ambientale, e quindi sostenibili, delle fonti di energia basate sull’utilizzo dei combustibili fossili. Ma chiaramente l’energia da fusione non sarà pronta per l’utilizzo su larga scala in tempo utile per contribuire a questa transizione virtuosa. Il ruolo dell’energia da fusione è semmai quello di fornire un’opzione ulteriore in uno scenario futuro in cui la domanda complessiva di energia andrà aumentando,

divenendo accessibile a una frazione crescente della popolazione mondiale con un tenore di vita ecosostenibile sempre migliore. A seconda degli scenari possibili e dell’importanza relativa dell’energia da fusione, di cui si è parlato ampiamente in precedenza, potranno cambiare le nostre abitudini di vita e la geografia delle aree regionali di influenza nel mondo globalizzato della seconda parte del XXI secolo. In questo senso, lo sviluppo e l’utilizzo dell’energia da fusione potrà avere un importante impatto politico, oltre che socio-economico e ambientale di cui abbiamo detto.

L’energia da fusione si pone inoltre come elemento importante nella spinta verso lo sviluppo di nuove tecnologie. Dei superconduttori ad alta temperatura e dei nuovi materiali si è parlato in breve per il ruolo che avranno in prospettiva di ITER e DEMO e perché sono aspetti importanti del programma di ricerca Italiano sulla fusione con l’esperimento DTT in costruzione a Frascati, a sessant’anni dalla prima Associazione dei Laboratori di Frascati con l’EURATOM. Al di là dell’impatto diretto che queste nuove tecnologie

avranno sullo sviluppo e l'utilizzo dell'energia da fusione, non è facilmente prevedibile come esse potranno cambiare la nostra vita di ogni giorno. Sappiamo però che queste nuove tecnologie hanno già ora importanza nella ricerca di frontiera nei settori più avanzati della scienza: si pensi all'utilizzo dei magneti superconduttori nell'esperimento LHC al CERN e all'utilizzo di nuovi materiali nell'industria aerospaziale.

Un ultimo importante aspetto da ricordare è che la fusione termonucleare controllata, nata come costola dall'astronomia e dall'astrofisica grazie al lavoro di pionieri come Lyman Spitzer e Yakov Zel'dovich, affonda le sue radici nella fisica del plasma. In quanto tale conserva una componente importante di ricerca che non solo permetterà in futuro di sviluppare approcci sempre più efficienti e ecosostenibili, ma anche concetti innovativi di reattori a fusione. Spingendosi più in là, i ricercatori di tutto il mondo stanno già pensando alle nuove sfide che una sorgente praticamente illimitata di energia potrebbe rendere accessibili. Si pensi, ad esempio, alla propulsione a plasma che potrebbe essere una soluzione per la missione umana su Marte.



- [1] M. R. Turetsky *et al.*: "Permafrost collapse is accelerating carbon release", *Nature* **569** (2019) 32.
- [2] <https://www.euro-fusion.org>
- [3] https://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/documenti/nucleare/50anni-fusione-pdf
- [4] <https://www.iter.org/org/team/fst/itpa>
- [5] <https://nucleus.iaea.org/sites/fusionportal/Pages/Fusion%20Portal.aspx>
- [6] M. Zuin *et al.*: "Overview of the RFX-mod fusion science activity", *Nuclear Fusion* **57** (2017) 102012.
- [7] U. Ascoli-Bartoli *et al.*, "Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research" (Proc. 7th Int. Conf Innsbruck, 1978) Vol. 1, IAEA, Vienna (1979) 149.
- [8] F. Alladio *et al.*, "Heating experiments on FT tokamak in the Lower Hybrid frequency range", in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1990* (Proc. 13th Int. Conf. Washington, DC, 1990), Vol. 1, IAEA, Vienna (1991) 153.
- [9] F. Alladio *et al.*: "Energy confinement at high density in the FT tokamak", *Nucl. Fusion* **22** (1982) 479.
F. Alladio *et al.* "Density limit for lower hybrid wave-electron interaction and minority hydrogen absorption in FT" *Nucl. Fusion* **24** (1984) 725.
- [10] F. Alladio *et al.*: "Energy confinement and plasma heating during lower hybrid experiments", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **26** (1984) 157.
- [11] A. A. Tuccillo *et al.*, "Current drive at plasma densities required for thermonuclear reactors", *Proceedings of the International Workshop on Strong Microwaves in Plasmas*, Nizhny Novgorod, Russia, August 15-22 1993, V.1, pag. 47 (1994).
- [12] V. Pericoli-Ridolfini *et al.*: "High Plasma Density Lower-Hybrid Current Drive in the FTU Tokamak", *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 93.
- [13] R. Cesario *et al.* "Current drive at plasma densities required for thermonuclear reactors" *Nature Comm.* (2010), DOI: 10.1038/ncomms1052, <http://dx.doi.org/10.1038/ncomms1052>
- [14] S. Cirant *et al.*: "High power heating and current drive experiments with EC waves in FTU tokamak", *AIP Conference Proceedings* **485** (1999) 221. <https://doi.org/10.1063/1.59734>
- [15] P. Buratti *et al.*: "High core electron confinement regimes in FTU plasmas with low-or reversed-magnetic shear and high power density electron-cyclotron-resonance heating", *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 560.
- [16] J.R. Martín-Solís *et al.*: "Comparison of runaway dynamics in LH and ECRH heated discharges in the Frascati Tokamak Upgrade", *Nucl. Fusion* **45** (2005) 1524.
- [17] D. Frigione *et al.*: "High density operation on frascati tokamak upgrade", *Nucl. Fusion* **36** (1996) 1489.
D. Frigione *et al.* "Steady improved confinement in FTU high field plasmas sustained by deep pellet injection" *Nucl. Fusion* **41** (2001) 1613.
- [18] B. Esposito *et al.*: "Runaway electron generation and control", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **61** (2019) 014044.
- [19] D. Carnevale *et al.*: "Runaway electron beam control", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **61** (2019) 014036.
- [20] F. Alladio *et al.*: "Design of the PROTO-SPHERA experiment and of its first step (MULTI-PINCH)", *Nucl. Fusion* **46** (2006) S613.
- [21] P. Micozzi *et al.*: "Ideal MHD stability limits of the PROTO-SPHERA configuration", *Nucl. Fusion* **50** (2010) 1.
- [22] A. Caruso, "Inertial confinement physics and technology group progress report" (1994–1995), ENEA, RT/ERG/FUS/96/18. (1996) http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/29/067/29067556.pdf
- [23] H. Alfvén: "Existence of Electromagnetic-Hydrodynamic Waves", *Nature* **150** (1942) 405.
- [24] G. Vlad, F. Zonca and S. Briguglio: "Dynamics of Alfvén waves in tokamaks", *Riv. Nuovo Cimento* **22** (1999) 1.
- [25] L. Chen and F. Zonca: "Physics of Alfvén waves and energetic particles in burning plasmas", *Rev. Mod. Phys.* **88** (2016) 015008.

- [26] L. Chen and F. Zonca: "Theory of Alfvén waves and energetic particle physics in burning plasmas", *Nucl. Fusion* **47** (2007) S727.
- [27] F. Zonca *et al.*: "Energetic particles and multi-scale dynamics in fusion plasmas", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **57** (2015) 014024.
- [28] G. Vlad *et al.*: "Consistency of proposed burning plasma scenarios with alpha-particle transport induced by Alfvénic instabilities", *Plasma Physics and Controlled Fusion* **46** (2004) S81.
- [29] DTT Divertor Tokamak Test facility Interim Design report, https://www.dtt-project.enea.it/downloads/DTT_IDR_2019_WEB.pdf
- [30] <http://www.jt60sa.org/>
- [31] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_SPM.pdf
- [32] <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10a01.pdf>
- [33] L. Cozzi, T. Gould, "What would it take to limit the global temperature rise to 1.5°C?" (2019) <https://www.iea.org/commentaries/what-would-it-take-to-limit-the-global-temperature-rise-to-15c>
- [34] R. Moss *et al.*: "The next generation of scenarios for climate change research and assessment", *Nature* **463** (2010) 747.
- [35] "Global Energy & CO2 Status Report 2019", IEA, Paris (2019) <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>
- [36] "Safety and Environmental Assessment of Fusion Power" EUROPEAN COMMISSION Directorate General XII Fusion Programme Brussels, EURFUBRU XII-217/95 Ed.: Jurgen Raeder *et al.*
- [37] G. Borrelli *et al.* "Socio-Economic Research on Fusion Summary of EU Research" 1997 – 2000. EFDA – RE – RE – 1, July 20, 2001.
- [38] D. Maisonnier *et al.*: "Power plant conceptual studies in Europe", *Nucl. Fusion* **47** (2007) 1524.
- [39] G. Federici *et al.*: "European DEMO design strategy and consequences for materials", *Nucl. Fusion* **57** (2017) 092002.
- [40] M. Kovari, M. Coleman, I. Cristescu, R. Smith: "Tritium resources available for fusion reactors", *Nucl. Fusion* **58** (2018) 026010.
- [41] U.S. Department of the Interior, U.S. Geological Survey "Mineral commodity summaries 2020" <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2020/mcs2020.pdf>
- [42] A. M. Bradshaw, T. Hamacher, U. Fischer: "Is nuclear fusion a sustainable energy form?", *Fusion Engineering and Design* **86** (2011) 2770.
- [43] N. Taylor, P. Cortes: "Lessons learnt from ITER safety & licensing for DEMO and future nuclear fusion facilities", *Fusion Engineering and Design* **89** (2014) 1995.
- [44] <http://www.iea-etsap.org/web/Documentation.asp>
- [45] H. Cabal *et al.*: "Fusion power in a future low carbon global electricity system", *Energy Strategy Reviews* **15** (2017) 1.
- [46] W.E. Han, D. J. Ward: "Revised assessments of the economics of fusion power", *Fusion Engineering & Design* **84** (2009) 895.
- [47] D. J. Ward, I. Cook, Y. Lechon, R. Saez: "The economic viability of fusion power", *Fusion Engineering & Design* **75-79** (2005) 1221.
- [48] T. Hamacher *et al.*: "A comprehensive evaluation of the environmental external costs of a fusion power plant", *Fusion Engineering & Design* **56-57** (2001) 95.
- [49] F. Gracceva *et al.*: "Il ruolo della fusione negli scenari di lungo periodo", *Energia, ambiente e innovazione* **2** (2019) 67. DOI 10.12910/EAI2019-016
- [50] Di Pace *et al.* *Radioactive Waste Management of Fusion Power Plants*, IntechOpen, Chapter 14 in *Radioactive Waste*, ed. R. A. Rahman, London (2012).
- [51] M. R. Gilbert *et al.*: "Waste implications from minor impurities in European DEMO materials", *Nucl. Fusion* **59** (2019) 076015.

Daniilo Dongiovanni: dopo la laurea in Fisica nel 2001 presso l'Università di Bologna, si è specializzato nello sviluppo di modelli di *machine learning* e *pattern recognition* in applicazioni di *imaging* medico. Ha lavorato presso l'INFN in progetti di calcolo distribuito per la fisica delle alte energie. Dal 2012 è ricercatore presso il gruppo di sicurezza nucleare del dipartimento fusione nucleare del centro di ricerca ENEA di Frascati dove si occupa di analisi di sicurezza e affidabilità dei sistemi per impianti di ricerca in fusione nucleare quali ITER e DEMO europeo. Collabora dal 2014 al progetto *Socio Economic Studies* del consorzio europeo EUROfusion.

Lori Gabellieri: si laurea in Fisica presso l'Università degli Studi di Padova nel 1985. Dal 1987 fino ad oggi è ricercatore nel gruppo Fisica della Fusione a Confinamento Magnetico nel Centro ENEA di Frascati ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile. Si è interessato principalmente allo studio della radiazione emessa dal plasma nell'intervallo VUV – SXR e Hard – X, avendo cura dell'aspetto sperimentale di progettazione e funzionamento delle diagnostiche, di quello che concerne lo sfruttamento scientifico dei risultati prodotti nel corso dei programmi scientifici e dello sviluppo nuove diagnostiche in

questo settore. Dal 2016 ha coordinato i sistemi di misura diagnostici sull'impianto FTU Tokamak. Dal 1 gennaio 2020 ha una assegnazione al consorzio DTT S.c.a r.l. nata per la realizzazione e gestione della facility Divertor Tokamak Test. In quest'ambito collabora al coordinamento dei sistemi di misura diagnostica del Tokamak e alla cura degli aspetti di comunicazione e di pubbliche relazioni del progetto.

Piero Martin: Piero Martin è un fisico sperimentale che insegna, ricerca e racconta. Insegna all'Università di Padova e svolge la sua attività di ricerca sulla fusione termonucleare controllata. *Fellow dell'American Physical Society* e autore di 130 pubblicazioni in riviste scientifiche internazionali, è stato responsabile scientifico di grandi imprese di ricerca, come l'esperimento RFX a Padova e la Task Force Europea *Eurofusion Medium Size Tokamak*. Dal 2017 è membro dell'*executive board* di DTT, il nuovo esperimento di fusione italiano.

Angelo Antonio Tuccillo: si laurea in Fisica con lode presso l'Università di Roma Sapienza nel settembre 1978. Da luglio 1981 a dicembre 2019 ha fatto parte del gruppo di ricerca sulla fusione dell'ENEA di Frascati come esperto di diagnostica e di riscaldamento addizionale dei plasmi. È stato direttore del Comitato Europeo per la Lower Hybrid (CCLH 1999 – 2005) e ha diretto le Task Force Europee per i riscaldamenti addizionali (TFH, 2000–02) e per gli scenari avanzati del JET (TFS2, 2002–4). Dal 2004 al 2017 è stato membro EU dell'*Integrated Operation Scenario* dell'*International Tokamak Programme Activity*. Ha diretto il gruppo di Fisica del Plasma di Frascati dal 2010 al 2019. Dal 2015 è membro del *Fusion Programme Consulting Committee* della IEA e dal 2017 dello *Scientific and Technological Advisory Committee* del programma fusione Europeo. Dal pensionamento, avvenuto a gennaio 2020, è collaboratore del Progetto DTT.

Gregorio Vlad: ha conseguito la laurea in Fisica (1981) e il titolo di Dottore di Ricerca in Fisica (1987) presso l'Università la Sapienza di Roma. Dal 1984 lavora presso i Laboratori ENEA di Frascati, nella Divisione di Fisica della fusione a confinamento magnetico. È stato ospite come *visiting physicist* presso diverse istituzioni

(MIT (USA), JET–Culham (UK), Chalmers University (Sweden), CRPP-EPFL (CH), Max-Planck-Institute für Plasmaphysik, Garching (Germany), e altre). La sua attività include la teoria e la simulazione numerica nel campo della stabilità magnetoidrodinamica (MHD), dei modi di Alfvén in presenza di particelle energetiche, del trasporto dell'energia in plasmi di interesse termonucleare. Dal 2015 è responsabile del Laboratorio di Teoria, Simulazione e Modelling della Divisione di Fisica nel Dipartimento FSN dell'ENEA. È autore di più di 160 articoli su riviste internazionali e a conferenze con referee.

Fulvio Zonca: ha conseguito il Ph.D. in Astrophysical Sciences presso la Princeton University nel 1993. È Dirigente di Ricerca presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati dove lavora dal 1988, e Professore Aggiunto dal 2009 presso l'Institute for Fusion Theory and Simulation, Zhejiang University, Hangzhou, in Cina, presso la quale è Qìushì Chair Professor dal 2020. È *Principal Investigator* del progetto *Multi-scale Energetic particle Transport in fusion devices*, un progetto *Enabling Research* per l'implementazione della *fusion roadmap* del *Consorzio Eurofusion*. È autore di più di 160 articoli su riviste internazionali, tra cui *Physics of Alfvén waves and energetic particles in burning plasmas* (Review of Modern Physics 88, 015008, 2016) col Prof. Liu Chen.

