

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

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 Niobio₃-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.

¹ 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