

Corsa alla fusione



Le aziende che investono nella fusione nucleare sperano di realizzare reattori commerciali entro i prossimi dieci anni. Superando così i grandi progetti internazionali

20642
POSTE ITALIANE SPED. IN A.P. - D.L. 353/2003
CONVL. 46/2004, ART. 1, C. 1, DGB - ROMA
RIVISTA MENSILE - NUMERO 642 - 27 GENNAIO 2022
9 17700361808000

Transizione energetica

Perché le terre rare sono il petrolio del futuro

Astronomia

La minaccia delle tempeste solari per la società connessa

Tecnologia

Spiare le emozioni con l'intelligenza artificiale

La gara per l'energia

di Philip Ball

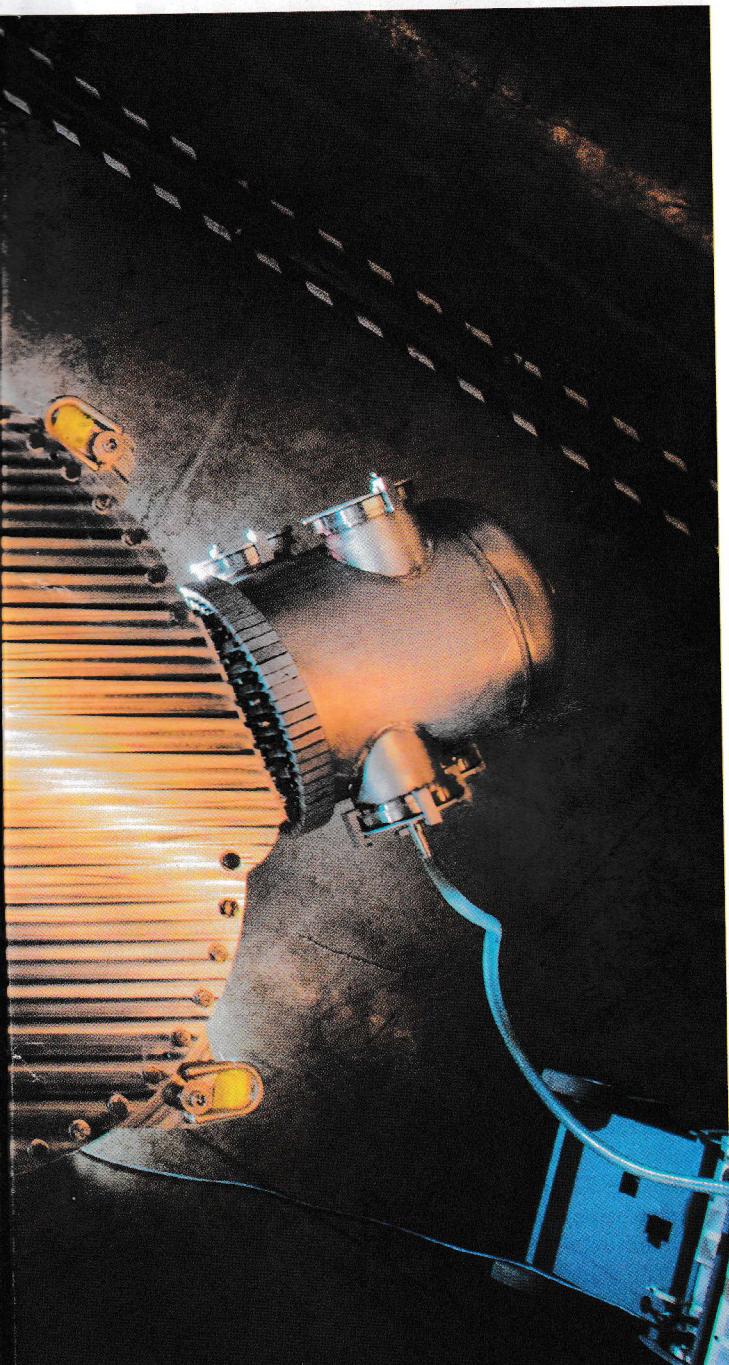


Gretchen Ertl, CFS/MIT-PSFC, 2021

Questo magnete superconduttore ad alta temperatura è stato progettato e costruito da Commonwealth Fusion Systems (CFS) e dal Plasma Science and Fusion Center del Massachusetts Institute of Technology. È il magnete più forte tra quelli pensati per la fusione nucleare e verrà impiegato da CFS nel 2025 in un reattore per la fusione.

Un comparto emergente di aziende che si occupano di fusione nucleare promette reattori commerciali entro i prossimi dieci anni

da fusione



L'antico paesino di Culham, accoccolato in un'ansa del Tamigi a ovest di Londra, sembra una piattaforma improbabile da cui far partire il futuro. Eppure proprio qui nel 2022 inizieranno i lavori di costruzione di un edificio lucido in vetro e acciaio che potrà contenere quella che a detta di molti è una tecnologia indispensabile per rispondere alla domanda di energia pulita nel XXI secolo e oltre.

Schernita a lungo come una prospettiva a cui mancano sempre trent'anni per diventare realtà, la fusione nucleare sembra finalmente sul punto di diventare praticabile a livello commerciale. Oggi sono più di 30 le aziende private dedicate alla fusione in tutto il mondo, stando a un'indagine condotta nell'ottobre 2021 dall'associazione di settore, la Fusion Industry Association (FIA) di Washington; le 18 aziende che hanno reso noti i finanziamenti ricevuti affermano di aver attratto oltre 2,4 miliardi di dollari in totale, quasi tutti da investimenti privati. Cruciali per queste iniziative sono progressi dell'informatica e della scienza dei materiali, che rendono possibili tecnologie diverse rispetto ai progetti standard portati avanti tanto a lungo da enti nazionali e internazionali.

La nuova iniziativa avviata a Culham, che da decenni è il fulcro della ricerca sulla fusione nucleare nel Regno Unito, sarà un impianto dimostrativo di General Fusion (GF), una società con sede a Burnaby, in Canada. La struttura dovrebbe essere operativa entro il 2025 e l'azienda punta ad avere reattori in commercio poco dopo il 2030. Sarà «la prima dimostrazione su larga scala orientata alla realizzazione di centrali elettriche», afferma l'amministratore delegato di GF Chris Mowry; certo, sempre che i concorrenti non ci arrivino prima (*si veda il box a p. 30*).

Progettato dall'architetta britannica Amanda Levete, l'impianto prototipo di GF illustra come la ricerca sulla fusione stia passando da mastodontiche imprese finanziate dallo Stato o da enti inter-

nazionali a opere eleganti e attente all'immagine, portate avanti da aziende private, spesso con il sostegno dello Stato. Per inciso, GF riceverà un finanziamento dal governo britannico, ma finora non ne ha reso noto l'importo.

L'atmosfera è cambiata

In questo senso, i sostenitori della tecnologia della fusione vedono tanti paralleli tra il loro settore e l'industria dello spazio. Anche quest'ultima in passato era limitata alle iniziative degli enti governativi, mentre oggi beneficia dell'impulso e della fantasia di agili società private (anche se spesso con il sostegno dello Stato). Siamo nel «momento SpaceX della fusione», afferma Mowry, facendo riferimento all'azienda spaziale di Elon Musk con sede a Hawthorne, in California.

«L'atmosfera è cambiata», commenta Thomas Klinger, specialista di fusione al Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP) di Greifswald, in Germania. «Ormai siamo così vicini che ne sentiamo l'odore». Gli investitori percepiscono che c'è davvero la prospettiva di ottenere profitti: Google e la banca d'investimento newyorchese Goldman Sachs, per esempio, sono tra i finanziatori della TAE Technologies, una società con sede a Foothill Ranch, in California, che finora ha raccolto circa 880 milioni di dollari in fondi per la fusione. «Le aziende private iniziano a costruire progetti al livello di quelli che possono costruire i governi», commenta Bob Mumgaard, amministratore delegato di Commonwealth Fusion Systems (CFS), con sede a Cambridge, in Massachusetts [l'azienda italiana ENI è oggi il principale azionista di CFS attraverso ENI Next, società di *corporate venture capital* del gruppo, N.d.R.].

Proprio come stanno diventando realtà i viaggi privati nello spazio, molti osservatori prevedono che lo stesso modello di business porterà all'avvento della fusione nucleare a livello commerciale (necessaria per la decarbonizzazione dell'economia energetica) entro una decina d'anni. «Ci sono ottime possibilità di arrivarci in meno di dieci anni», afferma Michl Binderbauer, CEO di TAE Technologies. Nel rapporto FIA, la maggioranza dei rispondenti ritiene che la fusione nucleare inizierà ad alimentare la rete elettrica in qualche punto del mondo tra il 2030 e il 2040.

Diversi esperti di fusione che non lavorano per aziende private hanno sostenuto, parlando con «Nature», che anche se le prospettive sono innegabilmente eccitanti, l'idea di avere la fusione disponibile a livello commerciale in dieci anni è un po' troppo ottimistica. «Le società private affermano che riusciranno a renderla operativa in dieci anni, ma è solo per attirare gli investitori», commenta Tony Donné, direttore di programma per il consorzio Eurofusion, che effettua esperimenti al Joint European Torus, una struttura creata a Culham alla fine degli anni settanta e gestita dallo Stato. «È da sempre che dicono di aver bisogno di una decina d'anni per realizzare un reattore a fusione funzionante. E continuano a dirlo anche oggi».

I termini temporali proiettati dalle aziende coinvolte non andrebbero considerati tanto come promesse quanto come aspirazioni motivazionali, afferma Melanie Windridge, una fisica del plasma che lavora come direttrice della comunicazione per la FIA nel Regno Unito e come consulente della comunicazione per Tokamak Energy, un'azienda di Culham che si occupa di fusione nucleare. «Ritengo che avere obiettivi audaci sia necessario», continua. Probabilmente sarà necessario anche il sostegno dello Stato per costruire una centrale a fusione che riesca effettivamente ad alimentare la rete elettrica nazionale, aggiunge Ian Chapman, amministratore delegato della UK Atomic Energy Authority (UKAEA).

Philip Ball è un giornalista scientifico che lavora a Londra.



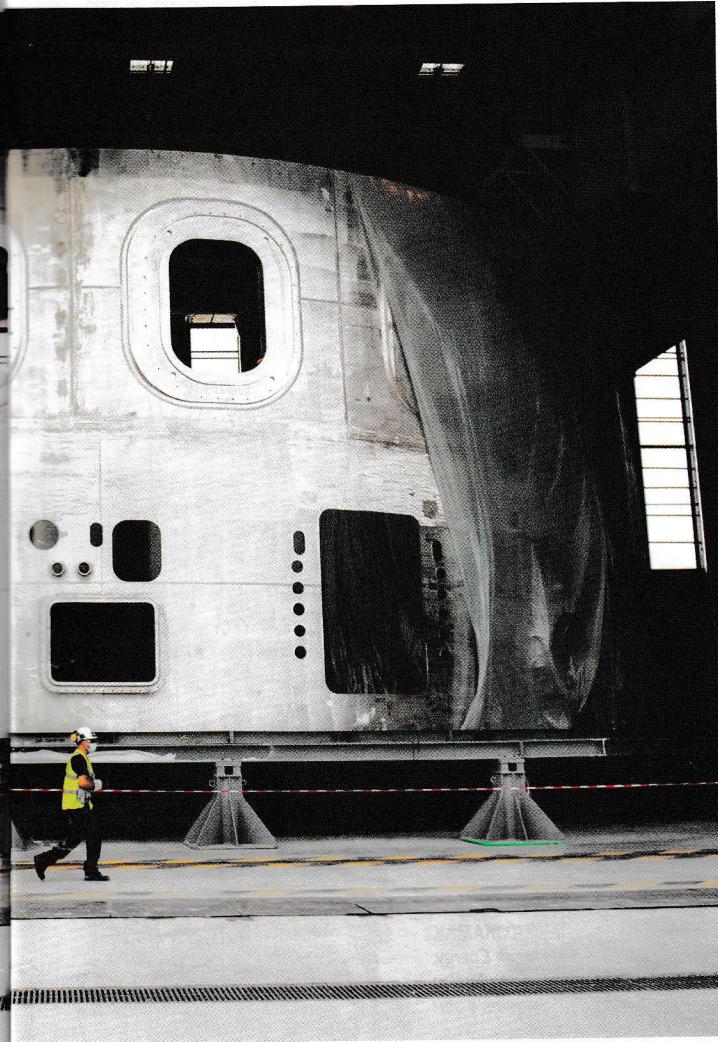
In ogni caso, che dipenda da imprese private su piccola scala, da enormi progetti nazionali o internazionali o ancora da un insieme di queste due componenti, una versione pratica della fusione nucleare sembra finalmente in vista. «Sono convinto che si realizzerà», sostiene Chapman. Chris Kelsall, amministratore delegato di Tokamak Energy, concorda: «Prima o poi ci si riuscirà - afferma - e sarà una cosa rivoluzionaria».

Controllare il processo

La fusione nucleare, afferma Klinger, è «l'unica fonte di energia primaria rimasta nell'universo» che ancora non abbiamo sfruttato. Da quando siamo riusciti a dominare il processo che alimenta le stelle usando per le bombe all'idrogeno, negli anni cinquanta, i tecnologi sognano di poterlo attivare in modo più controllato per produrre energia.

Le centrali nucleari esistenti usano la fissione, cioè il rilascio di energia che deriva dal decadimento di atomi pesanti come l'uranio. La fusione, al contrario, produce energia dall'unione di nuclei molto leggeri, tipicamente quelli dell'idrogeno, in un proces-

Un componente centrale nella costruzione del reattore a fusione nucleare del progetto internazionale ITER. Il reattore è in fase di assemblaggio a Cadarache, nel sud della Francia.



so che può avvenire solo a temperature e pressioni molto elevate. Nella maggior parte dei casi, per realizzare questo processo in modo controllato nei reattori si cerca di riscaldare due isotopi dell'idrogeno, il deuterio (D) e il trizio (T), fino a che formano un plasma (uno stato fluido della materia che contiene atomi ionizzati e altre particelle cariche) e poi si fondono. Per questi isotopi, la fusione inizia a temperature e densità inferiori rispetto all'idrogeno normale.

La fusione D-T genera un po' di radiazioni sotto forma di neutroni a vita breve, ma non produce rifiuti radioattivi di lunga durata, al contrario della fissione. Inoltre è un processo più sicuro rispetto alla fissione perché lo si può interrompere facilmente: se si porta il plasma al di sotto della soglia critica di temperatura o di densità, la reazione nucleare si interrompe.

Ciò che rende difficile realizzare questo processo in modo controllato, tuttavia, è il problema di come confinare il plasma elettricamente carico durante la fusione, che avviene a temperature di circa 100 milioni di kelvin, cioè molto più elevate del nucleo del Sole. In genere i ricercatori usano campi magnetici per confinare

e far levitare il plasma nel reattore. Ma le instabilità di questo fluido infernale rendono molto difficile il confinamento e finora hanno impedito di sostenere la fusione per un periodo sufficiente a estrarre più energia di quella impiegata per avviare il processo.

Un sogno lungo settant'anni

Si tratta ovviamente di un obiettivo da *big science*, e fino a questo secolo erano solo le iniziative pubbliche ad avere le risorse necessarie. Le proporzioni di questa impresa si riflettono oggi nel progetto più grande al mondo per questo settore: ITER, un reattore a fusione attualmente in costruzione nel sud della Francia, che vanta il sostegno di 35 nazioni, tra cui Cina, gli Stati membri dell'Unione Europea, Stati Uniti, Russia, Corea del Sud e Giappone, e con un costo di almeno 22 miliardi di dollari. Anche se le prime sperimentazioni sono previste nel 2025, la fusione D-T inizierà non prima del 2035, con l'obiettivo finale di estrarre continuamente 500 megawatt (MW) di energia, paragonabili alla produzione di una piccola centrale elettrica a carbone, immettendo nel reattore 50 MW. Queste cifre fanno riferimento solo all'energia immessa ed estratta direttamente dal plasma; non tengono conto di altri processi quali la manutenzione o l'inefficienza nella conversione in elettricità della produzione termica della fusione.

Dopo ITER potrebbe arrivare un'altra serie di grandi reattori: la Cina, che mette a disposizione di ITER i risultati di tre reattori a fusione, progetta di introdurre il China Fusion Engineering Testing Reactor (CFETR) tra il 2030 e il 2040, mentre sia la Corea del Sud che l'Unione Europea si propongono di costruire impianti dimostrativi sulla base di ITER.

I grandi sforzi delle agenzie nazionali e internazionali non avranno successo in tempo per aiutare la decarbonizzazione necessaria contro il cambiamento climatico, anche se si prevede che la fusione diventi una parte essenziale dell'economia energetica nella seconda metà di questo secolo. Invece le società private sperano di avere impianti funzionanti e poco costosi già prima di quel periodo.

Come per l'esplorazione dello spazio, uno dei benefici dell'industria privata nella fusione è una gamma di approcci più variegata rispetto a quella consentita dalle iniziative monolitiche statali. ITER usa il metodo più diffuso per il confinamento del plasma, in un impianto chiamato *tokamak*, che è dotato di potenti magneti superconduttori per trattenere il plasma in una camera a forma di anello (ovvero toroidale). Anche il flusso di particelle elettricamente cariche del plasma stesso genera un campo magnetico che ne favorisce il confinamento.

Ma il tokamak non è l'unica opzione. Ai primordi della fusione nucleare, negli anni cinquanta, l'astrofisico statunitense Lyman Spitzer dimostrò che era possibile configurare i campi magnetici in un anello attorcigliato su se stesso, simile a un 8, per formare una «bottiglia magnetica» da riempire con il plasma. Questa configurazione è chiamata *stellarator*. Però per risolvere le equazioni che descrivono il plasma in questa complicata geometria c'era bisogno di troppa potenza di calcolo, perciò l'idea fu in gran parte abbandonata quando si dimostrò che i tokamak funzionavano.

Con l'avvento dei supercomputer, alla fine degli anni ottanta, i ricercatori rispolverarono l'idea. Si arrivò così al progetto dello stellarator dell'IPP chiamato reattore Wendelstein 7-X. Costato circa un miliardo di euro tra costruzione, spese di personale e gestione fino al primo test sul plasma nel 2015, di cui 370 milioni di euro spesi per la costruzione e finanziati principalmente dal governo tedesco, Wendelstein 7-X sarà pronto a fine 2021. Poi inizie-

Corsa alla fusione

Aziende e governi stanno sviluppando molti tipi diversi di reattori a fusione. Tutti riscaldano un gas per creare un plasma, confinato a temperature così alte che i nuclei degli atomi si uniscono tra loro, rilasciando energia che si può catturare per produrre elettricità. Ecco cinque modelli tra i più importanti.

MISCELA DI CARBURANTI

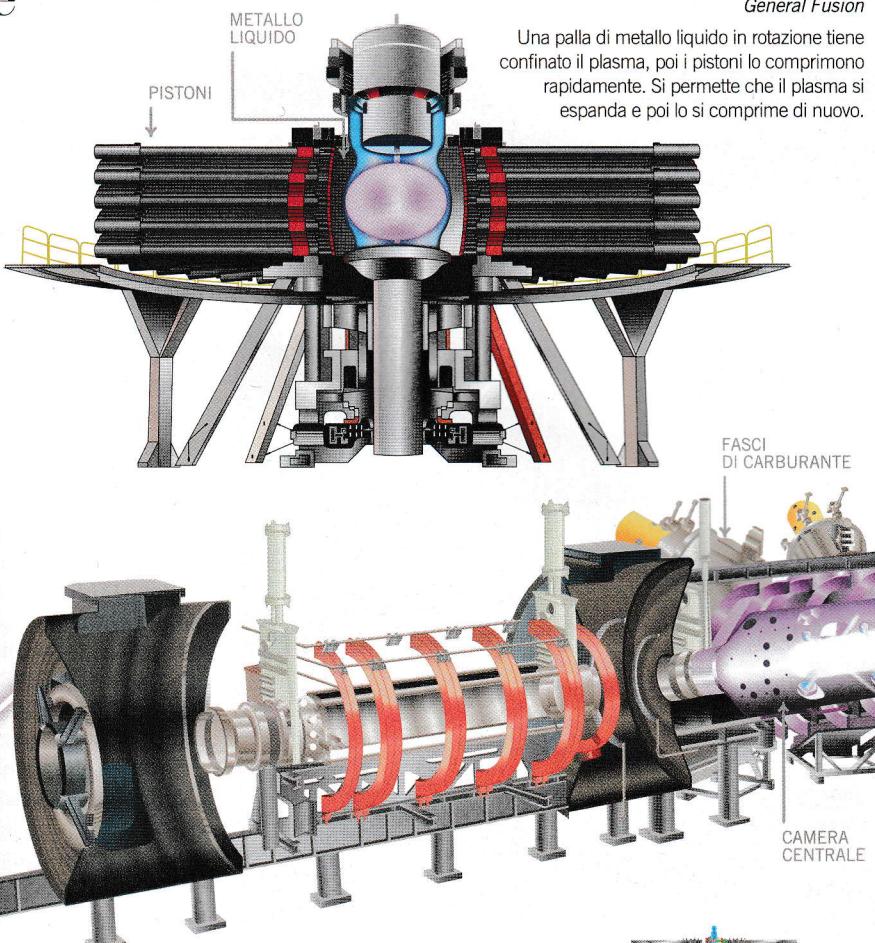
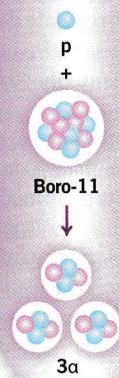
Molti reattori usano deuterio (D) e trizio (T) per rilasciare l'energia. Questa miscela si innesca, o crea una reazione di fusione autosostenuta, a circa 100 milioni di kelvin. La reazione produce neutroni, che possono rendere radioattiva la camera di fusione.

D-T



Altre reazioni, come la fusione di protoni (p) e boro-11 (^{11}B), non producono neutroni, però l'ignizione richiede temperature più elevate.

$\text{p} - ^{11}\text{B}$



REATTORE LINEARE (CON FASCI IN COLLISIONE) TAE Technologies

Si sparano pacchetti di plasma in una camera centrale e si fa ruotare rapidamente all'interno di un solenoide (un elettromagnete formato da una bobina di filo conduttore).

MINI TOKAMAK Tokamak Energy, Commonwealth Fusion Systems e altri

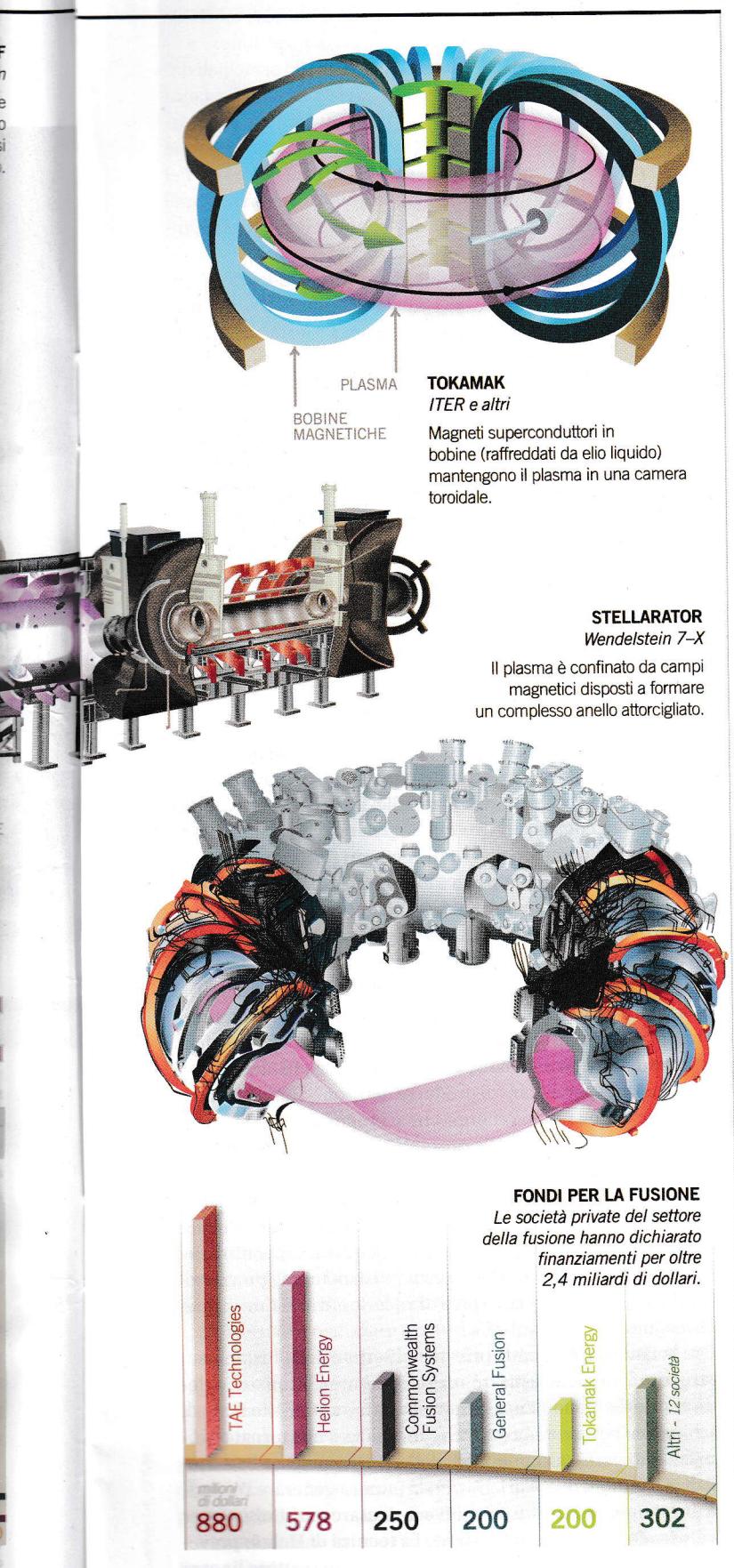
Magneti superconduttori ad alta temperatura producono campi magnetici più forti e si possono raffreddare più facilmente, il che permette di costruire tokamak più compatti di forma sferica.

PROMESSE FUTURE

Le società private fanno audaci promesse secondo cui riusciranno a produrre reattori a fusione per uso commerciale tra il 2030 e il 2040.



Illustrazioni di Danilo Sossi



rà il lungo processo per capire come farlo funzionare regolarmente come impianto dimostrativo.

Gli stellarator hanno il vantaggio che all'interno della loro struttura il plasma è più facile da confinare e non c'è bisogno (come invece nei tokamak) di farlo attraversare da forti correnti elettriche per tenere a freno le instabilità, afferma la fisica della fusione Josefine Proll, del Politecnico di Eindhoven, nei Paesi Bassi. Però non è chiaro se sarà possibile adottare la tecnologia degli stellarator in un reattore nei prossimi 20-30 anni. «Non sembra affatto probabile al momento», continua la ricercatrice. «Abbiamo tante domande fondamentali ancora senza risposta», concorda Klinger. «Questa macchina è la prima del suo genere, perciò dobbiamo avere pazienza e fare un passo alla volta». Le aziende private si pongono obiettivi più a breve termine perché devono rendere conto agli investitori, spiega, ma questo non significa che siano in grado di mantenere le promesse.

Modelli alternativi

Alcune società private del settore fusione nucleare usano sempre il modello tokamak, ma in versione a scala ridotta. Presso Tokamak Energy, una squadra di circa 165 dipendenti lavora a un tokamak sferico, che ha la forma di una mela senza il torsolo. Largo 3,5 metri, questo impianto sarà molte volte più piccolo rispetto a quello di ITER, che, se si calcola anche la strumentazione circolante necessaria per il raffreddamento, sarà alto quasi 30 metri e largo altrettanto. Alcune iniziative finanziate da fondi statali considerano anche un modello sferico compatto: la UKAEA, per esempio, ha lanciato un progetto chiamato STEP (Spherical Tokamak for Energy Production) che punta a creare un sistema del genere in un impianto prototipo in grado di fornire almeno 100 MW di elettricità alla rete nazionale entro il 2040. La UKAEA ha selezionato cinque possibili siti per l'impianto e conta di raggiungere la decisione definitiva entro il 2022.

Una componente essenziale per questi modelli di reattori è un nuovo tipo di magneti formato da nastri di materiali superconduttori ad alta temperatura, che dovrebbero produrre campi magnetici molto più intensi rispetto ai magneti superconduttori convenzionali usati da ITER. Sono «potenzialmente rivoluzionari», commenta Klinger, non solo perché generano un campo magnetico più forte, ma anche perché i superconduttori convenzionali hanno bisogno di un sistema di raffreddamento a elio liquido, che è un incubo dal punto di vista ingegneristico: l'elio liquido ha una viscosità quasi inesistente, perciò basta una fessura minuscola per avere una perdita. I superconduttori ad alta temperatura, al contrario, possono usare sistemi di raffreddamento ad azoto liquido, che è abbondante, economico e agevole da conservare.

Sia Tokamak Energy (in collaborazione con il CERN, il laboratorio europeo di fisica delle particelle che si trova nei pressi di Ginevra, in Svizzera) che CFS fanno affidamento su questi nuovi magneti. Nell'agosto 2021 CFS ha annunciato di essere riuscita a realizzarli nella forma necessaria per i suoi tokamak e di averlo fatto «nei tempi previsti e nel rispetto del budget», afferma Mumgaard con orgoglio.

CFS è nata nel 2018 come *spin-off* del Plasma Science and Fusion Center del Massachusetts Institute of Technology (MIT) di Cambridge e Klinger la ritiene «l'iniziativa privata di fusione nucleare più promettente, più preziosa e meglio concepita». Insieme, il MIT e CFS si preparano a costruire quella che Mumgaard chiama «la prima macchina di fusione con un bilancio energetico posi-

tivo», cioè che produce più energia di quanta ne consumi. Il sistema si chiama SPARC ed è attualmente in costruzione a Devens, in Massachusetts. Mumgaard afferma che sarà in funzione entro la fine del 2025 e che sarà «rilevante a livello commerciale» perché genererà circa 100 MW di energia.

First Light Fusion, fondata nel 2011 come spin-off dell'Università di Oxford, nel Regno Unito, segue una strategia diversa, chiamata confinamento inerziale. In questo caso il plasma per la fusione non è trattenuto da campi magnetici: c'è invece un'onda d'urto che lo comprime fino alle enormi densità necessarie per la fusione, dopo di che per una frazione di secondo il plasma mantiene la forma per pura inerzia, prima di espandersi e dissipare l'energia. L'idea esiste fin dagli anni cinquanta e attualmente è allo studio alla US National Ignition Facility (NIF) del Lawrence Livermore National Laboratory in California, dove si fanno implodere capsule di carburante D-T delle dimensioni di un pisello usando fasci laser con impulsi di un nanosecondo per innescare la fusione. Ad agosto 2021 la NIF ha riferito che un colpo di laser aveva generato una produzione momentanea di energia otto volte superiore a qualsiasi quantità mai raggiunta prima e pari al 70 per cento dell'energia immessa per la reazione. La notizia ha risollevato la speranza di ottenere un bilancio energetico positivo dalla fusione a confinamento inerziale laser, anche se un processo così energivoro sarà forse più utile nella ricerca di base che nella produzione di energia su larga scala.

A First Light l'onda d'urto per la compressione non è generata con i laser, che consumano tanta energia, ma usando una pistola elettromagnetica per sparare un piccolo proiettile contro un bersaglio che contiene gli isotopi di idrogeno. L'azienda mantiene il riserbo sui dettagli del processo, ma ha affermato che per innescare la fusione dovrà riuscire a sparare il proiettile a 50 chilometri al secondo, cioè una velocità doppia rispetto a quella normalmente raggiunta negli esperimenti sulle onde d'urto.

GF segue un approccio ancora diverso, chiamato *magnetized target fusion* (MTF). In questo sistema il plasma è compresso più lentamente, per esempio con pistoni, ma esiste un confinamento magnetico che impedisce la dissipazione del calore quando il plasma è sotto pressione. Questa idea, proposta all'inizio degli anni settanta dai ricercatori dello US Naval Research Laboratory di Washington, cerca di raggiungere un compromesso ottimale tra i campi magnetici forti ed energivori necessari per il confinamento del plasma nei tokamak e le onde d'urto, i laser e gli altri metodi, anch'essi ad alto consumo energetico, usati per comprimere rapidamente il plasma nei sistemi a confinamento inerziale.

Il progetto seguito da GF con il reattore di Culham prevede una centrifuga che fa ruotare una camera riempita di piombo e litio liquidi. Il movimento forma nel metallo una cavità in cui si raccoglie il plasma. Un sistema di pistoni inietta altro metallo liquido all'interno della camera, aumentando la compressione del plasma per qualche decina di millisecondi e innescando così la fusione; poi si fa scendere la pressione. Il processo si ripete ciclicamente, circa una volta al secondo.

Un aspetto particolarmente positivo di questo reattore è che genera trizio, una risorsa costosissima che si può produrre solo con le reazioni nucleari e che decade rapidamente. In ITER e in altri progetti il trizio si produce quando i neutroni che escono dal reattore colpiscono il rivestimento in litio del tokamak. Nel pro-

getto di GF il trizio si produce quando i neutroni colpiscono il litio già nel metallo liquido usato per il sistema di compressione.

È stato solo negli ultimi anni che GF ha risolto le principali difficoltà: come creare un bersaglio di plasma che resista abbastanza da essere compresso e come far collassare agevolmente e rapidamente la cavità di metallo liquido. Tuttavia l'azienda afferma che la sua centrale dimostrativa nel Regno Unito sarà operativa nel 2025 e che poi «alimenterà case, aziende e industrie con l'energia pulita, affidabile e conveniente della fusione nucleare qualche anno dopo il 2030».

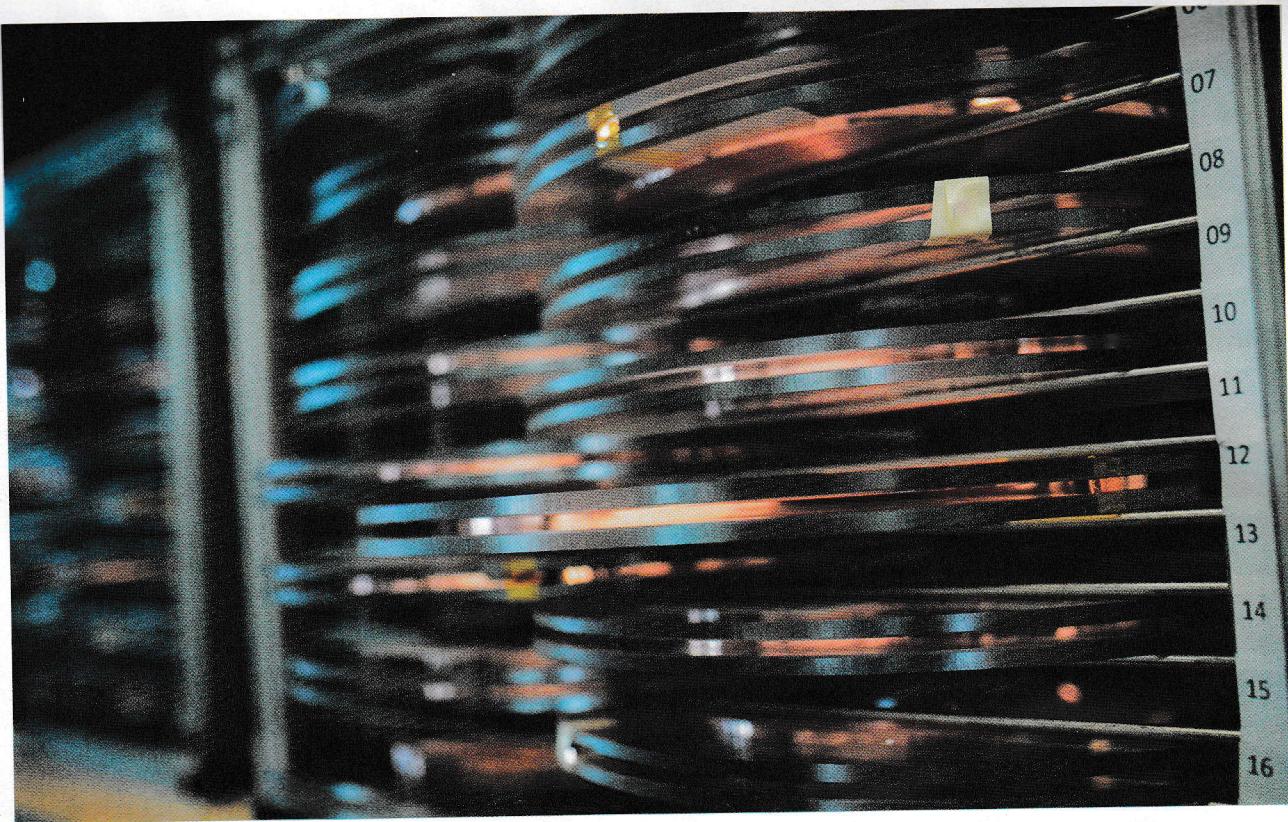
TAE Technologies ha, in certi sensi, un progetto ancora più audace. Punta ad abbandonare del tutto il carburante D-T per usare invece atomi di boro-11 e nuclei di idrogeno-1 (protoni). Questa idea, che ha il sostegno del cofondatore di TAE, il fisico del plasma canadese Norman Rostoker, e che è chiamata fusione p-¹¹B, richiede temperature dieci volte superiori a quelle usate nella fusione D-T: circa un miliardo di kelvin. Il vantaggio è che usa solo carburante ampiamente disponibile e non genera neutroni che possano contaminare il reattore. Binderbauer afferma che questo progetto promette bassi costi di manutenzione e un obiettivo finale molto più sostenibile.

Per decarbonizzare l'economia energetica abbiamo bisogno della fusione nucleare a livello commerciale

Nei reattori TAE il plasma è confinato in un campo magnetico cilindrico creato da un solenoide, una struttura ispirata alle tecnologie usate negli acceleratori di particelle. Il plasma ruota attorno a un asse e così, come in una trottola, si genera una stabilità intrinseca. Per il confinamento non sono necessari forti campi magnetici esterni: per la maggior parte è lo stesso plasma in rotazione a generarli. Per mantenere la rotazione, si immette il boro con flusii tangenziali che aumentano il moto angolare del plasma, simili ai colpi di frusta che mantengono in moto una trottola.

L'azienda ha realizzato prototipi per dimostrare il sistema. Dal 2017 lavora a un impianto dimostrativo chiamato Norman, mentre oggi ha iniziato a elaborare un sistema chiamato Copernicus che funzionerà con normale plasma di idrogeno (o altri plasmi non da fusione) per evitare di produrre neutroni. Simulazioni informatiche calcoleranno l'energia che si produrrebbe se si usasse vero carburante da fusione. Se riuscirà a raggiungere le condizioni necessarie per la fusione D-T (cosa che spera di ottenere attorno al 2025), TAE intende concedere la tecnologia su licenza ad altri operatori che studiano quel carburante. Binderbauer definisce Copernicus «un trampolino» per raggiungere le temperature necessarie alla fusione p-¹¹B. «Siamo convinti di poter raggiungere il miliardo di gradi», afferma, e spera di vederlo entro la fine di questo decennio.

Tra le tante altre aziende private nel settore della fusione nucleare, quella che ha attirato maggiormente l'attenzione degli investitori è Helion Energy, con sede a Everett, nello Stato di Washington: nel novembre 2021 ha annunciato una tornata di finanziamenti pari a 500 milioni di dollari, arrivando così a un totale di 578 milioni di dollari. L'azienda punta a generare l'elettricità direttamente dalla fusione, invece di usare quest'ultima per riscaldare fluidi e azionare turbine. La tecnica di Helion prevede di sparare impulsi di plasma all'interno di un reattore lineare



Bobina di nastro superconduttore ad alta temperatura usato nel magnete costruito e testato da CFS e MIT. Il magnete contiene 267 chilometri di nastro. Quasi come da Roma a Firenze in auto (circa 275 chilometri).

e poi, dopo che il plasma si è unito, comprimerlo rapidamente per mezzo di campi magnetici. Quando si innesca la fusione, il plasma si espande e il suo campo magnetico interagisce con quello che circonda il reattore inducendo una corrente elettrica. Helion spera di usare una miscela di deuterio ed elio-3, che non genera neutroni come sottoprodotto. Però l'elio-3 dovrebbe essere prodotto con la fusione D-D. L'azienda sta costruendo un reattore dimostrativo chiamato Polaris, che spera di avere pronto e in funzione entro il 2024.

Reattori più economici?

Dato che sono più piccoli rispetto a progetti della scala di ITER, i reattori costruiti da aziende private saranno molto più abbordabili economicamente. Il cofondatore di Tokamak Energy, David Kingham, prevede impianti da un miliardo di dollari, mentre Binderbauer ritiene che i sistemi di TAE si potranno costruire a un costo di circa 250 milioni di dollari.

L'obiettivo è realizzare reattori a fusione di piccole dimensioni e compatibili con le reti elettriche esistenti. Kelsall afferma che potrebbero rifornire anche settori particolarmente energivori, come quello siderurgico, che non si può alimentare con le fonti rinnovabili. Mowry aggiunge che un altro mercato importante potrebbe essere quello del trasporto merci: un impianto che produce circa 100 MW di energia è «proprio della dimensione giusta per una grande nave porta-container».

Donné rimane invece più cauto riguardo alle prospettive e afferma che le aziende private «seguono tabelle di marcia più ag-

gressive rispetto ai progetti che si basano su finanziamenti pubblici, ma hanno anche un rischio di fallimento molto più alto». Comunque TAE, per esempio, ribadisce di essere in linea con il programma che aveva annunciato attorno al 2015, cioè di avere un sistema di fusione nucleare pronto per la commercializzazione più o meno entro la fine di questo decennio.

Nonostante lo scetticismo, Donné aggiunge: «Vedo la rapida crescita del numero di aziende private nel settore della fusione come un buon segnale. Mantenere legami stretti tra i progetti di fusione pubblici e quelli privati può portare a benefici per entrambe le parti». Di certo è quello che sta succedendo. Il settore privato della fusione nucleare da un lato può partire dalla base raggiunta con anni di investimenti pubblici in progetti come ITER e dall'altro beneficia del fatto che i governi ritengono utile sostenerlo (è per questo che il governo britannico e il Department of Energy degli Stati Uniti investono anche in aziende come Tokamak Energy, CFS e GF). Mowry ritiene che la strada da seguire siano questi partenariati pubblico-privati, come è successo per i vaccini contro COVID-19. E, proprio come per i vaccini, la fusione nucleare sarà necessaria ovunque, soprattutto con l'aumento dei consumi energetici nei paesi a basso reddito.

I vaccini hanno dimostrato «quello che possiamo fare se abbiamo le risorse», afferma Windridge. «Se avessimo un investimento del genere nel settore dell'energia, credo che sarebbe incredibile quello che si potrebbe vedere». E come con i vaccini la società ha un bisogno disperato anche di fonti di energia più pulite e senza emissioni di carbonio. «È una sfida esistenziale», commenta Mowry. «La fusione è il vaccino per il cambiamento climatico».

L'originale di questo articolo è stato pubblicato su «Nature», Vol. 599, 18 novembre 2021. Riproduzione autorizzata, tutti i diritti riservati.