

Colli Albani: il vulcano attivo alle porte di Roma

Le Scienze

Gennaio 2017

€ 4,50

www.lescienze.it

edizione italiana di Scientific American

La via privata alla fusione nucleare

Nella corsa all'energia pulita alcune piccole aziende stanno sperimentando soluzioni semplici e poco costose

Innovazione

Dieci idee rivoluzionarie per cambiare il mondo

Medicina

Organi umani da corpi animali per risolvere la crisi dei trapianti



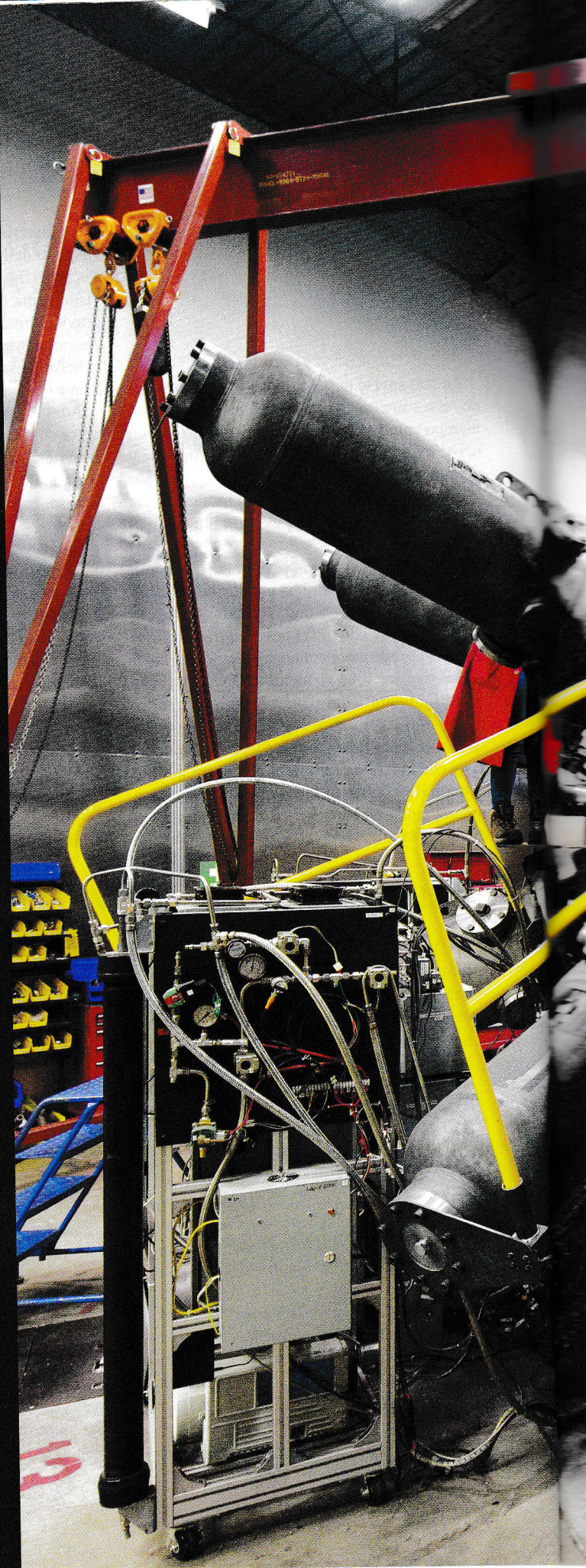
POSTALMARKET S.P.A. - D.L. 355/2003 (CONV. L. 17/02/04) ART. 1, CO. 2, LET. A) - PUBBLICAZIONE QUOTIDIANA - PUBBLICAZIONE QUOTIDIANA

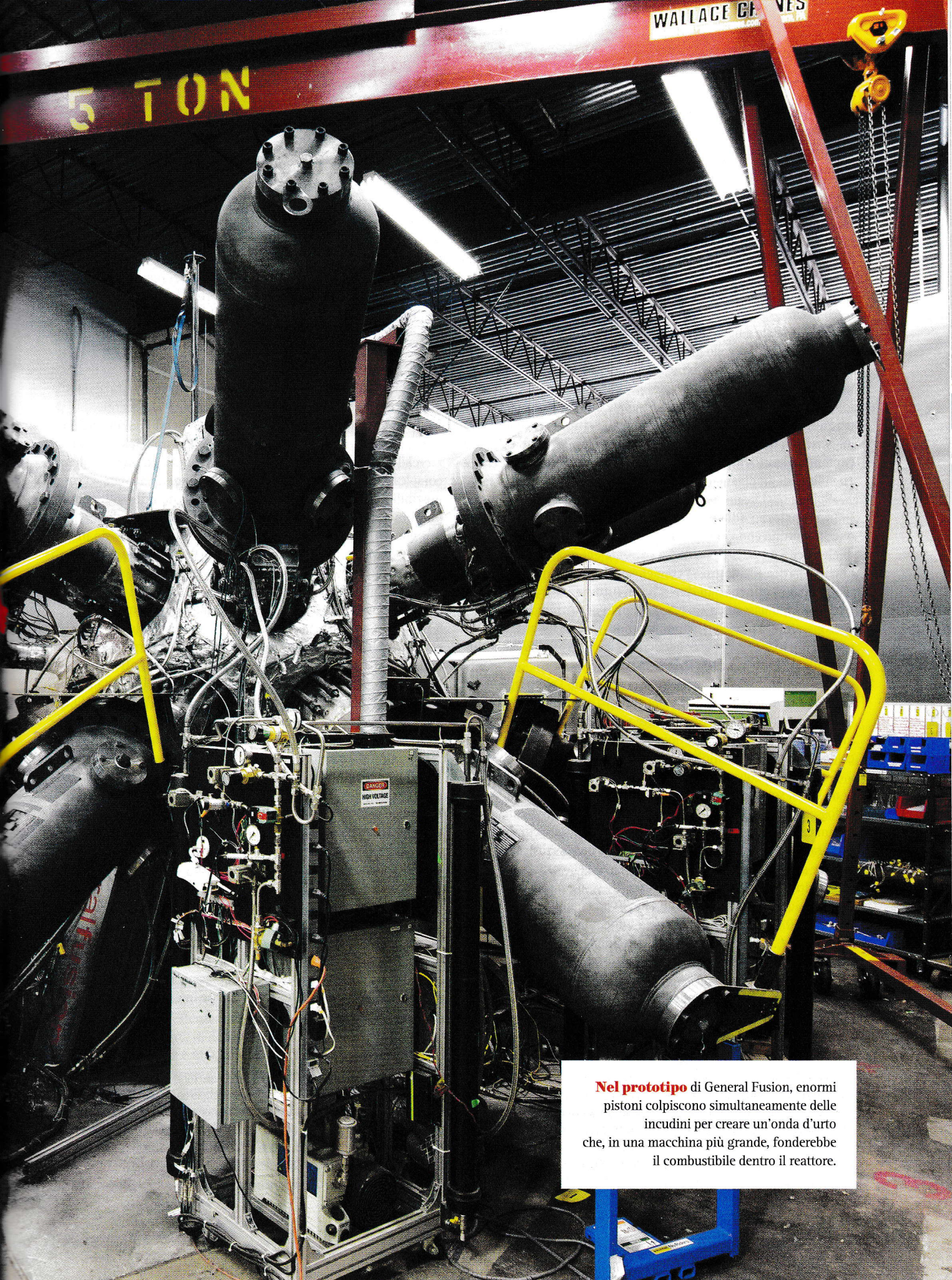
LE NUOVE FRONTIERE DELLA FUSIONE

ENERGIA

Alcuni fisici coraggiosi, in qualche caso finanziati da miliardi, stanno esplorando strade più rapide ed economiche verso la fonte perfetta di energia pulita

di W. Waagt Gibbs





Nel prototipo di General Fusion, enormi pistoni colpiscono simultaneamente delle incudini per creare un'onda d'urto che, in una macchina più grande, fonderebbe il combustibile dentro il reattore.

S

eduto nella sala di controllo del reattore sperimentale a fusione di Tri Alpha Energy, davanti allo schermo con le scritte «cannoni al plasma» e «controllo dello sparo», mi sento leggermente ansioso mentre ci prepariamo a fare fuoco. Questo reattore è un prototipo iniziale di una centrale elettrica che genererebbe energia con una versione controllata del processo che avviene nelle stelle e nelle bombe H.

Nel video in alto vedo gli addetti sul pavimento di questo anonimo magazzino vicino a Irvine, in California, che dal grande reattore si dirigono verso le porte. La camera a vuoto al centro del reattore, lucida, cilindrica e lunga circa come due scuolabus uno dietro l'altro, è circondata da due dozzine di elettromagneti ad anello, ciascuno più alto di me e largo come una mia gamba. Al mio comando, dentro quella camera la temperatura aumenterà fino a 10 milioni di gradi, anche se solo per un istante.

«Spinga quel tasto», mi dice l'operatore. Eseguo.

In un palazzo adiacente, quattro batterie a volano, caricate questa mattina con l'energia della rete locale, rilasciano un picco di elettricità da 20 megawatt. La corrente energizza i magneti ad anello e carica file di grossi condensatori, preparandoli all'enorme scarica imminente. In due minuti, tutti gli indicatori sul mio schermo sono passati da «In preparazione» ad «Armato».

L'operatore si avvicina a un microfono. «Pronti all'innescò», dice all'altoparlante. Le spie cominciano a lampeggiare. Porto il cursore sul tasto con la scritta «Innesco». Quindi spingo.

In un microsecondo i condensatori rilasciano l'elettricità accumulata. Alle estremità opposte del cilindro a vuoto si creano nuvole di ioni idrogeno e sono inviate a quasi un milione di chilometri all'ora verso il centro, dove collidono formando un plasma caldo e rotante che somiglia a un enorme sigaro vuoto.

Suona spettacolare, ma nella sala di controllo non ci sono lampi né boati: solo un debole «ping», come se nella camera del reattore fosse caduta una chiave sul pavimento di cemento. In un attimo l'ammasso di plasma si è dissolto e i computer hanno cominciato a elaborare il gigabyte di dati in arrivo da decine di sensori nel reattore. Le spie si spengono, gli addetti tornano al lavoro.

Un altro tentativo di fusione. Quando se ne fanno anche 100 al giorno, come per Tri Alpha, uno in più non è niente di speciale.

Dopo 50.000 piccoli «ping» in soli due anni, al momento della mia visita, nel febbraio 2016, la macchina di prova C-2U aveva dato a Tri Alpha i dati per andare avanti. Ad aprile il fisico Michl Binderbauer, *chief technology officer* dell'azienda, ha detto agli ingegneri di smontarlo e cannibalizzarne i pezzi per costruire un reattore più avanzato, C2-W, che dovrebbe essere finito a metà 2017.

W. Wayt Gibbs lavora a Seattle come scrittore scientifico freelance ed *editor*. È *contributing editor* per «Scientific American» e direttore editoriale di Intellectual Ventures, società di ricerca e investimenti che ha uno *spin-off* attivo nel campo della fissione (non della fusione) nucleare.



Il metodo Tri Alpha – costruire un prototipo rapidamente, testarlo a sufficienza e poi sostituirlo con uno migliore – rappresenta una differenza notevole rispetto alla norma nella ricerca sulla fusione. Da decenni gli scienziati progettano macchine gigantesche che puntano a fare luce sui comportamenti misteriosi dei plasmi roventi e pressurizzati che dovrebbero generare reazioni di fusione, ma spesso non lo fanno. Binderbauer, figlio di un imprenditore viennese, è l'esempio di un nuovo approccio alla fusione, spinto dagli investitori, con una mentalità ingegneristica che non perde di vista l'obiettivo di costruire una centrale elettrica di utilità pratica, non un monumento alla fisica delle alte energie.

Analogamente altre *start-up*, come General Fusion, vicino a Vancouver, scommettono sulla costruzione di una macchina commerciale senza dover sviscerare ogni dettaglio di questa scienza complessa. Queste centrali a fusione sarebbero alimentate da combustibili derivati dall'acqua degli oceani o da minerali comuni, quasi inesauribili e privi di carbonio. Le centrali quindi non produrrebbero quasi gas serra. Inoltre porrebbero un rischio di fatto nullo di radiazioni o di impiego a scopi bellici, e genererebbero elettricità sufficiente per le città: tutto il giorno, tutti i giorni. I nuovi pionieri non devono fare altro che risolvere alcuni dei più difficili problemi di fisica e ingegneria affrontati dall'umanità.

Al momento i pragmatici hanno l'attenzione delle persone perché gli accademici sono finiti in vicoli ciechi: enormi reattori che hanno chiarito qualche aspetto della fusione ma, almeno fino a metà del secolo, non saranno in grado di fornire elettricità alla rete. Un esempio perfetto è la National Ignition Facility (NIF) del Lawrence Livermore National Laboratory, una macchina da 4 miliardi di dollari che colpisce minuscoli contenitori di combustibili con impulsi laser da migliaia di miliardi di watt. «La NIF spara solo qualche centinaio di colpi l'anno», racconta Binderbauer. Una centrale elettrica dovrebbe spararne decine di migliaia al giorno. Il sistema si è dimostrato utile per la ricerca bellica (il suo scopo principale), ma la produzione energetica dovrebbe aumentare di quasi 30.000 volte solo per compensare il consumo necessario al funzionamento dei laser, e molte volte di più per avere un'utilità commerciale. Due anni fa Livermore ha abbandonato il progetto di un prototipo di centrale elettrica.

Il secondo esempio scoraggiante è ITER, una macchina alta come un palazzo di dieci piani, che un consorzio di paesi sta realizzando in Francia. Si baserà su giganteschi magneti superconduttori per gestire la combustione di un plasma a circa 150 milioni di gradi per alcuni minuti alla volta. Anche in caso di successo, ITER non produrrà elettricità.

IN BREVE

I grandi progetti per la fusione, come ITER in Francia e NIF negli Stati Uniti, hanno consumato miliardi di dollari e sono ancora molto lontani dal generare energia sufficiente a sostenere il proprio funzionamento,

per non parlare della produzione commerciale di energia.

Adesso si lavora a progetti più semplici, in alcuni casi da parte di società private. I risultati preliminari fanno sperare in strade più pratiche

e meno costose verso le centrali a fusione nucleare.

I nuovi arrivati devono superare però ostacoli scientifici proibitivi: per esempio evitare che nei plasmi surriscaldati la turbolenza ponga fine

subito alle reazioni di fusione. Anche il passaggio da brevi esperimenti a un funzionamento costante e affidabile necessario per le centrali elettriche pone difficoltà ingegneristiche straordinarie.



Michel Laberge, fondatore e chief scientist di General Fusion, presenta uno strumento diagnostico che può aiutare a testare proprietà fisiche non dimostrate. Commenta: «Ci sono molte possibilità di avere una brutta sorpresa... O una bella».

Energy (ARPA-E) del Department of Defense, che finanzia le imprese audaci come potrebbe fare chi investe in capitale di rischio.

I sostenitori stanno facendo scommesse rischiose, ma potenzialmente assai redditizie. In effetti, la ricerca sulla fusione è piena di casi in cui «la natura dice: "bella idea, ma non funziona così"», scherza Stephen A. Slutz, capo dei teorici nel progetto Sandia.

Schiacciare il fuoco

La sfida di stabilizzare un plasma impetuoso deriva proprio dalla natura intrinseca della fusione stessa. Due nuclei atomici privati degli elettroni possono fondersi solo quando si avvicinano abbastanza e per un tempo sufficiente affinché l'attrazione della forza nucleare forte tra loro sia superiore alla repulsione elettrostatica tra i protoni. Quando accade, gli ioni si uniscono e formano un unico nucleo di un elemento più pesante, che ha una massa minore rispetto agli ingredienti originari. La materia mancante si trasforma in abbondante energia, sotto forma di fotoni e particelle subatomiche ad alta velocità. I reattori a fissione estraggono energia da atomi, come l'uranio, che invece di unirsi si scindono.

Per raggiungere alti tassi di fusione, gli ioni in un plasma devono muoversi l'uno verso l'altro velocemente, ma non troppo. In genere questo significa una temperatura del plasma superiore a 100 milioni di gradi. Un reattore deve schiacciare il plasma surriscaldato in uno spazio relativamente piccolo dentro una camera a vuoto e mantenerci i nuclei finché avvengono le reazioni. Come regola approssimativa, il prodotto tra densità del plasma e tempo di confinamento dell'energia deve essere maggiore di circa 10^{14} secondi per centimetro cubo. La combinazione possibile tra densità, tempo e temperatura è molto varia.

ITER, un progetto di reattore *tokamak*, userà un sottile plasma di circa mezzo grammo di deuterio e trizio, due isotopi dell'idrogeno ricchi di neutroni, immerso in una camera a vuoto dalle dimensioni di una piccola casa. ITER punta a una bassa densità del plasma, con un confinamento dell'energia lungo alcuni secondi.

Nella NIF, invece, laser con potenza fino a 500.000 miliardi di watt sono puntati da 192 direzioni su un piccolissimo contenitore che racchiude un granello congelato di deuterio e trizio solidi. Gli strumenti ottici ed elettronici che generano e dirigono gli impulsi laser riempiono un palazzo alto 30 metri e grande come tre campi da calcio. Per raggiungere l'ignizione, stato in cui il combustibile in fusione libera energia a sufficienza per sostenere le reazioni di fusione in corso senza aiuti esterni, la NIF punta a una densità del plasma incredibilmente alta, di cui ha bisogno perché l'energia è confinata solo dall'inerzia e solo per una frazione di nanosecondo.

Per Patrick McGrath, direttore del programma dell'ARPA-E, una grande occasione potrebbe essere offerta dalla situazione, poco esplorata, tra questi due estremi: una densità del plasma moderata e tempi di confinamento dell'energia a loro volta moderati. Ma nessuna macchina è riuscita a dominare turbolenza e instabilità, due insidie che inevitabilmente si nascondono in questi plasmi. Tenere sotto controllo un plasma caldo mentre all'interno si scatena la fusione è come cercare di schiacciare la fiamma di una candela senza toccarla; anzi, è più difficile perché gli ioni in un

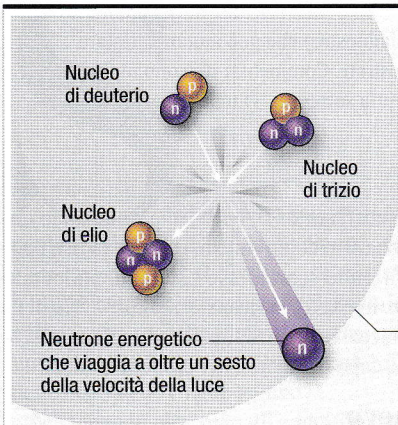
I politici che hanno lanciato ITER nel 2006 prevedevano un costo di 11 miliardi di dollari e la conclusione dei lavori entro il 2016. A maggio 2016 la spesa si era ormai gonfiata fino a 20 miliardi di dollari, con gli Stati Uniti in debito per circa 5 miliardi. Nella migliore delle ipotesi non sarà operativo prima del 2035. Frustrati, i senatori statunitensi hanno votato 90 a 8 per interrompere i finanziamenti. Ma dopo una successiva mozione, seppure prudente, da parte del Department of Energy, al momento della stesura di questo articolo il Congresso degli Stati Uniti era propenso a restare in gioco, almeno fino all'anno prossimo.

Messi in guardia dal progresso lentissimo dei giganti, Binderbauer e gli altri anticonformisti puntano su macchine più piccole, che affrontino il problema da nuove prospettive. Per ottenere risultati devono comprimere una minima quantità di combustibile con densità, temperatura e tempo di confinamento sufficienti a fare sì che gli atomi si fondano insieme, convertendo parte della propria massa minuscola in enormi quantità di energia. NIF e ITER si trovano alle estremità opposte in uno spettro di progetti possibili, che comprende una gamma molto ampia di densità del plasma e tempi di confinamento dell'energia (cioè il tempo per cui il calore resta nel plasma). Molti dei nuovi arrivati cercano punti più comodi nella zona intermedia, meno esplorata.

Un altro aspetto importante è che le start-up sono progettate per arrivare al successo o fallire in tempi relativamente brevi. I loro reattori sono «potenzialmente 100 volte meno costosi di ITER, più facili e rapidi da costruire e si prestano a progressi più veloci nella ricerca», spiega Scott Hsu, esperto di fusione al Los Alamos National Laboratory che collabora con la start-up HyperV Technologies. (In questo progetto, centinaia di cannoni sparano plasmi di idrogeno e argon al centro di un reattore sferico, dove implodono e comprimono il combustibile.) In questi progetti, eventuali difetti che bloccino tutto si manifesteranno con ogni probabilità prima che si rischi di perdere miliardi di dollari e decenni di tempo.

Per gli investitori è una buona notizia. I 100 milioni di dollari di cui dispone General Fusion provengono in parte dal fondatore di Amazon.com Jeff Bezos, dal governo canadese e dal fondo sovrano della Malaysia. Tri Alpha dichiara di avere raccolto centinaia di milioni di dollari da investitori tra cui Goldman Sachs e Paul Allen, cofondatore della Microsoft. Un altro gruppo che si muove rapidamente è quello dei Sandia National Laboratories, parzialmente sostenuti dall'Advanced Research Projects Agency-

I nuovi reattori a fusione



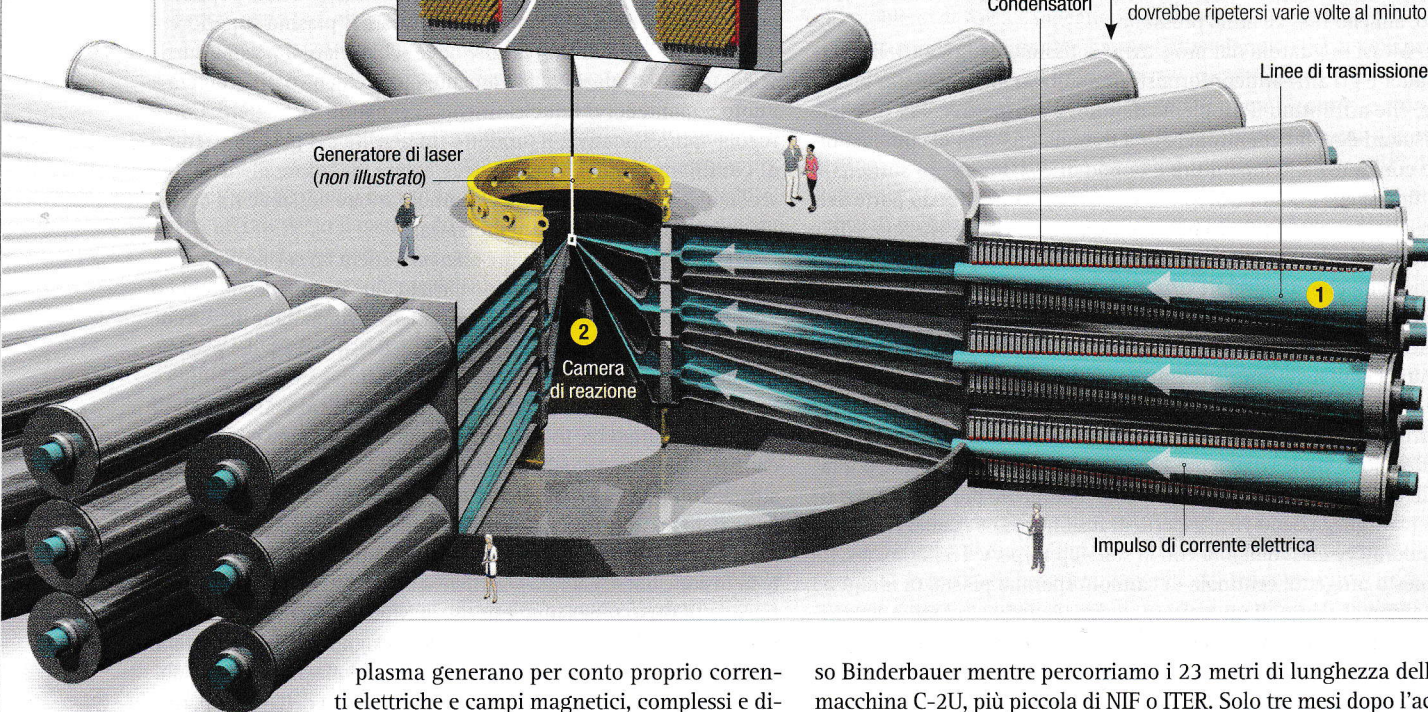
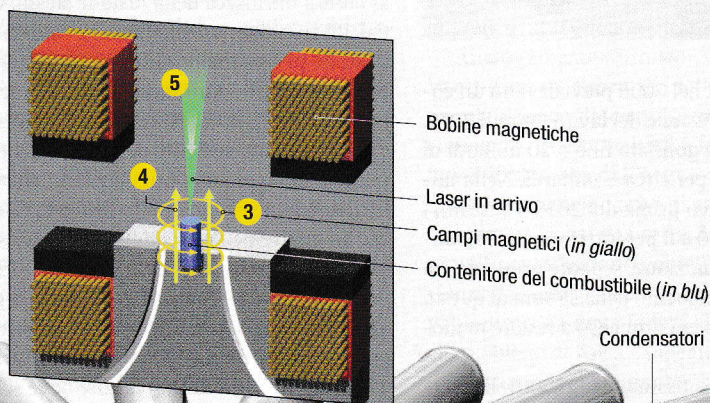
Vari gruppi stanno costruendo prototipi di macchine per fusione che convertirebbero minuscoli frammenti di materia in enormi quantità di energia (*inserto, a sinistra*). I Sandia National Laboratories (*in basso*) e la start-up General Fusion (*in basso a destra*) vogliono creare plasmi caldi che emettono neutroni ad alta energia, convertibili in elettricità. Il metodo di Tri Alpha Energy (*in alto a destra*) genererebbe principalmente raggi X che sarebbero convertiti. I progetti presentati sono per reattori su scala commerciale.

LA MATERIA DIVENTA ENERGIA

Quando due ioni (come deuterio e trizio) collidono a una certa, elevata velocità, si fondono in un nucleo di un elemento più pesante (per esempio elio) che ha una massa minore rispetto alla somma dei due ioni. La fusione trasforma la massa mancante in energia, portata via da fotoni e particelle ad alta velocità (per esempio i neutroni).

SANDIA: FUOCO AL COMBUSTIBILE

Novanta gruppi di condensatori e linee di trasmissione **1** emettono un impulso di corrente coordinato, a 65 milioni di ampere, verso la camera del reattore **2**, generando potenti campi magnetici intorno a un cilindro di metallo contenente combustibile freddo di deuterio e trizio. Un campo (*riquadro*) collasa intorno all'asse verticale del cilindro (*in blu*) e lo fa implodere in 100 nanosecondi **3**, un altro non fa uscire il combustibile **4**. Quando il combustibile collasa, un lampo laser da migliaia di miliardi di watt **5** lo preriscalda per circa 10 nanosecondi. L'implosione porta il combustibile alla temperatura di fusione, emettendo una scarica di neutroni energetici. Nel reattore di una centrale, il processo dovrebbe ripetersi varie volte al minuto.



plasma generano per conto proprio correnti elettriche e campi magnetici, complessi e dirimpenti. «Anche se riuscite ad accenderla - spiega Dylan Brennan, esperto di fusione del Princeton Plasma Physics Laboratory - la candela si spegne da sola».

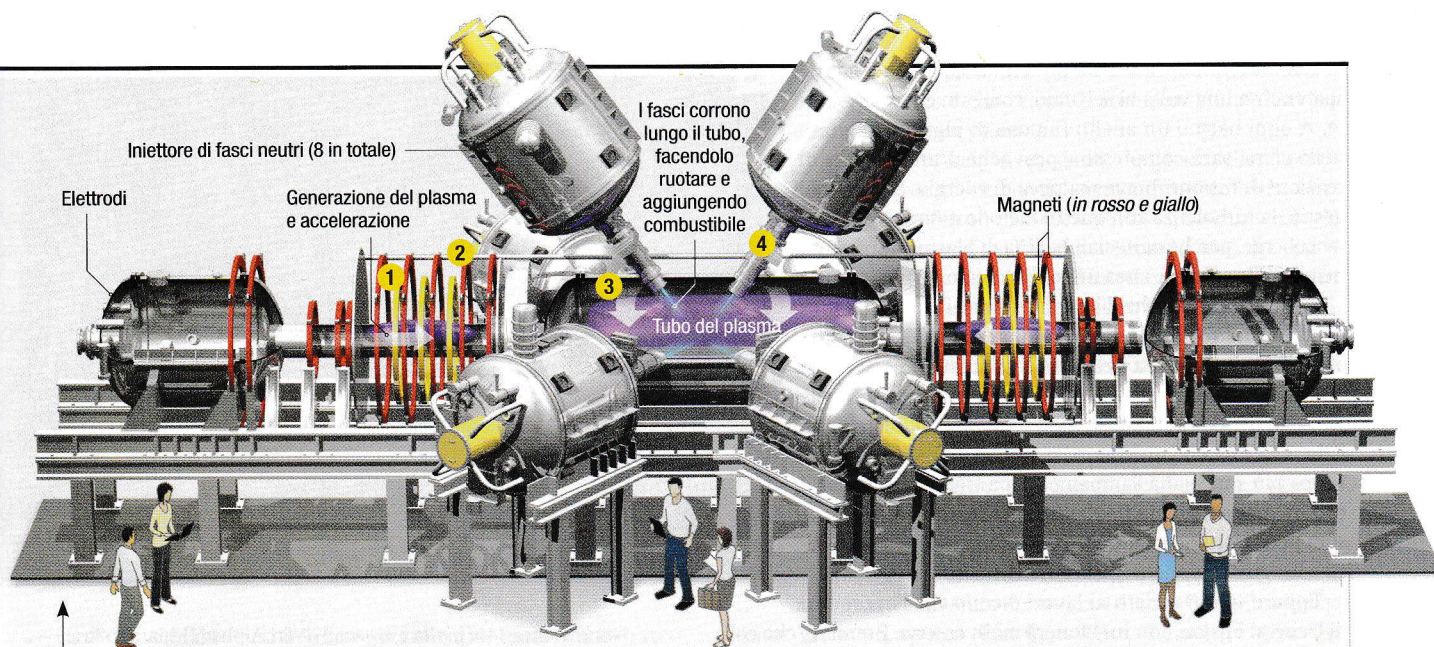
Ecco i nuovi arrivati

Tra le start-up, Tri Alpha ha dimostrato i maggiori progressi nel mantenere costantemente il controllo del plasma. «Tutto quello che vede è stato costruito in meno di un anno», dice orgogliosamente

di Binderbauer mentre percorriamo i 23 metri di lunghezza della macchina C-2U, più piccola di NIF o ITER. Solo tre mesi dopo l'accensione generava ogni giorno fino a 100 gocce rotanti di plasma di idrogeno, ciascuna con densità pari a circa la metà dell'obiettivo fissato dalla società, 10^{14} ioni per centimetro cubo. Le gocce sono rimaste stabili e calde per 5 millisecondi.

L'obiettivo della azienda, un plasma che ruoti al suo posto per giorni o settimane, è ancora molto lontano. Ma i test hanno sofferto limitazioni dalle forniture elettriche esterne. «Niente dice che non possa continuare fin quando vogliamo», dice Binderbauer, in

Illustrazioni di Don Foley (reattori) e Jehn Christiansen (diagramma delle particelle)

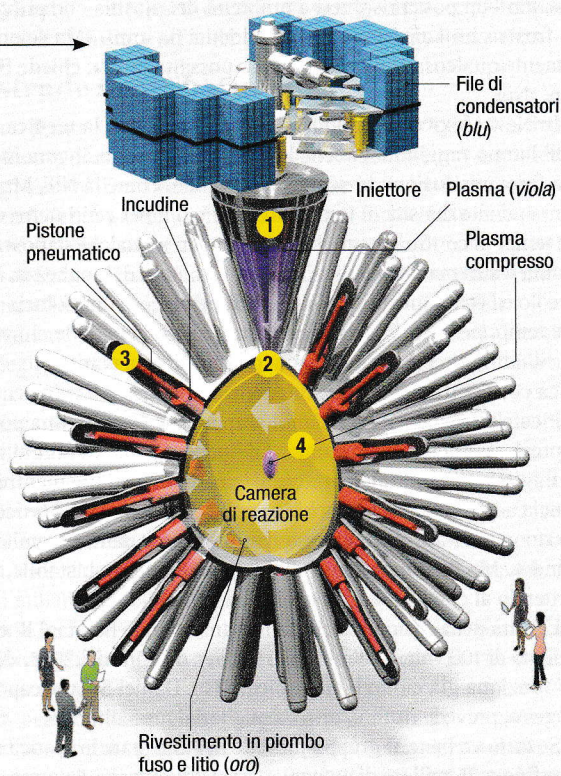


TRI ALPHA: IONI ROTANTI

Una scarica di elettricità breve e intensa energizza i magneti (in giallo) da entrambi i lati del nocciolo 1, trasformando uno sbuffo di combustibile gassoso in un plasma di ioni boro e protoni. Altri magneti (in rosso) mantengono il plasma in posizione, e un campo magnetico opposto lo investe per un microsecondo, generando una forte corrente elettrica dentro il plasma 2. Quella corrente circolare genera il proprio campo magnetico, a forma di ciambella, che funge da gabbia per tenere insieme il plasma. Quindi si invia un altro impulso di elettricità attraverso il primo gruppo di magneti, facendo accelerare gli anelli di plasma verso il centro, dove si scontrano a circa un milione di chilometri all'ora. La collisione forma un plasma a forma di tubo, più grande e caldo 3, che deve raggiungere i 3,5 miliardi di gradi per dare il via alle reazioni di fusione. Otto iniettori sparano fasci di atomi neutri nelle estremità del tubo per fare sì che continui a girare intorno al suo asse 4, aggiungendo nuovo combustibile e stabilizzando il plasma mentre brucia per ore o giorni alla volta, emettendo raggi X e nuclei di elio ad alta energia.

GENERAL FUSION: L'URTO DEL PLASMA

I condensatori alimentano un iniettore che spara un plasma di deuterio e trizio, con la forma di un anello di fumo, in un imbuto 1, comprimendolo fortemente prima che entri nella camera di reazione 2. Qui circa 200 grandi pistoni pneumatici percuotono simultaneamente delle incudine a 200 chilometri all'ora 3, generando potenti onde d'urto. Le onde attraversano velocemente un vortice di piombo fuso e litio, diffondendosi lungo la parete interna della camera 4. Quando le onde convergono al centro il vortice implode, comprimendo il plasma fino a circa 150 milioni di gradi e a una pressione superiore a 5 milioni di atmosfere, che sono sufficienti per dare il via alla fusione per una frazione di secondo. Il metallo liquido cattura i neutroni e il calore rilasciati dalla fusione. Tutto il processo si ripeterebbe una volta al secondo, generando esplosioni di neutroni energetici.



un reattore di grandi dimensioni che alimenti sé stesso oltre la rete elettrica. C-2W aggiornato includerà anche un feedback digitale per contrastare la tendenza della goccia a ondeggiare o vagare.

Hsu, che non ha legami con Tri Alpha, afferma che l'azienda ha fatto «progressi straordinari. Sostanzialmente ha risolto il problema della stabilità». Ma ottenere tempi di contenimento più lunghi - e a temperature molto più alte, mentre si pompa un flusso costante di combustibile - sarà essenziale, dato che per generare energia il reattore deve operare ininterrottamente.

Il reattore di General Fusion invece funziona a impulsi. La ca-

mera di reazione sferica in acciaio, costruita all'interno di un magazzino, misura un metro ed è piena di pistoni larghi una trentina di centimetri, ciascuno lungo quasi come Michel Laberge, fondatore e scienziato capo dell'azienda. Con il suo forte accento franco-canadese, Laberge descrive la macchina, il cui aspetto ricorda le atmosfere *steampunk*: «Il gas compresso accelera questi pistoni fino a 200 chilometri orari, e quindi colpiscono incudini... Bang!» grida, battendo le mani rumorosamente. «Tutti gli impatti devono avvenire entro cinque microsecondi per creare un'onda d'urto» che collassi esattamente al centro della camera.

Quando tutti i pezzi della macchina saranno integrati, spariranno una volta al secondo, come un cuore che batte. A ogni battito un anello fumoso di plasma, iniettato nella sfera, sarà compresso e provocherà una cascata di reazioni di fusione, breve ma ricca di energia. È più facile gestire la turbolenza con questo metodo a impulsi, sostiene Laberge, perché ogni ciambellina di plasma deve rimanere stabile solo per circa un millisecondo.

Laberge afferma che il sistema di iniezione ha già prodotto plasmi con la giusta densità di preimplosione, oltre a temperatura e forza del campo magnetico necessarie. I plasmi però sono durati solo 20 microsecondi, 50 volte meno del dovuto, prima di soccombere all'instabilità. Laberge crede che un nuovo design degli ugelli, con una forma più simile alla campana di una tromba, piegherà il campo magnetico creato dal plasma stesso fino alla misura perfetta per tenere insieme il combustibile abbastanza a lungo da permetterne la fusione.

Eppure «molti addetti ai lavori dicono che l'approccio di General Fusion non funzionerà mai», osserva Brennan, che collabora con l'azienda. I critici dubitano che un piccolo gruppo in una start-up possa risolvere i problemi del plasma che provocano frustrazioni ai ricercatori accademici da anni. «Ma scientificamente qualcosa ci dice che non lo possano fare?», chiede Brennan. «No».

In New Mexico, ai Sandia, gli esperimenti con la tecnica MagLIF hanno raggiunto ciò che le start-up non sono ancora riuscite a fare: una fusione su scala apprezzabile. Come la NIF, MagLIF punta ad alte densità di ioni – circa 10^{24} ioni per centimetro cubo – e tempi di confinamento dell'energia pari a qualche nanosecondo. Ma il sistema dei Sandia, con i suoi 34 metri di lunghezza, è più piccolo ed economico rispetto alla NIF, perché usa una soluzione in due tempi per riscaldare e pressurizzare il combustibile chiuso in un cilindro non più grande di una gomma di una matita.

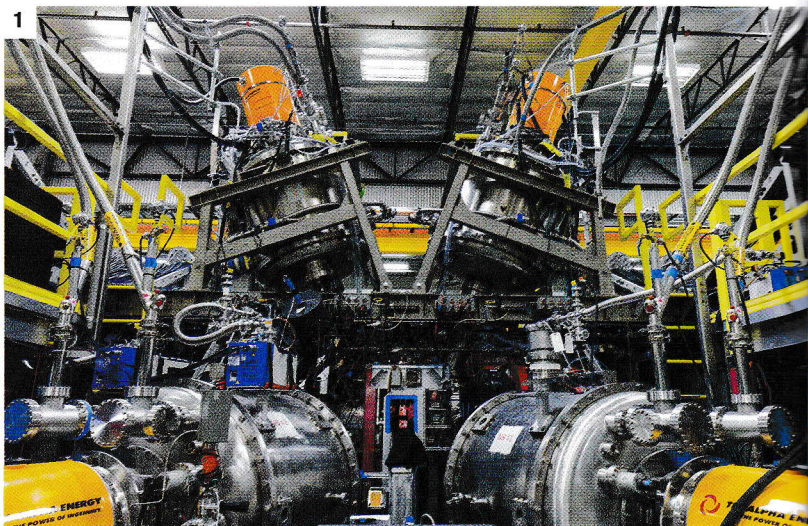
La cosiddetta Z machine che alimenta la MagLIF provoca una scarica elettrica da 19 milioni di ampere che esercita una potente presa magnetica e frantuma il cilindro. Un breve raggio laser da migliaia di miliardi di watt ionizza il combustibile mentre comincia a implodere. La macchina applica un campo magnetico separato per evitare che il plasma risultante esca dalle estremità del cilindro. Ma il cilindro che collassa può diventare instabile, permettendo al combustibile di uscire dai lati.

L'entità della fusione ottenuta in ogni sparo della MagLIF è aumentata di 100 volte dall'inizio dei test verso la fine del 2013. «MagLIF funziona già molto bene», spiega Hsu. Daniel Sinars, capo del progetto, prevede risultati ancora migliori da test ulteriori.

Se tutto va bene, il gruppo prevede di aumentare la scarica elettrica fino a 25 milioni di ampere. Così si dovrebbero generare circa 10^{16} reazioni di fusione, sufficienti a compensare l'energia assorbita dal combustibile per arrivare a fondersi, e questo uguaglierebbe – ma con una spesa assai minore – il risultato ottenuto dalla NIF nel 2014. «Sarebbe entusiasmante», commenta Sinars.

I Sandia hanno già programmato l'aggiornamento della Z machine. Con 60 milioni di ampere e l'aggiunta di trizio al combustibile di deuterio usato finora, la nuova Z800 potrebbe generare fino a 100.000 volte più energia per ogni sparo. Basterà per raggiungere l'ignizione e quindi la fusione autosufficiente almeno un decennio prima di ITER? Secondo i ricercatori dei Sandia, forse sì.

Dato che i laboratori Sandia sono pubblici, qualsiasi rinnovamento consistente dovrebbe essere approvato dal Congresso, che



Gli iniettori (in giallo e argento) di Tri Alpha (1) sparano fasci atomici che farebbero ruotare un plasma di fusione caldo per mantenerlo stabile nel nucleo di un reattore. La Z machine dei Sandia (2) genera brevi impulsi di corrente intensa, che creerebbero forti campi magnetici per comprimere il combustibile della fusione.

non è in vena di spese. Ma questa opinione potrebbe cambiare a causa della concorrenza. Secondo Slutz, scienziati cinesi hanno già costruito una versione più piccola della Z machine e stanno replicando gli esperimenti dei Sandia, mentre in Russia si prevede di realizzare una macchina simile da 50 milioni di ampere.

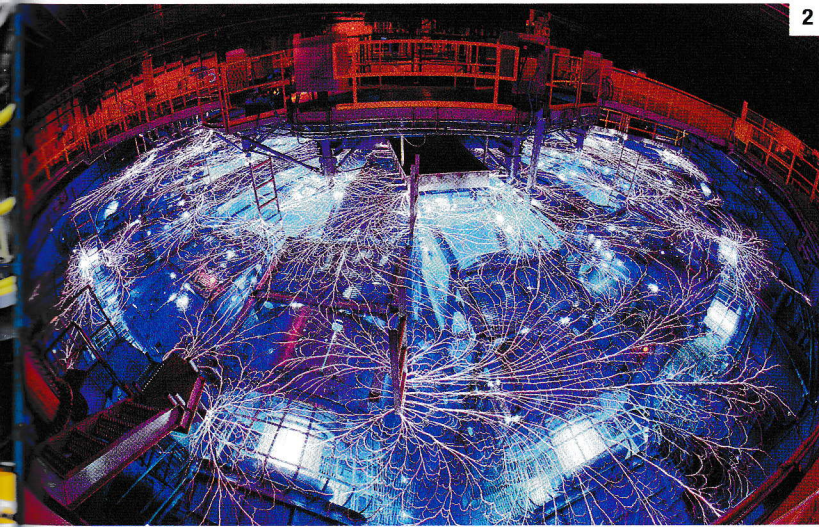
Riscaldamento acceso

Se qualcuno di questi progetti di fusione riesce a raggiungere densità di ioni e tempo di confinamento necessari, deve ancora fornire il terzo ingrediente che serve per l'ignizione: una temperatura del plasma incredibilmente alta. Ed è difficile, perché emissioni di luce, interazioni tra gli elettroni e innumerevoli altri meccanismi possono raffreddare il plasma abbastanza da stroncare nascente le reazioni di fusione.

Ai Sandia, per esempio, Sinars e Slutz continuano a chiedersi perché il laser abbia scaldato il combustibile assai meno di quanto previsto dai loro modelli. Forse la finestra sottile che copre l'estremità aperta del bersaglio con il combustibile diffonde la luce. Ma può darsi che per questo lavoro un laser sia lo strumento sbagliato. Per un sistema commerciale, ammette Sinars, «probabilmente si cercherebbe di scaldare il combustibile in qualche altro modo». Il gruppo cerca di migliorare il riscaldamento con il laser, ma se non ci riuscirà il fallimento almeno arriverà presto.

Tri Alpha deve raggiungere una temperatura molto più alta rispetto alla concorrenza perché usa come combustibile una miscela di protoni e boro-11, che brucia a 3,5 miliardi di gradi. Una temperatura oltre 20 volte più grande di quella necessaria per il combustibile di deuterio e trizio.

I plasmi più caldi tendono a essere più difficili da contenere, ma Binderbauer scommette che a Tri Alpha invece il confinamento dell'energia migliorerà con l'aumento della temperatura. Finora nei test è stato così, ma addirittura la nuova macchina C-2W riscalderebbe i plasmi ad assai meno dell'1 per cento della temperatura necessaria, che manterrà per soli 30 millisecondi. Binderbauer ammette che potrebbe perdere questa scommessa sulla fisica, ma di-



2

il nome dell'azienda – e raggi X, ma pochissimi neutroni. Il lato negativo è che i raggi X forniscono oltre l'80 per cento dell'energia prodotta.

In linea di principio, spiega Binderbauer, celle fotovoltaiche disposte all'interno del contenitore potrebbero convertire questi fotoni in elettricità. Ma questa tecnologia non esiste ancora. Così l'azienda esamina l'idea di ricoprire con un refrigerante le pareti interne della camera di fusione per estrarre il calore depositato dai raggi X.

General Fusion continua con il combustibile di deuterio e trizio, nonostante il problema dei neutroni e il fatto che il trizio sia leggermente radioattivo, assai raro e molto costoso. Laberge prevede di pompare un vortice turbinoso di piombo fuso e litio lungo le pareti interne della camera di reazione per catturare l'energia dei neutroni. I neutroni scinderanno inoltre alcuni atomi di litio in elio e trizio, che quindi si potranno riciclare come combustibile.

Sulla carta è una soluzione elegante, ma un sistema simile non è mai stato costruito. La quantità di trizio che sarebbe generata, spiega Hsu, è ipotetica. E Laberge teme che mentre le onde d'urto in arrivo dai pistoni passano nella miscela di piombo e litio, parte del metallo possa schizzare nel plasma, spegnendo la fusione: «Sarebbe come versare acqua sul fuoco».

ce: «Non abbiamo dati in questo regime. È tutto da dimostrare». Anche General Fusion deve affrontare fattori fisici sconosciuti, per esempio la velocità con cui il calore è disperso dal plasma. «Non si può calcolare in base ai principi fondamentali, quindi ci sono molte possibilità di avere una brutta sorpresa... o una bella», spiega Laberge. «Se le perdite di calore sono peggiori del previsto, possiamo ingrandire la macchina. Ma se cresce fino a diventare come ITER, allora c'è un problema».

Dal prototipo alla centrale elettrica

Si stapperà lo champagne quando qualche reattore riuscirà a raggiungere l'ignizione, e quindi una maratona di duro lavoro ingegneristico comincerà a trasformare un reattore sperimentale in una centrale elettrica che genera energia e profitti. Per avere un impatto rilevante sulla fornitura elettrica globale, di cui si prevede una crescita del 70 per cento entro il 2040, la fusione dovrà avere costi competitivi rispetto alle altre fonti di energia pulita.

I tokamak giganteschi come ITER probabilmente non si affermeranno mai, dice Dennis Whyte, che dirige il Plasma Science and Fusion Center al Massachusetts Institute of Technology, perché per funzionare consumano troppa della loro stessa energia. Le start-up hanno dedicato da subito più attenzione all'aspetto ingegneristico, ma dovranno ancora affrontare tante sfide pratiche.

Nel prossimo futuro, per esempio, ai Sandia ogni sparo con MagLIF distruggerà parte dell'apparecchiatura. La fusione con deuterio e trizio libera gran parte di energia sotto forma di neutroni ad alta velocità, che danneggiano i componenti in acciaio e via via li rendono radioattivi. Qualsiasi centrale a fusione che usi questo tipo di combustibile dovrà catturare i neutroni veloci e usarne il calore per far girare turbine con cui generare elettricità, al tempo stesso riducendo al minimo gli effetti collaterali. Ai Sandia gli scienziati non si sono ancora soffermati sulla prevenzione dei danni e hanno solo qualche idea, approssimativa e non verificata, su come aumentare gli spari ed eseguirne vari ogni minuto, invece che ogni settimana. HyperV e Magneto-Inertial Fusion Technologies, azienda di Tustin, in California, usano finanziamenti dell'ARPA-E per esplorare approcci simili che potrebbero risolvere alcune di queste difficoltà, ma devono fare ancora molta strada.

Tri Alpha punta alla fusione di protoni e boro proprio per evitare gli ostacoli posti dai neutroni veloci. La fusione con questo combustibile emette tre nuclei di elio, detti particelle alfa – da cui

Le strade meno battute

Dato il ritmo deludente di ITER e NIF, spiega Whyte, «è arrivato il momento di raccogliere tutte le conoscenze ottenute e guardare ad altri sistemi di ottimizzazione», compresi interventi sui tokamak per renderli più piccoli o piegarli in strane forme, i cosiddetti *stellarator*. «Mi piacerebbe vedere una gara tra un tokamak compatto, l'idea di General Fusion, uno stellarator compatto e una macchina come quella di Tri Alpha. Vediamo quale funziona meglio».

Attualmente negli Stati Uniti quella gara si basa sulla generosità degli investitori. I finanziamenti federali per le strade alternative verso la fusione diminuiscono di anno in anno, osserva Hsu. Insieme con Stewart Prager, capo del laboratorio di fisica dei plasmi alla Princeton University, ha chiesto al Congresso di aumentare i fondi alla ricerca per esplorare metodi di fusione innovativi, che potrebbero permettere ad altre start-up ambiziose di entrare in gioco. Se qualcuna delle concezioni innovative ha successo, continua Hsu, «l'energia da fusione si potrebbe forse sviluppare con pochi miliardi di dollari in meno di vent'anni».

Forse, o forse no. Come osserva Binderbauer, «ci sono buone possibilità che la fisica a noi ancora sconosciuta ci faccia qualche brutto scherzo».

Ma pensiamo al premio potenziale: una fonte di energia che non dipende dai capricci del vento o del Sole coperto dalle nuvole, non richiede grandi cambiamenti alla rete elettrica esistente, non pone il problema delle armi nucleari, non rischia il *meltdown* o l'irradiazione delle comunità circostanti e forse, una volta avviata, non sarebbe più costosa di altre forme di energia pulita.

Vale la pena di fare qualche altro tentativo? ■

PER APPROFONDIRE

Plasma Physics: The Fusion Upstarts. Mitchell Waldrop M., in «Nature», Vol. 511, pp. 398-400, 24 luglio 2014.

Scaling Magnetized Liner Inertial Fusion on Z and Future Pulsed-Power Accelerators. Slutz S.A. e altri, in «Physics of Plasmas», Vol. 23, n. 2, articolo n. 022702, febbraio 2016.

La falsa partenza della fusione. Moyer M., in «Le Scienze» n. 502, maggio 2010.