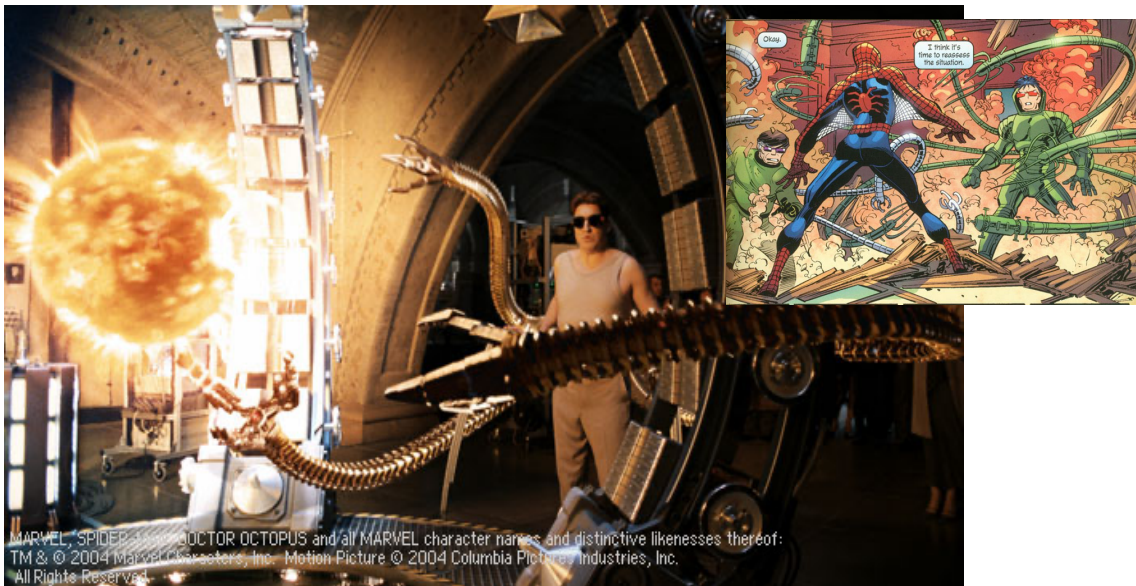


Energia Infinita dalla Fusione Nucleare: top, flop o ... pop?

Andrea Macchi (CNR/INO)



In *Spiderman 2* il Dr Octopus costruisce una macchina per la fusione nucleare creando un piccolo Sole in laboratorio. Ma il processo si rivela instabile e l'esperimento fallisce con perdita di senno del protagonista e sequenza di guai a cui cercherà di rimediare Spiderman (sotto la cui maschera Peter Parker è un timido studente di Fisica). Questo è un buon riassunto di decenni di ricerche ancora in corso per sfruttare il processo di *fusione nucleare* in cui due nuclei atomici leggeri si fondono per produrre nuclei più pesanti producendo energia.

La fusione è il processo inverso alla *fissione* cioè allo "spezzamento" di nuclei pesanti (Uranio, Plutonio) e sulla quale sono basati i reattori nucleari "tradizionali" esistenti. Con la fusione il Sole e tutte le stelle producono nuovi elementi (*nucleosintesi*) lungo la tavola periodica dal più leggero (Idrogeno) fino al Ferro, liberando l'energia che le rende calde e brillanti e che dal Sole raggiunge la Terra trasportata dalla luce. Quindi è la fusione a riscaldare la Terra ed a fornire alla biosfera l'energia necessaria per la vita, in particolare la nostra: la ritroviamo come energia chimica che dalle piante entra nella catena alimentare, o la sfruttiamo per la nostra civilizzazione: "in diretta" coi pannelli fototermici e fotovoltaici, "in differita" coi generatori eolici e idroelettrici, o accumulata da milioni di anni nei combustibili fossili.

Ma la nostra specie è ingorda di energia; poiché il Sole non può dare di più, ecco l'idea di realizzare la fusione sulla Terra per ottenere un'energia praticamente infinita grazie dell'altissimo rendimento energetico e all'abbondanza naturale dei combustibili. Sfruttando la fusione di nuclei di Deuterio (isotopo "pesante" dell'Idrogeno contenente un neutrone in più) che è ricavabile dall'acqua, da circa tre bicchieri otterremmo il necessario per il consumo domestico di un anno. Il tutto senza rischi di reazioni incontrollate, senza emissione di gas serra e con al più una produzione di scorie radioattive modesta e a vita breve, assolutamente più gestibile rispetto ai reattori a fissione. Quindi una soluzione *top* contro il riscaldamento globale e, magari, una fonte energetica "democratica" accessibile a ogni paese?

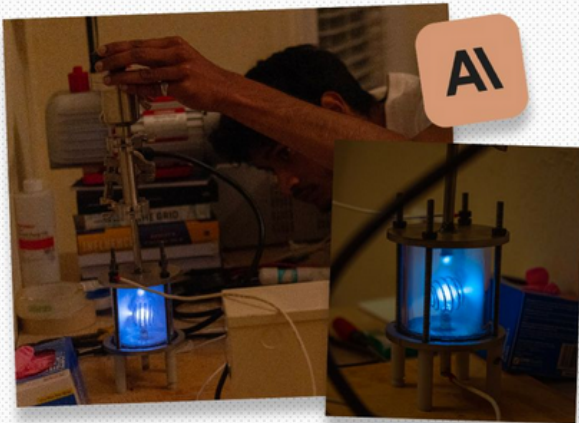


Inoltre, l'altissimo rendimento energetico renderebbe la fusione ideale per la propulsione visto il peso ridotto del "carburante". Nei tanti universi narrativi, questo avviene nei motori dell'Enterprise di *Star Trek* o della DeLorean di *Ritorno al Futuro* dove nel generatore "Mr Fusion" il deuterio (o altro) è estratto dai rifiuti, rimpiazzando il plutonio come combustibile: assolutamente ecologico! Ma, nel nostro universo, è difficile realizzare una macchina per la fusione?

 Datapizza

Costruisce un fusore nucleare con l'AI

È stato uno studente di matematica con l'aiuto di Claude 3.5 Sonnet, l'AI di Anthropic.



Potrebbe sembrare facile: vari amatori (anche adolescenti) hanno realizzato in garage "fusori" (secondo un design proposto nei '60) dove effettivamente avvengono reazioni di fusione. In pratica serve un campo elettrico abbastanza intenso che acceleri i nuclei e li faccia scontrare ad un'energia sufficiente per vincere la loro mutua repulsione, avendo essi carica elettrica dello stesso segno; tutto piuttosto semplice e ben documentato (anche se spesso queste imprese amatoriali vengono presentate come rivoluzionarie ... quando poi coinvolgono l'intelligenza artificiale!). Ma in questi dispositivi l'energia prodotta per fusione è trascurabile rispetto a quella spesa per il loro funzionamento.



C'è un modo sperimentato di liberare grandi quantità di energia da fusione: la *bomba H*, progettata e promossa da Edward Teller, scienziato che ha ispirato la figura del *Dottor Stranamore* (e a cui il nostro Prof. Antonino Zichichi diede un premio per il contributo alla pace nel mondo ...), qui raffigurato in un fumetto Marvel (all'epoca molto allineata ...). Questo modo "incontrollato" di sfruttare la fusione non implica che essa sia intrinsecamente pericolosa: la bomba H viene innescata da una bomba atomica tradizionale "a fissione" e il ruolo della fusione è solo quello di far bruciare più combustibile nucleare. Non è possibile che un reattore a fusione "esplosa" per reazioni a catena, semplicemente perché la fusione diminuisce il numero delle particelle reagenti, contrariamente alla fissione.

Per realizzare una fusione "controllata" e in grado di produrre un guadagno energetico netto la ricetta è: portare il combustibile a una *densità* sufficientemente alta e mantenerlo così per un *tempo* sufficientemente lungo, il tutto a una *temperatura* sufficientemente elevata. Per comprendere il criterio, pensiamo a una festa organizzata per dei single in cerca di partner. La formazione di coppie per "fusione" dei singoli sarà favorita da un alto numero di partecipanti ma più precisamente dalla loro densità (persone per metro quadro ... o cubo) perché troppo distanziamento non favorisce le (misteriose) forze di attrazione amorosa (incrocio di sguardi, annusamento, ...). Servirà inoltre non fare scappare le persone troppo presto: occorre un certo tempo perché tutte le coppie virtuali possano interagire realizzando così ogni possibile "fusione". Infine bisognerà "scaldare" l'ambiente per combattere la timidezza dei partecipanti!

La stessa ricetta per i nuclei diventa più difficile a causa della temperatura necessaria: qualche decina di *milioni* di gradi. Ad alte temperature la materia non rimane aggregata e si espande rapidamente, come fa un gas caldo, rendendo difficile il mantenimento di alte densità: per questo occorre *confinare* il combustibile, ovvero usare qualche metodo per contrastarne la rarefazione. Altro problema è che più un corpo è caldo e più tende a raffreddarsi emettendo maggiori quantità di radiazione, così che è difficile mantenere altissime temperature.

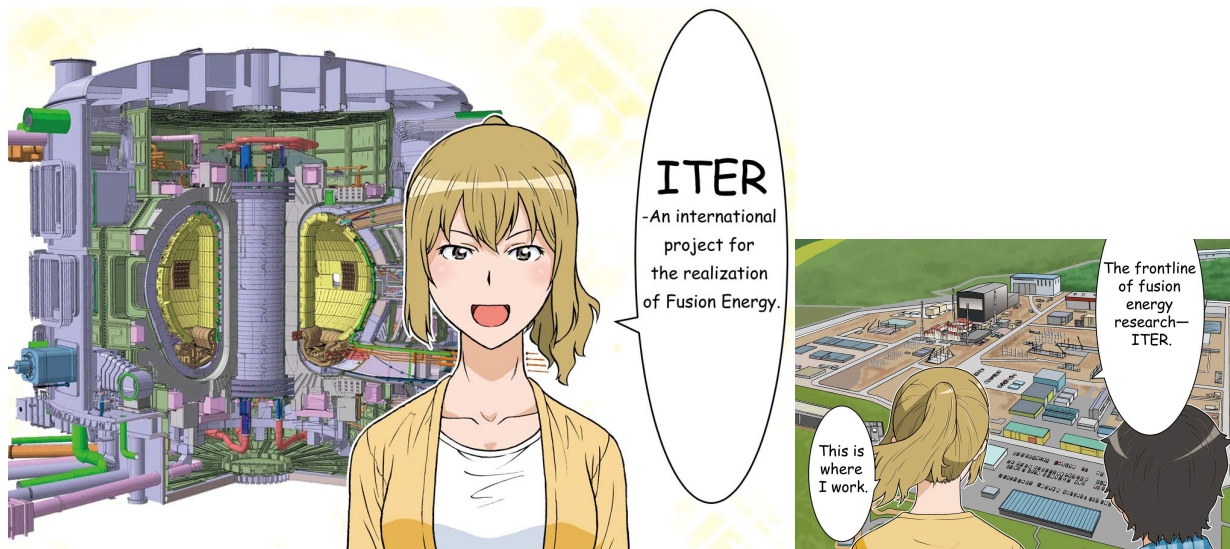
Per la fusione la temperatura è così alta che gli elettroni non rimangono legati ai nuclei: questo è lo stato di *plasma* nel quale si trova più del 99% della materia visibile dell'Universo, proprio perché è lo stato delle stelle! Il plasma è anche detto "il *quarto stato*" della materia per continuità con i tre stati "ordinari" (solido, liquido, gassoso) ma la definizione rischia di essere percepita come "lo stato più povero e sfigato" perché difficile da controllare; un plasma "confinato" tende ad essere instabile (come nella macchina del Dr Octopus) e questo rappresenta il maggior ostacolo scientifico verso la fusione: il plasma non collabora! Secondo Teller: "*c'è di mezzo il plasma? Non funzionerà*".

Perché allora le stelle riescono così bene a produrre energia? *Le dimensioni contano*. La grande massa di una stella fa sì che l'attrazione gravitazionale compensi la pressione dovuta all'alta

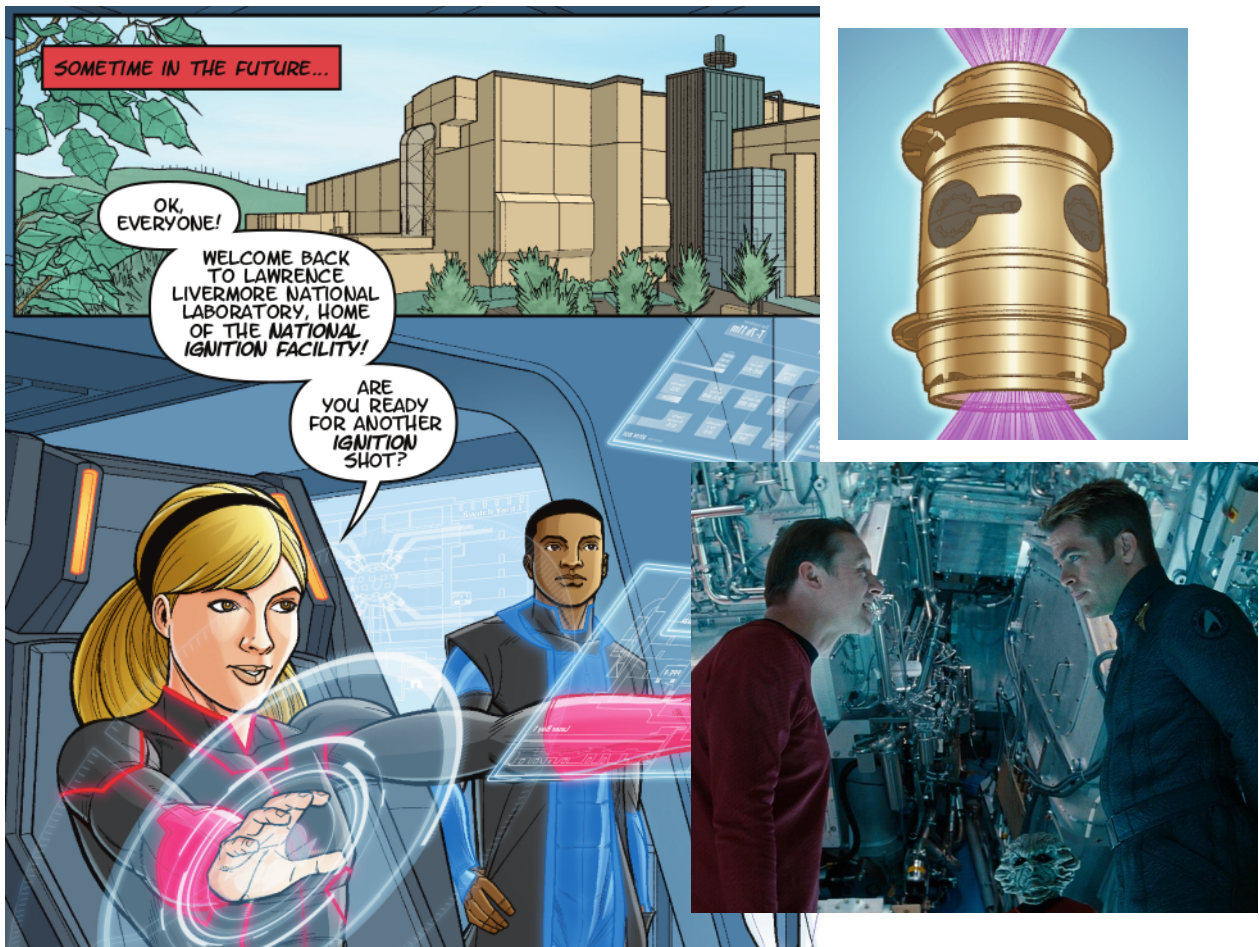
temperatura. Inoltre, una stella è abbastanza grande e densa che la radiazione fugge a fatica venendo massimamente riassorbita, a parte quella parte minima (ma tanto preziosa per noi, nel caso del Sole) che viene emessa dalla superficie. Nel nostro piccolo non è possibile ottenere condizioni simili!



La strategia sinora più seguita utilizza intensi campi magnetici (prodotti da grandi bobine di corrente elettrica) per confinare il plasma. Chi non ha familiarità coi campi magnetici li può pensare come linee astratte nello spazio lungo le quali particelle cariche sono costrette a muoversi. Chiudendo le linee a formare una "ciambella" possiamo confinare il plasma all'interno di un "pentolone", dei quali la versione più usata è *Tokamak* (dal russo, per "macchina a forma di toro" che è il termine matematico per "ciambella"). Quindi il "Fantastico Tokamak" mostrato su *Topolino* nel 1983 (e ricevuto da degli alieni) avrebbe dovuto chiamarsi diversamente (*Topomak?* Per non dire *Topamak* ...).



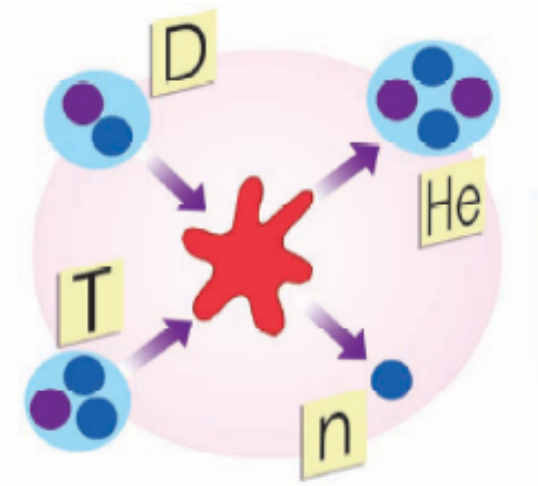
ITER (International Tokamak Experimental Reactor) è un enorme tokamak in costruzione in Francia, ritenuto allo stato attuale la macchina più vicina come dimensioni a una futura centrale energetica. ITER è nato con i migliori propositi come collaborazione su scala mondiale: una prima intesa fu firmata da Reagan e Gorbaciov nello storico vertice di Reykjavik del 1986 e ancora oggi la Russia è coinvolta nel progetto (!); attualmente i partner principali sono EU e Giappone (da qui lo stile "manga" del fumetto di presentazione). Purtroppo, vari errori principalmente organizzativi e gestionali hanno fatto sì che ITER accumulasse ritardi decennali e moltiplicasse i costi, generando scetticismo e timori di fallimento. Al momento ITER prevede di essere operativo nel 2035, con l'obiettivo di generare un'energia da fusione 10 volte maggiore dell'energia impiegata per "accendere" il plasma. Tokamak più piccoli hanno sinora generato un'energia da fusione non superiore al 65% dell'energia immessa.



Una strategia alternativa è quella di concentrare intensi fasci laser su una microcapsula di combustibile provocandone l'*implosione*; questo approccio impulsato è noto come *confinamento inerziale*. Questi esperimenti sono oggi possibili a NIF (National Ignition Facility) negli USA (da cui lo stile "Marvel" del fumetto), struttura basata sul laser più grande del mondo (occupa una superficie pari a tre campi da football). L'interno di NIF può essere visto nel film *Star Trek: Darkness* del 2013, dove viene spacciato per la sala macchine dell'Enterprise. Nello schema attuale, i 182 fasci di NIF vengono focalizzati all'interno di un millimetrico cilindro di oro (il costo del materiale è infimo rispetto a quello di manifattura!) detto *hohlraum* nel quale si produce un "bagno" di radiazione che fa implodere la capsula.

Nonostante NIF abbia avuto anch'essa una gestazione lunga e travagliata, il 5 Dicembre 2022 ha annunciato di aver ottenuto per la prima volta l'*ignizione* della capsula, ovvero una reazione di fusione *autosostenuta* dall'energia prodotta (come avviene in ogni processo di combustione, dove l'energia rilasciata innesca nuove reazioni), con un guadagno netto pari a 1,5 volte l'energia immessa. Se questo rappresenta certamente una pietra miliare per la fusione, in una prospettiva di uso "commerciale" è bene precisare alcuni numeri (per lo più rimasti in ombra nelle cronache). Il guadagno è riferito all'energia che i fasci laser hanno immesso nell'*hohlraum*, ma data la bassa efficienza dei laser nel convertire l'energia elettrica che li alimenta in energia luminosa, l'efficienza attuale rispetto alla rete (alla quale idealmente un reattore restituirebbe l'energia prodotta) è dello 0,5% (ovvero 1 parte su 200). Inoltre, il sistema laser può generare un solo impulso con tutta l'energia disponibile al giorno (per non danneggiare i propri componenti); una stima grossolana

indica che un reattore commerciale dovrebbe bruciare più di una capsula al secondo. Questo dà un'idea della notevole distanza ancora da percorrere per usi pratici dell'approccio inerziale, anche se indica utilmente che il fronte principale da far avanzare è la tecnologia laser. Occorre anche notare che la missione principale di NIF è di natura militare. Gli esperimenti devono fornire dati sullo status dell'arsenale nucleare degli USA, in particolare su quanto "invecchiano" le testate nucleari in vista del loro (non auspicabile) uso futuro senza dover ricorrere a esplosioni di prova con i problemi ambientali e geopolitici che questo comporta.



Tornando agli usi civili, come recuperare l'energia prodotta dalla fusione? I primi prototipi di reattori (sia magnetici che inerziali) saranno massimamente basati sulla reazione di fusione più "facile" da innescare (per ragioni legate alle forze nucleari) che è quella tra i due isotopi dell'idrogeno, il già citato Deuterio e il *Trizio* (che Dr Octopus cercava febbrilmente!) con produzione di un nucleo di Elio e di un neutrone. Ci sono due problemi: 1) il Trizio è radioattivo con vita media breve, e quindi non disponibile in natura; 2) l'energia della reazione viene fornita principalmente al neutrone, che essendo privo di carica è una particella meno "governabile" di protoni o elettroni. La soluzione prevista a entrambi i problemi è circondare il reattore con un mantello di *Litio*, interagendo col quale i neutroni 1) producono Trizio che si può recuperare, 2) cedono la propria energia al Litio generando calore che può essere estratto con un normale ciclo termico. Questa soluzione però non è ancora stata testata, anche per l'assenza di sorgenti di neutroni che producano un flusso comparabile a un futuro reattore! Inoltre implica quantità ingenti di Litio, risorsa abbondante ma non "inesauribile" come il Deuterio e assai costosa e ricercata ("oro bianco") per l'impiego nelle batterie, ruolo importante per la transizione ecologica! Avremo quindi una competizione "interna" fra fonti energetiche "pulite"?


Sam Altman e John Elkann, l'IA e il futuro: “Parleremo con le macchine e avremo energia in abbondanza”

di Pier Luigi Pisa

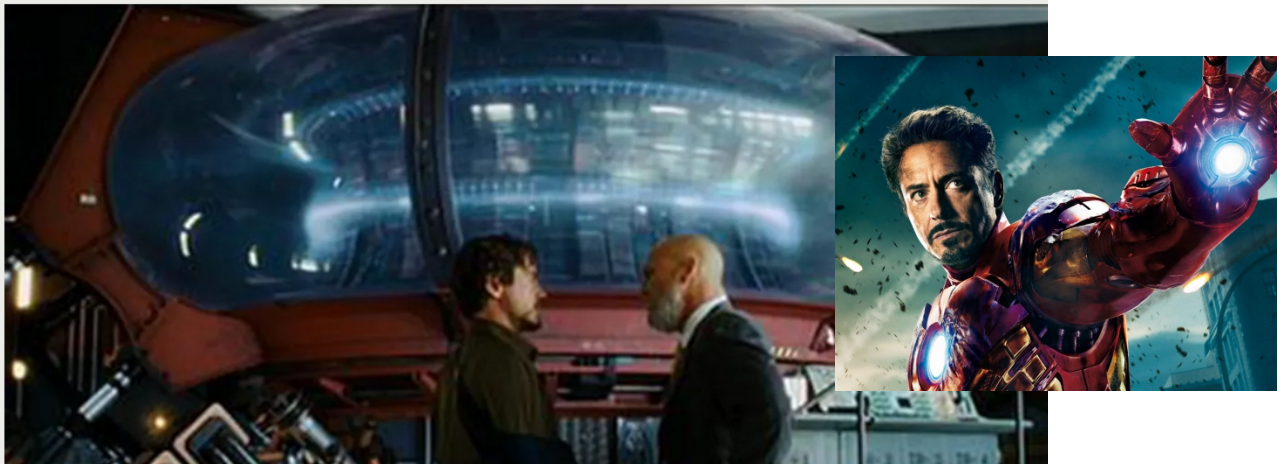


Nonostante i problemi irrisolti, l'ignizione a NIF e altri vari successi parziali nel "campo largo" della fusione hanno rilanciato l'interesse e la discussione sul "*come, dove, quando*" sarà realizzata, con notizie quotidiane (spesso non scientificamente accurate) sui canali d'informazione. Una novità di rilievo, almeno in Europa, è il sorgere rapido di molte imprese (*start-up* e *spin-off*) sostenute in parte o del tutto da investitori privati, operanti su approcci sia tradizionali che "alternativi" e nelle quali lavora personale uscito dall'accademia o dalla ricerca pubblica, talvolta in polemica con la "lentezza" di quest'ultima. Alcune imprese hanno partnership con colossi industriali e informatici, in particolare nel settore dell'intelligenza artificiale. Molti dei progressi recenti della ricerca in fusione sono stati effettivamente favoriti dall'uso dell'AI e dal Machine Learning (con l'effetto collaterale di provocare l'estinzione della specie ... dei fusionisti teorici). In questo ambito si sono espressi sulla fusione nomi famosi come Sam Altman di OpenAI, che immagina un circolo virtuoso in cui l'energivora AI aiuti a fare la fusione e questa fornisca l'energia necessaria al funzionamento dell'AI. (Non è dato sapere se Altman abbia convinto il proprio interlocutore John Elkann e cosa quest'ultimo pensi della fusione.)

MIT Has Plans for a Real ARC Fusion Reactor > Iron Man's alma mater has a design for a realistic ARC fusion reactor

BY EVAN ACKERMAN | PUBLISHED 11 AUG 2015 | UPDATED 02 APR 2024 | 3 MIN READ | 

Evan Ackerman is IEEE Spectrum's robotics editor.



Avremo quindi la fusione grazie a degli emuli di Tony Stark/*Iron Man* che ha due reattori simil-tokamak, uno in azienda (ARC) e l'altro ... nel cuore? La start-up Commonwealth Fusion Systems nata come spin-off del rinomato Massachusetts Institute of Technology (*alma mater* di Stark) pare crederci se ha chiamato il proprio progetto di Tokamak SPARC (per *Smallest/Soonest Possible ARC*, dove ARC sta per *Affordable, Robust, Compact*). E pare crederci anche qualcuno in Italia, visto che l'AD di ENI Claudio Descalzi a Ottobre 2022 ha dichiarato al TG2 che la collaborazione dell'azienda col progetto SPARC porterà energia da fusione alla rete nel 2030 (!).

Descalzi: "Con la fusione a confinamento magnetico avremo energia a bassissimo costo" (AGI, Giugno 2022)

L'ad dell'Eni a New York parla del progetto messo a punto dal Commonwealth Fusion System e che riguarda la realizzazione entro il 2030 di un reattore pilota per produrre energia pulita

☰ MENU | 🔍 CERCA

la Repubblica

ABBONATI

OGGI SMILE

IL VERTICE

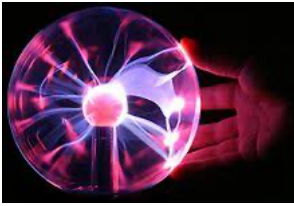


La stretta nucleare di Putin e Berlusconi "Accordo con Russia, prima centrale in 3 anni"

(La Repubblica, 20 Aprile 2010)

Molti esperti "accademici" considerano SPARC come uno dei progetti più promettenti in assoluto, ma la data del 2030 come largamente irrealistica. In effetti l'esperienza insegna a dubitare della tempistica degli annunci fatti a un livello più "politico" che "scientifico": il titolo di Repubblica del 2010 si riferisce a *IGNITOR*, un tokamak per certi versi progenitore di SPARC che fu finanziato e sventolato come "progetto bandiera" italiano - ma da costruire in Russia - dall'allora ministro per la

ricerca Maria *Stella* (un buon auspicio?) Gelmini. Peraltro anche tra i più diretti emuli di Stark ci sono posizioni scettiche sui tempi (se avete pensato ad Elon Musk, pare non sia interessato a un investimento in fusione perché il ritorno economico sarebbe troppo ritardato).



La sensazione che il confine tra realtà e immaginazione si sia un po' sfumato: la fusione è diventata certamente *pop*, ma si farà davvero o sarà un *flop*? C'è chi ha detto *“la fusione è l'energia del futuro, e così sempre sarà”*. Forse il quadro attuale fa sperare che il futuro prima o poi diventi il presente, ma esattamente *quando*? Non sapendo leggere in una sfera di cristallo (ovviamente una sfera al plasma) ci affidiamo a chi il futuro ... lo ha già raccontato: *Memory Alpha/Beta*, ovvero la cronaca dell'universo di *Star Trek*, afferma: *“Per molti anni, gli umani non furono in grado di creare una reazione di fusione nucleare controllata; di conseguenza usarono la fissione nucleare estesamente durante il 20mo e 21mo secolo, In seguito la fusione rimpiazzò i vecchi reattori a fissione e i reattori a fusione divennero parte della vita quotidiana [...] Nel 24mo secolo, i reattori a fusione erano diventati abbastanza piccoli che molte case avevano i propri.”* Questo scenario immaginato sposta la fusione molto in là ma la descrive come possibile e, soprattutto, prevede che l'umanità riesca a sopravvivere abbastanza a lungo per realizzarla: possibilità che nel nostro universo pare un po' più critica che in *Star Trek*. Gli scienziati “accademici” sono restii a fornire date, ma se mi puntaste un'arma (al plasma) alla testa vi direi: 2070 (ma non vi spiego perché). Nell'attesa, *lunga vita e prosperità*.