

Fissione, fusione, scorie nucleari e i limiti fisici

di Angelo Tartaglia

Abstract. Vengono descritti i processi nucleari corrispondenti sia alla fissione che alla fusione e si illustrano le caratteristiche dei reattori a fissione evidenziando i problemi connessi con la produzione delle scorie. Vengono altresì analizzate e criticate alcune delle rappresentazioni ingiustificatamente ottimiste diffuse dai propugnatori della soluzione nucleare al problema dell'energia e del collasso climatico imminente. Si conclude evidenziando la strutturale insostenibilità dell'economia corrente che non può essere curata con mitiche soluzioni tecnologiche capaci di violare le stesse leggi della fisica.

Sommario: Energia nucleare: che cos'è - I reattori nucleari - L'energia nucleare da fissione non è "pulita" - L'energia da fissione non è "praticamente illimitata" - Economicità del nucleare - I piccoli reattori modulari - La fusione nucleare - La radice del problema

Parole chiave: fissione del nucleo; reattore nucleare; fusione nucleare; prodotti di fissione; scorie nucleari; radioattività; sostenibilità.

Energia nucleare: che cos'è

L'energia associata ad un dato sistema fisico dipende dall'intensità delle forze attraverso cui interagiscono le diverse componenti del sistema. Ragionando in termini di interazioni fondamentali le forze in questione si riducono a quattro: la forza di gravità, la "forza debole", la forza elettromagnetica, la "forza forte". L'elenco che ho fatto è in ordine di intensità e va detto che le forze "debole" e "forte" sono rilevanti essenzialmente alla scala nucleare e sub-nucleare e la prima si può accorpare all'elettromagnetismo in quella che si chiama interazione elettrodebole. In concreto, se consideriamo un certo volume di materia, presente sotto forma di molecole, atomi e, al loro interno, nuclei atomici, il contenuto energetico associabile ai nuclei è enormemente maggiore di quello associato alle altre interazioni (10^{38} volte quello gravitazionale). Bisogna aggiungere, però, che il raggio d'azione di queste forze fondamentali è molto diverso: infini-

to (l'interazione diviene sempre più debole con la distanza ma si azzerava solo all'infinito) nel caso della gravità e dell'elettromagnetismo, dell'ordine della dimensione dei nuclei nel caso delle altre due. Per quanto può interessarci qui, è il caso di rilevare che il raggio di azione della forza "forte" è talmente piccolo da risultare, nel caso di un nucleo abbastanza grande (cioè composto da un buon numero di particelle), persino più breve delle dimensioni del nucleo stesso. Aggiungiamo che alcune delle particelle del nucleo (i protoni) sono elettricamente cariche e con cariche dello stesso segno, il che dà luogo ad una violenta repulsione. La repulsione è per lo più sopraffatta dall'attrazione ancora più intensa dovuta alla forza forte, ma il conflitto tra i due effetti, unito alle peculiarità della meccanica quantistica (semplificando al massimo, e ancor di più, la descrizione), tende a generare due tipi di instabilità. Uno può riguardare tutti i nuclei composti da tre particelle in su ed è quello che pos-

siamo chiamare radioattività: consiste in un riassetto del nucleo con emissione dell'energia in eccesso sotto forma di radiazione (raggi γ) e/o di particelle che, quando sono cariche, comportano anche un cambio di specie atomica. L'altro si manifesta in nuclei molto pesanti, composti da più di 230 particelle (92 protoni e 148 neutroni nel caso del più famoso uranio 235, U^{235}) ed è la propensione ad "esplosione" spaccandosi in due nuclei più leggeri più qualche neutrone. Quest'ultima è quella che si chiama fissione e i nuclei che possono subirla si dicono fissili. Nel caso della fissione l'energia iniziale del nucleo si converte parzialmente in energia cinetica delle "schegge", che sono poi, per loro conto, radioattive. Questa ipersintetica e schematicissima descrizione farà inorridire gli esperti, ma è quanto basta per le finalità di questo scritto.

I reattori nucleari

Continuando in questa brevissima esposizione, preliminare al tema vero è proprio, è il caso di parlare, sempre in maniera iperschematica, dei reattori nucleari. Un reattore è, per così dire, una macchina che, sfruttando la fissione del nucleo, converte l'energia liberata in una forma idonea per i nostri usi: in altre parole, in energia elettrica. All'interno del nocciolo del reattore ci sono delle barre contenenti l'uranio 235 insieme al più abbondante uranio 238 (il primo è qualche per cento del totale, tipicamente dell'ordine del 3÷5%, comunque meno del 20%).¹ Ripartendo dalle "schegge" menzionate più su (cioè i prodotti della fissione) consideriamo che queste schizzano via a grande velocità e urtano i nuclei del mezzo circostante. Ad ogni urto parte dell'energia cinetica del proiettile in arrivo viene trasferita al bersaglio occasionale: il primo rallenta e il secondo rincula più o meno violentemente e poi a sua volta urterà altri nuclei disperdendo tutto intorno l'energia iniziale. Vedendo la cosa a scala macroscopica possiamo dire che l'energia della fissione viene convertita, nel mezzo, in calore. Da qui in avanti la logica è la stessa che nelle centrali termiche: il calore viene prelevato da un qualche fluido refrigerante e, magari attraverso un cambio di stato (banalmente, con l'acqua, si passa al

vapore) si arriva ad azionare una turbina che convertirà ulteriormente l'energia in entrata in elettricità che verrà portata all'esterno verso gli utenti tramite una rete di distribuzione. In concreto le tipologie di reattori costruiti o anche solo sperimentati o qualche volta, per ora, solo progettati, sono estremamente varie ma alla fin fine il principio è più o meno quello descritto.

Diciamo che, come centrale termoelettrica, un reattore (non importa di che tipo), non è particolarmente efficiente. Del calore sviluppato nel nocciolo (lì dove avviene la fissione) circa il 30% viene convertito in energia elettrica; il restante 70% deve essere smaltito nell'ambiente circostante: nell'atmosfera attraverso le grandi torri di raffreddamento, e nei corpi idrici come fiumi e mare. L'efficienza di molte centrali termoelettriche tradizionali è migliore di così.

Parlando di efficienza è il caso di ricordare che essa entra in gioco anche riguardo al processo di fissione. L'evento iniziale, per verificarsi, ha bisogno di una sorta di stimolo appropriato. Bisogna dare un colpetto al nucleo di U^{235} dopo di che questo, come un petardo carico, "scoppia". Il colpetto glielo può dare un neutrone non troppo veloce. D'altra parte, come ho accennato, quando si verifica un evento di fissione, oltre alle due "schegge" maggiori si liberano anche due o tre neutroni veloci. Se ciascuno di questi trovasse sulla sua strada un nucleo di U^{235} si darebbe luogo ad un processo esplosivo: la bomba atomica, appunto. Nel nocciolo del reattore, però, i nuclei di U^{235} sono frammisti a quelli del ben più abbondante U^{238} (più del 90%) nonché da nuclei di altri elementi inseriti per rallentare o assorbire i neutroni. Il tutto è appositamente realizzato in modo che dei neutroni mediamente liberati da un evento di fissione la parte maggiore venga assorbita dai materiali circostanti e solo uno sopravviva, dopo essere stato alquanto rallentato da una serie di urti elastici, fino ad incontrare un altro nucleo di U^{235} e a indurre una nuova fissione. In questo modo si realizza la reazione a catena, cioè un processo che si sviluppa a ritmo sostanzialmente costante fin tanto che è assicurata la sopravvivenza di un neutrone per ogni fissione e naturalmente finché ci sono in giro dei nuclei fissili. Il punto è che, col procedere delle fissioni, si accumulano nella barra iniziale anche i prodotti della fissione i quali, oltre ad essere, come già detto, radioattivi sono anche

degli ottimi assorbitori di neutroni di modo che, a un certo punto, la catena delle fissioni viene meno perché, diciamo così, la barra viene “avvelenata” dai prodotti della fissione. A quel punto la barra è esausta e deve essere estratta e sostituita. Quando ciò avviene, però, essa contiene ancora una grande quantità di materiale fissile, dell’ordine del 90% di quanto ce n’era all’inizio. Insomma, anche da questo punto di vista si può dire che il rendimento di tutto il processo è piuttosto scadente.

L’energia nucleare da fissione non è “pulita”

Nella rappresentazione mitica e propagandistica che viene così spesso proposta e che viene prontamente assorbita dalla politica e dai maggiori portatori di interessi a breve termine, l’energia nucleare viene presentata come “pulita” in quanto, non essendo il processo base una combustione, non ci sono emissioni climalteranti. È un po’ come dire che l’amianto è pulito perché non produce effetto serra. In realtà, anche riguardo al contributo all’effetto serra la valutazione va fatta considerando l’intero ciclo di vita di una centrale: dall’estrazione delle materie prime e dell’uranio nelle miniere, alla dismissione finale dell’impianto a fine vita (quando l’intensa radioattività e le alte temperature all’interno hanno ormai resa insicura la struttura). A parte questo, comunque, il punto cruciale è la presenza delle scorie, cioè delle barre esauste che contengono un guazzabuglio di isotopi radioattivi diversi (i prodotti della fissione) e di materiale fissile residuo (U^{235}) o generato dall’assorbimento di neutroni da parte dell’ U^{238} il cui nucleo, dopo una breve sequenza di passaggi intermedi, si trasforma in plutonio 239 (Pu^{239}) che è a sua volta fissile.

Le scorie, nel loro insieme, sono altamente radioattive e non ci si può far nulla salvo aspettare. La radioattività decade nel tempo e per ogni diverso isotopo c’è un tipico e caratteristico *tempo di dimezzamento* che è il tempo in capo al quale in media il numero di nuclei che debbono ancora decadere si riduce alla metà: per il Pu^{239} è 24.000 anni; per il cesio 137, 30 anni; per lo iodio 131, 8 giorni; e così via. Prendendo la miscela nel suo insieme il tempo che bisogna aspettare per poterla considerare praticamente non più pericolosa (non più della radioattività ambientale) è dell’ordine dei 100.000 (centomila) anni. Insomma, le scorie

dei reattori dovrebbero essere messe da parte in depositi “definitivi” di cui si possa essere ragionevolmente certi che nelle prossime decine di migliaia di anni nessuno andrà a mettere il naso e non si infiltrerà l’acqua che poi scioglie e porta in giro le sostanze radioattive.

Se consideriamo che, guardando indietro, le prime città in Mesopotamia sono nate più o meno 6.000 anni fa; che l’umanità ha continuato a vivere in uno stato quasi permanente di guerra; che le guerre (come stiamo vedendo anche oggi) sono divenute sempre più devastanti; che ci sono in giro regimi di tutti i tipi, dittatori e governanti paranoidi; la pretesa di realizzare ora un deposito definitivo stagno ed inaccessibile per millenni è un tantino irresponsabile e azzardata. Sta di fatto che a oggi, dopo più di settant’anni dalla costruzione dei primi reattori, di depositi ufficialmente definitivi non ce n’è neppure uno in tutto il mondo.² Le scorie finora prodotte, anche in Italia, a parte quelle sparse nell’ambiente dai vari incidenti, sono immagazzinate *temporaneamente* presso le centrali che le hanno prodotte.

Nella narrazione propagandistica si trova a volte l’affermazione secondo cui, nei reattori del futuro, le scorie verranno “bruciate” (terminologia comunque impropria in quanto non c’è nessuna combustione) bombardandole coi neutroni prodotti dallo stesso reattore. In effetti se si bombarda un nucleo radioattivo con delle particelle nucleari (in questo caso neutroni) si può dare avvio ad una serie di trasmutazioni verso altri isotopi sempre radioattivi che potrebbero avere tempi di dimezzamento più brevi di quello iniziale: nell’immediato la radioattività aumenterebbe, ma poi durerebbe di meno. In questo modo, sfoderando il massimo dell’ottimismo senza riscontri specifici, si potrebbe pensare di far passare la scala dei tempi dai millenni ai secoli. Non mi pare che il problema dell’ipoteca lasciata alle generazioni future cambi di molto.

L’energia da fissione non è “praticamente illimitata”

Tra le connotazioni mitiche che i propugnatori del nucleare futuro gli attribuiscono, a volte vi è quella di essere una fonte di energia praticamente illimitata. In generale in un ambiente finito (il nostro pianeta) nulla può essere illimitato, ma, nel caso specifico, le stime relative alle riserve di uranio realmente ac-

cessibili mostrano che, se si pretendesse di generalizzare l'uso dell'energia nucleare per far fronte agli attuali consumi di energia dell'umanità, la durata delle riserve sarebbe dello stesso ordine di grandezza di quella del petrolio, cioè si misurerebbe in decenni (lasciando un'eredità negativa per millenni).³

Spesso il problema viene posto non in termini di variabili fisiche (quante tonnellate, in quali concentrazioni) ma di prezzo: quando il prezzo sale, depositi inizialmente non convenienti divengono sfruttabili e, nel caso dell'uranio, si può pensare ad esempio di estrarlo dalle acque degli oceani in cui è presente con una concentrazione dell'ordine di 3,3 microgrammi (milionesimi di grammo) per litro. Insomma, le riserve sfruttabili di uranio crescono, così come quelle di petrolio o di altri combustibili fossili, al crescere del prezzo del medesimo pur senza diventare mai "praticamente illimitate". Allo stesso tempo, quanto più una risorsa diviene scarsa e difficile da recuperare tanto più il suo prezzo sale. La menzione del prezzo permette di osservare che, comunque, si tratta di una variabile basata su convenzioni umane (la stessa cosa può avere un prezzo maggiore o minore in relazione alla domanda sul mercato) laddove la natura usa variabili che convenzionali non lo sono affatto (quali che siano le scelte, queste sì, convenzionali, delle unità di misura), insensibili a speculazioni e dinamiche di mercato.

Economicità del nucleare

Una componente rilevante fra i criteri che presiedono alle scelte nel settore energetico è certamente quella del prezzo finale del kWh messo sul mercato. Nella narrazione vigente fino a qualche tempo fa, ad esempio, era spesso citato il basso costo dell'energia elettrica di origine nucleare sul mercato francese, costo che consentiva non solo di soddisfare in maniera conveniente la domanda interna (anzi, di stimolarne la crescita), ma anche di vendere kWh a prezzi competitivi e remunerativi ad altri paesi, Italia inclusa. Per di più si trattava di prezzi molto stabili a fronte di una produzione altrettanto stabile.

L'uso del passato è doveroso, dal momento che la situazione si è progressivamente modificata e la Francia si è trovata ad importare energia elettrica dai paesi limitrofi nell'estate del 2022 perché alcuni dei suoi reattori dovettero essere spenti a causa della siccità che non

consentiva di assicurare l'indispensabile raffreddamento dei noccioli. Aggiungiamo che le centrali cominciano ad essere, quale più quale meno, piuttosto vicine alla loro data di dismissione. Un impianto nucleare in effetti è caratterizzato da una vita utile che non può essere indefinitamente prolungata; non basta infatti appoggiarsi ad una buona manutenzione: l'intensa radioattività nel nocciolo, unita con le alte temperature, determina un progressivo indebolimento della struttura che diviene sempre meno affidabile. La vita utile di progetto dei primi reattori era valutata in una trentina d'anni, passati poi, col migliorare delle tecnologie, ad una quarantina e, al giorno d'oggi, in qualche caso prolungata in corso d'opera (con però un aumento dei costi di gestione) fin verso una sessantina. Non si può però in alcun caso pensare di andare avanti a tempo indeterminato; già i 60 anni sono un po' stracchiati, dopodiché la centrale deve essere spenta, ma non basta: una volta spenta le sue strutture, tutte radioattive, dovrebbero essere smantellate e trasferite, insieme alle scorie prodotte durante il funzionamento, in qualche deposito con le caratteristiche già descritte (anche se in questo caso i tempi sarebbero verosimilmente misurati "solo" in secoli). È questo il cosiddetto *decommissioning*.

Orbene, le centrali francesi sono, in un buon numero, ormai prossime alla dismissione per motivi di sicurezza e alcune sono già spente. Il fatto è che lo smantellamento di una centrale a fine vita è tutt'altro che semplice ed è un'operazione estremamente costosa. Al riguardo, una viva preoccupazione è stata espressa dalla Corte dei Conti (*Cour des comptes*) francese che ha criticato l'approccio al modo con cui i costi sono stati stimati dalle società Edf (*Électricité de France*) e Orano (ex Areva).

In teoria i costi dell'inevitabile smantellamento dovrebbero essere previsti già al momento dell'avvio delle attività di una centrale per essere inclusi nel prezzo di vendita del kWh e dar luogo ad un accantonamento da utilizzare a tempo debito. In pratica le valutazioni preventive sono in generale iperottimiste, tanto più che non esiste una metodologia standard per il *decommissioning*: ogni centrale fa storia a sé. Aggiungo che gli accantonamenti di denaro su lunghi periodi passano attraverso i circuiti finanziari nei quali accade di tutto e di più, visto appunto che il denaro è una convenzione umana, non una grandezza fisica. La sostanza finale è che lo stato france-

se che possiede al 100% Edf, che a sua volta controlla Areva divenuta Orano e altre cose, vede a corto termine l'esigenza di farsi carico dell'ingentissimo costo dello smantellamento delle vecchie centrali; di qui la spinta compulsiva a promuovere ulteriore nucleare nel mondo (per fare affari) e per realizzarne di nuovo in Francia, contando di poter così quadrare (o quanto meno non disestare troppo) i bilanci. Di certo il prezzo praticato in passato non ha incluso i reali costi del *decommissioning* e men che meno del trattamento e della collocazione delle scorie.

Le considerazioni fatte per il caso francese valgono in generale e oggi, aggiungendo requisiti sempre più stringenti per quanto riguarda la sicurezza, il prezzo del kWh nucleare non è migliore di quello del kWh solare e nemmeno eolico, anche lasciando sullo sfondo scorie e *decommissioning*.

Evidenziando la parte relativa alle spese per la realizzazione di una nuova centrale, i dati relativi a due reattori recenti come quello di Olkiluoto 3 in Finlandia e quello di Flamanville 3 in Francia, i costi dichiarati a preventivo si sono più che triplicati. Olkiluoto 3 doveva costare 3,2 miliardi di € ma a consuntivo si sono superati gli 11 miliardi e il tempo di costruzione che doveva essere di 4 anni, cominciando nel 2005, è arrivato a 17 anni: il reattore è entrato in funzione nel marzo del 2022. Il terzo reattore della centrale di Flamanville, iniziato nel 2007, doveva entrare in funzione nel 2012 ma è ancora in corso di costruzione oggi (ufficialmente sarà attivato nel 2024); il costo stimato all'inizio era di 3,4 miliardi di €, rivalutati già nel 2010 a 5 miliardi di €, ma a fine 2019 la Corte dei Conti francese rilevava che la spesa era già arrivata a 19,1 miliardi, e la storia non è finita.

I piccoli reattori modulari

Fra le cose rilanciate da una ricorrente campagna mediatica promossa da operatori vivamente interessati e da quella parte della politica che rappresenta gli interessi a breve termine e il negazionismo climatico, si trovano anche i piccoli reattori modulari o SMR (Small Modular Reactors). L'immagine suggerita al grande pubblico è letteralmente quella di relativamente piccoli parallelepipedi, ciascuno dei quali è un reattore nucleare, trasportabili di qua e di là e componibili, alla bisogna, un po' come le tessere del Lego. Capita di leggere

di impianti di taglia variabile spostati presso temporanei assorbitori industriali di rilevanti quantità di energia e poi trasferiti e rimodellati presso altri grandi utenti. Oppure di piccoli reattori a bordo di navi ancorate al largo che poi forniscono energia ad utenze sulla terraferma spostandosi a seconda della domanda.

Nel merito una prima osservazione riguarda il significato di "piccoli" riferito a dei reattori nucleari. Le centrali in esercizio o in costruzione sono divenute sempre più grandi per ragioni di economie di scala e oggi hanno potenze superiori al GW (miliardo di watt); in precedenza la taglia tipica si misurava in centinaia di MW (milioni di watt). Col linguaggio di oggi un "piccolo" reattore ha una potenza dalle centinaia di MW in giù, il che non lo rende un oggettino agevolmente trasportabile di qua e di là. È il caso di ricordare che un reattore non consiste semplicemente nel suo nocciolo, dove sono contenute le barre immerse nel moderatore (il materiale che rallenta i neutroni liberati dalla fissione rendendoli idonei a perpetuarla). Intorno occorre una schermatura (per assorbire i neutroni di troppo) e poi c'è il sistema di refrigerazione, fondamentale per la sicurezza e poi destinato a far uscire il calore che alla fine verrà convertito in energia elettrica; e poi ci sono tutti i dispositivi di controllo e sicurezza.

Ciò detto i piccoli reattori trasportabili non sono una novità, nel senso che a questa categoria appartengono gli impianti a bordo dei sommergibili nucleari (alcuni per incidenti vari sono finiti sul fondo del mare) o in qualche caso di navi, per lo più militari. Altri erano stati realizzati per finalità di ricerca, come nel caso del reattore Avogadro di Saluggia, o del reattore Galileo Galilei del CAMEN (Centro Applicazioni Militari dell'Energia Nucleare) di San Piero a Grado in provincia di Pisa.

Ora, se è vero che riducendo la potenza il controllo dell'impianto per garantire la sicurezza diviene più semplice e più agevole, tutti i problemi relativi alla produzione di scorie restano tali e quali: come già detto, se c'è la fissione ci sono necessariamente i prodotti di fissione in quantità proporzionale al numero di fissioni che avvengono.

Provando poi a prendere sul serio l'idea di una rete di piccoli reattori, magari anche mobili, sparsi qua e là sul territorio nazionale, bisogna immaginare anche un corrispondente sistema di trasporto degli apparati o quanto

meno delle barre fresche (bassa radioattività) per alimentarli e poi delle barre esauste con relative scorie (ad altissima radioattività) da rimuovere per portarle in qualche deposito temporaneo e poi definitivo. Oggi gli spostamenti di materiale nucleare sono effettuati con procedure eccezionali e adeguate misure di sicurezza. Pensando ad un sistema di trasporto dedicato sparso sul territorio nazionale e considerando i correlati possibili incidenti (gli incidenti sono proporzionali al volume di traffico su strade e ferrovie e nei porti), le possibilità di attentati, gli errori e le patologie umane, c'è di che essere parecchio preoccupati. Senza contare che la sicurezza di una tale rete di trasporto si riverbererebbe sui costi dei kWh prodotti.

Comunque, intanto, arriva fresca fresca (autunno 2023) la notizia che Nuscale Power Corp., che avrebbe dovuto realizzare un primo SMR negli Stati Uniti, ha cancellato il progetto per il venir meno delle condizioni di economicità dell'impianto (QualEnergia.it, 2023).

La fusione nucleare

Tornando alle argomentazioni che accompagnano la riproposizione del nucleare da fissione ci si trova a volte anche davanti all'idea che quest'ultimo dovrebbe essere attivato non tanto perché potrebbe costituire, in un certo senso, la soluzione finale al problema dell'energia, ma come anello di transizione temporaneo verso qualcos'altro che non presenti i problemi che abbiamo visto. Questa idea della fissione come tappa intermedia si scontra comunque coi tempi dell'emergenza climatica e la necessità di agire in modo drastico a brevissimo termine. I reattori nucleari costruibili oggi richiedono tra i quindici e i vent'anni per entrare in funzione mentre la partita per gestire l'emergenza climatica va giocata nell'arco all'incirca di un decennio (la data termine convenzionale è il 2030).

Comunque sia, il punto d'approdo di questa fase nucleare intermedia, per chi la propugna, dovrebbe essere l'implementazione del nucleare sì, ma da fusione.

La fusione nucleare è per così dire il processo inverso della fissione. Si parte da due nuclei leggeri e li si costringe a scagliarsi l'uno contro l'altro con un impeto tale da vincere la repulsione elettrica tra di loro, fino a che i due arrivano praticamente a toccarsi, cioè si accostano quanto basta per consentire alla forza

nucleare forte di entrare in azione legandoli saldamente a costituire un nuovo nucleo stabile; quando ciò avviene, se i nuclei hanno un numero atomico inferiore a 28 (nichel) si libera anche un surplus di energia che è l'obiettivo perseguito.

In concreto si può procedere partendo da una miscela dei due ingredienti iniziali e trovando il modo di portarla a temperature tali per cui gli urti fra i nuclei avvengano con la violenza richiesta. Il fatto è che le temperature necessarie si misurano in *milioni* di gradi; nel caso più semplice, in cui gli ingredienti sono due isotopi dell'idrogeno (deuterio e trizio) la temperatura richiesta va dai 200.000.000 di gradi in su. Non a caso, finora, l'unica applicazione della fusione nucleare è stata nelle bombe termonucleari in cui la fusione stessa viene innescata dall'esplosione di una bomba atomica a fissione in grado di produrre le pressioni e temperature richieste.

Fin dagli anni '60 del '900 sono in corso studi ed esperimenti per arrivare a realizzare un vero e proprio reattore a fusione in cui il processo possa avvenire in maniera controllata e continua consentendo di estrarre in modo utile l'energia in eccesso liberata dal procedimento. Le difficoltà sono molto grandi e legate alle esorbitanti temperature da mantenere all'interno della macchina. Le strade fin qui seguite sono due: quella del confinamento magnetico e quella del confinamento inerziale. Nel primo caso ciò che impedisce al plasma, in cui deve avvenire la fusione, di toccare le pareti del contenitore è un intensissimo campo magnetico che forza i nuclei (che sono carichi elettricamente) a muoversi lungo percorsi chiusi. Nel secondo caso un insieme di laser di potenza, puntati in maniera concentrica verso una piccola regione in cui è posta la miscela destinata alla fusione, genera un'onda elettromagnetica di pressione tale da innescare la fusione. In entrambi i casi, occorre poi trovare il modo di estrarre dalla macchina in modo continuativo l'energia liberata dalla fusione e fare in modo che essa sia di più di quella richiesta per far funzionare il tutto.

Nel dicembre 2021, presso il Culham Centre for Fusion Energy in Gran Bretagna, si è riusciti ad estrarre una piccola quantità di energia per 5 secondi consecutivi dal Joint European Torus (JET), reattore a confinamento magnetico frutto di una collaborazione internazionale; il bilancio energetico complessivo

permane però fortemente negativo.

Nel dicembre 2022, per la prima volta, presso la National Ignition Facility del Lawrence Livermore National Laboratory negli Stati Uniti, dove esiste un apparato che sfrutta il confinamento inerziale, si è ottenuto un evento in cui l'energia liberata è risultata superiore a quella immessa dall'onda d'urto generata dai laser. Se però si include anche l'energia necessaria al funzionamento dei laser il bilancio energetico rimane anche in questo caso fortemente negativo.

La ricerca continua ed è bene che continui, ma è il caso di osservare che a fine anni '60 si diceva che ci sarebbe voluta una trentina di anni per avere i primi reattori a fusione funzionanti; ora, dopo i risultati ottenuti con JET e presso il Livermore Laboratory, si dice che tra una trentina d'anni dovrebbero essere in funzione i primi reattori commerciali...

La fusione nucleare per uso pacifico dunque non c'è, ma, a parte questo, è il caso di analizzare da vicino anche la sua leggenda. La vulgata la presenta come una fonte di energia praticamente illimitata e pulita. Stiamo parlando di un processo i cui ingredienti essenziali sono, come detto, due isotopi dell'idrogeno: il deuterio (un protone e un neutrone nel nucleo) e il trizio (un protone e due neutroni, H^3). Il deuterio, che è stabile, si trova nella molecola dell'acqua pesante presente negli oceani, nella proporzione di un atomo di deuterio ogni 6.400 atomi di idrogeno; molto meno abbondante dell'idrogeno, certo, ma comunque sempre tanto. Il trizio invece è radioattivo con un tempo di dimezzamento di poco più di 12 anni e un decadimento che lo trasforma in un isotopo stabile dell'elio (He^3). In pratica, in natura, del trizio si trovano solo tracce derivanti da processi innescati dalla radiazione cosmica nell'alta atmosfera oppure dalle esplosioni nucleari del passato o ancora dal funzionamento dei reattori nucleari presenti nel mondo; il tempo di dimezzamento non particolarmente lungo gli impedisce comunque di accumularsi. Tradotto in termini pratici: per usarlo nei reattori a fusione il trizio bisogna produrselo. Lo si può produrre bombardando un altro elemento, il litio, in particolare l'isotopo 6 (Li^6), con dei neutroni. Un neutrone aggiunto al Li^6 lo fa diventare Li^7 ma nello stesso tempo lo spacca in due: uno dei pezzi è il voluto H^3 ; l'altro è He^4 , non più radioattivo. In sintesi: da una parte ci vogliono i neutroni, prodotti da

un qualche altro impianto nucleare; dall'altra occorre, come materia prima, il Li^6 , che è presente in natura, ma certo è molto meno abbondante del deuterio. Insomma, il fattore limitante è il litio.

Quanto alla fusione come fonte energetica pulita, non c'è dubbio che il processo non liberi gas serra e non lasci nemmeno i residui radioattivi tipici della fissione. Dalla fusione di un nucleo di deuterio e uno di trizio si ottengono un nucleo di elio (He^4) e un neutrone. Il primo non è né radioattivo né tossico, il secondo, che schizza via a grande velocità, viene assorbito dai materiali circostanti rendendoli radioattivi: le strutture di un ipotetico reattore a fusione divengono radioattive e a tempo debito dovranno essere smaltite come scorie. Posso aggiungere che l'elio, che è un gas nobile già presente in atmosfera nella misura all'incirca di 5 parti per milione (ppm), è anche del tutto innocuo; c'è però da chiedersi se, aumentando la quantità dispersa, per lo più ad alta quota, le proprietà fisiche complessive dell'atmosfera stessa non ne risentirebbero in qualche modo, e ogni cambiamento nelle proprietà dell'atmosfera finisce per avere dei riflessi sul sistema climatico globale. Per ora non ci sono studi in merito, ma varrebbe la pena di farli.

La radice del problema

Direi che, come considerazioni finali, si può rilevare che non esistono soluzioni miracolose al problema della fame di energia. I limiti fisici del "nulla si crea, nulla si distrugge, tutto si trasforma" e del secondo principio della termodinamica che, tradotto in linguaggio corrente, dice che qualunque trasformazione di energia produce *necessariamente* degli effetti collaterali, non possono in alcun modo essere superati. Cionondimeno una parte dei cittadini, e soprattutto, della politica continua testardamente a rifiutare questi vincoli pur di non cambiare l'impostazione corrente dei rapporti del dare e dell'avere, del produrre e del consumare, cioè dell'economia globalizzata.

La radice del problema sta lì, nel mito, convertito in vera e propria religione idolatrica, della crescita perpetua e della valenza salvifica degli automatismi del mercato. Non c'è nulla

di scientifico nell'idea che sarà l'egoismo individuale a salvare il mondo, unito all'aspirazione del "sempre di più". È proprio la scienza a dirci che la crescita materiale a tempo indeterminato non è possibile. Oltre all'argomento elementare che ci dice che nulla può indefinitamente crescere in un ambiente finito, vi è una dinamica caratteristica di qualsiasi processo che preveda di generare materialmente qualcosa e in quantità crescenti.

Se voglio produrre qualcosa, sia che si tratti di un oggetto sia che si tratti di un qualche servizio, debbo farmi carico anche dei costi materiali del processo produttivo; in altri termini, dovrò immettere materie prime ed energia che, insieme, costituiscono appunto i costi materiali.

Ovviamente farò in modo che quei costi siano inferiori al valore del prodotto lordo e la differenza tra prodotto lordo e costi materiali sarà il mio vantaggio.

Fin qui tutto bene, ma proviamo ad aggiungere la crescita: vogliamo produrre sempre di più, col che naturalmente anche i costi materiali cresceranno. Ciò che ci dice la fisica è che quando una produzione aumenta, certo,

anche i costi materiali aumenteranno, ma, ahimè, questi ultimi crescono più in fretta del prodotto. Un esempio banale è quello dell'energia cinetica: se voglio raddoppiare la velocità devo immettere nel sistema un'energia che è quattro volte quella iniziale. Un altro esempio è quello fornito dall'elettrotecnica: se voglio raddoppiare la corrente elettrica in un circuito, la quantità di energia che debbo immettere, e che verrà dispersa sotto forma di calore, è quattro volte quella iniziale. Ancora: se consideriamo un sistema complesso in cui si vuol far crescere il numero dei nodi (il numero di stazioni produttive diversificate) il numero di relazioni lungo le quali viaggiano dei flussi materiali (di energia, di semilavorati, di prodotti, di informazione, eccetera) e quindi la quantità di risorse materiali da spendere per tenere il tutto in condizioni di sicurezza e sotto controllo cresce col quadrato del numero dei nodi. Al di là di questi esempi, in qualsiasi processo materiale il fabbisogno di risorse anch'esse materiali cresce più in fretta del prodotto (Tartaglia, 2020). Se all'inizio la produzione era conveniente, con l'andar del tempo l'utile crolla. L'evoluzione è quella presentata in figura 1.

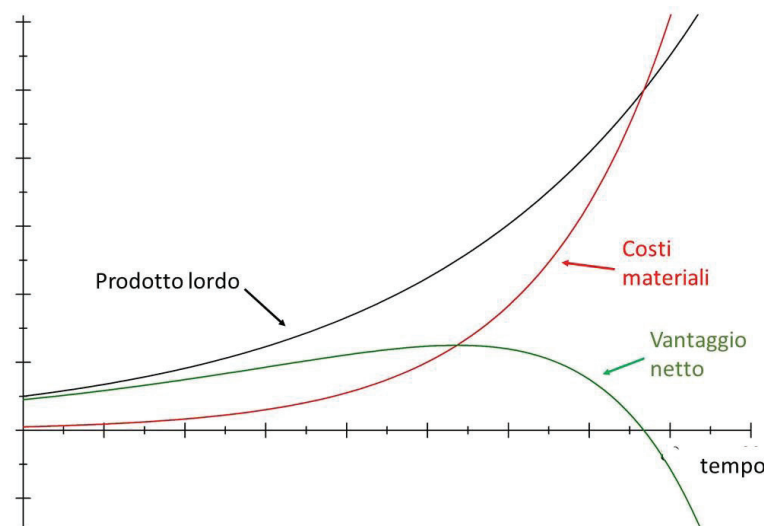


Fig. 1 Evoluzione del prodotto (in nero) e dei costi (in rosso) in un sistema materiale in crescita. La linea verde riproduce l'utile netto, differenza tra le altre due curve.

Aggiungiamo poi che, sempre per colpa della fisica, in un sistema materiale in crescita competitiva le disuguaglianze, al di là di occasionali episodi in controtendenza, necessaria-

mente crescono, e vediamo ancora una volta che il problema non sta nelle tecnologie utilizzate ma nelle regole del gioco nel campo delle relazioni sociali ed economiche.

1 - In natura l' U^{235} è lo 0,7% del minerale uranifero per cui per arrivare alle percentuali utili per i reattori (o per le bombe) occorre procedere artificialmente all'arricchimento.

2 - Per la verità uno è ufficialmente entrato in funzione nell'agosto del 2023 a Onkalo in Finlandia e un altro è ipotizzato, per essere attivato dal 2040 in poi, a Bure nella Francia nordorientale. Il deposito di Schacht Asse II, aperto in Germania a titolo sperimentale a partire dal 1965 è stato un fallimento con fughe di sostanze radioattive nell'area circostante, tanto da indurre le autorità a bloccarne l'uso a partire dal 1995 e prevedere una complicatissima operazione di recupero di quanto già immagazzinato al suo interno. Operazione che concretamente comincerà non prima del 2030 al costo di svariati miliardi di €

3 - Secondo un rapporto congiuntamente prodotto dalla Nuclear Energy Agency (NEA) e dalla International Atomic Energy Agency (IAEA), intitolato "Uranium 2022 Resources, Production and Demand" le riserve di uranio nel mondo, alle condizioni di sfruttamento del 2021, risultavano essere pari all'incirca a 8 milioni di tonnellate. La quantità annualmente consumata dagli attuali 423 reattori nucleari attivi nel mondo si aggira intorno alle 60.000 tonnellate, da cui si desumono le durate riportate nel testo. Considerando che le centrali nucleari, al momento, contribuiscono al consumo di energia primaria a scala mondiale per all'incirca un 4%, nel caso la loro importanza dovesse crescere la durata delle riserve, a parità di condizioni economiche si ridurrebbe ulteriormente.

Riferimenti bibliografici

Cour des comptes de France, 2020, *La filière EPR*.

<https://www.ccomptes.fr/fr/publications/la-filiere-epr>

Cour des comptes de France, 2020, *L'Arrêt et le Démantèlement des Installations Nucléaires*, https://www.ccomptes.fr/sites/default/files/2023-10/20200304-rapport-arret-demantelement-installations-nucleaires-2_0.pdf

Energy Institute, 2023, *2023 Statistical Review of World Energy*. <https://www.energyinst.org/statistical-review>

IAEA e NEA, 2023, *Uranium 2022 Resources, Production and Demand*. https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2023-04/7634_uranium_-_resources_production_and_demand_2022.pdf

QualEnergia.it (redazione), 2023, *Passo falso per il nucleare SMR: cancellato il primo progetto commerciale di NuScale*, QualEnergia.it, 9 novembre 2023. <https://www.qualenergia.it/articoli/passo-falso-nucleare-smr-cancellato-primo-progetto-commerciale-nuscale/>

Sassi Francesco, *La crisi del modello energetico francese*, Energia, 28 aprile 2023. <https://www.rivista-energia.it/2023/04/criisi-modello-energetico-francese/>

Tartaglia Angelo, 2020, *Growth and Inequalities in a Physicist's view*, Biophysical Economics and Sustainability, vol. 5, n. 3, pp 1-9.

Tartaglia Angelo, 2022, *Spaccare l'atomo in 4uattro*, Edizioni Gruppo Abele, Torino.