

MIRCO ELENA

IL NUCLEARE TRA PACE E GUERRA

ABSTRACT - ELENA M., 2013 - Nuclear Energy Between Peace and War.

Atti Acc. Rov. Agiati, a. 263, 2013, ser. IX, vol. III, B: 45-70.

The possibility to use nuclear energy for practical applications (bombs and reactors) represents the greatest techno-scientific achievement of humankind. While in the military field nuclear weapons have been built in extremely large numbers, in the civilian sector increasing costs and fear of Chernobyl-style disasters have led to a stop in the growth of nuclear plants. In this article we briefly discuss the link between military and civilian nuclear technologies and the still unsolved problems of nuclear proliferation and of safe long term storage of nuclear wastes.

KEY WORDS - Nuclear energy, Nuclear proliferation, Dual use technologies, Nuclear waste.

RIASSUNTO - ELENA M., 2013 - Il nucleare tra pace e guerra.

Aver trovato il modo di sfruttare l'energia nucleare rappresenta il maggior trionfo dell'intelletto umano. Le applicazioni di questa potente fonte di energia nel settore militare hanno portato a realizzare enormi arsenali bellici, mentre nel settore civile le promesse di una diffusione sempre maggiore delle centrali nucleari si sono scontrate con problemi economici e con la paura di nuovi disastri tipo Chernobyl. In questo articolo esaminiamo come l'energia nucleare presenti due gravi problemi tuttora non risolti: la proliferazione nucleare e la gestione delle scorie di lunga durata ed alta attività.

PAROLE CHIAVE - Energia nucleare, Proliferazione nucleare, Tecnologie a doppio uso, Scorie nucleari.

1) INTRODUZIONE

Il nostro paese per ben due volte ha rinunciato all'uso civile dell'energia nucleare con i referendum del 1987 e del 2011, in entrambi i casi a seguito di grandi disastri avvenuti in impianti per la produzione elettrica che sfruttavano le grandiose quantità di energia ottenute dalla

rottura («fissione») di alcuni dei più minuscoli oggetti esistenti in natura: i nuclei di speciali atomi. Ormai la prospettiva che in Italia si ritorni ad utilizzare quella potente fonte energetica è praticamente sfumata del tutto e ciò permette di fare alcune pacate riflessioni sul tema del nucleare, prendendo anche in esame taluni importanti dati di fatto poco noti al grande pubblico, in quanto sono sempre stati del tutto assenti nel corso degli infuocati dibattiti svoltisi in Italia pro e contro questa fonte. Tra questi, innanzitutto, il fatto che il nucleare civile e quello militare sono strettamente collegati, con conseguenze di grande portata.

L'energia nucleare non è solo la concretizzazione della famosa equazione einsteiniana $E=mc^2$, che ha avuto la più evidente e drammatica applicazione nell'esplosione della bomba atomica. Il suo sfruttamento costituisce la chiara dimostrazione di cosa può fare l'intelligenza umana, affrontando fenomeni complessi, difficili da controllare, che però si è riusciti ad impiegare per conseguire un preciso obiettivo. Questo è importante al giorno d'oggi, quando ci si trova di fronte a problemi che appaiono di difficile soluzione, come il cambiamento climatico. L'essere riusciti ad estrarre enormi quantità di energia da oggetti infinitesimi, superando difficoltà teoriche e pratiche di ogni tipo, ci dà grande fiducia che sia possibile vincere anche le sfide più complesse con cui le nostre società si trovano a confrontarsi. Però a questo scopo serve una unità di intenti e un progetto chiaro, di lungo periodo e ben elaborato.

2) UNA SCOPERTA IMPREVISTA

La storia dell'energia nucleare ha le sue radici nella scoperta, avvenuta per caso, nel 1896, della radioattività da parte del fisico francese Henry Becquerel. In un momento in cui la fisica sembrava ormai assestata e in cui nessuna grossa novità risultava prevedibile, questo ravvivò la ricerca, aprendo insospettate ed entusiasmanti prospettive. Nel giro di pochi decenni si arrivò a capire come erano fatti gli atomi, che risultavano costituiti da un piccolissimo nucleo con carica elettrica positiva, attorno a cui giravano elettroni di carica negativa in numero sufficiente a garantire la neutralità elettrica del tutto. Sorprendente era che la radioattività, con le sue fantastiche energie, venisse a prodursi nel minuscolo nucleo, talmente piccolo che ancora oggi non lo riusciamo a «vedere» direttamente nemmeno con i più potenti microscopi. Sorprendente era anche che non si potesse in alcun modo influire su tali fenomeni.

Una scoperta decisiva venne effettuata nel 1938, quando si capì che,

bombardando con neutroni ⁽¹⁾ il nucleo di certi tipi di atomi, come l'uranio, si poteva indurre lo spaccamento (in termine tecnico: la «fissione»), con la produzione di ancora maggiore energia. Si apriva in tal modo la possibilità di sfruttare a nostro piacimento le gigantesche energie presenti nei nuclei. Ben presto qualcuno ebbe un'idea che si dimostrò fatale: che si sarebbe potuto sfruttare l'atomo per nuove, dirompenti applicazioni nel settore militare, grazie alla cosiddetta reazione a catena ⁽²⁾. Faceva capolino la possibilità di una superbomba dalla potenza sino ad allora inimmaginabile, davvero fantascientifica per quei tempi. Con questa prospettiva, essendo ormai alla vigilia della seconda guerra mondiale, fu inevitabile che gli studi sul nucleare, fino a quel momento compiuti in competitiva collaborazione tra gruppi delle diverse nazioni, venissero secretati; non si poteva certo permettere che stati nemici potessero avvantaggiarsi, imparando a gestire reazioni che generavano cento milioni di volte più energia rispetto alla classica reazione chimica impiegata nell'esplosivo tradizionale, dinamite o tritolo che fosse.

In questa corsa alla bomba, come è noto, il successo arrivò agli Stati Uniti. Il loro programma nucleare militare, battezzato Progetto Manhattan, iniziò nel 1942 e godette di risorse mai viste in precedenza in nessun settore tecnico-scientifico. Sotto la direzione del fisico Robert Oppenheimer, migliaia dei più brillanti esperti mondiali ⁽³⁾ si impegnarono nella più audace e difficile applicazione concreta degli studi scienti-

⁽¹⁾ Il neutrone è una particella elementare che agisce come «collante» per i protoni responsabili della carica positiva dei nuclei, che altrimenti, per repulsione elettrostatica, non potrebbero restarsene assieme. Non avendo carica elettrica (da cui il suo nome) può venir utilizzato come efficace sonda per giungere fin nel cuore dell'atomo, dove può venirvi catturato oppure viceversa causarne la spaccatura. Questo ha permesso di produrre tanto le bombe quanto i reattori nucleari.

⁽²⁾ Nella reazione a catena si parte con un (raro) nucleo adatto, contro cui si spara un neutrone di energia appropriata per riuscire a spaccarlo (fenomeno della fissione) con la liberazione di grandi quantità di energia. A seguito di questa rottura vengono anche liberati due o tre neutroni i quali, se si sono fatte le cose per bene (purezza dei materiali, densità adatta, ...), possono indurre la fissione di altri nuclei circostanti. Si liberano così altri neutroni che possono continuare il processo, come in una valanga, fin quando tutti, o almeno una buona parte dei nuclei presenti, hanno reagito. Se la «reazione a catena» si sviluppa in modo incontrollato, selvaggio, si ha la bomba; se invece la si riesce a controllare, si può realizzare una centrale nucleare.

⁽³⁾ Tra cui molti emigrati dall'Europa per motivi politici e razziali, tra cui il nostro Enrico Fermi, cui si deve la realizzazione della prima reazione a catena controllata, alla base della possibilità di costruire centrali elettronucleari. È una educativa ironia della storia che le potenze nazifasciste, con le loro politiche razziste, abbiano costretto all'emigrazione, verso i paesi democratici loro nemici, proprio di quegli ingegni che avrebbero potuto consentire loro di realizzare per prime la bomba nucleare, che avrebbe garantito la vittoria nel secondo conflitto mondiale.

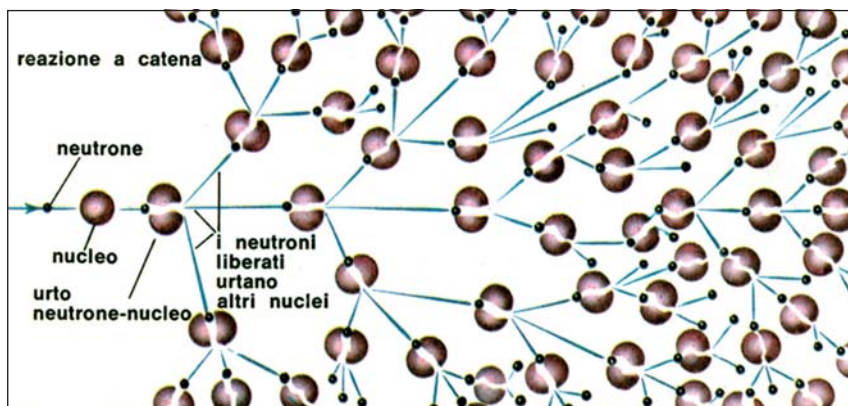


Fig. 1 - Schema della fissione nucleare.

fici. Il risultato del loro lavoro si ebbe già nell'estate del 1945 ⁽⁴⁾, quando le esplosioni atomiche, prima nel deserto di Alamogordo nel New Mexico e, poco dopo, sulle città giapponesi di Hiroshima e Nagasaki, cambiarono per sempre il modo di immaginare la guerra, che divenne improvvisamente capace di uccidere in un istante milioni di persone. La potenza del nuovo ordigno lo rendeva però inadatto a discriminare tra personale militare e popolazione, rendendo così il conflitto ancor più sanguinario e con effetti sempre più gravi per i civili, che invece per le leggi internazionali dovrebbero essere protetti.

Dopo che Enrico Fermi aveva trovato il modo di «addomesticare» la reazione a catena, facendola procedere in modo controllato, si realizzarono le prime centrali nucleari, il cui scopo iniziale fu esclusivamente militare: creare artificialmente un materiale non presente sul pianeta Terra, il plutonio, che ci si aspettava avesse caratteristiche ottimali per produrre bombe atomiche ⁽⁵⁾. Solo vari anni dopo la guerra, nei primi

⁽⁴⁾ Non erano trascorsi nemmeno cinquant'anni dalla scoperta della radioattività; un tempo brevissimo per passare da uno studio di base, apparentemente solo di laboratorio, alla più sconvolgente dimostrazione che si potesse avere della potenza della scienza e della tecnologia.

⁽⁵⁾ La prima esplosione nucleare, avvenuta nel luglio 1945 ad Alamogordo, nello stato americano del New Mexico, fu proprio di una bomba al plutonio. Fu necessario effettuare questo test perché i tecnici fossero davvero sicuri del suo efficace funzionamento. Infatti la deflagrazione del plutonio richiede che una sfera cava formata da questo materiale venga fatta implodere simmetricamente a grandissima velocità, cosa assai difficile. Il test ebbe successo e il destino di Nagasaki fu segnato. La bomba di Hiroshima, invece, impiegava uranio fortemente arricchito e non necessitò di alcuna



Fig. 2 - Hiroshima distrutta.

anni '50, ci si impegnò per la realizzazione di centrali civili, capaci di produrre calore e soprattutto elettricità. Nacquero a quel punto tanti sogni (che oggi possiamo definire ingenui, che promettevano di fornire energia illimitata e a costi irrisori ad un'umanità attonita di fronte all'enorme potenza dell'atomo. Ma si posero anche le radici per alcuni incubi che ancora ci accompagnano al giorno d'oggi. Per meglio capirne la natura, dobbiamo esaminare in maggior dettaglio come funziona l'energia nucleare.

2) AL CUORE DELLA BOMBA E DELLE CENTRALI

In natura esistono due tipi (isotopi) di uranio, ma solo uno di essi può essere impiegato per realizzare la reazione di fissione a catena, il fenomeno che, come abbiamo già visto nella nota 2, sta alla base sia delle bombe che delle centrali. È questo l'uranio 235 (U235; il numero denota quanti neutroni e protoni ci sono complessivamente in quel nucleo). L'altro isotopo, l'U238, è quasi uguale all'U235, soltanto è un po'

detonazione sperimentale prima di venir impiegata sul teatro di guerra. Gli scienziati e i tecnici avevano fiducia assoluta che avrebbe funzionato al primo tentativo!

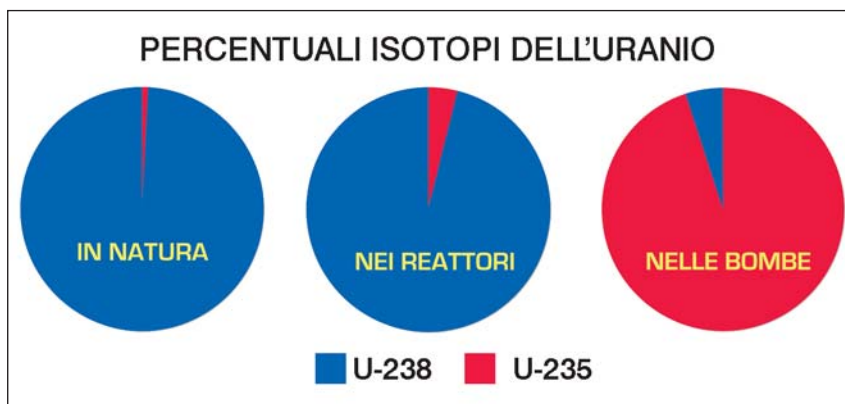


Fig. 3 - I due principali isotopi dell'uranio e le relative percentuali: in natura, nei reattori e nelle bombe.

più pesante (possiede tre neutroni in più), ma non ha le proprietà giuste per produrre una reazione a catena. L'uranio 235 è piuttosto raro, rappresentando solo lo 0,7% di tutto l'uranio naturale. Il restante 99,3% è uranio 238, in prima battuta un materiale del tutto inutile ⁽⁶⁾. Per produrre una bomba o una centrale nucleare di tipo convenzionale, si trat-

⁽⁶⁾ L'uranio 238 può però trovare una interessante applicazione nel settore nucleare civile, grazie al fatto che, sottoposto a bombardamento neutronico, si trasforma in plutonio 239, isotopo che può generare la reazione a catena. Questo aprirebbe la possibilità di realizzare i cosiddetti surgeneratori, centrali capaci di produrre più combustibile (plutonio) di quello (uranio) che consumano. I sostenitori di questa ipotesi hanno parlato addirittura di una «economia del plutonio». Tutti i tentativi di commercializzare tali impianti, specie in Francia con il Superphenix, sono però falliti. Parte essenziale di una eventuale economia del plutonio è il cosiddetto riprocessamento, il processo per cui si prende il combustibile irraggiato nel nocciolo di un reattore, si tolgono i rivestimenti delle pastiglie (v. la quarta sezione di questo articolo, sui reattori civili) si sciolgono con l'aiuto di acidi gli ossidi in esse contenuti e, con metodi chimici piuttosto diretti, si estrae quanto di utile presente; ovviamente il plutonio, ma anche le considerevoli quantità di uranio non utilizzato e taluni frammenti di fissione che presentano interesse commerciale, come gli isotopi per usi medici, scientifici o industriali. Tutto potrebbe sembrare facile e realizzabile anche in un piccolo laboratorio, ad esempio quello di una scuola superiore specializzata in chimica, se non fosse che si ha a che fare con sostanze dalla elevatissima radioattività, che in pochi istanti possono uccidere una persona, per cui si deve operare con sistemi robotizzati, tenendo il personale adeguatamente riparato e protetto. Il riprocessamento avrebbe anche il vantaggio di concentrare le sostanze più radioattive in volumi più compatti, venendo così ad agevolare il loro stoccaggio a lungo termine. V'è però anche uno svantaggio, nel senso che se all'inizio le scorie sono solide, dopo il riprocessamento si hanno molti residui liquidi, che quindi sono più soggetti a fughe, infiltrazioni, perdite.

ta quindi di selezionare, nell'uranio che esce dalla miniera, quello dalle proprietà giuste, l' U_{235} , con un processo detto arricchimento. Ma non è un compito banale, anzi. Si tratta di un processo difficilissimo, dato che si devono usare metodi fisici che sfruttano la piccola differenza di peso (1,5%) esistente tra i due isotopi. Si noti che le centrali nucleari più diffuse richiedono un arricchimento fino a circa il 4% in U_{235} ; per una bomba bisogna invece spingersi invece fino al 90-95% circa (7).

Oggi una delle tecniche di arricchimento più diffuse impiega speciali centrifughe, tipo quelle delle lavatrici, ma ruotanti molto più velocemente. Vi si immette un gas di uranio la cui parte leggera (l' U_{235}) si distribuisce più vicino all'asse di rotazione, da dove viene prelevata per sottoporla a ulteriori cicli di «arricchimento», ognuno dei quali aumenta solo di pochi percento la concentrazione dell'isotopo interessante. È proprio il tipo di processo che per molti anni ha visto l'Iran opposto alle principali potenze occidentali. Parlando di arricchimento dell'uranio incontriamo per la prima volta uno dei più gravi problemi del nucleare. Se infatti si dispone dell'equipaggiamento necessario a produrre l'uranio da usare in una centrale nucleare (che, ripetiamolo, richiede nei casi più diffusi un combustibile con circa il 4% di U_{235}), allora si può dire con certezza che anche fare una bomba non sarebbe poi tanto difficile. Il perché di questa drastica affermazione è presto detto: quando si è arricchito l'uranio fino ad avere il 4% di U_{235} , il quantitativo di materiale su cui operare si è ormai fortemente ridotto e quindi per fare il passo ulteriore (dal 4% di U_{235} al novanta e oltre necessario per la bomba) basta far funzionare le centrifughe per un tempo supplementare davvero breve, circa la metà di quello che è stato necessario per andare dallo 0,7% fino al 4%. E a quel punto il gioco è fatto, o meglio la bomba è fatta, in quanto per avere una esplosione tipo quella di Hiroshima è sufficiente disporre di qualche decina di chili di uranio fortemente arricchito, dargli la forma di due semisfere e quindi spararle l'una contro l'altra ad altissima velocità. Questo si può fare disponendo le due semisfere agli estremi di un tubo e quindi detonando del normale tritolo per riuscire a lanciare velocissimamente una semisfera contro l'altra. Posto che l'impatto sia abbastanza rapido, l'esplosione tipo Hiroshima avviene spontaneamente. Un gioco da ragazzi.

(7) Dalla concentrazione del materiale fissile dipende la quantità di materiale minima necessaria per innescare la reazione a catena. Anche la densità del materiale gioca un ruolo importante, tanto che se si vuole ottenere un'esplosione ma si dispone di poco materiale, si aggira il problema, entro certi limiti, comprimendolo.



Fig. 4 - Modello della bomba «Little Boy» che distrusse Hiroshima.

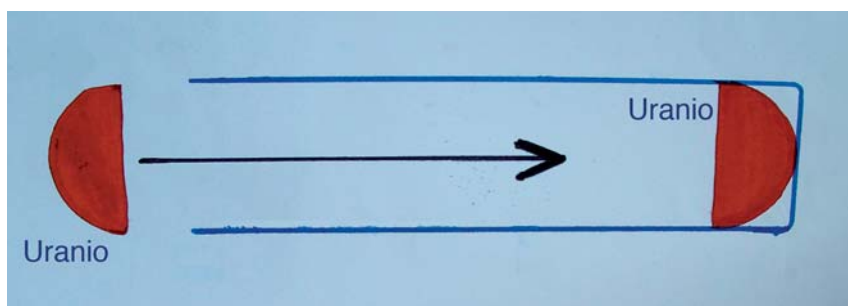


Fig. 5 - Il meccanismo di detonazione dell'uranio nella bomba di Hiroshima. Due semi-sfere di uranio fortemente arricchito vengono spinte una contro l'altra a grandissima velocità.

Siamo qui di fronte ad un fatto fondamentale: la tecnologia e gli impianti che portano al nucleare militare risultano sostanzialmente identici a quelli che si usano per il nucleare civile ⁽⁸⁾ (ed è proprio questa la

⁽⁸⁾ Si parla di tecnologie a doppio uso.

strada seguita da stati come il Pakistan e il Sud Africa per dotarsi della bomba atomica). Quando si è prodotto l'uranio adatto per una centrale nucleare si è già fatto il grosso del lavoro di arricchimento necessario per arrivare alla bomba. Ecco perché ci sono stati per molti anni forti timori che il programma di arricchimento dell'Iran, ufficialmente a scopi civili, nascondesse in realtà il desiderio di dotarsi in un secondo momento – con poco sforzo e velocemente – di un armamento nucleare.

Per il Progetto Manhattan gli Usa spesero complessivamente l'equivalente attuale di 26 miliardi di dollari, ma oggi il processo risulterebbe meno costoso, essendo nota la procedura giusta da seguire per ottenere un ordigno atomico. Oggi la bomba potrebbe venir costruita da qualunque nazione con una media capacità industriale e i materiali giusti. Poi basta mettere la bomba su un missile e si dispone di un'arma potentissima e invulnerabile. È questa la strada che tutte le potenze atomiche militari hanno seguito nel corso dei decenni passati.

3) IL NUCLEARE CON LE STELLETTE: ARSENALI ENORMI

Gli Stati Uniti sono stati i primi a dotarsi di armamento nucleare (1945), seguiti a ruota dall'Urss (1949). Il possesso di ordigni nucleari venne visto come essenziale strumento di forza militare e di prestigio politico da parte di molti stati e non sorprende quindi che nel club atomico siano entrati ben presto la Gran Bretagna (1952), la Francia (1960) e la Cina (1964).

Nel corso della Guerra Fredda, il numero di ordigni presenti negli arsenali crebbe a dismisura, oltre ogni valore ragionevole, in una specie di gioco infantile in cui pareva necessario disporre di un vantaggio numerico che trascurava ogni criterio di sufficienza. Studiando l'andamento degli arsenali, si vede come vi siano stati dei momenti di grande accelerazione, come nel caso della reazione americana ad una percepita inferiorità missilistica («missile gap»), tra la fine degli anni '50 e inizio dei '60. Anche qui il ruolo predominante non fu giocato dai dati concreti, dai numeri, dalle analisi razionali, ma solo dalla percezione pubblica e dagli interessi personali di taluni politici arrembanti, che cavalcarono patriotticamente infondate paure.

La conseguenza fu uno spreco enorme di risorse, ma soprattutto la creazione di un rischio straordinariamente alto nel caso di scoppio di un conflitto che avesse visto l'uso di tutti gli arsenali. Tra gli effetti più pesanti troviamo anche la possibilità di un cosiddetto «inverno nucleare», a causa dell'immissione in atmosfera di grandi quantità di pulvisco-

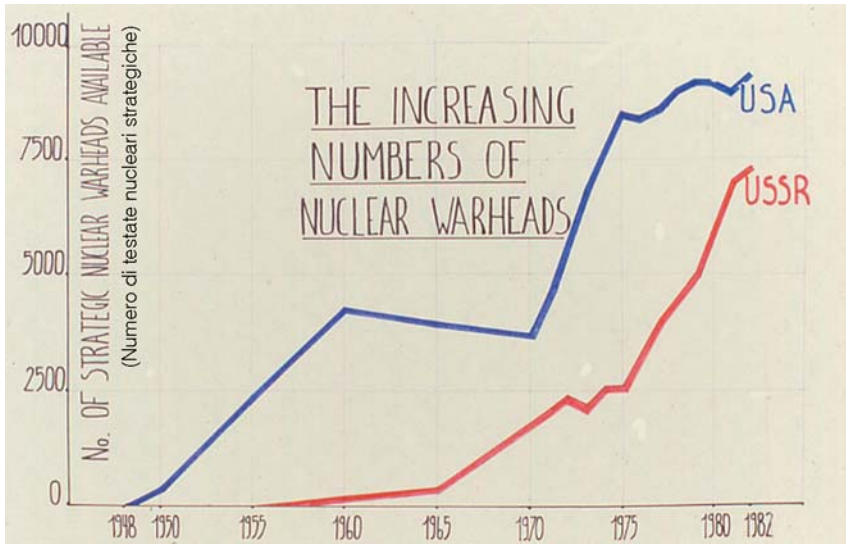


Fig. 6 - I primi trent'anni della corsa agli armamenti nucleari tra Usa e Urss. Il grafico mostra la crescita degli arsenali strategici americani (linea blu) e sovietici (linea rossa).



Fig. 7 - Il test nucleare sottomarino Baker, effettuato nell'atollo di Bikini dagli americani nel 1946. In prossimità dell'esplosione erano state posizionate varie navi senza equipaggio.



Fig. 8 - Il test termonucleare Canopus nella Polinesia francese nel 1968.



Fig. 9 - Esplosione di un proiettile nucleare di artiglieria.



Fig. 10 - Una delle più piccole bombe nucleari tattiche mai realizzata, la Davy Crockett. Peso circa 23 kg; potenza circa 20 tonnellate di tritolo equivalente (un millesimo rispetto a Hiroshima)

lo e di fuliggine che avrebbero ridotto per molti mesi l'arrivo del calore solare sulla Terra.

A proposito del costo degli armamenti nucleari ci sono dati piuttosto sorprendenti. Tra il 1945 e il 1996 per costruire le 30.000 bombe atomiche presenti nel loro arsenale gli Usa spesero solo il 7% del loro enorme bilancio militare, mentre ben il 57% dello stesso fu destinato ai «mezzi di consegna», quindi aerei, missili, sottomarini. Il 14% venne assorbito dall'individuazione dei bersagli (satelliti, spionaggio ecc.). La bomba non risulta quindi particolarmente costosa di per sé⁽⁹⁾, specie se si considera il beneficio politico che ne consegue; quel che fa lievitare la spesa sono i mezzi necessari per portarla a destinazione⁽¹⁰⁾. Fa impressione pensare comunque al valore assoluto della spesa legata agli arsenali atomici. Nel caso degli Stati Uniti, dove le informazioni al riguardo sono disponibili, si stima⁽¹¹⁾ che in tutto si siano spesi nel corso del XX secolo oltre 5.000 miliardi di dollari. Una cifra astronomica, talmente grande da riuscire difficilmente immaginabile. Basti dire che tale cifra,

⁽⁹⁾ Ciò spiega anche perché stati poveri come il Pakistan e la Corea del Nord abbiano potuto permettersela.

⁽¹⁰⁾ Da questo punto di vista il missile balistico è la scelta ottimale, dato che non vi è nessuna difesa efficace contro un oggetto che viaggia a circa 10 km al secondo.

⁽¹¹⁾ *Atomic Audit*, a cura di S.I. Schwartz, Brookings Institution Press, Washington, 1998, p. 546.

sotto forma di una pila di banconote da un dollaro, arriverebbe alla Luna e tornerebbe indietro di un bel po'.

Come abbiamo già detto, costruire la bomba non bastava. Per verificare le caratteristiche e gli effetti degli ordigni nucleari, i vari stati compirono oltre cinquecento test, negli ambienti più diversi, nell'aria, nello spazio esterno, negli oceani, alla superficie terrestre e sotto di essa. Gli esperimenti svolti in atmosfera provocarono in particolare un diffuso inquinamento radioattivo a livello planetario⁽¹²⁾, per porre un freno al quale si arrivò nel 1963 ad elaborare il Limited Test Ban Treaty, un accordo internazionale che bandiva le esplosioni in atmosfera, negli oceani e al di fuori della Terra⁽¹³⁾. C'è da notare la tragica ironia di un aspetto di questi test. Quando essi furono compiuti sul territorio nazionale degli stessi stati, è ovvio che la maggior parte delle radiazioni emesse colpirono le aree vicine e le popolazioni che in esse risiedevano, che pertanto ricevettero un danno alla salute. Quindi si vede come i test delle bombe, bombe che avrebbero dovuto proteggere la popolazione da attacchi esterni, hanno in realtà danneggiato principalmente proprio loro, i cittadini, e non gli avversari.

È consolante notare come il numero di paesi militarmente nucleari sia rimasto limitato. Ciò è dovuto in buona parte al Trattato di Non Proliferazione (TNP), vero pilastro della pace mondiale, che entrò in vigore nel 1970. Doveva durare per 25 anni; poi, alla sua scadenza, venne prolungato indefinitamente. È stato ratificato da 189 paesi, tra cui le originarie cinque potenze (P5) con arsenali nucleari (le ultime, Francia e Cina, hanno aderito solo nel 1992) ma mancano alcune nazioni con capacità atomiche militari, come Israele, India, Pakistan. La Corea del Nord ne fece parte, abbandonandolo però nel 2003. Attraverso il TNP si è cercato, e ancor oggi si cerca, di limitare la diffusione delle armi nucleari. Il punto chiave sta nell'articolo 6: «tutti i P5 si impegnano a condurre negoziati in buona fede su misure efficaci mirate a fermare la corsa agli armamenti *in tempi brevi*⁽¹⁴⁾ e a giungere al disarmo nucleare». È un dettaglio importante, che presenta notevoli criticità. Di fatto, al Trattato non si sono adeguate quelle stesse nazioni che l'avevano proposto, perché è ben difficile ritenere che le grandi potenze abbiano agito davvero, negli ultimi quarant'anni, in direzione di un disarmo atomi-

(12) Stime scientifiche indicano che in futuro si avranno, come conseguenza, ben oltre un milione di cancro mortali, tra tutta la popolazione mondiale (questo ipotizzando una relazione lineare tra radiazione assorbita ed effetto sulla salute).

(13) L'ultimo test atmosferico venne svolto dalla Cina nel 1980.

(14) Corsivo aggiunto dall'autore.

co completo. E l'anima del trattato è proprio qui: gli altri Stati accettarono di non dotarsi di armi nucleari perché quelli che le possedevano si impegnarono ad eliminarle nel giro di pochi anni.

Tra Russia e USA sono stati concordati vari accordi di parziale disarmo nucleare; ma ancora oggi gli arsenali di Usa e Russia contengono migliaia di bombe, sufficienti a causare un disastro planetario.

Le loro testate sono suddivise come segue:

Tipo di testata	Usa	Russia
Strategiche operative	1952	Circa 2500
di cui su missili intercontinentali (ICBM)	500	1050
di cui su missili lanciati da sottomarino (SLBM)	1152	624
di cui su bombardieri	300	810
Tattiche	200	2000

Sebbene il TNP abbia avuto un notevole successo nel limitare la corsa agli armamenti nucleari, attualmente esso versa in una profonda crisi a seguito di eventi in India, Pakistan, Corea del Nord, Iran, Israele. I primi due paesi hanno attraversato la soglia nucleare alla fine degli anni '90, senza incorrere in conseguenze di particolare gravità. Anzi l'India è come se fosse stata premiata dagli Usa, con un accordo che – andando contro quanto stabilito dal TNP ⁽¹⁵⁾ – prevedeva la fornitura di tecnologie e di uranio, con ciò consentendo a New Delhi di dedicare ai propri armamenti tutto l'uranio di cui già disponeva. Nel caso nord-coreano le sanzioni imposte a quella nazione non hanno sortito effetto alcuno, e il regime di Pyongyang ha effettuato test nucleari negli anni 2006, 2009 e 2013. Nel Medio Oriente l'unica potenza nucleare è attualmente Israele, con un arsenale che potrebbe raggiungere le duecento testate (paragonabile quindi a quelli di Francia, Gran Bretagna e Cina). L'Iran, da parte sua, per anni ha lavorato ad un programma indipendente di arricchimento dell'uranio che – sebbene ripetutamente dichiarato a esclusivi fini pacifici – potrebbe in caso di necessità permettergli in pochi mesi di avere sufficiente uranio fortemente arricchito da far esplodere un ordigno tipo Hiroshima. Si può sospettare che sia a seguito di questi sviluppi che diversi stati del golfo Persico hanno dichiarato

⁽¹⁵⁾ Secondo il TNP solo le nazioni che vi aderiscono possono ricevere assistenza atomica (ovviamente nel solo settore civile) da parte dei paesi nuclearmente competenti.

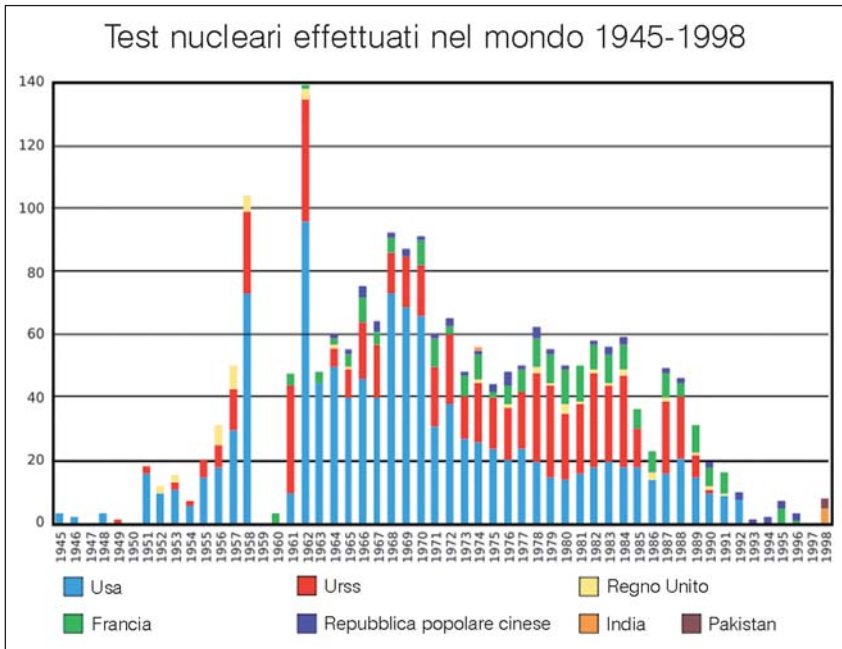


Fig. 11 - Test nucleari militari nel tempo.

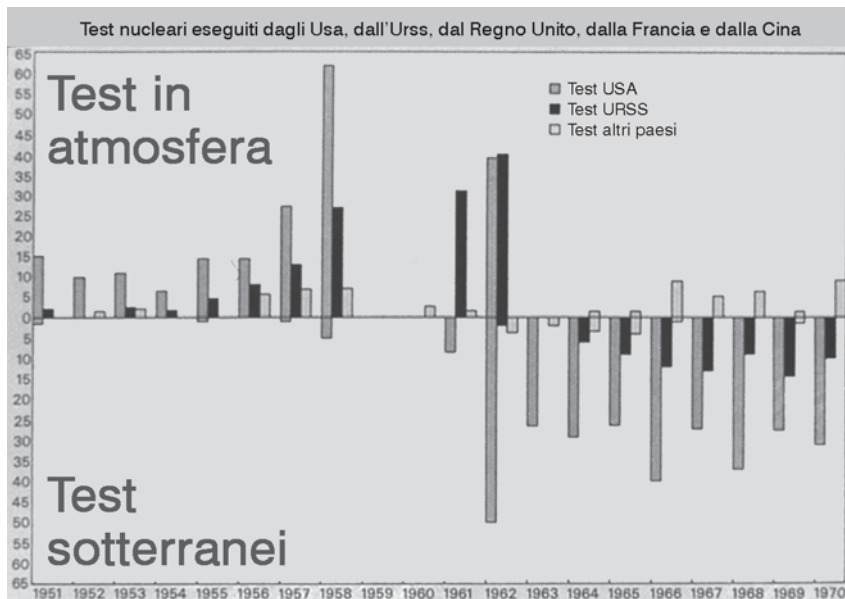


Fig. 12 - Il Trattato sulle messa al bando parziale dei test (1963) causò lo spostamento nel sottosuolo della maggior parte degli esperimenti nucleari militari.

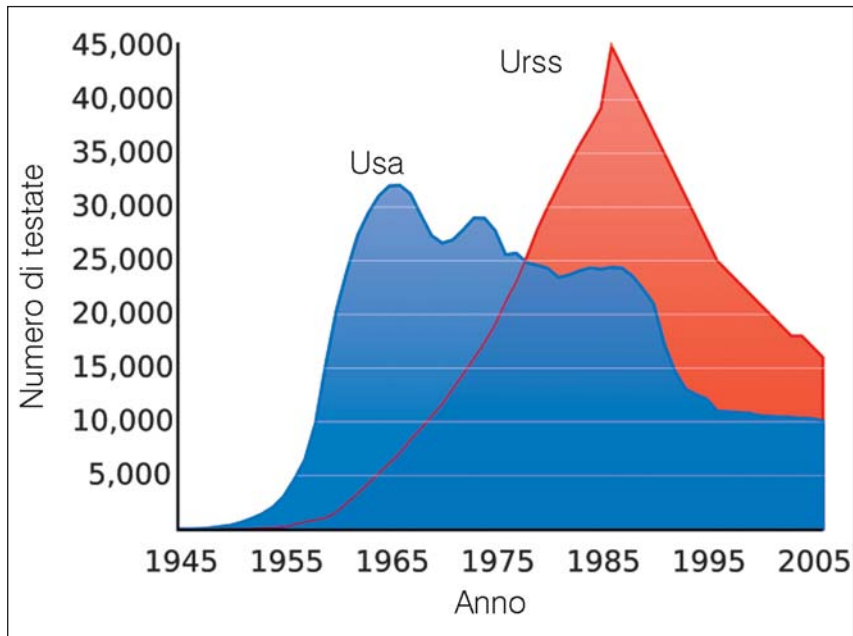


Fig. 13 - Andamento temporale degli arsenali nucleari di Usa e Urss sia strategici che tattici: dopo l'arrebante crescita, una benvenuta ma ancora insufficiente, riduzione.

di volersi dotare pur essi di centrali nucleari; costruire tali impianti potrebbe costituire la maniera più «innocente» per incamminarsi sulla strada del nucleare militare.

Pochi sanno che anche l'Italia, alla fine degli anni cinquanta, aveva un progetto di bomba nucleare, in accordo con Germania e Francia. Questa iniziativa ebbe termine nel momento in cui la Francia decise di procedere da sola. Anche altre nazioni ebbero nel corso del tempo ambizioni atomiche militari: Svizzera, Svezia, Argentina, Brasile, Iraq, Libia; questi programmi sono stati ormai abbandonati, volontariamente o per imposizione esterna.

Il tema del disarmo atomico riguarda direttamente il nostro paese in quanto esso dispone comunque di un discreto numero di ordigni nucleari, pur avendo rinunciato a costruirseli. Da una parte perché siamo membri di una Unione Europea in cui i nostri partner Francia e Gran Bretagna hanno l'arma atomica; dall'altra perché siamo «coperti» dall'ombrello atomico Usa e ospitiamo sul territorio nazionale un bel numero di testate nucleari statunitensi. Quest'ultimo aspetto è davvero contraddittorio con lo spirito, se non la lettera, del TNP; per qual moti-

vo, nelle basi militari di Aviano (provincia di Pordenone) e Ghedi (Brescia), abbiamo novanta bombe atomiche americane da aereo? Sono pronte all'uso ma un uso per loro non c'è, nell'attuale scenario internazionale che caratterizza il sud Europa; sono ormai totalmente prive di qualunque significato militare. Il Trattato di Non Proliferazione ce lo vieterebbe, ma noi facciamo i furbetti, giustificandoci col fatto che queste bombe sono di proprietà americana. Si noti che fino a pochi anni fa anche in Germania ce n'erano parecchie e sono state mandate via quasi tutte; stessa cosa anche in Grecia. In Italia non c'è neppure un minimo di dibattito sull'argomento. La nostra situazione è ancor più assurda in quanto abbiamo detto «no!», con il referendum, al nucleare civile, ma ci teniamo tranquillamente in casa delle assurde bombe nucleari! Nei rari casi in cui i media hanno sollevato la questione della presenza di questi ordigni, nel giro di qualche giorno l'attenzione è svanita e tutto è tornato nel dimenticatoio. Questo è triste, anche perché così diamo un pessimo messaggio a tutta la comunità internazionale; come possiamo venir visti dall'esterno? Dall'Iran o dalla Corea del Nord? Perché noi possiamo tenerci queste bombe e loro no?

Di fronte ad un mondo che mostra una certa passione per gli armamenti atomici, vi sono diverse nazioni che vi hanno invece rinunciato volontariamente ⁽¹⁶⁾: Sudafrica, Bielorussia, Ucraina, Kazakistan; davvero enormi gli arsenali posseduti dagli ultimi due paesi di questa lista (maggiori della somma di quelli di Cina, Gran Bretagna e Francia messi assieme!). La regione dell'Oceano Pacifico è anch'essa denuclearizzata, grazie al trattato di Rarotonga, entrato in vigore nel 1986. Il trattato di Bangkok per l'Asia sudorientale è entrato in vigore nel 1997. Anche il Sudamerica è continente denuclearizzato, come sancito dal trattato di Tlatelolco (2002). Quello di Semipalatinsk per l'Asia Centrale è del 2009. Tutta l'Africa è stata recentemente (2009) dichiarata «continente denuclearizzato», a seguito del Trattato di Pelindaba. Anche la Mongolia si è unilateralmente dichiarata zona denuclearizzata.

Ma che fare oggi quando si è in presenza di uno stato che lavora per sviluppare armi nucleari (o dà l'impressione di volerlo fare)? È il caso dell'Iran. Innanzitutto dobbiamo cercare di metterci nei panni di un *leader* di quel paese; ci risulterà allora più facile capire le motivazioni

⁽¹⁶⁾ Forse memori del fatto che le armi nucleari non hanno in pratica nessuna utilità militare, come dimostrano gli esempi storici di superpotenze atomiche sconfitte in guerra senza aver fatto uso di nemmeno una bomba atomica: gli Usa in Vietnam, l'Urss in Afghanistan.

che hanno portato la dirigenza di Tehran ad opporsi alle indicazioni delle diplomazie europee e statunitensi. L'Iran è un paese orgoglioso della sua civiltà e del suo ruolo storico e si può sentire umiliato – se non addirittura minacciato – dai suoi vicini con armamento atomico (Israele, Pakistan, Russia, India) o che ospitano basi americane (Turchia, Afghanistan, Arabia Saudita e altre nazioni che si affacciano sul golfo Persico). Inoltre l'Iran ha avuto esperienza diretta dell'interferenza degli stati occidentali nei suoi affari interni (ricordiamoci della fine del primo ministro Mossadeq). Avendo inoltre visto negli ultimi decenni che, tra i «nemici dell'occidente» solo chi possiede armamento nucleare non viene attaccato o invaso con le più varie motivazioni (infatti nessuno si è mai sognato di intervenire contro gli abusi russi in Cecenia, o contro la Cina per la repressione in Xinjiang o in Tibet), le autorità di Tehran potrebbero pensare che è indispensabile mirare a possedere qualche bomba nucleare. Anche la Corea del Nord si trova in una situazione simile. Ciò detto, c'è sempre da ricordare la necessità di tenere aperto il dialogo e di non voler usare due pesi e due misure diverse a seconda di chi ci si trova davanti. In questo caso, con l'Iran, non si può certo dire che questo sia stato fatto; basta ricordare come la Corea del Sud non abbia subito alcuna conseguenza negativa per i suoi illegali esperimenti effettuati con il plutonio. Inoltre bisognerebbe abbandonare le minacce di intervento armato mirato a promuovere i cambiamenti di regime politico, quando questo non ci aggrada.

4) IL NUCLEARE CIVILE: VANTAGGI E PROBLEMI

Veniamo ora all'altra faccia della medaglia atomica, quella civile. Il reattore nucleare, fondamentalmente, non è altro che un complicato impianto che serve per far bollire dell'acqua. Lo fa con pastiglie di ossido di uranio arricchito lunghe poco più di un centimetro, infilate in lunghi tubi di materiali speciali, formando così i cosiddetti «elementi di combustibile», che vengono poi assemblati assieme nelle «barre di combustibile». Al loro interno avviene la cosiddetta reazione a catena controllata, milioni di volte più energetica di qualunque reazione chimica. Di conseguenza basta poco combustibile – diciamo un camion di uranio *all'anno* – per far funzionare l'intero l'impianto (mentre in una centrale a combustibile fossile – carbone, petrolio o metano che sia – serve *ogni giorno* il carico di un intero treno). Una centrale nucleare è un congegno complicato, fantasticamente «intelligente», ma presenta alcuni punti deboli, tra cui in primis la necessità di una grande quantità di

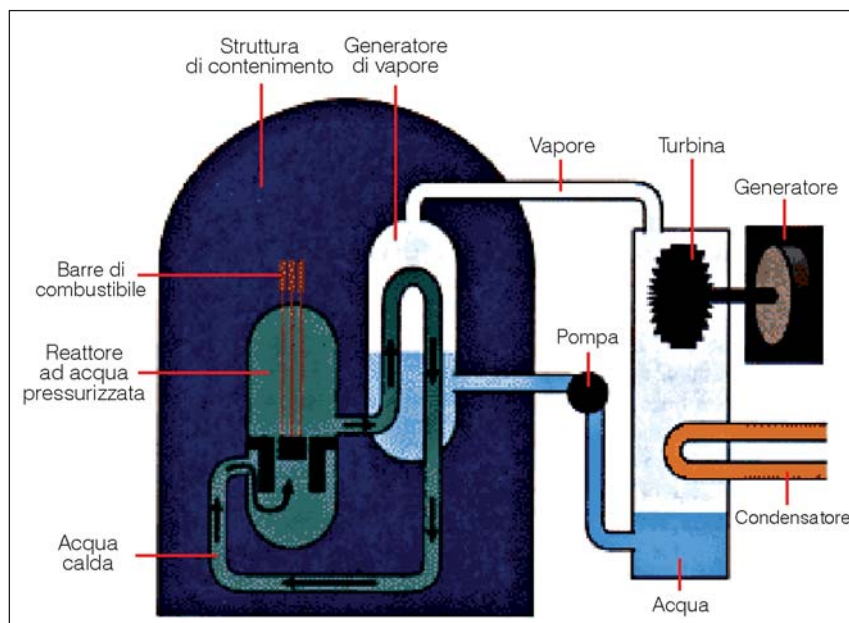


Fig. 14 - Schema di centrale nucleare.

acqua, che serve per garantire sempre e comunque il raffreddamento del cuore dell'impianto, quel «nociolo» dove avvengono le reazioni di fissione a catena generatrici di energia. Se il raffreddamento non funziona a dovere si rischia la distruzione dell'impianto e gravi conseguenze ambientali. E la situazione non cambia nemmeno dopo l'arresto della reazione nucleare, in quanto i frammenti di fissione continuano a decadere radioattivamente, producendo ingenti quantità di calore, in grado di far fondere in pochi minuti le barre di combustibile.

Il numero dei reattori nel mondo è cresciuto rapidamente, fino a raggiungere le oltre quattrocento unità alla fine degli anni ottanta. Sembravano corrette le previsioni di chi vedeva nel nucleare civile una vera panacea energetica, in grado di assicurare rifornimenti abbondanti e a buon prezzo, capace di assicurare un radioso futuro all'umanità. Ma poi c'è stata una stasi, dovuta in parte alla paura dovuta al disastro di Chernobyl, ma soprattutto alla scarsa competitività economica e ai rischi finanziari. In occidente, le poche nuove centrali nucleari si fanno oggi solo dove ci sono pesanti investimenti pubblici diretti, o comunque dove esistono sostanziali garanzie ed incentivi statali. Questo appare strano, per una tecnologia che è sul mercato ormai da sessanta anni e

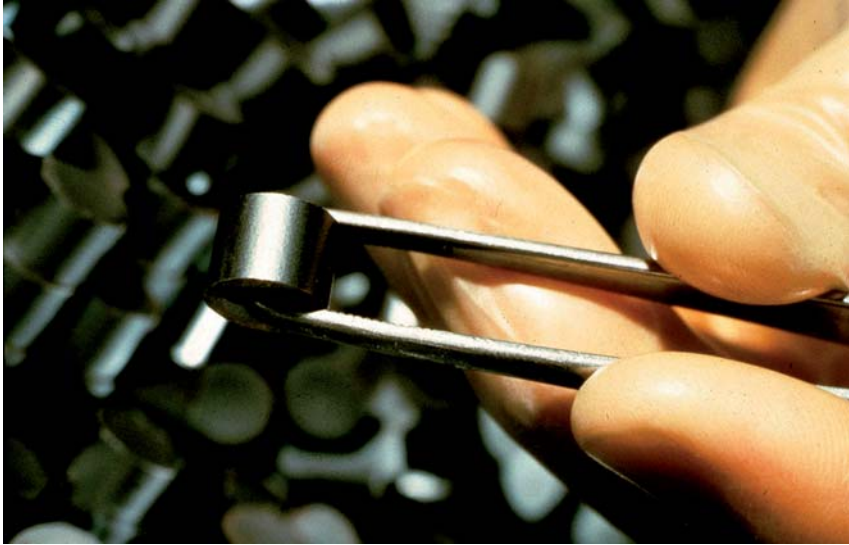


Fig. 15 - Pastiglie di ossido di uranio.



Fig. 16 - Barre di combustibile prima del loro inserimento nel nocciolo del reattore.

che, se fosse davvero l'optimum descritto da taluni, dovrebbe ormai essere in grado di camminare con le proprie gambe, senza le stampelle dei soldi pubblici. Si aggiunga che le leggi accollano alla collettività il costo delle eventuali conseguenze di incidenti e disastri, essendo permesso alle ditte elettriche che gestiscono le centrali atomiche di stipulare contratti di assicurazione per importi minimi. Nel caso svizzero, esemplificativo della situazione generale, l'industria si assicura solo per una cifra di un paio di miliardi di franchi, a fronte di un costo preventivabile di 500 miliardi per un incidente grave e di 4000 miliardi per un disastro tipo Chernobyl. Nel caso di guai seri, è ovvio, pagherà Pantalone...

Nel mondo d'oggi il 17% dell'energia elettrica ⁽¹⁷⁾ è generata dal nucleare; non è poco, ma è assai meno di quel che si pensava qualche decennio fa, quando si riteneva che dovesse dominare il settore della produzione elettrica. Percentuali assai più alte di elettricità sono prodotte col nucleare in vari paesi europei, come nel caso della Francia, dove ben tre quarti del fabbisogno elettrico sono coperti da questa fonte ⁽¹⁸⁾. In termini di numero di reattori, gli Usa detengono comunque il primato, con un centinaio di impianti.

I principali vantaggi del nucleare sono rappresentati dalla produzione concentrata (grosso modo, una grande centrale è in grado di soddisfare le esigenze elettriche di una regione di medie dimensioni); dalla modesta quantità di combustibile; dalla presenza sul mercato internazionale di diversi fornitori di uranio, sia naturale che arricchito; dalla relativamente buona sicurezza ed affidabilità degli impianti (tre soli incidenti gravissimi nel corso di varie decine di anni); dall'assenza di emissioni di gas serra nel corso del funzionamento di routine (ma parecchi ne vengono emessi durante la fase di costruzione dell'impianto); dall'impatto modesto del costo del combustibile sul prezzo dell'elettricità prodotta, che quindi risulta abbastanza stabile nei confronti di sommovimenti sui mercati dell'energia.

⁽¹⁷⁾ Ricordiamo che, nei paesi avanzati, l'elettricità è responsabile di circa un terzo dei consumi energetici complessivi. Quindi il 17% elettrico corrisponde grosso modo al 6% degli usi energetici totali. A livello mondiale il 40% dell'elettricità viene prodotta bruciando carbone. L'idroelettrico copre una percentuale praticamente uguale al nucleare.

⁽¹⁸⁾ Ciò che peraltro non le evita di dover ricorrere all'importazione dall'estero di elettricità, per fare fronte ai picchi di domanda. Questo perché, dal punto di vista economico, non ha nessun senso realizzare una costosissima centrale atomica per poi farla funzionare solo poche ore al giorno, nei momenti di massima richiesta. Oltretutto, questo non sarebbe nemmeno tecnicamente fattibile, non essendo questi impianti particolarmente «elastici» per quanto riguarda la modulazione della loro produzione.

Non mancano però anche gli svantaggi. I tempi lunghi di costruzione rendono il nucleare assai poco appetibile dal punto di vista finanziario e richiedono inevitabilmente il pesante intervento dei governi. Una produzione di energia fortemente concentrata, se è un vantaggio per certi versi, pone anche il problema dell'inquinamento (due terzi del calore prodotto va disperso nell'ambiente; non è pensabile di recuperarlo e utilizzarlo, a meno che la centrale nucleare sia collocata vicino a una grande città, ma questo è sconsigliabile per motivi di sicurezza). Inoltre la mancata produzione di un solo impianto (per guasto, manutenzione o altro motivo) si fa sentire pesantemente sul bilancio energetico complessivo della regione o del paese, imponendo la realizzazione di costosi sistemi di rimpiazzo. Nel raro caso, poi, in cui si verifichi un disastro, questo può assumere proporzioni bibliche, causando costi colossali e portando nei casi peggiori all'abbandono perenne di aree rilevanti di territorio. Non vanno dimenticate le scorie, che rappresentano non solo una sfida tecnologica ancora non risolta, ma anche un problema etico, perché costituiscono un'eredità pesante che le future generazioni dovranno gestire (e pagare) per un tempo inimmaginabile: almeno centomila anni, venti volte maggiore della durata di tutta la civiltà umana. La pericolosità dei materiali nucleari li rende poi un possibile obiettivo privilegiato per un eventuale attacco terroristico, per difendersi dal quale si rende inevitabile un controllo militare del territorio, con possibili conseguenze sul sistema democratico. Già questo potrebbe bastare per rendere il nucleare men che ideale dal punto di vista della produzione energetica civile. C'è però anche il problema della proliferazione nucleare; come abbiamo visto, le tecnologie impiegabili per produrre il combustibile nucleare o per ritrattare le scorie sono le stesse che possono permettere ad uno stato di procurarsi i materiali fissili indispensabili per produrre ordigni nucleari.

5) LE PROSPETTIVE FUTURE

Come abbiamo sommariamente visto, le previsioni di un utilizzo sempre più vasto dell'energia nucleare per scopi civili si sono dimostrate errate; il nucleare ha perso lo slancio dei suoi anni iniziali e si trova a sopravvivere con una certa difficoltà; anche grandi ditte un tempo concorrenti si sono dovute associare per poter continuare ad operare. Il ruolo dell'atomo come potenziale strumento di contrasto all'effetto serra non si è concretizzato, risultando più facile puntare sulle fonti rinnovabili e sull'efficienza. In Occidente è molto difficile che ci si torni ad

affidare decisamente al nucleare; diverso è il discorso in estremo oriente, dove economie in forte crescita e società in rapido arricchimento richiedono quantità di energia drasticamente maggiori ogni anno ⁽¹⁹⁾. Ma anche lì crescono i dubbi che il nucleare sia la strada da percorrere; in particolare l'effetto Fukushima ha fatto vacillare molte certezze ⁽²⁰⁾. Molto dipenderà dall'andamento dei prezzi dei combustibili fossili e dalle scelte politiche di lungo termine.

Attualmente stiamo vedendo come l'estrazione del metano e del petrolio dagli scisti (shale gas e shale oil) stia impattando fortemente sul mercato, specie quello statunitense. Questo dovrebbe diminuire i prezzi dei combustibili fossili e quindi ridurre l'attrattiva del nucleare (ma anche delle altre fonti alternative). D'altra parte il desiderio di assicurarsi il materiale e le tecnologie capaci di aprire la strada ad un armamento nucleare prescindono dal discorso costi; è il caso, viene da sospettare, dei paesi del Golfo Persico che, pur disponendo di abbondante petrolio e metano, studiano ambiziosi programmi nucleari civili. In zone caratterizzate da alta instabilità politica, questo non depone bene per il futuro.

Torniamo così al tema delle armi nucleari. Se la proliferazione orizzontale ⁽²¹⁾ non viene arrestata, cresce il rischio che, prima o poi, in qualche teatro di conflitto, le armi nucleari vengano usate di nuovo, con conseguenze gravissime per quanto riguarda le vittime e – nel caso le

⁽¹⁹⁾ In Cina si realizzano ogni anno nuove centrali termoelettriche per una potenza complessiva circa pari a tutto il parco elettrico italiano attuale. Questo anche perché la Cina (e gli altri paesi emergenti) tendono a seguire un modello economico «energy intensive», copiando quanto è stato fatto in passato dai paesi industrializzati, perdendo invece di vista la possibilità di adottare le migliori tecnologie di efficienza e risparmio, che evitano di spendere fortune per l'acquisto dei combustibili fossili, riducono l'inquinamento e limitano la vulnerabilità strategica del paese.

⁽²⁰⁾ Se le cause del disastro di Chernobyl potevano essere ricondotte anche al poco efficiente sistema sovietico, alla scarsa motivazione degli addetti, al loro insufficiente addestramento periodico, alla rigidità burocratica, alle pecche tecniche dell'impianto, per Fukushima queste ragioni non valgono. Fukushima si è verificato in uno dei più tecnologici paesi al mondo, dove la forza lavoro è ben preparata e pronta a dare il massimo, dove si è abituati a fronteggiare anche i grandi terremoti. Questo instilla dubbi e origina ripensamenti anche in nazioni che finora avevano adottato fideisticamente l'opzione nucleare, come la Cina, paese caratterizzato anch'esso da elevatissima sismicità, con grandi problemi di corruzione, con una storia infinita di scandali e di mancato rispetto delle regole (in questo somiglia abbastanza al nostro paese).

⁽²¹⁾ Con proliferazione orizzontale si intende la diffusione di ordigni atomici a sempre nuovi paesi. La proliferazione verticale invece indica l'aumento numerico degli arsenali delle potenze già in possesso di questi ordigni.

potenze in guerra siano dotate di arsenali molto consistenti – con potenziali negativi effetti sull’ambiente planetario. C’è anche il rischio che, in nazioni militarmente nucleari, prima o poi arrivino al governo gruppi fondamentalisti, che potrebbero essere tentati di esercitare qualche ricatto atomico. A questo riguardo il caso più preoccupante è quello del Pakistan, dove una cronica violenza ed una precaria stabilità politica potrebbero vedere le leve del potere – e con esse il controllo sulle armi nucleari – cadere in mano ai talebani locali. Con conseguenze difficilmente prevedibili ma certamente di grande portata anche per le nazioni occidentali.

Pur senza pensare a cosa potrebbero fare dei fanatici con una bomba nucleare, per indurre incubi notturni basta riflettere su come i reattori nucleari civili possano costituire un obiettivo assai attraente per dei terroristi. Dopo l’incredibile abilità mostrata dagli attaccanti dell’11 settembre 2001, non ci si possono fare illusioni sul livello di sicurezza necessario ad evitare un disastro. Non è necessario pensare alla distruzione del nocciolo del reattore, ma è sufficiente immaginare quel che succederebbe se venissero colpite le vasche in cui sono poste a raffreddare le barre di combustibile esaurito; si tratta di semplici piscine, che, se venissero fatte esplodere, immetterebbero nell’ambiente grandi quantità di sostanze radioattive, con conseguenze non troppo dissimili da quanto avvenuto a Fukushima e a Chernobyl. Ricordiamoci inoltre che vi sono alcuni impianti nucleari posti in relativa vicinanza a grandi centri popolati (come ad esempio il reattore Kanupp a Karachi in Pakistan, che nel raggio di 30 km ⁽²²⁾ vede la presenza di oltre otto milioni di persone).

Nelle società dei diversi paesi, ma soprattutto di quelli avanzati, dove un elevato benessere è stato, fino a pochi anni fa, dato per scontato (mentre invece ora fronteggiamo la prospettiva di un progressivo impoverimento e lo smantellamento del welfare) manca un dibattito su quale tipo di futuro desideriamo costruire. In quest’ottica, il nucleare risulterebbe probabilmente la fonte energetica più svantaggiata, presentando due problemi sinora praticamente irrisolti: le scorie radioattive di lungo periodo e i pericoli di proliferazione militare. D’altra parte le fonti rinnovabili dovrebbero risultare quelle preferite, essendo caratterizzate da enorme abbondanza ⁽²³⁾; durata infinita; almeno a tutti gli effetti pratici

⁽²²⁾ Lo stesso raggio della zona di evacuazione a Chernobyl.

⁽²³⁾ L’energia solare che cade sul nostro pianeta risulta oltre diecimila volte (10.000!) superiore agli attuali consumi umani complessivi.

della non monopolizzabilità; scarso o nullo impatto ambientale; elevata creazione di posti di lavoro, a seguito della loro scarsa concentrazione e ampia distribuzione territoriale; massima robustezza strategica nel caso di conflitti ⁽²⁴⁾.

Che si sia favorevoli o contrari al nucleare, che questa fonte venga sempre più sfruttata o all'opposto venga abbandonata, resta da affrontare e risolvere lo spinoso problema delle scorie. La scelta che attualmente gode di maggior favore è quella dell'immagazzinamento geologico profondo a lungo termine. L'idea è quella di scavare gallerie sotterranee in strati rocciosi particolarmente stabili dove poi depositare queste pericolose sostanze. Peccato che i depositi permanenti di di questo tipo siano pochi e ancora sperimentali; vari tentativi di realizzarne di definitivi sono andati incontro a problemi serissimi; difficoltà tecniche come nel caso di quello tedesco di Asse ⁽²⁵⁾ o politici come per quello statunitense di Yucca Mountain. In quest'ultimo caso, che avrebbe dovuto poter ospitare 75.000 tonnellate di scorie (attualmente distribuite in ottanta siti) i contribuenti americani hanno già sborsato negli scorsi anni oltre quindici miliardi di dollari per vedere poi il progetto bloccato dall'amministrazione Obama nel 2010, poco dopo il suo insediamento. Ora vi sono tentativi legali di riaprire il progetto, ma anche se questo avvenisse, la capacità di Yucca Mountain sarebbe sufficiente a contenere solo le scorie prodotte sinora e non quelle che si genereranno da questo momento in avanti.

* * *

Per concludere queste brevi note, riassumiamo i punti fondamentali che caratterizzano il nucleare: si tratta del maggior trionfo tecnico-scientifico ottenuto dall'umanità; partecipa in modo rilevante alla produzione elettrica mondiale; non pare però destinato ad aumentare il proprio ruolo nel futuro (anzi il suo contributo percentuale calerà man

⁽²⁴⁾ Con l'eccezione delle grandi dighe idroelettriche, facilmente attaccabili e capaci, se distrutte, di provocare alluvioni devastanti nelle zone poste a valle. Secondo le norme internazionali, le installazioni atomiche dovrebbe essere protette da attacchi anche nel caso di conflitto bellico. La storia degli ultimi decenni ci mostra però come installazioni nucleari siano state attaccate in vari momenti. Ad esempio nel 1980 l'Iran cercò di colpire l'impianto di Al Tuwaitha in Iraq; nel 1981 Israele distrusse il centro di ricerca nucleare di Osirak in Iraq; nel 1991 gli Usa attaccarono impianti in Iraq e nello stesso anno l'Iraq lanciò missili Scud contro il reattore israeliano di Dimona.

⁽²⁵⁾ Si è trattato di grosse infiltrazioni di acqua, che nel lungo termine potrebbero corrodere i contenitori delle scorie e trasportarle distanti fino ad arrivare a contaminare la biosfera.

mano che vecchi impianti vengono spenti nei paesi occidentali); le scorie prodotte in varie fasi del ciclo del combustibile costituiscono un problema tecnico di difficile soluzione e di lunghissima durata, il cui costo risulta difficile da valutare; la possibilità di dirottare a fini militari le conoscenze, le tecnologie e gli impianti sviluppati in ambito civile rappresenta un grave rischio per la pace mondiale, che da solo potrebbe far propendere per un ragionato, progressivo abbandono di questa fonte, a favore invece di un sempre più esteso impiego delle fonti rinnovabili, le cui potenzialità e la cui economicità cominciano ormai ad essere riconosciute da ampi settori delle nostre società.

Chi fosse interessato ad approfondire gli argomenti trattati in questo articolo e, più in generale, le questioni energetiche e le loro implicazioni per quanto riguarda il nostro futuro e la pace, può contattare l'autore all'indirizzo di posta elettronica elena@science.unitn.it.