

# Atti

DELLA ACCADEMIA ROVERETANA DEGLI AGIATI

---

ser. X, vol. III, B

**Classe di Scienze matematiche, fisiche e naturali**



CCLXXI ANNO ACCADEMICO  
2021

# Atti

**DELLA ACCADEMIA ROVERETANA DEGLI AGIATI**

CCLXXI ANNO ACCADEMICO

2021 ser. X, vol. III, B

Classe di Scienze matematiche, fisiche e naturali



SCRIPTA EDIZIONI

Mirco Elena

## A proposito di energia: il nucleare

**ABSTRACT:** Nuclear energy represents the greatest technological achievement of humankind and represents a good example of how we can successfully confront and solve even the most difficult problems. Less than fifty years passed between the discovery of radioactivity and the dramatic destruction of Hiroshima and Nagasaki; a (tragic) demonstration of the power of science and technology. Developed for military applications, nuclear energy quickly found civilian uses, mainly as nuclear power plants. These were seen by many as the future of electricity production, dreaming even of an “energy too cheap to meter”. Some well-advertised accidents and the continent-scale disaster of Chernobyl led to considerable cost increases and to the rejection of this energy source by a large part of the public. The number of nuclear reactors stopped growing; in particular very few new plants have been built in the West in the last two decades. More interest towards atomic energy can be found today in Russia, India, China and the Middle East. The prospects for a major return of nuclear enthusiasm appear today scarce; this is due to the intrinsic weaknesses of this energy source, such as extremely long duration highly radioactive waste, the dual-use nature of the technology (which gives rise to severe proliferation risks), and the delicate financial aspects of new nuclear projects. In addition, competition by renewable sources becomes every day stronger.

**KEY WORDS:** Nuclear energy, radioactivity, science and technology achievements, dual use technologies, horizontal proliferation risks, advantages and disadvantages of nuclear energy for civilian applications, renewable energies.

**RIASSUNTO:** Essere riusciti a sfruttare l'energia nucleare costituisce il trionfo dell'ingegno scientifico e tecnologico umano, ciò che fa sperare che l'homo sapiens possa affrontare con successo qualunque sfida si possa trovare davanti oggi e nel futuro. Peccato che sia stata sviluppata essenzialmente a scopi militari, culminati con la distruzione di Hiroshima, nemmeno metà secolo dopo la scoperta della radioattività, che fece partire una serie di affascinanti e rivoluzionari studi. I sogni nucleari di una energia quasi illimitata e pressoché gratis non si sono avverati, ma oltre 400 reattori sono in funzione oggi nel mondo. Il loro numero però è stazionario e nuovi impianti vengono costruiti principalmen-

---

*Mirco Elena*, Mirco Elena è fisico e ricercatore. Vice segretario nazionale dell'Unione Scienziati per il Disarmo (USPID), membro del consiglio scientifico della International School on Disarmament and Research on Conflicts (ISODARCO; è il braccio formativo delle Pugwash Conferences on Science and World Affairs, premio Nobel per la pace 1995). Divulgatore e ambientalista scientifico.

te in Russia, India, Medio e Estremo Oriente. Alcuni problemi dell'energia atomica sono di difficilissima soluzione; tra questi le scorie assai radioattive per tempi geologici, i rischi di proliferazione di armi di distruzione di massa, le difficoltà di finanziamento sul mercato. Inoltre negli ultimi anni il crollo del costo di alcune energie rinnovabili tende a mettere fuori mercato il nucleare.

PAROLE CHIAVE: Energia nucleare, radioattività, trionfi della scienza e della tecnica, tecnologie a doppio uso, rischi di proliferazione nucleare, pro e contro dell'energia nucleare per applicazioni civili, energie rinnovabili.

## Introduzione

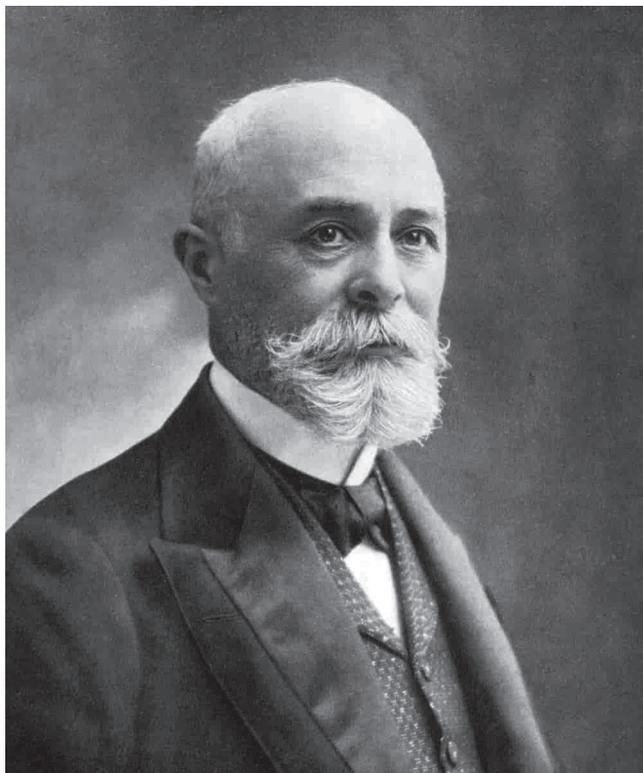
Il primo marzo 1896, nel suo laboratorio parigino, il fisico Henri Becquerel fece una scoperta che segnò l'inizio di una vera epopea, quella della radioattività; quell'epopea, nel giro di nemmeno mezzo secolo, avrebbe cambiato il modo in cui immaginiamo le guerre e ci prepariamo ad esse. Quell'epopea mise a disposizione energie inimmaginabili, portò a realizzare il più complicato impianto tecnologico mai prodotto e nel contempo aprì la strada per la possibile autodistruzione dell'umanità.

In questo articolo ci concentreremo<sup>1</sup> sulle conseguenze di quella scoperta, che hanno portato in pochi decenni a cambiare le prospettive umane in fatto di conflitti, di generazione di incredibili quantità di energia da piccoli volumi di "combustibile", di potenti nuove metodiche di indagine medica, oltre ad aver aperto anche la strada all'esplorazione dello spazio profondo, ai limiti del sistema solare e anche oltre.

I lustri a cavallo del 1900 costituiscono, per la fisica, un periodo di eccezionali ed imprevisi passi in avanti, proprio nel momento in cui sembrava che il lavoro iniziato da Galilei e portato avanti poi da Newton e successori fosse vicino al termine, ad avere cioè capito tutto quello che nel mondo fisico c'era da sapere. Nel 1895 si individuarono i raggi X; nell'anno successivo la radioattività; in quello dopo l'elettrone. Al cambio di secolo, con Planck, iniziò la teoria quantistica e nel 1905 venne pubblicata la relatività speciale di Einstein. Queste scoperte non solo hanno cambiato profondamente la nostra immagine del mondo fisico, ma hanno anche avuto straordinarie applicazioni per la vita di ognuno di noi, come ben capiamo immediatamente guardandoci in giro, ed in particolare per la diffusissima presenza oggigiorno di quegli innumerevoli apparati che chiamiamo *elettronici*.

---

<sup>1</sup> Tratteremo solo dell'energia nucleare da fissione. Quella da fusione è ancora molto lontana dall'essere utilizzabile; inoltre, quando diverrà disponibile, è probabile che risulterà economicamente e socialmente non competitiva rispetto alle rinnovabili.



1. Henri Becquerel,  
scopritore della  
radioattività.

Fu proprio in quegli anni, a cavallo del cambio di secolo, tra il XIX ed il XX, che iniziammo a capire come davvero erano fatti gli atomi, quegli enti già immaginati dagli antichi filosofi greci, come entità indivisibili fondamentali, che invece oggi sappiamo essere costituiti da un nucleo pesante circondato da particelle assai più leggere; nel nucleo troviamo *protoni*, con carica elettrica positiva, e anche, nella maggior parte degli atomi, anche particelle elettricamente neutre (per questo chiamate *neutroni*<sup>2</sup>). Attorno al nucleo carico positivamente ruotano poi, in modo che ricorda alla lontana un sistema solare in miniatura, un certo numero di elettroni, carichi negativamente. Quando gli elettroni ed i protoni numericamente si equivalgono, l'atomo risulta elettricamente neutro; è questa la situazione che normalmente troviamo attorno a noi alla superficie

---

<sup>2</sup> Scoperte solo nel 1932 dal fisico inglese James Chadwick, costituiscono la "colla" che tiene assieme i protoni, che altrimenti tenderebbero ad allontanarsi gli uni dagli altri, per effetto della repulsione elettrostatica che si esercita tra cariche dello stesso segno.

del nostro pianeta. È poi la condivisione di elettroni tra atomi diversi che permette la formazione delle molecole di tutti i composti chimici. Scoprendo le proprietà dei diversi atomi e dei loro componenti, la comunità degli scienziati e dei tecnologi è riuscita a rendere possibili cose che all'inizio del secolo scorso sarebbero sembrate niente meno che fantascientifiche. E come nella migliore fantascienza, le invenzioni possono essere esaltanti ma anche spaventose.

## La radioattività

Con radioattività intendiamo quei fenomeni che causano la trasformazione spontanea (radioattività naturale) o a seguito di un intervento esterno (radioattività artificiale) di un nucleo atomico in un differente nucleo<sup>3</sup>; questa trasformazione è accompagnata dall'emissione di rilevantissime quantità di energia, grosso modo un milione di volte superiori a quelle proprie delle reazioni chimiche<sup>4</sup>.

Questa energia può presentarsi sotto forma di una particella alfa<sup>5</sup> ( $\alpha$ ) o beta<sup>6</sup> ( $\beta$ ), di raggi gamma<sup>7</sup> ( $\gamma$ ) o di neutrini (indicati con la lettera greca "nu":  $\nu$ ).

---

<sup>3</sup> Si dice che il nucleo originario "decade" nel nucleo figlio: in un certo senso la radioattività realizza l'antico sogno degli alchimisti, di cambiare un elemento in un altro. Con i moderni acceleratori di particelle oggi saremmo davvero in grado di cambiare il piombo in oro, ma economicamente non converrebbe, data l'onerosità del processo.

<sup>4</sup> Pertanto, al fine di indicare queste energie non si usa l'elettronvolt (eV) ma il megaelettronvolt, un milione di volte maggiore (MeV).

<sup>5</sup> Si dice particella alfa l'insieme di due protoni e due neutroni (come nel nucleo dell'atomo di elio) in movimento ad altissima velocità. Se la sostanza radioattiva originaria è costituita da un solo tipo di nucleo, le particelle alfa emesse hanno tutte la medesima energia. Data la loro carica elettrica di +2 sono poco penetranti, interagendo esse molto fortemente con la materia bersaglio; può già bastare lo spessore di un foglio di carta per fermarle, o un tragitto in aria di pochi centimetri. Questo non vuol però dire che non siano molto pericolose, se colpiscono i tessuti viventi [come nel caso del comunissimo gas radon e delle cellule polmonari; si veda l'articolo "Radon: una minaccia naturale nelle nostre case", di M. Elena e A. Valentini, apparso alle pagg. 135-180 nella Serie X, vol. I, B (2019) di questa stessa pubblicazione], dato che tutta la loro elevata energia va depositata in uno spessore molto piccolo, causando al tessuto un danno rilevante.

<sup>6</sup> Si dice particella beta un elettrone in movimento ad altissima velocità (esistono anche raggi  $\beta^+$ , formati da elettroni positivi, o positroni); data la loro carica unitaria sono più penetranti delle particelle alfa; percorrendo alcuni metri in aria; per fermarli bastano anche alcuni millimetri di alluminio e qc centimetro di materiale biologico. Questi elettroni prodotti nel decadimento radioattivo presentano, per una data sostanza radioattiva, una varietà di energie, e questo risulta incompatibile con i principi della conservazione dell'energia e del momento angolare; ciò portò nel 1930 il fisico Wolfgang Pauli a proporre l'esistenza di una nuova particella dalle insolite caratteristiche, oggi nota come neutrino.

<sup>7</sup> I raggi gamma sono una forma assai energetica di "luce", cioè di radiazione elettromagnetica. Data la loro mancanza di carica elettrica, sono estremamente penetranti; per bloccarli sono necessari spessori di piombo di alcuni centimetri.



2. Placca commemorativa posta nel luogo dove venne scoperta la radioattività (rue Cuvier 47 a Parigi, già Laboratorio di fisica applicata del Museo di Scienze Naturali).<sup>8</sup>

Le particelle e le onde elettromagnetiche molto energetiche emesse nei decadimenti radioattivi vengono genericamente dette “*radiazioni ionizzanti*”, in quanto riescono a strappare uno degli elettroni che ruotano attorno al nucleo di un atomo bersaglio (“ionizzazione”). La parola “radiazione” deriva dal latino *radius*, e indica come esse tendano a viaggiare diritte (ovviamente le particelle alfa e beta, essendo cariche, vengono deviate dai campi elettrici e, se in movimento, anche da quelli magnetici). Le sperimentazioni hanno mostrato una caratteristica fondamentale dei “*decadimenti*” radioattivi dei singoli atomi: essi sono assolutamente indipendenti tra di loro ed avvengono secondo leggi esclusivamente statistiche. Ciò vuol dire che, fissata una certa quantità di sostanza radioattiva, possiamo sottoporla a qualsivoglia trattamento chimico o fisico, ma il numero di decadimenti per unità di tempo non varia; è una proprietà fondamentale di quel tipo di nucleo atomico. Nel decadimento radioattivo il nucleo “dimagrisce”, perdendo massa ed energia e si trasforma in un altro nucleo. Il tempo necessario perché metà del materiale sia decaduto viene detto *tempo di dimezzamento* ( $T_{1/2}$ ) ed ha valori anche molto diversi da nucleo a nucleo. Per dare qualche esempio, il polonio 214 ha

<sup>8</sup> (CC BY-NC-ND 2.0).



3. Lise Meitner e Otto Hahn nel loro laboratorio a Berlino nel 1913.

$T_{1/2}$  di 164 microsecondi; il polonio 218 di 3,1 minuti; il radon di 3,8 giorni; il plutonio 239 di 24.000 anni; l'uranio 235 di 700 milioni di anni; l'uranio 238 di 4,5 miliardi di anni. In base al  $T_{1/2}$  si può avere un'idea immediata, anche se solo approssimativa, del tipo di attività (numero di decadimenti al secondo) di una certa quantità di elemento radioattivo; tempo di dimezzamento breve, alta attività, e viceversa. Il decadimento spontaneo dei materiali radioattivi costituisce un fattore importante nell'affrontare i casi di inquinamento ambientale dovuti a questi materiali; basterebbe infatti lasciar trascorrere un adeguato numero di tempi di dimezzamento per ridurre fin quasi a scomparire qualsiasi polluzione; cosa evidentemente fattibile solo nel caso di isotopi a vita piuttosto breve (giorni, settimane o mesi), più complicata nel caso di  $T_{1/2}$  di decine d'anni (come nel caso del cesio 137 emesso in abbondanza al tempo del disastro di Chernobyl), praticamente impossibile per isotopi a vita lunga.

Le radiazioni emesse nei decadimenti hanno rappresentato lo strumento fondamentale per sondare la struttura profonda degli atomi, che alla vigilia del XX secolo non era ancora stata chiarita; nel 1891 H. Hertz aveva scoperto che un fascetto di elettroni veloci, incidente su un sottilissimo foglio metallico (spessore di circa  $1\ \mu\text{m}$ ) riesce in parte ad attraversarlo senza subire alcuna deviazione; se ne dedusse che gli atomi erano piuttosto trasparenti per queste particelle, le cui dimensioni dovevano essere davvero minuscole. Il fatto che il numero di elettroni deviati crescesse proporzionalmente al numero atomico del bersaglio metallico fece inoltre capire che la deviazione era dovuta alla repulsione coulombiana tra gli elettroni incidenti e quelli del bersaglio. All'inglese E. Rutherford spettò nel 1908 la scoperta che le particelle alfa vengono fortemente deviate nel

passaggio attraverso la materia bersaglio, in misura tanto maggiore quanto più elevato è il numero atomico della sostanza attraversata. Modelli teorici mostrarono come i dati sperimentali fossero interpretabili solo nel caso che all'interno degli atomi ci fosse un piccolissimo nucleo carico positivamente; le sue dimensioni erano all'incirca un centomillesimo delle dimensioni dell'atomo.<sup>9</sup>

Bombardando con protoni e particelle alfa i nuclei di certi atomi, si vide come essi talora si trasformassero: ad esempio, il litio 7, colpito da un protone, si trasformava in due nuclei di elio; si apriva la possibilità affascinante di cambiare la materia, da un tipo di atomo ad un altro, in una specie di moderna alchimia. Ma, come sempre, le cose non sono mai troppo facili; la carica elettrica delle particelle alfa rende difficile bombardare nuclei molto pesanti, ricchi di protoni e quindi anch'essi con una forte carica elettrica positiva; l'unico modo per riuscirci è di aumentare molto l'energia delle particelle, cosa che richiedeva macchine acceleratrici di grande potenza, non facilmente disponibili. Per questo, al fine di riuscire efficacemente a bombardare i nuclei pesanti, all'inizio degli anni '30 i fisici impiegarono i neutroni, da poco scoperti; essendo privi di carica riuscivano facilmente a penetrare nel cuore degli atomi; si capì così che, ad esempio, il bombardamento dei nuclei di azoto 14 con un neutrone (come avviene in natura negli strati alti della nostra atmosfera), produce carbonio 14 (la cui radioattività è alla base di un potente metodo di datazione archeologica).

La possibilità di bombardare nuclei pesanti con dei neutroni portò nel dicembre 1938 Otto Hahn, Lise Meitner e Fritz Strassmann a scoprire un fenomeno che avrebbe avuto conseguenze epocali: la fissione nucleare.

## La fissione nucleare

Il bombardamento con neutroni induceva piccoli cambiamenti nei nuclei bersaglio e conseguentemente nel numero atomico e nel peso atomico dei rispettivi atomi. La loro posizione si discostava poco, nella Tabella Periodica degli Elementi di Mendeleev, da quella del progenitore. Ma in un laboratorio in Germania si accorsero che, in un caso, i prodotti del bombardamento avevano grosso modo la metà del peso e della carica del nucleo originario; inoltre l'energia

---

<sup>9</sup> Le dimensioni del nucleo sono di circa  $10^{-13}$  cm; per dare un'idea di quanto piccolo sia questo numero, immaginiamoci di ridurre una persona alle dimensioni del nucleo atomico; in tal caso una catena umana di tutta la popolazione umana, di quasi 8 miliardi di individui (che, se dovessimo contarli uno a uno, impiegando un secondo ciascuno, ci vorrebbe qualche secolo), arriverebbe ad essere lunga solo circa un centesimo di millimetro.

emessa nel nuovo processo (battezzato “*fissione*”) era straordinariamente alta: centinaia di volte superiore a quella, già enorme, tipica dei fenomeni radioattivi. Ci si rese conto in seguito che il nuovo fenomeno si era già verificato nel corso di esperimenti effettuati dal gruppo di fisici italiani guidati da Enrico Fermi, solo che gli scienziati non se ne erano accorti. La fissione avveniva solo nel caso di speciali nuclei bersaglio, ad esempio nell’uranio 235 (U235)<sup>10</sup>.

I visionari più fantasiosi intuirono che la nuova scoperta apriva la via a prospettive fino ad allora del tutto impensabili: se il bombardamento neutronico di certi speciali nuclei poteva produrre enorme energia, non sarebbe stato possibile utilizzarla a fini pratici? Forse anche per produrre un esplosivo di potenza inaudita? Passò poco tempo prima che una cappa di segretezza calasse su tutte le notizie riguardanti la fisica nucleare, che sino ad allora erano state pubblicate liberamente sulle riviste scientifiche internazionali, disponibili in tutte le università. Faceva capolino l’idea di una superbomba. E il periodo era tale che una prospettiva di questo genere non poteva lasciare indifferenti; già si sentivano soffiare nell’aria venti di guerra ed infatti l’anno successivo sarebbe scoppiato il secondo conflitto mondiale.

### La reazione a catena e la bomba atomica

Negli Stati Uniti, Leo Szilard, un fisico ungherese ebreo emigrato da poco dall’Europa per motivi razziali, studiando la scoperta degli scienziati tedeschi intuì che con essa si sarebbe potuto realizzare un nuovo rivoluzionario ordigno bellico. Bisognava sfruttare il fatto che, nella fissione del nucleo di uranio 235, vengono emessi non solo i frammenti di fissione (i due grossi pezzi in cui si spezza il nucleo), ma anche qualche neutrone. Szilard immaginò che questi neutroni potessero venir impiegati per “fissionare” a loro volta altri nuclei di uranio 235, realizzando così quella che sarebbe diventata nota come “*reazione a catena*”.

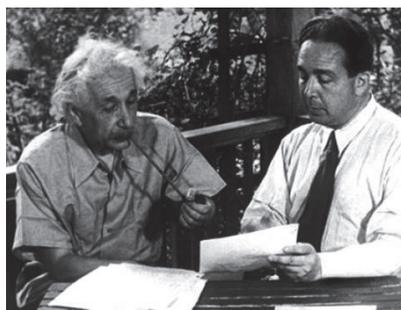
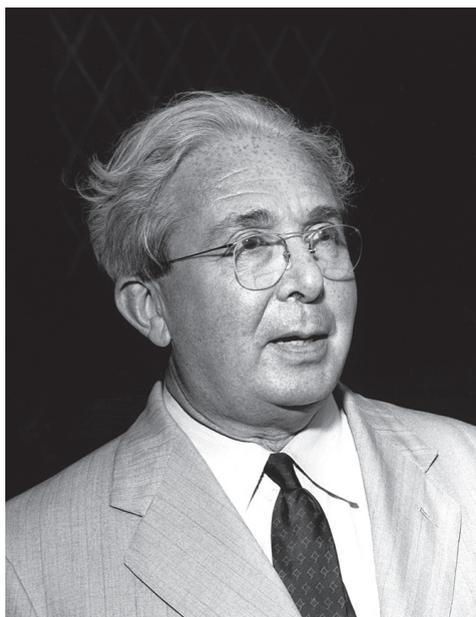
Questa prospettiva gli apparve spaventosa, proprio per le sue vicissitudini personali di ebreo perseguitato dalle politiche nazifasciste. Se fossero stati i tedeschi a dotarsi per primi della superbomba, Hitler avrebbe potuto conquistare il mondo; uno scenario da incubo per il povero Szilard.

---

<sup>10</sup> Il numero indica la massa atomica di quel nucleo; è la somma dei 92 protoni e dei 143 neutroni presenti in esso. Subiscono fissione anche isotopi dei seguenti elementi: torio, nettunio, curio, americio, plutonio. Dalla fissione di un kg di U235 si ottiene tanta energia quanto bruciando 3.000 t di carbone; a parità di peso, un rapporto di 1:3.000.000.

L'ungherese pensò di avvisare il governo americano del pericolo che il mondo libero correva, nel momento in cui erano proprio gli scienziati tedeschi ad aver scoperto la fissione nucleare; forse anche loro avevano avuto la sua stessa idea di costruire una superbomba; forse i nazisti avevano già iniziato programmi di armamento nucleare. Ma Szilard si rendeva conto di non essere un personaggio famoso e di non aver modo di arrivare ai massimi gradi dell'establishment americano per dar loro l'allarme. Però conosceva un altro emigrato che, quello sì, famoso lo era davvero, un ebreo come lui, il più prestigioso dei premi Nobel.

Il fisico Albert Einstein si era pure lui trasferito negli Stati Uniti per motivi razziali ed era universalmente noto come il più grande genio del secolo. Szilard gli confidò i suoi timori, che stimolarono il bravo Albert ad agire. Firmò una lettera (stilata da Szilard; era datata 2 agosto 1939) al presidente americano Roosevelt, in cui esplicitava i loro timori ed avanzava la proposta che l'America si impegnasse a verificare se davvero, con la fissione nucleare,



4. Leo Szilard.<sup>11</sup>

5. Einstein e Szilard.<sup>12</sup>

<sup>11</sup> La foto mostra Szilard circa nel 1960. Photo credit: US DOE.

<sup>12</sup> (CC BY-SA 4.0)

Albert Einstein  
Old Grove Rd.  
Hawsum Point  
Pecnic, Long Island  
August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,  
President of the United States,  
White House  
Washington, D.C.

Sirs

Some recent work by E. Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium, by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. How it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable - though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.

-2-

The United States has only very poor ores of uranium in moderate quantities. There is some good ore in Canada and the former Czechoslovakia, while the most important source of uranium is Belgian Congo.

In view of this situation you may think it desirable to have some permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust with this task a person who has your confidence and who could perhaps serve in an unofficial capacity. His task might comprise the following:

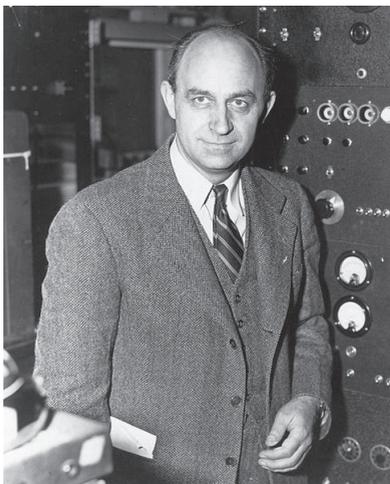
a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and put forward recommendations for Government action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States;

b) to speed up the experimental work, which is at present being carried on within the limits of the budgets of University laboratories, by providing funds, if such funds be required, through his contacts with private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining the co-operation of industrial laboratories which have the necessary equipment.

I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Under-Secretary of State, von Weizsäcker, is attached to the Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin where some of the American work on uranium is now being repeated.

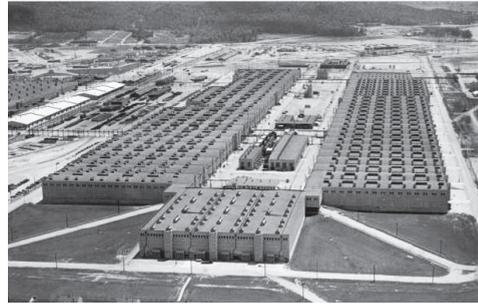
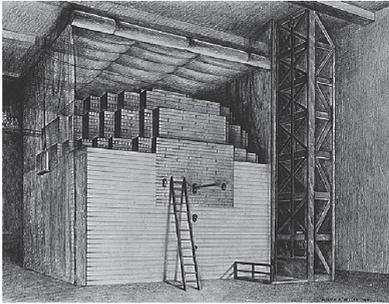
Yours very truly,  
*A. Einstein*  
(Albert Einstein)

## 6. La lettera di Einstein a Roosevelt.



## 7. Enrico Fermi.<sup>13</sup>

<sup>13</sup> Cortesia degli US National Archives (Identifier 558578).



8. La pila di Fermi sotto lo stadio di Chicago.

9. Il complesso K-25 dell'impianto di diffusione gassosa di Oak Ridge.<sup>14</sup>

non si potesse realizzare una superbomba. La lettera di Einstein venne consegnata al presidente poco tempo dopo; ne derivò un tavolo di lavoro ad hoc che però non produsse grandi e tempestivi risultati, tanto che Einstein ritenne di spedire una seconda lettera a Roosevelt il sette marzo del 1940; questa contribuì a mettere in moto uno sforzo di ricerca e sviluppo senza precedenti nella storia umana, che di lì a un lustro avrebbe prodotto un ordigno capace di cambiare il modo in cui tutta l'umanità si immaginava la guerra.

Non erano passati nemmeno 50 anni dalla scoperta di Becquerel e ora ci si accingeva a realizzare un'arma capace di distruggere in un istante una città intera. Ma si trattava di una scommessa, oltretutto difficilissima; infatti le incognite davanti agli scienziati e agli ingegneri erano enormi; impossibile risultava valutare a priori la probabilità di riuscita del "Progetto Manhattan" (così venne battezzato il programma di ricerca e sviluppo che avrebbe mobilitato le migliori teste pensanti d'America, in gran parte rappresentate da emigrati dal vecchio continente, fuggiti da esso a seguito delle politiche nazifasciste delle potenze contro cui ora si accingevano a lavorare). Si costruirono dal nulla imponenti impianti, dedicati a produrre i materiali necessari per la superbomba: uranio fortemente arricchito e plutonio. Vide così la luce anche il primo reattore nucleare della storia, che entrò in funzione sotto lo

<sup>14</sup> In questa foto che risale a circa l'anno 1950 vediamo il primo grande impianto di arricchimento dell'uranio tramite diffusione gassosa. In esso si ottenne l'uranio per la bomba atomica che distrusse Hiroshima. L'edificio a forma di U aveva una superficie di 15 ettari e conteneva più di 3.000 stadi di arricchimento, con 600 km di tubature. Venne completamente demolito nel 2013.

stadio di Chicago il due dicembre 1942. Il messaggio in codice con cui si avvisò il presidente Roosevelt del successo dell'impresa diceva: "Il navigatore italiano è sbarcato nel nuovo mondo". Ci si riferiva al fatto che il gruppo di scienziati che per primo realizzò la *reazione a catena controllata* era diretto da Enrico Fermi<sup>15</sup>.

Questo primo reattore aveva una struttura semplicissima (Figura 8): un parallelepipedo di mattonelle di grafite al cui interno venivano inserite barre di uranio come "combustibile" e altre barre di assorbitori di neutroni, usate per controllare il processo di fissione a catena. Appena verificato il concreto funzionamento della "pila atomica"<sup>16</sup> di Fermi si procedette a costruire ad Oak Ridge, nel Tennessee, l'impianto pilota X-10, capace di funzionare ininterrottamente, primo passo per produrre un quantitativo di plutonio sufficiente a studiare le proprietà di questo elemento chimico artificiale, col quale si sarebbe poi costruita la bomba che avrebbe distrutto Nagasaki. Il reattore X-10 entrò in funzione il 4 novembre 1943.<sup>17</sup> Nel frattempo, sempre ad Oak Ridge, enormi impianti furono costruiti per procedere all'arricchimento dell'uranio (Figura 9). Un reattore ancora più grande, indicato con la lettera "B", della potenza di 250 MW termici, venne realizzato nello stato occidentale di Washington e cominciò a produrre plutonio il 6 novembre 1944. Altri due reattori nella stessa località, indicati con le lettere "D" ed "F" entrarono in attività nel dicembre '44 e nel febbraio '45. Il plutonio prodotto in questi tre impianti venne impiegato per realizzare la prima esplosione nucleare *sperimentale* ad Alamogordo il 16 luglio 1945 e quella *bellica* su Nagasaki il 9 agosto di quello stesso anno.

I reattori di cui sopra erano abbastanza simili a quello originale di Fermi: tubazioni all'interno di grandi cumuli di grafite permettevano l'inserimento di lattine di alluminio contenenti l'uranio; i neutroni generati nelle fissioni venivano rallentati (in gergo: "moderati") dalla grafite e consentivano la reazione a catena. Il calore prodotto veniva asportato da un forte flusso d'acqua (nel reattore "B" la portata era di 1,9 metri cubi al secondo) che lambiva le lattine del combustibile.

---

<sup>15</sup> Anche lui emigrato negli Usa, avendo la moglie ebrea.

<sup>16</sup> Nome generico usato nei primi anni dell'era atomica per indicare i reattori nucleari ed ora desueto.

<sup>17</sup> <https://www.atomicheritage.org/history/nuclear-reactors>

## L'arricchimento dell'uranio ed il rischio di proliferazione

Abbiamo già detto che la fissione nucleare e la possibilità di realizzare una reazione a catena avvengono solo impiegando speciali nuclei, detti *fissili*. Il primo a venire utilizzato nella pila di Fermi fu l' $U^{235}$ . Bisogna sapere che, in natura, l'uranio è abbastanza diffuso,<sup>18</sup> ma la stragrande maggioranza di questo è uranio 238, quindi con 92 protoni e 146 neutroni.<sup>19</sup> La possibilità di realizzare una reazione a catena incontrollata, *di tipo esplosivo*, richiede di aumentare la concentrazione di  $U^{235}$  fino a livelli superiori al 90%, in un processo detto di arricchimento<sup>20</sup>. Date le caratteristiche chimiche essenzialmente identiche dell' $U^{235}$  e dell' $U^{238}$ , per separare questi due isotopi ci si deve basare sulla loro lieve differenza di massa: tre parti su 238 (corrisponde all'1,26%). Nel corso del tempo si sono sfruttate varie tecniche fisiche, tra cui quelle impieganti: caratteristiche elettromagnetiche, spettrometria di massa, separazione in fase plasma, trattamenti al laser, diffusione termica e gassosa, centrifugazione. Sono le ultime due ad essere state maggiormente usate su scala industriale in tempi recenti. Oggi diversi paesi dispongono di impianti di arricchimento.<sup>21</sup>

La maggior parte dei reattori nucleari attualmente esistenti impiegano combustibile arricchito fino a circa il 4% in  $U^{235}$ ; il resto è  $U^{238}$ . La reazione a catena coinvolge solo l' $U^{235}$ , che viene quindi consumato. I neutroni possono però anche colpire i nuclei di  $U^{238}$ , venendovi assorbiti. Si viene quindi a formare un nuovo nucleo, il plutonio 239<sup>22</sup> ( $Pu^{239}$ ), anche esso fissile ed adatto quindi a sostenere una reazione a catena. Da qui un'idea eccezionale: disporre attorno al nocciolo del reattore di un rivestimento di

---

<sup>18</sup> È più diffuso di elementi a noi familiari come l'argento, l'oro o il mercurio. È invece piuttosto raro trovarlo concentrato in minerali che siano economicamente e tecnicamente recuperabili.

<sup>19</sup> Si parla di isotopi (dal greco "nello stesso posto") dell'uranio, che nella Tabella di Mendeleev occupano la stessa casella, ma hanno peso leggermente diverso in base al diverso numero di neutroni presenti nel loro nucleo. L' $U^{235}$  rappresenta solo lo 0,7% del totale; il resto (99,3%) è  $U^{238}$ . Il differente numero di neutroni (si ricorderà che funzionano da "colla" per tenere assieme i protoni elettricamente positivi) fa sì che il tempo di dimezzamento dei vari isotopi radioattivi di un elemento possa essere molto differente. Nel caso dell'uranio 238 questo è di 4,5 miliardi di anni, mentre per l' $U^{235}$  è di 0,7 miliardi di anni. Ecco uno dei motivi per cui di  $U^{235}$  in natura ce ne è di meno; molti più nuclei di  $U^{235}$  sono infatti decaduti nel corso delle ere geologiche, rispetto a quelli di  $U^{238}$ .

<sup>20</sup> Il materiale di risulta, con una concentrazione di  $U^{235}$  ormai nettamente inferiore allo 0,7% viene detto uranio impoverito.

<sup>21</sup> Argentina, Brasile, Cina, Francia, Germania, India, Iran, Giappone, Olanda, Nord Corea, Pakistan, Russia, Gran Bretagna, USA. Alcune altre nazioni hanno partecipazioni negli impianti realizzati in altri paesi.

<sup>22</sup> Il processo dettagliato è il seguente:  $U^{238} + n \rightarrow U^{239} + \beta^- \rightarrow Np^{239} + \beta^- \rightarrow Pu^{239}$ .

U238 per produrre un quantitativo di materiale fissile anche superiore a quello inizialmente presente; è questo all'origine dell'idea di realizzare reattori cosiddetti surgeneratori, o *autofertilizzanti*. La loro realizzazione è stata caratterizzata da diverse difficoltà, ad esempio con gli ormai chiusi impianti francesi Phénix e Superphénix, ma il fascino di questa possibilità rimane forte.

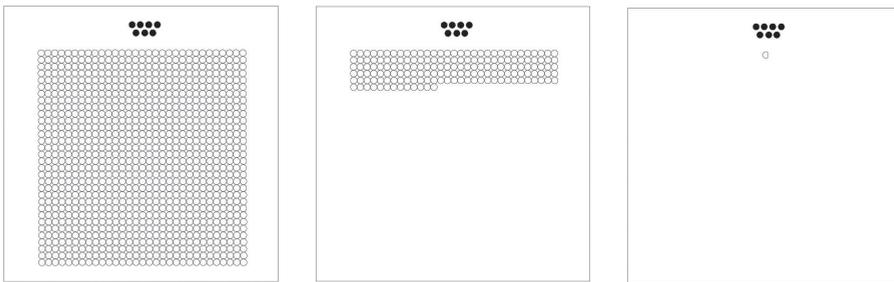
Affrontiamo ora un aspetto fondamentale dal punto di vista della politica internazionale, relativamente alla possibilità di proliferazione di armi di distruzione di massa. È piuttosto facile realizzare il meccanismo “a cannone” per l'innesco della reazione a catena esplosiva che avviene nel cuore di una bomba atomica del tipo di quella di Hiroshima; probabilmente è fattibile anche a livello di un gruppo di dilettanti provetti. Si capisce quindi che l'ostacolo principale per chi (organizzazione terroristica, stato canaglia, ecc.) volesse dotarsi di una bomba tipo Hiroshima è proprio l'ottenimento dell'uranio fortemente arricchito (>90% di U235, il cosiddetto *highly enriched uranium*, HEU, ovvero *weapon-grade uranium*).

A questo riguardo c'è un aspetto importante ma apparentemente contraddittorio e poco noto agli stessi politici che si occupano di proliferazione. È il fatto che, una volta raggiunto il 4% di arricchimento in U235, è cosa molto veloce e banale procedere ulteriormente ad arricchire fino al livello necessario (oltre il 90%) per ottenere il materiale fissile indispensabile per costruirsi una bomba. Da qui le preoccupazioni di diversi stati nei confronti del programma di arricchimento portato avanti dall'Iran in anni recenti; le autorità di quel paese sostengono che esse vogliono solamente disporre autarchicamente del combustibile per il loro crescente programma nucleare civile, per il quale però è sufficiente un arricchimento dell'uranio di soli pochi per cento. I “nemici” dell'Iran sanno che in qualunque momento, usando le stesse apparecchiature, le autorità di Tehran potrebbero facilmente e rapidamente spingere l'arricchimento fino ai livelli richiesti per l'HEU; da qui le loro preoccupazioni. Nelle prossime poche righe offriamo al lettore curioso la spiegazione più semplice possibile di questo fatto così fondamentale e apparentemente contro intuitivo.

Prendiamo in considerazione le Figure 10, 11 e 12; esse permettono di visualizzare come la quantità di materiale, su cui devono operare i macchinari per l'arricchimento, cali drasticamente quando si passa dal lavorare sull'uranio naturale a quello arricchito al 4%. Essendosi così fortemente ridotto il materiale da trattare, l'arricchimento dal 4 al 90 e rotti per cento è cosa che si fa in davvero poco tempo. Ecco perché tenere sotto controllo gli impianti di arricchimento è compito così critico se si vuole evitare che una nazione possa utilizzare clandestinamente a fini militari le tecnologie nucleari civili.

Si tenga anche presente che, quanta meno energia un impianto di arricchimento impiega, tanto più economico è farlo funzionare, e più difficile è

anche individuarlo nel caso qualcuno volesse eseguire questa operazione in segreto; questi due motivi spiegano perché in decenni recenti si è preferito puntare sul processo di arricchimento impiegante centrifughe, che richiedono poca elettricità per il loro funzionamento, almeno rispetto alla diffusione gassosa. Non sorprenderà, quindi, che paesi tipo la Corea del Nord o l'Iran, impegnati nel settore nucleare da relativamente poco tempo, abbiano optato per le centrifughe, dato che le loro attività nucleari sono pure oggetto di aspro confronto politico a livello internazionale.



10, 11, 12. Perché passare dall'arricchimento del 4% al 90% in U235 richiede meno lavoro che per andare dallo 0,7% al 4%.

I circoletti neri rappresentano l'U235; quelli bianchi l'U238. La Figura 10 mostra l'uranio naturale, dove l'U235 è solo lo 0,7%. La quantità totale di circoletti nella figura 11, corrispondente ad un arricchimento del 4%, è ovviamente molto inferiore; si può quindi capire intuitivamente, dato che il materiale da elaborare è calato fortemente, come il lavoro di arricchimento che serve per passare dal 4 al 90% di arricchimento in U235 (Figura 12) sia assai inferiore a quello che c'è voluto per andare dallo 0,7% al 4%.

(Si ringrazia l'amico Piergiorgio Pasquali per la realizzazione di queste tre figure).

## Il riprocessamento del combustibile irraggiato ed il rischio di proliferazione

Quando il combustibile nucleare è stato per un certo tempo (circa un paio d'anni) nel nocciolo di un reattore producendo energia (combustibile "irraggiato"), esso viene sostituito. A questo punto esso contiene ancora materiale fissile: sia un po' di U235 non ancora "bruciato" (nel caso dei reattori ad acqua leggera più diffusi si parla di circa l'1% di U235, rispetto al 4% nel combustibile pre irraggiamento), sia il plutonio che si è prodotto per bombardamento neutronico dell'U238 (anche qui siamo sull'1% del materiale estratto; di questo 1%, più della metà è Pu239, un isotopo dalle caratteri-

stiche adatte per sostenere una reazione a catena). Questi materiali possono venir recuperati con il cosiddetto *riprocessamento*.<sup>23</sup>

Si noti che nel caso resti nel reattore a lungo, il plutonio 239, sottoposto a bombardamento neutronico, tende a venir trasformato in Pu240, Pu241 e Pu 242 e altri nuclei (cosiddetti attinici), le cui caratteristiche non sono adatte né a scopi civili né militari. Per evitarne la formazione, cosa importante soprattutto per applicazioni belliche, si deve estrarre frequentemente il combustibile irraggiato dai reattori e procedere al recupero del Pu239. Si capisce quindi come i reattori costruiti principalmente per produrre plutonio per scopi militari abbiano caratteristiche tali da agevolare l'estrazione del plutonio, come nei reattori tipo l'RBMK sovietico o il Candu canadese. La mancanza di un involucro di contenimento robusto (che avrebbe intralciato le operazioni di sostituzione frequente del combustibile) nell'impianto RBMK di Chernobyl, permise nel 1986 ad una gran quantità di sostanze radioattive di fuoriuscire nell'atmosfera al momento dell'esplosione del reattore (si veda anche l'Appendice 1), causando il primo drammatico caso di inquinamento da radiazioni su scala continentale.

Il plutonio 239 fissile, ottenuto con il riprocessamento delle barre di combustibile irraggiato, può venir aggiunto all'uranio 235 per sostenere la reazione a catena in una centrale. Si parla allora di *combustibile MOX* (da "mixed oxides", ossidi misti; sia l'uranio che il plutonio sono infatti in questa forma chimica:  $UO_2$  e  $PuO_2$ ). Il combustibile MOX contiene una percentuale di plutonio variabile tra l'1,5% in peso fino anche al 30%, a seconda del tipo di reattore che si considera; può essere una alternativa all'uranio debolmente arricchito anche nei reattori di seconda generazione ed infatti in Francia il MOX è usato in 24 centrali, dove produce circa il 10% dell'elettricità nazionale. L'impiego del MOX, fino a costituire circa il 50% di tutto il combustibile, non fa cambiare le caratteristiche operative dei reattori, sebbene richieda che l'impianto sia stato progettato tenendone conto, o comunque leggermente adattato a questo scopo; ad esempio si richiede un numero maggiore di barre di controllo. Se invece si vuole che la percentuale di MOX superi il 50%, i cambiamenti da apportare ai reattori divengono significativi e quindi i progetti devono essere differenti.<sup>24</sup>

---

<sup>23</sup> A livello mondiale ogni anno si produce nei reattori un centinaio di tonnellate di plutonio. Considerato che ne basta qualche chilo per realizzare una bomba atomica, si vede come i modi per tenerlo sotto controllo, oppure per eliminarlo, siano di fondamentale importanza.

<sup>24</sup> <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox.aspx>.

Il riprocessamento del plutonio rende ottenibile un 12% *extra di energia*, rispetto a quella disponibile nell'uranio 235 iniziale. Se col riprocessamento si recupera anche l'1% di U235 ancor presente nel combustibile esaurito, questa cifra arriva al 20%. Esistono diverse varianti operative per effettuare il riprocessamento; quella più diffusa è chiamata PUREX (Plutonium URanium EXtraction), ed impiega acidi forti per sciogliere il materiale e poi, con semplici<sup>25</sup> procedimenti chimici, procede alla separazione degli elementi di interesse. In questo modo non solo si recupera il materiale ancora impiegabile per generare reazioni a catena (U235 e Pu239), ma si riduce anche la radioattività del combustibile esaurito, dovuta principalmente ai frammenti di fissione e alla presenza di attinidi. Inoltre usando il MOX si riduce il volume del combustibile esaurito; da sette elementi di combustibile se ne ottiene infatti uno di MOX, oltre ad un certo quantitativo di scorie vetrificate ad alta attività, per un volume e un peso ridotti a solo il 35%.<sup>26</sup>

Tabella 1: Capacità di riprocessamento commerciale nel mondo (t/anno).

Materiale da riprocessare	Paese e impianto	t/anno
Combustibile da reattori ad acqua leggera	Francia, La Hague	1700
	Russia, Ozersk (Mayak)	400
	Giappone (Rokkasho)	800 *
	<b>Totale (appross.)</b>	<b>2900</b>
Altri tipi di combustibile nucleare	GB, Sellafield (Magnox)	1500 §
	India (PHWR, 4 impianti)	260
	<b>Totale (appross.)</b>	<b>1760</b>
Capacità totale civile		<b>4660</b>

\* L'inizio attività è previsto per il 2022; § L'impianto Magnox di riprocessamento da 1500 t/anno è stato chiuso nel 2021.

<sup>25</sup> Semplici fino ad un certo punto, dato che si lavora su materiali altamente radioattivi e pericolosi anche dal punto di vista dell'avvelenamento chimico, ciò che impone di operare a distanza e con metodologie automatizzate.

<sup>26</sup> <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/mixed-oxide-fuel-mox.aspx>.

Tabella 2: Capacità di fabbricazione di combustibile MOX nel mondo nel 2020.

Paese (impianto)	t/anno
Francia (Melox)	195
Giappone (Tokai)	10
Giappone (J-Mox, Rokkasho)	140
Russia (MCC Zheleznogorsk)	60
<b>Totale</b>	<b>405</b>

## Bombe nucleari

L'energia nucleare oggi forse non sarebbe disponibile, o lo sarebbe divenuta solo molto più tardi di come in realtà successe, se non ci fossero state fortissime motivazioni militari (e i relativi abbondanti fondi) che spinsero a svilupparla in tempi rapidissimi.

Il progetto Manhattan ebbe ufficialmente inizio il 13 agosto del 1942 e costò circa 20 miliardi di dollari odierni. Nel corso del tempo arrivò ad impiegare oltre 130.000 persone. Dai fisici nucleari ai manovali edili, tutti operarono nella massima segretezza possibile, per permettere agli Stati Uniti di sviluppare il nuovo super ordigno; si dovettero escogitare metodi per l'arricchimento dell'uranio, progettare grandi reattori nucleari, sviluppare tecniche per il riprocessamento del combustibile (per estrarre il plutonio 239 formatosi per bombardamento neutronico a partire dall'U238), progettare le bombe (molto differenti nel caso di una bomba "a cannone"<sup>27</sup>, che impiegava uranio molto arricchito nell'isotopo 235, e nel caso di una bomba "a implosione"<sup>28</sup>, che impiegava Pu239<sup>29</sup>). Tutti compiti complessi e difficili

<sup>27</sup> Così detta perché due pezzi di uranio, ciascuno di massa inferiore a quella necessaria per ottenere l'esplosione ("massa critica") vengono sparati alla massima velocità uno contro l'altro; ciò basta ad innescare lo scoppio, in presenza di un neutrone che inizi la catena di reazioni. Questo neutrone viene generato da un piccolo dispositivo.

<sup>28</sup> Nella bomba ad implosione un certo quantitativo di plutonio 239, appena insufficiente ad ottenere l'esplosione, viene compresso in modo perfettamente simmetrico fino a superare la densità critica che permette di scatenare la reazione a catena. La compressione viene ottenuta disponendo "lenti" di esplosivo tutto attorno al cuore fissile della bomba. Quando le lenti sono fatte brillare, si genera una onda d'urto sferica che addensa il plutonio fino al valore desiderato.

<sup>29</sup> Ricordiamo che il plutonio non esiste attualmente in natura; se ce ne fosse stato quando la Terra si è formata, quattro miliardi e mezzo di anni fa, il suo tempo di dimezzamento relativamente breve (poche decine di migliaia di anni) gli ha permesso di scomparire ormai del tutto. L'unico

che non era per nulla scontato avrebbero avuto successo, almeno in tempi brevi. Le attività del progetto Manhattan proseguirono veloci e la mattina del 16 luglio del 1945 portarono alla prima esplosione atomica *sperimentale*, effettuata nel deserto del Nuovo Messico, vicino ad Alamogordo. Si trattava di una bomba al plutonio 239, nella quale un “cuore” sferico di questo elemento venne fortemente compresso dall’esplosione di un guscio di esplosivo che lo racchiudeva. In tal modo si poté superare la concentrazione critica di materiale fissile, che scatenò la reazione a catena. Una bomba che funzionava sullo stesso principio fu impiegata il 9 agosto dello stesso anno per colpire Nagasaki. Si noti come la bomba destinata a *Hiroshima non venne invece mai testata prima dell’uso bellico*, essendo gli scienziati assolutamente certi del suo funzionamento.

Oggi diverse nazioni posseggono ordigni nucleari; si veda la Tabella 3.

Tabella 3: Paesi in possesso di ordigni nucleari e stime al 2022 dei rispettivi arsenali atomici.<sup>30</sup>

Paese	Numero di testate nucleari (tra schierate e in riserva)
Russia	5.977
Usa	5.428
Cina	350
Francia	290
Gran Bretagna	225
Israele	90
India	160
Pakistan	165
Corea del Nord	20

Tutte le bombe nucleari utilizzano uranio 235 fortemente arricchito o plutonio 239 quasi puro. Le tecnologie per disporre di questi isotopi fissili sono praticamente identiche a quelle impiegate nella industria nucleare

modo per ottenerlo è di usare neutroni per bombardare isotopi ad esso vicini nella tabella periodica di Mendeleev; in particolare l’U238.

<sup>30</sup> <https://fas.org/issues/nuclear-weapons/status-world-nuclear-forces/>.

civile. Per questo si parla di *tecnologie a doppio uso* e la loro commercializzazione è sottoposta a regole e controlli, per evitare il rischio di proliferazione. Resta il problema che se un governo decide di “dirottare” a fini militari i materiali e il know how originariamente civili non c’è molto che si possa fare per evitarlo. A questo riguardo bisogna dire che la bomba atomica ormai è alla portata di qualunque nazione che possenga una discreta base industriale e tecnologica. La storia mostra come se ne siano dotati paesi non certo all’avanguardia, come il Pakistan, la Nord Corea, il Sud Africa<sup>31</sup>. Oggi grandi quantitativi di uranio fortemente arricchito e di plutonio 239 sono disponibili in diversi paesi. Nella Tabella 4 presentiamo alcuni dati al proposito.

Tabella 4: Quantità approssimative<sup>32</sup> di uranio fortemente arricchito nell’isotopo U235 (Weapon Grade Uranium).

Paese	U235 dal settore militare (t)	U235 dal settore civile (t)	Totale (t)
Russia	672	6	678
Usa	480	82	562
Francia	25	5	30
Cina	14	0,2	14,2
GB	22	0,7	22,7
Israele	0,3	0	0,3
Pakistan	3,9	0	3,9
India	5,2	0	5,2
N. Corea	0,7		0,7
Altri		15	15
<b>Totale</b>	<b>1220</b>	<b>110</b>	<b>1330</b>

<sup>31</sup> Al tempo della cessione del potere dal regime dell’apartheid alla maggioranza nera, il Sud Africa distrusse le sei bombe di cui disponeva, assieme a tutta la documentazione relativa.

<sup>32</sup> <https://fissilematerials.org/>. [https://www.recna.nagasaki-u.ac.jp/recna/en-fmdata/pu\\_2021](https://www.recna.nagasaki-u.ac.jp/recna/en-fmdata/pu_2021). Si noti che per una bomba atomica bastano circa 50 kg di U235.

Tabella 5: Quantità approssimative<sup>33</sup> di Pu239 separato disponibile in vari paesi.

Paese	Pu dal settore militare (t)	Pu dal settore civile (t)	Totale (t)
Russia	88	103	191
Usa	103	49	152
Francia	6	75	81
Cina	3	0	3
GB	3	116	119
Israele	1		1
Pakistan	0,5		0,5
India	8	0,5	8,5
N. Corea	0,04		0,04
Giappone		46	46
Altri		0,7	0,7
<b>Totale</b>	<b>148</b>	<b>390</b>	<b>538</b>

Risalta il caso del Giappone, che (unico tra tutte le nazioni senza armamento nucleare) ha accumulato un ingentissimo quantitativo di plutonio, con la giustificazione di un suo possibile uso futuro nei propri reattori. Ci sono motivi per sospettare che, oltre a questa motivazione civile, esista anche un non confessato desiderio di poter realizzare in tempi brevissimi un potente arsenale atomico, nel momento in cui venisse a mancare a Tokyo l'ombrello nucleare americano. Una giustificazione per il Giappone è costituita dai suoi vicini armati nuclearmente, Cina e Nord Corea, con i quali i rapporti non sono proprio idilliaci. Impressiona il fatto che, con 46 tonnellate di plutonio separato pronte per essere militarizzate, il paese del sol levante potrebbe in breve tempo costruire più di 5.000 testate atomiche, ponendolo automaticamente tra le nazioni più potenti per armamento militare.

<sup>33</sup> <https://fissilematerials.org/>. [https://www.recna.nagasaki-u.ac.jp/recna/en-fmdata/pu\\_2021](https://www.recna.nagasaki-u.ac.jp/recna/en-fmdata/pu_2021). Si noti come per una bomba atomica bastino alcuni chili di Pu239.

## I primi reattori nucleari

I reattori B, D ed F costruiti ad Hanford erano destinati solo alla produzione del plutonio per fini militari. Dopo la fine della guerra nacque l'idea di sfruttare l'enorme energia nascosta nei nuclei atomici per le applicazioni navali, ed in particolare per i propulsori dei mezzi subacquei; il primo entrò in funzione nel 1955 sul sottomarino Nautilus. Una volta sviluppati questi reattori, venne naturale pensare di usarli anche per la produzione di elettricità per scopi civili; in fondo, i costi di ricerca e sviluppo erano già stati pagati dai militari, quindi ci sarebbe stato solo da guadagnarci. Per questa applicazione, negli Stati Uniti furono scelti reattori impieganti uranio arricchito, di due *filieri* diverse: i modelli ad acqua pressurizzata (pressurized water reactors: PWR) e ad acqua bollente (boiling water reactors: BWR).

Fu però ad Obninsk nell'URSS che un reattore nucleare generò per la prima volta elettricità per scopi civili. Il primo impianto commerciale in Occidente fu quello di Calder Hall in Gran Bretagna, con una potenza di 50 MW<sup>34</sup>, mentre il primo piccolo prototipo civile americano fu quello di Vallecitos, con una potenza di 5 MW, cui fece seguito il PWR di Shippingport, operativo nel 1957, con una potenza elettrica di 60 MW. Il prototipo di reattore BWR americano fu quello di Dresden, da 200 MW elettrici, entrato in servizio nel 1960. In Gran Bretagna (che non disponeva di impianti di arricchimento) si realizzarono reattori ad uranio naturale, sul tipo della pila di Fermi, impieganti grafite come moderatore.<sup>35</sup> Anche il Canada, che non aveva nessun progetto militare, optò per un tipo di reattore ad uranio naturale (divenuto noto come Candu, da CANada-Deuterio-Uranio). Il primo Candu dimostrativo entrò in attività nel 1962; produceva venti MWe.

Le filiere come il Candu presentano il vantaggio di poter sostituire il combustibile, una volta usato, senza dover spegnere tutto l'impianto. Questo è possibile dato che, ad essere tenuti in pressione, sono solo i tubi contenenti il combustibile nucleare. Nei reattori tipo BWR e PWR, dove tutto il nocciolo è racchiuso in un robusto involucro sotto pressione, per accedere al com-

---

<sup>34</sup> La "M" maiuscola indica "mega", il suffisso per "milione". Quindi MW = megawatt = un milione di watt (in fisica il watt, W, è l'unità di misura della potenza). Il MW serve sia per indicare la produzione di calore come quella di elettricità; per evitare confusione, nel secondo caso spesso di aggiunge il suffisso "e", quindi MWe.

<sup>35</sup> Il moderatore serve per rallentare i neutroni prodotti nel processo di fissione, così da agevolare le reazioni di fissione nucleare. Per l'U235 la sezione d'urto per fissione nel caso dei neutroni rallentati ("termici") è centinaia di volte superiore rispetto ai neutroni veloci emessi nella fissione.

bustibile è invece necessario interrompere il funzionamento dell'impianto, anche per diverse settimane.

Un'altra differenza tra le varie filiere è dovuta al differente tipo di moderatore; nei PWR e BWR si usa acqua normale; da qui la denominazione di "reattori ad acqua leggera", per distinguerli dai primi reattori britannici e da quelli canadesi dove l'uso dell'uranio naturale costringeva a usare acqua pesante.<sup>36</sup>

Per una descrizione approfondita dei vari tipi di reattore, del loro funzionamento, nonché di alcuni dettagli importanti per quanto riguarda il loro controllo in sicurezza, rinviamo a testi specifici.<sup>37</sup>

## La maturità dei reattori nucleari

L'energia nucleare ha rappresentato per vari decenni e per almeno un paio di generazioni di scienziati, tecnici e politici un bellissimo e avvincente sogno, che pareva destinato a garantire all'umanità un rifornimento abbondante e a basso prezzo di preziosa energia elettrica. Famosa la frase attribuita a Lewis L. Strauss nel 1954, allora presidente della Commissione per l'energia atomica americana, secondo la quale, sfruttando l'atomo, si sarebbe potuto fare a meno di conteggiare l'elettricità consumata, talmente poco essa sarebbe costata. Simile filosofia motivava il presidente americano Eisenhower, che nel 1953 fece uno storico discorso, intitolato "Atomi per la pace", davanti all'Assemblea dell'ONU; in esso proponeva la creazione di una Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica, AIEA, il cui scopo fosse quello di aiutare tutte le nazioni a sfruttare l'atomo per scopi pacifici. La sua indicazione venne accettata e oggi la AIEA ha la propria sede a Vienna ed opera in tutto il mondo. Poco dopo, il Congresso statunitense approvò l'Atomic Energy Act, col quale si toglieva il monopolio governativo sui dati tecnici relativi ai materiali fissili e si creavano le basi per una industria nucleare commerciale privata.

---

<sup>36</sup> Cosiddetta perché nelle molecole d'acqua l'idrogeno è sostituito dal deuterio; quest'ultimo assorbe meno neutroni e consente quindi di far funzionare il reattore senza dover ricorrere all'uranio arricchito.

<sup>37</sup> Un trattamento approfondito dei reattori, ma di taglio divulgativo e comprensibile a tutti, si trova nei seguenti due volumi: M. Elena, "Chernobyl e in Trentino: la paura atomica nel piatto", Tecnolito, Trento, 2007. M. Elena (a cura), "Chernobyl, dal dramma all'accoglienza", Aiutiamoli a vivere, 2016.



13A e B. Simbolo dell'iniziativa "Atomi per la Pace" e francobollo commemorativo.

Grossi gruppi industriali svilupparono quindi i progetti per nuovi e più grandi reattori nucleari, in un clima di entusiasmo e accettazione acritica della nuova tecnologia. L'atomo sembrava destinato a garantire un futuro radioso all'umanità; qualcuno sognò automobili a propulsione nucleare; ingenti somme furono spese nel tentativo infruttuoso di realizzare aerei atomici. In questo atteggiamento un po' ingenuo c'era senza dubbio anche il desiderio di scordare il disastroso e disumano impiego delle bombe atomiche contro il Giappone (per giunta avvenuto in una fase del conflitto in cui la sconfitta del Sol Levante era ormai certa).

Anche l'Italia si impegnò molto nel settore nucleare, e ad un certo punto eravamo al terzo posto nel mondo per produzione elettronucleare, dopo Usa e Gran Bretagna, avendo realizzato impianti a Latina (con un reattore Magnox di progetto inglese da 160 MWe, al tempo il più potente di quel tipo in Europa), al Garigliano (nel 1964, con un reattore PWR da 270 MWe, al tempo il più potente al mondo) e a Trino Vercellese (con un reattore BWR da 160 MWe, entrato in funzione nel 1965). Lo slancio nucleare italiano ebbe bruscamente termine verso la metà degli anni '60, a seguito di uno scandalo (probabilmente montato ad arte da politici e petrolieri), che portò alla condanna del capo del CNEN,<sup>38</sup> Felice Ippolito, causando un forte rallentamento ai nostri ambiziosi progetti atomici.

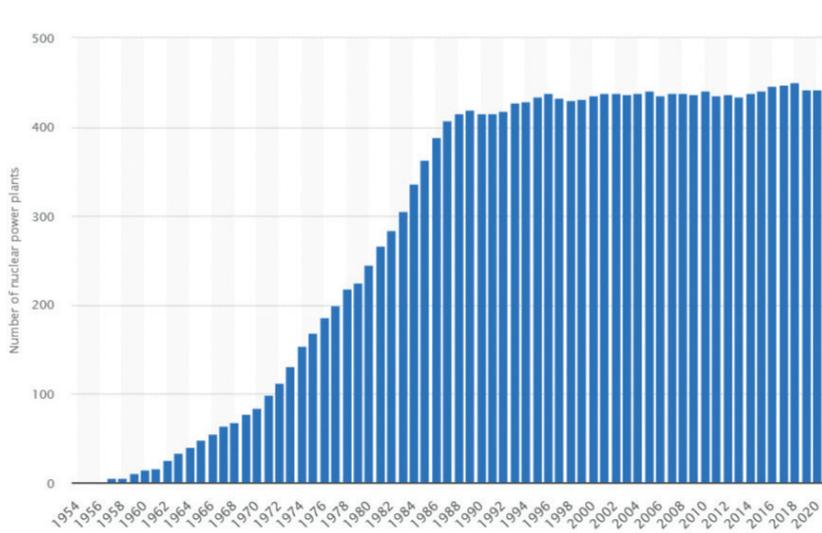
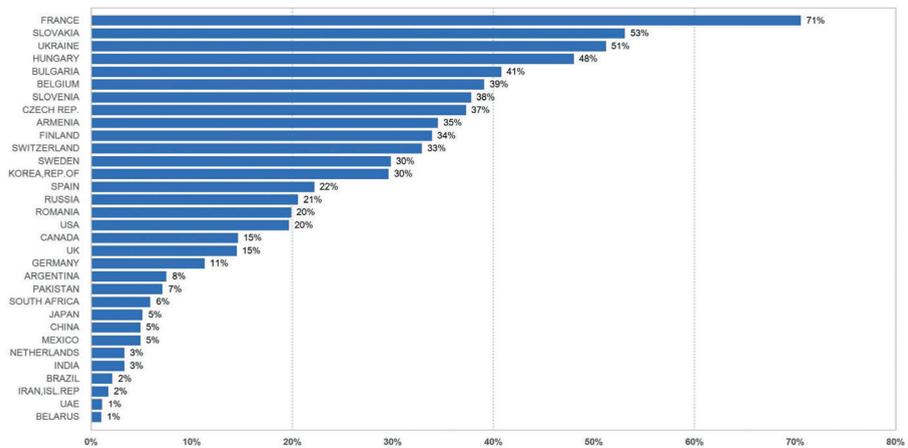
Il favore di cui godeva a livello mondiale il nucleare fece sì che il numero dei reattori nel mondo salisse velocemente. A metà degli anni '60 ce n'erano in funzione una cinquantina; un centinaio nel 1970. Poi la corsa al nucleare accelerò; nel 1987 si arrivò a superare i 400. A fine dicembre 2020 erano 442, suddivisi tra le varie filiere come in Tabella 6 e distribuiti sui diversi paesi come indicato in Tabella 7.

<sup>38</sup> Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare.

Tabella 6: Tipi di reattori esistenti al mondo.<sup>39</sup>

Tipo di reattore	Sigla	In funzione	In costruzione	Spenti
Reattore moderato e raffreddato ad acqua leggera bollente	BWR	63	2	52
Reattore autofertilizzante	FBR	3	2	8
Reattore moderato a grafite e raffreddato a gas	GCR	14		38
Reattore ad alta temperatura raffreddato a gas	HTGR		1	4
Reattore raffreddato a gas e moderato ad acqua pesante	HWGCR			4
Reattore raffreddato ad acqua leggera bollente e moderato ad acqua pesante	HWLWR			2
Reattore moderato a grafite e raffreddato ad acqua leggera	LWGR	12		12
Reattore moderato e raffreddato ad acqua pesante in pressione	PHWR	48	4	9
Reattore moderato e raffreddato ad acqua leggera in pressione	PWR	302	43	60
Reattore ad acqua pesante con generazione di vapore	SGHWR			1
Altro				2
<b>Totale</b>		<b>442</b>	<b>52</b>	<b>192</b>

<sup>39</sup> Adattata da "Nuclear Power Reactors in the World", Reference Data Series No.2, 2021 Edition, IAEA.

14. Numero di reattori in funzione nel mondo nel corso del tempo.<sup>40</sup>15. Percentuale di elettricità generata col nucleare nei diversi paesi.<sup>41</sup>

<sup>40</sup> Per gentile concessione di Statista su dati AIEA.

<sup>41</sup> Da: Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series No.2, 2021 edition, IAEA.

Tabella 7: Numero di reattori nucleari presenti nei diversi paesi nel 2020.<sup>42</sup>

Nazione	Numero di reattori	Nazione	Numero di reattori
Argentina	3	Messico	2
Armenia	1	Olanda	1
Bielorussia	1	Pakistan	5
Belgio	7	Romania	2
Brasile	2	Russia	38
Bulgaria	2	Slovacchia	4
Canada	19	Slovenia	1
Cina	50	Sud Africa	2
Cechia	6	Spagna	7
Finlandia	4	Svezia	6
Francia	56	Svizzera	4
Germania	6	Emirati Arabi Uniti	1
Ungheria	4	Regno Unito	15
India	22	Taiwan	4
Iran	1	Ucraina	15
Giappone	33	Usa	94
Corea del Sud	24	<b>Totale</b>	<b>442</b>

Questi reattori nel 2020 hanno prodotto<sup>43</sup> 2553 terawatt-ora<sup>44</sup> e coprivano il 10,1% del fabbisogno elettrico mondiale, assai meno del picco di 17,5% raggiunto nel 1996. Notiamo *en passant* che il 2020 è stato il primo anno in cui la produzione cinese ha superato quella francese, ponendosi al secondo posto al mondo dopo gli Usa.

<sup>42</sup> Da: Nuclear Power Reactors in the World, 2021 Edition, IAEA, Vienna, 2021.

<sup>43</sup> The World Nuclear Industry Status Report 2021, p.42-3. [www.worldnuclearreport.org](http://www.worldnuclearreport.org).

<sup>44</sup> TWh, ovvero miliardi di chilowattora (kWh). 1 TWh = 0,39 Mt di carbone equivalente = 0,23 Mt di petrolio equivalente.

Dopo gli anni '90 c'è stata una stasi nella crescita del nucleare, specie in Europa e negli Usa. Programmi ambiziosi sono in corso soltanto in Asia; si veda la Tabella 8.

Tabella 8: Reattori in costruzione o in programma a fine 2020, per paese.<sup>45</sup>

Nazione	Reattori in costruzione	Reattori in programma
Argentina	1	
Bangladesh	2	
Bielorussia	1	
Brasile	1	
Cina	13	28
Corea del Sud	4	
Emirati Arabi Uniti	3	
Finlandia	1	1
Francia	1	
India	7	2
Iran	1	2
Giappone	2	9
Pakistan	2	
Russia	3	20
Slovacchia	2	
Turchia	2	2
Regno Unito	2	
Ucraina	2	
Ungheria		2
Usa	2	

<sup>45</sup> Con "in programma" si intende qui che è stata presentata domanda di autorizzazione alla costruzione alle autorità competenti. Da "Nuclear Power Reactors in the World", Reference Data Series No.2, 2021 Edition, IAEA, p. 21-5.

La crescita impetuosa del nucleare “inciampò” di quando in quando in alcuni incidenti, sia in Occidente che in URSS (ma di questi ultimi in Occidente non si venne a sapere inizialmente quasi nulla). Un incendio a Windscale (ora Sellafield) nel 1957 causò una imponente nube radioattiva che si espanse sull'Europa settentrionale; questo evento venne presto dimenticato. Nel 1979 un discreto spavento fu provocato dalla quasi esplosione del reattore di Three Mile Island nello stato americano della Pennsylvania; una grande dose di fortuna permise di limitare i danni alla fusione del nocciolo e a qualche emissione radioattiva. Il disastro fu evitato, ma molti cittadini in tutto il mondo cominciarono a temere il nucleare ritenendolo una minaccia potenziale e inaccettabile.

Arrivò poi il fatidico 1986, quando nell'estremo nord dell'Ucraina (allora facente ancora parte dell'URSS) il reattore numero 4 della centrale di Chernobyl esplose, liberando in atmosfera per molti giorni di seguito enormi quantità di sostanze radioattive, le quali, disperse dai venti, contaminarono buona parte del territorio europeo (e non solo). In molti paesi, inclusa l'Italia, draconiane misure di protezione civile vennero messe in atto, bloccando la vendita di certi prodotti, come il latte fresco e le verdure a foglia larga. Nonostante queste misure, il timore e lo sconcerto furono forti; quasi nessuno aveva infatti idea di quali fossero i pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti, né di come ci si dovesse comportare. La poca e approssimativa informazione, la scarsità delle apparecchiature di misura, la confusione delle autorità, le polemiche politiche, tutto congiurò affinché la paura atomica si insinuasse pure nel cibo consumato ad ogni pasto.<sup>46</sup> Drammatica la situazione delle donne incinte, che, a fronte del rischio di malformazione del feto dovuta alle radiazioni ionizzanti, si trovarono a dover decidere a tambur battente se proseguire o meno la gravidanza.

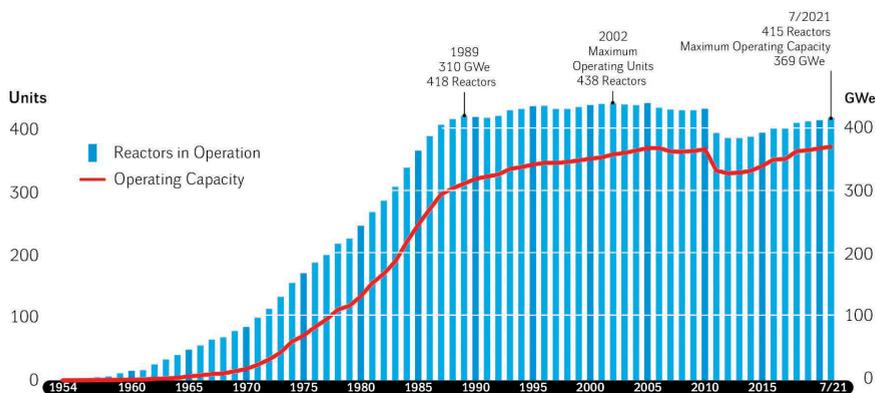
Il disastro di Chernobyl segnò un vero spartiacque per l'industria nucleare, che fino a quel momento aveva aumentato il suo business ed aveva guardato con ottimismo al futuro. I cittadini erano spaventatissimi e naturalmente il mondo politico gli andò dietro, schierandosi, in diverse nazioni, contro la continuazione dei programmi nucleari, che vennero ridotti o addirittura del tutto eliminati.<sup>47</sup> L'industria e vari governi cercarono di superare l'opposizio-

---

<sup>46</sup> Da cui il titolo di un libro dell'autore di queste righe (v. nota 36).

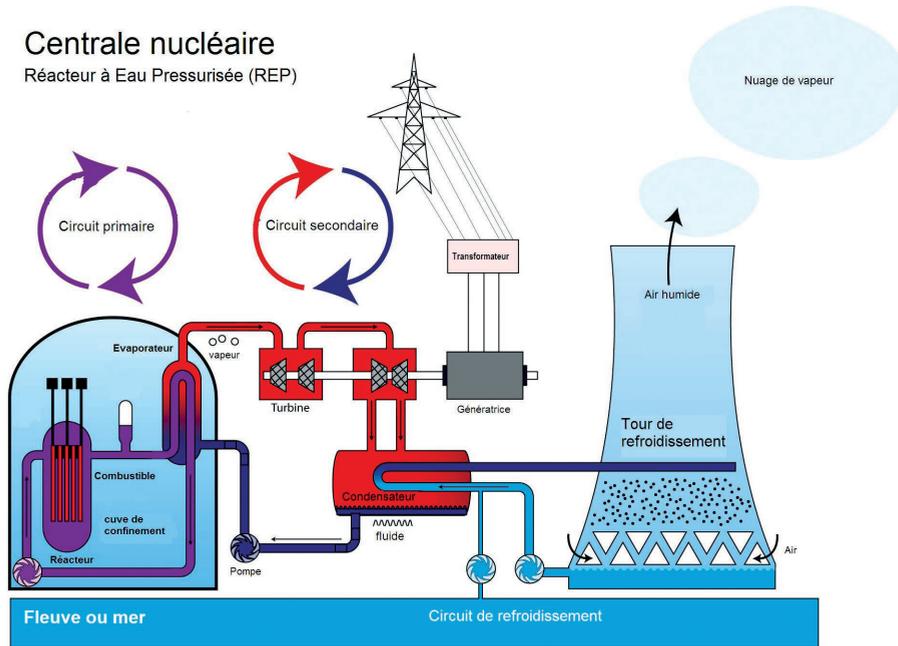
<sup>47</sup> In Italia un referendum popolare si esprime nel 1987 nettamente contro la prosecuzione dei programmi nucleari, o almeno così venne interpretato dalla maggioranza dei partiti. Le quattro centrali esistenti nel paese vennero spente e non ne vennero costruite altre. Situazione per certi versi simile in Austria, dove l'unico reattore costruito nel paese, quello di Zwentendorf, non entrò mai in funzione a seguito di una decisione del parlamento nel 1978.

ne popolare sostenendo che nei paesi occidentali un tale disastro non sarebbe mai potuto avvenire, e che le sue cause erano da ricercare nell'inefficienza del sistema sovietico. Queste spiegazioni non ebbero però molto successo. Anche nei paesi che mantennero in piedi dei programmi nucleari, questi vennero rivisti, aumentando le misure di sicurezza, tecniche e procedurali, provocando un forte aumento nel costo dei reattori e un allungamento dei tempi di costruzione. Ciò contribuì a ridurre l'attrattiva delle centrali nucleari. La curva ascendente del numero di reattori funzionanti nel mondo ben presto arrestò la sua corsa verso l'alto, che proseguiva da parecchi anni. Similmente ne risentì anche il contributo del nucleare alla copertura del fabbisogno elettrico mondiale (Figura 16).



16. Reattori nucleari in funzione nel mondo nel corso del tempo e potenza disponibile netta.<sup>48</sup>

<sup>48</sup> Da: "The World Nuclear Industry Status Report 2021", pag. 50, per gentile concessione. È utile confrontare attentamente questa figura con la figura 14, dove è mostrato il numero di reattori, sia funzionanti che in momentaneo arresto. Si vede che, nonostante il numero di impianti sia rimasto praticamente costante a partire dalla metà degli anni '90, la potenza disponibile dal nucleare è lentamente cresciuta fino al 2006, come effetto di una ottimizzazione nella gestione dei reattori. Il netto calo di produzione a partire dal 2011 è soprattutto dovuto all'arresto (più o meno temporaneo) dei reattori in Giappone a seguito del disastro di Fukushima (v. anche l'appendice 2 in questo articolo). Essendo i reattori in gran parte in condizione di ripartire, appena le condizioni normative lo permettessero, essi non sono stati rimossi dai dati di figura 14. (Reactors in operation = reattori in funzione; operating capacity = potenza elettrica; reactors = reattori; maximum operating units = numero massimo di reattori funzionanti; maximum operating capacity = massima potenza).



17. Schema di reattore ad acqua leggera in pressione (PWR)<sup>49</sup>

## Vantaggi e svantaggi dei reattori nucleari

Volendo semplificare al massimo, potremmo dire che un reattore nucleare è, nella maggior parte dei casi, null'altro che una pentola molto complicata e costosa, usata per riscaldare dell'acqua e portarla ad ebollizione. Con il vapore prodotto si fa girare una turbina, in tutto simile a quelle presenti in una centrale elettrica a petrolio o a gas; la turbina aziona quindi un alternatore e così si produce elettricità.

### *Vantaggi del nucleare*

Se svaniti sono ormai i sogni ingenui che caratterizzarono i primi anni dell'e-

<sup>49</sup> Circuit primaire = circuito primario; circuit secondaire = circuito secondario; evaporateur = generatore di vapore; combustible = combustibile; cuve de confinement = contenitore del nocciolo ("vessel"); réacteur = reattore; vapeur = vapore; turbine = turbina; génératrice = alternatore; transformateur = trasformatore; condensateur = condensatore; fluide = fluido; air humide = aria umida; nuage de vapeur = nube di vapore; tour de refroidissement = torre di raffreddamento; pompe = pompa; fleuve ou mer = fiume o mare; circuit de refroidissement = circuito di raffreddamento.

ra nucleare (elettricità così economica da non doverne più misurare il consumo, aerei ed automobili atomici, ...), resta il fatto che il vantaggio tecnico principale del nucleare è rappresentato dalla *piccola quantità di combustibile* necessaria per far funzionare una grande centrale; se questa è da 1000 MWe, come ordine di grandezza parliamo di 25 tonnellate all'anno. Per confronto, una centrale a carbone o a petrolio ne consuma almeno diecimila volte di più: un milione di tonnellate (come dire un quintale al secondo!). La ridotta necessità di combustibile agevola il suo acquisto e trasporto, facilitando anche la costituzione di scorte. Non esiste poi un monopolio nelle forniture di combustibile. Non vengono nemmeno emesse cospicue quantità di anidride carbonica nel normale funzionamento delle centrali (sebbene i materiali speciali con cui vengono realizzate richiedano lavorazioni assai energivore).

Come nel caso di tutti gli impianti energetici di grandi dimensioni, anche le centrali nucleari hanno un rilevante *vantaggio politico*: per riuscire a soddisfare le necessità energetiche di una piccola regione, è sufficiente che le autorità convincano poche controparti (un comune, una provincia, una regione, pochi proprietari locali) per ottenere i nulla osta necessari per la costruzione di un impianto, che così può cominciare in tempi brevi: si avrà in tal modo la certezza che in un certo lasso di tempo (vari anni) si disporrà di un impianto affidabile, notevolmente sicuro, che impatta poco sull'ambiente circostante. Piuttosto differente è il caso degli impianti ad energie rinnovabili, dove ciascuno è di potenza modesta,<sup>50</sup> in cui l'impegno di superfici è complessivamente molto maggiore, con conseguente necessità per gli amministratori ed il mondo politico di confrontarsi con un numero assai superiore di controparti, con conseguente grande impegno di tempo e di energie prima di raggiungere un accordo, spesso dopo faticosi compromessi; e il risultato energetico atteso dovrà comunque attendere che tutti i piccoli impianti siano terminati prima di poter affermare "risultato raggiunto". Da questo si capisce come gli impianti energetici di grandi dimensioni risultino piuttosto attraenti per tutto il mondo politico e quello dei decisori in genere.

Data l'immagine fortemente negativa che l'energia nucleare si porta addosso dai suoi inizi (fu infatti responsabile della distruzione subitanea di Hiroshima e Nagasaki), spesso le proposte di costruzione di nuovi impianti di questo tipo sono rifiutate dalle comunità locali destinate ad ospitarli, preoccupate soprattutto della loro *sicurezza*. A questo riguardo bisogna dire che, nei vari decen-

---

<sup>50</sup> Le più potenti pale eoliche arrivano ad una potenza massima sui 10 MW; quindi per eguagliare la potenza elettrica di una centrale nucleare di discreta potenza servirebbero un centinaio di queste turbine. Nel momento in cui diciamo che gli impianti a energia rinnovabile hanno ciascuno potenza modesta, trascuriamo ovviamente gli impianti idroelettrici.

ni in cui le centrali nucleari hanno operato, vi son stati pochi incidenti dalle conseguenze davvero rilevanti: possiamo citare Sellafield/Windscale nel 1957, Three Mile Island nel 1979, Chernobyl nel 1986 e infine Fukushima nel 2011. Quattro eventi a fronte di alcune centinaia di reattori funzionanti per decine di anni è un bilancio abbastanza buono. Per quanto riguarda invece le *emissioni di sostanze radioattive* durante il funzionamento normale delle centrali nucleari, esse sono modeste, certamente molto inferiori rispetto alla radioattività emessa da una centrale a carbone, viste le quantità impressionanti di combustibile che colà vengono bruciate (e nel carbone, pur se percentualmente scarsissimi, vi sono anche isotopi radioattivi). Queste emissioni legate al normale funzionamento della centrale avvengono soprattutto in forma gassosa.

Tabella 9: Vantaggi del nucleare per la produzione energetica.

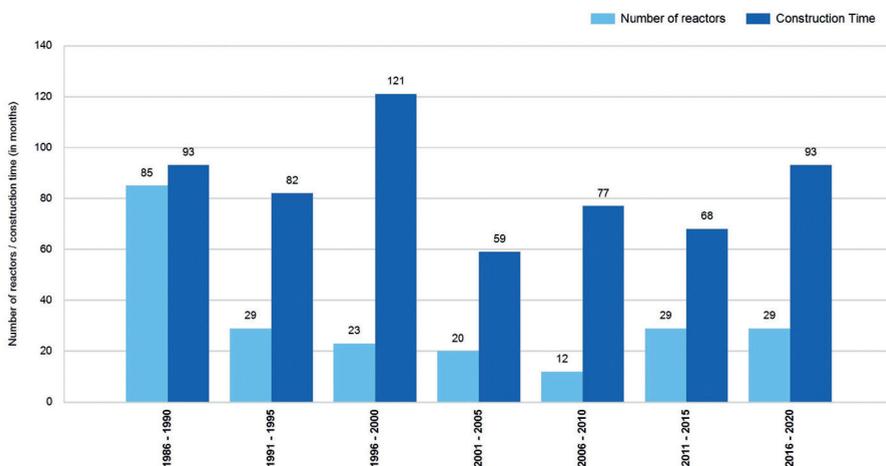
Area necessaria	Piuttosto piccola (dell'ordine del kmq)
Quantità <i>annua</i> di combustibile	Piccola. Alcune decine di tonnellate (per un reattore ad acqua leggera da 1000 MWe)
Fornitori del combustibile	Diversi
Operatività degli impianti	Elevata (anche 80%) <sup>51</sup>
Sicurezza nel funzionamento ordinario	Elevata
Emissioni in ambiente	Solo grandi quantità di calore, sotto forma di acqua calda o vapore. Inoltre rilasci di sostanze radioattive in quantità esigue.

### *Svantaggi del nucleare*

Quella nucleare è una tecnologia complessa e particolarmente delicata, che richiede materiali speciali e competenze molto sviluppate, disponibili in un numero limitato di stati e di grandi aziende. Di conseguenza il **costo** della centrale nucleare è molto superiore a quello di un impianto convenzionale a combustibile fossile, per non dire di una centrale a energia rinnovabile, ora che i costi di eolico e soprattutto fotovoltaico sono fortemente ribassati. Nel 2019, Électricité de France ha stimato che costruire sei reattori EPR2 in Francia verso la fine degli anni 2020 costerebbe per lo meno 56 miliardi di euro, cioè più di nove miliardi ciascuno.<sup>52</sup>

<sup>51</sup> Nuclear Power Reactors in the World, Reference Series No. 2, 2021 Edition, IAEA, p.61.

<sup>52</sup> <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>.



18. Variazione negli anni del tempo di costruzione medio (barre più scure) dei reattori nucleari a livello mondiale, in mesi. Si noti come i tempi restino a tutt'oggi elevati. Le barre chiare indicano il numero di reattori costruiti nel periodo considerato.<sup>53</sup>

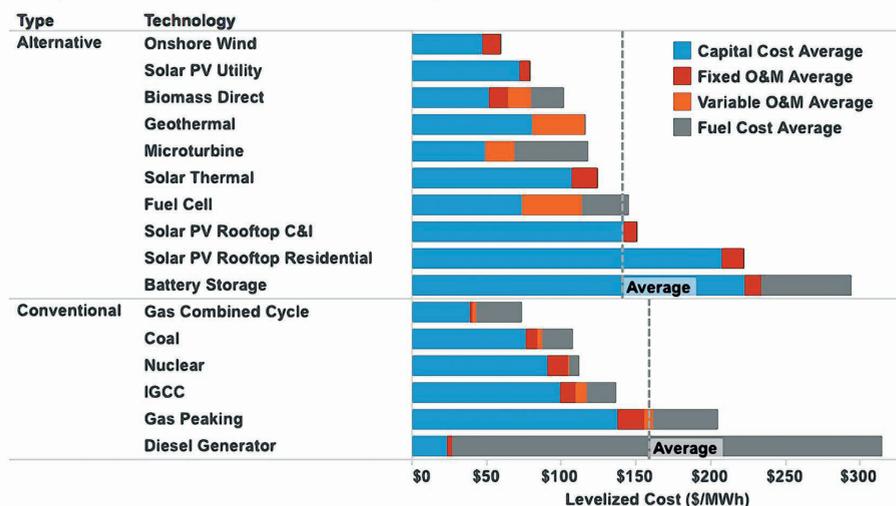
Consideriamo ora il caso in cui il costruttore dell'impianto sia una ditta privata; difficilmente disporrà in cassa dei molti miliardi di euro necessari e quindi dovrà necessariamente rivolgersi alle banche per ottenere un prestito. Si capisce quindi come, nel determinare la convenienza dell'energia nucleare,<sup>54</sup> il costo del capitale giochi un ruolo chiave, specie in quanto il tempo di costruzione è lungo (si veda la figura 18); in tal caso l'ammontare degli interessi sul capitale può diventare proibitivamente alto. Entra qui in gioco il costo del denaro; se questo è elevato potrebbe addirittura risultare impossibile recuperare i soldi investiti nella costruzione. In molti casi il costo annuale che si affronta per ripagare l'investimento iniziale è sostanzialmente maggiore del costo operativo annuale, con il primo che facilmente arriva al 60% del costo totale.<sup>55</sup> Per il nucleare il costo del combustibile è una piccola frazione del costo di funzionamento; i costi capitale dell'impianto sono invece superiori a quelli per le centrali a carbone, e molto maggiori rispetto alle centrali a gas (Figura 19).

<sup>53</sup> Da: Nuclear Power Reactors in the World, Reference Data Series No.2, 2021 edition, IAEA, pag. 82. (Number of reactors = numero di reattori; construction time = tempo di costruzione; in months = in mesi).

<sup>54</sup> <https://thebulletin.org/2019/06/why-nuclear-power-plants-cost-so-much-and-what-can-be-done-about-it/>.

<sup>55</sup> <https://thebulletin.org/2019/06/why-nuclear-power-plants-cost-so-much-and-what-can-be-done-about-it/>.

## Components of levelized cost of energy



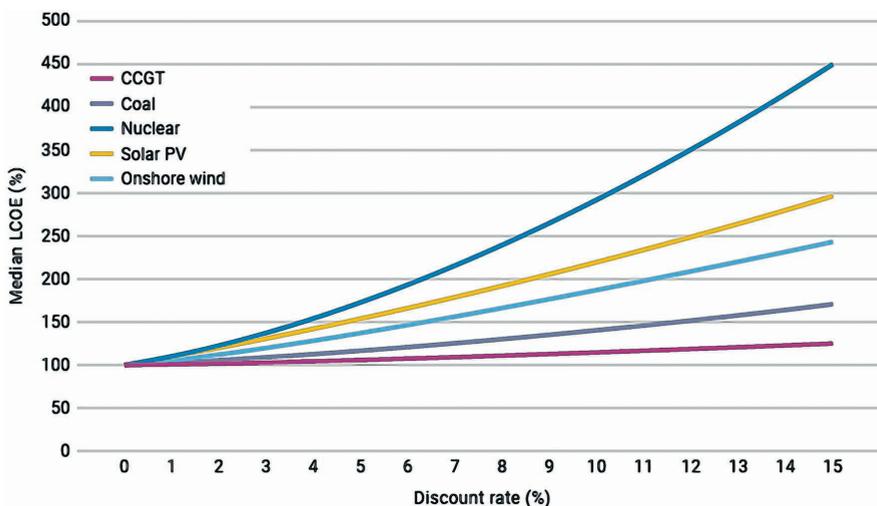
19. Componenti del costo livellato dell'elettricità per diverse tecnologie.<sup>56</sup>

Tra le varie fonti di elettricità, il nucleare è molto penalizzato dall'aumentare del tasso di interesse; studi particolareggiati mostrano come il cosiddetto costo livellato dell'elettricità<sup>57</sup> cresca rapidamente. Si veda la Figura 20.

Ecco quindi spiegato come gli impianti nucleari abbiano ancor oggi successo in quelle nazioni in cui è la mano pubblica, cioè i governi, a sovvenzionarne direttamente o indirettamente i costi, come nel caso di Francia, Cina,

<sup>56</sup> Da: <http://www.behindenergy.com/wp-content/uploads/2015/04/Schermata-2015-04-21-alle-00.15.25.png>. (Type= tipo di energia; alternative = energie alternative; conventional = energie tradizionali; technology = tecnologia; onshore wind = eolico a terra; solar PV utility = centrale fotovoltaica; biomass direct = utilizzo diretto delle biomasse; geothermal = geotermico; microturbine = microturbine; solar thermal = solare termico; fuel cell = celle a combustibile; solar PV rooftop C&I = solare fotovoltaico su tetti di esercizi commerciali e impianti industriali; solar PV rooftop residential = solare fotovoltaico sui tetti di edifici residenziali; battery storage = immagazzinamento dell'energia tramite batterie; gas combined cycle = impianto a gas a ciclo combinato; coal = carbone; nuclear = nucleare; IGCC = impianto di gassificazione integrato a ciclo combinato; gas peaking = impianto a gas per soddisfare la domanda di picco; diesel generator = generatore diesel; capital cost average = media del costo capitale; fixed O&M average = costo medio fisso di funzionamento e manutenzione; variable O&M average = costo variabile di funzionamento e manutenzione; fuel cost average = costo medio del combustibile).

<sup>57</sup> Il costo livellato dell'elettricità rappresenta il ricavo medio, per unità di elettricità prodotta, che è necessario per recuperare i costi di costruzione e gestione dell'impianto, nell'ipotesi di un dato ciclo di vita finanziaria e di funzionamento.



20. Variazione del costo livellato dell'elettricità in funzione del tasso di sconto per diverse tecnologie.<sup>58</sup>

India, Giappone, Russia<sup>59</sup>. Negli Stati Uniti questi fattori hanno portato ad un forte calo nella costruzione di nuovi impianti, gestita dal settore privato; solo uno è diventato commercialmente operativo negli ultimi 20 anni, quello di Watts Bar 2. Nella South Carolina si è arrivati addirittura all'abbandono di due reattori AP1000 della Westinghouse prima ancora del termine dei lavori, a causa di ritardi realizzativi e di sfioramento dei preventivi di costo. Negli Usa vi sono ora solo due altri AP1000 in costruzione, entrambi nella Georgia; anche qui non mancano i problemi; il costo previsto, che era di 14 miliardi di dollari, è stato rivisto all'insù, arrivando a 23 miliardi, ma la costruzione

<sup>58</sup> Da: <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>, su dati della Nuclear Energy Agency della Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico. (In ordinata il costo livellato medio dell'elettricità in %; in ascissa il tasso di sconto in %; CCGT = turbine a gas a ciclo combinato; coal = carbone; nuclear = nucleare; solar PV = solare fotovoltaico; onshore wind = eolico a terra).

<sup>59</sup> Il tasso di sconto per la costruzione di un reattore nucleare è di circa il 12,5% negli Usa, 8% in Francia, 2 o 3 % in Giappone. Uno studio effettuato in 22 paesi ha mostrato come con un tasso del 10% il gas o il carbone sono più economici del nucleare, mentre se il tasso è del 3% la situazione si capovolge. <https://thebulletin.org/2019/06/why-nuclear-power-plants-cost-so-much-and-what-can-be-done-about-it/> e anche <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>.

comunque procede, dato che il governo ha promesso un aiuto finanziario per il loro completamento (è il primo intervento di questo tipo negli USA).<sup>60</sup>

Da quanto detto sin qui e tenuto conto della complessità tecnologica, dei costi elevati, dei rischi finanziari, si comprende come un programma nucleare di una certa importanza non si possa improvvisare, a meno di rivolgersi ad un venditore che consegni l'impianto chiavi in mano, come succede ad esempio con il colosso nucleare russo Rosatom, che riscuote un buon successo nell'esportazione dei suoi reattori, grazie ad una offerta che include non solo la costruzione, ma anche la proprietà e la gestione degli impianti. Ciò risulta attraente per quei paesi che non hanno esperienza nel settore atomico e che potrebbero avere difficoltà pure ad affrontare i rischi economici legati ad una autonoma iniziativa in questo settore. A fronte di questi benefici, tuttavia, resta il fatto che a queste condizioni il committente nazionale resterà sempre dipendente dal fornitore estero.

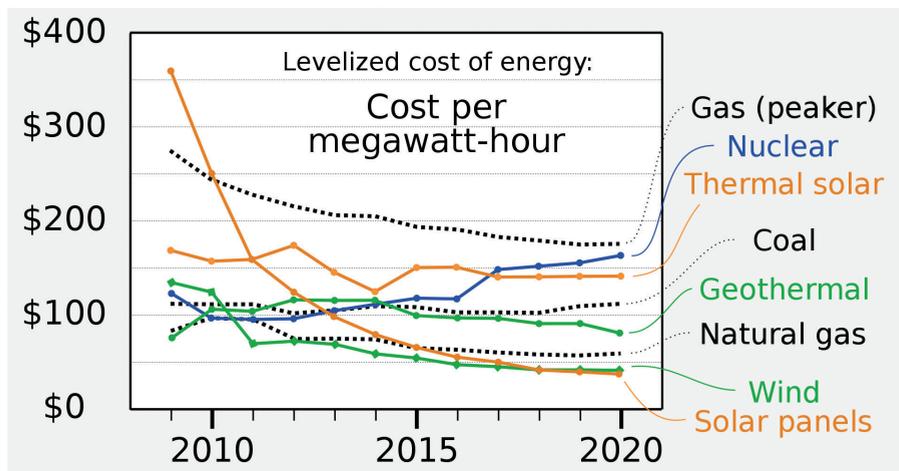
Passando dal costo delle centrali nucleari al costo dell'energia da esse prodotta, si vede come la situazione nel corso dei decenni sia molto cambiata. Fino ad alcuni decenni fa il costo dell'elettricità prodotta con il nucleare risultava competitivo rispetto a quella ottenuta con i combustibili fossili tradizionali; si è però avuto un considerevole aumento di costi a seguito delle accresciute misure di sicurezza introdotte a seguito dei disastri di Chernobyl e Fukushima, ma soprattutto c'è stata la diminuzione dei costi per l'eolico e il vero crollo per il fotovoltaico; questo ha ribaltato la situazione (si veda la Figura 21). Nel 2020 il grosso degli investimenti nel settore energetico è andato alle rinnovabili, con il risultato di installare oltre 130 GW di solare e oltre 70 GW di eolico<sup>61</sup> (Figura 22).

Il nucleare non è peraltro privo di altri problemi. Cominciamo da quelli più banali. Se le potenze degli impianti sono grandi, quando essi devono venir spenti, per guasti o per semplice manutenzione, nel sistema elettrico viene a mancare un grosso contributo alla produzione, ciò che costringe ad avere degli adeguati e assai costosi sistemi di *rimpiazzo*. Inoltre la grande quantità di calore di scarto richiede una *abbondante disponibilità di acqua* per il raffreddamento, affiancata, se del caso, da grandi torri di raffreddamento dal grande impatto paesaggistico. Data la limitata efficienza del processo di trasformazione da energia termica in elettricità, una parte rilevante dell'energia nucleare liberata (anche i 2/3) viene dispersa nell'ambiente sotto forma di calore di scarto e questo può causare un pesante impatto ambientale locale.

---

<sup>60</sup> <https://thebulletin.org/2019/06/why-nuclear-power-plants-cost-so-much-and-what-can-be-done-about-it/>

<sup>61</sup> <https://about.bnef.com/blog/energy-transition-investment-hit-500-billion-in-2020-for-first-time/>



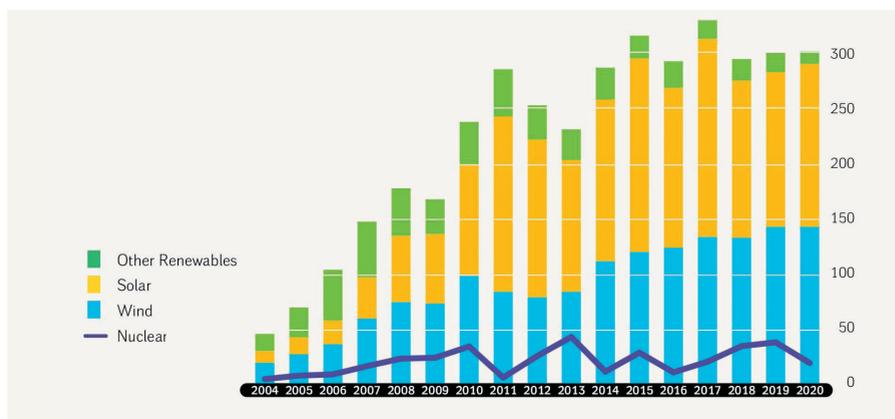
21. Costo livellato dell'energia, in dollari Usa, nel periodo 2009-2020 per diverse tecnologie di produzione elettrica.<sup>62</sup>

La necessità inderogabile di raffreddare i reattori rende quegli impianti che prelevano il liquido necessario dai fiumi fortemente soggetti ai periodi di siccità. In questo senso anche la fonte di energia più tecnologica, il nucleare, dipende dalle condizioni ambientali, proprio come succede all'eolico e al fotovoltaico, che producono solo in presenza di vento e sole.

Vi è poi il *potenziale per eventi disastrosi*, specie nel caso di attacchi terroristici o nell'eventualità di conflitti (si veda il caso dell'invasione dell'Ucraina nel 2022, con il conseguente distacco per diversi giorni dell'alimentazione elettrica agli impianti di Chernobyl). La minaccia terroristica va tenuta ben presente, dato che non è necessario distruggere totalmente un reattore per causare il panico, ma sarebbe sufficiente impadronirsi di sostanze radioattive in esso contenute e spargerle in una città per scatenare il terrore tra i cittadini e provocare un fuggi fuggi generale, capace forse di causare più vittime delle stesse radiazioni; qualcosa di simile era stato tentato a metà degli anni '90 dalla setta giapponese Aum Shin Rikyo, usando gas nervino e acido cianidrico.<sup>63</sup>

<sup>62</sup> Da [https://en.wikipedia.org/wiki/Levelized\\_cost\\_of\\_energy](https://en.wikipedia.org/wiki/Levelized_cost_of_energy). (Costo per megawatt-hour = costo per MWh; gas (peaker) = gas per far fronte ai picchi di domanda; nuclear = nucleare; thermal solar = solare termico; coal = carbone; geothermal = geotermico; natural gas = gas naturale; wind = eolico; solar panels = pannelli solari).

<sup>63</sup> <https://it.insideover.com/schede/terrorismo/aum-shinrikyo-i-terroristi-apocalittici-del-sol-levante.html>.



22. Decisioni di investimento nel nucleare e nelle rinnovabili a livello mondiale nel periodo 2004-2020 (miliardi di \$).<sup>64</sup>

Tornando al disastro di Chernobyl (v. anche l'appendice 1), esso ci insegna come possa essere il fattore umano il punto debole della sicurezza dei reattori nucleari, anche a causa della loro grande complessità. Aggiungiamo a questo la *possibilità* di eventi naturali quasi incontrollabili, quali terremoti e maremoti, come nel caso che ha portato al disastro di Fukushima. Le conseguenze di un grave disastro sono indubbiamente costosissime, sia in termini umani che economici (v. le appendici alla fine di questo articolo). Stante così la situazione, Tatsujiro Suzuki, già esponente ai vertici del nucleare civile giapponese, ha affermato<sup>65</sup> che una nazione dovrebbe intraprendere la strada dell'energia nucleare solo se è disposta ad accollarsi le conseguenze dell'incidente peggiore che si possa immaginare, a prescindere dalla scarsa probabilità che questo si verifichi.

Altri aspetti assai delicati del nucleare sono la *natura duale* (adatta per il settore civile come per quello militare) *delle tecnologie* relative al combustibile nucleare, sia nella fase iniziale in cui esso è arricchito, che in quella finale in cui è riprocessato (al fine di recuperare circa l'1% di U235 ancora presente, oltre agli isotopi che vi si sono creati durante l'irraggiamento neutronico del combustibile, in primis circa l'1% di plutonio). In parole povere significa che se una nazione sviluppa le tecniche per preparare il combustibile nucleare e

<sup>64</sup> Da: World Nuclear Industry Status Report 2021, p.291, per gentile concessione. (Other renewables = altre rinnovabili; solar = solare; wind = eolico; nuclear = nucleare).

<sup>65</sup> Dichiarazione effettuata nel corso della presentazione tenuta dal professor Suzuki al XIV convegno PIIC-Isodarco, svoltosi nel 2014 ad Hangzhou, in Cina.

anche per poi trattarlo (“riprocessarlo”) dopo la permanenza nella centrale, essa viene a disporre, se così desiderasse fare, dei materiali e delle competenze necessari per sviluppare un proprio arsenale di ordigni nucleari. Questa della cosiddetta “*proliferazione orizzontale*” è una prospettiva piuttosto preoccupante, specie per quelle nazioni che si trovano in aree “calde” del mondo. Per cercare di ridurre il pericolo, ancora nel 1970 è entrato in vigore il “Trattato internazionale di non proliferazione” (TNP), che ha prodotto sinora buoni risultati. Si basa su di un accordo di massima: i paesi senza tecnologia atomica militare si impegnano a non dotarsene, a fronte della promessa degli stati con armi nucleari a ridurre il numero di ordigni nei loro arsenali e, in tempi adeguati, ad eliminarli del tutto. Purtroppo oggi questo trattato è fortemente a rischio, dato che i paesi nucleari non hanno adempiuto alla loro promessa e che quegli stati (per fortuna pochi) che hanno intrapreso la strada nucleare non hanno subito penalizzazioni tali da farli rinunciare.<sup>66</sup>

Un ulteriore problema è costituito dalle *scorie* che si producono nel corso della attività delle centrali; sono caratterizzate da *alta radioattività e lunghissima durata* temporale. Per il primo aspetto (elevata attività), si rende assolutamente necessario isolarle dalla biosfera e, nel caso le si voglia trattare, operare in maniera robotizzata e/o a distanza. Per il secondo (durata), si deve affrontare il problema di un loro contenimento, lontano dagli esseri umani e dal resto della biosfera, per una scala temporale spaventosamente lunga, valutabile (per il combustibile così come esce da una centrale) in oltre centomila anni; un lasso di tempo superiore di almeno 20 volte alla durata dell’intera storia umana, dalle sue remote origini fino ai giorni nostri. Queste caratteristiche costituiscono una vera sfida tecnologica<sup>67</sup> che non ha precedenti, oltre

---

<sup>66</sup> Teniamo anche presente che alcune nazioni non hanno mai aderito al TNP, come Israele, India, Pakistan ed il recentemente indipendente Sud Sudan. La Corea del Nord vi aveva aderito nel 1985 ma poi ne è uscita nel 2003. Israele, India, Pakistan e Nord Corea hanno tutti costruito bombe nucleari. L’Iran è membro del TNP. Un colpo pesante al TNP è stato inferto dalla decisione statunitense di autorizzare il trasferimento all’India di materiale e tecnologie nucleari, nonostante la non appartenenza di questa nazione al TNP (si veda il Box “Geopolitica del nucleare” e anche <https://www.armscontrol.org/act/2005-10/features/us-india-nuclear-deal-taking-stock>).

<sup>67</sup> Tra le soluzioni più promettenti per lo stoccaggio a lunghissimo termine delle scorie nucleari ci sono i depositi geologici: profondi tunnel e caverne scavate in materiali stabili e compatti, che si ritengono capaci di isolare le scorie dalla biosfera per tempi di molte decine di migliaia di anni. Ciò significa trovare ad esempio duomi salini (diapiri) nel sottosuolo, lontani da falde acquifere (che scioglierebbero il sale e corroderebbero i contenitori), scavarvi gli ambienti di immagazzinamento e sigillare il tutto così da impedirne l’accesso attuale e futuro. Che non sia cosa banale lo si vede nel caso del deposito-prototipo di Asse in Germania, ove le scorie immagazzinate nei decenni scorsi dovranno venir asportate dopo che problemi strutturali e infiltrazioni di acqua ne hanno messo

a porre una serie di delicate questioni etiche: che diritto abbiamo di imporre a migliaia di generazioni future di prendersi cura dei nostri rifiuti e chi pagherà il conto economico? Nonostante le promesse di mettere i rifiuti in un deposito geologico profondo, è probabile che non sarà possibile chiuderlo e dimenticarsene per sempre; da una parte bisognerà badare che malintenzionati non cerchino di recuperare materiali adattissimi ad attività terroristiche; d'altra parte si dovrà periodicamente controllare la tenuta dei contenitori e delle protezioni.

Ma supponiamo di poter sigillare il deposito e abbandonarlo, fiduciosi che resista al passare dei millenni. Un altro aspetto delicato è come avvisare i nostri lontani discendenti che in quel luogo ci sono sepolte sostanze pericolose. Se il problema sembra banalmente risolvibile mettendo dei cartelli o altre segnalazioni, pensiamo a come potrà essere differente il mondo fra diecimila o cinquantamila anni. Le lingue attuali saranno ancora comprensibili? Ci sarà stato un conflitto globale capace di cancellare l'attuale cultura e tutti i nostri documenti? Come fare a trasmettere un segnale di pericolo a persone che con noi potrebbero ormai avere poco in comune? Pensiamo a cosa sarebbe successo se fossero stati gli antichi egizi a creare un deposito di scorie pericolosissime; come faremmo ad accorgercene oggi? Non rischieremmo di imbatterci in esso inavvertitamente? Morire a causa di attività effettuate dai nostri predecessori di migliaia di anni prima non sarebbe proprio la cosa più bella del mondo. D'altra parte, l'umanità ha sempre modificato il proprio ambiente senza curarsi minimamente dell'impatto delle proprie attività sulle generazioni future; ed è vero che queste, in un modo o nell'altro, sono riuscite a sopravvivere nelle nuove condizioni venutesi a creare; pensiamo alla distruzione della foresta che copriva quasi completamente il territorio tra Roma e la Gallia al tempo di Giulio Cesare. Potremmo quindi semplicemente disinteressarci del "regalo avvelenato" che lasceremmo ai nostri discendenti? Con le scorie nucleari non è così semplice. Una possibile soluzione però c'è: "bruciare" le scorie, impiegandole in futuri reattori nucleari di nuovo tipo che attualmente sono in fase di studio.

Nella tabella 10 riassumiamo i vari aspetti problematici dell'energia nucleare come oggi l'abbiamo conosciuta e impiegata. Come nel caso delle scorie, anche qui ci sono proposte tecniche per migliorare alcuni aspetti; bisogna poi vedere se effettivamente tali soluzioni sono efficaci e praticabili in concreto.

---

a rischio la stabilità. Il costo previsto è stimato in quasi quattro miliardi di euro (si veda: [https://en.wikipedia.org/wiki/Asse\\_II\\_mine](https://en.wikipedia.org/wiki/Asse_II_mine)).

Tabella 10: Problemi che ostacolano la crescita dell'energia nucleare a fini civili.

Tempo di costruzione	Molto lungo.
Costo	Assai elevato. La spesa si affronta molti anni prima che l'entrata in produzione consenta di cominciare a fare utili.
Rischi finanziari	Molto alti, a seguito dei lunghi tempi di costruzione.
Produzione energetica	Molto concentrata. Un solo impianto da 1 GWe soddisfa le necessità di una popolazione di circa un milione di abitanti.
Efficienza dell'impianto	Piuttosto bassa; 2/3 del calore prodotto nelle reazioni nucleari viene disperso.
Necessità speciali	Grandi quantità d'acqua per il raffreddamento. Luogo dove scaricare grandi quantità di acqua calda o dove costruire torri di raffreddamento con impatto paesaggistico notevole.
Costi extra	Realizzazione di impianti di rimpiazzo. Costo di gestione delle scorie.
Flessibilità nel soddisfare le fluttuazioni del carico	Ridotta nelle centrali di II generazione. In talune centrali di III generazione e successive è possibile variare la produzione anche di oltre il 50% nel giro di poche decine di minuti.
Scorie nucleari	Devono essere isolate dalla biosfera per oltre 100.000 anni (a meno che non si trovi il modo per "bruciarle" in nuovi tipi di reattori).
Conseguenze di possibili disastri	Potenzialmente pesantissime, sia dal punto di vista umano che economico e ambientale, coinvolgendo aree estese per molti decenni.
Rischi di proliferazione	Materiali fissili e tecnologie di arricchimento e di riprocessamento possono essere usati anche per produrre ordigni militari. Il plutonio 239 che si può produrre con i reattori è adattissimo per fare bombe.
Sostenibilità economica	Senza un forte sostegno economico governativo è generalmente difficile costruire nuovi impianti nucleari.
Smantellamento degli impianti arri- vati a fine vita	Lungo, complicato e molto costoso.
Robustezza strategica	Assai debole. Nel caso di un conflitto feroce, gli impianti nucleari diventano obiettivi allettanti, che possono ingigantire i danni arrecati al nemico.

## I reattori nucleari oggi funzionanti

Come abbiamo già scritto in precedenza, dopo una fase di veloce crescita fino ai primi anni '90, la tecnologia nucleare ha poi vissuto una lunga fase di difficoltà, specie nei paesi occidentali. Nazioni come la Germania hanno deciso di abbandonare del tutto questa tecnologia di produzione dell'elettricità (nel caso tedesco entro il 2022); anche la Francia, affezionatissima al nucleare, ad un certo punto aveva deciso di abbandonarlo, almeno nel medio periodo. Poi considerazioni ecologiche (la necessità di ridurre velocemente le emissioni di CO<sub>2</sub>) e politiche (il desiderio di ridurre la dipendenza europea dai combustibili fossili russi) hanno fatto fare a talune nazioni marcia indietro, ad esempio al governo di Parigi. Vediamo comunque come è la situazione al momento in cui scriviamo (aprile 2022).

Attualmente ci sono 442 reattori operativi in 33 paesi (si veda la Tabella 7 per un elenco dettagliato). Sono di modelli diversi, realizzati da una decina di importanti ditte, come indicato in Tabella 11. Nelle tabelle 12 e 13 forniamo alcuni dettagli sui modelli di reattori nucleari avanzati oggi disponibili commercialmente, operativi ed in fase di realizzazione. La loro produzione assommava nel 2020 a 2553 TWh, ciò che ha coperto il 10,1% dell'elettricità totale mondiale, come già mostrato in Figura 16.

I reattori nucleari sono tra le più complesse realizzazioni industriali mai effettuate; essere riusciti a controllare fenomeni naturali nascosti nelle più piccole dimensioni spaziali immaginabili costituisce uno dei maggiori trionfi dell'ingegno umano, ciò che li rende amati da una vasta fascia di esperti. La progettazione e lo sviluppo di reattori nucleari richiedono tuttavia tempi lunghi e costi assai ingenti<sup>68</sup>. Si capisce come anche le ditte più grandi possano aver problemi ad affrontare tali spese e per questo non è sorprendente che (specie in anni passati quando le prospettive del nucleare, almeno in Occidente, erano assai nere) ci siano stati accordi tra i colossi del settore. Già nel 2006 vi erano tre alleanze tra gruppi occidentali e giapponesi per quanto riguarda la produzione di reattori nucleari: Areva con Mitsubishi Heavy Industries; General Electric con Hitachi; inoltre Westinghouse è diventata quasi al 90% proprietà di Toshiba. Nel 2016, poi, la Westinghouse ha collaborato con la cinese State Nuclear Power Technology Corporation per svi-

---

<sup>68</sup> L'adattamento per il mercato americano del reattore EPR, l'US-EPR da 1710 MWe, anche noto come Evolutionary EPR, ha da solo richiesto un milione di ore-uomo di lavoro; e si noti che il grosso del lavoro ha riguardato il "semplice" cambio della frequenza dell'elettricità generata, dai 50 Hz originari ai 60 Hz usati negli Usa.

luppare l'impianto AP1000 (che è divenuto noto come CAP1000, e, come versione maggiorata, CAP1400).

Tabella 11: Modelli di reattori disponibili oggi sul mercato, con i rispettivi produttori.

Ditta costruttrice	Modelli di reattore
EDF (Framatome)	EPR2, Atmea 1, Kerena
Westinghouse	AP1000
GE Hitachi	ABWR, ESBWR, PRISM
KHNP	APR1400, Eu-APR
Mitsubishi	APWR, Atmea 1
Rosatom	AES-92, AES-2006, VVER-TOI
SNC-Lavalin	EC6
CNNC & CGN	Hualong One
SNPTC	CAP 1400

Tabella 12: Reattori di potenza avanzati oggi operativi o in costruzione.

Costruttore	Tipo di reattore	Potenza in MWe (lorda)	Situazione & note
GE Hitachi, Toshiba	ABWR	1380	Commercialmente operativo in Giappone dal 1996-7. Certificazione del progetto in Usa ottenuta nel 1997. Certificazione del progetto in GB nel 2013. Sistemi di sicurezza attiva.
KHNP	APR1400 (PWR)	1450	Operativi: Shin Kori 3&4 in Sud Corea e a Barakah negli Emirati Arabi Uniti. In costruzione: Shin Hanul 1&2 in Sud Corea. Certificazione del progetto coreana nel 2003. Certificazione del progetto americana nel 2019.

Gidropress	VVER-1200 (PWR)	1200	Operativi a Novovoronezh II e Leningrad II in Russia e a Ostrovets in Bielorussia. In costruzione ad Akkuyu in Turchia e a Rooppur in Bangladesh.
OKBM	BN-800	880	Reattore veloce dimostrativo e per test a Beloyarsk 4.
Westinghouse	AP1000 (PWR)	1250	4 unità in funzione in Cina e molte in programma (nella versione CAP1000); 2 in costruzione negli Usa.
Framatome (& EDF)	EPR (PWR)	1750	2 unità in funzione in Cina, una in Finlandia <sup>69</sup> ; in costruzione in Francia e GB.
CNNC & CGN	Hualong One (PWR)	1170	Principale progetto cinese destinato all'esportazione; in funzione a Fuqing in Cina, e a Karachi in Pakistan.

Tabella 13: Altri reattori avanzati costruiti o in costruzione.

Costruttore	Tipo di reattore	Potenza in MWe (lorda)	Stato di avanzamento & note
Gidropress	VVER-TOI (PWR)	1255	In costruzione a Kursk II; in programma a Nizhny Novgorod e in molti altri siti russi.
INET & CNEC (Cina)	HTR-PM, modulo HTR-200	2x105 (un modulo)	Impianto dimostrativo costruito a Shidaowan.
SNPTC	CAP1400/ Guohe One	1500	Impianto dimostrativo costruito a Shidaowan.

<sup>69</sup> Si tratta del famoso (famigerato?) reattore EPR di Olkiluoto, la cui costruzione iniziò nel 2005, con una previsione di costo di 3,2 miliardi di euro e con la conclusione dei lavori fissata per il 2009. A seguito di una serie di ritardi tecnici e burocratici questo impianto, all'ottobre 2017, era già costato 8,5 miliardi di euro. La prima criticità è stata raggiunta a fine 2021. L'immissione regolare di elettricità in rete è prevista per il luglio 2022.

Tabella 14: Reattori di potenza avanzati pronti per il mercato.

Costruttore	Tipo di reattore	Potenza in MWe (lorda)	Situazione & note
GE Hitachi	ESBWR	1600	Due impianti previsti negli Usa. Sviluppato a partire dall'ABWR, cui si sono aggiunti sistemi passivi di sicurezza. Certificazione del progetto in USA nel 2014.
Mitsubishi	APWR	1530	Previsto a Tsuruga in Giappone. Richiesta di certificazione del progetto in Usa per la versione US-APWR, ma ora ritardata. Nell'ottobre 2014 approvazione in Europa per il progetto EU-APWR.
Areva & Mitsubishi	Atmea1 (PWR)	1150	In origine progettato per Sinop in Turchia. Il progetto per la Francia è stato approvato nel 2012. La certificazione del progetto in Canada sta procedendo.
Candu Energy	EC6 (PHWR)	750	Si tratta di un modello Candu-6 migliorato. Nel 2013 ha ottenuto la certificazione canadese per il progetto.
OKBM	VVER-600	600	In programma per la penisola di Kola.

### Dai reattori di oggi a quelli del futuro

L'industria nucleare ha continuato a sviluppare le proprie tecnologie nel corso dei passati decenni, producendo reattori di vari tipi; in generale si parla di impianti di *prima generazione* per quelli sviluppati negli anni '50 e '60, dei quali l'ultimo è rimasto in funzione fino al 2015 in Gran Bretagna. Quelli di seconda generazione comprendono gli impianti più diffusi in Usa, Francia e altrove; includono i reattori ad acqua bollente (BWR), ad acqua in pressione (PWR), ad acqua pesante<sup>70</sup> come i Candu canadesi; inoltre gli RBMK e

<sup>70</sup> Acqua pesante = acqua deuterata, con atomi di deuterio al posto di idrogeno, cioè D<sub>2</sub>O anziché H<sub>2</sub>O.

VVER sovietici/russi, ecc. Ci sono poi le centrali di *terza generazione*, che presentano vari miglioramenti evolutivi in termini di sicurezza, affidabilità, operabilità, durata di vita utile (arrivata ormai a 60 anni), aumento a (di solito) 72 ore del tempo in cui l'impianto non richiede interventi a seguito di un arresto d'emergenza. Inoltre sono introdotte specifiche misure per resistere meglio all'eventuale impatto di aerei, per ridurre gli eventuali rilasci di sostanze radioattive, per sfruttare meglio il combustibile, per limitare il volume delle scorie, per aumentare il periodo tra una ricarica di combustibile e la successiva, grazie all'uso di assorbitori di neutroni sacrificabili (veleni neutronici che si distruggono man mano che la reazione a catena procede). In questi impianti si è operata anche una semplificazione e standardizzazione del progetto, col risultato di velocizzare le procedure autorizzative, ridurre i costi e minimizzare i tempi di costruzione; non si tratta comunque di nulla di eccezionalmente nuovo, nemmeno nella cosiddetta *generazione III+*, caratterizzata dall'inclusione di alcuni sistemi di *sicurezza passiva*, che si basano su fenomeni fisici tipo la convezione naturale o la forza di gravità, così che l'impianto possa reagire spontaneamente quando ci dovessero essere scostamenti dalle condizioni di normale funzionamento; la sicurezza risulta quindi aumentata dal fatto che, per entrare in funzione, questi dispositivi non necessitano né di intervento umano né di alimentazione elettrica. Il Giappone è stato tra i primi ad impiegarli.

Ulteriore caratteristica interessante dei reattori di questa generazione è la possibilità di *variare la potenza* in base alle fluttuazioni di richiesta sulla rete elettrica in cui immettono l'energia da loro prodotta. Questo elimina uno dei grossi limiti delle centrali nucleari tradizionali, che sono state sempre viste come adatte solo alla copertura del carico di base, mentre per seguire i transienti e le variazioni rapide si ricorreva ad altre fonti energetiche (soprattutto idroelettrico e gas). C'è in realtà una specifica europea<sup>71</sup> che stabilisce come i nuovi progetti di reattore debbano essere capaci di "inseguire" il carico,

---

<sup>71</sup> Detta European Utility Requirements (EUR), le sue origini risalgono al 1991. È il frutto del primo accordo tra le principali ditte in possesso di reattori (o interessate a realizzarli), che hanno in pratica steso una lista dettagliata di circa 5000 (cinquemila!) componenti che devono essere presenti nei nuovi impianti nucleari, per soddisfare rigidi criteri di sicurezza. In Europa si richiede sempre più spesso che i nuovi grandi reattori siano dotati di un "acchiappa nocciolo" (ci si permetta di chiamarlo scherzosamente così), tale che nel caso di un incidente grave con fusione del nocciolo, non solo la base di questo venga fortemente raffreddata, ma che ci sia un sistema per raccogliere e contenere ogni materiale fuso che dovesse sprofondare verso il basso. Reattori come l'EPR ed il VVER-1200 hanno un "acchiappa nocciolo" sotto il vessel a pressione, mentre l'AP1000 e l'APWR prevedono un raffreddamento rafforzato.

modulando la propria produzione tra il 50 ed il 100% della potenza nominale. Già i reattori francesi venivano parzialmente utilizzati in questo modo.

Tra i reattori recenti possiamo ricordare gli impianti ad acqua bollente evoluti del tipo dell'ABWR della Toshiba in collaborazione con la General Electric, il BWR 90+ della Westinghouse, l'ESBWR della General Electric e lo SWR-1000 di Areva. E ci sono anche i reattori avanzati ad acqua in pressione, che includono i Westinghouse AP-600<sup>72</sup> e AP-1000<sup>73</sup>, il PWR System 80+ della Westinghouse, l'APWR di Mitsubishi, l'APR1400 sudcoreano e l'EPR<sup>74</sup> di Areva. Quest'ultimo è progettato per poter ridurre la propria produzione al 25% in caso di scarsa richiesta sulla rete, per poi aumentarla al tasso del 2,5% al minuto fino a giungere al 60% della potenza massima, e addirittura al 5% al minuto per arrivare al 100%. Ciò permette di andare dal 25% al 100% in meno di mezz'ora, a scapito di un aumento dello stress delle strutture dell'impianto.

L'ultima caratteristica che citiamo per i reattori di questa generazione è che, in taluni casi, si prevede una *costruzione modulare*, nella quale parti importanti della struttura e della meccanica, fino a un peso massimo dei moduli di un migliaio di tonnellate, possono venir realizzate in fabbrica o in prossimità del sito della centrale, per poi venir spostate in posizione. Questo permette di effettuare in parallelo certe fasi della lavorazione, riducendo i tempi di costruzione. Per dare un'idea, il reattore AP1000 ha 149 moduli strutturali di cinque tipi principali e 198 moduli meccanici di quattro tipi; assieme rappresentano un terzo di tutta la costruzione.<sup>75</sup> La Westinghouse stima che grazie a queste modalità costruttive il tempo di realizzazione della centrale possa ridursi addirittura a soli tre anni.<sup>76</sup>

---

<sup>72</sup> AP=Advanced Passive (passivo avanzato).

<sup>73</sup> Questo è stato il primo reattore di generazione III+ ad ottenere la certificazione della Nuclear Regulatory Commission americana, ancora nel 2005. (<https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>).

<sup>74</sup> Il primo reattore EPR è stato realizzato ad Olkiluoto in Finlandia; il secondo a Flamanville in Francia. Entrambi sono incorsi in tremendi ritardi, ciò che ha causato la ristrutturazione della ditta costruttrice (Areva), mentre Electricité de France si è accollata il settore degli impianti nucleari. Il primo EPR connesso alla rete elettrica è stato comunque quello di Taishan in Cina, entrato in attività commerciale nel 2018.

<sup>75</sup> <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>.

<sup>76</sup> Ciò va confrontato con il dato reale della costruzione del primo di questi reattori in Cina, che doveva richiedere solo 57 mesi ma ne ha impiegati 110. Questo dato va anche confrontato con i 7 o 8 anni impiegati per la costruzione dei recentissimi reattori sudcoreani APR1400 (di generazione III; sono entrati in funzione dopo il 2020) negli Emirati Arabi Uniti.

Si stanno ora studiando impianti di cosiddetta *IV generazione*; una definizione generica che indica non un semplice miglioramento o ottimizzazione delle precedenti filiere, ma una riprogettazione pesante che, partendo da un nuovo set di principi di base, operi per soddisfarli, tenendo ovviamente conto delle lezioni apprese con l'esperienza maturata nei decenni passati sui reattori allora disponibili. Questi principi sono riassumibili in tre punti: *Sostenibilità*, ovvero l'utilizzabilità nel lungo periodo dei nuovi impianti, associata alla minimizzazione dei volumi di scorie e alla loro durata; *Economia*, ovvero offrire vantaggi superiori rispetto ad altre fonti energetiche, uguagliandone i rischi finanziari; *Sicurezza ed affidabilità*, ovvero questi nuovi progetti devono eccellere in questi settori critici e ridurre al minimo la possibilità che il nocciolo dei reattori subisca danni; e se ciò succedesse, i danni dovranno essere limitati, così da rendere inutile ogni misura di sicurezza al di fuori del perimetro dell'impianto.

Ancora nel 2000 nacque il Forum Internazionale per la Quarta Generazione (in sigla inglese GIF), su iniziativa del ministero dell'energia americano. Vi partecipano oggi molti governi e qualche ditta privata. Il GIF ha selezionato sei tecnologie nucleari ritenute particolarmente promettenti per il futuro di questo settore. La maggior parte di queste prevede un ciclo chiuso del combustibile, per minimizzare il consumo di risorse minerarie e per ridurre la quantità di scorie ad alta attività da inviare in discarica. Inoltre tre tecnologie su sei impiegano neutroni veloci. Due sono raffreddate con elio mentre le altre impiegano piombo/bismuto, sodio o fluoruri salini; questi ultimi tre tipi funzionano a pressioni basse, ciò che costituisce un ulteriore fattore di sicurezza. L'uranio usato nel reattore a fluoruri salini è disperso nel fluido di raffreddamento. Un'importante caratteristica di alcune filiere di IV generazione è che le loro caratteristiche di funzionamento (in particolare l'altissima temperatura, che va da 510 a 1000 °C, rispetto ai reattori oggi più diffusi, che non superano i 330°C) potrà consentire di produrre non solo ed esclusivamente energia elettrica e calore, ma anche generare idrogeno, oppure potranno venir impiegati per la propulsione navale. Inoltre questi nuovi reattori dovranno caratterizzarsi per un'elevata resistenza alla proliferazione nucleare del combustibile da loro impiegato, sia nella fase pre- che post-irraggiamento. Gli impianti di quarta generazione per diffondersi richiederanno parecchi anni, stimiamo una ventina; per qualche modello ciò avverrà anche prima.

Ecco qualche dettaglio per vari progetti di quarta generazione:

*Reattori veloci raffreddati a gas*, in grado di usare come combustibile una buona parte delle attuali scorie prodotte dalle filiere precedenti; il refrigerante sarà elio.

*Reattori ad altissima temperatura*, refrigerati ad elio, moderati con grafite e con l'uranio come combustibile, in un ciclo aperto.<sup>77</sup> L'alta temperatura consentirà di produrre idrogeno.

*Reattori raffreddati ad acqua supercritica*, progettati per funzionare ad alta pressione e temperatura, così che l'acqua si trovi oltre il punto critico termodinamico.

*Reattori veloci raffreddati a sodio liquido*, potranno utilizzare le attuali scorie radioattive come combustibile, in un ciclo chiuso che permetta di gestire tutti gli attinidi prodotti durante il funzionamento, così come di convertire l'U238 in isotopi fissili.

*Reattori veloci raffreddati a piombo liquido*, (in alcuni casi il refrigerante impiegherà anche il bismuto) caratterizzati da un ciclo chiuso per convertire efficacemente l'U238 e gestire gli attinidi.

*Reattori a sali fusi*, dovrebbero funzionare con un combustibile formato da una miscela di materiali fissili e sali fusi, permettendo di usare gli attinidi provenienti dal riprocessamento, in un ciclo chiuso.

Prima di chiudere questa sezione del nostro articolo, diciamo qualche parola sui Piccoli Reattori Modulari (*Small Modular Reactors*, SMR), nei cui riguardi c'è attualmente parecchio interesse. Si tratta di impianti di terza o quarta generazione, con una produzione limitata di elettricità, in genere non superiore ai 300 MWe. Sono state elaborate decine di progetti. Attualmente esiste un solo vero SMR, la centrale flottante Akademik Lomonosov, ancorata nell'estremo oriente russo a Pevek. Il primo SMR commerciale basato a terra viene costruito in questi anni in Cina e dovrebbe entrare in funzione nel 2026.

La costruzione degli SMR dovrebbe avvenire in apposite fabbriche, da dove sarebbero poi trasportati a destinazione. La minor presenza di materiali radioattivi nel nucleo ridurrebbe l'impatto ambientale nel caso di grossi incidenti, e le dimensioni limitate dovrebbero consentire di ridurre i tempi di costruzione e, conseguentemente, i rischi finanziari dovuti all'immobilizzazione di grossi capitali. Discutibile la eventuale riduzione del costo, dipendendo molto dal numero di impianti realizzati, così da ottenere economie di

---

<sup>77</sup> Con ciclo del combustibile nucleare si intende l'insieme delle fasi cui esso viene sottoposto, da quelle preliminari di preparazione degli elementi che saranno inseriti nel nocciolo del reattore, alla fase di irraggiamento in cui esso libera energia, a quelle terminali necessarie per gestire in sicurezza la fortissima radioattività che vi si è generata; in questa ultima fase si può scegliere se "riprocessare" il materiale per recuperare ciò che ancora di utile contiene, oppure mandare tutto in una opportuna scarica. Nel primo caso si parla di ciclo chiuso, nel secondo di ciclo aperto.

scala. In sostanza ci pare ancora troppo presto per poter affermare qualcosa di definitivo sulla concreta praticabilità di queste nuove centrali nucleari; rimane comunque un dato di fatto, che il basso costo del chilowattora, da eolico e fotovoltaico in particolare, rende molto difficile la competitività di questi impianti. Come ha detto W. Magwood, direttore generale della Agenzia per l'energia nucleare della Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico, già membro della US Nuclear Regulatory Commission, "Se queste tecnologie non arrivano sul mercato ... nel giro di un decennio ... potrebbero non giocare nessun ruolo nella transizione energetica [verso una produzione senza emissioni di gas clima-alteranti. NdA]".<sup>78</sup>

Tra i principali problemi presentati dai reattori nucleari abbiamo visto esservi la possibilità di gravi incidenti (*à la Chernobyl*) e la produzione di scorie radioattive di lunghissima durata. Inoltre la quantità di uranio non è abbondante. Sulla base di queste considerazioni, sono state avanzate proposte (ad esempio da Carlo Rubbia) miranti a proporre un nuovo tipo di impianto capace di ridurre (se non eliminare) i problemi suddetti. Chiamato "*accelerator driven system*"<sup>79</sup> o ADS, consisterebbe in una parte in cui avvengono reazioni a catena, impieganti uranio o plutonio, ma sottocritiche, cioè non in grado di prolungarsi nel tempo, causa un insufficiente flusso di neutroni capaci di provocare fissioni. A ciò si rimedia immettendo dall'esterno una piccola quantità di neutroni extra, in particolare impiegando un acceleratore di particelle (del tipo di quelli usati per esperimenti di fisica nucleare e sub-nucleare) che spara protoni di alta energia contro un adatto bersaglio di alto numero atomico (ad es.: tungsteno, tantalio, torio, uranio impoverito, piombo-bismuto, ...), che per il fenomeno della spallazione emette neutroni. Per dare un'idea, un protone da 25 MeV di energia produce circa un neutrone per spallazione, e questo numero cresce all'aumentare dell'energia. Con questo aiutino la reazione a catena può procedere nel tempo. Il vantaggio è che in caso di malfunzionamenti del reattore, basta spegnere l'acceleratore per interrompere immediatamente il fascio di protoni ed arrestare la produzione di energia da fissione. Quindi la sicurezza aumenta notevolmente.

Il flusso di neutroni dà poi la possibilità di bombardare nuclei di torio (elemento fertile<sup>80</sup> la cui abbondanza è circa quattro volte superiore all'ura-

---

<sup>78</sup> <https://thehill.com/opinion/energy-environment/565024-its-time-to-cancel-the-versatile-test-reactor/>.

<sup>79</sup> Potremmo tradurlo come "sistema sostenuto da un acceleratore (di particelle)".

<sup>80</sup> Colpito da neutroni si trasforma in un altro nucleo, l'uranio 233, fissile, capace cioè di sostenere una reazione a catena.

nio) disposti intorno al bersaglio del fascio di protoni, trasformandolo in uranio 233 che è fissile e, scindendosi, contribuisce energia al sistema, che può quindi trasformarsi in un “amplificatore di energia”, secondo l’espressione cara a Rubbia. Continuando la produzione di U233 si potrebbe arrivare a far funzionare il reattore senza più ricorrere all’immissione di uranio o plutonio, ma solamente impiegando torio.

Ultimo aspetto interessante dell’ADS sarebbe la possibilità di ridurre col bombardamento neutronico il tempo di dimezzamento degli isotopi radioattivi a lunga vita che si producono durante il funzionamento dei reattori convenzionali, se non addirittura trasformarli in nuclei stabili. Si potrebbe quindi immaginare una specie di complesso nucleare con diversi reattori convenzionali il cui combustibile esaurito è poi processato in un ADS per ridurre il problema delle scorie a lunga vita.

Come si può capire facilmente, le procedure descritte sono complesse e non costituiscono certo una panacea.

### *Geopolitica del nucleare*

*Nelle discussioni sul nucleare quale fonte energetica da impiegare per soddisfare le esigenze delle nazioni, raramente si presta attenzione ad un aspetto particolarmente impegnativo, quello della cosiddetta proliferazione nucleare. La prospettiva di un mondo con sempre più stati dotati di armamento atomico non è particolarmente positiva, dato che cresce la probabilità che, prima o poi, qualcuno lo utilizzi in situazioni di conflitto. Per questo, numerosi sforzi sono stati compiuti nel passato per cercare di limitare la diffusione di questi ordigni. Un notevole traguardo è stato conseguito una cinquantina di anni fa, quando è stato firmato il cosiddetto Trattato di Non Proliferazione (TNP), entrato in vigore nel 1970. Doveva durare per 25 anni, poi è stato prolungato indefinitamente. È stato ratificato da 189 paesi, alcuni subito, altri più tardi (Cina e Francia solo nel 2003), ma non da Israele, India, Pakistan; la Corea del Nord ne era membro ma se ne è uscita nel 2003.*

*Il punto-chiave del TNP sta nell'articolo 6, secondo il quale tutti i paesi aderenti, dotati dell'arma nucleare, si impegnano a condurre negoziati in buona fede su misure efficaci mirate a fermare la corsa agli armamenti in tempi brevi e a giungere al disarmo nucleare. Questo è un aspetto critico: di fatto il Trattato non è stato soddisfatto da quegli stessi che l'avevano proposto, perché è pur vero che i principali arsenali, quelli di Usa e Russia, sono stati ridotti, ma si è ben lontani dalla loro eliminazione; al contrario, grossi investimenti vengono fatti ancor oggi, a mezzo secolo dalla nascita del TNP, per tenerli in efficienza e per modernizzarli. Questo rappresenta un bel siluro lanciato contro il trattato. Infatti il TNP prevedeva che gli stati non nuclearmente dotati accettassero di restar tali a fronte del solenne impegno a disarmare preso dalle potenze atomiche. Ma ancora oggi gli arsenali di USA e Russia contengono qualche migliaio di bombe, sufficienti per distruggere la civiltà moderna. È questo uno dei motivi per cui il TNP non gode di buona salute.*

*Un altro motivo è che proprio gli Stati Uniti, un paese che ha fortemente voluto il TNP, gli hanno inferto un grave colpo, quando, al tempo del governo di G. W. Bush, hanno sottoscritto un accordo con l'India, per la fornitura a questo paese di tecnologia e materiali nucleari. Se lo scopo di questa mossa era il rafforzamento dei rapporti indo-americani in funzione anticinese, il fatto che l'India non facesse parte del TNP avrebbe dovuto impedirle di ricevere assistenza nucleare. È prevista infatti la possibilità di assistere i Paesi che intendono sfruttare l'energia atomica a fini pacifici, ma solo se aderiscono al TNP e si sottopongono pure ai controlli della Agenzia internazionale per l'energia atomica (un organismo dell'ONU). Specialmente la fornitura di uranio per i reattori nucleari dell'India permette a questo paese di dirottare sul proprio programma nucleare militare tutte le risorse di materiali fissili già in suo possesso. Il considerare l'India un paese amico, cui fare favori (contrari però alla legge internazionale), contrasta fortemente con le sanzioni feroci imposte a paesi come la Corea del Nord e l'Iran. Se per il primo una giustificazione ci potrebbe essere, dato che ha decisamente imboccato la strada del nucleare bellico, il secondo afferma di volersi limitare strettamente al settore civile. Ci troviamo qui di fronte a un classico caso dell'uso di due pesi e due misure.<sup>81</sup>*

*L'interesse di alcuni paesi ricchissimi di idrocarburi per il nucleare civile può far sorgere qualche sospetto che le loro intenzioni siano in realtà anche di carattere militare; è il caso degli Emirati Arabi Uniti, che hanno già due reattori funzionanti e altri due in programma, e dell'Arabia Saudita, che ha in atto collaborazioni con Cina<sup>82</sup> e Argentina.*

<sup>81</sup> Anche nei confronti della Corea del Sud si è chiuso un occhio su gravi violazioni. Seoul condusse esperimenti segreti di arricchimento dell'uranio dal 1979 al 1981 e poi ancora nel 2000 e di separazione del plutonio nel 1982 incompatibili con gli accordi internazionali che ha sottoscritto. Stante i buoni rapporti di questo paese con gli Stati Uniti, nessuna penalità o altra misura punitiva gli venne mai applicata. (Bulletin of the Atomic Scientists, Jan/Feb 2005, p. 40-9).

<sup>82</sup> W.P. Strobel, M.R. Gordon e F. Schwartz, "Saudi Arabia, With China's Help, Expands Its Nuclear Program", The Wall Street Journal, August 4, 2020, <https://www.wsj.com/articles/saudi-arabia-with-chinas-help-expands-its-nuclear-program-11596575671>.

*Se guardiamo alla storia degli ultimi settant'anni dal punto di vista delle armi nucleari, scopriamo che anche l'Italia, alla fine degli anni cinquanta, aveva i suoi progetti, in accordo con Germania e Francia. I Paesi che allora volevano la bomba atomica erano tanti: molti progetti sono stati però abbandonati, e ci sono addirittura quattro potenze (Sudafrica, Ucraina, Bielorussia, Kazakistan) che hanno rinunciato alle bombe nucleari già in loro possesso. Ricordiamo en passant come l'Africa sia un "continente denuclearizzato", così come anche il Sudamerica. È infine utile notare alcuni esempi storici di superpotenze nucleari che hanno perso delle guerre senza ricorrere a nessuna delle loro numerosissime bombe atomiche: gli USA in Vietnam e l'URSS in Afghanistan. Sulla base di questi casi, si può perfino dubitare che le armi nucleari abbiano un significato concretamente militare, oltre ad essere un evidente simbolo di potenza e prestigio.*

## Conclusioni

Essere riusciti a padroneggiare l'energia nucleare, specie nella sua veste civile, con la costruzione dei moderni reattori, rappresenta il maggior successo dell'intelletto umano e della capacità di dare forma concreta anche alle idee più ambiziose; un vero trionfo dell'*homo faber*. Il dominio sull'energia nasosta nel nucleo degli atomi costituisce un prezioso precedente, da tenere presente quando l'umanità si sente fronteggiata da problemi gravi ed urgenti, come il cambiamento climatico, le nuove pandemie, la scarsità di risorse essenziali come l'acqua. Essendo riusciti a "domare" l'energia nucleare, possiamo essere fiduciosi di poter davvero risolvere ogni problema! Ciò nel caso che ci sia una chiara e decisa volontà politica ed un preciso progetto operativo.

L'energia atomica sconta però un peccato originale gravissimo, quello di essersi proposta all'attenzione dei popoli della Terra nella sua veste peggiore, quella che ha consentito ad un singolo ordigno di distruggere in un istante la vita di circa centomila persone nella città di Hiroshima il sei agosto del 1945, ripetendo tre giorni dopo questa "prodezza" contro Nagasaki.

Per quanto riguarda l'energia nucleare nella sua veste civile, essa ha messo l'umanità nella scomoda situazione di dover affrontare un problema che mai prima si era posto concretamente; adottare o no una tecnologia capace, da una parte, di darci un prodotto assai utile come l'elettricità, ma dall'altra generando un rischio che, pur relativamente basso, avrebbe però dalle conseguenze potenziali davvero molto pesanti, come insegnano i disastri di Chernobyl e di Fukushima. Per ridurre questo rischio le nostre società dovrebbero riuscire a mettere in primo piano la sicurezza, anteponendola alla tendenza quasi insuperabile a porre invece al primo posto l'interesse economico.<sup>83</sup>

Un altro aspetto davvero delicato, almeno dal punto di vista etico, è rappresentato dalla produzione di scorie altamente radioattive, talora in parte pure chimicamente molto velenose, che vanno tenute separate dalla biosfera per tempi che superano i centomila anni, cioè una durata decine di volte superiore a quella delle più antiche civiltà umane. È giusto ed accettabile lasciare alle future generazioni una eredità così scomoda?

Le ingenue speranze che il nucleare rappresentasse la panacea energetica del futuro sono ormai scomparse da tempo, non tanto a seguito dei gravissimi incidenti, davvero pochi peraltro, ma piuttosto per banali considerazioni

---

<sup>83</sup> Si vedano i seguenti volumi: di M. Elena "Chernobyl e il Trentino: la paura atomica nel piatto", Tecnolito, Trento, 2007, pagg. 75-6; di G. Charpak, R. L. Garwin e V. Journé "De Tchernobyl en tchernobyls", Odile Jacob, Paris, 2005.

economiche, che da due o tre decenni a questa parte hanno fortemente limitato, almeno in Occidente, l'adozione diffusa di questa tecnologia. A maggior ragione, oggi il nucleare sconta un costo per chilowattora che non lo rende concorrenziale con le energie rinnovabili più promettenti, come l'eolico e il fotovoltaico. Il nucleare viene ancora perseguito solo in quei paesi in cui sono i denari pubblici a sovvenzionarlo pesantemente (e questo avviene oltre cinquant'anni dopo il suo primo arrivo sul mercato; ciò che non ci si aspetterebbe da una tecnologia, se fosse ormai davvero "matura").

La complessità dei reattori nucleari li rende inoltre poco adatti per l'impiego in paesi sottosviluppati, dove manca una sufficiente struttura tecnologica, così come maestranze ben addestrate per utilizzarli al meglio. Questa tecnologia è invece essenziale per applicazioni in situazioni ed ambienti estremi, come potrebbero essere le basi in Antartide, su Marte o le sonde per l'esplorazione dei pianeti esterni del sistema solare o anche per lo spazio interstellare.

Un ultimo aspetto molto delicato della tecnologia dei reattori è infine rappresentato dal rischio di proliferazione di ordigni di distruzione di massa. Questo risulta possibile data la natura duale delle competenze e dei materiali necessari per realizzare le centrali nucleari; la storia ha dimostrato chiaramente che paesi come l'India, il Pakistan, la Corea del Nord, il Sudafrica hanno costruito le loro bombe atomiche solo dopo essersi dotate delle infrastrutture e delle competenze di base necessarie per portare avanti la realizzazione di impianti energetici impieganti le reazioni a catena dell'uranio o del plutonio. Come abbiamo già trattato in un testo specifico,<sup>84</sup> non c'è modo davvero efficace per evitare del tutto questo pericolo, che potrebbe rendere la convivenza pacifica tra i popoli ancora più difficile e precaria.

A prescindere dai rischi di proliferazione, sono varie le ragioni per cui riteniamo che il nucleare non sia destinato a giocare un ruolo di primaria importanza nel nostro futuro, specie se confrontiamo le sue caratteristiche con quelle delle energie rinnovabili, eolico e fotovoltaico in particolare. I vantaggi delle rinnovabili sono assai rilevanti: mancanza di inquinamento e di scorie pericolose, facilità di smantellamento a fine vita, distribuzione universale, non interrompibilità per ragioni politiche, durata infinita, abbon-

---

<sup>84</sup> M. Elena, "Nuclear Proliferation: Shadows, Lights and Reflections" nel volume "Still the Century of Overkill? Strengthening the Control of Weapons of Mass Destruction", P. Foradori (Ed.), 2015, Nomos Bloomsbury.

danza straordinaria,<sup>85</sup> robustezza strategica,<sup>86</sup> costo conveniente, mancanza di esternalità pesanti.

Per capire che la prospettiva di una estesissima diffusione delle rinnovabili<sup>87</sup> è davvero concreta basti dire che uno studio commissionato all'International Energy Agency e al Réseau de transport d'électricité transalpino dal governo francese (pubblicato ad inizio del 2021) conclude che "non ci sono barriere tecniche insormontabili per sviluppare una produzione energetica in cui le rinnovabili coprano una percentuale molto alta del totale"; si parla addirittura di un 85-90% entro il 2050 e il 100% entro il 2060. Per giungere a questi livelli vengono però indicati quattro settori in cui si deve ancora migliorare molto: la robustezza dei sistemi elettrici: l'adeguatezza e la flessibilità delle risorse per gestire la variabilità del vento e del fotovoltaico; la disponibilità di riserve operative ed infine lo sviluppo della rete elettrica.

C'è chi immagina che nel giro di alcuni decenni avremo molta energia dalla fusione nucleare. In questo articolo, per brevità, non abbiamo toccato questo argomento, ma riteniamo che quando i primi reattori di questo tipo diverranno disponibili (cosa su cui non nutriamo dubbi), la loro adozione si troverà di fronte barriere rilevanti, in particolare il costo e le relative problematiche di finanziamento, la complessità tecnologica (che diminuirà la affidabilità e creerà dipendenza da pochissimi fornitori), la produzione concentrata e la debolezza strategica. I reattori a fusione arriveranno sul mercato quando questo avrà ormai adottato e assorbito una filosofia di produzione distribuita con la partecipazione dei cittadini sia sul fronte della generazione (con impianti familiari e comunità energetiche) che dell'immagazzinamento

---

<sup>85</sup> La quantità di energia solare che cade sul nostro pianeta in un anno è circa quindicimila volte superiore all'insieme di tutte le energie attualmente consumate dagli umani nello stesso periodo di tempo.

<sup>86</sup> Ci riferiamo alla possibilità che, in una situazione di conflitto, gli impianti energetici costituiscano obiettivo di attacco da parte del nemico. Da questo punto di vista una centrale nucleare, pur costruita con criteri di massima robustezza, mai potrà resistere ad un attacco determinato con le armi più distruttive. Il risultato sarebbe la perdita di una impropria fonte di energia e soprattutto la fuoriuscita di sostanze radioattive con la conseguente necessità di evacuazione di popolazione, panico, sospensione di attività economiche, ecc. D'altra parte, un parco eolico oppure un campo fotovoltaico, distribuiti su un territorio più vasto, per essere distrutti in maniera irreversibile possono richiedere maggior sforzo all'attaccante, oltretutto con un dubbio bilancio tra costo economico degli ordigni impiegati e danno inferto.

<sup>87</sup> RTE-IEA, "RTE and IEA publish study on the technical conditions necessary for a power system with a High Share of Renewables in France Towards 2050", Press Release, 27 January 2021. <https://www.iea.org/news/rte-and-iea-publish-study-on-the-technical-conditions-necessary-for-a-power-system-with-a-high-share-of-renewables-in-france-towards-2050>.

(grazie al parco veicoli elettrici che serviranno a far fronte alle fluttuazioni della curva di carico elettrico).

Detto quanto sopra, è necessario, in questi primi decenni del secondo millennio, trovare la volontà politica per indirizzare urgentemente risorse materiali, finanziarie ed intellettuali verso un aggressivo programma di adozione su grande scala delle energie rinnovabili, così da evitare i disastri causati dal cambiamento climatico e nel contempo garantire a tutti i popoli del pianeta una disponibilità elettrica capace di garantire qualità di vita e prospettive di sviluppo.

Abbiamo ormai diversi esempi del modo in cui si sono mobilitate cifre ingentissime per affrontare delle emergenze improvvise: salvare il mondo della finanza dopo la crisi originatasi con i mutui subprime americani; fronteggiare l'epidemia di covid-19; aiutare l'Ucraina assalita dai russi. In maniera simile bisogna che ora i governi del mondo si impegnino per combattere immediatamente il cambiamento climatico; anche i popoli della Terra devono fare la loro parte, esigendo che le loro autorità politiche si muovano velocemente in questa direzione. Se non lo faranno e perderemo altro tempo prezioso, prima di agire con decisione, il prezzo da pagare sarà enorme. Sta a tutti noi fare ora le scelte giuste.

## Appendice 1

### Alcuni dati sulla situazione post disastro di Chernobyl

Il reattore numero quattro della grande centrale di Chernobyl esplose nella notte del 26 aprile 1986, causando il peggior disastro nella storia dell'industria nucleare civile. L'analisi dell'evento è molto interessante, ma rimandiamo i lettori interessati a testi specifici.<sup>88</sup>

La popolazione che viveva nel raggio di trenta chilometri dalla centrale dovette venir evacuata, per limitare l'esposizione alle radiazioni. Oggi questo sito è diventato una destinazione turistica per chi è alla ricerca di sensazioni forti. Si potrebbe quindi pensare che la situazione sia ormai normalizzata, ma invece i problemi non sono finiti.

Nel novembre 2016 il governo ucraino ha inaugurato il New Safe Containment (NSC), una specie di supersarcofago per racchiudere i resti ancora

---

<sup>88</sup> M. Elena, "Chernobyl e il Trentino: la paura atomica nel piatto", Tecnolito, Trento, 2007. M. Elena (a cura), Chernobyl, dal dramma all'accoglienza, Fondazione aiutiamoli a vivere, 2016.

molto radioattivi del reattore; si tratta della più grande struttura mobile mai realizzata sulla terraferma. Per proteggere le maestranze addette alla costruzione, il suo enorme arco è stato eretto a varie centinaia di metri di distanza dal reattore disastroso nel 1986, ed una volta completato è stato spostato su speciali rotaie fino a sovrapporsi esattamente al vecchio “sarcofago” affrettatamente realizzato per impedire la fuoriuscita di ulteriore materiale radioattivo, e che si trovava ormai in precario stato di stabilità.

Progettato per sigillare tutto quello che è rimasto del reattore esploso, l'NSC dovrebbe avere una vita utile di almeno cento anni. È costato 1,6 miliardi di euro, raccolti grazie a contributi volontari di 45 nazioni e di alcune istituzioni internazionali, tra cui in primo luogo la Banca europea per la ricostruzione e lo sviluppo.

L'NSC garantirà che l'acqua piovana non arrivi più sulle circa 170 tonnellate di materiali presenti nel nocciolo fuso del reattore numero quattro, evitando così la possibilità che essa rallenti i neutroni emessi dall'uranio e dal plutonio, causando l'innescò di una nuova reazione nucleare a catena.<sup>89</sup> Come ci si poteva aspettare, il numero di neutroni che si misurano nei resti del reattore 4 è stabile o cala lentamente nel tempo, con però una notevole eccezione. In uno degli ambienti dell'impianto si è infatti verificato quasi un raddoppio dei neutroni e le cause di ciò non sono chiare.<sup>90</sup> Motivo di una certa tranquillità è comunque che, anche nel caso di una ripresa di criticità, cioè della ripartenza della reazione a catena, l'NSC dovrebbe riuscire a trattenere ogni rilascio di radioattività.

Vista la precaria stabilità del vecchio sarcofago, oggi contenuto all'interno dell'NSC, le autorità preposte a Chernobyl hanno dato incarico ad una ditta di smontarlo entro il 2023; compito questo non banale dato il livello elevato di radiazioni ancora presente in loco. Un progetto a più lunga scadenza prevede poi la rimozione di tutto il combustibile fuso e il suo immagazzinamento in un deposito geologico.

A Chernobyl, oltre ai resti dei quattro reattori là esistenti, vi sono altri

---

<sup>89</sup> Nel giugno 1990, dopo un intenso acquazzone, uno degli addetti al reattore disastroso dovette avventurarsi con urgenza in ciò che restava della sala reattore (esponendosi così agli elevati livelli di radiazioni colà presenti) per spargere sopra i materiali contenenti uranio e plutonio una soluzione di nitrato di gadolinio (elemento capace di assorbire i neutroni) e così cercare di bloccare una temuta ripresa della reazione a catena. Anni dopo venne installato sul tetto del sarcofago un sistema automatico di spruzzamento del gadolinio. Purtroppo è difficile che questo riesca ad infiltrarsi fino negli spazi sotterranei colmi di detriti. (<https://www.science.org/content/article/nuclear-reactions-reawaken-chernobyl-reactor>)

<sup>90</sup> “The World Nuclear Industry Status Report 2021”, p. 209.

impianti importanti. Tra questi la struttura provvisoria per l'immagazzinamento del combustibile nucleare esausto (indicata con la sigla ISF-1). Essa consiste di cinque grandi piscine, di cui quattro sono ormai piene con circa 21.000 vecchi elementi di combustibile. Nel 2000, dopo lo spegnimento dell'ultimo reattore ancora funzionante a Chernobyl, vari donatori internazionali hanno accettato di finanziare la realizzazione di due ulteriori impianti: il primo per trattare le scorie radioattive liquide (che è stato completato ancora nel 2018) e il secondo per immagazzinare a secco i materiali radioattivi (è indicato con la sigla ISF-2). In quest'ultimo, a partire dalla fine del 2019, si sono realizzati alcuni test di prova, per poi iniziare a fine 2020 dei test "a caldo", nel corso dei quali 16 elementi di combustibile sono stati predisposti, inseriti in speciali contenitori e indi depositati in appositi bunker di cemento, che sono stati infine sigillati dagli ispettori della AIEA. Nell'aprile del 2021 le autorità ucraine hanno dato l'assenso per il trasferimento di tutto il combustibile esaurito presente nelle piscine ISF-1 verso lo stoccaggio a secco ISF-2.

Il costo degli interventi per portare il reattore disastroso sotto controllo sono stati assai elevati. Nel 1991, oltre un quinto del bilancio statale della Bielorussia era dedicato a questo;<sup>91</sup> negli anni successivi questa cifra è calata fino a raggiungere il sei per cento nel 2002. Complessivamente la Bielorussia (paese piccolo e poco popolato) ha speso per Chernobyl tra il 1991 e il 2003 la cifra di circa tredici miliardi di dollari. Per quanto riguarda la Ucraina (sul cui territorio si trova Chernobyl, posta nell'estremo nord del paese) negli anni '90 essa ha speso per Chernobyl fino al 15% del suo budget, mentre negli anni 2000 fino al 7%. Queste cifre non rappresentano peraltro il costo totale del disastro, in quanto non includono le perdite indirette, come la mancata produzione elettrica, agricola, zootecnica, forestale, ed i redditi provenienti dalla pesca, dalla manifattura, e così via. Mettendo tutte queste voci assieme, l'Ucraina stima, per il periodo di venticinque anni seguiti al disastro, una perdita che si aggira sui 230 miliardi di dollari.<sup>92</sup> Come nel caso di Fukushima (v. Appendice 2) i costi dei disastri nucleari sono davvero pesanti.

---

<sup>91</sup> The Chernobyl Forum, "Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine", April 2006.

<sup>92</sup> Ministry of Ukraine for Emergencies, "Twenty-five Years after Chornobyl Accident: Safety for the Future", National Report of Ukraine, 2011. (<http://www.chernobyl.info/Portals/0/Docs/ua-25-chornobyl-angl-c.pdf>).

Chiudiamo queste brevi note citando uno studio tedesco,<sup>93</sup> secondo il quale, nella carne di molti dei cinghiali cacciati nella Sassonia, c'è ancor oggi una concentrazione eccessiva di isotopi radioattivi emessi dal reattore sovietico. Sembra che ciò sia dovuto all'alimentazione dei cinghiali, ricca di alcuni tipi di funghi che concentrano taluni isotopi radioattivi. In particolare, nella stagione venatoria 2020-21, su 1570 campioni esaminati, in 227 si superava il limite di legge di 600 Bq/kg. Un'altra fonte tedesca indica che ci sono diverse specie di funghi che, ancora nel triennio 2018-2020, sono ricchi di radioattività (>1000 Bq/kg).<sup>94</sup> Anche su questo fronte le conseguenze di Chernobyl si fanno ancora sentire, dopo ben trentasei anni.

## Appendice 2

### Alcuni dati sulla situazione post disastro di Fukushima

Rimandando ad altre fonti<sup>95</sup> per un esame dettagliato del disastro di Fukushima, avvenuto l'11 marzo del 2011, e che ha coinvolto quattro reattori, presentiamo qui alcuni dati sulle azioni di rimedio messe in campo dalle autorità giapponesi, così da capire l'enorme impegno tecnico e finanziario che ciò ha comportato e ancora richiede.

Iniziamo col dire che la rimozione del combustibile presente nei reattori disastri è stata completata per le unità 3 e 4, mentre si dovrà attendere fino al 2031 per le altre due. L'attuale piano di smantellamento degli impianti prevede sia completato tra il 2041 e il 2051.

Un grosso problema nei mesi successivi al disastro era costituito dall'acqua di raffreddamento gettata sui reattori, che si contaminava giungendo a contatto con le sostanze radioattive disperse dalle esplosioni e dalla fusione del nocciolo. Analogo problema si aveva con l'acqua piovana e quella di falda. Ancora nel 2014 la quantità era rilevante: 540 metri cubi (mc) al giorno; l'ipotesi di lasciarla fluire in mare, come successe nell'immediatezza delle esplosioni, non risultava accettabile nel medio-lungo periodo, soprattutto perché i giapponesi utilizzano molto il pesce, che sarebbe potuto risultarne inquinato.

<sup>93</sup> <https://www.wald.sachsen.de/radiocaesiumbelastung-von-wildschweinfleisch-4538.html>.

<sup>94</sup> <https://www.bfs.de/EN/topics/ion/environment/foodstuffs/mushrooms-game/mushrooms-game.html>.

<sup>95</sup> The Fukushima Daiichi Accident, Report by the Director General, IAEA, 2015. The Official Report of the Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission, The National Diet of Japan, 2012. <https://www.ucsusa.org/resources/fukushima-story-nuclear-disaster>.



23. Alcuni dei circa 1000 serbatoi in cui è stata immagazzinata l'acqua contaminata da sostanze radioattive e che verrà prossimamente riversata in mare.<sup>96</sup>

Per cercare di rimediare si decisero due azioni: primo, immagazzinare l'acqua contaminata in grandi serbatoi (tipo quelli usati nei porti ove si scarica il petrolio; Figura 23) e, secondo, ridurre le quantità realizzando una barriera impermeabile sotterranea, in parallelo al congelamento dell'intero sottosuolo, così da limitare al massimo l'afflusso di acqua di falda. In tal modo si è arrivati nel 2020 a ridurre il volume dell'acqua da immagazzinare a 140 mc/giorno in media. Ciò nonostante, nel corso degli anni si sono riempiti ben 1000 serbatoi, per un totale di circa un milione di mc di liquido, occupando tutta l'area disponibile. Di conseguenza il governo giapponese ha deciso, nell'aprile 2021, che a partire dal 2023 questa acqua andrà versata in mare, diluita nel rapporto almeno di 1:100, e dopo essere stata trattata con i cosiddetti ALPS, sistemi avanzati di trattamento dei liquidi. Purtroppo questi non riescono a catturare né il trizio né il carbonio 14, che finiranno in ambiente. Tutta la fase di rilascio in mare *durerà almeno trent'anni*. Questa decisione ha sollevato un putiferio, in Giappone e nei paesi vicini, che sono forti consumatori di pesce, che si teme risulti contaminato, anche a causa della concentrazione che si verifica man mano che si sale nella piramide alimentare.

<sup>96</sup> Da: Dean Calma/IAEA (CC BY 2.0).

Negli anni il terreno superficiale nella zona di Fukushima, inquinato da isotopi radioattivi, è stato decontaminato e spesso totalmente rimosso, generando quattordici milioni di metri cubi di suolo da smaltire; per meglio visualizzare questo dato, si pensi ad un cubo col lato di 250 metri.

Per quanto riguarda gli aspetti umani, all'aprile 2021 ancora 35.000 residenti della prefettura di Fukushima vivevano come evacuati al di fuori della zona di venti chilometri di raggio ove la dose di radiazioni annuale superava i 20 mSv. Pochi di essi hanno accettato di tornare nei luoghi di residenza originari, pur dopo l'autorizzazione governativa. Ricordiamo come il numero massimo di persone evacuate fu di 165.000 nel 2012.

Tra i bambini esposti a Fukushima si sono trovati 218 casi di cancro tiroideo, un numero decine di volte superiore al valore atteso per una popolazione sana che vive in zone non inquinate.

I dati precedenti mostrano le dimensioni impressionanti del disastro e la difficoltà di intervento per limitare i danni e i problemi. Si capisce quindi facilmente come i costi di rimedio siano elevati; stime governative del 2021 forniscono i numeri riportati in Tabella 15 (in miliardi di dollari Usa: G\$). Stime indipendenti effettuate dal Japan Center for Economic Research nel 2017 e nel 2019 forniscono costi totali variabili tra 322 e 758 G\$ a seconda del tempo previsto per lo smantellamento degli impianti.<sup>97</sup>

Tabella 15: Costi del disastro di Fukushima.<sup>98</sup>

Attività	Costo (G\$)
Smantellamento impianti	75
Decontaminazione	52,5
Indennizzi	74
Altro	21,6
<b>Totale</b>	<b>223,1</b>

<sup>97</sup> "The World Nuclear Industry Status Report 2021", p. 194.

<sup>98</sup> "The World Nuclear Industry Status Report 2021", p. 192.

