

Andrea De Mauro

# **Il nucleare buono**

*Introduzione ai reattori nucleari*

# Indice

<b>1</b>	<b>INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<hr/>		
<b>2</b>	<b>CENNI DI FISICA NUCLEARE</b>	<b>2</b>
<hr/>		
<b>2.1</b>	<b>NUCLEO</b>	<b>2</b>
<b>2.2</b>	<b>REAZIONI NUCLEARI</b>	<b>2</b>
2.2.1	FISSIONE	2
2.2.2	FUSIONE	4
<b>2.3</b>	<b>RADIOATTIVITÀ</b>	<b>6</b>
<hr/>		
	<b>INGEGNERIA DEI REATTORI NUCLEARI</b>	<b>8</b>
<hr/>		
<b>3.1</b>	<b>TIPI DI REATTORI NUCLEARI</b>	<b>8</b>
3.1.1	REATTORI PWR	8
3.1.2	REATTORI BWR	9
3.1.3	REATTORI A PROPULSIONE	10
3.1.4	REATTORI AUTOFERTILIZZANTI	10
<b>3.2</b>	<b>SICUREZZA NEI REATTORI NUCLEARI</b>	<b>11</b>
3.2.1	STRUTTURE DI CONTROLLO	11
3.2.2	CHERNOBYL	11
<b>3.3</b>	<b>STORIA DELLE CENTRALI NUCLEARI</b>	<b>12</b>
<b>3.4</b>	<b>SITUAZIONE ATTUALE</b>	<b>13</b>
<hr/>		
<b>4</b>	<b>CONCLUSIONE</b>	<b>14</b>
<hr/>		
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>15</b>
<hr/>		

# 1 Introduzione

Quando si parla di energia nucleare il primo pensiero va alle bombe atomiche e ai loro drammatici effetti. Le immagini disastrose dei danni causati dalle bombe di Hiroshima e Nagasaki sono scalfite con forza nelle nostre menti ed è giusto che nessuno dimentichi la storia, con tutto quello che essa ha da insegnarci. In verità, pensare che quella nucleare sia una forma di energia “negativa” costituisce un grave peccato di superficialità.

Nel 1942 il fisico italiano Enrico Fermi riuscì per ad ottenere per la prima volta una *fissione controllata* grazie alla quale si poteva ricavare una certa quantità di energia termica, trasformabile in una forma di energia più facilmente utilizzabile come quella elettrica. Con questa esperienza Fermi mise in funzione il primo *reattore nucleare* del mondo ovvero la prima *macchina in grado di produrre energia sfruttando le forze nucleari risiedenti negli atomi*. Quest’ultima può costituire una prima definizione di reattore nucleare.

Appare evidente, quindi, che una macchina di questo tipo potrebbe facilmente risolvere i problemi energetici del nostro pianeta. Purtroppo non è facile gestire una mole di energia così grande e, inoltre, bisogna fare i conti con la *radioattività* delle sostanze usate nei processi sui quali si basano i reattori nucleari. Se, poi, teniamo conto del fatto che gli “scarti di lavorazione” sono radioattivi anch’essi, si capisce come non sia un problema di facile risoluzione la progettazione e la gestione di un impianto di questo tipo (tanto è vero che molti paesi, tra cui il nostro, hanno dismesso i propri reattori per paura di crisi ecologiche).

Per addentrarci più approfonditamente nelle problematiche a cui si è appena accennato occorre analizzare i processi di fissione e fusione nucleare sui quali si basa la produzione di energia atomica (sia per uso bellico che pacifico).

## 2 Cenni di fisica nucleare

### 2.1 Nucleo

La materia che si trova intorno a noi apparirebbe molto diversa se osservata su scala microscopica. Essa darebbe l'idea di essere molto più "vuota" che piena, a dispetto di come ci sembra normalmente. La materia, difatti, è costituita da *atomi* che assomigliano, in prima approssimazione, a microscopici sistemi solari: al centro troviamo, infatti, il *nucleo* nel quale è concentrata tutta la massa del sistema solare; intorno al nucleo troviamo gli *elettroni* particelle aventi carica elettrica negativa che ruotano a velocità vicine a quelle della luce intorno al nucleo e che sono di massa trascurabile rispetto a quella di tutto l'atomo intero. Essendo le distanze tra elettroni e nucleo molto grosse rispetto al raggio di quest'ultimo, è facile capire che a livello microscopico il "vuoto" è molto più esteso del "pieno".

Consideriamo ora la parte centrale del nostro sistema solare: il nucleo. Esso è costituito da un numero variabile di particelle che sono, fondamentalmente, di due tipi: i *neutroni* e i *protoni*. I primi sono delle particelle neutre dal punto di vista elettrico. I secondi, invece, sono dotati di una carica positiva, uguale e contraria a quella degli elettroni, in maniera tale che, a livello dell'intero atomo, si neutralizzi con quest'ultima.

### 2.2 Reazioni nucleari

#### 2.2.1 Fissione

Dalla fisica classica sappiamo che, a causa della *forza di Coulomb*, particelle con carica elettrica diversa si attraggono, con carica uguale si respingono. E, per di più, sappiamo che questa forza è inversamente proporzionale al quadrato della distanza: dimezzando la distanza tra le due particelle cariche, la forza si

quadruplica. Ma, allora, diventa spontaneo chiedersi: come fanno i protoni, carichi tutti positivamente, a stare così vicini impaccati nel nucleo?

La domanda è del tutto lecita: non si potrebbe, difatti, spiegare la stabilità del nucleo degli atomi senza postulare l'esistenza di una forza, quella *nucleare forte*, capace di tenere assieme i protoni nel nucleo. Questa forza, dovrà essere molto intensa, tanto da riuscire a tenere insieme, a distanza molto piccola, molti protoni con la stessa carica. Per di più essa dovrà essere praticamente inefficiente al di fuori del nucleo atomico stesso, altrimenti della sua esistenza ci saremmo accorti ben prima, così come accadde con le forze gravitazionali ed elettromagnetiche. Sarà, quindi, attiva a distanze inferiori al miliardesimo di millimetro, ma inefficace a distanze maggiori.

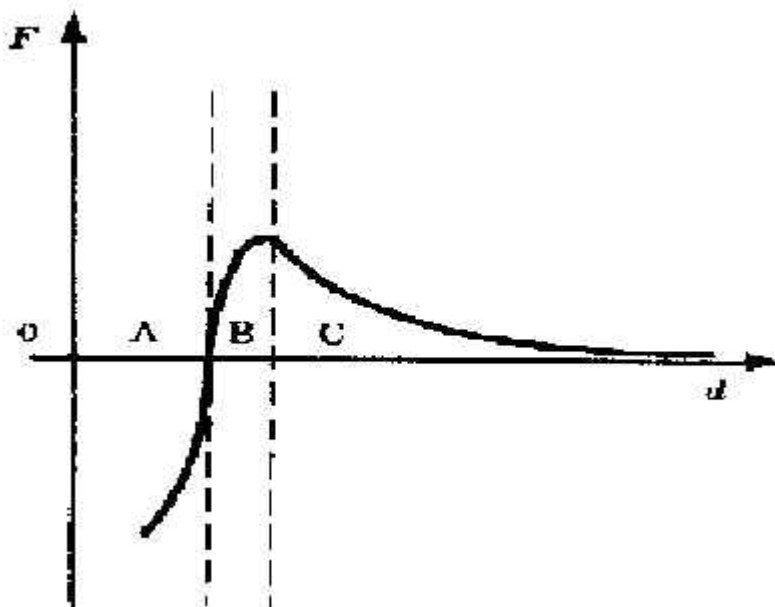


Fig. 1 - Diagramma qualitativo delle forze tra due protoni in funzione della loro distanza.

Come si evince dalla fig. 1, tra i protoni del nucleo, per distanze superiori a  $10^{-14}$  m (tratto C), agiscono solo le forze repulsive coulombiane. Per distanze comprese tra  $10^{-15}$  m e  $10^{-14}$  m (tratto B) si manifestano le forze nucleari che si oppongono a quelle elettriche. Per distanze inferiori a  $10^{-15}$  m (tratto A) prevalgono le forze nucleari attrattive.

Le forze nucleari devono compiere un certo lavoro per mettere assieme il nucleo, partendo da protoni e neutroni isolati e avvicinandoli fino alle distanze alle quali essi si trovano all'interno del nucleo. Durante questa operazione le forze elettriche lavorano "contro", nel senso che esse tenderebbero a tenere i protoni, di carica uguale, il più possibile lontani gli uni dagli altri. Quindi per mettere insieme il nucleo si dovrà spendere una certa quantità di energia, esattamente eguale al lavoro compiuto. Questa energia rimarrà poi immagazzinata nel nucleo fino a quando qualcuno non lo rompa. Per ogni protone che si riesce ad avvicinare ad una certa distanza da un altro si spenderà, quindi, una certa quantità di energia la quale rimane poi imprigionata nella struttura creata.

Dobbiamo considerare, inoltre, che non tutti i nuclei sono fatti allo stesso modo, nel senso che le posizioni reciproche dei protoni nei diversi nuclei sono diverse. Di conseguenza le energie spese nella costruzione dei diversi tipi di nucleo saranno diverse. Ogni tipo di nucleo avrà immagazzinata dentro di sé, quindi, una diversa quantità di energia, caratteristica del tipo di nucleo in questione, come si può dedurre dalla fig. 2. Tutto ciò è vero sia per i nuclei "naturali", cioè quelli che si trovano in natura, sia per quelli "artificiali", cioè quelli costruiti in laboratorio.

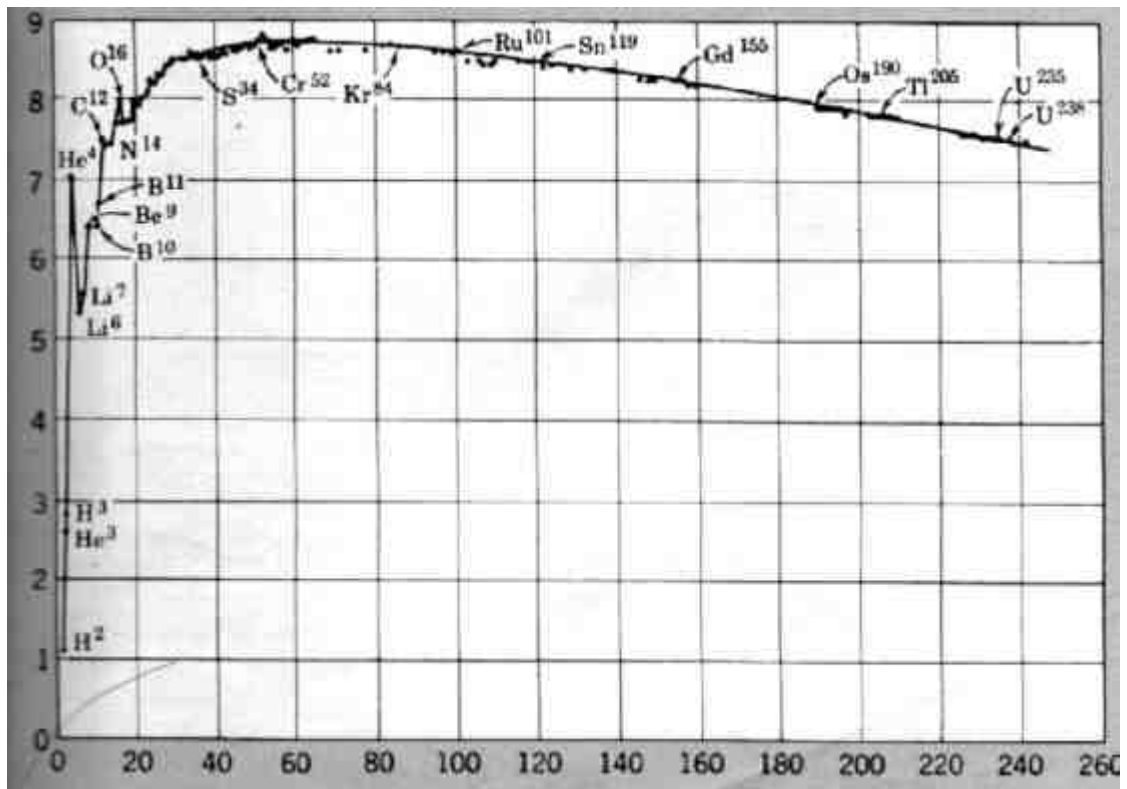


Fig. 2 - Curva dell'energia di legame media per nucleone.

Se, ad esempio, prendiamo un nucleo di uranio e lo rompiamo per ottenere due nuclei più leggeri è possibile che nei due nuclei più leggeri sia immagazzinata in totale meno energia di quanta ne era immagazzinata originariamente nel nucleo di uranio. In questo caso, nel rompere il nucleo, si otterrebbe un guadagno netto di energia. A priori anche la situazione opposta potrebbe essere legittima: cioè che nel nucleo iniziale sia immagazzinata meno energia che nei nuclei ottenuti dalla sua rottura. In questo caso per spezzare il nucleo bisognerebbe fornire dall'esterno l'energia mancante. Per i materiali più pesanti accade proprio che l'energia totale dei due nuclei residui ottenuti dalla frammentazione di quello originario sia minore dell'energia di partenza. In questo caso l'energia disponibile viene immediatamente liberata. Questo è il principio della *fissione nucleare* (dal lat. *fissio*ne "rottura", "frantumazione").

## 2.2.2 Fusione

Chiediamoci ora cosa accade effettuando il processo inverso cioè tentando di far avvicinare sempre più due nuclei leggeri cercando di farli “fondere” per ottenere un nucleo pesante. Anche in questo caso vi sono, a priori, due possibilità:

- l'energia immagazzinata alla fine nel nucleo più pesante è maggiore di quella iniziale. In questo caso dovremmo spendere energia per far avvenire il processo;
- l'energia del nucleo finale è minore di quella originariamente immagazzinata nei due nuclei più leggeri. Effettuando questo processo si guadagnerebbe energia.

Il secondo caso costituisce una descrizione di quello che avviene durante la *fusione nucleare*.

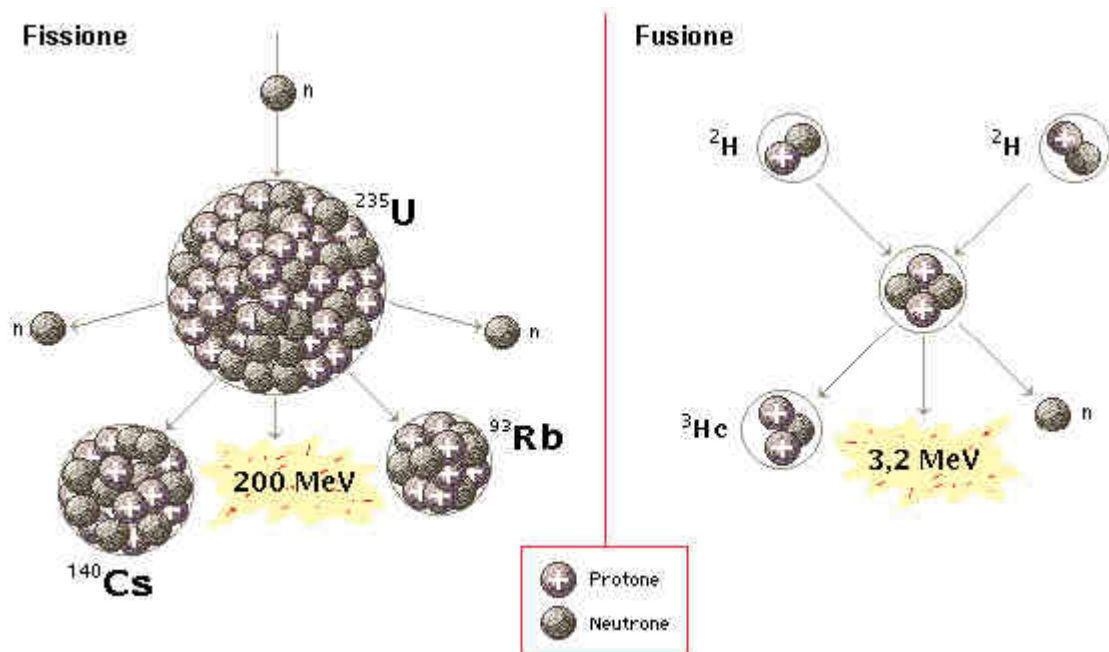


Fig. 3 – Schema generale delle reazioni nucleari di fissione e di fusione (fonte: Microsoft Encarta Illustration).

Occorre fare attenzione a non confondere i concetti di fusione e di fissione: o si guadagna energia fondendo due nuclei leggeri in un dato nucleo pesante, o la si guadagna spezzando lo stesso nucleo nei due più leggeri. Il fatto di poter guadagnare energia in entrambi i casi è escluso: si potrebbero, in questo modo, produrre quantità illimitate di energia ripetendo il ciclo di fissione—fusione, dal nulla. In verità, ciò che risulta praticamente più conveniente è spezzare nuclei pesanti in nuclei medi o fondere nuclei leggeri in nuclei medi.

Abbiamo, quindi, due possibili tipi di "carburante" per le reazioni nucleari: nuclei molto pesanti come uranio o plutonio (fissione) e nuclei molto leggeri come idrogeno o elio (fusione). In generale potremo quindi affermare che i nuclei di peso intermedio immagazzinano meno energia sia rispetto a quelli pesanti che a quelli leggeri.

Quando compiamo un processo di fissione o di fusione partiamo con più energia immagazzinata di quanta ce ne sia alla fine nei cosiddetti prodotti di reazione. Dove finisce l'energia mancante? Essa viene liberata rendendosi immediatamente disponibile per qualsiasi altro uso. Questa energia viene liberata essenzialmente in due modi: o sotto forma di calore, quando il combustibile si riscalda insieme a tutto quello che lo circonda, o sotto forma di particelle veloci che si allontanano. Il primo meccanismo è molto familiare: è lo stesso che si usa per far bollire una pentola d'acqua liberando energia con la fiamma del gas. Il secondo meccanismo è, invece, dovuto al fatto che non tutti i protoni, i neutroni e gli elettroni inizialmente a disposizione finiscano, poi, nei nuclei residui. Quelli che avanzano si allontanano velocemente dalla zona di reazione portando con sé parte dell'energia liberata proprio come fa un proiettile in moto il quale, grazie alla sua energia, riesce a penetrare un materiale o a rompere un vetro.

Il problema successivo è capire se questa energia sia disponibile per scopi pratici. Un uso militare, ad esempio, richiederebbe non solo la disponibilità di una grande quantità di energia, ma anche che essa sia effettivamente disponibile in un tempo molto breve: molta energia a disposizione in un tempo molto breve significa poter provocare un'esplosione. Molta energia disponibile su tempi relativamente lunghi significa, invece, disporre di una fonte di energia alternativa per usi civili ed industriali. Della produzione di questa forma di energia nucleare “diluita” si occupano i reattori nucleari, argomento dei prossimi paragrafi.

### 2.3 Radioattività

Prima di analizzare il funzionamento dei reattori nucleari occorre, però, introdurre un altro concetto fondamentale della fisica nucleare: quello di *radioattività*.

Tra gli elementi naturali più pesanti ve ne sono alcuni (tra i quali ricordiamo in particolare l'uranio, U, e il plutonio, Pu) che hanno *isotopi* (ovvero atomi aventi stesso numero di protoni ma diverso numero di neutroni) nuclearmente instabili: nel loro nucleo, infatti, avvengono naturalmente alcune reazioni di fissione nucleare. Questa propensione a dar luogo spontaneamente a reazioni nucleari si dice, appunto, *radioattività naturale*.

Durante la fissione di un nucleo pesante, si è detto, notiamo l'allontanamento di particelle veloci (ad esempio, i neutroni). Queste possono essere alla base di nuove reazioni di fissione dando luogo ad un'incontrollata reazione a catena. Quindi, avvicinando tra loro diverse quantità di materiale naturalmente radioattivo, la probabilità che queste reazioni si “autoalimentino” aumenta in funzione della massa di materiale accumulato. Esiste un particolare valore di massa superato il quale avviene spontaneamente l'incontrollata reazione di cui sopra cioè l'esplosione: esso si chiama *valore di massa critica*. Per l' $^{235}\text{U}$  la massa critica è di circa 16 kg equivalente ad una pallina del diametro di 12 cm.



Ovviamente sarà opportuno rimanere ben lontani nel momento in cui si riescano ad ottenere i fatidici 16 kg: non appena raggiunti la pallina di uranio esploderebbe spontaneamente.

La prima bomba atomica basata su questo meccanismo esplose il 16 luglio 1945, per prova, ad Alamogordo nel Nuovo Messico, una zona desertica degli Stati Uniti. Essa era costituita da due pezzi di  $^{235}\text{U}$ : una sfera di 12 cm di diametro, con un foro cilindrico nel mezzo, e un cilindro che poteva entrare perfettamente nel foro. Fino a che il cilindro si trovava fuori dalla sfera non si osservò nulla, tranne che un piccolo aumento della radioattività. Una piccola bomba al tritolo spinse, allora, il cilindro dentro la sfera e, poiché erano stati raggiunti i 16 kg di massa critica, si innescò istantaneamente un'esplosione nucleare. La seconda e la terza bomba, all'uranio ed al plutonio, esplosero rispettivamente il 6 ed il 9 agosto 1945 su Hiroshima e Nagasaki.

Quello di cui abbiamo appena parlato costituisce l'uso "cattivo" della radioattività. Fortunatamente, facendo aumentare in maniera controllata e abbastanza lenta la radioattività di elementi radioattivi, controllando che non vi siano mai i presupposti per una reazione a catena, è possibile dar luogo ad una produzione "diluita" di energia, proprio quella cui abbiamo accennato prima e sui cui si basa il funzionamento dei reattori nucleari.

# Ingegneria dei reattori nucleari

Nel dicembre del 1942, all'università di Chicago, in presenza del rappresentante dell'industria che avrebbe dovuto curarne la produzione, il fisico italiano Enrico Fermi riuscì a produrre la prima reazione nucleare a catena controllata, utilizzando frammenti di uranio naturale distribuiti all'interno di un blocco di grafite pura (una forma di carbonio). Nella *pila*, o *reattore nucleare di Fermi*, la grafite fungeva da moderatore per rallentare i neutroni, rendendo così possibile la reazione a catena.

Il funzionamento di un reattore nucleare risulta essere ancora molto simile a quello del suo capostipite.

## 3.1 Tipi di reattori nucleari

### 3.1.1 Reattori PWR

La grande maggioranza delle centrali nucleari moderne è del tipo *PWR* (*Pressurized Water Reactor*, reattore ad acqua in pressione). Questo tipo di reattore è molto diffuso perché: costituisce quello tecnologicamente più semplice, non pone particolari problemi di reperibilità né di materiali né di combustibile e offre ottime garanzie di sicurezza.

Nel *nocciolo* (il nucleo del reattore) avvengono le reazioni nucleari di fissione controllata le quali riscaldano notevolmente gli elementi di combustibile (uranio) costituiti da *barre* ovvero da cilindri molto lunghi e stretti. Le barre di uranio sono lambite dall'*acqua di raffreddamento* del circuito primario che, raffreddandole, ne asporta il calore e si riscalda. L'acqua di raffreddamento arriva, così, a temperature di circa 300-330° C ma non evapora in quanto viene tenuta a una pressione di circa 155 bar (cioè 154 volte più grande di quella atmosferica).

Proseguendo nel suo cammino l'acqua di raffreddamento scambia calore con dell'altra acqua contenuta in un secondo circuito, a una pressione inferiore. Quest'ultima, a causa della bassa pressione, evapora e il vapore ottenuto, avente una pressione di circa 55 bar e una temperatura di circa 280° C, investe una turbi-

na collegata a un alternatore che fornisce energia alla rete elettrica (come se fosse una grossa dinamo).

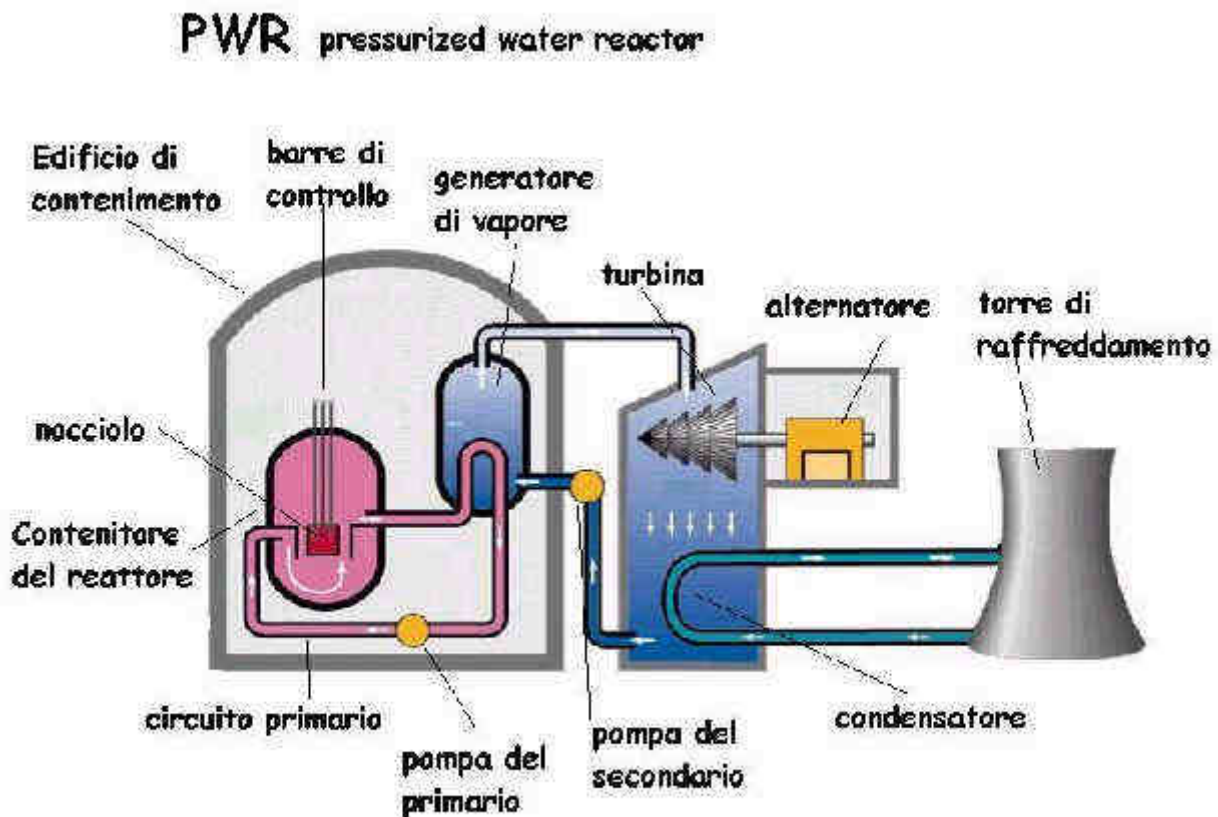


Fig. 3 – Lo schema generale di un reattore PWR.

Il vapore a bassa pressione in uscita dalla turbina viene raffreddato dall'acqua che scorre in un terzo circuito il quale viene, infine, raffreddato ad aria in *torri di raffreddamento*. Se la centrale si trova nelle vicinanze di un fiume l'acqua del *circuito di condensazione* (il terzo), che non ha avuto il minimo contatto con zone contaminate, viene scaricata nel fiume, ovviamente con portate e temperature tali da non influire sull'ecosistema.

### 3.1.2 Reattori BWR

Nel reattore *BWR* (*Boiling Water Reactor*, reattore ad acqua bollente) l'acqua refrigerante è mantenuta a una pressione inferiore di quella alla quale si trova nel PWR e viene portata ad ebollizione direttamente nel nocciolo. Il vapore prodotto viene, poi, spedito direttamente nel generatore a turbina, condensato e, infine, "ripompato" nel reattore. Sebbene il vapore sia radioattivo, in questo reattore non è presente alcuno scambiatore di calore intermedio tra reattore e turbina, con il conseguente guadagno in efficienza. Come nel PWR, l'acqua di raffreddamento del condensatore proviene da un'altra fonte, come un fiume o un lago.

### 3.1.3 Reattori a propulsione

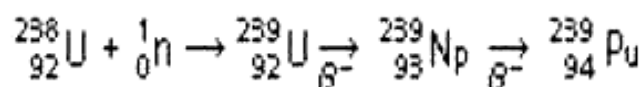
Reattori nucleari vengono utilizzati anche nella propulsione di grandi navi militari, come la portaerei statunitense *Nimitz*, e di sottomarini. In genere i sottomarini a energia nucleare sfruttano uranio molto arricchito (cioè ad alto livello radioattivo) così da permettere una sensibile riduzione delle dimensioni del reattore.

Tre navi nucleari, su iniziativa di Stati Uniti, Germania e Giappone, hanno operato per periodi limitati a scopo di sperimentazione ma, nonostante il successo ottenuto dal punto di vista tecnico, le regolamentazioni portuali restrittive e altri motivi di carattere economico hanno portato all'abbandono di questi progetti. All'ex Unione Sovietica spetta il merito di aver realizzato la prima rompighiaccio a energia nucleare, la *Lenin*, impiegata per liberare i canali del mare Artico.

### 3.1.4 Reattori autofertilizzanti

L'uranio, la risorsa naturale da cui dipende la produzione di energia nucleare, si trova in giacimenti diffusi in tutto il mondo. Non se ne conosce con precisione la disponibilità, ma essa sembra essere molto limitata, soprattutto se si trascurano fonti a bassissima concentrazione, quali il granito e le argilliti.

La caratteristica fondamentale di un *reattore autofertilizzante* è nel fatto che esso può produrre, a partire da particolari sostanze dette *fertili*, una quantità di materiale fissile superiore a quella che consuma. Il sistema ad autofertilizzazione più diffuso in tutto il mondo utilizza uranio 238 come materiale fertile. L'assorbimento di un neutrone da parte di un nucleo di uranio 238 dà luogo a un processo radioattivo, chiamato *decadimento  $\beta$* , durante il quale il nucleo si trasforma nell'isotopo fissile plutonio 239. La sequenza di reazioni nucleari è



Nel decadimento beta un neutrone decade in un protone, una particella beta e un antineutrino elettronico. La fissione di un nucleo di plutonio 239, innescata da un neutrone, avviene con emissione di una media di 2,8 neutroni, uno dei quali è necessario per indurre la fissione nello stadio successivo della reazione a catena. Circa 0,5 neutroni in media vengono persi perché assorbiti dalle strutture del reattore o dal refrigerante e i restanti 1,3 neutroni possono essere assorbiti dall'uranio 238 per la produzione di altro plutonio 239, secondo la reazione sopra riportata.

I reattori autofertilizzanti costituiscono motivo di forte speranza per il futuro: essi costituiscono, infatti, un mezzo per produrre energia veramente "pulita", cioè non collegata alla produzione di scorie radioattive.

## 3.2 *Sicurezza nei reattori nucleari*

### 3.2.1 **Strutture di controllo**

Il livello di potenza di un reattore in funzione viene costantemente controllato da una serie di strumenti di vario genere. La potenza in uscita viene regolata mediante l'inserimento o la rimozione dal nocciolo del reattore di un certo numero di *barre di controllo*, cioè di elementi costituiti da un materiale che, come la grafite, è capace di assorbire neutroni molto efficientemente. La posizione delle barre viene determinata in modo che la reazione a catena proceda a ritmo costante.

Durante il funzionamento e anche dopo l'interruzione, un grosso reattore da 1000 Mw ha una radioattività di miliardi di curie (il *curie* è l'unità di misura della radioattività definita come quella quantità di sostanza nella quale si disintegrano 37 miliardi di atomi al secondo). Le radiazioni emesse dal materiale radioattivo vengono assorbite da opportune schermature poste intorno al reattore e al circuito di raffreddamento primario. Altre strutture di sicurezza sono: un *sistema di raffreddamento del nucleo*, che evita che quest'ultimo raggiunga temperature pericolosamente elevate in caso di avaria dei sistemi di raffreddamento principali; una *struttura di contenimento* di tutto il materiale radioattivo, che evita qualunque fuga radioattiva in caso di rottura.

### 3.2.2 **Chernobyl**

Malgrado la presenza di adeguati sistemi di controllo, una centrale nucleare costituisce comunque un impianto molto "pericoloso" come dimostra la storia dell'unico incidente nucleare veramente importante incorso fino ad ora: quello del 26 aprile del 1986 avvenuto a Chernobyl, tra l'Ucraina e la Bielorussia. La centrale di Chernobyl, chiusa recentemente, generava 4000Mw di elettricità. Fu costruita nel 1983 ed è classificabile come una centrale "del vecchio tipo" in quanto utilizzava la grafite come moderatore. Senza scendere in particolari tecnici, questo tipo di reattore ha un'importante controindicazione: in caso di fusione del nocciolo, cioè se la temperatura sale in maniera incontrollata, la grafite inizia reagire con l'acqua di raffreddamento, aggiungendo danno a danno. Il 26 aprile del 1986 si stava eseguendo una prova tecnica atta allo studio del comportamento di un sistema di sicurezza in condizioni critiche. Furono, quindi, esclusi i sistemi di spegnimento automatico del nocciolo, e fu portato il reattore a funzionare a una potenza molto inferiore a quella di targa, condizione in cui quel nocciolo diveniva, evidentemente, instabile. Nel caso specifico, instabile vuol dire che, in caso di una fluttuazione di potenza, la reazione a catena tende ad avvenire in modo incon-

trollato. In Europa occidentale e in America è assolutamente vietato produrre reattori che abbiano una modalità di funzionamento di questo tipo.

Alle ore 01:23 il reattore arrivò, nel giro di 20 secondi, a 100 volte la sua potenza nominale. L'esplosione distrusse il nocciolo, l'edificio di contenimento e la sala turbine, buttando pezzi di nocciolo, di copertura e di macchine tutto intorno. La grafite prese fuoco e si creò una colonna di fumo che trasportò in aria tonnellate di *particolati radioattivi* tra qui si trovavano prodotti di fissione, il peggio che si possa immaginare. Il 15% ricadde sulla centrale, il 50% nella “zona rossa” intorno alla centrale stessa, e il resto fu trasportato dalle correnti. Il grosso della nube radioattiva passò sul nord Europa e scese, poi, sull'Europa centrale e meridionale.



**Fig. 5** – La centrale di Chernobyl dopo il disastro del 1986. (fonte: *INS – International Nuclear Safety*, <<http://insp.pnl.org>>)

Le conseguenze furono praticamente nulle fuori dalla Bielorussia e dall'Ucraina. In Italia la concentrazione di Iodio 131 (il radionuclide più presente nella nube) rimase entro la concentrazione ammessa in caso di incidente per un lavoratore esposto: assolutamente, quindi, entro i limiti di sicurezza. La dose assorbita da noi italiani è stata equivalente a quella di una radiografia, ma meno pericolosa perché diluita in una settimana. La proibizione delle verdure a foglia larga fu decisa per scrupolo, ma la radioattività di un chilo di lattuga era di circa quattro microcurie, assolutamente, quindi, non pericolosa. In Italia non ci sono stati incrementi di nessun tipo di tumore rilevati a livello statistico (come ci assicura l'Oms, Organizzazione mondiale della sanità).

### 3.3 *Storia delle centrali nucleari*

Sebbene all'inizio degli anni Ottanta fossero già operanti negli Stati Uniti più di 100 impianti per la produzione di energia nucleare, in seguito all'incidente

di Three Miles Island (1978) le preoccupazioni per la sicurezza e vari fattori di tipo economico hanno bloccato ogni ulteriore sviluppo nel campo dell'energia nucleare. Dal 1978 in poi non sono stati messi in cantiere altri impianti nucleari e alcuni di quelli completati dopo quella data non sono stati resi operativi. Nei primi anni Cinquanta, quando iniziò lo sfruttamento dell'energia nucleare, l'uranio arricchito era disponibile solo negli Stati Uniti e nell'ex Unione Sovietica. Di conseguenza i primi programmi di produzione di energia nucleare di Canada, Francia e Gran Bretagna prevedevano l'impiego di uranio naturale. Questo tipo di combustibile, meno efficace dell'uranio arricchito, richiede l'uso di ossido di deuterio ( $D_2O$ ) detto anche *acqua pesante*; l'acqua naturale, infatti, ha la caratteristica di catturare un numero eccessivo di neutroni che d'altra parte sono necessari in elevate quantità a causa del basso rendimento del combustibile.

I primi reattori, alimentati con barre di uranio naturale, moderati a grafite e refrigerati con ossido di deuterio, furono in seguito soppiantati da reattori a uranio arricchito, e dai più avanzati *AGR* (Advanced Gas-cooled Reactor, reattore avanzato raffreddato a gas). In Francia, in seguito alla costruzione di impianti per l'arricchimento di uranio, sono stati costruiti reattori del tipo PWR.

### 3.4 Situazione attuale

Al momento sono attive circa 440 centrali, che contribuiscono al fabbisogno energetico mondiale per il 6-7 % sul totale e per il 18% sul fabbisogno elettrico (si veda la fig. 6: l'energia nucleare è indicata con il grigio più chiaro).

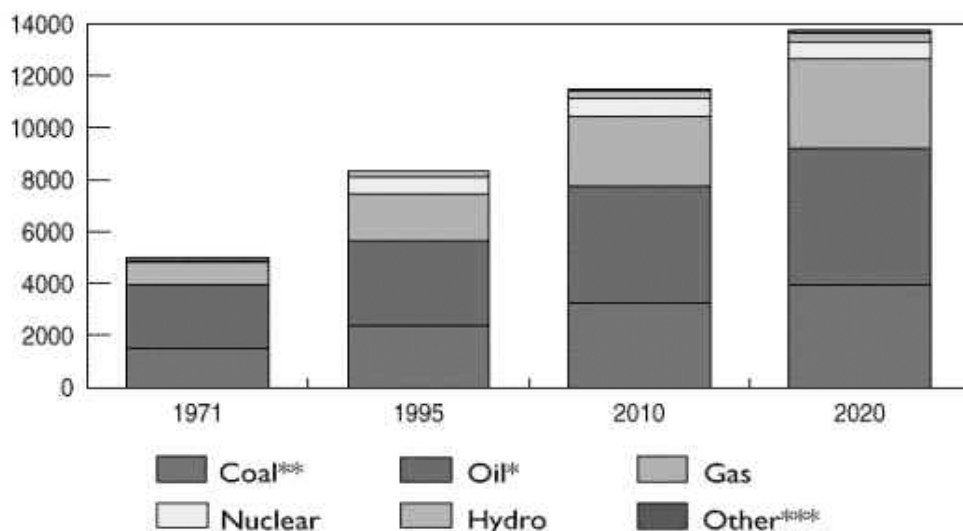


Fig. 6 – Istogramma della produzione di energia ordinato per fonti. (fonte: I.E.A – International Energy Agency, <<http://www.iea.org>>)

Paesi come la Francia basano l'80% della produzione d'energia elettrica sulle centrali nucleari, moltissimi paesi occidentali le sfruttano per il 18-20%. La Russia e gli altri stati dell'ex Unione Sovietica hanno un programma molto ampio di sfruttamento dell'energia nucleare il quale prevede sia il sistema PWR che quello moderato a grafite. All'inizio degli anni Novanta erano in costruzione in tutto il mondo più di 120 nuovi impianti per la produzione di energia nucleare.

## 4 Conclusione

In chiusura, sembra opportuno chiedersi quali siano le prospettive dell'utilizzo di questa forma di energia nel futuro e i motivi per i quali essa ha avuto fino ad ora un successo molto inferiore a quello immaginato dai suoi primi sostenitori.

Il problema che, attualmente, blocca l'apertura di molti paesi (tra i quali il nostro) nei confronti del nucleare è legato al trattamento delle barre di uranio non più utilizzabili, dell'acqua pesante, delle barre di controllo usate come moderatrici e di tutti quei materiali che possono essere considerati come gli "scarti di lavorazione" della produzione di energia atomica e che vanno sotto il nome di *scorie radioattive*.

Per le scorie si sono proposti tanti tipi di trattamento, dal bruciamento nel "Rubbiatrone" alla vetrificazione. Al momento, per onestà intellettuale, bisogna ammettere che l'unico modo serio di disfarsi delle scorie è quello di chiuderle in bidoni adeguatamente schermati (quelli progettati recentemente offrono garanzie elevatissime) in posti geologicamente stabili e adeguatamente monitorati.

L'avanzamento delle ricerche nel campo dell'ingegneria nucleare potrebbero, nei prossimi anni, assicurare un certo livello di sicurezza e una riduzione dell'impatto ambientale tali da riconsiderare l'utilizzo dell'energia nucleare anche nel nostro paese.



## Bibliografia

- AA. VV. *Dizionario tecnico nucleare*, Roma, ANIDEL, 1962.
- AA. VV. *Encyclopedia of energy*, Lapedes, D. (a cura di), New York, Mc Graw Hill, 1976.
- AA. VV. *Newnes concise encyclopedia of nuclear energy*, Barnes D. E. (a cura di), Londra, Newnes, 1962.
- AA. VV. *Primo programma indicativo per la comunità europea dell'energia atomica*, Bruxelles, EURATOM, 1966.
- *Annals of nuclear energy*, Melbourne.
- *Ansaldo nuclear division Homepage*, <<http://www.ansaldo.it/dnu>>, visitato il 20 marzo 2002.
- Bernardini, C., Tamburini, S. *Fisica*, Vol. III, Firenze, Giunti Marzocco, 1990.
- Borovoi A., "Chernobyl 15 years after: radioactivity release", *Nuclear european worldscan*, Londra, gennaio 2001, p. 48-52.
- Cuomo, M. "Reattori e tecnologie nucleari: lo sviluppo nel mondo", <<http://www2.sif.it/libri/fermi/13.pdf>>, visitato il 20 marzo 2002, in *Homepage della Società italiana di fisica*, <<http://www.sif.it>>.
- Glasstone, S. *Ingegneria dei reattori nucleari*, Roma, Dell'Ateneo, 1957.
- *Homepage AIN - Associazione Italiana Nucleare*, <<http://www.ain.it>>, visitato il 10 aprile 2002.
- *Homepage Ce.S.N.E.F. Politecnico di Milano*, Abate, A., Da Ros, M. (a cura di), <<http://www.cesnef.polimi.it>>, aggiornato il 15 febbraio 2002, visitato il 22 marzo 2002.
- *Il nucleare homepage*, Oppizzio, P. (a cura di), <<http://www.angelfire.com/mi2/nucleare/Nucleare.html>>, visitato il 27 marzo 2002.
- *L'energia nucleare*, Ferrarini M. (a cura di), <<http://digilander.iol.it/maikol1976/energia.htm>>, visitato il 5 aprile 2002.
- *L'energia nucleare: principi, applicazioni ed effetti*, De Mauro, A. (a cura di), <<http://www.energianucleare.4all.cc>>, aggiornato nel Giugno 2001, visitato il 22 marzo 2002.
- *La radioattività e le sue conseguenze*, Zanobini, M. (a cura di), <<http://digilander.iol.it/mat595/index.html>>, visitato il 7 aprile 2002.

- Littler D. J., Raffle J. F. *Reattori nucleari: fondamenti teorici*, Torino, Boringhieri, 1959.
- Neviani, I., Pignocchino C. *Geografia generale*, Torino, SEI, 1998.
- Nordheim, P., Weimberg, G. “Reattori nucleari”, *Enciclopedia del novecento*, Vol. IV, Roma, Istituto enciclopedico italiano, 1975.
- Orsoni, L. *Reattori nucleari: fondamenti scientifici*, Milano, Goliardica, 1958.
- Peter Van Vliet, *Armi nucleari & non convenzionali*, La Spezia, Fratelli Melita, 1992.
- Wilmer, P., Bertel, E. “Nuclear power: a competitive option?”, *Journal of the British nuclear energy*, Londra, 39.1 (febbraio 2000), p. 43-47.