

## Capitolo 27

Bombardando l'uranio con neutroni si rilevò che esso si divideva in due elementi diversi, aventi massa eguale a circa metà di quella dell'uranio di origine, con emissione di altri neutroni capaci a loro volta di ripetere il fenomeno agendo sui rimanenti atomi di uranio per produrre la stessa dissociazione (*reazione a catena*). Fu questo l'inizio del *processo di fissione* che può essere una fonte di energia se:

- la reazione a catena viene controllata evitandone la rapida propagazione in forma esplosiva;
- si possono prendere delle precauzioni per evitare che le radiazioni sviluppate nel processo possano arrecare danni alle persone;
- si riescono a smaltire le scorie radioattive.

Gli atomi sono costituiti da un **nucleo** centrale, costituito da **protoni** (carica elettrica positiva) e **neutroni** (senza carica di massa circa uguale a quella del protone) intorno al quale ruotano, su più orbite, gli **elettroni** (carica elettrica negativa). L'atomo risulta **eletticamente neutro** se il numero di protoni contenuti nel nucleo è eguale a quello degli elettroni. Il numero dei protoni è detto **numero atomico** ( $Z$ ) dell'elemento e il numero totale di protoni e neutroni è detto **numero di massa** ( $A$ ). Un generico elemento  $X$  si indica con il simbolo  ${}^A_ZX$ , anche se, nel campo della fisica nucleare, si indica soltanto il numero di massa  $A$ . Gli **isotopi** di un elemento sono una varietà dell'elemento stesso aventi lo stesso numero atomico ma diverso numero di massa (atomo con lo stesso numero di elettroni e di protoni, ma con **diverso numero di neutroni**). Gli isotopi di un elemento non si differenziano per le proprietà chimiche dall'elemento base, che dipendono dal numero degli elettroni, ma per le proprietà nucleari diverse essendo diversa la composizione del nucleo.

La maggior parte degli elementi naturali sono *stabili* (caratteristiche chimiche e nucleari invariabili nel tempo), in altri avviene il fenomeno di **decadimento radioattivo** (emettono spontaneamente particelle piccolissime cariche elettricamente trasformandosi in atomi di elementi diversi). Il **radio**, il **torio**, il **polonio** e l'**uranio** esistono in natura solo sotto forma di isotopi instabili. Gli studi sulla radioattività dei coniugi Curie permisero di individuare le particelle radioattive suddivise in **radiazioni**:

- $\alpha$ : particelle formate da due protoni e due neutroni  ${}^4_2\text{He}$  privi dei necessari elettroni che ne completerebbero l'atomo e dotati di velocità elevata. L'emissione di una particella  $\alpha$  comporta una riduzione di due unità nel numero atomico  $Z$  e di quattro unità nel numero di massa  $A$ ;
- $\beta$ : **negli atomi di elementi instabili può accadere che un neutrone si «spezzi» dando origine ad un protone e un elettrone, e che quest'ultimo venga espulso dall'atomo producendo così la radiazione**

$\beta$ . Ne segue un aumento di una unità nel numero atomico (un protone in più) mentre nessuna variante appare nel numero di massa;

- $\gamma$ : radiazione elettromagnetica, simile ai raggi X ma di lunghezza d'onda inferiore; l'eccesso di energia posseduta dal nucleo in seguito a disintegrazione di radiazioni  $\alpha$  o  $\beta$ , oppure in seguito ad altre reazioni nucleari viene smaltito sotto forma di radiazioni  $\gamma$ .

La penetrazione delle varie radiazioni dipende dall'energia iniziale di cui sono dotate, la cui entità cresce in ordine alfabetico: la radiazione  $\alpha$  è quella dotata di minor penetrazione,  $\beta$  è quella intermedia e  $\gamma$  è quella dotata di maggior forza di penetrazione.

Quando un neutrone colpisce l'atomo di uno degli isotopi dell'uranio, si può verificare che:

- il **neutrone venga assorbito dal nucleo dell'isotopo che si spezza in due frammenti, di massa circa eguale, liberando una quantità di energia** corrispondente alla quantità di massa che scompare ed emettendo contemporaneamente altri neutroni (mediamente 2,5) con elevata energia cinetica (**processo di fissione nucleare**);
- il **nucleo dell'isotopo emette radiazioni**  $\gamma$  dando origine ad un nuovo isotopo dell'elemento base a sua volta radioattivo che decadrà con emissione di raggi  $\beta$ .

La probabilità della prima ipotesi è notevolmente superiore alla seconda e per aumentarla si provvede regolando la velocità dei neutroni emessi. La **reazione a catena**, atta a sviluppare energia con continuità, può verificarsi e mantenersi solo se i neutroni emessi dal nucleo spezzato sono in condizione di agire su altri nuclei del materiale fissile ripetendo il fenomeno. Un neutrone lento dispone di un tempo maggiore per agire nei confronti del nucleo di un atomo vicino, per cui **occorre ridurre la velocità dei neutroni emessi** tramite un materiale **moderatore** (elementi con basso numero di massa con **buone capacità di rallentamento** senza assorbire i neutroni: acqua naturale o pesante, berillio e grafite) inserito nel reattore. Se, in un determinato istante,  $N$  nuclei di materiale fissile subiscono la scissione emettendo neutroni, parte dei quali ( $N'$ ) agisce su altri nuclei, si può verificare che:

- $N' < N$ : la reazione a catena si esaurisce;
- $N' > N$ : la reazione genera un'onda esplosiva;
- $N' = N$ : la reazione si mantiene con produzione continua (e controllata) di energia.

Un altro fattore che influenza la reazione a catena è il tipo di combustibile nucleare impiegato: l'isotopo U-235 **rappresenta solo una piccolissima aliquota della massa totale** del combustibile, il che rende più problematico l'urto dei neutroni e la conseguente

emissione di energia; un aumento della percentuale di U-235, mediante un **processo di arricchimento** (per diffusione o centrifugazione gassosa), aumenta la probabilità di mantenere la reazione a catena e diminuisce le dimensioni del reattore. L'uranio 235 al 3 ÷ 7% viene utilizzato nelle centrali nucleari a fissione, mentre all'80% è utilizzato per fini bellici.

Un reattore nucleare (Fig. 27.3) è costituito da:

- **una parte attiva (nocciolo):** blocco di materiale *moderatore* con delle cavità in cui alloggia il combustibile nucleare;
- **un riflettore:** contenitore che racchiudendo il nocciolo, impedisce la dispersione dei neutroni ed assicura il mantenimento della reazione a catena;
- **un fluido refrigerante:** contiene la temperatura nel nocciolo; spesso il refrigerante assolve anche la funzione di convogliare l'energia termica allo scambiatore di calore. Possono essere: anidride carbonica (non cattura i neutroni e costa relativamente poco), acqua purificata (consente di eliminare lo scambiatore di calore ed inviare direttamente il vapore del fluido refrigerante nelle motrici), lega sodio-potassio (22% Na e 78% K, liquida a temperatura ambiente);
- **uno schermo termico** (di metallo): frena le radiazioni  $\gamma$ ;
- **uno schermo biologico** (calcestruzzo contenente piccole aggiunte di metalli vari con spessore che può raggiungere qualche metro): contiene gli effetti delle rimanenti radiazioni e dei neutroni vaganti;
- **una struttura di sostegno** con le relative pompe di circolazione, tubazioni ecc. e lo scambiatore entro il quale avviene la trasmissione del calore dal fluido intermediario a quello operante.

Il vapore prodotto poi si espande nelle turbine e viene ricondotto in ciclo attraverso un sistema simile a quello degli impianti a vapore (Cap. 26). Per la regolazione del reattore si ricorre ad un sistema di barre mobili atto ad assorbire i neutroni.

Ci sono vari **tipi di reattori**:

- **di produzione:** sviluppano isotopi fissionabili;
- **di ricerca:** studia e sfrutta i prodotti di fissione (ma non del calore generato nel processo);
- **di potenza:** l'energia nucleare sviluppata viene convertita in energia meccanica o elettrica. Si suddividono in **reattori: a grafite-gas, ad acqua leggera** (il combustibile è uranio arricchito), **ad acqua pesante** (uranio naturale), **a metallo liquido** (lega sodio-potassio e uranio arricchito), **autofertilizzanti** o **breeders** (sviluppa energia e converte un isotopo fertile in materiale fissile).

Per la propulsione dei grossi mezzi di trasporto (ad es. navali) **si ricorre all'uranio fortemente arricchito per ridurre il peso di combustibile trasportato ed eliminare il riflettore**. Mentre l'utilizzo nella propulsione aerea è ancora lontano per questioni di

peso. **Nelle centrali elettronucleari invece il fattore peso passa in seconda linea** rispetto alle considerazioni di carattere economico per rendere competitivo il prezzo dell'energia prodotta.

Con **scorie nucleari** si indica il combustibile esausto originatosi all'interno dei reattori nucleari nel corso dell'esercizio e si suddividono nel **livello** di attività:

- **basso:** indumenti usati e getta usati nelle centrali nucleari (tempi di dimezzamento  $\leq 75$  giorni);
- **intermedio:** rifiuti da disattivazione di impianti (tempi di decadimento di un centinaio di anni);
- **alto:** combustibile esausto delle centrali nucleari (tempi di decadimento di migliaia di anni)

Le centrali nucleari sono state, nel tempo, di:

- **prima generazione:** realizzate nei primi anni '60, di ridotta potenza e con ridotti criteri di sicurezza;
- **seconda generazione:** realizzate negli anni '70 e '80 con un incremento sostanzioso della potenza e delle dimensioni delle centrali (ad es. Chernobyl);
- **terza generazione:** ha potenze più elevate e procedure di intervento automatico spegnimento in caso di anomalia anche minima o solo sospetta;
- **terza generazione avanzata:** ad es. Fukushima;
- **quarta generazione:** dovrà utilizzare in maniera più efficiente l'uranio e riprocessare direttamente nel ciclo di generazione il materiale esaurito.

Nella **fusione nucleare calda** due nuclei leggeri si fondono per ottenere nuclei pesanti generando energia per difetto di massa (come nelle stelle e nel Sole); è un metodo pulito per produrre energia senza rischio di esplosioni devastanti o di fughe radioattive e senza il problema di smaltimento delle scorie. Il combustibile dei reattori a fusione è il deuterio e il trizio che se portati ad una distanza dell'ordine di  $10^{-12}$  m tendono a fondersi sotto la spinta della forza di gravità nucleare e rilasciano energia ( $^2\text{H} + ^3\text{H} = ^4\text{He} + \text{neutrone} + \text{energia}$ ). Il processo è ostacolato dalla forza elettrostatica repulsiva dei protoni ma se si portano ad uno stato di eccitazione con temperature di 100 milioni di gradi, i nuclei si scontrano e fondono. Il problema della temperatura si risolve confinando il *plasma* (gas ionizzato in cui una significativa parte degli elettroni si sono separati dai nuclei) con dei campi magnetici che lo sostengano a distanza dalle pareti del contenitore dove avviene la fusione. Siamo ancora nel campo della ricerca.

**La fusione nucleare fredda** è il nome attribuito a un tipo di fusione **catalizzata** da metalli (processo ancora non molto chiarito nei suoi principi fisici) che produrrebbe energia a temperature molto minori della fusione *calda*. Caricando del deuterio in un reticolo cristallino, si costringono i nuclei dei relativi atomi a *stare vicini* aumentando la probabilità di fusione secondo una reazione del tipo:  $^2\text{H} + ^2\text{H} = ^3\text{He} + \text{neutrone} + \text{energia}$ . La riproducibilità di questi esperimenti (detti *chimici*) al momento non è assicurata.