

SUPPLEMENTO  
**GIORNALE  
DI FISICA**

volume 51 2010

**1** Serie Speciale L'ENERGIA NELLA SCUOLA

**ENERGIA E  
FISSIONE NUCLEARE**



Suppl. 1

vol. 51  
2010

# GIORNALE DI FISICA

della  
Società Italiana di Fisica

---

Serie Speciale L'ENERGIA NELLA SCUOLA  
numero 1

## ENERGIA E FISSIONE NUCLEARE

A cura di Enzo De Sanctis  
con la collaborazione di Stefano Monti e Giovanni Ricco



Copyright © 2010, Società Italiana di Fisica

*Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte di questo volume può essere riprodotta in qualsiasi forma o con qualsiasi mezzo, elettronico, meccanico, per fotocopia o con altri procedimenti senza previa autorizzazione scritta dell'editore.*

DOI 10.1393/gdF/i2011-10130-2

Produzione a cura dello Staff Editoriale della SIF

In copertina: Il nocciolo di un reattore nucleare, elaborazione grafica di Simona Oleandri

Questo volume è stato realizzato con il contributo del Ministero dell'Istruzione dell'Università e della Ricerca



*Ministero dell'Istruzione  
dell'Università e Ricerca*

Publicato da  
Società Italiana di Fisica  
Via Saragozza 12, 40123 Bologna-Italy  
<http://www.sif.it>

Proprietà Letteraria Riservata  
Printed in Italy

# SOMMARIO

PREFAZIONE	5
PREMESSA	7
1. FISICA NUCLEARE E RADIOATTIVITÀ	9
1.1 Al cuore della materia	9
1.1.1 L'atomo	9
Approfondimento: Visualizzare gli atomi	11
1.1.2 Il nucleo	12
Approfondimento: Densità nucleare	14
1.2 La forza nucleare forte e la stabilità dei nuclei	15
1.3 L'energia di legame nucleare	18
1.4 Le reazioni nucleari	24
1.5 Nuclei instabili e radioattività	26
1.6 Tempo di dimezzamento, vita media, attività	28
Approfondimento: Famiglie radioattive	30
1.7 Radioattività naturale e artificiale	33
Approfondimento: Effetti biologici delle radiazioni.	
Dosimetria	35
1.8 Applicazioni delle radiazioni ionizzanti in medicina, industria e ricerca	40
Approfondimento: Metodi di datazione	41
2. ENERGIA DA FISSIONE NUCLEARE	45
2.1 La Fissione nucleare	45
Approfondimento: La cattura di neutroni su uranio	48
2.2 La reazione a catena	49
2.3 Applicazioni energetiche della fissione nucleare	53
2.3.1 La fisica del reattore	53
2.3.2 Il reattore nucleare termico	54
Approfondimento: Il rallentamento dei neutroni	57
2.3.3 Tipi di reattori nucleari	60
Approfondimento: Le generazioni di reattori nucleari	63
2.4 Il ciclo del combustibile	67
2.5 Riserve naturali di combustibile nucleare e loro utilizzo	69

2.6 Sicurezza degli impianti nucleari	72
2.7 Gestione dei rifiuti radioattivi	74
2.7.1 Gestione dei materiali a bassa e media attività	75
2.7.2 Gestione dei materiali ad alta attività	77
2.7.3 Sviluppi della ricerca	78
Approfondimento: Volume dei rifiuti radioattivi	79
2.8 Nuove frontiere: Ricerca e Sviluppo	82
2.9 Formazione	83
Appendice A: Proliferazione nucleare	87
Appendice B: I tre referendum del 1987 sul nucleare in Italia	87
Crediti iconografici	90
Glossario	91

## INDICE DEI QUADRI DI SINTESI

Quadro 1: L'atomo	10
Quadro 2: Nuclei stabili. Isotopi e isotoni	17
Quadro 3: L'equivalenza massa-energia	24
Quadro 4: La radioattività	27
Quadro 5: Radioattività naturale e artificiale	34
Quadro 6: Effetti delle radiazioni sull'uomo	38
Quadro 7: La fissione nucleare e la reazione a catena	52
Quadro 8: Reattori nucleari	60
Quadro 9: Eventi storici della fissione nucleare	66
Quadro 10: Energia nucleare	69
Quadro 11: La sicurezza nucleare	74
Quadro 12: I rifiuti radioattivi	81

## PREFAZIONE

La questione energetica si impone oggi come un problema di interesse cruciale e richiama l'attenzione di tutti, anche di chi solitamente non si occupa di questioni di scienza, o di economia o di politica. Essa è legata alla disponibilità delle diverse fonti energetiche, alla domanda e al consumo di energia – in aumento nelle sue diverse forme – e agli effetti ambientali che la sua produzione genera, come inquinamento del suolo e dell'atmosfera.

Purtroppo, nel settore energetico esiste, non solo in Italia, una grave confusione che deriva in parte da ignoranza e in parte da informazione non corretta, a volte diffusa per fini ideologici. Una cultura dell'energia fondata su analisi e interpretazioni tecnico-scientifiche diventa, quindi, sempre più necessaria ed è propedeutica a una più corretta e consapevole cultura ambientale e socio-economica.

Saranno soprattutto i giovani a subire le conseguenze delle scelte effettuate nei prossimi anni in campo energetico e ambientale. È quindi necessario e auspicabile che essi dispongano di strumenti adeguati e informazioni corrette e non superficiali per partecipare in modo consapevole al dibattito in corso sui problemi dell'energia.

Per questo motivo la Società Italiana di Fisica (SIF) e la Società Chimica Italiana (SCI) hanno avviato il progetto "L'ENERGIA NELLA SCUOLA" che contempla la pubblicazione, per le scuole secondarie superiori, di alcuni fascicoli tematici sulle più importanti e promettenti fonti energetiche, le loro potenzialità e i loro problemi.

Scopo di questi fascicoli è di presentare le idee fondamentali e gli aspetti scientifici e tecnologici della questione energetica in modo comprensibile agli studenti e a tutti coloro che, benché privi di cultura scientifica, possiedono tuttavia la curiosità di conoscere e la voglia di apprendere. Il testo dei fascicoli è quindi elementare, nel senso che i concetti presentati sono semplificati al massimo e non richiedono una specifica conoscenza su alcuno degli argomenti trattati.

L'iniziativa è stata concordata con l'Associazione per l'Insegnamento della Fisica (AIF) e prevede la collaborazione dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), Agenzia nazionale per le nuove tecnologie e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA) e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

Il piano editoriale prevede la pubblicazione dei seguenti fascicoli:

- Produzione e trasporto di energia. Efficienza energetica.
- Futuro delle fonti fossili. Problemi della CO<sub>2</sub>.
- Fonti perenni naturali (idroelectriche, geotermiche, eoliche, solari termiche).
- Energia e fissione nucleare.
- Energia e fusione nucleare.
- Sorgenti fotovoltaiche.
- Energia dalle biomasse.
- Energia portatile: pile e accumulatori.

I fascicoli sono pubblicati come numeri speciali del “GIORNALE DI FISICA”, rivista pubblicata dalla SIF, particolarmente dedicata agli insegnanti di fisica delle scuole secondarie, che fornisce aggiornamenti sulle più recenti ricerche in tutti i campi della fisica, sui più moderni metodi didattici e sulle nuove tecniche di insegnamento.

Il presente fascicolo è il primo della serie. Esso riguarda l’energia ottenuta da fissione nucleare, che è diventata di grande attualità in seguito alla recente decisione del Governo di costruire centrali nucleari in Italia.

Ci auguriamo che questo primo numero de “L’ENERGIA NELLA SCUOLA” risulti non soltanto interessante, ma anche di gradevole lettura e che riesca a catturare l’attenzione dei giovani su un tema molto dibattuto e di grande rilievo per il loro futuro.

Luisa Cifarelli  
*Presidente SIF*

Luigi Campanella  
*Presidente SCI*

Enzo De Sanctis e Michele Aresta  
*Coordinatori del Gruppo di Lavoro sull’Energia SIF-SCI*

*Nota aggiuntiva:*

*L’11 marzo 2011 - poco prima della distribuzione di questo fascicolo - è sopravvenuto il drammatico incidente della centrale nucleare di Fukushima, in Giappone, come conseguenza di un terribile sisma la cui onda di tsunami ha provocato in quel Paese una tragedia epocale. L’incidente ha portato nuovamente alla ribalta una serie di problemi legati alla sicurezza dei reattori, problemi che peraltro erano già stati affrontati in questo fascicolo e cui va dedicata, ora come sempre, la massima attenzione.*

## PREMESSA

Questo fascicolo si compone di due capitoli, riguardanti rispettivamente la fisica nucleare e la fissione nucleare come fonte energetica, due appendici, sulla proliferazione nucleare e sui tre quesiti sul nucleare del referendum del 1987 in Italia, e un glossario.

Nel primo capitolo vengono illustrate le caratteristiche delle forze che agiscono tra le particelle presenti nei nuclei atomici, vale a dire i neutroni e i protoni. Sono, in particolare, affrontati i temi della stabilità dei nuclei atomici, della radioattività naturale e artificiale e delle sue applicazioni mediche e industriali.

Il secondo capitolo conduce il lettore dal fenomeno fondamentale della fissione nucleare, attraverso la cattura dei neutroni e la reazione a catena, fino a una breve rassegna delle sue applicazioni energetiche. Sono anche trattati i temi delle riserve di uranio, della gestione dei rifiuti radioattivi, della ricerca e della formazione nel campo specifico. Il lettore con buone conoscenze scientifiche, ma non specialistiche, interessato principalmente agli aspetti energetici della fisica nucleare, può leggere direttamente questo capitolo, senza soffermarsi sulla parte propedeutica, trattata nel capitolo 1.

L'Appendice A trascrive il paragrafo sulla "Proliferazione Nucleare" riportato nel libro bianco "Energia in Italia, problemi e prospettive: 1990-2020", pubblicato dalla Società Italiana di Fisica nell'aprile 2008. Il documento è scaricabile gratuitamente dal sito: <http://www.sif.it/SIF/it/portal/attivita/energy/librobianco>.

L'Appendice B riporta il testo integrale dei tre quesiti sul nucleare del referendum svolto in Italia l'8 novembre 1987.

Nel Glossario sono riportate le definizioni di termini tecnici, unità di misura, sigle e acronimi usati nel testo e di frequente impiego nella trattazione di problemi energetici.

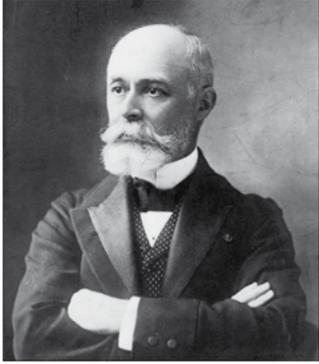
Il testo è organizzato su tre livelli di lettura:

- La parte più estesa, in carattere nero, illustra in modo elementare e didattico la materia trattata.
- Nella parte in carattere azzurro sono riportati, a beneficio dei lettori più curiosi, approfondimenti di alcuni argomenti specifici.
- Nei dodici Quadri di sintesi sono evidenziati, con un linguaggio semplice e auto-consistente, i punti salienti degli argomenti trattati. La lettura solo di questi quadri permette, anche al lettore più frettoloso, di farsi un'idea corretta e essenziale dei temi esaminati.

Il fascicolo contiene inoltre 24 Esempi che permettono di approfondire in modo quantitativo alcuni aspetti particolarmente importanti.

L'autore ringrazia i colleghi Alessandro Bettini, Maria Sofia Candeloro, Luisa Cifarelli, Simonetta Croci, Gaudenzio Mariotti e Marisa Michelini per la lettura critica del documento e gli utili suggerimenti.

## I pionieri della fissione nucleare



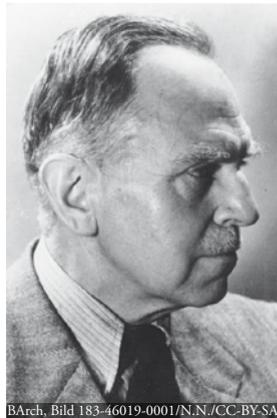
Antoine Henri Becquerel



Frédéric Joliot e Irène Joliot-Curie



Fritz Strassmann



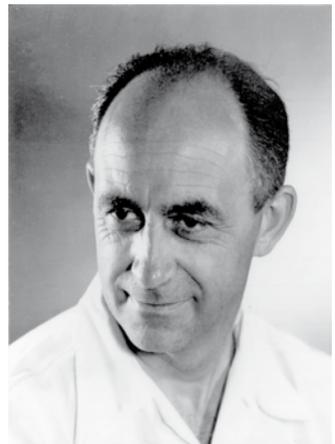
Otto Hahn



Lise Meitner



Otto Frisch



Enrico Fermi

La lista completa dei crediti iconografici è pubblicata a pagina 90.

# 1. FISICA NUCLEARE E RADIOATTIVITÀ

## 1.1 Al cuore della materia

### 1.1.1 L'atomo

Nel mondo in cui viviamo tutta la materia, sia vivente che inanimata, è costituita da atomi. Questi hanno dimensioni molto piccole rispetto agli oggetti comuni (dell'ordine di  $10^{-10}$  m, ossia un decimilionesimo di millimetro) e sono formati da una parte centrale, il *nucleo*, dotato di carica elettrica positiva, attorno al quale si trovano distribuzioni di cariche elettriche negative, descritte come *elettroni*.

Il nucleo contiene più del 99,95% della massa dell'atomo, ma occupa soltanto una piccolissima frazione del suo volume (circa  $10^{-15}$ , ossia un milionesimo di miliardesimo). Gli elettroni costituiscono la rimanente massa e occupano la maggior parte del volume.

Nucleo ed elettroni stanno insieme nell'atomo perché, essendo dotati di cariche elettriche di segno contrario, si attraggono. La carica elettrica totale dell'atomo è nulla: ciò deriva dal fatto che la carica totale negativa degli elettroni è uguale e di segno opposto alla carica positiva del nucleo.

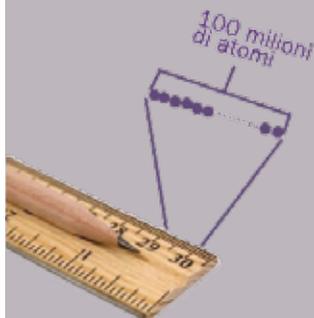
L'atomo può venire facilmente privato di uno o più elettroni o, al contrario, può acquistare uno o più elettroni: in tal caso si dice che l'atomo è *ionizzato* rispettivamente positivamente una o più volte, e negativamente una o più volte.

Le proprietà chimiche degli atomi, cioè il loro grado di affinità verso altri atomi, dipendono dal numero di elettroni. Alcune trasformazioni chimiche avvengono spontaneamente. Due sostanze diverse che vengono a contatto possono unirsi dando origine a una nuova sostanza. In questi casi si libera energia, solitamente sotto forma di calore. In altri casi, invece, perché la trasformazione avvenga occorre fornire energia dall'esterno, ad esempio scaldando il recipiente in cui deve avvenire la reazione.

Le reazioni chimiche coinvolgono gli elettroni periferici degli atomi e le forze di natura elettrica, ma non hanno alcuna possibilità di influenzare la struttura dei nuclei, perché (come vedremo più avanti) le energie in gioco nelle reazioni chimiche sono enormemente inferiori a quelle necessarie per disgregare i nuclei.

### QUADRO 1: L'ATOMO

Gli atomi hanno dimensioni molto piccole, con diametri di qualche decimo di nanometro; per formare un segmento lungo un centimetro occorrerebbe metterne in fila cento milioni.



Tuttavia sono molto numerosi: mettendo in fila uno accanto all'altro gli atomi che formano un granello di sale\*, si potrebbe coprire una distanza pari a quella tra la Terra e il Sole (raggio medio dell'orbita 150 milioni di chilometri ( $1,5 \cdot 10^{11}$  m)).

Nel nucleo è praticamente concentrata tutta la massa dell'atomo: per esempio, nell'atomo più semplice, l'idrogeno (formato da 1 protone e 1 elettrone), il nucleo ha una massa circa 1836 volte più grande di quella dell'elettrone, precisamente  $1,67262 \cdot 10^{-27}$  kg contro  $9,109 \cdot 10^{-31}$  kg. Nell'atomo naturale più complesso, l'uranio (formato da 92 protoni, 146 neutroni e 92 elettroni), il nucleo ha una massa circa 4750 volte più grande di quella dei 92 elettroni.

Gli atomi sono fatti soprattutto di vuoto: i nuclei hanno dimensione dell'ordine di  $10^{-15}$  m, mentre le distribuzioni elettroniche sono relativamente molto grandi (con dimensioni di circa  $10^{-10}$  m). Mantenendo queste proporzioni, se il nucleo fosse grande come una formica al centro di uno stadio, le distribuzioni elettroniche occuperebbero uno spazio che arriva fin sugli spalti!



©INFN 2009, riprodotta per gentile concessione da Asimmetrie, anno 4, numero 9/9.09

\* In una mole di una qualsiasi sostanza (ossia in una quantità della sostanza il cui peso espresso in grammi è uguale al suo peso molecolare) ci sono  $6,022 \cdot 10^{23}$  molecole e ogni molecola è formata, a sua volta, da uno o più atomi legati insieme da forze elettriche.

---

**APPROFONDIMENTO: Visualizzare gli atomi**


---

Alle scale atomiche ( $10^{-10}$  m) le leggi della fisica sono quantistiche ed hanno caratteristiche radicalmente diverse da quelle del mondo che vediamo con gli occhi, o con i cannocchiali. È sbagliato, quindi, pensare alla struttura degli atomi, come a quella di un sistema macroscopico rimpicciolito. In particolare, il modello di Bohr-Sommerfeld, che immagina l'atomo come un piccolo sistema solare col nucleo al centro e gli elettroni che gli girano intorno su orbite esattamente prescritte, ha interesse puramente storico. I disegni degli atomi secondo questo modello, che ancor oggi si incontrano anche in libri di testo, e di cui un esempio è riportato in figura 1 (a), inducono ad una visione completamente errata della situazione.

In realtà, alle dimensioni atomiche non si può parlare di traiettorie degli elettroni. Gli elettroni, invece, si possono trovare in qualsiasi punto nelle vicinanze del nucleo, con probabilità diversa a seconda del punto. Se si potesse vedere un elettrone, lo si troverebbe più spesso in certe posizioni che in altre. Dobbiamo quindi immaginare una “nuvola elettronica” (anche se l'elettrone è uno solo come nel caso dell'idrogeno) la cui densità in differenti punti corrisponde alla densità di probabilità di trovarvi l'elettrone, come riportato nella figura 1 (b).

In realtà, ogni specie atomica possiede una serie discreta di possibili “stati” ciascuno con un'energia definita e ciascuno con una certa forma della nuvola elettronica. La meccanica quantistica permette di calcolare esattamente queste energie e densità di probabilità.

Si pensi, per analogia, ad una corda di chitarra. Particolarmente importanti sono le sue vibrazioni a frequenza definita, la fondamentale e le sue armoniche. Si tratta di una sequenza discreta di stati con frequenze crescenti, appunto, in successione armonica (proporzionalmente ai numeri primi). Ciascuno stato ha una forma definita, ciascuno con un numero, crescente, di nodi e di ventri. Analoghi sono gli stati di vibrazione a frequenza definita di oggetti a due dimensioni, come la membrana di un tamburo, o a tre, come una campana. Ciascuno di questi stati può essere individuato da un numero primo, l'ordine dell'armonica, nel caso della corda, due o tre numeri primi se le dimensioni sono due o tre.

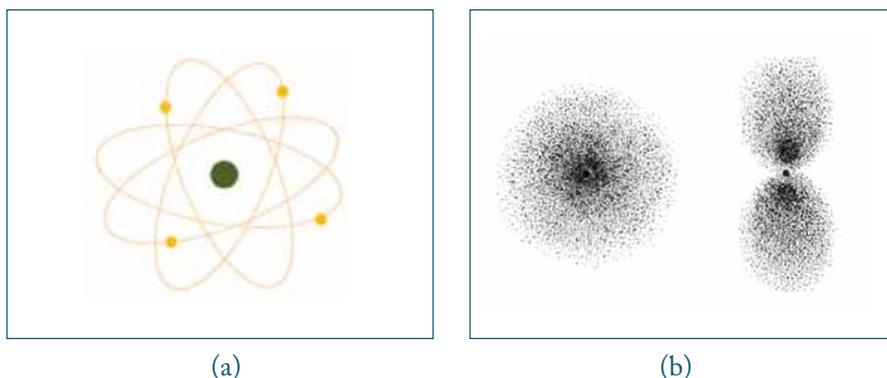


Fig. 1. – (a) Rappresentazione schematica, ormai superata, di un atomo con il nucleo al centro e gli elettroni che gli orbitano intorno. (b) Nuvole elettroniche dell'atomo d'idrogeno in due diversi "stati" di energia: maggiore addensamento dei puntini neri significa maggiore probabilità di trovare l'elettrone. (Il punto nero al centro delle due distribuzioni – sferica, a sinistra, e a due lobi verticali, a destra – rappresenta il nucleo.)

La situazione è del tutto analoga negli atomi, pur di pensare all'energia dello stato atomico al posto della frequenza della vibrazione della corda (o altro) e alla nuvola di probabilità al posto della distribuzione lungo la corda dell'energia di vibrazione.

La figura 1 (b) mostra le prime nuvole elettroniche nella sequenza, corrispondenti alle energie più basse, per l'atomo di idrogeno.

### 1.1.2 Il nucleo

Il nucleo, che rappresenta la parte centrale dell'atomo in cui è concentrata la quasi totalità della massa atomica, è circa centomila volte più piccolo dell'atomo stesso ed è, a sua volta, un aggregato di altre particelle: *protoni* (aventi massa  $M_p = 1,67262 \cdot 10^{-27}$  kg) e *neutroni* (aventi massa  $M_n = 1,67493 \cdot 10^{-27}$  kg, ossia maggiore soltanto di meno dello 0,14% di quella del protone). Queste particelle sono molto simili e per questo si usa molto spesso il termine *nucleone* per indicare entrambe.

Ogni atomo contiene un ugual numero di protoni e di elettroni e viene individuato da due numeri: il *numero atomico*  $Z$ , pari al numero di protoni (e di elettroni) in esso contenuti, e il *numero di massa*  $A^{(1)}$ , pari al numero totale di nucleoni (protoni + neutroni) che contiene il suo nucleo. Viene anche usato il numero  $N$  dei neutroni; tra i tre numeri esiste la relazione:

$$(1) \quad A = Z + N.$$

I protoni hanno una carica elettrica positiva,  $+e$ , dello stesso valore, ma di segno opposto, di quella negativa,  $-e$ , degli elettroni ( $e = 1,60217653 \cdot 10^{-19}$  C). I neutroni non hanno carica elettrica. La carica totale del nucleo è quindi  $+Ze$ .

Nella Tabella I sono riportati i valori della carica elettrica e della massa (in kg e in unità di massa atomica, u, definita nel par. 1.3) dell'elettrone e dei nucleoni.

Tabella I. – Carica elettrica e massa delle particelle atomiche.

Particella	Simbolo	Carica elettrica (C)	Massa	
			(kg)	(u)
elettrone	$e$	$-1,60217653 \cdot 10^{-19}$	$9,10938 \cdot 10^{-31}$	$5,485799 \cdot 10^{-4}$
protone	$p$	$+1,60217653 \cdot 10^{-19}$	$1,67262 \cdot 10^{-27}$	1,007276
neutrone	$n$	0	$1,67493 \cdot 10^{-27}$	1,008665

Tutti i nuclei con gli stessi valori di  $Z$  e  $A$  (e quindi anche di  $N$ ) costituiscono una

<sup>(1)</sup> Il nome deriva dal fatto che la massa di un nucleo è molto prossima alla massa di un nucleone moltiplicata per  $A$ .

particolare specie nucleare o *nuclide*. Un particolare nuclide viene indicato aggiungendo al simbolo chimico dell'elemento corrispondente, X, il numero di massa, come indice soprascritto, e quello atomico, come indice sottoscritto:  ${}^A X_Z$ . Per esempio  ${}^{15}\text{N}_7$  rappresenta il nucleo di azoto che contiene 7 protoni e 8 neutroni, per un totale di 15 nucleoni.

Poiché un atomo è elettricamente neutro, il numero di protoni in un nucleo determina quello degli elettroni nell'atomo e quindi le proprietà chimiche dell'atomo stesso. Pertanto il numero atomico  $Z$  stabilisce di quale atomo si tratta: carbonio, ossigeno, oro, e così via. Di conseguenza è ridondante specificare sia il simbolo dell'elemento che il suo numero atomico. Per esempio, se parliamo di un nucleo di azoto, sappiamo automaticamente che  $Z = 7$ . Per questo il pedice 7 a  ${}^{15}\text{N}_7$  a volte non compare e si scrive semplicemente  ${}^{15}\text{N}$ , che discorsivamente si pronuncia "azoto quindici".

Togliere o aggiungere un protone in un nucleo equivale a trasformare un elemento in un altro. Se invece si aggiunge o toglie un neutrone il numero degli elettroni periferici non viene alterato e quindi non cambiano le proprietà chimiche dell'atomo che è stato modificato.

Nuclidi con lo stesso numero di protoni ed un diverso numero di neutroni sono chiamati *isotopi*. Nuclidi con lo stesso numero di neutroni ed un diverso numero di protoni sono chiamati *isotoni*.

Nuclidi isotopi formano atomi con proprietà chimiche identiche, ma con proprietà nucleari differenti. Ad esempio, si conoscono 14 isotopi dell'uranio, aventi numero di massa compreso tra 227 e 240, e 6 isotopi del carbonio, aventi numero di massa compreso tra 11 e 16.

Gli isotopi di un elemento non sono presenti tutti con la stessa abbondanza sulla Terra. Ad esempio, oltre all'idrogeno con un solo protone, esistono altri due isotopi, il deuterio e il trizio, che hanno rispettivamente un neutrone e due neutroni in più nel nucleo (vedi figura 2). Il deuterio, che è stabile (per la definizione di nucleo stabile vedi par. 1.5), è presente in natura nel rapporto 1 a 6000 rispetto all'idrogeno. Ciò vuol dire che nei composti contenenti un atomo di idrogeno nella propria molecola, ogni seimila molecole si trova un atomo di deuterio al posto di quello di idrogeno.

L'uranio, che ha numero atomico  $Z = 92$ , si trova in natura come una miscela dei tre isotopi  ${}^{238}\text{U}$  (99,282%),  ${}^{235}\text{U}$  (0,712%) e  ${}^{234}\text{U}$  (0,006%) (i numeri riportati tra parentesi indicano le relative percentuali).

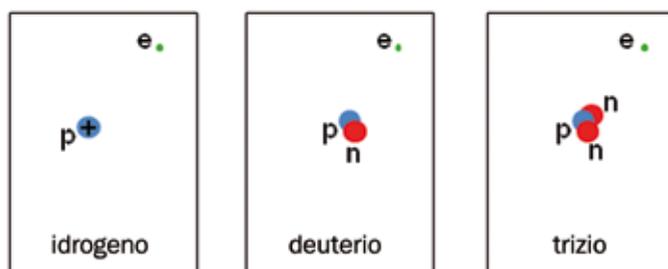


Fig. 2. – Gli isotopi dell'idrogeno.

---

**APPROFONDIMENTO: Densità nucleare**


---

Le dimensioni molto piccole del nucleo comportano che la materia nucleare è circa  $10^{14}$  volte (ossia circa centomila miliardi di volte) più densa della materia ordinaria.

Protoni e neutroni sono raggruppati nel nucleo in modo da formare una regione approssimativamente sferica con raggio  $R$  dato approssimativamente da

$$(2) \quad R \approx r_0 A^{1/3},$$

con  $r_0 = 1,2 \cdot 10^{-15}$  m.

Questa equazione indica che il volume del nucleo ( $V = (4/3)\pi R^3$ ) è proporzionale al numero di massa  $A$ , ossia al numero di nucleoni che esso contiene. L'aggiunta di protoni e di neutroni a un nucleo per formare, rispettivamente, un nuovo elemento o un nuovo isotopo non rende più addensati i nucleoni: ogni protone e ogni neutrone occupa sostanzialmente lo stesso volume qualunque sia il numero dei nucleoni nel nucleo. I nucleoni, quindi, sono raggruppati insieme in modo da formare un ammasso di materia incompressibile.

Il numero di massa  $A$  è, a sua volta, direttamente proporzionale alla massa nucleare totale, poiché – come abbiamo detto più sopra – neutroni e protoni hanno all'incirca la stessa massa. Perciò il volume e la massa di un nucleo sono direttamente proporzionali e la densità della materia nucleare è approssimativamente la stessa per tutti i nuclei.

Nella Tabella II sono riportati, per un utile confronto, i valori delle densità di alcune sostanze.

Tabella II. – Valori delle densità di alcune sostanze.

Tipo di sostanza	Densità (kg/m <sup>3</sup> )
materia nucleare	$\sim 10^{17}$
centro del Sole	$\sim 10^5$
uranio	$18,7 \cdot 10^3$
mercurio	$13,59 \cdot 10^3$
piombo	$11,3 \cdot 10^3$
ferro	$7,86 \cdot 10^3$
alluminio	$2,70 \cdot 10^3$
acqua (a 4 °C)	1000
aria	1,29
ultravuoto di laboratorio	$\sim 10^{-15}$
spazio interstellare	$\sim 10^{-21}$
spazio intergalattico	$\sim 10^{-27}$

**Esempio 1:** Calcolare il raggio dei nuclei  ${}^1\text{H}_1$ ,  ${}^{27}\text{Al}_{13}$  e  ${}^{238}\text{U}_{92}$

**Soluzione:** Usando l'equazione (2) si ottiene:

$$R({}^1\text{H}) = 1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m} ,$$

$$R({}^{27}\text{Al}) = (1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m})(27)^{1/3} = 3,6 \cdot 10^{-15} \text{ m} ,$$

$$R({}^{238}\text{U}) = (1,2 \cdot 10^{-15} \text{ m})(238)^{1/3} = 7,4 \cdot 10^{-15} \text{ m} .$$

Poiché i raggi nucleari variano come  $A^{1/3}$ , il nucleo più grande in natura ( ${}^{238}\text{U}$ ) ha un raggio solo 6 volte maggiore di quello del nucleo più piccolo ( ${}^1\text{H}$ ).

**Esempio 2:** Calcolare la densità della materia nucleare.

**Soluzione:** In un nucleo il numero di nucleoni per unità di volume  $W$  è

$$W = \frac{A}{V} = \frac{A}{(4/3)\pi R^3} = \frac{A}{(4/3)\pi (1,2 \cdot 10^{-15})^3 A} = 1,38 \cdot 10^{44} \text{ nucleoni/m}^3 .$$

La densità della materia nucleare si ottiene moltiplicando questo numero per la massa (media) del singolo nucleone:

$$D = (1,38 \cdot 10^{44} \text{ nucleoni/m}^3)(1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}) = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ kg/m}^3 = 2,3 \cdot 10^{14} \text{ g/cm}^3 .$$

Si tratta di un valore enorme, pari a 230 000 tonnellate per  $\text{mm}^3$ .

## 1.2 La forza nucleare forte e la stabilità dei nuclei

Il numero di protoni e neutroni che possono dare luogo a nuclei stabili non è arbitrario. Questo è mostrato nella figura 3, che è un diagramma del numero di protoni  $Z$  in funzione del numero di neutroni  $N$  per i nuclei attualmente conosciuti. Questi sono circa 3000 e in gran parte sono prodotti in laboratorio e all'interno delle stelle.

In figura in verde sono indicati i nuclei stabili, in giallo quelli instabili (per la relativa definizione vedi par. 1.5). La retta rossa rappresenta la bisettrice degli assi  $N = Z$ . Gli isotopi di uno stesso elemento si trovano sulla stessa retta orizzontale, gli isotoni sulla stessa retta verticale.

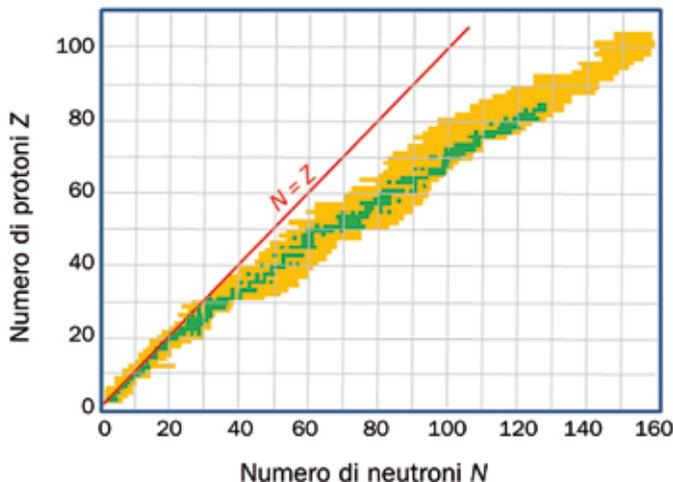


Fig. 3. – Diagramma dei nuclei attualmente conosciuti: in verde sono indicati i nuclei stabili, in giallo quelli instabili. Tutti i nuclei stabili giacciono al di sotto della retta  $N = Z$  (retta rossa), il che rispecchia il fatto che il numero di neutroni diventa maggiore del numero di protoni al crescere del numero atomico  $Z$ .

La figura mostra che i nuclei leggeri contengono generalmente quasi un ugual numero di protoni e di neutroni, mentre via via che si passa ai nuclei più pesanti si manifesta un eccesso sempre crescente di neutroni.

Protoni e neutroni sono tenuti assieme nel nucleo da una forza fondamentale che ha preso il nome di *forza nucleare*, perché opera tra le particelle che costituiscono i nuclei. (Oggi sappiamo che la forza nucleare forte è il risultato di forze subnucleari che agiscono tra i costituenti elementari dei nucleoni (“quark”).) La forza nucleare è diversa sia dalla forza elettrostatica che dalla forza gravitazionale: essa è molto più grande di entrambe (per questo motivo è anche detta *forza forte*), ma diminuisce più rapidamente all’aumentare della distanza tra due nucleoni. Questo fatto si esprime usualmente dicendo che la forza nucleare ha un *raggio di azione corto*.

Il corto raggio di azione,  $R_a$ , della forza nucleare ha un ruolo importante nella stabilità del nucleo. Questa si basa su un equilibrio di forze. Infatti, affinché un nucleo sia stabile, la repulsione elettrostatica tra i protoni deve essere equilibrata dall’attrazione fra i nucleoni dovuta alla forza nucleare. Ma un protone respinge tutti gli altri protoni all’interno del nucleo, poiché la forza elettrostatica ha raggio di azione molto grande<sup>(2)</sup>. Per contro un nucleone (protone o neutrone) attrae, mediante la forza nucleare, soltanto i nucleoni a lui più vicini, quelli che si trovano a una distanza minore del raggio di azione  $R_a$ . Perciò, al crescere del numero  $Z$  di protoni nel nucleo, il numero  $N$  di neutroni deve crescere ancor più rapidamente affinché sia mantenuta la stabilità.

<sup>(2)</sup> La forza elettrostatica tra due cariche elettriche diminuisce di intensità con il quadrato della distanza, annullandosi a distanza infinita.

Via via che il numero di protoni in un nucleo aumenta, si raggiunge un punto in cui non è più possibile trovare un equilibrio tra forza attrattiva e forza repulsiva aumentando il numero di neutroni. A causa del corto raggio di azione della forza nucleare, i neutroni aggiuntivi non possono equilibrare la repulsione elettrostatica a lungo raggio di azione dei protoni aggiuntivi. Pertanto il nucleo non è stabile.

Il nucleo stabile con il massimo numero di protoni è l'isotopo  $^{209}\text{Bi}_{83}$  (che ha  $Z = 83$  e  $A = 209$ ). I nuclei con più di 83 protoni (per esempio l'uranio, che ha  $Z = 92$ ) sono instabili, ossia si disintegrano spontaneamente o riordinano la propria struttura interna con il passare del tempo. Questo fenomeno, scoperto nel 1896 dal fisico francese Henri Becquerel (Parigi 1852 – Le Croisic 1908), si chiama “radioattività”.

## QUADRO 2: NUCLEI STABILI. ISOTOPI E ISOTONI

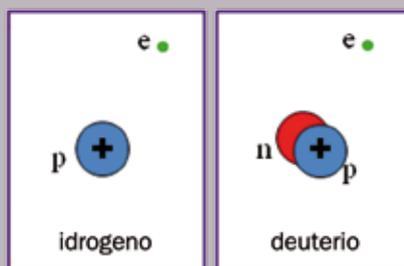
Solo certe combinazioni di protoni e neutroni danno luogo a formazione di nuclei stabili. Queste combinazioni realizzano l'equilibrio tra le forze nucleari (attrattive) e le forze elettrostatiche (repulsive) che agiscono tra i nucleoni.

L'aggiunta o la diminuzione di un protone o un neutrone rompe l'equilibrio e, entro certi limiti, il nucleo resta ancora legato, ma è instabile (nucleo radioattivo).

Aggiungendo o togliendo un neutrone da un nucleo si ottiene un nuovo nucleo con le stesse caratteristiche chimiche di quello iniziale.

I due nuclei sono detti *isotopi*.

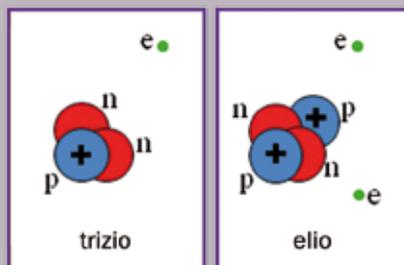
Per esempio, idrogeno e deuterio sono isotopi.



Aggiungendo o togliendo un protone da un nucleo si ottiene il nucleo di un elemento chimico diverso.

I due nuclei sono detti *isotoni*.

Per esempio, aggiungendo un protone ad un nucleo di trizio (costituito da un protone e due neutroni) si ottiene un nucleo di elio.



### 1.3 L'energia di legame nucleare

Ogni nucleo ha massa leggermente inferiore alla somma delle masse degli  $A$  nucleoni che contiene. La massa mancante  $\Delta m$  indica il grado di legame dei protoni e dei neutroni in quel nucleo<sup>(3)</sup>.

Se la massa di un nucleo fosse esattamente uguale alla somma delle masse dei  $Z$  protoni e  $N$  neutroni costituenti, il nucleo potrebbe sfaldarsi senza bisogno di alcuna immissione di energia. Per essere stabile la massa di un nucleo deve essere inferiore a quella dei suoi costituenti in modo che occorra fornirgli energia per spaccarlo.

Il prodotto  $\Delta m \cdot c^2$ , dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto<sup>(4)</sup>, si chiama energia di legame totale del nucleo. Essa rappresenta la quantità di energia che occorre cedere al nucleo per separare tutti i suoi nucleoni componenti o, all'opposto, la quantità di energia che viene liberata quando i nucleoni costituenti si legano tra di loro.

Tabella III. – Massa di alcuni atomi neutri (compresi gli elettroni e tenendo conto della loro energia di legame) di alcuni isotopi (Fonte: G. Audi, A. H. Wapstra, Nuclear Physics A565 (1993) 1 e Nuclear Physics A595 (1995) 409).

Nucleo	Simbolo	Massa (u)	Nucleo	Simbolo	Massa (u)
idrogeno	$^1\text{H}_1$	1,007825	alluminio	$^{27}\text{Al}_{13}$	26,981538
deuterio	$^2\text{H}_1$	2,014102	calcio	$^{40}\text{Ca}_{20}$	39,962591
trizio	$^3\text{H}_1$	3,016029	ferro	$^{56}\text{Fe}_{26}$	55,934939
elio	$^4\text{He}_2$	4,002603	argento	$^{63}\text{Cu}_{29}$	62,939598
carbonio	$^{12}\text{C}_6$	12	rame	$^{107}\text{Ag}_{47}$	106,905092
azoto	$^{14}\text{N}_7$	14,003074	piombo	$^{206}\text{Pb}_{82}$	205,974440
ossigeno	$^{16}\text{O}_8$	15,994915	uranio	$^{238}\text{U}_{92}$	238,050784

Nella Tabella III sono riportate le masse degli atomi neutri (compresi gli elettroni e tenendo conto della loro energia di legame) di alcuni isotopi. Queste vengono usualmente date in unità di massa atomica (abbreviato spesso *uma*, simbolo u, o *amu* dall'inglese *atomic mass unit*), pari a 1/12 della massa di un atomo di  $^{12}\text{C}_6$  ( $1 \text{ u} = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ ).

Spesso le masse nucleari si esprimono in elettronvolt/ $c^2$  ( $\text{eV}/c^2$ )<sup>(5)</sup>. Ricordando che

<sup>(3)</sup> Questo fatto è del tutto generale: la massa di un qualsiasi sistema legato è minore della somma  $m$  delle masse dei suoi costituenti liberi, perché per separarli si deve fornire energia. Nella maggior parte dei casi la massa mancante  $\Delta m$  è così piccola che non può essere determinata mediante misure dirette della massa e si deve perciò ricorrere ad altri metodi. Per esempio, per il sistema Terra-Sole  $\Delta m/m \cong 10^{-17}$ ; per un cristallo  $\Delta m/m \cong 10^{-11}$ ; per l'idrogeno atomico nello stato fondamentale  $\Delta m/m \cong 1,5 \cdot 10^{-8}$ . Nelle reazioni chimiche più violente (per esempio nelle esplosioni) le energie liberate non superano la frazione  $10^{-8}$  della massa dei reagenti. L'ordine di grandezza del legame nucleare è enormemente più grande degli altri legami, ma il principio è lo stesso.

<sup>(4)</sup> Si ricordi che nella teoria della relatività ristretta di Einstein energia a riposo  $E$  e massa  $M$  di una particella sono legate dalla relazione  $E = Mc^2$ .

<sup>(5)</sup> Molto usati sono i multipli dell'elettronvolt: il chiloelettronvolt (keV), pari a  $10^3 \text{ eV}$ , il megaelettronvolt

l'elettronvolt è l'energia cinetica che acquista un elettrone quando viene accelerato da una differenza di potenziale di 1 volt (ossia:  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 4,45 \cdot 10^{-26} \text{ kWh}$ ), è facile ricavare che  $1 \text{ u} = 931,481 \cdot 10^6 \text{ eV}/c^2 = 931,481 \text{ MeV}/c^2$  (vedi Esempio 3).

In figura 4 è rappresentato l'andamento dell'energia di legame media per nucleone – energia di legame totale di un nucleo divisa per il numero totale di nucleoni  $A$  (indicata in seguito con la lettera  $B$ ) – in funzione del numero di massa  $A$ .

Osservando la curva si nota che, a partire dagli elementi più leggeri, l'energia di legame cresce con l'aumentare del numero di massa, raggiungendo un valore massimo di circa 8,8 MeV, in corrispondenza dell'isotopo  $^{62}\text{Ni}_{28}$  ( $B_{\text{Ni}} = 8,7946 \pm 0,0003 \text{ MeV/nucleone}$ ), e poi diminuisce gradualmente fino a 7,6 MeV per  $A = 238$ , valore – come vedremo tra poco – insufficiente per mantenere unito il nucleo. Questo andamento è di importanza fondamentale per i decadimenti nucleari e per la produzione di energia da processi nucleari.

Come abbiamo detto nel precedente paragrafo, la forza attrattiva su un singolo nucleone è dovuta a tutti gli altri nucleoni del nucleo che si trovano a distanza minore del raggio di azione della forza nucleare: quanto maggiore è questo numero tanto maggiore è la forza attrattiva e quindi l'energia necessaria per strappare un particolare nucleone. Questo spiega il valore più basso dell'energia di legame dei nuclei leggeri.

Poiché il raggio di azione della forza nucleare è corto e i nucleoni sono incompressibili, al crescere del numero di nucleoni si arriva a una situazione (caso dei nuclei pesanti) in cui i nucleoni sono per la maggior parte troppo distanti per esercitare un'attrazione reciproca notevole. Per contro, poiché la forza elettrica non diminuisce così rapidamente con la distanza quanto la forza nucleare, nei nuclei più grandi la repulsione elettrica tra i protoni ha un'influenza tutt'altro che trascurabile.

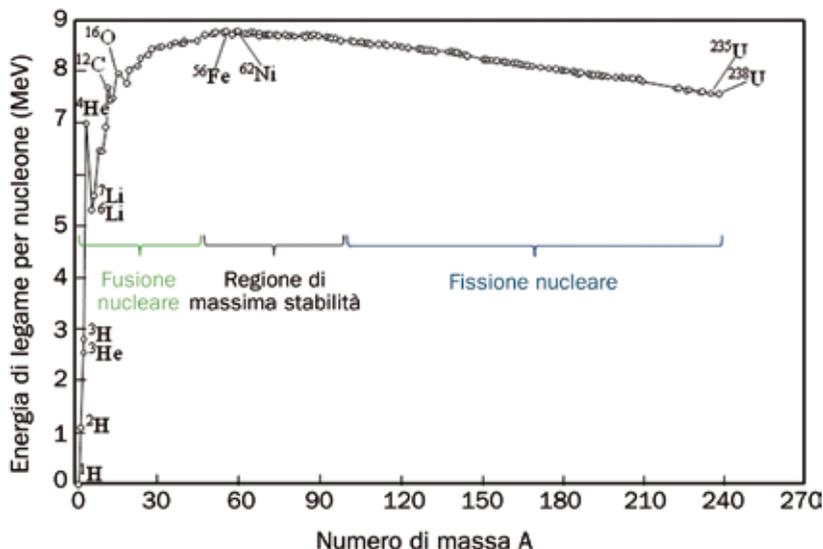


Fig. 4. – Valori sperimentali dell'energia media di legame per nucleone in funzione del numero di massa  $A$ . I nuclei vicini a  $^{56}\text{Fe}$  e  $^{62}\text{Ni}$  possiedono la più alta energia di legame per nucleone.

(MeV), pari a  $10^6 \text{ eV}$ , il gigaelettronvolt (GeV), pari a  $10^9 \text{ eV}$  e il teraelettronvolt (TeV), pari a  $10^{12} \text{ eV}$ .

Un altro aspetto importante della curva della figura 4 è il picco per il nucleo  ${}^4\text{He}_2$ , che risulta particolarmente stabile rispetto ai nuclei vicini ( $B_{4\text{He}} = 7 \text{ MeV}$ , vedi Esempio 4). Ciò comporta che nei nuclei pesanti esiste una situazione favorevole, dal punto di vista energetico, all'emissione spontanea di nuclei di elio (chiamati *particelle alfa* nei decadimenti nucleari, vedi par. 1.5).

È facile rendersi conto di questo fatto: per esempio, in un nucleo in cui  $B = 8 \text{ MeV}$  ( $A = 180$  in figura 4), l'energia di legame totale di due protoni e due neutroni è più grande di quella complessiva di un nucleo  ${}^4\text{He}_2$  ( $B_{4\text{He}} = 7 \text{ MeV}$ ): precisamente  $4 \cdot 8 \text{ MeV} = 32 \text{ MeV}$  contro  $4 \cdot 7 = 28 \text{ MeV}$ . Pertanto per liberare una particella  $\alpha$  da quel nucleo sono richiesti soltanto  $4 \text{ MeV}$  ( $32 - 28 = 4 \text{ MeV}$ ) contro gli  $8 \text{ MeV}$  richiesti per liberare un singolo nucleone.

Poiché per i nuclei con  $A > 185$  l'energia media di legame per nucleone è minore di  $8 \text{ MeV}$  e decresce al crescere di  $A$ , l'energia richiesta per l'emissione di una particella  $\alpha$  può ridursi a zero e il nucleo può emettere spontaneamente (ossia senza necessità di energia aggiuntiva) particelle  $\alpha$  (vedi Esempio 7). È chiaro che per due protoni e due neutroni è energeticamente conveniente essere legati in un nucleo  ${}^4\text{He}_2$  anziché in un nucleo molto più pesante dove i due protoni sarebbero respinti dai molti altri protoni presenti. Questo è il motivo per cui i nuclei con massa  $A$  maggiore di quella del nucleo  ${}^{209}\text{Bi}_{83}$  sono instabili e emettono particelle  $\alpha$ .

La curva di figura 4 mostra anche che la  *fusione*  (cioè l'unione di due nuclei leggeri in uno più pesante) è energeticamente favorevole per i nuclidi più leggeri (vedi Esempi 4, 9 e 10), e la  *fissione*  (cioè la scissione di un nucleo pesante in due nuclei di massa circa metà) per quelli più pesanti. Un nucleo è, infatti, dinamicamente instabile quando la sua energia di legame per nucleone è inferiore a quella nei frammenti in cui può dividersi. Un esame della figura 4 mostra che questo fatto si verifica per tutti i nuclei di numero  $A > 100$ , che pertanto sono instabili rispetto al processo di fissione (vedi Esempio 19).

**Esempio 3:** Calcolare il valore del fattore di ragguglio tra unità di massa atomica e elettronvolt/ $c^2$  ( $\text{eV}/c^2$ ).

**Soluzione:** In base alla sua definizione,  $1 \text{ u} = M({}^{12}\text{C})/12 = 1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$ . Sfruttando la relazione tra massa e energia a riposo stabilita da Einstein, questa massa equivale a un'energia

$$E = mc^2 = (1,66054 \cdot 10^{-27} \text{ kg})(2,9979 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 1,49239 \cdot 10^{-10} \text{ J}.$$

Ricordando che  $1 \text{ eV} = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  ( $= 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \text{ V}$ ), segue che

$$E = \frac{1,49239 \cdot 10^{-10} \text{ J}}{1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}} = 931,5 \cdot 10^6 \text{ eV} = 931,5 \text{ MeV}.$$

Pertanto

$$1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2.$$

**Esempio 4:** Calcolare il difetto di massa e l'energia di legame del più abbondante isotopo dell'elio, il nucleo  ${}^4\text{He}_2$ , la cui massa è  $m_{\text{He}} = 6,6447 \cdot 10^{-27}$  kg.

**Soluzione:** Per ottenere il difetto di massa  $\Delta m$ , si deve sottrarre la massa del nucleo  ${}^4\text{He}_2$  dalla somma delle masse dei due protoni e due neutroni che lo costituiscono:

$$\begin{aligned}\Delta m({}^4\text{He}_2) &= 2m_p + 2m_n - m_{\text{He}} = \\ &= 2(1,67262 \cdot 10^{-27}) + 2(1,67493 \cdot 10^{-27}) - 6,6447 \cdot 10^{-27} = \\ &= 0,0504 \cdot 10^{-27} \text{ kg}.\end{aligned}$$

$\Delta m$  è pari a circa il 7 % della massa  $m_{\text{He}}$   $[(0,0504 \cdot 10^{-27}) / (6,6447 \cdot 10^{-27}) = 0,0076]$ .

L'energia di legame del nucleo  ${}^4\text{He}_2$  è quindi (usando il valore approssimato  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s per la velocità della luce nel vuoto)

$$\Delta m \cdot c^2 = (0,0504 \cdot 10^{-27} \text{ kg})(3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = 4,53 \cdot 10^{-12} \text{ J}.$$

Di solito le energie di legame vengono espresse in elettronvolt anziché joule (1 eV =  $1,60 \cdot 10^{-19}$  J). Quindi

$$\Delta m \cdot c^2 = \frac{4,53 \cdot 10^{-12}}{1,60 \cdot 10^{-19}} = 28,3 \text{ MeV}.$$

Questo valore è più di 2 milioni di volte l'energia necessaria per rimuovere un elettrone da un atomo di idrogeno, che vale 13,6 eV.

L'energia media di legame per nucleone in un nucleo di elio-4, che ha 4 nucleoni, è  $(28,3 \text{ MeV}) / (4 \text{ nucleoni}) = 7,07 \text{ MeV}$ .

**Esempio 5:** Calcolare l'energia di legame totale del più abbondante isotopo del ferro, il nucleo  ${}^{56}\text{Fe}_{26}$ .

**Soluzione:** L'energia di legame totale si ottiene sottraendo la massa del nucleo  ${}^{56}\text{Fe}_{26}$  dalla somma delle masse dei 26 protoni e 30 neutroni che lo costituiscono. Utilizzando i valori di Tabella 3 (quando si usano i valori delle masse atomiche per determinare il difetto di massa di un nucleo occorre tenere conto della massa degli elettroni. Per questo useremo la massa degli atomi di idrogeno invece di quella del protone) si ha

$$\begin{aligned}\Delta m({}^{56}\text{Fe}_{26}) &= 26m({}^1\text{H}_1) + 30m_n - m_{\text{Fe}} = \\ &= 26(1,007825) + 30(1,008665) - (55,934939) = 0,52846 \text{ u}.\end{aligned}$$

L'energia di legame del nucleo  ${}^{56}\text{Fe}_{26}$  è quindi

$$\Delta m \cdot c^2 = (0,52846 \text{ u}) c^2 (931,481 \text{ (MeV}/c^2)/\text{u}) = 492,26 \text{ MeV}.$$

L'energia media di legame per nucleone in un nucleo di ferro-56, che ha 56 nucleoni, è  $(492,26 \text{ MeV}) / (56 \text{ nucleoni}) = 8,79 \text{ MeV}$ .

**Esempio 6:** Calcolare l'energia di legame dell'ultimo neutrone del nucleo  $^{13}\text{C}_6$  (massa 13,003355 u).

**Soluzione:** Con chiaro significato dei simboli si ha

$$\begin{aligned}\Delta m &= [m(^{12}\text{C}_6) + m(n)] - m(^{13}\text{C}_6) = \\ &= 12,000000 \text{ u} + 1,008665 \text{ u} - 13,003355 \text{ u} = 0,005310 \text{ u} .\end{aligned}$$

Pertanto l'energia di legame dell'ultimo neutrone è

$$\Delta m \cdot c^2 = (0,005310 \text{ u}) c^2 (931,481 \text{ (MeV}/c^2)/\text{u}) = 4,95 \text{ MeV} .$$

Questo neutrone è quindi meno legato degli altri nucleoni del nucleo  $^{13}\text{C}$  che hanno un'energia media di legame di circa 7,5 MeV (vedi figura 4).

**Esempio 7:** Valutare se il nucleo  $^{226}\text{Ra}_{88}$  (massa = 226,025403 u) può subire un decadimento  $\alpha$  spontaneo trasformandosi in  $^{222}\text{Rn}_{86}$  (massa = 222,017570 u).

**Soluzione:** La massa del nucleo  $^{226}\text{Ra}_{88}$  è maggiore della somma delle masse dei nuclei  $^{222}\text{Rn}_{86}$  e  $^4\text{He}_2$ :

$$m_{\text{Ra}} - (m_{\text{Rn}} + m_{\text{He}}) = 226,025403 - (222,017570 + 4,002603) = 0,005230 \text{ u} .$$

Pertanto la disintegrazione spontanea è possibile. Un simile processo si dice "energeticamente possibile".

**Esempio 8:** Per nuclei con numero di massa  $A = 180$  e  $A = 200$  l'energia di legame media per nucleone è rispettivamente di 8,0 MeV e 7,85 MeV. Calcolare l'energia di legame media  $b$  dei 20 nucleoni in più nel secondo nucleo.

**Soluzione:** Utilizzando i dati forniti, risulta che

$$180 \cdot 8,0 + 20b = 200 \cdot 7,85 ,$$

da cui segue

$$b = 6,5 \text{ MeV} .$$

Se due protoni e due neutroni di questi 20 nucleoni formassero un nucleo  $^4\text{He}_2$ , essi sarebbero legati tra di loro con 7 MeV ciascuno. Pertanto l'emissione di un nucleo  $^4\text{He}$  (particella  $\alpha$ ) porterebbe a una riduzione dell'energia di  $4(7 - 6,5) = 2 \text{ MeV}$  ed è, quindi, favorita dal punto di vista energetico.

**Esempio 9:** Calcolare quanta energia occorre per spezzare un nucleo  $^{12}\text{C}$  in tre particelle  $\alpha$ .

**Soluzione:** Dalla Tabella III risulta che, per definizione, la massa atomica di  $^{12}\text{C}$  è 12 u, e quella di tre particelle  $\alpha$  è

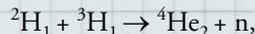
$$3 \cdot 4,002603 = 12,007809 \text{ u}.$$

Per ottenere l'energia necessaria  $\varepsilon$ , si deve sottrarre la massa del nucleo  $^{12}\text{C}$  dalla somma delle masse di tre nuclei  $^4\text{He}_2$ . Usando i valori riportati nella Tabella III, si ottiene

$$\begin{aligned} \varepsilon &= [3m(^4\text{He}) - m(^{12}\text{C})] c^2 = (12,007809 - 12) c^2 = \\ &= (0,007809 \text{ u})(931,481 \text{ MeV/u}) = 7,274 \text{ MeV}. \end{aligned}$$

Viceversa si può concludere che, quando 3 particelle  $\alpha$  si combinano per formare un nucleo  $^{12}\text{C}$ , si liberano 7,274 MeV. Questo processo è particolarmente importante per la formazione del carbonio nelle stelle.

**Esempio 10:** Calcolare quanta energia si libera nella reazione



in cui un nucleo di deuterio e uno di trizio si fondono, formando un nucleo di elio e un neutrone libero.

**Soluzione:** L'energia liberata si ottiene sottraendo la massa totale del sistema finale (nucleo  $^4\text{He}_2$  e un neutrone) dalla somma delle masse del sistema iniziale (deuterio e trizio):

$$\begin{aligned} m(^2\text{H}_1) + m(^3\text{H}_1) - [m(^4\text{He}_2) + m(\text{n})] = \\ 2,014102 + 3,016029 - 4,002603 - 1,008665 = 0,188630 \text{ u}. \end{aligned}$$

Pertanto l'energia liberata è  $(0,18863 \text{ u})(931,481 \text{ MeV/u}) = 17,57 \text{ MeV}$ .

Alla reazione di fusione partecipano cinque nucleoni e, quindi, l'energia di legame liberata per nucleone è

$$\frac{17,57}{5} = 3,51 \text{ MeV}.$$

Questa energia è circa 4 volte maggiore di quella liberata in un processo di fissione, pari a circa 0,9 MeV/nucleone (vedi Es. 19). A parità di massa di combustibile, una reazione di fusione fornisce più energia di una reazione di fissione.

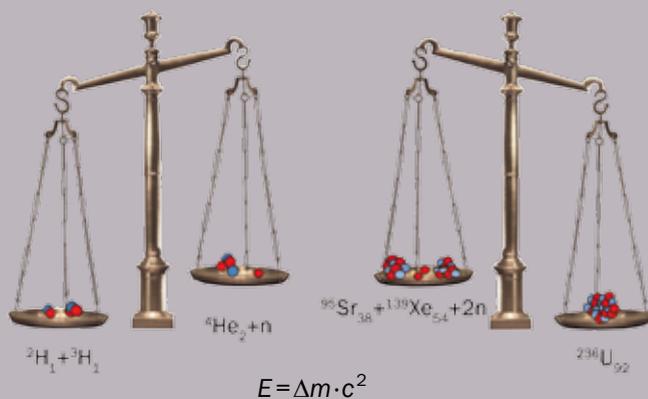
### QUADRO 3: L'EQUIVALENZA MASSA-ENERGIA

L'energia di un oggetto fermo,  $E$ , è legata alla sua massa  $M$  dalla relazione  $E=Mc^2$ , dove  $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s è la velocità della luce nel vuoto.

La massa può trasformarsi in energia e viceversa. La quantità di energia che si produce trasformando la massa è enorme perché essa viene moltiplicata per  $c^2$ , un numero grandissimo. La  *fusione*, cioè l'unione di due nuclei leggeri in uno più pesante, è energeticamente favorevole per i nuclidi più leggeri, e la  *fissione*, cioè la scissione di un nucleo pesante in due nuclei di massa circa metà, per quelli più pesanti.

La bilancia di sinistra in figura mostra che la somma delle masse di due nuclei leggeri (per esempio deuterio,  $^2\text{H}_1$ , e trizio,  $^3\text{H}_1$ ) è maggiore della somma delle masse dei prodotti della loro fusione (elio,  $^4\text{He}_2$ , più un neutrone). La reazione di fusione converte in energia la massa mancante.

La bilancia di destra mostra invece che per atomi medi e pesanti la somma delle masse dei due nuclei medi (per esempio stronzio,  $^{95}\text{Sr}_{38}$ , e xenon,  $^{139}\text{Xe}_{54}$ ) più due neutroni è minore di quella del nucleo pesante (uranio,  $^{236}\text{U}_{92}$ ) che con la sua fissione li ha generati. In questo caso è la reazione di  *fissione* che converte la massa mancante in energia.



## 1.4 Le reazioni nucleari

Così come avvengono reazioni chimiche che modificano la distribuzione degli elettroni esterni degli atomi, dando origine alla formazione di molecole, reazioni tra due nuclei possono dare luogo a formazioni di nuclei diversi da quelli iniziali.

Nel caso delle reazioni nucleari, le energie in gioco nelle trasformazioni sono molto maggiori (circa un milione di volte) di quelle che intervengono nelle reazioni chimiche. Occorrono quindi situazioni particolari perché le reazioni nucleari possano avvenire.

Tali condizioni si verificano, per esempio, nella regione centrale delle stelle dove, per effetto della grande pressione esercitata dalla massa dell'astro, i nuclei di idrogeno (elemento di cui è costituita la stella) sono portati a stretto contatto fra loro e possono fondere, dando luogo a una serie di reazioni che portano alla produzione di nuclei di elio, liberando, sotto forma di radiazione e rilascio di neutrini, un'energia pari a circa 28 MeV (vedi Esempio 4)<sup>(6)</sup>.

<sup>(6)</sup> Tenendo conto che la massa del protone è pari a circa  $938 \text{ MeV}/c^2$ , in questo processo circa il sette per mille della massa iniziale si trasforma in energia [ $\Delta m/m \cong 28/(4 \cdot 938) = 7\%$ ]. È interessante confrontare

Quando la zona centrale della stella si è arricchita di elio, sempre con un meccanismo di fusione, le stelle fabbricano carbonio, azoto e ossigeno. Successivamente partendo da questi elementi, in uno stadio successivo, vengono prodotti elementi ancora più pesanti, come ferro e silicio. In una delle fasi finali una stella può esplodere, scaraventando fuori i prodotti della sua attività<sup>(7)</sup>. Nella fase dell'esplosione vengono prodotti tutti i nuclei più pesanti del ferro e molti nuclei di massa intermedia.

L'origine degli elementi di cui è costituita la Terra risale quindi a remote esplosioni stellari che liberarono nello spazio circostante tutti gli elementi. In quel processo vennero liberati nuclei stabili e nuclei instabili.

**Esempio 11:** La produzione di energia solare è un caso di trasformazione continua di massa in energia. Le reazioni che danno luogo a questo processo sono quelle termonucleari di fusione di elementi leggeri.

La produzione del nucleo di deuterio è il primo processo di un ciclo che porta attraverso stadi intermedi, alla formazione di un nucleo di  ${}^4\text{He}$  dalla combinazione di quattro protoni, liberando, sotto forma di radiazione e rilascio di neutrini, un'energia pari a circa 28 MeV.

Sapendo che ogni secondo su ogni metro quadrato della Terra arriva, sotto forma di radiazione solare, una quantità di energia pari a 1360 J (ossia, il flusso solare sulla Terra è  $P_S = 1,36 \text{ kW/m}^2$ ), calcolare il "combustibile" effettivamente consumato al secondo sul Sole.

**Soluzione:** Il Sole emette energia in tutte le direzioni; quindi la stessa quantità di energia cadrà su ogni metro quadrato di una ipotetica superficie sferica con centro nel Sole e raggio  $R$  pari alla distanza Terra-Sole ( $R = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ m}$ ). Pertanto la potenza totale irradiata dal Sole è:

$$P = 4\pi R^2 P_S = 4 \cdot 3,14 (1,5 \cdot 10^{11})^2 1,36 = 3,84 \cdot 10^{23} \text{ kW} = \\ = (\text{tenendo conto che } 1 \text{ J} = 6,25 \cdot 10^{12} \text{ MeV}) = 2,40 \cdot 10^{39} \text{ MeV/s.}$$

Chiaramente l'energia irradiata al secondo è  $E = 2,40 \cdot 10^{39} \text{ MeV}$ . Come osservato nell'Esempio 4, questa energia corrisponde a circa il 7‰ della massa  $M$  reagente al secondo, ossia  $E = 0,007 M c^2$ , da cui segue

$$M = \frac{2,40 \cdot 10^{39}}{0,007} \simeq 3,43 \cdot 10^{41} \text{ MeV}/c^2.$$

Tenendo conto che la massa del protone è pari a circa  $938 \text{ MeV}/c^2$ , ogni secondo sul Sole brucia un numero  $N_p = M/938 \simeq 3,66 \cdot 10^{38}$  di protoni al secondo, il che corrisponde a circa seicento milioni di tonnellate di idrogeno al secondo ( $\simeq 6 \cdot 10^{11} \text{ kg/s}$ ). Questa quantità di massa, pur essendo enorme, rappresenta soltanto una minuscola frazione ( $3 \cdot 10^{-19}$ ) della massa del Sole ( $M_S = 1,99 \cdot 10^{30} \text{ kg}$ ).

questo valore con la resa di un processo di fissione nucleare [ $\Delta m/m \simeq 1\%$ ] e con i rendimenti dei processi elettromagnetici [ $\Delta m/m \simeq 10^{-8}$ ]. La fusione termonucleare è chiaramente il più efficiente processo esistente in natura di trasformazione di massa in energia.

<sup>(7)</sup> Un evento del genere, avvenuto circa 170000 anni or sono nella Nube di Magellano (che dista dalla Terra 168000 anni-luce), visibile nell'emisfero sud della Terra, è stato osservato il 23 febbraio 1987.

## 1.5 Nuclei instabili e radioattività

Un nucleo è instabile se può trasformarsi spontaneamente in un nucleo diverso o può riordinare la propria struttura interna con liberazione di energia. Questa instabilità è detta *radioattività*.

Un nucleo instabile, o *radionuclide*, emette particelle o pacchetti di energia. Queste emissioni sono determinate, valutate e misurate con estrema precisione; esse sono tipiche di ciascun nucleo emettitore.

- Si ha un'emissione  $\alpha$  (*alfa*) quando il nucleo di un atomo espelle un nucleo di elio-4,  ${}^4\text{He}_2$ , consistente in due protoni e due neutroni legati.
- Si ha un'emissione  $\beta^-$  (*beta meno*) quando un neutrone interno ad un nucleo si trasforma in un protone emettendo un elettrone e una particella neutra detta *antineutrino*.
- Si ha un'emissione  $\beta^+$  (*beta più*) quando un protone interno ad un nucleo si trasforma in un neutrone emettendo un positrone (ossia un “elettrone positivo”, vedi glossario) e una particella neutra detta *neutrino*.
- Si ha un'emissione  $\gamma$  (*gamma*) quando, fermo restando il numero di nucleoni costituenti il nucleo dell'atomo, variano i livelli energetici da essi occupati e l'energia risultante viene emessa come un'onda elettromagnetica, non accompagnata da materia. I raggi  $\gamma$  sono anche descritti come pacchetti di energia, chiamati *fotoni*.

Poiché le emissioni  $\alpha$  e  $\beta$  comportano una variazione del numero delle cariche elettriche dell'atomo (l'emissione  $\alpha$  produce una diminuzione di due cariche positive, mentre le emissioni  $\beta^-$  e  $\beta^+$  producono rispettivamente l'aumento e la diminuzione di una carica positiva), l'atomo emettitore si trasmuta da un elemento a un altro (vedi Quadro 4). Le emissioni  $\gamma$  sono elettricamente neutre e non provocano trasmutazioni.

Questi processi si indicano usualmente con il termine *decadimento* e si parla di un nucleo che decade  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ .

Esistono molti isotopi instabili in natura e la radioattività che essi emanano è detta *radioattività naturale*. In laboratorio si possono produrre molti altri isotopi instabili per mezzo di reazioni nucleari; si dice quindi che questi isotopi sono prodotti “artificialmente” e si parla in questi casi di *radioattività artificiale*. È bene evidenziare che dal punto di vista fisico le radiazioni naturali e quelle artificiali sono perfettamente uguali.

Ogni nuclide instabile emette sempre lo stesso tipo di radiazioni e con la stessa energia totale unitaria; ad esempio, un emettitore  $\gamma$  emette sempre  $\gamma$  di uguale energia.

In alcuni casi il nucleo che si è formato dopo l'emissione di radiazione è a sua volta instabile. Il processo di decadimento si ripete quindi fino al raggiungimento di una configurazione stabile. È il caso, per esempio, dell'uranio-238 che si trasforma in piombo con una successione di quattordici decadimenti (vedi l'approfondimento “Famiglie radioattive”).

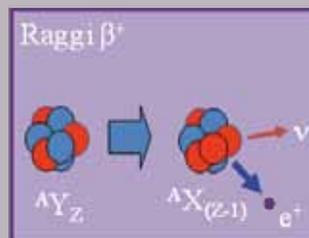
Il decadimento  $\alpha$  riguarda principalmente gli isotopi degli elementi più pesanti ( $Z > 78$ ), mentre il decadimento  $\beta$  avviene negli isotopi di tutti gli elementi: precisamente gli isotopi che si trovano sopra la curva di stabilità di figura 3 decadono  $\beta^+$  quelli che si trovano sotto la curva decadono  $\beta^-$ . Il decadimento  $\gamma$  si accompagna spesso al decadimento  $\alpha$  o  $\beta$ . Infatti, quando un nucleo radioattivo decade, il nucleo figlio non viene necessariamente prodotto nella configurazione di più bassa energia (*stato fondamentale*): in tal caso decade rapidamente nello stato fondamentale mediante emissione di  $\gamma$ .

#### QUADRO 4: LA RADIOATTIVITÀ

Un nucleo che contiene un numero di protoni e di neutroni non ben bilanciato deve riequilibrare la sua situazione interna. A tal fine emette particelle (radiazioni) di diverso tipo: particelle  $\alpha$ , raggi  $\beta$ , raggi  $\gamma$ . Questo fenomeno si chiama radioattività.

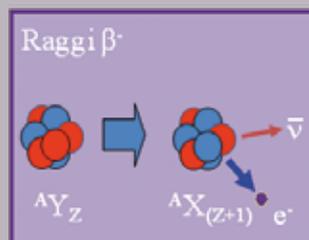
**Raggi  $\beta^+$ :** un protone del nucleo può trasformarsi in un neutrone emettendo un positrone (ossia un elettrone con carica elettrica positiva) e una particella neutra detta neutrino.

Il nucleo emittitore  ${}^A Y_Z$  si trasforma nel nucleo  ${}^A X_{(Z-1)}$  contenente lo stesso numero di nucleoni e un protone in meno.



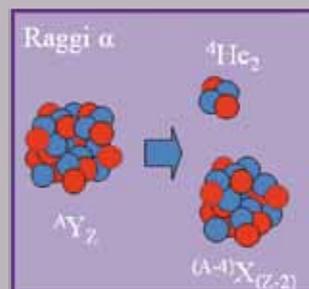
**Raggi  $\beta^-$ :** un neutrone del nucleo può trasformarsi in un protone emettendo un elettrone e una particella neutra detta antineutrino.

Il nucleo emittitore  ${}^A Y_Z$  si trasforma nel nucleo  ${}^A X_{(Z+1)}$  contenente lo stesso numero di nucleoni e un protone in più.

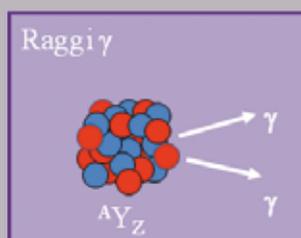


**Particelle  $\alpha$ :** Nei nuclei pesanti (ossia con molti nucleoni) può verificarsi l'emissione di una particella  $\alpha$  (nucleo di elio, costituito da due protoni e due neutroni legati, avente carica elettrica positiva pari a due volte la carica dell'elettrone).

Il nucleo emittitore  ${}^A Y_Z$  si trasforma nel nucleo  ${}^{(A-4)} X_{(Z-2)}$  contenente due protoni e due neutroni in meno.



**Raggi  $\gamma$ :** Se il nucleo può passare ad una configurazione ("stato") più stabile senza variare il numero di protoni e di neutroni, lo fa liberando l'energia in eccesso sotto forma di onde elettromagnetiche di elevata frequenza.



Ogni processo radioattivo è caratterizzato da un tempo di dimezzamento, che è il tempo che deve trascorrere perché metà dei nuclei di un determinato campione di materiale radioattivo subiscano la trasformazione.

## 1.6 Tempo di dimezzamento, vita media, attività

Oltre che dal tipo di particelle emesse e dalla loro energia, un radionuclide viene caratterizzato anche dalla rapidità con cui avviene il decadimento. È questa una proprietà intrinseca del nucleo stesso, che non dipende dalle condizioni esterne in cui esso si trova, quali temperatura, pressione, presenza di altri elementi che ne diluiscano la concentrazione, ecc.

Ogni nucleo radioattivo ha una probabilità ben definita di decadere in un dato periodo di tempo; pertanto il numero di decadimenti  $\Delta N$  che avviene in un breve intervallo di tempo  $\Delta t$  è proporzionale a  $\Delta t$  e al numero totale  $N$  di nuclei radioattivi presenti, ossia

$$(3) \quad \Delta N = -\lambda N \Delta t,$$

dove il segno meno al secondo membro tiene conto del fatto che il numero  $N$  di nuclei radioattivi va diminuendo con il passare del tempo e  $\lambda$  è una costante che prende il nome di *costante di decadimento*. Quanto maggiore è  $\lambda$ , tanto più elevata è la frequenza dei decadimenti. La costante di decadimento è fissa per ciascun radionuclide, ma varia molto tra i diversi radionuclidi.

Per la misura della velocità di un decadimento si usa l'*emivita* o *tempo di dimezzamento* (che si denota con  $\tau_{1/2}$ ), che è il tempo trascorso il quale la metà dei radionuclidi presenti in un materiale radioattivo si è disintegrata.

L'equazione (3) può essere risolta rispetto a  $N$  (mediante qualche passaggio di analisi matematica) ottenendo il risultato:

$$(4) \quad N(t) = N_0 e^{-\lambda t},$$

dove  $N_0$  è il numero di nuclei presenti al tempo zero e  $N(t)$  rappresenta il loro numero dopo un tempo  $t$ . L'equazione (4) indica che il numero di nuclei radioattivi presenti in un campione diminuisce nel tempo con l'andamento esponenziale riportato in figura 5 (curva verde): dopo ciascun periodo di tempo  $\tau_{1/2}$  resta metà della quantità di radionuclide che esisteva all'inizio di quel periodo di tempo. Pertanto, dopo  $n$  tempi di dimezzamento la quantità di isotopo radioattivo si è ridotta a  $1/2^n$  della quantità iniziale.

In base alla sua definizione, dall'equazione (4) segue che il tempo di dimezzamento è

$$(5) \quad \tau_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}.$$

Spesso si usa anche la *vita media* di un isotopo definita  $\tau = 1/\lambda$  e la precedente relazione diventa

$$(6) \quad \tau_{1/2} = 0,693 \tau.$$

È opportuno evidenziare che le due grandezze, vita media e emivita, sono diverse numericamente e quindi confonderle può provocare gravi errori.

In Tabella IV sono riportati l'emivita e il modo di decadimento di alcuni radionuclidi. I tempi di dimezzamento dei diversi nuclei radioattivi variano entro limiti assai ampi, pas-

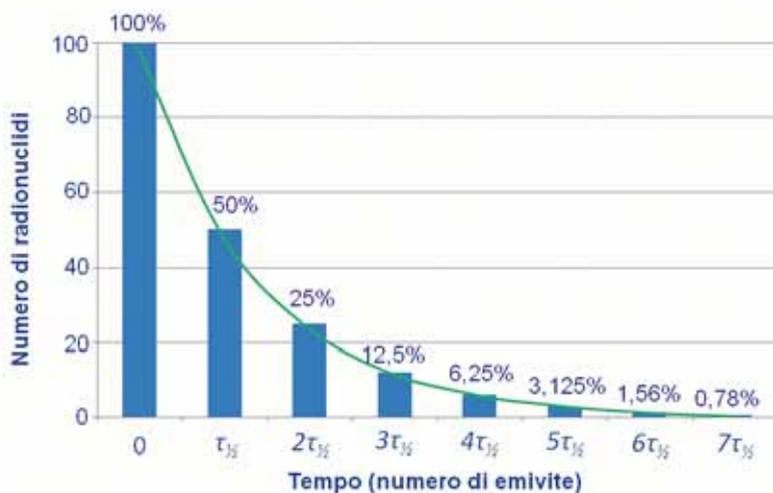


Fig. 5. – Curva del decadimento radioattivo. In ordinate è indicato il numero di radionuclidi restanti in funzione del tempo su un intervallo di sette periodi di dimezzamento. Dopo sette emivite la quantità di radionuclidi si è ridotta a circa lo 0,8% di quella iniziale.

sando da oltre centomila miliardi di anni dell'indio-115, agli otto giorni dello iodio-131, fino a un milionesimo di miliardesimo di secondo per certi nuclei. L'uranio-238 ha un tempo di dimezzamento circa uguale all'età media della Terra (che è stimata in 4,5 miliardi di anni). Questo significa che circa la metà dell'uranio-238 esistente al momento della formazione della Terra è ancora presente oggi.

La quantità di radiazioni emesse da una sostanza contenente isotopi radioattivi dipende da due fattori: il numero di nuclei instabili presenti e il loro tempo di dimezzamento. Ai fini pratici, tuttavia, è importante poter individuare l'*attività*,  $\Delta N/\Delta t$ , di una sostanza radioattiva, definita come il numero di decadimenti che avvengono nell'unità di tempo.

Usando l'equazione (3) si ha:

$$(7) \quad \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \lambda N .$$

L'unità di misura dell'attività è il *becquerel* (Bq), così chiamato in onore del grande fisico francese che, per primo, scoprì i fenomeni radioattivi. Si parla di 1 becquerel quando nella sorgente radioattiva avviene una trasformazione al secondo, con conseguente emissione di una particella  $\alpha$ ,  $\beta$  o  $\gamma$ <sup>(8)</sup>.

<sup>(8)</sup> Il becquerel ha sostituito il *curie* (Ci) che è l'attività ( $3,7 \cdot 10^{10}$  disintegrazioni al secondo) che si registra in 1 grammo di radio-226.  $1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$ .

Tabella IV. – Emivita e modi di decadimento di alcuni nuclei radioattivi.

Isotopo	Simbolo	Tempo di dimezzamento	Modo di decadimento
polonio-214	$^{214}\text{Po}_{84}$	$1,64 \cdot 10^{-4}$ s	$\alpha, \gamma$
ossigeno-15	$^{15}\text{O}_8$	2,04 min	$\beta^+$
cripto-89	$^{89}\text{Kr}_{36}$	3,16 min	$\beta^-, \gamma$
azoto-13	$^{13}\text{N}_7$	9,97 min	$\beta^+$
carbonio-11	$^{11}\text{C}_6$	20,39 min	$\beta^+$
uranio-239	$^{239}\text{U}_{92}$	23,45 min	$\beta^-, \gamma$
fluoro-18	$^{18}\text{F}_9$	109,8 min	$\beta^+$
nettunio-239	$^{239}\text{Np}_{93}$	2,36 d	$\beta^-, \gamma$
radon-222	$^{222}\text{Rn}_{86}$	3,83 d	$\alpha, \gamma$
iodio-131	$^{131}\text{I}_{53}$	8,02 d	$\beta^-, \gamma$
trizio	$^3\text{H}_1$	12,33 a	$\beta^-$
stronzio-90	$^{90}\text{Sr}_{38}$	28,79 a	$\beta^-$
cesio-137	$^{137}\text{Cs}_{55}$	30,0 a	$\beta^-, \gamma$
radio-226	$^{226}\text{Ra}_{88}$	1600 a	$\alpha, \gamma$
carbonio-14	$^{14}\text{C}_6$	5730 a	$\beta^-$ ,
americio-243	$^{243}\text{Am}_{95}$	7370 a	$\alpha, \gamma$
plutonio-239	$^{239}\text{Pu}_{94}$	24110 a	$\beta^-, \gamma$
nettunio-237	$^{237}\text{Np}_{93}$	$2,14 \cdot 10^6$ a	$\alpha, \gamma$
curio-247	$^{247}\text{Cu}_{96}$	$1,56 \cdot 10^7$ a	$\alpha, \gamma$
uranio-235	$^{235}\text{U}_{92}$	$7,04 \cdot 10^8$ a	$\alpha, \gamma$
uranio-238	$^{238}\text{U}_{92}$	$4,47 \cdot 10^9$ a	$\alpha, \gamma$
potassio-40	$^{40}\text{K}_{19}$	$1,28 \cdot 10^9$ a	$\beta^-$
torio-232	$^{232}\text{Th}_{90}$	$1,41 \cdot 10^{10}$ a	$\alpha, \gamma$
indio-115	$^{115}\text{In}_{49}$	$4,41 \cdot 10^{14}$ a	$\beta^-$

---

## APPROFONDIMENTO: Famiglie radioattive

---

Quando un nucleo radioattivo decade, talvolta anche il nucleo che si forma è instabile e decade a sua volta, producendo un altro nucleo. Il processo di decadimento si ripete fino a quando non si raggiunge una configurazione stabile. Si verifica così quella che si chiama “serie di decadimenti radioattivi”. L'insieme di tutti i nuclidi di una serie di decadimenti si chiama “famiglia radioattiva”.

Tutti i radionuclidi naturali conosciuti si raggruppano in tre famiglie aventi rispettivamente per capostipite uranio (U,  $Z = 92$ ), protoattinio (Pa,  $Z = 91$ ) e torio (Th,  $Z = 90$ ). Tutti gli isotopi di questi elementi sono radioattivi e ciascun elemento ha almeno un isotopo con un tempo di dimezzamento tanto lungo che l'elemento continua a esistere in natura.

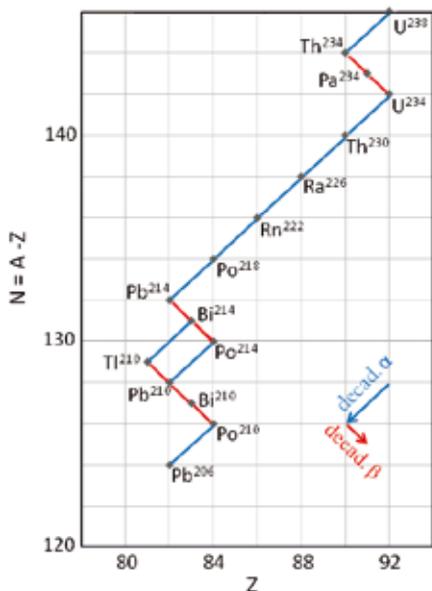


Fig. 6. – La serie di decadimento radioattivo che comincia con  $^{238}\text{U}$  e termina con  $^{206}\text{Pb}$ .

I numeri di massa di questi capostipiti sono di tipo  $4n$ ,  $(4n + 2)$  e  $(4n + 3)$ , con  $n$  intero. Manca in natura una famiglia del tipo  $(4n + 1)$ . Essa è stata scoperta nel campo dei radionuclidi artificiali (famiglia del nettunio). La sua assenza in natura si spiega con il fatto che tutti i suoi membri hanno vite medie molto brevi rispetto all'età del Sistema Solare, così che anche se questi radionuclidi esistevano all'epoca della formazione della Terra, essi sono ormai completamente trasformati nel termine finale stabile della famiglia, che è il  $^{209}\text{Bi}$ .

Per tutte le tre famiglie sopra indicate, la serie di decadimenti successivi continua finché non si forma un isotopo stabile del piombo ( $^{206}\text{Pb}_{82}$ ,  $^{207}\text{Pb}_{82}$  o  $^{208}\text{Pb}_{82}$ ) o del bismuto ( $^{209}\text{Bi}_{83}$ ).

A titolo di esempio, la figura 6 mostra la famiglia che ha come capostipite il nucleo  $^{238}\text{U}$  e termina con il  $^{206}\text{Pb}$ . I nuclei sono rappresentati mediante un quadratino nero in corrispondenza dei relativi valori di  $N$  e  $Z$ . Le frecce azzurre indicano un decadimento  $\alpha$  ( $N$  e  $Z$  diminuiscono di 2 unità), quelle rosse un decadimento  $\beta^-$  ( $N$  diminuisce di 1 e  $Z$  aumenta di 1). In vari punti lungo la catena di decadimenti si producono ramificazioni, essendo possibili più di un tipo di decadimenti per un nuclide intermedio. Per esempio il  $^{214}\text{Bi}$  può subire sia il decadimento  $\alpha$  che il decadimento  $\beta^-$  e, dopo un altro decadimento (rispettivamente  $\beta^-$  e  $\alpha$ ), entrambi i rami conducono a  $^{210}\text{Pb}$ .

Grazie a queste catene di decadimenti si trovano in natura elementi radioattivi a breve emivita che altrimenti non esisterebbero. Per esempio, il  $^{226}\text{Ra}_{88}$  ha un'emivita così breve (1600 anni) che tutto il radio che si produsse quando la Terra si formò, circa 4,5 miliardi di anni fa, è oggi scomparso. Tuttavia la catena di decadimenti della famiglia dell'uranio-238 assicura un apporto continuo di  $^{226}\text{Ra}_{88}$ . Lo stesso può dirsi per molti altri nuclei radioattivi.

In una famiglia radioattiva il decadimento del nucleo padre agisce come collo di bottiglia per il decadimento del nucleo figlio. Per esempio, a confronto dell'emivita di 1600 anni del  $^{226}\text{Ra}_{88}$ , il nucleo "figlio"  $^{222}\text{Rn}_{86}$  decade quasi subito, ma non può decadere prima di essere formato.

**Esempio 12:** Gli isotopi  $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$  hanno tempi di dimezzamento di 4,5 e 0,7 miliardi di anni. Calcolare la frazione dei due isotopi inizialmente presenti che esiste ancora.

**Soluzione:** L'isotopo  $^{238}\text{U}$  ha tempo di dimezzamento pari all'età della Terra e quindi di tutto l' $^{238}\text{U}$  inizialmente presente ne esiste oggi ancora circa metà. Per l'isotopo  $^{235}\text{U}$ , sono invece trascorsi più di 6 tempi di dimezzamento. Pertanto esiste ancora soltanto la frazione  $1/2^6 = 1/64 = 0,0156$  dell' $^{235}\text{U}$  originario.

**Esempio 13:** Un isotopo radioattivo  $^{124}\text{Sb}$  (antimonio) con attività iniziale  $R_0 = 7,4 \cdot 10^7$  Bq ha una emivita di 60 d. Calcolare la sua attività residua  $R$  dopo un anno.

**Soluzione:** La costante di decadimento del campione di antimonio in esame è  $\lambda = 0,693/60 = 0,01155 \text{ d}^{-1}$ .

Usando le equazioni (7) e (4) e chiamando  $N_0$  e  $N$  il numero di nuclei di Sb all'istante iniziale e dopo un anno, si ottiene

$$R_0 = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right|_0 = \lambda N_0 \quad ,$$

$$\begin{aligned} R &= \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = R_0 e^{-\lambda t} = \\ &= 7,4 \cdot 10^7 e^{-0,01155 \cdot 365} = 1,09 \cdot 10^6 \text{ Bq} . \end{aligned}$$

**Esempio 14:** In 3,5 ore l'attività di un isotopo radioattivo passa da 350 a 275 disintegrazioni al minuto. Calcolare la sua emivita e la sua costante di decadimento.

**Soluzione:** Dall'esempio precedente risulta che  $R/R_0 = e^{-\lambda t}$ . Eseguendo il logaritmo naturale del primo e secondo membro di questa relazione si ha

$$\ln \frac{R}{R_0} = -\lambda t .$$

Da cui segue

$$\lambda = -\frac{1}{t} \ln \frac{R}{R_0} = \frac{1}{t} \ln \frac{R_0}{R} .$$

Ossia, osservando che 3,5 ore = 12600 s,

$$\lambda = \frac{\ln(R_0/R)}{t} = \frac{\ln(350/275)}{12600} = 1,91 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1} .$$

Il tempo di dimezzamento è quindi

$$\tau_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} = \frac{0,693}{1,91 \cdot 10^{-5}} = 0,362 \cdot 10^5 \text{ s} = 10,07 \text{ ore} .$$

## 1.7 Radioattività naturale e artificiale

L'uomo è sempre stato soggetto alle radiazioni naturali. Siamo esposti alle radiazioni del Sole e a quelle cosmiche provenienti da altri corpi celesti; materiali naturalmente radioattivi sono presenti ovunque: nel terreno e negli edifici in cui abitiamo, nel cibo e nell'acqua che consumiamo. Gas radioattivi sono nell'aria che respiriamo e persino il nostro corpo è reso debolmente radioattivo dalla presenza di sostanze radioattive naturali.

I livelli di queste radiazioni naturali, usualmente chiamate *radiazioni di fondo*, non sono costanti in ogni luogo e dipendono in parte anche dalle abitudini di vita.

L'uomo non è esposto solo a radiazioni naturali dato che, nel corso di tutta la vita, viene a contatto con sorgenti di radiazioni che egli stesso ha creato. I raggi X e altri tipi di radiazioni usate in medicina, le ricadute radioattive causate dagli esperimenti con esplosivi nucleari, o ancora i materiali radioattivi generati nel corso della produzione di energia nucleare sono alcuni esempi di queste sorgenti di radiazioni.

I danni che le radiazioni possono provocare agli organismi biologici sono principalmente dovuti alla ionizzazione, cioè alla rimozione di un elettrone dalla nuvola elettronica di un atomo. Nel tessuto biologico la componente fondamentale è la cellula composta per l'80% di acqua ( $H_2O$ ) e per il restante 20% da sistemi biologici complessi. Il processo di ionizzazione produce radicali  $OH^*$  liberi che sono chimicamente molto attivi e possono alterare altre importanti molecole nella cellula. Queste variazioni chimiche possono causare dannosi effetti biologici e il danno dipende dalla parte di cellula colpita: se la ionizzazione ha luogo nelle parti critiche della cellula, quali il DNA che presiede al funzionamento e alla riproduzione della cellula stessa, queste funzioni possono essere alterate con gravi danni biologici, fino alla formazione di tumori o modificazioni genetiche.

Per quanto riguarda la pericolosità dei radionuclidi è importante osservare che, a parità di numero di radionuclidi, un tempo di dimezzamento più breve significa che l'attività è più elevata e quindi la sostanza è più radioattiva e potenzialmente più pericolosa. D'altra parte un tempo di dimezzamento più breve significa che il materiale in questione decadrà più presto a un livello inferiore e quindi richiede una protezione per un periodo di tempo più breve. Per esempio, in un campione di un materiale radioattivo con emivita 30 anni, metà dei nuclei si disintegra in quel periodo. Un materiale con lo stesso numero di radionuclidi con emivita 300 anni avrà perso, dopo lo stesso periodo, meno di 1/10 della radioattività iniziale ( $1 - e^{-(0,1 \times 0,693)} = 0,067$ ; vedi anche Esempio 13), ma la manterrà 10 volte più a lungo. Per un'emivita di 3000 anni il numero di decadimenti sarà circa 1/100 ( $1 - e^{-0,00693} = 0,007$ ). Pertanto i materiali più pericolosi sono spesso quelli con emivita né lunga né corta, ma intermedia. Questo perché, in caso di esposizione, il nostro corpo riceverebbe solo i decadimenti che hanno luogo nel corso della nostra vita e i radionuclidi con emivita breve scompaiono rapidamente, mentre quelli con emivita lunga impiegano talmente tanto tempo a esaurirsi che hanno pochissimi decadimenti al secondo.

## QUADRO 5: RADIOATTIVITÀ NATURALE E ARTIFICIALE

Le radiazioni sono da sempre una componente dell'ambiente naturale e pertanto una gran parte della dose di radiazioni che riceviamo è inevitabile. Noi conviviamo con questa radioattività ambientale che è naturale, ma non meno pericolosa (o benefica) di quella artificiale.

Una parte di tutti gli elementi di cui è composta la Terra, noi stessi inclusi, è costituita da nuclei instabili. Essi sono destinati, nel tempo, a trasformarsi in specie stabili. Nel processo di decadimento vengono emesse radiazioni (tra cui il radon,  $^{222}\text{Rn}_{86}$ , che oggi viene considerato con particolare attenzione) che costituiscono una parte della radioattività naturale.

Oltre alle radiazioni provenienti dal decadimento dei nuclei instabili, siamo bombardati anche dalle radiazioni provenienti dall'esterno della Terra ("radiazione cosmica").

### Radioattività naturale



In aggiunta alle radiazioni provenienti dai nuclei instabili naturali e alla radiazione cosmica, esistono altre sorgenti di radiazioni prodotte artificialmente dall'uomo. Si tratta di nuclei instabili ottenuti nei reattori a fissione come prodotti della scissione dell'uranio e del plutonio, in esplosioni di bombe termonucleari o per irraggiamento di nuclei stabili. La produzione di questi ultimi è legata al loro impiego in medicina per diagnostica e terapia e in numerose altre applicazioni.

Vanno infine ricordate le macchine radiogene (generatori di raggi X, acceleratori di particelle) usate in medicina diagnostica e terapeutica, nell'industria e per la ricerca scientifica.

### Radioattività artificiale



È bene notare che anche il corpo umano è radioattivo, grazie ad alcuni elementi che vi sono contenuti (per esempio uranio nelle ossa) o che mangiamo, come il potassio contenuto, per esempio, nelle banane e nei fagioli.

## APPROFONDIMENTO: Effetti biologici delle radiazioni. Dosimetria

L'informazione sull'attività di una sorgente non è sufficiente per conoscere del tutto gli effetti prodotti dalle radiazioni emesse. Ciò deriva dal fatto che le interazioni di particelle  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e di neutroni con la materia sono diverse e dipendono inoltre dall'energia delle radiazioni.

La radiazione  $\alpha$  può essere fermata da un foglio di carta, quella  $\beta$  può attraversare 1–2 cm di tessuto umano, i raggi  $\gamma$  e i neutroni sono assai più penetranti (vedi figura 7).

Un comportamento così diverso dipende dal differente modo di interazione con la materia delle varie radiazioni. I raggi  $\alpha$  e  $\beta$ , che sono particelle cariche, nell'attraversamento di un qualsiasi materiale, strappano elettroni agli atomi che incontrano per via (ossia li ionizzano) e trasferiscono loro una frazione della loro energia. Così alla fine del percorso, quando si arrestano, la loro energia iniziale è stata interamente trasferita al mezzo attraversato. Le particelle  $\alpha$ , che hanno massa assai maggiore (circa ottomila volte) delle particelle  $\beta$ , perdono energia assai più rapidamente e quindi vengono arrestate da piccoli spessori di materiale.

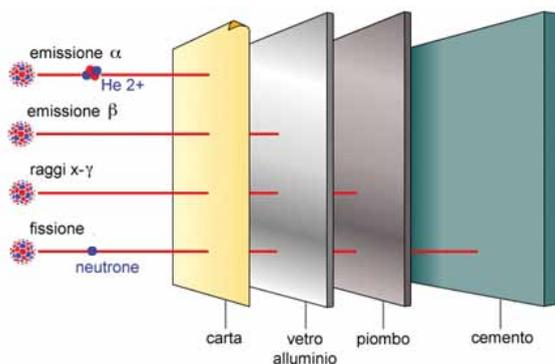


Fig. 7. – Il potere penetrante delle diverse radiazioni.

L'interazione dei raggi  $\gamma$  con la materia è invece più complessa: un  $\gamma$  può attraversare notevoli spessori di materiale conservando per intero la sua energia, finché, nell'interazione con un atomo, strappa via un elettrone, cedendo ad esso buona parte della propria energia. L'elettrone estratto, a sua volta, cede l'energia ricevuta al materiale, con lo stesso meccanismo dei raggi  $\beta$ .

I neutroni, che sono elettricamente neutri, interagiscono debolmente con la materia e sono quindi molto penetranti e non si rallentano facilmente. Essi perdono velocità negli urti con i nuclei atomici del materiale attraversato. Per fermarli si usano spessi strati di cemento o di materiali che contengono idrogeno (acqua o oli), che assorbono più efficacemente la loro energia (vedi l'approfondimento "Il rallentamento dei neutroni").

I processi di interazione consistono, quindi, nel trasferimento di energia dalle radiazioni alla materia attraversata. La quantità di energia che la radiazione cede all'unità di massa della materia attraversata si chiama *dose assorbita* e si misura in gray (simbolo Gy). Il gray è la dose corrispondente all'energia di 1 joule depositata nella massa di 1 chilogrammo,  $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$ .

Per valutare gli effetti delle radiazioni nei tessuti biologici non è sufficiente conoscere la dose assorbita; occorre anche tenere in conto la qualità della radiazione e il fatto che alcuni

tessuti sono più sensibili di altri. Ad esempio, a parità di dose assorbita, la radiazione  $\alpha$  è potenzialmente circa 20 volte più pericolosa di quelle  $\beta$  e  $\gamma$  perché rilascia l'energia in regioni più piccole; quindi il danno cellulare risultante può essere più difficilmente riparabile. Così pure, a parità di dose e di tipo di radiazione che la induce, il danno prodotto ai polmoni è maggiore di quello prodotto alle ossa.

La pericolosità delle radiazioni dipende anche dalle modalità di introduzione nel corpo; per esempio le radiazioni  $\alpha$  sono molto pericolose se il radionuclide che le emette è inalato. Per irradiazione esterna, la pericolosità è invece molto minore perché esse sono facilmente schermabili; per esempio è sufficiente lo spessore della pelle per arrestarle.

Per tener conto della diversa efficacia biologica relativa correlata anche alla capacità ionizzante delle diverse radiazioni sui tessuti viventi, si usa la *dose equivalente* che si ottiene moltiplicando la dose assorbita per un fattore di ponderazione adimensionale,  $w_R$ , della radiazione considerata. La dose equivalente è misurata in sievert (simbolo Sv), definito come la dose assorbita di qualsiasi radiazione che produce lo stesso effetto (danno) biologico di 1 Gy di raggi X. Pertanto, un sievert, a differenza di un gray, produce gli stessi effetti biologici indipendentemente dal tipo di radiazione considerata. Nella Tabella V sono riportati i fattori di ponderazione dei diversi tipi di radiazioni.

Tabella V. – Fattori di ponderazione dei diversi tipi di radiazioni.

Radiazione	$w_R$
raggi X, $\gamma$ di qualsiasi energia	1
elettroni e positroni di qualsiasi energia	1
protoni di energia > 2 MeV	5
particelle $\alpha$ , frammenti di fissione, nuclei pesanti	20
neutroni di energia < 10 keV	5
10–100 keV	10
100–2000 keV	20
2–20 MeV	10
>20 MeV	5

Per tenere conto della diversa radiosensibilità dei tessuti, si usa la *dose efficace*, che si ottiene moltiplicando la dose equivalente per un fattore di ponderazione adimensionale,  $w_T$ , del tessuto considerato. Anche la dose efficace si misura in sievert. Nella Tabella VI sono riportati i fattori di ponderazione di alcuni tessuti e organi.

Tabella VI. – Fattori di ponderazione di alcuni tessuti e organi (valori assunti nel Decreto Legislativo 230/95, come modificato ed integrato dai Decreti Legislativi n. 241/00 e n. 257/01).

Tessuto/organo	$w_T$
gonadi	0,20
midollo osseo, colon, stomaco, polmone	0,12
vescica, mammella, fegato, esofago, tiroide	0,05
pelle, superfici ossee	0,01
altri organi e tessuti	0,05

In pratica ciò che importa conoscere è la dose efficace media annua che ciascuno di noi riceve dalle più disparate sorgenti di radiazione.

Il maggior contributo alla dose efficace assorbita dagli esseri viventi è dovuta alla radiazione emessa da sorgenti naturali (radon, raggi cosmici, radionuclidi sulla crosta terrestre e nei cibi), la cui distribuzione non è tuttavia la stessa per tutte le zone geografiche. Mentre mediamente la dose di esposizione del pubblico alle radiazioni sulla Terra è valutabile in circa 3 mSv annui<sup>(9)</sup>, in alcune zone del Brasile (Guarapari) e dell'India (Kerala) essa arriva a 50 mSv all'anno. Il record mondiale è probabilmente detenuto dalla zona di Ramsar, in Iran, dove, a causa di acque termali contenenti radio, si toccano i 260 mSv all'anno (Fonte UNSCEAR 2000 Report).

Studi recenti hanno rilevato l'importanza del radon (Rn), un gas radioattivo (che emana dal terreno) che decade emettendo  $\alpha$  e che, insieme ai propri discendenti, contribuisce alla maggior parte della dose naturale. Il radon, essendo un gas, si può concentrare all'interno delle abitazioni filtrando dal pavimento, se l'edificio è costruito su un terreno radioattivo, e dalle pareti, originato dai materiali impiegati per la costruzione. Tra gli anni '80 e '90 è stata realizzata un'indagine nazionale sulla esposizione al radon nelle abitazioni in Italia<sup>(10)</sup>. Il valore della concentrazione media è risultato pari a 70 Bq/m<sup>3</sup>, valore relativamente elevato rispetto alla media mondiale valutata intorno a 40 Bq/m<sup>3</sup>. Nelle varie Regioni

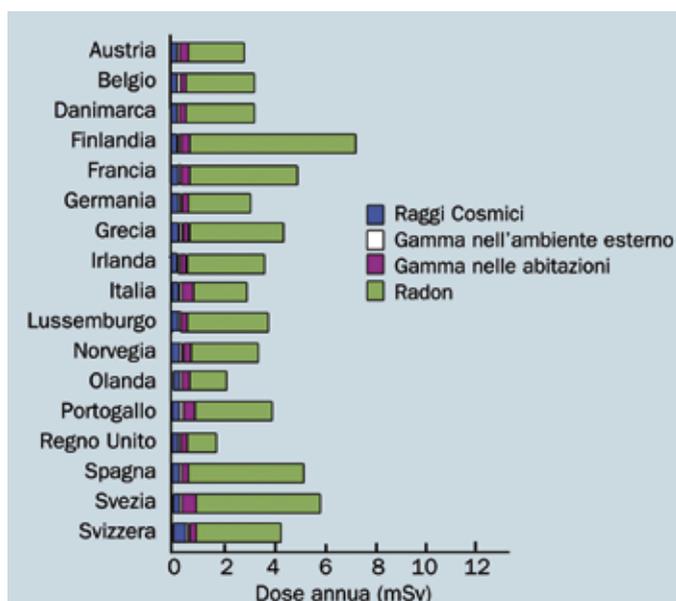


Fig. 8. – Dose efficace media annua di fondo di radioattività naturale in alcuni Paesi europei, suddivisa in base ai contributi delle diverse fonti.

<sup>(9)</sup> Il mSv (millisievert) e il  $\mu$ Sv (microsievert) sono due sottomultipli del sievert rispettivamente uguali a un millesimo e un milionesimo di sievert.

<sup>(10)</sup> L'indagine è stata realizzata dall'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e del Territorio (APAT), dall'Istituto Superiore della Sanità e dalle Agenzie per la Protezione dell'Ambiente Regionali e Provinciali (ARPA e APPA).

esiste una situazione molto diversificata con concentrazioni medie regionali che vanno da poche decine di  $\text{Bq/m}^3$  fino ad oltre  $100 \text{ Bq/m}^3$  e singole abitazioni che arrivano fino a migliaia di  $\text{Bq/m}^3$ .

Un altro contributo importante alla dose equivalente deriva dalla radiazione cosmica (“raggi cosmici”), costituita da radiazione elettromagnetica (prevalentemente raggi  $\gamma$ ), protoni e nuclei più pesanti di altissima energia che piovono sulla Terra dall'esterno, originati in processi stellari. I raggi cosmici bersagliano costantemente l'atmosfera creando un flusso continuo sulla superficie terrestre dell'ordine di 180 particelle al secondo per metro quadrato.

In figura 8 sono riportati i valori della dose efficace media annua di fondo di radioattività naturale in alcuni Paesi europei, suddivisa in base ai contributi delle diverse fonti.

---

---

## QUADRO 6: EFFETTI DELLE RADIAZIONI SULL'UOMO

Quando si è esposti alle radiazioni, quando cioè si assorbe una certa energia dovuta a esse, si dice che si riceve una “dose” di radiazioni.

Come per tutte le sostanze che assumiamo (caffè, liquori, farmaci, ecc.) i possibili effetti sulla salute umana possono essere valutati nel migliore dei modi quando si conoscono la quantità di radiazioni ricevute e il tempo e il modo in cui sono state assorbite.

Per esempio, si può bere un bicchierino di grappa senza risentire effetti collaterali significativi. La cosa può essere diversa se, invece, si beve tutta una bottiglia di grappa. In tal caso occorrerebbe anche sapere se essa viene bevuta in pochi minuti o in un mese. Bisogna anche constatare che per molte sostanze naturali esistono dei valori di soglia al disotto dei quali esse sono indispensabili per l'uomo mentre al di sopra diventano dannose. È questo, ad esempio, il caso di molti metalli pesanti (come zinco, ferro, selenio e altri), delle vitamine e anche dello stesso ossigeno.

Gran parte delle dose di radiazioni che riceviamo (circa l'85%) è dovuta a radiazioni naturali (vedi figura) e quindi è inevitabile. Questa dose varia notevolmente da una località all'altra. Essa dipende, tra l'altro, dalla composizione del terreno e dall'altezza dal livello del mare.

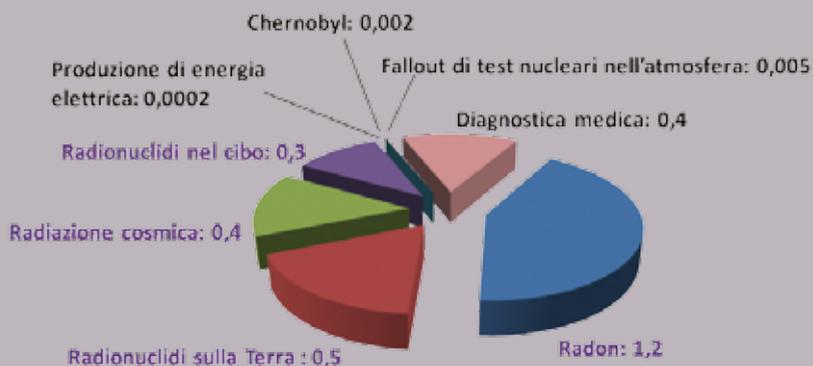
In alcune località del mondo la dose media di esposizione può raggiungere valori anche cento volte più alti del valore medio riportato in figura (2,4 mSv/a). In Italia essa varia anche di cin-

que volte da zona a zona. Per esempio in Piazza San Pietro a Roma, a causa del torio naturale contenuto nella roccia di porfido (i famosi “sanpietrini”), di cui è lastricata la pavimentazione, la dose equivalente di radiazioni ionizzanti è dell'ordine di 7 mSv/a.

L'utilizzo delle radiazioni per scopi medici e per gli usi industriali e di ricerca aggiunge altri quantitativi alla nostra dose di radiazioni. Questi usi sono accettabili se i benefici connessi risultano nettamente maggiori dei rischi associati. Per esempio, una tomografia computerizzata completa (testa e corpo) comporta un assorbimento di una dose di radiazioni pari a 3-4 dosi ambientali annue, eppure si tratta di una tecnologia universalmente accettata.

L'impiego dell'energia nucleare apporta un contributo molto basso alla nostra dose totale di radiazioni assorbite e ciò limitatamente alle popolazioni che risiedono nei pressi degli impianti nucleari per la produzione di energia elettrica (0,0002 mSv/a, vedi figura).

Gli effetti delle radiazioni sono meglio noti di quelli di quasi tutti gli agenti dannosi e i regolamenti e le misure di controllo per proteggerci contro gli effetti delle radiazioni sono molto più rigidi e affidabili che per altre sostanze pericolose. In particolare, dal 1928 è attiva la Commissione Internazionale per la Protezione dalle Radiazioni (*ICRP*, acronimo dell'inglese *International Commission on Radiological Protection*, sito web: <http://www.icrp.org>) che fornisce raccomandazioni ai Governi sulle dosi massime di radiazione cui le persone possono essere esposte. Le raccomandazioni dell'ICRP sono accolte nelle direttive di radioprotezione del Governo Italiano.



Dosi medie di esposizione del pubblico alle radiazioni (in mSv per anno): in viola sono indicate le fonti naturali e in nero quelle artificiali. Come si vede, il contributo complessivo delle radiazioni naturali è di gran lunga preponderante (2,4 mSv/a sul totale di 2,8 mSv/a). (Fonte UNSCEAR, *Sources and Effects of Ionizing radiation*, vol. 1, New York: UN 2000.)

## 1.8 Applicazioni delle radiazioni ionizzanti in medicina, industria e ricerca

Le radiazioni ionizzanti sono ampiamente usate nella pratica.

In medicina esse vengono usate nella diagnostica (radiografie e radioscopie, tomografia assiale computerizzata (TAC), tomografia a emissione di positroni (PET)), nella terapia del cancro (perché esse distruggono i tessuti malati con un'efficienza maggiore che per i tessuti sani), nella sterilizzazione di ferri e strumenti chirurgici (perché uccidono i batteri).

Radionuclidi vengono utilizzati per marcare composti chimici, denominati radiofarmaci, che somministrati al paziente consentono di visualizzare con immagini bidimensionali o tridimensionali diverse parti del corpo, organi e tessuti. È possibile così identificare e diagnosticare precocemente patologie come tumori e sindromi degenerative del sistema nervoso centrale (come i morbi di Alzheimer e di Parkinson). Le cellule, infatti, sono dotate di recettori estremamente specifici per determinate molecole, che vengono "catturate" anche se presenti in concentrazioni molto basse.

Negli anni più recenti l'ideazione di radiofarmaci, in grado di legarsi specificamente e selettivamente a tali recettori, ha consentito di studiare questo meccanismo di cattura e di visualizzare il funzionamento (*metabolismo*) della cellula a livello molecolare e talvolta anche in tempo reale. Inoltre, sfruttando lo stesso meccanismo, può essere di grande efficacia la somministrazione al paziente di composti marcati con radionuclidi, che irradiano in modo specifico e selettivo le cellule tumorali, risparmiando il tessuto sano circostante (*radioterapia metabolica*).

In cristallografia i raggi X (vedi glossario) e i raggi  $\gamma$  sono impiegati nello studio di strutture molecolari cristalline.

Nell'industria le radiazioni vengono usate per il controllo di strutture metalliche al fine di evidenziare eventuali difetti prima che questi provochino guasti pericolosi (per esempio questa tecnica viene usata nei controlli periodici di usura delle parti meccaniche degli aerei); per produrre materiali con caratteristiche chimico-fisiche nuove mediante modifiche strutturali di alcuni materiali; per il trattamento delle acque e dei fanghi di scarico degli impianti industriali od ospedalieri; per l'abbattimento di gas che vengono immessi nell'atmosfera a seguito di processi di combustione; nei controlli di sicurezza negli aeroporti; ecc.

In agricoltura l'irraggiamento con raggi  $\gamma$  è usato per aumentare il periodo di conservazione di certi vegetali e in alcuni processi di disinfestazione delle derrate alimentari.

In archeologia, in geologia e in paleontologia il decadimento radioattivo ha trovato interessanti applicazioni per stabilire le date di eventi molto remoti e per misurare intervalli di tempo molto grandi.

**Esempio 15:** Un ospedale ha comprato un campione di  $^{60}\text{Co}_{27}$  per trattamenti di irradiazione. Calcolare l'attività residua del campione dopo tre emivite (circa 15,9 a).

**Soluzione:** In base alla definizione di emivita l'attività residua del campione dopo  $3\tau_{1/2}$  ammonta a  $1/2^3 = 1/8$  del valore iniziale.

**Esempio 16:** Un laboratorio dispone di  $1,49 \mu\text{g}$  di  $^{13}\text{N}_7$  con emivita  $600 \text{ s}$ . Calcolare l'attività iniziale e quella residua dopo  $1 \text{ ora}$ .

**Soluzione:** In una mole del campione in esame ( $13 \text{ g}$ ) sono contenute  $6,02 \cdot 10^{23}$  nuclei di  $^{13}\text{N}_7$ . Pertanto il numero di nuclei di  $^{13}\text{N}_7$  inizialmente presenti nel campione è dato da

$$N_0 = \frac{6,02 \cdot 10^{23}}{13} 1,49 \cdot 10^{-6} = 6,90 \cdot 10^{16} \text{ nuclei.}$$

Usando l'equazione (5) si ha

$$\lambda = \frac{0,693}{\tau_{1/2}} = \frac{0,693}{600} = 1,16 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}.$$

Quindi, usando l'equazione (7), l'attività all'istante  $t = 0$  è

$$\left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right|_0 = \lambda N_0 = 1,16 \cdot 10^{-3} \cdot 6,90 \cdot 10^{16} = 8,00 \cdot 10^{13} \text{ decadimenti al secondo;}$$

e l'attività residua dopo  $1 \text{ ora}$  è

$$\left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right|_0 e^{-\lambda t} = 8,00 \cdot 10^{13} \cdot e^{-1,16 \cdot 10^{-3} \cdot 3600} = 1,23 \cdot 10^{12} \text{ decadimenti al secondo.}$$

---

## APPROFONDIMENTO: Metodi di datazione

---

In archeologia è largamente utilizzato il *metodo del radiocarbonio*, o del  $^{14}\text{C}$ , per datare materiali di origine organica (ossa, legno, fibre tessili, semi, carboni di legno). Il metodo, basato sulla misura delle abbondanze relative degli isotopi del carbonio, permette la datazione di materiali di età compresa tra i  $50\,000$  e i  $100$  anni.

Il carbonio è un elemento chimico fondamentale per la vita, presente in tutte le sostanze organiche. In natura esso possiede tre isotopi, due stabili ( $^{12}\text{C}$  e  $^{13}\text{C}$ ) e uno radioattivo ( $^{14}\text{C}$ ). Quest'ultimo si trasforma, per decadimento  $\beta^-$ , in azoto ( $^{14}\text{N}$ ), con un tempo di dimezzamento di  $5730$  anni. Di conseguenza a lungo andare scomparirebbe, se non venisse continuamente reintegrato. La produzione di nuovo  $^{14}\text{C}$  avviene in natura negli strati alti della troposfera e nella stratosfera, per la cattura di neutroni da parte degli atomi di azoto provocata dai raggi cosmici che bombardano incessantemente la Terra.

L'equilibrio dinamico che si instaura tra produzione e decadimento radioattivo mantiene costante la concentrazione di  $^{14}\text{C}$  nell'atmosfera, dove è presente principalmente legato all'ossigeno sotto forma di anidride carbonica (il  $^{14}\text{C}$  è presente nell'atmosfera terrestre a una concentrazione di equilibrio di circa 1 atomo su  $8,3 \cdot 10^{11}$  atomi di carbonio ordinario  $^{12}\text{C}$ ).

Tutti gli organismi viventi (animali e vegetali) scambiano continuamente carbonio con l'atmosfera attraverso processi di respirazione, sintesi clorofilliana o alimentazione. Noi anche assorbiamo il radiocarbonio con il cibo che mangiamo e con l'aria che respiriamo. Nel corpo umano si verificano circa 120000 decadimenti nucleari di  $^{14}\text{C}$  al minuto. Ogni decadimento emette un raggio  $\beta^-$  di alta energia, che può danneggiare le cellule vicine<sup>(11)</sup>. (È interessante sapere che quando siamo tra la folla, per esempio quando andiamo allo stadio, prendiamo più radiazioni gamma di quando stiamo vicino a una centrale nucleare!).

Finché un organismo è vivo, tutti i suoi tessuti hanno la stessa concentrazione di  $^{14}\text{C}$  di quella che si riscontra nell'atmosfera<sup>(12)</sup>. Quando l'animale o la pianta muore, il suo scambio di carbonio si arresta e la concentrazione di  $^{14}\text{C}$  diminuisce in modo regolare secondo l'equazione (4):

$$C(t) = C_0 \cdot e^{-\lambda \Delta t},$$

dove  $C_0$  è la concentrazione di carbonio-14 nell'atmosfera,  $\Delta t$  è il tempo trascorso dalla morte dell'organismo e  $\lambda$  la costante di decadimento del  $^{14}\text{C}$ . Misurando dunque la quantità di  $^{14}\text{C}$  presente nei resti organici, se ne ricava l'età applicando la seguente formula:

$$(8) \quad \Delta t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{C}{C_0}.$$

Se in un fossile la quantità di  $^{14}\text{C}$  ammonta a un quarto del livello naturale, allora il fossile ha l'età di due emivite. Se è inferiore di un fattore 1000, allora è morto da 10 emivite.

Questo metodo permette di ottenere datazioni con un margine di errore tra il 2 e il 5% e fino ad un tempo massimo di circa 50000 anni; per campioni più vecchi, la concentrazione di  $^{14}\text{C}$  è troppo bassa per poter essere misurata con sufficiente accuratezza<sup>(13)</sup>.

Utilizzando radionuclidi a vita media più lunga si possono effettuare datazioni più indietro nel tempo, fino a valutare l'età del sistema solare (-4,5 miliardi di anni). Per esempio il metodo potassio-argon, basato sul decadimento  $\beta^+$  del  $^{40}\text{K}_{19}$  in  $^{40}\text{A}_{18}$  con vita media di 11,9

<sup>(11)</sup> Per lo stesso motivo anche questo fascicolo che state leggendo è radioattivo, come pure lo è, ad esempio, l'alcool che beviamo. Il *Bureau of Alcohol, Tobacco, Firearms and Explosives* degli Stati Uniti controlla appunto il livello di radioattività presente nel vino e negli alcolici: 200 millilitri di whisky devono emettere almeno 400 raggi  $\beta$  al minuto, altrimenti il liquore è considerato non idoneo al consumo umano.

<sup>(12)</sup> In realtà il valore di  $C_0$  non è rimasto costante nel tempo. La determinazione del suo valore lungo i secoli ha richiesto l'uso di tecniche particolari, come il confronto tra il valore atteso e quello reale che presentano gli oggetti di cui sia nota l'età, per esempio alberi molto vecchi in cui si possono riconoscere gli anelli di crescita.

<sup>(13)</sup> Si riescono a misurare concentrazioni di  $^{14}\text{C}$  anche di solo 1 atomo ogni milione di miliardi di atomi, che è quella rimasta in reperti vecchi di circa 50 mila anni.

miliardi di anni, è attendibile nell'intervallo fra 4,5 miliardi di anni e centomila anni, mentre il sistema rubidio-stronzio, basato sul decadimento  $\beta^-$  del  $^{87}\text{Rb}_{37}$  in  $^{87}\text{Sr}_{38}$  con vita media di 47,5 miliardi di anni, è attendibile nell'intervallo fra 4,5 miliardi di anni e cinque milioni di anni. Questi metodi vengono impiegati nelle datazioni di tipo geologico.

**Esempio 17:** In un campione di roccia che include fossili di animali preistorici si registra un rapporto tra i nuclei  $^{87}\text{Sr}_{38}$  e  $^{87}\text{Rb}_{37}$  pari a 0,016. Calcolare l'età  $\Delta t$  dei fossili supponendo la totale assenza di  $^{87}\text{Sr}_{38}$  al momento della formazione della roccia (l'emivita del Rb è  $4,75 \cdot 10^{10}$  anni).

**Soluzione:** Chiamando  $N_0$  il numero dei nuclei iniziali di Rb, sappiamo che, nel tempo  $\Delta t$ , 0,016.  $N_0$  nuclei di Rb sono decaduti  $\beta^-$  formando altrettanti nuclei di Sr.

Pertanto secondo l'equazione (8) l'età dei fossili è

$$\Delta t = -\tau_{1/2} \ln(1 - 0,016) = \frac{4,75 \cdot 10^{10}}{0,693} 1,613 = 1,11 \cdot 10^{11} \text{ anni.}$$

**Esempio 18:** Un antico reperto ligneo contiene solo il 6% di nuclei di  $^{14}\text{C}$  rispetto a un campione di legno fresco. Quant'è vecchio il reperto?

**Soluzione:** Chiamando  $N_0$  e  $N$  il numero di nuclei di  $^{14}\text{C}$  presenti rispettivamente nel campione di legno fresco e, dopo la vita  $\Delta t$ , nel reperto, ed utilizzando l'equazione (4), si ha

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda \Delta t},$$

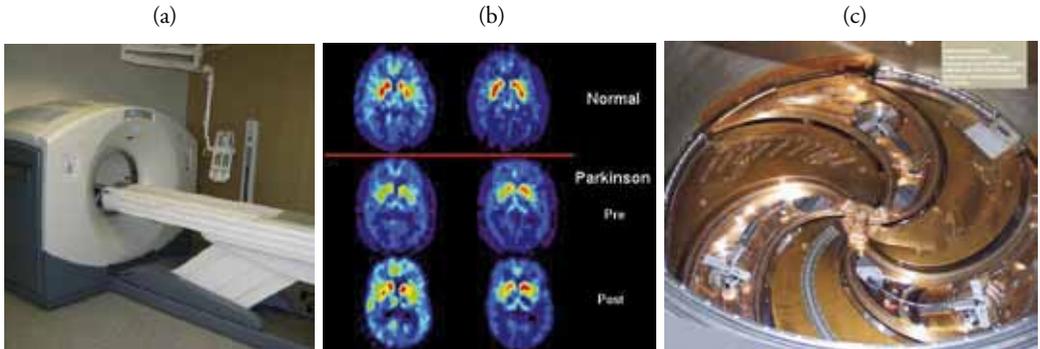
da cui, estraendo membro a membro il logaritmo, si ottiene

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda \Delta t,$$

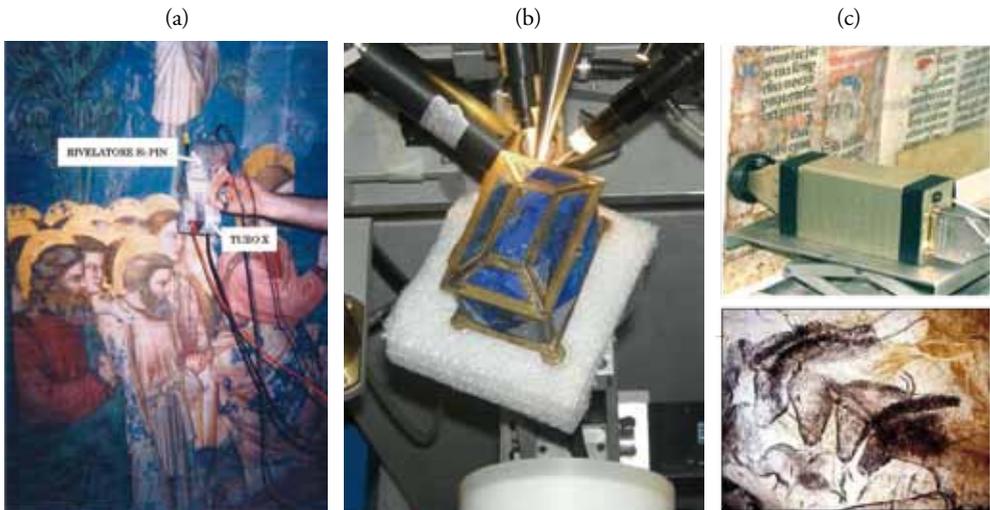
che, utilizzando la (5) e ricordando che l'emivita del  $^{14}\text{C}$  è  $\tau_{1/2} = 5730$  anni (vedi Tabella IV), dà

$$\Delta t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{N}{N_0} = -\frac{\tau_{1/2}}{0,693} \ln \frac{N}{N_0} = -\frac{5730}{0,693} \ln(0,06) \simeq 2,3 \cdot 10^4 \text{ anni.}$$

## Applicazioni della fisica nucleare alla diagnostica medica



## Applicazioni della fisica nucleare nel campo dei beni culturali



La fisica nucleare è oggi comunemente usata per una diagnostica non invasiva dei beni culturali.

(a) Analisi con fluorescenza a raggi X dell'aureole nell'affresco "Ingresso di Gesù a Gerusalemme", Giotto, Cappella degli Scrovegni, Padova. (b) Analisi con microfascio di ioni al LABEC (Laboratorio di Tecniche Nucleari per i Beni Culturali - INFN, Firenze) della parete in lapislazzuli di un prezioso bauletto della "Collezione Medicea di Pietre Ornamentali", cat. N. [13684]. (c) Analisi con la tecnica IBA (Ion Beam Analysis, analisi con fascio di ioni) di un codice miniato e di un graffito rupestre.

## 2. ENERGIA DA FISSIONE NUCLEARE

### 2.1 La Fissione nucleare

La fissione nucleare è una reazione in cui un nucleo di un elemento pesante si spacca in due frammenti, approssimativamente di uguale massa, liberando una grande quantità di energia e emettendo un certo numero di neutroni liberi (di solito due o tre). Questa reazione interessa prevalentemente nuclei con numero di massa superiore a 100 ed è molto più facilmente osservabile in quelli aventi un numero di massa intorno al valore di 230.

L'emissione di neutroni liberi si deve al fatto che i nuclei fissili (vedi glossario), molto pesanti, sono caratterizzati da un numero medio di neutroni proporzionalmente maggiore di quello dei nuclei più leggeri: quando un nucleo si rompe in due frammenti, quindi, i neutroni in eccesso, che non trovano posto nella composizione dei frammenti, vengono liberati.

In base alle considerazioni svolte nel par. 1.3, la fissione di questi nuclei è energeticamente possibile e, se si verifica, circa 200 MeV di energia a riposo viene trasformata in energia cinetica dei frammenti di fissione e dei neutroni emessi (vedi Esempio 19). I frammenti di fissione a loro volta urtano gli atomi circostanti e, rapidamente e nello spazio dell'ordine del millimetro, perdono la loro energia cinetica, che è convertita in energia termica del mezzo circostante.

L'energia che si libera in una reazione di fissione nucleare è circa 10 milioni di volte più grande di quella che si libera in una reazione chimica. La fissione nucleare è pertanto una straordinaria sorgente di energia: la fissione di 1 g di  $^{235}\text{U}$  (il combustibile nucleare più usato) libera circa 80 miliardi di joule di energia (circa 20 milioni di chilocalorie), equivalenti alla combustione di circa 3000 kg di antracite (vedi Esempio 21).

Anche se è energeticamente vantaggioso per un nucleo pesante dividersi in due parti, questo processo è ostacolato dalle intense forze nucleari attrattive tra i nucleoni. Il nucleo può allungarsi in un tentativo di scindersi, ma in genere ritorna nella sua forma di equilibrio e vibra intorno a essa. La probabilità che avvenga la fissione spontanea è molto piccola e, perciò, il corrispondente tempo di dimezzamento è lunghissimo (circa  $10^{17}$  anni nel caso dell'uranio-235, più di venti milioni di volte l'età della Terra).

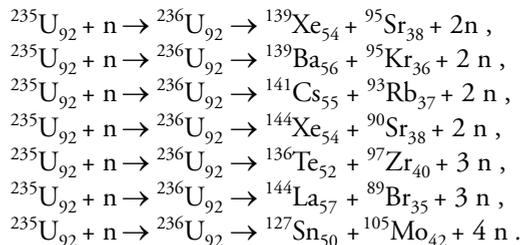
È sufficiente però che un nucleo di tali elementi catturi un neutrone perché l'energia rilasciata dal riassetto dei nucleoni ecceda l'energia di legame del nucleo composto che si è formato. A questo punto il nucleo acquista un'anomala forma allungata e, nel giro di una piccolissima frazione di secondo (meno di  $10^{-12}$  s), fissiona. Per molti nuclei pesanti, come per esempio l'uranio-235, la probabilità di fissione indotta da neutroni è altissima (tempo di dimezzamento circa  $10^{-21}$  s). Pertanto la cattura di un neutrone da parte dell'uranio-235 aumenta la sua probabilità di subire la fissione di un fattore circa  $10^{45}$  (da  $10^{17}$  anni a  $10^{-21}$  s)!

Questa situazione è molto favorevole per la produzione di energia.

Nella fissione entrambi i frammenti che si formano hanno un numero di massa molto inferiore a quello del nucleo di partenza e hanno sempre un eccesso di neutroni. Essi, quindi, vanno incontro a decadimenti  $\beta^-$  e  $\gamma$  successivi, con tempi di dimezzamento anche molto lunghi, finché non si formano nuclei stabili con lo stesso numero di massa. L'insieme di questi nuclei, prodotti direttamente dalla fissione o indirettamente in seguito a decadimento radioattivo di frammenti di fissione, rappresenta i cosiddetti *prodotti di fissione*.

Nella fissione di un determinato nucleo si producono molti differenti frammenti di fissione. Per esempio, nel caso dell'uranio è favorita la formazione di un nucleo più leggero, di numero di massa  $A$  compreso tra 80 e 100, e di uno più pesante, con  $A$  tra 125 e 155<sup>(14)</sup>. Complessivamente, tenendo conto anche delle disintegrazioni dei frammenti di fissione, mediante la fissione dell'uranio si producono più di 200 nuclidi radioattivi differenti. Molti di questi non esistono in natura sulla Terra.

Qui di seguito sono elencate alcune possibili reazioni di fissione del nucleo  $^{236}\text{U}_{92}$  che si forma per cattura di un neutrone da parte dell'isotopo  $^{235}\text{U}_{92}$ :



Nella figura 9 è schematicamente illustrata la prima di queste reazioni di cattura.

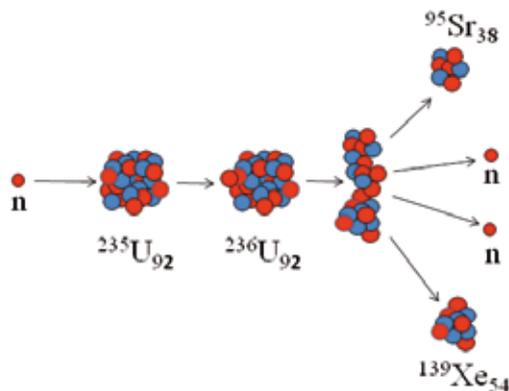


Fig. 9. - Rappresentazione schematica della reazione di cattura di un neutrone da  $^{235}\text{U}_{92}$  con produzione di un nucleo  $^{236}\text{U}_{92}$  che, in un tempo minore di  $10^{-12}$  s, si fissiona in  $^{95}\text{Sr}_{38}$  e  $^{139}\text{Xe}_{54}$ , emettendo 2 neutroni.

<sup>(14)</sup> La modalità di fissione più probabile, che corrisponde all'incirca al 6,4% delle fissioni totali, dà frammenti con numeri di massa 95 e 139.

**Esempio 19:** Calcolare l'energia che si libera quando un nucleo  $^{236}\text{U}_{92}$  si frammenta nei nuclei  $^{95}\text{Sr}_{38}$  e  $^{139}\text{Xe}_{54}$  e emette due neutroni liberi.

**Soluzione:** La figura 4 mostra che l'energia media di legame per nucleone di un nuclide stabile con numero di massa  $A$  compreso tra 75 e 160 è di circa 8,5 MeV, mentre quella dell' $^{236}\text{U}$  è di 7,6 MeV. Questo significa che nei nuclei  $^{95}\text{Sr}$  e  $^{139}\text{Xe}$  i nucleoni sono più legati che nell' $^{236}\text{U}$ . Perciò, aumentando l'energia di legame media da 7,6 a 8,5 MeV, si liberano 0,9 MeV per nucleone. Osservando che 234 nucleoni dell' $^{236}\text{U}$  si riorganizzano per formare i nuclei  $^{95}\text{Sr}$  e  $^{139}\text{Xe}$  (vengono anche emessi 2 neutroni liberi), per ogni evento di fissione si liberano

$$234 \cdot 0,9 \text{ MeV} = 211 \text{ MeV}.$$

Circa l'86% di questa energia viene libera istantaneamente sotto forma di energia cinetica dei frammenti di fissione e dei neutroni.

Tenendo conto che la massa dell' $^{236}\text{U}$  è 236,045562 u, solo circa lo 0,1% della massa totale di un nucleo di uranio si converte in energia cinetica

$$\frac{211 \text{ MeV}}{(236,045562 \text{ u}) (931,481 \text{ MeV/u})} = 9,6 \cdot 10^{-4}.$$

Il rimanente 99,9% resta nelle masse dei neutroni e protoni dei prodotti della reazione.

**Esempio 20:** Calcolare l'energia in chilowattora e in chilocalorie che si libera quando 1 g di  $^{235}\text{U}_{92}$  fissiona.

**Soluzione:** In 1 g di uranio-235 sono contenuti  $6,02 \cdot 10^{23}/235$  nuclei. La fissione di tutti questi nuclei produce un'energia (vedi Esempio 19)

$$\frac{6,02 \cdot 10^{23}}{235} 211 \text{ MeV} = 5,04 \cdot 10^{23} \text{ MeV}.$$

Ricordando che  $1 \text{ eV} = 4,45 \cdot 10^{-26} \text{ kWh} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ , questo valore corrisponde a

$$\begin{aligned} (5,04 \cdot 10^{29} \text{ eV})(4,45 \cdot 10^{-26} \text{ kWh/eV}) &= 22,43 \cdot 10^3 \text{ kWh}, \\ (5,04 \cdot 10^{29} \text{ eV})(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J/eV}) &= 80,6 \cdot 10^9 \text{ J}. \end{aligned}$$

**Esempio 21:** Quando viene bruciato 1 kg di carbone fossile si liberano circa  $3 \cdot 10^7 \text{ J}$  di energia. Calcolare quanti chilogrammi di carbone si devono bruciare per produrre la stessa energia che si libera quando 1 kg di  $^{235}\text{U}$  fissiona.

**Soluzione:** Utilizzando i risultati dell'Esempio precedente risulta che la fissione di 1 kg di  $^{235}\text{U}$  libera  $8,06 \cdot 10^{13} \text{ J}$ . Pertanto la quantità di carbone che occorre bruciare per produrre la stessa energia è

$$\frac{8,06 \cdot 10^{13} \text{ J}}{3 \cdot 10^7 \text{ J}} = 2,67 \cdot 10^6 \text{ kg}.$$

A parità di massa di combustibile la fissione fornisce un'energia circa 3 milioni di volte maggiore di quella fornita dalla combustione di carbone.

---

**APPROFONDIMENTO: La cattura di neutroni su uranio**


---

Abbiamo detto che la fissione spontanea di un nucleo pesante è molto improbabile e si verifica, quindi, ad un ritmo molto lento. Basta però fornire al nucleo una piccola energia aggiuntiva perché la fissione avvenga a una velocità assai elevata.

Un semplice modo di fornire questa energia consiste nell'inviare sul nucleo neutroni: il nucleo composto (con un neutrone in più) che si forma si trova in uno stato eccitato con energia di eccitazione pari alla somma dell'energia di legame del neutrone catturato, nel nuovo nucleo, e dell'energia cinetica del neutrone iniziale. L'energia in sovrappiù provoca l'aumento dell'agitazione dei singoli nucleoni che induce il nucleo ad assumere una forma allungata abnorme con due parti quasi separate. La forza nucleare tra queste due parti risulta indebolita a causa della maggiore distanza delle due parti e le forze elettrostatiche repulsive tra i protoni diventano dominanti. In conseguenza il nucleo si spacca in due.

Analizziamo più in dettaglio questo comportamento considerando il caso dell'uranio che, per fissionarsi, richiede un'energia aggiuntiva di circa 5,5 MeV al di sopra dello stato fondamentale.

Se il più abbondante isotopo dell'uranio presente in natura,  $^{238}\text{U}_{92}$ , cattura un neutrone che possiede un'energia cinetica di 1 MeV (*neutrone veloce*<sup>(15)</sup>), si forma un nucleo  $^{239}\text{U}_{92}$  con un'energia di eccitazione di 5,8 MeV (somma dell'energia cinetica di 1,0 MeV del neutrone più i 4,8 MeV dell'energia di legame del neutrone nel nucleo  $^{239}\text{U}_{92}$  (vedi Esempio 22)). Questa energia è sufficiente per permettere al nucleo di assumere una configurazione deformata con 5,5 MeV al di sopra della configurazione fondamentale e spaccarsi in due parti. La fissione è, quindi, energeticamente possibile e in realtà spesso avviene. I neutroni veloci sono quindi degli efficaci agenti per provocare la fissione dell'isotopo  $^{238}\text{U}_{92}$ .

Se però l'energia cinetica dei neutroni è minore di 0,5 MeV, l'eccitazione provocata dalla cattura del neutrone dal nucleo  $^{238}\text{U}_{92}$  (4,8 MeV) non è sufficiente a produrre la grande deformazione nucleare richiesta (in questo caso il nucleo  $^{239}\text{U}$  ha un'energia di eccitazione di solo  $(4,8 + 0,5) = 5,3$  MeV) e la fissione rimane altamente improbabile. Pertanto la cattura di neutroni con energia cinetica  $< 0,5$  MeV da parte del nucleo  $^{238}\text{U}_{92}$  non provoca la sua fissione.

La storia della cattura di neutroni da parte del più raro isotopo  $^{235}\text{U}_{92}$  è diversa per un dettaglio importante: l'energia di legame del neutrone catturato fornisce da sola un'energia sufficiente a produrre la fissione del nucleo (vedi Esempio 22). In questo caso, quindi, non è necessario che il neutrone abbia un'energia cinetica maggiore di un determinato valore minimo. Pertanto anche i neutroni *termici*<sup>(16)</sup> provocano la fissione dei nuclei  $^{235}\text{U}_{92}$ .

Lo stesso avviene per la cattura di neutroni da parte dell'isotopo artificiale  $^{235}\text{Pu}_{94}$ , che si fissiona qualunque sia l'energia cinetica del neutrone catturato.

I due più importanti isotopi dell'uranio, per quanto concerne i processi di fissione, sono  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ . Come abbiamo visto poco più sopra, solo l' $^{235}\text{U}$  subisce facilmente la fissione assorbendo un neutrone lento; l' $^{238}\text{U}$  richiede un neutrone energetico per innescare una

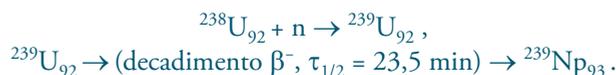
---

<sup>(15)</sup> Si chiamano così i neutroni con energia cinetica  $> 100$  eV (vedi il par. 2.3.1).

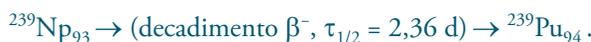
<sup>(16)</sup> Si chiamano così i neutroni con energia cinetica dell'ordine di quella di agitazione termica,  $\approx 0,25$  eV a  $20$  °C (vedi par. 2.3.1).

reazione di fissione. Ma l'abbondanza naturale di  $^{235}\text{U}$  è solo lo 0,7%; perciò occorrono elaborati procedimenti di accrescimento della relativa concentrazione (processi di *arricchimento*) per costruire un reattore nucleare o una bomba che utilizzino questo isotopo. È bene rilevare che il livello di arricchimento richiesto è molto diverso nei due casi: per la maggior parte delle applicazioni energetiche (reattori nucleari ad acqua leggera) la concentrazione dell'isotopo  $^{235}\text{U}$  deve essere aumentata fino a percentuali del 3–5 %. Per le testate nucleari sono invece necessarie concentrazioni del 95%.

L' $^{238}\text{U}$  ha comunque un'importante applicazione energetica: se viene esposto ai neutroni lenti, può catturarne uno e formare  $^{239}\text{U}$ . Questo nucleo radioattivo subisce il decadimento  $\beta^-$  e forma l'elemento transuranico nettunio, Np ( $Z = 93$ ), come indicato nelle seguenti reazioni:



Il nucleo  $^{239}\text{Np}$  è a sua volta radioattivo e forma l'elemento plutonio, Pu ( $Z = 94$ ), per decadimento  $\beta^-$ :



L'importanza del plutonio sta nel fatto che esso subisce facilmente la fissione indotta da neutroni lenti – più facilmente in realtà dell' $^{235}\text{U}$ . Perciò entrambi gli isotopi dell'uranio possono essere usati nei processi di fissione indotta da neutroni lenti: l' $^{235}\text{U}$  può essere usato direttamente e l' $^{238}\text{U}$  può essere convertito in  $^{239}\text{Pu}$ .

## 2.2 La reazione a catena

In un processo di fissione, insieme ai due frammenti di medio peso atomico, vengono emessi da 2 a 4 neutroni liberi, rilasciati immediatamente (*neutroni pronti*), o dopo un intervallo di tempo dell'ordine di parecchi secondi (*neutroni ritardati*)<sup>(17)</sup>.

Si tratta di un aspetto di straordinaria importanza pratica: se un neutrone prodotto da un evento di fissione innesca la fissione di un altro nucleo e un neutrone prodotto in questo evento innesca un'altra fissione, e così via, questa serie di eventi di fissione si autosostiene e costituisce una *reazione a catena*.

In figura 10 sono schematicamente mostrati tre stadi di una reazione a catena originata da un processo di fissione di un nucleo di  $^{235}\text{U}$ .

<sup>(17)</sup> I neutroni pronti sono quelli rilasciati con un ritardo che non supera  $10^{-14}$  s. Quelli ritardati provengono dal decadimento dei frammenti di fissione, ricchi di neutroni, (o dai loro figli) che hanno una emivita dell'ordine dei secondi. Sebbene siano molto meno numerosi (solo lo 0,65% nel caso dell'uranio-235, lo 0,26% per l'uranio-233 e lo 0,21% per il plutonio-239), i neutroni ritardati hanno un'importanza notevole nell'utilizzazione tecnica della fissione, perché rendono assai agevole il controllo dei reattori nucleari.

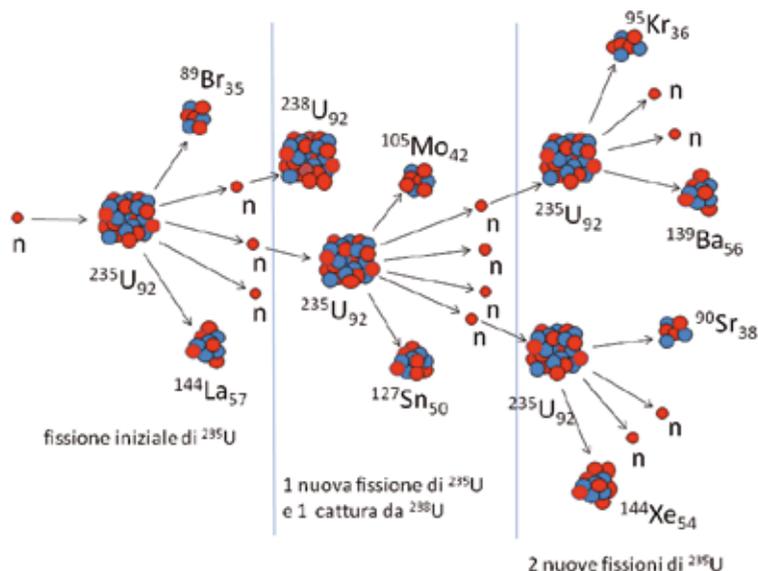


Fig. 10. – Schema di un'ipotetica reazione a catena originata da un processo di fissione di un nucleo di  $^{235}\text{U}$  in  $^{89}\text{Br}_{35}$  e  $^{144}\text{La}_{57}$  più tre neutroni. Nel secondo stadio, uno di questi neutroni viene perso, un altro viene assorbito da un nucleo di  $^{238}\text{U}$  e il terzo produce una nuova fissione di un nucleo di  $^{235}\text{U}$  in  $^{105}\text{Mo}_{42}$  e  $^{127}\text{Sn}_{50}$ . Nello stadio successivo, due dei quattro neutroni prodotti nella nuova fissione vengono persi e due fissionano due nuclei di  $^{235}\text{U}$ , rispettivamente in  $^{95}\text{Kr}_{36}$  e  $^{139}\text{Ba}_{56}$  e  $^{90}\text{Sr}_{38}$  e  $^{144}\text{Xe}_{54}$ .

Controllando l'ambiente in cui si trovano i nuclei che subiscono la fissione, si può mantenere una condizione in cui, in ciascun evento di fissione, in media soltanto uno dei neutroni emessi innesca un altro evento di fissione. In questo modo l'energia sviluppata nell'unità di tempo (cioè la potenza) è mantenuta a un livello costante e si parla di *reazione a catena controllata*. Una quantità di materiale fissile che si trova in queste condizioni si chiama *massa critica*.

Su questo principio si basa la generazione commerciale dell'elettricità con reattori nucleari.

Nel caso in cui il numero medio di neutroni che danno luogo a nuove fissioni è minore di 1 (*reazione sottocritica*), la reazione non si autosostiene e, in assenza di opportune correzioni, finisce con l'estinguersi. Se al contrario il numero medio di neutroni che danno luogo a nuove fissioni è maggiore di 1 la reazione si dice *sovra critica*: in questo caso l'energia liberata aumenta e, se lasciata incontrollata, potrebbe determinare una fusione parziale o totale della massa fissile.

La prima reazione a catena autosostenuta fu realizzata da Enrico Fermi e i suoi collaboratori all'università di Chicago il 2 dicembre 1942<sup>(18)</sup>. Il reattore sperimentale di Fermi si

<sup>(18)</sup> Sul luogo è posta una targa in bronzo in cui si legge: "Il 2 dicembre 1942 l'uomo ottenne qui la prima reazione a catena autosostenuta e qui iniziò la produzione controllata dell'energia nucleare." Il successo dell'esperimento venne comunicato a Washington con il seguente messaggio in codice: *The Italian navigator has landed in the new world* (Il navigatore italiano è arrivato nel nuovo mondo).

chiamava CP-1 (*Chicago Pile number 1*). Il termine reattore nucleare ancora non esisteva e la macchina si chiamava “pila”. Fermi lo descrive come un’enorme massa di mattoni neri e marroni; i mattoni neri erano l’uranio e quelli marroni i blocchi di grafite che servivano per rallentare i neutroni.

**Esempio 22:** Quando i nuclei  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$  catturano un neutrone si trasformano rispettivamente negli isotopi  $^{236}\text{U}$  e  $^{239}\text{U}$ . Calcolare l’energia di legame  $\varepsilon$  dei neutroni catturati nei due isotopi dell’uranio, sapendo che le masse a riposo dei vari isotopi sono:  $m(^{235}\text{U}) = 235,043923 \text{ u}$ ,  $m(^{236}\text{U}) = 236,045562 \text{ u}$ ,  $m(^{238}\text{U}) = 238,050783 \text{ u}$  e  $m(^{239}\text{U}) = 239,054288 \text{ u}$ .

**Soluzione:** Ripetendo il procedimento seguito nell’Esempio 5 risulta che

$$\begin{aligned}\varepsilon(^{236}\text{U}) &= \Delta m(^{236}\text{U}) c^2 \\ \varepsilon(^{239}\text{U}) &= \Delta m(^{239}\text{U}) c^2\end{aligned}$$

con

$$\begin{aligned}\Delta m(^{236}\text{U}) &= [m(^{235}\text{U}) + m(\text{n}) - m(^{236}\text{U})] = \\ &= 235,043923 \text{ u} + 1,008665 \text{ u} - 236,045562 \text{ u} = 0,007026 \text{ u}.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\Delta m(^{239}\text{U}) &= [m(^{238}\text{U}) + m(\text{n}) - m(^{239}\text{U})] = \\ &= 238,050783 \text{ u} + 1,008665 \text{ u} - 239,054288 \text{ u} = 0,005160 \text{ u}.\end{aligned}$$

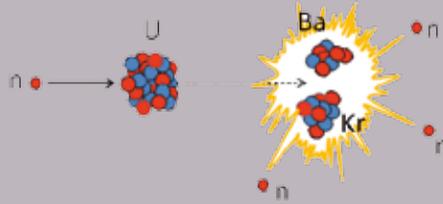
Pertanto

$$\begin{aligned}\varepsilon(^{236}\text{U}) &= (0,007026 \text{ u}) (931,481 \text{ MeV/u}) = 6,5446 \text{ MeV}, \\ \varepsilon(^{239}\text{U}) &= (0,005160 \text{ u}) (931,481 \text{ MeV/u}) = 4,8064 \text{ MeV}.\end{aligned}$$

Questa energia si ritrova come energia di deformazione degli isotopi  $^{236}\text{U}$  e  $^{239}\text{U}$ .

### Quadro 7: LA FISSIONE NUCLEARE E LA REAZIONE A CATENA

La fissione nucleare è una reazione in cui un nucleo di un elemento pesante si spacca in due frammenti, approssimativamente di uguale massa, liberando una grande quantità di energia e emettendo un certo numero di neutroni liberi, in media 2,5 (vedi figura).



L'emissione di neutroni liberi si deve al fatto che i nuclei molto pesanti sono caratterizzati da un numero medio di neutroni proporzionalmente (rispetto al numero di nucleoni) maggiore di quello dei nuclei più leggeri: quando un nucleo pesante si rompe in due frammenti i neutroni in eccesso, che non trovano posto nella composizione dei frammenti, vengono liberati.

I frammenti di fissione hanno un numero di massa molto inferiore a quello del nucleo di partenza e hanno sempre un eccesso di neutroni. Essi sono sempre radioattivi e, prima di raggiungere la stabilità, vanno incontro a decadimenti beta e gamma successivi, con tempi di dimezzamento anche molto lunghi (per esempio circa 30 anni per lo stronzio-90).

La fissione nucleare si verifica più facilmente in seguito alla cattura di un neutrone. Il nuovo nucleo composto, con un neutrone in più, che si forma è molto instabile e rapidamente (in un tempo inferiore a mille miliardesimi di secondo) si spacca in due frammenti.

La cattura di un neutrone da parte di un nucleo fissile è tanto più probabile quanto più lento è il neutrone, cioè quanto più lungo è il tempo di interazione tra il neutrone e il nucleo. Di qui l'interesse a rallentare i neutroni affinché riescano meglio a indurre la fissione.

L'unico nucleo fissile in natura è l'isotopo  $^{235}\text{U}$ , presente nell'uranio naturale solo con una percentuale molto bassa (0,711%). Sorge quindi la necessità di arricchire artificialmente il contenuto di  $^{235}\text{U}$  nell'uranio utilizzato come combustibile nei reattori nucleari.

Se ognuno dei neutroni risultanti da una fissione produce fissioni in altri nuclei, il numero di queste cresce rapidamente e basterà un solo neutrone iniziale per provocare la fissione di un numero enorme di nuclei (reazione a catena: vedi figura 10). È questa la chiave di tutte le applicazioni pratiche dell'energia nucleare.

Una reazione a catena può essere: controllata, come avviene nei reattori nucleari di uso civile dove il processo è molto lento e la liberazione di energia è graduale; o incontrollata, come avviene negli ordigni nucleari dove il processo è pressoché istantaneo e si ha una totale liberazione dell'energia disponibile in pochissime frazioni di secondo.

## 2.3 Applicazioni energetiche della fissione nucleare

### 2.3.1 La fisica del reattore

Il reattore nucleare è il sistema nel quale si utilizza la reazione a catena per produrre, in condizioni controllate, energia da utilizzare per scopi industriali (produzione di elettricità, propulsione di sottomarini e grandi navi, riscaldamento, impianti di dissalazione dell'acqua di mare o salmastra, conversione di materiale fertile<sup>(19)</sup> in materiale fissile, ecc.), oppure per scopi medici o di ricerca (produzione di radioisotopi per uso medico-biologico, produzione di fasci di neutroni di elevata intensità, studio del comportamento di materiali sottoposti ad intensa radiazione gamma e neutronica, produzione di nuclidi, ecc.).

I reattori della prima categoria sono sempre di potenza notevole (dell'ordine fino anche a qualche GW), quelli di ricerca hanno generalmente potenza modesta (da pochi kW a qualche centinaio di kW).

La figura 11 sintetizza alcuni elementi fondamentali che caratterizzano i diversi tipi di reattori nucleari. La figura superiore (figura a) dà il numero di neutroni emessi, per ogni neutrone assorbito dai vari nuclidi indicati, in funzione dell'energia del neutrone primario che causa la fissione. Ad esempio, un neutrone da 0,2 MeV produce, in media, 1,9 neutroni per neutrone assorbito nell'<sup>235</sup>U e 2,4 neutroni per neutrone assorbito nel <sup>239</sup>Pu. A questa energia, invece, l'<sup>238</sup>U non è fissile e quindi non produce alcun neutrone.

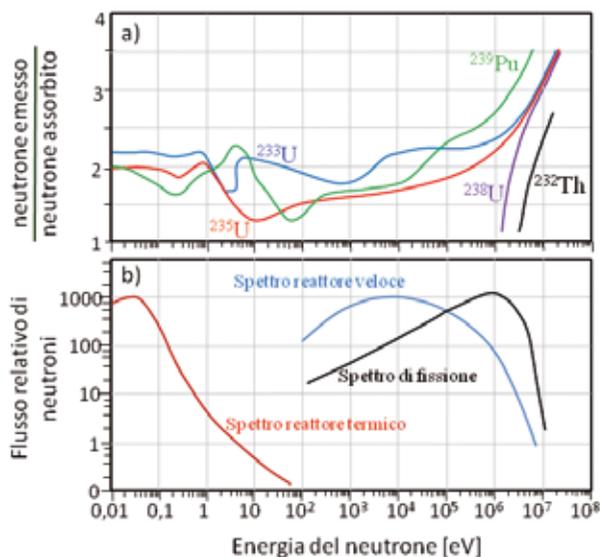


Fig. 11. - a) Neutroni emessi per evento di fissione degli elementi indicati, in funzione dell'energia del neutrone primario. b) Tipiche distribuzioni di energia dei neutroni emessi nella fissione (curva nera) e dei neutroni in un reattore veloce (curva azzurra) e in un reattore termico (curva rossa). Si noti la scala logaritmica delle ordinate

<sup>(19)</sup> Si dice fertile un materiale che può diventare fissile in seguito a cattura di un neutrone, eventualmente seguita da decadimento radioattivo.

I neutroni prodotti dalla fissione possiedono, all'atto in cui sono generati, un'energia cinetica variabile in un ampio intervallo di valori (curva nera "spettro di fissione" nella figura 11 b): come si vede, la maggior parte dei neutroni di fissione ha energia di poco inferiore al MeV e i neutroni emessi con energia attorno al keV sono circa 20 volte meno numerosi. Diffondendosi nella materia, i neutroni hanno una certa probabilità di urtare i nuclei delle sostanze presenti e, così facendo, perdono energia e si rallentano. Per motivi pratici essi sono raggruppati in tre classi: *neutroni veloci*, con energia cinetica maggiore di 100 eV, *neutroni epitermici*, con energia cinetica tra 0,1 e 100 eV, e *neutroni termici*, con energia cinetica minore di 0,1 eV. Quest'ultima classe corrisponde ai neutroni più lenti, la cui energia è circa uguale a quella dovuta all'agitazione termica dei nuclei contro i quali i neutroni collidono<sup>(20)</sup>.

Analogamente, nei riguardi del modo di funzionamento, i reattori si classificano in *reattori veloci*, *reattori intermedi*, e *reattori termici*, a seconda della velocità dei neutroni che provocano la fissione: nei reattori veloci i neutroni sono utilizzati così come sono prodotti nella fissione<sup>(21)</sup>, mentre nei reattori termici sono rallentati fino all'energia termica e in quelli intermedi sono rallentati fino a un'energia intermedia. Le curve "spettro reattore termico" e "spettro reattore veloce" di figura 11 b) mostrano le distribuzioni di velocità dei neutroni tipiche, rispettivamente, in un reattore termico e in un reattore veloce.

Come vedremo più avanti, il processo di rallentamento dei neutroni, o *moderazione*, è auspicabile in un reattore a uranio naturale e viene artificialmente favorito, introducendo nel reattore elementi leggeri che rallentano i neutroni senza assorbirli. Infatti la fissione dell' $^{235}\text{U}$  è favorita se i neutroni sono relativamente lenti. Inoltre i neutroni lenti sono meno facilmente assorbiti nell' $^{238}\text{U}$ , che non è fissile ed è 140 volte più abbondante dell' $^{235}\text{U}$ , che è fissile.

La maggior parte dei reattori esistenti sono reattori termici e perciò, nel seguito, ci riferiremo di norma a questo tipo di reattori.

### 2.3.2 Il reattore nucleare termico

Come detto poco sopra, i reattori destinati alla produzione di energia elettrica sono sempre di potenza elevata, dell'ordine fino a qualche GW. L'energia termica sviluppata viene utilizzata in una caldaia per produrre vapore di acqua o gas ad alta temperatura. Questo viene poi utilizzato in una turbina per produrre energia meccanica, che a sua volta viene trasformata in energia elettrica tramite trasformatori, come avviene negli impianti alimentati con combustibili fossili.

La parte del reattore dove si sviluppa la reazione nucleare e si produce energia è detta "nocciolo" (*core*, in inglese) ed è sempre riconducibile, nonostante vi siano attualmente nel mondo vari tipi di reattori in funzione, al medesimo schema di base, sostanzialmente costituito da quattro componenti: il combustibile, il moderatore, l'assorbitore e il refrigerante.

<sup>(20)</sup> A temperatura ambiente ( $T = 293\text{ K}$ ), l'energia cinetica media in una molecola di un gas ideale monoatomico è  $E = 3/2 kT = 6,07 \cdot 10^{-21}\text{ J} = 0,038\text{ eV}$ , dove  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}\text{ J/K}$  è la costante di Boltzman.

<sup>(21)</sup> In un reattore veloce i neutroni che producono la fissione hanno un'energia di diverse centinaia di keV, mentre l'energia media dei neutroni di fissione è di circa 1 MeV. La degradazione di energia nel corso della vita dei neutroni è dovuta a collisioni inelastiche con i nuclei del combustibile, del materiale strutturale e del refrigerante.

Molto spesso il mezzo che funge da moderatore viene anche utilizzato come refrigerante.

- 1) Il **combustibile**: componente, quasi sempre allo stato solido, costituito da elementi fissili (uranio, plutonio, torio). Nel combustibile avviene la reazione di fissione e la maggior parte della trasformazione dell'energia di fissione in energia termica, nonché la trasmutazione dei nuclei pesanti.

L'unico elemento esistente in natura che può fissionare alle più basse energie del neutrone è l' $^{235}\text{U}$ , che però costituisce solo lo 0,7110% dell'uranio naturale, come estratto dalle miniere, la parte restante è essenzialmente costituita dall'isotopo  $^{238}\text{U}$  (99,2745%). Questa percentuale non è, in generale, sufficiente per mantenere una reazione a catena e, quindi, come combustibile si usa frequentemente uranio arricchito nell'isotopo  $^{235}\text{U}$  fino a percentuali tra il 3% e il 5% in peso, sotto forma di pastiglie di ossido  $\text{UO}_2$  (*pellet*) di circa 1 cm di raggio, a loro volta contenute in tubi metallici cilindrici lunghi qualche metro (*barre di combustibile*).

- 2) Il **moderatore/refrigerante**: in un reattore termico la funzione del *moderatore* è di rallentare i neutroni rilasciati dalla fissione in modo che essi possano continuare più facilmente a sostenere la reazione a catena.

La funzione del *refrigerante* è di rimuovere l'energia termica prodotta nella fissione e di cederla a uno scambiatore di calore in cui si produce il vapore che serve ad azionare la turbina a vapore (*generatore di vapore*).

Le sostanze usate come moderatore devono contenere atomi di basso peso atomico, ciò perché i neutroni non perdono molta energia se urtano nuclei molto più pesanti (vedi approfondimento "Il rallentamento dei neutroni"), e avere una piccola probabilità di assorbimento per neutroni veloci e lenti. In pratica, per questa funzione, vengono usate acqua, acqua pesante (ossia ricca di deuterio) e grafite. Nei primi due casi il moderatore può coincidere con il refrigerante.

Il moderatore manca nei reattori veloci.

- 3) L'**assorbitore**: nella reazione a catena la moltiplicazione dei neutroni tra due successive reazioni di fissione può essere controllata mescolando al moderatore una sostanza (come il boro, il cadmio, ecc.) che assorbe i neutroni senza fissionare: tanto maggiore è la quantità di assorbitore introdotto, tanto minore è la moltiplicazione dei neutroni e tanto più lento è lo sviluppo della reazione a catena.

Se il numero di neutroni cresce, in media, sempre tra una fissione e la successiva, la potenza sviluppata tende ad aumentare; se decresce, la potenza tende a diminuire; se resta costante, la potenza è costante nel tempo.

L'assorbitore viene usualmente inserito in tubi cilindrici lunghi qualche metro (*barre di controllo*). La quantità di assorbitore effettiva, e quindi lo sviluppo della reazione, può essere variata aumentando o diminuendo, con movimenti meccanici, la lunghezza della barre di controllo immerse nel moderatore.

Il nocciolo è circondato dal *riflettore*, materiale (generalmente grafite o acqua o berillio) che riflette indietro la maggior parte dei neutroni diretti verso l'esterno, diminuendo così le fughe di neutroni attraverso la superficie del nocciolo.

Il nocciolo e il riflettore sono contenuti all'interno di uno spesso recipiente di acciaio a pressione, chiamato *vessel*.

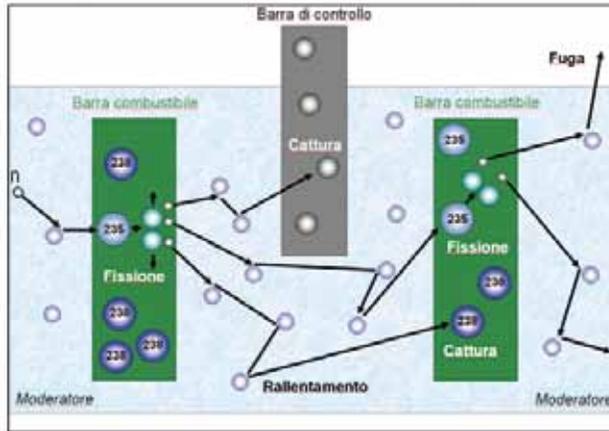


Fig. 12. - Descrizione schematica del nocciolo di un reattore: sono mostrate le barre di combustibile (rettangoli verdi) e quelle di controllo (rettangoli grigi) immerse nel materiale moderatore (celeste). Le sfere con i numeri 235 e 238 rappresentano i nuclei degli isotopi  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$ ; quelle con bordo celeste i frammenti di fissione; quelle con bordo viola e grigio sono i nuclei del moderatore e dell'assorbitore. Le palline bianche più piccole rappresentano i neutroni. Le frecce indicano il percorso dei neutroni, che cambia di direzione a causa degli urti con i nuclei dei vari materiali attraversati.

L'evoluzione della reazione a catena tra due successive fissioni nel nocciolo è mostrata schematicamente in figura 12 dove il nocciolo è rappresentato come una piscina di acqua nella quale sono immerse sia le barre di combustibile che le barre di controllo. Un neutrone prodotto da precedenti fissioni urta un nucleo di  $^{235}\text{U}$  fissionandolo in due frammenti carichi che vengono arrestati, a causa della interazione elettrica con gli elettroni atomici, in pochi millesimi di millimetro. La maggior parte dell'energia liberata nella fissione si manifesta come energia cinetica dei frammenti che, in seguito al frenamento, si trasforma a sua volta in energia termica con un meccanismo assai simile a quello che, nella brusca frenata di un'automobile, riscalda terreno e gomme: il risultato finale è quindi un riscaldamento della barra di combustibile. L'energia termica qui prodotta viene trasportata all'esterno del nocciolo in modo che possa essere utilizzata, in una caldaia, per la produzione di vapore. Il vapore viene poi utilizzato in una turbina per produrre energia meccanica che è successivamente trasformata in energia elettrica mediante alternatori.

Nella fissione vengono emessi anche due/tre neutroni veloci, che fuoriescono dalle barre di combustibile senza rallentamento e vengono tutti rallentati dal moderatore di acqua. Essi possono seguire cammini diversi, come è mostrato in figura 12:

- Cattura da parte dei nuclei contenuti nella barra di controllo, con conseguente eliminazione del neutrone dalla reazione a catena.
- Urto con un nucleo di  $^{235}\text{U}$  in un'altra barra, che provoca una seconda fissione con emissione di una generazione successiva di neutroni e prosecuzione della reazione a catena.
- Urto con un nucleo di  $^{238}\text{U}$ , che dà luogo, mediante cattura, alla formazione di nuclei radioattivi più pesanti dell'uranio, con vite medie lunghissime, anche di milioni di anni, i cosiddetti *attinidi minori*.
- Cattura nei materiali strutturali del reattore.
- Fuga dal volume del nocciolo.

I frammenti di fissione e gli attinidi minori sono nuclei radioattivi che restano di norma all'interno della guaina della barra di combustibile, anche quando questa è esaurita, e costituiscono buona parte delle cosiddette *scorie radioattive*.

In condizioni normali di funzionamento (*reattore critico*) il numero dei neutroni di una generazione eguaglia quello dei neutroni della generazione precedente e la potenza erogata è costante. Questa condizione viene realizzata, per qualsiasi livello di potenza termica, solo per un definito rapporto tra la massa del combustibile, quella del moderatore e quella dell'assorbitore, ovvero della parte immersa delle barre di controllo.

Per diminuire (aumentare) il livello di potenza basta rendere il reattore sottocritico (sovra-critico) abbassando (alzando) leggermente le barre di controllo nel moderatore in modo da aumentare (diminuire) l'assorbimento, salvo riportarle al livello di criticità iniziale non appena raggiunta la potenza voluta.

---

### APPROFONDIMENTO: Il rallentamento dei neutroni

---

Nell' $^{235}\text{U}$  la probabilità di fissione indotta da neutroni termici è circa 600 volte più grande che da neutroni veloci. Poiché i neutroni prodotti in una fissione sono veloci, è evidente che per produrre la reazione a catena conviene rallentarli fino a farli diventare termici, in modo che abbiano una maggiore probabilità di produrre nuove fissioni. Il rallentamento si ottiene facendo diffondere i neutroni attraverso una sostanza di basso peso atomico, ai cui nuclei essi cedono la loro energia cinetica in una serie di urti elastici. Se la massa del nucleo urtato è confrontabile con quella del neutrone, questo deflette e perde velocità, che viene invece acquistata dal nucleo bersaglio, come avviene a una palla da tennis che colpisce un'altra palla da tennis; se invece il nucleo urtato ha massa molto più grande, il neutrone viene rimbalzato praticamente senza perdere energia, come avviene a una palla da tennis che colpisce una boccia da bowling (vedi figura 13).

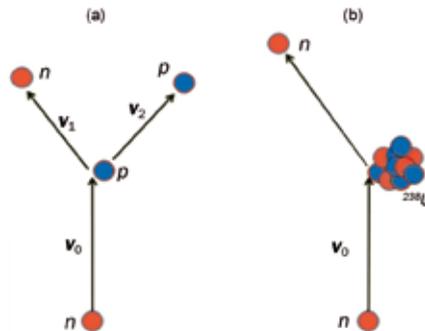
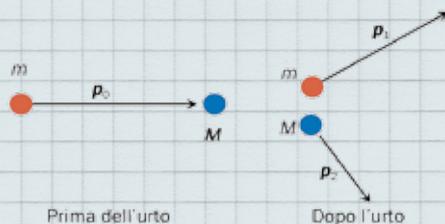


Fig. 13. – a) Urto elastico di un neutrone con un nucleo di idrogeno (protone) che ha massa leggermente inferiore: nell'urto le due particelle si ripartiscono l'energia in parti quasi uguali. b) Urto elastico del neutrone con un nucleo molto più pesante (uranio): il neutrone rimbalza perdendo solo una piccola frazione della sua energia.

Poiché l'uranio ha massa molto grande, oltre 200 volte quella del neutrone, gli urti all'interno delle barre di combustibile non rallentano i neutroni, che vengono quindi fatti viaggiare, tra una fissione e l'altra, in un mezzo contenente idrogeno, il cui nucleo, il protone, ha massa leggermente inferiore e dimezza, in media, a ogni urto l'energia dei neutroni (vedi Esempio 23).

**Esempio 23:** Consideriamo l'urto elastico di una biglia di massa  $m$ , che si muove con velocità  $v$ , contro un'altra biglia ferma di massa  $M$ . Calcolare le velocità  $v_1$  e  $v_2$  delle due biglie dopo l'urto (si consideri il sistema delle due biglie isolato).

**Soluzione:** Il moto delle due biglie si svolge su un piano. Chiamiamo  $p_0, p_1$  e  $T_0, T_1$  la quantità di moto e l'energia cinetica della biglia di massa  $m$  prima e dopo l'urto e  $p_2$  e  $T_2$  le corrispondenti grandezze della biglia di massa  $M$  (vedi la figura seguente).

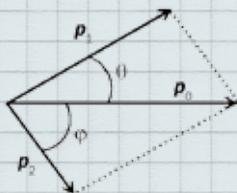


Nel caso di velocità molto minori della velocità della luce  $c$ , possiamo trascurare le correzioni relativistiche e scrivere:  $T_0 = p_0^2/2m$ ,  $T_1 = p_1^2/2m$  e  $T_2 = p_2^2/2M$ . Applicando i principi di conservazione dell'energia e della quantità di moto (per ipotesi il sistema delle due biglie è isolato) si ha

$$T_0 = T_1 + T_2,$$

$$p_0^2 = p_1^2 + p_2^2 - 2p_1 p_2 \cos\theta.$$

L'ultima relazione è illustrata, in forma vettoriale, nella figura seguente:



Utilizzando la relazione tra energia cinetica e quantità di moto, l'ultima equazione si può riscrivere

$$mT_1 = mT_0 + MT_2 - 2(mT_0 MT_2)^{1/2} \cos\theta.$$

Eliminando  $T_1$  si ha

$$m(T_0 - T_2) = mT_0 + MT_2 - 2(mT_0 MT_2)^{1/2} \cos \vartheta ,$$

che si semplifica a

$$T_2 (m + M) = 2(m M T_0 T_2)^{1/2} \cos \vartheta .$$

Elevando al quadrato e dividendo entrambi i membri per  $(m + M)^2 T_0 T_2$ , si ottiene

$$\frac{T_2}{T_0} = \frac{4mM}{(m + M)^2} \cos^2 \vartheta .$$

Da cui segue che la frazione di energia ceduta alla biglia di massa  $M$  è massima per  $\vartheta = 0$  (urto centrale) e vale

$$\frac{T_2}{T_0} = \frac{4mM}{(m + M)^2}$$

Si vede facilmente che questa espressione è massima nel caso in cui le due biglie hanno massa uguale,  $m = M$ . Quindi la massima perdita di energia che può subire un neutrone è quella che si ha nell'urto centrale contro un nucleo di idrogeno (protoni). L'energia ceduta in un urto centrale decresce rapidamente al crescere della massa  $M$  della biglia bersaglio, come risulta dalla seguente Tabella:

Nucleo urtato	$^1\text{H}$	$^2\text{H}$	$^4\text{He}$	$^{12}\text{C}$	$^{238}\text{U}$
$M/m$	1	2	4	12	238
$T_2/T_0$	1	0,89	0,64	0,28	0,017

Nel caso particolare di urto di un neutrone contro un protone ( $m = M$ ) gli angoli  $\vartheta$  e  $\varphi$  sono complementari ( $\vartheta + \varphi = 90^\circ$ ) e risulta:

$$\frac{T_2}{T_0} = \cos^2 \vartheta = \sin^2 \varphi ,$$

$$\frac{T_1}{T_0} = \sin^2 \vartheta = \cos^2 \varphi .$$

### Quadro 8: REATTORI NUCLEARI

I reattori nucleari sono impianti per produrre in condizioni controllate reazioni di fissione per generare energia da destinarsi all'utilizzazione industriale (produzione di elettricità, propulsione di sottomarini e grandi navi, riscaldamento, impianti di dissalazione dell'acqua marina o salmastra), oppure per scopi medici o di ricerca.

Vi sono molti tipi di reattori nucleari in funzione nel mondo. In tutti il nocciolo, che è la parte in cui si sviluppa la reazione a catena e si produce energia termica, è riconducibile al medesimo schema di base costituito dai seguenti componenti: il combustibile nucleare, il moderatore (per rallentare i neutroni veloci di fissione all'energia ottimale per indurre altre fissioni), l'assorbitore di neutroni (per permettere il controllo della velocità di svolgimento della reazione a catena) e il refrigerante (per estrarre dal nocciolo l'energia termica prodotta).

Attualmente circa l'85% dei reattori nucleari sono reattori che usano uranio-235 come combustibile e acqua come moderatore e refrigerante.

All'interno di un reattore nucleare non si ha mai la fissione totale di tutto il combustibile nucleare, anzi la quantità di atomi fissili effettivamente coinvolta nella reazione a catena è molto bassa (tipicamente solo l'1-2% circa).

Le reazioni nucleari che avvengono nel reattore generano due principali categorie di nuovi elementi radioattivi:

- Una quota di elementi trasmutati, che hanno catturato uno o più neutroni senza spezzarsi e si sono dunque appesantiti (si tratta di elementi facenti parte del gruppo degli "attinidi").
- Una parte di cosiddetti prodotti di fissione, cioè di atomi che sono stati effettivamente spezzati dalla fissione e sono pertanto molto più leggeri dei nuclei di partenza. Alcuni di questi elementi sono allo stato gassoso.

Entrambe queste categorie di materiali, accumulandosi, tendono ad impedire il corretto svolgersi della reazione a catena e pertanto periodicamente (tipicamente ogni 3 anni) il combustibile deve essere estratto dai reattori ed eventualmente ripulito ("riprocessamento") per essere riutilizzato.

Il materiale estratto dal reattore dopo l'uso ("combustibile esausto" o "spento"), costituisce le scorie radioattive. (Per saperne di più, vedi i par. 2.4 e 2.7.)

### 2.3.3 Tipi di reattori nucleari

Una classificazione logica di tutti i possibili reattori nucleari è molto problematica e non esente da critiche. Riferendosi ai reattori che hanno raggiunto la commercializzazione, si fa solitamente riferimento al tipo di moderatore che viene usato e si parla di: *reattori a grafite*, *reattori ad acqua leggera*, *reattori ad acqua pesante* e *reattori senza moderatore* o *reattori veloci*.

La maggior parte degli impianti nucleari esistenti al mondo (circa l'85%) è costituita da reattori ad acqua pressurizzata o PWR (acronimo da *Pressurized Water Reactor*). Questo reattore è caratterizzato dall'avere due circuiti di raffreddamento indipendenti: il primario,

in cui l'acqua circola attraverso il nocciolo del reattore a pressione elevata (70–155 volte la pressione atmosferica), e il secondario, in cui viene generato vapore, a più bassa pressione, che va in turbina.

In figura 14 è riportata schematicamente la configurazione completa di un reattore del tipo ad acqua pressurizzata dal nocciolo fino alle turbine:

- a) L'ingrandimento a sinistra mostra il guscio in acciaio (1) che contiene il nocciolo. Questo è costituito da barre di combustibile (cilindri verdi) e barre di controllo (cilindri grigi), disposte in schiere quadrate, immerse in acqua mantenuta ad alta pressione, per evitare l'ebollizione alle temperature elevate raggiunte dal combustibile. Le barre di controllo possono essere inserite nel nocciolo più o meno profondamente per controllare la velocità della reazione nucleare. In caso di incidente, o semplicemente per sostituire il combustibile, tutte le barre di controllo vengono inserite completamente nel nocciolo in modo da bloccare la reazione.
- b) L'acqua (2) funge da moderatore e da refrigerante; serve per rimuovere il calore accumulato dalla reazione a catena nel combustibile. Viene fatta circolare in un circuito interno chiuso attraverso uno scambiatore di calore (3) che genera sul lato secondario vapore ad alta pressione.
- c) Il vapore aziona le turbine (4), generando elettricità, in modo del tutto simile alle centrali a combustibili fossili.
- d) Il vapore delle turbine viene convertito, da un sistema di condensazione (5), nuovamente in acqua per alimentare il generatore di vapore.
- e) L'acqua di raffreddamento del condensatore viene restituita all'ambiente, eventualmente dopo esser passata attraverso una torre di raffreddamento (6), per disperdere il calore nell'atmosfera.

L'impianto a valle del reattore nucleare (contenitore del nocciolo) è del tutto simile a quello di un qualsiasi impianto termoelettrico, che brucia carbone o gas o petrolio per produrre vapore.

Il recipiente in pressione del reattore è comunemente ospitato all'interno di un sarcofago di calcestruzzo, di qualche metro di spessore, che serve come protezione dalle radiazioni. Il sarcofago è a sua volta racchiuso all'interno di una struttura di contenimento di calcestruzzo rinforzato con acciaio, concepita per prevenire perdite di gas o di liquidi radioattivi.

Le diverse filiere cui appartengono gli oltre 400 reattori nucleari di potenza attualmente operativi nel mondo, pur esibendo rilevanti differenze nelle soluzioni tecniche e attuative, funzionano sostanzialmente tutte secondo i principi fisici che abbiamo esposto.

Questo tipo di soluzione fisica, pur fornendo indubbi vantaggi di sicurezza, affidabilità e economicità, presenta tuttavia il problema che il combustibile utilizzato, l'uranio-235, costituisce solo una piccola parte in peso dell'uranio naturale (formato per il 0,7% da  $^{235}\text{U}$  e per il 99,3% da  $^{238}\text{U}$ ) il che comporta alcune conseguenze negative:

- Nonostante le grandi riserve naturali di uranio, la disponibilità di  $^{235}\text{U}$  è molto più limitata e potrebbe portare, nel caso di un forte incremento nell'utilizzo dell'energia nucleare, se non all'esaurimento, a una crescita nei prezzi di questo minerale.
- Nei reattori di potenza, anche se arricchiti, l' $^{238}\text{U}$  costituisce la parte dominante (dal 93% al 95%) nelle barre di combustibile. Come detto più sopra (vedi l'Approfondimento "La cattura di neutroni su uranio"), la probabilità per fissione di questo nucleo

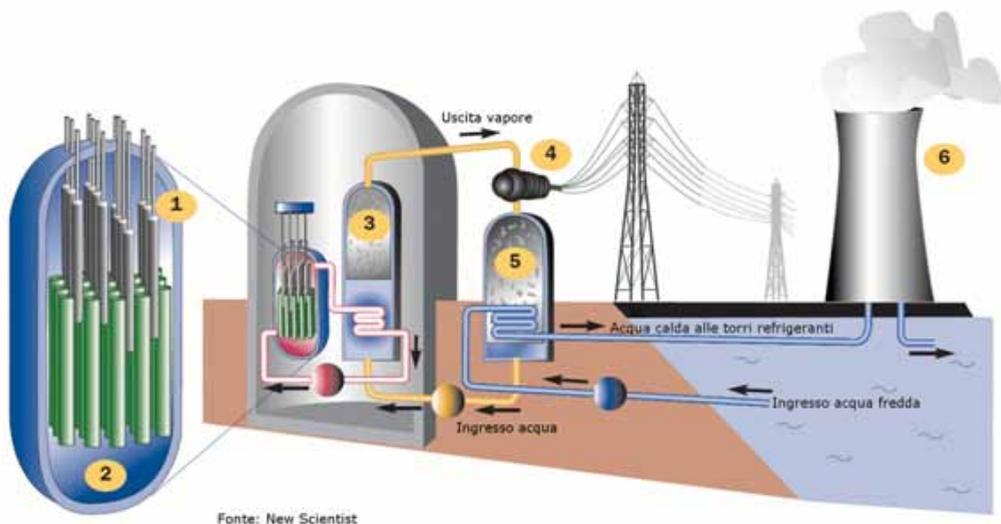


Fig. 14. – Configurazione completa di un impianto nucleare di potenza ad acqua pressurizzata (PWR). Il reattore nucleare è costituito dal recipiente a pressione (guscio azzurro (1) mostrato ingrandito a sinistra) che contiene le barre di combustibile (cilindri verdi), le barre di controllo (cilindri grigi) e l'acqua in pressione (2). L'acqua, che funge da refrigerante e moderatore, passa attraverso lo scambiatore di calore (3), detto generatore di vapore, dove comunica il proprio calore a un circuito di vapore secondario che funziona a un livello di pressione più basso. All'esterno della struttura di protezione in calcestruzzo rinforzato con acciaio (guscio grigio), il vapore prodotto si espande in una turbina, che a sua volta muove un generatore di corrente (4). Il vapore è poi condensato nel condensatore (5) e ripompato nello scambiatore di calore per chiudere il circuito. La torre di raffreddamento (6) disperde nell'atmosfera il calore in eccesso dell'acqua di raffreddamento utilizzata nel condensatore.

è diversa da zero solo a energie più elevate di quelle in media disponibili nel reattore, ma quella di cattura è grande a tutte le energie del neutrone, soprattutto alle più basse. Nel loro percorso di rallentamento i neutroni non hanno quindi energia sufficiente per fissionare questo nucleo, ma possono venire da esso catturati (vedi figura 12) col doppio risultato di venire rimossi dal processo di fissione su  $^{235}\text{U}$  e creare nuovi isotopi radioattivi più pesanti dell'uranio con vite medie lunghissime (attinidi minori). Di questi il più abbondante è il plutonio ( $^{239}\text{Pu}$ ), che può costituire a sua volta un combustibile molto efficace e quindi anche di elevato interesse economico e strategico (vedi l'approfondimento "La cattura di neutroni su uranio").

A questi inconvenienti si può, almeno in parte, ovviare utilizzando un processo fisico diverso. Restando nello schema di figura 12, si può usare un metallo liquido (per es. sodio o piombo liquido) sia come refrigerante che come mezzo di trasmissione dell'energia termica: in questo materiale i neutroni vengono deflessi, ma poco rallentati (vedi approfondimento "Rallentamento dei neutroni") restando nell'intervallo di energia (qualche MeV) nel quale vengono prodotti. A queste energie fissionano sia  $^{235}\text{U}$  che  $^{238}\text{U}$ , se pur quest'ultimo con minore probabilità. Se si aumenta l'arricchimento di  $^{235}\text{U}$  fino a valori del 20% o oltre si possono costruire reattori di potenza confrontabile con quelli termici.

Questo sistema può presentare alcuni vantaggi rispetto al reattore convenzionale termico:

- Il numero di neutroni prodotti in ciascuna fissione veloce è più elevato, ben superiore

a due (vedi figura 11): in media, tenendo conto anche delle perdite, un neutrone è utilizzato per alimentare la reazione a catena e un altro per produrre, mediante cattura sull' $^{238}\text{U}$ , il plutonio, che è a sua volta combustibile e può essere bruciato nel reattore. Questo tipo di reattore, oltre a fissionare l' $^{238}\text{U}$ , può quindi anche produrre combustibili artificiali in quantità almeno pari a quello bruciato (*autofertilizzazione*).

- I restanti attinidi minori (nettunio, americio e curio) a vita media lunghissima (fino a milioni di anni) possono, a queste energie del neutrone, essere a loro volta fissionati e trasformati in frammenti di fissione, cioè nuclei ancora radioattivi ma più leggeri e a vita media molto più breve (decine/centinaia di anni).

I reattori a metallo liquido hanno un altro vantaggio: contrariamente a quelli raffreddati ad acqua che operano ad alta pressione, essi operano a pressione atmosferica e quindi assicurano perdite minori del refrigerante in caso di guasti alle tubature.

Questi reattori, di cui esistono nel mondo solo pochi prototipi in funzione e il cui ulteriore sviluppo è oggetto di intense attività di ricerca e sviluppo, potrebbero in futuro (“Generazione IV”) ridurre fortemente il consumo di uranio naturale e bruciare le proprie scorie radioattive a lunghissima vita media trasformandole in residui a vita media più breve, la cui custodia appare molto più semplice.

## APPROFONDIMENTO: Le generazioni di reattori nucleari

Ripercorrendo la storia ormai cinquantennale della tecnologia nucleare si possono individuare diverse generazioni di reattori:

**Generazione I:** è quella degli anni Cinquanta e Sessanta dello scorso secolo, che vide la costruzione e la sperimentazione di molti prototipi delle più varie concezioni. In Italia hanno funzionato tre centrali di Generazione I: Latina (GCR-210 MW<sub>e</sub><sup>(22)</sup>), Garigliano (BWR-160 210 MW<sub>e</sub>) e Trino Vercellese (PWR-270 MW<sub>e</sub>).

**Generazione II:** nei successivi anni Settanta e Ottanta si vide la costruzione di un gran numero di centrali commerciali per la produzione di energia elettrica, in massima parte ad uranio arricchito ed acqua naturale (pressurizzata o bollente). È dai reattori di questa generazione che attualmente proviene la maggior parte dell'energia elettronucleare mondiale. In Italia ha funzionato la centrale di Generazione II di Caorso (BWR-800 MW<sub>e</sub>).

**Generazione III:** è costituita da reattori già certificati e disponibili sul mercato. Comprende innanzi tutto i reattori avanzati ad acqua naturale, alcuni già in funzione in Giappone, come l'*Advanced Boiling Water Reactor* (ABWR da 1400 MW<sub>e</sub> progettato da General Electric e Toshiba), altri in fase di costruzione o ordinazione, come lo *European Pressurized Water Reactor*

<sup>(22)</sup> Usualmente la potenza elettrica di un reattore nucleare viene espressa in megawatt elettrici, MW<sub>e</sub>, per distinguerla dalla potenza termica, che rappresenta la quantità di calore generata per unità di tempo. Questa è usualmente espressa in megawatt termici MW<sub>th</sub>. In un reattore ad acqua leggera (LWR) l'efficienza di trasformazione dell'energia termica in elettricità è pari a circa il 33%; pertanto un impianto con una potenza termica di circa 3300 MW<sub>th</sub> ha una potenza elettrica di 1000 MW<sub>e</sub>.

(EPR) da 1.600 MW<sub>e</sub>, fornito dalla franco-tedesca AREVA (il primo esemplare di EPR entrerà in funzione in Finlandia nel 2012, altri sono in fase di approntamento (Flamanville, in Francia, e Taishan, in Cina) o di trattativa commerciale in Europa, in Asia e nel Medio Oriente).

**Generazione III+ o *International Near Term Deployment (INTD) Reactors*:** è una classe di reattori evolutivi rispetto ai precedenti che si prevede siano disponibili entro il 2015. Fra essi si citano l'*Advanced CANDU Reactor* (ACR), in corso di certificazione in Canada, Cina, Stati Uniti e Regno Unito; i reattori refrigerati a gas ad alta temperatura come il *Pebble Bed Modular Reactor* (PBMR), reattore modulare refrigerato a gas da 100 MW<sub>e</sub> sviluppato in Sud Africa.

Una menzione particolare fra i reattori di questa generazione merita l'*International Reactor Innovative & Secure* (IRIS), sviluppato da un ampio consorzio internazionale guidato da Westinghouse con il sostanziale apporto di università e industrie italiane. IRIS è un reattore modulare ad acqua pressurizzata da 335 MW<sub>e</sub>, con circuito primario e generatori di vapore disposti all'interno del contenitore a pressione. Tale peculiarità consente notevoli riduzioni delle dimensioni del sistema di contenimento e, di conseguenza, la possibilità di collocare tali reattori in caverna o nel sottosuolo, un'idea del passato che potrebbe ridiventare attuale in tempi di crescente preoccupazione per gli attacchi terroristici.

In sintesi, caratteristiche tipiche per i reattori di Generazione III e III+ sono:

- un progetto standardizzato che abbrevi le procedure di approvazione e riduca i tempi ed i costi di costruzione;
- alta disponibilità e lunga vita utile (tipicamente, 60 anni);
- presenza di dispositivi di sicurezza di tipo “intrinseco” o “passivo”;
- flessibilità nella composizione del combustibile (uranio naturale e a vari arricchimenti, miscele uranio-plutonio, quest'ultimo anche proveniente dallo smantellamento di armi nucleari) e sua alta “utilizzabilità” (*burn-up*), al fine di distanziare nel tempo le ricariche di combustibile.

**Generazione IV:** sono reattori ancora allo stadio concettuale. Essi sono oggetto di una iniziativa avviata nel gennaio 2000, allorquando dieci Paesi formarono il “*Generation IV International Forum*” (GIF) col fine di sviluppare i sistemi nucleari di futura generazione, cioè i sistemi che potranno divenire operativi fra 20 o 30 anni, affiancando e/o subentrando all'attuale generazione di reattori a neutroni termici refrigerati ad acqua. I sistemi nucleari di quarta generazione dovranno rispettare i seguenti requisiti:

- sostenibilità, ovvero massimo utilizzo del combustibile e minimizzazione dei rifiuti radioattivi;
- economicità, ovvero basso costo del ciclo di vita dell'impianto e livello di rischio finanziario equivalente a quello di altri impianti energetici;
- sicurezza e affidabilità; in particolare i sistemi di quarta generazione dovranno avere: una bassa probabilità di danni gravi al nocciolo del reattore e tollerare anche gravi errori umani; non dovranno richiedere piani di emergenza per la difesa della salute pubblica, non essendoci uno scenario credibile per il rilascio di radioattività fuori dal sito; dovranno, inoltre, assicurare una resistenza alla proliferazione nucleare e una protezione fisica contro attacchi terroristici.

Nella Tabella VII sono riportate per comodità le sigle di alcuni reattori nucleari.

Tab. VII. – Sigle di alcuni reattori nucleari.

ACR	<i>Advanced CANDU Reactor</i> , reattore canadese a uranio e deuterio.
AGR	<i>Advanced Gas-Cooled Reactor</i> , reattore avanzato raffreddato a gas.
AP600	<i>Advanced Passive-600 pressurized water Reactor</i> , reattore avanzato ad acqua in pressione.
AP1000	<i>Advanced Passive-1000 pressurized water Reactor</i> , reattore avanzato ad acqua in pressione.
BWR	<i>Boiling Water Reactor</i> , reattore ad acqua bollente.
CANDU	<i>CANAdian Deuterium Uranium Reactor</i> , reattore a uranio e deuterio di tipo canadese.
EPR	<i>Evolutionary Pressurized Reactor</i> , reattore evolutivo di potenza.
GCR	<i>Gas Cooled Reactor</i> , reattore raffreddato a gas
HTGR	<i>High Temperature Gas Reactor</i> , reattore ad alta temperatura raffreddato a gas.
HTR	<i>High Temperature Reactor</i> , reattore ad alta temperatura.
HWR	<i>Heavy Water Reactor</i> , reattore ad acqua pesante.
IRIS	<i>International Reactor Innovative and Secure</i> , reattore internazionale, innovativo e sicuro.
LFR	<i>Lead-cooled Fast Reactor</i> , reattore veloce refrigerato con piombo fuso o con la lega piombo-bismuto.
LMFBR	<i>Liquid Metal Fast Breeder Reactor</i> , reattore autofertilizzante veloce raffreddato con sodio liquido.
LWR	<i>Light Water Reactor</i> , reattore moderato e raffreddato ad acqua leggera normale.
MSBR	<i>Molten Salt Breeder Reactor</i> , reattore autofertilizzante con il combustibile contenuto in una massa di sale fuso.
PBMR	<i>Peeble Bed Modular Reactor</i> , reattore modulare a letto di sfere.
PBR	<i>Peeble Bed Reactor</i> , reattore a letto di sfere.
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i> , reattore ad acqua in pressione.
PHWR	<i>Pressurized Heavy Water Reactor</i> , reattore ad acqua pesante in pressione.
VVER	<i>Vodo-Vodjanoi Energetičesky Reactor</i> , versione Russa dei reattori PWR ad acqua in pressione.

### Quadro 9: EVENTI STORICI DELLA FISSIONE NUCLEARE

- 1934: Irène Curie e Frédéric Joliot scoprono nuovi elementi radioattivi ottenuti bombardando elementi non radioattivi con particelle  $\alpha$ .
- Nello stesso anno Enrico Fermi, con i suoi collaboratori a Roma, scopre l'efficacia dei neutroni lenti (rallentati tramite acqua o paraffina) nel provocare reazioni nucleari.
- Gennaio 1939: Otto Hahn e Fritz Strassman a Berlino scoprono la produzione di bario radioattivo ( $Z = 56$ ) a seguito di bombardamento di uranio con neutroni.
- Poche settimane dopo: Lise Meitner e Otto Frisch a Stoccolma interpretano il fenomeno come fissione del nucleo di uranio.
- 2 dicembre 1942: Enrico Fermi e i suoi collaboratori ottengono a Chicago la prima reazione a catena autosostenuta.
- 1943: A Oak Ridge, in Tennessee (USA), entra in operazione il primo reattore nucleare per produzione di energia (1000 kW).
- 16 luglio 1945: Esplosione della prima bomba atomica a Alamogordo in New Mexico (USA).
- 6 agosto 1945: Lancio della bomba atomica "Little Boy" sulla città giapponese di Hiroshima, seguita tre giorni dopo dal lancio della bomba "Fat Man" su Nagasaki, pure in Giappone.
- 1954: La marina degli Stati Uniti vara il *Nautilus*, primo sottomarino a propulsione nucleare.
- 1956: A Calder Hall, in Inghilterra, entra in servizio la prima centrale nucleare commerciale, seguita da Shippingport, negli USA, nel 1957.
- 1964: Entra in funzione a Trino Vercellese la prima centrale nucleare italiana.
- 29 marzo 1979: Incidente nella centrale nucleare di Three Mile Island in Pennsylvania (USA). Il surriscaldamento del reattore provocò la parziale fusione del nocciolo rilasciando nell'atmosfera gas radioattivi pari a 15000 TBq.
- 26 aprile 1986: Incidente di Chernobyl in Ucraina. Il surriscaldamento del reattore provocò la fusione del reattore e l'esplosione del vapore radioattivo. Fu proiettata in atmosfera una nube di materiale radioattivo pari a circa 800 volte la radioattività rilasciata nell'incidente di Three Mile Island.
- 8-9 novembre 1987: Si svolge in Italia il referendum per l'abrogazione di alcune disposizioni legislative atte a favorire gli insediamenti di impianti energetici a carbone e nucleari previsti dal "Piano energetico nazionale 1985-1986". Le tre norme poste in votazione furono abrogate a larga maggioranza dei votanti. (vedi Appendice B).
- Negli anni seguenti, il Parlamento Italiano interpretò il risultato del referendum, con decreti e atti governativi successivi, per chiudere le centrali nucleari del Paese.
- 1987–2010: Dall'incidente di Chernobyl c'è stato, nel mondo, quasi un raddoppio dell'energia nucleare annua prodotta, nonostante che in questo periodo la costruzione di nuove centrali, specialmente nei Paesi del mondo occidentale, si sia fortemente rallentata. Tuttavia, al tempo stesso, in molti impianti esistenti c'è stato sia un aumento di potenza sia, soprattutto, un netto aumento delle ore di funzionamento annuo.
- Gennaio 2010: A questa data sono in funzione nel mondo 438 impianti elettronucleari, per una potenza complessiva di circa 370 GW<sub>e</sub>. (vedi Tabella 9) e con una produzione annua di circa 2700 TWh, corrispondente a circa il 16% del fabbisogno elettrico mondiale. Nei 27

Stati dell'Unione Europea la fonte nucleare è la fonte più importante per la produzione di energia elettrica (circa il 33% del fabbisogno) .

- Attualmente circa il 14% del fabbisogno elettrico Italiano è di origine nucleare, importato da Francia, Svizzera e Slovenia.

## 2.4 Il ciclo del combustibile

Ogni tre anni circa i reattori nucleari vengono fermati e il 25–30% delle barre di combustibile bruciato viene rimosso e collocato in piscine di decadimento, adiacenti al reattore, finché la maggior parte della radioattività a emivita breve è svanita (tipicamente per 5–10 anni). Ciò che resta costituisce le cosiddette scorie radioattive: di queste il 95% è costituito da materiali a bassa e media attività, per la maggior parte  $^{238}\text{U}$ , il 5% corrisponde invece a materiali ad alta attività tra cui frammenti di fissione, nuclei radioattivi molto più leggeri dell'uranio e nuclei più pesanti dell'uranio, come il plutonio e i cosiddetti attinidi minori (nettunio, americio e curio), questi ultimi a emivita lunghissima<sup>(23)</sup>.

In figura 15 è mostrata quantitativamente l'evoluzione della composizione del combustibile nucleare dopo tre anni di permanenza nel reattore. Complessivamente il combustibile irradiato contiene più del 95% di uranio che non ha subito processi di trasformazione (94,3% di  $^{238}\text{U}$  e 0,8% di  $^{235}\text{U}$ ); questo uranio ha una percentuale di  $^{235}\text{U}$  superiore a quella dell'uranio naturale e può quindi essere ancora utilizzato come combustibile nucleare.

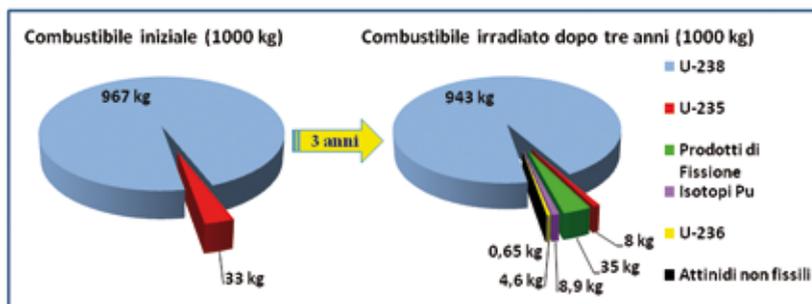


Fig. 15. – Trasformazione della composizione del combustibile nucleare in tre anni di funzionamento in un reattore nucleare. Il combustibile iniziale è costituito da  $^{238}\text{U}$  e  $^{235}\text{U}$  in percentuali rispettivamente del 96,7% e del 3,3%. Nel combustibile irradiato l' $^{238}\text{U}$  scende al 94,3% e l' $^{235}\text{U}$  allo 0,8%. La rimanente frazione è costituita da prodotti di fissione –  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{95}\text{Zr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{95}\text{Kr}$ , ecc. – (pari al 3,5%), vari isotopi del plutonio (0,89%),  $^{236}\text{U}$  (0,46%) e attinidi non fissili (0,065%).

<sup>(23)</sup> Il contributo maggiore alla pericolosità delle scorie è dato dal plutonio (l'80% dopo 300 anni, il 90% dopo 500 anni); seguono gli attinidi minori, che contribuiscono per un ordine di grandezza meno del plutonio ma circa mille volte più dei prodotti di fissione. Di questi particolarmente pericolosi sono alcuni isotopi dello iodio, dello stronzio, del tecnezio e del cesio, data la loro maggiore mobilità nella biosfera e la loro maggiore affinità biologica (vie di ritorno per l'uomo).

Questo fatto ha favorito l'adozione di due diverse modalità di trattamento del combustibile spento: il "ciclo aperto" e il "ciclo chiuso" (vedi figura 16).

Nel caso del ciclo aperto, noto in termine tecnico come ciclo *once-through*, l'uranio è bruciato una sola volta nel reattore e il combustibile esausto viene immagazzinato in depositi geologici. Questo metodo utilizza meno del 2,5% del contenuto in energia dell'uranio, il che comporta la produzione di grandi quantità di combustibile esausto da immagazzinare in condizioni di sicurezza. Entrambi questi inconvenienti possono essere mitigati riciclando il combustibile esausto.

Nel caso del ciclo chiuso il combustibile scaricato dai reattori viene ritrattato chimicamente per recuperare l'uranio e il plutonio presenti che sono riutilizzati per fabbricare combustibile fresco. In tal modo il problema dello smaltimento di materiali ad alta attività si pone solo per i prodotti non riutilizzabili (circa il 3%), le cosiddette scorie ad alta attività, che includono solo i prodotti di fissione e gli attinidi minori.

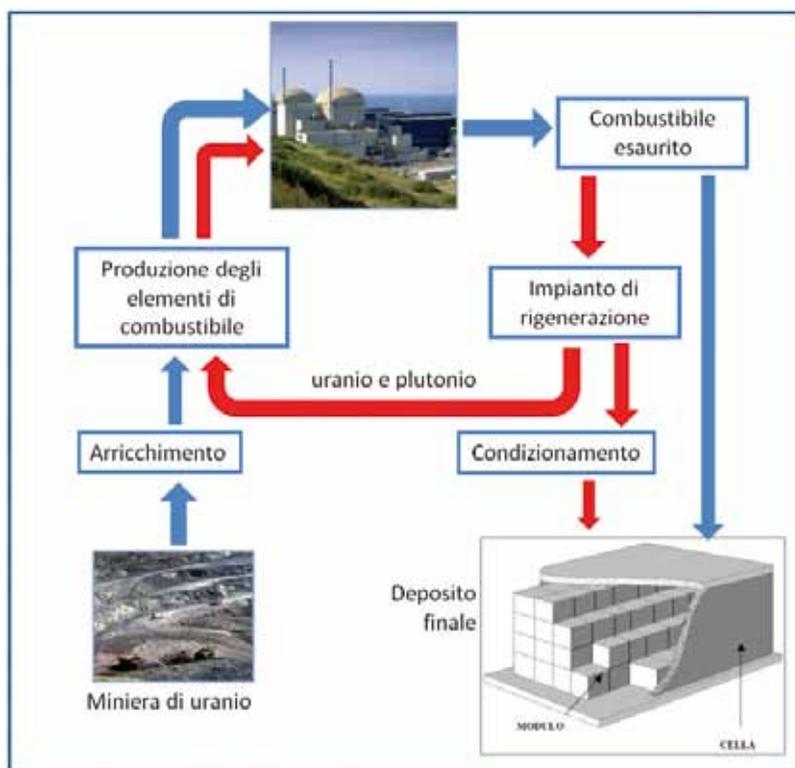


Fig. 16. – Il ciclo del combustibile nucleare comprende tutte le operazioni eseguite sul combustibile nucleare che vanno dall'estrazione del minerale fissile fino all'immagazzinamento delle scorie radioattive. Nel ciclo aperto (frecche blu) l'uranio è estratto dal giacimento, trasformato in materiale fissile, bruciato una sola volta nel reattore e depositato in un sito di smaltimento. Nel ciclo chiuso (frecche rosse) il combustibile esausto è riciclato per estrarne l'uranio e il plutonio da riutilizzare per produrre combustibile fresco. In questo modo si riutilizza il 97% del combustibile nucleare e si riduce la quantità di scorie da immagazzinare nel deposito finale.

### Quadro 10: ENERGIA NUCLEARE

Una centrale elettronucleare non è molto diversa da una centrale termoelettrica a combustibili fossili, l'unica differenza è che per produrre energia “brucia” uranio (o altro materiale fissile) invece che carbone o gas o olio combustibile.

La fissione nucleare è una straordinaria sorgente di energia: la fissione di 1 kg di uranio in un reattore nucleare tipico (reattore LWR a ciclo aperto) libera un'energia equivalente a quella rilasciata da circa 45000 kg di legna, 22000 kg di carbone, 15000 kg di olio combustibile e 14000 kg di gas liquido.

Grazie alla sua alta densità energetica, la fissione nucleare produce una quantità relativamente modesta di rifiuti per unità di energia prodotta. A titolo esemplificativo, dal trattamento degli elementi di combustibile annualmente bruciati in



1 kg di uranio



= 22000 kg di carbone

un reattore moderato e raffreddato ad acqua di 1000 MW<sub>e</sub> (reattore LWR a ciclo chiuso) si ottengono circa 15–35 metri cubi di rifiuti liquidi che, una volta solidificati e condizionati, possono essere ridotti a 2 o 3 metri cubi di rifiuti ad altissima radioattività.

A parità di potenza nominale un impianto nucleare occupa una superficie molto più piccola di quella di un impianto a energia solare (~1/10) o di un impianto a energia eolica (~1/600). Allo stato attuale delle tecnologie e tenendo conto delle efficienze di esercizio e della disponibilità di sole e vento, un impianto nucleare di 900 MW<sub>e</sub> produce in un anno la stessa quantità di energia di 70 chilometri quadrati di pannelli solari o alcune migliaia di mulini a vento.

## 2.5 Riserve naturali di combustibile nucleare e loro utilizzo

Le risorse di uranio nel mondo sono periodicamente valutate da un gruppo di lavoro congiunto della NEA (*Nuclear Energy Agency*<sup>(24)</sup>) e della IAEA<sup>(25)</sup> (*International Atomic Energy Agency*) e riportate nel cosiddetto *Red Book*.

<sup>(24)</sup> La NEA (*Nuclear Energy Agency*, Agenzia Nucleare per l'Energia), è l'Agenzia specialistica dell'OCSE, con sede a Parigi, (<http://www.nea.fr>), che promuove la diffusione tra gli Stati membri delle conoscenze tecnologiche e legali necessarie per l'uso pacifico, economico e sicuro dell'energia nucleare.

<sup>(25)</sup> L'IAEA (*International Atomic Energy Agency*, Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica) è un'Agenzia internazionale autonoma fondata il 29 luglio 1957 (<http://www.iaea.org>), con lo scopo di promuovere l'utilizzo pacifico dell'energia nucleare e di impedirne l'utilizzo per scopi militari.

L'edizione 2007 del *Red Book* indica che le risorse totali “convenzionali” di uranio (dove l'uranio è il prodotto principale dell'estrazione) assommano a circa 16 milioni di tonnellate e si stima che esse siano recuperabili a costi oggi considerati convenienti (fino a 130 \$/kg). Tra queste, le risorse identificate come “certe” ammontano a 5,47 milioni di tonnellate. Per la parte restante, pari ad almeno 10,5 milioni di tonnellate, si tratta di risorse “non scoperte”, “estrapolate” e “pronosticate” le cui stime si basano su investigazioni geologiche limitate o sulla conoscenza geologica delle aree favorevoli.

Accanto a queste risorse convenzionali, ne esistono altre, dette “non convenzionali”, dove l'uranio viene ricavato come sottoprodotto dell'estrazione di altri materiali. Queste risorse sono stimate ammontare a circa 22 milioni di tonnellate. Esse sono associate in particolare a formazioni di fosfati e anch'esse ricadono sotto il limite di costo di 130 \$/kg.

Un'altra fonte potenziale di uranio, praticamente inesauribile, è l'acqua di mare, ove l'uranio è presente in soluzione con una concentrazione di circa 13 mg/m<sup>3</sup>. Si valuta che in questa forma sia disponibile una quantità di uranio pari a circa 4 miliardi di tonnellate. Ricercatori giapponesi hanno già messo a punto una tecnica di separazione mediante la quale sono riusciti a ricavare da acqua di mare l'uranio necessario per il funzionamento per un anno di due centrali nucleari da 1000 MW<sub>e</sub> ciascuna, a costi compresi tra 330 e 620 \$/kg. Si tratta di costi ancora lontani dai valori attuali di mercato, ma non così lontani come lo erano alcuni anni fa.

Fin dalla metà del secolo scorso è stata inoltre presa in considerazione la possibilità di utilizzare come combustibile il torio, elemento radioattivo più abbondante in natura dell'uranio (ce n'è, grosso modo, il triplo dell'uranio). Bombardando con neutroni il torio lo si trasforma in <sup>233</sup>U, elemento fissile che può sostenere reazioni a catena. Nel processo la quantità di scorie prodotte è relativamente limitata. I combustibili a base di torio producono plutonio in quantità minore di quelli a base di uranio e, soprattutto, con composizione isotopica inadatta per la fabbricazione di ordigni bellici. Per questi motivi lo sfruttamento del torio come combustibile nucleare è ritornato in auge in reattori di nuova concezione.

Al tasso attuale di utilizzazione (il fabbisogno mondiale di uranio nel 2006 è stato di 66 529 tonnellate<sup>(26)</sup>), i 5,47 milioni di tonnellate di risorse identificate durerebbero circa 80 anni e quelle totali convenzionali di 16 milioni di tonnellate basterebbero per circa 240 anni. Se vi aggiungiamo le riserve non-convenzionali (22 milioni di tonnellate), la durata totale, sempre al consumo attuale costante, arriverebbe a circa 570 anni.

In effetti appare più che ragionevole prevedere che cambieranno sia il tasso di consumo che l'ampliamento delle risorse disponibili, insieme ad un utilizzo più efficiente delle stesse. In particolare, l'introduzione di reattori veloci di Generazione IV in ciclo chiuso aumenterebbe l'efficienza di utilizzo dell'uranio di un fattore 60 rispetto alla situazione attuale dei reattori ad acqua LWR a ciclo aperto. Anche nell'ipotesi di dover aspettare la fine del secolo in corso per la loro entrata a regime, tali reattori veloci permetterebbero di moltiplicare le risorse di uranio rimanenti a quella data (10 + 22 milioni di tonnellate) per il suddetto fattore 60, che, in termini di durata, significherebbero circa 30 mila anni, al tasso di consumo costante odierno. E questo trascurando l'uranio dell'acqua di mare e le riserve di torio.

<sup>(26)</sup> È utile tenere presente che nei circa 60 anni di storia del nucleare l'uranio totale estratto fino ad oggi assomma a circa 2,2 milioni di tonnellate.

Al problema della sicurezza di approvvigionamento risponde la mappa di distribuzione delle risorse uranifere nelle diverse aree geografiche, che, come mostrato in figura 17, è abbastanza diversa da quella del petrolio: le più importanti risorse identificate si trovano in Australia, Kazakistan, Federazione Russa, Canada, Sud Africa, USA, Brasile, Namibia e Niger. Questa distribuzione geopolitica delle risorse e della produzione riduce significativamente il rischio di perturbazioni violente come quelle possibili nel caso del petrolio.

Di uranio ce n'è, dunque, in abbondanza sulla Terra, e il rafforzamento delle esplorazioni e l'apertura di nuove miniere lo renderà tale anche per l'industria nucleare. Gli eventuali rischi alla sicurezza degli approvvigionamenti potrebbero venire non dalla limitatezza delle risorse o dall'instabilità politica, ma dai possibili ritardi nel passare dalla scoperta dei giacimenti alla produzione, particolarmente se la domanda tornerà a crescere con rapidità. In merito alla crescita della domanda, il *Red Book* considera due proiezioni al 2030, identificate come "proiezione alta" e "proiezione bassa". Entrambi gli scenari prospettano una crescita della potenza nucleare installata nel mondo: +20% in caso di crescita bassa e +43% in caso di alta. In termini di domanda di uranio questo equivale a 90000-120000 tonnellate/anno nel 2030. Secondo le previsioni OECD-IAEA questi livelli sono raggiungibili con i programmi che l'industria ha già iniziato e che porterà avanti nei prossimi anni.

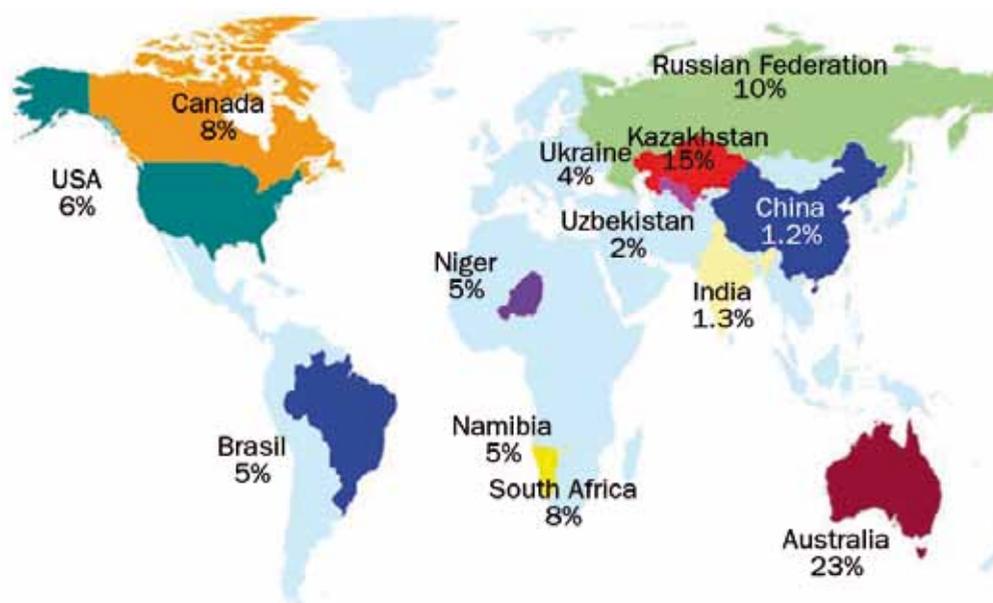


Fig. 17. – Distribuzione globale delle risorse di uranio identificate al 2007. (Fonte: NEA, *Uranium 2007: Resources, production and demand*.)

**Esempio 24:** Una centrale nucleare genera  $1000 \text{ MW}_e$  di potenza elettrica utilizzabile. Sapendo che il suo rendimento è del 33% (ossia il 33% della potenza nominale genera elettricità e il rimanente 67% va perso sotto forma di calore) e che ciascun evento di fissione libera  $211 \text{ MeV}$  di energia, calcolare quanti chilogrammi di  $^{235}\text{U}$  subiscono la fissione durante un anno?

**Soluzione:** La potenza nominale della centrale è  $1000/0,33 = 3000 \text{ MW}$ . Pertanto, tenendo conto che il numero di ore in 1 anno è  $8760 ((24 \text{ ore/giorno}) \times (365 \text{ giorni}) = 8760 \text{ ore})$  e che in 1 ora ci sono  $3600$  secondi, essa produce

$$(3000 \cdot 10^6 \text{ W})(8760 \text{ ore})(3600 \text{ s}) = 94,6 \cdot 10^{15} \text{ J}.$$

Poiché la fissione di  $1 \text{ kg}$  di  $^{235}\text{U}$  libera  $8,06 \cdot 10^{13} \text{ J}$  (vedi Esempio 21), in un anno subiscono la fissione:

$$\frac{94,6 \cdot 10^{15}}{8,06 \cdot 10^{13}} \approx 1174 \text{ kg di } ^{235}\text{U}.$$

Considerando che l'uranio-235 rappresenta solo lo 0,7% dell'uranio naturale, il fabbisogno annuale di uranio della centrale in questione ammonta a circa 168 tonnellate. Si tratta di una quantità inferiore di molti ordini di grandezza, sia in volume che in massa, a quella dei combustibili fossili necessari per alimentare una equivalente centrale termoelettrica (vedi Quadro 10).

## 2.6 Sicurezza degli impianti nucleari

Gli obiettivi della sicurezza nucleare consistono nell'assicurare condizioni di localizzazione del sito e di funzionamento d'impianto tali da salvaguardare l'incolumità del pubblico contro i pericoli di rilascio di prodotti radioattivi.

Fin dalla prima applicazione dell'energia nucleare la sicurezza ha assunto un'importanza primaria nel processo di progettazione, costruzione, esercizio e smantellamento degli impianti a causa del pericolo potenziale derivante dall'accumulo di grandi quantità di prodotti radioattivi nel combustibile.

Il combustibile fresco è solo debolmente radioattivo, perché è formato dai due isotopi  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$  che decadono con emivita molto lunga. Per questo, una volta protetto da una incamiciatura metallica, nota in termine tecnico come guaina o *cladding*, il combustibile può essere maneggiato senza pericolo. Tuttavia, durante il funzionamento del reattore nucleare si producono sostanze radioattive di diversa natura: innanzitutto prodotti di fissione e prodotti della trasmutazione di elementi pesanti all'interno del combustibile, ma anche fluidi contaminati dal contatto con le barre di combustibile e materiali strutturali resi radioattivi dall'irraggiamento con neutroni. È pertanto necessario evitare che questi materiali siano rilasciati nell'ambiente esterno, anche a fronte di malfunzionamenti dell'impianto.

Il principio di base della progettazione degli impianti nucleari è quello della cosiddetta “difesa in profondità”, che consiste nell’assicurare diversi livelli di protezione contro il rilascio di sostanze radioattive. Partendo dall’interno del reattore verso l’esterno, le barriere che si interpongono fra la popolazione e la fuoriuscita dei prodotti radioattivi sono almeno quattro: i) la matrice ceramica che compone il combustibile nucleare; ii) l’incamiciatura metallica del combustibile, il cui compito è quello di contenere, anche strutturalmente, le pastiglie di ossido di uranio che costituiscono il combustibile nucleare; iii) il circuito refrigerante, formato da tubi di acciaio inox che collegano vessel, pompe di circolazione, generatori di vapore e pressurizzatore; iv) il sistema di contenimento del reattore, che serve sia per proteggere l’ambiente esterno dall’impianto, in caso di incidente e conseguente rilascio di prodotti radioattivi, sia l’impianto dall’ambiente esterno, in caso di attentati, incidenti aerei, inondazioni, etc..<sup>(27)</sup>.

Al fine di garantire un adeguato livello di sicurezza in qualsiasi condizione operativa e/o incidentale, alle barriere ingegneristiche di tipo passivo sopra descritte si aggiungono sistemi di sicurezza, attivi e passivi, atti a prevenire o gestire le più svariate condizioni incidentali.

Ai sistemi di sicurezza tradizionali principalmente “attivi”, nel senso che per il loro funzionamento richiedono l’attuazione di tipo elettrico o meccanico su comando di un operatore, sono stati progressivamente affiancati, nel corso degli anni, i sistemi a “totale sicurezza passiva”, che sono governati unicamente da fenomeni fisici naturali (come la gravità, la convezione naturale o la resistenza alle alte temperature) che si innescano spontaneamente quando si determinano condizioni d’impianto che possono evolvere in una fase incidentale.

L’affidabilità dei reattori di ultima generazione è perseguita, in definitiva, con sistemi e mezzi di sicurezza ad ampio spettro e attraverso la ridondanza parallela di sistema.

Sistemi di sicurezza attivi sono già presenti nei reattori nucleari di Generazione II in funzione da svariate decine di anni. In aggiunta a questi sistemi, i reattori di Generazione III e III+, oggi disponibili sul mercato, incorporano anche sistemi di sicurezza passivi.

Poiché un incidente a un impianto nucleare può mettere a repentaglio l’incolumità del pubblico, in tutti i Paesi industrialmente progrediti è stata predisposta una rigorosa legislazione per la sicurezza nucleare, che in particolare fissa le norme da seguire per ottenere le autorizzazioni necessarie nelle varie fasi di approntamento e gestione dell’impianto.

Per questo esiste un Ente indipendente, detto “Autorità di Sicurezza”, a cui viene demandata la responsabilità di verifica del soddisfacimento di tutte le norme di sicurezza. La licenza di costruzione è subordinata a un giudizio positivo sulle caratteristiche del sito e dell’impianto, quella di esercizio a un giudizio parimenti positivo sull’esito delle varie prove. Inoltre durante l’esercizio, vengono periodicamente effettuate verifiche ed è sempre possibile che l’impianto venga arrestato dall’Autorità di Sicurezza, per imporre l’effettuazione di modifiche anche sostanziali.

---

<sup>(27)</sup> Tale barriera era assente nel caso del reattore di Chernobyl, in quanto esso era stato progettato per produrre plutonio militare, che richiedeva un ricambio del combustibile molto frequente. Questo portò alla realizzazione di edifici di contenimento (molto alti) senza le dovute caratteristiche di robustezza e tenuta ai fini della sicurezza nucleare richieste dalle normative adottate nel mondo occidentale.

### Quadro 11: LA SICUREZZA NUCLEARE

La sicurezza è da sempre un elemento centrale nella progettazione, realizzazione ed esercizio degli impianti nucleari e del ciclo del combustibile nucleare.

Il fine primario di qualsiasi sistema di sicurezza nucleare è di assicurare che la radioattività rimanga comunque confinata in un determinato luogo e che, nel caso venga rilasciata, questo avvenga in quantità e in condizioni che assicurino l'assenza di alcun pericolo per il pubblico.

Il principio di base della costruzione e gestione di un impianto nucleare è quello della "difesa in profondità", che consiste nell'assicurare una serie di barriere successive, atte a fronteggiare un ipotetico incidente, di modo che il fallimento di una qualsiasi di esse non danneggi le altre e non comporti comunque rilascio di sostanze radioattive.

Le centrali nucleari a fissione seguono oggi norme di sicurezza di livello molto elevato e normalmente condensano al loro interno un bagaglio tecnologico molto avanzato per la gestione di tutti i processi. Esse sono, di fatto, tra gli impianti più controllati in uso oggi.

In una centrale nucleare le funzioni di sicurezza sono assicurate da una serie di sistemi speciali, indipendenti dai sistemi che assicurano il normale funzionamento dell'impianto, progettati secondo criteri di "ridondanza e di diversificazione".

L'impatto radiologico delle centrali nucleari è continuamente sorvegliato da una rete di monitoraggio, interna ed esterna all'impianto, integrata da stazioni meteorologiche. I risultati delle misure sono costantemente verificati dall'Autorità di controllo nucleare.

Le esposizioni della popolazione alla radioattività prodotta dagli impianti nucleari sono minime e di gran lunga inferiori a quelle dovute a tutte le altre cause, naturali e antropiche (in media 0,002 mSv/a rispetto al totale di 2,8 mSv/a; vedi figura del Quadro 6).

## 2.7 Gestione dei rifiuti radioattivi

Il problema delle scorie radioattive è quello più critico per l'industria nucleare. Il procedimento di fissione nucleare produce materiali residui ad elevata radioattività che rimangono pericolosi per periodi lunghissimi (fino a tempi dell'ordine delle centinaia di migliaia di anni). Smaltire i materiali radioattivi significa pertanto sottoporli a trattamento adeguato e isolarli dalla biosfera per il tempo necessario a consentire il decadimento della radioattività in essi presente fino a livelli confrontabili con quelli del minerale di uranio originale.

I rifiuti radioattivi sono classificati in tre categorie in relazione al tempo di decadimento e alla concentrazione dei radioisotopi contenuti:

- i) "Rifiuti di prima categoria", che hanno un basso livello di radioattività e possono diventare rilasciabili, senza vincoli radiologici, in un periodo che varia da pochi giorni fino a qualche decennio. Fanno parte di questa categoria gli indumenti "usa e getta" usati nelle centrali nucleari e alcuni rifiuti prodotti in medicina nucleare, nell'industria e nella ricerca scientifica.

- ii) “Rifiuti di seconda categoria”, che richiedono invece qualche secolo per scendere sotto i livelli di rilascio. Fanno parte di questa categoria materiali strutturali dei reattori resi radioattivi dalle interazioni con neutroni.
- iii) “Rifiuti di terza categoria”, che richiedono per decadere tempi dell’ordine di migliaia di anni e oltre. Questi rifiuti sono generalmente prodotti negli elementi di combustibile dei reattori nucleari.

A ciascuna categoria corrispondono modalità e soluzioni diverse di gestione e di smaltimento.

Il 95% dei rifiuti radioattivi provenienti da una centrale nucleare è costituito da rifiuti solidi a bassa e media attività. Il restante 5%, che contiene più del 95% della radioattività totale, è rappresentato dai rifiuti ad alta attività e lunga emivita, di diversa tipologia a seconda della scelta relativa alla gestione del combustibile irraggiato.

Alcuni Paesi (tra cui Francia, Regno Unito e Giappone) hanno scelto il ritrattamento del combustibile irraggiato (ciclo chiuso del combustibile) con recupero del materiale nucleare riutilizzabile (uranio, plutonio) e vetrificazione (vedi glossario) dei rifiuti ad alta attività residui. Altri Paesi (tra cui Germania, Spagna, Svezia e USA), invece, considerano il combustibile irraggiato direttamente come rifiuto (ciclo aperto del combustibile) e ne progettano lo stoccaggio di medio-lungo periodo in attesa di decisioni future. L’Italia ha optato per il ritrattamento del combustibile all’estero (in Inghilterra e Francia) con ritorno in Italia dei rifiuti prodotti.

Dopo la produzione i rifiuti radioattivi vengono sottoposti a trattamenti chimici e fisici, il cui obiettivo principale è il *condizionamento*, cioè la loro conversione in una forma solida stabile e duratura, che ne consenta la manipolazione, lo stoccaggio, il trasporto e, infine, lo smaltimento. Il rifiuto condizionato è quindi un manufatto, costituito dal materiale solidificato (es. cemento o vetro) inglobante il materiale radioattivo, e dal contenitore esterno (es. fusto in acciaio). L’ultima fase della gestione dei rifiuti radioattivi, lo smaltimento, consiste nella collocazione definitiva di questi manufatti in un deposito con l’intenzione di non recuperarli mai più; il deposito deve garantire il completo isolamento dalla popolazione e dall’ambiente fino a quando la radioattività residua, per effetto del decadimento radioattivo, non raggiunge valori paragonabili a quelli ambientali.

### 2.7.1 Gestione dei materiali a bassa e media attività

Nel caso dei rifiuti radioattivi a bassa e media attività (“Rifiuti di seconda categoria”), l’isolamento deve essere garantito al massimo per qualche secolo, e quindi la soluzione di smaltimento ritenuta più idonea è il deposito superficiale o sub-superficiale a bassa profondità (decine di metri), di tipo “ingegneristico”, in quanto si affida prevalentemente a barriere artificiali.

I materiali possono essere ad esempio immobilizzati all’interno di fusti di acciaio mediante colaggio di una matrice cementizia (figura 18 (a)) i quali sono poi stoccati all’interno di cassoni prefabbricati in calcestruzzo armato (moduli di deposito, figura 18 (b)), che sono a loro volta impilati all’interno di grandi vasche in calcestruzzo (unità di deposito, figura 18 (c)). Una volta riempite, le unità di deposito vengono chiuse con coperchi in calcestruzzo, impermeabilizzate e coperte con uno strato di terreno (figura 18 (d)).

Attualmente sistemi di deposito definitivo per rifiuti a bassa attività sono in funzione o in

progetto in quasi tutti i Paesi che detengono rifiuti radioattivi di questo tipo. I più moderni e avanzati si trovano in Francia, Spagna, Svezia, Giappone, Regno Unito e USA. Questi depositi sono progettati per isolare i materiali dalla biosfera per 300 anni; trascorso questo periodo si può perdere memoria del deposito, in quanto i materiali in esso ospitati hanno raggiunto livelli di radioattività analoghi a quelli del fondo naturale.

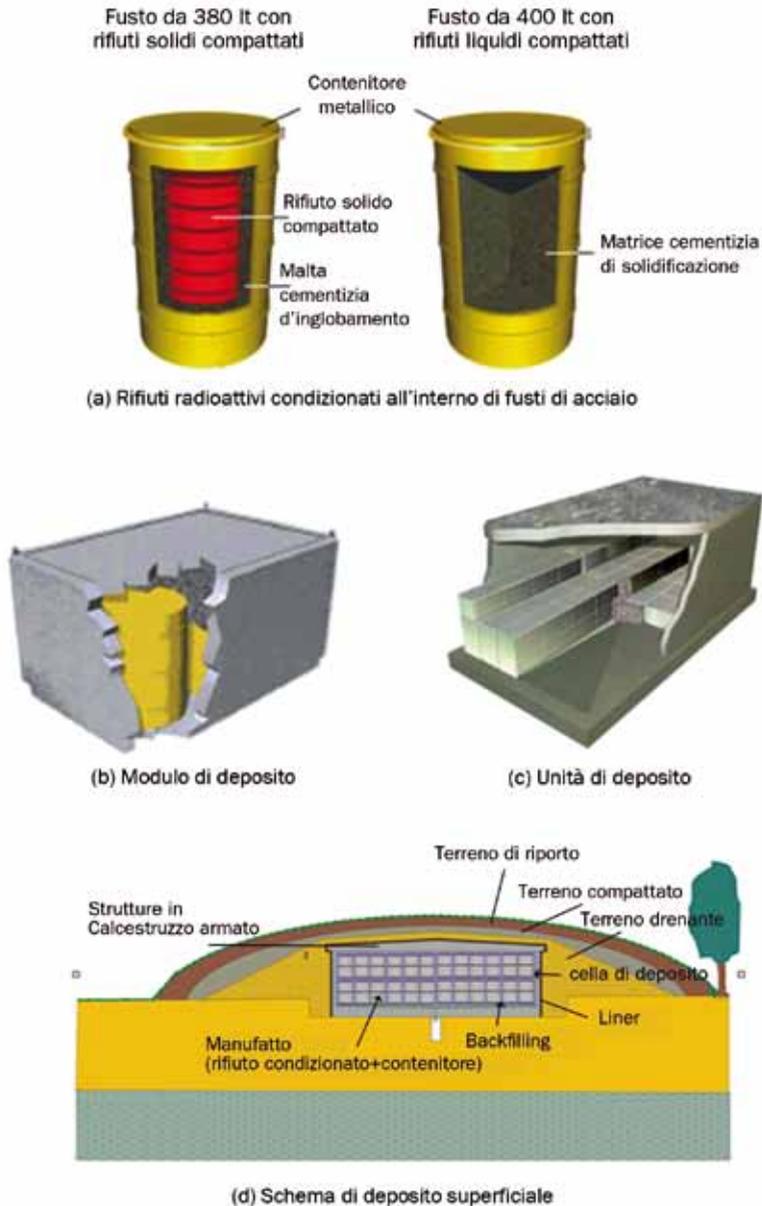


Fig. 18. – Condizionamento e stoccaggio definitivo dei materiali radioattivi a bassa e media attività.

### 2.7.2 Gestione dei materiali ad alta attività

I rifiuti radioattivi ad alta attività o a lunga emivita (“Rifiuti di terza categoria”) mantengono livelli di radioattività significativi per decine e centinaia di migliaia di anni. Per l’isolamento di tali rifiuti in questo lasso di tempo non è possibile fare affidamento su barriere artificiali, ma ci si deve affidare in massima parte alle barriere naturali. A tale scopo si prendono in considerazione formazioni geologiche ad elevata profondità (600-800 metri e oltre), che presentino adeguate caratteristiche di stabilità e impermeabilità (es. giacimenti di salgemma o formazioni argillose o di granito).

I materiali ad alta attività sono inglobati a caldo all’interno di un contenitore in acciaio (*flask*) che viene chiuso mediante saldatura e avviato al deposito temporaneo. I flask sono successivamente inseriti all’interno di contenitori cilindrici corazzati (*cask*) aventi diametro di 2,5 m e altezza di 4,5 m, adatti al trasporto e allo stoccaggio di lungo termine all’interno di depositi idonei.

In figura 19 sono mostrate le strutture esterne e quelle in profondità del deposito finlandese a Forsmark.



Fig. 19. – Le strutture esterne e quelle in profondità del deposito finlandese a Forsmark.

L’individuazione di un sito geologico adeguato richiede un progetto di lungo respiro con decenni di studi e costose indagini in laboratori sotterranei, non alla portata di tutti i Paesi.

Nell’Unione Europea si discute da qualche tempo della possibilità di individuare un sito geologico comune, ma il discorso è ancora a uno stadio molto preliminare per motivi prevalentemente di accettabilità pubblica. Considerato il volume limitato di rifiuti ad alta attività

e lunga vita (vedi approfondimento “Volume dei rifiuti radioattivi”), questa soluzione viene considerata perseguibile e quindi molti Paesi europei hanno assunto una politica di attesa.

La Svezia ha già selezionato il deposito geologico nazionale<sup>(28)</sup> mentre altri Paesi nuclearmente avanzati (tra cui Regno Unito, Francia, Finlandia, Germania e Giappone) hanno messo in programma la realizzazione di un deposito geologico sul proprio territorio; allo stato attuale, nella maggior parte dei casi, sono in corso programmi di ricerca e sviluppo in laboratori sotterranei in aree considerate buone candidate.

Un caso particolare è costituito dal WIPP (*Waste Isolation Pilot Plant*, New Mexico, USA; <http://www.wipp.energy.gov>), un deposito di smaltimento geologico riservato ai rifiuti contenenti plutonio di produzione militare, in funzione già dal 1999. Il WIPP ha una profondità di circa 700 metri in un giacimento salino e ha richiesto 25 anni per la realizzazione.

### 2.7.3 Sviluppi della ricerca

Sono attualmente in corso studi, in molti Paesi, che mirano all’ulteriore riduzione della radiotossicità (attività e vita media) delle scorie mediante processi di separazione e trasmutazione degli attinidi (che sono le componenti più “dure”), per trasformarli in elementi a vita media più breve e di più agevole conservazione, mediante irraggiamento neutronico in reattori critici o sottocritici alimentati da acceleratori di particelle<sup>(29)</sup>.

L’effetto delle varie fasi di riprocessamento del combustibile è mostrato in figura 20. La curva nera riporta, in unità relative, l’andamento nel tempo della radiotossicità del combustibile irraggiato, così come scaricato dal reattore (uranio + plutonio + attinidi minori + prodotti di fissione). Il tempo necessario a ridurre la radiotossicità di questo combustibile a quella del minerale di uranio originale (linea rossa orizzontale) è pari a circa 200 mila anni. Questa è la situazione con gli attuali reattori di Generazione II.

<sup>(28)</sup> La città di Östhammar, situata a 100 km a nord di Stoccolma, è stata scelta lo scorso aprile come sede del primo deposito geologico di profondità permanente. La richiesta, la prima al mondo mai inoltrata, dovrebbe arrivare sul tavolo della IAEA entro il 2010, per cominciare la costruzione entro il 2015 ed entrare in funzione tra il 2022 e il 2024. Le scorie, raccolte in *pellet* di ossido di uranio, sono stoccate in fusti di rame impermeabili e spessi 5 cm che, in assenza di ossigeno, sono immuni alla corrosione. A loro volta i fusti sono immersi in una colata di cemento per ancorarli in un letto di roccia cristallina circondata da argilla in una serie di tunnel lunghi 250 metri. Scavati a una profondità di 500 metri e distanziati di 40 metri, i tunnel verranno sigillati per sempre man mano che vengono riempiti. Il deposito è destinato a diventare un sarcofago in grado di durare per più di 100 mila anni, al riparo da rischi di infiltrazioni d’acqua e per le attività in superficie.

<sup>(29)</sup> In questo contesto si inserisce il programma italiano TRASCO (acronimo di TRAsmutazione SCORie) sviluppato congiuntamente dall’ENEA (Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile) e dall’INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare). Tale programma si inserisce nella strategia futura di gestione del ciclo chiuso del combustibile nucleare e prevede l’utilizzo di una filiera di reattori EPR destinata a funzionare con il 100% di combustibile formato da una miscela di uranio naturale e plutonio e lo sviluppo di alcuni sistemi nucleari veloci per la trasmutazione delle scorie.

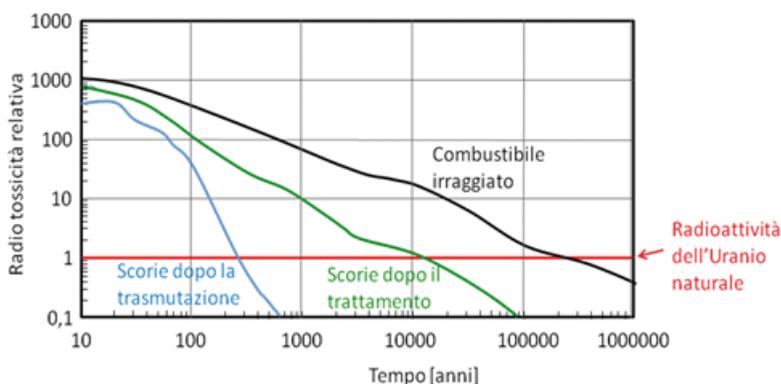


Fig. 20. – Decadimento dei materiali radioattivi ad alta attività e a lunga emivita costituenti il combustibile nucleare esaurito. Il combustibile irraggiato scaricato dal reattore, che contiene uranio, plutonio, attinidi minori e prodotti di fissione, torna alla radioattività dell'uranio originale in circa 200 mila anni. Il riciclo dell'uranio e del plutonio lascia nelle scorie solo attinidi e prodotti di fissione, riducendo così il periodo di decadimento di un fattore 10 (curva verde). La separazione e la trasmutazione degli attinidi riduce il periodo di decadimento di un fattore 1000 (curva azzurra). (Fonte: AIN, Quaderno n. 1, 21° Secolo Scienza e Tecnologia, n. 6-2008.)

Se però si separano e si riutilizzano l'uranio e il plutonio, il tempo di decadimento delle scorie residue (attinidi e prodotti di fissione) si riduce a circa 10 mila anni (curva verde in figura). Questo procedimento sarà disponibile già con i reattori attualmente in costruzione (Generazione III+).

La curva azzurra, infine, mostra come potrà ridursi la radiotossicità finale quando si realizzerà, nei reattori ora in studio (Generazione IV), la trasmutazione degli attinidi in elementi più leggeri. In tal modo è possibile trasformare le scorie ad alta attività in materiali caratterizzati da emivita analoga a quella dei rifiuti a bassa attività (circa 300 anni) e risolvere in modo completamente soddisfacente il problema della gestione dei materiali radioattivi. Ricercatori francesi hanno già mostrato la fattibilità tecnica di questo processo (Progetto Atalante, "Atelier alpha et laboratoires pour les analyses des transuraniens et études de retraitement" nel centro di ricerca di Marcoule del Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA)).

---

## APPROFONDIMENTO: Volume dei rifiuti radioattivi

---

Grazie alla sua elevata densità energetica, l'energia nucleare produce un volume relativamente modesto di rifiuti per unità di energia prodotta. Il problema dei rifiuti radioattivi prodotti negli impianti nucleari si pone, quindi, per quantitativi molto limitati, inferiori di diversi ordini di grandezza ai quantitativi di rifiuti tossico-nocivi prodotti nelle centrali termoelettriche convenzionali.

A titolo esemplificativo, si fa notare che, in condizioni di normale esercizio, una centrale nucleare da 1000 MW<sub>e</sub> movimentata annualmente circa 20 tonnellate di combustibile (2 carri

ferroviari) e produce i seguenti materiali:

- rifiuti ad alta attività 2 t,
- rifiuti a bassa e media attività 20 t,
- rilasci di radioattività (effluenti a lunga emivita) 2 GBq.

Le scorie ad alta attività vetrificate occupano un volume di solo circa 3 m<sup>3</sup>.

Per contro, una centrale termoelettrica (gas, olio, carbone) della stessa potenza movimentata da 1 a 2 milioni di tonnellate di combustibile (1000 carri ferroviari al giorno per il trasporto di carbone) e che i rilasci radioattivi a lunga vita (pur presenti) vanno da 1 a 50 GBq.

Tab. VIII. – Emissioni e rilasci (in tonnellate all'anno) per un impianto di 1000 MW<sub>e</sub>.

Impianto	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	MO <sub>x</sub>	Polveri	Residui di produzione
Nucleare	0	0	0	0	100
Carbone	7 500 000	60 000	22 000	1 300	250 000
Olio combustibile	6 200 000	43 000	10 000	1 600	70 000
Gas	4 300 000	35	12 000	100	100

(Fonte: Società Italiana di Fisica, “Energia in Italia: problemi e prospettive (1990–2020)”, <http://www.sif.it/SIF/it/portal/attivita/energy/librobianco>).

Nella Tabella VIII sono inoltre riportati, in tonnellate/anno, le emissioni e i rilasci per i vari impianti corrispondenti a una potenza di 1000 MW<sub>e</sub>.

Infine è opportuno ricordare che grandi quantità di rifiuti radioattivi sono anche prodotti da industria, ospedali e centri di trattamento dei tumori e che, complessivamente, i rifiuti radioattivi rappresentano solo una piccola frazione dei rifiuti tossici prodotti ogni anno dall'industria e una frazione piccolissima dei rifiuti prodotti dalla società.

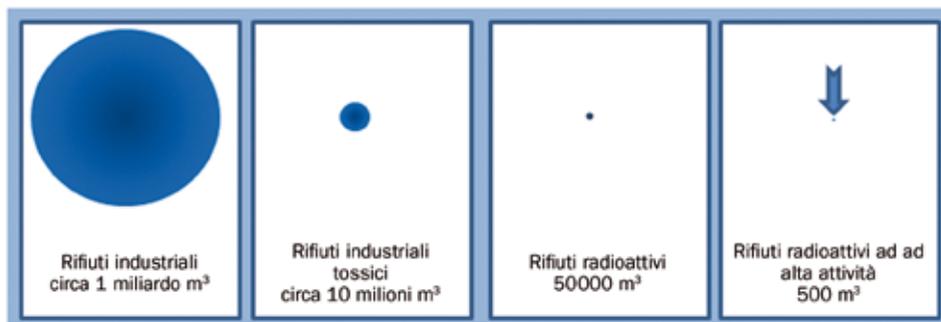


Fig. 21. – Confronto tra le quantità dei vari tipi di rifiuti prodotti all'anno nell'Unione Europea. (Fonte: OECD-NEA, *Nuclear Energy Today*, 2003 – ISBN 92-64-10328-7.)

Per dare un'idea delle reali dimensioni del problema in figura 21 è mostrato un confronto tra le quantità di rifiuti prodotti all'anno nell'Unione Europea. È anche utile ricordare che le scorie ad alta attività prodotte dal ritrattamento del combustibile nucleare utilizzato in Italia

fino ad oggi e inviato al ritrattamento impegnano 20 contenitori cilindrici in acciaio (*cask*) del diametro di 2,5 metri e lunghi 4,5 metri contenenti blocchi di vetro minerale.

È istruttivo dare una dimensione pratica a queste cifre: il volume delle scorie ad alta attività (Rifiuti di III categoria) che sarebbero prodotte in Italia, in 60 anni di funzionamento, dalle sette centrali nucleari da 1700 MW<sub>e</sub> ciascuna, che – nei piani del Governo – dovrebbero coprire nel 2030 il 25–30% del fabbisogno di energia elettrica del Paese, sarebbe inferiore a quello di un cubo di 20 m di lato.

### Quadro 12: I RIFIUTI RADIOATTIVI

Rifiuti radioattivi sono prodotti in numerosi processi industriali e medici. Di questi, la produzione di energia nelle centrali nucleari è il più importante per l'entità dei volumi prodotti e per la lunga emivita dei radionuclidi generati ("scorie nucleari").

I rifiuti radioattivi sono suddivisibili, in base al livello di attività, in tre categorie: basso, intermedio ed alto.

Esempio di rifiuti a basso livello sono costituiti dagli indumenti "usa e getta" usati nelle centrali nucleari e da rifiuti prodotti in medicina nucleare, nell'industria e nella ricerca scientifica. Il 90% di tutti i rifiuti radioattivi prodotti appartengono a questa categoria; essi contengono solo l'1% della radioattività di provenienza antropogenica.

Rifiuti a livello intermedio di attività sono costituiti da materiali strutturali dei reattori (come l'incamiciatura del combustibile) resi radioattivi dalle interazioni con neutroni. Essi costituiscono il 5% del volume dei rifiuti radioattivi prodotti nel mondo e contengono solo il 4% della radioattività di provenienza antropogenica. Richiedono schermatura e isolamento per al massimo qualche secolo.

Le scorie ad alto livello di attività o lunga emivita costituiscono solo il 5% del volume prodotto nelle attività umane, ma contengono il 95% della radioattività (un tipico esempio è costituito dal combustibile esausto delle centrali nucleari). Richiedono isolamento per decine e centinaia di migliaia di anni.

I volumi di scorie ad alta attività prodotte da un reattore nucleare sono esigui: una centrale nucleare con un reattore ad acqua leggera da 1000 MW<sub>e</sub> produce in un anno solo 3 m<sup>3</sup> di scorie ad alta attività.

Il volume totale delle scorie ad alta attività che sarebbero prodotte in Italia in 60 anni di funzionamento, da eventuali sette centrali nucleari da 1700 MW<sub>e</sub>, sarebbe inferiore a quello di un cubo di 20 m di lato.

Per l'immagazzinamento permanente le scorie nucleari sono convertite in forma solida stabile e duratura ("condizionamento"), e deposte in luoghi scelti per la loro stabilità idrografica e geologica. Il deposito deve garantire il completo isolamento dalla popolazione e dall'ambiente fino a quando la radioattività residua, per effetto del decadimento radioattivo, non raggiunge valori paragonabili a quelli ambientali.

In tutto il mondo si stanno studiando tecnologie avanzate di trasmutazione che mirano a ridurre drasticamente la radiotossicità dei rifiuti radioattivi a lunga vita e quindi anche del periodo di custodia, permettendo nel contempo un ulteriore recupero energetico. L'Italia è coinvolta in alcuni di tali progetti.

## 2.8 Nuove frontiere: Ricerca e Sviluppo

La tecnologia nucleare, anche se è giunta a piena maturità industriale, è una tecnologia complessa, soggetta, al pari di tutte le tecnologie avanzate e sofisticate, ad una costante evoluzione tecnica e scientifica. Le ricerche mirano a ottimizzarne l'impiego in termini di riduzione dei costi, nonché a migliorarne la sostenibilità attraverso la riduzione delle risorse naturali utilizzate per produrre una certa quantità di energia e dei rifiuti radioattivi da stoccare in maniera definitiva. In quanto tecnologia complessa, richiede in tutte le fasi del processo, personale altamente specializzato.

La Ricerca & Sviluppo (R&S) sugli impianti del futuro richiede tempo (decine di anni), è molto costosa (centinaia di milioni di euro) e può essere effettuata solo attraverso la cooperazione internazionale. Questo è quanto è avvenuto negli anni '80 e '90 del secolo scorso per sviluppare gli impianti nucleari disponibili oggi; parimenti nel 2000, quando sono giunti a maturità industriale i reattori nucleari sviluppati nei decenni precedenti, i Paesi più avanzati con lunga e consolidata tradizione di utilizzo dell'energia nucleare hanno avviato collaborazioni internazionali per sviluppare le tecnologie che saranno disponibili fra 20-30 anni e anche oltre. Anche l'Italia, che peraltro aveva partecipato negli anni '80 e '90 allo sviluppo degli impianti oggi disponibili, ha recentemente aderito alle principali iniziative europee ed internazionali per il nucleare del futuro. È, infatti, fondamentale affiancare il programma industriale con un impegno continuo rivolto sia all'evoluzione ("innovazione") delle tecnologie di oggi, sia alla ricerca, che permetterà di rendere disponibili domani sistemi rivoluzionari rispetto a quelli odierni.

In Italia esistono ancora competenze disponibili per gestire il nuovo programma nucleare. Ciò è dovuto in larga parte all'impegno da un lato dei maggiori atenei italiani a mantenere in vita corsi in ingegneria nucleare e, dall'altro, di un certo numero di organizzazioni di ricerca ed industrie italiane a partecipare a progetti e programmi europei ed internazionali sul nucleare innovativo anche nel periodo post-Chernobyl, in cui il nostro Paese ha ritenuto di non ricorrere più a questa fonte energetica. In particolare, questo impegno ha consentito al sistema produttivo italiano di acquisire commesse (e quindi posti di lavoro altamente qualificati) nel mercato internazionale e, oggi, di essere pronto a competere nel momento in cui si riaprono le prospettive di un rilancio del nucleare anche nel nostro Paese.

La R&S per i sistemi del futuro non deve precludere l'utilizzo delle migliori tecnologie attualmente disponibili, altrimenti assisteremmo ad una corsa senza fine verso "il meglio" senza mai arrivare a sfruttare industrialmente, per soddisfare i bisogni di oggi, quanto la tecnologia ha al momento prodotto.

Un semplice esempio è forse più comprensibile di tante parole: se gli antichi Romani avessero aspettato di poter disporre delle tecnologie attuali per costruire ponti sospesi come quello di Brooklyn non avrebbero mai costruito i loro ponti che invece resistono ancora oggi all'usura dei secoli.

## 2.9 Formazione

La necessità di migliaia di figure professionali da impiegare sia nel programma industriale che nell'innovazione di prodotto e processo, oltre che nella R&S rischia di diventare il vero collo di bottiglia per la ripresa nucleare in tutto il mondo.

Da oggi al 2050 si prevede che saranno ordinati e costruiti nel mondo più di 500 nuovi impianti nucleari di potenza (vedi Tabella IX). Ad essi si aggiungono gli impianti e le attrezzature relativi al ciclo del combustibile nucleare: dall'estrazione del minerale dalla miniera, ai processi di produzione del combustibile, a quelli per il trattamento, condizionamento, trasporto e stoccaggio dei rifiuti radioattivi e al loro eventuale riciclo, per recuperarne il potenziale energetico, fino allo smantellamento degli impianti che hanno raggiunto il fine vita.

Si tratta dunque di poter disporre di personale altamente qualificato per ogni fase del processo: stiamo dunque parlando di decine di migliaia di posti di lavoro in tutto il mondo.

Di questo si cominciano già a vedere i primi effetti con la corsa da parte delle maggiori industrie nucleari mondiali ad assicurarsi i giovani più preparati e promettenti. Si tratta di un processo competitivo sia fra i Paesi che già fanno ricorso da tempo all'energia nucleare e che intendono mantenere in sicurezza gli impianti in esercizio sul loro territorio o sostituire e potenziare il proprio parco reattori, che tra i Paesi sviluppati, emergenti o in via di sviluppo, che si affacciano per la prima volta a questa fonte energetica.

Tab. IX. – Reattori nucleari nel mondo (Fonte: WNA<sup>(30)</sup> e IAEA).

PAESE	Reattori in funzione	Reattori in costruzione	Reattori pianificati	Reattori proposti
Argentina	2	1	2	1
Armenia	1	0	1	
Bangladesh	0	0	0	2
Bielorussia	0	0	2	2
Belgio	7	0	0	0
Brasile	2	0	1	4
Bulgaria	2	0	2	0
Canada	18	2	4	3
Cina	11	23	34	120
Rep. Ceca	6	0	0	2
Corea del Nord	0	0	0	1

<sup>(30)</sup> La World Nuclear Association (WNA) (<http://www.world-nuclear.org>) è un'organizzazione internazionale cui fanno capo tutte le industrie che operano nel settore nucleare civile. Ha sede a Londra e svolge un ruolo di analisi e coordinamento tra le diverse aziende e tiene sotto costante controllo i reattori operativi nel mondo, monitora lo stato delle scorie nucleari e della produzione di uranio e svolge un ruolo di divulgazione delle tematiche nucleari.

Tab. IX. – Continua.

PAESE	Reattori in funzione	Reattori in costruzione	Reattori pianificati	Reattori proposti
Corea del Sud	20	6	6	0
Egitto	0	0	1	0
Emirati Arabi	0	0	4	10
Finlandia	4	1	0	1
Francia	58	1	1	1
Germania	17	0	0	0
Giappone	54	2	12	1
Giordania	0	0	1	
Ungheria	4	0	0	2
India	19	4	20	40
Indonesia	0	0	2	4
Iran	0	1	2	1
Israele	0	0	0	1
Italia	0	0	0	10
Kazakistan	0	0	2	2
Lituania	0	0	0	2
Messico	2	0	0	2
Olanda	1	0	0	1
Pakistan	2	1	2	2
Polonia	0	0	6	0
Regno Unito	19	0	4	6
Rep. Ceca	6	0	0	2
Romania	2	0	2	1
Russia	32	9	15	30
Slovacchia	4	2	0	1
Slovenia	1	0	0	1
Sud Africa	2	0	3	24
Spagna	8	0	0	0
Svezia	10	0	0	0
Svizzera	5	0	0	3
Thailandia	0	0	2	4

Tab. IX. – Continua.

PAESE	Reattori in funzione	Reattori in costruzione	Reattori pianificati	Reattori proposti
Turchia	0	0	2	1
Ucraina	15	0	2	20
USA	104	1	9	23
Vietnam	0	0	4	6
<b>MONDO</b>	<b>438</b>	<b>54</b>	<b>148</b>	<b>342</b>

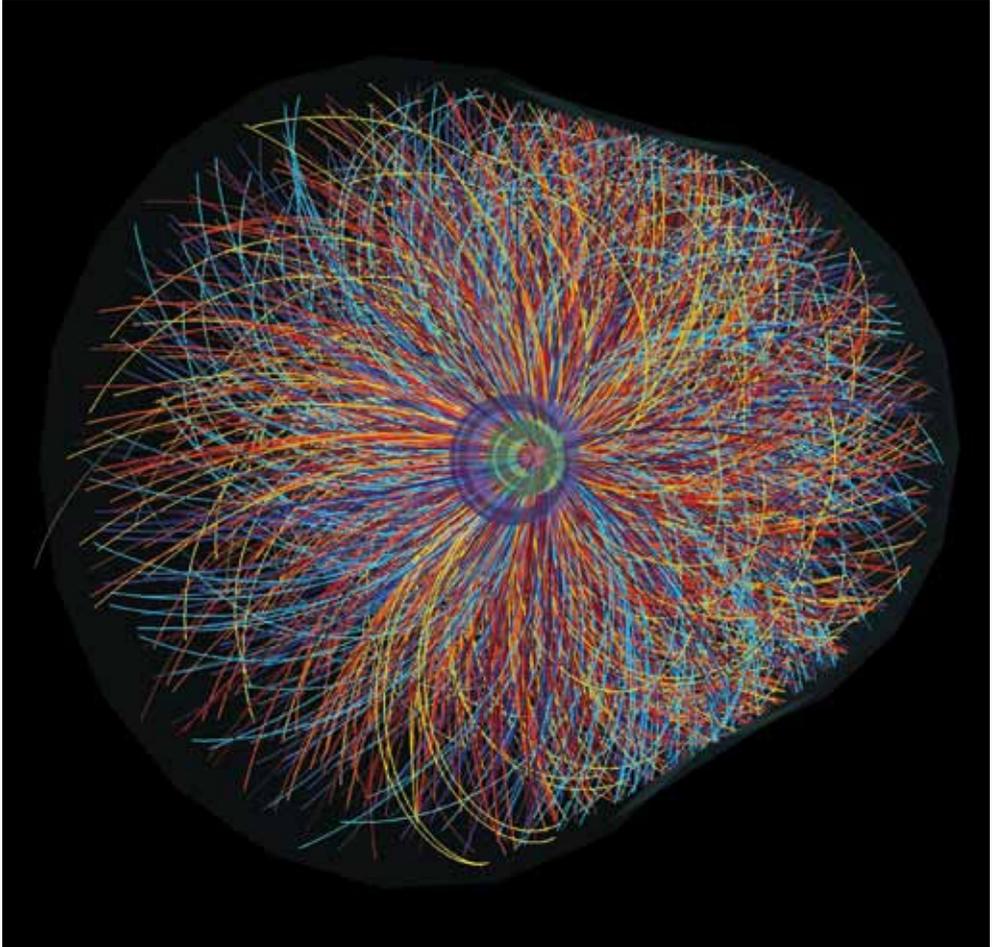
Un caso tutto particolare è ovviamente rappresentato da Paesi emergenti quali la Cina e l'India, che hanno programmi nucleari molto ampi per soddisfare i bisogni energetici di una popolazione che si conta a miliardi di persone. Ma ad essi occorre aggiungere una cinquantina di Paesi, anche africani, in via di sviluppo che hanno già espresso all'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica di Vienna (IAEA) la propria volontà di dotarsi di impianti nucleari adatti ai loro fabbisogni energetici sempre più crescenti.

Da questo quadro emerge la necessità di potenziare da subito la capacità formativa in questo campo nel nostro Paese per arrivare, a regime, ad un numero di circa 300 ingegneri nucleari che entreranno nel mercato ogni anno, un numero peraltro analogo a quello che usciva dalle università italiane all'inizio degli anni '80 del secolo scorso, quando l'Italia aveva un ambizioso programma nucleare. Parallelamente è necessario uno sforzo straordinario per assicurare il turnover e il potenziamento del corpo docente.

I tempi lunghi per la formazione delle figure professionali più critiche richiedono una specifica programmazione già all'inizio del programma nucleare. Infatti, la formazione di un ingegnere da inserire nel mercato nucleare richiede attualmente 3+2 = 5 anni di preparazione iniziale, meglio se seguita e completata da un "Dottorato di ricerca" per ulteriori 3 anni di studio; Dottorato che può essere considerato strettamente necessario, in particolare, per coloro che saranno poi impiegati nel settore della R&S presso enti di ricerca, università e industrie.

Non c'è dubbio che gli ingegneri nucleari rivestono un ruolo centrale che investe tutte le fasi del processo produttivo, ma le necessità professionali si estendono anche al campo dell'ingegneria civile, della meccanica, della fisica, della chimica, dell'elettronica, dell'informatica, etc. e, non da ultimo, della comunicazione per migliorare la comprensibilità e, quindi, l'accettabilità da parte di un pubblico sempre più vasto e desideroso di avere coscienza delle implicazioni delle scelte energetiche del Paese. Formazione, infatti, significa non solo sviluppo delle competenze universitarie e post-universitarie per formare gli scienziati e i tecnici che opereranno sulle centrali, ma anche educazione sui problemi energetici e sui vantaggi e limiti di ogni fonte energetica, incluso quella nucleare, fin dalle scuole elementari e medie.

## Nuove frontiere della fisica nucleare



Una delle prime collisioni tra 2 nuclei di piombo ( $Pb + Pb$ ) visualizzate dall'esperimento ALICE (A Large Ion Collider Experiment) e registrate dai suoi principali rivelatori di traccia. I fasci di piombo hanno iniziato a circolare all'LHC (Large Hadron Collider) del CERN di Ginevra il 7 novembre 2010. Come previsto, tali collisioni hanno prodotto un numero di particelle senza precedenti (migliaia per evento) a una energia nel centro di massa di 2,76 TeV per coppia di nucleoni interagenti, valore mai prima raggiunto. Le strutture ombreggiate rappresentano gli elementi del rivelatore visti in prospettiva. Le linee sono la ricostruzione delle traiettorie delle particelle dotate di carica elettrica in presenza di campo magnetico e la scala di colori indica l'energia di tali particelle.

## Appendice A: Proliferazione nucleare

Il trattato di non proliferazione nucleare (TNP), attuato sotto l'egida dell'ONU e applicato attraverso il regime ispettivo dell'IAEA (*International Atomic Energy Agency*), vincola i Paesi firmatari a non destinare a scopi militari i materiali e le tecnologie nucleari acquisite nell'ambito delle applicazioni pacifiche.

Vi è anzitutto il problema dei Paesi che non hanno aderito al TNP e che hanno ugualmente ottenuto e sviluppato tecnologie nucleari: sono pochi, ma dotati di grande peso politico e militare a livello regionale. Un ulteriore segnale d'allarme viene dalla consapevolezza che anche alcuni Paesi che avevano aderito al trattato hanno successivamente sviluppato un potenziale nucleare per scopi militari. Ai primi anni Novanta risale la scoperta in Iraq di un programma nucleare non dichiarato, sviluppato nonostante il Paese fosse sottoposto ai controlli di salvaguardia dell'IAEA. Analogamente ha fatto la Corea del Nord, e si ha oggi il sospetto che anche l'Iran stia sviluppando un programma nucleare.

Accanto a questi esempi negativi si collocano certamente quelli positivi degli Stati che hanno rinunciato spontaneamente alla realizzazione di armamenti nucleari o alla conservazione di arsenali già costituiti. Il caso principale è rappresentato dal Sud Africa che, dopo essersi dotato di ordigni nucleari, ha optato per il loro smantellamento, aderendo al TNP.

Ma il quadro composito che emerge a livello mondiale dimostra che la fine della guerra fredda non ha affatto attenuato i rischi connessi alla proliferazione nucleare. Venuto meno il confronto bipolare, la globalizzazione delle problematiche regionali ha anzi reso più complesso il contesto, moltiplicando le aree sensibili.

Da un decennio è maturata una sostanziale consapevolezza della scarsa efficacia del regime di verifica ora in vigore e della conseguente necessità di un suo adeguamento al mutato scenario internazionale. Nonostante lo sforzo profuso sul piano organizzativo, tecnico e finanziario, occorre riconoscere che l'attuale regime di salvaguardia non può da solo conseguire l'obiettivo di evitare la proliferazione di armi nucleari.

Il regime delle verifiche è un punto cruciale del TNP. Esso si fonda su due principi cardine:

1. Ciascun Paese aderente al TNP deve sottoscrivere con l'IAEA un accordo internazionale con il quale si impegna a sottoporre ai controlli tutto il materiale nucleare in suo possesso e a dichiarare i siti dove esso si trova.
2. Il controllo dell'IAEA avviene essenzialmente attraverso la "contabilità" del materiale localizzato nei siti dichiarati.

I casi recenti dell'Iraq, della Corea del Nord e dell'Iran hanno evidenziato i punti deboli del sistema, costituiti essenzialmente dall'obbligo dell'IAEA di effettuare le ispezioni solo nei siti dichiarati e soltanto sulla base della contabilità del materiale nucleare inizialmente dichiarato. A ciò si aggiunge il problema delle cosiddette "ispezioni non dichiarate" che, spesso avversate dagli Stati interessati e comunque non tempestive a causa della procedura attualmente in vigore, contribuiscono a rendere il sistema "penetrabile".

L'opinione universalmente condivisa è che sia ormai necessario e urgente attribuire maggiori poteri e prerogative all'IAEA. In particolare, sul piano istituzionale è necessario che l'Agenzia possa operare in stretto contatto con il Consiglio di Sicurezza dell'ONU,

potenziando i meccanismi di controllo che hanno dimostrato maggiore efficacia. Sul piano operativo è inoltre indispensabile che siano conferiti ai suoi ispettori poteri di indagine e strumenti tecnici di verifica finora giudicati troppo intrusivi.

Il nuovo modello operativo predisposto dall'IAEA si basa sul principio secondo cui i controlli non devono più limitarsi ai soli siti dichiarati, superando la prassi fondata sulla mera contabilità del materiale nucleare. I controlli devono avvalersi di tecniche di carattere induttivo, fondate su una più ampia possibilità di accesso all'informazione in modo da ottenere, mediante riscontri incrociati, la tempestiva individuazione delle attività proliferanti.

Sotto quest'ultimo punto di vista, tre sono le novità fondamentali:

1. Il protocollo di salvaguardia deve comprendere la cosiddetta *expanded declaration*, diretta a rendere più trasparente tutto il ciclo del combustibile nucleare e le operazioni connesse. Più in dettaglio, gli Stati dovrebbero fornire all'IAEA precise indicazioni circa quelle attività che, pur non strettamente nucleari, siano in qualche modo correlate a queste ultime, notificando all'Agenzia tutte le installazioni civili e militari situate in prossimità dei siti dichiarati.
2. Il ruolo dell'IAEA deve estendersi ad un'azione di *intelligence*, attraverso il trattamento delle informazioni fornite dagli Stati o comunque pervenute in suo possesso. In caso di incongruenze, l'Agenzia deve potersi avvalere del potere vincolante di richiedere informazioni aggiuntive o chiarimenti allo stato interessato.
3. L'IAEA deve essere dotata della strumentazione necessaria all'efficace espletamento di una funzione di monitoraggio ambientale, tesa al rilevamento degli elementi radioattivi che sfuggono ai processi di lavorazione e che sono indicativi del tipo di processo effettuato.

Per quanto concerne invece l'accesso ai siti, la nuova modalità operativa prevede le seguenti innovazioni:

- a) Nei siti dichiarati l'accesso deve essere consentito non solo agli *strategic points*, ma anche alle altre installazioni dello stesso sito.
- b) Deve essere consentito l'accesso alle installazioni ed ai siti che, pur non contenendo materiale nucleare, costituiscono parte integrante del ciclo di lavorazione del combustibile.
- c) Deve essere consentito l'accesso degli ispettori alle installazioni industriali e militari situate in prossimità dei siti nucleari.
- d) Qualora l'IAEA ritenga necessario acquisire informazioni aggiuntive ed effettuare attività di monitoraggio ambientale, deve essere consentito l'accesso anche a siti non indicati nella *expanded declaration*.

Per mettere in atto tali trasformazioni, occorre inoltre dare via libera alle cosiddette *challenge inspections*, ovvero alle ispezioni decise autonomamente dall'IAEA e non previamente comunicate, prevedendo per gli ispettori dell'Agenzia la possibilità di visti multipli o, addirittura, la libertà di accesso senza visto.

È importante infine sottolineare come il quarto requisito, che dovrà essere rispettato dai reattori di quarta generazione, sarà proprio la "resistenza alla proliferazione e protezione fisica contro attacchi terroristici".

## Appendice B: I tre referendum del 1987 sul nucleare in Italia

L'8 novembre 1987 in Italia si votò per cinque referendum, tre dei quali riguardavano l'abrogazione di alcune disposizioni legislative votate dal Parlamento per favorire gli insediamenti di impianti energetici a carbone e nucleari previsti dal "Piano energetico nazionale 1985-1986". Nessuno di quei tre quesiti chiedeva esplicitamente l'abolizione o la chiusura delle centrali nucleari.

I votanti furono il 65,1%, con una percentuale di schede nulle o bianche che andarono dal 12,4% al 13,4%.

I votanti abrogarono a larga maggioranza le tre norme poste in votazione.

Negli anni seguenti, il Parlamento interpretò il risultato del referendum, con decreti e atti governativi successivi, per chiudere le centrali nucleari del Paese.

**Il primo quesito referendario** riguardava l'abolizione dell'intervento statale nel caso in cui un Comune non avesse concesso un sito per l'apertura di una centrale nucleare nel suo territorio.

Il testo del quesito è il seguente: "Volete che venga abrogata la norma che consente al CIPE (Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica) di decidere sulla localizzazione delle centrali nel caso in cui gli enti locali non decidano entro tempi stabiliti? (la norma a cui si riferisce la domanda è quella riguardante "la procedura per la localizzazione delle centrali elettronucleari, la determinazione delle aree suscettibili di insediamento", previste dal 13° comma dell'articolo unico legge 10/1/1983 n.8)"

I sì vinsero con l'80,6%.

**Il secondo quesito referendario** riguardava l'abrogazione dei contributi statali per gli enti locali per la presenza sui loro territori di centrali nucleari.

Il testo del quesito è il seguente: "Volete che venga abrogato il compenso ai comuni che ospitano centrali nucleari o a carbone? (la norma a cui si riferisce la domanda è quella riguardante "l'erogazione di contributi a favore dei comuni e delle regioni sedi di centrali alimentate con combustibili diversi dagli idrocarburi", previsti dai commi 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 della citata legge)".

I sì s'imposero con il 79,7%.

**Il terzo quesito referendario** riguardava l'abrogazione della possibilità per l'ENEL di partecipare all'estero alla costruzione di centrali nucleari.

Il testo del quesito è il seguente: "Volete che venga abrogata la norma che consente all'ENEL (Ente Nazionale Energia Elettrica) di partecipare ad accordi internazionali per la costruzione e la gestione di centrali nucleari all'estero? (questa norma è contenuta nella legge N. 856 del 1973, che modificava l'articolo 1 della legge istitutiva dell'ENEL)."

I sì ottennero il 71,9%.

## Crediti Iconografici

Fotografie di pag. 8

H. Bequerel, riprodotta con permesso dell'autore da P. Chomaz, "The impact of Nuclear Physics on Human Life", Relazione Generale al XCVI Congresso Nazionale SIF, Bologna, 2010 pubblicato in rete nel sito <http://www.sif.it/portal/attività/congressoxcvi/relazioni> e anche in pubblico dominio nel sito Wikimedia Commons [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Becquerel,\\_Henri\\_%281852-1908%29.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Becquerel,_Henri_%281852-1908%29.jpg) con numero di riferimento cph.3c02506.

F. Joliot e I. Joliot-Curie, riprodotta da Smithsonian Institution Archives, in pubblico dominio nel sito <http://www.flickr.com/photos/smithsonian/4406405576/in/photostream/> con numero di riferimento Acc 90-105- Science Service, Records 1020s-1970s, Smithsonian Institution Archives.

L. Meitner, e F. Strassmann, riprodotte con permesso dell' "Archiv der Max-Planck-Gesellschaft, Berlin-Dahlem"

O. Hahn, riprodotta con permesso di "Deutsches Bundesarchiv", dal sito Wikimedia Commons [http://it.wikipedia.org/wiki/File:Bundesarchiv\\_Bild\\_183-46019-0001,\\_Otto\\_Hahn.jpg](http://it.wikipedia.org/wiki/File:Bundesarchiv_Bild_183-46019-0001,_Otto_Hahn.jpg) con numero di riferimento BArch, Bild 183-46019-0001.

O. Frisch, riprodotta con permesso dell'American Institute of Physics, da "AIP Emilio Segrè Visual Archives" <http://photos.aip.org/quickSearch.jsp?qsearch=Frisch+Otto+A5&group=10&Submit=GO> con numero di riferimento Catalog #: Frisch Otto A5.

E. Fermi, riprodotta dall'Archivio della Società Italiana di Fisica.

Immagini a pag. 44, parte superiore:

- a) riprodotta dal sito [http://wn.com/positron\\_emission\\_tomography](http://wn.com/positron_emission_tomography) in pubblico dominio con riferimento Hg 6996
- b) riprodotta dal sito <http://www.digitaljournal.com/image/54432> in pubblico dominio
- c) riprodotta con permesso dell'INFN da G. Cuttone, *Asimmetrie*, no 6/4.08, pag. 26, © INFN, 2010.

Immagini a pag. 44, parte inferiore:

- a) riprodotta con permesso dell'autore da R. Cesario, *Il Nuovo Saggiatore*, vol 19, no 1-2, pag. 74, © SIF, 2003
- b) riprodotta con permesso dell'autore da M. Masi, *Il Nuovo Cimento C*, vol 34, no. 1, © SIF, 2011
- c) riprodotta con permesso dell'autore da P. Chomaz, "The impact of Nuclear Physics on Human Life", Relazione Generale al XCVI Congresso Nazionale SIF, Bologna, 2010 pubblicato in rete nel sito <http://www.sif.it/portal/attività/congressoxcvi/relazioni>

Immagine a pag. 84:

riprodotta, con permesso della Collaborazione ALICE, CERN, Ginevra, dal sito [http://aliceinfo.cern.ch/static/Pictures/pictures\\_High\\_Resolution/wwwFirstPbPb/pictures137161\\_global.html](http://aliceinfo.cern.ch/static/Pictures/pictures_High_Resolution/wwwFirstPbPb/pictures137161_global.html) © CERN, 2010.

## Glossario

### A

#### **ABWR: Advanced Boiling Water Reactor**

È un tipo di reattore ad acqua bollente di Generazione III prodotto da General Electric e Toshiba.

#### **Acqua pesante**

È acqua con una quantità di atomi di deuterio molto maggiore di quella nell'acqua normale. Il deuterio è l'isotopo pesante dell'idrogeno il cui nucleo contiene un neutrone oltre al solo protone dell'isotopo più diffuso. L'acqua pesante è usata come refrigerante e moderatore nei reattori a acqua pesante in pressione (PHWR) perché le sue proprietà consentono l'uso di uranio naturale come combustibile. L'acqua pesante costituisce meno dell'1% dell'acqua presente in natura e deve essere separata e concentrata in appositi impianti per l'uso nei reattori nucleari.

#### **ACR: Advanced CANDU Reactor**

È un reattore di Generazione III+. È l'ultima evoluzione del reattore canadese CANDU: esso usa ancora l'acqua pesante come moderatore, ma il fluido termovettore è acqua leggera. Inoltre l'uranio è debolmente arricchito.

#### **ADS: Accelerator Driven System**

Sistema di acceleratori di particelle accoppiati a reattori nucleari per la trasmutazione dei residui radioattivi allo scopo di abbreviare l'emivita delle scorie, permettendo un ulteriore recupero energetico. L'Italia è coinvolta seriamente in alcuni di tali progetti.

#### **Agenzia per il Nucleare e la sicurezza nazionale**

Istituita con la legge n. 99/2009, l'Agenzia è l'autorità nazionale responsabile per la sicurezza nucleare, in linea con le analoghe istituzioni a livello internazionale. Il suo compito è esercitare il potere di regolamentazione tecnica in materia e intervenire nei procedimenti di attualizzazione degli impianti.

#### **AIEA: Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica, vedi IAEA**

#### **AIN: Associazione Italiana Nucleare**

È un'associazione tecnico-scientifica senza fini di lucro, che rappresenta tutti i centri di competenza esistenti in Italia nel campo dell'energia e delle tecnologie nucleari.

#### **ALARA: As Low As Reasonably Achievable**

Procedura da adottare per rendere più bassa possibile l'esposizione alle radiazioni ionizzanti.

#### **AP1000 (AP600): Advanced Passive-1000 (600) pressurized water reactor**

È un reattore di generazione III+ prodotto dalla Westinghouse Electric Company. La tipologia di reattori AP1000 è essenzialmente la versione potenziata del modello AP600, che riesce a generare fino a 1154 MW con lo stesso utilizzo di terreno.

#### **AREVA**

Multinazionale francese che opera nel campo dell'energia, specialmente quella nucleare.

#### **Arricchimento**

In generale è l'insieme dei processi volti ad aumentare la concentrazione di un determinato isotopo di un elemento rispetto al valore con cui si trova in natura. In particolare, nel caso dell'uranio è il processo fisico per aumentare la concentrazione di uranio-235 ( $^{235}\text{U}$ ) al di sopra del livello in cui si trova nell'uranio naturale (0,711%). Sono usati due processi industriali: la diffusione gassosa e la centrifugazione.

#### **Attinidi (Attinoidi)**

Con questo termine si indicano i 15 elementi della tavola periodica compresi tra l'attinio e il laurenzio.

Si tratta dei seguenti elementi: attinio (Ac,  $Z = 89$ ), torio (Th,  $Z = 90$ ), protoattinio (Pa,  $Z = 91$ ), uranio (U,  $Z = 92$ ), nettunio (Np,  $Z = 93$ ), plutonio (Pu,  $Z = 94$ ), americio (Am,  $Z = 95$ ), curio (Cm,  $Z = 96$ ), berkelio (Bk,  $Z = 97$ ), californio (Cf,  $Z = 98$ ), einsteinio (Es,  $Z = 99$ ), fermio (Fm,  $Z = 100$ ), mendelevio (Md,  $Z = 101$ ), nobelio (No,  $Z = 102$ ), laurenzio (Lr,  $Z = 103$ ). Gli attinidi sono tutti radioattivi; il plutonio, inoltre, è anche estremamente velenoso. Gli attinidi con il numero atomico più alto non sono reperibili in natura per via della loro emivita molto breve. Nettunio, americio e curio, sono spesso chiamati “attinidi minori” perché nel combustibile nucleare esausto sono presenti in concentrazione minore rispetto all’uranio e al plutonio, che sono denominati “attinidi maggiori”.

## B

### Barre di controllo

Sono barre di materiali che assorbono i neutroni, come boro, argento, cadmio, indio o afnio. Esse vengono inserite nel nocciolo del reattore per ridurre il numero di neutroni e, quindi, interrompere il processo di fissione, quando è richiesto, o per regolare la potenza del reattore, durante il suo funzionamento.

### becquerel (Bq)

Unità di misura della radioattività, definita come l’attività di un materiale in cui si ha un decadimento al secondo. Si tratta di un’unità molto piccola e, pertanto, nella pratica si usano di norma il Gigabecquerel (GBq), miliardi di becquerel, o il Terabecquerel (TBq), migliaia di gigabecquerel.

### Breeder Reactor

Reattore nucleare che produce più combustibile di quanto ne consuma. Tipicamente questi reattori hanno materiale fertile disposto dentro e intorno al nocciolo del reattore in modo da utilizzare i neutroni prodotti nella fissione per trasmutare il materiale fertile in materiale fissile. Per esempio, si può posizionare  $^{238}\text{U}$  intorno a un reattore veloce che, per trasmutazione produce  $^{239}\text{Pu}$  che a sua volta può essere riciclato e usato come combustibile nel reattore.

### BWR: Boiling Water Reactor

Si tratta di un reattore ad acqua leggera molto usato nel mondo. L’acqua, usata contemporaneamente come moderatore e come refrigerante, è portata all’ebollizione nel reattore. Il vapore prodotto viene quindi utilizzato per generare elettricità.

## C

### CANDU: CANadian Deuterium Uranium reactor.

Questo reattore usa acqua pesante, ossia ossido di deuterio, come moderatore e refrigerante. Ciò permette di usare come combustibile uranio naturale rendendo, quindi, non necessario il processo di arricchimento in uranio-235.

### Ciclo aperto

Nel caso del ciclo aperto, noto in termine tecnico come ciclo *once-through*, l’uranio è bruciato una sola volta nel reattore e il combustibile esausto viene immagazzinato in depositi geologici. Questo metodo utilizza solo l’1-2% circa del contenuto in energia dell’uranio.

### Ciclo chiuso

Nel caso del ciclo chiuso il combustibile scaricato dai reattori viene processato chimicamente per separare l’uranio e il plutonio che possono essere riutilizzati come combustibile. In tal modo il problema dello smaltimento di materiali ad alta attività si pone solo per i prodotti non riutilizzabili (circa il 3%), le cosiddette scorie ad alta attività, che includono solo i prodotti di fissione e gli attinidi minori.

### Ciclo del combustibile nucleare

Il ciclo del combustibile nucleare comprende tutte le operazioni eseguite sul combustibile nucleare che vanno dall’estrazione del minerale fissile, allo sfruttamento (“bruciamento”) nei reattori, fino al ritrattamento (“riprocessamento”) e successivo immagazzinamento delle scorie radioattive.

**CIRTEN**

Consorzio di università italiane (Politecnico di Milano, Politecnico di Torino, Università di Pisa, Università di Roma "La Sapienza", Università di Palermo) che partecipa al progetto IRIS per la fissione nucleare.

**CNR: Consiglio Nazionale delle Ricerche**

È l'ente pubblico nazionale che ha il compito di svolgere, promuovere, diffondere, trasferire e valorizzare l'attività di ricerca nei principali settori di sviluppo delle conoscenze e delle loro applicazioni per lo sviluppo scientifico, tecnologico, economico e sociale del Paese.

**Combustibile nucleare**

È il materiale che nel reattore nucleare si fissiona e produce energia. La maggior parte dei combustibili commerciali contiene uranio arricchito nella sua componente di  $^{235}\text{U}$  (3-5% invece dello 0,711% presente nell'uranio naturale).

**Costante di decadimento**

È un parametro caratteristico di ogni radionuclide che rappresenta la sua probabilità di decadimento nell'unità di tempo. Il suo inverso, o vita media, indica il tempo necessario perché la quantità di sostanza si sia ridotta al 36% circa (esattamente a  $1/e$ ).

**D****Decommissioning**

Azioni tecniche e amministrative adottate per permettere la rimozione di parte o di tutti i controlli da un'installazione nucleare. Il decommissioning di solito comprende vari stadi: chiusura, decontaminazione e smantellamento, demolizione e sgombero del sito.

**Deposito geologico**

È un deposito per le scorie nucleari ad alta attività. Deve essere sotterraneo, a centinaia di metri di profondità per custodire in sicurezza le scorie nucleari. Deve, inoltre, poter resistere ad eventi geologici e essere difficilmente individuabile.

**Deuterio**

Isotopo stabile dell'idrogeno con un protone e un neutrone nel nucleo, invece del solo protone dell'idrogeno. Il deuterio è presente in natura nel rapporto 1 a 6000 rispetto all'idrogeno.

**Difesa in profondità**

È una filosofia di progetto e di operazione impiegata negli impianti nucleari. Consiste nell'assicurare diversi livelli di protezione contro il rilascio di sostanze radioattive. Comprende controlli fisici e amministrativi, barriere fisiche, ridondanza delle funzioni di sicurezza e misure di risposta alle emergenze.

**DOE: Department of Energy**

È il Dipartimento del Governo degli Stati Uniti responsabile della gestione dell'energia e della sicurezza nucleare. Il DOE si occupa del programma nucleare statunitense, sia in ambito civile che militare.

**Dose di radiazioni assorbita**

È la quantità di energia assorbita per unità di massa irraggiata. Si misura in gray (simbolo Gy).

**Dose efficace**

È la somma delle dosi equivalenti nei diversi organi e tessuti del corpo umano moltiplicate per gli appropriati fattori di ponderazione. Tiene conto della diversa radiosensibilità dei tessuti. Si misura in sievert (simbolo Sv).

**Dose equivalente**

È il prodotto della dose media assorbita in un tessuto o organo per il fattore di ponderazione adimensionale della radiazione considerata. Tiene conto della diversa efficacia biologica relativa delle diverse radiazioni sui tessuti viventi. Si misura in sievert (simbolo Sv).

## E

**EC: European Commission (Commissione Europea)**

È l'organo esecutivo dell'Unione Europea.

**EDF: Electricité de France**

È la maggiore azienda produttrice e distributrice di energia in Francia.

**EIA: Energy Information Administration**

È un'agenzia di statistica del Governo USA fondata nel 1977. Produce statistiche ufficiali su problemi energetici.

**Elettronvolt (eV)**

Unità di energia generalmente usata in fisica nucleare. È l'energia cinetica che acquista un elettrone quando viene accelerato da una differenza di potenziale di 1 volt;  $1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J} = 4,45 \cdot 10^{-26} \text{ kWh}$ . Si tratta di una piccola quantità di energia; spesso si usano i MeV, milioni di elettronvolt, e i GeV, miliardi di elettronvolt.

**Emivita**

È il tempo entro cui la metà dei radionuclidi presenti in un materiale si è disintegrata. Conseguentemente, dopo un'emivita, il numero dei nuclei ancora radioattivi si è ridotto alla metà.

**ENEA: Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile.**

È un'Agenzia finalizzata alla ricerca e all'innovazione tecnologica nonché alla prestazione di servizi avanzati nei settori dell'energia, con particolare riguardo al settore nucleare, e dello sviluppo economico sostenibile. L'Agenzia svolge le proprie funzioni con le risorse finanziarie, strumentali e di personale dell'ex Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, che è stato soppresso il 15 settembre 2009.

**EPR: Evolutionary Power Reactor**

È un reattore nucleare di Generazione III+ della tipologia PWR (la refrigerazione del nocciolo e la moderazione dei neutroni vengono ottenuti con acqua naturale in condizioni sottoraffreddate). L'EPR potrebbe essere uno dei reattori scelti dall'Italia per un eventuale ritorno al nucleare.

**EROEI: Energy Return On Energy Invested**

È il "ritorno energetico nell'investimento energetico". Si tratta di un parametro molto importante da tenere presente nella realizzazione di ogni impianto di produzione di energia. Matematicamente è dato dal rapporto tra tutta l'energia che sarà ricavata dall'impianto e tutta l'energia spesa per costruirlo. Tanto più elevato è il valore di tale indicatore, tanto più conveniente è l'impianto di produzione. Un valore inferiore a 1 sta a indicare un'operazione in perdita.

**Euratom**

Organizzazione internazionale istituita, contemporaneamente alla Comunità Economica Europea (CEE), con i trattati di Roma del 25 marzo 1957 allo scopo di coordinare i programmi di ricerca degli Stati membri relativi all'energia nucleare ed assicurare un uso pacifico della stessa.

## F

**Fattore di carico**

È la percentuale di utilizzo di un impianto energetico. Si tratta di un parametro molto importante che, moltiplicato per la potenza dell'impianto, determina l'energia prodotta. Per un corretto confronto dei vari impianti si deve tenere conto dell'energia annua prodotta e non della potenza. Il fattore di utilizzo di una centrale a combustibile fossile si aggira attorno al 90%, mentre per una centrale nucleare è circa l'85% con punte del 95% per le nuove centrali. Per gli impianti eolici oscilla tra il 25% in zone con vento regolare (per esempio in Danimarca) e il 15-20% in zone con vento non regolare (ad esempio in Italia). Gli impianti solari hanno un fattore di utilizzo medio dell'ordine del 10%.

**Fissione nucleare**

È il processo in cui il nucleo di un elemento pesante si spacca in due o più frammenti, liberando una grande quantità di energia e emettendo un certo numero di neutroni. Questa reazione interessa prevalentemente nuclei con numero di massa superiore a 100 ed è molto più facilmente osservabile in quelli aventi una massa intorno al valore di 230. I nuclei pesanti possono subire la fissione spontanea, con probabilità molto bassa. La probabilità di fissione aumenta notevolmente in seguito alla cattura di neutroni.

**G****GBq (gigabecquerel)**

Unità di attività: 1GBq = 1 miliardo di becquerel.

**GIF: Generation IV International Forum**

È un'iniziativa internazionale, avviata nel 2000 dagli USA, cui partecipano dieci Paesi, con il fine di sviluppare i sistemi nucleari di futura generazione ("Generazione IV"), che potranno divenire operativi fra 20 o 30 anni.

**GJ (gigajoule)**

Unità di energia. 1 GJ= 1 miliardo di J.

**gray (Gy)**

Il gray (simbolo Gy) è l'unità di misura della dose assorbita di radiazione del Sistema Internazionale di unità di misura. Un'esposizione di 1 gray corrisponde a una radiazione che deposita 1 joule per chilogrammo di materia.

**H**

**HLW: High-level waste**, vedi **Rifiuti ad alta attività**

**I****IAEA: International Atomic Energy Agency**

È un'agenzia internazionale autonoma (<http://www.iaea.org>) fondata il 29 luglio 1957 nell'ambito delle Nazioni Unite (ONU) – con cui ha un accordo speciale –, con lo scopo di promuovere l'utilizzo pacifico dell'energia nucleare e di impedirne l'utilizzo per scopi militari. L'IAEA controlla, tramite ispettori qualificati, ogni centrale dei Paesi che hanno firmato il trattato di non proliferazione di armi atomiche (1968) per verificare che non venga trafugato illegalmente materiale fissile e per verificare lo stato di ogni centrale o impianto. L'Agenzia ha sede a Vienna e ha uffici regionali a Ginevra, New York, Toronto e Tokyo. L'Agenzia ha anche centri di ricerca e laboratori scientifici a Seibersdorf (Austria) e Trieste.

**IEA: International Energy Agency**

È un'agenzia internazionale (<http://www.iea.org>), con sede a Parigi, nata nel 1974 a seguito della crisi energetica degli anni '70 del secolo scorso. Si tratta di un'organizzazione autonoma, fondata nell'ambito dell'OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), che promuove presso gli Stati membri politiche strategiche per un uso razionale delle fonti energetiche.

**ILW: Intermediate-Level Waste**, vedi **Rifiuti a media attività**

**INTD Reactors: International Near Term Deployment Reactors**

**INFN: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare**

È l'Istituto italiano che promuove, coordina ed effettua la ricerca scientifica nel campo della fisica subnucleare, nucleare e delle astro-particelle, nonché lo sviluppo tecnologico necessario alle attività in tali settori.

**IRIS: International Reactor Innovative & Secure**

È un reattore modulare ad acqua pressurizzata da 335 MW<sub>e</sub>, con circuito primario e generatori di vapore disposti all'interno del contenitore a pressione. Il reattore è sviluppato da un ampio consorzio internazionale, guidato da Westinghouse, con il sostanziale apporto di università e industrie italiane.

**Isotono**

Gli isotoni sono nuclei con lo stesso numero di neutroni, ma diverso numero di massa.

**Isotopo**

Gli isotopi sono atomi con lo stesso numero di protoni ed elettroni (quindi con proprietà chimiche uguali), ma un diverso numero di neutroni (quindi con proprietà fisiche diverse). Possono essere naturali o artificiali, stabili o instabili. Vengono generalmente rappresentati con il simbolo dell'elemento preceduto a esponente dal numero di massa (es. <sup>2</sup>H o deuterio, <sup>12</sup>C, <sup>235</sup>U).

**L****LHC: Large Hadron Collider**

È il più potente acceleratore di particelle costruito dall'uomo. È alloggiato all'interno di un tunnel sotterraneo, lungo circa 27 chilometri, al CERN nei pressi di Ginevra. Accelera protoni ad altissima energia (fino a 7 teraelettronvolt), nonché nuclei pesanti, in particolare nuclei di piombo (fino a 574 teraelettronvolt per nucleo), che poi vengono fatti scontrare tra di loro. Negli scontri si producono moltissime particelle che vengono registrate nei rivelatori e poi studiate dai fisici. I fasci di protoni (o nuclei pesanti) di LHC si incrociano in quattro punti lungo il percorso e in ogni punto è posto un rivelatore: ATLAS e CMS sono rivelatori di carattere generale progettati per osservare qualsiasi nuova fisica la natura ci riservi; LHCb e ALICE sono rivelatori finalizzati allo studio, rispettivamente, dell'asimmetria tra materia e antimateria e della formazione del plasma di quark e gluoni attesa nelle collisioni fra nuclei pesanti. Si ritiene che questo plasma permeasse l'universo primordiale circa dieci microsecondi dopo il Big Bang.

**LLW: Low-Level Waste**, vedi **Rifiuti a bassa attività**

**Loading Factor**, vedi **Fattore di carico**

**LWR: Light Water Reactor**

È un tipo di reattore nucleare raffreddato e/o moderato ad acqua.

**M****Materiale fertile**

Materiale che può diventare fissile in seguito a cattura di un neutrone, eventualmente seguita da decadimento radioattivo. Dal punto di vista applicativo, importanti materiali fertili sono l'uranio-238 (<sup>238</sup>U), che si può trasformare nell'isotopo fissile uranio-239 (<sup>239</sup>U), e il torio-232 (<sup>232</sup>T), che si può trasformare in uranio-233 (<sup>233</sup>U), pure fissile.

**Materiale fissile**

È un materiale che è in grado di sviluppare una reazione a catena di fissione nucleare in seguito a cattura di un neutrone termico. Dal punto di vista applicativo, i più importanti materiali fissili sono l'uranio-233 (<sup>233</sup>U), l'uranio-235 (<sup>235</sup>U) e il plutonio-239 (<sup>239</sup>Pu).

**Massa critica**

È la quantità di materiale fissile necessario a mantenere, in determinate condizioni – quali per esempio forma del materiale fissile, quantità e tipo del moderatore o del riflettore –, la reazione di fissione a catena.

**Moderatore**

È una sostanza usata in un reattore termico per rallentare i neutroni rilasciati dalla fissione fino a portarli all'energia termica in modo da aumentare la loro efficienza a sostenere la reazione a catena. Nella pratica,

per questa funzione, vengono usate acqua, acqua pesante (ossia ricca di deuterio) e grafite. Nei primi due casi il moderatore può coincidere con il refrigerante.

### **MOX: Mixed Oxide fuel**

Combustibile per reattori nucleari fatto da una miscela di uranio naturale e plutonio.

### **MW (megawatt)**

Unità di potenza pari a un milione di watt ( $= 1 \cdot 10^6$  W).

## N

### **NEA: Nuclear Energy Agency (Agenzia per l'Energia Nucleare)**

È un'organizzazione internazionale intergovernativa (<http://www.nea.fr>) creata nel 1958 sotto l'egida dell'OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), con sede a Parigi. La sua missione è quella di assistere i Paesi membri a mantenere e sviluppare, attraverso la cooperazione internazionale, le basi scientifiche, tecnologiche e legali necessarie per un uso sicuro, sostenibile e economico dell'energia nucleare per scopi pacifici.

### **nm (nanometro)**

Unità di misura di lunghezza, pari a 1 milionesimo di metro.

### **Neutrone**

Particella subatomica senza carica elettrica e con massa a riposo di  $1,67493 \cdot 10^{-27}$  kg. I nuclei atomici degli elementi – ad eccezione del più comune isotopo dell'idrogeno, che consiste di un singolo protone – sono composti da protoni e neutroni. Al di fuori del nucleo, i neutroni sono instabili ed hanno una emivita di circa 15 minuti.

### **Neutrone epitermico**

Si chiamano neutroni epitermici quelli con energia cinetica tra 0,1 e 100 elettronvolt (eV).

### **Neutrone termico**

Si chiamano neutroni termici quelli con energia cinetica minore di 0,1 elettronvolt (eV). L'aggettivo termico si usa per indicare che la velocità del neutrone in questione è pari a quella dovuta all'agitazione termica dei nuclei contro i quali i neutroni collidono. I neutroni termici hanno la più alta probabilità di causare la fissione dell'uranio-235 ( $^{235}\text{U}$ ) e del plutonio-239 ( $^{239}\text{Pu}$ ).

### **Neutrone veloce**

Si chiamano neutroni veloci quelli con energia cinetica maggiore di 100 elettronvolt (eV) e minore di qualche milione di elettronvolt (MeV). I neutroni veloci possono provocare la fissione di materiali fissili, ma con probabilità minore di quelle dei neutroni termici. Comunque il numero di isotopi che possono fissionare cresce al crescere dell'energia dei neutroni.

## **NUCLECO**

Società per l'Ecoingegneria Nucleare: è l'operatore italiano per la gestione dei rifiuti a basso e medio livello di radioattività prodotti in Italia.

## O

### **OCSE: Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico, vedi OECD**

### **OECD: Organization for Economic Cooperation and Development**

È un'organizzazione internazionale di studi economici che ha sede a Parigi. Svolge prevalentemente un ruolo di assemblea consultativa che consente un'occasione di confronto delle esperienze politiche, per la risoluzione dei problemi comuni, l'identificazione di pratiche commerciali ed il coordinamento delle politiche locali ed internazionali dei Paesi membri.

**Operatività**

Con questo termine si indica la vita operativa delle centrali nucleari. I primi impianti erano progettati per avere una vita operativa di almeno 20 anni. Ora con i reattori di terza generazione la vita operativa delle centrali può arrivare anche a 60 anni.

**P****Particella  $\alpha$** 

Particella avente carica elettrica positiva ( $+2e$ ) emessa dal nucleo di alcuni atomi radioattivi. Una particella  $\alpha$  è un nucleo di elio e consiste, quindi, di 2 protoni e 2 neutroni.

**Particella  $\beta$** 

Particella emessa dal nucleo in alcuni decadimenti radioattivi. Si tratta o di elettroni ( $\beta^-$ ), che hanno carica elettrica negativa ( $-e$ ), o di positroni ( $\beta^+$ ) che hanno carica elettrica positiva ( $+e$ ).

**Partitioning and transmutation, vedi Separazione e trasmutazione****PBMR: Pebble Bed Modular Reactor (Reattore modulare a letto di sfere)**

Reattore refrigerato a gas ad alta temperatura sviluppato in Sud Africa.

**Positrone**

Particella elementare in tutto simile all'elettrone, ma avente carica elettrica positiva  $+e$ . È l'"antiparticella" dell'elettrone – viene spesso indicato  $e^+$ .

**Prodotti di fissione**

Sono i frammenti nucleari che si producono nella fissione di un nucleo atomico. Possono essere stabili e instabili (ossia radioattivi). Prodotti di fissione importanti, dal punto di vista dell'abbondanza e della radioattività, sono bromo, iodio, cripto, rubidio, stronzio e xeno che, insieme ai loro prodotti di decadimento, costituiscono una parte importante dei rifiuti nucleari.

**Protocollo di Kyoto**

Trattato internazionale in materia ambientale riguardante il riscaldamento globale sottoscritto nella città giapponese di Kyoto l'11 dicembre 1997 da più di 160 Paesi in occasione della Conferenza COP3 della Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici. Il trattato è entrato in vigore il 16 febbraio 2005, dopo la ratifica anche da parte della Russia. Il trattato prevede l'obbligo in capo ai Paesi industrializzati di operare una riduzione delle emissioni di elementi inquinanti in una misura non inferiore al 5,2% rispetto alle emissioni registrate nel 1990 – considerato come anno base – nel periodo 2008-2012. Nessun tipo di limitazione di gas serra è previsto per i Paesi in via di sviluppo, perché tale vincolo rallenterebbe o condizionerebbe la loro crescita. Il protocollo ribadisce, comunque, la necessità di trasferire tecnologie e di costruire capacità anche in questi Paesi. Inoltre impegna i Paesi firmatari alla protezione e estensione delle foreste per favorire l'assorbimento delle emissioni di anidride carbonica.

**Protone**

È una particella dotata di carica elettrica positiva ( $+e$ ) e massa a riposo di  $1,67262 \cdot 10^{-27}$  kg. Può esistere libero o legato in un nucleo atomico.

**Plutonio**

È l'elemento chimico di numero atomico 94. Il suo simbolo è Pu. Il plutonio puro è un metallo argenteo. Viene prodotto nei reattori nucleari bombardando l'uranio-238 con neutroni. È l'elemento oggi più usato nelle bombe nucleari a fissione. Il suo isotopo più importante è il plutonio-239 ( $^{239}\text{Pu}$ ), che ha un'emivita di 24110 anni.

**PWR: Pressurized Water Reactor**

È un reattore nucleare mantenuto sotto alta pressione per impedire all'acqua, usata come refrigeratore, di bollire alle alte temperature di funzionamento. Il calore generato nel reattore è trasportato a uno scambiatore di calore in cui l'acqua di un circuito secondario viene riscaldata per produrre il vapore necessario a generare elettricità.

## R

**Radiazione**

Il termine radiazione viene generalmente utilizzato per indicare un insieme di fenomeni caratterizzati dal trasporto di energia nello spazio. Nel caso specifico indica energia che viaggia sotto forma di particelle di alta velocità o onde elettromagnetiche. Incontriamo radiazioni elettromagnetiche dovunque. La luce visibile, le onde radio e televisive, le onde ultraviolette e le microonde sono esempi di radiazioni elettromagnetiche non ionizzanti, perché non hanno l'energia necessaria per strappare elettroni dagli atomi ("ionizzazione"). I raggi gamma sono invece radiazioni ionizzanti, perché hanno energia sufficiente a ionizzare gli atomi.

**Radiazione ionizzante**

È una radiazione che ha un'energia sufficiente a rimuovere elettroni dalla nuvola degli atomi con cui interagisce, trasformandoli in ioni ("ionizzazione").

**Radiazione terrestre**

È la radiazione emessa dalla Terra, prodotta dal decadimento di radionuclidi primordiali e cosmogenici. La maggior parte di questa radiazione proviene dal decadimento di uranio e torio, elementi molto comuni sulla crosta terrestre, che decadono con tempi di dimezzamento di milioni di anni fino a trasformarsi in piombo, che è stabile e, quindi, non emette radiazioni. Conseguentemente la crosta terrestre contiene, oltre a uranio e torio, anche i prodotti dei loro decadimenti e emette radiazioni. Anche l'aria che respiriamo emette radiazioni dal momento che uno dei nuclei della catena di decadimento dell'uranio è il radon. Si tratta di un gas che, se prodotto in prossimità della superficie terrestre, entra nell'atmosfera.

**Radioattività**

La radioattività è il fenomeno per cui alcuni nuclei, non stabili, si trasformano spontaneamente in altri emettendo particelle o radiazioni. La radioattività non è stata inventata dall'uomo, anzi, al contrario, l'uomo è esposto alla radioattività fin dal momento della sua apparizione sulla Terra. La radioattività è antica quanto l'Universo ed è presente ovunque: nelle Stelle, nella Terra e nei nostri stessi corpi.

**Raggi cosmici**

Sono particelle e nuclei atomici di alta energia che, muovendosi quasi alla velocità della luce, colpiscono la Terra da ogni direzione. Come dice il nome stesso, provengono dal Cosmo, cioè dallo spazio che ci circonda. La loro origine è sia galattica che extragalattica. Quando i raggi cosmici entrano nell'atmosfera terrestre collidono con i nuclei di cui essa è composta. In queste collisioni viene prodotto un gran numero di particelle che a loro volta interagiscono o decadono, creandone delle altre. Si produce così quello che viene chiamato *shower*, ossia doccia di particelle. Molte di esse, soprattutto elettroni, muoni, fotoni e neutrini, arrivano fino alla superficie terrestre e vengono chiamate raggi cosmici secondari per distinguerli da quelli primari che hanno colpito l'atmosfera.

**Raggi gamma (raggi  $\gamma$ )**

Sono una forma di radiazione elettromagnetica di alta energia prodotta dalla radioattività o da altri processi nucleari o subatomici. Se un nucleo può passare ad una configurazione ("stato") più stabile senza variare il numero di protoni e di neutroni, lo fa liberando l'energia in eccesso sotto forma di raggi  $\gamma$ .

**Raggi X**

Sono onde elettromagnetiche emesse nei salti di energia degli elettroni atomici o durante l'accelerazione di particelle cariche. Sono usati principalmente per fini medici (attraverso le radiografie), nell'analisi chimica con la spettrofotometria XRF (X-ray fluorescence) e nell'analisi della struttura dei materiali con la cristallografia a raggi X e con la spettroscopia di assorbimento dei raggi X.

**Reattori di I Generazione**

Si tratta dei reattori costruiti negli anni Cinquanta e Sessanta dello scorso secolo, che vide la costruzione e la sperimentazione di molti prototipi delle più varie concezioni.

**Reattori di II Generazione**

Si tratta di un gran numero di centrali commerciali per la produzione di energia elettrica, in massima

parte ad uranio arricchito ed acqua naturale (pressurizzata o bollente), costruite negli anni Settanta e Ottanta dello scorso secolo. È dai reattori di questa generazione che attualmente proviene la maggior parte dell'energia elettronucleare mondiale.

### **Reattori di III Generazione**

È costituita da reattori già certificati e disponibili sul mercato. Comprende innanzi tutto i reattori avanzati ad acqua naturale, alcuni già in funzione in Giappone, come l'Advanced Boiling Water Reactor (ABWR) da 1400 MW<sub>e</sub> progettato da General Electric e Toshiba, altri in fase di ordinazione o costruzione, come lo European Pressurized Water Reactor (EPR) da 1.600 MW<sub>e</sub>, fornito dalla franco-tedesca AREVA (il primo esemplare di EPR entrerà in funzione in Finlandia nel 2011, altri sono in fase di approntamento (Flamanville, in Francia, e Taishan, in Cina) o di trattativa commerciale in Europa, in Asia e nel Medio Oriente).

### **Reattori di Generazione III+ o International Near Term Deployment (INTD) Reactors**

È una classe di reattori evolutivi rispetto ai reattori di III Generazione che si prevede siano disponibili entro il 2015.

### **Reattori di IV generazione**

La quarta generazione di reattori è costituita da progetti innovativi ancora in fase di studio. Comprende sistemi nucleari che probabilmente raggiungeranno maturità tecnica a partire dal 2030 e saranno disponibili per applicazioni commerciali solo a partire dal 2050. Tale tecnologia potrebbe consentire non solo l'uso di altri materiali, oltre all'uranio, come combustibile, ma anche un'ulteriore riduzione delle scorie ad alta attività.

### **Reattore nucleare**

È un sistema che usa la fissione nucleare per produrre energia. Tutti i reattori sono caratterizzati dal tipo di carburante, il moderatore (tranne i reattori veloci), il refrigerante e le barre di controllo. Altre caratteristiche tipiche sono il riflettore per conservare i neutroni che scappano dal nocciolo, le schermature per proteggere il personale dalle radiazioni, la strumentazione di misura e controllo del reattore e gli impianti di sicurezza.

### **Reattore veloce**

È una categoria di reattore nucleare nel quale la fissione è sostenuta da neutroni veloci. Un tale reattore non ha bisogno di un moderatore di neutroni e deve utilizzare un combustibile nucleare relativamente ricco in materiale fissile rispetto a un reattore termico.

### **Refrigerante**

Il refrigerante assorbe e rimuove il calore prodotto dalla fissione nucleare in un reattore e mantiene la temperatura del combustibile entro limiti definiti. Il calore assorbito viene utilizzato per azionare turbine per produrre elettricità. Quando si usa acqua come refrigerante, il vapore che essa produce quando è riscaldata può essere trasferito direttamente alle turbine; oppure essa, o qualsiasi altro refrigerante, può venire fatta circolare in uno scambiatore di calore che rimuove l'energia termica e produce il vapore. Altri refrigeranti usati sono elio o metalli fusi, come iodio o piombo. Il refrigerante può anche essere usato come moderatore; l'acqua è impiegata in questa duplice funzione nella maggior parte dei reattori.

### **Rifiuti ad alta attività**

Sono rifiuti ad alta attività e lunga emivita che mantengono livelli di radioattività significativi per decine e centinaia di migliaia di anni e possono anche produrre calore. In Italia sono classificati come "Rifiuti di III Categoria". Sono usualmente sottoposti a processi di vetrificazione e immagazzinati in specifici depositi geologici.

### **Rifiuti a bassa attività**

Sono rifiuti che hanno basso livello di radioattività che non richiedono importanti protezioni per la loro manipolazione e possono diventare rilasciabili, senza vincoli radiologici, in un periodo che varia da pochi giorni fino a qualche decennio. In Italia sono classificati come "Rifiuti di I Categoria".

**Rifiuti a media attività**

Sono rifiuti a attività e emivita medie (in Italia sono classificati come “Rifiuti di II Categoria”), per i quali l’isolamento deve essere garantito al massimo per qualche secolo. La soluzione di smaltimento ritenuta più idonea è il deposito superficiale o sub-superficiale a bassa profondità (decine di metri) di tipo “ingegneristico”, in quanto si affida prevalentemente a barriere artificiali.

**Riprocessamento**

È una tecnica di trattamento del combustibile irraggiato, usato nei reattori nucleari, che consiste nella separazione dei suoi elementi costituenti: prodotti della fissione dell’uranio, cioè i rifiuti veri e propri, uranio fissile residuo, che può essere riutilizzato in un’altra centrale, e plutonio. In questo modo la frazione di uranio che viene utilizzata per produrre energia è maggiore e si riduce il volume delle scorie radioattive.

**S****Scorie nucleari**

Con questo termine si indica il combustibile esausto originatosi all’interno dei reattori nucleari nel corso dell’esercizio. Rappresentano un sottoinsieme dei rifiuti radioattivi, che, a loro volta si dividono in tre categorie sulla base delle loro diverse caratteristiche. Quelle più difficili da gestire sono costituite dal combustibile esaurito. Possono essere radioattive per tempi molto lunghi. Possono essere confinate in speciali depositi costruiti nel sottosuolo, oppure riprocessate per essere riutilizzate di nuovo come combustibile nucleare.

**Separazione e trasmutazione**

Il partitioning è il processo di separazione degli elementi radioattivi a lunga vita media e dei prodotti di fissione dal combustibile nucleare esaurito. La trasmutazione è la trasformazione di questi elementi pericolosi, ad alta emivita, in altri, a vita media più breve o stabili, per mezzo di opportuni processi nucleari. Questi due processi, insieme, dovrebbero consentire di ridurre il tempo di isolamento dei rifiuti da alcune migliaia di anni a alcune centinaia di anni.

**sievert (Sv)**

Unità di misura dell’effetto biologico causato dall’esposizione alle radiazioni. È definito come la dose assorbita di qualsiasi radiazione che produce lo stesso danno biologico di 1 Gy di raggi X. Pertanto, un sievert, a differenza di un gray, produce gli stessi effetti biologici indipendentemente dal tipo di radiazione considerata.

**SIF: Società Italiana di Fisica**

La SIF è una società senza fini di lucro che si prefigge di promuovere, favorire e tutelare lo studio e il progresso della Fisica in Italia. La SIF rappresenta la comunità scientifica italiana, dal mondo della ricerca e dell’insegnamento, a quello professionale, pubblico e privato, in tutti i campi della Fisica e in tutti i suoi settori applicativi (Medicina, Biologia, Informatica, Economia e Finanza, Meteorologia e Climatologia, Ambiente, Archeometria, Beni Culturali e altri).

**SOGIN: Società Gestione Impianti Nucleari**

È la società costituita nel 1999 per gestire in sicurezza la chiusura del ciclo di vita delle installazioni nucleari italiane (“decommissioning”). Svolge, inoltre, attività di ricerca, consulenza, assistenza e servizio in campo nucleare, energetico e ambientale.

**T****tep (tonnellate equivalenti di petrolio)**

Unità convenzionale di energia, pari a 10 milioni di kcal, con la quale può essere espressa la quantità di una qualsiasi fonte energetica confrontando la sua potenzialità energetica con quella del petrolio greggio. 1 tep (=  $11 \cdot 628 \text{ kWh} = 41,86 \cdot 10^9 \text{ J}$ ) corrisponde al consumo annuo di energia elettrica di circa 2-3 famiglie italiane.

**Tempo di dimezzamento**, vedi **Emivita**

**TERNA:** Trasmissione Elettricità Rete Nazionale

È la società responsabile in Italia della trasmissione dell'energia elettrica sulla rete ad alta e altissima tensione su tutto il territorio nazionale.

**TNP**

Trattato di non proliferazione nucleare. Attuato sotto l'egida dell'ONU e applicato attraverso il regime ispettivo dell'IAEA, vincola i Paesi firmatari a non destinare a scopi militari i materiali e le tecnologie nucleari acquisite nell'ambito delle applicazioni pacifiche.

**toe (ton of oil equivalent)**, vedi **tep**

**Torio**

È l'elemento chimico di numero atomico 90. Il suo simbolo è Th. Allo stato puro è un solido tenero, grigio. È un metallo radioattivo che potrebbe sostituire l'uranio come combustibile principale dei reattori nucleari. Bombardando con neutroni il torio lo si trasforma in uranio-233 ( $^{233}\text{U}$ ), elemento fissile che può sostenere reazioni a catena. Nel processo la quantità di scorie è relativamente limitata. I combustibili a base di torio producono plutonio in quantità minore di quelli a base di uranio e, soprattutto, con composizione isotopica inadatta per la fabbricazione di ordigni bellici.

**TRASCO: TRASmutazione SCORie**

È il progetto per l'incenerimento delle scorie radioattive sviluppato dall'INFN (Istituto Nazionale di Fisica nucleare) presso i Laboratori Nazionali di Legnaro.

**Trasmutazione**

È la trasformazione di un nucleo in un altro diverso. Processi di trasmutazione si verificano nei reattori nucleari attraverso reazioni di cattura neutronica responsabili della formazione di radionuclidi di lunga emivita. Sono attualmente in corso studi per utilizzare l'irraggiamento neutronico per trasformare elementi radioattivi a lunga emivita in altri a vita media più breve e di più agevole conservazione.

**Trizio**

Isotopo radioattivo dell'idrogeno con due neutroni e un protone. Decade  $\beta^-$  con emivita di 12,33 a. Il trizio è un combustibile per la fusione nucleare.

**TW (terawatt)**

Unità di potenza. 1 TW = 1 miliardo di chilowatt.

**TWh (terawattora)**

Unità di energia. 1 TWh = 1 miliardo di chilowattora.

## U

**UE: Unione Europea**

È un soggetto politico a carattere sovranazionale ed intergovernativo che, dal 1 gennaio 2007, comprende 27 Paesi membri europei, che hanno trasferito all'Unione una parte della loro sovranità o autorità legislativa.

**Uranio**

L'uranio è l'elemento chimico di numero atomico 92. Il suo simbolo è U. È un solido argenteo, malleabile, radioattivo che si estrae da molte rocce tra le quali la pechblenda, in cui è presente come ossido  $\text{UO}_2$ , e la carnotite. L'uranio naturale, ossia che si trova in natura, ha la seguente composizione isotopica: 99,2745%  $^{238}\text{U}$ ; 0,7110%  $^{235}\text{U}$  e 0,0055%  $^{234}\text{U}$ . L'uranio-238 è utilizzato, tramite bombardamento di neutroni, per la produzione di plutonio, combustibile nucleare. L'uranio-235 è adatto alla fissione nucleare ed è l'unico combustibile nucleare naturale.

**Uranio arricchito**

Uranio con una concentrazione di uranio-235 ( $^{235}\text{U}$ ) superiore a quella dell'uranio naturale, pari a circa lo 0,711%.

**Uranio impoverito**

Uranio con una concentrazione di uranio-235 ( $^{235}\text{U}$ ) inferiore a quella dell'uranio naturale, pari a circa lo 0,711%. L'uranio impoverito è generato come prodotto secondario nel processo di arricchimento.

**V****Vetrificazione**

Tecnica di condizionamento dei rifiuti nucleari radioattivi che prevede l'inglobamento in materiale vetroso dei prodotti di fissione e degli attinidi a emivita lunga, estratti dal combustibile nucleare esaurito tramite il riprocessamento. L'obiettivo è quello di stabilizzare il rifiuto in modo che non si degradi né reagisca chimicamente per periodi lunghi, realizzando una matrice resistente e impermeabile all'acqua.

**Vita media**

È la media aritmetica sui tempi di vita di tutti i radionuclidi della stessa specie. È pari all'inverso della costante di decadimento del radionuclide in questione.

**VVER: Vodo-Vodjanoi Energetičesky Reactor**

È un reattore ad acqua pressurizzata. Si tratta della versione Russa dei reattori PWR.

**W****W (watt)**

Unità di misura di potenza nel Sistema Internazionale di unità di misura. Viene spesa la potenza di 1 watt quando 1 joule di lavoro viene compiuto in 1 secondo:  $1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$ . I multipli del watt più utilizzati sono il kilowatt ( $1 \text{ kW} = 1000 \text{ W}$ ), il megawatt ( $1 \text{ MW} = 1 \text{ milione di W}$ ), il gigawatt ( $1 \text{ GW} = 1 \text{ miliardo di W}$ ), il terawatt ( $1 \text{ TW} = 10^{12} \text{ W}$ ).

 **$W_e$  (watt-elettrico) e  $W_{th}$  (watt termico)**

Usualmente la potenza elettrica di un reattore nucleare viene espressa in megawatt elettrici,  $MW_e$ , per distinguerla dalla potenza termica, che rappresenta la quantità di calore generata per unità di tempo. Questa è usualmente espressa in megawatt termici,  $MW_{th}$ . In un reattore ad acqua leggera (LWR) l'efficienza di trasformazione dell'energia termica in elettricità è pari a circa il 33%; pertanto un impianto con una potenza termica di circa  $3300 \text{ MW}_{th}$  ha una potenza elettrica di  $1000 \text{ MW}_e$ .

**World Nuclear Association (WNA)**

Associazione internazionale cui fanno capo tutte le industrie che operano nel settore nucleare civile. Ha sede a Londra (<http://www.world-nuclear.org>) e svolge un ruolo di analisi e coordinamento tra le diverse aziende e tiene sotto costante controllo i reattori operativi nel mondo, monitora lo stato delle scorie e della produzione di uranio e svolge un ruolo di divulgazione delle tematiche nucleari.

---

© 2010, Società Italiana di Fisica, Proprietà letteraria riservata

---

*Giornale di Fisica*, Vol. 51, Suppl. 1  
Associato all'Unione Stampa Periodica Italiana

Questo numero è stato prodotto e realizzato dall'ufficio editoriale del *Giornale di Fisica*, Bologna  
e stampato a Bologna da Compositori Industrie Grafiche  
nel mese di dicembre 2010

---

Direttore Responsabile: LUISA CIFARELLI

---

Autorizzazione del Tribunale di Bologna 2651 del 19 Luglio 1956