



ITALIAN PHYSICAL SOCIETY
SOCIETÀ ITALIANA DI FISICA

"L'energia nella scuola"

Enzo De Sanctis

INFN-Laboratori Nazionali di Frascati

Società Italiana di Fisica

Il Progetto

PUBBLICAZIONE DI FASCICOLI SULLE PIÙ IMPORTANTI E PROMETTENTI FONTI ENERGETICHE, LE LORO POTENZIALITÀ E I LORO PROBLEMI.

SCOPO **DIDATTICO/FORMATIVO** PER STUDENTI/INSEGNANTI
INFORMATIVO PER UN PUBBLICO PIÙ VASTO.

IL TESTO È ELEMENTARE: I CONCETTI E GLI ASPETTI SCIENTIFICI E TECNOLOGICI SONO PRESENTATI IN MANIERA SEMPLIFICATA, TALE DA NON RICHIEDERE UNA SPECIFICA CONOSCENZA SU ALCUNO DEGLI ARGOMENTI TRATTATI.

I FASCICOLI SONO PUBBLICATI COME NUMERI SPECIALI DEL "**GIORNALE DI FISICA**" RIVISTA DELLA SIF PER GLI INSEGNANTI DELLE SCUOLE.

Obiettivo

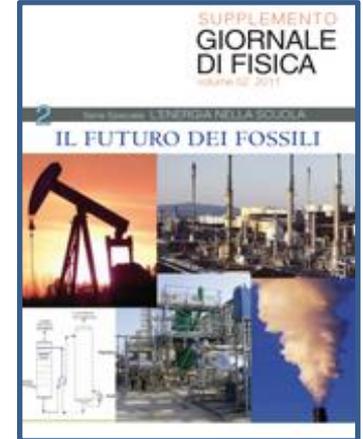
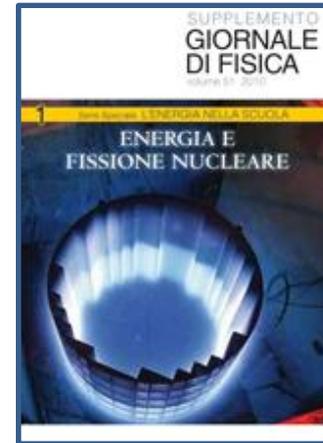
- PROMUOVERE L'APPROCCIO SCIENTIFICO NEL DIBATTITO SUI PROBLEMI DELL'ENERGIA.
- EVIDENZIARE LE POTENZIALITÀ DELLA FISICA E DELLA CHIMICA PER LO SVILUPPO DELLE TECNOLOGIE DI PRODUZIONE, TRASFORMAZIONE, TRASMISSIONE E RISPARMIO DELL'ENERGIA.
- STIMOLARE L'INTERESSE DEI GIOVANI PER LA RICERCA E LA SPERIMENTAZIONE SCIENTIFICA ILLUSTRANDO LE NUOVE ATTIVITÀ DI RICERCA E SVILUPPO IN CORSO NEL CAMPO ENERGETICO.

**Istituzioni coinvolte:
SIF, SCI, AIF, INFN, ENEA, INGV**

Il piano editoriale

I Fascicoli previsti

1. Energia nucleare da fissione
2. Il Futuro dei fossili.
3. CO₂ rifiuto o risorsa.
4. Fotovoltaico.
5. Fonti perenni naturali (idroelettrico, geotermico, eolico, solare termodinamico).
6. Produzione e trasporto dell'energia.
Efficienza energetica.
7. Energia dalle biomasse.
8. Pile ed accumulatori: l'energia portatile.
9. Energia nucleare da fusione.



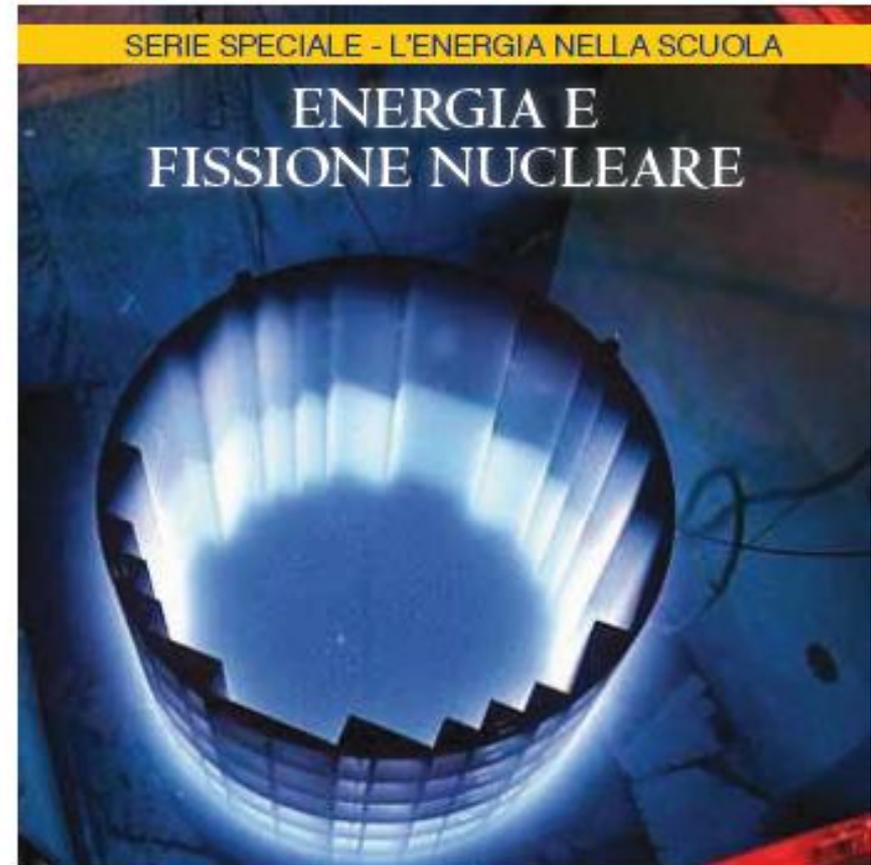
www.sif.it/SIF/it/portal/attivita/energy/scuola

SUPPLEMENTO N.1
GIORNALE
DI FISICA
volume 51 2010

Il primo fascicolo "Energia e Fissione Nucleare", prodotto con un contributo del MIUR, è stato stampato in 6000 copie che saranno distribuite gratuitamente alle scuole tenendo conto della uniforme copertura di tutte le Regioni.

Per ricevere la versione cartacea del fascicolo no. 1 (opzione riservata agli istituti scolastici superiori), registrare i propri dati al seguente [link](#).

La versione elettronica del fascicolo no. 1 è disponibile in accesso libero al seguente [link](#).



Sommario

PREFAZIONE	5		
PREMESSA	7		
1. FISICA NUCLEARE E RADIOATTIVITÀ	9	2.6 Sicurezza degli impianti nucleari	72
1.1 Al cuore della materia	9	2.7 Gestione dei rifiuti radioattivi	74
1.1.1 L'atomo	9	2.7.1 Gestione dei materiali a bassa e media attività	75
Approfondimento: Visualizzare gli atomi	11	2.7.2 Gestione dei materiali ad alta attività	77
1.1.2 Il nucleo	12	2.7.3 Sviluppi della ricerca	78
Approfondimento: Densità nucleare	14	Approfondimento: Volume dei rifiuti radioattivi	79
1.2 La forza nucleare forte e la stabilità dei nuclei	15	2.8 Nuove frontiere: Ricerca e Sviluppo	82
1.3 L'energia di legame nucleare	18	2.9 Formazione	83
1.4 Le reazioni nucleari	24		
1.5 Nuclei instabili e radioattività	26	Appendice A: Proliferazione nucleare	87
1.6 Tempo di dimezzamento, vita media, attività	28		
Approfondimento: Famiglie radioattive	30	Appendice B: I tre referendum del 1987 sul nucleare in Italia	87
1.7 Radioattività naturale e artificiale	33		
Approfondimento: Effetti biologici delle radiazioni. Dosimetria	35	Crediti iconografici	90
1.8 Applicazioni delle radiazioni ionizzanti in medicina, industria e ricerca	40		
Approfondimento: Metodi di datazione	41	Glossario	91
2. ENERGIA DA FISSIONE NUCLEARE	45		
2.1 La Fissione nucleare	45	INDICE DEI QUADRI DI SINTESI	
Approfondimento: La cattura di neutroni su uranio	48	Quadro 1: L'atomo	10
2.2 La reazione a catena	49	Quadro 2: Nuclei stabili. Isotopi e isotoni	17
2.3 Applicazioni energetiche della fissione nucleare	53	Quadro 3: L'equivalenza massa-energia	24
2.3.1 La fisica del reattore	53	Quadro 4: La radioattività	27
2.3.2 Il reattore nucleare termico	54	Quadro 5: Radioattività naturale e artificiale	34
Approfondimento: Il rallentamento dei neutroni	57	Quadro 6: Effetti delle radiazioni sull'uomo	38
2.3.3 Tipi di reattori nucleari	60	Quadro 7: La fissione nucleare e la reazione a catena	52
Approfondimento: Le generazioni di reattori nucleari	63	Quadro 8: Reattori nucleari	60
2.4 Il ciclo del combustibile	67	Quadro 9: Eventi storici della fissione nucleare	66
2.5 Riserve naturali di combustibile nucleare e loro utilizzo	69	Quadro 10: Energia nucleare	69
		Quadro 11: La sicurezza nucleare	74
		Quadro 12: I rifiuti radioattivi	81

Tre livelli di lettura

- IL **TESTO NORMALE**, illustra in modo elementare e didattico la materia trattata.
- **GLI APPROFONDIMENTI**, di argomenti specifici a beneficio dei lettori più curiosi.
- I **QUADRI DI SINTESI**, evidenziano, con linguaggio semplice e autoconsistente, i punti salienti degli argomenti trattati. La loro lettura permette di farsi un'idea corretta e essenziale dei temi trattati

Gli Approfondimenti

Capitolo 1 Fisica nucleare e radioattività

- Visualizzare gli atomi
- Densità nucleare
- Famiglie radioattive
- Effetti biologici delle radiazioni
- Metodi di datazione

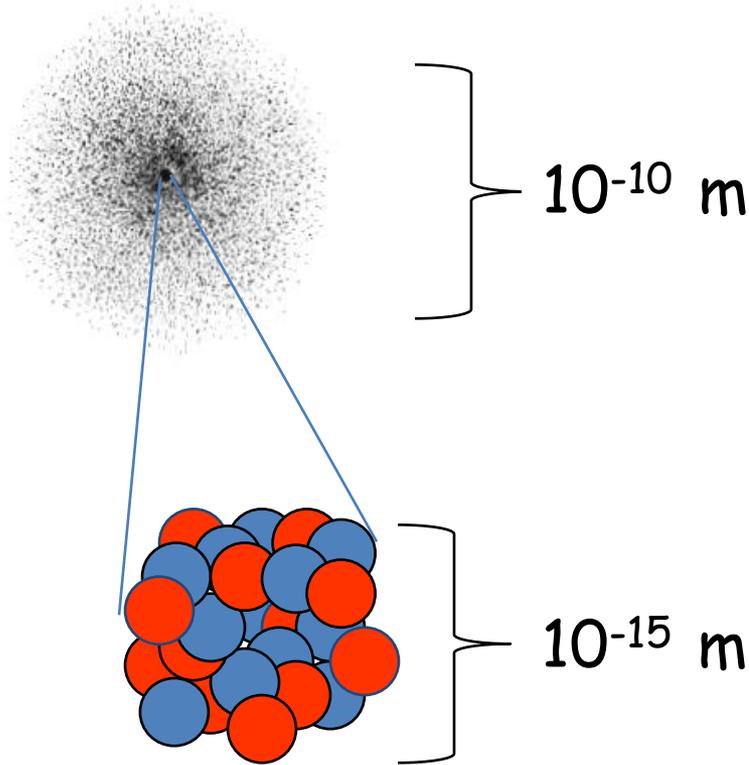
Capitolo 2 Energia da fissione nucleare

- La cattura di neutroni su uranio
- Il rallentamento dei neutroni
- Le generazioni dei reattori nucleari
- Volumi dei rifiuti radioattivi

I Quadri di sintesi

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

L'atomo



$$R_{\text{atomo}} = 100\,000 R_{\text{nucleo}}$$

$$M_{\text{nucleo}} = (3670 \text{ a } 4750) M_{\text{elettroni}}$$

$$(m_n - m_p) / (m_n + m_p) < 0,13\%$$

$$\text{Densità nucleare} \sim 10^{17} \text{ kg/m}^3$$

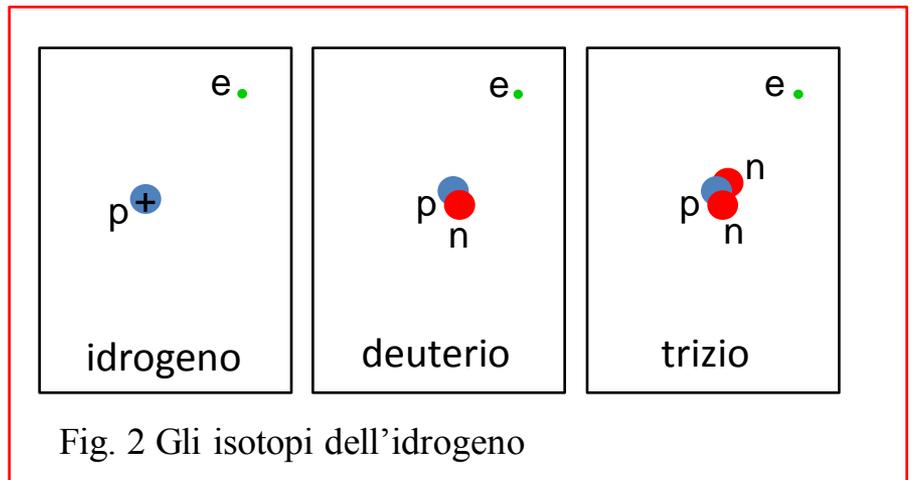
Esempio 1: Calcolare il raggio dei nuclei ${}^1\text{H}_1$, ${}^{27}\text{Al}_{13}$ e ${}^{238}\text{U}_{92}$.

Esempio 2: Calcolare la densità della materia nucleare.



$$A = N + Z$$

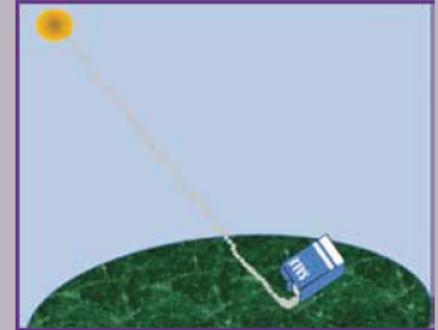
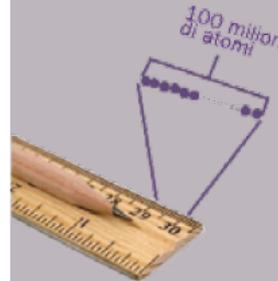
Isotopi: ${}^{12}\text{C}_6$, ${}^{13}\text{C}_6$, ${}^{14}\text{C}_6$
 Isotoni: ${}^{14}\text{C}_6$, ${}^{13}\text{N}_7$, ${}^{16}\text{O}_8$
 Isobari: ${}^6\text{He}_2$, ${}^6\text{Li}_3$, ${}^6\text{Be}_4$



Quadro 1: L'atomo

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!



* 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.

.....

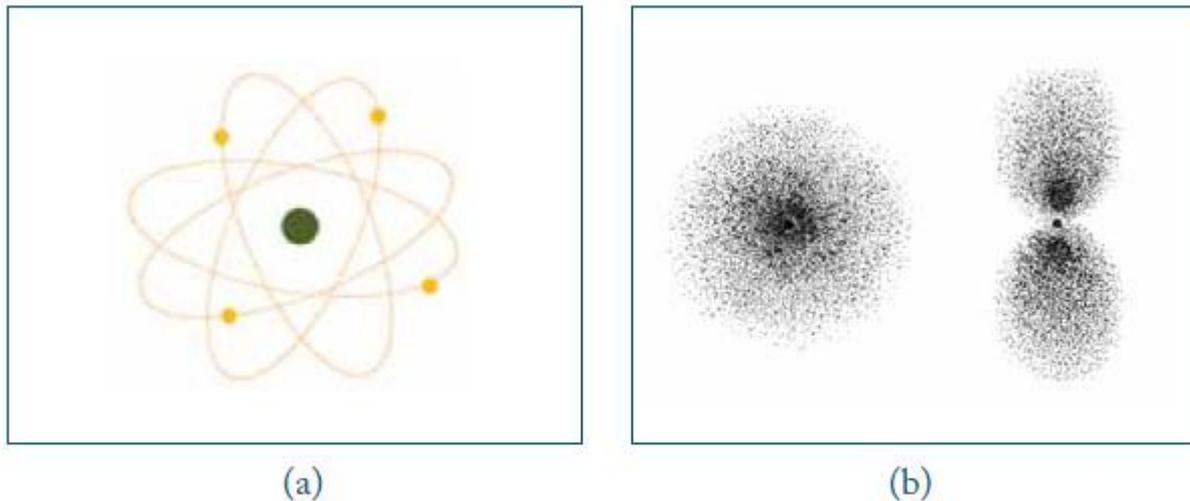


Fig. 1. – (a) Rappresentazione schematica, ormai superata, di un atomo con il nucleo al centro e gli elettroni che gli orbitano intorno. (b) Nuvole elettroniche dell'atomo d'idrogeno in due diversi "stati" di energia: maggiore addensamento dei puntini neri significa maggiore probabilità di trovare l'elettrone.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

Gli aspetti quantitativi

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 $6,6447 \cdot 10^{-27}$ kg.

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

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

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

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.

Esempio 9: Calcolare quanta energia occorre per spezzare un nucleo ^{12}C in tre particelle α .

Esempio 10: Calcolare quanta energia si libera nella reazione $^2\text{H}_1 + ^3\text{H}_1 \rightarrow ^4\text{He}_2 + n$, in cui un nucleo di deuterio e uno di trizio si fondono formando un nucleo di elio e un neutrone libero.

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 ^4He 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.

RADIOATTIVITA' NATURALE E ARTIFICIALE

EFFETTI DELLE RADIAZIONI SULL'UOMO

QUADRO 5: RADIOATTIVITA' 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").

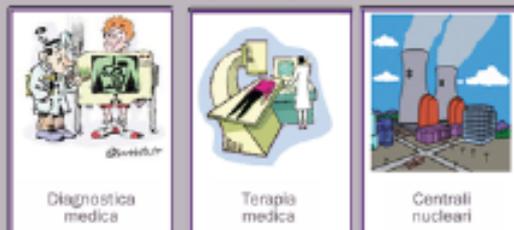
Radioattività naturale



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.

QUADRO 6: EFFETTI DELLE RADIAZIONI SULL'UOMO

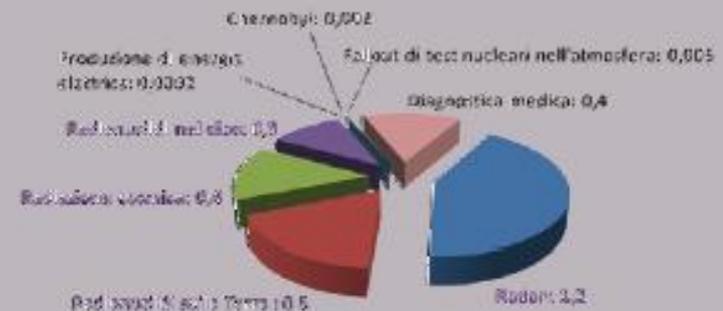
Quando si è esposti alle radiazioni, quando cioè si assorbe una certa energia dovuta a esse, si dice che si riceve una "dose" di radiazioni.

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 di sotto 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 della 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-



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.)

APPROFONDIMENTO: EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI. DOSIMETRIA

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 α , β , γ e di neutroni con la materia sono diverse e dipendono inoltre dall'energia delle radiazioni.

La radiazione α può essere fermata da un foglio di carta, quella β può attraversare 1-2 cm di tessuto umano, i raggi γ 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 α e β , 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 α , che hanno massa assai maggiore (circa ottomila volte) delle particelle β , perdono energia assai più rapidamente e quindi vengono arrestate da piccoli spessori di materiale.

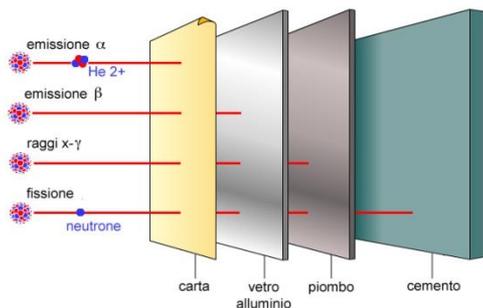


Fig. 7. – Il potere penetrante delle diverse radiazioni.

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

Radiazione	w_R
raggi X, γ di qualsiasi energia	1
elettroni e positroni di qualsiasi energia	1
protoni di energia > 2 MeV	5
particelle α , 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

LA FISSIONE NUCLEARE

LA REAZIONE DI FISSIONE

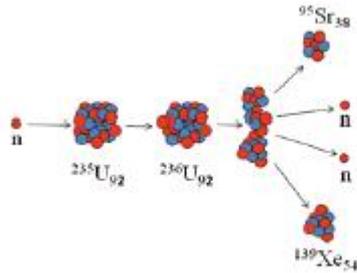


Fig. 9. - Rappresentazione schematica della reazione di cattura di un neutrone da $^{235}\text{U}_{92}$ con produzione di un nucleo $^{236}\text{U}_{92}$ che, in un tempo minore di 10^{-12} s, si fissiona in $^{95}\text{Sr}_{38}$ e $^{139}\text{Xe}_{54}$, emettendo 2 neutroni.

LA FISICA DEL REATTORE NUCLEARE

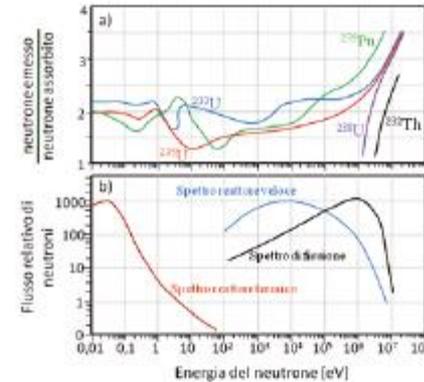


Fig. 11. - a) Neutroni emessi per evento di fissione degli elementi indicati, in funzione dell'energia del neutrone primario. b) Tipiche distribuzioni di energia dei neutroni emessi nella fissione (curva nera) e dei neutroni in un reattore veloce (curva azzurra) e in un reattore termico (curva rossa).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

LA REAZIONE A CATENA

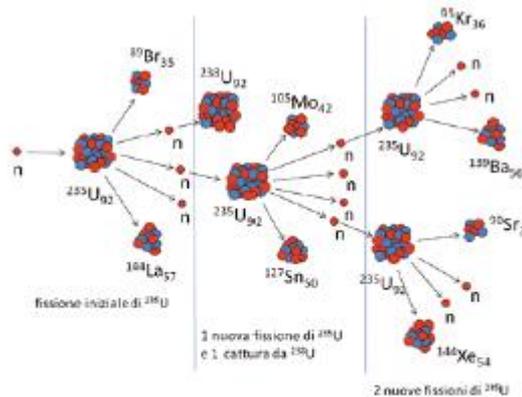


Fig. 10. - Schema di un'ipotetica reazione a catena originata da un processo di fissione di un nucleo di ^{235}U in $^{87}\text{Br}_{35}$ e $^{144}\text{La}_{57}$ più tre neutroni. Nel secondo stadio, uno di questi neutroni viene perso, un altro viene assorbito da un nucleo di ^{238}U e il terzo produce una nuova fissione di un nucleo di ^{235}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}U , rispettivamente in $^{79}\text{Kr}_{36}$ e $^{137}\text{Ba}_{56}$ e $^{93}\text{Sr}_{38}$ e $^{144}\text{Xe}_{54}$.

NOCCIOLO DEL REATTORE NUCLEARE

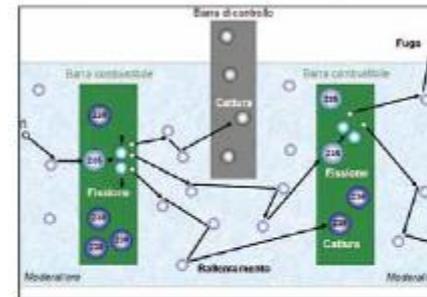
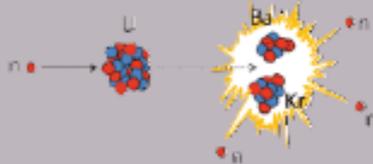


Fig. 12. - Descrizione schematica del nocciolo di un reattore: sono mostrate le barre di combustibile (rettangoli verdi) e quelle di controllo (rettangoli grigi) immerse nel materiale moderatore (azzurro). Le sfere con i numeri 235 e 238 rappresentano i nuclei degli isotopi ^{235}U e ^{238}U ; quelle 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.

I RELATIVI QUADRI DI SINTESI

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}U , presente nell'uranio naturale solo con una percentuale molto bassa (0,711%). Sorge quindi la necessità di arricchire artificialmente il contenuto di ^{235}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.

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 legno, 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

un reattore moderato e raffreddato ad acqua di 1000 MW_e (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_e produce in un anno la stessa quantità di energia di 70 chilometri quadrati di pannelli solari o alcune migliaia di mulini a vento.



1 kg di uranio



22000 kg di carbone

1 kg di uranio = 22000 kg di carbone
45000 kg di legno
15000 kg di petrolio
14000 kg gas liquido

Gli aspetti quantitativi

Esempio 12: Gli isotopi ^{238}U e ^{235}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.

Esempio 13: Un isotopo radioattivo ^{124}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.

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.

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).

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

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 Δt dei fossili supponendo la totale assenza di $^{87}\text{Sr}_{38}$ al momento della formazione della roccia (l'emivita del Rb è $4,75 \cdot 10^{10}$ a).

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

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.

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

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

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

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).

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

IL CICLO DEL COMBUSTIBILE

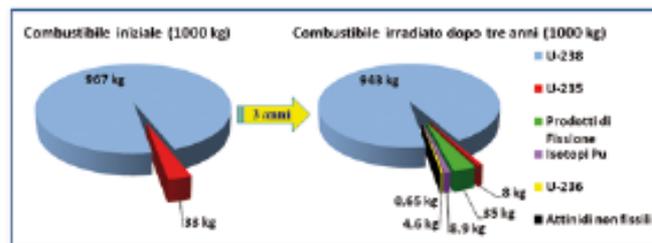


Fig. 15. - Trasformazione della composizione del combustibile nucleare in tre anni di funzionamento in un reattore nucleare. Il combustibile iniziale è costituito da ^{238}U e ^{235}U in percentuali rispettivamente del 96,7% e del 3,3%. Nel combustibile irradiato l' ^{238}U scende al 94,3% e l' ^{235}U allo 0,8%. La rimanente frazione è costituita da prodotti di fissione - ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{92}Zr , ^{99}Tc , ^{99}Kr , ecc. - (pari al 3,5%), vari isotopi del plutonio (0,89%), ^{236}U (0,46%) e attinidi non fissili (0,065%).

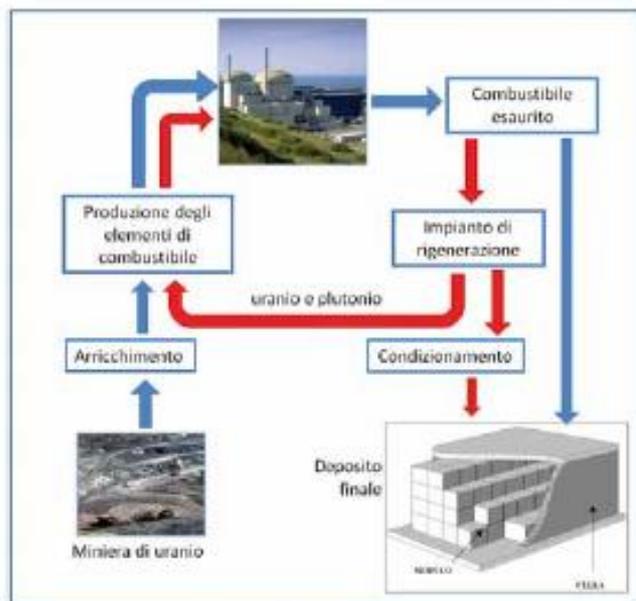


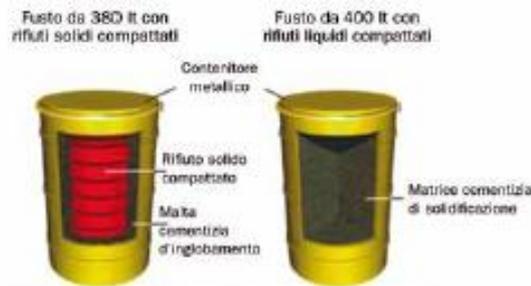
Fig. 16. - Il ciclo del combustibile nucleare comprende tutte le operazioni eseguite sul combustibile nucleare che vanno dall'estrazione del minerale fissile fino all'immagazzinamento delle scorie radioattive. Nel ciclo aperto (freccie blu) l'uranio è estratto dal giacimento, trasformato in materiale fissile, bruciato una sola volta nel reattore e depositato in un sito di smaltimento. Nel ciclo chiuso (freccie rosse) il combustibile esaurito 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.

LE RISERVE DI URANIO

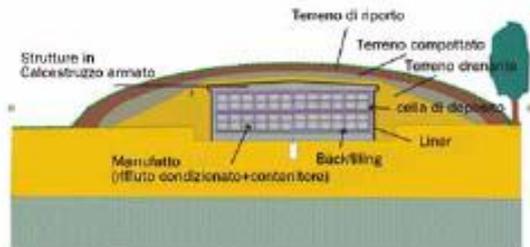


Fig. 17. - Distribuzione globale delle riserve di uranio identificate al 2007. (Fonte: NEA, *Uranium 2007: Resources, production and demand*.)

LA GESTIONE DEI RIFIUTI RADIOATTIVI



(a) Rifiuti radioattivi condizionati all'interno di fusti di acciaio



(d) Schema di deposito superficiale

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

LE SCORIE RADIOATTIVE

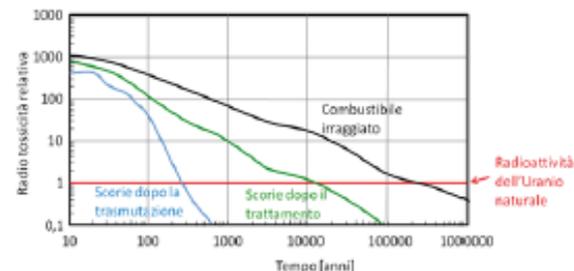


Fig. 20. - Decadimento dei materiali radioattivi ad alta attività e a lunga emivita costituenti il combustibile nucleare esaurito. Il combustibile irradiato scaricato dal reattore, che contiene uranio, plutonio, attinidi minori e prodotti di fissione, torna alla radioattività dell'uranio originale in 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.)

Tab. VIII. - Emissioni e rilasci (in tonnellate all'anno) per un impianto di 1000 MW_e.

Impianto	CO ₂	SO ₂	MO _x	Polveri	Residui di produzione
Nucleare	0	0	0	0	100
Carbone	7500000	60000	22000	1300	250000
Olio combustibile	6200000	43000	10000	1600	70000
Gas	4300000	35	12000	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_e.

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.

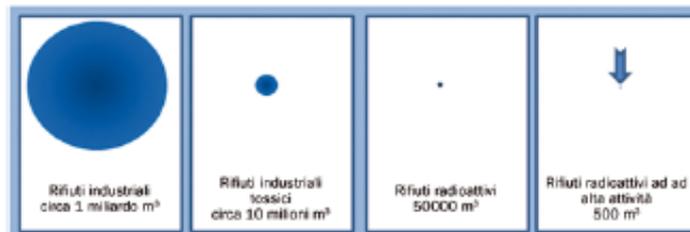


Fig. 21. - Confronto tra le quantità dei vari tipi di rifiuti prodotti all'anno nell'Unione Europea. (Fonte: OECD-NEA, *Nuclear Energy Today*, 2005 - ISBN 92-64-10328-7.)

Il Glossario

131 voci, 13 pagine

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.

ADS: acronimo di *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.

Le Appendici

Appendice A; Proliferazione nucleare

Appendice B; I tre Referendum del 1987 sul nucleare
in Italia

[www.sif.it/SIF/it/portal/
attivita/energy/scuola](http://www.sif.it/SIF/it/portal/attivita/energy/scuola)