



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**", LA 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.

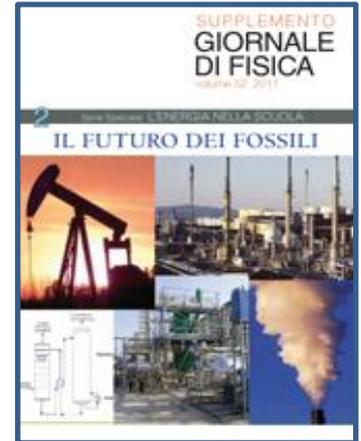
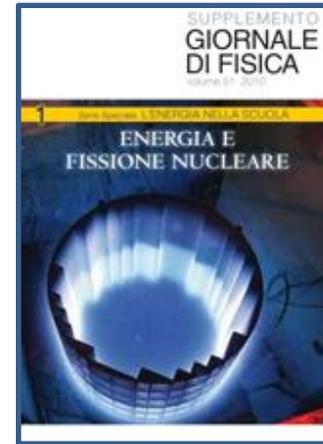
Iniziativa congiunta SIF-SCI

Istituzioni coinvolte: AIF, INFN, ENEA, INGV

Il piano editoriale

I Fascicoli previsti

1. Energia nucleare da fissione.
2. Il Futuro delle fonti 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.



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 **Esempi** per approfondire in modo quantitativo alcuni aspetti particolarmente importanti.
- Il **Glossario** (termini tecnici, unità di misura, sigle, acronimi, ...)

Il Fascicolo N. 1

Energia e Fissione Nucleare

ISBN

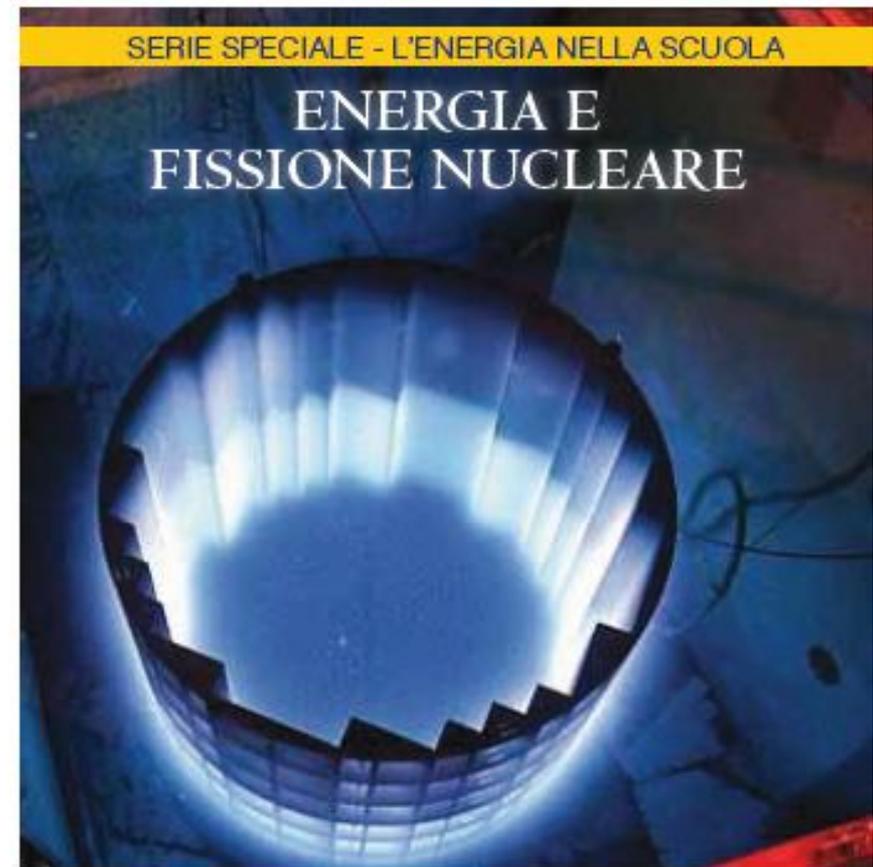
www.sif.it/SIF/it/portal/attivita/energy/scuola

SUPPLEMENTO N.1
GIORNALE
DI FISICA
volume 51 2010

Stampato, con contributo del MIUR, in 6000 copie che verranno **distribuite gratuitamente alle scuole** tenendo conto della uniforme copertura di tutte le Regioni. Per ricevere copie a stampa gli Istituti scolastici interessati devono **registrarsi al sito web**.

La versione elettronica è **scaricabile in accesso libero dal sito web**.

**Totale downloads dal 29 marzo:
876 (circa 5 al giorno)**



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.	35
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

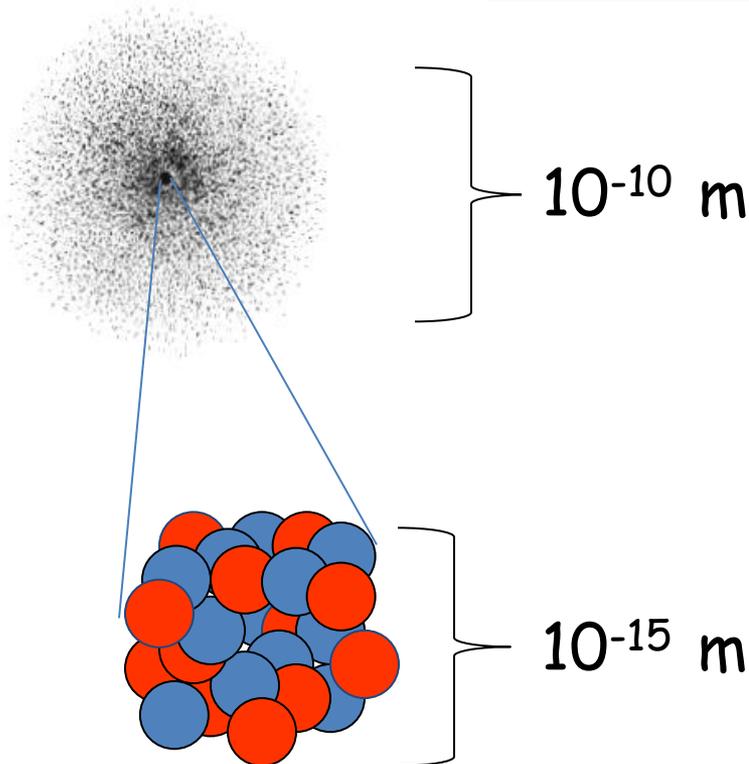
2 Capitoli, 2 Appendici, 1 Glossario, 24 Esempi

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

L'atomo e il nucleo



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

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

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

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

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: $^6\text{He}_2, ^6\text{Li}_3, ^6\text{Be}_4$



$$A = N + Z$$

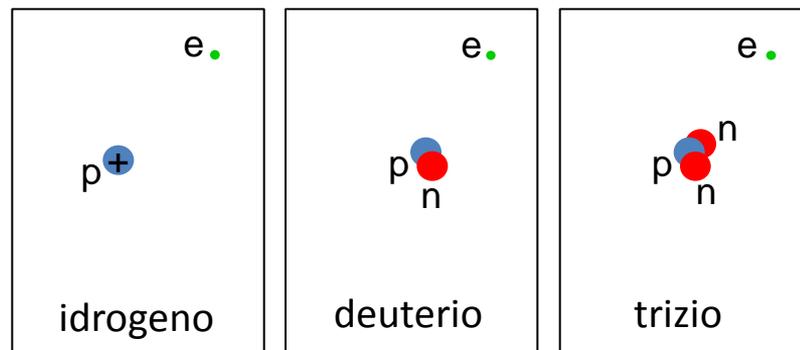


Fig. 2 Gli isotopi dell'idrogeno

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.

GLI APPROFONDIMENTI

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.

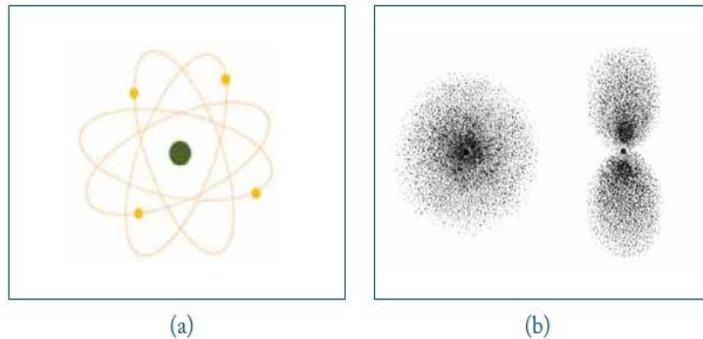


Fig. 1. – (a) Rappresentazione schematica, ormai superata, di un atomo con il nucleo al centro e gli elettroni che gli orbitano intorno. (b) Nuvole elettroniche dell'atomo d'idrogeno in due diversi "stati" di energia: maggiore addensamento dei puntini neri significa maggiore probabilità di trovare l'elettrone.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

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 a

Tabella II. – Valori delle densità di alcune sostanze.

Tipo di sostanza	Densità (kg/m^3)
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	$\sim 10^{-27}$

Quadro 1: L'atomo

QUADRO 1: L'ATOMO

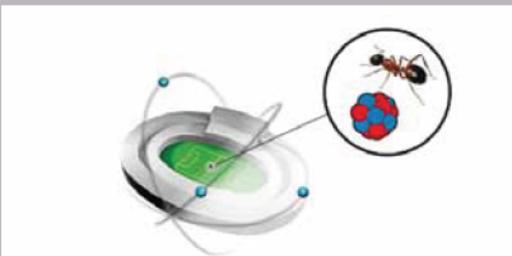
Gli atomi hanno dimensioni molto piccole, con diametri di qualche decimo di nanometro; per formare un segmento lungo un centimetro occorrerebbe metterne in fila cento milioni.



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!



©INFN 2009, riprodotta per gentile concessione da Asimmetria, 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.

Quadro 2: Nuclei stabili: isotopi e isotoni

QUADRO 2: NUCLEI STABILI. ISOTOPI E ISOTONI

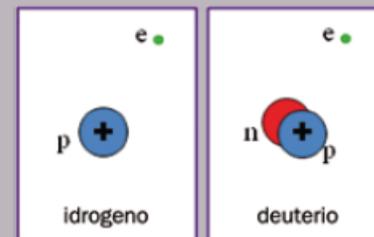
Solo certe combinazioni di protoni e neutroni danno luogo a formazione di nuclei stabili. Queste combinazioni realizzano l'equilibrio tra le forze nucleari (attrattive) e le forze elettrostatiche (repulsive) che agiscono tra i nucleoni.

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*.

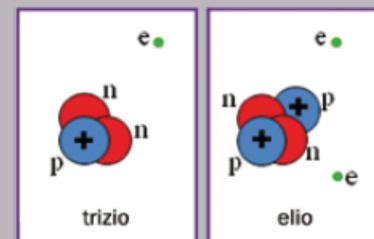
Per esempio, idrogeno e deuterio sono isotopi.



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

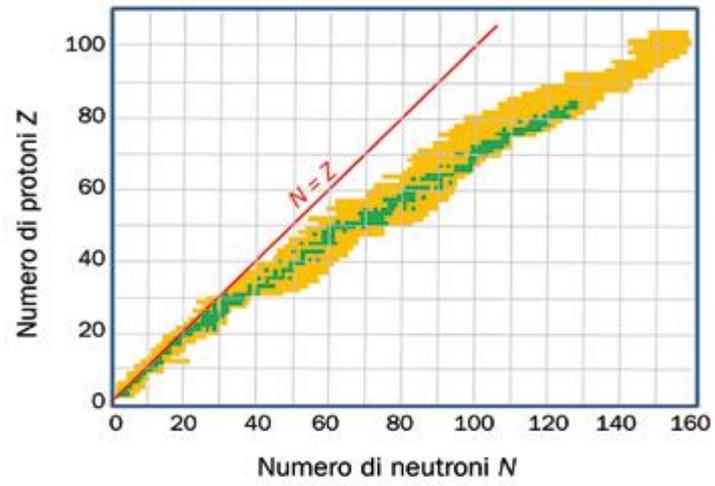
I due nuclei sono detti *isotoni*.

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

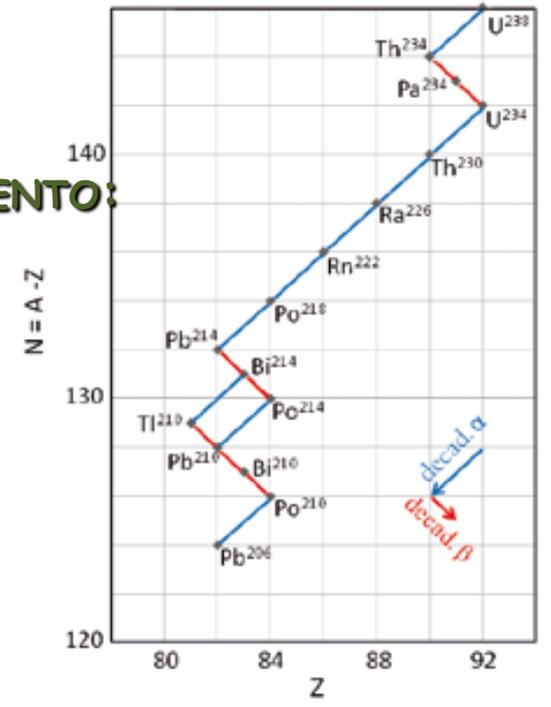


Fisica nucleare e radioattività

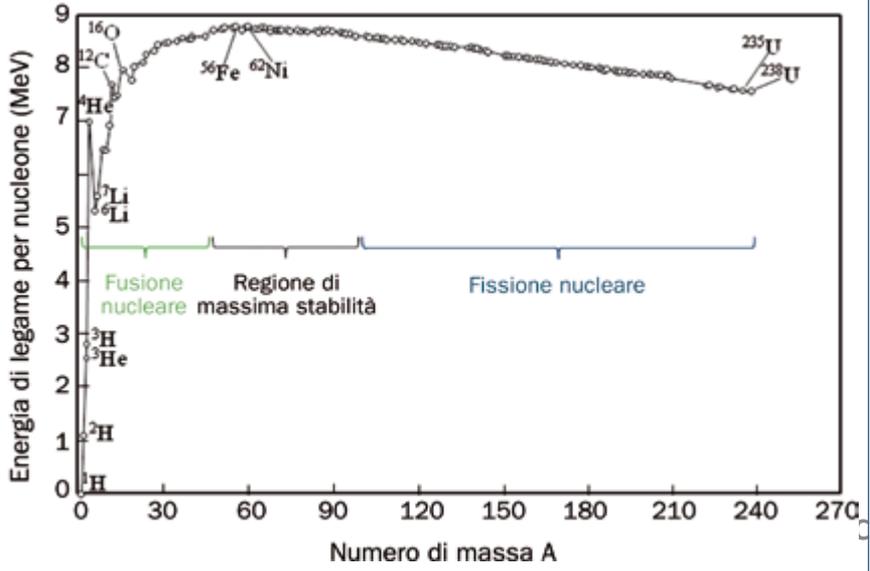
LA FORZA NUCLEARE FORTE E LA STABILITÀ DEI NUCLEI



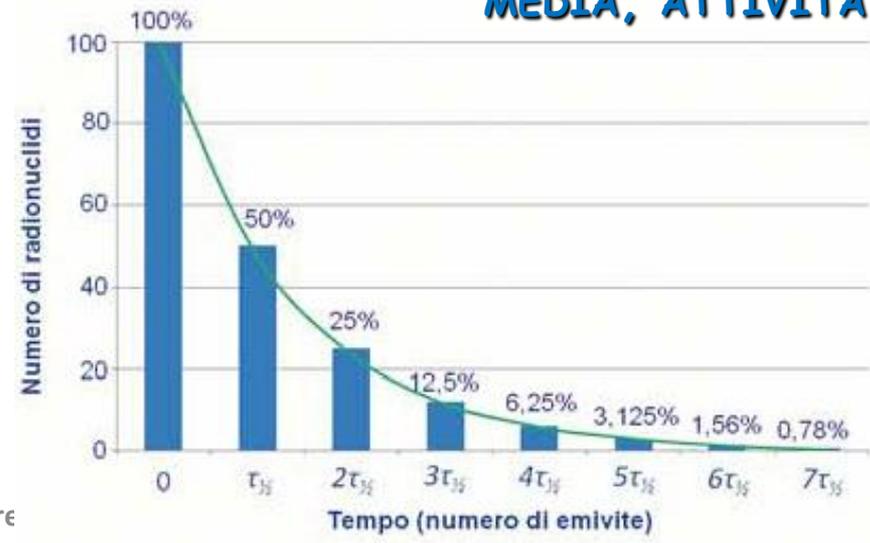
APPROFONDIMENTO: FAMIGLIE RADIOATTIVE



L'ENERGIA DI LEGAME NUCLEARE

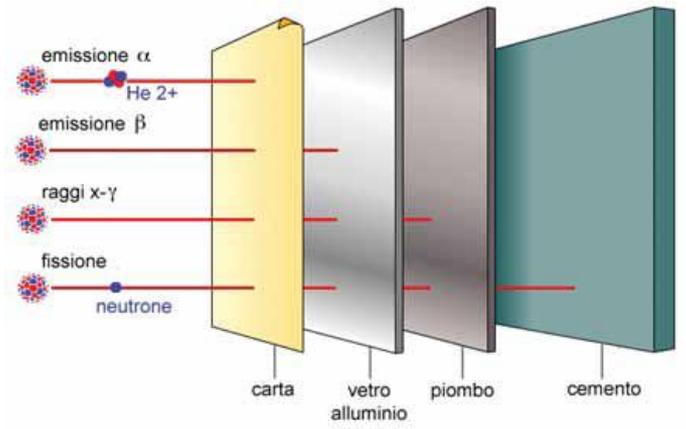


TEMPO DI DIMEZZAMENTO, VITA MEDIA, ATTIVITÀ



APPROFONDIMENTI: EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI. DOSIMETRIA. METODI DI DATAZIONE.

POTERE PENETRANTE DELLE RADIAZIONI



FATTORI DI PONDERAZIONE DELLE RADIAZIONI E DI TESSUTI E ORGANI

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

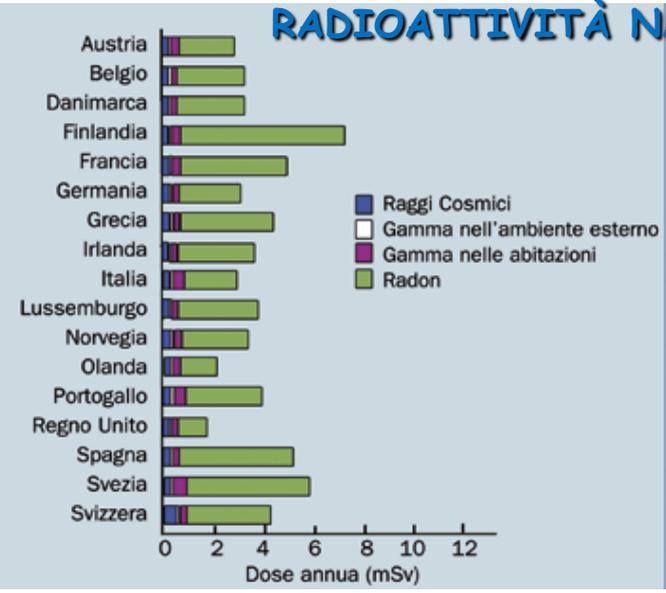
Radiazione	w_R
raggi X, y di qualsiasi energia	1
elettroni e positroni di qualsiasi energia	1
protoni di energia > 2 MeV	5
particelle α , frammenti di fissione, nuclei pesanti	20
neutroni di energia < 10 keV	5
10–100 keV	10
100–2000 keV	20
2–20 MeV	10
>20 MeV	5

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

DOSE EFFICACE MEDIA DI FONDO DI RADIOATTIVITÀ NATURALE



Energia di legame: aspetti quantitativi

Esempio 3: Calcolare il valore del fattore di ragguglio tra unità di massa atomica e elettronvolt/ c^2 (eV/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 $6,6447 \cdot 10^{-27}$ 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 a spontaneo 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 ${}^{12}\text{C}$ 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.

Radiazioni, Datazione: 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?

QUADRO 3: L'EQUIVALENZA MASSA-ENERGIA

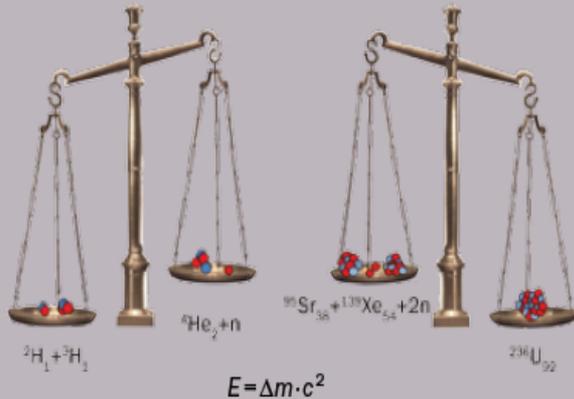
QUADRO 3: L'EQUIVALENZA MASSA-ENERGIA

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, $^{90}\text{Sr}_{38}$, e xenon, $^{139}\text{Xe}_{54}$) più due neutroni è minore di quella del nucleo pesante (uranio, $^{238}\text{U}_{92}$) che con la sua fissione li ha generati. In questo caso è la reazione di *fissione* che converte la massa mancante in energia.



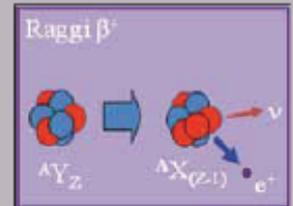
QUADRO 4: LA RADIOATTIVITÀ

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 α , raggi β , raggi γ . Questo fenomeno si chiama radioattività.

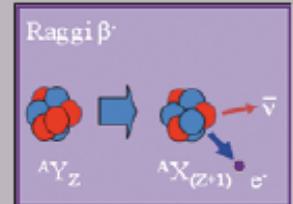
Raggi β^+ : un protone del nucleo può trasformarsi in un neutrone emettendo un positrone (ossia un elettrone con carica elettrica positiva) e una particella neutra detta neutrino.

Il nucleo emittitore $^A\text{Y}_Z$ si trasforma nel nucleo $^A\text{X}_{(Z-1)}$ contenente lo stesso numero di nucleoni e un protone in meno.



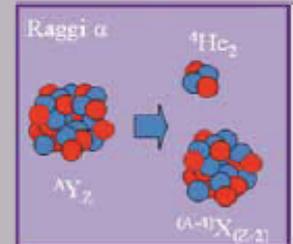
Raggi β^- : un neutrone del nucleo può trasformarsi in un protone emettendo un elettrone e una particella neutra detta antineutrino.

Il nucleo emittitore $^A\text{Y}_Z$ si trasforma nel nucleo $^A\text{X}_{(Z+1)}$ contenente lo stesso numero di nucleoni e un protone in più.

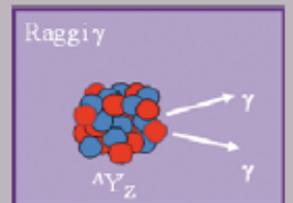


Particelle α : Nel nuclei pesanti (ossia con molti nucleoni) può verificarsi l'emissione di una particella α (nucleo di elio, costituito da due protoni e due neutroni legati, avente carica elettrica positiva pari a due volte la carica dell'elettrone).

Il nucleo emittitore $^A\text{Y}_Z$ si trasforma nel nucleo $^{(A-4)}\text{X}_{(Z-2)}$ contenente due protoni e due neutroni in meno.



Raggi γ : 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.

QUADRO 5: RADIOATTIVITÀ NATURALE E ARTIFICIALE

QUADRO 6: EFFETTI DELLE RADIAZIONI SULL'UOMO

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}Rn , 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.

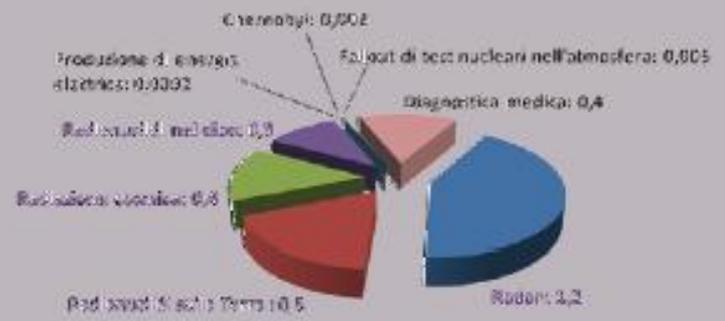
Radioattività artificiale



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 delle dosi 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-



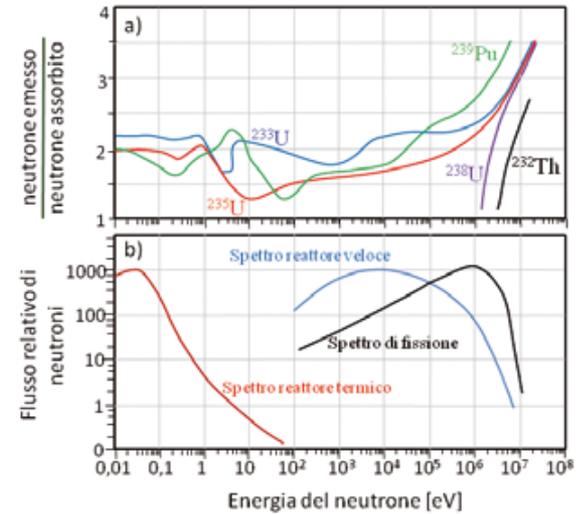
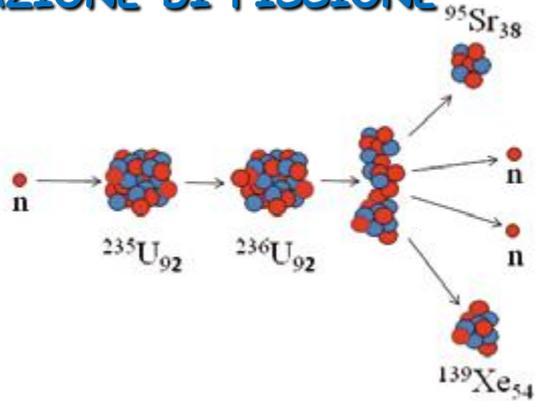
Dosi medie di esposizione del pubblico alle radiazioni (in mSv per anno): in viola sono indicate le fonti naturali e in nero quelle artificiali. Come si vede, il contributo complessivo delle radiazioni naturali è di gran lunga preponderante (2,4 mSv/a sul totale di 2,8 mSv/a). (Fonte UNSCEAR, Sources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

Con

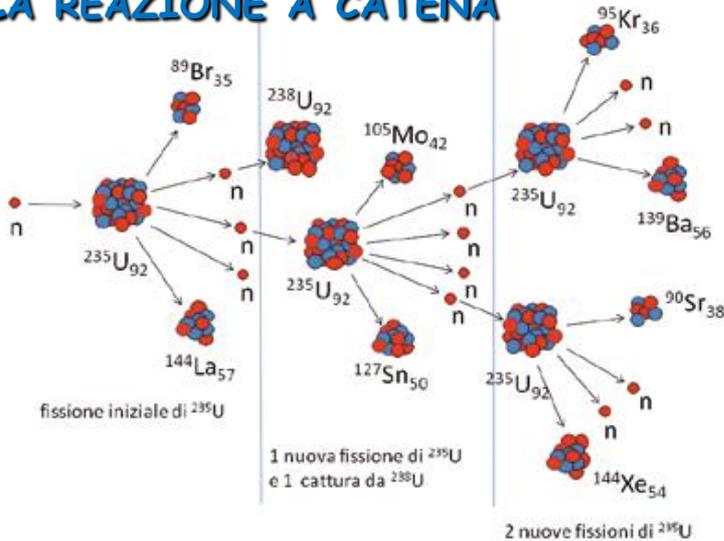
LA FISSIONE NUCLEARE

LA FISICA DEL REATTORE NUCLEARE

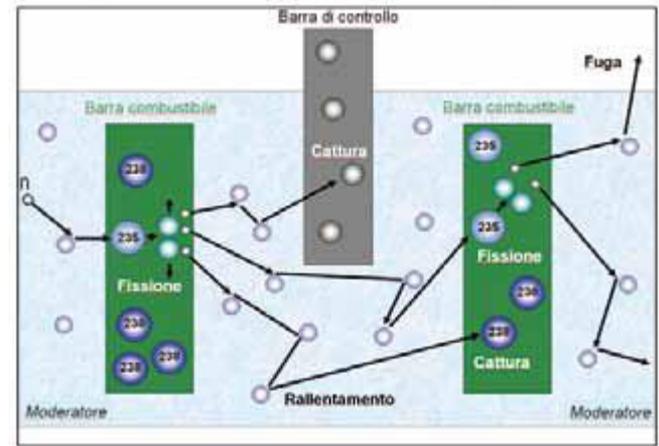
LA REAZIONE DI FISSIONE



LA REAZIONE A CATENA



IL NOCCIOLO DEL REATTORE NUCLEARE



APPROFONDIMENTO: LA CATTURA DI NEUTRONI SU URANIO
APPROFONDIMENTO: IL RALLENTAMENTO DEI NEUTRONI

Fissione: aspetti quantitativi

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 1 g 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.

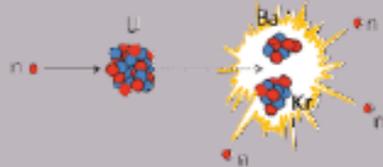
Esempio 22: Quando i nuclei ^{235}U e ^{238}U catturano un neutrone si trasformano rispettivamente negli isotopi ^{236}U e ^{239}U . Calcolare l'energia di legame dei neutroni catturati nei due isotopi dell'uranio, sapendo che le masse a riposo dei vari isotopi sono: $m(^{235}\text{U}) = 235,043923$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

Esempio 24: Una centrale nucleare genera 1000 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 MeV di energia, calcolare quanti chilogrammi di ^{235}U subiscono la fissione durante un anno?

QUADRO 7: LA FISSIONE NUCLEARE E LA REAZIONE A CATENA

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 8: REATTORI NUCLEARI

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.)

QUADRO 9: EVENTI STORICI DELLA FISSIONE

QUADRO 10: ENERGIA NUCLEARE

Quadro 9: EVENTI STORICI DELLA FISSIONE NUCLEARE

- 1934: Irène Curie e Frédéric Joliot scoprono nuovi elementi radioattivi ottenuti bombardando elementi non radioattivi con particelle α .
- 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.

- • • •
- 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_e (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.

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



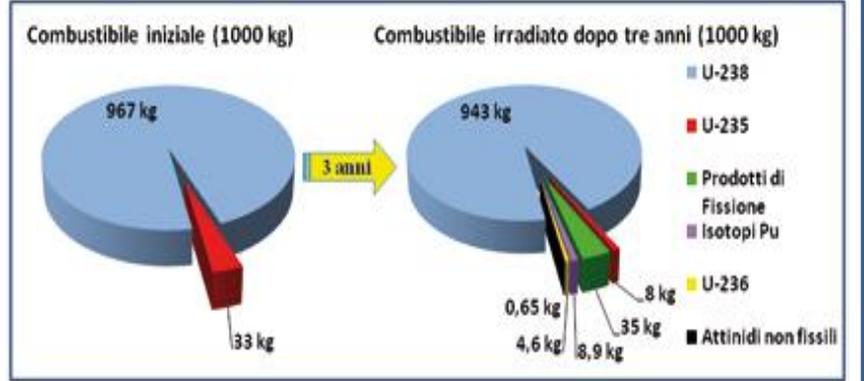
= 22000 kg di carbone

un reattore moderato e raffreddato ad acqua di 1000 MW_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.

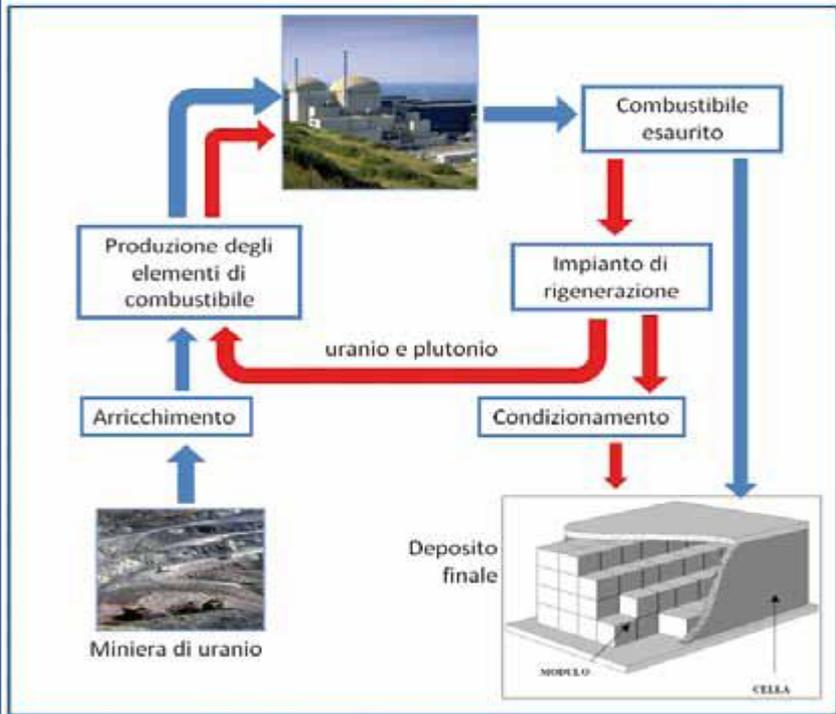
A parità di potenza nominale un impianto nucleare occupa una superficie molto più piccola di quella di un impianto a energia solare (~1/10) o di un impianto a energia eolica (~1/600). Allo stato attuale delle tecnologie e tenendo conto delle efficienze di esercizio e della disponibilità di sole e vento, 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.

IL CICLO DEL COMBUSTIBILE E LE RISERVE DI URANIO

TRASFORMAZIONE DELLA COMPOSIZIONE DEL COMBUSTIBILE IN TRE ANNI DI FUNZIONAMENTO



CICLO APERTO E CICLO CHIUSO



LE RISERVE DI URANIO



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

GESTIONE E VOLUME DEI RIFIUTI RADIOATTIVI

CONDIZIONAMENTO E STOCCAGGIO DEI RIFIUTI RADIOATTIVI A BASSA E MEDIA ATTIVITÀ

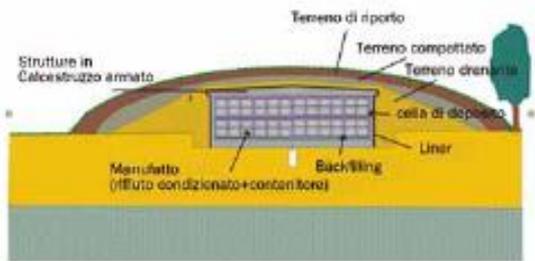


(a) Rifiuti radioattivi condizionati all'interno di fusti di acciaio



(b) Modulo di deposito

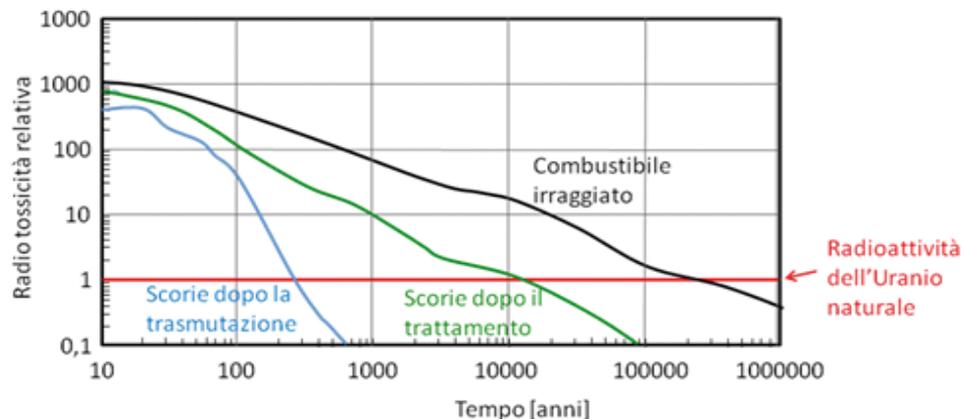
(c) Unità di deposito



(d) Schema di deposito superficiale

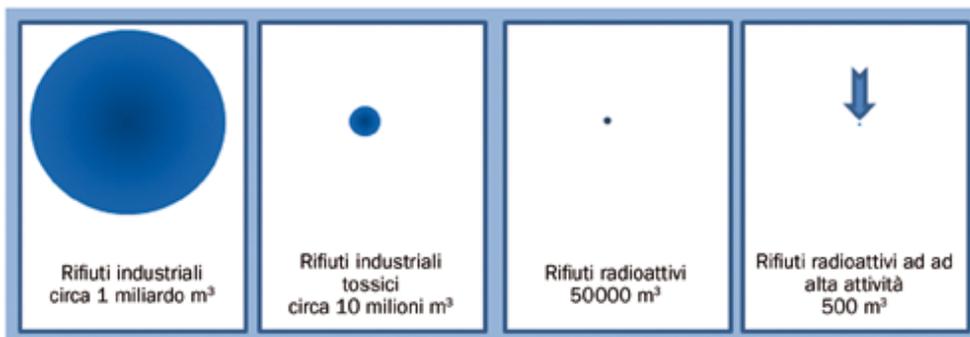
Fig. 18. - Condizionamento e stoccaggio definitivo dei materiali radioattivi a bassa e media attività.

RADIOTOSSICITÀ DEI RIFIUTI RADIOATTIVI



Fonte: AIN, Quaderno n. 1,21 Secolo Scienza e Tecnologia, n. 6-2008

CONFRONTO TRA LE QUANTITÀ DEI VARI TIPI DI RIFIUTI PRODOTTI ALL'ANNO NELL'UNIONE EUROPEA



Fonte: OECD-NEA: Nuclear Energy today, 2003 - ISBN 9264-10328-7

QUADRI 11: SICUREZZA NUCLEARE.

QUADRO 12: RIFIUTI RADIOATTIVI

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).

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_e produce in un anno solo 3 m³ 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_e, 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.

Argomenti generali: aspetti quantitativi

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.

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

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*.

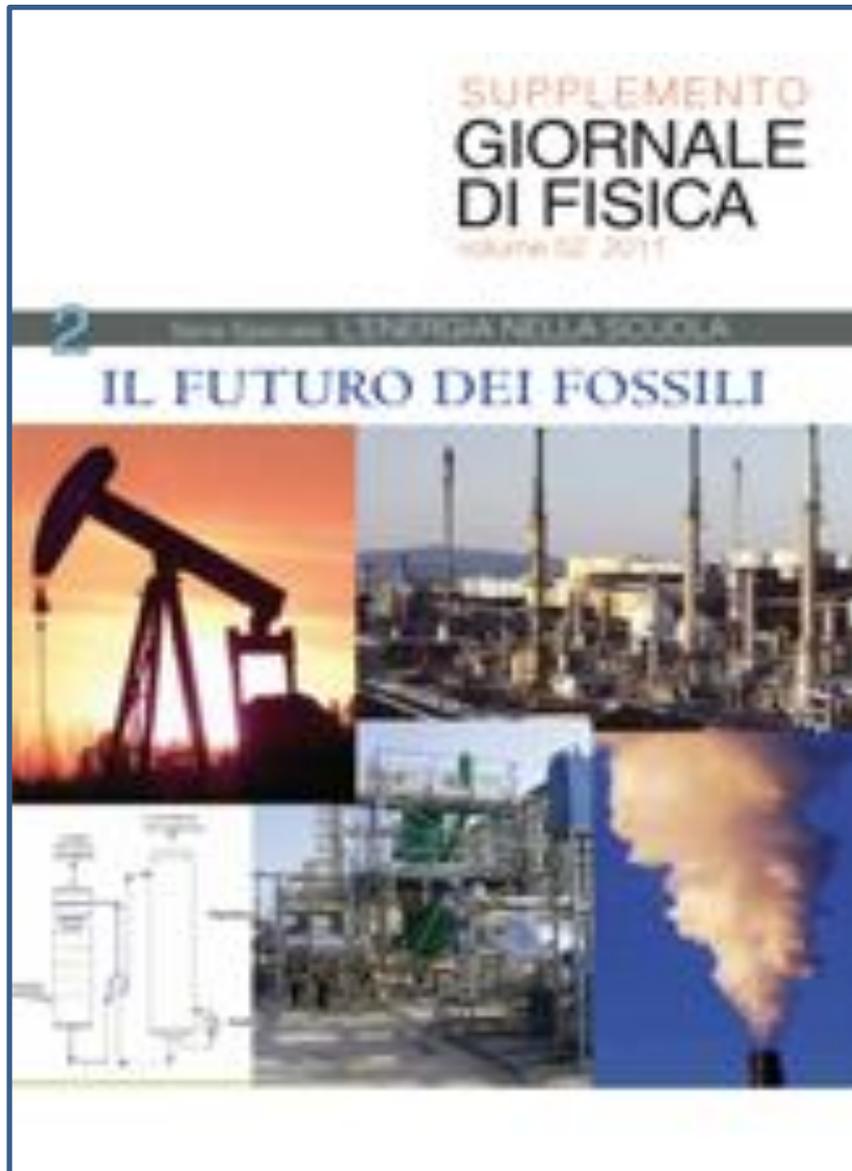
Sistema di acceleratori di particelle accoppiati a reattori nucleari per la trasmutazione dei residui radioattivi allo scopo di abbreviare l'emivita delle scorie, permettendo un ulteriore recupero energetico. L'Italia è coinvolta seriamente in alcuni di tali progetti.

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.

I Fascicoli N. 2 e 3

Il fascicolo N. 2



Suppl. 1

vol. 53
2011

**GIORNALE
DI FISICA**
della
Società Italiana di Fisica

Serie Speciale **L'ENERGIA NELLA SCUOLA**
numero 2

**IL FUTURO DELLE
FONTI FOSSILI**

A cura di Stefano Rossini



Società Italiana di Fisica

Bologna

PREFAZIONE	5
1. COSA SONO LE FONTI FOSSILI	7
1.1 Gas naturale	12
Approfondimento 1: Gas naturale liquefatto (GNL)	16
1.2 Petrolio	22
Approfondimento 2: La ricerca del giacimento in laboratorio	31
1.3 Carbone	34
2. LE RISERVE MONDIALI	37
2.1 Riserve di gas naturale	38
2.1.1 Riserve convenzionali	38
2.1.2 Riserve non convenzionali	41
<i>a. Tight natural gas</i>	42
<i>b. Shale gas</i>	42
<i>c. Coalbed methane</i>	43
<i>d. Natural gas from geopressurized zones</i>	44
<i>e. Deep natural gas</i>	44
<i>f. Gas hydrates</i>	45
2.1.3 Conclusioni: tiriamo le somme	47
2.2 Riserve di petrolio	48
2.2.1 Riserve convenzionali	49
2.2.2 Riserve non convenzionali	50
<i>a. Extra heavy oil and tar sands</i>	51
<i>b. Oil shale</i>	54
<i>c. Petrolio che viene dal freddo</i>	56
2.2.3 Conclusioni: tiriamo le somme	58
2.3 Riserve di carbone	58
3. LA PREVISIONE DEL FUTURO	61
3.1 La richiesta di energia nel mondo	62
3.2 La situazione energetica italiana	73
3.3 La teoria del picco	75
3.4 Gli scenari	79
Appendice A	85
Appendice B	88
Glossario	89

Il fascicolo N. 3



Suppl. 2

vol. 53
2011

GIORNALE DI FISICA

della
Società Italiana di Fisica

Serie Speciale L'ENERGIA NELLA SCUOLA
numero 3

CO₂: RIFIUTO O RISORSA? RECUPERO, CONFINAMENTO ED UTILIZZAZIONE DEL CO₂

A cura di Michele Aresta
Dipartimento di Chimica e CIRCC
Università degli studi, Bari



Società Italiana di Fisica

Bologna

PREFAZIONE	5
1. PRODUZIONE DI ENERGIA DA FOSSILI A BASE DI CARBONIO: EFFETTI DELLA EMISSIONE DI CO ₂	7
1.1 Il ciclo del carbonio	12
1.2 La fissazione naturale del CO ₂	13
1.3 Dissoluzione del CO ₂ nelle acque	15
1.4 Accumulo del CO ₂ in atmosfera	16
2. TECNOLOGIE DI RIDUZIONE DELLE EMISSIONI DI CO ₂ E DELLA SUA IMMISSIONE IN ATMOSFERA	17
2.1 Sostituzione di combustibili	17
2.2 Aumento della efficienza nella produzione di energia	17
2.3 Aumento della efficienza nell'utilizzo di energia	21
2.4 Utilizzo di energie perenni	22
2.5 Utilizzo di energie rinnovabili	23
2.6 Energie alternative: il nucleare	24
2.7 Integrazione di fonti energetiche	25
3. SEPARAZIONE DI CO ₂ DA GAS EMESSI DA CENTRALI PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA E DA IMPIANTI INDUSTRIALI: LA TECNOLOGIA CCS	27
3.1 Separazione del CO ₂ dai gas di combustione	28
3.1.1 Utilizzo di ammine liquide: monoetanolamina-MEA	29
3.1.2 La tecnologia "oxy-fuel"	31
3.2 Destino del CO ₂ separato	32
3.3 Trasporto del CO ₂ separato	33
3.4 Confinamento del CO ₂ separato	34
3.4.1 Confinamento in pozzi esausti di gas naturale, coal-beds e acquiferi	34
3.4.2 Eliminazione negli oceani	36
3.4.3 Fissazione del CO ₂ in carbonati inorganici	38
3.4.4 Stabilità del CO ₂ confinato e condizioni per il confinamento	40
3.4.5 Stato dell'arte delle varie tecnologie di sconfinamento	41

4. I DIVERSI ASPETTI DELLA UTILIZZAZIONE DEL CO ₂	43
4.1 Le condizioni di utilizzo del CO ₂	44
4.2 Le fonti del CO ₂ ed il suo valore	46
4.3 Utilizzo tecnologico del CO ₂	47
4.4 Utilizzo del CO ₂ supercritico	50
4.5 Fissazione industriale in biomassa acquatica	51
4.6 Conversione del CO ₂ per la sintesi di prodotti chimici utilizzati come "stoccaggio" di energia elettrica in eccesso o di energie intermittenti	56
4.7 Processi termici per la riduzione del CO ₂	57
4.8 Riduzione foto-catalitica del CO ₂	58
4.9 Produzione di prodotti chimici	59
4.9.1 Sintesi di intermedi e prodotti di chimica fine	60
4.9.2 Sintesi di prodotti energetici	63
Conclusioni	65
Glossario	67
Indice dei Quadri	
Quadro 1: Incremento dell'uso di energia al 2030 e contributo delle varie fonti	5
Quadro 2: C	12
Quadro 3: Il fattore 3,67	13
Quadro 4: Equilibri del CO ₂ in fase acquosa	15
Quadro 5: Solubilità del CO ₂ (mL/mL)	15
Quadro 6: Efficienza energetica	18
Quadro 7: Energia e ossidazione	18
Quadro 8	19
Quadro 9	21
Quadro 10: Frazione di C usato, economia di atomi, carbon-footprint	45
Quadro 11: Analisi del ciclo di vita-LCA	45

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