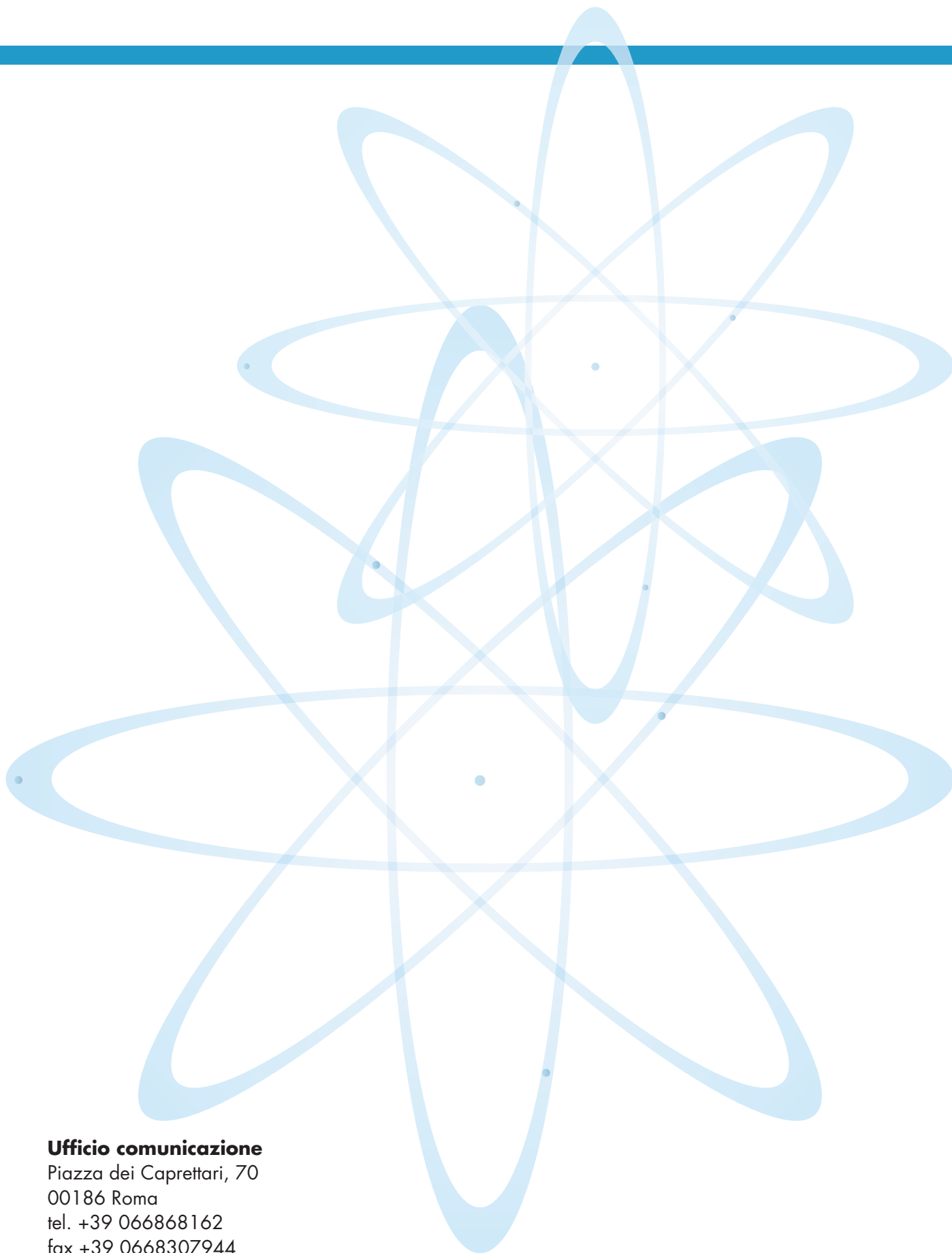


Appunti sull'energia nucleare

Gennaio 2009



infografica by **centimetri.it**



Ufficio comunicazione

Piazza dei Caprettari, 70

00186 Roma

tel. +39 066868162

fax +39 0668307944

email: comunicazione@presid.infn.it

<http://www.infn.it>





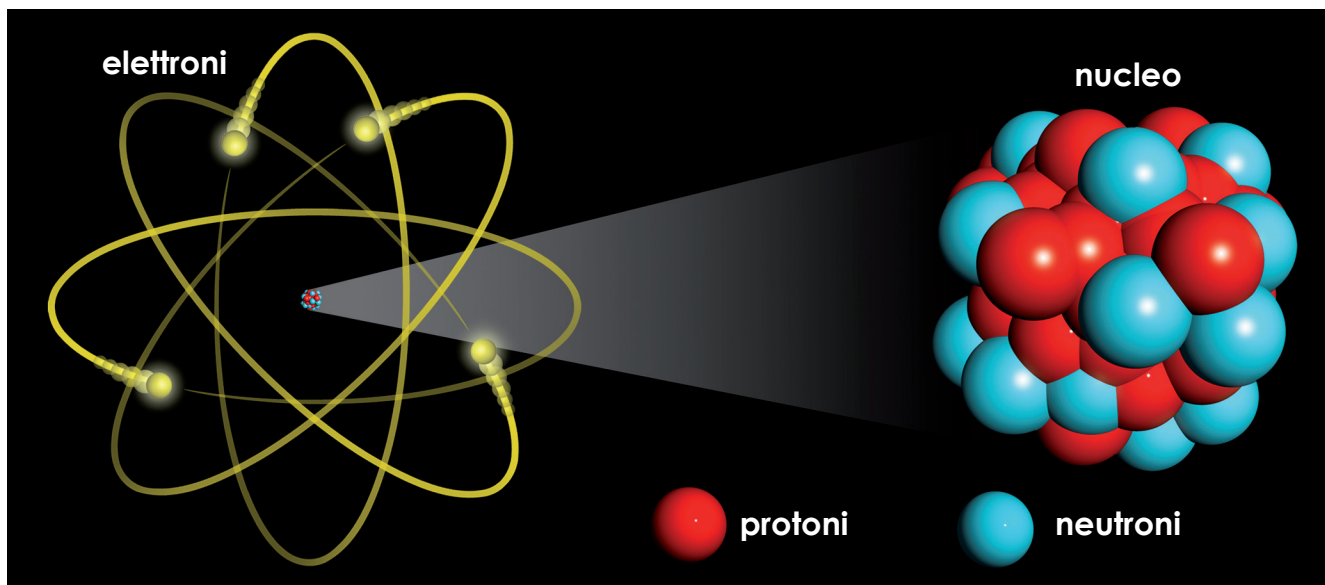
UN PO' DI FISICA NUCLEARE...

Se in un laboratorio immaginario potessimo mettere a fuoco un pezzo di materia con un microscopio ideale in grado di distinguere oggetti comunque piccoli, cosa osserveremmo?

Innanzitutto la materia apparirebbe al microscopio non compatta ma discreta, formata cioè da entità singole o a gruppi, gli **atomi** e le **molecole**, con dimensioni dell'ordine del decimilionesimo di millimetro e separate da grandi spazi vuoti. Mettendo nuovamente a fuoco il nostro microscopio su ciascun atomo noteremmo una specie di minuscolo sistema planetario dove una nuvola di particelle puntiformi con carica elettrica negativa, gli **elettroni**, ruota attorno a un centro fisso.

*Il numero **Z** di elettroni per atomo, che chiameremo **numero atomico**, è il medesimo per tutti gli atomi dello stesso elemento chimico, ma cambia da elemento a elemento (8 per l'ossigeno, 20 per il calcio, 92 per l'uranio) e caratterizza quindi le proprietà chimiche degli elementi.*

Fig.1



Se ora spingessimo il nostro potentissimo microscopio a focalizzare il punto centrale (fig.1), scopriremmo che non si tratta affatto di un punto, ma di un sistema composto esteso con raggio circa 10.000 volte più piccolo di quello della nuvola elettronica.

Questo sistema, che chiameremo **nucleo**, è composto da due tipi di particelle identici in tutto tranne per la carica: i **protoni**, ciascuno con carica elettrica uguale a quella dell'elettrone ma di segno opposto, e i **neutroni** privi di carica elettrica.

*Il numero dei protoni è **Z**, uguale al numero degli elettroni in modo che l'atomo risulta elettricamente neutro, il numero dei neutroni è **N** e chiameremo peso atomico il numero totale $A=Z+N$ dei protoni e dei neutroni componenti il nucleo (nucleoni).*





Un elemento chimico caratterizzato dal numero di elettroni Z potrà quindi in generale esistere in forme fisicamente differenziate (**isotopi**) composte da atomi con il medesimo numero di elettroni, ma con nuclei diversi, tutti ancora con lo stesso numero di protoni, ma con differenti numeri di neutroni: il peso di ciascun isotopo del medesimo elemento risulta quindi differente.

Per l'elemento $Z=92$ (uranio) si conoscono più di 9 isotopi, i cui nuclei sono composti da 92 protoni, ma da un numero di neutroni che varia da 140 (peso atomico 232) fino a 148 (peso atomico 240), tutti con masse diverse ma tutti indistinguibili a vista e con analisi chimiche e generalmente indicati tramite il loro numero atomico e il peso atomico: per esempio ${}_{92}\text{U}^{235}$ oppure ${}_{92}\text{U}^{238}$ per due isotopi dell'Uranio con 92 elettroni ma rispettivamente 235 e 238 tra protoni e neutroni.

Pochissimi isotopi sono stabili, la maggior parte si trasforma in tempi più o meno lunghi in nuclei diversi attraverso i **decadimenti radioattivi**. La stabilità è determinata dal valore del rapporto N/Z tra il numero dei neutroni e il numero dei protoni componenti il nucleo dell'isotopo, che può variare da circa 1 per gli elementi stabili leggeri, che hanno quindi egual numero di neutroni e di protoni, fino a circa 1.5 per quelli stabili o quasi stabili pesanti, nei quali quindi i neutroni sono sempre in numero maggiore.

L'elemento che conosciamo in natura è in generale una miscela dei suoi isotopi stabili o quasi stabili: l'Ossigeno che respiriamo è una miscela di tre isotopi ${}_{8}\text{O}^{16}$ (8 protoni, 8 neutroni, peso atomico 16), ${}_{8}\text{O}^{17}$ (8 protoni, 9 neutroni, peso atomico 17), ${}_{8}\text{O}^{18}$ (8 protoni, 10 neutroni, peso atomico 18) e l'Uranio estratto dalle miniere è a sua volta una miscela di ${}_{92}\text{U}^{235}$ (92 protoni, 143 neutroni, peso atomico 235) e ${}_{92}\text{U}^{238}$ (92 protoni, 146 neutroni, peso atomico 238).

Se volessimo ora concludere il nostro esperimento ideale dovremmo misurare, ancora con una immaginaria "pesata", come sono distribuite le masse all'interno dell'atomo. Scopriremmo così che nel piccolissimo volume del nucleo è concentrato il 99.98% della massa dell'atomo e solo circa lo 0.02% è portato dalla nuvola elettronica.

Questa scoperta ha grande importanza per quanto riguarda i meccanismi di produzione di energia: l'equivalenza tra massa e energia $E=Mc^2$ ci dice infatti che le trasformazioni chimiche che coinvolgono la nuvola elettronica (reazioni, combustioni, fermentazioni, ecc) produrranno, a parità di quantità di materia bruciata, variazioni di massa molto minori e quindi molta meno energia di quelle che agiscono direttamente sul nucleo (reazioni nucleari, fissione, fusione).



... E QUALCHE RISPOSTA PER I PIÙ CURIOSI

• Cosa tiene gli elettroni legati attorno al nucleo?

Gli elettroni sono carichi negativamente, i protoni nel nucleo hanno ugual carica positiva. Cariche di segno opposto si attraggono: le forze di attrazione elettrica tengono l'atomo legato.

• Perché il nucleo è così piccolo?

Perché, a differenza delle forze elettriche, le forze attrattive nucleari, che tengono legati assieme i protoni e i neutroni nel nucleo, sono molto forti, ma agiscono solo su distanze molto piccole, dell'ordine proprio del raggio nucleare, e dopo si annullano rapidamente.

• Perché nel nucleo sono necessari sia i protoni che i neutroni?

Perché i protoni, tutti carichi positivamente, esercitano tra loro sia forze elettriche, che sono repulsive (cariche dello stesso segno si respingono), sia forze nucleari attrattive che non sono però sufficienti a tenerli legati. L'aggiunta di neutroni, privi di carica elettrica che esercitano tra loro e coi protoni solo

forze nucleari, aumenta le forze attrattive senza variare quelle elettriche e realizza la coesione del nucleo.

• Perché i nuclei sono stabili solo per un definito rapporto N/Z?

Perché quel valore del rapporto tra il numero di neutroni e il numero di protoni è proprio quello che realizza l'equilibrio tra forze nucleari e forze elettriche. L'aggiunta o la diminuzione di protoni o neutroni rompe l'equilibrio e, entro certi limiti, il nucleo resta ancora legato, ma instabile (Isotopo radioattivo).

• Perché aggiungendo ancora neutroni non si costruiscono nuclei ancora più stabili?

Perché le forze nucleari sono di due tipi: l'interazione nucleare "forte", responsabile del legame dei nuclei, e quella "debole" che consente il decadimento del neutrone in un protone, un elettrone ed un antineutrino (decadimento cosiddetto "beta"). Un eccessivo numero di neutroni rende il nucleo instabile rispetto a questo tipo di decadimento.

LA RADIOATTIVITÀ

Radioattività è il processo che rende stabili i nuclei instabili mediante rilascio di energia: il nucleo instabile (**isotopo radioattivo**) si trasforma in un altro nucleo con diverso rapporto neutroni/protoni emettendo particelle energetiche dette radiazioni. Se il nucleo finale è ancora instabile decade a sua volta in un nuovo nucleo e così via fino a raggiungere un nucleo stabile (col corretto rapporto N/Z) con un processo che può durare da frazioni di secondo a miliardi di anni.

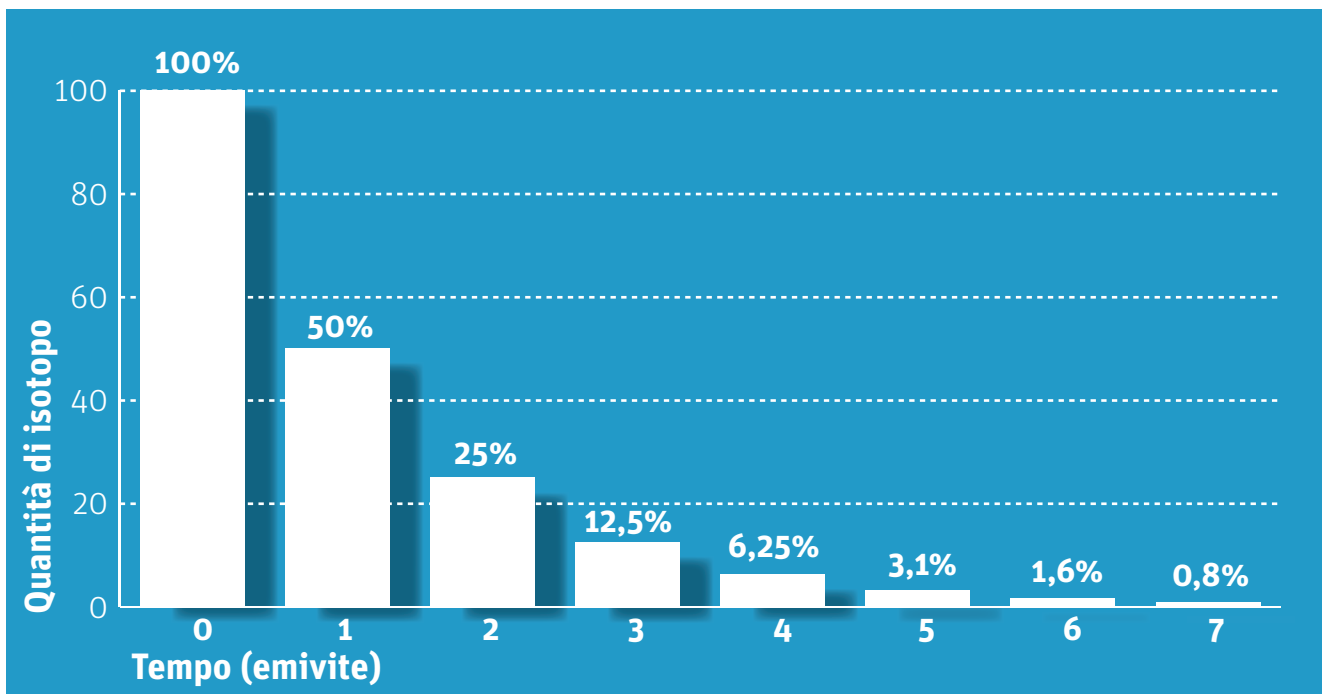
La rapidità con la quale avviene il fenomeno del decadimento è determinata dalla **emivita o tempo di dimezzamento**, cioè il tempo



nel quale si trasforma la metà dei nuclei radioattivi inizialmente presenti. Il decadimento ha nel tempo l'andamento (esponenziale) riportato in (fig.2): dopo ogni emivita la quantità di isotopo radioattivo si è ridotta a metà, dopo 7 emivite a meno dell'1% della quantità iniziale. Il periodo di dimezzamento può essere molto diverso da isotopo a isotopo, variando da frazioni di secondo a miliardi di anni. Emivita breve corrisponde a decadimento veloce, cioè a un elevato numero di trasformazioni al secondo, emivita lunga a decadimento lento.

Il numero di nuclei che decadono in un secondo è detto **attività** dell'isotopo radioattivo ed è proporzionale alla intensità delle radiazioni emesse e quindi alla energia radiata dal campione di isotopo in un secondo. A parità di quantità di materiale radioattivo, un isotopo a breve emivita ha maggiore attività. Rilascia quindi più radiazioni al secondo di un altro a emivita più lunga. Si può pensare alla analogia con un recipiente pieno d'acqua in ebollizione: tanto più forte è l'ebollizione, tanto più rapidamente evapora e si esaurisce il liquido.

Fig. 2



Gli isotopi radioattivi primari vengono prodotti da reazioni nucleari all'interno delle stelle e dei pianeti in formazione o, in tempi recenti, nei laboratori di ricerca e nei reattori nucleari. Ma in effetti l'uomo convive da sempre con la radioattività: in natura particelle di altissima energia provenienti in prevalenza dal sole, i **raggi cosmici**, bersagliano l'atmosfera creando un flusso continuo sulla superficie terrestre dell'ordine di 180 particelle per metro quadrato e per secondo; inoltre in molte rocce, soprattutto di origine vulcanica, ancora continuano le catene di decadimenti radioattivi con vita media lunghissima originati circa 5 Miliardi di anni fa nei processi nucleari di formazione degli elementi che compongono la Terra.





Tra gli altri un isotopo radioattivo del comunissimo potassio, il potassio 40 (${}_{19}\text{K}^{40}$), con emivita 1.3 miliardi di anni, che costituisce il 0.012% del potassio naturale (12 parti ogni centomila) è ben presente nei terreni, negli alimenti vegetali e animali e in molti materiali da costruzione. In conseguenza di ciò radiazioni sono emesse dalle pareti della abitazioni, dai cibi più comuni e lo stesso corpo umano è di fatto una debole sorgente radioattiva con una attività pari a circa 100 decadimenti al secondo per chilogrammo di peso. Nei Paesi nei quali esiste un numero consistente di reattori nucleari questi contribuiscono ad aumentare la radioattività ambientale per meno dello 0.03% (dati USA).

Questo ci dice che piccoli livelli di radioattività, che chiameremo fondo ambiente fanno parte degli equilibri naturali ai quali l'organismo umano è da sempre soggetto. Ma che succederebbe se questi livelli per ragioni accidentali o controllate dovessero aumentare?

... E QUALCHE RISPOSTA PER I PIÙ CURIOSI

• Cosa sono in realtà le radiazioni emesse?

Lo scopo del decadimento radioattivo è quello di trasformare il nucleo variando il rapporto neutroni/protoni verso il valore finale stabile. Per far questo il nucleo instabile può a seconda dei casi:

- Trasformare un neutrone in un protone emettendo un **elettrone** e un antineutrino (decadimento beta negativo)

- Trasformare un protone in un neutrone emettendo un antielettrone (**elettrone positivo**) e un neutrino (decadimento beta positivo)

- Emettere un mininucleo molto stabile formato da due protoni e due neutroni detto **particella alfa** (decadimento alfa)

I decadimenti precedenti sono spesso accompagnati dall'emissione contemporanea di un **raggio gamma** (onda elettromagnetica di alta energia)

Poiché i neutrini hanno interazione trascurabile con la materia,

che attraversano senza effetti di qualche rilievo, le radiazioni di cui si è parlato e con rilievo per la salute sono elettroni (radiazione beta), particelle alfa e raggi gamma.

I termini alfa, beta e gamma derivano dagli albori degli studi sulla radiazioni, quando si era accertata la loro esistenza e se ne erano riconosciute le diverse caratteristiche fisiche, ma ancora non si era in grado di associarle all'emissione, rispettivamente di particelle alfa (ovvero nuclei di elio), elettroni e raggi gamma.

La pericolosità di una radiazione dipende dal tipo di particelle: le particelle alfa vengono in genere bloccate nei primi strati della pelle senza causare danni, gli elettroni e soprattutto i gamma sono penetranti e possono raggiungere e ionizzare cellule del sangue e degli organi interni. Il discorso si inverte quando la sostanza radioattiva viene ingerita o inalata, nel qual caso la particella alfa produce effetti più importanti.



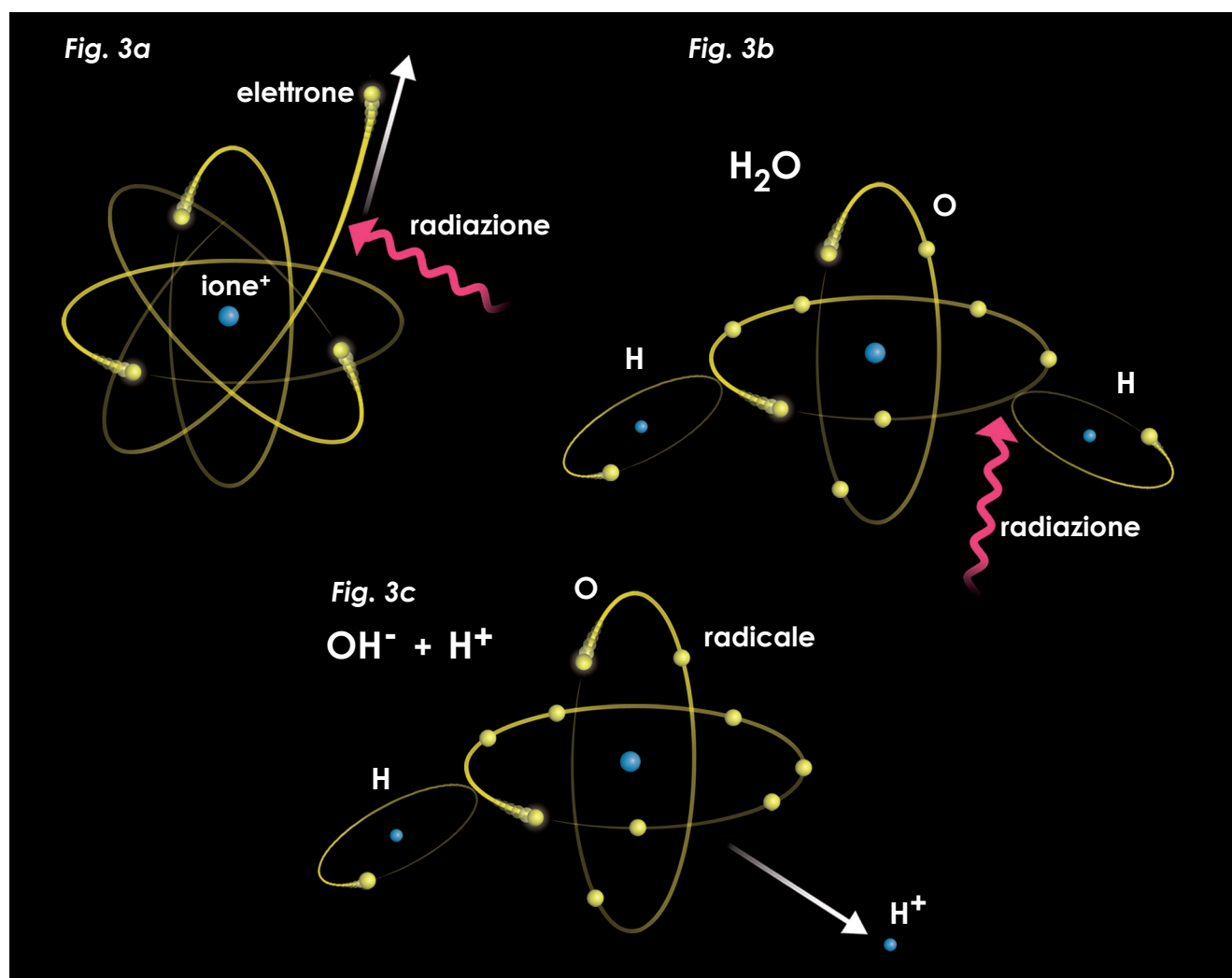
GLI EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI

Il principale effetto delle radiazioni sulla materia è la **ionizzazione**, cioè la rimozione di un elettrone dalla nuvola elettronica dell'atomo (fig. 3a). Dopo l'emissione dell'elettrone, l'atomo residuo non è più neutro, (il numero di cariche negative portate dagli elettroni restanti è ora inferiore di una unità al numero di cariche positive portate dai protoni del nucleo), ma carico positivamente e prende il nome di **ione**.

Le molecole sono a loro volta formate da due o più atomi legati assieme dalla condivisione di un elettrone: la rimozione dell'elettrone da parte della radiazione (ionizzazione) può rompere la molecola, creando frammenti carichi detti **radicali**.

A titolo di esempio in fig. 3 è riportata la ionizzazione di un atomo generico (fig. 3a) e quella di una molecola di acqua (H_2O) (composta da un atomo di Ossigeno O (8 elettroni) e due atomi di Idrogeno H (1 elettrone ciascuno) legati tra loro (fig. 3b), con la creazione del radicale OH più uno ione di idrogeno (fig. 3c).

Fig. 3





Nel tessuto biologico la componente fondamentale è la **cellula**, composta per l'80% di acqua e per il restante 20% da complessi organismi biologici. Il processo di ionizzazione produce radicali OH^\cdot 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 ciascun tipo di tessuto biologico la grandezza fondamentale per determinare il danno effettivo apportato dalla esposizione alle radiazioni è la **dose**, definita come la *quantità di energia della radiazione assorbita dalla unità di peso del tessuto stesso* (ad esempio per Kg di tessuto). In quanto segue ci limiteremo a considerare gli effetti delle cosiddette *dosi croniche* cioè dosi assorbite in tempi relativamente lunghi (almeno qualche giorno), escludendo cioè le cosiddette dosi acute che ebbero luogo per esempio in caso di deflagrazione di ordigni nucleari.

In generale l'effetto delle radiazioni sulle cellule può essere classificato in uno dei casi seguenti:

- a) Nessun effetto: il danno non avviene o non è rilevante
- b) Il danno viene riparato dalla cellula stessa: è questo il caso più frequente per dosi non elevate
- c) Il danno non è riparato: la cellula sopravvive, ma il funzionamento è alterato
- d) La cellula muore

Solo gli ultimi due casi possono avere effetti negativi; la morte delle cellule è normale e diventa problematica solo se indotta in quantità massicce da dosi di radiazioni molto elevate in tempi brevi. Per basse dosi la principale preoccupazione è quindi il caso c) e in particolare i cosiddetti effetti ritardati, che possono svilupparsi anche a tempi lunghi durante o dopo la esposizione: tra questi il più importante è l'insorgenza di tumori.

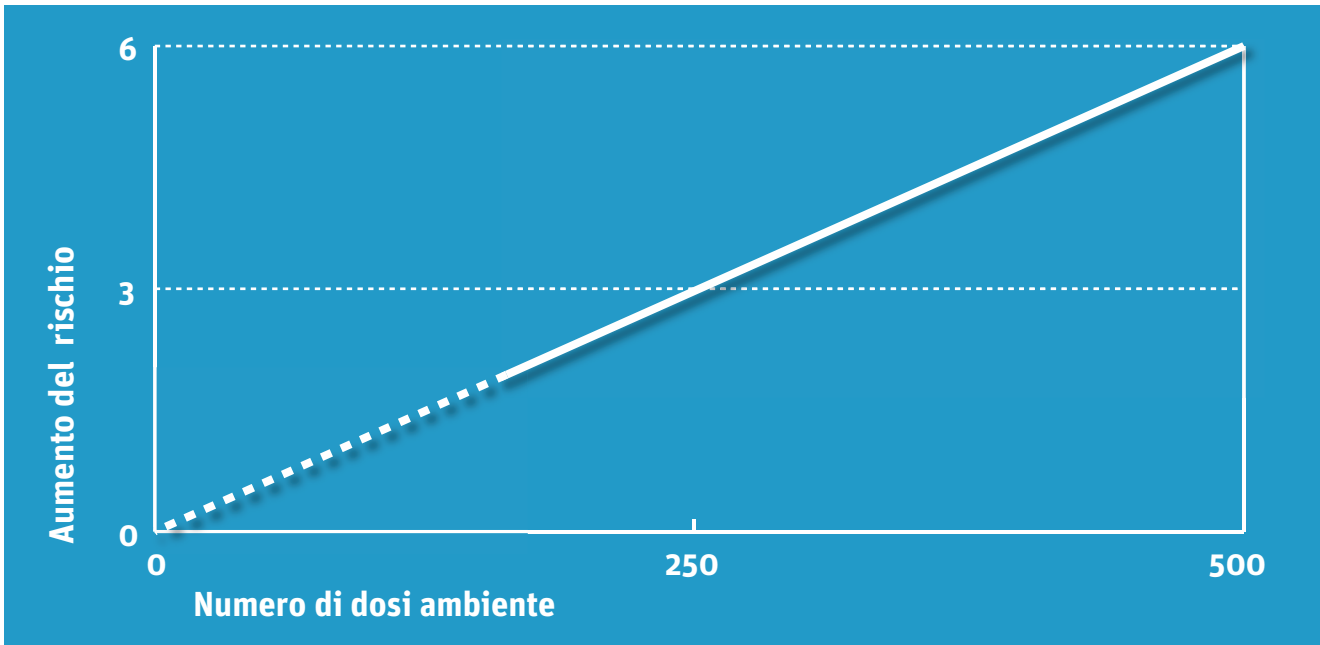
Se definiamo come **dose ambiente annuale** la dose media assorbita da un individuo (sia per inalazione che per esposizione esterna) in un anno a causa del solo fondo ambiente, in fig. 4 è riportato l'aumento del rischio di tumore al crescere della dose assorbita espressa in unità di dose ambiente annuale.

Per fare un esempio se una popolazione assorbisse per cause accidentali una dose cronica pari a 100 volte la dose ambiente annuale, subirebbe un aumento del rischio di tumore di circa l'1%: in altri termini se nelle normali condizioni di vita il rischio di tumore dovuto ad altre cause (fumo, inquinamento, alimentazione, genetica, ecc) fosse del



20%, nel senso di 20 malati ogni 100 individui, l'assorbimento di quella dose di radiazioni porterebbe tale rischio al 21%, cioè 21 malati ogni 100 individui.

Fig. 4



Un altro modo di valutare il rischio è quello di confrontare tra loro attività che portino per cause diverse alla medesima probabilità di morte, ad esempio una possibilità su un milione, come i casi che seguono:

- Fumare 1.4 sigarette (tumore ai polmoni)
- Venire esposti a una dose di radiazioni pari a un terzo della dose ambiente annuale (tumore)
- Mangiare 40 cucchiaini di burro di arachidi (tumore al fegato)
- Mangiare 100 bistecche grigliate (tumore)
- Passare due giorni a New York (inquinamento)
- Guidare 65 Km in macchina (incidente)
- Volare 4000 Km in aereo (incidente)

L'esposizione alle radiazioni comporta quindi rischi che sono in generale confrontabili con quelli che si incontrano in numerose comuni attività: ovviamente il rischio va bilanciato col beneficio che nel caso nucleare include produzione di energia o di isotopi per cure mediche o attività di ricerca scientifica. Un esempio tipico sono le analisi mediche: una tomografia computerizzata completa (testa e corpo) comporta da 3 a 4 dosi ambiente annuali assorbite, eppure si tratta di una tecnologia universalmente accettata.



... E QUALCHE RISPOSTA PER I PIÙ CURIOSI

• Come si misura in realtà la dose e quali sono i limiti tollerati?

Come abbiamo visto la dose è l'energia assorbita dalla unità di massa di un qualsiasi materiale (incluso il tessuto biologico): se misuriamo l'energia in Joule e la massa in Kg (sistema MKS) la dose si misura in Sievert dove 1 Sievert = 1 joule/1 Kg, però diversamente pesato per i diversi tipi di radiazione (alfa, elettroni, gamma) per tener conto della diversa capacità di ionizzare e quindi pericolosità.

La dose ambiente annuale è presa pari a un valore medio di 3 millesimi di Sievert per anno (3mSv/anno), ma è ovviamente soggetta a fluttuazioni, anche notevoli, da luogo a luogo per cause naturali.

Per la popolazione in generale la dose annuale non deve superare quella ambiente, ogni sorgente radioattiva (reattore nucleare, centro medico o scientifico) deve essere dimensionata in modo da non superare all'esterno il limite ambientale locale.

Per i singoli individui che, per ragioni professionali, debbano utilizzare sorgenti radioattive o lavorare presso impianti nucleari è ammessa una dose media annuale fino a 50 millesimi di Sievert/anno, pari a circa 17 volte la dose ambiente annuale, o anche di più se limitata alla esposizione di solo certe parti del corpo (braccia, mani).

L'ENERGIA NUCLEARE

Per poter comprendere i meccanismi di produzione di Energia Nucleare occorre rifarsi a una grande scoperta della relatività ristretta: la nota relazione di equivalenza massa/energia:

$$E=Mc^2$$

che stabilisce che una certa quantità di massa può essere distrutta generando una corrispondente quantità di energia e viceversa una certa quantità di energia può materializzarsi come massa: la costante c^2 , velocità della luce al quadrato, stabilisce la scala tra le due grandezze e permette di utilizzare le medesime unità di misura energetiche per ambedue.

Non è infrequente che, in una trasformazione di nuclei il sistema iniziale abbia massa maggiore di quello finale: in questo caso la trasformazione avviene spontaneamente, cioè senza apporto di energia esterno, ma sfruttando una energia disponibile pari alla differenza tra massa iniziale e finale moltiplicata per c^2 : è il caso dei decadimenti radioattivi e in particolare della **fissione spontanea**.

Schematicamente si intende per **fissione** la divisione di un nucleo pesante in due nuclei-frammenti più leggeri.



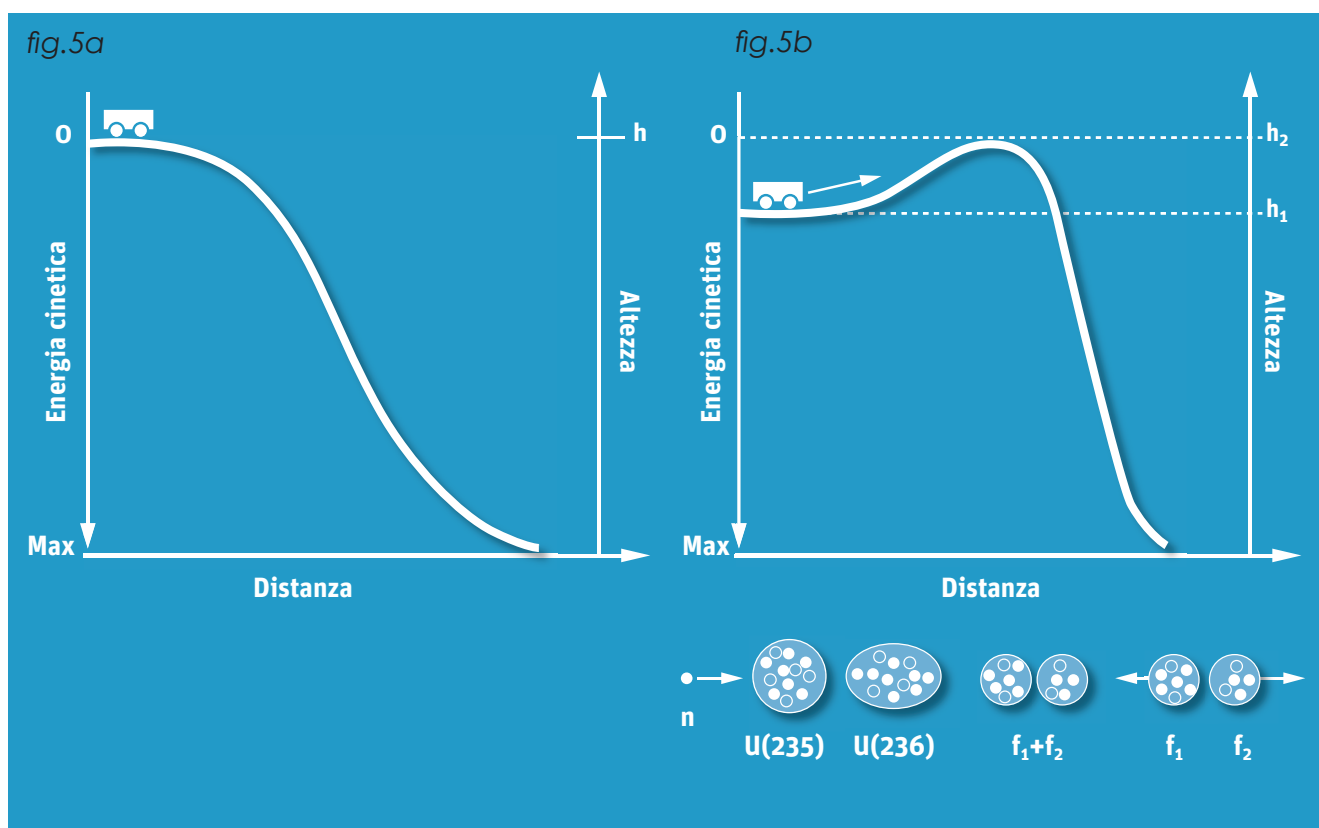
Se la massa del nucleo iniziale è più grande della massa finale cioè della somma delle masse dei frammenti, il nucleo può essere instabile e spezzarsi spontaneamente (**fissione spontanea**).

Il bilancio energetico è molto simile a quello, nel campo gravitazionale, di un carrello in cima a un pendio (fig. 5a): se lasciato libero il carrello scende da solo e acquista in fondo una energia cinetica ($1/2$ massa per quadrato della velocità) proporzionale alla altezza h del pendio.

In modo analogo nella fissione il nucleo inizia a oscillare e a deformarsi fin quando i due frammenti non si separano acquistando energie proporzionali alla altezza del pendio [cioè in questo caso alla differenza tra la massa del nucleo A iniziale e la somma delle masse dei frammenti f_1 e f_2 pari a $M_A c^2 - (M_{f_1} c^2 + M_{f_2} c^2)$].

Il risultato finale è quindi la trasformazione di un nucleo pesante inizialmente fermo in due nuclei più leggeri in movimento con una energia cinetica che potrebbe, come vedremo, essere convertita e sfruttata.

Fig. 5



La fissione spontanea è un tipo di decadimento radioattivo molto comune nei nuclei pesanti e costituisce la ragione principale per cui in natura non si trovano nuclei stabili o quasi stabili sopra peso atomico **attorno a $A=150$ (150 nucleoni)**: ma il suo sfruttamento impone la disponibilità di enormi quantità di materiali fissili senza possibilità di



umentare o diminuire facilmente la potenza sviluppata, cosa che invece può essere ottenuta con la fissione controllata. Come è possibile controllare la fissione?

Per comprenderlo torniamo all'esempio del carrello: se vogliamo controllare l'energia di caduta del carrello dobbiamo scegliere una configurazione particolare delle forze gravitazionali, cioè un terreno a dosso come mostrato in fig. 5b. In questo caso per far scendere il carrello acquistando energia sarà necessaria una spinta iniziale che può essere peraltro, per un basso dislivello, anche molto piccola. La spinta costituisce il controllo: uno sforzo anche minimo può dar luogo a una velocità, e quindi a una energia cinetica finale molto elevata, mentre senza spinta il carrello non si muove e non si ha alcuna produzione di energia.

Una situazione analoga può verificarsi, in pochissimi casi, anche per le forze nucleari: un nucleo molto pesante, ad es. ${}_{92}\text{U}^{235}$, fissiona spontaneamente con bassissima probabilità ed è quindi quasi stabile (emivita di circa 700 milioni di anni), l'aggiunta di un neutrone forma il nucleo (${}_{92}\text{U}^{236}$) eccitato, che è quindi instabile e fissiona decadendo immediatamente in due frammenti (fig. 5b, in basso).

In presenza di un flusso di neutroni il nucleo di ${}_{92}\text{U}^{235}$ tende a catturare un neutrone e trasformarsi in ${}_{92}\text{U}^{236}$, che fissiona immediatamente. La cattura avviene con frequenza tanto maggiore quanto minore è la velocità del neutrone e l'aggiunta del neutrone fornisce la possibilità di controllare la singola reazione di fissione: in assenza di neutroni liberi la fissione non ha di fatto luogo.

L'energia liberata nella fissione, pari alla differenza tra la massa dell' ${}_{92}\text{U}^{236}$ e la somma delle masse dei due frammenti viene trasformata in energia cinetica dei frammenti stessi. I frammenti di fissione sono a loro volta nuclei più leggeri, ma completamente ionizzati, privi cioè della nuvola elettronica, e quindi con carica elettrica positiva.

Quando si muovono nella materia interagiscono tramite le forze elettriche con le nuvole elettroniche negative degli atomi del mezzo e vengono rallentati fino a fermarsi completamente in qualche millesimo di millimetro: la loro energia cinetica viene trasformata in calore con un meccanismo non molto diverso da quello per cui la brusca frenata di un'automobile trasforma l'energia cinetica di movimento della macchina in calore delle gomme e dell'asfalto sottostante.

Il calore prodotto dalla singola reazione è tuttavia trascurabile e la fissione non sarebbe sfruttabile senza un effetto cumulativo **detto reazione a catena**: nella reazione di fissione oltre ai due nuclei frammento vengono in realtà emessi anche da due a tre neutroni veloci (fig. 6a), detti **neutroni di fissione**, questi nel propagarsi nel mezzo possono incontrare altri nuclei di ${}_{92}\text{U}^{235}$ inducendo altre reazioni di fissione e producendo una nuova generazione di neutroni che a loro volta fissionano e così via in un meccanismo di

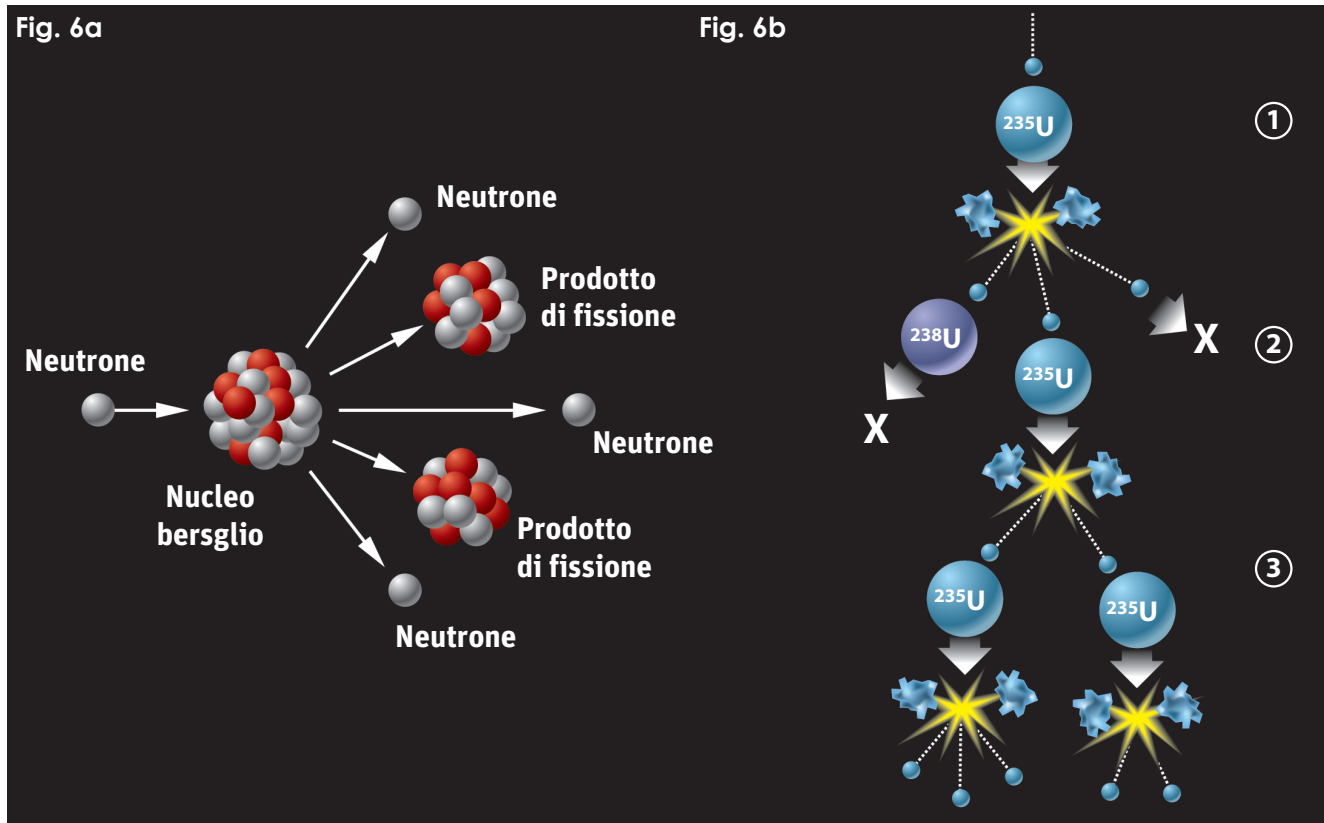




moltiplicazione a valanga simile alla nota dama cinese (fig.6b).

Si definisce **fattore k di moltiplicazione** della reazione a catena il valore medio del rapporto tra il numero di neutroni di una generazione e quello della generazione precedente: nell'esempio in figura 6b tra la seconda e la prima generazione $k_{12}=2/3$, tra la terza e la seconda $k_{23}=5/2$, in media su tre generazioni $k=1.58$.

Fig. 6



Il valore del fattore di moltiplicazione regola lo sviluppo della reazione a catena:

Se k è minore di uno in media ogni generazione di neutroni ne produce meno di quella precedente, la reazione è detta **sottocritica** e tende rapidamente a spegnersi.

Se $k=1$ ciascuna generazione di neutroni è in media uguale alla precedente, la produzione di energia è costante nel tempo e la reazione si dice **critica**.

Se k è maggiore di uno in media ogni generazione di neutroni ne produce più di quella precedente, la reazione è detta **sovrcritica** e tende ad aumentare rapidamente l'energia prodotta.

Produrre energia in modo controllato significa quindi regolare la reazione a catena partendo da uno stadio iniziale sovrcritico fino a raggiungere il livello di potenza desiderato, renderla critica per tutto il tempo di utilizzo e infine sottocritica quando si vuole spegnerla.





... E QUALCHE RISPOSTA PER I PIÙ CURIOSI

• Perché la cattura del neutrone da parte del nucleo è più probabile quando la velocità del neutrone è molto bassa?

Il neutrone non ha carica, quindi di fatto non "vede" le nuvole elettroniche degli atomi ma interagisce con i nuclei con forze nucleari, quindi praticamente a contatto. In queste condizioni la probabilità di un urto, che può portare alla cattura, è proporzionale alla sezione che il nucleo presenta al neutrone incidente (sezione d'urto).

Effetti di meccanica quantistica fanno sì che tale sezione cresca al decrescere della velocità del neutrone rendendo quindi l'urto più probabile. Infatti secondo il principio di indeterminazione di Heisenberg, base della moderna meccanica quantistica, quando la velocità del neutrone decresce il nucleo gli appare sempre meno localizzato e le sue dimensioni sempre più indeterminate. Di fatto è come se la sezione geometrica del nucleo stesso sfumasse in un alone tanto più grande quanto più il neutrone è lento.

IL REATTORE NUCLEARE OGGI

Il **Reattore Nucleare** è il sistema a tecnologia complessa mediante il quale l'energia nucleare viene prodotta, controllata e trasformata in energia elettrica per l'utilizzo. Tra i vari tipi di reattore sviluppati considereremo qui il più comune, il reattore termico a acqua pressurizzata (PWR = Pressurized Water Reactor), schematicamente composto dal contenitore, dal nocciolo, dai sistemi di scambio termico e dalle turbine (fig. 8).

Il **nocciolo**, che è la zona dove si sviluppa la reazione a catena e si genera il calore, è di forma approssimativamente cilindrica e contiene:

- il **combustibile**, cioè la miscela di isotopi di uranio, contenente in particolare l' ${}_{92}\text{U}^{235}$, dove avviene la fissione e si genera il calore. L'Uranio naturale è una miscelazione di ${}_{92}\text{U}^{235}$ con l' ${}_{92}\text{U}^{238}$, che non fissiona, in quantità pari allo 0.7% del totale, in generale una percentuale troppo bassa per alimentare una reazione a catena stabile. Si ricorre pertanto a un arricchimento dell' ${}_{92}\text{U}^{235}$ fino a percentuali dell'ordine di qualche per cento, il tutto generalmente sotto forma di ossido di Uranio contenuto in barre cilindriche.
- Il **moderatore** è il mezzo, nel nostro caso acqua, in cui sono immerse le barre di combustibile e che consente di rallentare i neutroni prodotti dalla fissione. Poiché i neutroni sono privi di carica elettrica, essi urtano i nuclei praticamente a contatto con

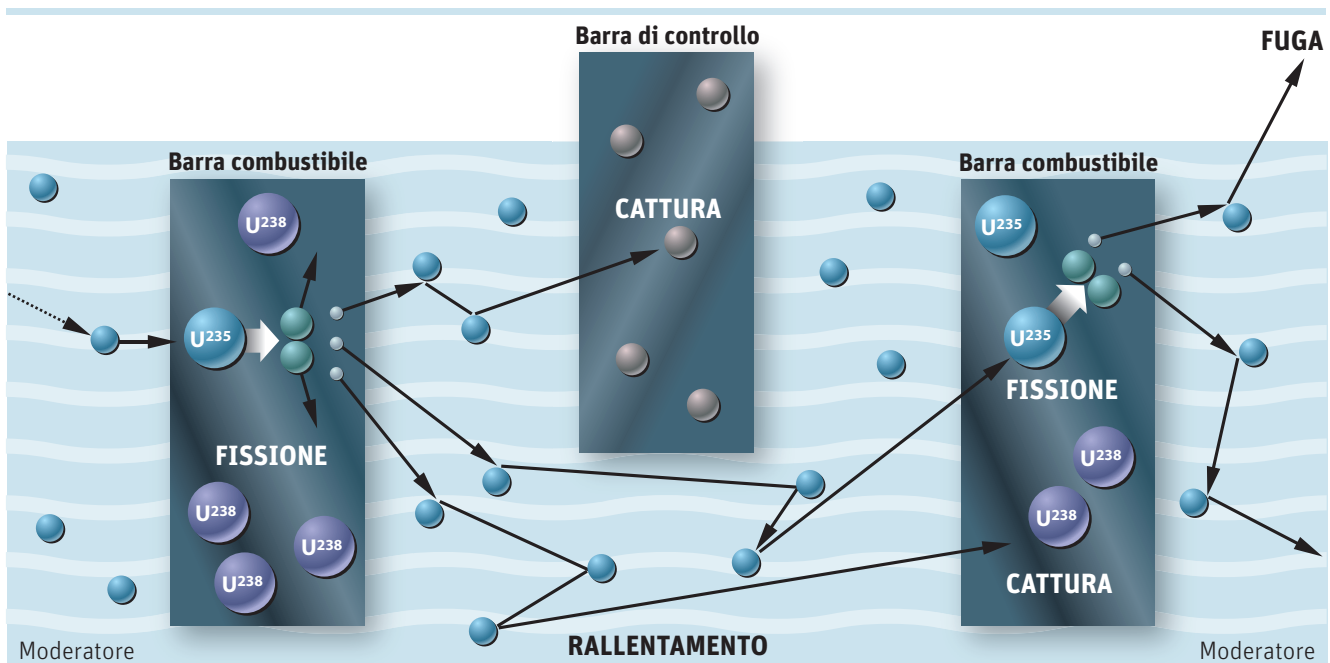


processi assai simili a quanto si osserva nel gioco del biliardo. Se il neutrone urta contro un nucleo di idrogeno (un protone), di massa uguale alla sua, l'effetto è analogo all'urto di una palla da biliardo contro un'altra ferma: la palla in moto (il neutrone) devia perdendo energia, la palla ferma (nucleo) rincula acquistando velocità. Se l'urto avviene contro un nucleo molto più pesante (ossigeno, uranio) l'effetto è simile all'urto della palla da biliardo contro le sponde: rimbalza elasticamente, cambia direzione ma mantiene la sua velocità. I neutroni vengono quindi deflessi, ma pochissimo rallentati dai nuclei pesanti di uranio nelle barre di combustibile, mentre perdono energia, in media la dimezzano ad ogni urto, contro i nuclei di idrogeno dell'acqua. Come vedremo, in questo tipo di reattore il moderatore è anche refrigerante/raffreddatore, rimuove cioè il calore prodotto nel combustibile.

- L'**assorbitore** cioè una sostanza (come il boro, il cadmio, il gadolinio, ecc) in grado di assorbire con grande probabilità i neutroni senza fissionare: variando la quantità di assorbitore si può cambiare la quantità di neutroni disponibili nel moderatore per la fissione e quindi controllare la reazione a catena. L'assorbitore è anche esso generalmente in forma di barre mobili che possono essere inserite o estratte dal nocciolo anche per piccole lunghezze per variare in modo controllato il flusso di neutroni circolanti (barre di controllo).

Il nocciolo appare quindi come una piscina nella quale sono totalmente immerse le barre di combustibile e parzialmente immerse le barre di controllo estraibili.

Fig. 7





Le possibilità di sviluppo della reazione a catena nel nocciolo sono illustrate in fig. 7:

I neutroni prodotti dalla fissione su ${}_{92}\text{U}^{235}$ possono, a seguito di rallentamento:

- a) essere catturati dalle barre di assorbimento (o da altri materiali strutturali del nocciolo, quali le guaine degli elementi di combustibile, etc.) (assorbimento da cattura)
- b) produrre a loro volta fissione in una barra di combustibile, generando nuovi neutroni di fissione e i due frammenti che perdono tutta la loro energia entro pochi centesimi di millimetro nella barra riscaldandola (assorbimento da fissione).
- c) essere catturati senza fissionare su nuclei di ${}_{92}\text{U}^{238}$ creando, attraverso successivi decadimenti radioattivi, nuclei molto pesanti instabili con emivite lunghissime (migliaia di anni), detti attinidi minori, tra cui il plutonio ${}_{94}\text{Pu}^{239}$, anch'esso fissile. (assorbimento da cattura)
- d) Fuggire dal nocciolo perdendosi nei materiali di schermatura.

Solo la possibilità b) moltiplica i neutroni, le altre li sottraggono alla reazione a catena: l'evoluzione della reazione (e quindi il fattore k di moltiplicazione) sono quindi determinati dal rapporto tra i neutroni che fissionano e quelli che vengono comunque assorbiti o fuggono dal nocciolo.

*Il reattore è stabile (**critico**) quando il numero di neutroni prodotti per fissione eguaglia il numero di quelli che fuggono o vengono **comunque assorbiti** (fattore di moltiplicazione $k=1$); per geometria fissata del nocciolo questa condizione viene realizzata (per qualsiasi livello di potenza termica prodotta!) solo per un definito rapporto tra la massa del combustibile (**massa critica**), la massa del moderatore e quella dell'assorbitore, ovvero della parte immersa delle barre di controllo.*

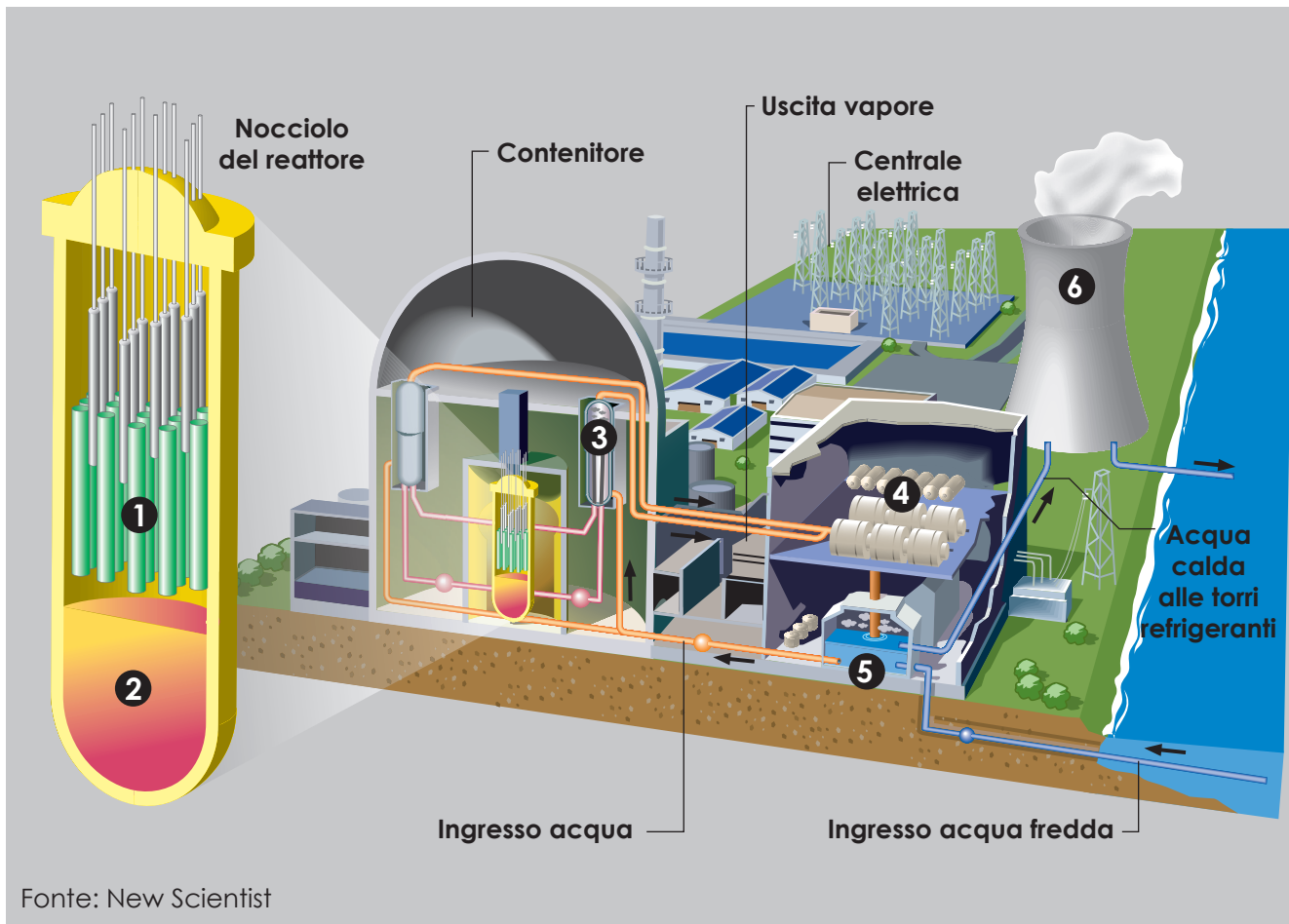
Una anche piccola variazione temporanea in più o in meno della parte immersa della barra di controllo permette di variare il livello di potenza aumentando o rispettivamente diminuendo l'assorbimento di neutroni.

In questo tipo di reattore l'acqua del moderatore assorbe il calore dal combustibile, senza però bollire perché mantenuta ad elevata pressione, e viene poi fatta circolare attraverso uno scambiatore di calore: funziona così anche da refrigerante/termovettore.



La configurazione completa del reattore è riassunta in fig. 8

Fig. 8



Fonte: New Scientist

- **1)** Il combustibile (verde) riscalda l'acqua pressurizzata. Le barre di controllo (grigie) assorbono neutroni per controllare o terminare la fissione.
- **2)** Il combustibile e le barre di controllo sono circondati da acqua pressurizzata che serve sia da moderatore che da raffreddatore.
- **3)** L'acqua calda dal reattore è pompata attraverso uno scambiatore di calore per generare, sul lato secondario, vapore ad alta pressione.
- **4)** Il vapore aziona una turbina per generare elettricità.
- **5)** Un sistema a condensazione rimuove il calore latente per convertire il vapore uscente dalle turbine di nuovo in acqua, che viene reinviata al generatore di vapore.
- **6)** L'acqua circolante nel condensatore viene fatta generalmente passare in una torre di raffreddamento per disperdere il calore all'atmosfera.



... E QUALCHE RISPOSTA PER I PIÙ CURIOSI

• È possibile, in assenza di moderazione, avere una reazione a catena critica?

È possibile, agendo opportunamente sulla composizione e la geometria del nocciolo. Infatti, in assenza di moderatore i neutroni non vengono rallentati all'interno del nocciolo: di conseguenza, il numero di fissioni nell' ${}_{92}\text{U}^{235}$ diminuisce, ma diminuiscono anche le catture da parte degli altri materiali del nocciolo (${}_{92}\text{U}^{238}$, materiali strutturali, ecc.).

È ancora possibile quindi raggiungere un bilanciamento tra le masse del combustibile e quella degli assorbitori arricchendo ulteriormente il combustibile in materiale fissile.

I reattori che non utilizzano moderatore sono genericamente chiamati reattori veloci; per il raffreddamento del combustibile venono impiegate sostanze refrigeranti con scarse caratteristiche di moderazione, quali il sodio o il piombo fuso.

LA SICUREZZA NEGLI IMPIANTI NUCLEARI

Sin dall'inizio dello sfruttamento pacifico dell'energia nucleare, la sicurezza è stata un aspetto dominante nel processo di progettazione, costruzione ed esercizio degli impianti.

Nel reattore nucleare, infatti, si producono sostanze radioattive di diversa natura: innanzitutto, prodotti di fissione e nuclei di elementi pesanti all'interno del combustibile; ma anche fluidi contaminati dal contatto con le barre di combustibile, ovvero materiali strutturali resi radioattivi dall'irraggiamento con neutroni.

È quindi essenziale evitare che questi materiali siano rilasciati all'ambiente esterno, anche a fronte di malfunzionamenti dell'impianto.

Per ottenere questo scopo, nella progettazione degli impianti nucleari vengono introdotte una serie di "barriere" successive, atte a fronteggiare l'incidente, di modo che il fallimento di una qualsiasi di esse non danneggi le altre e non comporti comunque rilascio all'ambiente.

Nel caso dei reattori PWR, ad esempio, una prima barriera è costituita dalle guaine che racchiudono il combustibile (e quindi i prodotti di fissione); una seconda dal vaso di contenimento del nocciolo; una terza dall'edificio che racchiude nocciolo e circuito del refrigerante e che in caso di incidente viene completamente isolato.





Le funzioni di sicurezza fondamentali, che bisogna assicurare in ogni eventuale incidente, sono:

- Arresto della reazione a catena.
- Rimozione del calore di decadimento (infatti, anche dopo che la reazione a catena è stata fermata, all'interno del nocciolo continua ad essere generata una certa potenza, a causa del decadimento radioattivo dei prodotti di fissione: questo calore, se non asportato, può comportare il danneggiamento del combustibile).
- Prevenzione di qualsiasi rilascio di radioattività verso l'esterno.

Queste funzioni di sicurezza vengono assicurate da una serie di sistemi speciali, indipendenti dai sistemi che assicurano il normale funzionamento dell'impianto, e progettati secondo criteri di *ridondanza* e di *diversificazione*.

Per illustrare in modo semplice questi due concetti pensiamo ad una situazione in cui sia necessario immettere nell'impianto una certa quantità di acqua per il raffreddamento tramite l'apertura di una valvola.

In un sistema nucleare, al fine di garantire il successo di questa operazione, la valvola viene duplicata utilizzando due linee in parallelo (*ridondanza*) e vengono utilizzate valvole di tipo diverso e fornite da differenti costruttori (*diversificazione*).

È facilmente intuibile come un approccio di questo tipo sia in grado di assicurare un'elevatissima affidabilità del sistema.

La ricerca di un sempre maggiore livello di sicurezza ha portato negli ultimi anni allo sviluppo di dispositivi che sfruttano semplici principi fisici (ad esempio, la gravità, la circolazione naturale, ecc.) senza necessità di intervento umano o di sofisticate apparecchiature elettroniche.

Continuando nel nostro esempio relativo all'iniezione di acqua per il raffreddamento in emergenza, secondo questo approccio si preferisce, piuttosto che utilizzare una pompa (che ha bisogno per funzionare dell'energia elettrica), posizionare un serbatoio atmosferico ad adeguata altezza in modo da poter provvedere l'acqua necessaria utilizzando la sola forza di gravità.

L'attuale livello di sicurezza raggiunto dagli impianti nucleari, utilizzando le tecniche di analisi di affidabilità, permette di contenere le conseguenze di un eventuale incidente all'interno dell'impianto prevenendo quindi qualsiasi tipo di rilascio di radiazioni verso l'esterno, senza impatto sulla popolazione circostante.



IL COMBUSTIBILE E LE SCORIE

La medesima potenza di un Megawatt viene prodotta bruciando in un giorno circa 1 grammo di U^{235} , 2.9 tonnellate di carbone o 2 tonnellate di petrolio. Secondo stime delle riserve di Uranio e del consumo previsto in diversi scenari, le riserve naturali accertate di Uranio dovrebbero esaurirsi attorno al 2035 circa. Se si tiene anche conto delle riserve stimate, disponibili agli attuali costi di estrazione, si arriva al 2065 circa.

Qualora invece si tenga conto anche delle riserve stimate a più alto costo di estrazione, la data di esaurimento dell'uranio si sposta oltre il 2100. Se poi si considerano i nuovi reattori veloci che produrrebbero combustibile essi stessi, il problema delle riserve risulta spostato considerevolmente in avanti nel tempo, assumendo che tali nuovi reattori entrino in funzione entro il 2040.

Infatti, nei reattori veloci le reazioni nucleari che si instaurano permettono la formazione di nuovi elementi fissili: in particolare l' U^{238} viene trasformato, grazie all'assorbimento di neutroni veloci, in isotopi fissionabili del Plutonio.

Ovviamente queste considerazioni dipendono dallo scenario adottato per i consumi nei prossimi trent'anni e quindi vi è un ovvio margine di incertezza.

Va comunque notato che il prezzo del combustibile nel nucleare grava soltanto per circa 1/5 sul costo dell'energia, il resto è soprattutto costo di impianto, una situazione favorevole per paesi che non hanno proprie risorse energetiche naturali.

Un reattore nucleare movimentata quindi quantità di combustibile enormemente minori e produce una massa di scorie (gas, polveri, residui di produzione) proporzionalmente più bassa.

In tabella 1 sono riportate in tonnellate /anno, per vari tipi di impianto, le emissioni e i rilasci corrispondenti a una potenza di 1000MWe.

Tab. 1

Emissioni e rilasci per un impianto di 1000MWe (tonnellate/anno)

Tab. 1	CO ₂	SO ₂	MO _x	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 (ciclo Comb)	4.300.000	35	12.000	100	100

Fonte: Società Italiana di Fisica 2008



Fra tutte le energie non rinnovabili, quella nucleare produce quindi la quantità di residui e emissioni di gran lunga minore.

È importante la mancanza di emissioni di gas serra (anidride carbonica CO₂) particolarmente rilevante per i possibili effetti sul clima.

Ciononostante esiste ancora nel combustibile bruciato un problema di scorie tutt'altro che trascurabile.

Ogni due anni circa i reattori 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.

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 ${}_{92}\text{U}^{238}$, 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 ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ e i cosiddetti attinidi minori (fig. 7), questi ultimi a emivita lunghissima.

Il principio che governa lo smaltimento dei rifiuti radioattivi è che i manufatti siano depositati in un sito e in un modo tali che le sostanze pericolose in essi contenute non possano venire a contatto con la biosfera, isolandole quindi dall'acqua e dai fenomeni sismici.

Se l'intera massa dei rifiuti radioattivi, (circa 20 tonnellate all'anno per un reattore da 1000 Mw elettrici) viene così depositata, la presenza degli attinidi richiederà che il sito mantenga le sue caratteristiche stabili per migliaia di anni, un problema di difficile soluzione.

Si sta perciò affermando in tutto il mondo il ritrattamento del materiale scaricato dai reattori, finalizzato al recupero dell'Uranio e del Plutonio prodotto dal reattore, anche esso utilizzabile come combustibile.

Uranio e Plutonio sono riutilizzati per fabbricare del combustibile fresco e il problema delle scorie a alta attività si riduce ai prodotti non utilizzabili (circa 3%), che includono frammenti di fissione e attinidi. In ogni caso il problema di tali scorie potrà trovare una soluzione sistematica attraverso ricerche in corso in vari paesi, tra cui l'Italia (ENEA/INFN) sulla trasmutazione attraverso fissione con neutroni veloci delle componenti ad alta attività e lunga vita per trasformarle in sostanze a vita media più breve di più agevole conservazione.

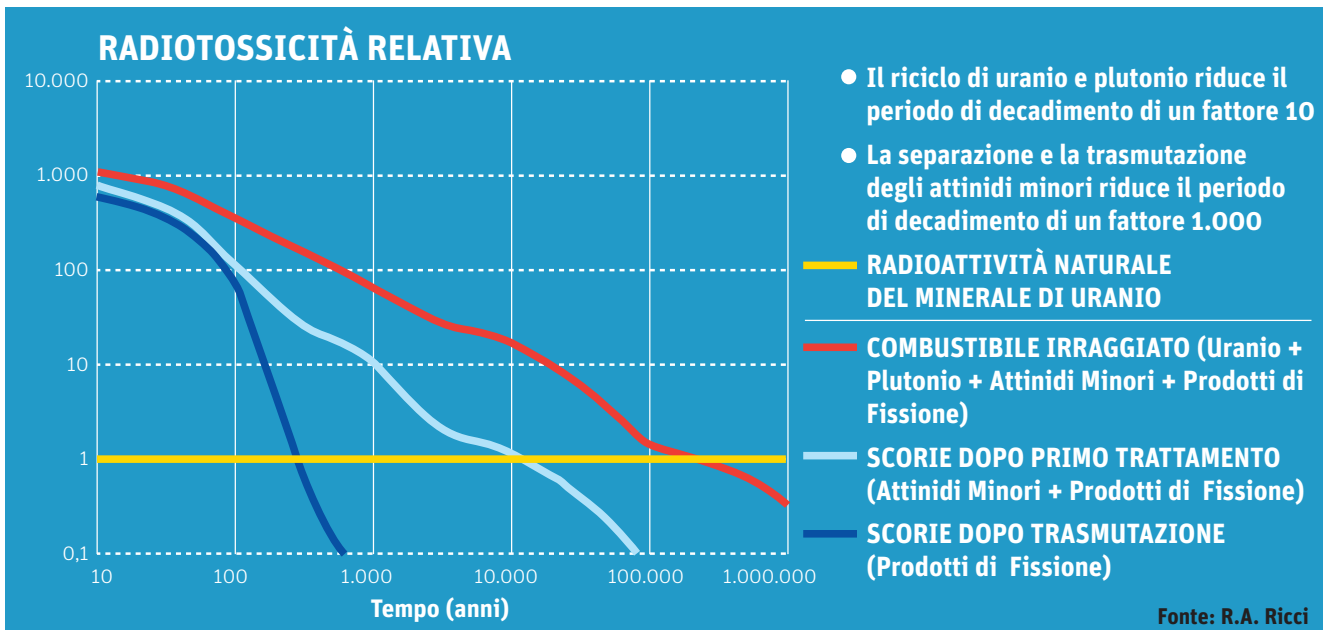
L'effetto delle varie fasi di riprocessamento del combustibile è mostrato in fig. 9.

- la curva rossa riporta in unità relative la radiotossicità per l'intero combustibile bruciato in funzione del tempo: si vede il decremento lunghissimo, decine di migliaia di anni, per ritornare al livello iniziale della radioattività naturale del minerale Uranio. Questa era la situazione con i reattori più vecchi (generazione II)



- la curva celeste dà il livello di radiotossicità degli attinidi e dei frammenti di fissione, una volta estratti Uranio e Plutonio con riduzione delle emivite di quasi due ordini di grandezza. Un procedimento che sarà disponibile già con i reattori attualmente in costruzione (generazione III+)
- la curva blu infine mostra come potrà ridursi la radiotossicità finale (frammenti di fissione) quando si realizzerà la trasmutazione degli attinidi nei reattori ora in studio (generazione IV)

Fig. 9



Tali reattori veloci, oggi in via di sviluppo, saranno in grado di “bruciare le proprie scorie” e, se opportunamente progettati, “bruciare” anche le scorie prodotte dai reattori termici attualmente in funzione. Questo fatto, pur non eliminando completamente la necessità di un deposito geologico a lungo termine, contribuirà a ridurne drasticamente le dimensioni ed il problema delle scorie diverrà in massima parte risolvibile con i depositi temporanei di superficie già esistenti o in costruzione in varie parti del mondo.

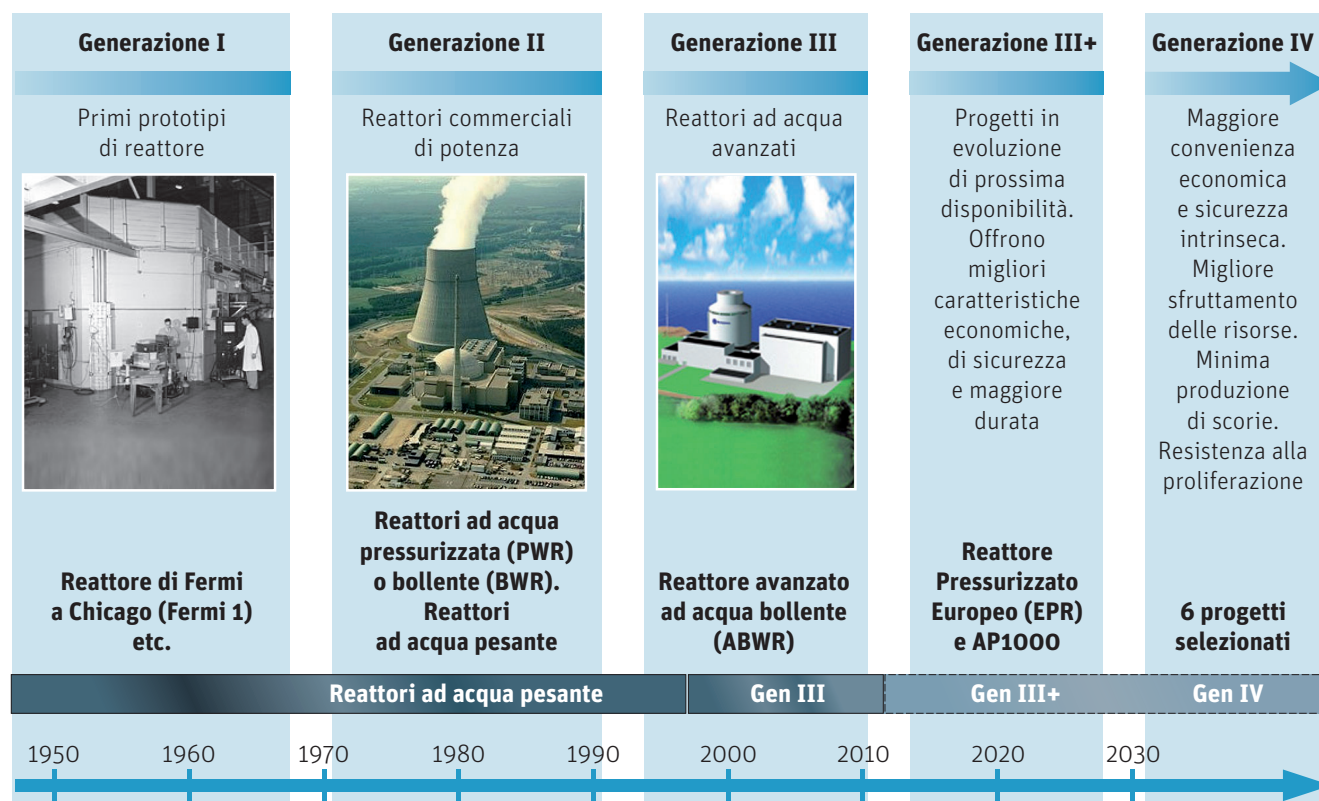
CONCLUSIONE

La fissione nucleare costituisce un mezzo molto potente per la produzione di energia a livelli industriali, l'unico confrontabile con la combustione dei fossili (petrolio, gas, carbone) e anche l'unico tra questi a non rilasciare emissioni di polveri o gas serra in atmosfera.

I reattori nucleari sono comunque sistemi a elevata tecnologia in continua evoluzione (fig.10): dai largamente collaudati reattori di II generazione, cui appartengono gli oltre 400 reattori in funzione nel mon-

do, agli attuali reattori di Generazione III o III+, più flessibili nella composizione del combustibile e muniti di sistemi di sicurezza "intrinseca" o "passiva" con ridotto intervento umano, ai futuri reattori di IV Generazione studiati per il massimo utilizzo del combustibile, la trasmutazione e la minimizzazione dei rifiuti e, in alcuni casi, la produzione di idrogeno.

Fig. 10



La messa in opera nel nostro Paese di centrali nucleari richiede quindi uno sforzo di organizzazione da parte dell'industria e delle istituzioni e uno sforzo congiunto di formazione e ricerca con le istituzioni di ricerca scientifica e tecnologica, tanto per i reattori della generazione attualmente disponibile quanto per gli sviluppi futuri.

Appunti sull'energia nucleare



Ufficio comunicazione

Piazza dei Caprettari, 70

00186 Roma

tel. +39 066868162

fax +39 0668307944

email: comunicazione@presid.infn.it

<http://www.infn.it/comunicazione>



infografica by centimetri.it