

Radioattività ed energia nucleare

L'atomo è la parte più piccola di ogni elemento presente in natura che ne conserva la specificità chimica, cioè la capacità di formare legami chimici con altri atomi a formare molecole. L'atomo è stato per lungo tempo ritenuto indivisibile (la parola greca “atomo” significa proprio “indivisibile”). In realtà ogni atomo è costituito da un nucleo compatto, dove è concentrata quasi tutta la massa atomica, circondato da elettroni molto più leggeri, che hanno la proprietà di formare legami chimici con la nuvola elettronica di altri atomi. Nel contesto delle reazioni chimiche i nuclei atomici possono essere considerati indivisibili, cioè delle particelle elementari aventi una determinata massa a riposo, carica e spin. In realtà i nuclei degli atomi sono costituiti da protoni e neutroni molto vicini tra di loro ed ogni nucleo si caratterizza per il numero di protoni e di neutroni. Nelle reazioni nucleari i nuclei si trasformano acquistando o cedendo protoni e neutroni e da ciò si può sviluppare una grande quantità di energia, chiamata energia nucleare. L'impiego dell'energia nucleare nasce proprio dalla possibilità di utilizzare le grandi energie presenti nel nucleo dell'atomo, ben maggiori rispetto alle energie ottenute da reazioni chimiche, dove il nucleo dell'atomo non subisce trasformazioni. L'utilizzo dell'energia nucleare ha riguardato e riguarda tuttora per la maggior parte la produzione di energia elettrica. Sappiamo però che è stata usata anche per scopi militari, soprattutto contro la popolazione civile.

Prima di discutere dell'impiego dell'energia nucleare facciamo alcuni richiami di fisica nucleare.

Elementi di Fisica Nucleare

Ogni atomo è costituito dal nucleo e da un certo numero di elettroni. La diversa carica elettrica dei nuclei (+) e degli elettroni (-1) produce un potenziale Coulombiano attrattivo che li tiene vicini. La tabella sotto riporta le proprietà dei nucleoni (protoni e neutroni) e degli elettroni. L'unità di massa atomica (u) è definita come la massa dell'isotopo 12 dell'atomo di Carbonio divisa per 12, $1\text{ u} = m(^{12}\text{C})/12 = 1.66 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$. Il nucleo ha raggio circa 10.000 volte più piccolo di quello dell'orbita elettronica, che per l'atomo di Idrogeno vale circa $5.3 \cdot 10^{-11}\text{ m} = 0.05\text{ nm}$. Quindi, il raggio del nucleo è circa $10^{-14}\text{ m} = 10^{-5}\text{ nm}$.

Atomo		Carica (in unità di carica dell'elettrone)	Massa a riposo (unità di massa atomica, u)
Nucleo	Protoni	+1	1.007276
	Neutroni	0	1.008665
Elettroni		-1	0.000549 u = 1.007276/1836

Si definiscono:

Z = numero di protoni = numero atomico (per atomi neutri è uguale al numero di elettroni)

N = numero di neutroni

A = Z+N = numero di massa, ovvero il numero di nucleoni.

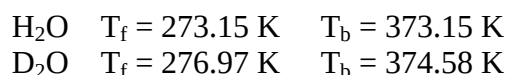
Un atomo si indica schematicamente con ^A_ZX essendo X il simbolo chimico dell'elemento. Per esempio $^{15}_7\text{N}$ indica l'atomo di Azoto, avente 7 protoni e 15 nucleoni, ovvero 8 neutroni. Questa notazione è in realtà un poco ridondante, in quanto Z identifica univocamente l'atomo per cui per es. Z=7 significa atomo di Azoto e d'altra parte il simbolo N indica univocamente Z=7; quindi la notazione ^AX sarebbe sufficiente. Poiché i neutroni non hanno carica elettrica, il loro numero non cambia l'identità dell'atomo. Le caratteristiche di un elemento chimico sono quindi determinate dal numero di protoni che specifica l'identità dell'atomo. Le particelle elementari protoni, neutroni ed

elettroni in questa notazione sono indicate rispettivamente con ${}^1_1\text{p}$, ${}^1_0\text{n}$ e ${}^0_{-1}\text{e}$. Per indicare collettivamente una singola specie nucleare, caratterizzata da un numero atomico Z e da un numero di massa A , si usa talvolta il termine *nuclide*.

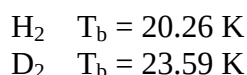
Dalla tabella sopra appare che quasi tutta la massa atomica è concentrata nel nucleo ($> 99.9\%$) mentre il volume atomico è determinato dal raggio delle orbite degli elettroni. La densità degli elementi nel loro stato condensato (densità = massa/volume) dipende quindi sia dal numero di nucleoni che dal volume atomico determinato dalle orbite elettroniche.

Isotopi

Gli isotopi sono nuclei aventi lo stesso numero di protoni Z ma diverso numero di neutroni. Ad esempio esistono tre isotopi del Carbonio aventi numero di massa 12, 13 e 14, indicati come ${}^{12}_{12}\text{C}$, ${}^{13}_{12}\text{C}$ e ${}^{14}_{12}\text{C}$. Gli isotopi più conosciuti sono quelli dell'Idrogeno: Idrogeno ${}^1_1\text{H}$, Deuterio ${}^2_1\text{H}$ e Trizio ${}^3_1\text{H}$. Gli isotopi danno luogo alle stesse molecole con la stessa stabilità, che hanno proprietà chimico-fisiche molto simili ma non identiche. Ad esempio le temperature di transizione dell'acqua e dell'acqua deuterata sono

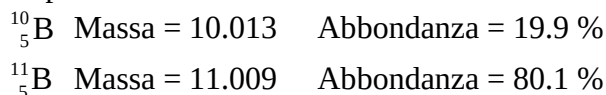


mentre per l'Idrogeno molecolare



Si possono osservare fino 4 K di differenza nelle temperature di transizione. Gli effetti sulle molecole non contenenti idrogeno sono in genere meno importanti.

Per l'Uranio ($Z=92$) si conoscono almeno 9 isotopi che vanno da $N=140$ a $N=148$. L'abbondanza isotopica è costante nel tempo per ogni elemento e la massa atomica degli elementi viene data come la media pesata sulla abbondanza dei vari isotopi. Ad esempio per l'atomo di Boro la composizione isotopica è



e la massa atomica del Boro è $10.81 = (10.013 \cdot 19.9 + 11.009 \cdot 80.1) / 100$.

Pochi isotopi sono stabili, la maggior parte di essi si trasforma in tempi più o meno lunghi in nuclidi più stabili, attraverso delle reazioni nucleari detti Decadimenti Radioattivi. Un criterio generale per valutare la stabilità dei nuclei è il rapporto N/Z che varia da 1 (elementi leggeri) ad 1.5 (elementi pesanti). La fascia in cui N/Z varia da 1 ad 1.5 determina la cosiddetta fascia di stabilità fuori dalla quale nessun nucleo può essere stabile. La stessa fascia espressa in A/Z va da 2 a 2.5.

Ai fini dello sfruttamento dell'energia nucleare, è importante l'Uranio estratto dalle miniere che ha la seguente composizione isotopica: ${}^{235}_{92}\text{U}$ 0.7 % e ${}^{238}_{92}\text{U}$ 99.3 %.

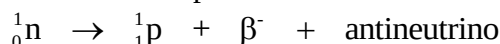
Forze nucleari

In ogni atomo gli elettroni ed il nucleo sono tenuti vicini dalle forze elettromagnetiche attrattive dato che hanno carica opposta. I protoni ed i neutroni nel nucleo sono invece tenuti insieme dalle **interazioni nucleari forti** che agiscono su tutte le coppie pp pn e nn. Esse sono fortemente attrattive ma agiscono solo su particelle vicinissime, dell'ordine del raggio nucleare, mentre decadono rapidamente a zero all'aumentare della distanza tra due particelle. Nel nucleo i nucleoni si muovono incessantemente, analogamente a come gli elettroni si muovono nelle loro orbite.

Tra i protoni nel nucleo si esercitano anche le forze elettriche repulsive che tendono ad allontanare i protoni tra di loro, ma che nei nuclei stabili sono sopraffatte dalle forze nucleari forti. I neutroni invece, avendo carica elettrica nulla, non sono coinvolti nelle forze elettriche se non per il fatto che un loro incremento nel nucleo aumenta la distanza media tra i protoni, diminuendo così la loro

repulsione Coulombiana, anche se questo è un effetto di modesta importanza. I neutroni sono comunque di grande importanza per la stabilità dei nuclei, dato che l'aggiunta di neutroni ad un nucleo aumenta il numero di interazioni nucleari forti senza aumentare il numero di repulsioni coulombiane.

Il numero dei neutroni nel nucleo non può però crescere a dismisura perché oltre un certo valore interviene l'**interazione nucleare debole** che provoca la reazione di decadimento β



in cui un neutrone si scinde in un protone e un elettrone (β^- = elettrone) più una particella di antimateria. Questa reazione destabilizza il nucleo perché aumenta il numero di protoni eliminando un neutrone, per cui aumenta il numero di forze repulsive elettriche senza aumentare il numero di interazioni forti.

Come già detto sopra, il numero di protoni e neutroni per i quali il nucleo è stabile (cioè prevalgono le interazioni forti sulle interazioni deboli ed elettriche) è regolato dalla fascia di stabilità, che stabilisce che un nucleo è stabile se il rapporto N/Z sta nell'intervallo 1.0 ÷ 1.5.

Per completezza va infine ricordato che, nonostante che in queste discussioni parliamo di protoni e neutroni come particelle elementari, i nucleoni sono costituiti dall'unione di più particelle elementari chiamate quark. In particolare un protone è formato da 2 quark up e 1 quark down, mentre un neutrone da 1 quark up e 2 quark down.

Va anche ricordato che il neutrone isolato (fuori dal nucleo) è una particella instabile con un tempo di vita medio di circa 15 minuti (vedi dopo) e si trasforma in un protone secondo la reazione sopra scritta.

Reazioni nucleari

Una reazione chimica implica la rottura e formazione di legami tra atomi senza alcun cambiamento dei nuclei degli atomi coinvolti. In una reazione nucleare invece si ha la trasformazione di uno o più nuclei in altri nuclei con A e/o Z diversi. Normalmente, cioè quando il numero Z cambia, questo implica la trasformazione di elementi chimici in altri elementi chimici. Alle reazioni nucleari partecipano, oltre ai nuclei, particelle α , β , γ ed anche protoni.

Particelle α : sono nuclei di Elio, hanno carica +2 e sono nuclidi molto stabili

Particelle β : sono elettroni ${}_0^{-1}\beta$ (hanno carica negativa)

Particelle β^+ : sono positroni (antimateria dell'elettrone), cioè elettroni con carica positiva ${}_0^1\beta$

Particelle γ : sono onde elettromagnetiche ad alta energia (bassa lunghezza d'onda)

Quando queste particelle interagiscono con una molecola, possono cedere ad essa parte della loro energia, per cui la molecola passa in uno stato eccitato e diventa molto reattiva. Per la loro capacità di provocare reazioni chimiche che in loro assenza non avverrebbero, queste particelle sono dette anche radiazioni ionizzanti.

Vediamo alcuni esempi

${}_6^{14}\text{C} \rightarrow {}_7^{14}\text{N} + \beta^-$	Un neutrone si trasforma in un protone con l'emissione di un elettrone
${}_7^{14}\text{N} + {}_0^1\text{n(veloce)} \rightarrow {}_7^{15}\text{N} \rightarrow {}_6^{12}\text{C} + {}_1^3\text{H}$	Il nucleo di Azoto assorbe un neutrone e forma ${}_7^{15}\text{N}$ che subisce una reazione di fissione (vedi dopo) spezzandosi in due nuclei più leggeri.
${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + \alpha$	Il nucleo di Radio fissiona producendo Radon e una particella α

Come si può vedere anche dalle reazioni sopra, nelle reazioni nucleari valgono alcune regole di conservazione e in particolare:

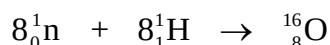
- 1) Vale la conservazione dell'energia

- 2) Vale la conservazione della carica elettrica
- 3) Vale la conservazione del numero di massa $A=N+Z$
- 4) Non vale la conservazione di N né di Z (a causa di $n \rightarrow p + \beta^-$ $p \rightarrow n + \beta^+$)
- 5) Non vale la conservazione della massa

Mentre nelle reazioni chimiche si osserva la conservazione di tutte le quantità sopra, nelle reazioni nucleari la massa non si conserva e la grande energia che si libera proviene proprio dalla diminuzione di massa dei prodotti rispetto ai reagenti.

Ma come può avvenire una diminuzione di massa se il numero di massa A si conserva, cioè si conserva il numero dei nucleoni? La ragione sta nel fatto che i *nucleoni presenti nei nuclei atomici hanno una massa inferiore rispetto a quella che hanno quando sono liberi*, e questa differenza cambia per ogni tipo di nucleo. Consideriamo per esempio l'Ossigeno

$^{16}_8\text{O}$ ha massa = 15.9950 e contiene 8p,8n,8e. La somma delle masse delle particelle libere che lo compongono è $8 \cdot 1.008665 + 8 \cdot (1.007276 + 0.000549) = 16.1319$ da cui si deduce che nella ipotetica reazione nucleare



si è persa circa 0.137 u di massa.

Il fenomeno della diminuzione della massa si chiama *DIFETTO DI MASSA* e avviene in tutte le reazioni nucleari. Secondo la teoria della relatività di Einstein, a questa scomparsa di massa è associata un'energia

$$E=mc^2$$

dove m è il difetto di massa e c è la velocità della luce. Dato che $c = 2.997925 \cdot 10^8$ m/s è molto grande, è chiaro che a piccole diminuzioni di massa corrispondono enormi quantità di energia, che viene rilasciata nella forma di energia cinetica. Nell'esempio della formazione dell'atomo di Ossigeno si è liberata una energia di ben 10^{10} kJ/mol, come si deduce dal calcolo seguente

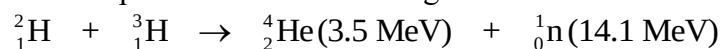
$$E \text{ (J)} = m(\text{u}) \cdot 1.66 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot 6 \cdot 10^{23} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2 = m(\text{u}) \cdot 10^{11}$$

Tipi di reazioni nucleari

Fusione nucleare

Nella fusione nucleare due atomi leggeri si uniscono (fondono) per formarne uno più grande. Per le leggi di conservazione sopra elencate, il nucleo prodotto dovrà avere $N=N_1+N_2$ e $Z=Z_1+Z_2$ dove 1 e 2 indicano i nuclei reagenti. La diminuzione di massa (difetto di massa) mediamente si aggira attorno allo 1% a cui corrisponde un enorme quantità di energia sotto forma di calore e radiazioni. Affinché avvenga la fusione, i due nuclei devono avvicinarsi a distanza dell'ordine di 10^{-15} m vincendo le forze elettriche repulsive e per questo sono necessarie temperature molto alte, milioni di gradi. La fusione nucleare avviene normalmente nei nuclei delle stelle, compreso il sole, dove le temperature sono di quell'ordine.

L'uomo non è ancora riuscito ad ottenere una fusione *controllata* per produrre energia elettrica proprio a causa delle elevate temperature necessarie, ma è stato capace di costruire la bomba termonucleare (bomba H) in cui il processo di fusione nucleare è del tutto *incontrollato*. Esiste un progetto internazionale per la costruzione di una centrale nucleare a fusione, ma siamo ancora ben lontani dalla sua realizzazione pratica. Negli esperimenti odierni si cerca di utilizzare la reazione tra Deuterio e Trizio che fondono più facilmente dell'Idrogeno

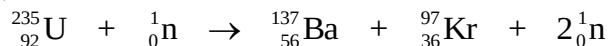


Per formare particelle α e neutroni ad altissima velocità. L'unità usata è $1 \text{ MeV} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$ che moltiplicata per il numero di Avogadro e per $14.1+3.5$ dà luogo a circa $2 \cdot 10^{12} \text{ J}$ di energia per una mole di reagenti. Nelle reazioni chimiche di combustione le energie sviluppate sono molto minori; ad es. una mole di metano bruciata sviluppa circa 10^6 J , che risulta inferiore di un milione di volte.

Si deduce che la quantità di combustibile nelle reazioni nucleari sarà molto minore rispetto alle quantità necessarie nelle centrali tradizionali a combustione.

Fissione nucleare

In una reazione di fissione nucleare un nucleo decade spontaneamente o attraverso la collisione con un neutrone, per formare due nuclei più leggeri. Si osserva una diminuzione di massa cui corrisponde una grande energia rilasciata in particelle α , β , γ . Una delle reazioni che avviene nelle centrali nucleari a fissione, e che viene indotta da una collisione con un neutrone, è

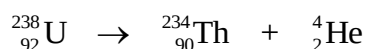


Con rilascio di 193 MeV (immediato) e di altri 7 MeV per gli ulteriori decadimenti dei prodotti che sono a loro volta instabili. Questa energia viene rilasciata per 80% in energia cinetica e 20% mediante emissione di raggi γ . I 2 neutroni prodotti possono a loro volta reagire con l'Uranio e produrre altri neutroni in una sequenza che viene chiamata reazioni a catena. Nella fissione controllata sono necessari particolari accorgimenti per evitare questo fenomeno.

Le fissioni spontanee riguardano nuclei instabili e costituiscono i decadimenti radioattivi.

Radioattività

La radioattività è il processo per cui un nucleo instabile diventa stabile mediante un processo *spontaneo* che rilascia particelle ad alta energia ed in cui si formano nuclei con diversi A,Z. Quindi degli elementi chimici si trasformano in altri elementi chimici. I nuclei radioattivi sono per lo più pesanti. I nuovi nuclei possono a loro volta risultare instabili ed andare incontro ad ulteriori decadimenti radioattivi. La sequenza di reazioni di fissione cessa quando si forma un nucleo stabile. In queste reazioni i reagenti sono un unico nuclide, mentre i prodotti sono in genere nuclidi, particelle α , β e γ . Come esempio citiamo la reazione



In cui un isotopo dell'Uranio si trasforma spontaneamente in Torio 234 con l'emissione di una particella α . Le reazioni di decadimento radioattivo hanno tutte una cinetica del primo ordine, per cui l'equazione che esprime il numero del radionuclide che decade è

$$N(t) = N(0)e^{-kt}$$

dove k è la costante cinetica, legata al tempo di dimezzamento (o emivita) dalla relazione $t_{1/2} = \ln 2 / k$, che può essere anche molto lungo. Come è noto l'emivita per reazioni del primo ordine non dipende dal numero di nuclei iniziale. Per esempio per la reazione sopra, l'emivita di una massa di Uranio 238 è $t_{1/2} = 4 \cdot 10^9$ y (y = year = anno). L'emivita risulta molto lunga per nuclei stabili ma può esserlo anche in quei decadimenti radioattivi che hanno una alta barriera di attivazione.

In tutti i corpi vi sono nuclidi radioattivi anche se, normalmente, in concentrazioni molto basse. I radionuclidi vengono classificati in tre specie a seconda della loro provenienza:

Cosmogenici : formati per effetto delle radiazioni cosmiche, capaci di innescare reazioni nucleari

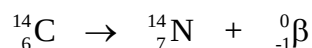
Primordiali : formati insieme alla terra, hanno tempi di vita lunghissimi.

Antropogenici: immessi in natura dalle attività umane.

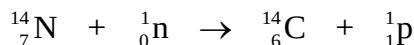
Datazione basata sul ^{14}C

Il metodo del ^{14}C permette di datare materiali di origine organica (ossa, legno, fibre tessili) ed è utilizzabile per materiali di età compresa tra 100 e 50.000 anni. La sua principale utilizzazione è in archeologia per datare i reperti costituiti da materia organica, quindi contenenti atomi di Carbonio.

Il Carbonio è presente sulla terra in tre isotopi: due stabili ^{12}C (98.93%) e ^{13}C (1.07%) e uno radioattivo ^{14}C (pochissimo), che si trasforma per decadimento beta in Azoto (^{14}N), con un tempo di dimezzamento di 5730 anni



per cui, se non fosse rigenerato, questo isotopo andrebbe gradualmente scomparendo dalla Terra. Nell'atmosfera il ${}^{14}\text{C}$ è continuamente prodotto dall'azione dei neutroni provenienti dai raggi cosmici che hanno un flusso costante nel tempo e che reagiscono con l'Azoto stratosferico e troposferico secondo la reazione



Si instaura perciò un equilibrio dinamico tra il processo di formazione e di distruzione del ${}^{14}\text{C}$ per cui il rapporto ${}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ nell'aria è circa costante nel tempo.

Tutti gli organismi viventi scambiano continuamente carbonio con l'atmosfera, attraverso processi di respirazione (animali) o fotosintesi (vegetali), oppure lo assimilano nutrendosi di altri esseri viventi o sostanze organiche. Di conseguenza finché un organismo è vivo, il rapporto tra la concentrazione di ${}^{14}\text{C}$ e quella degli altri due isotopi di Carbonio si mantiene costante nel suo corpo nel tempo. Inoltre questa concentrazione è uguale a quella che si riscontra nell'atmosfera. Quando un organismo muore, cessa di scambiare Carbonio con l'aria e il ${}^{14}\text{C}$ che contiene decade gradualmente e la sua quantità diminuisce nel tempo perché non viene più reintegrato dagli scambi con l'atmosfera. Il valore di $X = {}^{14}\text{C}/{}^{12}\text{C}$ nel tempo è

$$X(t) = X_0 e^{-kt}$$

dove X_0 è il valore negli organismi viventi, k è la costante cinetica e t è il tempo trascorso dalla morte dell'organismo. La misurazione di X permette con semplici equazioni di ricavare il valore della data di morte dell'organismo.

Effetti sulla salute delle radiazioni ionizzanti

Le particelle α e β non sono di per se sostanze chimiche nocive, ma lo diventano perché sono emesse a grande velocità e per urti possono trasmettere energia alle altre molecole fino ad ionizzarle o a portarle in stati molto eccitati. La reattività di tali molecole risulterà perciò molto aumentata e si possono innescare reazioni chimiche biologicamente dannose per gli organismi viventi. Vediamole una per una.

Particelle α

Riescono ad entrare nel corpo per pochi centesimi di mm, dato che sono pesanti, catturano elettroni per diventare He neutro e perdono rapidamente energia per urti non reattivi. Se provengono dall'esterno del corpo si fermano allo strato corneo della pelle (che è formato da cellule morte) e sono perciò innocue. Se invece sono emesse da atomi radioattivi inalati o ingeriti e quindi provengono dall'interno del corpo, possono causare gravi danni biologici in un raggio di 0.05 mm dal punto di emissione. In particolare provocano ionizzazione di molecole, frammentazioni molecolari e per queste ragioni, se colpiscono il DNA, possono provocare cancro.

Particelle β

Vengono in genere emesse a velocità più alta rispetto alle particelle α e possono penetrare fino a 3 mm nel tessuto biologico. Nell'aria possono percorrere fino ad un metro prima di reagire con qualche molecola. Sono quindi dannose anche se provengono dall'esterno del corpo, ma se sono emesse da atomi inalati o ingeriti possono causare danni ancora superiori alle cellule.

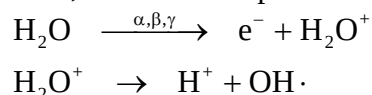
Particelle γ

Essendo radiazioni elettromagnetiche (perciò prive di massa a riposo) di bassa lunghezza d'onda possono penetrare nel corpo; schermi al Piombo di pochi cm di spessore sono in grado di proteggerci. Sono senz'altro le particelle più penetranti e quindi le più dannose agli organismi, tra

quelle emesse all'esterno del corpo. Le particelle γ riescono a passare completamente il corpo (fenomeno sfruttato nelle radiografie, raggi X) anche se perdono energia nel passaggio.

Danni biologici da esposizione a radiazioni ionizzanti

Le radiazioni ionizzanti hanno energie elevate (a livello molecolare) e possono dar luogo a reazioni che alle normali temperature non potrebbero avvenire o avrebbero una cinetica talmente lenta che in pratica è come se non avvenissero. Il meccanismo di azione si basa sul fatto che una molecola colpita da radiazione ionizzante passa ad uno stato molto eccitato e può provocare reazioni dannose per la vita delle cellule, come la formazione di ioni e radicali liberi. Ad esempio, considerando la grande quantità di acqua negli organismi, una reazione possibile è



in cui si libera il radicale ossidrile che è molto reattivo ed innesca reazioni dannose su DNA e proteine. Le radiazioni ionizzanti sono anche utilizzate per preservare gli alimenti, in quanto distruggono i batteri, attraverso gli stessi meccanismi nocivi anche per l'uomo.

Quando gli esseri umani sono esposti a dosi consistenti di radiazioni ionizzanti, possono sviluppare la cosiddetta malattia da raggi. I primi danni da esposizione si osservano in quei tessuti contenenti cellule a rapida divisione come nel *midollo osseo* deputato a produrre globuli bianchi e nel *tessuto epiteliale dello stomaco* in cui la vita media delle cellule è di tre giorni. I primi effetti di conseguenza sono la diminuzione di globuli bianchi e nausea. Per la stessa ragione i bambini sono più vulnerabili degli adulti alle radiazioni ionizzanti.

Le radiazioni γ sono anche utilizzate nella terapia contro il cancro (radioterapia), dato che le cellule cancerose si replicano più frequentemente delle sane. Comunque la selettività non è molto elevata per cui subiscono danni anche le cellule sane e la radioterapia comporta diversi effetti collaterali.

Quantità di radiazioni ionizzanti

La quantità di radiazione assorbita dal corpo umano viene misurata in *rad* (radiative absorbed dose). 1 rad equivale alla quantità di radiazione che cede 0.01 J di energia ad un chilogrammo di tessuto corporeo. Questa unità di misura non è molto utile ai fini della determinazione della pericolosità in quanto il danno biologico dipende dal tipo di radiazione. Per esempio il danno causato da un rad di particelle α è considerato almeno 10 volte maggiore a quello provocato da un rad di particelle β . La dose biologica di radiazioni viene allora misurata in *rem* (roentgen equivalent man) che è la dose assorbita moltiplicata per un fattore di rischio che vale 1 per raggi X, β , γ , da 2 a 20 per i neutroni, 20 per le particelle α .

La dose media annuale umana è di circa 0.3 rem che proviene dalle seguenti fonti:

- 55% dal gas Radon che si trova nell'aria
- 8% dai raggi cosmici provenienti dallo spazio (costituiti essenzialmente da protoni e particelle α)
- 8% dalle sostanze radioattive del suolo e delle rocce
- 11% dagli isotopi radioattivi naturali degli elementi presenti nel nostro corpo
- 18% da fonti antropogeniche come per esempio i raggi X nelle radiografie
- Pochissima dalle attività umane legate allo sfruttamento dell'energia nucleare

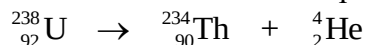
I danni alla salute da esposizione alle radiazioni ionizzanti sono quantificabili in modo molto approssimativo nel seguente modo:

- 25 rem/anno: diminuzione dei globuli bianchi
- 100 rem/anno: nausea, perdita di capelli
- 500 rem/anno: 50% di probabilità di morte

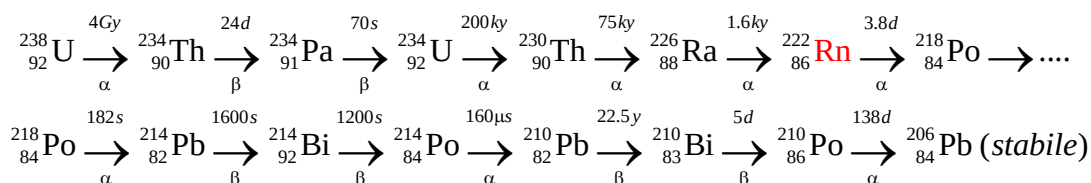
Da studi effettuati si stima che se una popolazione assorbisse una dose di 100 volte la dose naturale, subirebbe un aumento di rischio di tumore dello 1%.

Decadimento dell'Uranio e gas Radon

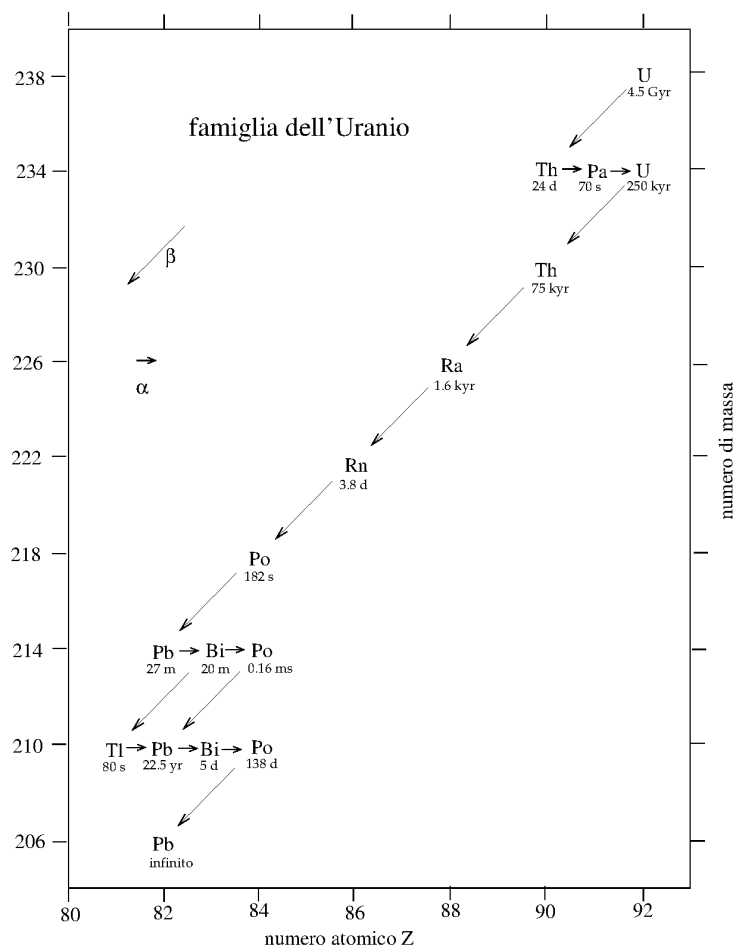
Molti tipi di rocce e graniti contengono piccole frazioni di Uranio (principalmente l'isotopo ^{238}U) che subisce il decadimento radioattivo a Torio emettendo una particella α , secondo la reazione



con una emivita molto lunga, 4.5 miliardi di anni. L'emivita corrisponde all'incirca alla età della Terra per cui la quantità di ^{238}U attualmente presente è circa la metà di quella presente al momento della formazione della Terra. Il Torio formatosi è a sua volta radioattivo e subisce un rapido decadimento β a Pa (Protoattinio), emivita di 24 giorni. La sequenza di decadimenti continua con ^{234}U etc ... Qui sotto è riportata la sequenza di decadimenti radioattivi che parte dall'Uranio 238 e che viene chiamata famiglia dell'Uranio. Per ogni reazione è indicata l'emivita e il tipo di decadimento.



Le stesse informazioni sono contenute nella figura di seguito. La lunga sequenza continua fino alla formazione di $^{206}_{82}\text{Pb}$ che è stabile e termina la sequenza radioattiva. Le concentrazioni di ciascuno dei nuclidi riportati dipendono evidentemente dalla velocità di formazione e da quella di



decadimento, secondo l'approssimazione dello stato stazionario. Ai fini dell'esposizione umana alle radiazioni, il nuclide più interessante è il Radon (Rn) 222 che decade in pochi giorni a Polonio emettendo una particella α . La sua peculiarità deriva dal fatto che, diversamente da tutti gli altri nuclidi della famiglia, il Radon si trova allo stato gassoso e questo ne aumenta la pericolosità per due ragioni:

1) Viene formato dall'Uranio delle rocce, ma può fluire attraverso le fessure e arrivare alla superficie. Da qui può diffondere nella troposfera e nelle abitazioni anche se per brevi percorsi, dato che la sua emivita è di meno di 4 giorni.

2) Può essere respirato e quindi l'emissione di particelle α può avvenire anche all'interno dell'organismo.

Si calcola (vedi tabella sopra) che il gas Radon sia responsabile circa della metà delle esposizioni a radiazioni ionizzanti. Anche se il Radon decade in

pochi giorni, esso viene continuamente rimpiazzato dal decadimento α del Radio e quindi la sua concentrazione è bassa ma costante. Il gas Radon è stata osservato in particolare nelle grotte e nelle costruzioni su terreno sabbioso, soprattutto nelle cantine. I terreni argillosi o ghiacciati inibiscono la fuoriuscita di Radon dalla superficie, per cui il decadimento avviene nel sottosuolo e il prodotto (Po), che non è un gas, non arriva alla superficie per cui non crea problemi alla salute.

In realtà il Radon in se stesso non è molto pericoloso perché la probabilità che decada durante la permanenza nei polmoni è molto bassa, mentre che se decade all'esterno del corpo le particelle α prodotte non penetrano nell'organismo. Più pericolosi sono invece gli elementi figli del Radon Pb, Bi, Po che non sono gas e aderiscono alla polvere dell'aria che, una volta inalata, si può attaccare alla superficie dei bronchi e dei polmoni, dimodoché il tempo di permanenza nell'organismo risulta molto aumentato. I più pericolosi sono ^{218}Po e ^{214}Po che emettono particelle α molto veloci, che colpiscono i bronchi e possono provocare danni alla salute. Negli organismi viventi questa sequenza in pratica finisce col ^{210}Pb (e non con il ^{206}Pb) che ha una emivita di 22 anni e può essere efficacemente eliminato prima che subisca un decadimento α .

Centrali nucleari a fissione

Dato che dalle reazioni nucleari si possono ottenere grandi quantità di energia con piccole quantità di materia, si è pensato di sfruttarle per produrre energia elettrica. Nella seconda metà dello scorso secolo si sono costruite molte centrali nucleari in tutto il mondo, che sfruttano le reazioni di fissione dei nuclidi (U, Pu) per produrre calore a da questo energia elettrica.

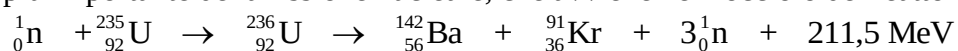
La fissione nucleare fu ottenuta sperimentalmente per la prima volta da un gruppo scienziati guidato da Enrico Fermi nel 1934 bombardando l'Uranio con neutroni opportunamente rallentati. Dopo alcuni anni di ricerche si comprese che un urto con il neutrone è in grado di scindere il nucleo degli atomi di Uranio in due parti pressoché uguali e che le reazioni di fissione rilasciavano ulteriori neutroni, con il risultato di potere originare una reazione a catena in grado di autoalimentarsi. Dopo queste importanti scoperte molti governi fornirono grandi supporti finanziari alla ricerca sulla fissione nucleare. L'attività di ricerca negli Stati Uniti fu condotta nell'ambito del progetto Manhattan, che portò anche alla costruzione di alcuni reattori, allo scopo di produrre Plutonio da utilizzare per le prime armi nucleari. Il primo uso della fissione fu infatti la costruzione di bombe nucleari. La prima bomba sperimentale al plutonio fu fatta esplodere nel luglio 1945 in Nuovo Messico, la prima bomba all'Uranio fu sganciata sulla città di Hiroshima il 6 agosto 1945, la seconda bomba al Plutonio fu sganciata invece su Nagasaki tre giorni dopo. Dopo la seconda guerra mondiale la maggioranza delle ricerche sui reattori nucleari fu incentrata a fini puramente militari e per diversi anni vennero realizzate migliaia di testate atomiche, nel contesto della guerra fredda tra superpotenze mondiali. A scopi puramente civili invece l'elettricità venne prodotta per la prima volta da un reattore nucleare nel 1951 nella centrale di Arco (Idaho, USA), che inizialmente produceva circa 100 kW. Successivamente sono state costruite sulla Terra più di 400 centrali a fissione in oltre 30 paesi, che attualmente producono il 16% del fabbisogno energetico totale. La percentuale di energia elettrica generata dalle centrali nucleari in alcuni paesi è riportata sotto

Francia 75%	Svezia 39%	Giappone 34%	USA 20%
-------------	------------	--------------	---------

La reazione di fissione più usata è quella indotta dalla collisione tra un neutrone ed un nucleo ^{235}U . Si forma ^{236}U che è instabile e fissiona immediatamente ($t_{1/2} < 10^{-12}\text{s}$). La cattura avviene con maggiore probabilità con neutroni lenti (detti neutroni termici, cioè con energia cinetica dell'ordine di $k_B T$). La caratteristica decisiva è che tra i prodotti figurano pure dei neutroni, che possono quindi essere usati per produrre nuove fissioni, producendo una nuova generazione di neutroni che a loro volta fissionano e così via in un meccanismo di moltiplicazione a valanga. Quelle reazioni in cui i prodotti inducono altri eventi reattivi sono chiamate reazioni a catena. Occorre però che di tutti i neutroni prodotti si possa scegliere quale frazione far reagire con ^{235}U , in modo da tenere sotto

controllo la reazione di fissione. Questo requisito non è necessario nelle bombe nucleari, dove la fissione è incontrollata, ma è di fondamentale importanza nelle centrali nucleari per evitare che le reazioni a catena portino a sviluppo incontrollato di energia con temperature eccessive.

La reazione più importante della fissione nucleare, che avviene nel nocciolo del reattore, è



Mentre ve ne sono altre simili. In ogni caso si formano sempre 2 o 3 neutroni. I prodotti hanno una energia cinetica elevatissima determinata dal difetto di massa della reazione. Un grammo di ${}^{235}\text{U}$ che subisce interamente la fissione produce circa 8×10^{10} J, ossia quanto la combustione di circa 3 tonnellate di carbone. I nuclei prodotti sono completamente ionizzati, privi cioè di elettroni per cui quando si muovono nella materia interagiscono fortemente con le molecole, rallentano e si fermano prima di aver percorso 1mm, con l'effetto di riscaldare le barre dello stesso Uranio da cui sono stati generati. Inoltre i nuclei prodotti sono anche essi radioattivi e danno luogo ad ulteriori reazione di fissione.

Come già accennato prima, il fenomeno decisivo è che i prodotti possono essere usati per produrre la fissione di altro ${}^{235}\text{U}$ che a sua volta genera altri neutroni e così via.

In una bomba atomica i neutroni prodotti vengono usati per innescare altre 2 o 3 fissioni molto rapide in tutto l'Uranio forzato in piccolo volume. Si libera così energia in modo esplosivo e incontrollato con effetti devastanti e abbondante rilascio di materiale radioattivo. La bomba sganciata su Hiroshima conteneva 60 kg di ${}^{235}\text{U}$.

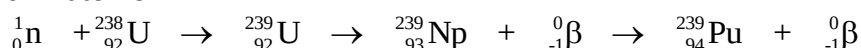
La zona dove avvengono le reazioni di fissione viene chiamata nocciolo. In un reattore nucleare l'energia deve essere rilasciata in modo controllato per cui un solo neutrone liberato deve innescare una nuova fissione. Gli altri neutroni prodotti vengono assorbiti dalle *barre di regolazione* formate da B, Cd o Gd, che hanno capacità di assorbire neutroni senza subire fissioni. Le barre sono regolabili in modo da tenere sotto controllo le reazioni a catena.

I neutroni prodotti dalla fissione sono inoltre troppo veloci, per essere assorbiti efficacemente dallo ${}^{235}\text{U}$. Infatti i neutroni non subiscono forze elettriche e non hanno difficoltà ad avvicinarsi ai nuclei, però la probabilità che vengano catturati aumenta al diminuire della loro velocità. Per il rallentamento si usano dei *moderatori* che possono essere H_2O , HDO , D_2O , CO_2 (usati come fluido nel nocciolo) e grafite (usata in barre regolabili). Attraverso uno scambiatore di calore, il calore prodotto vien trasferito ad un circuito idraulico contenente H_2O (ma anche CO_2) dove si ottiene vapore ad elevate T,P (come nelle centrali a combustibili fossili) che aziona una turbina che genera energia elettrica. Il vapore dovrà poi essere raffreddato nelle gigantesche *torri di raffreddamento*. Il rendimento è più basso rispetto alle centrali tradizionali perché la temperatura di esercizio delle centrali nucleari è 300°C contro i 550°C delle centrali a combustibile fossile.

L'Uranio che si trova nelle *barre di combustibile* non ha la composizione isotopica naturale (${}^{235}\text{U}$ 0.7%, ${}^{238}\text{U}$ 99.3%) ma deve essere stato arricchito nell'isotopo 235 che è l'unico efficace per la fissione. La fissione consuma l'isotopo 235 che si esaurisce nel tempo e le barre devono essere completamente sostituite all'incirca una volta all'anno.

Reazioni secondarie: produzione di Plutonio

I neutroni prodotti dalla fissione possono colpire sia lo ${}^{235}\text{U}$ ed alimentare ulteriori fissioni, o un ${}^{238}\text{U}$. In questo secondo caso si forma il nuclide ${}^{239}\text{U}$ che non fissiona, ma è radioattivo e conduce alla formazione di Plutonio



che, quindi, va considerato un sottoprodotto della fissione. Esso è a sua volta radioattivo e subisce decadimento α con un'emivita di 24000 anni per cui contribuisce esso stesso alla potenza del reattore. Pure i nuclei ottenuti dalla fissione del ${}^{235}\text{U}$, Ba, Kr ed altri, sono radioattivi ed insieme al Pu rimangono nelle barre di combustibile esaurite che sono perciò molto radioattive, molto di più delle barre di combustibile iniziali. Inoltre tutta la struttura del nocciolo resta contaminata dalle reazioni nucleari durante l'esercizio ed è per questa ragione che i reattori nucleari vanno smantellati dopo un tempo di lavoro di 20-25 anni.

Prima di passare ai problemi ambientali provocati dall'uso del nucleare per scopi civili, riassumiamo brevemente il ruolo dei neutroni nel nocciolo. Gli eventi possibili sono per i neutroni emessi nella fissione del ^{235}U sono:

- Sono catturati dalle barre di regolazione (dette anche di controllo o di assorbimento),
- Producono una nuova fissione in una barra di combustibile che genera calore nella barra stessa,
- Colpiscono un ^{238}U che non fissiona ma innesca una sequenza di decadimenti che genera nuovi elementi pesanti tra cui il Plutonio e gli Attinidi,
- Fuggono dal nocciolo e si perdono nei materiali di schermatura.

Evidentemente, solo la possibilità b) alimenta la reazione.

Impatto ambientale delle centrali nucleari

Uno degli aspetti positivi venuto alla luce ben dopo la realizzazione della prima centrale elettronucleare, è che nei processi nucleari *non viene prodotta anidride carbonica ed altri gas serra* per cui l'uso civile del nucleare non contribuisce al riscaldamento globale del pianeta.

I problemi ambientali maggiori derivano dalla produzione di scorie, ma ve ne sono anche durante le sequenze di lavoro che vanno dall'estrazione del minerale allo smaltimento delle scorie.

Estrazione di Uranio dalle miniere

I minerali da cui si estrae l'Uranio contengono altre sostanze radioattive (derivate dal decadimento spontaneo di ^{238}U , la famiglia dell'Uranio) e durante il processo di estrazione si ha una contaminazione dell'ambiente. Il minerale di scarto contiene infatti sostanze radioattive. Se i residui vengono interrati dove in seguito verranno costruite abitazioni, si può avere una dose anormale di gas Radon, che costituisce anche un grave rischio per i minatori.

Arricchimento di dell'isotopo 235

Affinché le barre di combustibile siano efficaci e si possa ottenere la reazione a catena che auto alimenta la centrale, è necessario che l'Uranio estratto sia arricchito nell'isotopo 235 dallo 0.7% iniziale al 3%. Questo processo non è facile da realizzare e si deve passare per una reazione che produce UF_6 (gassoso) e la separazione isotopica avviene sfruttando la diversa velocità media di $^{238}\text{UF}_6$ e $^{235}\text{UF}_6$. In un gas queste due molecole avranno la stessa energia cinetica (teoria cinetica dei gas) e perciò l'isotopo più leggero avrà una maggiore velocità. Per la costruzione di bombe nucleari l'arricchimento deve essere ancora superiore, fino al 90% o più di ^{235}U .

Ciò che rimane alla fine delle operazioni di arricchimento è chiamato uranio impoverito e contiene meno dello 0,2% dell'isotopo 235. Nonostante esso sia radioattivo, anche se in misura piccolissima, esso è stato impiegato in ambito militare dove è utilizzato nella produzione di munizioni anticarro e nella corazzatura dei veicoli militari. L'Uranio impoverito fu ampiamente utilizzato negli anni 90 durante la guerra in Bosnia e in Kosovo, luoghi in cui si recarono anche truppe italiane alla fine del conflitto. È accaduto che alcuni militari i quali avevano preso parte a quella spedizione, al ritorno in patria si siano ammalati di cancro, contratto, a loro dire, per essere stati a contatto con munizioni di uranio impoverito. All'indomani del primo decesso conseguente alla malattia, la polemica si inasprì con due fazioni una scettica sugli effetti dell'esposizione a Uranio impoverito e l'altra convinta della sua pericolosità. Questa problematica è nota col nome di "Sindrome dei Balcani".

Scorie nucleari

Questo è senz'altro il problema maggiore. Il combustibile esaurito contiene ancora una varietà di nuclei radioattivi. Uno dei componenti più problematici è il Plutonio 239 che proviene da ^{238}U +neutrone e che emette particelle α con una emivita di 24000 anni e che perciò richiede tempi

di stoccaggio molto lunghi. I nuclei più leggeri hanno emivite abbastanza brevi, per cui dopo un migliaio di anni rimangono soltanto Pu e altri nuclei molto pesanti.

Di particolare pericolosità tra i sottoprodotti della fissione sono il ^{90}Sr ($t_{1/2}=29\text{y}$) e ^{137}Cs ($t_{1/2}=30\text{y}$) per la loro capacità di entrare nei cicli biologici degli organismi. Lo Stronzio è chimicamente simile al Calcio, che è presente negli organismi, e può sostituirlo andando a decadere all'interno dell'organismo stesso. Lo stesso dicasi per il Cesio rispetto al Potassio.

Le scorie nucleari possono essere *riprocessate* con lo scopo di separare il Plutonio dagli altri nuclidi che decadono più rapidamente, e utilizzare la parte ricca di Plutonio per preparare nuovo materiale combustibile per centrali nucleari o per costruire bombe nucleari (come quella lanciata nel 1946 su Nagasaki) o smaltirlo attraverso la vetrificazione e successivo interrimento.

Catastrofi nucleari

Come è ben noto anche da fatti recenti, gli incidenti alle centrali nucleari possono essere molto pericolosi sia per gli addetti sia per la popolazione civile che vive nei dintorni, ma anche a grandi distanze. Il pericolo più grave è senz'altro rappresentato dalla perdita di controllo della fissione che porterebbe alla fissione incontrollata con la fusione del nocciolo la cui esplosione provoca fuoriuscita di materiale radioattivo anche in fase gassosa, per cui può ricadere al suolo anche in regioni molto lontane dal luogo dell'incidente.

Nel 1979 a *Three Miles Island* (Pennsylvania, USA)

) ci furono dei guasti al sistema di raffreddamento ad acqua del reattore e, nonostante l'efficienza delle barre di regolazione che permisero di interrompere la fissione, il reattore ha continuato a riscaldarsi a causa dei decadimenti dei prodotti della fissione. Il nocciolo è rimasto parzialmente privo di raffreddamento e si è surriscaldato fino a 2000 °C per cui metà di esso è fuso. I sistemi di contenimento hanno comunque retto e non c'è stata esplosione, anche se si è verificata una certa fuoriuscita di materiali radioattivi.

L'incidente più grave accadde a *Chernobyl* (Ucraina) nel 1986. Durante un test di routine vennero sollevate le barre di regolazione a grafite per aumentare la potenza e, ignorando alcune norme di sicurezza, il reattore si è surriscaldò provocando un incendio della grafite stessa, che portò ad un eccesso di pressione e ad una esplosione che fece saltare la pesante cupola protettiva con abbondante fuoriuscita di ^{131}Xe , ^{85}Kr , ^{131}I e ^{134}Cs e ^{137}Cs (prodotti della fissione). Oltre ai 58 morti tra gli addetti, la popolazione esposta alle radiazioni ha subito successivamente seri problemi sanitari. Il principale fu causato dallo ^{131}I che decade con emissione β , ha una emivita di 8 giorni e si accumula nella tiroide dove il decadimento può provocare il cancro. La cura consistette nel somministrare molto Ioduro di Potassio (KI) per diluire lo Iodio radioattivo inalato. Sono stati osservati altri problemi sanitari come difetti di bambini alla nascita e pochi casi di leucemia. I documenti ufficiali parlano di due morti nell'immediatezza del disastro e di 240 persone, fra addetti alla centrale e pompieri accorsi sul posto per spegnere l'incendio. Va detto che sui danni sanitari provocati vi sono cifre molto distanti tra di loro a seconda che la fonte sia favorevole o contraria al nucleare; i forti interessi economici in gioco non aiutano a disporre di dati univoci e attendibili.

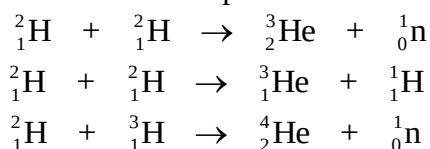
L'incidente nucleare più recente è accaduto a *Fukushima* (Giappone) l'11 marzo 2011 in seguito ad un terremoto e soprattutto a un maremoto (tsunami) che ha creato un'onda anomala di circa 14 metri che ha colpito l'impianto, composto di 6 reattori nucleari. Gli impianti che erano stati progettati per resistere a onde anomale fino a 6.5 metri di altezza, subirono gravi danni ai circuiti elettrici deputati al raffreddamento del nocciolo. Senza circolazione, l'acqua all'interno dei noccioli dei tre reattori ha iniziato a surriscaldarsi, a causa del calore prodotto dal decadimento radioattivo, e a evaporare, lasciando probabilmente scoperta una parte delle barre di combustibile di Uranio, che è fuso in almeno 3 reattori. A causa di ciò la temperatura e pressione sono salite e sono avvenuti

incendi ed esplosioni con rilascio di materiale radioattivo. Per evitare danni alla popolazione circostante, sono state evacuate ben 180,000 persone.

Centrali nucleari a fusione

La fusione nucleare implica la formazione di un atomo più pesante da due più leggeri. Il massimo di stabilità si osserva per numeri atomici intermedi intorno a 50-60 per cui con due atomi leggeri che fondono si ha un aumento di stabilità con elevati difetti di massa e conseguente grande rilascio di energia. Le reazioni di fusione sono infatti le fonti di energia liberata dal Sole e dalle altre stelle. Tutte le reazioni di fusione richiedono enormi energie di attivazione per vincere le forze elettrostatiche tra i due nuclei che devono avvicinarsi a brevissime distanze perché si attivino le forze nucleari forti. Per questo sono necessarie temperature elevatissime che creano seri problemi tecnologici che riguardano il confinamento del combustibile, dato che a quelle temperature nessun materiale esistente può essere usato, perché nulla esiste nello stato solido.

Le reazioni di fusione più interessanti ai fini della produzione di energia elettrica sono



Ma ve ne sono altre prese in considerazione. Nelle prime due il combustibile è il Deuterio, l'isotopo con A=2 dell'Idrogeno, che si trova in natura nella frazione dello 0.015% ed è stabile. Il Trizio invece è instabile e per usarlo come combustibile deve essere sintetizzato a partire dal Litio.

Al momento sono in corso di studio dei progetti per la realizzazione di centrali nucleari a fusione, ma lo stadio delle ricerche è ancora ben lontano da una realizzazione pratica.

Le conseguenze ambientali di queste centrali dovrebbero essere meno gravi di quelle degli odierni reattori a fissione. La sola scoria radioattiva è il Trizio che subisce decadimento β in 12 anni. Anche i neutroni prodotti però vanno considerati perché potrebbero reagire con altri nuclei e formarne di radioattivi. Il Trizio non può in alcun modo essere liberato nell'ambiente perché si comporta chimicamente come l'Idrogeno ed entra perciò in tutti i cicli biologici degli organismi. Quindi, se assorbito emette radiazioni β all'interno del corpo con gravi danni alla salute.

Riassumendo, la fusione controllata sarebbe di grande utilità nella produzione di energia, per le seguenti ragioni

1. Poca quantità di materia permette di ottenere grandi quantità di energia
2. Non si ha produzione di gas serra
3. Il prodotto della fusione è l'Elio che ha un nucleo stabile; si ottengono poche scorie radioattive di Trizio che ha un tempo di dimezzamento di 12 anni e quindi richiederebbe la protezione per tempi ragionevoli.
4. Non si innescano reazioni a catena e quindi non può accadere che la reazione vada fuori controllo.