Atomo: l'origine del termine

L'**atomo,** dal greco *a* (negazione) + *tomòs* (divisibile), fu così chiamato perché considerato l'unità più piccola e indivisibile della materia: è un concetto filosofico risalente alla dottrina di filosofi greci (Leucippo, Democrito e Epicuro, IV sec. a.C.) e latini (Lucrezio, I secolo d.C).

In particolare Democrito ipotizza che la materia non sia continua, ma costituita da particelle minuscole e indivisibili tra le quali c'è il vuoto. Questa idea viene avversata da Aristotele il cui pensiero resta predominante durante il Medioevo. Viene ripresa da alcuni filosofi rinascimentali (Giordano, Cusano) e dai primi scienziati sperimentali (Boyle e Galileo) nel XVII secolo.

Atomo come modello scientifico

Il concetto di atomo viene riproposto nel 1803 (quindi 22 secoli più tardi) da John Dalton sulla base di dati sperimentali, cioè di risultati ottenuti da esperimenti di laboratorio sulla composizione dei materiali, sulla conservazione della massa durante le trasformazioni (legge di Lavoisier) e sui rapporti di combinazione in massa tra i materiali puri semplici nel formare i materiali puri composti (legge di Proust).

Dalton postula atomi pieni e indivisibili, tutti uguali per ogni singolo elemento, diversi per la loro massa da elemento a elemento e che si mantengono inalterati durante le trasformazioni di materia (reazioni chimiche).

I composti chimici risulterebbero quindi da una precisa combinazione numerica tra gli atomi dei loro elementi componenti .

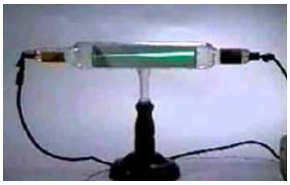
L'atomo « elettrico »

I lavori di Faraday, Stoner, Geissler, Crookes, Goldstein e Thomson (XIX secolo) rendono evidente che l'atomo ha una natura elettrica. Pur essendo allo stato normale elettricamente neutro esso può essere ionizzato: è cioè possibile ottenere da gas a bassa pressione particelle elettricamente negative e particelle elettricamente positive mediante intensi campi elettrici, come avviene nel tubo catodico.

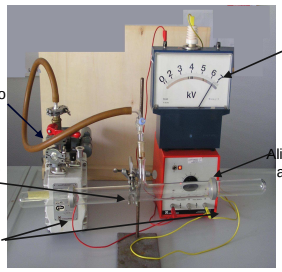
L'atomo sarebbe quindi normalmente neutro perché contiene cariche opposte che si neutralizzano.

La conducibilità elettrica dei gas

- Cosa fu possibile capire dagli esperimenti di Faraday?
- Qual è la differenza essenziale tra luce e raggio catodico?



La scarica elettrica nei gas



La scarica nell'aria

- Anche se la differenza di potenziale tra gli elettrodi è di 6000 Volt, nel tubo non passa corrente elettrica.

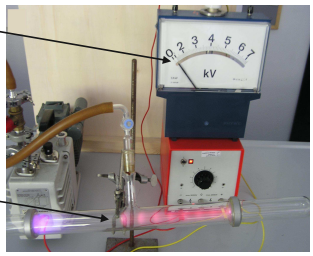
=>

Non sono presenti cariche elettriche libere di muoversi da un polo all'altro.

- Durante un temporale quando scocca un fulmine, la differenza di potenziale che permette la scarica elettrica è dell'ordine di 100000 Volt e più.

Scarica e luminescenza nei gas

La differenza di potenziale crolla bruscamente



Il gas all'interno del tubo emette luce

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 7

Il trasporto di corrente nei gas

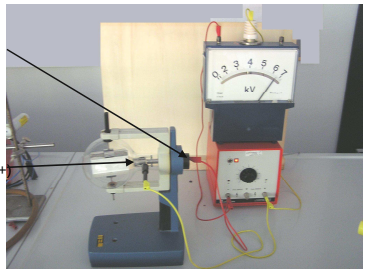
- Nel tubo circola una corrente elettrica che trasporta energia.
- L'energia trasportata viene ceduta alle molecole di ossigeno e azoto ancora presenti nel tubo che la emettono nuovamente come radiazione luminosa (non si osserva un riscaldamento del tubo)
- Gli ioni o altre particelle cariche presenti nel tubo si formano solo grazie alla elevata tensione elettrica iniziale e non rimangono libere a lungo.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 8

Tubo catodico (tubo di Geissler e Crookes)

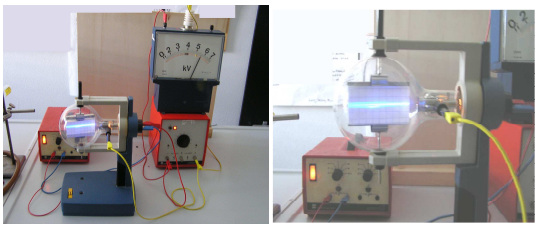
Catodo (polo -)

Anodo (polo +)

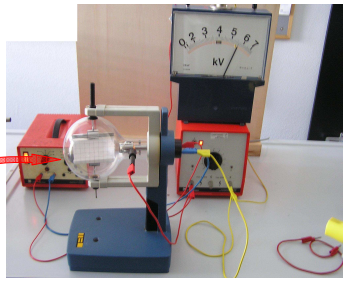


Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 9

Il fascio catodico

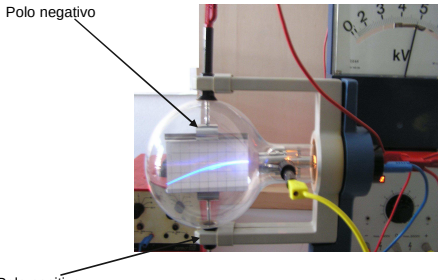


Inversione dei poli nel tubo catodico



Non si osserva nessun raggio catodico

Deviazione del raggio catodico con un campo elettrico



Proprietà dei raggi catodici

- Hanno carica negativa poiché sono diretti verso l'anodo (+).
- Hanno natura corpuscolare (sono costituiti da particelle) poiché fanno ruotare un mulinello posto sul loro cammino.
- Possono essere generati indipendentemente dal gas inserito nel tubo di Crookes. Le particelle costituenti questi raggi sono perciò presenti in qualunque tipo di atomo.

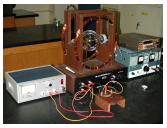
In base a questo e ad altri esperimenti, J. Thomson nel 1897 riuscì a dimostrare che i raggi catodici sono in realtà:

Un fascio di particelle tutte uguali, molto piccole, dotate di carica elettrica negativa che si muovono ad altissima velocità.

A tali particelle fu dato il nome di ***elettroni.***

Elettroni come componenti carichi dell'atomo

- L'esperimento di Thomson (tubo catodico) cosa ci permette di osservare?
- Quale valore ha misurato Thomson?
- Il valore misurato dipende dal gas e dai materiali del tubo catodico?
- Qual è l'interpretazione data da Thomson?



La scoperta dell'elettrone

I lavori di J.J.Thomson (1899) permettono di stabilire che la carica negativa risiede in particelle che hanno massa molto piccola rispetto a quella dell'atomo intero.

Queste particelle negative vengono denominate elettroni.

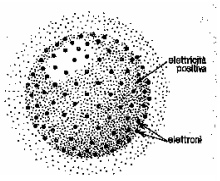
Nel tubo catodico avviene quindi un processo che estrae dagli atomi uno o più elettroni. Ciò che rimane in questo caso è una particella con carica positiva e con massa quasi uguale a quella dell'atomo, detta ione (ione positivo o catione).

La ionizzazione consisterebbe in una perdita o emissione da parte dell'atomo di particelle negative con massa molto piccola rispetto a quella dell'atomo con conseguente formazione di ioni positivi..

Thomson riesce misurare il rapporto tra massa e carica dell'elettrone. Più tardi R.Millikan (1910) ne quantifica la carica elettrica e rende quindi possibile il calcolo del valore della loro massa.

Un primo modello di atomo elettrico

J.J.Thomson (1899) propone un modello di atomo elettrico sull'esempio di un budino o una torta di mele: un corpo pieno di carica positiva con gli elettroni di carica negativa alla sua superficie, trattenuti su di essa dall'attrazione elettrostatica:



Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 16

La radioattività

A.H. Becquerel (1896) scopre l'emissione di radiazioni da parte dell'uranio e osserva la differenza tra questo fenomeno e altri già conosciuti come l'emissione di raggi X e la fosforescenza.

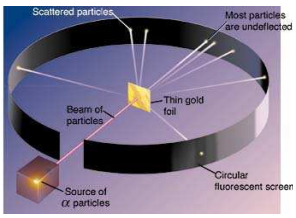
Il fenomeno viene poi osservato dai suoi allievi Pierre e Marie Curie con gli elementi attinio, polonio, radio e torio (1898) e fu da essi denominato **radioattività**.

E.Rutherford (1897) riesce e descrivere la radioattività in forma di radiazioni α (+), β^-, β^+, e γ, osservando pure la capacità ionizzante di queste radiazioni con possibili effetti fisiologici sul corpo umano.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 17

L'atomo « nucleare »

L'esperimento di Rutherford con la lamina d'oro (1911)



Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 18

L'atomo « nucleare »

L'esperimento con la lamina d'oro di Rutherford rende evidente la natura discontinua dell'atomo fino a quel tempo supposto un corpo pieno.

La diffrazione dei raggi α da parte della lamina d'oro da pochi μm di spessore porta al concetto di atomo "quasi vuoto".

La gran parte della massa dell'atomo è concentrata in un nucleo avente un raggio con dimensioni dell'ordine del millesimo rispetto al raggio dell'atomo.

La relazione tra le dimensioni dell'atomo e del nucleo può essere equiparata a quella tra un grande stadio (atomo) e un pallone da calcio (nucleo). Gli elettroni avrebbero in questo contesto le dimensioni di moscerini.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 19

La struttura dell'atomo nucleare

I lavori di Rutherford portano inoltre alla conclusione che nel nucleo deve essere concentrata oltre alla massa anche la carica elettrica positiva, mentre nello spazio circostante sono dispersi gli elettroni aventi carica elettrica negativa e massa trascurabile rispetto al nucleo.

La carica elettrica positiva del nucleo è caratteristica di ogni elemento chimico.

Sulla base delle immagini (insieme di punti) fornite dalle particelle α disperse dalle foglioline dei vari metalli utilizzati Rutherford fu in grado di valutare la carica nucleare di numerosi elementi.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 20

La caratterizzazione dell'elemento: il numero atomico

I lavori di Moseley (1913) permettono di perfezionare le valutazioni di Rutherford.

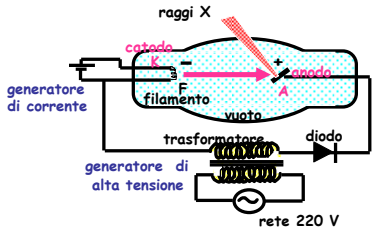
Misurando la frequenza dei raggi X (raggi Röntgen) emessi da un elemento solido colpito da raggi catodici è possibile assegnare ad ogni elemento un numero atomico con grande precisione, confermando i valori di Rutherford.

Ogni elemento chimico si caratterizza quindi per una particolare carica elettrica positiva contenuta nel suo nucleo: questo numero è detto **numero atomico**.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 21

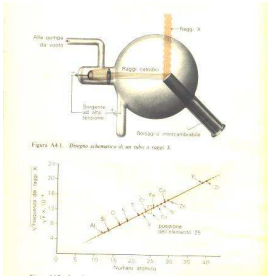
La caratterizzazione dell'elemento: il numero atomico

Il tubo a raggi X di Moseley



La caratterizzazione dell'elemento: il numero atomico

Il risultato dell'esperimento di Moseley



Da Parry et al., "Chimica, Fondamenti sperimentali", Zanichelli

La ionizzazione dell'atomo

La ionizzazione consiste in una perdita di elettroni da parte dell'atomo. Ciò richiede che venga vinta la forza di attrazione sull'elettrone (negativo) da parte del nucleo (positivo), per esempio mediante campi elettrici e/o campi magnetici, radiazioni elettromagnetiche, radiazioni α eβ, bombardamento con elettroni, calore.

Si ottengono elettroni e ioni positivi; la massa degli elettroni è sempre uguale per tutti gli elementi, mentre la massa dello ione positivo dipende dall'elemento.

Elementi e nuclei

Ogni elemento chimico è quindi caratterizzato dalla carica elettrica positiva contenuta nel nucleo dei suoi atomi (numero atomico) e dalla massa di questi stessi atomi (massa atomica o peso atomico).

Fino all'inizio del XX secolo gli elementi chimici venivano caratterizzati in base al loro peso atomico: la misura accurata dei pesi atomici (Cannizzaro, 1862) e le conoscenze delle proprietà chimiche e fisiche degli elementi aveva già permesso a Mendeleiev (1868) di allestire una prima « Tavola Periodica degli elementi chimici».

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 25

La misura accurata della massa atomica

Lo spettrometro di massa permette di separare atomi in forma di ioni in base alla loro massa e di comparare accuratamente questi valori di massa.

Aston (1910) riconosce che l'elemento Neon è costituito da tre tipi di atomi aventi tutti lo stesso numero atomico ma diversa massa (20, 21 e 22).

La differenza di massa tra atomi di uno stesso elemento deve essere riferita ad una differenza di massa tra nuclei aventi la stessa carica elettrica positiva.

L'insieme di atomi di un elemento caratterizzati da un uguale valore di massa si dice **isotopo** dell'elemento mentre il particolare atomo che lo caratterizza si dice **nuclide**.

Mediante lo spettrometro di massa è pure possibile misurare l'abbondanza relativa di ogni isotopo nel corrispondente elemento e verificare che l'isotopia è propria della maggior parte degli elementi.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 26

Elementi e isotopi: un esempio

L'elemento idrogeno è costituito in natura da due isotopi: il prozio e il deuterio:

- l'atomo di deuterio ha massa circa doppia rispetto al prozio (il più leggero di tutti gli atomi conosciuti).
- L'abbondanza relativa del deuterio in natura è 0.0115%

Quindi in natura su 10^6 atomi di idrogeno 115 sono di deuterio e 999885 sono di prozio.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 27

I costituenti del nucleo: il protone

Storicamente, la scoperta del protone non è legata ai risultati di un esperimento preciso, come è invece avvenuto per le altre particelle: infatti, intorno al 1920, si accertò che non esisteva alcun componente nucleare di carica positiva più leggero dell'atomo di prozio (H-1). Considerando che la massa degli elettroni è trascurabile rispetto a quella dei protoni si arrivò alla conclusione che il costituente fondamentale dei nuclei atomici fosse il nucleo di idrogeno, che fu chiamato protone (dal greco *proton,* che significa "primo").

La carica positiva del nucleo deve quindi essere il risultato dell'unione di più nuclei di idrogeno, quindi di più protoni. L'emissione di protoni da parte di materiali colpiti dalla radiazione α emessa da polonio e berillio fu osserata solo nel 1932 da I.Curie e Joliot.

Elementi e loro nuclidi

L'analisi delle masse atomiche mette in relazione il numero atomico con la massa degli atomi.

La differenza di massa tra atomi di uno stesso elemento (isotopi) deve essere riferita ad una differenza di massa tra nuclei aventi la stessa carica elettrica positiva; non è quindi da riferire al numero di protoni, ritenuti tutti di ugual massa.

La singola specie atomica di un elemento caratterizzata dal numero di protoni e dalla sua massa si dice **nuclide** e rappresenta il singolo isotopo dell'elemento.

Il neutrone

L'analisi della radiazione neutra scoperta da Bothe e Becker (1930) e la reinterpretazione dell'osservazione di Curie e Joliot portò Chadwick (1932) alla conclusione che nel nucleo oltre ai protoni ci sono anche particelle con massa quasi uguale (solo leggermente superiore) a quella del protone ma senza carica: queste particelle sono denominate **neutroni**.

La massa del nucleo è quindi determinata dalla presenza in esso di neutroni e di protoni.

Dal confronto dei valori delle masse nuclidiche degli elementi e dei loro isotopi si deduce che il numero atomico di un elemento corrisponde al numero di protoni presenti nei nuclei dei suoi atomi.

Il nucleo del prozio (H-1) contiene quindi un solo protone e nessun neutrone.

http://www.lfns.it/STORIA/Material%20Scuole/documents/RussoNeutrone.ppt

Il neutrino

Nel 1934 E.Fermi propone l'interpretazione dell'emissione β^- :

$$n \rightarrow p + e + \nu$$

Un neutrone si trasforma in un protone, in un elettrone e in un neutrino. L'elettrone e il neutrino vengono espulsi dal nucleo a grande velocità con conservazione dell'energia.

Si esclude così definitivamente la presenza di elettroni nel nucleo .

Il neutrino fu postulato da W.Pauli (1930) sulla base della teoria della relatività speciale di Einstein.

Fu così denominato da Fermi. La sua esistenza fu dimostrata sperimentalmente solo nel 1956 in esperimenti condotti in un reattore a fissione nucleare.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 31

Numero atomico e numero di massa

L'identità di un nuclide viene quindi espressa mediante il numero atomico (numero dei protoni) e il numero di massa (somma di neutroni e protoni).

I nuclidi di uno stesso elemento differiscono quindi per la massa; la differenza è determinata da un diverso numero di neutroni nel nucleo, e questa differenza viene espressa dal numero di massa.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 32

Numero di massa e massa nuclidica

La massa nuclidica viene misurata con gli spettrometri di massa (Aston) ed espressa come valore relativo. Come riferimento viene scelto l'isotopo più abbondante del carbonio al quale si assegna valore 12.0000000(0).

Malgrado che protoni e neutroni abbiano massa uguale le masse nuclidiche non risultano mai intere: Aston (1910) scopre che vi è sempre un difetto di massa derivante dall'unione di neutroni e protoni. La massa del nucleo da essi prodotto è inferiore alla somma delle masse dei singoli componenti (neutroni e protoni).

Il numero di massa (somma del numero di neutroni e di protoni) è invece sempre un numero intero.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 33

Il difetto di massa

Il fenomeno del **difetto di massa** scoperto da Aston sarà correlato in seguito agli scambi di energia nei processi nucleari in accordo con la formula di Einstein ($\Delta E = \Delta m * c^2$).

Causa il difetto di massa si è deciso di definire l'unità di massa atomica non la massa del protone ma la dodicesima parte della massa del nuclide 12 del carbonio (C-12). Grazie a ciò le masse nuclidiche si avvicinano sempre molto ai rispettivi numeri di massa.

Massa nuclidica e massa atomica

La massa atomica di un elemento (che troviamo nella Tavola periodica) rappresenta la media delle masse nuclidiche dell'elemento considerando l'abbondanza di ogni nuclide in un campione tipico dell'elemento.

Esempio: per il cloro la massa atomica sarà calcolata considerando che il 75.78% dei nuclidi ha numero di massa 35 e massa nuclidica 34.968852721 e il 24.22% ha numero di massa 37 e massa nuclidica 36.96590262:
(75.78 x 34.968852721 + 24.22 x 36.96590262)/100 = 35.453(2)

www.webelements.com

Isotopi: caratterizzazione e simbologia

Un elemento chimico viene caratterizzato dal numero atomico

Un isotopo di un elemento chimico viene caratterizzato dal numero di massa del nuclide e viene descritto mediante il numero atomico e il numero di massa:

Esempio:

i nuclei di tutti gli atomi di carbonio hanno carica +6: numero atomico del carbonio = 6

La maggior parte dei nuclei degli atomi di carbonio ha massa relativa 12: isotopo C-12 o carbonio-12

Si osservano pure atomi di carbonio con massa 13: isotopo C-13

Si osservano pure atomi di carbonio con massa 14: isotopo C-14

Questi isotopi vengono pure descritti con la seguente simbologia:

$${}^{12}_{6}C \qquad {}^{13}_{6}C \qquad {}^{14}_{6}C$$

Proprietà chimiche di elementi e isotopi

Le proprietà chimiche dipendono dal numero atomico: esse cambiano quindi da elemento a elemento.

Sono invece identiche per gli isotopi di uno stesso elemento.

I composti ottenuti con diversi isotopi di uno stesso elemento hanno quindi uguali proprietà chimiche (differiscono per velocità di reazione, vedi seguito)

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 37

Proprietà fisiche di elementi e isotopi

Le proprietà fisiche cambiano naturalmente con il numero atomico ma cambiano anche con il numero di massa: due isotopi di uno stesso elemento non sono quindi fisicamente identici e pure i composti che essi formano hanno proprietà fisiche (leggermente) diverse.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 38

Proprietà fisiche di elementi e isotopi

L'isotopo dell'idrogeno con numero di massa 2 (D, deuterio, H-2, ${}^{2}_{1}H$) forma con l'ossigeno acqua deuterata (o acqua pesante, D_2O) che rispetto all'acqua normale ha densità maggiore, punto di ebollizione leggermente superiore (100,4℃), reagisce più lentamente nei processi chimiche di elettrolisi, diffonde più lentamente in fase gassosa, ha diverso potere di moderazione dei neutroni nei processi nucleari, ecc.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 39

Il legame tra protoni e neutroni

I protoni, tutti elettricamente positivi possono stare uniti nel nucleo solo tramite un tipo di interazione di natura diversa rispetto a quella elettrica (cariche elettriche uguali si respingono!).

Per questo tipo di interazione è decisiva la presenza dei neutroni (anche se elettricamente neutri).

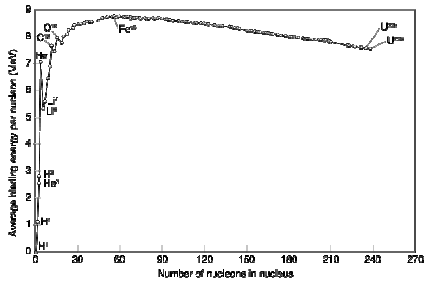
La forza attrattiva tra i costituenti dei nuclei cresce in generale con il numero di protoni e neutroni, detti insieme **nucleoni**, fino ad un massimo corrispondente ad un numero di 60 nucleoni.

L'unione tra protoni e neutroni fino a formare nuclei con 60 nucleoni libera quindi energia (fusione nucleare).

Nuclei con più di 60 nucleoni liberano invece energia quando si separano in nuclei più leggeri (fissione nucleare).

Il legame tra protoni e neutroni

Diagramma dell'energia legante tra i nucleoni dei nuclei



Emissione di neutroni

Il neutrone non porta carica elettrica ed ha massa identica a quelle del nucleo del prozio, quindi del protone.

Viene espulso a grande velocità (10^5 km/s) da nuclei resi instabili da altre radiazioni o da nuclei durante la fissione (vedi fissione nucleare) dando luogo alla cosiddetta radiazione neutra che risulta pure ionizzante e molto penetrante.

I neutroni essendo neutri non possono essere « pilotati » (cioè accelerati o curvati nella loro traiettoria).

I neutroni veloci possono essere però rallentati con acqua, acqua deuterata (acqua pesante) e grafite, detti moderatori.

I neutroni moderati possono rendere radioattivi o fissili nuclei stabili (attivazione, vedi fissione nucleare).

Sia i neutroni veloci che quelli moderati (lenti) possono essere fermati da materiali "spugna" quali boro e cadmio i cui nuclei "ingoiano" i neutroni bloccandoli senza conseguenze o divenendo radioattivi.

La radiazione neutra

La radiazione neutra consiste in una propagazione di neutroni veloci che oltre a ionizzare gli atomi che incontrano, essendo neutri e non subendo repulsione riescono a entrare nei loro nuclei modificandone le proprietà (numero di massa e stabilità). Possono rendere radioattivi nuclidi inizialmente stabili. Attraverso questa radioattività indotta (misurabile) si rende evidente la radiazione neutra.

La radiazione neutra fu osservata da Bothe e Becker bombardando con particelle α emesse dal polonio elementi quali berillio, boro o litio.

La radiazione neutra viene impiegata per attivare reazioni di fissione nucleare (vedi in seguito "centrali nucleari") ma ha pure applicazioni analitiche: se un campione di materiale viene esposto alla radiazione i nuclidi attivati daranno una caratteristica emissione radioattiva che ne permette l'identificazione e la quantificazione nel campione anche in quantità minima (tracce). Ciò viene applicato in medicina, archeologia, criminologia, astrochimica ecc.

La radiazione neutra rappresenta anche la gran parte della radiazione ionizzante prodotta da armi nucleari, in particolare dalle bombe a neutroni (bomba N).

Stabilità nucleare e radioattività

Determinate combinazioni di protoni e neutroni portano a nuclei stabili (non radioattivi); la presenza di un numero diverso di neutroni rispetto ad un determinato numero di protoni può portare a nuclei instabili che si stabilizzeranno mediante l'emissione di radiazioni (radioattività) fino a raggiungere una combinazione stabile.

Nuclei stabili possono divenire instabili, quindi radioattivi, se colpiti da neutroni veloci che riescono ad entrare nel nucleo generando instabilità ed emissione α o β. Se i neutroni veloci vengono adeguatamente moderati il loro ingresso in nuclei relativamente pesanti (massa nuclidica > 60) può dar luogo alla rottura del nucleo (fissione nucleare).

Stabilità nucleare e radioattività

Determinate combinazioni di protoni e neutroni portano a nuclei stabili; la presenza di un numero diverso di neutroni può portare a nuclei instabili che si stabilizzeranno mediante l'emissione di radiazioni fino a raggiungere una combinazione stabile. L'analisi accurata delle radiazioni α e β permette di misurarne carica e massa:

- le radiazioni α sono costituite da particelle con carica e massa equivalente a nuclei di elio (^4_2He)
- le radiazioni β^- sono costituite da particelle con carica e massa equivalente all'elettrone (elettroni ad alta energia),
- le radiazioni β^+ sono costituite da particelle con carica equivalente al protone e massa equivalente all'elettrone.

Stabilità nucleare e radioattività

Dopo la scoperta del protone e del neutrone (1932) viene chiarito che durante i processi di decadimento il nucleo può dar luogo ai seguenti fenomeni:

- perdere un gruppo di 2 protoni e due neutroni (emissione α)
- trasformare un neutrone in un protone (emissione β^-)
- trasformare un protone in un neutrone (emissione β^+)

In tutti i casi cambia il numero atomico, quindi si producono elementi diversi da quelli di partenza.

La prima trasformazione di un elemento in un altro era riuscita già a Rutherford (1919) che ottenne Ossigeno-17 bombardando Azoto-14 con particelle α.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 46

Trasformazione di elementi

Rutherford (1919) riuscì a produrre ossigeno (O-17) da azoto (N-14) con particelle α (He-4).

La trasformazione è visibile nella camera a nebbia (contenitore contenente aria saturata di vapor d'acqua) nella quale vengono "sparate" particelle α provenienti da un materiale radioattivo (radio o polonio). Le particelle α ionizzano le molecole di ossigeno e di azoto; sugli ioni generati condensano molecole d'acqua: il complesso formatosi lascia una traccia luminosa nella camera che indica il loro moto rettilineo. Circa ogni 50'000 particelle α sparate si osserva una biforcazione di in una delle tracce luminose.

In base a misure su direzione, intensità e propagazione delle tracce luminose è possibile stabilire massa, velocità e natura elettrica delle particelle che si propagano e chiarire la dinamica del processo:

I nuclei N-14 colpiti da una particella α liberano un protone generando un nucleo O-17:

$$^{4}_{2}He + {}^{14}_{7}N \longrightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}p$$

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 47

Velocità di decadimento dei nuclidi radioattivi

Ad ogni emissione di una particella corrisponde il decadimento di un nucleo.

La frequenza con la quale vengono emesse particelle radioattive a partire da un certo numero di nuclei è un fenomeno statistico.

Essa dipende dall'instabilità dei nuclei: maggiore è la loro instabilità e più frequente sarà l'emissione.

La velocità con la quale i nuclei di un isotopo decadono viene espressa con il **semiperiodo o emivita**: esso è il tempo dopo il quale la metà dei nuclei presenti inizialmente nel campione si sono trasformati attraverso il decadimento.

Esso non dipende da numero di nuclei inizialmente presenti.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 48

Radioattività naturale

I decadimenti nucleari sono processi naturali che avvengono nei materiali minerali per la presenza di elementi con isotopi radioattivi naturali come uranio (U-238), radio (Ra-226), polonio (Po-210), torio (Th-232) e nell'aria per la presenza di radon (Rn-222).

Tutti danno tutti decadimenti α .

Anche nel nostro corpo, in quello di tutti gli animali e nei vegetali vi è radioattività per la presenza naturale del nuclide radioattivo Carbonio-14 che dà decadimento β.

Alcuni nuclidi radioattivi presenti in natura derivano dal decadimento di altri, come Rn-222 prodotto dal decadimento del radio e Ra-226 a sua volta dal decadimento dell'uranio.

L'energia liberata nel sottosuolo da questi processi origina l'energia geotermica che noi possiamo sfruttare per il riscaldamento o che deve essere smaltita come nel caso del tunnel di Alptransit.

I nuclidi radioattivi naturali conosciuti sono circa 60.

Nuclidi non naturali stabili o radioattivi possono inoltre essere prodotti per collisione in esperimenti condotti con acceleratori di particelle.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 49

Diffusione di nuclidi radioattivi naturali e artificiali

Accidentalmente possono inoltre finire nell'ambiente nuclidi radioattivi non naturali prodotti per via tecnica attraverso processi nucleari come Cesio-137 e Iodio-131 al tempo dell'incidente nella centrale di Tschernobyl (1986). Gli stessi isotopi oltre a Plutonio-239, Stronzio-90 e altri possono essere prodotti in grande quantità da esplosioni nucleari come quelle prodotte a Nagasaki e Hiroshima (seconda guerra mondiale, 1945), e in vari luoghi del mondo nei test eseguiti dai paesi in possesso di armi nucleari (Russia, USA, GB, F, Cina, Pakistan, India, Israele e Corea del Nord).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 50

Radiazioni: propagazione e schermatura

Le radiazioni α sono particelle con carica positiva (2 neutroni e 2 protoni) e si spengono dopo circa 1 cm nell'aria; possono pure essere bloccate con un semplice foglio di carta.

Le radiazioni β^- hanno carica negativa (elettroni ad alta energia emessi dal nucleo), sono più energetiche e si propagano nell'aria per circa 1 m; possono pure essere bloccate con schermi di materiali opportuni per esempio piombo o acciaio con spessori di alcuni mm.

Le emissioni α e β possono essere accompagnate da radiazioni γ (onde elettromagnetiche più energetiche dei raggi X) che si propagano nell'aria statisticamente per circa 100 m.

Raggi γ e X possono anche essere prodotti dalla collisione di particelle α e β con nuclei di atomi eccitabili (radiazione secondaria).

Queste radiazioni vengono bloccate per urto diretto con nuclei stabili; molto adatto è il piombo, materiale ad alta densità atomica con nuclei molto stabili.

L'assorbimento delle radiazioni γ e X è esponenziale rispetto allo spessore del materiale schermante e questo spessore può essere facilmente calcolato per avere una schermatura efficace.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 51

Radiazioni: esposizione diretta

Gli effetti biologici delle radiazioni ionizzanti dipendono dall'energia trasportata dalla radiazione e dalla sua natura (α,β,γ,X, UV, neutroni, ecc.):

I diversi tipi di radiazione possono dare a parità di energia trasportata effetti biologici diversi che vanno da quelli benefici della medicina nucleare a quelli negativi o addirittura letali delle sovraesposizioni.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 52

Radiazioni: esposizione diretta

Viene definita un valore limite (dose massima) sotto il quale la salute umana non è a rischio di danni: si tratta di un valore equivalente calcolato in base all'energia assorbita per kg di massa corporea moltiplicata per un fattore che dipende dal tipo di radiazione.

La dose equivalente massima viene definita sia per tutto il corpo come valore medio, sia per parti di esso particolarmente sensibili (organi genitali, fegato, ecc.).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 53

Radioattività e radiazioni: unità di misura

L'attività di una massa di materiale radioattivo è espressa in **Becquerel**:

1 Bq = 1 decadimento/s

(ev. Bq/m^3)

L'energia assorbita attraverso l'esposizione viene espressa in **Gray**:

1 Gy = 1 J/kg

La dose equivalente viene espressa in **Sievert** (Sv o mSv) e calcolata in Gy x Q dove Q è il fattore di qualità che dipende da tipo di radiazione.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 54

Radioattività e radiazioni: rischio da esposizione

Il rischio da esposizione non dipende dall'attività di un materiale radioattivo presente nell'ambiente (cioè dal numero di decadimenti nel tempo) ma dalla dose assorbita dal corpo, quindi dall'energia e dalla qualità delle radiazioni alle quali si può essere esposti.

La dose equivalente limite alla quale può essere esposta una persona professionalmente è di 50 mSv per anno. Questo tasso corrisponde ad un rischio teorico di insorgenza di gravi malattie (cancro o danni genetici) equivalente ai normali rischi quotidiani.

I valori realmente misurati nel personale addetto a impianti nucleari è inferiore a 10 mSv per anno.

Per persone non addette il valore limite è di 5 mSv/anno mentre qualsiasi impianto anche nucleare non deve dare incrementi nella popolazione oltre 0.3 mSv/anno per singole persone.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 55

Radioattività e radiazioni: misura dell'attività e dell'esposizione

L'attività di un materiale o di un singolo nuclide, l'energia delle radiazioni e la dose dell'esposizione vengono misurate con rivelatori basati sul principio dei contatori Geiger:

Le radiazioni ionizzanti producono la ionizzazione di un gas presente in un tubo attraverso una finestra.

La conducibilità elettrica che ne deriva e la corrente elettrica generata permettono la misura. Utilizzando specifici materiali per pareti, finestre e gas possono essere rivelate tutte le diverse radiazioni (α,β,γ,X, neutroni).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 56

Radioattività e radiazioni: esempi di valori di esposizione

L'esposizione misurata su addetti ad impianti nucleari è dell'ordine dei 10 mSv (valore massimo misurato per una singola persona).

L'esposizione della popolazione ticinese nei mesi seguenti l'incidente di Tschernobyl (1986) causata principalmente dai nuclidi di cesio e iodio è stata di 0.2 mSv/anno (oggi scesa a 0.01).

L'esposizione media della popolazione svizzera è di 4 mSv/anno (esposizione naturale a Caslano 1 mSv/anno, a Leibstadt di 0.700 (incremento da parte della centrale nucleare: 0.003 mSv/anno)[1,2].

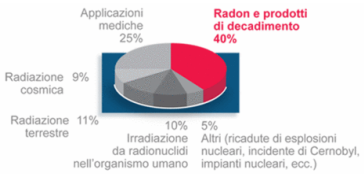
L'esposizione alla quale sono stati esposti gli operai inviati nell'area dell'impianto del reattore aperto di Tschernobyl nei giorni seguenti l'incidente fu > 500 mSv.

L'esposizione durante un'esplosione nucleare (Hiroshima, Nagasaki) è > 500 μSv/h (4000 mSv/anno) nel raggio di alcuni km dal luogo dell'esplosione

[1] http://www.bag.admin.ch/themen/strahlung/00045/02411/index.html?lang=de
2 http://info.casaccia.enea.it/gsp3/Dosi/RadAmbDosIrradSvizz.pdf

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 57

Radioattività e radiazioni: fonti di esposizione



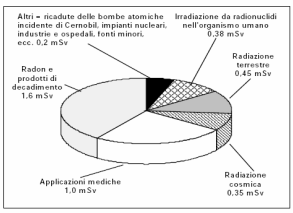
Fonte: Radioattività dell'ambiente e dosi d'irradiazione in Svizzera, UFSP, 2003

La principale fonte di esposizione in Svizzera è data dal radon, un gas chimicamente inerte che si forma nel sottosuolo a partire dal decadimento naturale di uranio; esso diffonde nell'atmosfera e dà luogo ad prodotti di decadimento a loro volta radioattivi. Occorre evitare che si possa accumulare nei locali abitativi.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 58

Radioattività e radiazioni: valori di esposizione in Svizzera

Esposizione a radiazioni della popolazione svizzera in media, in mSv/anno (totale: 4 mSv/anno)



Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 59

Materiali radioattivi: diffusione e assorbimento

I materiali che emettono particelle α e β e radiazioni γ non rappresentano un pericolo se custoditi stabilmente sotto schermatura.

L'emissione di particelle α è invece particolarmente pericolosa se avviene direttamente nelle nostre cellule; questo può avvenire **se i nuclei responsabili vengono assimilati dall'organismo** tramite l'inalazione, l'alimentazione o il passaggio diretto nel sangue.

L'energia associata alla particella α nel punto e al momento dell'emissione è in grado di produrre la ionizzazione in atomi di molecole che si trovano a diretto contatto.

Questa ionizzazione può tradursi in un danno fisiologico, particolarmente grave se riguarda molecole di sistemi produttivi o riproduttivi quali proteine e acidi nucleici (DNA).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 60

La pericolosità dei materiali radioattivi

Materiali radioattivi prodotti da processi tecnici controllati (centrali nucleari, medicina, ricerca,..) custoditi in sistemi schermanti appropriati non danno effetti sull'ambiente purché il loro confinamento sia ragionevolmente assicurato.

Materiali radioattivi naturali presenti e confinati in rocce o giacimenti (come l'uranio nel granito della nostra regione o in giacimenti carboniferi) non rappresentano un pericolo in quanto naturalmente schermati dagli altri materiali. Essi generano la cosiddetta radioattività ambientale che può variare da luogo a luogo. Ad esempio nella zona di Verscio si misura la radioattività ambientale maggiore di tutta la Svizzera per la presenza relativamente elevata di uranio nelle rocce.

La pericolosità di materiali radioattivi

La presenza naturale o accidentale di nuclidi radioattivi in terreni, nelle acque o nell'aria può invece portare all'assimilazione e all'accumulo nell'organismo di nuclei radioattivi con conseguenti gravi pericoli.

Alcune cause possono essere:

- processi di lavorazione di rocce uranifere (polveri inalabili),
- combustioni di carboni uraniferi (fumi inalabili e ricadute sulle colture)
- combustione di tabacchi contenenti polonio (inalazione),
- deponia o smaltimento incontrollati di scorie contenenti nuclidi radioattivi provenienti da medicina, ricerca e industria con conseguente infiltrazione nelle acque o diffusione nel terreno,
- fughe di materiale radioattivo da centrali nucleari o centri di ricerca,
- esplosioni nucleari (bombe a fissione o a fusione nucleare)

La pericolosità di materiali radioattivi

Vi può essere un pericolo per la salute dovuto alla diffusione nell'ambiente di nuclidi assimilabili senza che si registri un apprezzabile aumento della radioattività ambientale globale.

Un forte aumento della radioattività ambientale produce invece un pericolo sia per esposizione diretta e immediata alle radiazioni sia per assimilazione a medio- lungo termine di nuclidi radioattivi.

La pericolosità di materiali radioattivi nel corpo umano

L'assimilazione nell'organismo di nuclidi radioattivi avviene per affinità chimica:

Il radio (Ra) appartiene alla stessa famiglia chimica del calcio (Ca) è può essere assimilato nelle ossa; il suo nuclide Ra-226 dà emissione α direttamente nelle cellule del tessuto osseo;

L'uranio (U) può comportarsi come cromo e molibdeno e legarsi a proteine finendo nelle ossa o nel fegato dove il suo nuclide più comune U-238 emette particelle α.

Il radon (Rn) è un gas inerte e pesante: viene inalato e circola nelle vie respiratorie e staziona nei polmoni; può pure diffondere nel sangue e circolare a contatto con i suoi costituenti; il nuclide Rn-222 emette particelle α può danneggiare sangue e tessuti delle vie respiratorie.

Isotopi radioattivi non naturali (prodotti tecnicamente) di elementi comunemente utilizzati dall'organismo (come il nuclide I-129 dello iodio utilizzato dalla tiroide) vengono utilizzati dall'organismo come i normali isotopi stabili in quanto hanno uguale comportamento chimico.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 64

La scoperta della fissione nucleare

L'effetto della fissione nucleare fu osservata da Irene Curie e Frederic Joliot (1938) scoprendo la produzione di nuclidi radioattivi non naturali a partire dall'uranio. Essi non furono però in grado di interpretare il fenomeno.

La spiegazione venne da Otto Hahn, Lise Meitner e Fritz Strassmann (1939) che riuscirono a isolare il bario prodotto dall'irraggiamento di uranio con neutroni lenti ipotizzando la demolizione del nucleo di uranio.

Lise Meitner fu in grado di formulare il processo come fissione del nucleo di U-235 in due nuclei figli di bario e di un secondo elemento (kripton).

$$ {}^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \longrightarrow {}^{144}_{56}Ba + {}^{89}_{36}Kr + 3{}^{1}_{0}n $$

Paul Scherrer scoprì che la fissione dell'uranio è accompagnata **dall'emissione di due o tre neutroni**, scoperta fondamentale per lo sviluppo di una **reazione a catena** a scopo di produzione di **energia controllata a scopo pacifico**.

Paul Scherrer ottenne pure la fissione nucleare a partire da torio.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 65

Nuclidi fissili

I nuclidi degli elementi naturali relativamente pesanti (numero di massa da 60 fino a 92) danno luogo a fissione se colpiti da neutroni rallentati (moderati), cioè i loro nuclei si spaccano in nuclei più piccoli con liberazione di energia in quantità ingente in quanto nei nuclei prodotti è maggiore l'energia legante tra i nucleoni (protoni e neutroni).

Lo stesso fenomeno si produce con nuclidi di elementi transuranici, cioè più pesanti dell'uranio e non naturali (l'uranio è l'elemento naturale più pesante).

I nuclidi Pu-239, Th-232 e U-238 possono dare fissione anche con neutroni veloci.

Solo alcuni nuclidi danno fissione spontanea (senza attivazione con neutroni) con emissione di neutroni: U-238 (in 1g una fissione ogni 130 s), Cm-244, Cf-252, Fm-256.

Questi nuclidi fungono da generatori di neutroni per esempio nella medicina nucleare.

I nuclidi U-233, U-235, Pu-239 e Pu-241 oltre alla fissione dei loro nuclei in nuclei più piccoli liberano 2 o più neutroni, quindi permettono una reazione a catena e quindi uno sfruttamento tecnico del processo per la produzione di energia. La liberazione di più di un neutrone per ogni fissione è necessaria in quanto qualsiasi materiali utilizzato per un reattore "ingoia" e inattiva una parte dei neutroni emessi.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 66

L'energia liberata della fissione nucleare

La fissione di U-235 libera 200 MeV:

$^{1}_{0}n + {}^{235}_{92}U \longrightarrow {}^{89}_{36}Kr + {}^{144}_{56}Ba + 3\,{}^{1}_{0}n + 200\ MeV$

1 eV equivale a $1.6*10^{-19}$ J

Quindi ogni nucleo di U-235 libera $200*10^{6}*1.6*10^{-19} = 3.2*10^{-11}$J $=3.2*10^{-14}$ kJ

Da 1 g U-235 si ottengono:

$$\frac{1g}{235g/mol} * 6.02*10^{23} atomi/mol * 3.2*10^{-14} kJ/atomo = 8.2*10^{7} kJ$$

La produzione di una quantità equivalente di energia richiede la combustione di oltre 2'000 L di benzina o l'esplosione di 20'000 kg di tritolo (TNT).

Fissione autofertilizzante

I nuclidi U-238 e Th-232 mediante un neutrone veloce si trasformano in Pu-239 e in Th-233 e possono produrre combustibile fissile:

da un nucleo di Pu-239 che dà fissione liberando 3 neutroni si possono produrre 3 nuclei di Pu-239 se i neutroni veloci vengono catturati da tre nuclei di U-238.

Ciò permette di ottenere energia aumentando nel contempo la quantità di combustibile fissile Pu-239 (autofertilizzazione).

Questo principio era applicato nel reattore Superphénix di Creys-Malville, ora non più in funzione.

La produzione di energia nucleare

Causa il massimo di energia legante con 60 nucleoni si può ottenere energia secondo due vie:

- l'unione di nuclei piccoli per formare nuclei più grandi con un massimo di 60 nucleoni (fusione nucleare).
- la scissione di nuclei grossi per dare nuclei più piccoli con più di 60 nucleoni (fissione nucleare).

La produzione di energia nucleare

La fissione nucleare è realizzabile in condizioni controllate (centrali nucleari per la produzione di energia elettrica) o in condizioni esplosive (armi nucleari: bombe atomiche all'uranio o al plutonio).

La fusione nucleare avviene costantemente nel sole e nelle stelle; è stata finora realizzata dall'uomo in esperimenti militari (bomba a idrogeno o bomba H); sono allo studio reattori a fusione (confinatori di plasma Tokamak[1])

per la produzione controllata di energia elettrica.

[1] http://it.wikipedia.org/wiki/Tokamak

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 70

La fissione nucleare controllata

La fissione è il processo nucleare oggi realizzato tecnicamente per una produzione controllata di energia.

Il primo reattore nucleare sperimentale fu realizzato da Enrico Fermi nella palestra dell'Università di Chicago nel 1942 (Chicago-Pile 1).

Il combustibile fissile utilizzato era l'Uranio-235, come nelle centrali nucleari per produzione di elettricità e nei sottomarini a propulsione nucleare in funzione attualmente.

Altri nuclei fissili utilizzabili sono il Plutonio-239 e il Torio-233.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 71

Storia dell'uranio

L'uranio (U) è l'elemento naturale più pesante (massa atomica media 238.029).

Gli elementi più pesanti dell'uranio sono tutti sintetici e si dicono transuranici.

L'uranio fu scoperto da M.H. Klaproth nel 1789 che lo denominò in riferimento al pianeta Uranio appena scoperto a quel tempo. Klaproth che scoprì anche cerio, cromo, tellurio, titanio e zirconio riuscì ad ottenerlo solo in forma di ossido. La forma metallica pura fu ottenuta solo nel 1841 da Peligot.

Prima di assumere importanza per la tecnica nucleare era di interesse quale colorante per vetro,ceramica e porcellane e per la produzione di materiali duri.

Determinante per l'interesse odierno per l'uranio furono le scoperte di Becquerel, P. e M. Curie (radioattività), I.Curie e Joliot (elementi sintetici), Hahn e Meitner (fissione), Strassmann e Scherrer (reazione a catena), Fermi (pila nucleare).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 72

L'uranio in natura

L'uranio in natura è costituito da tre isotopi:

• il nuclide 238 (99.2745%) che decade emettendo radiazioni α con un semiperiodo di $4.5.10^9$ anni,

• il nuclide 235 (0.7200%) che decade emettendo radiazioni α con un semiperiodo di 713.10^6 anni,

• il nuclide 234 (0.0055%) che decade emettendo radiazioni α

L'uranio è molto diffuso in natura, anche nel granito e nel gneiss del Ticino e dell'altipiano svizzero in forma di ossido. Dopo il 1950 sono stati scoperti giacimenti in USA, Canada, Australia, Sudafrica, Congo, Niger e Gabun, Russia e Uzbekistan.

L'acqua di mare ne contiene 0.003 g/cm^3 quindi circa 4.10^9 ton il che ne rende potenzialmente interessante l'estrazione; si studia il modo per rendere questa estrazione economicamente vantaggiosa.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 73

Purificazione dell'uranio

L'uranio viene impiegato nella tecnica nucleare in forma di ossido di uranio UO_2 molto puro e ottenuto da minerali con un contenuto minimo in uranio dello 0.1%.

L'estrazione e la purificazione avvengono mediante solubilizzazione (acidi), precipitazione, calcinazione fino a U_3O_8 (yellow cake), ripetizione del ciclo fino a UO_3 (polvere arancione utilizzata come colorante di porcellane e ceramiche), riduzione a UO_2.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 74

L'arricchimento dell'uranio

Per centrali nucleari ad acqua l'uranio deve essere arricchito in U-235 dallo 0.7% fino al 3%, per armi nucleari fino al 93% (m>17 kg).

L'arricchimento isotopico avviene trasformando U_2O in UF_6 (aeriforme sopra i 56℃); a UF_6 in forma aeriforme possono essere applicati diverse tecniche di cui le principali sono:

• diffusione sotto pressione attraverso ultrafiltri: U-235, più piccolo, diffonde più facilmente (1200 cicli circa per raggiungere il 3%),

• centrifugazione: U-235 più leggero si concentra nel centro della centrifuga (20 cicli per raggiungere il 3%).

Dopo l'arricchimento UF_6 viene nuovamente convertito in U_2O.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 75

Combustibile nucleare: il plutonio

Elemento transuranico (quindi non naturale) scoperto nel 1941;
si forma da U-238 per cattura di un neutrone e due susseguenti emissioni β:
Il Plutonio-239 venne ottenuto per la prima volta bombardando l'uranio in acceleratori nel ciclotrone di Berkeley (1941).
Altre vie di produzione del Plutonio-239 sono i reattori a neutroni veloci (reattori autofertilizzanti).
I suoi nuclidi più importanti 239 e 241 sono radioattivi (emissione α), quindi l'elemento è pericoloso in particolare per inalazione.
Ambedue i nuclidi subiscono fissione se colpiti da neutroni e possono dare reazione a catena (emissione di 2 o 3 neutroni).
Pu-239 cattura facilmente un neutrone trasformandosi in Pu-240 che però non dà fissione.
Pu-240 cattura facilmente un neutrone trasformandosi in Pu-241
che dà però immediatamente fissione e non è conservabile.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 76

La produzione di plutonio

Pu-239 viene prodotto in quantità rilevanti nei reattori a uranio nei quali funge pure da combustibile.
Con una massa minima (massa critica) di 4 kg di Pu-239 puro (>93%) è possibile costruire una bomba nucleare: per arrivare a questo il Pu-239 deve essere recuperato da appositi reattori e separato dall'uranio subito dopo la sua produzione (pochi giorni, per evitare la sua trasformazione a Pu-240): questo richiede una particolare tecnologia del reattore: spegnimento e riaccensione rapide oppure estrazione delle sbarre di uranio senza fermare il reattore (reattori RBMK).
Con il diminuire della purezza del plutonio in Pu-239 aumenta di molto la massa critica necessaria per la bomba. Nelle nostre centrali il combustibile permane per circa tre anni e diventa inutilizzabile per la produzione dell'arma.
Nel 1944 negli USA vengono costruiti i primi reattori militari per la produzione di plutonio comprendenti impianti per la purificazione del Pu-239. Nei primi anni 50 sempre negli USA e in URSS vengono costruiti reattori autofertilizzanti militari per lo stesso scopo.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 77

Lo smaltimento del plutonio

Durante il periodo della guerra fredda furono accumulate grandi quantità di plutonio in particolare da USA e URSS, valutate a circa 300 tonnellate.

Lo smaltimento queste scorte è possibile mediante conversione di centrali a uranio in centrali a plutonio.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 78

Combustibile nucleare: il torio

Elemento con numero atomico 90 scoperto dal chimico svedese Berzelius nel 1828 e da lui denominato in riferimento ad una divinità nordica (Thor, dio della guerra).

Più diffuso dell'uranio trova utilizzo convenzionale nella produzione di ceramiche speciali. Ha assunto crescente interesse per la tecnologia nucleare dopo che Marie Curie ne scoprì la radioattività (1898, emissione α) e dopo che Scherrer (1937) ottenne da esso una fissione per attivazione con neutroni.

Responsabile di questa fissione è il nuclide Th-232 che, colpito da un neutrone si trasforma in U-233 tramite cattura del neutrone e due emissioni β. U-233 dà fissione con liberazione di 3 neutroni e induce così una reazione a catena.

Attualmente il torio è utilizzato insieme all'uranio in centrali moderate ad acqua. C. Rubbia ne ha proposto l'utilizzo senza uranio in quanto i prodotti di fissione di U-233 decadono rapidamente risolvendo il problema delle scorie.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 79

Una centrale nucleare naturale preistorica

Circa due miliardi di anni fa nell'attuale miniera di Uranio di Oklo (Gabun, Africa) si formarono spontaneamente per via naturale almeno 6 reattori nucleari che produssero energia (riscaldamento di acqua naturale) per più di 100'000 anni.

Ciò fu possibile grazie al deposito di uranio da parte di acque uranifere fino a dar luogo ad una concentrazione in uranio naturale del 60%. Si formarono 6 sacche lenticolari di circa 15 m di lunghezza e 1 m di spessore contenenti uranio al 60% (con U-235 allo 0.7%) distribuito in granuli immersi in acqua. Si crearono le condizioni di un odierno reattore a fissione moderato ad acqua. A seguito dell'attività di fissione le sacche oggi contengono uranio impoverito (0.3% U-235) e tipici prodotti di fissione dell'uranio, mentre la concentrazione di uranio è scesa al 20%; la diminuzione della sua concentrazione sotto il limite del 20-25% ha determinato lo spegnimento naturale del processo.

La storia dei reattori naturali di Oklo a potuto essere ricostruita con precisione grazie alle misure dell'intensità delle emissioni dell'uranio e degli altri materiali (prodotti di fissione) presenti nel giacimento.

Questi prodotti (10 t di prodotti di fissione e 1 t di plutonio) sono rimasti confinati naturalmente nel sottosuolo per quasi due miliardi di anni diffondendo in esso per soli pochi millimetri. Questa conoscenza è di grande utilità per la messa a punto di tecniche di confinamento delle scorie radioattive.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 80

La produzione controllata di energia nucleare

Per produrre energia in quantità rilevante occorre mantenere in vita un processo di fissione con una massa sufficiente di combustibile fissile.

Se un nucleo di U-235 viene colpito da un neutrone rallentato si scinde nei nuclei di Kr-89 e di Ba-144 liberando 3 neutroni. Il bilancio netto è di 2 neutroni guadagnati. Se almeno uno dei 3 neutroni emessi riesce a colpire un altro nucleo di U-235 il processo si tiene in vita in forma di reazione a catena a velocità costante.

Affinché questo avvenga i neutroni devono essere moderati prima che vengano tutti ingoiati da U-238 che trasformandosi in Pu-239 fermerebbe il processo per mancanza di neutroni. Dopo un adeguato rallentamento da parte del moderatore (da 10^5 km/s a circa 1 km/s) non potranno penetrare in nuclei di U-238 e potranno colpire un nucleo di U-235 o uno di Pu-239, anch'esso fissile e produttore di neutroni durante la sua fissione.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 81

Moderatori di neutroni e regolatori di reazione

Con moderatore si intende un materiale che rallenta (modera) i neutroni e quindi rende possibile o accelera il processo (maggior produzione di energia).

Un aumento della capacità del moderatore aumenta la produzione di energia.

Un regolatore di velocità è invece un materiale che blocca i neutroni e rallenta ilo processo (minor produzione di energia)

Materiali moderatori sono acqua leggera, acqua pesante, grafite.

Materiali regolatori sono cadmio e boro

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 82

Attivazione e moderazione dei neutroni in un reattore

L'azione del moderatore diventa possibile se l'uranio (in forma di ossido di uranio UO_2) viene suddiviso in molte porzioni e tra queste porzioni si pone il moderatore che rallenta i neutroni emessi dalla fissione.

La fissione viene inizialmente attivata da neutroni forniti da una fissione spontanea e adeguatamente moderati.

Il calore prodotto dal processo dovrà essere assorbito da una circolazione di acqua o di un liquido con sufficiente capacità calorica.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 83

Controllo dei neutroni in un reattore

Uranio e moderatore vengono quindi opportunamente distribuiti in modo che statisticamente si "salvi" almeno uno dei tre protoni emessi dalla fissione dei nuclei di U-235.

Il processo può essere ulteriormente controllato (regolazione) inserendo tra le sbarre di uranio delle sbarre di materiali in grado di assorbire e bloccare i neutroni (boro o cadmio).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 84

Moderatori di neutroni

Con uranio naturale (quindi senza arricchimento alcuno) occorre utilizzare uno dei due seguenti moderatori:

- la grafite (forma allotropica del carbonio)
- acqua pesante (acqua deuterata, D_2O)

Il moderatore più efficace per i neutroni è l'atomo di idrogeno-1 che è il più simile al neutrone (ha la stessa massa), quindi l'acqua è un moderatore ideale. L'atomo di ossigeno è però in grado di catturare neutroni togliendoli alla reazione per cui l'uranio deve essere arricchito in U-235 (almeno fino al 3%).

Gli atomi di carbonio della grafite non catturano neutroni, quindi con la grafite come moderatore non è necessario l'arricchimento. Nell'acqua pesante la presenza del deuterio (H-2, che non cattura neutroni) al posto di H-1 riduce la presenza statistica dell'ossigeno e quindi la cattura di neutroni, quindi anche con essa non è necessario arricchire l'uranio.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 85

Moderatori e sicurezza intrinseca

Il primo reattore sperimentale realizzato da Fermi (1942) era moderato a grafite.

La grafite rappresenta un pericolo intrinseco per il reattore in quanto con l'aumentare della temperatura aumenta la sua capacità moderatrice dei neutroni accelerando il processo: in caso di problemi di raffreddamento, assicurato da una circolazione di acqua in tubazioni pressurizzate, si crea quindi un circolo vizioso che porta alla fusione del combustibile, all'aumento incontrollato della pressione, alla fusione delle tubature e al contatto diretto tra grafite e acqua con conseguente produzione di idrogeno e reazione chimica esplosiva (vedi incidente di Tchernobyl).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 86

Moderatori e sicurezza intrinseca

L'acqua è un moderatore con proprietà contrarie alla grafite: con l'aumentare della temperatura essa perde capacità moderatrice e quindi anche la capacità di tenere in vita il processo: la reazione si spegne spontaneamente in caso di aumento della temperatura del reattore. Ciò rappresenta una sicurezza intrinseca estremamente importante.

L'utilizzo dell'acqua leggera quale moderatore obbliga ad arricchire l'uranio (costo superiore del combustibile). D'altra parte la stessa acqua oltre che da moderatore fa pure da raffreddante, semplificando l'impianto.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 87

Moderatori e plutonio per armi

Utilizzando la grafite (che è solida) quale moderatore è possibile realizzare un sistema di inserimento ed estrazione delle barre di combustibile senza fermare il reattore. Ciò permette di recuperare plutonio fresco ricco di Pu-239 per la produzione di armi.

Utilizzando l'acqua quale moderatore le sbarre devono essere messe a bagno e il reattore chiuso ermeticamente. Le barre possono essere estratte solo dopo spegnimento del reattore e apertura dello stesso, ciò che determina l'invecchiamento eccessivo del plutonio (Pu-239 si trasforma in Pu-240 inutilizzabile).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 88

Moderatori e plutonio per armi

Una centrale nucleare adibita alla produzione di energia può produrre plutonio per armi solo se moderata a grafite. Una centrale moderata ad acqua non sarebbe redditizia se venisse fermata ogni pochi giorni. Normalmente le nostre centrali (tutte moderate ad acqua) vengono fermate per un mese una volta all'anno o ogni due anni per i controlli e per la sostituzione del combustibile esausto.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 89

Il trasporto di calore in una centrale: raffreddamento ad acqua pressurizzata

Il calore generato dal processo deve essere assorbito ed evacuato mediante una circolazione di acqua pressurizzata o di acqua bollente assicurata dall'azione di pompe.

Nei reattori moderati a grafite l'acqua circola in tubi zirconio attraverso il sistema solido rappresentato da barre di uranio e da blocchi di grafite.

Nelle centrali moderate ad acqua pesante gli elementi di uranio sono immersi nel moderatore mentre il raffreddamento, pure ad acqua pesante circola in un circuito proprio che attraversa il bagno.

Nelle centrali ad acqua leggera gli elementi di uranio sono pure immerse nel bagno che fa sia da moderatore che da raffreddante; questa massa d'acqua liquida che è a diretto contatto con il combustibile nucleare acquista radioattività indotta dai neutroni in circolazione. Questo circuito fa quindi parte del reattore stesso nel contenitore di sicurezza e non ha contatto diretto con l'esterno. Per avere acqua in forma liquida il reattore e le condotte devono essere pressurizzate.

Tramite scambiatori di calore si ottiene in seguito nelle condotte dei circuiti secondari e terziari di acqua a bassa pressione il vapore che aziona le turbine generatrici di elettricità come nelle convenzionali centrali termoelettriche.

Tramite adeguati materiali schermanti questa circolazione secondaria non acquista radioattività e può uscire dal cuore della centrale.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 90

Il trasporto di calore in una centrale: raffreddamento ad acqua bollente o gas

L'acqua di raffreddamento può anche essere tenuta a pressione ambientale lasciando che entri in ebollizione fluendo nel circuito primario in forma di vapore. Come raffrewddante possono anche essere utilizzati dei gas (CO_2). Nei reattori autofertilizzanti con grande produzione di energia vengono utilizzati raffreddanti liquidi con alta capacità calorica come il sodio (Na).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 91

Il controllo della temperatura

La temperatura del reattore durante la produzione di energia deve rimanere costante. Ciò è possibile mediante una circolazione di acqua adeguata alla velocità del processo tramite la potenza delle pompe. In una centrale moderata ad acqua la velocità del processo è controllata in base al fabbisogno di energia tramite sbarre al cadmio-boro che vengono calate o alzate tra le sbarre di combustibile regolando la circolazione dei neutroni.

Una diminuita richiesta di energia si traduce quindi in un abbassamento delle sbarre di cadmio-boro e in una diminuzione della potenza delle pompe e viceversa.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 92

La denominazione degli impianti

Gli impianti nucleari vengono denominate in base al tipo di reattore:

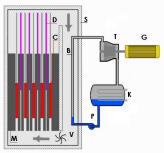
- energia dei neutroni: neutroni moderati o neutroni veloci
- tipo di moderatore (grafite, acqua pesante, acqua leggera
- tipo di raffreddante (acqua pressurizzata (PWR), acqua bollente (BWR), gas (Magnox), sodio, piombo)
- tipo di combustibile (omogeneo o eterogeneo: uranio, plutonio, torio, uranio-torio, uranio-plutonio)
- uso: produzione di elettricità, produzione di combustibile nucleare (Pu-239), sperimentazione, ricerca.

Le centrali nucleari in CH sono concepite con reattori ad uranio moderate e raffreddate con acqua leggera pressurizzata.

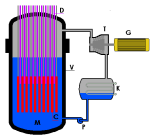
http://it.wikipedia.org/wiki/Reattore_nucleare_a_fissione

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 93

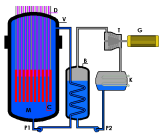
Schemi di reattori



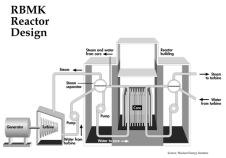
Magnox (GB): grafite-gas (1956-2003)



BWR (USA) : acqua-acqua bollente



PWR (CH/F/D..): acqua-acqua liquida



RBMK (URSS): grafite-acqua

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 94

Il controllo della temperatura: possibili avarie

In centrali raffreddate ad acqua un aumento della temperatura del reattore è possibile in caso di interruzione della corrente elettrica (blocco delle pompe e della circolazione di acqua).

La circolazione di acqua di raffreddamento deve essere ripristinata al più presto mediante generatori di elettricità basati su motori diesel.

In una centrale moderata a grafite un aumento per brevissimo tempo della temperatura è pericolosissimo per le proprietà moderanti della grafite (vedi “sicurezza intrinseca”) e può avere effetti devastanti (vedi “L’incidente di Tschernobyl”).

In una centrale moderata ad acqua l’aumento di temperatura produce un autospegnimento del processo (diminuzione delle proprietà moderanti dell’acqua) ma può essere fonte di danni economici notevoli (danni alle sbarre di combustibile, vedi “Incidenti delle centrali occidentali”).

Per evitare questi danni l’immediato spegnimento della reazione viene realizzato con la caduta automatica delle sbarre di cadmio-boro che sono sostenute con campi elettromagnetici mediante la stessa corrente elettrica che alimenta le pompe.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 95

Le scorie radioattive

I processi di fissione di uranio e plutonio producono un centinaio di nuclidi radioattivi che nel loro insieme rappresentano una scoria altamente radioattiva:
sono prodotti diretti della fissione, prodotti del loro decadimento e prodotti dell’attivazione da parte dei neutroni di materiali non fissili presenti in particolare nelle barre di combustibile.

Questi materiali che vengono recuperati dalle barre esauste o da soluzioni e devono essere trasportati e manipolati sotto schermatura e sotto raffreddamento per evitare l’esposizione alle radiazioni ionizzanti che emettono e il surriscaldamento che esse generano.

Inoltre non devono assolutamente essere dispersi nell’ambiente.

Attraverso le tecniche di separazione isotopica da queste scorie vengono recuperati tutti i nuclidi radioattivi riutilizzabili (medicina, ricerca, ..).

La rimanenza deve essere confinata in sistemi che garantiscano il loro immobilizzo assoluto, la schermatura dalle radiazioni e l’isolazione dal calore.

Dalle centrali, dagli ospedali, dall’industria e dalla ricerca vengono inoltre prodotte scorie debolmente e mediamente radioattive (utensili e materiali rimasti a contatto con materiali radioattivi, indumenti, filtri ecc.) che richiedono un trattamento diverso. Le scorie debolmente radioattive non necessitano di schermatura e di isolazione termica, quelle mediamente radioattive devono essere schermate ma non sviluppano calore. Anche per esse deve garantito l’immobilizzo assoluto.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 96

Le scorie radioattive: i quantitativi

Una centrale da 1GW (per es. Gösgen) produce annualmente circa:

- 500 fusti da 200 L (100 m^3) di beton speciale nel quale sono state immobilizzate scorie debolmente radioattive,
- 10 fusti da 200 L (2 m^3) di beton speciale nel quale sono state immobilizzate scorie mediamente radioattive,
- 10 fusti da 200 L (2 m^3) di vetro speciale (boro-silicato) e beton nel quale sono state immobilizzate le scorie altamente radioattive.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 97

La gestione delle scorie radioattive

La radioattività delle scorie radioattive decresce nel tempo secondo una funzione iperbolica che dipende dal semiperiodo dei singoli nuclidi (vedi "velocità di decadimento dei nuclei radioattivi").

Tutte le scorie devono quindi essere immobilizzate e schermate dalle radiazioni fino a che le dosi da loro emesse non siano scese a valori ambientali e senza rischio.

I tempi necessari sono valutati come segue:

- circa 100 anni (max 300) per le scorie debolmente radioattive
- circa 600 anni (max 3'000) per le scorie mediamente radioattive
- circa 1'000 anni (max 10'000) per le scorie altamente radioattive

Per le scorie altamente radioattive immobilizzate in vetro speciale la tenuta calcolata da parte del vetro in acqua è di 100'000 anni.

Per garantire l'attività di ricerca, le attività industriali, la produzione di energia e le cure mediche che utilizzano materiali radioattivi devono quindi essere realizzati depositi che permettano la custodia temporanea dei materiali in attesa del trattamento negli impianti specializzati per il recupero dei nuclidi riutilizzabili e la custodia definitiva delle scorie finali non riutilizzabili per un tempo molto lungo.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 98

La gestione intermedia delle scorie

Depositi temporanei di materiali radioattivi sono necessari per due motivi:

- attesa prima dell'invio del combustibile esausto e di altre scorie ai centri di recupero;
- raffreddamento delle scorie mediamente e altamente radioattive prima dell'invio ad un deposito definitivo;

Inoltre fino alla fine degli anni 80 la scarsità di centri per il trattamento delle sbarre esauste delle centrali aveva reso necessario uno stoccaggio di attesa relativamente lungo (problema ora superato grazie ai centri di trattamento di La Hague (F) e Sellafield (GB).

Attualmente la Svizzera non dispone ancora di depositi finali per le scorie altamente radioattive non più utilizzabili.

Per queste necessità sono stati realizzati nei vari Stati depositi di sicurezza secondo norme di legge e sotto controllo e verifiche internazionali.

La sicurezza non si riferisce solo alle proprietà dei materiali contenuti (schermatura, e controllo del calore) ma anche alla protezione dei depositi da eventi esterni (terremoti, onde sismiche da esplosioni esterne, incendi, cadute di aerei, bombardamenti, inondazioni, ecc.)

Per la produzione CH questi depositi sono stati realizzati nella centrale sperimentale di Lucens dopo la sua inattivazione (fino al 2003) e presso il centro di ricerca di Würenlingen (PSI) dove dal 2000 vengono stoccate tutte le scorie radioattive.

http://www.news-service.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/2781.pdf

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 99

L'immagazzinamento finale delle scorie

Le scorie non più utilizzabili devono essere custodite in luoghi sicuri per un tempo molto lungo (fino a 10'000 anni per scorie altamente radioattive).

Vengono concepiti due tipi di depositi definitivi:

- depositi sotterranei a medie profondità in bunker di sicurezza per scorie debolmente e mediamente radioattive,
- depositi a grandi profondità in zone geologicamente molto stabili, sigillati e non più agibili per scorie mediamente e altamente radioattive,
- depositi sotterranei geologicamente adatti, agibili e sorvegliabili per scorie altamente radioattive (deposito in costruzione in Finlandia).

L'immagazzinamento finale delle scorie: le barriere

La deponia in cavità naturali o artificiali in zone geologicamente adatte (rocce granitiche cristalline, sacche o strati salini o di gesso che si sono dimostrati stabili da milioni di anni) rappresenta la via meglio praticabile e risolve nel migliore dei modi il problema della sicurezza da eventi esterni naturali e non. L'unica via pensabile attraverso la quale nuclidi ancora radioattivi possano ritornare in circolazione è il trasporto tramite acqua che potrebbe penetrare nella zona del deposito e riaffiorare in seguito.

La protezione viene generata secondo un concetto di barriera:

- immobilizzo in materiale insolubile e inattaccabile (vetri speciali)
- ricopertura con strati di materiali resistenti alla corrosione (beton e acciai inox)
- immersione in materiali impermeabili all'acqua e in grado di fissare nuclidi radioattivi (argille speciali)
- schermatura, assorbimento del calore e protezione da eventi violenti da parte della roccia stabile.

Storia dei reattori nucleari 1942-1961

Dopo il primo reattore sperimentale realizzato da Fermi (1942) a partire dal 1944 negli USA si realizzano 8 reattori militari per la produzione di plutonio con il quale vengono prodotte le bombe sperimentali e la bomba di Nagasaki (moderatore grafite, raffreddamento a CO_2 gassoso).

Nel 1951 il reattore auto fertilizzante militare USA EBR-1 (senza moderatore) produce per la prima volta energia elettrica

La prima centrale elettronucleare da 5 MW (moderata a grafite eraffreddata a gas) viene messa in funzione nel 1952 a Obninsk (URSS).

La prima centrale commerciale viene realizzata nel 1956 in GB (50 MW, grafite/CO_2).

Nel 1954 viene varato il primo sommergibile a propulsione nucleare (Nautilus, USA; moderazione e raffreddamento ad acqua pressurizzata);

nel 1957 vengono realizzati i primi reattori sperimentali in D, CH e A;

nel 1961 entra in funzione la prima centrale nucleare commerciale in D (15 MW).

Storia dei reattori nucleari 1961-1985

Nel 1962 negli USA sono in funzione 233 reattori: 13 centrali nucleari commerciali, 18 impianti militari per la produzione di plutonio, 42 sommergibili, 137 per sperimentazione e ricerca. Nel 1970 viene messa in esercizio la prima centrale CH a Beznau I (350 MW), che sarà seguita da altre 4 centrali entro il 1984 (Beznau II, Mühleberg, Gösgen e Leibstadt.

Nel 1985 sono funzione 609 centrali in 35 paesi.

Incidenti nelle centrali occidentali

I problemi ambientali che possono generare le centrali nucleari riguardano unicamente fughe di materiale radioattivo (acqua o vapore). Non sono ipotizzabili esplosioni nucleari in quanto non esistono le condizioni fisiche (massa critica di nuclidi fissili in forma altamente purificata: vedi “Bomba a fissione). Utilizzando acqua come moderatore non è possibile lo sviluppo della dinamica dell’incidente di Tchernobyl (incendio della grafite e dispersione di combustibile e prodotti della fissione).

La dispersione nell’ambiente di materiale radioattivo rappresenta un rischio non tanto per l’esposizione a radiazioni ma per la possibilità di assimilazione di nuclidi radioattivi da parte della popolazione (vedi “pericolosità dei nuclidi radioattivi”).

Incidenti nelle centrali occidentali

Sull’esercizio delle centrali nucleari occidentali è riferito di numerose avarie occorse per i quali non sono stati riscontrati problemi alla salute di persone. Il più grave, quello di Harrisburg (Three Mile Island, USA, 1979) ha portato alla chiusura della centrale con un grave danno economico. L’immissione di gas inerti radioattivi causata da un errore umano dopo un arresto automatico della reazione non ha da determinato rischi apprezzabili alla popolazione. Se da un lato l’avaria ha permesso di dimostrare la validità dei sistemi di sicurezza in caso di disturbo (in quel caso un bollitore e una valvola) e la capacità di contenimento dei danni ambientali a livelli trascurabili, d’altro lato fu evidenziato una eccessiva possibilità di errore umano con conseguenze economiche molto elevate. In questo caso l’intero cuore della centrale subì danni tecnici irreparabili.

Incidenti nelle centrali occidentali

La centrale autofertilizzante di Creys-Malville (F) fu chiusa per decisione politica (non per aspetti tecnici). Si è molto discusso sui potenziali pericoli derivanti da un difetto di costruzione (crepa nel cemento armato del contenitore di sicurezza). Durante il suo esercizio durato dal 1996 al 1998 non sono state ravvisate fughe radioattive o variazioni della radioattività ambientale. In questo impianto la grande quantità di energia prodotta veniva assorbita da una circolazione di sodio liquido che ha una maggior capacità calorica dell'acqua. Il vantaggio di un tale impianto sta nella possibilità di produrre combustibile fissile (Pu-239) per nuovi impianti e nella produzione di prodotti di fissione leggeri che perdono molto rapidamente la loro radioattività eliminando il problema delle scorie.

L'uso di sodio liquido (infiammabile con l'acqua) come raffreddante obbliga a particolari norme di sicurezza.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 106

Incidenti nelle centrali occidentali

Nel luglio 2007 un terremoto di grande potenza in Giappone ha prodotto una fuga di acqua radioattiva dalla centrale di Kashiwazaki-Kariwa. Secondo le misure effettuate non sarebbe stata raggiunta la soglia di pericolo.

http://www.repubblica.it/2007/07/sezioni/esteri/giappone-terremoto/giappone-terremoto/giappone-terremoto.html

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 107

L'energia nucleare in Unione Sovietica (URSS)

Solo da poco tempo è possibile ricostruire anche solo parzialmente la storia nucleare dell'Unione Sovietica. L'attività nucleare è sempre stata coperta da segreto sia per ragioni puramente politiche (stato non democratico e guerra fredda con il mondo occidentale) sia perché dall'inizio sempre indissolubilmente legata ai programmi militari di armamento.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 108

L'energia nucleare in Unione Sovietica (URSS)

Oltre alle realizzazioni di impianti produttori di elettricità di Obninsk (1952), Tschernobyl (1977), dichiarate internazionalmente, altri impianti furono realizzati in nei paesi dell'Est.

Di questi parecchi erano dedicati unicamente alla produzione di Pu-239. Tutte le centrali furono però concepite in funzione della produzione di plutonio per armi nucleari.

Tutte le centrali furono quindi realizzate con moderazione a grafite con la possibilità di estrarre plutonio fresco ricco di Pu-239 (reattori RBMK).

http://it.wikipedia.org/wiki/Reattore_nucleare_a_fissione

L'incidente di Tschernobyl: l'impianto

La centrale di Tschernobyl è costituita da quattro reattori (di cui tre ancora in funzione) moderati a grafite e raffreddati ad acqua leggera con una produzione totale di 4 GW.

Nei 4 reattori l'estrazione del plutonio fresco è resa possibile da un sistema di inserimento ed estrazione delle sbarre di combustibile che funziona senza interruzione del processo. Questo sistema costringe a rinunciare al contenitore di sicurezza per il reattore in quanto occorre un contatto diretto con l'esterno e a utilizzare grafite come moderatore.

Inoltre i tutti gli impianti RBMK sovietici alcune carenze progettuali creano un pericolo di aumento temporaneo della velocità del processo durante le operazioni di riduzione della stessa (estensori di grafite nelle sbarre di regolazione).

http://it.wikipedia.org/wiki/Disastro_di_Chernobyl

L'incidente di Tschernobyl: l'origine

Il 26 aprile 1986 il reattore Nr.2 fu teatro del più grave incidente nucleare della storia.

Da parte degli ingegneri dell'impianto fu progettato un esperimento volto a verificare la capacità inerziale delle turbine durante l'entrata in funzione dei generatori diesel in caso di interruzione dell'alimentazione elettrica diretta alle pompe dell'acqua di raffreddamento.

In questa situazione i generatori hanno pochissimo tempo per riattivare la circolazione d'acqua impedendo un surriscaldamento del reattore: esso oltre a generare danni tecnici al sistema innesca la spirale perversa dovuta all'aumento della capacità moderatrice dei neutroni della grafite (vedi "moderatori e sicurezza intrinseca").

Fu quindi deciso di disattivare il circuito elettrico e di mettere parallelamente in funzione i generatori diesel. L'esperimento fu possibile grazie alla copertura politica che garantiva il segreto sulle attività nelle centrali verso il mondo, quindi non fu necessario agli ingegneri ottenere l'approvazione internazionale.

Gli ingegneri (poco qualificati per l'impianto RBMK) non erano informati dei difetti e dei problemi dell'impianto (non comunicati dai progettisti) ma violarono pure gravemente le procedure e omisero le adeguate informazioni.

L'impianto non era dotato di un sistema di riconoscimento delle operazioni sbagliate con conseguente esclusione del personale e entrata in funzione del pilota automatico (come nelle attuali centrali occidentali).

L'incidente di Tschernobyl: la dinamica

Nei calcoli degli ingegneri non fu considerato il problema generato dalla parte in grafite delle sbarre di regolazione quando esse vengono abbassate per ridurre la reazione.

Durante l'avvio dei generatori diesel la temperatura del reattore poté salire fino a innescare l'auto induzione del processo (aumento di capacità moderatrice della grafite) con un aumento incontrollabile della temperatura. Una volta superato il punto di fusione dello zirconio (1850°C) delle tubazioni l'acqua di raffre ddamento in forma gassosa entrando in contatto con la grafite caldissima ha generato la produzione di idrogeno e monossido di carbonio

$$H_2O\ (g) + C(s) \longrightarrow H_2(g) + CO\ (g)$$

con aumento della pressione nel reattore. La mancanza di un contenitore di sicurezza pressurizzato e a tenuta stagna determinata dalla concezione dell'impianto (estrazione del plutonio fresco) ha reso possibile lo sfondamento del debole contenitore con fuoriuscita del gas prodotti infiammabili ed esplosivi. La fiammata prodottasi dal contatto con l'ossigeno dell'aria da parte dei gas esplosivi ha risucchiato per oltre mmm di altezza il materiale radioattivo presente nel reattore (prodotti di fissione). Parte di questo materiale è ricaduto nelle vicinanze dell'impianto, parte è stato disperso dai venti e trasportato a grandi distanze, giungendo anche nell'Europa occidentale e ricadendo un po' ovunque. La presenza dei nuclidi nell'aria fu rilevata dai sistemi di sorveglianza svedesi e ciò costrinse le autorità sovietiche ad ammettere il fatto.

In Svizzera e in Italia furono rilevate ricadute di Cs-137 e I-131.

L'incidente di Tschernobyl: gli effetti

Per arginare gli effetti immediati del disastro furono effettuati interventi diretti nel reattore e nell'area dell'impianto. Furono inviati dentro lo stesso 28 operai e pompieri inconsapevoli dell'altissimo rischio da esposizione senza rispettare le normali norme e altri circa 1000 operai pure senza adeguate protezioni furono impiegati nell'area circostante. 9 degli operai inviati nel reattore morirono nel giro di alcuni mesi, gli altri 19 morirono tra il 1987 e il 2005. Quindi 28 vittime per irraggiamento. Furono in seguito registrati 9 morti sui circa 4'000 casi di tumore alla tiroide, una forma di cancro fortunatamente quasi sempre guaribile. Questi 37 morti con le 2 vittime accidentali al momento dell'incendio rappresentano a tutt'oggi le vittime dirette accertate dell'incidente. Nei prossimi anni è possibile statisticamente calcolare un'incidenza dello 0.6% di mortalità delle persone della zona per danni a lungo termine, supposizione che può significare 9'000 morti in 90 anni.

L'evacuazione della popolazione della regione avvenne con estrema lentezza per la mancanza di un piano di emergenza: in molti abitanti della regione furono riscontrati in seguito elevate dosi di esposizione superiori alla dose assorbita massima. Si dubita di alcune malformazioni in neonati. Nella popolazione residente oltre un raggio di 100 km non sono stati riscontrati problemi di salute. Nella nostra ragione per motivi precauzionali furono proibite pesca e caccia e fu raccomandato di non consumare funghi non ché di pulire accuratamente verdure e frutta. In particolare era temuto lo iodio-131 che viene facilmente assorbito nella tiroide soprattutto dai bambini.

http://it.wikipedia.org/wiki/Disastro_di_Chernobyl
http://www.progettohumus.it/include/chernobyl/dintorni/dossier/Bertell.pdf

L'incidente di Tschernobyl: considerazioni

All'origine dell'incidente ci fu la decisione di procedere all'esperimento rivelatosi poi catastrofico: sin dal 1957 esiste l'agenzia internazionale per l'energia atomica (IAEA) che funge da organismo di controllo, consulenza e coordinazione per lo sviluppo pacifico dell'energia nucleare. Ogni paese è tenuto a riferire con precisione la sua attività nel campo e a sottoporre a questo organismo ogni suo progetto di esperimenti o di realizzazioni. Come attualmente capita con paesi quali Iran e Corea del Nord anche l'ex URSS si è regolarmente sottratta a questi obblighi. I principi già vigenti nel 1986 presso l'IAEA non avrebbero in alcun modo permesso l'esperimento progettato dagli ingegneri sovietici: anche solo per la mancanza di documentazione precisa non fornita dai progettisti dell'impianto. Se poi questa fosse stata fornita l'altissimo pericolo generato dalla grafite degli estensori delle barre e dal resto della grafite moderatrice sarebbe risultato immediatamente evidente e il permesso non sarebbe stato concesso.

www.ecolo.org/documents/documents_in_italian/it.cause-**Chernobyl**.jfrot.doc
http://www.iaea.org/

L'incidente di Tschernobyl: considerazioni

La dinamica dell'incidente è strettamente collegata alla concezione dell'impianto.

La moderazione a grafite e la mancanza di un contenitore di sicurezza (per il recupero del plutonio fresco) hanno determinato la reazione chimica prima e la diffusione del materiale radioattivo poi.

Alla concezione di per sé pericolosa dell'impianto vanno aggiunti i punti deboli di progettazione (estensori delle barre, mancanza di un controllo automatizzato in caso di comando non predefinito da parte del personale) e l'insufficiente formazione del personale.

La scelta e il mantenimento di questa tecnologia nucleare sono strettamente legate ai fini di armamento e alla possibilità data dal regime politico in URSS di eludere i controlli IAEA e gli accordi per la non proliferazione delle armi nucleari in vigore dal 1970 e sottoscritti a quel tempo da tutti i paesi nuclearizzati ad eccezione di Cina, Francia e India.

Sulla base di questi accordi che proibivano la produzione di nuovo combustibile nucleare per armi in Europa e in USA la tecnologia a grafite fu gradualmente abbandonata già dagli anni 60 e l'estrazione di plutonio da centrali commerciali (in particolare autofertilizzanti) sottoposta ai severi controlli dell'IAEA.

L'incidente di Tschernobyl: considerazioni

Con una evacuazione rapida della popolazione secondo i normali piani di sicurezza a cui sono tenuti i paesi sotto controllo IAEA, con interventi adeguati alla popolazione giovane (somministrazione di iodio nelle prime 24 ore) e rispettando norme di sicurezza per il personale è assai probabile che non ci sarebbero state vittime oltre ai due morti accidentali al momento dello sviluppo dell'incendio.

L'incidente di Tschernobyl: considerazioni

Il caso di Tschernobyl insegna che lo sfruttamento pacifico dell'energia nucleare può essere legato più ad aspetti politici che tecnici.

Gli enormi progressi tecnologici compiuti dagli anni 40 ad oggi permettono di concepire impianti a fissione intrinsecamente sicuri e di altissima affidabilità, con rischi inferiori rispetto alle altre tecniche di produzione (idroelettrica, termoelettrica a carbone o olio, ecc.) anche relativamente alla gestione delle scorie.

Ciò è però legato alla volontà politica del paese costruttore di rendere trasparente progetti e attività.

Le conseguenze di concezioni opposte a quelle del programma "atomo per la pace" possono essere di grave danno non solo locale.

Un futuro per le centrali nucleari a fissione

Le centrali moderate e raffreddate ad acqua leggera offrono attualmente un altissimo grado di sicurezza per quanto riguarda il loro esercizio.

Questo genera però scorie radioattive la cui gestione è oggi fonte di dibattiti.

In alcuni paesi si stanno allestendo depositi per scorie mediamente e altamente radioattive sulla cui concezione ci sono pareri discordi.

Per reazioni nucleari che diano scorie radioattive in minor quantità o di minor durata che non permettano la produzione di armi e migliorino efficienze e sicurezza sono allo studio diverse soluzioni tecniche innovative (reattori di IV generazione)

http://it.wikipedia.org/wiki/Reattori_nucleari_di_IV_generazione

Un futuro per le centrali nucleari a fissione

In una conferenza al CERN di Ginevra il fisico italiano Carlo Rubbia (1993) presenta un progetto per realizzare un reattore nucleare basato su un ciclo torio-uranio che non ha bisogno della classica reazione a catena ma si basa su un acceleratore di particelle. Il nuovo metodo elimina completamente il rischio di reazioni nucleari ingovernabili e produce scorie che perdono la loro radioattività in 300 anni invece che nei 24'000 anni richiesti dal plutonio; inoltre non verrebbe più prodotto materiale utilizzabile per le bombe.

http://it.wikipedia.org/wiki/Rubbiatron

Centrali nucleari e produzione di armi nucleari

Come visto la produzione di armi nucleari richiede arricchimento di U-235 o produzione di Pu-239.

L'arricchimento di U-235 a valori >95% richiede grandi impianti per la lavorazione di ingenti quantitativi di uranio naturale. Occorre sorvegliare che i procedimenti di arricchimento si limitino all'incremento di U-235 dallo 0.7% al 3% come richiesto dalle centrali nucleari moderate ad acqua. Non tutti i paesi permettono ispezioni con la massima trasparenza (caso attuale dell'Iran).

U-235 al 3% non può dare in nessun modo una reazione di esplosione nucleare.

La produzione di Pu-235 richiede reattori nucleari specifici (autofertilizzanti o a neutroni veloci) oppure reattori del tipo RBMK (tipo Chernobyl, 15 unità attive ancora nell'Europa dell'est) moderati a grafite e raffreddati ad acqua, oggi sotto stretta sorveglianza dell'IAEA sia per l'eliminazione dei difetti di progettazione, sia per la gestione del plutonio.
Parecchi di essi sono stati spenti e demoliti, altri lo saranno presto, per essere sostituiti con impianti di altra concezione (moderazione ad acqua) come nel caso delle centrali di Ignalina (Lituania).
Con acqua quale moderatore non è possibile produrre Pu-239 per armi.

http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull381/rbmk.html
http://en.wikipedia.org/wiki/Ignalina_Nuclear_Power_Plant

La produzione esplosiva di energia nucleare

Per una reazione a catena a crescita esponenziale occorre disporre di almeno 15 kg di uranio isotopicamente puro in U-235 (min. 93%) o di almeno 6 kg di plutonio isotopicamente puro in Pu-239 (min. 95%).

In queste condizioni si produce la base necessaria ad una bomba a fissione nucleare a uranio (Hiroshima) o a plutonio (Nagasaki).

Dato che l'U-235 rappresenta solo lo 0.7% dell'uranio naturale occorre un lungo e costoso processo di arricchimento che si basa su tecniche di centrifugazione e di diffusione.

Il Pu-239 è ottenuto dalla purificazione del combustibile nucleare di fresca produzione estratto da reattori autofertilizzanti o da reattori a grafite di tipo (RBMK).

Bombe a fissione nucleare: la massa critica

Gli ordigni sono costituiti di due masse sotto critiche di Uranio-235 o di Plutonio-239 tenute separate fino al momento dell'esplosione.

Il raggiungimento della massa critica viene realizzato mediante l'esplosione di un esplosivo convenzionale (dinamite, tritolo, ..) che unisce le due masse sottocritiche.

Con l'uranio la massa critica è di 25-20 kg e con il plutonio 5-10 kg a seconda della purezza isotopica dei nuclidi fissili U-235 e Pu-239 (93-98%).

Bombe a fissione nucleare: l'innesco

La massa critica diventa attiva solo se viene ottenuto il rapporto superficie-volume che assicura il minimo di perdita di neutroni emessi: ciò corrisponde ad una forma sferica della massa di U o Pu. Inoltre occorre un rivestimento di materiale che rifletta tutti i neutroni emessi, che mantenga unite la massa di U o Pu per un tempo sufficientemente lungo e che permetta l'accesso di neutroni dall'ambiente per innescare il processo.

La massa critica di plutonio è inferiore a quella di uranio in quanto Pu-239 emette un maggior numero di neutroni durante la fissione del suo nucleo.

Bombe a fissione nucleare: la potenza

La potenza di una bomba viene espressa in Mton, cioè in milioni di tonnellate di tritolo che possono dare lo stesso effetto distruttivo.

L'energia liberata si distingue in calore (35%), onda d'urto e onda di risucchio (50%), radiazione iniziale (radiazione γ e neutroni, 5%) e radiazione residua (emissione di prodotti di fissione e prodotti attivati da neutroni, 10%).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 124

Bombe a fissione nucleare: gli effetti

Al momento dell'esplosione che avviene ad una certa altezza dal suolo tramite controllo a distanza, la bomba sviluppa una palla di fuoco del diametro di alcuni km dove si raggiungono temperatura fino a 20 milioni di ℃.

La nube contenente materiale radioattivo si estende quindi per circa 20 km in altitudine e viene dispersa dai venti nel giro di alcune ore.

Un'esplosione a circa 10'000 m di altezza produce una zona di morte al suolo con diametro di circa 6 km mentre la distruzione degli edifici si estende per 15-20 km.

La morte diretta al suolo è determinata dal calore e dalla radiazione neutronica e γ della radiazione iniziale.

La radiazione residua generata dalle polveri radioattive disperse si può estendere per un raggio di 400 km durante le prime 10 ore e genera forte pericolo per irraggiamento (fallout locale), per 4000 km dopo una settimana e genera pericolo da inalazione e alimentazione (fallout troposferico) e in tutto il mondo dopo mesi o anni generando pericolo da alimentazione (fallout globale).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 125

Bombe a neutroni

La bomba a neutroni (bomba N) è una bomba nucleare di bassa potenza che genera però una forte radiazione neutra (emissione di neutroni) in un raggio limitato (circa 1.5 km); la radiazione neutra attraversa i materiali solidi, genera radiazioni γ e produce danni letali agli organismi viventi.

Si tratta di un'arma tattica che distrugge poco ma genera morte.

Non ci sono indizi circa un uso fatto di queste armi e non è noto con sicurezza se essa sia effettivamente in dotazione a qualche paese.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 126

Lo smaltimento delle armi nucleari

Si tratta di smaltire almeno 100 tonnellate di plutonio e 700 tonnellate di uranio altamente arricchito.

Per quanto riguarda l'uranio arricchito, la miglior soluzione è quella di diluirlo con uranio naturale o impoverito, in modo da costituire uranio a bassi livelli di arricchimento utilizzabile in reattori nucleari (centrali elettriche).

Il plutonio può essere custodito come le scorie altamente radioattive per un tempo indefinito oppure utilizzato per la produzione di combustibile misto Pu-U per reattori nucleari (centrali elettriche).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 127

La fusione nucleare

L'energia legante tra neutroni e protoni (nucleoni) cresce con il loro numero fino ad un massimo di 60 nucleoni. Fino a questo limite l'aumento del numero di nucleoni genera un aumento di stabilità del nucleo: l'unione di nuclei piccoli per dare nuclei più grossi o l'aggiunta di nucleoni a nuclei piccoli libera quindi energia. Essa si riflette (come nel caso della fissione con più di 60 nucleoni) in un difetto di massa secondo la relazione di Einstein ($\Delta E = \Delta m * c^2$). Questa liberazione di energia è detta energia di fusione nucleare.

L'unione di nuclei piccoli o l'aggiunta di nucleoni richiede però una grande energia di attivazione in quanto devono essere vinte le repulsioni elettriche tra gli elettroni attorno ai nuclei (negativi) e tra nuclei stessi (positivi).

La fusione nucleare può quindi avvenire solo a temperature altissime, nell'ordine di 10^7 ℃. A queste temperature gli atomi vengono completamente ionizzati e i nuclei possiedono altissima energia cinetica (stato di **plasma**).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 128

La fusione nucleare nel sole

La temperatura nel cuore del sole è di circa 15 milioni di ℃ e la densità della sua materia circa 150 g/mm^3. In queste condizioni avviene la fusione dei nuclei di idrogeno.

Per ottenere lo stesso processo sulla terra con densità massime di circa 10 g/cm^3 occorrono temperature dell'ordine di 10^8℃ .

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 129

La fusione nucleare: dove e come

Le condizioni necessarie allo sviluppo di processi di fusione nucleare si realizzano naturalmente solo nella fase giovane delle stelle, come attualmente nel nostro sole.

Possono essere generate anche tramite processi di fissione come nell'esplosione di bombe all'uranio o al plutonio (vedi "fissione esplosiva") per armi nucleari (bomba H) o tramite tecniche di riscaldamento puntiforme con campi elettromagnetici come nei Tokamak per i progetti di produzione controllata di energia da fusione nucleare a scopo pacifico.

Il combustibile della fusione è normalmente costituito da isotopi dell'idrogeno (prozio H-1 e deuterio H-2) e i prodotti sono isotopi di elio (He-3 e He-4) e di idrogeno (H-3, trizio) oltre a neutroni ad alta energia.

La fusione nucleare: energia e prodotti

La reazione di fusione più importante e più frequente è quella tra nuclei di deuterio (H-2) e nuclei di trizio (H-3). Essa produce nuclei stabili di elio (He-4) e neutroni veloci oltre a energia. Non si hanno quindi prodotti radioattivi ma solo radioattività indotta dalla collisione di neutroni veloci con i materiali circostanti:

$$^{2}_{1}D + {}^{3}_{1}T \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n + 17.6\ MeV$$

Energia da fusione e da fissione

La fusione di 1 g di idrogeno in forma di deuterio e trizio produce quindi:

$$\frac{1g}{2.5g/mol} * 6.02 * 10^{23} atomi/mol * 17.6 * 10^{6} * 1.6 * 10^{-19} J = 6.8 * 10^{11} J = 6.8 * 10^{8} kJ$$

La fusione di 1 g di deuterio/trizio produce quindi quasi 10 volte l'energia prodotta dalla fissione di 1 g di U-235 (vedi "L'energia liberata dalla fissione nucleare").

Per una produzione a scopo pacifico i problemi principali risiedono nell'attivazione del processo (raggiungimento di temperature superiori a 10^{7}℃) e nel confinamento del plasma a queste temperature durante il processo.

La fusione nucleare nella bomba H

La bomba a idrogeno o bomba H o bomba a fusione nucleare o bomba termonucleare non è mai stata utilizzata in guerra ma solo sperimentata da USA (dal 1952), URSS (dal 1953), GB (dal 1957), F (dal 1966), e Cina (dal 1967) in prove nell'atmosfera, nel sottosuolo o in mare.

Dal 1963 vige un accordo internazionale tra le potenze nucleari (eccetto F e Cina) per un divieto di esperimenti nucleari nell'atmosfera e nel mare. Da esse in seguito furono condotti solo esperimenti sotterranei. La Francia invece proseguì gli esperimenti anche in mare fino al 1996 (Polinesia).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 133

La fusione nucleare nella bomba H

Una bomba H è costituita da un involucro di U-238 nel quale sono poste numerose coppie di masse sottocritiche di U-235, un contenitore di deuterio (H-2) e trizio (H-3) raffreddati a -250℃ e dell'esplosivo convenzionale. L'esplosio ne di quest'ultimo unisce la masse sottocritiche di U-235 in masse critiche che scatenano più reazioni di fissione contemporanee (vedi "bomba a fissione"). Si creano le condizioni di temperatura sufficienti per scatenare la reazione di fusione tra H-2 e H-3 con enorme liberazione di energia. Si formano nuclei di He-5 e neutroni veloci in grado di provocare l'ulteriore fissione dell'U-238 dell'involucro.

Si tratta quindi di una bomba a 3 stadi (F-F-F o fissione-fusione-fissione).

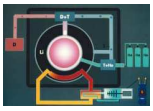
Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 134

La fusione nucleare a scopo pacifico

La ricerca scientifica e tecnologica per la realizzazione della fusione nucleare a scopo pacifico ha inizio attorno al 1950 (URSS) e ha dato luogo a programmi internazionali in centri URSS, USA e EU: studio della fisica della materia allo stato di plasma e realizzazione di sistemi sperimentali per il controllo del plasma per confinamento magnetico (principio Tokamak: nome di origine russa che significa: camera toroidale a bobine magnetiche) e laser.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 135

Schema di un Tokamak



http://crppwww.epfl.ch/pdf/crpp_it.pdf

Ignizione in un Tokamak

Si immette corrente nelle bobine di campo toroidale;

in seguito, viene immessa una piccolissima quantità di gas (generalmente idrogeno o suoi isotopi) di cui si vogliano studiare le proprietà.

si immette corrente nel solenoide centrale, che occupa il buco centrale del toro (vedi figura a lato), creando un flusso nel nucleo del Tokamak: esso costituisce il circuito primario di un trasformatore, di cui il toro costituisce il circuito secondario;

la corrente nel primario viene fatta rapidamente calare, e questo crea una forza elettromotrice. Gli atomi neutri vengono ionizzati, si crea una scarica con elettroni via via più numerosi per effetto degli urti fra elettroni e atomi neutri.

Il gas non è più neutro, ma è diventato plasma: a questo punto la corrente elettrica, per effetto Joule, riscalda il plasma a temperature anche molto elevate (qualche milione di °C).

Se il gas introdotto nel Tokamak è una miscela di deuterio e trizio, si possono allora studiare le reazioni di fusione termonucleare dei plasmi ricreando per certi versi l'ambiente che si ha all'interno delle stelle. La speranza è quella di ottenere l'ignizione del plasma, un fenomeno che si autososterrebbe, per poter estrarre energia da fusione nucleare, un'energia che non lascia scorie radioattive né è passibile di esplosioni o fughe di radiazione e in tal senso è un'energia completamente "pulita".

http://it.wikipedia.org/wiki/Tokamak

La fusione nucleare a scopo pacifico: i problemi da risolvere

Oltre al raggiungimento della temperatura di innesco e al controllo del plasma la ricerca deve fornire soluzioni circa i costi di costruzione, la continuità d'esercizio e i materiali da costruzione da utilizzare per la resistenza e la schermatura dalle radiazioni prodotti dai neutroni circolanti nel reattore.

Se da un lato il processo non crea prodotti di reazione radioattivi occorre preventivare la produzione di scorie radioattive in forma di parti invecchiate dell'impianto attivate dal bombardamento neutronico che richiederanno regolare sostituzione.

La fusione nucleare a scopo pacifico: lo stato dell'arte

Attualmente sono attivi diversi reattori sperimentali nei quali si studia l'attivazione della reazione e il confinamento del plasma. Si prevede la realizzazione di un reattore a fusione per produzione di energia elettrica fra circa 40 anni.

http://www.tdf.it/2006/fvp-fusione.htm

http://fusion.gat.com/global/Home

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 139

Il Big Bang e l'informazione

Con Big Bang si intende un processo durante il quale a partire dal vuoto[1] e senza necessità di una causa primitiva sorgono spontaneamente e liberamente il tempo, lo spazio e l'universo intero in forma di particelle contenenti tutta l'informazione necessaria alla gestazione cosmica successiva fino a ciò che oggi ci appare, dalle galassie alla vita sulla terra e all'uomo. Si dibatte sulla questione se quest'informazione permette di prevedere anche le nostre scelte oppure no.

La fisica moderna riconosce eventi simili con particelle che dal vuoto sorgono in modo imprevedibile e improvviso e dotate di energia attinta dalla Natura. Alla fisica non è possibile sapere dove e quando esse appariranno ma solo annunciare la probabilità che ciò accada entro un certo tempo e in un certo luogo. Questa impossibilità è stata dimostrata con il teorema di Bell (1964).

[1]Il vuoto per i fisici quantistici non è il "niente" ma è un ambiente materiale suscettibile di provocare ogni sorta di fenomeno osservabile, avente energia, nel quale si propagano radiazioni, esistono simmetrie, ecc.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 140

Creazione o caso

L'informazione primordiale contenuta nel flusso quantico dal quale nascono tempo, spazio e materia, consiste in un set di costanti fisiche e matematiche che governano e rendono possibile tutto ciò che esiste, avviene e che osserviamo nell'universo. Una differenza anche minima in una di esse renderebbe impossibile ogni cosa.

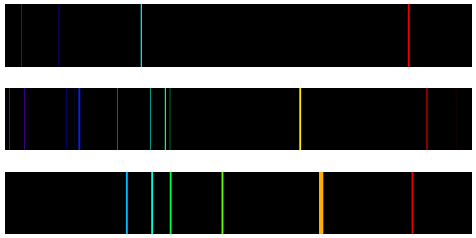
Occorre quindi credere o ad un'informazione data da un'entità superiore al momento della creazione o ad un'infinità di universi corrispondenti ad infinite combinazioni di costanti fisiche tra le quali il caso ha determinato anche l'esistenza del nostro universo.

La risposta non può essere data dalla fisica e dal metodo scientifico ma riguarda l'ambito filosofico e soprannaturale il cui metodo ci può indicare a cosa sia più razionale credere.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 141

La ricerca di elementi chimici nelle stelle

La presenza di elementi chimici nella stella può essere indagata analizzando lo spettro della luce emessa dalla stessa: in esso si cercano le linee spettrali tipiche di ogni elemento:



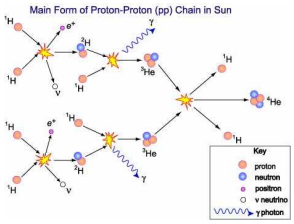
Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 142

La fusione nucleare nelle stelle giovani

Dopo 10^{-14} s le dimensioni dell'universo erano di 10^{-33} cm (10^{25} volte più piccolo di un atomo). L'espansione che segue nei primi minuti determina un raffreddamento fino a temperature di alcuni milioni di °C che permette la produzione di idrogeno H-1 (emissione β^- da un semplice neutrone) e quindi, per fusione nucleare, di altri isotopi dell'idrogeno (H-2 e H-3) e di elio. Durante la maggior parte della loro vita le stelle fondono nuclei di idrogeno in nuclei di elio. La stella si comporta come un sistema in equilibrio mantenendo stabile la sua temperatura attraverso espansione (raffreddamento) e compressione (riscaldamento). E' ciò che avviene attualmente sul nostro sole.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 143

Alcune reazioni di nucleosintesi



Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 144

Fusione nucleare nelle stelle giovani: da H a He

$$^{1}_{0}n \longrightarrow \beta^{-} + {}^{1}_{1}H$$

$$^{1}_{1}H + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{2}_{1}H$$

$$^{2}_{1}H + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{3}_{1}H$$

$$^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{3}_{1}H + {}^{1}_{1}H$$

$$^{2}_{1}H + {}^{2}_{1}H \longrightarrow {}^{4}_{2}He \longrightarrow {}^{3}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

$$^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \longrightarrow {}^{5}_{2}He \longrightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n$$

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 145

Nucleosintesi tramite fusione nucleare nelle stelle in evoluzione

Quando pressione e temperatura superano un valore di soglia prendono inizio i processi di fusione consecutivi a partire dai nuclei di elio che portano a Be, C, O, Ne, ecc.; da C si produce pure N per emissione β^- e allo stesso modo da O si produce F.

Decadimenti α e β dei nuclei prodotti portano in seguito ai nuclidi stabili e instabili degli elementi superiori fino al numero di massa 56 (ferro).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 146

Alcune reazioni di nucleosintesi

$$^{2}_{4}He + {}^{2}_{4}He \longrightarrow {}^{4}_{8}Be$$

$$^{4}_{8}Be + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{4}_{9}Be$$

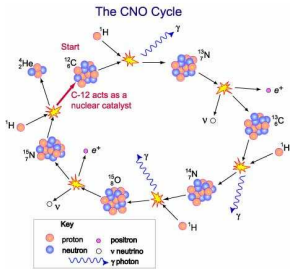
$$^{4}_{9}Be + {}^{2}_{4}He \longrightarrow {}^{6}_{13}C$$

$$^{4}_{8}Be + {}^{2}_{4}He \longrightarrow {}^{6}_{12}C$$

$$^{6}_{13}C + {}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{6}_{14}C \longrightarrow {}^{7}_{14}N + \beta^{-}$$

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 147

Alcune reazioni di nucleosintesi



Nucleosintesi: cattura di neutroni nelle stelle invecchiate

Nuclei con più di 56 nucleoni (26 protoni e 30 neutroni, Fe-56) non possono più formarsi per fusione in quanto l'evento richiederebbe un quantità eccessiva di energia e porterebbe a nuclei molto meno stabili.

L'addizione di singoli neutroni può avvenire nelle condizioni che caratterizzano la stella in questa fase.

L'addizione di un neutrone non crea un nuovo elemento. Questo può però generarsi se il nuovo nucleo è instabile e dà luogo a decadimento β^- trasformando un suo neutrone in un protone.

Tramite cattura di neutroni e successivi decadimenti si formeranno in seguito i nuclei più pesanti fino a 92 protoni (uranio).

Nucleosintesi: cattura lenta di neutroni

La cattura lenta di neutroni (slow neutron capture, s-process) produce una serie di elementi vicini al ferro in quanto i nuclei prodotti hanno tempo di dare decadimento β^- tra una cattura e l'altra aumentando di una sola unità il numero di protoni: da ferro (Fe) si generano cobalto (Co), nickel (Ni), rame (Cu).

I neutroni circolanti provengono da emissioni da parte di nuclei in particolare di carbonio (C) e neon (Ne).

Questo processo è tipico di quella fase della vita della stella che precede il raffreddamento finale che porta alla nana bianca.

Nucleosintesi: cattura rapida di neutroni

La cattura rapida di neutroni (rapid neutron capture, r-process) produce elementi con elevato numero atomico in quanto vengono catturati rapidamente numerosi neutroni che decadono poi a cascata dando una serie di elementi pesanti (Au, Pb, … fino a U).

Anche questi processi sono tipici della tarda vita della stella durante la quale essa diventa una nana bianca (white dwarf).

Nucleosintesi: la stella a cipolla

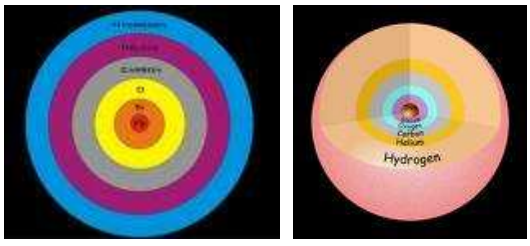
La nucleosintesi degli elementi pesanti è particolarmente intensa nell'ultima fase della vita della stella e che precede l'esplosione supernova.

La temperatura nel cuore della stella è sufficiente per produrre le fusioni successive che portano alla formazione di ferro. Da questi nuclei, troppo stabili per fondersi tra di loro si formano gli elementi pesanti per cattura di neutroni (s- e r-process).

Il nucleo di ferro cresce grazie alla fusione di nuclei negli strati adiacenti via via più esterni dove possono fondere nuclei di silicio, quindi di carbonio e di ossigeno. Negli strati più esterni avviene invece la fusione dell'elio e quella dell'idrogeno.

Nucleosintesi: la stella a cipolla

Rappresentazione della stella nella sua fase terminale:



L'esplosione finale della stella

Vi è un limite massimo oltre il quale la massa del cuore di ferro non può più crescere: il suo peso diventa superiore a quello che esso stesso può sopportare.

Ciò dà vita ad un collasso catastrofico: un'implosione durante la quale gli strati esterni precipitano su quelli interni con velocità valutate a circa 200 milioni di km/h. L'implosione determina una concentrazione di materia ed energia tale da generare un'immane esplosione (**supernova**) che disperde il materiale a milioni di km di distanza.

Dalla condensazione della polvere dispersa si possono poi formare sistemi di stelle con pianeti che finiscono nel loro campo gravitazionale come il nostro sistema solare.

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 154

Nucleosintesi per cattura di protoni

Nel nostro sistema solare c'è una sola stella, il nostro sole. Ci sono però numerose stelle in sistemi accoppiati di almeno due stelle orbitanti una attorno all'altra. In questi casi se le due stelle sono sufficientemente vicine possono fondere i loro strati esterni: una stella spinge il suo materiale nell'altra ad altissime temperature, per esempio nel caso di stelle a neutroni o nana bianca molto compatte che spingono il loro strato di idrogeno all'interno della superficie della stella partner: in questi casi il materiale fornisce un flusso di protoni liberi sufficientemente energetico per superare la barriere energetica rappresentata dalla repulsione elettrostatica. Si generano elementi pesanti come lantanio (La), rutenio (Ru) e samario (Sm).

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 155

La supernova

Liceo Lugano 2. Corso di scienze 07-08. Struttura atomica, energia nucleare e nucleosintesi 156