

VII.3 Applicazioni del nucleare

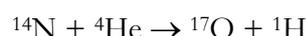
- ⌘ La radioattività artificiale
- ⌘ Le applicazioni della radioattività artificiale in ambito biomedico ed alla datazione
- ⌘ La bomba nucleare
- ⌘ Energia nucleare da fissione
- ⌘ Misura ed effetti delle radiazioni ionizzanti
- ⌘ Questione nucleare e questione energetica
- ⌘ Energia nucleare da fusione

3.1 La radioattività artificiale

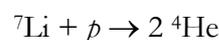
3.1.1 LA RADIOATTIVITÀ ARTIFICIALE: GENESI

La storia della radioattività artificiale rappresenta la naturale e sistematica continuazione delle trasmutazioni nucleari artificiali già osservate nella prima fase della storia della fisica del nucleo e cioè:

- nel 1914 scoperta del protone da parte di Marsden e Rutherford:



- nel 1929 produzione artificiale dell'elio tramite bombardamento protonico del litio da parte di John D. Cockroft and Ernest T.S. Walton che utilizzarono il primo acceleratore di particelle (di tipo elettrostatico) per accelerare i protoni:



- nel 1932 scoperta del neutrone tramite bombardamento di elementi leggeri con le particelle alfa da parte Chadwick:



3.1.2 I LAVORI DI F. JOLIOT E I. CURIE

Nel caso della radioattività artificiale però, alla trasmutazione nucleare, si accompagna la creazione di un isotopo radioattivo in precedenza inesistente.

Nella seconda metà degli anni 30 la miglior sorgente per indurre radioattività artificiale sarà costituita dai neutroni (largamente utilizzati dopo Joliot-Curie dal gruppo di Fermi), ma all'inizio, *tanto per cambiare*, sono ancora protagoniste le particelle α .

La radioattività artificiale inizia ufficialmente nel gennaio 1934 quando F. Joliot e I. Curie comunicano di avere scoperto che le loro ricerche sul bombardamento di materiali leggeri con particelle α avevano portato ad un risultato inatteso, ma perfettamente interpretabile attraverso l'uso di un nuovo quadro concettuale.

Per il bombardamento veniva utilizzata una sorgente di Polonio che ha il vantaggio di dare una *emissione pulita*. Tale sorgente veniva diretta su bersagli di svariati elementi leggeri e si osservava una *emissione di neutroni inattesa*.

Per esempio l'alluminio dovrebbe assorbire la particella alfa e trasformarsi in un isotopo stabile del silicio con emissione di un protone. Si osserva invece la emissione di positroni e di neutroni. Poiché il prodotto finale non cambia Joliot e Curie presentarono inizialmente il loro lavoro sperimentale (al congresso di Bruxelles) come la dimostrazione del fatto che il protone fosse una particella composta da un neutrone e un positrone.

La relazione ebbe una accoglienza molto critica e, al ritorno dal congresso, nel tentativo di migliorare i dati sperimentali, Joliot e Curie allontanarono progressivamente la sorgente dal bersaglio. Come previsto si os-



Friederic Joliot e Irene Curie scopritori della radioattività artificiale

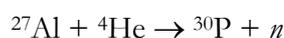
servò una attenuazione del flusso neutronico, perché un numero minore di particelle α colpivano l'alluminio, ma il flusso osservato dei positroni risultò essere indipendente.

I positroni emessi dal bersaglio continuavano ad essere emessi anche dopo la cessazione della esposizione alla sorgente radioattiva: ovvero la loro emissione non era dovuta alla interazione con le particelle α ma a qualcosa di diverso: c'era un *effetto ritardo*.

Sotto ponendo ad indagine quantitativa i bersagli irradiati Joliot e Curie videro che la radioattività indotta seguiva le leggi esponenziali del decadimento radioattivo con un tempo di dimezzamento tipico del materiale bombardato: *si stava osservando il decadimento β^+ di un nuovo nuclide generato dalla interazione tra le α e il bersaglio*.

Non c'erano un neutrone ed un positrone generati al posto di un protone, ma i positroni venivano generati in modo indipendente dalla esistenza dei neutroni.

La reazione osservata era:



seguita da:



Il decadimento β^+ osservato risultava avere un tempo di dimezzamento di circa 3 minuti e veniva prodotto da un isotopo del fosforo con numero di massa 30 invece di 31 (fosforo stabile). L'immagine qui a lato illustra l'apparecchiatura utilizzata per separare chimicamente il P dall'Al per via chimica in modo di evidenziare che la emissione β^+ avveniva lontano dall'alluminio e dopo che da esso era stato asportato chimicamente un diverso elemento.

Per qualche ragione non chiara la particella α si assestava nel nucleo di alluminio creando un isotopo instabile del fosforo e la espulsione di un neutrone. L'isotopo corrispondente aveva un eccesso di protoni e decadde attraverso la conversione interna di un protone in un neutrone con espulsione di un positrone.

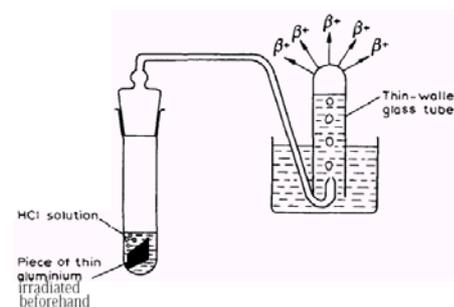
Gli stessi esperimenti vennero riprodotti sul boro e sul magnesio con produzione, nel primo caso, di un isotopo dell'azoto ($T_{1/2} = 11$ minuti) e nel secondo caso con isotopi instabili del silicio e dell'alluminio.

Joliot e Curie ricevettero nell'anno successivo il premio Nobel per la chimica (III premio in famiglia, II premio ad una coppia Curie) perché, una volta scoperta la ricetta per fare nuovi isotopi, il numero di isotopi crebbe a dismisura.

3.1.3 IL GRUPPO DI ROMA E LA RADIOATTIVITÀ ARTIFICIALE

Con il consueto senso fisico che lo contraddistingueva Fermi mise immediatamente all'opera il suo gruppo: *se si trattava di creare trasformazioni nel nucleo il miglior proiettile era il neutrone* che si poteva avvicinare al nucleo senza i problemi della repulsione coulombiana delle α .

Per questa ragione si usò una sorgente di Radon – Berillio più sporca ma più efficace nel creare intensi flussi neutronici. Se si trattava di indurre una cattura, i neutroni lenti sarebbero andati meglio di quelli veloci per-



La apparecchiatura usata da Joliot per separare chimicamente il fosforo radioattivo dall'alluminio



Roma 1934: D'Agostino, Segrè, Amaldi, Rasetti, Fermi. Il gruppo si sfalderà dopo la scelta di Fermi di andare negli Usa un po' per le leggi razziali che colpivano la moglie, un po' perché per mantenere il primato nella ricerca serviva un grosso acceleratore e il CNR non era disposto a realizzarlo. Il solo Amaldi rimarrà in Italia e contribuirà, nei primi anni 50, alla realizzazione del CERN

ché, a causa della bassa velocità, sarebbe risultato maggiore il tempo a disposizione per la interazione nucleonica.

Così, nel giro di un anno *furono scoperti oltre 60 isotopi radioattivi artificiali* e, per pochi anni, l'Italia diventò il punto di riferimento della ricerca sul neutrone e sul nucleare.

Tutto ciò avveniva negli scantinati dell'Istituto di Fisica dell'Università di Roma con Fermi, Amaldi, Rasetti, D'Agostino, Segrè, Pontecorvo, Majorana.

Se diamo una occhiata alla carta degli isotopi vediamo che ormai quelli artificiali, in larga misura ottenuti mediante bombardamento neutronico, sono la maggioranza e il loro interesse risiede nella possibilità di produrre materiali che conservano le caratteristiche chimiche dei loro parenti naturali e contemporaneamente possono essere piegati alle esigenze radioattive intervenendo su tipologia e caratteristiche del decadimento (energie in gioco e tempi di dimezzamento) con correzioni del numero di massa.

Oggi le principali sorgenti di neutroni sono le *celle calde* appositamente realizzate in zone adiacenti al *core* di speciali reattori nucleari costruiti non tanto per produrre energia quanto per sfruttare gli elevati flussi neutronici nella produzione di isotopi artificiali.

Invece ai tempi di Fermi e della nascente fisica del nucleo si utilizzavano delle sostanze α emettitrici mescolate con elementi di bassa numero atomico in grado di emettere neutroni per effetto della interazione con le α .¹

Sorgente	Reazione	energia (MeV)
Ra and Be	${}^9\text{Be} (\alpha, n) {}^{12}\text{C}$	fino a 13
Po and Be	${}^9\text{Be} (\alpha, n) {}^{12}\text{C}$	fino a 11
Pu and B	${}^{11}\text{B} (\alpha, n) {}^{14}\text{N}$	fino a 6

Per ottenere sorgenti più intense caratterizzate da energia più bassa dei neutroni si separava la sostanza radioattiva dall'elemento irradiato in modo di sfruttare il potere di penetrazione dei γ mentre le α si arrestavano prima del bersaglio. Con il simbolo D si intende il deuterio (isotopo pesante dell'idrogeno).

Sorgente	Reazione	energia (MeV)
Ra, Be	${}^9\text{Be} (\gamma, n) {}^8\text{Be}$	0.6
Ra, D ₂ O	${}^2\text{D} (\gamma, n) {}^1\text{H}$	0.1
²⁴ Na, Be	${}^9\text{Be} (\gamma, n) {}^8\text{Be}$	0.8
²⁴ Na, D ₂ O	${}^2\text{D} (\gamma, n) {}^1\text{H}$	0.2

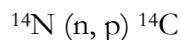
¹ In fisica del nucleo le reazioni sono spesso indicate mettendo tra parentesi la particella proiettile e la particella prodotta. Dunque ${}^9\text{Be} (\alpha, n) {}^{12}\text{C}$ vuol dire ${}^9\text{Be} + \alpha \rightarrow n + {}^{12}\text{C}$

3.2 Le applicazioni della radioattività artificiale nella datazione e in ambito sanitario

3.2.1 IL CARBONIO 14 E I PROBLEMI DI DATAZIONE ARCHEOLOGICA

Una interessante sorgente di neutroni ci viene dai raggi cosmici. Questi sono costituiti in larga misura da protoni di alta energia che, colpendo i materiali situati negli alti strati dell'atmosfera producono reazioni nucleari di vario tipo che comportano la liberazione di neutroni.

Questi neutroni ad una quota variabile tra i 10 e i 20 km interagiscono con l'azoto 14 presente negli strati alti della atmosfera dando luogo alla formazione di ^{14}C con emissione di un protone.



Il ^{14}C così come il ^{12}C si ossida e produce CO_2 . A causa del ciclo del carbonio che caratterizza tutti i sistemi viventi (animali o vegetali), se ne riscontra la presenza, accanto al ^{12}C in tutti i materiali di origine biologica.

Ma poiché si tratta un isotopo radioattivo che presenta un eccesso di neutroni esso subisce il decadimento β^- con un tempo di dimezzamento di 5730 anni. La abbondanza relativa del ^{14}C è praticamente costante sulla terra e vale all'incirca $1.2 \cdot 10^{-10} \%$.

Poiché per periodi di tempo a scala umana si può ipotizzare come stazionario il flusso di produzione del ^{14}C è possibile assumere la percentuale di tale isotopo presente in un materiale biologico morto come un indicatore del tempo trascorso dalla sua morte.

Infatti l'organismo vivente continua a scambiare carbonio finché è in vita e dunque la percentuale di ^{14}C rispetto al ^{12}C risulta la stessa presente in atmosfera. Ma quando l'organismo muore, lo scambio cessa e da quel momento diminuisce la frazione di ^{14}C presente.

Willard Frank Libby un chimico-fisico che operava a Chicago dai tempi delle ricerche di Fermi propose di utilizzare la misura della attività radioattiva del carbonio come strumento di datazione di reperti di origine biologica; per tale metodica divenuta poi strumento di lavoro standard in archeologia ebbe il premio Nobel per la Chimica nel 1960.

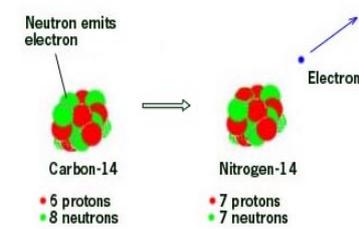
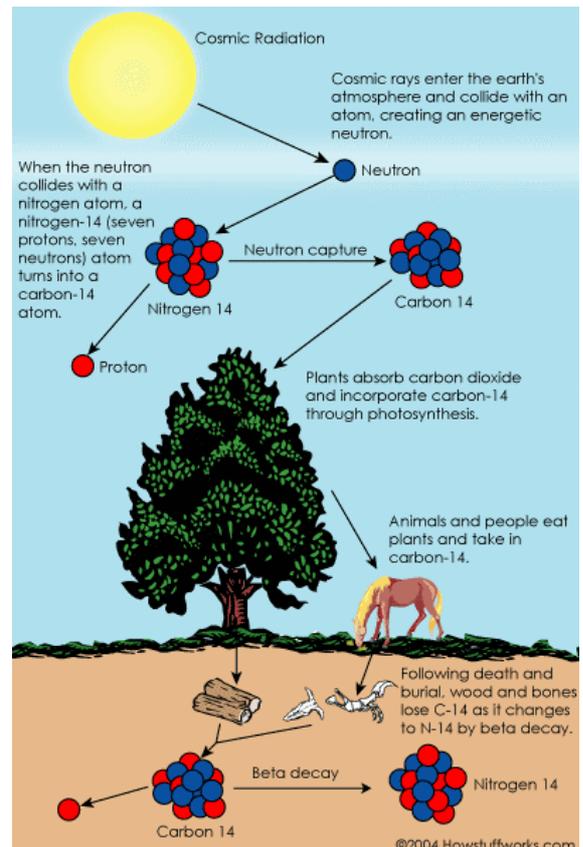
Il metodo venne inizialmente testato utilizzando reperti antichi già datati provenienti dalla civiltà egizia che permisero di verificarne l'accuratezza.

La attività radioattiva per unità di massa di un campione di carbonio terrestre è stata misurata e risulta pari a $A_0 = 14.9$ disintegrazioni/(minuto·g). Basta misurare la attività radioattiva di un reperto della stessa massa e si ha:

$$\frac{A}{A_0} = \exp(-t/\tau)$$

da cui si trova:

$$t = \ln \frac{A_0}{A} \tau$$





Con la datazione del ^{14}C si è osservato che i materiali dell'uomo del Similaun hanno circa 5'700 anni molto di più di quanto si era pensato in un primo momento



Anche la Sindone di Torino è stata finalmente sottoposta ad indagine con il ^{14}C nel 1988 e il risultato è stata una età tra i 608 e i 728 anni il che ci riporta al periodo tra il 1260 e il 1380. La prima ostensione della Sindone è del 1354 e ciò ci riporta al complesso tema delle reliquie tipico del medioevo

I limiti di questo metodo sono legati al valore del tempo di dimezzamento che vincolerà la capacità di retrodatazione ad una decina di tempi di dimezzamento (attualmente da 100 a 50'000 anni) e al fatto che certamente, nel corso dell'ultimo secolo, le attività umane hanno fatto aumentare la presenza di CO_2 in atmosfera e dunque andrà apportata una correzione.

Un altro elemento di cui si tiene conto è il cambiamento nel fondo di radioattività che si è avuto negli anni 50 e in una parte dei 60 per effetto della sperimentazione selvaggia delle bombe all'uranio e all'idrogeno da parte di Usa e Urss e per effetto del rilascio dovuto alle attività legate alle tecnologie del nucleare in genere.

Le curve di correzione sono state costruite per confronto tra l'età da carbonio e l'età da altre misure (dendrocronologia nei vegetali).

Un incremento notevole di precisione oltre che di diminuzione della invasività legata alla dimensione del campione da analizzare è stata recentemente ottenuta attraverso gli spettrometri di massa che consentono di separare dal campione in esame ogni impurità in grado di sovrapporre fondi di radioattività estranei e di operare sostanzialmente un atomo alla volta: ciò permette di diminuire la invasività della misura perché bastano campioni molto piccoli e contemporaneamente aumentare la precisione.

In questo modo è stato possibile giungere a conclusioni importanti su due fenomeni che hanno coinvolto notevolmente il nostro paese: il primo è stato la vicenda dell'uomo del Similaun la cui datazione ha dato un'età molto maggiore di quella inizialmente stimata.

Il secondo ha riguardato l'esame della Sindone. La datazione del tessuto ha permesso di stimare all'età medioevale la produzione del tessuto confermando ipotesi già avanzate in sede storiografica circa il carattere devozionale e non storico del reperto.

3.2.2 LE TECNICHE DI DATAZIONE IN GEOCRONOLOGIA

Con tecniche analoghe a quelle del ^{14}C , ma utilizzando materiali con tempi di dimezzamento molto più lunghi, è possibile effettuare la datazione delle rocce andando a misurare periodi sino all'ordine dei miliardi di anni.

I tre isotopi tipicamente usati per la datazione geologica sono:

- l'Uranio 238 ($T_{1/2} = 4.5 \cdot 10^9$ anni) che attraverso 16 decadimenti α e β forma, alla fine, il Piombo 206. Poiché il tempo di dimezzamento dell'Uranio è 20'000 volte più grande del nucleo figlio a più lunga durata si può ipotizzare che la serie sia in equilibrio e che il numero di atomi di Piombo attualmente presenti nella roccia aggiunti a quelli attuali di Uranio fornisca il numero iniziale N_0 di atomi di uranio. Da qui si può risalire agevolmente a

$$t / \tau = \ln \frac{N_0}{N}$$

- il potassio K^{40} che, tramite cattura elettronica si trasforma in Argon 40 con $T_{1/2} = 1.3 \cdot 10^9$ anni
- il Rubidio 87 che tramite un decadimento β^- si trasforma in Stronzio 87 con $T_{1/2} = 5.7 \cdot 10^{10}$ anni

URANIUM 238 (U^{238}) RADIOACTIVE DECAY		
type of radiation	nuclide	half-life
α	uranium-238	4.47 billion years
β	thorium-234	24.1 days
β	protactinium-234m	1.17 minutes
α	uranium-234	245000 years
α	thorium-230	8000 years
α	radium-226	1600 years
α	radon-222	3.823 days
α	polonium-218	3.05 minutes
α	lead-214	26.8 minutes
β	bismuth-214	19.7 minutes
β	polonium-214	0.000164 seconds
α	lead-210	22.3 years
β	bismuth-210	5.01 days
α	polonium-210	138.4 days
	lead-206	stable

Il potassio e il rubidio sono più utilizzati dell'uranio a causa della maggiore distribuzione di essi nelle rocce. Nella eseguire qualunque datazione a grande scala si assume un elemento di indeterminazione legato all'ipotesi che il sistema sia stato chiuso durante il periodo considerato e che al tempo zero non fossero già presenti nuclei figlio. Pertanto si considera attendibile una datazione quando metodiche diverse conducono a risultati comparabili.

A questo proposito osserviamo che, nonostante le rocce terrestri più antiche abbiano una età di $3.5 \cdot 10^9$ anni si assegna alla terra un miliardo di anni in più perché tale è l'età dei meteoriti e delle rocce lunari (che vengono considerate coeve alla terra) che presentano una distribuzione isotopica del Piombo identica a quella terrestre.

3.2.3 LA RADIOTERAPIA: UN ESEMPIO RAFFINATO

E' ben noto l'uso associato che si fa di radioterapia e chemioterapia per il trattamento dei tumori. Come si è già accennato le originarie sorgenti di radio sono ormai ovunque sostituite dal Co^{60} che viene prodotto nelle celle calde dei reattori nucleari.

Vogliamo parlare qui, invece di una nuova tecnica, che utilizza la più efficace delle particelle nucleari: il neutrone. La tecnica si chiama *TAORMINA* (*Trattamento Avanzato di Organi Mediante Irraggiamento Neutronico ed Autotrapianto*). Si tratta di una tecnica utilizzata con successo tramite collaborazione dell'INFN con il Policlinico S. Matteo di Pavia.

Il trattamento si basa sulla elevata capacità del Boro di assorbire neutroni trasformandosi nell'isotopo radioattivo Bo^{11} che decade immediatamente trasformandosi in Li con emissione di particelle α da 2.97 MeV:

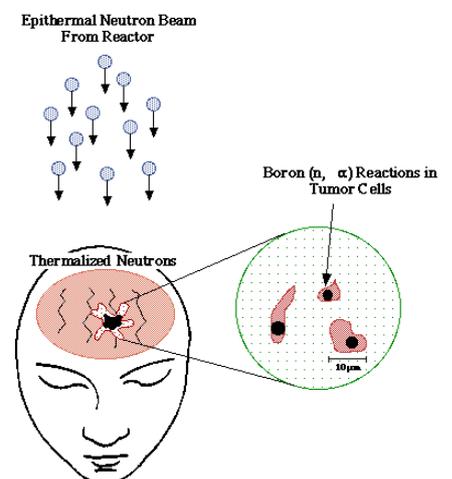
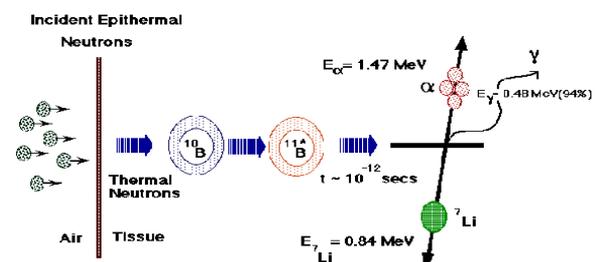
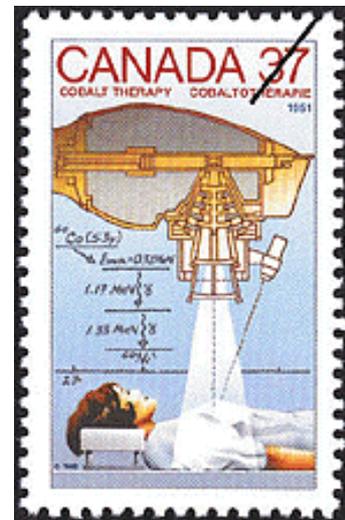


come è noto le α hanno un elevatissimo potere distruttivo a *basso range* e nella metodica esaminata si sfrutta proprio questo aspetto: si fa in modo che il Boro venga assorbito selettivamente dalle cellule cancerose e saranno poi queste cellule ad essere distrutte per effetto delle α generate da un opportuno bombardamento neutronico.

Si tratta di qualcosa di simile a quanto si fa con la chemioterapia dove si usano sostanze particolarmente attive verso le cellule a grande potere di moltiplicazione quali quelle cancerose. In questo caso, al paziente viene somministrato un aminoacido la *borophenilalanina* che ha la proprietà di fissarsi selettivamente nelle cellule tumorali che lo fissano in un rapporto 1:5 rispetto alle cellule sane.

L'organo malato viene temporaneamente espantato e sottoposto ad un intensissimo bombardamento neutronico a base di neutroni termici direttamente in un reattore nucleare. L'uso del reattore consente una maggiore isotropia dei fasci e un controllo ottimale della dose senza coinvolgimento del paziente (nel primo caso si è operato su un fegato metastazizzato da un tumore del colon).

L'assorbimento dei neutroni determina la emissione delle α direttamente in situ e sono esse a produrre, senza effetto collaterale, o la distruzione della singola cellula cancerogena o la distruzione del suo processo di re-

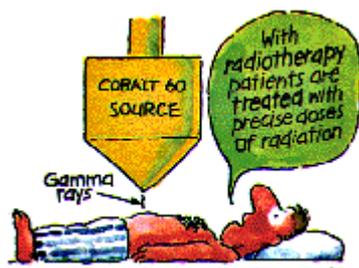


plicazione. Entro le 24 ore il fegato *ripulito dal cancro* viene reimpiantato e riprende le sue normali funzioni.

Questa stessa metodica (senza asportazione dell'organo) si rivela efficace anche in casi di tumore al cervello dove l'intervento chirurgico è impossibile e la tradizionale radioterapia difficilmente riesce ad ottenere la necessaria concentrazione di dose senza importanti danni collaterali.

3.2.4 LA MEDICINA NUCLEARE ²

La Medicina Nucleare è la branca specialistica della medicina che si avvale dell'uso di radionuclidi artificiali impiegandoli in forma non sigillata a scopo diagnostico, terapeutico e di ricerca biomedica.



I radionuclidi vengono introdotti nell'organismo sotto forma di soluzioni, sospensioni, aerosol o altro e possono comportarsi come traccianti funzionali, permettendo studi diagnostici *in vivo*, o concentrarsi in tessuti patologici, permettendone sia il riconoscimento sia l'irradiazione terapeutica.

Al contrario delle immagini radiologiche, che vengono ottenute sfruttando l'attenuazione del fascio di radiazioni X da parte dei tessuti interposti tra l'apparecchiatura che le ha prodotte e il sistema di rilevazione, le immagini medico-nucleari vengono ottenute per mezzo della rilevazione di radiazioni emesse da radiofarmaci distribuiti nell'organismo.

E' quindi il paziente che emette le radiazioni che vengono registrate da apposite apparecchiature in grado di ricreare l'immagine corrispondente. Dal termine *scintillazione*, che definisce il fenomeno fisico sfruttato da queste apparecchiature per trasformare in energia elettrica l'energia quantica dei fotoni, le immagini da esse fornite vengono dette *scintigrafie*.

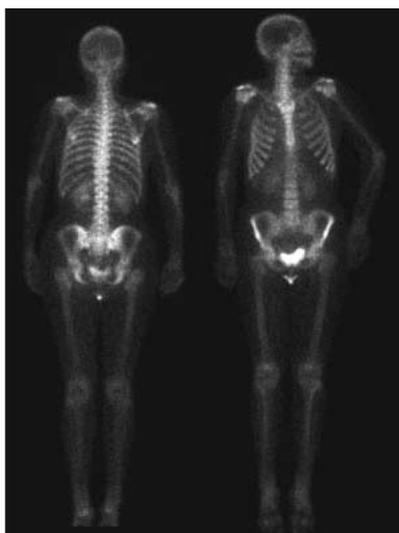
Le varie metodiche medico nucleari prevedono la somministrazione ai pazienti di un radiofarmaco scelto opportunamente in modo che si concentri nell'organo oggetto di studio o che si comporti come tracciante di una particolare funzione biologica.

La immagini scintigrafiche esprimono la distribuzione spaziale o spaziotemporale del radiofarmaco. La peculiarità di queste immagini è, quindi, di essere *funzionali*, cioè l'espressione morfologica di una funzione vitale. Rispetto alle altre metodiche di "imaging" (Radiologia, ECO e RMN), le immagini medico-nucleari sono caratterizzate, in genere, da un dettaglio morfologico nettamente inferiore, ma sono molto più ricche di informazioni funzionali.

L'immagine scintigrafica si contraddistingue, rispetto alle altre metodiche di *imaging*, per la capacità di mettere in evidenza una compromissione funzionale anche prima che siano riconoscibili alterazioni anatomiche.

Il razionale dell'uso della medicina nucleare in TERAPIA è che il radiofarmaco somministrato al paziente, concentrandosi nei tessuti pericolosi, possa irradiarli e distruggerli risparmiando, per quanto possibile, quelli sani.

I radiofarmaci che vengono usati in terapia sono, per lo più, differenti rispetto a quelli usati in diagnostica perché emettono radiazioni in grado



esempio di scintigrafia dell'apparato scheletrico

² Le informazioni di questo paragrafo sono riprese dal sito di medicina nucleare dell'Università di Padova.

di dissipare tutta la loro energia in uno spazio molto piccolo (<1 cm); ciò permette una radioterapia metabolica selettiva e mirata.

Esempi di applicazioni di radioterapia metabolica sono: in campo endocrinologico la terapia dell'ipertiroidismo, con radioiodio; in campo ematologico: la terapia della policitemia con radiofosforo; in campo reumatologico: la terapia intra-articolare della sinovite cronica con radiocolloidi; in campo oncologico: la radioterapia metabolica del carcinoma tiroideo con radioiodio, la terapia delle metastasi ossee con radiostronzio, la terapia palliativa dei versamenti sierosi neoplastici con radiocolloidi.

Le metodiche medico nucleari hanno avuto ed hanno un ruolo di primaria importanza nella RICERCA BIOMEDICA.

Di particolare interesse, a questo riguardo, sono le nuove possibilità fornite dalla tomografia ad emissione di positroni (PET) che può utilizzare le stesse molecole che normalmente entrano nel metabolismo dei tessuti.

Infatti, l'uso di radionuclidi emittenti positroni, come il Carbonio-11, l'Azoto-13, l'Ossigeno-15, il Fluoro-18, permette di marcare le molecole biologiche sostituendo uno o più isotopi stabili con il loro isotopo radioattivo, con il pregio di non modificarne in alcun modo le altre caratteristiche fisiche e chimiche, mantenendo quindi invariate la biodistribuzione e la funzione.

Queste sostanze vengono somministrate al paziente in maniera diversa a seconda del tipo di organo e/o patologia da indagare. Si tratta di isotopi a corta vita media (carbonio11, 20.3 minuti, ossigeno 15, 2.03 minuti, fluoro 18, 109.8 minuti, bromo 75, 98.0 minuti). La elevata selettività fa sì che si possano somministrare dosi che ormai si misurano in micro o nano grammi. Il materiale radioattivo emette positroni che annichilandosi producono una coppia di γ che vengono raccolti dal rivelatore che ricostruisce poi immagini al computer.

L'impulso decisivo alla crescita della medicina nucleare, che ne ha permesso la trasformazione da branca della radiologia a disciplina autonoma, è venuto dalla ideazione del primo generatore di ^{99m}Tc , costruito al Brookhaven Lab di New York nel 1958 e introdotto nell'uso clinico nel 1963.

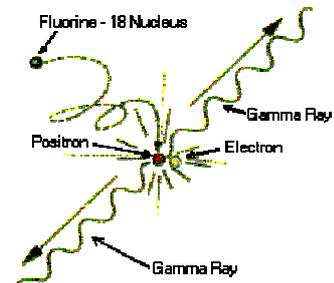
Il tecnezio rappresenta il 90% dei radionuclidi oggi usati in diagnostica. E' così importante per il medico nucleare perché *si fa in casa* ad un costo contenuto, emette solo radiazione γ (eliminando il problema della pericolosità indesiderata dei β), ha un tempo di dimezzamento di sole 6 ore,

Trovato il radionuclide ideale è diventato poi compito dei radio-chimici e radio-farmacisti identificare differenti sostanze che, legate al tecnezio, fossero in grado di concentrarsi in organi diversi.

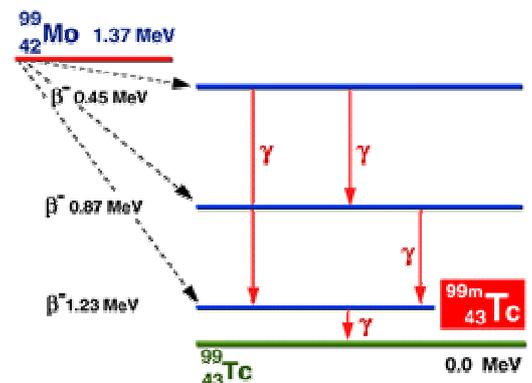
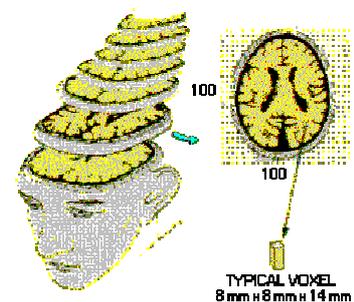
Sono oggi disponibili numerosi radiofarmaci in grado di concentrarsi elettivamente in diversi tessuti e organi, permettendo quindi lo studio delle loro caratteristiche morfo-funzionali. Essi possono essere *marcati* facilmente e rapidamente (per lo più con la semplice introduzione di una soluzione di ^{99m}Tc nel flacone contenente il farmaco stesso).

Così il tecnezio diventa il vettore gamma emittente in grado di essere associato a molti tipi di indagine.

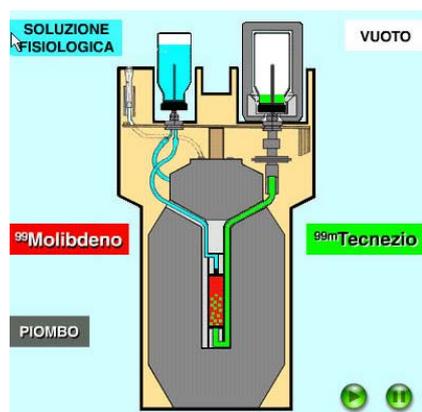
Positron Emission Tomography



Typical "Slice"



Il tecnezio 99 si ottiene per decadimento β del Molibdeno, ma tale decadimento ($T_{1/2} = 2.7$ giorni) produce uno stato metastabile da cui il tecnezio decade con emissione di raggi γ con $T_{1/2} = 6$ h. La macchina che estrae il tecnezio dal molibdeno è piccola e portatile



In figura è mostrato lo schema della sezione di un tipico generatore di ^{99m}Tc , le cui dimensioni reali sono circa 30 x 15 x 15 cm.

Il Molibdeno (numero atomico 32) e il Tecnezio (numero atomico 43) sono due elementi chimicamente differenti; è quindi possibile scegliere una resina a scambio ionico tale da legare in modo indissolubile il Molibdeno, lasciando invece completamente libero il Tecnezio.

Nel generatore viene introdotto il Mo^{99} che decade in Tc^{99} con $T_{1/2}$ di 67.7 ore. Il tutto avviene entro un recipiente di piombo in grado di schermare sia i β sia i γ . Durante questa fase è possibile attraverso un processo di lavatura estrarre per depressione il tecnezio puro che diventa disponibile per gli esami di medicina nucleare.

La macchina continua a produrre tecnezio a ciclo continuo finché dopo qualche giorno si ricarica con altro molibdeno.

3.3 La bomba nucleare

3.3.1 UN PO' DI STORIA DA FERMI A LOS ALAMOS

Come abbiamo visto il *Gruppo di Roma* era arrivato alla scoperta della creazione degli isotopi radioattivi tramite bombardamento con neutroni termici, cioè con neutroni opportunamente rallentati attraverso gli urti elastici con materiali di basso numero di massa.³

Nel corso di tali esperimenti il *gruppo di Roma* si era reso conto della esistenza di anomalie riguardanti l'irradiazione dell'Uranio ma esse non vennero interpretate per quello che erano e cioè fissioni.

La svolta si ebbe nel 1938 quando due chimici tedeschi Otto Hahn e Friedrich Strassmann scoprirono che nell'Uranio bombardato con neutroni termici si trovano, al termine della irradiazione, del Ba⁵⁶ e anche del La⁵⁷ (prodotto dal decadimento beta del Bario).

La cosa era molto strana perché sino ad allora il bombardamento con neutroni aveva sempre prodotto il decadimento γ seguito dal β . Insomma, al più si passava da Z a Z + 1 mentre qui si passava da 92 a 56. Era stata scoperta la fissione dell'Uranio.

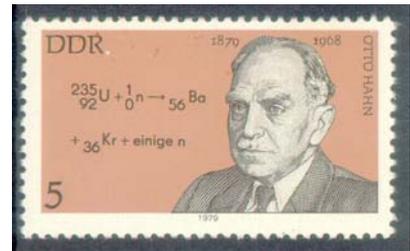
Hahn chiese lumi a due altri fisici di origine tedesca esuli a Stoccolma e Copenhagen con cui aveva già collaborato in Germania prima che fossero costretti all'esilio: Lise Meitner e O. Frisch.

La spiegazione dei due fu quella giusta. La cattura del neutrone induceva uno stato di instabilità nel nucleo di Uranio che, a causa della energia liberata dalla formazione del legame, iniziava ad oscillare sino a spezzarsi cedendo ai due frammenti tutta l'energia prevista dalla relazione sul difetto di massa e cioè all'incirca 200 MeV. Il modello a goccia del nucleo su cui si basava il meccanismo di spiegazione era stato elaborato da Bohr a Copenhagen nel 1937.

La notizia arrivò in America nel gennaio 39 portata da N. Bohr che era stato avvertito dal suo allievo Frisch e propagata da Bohr la notizia mise a soqquadro tutta la comunità di fisici europei emigrati in Usa (incluso Fermi che al ritorno dalla cerimonia del Nobel era passato direttamente negli Usa da pochi giorni).

Fermi, come era suo costume, propose un semplice esperimento (con esito positivo) per verificare la presenza, nei prodotti di fissione, di *neutroni secondari*, la cui esistenza sarebbe stata fondamentale per innescare una *reazione a catena*. Egli si mise in team con un giovane fisico ungherese Leo Szilard mentre Bohr e Rosenfeld, attraverso considerazioni di natura teorica sul rapporto protoni neutroni nel determinare le instabilità nel modello a goccia, arrivarono alla conclusione che quello che si fissionava non era il comune U²³⁸ ma il suo isotopo 235 che è molto più raro.

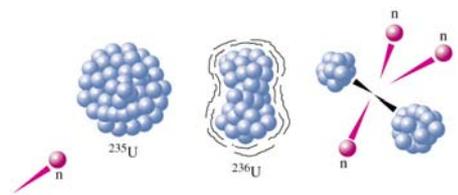
Bohr era dell'opinione che ci si dovesse impegnare per perfezionare le tecniche di separazione isotopica al fine di *arricchire* la percentuale di U²³⁵ per potere produrre la reazione a catena di fissione. Fermi era invece convinto della possibilità di costruire una reazione a catena usando Uranio naturale attraverso opportune geometrie dell'apparato.



O. Hahn 1938: l'Uranio bombardato con neutroni di bassa energia rivela la presenza di tracce di Bario. Da Z = 92 si passa a Z = 56. E' stata scoperta la **fissione nucleare**



L'opinione di L. Meitner e O. Frisch 1939: avete scoperto la fissione dell'Uranio e da quella reazione si libera moltissima energia



Leo Szilard, fisico di origine ungherese, sarà uno dei maggiori collaboratori di Fermi nella corsa alla *pila atomica*

³ Rivedere in proposito il paragrafo I.12.4 in cui vengono svolti i conti e si evidenzia il legame tra fattore di rallentamento e numero di massa.



Leo Szilard, collaboratore di Fermi, a colloquio con Einstein

Nell'estate del '39 Einstein, che era del tutto disinteressato alle problematiche applicative del nucleare, venne informato da Szilard delle novità sulla fissione e si lasciò convincere ad usare la sua autorevolezza per smuovere il Presidente Roosevelt in vista della necessità che gli USA realizzassero la bomba nucleare prima e contro i nazisti (si veda la lettera originale di Einstein in questa stessa pagina).

Ma con lo scoppio della guerra in Europa il Presidente Roosevelt aveva poco tempo per gli scienziati, anche per Einstein, e sino all'estate '40 la ricerca sulla fissione rimase una faccenda ristretta al mondo di alcuni (pochi) fisici.

Nel febbraio 1940 il progetto di Fermi iniziò ad essere finanziato dal governo mentre negli stessi giorni venivano separati dall'Uranio naturale i primi grammi di U^{235} . Nell'estate del 1940 venne isolato il plutonio Pu_{94}^{239} che si ottiene dalle reazioni



Il Plutonio presentava un tempo di dimezzamento relativamente lungo (dell'ordine delle decine di migliaia di anni) Z pari e A dispari come l'Uranio 235 e si sospettava, a ragione, che potesse avere le stesse proprietà nel dar luogo alla fissione. Con un vantaggio: avendo un numero atomico diverso poteva essere separato per via chimica.

La lettera di Einstein al presidente Roosevelt per sensibilizzarlo alla necessità di battere la Germania nella produzione della bomba atomica

Si trattava dunque di produrre il Nettunio e poiché questo si poteva ottenere bombardando con neutroni l' U^{238} serviva un reattore nucleare (sorgente intensa di neutroni) per sfruttare la capacità dell'Uranio 238 di assorbire i neutroni veloci.



Albert Einstein
Old Grove Rd.
Nassau Point
Peconic, Long Island
August 2nd, 1939

F.D. Roosevelt,
President of the United States,
White House
Washington, D.C.

Sir:

Some recent work by E.Fermi and L. Szilard, which has been communicated to me in manuscript, leads me to expect that the element uranium may be turned into a new and important source of energy in the immediate future. Certain aspects of the situation which has arisen seem to call for watchfulness and, if necessary, quick action on the part of the Administration. I believe therefore that it is my duty to bring to your attention the following facts and recommendations:

In the course of the last four months it has been made probable - through the work of Joliot in France as well as Fermi and Szilard in America - that it may become possible to set up a nuclear chain reaction in a large mass of uranium, by which vast amounts of power and large quantities of new radium-like elements would be generated. Now it appears almost certain that this could be achieved in the immediate future.

This new phenomenon would also lead to the construction of bombs, and it is conceivable - though much less certain - that extremely powerful bombs of a new type may thus be constructed. A single bomb of this type, carried by boat and exploded in a port, might very well destroy the whole port together with some of the surrounding territory. However, such bombs might very well prove to be too heavy for transportation by air.

-2-

The United States has only very poor ores of uranium in moderate quantities. There is some good ore in Canada and the former Czechoslovakia, while the most important source of uranium is Belgian Congo.

In view of this situation you may think it desirable to have some permanent contact maintained between the Administration and the group of physicists working on chain reactions in America. One possible way of achieving this might be for you to entrust with this task a person who has your confidence and who could perhaps serve in an unofficial capacity. His task might comprise the following:

a) to approach Government Departments, keep them informed of the further development, and put forward recommendations for Government action, giving particular attention to the problem of securing a supply of uranium ore for the United States;

b) to speed up the experimental work, which is at present being carried on within the limits of the budgets of University laboratories, by providing funds, if such funds be required, through his contacts with private persons who are willing to make contributions for this cause, and perhaps also by obtaining the co-operation of industrial laboratories which have the necessary equipment.

I understand that Germany has actually stopped the sale of uranium from the Czechoslovakian mines which she has taken over. That she should have taken such early action might perhaps be understood on the ground that the son of the German Under-Secretary of State, von Weizsäcker, is attached to the Kaiser-Wilhelm-Institut in Berlin where some of the American work on uranium is now being repeated.

Yours very truly,
A. Einstein
(Albert Einstein)

Tutto ciò creò, da allora in poi due strategie alternative nella corsa alla fissione: il gruppo di Fermi puntava a realizzare un reattore nucleare che potesse servire oltre che a produrre energia a produrre plutonio; il grup-

po di Bohr lavorava invece sulle metodiche di separazione isotopica per produrre ingenti quantità di U^{235} .

Le due ipotesi ebbero entrambe successo e il risultato fu la doppia tragedia di Hiroshima (bomba all'Uranio) e Nagasaki (bomba al Plutonio), la seconda delle quali, si sottolinea in ambito storico, sganciata esclusivamente per completare la sperimentazione, nonostante la sua fattibilità fosse già stata provata sul piano prototipale a Los Alamos. ⁴

Nel marzo 1941 vennero resi disponibili (tramite acceleratori) i primi microgrammi di Plutonio e si verificò che le ipotesi di Bohr erano corrette: effettivamente, esso subisce la fissione con i neutroni termici e, addirittura, ha una sezione d'urto maggiore dell' U^{235} .

Diventò allora inevitabile sviluppare la macchina Uranio Grafite di Fermi per acquisire le conoscenze sui reattori nucleari necessarie a produrre plutonio in grande quantità.

Sul finire del '41 alla Columbia University di New York venne costruita la prima pila atomica. Il fattore di moltiplicazione iniziale dei neutroni fu di 0.87. ⁵

Costruito il prototipo venne presa la decisione di spostare le ricerche su Chicago dove Fermi si trasferì nell'aprile del '42 mentre il progetto U(ranio) passò sempre più dalle mani incerte dei fisici a quelle organizzate dei militari e divenne dimensionalmente ed economicamente sempre più rilevante (a partire dall'entrata in guerra degli Usa nell'estate 1941).

Venne dapprima raggiunto il valore di $k = 1$ in condizioni di non autosostenibilità della reazione e si passò infine alla realizzazione della macchina, per ragioni di sicurezza, sotto una tribuna dello stadio di Chicago. Il 2 dicembre 1942 la prima pila atomica entrò in funzione e rimase attiva per 28' con una potenza di 0.5 W.

Si trattava di una struttura a forma di ellissoide di rotazione di semiassi di 3.9 e 3.1 m costituita da strati di grafite alternati a strati misti di grafite e ossido di uranio. La reazione veniva controllata attraverso 10 sbarre di cadmio (materiale in grado di spegnere la reazione data l'alta capacità di assorbire i neutroni). La scelta sferoidale serviva a minimizzare la superficie esterna e con essa la probabilità di fuga dei neutroni necessari a sostenere la reazione.

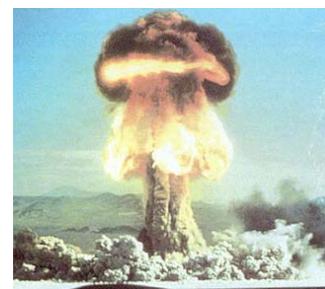
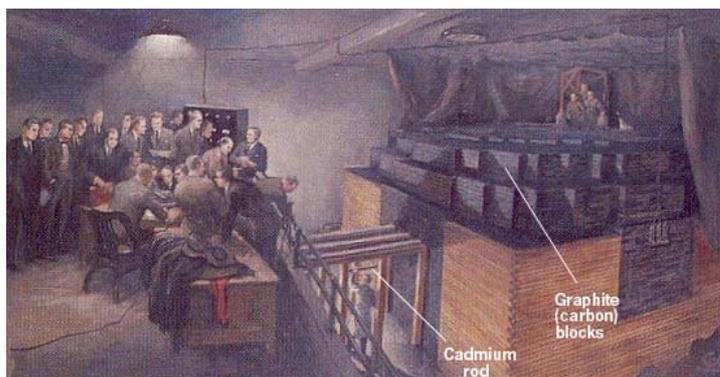
Dimostrata la fattibilità si passò alla fase realizzativa e nacque il famoso progetto Manhattan (dal nome dell'ufficio di Manhattan del comitato per l'Uranio) con i laboratori di Los Alamos nel New Mexico e due grandi

⁴ Questa faccenda viene solitamente trascurata quando si parla della bomba. Io penso che possa essere oggetto di dibattito storico la opportunità o meno di sganciare la bomba di Hiroshima, ma sul test di Nagasaki credo si possa solo inorridire.

Osservo ancora che l'idea di produrre Plutonio tramite reattori è il tema che preoccupa ancora oggi in relazione agli impianti nucleari dei cosiddetti paesi emergenti (Corea, Pakistan, Israele, Iran) e che esso ha fatto da scusa per l'intervento in Iraq.

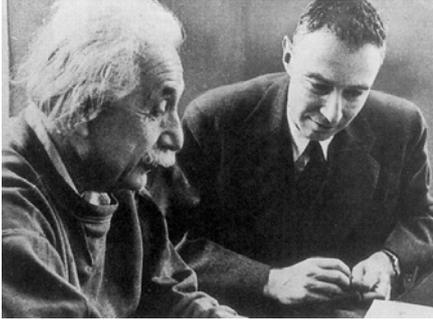
⁵ La reazione si autosostiene se $k \geq 1$

Un disegno che ricostruisce la messa in funzione della prima pila atomica nel dicembre 1942; non esistono, per ragioni di segretezza, immagini fotografiche



La prima esplosione atomica ad Alamogordo in New Mexico

strutture per l'arricchimento dell'Uranio a Oak Ridge e a Hanford rispettivamente.



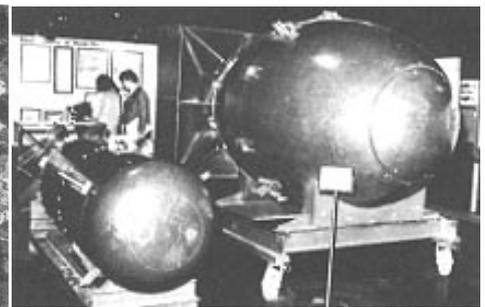
Robert Oppenheimer, qui con Einstein, fu poi perseguitato ai tempi del maccartismo e accusato di attività antiamericane. Fermi sulla vicenda mantenne un atteggiamento ambiguo

A Los Alamos si trasferì il grosso della comunità dei fisici sotto la direzione di Robert Oppenheimer; a Oak Ridge nel Tennessee giunsero lavorare circa 40'000 persone nei tre impianti di separazione isotopica (elettromagnetico, termodinamico e di centrifugazione gassosa); qui fu costruita la bomba utilizzata ad Hiroshima; infine a Hanford nello stato di Washington furono realizzati i reattori e gli impianti per la produzione e la separazione del plutonio (impianti rimasti in esercizio sino alla fine degli anni 80).

Tra il 1943 e il 1945 furono risolti i diversi problemi di realizzazione di reattori di potenza per produrre il plutonio e furono utilizzati in maniera combinata i diversi processi di arricchimento. Nel frattempo furono affrontate tutte le problematiche legate alla modalità di detonazione (come arrivare rapidamente e in maniera efficace alla massa critica).

A guerra già terminata in Europa vennero terminati i test nel deserto del New Mexico e poi, nell'estate del 45, a distanza di una quindicina di giorni l'una dall'altra furono colpite le due città di Hiroshima e Nagasaki.

Le due fotografie di Nagasaki prima e dopo non hanno bisogno di commenti.



Modelli delle due bombe in scala naturale: a sinistra **Little Boy** e a destra **Fat Man** le due bombe all'Uranio e al Plutonio sganciate su Hiroshima e Nagasaki il 6/8/45 (100'000 morti) e il 9/8/45 (70'000 morti).

Queste bombe con potenze del kton (migliaia di tonnellate equivalenti di tritolo) sono *caramelle* rispetto a quelle degli arsenali messi insieme negli anni 50 e 60 dalle due superpotenze (Mton) e montate come testate di missili intercontinentali. Ora che il pericolo è passato possiamo tirare un sospiro di sollievo; ma non dimenticare.



3.4 Energia nucleare da fissione

3.4.1 UN GLOSSARIO SULLA FISSIONE A MO' DI INTRODUZIONE

Per discutere con un minimo di dettaglio di problematiche della fissione è opportuno familiarizzarsi con alcuni termini tecnici che la riguardano.

Avvelenamento del reattore: consiste nella comparsa all'interno del core del reattore di isotopi radioattivi dotati di una altissima sezione d'urto per la cattura dei neutroni (in particolare lo Xe^{135} prodotto dal decadimento beta dello I^{135} con vita media di 6.5 h) e dunque in grado di spegnere la reazione.

Dopo la cattura del neutrone lo Xe^{135} si trasforma in Cs^{135} con una vita media di circa 9 ore ed esiste pertanto un tempo di avvelenamento di un reattore a basso regime durante il quale la presenza dello Xe impedisce materialmente al reattore di riprendere potenza.

Durante il funzionamento normale del reattore lo Xe non avvelena la reazione perché l'elevato flusso neutronico lo costringe a seguire una diversa via di decadimento. L'avvelenamento fu osservato per la prima volta già con la pila di Fermi, è tipico dei reattori a grafite, e come si vedrà ha avuto un ruolo centrale nell'incidente di Chernobyl.

Barre combustibili: combustibile nucleare composto dal materiale fissile allo stato metallico o di ossido.

Cattura radioattiva: è il fenomeno per cui il nuclide cattura un neutrone, cambia caratteristiche ed emette l'energia in eccesso tramite un raggio γ .

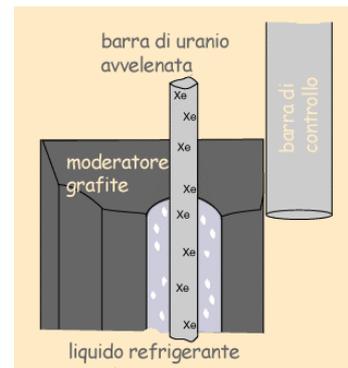
Cattura di risonanza: durante il processo di rallentamento, i neutroni acquistano una energia pericolosa per la loro sorte; infatti per energie comprese tra 1 e 100 eV l' U^{238} presenta una elevata sezione d'urto per la cattura neutronica. Per questa ragione si fa in modo di circondare le barre di combustibile con il moderatore in modo che il rallentamento avvenga in zone a scarsa presenza di uranio. Già Fermi si rese conto di questo problema e lo risolse mescolando tra loro moderatore e combustibile.

Fluido di trasporto del calore: si può usare acqua, acqua bollente pressurizzata, acqua pesante o sodio liquido (quando si ha una elevata produzione di energia per unità di volume a causa della capacità del sodio metallico di andare rapidamente in equilibrio).

Materiale fertile: isotopo radioattivo che, pur non essendo fissile (vedi), può facilmente essere trasformato in materiale fissile.

Materiale fissile: isotopo radioattivo che, per bombardamento neutronico, subisce la fissione. Tipicamente sono fissili U^{235} , U^{233} , Pu^{239} , Pu^{241} . Ma lo è anche, in determinate condizioni U^{238} .

Fattore di moltiplicazione: numero di neutroni efficaci che vengono liberati in ogni singola fissione indotta da un neutrone.



Lo Xenon¹³⁵ che si forma nel decadimento dello Iodio¹³⁵ inquina il reattore a causa della elevatissima capacità di assorbire neutroni

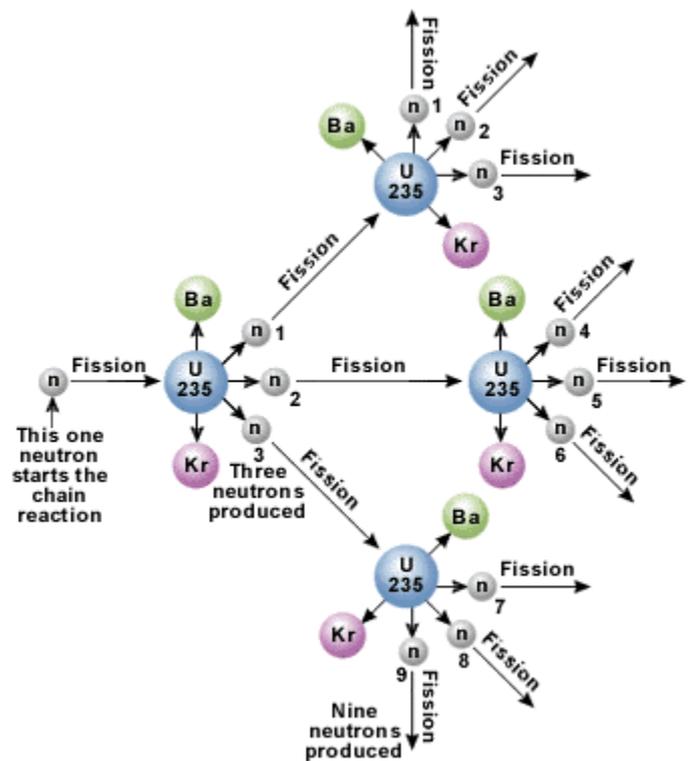
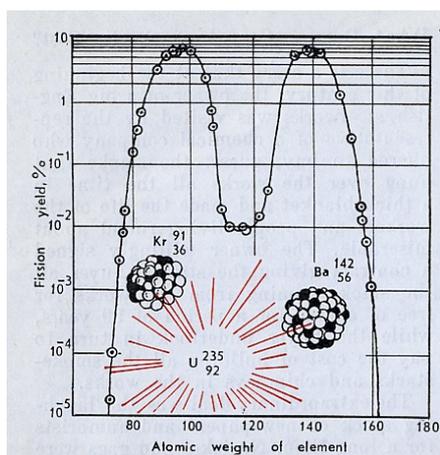
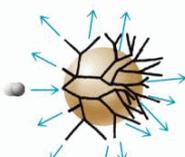


Diagram to show the chain reaction during the fission of uranium-235 with a neutron

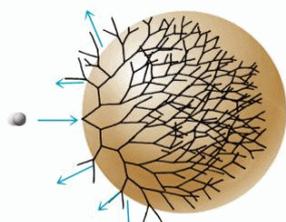
Il meccanismo della fissione dell'Uranio 235 con la produzione tipica dei 3 neutroni per ogni evento e la conseguente reazione a catena



La fissione dell' U^{235} produce **coppie di frammenti** di diverso genere con le probabilità percentuali indicate in figura. Prestare attenzione al fatto che la scala sulle ordinate è **logaritmica**

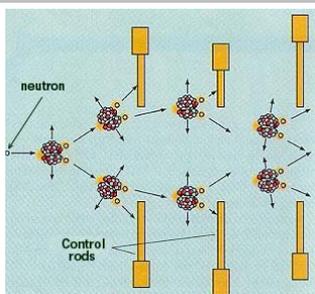


In una piccola massa di uranio la probabilità che i neutroni fuggano all'esterno è elevata



In una grande massa di uranio la probabilità che i neutroni fuggano all'esterno è più bassa

Il concetto di **massa critica** (quantitativo minimo di materiale fissile in grado di produrre la reazione a catena) si basa sul fatto che al crescere di r la probabilità di produrre fissioni è legata al volume (va come r^3) mentre la probabilità di perdere neutroni all'esterno è legata a S e va come r^2



Le **barre di controllo** hanno la funzione di moderatori della reazione e funzionano sul principio di diminuire il fattore di moltiplicazione attraverso l'assorbimento di neutroni. Se vengono inserite nel *core* la reazione rallenta e viceversa

Fissione: reazione per cui un isotopo sottoposto ad irradiazione neutronica assorbe il neutrone e si spezza in due frammenti di numero di massa tra 120 e 160 e tra 70 e 110 insieme ad un numero variabile (da due a tre) di altri neutroni. I frammenti subiscono da 3 a 4 decadimenti prima di raggiungere la stabilità ed hanno tempi di dimezzamento sino a qualche anno. Nella immagine qui a lato è rappresentato l'andamento della distribuzione dei frammenti di fissione al variare del numero di massa. Sono molto probabili le coppie di frammenti prossime a 142 e a 91.

Massa critica: quantità di materiale fissile al di sopra della quale la reazione a catena si autosostiene (la probabilità di impatto tra i neutroni e i nuclei di U cresce come r^3 ; la probabilità di fuga inefficace dei neutroni cresce come r^2). Si ricordi che la sfera è il solido con il massimo di volume e minimo di superficie. Al crescere di r cresce dunque il fattore di moltiplicazione finché si arriva a 1 in corrispondenza della massa critica. Nel caso dell'uranio occorrono dai 5 ai 10 kg per raggiungere la massa critica, mentre per il plutonio ne basta meno della metà.

Moderatore (rallentatore) dei neutroni: sostanza in grado di far diminuire molto rapidamente l'energia cinetica dei neutroni originati dalla fissione. Deve avere basso potere di cattura e massa il più possibile simile al neutrone. Va bene il deuterio, non va bene l'idrogeno che tende a catturare i neutroni formando il deuterio. In alcuni tipi di reattori si usa carbonio cristallizzato come grafite.

Moderatore della reazione: sostanza che, essendo dotata di elevata capacità di cattura neutronica fa abbassare il fattore di moltiplicazione. Viene usata per costruire le *barre di controllo* (Boro, Cadmio).

Neutroni istantanei: sono i neutroni emessi entro un tempo tipico di 10^{-14} s dalla fissione da parte dei due frammenti che hanno un eccesso di neutroni rispetto a Z . Giocano un ruolo fondamentale nella reazione a catena perché contribuiscono ad ulteriori fissioni

Neutroni ritardati: sono neutroni emessi da frammenti con tempi di decadimento tra 10^{-2} s e 100 s e sono circa l'1% del totale. Possono creare problemi nei tempi di risposta durante il controllo della reazione.

Neutroni termici: neutroni con energia cinetica media dell'ordine di $3/2 k_B T$ con $T \approx 300$ K. Corrisponde a circa 0.03 eV.

Reattori autofertilizzanti: (*fast breeder*, o reattori a *neutroni veloci*) sono reattori che mentre producono energia contemporaneamente trasformano in materiale fissile una quantità di materiale fertile più alta del combustibile consumato (vedi).

Reazione a catena: processo di ripetizione rapida della fissione con crescita esponenziale che si verifica quando il fattore di moltiplicazione è > 1 .

Riflettore: componente di confine del *core* deputato ad evitare la dispersione verso l'esterno dei neutroni; circonda solitamente le barre combustibili ed è fatto solitamente di materiale metallico a bassa cattura.

Sezione d'urto: si misura in barn (10^{-24} cm²) e ci indica la probabilità di interazione.

Uranio arricchito: si tratta di uranio sottoposto ad un processo di incremento dell' U^{235} rispetto al 238. Nel caso dei reattori si punta ad arri-

vare al 3÷5 % mentre nel caso della bomba, in cui bisogna garantire un fattore di moltiplicazione elevato, si opera con U²³⁵ o Pu²³⁹ pressoché puri.

Uranio impoverito: si tratta del residuo di uranio 238 dopo i processi di arricchimento. A causa delle proprietà fisiche dell'uranio (densità, durezza, ...) è stato usato per costruire involucri dei proiettili di artiglieria.

3.4.2 PROBLEMATICHE DELLA FISSIONE CONTROLLATA ED ESPLOSIVA

Trattando di fissione il primo elemento da sottolineare riguarda la forte diversità di comportamento tra U²³⁵ e U²³⁸.

I due principali isotopi dell'Uranio naturale hanno concentrazioni, in natura, molto diverse (0.7% contro 99.3 %) a causa dei tempi di dimezzamento molto diversi che fanno sì che l'U²³⁵ si sia consumato più in fretta.

Inoltre l'U²³⁸ subisce la fissione solo per urto con neutroni di alta energia (e anche in tal caso con una sezione d'urto non elevata come si vede nell'immagine qui a lato).

In compenso, al di sotto del MeV, l'U²³⁸ è un buon assorbitore di neutroni. Questo fatto è interessante se il reattore serve a produrre Plutonio, ma è invece negativo se serve a produrre energia perché i neutroni assorbiti non saranno più disponibili per la fissione. Questa capacità dell'U²³⁸ di catturare neutroni mentre è in corso il loro processo di rallentamento determina, nel caso dei reattori nucleari, la necessità di separare le zone di produzione dalle zone di rallentamento e di operare con uranio arricchito

Dal punto di vista che ci interessa l'U²³⁵ ha un comportamento opposto come si vede nella tabella qui a lato: la sua sezione d'urto per la fissione cresce al decrescere della energia dei neutroni e comunque non dà luogo a cattura neutronica. Dunque l'uranio 235 è ideale per la fissione mentre il 238 avendo probabilità di cattura diversa da zero, nella maggioranza dei casi è di ostacolo alla fissione.

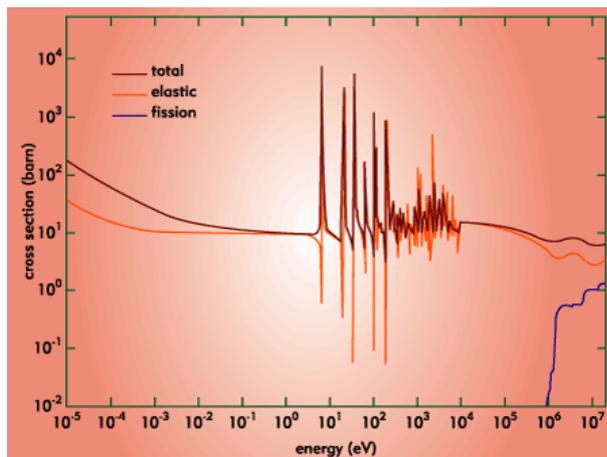
3.4.3 COME FUNZIONA LA BOMBA NUCLEARE

La bomba a fissione (impropriamente denominata bomba atomica) sfrutta le potenzialità della reazione a catena e in particolare la rapidità (di tipo esponenziale) del processo di fissione.

La energia rilasciata nel processo di fissione dell'Uranio si ripartisce, grosso modo, nei seguenti rapporti:

- Energia cinetica dei frammenti 167 MeV
- Energia dei γ istantanei 8 MeV
- Energia cinetica dei neutroni prodotti..... 8 MeV
- Energia dei γ del decadimento dei frammenti..... 7 MeV
- Energia dei β del decadimento dei frammenti 7 MeV
- Energia degli antineutrini 7 MeV

per un totale di circa 200 MeV ($\approx 3.2 \cdot 10^{-11} J$) per ogni nucleo che subisce la fissione. Questa energia va però rapportata alla scala macroscopica su cui viene utilizzata.



Andamento della sezione d'urto dell'U²³⁸ per i neutroni al variare della energia. In blu fissione (che avviene solo per energie sopra il MeV). In rosso collisioni elastiche. In nero il valore totale. La differenza tra il nero e il rosso corrisponde alla cattura (molto pericolosa la zona ben visibile delle risonanze in cui si ha un'alta probabilità di cattura dei neutroni)

Energia	U ²³⁵		U ²³⁸	
	Urto elastico	Fissione	Urto elastico	Fissione
veloci MeV	58%	42%	67%	33%
risonanza 7eV	42%	58%	45%	55% cattura
termici 0.03 eV	25%	75%	100%	



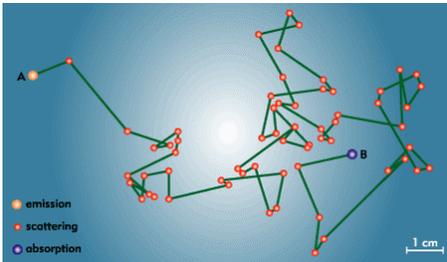
Immagine dall'alto di Hiroshima prima e dopo l'esplosione che la distrusse con la bomba all'U²³⁵ fatta esplodere a 600 m d'altezza

1 kg di $U^{235} = 1000/235 = 4.26$ moli/kg = $4.26 \cdot 6.02 \cdot 10^{23}$ nuclei/kg = $2.56 \cdot 10^{24}$ nuclei/kg = $2.56 \cdot 10^{24} \cdot 3.2 \cdot 10^{-11} = 8.2 \cdot 10^{13}$ J/kg = $8.2 \cdot 10^7$ MJ/kg.

Il potere energetico per unità di massa dei combustibili tradizionali è invece:

- Legno.....16 MJ/kg
- Gas naturale39 MJ/m³
- Carbone puro.....30 MJ/kg
- Petrolio45 MJ/kg

Per produrre la reazione a catena di tipo esplosivo occorre fare in modo che il fattore di moltiplicazione dei neutroni disponibili per produrre altre fissioni sia maggiore di 1.



Il cammino dei neutroni nel reattore è fatto di urti elastici (cammino libero medio di circa 1 cm) durante i quali si ha cessione di energia sino alla cattura che può essere finalizzata alla fissione se avviene con U^{235} o alla catena di produzione di Plutonio se avviene con U^{238}

Ma il fattore di moltiplicazione dei neutroni deve fare i conti con il rischio che un neutrone prodotto si riveli inefficace (perché viene catturato o perché sfugge). Contro il rischio di cattura si tende ad operare con materiale fissile allo stato quasi puro; contro il rischio di uscita all'esterno si opera con geometrie sferiche e si fa in modo di circondare il materiale fissile con uno schermo metallico riflettente.

Come si è già osservato nel glossario, la probabilità che un neutrone sfugga all'esterno dipende dalla quantità di materiale preso in esame. Teoricamente se questo avesse dimensioni infinite si avrebbe che il fattore di moltiplicazione è pari al numero medio di neutroni prodotti in ogni fissione (i fisici parlano in quel caso di k_{∞}). Per quantità finite di materiale fissile esiste un valore di massa, detto *massa critica*, che rende il valore di k significativamente > 1 e ciò determina la reazione esplosiva.

Naturalmente, perché ciò accada occorre fare in modo che la liberazione di energia avvenga molto rapidamente, prima che la esplosione faccia allontanare i nuclei con il conseguente calo del fattore di moltiplicazione.

Le tecniche di passaggio da una *massa subcritica* ad una *massa critica* sono state di difficile soluzione oltre che oggetto di spionaggio: esse si basano comunque sull'utilizzo di una opportuna esplosione o implosione che avvicini rapidamente le due masse.

Per fare un esempio, supponiamo che la vita media di una generazione di neutroni sia di 10^{-7} s e supponiamo che il fattore di moltiplicazione sia $k = 2$. In un tempo 100 volte superiore (10^{-5} s) si produrranno allora 100 generazioni di neutroni e dunque in 10^{-5} secondi si avranno, nella ipotesi che tutti i neutroni producano una fissione, un numero di fissioni $N = 1 + 2 + 2^2 + 2^3 + \dots + 2^{100} = 2^{101} \approx 2.54 \cdot 10^{30}$

La corrispondente liberazione di energia sarebbe pari a:

$$3.2 \cdot 10^{-11} \cdot 2.54 \cdot 10^{30} = 8.1 \cdot 10^{19} \text{ J}$$

La potenza media di questa esplosione sarebbe di

$$8.1 \cdot 10^{19} \text{ J} / 10^{-5} \text{ s} = 8.1 \cdot 10^{24} \text{ W}$$

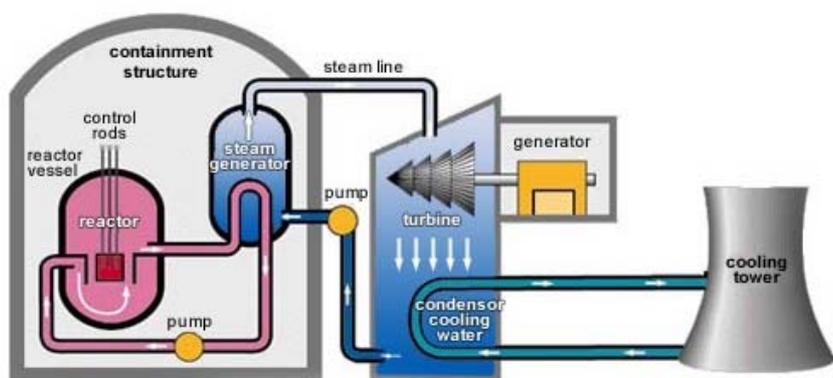
(si tenga presente che la energia rilasciata in un grande impianto nucleare di potenza è di $4 \cdot 10^9$ W cioè un milione di miliardi di volte inferiore.

D'altra parte per fare $2.54 \cdot 10^{30}$ fissioni ci vogliono $4.2 \cdot 10^6$ moli di U^{235} e cioè circa 10^6 kg (mille tonnellate) e dunque occorrerebbe una quantità di uranio nettamente superiore.

In effetti gli ordigni nucleari hanno potenze tipiche, misurate in kton e Mton equivalenti di tritolo e sono realizzate con quantità di materiale fissile dell'ordine di qualche kg.

3.4.4 COME FUNZIONA UN REATTORE NUCLEARE

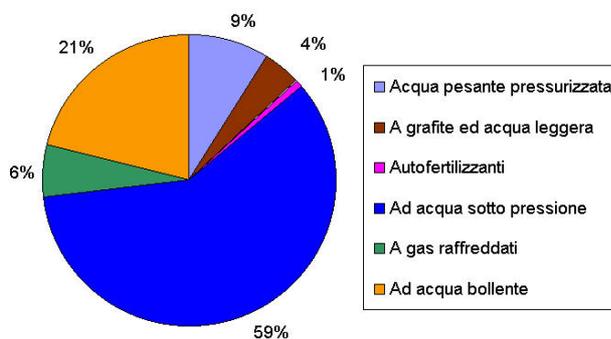
Come si è visto i primi reattori hanno avuto esclusivamente o una funzione finalizzata alla produzione del Plutonio, per le bombe, o una finalità di ricerca scientifica. Ma, a partire dai primi anni 50 del '900, si è passati alla loro applicazione su larga scala come produttori di energia (per le centrali elettriche ma anche per sommergibili e navi rompighiaccio). Il reattore, in un impianto nucleare ha le stesse funzioni della caldaia di un impianto tradizionale a combustibile fossile. Le sue parti principali sono il nocciolo (*core*), il moderatore, le barre di controllo, un fluido di raffreddamento e trasporto, la schermatura.



Schema di impianto di una centrale nucleare del tipo PWR con impianto separato di produzione del vapore. Si tratta del tipo di reattore nucleare più diffuso al mondo con il 59% di energia prodotta.

Il nocciolo contiene le barre di combustibile: tipicamente un reattore da 1'000 MW contiene circa 75 tonnellate di uranio.

Della funzione delle barre di controllo si è già ampiamente detto; il fluido trasporta il calore a un bollitore separato che produce il vapore necessario al funzionamento delle turbine, il fluido fa spesso anche da moderatore dei neutroni. In base al II principio della termodinamica che connette il rendimento teorico al rapporto T_2/T_1 delle temperature assolute della sorgente fredda e calda, è necessaria la presenza delle grandi torri di raffreddamento a forma di iperboloidi sempre visibili nelle fotografie dei grandi impianti nucleari.



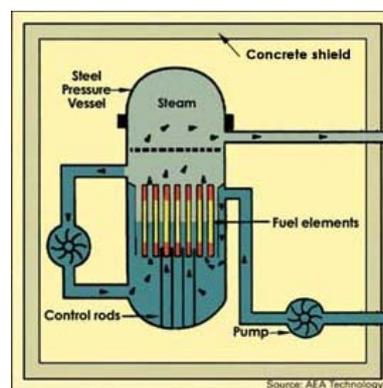
Ripartizione della energia nucleare prodotta ripartita per tipologia di impianto.

Come si vede nella immagine qui a lato esistono al mondo diverse tipologie di reattore che si distinguono prevalentemente rispetto alla modalità di trasporto del calore.

Reattori BW (boiling water): non c'è separazione tra il fluido di trasporto e il bollitore in cui si produce il vapore per il funzionamento della turbina.

Reattori PW (pressurised water): è il caso della figura dello schema generale. L'acqua viene mantenuta in pressione in modo che non bolla nonostante temperature intorno ai 300°C mentre un secondo circuito separato produce il vapore.

Reattori PHW (pressurised heavy water): differiscono dal tipo precedente per il fatto di usare come fluido primario l'acqua pesante; poiché il de-



Schema di reattore ad acqua bollente. I due tipi più diffusi PW e BW utilizzano uranio arricchito

terio non cattura i neutroni ciò consente di usare come combustibile uranio non arricchito.

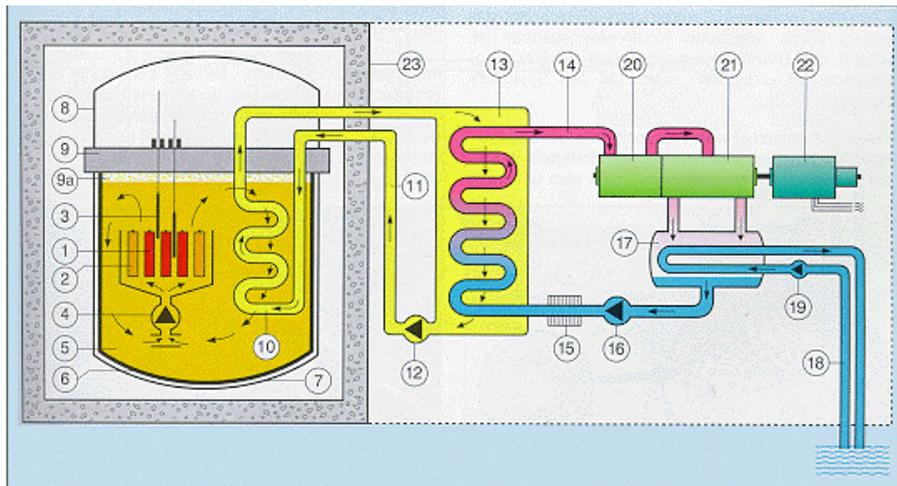
Reattori GC (*gas cooled*): utilizzano come fluido di trasporto anidride carbonica e come moderatore la grafite. Funzionano ad uranio naturale.

Reattori LWG (*light water graphite*): utilizzano come fluido di trasporto acqua leggera e come moderatore la grafite. Funzionano ad uranio naturale o debolmente arricchito.

Reattori FB (*fast breeder*): fertilizzanti a neutroni veloci; sono le macchine che potrebbero garantire, se opportunamente perfezionate e rese sicure la soluzione del fabbisogno di combustibile primario.

Il core è costituito da Plutonio (1) circondato da Uranio 238 (2) e per ogni 4 nuclei di Plutonio che partecipano alla fissione se ne formano altri 5 per effetto della cattura neutronica da parte dell'Uranio.

Non c'è moderatore perché vengono utilizzati i neutroni veloci. Il rendimento energetico (oltre alla produzione di nuovo combustibile) è molto elevato (prossimo al 40%) ed è molto elevata anche la produzione di calore per unità di



Schema di SuperPhoenix

1) Materiale fissile 2) Materiale fertile 3) Barre di controllo 4) e 5) Circuito primario del Sodio 6) Contenitore 7) Protezione 8) 9) Coperchio 10) Scambiatore sodio-sodio 11) e 12) Circuito secondario del sodio 13) e 14) Generatore e circuito del vapore 15) e 16) ritorno 17) Condensatore 18) e 19) Circuito di raffreddamento

volume.

Per questa ragione è necessario utilizzare come fluido di trasporto del sodio liquido e questo fatto rende particolarmente critico tutto il processo di scambio (si pensi alla altissima reattività del sodio verso l'acqua e al fatto che i metalli in cui viene fatto scorrere sono a loro volta sottoposti ad un intenso flusso neutronico). Ciò spiega le difficoltà nello sviluppo di questa tecnologia e lo sdoppiamento del circuito del sodio (10,11,12).

Di questo genere di reattori non si potrà fare a meno in futuro. Oggi esiste al mondo il solo *SuperPhoenix* in Francia al cui progetto, prima del referendum antinucleare promosso sull'onda dell'emozione per il disastro di Chernobyl partecipava anche l'Italia.

3.4.5 L'INCIDENTE DI CHERNOBYL DEL 26 APRILE 1986

L'incidente di Chernobyl del 26 aprile 1986 ha segnato una svolta sia nella storia del nucleare nel mondo (per la emozione suscitata e per l'atteggiamento di rifiuto che ne è seguito), sia nella riflessione sulla necessità di pensare ad un uso della energia nucleare basato su tecnologie e standard di comportamento intrinsecamente sicuri.⁶

A Chernobyl c'erano 4 reattori, relativamente recenti, ma tecnologicamente piuttosto obsoleti come per altro l'intero sistema sovietico in fase di decadenza e prossimo al crollo.

Si trattava di 4 reattori per una potenza elettrica nominale di 4'000 MW realizzati tra il 1970 e il 1983 e del tipo LWG cioè ad acqua leggera e con

⁶ Per le informazioni ho consultato, oltre che i documenti ufficiali, il saggio di Roberto Renzetti disponibile all'indirizzo <http://www.fisicamente.net/index.html>

moderatore di grafite. Il reattore interessato, il numero 4, aveva solo 3 anni di vita. La tipologia del reattore costituisce un dato importante per capire l'accaduto che è stato dovuto ad un *mix di ritardo tecnologico, avventurismo ed errore umano*; il tutto seguito, nel migliore stile tardo sovietico, dalla *disinformazione più totale verso le popolazioni e il personale* intervenuto per gestire la prima emergenza.

La notizia dell'incidente venne diramata con due giorni e mezzo di ritardo dopo che l'aumento di radioattività misurato in una centrale scandinava a nord di Stoccolma, eseguiti tutti i controlli, risultava non imputabile alla centrale stessa ma, più probabilmente, a qualche evento accaduto in URSS. A quel punto una nube radioattiva stava già viaggiando in alta quota per l'intera Europa.

E' difficile stabilire se i maggiori disastri siano avvenuti nella dinamica che ha determinato l'incidente o nel gestire l'emergenza. Personalmente propendo per la prima ipotesi. Vediamo perché.

I reattori a grafite hanno un problema intrinseco di sicurezza: in caso di incidente al circuito di raffreddamento la moderazione dei neutroni non si interrompe ma continua ad opera della grafite; pertanto se il circuito di trasporto del calore *va in tilt* si può rapidamente produrre la fusione del *core* perché la produzione di energia prosegue mentre la stessa non viene rimossa dal nucleo; anzi, poiché una parte dei neutroni è normalmente assorbita dall'acqua, quando essa non circola più e si formano bolle di vapore aumenta il numero di neutroni disponibili e pertanto la reazione procede più velocemente.

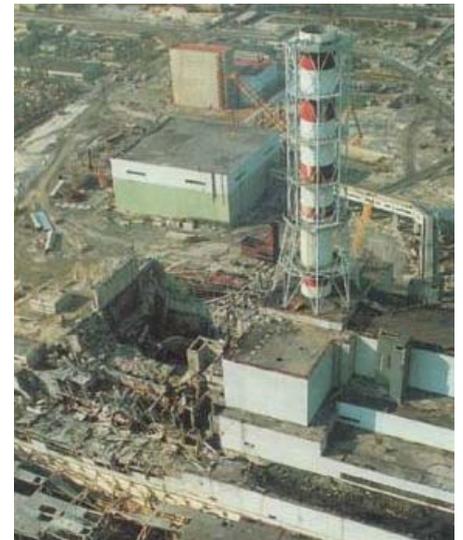
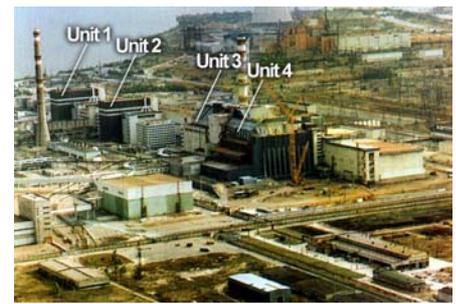
L'unica sicurezza può venire dalla rapidità di intervento delle barre di controllo che però, nel caso di Chernobyl, avevano un tempo di latenza di 20 s contro i max 2 previsti in occidente.

La situazione è totalmente diversa nei reattori in cui il fluido fa anche da moderatore: se il fluido non circola correttamente, non c'è più moderazione dei neutroni e la reazione si attenua.

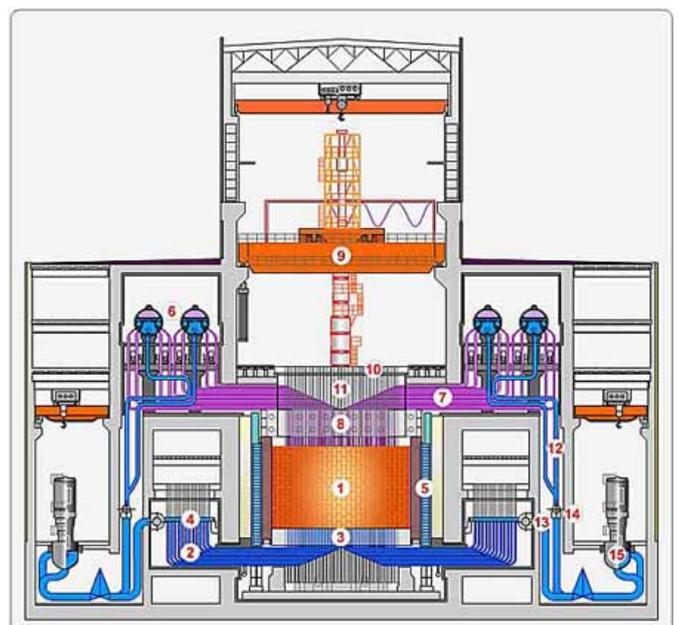
Inoltre nel reattore di Chernobyl non esisteva una cupola di contenimento contro il rischio che l'incendio delle barre di grafite potesse disperdere in atmosfera grandi quantità di elementi radioattivi insieme ai fumi della combustione. C'era uno spesso e pesante tetto di acciaio (n. 9 nella figura) che saltò alla prima esplosione e ricadde in verticale peggiorando la distruzione del *core*.

Un ultimo problema di questi reattori, cruciale per capire la dinamica dell'incidente, è che sono intrinsecamente instabili quando operano a bassa potenza a causa dell'avvelenamento da Xenon: ciò significa che la loro risposta in termini di potenza erogata ai comandi dei sistemi di controllo non è ben regolabile e nemmeno immediata.

Ma veniamo ai fatti: la prima cosa da dire è che non si è trattato di un incidente connesso al funzionamento del reattore, ma piuttosto di uno *scellerato esperimento finito male*. Poiché i reattori LWG hanno i problemi di sicurezza citati, si stava tentando di verificare la capacità del reattore (in

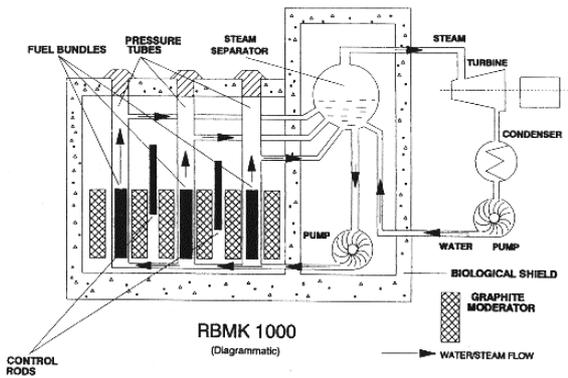


Il sito prima e dopo l'incidente
Nella immagine superiore si vedono i 4 reattori affiancati e in quella inferiore il reattore n. 4 subito dopo lo spegnimento degli incendi



Caratteristiche del reattore
1500 tonnellate di grafite con 1'700 canali che ospitano le barre di combustibile e i passaggi per l'acqua.
Oltre ai due sistemi di refrigerazione esiste un sistema di emergenza che era stato disattivato per condurre l'esperimento
Si noti indicato dal 9 il tetto in acciaio

regime di bassa potenza) di produrre autonomamente energia sufficiente al funzionamento dei sistemi di sicurezza.



Schema di metà core del reattore

I sistemi di raffreddamento erano due ma il secondo era inattivo perché il reattore era in manutenzione al momento dell'incidente. Le pompe devono far funzionare il circolo dell'acqua e per funzionare hanno bisogno di molta energia che viene dalla potenza elettrica generata dall'impianto stesso.

Erano stati spenti i generatori diesel per le pompe di sicurezza perché si voleva testare la capacità della turbina del reattore di far fronte da sola alla emergenza. L'esperimento fu tentato in una condizione di barre di combustibile quasi esaurite (cioè con una grande presenza di prodotti di fissione e dunque di Xe) e ciò determinò un peggioramento della instabilità del sistema che, portato a bassa potenza, divenne inerte rispetto alla possibilità di ridare rapidamente potenza alla turbina.

L'esperimento consisteva nel tentare di ridare potenza al reattore a basso regime tentando di sollevare le barre di controllo (e ciò in condizione di instabilità è molto pericoloso perché può aversi un brusco aumento della energia termica prodotta mentre le pompe non riescono, per mancanza di energia elettrica, a portar via il calore prodotto).

Si genera una controreazione positiva con un brusco aumento di temperatura e, se non intervengono rapidamente i sistemi di sicurezza, si determinano:

- blocco della circolazione del fluido di trasporto del calore
- incendio della grafite
- esplosione del sistema
- fusione del nocciolo fonde e sprofondamento dello stesso.

A Chernobyl il processo, una volta iniziato è stato così rapido, nel determinare rotture all'interno del core che le barre di emergenza non sono riuscite, neanche per gravità, a penetrare nelle loro sedi a causa della rottura delle sedi stesse e delle elevate pressioni indotte dalla reazione che ha raggiunto 100 volte la potenza nominale in pochi secondi.

Era la 1.23'20" del 26 aprile.

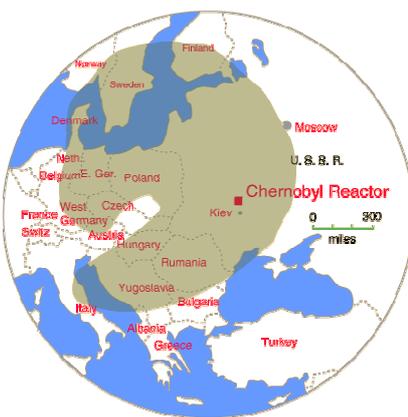
In 20 s dall'inizio della emergenza il tetto di contenimento, un monoblocco da 2'000 tonnellate di acciaio fu spazzato via dalla prima esplosione dovuta al vapore surriscaldato.

Il tetto ricadde di costa danneggiando ulteriormente il core e dopo pochi secondi una seconda esplosione dovuta all'idrogeno spazzò in aria il 35% della grafite incendiata mista ad elementi delle barre con tutti i prodotti di fissione altamente radioattivi in esse accumulati.

Si è calcolato che in questa esplosione siano stati proiettati l'equivalente di circa 20'000'000 Curie (equivalenti, ricordiamolo, a 20'000 kg di Radio); in parte essi ricaddero con i materiali pesanti nelle zone limitrofe e in parte presero la direzione di nord est ed entrarono nella circolazione atmosferica.

Il primo obiettivo fu quello di spegnere gli incendi visto che c'erano in funzione altri 3 reattori con un totale di 3'000 kg di Plutonio e 700'000 kg di Uranio.

Il passo successivo fu quello di individuare il core fuso e sprofondato di 4 metri e poi sigillare il tutto in una grande bara di calcestruzzo.



La zona di Europa interessata dalla nube di Chernobyl.

Per effetto diretto dell'incidente si sono avuti 31 morti nel primo anno e 9 nei successivi per effetto della esposizione molto elevata alle radiazioni (personale addetto alle operazioni di sgombero).

Si sono poi avuti oltre 900 casi di tumore della tiroide nei bambini, dovuti allo Iodio¹³¹, con 100 casi mortali. In un raggio di 50 km dalla centrale, la cosiddetta zona rossa presenta livelli di contaminazione molto differenziati e distribuiti a macchia di leopardo con valori da 1 a 100 rispetto ai livelli di guardia.

Tra i contaminanti pericolosi bisogna citare:

- lo I¹³¹ che si fissa nella tiroide ed ha un tempo di dimezzamento di 8 giorni: pertanto è molto attivo nella fase immediatamente a ridosso del rilascio ed è stato il responsabile dei tumori della tiroide nei bambini.
- il Cs¹³⁷ con $T_{1/2} = 30$ anni che dà luogo a inquinamenti di qualche secolo e che, confuso con il potassio per la notevole somiglianza chimica, finisce per entrare nel metabolismo cellulare elettrolitico dei viventi.
- lo Sr⁹⁰ con proprietà simili a quelle del Cs e che si mimetizza con il Ca dando luogo ad accumulo nelle ossa. Per fortuna è molto meno volatile e pertanto lo si riscontra in maniera pesante solo dopo le esplosioni nucleari.

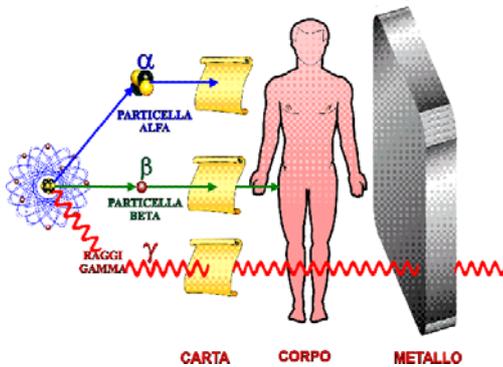
3.5 Misura delle radiazioni ionizzanti

3.5.1 EFFETTI DI TIPO FISICO: ESPOSIZIONE E DOSE

Con il termine *radiazioni ionizzanti* si intende genericamente qualunque tipo di processo energetico dovuto a particelle materiali o dovuto a fotoni che sia in grado di produrre ionizzazione della materia. Tali processi di ionizzazione possono aver luogo sia direttamente per urto, sia indirettamente come nel caso dei fotoni.

Questi ultimi interagiscono con la materia per effetto fotoelettrico, Compton e creazione di coppie. Nei 3 casi il fotone originario sparisce e al suo posto possono comparire o particelle cariche dotate di energia e/o altri fotoni dotati di energia minore che, a loro volta possono dar luogo ad ulteriori interazioni. Possiamo dire, in ultima analisi, che l'effetto finale è sempre una sequela di ionizzazioni con rilascio di energia nella materia e rottura di legami atomici e/o molecolari.

RADIAZIONI E LORO POTERE DI PENETRAZIONE



Per misurare gli effetti fisici prodotti da fasci di particelle monocromatiche ionizzanti si utilizzano grandezze fisiche diverse che hanno a che fare con: l'energia che viene irradiata (*attività* radioattiva oppure *intensità*), la quantità di carica elettrica che viene prodotta in una determinata regione (*esposizione*), la quantità di energia che viene rilasciata in una determinata regione (*dose*), la quantità di energia che viene rilasciata in una determinata regione tenuto conto del tipo di danno che quel tipo di radiazione è in grado di provocare (*dose equivalente*).

o attività e intensità di una sorgente

Una sorgente radioattiva è caratterizzata da emissione regolare di radiazioni ionizzanti ed essa viene misurata tramite la *attività* in disintegrazioni al secondo.

L'unità di misura nel sistema internazionale è il *Becquerel* (Bq) definito in s⁻¹.

Poiché, come sappiamo, la attività radioattiva dipende esclusivamente dalle caratteristiche del nuclide e dalla sua quantità secondo la relazione:

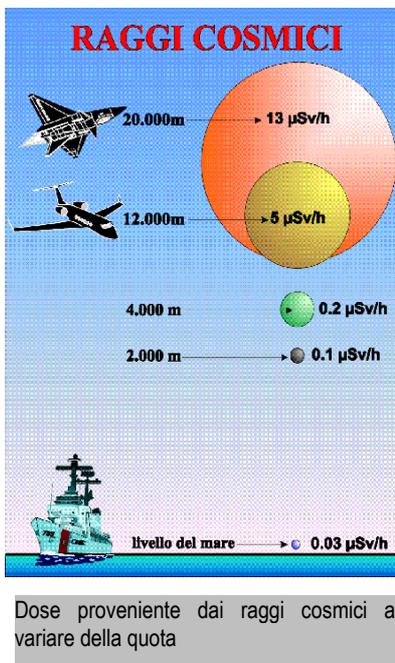
$$A = \lambda N = \frac{N}{\tau} \tag{VII.3.3}$$

vediamo che concorrono a determinare l'attività di una sorgente il tempo di dimezzamento e la quantità di materiale.

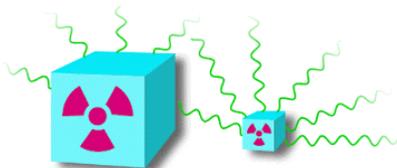
Storicamente la prima unità di attività usata faceva riferimento al radio ed era definita come attività di 1 g di Radio. Dalla conoscenza del tempo di dimezzamento e della massa atomica A si risale all'equivalente in Bq che risulta:

$$1 \text{ Curie} = 3.7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} \tag{VII.3.4}$$

La attività radioattiva di una sorgente isotropa determina nello spazio una irradiazione la cui intensità (w/m²) decresce come l'inverso del quadrato della distanza per la conservazione della energia e si attenua ulteriormente, con legge esponenziale, per effetto della interazione tra radiazione e materia.



Dose proveniente dai raggi cosmici al variare della quota



Dunque dalla conoscenza della attività della sorgente e delle caratteristiche geometriche dell'ambiente considerato si può sempre risalire alla intensità.

Naturalmente, poiché ogni disintegrazione corrisponde alla emissione di energia in varie forme, occorre conoscere anche lo schema di decadimento e tenere presente che i coefficienti di attenuazione dei materiali dipendono dal tipo di radiazione considerata e dalla energia a cui si sta operando.

○ **esposizione: misura del potere ionizzante in una determinata regione**

Le radiazioni ionizzanti si chiamano così perché hanno la capacità di *ionizzare* la materia, cioè di creare coppie ione-elettrone.

Storicamente, anche a causa del largo utilizzo delle camere ad ionizzazione come strumenti per valutare il potere ionizzante in un dato contesto, si è utilizzata la misura della esposizione.

Essa è nata nell'ambito del sistema cgs e dunque la definizione fa riferimento alle grandezze tipiche di tale sistema

Si chiama *Roentgen* (R) la quantità di radiazione X o gamma che produce in un campione di aria secca di 1cm³ una quantità di ioni corrispondente ad una carica elettrica di 1 esu.⁷

Poiché la carica elettrica elementare è 4,8·10⁻¹⁰esu/elettrone, 1 R corrisponde al suo inverso e cioè 2.08·10⁹ ioni con singola carica. Un orologio luminoso produce circa 5 mR per anno. Una radiografia produce circa 500 mR.

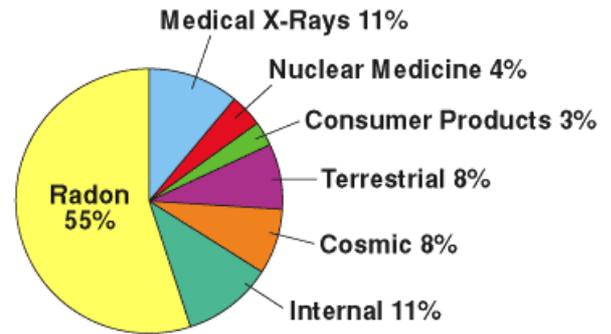
Se, invece di riferirsi ad 1 cm³ di aria, ci si riferisce a 1 kg si ottiene il fattore di conversione normalmente utilizzato e cioè:

$$1R = 2.58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg} \quad (\text{VII.3.5})^8$$

L'esposizione è facile da misurare ma non ci informa della energia che viene rilasciata nei tessuti biologici. Infatti le coppie ione-elettrone che si formano iniziano un processo che le può portare a rilasciare la loro energia cinetica all'esterno della zona considerata.

○ **dose: misura della energia rilasciata in una data massa di materiale**

La dose, per contrasto, consente di comprendere la differenza rispetto alla esposizione. E' evidente che in un contesto omogeneo ad una data esposizione corrisponde una data dose, ma non è così in situazioni non isotrope e non omogenee perché l'energia rilasciata



Percentuale di radiazioni ionizzanti assorbite dal corpo umano distinte per tipologia di causa; si osservi il peso rilevante del Radon proveniente dal decadimento dell'Uranio naturale presente nelle rocce



⁷ e.s.u. sta per *electro static unity* ed essa è definita come la carica che alla distanza di 1 cm produce nel vuoto una forza di 1 dyne (g cm/s²).

Poiché 1 dyne = 10⁻⁵ Newton e poiché la costante della legge di Coulomb vale nel vuoto 9.00·10⁹ si ha per cariche di 1 esu che $q^2 = \frac{F r^2}{k} = \frac{10^{-5} 10^{-4}}{9 \cdot 10^9}$ dunque $q = 3.33 \cdot 10^{-10}$ C e dunque 1 C = 3·10⁹ esu

¹⁰ C e dunque 1 C = 3·10⁹ esu

Dunque 1 e = 1.602·10⁻¹⁹ C·3·10⁹ esu/C = 4.8·10⁻¹⁰ esu

⁸ Si consiglia di effettuare per esercizio la conversione dai cm³ ai kg.



tuazioni non isotrope e non omogenee perché l'energia rilasciata sarà data solo dalle particelle prodotte o non prodotte nel volume e che si arrestano al suo interno.

L'unità di misura si chiama Gray (G) e corrisponde a 1J/kg. E' ancora molto utilizzato un suo sottomultiplo derivato dal sistema cgs:

$$1 \text{ Rad} = 10^{-2} \text{ G} \quad (\text{VII.3.6})$$

Si tenga presente che, grosso modo la dose di 1 Rad (*radiation absorbed dose*) è quanto viene assorbito da tessuto biologico sottoposto ad una esposizione di 1 Roentgen.

Una energia di 1 J/kg è abbastanza piccola se ragioniamo con i metodi a cui siamo abituati.

Per esempio, se ricordiamo che 1 kcal = 4'180 J possiamo concludere che quando alziamo di 1 ° C la temperatura di 1 kg d'acqua gli forniamo una energia equivalente a 4'180 G che, in unità di dose, corrisponde, come vedremo tra poco, ad una dose micidiale.

La ragione di ciò sta nella differenza di azione microscopica di queste energie. Nel caso del riscaldamento abbiamo aumento delle energie cinetiche traslazionali, rotazionali e vibrazionali; nel caso delle radiazioni ionizzanti abbiamo necrosi cellulare, rottura di legami atomici e molecolari.

○ **dose equivalente per l'uomo: misura della energia rilasciata in una data massa di materiale in relazione agli effetti biologici**

Abbiamo già osservato in diversi punti del testo che le radiazioni e particelle ionizzanti non producono gli stessi effetti nei tessuti biologici.

Per questa ragione, quando si vuole quantificarne il grado di danno, si introduce un fattore di qualità diverso per le diverse radiazioni.

L'unità storicamente utilizzata in radioprotezionistica è stata il rem (*rad equivalent for man*) definito così:

$$1 \text{ rem} = 1 \text{ rad} \cdot \text{QF} \cdot \text{AF} \quad (\text{VII.3.7})$$

dove QF sta per fattore di qualità ed è un numero puro che vale 1 per i γ e i β di alta energia, 1.8 per i β di bassa energia, tra 4 e 5 per i neutroni lenti, 10 per i neutroni e protoni veloci mentre vale sino a 20 per le α (molto più dannose).

Con AF intendiamo ogni altro fattore in grado di influenzare il processo (organi coinvolti, esposizione intensa o diluita nel tempo, etc.).

L'equivalente del rem nel sistema internazionale si chiama Sievert (Sv):

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy} \cdot \text{QF} \cdot \text{AF} \quad (\text{VII.3.8})$$

Torniamo ora agli aspetti di quantificazione delle dosi:

La radioattività di origine cosmica è di circa 0.3 mSv/anno al livello del mare e circa doppia alla quota di 1000 m (per la diminuzione degli effetti di schermatura della atmosfera).

La radioattività ambientale in Italia varia da 0.5 mSv/anno a 2.0 mSv/anno a seconda delle città (radioattività terrestre e non effetto dell'inquinamento umano).

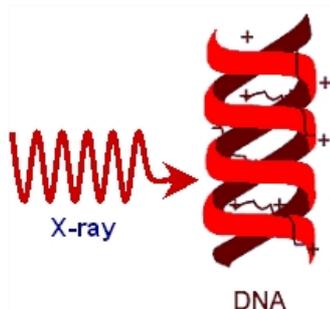
Il limite di dose ammissibile è fissato intorno ai 15 mSv/anno mentre la dose letale si aggira intorno ai 2.5÷3 Sv.

3.6 Effetti biologici delle radiazioni ionizzanti

Gli effetti sono in primo luogo relativi al danno cellulare diretto ed indiretto (quando i radicali e gli ioni prodotti dalla ionizzazione interagiscono con la cellula) e sono di tipo diverso per i diversi tipi di cellule (le più danneggiate sono quelle ad alta capacità di riproduzione e basso livello di differenziazione).⁹

3.6.1 EFFETTI DI TIPO IMMEDIATO SU PARTI DEL CORPO UMANO

Sono tipici di condizioni di irradiazione forte e di breve durata. Si manifestano, in due o tre settimane dall'irradiazione solo se è superato un valore-soglia di dose. Segnaliamo gli organi e apparati più sensibili.



- a) - Cute. Se la cute è colpita dalle radiazioni e riceve una dose elevata si arrossa. Nelle comuni condizioni della pratica radiologica medica si ha un eritema di intensità media a seguito di esposizione a 350 - 400 roentgen di raggi X
- b) Capelli, barba, peli. Per dosi di 3,5 - 4,0 Gy si ha la caduta temporanea dopo 15 - 20 giorni dall'irradiazione .
- c) Tessuti emopoietici linfatici (che producono linfociti) e dal midollo osseo rosso (che produce granulociti, monociti, eritrociti e piastrine). Se il corpo intero viene irradiato con radiazioni penetranti compare la riduzione dei globuli bianchi (leucopenia) e dei globuli rossi (anemia) circolanti nel sangue. I tessuti linfatici sono tra i più sensibili alle radiazioni, anche dopo modeste dosi al corpo intero dell'ordine di qualche decimo di rad.
- d) Sistema gastro-intestinale: le mucose sono molto sensibili alle alte dosi di radiazioni e presentano fenomeno di arrossamento, gonfiore, ulcerazione. Per dosi elevate e concentrate nel tempo

- (dell'ordine di molti Gy) su campi addominali, gli epitelii intestinali perdono le loro proprietà regolatrici dell'assorbimento e dell'equilibrio idrico-salino dell'organismo, e l'individuo esposto è colpito da shock.
- e) Testicoli e ovaie: sono altamente sensibili. Si ha la sterilità definitiva: per dosi da 5 a 8 Gy.
- f) Encefalo: i tessuti encefalici sono molto sensibili, infatti con dosi di qualche decina di Gy somministrati in una sola volta, si può avere in poche ore o al più in qualche giorno la

rem	effetti
0-25	nessun effetto osservabile
25-100	piccole modificazioni nel sangue
100 -200	moderate modificazioni nel sangue; vomito nel 5-50% dei casi entro 3 ore; completa guarigione in poche settimane (eccetto che per i tessuti emopoietici)
200-600	gravi modificazioni del sangue; vomito nel 50-100% dei casi entro 3 ore; perdita dell'udito entro 3 settimane; emorragia e infezioni; morte nell'80% dei casi entro 2 mesi
600-1000	gravi modificazioni del sangue; vomito entro 1 ora; perdita dell'udito; emorragia e infezioni; morte nell'80-100% dei casi entro 2 mesi.

tab. II - effetti prodotti da un assorbimento istantaneo di radiazioni

morte dell'individuo esposto.

- g) I reni: pr dosi che superano la decina di Gy possono comparire lesioni di tipo degenerativo o sclerotico.

3.6.2 EFFETTI DI TIPO IMMEDIATO SULL'INTERO ORGANISMO

⁹ Per questo argomento mi sono rifatto all'ottimo lavoro di Matteo Zanobini reperibile in rete all'indirizzo <http://xoomer.virgilio.it/mazanob/index.htm>

Un individuo che viene irradiato in una sola volta, in breve tempo e su tutto il corpo da raggi X e γ :

- ❑ con 0.25 Gy, non presenta sintomi
- ❑ con 0.50 Gy, può comparire nausea, lieve malessere e riduzione dei globuli rossi nella seconda e terza settimana;
- ❑ con 1 Gy la nausea è forte, accompagnata da vomito e astenia. Nella II-IV settimana appare prima leucopenia e poi anemia riducendo le capacità di difesa dell'organismo;
- ❑ con 2 Gy si ha una vera e propria malattia, con esito talvolta mortale: si tratta della sindrome acuta da radiazioni che è tanto più grave quanto più elevata è la dose ricevuta. Dopo uno stato iniziale di lieve shock, con nausea, vomito e inappetenza, segue uno stadio di latenza e poi compare lo stato acuto con astenia grave, febbre, tachicardia, ipotensione arteriosa, diarrea, tendenza al collasso cardiocircolatorio, leucopenia grave, anemia marcata, riduzione delle piastrine e diatesi emorragica. Il sintomo predominante è comunque l'anemia.
- ❑ con 4 Gy la sindrome acuta si presenta più grave e il 50% degli irradiati non adeguatamente curati va a morte in un lasso di tempo tra i 30 e i 60 giorni.
- ❑ con 6 Gy la sindrome si presenta molto aggravata ed il 100% degli irradiati muore nell'arco di 30 giorni successivi alla irradiazione.
- ❑ con dosi superiori a 6 Gy il decorso clinico cambia, lo stadio acuto è dominato dalla caduta dell'epitelio intestinale e comporta grave shock e setticemia, il decorso termina sempre con la morte dell'individuo irradiato.

regione esposta	esposizione professionale		pubblico 1 anno
	13 settimane	1 anno	
gonadi e midollo osseo	3	5	0,5
addome femminile nel periodo fertile	1,3	5	
cute, tiroide, ossa	15	30	1,5 nella tiroide dei ragazzi con meno di 16 anni
altri singoli organi	8	15	1,5
estremità	38	75	7,5

tab. III - dosi massime ammissibili per gli adulti (in rem). Dopo la conferma della gravidanza, la dose assorbita dal feto durante il resto della gravidanza dovrebbe essere limitata ad 1 rem.

3.6.3 EFFETTI TARDIVI SULL'INDIVIDUO IRRADIATO

Si apre qui un discorso in cui la statistica interviene a piene mani, ma statistica non significa mancanza di leggi.

Questi effetti che si manifestano dopo anni, talora decenni dall'irradiazione, sono a carattere probabilistico, non richiedono il superamento di valore-soglia per comparire, hanno frequenza di comparsa piccola e non del tipo tutto o niente qualunque sia stata la dose.

Gli effetti probabilistici sono rappresentati da malattie che esistono già spontaneamente tra la popolazione, essi si aggiungono ai casi spontanei e sono: *leucemia e tumori maligni.*

Questi effetti sono stati osservati sull'uomo dopo esposizione al corpo intero a qualche decimo di Gy o dopo esposizione di parte corporea a qualche Gy, ricevuti in una sola volta o più volte, ma per lo più entro un tempo relativamente breve.

Gli effetti tardivi presentano leggi causali dissimili da quelle degli effetti immediati e sono questi aspetti a determinare l'utilizzo di norme di cautela particolarmente forti e ad ingenerare comportamenti irrazionali dove mancano la informazione e l'abitudine alla razionalità scientifica.

- ❑ Linearità della relazione dose-effetto alle piccole dosi. La probabilità di eventi dannosi sull'individuo o la frequenza di eventi dannosi sulla popolazione esposta sono direttamente proporzionali alla dose indi-

viduale o rispettivamente alla dose media ricevuta pro-capite. Questa ipotesi spinge a ridurre ogni dose anche sotto i valori massimi ammissibili.

- Mancanza di una dose soglia. Per piccole dosi vi è una probabilità minima di effetti probabilistici sulle persone esposte. Questa ipotesi fa sì che non si possa pensare ad una dose senza rischio. Anche dosi piccolissime presentano un rischio non rigorosamente nullo.
- Mancanza di azione sinergica tra esposizione di varie parti ed organi corporei. La reazione alla radiazione di una parte del corpo non è influenzata, in modo determinante, da irradiazioni di altre parti del corpo. Pertanto il rischio di effetti tardivi, connesso con l'irradiazione del corpo intero, è la somma dei rischi dovuti all'irradiazione dei suoi organi e tessuti costitutivi.
- Irrilevanza della distribuzione temporale della dose somministrata. Una dose comporta una determinata probabilità di effetto, sia che venga somministrata in una sola volta, sia che venga suddivisa in più volte. Su questa caratteristica ci sono teorie contrastanti.

radiazione proveniente dall'ambiente naturale:	80 mrem/ anno						
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>radiazione cosmica</td> <td>23 mrem/anno</td> </tr> <tr> <td>radiazione terrestre</td> <td>31 mrem/anno</td> </tr> <tr> <td>cibo ed aria</td> <td>26 mrem/anno</td> </tr> </tbody> </table>	radiazione cosmica	23 mrem/anno	radiazione terrestre	31 mrem/anno	cibo ed aria	26 mrem/anno	
radiazione cosmica	23 mrem/anno						
radiazione terrestre	31 mrem/anno						
cibo ed aria	26 mrem/anno						
radiazione prodotta da applicazioni mediche:	37 mrem/anno						
<table border="1"> <tbody> <tr> <td>diagnostica</td> <td>32 mrem/anno</td> </tr> <tr> <td>medicina nucleare</td> <td>5 mrem/anno</td> </tr> </tbody> </table>	diagnostica	32 mrem/anno	medicina nucleare	5 mrem/anno			
diagnostica	32 mrem/anno						
medicina nucleare	5 mrem/anno						
radiazione derivante dal <i>fall-out</i> di armi nucleari:	4 mrem/anno						
radiazione derivante dalla produzione di energia nucleare:	3 mrem/anno						
radiazioni assorbite in mrem/anno (mrem=rem/1000)							

- Irrilevanza della distribuzione spaziale a livello macroscopico della dose somministrata. Per il rischio di effetti tardivi è rilevante la dose media all'organo e non la distribuzione della dose ricevuta zona per zona negli organi sensibili. Per esempio, se l'intero midollo osseo è colpito da una dose piccola oppure se 1/5 del midollo è colpito da una dose 5 volte maggiore, la probabilità degli effetti probabilistici (leucemia) non cambia. Sulla base di studi effettuati un 10^{-2} Sv ricevuti su tutto il corpo corrispondono ad una probabilità $0.5 \div 1 \cdot 10^{-4}$ che si manifestano tumori maligni con esito fatale.

3.6.4 EFFETTI GENETICI

Gli effetti sulla prima generazione possono essere dovuti all'azione delle radiazioni sui tessuti embrionali o sugli organi fetali oppure come conseguenza di danni sulle cellule germinali dei genitori.

- Nel primo mese di gravidanza dosi di alcuni decimi di Gy ricevuti sull'embrione possono talvolta provocare l'aborto, questo diviene più probabile per dosi maggiori.
- Sul finire del primo mese e fino alla prima parte del terzo mese, dosi dell'ordine di decimi di Gy all'embrione non sono abortive ma assai temibili perché colpiscono il prodotto del concepimento mentre si stanno formando gli organi e gli apparati corporei. Si possono verificare, con probabilità molto alte, varie malformazioni.
- Dalla seconda parte del terzo mese e fino al termine della gravidanza, dosi dell'ordine dei decimi di Gy non provocano né aborti né malformazioni ma sono capaci di indurre effetti tardivi a carattere probabilistico nei primi anni di vita del nascituro.

Se è possibile, è bene evitare gli esami radiologici sull'addome nei primi mesi di gravidanza. Quando sono irradiate le cellule riproduttive di un individuo si possono produrre cambiamenti nei geni e nei cromosomi

che sono poi trasmessi ai discendenti. Questi cambiamenti sono i seguenti:

- a) Mutazioni genetiche, vale a dire alterazione nella funzione dei singoli geni;
- b) Aberrazioni cromosomiche che risultano dalla rottura e riorganizzazione dei cromosomi;
- c) Variazione del numero dei cromosomi.

Per quel che riguarda le mutazioni genetiche un certo numero di esse compare spontaneamente in ogni generazione, l'azione della radiazione consiste nell'aumento della frequenza di comparsa di mutazioni. Una volta che una mutazione si è realizzata permane nel patrimonio ereditario e passa da generazione in generazione manifestandosi in tutti i discendenti (mutazioni dominanti) o solo in una parte di essi (mutazioni recessive) fino a quanto scompare per selezione naturale.

Un certo numero di aberrazioni cromosomiche si realizzano spontaneamente provocando malformazioni congenite e varie forme morbose. Per dosi non elevate (0,01 Gy) somministrate in un tempo abbastanza lungo (esposizione critiche) a tutti i componenti di una generazione, la frequenza di mutazioni spontanea ha un incremento di circa 1% per 0,01 Gy.

3.7 Questione nucleare e questione energetica

3.7.1 LA QUESTIONE ENERGETICA COME QUESTIONE SOCIALE E DI SVILUPPO

Le problematiche energetiche, comunque la si pensi dal punto di vista politico, non possono essere ignorate nella nostra società.

Il disinteresse non è ammesso né dal punto di vista politico, né dal punto di vista scientifico e nemmeno dal punto di vista del futuro immediato.

- Non si può far finta di nulla dal punto di vista politico perché *l'uso illimitato della energia* nell'ultimo secolo ci sta consegnando un pianeta in cui l'impatto sull'ecosistema si fa sempre più pericoloso per le sorti della civiltà umana nonostante la maggioranza degli uomini sia ancora molto lontana dai livelli di utilizzo della energia che caratterizzano il *mondo sviluppato*. Cosa accadrà quando la maggioranza del pianeta pretenderà o potrà usare l'energia che si usa in nord America e in Europa?
- Non si può far finta di nulla dal punto di vista scientifico perché solo da una riflessione razionale, pacata e lungimirante sul problema delle fonti, degli equilibri termodinamici, del rapporto equilibrato uomo-natura potrà venire la risposta *in avanti* alla domanda di incremento dei consumi energetici.
- Non si può far finta di nulla dal punto di vista del futuro immediato perché, per fare solo un esempio recente, lo sviluppo accelerato della Cina sta creando problemi di approvvigionamenti delle fonti tradizionali anche ora che siamo solo all'inizio.

3.7.2 LE UNITÀ DI MISURA DELLA QUESTIONE ENERGETICA

3.7.3 QUALCHE DATO QUANTITATIVO: FONTI, IMPATTO AMBIENTALE, CONSUMI

3.7.4 LA NECESSITÀ DI UNA PROSPETTIVA MULTILATERALE CHE TENGA CONTO DELLE LEGGI DELLA FISICA

3.8 Energia nucleare da fusione

- 3.8.1 LE REAZIONI DI FUSIONE NUCLEARE
- 3.8.2 LA FUSIONE NUCLEARE NELLE STELLE: IL CICLO PROTONE PROTONE
- 3.8.3 LA FUSIONE NUCLEARE NELLE STELLE: IL CICLO CARBONIO AZOTO
- 3.8.4 LA BOMBA ALL'IDROGENO E LA RICERCA DELLA FUSIONE NUCLEARE CONTROLLATA
- 3.8.5 LA FASE FINALE DI VITA DELLE STELLE E LA PRODUZIONE DEI DIVERSI ELEMENTI.