

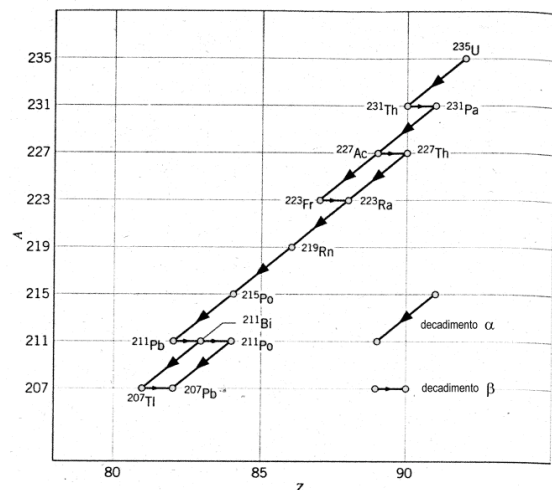
# FISICA NUCLEARE in BREVE (BREVISSIMO). PARTE II

## Radioattività naturale ed energia nucleare

### 1. Decadimenti naturali del nucleo

Escludendo gli elementi più leggeri (idrogeno ed elio), tutti gli altri sono stati prodotti da reazioni nucleari all'interno delle stelle. Come spiegato nel precedente capitolo, alcuni nuclei sono stabili ma la maggior parte della famiglia nucleare è popolata da elementi instabili, soggetti a decadimenti (trasformazioni) in altre specie nucleari, eventualmente a loro volta instabili, radioattive, fintantoché la trasformazione non giunge ad un nucleo stabile, fermando dunque la catena di decadimenti. Queste trasformazioni avvengono con rapidità differente a seconda del nucleo considerato. I decadimenti che prevedono un'emivita molto minore della vita stimata della terra sono tali che il nucleo capostipite della catena di trasformazioni è ormai scomparso dal nostro pianeta. Gli elementi invece con minore attività (più lenti a trasformarsi) sono ancora presenti sulla terra e contribuiscono alla radiazione "naturale" che, in dosi più o meno grandi a seconda di molti e svariati fattori, ci irraggia costantemente. Sappiamo che esistono tre tipi di processi di trasformazione nucleare: i decadimenti alfa e beta (che causano variazioni di  $A$  e  $Z$ , dunque conducono a specie nucleari differenti) e le emissioni gamma (che, pur variando l'energia del nucleo, non comportano variazioni della specie nucleare). I processi alfa implicano una variazione di  $A$  pari a 4 unità e di  $Z$  pari a due unità. I processi beta ("meno", ossia emissione di un elettrone nucleare e "più", emissione di un positrone) conducono alla variazione solo di  $Z$  pari ad un'unità ( $A$  non cambia perché l'emissione beta implica la trasformazione fra un neutrone ed un protone). E' dunque possibile, partendo da una specie nucleare instabile, costruire una sequenza di decadimenti tenendo conto di tutte le combinazioni di trasformazioni alfa e beta (ancora una volta, anche se le trasformazioni gamma sono importanti – di fatto accompagnano molte delle alfa e beta e contribuiscono in modo sostanziale al bilancio della radiazione naturale – non vanno incluse nella definizione di una catena di decadimenti perché non conducono a nuove specie nucleari). Si consideri ad esempio la specie  ${}^A X_N$ . Se è instabile, essa potrà decadere via emissione di alfa alla specie  ${}^{A-4} X_{N-2}$  oppure alla specie  ${}^A X_{N\pm 1}$  per emissione di elettroni o positroni. Se questa specie è stabile la catena si ferma, altrimenti procede tramite ulteriori decadimenti alfa o beta.

A titolo di esempio si riporta nel disegno la sequenza di decadimenti che conducono alla stabilità nucleare l'isotopo  ${}^{235}\text{U}$ . E' possibile ricavare il bilancio energetico della sequenze suddetta semplicemente sapendo che il prodotto finale, stabile, è  ${}^{207}\text{Pb}$ . Si tratta di calcolare quanti decadimenti alfa e beta sono richiesti per la trasformazione complessiva. In questo esempio  $A$  cambia di 28 unità. Vi devono essere 7 decadimenti alfa ( $4 \times 7 = 28$ ). Ciò implicherebbe che  $Z$  cambiasse di 14 unità. Ma in  ${}^{235}\text{U}$   $Z=92$  ed in  ${}^{207}\text{Pb}$   $Z=82$ , per cui nella catena vi devono essere 4 decadimenti beta che "recuperano" quattro unità di  $Z$ . Per calcolare il  $Q$  della reazione usiamo il fatto che i decadimenti beta implicano che nel bilancio energetico si debbano usare le masse atomiche al posto di quelle nucleari. Quindi  $Q = [m({}^{235}\text{U}) - m({}^{207}\text{Pb}) - 7 \times m({}^4\text{He})]c^2 = (235.043922 - 206.97588 - 7 \times 4.002603) \times (931.5 \text{ MeV}/c^2) = 46.4 \text{ MeV}$ . Per quanto riguarda l'energia emessa da una certa quantità di sostanza, ad esempio 1 g di  ${}^{235}\text{U}$ , pari a  $1/235$  moli, ossia  $N_A/235 = 2.6 \times 10^{21}$  nuclei, utilizziamo la probabilità di decadimento,  $\lambda({}^{235}\text{U}) = 3.12 \times 10^{-17} \text{ sec}^{-1}$ . Dunque, il numero di decadimenti in 1 g di  ${}^{235}\text{U}$  è pari a  $(2.6 \times 10^{21} \text{ nuclei}) \times (3.12 \times 10^{-17}$



decadimenti/nuclei-sec)=81000 decadimenti/sec. In ogni decadimento (complessivo, fino al piombo) si liberano 46.4 MeV, per cui ogni secondo 1 g di  $^{235}\text{U}$  libera  $(81000\text{sec}^{-1}) \times (46.4 \times 10^6 \text{eV}) \times (1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = 6 \times 10^{-7} \text{ W}$  di potenza. Sebbene questo numero sia piccolo, un calcolo termodinamico diretto conduce al risultato che, nell'ipotesi che tutta l'energia liberata nella sequenza di reazioni resti confinata nel grammo di uranio, tale porzione di materia è destinata a subire un riscaldamento di qualche decina di grado all'anno, per cui è destinato a vaporizzare entro circa un secolo di trasformazioni (piccola frazione del tempo che esso ha a disposizione!). Fenomeni di questo genere potrebbero essere importanti, infatti, nel giustificare le elevate temperature all'interno del globo terrestre. Infine si noti che nel grafico riportato vi sono due "doppie sequenze" di decadimento, a seconda che il nucleo inizi con un decadimento alfa oppure beta.

Un ulteriore esempio è costituito dalla trasmutazione di  $^{238}\text{U}$  in  $^{206}\text{Pb}$ . Questo caso può essere utilizzato per tentare la datazione di rocce antiche, in quanto l'emivita dell'isotopo 238 dell'uranio (4.5 miliardi di anni) è molto maggiore di altri isotopi dello stesso elemento, che possono dunque essere trascurati nel bilancio complessivo (ammesso che la roccia in esame sia davvero molto antica). Supponendo che tre rocce diverse presentino rapporti di composizione  $^{238}\text{U}/^{206}\text{Pb}$  variabili, ad esempio pari a 0.5, 1.0 e 2.0, e supponendo che quando le rocce si sono formate esse contenessero solamente uranio, i rapporti  $r$  sopra scritti diventano

$$r = (N_0 e^{-\lambda t}) / (N_0 - N_0 e^{-\lambda t}) = e^{-\lambda t} / (1 - e^{-\lambda t}).$$

Il denominatore della frazione sopra scritta sta ad indicare che la popolazione di uranio iniziale ( $N_0$ ) è diminuita a favore del piombo nel tempo  $t$ . Risolvendo proprio per  $t$  ricaviamo

$$t = \ln(1+1/r) / \lambda = t_{1/2} \ln(1+1/r) / 0.693,$$

avendo introdotto l'emivita dell'isotopo 235 dell'uranio. In corrispondenza dei tre valori ipotizzati per  $r$  ricaviamo  $t(r=0.5) = 7.1 \times 10^9$  anni,  $t(r=1.0) = 4.5 \times 10^9$  anni,  $t(r=2.0) = 2.6 \times 10^9$  anni. La roccia più antica datata con questa tecnica ha circa 4.5 miliardi di anni. Dunque la roccia con  $r=0.5$  è più antica dell'età stimata della terra: essa potrebbe avere origini extraterrestri oppure le supposizioni sulla sua composizione e "storia nucleare" potrebbero essere incorrette.

Vale infine la pena considerare un ulteriore esempio di datazione basato su tecniche di spopolamento nucleare. I raggi cosmici che colpiscono la terra producono l'isotopo 14 del carbonio, che è radioattivo per decadimento beta con emivita di 5730 anni. Esso costituisce una piccola percentuale della famiglia isotopica del carbonio (1 parte su  $10^{12}$ , mentre l'1% è  $^{13}\text{C}$ ). Ciononostante viene regolarmente assorbito e ricambiato nel ciclo vitale di ogni essere vivente (dei regni sia vegetale che animale) fino alla morte dell'organismo. A partire da questo momento, il  $^{14}\text{C}$  presente nei tessuti non è più rinnovato e decade con rapidità fissata dalla sua emivita. Una misura della frazione di  $^{14}\text{C}$  in un tessuto morto permette la sua datazione con precisione piuttosto elevata. La tecnica consiste nell'utilizzare un oggetto di confronto, come una quantità prefissata di gas contenente carbonio (e dunque  $^{14}\text{C}$ ) in qualche forma, tipicamente anidride carbonica. L'oggetto da datare viene bruciato e l'anidride carbonica ottenuta per combustione viene posta nelle stesse condizioni del gas di riferimento per confrontare a parità di condizioni i conteggi beta. Consideriamo, ad esempio, una quantità pari a  $100 \text{ cm}^3$  di  $\text{CO}_2$  alla pressione di 1 atm e temperatura 300K. Tale gas contiene un numero di molecole pari a  $n = PV/RT = 0.0041 \text{ moli} = 2.45 \times 10^{21}$  molecole. Di esse una frazione di  $1/10^{12}$  contiene l'isotopo  $^{14}\text{C}$ . Ci aspetta dunque un numero di nuclei di  $^{14}\text{C}$  pari a  $2.45 \times 10^9$ . L'attività del campione è data da  $N\lambda = 0.693 \times 2.45 \times 10^9 / (5730 \text{anni} \times 3.16 \times 10^7 \text{sec/anno}) = 0.0094$  decadimenti/sec. In una settimana, ad esempio, si conteranno 5672 eventi. Se ora poniamo il gas ottenuto per combustione del campione da datare nelle medesime condizioni del gas

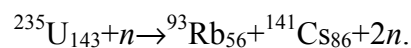
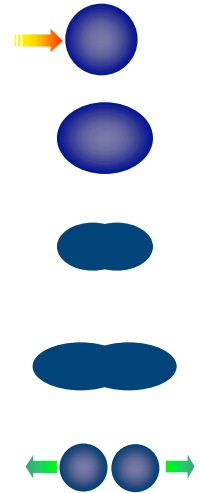
di riferimento e contiamo, ad esempio, 1569 eventi in una settimana, possiamo scrivere che  $e^{-\lambda t} = 1569/5672$ , da cui, per inversione,  $t = 10626$  anni.

I fenomeni radioattivi fino a questo punto descritto interessano direttamente ciascuno di noi (come tutti gli essere viventi): le radiazioni (alfa, beta, X, gamma) che sono in grado di apportare sufficiente energia ad una cellula vivente (o, in generale, ad un qualunque atomo o molecola) da provocare la perdita di uno o più elettroni atomici sono dette radiazioni *ionizzanti*. Il loro effetto può essere dannoso se esso supera certi livelli, anche se un lavoro di sistematica degli effetti sugli esseri viventi è estremamente complesso. Resta anche il fatto che la maggior parte della radiazione che ci investe è inevitabile, in quanto fa parte di un “fondo” naturale generato da materiali instabili che sono inclusi nelle rocce e nei materiali che ci circondano. Un altro contributo alla radiazione che ci investe è di origine artificiale, e trova le fonti principali nelle apparecchiature per la diagnostica medica, nelle scorie dei combustibili per la produzione di energia nucleare e nelle polveri e materiali di vario genere depositati a seguito degli esperimenti facenti uso di ordigni nucleari. Un contributo non trascurabile, almeno in Europa, viene anche da prodotti a lunga vita media depositati ed inglobati nel suolo a seguito dell’incidente al reattore nucleare dell’ex-unione Sovietica a Chernobyl, nel 1986. E’ importante non confondere le misurazioni di *attività* ionizzante (il numero di eventi di ionizzazione associati al numero di particelle emesse nell’unità di tempo) con le misure di *dosimetria*, ossia misure atte a quantificare gli effetti dovuti agli eventi di ionizzazione. C’è molta confusione su questi argomenti, soprattutto a causa del proliferare di unità di misura di vario genere ed a volte dedicate alla stessa grandezza fisica. Quando si parla di attività (uso del contatore Geiger-Mueller, per esempio) si devono adottare i Becquerel, come già spiegato, ovvero Curie e suoi (sotto)multipli. Una (radio)attività di 100 Bq *non* implica a priori una misura *dosimetrica*, almeno fintantoché non vengono specificate (a) il tipo di radiazione ionizzante e (b) le modalità di assorbimento (tipo di tessuto, localizzazione, ecc.). Per quanto riguarda il tipo di radiazione ionizzante, è importante sottolineare che le particelle alfa hanno un potere penetrante estremamente ridotto (vengono fermate da un foglio di carta ed, a maggior ragione, dalla pelle). Possono essere però estremamente dannose se la sorgente che le emette è ingerita: le particelle alfa sono pesanti e cariche, per cui molto idonee a provocare la ionizzazione. La radiazione beta, elettroni e positroni, dunque ancora particelle cariche, hanno un maggiore potere di penetrazione (vengono fermate dagli occhiali, ad esempio, o da un foglio di alluminio sottile). Possono depositare però meno energia delle particelle alfa. La radiazione gamma va intesa come una radiazione X a maggiore energia. Tipicamente attraversa spessori notevoli di materia prima di essere arrestata, ed è piuttosto efficace nel produrre fenomeni di ionizzazione a partire da sorgenti esterne al bersaglio. In ogni caso, la radiazione ionizzante è potenzialmente dannosa per i tessuti viventi in quanto i processi di ionizzazione alterano l’equilibrio *chimico* delle cellule colpite, rendendole reattive in modo anomalo ed a volte imprevedibile. La somma di molti studi statistici e sperimentali ha condotto alla definizione di unità di misura dosimetriche che, essenzialmente, assegnano un riferimento all’ammontare di energia rilasciata in situazioni “standard” ed utilizzabile per processi di ionizzazione (in generale, ed allora si parla di *rad* oppure di *Gray* (Gy), oppure specificatamente relativi al deposito di energia ionizzante su tessuti viventi, ed allora si parla di *rem* oppure di *Sievert*). Infine: *non esistono evidenze statistiche* che permettano di affermare con sufficiente confidenza che piccole dosi di radiazione siano o non siano cumulative nei loro effetti sui tempi lunghi. Proprio per questi motivi, con il passare del tempo le organizzazioni preposte alla salvaguardia della popolazione e soprattutto dei lavoratori professionalmente esposti a radiazioni ionizzanti, ha gradualmente abbassato le dosi massime annuali o mensili ammesse per evitare l’insorgere di malattie collegate alla ionizzazione da radiazioni.

## 2. Fissione nucleare

Come accennato nel precedente capitolo, se un nucleo è sufficientemente grande, esso può subire un processo di *fissione*, ossia di rottura in due (o più) frammenti più leggeri con liberazione di energia

associata all'effetto della repulsione elettrostatica agente fra i frammenti stessi carichi positivamente. L'energia suddetta è dell'ordine di 200 MeV per nucleo, se consideriamo specie con almeno 200 nucleoni. Questo dato deriva dal considerare un guadagno energetico dell'ordine di 1 MeV per nucleone quando si passa dal nucleo pesante a quelli fissionati, nei quali per l'appunto l'energia media per nucleone è maggiore di circa 1 MeV. Se fosse possibile utilizzare interamente l'energia liberata in seguito alla fissione dei nuclei di, diciamo, un grammo di  $^{235}\text{U}$ , si otterrebbe un valore corrispondente al lavoro richiesto per sollevare a 1000 m dal suolo una massa di 10,000 tonnellate! Prima di entrare più approfonditamente nel merito dei bilanci energetici, è interessante accennare al possibile meccanismo microscopico per il processo di fissione di un nucleo pesante. In esso la forza forte mantiene legati i nucleoni bilanciando e, sempre più a fatica, superando la forza coulombiana di repulsione. Possiamo immaginare che un nucleo di grandi dimensioni sia di forma ellissoidale, una specie di sfera allungata che, se stimolata energeticamente, subisce moti di oscillazioni simili a quelli di una goccia d'acqua. Un disturbo energetico appropriato può far sì che tali oscillazioni aumentino di ampiezza, in modo tale che nella "goccia" nucleare molto distorta la forza forte sia sempre meno efficace nel tenere unite le due estremità del nucleo (a causa del suo corto raggio d'azione). La forza di Coulomb mantiene invece inalterata la sua azione distruttiva. Il processo dunque tipicamente evolve nel senso della separazione delle due parti della goccia con la liberazione dell'energia coulombiana di repulsione (che tipicamente va in gran parte – circa l'80% - in energia cinetica dei frammenti) e con l'emissione anche di altre particelle (neutroni, ma anche radiazione gamma e beta associata all'assestamento energetico di livelli eccitati dei frammenti di fissione). I frammenti principali non sono eguali: per la fissione di  $^{235}\text{U}$  la distribuzione di massa dei frammenti (in senso statistico) ha due picchi in corrispondenza delle masse  $A_1=90$  ed  $A_2=140$ . Una tipica reazione di fissione può dunque essere (ma non è l'unica)



Notiamo subito che la reazione (a) richiede un neutrone che "accende" la fissione e (b) oltre ai frammenti di rubidio e cesio la fissione produce *due* neutroni, detti "immediati" in quanto conseguenti alla reazione stessa. Il fatto di avere due neutroni energetici disponibili in seguito alla fissione, rende teoricamente possibile un fenomeno di "autosostentamento" della reazione, nel senso che tali neutroni potrebbero a loro volta innescare altre fissioni di nuclei di uranio. Il risultato di questa sequenza (che non avviene in realtà in questo modo, come spieghiamo subito dopo) è una tipica *reazione a catena*. Se essa avviene in modo "controllato", ossia se si riesce a mantenere essenzialmente costante e comunque regolabile il ritmo al quale avvengono le fissioni e dunque la liberazione di energia, ci si sta riferendo ad un uso pacifico della materia nucleare. Se la reazione a catena viene invece lasciata libera di evolvere senza controllo, ci si sta riferendo alle basi di funzionamento di un arma esplosiva, nota come bomba nucleare (o, impropriamente, atomica). Come prima osservazione importante, deve essere chiaro che la reazione sopra scritta è una possibile fra molte: ci si aspettano altre modalità di frammentazione del nucleo di uranio iniziale, con liberazione di altre particelle. Il risultato nel senso statistico è che *in media* per ogni fissione si liberano 2.5 neutroni "immediati" e che la distribuzione di massa dei frammenti è centrata su cesio e rubidio.

Ai fini di un utilizzo pacifico delle reazioni di fissione per la produzione di energia, si deve tener conto inizialmente di tre aspetti fondamentali, che sono:

(a) *metodi per l'estrazione e l'utilizzo dell'energia liberata dalle fissioni*. Inizialmente tale energia è quasi interamente posseduta dai frammenti di fissione in forma cinetica. Essa viene rilasciata per collisioni al materiale che si riscalda. Si creano così le condizioni per portare a temperature

elevate un fluido vettore, in grado a sua volta di mettere in moto una turbina per la produzione di energia elettrica;

- (b) *ruolo dei neutroni*. In funzione del tipo di fissione (del “combustibile” nucleare) si avrà un numero medio di neutroni “immediati” differente. Sarà anche in funzione di questo parametro che si potranno definire le modalità di operazione e resa termica dell’intero sistema (il “reattore”);
- (c) *neutroni “immediati” e “ritardati”*. Il reattore nel suo insieme può essere mantenuto sotto controllo grazie ad una particolarità che è importante sottolineare. Se a seguito di una fissione vi fossero solo i neutroni “immediati”, la rapidità della loro comparsa renderebbe di fatto impossibile un qualunque tipo di controllo “meccanico” (come verrà spiegato in seguito) sull’evolversi della reazione a catena. I prodotti della fissione (i frammenti “leggeri”; come rubidio e cesio) non sono però stabili ed a loro volta decadono in altre specie. In particolare, si osservano processi di decadimento che danno luogo, in tempi dell’ordine di qualche secondo, all’emissione di neutroni energetici detti “ritardati”. Questi neutroni permettono tempi di intervento accessibili in pratica agli operatori sul controllo della reazione. In un reattore tipico, nella camera che contiene il combustibile vengono inserite a piacimento delle barre di materiale fortemente assorbitore di neutroni. Quando le barre sono completamente inserite tutti i neutroni, immediati e ritardati, sono arrestati e la reazione si ferma (c’è meno di un neutrone *in media* per fissione). Se le barre vengono estratte, il numero di neutroni disponibile sale a valori di “criticità” per il reattore, che comincia a funzionare. In pratica, le barre permettono il controllo solo dei neutroni “ritardati”. Il reattore deve risultare “critico” per quanto riguarda l’azione dei neutroni “ritardati” (sui quali i tempi di controllo sono accessibili agli operatori, come già detto) e “sottocritico” per i neutroni “immediati”.

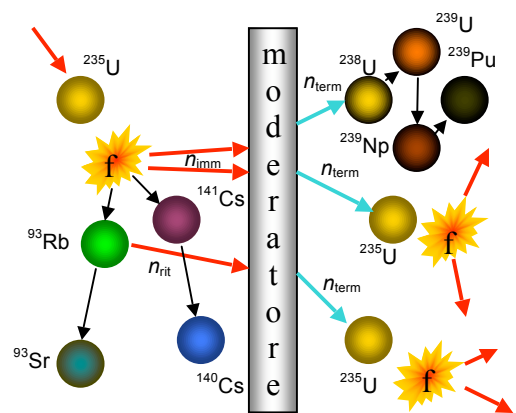
Ci sono altri aspetti (più tecnologici) da tenere presente in un progetto praticamente fattibile e funzionante di un reattore nucleare. I più rilevanti sono i seguenti:

- (a) *arricchimento del combustibile*: l’unico elemento naturale che presenta caratteristiche idonee per i processi di fissione sopra descritti è l’isotopo 235 dell’uranio. Esso costituisce solo lo 0.7% del totale di questo elemento, la maggior parte essendo invece l’isotopo 238 (che non è fissile). E’ dunque necessario predisporre tecniche di *arricchimento* artificiale del minerale. Essendo i due elementi (235 e 238) specie isotopiche, non è possibile separarle per via chimica. Si adottano quindi tecniche complesse di separazione per diffusione che utilizzano la piccola differenza di massa dei due isotopi. Un altro elemento predisposto alla fissione è l’isotopo 239 del plutonio,  $^{239}\text{Pu}$ . Esso è prodotto artificialmente per bombardamento neutronico di uranio 238, secondo le reazioni  $^{238}\text{U}_{146}+n\rightarrow^{239}\text{U}_{147}\rightarrow^{239}\text{Np}_{146}+e+\nu$ ,  $^{239}\text{Np}_{146}\rightarrow^{239}\text{Pu}_{145}+e+\nu$ . Il plutonio è separabile per via chimica dall’uranio. La produzione di combustibile basato sul plutonio a partire dall’uranio è detta “fertilizzazione”;
- (b) *moderazione di neutroni*: i neutroni emessi dalla fissione (sia “immediati” che “ritardati”) hanno energie dell’ordine di qualche MeV. Si osserva che essi sono estremamente poco efficaci nell’indurre ulteriori fissioni. La misura della probabilità di accadimento della reazione è associata alla cosiddetta *sezione d’urto* del processo, che per i neutroni ad alta energia nel caso di fissione è dunque molto piccola. Si adottano quindi tecniche di *moderazione neutronica*, ossia sistemi che rallentano i neutroni finché la loro energia cinetica è tale da aumentare a sufficienza la sezione d’urto per innescare la fissione. La moderazione è di fatto un processo di *termalizzazione*, in quanto i neutroni vengono portati ad energie di equilibrio con il reticolo del solido moderatore, che sono energie per l’appunto termiche. I neutroni sono molto più leggeri dei nuclei di uranio, per cui negli urti che avvengono fra di essi i neutroni essenzialmente rimbalzano senza perdere energia in modo apprezzabile. Perché ciò avvenga è necessario adottare materiali i cui nuclei sono di massa vicina a quella dei neutroni. In questo modo gli urti corrispondono a scambi di quantità di moto, in cui il proiettile arriva quasi ad arrestarsi per conferire la velocità iniziale al bersaglio. La possibilità più semplice è quella di usare acqua, che contiene protoni a sufficienza per fornire un bersaglio ideale per la moderazione dei neutroni. Il

problema è che l'acqua ha una sezione d'urto per la cattura di neutroni e la formazione di nuclei di deuterio molto elevata (si forma in pratica acqua pesante,  $D_2O$ , ed i neutroni vengono inglobati in questa molecola invece di contribuire alla fissione). Si utilizza dunque come moderatore acqua pesante (i deuteri sono efficaci bersagli frenanti per i neutroni senza catturarli) oppure carbonio sottoforma di grafite. Quest'ultima tecnica di moderazione fu utilizzata per la costruzione del primo reattore a fissione controllato, progettato e realizzato sotto la direzione di Fermi nel 1942 a Chicago. Ancora moderati a grafite sono i reattori in funzione a Chernobyl e sopravvissuti al disastro del 1986;

- (c) *perdita di neutroni*: pur evitando dettagli tecnici sofisticati, è comunque importante accennare al fatto che ci si deve aspettare che non *tutti* i neutroni prodotti e/o moderati siano resi disponibili allo scopo di sostenere la reazione a catena di fissione. Una frazione di essi, ovviamente da minimizzare, è destinata ad essere persa per fuga dal materiale fissile, per cattura dal moderatore, per assorbimento da parte del combustibile non fissile ( $^{238}U$ ). Esistono disegni e progetti che in certa misura tengono sotto controllo questi problemi.

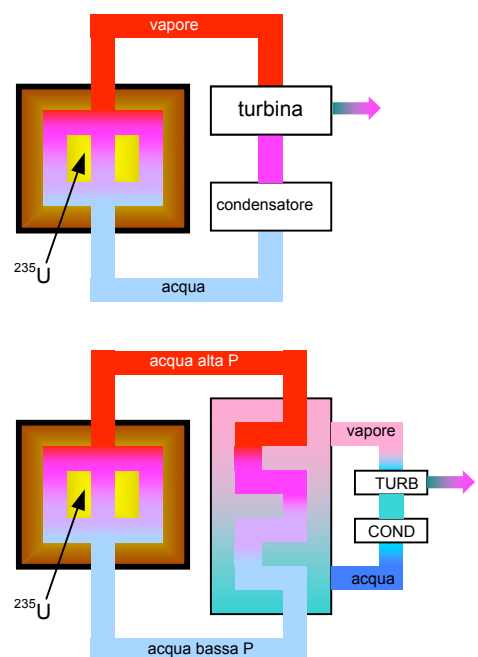
Nel disegno è riportato schematicamente l'assieme delle reazioni essenziali per il funzionamento di un reattore nucleare a fissione basato su  $^{235}U$ . Il calore prodotto deve venire asportato con un apposito fluido vettore, come già accennato. Questo anche allo scopo di mantenere entro valori di sicurezza la temperatura del combustibile, che altrimenti potrebbe fondere e distruggere la camera che lo contiene, con conseguenze ovviamente disastrose (la cosiddetta "sindrome cinese": un reattore americano nel quale il "nocciolo" nucleare fuso sprofonda nel sottosuolo e, dopo avere contaminato falde acquifere e terreni, attraversa la terra per sbucare in Cina ...). Vi sono essenzialmente tre tecniche distinte per estrarre l'energia termica dal reattore:



- (a) *reattori ad acqua bollente*: l'acqua è a diretto contatto con il nocciolo caldo e viene vaporizzata. La sua pressione è sufficiente a mettere in moto la turbina generatrice di elettricità. Lo svantaggio principale di questo sistema è che l'acqua può diventare radioattiva (secondo svariati processi) ed in caso di fuga la contaminazione ambientale è assicurata;

- (b) *reattori ad acqua pressurizzata*: in questo tipo di reattore vi sono due circuiti separati. In uno si utilizza acqua ad alta pressione, che rimane dunque liquida ad elevate temperature, a contatto diretto con il reattore dal quale asporta calore. Tale calore è ceduto con opportuni scambiatori ad un secondo circuito che contiene acqua non pressurizzata e che lavora direttamente sulle turbine. Il vantaggio di questo disegno è che in caso l'acqua a contatto con la zona radioattiva resta sempre isolata dalla parte "ordinaria" della centrale. Questi reattori sono utilizzati negli Stati Uniti. In Canada vengono utilizzati reattori di minori dimensioni che utilizzano acqua pesante ed uranio naturale al posto di uranio arricchito;

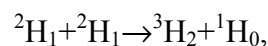
- (c) *reattori a metallo liquido*: il termovettore è costituito da sodio liquefatto (o da simili metalli alcalini). Il vantaggio rispetto il modello ad acqua pressurizzata è che le temperature di esercizio possono essere più



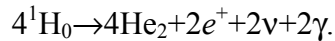
elevate e l'efficienza complessiva aumentata per la migliore conduttività termica del sodio. Benché questo sia un capitolo estremamente complesso della storia delle tecnologie al servizio dell'umanità, è il caso almeno di accennare al fatto che i reattori nucleari, di qualunque classe essi siano, presentano simultaneamente enormi vantaggi e svantaggi quando vengono confrontati con metodi tradizionali o alternativi per la produzione di energia. Fra i maggiori problemi è sicuramente il caso di parlare della manipolazione, trasporto e stoccaggio delle "scorie" della centrale, ossia il materiale combusto che è ancora ad elevate temperature e fortemente radioattivo. Gli incidenti alla Chernobyl o alla Three-Miles Island sono da notare sicuramente, ma non vanno nemmeno demonizzati: i rischi connessi alla produzione di energia sono intrinseci alle strutture ed alle tecnologie a questo scopo utilizzate, sia che si tratti di centrali nucleari, sia nel caso di centrali a carbone, idroelettriche, geotermiche o eliotermiche. Ogni tipo di sfruttamento energetico ha un risvolto in termini di impatto (o inquinamento) ambientale. Si tratta di operare con metodo, accuratezza e correttezza sia tecnologica che politica e sociale *prima* di mettere in opera qualsivoglia tipo di sistema di sfruttamento energetico. Infine, è da notare che l'efficienza termica (nel senso termodinamico del termine) di una centrale nucleare è minore di quella di una centrale a carbone (a causa della minore temperatura di funzionamento della centrale nucleare), come pure risulta maggiore l'inquinamento termico (rilascio di fluidi ad elevata temperatura nell'ambiente) sempre di una centrale nucleare a pari prestazioni.

### 3. Fusione nucleare

Come accennato in precedenza, le specie nucleari leggere ( $A < 62$ ) hanno la peculiarità di rilasciare energia quando due (o più) nuclei vengono uniti per formare un nucleo più massivo. Questo processo, noto come fusione nucleare, può avvenire riuscendo a superare la barriera di potenziale repulsivo dovuto ai protoni contenuti nei nuclei. Si consideri ad esempio la reazione

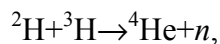


ovvero la fusione di due deuteroni che fornisce un nucleo di trizio (l'isotopo dell'idrogeno di massa tripla) ed un protone. Il  $Q$  di questa reazione è di 4.0 MeV (energia *liberata*), ossia circa 1 MeV per nucleone (sono quattro). Possiamo stimare la repulsione coulombiana fra i deuteroni direttamente ponendo due cariche  $e$  alla distanza di circa 3 fm (il raggio del deuterone è circa 1.5 fm). Si ottiene che è necessario superare una barriera di circa 0.5 MeV. Dunque un deuterone con energia cinetica di 0.5 MeV conduce ad una reazione di fusione con rilascio di energia pari a 4.5 MeV. Con correnti di deuterio accessibili alle tecnologie attuali, la potenza utile per un dispositivo basato su questa reazione non supera i 4 W, dunque un valore decisamente poco interessante ai fini applicativi. Un metodo più efficace prevede di riscaldare un gas di deuterio all'energia equivalente di 0.25 MeV. In questo modo si ottengono collisioni fra coppie di nuclei di deuterio con energia sufficiente a superare la barriera coulombiana nucleare. Secondo questo approccio, detto fusione *termonucleare*, i nuclei contenuti in una tazza di acqua pesante sarebbero sufficienti a fornire una potenza utile di circa 50 MW. Anche solo con l'utilizzo di acqua "leggera", contenente circa lo 0.015% di  $\text{D}_2\text{O}$ , la resa energetica per fusione è equivalente a quella convenzionalmente ottenuta con la combustione di 300 litri di gasolio. La difficoltà pratica è che il riscaldamento a 0.25 MeV del deuterio prevede, a partire dalla relazione  $kT$  per l'energia termica, una temperatura di esercizio di circa un *miliardo* di gradi kelvin. Anche assumendo che minori temperature ( $10^8$  K) potrebbero permettere, tramite attraversamento quantistico della barriera coulombiana, un innesco efficace del processo di fusione, si capisce come difficilmente sia realizzabile un apparato in grado di lavorare a temperature tanto elevate. D'altra parte questo è ciò che avviene nelle stelle: i fisici che studiano i fenomeni di fusione nucleare ai fini di un utilizzo pacifico dell'energia ottenuta, stanno in pratica cercando di costruire nei loro laboratori una piccola stella, almeno per tempi molto brevi. Una delle reazioni più semplici che stanno alla base del funzionamento della fornace nucleare nel sole è



Dalla fusione di quattro nuclei di idrogeno si ottengono nuclei di elio e radiazione gamma, oltre a positroni e neutrini, con un  $Q$  pari a 27 MeV. Un conto classico permette di stabilire che, in base a questo valore, il sole sta bruciando circa  $4 \times 10^{38}$  protoni al secondo (con una riserva di circa  $10^{57}$  ... quindi nessun problema immediato). Questa reazione, detta *ciclo protone-protone*, pur essendo importante, non è la più rilevante fra quelle che caratterizzano la dinamica nucleare nel sole, in quanto ne esiste una basata sul nucleo  $^{12}\text{C}$  che, fungendo da catalizzatore, conduce agli stessi prodotti della reazione protone-protone ma con maggiore rapidità.

Nei prototipi di reattore termonucleare oggi in funzione, la reazione più utilizzata – detta ciclo deuterio-trizio, è



con un  $Q$  pari a 17.6 MeV. La realizzazione sperimentale prevede che la miscela combustibile sia portata ad elevatissime temperature ( $10^8\text{K}$ , allo stato di *plasma*, ossia in cui il gas è completamente ionizzato), ad elevate densità (per aumentare la probabilità di collisioni) e per un tempo (detto di *confinamento*) sufficientemente lungo da permettere l'innesco della fusione. Il tutto è riassunto in un criterio, detto di *Lawson*, secondo il quale il reattore è “conveniente”, ossia produce più energia di quanta non se ne spenda per portarlo a regime operativo, se il prodotto della densità per il tempo di confinamento supera il valore critico di  $10^{20} \text{ sec/m}^3$ . Per ottenere questa condizione si sta procedendo secondo due tecniche principali. Nei reattori *tokamak* si usa un campo magnetico toroidale per confinare il plasma. Il reattore tokamak di Princeton (USA) ha prodotto 6 MW di potenza per un secondo. A questa tecnica, nota anche come fusione in confinamento inerziale, si giustappone il metodo basato sulla compressione ed il surriscaldamento del combustibile che viene da un fascio di laser ad altissima potenza concentrati su una pastiglia molto piccola e densa di miscela deuterio-trizio. L'impulso iniziale dei laser può raggiungere una potenza di  $10^{14} \text{ W}$  (per una frazione di un miliardesimo di secondo): è più di cento volte superiore alla potenza necessaria a soddisfare la richiesta di potenza elettrica degli interi Stati Uniti!).

Nonostante i notevoli progressi compiuti in questi settori, il reattore a fusione resta ancora nei laboratori per moltissime difficoltà ancora da superare su svariati fronti. Le voci che circolano sulla “pulizia” del reattore a fusione sono assolutamente false: le reazioni liberano un numero immenso di neutroni che possono rendere radioattivi molti elementi dei materiali costruttivi del reattore. Si sta cercando di utilizzare il litio come vettore di energia termica rilasciata dai neutroni, ottenendo così anche il loro arresto o moderazione.