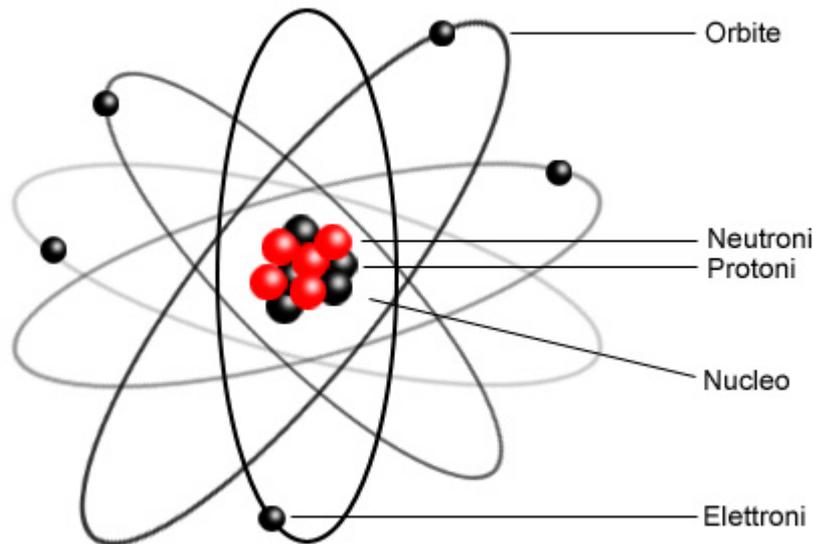


ENERGIA NUCLEARE



L'**energia nucleare**, protagonista indiscussa della seconda metà del Ventesimo Secolo, è l'energia posseduta dagli atomi, particelle piccolissime, che compongono la materia.

Gli atomi, unendosi tra loro, danno origine a tutte le forme di materia che ci circondano.

L'**atomo** è costituito da un nucleo che contiene protoni con carica elettrica positiva e neutroni con carica neutra; intorno al nucleo ruotano gli elettroni con carica elettrica negativa. La materia, a livello infinitamente piccolo, non si lascia manipolare facilmente poiché le forze che tengono insieme i differenti componenti dell'atomo sono molto tenaci. Vi sono però alcuni elementi, come l'uranio fissile, che si trasformano spontaneamente liberando una considerevole energia sotto forma di calore.

Esistono due **tipi di reazione nucleare** per produrre energia dagli atomi:

- **fissione nucleare**
- **fusione nucleare.**

LA FISSIONE NUCLEARE

La *fissione* o *scissione nucleare* consiste nella disintegrazione del nucleo di un atomo mediante il bombardamento per mezzo di piccolissime particelle (*neutroni*) che lo colpiscono e lo spezzano in due nuclei più leggeri. La somma dei prodotti della scissione ha una massa più piccola di quella del nucleo originale: ciò significa che durante il processo una parte della materia si è trasformata in energia secondo la celeberrima equazione $E=mc^2$.

Se la quantità di materiale fissile è sufficiente, durante la fissione si liberano altri neutroni capaci, a loro volta, di colpire nuovi nuclei e così via; si innesta una reazione a catena che può essere tenuta sotto controllo mediante determinati accorgimenti.

L'uranio 235 costituisce il combustibile che, introdotto nei reattori, svilupperà, mediante la fissione nucleare, una notevole quantità di energia.

Nei reattori auto-fertilizzanti, ancora di limitata diffusione, non solo viene prodotta energia, ma anche nuovo combustibile nucleare.

Esso però risulta altamente reattivo e, se inalato, provoca il cancro: perciò rimuovere le barre di combustibile per trasferirle in altri reattori è piuttosto complicato e pericoloso.

LA FUSIONE NUCLEARE

La *fusione nucleare* consiste nell'unione di nuclei di atomi leggeri per formare nuclei più pesanti; in un certo senso è il processo inverso di quello precedentemente descritto della scissione nucleare. Quando due nuclei leggeri (ad esempio l'*idrogeno*) sono spinti con forza l'uno contro l'altro, possono saldarsi o fondersi insieme e formare un solo nucleo il quale però risulta un po' meno pesante della somma degli altri due. La quantità di materia mancante risulta trasformata in energia.

Questa reazione avviene con continuità sul Sole e sulle altre stelle ad una temperatura di alcuni milioni di gradi; la luce ed calore che giungono a noi ne sono gli effetti visibili. Il vantaggio di questa reazione sta nell'enorme quantità di energia liberata: la completa fusione nucleare di una data massa d'idrogeno libera quasi il triplo dell'energia che viene liberata a seguito della completa fissione nucleare della stessa quantità d'uranio.

Gli scienziati sono finora riusciti a realizzare la fusione nucleare lenta e controllata solamente in laboratori sperimentali (esempi di fusione nucleare non controllata sono le bombe ad idrogeno).

La causa principale sta nell'identificazione di un materiale solido capace di resistere alle altissime temperature (alcuni milioni di °C) occorrenti alla reazione.

Il problema continua ad essere oggetto di appassionata ricerca da parte di scienziati di tutto il mondo: se e quando verrà risolto si potrà disporre di enormi quantità di energia derivante da materiali, come l'idrogeno, abbondanti in natura e, quel che più conta, senza il pericolo di scarichi e scorie inquinanti.

L'alternativa al processo di fusione nucleare sopra descritta è la *fusione a freddo* che alcuni ricercatori affermano di aver sperimentato ma siamo ancora lontani dal poterne parlare come applicazione sperimentale (in Italia è stato dichiarato di aver ottenuto la fusione a freddo nel laboratorio del Gran Sasso).

La fusione nucleare nelle stelle

Soltanto nel nostro secolo i fisici sono riusciti a capire quali processi avvenissero all'interno delle stelle che permettessero loro di emanare quantità di energia nell'ordine di miliardi di

joule al secondo. Osservando il sole, perciò, si è scoperto che le reazioni più semplici sono quelle che comportano la trasformazione di 3 nuclei di idrogeno in un nucleo di elio.

Si ritiene che nel sole il processo prevalente sia quello protone-protone e che il 3% dell'energia venga emesso sotto forma di neutrini e il 97% sotto forma di raggi gamma.

Grazie alla legge di Stefan-Boltzmann, che mette in relazione l'energia irradiata con la quarta potenza della temperatura si può poi calcolare la temperatura superficiale delle varie stelle.

Tali reazioni nel sole avvengono nel nucleo che rappresenta una minima parte dell'intero volume del sole (1,5%), dal momento che il suo raggio è circa $\frac{1}{4}$ dell'intero raggio solare. In esso, però, si concentra metà della massa del sole. L'energia che si libera a seguito delle reazioni nucleari viene emessa prevalentemente sotto forma di raggi gamma e, solo in parte di neutrini. Poiché i primi interagiscono fortemente con la materia e per arrivare alla superficie del sole possono impiegare anche 10 milioni di anni, mentre i secondi non interagiscono con la materia e viaggiano alla velocità della luce.

LE CENTRALI NUCLEARI

Principio di funzionamento

Il principio di funzionamento di una centrale nucleare è abbastanza semplice: nel *reattore* o *core*, dove si trova il combustibile nucleare, avviene la fissione controllata e da questo processo si sviluppa una grande quantità di energia sotto la forma di calore, che viene sottratto al reattore dall'acqua che circola attorno alle barre di combustibile. Essa è mantenuta allo stato liquido da una pressione di 100-200 atmosfere (con temperature di 300°C).

A questo punto l'acqua è pompata in uno scambiatore di calore, dove l'energia termica da essa trasportata è trasferita all'acqua di un generatore di calore. Si noti che l'acqua che raffredda il reattore e quella che fa funzionare la turbina sono contenuti in 2 sistemi chiusi e separati. Il calore generato viene utilizzato per la produzione di *vapore* che, espandendosi in una *turbina*, fa ruotare un *alternatore* ad essa collegato ottenendo quindi energia elettrica.

Il primo collegamento alla rete di una centrale atomica per uso (anche) civile data infatti all'inizio dell'estate del 1954. Il primato appartiene alla centrale sovietica di Obninsk, ora in Russia, a un centinaio di chilometri a sud-ovest di Mosca, disattivata nel 2002.

Le *barre di combustibile* sono tubi di metallo pieni di ossido di uranio, collocati nel nocciolo con, attorno, un liquido di raffreddamento, talvolta acqua, che cattura neutroni secondo una determinata reazione.

L'emissione di energia, è quindi regolata dalle *barre di controllo* di boro o cadmio che rimuovono i neutroni in eccesso. L'acqua, poi, oltre che fungere da liquido di raffreddamento è anche un moderatore: i neutroni emessi durante la reazione, infatti, hanno un'energia che

viene dissipata (in parte) dagli atomi d'idrogeno dell'acqua. Altri moderatori, poi, possono essere l'acqua pesante (che permette l'uso di uranio non arricchito) o la grafite.

Sicurezza nelle centrali nucleari Attualmente nel mondo sono in attività 433 **centrali nucleari**, 69 sono in costruzione, 160 pianificate e 329 proposte per la realizzazione.

Uno dei pericoli legati a queste industrie è la *fusione del nocciolo*: se il liquido moderatore fuoriesce, il reattore si spegne per la mancanza di neutroni lenti, ma le reazioni nucleari residue possono far aumentare di temperatura il nocciolo. Surriscaldandosi le barre di combustibile, la materia fuoriuscita può entrare in contatto con l'acqua di raffreddamento, immettendo nell'aria gas radioattivo. La massa fusa può inoltre aprirsi un varco attraverso il pavimento e penetrare nell'ambiente (la cosiddetta sindrome cinese).

L'installazione delle centrali nucleari provoca forti opposizioni da parte di larghi strati dell'opinione pubblica di numerosi Paesi temendone la pericolosità sia durante il funzionamento sia per lo smaltimento delle scorie radioattive.

E proprio il problema delle scorie risulta essere il più scottante specialmente dopo l'entrata in funzione dei reattori auto-fertilizzanti. Le soluzioni finora adottate, come il seppellimento dei materiali radioattivi racchiusi in contenitori di piombo in fosse marine o in miniere di sale abbandonate, non sono certo soddisfacenti.

Disastri nucleari I gravi incidenti nelle centrali nucleari di Three Mile Island (USA 1979), Chernobyl (ex URSS 1986), Fukushima (Giappone 2011) hanno indotto, nel tempo, ad una riflessione molto critica anche coloro i quali, pur essendo contrari in linea di principio alle centrali nucleari, erano disposti ad accettarle come un male necessario (mancanza di emissioni atmosferiche inquinanti).

In Italia, a seguito di un referendum, la popolazione si è pronunciata contro l'energia nucleare, nonostante i numerosi vantaggi che questo tipo di industrie avrebbe portato al nostro Paese e nonostante numerose Nazioni europee confinanti posseggano ed utilizzino centrali nucleari potenzialmente pericolose anche per il nostro Paese.

Cenni storici

Il fisico inglese Chadwick nel 1932 fu lo scopritore del neutrone ed i francesi Joliot svolsero per primi esperimenti sull'atomo e scoprirono la radioattività artificiale

Per lo sfruttamento della grande scoperta della radioattività artificiale occorreva però un complemento: l'uso dei neutroni come proiettili.

Nel 1934, per una serie di casi fortuiti, il gruppo di ricerca di Enrico Fermi scoprì che i neutroni rallentati, tramite della paraffina, erano molto più efficaci di quelli provenienti direttamente da una sorgente radioattiva. Benché queste scoperte possano sembrare a prima vista inutili o di scarso interesse, esse saranno la chiave per la liberazione dell'energia nucleare. Siamo così giunti al 1938. La situazione politica precipitava con l'asservimento dell'Italia a Hitler e Fermi ricevette la notizia di una probabile premiazione con il Nobel. Vista la situazione europea, colse l'occasione e decise di proseguire, da Stoccolma, fino a New York, dove alla Columbia University lo accolsero a braccia aperte.

Era appena giunto in America, che la notizia della scissione dell'uranio era già al centro del mondo scientifico. L'esperimento era stato portato a termine da due fisici tedeschi: Hahn e Strassmann.

A questo punto il passo concettuale dalla scissione ad una reazione nucleare a catena non è lungo. Infatti nella scissione vengono a crearsi dei frammenti, che possono liberare neutroni a loro volta. Per ottenere la reazione a catena è sufficiente che tali neutroni siano in numero maggiore a quelli utilizzati per innescarla: si ottiene così una reazione divergente. Nel caso la divergenza sia repentina avremo una bomba, mentre, se viene controllata, può essere utilizzata come fonte d'energia. Così divenne chiaro che esplosivi nucleari di potenza inimmaginabile, fino a quel momento, non fossero solo fantasie, ma realtà da prendersi molto sul serio, soprattutto quando potevano venire utilizzati da una persona come Adolf Hitler.

Di fronte a questa incredibile minaccia, si assistette ad una mobilitazione volontaria degli scienziati un po' in tutto il mondo.

Einstein stesso, a nome di un nutrito gruppo di uomini di scienza, firmò una lettera per il Presidente Roosevelt, nella quale lo informava della situazione dei possibili vantaggi/svantaggi che essa comportava.

Nel frattempo, Bohr, scoprì che la fissione nucleare per mezzo di neutroni lenti era possibile solo sull'isotopo raro dell'uranio con numero di massa 235, presente in una parte su 140 di sostanza. Ora si sapeva che per creare una bomba bisognava disporre di quantità sufficienti di un particolare isotopo, cosa che prevedeva l'immane compito di separare tali atomi da quelli più comuni; ma proprio quando tutto sembrava perduto, ecco che un gruppo di fisici, sfruttando il ciclotrone di Berkeley, scoprirono che anche il Plutonio 239 può servire allo scopo di combustibile nucleare.

L'interesse del Governo e dei maggiorenti della fisica statunitense, occupatissimi con il radar, crebbe fino al realizzarsi del Manhattan Project che aveva lo scopo di preparare un'arma atomica che potesse essere utile nella guerra che si stava combattendo. La metodologia di

preparazione fu la più efficiente che si potesse immaginare: preparazione del plutonio attraverso un reattore e separazione per via chimica, in quanto la produzione attraverso gli acceleratori sarebbe stata troppo lenta e infruttuosa.

Fermi, forte dell'esperienza accumulata in Italia, si occupò principalmente di analizzare la reazione a catena, miscelando i vari isotopi in modo da eliminare qualsiasi perdita di neutroni o assorbimento parassita. Sembra incredibile, ma il gruppo di scienziati riuscì ad ottenere il combustibile necessario nel tempo previsto; le motivazioni di quest'incredibile impresa vanno ricercate sia nella situazione tecnologica favorevole, sia nell'odio che molti fisici, in prevalenza Ebrei, provavano per Hitler. Questo sentimento era tale che molti lasciarono le proprie occupazioni per fermare la sua follia. Quando il materiale fissile fu pronto, ci fu da progettare la bomba vera e propria, ed a questo scopo venne creato il laboratorio di Los Alamos, nel Messico. A dirigere questo laboratorio ci fu J.R. Oppenheimer, uno dei personaggi più controversi nella storia dell'era nucleare. Questo scienziato infatti, pur partecipando alla costruzione della bomba a fissione, divenne uno degli oppositori alla bomba all'idrogeno e per questo fu perseguito politicamente.

Nel laboratorio di Los Alamos comunque, ci furono alcune gravi crisi che sembrarono mettere in dubbio la possibilità di costruire una bomba; per superare tali crisi servirono delle vere e proprie invenzioni tecniche che consentissero la progettazione. Il compito originale di Los Alamos si esaurì con la detonazione della prima bomba atomica a Jornada del Muerto, vicino ad Alamogordo (New Mexico), all'alba del 16 luglio 1945, data di nascita dell'attuale era nucleare.

Il 26 luglio 1945 gli Alleati inviano un ultimatum al Giappone per una resa incondizionata. Ricevuto il rifiuto come risposta il presidente americano Truman ordinò di sperimentare una nuova arma: *la bomba atomica* che fu sganciata il 6 agosto su Hiroshima e il 9 agosto su Nagasaki.

L'USO PACIFICO DELL'ENERGIA ATOMICA

La scoperta e l'utilizzo dell'energia nucleare hanno portato il progresso scientifico ad essere considerato un male per la vita dell'uomo, quasi un errore.

L'energia nucleare, però, può avere anche un utilizzo pacifico: gli artefici di questa scoperta hanno offerto all'umanità un potenziale energetico che non trova alternative e che può avere svariati usi.

Nel 1945, il premio Nobel James Frank, insieme ad altri fisici, si oppose all'utilizzo bellico dell'arma atomica sulle città giapponesi con una petizione al ministero della guerra ma,

essendo gli obiettivi dei capi politici e militari prioritari rispetto agli scrupoli di coscienza, la storia ha avuto il corso che tutti conosciamo.

L'utilizzo della potenza nucleare può avere anche effetti positivi: essa può essere impiegata come esplosivo chimico nella ricerca mineraria e nella costruzione di dighe e autostrade, nella creazione di porti, nello scavo di canali, nella frantumazione di formazioni rocciose del sottosuolo, per ottenere riserve di calore, per la produzione di energia e persino per la propulsione a grande distanza delle navicelle spaziali. L'uso odierno di questo tipo di energia è basato sul tipo di reazione a catena nata dalle ricerche scientifiche eseguite presso l'Università di Chicago.

Un reattore nucleare controllato può sviluppare grandi quantità di calore che, convogliate da un refrigerante (l'acqua o un metallo fuso), possono produrre elettricità o riscaldare un edificio.

Una centrale nucleare brucia uranio e produce energia elettrica, ma, a differenza di una normale centrale termoelettrica che brucia carbone, petrolio o gas, non sfrutta reazioni chimiche, bensì reazioni di fissione nucleare, circa un milione di volte più energetiche a parità di massa di combustibile.

I combustibili fossili costituiscono una fonte di *energia non rinnovabile* ed è stato stimato che dureranno per altri 50-60 anni.

In previsione di un prossimo esaurimento dell'uranio estratto in miniera sono stati sperimentati metodi per estrarre uranio in quantità quasi infinita dall'acqua marina e da altri materiali comuni (basti pensare che anche il granito, il principale componente delle rocce che formano la crosta continentale, è costituito, in parte, anche da uranio). L'energia nucleare, in condizioni di normale funzionamento, ha un impatto ambientale di gran lunga minore delle centrali a carbone o a metano, e non produce né anidride carbonica, né ceneri come le centrali a carbone.

Il problema maggiore sta nella produzione di scorie nucleari radioattive (prodotti di fissione: cesio, stronzio, iodio, rubidio, ecc...) estremamente pericolose da trattare. Per le scorie si sono proposti molti tipi di trattamento, dal bruciamento nel Rubbiatrone alla vetrificazione.

Al momento, l'unico modo per disfarsi delle scorie consiste nel chiuderle in bidoni adeguatamente schermati (quelli progettati recentemente offrono garanzie elevatissime), depositati in aree geologicamente stabili e adeguatamente monitorate. E' esattamente quanto si fa con i rifiuti chimicamente tossici.

Con l'unica eccezione di alcuni gravi incidenti, una centrale funzionante sottopone l'ambiente circostante ad un'esposizione alle radiazioni risibile. Per esempio, il sito di Cadarache, in

Provenza, dove si trovano alcuni reattori funzionanti ed un deposito di scorie, causa alla popolazione un'esposizione di 7 microsievert/anno, contro un millisievert/anno di fondo naturale.

Reattori tipici

Al momento, sono attive circa 440 centrali, che contribuiscono al fabbisogno energetico mondiale per il 6-7 % sul totale e per il 18% sul fabbisogno elettrico. Paesi come la Francia hanno quasi l'80% dell'energia elettrica nucleare, moltissimi paesi occidentali si aggirano sul 18-20%.

Esiste in tutto il mondo una grande varietà di reattori per la produzione di energia nucleare, che differiscono l'uno dall'altro per il tipo di combustibile, il moderatore o il sistema di raffreddamento. Nei reattori moderati e refrigerati ad acqua viene, generalmente, usata acqua naturale (non pesante) e questo richiede l'impiego, come combustibile, di uranio arricchito.

Gran parte delle centrali nucleari è del tipo P.W.R. (*Pressurized Water Reactor*, cioè, reattore ad acqua in pressione). Questo tipo di reattore è molto diffuso perché costituisce quello tecnologicamente più semplice, non pone particolari problemi di reperibilità, né dei materiali, né del combustibile, ed offre ottime garanzie di sicurezza. Nel nocciolo avvengono le reazioni nucleari, che riscaldano a temperature anche notevoli gli elementi di combustibile (uranio) impilati in cilindri molto lunghi e stretti. Questi sono lambiti dall'acqua di raffreddamento del circuito primario, che, raffreddandoli, asporta il calore e si riscalda. Essa si trova a circa 300-330°, ma non evapora, perché viene tenuta a una pressione di circa 155 bar (155 volte la pressione atmosferica).

Proseguendo nel proprio cammino, l'acqua scambia calore con altra acqua in un secondo circuito, a una pressione inferiore; il vapore generato arriva ad una pressione di circa 55 bar e ad una temperatura di circa 280° e investe una turbina, collegata ad un alternatore che dà energia alla rete elettrica.

Il vapore a bassa pressione in uscita dalla turbina viene raffreddato da acqua che scorre in un terzo circuito, che viene poi raffreddato ad aria in torri di raffreddamento. Se la centrale si trova nelle vicinanze di un corso d'acqua, l'acqua del circuito di condensazione (il terzo), che non ha avuto il minimo contatto con zone contaminate, viene scaricata nel fiume, ovviamente con portate e temperature tali da non influire sull'ecosistema.

Nel reattore ad acqua bollente (*Boiling Water Reactor, B.W.R.*), l'acqua refrigerante è mantenuta a una pressione inferiore e portata all'ebollizione nel nocciolo. Il vapore prodotto viene mandato direttamente nel generatore a turbina, condensato, e, quindi, ripompato nel

reattore. Sebbene il vapore sia radioattivo, non c'è bisogno di alcuno scambiatore di calore intermedio tra reattore e turbina, con il conseguente guadagno in efficienza. Come nel P.W.R., l'acqua di raffreddamento del condensatore proviene da un'altra fonte, come un fiume o un lago.

Il livello di potenza di un reattore in funzione viene costantemente controllato da una serie di strumenti di vario genere. La potenza in uscita viene regolata mediante l'inserimento o la rimozione, dal nocciolo del reattore, di barre di controllo, cioè di elementi costituiti da un materiale capace di assorbire neutroni molto efficientemente. La posizione delle barre viene determinata in modo che la reazione a catena proceda a ritmo costante.

Durante il funzionamento, e anche dopo l'interruzione, un grosso reattore da 1000 MW ha una radioattività di miliardi di *curie*. Le radiazioni emesse dal materiale radioattivo vengono assorbite da opportune schermature poste intorno al reattore e al circuito di raffreddamento primario. Ulteriori strutture di sicurezza sono costituite da un sistema di raffreddamento del nucleo, che evita che quest'ultimo raggiunga temperature pericolosamente elevate in caso di avaria dei sistemi di raffreddamento principali, ed una struttura di contenimento di tutto il materiale radioattivo, che evita qualunque fuga radioattiva in caso di rottura.

Sebbene all'inizio degli anni Ottanta fossero già operanti negli Stati Uniti d'America più di 100 impianti per la produzione di energia nucleare, in seguito all'incidente di *Three Miles Island* le preoccupazioni per la sicurezza e vari fattori di tipo economico hanno bloccato ogni ulteriore sviluppo nel campo dell'energia nucleare. Dal 1978 in poi non sono stati messi in cantiere altri impianti nucleari, e alcuni di quelli completati dopo quella data non sono stati resi operativi. Nei primi anni Cinquanta, quando iniziò lo sfruttamento dell'energia nucleare, l'uranio arricchito era disponibile solo negli Stati Uniti e nell'ex-Unione Sovietica; di conseguenza, i primi programmi di produzione di energia nucleare di Canada, Francia e Gran Bretagna prevedevano l'impiego di uranio naturale. Questo tipo di combustibile, meno efficace dell'uranio arricchito, richiede l'uso di ossido di deuterio o acqua pesante; l'acqua naturale ha la caratteristica di catturare un numero eccessivo di neutroni che, d'altra, parte sono necessari in elevate quantità a causa del basso rendimento del combustibile.

I primi reattori, alimentati con barre di uranio naturale, moderati a grafite e refrigerati con ossido di deuterio, furono in seguito soppiantati da reattori ad uranio arricchito e dai più avanzati A.G.R. (*Advanced Gas-cooled Reactor*, Reattore avanzato raffreddato a gas).

In Francia, in seguito alla costruzione di impianti per l'arricchimento dell'uranio, sono stati costruiti reattori del tipo P.W.R. La Russia e gli altri Stati dell'ex-Unione Sovietica hanno un programma molto ampio di sfruttamento dell'energia nucleare, che prevede sia il sistema

P.W.R. sia quello moderato a grafite. All'inizio degli anni Novanta erano in costruzione in tutto il mondo più di 120 nuovi impianti per la produzione di energia nucleare.

Reattori a propulsione

Dopo la fine del secondo conflitto mondiale, in Gran Bretagna e negli Stati Uniti d'America furono costruiti i primi reattori nucleari sperimentali per la produzione di energia. Impianti nucleari vengono utilizzati anche nella propulsione di grandi navi militari o di sottomarini. Generalmente, i sottomarini a energia nucleare sfruttano uranio molto arricchito, così da permettere una sensibile riduzione delle dimensioni del reattore.

Gli Stati Uniti d'America possiedono una flotta di più di cento sottomarini nucleari, il primo tra i quali, il Nautilus, costruito nel gennaio 1954, era dotato di motori che potevano contare su una fonte illimitata di energia. Anche l'Unione Sovietica varò, nel dicembre 1957, la prima nave nucleare in superficie, il rompighiaccio *Lenin*, impiegato per liberare i canali del mare Artico, e nel luglio del 1958 il *Long Beach* (incrociatore) e il *Savannah* (nave mercantile).

Tre navi nucleari, su iniziativa di Stati Uniti d'America, Germania e Giappone, hanno operato per periodi limitati a scopo di sperimentazione ma, nonostante il successo ottenuto dal punto di vista tecnico, le regolamentazioni portuali restrittive ed altri motivi di carattere economico hanno imposto la fine di questi progetti.

L'uranio, la risorsa naturale da cui dipende la produzione di energia nucleare, si trova in giacimenti diffusi in tutto il mondo; non se ne conosce con precisione la disponibilità, ma essa sembra essere molto limitata, soprattutto se si trascurano fonti a bassissima concentrazione, quali il granito e le argilliti.

La caratteristica fondamentale di un reattore autofertilizzante consiste nel fatto che esso può produrre, a partire da sostanze dette fertili, una quantità di materiale fissile superiore a quella che consuma. Il sistema ad autofertilizzazione più diffuso in tutto il mondo utilizza uranio 238 come materiale fertile. L'assorbimento di un neutrone da parte di un nucleo di uranio 238 dà luogo ad un processo radioattivo chiamato decadimento- β , durante il quale il nucleo si trasforma nell'isotopo fissile plutonio 239.

Radioterapia

La nascita della radioterapia, disciplina clinica che si serve delle radiazioni ionizzanti per la cura dei tumori, è stata resa possibile da tre scoperte fondamentali avvenute al termine del XIX secolo per merito di W.C. Roentgen (1895), H. Becquerel (1896) e M. e P. Curie (1898).

Questi scienziati, che per le loro ricerche conseguirono il premio Nobel, scoprirono i *raggi X* e la radioattività naturale; sul loro sviluppo sono fondate la moderna radioterapia a fasci esterni e la brachiterapia, che utilizza le radiazioni emesse da particolari sorgenti poste *vicino* alla lesione da curare.

Sono occorsi cinquant'anni di tumultuosi progressi scientifici nel campo delle radiazioni e delle loro applicazioni mediche per arrivare alla moderna radioterapia, che si serve delle alte energie dei fasci di radiazioni ionizzanti, meno lesive e più efficaci.

La possibilità di misurare le radiazioni ionizzanti e di conoscerne la distribuzione all'interno del corpo umano ha accompagnato lo sviluppo della radioterapia con la possibilità di ottenere grandi benefici con la guarigione dalla malattia tumorale, accompagnata dalla riduzione al minimo degli effetti collaterali.

Lo studio degli effetti delle radiazioni sui tessuti animali ed umani, sani e tumorali, ha permesso di determinare i frazionamenti della dose capace di uccidere determinati tumori con la morte delle cellule neoplastiche, senza la contemporanea morte delle cellule sane.

Il ruolo che la radioterapia svolge nella cura dei tumori o in alcune manifestazioni della malattia tumorale, come il dolore, coinvolge approssimativamente il 60% di tutti i pazienti ammalati di cancro. La radioterapia può essere usata in alcune forme tumorali o in alcuni stadi di esse come terapia esclusiva, cui può conseguire la guarigione, oppure può integrarsi con chirurgia e chemioterapia per conseguire lo stesso risultato. In caso di dolore, soprattutto se dovuto alla presenza del tumore diffuso allo scheletro, la radioterapia può essere ritenuta l'analgesico più efficace e dare un notevole contributo al miglioramento della qualità di vita del paziente.

Le due anime della radioterapia, quella clinica e quella tecnica, strettamente fuse, pur essendo la parte tecnologica al servizio di quella clinica, rappresentano un binomio di grande interesse nella medicina moderna per la cura del paziente affetto dal cancro.

La Scintigrafia nella clinica

L'esame scintigrafico è una metodica di diagnostica per immagini appartenente al campo della medicina nucleare.

In medicina, la sua utilizzazione è iniziata negli anni '50 e le diverse tecniche di impiego si sono progressivamente sviluppate con la disponibilità di nuovi isotopi radioattivi, di strumentazioni avanzate e con lo sviluppo dell'informatica.

L'esame scintigrafico consiste nel somministrare al soggetto, per via endovenosa, orale o inalatoria, un isotopo radioattivo libero o legato ad un farmaco a costituire una molecola più o

meno complessa. Dopo un intervallo variabile da pochi minuti ad alcune ore, a seconda dell'organo o dell'apparato che si vuole esaminare, la distribuzione delle radiazioni emesse dal radioisotopo può essere *mappata*, cioè rilevata con strumentazione apposita, essenzialmente data da una gamma-camera che, collegata ad un calcolatore, è in grado di fornire un'immagine dell'organo o dell'apparato *bersaglio* come risulta dopo l'arrivo del radioisotopo.

Sulla base delle *alterazioni di fissazione* del radiofarmaco è possibile localizzare alterazioni morfologiche nell'organo in esame e, mediante opportune tecniche di analisi e di elaborazione computerizzata delle immagini, ottenere indicazioni sulla natura delle lesioni rilevate.

L'impiego della scintigrafia nella medicina è iniziato dopo gli anni settanta.

Per eseguire la scintigrafia viene iniettata per via endovenosa una soluzione di isotopo radioattivo.

E' un isotopo molto maneggevole: le sue caratteristiche chimico-fisiche ne consentono l'utilizzo in massima sicurezza sia per chi esegua, sia per chi sia sottoposto all'esame. Non esiste pericolo derivante dal transito dell'isotopo nell'organismo, perché le dosi e l'attività delle radiazioni impiegate, sono a livello *diagnostico*, cioè non inducono alterazione alcuna nell'organismo.

L'utilità dell'esame scintigrafico consiste nel poter esattamente localizzare una lesione, sulla quale approfondire l'esame clinico o procedere ad esame radiografico e/o ecografico, specificamente orientati.

Aspetti positivi e negativi del nucleare

L'energia nucleare è una fonte energetica da valutare attentamente sia negli aspetti positivi che negativi. Come detto in precedenza, nelle centrali nucleari l'energia scaturisce dal bombardamento dell'uranio con neutroni. Il nucleo dell'uranio si divide in due nuclei più piccoli tramite un processo detto di "**fissione nucleare**" durante il quale si genera energia e altri neutroni che, a loro volta, continueranno a far dividere i nuclei di uranio dando luogo alla famosa "**reazione a catena nucleare**".

Durante questo processo viene emessa radioattività ad alta intensità. Gli oggetti e i metalli esposti alle radiazioni diventano essi stessi radioattivi, ossia scorie radioattive. Le scorie dovranno essere stoccate per migliaia di anni fin quando non decade il livello di radioattività. Il grado di radioattività non consente all'uomo di avvicinarsi alle scorie e, al momento, la scienza non è in grado di distruggere le scorie radioattive o di accelerare il periodo di decadimento della radioattività.

L'uranio è la materia prima delle centrali nucleari a fissione. Una minima quantità di uranio consente di produrre un'elevata quantità energia, e a differenza del carbone o del petrolio, senza emissioni di anidride carbonica (principale causa dell'effetto serra). Non esistono stime ufficiali sull'estrazione annuale di uranio. Questi dati sono coperti dal segreto militare o dal segreto di Stato.

Fin qui i vantaggi che hanno determinato lo sviluppo dell'energia nucleare nella seconda metà del novecento.

Su altri aspetti il nucleare non trova ancora valide risposte.

Il principale svantaggio del nucleare sono le drammatiche conseguenze in caso di incidente. L'epilogo di Chernobyl ha causato conseguenze globali e, ancora oggi, non si conosce il reale impatto sulla salute. Se da un lato le nuove centrali di ultima generazione garantiscono un livello di sicurezza elevato, dall'altro non si può fare a meno di pensare che anche la centrale di Chernobyl era stata considerata sicura a suo tempo.

Le scorie radioattive devono essere stoccate per migliaia di anni. Nessun paese al mondo è giunto a una soluzione definitiva di stoccaggio. In Italia, nel 2003 si fermò in protesta un'intera regione italiana per impedire la realizzazione di un deposito geologico di scorie.

La produzione di armi nucleari resta l'ultimo grande handicap. Non si può negare un legame tecnologico tra la produzione civile di energia nucleare e l'industria bellica. Nel 2004 gli USA e altri paesi occidentali fecero grande pressione sull'Iran per impedire la costruzione di una centrale nucleare civile proprio per il timore che questi impianti fossero utilizzati anche per finalità belliche. Di recente, lo sviluppo del nucleare nella Corea del Nord sta creando grande tensione mondiale. Pertanto il legame tra le due attività esiste.

Il costo reale del nucleare. Da circa 15 anni nessun paese occidentale, salvo la Finlandia e di recente gli USA dopo l'elezione di Trump, ha messo in cantiere nuove centrali nucleari.

Il nucleare comporta costi elevati fin dalla realizzazione degli impianti. Vanno poi ad aggiungersi i costi militari per garantire la sicurezza dagli attentati terroristici e i costi per smantellare la centrale nucleare al termine della sua attività. Tutti questi costi non sono sostenibili da un'industria privata. Lo Stato deve necessariamente intervenire a copertura delle spese aumentando tasse e imposte ai contribuenti. In breve, il basso costo dell'energia in bolletta potrebbe essere più che compensato dall'aggravio fiscale in termini di imposte.

La localizzazione degli impianti nucleari. Le comunità locali sono restie ad accettare un deposito di scorie o una centrale nucleare vicino casa.

Volendo sintetizzare il nucleare a fissione realizzato con reattori di ultima generazione è relativamente sicuro. Resta però il problema dei costi sociali e quello della localizzazione

delle centrali e del deposito di scorie. Finora nessuna soluzione sembra essere stata condivisa con i cittadini del luogo destinato ad ospitare un deposito di scorie per le evidenti conseguenze sulla salute.

(Angelica Foderaro - IV C)