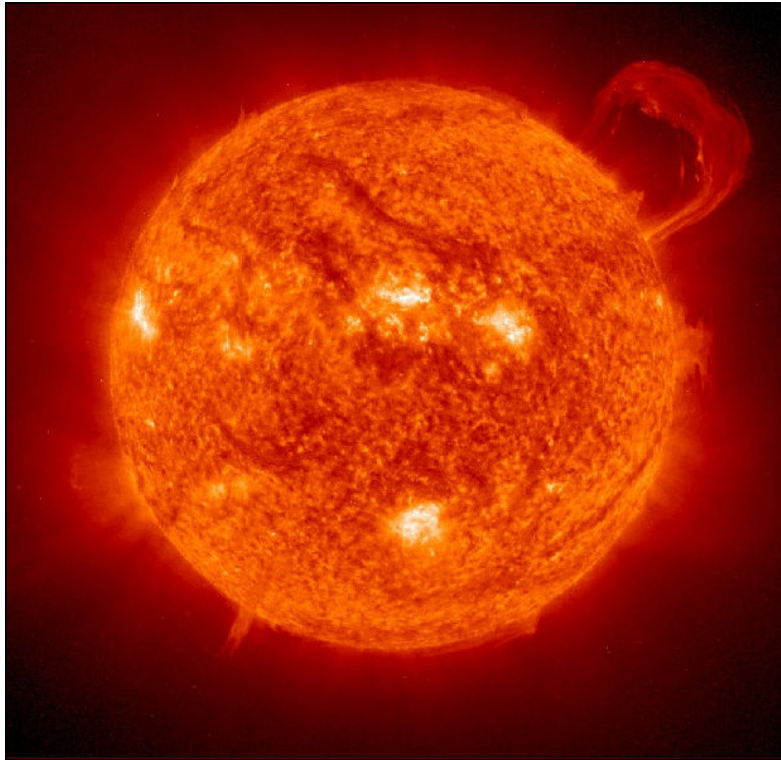


Roberto Perrino

Energia nucleare: come funziona?



Corona solare ed eruzione di elio (Courtesy of SOHO/EIT consortium. SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA).

La conquista del fuoco si è in un certo senso ripetuta in forme diverse nei millenni.

eBook n. 78
Pubblicato da *LaRecherche.it*

[Saggio]

PERCHÉ QUESTO EBOOK

Questo libro nasce dalla volontà di informare circa la tanto discussa questione dell'energia nucleare. Domanda: *L'energia nucleare è necessaria per risolvere il problema energetico che si delinea all'orizzonte dell'umanità?* Non entro qui nella questione degli sprechi energetici, derivanti da uno stile di vita opulento e consumistico, limitando i quali si potrebbe sicuramente già, e anche notevolmente, ridurre parte del problema energetico.

Tornando invece alla domanda sopra posta, la questione non è semplice. Roberto Perrino ci propone un percorso di riflessione tenendo nell'esposizione una certa neutralità, volendo appunto informare sulla questione energetica nucleare, non certo convincere. Lo ringraziamo perché con competenza ed in breve tempo, su nostra esplicita richiesta, è riuscito nell'impresa. Egli conduce il lettore in un tragitto di poche pagine proponendoci il punto di vista della scienza, qua e là ci sono formule e calcoli ma facilmente interpretabili sotto la guida dell'autore (siamo comunque, noi e l'autore, a disposizione per ogni ulteriore chiarimento e approfondimento).

Devo però dire che se l'autore è neutrale io non lo sono affatto, non riesco ad esserlo sull'argomento *energia*.

Allo stato attuale il processo utilizzato per la produzione di energia elettrica per mezzo del nucleare è quello della fissione, cioè la divisione di un nucleo di uranio in nuclei più piccoli con rilascio di energia – il processo sarà più in dettaglio sviluppato dall'autore in questo eBook –, tale processo è gravoso per vari motivi, primo fra tutti per il

rilascio di micidiali radiazioni e per la produzione di scorie che rimangono dannose per l'ambiente e la salute dell'uomo per molti secoli. Chi di noi vorrebbe una centrale nucleare vicino casa? Io no, e tanto meno vorrei un centro di stoccaggio dei materiali di scarto radioattivi. Nessuna tecnologia ci permette di realizzare centrali e stoccaggi sicuri. Inoltre c'è la questione che le scorte di uranio sono destinate ad esaurirsi, proprio come il petrolio. Dopo l'era dell'inquinamento petrolifero vogliamo l'era dell'inquinamento nucleare? O non sarebbe più appropriato per il futuro dell'umanità investire su altro per il proprio fabbisogno energetico? Ad esempio sul nucleare... ma quello del Sole o direttamente sulla fusione, lo stesso processo che avviene all'interno del Sole. Cioè un nucleare i cui scarti non sarebbero scorie radioattive ma elio, un gas totalmente inerte. Una reazione nucleare realizzabile con un combustibile come l'idrogeno (in realtà come vedrete servono suoi isotopi) che è innocuo e praticamente inesauribile, è possibile estrarlo dall'acqua del mare. Il combustibile contenuto in mezza vasca da bagno fornirebbe energia a un uomo per trenta anni. Con un grammo di combustibile si potrebbe ricavare l'energia equivalente di diecimila litri di petrolio. In tal caso dico nucleare sì. Ma per ottenere la fusione nucleare sulla Terra sono necessari ancora studi, ricerche e sperimentazioni. Segnalo qua, tra le varie ricerche in atto, il progetto ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), a cui accenna anche l'autore, un progetto internazionale per la costruzione di un reattore a fusione nucleare che coinvolge 500 scienziati di 34

paesi tra cui l'Italia, risiede in Provenza e fu ipotizzato nel 1985 da Gorbaciov, in un vertice per il disgelo a Ginevra con Reagan.

Ma in attesa che gli scienziati riescano a rendere utilizzabile il nucleare a fusione, si ipotizza non prima del 2027, si può usare il nucleare del Sole, cioè l'energia solare insieme alle altre fonti rinnovabili, eolico, maree, eccetera, fonti di energia che avremo sempre a disposizione e il cui impatto ambientale è praticamente nullo, e che permettono di eliminare alla radice anche il noto e reale problema dell'effetto serra. Insomma un mondo pieno di energia, e pulito, è possibile, basta volerlo, e tutti noi lo vogliamo, noi che viviamo la giornata nella semplicità degli affetti, che privilegiamo le relazioni costruttive e positive tra gli uomini, e con onore e passione per la vita cerchiamo il bene comune, la pace e la giustizia; ma si sa che ci sono altri che fondano la loro vita sulla massimizzazione dei guadagni, senza guardare in faccia niente e nessuno.

Il referendum è alle porte e ciascuno è chiamato ad esprimersi come meglio crede in coscienza, ma è necessario esprimersi opportunamente informati, è in gioco il futuro dell'Italia.

Per una volta partiamo avvantaggiati, altri paesi europei, hanno iniziato a pianificare la chiusura delle loro centrali nucleari e a investire nelle energie rinnovabili, noi non dobbiamo spendere soldi per chiudere centrali nucleari e possiamo investire soldi, tutti e direttamente, nello sviluppo di un piano energetico intelligente e a misura del nostro amato Paese e dell'Europa stessa; possiamo essere un traino

basterebbe uscire, una volta tanto, dall'involuzione che caratterizza la nostra politica e osare, investendo sul futuro.

Personalmente un'idea precisa me la sono fatta, nel corso di anni di studio nel campo della fisica nucleare, invito voi tutti con la lettura di questo eBook, sfruttando le competenze scientifiche di Roberto Perrino, ricercatore dell'INFN, a fare altrettanto, anche se in minor tempo. Buon voto.

Roberto Maggiani

UN'AVVERTENZA E DUE RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato concepito e realizzato in un tempo piuttosto breve, se rapportato alla vastità del tema trattato. Si presenta pertanto come uno strumento approssimato per trasmettere una informazione di base sui concetti di materia ed energia nella accezione delle scienze fisiche, con un focus finale sulla energia nucleare.

Ringrazio Emma, Giulio ed Annamaria per aver letto senza eccessive proteste le ripetute bozze dei vari capitoli propinate man mano che le andavo scrivendo.

Ringrazio Roberto Maggiani, al quale mi accomuna l'amore per Poesia e Scienza, per avermi chiesto di scrivere questo eBook.

Lecce, 30 maggio 2011.

Roberto Perrino

1. Il mondo macroscopico. La materia e l'energia.

Dalla nostra esperienza quotidiana impariamo, fin da piccoli, che il mondo che ci circonda ed il nostro stesso corpo sono fatti di materia, e che ciò che chiamiamo materia si può presentare in forme diverse, dette *stati della materia*: solida, liquida, aeriforme.

I *solidi* sono quei corpi le cui forme e dimensioni tendono a rimanere invariate, anche in presenza di sollecitazioni esterne. I *liquidi* non sono dotati di forma propria, ma assumono la forma del recipiente che li contiene, pur mantenendo sostanzialmente un volume costante in condizioni normali. Gli *aeriformi* (o *gas*), come i liquidi, hanno bisogno di un recipiente per essere contenuti, ma hanno la tendenza ad occupare tutto il volume disponibile: se aumentiamo il volume del recipiente, aumenta anche il volume del gas.

I diversi *stati della materia* sono distinti, sul piano della loro struttura interna microscopica, dalla diversa intensità delle forze di coesione tra i *componenti elementari*, comuni a tutta la materia conosciuta: gli *atomi* e le *molecole*. Nel caso dei solidi, tali forze sono talmente intense che gli atomi che li compongono sono sostanzialmente bloccati in posizioni fisse, e possono soltanto oscillare attorno a tali posizioni, come se ciascun atomo fosse connesso con quelli che lo

circondano attraverso piccole, ma robuste molle (Fig. 1, sinistra).

Nel caso dei liquidi, queste forze di coesione sono sensibilmente più deboli, cosicché gli atomi (o le molecole) tendono a scivolare gli uni sugli altri, come tanti pallini che possono così adattare le loro posizioni, non più bloccate, al recipiente in cui si trovano (Fig. 1, centro).

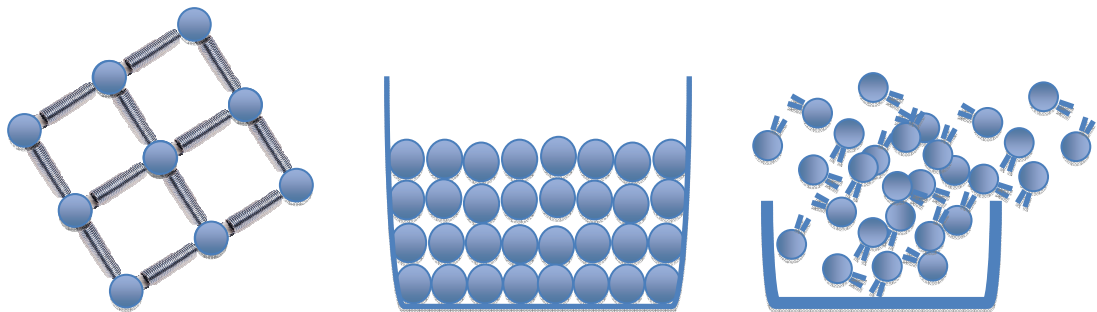


Fig. 1 Modelli di struttura di corpo solido (sinistra), liquido (centro) ed aeriforme (destra). Le sfere rappresentano le molecole. Le molle nel caso solido rappresentano le intense forze di coesione.

Nel caso gassoso i corpuscoli elementari risultano quasi del tutto privi di vincoli, e tendono a muoversi indipendentemente gli uni dagli altri (Fig. 1, destra). Ciò fa di un gas un corpo privo di una sua forma e di un suo volume proprio.

La materia trasforma continuamente il suo stato. L'acqua liquida del mare per effetto del riscaldamento solare passa allo stato gassoso, e si ricondensa in pioggia continuamente sul globo terrestre. A basse temperature solidifica trasformandosi in ghiaccio, cioè in un corpo solido.

Ciò che causa queste trasformazioni, dette *transizioni di fase*, è un trasferimento di *energia*. Il ghiaccio fonde perché sta assorbendo energia dall'esterno sotto forma di calore. Una transizione di fase, o *cambiamento di stato*, non avviene istantaneamente, poiché una quantità finita di materia m deve assorbire una quantità di calore Q , proporzionale alla massa stessa, per transitare da uno stato all'altro. Nella Fig. 2 sono rappresentate le trasformazioni di una quantità di materia m da solido a liquido a vapore su un diagramma cartesiano. Sull'*asse delle ascisse* (quello orizzontale) è riportata la quantità di calore Q assorbita dalla massa m . Sull'*asse verticale*, o *asse delle ordinate*, è riportata la temperatura T . Il corpo solido di massa m (ad esempio un cubetto di ghiaccio), quando assorbe energia dall'esterno sotto forma di calore Q , si comporta inizialmente come un contenitore di calore dotato di una certa *capacità termica*. Questa capacità per grammo è chiamata *calore specifico*, indicato nel diagramma con la lettera c . Il calore specifico è una proprietà della sostanza di cui è fatto il corpo. Il significato di questa costante è chiaro dal diagramma se osserviamo il primo segmento lineare (area verde scuro): man mano che forniamo calore al corpo, la sua temperatura si innalza dal valore iniziale (asse verticale) al valore T_f (*temperatura di fusione*). Possiamo dire che il corpo viene "riempito" gradualmente di calore fino alla sua capacità massima. L'aumento di temperatura indica che i corpuscoli (atomi e molecole) del corpo aumentano le loro oscillazioni rispetto alle loro posizioni di equilibrio, ma l'intensità delle forze (le robuste molle) che li tengono vincolati insieme non varia sensibilmente.

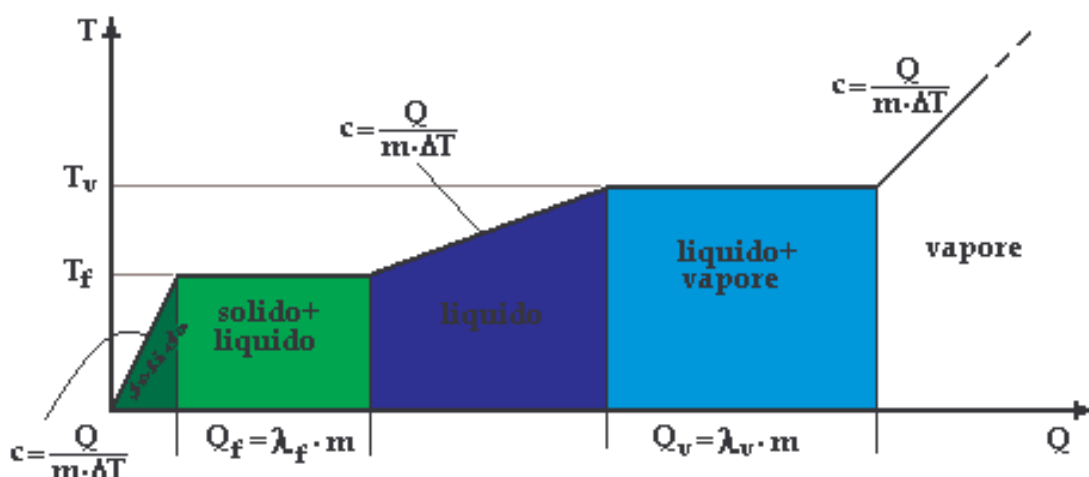


Fig. 2 Diagramma della transizione di fase della materia solido-liquido-vapore. (http://it.wikipedia.org/wiki/File:Passaggi_di_stato.PNG)

A questo punto inizia l'area verde chiaro (Fig. 2). In questa fase, mentre continuiamo a fornire calore al corpo, la sua temperatura non sale più, ma rimane costante al valore T_f . Quel che avviene è la progressiva transizione dallo stato solido allo stato liquido, cioè la *fusione*. La quantità di calore $Q_f = \lambda_f m$ che il corpo assorbe durante questo cambiamento di stato è una *energia latente*, cioè non si manifesta con un aumento di temperatura, ma agisce su un altro livello della struttura del solido. Essa provoca il progressivo indebolimento dei legami tra atomo e atomo (tra molecola e molecola) fino a rendere tali corpuscoli molto più liberi di muoversi l'uno rispetto all'altro, cosa che si manifesta come cambiamento di stato fisico. In modo del tutto analogo è possibile comprendere la transizione da liquido a gas.

Un corpo che si riscalda, quindi, assorbe *energia* sotto forma di *calore* e tale energia diviene energia interna al corpo attraverso un aumento del moto delle particelle che lo

compongono. Questo moto è misurato macroscopicamente dalla *temperatura*. Il calore si misura in calorie (cal). Una caloria è definita come la quantità di calore che occorre fornire ad 1 grammo di acqua (H₂O) per innalzare la sua temperatura da 14,5 a 15,5 gradi centigradi, al livello del mare. Non ci si deve meravigliare di definizioni così apparentemente cervellotiche. Spesso ciò è necessario perché le grandezze fisiche non sono sempre costanti, ma dipendono dai parametri ambientali (pressione, temperatura), cosicché conviene definirle in condizioni fissate convenzionalmente.

Le calorie a noi più familiari sono le grandi calorie (Cal = kcal), che sono 1000 volte più grandi della caloria sopra definita:

$$1 \text{ Cal} = 1 \text{ kcal} = 1.000 \text{ cal}$$

quindi 1 Cal è la quantità di calore che eleva di 1 grado centigrado la temperatura di 1 kg di acqua al livello del mare. Questa Cal ci è familiare perché è una unità di misura conveniente per misurare il fabbisogno energetico alimentare. Un pasto di 1500 Cal fornisce una energia capace di elevare di 1 grado la temperatura di 15 quintali di acqua!

C'è un altro modo per un corpo di acquisire energia, ed è il movimento del corpo come un tutt'uno. Questa, a differenza della energia interna (moto delle molecole), si manifesta attraverso uno spostamento del corpo da una

posizione ad un'altra, oppure per una variazione dello stato di quiete o di moto del corpo per effetto di una forza esterna. Ad un corpo di massa m in movimento con velocità v , si associa una *energia cinetica* (di movimento) E_c pari a:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2$$

Pertanto un corpo in quiete, avendo velocità nulla, ha energia cinetica nulla. Di conseguenza, non può essere utilizzato per compiere lavoro: se l'acqua non fosse in moto, non potrebbe azionare le macine di un mulino, se il vento non soffiasse (aria che si muove) sulla vela non potrebbe trascinare la barca. In questa accezione, *lavoro* indica la capacità di una forza di provocare lo spostamento di un corpo sul quale è esercitata. Il *lavoro compiuto da una forza* per muovere un corpo da una posizione ad un'altra per uno spostamento assegnato, è dato da:

$$\text{lavoro} = \text{forza} \times \text{spostamento}$$

e, dal punto di vista fisico, è una grandezza omogenea all'energia. Nel suo linguaggio, il fisico dice che *il lavoro ha le dimensioni di un'energia*.

L'unità di misura per questa energia, derivata dalle grandezze fondamentali *massa*, *lunghezza* e *tempo*, è il Joule (dal nome del fisico britannico James Prescott Joule). Un Joule (J) misura l'energia cinetica di un corpo di 2 kg che

viaggia alla velocità di 1 metro al secondo (3,6 km/h), ed equivale ad esempio, all'energia richiesta per sollevare di un metro (1 m) dal suolo terrestre una mela di circa un ettogrammo (100 g).

L'energia cinetica (o *meccanica*) si può facilmente trasformare in *energia termica* (calore). Ne abbiamo esperienza ogni volta che azioniamo i freni della nostra auto in movimento e la portiamo all'arresto totale. La sua energia cinetica viene dissipata, attraverso le *forze di attrito* (sfregamento) tra i pattini e i dischi dei freni, che di conseguenza si riscaldano, oltre che consumarsi. Joule misurò per primo l'*equivalente meccanico della caloria* con un celebre esperimento [1], ancora oggi eseguito nei primi anni del corso di laurea in fisica, ottenendo la conversione:

$$1 \text{ cal} \cong 4,19 \text{ J}$$

(Il simbolo \sim sopra l'*uguale* significa *circa uguale*).

Viceversa, anche il calore può essere convertito, attraverso *macchine termiche*, in energia meccanica (o, come spesso si dice, lavoro). È ciò che avviene, ad esempio, nei motori a scoppio delle nostre automobili, dove il rapido aumento di temperatura provocato dalla combustione esplosiva del carburante determina la spinta (*pressione*) che muove i pistoni, il cui movimento è poi trasmesso all'albero motore e da questo alle ruote.

È utile osservare che, mentre l'energia meccanica può essere trasformata completamente in calore, la conversione di calore in lavoro è in generale inefficiente, solo una frazione viene convertita in energia meccanica. Infatti una parte considerevole del calore assorbito viene immagazzinato sotto forma di energia interna dallo stesso materiale di cui è fatto il motore, e una parte viene dissipata nell'ambiente esterno. Ad esempio, nei motori delle automobili questa efficienza è tipicamente inferiore al 30%. Questa osservazione è un effetto del *secondo principio della termodinamica*, che, in una delle sue possibili formulazioni, afferma che “*Non è possibile - nemmeno in linea di principio - realizzare una macchina termica il cui rendimento sia pari al 100%*” [2].

Questo fondamentale principio va tenuto a mente, poiché ci dice che, nella maggior parte dei processi di produzione e trasferimento di energia, una volta giunti alla trasformazione in energia termica, una parte considerevole di tale energia va irrimediabilmente perduta e non è quindi recuperabile in altre forme. E ciò ha considerevoli conseguenze sulla nostra *economia energetica*.

Riferimenti

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

[2] http://it.wikipedia.org/wiki/Secondo_principio_della_termodinamica

2. Il mondo microscopico. La materia-energia.

Il mondo microscopico, che non ci è accessibile direttamente attraverso i nostri organi di senso, è formato tutto di molecole ed atomi. Le molecole sono la parte più piccola di una sostanza che ne conserva le proprietà fisico-chimiche. Una sostanza è quindi un insieme omogeneo di molecole o atomi tutti uguali. Le molecole sono a loro volta formate da atomi aggregati in composizioni con rapporti costanti. Ad esempio, l'acqua è formata da molecole (Fig. 3) ciascuna delle quali si compone di due atomi di idrogeno e uno di ossigeno (H_2O). In tal modo qualsiasi quantità di acqua comprende atomi di idrogeno in numero due volte superiore rispetto all'ossigeno.

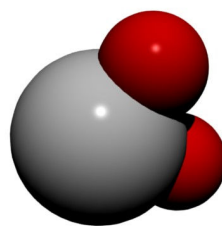


Fig. 3 Modello virtuale di una molecola di acqua (H_2O). La sfera bianca rappresenta l'atomo di ossigeno, le due sferette rosse i due atomi di idrogeno. (http://commons.wikimedia.org/wiki/File:H2O_2.jpg)

Al livello delle sostanze, ovvero fino alla scala delle molecole e degli atomi, la materia e l'energia si manifestano come due entità separate, e le strutture materiali, come si è

visto nel capitolo precedente, possono assorbire o emettere energia, ad esempio in modo termodinamico (attraverso una variazione della propria temperatura o con transizioni di fase), oppure assumendo energia cinetica attraverso il movimento causato da una forza esterna. Questo modello, tuttavia, non risulta del tutto adatto a descrivere i trasferimenti di energia termica e meccanica quando il corpo in osservazione si muove a velocità molto elevate, diciamo a velocità vicine alla velocità della luce. Tale circostanza, del tutto lontana dalla nostra esperienza quotidiana, si verifica invece nel mondo sub-atomico (cioè il mondo delle particelle che compongono l'atomo).

Nel 1905 Albert Einstein, elaborando le conseguenze della sua *teoria della relatività ristretta* [3], rivoluzionò la visione dei rapporti tra materia ed energia. Egli, superando la concezione del senso comune, scoprì che l'energia associata ad un corpo di massa m in movimento con velocità v non è semplicemente l'energia cinetica, ma piuttosto:

$$E_{\text{tot}} = \gamma mc^2 \quad (2.1)$$

dove il fattore γ (*gamma*, è una lettera dell'alfabeto greco) incorpora la dipendenza dalla velocità (energia cinetica), e c (dal latino *celeritas*) è la velocità della luce nel vuoto, all'incirca uguale a 300.000 chilometri al secondo (km/s). Il significato di questa importante scoperta è nel fatto che i due concetti di massa (materia) ed energia, che l'esperienza macroscopica ci fa percepire come entità fisiche di natura differente, sono

in realtà legate in modo molto più intimo, in quanto manifestazioni di una stessa struttura fisica di base (*spazio-tempo*).

La versione più famosa dell'equazione di Einstein (2.1)

$$E = mc^2 \quad (2.2)$$

si ottiene quando il corpo è in quiete (velocità $v = 0$). In tal caso $\gamma = 1$ (energia cinetica zero), e quindi l'energia totale è dovuta alla sola massa, che assume anche un nome speciale: *massa a riposo*.

Basta sostituire nella equazione (2.2) i numeri per rendersi conto di quale scala enorme di energia stiamo parlando. Un grammo di materia (un millesimo di kg: 1/1.000 kg), secondo tale equazione, racchiude un potenziale energetico pari a (si tenga conto che $c^2 = c \times c$):

$$\begin{aligned} E &= 1 \text{ grammo} \times (300.000 \text{ chilometri/secondo})^2 = \\ &= (1/1.000 \text{ kg}) \times (300.000.000 \text{ m/s})^2 = \\ &= (300.000.000 \times 300.000.000) / 1.000 \text{ kg} \times \text{m}^2/\text{s}^2 \\ &= 90.000.000.000.000 \text{ kg} \times \text{m}^2/\text{s}^2 \end{aligned}$$

ed essendo $1 \text{ kg} \times \text{m}^2/\text{s}^2 = 1 \text{ J} = 1/4,19 \text{ cal}$ possiamo dire:

$$E = 90.000.000.000.000 \text{ J} = 21.479.713.603.819 \text{ cal} \quad !!!$$

Novantamila miliardi di Joule! Circa ventunomila

cinquecento miliardi di calorie, una quantità di energia immensa!... che per nostra fortuna è normalmente stabile in condizioni normali, e di conseguenza rimane solo *potenziale*, il che ci permette in ambito comune di ignorare completamente tale aspetto del nostro mondo fisico.

Quindi, alla scala subatomica, la massa e l'energia sono intimamente legate e si possono convertire reciprocamente. Di conseguenza è conveniente usare un'appropriata unità di misura per l'energia, che permetta una diretta combinazione con la massa. Tale unità è l'elettronvolt (eV) [19] che, convertito in Joule, vale circa $1,6 \times 10^{-19}$ J. I suoi multipli: KeV= 10^3 eV, MeV= 10^6 eV, GeV= 10^9 eV, TeV= 10^{12} eV. Per le energie tipiche dei nucleoni nel sistema nucleare l'unità più adatta è il MeV.

Se l'energia è misurata in MeV, la massa sarà di conseguenza misurata in MeV/c², come ci permette convenientemente di fare l'equazione di equivalenza tra massa ed energia.

Gli esperimenti confermarono la conversione tra massa ed energia alla scala dei processi atomici e nucleari. Una dimostrazione spettacolare di questa intima relazione di identità tra massa-energia si ha negli *acceleratori di particelle* [4]. Per particelle si intendono qui i costituenti fondamentali della materia subatomica. Alcune di queste particelle, come gli elettroni e i protoni, essendo dotate di carica elettrica, possono essere estratte dagli atomi e messe insieme per mezzo di forti campi elettrici e magnetici per formare fasci di

particelle che possono essere accelerati fino a energie cinetiche molto elevate. Le macchine che permettono la realizzazione di fasci di particelle sono gli acceleratori. Il più grande acceleratore di particelle oggi in funzione è il Large Hadron Collider (LHC) del CERN di Ginevra [5]. LHC accelera due fasci di protoni lungo una galleria circolare lunga 27 chilometri e posta a circa 100 metri nel sottosuolo. I due fasci di protoni vengono poi portati a collidere nei punti di interazione, dove la loro energia totale relativistica ($E_{\text{tot}} = \gamma mc^2$) viene rilasciata dando luogo alla creazione di una miriade di nuove particelle che vengono osservate dagli apparati sperimentali.

I protoni di LHC vengono accelerati ad una energia cinetica di 7 TeV¹, che significa ad una velocità molto prossima a quella della luce. Tanto per aver un raffronto, il fattore γ dell'equazione (2.1) per il protone a 7 TeV vale circa 7500, mentre per una automobile di 1500 kg a 100 km/h vale soltanto 1.

Poiché i due fasci di protoni da 7 TeV ciascuno vengono fatti orbitare nell'acceleratore in direzioni opposte, l'energia che dissipano nella collisione è pari a 7 + 7 TeV. Tutta questa energia viene convertita in massa (Fig. 4).

Per un altro esempio molto evidente di conversione diretta materia-energia possiamo ispirarci ai fenomeni di *radioattività* [6]. Per radioattività si intende un insieme di *reazioni nucleari* spontanee, nelle quali un nucleo instabile

¹ Il TeV è un multiplo dell'*elettronvolt*, una conveniente unità di misura dell'energia dei sistemi sub-atomici. Per un confronto con altre unità di misura, si rimanda al Cap. 4.

tende a decadere (trasformarsi) in un nucleo stabile per mezzo della emissione di radiazioni. Questi processi avvengono in accordo con due principi fondamentali della fisica, le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto (grandezza fisica che tiene conto della velocità di un corpo in relazione alla sua massa, $m \times v$). Le *leggi di conservazione* stabiliscono che nelle trasformazioni di un sistema fisico isolato, l'energia totale e la quantità di moto totale rimangono costanti, cioè uguali prima e dopo la trasformazione.

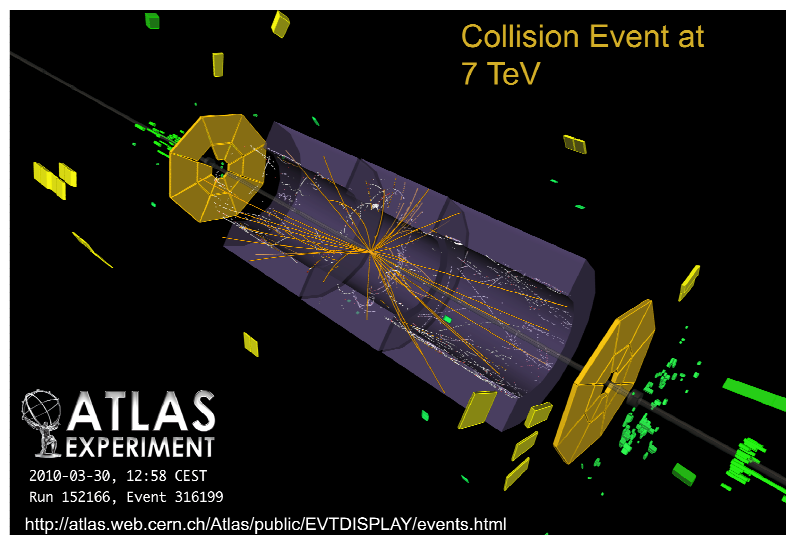


Fig. 4 Evento di una collisione tra due fasci di protoni ad una energia di 7 TeV, visto dagli apparati dell'esperimento ATLAS (CERN) [6]. La visualizzazione è una trasposizione virtuale delle grandezze fisiche misurate dagli strumenti. Le tracce che si diramano dal centro di interazione rappresentano le particelle prodotte dalla trasformazione dell'energia dei fasci in massa, secondo l'equazione di Einstein.

Nei processi radioattivi [7], scoperti alla fine del XIX secolo da Antoine Henri Bequerel, seguito da Maria Skłodowska e Pierre Curie, si ha emissione di *particelle alfa*

(α), successivamente identificate con i nuclei dell'elemento elio (He), *particelle beta* (β), successivamente identificate con gli elettroni (e^-) e indicate con il simbolo β^- , e *raggi gamma* (γ), la cui natura è quella di un'onda elettromagnetica simile ad un fascio di luce con energia molto elevata rispetto alla luce visibile dall'occhio umano.

Le particelle beta possono anche essere di carica elettrica positiva. In tal caso sono chiamate β^+ e si identificano con l'*antiparticella* [8] dell'elettrone, detta positrone (e^+). Quando una particella e la corrispondente antiparticella vengono a contatto, come il positrone e l'elettrone, si annichilano, ovvero scompare la loro massa, per riemergere sotto forma di pura energia.

Questo è quel che avviene in elementi radioattivi come l'isotopo del sodio, ^{22}Na (il 22 indica il numero di particelle, protoni e neutroni, presenti nel nucleo dell'atomo di sodio, il cui simbolo è Na). Il sodio è un elemento molto comune, che conosciamo principalmente perché, combinato con il cloro, forma il sale da cucina (cloruro di sodio). Il ^{22}Na è instabile e quindi decade (Fig. 5) nel nucleo stabile ^{22}Ne (neon), attraverso l'emissione di un positrone e di un neutrino (che possiamo ignorare ai fini della presente discussione).

Il positrone emesso incontra rapidamente un elettrone, annichilandosi. L'energia generata dalla scomparsa delle due antiparticelle è uguale, secondo l'equazione di Einstein, alla massa totale:

$$E = (\text{massa positrone} + \text{massa elettrone}) \times c^2$$

ed emerge sotto forma di due fotoni γ_1 e γ_2 , ciascuno con un'energia pari alla massa convertita di ciascuna delle particelle annichilate. In particolare, utilizzando l'unità di misura più appropriata in tale scala, parliamo di una energia di 511 keV (511.000 elettronvolt), essendo la massa di positrone ed elettrone pari a $511 \text{ keV}/c^2$.

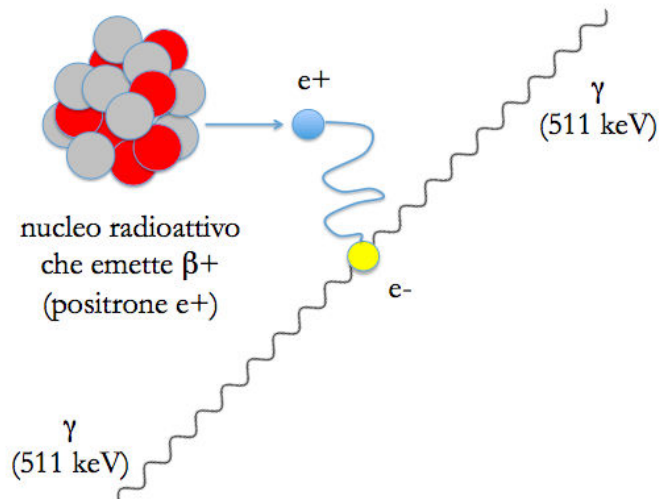


Fig. 5 Annichilazione di una coppia elettrone-positrone. Il positrone è emesso da un radionuclide e si annichila con il primo elettrone che incontra sul suo breve cammino. Nel processo le due particelle si trasformano totalmente in energia, emessa sotto forma di radiazione elettromagnetica.

Riferimenti

- [3] http://it.wikipedia.org/wiki/Relatività_ristretta
- [4] http://it.wikipedia.org/wiki/Acceleratore_di_particelle
- [5] <http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/LHC-en.html>
- [6] **ATLAS Experiment** © 2011 CERN ATLAS images are under [CERN copyright](#). If the ATLAS material is to be used for commercial purposes, it must not explicitly or implicitly convey CERN or ATLAS' endorsement.
- [7] <http://it.wikipedia.org/wiki/Radioattività>
- [8] <http://it.wikipedia.org/wiki/Antiparticella>

3. Forme e fonti di energia.

L'energia è una grandezza fisica di fondamentale importanza per la nostra vita quotidiana, ma è altrettanto importante il modo e la intensità con cui essa è distribuita.

Le forme di energia comuni che conosciamo sono poche e ben individuabili (Fig. 6): *meccanica*, *termica*, *elettrica*, *chimica*, *radiante*. Anche le fonti sono facilmente elencabili: le *fonti non rinnovabili* (combustibili fossili, nucleare) e le *fonti rinnovabili* (acqua, vento, sole, ecc.).

Le *energie meccanica* e *termica* le abbiamo discusse nei precedenti capitoli. La prima è collegata al moto macroscopico dei corpi, siano essi solidi, liquidi o gassosi. La seconda è strettamente connessa al moto microscopico delle molecole, che oscillano nei solidi e si muovono caoticamente nei liquidi e ancor di più nei gas. Da qui discende che sostanzialmente entrambe queste forme di energia sono dovute al moto, quindi sono forme di energia cinetica.

L'*energia elettrica* è dovuta alle forze (*campo elettrico*) che si instaurano tra corpi carichi elettricamente ed al loro moto relativo. La carica elettrica dei corpi è dovuta ai corpuscoli portatori di carica elettrica (quasi sempre elettroni, ai quali è associata per convenzione una carica negativa). L'energia elettrica ci è familiare soprattutto perché la preleviamo con le nostre apparecchiature (lampadine, elettrodomestici) nella forma di una *corrente* [11], in modo molto simile al prelievo della corrente di acqua dai rubinetti.

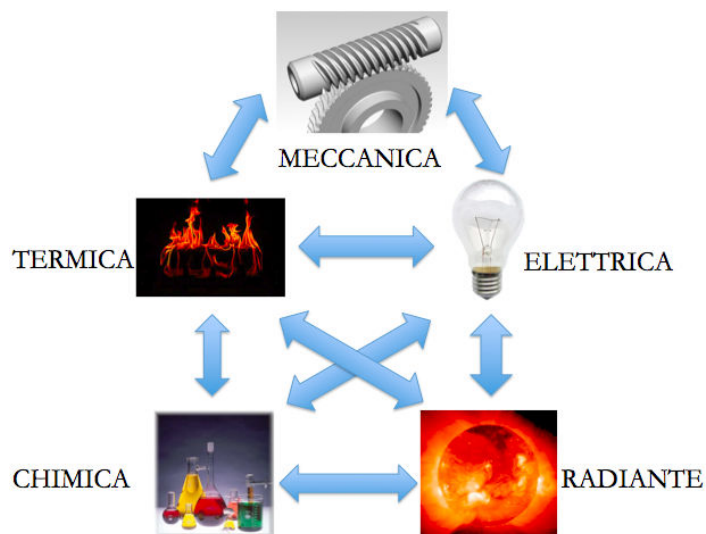
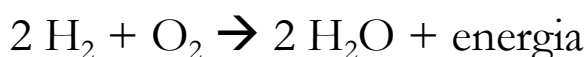


Fig. 6 Forme di energia comuni. Tutte si trasformano continuamente l'una nell'altra, sia in natura, sia nelle applicazioni artificiali create dall'uomo.

L'*energia chimica* è l'energia che risiede nelle molecole. Quando alcune sostanze interagiscono, le loro molecole si scindono e ricompongono in nuove molecole, liberando energia sotto forma di calore. Un esempio piuttosto spettacolare di reazione chimica [12] *esoenergetica* (che cioè produce calore) è la reazione che si innesca quando il gas idrogeno (H_2) viene a contatto con l'ossigeno (O_2). I due elementi reagiscono violentemente formando acqua (H_2O) e una gran quantità di calore in modo estremamente rapido ed esplosivo (miscela tonante):



L'alta instabilità dell'idrogeno ne limita l'uso come combustibile in condizioni standard. Ciò non vieta che sia usato con successo nella propulsione dello Space Shuttle in fase di decollo (Fig. 7, bombolone gigante centrale).

La *combustione* [13] è il processo chimico principe per la produzione di energia. Nella combustione una sostanza base (combustibile, carburante) reagisce, in opportune condizioni di pressione e temperatura, con l'ossigeno (comburente), portando alla produzione di calore e scorie residue. Nella combustione dei carburanti fossili (petrolio e derivati, carbone, gas naturale) il prodotto di scarto principale è il *biossido di carbonio* (CO_2). In alcuni casi, come la combustione dell'idrogeno, l'unico prodotto di reazione è l'acqua.



Fig. 7 Space Shuttle Atlantis in fase di decollo. Il bombolone centrale contiene una miscela calibrata di idrogeno ed ossigeno, che, innescati, detonano fornendo la spinta necessaria alla navicella. Il processo è a impatto zero, poiché l'unico prodotto di reazione è l'acqua.

L'*energia radiante* è, a guardar bene, la madre di tutte le energie. La fonte di questa energia è il Sole, la nostra stella. L'energia che essa irraggia è trasportata fino a noi dalla superficie del Sole per mezzo di *onde elettromagnetiche* [14]

(rappresentabili anche come flusso di quanti di luce, o *fotoni* [15]).

Questo flusso radiante riscalda l'atmosfera e il suolo terrestre. Inoltre viene trasformato ed immagazzinato in molte altre forme di energia.

I processi di fotosintesi clorofilliana nelle piante verdi, accumulano l'energia della luce solare attraverso la sintesi dello zucchero (*glucosio*), che diviene una delle fonti primarie di energia per il mondo vivente. Inoltre il flusso radiante viene convertito in energia meccanica attraverso il ciclo dell'acqua (Fig. 8). Infatti, una volta ricondensata e riportata nei fiumi, torrenti e cascate, l'acqua può alimentare, con il suo movimento, un semplice mulino o un alternatore a turbina, come avviene nelle centrali idroelettriche [16]. In quest'ultimo caso si ha una ulteriore trasformazione da energia meccanica ad energia elettrica.



Fig. 8 Il ciclo dell'acqua, o ciclo idrologico. Il calore del Sole fa sì che l'acqua degli oceani sia continuamente evaporata, condensata, precipitata in piogge. Questo processo alimenta una gigantesca riserva di energia la cui fonte è il Sole, ed il magazzino è l'acqua che scorre in fiumi, torrenti, cascate.

Il vento, che è lo spostamento di enormi masse d'aria nell'atmosfera causato da differenze di pressione, ha origine anch'esso dal riscaldamento dell'atmosfera, e può essere usato per produrre energia elettrica. L'energia radiante può infine essere usata direttamente per il riscaldamento per mezzo di un impianto termosolare.

È molto interessante osservare che l'energia radiante del Sole, da cui sostanzialmente traiamo tutte le altre forme/fonti di energia sia rinnovabili che non, abbia come sorgente una forma di energia che non abbiamo ancora citato in questo contesto: *l'energia nucleare*.

L'immensa quantità di energia che il Sole irraggia sulla superficie terrestre (circa 1000 Watt per ogni metro quadrato di superficie terrestre quando il Sole è a picco [17]) è infatti alimentata da reazioni di *fusione nucleare*.

Completiamo la nostra discussione sulle forme e fonti di energia confrontando la loro *densità energetica* [18], cioè la quantità di energia immagazzinata in un chilogrammo di carburante. La densità energetica viene espressa in MJ/kg (milioni di Joule al chilogrammo).

Con riferimento alla Tab. 1, è evidente che le fonti di energia con massima densità sono quelle nucleari, poiché si avvantaggiano del processo di conversione diretta di massa in energia. La densità di energia per la fusione dell'idrogeno, che riscalda il Sole, è di circa 64.5000.000 MJ/kg! Da confrontare, ad esempio, con l'energia immagazzinata in un

kg di benzina, che vale soltanto 47 MJ/kg. Il carbone è a circa 33 MJ/kg, mentre il legno non supera i 17 MJ/kg, esattamente la stessa densità di energia del nostro metabolismo degli zuccheri. Sotto questo profilo, la produzione di energia attraverso la digestione degli zuccheri è esattamente equivalente alla combustione del legno.

Tab. 1 Densità energetica di alcune fonti/serbatoi di energia [18].

	Densità energetica [MJ/kg]
Fusione idrogeno nel Sole	645.000.000
Benzina	47
Carbone	33
Legno, metabolismo zuccheri	17
Molle molecolari nel ghiaccio	0.335
Acqua in invaso diga 100 m	0.001

La densità di energia associata al legame intermolecolare del ghiaccio (acqua solida), cioè l'energia per unità di massa immagazzinata nelle robuste molle che abbiamo citato nel primo capitolo parlando dei corpi solidi, è di appena 0,335 MJ/kg (calore latente di fusione dell'acqua).

Se passiamo alle fonti rinnovabili troviamo valori molto bassi della densità energetica. L'energia potenziale per kg di acqua in un invaso a 100 m di dislivello, vale 0,001 MJ/kg. Questo è un argomento utilizzato, non senza una certa ragione, per giustificare visioni pessimistiche sullo sfruttamento efficace delle fonti di energia alternative.

Riferimenti

- [9] [http://it.wikipedia.org/wiki/Potenza_\(fisica\)](http://it.wikipedia.org/wiki/Potenza_(fisica))
- [10] http://it.wikipedia.org/wiki/James_Watt
- [11] http://it.wikipedia.org/wiki/Corrente_elettrica
- [12] http://it.wikipedia.org/wiki/Reazione_chimica
- [13] <http://it.wikipedia.org/wiki/Combustione>
- [14] http://it.wikipedia.org/wiki/Radiazione_elettromagnetica
- [15] <http://it.wikipedia.org/wiki/Fotone>
- [16] http://it.wikipedia.org/wiki/Centrale_idroelettrica
- [17] http://it.wikipedia.org/wiki/Energia_solare
- [18] http://it.wikipedia.org/wiki/Densità_energetica

4. Energia dal nucleo atomico: la fissione e la fusione.

4.1 Scala energetica delle reazioni chimiche esotermiche

In una centrale termoelettrica alimentata con combustibili a base di carbonio, una reazione chimica (la combustione, appunto) è utilizzata per trasformare l'energia chimica immagazzinata nel combustibile. Nel caso del carbone, trascurando le impurezze presenti nel minerale, questa reazione chimica può essere rappresentata in modo simbolico:



dove C è il simbolo del carbonio (monoatomico), O₂ è il simbolo della molecola di ossigeno (formata da due atomi), CO₂ (biossido di carbonio, o anidride carbonica) è il prodotto della reazione. È anche indicata l'energia prodotta per mole, quest'ultima essendo una quantità di carbonio standard (1 mole = 12 g di carbonio); tale energia è pari a 394 kJ = 94 Cal.

Per conoscere la scala di questa energia a livello molecolare, dobbiamo dividere per il numero N_A di atomi/molecole in una mole, detto *numero di Avogadro*. Si tratta di un numero elevatissimo², N_A = 6,02 × 10²³. Dalla

² Per i numeri molto grandi o molto piccoli conviene usare le potenze di 10: 10ⁿ = 1 seguito da n zeri (e.g. 10³ = 1000, 10⁶ = 1000000).

divisione e dalla conversione in una unità di misura appropriata alla scala molecolare [19], risulta una energia emessa pari a circa 4 eV per ogni molecola di CO_2 formata.

L'emissione di energia è dovuta al fatto che il sistema di due molecole separate C e O_2 ha una energia superiore al sistema della molecola di biossido di carbonio CO_2 , come illustrato nella Fig. 9. Questo fenomeno riflette un principio fondamentale della fisica, per il quale i sistemi con minima energia sono i più stabili. Di conseguenza le transizioni di un sistema sono favorite verso stati di minima energia (o stati di equilibrio). Il sistema dei tre atomi C, O, O trova equilibrio, stabilità, se fonde in un'unica molecola CO_2 emettendo l'energia che avanza.

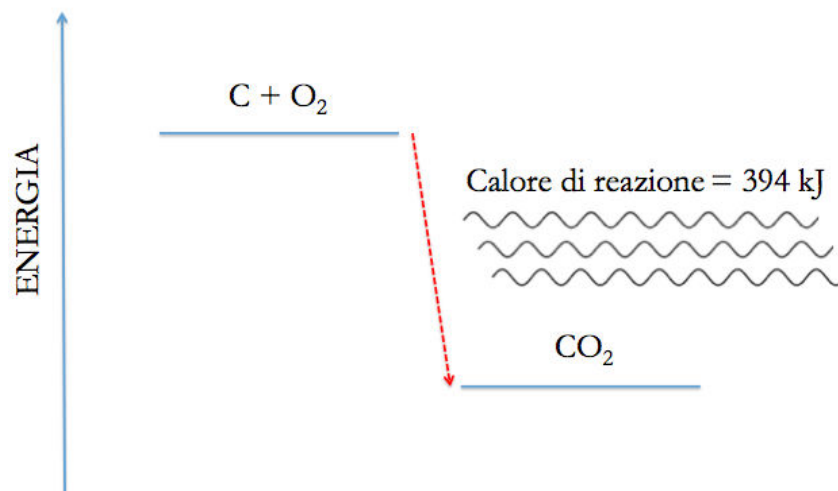


Fig. 9 Diagramma energetico della reazione di combustione del carbonio, riferito ad 1 mole = 12 g. Lo stato della molecola di CO_2 è favorito rispetto a quello del sistema separato C + O_2 , perché più basso sulla scala di energia. La differenza tra le due energie è emessa sotto forma di calore.

È interessante osservare che, in una reazione chimica, la massa dei prodotti di reazione non differisce

apprezzabilmente dalla massa totale dei reagenti. Anzi, alla scala delle energie chimiche, vige una *legge di conservazione della massa (legge di Lavoisier)*[20].

Questo non è il caso delle reazioni nucleari, nelle quali una frazione consistente della massa si trasforma in energia e viceversa.

Le reazioni nucleari, analogamente alle reazioni chimiche, possono fornire energia. In tal caso si dicono esotermiche e avvengono attraverso la transizione da uno stato di energia più elevata a uno più stabile avente energia più bassa.

Per comprendere come le reazioni nucleari divengano fonti di energia utilizzabile macroscopicamente, è utile considerare la *struttura del nucleo atomico* e i concetti di *difetto di massa* ed *energia di legame*.

4.2 La struttura del nucleo atomico

L'atomo (Fig. 10), cioè la più piccola parte di un elemento chimico, si compone di una parte centrale, il *nucleo*, dove è concentrata quasi tutta la massa atomica, e gli *elettroni*, che possiamo immaginare come particelle molto più leggere, orbitanti attorno al nucleo.

Le dimensioni del nucleo sono all'incirca 100.000 volte più piccole di quelle dell'atomo, e sono tipicamente misurate in femtometri³ (fm, $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$, cioè un milionesimo di miliardesimo di metro).

³ Il femtometro è tradizionalmente chiamato *fermi* dai fisici nucleari in omaggio a Enrico Fermi.

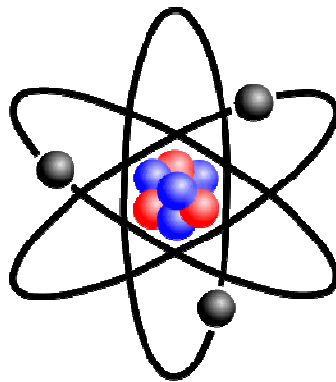


Fig. 10 Rappresentazione stilizzata di un atomo di litio. Attorno ad un nucleo centrale pesante ruotano gli elettroni.

I nuclei sono formati dalla *materia nucleare*. Questa materia ha una struttura molto complessa al livello di particelle elementari (*quarks* e *gluoni*), e le sue proprietà fondamentali sono descritte dalla Cromodinamica Quantistica (QCD) [21]. Per le applicazioni energetiche il nucleo può essere invece più semplicemente rappresentato da un sistema a molti corpi formato da nucleoni: *protoni* e *neutroni*.

Il numero di protoni di un nucleo, indicato con il simbolo Z , si chiama *numero atomico* [22] ed è caratteristico di ciascun elemento chimico. Detto N il numero di neutroni, il numero totale di nucleoni $A = Z + N$ è denominato *numero di massa* [23], poiché è all'incirca proporzionale alla massa totale del nucleo. Per uno stesso elemento, cioè a Z fisso, il numero di neutroni N (e di conseguenza il numero di massa A) può variare, dando origine agli *isòtopi* [24].

Consideriamo le masse delle particelle atomiche (Tab. 2) e osserviamo che l'elettrone ha una massa circa 2.000 volte più piccola di quella dei nucleoni.

Tab. 2 Masse delle particelle atomiche.

Particella	Carica elettrica C ^(*)	Massa MeV/c² ^(**)
Protone (p)	+ 1,6 × 10 ⁻¹⁹	M _p = 938
Neutrone (n)	0	M _n = 940
Elettrone (e)	- 1,6 × 10 ⁻¹⁹	M _e = 0,511

^(*) l'unità di misura della carica è il Coulomb (C)

^(**) la massa è convenientemente espressa tramite $E = mc^2$, cioè $m = E/c^2$

Misure accurate hanno dimostrato che la massa di un nucleo è sempre un po' più piccola della somma delle masse dei suoi componenti (Fig. 11). Queste misure sono fatte con una speciale bilancia, lo *spettrometro di massa* [25], che è in grado di misurare la massa di un atomo ionizzato (cioè un atomo che abbia perso tutti o parte degli elettroni perdendo così la sua neutralità elettrica) attraverso la misura della sua traiettoria in un campo magnetico di intensità nota e ad essa trasversale.

La differenza di massa tra *il tutto e le sue parti* è chiamata *difetto di massa*. Essa non è persa, ma è trasformata in *energia di legame* del nucleo.

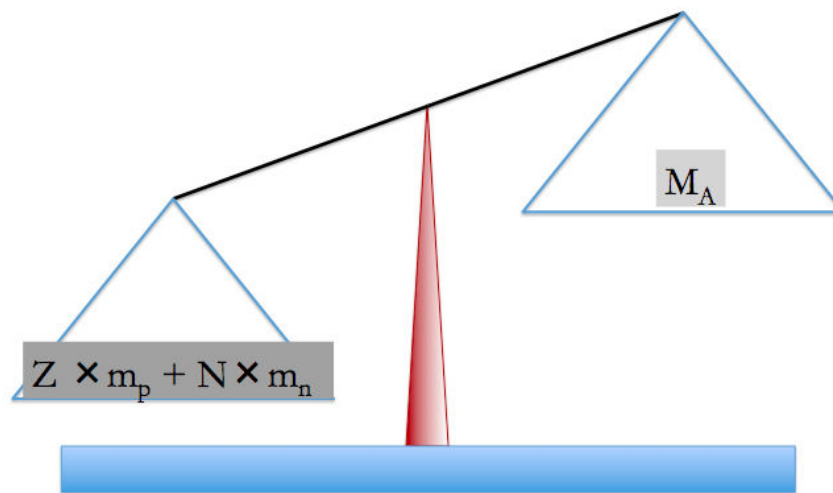


Fig. 11 Confronto tra la massa del nucleo con numero di massa $A = Z+N$ e la massa di Z protoni ed N neutroni separati.

Per illustrare questo concetto, possiamo considerare un'analogia meccanica (Fig. 12) riguardante il più semplice dei nuclei, a parte l'idrogeno che ha come nucleo un singolo protone. Un suo isotopo, chiamato *deutone*, è formato da un protone ed un neutrone. Se lo immaginiamo come una scatola che racchiude i due nucleoni, vincolati ad una molla compressa, allora la scatola rappresenta le forze che tengono insieme il nucleo (*interazione nucleare forte*), mentre l'energia accumulata nella compressione della molla rappresenta l'energia di legame. L'unica, ma fondamentale, differenza con l'analogia meccanica è che, a questa scala di massa-energia la massa totale del sistema *protone+neutrone=deutone* è leggermente inferiore ($2,2 \text{ MeV}/c^2$) alla somma delle masse dei due componenti. L'energia di legame è proprio $B=2,2 \text{ MeV}$.

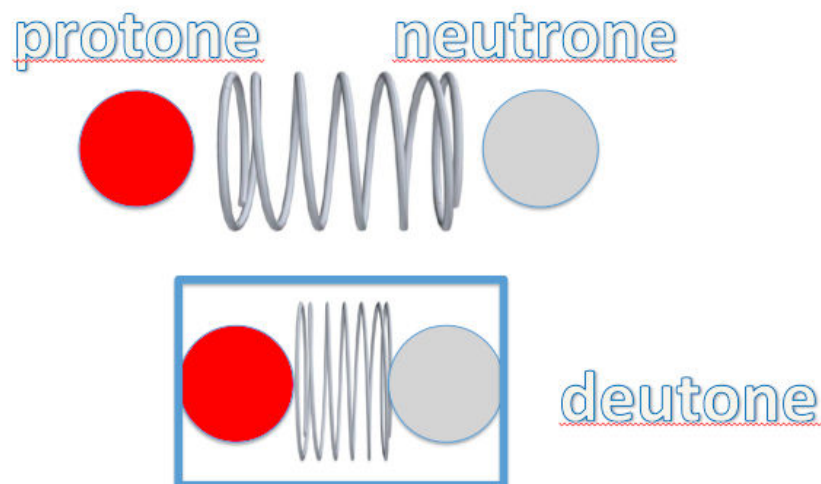


Fig. 12 Analogia meccanica dell'energia di legame del deutone, formato da un protone ed un neutrone. In questo caso $Z=1$ (idrogeno, H), $N=1$, $A=Z+N=2$. Il deutone è il nucleo del deuterio, isotopo dell'idrogeno. La scatola intorno al deutone rappresenta la forza nucleare. L'energia di compressione della molla rappresenta l'energia di legame.

L'energia di legame totale di un nucleo cresce con il suo numero di massa A ($=Z+N$), tuttavia l'energia di legame per ciascun nucleone aggiunto (Fig. 13) ha un andamento inizialmente molto rapido, fino a un valore $A \sim 60$. Per valori $A > 60$ tende a diminuire lentamente mantenendo un valore medio di circa 8 MeV per nucleone.

Il significato di tale andamento è che i nuclei con maggiore stabilità sono quelli con numero di massa intorno ad $A=60$, dove l'energia di legame per nucleone è massima. Nei casi estremi di nuclei molto leggeri (idrogeno, deuterio, trizio) e molto pesanti (Uranio), il valore molto piccolo della energia di legame per nucleone porta, rispettivamente, a

favorire processi di *fusione* e di *fissione nucleare*, che producono sistemi nucleari più stabili. Tali trasformazioni sono alla base dei processi di produzione di energia dal nucleo.

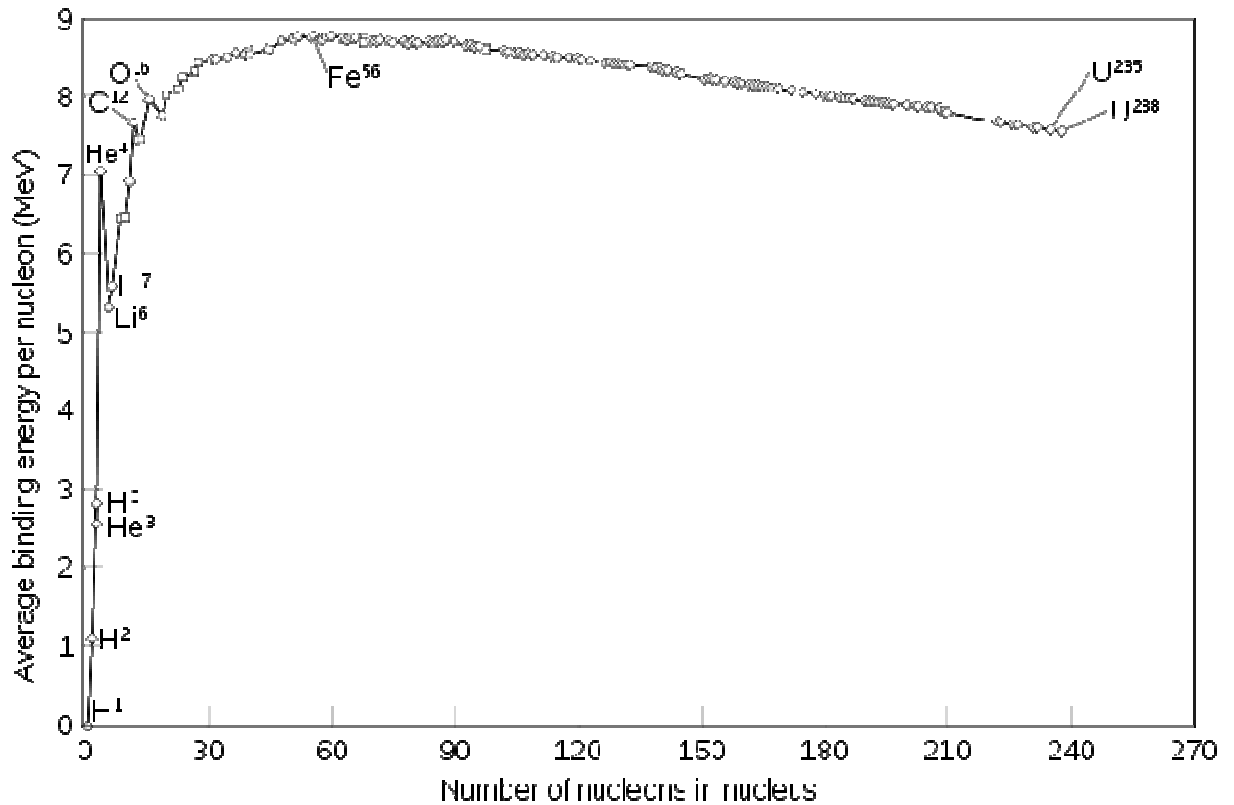


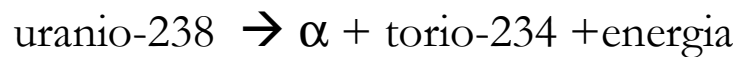
Fig. 13 Energia di legame media per nucleone in funzione del numero di massa A [26].

4.3 Reazioni nucleari. La fissione.

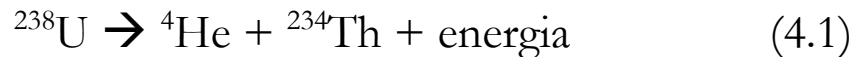
L'instabilità dei nuclei fu scoperta attraverso le trasmutazioni radioattive verso la fine del 1800. Eminentissimi chimici dell'epoca (Becquerel, Curie) si accorsero che alcune sostanze emettevano radiazioni. In seguito, Sir Frederick Soddy propose la teoria della trasmutazione isotopica: le radiazioni osservate erano il risultato di trasmutazioni di un

elemento in un altro. Le forme fondamentali di radioattività sono denominate α , β , γ (alfa, beta, gamma).

Nella radioattività α , un nucleo pesante ($A > 60$) instabile si spacca in due frammenti, uno leggero (la particella α , $A=4$, che altro non è se non un nucleo dell'elemento elio) e un residuo pesante, che a sua volta può ulteriormente decadere. Nel processo si libera energia, sotto forma di energia cinetica delle particelle irradiate, in perfetta analogia con la liberazione di energia termica nelle reazioni chimiche esotermiche. Un esempio di tali processi è il decadimento α dell'uranio-238 [27] in torio-234, a sua volta radioattivo:



che simbolicamente si scrive:



Nella radioattività β e γ vengono rispettivamente emessi un elettrone/positrone ed un quanto γ di radiazione elettromagnetica. Non approfondiremo, in questo lavoro, la natura di questi due processi.

Con riferimento all'esempio (4.1), l'emissione di una particella α avviene perché la configurazione del sistema iniziale, il nucleo ${}^{238}\text{U}$, è energeticamente instabile. Ciò favorisce la transizione (secondo un principio che abbiamo

enunciato discutendo le reazioni chimiche) a uno stato energeticamente favorevole (Fig. 14).

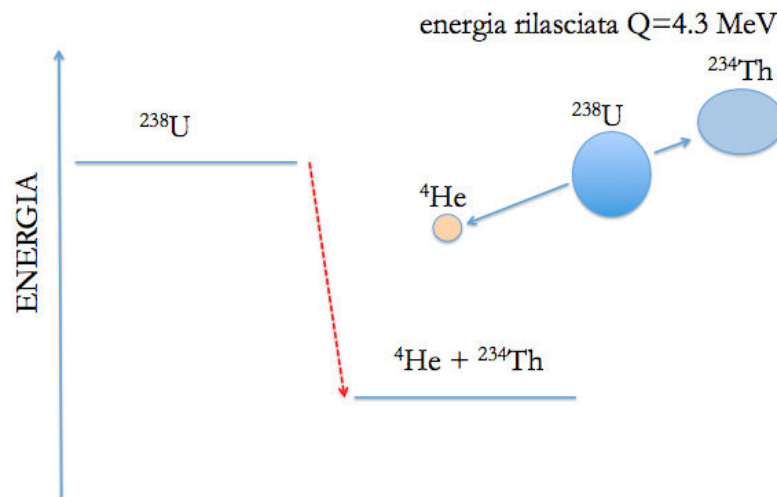


Fig. 14 Diagramma energetico del decadimento radioattivo dell'uranio-238. La particella leggera emessa è una $\alpha = {}^4\text{He}$, il residuo è il torio-234. La differenza di energia tra lo stato iniziale (uranio intero) e il finale (uranio spezzato in $\alpha +$ torio) compare come energia cinetica dei prodotti della reazione. L'energia rilasciata equivale a circa 7×10^{-16} kJ.

La *fissione* è un processo radioattivo presente in natura nei nuclei di massa medio-alta ($A \sim 200$). In perfetta analogia con il decadimento α , la fissione consiste della spaccatura di un nucleo in due frammenti di media massa ($A \sim 120$) accompagnata dalla emissione di alcuni neutroni (Fig. 15). Tale processo spontaneo è tuttavia fortemente meno probabile del decadimento α . Nel caso dell'isotopo di uranio ${}^{238}\text{U}$, ad esempio, la fissione risulta circa due milioni di volte più rara dell'emissione di una particella α .

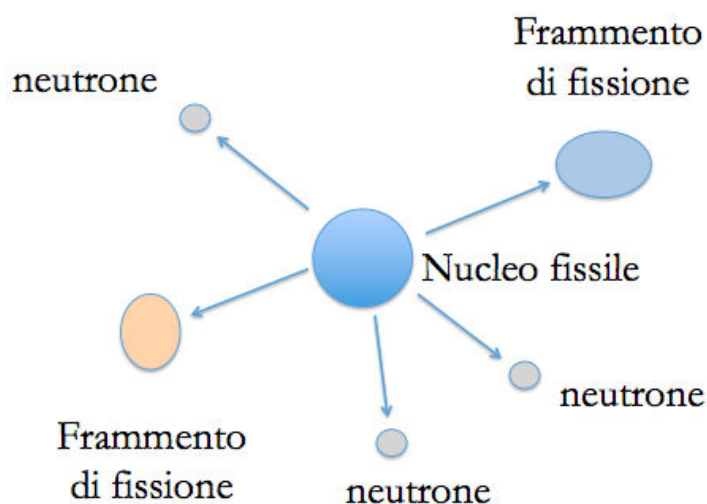


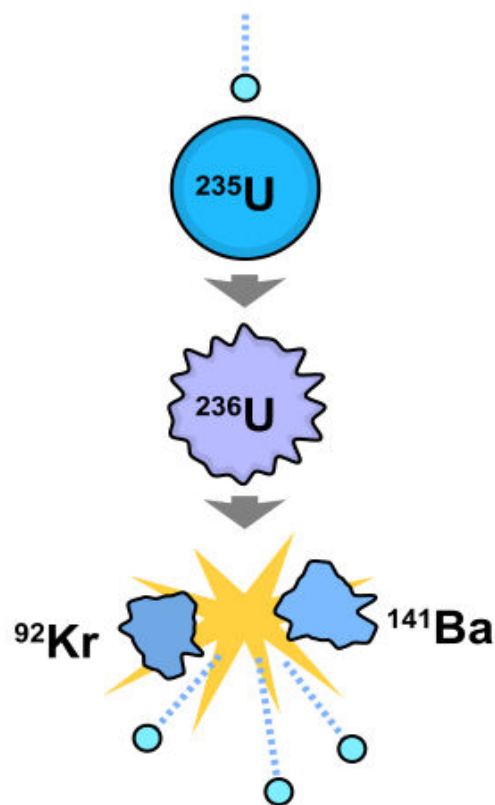
Fig. 15 Schema pittorico di una fissione nucleare. Il nucleo fissile si spezza in due frammenti nucleari di massa confrontabile. La fissione è accompagnata solitamente dalla emissione di alcuni neutroni.

Per questo motivo la fissione fu scoperta solo attraverso il bombardamento di uranio con neutroni. I primi esperimenti furono realizzati dal gruppo di Enrico Fermi (i *ragazzi di via Panisperna* [28]), ma fu il tedesco Otto Hahn che identificò correttamente il processo di fissione dell'isotopo ^{235}U (Fig. 16).

L'energia rilasciata in questo processo è di circa 200 MeV. Calcoliamone l'entità in MJ/kg per poterla confrontare con la densità energetica tipica di un combustibile convenzionale (vd. Cap. 3).

Essendo 1 mole di ^{235}U pari a 235 grammi di uranio-235, per conoscere l'energia prodotta dalla fissione di 1 grammo, dobbiamo moltiplicare i nostri 200 MeV per il numero di nuclei di una mole (numero di Avogadro, Cap. 3) e dividere per 235:

Fig. 16 Fissione nucleare dell'Uranio-235 indotta da bombardamento di neutroni. L'isotopo ^{235}U assorbe un neutrone, mutando nell'isotopo instabile ^{236}U , il quale in seguito decade a uno stato di minore energia attraverso la fissione in due nuclei di massa media, con emissione di neutroni ed energia.



$$200 \text{ MeV} \times 6,02 \times 10^{23} / 235 \text{ g} = 5 \times 10^{23} \text{ MeV/g}$$

e, tenendo conto che:

$$1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV} = 10^6 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} = 1,6 \times 10^{-13} \text{ J}$$

possono essere convertiti in MJ/kg:

$$\begin{aligned} 5 \times 10^{23} \text{ MeV/g} &= 5 \times 10^{23} \times 1,6 \times 10^{-13} \times 10^{-6} \times 10^3 \text{ MJ/kg} = \\ &= 8 \times 10^7 \text{ MJ/kg} \end{aligned}$$

$$80.000.000 \text{ MJ/kg} = \text{ottanta milioni di MJ/kg !!!} \quad (4.2)$$

Il diretto confronto di questo numero con quello tipico della benzina, *appena* 47 MJ/kg, fa comprendere l'origine dell'interesse per la fissione nucleare come fonte di energia.

4.4 Reazioni a catena: il reattore nucleare a fissione

Un fenomeno di estrema importanza pratica per la produzione di energia è la *reazione di fissione a catena*. Essa si produce quando ciascun neutrone emesso da una singola fissione, a sua volta stimola la fissione di un altro nucleo di *materiale fissile* (Fig. 17). In ogni evento di fissione vengono generati 2-3 neutroni in media, e quindi potenzialmente per ogni fissione si possono stimolare altre 2-3 fissioni successive. Si ha pertanto un processo di moltiplicazione delle fissioni. Poiché ciascuna di esse genera circa 200 MeV di energia, l'effetto complessivo è di amplificare l'energia prodotta.

Questo processo a valanga, però, non può che attenuarsi e spegnersi quando tutti i nuclei di sostanza fissile avranno subito la fissione. In tal caso il processo è *autoestinguente*. Soltanto quando si riesce a tenere il numero di neutroni presenti uguale a quello di neutroni della generazione precedente, il processo risulta stabile. Ciò si verifica quando la quantità di materiale fissile e la sua geometria consentono la massima efficienza nello sfruttare i neutroni generati (concetto di *massa critica*).

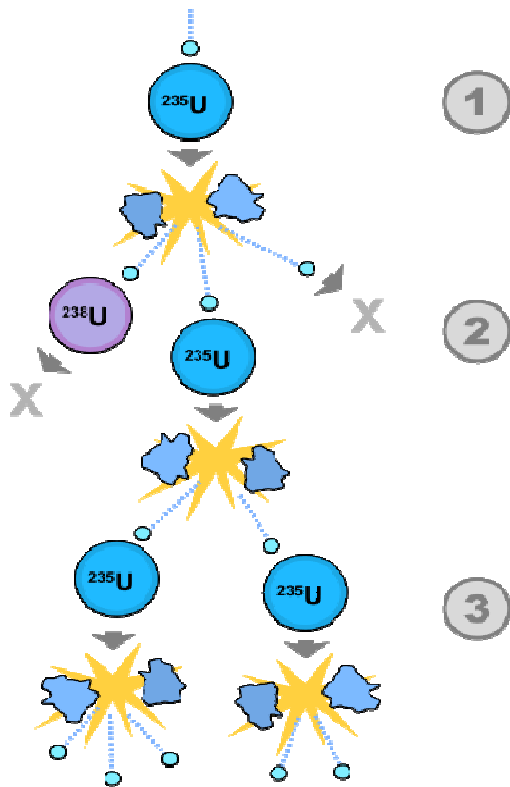


Fig. 17 Fissione a catena di ^{235}U .
Ciascun neutrone prodotto in una fissione, produce la fissione di un altro nucleo fissile.

Definiamo il fattore di moltiplicazione K dei neutroni:

$$K = \frac{\text{neutroni presenti in una generazione}}{\text{neutroni presenti nella generazione precedente}}$$

Il punto cruciale della fissione nucleare controllata è di mantenere il fattore K circa uguale a uno, o, al più, appena maggiore di uno. Infatti, se questo fattore supera un limite critico, il processo porta ad un incontrollato aumento della produzione di energia.

Questa situazione, che nelle *armi nucleari a fissione*, viene realizzata di proposito, con valori fino a $K=1,2$, pone seri problemi anche nel funzionamento controllato dei *reattori nucleari* [29] per la produzione di energia civile.

La *moderazione* di questo fattore è normalmente ottenuta inserendo, all'interno del reattore, *barre di controllo*, cioè materiali (ad esempio, il cadmio) in grado di ridurre, per mezzo della loro deviazione o assorbimento, il numero effettivo di neutroni che raggiungono il materiale fissile.

Per innescare, invece, l'accensione della reazione a catena, bisogna avere prima di tutto abbastanza materiale da raggiungere la massa critica ($K=1$); serve poi un *motorino di avviamento* costituito da una sorgente di neutroni, che fornirà i neutroni iniziali. L'uranio minerale è prevalentemente costituito da ^{238}U , mentre la percentuale di combustibile fissile ^{235}U è tipicamente dello 0,7 % [30]. Per raggiungere la massa critica, è necessario il cosiddetto processo di *arricchimento* [31]. Complesse procedure fisico-chimiche permettono di portare la percentuale di ^{235}U fino a livelli da reattore (3-4%), oppure fino a livelli del 90% per gli ordigni nucleari.

Per completare la discussione sulla produzione di energia nucleare da fissione, esaminiamo brevemente il principio di funzionamento di un *reattore* (Fig. 18). Il reattore è il cuore della centrale nucleare, e può essere paragonato a un motore. In un motore, la combustione del carburante trasforma l'energia chimica in energia termica, e successivamente l'energia termica è trasformata in energia meccanica attraverso la pressione che si sviluppa all'interno dei cilindri e spinge i pistoni. Nel caso di un reattore nucleare, il processo di reazione controllata di fissione a catena dell'uranio trasforma l'energia nucleare in energia termica. Un sistema di pompaggio idrico porta grandi

quantità di acqua (*fluido diatermico*) a raffreddare il *nocciolo* del reattore, come avviene nel sistema di raffreddamento della nostra auto. Il calore trasferito all'acqua è così elevato da produrre vapore ad alta pressione, la cui spinta aziona le turbine di un alternatore. Quest'ultimo trasforma l'energia meccanica in energia elettrica che è immessa sulla rete di distribuzione con sistemi analoghi a quelli convenzionali.

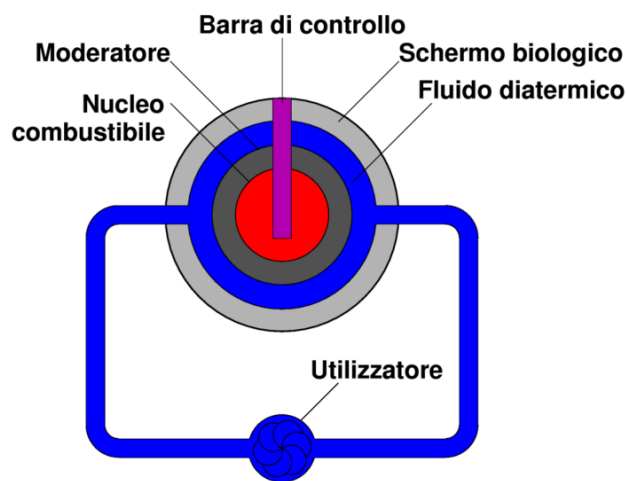


Fig. 18 Rappresentazione schematica di un reattore nucleare a fissione.

Sono elementi critici del sistema il *nocciolo*, il *materiale moderatore* e le *barre di controllo*. Come abbiamo visto, infatti, il funzionamento controllato della reazione a catena si può avere soltanto se il fattore K è vicino al valore unitario. Se, per un qualsiasi incidente, venissero meno i sistemi di moderazione e controllo, oppure il sistema di ricircolo dell'acqua diminuisse la sua portata o addirittura si fermasse, la temperatura del nocciolo tenderebbe a salire fino a valori talmente elevati da portare, nei casi estremi, alla fusione del nocciolo. È un meccanismo analogo a quello per cui

bruciamo il motore dell'auto se il radiatore perde acqua, ma gli effetti sono a una scala infinitamente più devastante.

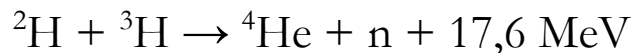
4.5 Fusione nucleare

L'esame dell'energia di legame per nucleone (Fig. 13), suggerisce che altre reazioni esotermiche possono avvenire nel settore dei nuclei più leggeri.

Il meccanismo, in tal caso, deve essere diverso dalla fissione. Infatti, se nella fissione si passa da un sistema nucleare instabile di grande massa ad uno più stabile attraverso la scissione in due frammenti di massa media, per i nuclei più leggeri il percorso più favorevole verso stati di massima energia di legame è quello della fusione di due nuclei leggeri in un nucleo più pesante.

È questo il caso della reazione deuterio-trizio (isotopi dell'idrogeno) simile a quella che alimenta il Sole (Fig. 19):

deuterio + trizio → elio + neutrone + energia



Queste reazioni sono anche dette *termonucleari*. Il valore tipico dell'energia rilasciata in queste reazioni esotermiche è dell'ordine di 10-20 MeV (17,6 MeV nel caso di Fig. 19).

Anche se l'energia emessa per ogni reazione di fusione (~15 MeV) è sensibilmente inferiore a quella della fissione (~200 MeV), tuttavia la densità energetica, che si può

calcolare in modo analogo a quanto già fatto per la fissione (espressione 4.2), risulta confrontabile.

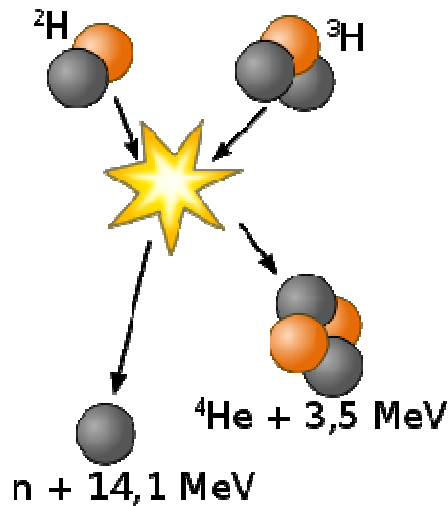


Fig. 19 Modello della fusione deuterio (^2H) - trizio (^3H). I due isotopi dell'idrogeno raggiungono uno stato più stabile fondendo in un unico nucleo di elio (^4He) con l'emissione di un neutrone e di energia. Questa è la reazione che genera l'energia nel Sole.

La potenzialità energetica di questi processi di fusione, tuttavia, non ha ancora avuto applicazioni tecnologiche, se non nella industria bellica. Ciò deriva dal fatto che per poter fondere, i due isotopi ^2H e ^3H devono essere portati a distanze ravvicinatissime, entro il raggio d'azione delle forze nucleari. La scala di queste distanze è il femtometro, $1\text{fm} = 10^{-15} \text{ m}$. A tali distanze, la forza di *repulsione elettrica coulombiana* [32] tra i due nuclei aventi la stessa carica elettrica, è elevatissima. Ciò significa che occorre una certa energia per portare i due nuclei a contatto ed innescare la reazione.

Questa situazione è possibile nel Sole a causa delle enormi pressioni esistenti, ma la nostra tecnologia può farlo solo attraverso acceleratori, campi elettromagnetici e... bombe. In effetti, nelle bombe termonucleari, le reazioni di fusione vengono innescate dallo scoppio di una piccola bomba a fissione, che fornisce l'energia di innesco.

Reattori a fusione controllata rimangono tutt'oggi ancora sperimentali.

Riferimenti

- [19] <http://it.wikipedia.org/wiki/Elettronvolt>
- [20] [http://it.wikipedia.org/wiki/Legge_della_conservazione_della_massa_\(chimica\)](http://it.wikipedia.org/wiki/Legge_della_conservazione_della_massa_(chimica))
- [21] http://it.wikipedia.org/wiki/Cromodinamica_quantistica
- [22] http://it.wikipedia.org/wiki/Numero_atomico
- [23] http://it.wikipedia.org/wiki/Numero_di_massa
- [24] <http://it.wikipedia.org/wiki/Isotopo>
- [25] http://it.wikipedia.org/wiki/Spettrometro_di_massa
- [26] (http://en.wikipedia.org/wiki/File:Binding_energy_curve_-_common_isotopes.svg)
- [27] <http://it.wikipedia.org/wiki/Uranio>
- [28] http://it.wikipedia.org/wiki/Ragazzi_di_via_Panisperna
- [29] http://it.wikipedia.org/wiki/Reattore_nucleare_a_fissione
- [30] http://it.wikipedia.org/wiki/Fissione_nucleare
- [31] http://it.wikipedia.org/wiki/Uranio_arricchito
- [32] http://it.wikipedia.org/wiki/Forza_di_Coulomb

5. Il fuoco può scaldarti o incendiare la tua casa.

La quasi totalità dell'energia che utilizziamo per muoverci e viaggiare, riscaldare le nostre case, mantenere produttive le fabbriche, illuminare gli ambienti in cui viviamo e lavoriamo, è prodotta a partire da sostanze di origine fossile (>80%, fonte: Eurostat). Le nostre centrali elettriche sono infatti alimentate da combustibili derivati dal petrolio, dal carbone e dal gas naturale. In queste centrali, l'energia chimica immagazzinata nel combustibile è convertita in calore. Grandi quantità di acqua, portata a temperature tali da produrre vapore ad alta pressione, trasformano l'energia termica in energia meccanica, e azionano turbine che generano l'elettricità. La stessa cosa avviene nelle centinaia di milioni di automobili che quotidianamente circolano nel mondo, e nelle caldaie dei nostri sistemi di riscaldamento.

Ci sono alcune osservazioni di base da fare su questo meccanismo di conversione energetica.

La combustione genera, oltre ad alcune sostanze di impatto biochimico che vengono immesse nell'ambiente, grandi quantità di biossido di carbonio (CO_2), che è oggi considerato una delle concause delle variazioni climatiche nell'atmosfera terrestre (effetto serra).

Sin dalla produzione, le varie forme di energia non si trasformano le une nelle altre con la massima efficienza, anche per l'effetto di principi fisici quali le leggi della termodinamica. Ciò determina la dispersione di una frazione

a volte molto consistente dell'energia prodotta, mentre spesso solo percentuali modeste possono essere trasformate in lavoro. L'efficienza di un motore a scoppio non è, in generale, superiore al 30-35%. Di conseguenza frazioni molto importanti dell'energia prodotta e distribuita risultano inutilizzabili (analogamente a quanto avviene spesso nella distribuzione dell'acqua lungo le linee idriche).

Quest'ultima problematica investe indifferentemente anche le fonti di energia rinnovabili.

In un mondo che, dal secondo dopoguerra del XX secolo, vedeva una crescita esponenziale del fabbisogno energetico domestico ed industriale, la scoperta della fissione nucleare a catena controllata da parte di Enrico Fermi (1942) spalancò le porte allo sfruttamento di una forma di energia che sembrò la panacea per le crescenti esigenze delle società industriali.

In tutti gli anni '50/'60 del XX secolo si affermò una proliferazione di impianti per la produzione di energia nucleare sia nei Paesi del blocco atlantico, sia nella Unione Sovietica e paesi da essa controllati. La prima grande crisi petrolifera dei primi anni '70 portò ad un ulteriore rafforzamento della scelta nucleare di molte Nazioni, inclusi i grandi Paesi Emergenti come India e Cina (Fig. 20). Nel 2004-2005 la fonte primaria per la produzione di energia elettrica in Italia è il fossile (80%), contro percentuali medie del 57% in Unione Europea, a significare una situazione in cui molti paesi europei, in particolare la Francia, hanno optato per il nucleare (Fonte: Eurostat).

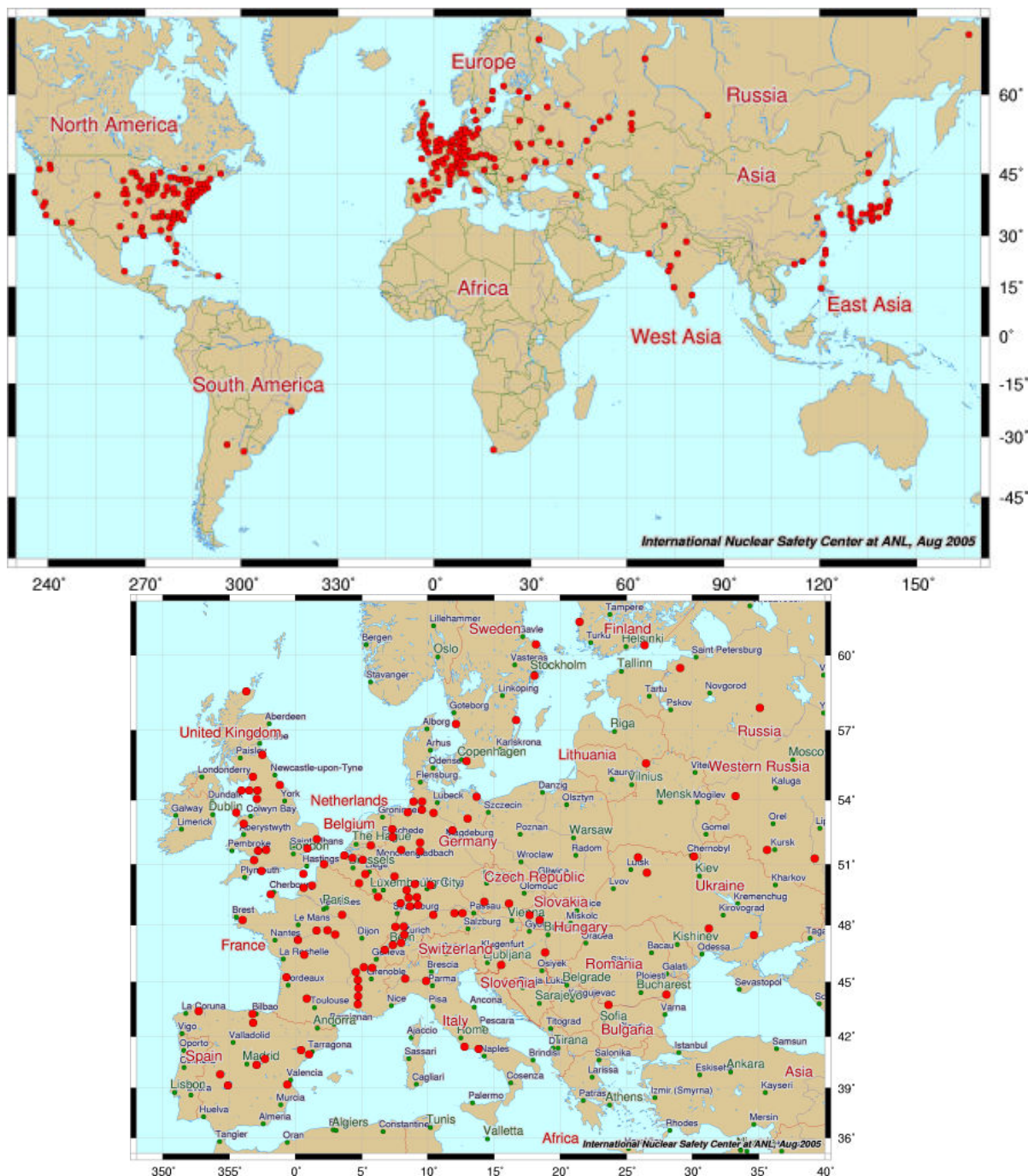


Fig. 20 Diffusione del nucleare nel mondo e in Europa [33].

I rischi associati al funzionamento di un impianto nucleare sono però più vasti rispetto a quelli, già considerevoli, degli impianti convenzionali. Alcuni di questi sono intrinseci alla speciale natura dei materiali fissili rispetto

ai carburanti convenzionali. Altri rischi sono in relazione con la controllabilità del processo di produzione dell'energia di fissione. Ulteriori rischi sono nella natura dei prodotti di scarto del processo (*scorie nucleari*). Infine, la condivisione della materia prima con l'industria bellica, aggiunge alla operatività di una centrale nucleare tutte le complicazioni derivanti dalla sorveglianza di veri e propri siti strategici dal punto di vista politico-militare.

È del tutto chiaro, quindi, che la contropartita per lo sfruttamento di una così copiosa fonte di energia, è un innalzamento di scala del rischio e un ampliamento delle potenziali conseguenze di incidenti. Discutiamo brevemente gli aspetti più delicati di questo sistema.

5.1 Approvvigionamento e trattamento del combustibile

Il combustibile nucleare per le centrali a fissione è l'uranio. Le risorse mondiali di uranio sono di importanza strategica, e il loro sfruttamento è di conseguenza sorvegliato da organismi internazionali (*Nuclear Energy Agency, NEA* e *International Atomic Energy Agency, IAEA*)⁴. Le riserve più importanti si trovano in Australia, Kazakistan, Russia, Canada, Sud Africa, USA, Brasile, Namibia e Niger [39]. L'estrazione dell'uranio procede con mezzi abbastanza convenzionali per l'industria mineraria. Il minerale (*uraninite* o *pechblenda*) contenente ossidi di uranio viene ridotto in

⁴ www.nea.fr ; www.iaea.org

polvere, poi trattato chimicamente per convertirlo in esafluoruro di uranio (UF_6). Questa conversione è necessaria per rendere possibile il processo successivo di *arricchimento*. Un procedimento fisico-chimico molto complesso, che include una separazione isotopica, ed è finalizzato all'aumento della percentuale di uranio fissile (^{235}U) fino al 3-4%. Solo per i reattori ad acqua pesante si può fare utilizzo di uranio non arricchito.

La forma finale del combustibile è in *pellet* di biossido di uranio (UO_2) posti in tubi metallici resistenti alla corrosione.

Il materiale fissile, una volta *bruciato* nel reattore, può essere riutilizzato dopo un opportuno trattamento, fino a percentuali del 97% [39].

5.2 Ceneri nucleari

La combustione del petrolio o del carbone produce residui potenzialmente nocivi per l'ambiente e per gli esseri viventi, quali la ben nota CO_2 e l'anidride solforosa, responsabile del fenomeno delle piogge acide.

In modo analogo, i prodotti della reazione di fissione nucleare costituiscono un problema per la loro radioattività, che li rende inadatti ad essere immessi nuovamente nell'ambiente. Una ricarica di materiale fissile in un impianto nucleare ha una durata tipica dell'ordine di un anno. Quando è esaurita, essa viene sostituita con nuovo uranio, mentre la *cenere nucleare* residua, altamente radioattiva, inizia un ciclo di trattamento.

Le specie radioattive che compongono le scorie nucleari hanno tempi di dimezzamento diversi. Il *tempo di dimezzamento* di un isotopo misura il tempo necessario per dimezzare una certa quantità iniziale di materiale radioattivo omogeneo. Poiché il decadimento radioattivo segue una legge di decrescita esponenziale, il tempo effettivo per raggiungere livelli di attività considerati compatibili con il fondo naturale, è in realtà molto più lungo. Ad esempio, se consideriamo il plutonio-239 (^{239}Pu), il tempo di dimezzamento è di 24200 anni. Significa che per ridurre un grammo di ^{239}Pu a mezzo grammo, occorrono ben 24200 anni. Tuttavia il mezzo grammo costituirebbe ancora una cospicua fonte radioattiva. Per vederlo ridotto a 250 mg (milligrammi) dovremmo attendere altri 24200 anni. Supponiamo che per portarlo ad un livello *innocuo* si debba ridurre la quantità iniziale di 1000 volte: di dimezzamento in dimezzamento arriveremmo ad attendere circa 250000 anni!

Le scorie di un reattore nucleare si possono classificare in due classi: quelle a decadimento rapido (i prodotti di fissione) e quelle a decadimento lento (gli isotopi pesanti). Come è illustrato nella Fig. 21 (notate la scala logaritmica sulle ascisse), i tempi tipici per l'abbattimento della radioattività dei prodotti di fissione, quali stronzio-90 (^{90}Sr), cesio-137 (^{137}Cs), linea fucsia tratteggiata, sono dell'ordine di alcune centinaia di anni. Si stima, al contrario, che gli isotopi pesanti, prodotti dell'assorbimento di neutroni da parte dell'uranio (tra cui il famigerato plutonio!) raggiungerebbero

il livello di radioattività naturale (U nat.), in poco meno di un milione di anni!

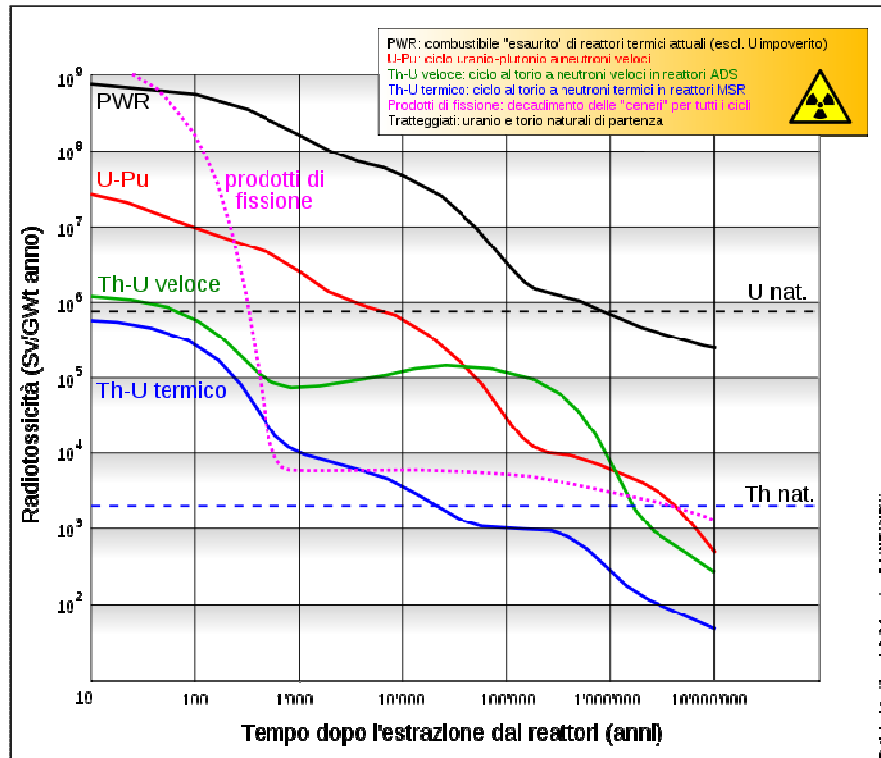


Fig. 21 Andamento nel tempo dei livelli di radioattività delle scorie generate in varie tecnologie di reattori a fissione [34]. I prodotti di fissione decadono in tempi relativamente brevi (5 secoli), mentre il combustibile esaurito (PWR) ha tempi di vita geologici.

Reattori basati sul ciclo uranio-plutonio a neutroni veloci, o sull'uso del torio come combustibile primario, mostrano una significativa riduzione di questi tempi, ma si parla comunque di molte migliaia di anni.

Bastano questi pochi numeri per rendersi conto di quanto siano scomode queste ceneri. L'unico modo che abbiamo per gestirle è un trattamento di triturazione, compressione e vetrificazione, che serve a renderle inerti e non volatili, per poi stoccarle in fusti presso depositi

possibilmente remoti da insediamenti umani, ed al riparo da cataclismi.

Contro la dispersione sia pure accidentale di tali sostanze, in particolare quelle biochimicamente più attive, quali il cesio-137, lo iodio-131, lo stronzio-90, allo stato delle attuali conoscenze e tecnologie, non saremmo in condizione di adottare alcun rimedio efficace.

Il rischio correlato alle scorie nucleari è pertanto intrinsecamente elevato, poiché da un lato sono molti i fattori di pericolo, e dall'altro sono estremamente elevati i danni per l'uomo e per l'ambiente nel caso di una loro dispersione. Infatti, nulla mette al riparo i depositi di scorie da eventi catastrofici, quali i terremoti. I contenitori di scorie, per quanto tecnologicamente avanzati, devono poter resistere per millenni anche in condizioni estreme. I depositi sottomarini, ed anche quelli nel sottosuolo, potrebbero essere sconvolti da eventi geologici assolutamente imprevedibili, ma più che probabili nell'arco di tempi così lunghi quali quelli della radiotossicità delle scorie. Infine, essendo le scorie nucleari potenzialmente materia prima per l'industria bellica, i depositi sono a tutti gli effetti luoghi di interesse strategico, suscettibili di bombardamenti in caso di guerra, o di attentati terroristici, diventando così anche arma di potenziale ricatto nelle relazioni internazionali. La storia della *guerra fredda* [35] non è così lontana da non darci un severo monito su questi risvolti, particolarmente importanti nel contesto politico mondiale attuale, caratterizzato dalla pressante richiesta, in aree critiche, di Paesi che puntano alla

tecnologia nucleare come forma di riscatto ed affrancamento (si pensi all'Iran ed alla Corea del Nord).

Nonostante la tecnologia nucleare sia più che cinquantennale, ad oggi il problema dei siti di stoccaggio delle scorie rimane un problema aperto [38].

Prendendo in prestito una citazione di Carlo Rubbia [36]: *“Queste scorie rappresentano delle bombe ritardate. Le nascondiamo pensando che non ci saremo per risponderne personalmente”* [37].

5.3 Incidenti nucleari. Fusione del nocciolo.

Il funzionamento di un impianto di produzione di energia deve prevedere un sistema di sicurezza molto complesso per garantire una minima affidabilità e robustezza nei confronti di potenziali incidenti. Nel caso di un reattore nucleare, questo aspetto assume una importanza molto più elevata rispetto allo standard delle altre forme di sfruttamento delle fonti energetiche. Infatti, data la natura del combustibile, dei prodotti della *combustione* nucleare, e degli stessi processi fisici coinvolti, i costi della sicurezza di un impianto devono essere estremamente più elevati rispetto a quelli convenzionali, poiché un incidente nucleare è per certo un vero e proprio disastro.

Sin dalla costruzione, un impianto nucleare deve essere difeso e molto robusto rispetto a qualsiasi evento che produca dispersione di materiali radioattivi nell'ambiente. La strategia di base è di collocare il cuore del reattore in profondità e di circondarlo con una serie di barriere

protettive di natura ingegneristica, in grado di contenere il più possibile il nocciolo del reattore sia in caso di eventi interni, quali la perdita di controllo della fissione a catena, sia di eventi esterni, quali terremoti, inondazioni, attacchi militari o terroristici.

Oltre ai sistemi di protezione passiva, si devono adottare anche sistemi attivi, cioè dispositivi in grado di attivarsi automaticamente nel caso di incidenti. Il complesso di questi sistemi deve poi avere una adeguata *ridondanza*, cioè la possibilità che, in presenza di una mancata attivazione di uno dei dispositivi, ve ne siano altri in grado di intervenire.

Deve, infine, essere attivato un sistema di sorveglianza esterna per valutare in tempo reale le esposizioni radiologiche sull'ambiente e prevedere, attraverso i rilevamenti di una rete di stazioni meteorologiche, gli eventuali spostamenti di prodotti radioattivi dispersi in ambiente.

L'evento più temuto in caso di incidente è la *fusione del nocciolo*. Questa è la trasformazione della massa fissile in liquido, e poi parzialmente in gas, dovuta ad un aumento abnorme della temperatura a causa della perdita di controllo del processo di fissione. Questo effetto si ha quando, per la accidentale interruzione del flusso d'acqua attorno al reattore, l'energia prodotta non è più dissipata, oppure quando non è possibile più intervenire con i moderatori della fissione, a causa di guasti prodotti da un cataclisma o da malfunzionamenti o *errore umano*.

Nel 1979 si verificò l'incidente di Three Mile Island in Pennsylvania (USA), con parziale fusione del nocciolo e

rilascio di una considerevole quantità di vapori radioattivi. Nel 1986 a Chernobyl (Ucraina) il nocciolo fuse e successivamente esplose rilasciando una nube radioattiva le cui conseguenze sono ancora misurabili oggi.

L'incidente più recente [40] è stato quello giapponese di Fukushima (marzo 2011), originato dalla *imprevedibile* potenza degli elementi, che hanno sconvolto la costa con terremoti, maremoti e tsunami di intensità senza precedenti. Si è trattato di un vero disastro di grandi proporzioni, con una serie di incidenti nei quali ben tre noccioli sono fusi rilasciando radioattività attraverso l'acqua di raffreddamento. A tutt'oggi la situazione non è ancora stabilizzata.

Incidenti come questo hanno posto un interrogativo categorico sullo sfruttamento dell'energia nucleare (oggi vi sono circa 430 impianti funzionanti) ed hanno aperto un vasto dibattito nell'opinione pubblica in tutto il mondo sulla necessità di ripensare il sistema energetico globale. Ciò non può che passare attraverso una profonda rivisitazione dell'attuale paradigma di sviluppo.

5.4 Un nucleare per il futuro?

L'energia che ci arriva dal Sole e che rende possibile la vita sulla Terra, ha origine nucleare. Infatti, al cuore del Sole vi è una vera e propria fornace a fusione nucleare. Le condizioni di altissima pressione (500 miliardi di atmosfere) e temperatura (13 milioni di gradi), favoriscono le reazioni *termonucleari* (cfr. Cap. 4) tra isotopi dell'idrogeno, che è il principale elemento della nostra stella (più del 70%). Il

prodotto finale di tali reazioni (*catena protone-protone*), oltre all'energia, è l'elio (${}^4\text{He}$), un nucleo stabile, cioè non radioattivo.

Il processo di fusione nucleare presenta, quindi, una caratteristica che lo renderebbe una opzione di estremo interesse per la produzione di energia nucleare pulita, visto che non produce scorie radioattive, al contrario di quanto avviene con la fissione dei nuclei pesanti.

Il grosso problema per lo sfruttamento pratico di tali reazioni è che per il loro innesco è necessario portare i nuclei reagenti a distanze molto piccole ($0,0000000000000001$ metri = 1 fm), dove l'interazione nucleare forte può prevalere sulla repulsione coulombiana dovuta alla medesima carica elettrica dei due nuclei. Queste condizioni sono realizzabili con l'ausilio degli acceleratori di particelle per fini sperimentali, ma per produrre energia utilizzabile sarebbe necessario ricostruire le condizioni che ci sono nel Sole per una massa consistente di idrogeno. Se ci si riuscisse, avremmo, teoricamente, una fonte di energia abbondante, affidabile, priva di scarti pericolosi per l'ambiente, praticamente inesauribile (l'idrogeno è presente in grande abbondanza e facilmente reperibile).

La via per accedere a tale fonte di energia è quella di realizzare artificialmente il *plasma* [41], cioè uno stato della materia in cui nuclei ed elettroni non sono più organizzati in atomi, ma sono liberi di muoversi in una sorta di gas ionizzato. In queste condizioni, raggiungibili attraverso altissime temperature e pressioni, è possibile innescare la fusione nucleare. Una delle principali problematiche su cui si

sta lavorando da decenni è il *confinamento del plasma*. Infatti, tale stato della materia non può entrare in contatto con il suo contenitore, perché lo distruggerebbe. Per questo il plasma deve essere confinato e tenuto sospeso per mezzo di campi magnetici molto intensi (*confinamento magnetico*), oppure attraverso l'azione combinata di potenti laser ed acceleratori (*confinamento inerziale*). Questo è uno dei motivi principali per cui la fusione nucleare è ancora oggi lontana dalla realizzazione per fini pratici. Un altro motivo è semplicemente legato al fatto che, per portare il plasma alle temperature e pressioni paragonabili a quelle che vi sono all'interno del Sole, è comunque necessario spendere una quantità enorme di energia. Paradossalmente, per poter far funzionare un reattore a fusione, oggi dovremmo alimentarlo inizialmente con un reattore a fissione, perché per ora è l'unico modo di fornire l'energia iniziale richiesta.

L'interesse a sostenere la ricerca in direzione di una forma di nucleare pulito, quale potrebbe essere la fusione, ha ricevuto recentemente una grossa spinta attraverso la nascita della collaborazione internazionale ITER [42], che costruisce un reattore sperimentale in Francia.

Va tuttavia considerato che, oltre all'innegabile vantaggio della sostanziale sicurezza intrinseca del processo, che peraltro non avrebbe neppure rischi di autoalimentazione incontrollata, come può avvenire nel caso della fissione, alcuni svantaggi richiederanno ancora molti anni di studio e sperimentazione. In particolare, la complessità tecnologica di un impianto a fusione; la manipolazione del trizio, che è radioattivo; la

contaminazione radioattiva di tutti i materiali di contenimento del plasma, indotta dall'emissione di neutroni.

5.5 Conclusione

L'Umanità, nel corso della Storia, ha sempre saputo cogliere le opportunità che i fenomeni naturali le hanno offerto. La conquista del fuoco si è in un certo senso ripetuta in forme diverse nei millenni.

Questa *potenza* dell'Uomo nell'interagire con la Natura in modo attivo ha sempre avuto un connotato ambivalente: da un lato la spinta per il progresso, dall'altro le conseguenti ricadute sulla Natura stessa, il cosiddetto *impatto antropico*. I miti comuni alle grandi civiltà del passato hanno rappresentato e in qualche modo anticipato questa costante contraddizione dell'Umanità: l'albero della conoscenza, Prometeo, Pandora.

La scoperta dell'energia nucleare è stata, in questo senso, l'ennesima conquista del fuoco da parte dell'Uomo. E, come sempre, ha portato il calore per le nostre case, ma anche il rischio di incendiarle.

Incidenti come quello del marzo 2011 a Fukushima hanno posto un interrogativo categorico sullo sfruttamento dell'energia nucleare (oggi vi sono circa 430 impianti funzionanti e se ne vorrebbero costruire un altro centinaio) ed hanno aperto un vasto dibattito nell'opinione pubblica in tutto il mondo sulla necessità di ripensare il sistema energetico globale. Ciò non può che passare attraverso una profonda rivisitazione dell'attuale paradigma di sviluppo.

Si tratta, in realtà, di ripensare il rapporto tra Umanità e Natura. L'*Homo Sapiens Sapiens* oggi sta producendo scorie nucleari che non sa dove mettere, ma che saranno attive per quasi un milione di anni: ben cinque volte di più della sua età, visto che è venuto al mondo circa duecentomila anni fa. In un milione di anni decine e decine di civiltà possono nascere e scomparire!

Forse è venuto il momento che l'Umanità rinunci al paradigma neopositivista delle *magnifiche sorti e progressive*, per coltivare con maggiore responsabilità la ricerca del benessere e della felicità, attraverso il rispetto per il mondo in cui abita (provvisoriamente) e per le generazioni future.

Le risorse e l'ingegno devono essere oggi orientati verso obiettivi di *altra* innovazione, non più meramente tecnologica, ma del modello complessivo dello sviluppo umano. Ciò include la consapevolezza delle conseguenze della nostra presenza sulla Terra, la riduzione degli sprechi, la rivoluzione copernicana (in campo energetico, ma non solo) di non ricorrere indiscriminatamente a fonti di energia intrinsecamente pericolose per la soddisfazione di bisogni non primari, ma piuttosto indotti da un modello sociale.

La natura è meravigliosa, e per l'Uomo è fonte di intima soddisfazione scoprirne i misteri, perché ne ha un innato desiderio. È bene che lo possa fare con *Umanesimo*, in modo che anche il conseguente uso della conoscenza sia per la soddisfazione dei bisogni veri di tutta l'Umanità.

Riferimenti

- [33] www.insc.anl.gov/pwrmaps/map/
- [34] http://it.wikipedia.org/wiki/Scoria_radioattiva
- [35] http://it.wikipedia.org/wiki/Guerra_fredda
- [36] http://it.wikipedia.org/wiki/Carlo_Rubbia
- [37] <http://blog.libero.it/ias/8461109.html>
- [38] http://it.wikipedia.org/wiki/Scorie_nucleari
- [39] Giornale di Fisica, Suppl., Vol. 51, 2010, Società Italiana di Fisica, Bologna.
- [40] http://it.wikipedia.org/wiki/Disastro_di_Fukushima_Daiichi
- [41] http://it.wikipedia.org/wiki/Fisica_del_plasma
- [42] <http://it.wikipedia.org/wiki/ITER>

Nota sulle figure e sui riferimenti bibliografici

Le illustrazioni di questo eBook, inclusa quella di copertina, sono state prevalentemente prese dalle pagine di Wikipedia, sotto licenza Wikicommons, e si assume che possano essere utilizzate liberamente senza fini di lucro.

La Fig. 4 del Cap.2 è sotto copyright del CERN di Ginevra, ma può essere usata per scopi non commerciali.

Altre figure, in particolare Fig. 1 del Cap. 1, Fig. 5 del Cap. 2, Figg. 9,11,12,14,15 del Cap. 4 sono state realizzate dall'autore.

Per i riferimenti bibliografici riportati alla fine di ciascun capitolo, si è preferito rimandare a contenuti pubblici disponibili sulla rete (Wikipedia).

Immagine di copertina: Corona solare ed eruzione di elio (Courtesy of SOHO/EIT consortium. SOHO is a project of international cooperation between ESA and NASA).

Per i riferimenti bibliografici riportati alla fine di ciascun capitolo, si è preferito rimandare a contenuti pubblici disponibili sulla rete.

NOTE SULL'AUTORE



Roberto Perrino è nato nel 1961 a Novoli (Lecce), di mestiere fa il fisico presso l'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), svolge ricerca nel campo della fisica sperimentale nucleare e sub-

nucleare. Ama leggere, scrivere e far di conto. Ha pubblicato il libro libero *I giochi innocenti*, LaRecherche.it, 2011 [eBook n. 64], un suo testo è stato pubblicato nell'antologia *Le vie di Marcel Proust*, LaRecherche.it, 2010 [eBook n.49].

Websites:

professionale: <http://www.fisica.unisalento.it/~roberto>

personale: <http://www.facebook.com/roberto.perrino>

INDICE

<i>PERCHÉ QUESTO EBOOK di Roberto Maggiani.....</i>	<i>2</i>
<i>UN'AVVERTENZA E DUE RINGRAZIAMENTI</i>	
<i>di Roberto Perrino.....</i>	<i>5</i>
<i>Cap. 1 - Il mondo macroscopico. La materia e l'energia.....</i>	<i>7</i>
<i>Cap. 2 - Il mondo microscopico. La materia-energia.....</i>	<i>15</i>
<i>Cap. 3 - Forme e fonti di energia.....</i>	<i>24</i>
<i>Cap. 4 - Energia dal nucleo atomico: la fissione e la fusione.....</i>	<i>31</i>
<i>4.1 Scala energetica delle reazioni chimiche esotermiche.....</i>	<i>31</i>
<i>4.2 La struttura del nucleo atomico.....</i>	<i>33</i>
<i>4.3 Reazioni nucleari. La fissione.....</i>	<i>38</i>
<i>4.4 Reazioni a catena: il reattore nucleare a fissione.....</i>	<i>43</i>
<i>4.5 Fusione nucleare.....</i>	<i>47</i>
<i>Cap. 5 - Il fuoco può scaldarti o incendiare la tua casa.....</i>	<i>50</i>
<i>5.1 Approvvigionamento e trattamento del combustibile.....</i>	<i>53</i>
<i>5.2 Ceneri nucleari.....</i>	<i>54</i>
<i>5.3 Incidenti nucleari. Fusione del nocciolo.....</i>	<i>58</i>
<i>5.4 Un nucleare per il futuro?.....</i>	<i>60</i>
<i>5.5 Conclusione.....</i>	<i>63</i>
<i>Nota sulle figure e sui riferimenti bibliografici.....</i>	<i>66</i>
<i>Note sull'autore.....</i>	<i>67</i>

Questo libro elettronico (eBook) è un *Libro libero* proposto in formato pdf da *LaRecherche.it*

Per contatti: ebook@larecherche.it

Pubblicato nel mese di giugno 2011 sui siti:

www.ebook-larecherche.it

www.larecherche.it

eBook n. 78

A cura di Giuliano Brenna e Roberto Maggiani

Ringraziamo Fabio Fabri per il prestito del suo personal computer nella fase conclusiva di correzione delle bozze.

[Senza l'autorizzazione dell'autore, è consentita soltanto la diffusione gratuita dei testi in versione elettronica (non a stampa), purché se ne citino correttamente autore, titolo e sito web di provenienza: www.ebook-larecherche.it]

