

Giovanni Vittorio Pallottino

# La radioattività intorno a noi

Pregiudizi e realtà



edizioni Dedalo

Giovanni Vittorio Pallottino

# La radioattività intorno a noi

Pregiudizi e realtà

Prefazione di Paolo Saraceno

edizioni Dedalo

In copertina: *Radioactive world globe*, © iStockphoto

Le definizioni delle parole in grassetto rosso si trovano nel Glossario finale.

I numeri tra parentesi quadre in rosso rimandano ai Riferimenti bibliografici.

© 2014 Edizioni Dedalo  
Divisione della Dedalo Litostampa srl  
Viale Luigi Jacobini 5, 70132 Bari  
[www.edizionidedalo.it](http://www.edizionidedalo.it)

Tutti i diritti sono riservati.  
Riproduzione vietata ai sensi di legge (art. 171 della legge 22 aprile 1941, n. 633)

## Prefazione

Questo libro dà un contributo importante alla comprensione di una delle grandi paure dell'umanità: la radioattività, un fenomeno fisico che spaventa perché è invisibile e, nell'immaginario collettivo, appare come un pericolo in agguato che ci colpisce a nostra insaputa. Il ricordo delle bombe atomiche di Hiroshima e Nagasaki aggiunge, inoltre, una luce cupa al fenomeno.

Eppure la radioattività è parte del nostro mondo. Leggendo questo libro scopriremo che siamo costantemente attraversati da raggi cosmici con energie (ma non flussi) superiori a quelle delle radiazioni emesse dagli incidenti di Fukushima e Chernobyl.

Scopriremo che noi stessi siamo radioattivi e che all'interno del corpo umano avvengono, a seconda del peso, dai 6000 ai 12000 decadimenti al secondo. Sono radioattive le nostre ossa, che contengono il potassio-40 che un'antica supernova ha immesso nella nebulosa da cui si è formata la Terra, e lo sono le nostre cellule, che contengono il carbonio-14 prodotto dai raggi cosmici e assorbito poi dai vegetali, dai quali si propaga a tutti i viventi. Radioattivo è il cibo che mangiamo, lo è tutto quello che ci circonda, sono particolarmente radioattivi alcuni terreni, come quelli vulcanici. Scopriremo così che Roma è sei volte più radioattiva di quanto fosse Tokyo dopo che i venti vi avevano portato le polveri di Fukushima; che la radioattività di Viterbo e

Orvieto è due volte quella di Roma, mentre in Iran e India ci sono zone sette volte più radioattive della nostra capitale e in alcune spiagge del Brasile si raggiungono valori 400 volte superiori. Ciò nonostante, chi vive in quelle zone non si ammala o, per lo meno, non si ammala più di chi vive in zone dove la radioattività è 10-100 volte più bassa. Questo accade perché gli organismi, nel corso dell'evoluzione, hanno imparato a difendersi dalle radiazioni, sin tanto che esse restano al di sotto di un certo limite.

Capiremo quali sono i pericoli della radioattività e vedremo che quel che conta non è stare o non stare in un ambiente radioattivo – perché senza dubbio tutti gli ambienti lo sono – ma l'intensità della radiazione che riceviamo. Vivere in un ambiente con livelli di radiazione molto bassi può essere addirittura dannoso per l'organismo, fa perdere alle cellule la capacità di reagire alle insidie dell'ambiente e rende gli organismi facilmente aggredibili dai tumori.

La radioattività è pericolosa e il libro lo sottolinea con chiarezza; ma, come per tutte le cose pericolose, il modo peggiore per affrontarla è quello di non conoscerla, di vederla come una minaccia oscura che aleggia sulla nostra esistenza. Questa paura dell'ignoto non riduce i rischi, ma li aumenta se porta a decisioni sbagliate. La paura può essere affrontata in un solo modo, cercando di capire meglio il fenomeno; ciò purtroppo non è facile in Italia dove i libri sull'argomento sono scritti per specialisti e non sono di facile lettura.

Spiegare la radioattività in modo semplice e non banale è il compito che si è prefisso questo libro. Il linguaggio usato dall'autore è quello di chi ha passato la vita nel mondo della ricerca, dove i ragionamenti sono basati sui fatti e su quello che dai fatti si può dedurre, non ci sono allarmismi e non si sottovalutano i pericoli. Lo stile sobrio rende la lettura facile e interessante per chi non ha una cultura scientifica, perché tutto è spiegato con l'aiuto di un glossario posto alla fine del libro. La lettura è utile anche per chi ha una cultura scientifica ma non conosce l'argomento, perché il libro è ben strutturato: si può trovare con

facilità quello che interessa e, a differenza di molti «libri divulgativi», l'autore non perde tempo in noiose descrizioni, non usa paragoni banalizzanti, centra gli argomenti e spinge il lettore ad approfondire e a cercare altre informazioni.

Noi viviamo in una società complessa, molto più complessa di quella dei nostri padri; abbiamo la fortuna di vivere in uno stato democratico, con la forma di governo che meglio di ogni altra ha dimostrato di saper garantire il benessere dei cittadini. La democrazia, però, richiede che gli elettori siano informati, in modo che le decisioni prese siano le migliori, e questo non è facile se le questioni sono complesse. La radioattività è uno di questi argomenti, perché alla sua corretta comprensione sono legate questioni importanti come quella dei depositi di rifiuti chimici e nucleari (le famose «scorie»). Tali rifiuti in Italia non sono più prodotti dalle centrali nucleari, da tempo chiuse, ma da ospedali, industrie e apparecchi di uso civile (come i sensori di fumo dei dispositivi antincendio) sul cui impiego, immagino, tutti concordiamo.

Questi rifiuti che non vengono dalle centrali nucleari sono oggi accumulati in depositi temporanei con scarsi controlli (come ebbe modo di mostrare tempo addietro la trasmissione televisiva *Report*). Una decisione su cosa farne va presa al più presto così come l'hanno presa i Paesi più civili. Il non prenderla aggrava il problema, aumenta i rischi e dà spazio alla criminalità che si nutre di queste nostre incapacità.

Una buona informazione serve anche per valutare se la scelta di non produrre energia nucleare in Italia, presa nel 2011, sia stata la migliore possibile per la nostra salute e per quella del pianeta. È stata anche quella una decisione importante che influirà sull'ambiente, sulla qualità della vita, sul costo e l'approvvigionamento dell'energia e di conseguenza sull'occupazione. È una scelta che coinvolge il nostro futuro e che va quindi presa da cittadini informati.

Per tutte queste ragioni ritengo il volume di Pallottino un libro importante. Con questo lavoro credo che l'autore abbia voluto dare al lettore una base da cui partire per costruire una

propria riflessione sulla radioattività. A chi fosse incuriosito dai fatti raccontati suggerisco di cercare da solo conferme, chiarimenti e approfondimenti: la rete è una fonte inesauribile di informazione e di disinformazione. Con l'aiuto di questo libro ritengo sia possibile imparare a discernere tra l'una e l'altra e acquisire quelle conoscenze indispensabili per divenire dei cittadini liberi e consapevoli.

*Paolo Saraceno*

Paolo Saraceno è Associato all'Istituto Nazionale di Astrofisica, consigliere scientifico del Festival dell'energia e consigliere dell'associazione Galileo 2001.

## Premessa

Sì, parliamo della radioattività: argomento intrigante, tanto controverso quanto misterioso. Che vale la pena di esplorare – non mancheranno le sorprese – per cercare di capire di cosa si tratta effettivamente. Tanto per cominciare, nella radioattività entra in gioco materia che emette spontaneamente energia, fenomeno che non rientra affatto nell'esperienza comune. E poi si sovverte l'idea dell'immutabilità dei costituenti elementari della materia, idea antichissima perché risale ai greci Leucippo e Democrito e al romano Lucrezio. Si dimostra infatti l'esistenza di atomi particolarissimi, gli atomi radioattivi, che sono instabili perché si trasformano spontaneamente in atomi di altre specie, realizzando così quelle trasmutazioni che gli alchimisti per secoli avevano cercato invano.

Ma soprattutto c'è il fatto delicatissimo che la radioattività coinvolge scelte che riguardano tutti, ma al tempo stesso è argomento largamente sconosciuto ai più, dunque in palese contrasto con il motto einaudiano «conoscere per deliberare». Si tratta quindi di un tema veramente emblematico del difficile e tormentato intreccio fra il mondo della scienza e quello della società umana.

Argomento largamente sconosciuto, anche perché poco o nulla considerato nell'insegnamento scolastico. Dove naturalmente non si può trattare tutto, ma qualche spazio dovrebbe tro-

vare la conoscenza di quello che ci circonda in natura, come è appunto il caso della radioattività. Perché, come si chiarisce sin dalle prime pagine, non si tratta di un diabolico ritrovato di scienziati pazzi, ma di un fenomeno naturale, che è da sempre attorno a noi e che addirittura si manifesta nel nostro corpo. E a questo proposito voglio ricordare il sincero stupore, misto a timore, di coloro ai quali mi è capitato di svelare che tutti noi siamo radioattivi, come del resto qualsiasi essere vivente, animale o vegetale.

Parlando di radioattività, naturalmente, sorgono innumerevoli quesiti e questo è il motivo per cui l'opera è articolata essenzialmente in una serie di domande e risposte, che sono di lettura agile, non richiedono conoscenze scientifiche di base e forniscono sempre dati di fatto per consentire a chi legge di costruirsi un giudizio autonomo sulle varie questioni.

Il punto più delicato riguarda il controverso problema dell'energia nucleare, che si è cercato di affrontare laicamente. Cioè evitando di risolverne i dilemmi con approcci sbrigativi basati su incrollabili certezze tecnofideistiche oppure su altrettanto aprioristiche demonizzazioni. Entrambi, del resto, sono stati ampiamente smentiti dalla realtà dei fatti, come hanno dimostrato da un lato il verificarsi di gravissimi incidenti che qualcuno aveva considerato praticamente impossibili e dall'altro il perseguimento dell'impiego della fonte nucleare da parte di un gran numero di Paesi che ritengono i benefici di questa scelta superiori ai suoi inconvenienti.

Scrivere questo libretto su argomenti che credevo di conoscere, ma mi sbagliavo, è stata un'esperienza che mi ha arricchito, conducendomi attraverso una serie di sorprese. Come mi auguro che sia per chi vorrà leggerlo.

# 1. Radioattività e radiazioni: anche noi siamo radioattivi?

## La radioattività? C'è, ma non si vede

Non si vede, però c'è. Anche se nessuno se ne accorge e nessuno ci pensa. Si tratta della **radioattività** naturale: il bagno di **radiazioni** nel quale siamo immersi, dovunque ci troviamo, durante tutta la nostra vita. Queste radiazioni provengono in parte dal cosmo (**raggi cosmici**) e in parte maggiore sono dovute alle piccole quantità di elementi radioattivi che si trovano nella crosta terrestre come residuo di quelli presenti, ben più abbondantemente, al tempo della formazione del nostro pianeta.

### **La radioattività non è una diabolica invenzione moderna degli scienziati**

Molti credono che si tratti di qualcosa di innaturale, di una diabolica invenzione di scienziati pazzi. E invece no: la radioattività c'è in natura e c'è sempre stata. La sua scoperta, dovuta al fisico francese Henri Becquerel, risale al 1896 (vedi Appendice II). Agli studi sui fenomeni radioattivi, svolti negli anni immediatamente successivi, contribuirono soprattutto Marie Skłodowska Curie e suo marito Pierre Curie. Che per questo nel 1903, assieme a Becquerel, ricevettero il premio Nobel per la Fisica.



Marie Curie nata Skłodowska, premio Nobel per la Fisica nel 1903, premio Nobel per la Chimica nel 1911.

Questi elementi radioattivi naturali sono contenuti nel terreno, nei minerali, nel cibo che mangiamo, nell'aria che respiriamo, nell'acqua che beviamo, nei materiali da costruzione di cui son fatte le case e persino nel nostro corpo.

Alla radioattività naturale si aggiunge poi il contributo dovuto alle attività umane. Soprattutto per quanto riguarda gli impieghi di radiazioni e di sostanze radioattive nella medicina, cioè nelle radiografie, nelle TAC, nelle PET e negli altri mezzi diagnostici e terapeutici, in particolare quelli usati nella cura dei tumori. E anche agli effetti degli incidenti nucleari e degli esperimenti militari di alcuni decenni or sono.

## **La radioattività, l'aspirina e Paracelso**

Ma la radioattività non è pericolosa? Sì certamente a grandi dosi, fino a risultare mortale, ma non per piccole dosi. Come del resto l'aspirina o qualsiasi altra cosa. Infatti ingerire cento aspi-

rine è sicuramente pericoloso, forse addirittura mortale, ma prenderne solo una può far bene se abbiamo l'influenza e se non l'abbiamo non fa certamente male. E questo è noto dai tempi di Paracelso, il grande medico e alchimista svizzero del Cinquecento, secondo il quale «Tutte le cose sono veleno e nulla è senza veleno, solo la dose permette a qualcosa di non essere veleno». Affermazione considerata oggi totalmente corretta, che però creò parecchio scalpore fra i medici del tempo.



Philippus Theophrastus Bombast von Hohenheim, detto Paracelso.

Lo stesso avviene per la radioattività, che in piccole dosi, come quelle a cui noi siamo esposti normalmente (vedi p. 34), non risulta pericolosa per la salute e più in generale per la vita, come sostengono molti studiosi. Tuttavia l'opinione finora prevalente<sup>1</sup> fra gli scienziati è che anche le dosi minime possano avere degli effetti, sebbene estremamente improbabili. Vi è poi

<sup>1</sup> Tale opinione è rappresentata nei pareri dei massimi organismi internazionali che si occupano di radioprotezione (vedi Appendice IV).

***Alle Dinge sind Gift, und nichts ist ohne Gift; allein die Dosis macht, daß ein Ding kein Gift sei.***

Così scrisse in tedesco antico Philippus Theophrastus Bombast von Hohenheim, detto Paracelso (1493-1541). L'alchimista, astrologo e medico svizzero, che oggi è considerato il padre della tossicologia.

anche chi, invece, afferma che piccole dosi di radioattività (come quelle che assumiamo ogni giorno nella vita normale) abbiano addirittura un ruolo positivo, favorendo una maggior resistenza agli effetti di dosi più intense. Tale fenomeno, chiamato *risposta adattativa*, è un fatto ricorrente in vari aspetti della vita, e nel caso delle radiazioni ha trovato conferme con esperimenti svolti sia su cellule *in vitro* che su organismi viventi. Infatti, sottoponendo a forti dosi di radiazioni cellule cresciute in ambienti normali e altre cresciute invece in ambienti a bassissimo livello di radioattività, si è trovato che le prime sopportano questo trattamento, che è sicuramente nocivo, assai meglio delle seconde. Ma vi è di più; alcuni fatti avrebbero dimostrato un effetto benefico delle basse dosi secondo la dottrina dell'**ormesi**, la quale afferma che per qualsiasi agente le grandi dosi sono dannose, mentre le piccole dosi sono stimolanti e possono essere benefiche.

### **La radioattività, lo sviluppo della vita e l'evoluzione biologica**

La vita sulla Terra ha avuto origine fra 3 e 4 miliardi di anni fa, quando la radioattività naturale era 3-4 volte più intensa dell'attuale (vedi p. 26). Se poi la vita si è sviluppata, diversificandosi nella miriade di specie vegetali e animali che conosciamo, lo si deve anche alla radioattività. Perché le radiazioni giocano un ruolo importante nelle mutazioni genetiche che sono alla base del processo dell'evoluzione biologica. Cioè il processo che

nel corso di tempi lunghissimi, miliardi di anni, ha condotto alla straordinaria varietà delle specie vegetali e animali che popolano la Terra. E quindi se noi stessi ci siamo lo si deve anche alla radioattività.

Se poi fosse vero che la radioattività è sempre pericolosa, anche in quantità piccole o piccolissime, allora sul nostro pianeta, in un ambiente da sempre radioattivo, non ci dovrebbe essere traccia di vita.

## Ma insomma che cos'è la radioattività?

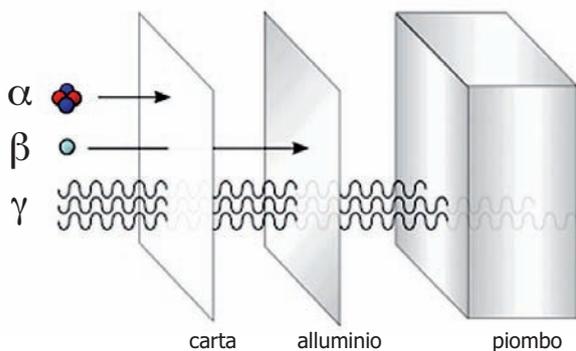
La maggior parte degli **atomi** che costituiscono la materia è stabile, cioè gli atomi restano sempre tali e quali. Anche quando subiscono reazioni chimiche che li trasformano nei diversi composti. Per esempio il cloruro di sodio, cioè il normale sale da cucina, si ottiene dall'unione di un atomo di cloro (un gas velenoso) e di un atomo di sodio (un metallo leggero molto reattivo). Ma gli atomi che formano la **molecola** del cloruro di sodio sono gli stessi che costituivano il cloro gassoso e il sodio metallico, e infatti possono essere riottenuti decomponendo il cloruro di sodio.

Alcuni atomi sono invece instabili, nel senso che si trasformano spontaneamente in atomi di altre specie con un processo chiamato **decadimento**. Come avviene, per esempio, per l'uranio. Questi atomi instabili sono detti *radioattivi* perché nell'attimo della trasformazione essi emettono radiazioni. Si tratta di

### **Gli elementi chimici radioattivi naturali**

Fra gli elementi chimici della tavola periodica che si trovano in natura ve ne sono diversi radioattivi. I più diffusi sono l'uranio, il torio e il radon. Altri elementi radioattivi naturali, come il radio e il polonio, sono invece piuttosto rari.

elettroni oppure di nuclei di atomi di elio<sup>2</sup>, che sono generalmente accompagnati da **fotoni** gamma, cioè pacchetti di radiazione elettromagnetica, simili a quelli che costituiscono la luce, ma dotati di energia assai maggiore. I tre tipi di radiazioni emesse nelle trasformazioni degli atomi radioattivi sono tradizionalmente chiamati **alfa** (nuclei di elio), **beta** (elettroni) e **gamma** (fotoni), e sono indicati rispettivamente con i simboli  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . I fotoni gamma sono privi di carica elettrica, le particelle alfa possiedono carica positiva, le beta carica negativa.



Queste diverse radiazioni si distinguono in base alla loro capacità di penetrare nei materiali, che dipende anche dalla loro energia. Per fermare le particelle alfa basta la pelle o un foglio di carta, mentre per bloccare gli elettroni occorrono materiali più densi e spessori maggiori, per esempio alcuni millimetri di alluminio. Più penetranti ancora sono i raggi gamma, specie quelli di alta energia: per bloccarli occorrono grandi spessori di cemento o di piombo. Sono quindi diverse anche le distanze percorse mediamente nell'aria da queste radiazioni fino al loro assorbimento: a parità di energia (1 **mega-elettronvolt**), le particelle alfa percorrono circa 1 cm, le beta circa 2,5 metri, i raggi gamma circa 300 metri.

<sup>2</sup> L'elio, il gas usato per riempire i palloncini, è il secondo elemento chimico della tavola periodica, il più leggero dopo l'idrogeno.

## Enrico Fermi e la radioattività artificiale

Riuscire a colpire un nucleo atomico con una particella alfa, come avevano fatto i coniugi Joliot-Curie, è un'impresa difficile. Questo perché sia le particelle alfa che i nuclei atomici possiedono carica elettrica positiva e quindi tendono a respingersi. Di ciò si rese conto Enrico Fermi, il quale pensò allora di utilizzare come proiettili delle particelle neutre: i neutroni che erano stati scoperti da James Chadwick nel 1932. Nel corso del 1934, nel giro di pochi mesi, Fermi e il suo gruppo (i «ragazzi di via Panisperna») svolsero una serie di esperimenti arrivando a scoprire che per ottenere i migliori risultati occorreva rallentare i neutroni (per esempio facendoli attraversare sostanze contenenti idrogeno, come l'acqua o la paraffina). Con questo procedimento, che fu brevettato il 26 ottobre 1934 e che è tuttora impiegato nei reattori nucleari (vedi p. 91), il gruppo di Roma riuscì a ottenere la trasmutazione di un gran numero di elementi chimici. Nel 1938 Fermi ricevette il premio Nobel per la Fisica per aver dimostrato l'esistenza di nuovi elementi radioattivi prodotti da irraggiamento neutronico e per la scoperta delle reazioni nucleari causate dai neutroni lenti.

Le radiazioni alfa, beta e gamma sono dette *ionizzanti*, perché la loro energia è tale da ionizzare gli atomi con cui possono interagire, cioè strappare da essi uno o più dei loro elettroni oppure rompere i legami chimici delle molecole. Questa proprietà, che rappresenta i danni che le radiazioni apportano alla materia con cui interagiscono, è importante anche perché è utilizzata negli strumenti che ne rivelano la presenza.

La radioattività può essere anche provocata artificialmente, per esempio colpendo il nucleo di un atomo stabile con una particella dotata di sufficiente energia. In tal caso l'atomo stabile si trasforma in un atomo radioattivo, che quindi poi decadrà a sua volta trasformandosi in un atomo diverso. I primi a ottenere questo risultato furono i coniugi francesi Irène e Fré-

déric Joliot-Curie, che nel 1934 bombardarono degli atomi di alluminio con particelle alfa, trasformandoli in una specie radioattiva di fosforo. Per questo nel 1935 ricevettero il premio Nobel per la Chimica. Ricordiamo anche che la trasmutazione di un gran numero di elementi chimici venne ottenuta a Roma da Enrico Fermi e dal suo gruppo, noto come «i ragazzi di via Panisperna»<sup>3</sup>.

Ma è importante osservare che non c'è alcuna differenza fra le radiazioni prodotte dalla radioattività artificiale e da quella naturale.

## Le trasformazioni degli atomi radioattivi

Le trasformazioni degli atomi radioattivi sono chiamate *decadimenti* o anche disintegrazioni, perché il nucleo dell'atomo che si trasforma emette, e quindi perde, qualcuna delle particelle che lo costituiscono: un nucleo di elio, cioè due protoni e due neutroni legati assieme (radiazione alfa), oppure un elettrone (radiazione beta). Queste trasformazioni sono delle vere e proprie trasmutazioni, nelle quali cioè un atomo di un elemento chimico si trasforma in uno di un altro elemento. Per esempio, quando un atomo emette radiazione alfa il suo nucleo perde due protoni e allora l'atomo cambia la sua identità, trasformandosi in un atomo di un altro elemento chimico, perché i diversi elementi chimici sono caratterizzati proprio dal numero di protoni contenuti nel loro nucleo (nella tavola periodica gli elementi sono ordinati in base al numero dei protoni che possiedono nel nucleo, a partire dall'idrogeno che ne contiene uno).

Con le trasformazioni degli atomi radioattivi si realizza il sogno degli alchimisti dei secoli passati: la cosiddetta *trasmuta-*

<sup>3</sup> Il gruppo dei «ragazzi di via Panisperna», chiamato così dal nome della strada dove al tempo si trovava la sede dell'Istituto di Fisica dell'Università di Roma, era costituito da ricercatori giovani e giovanissimi: Edoardo Amaldi, Oscar D'Agostino, Enrico Fermi, Ettore Majorana, Bruno Pontecorvo, Franco Rasetti, Emilio Segrè.

zione della materia. Peccato però che fra le numerose trasformazioni possibili non rientri quella del piombo in oro. Può anche darsi, e anzi avviene spesso, che l'atomo prodotto nella trasformazione sia a sua volta instabile, cioè radioattivo. Il processo di decadimento allora si ripete fino a che non si produce un atomo stabile. Proprio questo è quello che succede agli elementi radioattivi naturali più comuni, come l'uranio e il torio. Al loro decadimento iniziale segue una lunga serie di trasformazioni successive, che si conclude con il (deludente) risultato finale della loro trasmutazione in piombo.

Ma da dove proviene l'energia delle radiazioni emesse nel decadimento degli atomi radioattivi? Il fatto è che una parte ( $m$ ) della loro massa si converte in energia ( $E$ ) secondo la famosa formula di Einstein  $E = mc^2$ , dove  $c$  è la velocità della luce (circa 300 000 km/s). Più precisamente, si converte in energia la differenza fra la massa iniziale dell'atomo e la somma di quella del nuovo atomo e delle altre particelle emesse nella reazione. Il risultato finale di un decadimento è comunque lo sviluppo di calore, proveniente dall'**energia cinetica** delle particelle emesse e dall'energia dei fotoni.

Questo calore è veramente parecchio, enormemente maggiore di quello che si sviluppa in una reazione chimica. La combustione di un atomo di carbonio, per esempio, sviluppa 4,36 **elettronvolt**, mentre quando un atomo di uranio decade, e si trasforma in torio emettendo una particella alfa, si liberano 4,18 MeV, cioè una quantità di energia un milione di volte maggiore.

## **Ma quand'è che un atomo radioattivo si trasforma?**

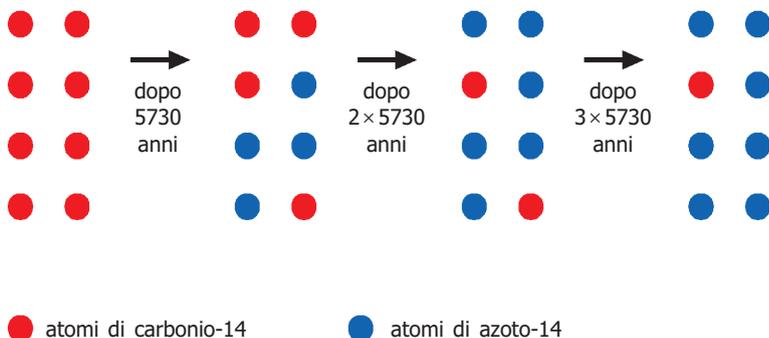
Il decadimento radioattivo di un atomo instabile è un fenomeno che avviene del tutto spontaneamente e che non si può influenzare in alcun modo. Tale fenomeno è determinato al tempo stesso dal caso e da una legge matematica assai rigorosa. Il caso, perché considerando un dato atomo radioattivo è asso-

lutamente impossibile stabilire il momento nel quale esso si trasformerà, che appunto è dettato dal caso. Una legge rigorosa, perché, considerando invece un certo numero di atomi radioattivi di una data specie, si può stabilire matematicamente quanti di essi, mediamente, decadranno durante un dato intervallo di tempo (vedi Appendice III).

A ogni diversa specie di atomi radioattivi è associato un tempo caratteristico, chiamato *vita media*, che rappresenta il tempo vissuto mediamente da un atomo prima di trasformarsi, e che è collegato matematicamente al **tempo di dimezzamento**, cioè il tempo necessario perché una popolazione di quegli atomi si dimezzi.

Per esempio, occorrono 1,25 miliardi di anni perché un chilogrammo di potassio-40 si riduca a mezzo chilo, producendo dopo una serie di decadimenti mezzo chilo di calcio e di argon, entrambi stabili.

Ad ogni successivo trascorrere di intervalli di tempo della stessa durata corrisponderà poi un ulteriore dimezzamento. Dopo due intervalli il numero iniziale di atomi radioattivi si ridurrà perciò a un quarto di quello iniziale, dopo tre a un ottavo e così via. Come è illustrato nella figura che segue, che rappresenta schematicamente il decadimento del carbonio-14, la specie radioattiva di carbonio che trova impiego nella datazione di reperti antichi (vedi p. 84).



E qui notiamo che i valori del tempo di dimezzamento, diversi a seconda della specie atomica<sup>4</sup>, vanno da frazioni di secondo a molti miliardi di anni: il berillio-8 ad esempio decade in 1/10 000 000 000 000 000 secondi (ci sono 16 zeri!!!), il rubidio-87 in 48,8 miliardi di anni (un tempo superiore alla vita dell'Universo).

<b>Tabella 1. Tempi di dimezzamento di alcuni atomi radioattivi</b>		
<b>specie atomica</b>	<b>tempo di dimezzamento</b>	<b>radiazione emessa</b>
radon-218	1,9 millisecondi	alfa
radon-222	3,82 giorni	alfa
iodio-131	8,02 giorni	beta
polonio-210	138,4 giorni	alfa e gamma
cesio-134	2,065 anni	beta e gamma
stronzio-90	28,78 anni	beta
cesio-137	30,17 anni	beta e gamma
radio-226	1602 anni	alfa e gamma
carbonio-14	5730 anni	beta
plutonio-239	24 100 anni	alfa
uranio-235	703,8 milioni di anni	alfa
potassio-40	1,25 miliardi di anni	beta e gamma
uranio-238	4,47 miliardi di anni	alfa e gamma
torio-232	14,1 miliardi di anni	alfa e gamma
rubidio-87	48,8 miliardi di anni	beta

<sup>4</sup> Le diverse specie atomiche sono indicate dal nome dell'elemento chimico e da un numero. Quest'ultimo rappresenta il **numero di massa** della specie, cioè il numero totale dei protoni e dei neutroni che costituiscono il nucleo di quegli atomi.

## Come si stabilisce «quanto sono radioattive» le diverse sostanze?

La radioattività, più precisamente l'**attività**, di una data quantità di materia è determinata dal numero dei suoi atomi che si trasformano in un dato tempo. Cosa che dipende sia dal numero di atomi radioattivi in essa contenuti sia dalla velocità con cui si svolgono i decadimenti, che è tanto maggiore quanto più breve è il tempo di dimezzamento. E allora si capisce che gli atomi radioattivi a vita breve contribuiscono molto all'attività, assai meno invece quelli a vita lunga che si trasformano molto più lentamente. Per esempio, un milligrammo di polonio-210<sup>5</sup> emette in un secondo la stessa quantità di particelle alfa di circa 4 grammi di radio-226, come si desume dal rapporto fra i tempi di dimezzamento riportati nella tabella 1, che è approssimativamente pari a quattromila (1602 anni/138,4 giorni = 4225).

L'unità di misura dell'attività si chiama **becquerel** (Bq), dove 1 becquerel corrisponde al decadimento di 1 atomo al secondo. Per esempio, la radioattività di una banana è di circa 15 becquerel perché ogni secondo si trasformano una quindicina dei suoi atomi. L'attività di 1 kg di carne è di circa 200 becquerel, quella di 1 kg di granito circa 1000 becquerel. Estremamente più elevata è l'attività delle sostanze a vita breve, che sono fortemente radioattive: ammonta a circa 200 miliardi di becquerel l'attività di appena un milligrammo del già citato polonio-210. Enormemente minore del polonio è l'attività dell'uranio-238, a fronte dell'assai più lunga vita media (4,5 miliardi di anni) di questo atomo.

Esistono vari tipi di strumenti che rivelano le radiazioni prodotte dai decadimenti. Il ticchettio dei contatori Geiger-Müller, per esempio, è prodotto da microscariche elettriche all'interno di un gas, ciascuna delle quali è causata dalla ionizzazione dovuta al passaggio di una particella ionizzante attraverso lo strumento. Quindi ogni tic proviene dalla trasformazione di un singolo atomo radioattivo.

<sup>5</sup> All'ingestione di questa sostanza radioattiva si deve la morte del dissidente russo Aleksandr Val'terovič Litvinenko, avvenuta a Londra il 23 novembre 2006, a quanto pare per opera di persone collegate ai servizi segreti russi. Si sospetta inoltre che il polonio-210 sia stato la causa della morte del leader palestinese Yasser Arafat.



Il contatore Geiger commerciale GAMMA SCOUT misura anche le radiazioni alfa, essendo dotato di un'apposita finestra di mica.

## I contatori Geiger-Müller

Sono i rivelatori di radiazioni più diffusi per la semplicità della loro costruzione. L'elemento sensibile è tipicamente costituito da un tubo metallico riempito con un gas inerte (per esempio argon o neon) all'interno del quale si trova un filo metallico. Fra il tubo e il filo viene applicata una tensione elettrica di qualche centinaio di volt. Quando nel tubo penetra una particella, alcuni atomi del gas si ionizzano e allora si crea una piccola scarica elettrica. Questa viene inviata a un altoparlante e registrata da un contatore. Il dispositivo appena descritto non è però sensibile alla radiazione alfa e alle radiazioni beta di bassa energia, che sono arrestate dalle pareti del tubo. Per rivelare anche queste radiazioni il tubo va dotato di un'apposita apertura, una finestra costituita per esempio da un sottile strato di mica.

Alcuni tipi di strumenti, come appunto i Geiger, si limitano a registrare il conteggio degli eventi di decadimento osservati, senza però dare indicazioni sull'energia delle radiazioni. Altri tipi di strumenti, invece, misurano anche l'energia associata ai diversi tipi di radiazioni. Un esempio di questi ultimi sono i cosiddetti rivelatori proporzionali, che misurano la carica elettrica complessiva liberata dalla ionizzazione indotta dal passaggio di una particella in un gas. Si produce così un impulso elettrico la cui ampiezza è proporzionale all'energia persa dalla particella nel gas.

La radioattività si misura quindi con notevole precisione e sicurezza. E soprattutto con straordinaria sensibilità, addirittura fino a registrare il decadimento di un singolo atomo! Molto diverso, invece, è il caso delle misure necessarie per valutare l'inquinamento chimico. Perché qui si richiedono analisi specifiche per individuare ciascuna delle numerosissime sostanze diverse (ossidi di zolfo, ossidi di azoto, ozono, idrocarburi, metalli pesanti, particelle sottili e via dicendo) che concorrono all'inquinamento dell'ambiente nell'aria, nelle acque e nel suolo.

Quando, però, i risultati di misure della radioattività dell'ambiente vengono resi noti si crea spesso sconcerto o addirittura preoccupazione per il semplice motivo che il pubblico ha scarsa nozione del significato delle grandezze che rappresentano la radioattività e delle loro unità di misura. E quindi non è in grado di stabilire l'eventuale grado di pericolosità rappresentato da questi dati, che generalmente i media propinano accompagnandoli con commenti esplicativi scarsi o fuorvianti.

Talvolta, del resto, neppure le autorità di governo, e non solo in Italia, sono in grado di valutare seriamente questo tipo di pericoli. E infatti in alcune occasioni sono stati promulgati divieti, in particolare riguardanti il consumo di determinati alimenti, che erano cautelativi oltre ogni necessità (vedi p. 47).

## **Quanto sono radioattive le rocce terrestri?**

La Terra, come tutto il Sistema Solare, ha avuto origine dalla condensazione delle polveri interstellari provenienti da prece-

denti generazioni di stelle che alla fine della loro vita hanno rimesso in circolo gran parte della massa di cui erano fatte, arricchita dagli elementi prodotti dai processi nucleari avvenuti al loro interno. Le stelle sono infatti degli straordinari laboratori dove avvengono reazioni nucleari di **fusione**, nelle quali i nuclei di elementi leggeri si fondono a formare nuclei di elementi via via più pesanti – dall'idrogeno all'elio, al carbonio e poi agli altri elementi – con un processo chiamato nucleosintesi. Al termine della sua vita, la stella esplose liberando grandi quantità di energia e di materia ricca di specie atomiche radioattive.

**Tabella 2. Principali atomi radioattivi primordiali nella crosta terrestre in unità di parti per milione (ppm)**

potassio (K-40)	2,1
rubidio (Rb-87)	25
torio (Th-232)	9,6
uranio (U-238)	2,7

Ciò che rimane oggi di questa radioattività primordiale si trova nel nucleo, nel mantello e nella crosta terrestre. Sicché tutte le rocce e i terreni sono radioattivi, più o meno debolmente, perché contengono sempre piccole quantità (al livello di qualche parte per milione) di atomi radioattivi: torio, uranio, potassio e così via. Le rocce più radioattive sono quelle che provengono dal profondo della crosta terrestre, come il porfido e il granito. In un chilogrammo di granito, per esempio, ogni secondo si trasforma grossomodo un migliaio di atomi con conseguente emissione di radiazioni. Cioè si hanno circa mille trasformazioni radioattive al secondo e dunque la radioattività del granito ammonta a 1000 becquerel/chilogrammo. Ancora più radioattivo è il tufo, con circa 1800 Bq/kg.

Meno radioattive sono le rocce calcaree, fra cui il marmo, come pure generalmente tutte quelle sedimentarie: il gesso, per esempio, è dieci volte meno radioattivo del granito. I valori di

## La radioattività e il calore terrestre

Sappiamo che l'interno della Terra è caldissimo, raggiungendo temperature di varie migliaia di gradi. E che la superficie terrestre è costantemente attraversata da un flusso di calore con **potenza** media di circa  $0,06 \text{ W/m}^2$ . L'origine del calore terrestre non è certamente primordiale, dato che nel corso di oltre 4 miliardi di anni la Terra ha avuto tutto il tempo necessario per raffreddarsi. E infatti nell'Ottocento l'età della Terra venne stimata in decine o centinaia di milioni di anni sulla base del suo raffreddamento. Oggi sappiamo invece che il calore terrestre si deve alle trasformazioni delle grandissime quantità di elementi radioattivi contenuti al suo interno, in particolare nella crosta e nel mantello.

È proprio a questo calore che si devono i grandi fenomeni geologici: la deriva dei continenti, i terremoti e le eruzioni vulcaniche. Cioè i fenomeni per cui la Terra, a differenza per esempio di Marte, è un pianeta «vivo».

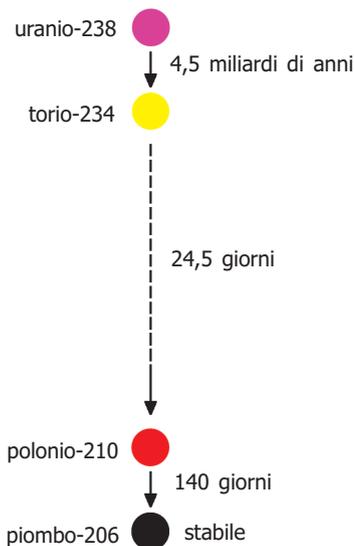
radioattività del suolo sono generalmente compresi fra 100 e 800 Bq/kg, con un valor medio che in Europa è di 400 Bq/kg. Alquanto più radioattivo è invece il legno (3000 Bq/kg), a causa del potassio-40 che contiene. Che del resto è contenuto in tutte le sostanze e i materiali di origine organica.

## Come mai nelle rocce terrestri vi sono ancora atomi radioattivi?

La presenza oggi sulla Terra di atomi radioattivi si deve alla grande durata della vita media di alcune delle specie presenti al tempo della formazione del nostro pianeta. L'atomo radioattivo di origine primordiale più longevo è il rubidio-87, con tempo di dimezzamento di quasi cinquanta miliardi di anni, oltre tre volte l'età dell'Universo. Tanto che si è trasformato meno del 10% di quello presente inizialmente.

Un altro atomo fra i più longevi è l'uranio-238, che ha un tempo di dimezzamento di 4,5 miliardi di anni, approssimativa-

mente uguale all'età della Terra. Si capisce quindi che degli atomi inizialmente presenti ne rimane oggi circa la metà. Più precisamente, quando si trasforma, l'uranio-238 produce un atomo (torio-234) a sua volta instabile, dando inizio a una catena di decadimenti che termina con la produzione di piombo-206, che è stabile. Un altro atomo radioattivo primordiale piuttosto longevo è il potassio-40, che ha un tempo di dimezzamento di 1,25 miliardi di anni.



Ci vogliono ben 14 trasformazioni successive, nel corso di tempi lunghissimi, perché l'uranio-238 si trasformi in piombo-206, che è stabile.

### **La radioattività terrestre 4,5 miliardi di anni fa**

Considerando i tempi di dimezzamento delle principali specie atomiche primordiali, si trova che di uranio-238 ce n'era il doppio di oggi, di potassio-40 ce ne doveva essere più di otto volte, mentre le quantità di torio-232 e di rubidio-87 erano poco maggiori di quelle attuali. Sicché la Terra, nel complesso, era assai più radioattiva di oggi.

Alla radioattività naturale della Terra contribuiscono poi vari altri elementi: quelli derivanti dal decadimento degli elementi radioattivi primordiali, come il radon, e quelli prodotti dall'azione dei raggi cosmici, come il carbonio-14.

## Il potassio è davvero radioattivo?

Non esattamente, perché fra le diverse specie, o **isotopi**, del potassio solo alcune sono radioattive. Fra queste, l'unica presente in natura in misura apprezzabile è il potassio-40, che costituisce però appena lo 0,012% del potassio (cioè su centomila atomi di potassio, solo 12 sono effettivamente radioattivi). Ciò nonostante il potassio-40 è relativamente diffuso – nei terreni, negli organismi viventi e nel nostro stesso corpo – perché il potassio è uno degli elementi più abbondanti nella crosta terrestre, il settimo nell'ordine. Ed è anche uno degli elementi radioattivi maggiormente presenti nei viventi, perché il potassio è un elemento nutriente importantissimo, componente essenziale<sup>6</sup> della nostra alimentazione (e anche di quella delle piante: esso è infatti un costituente fondamentale dei fertilizzanti usati in agricoltura).

Il potassio lo troviamo quindi nella frutta, nelle verdure, nel latte, nella carne, nel pesce; praticamente in tutti gli alimenti. Una banana di 150 grammi, per esempio, contiene circa 525 milligrammi di potassio e quindi  $525 \times 0,012\%$  milligrammi = 63 microgrammi di potassio-40, che comprendono 0,5 miliardi di miliardi di atomi. Dato che la vita media di questi atomi è  $1,25/0,693 = 1,8$  miliardi di anni (vedi Appendice III) si conclude che la radioattività della banana ammonta a circa 16 Bq.

Nel corpo di un adulto che pesa 70 kg vi sono circa 140 grammi di potassio e quindi circa 17 milligrammi di potassio radioattivo, che non è davvero poco, con attività corrispondente a circa 4000 Bq. Persino un neonato ha il suo milligrammo (con circa 200 Bq di radioattività).

<sup>6</sup> La carenza di potassio, che provoca gravi disturbi, si combatte assumendo cibi che contengono questo elemento.



Una bistecca con patate? In totale fanno circa 150 Bq, ma naturalmente la cifra esatta dipende dalle quantità.

### **Ma allora noi stessi siamo radioattivi?**

Assolutamente sì, come del resto tutti gli organismi viventi, vegetali o animali che siano. Alla radioattività del nostro corpo, oltre al potassio-40, contribuiscono varie altre specie di atomi. Fra questi l'uranio, il torio, e soprattutto il carbonio-14, che è prodotto dall'azione dei raggi cosmici nell'atmosfera, catturato dalle piante attraverso la fotosintesi e infine assorbito con il cibo. Il risultato complessivo è che nel corpo di un adulto di 70 kg ogni secondo decadono circa 8000 atomi, emettendo radiazioni alfa, beta e gamma<sup>7</sup>. Questa radioattività di 8000 becquerel è dovuta

<sup>7</sup> Ma allora è pericoloso stare vicino a un'altra persona? No, certamente, perché si tratta di una radioattività assai debole e poi perché solo una piccola frazione di queste radiazioni sfugge dal corpo, il resto viene assorbito al suo interno.

all'incirca per una metà al potassio-40 e per l'altra metà al carbonio-14. Ricorrendo alle unità di misura usate in passato, ciò corrisponde a circa 200 nanocurie.

Proprio di nanocurie, come qualcuno forse ricorderà, parlarono parecchio giornali e tv al tempo dell'incidente di Chernobyl, evocando oscuri pericoli, non spiegando però mai di cosa si trattasse effettivamente. Sicché questo termine è rimasto nell'immaginario collettivo per indicare qualcosa di misterioso e minaccioso al tempo stesso. Senza tuttavia avere la minima idea dei nanocurie che ci portiamo addosso naturalmente senza problemi. E non pensando alle radiazioni beta e gamma, peraltro di assai modesta entità, con cui irradiamo chi sta vicino a noi e che vengono su di noi irradiate.

E l'uranio? Nel corpo umano ve ne sono mediamente circa 90 milligrammi, cui corrisponde però una radioattività modestissima, di appena 2 Bq, quindi trascurabile rispetto a quanto si è detto prima. Il fatto è che l'uranio ha una vita media estremamente lunga ed è solo debolmente radioattivo.

Notiamo infine che gli elementi radioattivi presenti nell'organismo non vi permangono per sempre, e non si accumulano indefinitamente. Essi vi restano per un tempo più o meno lungo che dipende soprattutto dal metabolismo degli organi interessati oltre che dalle caratteristiche fisiche (tempo di dimezzamento) e chimiche di ciascuna specie radioattiva. Quindi, se mangiamo una banana (circa 16 Bq) al giorno, dopo cento giorni non avremo accumulato una radioattività di 1600 Bq, ma assai meno. Perché gran parte del potassio sarà stata smaltita attraverso le vie naturali (un eccesso di potassio permane nel corpo per circa 30 giorni).

### **I nanocurie: pericolosi mostriciattoli che aleggiano nell'aria?**

O invece piccole quantità di radioattività per nulla dannose? Tanto che sono circa duecento i nanocurie che ci portiamo addosso normalmente. In tutta sicurezza.

## 2. Le dosi di radioattività, la radioattività naturale e le paure

### Cosa s'intende per «dose» quando si parla di radioattività?

Le radiazioni, quando interagiscono con la materia, cedono ad essa la loro energia: tutta, se vengono assorbite, una parte soltanto, quando l'attraversano. Non entriamo nel dettaglio dei diversi meccanismi fisici attraverso i quali avviene questa cessione di energia, limitandoci a ricordare il più importante e significativo, cioè la ionizzazione (vedi p. 15).

Per dose di radiazione (o **dose assorbita**) s'intende l'energia che un materiale ha assorbito quando è stato sottoposto a radiazioni. Più precisamente s'intende il rapporto fra questa energia, misurata in **joule** (J), e la massa del materiale, misurata in chilogrammi (kg). L'unità di misura di questa grandezza si chiama **gray** (Gy).

Questa definizione di dose trascura però il fatto che, a parità di energia, i diversi tipi di radiazioni – alfa, beta e gamma – hanno effetti differenti sulla materia.

Ecco allora che si definisce la **dose equivalente**, nella quale gli effetti dei diversi tipi di radiazioni vengono pesati diversamente a seconda dei danni che essi arrecano alla materia, inclusa quella biologica (cellule, tessuti, organi, organismi). L'unità di misura di questa grandezza si chiama **sievert** (Sv). Per esempio, 1 gray di radiazione beta e gamma produce la dose equivalente

di 1 sievert, mentre 1 gray di radiazione alfa produce la dose equivalente di 20 sievert; dove la moltiplicazione per il fattore 20 tiene conto del fatto che le radiazioni alfa, in quanto assorbite in percorsi attraverso la materia molto più brevi di quelli delle altre radiazioni, possiedono un maggior potere ionizzante a parità di percorso, con effetti locali molto più intensi, e quindi sono più dannose per l'organismo.

### **Quanto riscalda la materia la dose di 1 gray?**

Consideriamo 1 kg, cioè 1 litro, di acqua. Quando riceve la dose di 1 gray, vuol dire che ha assorbito 1 joule di energia. Dato che per riscaldare di 1 grado 1 litro d'acqua occorrono 1000 calorie, si conclude che il litro d'acqua in questione si riscalda di appena  $1^{\circ}\text{C}/4186 = 0,24$  millesimi di grado. Che è veramente pochissimo! Sarebbe però totalmente sbagliato concludere che una dose di radiazioni di 1 gray produca effetti trascurabili. Perché nel caso delle radiazioni questa energia viene fornita alla materia attraverso interazioni estremamente localizzate, riguardanti cioè quantità di materia straordinariamente piccole, a livello atomico. E allora, localmente, l'energia in gioco può arrivare a produrre effetti assai rilevanti: veri e propri sconquassi nella struttura di un cristallo, addirittura la morte di una cellula nella materia vivente (vedi p. 62).

Infine, per tener conto del fatto che le radiazioni hanno effetti differenti sui diversi organi del corpo umano, si definisce la **dose efficace**, anch'essa misurata in unità di sievert. E quindi, per calcolarla, si devono usare appositi coefficienti, diversi per ciascun organo o tessuto del corpo esposto a radiazioni.

Anche le dosi si misurano piuttosto facilmente. Si usano a questo scopo *dosimetri* a forma di penna o di tessera, che consentono di determinare la dose ricevuta da una persona durante il tempo che ha portato con sé il dosimetro. Alcuni di questi strumenti determinano l'energia assorbita sfruttando il fenomeno della ionizzazione.



Dosimetro commerciale del tipo a termoluminescenza.

Ogni volta si dispone al loro interno una carica elettrica nota che viene poi parzialmente neutralizzata dalle cariche prodotte dalla ionizzazione dovuta alle radiazioni. Misurando la carica elettrica residua al termine dell'esposizione alle radiazioni è possibile stabilire la dose assorbita dalla persona che portava con sé il dosimetro.

Altri strumenti utilizzano una speciale pellicola fotografica sensibile alle radiazioni, che la impressionano: al termine dell'esposizione, la pellicola viene rimossa, sviluppata per determinare la dose e poi sostituita con una nuova. Altri ancora sfruttano il fenomeno della termoluminescenza, per cui gli elettroni degli atomi di certi materiali, quando vengono irradiati, acquistano energia portandosi a livelli praticamente stabili, dove permangono pressoché indefinitamente. Quando però il materiale viene riscaldato, questi elettroni ritornano al loro stato di riposo, emettendo luce in quantità proporzionale alla radiazione che avevano assorbito. Misurando la luce emessa durante il riscaldamento è possibile stabilire la dose assorbita a partire dall'ultimo riscaldamento.

## Che dose riceviamo dal Sole?

Calcoliamo la dose di radiazione solare che riceviamo quando ci sdraiamo al sole per mezz'ora. Sappiamo che il flusso di questa radiazione, quando cade a perpendicolo, ammonta a 1000 **watt** al metro quadrato e che la superficie corporea esposta al sole da un adulto sdraiato è di circa 1 metro quadrato. Trascurando la frazione di potenza che riflettiamo e quella che emettiamo a nostra volta, la potenza assorbita è dunque di 1000 watt. Dato che in mezz'ora ci sono 1800 secondi, l'energia totale assorbita è  $1800 \times 1000 = 1,8$  milioni di joule. La dose si calcola infine dividendo l'energia per la massa. Per un adulto che pesa 70 kg si ottiene  $1800000/70$ , cioè 26000 gray, che è un valore molto grande. Dobbiamo però ricordare che la luce solare è costituita da fotoni ciascuno dei quali ha un'energia straordinariamente inferiore a quella dei fotoni gamma della radiazione nucleare. Cioè si tratta di radiazione non ionizzante (se si esclude la componente ultravioletta), che non danneggia la materia, ma si limita a riscaldarla.

## A quali dosi siamo sottoposti normalmente? La radioattività naturale...

La dose totale di radiazioni che si riceve mediamente in Italia in un anno è di circa 4,5 millisievert, che è maggiore della media mondiale (3 mSv) e minore della dose media negli Stati Uniti (6,2 mSv). Alla dose media in Italia contribuisce soprattutto la radioattività naturale (3,3 mSv), dovuta ai raggi cosmici e agli atomi radioattivi contenuti nella crosta terrestre, che si manifesta nel terreno, nell'acqua, nell'aria: praticamente in tutto quello che ci circonda, oltre che in noi stessi<sup>1</sup>.

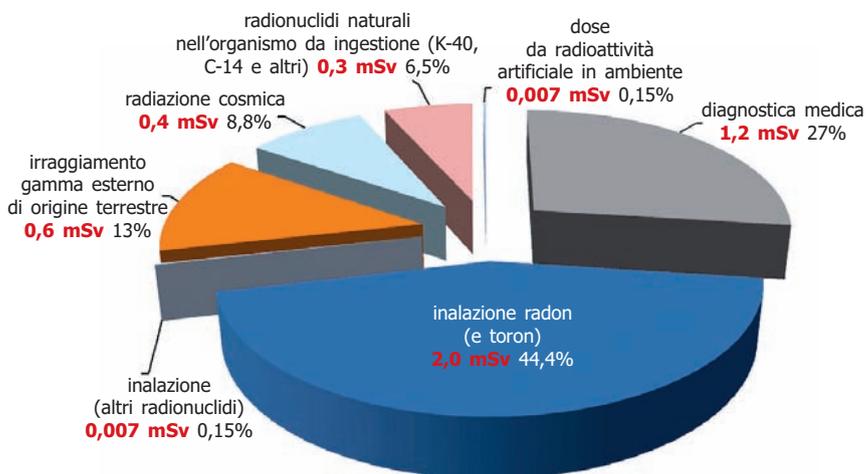
I raggi cosmici, più precisamente i raggi cosmici primari, sono una radiazione proveniente dallo spazio – dal Sole, dalla nostra galassia e da altre galassie più lontane – che è costituita quasi per intero da nuclei atomici (protoni, particelle alfa, ecc.), da una

<sup>1</sup> La dose (peraltro bassissima) che si riceve semplicemente dormendo accanto a un'altra persona ammonta a circa 50 miliardesimi di sievert.

## Dalla Terra a Marte e ritorno

Il flusso dei raggi cosmici nello spazio è assai elevato [1], comportando una dose oltre cento volte maggiore di quella dovuta alla radiazione naturale sulla superficie terrestre. Tale cioè da mettere in dubbio la possibilità che l'uomo possa raggiungere indenne il pianeta Marte. Si valuta infatti che nel corso di questa lunghissima missione, di oltre un anno, la dose ricevuta da un astronauta ammonterebbe a 0,5-1 Sv, che sono livelli pericolosi (vedi p. 64).

piccola frazione di elettroni e da fotoni gamma, che possiedono energie straordinariamente elevate<sup>2</sup>.



Contributi alla dose media di radioattività in Italia (grafico dell'ARPA Val d'Aosta tratto dall'*Annuario dei dati ambientali 2005-2006* dell'ISPRA).

<sup>2</sup> L'energia delle particelle che costituiscono la radiazione cosmica primaria è compresa tra una frazione di GeV (1 GeV è 1 miliardo di eV) e centinaia di miliardi di GeV. Si tratta di energie straordinariamente grandi, enormemente maggiori, per esempio, di quelle che si ottengono con i grandi acceleratori di particelle come l'LHC del CERN di Ginevra. Un singolo nucleo atomico cosmico dei più energetici ha la stessa energia di un corpo macroscopico: una palla da baseball lanciata a 100 km/h.

**Tabella 3. Contributi alla dose media che una persona riceve in un anno**

	<b>in Italia</b>	<b>negli USA</b>	<b>nel mondo</b>
raggi cosmici	0,4 mSv	0,3 mSv	0,4 mSv
radiazione terrestre	0,6 mSv	0,2 mSv	0,5 mSv
gas radon	2,0 mSv	2,3 mSv	1,2 mSv
radiazione interna	0,3 mSv	0,3 mSv	0,3 mSv
<b>radioattività naturale totale</b>	<b>3,3 mSv</b>	<b>3,1 mSv</b>	<b>2,4 mSv</b>
radioattività artificiale (diagnostica e cure)	1,2 mSv	3,1 mSv	0,6 mSv
<b>dose media totale</b>	<b>4,5 mSv</b>	<b>6,2 mSv</b>	<b>3,0 mSv</b>

Fonti: **ISPRA, EPA e UNSCEAR.**

Da questa radiazione l'atmosfera ci protegge solo parzialmente. La maggior parte dei raggi cosmici che arrivano sulla superficie terrestre appartiene infatti alla cosiddetta radiazione secondaria, assai meno energetica di quella primaria, che è prodotta proprio nell'atmosfera dagli urti fra la radiazione primaria e gli atomi delle molecole dell'aria. Questi urti avvengono principalmente a grande altezza, fra 15 e 20 km. È così, per esempio, che l'azoto presente nell'atmosfera viene trasformato in carbonio radioattivo, il carbonio-14 di cui si è detto.

Per avere un'idea dell'entità del flusso dei raggi cosmici, diciamo che sulla superficie terrestre cade mediamente una particella per centimetro quadro al secondo, e quindi ogni secondo ce ne arrivano addosso molte migliaia. Questo flusso dipende però sia dalla latitudine (ai poli è maggiore che all'equatore) che dall'altitudine, perché aumenta al crescere della quota. Per esempio a Città del Messico (2400 m) la dose cosmica è tre volte quella di Roma, mentre viaggiando in aereo a 12 km di altezza la dose dovuta ai raggi cosmici è circa cento volte maggiore che a terra. Un volo transatlantico, per esempio, comporta approssimativamente la dose di 40 milionesimi di sievert.

## La radioattività di un giardinetto

Per rendersi conto dell'onnipresenza della radioattività naturale, lo scienziato nucleare indiano Raja Ramanna ha calcolato [2] quanta ne compete, davvero non poca, all'inconsapevole possessore di un piccolo giardino. Senza però che ciò conduca a rischi significativi. Considerando un giardino di 400 m<sup>2</sup>, nel terreno contenuto in un metro di profondità si trovano all'incirca 11 000 kg di potassio, di cui 1,3 kg costituiti da potassio-40 radioattivo, più 3,5 kg di torio e 1 kg di uranio. Si tratta di valori approssimati, che in pratica possono essere maggiori o minori a seconda della località e del tipo di suolo.

Alla radiazione naturale concorre poi l'effetto degli atomi radioattivi presenti nell'ambiente terrestre, come l'uranio, il torio e il potassio-40, che si trovano nelle rocce, nei terreni e nei materiali da costruzione. E contribuisce anche la radiazione interna, alla quale siamo sottoposti per l'attività degli atomi radioattivi presenti nel nostro corpo (vedi p. 29). Quest'ultimo effetto è relativamente debole: come mostra la tabella 3 esso ammonta a meno di un decimo del totale.

Il contributo maggiore alla radioattività naturale si deve al radon, un gas radioattivo «nobile» (nel senso che si combina assai difficilmente con altri elementi per formare composti chimici) otto volte più denso, e quindi più pesante, dell'aria, che è prodotto nel corso dei decadimenti successivi degli elementi radioattivi naturali uranio e torio contenuti nelle rocce terrestri. La specie più diffusa, il radon-222, proviene dalle trasformazioni dell'uranio-238 e ha un tempo di dimezzamento di 3,8 giorni; un'altra specie è il radon-220, chiamato a volte toron o thoron, che proviene dal decadimento del torio.

La presenza del radon nell'aria si rappresenta usualmente in termini di radioattività per unità di volume, cioè di Bq/m<sup>3</sup>. Provenendo dal sottosuolo e/o dalle pareti degli edifici, il radon tende a concentrarsi al loro interno, nei piani bassi e soprattutto

to nelle cantine, essendo più pesante dell'aria. In Italia, misurandone la presenza, si sono trovate forti variazioni fra le diverse zone esaminate, con una media di  $70 \text{ Bq/m}^3$ , che è circa il doppio della media mondiale di  $40 \text{ Bq/m}^3$ . A  $70 \text{ Bq/m}^3$  corrisponde una dose oraria di 0,63 milionesimi di sievert, che a sua volta corrisponderebbe a una dose totale annua di 5,5 mSv, che però va ricalcolata in proporzione alle ore trascorse ogni giorno all'interno degli edifici. Assai maggiore, anche ben oltre  $1000 \text{ Bq/m}^3$ , è la concentrazione di radon all'interno delle miniere, con valori particolarmente elevati nelle miniere di uranio.

La radioattività dell'aria degli esterni, dove il radon emesso dal suolo si disperde, ha in Italia valori compresi generalmente fra 20 e  $100 \text{ Bq/m}^3$ , ma con punte che in certe zone, come nel viterbese, possono arrivare a  $1000 \text{ Bq/m}^3$ . Debolmente radioatti-

### **La radioattività delle sigarette: il polonio killer?**

È ben noto che il tabacco, e quindi il fumo delle sigarette, contiene varie sostanze chimiche cancerogene. Qualche anno fa l'attenzione dei media si concentrò sulla presenza nel tabacco di elementi radioattivi, polonio-210 e piombo-210, assunti dalle piante attraverso i fertilizzanti costituiti da fosfati. Questi elementi sono agenti carcinogeni che possono provocare tumori polmonari. Uno studio svolto nel 2011 dall'Istituto Superiore di Sanità (ISS) analizzando le sigarette più diffuse nel nostro Paese portò a concludere che la radioattività di una sigaretta è tipicamente di circa 30 millesimi di becquerel (cioè 500 volte minore di quella di una banana). Lo studio stabilì inoltre che, consumandone due pacchetti al giorno, un fumatore incallito sarebbe soggetto a una dose annua di circa 1,1 mSv, cioè un terzo della dose naturale media in Italia. Allora è facile capire che la pericolosità del fumo in quanto tale va certamente oltre quella della sua radioattività. Eppure in quella occasione i media parlarono ampiamente del polonio come «agente killer».

va, per la presenza di radon, è anche l'acqua potabile, con attività media di circa 25 becquerel/litro in Italia. Ma vi sono acque sorgive, in particolare fra le acque termali, con contenuti di radon assai maggiori (vedi p. 44).

Il radon decade emettendo radiazioni alfa e trasformandosi in altri atomi radioattivi che, negli ambienti chiusi, si accumulano pericolosamente. Quando questo gas viene inalato, gli elementi prodotti dalla sua trasformazione si depositano nel tratto respiratorio e nei polmoni. Per questo il radon è considerato assai pericoloso e si ritiene costituisca la seconda causa, dopo il fumo, del cancro ai polmoni, la prima per i non fumatori. Ma la valutazione dell'entità delle concentrazioni di radon che sono effettivamente pericolose è piuttosto controversa. In ogni caso, la normativa europea prevede che si debbano intraprendere azioni di ristrutturazione degli edifici quando al loro interno la radioattività supera il limite di  $400 \text{ Bq/m}^3$ .

Le prime osservazioni di problemi sanitari dovuti all'esposizione al radon risalgono a cinque secoli fa, quando della radioattività non si aveva alcuna nozione. Paracelso osservò infatti che i minatori delle miniere d'argento della regione di Schneeberg, in Sassonia, erano soggetti a malattie polmonari, con esiti spesso mortali. Fenomeni analoghi si registrarono successivamente anche fra gli addetti ad altre miniere. Ma le cause di questa «malattia di Schneeberg» rimasero sconosciute anche quando nella seconda metà dell'Ottocento si capì che si trattava di cancro ai polmoni. L'ipotesi che questa affezione fosse dovuta al radon fu avanzata solo nel secolo scorso, dopo che le misure svolte in miniera avevano indicato la presenza di alte concentrazioni di radon.

È interessante ricordare che la necessità di tenere sotto controllo i livelli di radioattività dovuti al radon all'interno delle abitazioni trovò forte motivazione a seguito del cosiddetto incidente Watras. Questa vicenda risale al dicembre del 1984, quando l'ingegnere Stanley J. Watras, che lavorava alla costruzione della centrale nucleare di Limerick, in Pennsylvania, USA, provocò più volte segnali di allarme da parte dei rivelatori di radiazioni dell'impianto e venne quindi «decontaminato». Si trovò poi che la causa del fenomeno non aveva nulla a che fare con la

centrale nucleare, che del resto a quel tempo era ancora priva di combustibile nucleare, ma era dovuto alla radioattività che l'ingegner Watras si portava addosso! Radioattività dovuta agli elevatissimi livelli del radon presente ( $100\,000\text{ Bq/m}^3$  nella cantina) nell'abitazione di Watras, che era stata costruita in prossimità di una vena di uranio.

### **... e la radioattività artificiale**

All'esposizione alle radiazioni di origine artificiale, in Italia come negli altri Paesi industrializzati, contribuiscono quasi esclusivamente le indagini e le terapie mediche. A una radiografia al torace, per esempio, corrisponde una dose di poco meno di  $0,1\text{ mSv}$ ; a una mammografia  $0,4\text{ mSv}$ ; a una tomografia computerizzata (TAC) o a una scintigrafia una dose fra  $2$  e  $15\text{ mSv}$ . Dosi decisamente più alte, come vedremo, sono utilizzate poi nella cura dei tumori.

Assai più modesto, per un totale attorno a  $0,1\text{ mSv/anno}$ , è il contributo dovuto a tutto il resto, cioè alle diverse attività industriali dove la radioattività trova impieghi utili (vedi p. 77), agli effetti residui delle esplosioni nucleari militari del passato e degli incidenti nucleari, alle attività di smantellamento delle centrali nucleari e ad altro ancora.

La dose media di  $1,2\text{ mSv/anno}$  dovuta alla radioattività artificiale per la popolazione italiana, riportata nella tabella 3, risale in realtà ad alcuni anni fa e quindi non tiene conto dell'aumento, certamente non piccolo, dovuto al crescente impiego delle tecniche mediche che si servono di radiazioni. Negli Stati Uniti, per esempio, dove le valutazioni del passato erano poco diverse da quelle riguardanti l'Italia, si valuta attualmente che la dose media dovuta alle cure mediche ammonti a  $3,1$  millisievert/anno. Che aggiungendosi al contributo del fondo naturale, il quale ovviamente è rimasto invariato a circa  $3,1\text{ mSv/anno}$ , porta a  $6,2\text{ mSv}$  la dose media annua complessiva degli statunitensi.

Le dosi di radioattività che una persona può assorbire nelle più varie condizioni (mangiare una banana, sottoporsi a una radiogra-

fia dentaria, vivere a 50 miglia da una centrale nucleare o da una a carbone, trascorrere due settimane nella zona di esclusione attorno alla disastrosa centrale di Fukushima, ecc.) sono rappresentate assai efficacemente nell'infografica (in lingua inglese) che si trova sul sito web: <http://xkcd.com/radiation/>. Un dato particolarmente significativo riguarda la valutazione delle dosi, peraltro entrambe minimali, ricevute da chi abita a 50 miglia (80 km) da una centrale nucleare (0,09 milionesimi di sievert all'anno) e da una alimentata a carbone (0,3 milionesimi di sievert all'anno). Ricordiamo infatti che il carbone contiene tipicamente fra una e tre parti per milione di uranio e torio debolmente radioattivi, che finiscono nelle ceneri e nei fumi che vengono dispersi attorno.

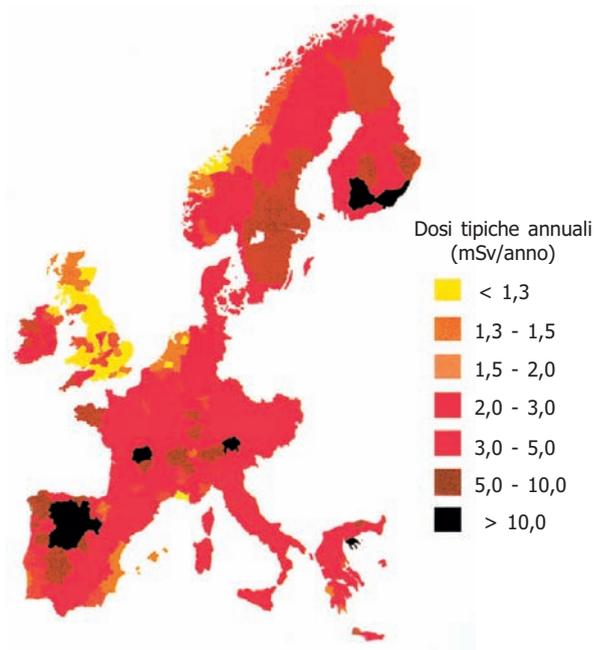
## La radioattività naturale non è la stessa dovunque

La distribuzione dei minerali radioattivi nella crosta terrestre è tutt'altro che uniforme. Vi sono quindi zone dove la radioattività naturale è decisamente maggiore di altre. Restando in Italia, per esempio, a Viterbo e a Napoli la radioattività naturale è cinque volte maggiore che ad Aosta. Nella città di Orvieto la dose media annua è di 5 mSv, ben maggiore della media nazionale di 3,3 mSv.

Le dosi medie annue presentano anche grandi differenze fra i diversi Paesi europei, con un minimo di 1,7 mSv in Gran Bretagna e un massimo di 7,5 mSv in Finlandia. Vi sono poi particolari regioni del mondo, in Iran, India, Brasile, Cina e altri Paesi, dove la radioattività naturale è decisamente maggiore di quella media terrestre, con valori massimi locali di oltre 100 mSv/anno. Senza, però, che si siano riscontrate differenze nell'incidenza di malattie fra le popolazioni di quelle regioni e le altre, mettendo così in dubbio le ipotesi circa la pericolosità delle piccole dosi di radiazioni.

### Il radon

Alle grandi differenze della radioattività naturale concorre soprattutto il radon, che è particolarmente presente nelle regioni dove vi sono sorgenti termali.



Dosi dovute alla radioattività naturale in alcuni Paesi europei.

Un caso estremo è quello delle spiagge nere ricche di torio di Guarapari, località turistica che si trova in Brasile, le quali, a quanto pare, sono frequentate per le sabbiature radioattive. Qui la sabbia è ricca di monazite, un minerale che contiene fino al 10% di torio, sicché la dose locale può arrivare fino a 90 microsievert/ora, corrispondenti a ben 800 mSv/anno. E questa, come si vedrà, è una dose considerata pericolosa, sicché un soggiorno prolungato a Guarapari non è particolarmente consigliabile.

A fronte dei valori delle dosi dovute alla radioattività naturale rappresentati nelle tabelle 3 e 4, è interessante notare come la normativa di legge in vigore in Italia (vedi Appendice IV) e negli altri Paesi del mondo, che è basata sulle indicazioni dei massimi consessi internazionali, preveda un limite di appena 1 mSv/anno per la dose di radioattività artificiale dovuta alle attività industriali a cui è soggetto un cittadino. Si tratta evidentemente di una

**Tabella 4. Radioattività naturale di alcune zone del mondo: dosi medie in mSv/anno**

spiagge di Guarapari, Brasile	800 (massimo)
Kerala, India	16
Ramsar, Iran	12
Orvieto, Italia	5
media italiana	3,3
media mondiale	2,4

Fonte: UNSCEAR.

norma estremamente cautelativa, per la quale se il Vaticano fosse un impianto nucleare occorrerebbe trasferire urgentemente altrove il Papa, dato che in piazza San Pietro la dose annua, dovuta alla radioattività del porfido della sua pavimentazione, ammonta a 7 mSv ed è quindi è sette volte maggiore del limite di legge.

Ricordiamo infine che vi sono anche luoghi dove la concentrazione di minerali radioattivi nelle rocce era in passato tale da dar luogo a reazioni nucleari di **fissione** a catena; le stesse che si sfruttano nelle centrali nucleari per produrre energia. Ciò avvenne attorno a due miliardi di anni fa nei cosiddetti «reattori nucleari naturali»<sup>3</sup> che sono stati individuati nei giacimenti di uranio che si trovano nei pressi del fiume Oklo nel Gabon, in Africa. A quel tempo, infatti, l'uranio-235, essenziale per lo sviluppo delle reazioni di fissione, era presente nell'uranio «naturale» con una concentrazione maggiore di quella odierna<sup>4</sup>, corrispondente a quella dell'uranio «arricchito» usato attualmente per alimentare le centrali nucleari (vedi p. 91). Gli studi svolti

<sup>3</sup> Per saperne di più vedi: [http://www.ingegnerianucleare.net/Tematiche/1FE/1FEmaterialefissileA/1FEmaterialefissileA\\_oklo/1FEmaterialefissileA\\_oklo.htm](http://www.ingegnerianucleare.net/Tematiche/1FE/1FEmaterialefissileA/1FEmaterialefissileA_oklo/1FEmaterialefissileA_oklo.htm)

<sup>4</sup> La vita media dell'uranio-235 è più breve (vedi tabella 1) di quella dell'uranio-238 che costituisce la maggior parte dell'uranio naturale. E quindi in passato la concentrazione dell'uranio-235 nel minerale di Oklo era maggiore di quella di oggi.

## **La scoperta dei reattori naturali di Oklo**

Nel 1972 i tecnici dell'impianto nucleare francese di Pierrelatte trovarono che una partita di uranio proveniente dal Gabon conteneva uranio-235 in percentuali anomale. Percentuali assai più basse di quella (0,7%) che si riscontra invariabilmente nell'uranio proveniente dai giacimenti di qualsiasi parte del mondo (la stessa, addirittura, che si trova nelle rocce lunari). Nel sito di provenienza dell'uranio anomalo, residuo di reazioni nucleari svoltesi in passato, si individuarono poi i reattori naturali sotterranei e le scorie radioattive da essi prodotte.

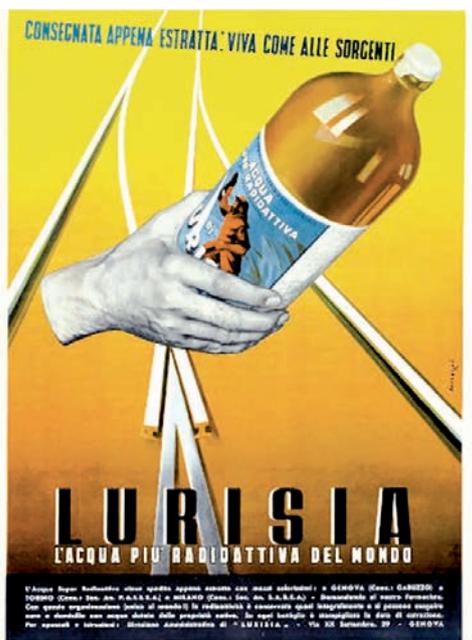
sul sito di Oklo mostrano che questi reattori funzionarono per diverse centinaia di migliaia di anni, sviluppando potenze attorno a 100 kW, fino a quando non ebbero esaurito il «combustibile», cioè quando la concentrazione dell'uranio-235 diminuì al punto da non sostenere più le reazioni nucleari di fissione.

E qui è importante osservare che le scorie radioattive prodotte nel funzionamento di questi reattori – parecchie tonnellate di plutonio e di altre specie atomiche fortemente radioattive, le stesse che si producono nelle centrali nucleari – sono rimaste confinate, per quasi due miliardi di anni, laddove si erano formate, all'interno di formazioni di granito e argilla. Senza contaminare l'ambiente naturale circostante danneggiandone gli ecosistemi, cosa che dimostra pienamente la fattibilità di depositi a lunghissimo termine dove disporre i rifiuti radioattivi.

## **La radioattività delle acque minerali e termali**

Sull'etichetta di molte acque minerali, fino a qualche decennio fa, si trovava l'indicazione «debolmente radioattiva», come titolo di pregio in quanto considerato fattore benefico per la salute. Oggi questa indicazione è sparita: non è più di moda, per le paure destinate dalla radioattività. Ma è del tutto ragionevole immaginare che

molte delle acque minerali in commercio siano effettivamente un po' radioattive. Perché provengono dal sottosuolo che in varia misura contiene sempre minerali radioattivi, alle trasformazioni dei quali è inevitabilmente associata l'emissione del gas radioattivo radon. Vi è comunque un limite di legge, fissato a 100 Bq/litro, per la radioattività delle acque minerali imbottigliate.



Etichetta di un'acqua minerale del passato: la più radioattiva del mondo!

La semplice esposizione al radon non è particolarmente dannosa perché questo gas, quando decade, emette radiazione alfa, che è facilmente schermata dalla pelle. È invece alquanto pericoloso, come si è detto, respirare o assumere radon (sebbene esso duri poco, perché ha un tempo di dimezzamento di 3,8 giorni e la sua permanenza effettiva nel corpo umano è piuttosto breve, di alcune ore) a causa della radioattività degli elementi prodotti dal suo decadimento.

Diverso è il caso delle acque termali radioattive (generalmente considerate tali quando la loro radioattività è di oltre 675 Bq/litro). Perché sono numerose le terme che, come in passato, reclamizzano anche oggi la radioattività delle loro acque a fronte di una serie di benefici per la salute, nella cura di varie affezioni, su cui però la medicina ufficiale è estremamente incerta. In questi stabilimenti vengono proposti bagni curativi in acque contenenti radon, inalazioni di radon o addirittura «bagni secchi al radon», in alcuni casi usufruibili grazie a convenzioni fra le terme e il Servizio Sanitario Nazionale. Anche se non vi è più, come in passato, la gara a chi dispone delle acque più radioattive.

### **Le Terme di Merano**

Riportiamo la descrizione dell'acqua minerale al radon presente sul sito ufficiale delle Terme di Merano.

Dagli anni '60 a Merano si utilizza a scopi terapeutici l'acqua contenente radon di Monte San Vigilio. Anche alle nuove Terme Merano essa viene utilizzata per inalazioni e bagni al radon. L'ultima rilevazione indica che la quantità di radon presente nell'acqua di Monte San Vigilio è di 481 Bq/litro.

Qualità terapeutiche dell'acqua al radon:

- Azione sedativa e analgesica sia sul sistema nervoso centrale sia su quello periferico, particolarmente indicata quindi nell'osteoartrite e molte patologie dell'apparato osteo-artro-muscolare.
- Azione vasodilatatrice periferica e ipotensiva, particolarmente indicata per le donne che soffrono di flebopatia cronica (varici, capillari ectasici, ecc.).
- Azione sulle vie respiratorie perché rafforza soprattutto la difesa aspecifica della mucosa respiratoria (fortifica le capacità di difesa delle vie respiratorie). La terapia viene effettuata mediante inalazioni. Questa cura è convenzionata con il Servizio Sanitario Nazionale.

Fra queste terme menzioniamo quelle di Lacco Ameno a Ischia, Merano (circa 500 Bq/litro), Bad Gastein in Austria (1500 Bq/litro), Bad Schlemma in Germania (oltre 10 000 Bq/litro), e numerose altre... Una località dove vi sono acque termali particolarmente ricche di radon è Ramsar, una cittadina che si trova in Iran sulle rive del mar Caspio.

### **Che succede agli abitanti e ai frequentatori delle zone ricche di acque termali radioattive?**

L'insieme dei dati epidemiologici raccolti finora non ha condotto a stabilire con certezza che vi siano effetti nocivi. Vi sono infatti alcuni studi che affermano la presenza di effetti nocivi, altri che proclamano il contrario sottolineando invece la presenza di effetti benefici.

### **Perché la radioattività suscita una reazione istintiva di paura?**

L'immagine che si ha oggi della radioattività è assolutamente e indiscutibilmente preoccupante: quella di un pericolo spaventoso da evitare in qualsiasi modo. Ma perché?

Una prima ragione è che la radioattività non è percepita dai nostri sensi e quindi sfugge al nostro controllo. Questo però avviene anche per le onde radio, che non vediamo né sentiamo, eppure vi siamo costantemente immersi: ascoltando la radio, guardando la televisione e soprattutto conversando al telefonino. Tutte cose che facciamo abitualmente senza porci alcun problema.

Alla base della paura nei confronti della radioattività c'è sicuramente il ricordo dell'olocausto nucleare delle città di Hiroshima e Nagasaki nel 1945. Con la morte di quasi duecentomila persone: alcune totalmente polverizzate, altre tremendamente ustionate dalla vampa di calore e dalla radioattività svi-

luppata dall'esplosione delle bombe atomiche. Ma c'è anche il ricordo, che risale ai decenni successivi, del timore dello scoppio di una guerra nucleare fra le due superpotenze del tempo, che sarebbe stata tragicamente distruttiva per l'umanità intera. Quando in molti Paesi si costruivano rifugi, accanto o sotto le abitazioni, per proteggersi da un possibile bombardamento nucleare.

### **Paure irrazionali: il caso dell'influenza aviaria di qualche anno fa**

Le paure irrazionali non riguardano soltanto il nucleare. Nel 2005-2006 la psicosi derivante dal timore di una pandemia dovuta al virus H5N1 condusse a un crollo delle vendite di pollame che mise in ginocchio il mercato avicolo nazionale, con una perdita stimata in 800 milioni di euro. Anche se nessun pollo risultò infetto, non vi fu nessuna pandemia e ovviamente nessuna vittima. Ma il ruolo dei media fu essenziale nel terrorizzare i consumatori. Che nei supermercati facevano addirittura in modo da evitare di avvicinarsi ai banchi del pollame.

Queste paure non riguardano soltanto gli effetti diretti della radioattività, ma anche quelli, ben più insidiosi e preoccupanti, che potrebbero manifestarsi nei discendenti di coloro che sono stati esposti alle radiazioni. Ma nella realtà dei fatti questi effetti non sono mai stati osservati. Nonostante i decenni di ricerche mirate a individuarli sui figli dei sopravvissuti ai bombardamenti atomici che avevano ricevuto dosi particolarmente alte (vedi p. 58).

Oggi la percezione della radioattività è strettamente collegata alle paure suscitate dagli incidenti che si sono verificati nelle centrali elettronucleari (vedi p. 114). Più precisamente, a come quegli eventi sono stati percepiti dalla popolazione sulla base delle informazioni fornite dai giornali e dalle televisioni. Infor-

## **Le vittime di incidenti dimenticati**

Dei più gravi incidenti nucleari, Chernobyl e Fukushima, si è molto parlato sui media. Assai meno, invece, di altri incidenti industriali più gravi. Dei quali si è praticamente persa memoria. Chi ricorda, per esempio, l'incidente all'impianto chimico di Bhopal in India (1984)? Che provocò più di 15 000 vittime e danni permanenti a oltre 100 000 persone. E chi ha mai sentito parlare della diga di Banqiao, in Cina? Il suo collasso, nel 1975, provocò il crollo di altre 60 dighe e la morte di oltre 170 000 persone.

mazioni assai spesso inesatte e parziali per la debolezza culturale dei giornalisti o volutamente distorte ed esagerate. A volte tali da risultare addirittura terroristiche, non importa se per scelta deliberata, perché così si cattura l'attenzione dei telespettatori o si vendono meglio i giornali, oppure semplicemente a causa di imprecisioni tali da generare fraintendimenti.

I più anziani ricorderanno sicuramente come al tempo dell'incidente di Chernobyl i media parlassero continuamente dei misteriosi nanocurie (che sappiamo essere un'unità di misura della radioattività di assai modesta entità) facendoli apparire come mostriciattoli in agguato. E ricorderanno anche le paure destate dalle «verdure a foglia larga» che il governo di allora, con qualche eccesso di precauzione, mise al bando per qualche tempo. Con il risultato di mandarne grandi quantità al macero e mettere in crisi

## **Quando si rompe un tubo**

Di un simile incidente in una normale centrale termoelettrica, nessun giornale, giustamente, ne riferisce. Quando invece lo stesso evento si verifica in una centrale nucleare, la notizia viene pubblicata con particolare risalto. Senza però spiegare che l'incidente non ha nulla a che vedere con il nucleare. Con il risultato, così, di confermare le paure di chi legge e di suscitare di nuove.

## Un caso plateale di disinformazione

La trasmissione *Report* del 29 marzo 2009 è stata veramente esemplare per la sua impostazione a tesi contro l'impiego dell'energia nucleare e per l'infondatezza delle informazioni fornite al telespettatore. Perché si è svolta senza alcun contraddittorio, sentendo soltanto una serie di «esperti» di parte. Uno dei quali confonde le nozioni di energia e potenza, mentre un altro sentenzia che il limite di esposizione radiologica è di 1 millisievert, oltre il quale il rischio diventa inaccettabile, quando è noto che la nostra esposizione alla radioattività naturale è mediamente tre volte maggiore, ma si vive tranquillamente anche in regioni dove è ancora più alta! Altri esperti ancora arrivano poi a sostenere che l'80% dell'energia consumata in Italia è puro spreco e, come se non bastasse, che «secondo l'ultimo rapporto sullo stato dell'industria nucleare, all'utente arriva solo il 2% di tutta l'energia prodotta dentro alle centrali atomiche del mondo».

Il testo completo della trasmissione, annotato con controdeduzioni molto puntuali, si trova in rete: <http://www.associazioneitalia.nucleare.it/file/Osservazioni%20Report%2029-03-2009.pdf>.

i coltivatori. Episodi analoghi, del resto, si verificarono anche in altri Paesi: in Svezia, per esempio, molte tonnellate di carne di renna e di alce vennero distrutte senza che fosse necessario, come poi fu riconosciuto ufficialmente anni dopo.

A volte, poi, i titoli dei giornali sono scelti in modo da stravolgere completamente le notizie. Come troviamo sul quotidiano «La Repubblica» del 22 agosto 2012 dove, nel testo sotto al titolo *Zichichi: l'80% delle centrali atomiche non ha norme di sicurezza adeguate*, si legge cosa effettivamente il fisico Antonino Zichichi aveva detto: «L'80% delle centrali nucleari in costruzione sono concentrate nel Terzo mondo dove i livelli di sicurezza non sono sempre ottimali».

## Il caso del monossido di diidrogeno

Nel 1990 all'Università della California, Santa Cruz, fu diffusa la notizia della pericolosità della sostanza chimica denominata DHMO (Dihydrogen monoxide, cioè monossido di diidrogeno). Successivamente si costituì una coalizione popolare per mettere al bando questa sostanza, trovando largo consenso fra il pubblico e dando luogo anche a petizioni rivolte alle autorità. Ma perché? Per i seguenti motivi, e altri ancora, che sono tutti rigorosamente veri.

- Si tratta del principale componente delle piogge acide.
- Contribuisce all'effetto serra, cioè al riscaldamento della Terra.
- Può provocare ustioni molto gravi.
- Può essere fatale se inalato.
- Ogni anno provoca numerose vittime nei mari, nei laghi e nei corsi d'acqua.
- Accelera la corrosione e l'arrugginimento di molti metalli.
- Può provocare incidenti elettrici.
- È usato nelle centrali nucleari.
- È usato nella distribuzione dei pesticidi in agricoltura.

Lasciamo al lettore, avvertendolo che si tratta di una beffa, il compito di individuare la vera natura della sostanza incriminata e di prendere atto della facilità con cui si può creare apprensione nella popolazione, anche senza alcun fondamento.

Il condizionamento costruito negli anni si è tradotto in una vera e propria demonizzazione, per cui parole come radioattività o nucleare sono diventate addirittura innominabili. Avviene così, per esempio, che il procedimento diagnostico chiamato inizialmente *risonanza magnetica nucleare* nel corso degli anni si è trasformato in *risonanza magnetica*. Perdendo per strada il *nucleare*, che avrebbe potuto destare dubbi e preoccupazioni in chi doveva sottoporsi a quella utilissima diagnostica!

C'è infine il timore che lo sviluppo di programmi nucleari civili rivolti alla produzione di energia elettrica possa condurre all'ac-

quisizione della capacità di realizzare armi nucleari da parte di altri Paesi in aggiunta a quelli che già ne dispongono. Questo è il problema della cosiddetta *proliferazione nucleare*. Per contrastarla, vi è un trattato internazionale di non proliferazione (TNP), a cui aderiscono attualmente 189 Paesi, il quale vieta di procurarsi armamenti nucleari agli Stati firmatari che non ne possiedono e vieta agli Stati firmatari che ne possiedono di trasferire tecnologie nucleari militari ad altri Stati. Affidando il controllo del trasferimento delle tecnologie nucleari per scopi pacifici all'AIEA di Vienna (Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica, in inglese International Atomic Energy Agency, IAEA).

Un caso degli ultimi anni riguarda l'Iran, che sta arricchendo dell'uranio (vedi box p. 93) per alimentare reattori per la produzione di elettricità senza sottoporsi ai controlli internazionali, sollevando però il sospetto di operare alla realizzazione di armi nucleari. Per quanto riguarda poi gli arsenali nucleari dei quali disponevano le maggiori potenze mondiali al termine della Guerra fredda, questi sono stati ridotti a seguito degli accordi START, e nel 2010 gli Stati aderenti al TNP hanno firmato un nuovo accordo che prevede un disarmo graduale da attuarsi nei prossimi anni.

A questo proposito ricordiamo l'accordo di programma fra gli Stati Uniti e la Russia (denominato *From Megatons to Megawatts*) che prevede il riciclaggio dell'uranio arricchito proveniente dallo smantellamento delle testate nucleari militari sovietiche per ricavarne uranio adatto al funzionamento delle centrali nucleari commerciali. Questo programma fornisce attualmente circa metà dell'uranio usato nelle centrali statunitensi.

## **Notizie e fraintendimenti a proposito dell'incidente di Fukushima**

Un esempio chiarissimo dei fraintendimenti che generano panico nel pubblico riguarda l'uscita sulla stampa nazionale della notizia che la radioattività a Roma, dopo l'incidente alla centrale di Fukushima, risultava maggiore di quella misurata a Tokyo. In effetti, sul tetto dell'ambasciata italiana nella capitale giapponese, secondo le misure della squadra della Protezione civile italiana

inviata d'urgenza, la dose di radioattività risultava di 0,04 microsievert/ora, pari a una dose annua di 0,35 mSv. Sicché Roma, dove la dose naturale annua è di circa 2,2 mSv, cioè sei volte maggiore, risultava ben più radioattiva di Tokyo. Conseguente preoccupazione a Roma, con intervento del sindaco Alemanno. Il quale chiarisce che il livello di radioattività a Roma non è per nulla pericoloso e rientra nella normalità, mentre quello più basso di Tokyo è semplicemente dovuto alla minore radioattività naturale in quella città. E quindi la vera notizia, che i media avrebbero dovuto evidenziare, non era che a Roma la radioattività fosse maggiore che a Tokyo, ma piuttosto che la radioattività a Tokyo, nonostante l'incidente nucleare, fosse minore che a Roma!

A rinfocolare le paure, in quegli stessi giorni del marzo 2011 in internet si potevano leggere messaggi del tipo «Nube radioattiva in Italia: è caccia alle pillole di ioduro di potassio». Sebbene nessuna nube radioattiva fosse mai arrivata dalle nostre parti, come certificavano le misure svolte dalle stazioni di rilevamento della radioattività dislocate sul territorio nazionale. E non vi fosse stata nessuna ressa nelle farmacie per procurarsi le pillole in questione.



L'assunzione di iodio (non radioattivo) nella forma di ioduro di potassio evita l'assorbimento nella tiroide dello iodio radioattivo (iodio-131) presente nelle emissioni prodotte in occasione di incidenti nucleari come quelli di Chernobyl e Fukushima.

Un altro caso riguarda le «esplosioni» verificatesi alla centrale di Fukushima, delle quali i giornali hanno riferito largamente. Senza precisare, però, che si trattava dello scoppio di miscele di idrogeno e ossigeno, cioè di esplosioni chimiche. Così i lettori sono stati portati a pensare che si trattasse di esplosioni nucleari, cioè le stesse di una bomba atomica. Cosa del resto impossibile, come vedremo più avanti.

Destano poi particolare sconcerto e preoccupazione nel pubblico le notizie di studi apparentemente «scientifici», che prefigurano situazioni di pericolosità per le popolazioni, e che solo al giudizio dell'esperto risultano infondati. Come la notizia *Radioattività: 14000 morti negli Stati Uniti a causa di Fukushima*, che troviamo in internet a proposito di un articolo pubblicato negli Stati Uniti da Janette Sherman e Joseph Mangano. Che tuttavia, come riferisce il blog della rivista «Scientific American», risulta palesemente insensata [3]. Gli autori sopracitati attribuiscono infatti 14000 morti agli effetti della nube radioattiva di Fukushima che avrebbe raggiunto gli Stati Uniti qualche giorno dopo l'incidente. Nube che però nessuno ha visto. E del resto gli stessi Sherman e Mangano scrivono che «il numero di campioni (aria, acqua e latte) per i quali l'EPA [l'ente statunitense per la protezione ambientale] poté rivelare concentrazioni misurabili<sup>5</sup> di radioattività è relativamente piccolo», senza però fornire alcuna indicazione quantitativa atta a stabilire le dosi effettivamente ricevute dalla popolazione. È noto d'altra parte che la radioattività dell'incidente nucleare di Fukushima non ha provocato, almeno sinora, alcuna vittima in Giappone. Come avrebbe potuto, allora, provocarne tante negli Stati Uniti, a distanze di migliaia di chilometri?

<sup>5</sup> Ricordiamo che gli strumenti che misurano le radiazioni sono estremamente sensibili, in grado di rivelare livelli di radioattività anche molto inferiori a quelli dovuti alla radioattività naturale.

# Appendice I

## Principali grandezze e unità di misura riguardanti la radioattività

Grandezza	Unità di misura e simbolo	Definizione
<b>Attività</b>	<b>becquerel (Bq)</b>	rappresenta il numero di atomi che si trasformano durante ogni secondo
	curie (Ci) (unità usata in passato)	1 Ci = $3,7 \times 10^{10}$ Bq    1 Bq = $2,7 \times 10^{-11}$ Ci
	Mache (ME) (unità usata in passato per le acque radioattive)	1 ME = 13,45 Bq/litro
Esempi: – l'attività di un adulto di 70 kg è di circa 8000 Bq, cioè 220 nCi (1 nCi = $10^{-9}$ Ci); – l'attività dell'aria all'interno delle abitazioni in Italia è in media di 70 Bq/m <sup>3</sup> ; – l'attività di una banana è di circa 15 Bq; – l'attività di un litro di acqua di mare è di circa 10 Bq; – l'attività di un litro di latte è di circa 80 Bq; – l'attività media del terreno è di circa 400 Bq/kg.		
<b>Dose assorbita</b>	<b>gray (Gy)</b> 1 gray corrisponde a 1 joule/1 chilogrammo	rappresenta il rapporto fra l'energia assorbita dalle radiazioni e la massa che le ha assorbite
	rad (unità usata in passato)	1 rad = 0,01 gray    1 gray = 100 rad
<b>Dose equivalente</b>	<b>sievert (Sv)</b> 1 sievert corrisponde a 1 joule equivalente/1 chilogrammo	definita come la dose assorbita, ma tenendo conto delle diverse proprietà dei vari tipi di radiazioni
	rem (unità usata in passato)	1 rem = 0,01 sievert    1 sievert = 100 rem
<b>Dose efficace</b>	<b>sievert (Sv)</b>	dose equivalente pesata per gli effetti biologici delle radiazioni sui diversi organi del corpo umano
Esempi: – una radiografia al torace comporta per il paziente una dose di circa 0,1 mSv; – la dose annua media per persona in Italia è di 3,3 mSv; – una tomografia computerizzata del corpo comporta per il paziente una dose di circa 15 mSv; – una dose di 5 Gy su tutto il corpo è mortale a breve con probabilità del 50%; – in radioterapia, per la cura del cancro, si usano dosi di 10-40 Gy, ma applicate solo localmente.		
<b>Dose collettiva</b>	<b>sievert-persona</b> somma delle dosi ricevute dagli appartenenti a una data popolazione a seguito di esposizione alla radioattività	È usata in radioprotezione per disporre di una valutazione complessiva del rischio per la popolazione conseguente all'esposizione alla radioattività. Non ne è previsto l'impiego per valutare le vittime di un incidente.

# Glossario

## Atomo

Gli atomi sono i mattoncini elementari che costituiscono la materia usuale. Essi sono costituiti da un nucleo attorno al quale orbitano degli elettroni (particelle dotate di una carica elettrica elementare negativa). Il nucleo è costituito a sua volta da protoni (particelle dotate di una carica elettrica elementare positiva) e da neutroni (particelle neutre). Gli atomi sono elettricamente neutri perché possiedono un ugual numero di elettroni e di protoni. Ogni atomo è caratterizzato da due dati essenziali: il numero atomico, cioè quanti protoni ha il suo nucleo, e il numero di massa, cioè la somma del numero dei suoi protoni e dei suoi neutroni. Dal numero atomico dipende il comportamento chimico degli atomi, e infatti ogni diverso elemento chimico ha un numero atomico ben determinato, compreso fra 1 (idrogeno) e 92 (uranio) per gli elementi che si trovano in natura, cosa che

ne determina la posizione nella tavola periodica. Gli elementi si rappresentano con il loro simbolo, per esempio H per l'idrogeno, O per l'ossigeno e U per l'uranio. Esistono atomi di uno stesso elemento chimico con numeri di massa diversi, perché nei loro nuclei si trovano numeri diversi di neutroni, costituendo quindi specie atomiche differenti. Questi atomi si chiamano isotopi.

## Attività

L'attività (nel linguaggio comune più spesso chiamata radioattività) di una data quantità di materia è rappresentata dal numero dei suoi atomi che si trasformano ogni secondo. Questo numero si misura in unità di becquerel, con simbolo Bq.

## Becquerel

Il becquerel, con simbolo Bq, è l'unità di misura dell'attività. Un becquerel corrisponde a una trasformazione al secondo.

### Chilowattora

Il chilowattora, con simbolo kWh, è un'unità di misura dell'energia, che corrisponde all'energia fornita durante un'ora da una sorgente con potenza di un chilowatt, cioè di mille watt. E quindi si ha: 1 chilowattora =  $3,6 \times 10^6$  joule.

### Decadimento

Si chiama decadimento la trasformazione spontanea di un atomo radioattivo in uno di un'altra specie, che è accompagnata dall'emissione di radiazioni. Si tratta di un fenomeno che avviene spontaneamente e che per un singolo atomo è assolutamente imprevedibile, mentre per un insieme di atomi è prevedibile statisticamente con una legge matematica esponenziale (vedi Appendice III). Ciascuna specie atomica radioattiva è caratterizzata da un tempo di dimezzamento, trascorso il quale decade, cioè si trasforma, approssimativamente la metà degli atomi presenti inizialmente. Sicché dopo due tempi di dimezzamento il numero di atomi si riduce a un quarto, dopo tre a un ottavo e così via.

### Deuterio

Il deuterio è un isotopo dell'idrogeno. Il suo nucleo possiede un protone e un neutrone, e quindi il deuterio ha numero di massa 2.

### Difetto di massa

Il difetto di massa di un nucleo atomico rappresenta la differenza fra la somma delle masse delle particelle

che lo costituiscono e la massa del nucleo. Questa differenza corrisponde all'energia di legame che tiene assieme il nucleo e che gli andrebbe fornita per separarlo nelle sue parti costituenti.

### Dose assorbita

La dose di radiazione, o dose assorbita, rappresenta il rapporto fra l'energia assorbita da un certo materiale e la massa di quel materiale. L'unità di misura della dose si chiama gray, con simbolo Gy. Esprimendo l'energia assorbita in joule e la massa in chilogrammi, si ha: 1 gray = 1 joule/1 chilogrammo.

### Dose efficace

La dose efficace è definita come la dose equivalente, ma tenendo conto delle differenze degli effetti delle radiazioni sui diversi organi del corpo umano. L'unità di misura della dose efficace si chiama sievert, con simbolo Sv.

### Dose equivalente

La dose equivalente è definita come la dose assorbita, ma assegnando pesi differenti ai diversi tipi di radiazione per tener conto della diversa entità degli effetti che essi producono nella materia. L'unità di misura della dose equivalente si chiama sievert, con simbolo Sv.

### Elementi transuranici

Si chiamano transuranici gli elementi che nella tavola periodica sono collocati oltre l'uranio perché il

loro numero atomico è maggiore di 92, quello dell'uranio. Sono elementi artificiali, non esistenti in natura, prodotti da reazioni nucleari.

### Elettronvolt

L'elettronvolt, con simbolo eV, è l'unità di misura dell'energia usata per i fenomeni che avvengono su scala atomica. Un elettronvolt equivale a una frazione estremamente piccola di joule:  $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$ .

### ENEA

ENEA è la sigla dell'ente pubblico attualmente denominato Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile. Prima del 1982 questo ente si chiamava Comitato nazionale per l'energia nucleare (CNEN).

### Energia cinetica

Detta anche energia di movimento, questa è l'energia che possiede un corpo in moto in ragione della sua velocità. Per un corpo di massa  $m$  con velocità  $v$ , l'energia cinetica  $E$  è data dalla metà del prodotto della massa per il quadrato della velocità:  $E = 1/2 mv^2$ . Esprimendo la massa in chilogrammi e la velocità in metri al secondo si ottiene l'energia in unità di joule.

### Energia di legame

L'energia di legame di un nucleo atomico è l'energia che occorre fornirgli per separarlo nelle particelle che lo costituiscono, la stessa che viene liberata quando queste parti-

celle si uniscono a formarlo. Si considera spesso l'energia di legame per nucleone, cioè il rapporto fra l'energia di legame di un nucleo atomico e il numero di protoni e di neutroni che lo costituiscono.

### EPA

EPA è la sigla dell'Environmental Protection Agency, l'agenzia governativa statunitense che si occupa della protezione dell'ambiente.

### Fissione

Le reazioni di fissione nucleare consistono nella rottura di un nucleo atomico, con la conseguente formazione di due nuclei più leggeri.

### Forza nucleare forte

La forza nucleare forte è una forza molto intensa, ma con raggio d'azione molto breve, che agisce sulle particelle subatomiche chiamate adroni (dal greco *adros* che vuol dire forte). Essa tiene assieme i protoni e i neutroni che si trovano nei nuclei atomici, vincendo la forza elettrostatica repulsiva che agisce fra i protoni.

### Fotone

Il fotone è la particella elementare che costituisce il quanto della radiazione elettromagnetica. Privi di massa ma dotati di energia, i fotoni viaggiano alla velocità della luce. L'energia di un fotone è via via crescente, di ordini di grandezza, a seconda che si tratti di onde radio, raggi infrarossi, luce visibile, raggi ultravioletti, raggi X e raggi gamma.

## Fusione

Le reazioni di fusione nucleare consistono nell'aggregazione di due nuclei atomici, con la conseguente formazione di un nucleo più pesante.

## Gigaelettronvolt (GeV)

Il gigaelettronvolt rappresenta un miliardo di elettronvolt. Il prefisso G equivale infatti a  $10^9$ , cioè a un miliardo.

## Gigawatt (GW)

Quest'unità, usata per esprimere grandi potenze, rappresenta 1 miliardo di watt. Il prefisso G equivale infatti a  $10^9$ , cioè a un miliardo. Il simbolo GWe è usato per indicare la potenza elettrica di un reattore, diversa dalla potenza termica (inferiore).

## Gray

Il gray, con simbolo Gy, è l'unità di misura della dose assorbita, cioè della quantità di energia assorbita da un corpo per unità di massa: 1 gray = 1 joule/1 chilogrammo.

## ICRP

ICRP è la sigla della Commissione internazionale sulla protezione radiologica (International Commission on Radiological Protection), un'organizzazione internazionale indipendente.

## Ione

Si chiama ione un atomo che ha perso, oppure acquistato, uno o più elettroni. E quindi è dotato di carica elettrica, a differenza di un atomo.

## Isotopo

Vi sono atomi di uno stesso elemento chimico con masse atomiche diverse, perché nei loro nuclei si trovano numeri diversi di neutroni, costituendo così specie atomiche differenti. Questi atomi si chiamano isotopi (dal greco «stesso posto») perché nella tavola periodica degli elementi si trovano in una stessa casella, avendo lo stesso numero di protoni e quindi le stesse proprietà chimiche. Essi hanno però proprietà fisiche leggermente differenti. L'idrogeno, per esempio, ha tre isotopi: l'idrogeno normale con numero di massa 1 (che si indica con il simbolo H-1), il nucleo del quale possiede un protone e nessun neutrone, il deuterio che possiede un protone e un neutrone e quindi ha numero di massa 2 (H-2), e il trizio che possiede un protone e due neutroni e ha numero di massa 3 (H-3).

Il numero complessivo delle diverse specie atomiche, indicate a volte con il termine nuclidi, che si conoscono è di oltre tremila mettendo assieme gli isotopi di tutti gli elementi.

## ISPRA

ISPRA è la sigla dell'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale, ente pubblico vigilato dal Ministero dell'Ambiente. In precedenza denominato ANPA e ancor prima APAT.

## Joule

Il joule, con simbolo J, è l'unità di misura standard dell'energia.

### **Megaelettronvolt (MeV)**

Il megaelettronvolt rappresenta un milione di elettronvolt. Il prefisso M equivale infatti a un milione. Si tratta di un'energia molto grande a livello atomico, ma estremamente piccola a livello macroscopico: per riscaldare un grammo d'acqua di un grado occorrono infatti 26 000 miliardi di MeV.

### **Megawatt (MW)**

Questa unità, usata per esprimere grandi potenze, rappresenta 1 milione di watt. Il prefisso M equivale infatti a un milione.

### **Micron**

Il micron è la denominazione usuale del micrometro, pari a un milionesimo di metro.

### **Molecola**

Le molecole, costituite da atomi tenuti assieme da un legame chimico, sono le parti più piccole di una sostanza che, in linea di principio, ne conservano le proprietà fisiche e chimiche.

### **Neutrino**

I neutrini sono particelle prive di carica elettrica dotate di massa piccolissima, un miliardo di volte inferiore a quella di un neutrone o di un protone, che interagiscono solo assai debolmente con la materia. E per questo sono difficilissimi da rivelare. Il flusso dei neutrini che arrivano sulla Terra, prodotti dalle

reazioni nucleari che si svolgono nel Sole, è di sessanta miliardi al secondo per centimetro quadrato, ma nessuno se ne accorge.

### **Nucleone**

Sono chiamate nucleoni le particelle pesanti, protoni e neutroni, che costituiscono il nucleo degli atomi. Dato che la massa dei protoni e dei neutroni è approssimativamente la stessa, la massa di un nucleo è ben rappresentata dal numero di massa, cioè dalla somma del numero di nucleoni che lo costituiscono.

### **Nuclide**

Per nuclide s'intende una specie nucleare, caratterizzata da un dato numero atomico e da un dato numero di massa.

### **Numero atomico**

Il numero atomico di un atomo rappresenta il numero di protoni contenuti nel suo nucleo, e quindi anche il numero dei suoi elettroni, dal momento che l'atomo è elettricamente neutro. Il numero atomico caratterizza gli elementi chimici, nel senso che tutte le specie atomiche, o isotopi, di un dato elemento chimico hanno lo stesso numero atomico.

### **Numero di massa**

Il numero di massa di un atomo (chiamato a volte peso atomico) rappresenta la somma del numero dei protoni e dei neutroni che sono contenuti nel suo nucleo. Di un dato elemento esistono generalmente varie specie atomiche diverse (isoto-

pi), i cui atomi hanno tutti lo stesso numero atomico, e quindi le stesse proprietà chimiche, ma numeri di massa diversi.

### OMS

OMS è la sigla della Organizzazione Mondiale della Sanità (World Health Organization, WHO), che è un'agenzia delle Nazioni Unite.

### Ormesi

Il fenomeno dell'ormesi riguarda una relazione fra causa ed effetto in cui si hanno effetti opposti a seconda dell'entità dello stimolo. Per esempio, si ha ormesi quando uno stimolo debole provoca effetti vantaggiosi per un organismo, mentre stimoli più intensi risultano invece svantaggiosi.

### Positroni

Si chiamano positroni o antielettroni le particelle identiche agli elettroni, ma dotate di carica elettrica positiva anziché negativa.

### Potenza

La potenza si misura in watt (W), cioè in joule al secondo. Quindi la potenza rappresenta un rapporto fra energia e tempo: fra energia ceduta (per esempio da una

pila) o assorbita (per esempio da una lampadina) e tempo durante il quale avviene il trasferimento dell'energia. Un watt, all'incirca, è la potenza che fa funzionare una torcia elettrica. Un chilowatt (cioè mille watt) è la potenza assorbita tipicamente da una stufa elettrica. Cinque megawatt (cinque milioni di watt) è la potenza necessaria a far marciare un treno. Un gigawatt (un miliardo di watt) è la potenza elettrica fornita tipicamente da un moderno reattore nucleare.

### Prefissi delle unità di misura

Per rappresentare in modo immediato e compatto valori numerici molto piccoli o molto grandi, si usano i cosiddetti prefissi o i loro simboli abbreviati. Per esempio, come mostrato nella tabella, un milione si indica con mega (M), un milionesimo con micro ( $\mu$ ).

Prefissi delle unità di misura				
	valore numerico	prefisso	simbolo	esempio
un miliardesimo	$10^{-9}$	nano	n	nanowatt
un milionesimo	$10^{-6}$	micro	$\mu$	microwatt
un millesimo	$10^{-3}$	milli	m	milliwatt
mille	$10^3$	chilo	k	chilowatt
un milione	$10^6$	mega	M	megawatt
un miliardo	$10^9$	giga	G	gigawatt
mille miliardi	$10^{12}$	tera	T	terawatt
un milione di miliardi	$10^{15}$	peta	P	petawatt

## Radioattività

Il termine radioattività è usato spesso per indicare genericamente l'emissione o la presenza di radiazioni nucleari (prodotte da decadimenti o da reazioni nucleari). Più precisamente, la radioattività è il fenomeno fisico di trasformazione, o decadimento, del nucleo di alcuni tipi di atomi (chiamati appunto radioattivi). Questi atomi, essendo instabili, si trasformano spontaneamente emettendo energia sotto forma di radiazioni alfa, beta o gamma. Il termine radioattività è usato comunemente anche come sinonimo di attività.

## Radiazione alfa

La radiazione alfa è costituita da nuclei di elio, formati da due protoni e da due neutroni legati assieme.

## Radiazione beta

La radiazione beta è costituita da elettroni o da positroni emessi dal nucleo di un atomo instabile nel corso del suo decadimento. Si tratta di elettroni quando l'atomo instabile, il cui nucleo ha un eccesso di neutroni, decade emettendo un elettrone, che proviene dalla trasformazione di un neutrone in un protone. Si tratta di positroni, quando l'atomo instabile, il cui nucleo ha invece un eccesso di protoni, decade emettendo un positrone, che proviene dalla trasformazione di un protone in un neutrone. In questi processi, chiamati decadimenti beta, si ha anche l'emissione di un neutrino.

## Radiazione gamma

La radiazione gamma è costituita da fotoni dotati di energia molto maggiore di quella dei fotoni della luce o dei raggi X. La radiazione gamma viene emessa dal nucleo di un atomo instabile quando esso decade.

## Radiazioni

Per radiazione s'intende in generale il trasferimento nello spazio di energia trasportata da onde, come nel caso della luce o delle onde radio, oppure da particelle subatomiche. Nel caso della radioattività si può distinguere la radiazione corpuscolare (alfa e beta) da quella elettromagnetica (gamma), sebbene i fotoni siano delle particelle e a loro volta le particelle si comportino anche come onde. Non hanno origine dalla radioattività le radiazioni elettromagnetiche come le onde radio e la luce, i cui fotoni hanno bassa energia, insufficiente a produrre il fenomeno della ionizzazione.

## Radionuclide

Per radionuclide s'intende una specie nucleare, caratterizzata da un dato numero atomico e da un dato numero di massa, che è instabile, cioè decade emettendo radiazioni e trasformandosi in un diverso nuclide.

## Radioterapia

Per radioterapia s'intende una cura medica basata sull'impiego di radiazioni ionizzanti. La radioterapia è utilizzata soprattutto nel trattamento del cancro, affidando alle radia-

zioni il compito di uccidere le cellule tumorali.

### **Raggi cosmici**

I raggi cosmici sono una radiazione naturale che investe la Terra dallo spazio. Si distingue una radiazione primaria, proveniente dallo spazio esterno (dal Sole, dalla nostra galassia e da galassie più lontane), e una secondaria, provocata dagli urti della radiazione primaria con gli atomi dei gas atmosferici. Il flusso dei raggi cosmici sulla superficie terrestre, che ammonta a circa una particella per centimetro quadrato al secondo, è costituito essenzialmente da questa radiazione secondaria.

### **Raggi X**

I raggi X sono costituiti da fotoni dotati di energia molto maggiore di quella dei fotoni della luce, ma minore dei fotoni della radiazione gamma. I raggi X, che hanno un forte potere ionizzante, sono tipicamente prodotti dall'urto di elettroni fortemente accelerati contro un bersaglio metallico.

### **Sievert**

Il sievert, con simbolo Sv, è l'unità di misura della dose. Quest'unità è usata per esprimere sia la dose equivalente, che rappresenta l'effetto dei diversi tipi di radiazioni sulla

materia (vivente o no), sia la dose efficace, nella quale si tiene conto della diversa sensibilità alle radiazioni degli organi e dei tessuti dell'organismo.

### **Tempo di dimezzamento**

Il tempo di dimezzamento di una specie atomica radioattiva rappresenta il tempo necessario perché si trasformi la metà degli atomi inizialmente presenti, e quindi la popolazione si dimezzi. Il valore di questa grandezza, che è caratteristica di ogni diversa specie atomica, varia grandemente fra minuscole frazioni di secondo e tempi geologici di molti miliardi di anni.

### **Trizio**

Il trizio è un isotopo dell'idrogeno. Il suo nucleo possiede un protone e due neutroni e quindi il trizio ha numero di massa 3.

### **UNSCEAR**

UNSCEAR è la sigla del Comitato scientifico delle Nazioni Unite per lo studio degli effetti delle radiazioni atomiche (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), che è un'istituzione dell'ONU.

### **Watt**

Il watt, con simbolo W, è l'unità di misura della potenza.

## Riferimenti bibliografici

[1] M. DURANTE, *Il problema della radiazione cosmica nei viaggi interplanetari*, «Nuovo Saggiatore», maggio 2004, n. 3-4, vol. 20, pp. 54-66.

[2] R. RAMANNA, *Background radiation and radioactivity in India*, «The Hindu», 5 maggio 2011. In rete: <http://www.thehindu.com/sci-tech/agriculture/article1991190>. ece.

[3] M. MOYER, *Researchers Trumpet Another Flawed Fukushima Death Study*, «Scientific American», 20 dicembre 2011. In rete: <http://blogs.scientific-american.com/observations/2011/12/20/researchers-trumpet-another-flawed-fukushima-death-study/>.

[4] Y. CHEN, A. EBENSTEIN, M. GREENSTONE, H. LIE, *Evidence on the impact of sustained exposure to air pollution on life expectancy from China's Huai River policy*, «PNAS», 8 luglio 2013. In rete: <http://www.pnas.org/content/early/2013/07/03/1300018110>. abstract.

[5] *Dramma carbone, riduce di 5 anni e mezzo l'aspettativa di vita dei cinesi*, greenreport.it, 10 luglio 2013. In rete: <http://www.greenreport.it/news/energia/dramma-carbone-riduce-di-5-anni-e-mezzo-laspettativa-di-vita-dei-cinesi/>.

[6] P. GRECO, *L'inquinamento causa tumori: uno studio lo dimostra*, Com. Unità, 11 luglio 2013. In rete: <http://scienzaesocieta.com.unita.it/scienza/2013/07/11/l-inquinamento-causa-tumori-uno-studio-lo-dimostra>.

[7] N. NAKAMURA, *Genetic effects of radiation in atomic-bomb survivors and their children: Past, present and future*, «Journal of Radiation Research», 2006, vol. 47, pp. B67-73. In rete: [http://jr.oxfordjournals.org/content/47/Suppl\\_B/B67.full.pdf](http://jr.oxfordjournals.org/content/47/Suppl_B/B67.full.pdf).

[8] F. MAURO, *Ma che cos'è questa epidemiologia?*, L'Astrolabio, 15 gennaio 2013. In rete: <http://astrolabio.amicidellaterra.it/node/348>.

[9] COMMITTEE TO ASSESS HEALTH RISKS FROM EXPOSURE TO LOW LEVELS OF IONIZING RADIATION, *Health Risks from Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation: BEIR VII Phase 2*, National Academies Press, Washington D.C. 2006. In rete: <http://www.nap.edu/openbook.php?isbn=030909156X>.

[10] D.L. PRESTON et al., *Solid Cancer Incidence in Atomic Bomb Survivors: 1958-1998*, «Radiation Research», luglio 2007, vol. 168, n. 1, pp. 1-64. In rete: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17722996>.

# Indice

## **Prefazione**

di Paolo Saraceno 5

## **Premessa**

9

### **1. Radioattività e radiazioni: anche noi siamo radioattivi?**

11

La radioattività? C'è, ma non si vede 11

La radioattività, l'aspirina e Paracelso 12

La radioattività, lo sviluppo della vita  
e l'evoluzione biologica 14

Ma insomma che cos'è la radioattività? 15

Le trasformazioni degli atomi radioattivi 18

Ma quand'è che un atomo radioattivo  
si trasforma? 19

Come si stabilisce «quanto sono radioattive»  
le diverse sostanze? 22

Quanto sono radioattive le rocce terrestri? 24

Come mai nelle rocce terrestri vi sono ancora atomi radioattivi? 26

Il potassio è davvero radioattivo? 28

Ma allora noi stessi siamo radioattivi? 29

<b>2. Le dosi di radioattività, la radioattività naturale e le paure</b>	31
Cosa s'intende per «dose» quando si parla di radioattività?	31
A quali dosi siamo sottoposti normalmente?	
La radioattività naturale...	34
... e la radioattività artificiale	40
La radioattività naturale non è la stessa dovunque	41
La radioattività delle acque minerali e termali	44
Perché la radioattività suscita una reazione istintiva di paura?	47
Notizie e fraintendimenti a proposito dell'incidente di Fukushima	52
<b>3. Gli effetti della radioattività sui viventi</b>	55
L'incidenza dei tumori è aumentata da quando si impiega l'energia nucleare?	55
I fattori chiave di rischio per il cancro	56
Ma insomma quali sono gli effetti della radioattività sull'uomo?	58
E ci sono anche gli effetti psicologici	61
Che succede quando le radiazioni colpiscono la materia vivente?	62
Il rischio del cancro ad alte dosi e a basse dosi	64
E se le basse dosi di radiazione fossero vantaggiose?	68
<b>4. Gli impieghi della radioattività in medicina</b>	71
Gli impieghi delle radiazioni in medicina	71
Gli altri impieghi utili della radioattività: tanto numerosi quanto poco noti	77
La radioattività nelle tecniche di datazione	84
<b>5. Le centrali nucleari</b>	87
Le reazioni nucleari di fusione e di fissione per la produzione di energia	87

I reattori nucleari: come funzionano	91
La struttura dei reattori e i sistemi di sicurezza	94
Vecchie e nuove generazioni di reattori nucleari	97
Navi e sottomarini a propulsione nucleare	102
<b>6. Le scorie nucleari: un problema senza soluzioni?</b>	105
I prodotti delle reazioni di fissione: le scorie radioattive	105
Lo smaltimento finale dei rifiuti radioattivi: un problema irrisolto?	107
Le centrali dismesse: una minaccia destinata a incombere per sempre?	111
<b>7. Gli incidenti nucleari e il nucleare dopo Fukushima</b>	113
Il nucleare nel mondo non è fermo ormai da parecchi decenni?	113
La storia del nucleare è costellata di incidenti gravissimi	114
La catastrofe di Chernobyl: il più grave incidente nella storia del nucleare	118
Chernobyl: la censura, l'evacuazione e i danni	121
Per l'incidente di Chernobyl si parla di milioni di vittime...	124
... e di danni irreparabili all'ambiente naturale	128
Poi c'è stato anche il disastro di Fukushima	132
Fukushima: la radioattività e l'esposizione della popolazione	136
Che cosa si è imparato dai grandi incidenti nucleari?	140
Il disastro di Fukushima non ha segnato l'abbandono definitivo del nucleare?	142
Non sono bastati due referendum per chiudere la porta al nucleare in Italia?	145
Ma perché non si pensa seriamente a impiegare l'energia solare e l'eolico?	147
E se anche l'uranio andasse in esaurimento?	148

<b>APPENDICI</b>	151
<b>Appendice I</b>	
<b>Principali grandezze e unità di misura riguardanti la radioattività</b>	153
<b>Appendice II</b>	
<b>La scoperta della radioattività e i primi passi della fisica nucleare</b>	155
<b>Appendice III</b>	
<b>La legge esponenziale del decadimento radioattivo</b>	159
<b>Appendice IV</b>	
<b>La radioprotezione e la normativa</b>	161
<b>Appendice V</b>	
<b>L'uranio impoverito</b>	165
<b>Appendice VI</b>	
<b>Le bombe nucleari</b>	167
<b>Glossario</b>	169
<b>Ringraziamenti</b>	177
<b>Riferimenti bibliografici</b>	179

*Volume di pagine 192  
con 39 illustrazioni a colori  
carta naturale di alta qualità, senza legno,  
riciclabile, Bianco offset, 80 gr.*

*Finito di stampare  
nell'aprile 2014  
dalla Dedalo litostampa srl, Bari*