

Prima edizione: maggio 2011

© Banda Larga srl
Via Atanasio Kircher, 7
00197 Roma
www.coopereditore.it – www.bandalargaeditore.it

Progetto grafico di Sara Fanelli
www.sarafanelli.com

Impaginazione di Fabio Rizzo

ISBN 978-88-7394-175-0

Non è stato possibile rintracciare gli aventi diritto delle figure 3 e 6. L'editore si dichiara disponibile a corrispondere i diritti a chi ne sia realmente in possesso.

Le altre figure presenti nel volume sono state elaborate dal nostro studio grafico.

COOPER è un marchio di **banda larga**

Marco Casolino

Come sopravvivere alla radioattività

COOPER

Per ulteriori aggiornamenti: <http://marco-casolino.blogspot.com/>

Indice

Come sopravvivere alla radioattività

Introduzione	7
Ringraziamenti	11
Cosa <i>non</i> è successo a Fukushima e in Giappone	15
I. Radiazione: se la conosci la temi un po' di meno	19
Figura 1	25
Figura 2	26
II. <i>Radithor</i> : un salutare bicchiere di acqua radioattiva	27
Figura 3	36
III. Effetti biologici della radiazione	37
Figura 4	46
Figura 5	47
Figura 6	48

IV.	Come difendersi dalla radiazione	49
	Figura 7	64
V.	L'energia nucleare: bombe e centrali	65
	Figura 8	74
VI.	Figuriamoci se... cosa è successo a Fukushima	75
VII.	Il nucleare in Giappone	93
VIII.	Altri usi della radiazione	101
IX.	Come <i>non</i> sopravvivere alla radioattività	106
	Figura 9	110
	Figura 10	111
X.	Come sopravvivere alla radioattività	112
	Conclusioni	119
	Riferimenti bibliografici	121
	Note	124

Introduzione

In questo libro cercherò di affrontare i rischi reali e i falsi miti che circondano la radiazione e la radioattività, un tema tornato drammaticamente d'attualità a causa dell'incidente alla centrale di Fukushima, in Giappone.

Parte dei contenuti provengono dal materiale – adattato per un pubblico non specialistico – che ho utilizzato in cicli di lezioni tenuti per vari anni nell'ambito dei corsi di laurea e dottorato in fisica dell'Università di Roma Tor Vergata.

Altri spunti nascono dalla mia esperienza nel campo della fisica dei raggi cosmici e la ricerca di antimateria nello spazio in esperimenti dell'INFN (Istituto nazionale di fisica nucleare) e dell'ASI (Agenzia spaziale italiana), nonché dagli studi ventennali sull'ambiente radioattivo cui sono soggetti astronauti e cosmonauti nello spazio, dapprima a bordo della vecchia e gloriosa Stazione spaziale russa Mir e successivamente sulla Stazione spaziale internazionale.

La concezione di questo volumetto è nata in viaggio verso il Giappone, pochi giorni dopo l'incidente di Fukushima: a seguito delle informazio-

ni amplificate e distorte fino al ridicolo, l'aereo viaggiava mezzo vuoto, con un solo passeggero occidentale oltre all'equipaggio e me.

La quantità di radiazione misurata dagli organismi internazionali, l'ambasciata italiana a Tokyo e i colleghi del RIKEN – l'istituto dove mi recavo per lavoro – era ben entro i limiti di sicurezza anche nei primi giorni dopo l'incidente. Dovendomi però fermare a lungo nel paese del Sol Levante mi ero premunito e portavo con me per sicurezza un paio di contatori Geiger.

Come c'era da aspettarsi, la radiazione in volo era quasi venti volte quella rivelabile a Roma. Giunto a Tokyo, dopo un atterraggio a Osaka perché i nostri aerei non atterravano nell'aeroporto della capitale, fu possibile verificare di persona che la radiazione a Tokyo fosse appena un terzo di quella di Roma.

Su suggerimento dell'editore di Cooper, con cui avevamo in cantiere un altro progetto sul Giappone, si è pensato di realizzare un libro che potesse chiarire i principi fondamentali della radiazione e al tempo stesso discuterne i rischi reali.

Putroppo i resoconti delle vicissitudini della centrale di Fukushima sono stati troppo spesso esagerati, riportati erroneamente e con titoli e contenuti che nulla avevano a che fare con gli eventi che stavano avendo luogo in Giappone. Anche gli inviti del governo giapponese agli organi di stampa esteri a riportare con obiettività la situazione sono caduti nel vuoto. In Italia come altrove le poche voci assennate sono state sommerse da urla e strepiti che hanno oscurato i reali problemi ingegneristici o fisici cui sono chiamati i tecnici per stabilizzare la situazione a Fukushima.

La radiazione e la radioattività sono temi che

spaventano tutti noi, e tuttavia questa paura, invece di invitare a una seria attività di divulgazione e di comprensione di questo fenomeno, instaura troppo spesso un terrore e una superstizione che sfociano più nella ricerca degli untori di manzoniana memoria piuttosto che nella discussione delle reali cause e sorgenti di radioattività.

Quasi tutta la radiazione cui siamo soggetti noi italiani viene dal radon sotterraneo che penetra nelle case e dal polonio presente nelle sigarette. In Italia come altrove, una frazione elevata di morti per tumore ai polmoni è dovuta al decadimento di queste particelle radioattive che possiamo respirare con il fumo attivo o passivo o se ci troviamo in ambienti chiusi e non ventilati. Se il clamore suscitato dall'arrivo della cosiddetta "nube radioattiva" di Fukushima, contenente, peraltro, una frazione trascurabile del radon e polonio già citati, fosse stato dedicato ad affrontare questi problemi, avremmo potuto ridurre in pochi anni l'incidenza di queste malattie.

A livello europeo la tragedia di Chernobyl e i devastanti effetti che 25 anni di ricaduta radioattiva hanno avuto nell'ex Unione Sovietica, in Europa e in Italia sono stati a lungo taciuti, minimizzati e nascosti. Solo di recente sta emergendo un quadro clinico molto serio non solo in Ucraina e Bielorussia ma anche nel resto delle nazioni colpite dalla ricaduta del materiale radioattivo della centrale.

Queste pagine cercano di illustrare i meccanismi e i processi fisici che sono alla base della radioattività senza supporre in chi legge particolari conoscenze tecnico-scientifiche. Le descrizioni maggiormente dettagliate, che potrebbero non

interessare tutti, ma che possono aiutare a capire più analiticamente i vari argomenti trattati sono riportate in box a parte.

Dopo un capitolo che descrive quanto accaduto a Fukushima, viene presentato un breve decalogo su “come sopravvivere alla radiazione”, ossia come ridurre gli effetti sia nella vita di tutti i giorni che in tempo di crisi.

Chi cerca una posizione nel dibattito scottante quanto sterile a favore o contro il nucleare in Italia e nel mondo non troverà qui una risposta, perché ho preferito trattare l'argomento attenendomi ai dati e alla situazione attuale, senza estrapolare da essi implicazioni di carattere economico o di politica dell'energia.

I proventi a me destinati dalla pubblicazione di questo volume saranno devoluti alla Croce Rossa giapponese per i soccorsi nella regione del Tohoku colpita dal terremoto e dallo *tsunami*.

Cosa *non* è successo a Fukushima e in Giappone

Prima di addentrarmi nei territori più scientifici legati alla radiazione, vorrei innanzitutto sgombrare il campo da possibili equivoci intorno alla situazione attuale di Fukushima e permettere un'adeguata comprensione degli argomenti trattati.

- 1) Non c'è stata un'esplosione nucleare. I reattori delle centrali nucleari non sono in grado di esplodere come le bombe atomiche, dato che la densità di materiale è troppo bassa. Nei quattro edifici della centrale è esploso l'idrogeno formatosi a causa delle alte temperature.
- 2) Non c'è stata fusione nucleare. Le centrali nucleari sono a fissione, ossia rompono i nuclei di atomi grandi in nuclei più piccoli; soltanto il nostro sole e le altre stelle producono energia con la fusione nucleare, ossia aggregando nuclei di atomi leggeri per produrne di più pesanti. Se potessimo ottenere la fusione nucleare in una centrale avremmo risolto (quasi) tutti i problemi energetici del pianeta in quanto avremmo a disposizione grandi quantità di energia pulita.

- 3) Fukushima non è come Chernobyl e meno che mai come Hiroshima e Nagasaki. Nella centrale ucraina ci fu un'esplosione che spaccò il guscio del reattore e distrusse l'edificio, spargendo radioattività per mezza Europa. A Fukushima i reattori sono relativamente intatti e la quantità materiale radioattivo disperso è minore di quello della centrale ucraina. Paragonare la detonazione delle bombe nucleari sulle città giapponesi all'esplosione di Fukushima è come paragonare il piombo di un proiettile sparato da una pistola con quello sparso nell'aria delle città inquinate.
- 4) Chi è stato esposto a radiazioni anche intense non diventa radioattivo e tanto meno "contagioso". Una volta effettuata la procedura di decontaminazione, che consiste in una doccia molto accurata e nella distruzione dei vestiti, le persone esposte a Fukushima emanano la stessa radioattività di quelle non esposte. Che è piccola ma non è zero.
- 5) Non esiste un vento radioattivo. Probabilmente l'unico vento radioattivo nel raggio di milioni di chilometri è quello di origine solare. Infatti il sole emette continuamente un plasma ionizzato di bassa energia che si propaga in tutto lo spazio interplanetario e – nei giorni di particolare attività – è causa delle aurore polari. Le particelle di materiale radioattivo vengono diffuse dalle correnti e dal vento come il polline. Il materiale radioattivo è pericoloso, soprattutto se la pioggia lo fa accumulare al suolo, ma a distanze oltre i 50 chilometri – stando ai rilevamenti sino ad ora praticati – è completamente innocuo.
- 6) Le mascherine che indossano gli abitanti di

Tokyo non servono per la radioattività, ma per proteggersi dai batteri e dal polline. In Giappone è uso comune andare in giro protetti da una maschera facciale sia per non essere contagiati da eventuali germi ma soprattutto per non infettare gli altri quando si è malati. Peraltro le mascherine offrono una protezione minima o nulla dalla radiazione, per la quale sono necessarie maschere stile Prima guerra mondiale con filtri e protezioni ben più consistenti.

- 7) Non ci sono *kamikaze* tra i lavoratori a Fukushima. I giapponesi non usano mai il termine *kamikaze* (letteralmente 'vento divino'), non lo usavano neanche al tempo della Seconda guerra mondiale, quando la designazione era *tokkō*, 'attacco speciale'. I lavoratori della centrale (che comunque temono seriamente per la loro vita) sono stati esposti a dosi elevate, qualche centinaio di *milliSievert* circa, che però non li pongono in pericolo immediato di vita, pur esponendoli al rischio di patologie nei decenni a venire. Ai più esposti sono state praticate terapie specifiche per ridurre i danni da radiazione, per cui si può sperare che non manifesteranno tumori o altri effetti negativi nei prossimi anni: ma non c'è la certezza né in un senso né nell'altro. La notizia che sei persone dell'esercito giapponese sono morte a causa dell'esplosione di uno dei reattori è priva di fondamento.
- 8) Non c'è stato panico nei negozi o accaparramento di cibo. Anche se i supermercati hanno in vendita meno prodotti del solito, i giapponesi hanno rispettato le raccomandazioni del governo che invitavano a non comprare più

cibo del necessario. In questa maniera è stato possibile rifornire le zone colpite dallo *tsunami* e dalla radiazione di tutti i medicinali e del cibo necessario. Anche nei giorni in cui l'acqua di Tokyo aveva una radioattività superiore alla soglia di sicurezza per i bambini, non sono mancate acqua e bibite in bottiglia. I pochi che compravano grandi quantità d'acqua o cibo sono stati considerati con disprezzo.

- 9) La quantità di materiale radioattivo giunta in Italia a causa dei venti da Fukushima è infinitesimale e a malapena misurabile. La fonte di radiazione più elevata è nelle nostre cantine, sotto forma di radon, un gas radioattivo che penetra dal terreno. Per i fumatori la fonte maggiore di radiazione proviene dal polonio contenuto nelle sigarette.
- 10) Per chi viaggia in aereo o nello spazio la dose più alta proviene invece dalla radiazione cosmica che permea tutta la galassia e il nostro sistema solare: in volo verso Tokyo si è soggetti a una dose venti volte più alta che nella capitale giapponese.

I Radiazione: se la conosci la temi un po' di meno

«L'energia nucleare non mi entusiasma, ma d'altro canto vedo cose completamente assurde, gente disposta a correre rischi migliaia di volte più grandi di quelli dell'energia nucleare senza batter ciglio e ne sono contenti. Ma se si ha a che fare con la radiazione allora tutto è inaccettabile... Perché non ha odore, non ha colore, non ha sapore, per cui deve fare male».

Emilio Segrèⁱ, premio Nobel per la fisica nel 1959 per la scoperta dell'antiprotone (testo tradotto dall'Autore dall'inglese).

Perché la radioattività è pericolosa? I rischi per la salute sono dovuti alla radiazione emessa nel decadimento dei nuclei radioattivi. Non tutta la radiazione è pericolosa ma solo quella *ionizzante*, quella in grado cioè di strappar via gli elettroni degli atomi e delle molecole del nostro corpo. La luce è un esempio di radiazione non ionizzante e pertanto innocua, almeno fino a che non ci si punta un laser negli occhi¹.

La prima scoperta della radiazione ionizzante riguardò i raggi x, nel 1895. Fu il loro scopritore, Wilhelm Röntgen (1845-1923), a battezzarli così perché “misteriosi” in origine e natura.

L'anno successivo, il fisico francese Henri Becquerel (1852-1908) notò che un minerale contenente uranio aveva casualmente impressionato

una lastra fotografica, emettendo un qualche tipo di sostanza sconosciuta. Nel 1898 Pierre (1859-1906) e Marie Curie (1867-1934) furono i primi a isolare uno degli elementi responsabili della radiazione, il radio. Altri, come l'uranio, il plutonio e il torio seguirono a breve.

Fu Ernest Rutherford (1871-1937) a determinare che vi erano tre tipi distinti di radiazione, da lui battezzati alfa (α), beta (β) e gamma (γ). Lo scienziato neozelandese le classificò in base alle proprietà con cui interagiscono con la materia e alla loro capacità di penetrarla in profondità. I raggi α vengono fermati da un solo foglio di carta, i β attraversano anche qualche millimetro di alluminio e i γ riescono a penetrare anche vari centimetri di cemento armato (*figura 2*).

Questi risultati sono ancora più rivoluzionari se si pensa che all'inizio del Novecento non si sapeva ancora come fosse fatto l'atomo. Fu solo nel 1911 che Rutherford propose il modello comunemente accettato di un microscopico nucleo centrale pesante, composto da protoni (con carica positiva) e neutroni (senza carica), e circondato da una nuvola di elettroni leggeri (con carica negativa) (*figura 1*).

In questo schema gli isotopi sono nuclei con lo stesso numero di protoni e più o meno neutroni: la carica elettrica è la stessa ma la massa è maggiore o minore. Le proprietà chimiche di tutti gli isotopi sono le stesse ma le caratteristiche nucleari possono essere profondamente diverse: aggiungere o rimuovere uno o più neutroni può rendere il nucleo instabile e farlo decadere molto facilmente.

Con il modello atomico di Rutherford fu anche possibile comprendere la natura della radiazione:

quando si ha un decadimento nucleare un nucleo instabile si tramuta spontaneamente in un altro perdendo una parte che viene espulsa ad alta velocità dal nucleo. Dall'analisi delle specie di partenza e quelle prodotte si giunse alla conclusione che i raggi α sono costituiti da nuclei di elio (2 protoni e 2 neutroni, senza gli elettroni atomici), i β da elettroni² negativi (β^-) o positivi (β^+ , i positroni), mentre i raggi γ sono fotoni, ma di energia maggiore di quella della luce e dei raggi x.

Anche i raggi x sono radiazione elettromagnetica, quindi sono anch'essi fotoni. Come i raggi gamma, di cui condividono molte caratteristiche, hanno un'energia in grado di ionizzare gli atomi del nostro corpo strappando via gli elettroni che orbitano intorno al nucleo.

Quando un nucleo instabile decade, emette radiazione e si tramuta in un altro nucleo. Un nucleo instabile può decadere anche in un altro nucleo instabile che decade a sua volta, creando una catena di prodotti figli. I modi di decadimento possono essere più d'uno, con il risultato che la famiglia di prodotti figli può essere molto complicata (*figura 6*).

Oltre al decadimento spontaneo, un nucleo può essere rotto in più frammenti (fissione in nuclei più leggeri) se colpito da un proiettile. I proiettili migliori sono i neutroni che, non avendo carica elettrica, non sono deflessi dal nucleo come accade ai protoni.

La fissione nucleare rompe un nucleo pesante, ad esempio di uranio o plutonio, in frammenti, ossia in nuclei più leggeri. Nel processo vengono anche emessi alcuni neutroni. Se questi neutroni urtano un altro nucleo, questo può rompersi (*fissionarsi*) a sua volta. Questa nuova fissione del

nucleo emette a sua volta altri neutroni, in grado di rompere a loro volta altri nuclei fissionabili. Nelle bombe nucleari questa reazione a catena può essere incontrollata e crescere a dismisura fino a consumare in pochi istanti la maggior parte del combustibile. Nelle centrali nucleari essa è regolata da una serie di moderatori e barre di controllo e dura per anni (*figura 3*).

Il nucleo atomico



Ciascun atomo è costituito da un nucleo pesante e da una serie di elettroni, leggeri ma che si muovono con tale velocità da occupare tutto lo spazio a disposizione dell'atomo. Se infatti un protone (con carica positiva) o un neutrone (con carica nulla) del nucleo atomico pesa quasi duemila volte un elettrone, quest'ultimo (che ha carica negativa) è in un continuo stato di agitazione, allontanandosi per una distanza di circa duemila volte rispetto alle dimensioni del nucleo. La tavola periodica degli elementi classifica ogni atomo in base al numero atomico, ossia al numero di protoni. Il numero di protoni determina il tipo di nucleo: 1 protone per l'idrogeno, 2 per l'elio (che ha anche 2 neutroni e massa 4, e dunque viene indicato come ${}^4\text{He}$ oppure elio-4), 8 per l'ossigeno (${}^{16}\text{O}$, ossigeno-16) e 92 per l'uranio (${}^{238}\text{U}$, uranio-238).

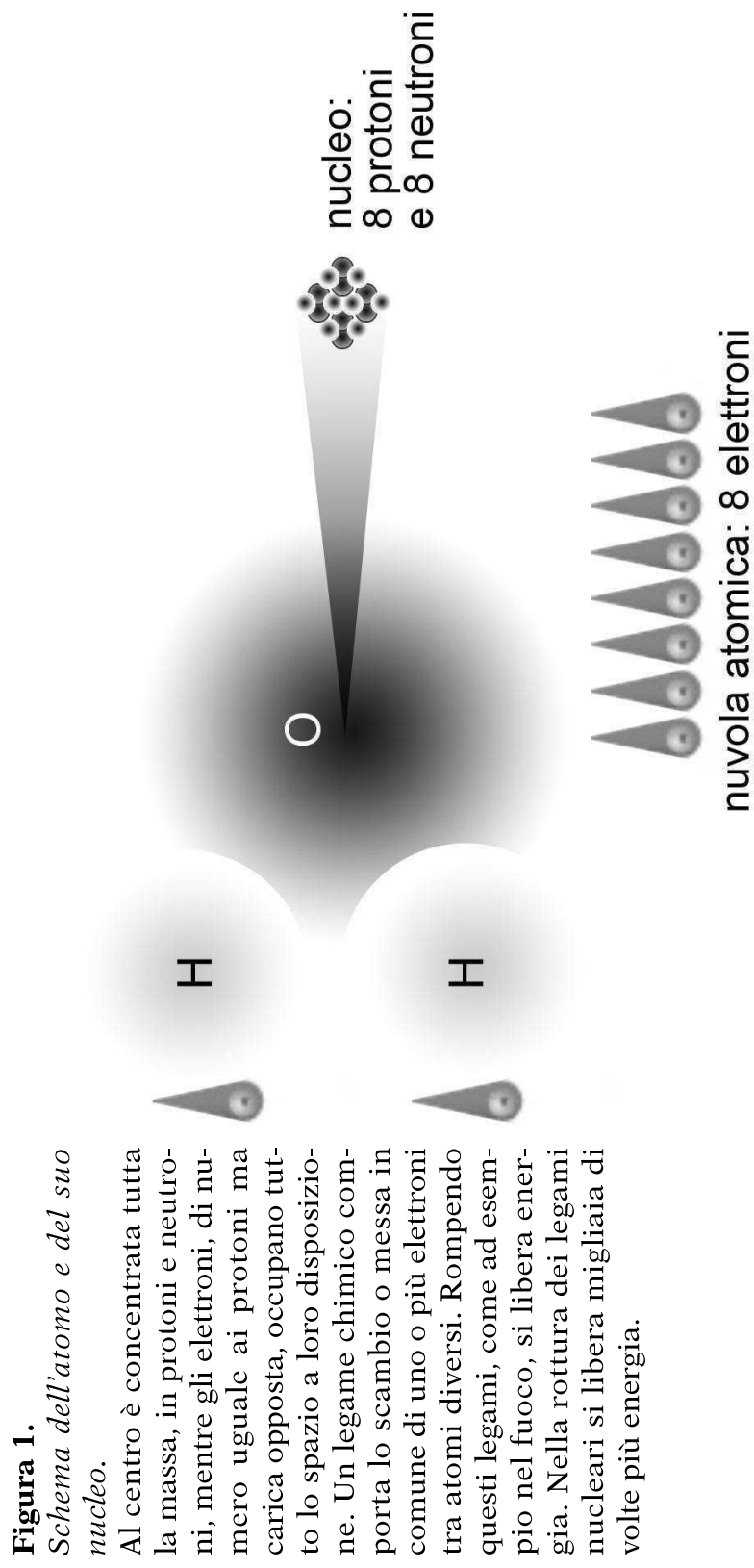
Nel nucleo vi sono anche i neutroni: hanno la stessa massa dei protoni ma sono senza carica elettrica. Uno stesso atomo può avere più isotopi, ossia nuclei con lo stesso numero di protoni ma più o meno neutroni: ad esempio il carbonio (6 protoni) ha come isotopo più comune e stabile il carbonio 12 (${}^{12}\text{C}$ = 6 protoni + 6 neutroni = massa 12). Un altro isotopo stabile, ma meno abbondante del carbonio è il carbonio 13 (${}^{13}\text{C}$ = 6 protoni + 7 neutroni). L'altra dozzina di isotopi del carbonio sono tutti instabili e decadono in altre specie nucleari. La presenza o assenza di neutroni può sbilanciare il precario equilibrio del nucleo, rendendolo instabile³.

Anche se l'atomo è elettricamente neutro – avendo un numero uguale e opposto di protoni positivi nel nucleo ed elettroni negativi negli orbitali atomici – gli elettroni più lontani dal nucleo possono legarsi con altri nuclei per formare composti stabili. L'atomo di idrogeno (H) – il più leggero degli elementi chimici – è costituito da un protone e un elettrone, mentre quello di ossigeno ha 8 protoni e 8 elettroni (ha anche 8 neutroni, per una massa complessiva di 16 ed è indicato come ${}^{16}\text{O}$). Se un atomo di ossigeno si avvicina a due di idrogeno, gli elettroni dell'idrogeno si legano con l'ossigeno per formare una molecola d'acqua (H_2O).

Vi sono vari altri tipi di legami chimici, ma tutti coinvolgono gli elettroni e la forza elettromagnetica. Quando accendiamo il gas della cucina o bruciamo un foglio di carta stiamo rompendo questi legami chimici, separando il gas o la carta nei suoi componenti fondamentali e ottenendo in cambio l'energia che in essi era stata immagazzinata quando erano stati creati: ad esempio bruciando un grammo di gas metano si ottengono 13.000 calorie⁴.

Così come gli elettroni sono tenuti al loro posto dalla forza elettromagnetica, i protoni e neutroni del nucleo sono tenuti insieme da un'altra forza, detta appunto *nucleare forte*. Questa è molto più intensa di quella elettromagnetica ed è il motivo della potenza sprigionata nelle centrali e nelle bombe nucleari. Infatti riesce a tenere insieme i protoni, che – avendo la stessa carica – si respingerebbero tra loro per repulsione elettrica.

Sfruttando l'energia di legame dei protoni e neutroni si può quindi avere accesso a energie migliaia di volte maggiore di quelle chimiche. Purtroppo – come vedremo nei prossimi capitoli – le cose non sono così facili: al giorno d'oggi siamo riusciti a controllare la forza elettromagnetica con una precisione e raffinatezza tale da consentirci di realizzare telefoni, radio e computer, ma con la forza *nucleare forte* riusciamo solo a produrre bombe o a scaldare l'acqua.



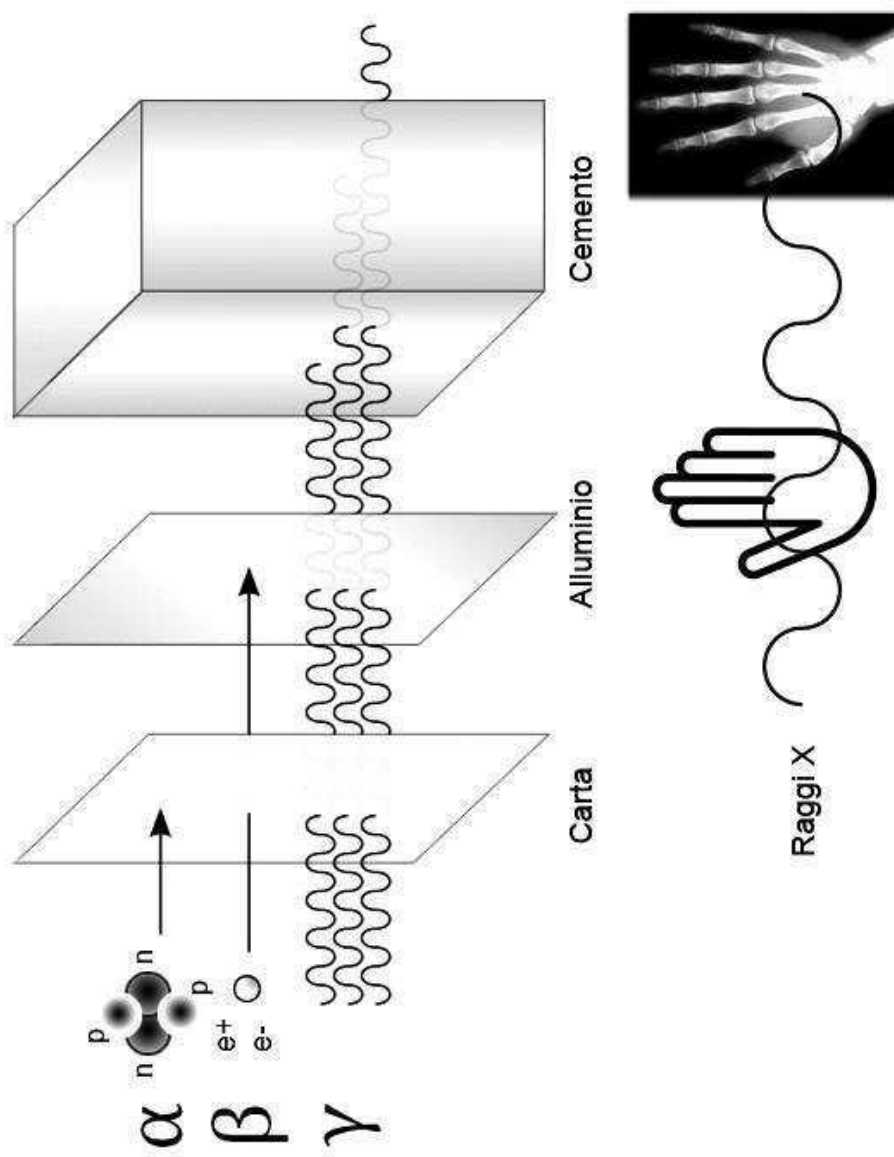


Figura 2.
Schema dei decadimenti.
 Il decadimento alfa (α) libera un nucleo di elio, che si ferma in pochi millimetri d'aria o in un foglio di carta. Il decadimento beta (β) può liberare un elettrone (β^-) o un positrone (β^+), che sono fermati da un foglio di alluminio. I raggi gamma (γ) possono invece penetrare centimetri di cemento o una parte del corpo umano. I raggi x attraversano il corpo umano e possono essere utilizzati per produrre radiografie.

III

Effetti biologici della radiazione

«Sono passati 20 anni dall'anniversario dell'incidente [di Chernobyl] e nell'ovest nulla è cambiato. È come se nessuno di questi eventi fosse mai accaduto. I bambini continuano a morire di cancro vicino a siti inquinati che continuano a rilasciare radioisotopi prodotti dalla fissione sotto permessi basati sul modello dell'ICRP. Cause in tribunale sono ancora perse da genitori disperati e infuriati perché i giudici ritengono che le dosi [cui sono stati esposti] i bambini [ammalati o morti di tumore] fossero troppo basse».

Chris Busby, Segretario Scientifico, ECRR, Comitato Europeo sui Rischi da Radiazione.

La radiazione ionizzante può determinare vari effetti nei tessuti che attraversa. Il più pericoloso è il rischio di danneggiare o rompere l'elica del DNA delle cellule. Questo può avvenire sia quando il DNA viene colpito direttamente dalla radiazione, sia quando viene colpito indirettamente, attraverso l'azione dei radicali liberi. Questi sono atomi o molecole con un elettrone spaiato che li rende molto attivi chimicamente. Ci sono molti tipi di radicali utili per il normale funzionamento cellulare, ma si ritiene che quelli contenenti ossigeno, come i perossidi (ad esempio $\text{OH}^\cdot$), siano particolarmente dannosi per la vita cellulare e per il DNA. Le cause della formazione dei radicali liberi sono molteplici: un'alimentazione errata e l'inquinamento sono le

principali, ma la radiazione ionizzante può scindere le molecole dell'acqua nella cellula producendo radicali liberi. La maggior parte dei danni alla cellula o al DNA nel suo nucleo (il nucleo della cellula ha un diametro di 3 micron, centinaia di milioni di volte più grande anche di un nucleo di uranio) non causa problemi: il DNA può ripararsi, il danno può avvenire in un punto non importante, oppure la cellula può morire senza riprodursi. Se la riparazione del DNA avviene in maniera anomala, possono generarsi mutazioni o riarrangiamenti cromosomici in grado di determinare trasformazioni cellulari. Le cellule "trasformate", negli organismi pluricellulari (come l'uomo), possono propagarsi di generazione in generazione in modo non controllato, portando allo sviluppo di tumori.

Nonostante gli studi siano ancora in corso, si ritiene che una dieta ricca di antiossidanti come le Vitamine C ed E sia in grado di neutralizzare l'effetto dei radicali liberi, anche quelli non creati dalla radiazione ionizzante.

Gli effetti della radiazione ionizzante vengono classificati secondo due raggruppamenti: deterministici e stocastici. I primi si manifestano *sempre* se esposti ad alte dosi di radiazione mentre i secondi sono tipici di basse dosi assorbite. Gli effetti stocastici sono casuali e vengono evidenziati solo analizzando – comparativamente rispetto alla generalità della popolazione – un consistente numero di pazienti o di persone esposte anche a dosi basse ma per lunghi periodi di tempo.

Nei soggetti esposti ad un'alta dose di radiazioni (maggiore di 0.25 Sv) i sintomi – spossatezza, mal di testa nausea e vomito, a cui ci si riferisce con il più comune "malessere da radiazione" – si manifestano con certezza nelle prime ore dopo

l'irraggiamento. Anche se in meno di 24 ore ci si sente di nuovo meglio e non si avverte nessun disagio, i sintomi ricompaiono dopo alcuni giorni nella forma di febbri, emorragie, sangue nel vomito e nelle feci. Ad almeno un Sv la fase di quiete, nel soggetto esposto è più breve e talvolta assente ma – se sottoposto a cura – si hanno buone probabilità di guarigione. Sopra 4 Sv si ha il 50% di possibilità di morte, raggiungendo il 100% sopra i 7 Sv . Se il paziente è sottoposto a cure la probabilità di sopravvivenza aumenta: dopo circa 8 settimane di terapia ha una buona possibilità di ricupero. A Fukushima il 24 marzo (dati IAEA) ci sono stati 17 lavoratori esposti a più di 0.1 Sv (tra questi sono inclusi i due tecnici esposti a 2-3 Sv alle gambe per essere venuti a contatto con l'acqua radioattiva) e tutti sono stati ricoverati in ospedale per accertamenti e cure.

Se gli effetti deterministici sono di gravità proporzionale alla radiazione ma esibiscono una soglia sotto la quale non si manifestano, si ritiene che gli effetti stocastici non abbiano una netta linea di demarcazione e possono colpire dopo vari anni. Solitamente si manifestano sotto forma di tumore ma non appaiono in tutti i soggetti esposti. Nel caso di esposizione di un gran numero di persone è possibile determinare l'aumento dell'incidenza dei tumori e metterli in relazione con la dose cui sono stati esposti.

Un'esposizione maggiore implica un rischio maggiore di contrarre tumore⁹. Per dare un'idea, la probabilità di morte per incidenti domestici o in auto è pari a quella associata ad una dose di 0.01 Sv (10 mSv), ossia una su 10.000 (0.01%).

A dosi più basse è ancora dibattuto se la radiazione abbia degli effetti sulla salute e quali siano.

Gli studi epidemiologici mostrano come alcuni tumori come la leucemia, il tumore al seno, ai polmoni e alla tiroide siano più facilmente indotti dalla radiazione, mentre altri (pancreas, testicolo, prostata) non aumentino nei soggetti esposti.

I danni al DNA dei soggetti esposti si possono trasmettere alla generazione successiva sotto forma di mutazioni genetiche. Il numero di mutazioni è trascurabile per basse esposizioni, fino a 10 mSv , circa l'1% di quelle che avvengono per cause naturali, ma aumenta della metà nel caso di esposizioni di 0.5 Sv ¹⁰.

Alcune sostanze possono aumentare la sensibilità alla radiazione, amplificando i danni cellulari che essa produce, ma altre riescono a contrastare gli effetti nefasti della radioattività, facendo resistere ad una dose altrimenti mortale di radiazione. Altri trattamenti avanzati riescono a bloccare i meccanismi di *apoptosi*, ossia una morte auto-programmata dalle cellule stesse^{vii}. Anche se questo meccanismo ha lo scopo di ridurre la propagazione dei danni ad altre cellule, in questo caso il "suicidio preventivo" avviene a dosi in cui la cellula potrebbe ancora guarire ed è quindi preferibile bloccarlo per quanto possibile.

In caso di esposizione ad alte quantità di materiale radioattivo, è anche possibile somministrare sostanze che – legandosi con i nuclei radioattivi presenti nel corpo – ne facilitino l'espulsione. Buoni risultati in tal senso si sono avuti negli anni Cinquanta e Sessanta nelle esposizioni da plutonio.

I mammiferi hanno tutti la stessa sensibilità alle radiazioni: la loro dose letale è intorno a qualche Sv . Altri animali sono molto più resistenti: la fama degli scarafaggi come unica specie animale in grado di sopravvivere ad una guerra nucleare è

però immeritata essendo la loro resistenza alle radiazioni “solo” 10-15 volte superiore a quella dell’uomo e superata anche dalla mosca delle frutta (640 Sv) e dai ragni (1.000 Sv). Ancora più robuste sono alcune vespe (1.800 Sv) e i virus (2.000 Sv). I veri campioni sono però due batteri: *deinococcus radiodurans* e *micrococcus radiophilus*. Come i loro nomi latini suggeriscono, sono in grado di sopravvivere sino a 30.000 Sv, riuscendo a riparare anche un milione di rotture della catena del DNA per mezzo di una speciale catena enzimatica. Colonie di questi batteri sono state trovate anche nei reattori delle centrali nucleari (figura 10).

Tra i regni non animali i miceti sono i più resistenti: il fungo *cryptococcus neoformans* (nocivo per l’uomo) riesce a sfruttare l’energia delle radiazioni ionizzanti a vantaggio della sua attività cellulare. In grado di sopravvivere a più di 30.000 Sv, questo fungo è stato trovato anche all’interno del reattore di Chernobyl.

Grazie alla loro elevata resistenza alle radiazioni, queste forme di vita sarebbero in grado di sopravvivere anche alle condizioni estreme di radiazione, temperature e vuoto di un viaggio spaziale, suffragando l’ipotesi che la vita possa essere giunta sulla terra portata da meteoriti che ospitavano questo tipo di forme di vita.

Se l’osservazione del comportamento degli organismi viventi ad alte dosi di radiazione ci permette di comprenderne i meccanismi di resistenza, e trovare quindi i rimedi per curare i soggetti esposti, all’estremo opposto, gli studi relativi ai comportamenti a basse dosi assumono un’importanza insostituibile, sotto il profilo epidemiologico, per valutare le conseguenze a lungo termine di esposizioni modeste ma prolungate.

Putroppo la maggior parte di questi studi è stata effettuata letteralmente sulla pelle di pazienti esposti a radiazione: gli abitanti di Hiroshima e Nagasaki per gli effetti delle bombe nucleari e quelli dell'ex Unione Sovietica, l'Europa dell'est e l'Italia sottoposti alla radiazione di Chernobyl¹¹.

Dai dati epidemiologici e medici dell'incidenza di malattie e morti dopo l'incidente di Chernobyl si ricava un quadro preoccupante: incremento della mortalità per tumore del 22% nelle regioni inquinate dell'Ucraina, mortalità per il cancro alla prostata raddoppiata, decuplicata per il cancro al pancreas, tumore nei bambini della regione inquinata di Gomel aumentato di venti volte, tumore alla tiroide incrementato di centinaia di volte in bambini e adolescenti, incremento del 40% dei tumori in Bielorussia. E ancora: danni al sistema nervoso, aborti, sterilità, invecchiamento prematuro. Per un rapporto completo e aggiornato dei devastanti danni alla salute nei venti anni da Chernobyl si rimanda di nuovo al rapporto ECRR^{viii}: la stima dei morti per tumore effettuata in quella sede va da 900.000 a 1.800.000 persone in tutta Europa.

Non è chiaro l'effetto della radiazione a dosi molto più basse: al momento gli effetti stocastici della radiazione seguono una relazione lineare senza soglia: si parte dall'ipotesi che, anche a piccolissime dosi (migliaia di volte più basse che nel caso di Chernobyl), la radiazione abbia effetti negativi sull'uomo. Questo approccio si basa sullo stesso modello ottenuto da studi a dosi più alte per cui non è chiaro quanto descriva accuratamente la realtà.

Infatti vi sono vari studi che mostrano come le cellule viventi cresciute in un ambiente povero di

radiazione, come nei laboratori del Gran Sasso siano in grado di resistere meno alla radiazione. Questi laboratori sono stati costruiti dall'INFN (Istituto nazionale di fisica nucleare) a 1.400 metri sotto il Gran Sasso, per effettuare ricerche e studi di processi di fisica delle particelle elementari, astrofisici e di biologia in condizioni di minima radiazione. Le cellule umane coltivate nel *silenzio radioattivo* delle viscere del Gran Sasso, dove la radiazione è un milionesimo di quella di Roma, si sono rivelate meno capaci di resistere all'irraggiamento con grandi quantità di radiazioni rispetto alle loro gemelle cresciute presso l'Istituto superiore di sanità di Roma dove la radiazione naturale è un milione di volte più elevata^{ix}. Una quantità minima, ben al di sotto di quelle in gioco con il radon o nelle terme, di radioattività potrebbe "adattare" le cellule allenando i meccanismi di riparazione del DNA ad una successiva esposizione a dosi più elevate di radiazioni ionizzanti.

Rivelatori di radiazione

Le radiazioni e le dosi assorbite vengono misurate con una serie di strumenti sviluppati nel corso del secolo scorso. Infatti, con l'unica eccezione dei "lampi di luce", descritti più avanti, l'uomo non è in grado di percepire la presenza e la quantità di radiazione presente nell'ambiente. La precisione e la sensibilità dei rivelatori consente di riportare il singolo decadimento e la singola particella radioattiva: se da un lato questo permette un'accuratezza non possibile in molti altri campi scientifici, dall'altro si è spesso ingenerata confusione a causa della associazione radiazione-pericolo.

Geiger

Il contatore Geiger, dal nome del suo inventore Hans Wilhelm Geiger (1882-1945), è il più semplice misuratore di radiazione attivo: consiste in un tubo in cui è sigillato del gas. Quando il tubo è portato ad alta tensione, gli elettroni ionizzati dal passaggio della particella producono una scarica elettrica che viene letta dai circuiti elettronici. Se il circuito è collegato ad un altoparlante questo emette il caratteristico ticchettio. Dal numero di conteggi in un certo tempo si ottiene la quantità di radiazione o dose in quel momento. Essendo costituiti da un tubo metallico, i Geiger sono adatti per misurare raggi gamma, e sono solo debolmente efficaci ai beta e ciechi agli alfa. Per misurare le particelle alfa è necessario un contatore che abbia un'apertura speciale per far sì che la radiazione non sia assorbita dal metallo. Nelle figure 4 e 5 sono mostrati i due contatori Geiger in mio possesso. Uno è portatile, di fabbricazione russa, e l'altro è un residuo bellico della Germania dell'Est. I due rivelatori sono molto affidabili e forniscono misure in accordo tra loro, anche se il secondo ha problemi a funzionare in condizioni di bassa radioattività ambientale. Rivelatori del genere sono acquistabili nei negozi specializzati o su internet per meno di 100 euro.

Dosimetri

I dosimetri misurano la dose assorbita da una persona e devono essere indossati in tutte le occasioni in cui si può essere soggetti a radiazioni. Questo include macchine di radioterapia, acceleratori di particelle, centrali nucleari. Sembrerebbe che la scarsità di dosimetri e il gran numero di lavoratori presenti a Fukushima abbia fatto dero-

gare a questa essenziale norma di sicurezza, almeno per i lavoratori che compiono lavori simili e dovrebbero essere esposti nella stessa maniera.

I dosimetri sono dei pezzetti di plastica speciale (TLD) o carta fotografica particolare (CR39) con i quali è possibile conoscere la dose totale assorbita. Le molecole dei TLD, o dosimetri termoluminescenti, vengono “caricate” dall’arrivo della radiazione che le pone in stati eccitati ad energia più elevata. Se scaldati in laboratorio questi emanano una luce proporzionale alla radiazione assorbita. I CR39 sono delle raffinate evoluzioni delle lastre fotografiche impressionate dai primi raggi x e dalla prima radiazione. Se opportunamente sviluppati sono in grado di misurare la quantità e il tipo della radiazione dai microscopici forellini che essa causa nel materiale.

Analizzatori di spettro

Le analisi dell’acqua e dei cibi sono effettuate con degli analizzatori di spettro. In questo caso è necessario misurare l’energia di ciascuna particella, assorbendola in un cristallo o in uno speciale materiale plastico. Questo cristallo altro non è che lo scintillatore con cui Paperino localizzava i suoi nipoti. Il funzionamento è simile al TLD: la radiazione depositata eccita le molecole, che in questo caso si diseccitano subito emettendo luce. La luce poi viene amplificata e il corrispondente segnale elettronico viene registrato in un computer. Ciascun nucleo radioattivo decade emettendo particelle di una ben precisa energia e dunque osservando i picchi è possibile identificare la presenza di un dato materiale radioattivo nell’acqua del suolo o nel cibo. Dall’altezza dei picchi è anche possibile risalire all’attività di ciascuna specie.



Figura 4.

Foto del Geiger di fabbricazione russa.

Grande come due pacchetti di sigarette, il contatore ha il tubo nella parte destra, dove si trovano le fessure nella plastica. Alimentato da una batteria a 9 volt, l'apparecchio misura la radiazione in *micro Roentgen/ora* (R/h). $1\mu R/h = 0.01\mu Sv/h$. I conteggi vengono sommati per 45 secondi e poi riportati nel display a led rossi. In questo caso la lettura del 16 aprile 2011 fornisce $15\mu R/h$ nell'area di Tokyo.

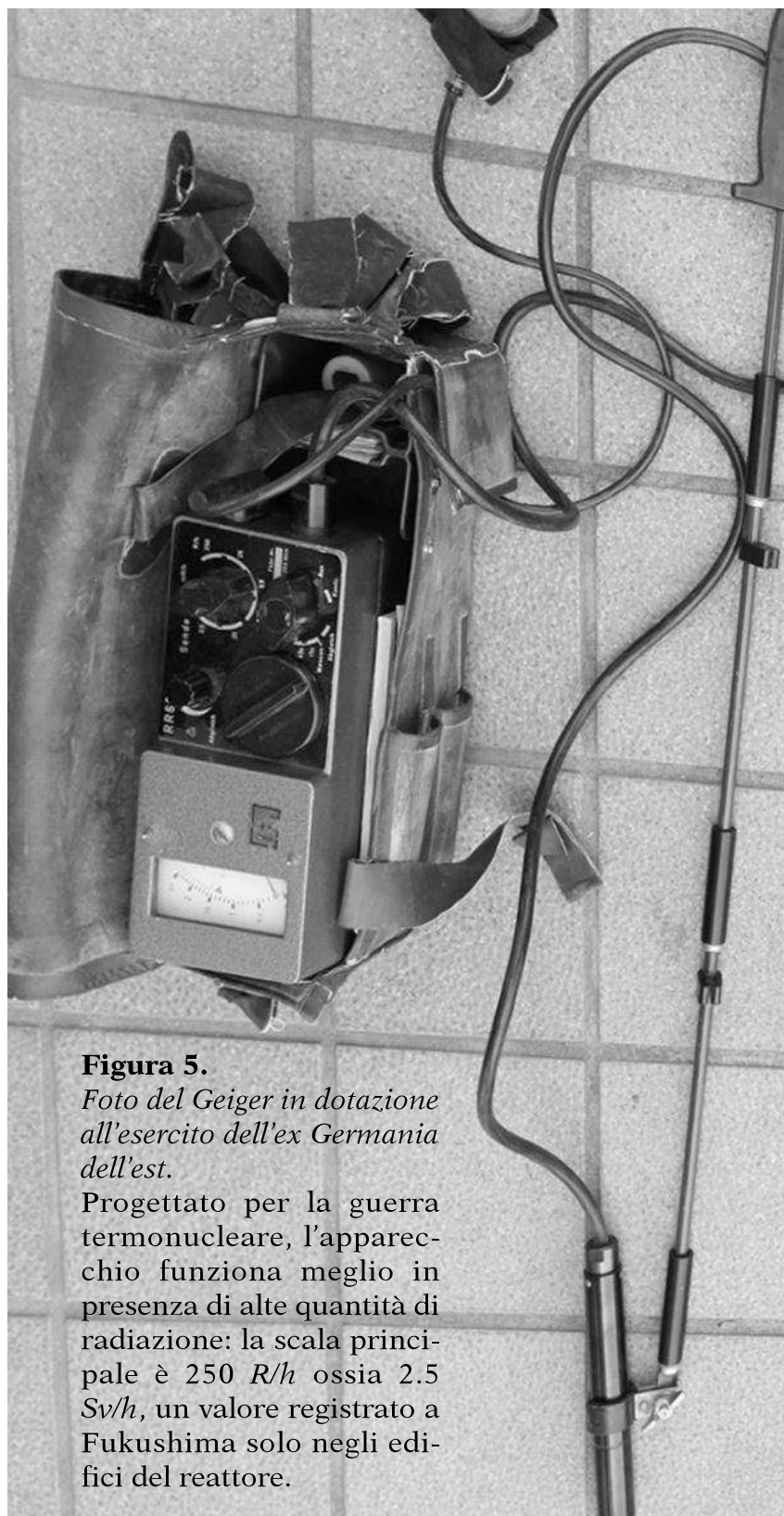
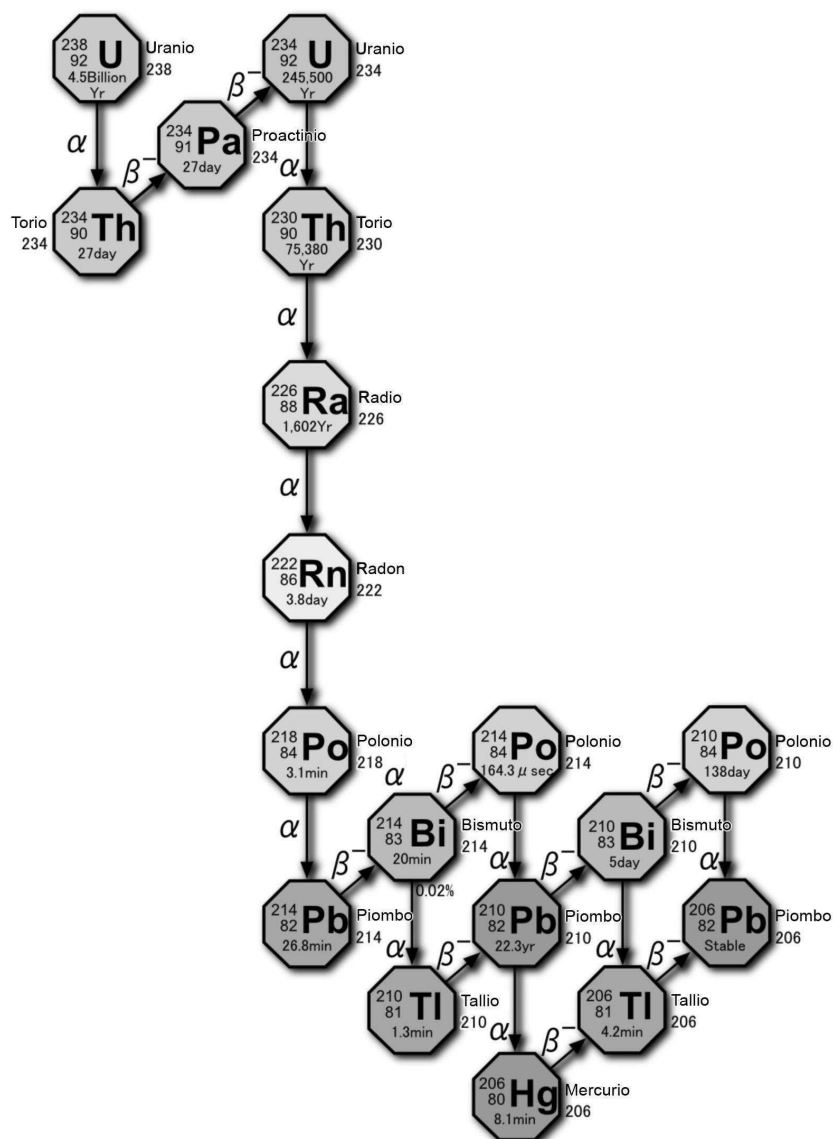


Figura 5.

Foto del Geiger in dotazione all'esercito dell'ex Germania dell'est.

Progettato per la guerra termonucleare, l'apparecchio funziona meglio in presenza di alte quantità di radiazione: la scala principale è 250 R/h ossia 2.5 Sv/h, un valore registrato a Fukushima solo negli edifici del reattore.

**Figura 6.**

Schema dei decadimenti dell'uranio-238.

Il nucleo di uranio è instabile, con un tempo di dimezzamento di 4.5 miliardi di anni. Emettendo un alfa si tramuta in torio-234, un nucleo con due protoni e due neutroni in meno. In 27 giorni il torio decade β emettendo cioè un elettrone. In questo decadimento un neutrone si tramuta in protone, quindi la massa rimane invariata ma il numero atomico aumenta di uno, da 90 a 91. La serie di decadimenti continua fino a raggiungere il piombo-206, il comune piombo (stabile). Notate il gas di radon, prodotto nel decadimento del torio.