

Radioattività ed Energia Nucleare



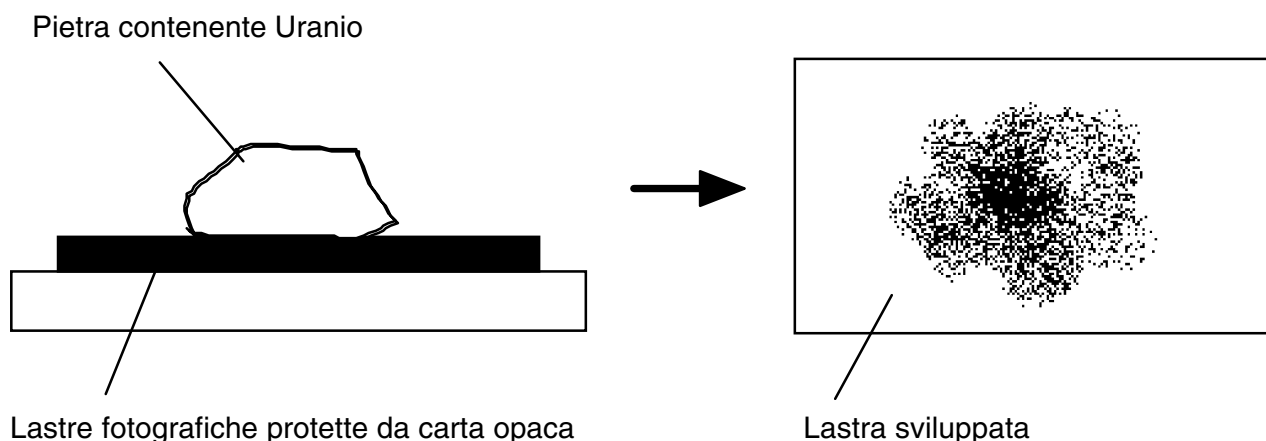
INDICE

1. Alcuni cenni storici.....	2
2. Misuriamo la radioattività.....	2
2.1. Il contatore Geiger	2
2.2. Qualche semplice esperimento	4
2.2.1. Misuriamo la radioattività nella nostra aula	4
2.2.2. Misuriamo la radioattività del Radio 226.....	4
3. Definiamo la radioattività	10
3.1. Instabilità atomica.....	10
3.2. Radiazioni alfa, beta e gamma.....	11
3.3. Energia	15
3.4. Tempo.....	17
4. Effetti della radioattività sull'essere umano	22
4.1. Le unità di misura della radioattività	22
4.1.1. Attività	23
4.1.2. Dose	24
4.2. Radiazioni ionizzanti	26
4.3. Dosi normali e dosi pericolose.....	27
4.4. Effetti delle radiazioni sulle cellule.....	30

4.5. Aspetti statistici.....	34
5. Fonti Radioattive	37
5.1. Fonti Naturali.....	37
5.1.1. Il Radon 222.....	39
5.1.2. Alcune curiosità	40
5.2. Fonti Artificiali.....	40
6. Centrali Nucleari.....	43
6.1. La Fissione Indotta Degli Atomi (FIDA).....	43
6.2. Reazioni a catena e massa critica.....	44
6.3. La contropartita: le scorie radioattive.....	47
6.4. Sicurezza ed incidenti nucleari.....	49
Appendice 1 - Riassumiamo alcuni concetti importanti.....	50
Appendice 2 - Alcuni principi di protezione in caso di aumento di radioattività....	51

1. Alcuni cenni storici

Fu nel lontano mese di febbraio del 1896¹ che il fisico francese **Antoine-Henri Becquerel** (1852-1908), nel suo laboratorio di Parigi scoprì, quasi per caso, la radioattività. Egli notò infatti come una pietra contenente uranio, lasciata *casualmente* sopra delle lastre fotografiche, le avesse impressionate nonostante queste fossero ben protette da carta opaca.



Negli anni che seguirono Marie Sklodowska Curie ed il marito Pierre si interessarono a questo fenomeno e dopo qualche anno di ricerche, nel 1898, riuscirono ad isolare nuovi elementi radioattivi precedentemente sconosciuti, che chiamarono Radio e Polonio. Per i suoi studi sulla radioattività Marie Curie fu insignita del premio Nobel per la Fisica nel 1903 e di quello per la Chimica nel 1911, il che se si pensa alla situazione femminile a cavallo tra il XIX ed il XX secolo, la dice lunga sulle geniali qualità di questa donna.

Ma che cosa è questa radioattività, quali proprietà ha?

2. Misuriamo la radioattività

2.1. Il contatore Geiger

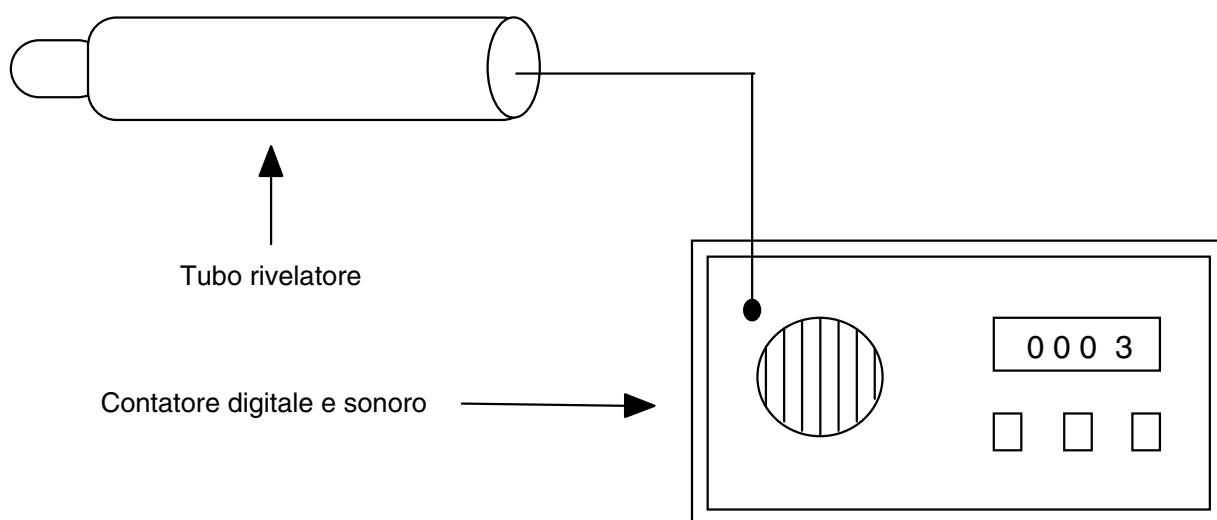
Anzitutto abbiamo bisogno di uno strumento che ci permetta di misurare la grandezza fisica che vogliamo indagare. Infatti così come volendo misurare il peso di una persona ho bisogno di una bilancia, oppure volendo misurarne l'altezza mi servo di un metro, o per misurare la temperatura adopero un termometro, allo stesso modo, per misurare la radioattività ho bisogno di uno strumento appropriato. Nel nostro caso la situazione è complicata dal fatto che:

¹ La storia della radioattività presenta alcune singolari ricorrenze a livello di date. Eccone due: 1896 Becquerel scopre la radioattività, 1986 incidente nucleare di Tschernobyl - 1942 Enrico Fermi accende la prima pila atomica a Chicago, 1492 Cristoforo Colombo scopre l'America.



I nostri sensi NON sono in grado di percepire la radioattività. Possiamo riconoscerla solo per le conseguenze della sua azione.

Tra i vari strumenti in grado di rilevare la radioattività, consideriamo il **Contatore Geiger** (Becquerel usò delle lastre fotografiche). Al momento non preoccupiamoci di come questo strumento funzioni, ma ricordiamoci solo che il valore che leggiamo sul display è legato in qualche modo alla radioattività.



Attenzione: Il tubo rivelatore è molto delicato ed il suo uso richiede una cautela particolare: a riposo è sempre munito di un cappuccio protettivo sulla finestrella di mica. Questa non deve essere toccata in nessun caso avendo uno spessore di 3/100 di mm. Inoltre il tubo è molto costoso (circa 500 SFr.) ed è meglio che venga manipolato esclusivamente dal maestro.

Il contatore in dotazione alla nostra scuola è soltanto un "*bravo contatore*" di particelle e di raggi, ma non ci può dare alcuna informazione circa la natura e la percentuale dei vari elementi radioattivi presenti nell'ambiente. Per ottenere informazioni di questo genere bisogna ricorrere ad apparecchiature più sofisticate come ad esempio lo spettrometro di massa.

Questo però non ci impedisce di utilizzare il nostro contatore Geiger per eseguire delle misurazioni interessanti riguardo la radioattività naturale in diversi luoghi e l'emissione di alcune deboli sorgenti radioattive artificiali in situazioni diverse.

2.2. Qualche semplice esperimento

Vediamo ora di svolgere qualche piccolo esperimento che ci aiuterà a farci un'idea più precisa sulla radioattività.

2.2.1. Misuriamo la radioattività nella nostra aula

Servendoci del nostro contatore Geiger, misuriamo la radioattività nell'aula di scienze. Riportiamo i dati nella tabella qui sotto.

Oggetto	I Misurazione		II Misurazione	
	Tempo [secondi]	Impulsi	Tempo [secondi]	Impulsi

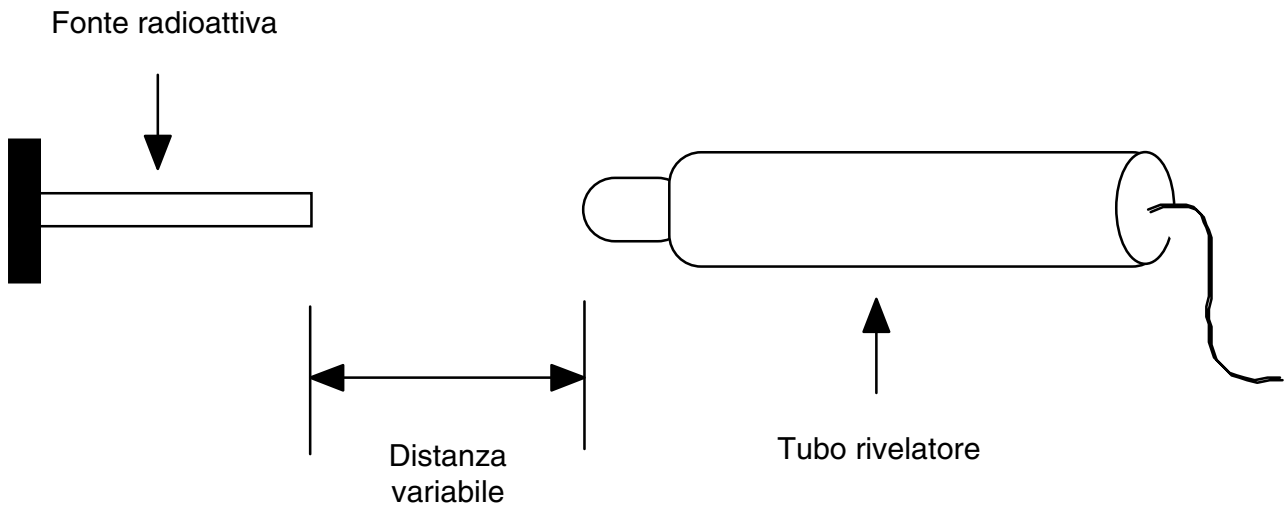
Osservazioni:

2.2.2. Misuriamo la radioattività del Radio 226

Sempre servendoci del nostro contatore Geiger, misuriamo la radioattività di una prova di materiale radioattivo: il Radio 226. Riportiamo i dati nelle tabelle di seguito.

- i) *Come varia il valore registrato della radioattività in funzione della distanza tra fonte radioattiva e detettore?*

Variamo la distanza tra detettore e materiale radioattivo e misuriamo la radioattività sempre per lo stesso periodo di tempo.

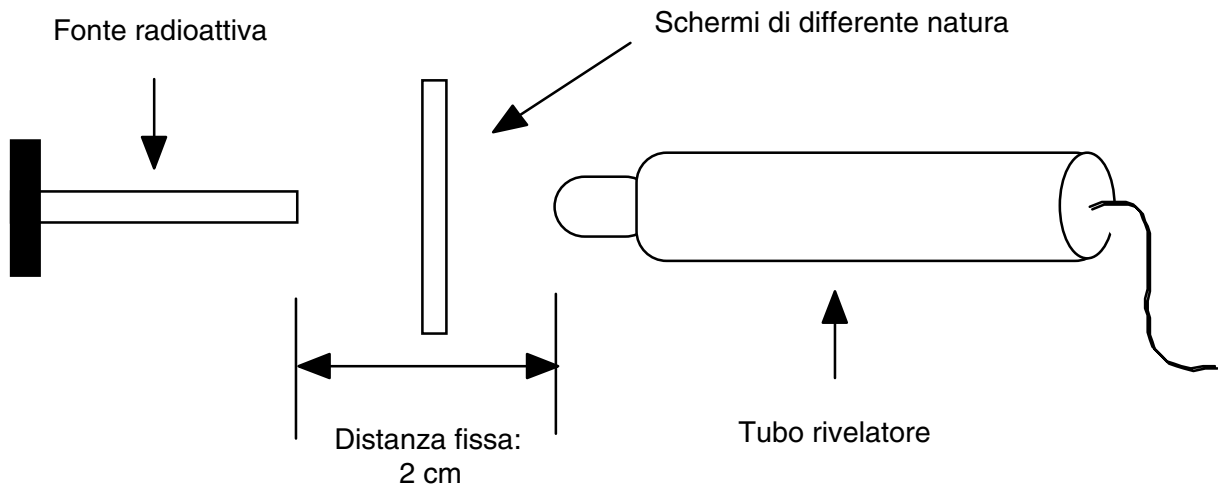


Distanza [cm]	I Misurazione		II Misurazione	
	Tempo [secondi]	Impulsi	Tempo [secondi]	Impulsi

Osservazioni:

ii) *Come varia il valore registrato della radioattività mettendo degli oggetti tra detettore e fonte radioattiva?*

Mettiamo diversi materiali tra detettore e materiale radioattivo, mantenendo fissa la distanza a 2 cm e misurando la radioattività sempre per lo stesso periodo di tempo.

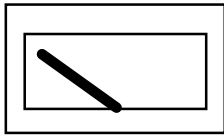


Schermo	I Misurazione		II Misurazione	
	Tempo [secondi]	Impulsi	Tempo [secondi]	Impulsi

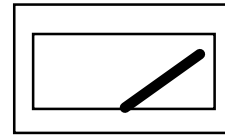
Osservazioni:

Un piccolo esercizio per ricapitolare quanto osservato:

Considera ora le situazioni esposte ai punti **i, ii, iii e iv** e per ciascun caso indica in quale circostanza l'indicatore segnerà una maggiore radioattività semplicemente disegnando una stanghetta nel rettangolo come illustrato qui sotto:

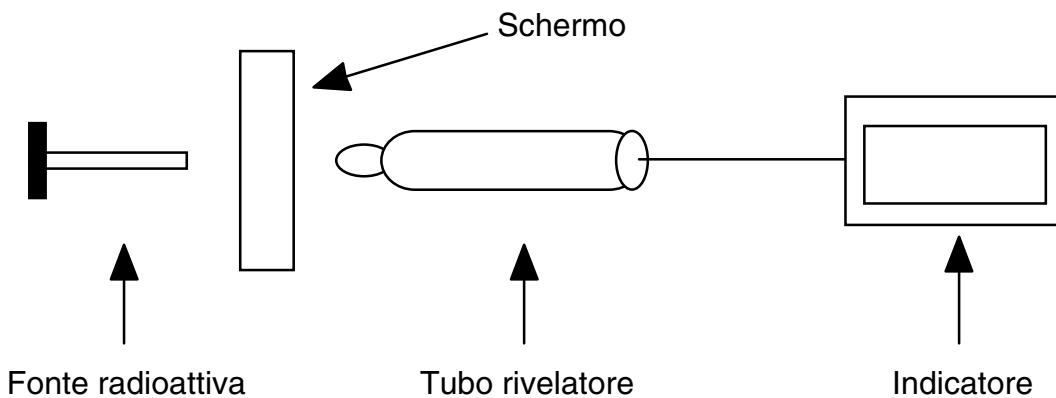


Bassi valori di radioattività



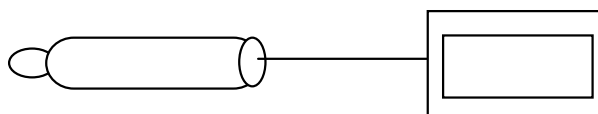
Alti valori di radioattività

Leggenda:

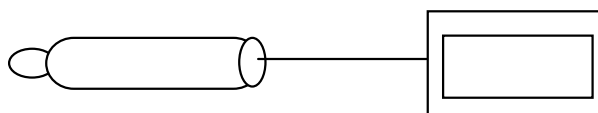


Motiva la tua scelta!!!

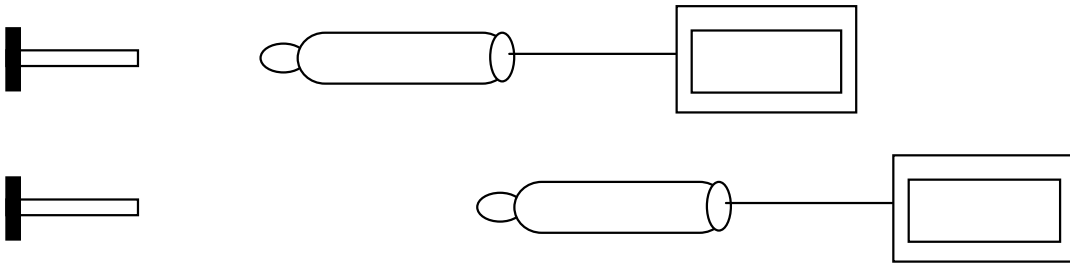
i) Tempo di esposizione di 20 secondi



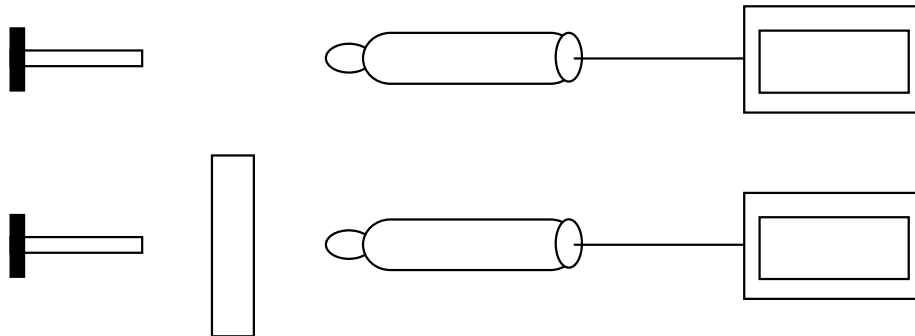
Tempo di esposizione di 40 secondi



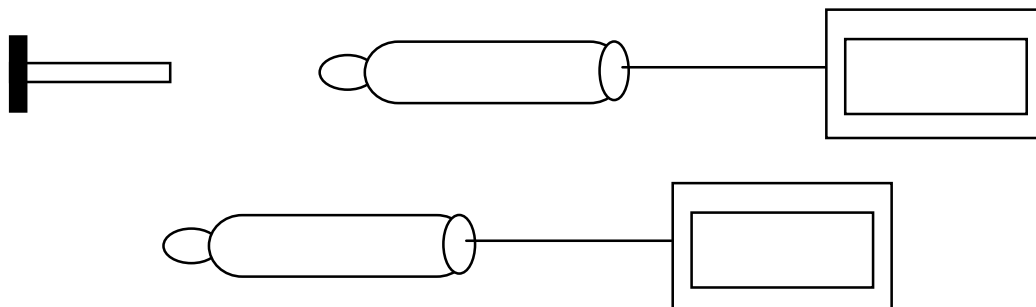
ii) In quale situazione, tra le due schizzate qui sotto, l'indicatore segnerà una maggiore radioattività per uno *stesso* periodo di esposizione?



iii) In quale situazione, tra le due schizzate qui sotto, l'indicatore segnerà una maggiore radioattività per uno *stesso* periodo di esposizione?



iv) In quale situazione, tra le due schizzate qui sotto, l'indicatore segnerà una maggiore radioattività per uno *stesso* periodo di esposizione?





Mettiamo in ordine quanto imparato fino ad ora

- In Natura esiste una radioattività di fondo molto debole.
- Più il tempo di esposizione è lungo e maggiore è la radioattività registra.
- La *radioattività* emessa dal Radio 226 si è rivelata molto più intensa. In particolare abbiamo visto che questa *diminuisce in funzione della distanza* a cui è posto il detettore dalla prova *e a dipendenza dei materiali usati come schermo*: materiali più consistenti e più spessi sembrano essere più efficaci nello schermare le radiazioni emesse.
- I valori della radioattività registrati mostrano delle fluttuazioni statistiche (la stessa misurazione, ripetuta più volte, dà risultati leggermente diversi).
- Inoltre abbiamo visto che *non dobbiamo intervenire sul materiale radioattivo* per misurarne la radioattività: basta infatti aprire la porticina e attraverso il foro esce qualche cosa di non ancora ben definito da noi chiamata radioattività e che può essere detettata da un contatore Geiger.



Ed ora qualche domanda

- Domanda 1:** *Come possiamo sottrarci dall'influsso di eventuali fonti radioattive?*
- Domanda 2:** *Perché la scatola contenente il materiale radioattivo è di piombo e non di carta?*
- Domanda 3:** *Come progetteresti un rifugio antiatomico? Motiva i criteri scelti.*
- Domanda 4:** *Come potresti spiegare il fatto che la radioattività fu scoperta per caso?*

3. Definiamo la radioattività

Dopo questa parte sperimentale introduttiva durante la quale abbiamo avuto modo di familiarizzare un po' con la radioattività, è giunto il momento di proporre un modello teorico in grado di spiegare e caratterizzare i fenomeni osservati.

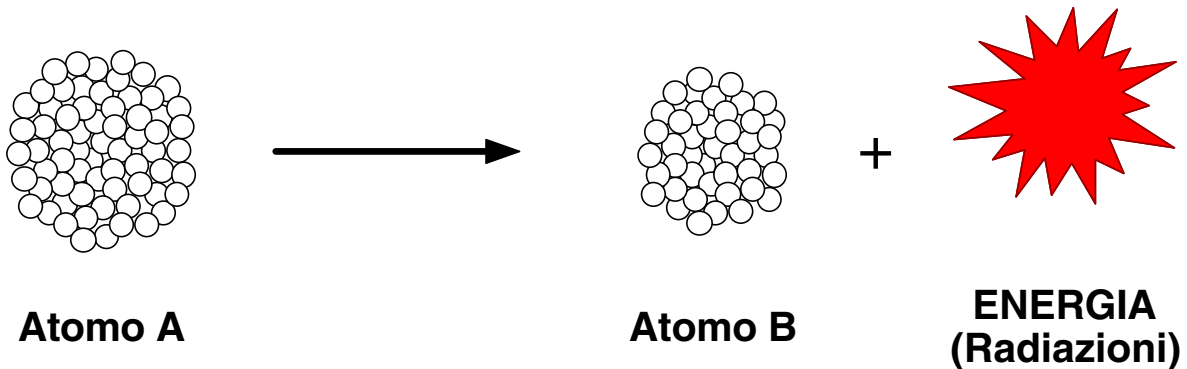
3.1. Instabilità atomica

Fino ad ora abbiamo usato a più riprese il termine *radioattività*. Vediamo di proporre una definizione:



Il fenomeno secondo il quale alcuni Atomi, detti radioattivi, in modo SPONTANEO, si trasformano in altri atomi emettendo radiazioni, prende il nome di radioattività. La radioattività di un elemento dipende dall'instabilità del suo nucleo.

Il processo in questione può essere schematicamente riassunto dalla formula seguente²:



A sua volta l'atomo B può essere radioattivo.

A volte gli atomi radioattivi vengono anche chiamati radionuclidi o isotopi radioattivi.

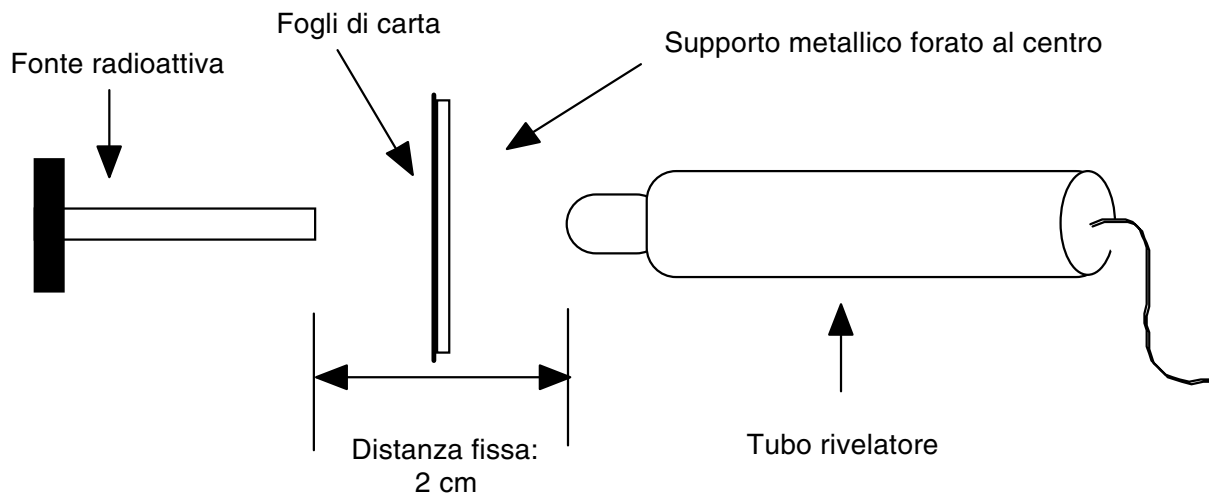
²Nello schema usato viene rappresentato solo il nucleo atomico con protoni e neutroni. La nube elettronica, orbitante attorno al nucleo è stata tralasciata per motivi di chiarezza. Generalmente il numero di neutroni nel nucleo è maggiore rispetto a quello dei protoni.

Per analogia possiamo pensare ad un processo di decadimento nucleare come ad una pistola (atomo radioattivo) che spara dei proiettili. Sono appunto tali proiettili che vengono "contati" dal contatore Geiger.

Vediamo ora di considerare alcuni aspetti legati al fenomeno di decadimento nucleare e quindi alla radioattività.

3.2. Radiazioni alfa, beta e gamma

Un semplice esperimento ti permetterà di giudicare, anche se solo qualitativamente, la natura delle componenti delle radiazioni emesse dal nostro materiale radioattivo. Manteniamo fissa la distanza tra detettore e fonte radioattiva, usiamo come schermo dei fogli di carta e registriamo la radioattività per la durata di un minuto.



Annota i dati nella tabella e costruisci un istogramma. Prima di iniziare l'esperimento prova a formulare con qualche breve frase quello che ti aspetti. Ciò ti sarà utile per interpretare i risultati.

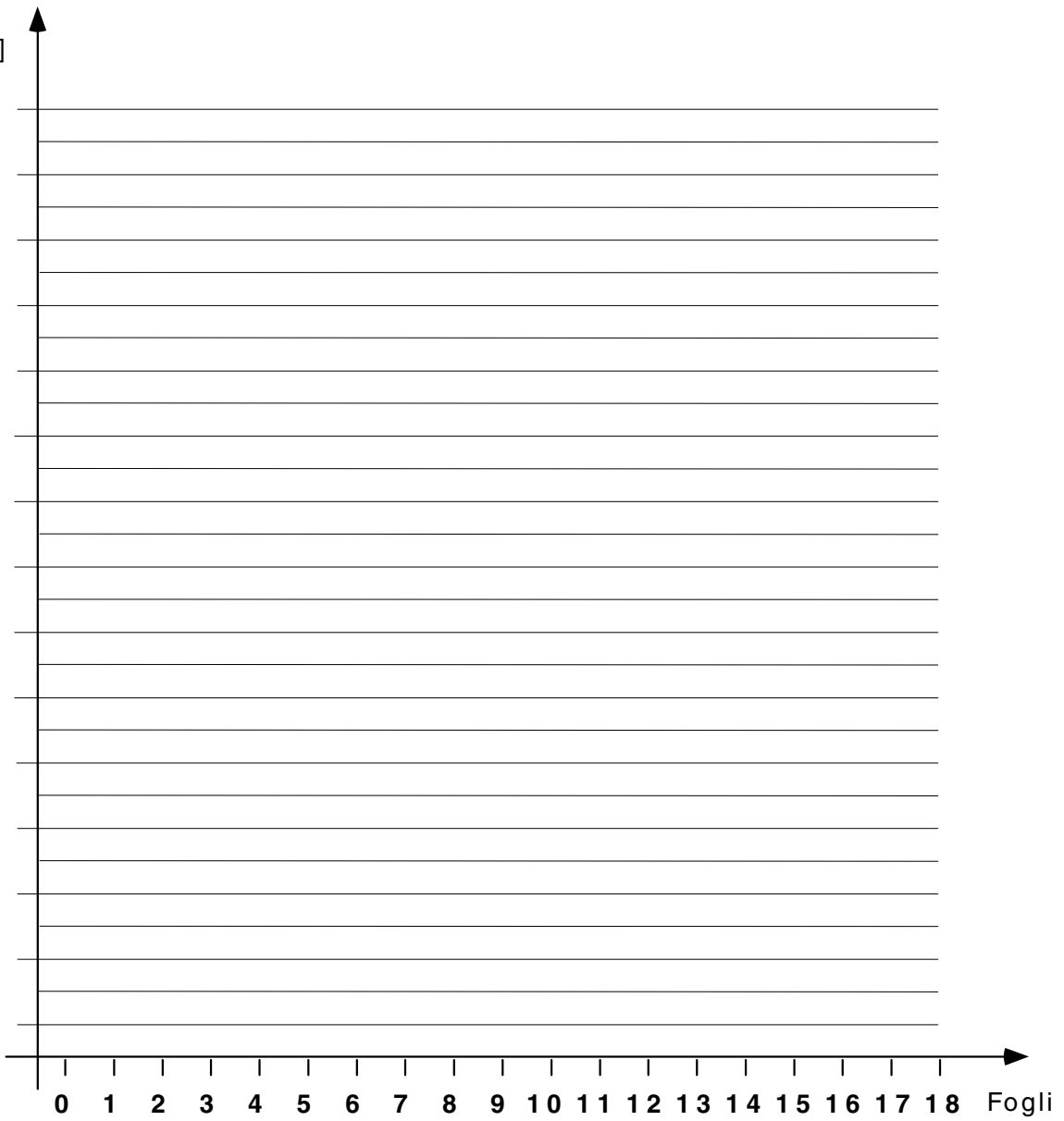
Tabella:

Fogli	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Impulsi [per min]	2'335	1'574	1'426	1'231	992	968	862	736	704

Fogli	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Impulsi [per min]	646	589	545	499	479	461	442	398	359

Istogramma:

Impulsi
[per min]



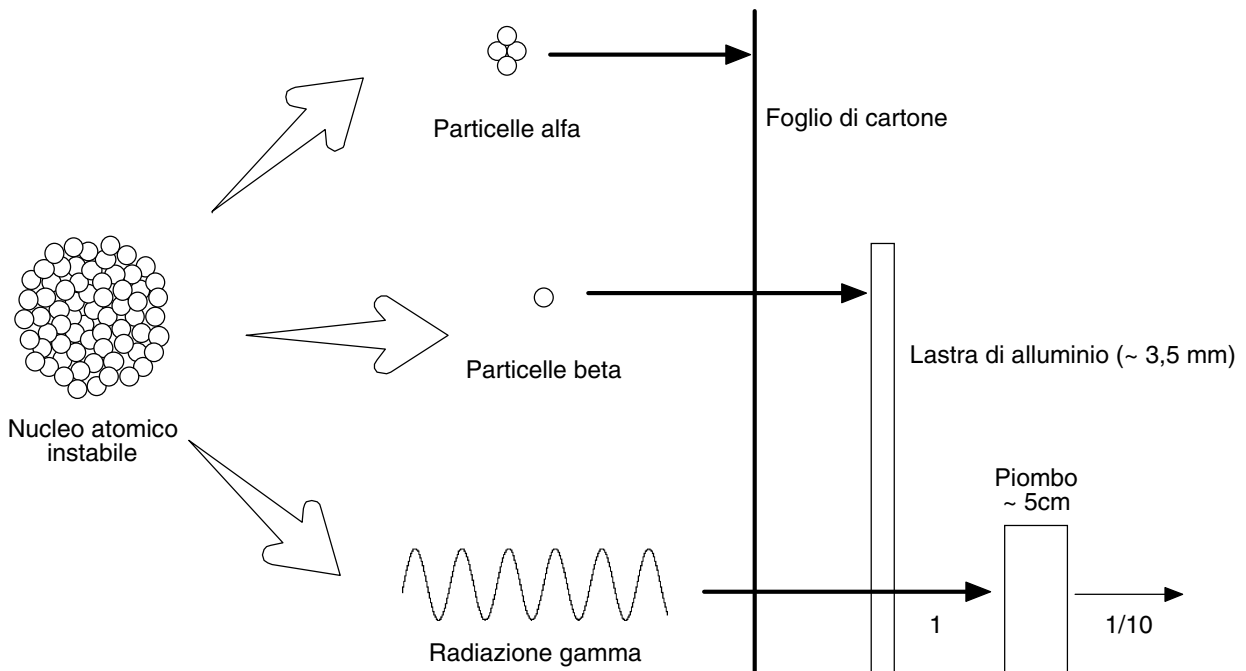
Osservazioni:

Le radiazioni sono schermate solo in parte da un singolo foglio di carta: la maggior parte di esse lo attraversa.

Lo studio della diminuzione della frequenza di conteggio dopo l'attraversamento di diversi strati di materia, porta a distinguere le *diverse componenti* della radiazione.

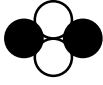


Il calo di conteggio con l'impiego di uno-due fogli può essere spiegato con il fatto che viene trattenuta una componente facilmente assorbibile: i raggi alfa. Impiegando più fogli di carta, viene assorbita un'altra componente con potere di assorbimento maggiore: i raggi beta. Le radiazioni, che anche con un numero maggiore di fogli sono ridotte solo in piccola parte, formano la terza componente: i raggi gamma.

Dalla curva di assorbimento così ottenuta non si può tuttavia dedurre in modo sicuro di quale parte di radiazione si tratta. Con una mescolanza di radiazioni dovute a 3 decadimenti beta con energie molto differenti si potrebbe, per esempio, ricavare una curva di assorbimento molto simile!



Durante i processi di decadimento radioattivo viene emessa energia sotto forma di particelle di tipo α o β , ed inoltre, spesso, di radiazioni di tipo γ .

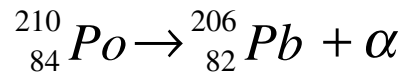
Caratteristiche delle radiazioni atomiche*

Forme di radiazioni	Proprietà	Massa	Velocità	Portata nell'aria	Penetrazione	Caratteristiche Elettriche
Particelle alfa  α	Sono formate da un nucleo del gas elio: 2 protoni e 2 neutroni.	Relativamente elevata (circa 7'300 volte quella di un elettrone)	da 15'000 a 21'000 km/s	5 - 12 cm	Debole. Sono per esempio assorbite da uno schermo di cartone.	Portano una doppia carica positiva (2 protoni).
Particelle beta  β	Elettroni molto rapidi.	molto piccola ($0,91 \times 10^{-27}$ g)	Fino a 297'000 km/s	circa 100 cm	Maggiore delle particelle α . Sono assorbite da 3,5 mm di alluminio.	Portano una carica negativa (1 elettrone).
Radiazioni gamma  γ	Non possiedono carica elettrica. Sono onde elettromagnetiche ad alta energia.	-	300'000 km/s (velocità della luce)	km	Molto grande	Nessuna carica. Lunghezza d'onda tra i 400 pm e i 70 fm.

* Tratto da M. Volkmer, Radioaktivität im Schulversuch, Leybold-Heraeus GmbH, Köln 1980

3.3. Energia

Abbiamo detto in precedenza che durante il processo di decadimento nucleare viene liberata energia sotto forma di radiazioni. Ma *quanta* energia? Consideriamo la seguente equazione che descrive il decadimento radioattivo del Polonio 210 (non lasciatevi distrarre dai numeri riportati)³



Questa equazione ci dice che l'atomo di Polonio decade trasformandosi in un atomo di Piombo ed emettendo energia sotto forma di una particella che i fisici chiamano alfa.

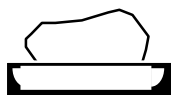
Nel caso specifico è possibile calcolare che per ogni atomo di Polonio che decade, vengono liberati $8,65 \times 10^{-13}$ Joule. Per capire cosa ciò significa, consideriamo il seguente esempio.

2g di Polonio contengono circa $5,735 \times 10^{21}$ Atomi di Polonio (questo è numero enorme che risulta difficile per noi da immaginare. Se potessimo contare 1'000 atomi al secondo impiegheremmo ben 181 miliardi di anni per contarli tutti!!! Detto per inciso l'età della terra è stimata a 4,5 miliardi di anni...). Quando tutti questi atomi saranno decaduti secondo l'equazione proposta, si sarà liberata un'energia pari a ben $4,96 \times 10^9$ Joule!

Ora per rendere l'idea di che cosa ciò significhi, considerate il seguente paragone:

Per preparare una tazza di tè ho bisogno di circa 70 kJ (70×10^3 J). Ciò significa che con 2 g di Polonio potrei prepararmi qualche cosa come:

$4,96 \times 10^9$ J / 70×10^3 J \approx 71'000 tazze di tè. **Ossia potrei bere per i prossimi 194 anni una tazza di tè al giorno!!!!**



2 grammi di Polonio-210

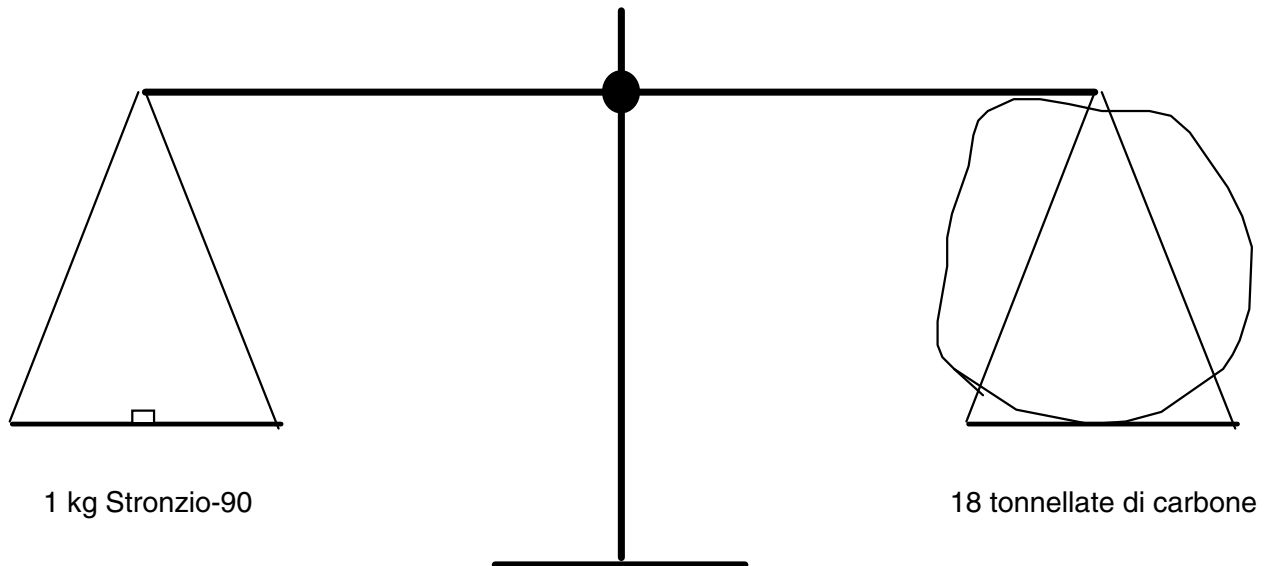


71'000 tazze di tè

³I numeri scritti accanto al simbolo corrispondente all'atomo in questione indicano il numero di protoni e neutroni presenti nel nucleo. Nel caso in questione il nucleo dell'atomo di Polonio è composto da 84 protoni e da $210 - 84 = 126$ neutroni.

Un altro esempio.

Durante il decadimento di **1 kg di Stronzio 90** (Sr 90) vengono liberati $582,7 \times 10^9$ J. Tanto per fare un paragone la combustione di 1 kg di carbone produce 32×10^6 J. Quindi possiamo dire che il decadimento di 1 kg di Sr 90 produce circa 18'210 volte più energia della combustione di 1 kg di carbone o se preferite per produrre la stessa quantità di energia liberata dal decadimento di 1 kg di Sr 90 ci vogliono **18 tonnellate di carbone!!!**



Come vedete le quantità di energia coinvolte sono enormi !!!!

Sebbene le modalità cambino da atomo radioattivo ad atomo radioattivo, in linea di massima le considerazioni esposte valgono per tutte le reazioni di decadimento nucleare.

Tabella con esempi di energia liberata durante il decadimento di alcuni atomi radioattivi.

Decadimento radioattivo	Energia liberata Per atomo [J]	Tazze di tè per grammo [£]
Radio 226	$7,80 \times 10^{-13}$	29'700
Uranio 238	$6,47 \times 10^{-13}$	23'400
Iodio 131	$1,55 \times 10^{-13}$	10'200
Polonio 210	$8,6 \times 10^{-13}$	35'500

[£] Sulla base di 70 kJ per tazza.



Durante i processi di decadimento radioattivo vengono liberate *enormi* quantità di energia.

3.4. Tempo

Ma *per quanto tempo* del materiale radioattivo rimane tale, o se preferite: quanto tempo impiegano, ad esempio, 8 g di Polonio a trasformarsi in Piombo secondo l'equazione sopra proposta?

Studi approfonditi su questo argomento hanno fornito delle risposte chiare in merito che cercheremo di illustrare con il seguente esempio.

Supponiamo di avere 8 g di Polonio 210. Vediamo cosa capita a questo campione nel tempo:

		Disintegrazioni al secondo	Energia prodotta al secondo
Tempo 0	8g di Polonio-210	$1'305 \times 10^{12}$	1'152 Watt = 1 min per tazza
	↓ Tempo di dimezzamento: 138,5 giorni		
Dopo 138,5 giorni	4g	$652,5 \times 10^{12}$	576 Watt = 2 min per tazza
	↓ Tempo di dimezzamento: 138,5 giorni		
Dopo 277 giorni	2g	$326,25 \times 10^{12}$	288 Watt = 4 min per tazza
	↓ Tempo di dimezzamento: 138,5 giorni		
Dopo 415,5 giorni	1g	$163,125 \times 10^{12}$	144 Watt = 8 min per tazza

Nota: Per preparare una tazza di tè occorrono circa 70 kJ. 1'152 Watt equivalgono a 1'152 J liberati ogni secondo. Ciò significa che con una potenza di 1'152 Watt impiego circa 1 minuto (60 secondi) per preparare una tazza di tè.

Come vedete maggiore la quantità del materiale radioattivo e maggiore la sua attività. Inoltre questo materiale mantiene la sua capacità di emettere radiazioni per un tempo relativamente lungo. Va comunque detto che il tempo impiegato da un elemento radioattivo a decadere completamente è caratteristica peculiare dell'elemento in questione.

Generalmente ad ogni elemento radioattivo viene associato un tempo di dimezzamento.

Questo indica in quanto tempo la metà degli atomi presenti sarà decaduta. Tale periodo può variare da alcuni secondi a parecchi milioni di anni. Le conoscenze tecnologiche di cui disponiamo attualmente non sono ancora in grado di accelerare questo processo di decadimento, anche se all'orizzonte si stanno delineando delle possibilità interessanti.

Alcuni esempi:

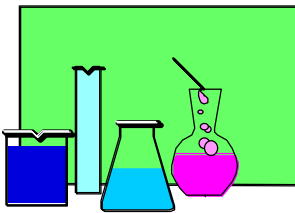
Atomo Radioattivo	Tempo di dimezzamento $T_{1/2}$	Attività specifica disintegrazioni $s^{-1} g^{-1}$
Radio 226	1'600 anni	$3,7 \times 10^7$
Uranio 238	$4,47 \times 10^9$ anni	$1,3 \times 10^4$
Plutonio 239	$2,41 \times 10^4$ anni	$2,3 \times 10^9$
Iodio 131	8,04 giorni	$4,6 \times 10^{15}$
Stronzio 90	29 anni	$5,1 \times 10^{12}$
Cesio 137	30,2 anni	$3,2 \times 10^{12}$

Si noti che più il tempo di dimezzamento è breve e più l'attività specifica è elevata. Sapresti dire perché?



Un materiale radioattivo rimane tale per tempi che possono variare da alcuni millesimi di secondo a parecchi miliardi di anni.

Una semplice regola: Dopo un periodo di tempo pari a **10** volte il tempo di dimezzamento ($T_{1/2}$), la radioattività (decadimenti al secondo) diminuisce a circa **1/1'000** del valore iniziale.



Un semplice esperimento ti permetterà di familiarizzare con il concetto di tempo di dimezzamento. A tale scopo ci serviremo di una situazione simulata.

MATERIALE: Cento dischetti colorati di nero su di un lato, un barattolo con un coperchio di plastica.

PROCEDIMENTO: Metti i dischetti in un barattolo e chiudilo con un coperchio. Agitalo, aprilo e rovescia sul tavolo i dischetti. Annota quindi in un'apposita tabella il numero dei dischetti con il lato bianco rivolto verso l'alto e separali dagli altri. Quindi metti gli altri dischetti nel barattolo e ripeti le precedenti operazioni fino ad esaurimento dei dischetti. Ripeti l'intera operazione per due volte.

Numero della prova	Numero di dischetti bianchi
0	
1	
2	
...	

COMPITI:

- 1 Costruisci un grafico con i dati raccolti, riportando sull'asse delle ascisse il numero delle prove e sull'asse delle ordinate il numero dei dischetti bianchi rilevato per ogni prova.
- 2 Descrivi l'andamento del grafico.
- 3 Considera i dischetti come degli atomi di un elemento radioattivo e ,tra di essi, i dischetti neri come gli atomi che hanno subito un processo di decadimento radioattivo. Quante prove sono necessarie perché il processo di dimezzamento fosse concluso? Se a ogni prova corrispondesse un periodo di tempo pari ad un'ora, a quanto ammonta il periodo di dimezzamento dell'ipotetico elemento?

Esso presenta un nucleo più o meno stabile del radio-226 (periodo di dimezzamento = 1'600 anni)? e del polonio-214 (periodo di dimezzamento = 0,001 secondi)?

A questo punto, prima di procedere a porre ordine tra le nozioni apprese, è forse opportuno, a scanso di equivoci, sottolineare il seguente aspetto. Noi *non sappiamo quando un dato atomo radioattivo decadrà* (emettendo radiazioni e trasformandosi in un altro atomo). L'unica informazione che abbiamo è che *in media*, dopo un periodo di tempo, che noi chiamiamo tempo di dimezzamento ($T_{1/2}$) e che è caratteristico per ogni tipo di atomo radioattivo, la metà degli atomi originariamente presenti sarà decaduta (non ci è dato però di sapere *quali* atomi)⁴.



Mettiamo in ordine quanto imparato fino ad ora

- Alcuni atomi, che noi definiamo radioattivi, sono in grado, senza alcun influsso esterno, di trasformarsi in altri atomi emettendo delle radiazioni che noi chiamiamo radioattività.
- Durante il processo di decadimento nucleare vengono liberate enormi quantità di energia.
- Un materiale radioattivo rimane tale per tempi che possono variare da alcuni millesimi di secondo a parecchi miliardi di anni.
- Più materiale radioattivo è presente in un campione e maggiore è la sua attività.

Piccolo Glossario

Attività specifica Numero di disintegrazioni che si verificano in 1 grammo di sostanza radioattiva ogni secondo. Ogni elemento radioattivo ha un'attività specifica propria.

⁴In tale contesto può essere utile ricordare che, ad esempio, in 1 grammo di Iodio-131 ci sono circa 5×10^{21} atomi! Il tempo di dimezzamento può essere visto come un indicatore della probabilità che un atomo radioattivo ha di decadere: maggiore $T_{1/2}$ e minore la probabilità.

Contatore Geiger Apparecchio che serve per misurare la radioattività. Il suo nome deriva dallo scienziato che lo ideò, tale signor Geiger.

Decadimento nucleare Processo per cui i nuclei di alcune sostanze si disintegrano spontaneamente.

Radioattività Proprietà dei nuclei di alcune sostanze di disintegrarsi spontaneamente, emettendo radiazioni particolarmente intense e trasformandosi in nuclei di altri elementi.

Tempo di dimezzamento Periodo di tempo, generalmente espresso in secondi, giorni o anni, necessario affinché la metà degli atomi radioattivi inizialmente presenti sia decaduta. Ogni atomo radioattivo ha un tempo di dimezzamento proprio.



Ed ora qualche domanda

Domanda 1: *Il tempo di dimezzamento del Radio 226 è di 1'600 anni. Se in una scatola di carta ho 1 kg di tale materiale, dopo 1'600 anni quanto Radio 226 sarà rimasto? E dopo 3'200 anni? Secondo te è da ritenersi saggio conservare tale materiale nella scatola di carta?*

Domanda 2: *Durante la reazione di decadimento dell'Uranio 238 per ogni atomo che decade vengono liberati $6,47 \times 10^{-13}$ J. Quanta energia viene prodotta dal decadimento di 1 kg di Uranio 238 sapendo che in 1 kg di tale materiale vi sono $2,53 \times 10^{24}$ atomi?*

Domanda 3: *Indica alcune differenze tra la radiazione alfa, beta e gamma. Da quale è più facile proteggersi? Perché?*

Domanda 4: *Servendoti dei dati riportati nella tabella a pagina 18 prova a costruire un diagramma simile a quello riportato a pagina 17 per il decadimento di 16 g di Plutonio 239.*

Domanda 5: *Commenta la seguente frase: "La radiazione emessa da un radioisotopo è tanto più intensa, tanto maggiore la sua concentrazione e più breve il suo periodo di dimezzamento."*

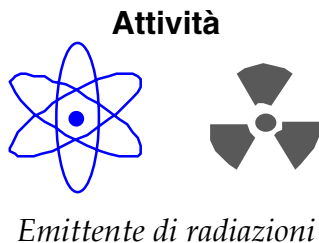
Domanda 6: *Commenta la seguente frase: "In Natura oggi sono presenti solo materiali radioattivi con tempi di dimezzamento molto lunghi."*

4. Effetti della radioattività sull'essere umano

Come più volte sottolineato nei capitoli precedenti, noi non siamo in grado di percepire, per mezzo dei nostri sensi, la radioattività: non la vediamo, non ne sentiamo il rumore, non ne assaporiamo né il gusto né l'odore e quantomeno riusciamo a toccarla con mano. Abbiamo anche però visto che il fenomeno delle emissioni radioattive è legato all'instabilità di alcuni nuclei atomici ed associato all'emissione di particelle alfa, beta e gamma dotate di alta energia. Nel presente capitolo vogliamo occuparci del modo in cui queste radiazioni agiscono sugli esseri viventi ed in particolare sull'uomo e di quali possono essere gli effetti di una prolungata esposizione a fonti radioattive. Prima di addentrarci in discussioni di questo tipo è però opportuno definire brevemente quali sono le unità di misura attraverso le quali si caratterizza la radioattività.

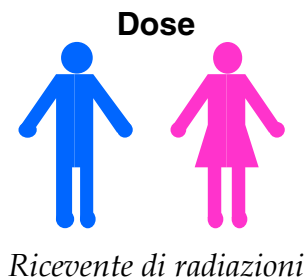
4.1. Le unità di misura della radioattività

Bisogna distinguere tra le seguenti due grandezze: *l'attività* (spesso anche indicata semplicemente come radioattività) e *la dose*. La prima si riferisce alle radiazioni emesse dagli atomi radioattivi e non ci dà alcuna indicazione circa le ripercussioni sugli esseri viventi, mentre la seconda, appunto, tende a quantificare l'effetto delle radiazioni sugli uomini. Un semplice paragone con una fontana servirà ad illustrare i due concetti.



Quanti atomi decadono ogni secondo.

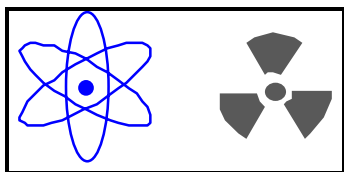
Litri di acqua che fuoriescono ogni minuto da una fontana.



Quantità di radiazioni che un uomo riceve.

Quanta acqua colpisce un uomo che si trova nelle vicinanze della fontana.

4.1.1. Attività



Come già accennato in precedenza l'attività⁵ di un elemento radioattivo è data dal numero di atomi che decadono ogni secondo. L'unità di misura dell'attività è il Becquerel:

$$1 \text{ Becquerel} = 1 \text{ Bq} = 1 \text{ decadimento / secondo} = \text{s}^{-1}$$

In passato si è usato anche il Curie (Ci) come unità di misura (in onore di Marie Curie 1867 - 1934, vedi capitolo 1). L'unità di misura Curie ha dunque origini storiche e corrisponde al numero di decadimenti che si verificano in 1 g di Radio 226 ogni secondo.

$$1 \text{ Curie} = 1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Alcuni esempi:

Emittente di radiazioni	Attività in Bq	Attività in Ci
Materiale radioattivo usato in classe (Radio 226)	$3,7 \times 10^3$	$0,1 \times 10^{-6}$
Potassio 40 presente nel corpo umano	da $3,7 \times 10^3$ a $7,4 \times 10^3$	da $0,1 \times 10^{-6}$ a $0,2 \times 10^{-6}$
1 grammo di Radio 226 puro	$3,7 \times 10^{10}$	1
1 grammo di Cobalto 60	$4,2 \times 10^{13}$	$1,1 \times 10^3$
Tutto il carbonio 14 presente in Natura (stima)	$8,5 \times 10^{18}$	$2,3 \times 10^8$
Prodotti radioattivi di rifiuto accumulati in un reattore nucleare	fino a $3,7 \times 10^{20}$	fino a 10^{10}

⁵Si può facilmente dimostrare che l'attività (A) è collegata con il tempo di dimezzamento ($T_{1/2}$) tramite la seguente formula:

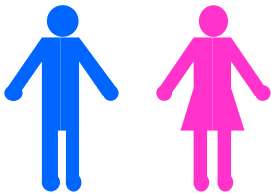
$$A = 0.693 \frac{N}{T_{1/2}}$$

Dove N rappresenta il numero di atomi radioattivi presenti. Dalla formula si può vedere come l'attività sia direttamente proporzionale al numero di particelle (N) ed inversamente proporzionale al tempo di dimezzamento ($T_{1/2}$).

Nel caso in cui la fonte radioattiva non sia puntiforme ma ridistribuita nello spazio, l'attività viene riferita ad un'unità di massa o di volume.

Ad esempio la radioattività del sangue umano è di circa 118 Bq (3,2 nCi) per litro mentre il valore massimo di radioattività tollerato nel latte in Svizzera ammonta a 3'700 Bq per litro (100 nCi).

4.1.2. Dose



Come accennato in precedenza, la dose quantifica l'effetto della radioattività sull'essere umano. Prova a fare un elenco dei fattori che secondo te possono entrare in linea di conto nel calcolo di questa quantità. Aiutati, se necessario, con l'analogia della fontana (vedi pagina 22).

Generalmente si distingue tra Dose Assorbita e Dose Equivalente. Un semplice paragone con lo sport del tiro a segno, come illustrato nella seguente figura, dovrebbe permetterti di apprezzare la differenza tra questi due concetti.

Dose Assorbita: Quantità di energia ceduta alla materia dalle radiazioni. Viene misurata in Gray (Gy).

$$1 \text{ Gray} = 1 \text{ Gy} = \text{Energia assorbita} / \text{massa} = 1 \text{ J/kg}$$

In passato, per indicare la dose assorbita, si è usato anche il rad (Radiation Absorbed Dose):

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

Dose Equivalente: Prodotto risultante dalla dose assorbita in Gray moltiplicata per un Fattore di Qualità (QF)

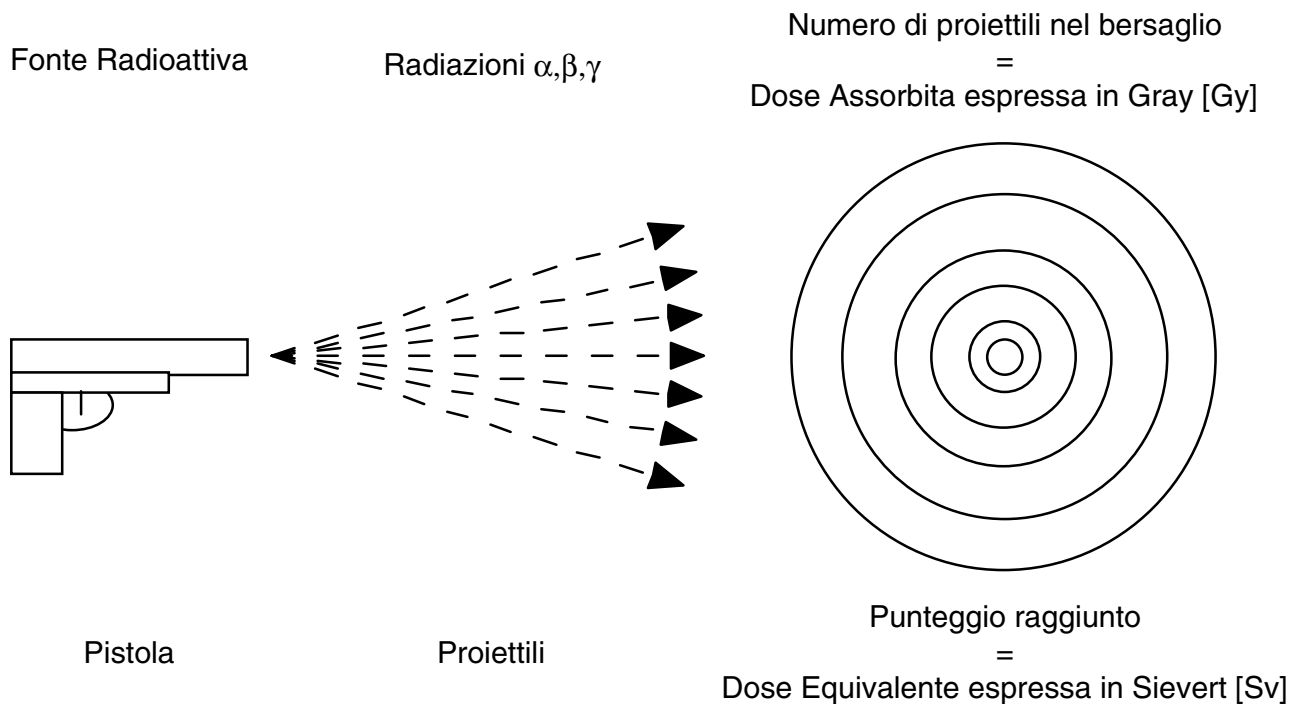
$$1 \text{ Sievert} = 1 \text{ Sv} = \text{QF} \times \text{Gray} = 1 \text{ J/kg}$$

Il Fattore di Qualità (QF) non ha nessuna unità di misura e permette di determinare la dose equivalente tenendo conto del differente impatto delle radiazioni α , β e γ sui diversi organi. Maggiore il suo valore e maggiore l'impatto biologico della radiazione in questione. Nella tabella sono riportati i fattori di qualità per le radiazioni α , β e γ . Come si vede le radiazioni alfa sono di gran lunga le più pericolose per il nostro organismo, anche se per fortuna è relativamente semplice proteggersi (Come?, Perché?).

Tipo di radiazione	Fattore di qualità
Raggi gamma	1
Radiazioni beta	1
Radiazioni alfa	da 10 a 20

In passato, per indicare la dose equivalente, si è usato anche il rem (Radiation Equivalent Men):

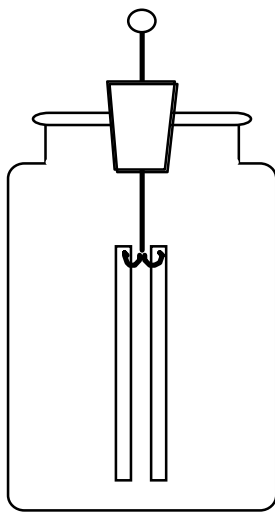
$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$



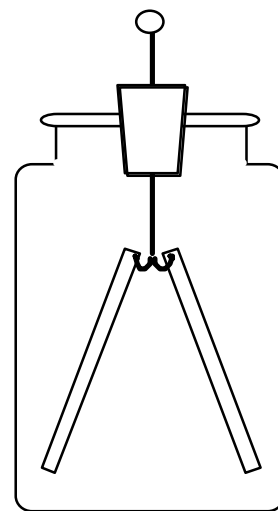
Nota: Dati in Sv o in rem non hanno di per sé alcun significato fisico oggettivo. Sono solo delle indicazioni tramite le quali é possibile *stimare* le conseguenze sulla salute di un'esposizione a materiale radioattivo e *paragonare* i diversi tipi di esposizione.

4.2. Radiazioni ionizzanti

Ma che cosa provocano queste radiazioni nell'uomo? É giunto il momento di proporre finalmente una risposta a questo quesito. A tale scopo ci serviremo di un elettroscopio e di un semplice esperimento illustrato nella figura qui sotto.



Scaricato



Caricato mediante una bacchetta strofinata

Misura quanto tempo impiega l'elettroscopio a scaricarsi in modo naturale. Riprova poi l'esperimento avvicinando la sorgente radioattiva* .

OSSERVAZIONI e COMMENTO:



Le radiazioni α, β, γ agiscono sulla materia producendo degli ioni e per questo vengono anche chiamate radiazioni ionizzanti.

* Riprenderemo questa esperienza quando tratteremo il tema dell'elettricit .

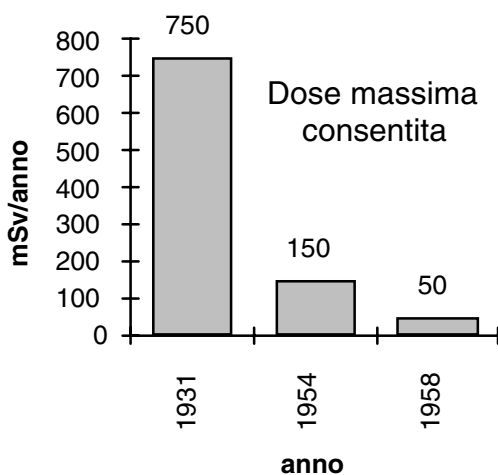
4.3. Dosi normali e dosi pericolose

Ma quando e in che misura una dose è pericolosa per la nostra salute? Consideriamo a tale proposito la seguente tabella⁶.

Dose		Effetto
10 Sv	1'000 rem	Letale nel 100 % dei casi in 3-4 giorni
7 Sv	700 rem	Letale nel 100 % dei casi in 30 giorni
5 Sv	500 rem	Dose generalmente letale, il 50 % dei colpiti muore entro un mese
1,8 Sv	180 rem	Primi casi di morte
1 Sv	100 rem	Malattia acuta, la cosiddetta sindrome da radiazioni: malessere, nausea, vomito, caduta dei capelli, in generale ristabilimento dopo alcune settimane
250 mSv	25 rem	Modificazioni del tessuto sanguigno appena percettibili
100 mSv	10 rem	Assenza di effetti dimostrabili
50 mSv	5 rem	Dose massima annua ammissibile per le persone esposte professionalmente alle radiazioni (centrali nucleari, ospedali, laboratori di ricerca)
<i>3,10 mSv</i>	<i>310 mrem</i>	<i>Dose media annua delle radiazioni naturali in Svizzera</i>
0,1 mSv	10 mrem	Dose annua massima ammessa da un deposito finale di scorie radioattive in caso di perturbazioni
0,01 mSv	1 mrem	3 ore di volo a 10 km di quota. Soglia legale per classificare una sostanza come radioattiva o meno.
10 µSv	1 mrem	Dose annua massima permessa nelle vicinanze di una centrale nucleare in esercizio

⁶Questi dati sono stati tratti da R. Spiess, Strahlenbiologie - Schule für Strahlenschutz, ESS 20.009.1181, Würenlingen.

Per molto tempo si credette che le radiazioni non avessero effetti nocivi sulla salute. Un rendiconto nel "*British Medical Journal*" del 1896 descrive l'arrossamento della pelle irradiata e gli occhi irritati nei pionieri dell'uso dei raggi X⁷. Sempre in Inghilterra si ebbe nel 1900 la prima vittima dell'eccessiva esposizione alla radiazione: nei 30 anni successivi si registrarono altri 60 decessi. Uno studio sulla leucemia tra i radiologi americani mise in evidenza che fra essi la frequenza di malattie mortali era dieci volte superiore a quella degli altri medici e sia Marie Curie, sia sua figlia Irene (anch'essa ricevette il premio Nobel per la Chimica nel 1935 per la scoperta della radioattività artificiale) morirono di leucemia.⁸



Nel 1928 la Commissione Internazionale per la Protezione Radiologica (ICPR) emise i limiti delle dosi raccomandate per le persone esposte professionalmente a radiazioni; essi sono stati fortemente ridotti nell'arco degli ultimi sessant'anni (vedi grafico). L'intento attuale è quello di portare tale limite a 5 mSv/anno. Le conoscenze e le esperienze accumulate negli ultimi anni ci hanno fatto comprendere che ogni radiazione è potenzialmente pericolosa per il nostro organismo ed è per questo motivo che si

consiglia di evitare qualsiasi inutile esposizioni a fonti di radiazioni ionizzanti.



Ogni dose superiore a quella naturale ($\approx 3,1$ mSv/anno \approx tra 40 e 300 nSv/h) è da considerarsi potenzialmente pericolosa e dannosa per il nostro organismo.

È importante insistere ancora una volta sul fatto che la dose assorbita da un individuo deve essere sempre messa in relazione al tempo di esposizione per poterne valutare gli effetti. Riprendendo infatti l'analogia con la fontana, esposta a pagina 22, dovrebbe essere evidente che non

⁷I raggi X hanno proprietà paragonabili a quelle dei raggi gamma.

⁸ Un bell'articolo che illustra alcuni problemi storici connessi alla radioattività e all'uso di sostanze radioattive si trova in: S. Boudia, *Le Radium, pour le meilleur et pour le pire*, La Recherche vol 315 p 76 1998

basta dire di aver ricevuto 10 litri di acqua per valutare l'effetto di questa esposizione. Devo anche specificare in quanto tempo ho ricevuto l'acqua: se in 1 secondo é probabile che mi sarò bagnato completamente; se in un anno allora forse sarò soltanto leggermente umido!

Nella seguente tabella, a titolo comparativo, sono riportate le dosi equivalenti dovute all'ingerimento di differenti quantità di radionuclidi⁹.

Radioisotopo	Massa [g]	Attività [Bq]	Dose [mSv]
Trizio	$2,8 \times 10^{-12}$	1'000	0,000 02
Carbonio-14	$5,1 \times 10^{-13}$	1'000	0,000 6
Stronzio-90	$9,5 \times 10^{-11}$	1'000	0,03
Cesio-137	$3,1 \times 10^{-10}$	1'000	0,012
Plutonio-239	$2,1 \times 10^{-10}$	1'000	da 0,014 a 100*

Esercizio: *Riferendoti ai dati riportati sopra e considerando la tabella a pagina 27 prova a calcolare quanti grammi dei diversi radioisotopi, se ingeriti, provocherebbero la morte in una persona nel giro di 3-4 giorni.*



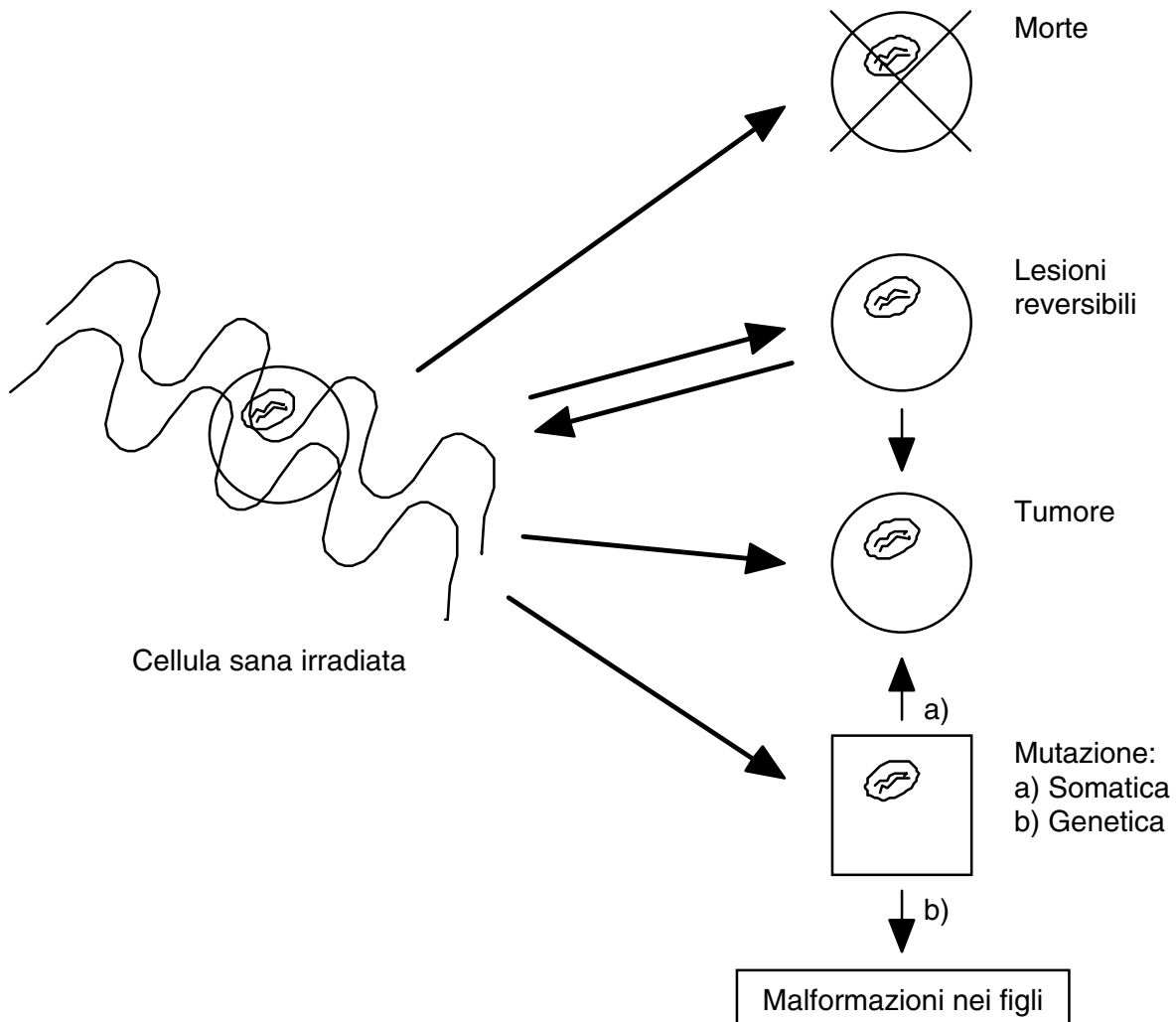
Il danno alla salute provocato da una sigaretta è comparabile ad una dose di 0,07 mSv. Un fumatore che consuma circa 10 sigarette al giorno subisce così in un anno un danno alla salute paragonabile ad una dose di _____ mSv. Confronta il risultato con la tabella a pagina 27.

⁹I dati sono tratti da D. Jäggi, Radioaktivität und Strahlenschutz, Bern 1990

* Dipende dalla forma chimica. All'inspirazione di 1'000 Bq corrisponde una dose di 100 mSv!!!!!!

4.4. Effetti delle radiazioni sulle cellule

Le conseguenze dell'irraggiamento di una cellula vivente, a dipendenza della dose, possono essere fondamentalmente le seguenti:



MORTE: La cellula non è più in grado di svolgere le sue funzioni e quindi muore. Di conseguenza morte dell'organo e dell'organismo.

LESIONI REVERSIBILI: Esistono particolari meccanismi cellulari in grado di riparare delle lesioni ai cromosomi.

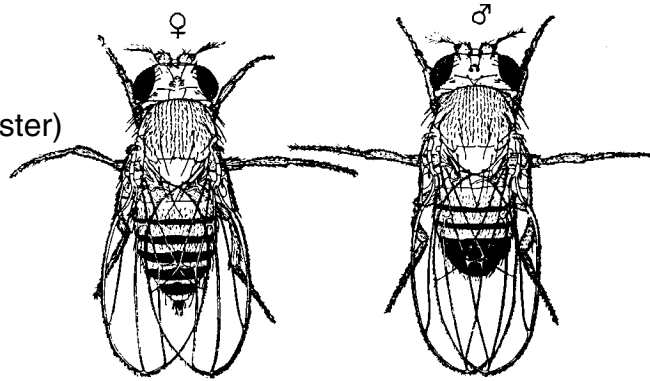
TUMORE: Induzione di tumori. Il sistema immunitario è però in grado spesso di eliminare le cellule cancerogene e di impedire così la formazione di tumori clinicamente importanti.

MUTAZIONE: Una mutazione in una cellula somatica può farla degenerare in cellula tumorale; una mutazione genetica (ad essere colpite in questo caso sono le cellule degli apparati genitali, gli embrioni o i feti) può, provocare delle malformazioni nei figli. A volte, anche se più raramente, le mutazioni possono avere dei risvolti positivi per l'individuo.

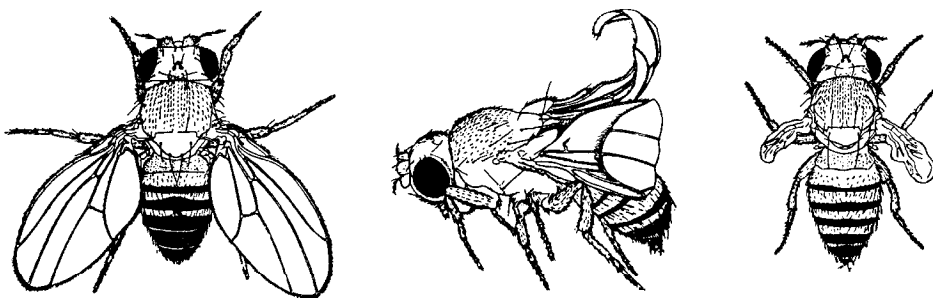
Domanda: *Saresti capace di intravedere un possibile meccanismo di come le radiazioni possono agire sugli apparati genitali dei genitori provocando malformazioni nei figli che nasceranno? (Pensa a come viene trasmessa l'informazione genetica a livello molecolare ed in particolare al codice genetico).*

Un paio di esempi...

Maschio e femmina
normali
(*Drosophila Melanogaster*)

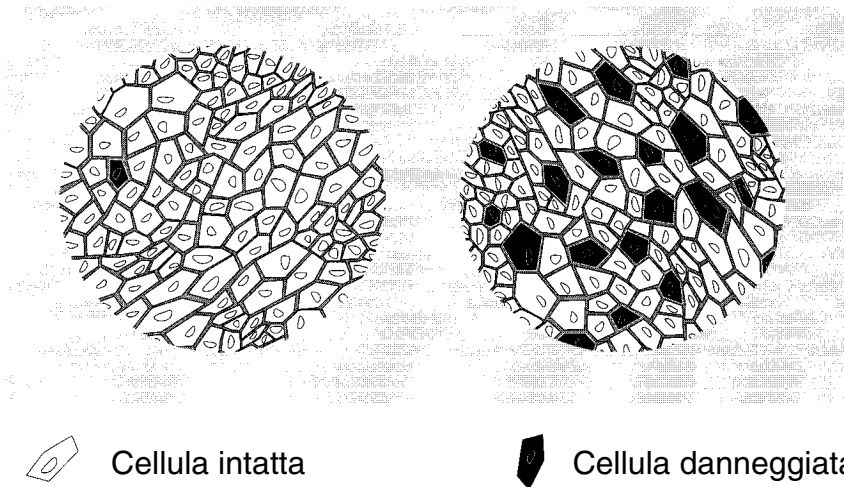


Mutazioni artificiali indotte



Esempi di mutazioni osservate nei figli di alcuni moscerini della frutta dopo che i genitori sono stati esposti a fonti radioattive (purtroppo non sono riuscito a trovare informazioni

circa la dose corrispondente). È opportuno segnalare che a volte le mutazioni possono portare anche dei considerevoli vantaggi per le generazioni future¹⁰!



Per una medesima Dose Assorbita (per esempio 2 Gy, vedi pagina 25) i raggi alfa (destra) provocano un danno biologico di circa 20 volte superiore rispetto ai raggi beta (sinistra).

Per gli appassionati:

Nel 1906 Bergonic e Tribondeau formularono una semplice regola che può aiutarci a ritenere l'effetto che le radiazioni ionizzanti provocano sulle cellule.

La sensibilità di una cellula (di un tessuto) per rapporto a radiazioni ionizzanti è direttamente proporzionale alla sua attività riproduttiva ed inversamente proporzionale alla sua differenziazione morfologica.

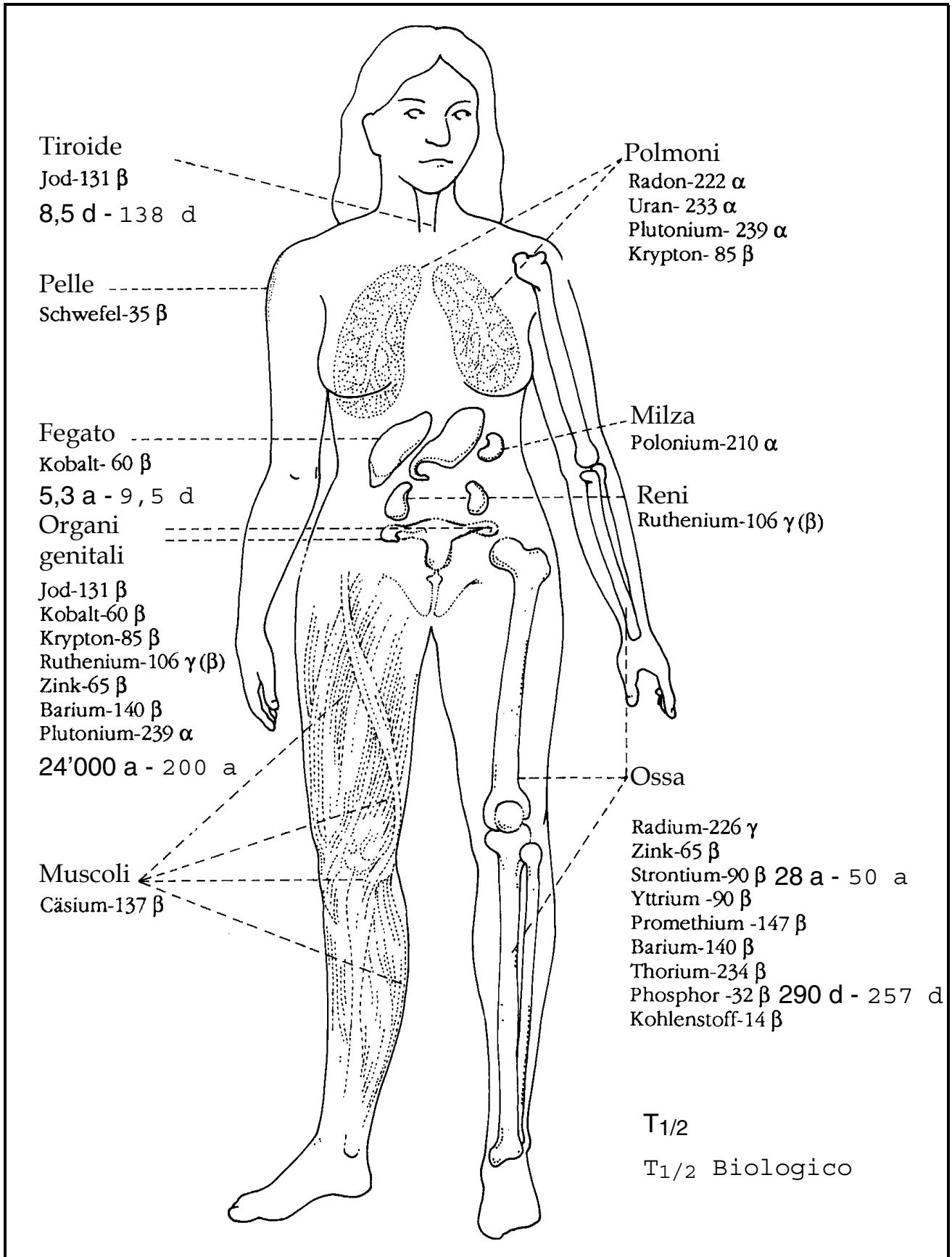
Ad esempio i globuli bianchi hanno un'alta attività riproduttiva e sono molto sensibili alle radiazioni. Le cellule nervose, d'altro canto, mostrano notevoli differenze morfologiche (sono di forma ed aspetto le une diverse dalle altre) ed anche una minore sensibilità per le radiazioni.

Come ogni regola che si rispetti anche questa ha però parecchie eccezioni!

La seguente figura mostra gli organi dove le diverse sostanze radioattive che noi possiamo ingerire tramite il cibo o inalare tramite la respirazione si accumulano nel nostro organismo. Per quanto tempo queste sostanze radioattive rimangono nel nostro corpo dipende da due fattori:

- Dal tempo di dimezzamento dell'elemento in questione.
- Dal tempo di dimezzamento biologico. Questo indica il tempo necessario affinché la metà della quantità iniziale di un sostanza, *in modo naturale*, sia stata espulsa dal nostro corpo (tramite il sudore, l'urina o le feci).

¹⁰Considerazioni di questo tipo stanno alla base delle teorie evoluzionistiche.



4.5. Aspetti statistici

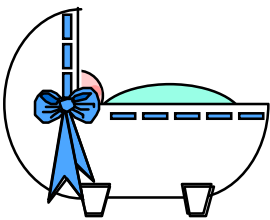
Oggi si sa che in genere la radioattività accorcia la vita delle persone. Si è potuto infatti accertare che le radiazioni ionizzanti sono in grado di generare negli organismi delle forme di cancro. Tuttavia non si è ancora riusciti a quantificare in modo esatto la relazione tra esposizione a radiazioni ed insorgere di cancro nell'organismo. In genere si parla di probabilità di contrarre un cancro in seguito ad una data esposizione a radiazioni. I seguenti esempi¹¹ dovrebbero chiarire il concetto.

- Se in un gruppo di 10'000 persone ognuna assorbisse una dose di 10 mSv (1'000 mrem) 1 di esse morirebbe di cancro o leucemia negli anni futuri in seguito a tale esposizione (si noti bene che non sappiamo chi morirà, è semplicemente un dato statistico).
- Se in un gruppo di 100'000 future madri e padri ognuno assorbisse una dose di 10 mSv (1'000 mrem), da queste madri nascerebbero in media 4 bambini handicappati (ancora una volta si noti che non sappiamo quale coppia darà alla luce dei bimbi anormali!).



Danni somatici o genetici possono essere prodotti anche da dosi piccolissime. La dose indica unicamente quale è la probabilità che ciò accada (maggiore la dose, maggiore la probabilità).

In generale la situazione è analoga a quella che si verifica nel gioco dei dadi. La probabilità di ottenere 6 in un lancio è di 1/6. Ciò significa che *in media* ottengo un 6 ogni 6 lanci. Questo tuttavia non mi garantisce che sicuramente in sei lanci otterrò almeno una volta sei, né mi dà alcuna indicazione di quando comparirà il 6!



È opportuno anche ricordare che l'effetto delle radiazioni dipende soprattutto dall'età degli individui che le ricevono. Particolarmente sensibili sono i neonati, i feti (le donne incinte) e ragazzi piccoli¹².

In ogni caso è bene ricordare e sottolineare che un cancro, per svilupparsi

¹¹Fonte: R. Spiess, Über die Auswirkung des Reaktorunfalles in Tschernobyl auf die Bevölkerung in der Schweiz, Würenlingen 1986

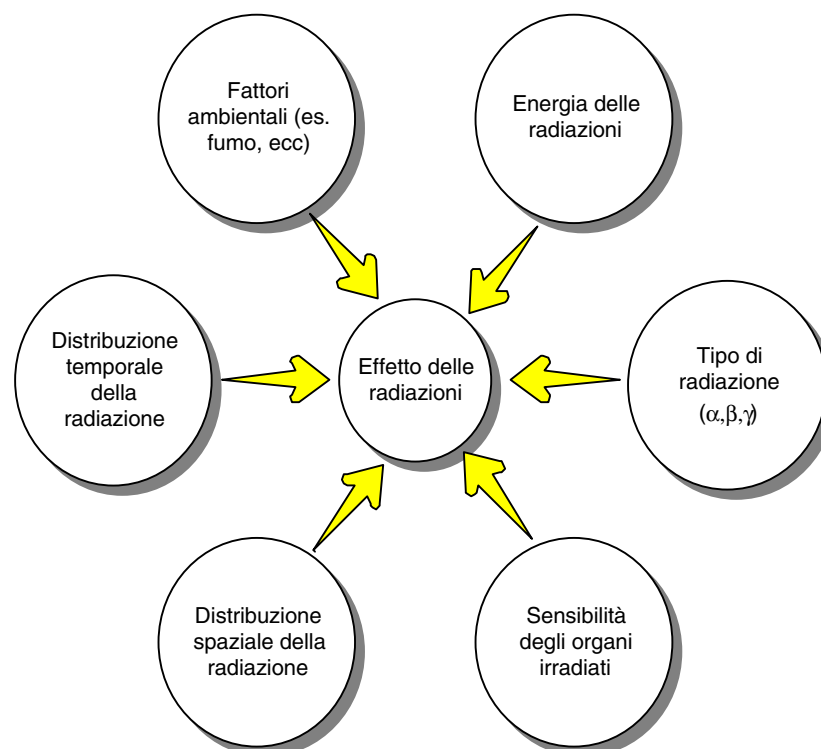
¹²Una semplice spiegazione a questo fatto può essere trovata nella regola di Bergonic e Tribondeau (p. 32). Infatti i bimbi piccoli mostrano alti tassi di crescita (le loro cellule "si riproducono molto in fretta").

nel nostro organismo, non abbisogna necessariamente di radiazioni. Vi possono essere molte altre cause (fumo, alimentazione, inquinamento atmosferico, e chi più ne ha, più ne metta) !!!



Mettiamo in ordine quanto imparato fino ad ora

- La radioattività viene caratterizzata in due modi differenti: *l'attività* (espressa in Becquerel) ci indica quante disintegrazioni si verificano in un secondo e *la dose* (espressa in Sievert) cerca di quantificare l'effetto delle radiazioni sugli esseri viventi.
- La radiazione agisce sulla materia generando degli ioni che a loro volta innescano delle reazioni chimiche. Queste possono uccidere le cellule o provocare delle mutazioni di tipo somatico (cancro) o genetico (malformazione nelle generazioni future).
- La dose assorbita da un individuo ci dà delle indicazioni circa la **PROBABILITÀ** che esso avrà di sviluppare dei tumori in un futuro più o meno immediato.
- Particolarmente sensibili alle radiazioni sono i feti, ed i bimbi piccoli in generale.





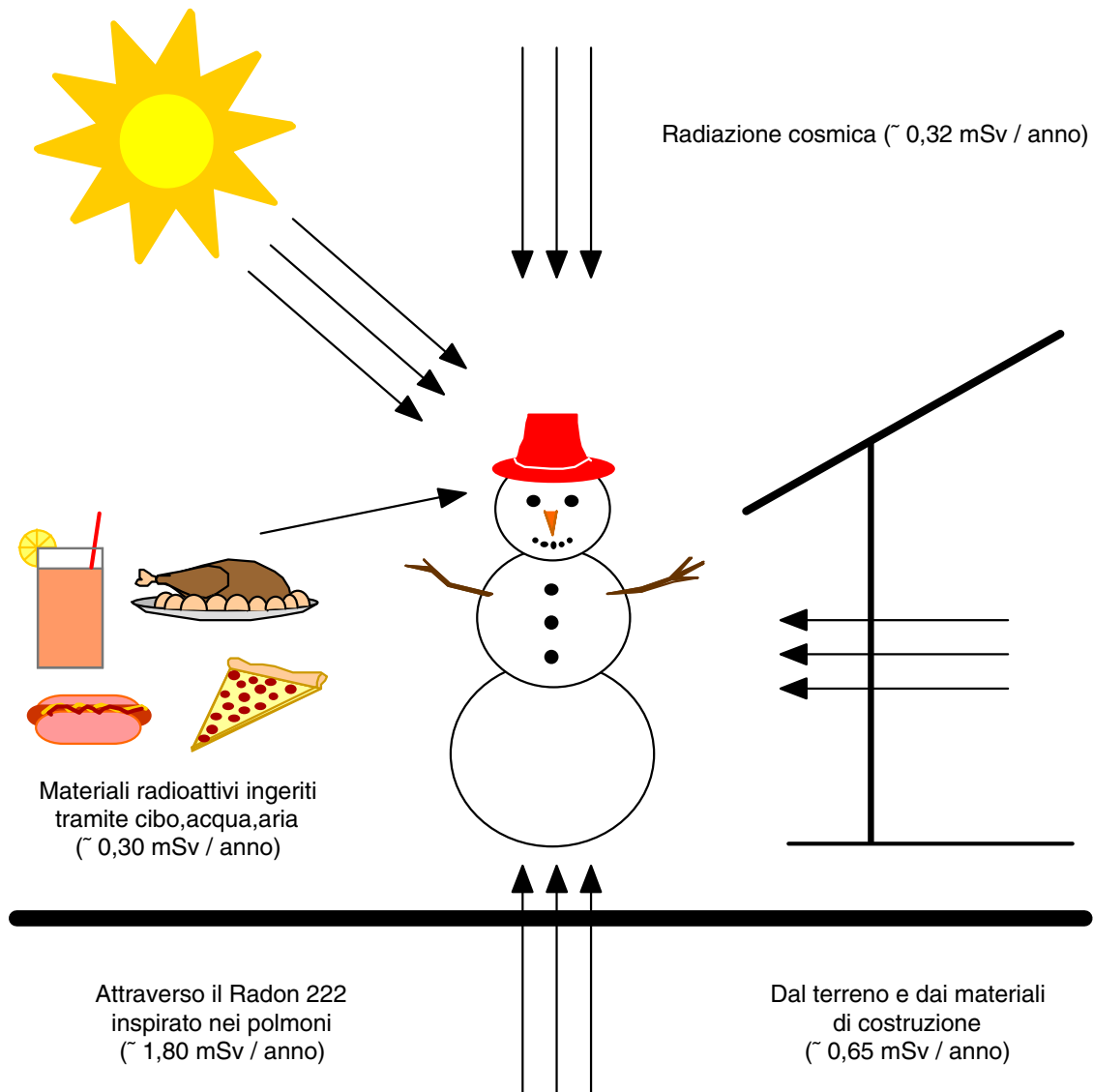
Ed ora qualche domanda

- Domanda 1:** *Che cosa significa che un litro di sangue ha un'attività di 118 Bq (3,2 nCi)?*
- Domanda 2:** *Che differenza c'è tra il tempo di dimezzamento ed il tempo di dimezzamento biologico?*
- Domanda 3:** *Che differenza c'è tra attività e dose?*
- Domanda 4:** *Da che cosa dipende l'effetto delle radiazioni ionizzanti sul nostro organismo? Cita e discuti alcuni aspetti.*
- Domanda 5:** *Commenta la seguente frase: "La radiotossicità di un radioisotopo dipende da:*
- Tipo di radiazione emessa durante il decadimento (α, β, γ) e l'energia associata
- Tempo di dimezzamento
- Tempo di dimezzamento biologico (cioè per quanto tempo questo elemento rimane nell'organismo)."
- Domanda 6:** *In base all'attività di una sostanza radioattiva si può prevederne l'effetto sull'uomo. Vero o falso? Perché?*
- Domanda 7:** *Il fisico e chimico tedesco Theophrastus Philipus Aureolus Bombastus von Hohenheim (1493-1541), al secolo Paracelsus, era solito affermare quanto segue: "Ogni cosa è veleno e nessuna cosa è senza veleno - dipende unicamente dalla dose!". Come situi questa dichiarazione per rapporto alla radioattività ed ai suoi effetti sulla salute?*
- Domanda 8:** *A quanto corrisponde la dose media annua di radiazioni naturali in Svizzera? A quanto corrisponde una dose letale?*
- Domanda 9:** *Perché lo Iodio-131 che si accumula generalmente nella tiroide è considerato estremamente pericoloso?*

5. Fonti Radioattive

5.1. Fonti Naturali

Nel capitolo 2 abbiamo visto che in Natura esiste una radioattività di fondo molto debole. È ora finalmente giunto il momento di chiederci da dove questa provenga e a che dose corrisponda. I seguenti schemi ci aiuteranno nella discussione.



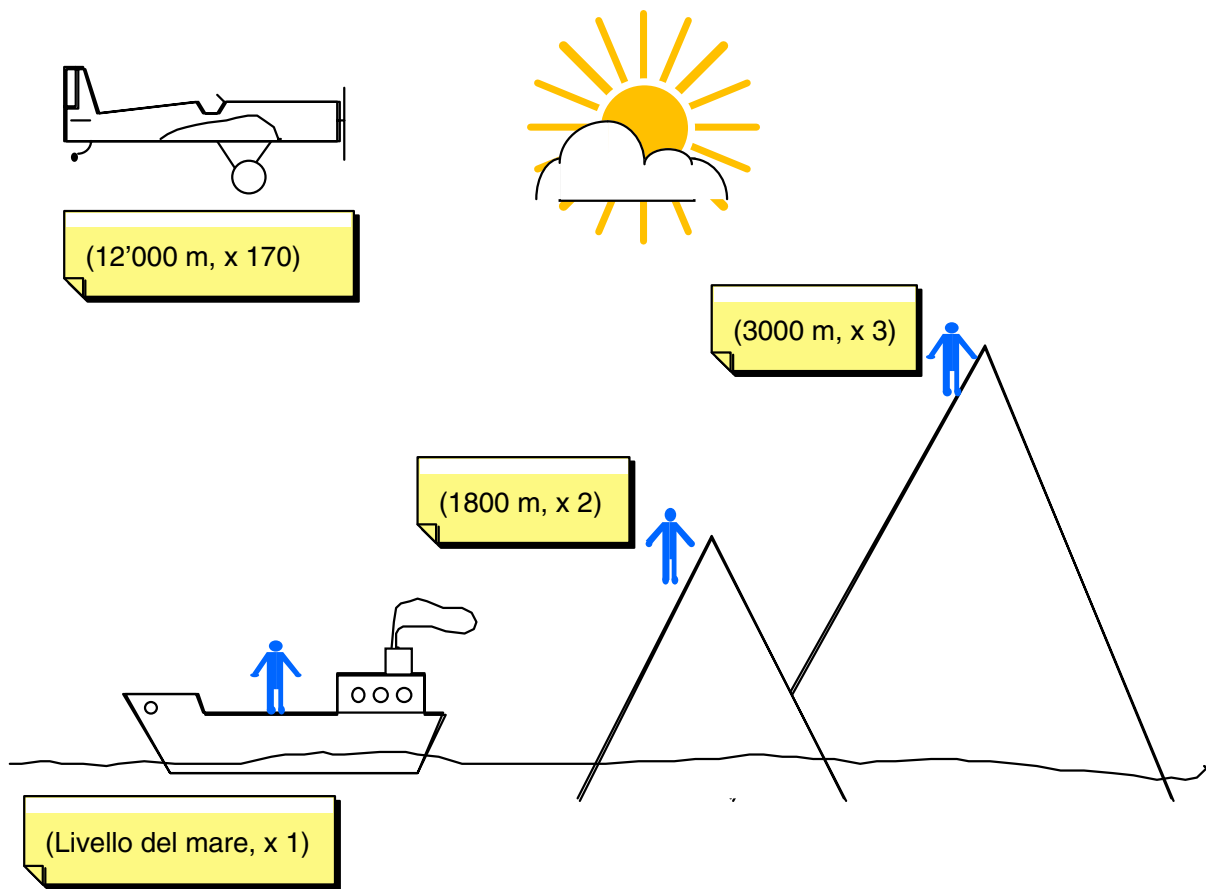
Dalla somma delle diverse componenti si può facilmente calcolare che la dose media annua dovuta a radiazioni naturali in Svizzera è di circa 3,10 mSv/anno.

È importante osservare che la radioattività naturale di fondo sul pianeta è molto variabile e dipende principalmente dalla qualità delle rocce (più o meno ricche di radionuclidi) e dall'altitudine (più si va in alto e maggiore risulta essere la radiazione cosmica).

Valori medi d'irradiazione naturale espressi in mSv/anno¹³:

Bienne	0,76	Bellinzona	1,59	Slesvig (DK)	0,3
Zurigo	1,19	Briga	1,76	Colorado (USA)	2
Ginevra	1,24	St. Moritz	1,84	Delta del Nilo (Egitto)	3 - 4
Glarona	1,29	Verscio	2,28	Kerala (India)	15 - 30

La nostra atmosfera riduce fortemente le radiazioni provenienti dal cosmo. Tanto per rendere l'idea il suo effetto schermante può essere paragonato a quello di una lastra di piombo dallo spessore di 1 metro¹⁴!



I livelli di radiazione cosmica aumentano rapidamente con l'altitudine¹⁵. A 3'000 m si ricevono tre volte più radiazioni per rapporto a chi si trova al livello del mare nello stesso

¹³Fonte: R. Spiess, Über die Auswirkung des Reaktorunfalles in Tschernobyl auf die Bevölkerung in der Schweiz, Würenlingen 1986

¹⁴P. Bunyard, La salute nell'era nucleare, De Agostini, Novara 1989

¹⁵Il livello di radiazione cosmica aumenta anche spostandosi dall'equatore ai poli (Burkard W., *Gefahr aus dem Kosmos?*, Radiologie Aktuell 1/93, pagina 14 e seguenti).

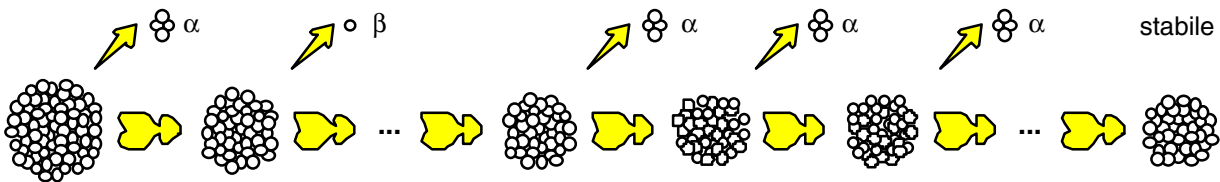
momento. Ad esempio durante un volo su un Boeing 747-400 dall'Europa all'America della durata di 8 ore ad un'altitudine di 10,5-11,7 km si riceve una dose di circa 0,05 - 0,065 mSv.

Domanda: *Come pensi che varierà il livello della radiazione cosmica immergendosi nel mare?*

Domanda: *È consigliabile, per donne incinte, intraprendere lunghi voli ad alta quota? Perché?*

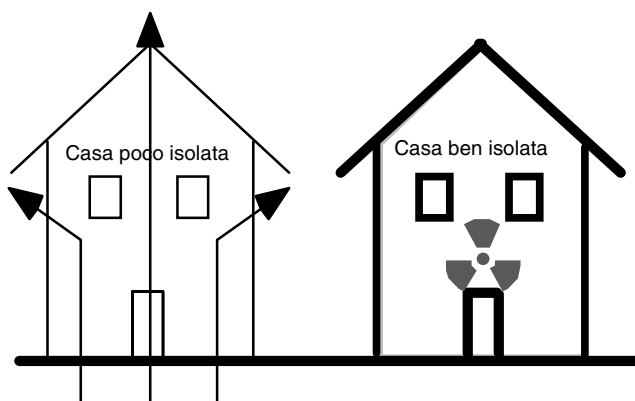
5.1.1. Il Radon 222

I materiali radioattivi sono sorprendentemente abbondanti: la Terra contiene circa mille volte più Uranio di Oro. Il decadimento dell'Uranio-238 dà vita ad un'intera catena di elementi a loro volta radioattivi che termina con la formazione di Piombo-206.



Uranio-238 Prodotti di decadimento Radio-226 Radon-222 Prodotti di decadimento Piombo-206

Il Radon-222 è un gas nobile radioattivo (inodore, incolore, chimicamente inerte e solubile in acqua) che deriva dalla disintegrazione del Radio-226 e si trova nel suolo e nella roccia. Il Radon è dannoso soprattutto a causa dei suoi prodotti di disintegrazione; questi vengono inalati e si depositano nei polmoni. Si stima che il Radon è, dopo il fumo, la causa più frequente di tumori polmonari.



Gran parte della radioemanazione del Radon non ha la capacità di propagarsi lontano, a causa della sua vita breve ($T_{1/2}$ 3,8 giorni). Il gas riesce però ad affiorare in superficie, dove, essendo più denso dell'aria, si accumula soprattutto nei punti più bassi. Si infila così nei piani terreni degli edifici e viene portato anche nelle stanze da bagno attraverso

l'acqua corrente. Nelle case ben isolate, ove il Radon viene "intrappolato", si possono raggiungere livelli di radioattività preoccupanti per la salute degli abitanti. Il Radon

rappresenta la maggior fonte naturale di radiazioni e in Svizzera sono tuttora in corso parecchi studi al proposito. Regularmente si eseguono delle misurazioni su tutto il territorio.

Domanda: *Secondo te come si potrebbe ovviare al problema del Radon nelle case?*

5.1.2. Alcune curiosità



Il potassio contenuto nel nostro corpo viene assunto tramite il cibo e poi regolarmente espulso. Una piccolissima parte degli atomi di potassio è radioattiva, si tratta degli atomi del Potassio-40. L'attività prodotta da questi atomi nel nostro corpo è di circa 5'000 Bq: ogni secondo si disintegrano al nostro interno circa 5'000 atomi di Potassio-40 emettendo radiazioni beta e gamma. Si può calcolare che a questa attività corrisponde una dose superiore a 0,01 mSv. In base alla legislazione sulla radioattività ed il trattamento di materiali radioattivi (vedi pagina 27) un essere umano sarebbe quindi da considerare come radioattivo, le sue ceneri dovrebbero venire eliminate come materiale radioattivo e necessiterebbero di una speciale concessione¹⁶! Questo piccolo aneddoto ci dà un'idea di quanto severe e restrittive siano le leggi sui materiali radioattivi.

Per ricevere una dose di 5 mSv causata da Potassio-40 (dose media annua in Svizzera tenendo conto delle fonti artificiali di radioattività) bisognerebbe ingerire circa 33 kg di potassio naturale, ossia circa 1'000 kg di carne (o 50 kg di concime a base di potassio) "in un sol boccone". Pochi di certo sopravviverebbero ad una simile indigestione...



Ogni secondo il nostro corpo è attraversato da circa 50'000 raggi gamma.

Anche se queste cifre possono impressionare, bisogna tener ben presente che noi siamo costituiti da miliardi di miliardi di miliardi di molecole e che quindi tali irradiazioni sono del tutto irrisorie.

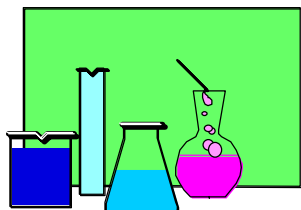
5.2. Fonti Artificiali

Oltre alle fonti naturali nella società moderna vi sono anche altre attività che contribuiscono a definire la dose annuale media a cui è esposta la popolazione: la medicina¹⁷ (soprattutto con le radiografie a raggi X) e la tecnica (Centrali nucleari, ricadute dovute ai test sulle armi nucleari, attività di ricerca).

¹⁶Vedi "Power Lehrer-Infos zum Thema Elektrizität, INFEL, No 55 2/96 pagina 19".

¹⁷I dati riportati nella tabella si riferiscono naturalmente a valori medi tenendo in considerazione l'intera popolazione svizzera (fonte: R. Spiess, Über die Auswirkung des Reaktorunfalles in Tschernobyl auf die Bevölkerung in der Schweiz, Würenlingen 1986).

Si noti che il contributo alla dose media annua da parte degli scarichi degli impianti nucleari, in casi normali, è pressoché insignificante: meno dell'un per cento della radiazione complessiva. Come vedremo nel prossimo capitolo, la situazione può essere però completamente invertita nelle zone colpite da un incidente nucleare. In tal caso la ricaduta radioattiva diventa il fattore che contribuisce in maniera preponderante alla dose annua.



Un piccolo esperimento

Procurati un asciugacapelli e sulla bocca d'uscita dell'aria applica ermeticamente un sacchetto di carta filtrante, per esempio da aspirapolvere. Recati nel rifugio della scuola e metti in funzione l'apparecchio per un quarto d'ora, poi in laboratorio brucia il sacchetto, raccogli le ceneri in una capsula e determinane la radioattività tramite il contatore Geiger. Discuti i risultati ottenuti (perché abbiamo bruciato il sacchetto?).

In conclusione è opportuno ricordare che dalla loro comparsa sulla Terra (circa 3,5 miliardi di anni fa) le forme viventi sono sempre state esposte a radiazioni¹⁸. In particolare all'inizio la radioattività naturale era molto superiore di quella odierna (perché?). La radioattività va quindi vista come un fenomeno naturale col quale siamo in grado di sopravvivere, sempre che, naturalmente, le dosi non superino determinati valori!



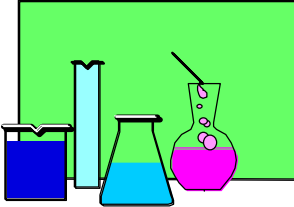
Fissiamo alcuni fatti ...

- Le radiazioni terrestri e cosmiche causano un'irradiazione esterna del nostro corpo, mentre un irradiamento dall'interno si ha in seguito a sostanze radioattive che sono state ispirate o ingerite con del cibo.
- La dose annua media di radiazioni ionizzanti è di circa 5 mSv/anno e varia molto da luogo a luogo. Vi contribuiscono fonti radioattive naturali (il Radon-222 in maggior parte) e fonti artificiali (soprattutto esposizione ai raggi X per scopi medici).
- In situazioni normali il contributo alla dose media annua dovuto dall'industria nucleare è praticamente irrilevante.

¹⁸Si calcola che quando la Terra si formò (circa 4,5 miliardi di anni fa), la quantità di Uranio-235 sarebbe stata circa 100 volte superiore all'attuale e la quantità di Uranio-238 sarebbe stata il doppio, rendendo così il pianeta molto più radioattivo di quanto sia ora.

6. Centrali Nucleari

Fino ad ora abbiamo sempre parlato di radioattività in termini di fenomeno naturale: abbiamo infatti visto che alcuni atomi, da noi chiamati radioattivi, sono in grado, *spontaneamente e senza alcun influsso esterno*, di trasformarsi in altri atomi emettendo delle radiazioni.

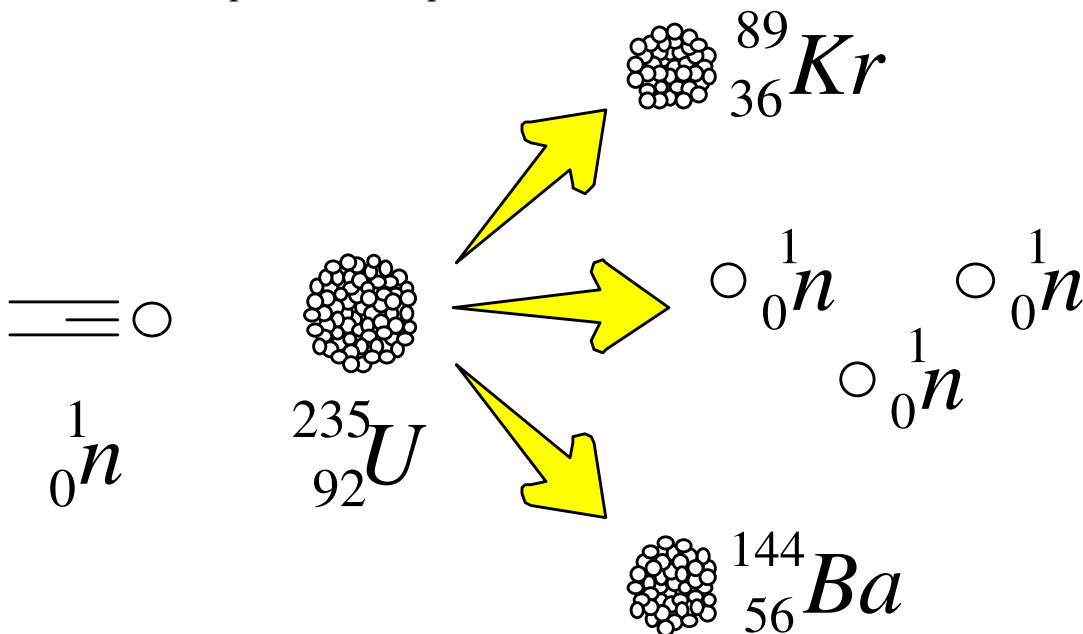


Prova a progettare e ad eseguire alcuni semplici esperimenti per rispondere ai quesiti riportati di seguito. Raccogli le tue idee ed i risultati in un protocollo suddiviso in SCOPO dell'esperimento, MATERIALE, RISULTATI e CONCLUSIONI.

- ☞ Un oggetto può diventare radioattivo in seguito ad esposizione a materiali radioattivi?
- ☞ Un oggetto può diventare radioattivo se bruciato?

6.1. La Fissione Indotta Degli Atomi (FIDA¹⁹)

In condizioni sperimentali particolari è però possibile manipolare del materiale in modo tale da produrre degli atomi radioattivi: è possibile cioè indurre una "malattia" in un atomo tale da provocarne la scomparsa per fissione. In tale analogia il virus responsabile è un neutrone. Un esempio famoso è quello dell'Uranio-235.

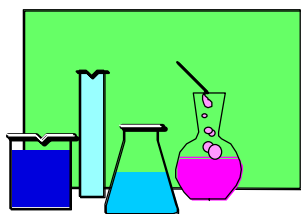


¹⁹Al lettore interessato si raccomanda vivamente l'eccellente libro di J. Deferne e A. Gassener *Le monde étrange des atomes*, La Nacelle, Genève 1994 (in francese).

L'Uranio-235 può infatti "assorbire" un neutrone (a condizione che non si muova "troppo velocemente") e rompersi in due producendo un atomo di Kripto-89, uno di Bario-144 ed altri tre neutroni oltre ad una notevole quantità di energia²⁰. La perdita di massa che si riscontra in seguito alla fissione completa di **1 kg di Uranio-235** è di 1g. Ciò significa che durante tale processo sono stati liberati 24 milioni di kWh di energia; il che equivale all'energia ottenibile dalla combustione di circa **3 milioni di kg di carbone!** Questo processo può essere quindi sfruttato per liberare immense quantità d'energia.

6.2. Reazioni a catena e massa critica²¹

Per introdurre alcuni concetti fondamentali per la comprensione del funzionamento di una centrale nucleare (e di una bomba atomica) considera il seguente esperimento.



Procurati circa 50 tessere simili a quelle del gioco del domino (anche delle semplici scatolette per fiammiferi andrebbero bene). Queste possono essere disposte su di un tavolo in modo tale che la caduta di una tessera inneschi quella delle altre. Considera ora i seguenti quesiti e riporta su di un protocollo, motivandole, le strategie scelte ed i rispettivi tempi impiegati.

- ☞ Come disporresti i vari pezzi affinché il tempo impiegato a farli cadere tutti sia il *maggiore* possibile?
- ☞ Come disporresti i vari pezzi affinché il tempo impiegato a farli cadere tutti sia il *minore* possibile?

Come visto in precedenza, iniettando un neutrone in un atomo di Uranio-235 se ne provoca la fissione con conseguente liberazione di energia oltre a due-tre neutroni. Che cosa ne sarà di costoro? Se riusciranno a colpire in modo efficace un altro nucleo di Uranio-235 ne provocheranno la fissione. Ciò comunque non è così semplice e questo principalmente per due motivi:

- ① I neutroni sono molto instabili (si trasformano in un protone ed un elettrone²²) e così, se non trovano immediatamente un bersaglio, decadono.

²⁰L'energia liberata può essere calcolata tramite la famosa formula di Einstein $E = m \times c^2$ dove m corrisponde alla differenza di massa tra reagenti e prodotti e c sta per la velocità della luce (300'000 km/s).

²¹Il primo reattore nucleare fu realizzato nel 1942 da Enrico Fermi a Chicago. È interessante notare come un altro italiano, Cristoforo Colombo, scopri l'America nel 1492. Una strana coincidenza di numeri se si pensa alla portata delle due scoperte!

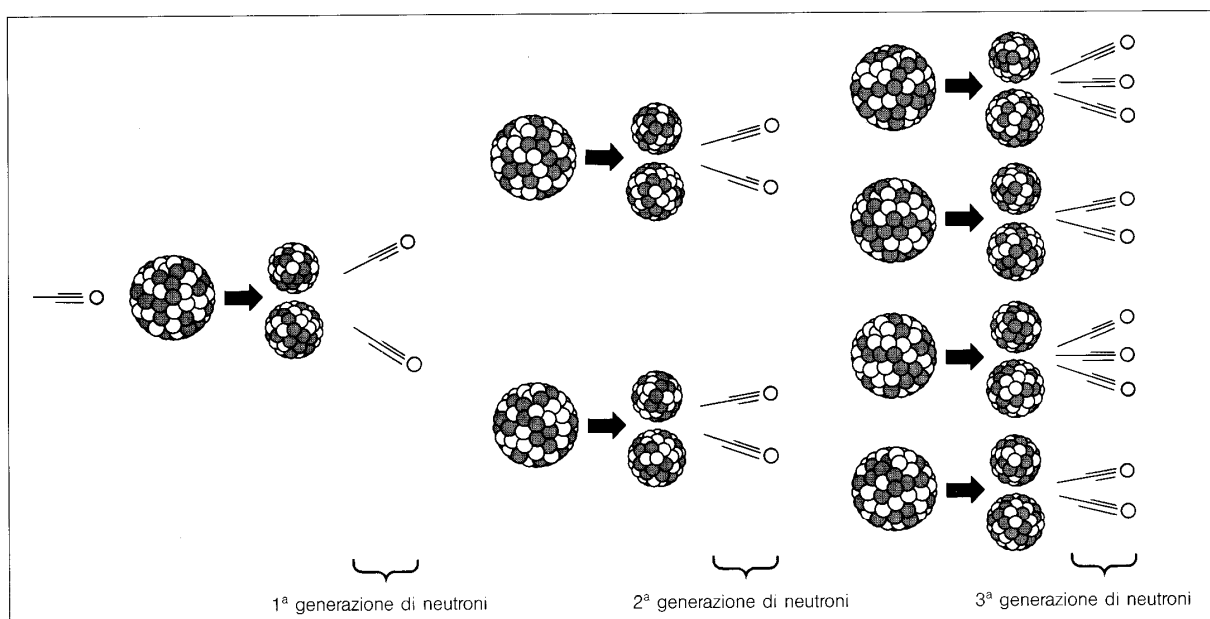
²²Oltre a ciò bisogna menzionare anche la produzione di una particella chiamata neutrino.

② Il bersaglio rappresentato dai nuclei di Uranio-235 è estremamente piccolo e difficile da colpire. In termini matematici si dice che la probabilità di una collisione favorevole è piccolissima.

Fortunatamente (o sfortunatamente?) però è possibile ricorrere a qualche espediente per sopperire a queste difficoltà:

- * Si può aumentare la concentrazione di atomi d'Uranio-235. L'Uranio estratto dalle miniere contiene unicamente lo 0,7% di Uranio-235, mentre il rimanente 99,3 % è Uranio-238 (non direttamente utilizzabile per il processo di fissione). Si procede quindi all'arricchimento di Uranio-235 con metodi molto sofisticati e costosi in modo da aumentare il numero di "bersagli" per unità di volume. Per gli usi attuali ci si accontenta del 2-3 %²³.
- * Si possono rallentare i neutroni. Tramite dei moderatori (per esempio grafite) si riesce a rallentare i neutroni prodotti dalla fissione in modo da avere più probabilità di innescare successive reazioni di fissione.

Questi due accorgimenti, se sapientemente gestiti, permettono di realizzare una reazione a catena che, se controllata, fa funzionare una centrale nucleare.

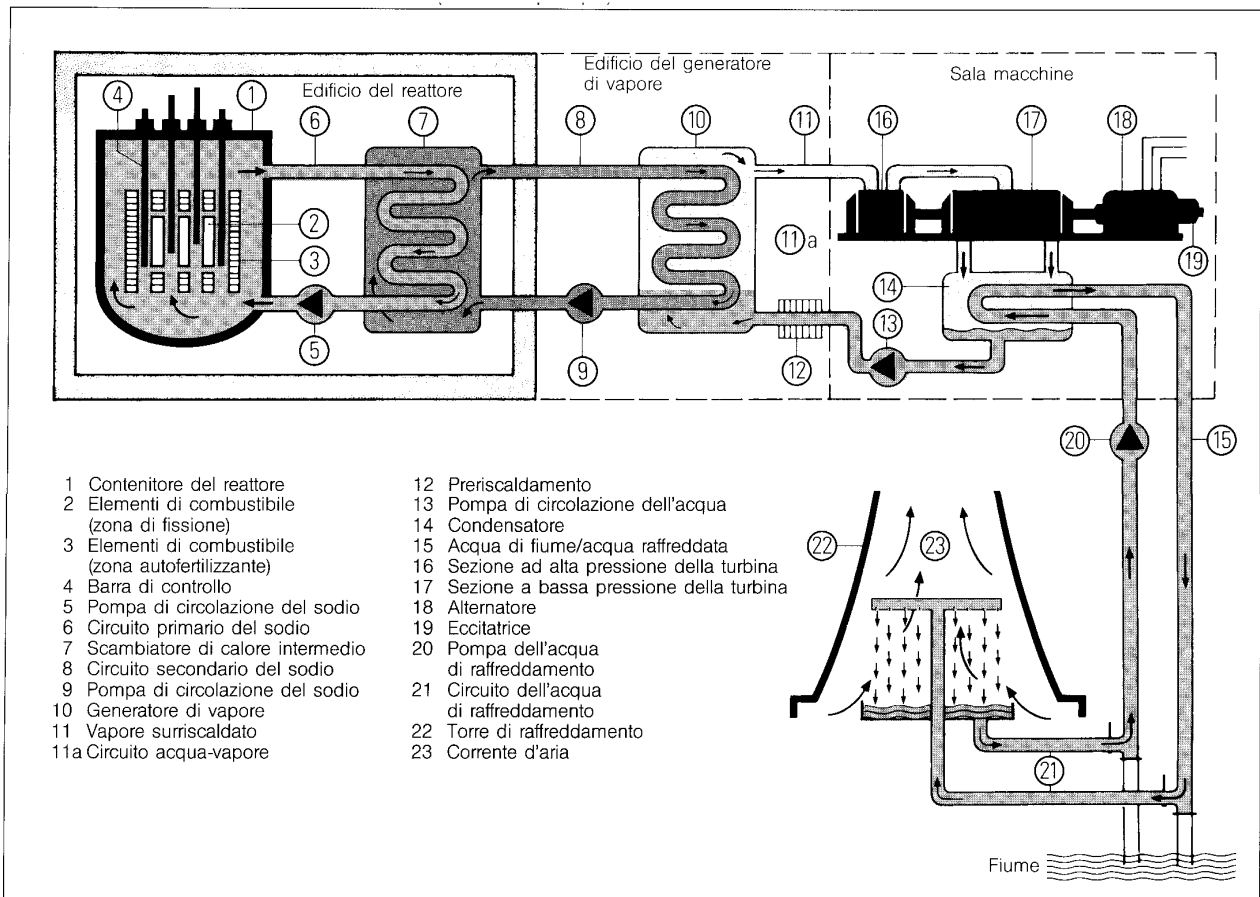


Rappresentazione schematica di una reazione a catena nel caso in cui per ogni fissione vengono liberati due neutroni che a loro volta innescano delle fissioni. Si noti come il numero di fissioni aumenti in modo esponenziale.

²³La quantità minima, occorrente per iniziare una reazione a catena, è detta *massa critica*. Per l'uranio-235 puro essa è di circa 50 kg e corrisponde ad una sfera di 8,4 cm di raggio.

Le centrali nucleari possono differire le une dalle altre per le caratteristiche del combustibile, per la natura del materiale utilizzato per rallentare i neutroni nonché per il sistema con cui viene scambiato il calore tra il reattore e la turbina. In ogni caso il principio di funzionamento è sempre più o meno lo stesso.

Il combustibile è costituito da barre di Uranio arricchito a circa il 3% in Uranio-235. Queste barre sono immerse in un medio che funge da moderatore (rallentando i neutroni prodotti durante la fissione e controllandone il numero). Durante i processi di fissione vengono sviluppate enormi quantità di calore che permettono di produrre del vapore per far funzionare delle turbine per la produzione di corrente elettrica (conversione d'energia da termica ad elettrica). Per fermare la reazione basta inserire delle barre di boro o di cadmio che hanno la proprietà di assorbire tutti i neutroni impedendo al fenomeno di fissione di autosostenersi (la reazione viene interrotta).



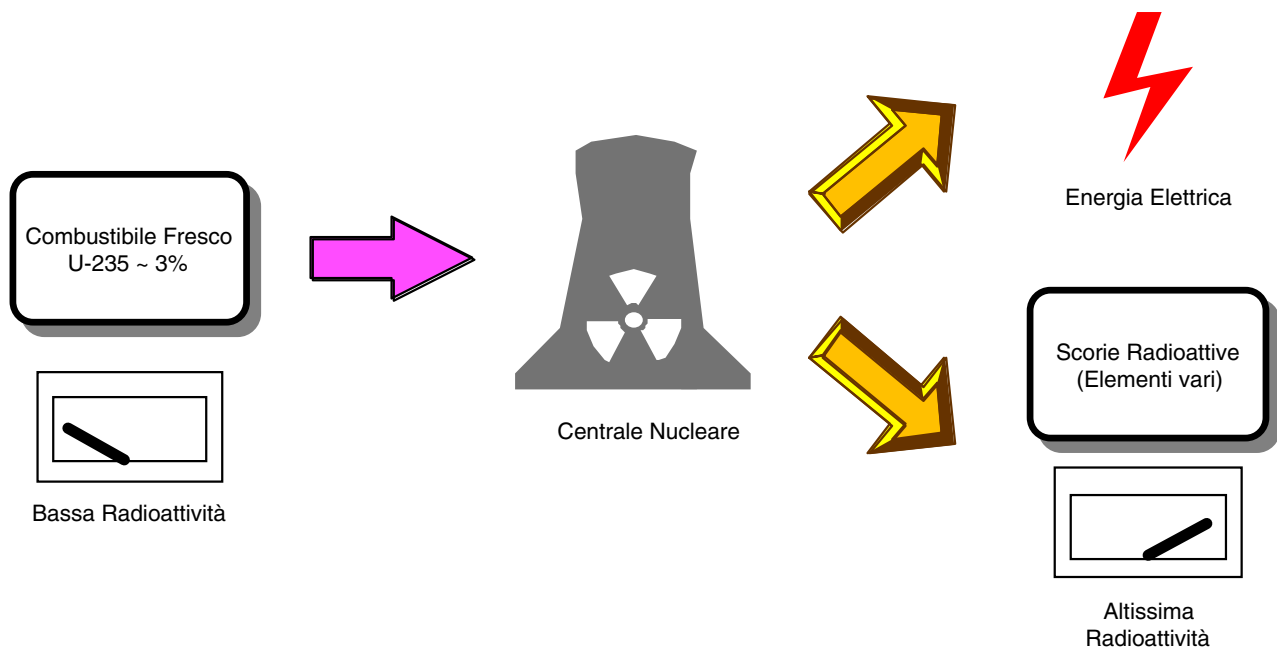
Domanda: Considera lo schema a pagina 45. Quanto dovrebbe valer il numero k affinché l'esercizio della centrale sia garantito senza rischi di esplosione?

$$k = \frac{\text{Numero di fissioni di una generazione}}{\text{Numero di fissioni della generazione precedente}}$$

6.3. La contropartita: le scorie radioattive

Il processo di fissione nucleare sembra, a prima vista, molto interessante per la produzione di energia elettrica. La contropartita purtroppo però sta nella pericolosità dei rifiuti generati. Infatti gli atomi prodotti dalla fissione nucleare dell'Uranio-235 sono altamente radioattivi e quindi, come abbiamo visto, particolarmente pericolosi per l'uomo.

Un semplice paragone servirà a rendere l'idea. Considerando come confronto il livello bassissimo di radioattività del combustibile fresco, quello esaurito è **200 milioni** di volte più radioattivo quando viene estratto dal reattore!



Una centrale nucleare, oltre a produrre energia elettrica, genera rifiuti altamente radioattivi che necessitano di particolari attenzioni nonché costi elevatissimi per essere smantellati senza che si contaminino l'ambiente circostante.

Domanda: *Perché le scorie radioattive rappresentano un problema per la loro eliminazione?*

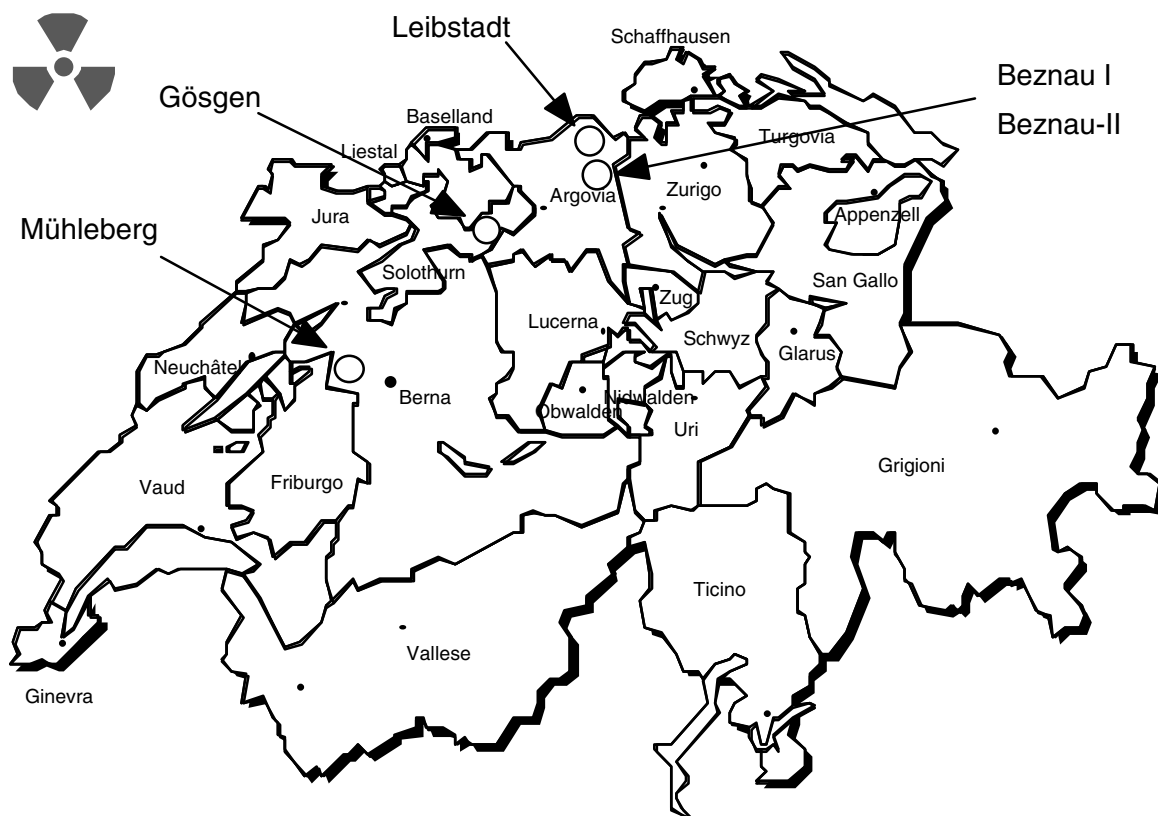
Domanda: *Come progetteresti un deposito per scorie radioattive?*

Una centrale nucleare da 900 - 1'000 MW²⁴ produce ogni anno dai 3 ai 4 m³ di scorie altamente radioattive²⁵. È comunque opportuno tener presente che ogni forma di "produzione" energetica (o meglio di trasformazione energetica) è legata, in modo più o meno evidente a forme di inquinamento²⁶. A titolo comparativo una centrale a carbone da 1'000 MW produce i seguenti rifiuti²⁷:

CO ₂	270 kg/s	Responsabile dell'effetto serra
SO ₂	4,5 kg/s	Responsabile per le piogge acide
NO _x	Tanto quanto 200'000 auto	
Ceneri	13,5 kg/s	

Oltre ad altre sostanze riconosciute come cancerogene.

In Svizzera attualmente sono in esercizio 5 centrali nucleari che coprono il 38 % circa del fabbisogno di energia elettrica del paese²⁸.



²⁴Con una tale potenza si potrebbero preparare circa 1 milione di tazze di tè ogni minuto o se preferite in 5-6 minuti si potrebbe organizzare un tea-party per l'intera popolazione svizzera.

²⁵Fonte: ASPEA, Energia nucleare: rischi e possibilità, 1988.

²⁶Al lettore interessato si raccomanda l'articolo di Mario Dall'Aglio, *Contaminazione ambientale da fonti energetiche*, Le Scienze, 1981, 97-107.

²⁷B.L. Cohen, *Il confinamento delle scorie radioattive*, Le Scienze, 1977, no 110

²⁸Fonte: VSE-UCS, *Strom: Zahlen und Fakten*, 1995

Alcuni dati sulle centrali nucleari svizzere²⁹:

	Anno di entrata in esercizio	Potenza elettrica netta [MW]
Beznau-I	1969	365
Beznau-II	1971	365
Mühleberg	1971	355
Gösgen	1979	970
Leibstadt	1984	1145

Domanda: *Tutte e cinque le centrali nucleari svizzere sono situate lungo il fiume Aar, ad eccezione di quella di Leibstadt che è posta lungo la sponda del Reno. Sapresti dire perchè?*

6.4. Sicurezza ed incidenti nucleari

Abbiamo visto che la radioattività, in dosi elevate, è estremamente pericolosa per la salute dell'uomo. Abbiamo anche imparato che noi non siamo in grado, coi nostri sensi, di percepire la radioattività (possiamo riconoscerla solo per le conseguenze della sua azione). Con l'esercizio delle centrali nucleari è quindi oltremodo opportuno investire sforzi ed energie su due fronti:

- ① *Il fronte della sicurezza.* Come ridurre al minimo le possibilità che delle sostanze radioattive prodotte nelle centrali nucleari vengano liberate nell'ambiente.
- ② Mettere a punto un *sistema di monitoraggio* della radioattività in modo da rilevare tempestivamente eventuali fughe. In Svizzera abbiamo una rete di misurazione denominata *NADAM*. Consiste di 58 stazioni distribuite in tutto il paese che misurano la radioattività ogni 10 minuti. I dati possono leggersi alla pagina 652 del teletext sul canale DRS (in tedesco - qui si trovano i dati della rete *MADUK* - si tratta di stazioni aggiuntive a quelle della rete *NADAM* poste nelle vicinanze delle centrali nucleari svizzere)

In tal senso gli insegnamenti raccolti in seguito all'incidente nucleare del 26 aprile 1986 occorso a Tschernobyl devono farci riflettere. Si consulti, ad esempio, l'opuscolo *10 anni dopo Tschernobyl - Un contributo dal punto di vista svizzero*, pubblicato dalla commissione federale per la protezione AC.

²⁹Fonte: Schweizerische Vereinigung für Atomenergie, Kernkraftwerke der Welt - Stand 2001

Appendice 1 * Riassumiamo alcuni concetti importanti

- ① I nostri sensi non sono in grado di percepire la radioattività. Possiamo riconoscerla solo per le conseguenze della sua azione. Distanza, schermo, statistica.
- ② Il fenomeno secondo il quale alcuni atomi, in modo spontaneo, si trasformano in altri atomi emettendo radiazioni, prende il nome di radioattività. La radioattività di un elemento dipende dall'instabilità del suo nucleo.
- ③ Durante i processi di decadimento radioattivo vengono liberate enormi quantità di energia sotto forma di particelle alfa o beta e gamma.
- ④ Un materiale radioattivo rimane tale per tempi che possono variare da alcuni millesimi di secondo a parecchi miliardi di anni (maggiore il tempo di dimezzamento e minore l'attività).
- ⑤ La radioattività viene espressa in Becquerel (decadimenti al secondo), quando ci si riferisce all'attività, o in Sievert, quando ci si riferisce alla dose ricevuta da un individuo. Analogia con la fontana.
- ⑥ Le conseguenze dell'irraggiamento di una cellula vivente, a dipendenza della dose, possono essere: la morte della cellula, delle lesioni reversibili, dei tumori o delle mutazioni che possono essere di tipo somatico o genetico.
- ⑦ La radioattività naturale varia da luogo a luogo in modo anche considerevole. La componente principale della radioattività naturale è dovuta al gas Radon.
- ⑧ In una centrale nucleare l'energia liberata durante la fissione di un atomo viene convertita in energia elettrica. Come rifiuti vengono prodotte delle scorie radioattive (problemi legati al loro smaltimento).
- ⑨ Reazione a catena. Sequenza di eventi che hanno luogo quando un atomo in fissione emette abbastanza neutroni da determinare la fissione di un altro o più atomi e così via in una catena continua.

Appendice 2 * Alcuni principi di protezione in caso di aumento di radioattività³⁰

Come proteggersi dalla radioattività che proviene dall'esterno

① Distanza	Maggiore la distanza da fonti radioattive, minore l'irraggiamento.
② Schermatura	Alcuni millimetri di materiale sono sufficienti per schermare i raggi alfa e quelli beta. Le pareti di un rifugio trattengono anche una parte delle radiazioni gamma. Nel rifugio la dose è di circa 100 volte inferiore rispetto all'esterno. In casa essa è dalle 5 alle 10 volte minore rispetto all'esterno. Questi fattori possono essere decisivi per evitare danni acuti da radiazioni.
③ Tempo di esposizione	Meno tempo si passa in un luogo con elevate radiazioni, minore sarà la dose ricevuta. È quindi raccomandabile abbandonare il rifugio solo per periodi molto brevi.
④ Aspettare	Gli atomi radioattivi decadono da soli. Se dopo una fuoriuscita di materiale radioattivo ci si trattiene nel rifugio per alcuni giorni, l'attività dei radionuclidi con tempi di dimezzamento brevi sarà diminuita considerevolmente. Sarà quindi meno pericoloso abbandonare il rifugio.

Come proteggersi dalla radioattività che proviene dall'interno

① Aria che respiriamo	Tener chiuse porte e finestre e spegnere i sistemi di ventilazione. In tal modo non si attireranno sostanze radioattive verso l'interno dell'edificio.
② Cibi	Ci si può proteggere consumando cibi non contaminati (cibi di scorta).
③ Pastiglie allo iodio	L'ingerimento tempestivo di pastiglie allo iodio evita esposizioni alla tiroide. Lo iodio non radioattivo si accumula nella tiroide ed impedisce a quello radioattivo di fissarvi.

³⁰Tratto da D. Jäggi, *Radioaktivität und Strahlenschutz*, Bundesamt für Gesundheitswesen, Bern 1990