



**ISPRA**

Istituto Superiore per la Protezione  
e la Ricerca Ambientale

**VERIFICA DELL'EFFICIENZA DI RIVELATORI CR-39  
E CREAZIONE DI UNA CARTA DI CONTROLLO PER LA MISURA DELLA  
CONCENTRAZIONE DI ATTIVITA' DI RADON**

**Dr.ssa Patrizia Di Lorenzo**

**Tutor: Dr. Giancarlo Torri**

**Co tutor: Dr.ssa Anna Maria Sotgiu**

## ABSTRACT

*The radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) is a natural radioactive element and it is very dangerous for the health. The instrumentation used by ISPRA laboratory for the measurement of radon's concentration is called TASLIMAGE. The method is based on multiple scanning and analysing system of TASTRAK detectors (CR39 plastics). In particular the technique includes a control of the efficiencies by using a source of  $^{241}\text{Am}$ , as a source of alpha particles. Currently in laboratory there are two systems for the irradiation of detectors with a source of  $^{241}\text{Am}$ .*

*This work concerns the calculation of the tracks' number and the use of the statistical method  $t$  of Student in order to analyse the possibility to use only one irradiation system. Afterwards, some CR-39 plastics have been chosen in order to create a Control's chart of efficiency; it is very important because contains the new values of reference to verify the results.*

*Il radon è un elemento naturale radioattivo molto pericoloso per la salute. Lo strumento di misurazione del radon chiamato TASLIMAGE è usato presso i laboratori dell'ISPRA; questo metodo si basa su una scansione multipla e un'analisi di lastre CR39. Questa tecnica comprende un controllo dell'efficienza usando una sorgente di americio 241 come sorgente di particelle alfa. Attualmente nel laboratorio ci sono due sistemi per l'irraggiamento dei CR-39 con la sorgente di  $^{241}\text{Am}$ .*

*Questo lavoro riguarda il calcolo del numero delle tracce e l'uso del metodo statistico  $t$  di Student per esaminare la possibilità di usare un solo sistema di irraggiamento.*

*In seguito alcuni rivelatori CR-39 sono stati scelti per creare una carta di controllo dell'americio-241; essa è molto importante perché contiene nuovi valori di riferimento per verificare i risultati ottenuti.*

## PREFAZIONE

L'ISPRA, nell'ambito del Servizio misure radiometriche del Dipartimento nucleare, rischio tecnologico e industriale, svolge attività per la gestione del sistema di qualità ISO 9001: 2005 e ha in programma l'accreditamento CEI EN ISO/IEC 17025:2005 delle prove per la determinazione della concentrazione di attività di radon in aria tramite rivelatori di tracce nucleari a stato solido (SSNTD's).

Il lavoro di tesi si inserisce nel programma per la validazione di un metodo interno per la misura della concentrazione di radon in aria.

Dopo un' introduzione al radon e una panoramica dei diversi metodi per la misura, la tesi focalizza l'attenzione sui rivelatori a tracce CR-39 e il loro impiego durante la fase di misura del radon.

Il lavoro di stage svolto presso il laboratorio ha trattato la metodologia usata per la misura del radon effettuata con il sistema TASLIMAGE che si basa sull'attacco chimico, la scannerizzazione e l'analisi dei rivelatori allo stato solido per la determinazione della densità di tracce prodotte sui rivelatori a seguito della esposizione al radon.

Per verificare la riproducibilità nella efficienza dell'attacco chimico, alcuni rivelatori sono esposti ad una sorgente di americio-241, per un tempo noto in un apposito dispositivo di irraggiamento.

Presso il laboratorio sono attualmente in uso due sistemi di irraggiamento, che si differenziano per la geometria di esposizione: nel vecchio sistema il rivelatore è posizionato con la superficie di esposizione verso l'alto, nel nuovo sistema verso il basso.

Sono stati selezionati alcuni rivelatori e suddivisi in gruppi in base al sistema di esposizione usato; i risultati sono stati poi confrontati con il test del t di Student per verificare la possibilità di abbandonare il vecchio sistema.

Inoltre, per monitorare nel tempo la efficienza dell'attacco chimico è stata creata anche una nuova carta di controllo per l'americio-241, con lo scopo di avere un nuovo range di valori grazie al quale è possibile verificare la correttezza delle procedure.

Infine, è stato verificato l'andamento della densità di tracce di fondo di un gruppo di rivelatori, che può variare in considerazione della conservazione dei rivelatori stessi prima del loro utilizzo.

I valori registrati nel presente lavoro sono stati confrontati con i dati di fondo iniziali e con dati intermedi per controllare un eventuale aumento nel numero di tracce visibili.

## **METODOLOGIA**

Un argomento vasto come quello riguardante il radon non può essere descritto né analizzato in tutte le sue parti in poche pagine, così come testimoniano i tanti lavori esistenti.

Questa tesi inizia con un'introduzione molto generale sulla natura radioattiva del radon e sui problemi ad esso legato in ambito medico, così come si evince dai primi due capitoli.

Il terzo capitolo tratta dei vari metodi di misura esistenti per quando riguarda la rivelazione di radon, e le diverse tecniche di misura soffermandosi sui rivelatori a stato solido di tracce nucleari CR-39; descrive le peculiarità del CR-39 ed i vantaggi e gli svantaggi che derivano dal suo utilizzo.

Il metodo di misura TASLIMAGE è quello in uso presso l'ISPRA ed è descritto senza divagazioni nel quarto capitolo che espone in dettaglio il metodo di lavoro adottato durante lo svolgimento dello stage in accordo alla procedura operativa conservata negli archivi.

Il quinto capitolo descrive passo dopo passo la verifica dell'efficienza di alcuni rivelatori CR-39 esposti ad una sorgente di americio-241 con due diversi sistemi delineando in questo il lavoro oggetto dello stage.

Successivamente, nel capitolo sesto è stato effettuato il controllo statistico ai dati ottenuti nel capitolo 5 utilizzando il test del t di Student.

Infine si sono scelti dei rivelatori, come campioni rappresentativi per la creazione di una carta di controllo per la verifica dell'andamento dell'attacco chimico dei rivelatori.

La creazione di una Carta di Controllo è spiegata nel settimo capitolo, seguendo le linee guida per la stesura delle carte di controllo di Shewhart.

L'utilità di una carta di controllo è controllare che le procedure adottate rientrino in un intervallo di riferimento; nel caso questo non succeda bisogna apportare le opportune correzioni per il rientro dei dati.

## INDICE

<b><u>Introduzione.....</u></b>	
<b>1. <u>Introduzione alle radiazioni ionizzanti</u></b>	
1.1	Cenni sulle radiazioni ionizzanti.....1
1.2	Decadimento alfa( $\alpha$ ).....4
1.3	Decadimento beta ( $\beta$ ).....5
1.4	Altri tipi di decadimento.....6
1.5	Equazioni del decadimento radioattivo.....6
1.6	Serie naturali di decadimento.....8
<b>2. <u>Caratteristiche del radon</u></b>	
2.1	Radon.....13
2.2	Considerazioni ambientali sul radon.....15
2.3	I rischi per l'uomo.....17
2.4	Sorgenti di radon indoor.....18
<b>3. <u>Metodologie e tecniche di misurazione</u></b>	
3.1	Metodi di misura.....23
3.2	Sistemi di rivelazione.....24
3.3	Rivelatori a tracce.....25
3.4	Il rivelatore CR-39.....27
<b>4. <u>Metodo TASLIMAGE per il conteggio delle tracce</u></b>	
4.1	Modalità operative TASLIMAGE.....29
4.2	Foglio EXCEL.....34
4.3	Verifica con la sorgente Am-241.....35
<b>5. <u>Verifica dell'efficienza dei rivelatori</u></b>	
5.1	Verifica della efficienza dei rivelatori compresi in uno stock.....36
5.2	Prima fase del lavoro.....36
	5.2.1 Materiali e metodi.....38
	5.2.2 Posizione del rivelatore per l'irraggiamento alla sorgente di $^{241}\text{Am}$ .....38
5.3	Seconda fase del lavoro.....40
5.4	Terza fase del lavoro.....44
5.5	Test del $t$ di Student.....47
5.6	Risultati ottenuti.....49
5.7	Confronto dei Risultati del Test $t$ di Student.....57
<b>6. <u>Carte di controllo di Shewhart</u></b>	
6.1	Carte di controllo di Shewhart.....58
6.2	Due tipi di carte di controllo.....62
6.3	Tipi di carte di controllo per variabili e per attributi.....63
6.4	Carta di controllo con tracce di $^{241}\text{Am}$ .....64

7 **Conclusioni**

7.1 Conclusioni.....72

## INTRODUZIONE

Il radon è un gas radioattivo naturale, privo di odore, colore, sapore ed estremamente volatile. Viene prodotto dal decadimento radioattivo dell'Uranio-238 naturale ed è emanato dai terreni (in particolar modo da lave, tufi, pozzolane), dalle rocce ed in minor misura dall'acqua, nella quale può disciogliersi (può essere presente infatti nelle falde acquifere).

Negli spazi aperti la sua concentrazione è diluita dalle correnti d'aria e non sono quasi mai raggiunte concentrazioni ritenute particolarmente elevate, mentre negli ambienti chiusi (case, scuole, ambienti di lavoro) e in particolari situazioni si accumula e può raggiungere alte concentrazioni tali da essere ritenute un rischio inaccettabile per gli occupanti. Si parla, infatti, sempre più spesso di **inquinamento indoor da radon**.

L'esposizione al radon causa un aumento di rischio di tumore polmonare proporzionale alla sua concentrazione e al tempo trascorso nei rispettivi ambienti.

Principali condizioni che favoriscono la presenza di radon negli edifici sono:

1. Diretto contatto con il terreno (piani interrati, seminterrati o piani terra);
2. Presenza di materiali con elevato contenuto di uranio e radio
3. Presenza di acqua con elevato contenuto di radon

I locali in cui più facilmente si può riscontrare alta concentrazione di radon sono quindi gli interrati, i seminterrati e comunque ambienti che siano direttamente a contatto con il terreno, o che siano costruiti con materiali particolarmente ricchi di uranio.

Nel presente lavoro vengono analizzate diverse procedure di misurazione, focalizzando l'attenzione sui rivelatori CR-39 e sul TASLIMAGE, metodo di misura in uso presso il Servizio misure radiometriche del dipartimento nucleare, rischio tecnologico e industriale, dell'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e Ricerca Ambientale).

Esso si basa sulla lettura ottica, automatica e seriale di rivelatori TASTRAK (plastiche di CR-39), in seguito all'esposizione al radon e ad un trattamento chimico dei rivelatori stessi. Ai fini del controllo di qualità della misura sono costantemente processati rivelatori esposti in maniera controllata e riproducibile, ad una sorgente di americio 241; attualmente sono in uso due sistemi di irraggiamento.

Questo lavoro di stage ha riguardato il confronto dei due sistemi di irraggiamento attraverso il calcolo del t di Student e la definizione di una nuova carta di controllo basata sul nuovo sistema di irraggiamento dell'americio 241, così da avere dei valori ai quali fare riferimento per le future prove di laboratorio.

**1.1 CENNI SULLE RADIAZIONI IONIZZANTI**

Per radiazione si intende il fenomeno per cui un elemento, emette entità fisiche che possono essere corpuscolari (particelle) o elettromagnetiche (fotoni ossia particelle senza massa). Si ha emissione di radiazioni quando in un nucleo atomico il rapporto tra i suoi principali costituenti, protoni (particella a carica positiva) e neutroni (particella a carica neutra) è lontano dal valore "ottimale" dell'elemento; le radiazioni sono il risultato dell'assestamento o decadimento del nucleo verso una condizione di maggiore stabilità, in un tempo che è caratteristico per ogni elemento o suo isotopo.

La radioattività, difatti, può essere di origine naturale, ad es. nel terreno, nelle rocce, oppure di origine cosmica, ma può essere prodotta anche artificialmente (centrali nucleari, armi atomiche).

Il termine radioattività, attività del radio, è stato coniato dai coniugi Curie che, nel 1898, isolarono un nuovo elemento, fortemente instabile, che emetteva radiazioni. Oggi, il termine radioattività è utilizzato per indicare la proprietà di alcuni elementi di emettere radiazioni che possono essere di tipo alfa " $\alpha$ ", beta " $\beta$ " e gamma " $\gamma$ " le prime due sono particelle di materia, mentre le radiazioni gamma sono onde elettromagnetiche ad alta frequenza. Le radiazioni, di qualunque tipo esse siano, nelle interazioni con la materia che le circonda tendono a rilasciare la propria energia. Una radiazione in relazione alla quantità di energia ceduta può produrre un' eccitazione (che riguarda i legami tra le molecole) o una ionizzazione (perdita di un elettrone).

Il **decadimento radioattivo** è un processo di trasformazione, con liberazione di energia nucleare, di un radionuclide padre in un nuclide figlio, il quale può essere a sua volta stabile o instabile: se il figlio è stabile, il processo termina, se il figlio è instabile, inizia un nuovo processo di decadimento che può portare alla emissione di particelle diverse, rispetto a quello del suo predecessore. La radioattività è espressa dall'attività

$$A = dN/dT$$

Dove  $dN$  è il numero atteso di transizioni nucleari di una determinata quantità di radionuclidi da uno stato particolare di energia in un momento determinato nell'intervallo di tempo determinato  $dT$ .

A partire da un dato tempo  $t_0$  l'attività cambia in funzione del tempo e del particolare radionuclide secondo la legge:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

## Capitolo 1 Introduzione alle radiazioni ionizzanti

Dove  $A_0$  è l'attività al tempo  $t_0$  e  $\lambda$  è la costante di decadimento caratteristica di ogni radionuclide.

L'attività misurata ( $A_m$ ) da un qualsiasi strumento è legata all'attività del radionuclide dalla legge :

$$A_m = cA$$

Dove  $c$  è definito come coefficiente di rilevamento.

Il valore del coefficiente  $c$  dipende dalla natura degli strumenti, dalla loro efficienza nel rilevare radiazioni di un particolare tipo di energia, dalla geometria del contatore e del campione e da altri diversi fattori sperimentali.

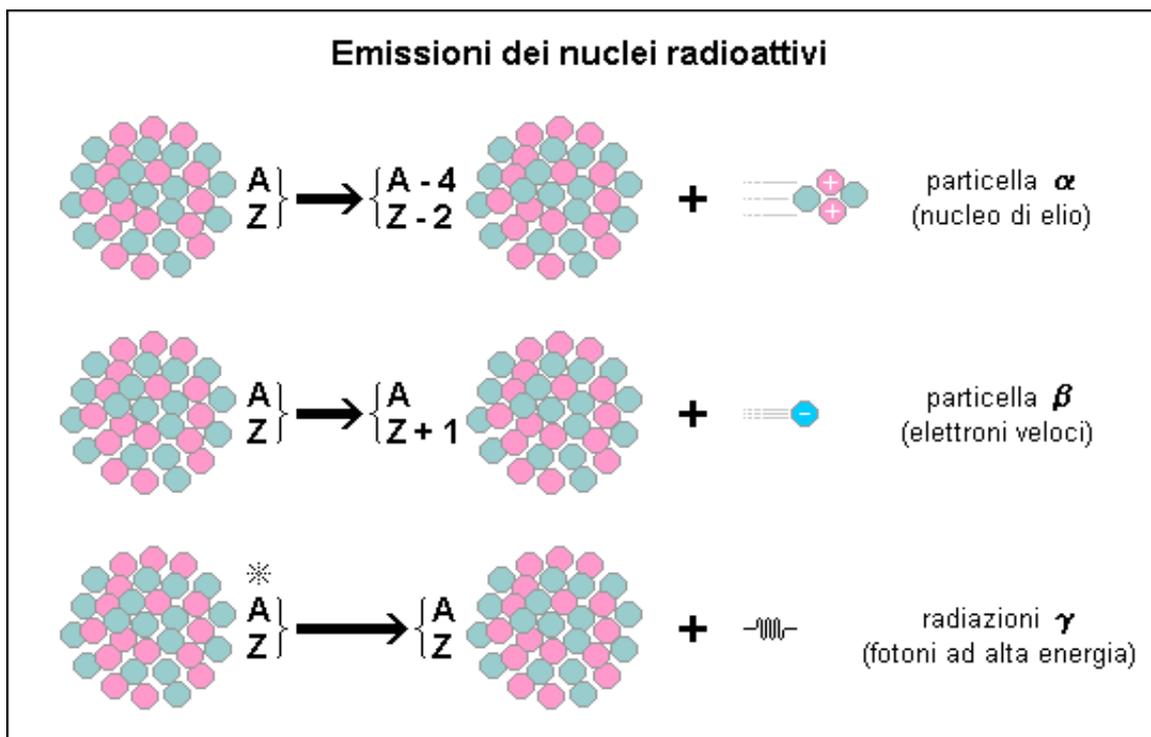
L'unità di misura della radioattività è il **becquerel (Bq)**

$$\underline{1 \text{ Bq} = 1 \text{ disintegrazione al secondo}}$$

Questa unità di misura è assai piccola, infatti, la radioattività si esprime, molto spesso, in multipli di Bq:

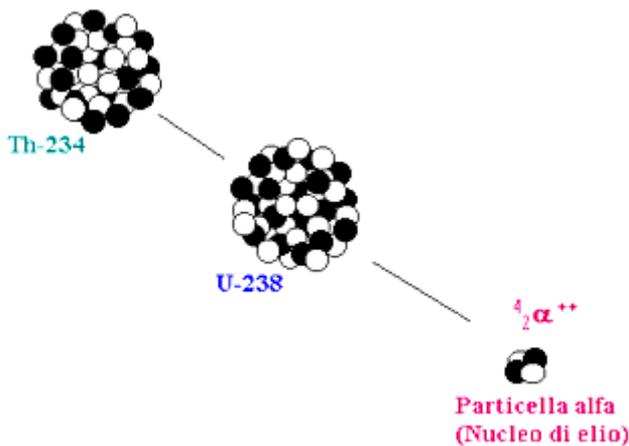
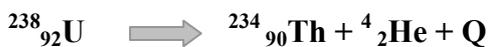
- Kilo-becquerel (kBq) =  $10^3$  Bq
- Mega-becquerel (MBq) =  $10^6$  Bq
- Gigabecquerel (GBq) =  $10^9$  Bq

Un'altra unità di misura è il Curie (Ci) definita come la quantità di radioattività presente in un grammo di radio. Questa unità è immensamente più grande del Bq, perché in un grammo di radio avvengono 37 miliardi di disintegrazioni al secondo; perciò:  $1\text{Ci} = 37 \text{ GBq} = 37 \text{ miliardi di Bq}$ .



## 1.2 DECADIMENTO ALFA

Il **decadimento alfa** avviene tramite l'emissione della particella  $\alpha$ , ossia una particella di elio composta da due protoni e due neutroni e carica uguale a +2. Questo processo è possibile per i nuclidi aventi un numero atomico da 58 in poi e per pochi nuclidi di numero atomico più basso:  ${}^5_2\text{He}$ ,  ${}^5_3\text{Li}$ , e  ${}^6_4\text{Be}$ . L'emissione di una particella alfa riduce il numero atomico e il numero dei neutroni del nuclide figlio di 2 unità e abbassa il numero di massa di 4 unità. Le particelle alfa emesse da un determinato radionuclide sono dotate della stessa energia, e proprio per questo mostrano uno spettro a righe. Quando un nuclide detto "nuclide padre" decade emettendo particelle  $\alpha$ , il prodotto di decadimento detto anche "nuclide figlio" può dar luogo ad ulteriori decadimenti oppure ad emissioni sotto forma di raggi gamma ( $\gamma$ ). In alcuni casi l'energia totale del decadimento alfa,  $E_0$ , è la somma fra l'energia cinetica della particella  $\alpha$ , l'energia di rimbalzo che essa impartisce al nuclide figlio e le energie di ciascun raggio gamma emesso. Il processo di decadimento alfa può essere descritto grazie all'equazione che esprime il decadimento dell' ${}^{238}_{92}\text{U}$  in  ${}^{234}_{90}\text{Th}$ :

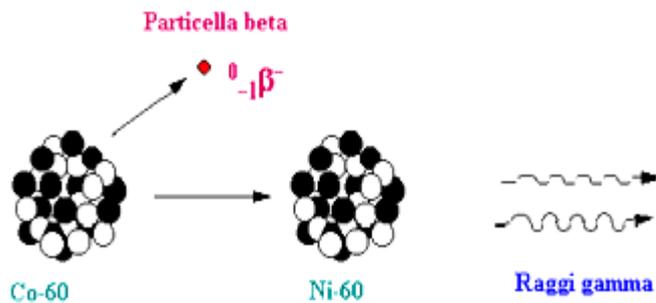


Dove  ${}^4_2\text{He}$  è la particella alfa e  $Q$  è l'energia totale di decadimento, che possono portare il nuclide sia verso lo stato fondamentale sia verso quello eccitato. Esistono cicli di decadimenti chiusi che portano sempre allo stesso prodotto finale, a prescindere dalla sequenza in cui vengono emesse le particelle.

### 1.3 DECADIMENTO BETA ( $\beta$ )

Il **decadimento beta** avviene tramite la trasformazione di un neutrone in una coppia protone-elettrone più un antineutrino elettronico. Il protone resta nel nucleo atomico, mentre le altre due particelle vengono espulse (emesse).

Esempio di questo è il decadimento dell'isotopo  $^{60}_{27}\text{Co}$  (instabile) nell'isotopo  $^{60}_{28}\text{Ni}$  (stabile).



Esistono due forme di decadimento beta,  $\beta^{-}$  e  $\beta^{+}$ , che emettono rispettivamente un elettrone o un positrone. Nel decadimento  $\beta^{-}$  un neutrone è convertito in un protone, un elettrone e un antineutrino elettronico (l'antiparticella del neutrino):



Nel decadimento  $\beta^{-}$  il nucleo prodotto avrà un numero atomico maggiore del padre di un'unità. Nel decadimento  $\beta^{+}$  (osservabile in nuclei ricchi di protoni), un protone interagisce con un antineutrino elettronico per dare un neutrone e un positrone (il decadimento diretto del protone in positrone non è stato ancora osservato):



Il decadimento  $\beta^{+}$  provoca una diminuzione del numero atomico di una unità e l'atomo si trasforma in un elemento chimico differente, situato a sinistra nella tavola periodica.

#### 1.4 ALTRI TIPI DI DECADIMENTO

Durante il **decadimento gamma** il nucleo non si trasforma ma passa semplicemente in uno stato di energia inferiore ed emette un fotone. La radiazione gamma accompagna solitamente una radiazione alfa o una radiazione beta. Dopo l'emissione alfa o beta, il nucleo è ancora eccitato perché i suoi protoni e neutroni non hanno ancora raggiunto la nuova situazione di equilibrio: di conseguenza, il nucleo si libera rapidamente del surplus di energia attraverso l'emissione di una radiazione gamma. Per esempio il cobalto-60 si trasforma per disintegrazione beta in nichel-60, che raggiunge il suo stato di equilibrio emettendo una radiazione gamma. Al contrario delle radiazioni alfa e beta, le radiazioni gamma sono molto penetranti, e per bloccarle occorrono materiali a elevata densità e/o spessore come il piombo. Un metodo alternativo, grazie al quale un nucleo può diminuire il numero dei suoi protoni e aumentare quello dei neutroni, si attua grazie alla cattura di uno dei suoi elettroni extra-nucleari. La **cattura elettronica** detta anche **cattura K** consiste nell'assorbimento di un elettrone dello strato elettronico più interno, strato K degli orbitali elettronici, da parte del nucleo instabile e dell'emissione di un neutrino. Quando un elettrone extra – nucleare viene rimosso dai gusci a più alta energia si crea una lacuna che può essere riempita da un altro elettrone. Durante tale processo, gli elettroni emettono una serie di raggi X che possono essere rilevati.

#### 1.5 EQUAZIONI DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO

La radioattività è un processo statisticamente casuale; l'istante in cui un particolare nucleo radioattivo decade trasformandosi in un nuclide stabile è assolutamente imprecisabile ed imprevedibile. Si può osservare che il numero di decadimenti rispetta una precisa legge statistica. Il numero di decadimenti che avviene in un intervallo  $dt$  è proporzionale al numero di atomi presenti. Questa legge può essere descritta tramite l'equazione differenziale del primo ordine:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

- **la costante di decadimento  $\lambda$** : rappresenta la frazione dei nuclei radioattivi presenti che decadono nell'unità di tempo;
- **$\lambda N$** : il numero totale delle trasformazioni
- **$N$** : il numero totale dei nuclei radioattivi presenti.

## Capitolo 1 Introduzione alle radiazioni ionizzanti

Il segno meno dinanzi al numero totale delle trasformazioni sta ad indicare che il numero dei nuclei radioattivi decresce.

La soluzione dell'equazione differenziale è:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

- $N_0$ : numero di nuclei radioattivi presenti all'istante  $t_0$
- $N$ : numero di nuclei presenti all'istante  $t$ .

Tale legge rappresenta un decadimento esponenziale ed è una soluzione approssimata, in primo luogo perché rappresenta una funzione continua, mentre l'evento fisico reale assume valori discreti, poi perché descrive un processo casuale, solo statisticamente vero. La funzione fornisce un'ottima approssimazione, poiché nella gran parte dei casi  $N$  è estremamente grande. Oltre alla costante di decadimento " $\lambda$ " il decadimento radioattivo è caratterizzato da un'altra costante chiamata **vita media**. Ogni **vita media** rappresenta appunto la media aritmetica sui tempi di vita di tutti gli atomi della stessa specie. La vita media è rappresentata dal simbolo  $\tau$ , legato a  $\lambda$  dalla legge:

$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

Un altro parametro molto usato per descrivere un decadimento radioattivo è dato da **tempo di dimezzamento**  $t_{1/2}$ . Dato un campione di un particolare nuclide, il tempo di dimezzamento ci dice dopo quanto tempo decade un numero di atomi pari alla metà del totale, ed è legato alla vita media dalla relazione:

$$N = \frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

Da cui:

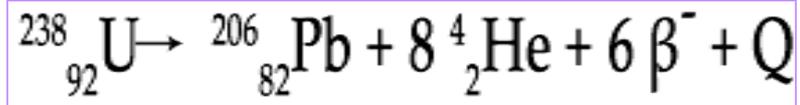
$$\log \frac{1}{2} = -\lambda T_{1/2} \rightarrow T_{1/2} = \frac{\log 2}{\lambda} = 0.693/\lambda$$

Possiamo descrivere il decadimento radioattivo sia in termini di vita media che grazie al tempo di dimezzamento. Il tasso di decadimento di una quantità iniziale di un nuclide decresce esponenzialmente in funzione del tempo; solo la quantità di nuclidi che decade durante un certo intervalli di tempo  $T$  resta costante.

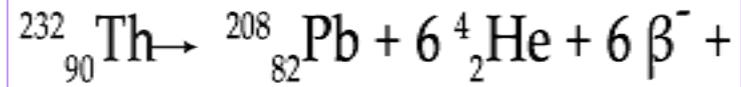
## 1.6 SERIE NATURALI DI DECADIMENTO

In natura esistono tre diverse serie di decadimento:  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ; ognuna di essa termina con la formazione di un isotopo stabile del Pb:  $^{206}\text{Pb}$ ,  $^{207}\text{Pb}$  e  $^{208}\text{Pb}$ . Il decadimento dell' $^{238}\text{U}$  genera un figlio intermedio  $^{234}\text{U}$  e termina con il  $^{206}\text{Pb}$ , l'elemento stabile.

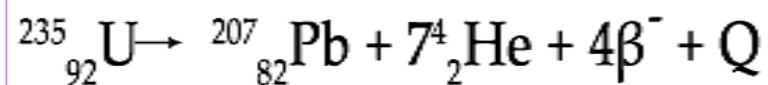
Il processo può essere espresso mediante la formula:



Ogni atomo di uranio che decade produce un atomo di  $^{206}\text{Pb}$  emettendo otto particelle  $\alpha$  e sei particelle  $\beta$ . Ogni elemento della tavola periodica tra l'uranio e il piombo è rappresentato in questa serie e ogni nuclide è distinguibile per il suo caratteristico periodo di dimezzamento. I membri della serie hanno tutti una caratteristica comune: i loro numeri di massa possono essere espressi dalla semplice formula  $4n + 2$ , dove  $n$  è un numero intero. Il decadimento del  $^{232}\text{Th}$  può essere riassunto nello schema:

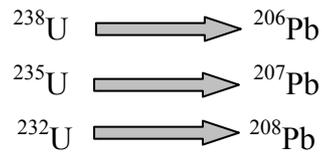


In questo caso il torio emette sei particelle  $\alpha$  e quattro particelle  $\beta$ , formando così il  $^{208}\text{Pb}$ . In entrambi i casi  $Q$  rappresenta la somma delle energie di decadimento dell'intera serie di unità di milioni di elettron-Volts. La serie naturale del Torio è detta serie  $4n$  perché i numeri di massa di tutti i suoi membri sono esattamente divisibili per 4. Il capostipite della serie del torio è l'isotopo  $^{232}\text{Th}$  e il suo elemento finale è l'isotopo stabile  $^{208}\text{Pb}$ . La serie dell'attinio inizia con l' $^{235}\text{U}$  che decade emettendo una particella  $\alpha$  trasformandosi in  $^{231}\text{Th}$  e termina con l'elemento stabile  $^{207}\text{Pb}$  (Actinium D). La serie è detta "4n+3".



Ogni serie di decadimento termina con la formazione di uno specifico isotopo del piombo:

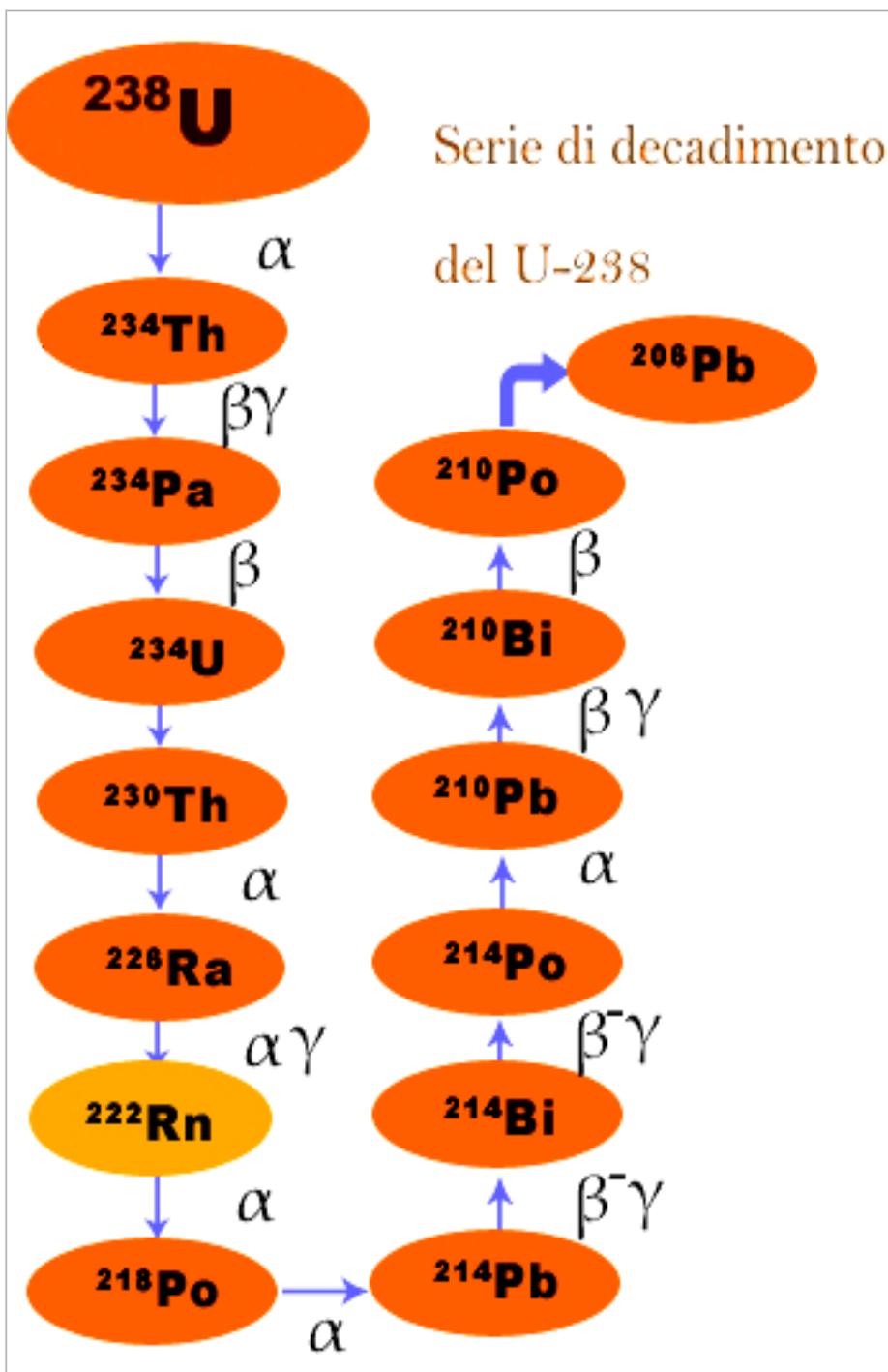
Capitolo 1 Introduzione alle radiazioni ionizzanti



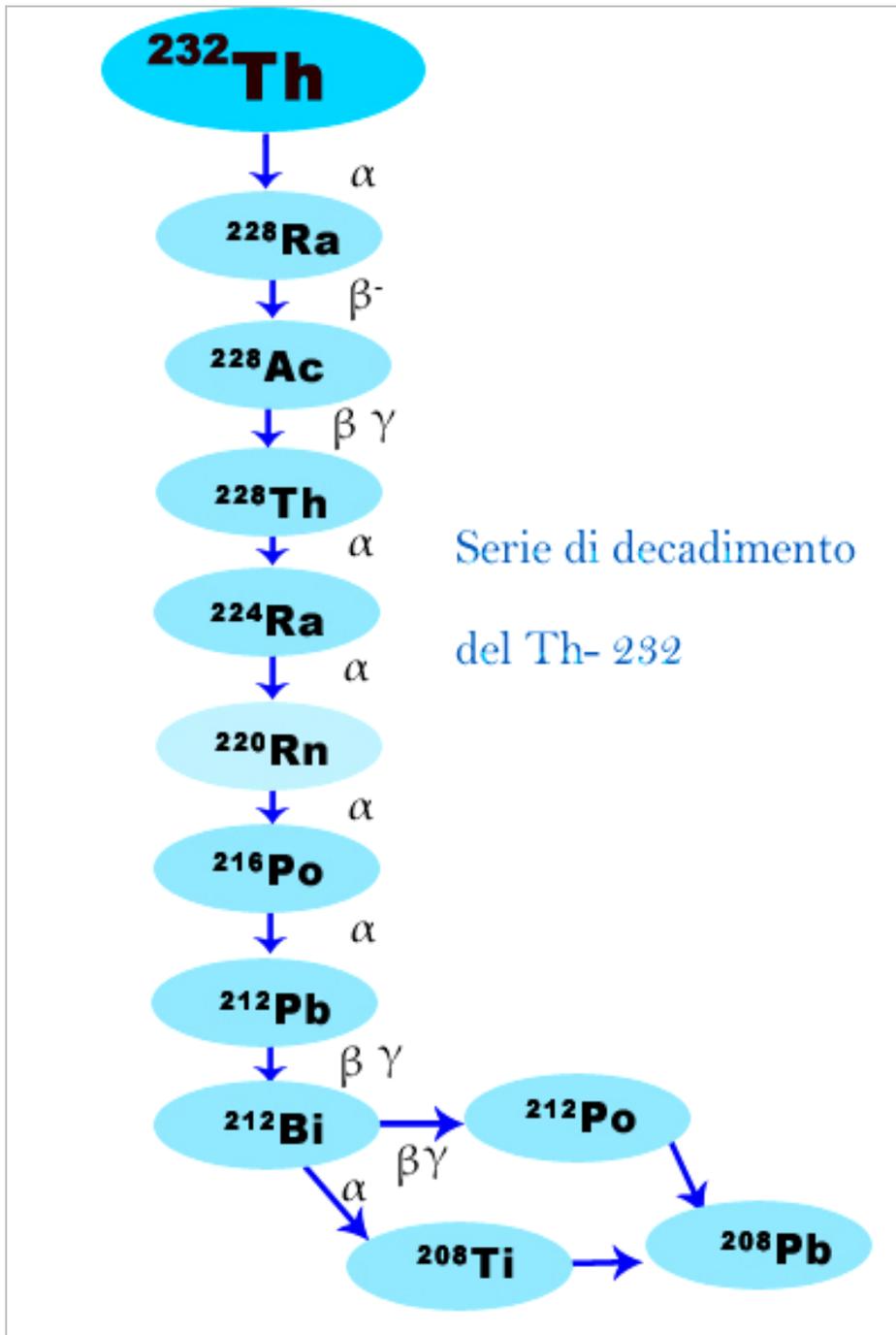
I membri intermedi di una serie di decadimento possono presentare una costante di decadimento maggiore e quindi risultano più radioattivi dei loro genitori; in tal caso la loro sopravvivenza è dovuta alla loro continua produzione per decadimento. Essi tendono a raggiungere una concentrazione di equilibrio man mano che passa il tempo, cioè tendono a raggiungere un'uguaglianza fra la velocità con cui si trasformano e quella con cui decadono. Quando tutti i termini di una serie, tranne l'elemento stabile, sono presenti in proporzioni inverse alle proprie costanti:

$$\lambda_1 N_1 = \lambda_2 N_2 = \dots = \lambda_n N_n$$

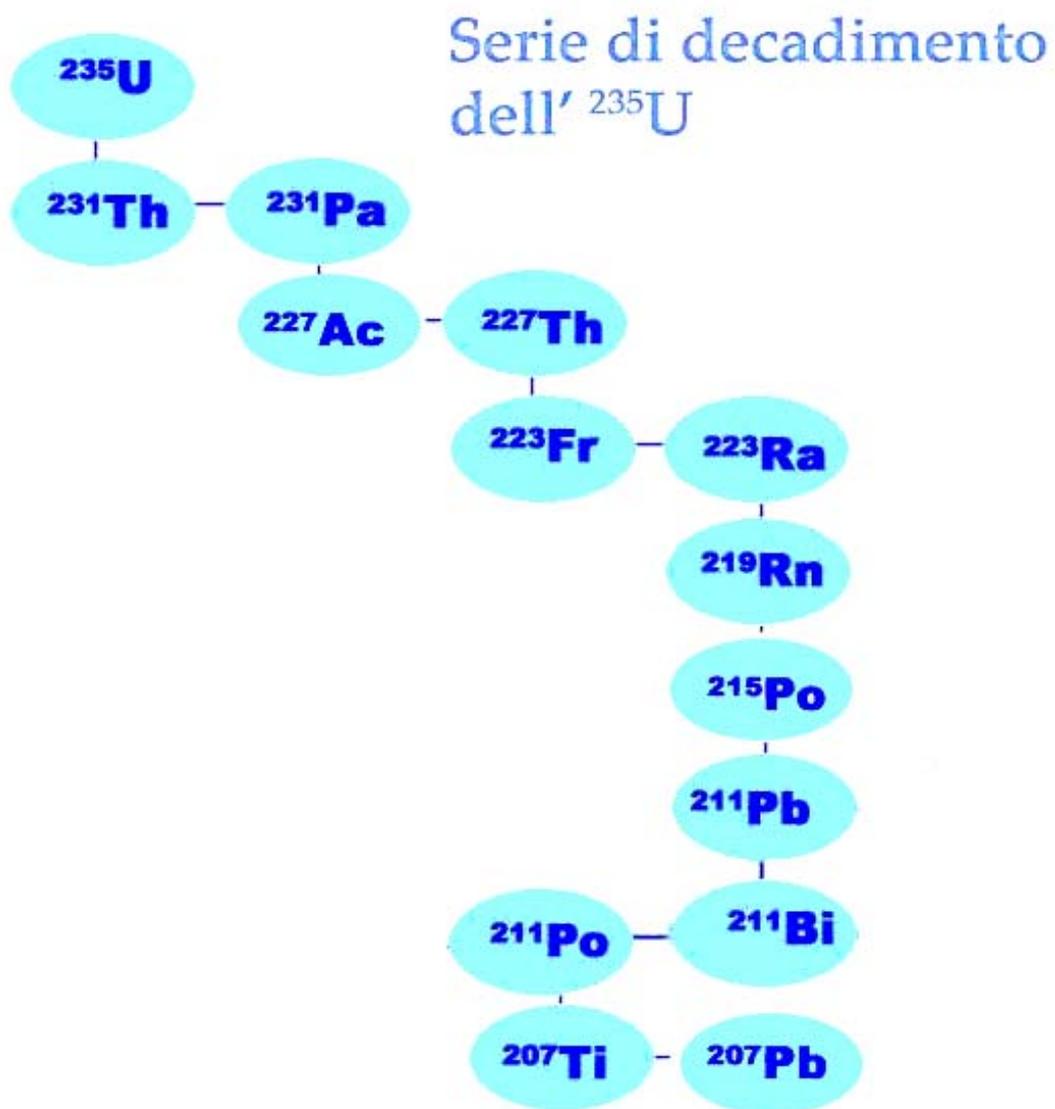
la serie di decadimento si trova in “**equilibrio secolare**”. In questa condizione il tasso di decadimento del nuclide figlio è uguale a quello del proprio nuclide padre.



Serie di decadimento dell'uranio-238



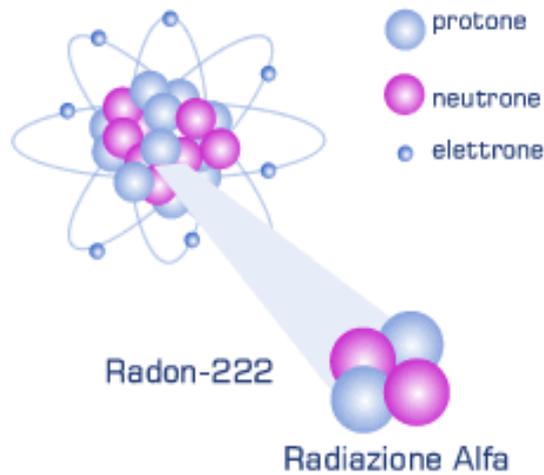
Serie di decadimento del thorio-232



Serie di decadimento dell'Uranio-235

## 2.1 RADON

Il radon è un gas radioattivo naturale, inodore, insapore e incolore, estremamente volatile e solubile nell'acqua.



In natura esistono 27 isotopi del Rn di cui i più abbondanti sono:

- RADON 219 (Acino) proveniente dalla serie di decadimento dell' $^{235}\text{U}$  con un tempo di dimezzamento  $T_{1/2} = 4$  secondi;
- RADON 220 (Thoron) appartenente alla serie di decadimento dell' $^{232}\text{Th}$  con un tempo di dimezzamento  $T_{1/2} = 54.5$  secondi;
- RADON 222 (Radon) derivante dalla serie di decadimento del  $^{238}\text{U}$  con un tempo di dimezzamento  $T_{1/2} = 3.825$  giorni.

### Caratteristiche chimico-fisiche del radon

Numero Atomico	86
Punto di fusione	71°C
Punto di ebollizione	61,8 °C
Densità in condizioni normali	9,96Kg/m <sup>3</sup>
Coefficiente di solubilità in acqua a pressione atmosferica alla temperatura di :	
0° C	0,570
20° C	0,250
37° C	0,167
100° C	0,106

## Capitolo2 Caratteristiche del Radon

L'isotopo più interessante e più abbondante in natura è il Rn-222, unico elemento gassoso della catena del  $^{238}\text{U}$  che tende a sfuggire dal materiale in cui si genera nel materiale per entrare a far parte dei sistemi fluidi che circolano nel materiale (suolo, materiale da costruzione ecc.).

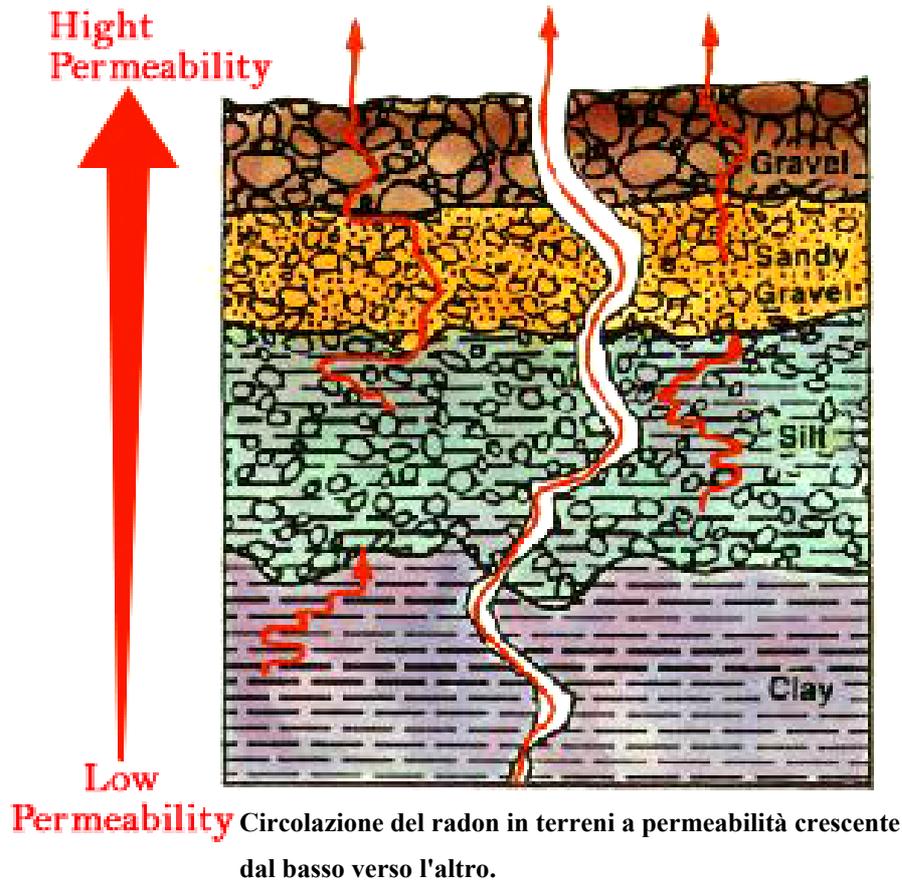
Le concentrazioni di radon aumentano in prossimità di affioramenti di rocce vulcaniche. Sebbene sia lecito immaginare che le concentrazioni di radon siano maggiori nei materiali di origine vulcanica spesso si riscontrano elevati tenori di radionuclidi anche nelle rocce sedimentarie come marne, flysh; più il terreno è permeabile più il radon può salire in superficie. La permeabilità risulta essere elevata negli interstizi più sottili (pori), nelle cavità maggiori (fessure, crepe, zone detritiche e zone scoscese), nei sistemi carsici e nelle grotte.

Gli atomi di Rn si trovano nei suoli in diverse fasi:

- contenuti all'interno dei granuli del suolo;
- adsorbiti sulla superficie dei granuli del suolo;
- dissolti nell'acqua contenuta nei pori del suolo;
- dispersi nei gas contenuti nei pori del suolo.

Come gas disciolto può essere presente nelle falde acquifere perché le acque che percolano attraverso il suolo hanno l'effetto di concentrare e trasportare il Rn nelle falde idriche sotterranee. Tra le possibili fonti di radon nell'ambiente bisogna tener conto, quindi, anche di alcune sorgenti di acqua minerali, sistemi di captazione e distribuzione di acque potabili, di tutti i campi geotermici e persino certi pozzi artesiani; il radon-222, a differenza del Rn-219 e del Rn-220, viene veicolato anche a grandi distanze dal luogo di formazione prima di decadere in Po-218 a causa del maggior tempo di permanenza.

Il radon è presente anche nei materiali da costruzioni, prodotti a partire da rocce come tufi, pozzolane, marmi ecc.



## 2.2 CONSIDERAZIONI AMBIENTALI SUL RADON

Il radon si diffonde nell'aria dal suolo e, a volte, dall'acqua (in cui può essere disciolto). A differenza degli altri elementi radioattivi, il radon può fuoriuscire dal sito di formazione nella roccia o altro materiale rendendosi, così, disponibile; può essere assorbito dal corpo umano tramite la respirazione in tal caso, le pareti dell'apparato respiratorio sono sottoposte ad un bombardamento continuo di radiazioni alfa dei prodotti di decadimenti del Rn.

In spazi aperti, è diluito dalle correnti d'aria e non raggiunge in genere alte concentrazioni. Al contrario, in un ambiente chiuso, come può essere quello di un'abitazione, il radon può accumularsi e raggiungere alte concentrazioni. Se non si adottano misure speciali, la pressione all'interno di una casa in genere è leggermente più bassa che all'esterno, quindi il Rn è aspirato dal suolo.

Il gas radioattivo che penetra in una casa è di solito direttamente proporzionale alla quantità che viene liberata dal terreno e alla sua permeabilità. Tanto maggiore è la permeabilità del suolo, tanto più radon sarà liberato all'aria aperta; un terreno gelato,

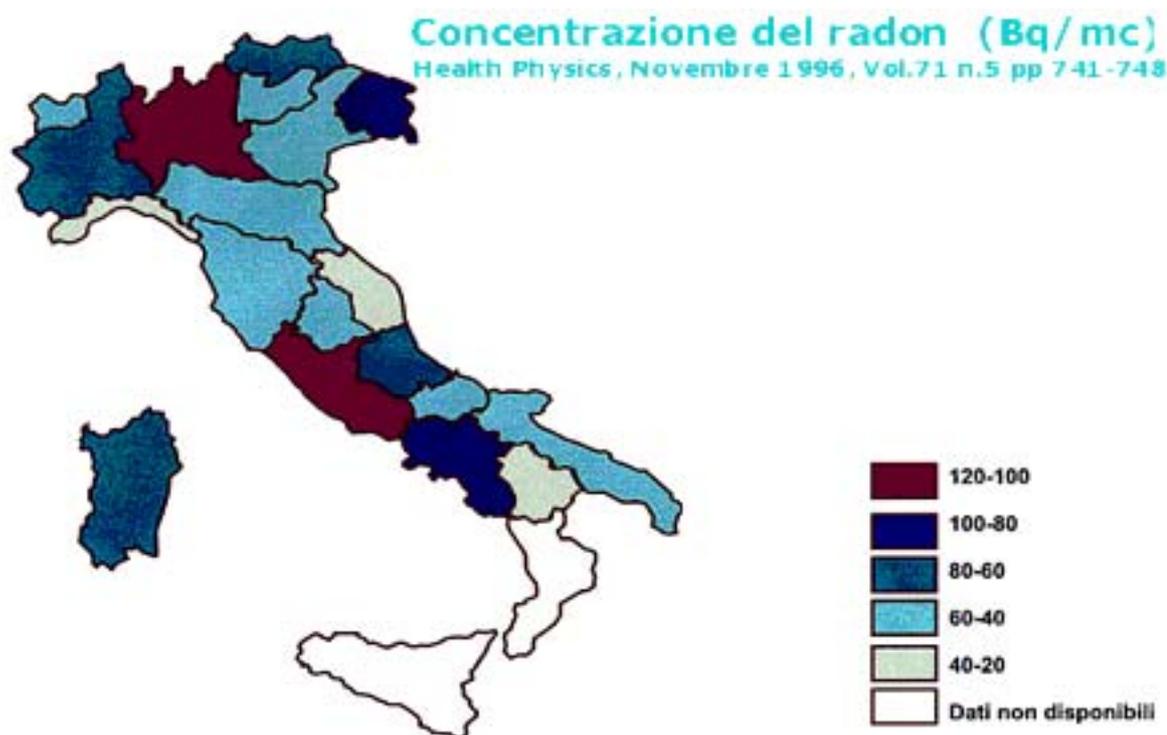
## Capitolo2 Caratteristiche del Radon

impregnato d'acqua o coperto dalla neve limita la fuoriuscita del Rn in atmosfera aumentandone la concentrazione nel suolo e rendendolo più disponibile all'ingresso e negli edifici. Anche le condizioni ambientali esterne possono influire: in inverno, ad esempio, le case presentano una temperatura interna superiore a quella esterna, ciò aumenta la differenza di pressione tra interno ed esterno delle case con una maggiore aspirazione dal suolo (effetto camino). Sono state rilevate delle variazioni di concentrazione periodiche, sia stagionali sia giornaliere, influenzate sia dalle temperature del suolo e dell'aria, sia dalla pressione atmosferica o da eventi meteorologici come la pioggia o la neve.

In Italia la situazione è particolarmente critica a causa della situazione geologica e delle tecniche di costruzione.

Tutto ciò pone problemi sanitari importanti per la popolazione, considerando, tra l'altro che nei paesi industrializzati l'80-90% del tempo è trascorso in ambienti chiusi (Camposo Venuti e Permattei, 1989; ICRP, 1984; BEIR IV, 1988; UNSCEAR, 1988).

In particolare, nella pubblicazione ICRP 65 si legge che "in alcuni casi, elevate concentrazioni di radon possono essere causate da materiali di riempimento e di costruzione caratterizzati da un elevato tasso di Radio-226". Siccome tali materiali possono essere facilmente individuati va valutata la possibilità di procedere all'identificazione di tali materiali al fine di impedirne o limitarne l'uso (ICRP 65, 1993).



### 2.3 I RISCHI PER L'UOMO

La pericolosità del radon è essenzialmente dovuta alle sue peculiarità chimico-fisiche. Essendo inerte ed elettricamente privo di carica è caratterizzato da una grande mobilità (al contrario di elementi come il radio o l'uranio che restano vincolati nel materiale in cui si trovano). In effetti, il radon è un gas che può facilmente penetrare all'interno dei polmoni.

Essendo inerte il radon reagisce poco con i tessuti e così come viene inspirato viene espirato, quindi non è indicabile come il principale responsabile del rischio.

Tuttavia, come visto, il radon fa parte di una catena di decadimento pertanto produce ulteriori radioelementi, solidi che in parte si attaccano al pulviscolo sospeso in aria e in parte rimangono liberi (non attaccati).

Quindi i prodotti di decadimento del radon, detti anche figli, sono anch'essi respirati e si fissano all'interno dell'apparato polmonare; a loro volta continuano a decadere producendo ulteriori radiazioni che colpiscono direttamente i tessuti.

In particolare i due figli Po-218 e Po-214 sono  $\alpha$ -emettitori e a loro è legata la gran parte della dose e del rischio associato alle esposizioni del radon.

Dato che esiste un certo equilibrio tra la presenza di radon e la presenza dei "figli" (equilibrio variabile in funzione delle condizioni ambientali) è generalmente e consapevolmente accettata, ultimamente, una terminologia riferita al Rn, piuttosto che ai figli, quando si tratta dell'esposizione della dose e del rischio associato.

Nei polmoni le particelle alfa che si liberano in seguito al decadimento del radon (figli) possono danneggiare il DNA e l'RNA delle cellule. Se i naturali meccanismi di riparazione degli acidi nucleici (DNA e RNA) non sono in grado di riparare tutti i danni causati da queste radiazioni allora vi è la possibilità che abbia inizio un processo cancerogeno. Al momento non si ritiene sufficientemente accertato l'insorgenza di tumore in altri organi del corpo. Bisogna inoltre sottolineare che i fumatori sono i soggetti più a rischio in quanto è stato dimostrato un effetto sinergico tra la presenza del radon e quella del fumo di sigaretta. In definitiva, si può ipotizzare che circa il 10% dei tumori di questo tipo sia dovuta al gas radioattivo. Per prevenire il rischio di contrarre questa malattia molte organizzazioni internazionali scientifiche hanno fissato dei livelli di riferimento per le abitazioni e per gli ambienti di lavoro al di sopra dei quali si raccomanda di adottare provvedimenti preventivi o correttivi. Molti di questi valori sono diventati dei limiti di legge.

In Italia ancora non c'è una chiara normativa per quanto riguarda le abitazioni. Si può fare riferimento ai valori raccomandati dalla Comunità Europea di 200 Bq/m<sup>3</sup> per le nuove

## Capitolo2 Caratteristiche del Radon

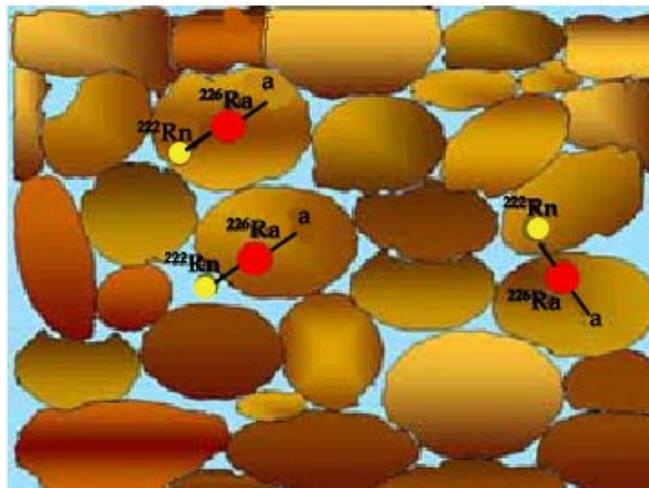
abitazioni (come parametro di progetto) e  $400 \text{ Bq/m}^3$  per quelle già esistenti. Una normativa invece esiste per gli ambienti di lavoro (Decreto legislativo n° 241, del 26/05/2000) che fissa un livello di riferimento di  $500 \text{ Bq/m}^3$ , per alcuni ambienti ben determinati. Anche le scuole rientrano nel campo di applicazioni del decreto legislativo (relativamente agli ambienti individuati).

### 2.4 SORGENTI DI RADON INDOOR

La presenza del radon all'interno delle abitazioni rientra in quello che è chiamato "inquinamento indoor", le principali fonti di inquinamento interno da radon sono il suolo, i materiali da costruzione e l'acqua.

Il radon si forma nelle rocce in seguito al decadimento del radio-226.

In particolare nel decadimento del radio-226 è emessa una particella  $\alpha$  e l'atomo di radon appena formato rincula nella direzione opposta. La posizione dell'atomo di radio nel granulo e la direzione di rinculo dell'atomo stesso determinano la fuoriuscita o meno del radon verso i pori tra i granuli.



**Processo di rinculo dell'atomo di Rn come conseguenza del decadimento del Ra-226**

L'atomo di radon può rimanere nel granulo oppure penetrare in un granulo vicino; infine l'atomo di radon può essere espulso dal reticolo cristallino ed essere successivamente allontanato dai gas del suolo o dall'acqua; solo in tal caso il radon è realmente libero di spostarsi attraverso il suolo, raggiungere la superficie e, infine, diffondersi nell'atmosfera.

## Capitolo2 Caratteristiche del Radon

La quantità di radon che si forma nelle rocce e nel suolo dipende strettamente dal loro contenuto di uranio e radio. Da un punto di vista geologico, la distribuzione di questi due elementi nel suolo varia in funzione del tipo di roccia o di terreno, in base al luogo e alle modalità di formazione. Il radon migra attraverso il suolo grazie a processi come: la diffusione e la convezione o trasporto forzato nel momento in cui è il fluido a trasportare il radon.

La diffusione e la convezione consentono lo spostamento del radon su distanze che variano dai centimetri ai metri, al contrario, il trasporto da parte di un fluido può determinare migrazioni per distanze maggiori.

La diffusione avviene in quanto il radon si sposta verso una zona a minor concentrazione; la velocità con la quale si muove dipende essenzialmente dalla porosità, dalla permeabilità, dal contenuto di fluidi e dalla temperatura.

- La porosità delle rocce può essere classificata in base all'origine dei pori in: porosità primaria (o originaria) quando deriva dal meccanismo che ha generato la roccia, ed in porosità secondaria quando i pori sono creati da variazioni di tipo chimico o meccanico successive alla deposizione del sedimento o alla formazione della roccia.

Si ha poi una porosità totale che comprende la totalità dei pori ed una porosità effettiva che si riferisce ai pori intercomunicanti; essa influenza il grado di esalazione del radon in quanto determina la frazione di volume occupato da pori liberi e disponibili per la diffusione del gas.

La porosità è influenzata non solo dalle dimensione e dalla forma dei granuli, ma anche dalla loro composizione, difatti la presenza di un cemento diminuisce la porosità fin quasi ad annullarla.

La permeabilità è una proprietà che permette al terreno di lasciarsi attraversare dai fluidi senza che vi siano alterazioni di struttura.

- Questa proprietà dipende dalla natura del mezzo, dal fluido che l'attraversa e dalle condizioni dinamiche a cui il fluido è sottoposto. La permeabilità dipende dalle dimensione e dalla continuità dei vuoti: più i vuoti sono ampi più facilmente i fluidi li attraversa.

## Capitolo2 Caratteristiche del Radon

La permeabilità secondaria è determinata dalla presenza di faglie e fratture che rappresentano proprio vie preferenziali per la fuoriuscita dei gas e anche del radon.

Nel trasporto per convezione di solito sono le acque o i gas del suolo che si muovono per instabilità termiche trasportando, in tal modo, il radon anche su distanze molto elevate.

La mobilità dei fluidi nel sottosuolo, e quindi la capacità di migrazione del radon, è influenzata dalla:

- Permeabilità del suolo;
- Quantità d'acqua presente;
- Emissione di gas generati da regioni calde, ad esempio i vulcani;
- Flusso indotto da variazioni di pressione in vicinanza della superficie.

La presenza di linee di faglia o più in generale di fratture del terreno rappresentano le vie preferenziali per la risalita dei fluidi proprio perché rendono gli ammassi rocciosi permeabili mentre la presenza di strati argillosi ne impediscono il passaggio. Nel caso dell'argilla ad elevata umidità la permeabilità dei gas del suolo è notevolmente ridotta e questa può rappresentare una barriera naturale alla fuoriuscita del radon.

Per quanto riguarda i materiali da costruzione c'è da dire che possono contenere quantità variabili e, a volte, relativamente elevate di radionuclidi naturali.

Rocce come i graniti ed i porfidi, spesso usati in edilizia, possono presentare alti livelli di uranio e torio elevati. Inoltre l'impiego di sottoprodotti di processi industriali quali additivi per i materiali da costruzione può aumentare il contributo radioattivo.

Questo gas una volta formato ed esalato dalle rocce e dai minerali, può entrare a far parte degli spazi interstiziali oppure venire disciolto nelle acque di falda e migrare per un'estensione che dipende in gran parte dal suo tempo di dimezzamento.

Le concentrazioni di radon nelle falde acquifere sono controllate in generale dalla litologia e dal contenuto di Uranio e Torio:

- rocce ignee silicee: acque con alte concentrazioni di radon;
- rocce ignee basaltiche: bassissime concentrazioni di radon;
- rocce metamorfiche: livelli di radon variabili;
- rocce carbonatiche fosfatiche: alte concentrazioni;
- rocce arenacee: da basse a medie concentrazioni.

Valori di concentrazione tipica di U e Th nelle rocce ignee

Tipi di rocce ignee	$^{238}\text{U}$ (Bq/Kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/Kg)
<i>Acide (granito)</i>	59	81
<i>Intermedie (diorite)</i>	23	32
<i>Mafiche(basalto)</i>	11	11
<i>Ultrabasiche (durite)</i>	0,4	24
<i>Ultramafiche</i>	0,2	0,2
<i>Gabbri</i>	10	15
<i>Andesiti</i>	29	32
<i>Sieniti-nefeline</i>	100	69

Valori tipici di concentrazione di U e Th nelle rocce sedimentarie

Tipi di rocce sedimentarie	$^{238}\text{U}$ (Bq/Kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/Kg)
<i>Calcari</i>	27	7
<i>Rocce carbonatiche</i>	26	8
<i>Arenarie</i>	18	11
<i>Scisti</i>	44	44
<i>Crosta superiore</i>	34	45
<i>Suolo</i>	25	25

## Capitolo2 Caratteristiche del Radon

La diffusione del radon dal suolo dipende anche da fattori meteorologici: decresce con l'aumentare della pressione atmosferica e cresce con l'aumento del tasso di umidità del suolo.

I principali fattori, che regolano la concentrazione del radon nelle acque e nei gas sono: la pressione atmosferica e la piovosità. L'entità di questi due parametri è condizionata dalla permeabilità dei suoli considerati, riducendosi a valori minimi se i suoli e gli orizzonti di questi sono poco permeabili.

### 3.1 METODI DI MISURA

I vari metodi di campionamento possono essere classificati in funzione della durata del monitoraggio:

- ⇒ **misura istantanea**: viene effettuata in tempi davvero brevi rispetto alle variazioni di concentrazione, e consegna un valore istantaneo.
- ⇒ **misura continua**: si esplica con l'uso di strumenti che permettono la misura di radon in modo continuo o con brevi intervalli dando la possibilità di rilevare fluttuazioni nella concentrazione del gas su tempi dell'ordine dell'ora, fornendo così informazioni anche sulle correlazioni con i diversi parametri che danno luogo alle variazioni;
- ⇒ **misura integrata**: si basa su un campionamento in intervalli di tempo anche molto lunghi (settimane o mesi), per dare notizie sulla concentrazione di radon. Sono i più usati nei casi di valutazione di dose e rischio anche per il rispetto dei livelli di azione indicati dalla legislazione.

Le particelle cariche e le radiazioni gamma vengono rilevate in base ai fenomeni che conseguono la loro interazione con la materia.

Un misuratore di radioattività è costituito essenzialmente da:

- un rivelatore;
- un sistema di amplificazione e conteggio.

All'interno del rivelatore, avviene l'interazione delle particelle o delle radiazioni con una determinata sostanza che genera un impulso in uscita. Il sistema di amplificazione e conteggio aumenta l'ampiezza dell'impulso, conta gli impulsi ed, eventualmente, li discrimina in base alla loro ampiezza. Quando un fascio di particelle o di radiazioni monoenergetiche è interamente assorbito dal rivelatore, le ampiezze degli impulsi in uscita dovrebbero essere tutte, teoricamente, uguali; praticamente, però, esistono diversi fattori che provocano una fluttuazione statistica intorno ad un valore medio delle ampiezze degli impulsi in uscita. La distribuzione delle ampiezze d'impulso determina un picco formando una curva simmetrica intorno ad un valore massimo. La funzione di distribuzione normale

detta anche **funzione di Gauss**, è il modello matematico usato molto spesso per descrivere una reale distribuzione dei valori delle ampiezze.

Lo spettrometro discrimina gli impulsi in base alla loro ampiezza e di conseguenza vengono distinte e registrate radiazioni di diversa energia.

### 3.2 SISTEMI DI RIVELAZIONE

Il processo che mira alla rivelazione delle particelle si basa sulla sottrazione di energia alla particella stessa.

La rivelazione del radon e dei suoi prodotti di decadimento avviene principalmente attraverso la rivelazione della particella alfa; il percorso di tale particella dipende dalla densità del mezzo che attraversa: più il materiale è denso minore sarà la distanza percorsa.

Gli strumenti di misura usati per rivelare la particella alfa possono essere suddivisi in:

⇒ **sistemi di misura attivi**: vengono usati per misurare la concentrazione del radon con strumenti che forniscono risultati in sito; sono strumentazioni dotate di sistemi di conteggio elettronico che rendono istantanea la misura, e quindi non adatte a misurazioni per tempi prolungati. Sono chiamati anche **rivelatori real-time** proprio perché forniscono una risposta in tempo reale;

⇒ **sistemi di misura passivi**: si basano sulla diffusione naturale del gas radon, in questo caso la misura avviene in due fasi: nella prima i rivelatori registrano i conteggi, nella seconda fase avviene l'elaborazione dei dati in laboratorio.

Sono detti **rivelatori non real-time** proprio perché non forniscono una risposta immediata.

Fra i **sistemi attivi** che effettuano la misura al momento dell'esposizione abbiamo:

⇒ **i rivelatori a scintillazione**: utilizzano un materiale di tipo fluorescente, che emette fotoni di luce quando sono colpiti dalle radiazioni ; i fotoni sono poi amplificati e contati.

I *sistemi passivi* utilizzano tecniche di rivelazione con tre tipi di rivelatori/campionatori:

- ⇒ **rivelatori a carica elettrostatica**: le misure avvengono tramite un disco caricato elettrostaticamente e poi inserito in un contenitore, camera, dove genera un campo elettrico. Quando il radon entra, le radiazioni alfa ionizzano l'aria presente dando origine a coppie di ioni che sono attratti dal campo e quindi si depositano sulla superficie del disco diminuendone la carica.
  
- ⇒ **Canestri a carbone attivo**: sono formati da una scatola metallica cilindrica che contiene i carboni attivi che adsorbono il radon presente nell'aria dopo un tempo di esposizione dell'ordine di qualche giorno. I canestri adsorbono il radon ma non lo rivelano, per fare ciò vengono poi analizzati con uno spettrometro gamma di solito uno scintillatore a ioduro di sodio.
  
- ⇒ **rivelatori a tracce**: sono costituiti da film di polimeri sensibili alle particelle alfa, quest'ultime attraversando il materiale perdono energia provocando una variazione dello stato di aggregazione. Tali danni provocano delle microtracce che risulteranno più sensibili all'attacco chimico del materiale circostante, e rendendole visibili ad un successivo sistema di analisi di immagine per il loro conteggio. Vengono usati per osservazioni di lungo periodo e verranno discussi più ampiamente in seguito.

### 3.3 RIVELATORI A TRACCE

I rivelatori a tracce si basano sull'effetto della interazione della particella alfa, lungo il percorso di attraversamento con la materia di cui sono costituiti.

Gli effetti del passaggio di particelle  $\alpha$  sono particolarmente visibili in materiali composti da lunghe molecole come i nitrati di cellulosa o policarbonati. I materiali sensibili sono disposti in appositi contenitori definiti anche "dispositivi di campionamento" che sono esposti nell'ambiente da misurare.

Questi dispositivi sono di varie forme e dimensioni e permettono l'ingresso del radon e non dei suoi prodotti di decadimento e quindi daranno un risultato che è riferibile alla concentrazione del Rn-222 (radon gas); questi dispositivi sono definiti anche "**rivelatori chiusi**".

Altri non impediscono l'esposizione o l'ingresso dei figli, con un risultato legato alla miscela Rn più figli; questi dispositivi sono detti anche “**rivelatori aperti**”.

Le particelle  $\alpha$ , generate dal continuo decadimento del radon, vengono registrate grazie al danneggiamento molecolare permanente che subisce il materiale attraversato; si formano così le cosiddette tracce nucleari “latenti” dell'ordine di alcuni millesimi di micron.

La densità delle tracce latenti (numero per unità di superficie) è proporzionale alla concentrazione di radon presente nell'ambiente per il tempo del campionamento (tempo di esposizione).

Terminata l'esposizione, per rendere visibili le tracce si procede al trattamento chimico del materiale che viene sottoposto ad un bagno in soluzione basica o acida; dopo l'attacco chimico si passa al conteggio delle tracce grazie all'uso di un microscopio ottico.

La visibilità delle tracce è resa possibile perché il reagente usato attacca più rapidamente le porzioni danneggiate del materiale rispetto al materiale non attraversato dalle particelle alfa.

Nel caso in cui l'angolo di incidenza della particella è inferiore all'“angolo limite” proprio del materiale usato la traccia non sarà resa visibile dal bagno chimico.

Conoscendo

- il numero di tracce;
- il tempo di esposizione;
- il fattore di calibrazione del rivelatore;

si può determinare la concentrazione media di radon durante il monitoraggio.

Gli svantaggi di questi rivelatori sono legati essenzialmente al tempo di esposizione, infatti non possono essere utilizzati per brevi periodi di misurazione (una settimana, un mese).

I vantaggi quali:

1. la convenienza economica;
2. il funzionamento semplice;
3. l'uso facilitato;
4. la trasmissibilità di dati postale;
5. la possibilità di misure dai 30 giorni ad 1 anno.

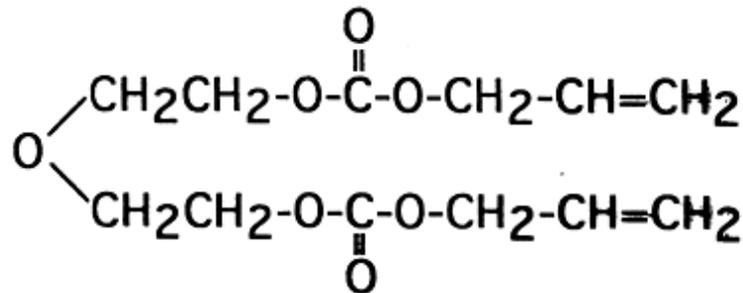
fanno di questi dispositivi la miglior risposta alle richieste di valutazione del rischio associato alle esposizioni al radon.

I rivelatori a tracce più usati al momento presso l'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) sono i rivelatori CR-39.

### 3.4 IL RIVELATORE CR-39

Il CR-39, è un polimero allilico trasparente, ed è una resina termoindurente; in pratica nelle fasi produttive viene diminuita la consistenza del materiale con un riscaldamento prolungato per poi aumentarla irreversibilmente. I CR-39 diventano così immuni alla solubilità e il materiale non è più manipolabile neanche per esposizione a ulteriori riscaldamenti.

Questi rivelatori risultano sensibili alle radiazioni  $\alpha$  e insensibili alla luce, ai raggi X e alle radiazioni  $\beta$  e  $\gamma$ .



I rivelatori vengono realizzati in lastre sottoposte ad un ciclo caratterizzato da periodi di esposizione e temperature diverse

- dai 34°C ai 65°C per 32 ore;
- 90°C per 1 ora.

Dalla lastre si ritagliano i rivelatori su cui viene impresso un codice identificativo resistente anche all'attacco chimico.

L'utilizzo dei CR-39 implica molteplici aspetti positivi:

1. le dimensioni ridotte consentono un utilizzo in grandi quantità, una maggiore maneggevolezza;
2. facilità nell'archiviare i rivelatori già sviluppati in appositi contenitori così da permettere un nuovo conteggio anche dopo un lungo periodo di tempo;
3. Attendibilità nel rilievo per temperature fino a 110°C e per intervalli di umidità compresi fra il 5% e il 95%;
4. costi di produzione bassi.

I problemi legati all'utilizzo di questi rivelatori riguardano la variabilità del numero di tracce di fondo del materiale, legata ad imperfezioni del processo di produzione causate da

### Capitolo 3 Metodologie e tecniche di misurazione

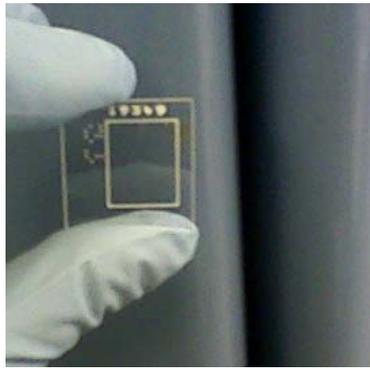
diversi fattori come il grado di purezza nel monomero di partenza, la sua concentrazione e il ciclo termico di polimerizzazione.

Tutte le fasi del processo di produzione devono essere accompagnate dalla massima precisione al fine di consegnare un prodotto finale con caratteristiche ben precise confrontabili fra le diverse produzioni.

#### **4.1 MODALITÀ OPERATIVE TASLIMAGE**

La TASL (Track Analysis System Ltd) propone un metodo per la misura del radon che si basa sullo sviluppo chimico, la scannerizzazione e l'analisi di rivelatori allo stato solido CR-39.

I rivelatori TASTRAK della TASL che consistono in lastre di dimensioni 25x25 mm e di 1 mm di spessore, vengono esposti nell'ambiente per la misura del radon e successivamente subiscono un processo di sviluppo chimico e un conteggio del numero di tracce impresse. (Figura 4.1).



**Figura 4.1: lastrina di dimensioni 25x25 mm e di 1 mm di spessore**

#### **Esposizione**

L'esposizione dei rivelatori avviene all'interno di appositi contenitori costituiti da un telaio interno su cui viene adagiata la lastrina di CR-39. Prima dell'esposizione i rivelatori CR-39 vengono lavati in acqua distillata per rimuovere ogni residuo di polvere, asciugati e trattati con un liquido antistatico. Dopo il trattamento la lastrina viene adagiata con il lato inciso (esposto alle radiazioni) verso l'alto nell'apposito alloggiamento alla base del telaio inferiore (Figura 4.2).



**Figura 4.2: posizione della lastrina all'interno dell' apposito contenitore.**

Mantenendo il telaio in posizione orizzontale si procede alla sua chiusura, con una apposita pressa manuale, con la massima cautela onde evitare rotture o spostamenti indesiderati (Figura 4.3).



**Figura 4.3: Dosimetro dopo l'accurata e precisa chiusura.**

Il dosimetro, dopo la preparazione e prima dell'esposizione, viene sigillato con una saldatura a caldo in buste a bassa permeabilità al radon. La misurazione inizia nel momento in cui la busta viene aperta. Il dosimetro deve essere posizionato in un luogo lontano da fonti di calore o di luce diretta.

Alla fine della misurazione è buona norma richiudere nuovamente i dosimetri in buste sigillate fino al loro arrivo in laboratorio, dove, una volta smontati, le lastrine vengono nuovamente sigillate in bustine a bassa permeabilità radon ad una temperatura pari a  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; come alternativa si possono conservare in atmosfera di azoto o d'aria priva di radon.

### Bagno termico

I rivelatori sono posizionati in un telaio di acciaio inox con il codice numerico verso l'alto e il codice meccanografico rivolto verso sinistra. I telai sono poi montati nell'apposito rack che contiene fino a 6 telai.

L'attacco chimico viene eseguito tramite un bagno termostatico a 98 °C in una soluzione di idrossido di sodio (NaOH) in acqua distillata per un periodo di 60 minuti ( **Figura 4.4**).



**Figura 4.4** introduzione dell'apposito rack con 6 telai all'interno della soluzione a 98°C della soluzione a 90°C

La temperatura viene controllata con un termometro a mercurio e la densità a 98°C della soluzione deve essere pari a 1.181 g/cm<sup>3</sup>; nel caso in cui il valore sia superiore o inferiore è necessario aggiungere acqua distillata o NaOH in pastiglie.

Quando tutti i parametri sono a norma viene introdotto il rack con le 6 griglie. Dopo che sono trascorsi 60 minuti esso viene estratto e immerso per circa 1 minuto in acqua distillata agitando al fine di rimuovere i residui di NaOH, come ultimo passaggio si pongono le griglie in un bagno definito di arresto formato da una soluzione di acido acetico (CH<sub>3</sub>COOH) al 2% e si lasciano immerse per 30 minuti agitando periodicamente.

Al termine si risciacquano in acqua distillata per 10 minuti ed infine si lasciano asciugare

### Letture delle tracce tramite il software TASLIMAGE

In seguito al trattamento chimico le tracce  $\alpha$  sono visibili al microscopio e si può procedere al conteggio tramite l'analizzatore automatico di immagini TASLIMAGE. Prima della lettura bisogna accertarsi che sui rivelatori non siano presenti eventuali residui dell'attacco chimico come ad esempio calcare o polvere; in questo caso bisogna pulirli accuratamente con acqua distillata e asciugarli con un panno morbido che non lasci residui.

Un supporto di metallo, che può contenere fino a 49 rivelatori, viene montato sul tavolo motorizzato del sistema avendo cura che il codice meccanografico sia sul lato sinistro e quello numerico verso l'alto e infine fissato con quattro viti.

La caratteristica di questo sistema consiste in una lettura automatizzata e basata sul software TASLIMAGE.

Il programma effettua automaticamente il conteggio delle tracce presenti grazie all'impostazione di pochi comandi.

Qui di seguito vengono descritte le semplici istruzioni da effettuare:

- Utilizzando le frecce presenti sulla tastiera si posiziona il tavolo motorizzato in modo da leggere il primo rivelatore e da visualizzare sul monitor un'immagine all'interno dell'area del rivelatore.
- Controllare la corretta illuminazione con il comando IMAGE CONTROL/GREY LEVEL HISTROGRAM. Il valore deve essere compreso fra 180 e 200;
- Usare i comandi SETTING –SCANNING per impostare il numero di plastiche da leggere;
- Impostare il numero delle plastiche in direzione X (X number of plastics) ovvero da sinistra verso destra;
- Impostare il numero delle plastiche in direzione Y (Y numbers of plastics) ossia dal fronte al retro dell'apparecchio;
- Tramite il comando SAVE AND APPLY salvare le modifiche e poi chiudere la finestra SETTING;

#### Capitolo 4 Metodo TASLIMAGE per il conteggio delle tracce

- Avviare la scansione cliccando su MULTIPLE SAMPLE SCAN (Figura 4.5);
- Alla fine della scansione appare una finestra che mostra i codici dei rivelatori sottoposti a lettura, la loro posizione e il numero di tracce conteggiate, eventuali errori sono indicati da opportuni colori. In caso di errore nella lettura del codice basta cliccare sullo stesso e immettere quello corretto.
- Con il tasto FINISH si chiude la finestra e i dati vengono salvati in automatico nel formato: IMGXXXXX.TRK; se una plastica viene riletta i dati vengono sovrascritti e in automatico viene creata una copia di BACKUP del precedente in formato \*.BAK;
- Il comando SETUP AS DOSEREADER permette la visualizzazione dei risultati.
- Il file con i dati può essere aperto con EXCEL, in questo modo i dati possono essere filtrati, stampati o esportati.

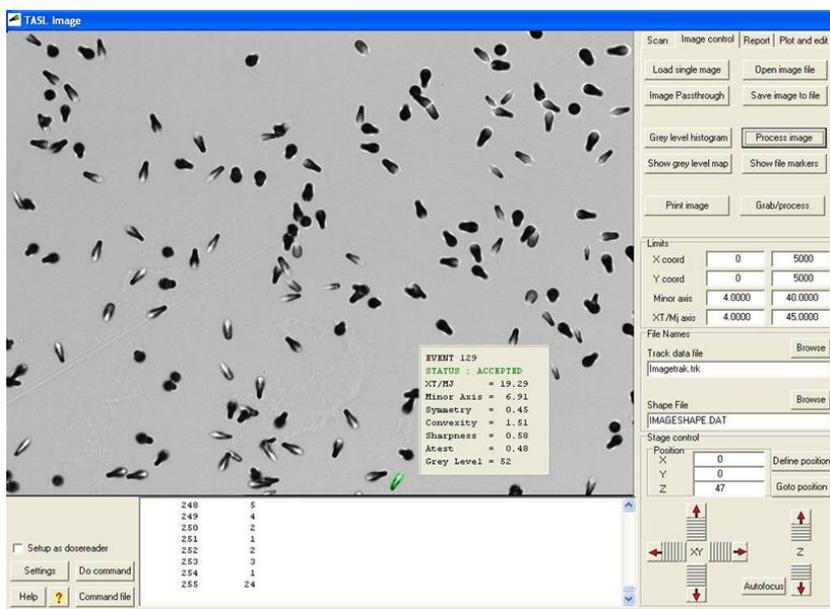


Figura 4.5 visualizzazione sul monitor del conteggio delle tracce dopo aver avviato la scansione

## 4.2 FOGLIO EXCEL

In generale si preferisce riportare i risultati su un foglio di calcolo EXCEL. Nella sua forma base e con riferimento a un solo rivelatore, esso si presenta con le colonne riportate di seguito:

Device	File_date	Start_date	Finish_date	Days	Total	Esposizione TASL KBq_m3_h					
18150	26/05/2008	26/05/2008	26/05/2008	0	3409	960	±	77			
Concentrazione TASL [Bq_m3]			Esposizione Annua TASL [Bq_m3_Ann]		N1	N2	Extra1	Extra2	Extra3	Area	
0	±	0	0	±	0	688	3146	205	62	3729	92

In cui:

- DEVICE : numero del dispositivo letto;
- FILE DATE: data di creazione del file;
- START DATE FINISH DATE: data di inizio e fine esposizione;
- DAYS: numero di giorni di esposizione ( $D$ );
- TOTAL: numero di tracce accettate per cm<sup>2</sup> ( $T$ );
- ESPOSIZIONE TASL [KBq m<sup>-3</sup> h]: valore dell'esposizione ( $E$ ) con incertezza tipo composta  $uc(E)$  forniti dal sistema TASLIMAGE;
- CONCENTRAZIONE TASL [Bq m<sup>-3</sup>] concentrazione di attività di radon ( $CRN$ ) con incertezza tipo composta  $uc(C_{RN})$  forniti dal sistema TASLIMAGE;
- ESPOSIZIONE ANNUA TASL [Bq m<sup>-3</sup> anno]: valore dell'esposizione annuale con incertezza tipo, impiegato nel Regno Unito;
- N1: numero di tracce attribuibili al <sup>214</sup>Po;
- N2: numero totale di tracce accettate dopo tutte le selezioni, prima delle correzioni per densità ed eventuale non uniformità della distribuzione di tracce;
- EXTRA1: tracce rifiutate nella banda sotto <sup>214</sup>Po poiché troppo piccole in confronto al rumore;
- EXTRA 2: tracce rifiutate secondo i parametri di simmetria, convessità, nitidezza e a-test;
- EXTRA 3: numero totale di oggetti dopo la selezione per livello di grigio e prima delle altre selezioni;
- AREA: area delle tracce

### 4.3 VERIFICA CON LA SORGENTE Am-241

Per la verifica del corretto andamento dell'attacco chimico si utilizzano dei rivelatori esposti ad una sorgente di  $^{241}\text{Am}$  in condizioni riproducibili.

L'irraggiamento con la sorgente nota di americio-241 avviene per un tempo prefissato di 5 minuti. È essenziale che il tempo di durata dell'irraggiamento (di 5') sia lo stesso di quello impiegato durante l'attacco chimico dei rivelatori per la taratura.

I risultati del conteggio delle tracce di questi rivelatori di controllo sono confrontati con i risultati di rivelatori esposti ad  $^{241}\text{Am}$ , ma inseriti nel bagno in cui sono stati sviluppati i rivelatori usati per la taratura dell'intera partita di CR-39.

Per il controllo tramite sorgente di americio sono attualmente in uso due dispositivi:

- ❖ vecchio dispositivo in cartone;
- ❖ nuovo dispositivo in alluminio.

I tempi di esposizione dei rivelatori alla sorgente di americio non variano fra i due dispositivi, l'unica differenza può essere la geometria della esposizione.

Il lavoro di stage svolto presso il laboratorio ha riguardato essenzialmente una verifica della efficienza di alcuni rivelatori e della loro sensibilità all'Am-241; paragonando fra di loro quattro gruppi di rivelatori esposti al nuovo e al vecchio sistema.

E' stato, poi, analizzato un quinto gruppo per la verifica della stabilità delle tracce di fondo dei rivelatori CR-39, in uso nel laboratorio, confrontando i risultati con i fondi di riferimento ottenuti in precedenza e con i fondi di uno sviluppo chimico effettuato nel corso del 2008 (sviluppo 32).

## **5.1 VERIFICA DELLA EFFICIENZA DI RIVELATORI COMPRESI IN UNO STOCK**

L'obiettivo dell'esperimento è quello di verificare che i rivelatori dello stock i cui codici sono compresi fra 17844 e 19591 hanno una sensibilità all'americio paragonabile a quella di altri rivelatori presi in esame.

## **5.2 PRIMA FASE DEL LAVORO**

1. selezionare un rivelatore ogni 50 nell'intervallo dei codici da 17844 a 19591 per esposizione a sorgente di americio nel nuovo sistema di esposizione metallico.  
(**Gruppo 1** = 36 rivelatori)
2. selezionare un rivelatore a caso dal codice 19664 al codice 19987 per esposizione a sorgente di americio nel nuovo sistema di esposizione metallico.  
(**Gruppo 2** = 10 rivelatori)
3. selezionare un rivelatore ogni 100 nell' intervallo dei codici da 17868 a 19148 e rivelatori a caso dal codice 19219 al 19593 per esposizione a sorgente di americio nel vecchio sistema di esposizione in cartone.  
(**Gruppo 3** = 21 rivelatori)
4. selezionare un rivelatore a caso dal codice 19667 al codice 19970 per esposizione a sorgente di americio nel vecchio sistema di esposizione.  
(**Gruppo 4** = 10 rivelatori)
5. selezionare un rivelatore ogni 100 da 17887 al 19787 per la verifica delle tracce di fondo dei rivelatori CR-39.  
(**Gruppo 5** = 20 rivelatori)

**Capitolo 5 Verifica dell'efficienza dei rivelatori**

<b>Gruppo 1 Nuovo sistema esposizione <sup>241</sup>Am</b>	<b>Gruppo 2 Nuovo sistema esposizione <sup>241</sup>Am</b>	<b>Gruppo 3 Vecchio Sistema di esposizione <sup>241</sup>Am</b>	<b>Gruppo 4 Vecchio Sistema di esposizione <sup>241</sup>Am</b>	<b>Gruppo 5 Fondo</b>
17844	19664	17868	19667	17887
17895	19691	17950	19695	17987
17945	19742	18047	19747	18087
17994	19791	18150	19793	18187
18044	19817	18248	19821	18287
18094	19841	18347	19843	18387
18144	19891	18448	19893	18487
18195	19941	18548	19925	18587
18244	19978	18648	19952	18687
18294	19987	18748	19970	18787
18344		18847		18887
18394		19048		18987
18444		19148		19087
18494		19219		19187
18544		19248		19287
18594		19291		19387
18644		19348		19487
18694		19391		19587
18744		19450		19687
18794		19494		19787
18844		19593		
18894				
18944				
18994				
19044				
19095				
19145				
19199				
19218				
19244				
19295				
19344				
19395				
19444				
19491				
19591				

**Tabella 1: Elenco dei rivelatori selezionati e divisione in 5 gruppi**

Nota 1: Nella tabella proposta sono state eliminate le colonne riguardanti la data della creazione del file, la data di inizio e di fine esposizione e il numero di giorni di esposizione . 37

### 5.2.1 MATERIALI E METODI

- Nuovo dispositivo: dispositivo in alluminio per l'esposizione dei rivelatori alla sorgente di americio;
- Vecchio dispositivo: dispositivo in cartone per l'esposizione dei rivelatori alla sorgente di americio;
- sorgente di  $^{241}\text{Am}$  emissione  $9,800 \alpha/\text{min}/2\pi$  con incertezza =1.5%
- cronometro;

### 5.2.2 POSIZIONE DEL RIVELATORE PER L'IRRAGGIAMENTO ALLA SORGENTE DI AM-241

- Nel vecchio dispositivo di cartone: il rivelatore è adagiato con la superficie sensibile rivolta verso l'alto, in un contenitore di plastica e la sorgente è posta al di sopra di esso, con la superficie di emissione rivolta verso il basso nell'apposito coperchio (Figura:5.1).

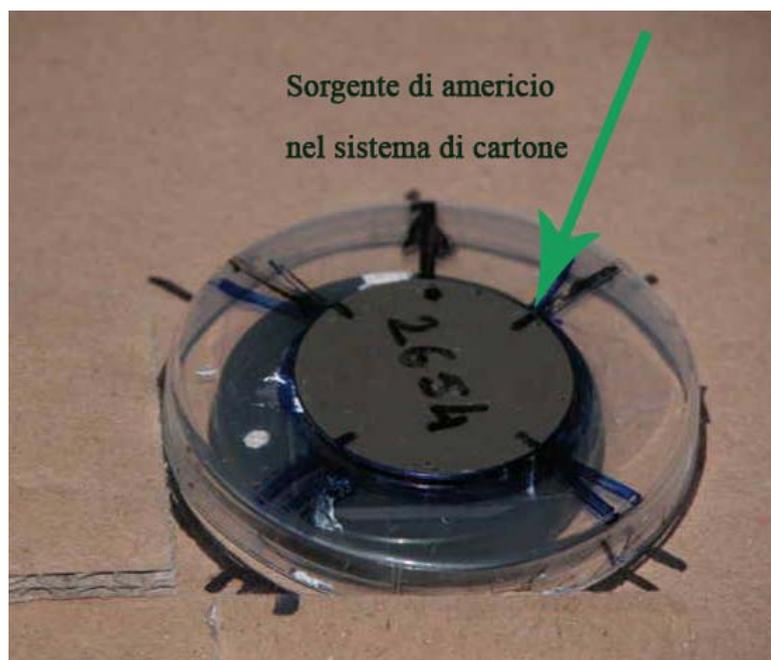


Figura 5.1: Sistema in cartone e posizione della sorgente di americio-241.

- Nel nuovo dispositivo di alluminio: la sorgente è posizionata con la superficie di emissione rivolta verso l'alto e il rivelatore è adagiato con la superficie sensibile verso il basso (Figura: 5.2).

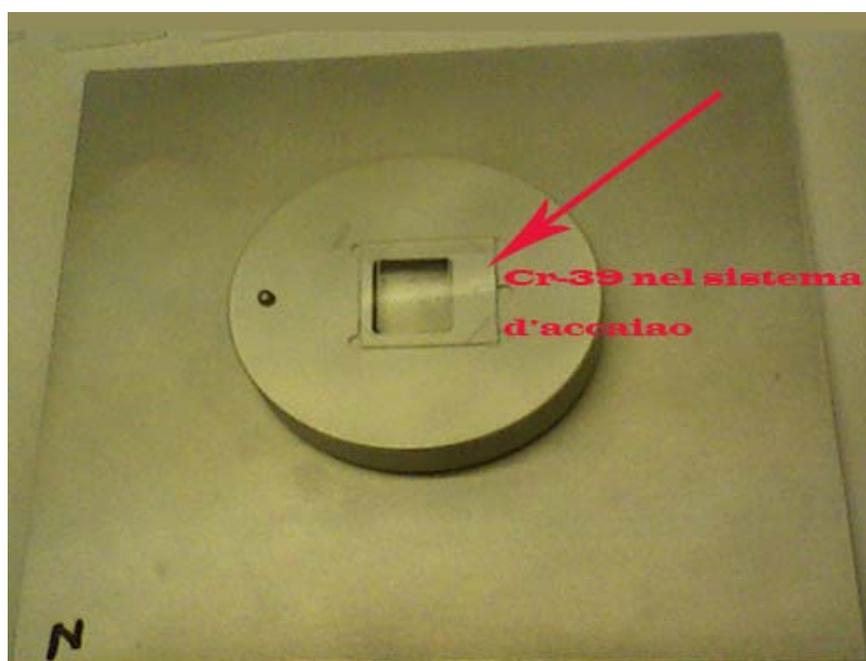


Figura 5.2: sistema in acciaio e posizione del rivelatore CR-39.

Dopo esser stati esposti per un tempo pari a 5 minuti, i rivelatori vengono inseriti in buste a bassa permeabilità al radon e conservati in congelatore fino allo sviluppo chimico.

### 5.3 SECONDA FASE DEL LAVORO

I rivelatori CR-39 dopo essere stati selezionati ed esposti all'irraggiamento sono stati trattati chimicamente seguendo la procedura precedentemente esposta. Dopo lo sviluppo chimico sono stati lavati in acqua distillata, asciugati con un panno morbido che non lascia residui e infine sono stati montati in un apposito supporto per la lettura automatizzata al TASL.

Seguendo i pochi comandi per avviare il conteggio sono stati registrati i risultati in un foglio EXCEL e divisi in base al gruppo di appartenenza.

**Capitolo 5 Verifica dell'efficienza dei rivelatori**

Device	Total	KBq m3 h	Bq m3	Bq m3 Ann	N1	N2	Extra1	Extra2	Extra3	Area
17844	3512	989 ± 97	0 ± 0	0 ± 0	658	3008	233	77	4239	88
17895	3596	1013 ± 134	0 ± 0	0 ± 0	678	3101	184	114	4031	82
17945	4068	1293 ± 139	0 ± 0	0 ± 0	757	3887	202	131	5021	87
17994	3303	929 ± 103	0 ± 0	0 ± 0	695	3176	148	95	3625	86
18044	3618	1101 ± 96	0 ± 0	0 ± 0	702	3448	170	86	3938	92
18094	3012	846 ± 127	0 ± 0	0 ± 0	586	2680	248	112	3642	88
18144	3683	1619 ± 132	0 ± 0	0 ± 0	395	3516	112	125	3923	84
18195	3648	1394 ± 128	0 ± 0	0 ± 0	537	3555	109	123	3991	94
18244	3735	1518 ± 118	0 ± 0	0 ± 0	483	3582	99	111	4108	92
18294	3173	892 ± 94	0 ± 0	0 ± 0	659	3012	184	84	3671	96
18344	3532	1254 ± 133	0 ± 0	0 ± 0	571	3371	127	126	3904	90
18394	3449	1238 ± 128	0 ± 0	0 ± 0	549	3294	122	121	3695	89
18444	3471	977 ± 86	0 ± 0	0 ± 0	711	3251	213	73	3995	97
18494	3644	1075 ± 124	0 ± 0	0 ± 0	737	3511	231	117	4711	99
18544	3878	1470 ± 134	0 ± 0	0 ± 0	578	3771	170	129	4253	96
18594	3537	1566 ± 125	0 ± 0	0 ± 0	286	3336	68	199	3689	84
18644	3613	1194 ± 114	0 ± 0	0 ± 0	644	3464	157	106	4076	95
18694	3469	1277 ± 100	0 ± 0	0 ± 0	533	3323	132	91	3717	94
18744	4078	1151 ± 128	0 ± 0	0 ± 0	815	3726	241	114	4654	92
18794	3420	1206 ± 111	0 ± 0	0 ± 0	558	3267	133	103	3676	92
18844	3664	1492 ± 96	0 ± 0	0 ± 0	474	3533	105	87	4000	88
18894	3354	944 ± 82	0 ± 0	0 ± 0	681	3112	119	68	3552	88
18944	3382	952 ± 117	0 ± 0	0 ± 0	692	3164	155	107	3856	86
18994	3123	1341 ± 118	0 ± 0	0 ± 0	360	3035	94	113	3327	82
19044	3473	1469 ± 142	0 ± 0	0 ± 0	412	3340	101	137	3687	86
19095	3687	1634 ± 72	0 ± 0	0 ± 0	365	3529	88	123	3961	85
19145	3478	1358 ± 147*	0 ± 0	0 ± 0	555	3675	175	153	4209	87
19199	3557	1002 ± 101	0 ± 0	0 ± 0	694	3173	194	85	3938	92
19218	3430	966 ± 135	0 ± 0	0 ± 0	678	3100	249	121	4004	87
19244	3552	1025 ± 104	0 ± 0	0 ± 0	735	3431	189	96	4089	94
19295	3093	869 ± 113	0 ± 0	0 ± 0	608	2780	192	99	3666	81
19344	3637	1025 ± 122	0 ± 0	0 ± 0	610	2790	313	89	4712	91
19395	4104	1703 ± 53	0 ± 0	0 ± 0	512	3962	194	24	4728	149
19444	4216	1870 ± 74	0 ± 0	0 ± 0	363	4065	197	39	5235	150
19491	4141	1837 ± 99	0 ± 0	0 ± 0	327	4046	159	59	5003	150
19591	4231	1608 ± 55	0 ± 0	0 ± 0	621	4065	248	33	5500	148

**Tabella 2 risultati lettura Gruppo 1**

**Capitolo 5 Verifica dell'efficienza dei rivelatori**

Device	Total	KBq m3 h	Bq m3	Bq m3 Ann	N1	N2	Extra1	Extra2	Extra3	Area
19664	3971	1348 ± 61	0 ± 0	0 ± 0	692	3842	215	44	4669	140
19691	4156	1693 ± 53	0 ± 0	0 ± 0	539	4012	180	13	4677	145
19742	4098	1505 ± 54	0 ± 0	0 ± 0	640	3963	222	32	4907	146
19791	3914	1104 ± 58	0 ± 0	0 ± 0	807	3690	286	37	4843	141
19817	4126	1830 ± 42	0 ± 0	0 ± 0	413	3962	183	47	5063	144
19841	3929	1552 ± 50	0 ± 0	0 ± 0	549	3851	240	20	4796	147
19891	4056	1145 ± 54	0 ± 0	0 ± 0	827	3782	309	28	4717	142
19941	4151	1841 ± 73	0 ± 0	0 ± 0	358	3987	152	47	4494	136
19978	4424	1963 ± 107	0 ± 0	0 ± 0	341	4253	146	61	5388	140
19987	4467	1982 ± 80	0 ± 0	0 ± 0	388	4347	216	50	5767	154

**Tabella 3 risultati lettura Gruppo 2**

Device	Total	KBq m3 h	Bq m3	Bq m3 Ann	N1	N2	Extra1	Extra2	Extra3	Area
17868	2953	829 ± 97	0 ± 0	0 ± 0	569	2602	160	81	3296	69
17950	3108	874 ± 58	0 ± 0	0 ± 0	637	2912	155	42	3388	86
18047	3461	1155 ± 88	0 ± 0	0 ± 0	638	3476	158	82	3975	99
18150	3409	960 ± 77	0 ± 0	0 ± 0	688	3146	205	62	3729	92
18248	3446	970 ± 73	0 ± 0	0 ± 0	720	3293	118	60	3694	97
18347	3250	981 ± 50	0 ± 0	0 ± 0	644	3142	117	31	3462	102
18448	3282	923 ± 61	0 ± 0	0 ± 0	638	2916	169	41	3598	95
18548	3730	1409 ± 60	0 ± 0	0 ± 0	567	3681	140	45	4218	109
18648	2754	805 ± 90	0 ± 0	0 ± 0	396	1878	92	56	2130	91
18748	3455	973 ± 86	0 ± 0	0 ± 0	731	3341	199	76	4005	96
18847	3287	925 ± 92	0 ± 0	0 ± 0	681	3113	146	82	3598	88
19048	3715	1646 ± 88	0 ± 0	0 ± 0	310	3559	119	107	4090	97
19148	3769	1670 ± 91	0 ± 0	0 ± 0	381	3633	155	166	4521	99
19219	3390	1490 ± 52	0 ± 0	0 ± 0	368	3283	53	35	3422	94
19248	3514	1357 ± 71	0 ± 0	0 ± 0	503	3392	101	59	3791	96
19291	3385	953 ± 90	0 ± 0	0 ± 0	713	3259	157	80	3811	86
19348	3648	1034 ± 127	0 ± 0	0 ± 0	803	3690	242	127	4487	96
19391	3558	1576 ± 85	0 ± 0	0 ± 0	210	3508	85	33	4117	145
19450	3571	1582 ± 85	0 ± 0	0 ± 0	187	3509	60	22	3932	149
19494	3634	1610 ± 33	0 ± 0	0 ± 0	384	3592	119	8	3968	153
19593	3410	960 ± 44	0 ± 0	0 ± 0	725	3313	174	14	3773	143

**Tabella 4 risultati lettura Gruppo 3**

Nota 1: Nella tabella proposta sono state eliminate le colonne riguardanti la data della creazione del file, la data di inizio e di fine esposizione e il numero di giorni di esposizione . 42

**Capitolo 5 Verifica dell'efficienza dei rivelatori**

Device	Total	KBq_m3_h	Bq_m3	Bq_m3_Ann	N1	N2	Extra1	Extra2	Extra3	Area
19667	3571	1313 ± 47	0 ± 0	0 ± 0	549	3415	139	13	3764	151
19695	3645	1615 ± 87	0 ± 0	0 ± 0	224	3577	145	24	4162	156
19747	3573	1583 ± 34	0 ± 0	0 ± 0	363	3461	96	12	3803	156
19793	3597	1386 ± 48	0 ± 0	0 ± 0	516	3467	148	25	3939	148
19821	3494	1066 ± 54	0 ± 0	0 ± 0	677	3335	192	34	4043	146
19843	3700	1472 ± 49	0 ± 0	0 ± 0	504	3586	130	16	4290	146
19893	3384	1247 ± 46	0 ± 0	0 ± 0	525	3278	106	16	3844	151
19925	3442	1524 ± 82	0 ± 0	0 ± 0	244	3307	112	12	3601	147
19952	3497	1415 ± 47	0 ± 0	0 ± 0	459	3380	105	9	3659	148
19970	3560	1577 ± 33	0 ± 0	0 ± 0	367	3459	88	11	3672	151

**Tabella 5 risultati lettura Gruppo 4**

Device	Total	KBq_m3_h	Bq_m3	Bq_m3_Ann	N1	N2	Extra1	Extra2	Extra3	Area
17887	101	24 ± 14	0 ± 0	0 ± 0	12	79	32	5	163	107
17987	83	15 ± 20	0 ± 0	0 ± 0	12	70	47	12	292	97
18087	32	-3 ± 13	0 ± 0	0 ± 0	4	22	7	7	114	80
18187	53	4 ± 16	0 ± 0	0 ± 0	8	49	30	11	124	107
18287	71	10 ± 24	0 ± 0	0 ± 0	8	46	47	11	178	76
18387	139	35 ± 13	0 ± 0	0 ± 0	18	107	20	5	359	166
18487	57	5 ± 11	0 ± 0	0 ± 0	8	49	6	6	123	155
18587	34	-3 ± 9	0 ± 0	0 ± 0	4	23	6	1	122	199
18687	213	62 ± 35	0 ± 0	0 ± 0	33	199	46	31	609	164
18787	115	27 ± 18	0 ± 0	0 ± 0	15	92	18	12	293	119
18887	22	-7 ± 9	0 ± 0	0 ± 0	2	13	1	2	90	84
18987	128	31 ± 26	0 ± 0	0 ± 0	16	98	47	16	253	96
19087	37	-2 ± 9	0 ± 0	0 ± 0	5	30	2	3	129	155
19187	39	-1 ± 15	0 ± 0	0 ± 0	6	34	21	10	93	76
19287	131	36 ± 30	0 ± 0	0 ± 0	18	120	34	26	295	96
19387	120	28 ± 18	0 ± 0	0 ± 0	18	109	31	13	266	125
19487	80	14 ± 17	0 ± 0	0 ± 0	16	98	18	18	320	128
19587	94	19 ± 18	0 ± 0	0 ± 0	17	104	28	17	236	121
19687	26	-6 ± 11	0 ± 0	0 ± 0	3	20	11	6	69	46
19787	84	15 ± 15	0 ± 0	0 ± 0	11	68	41	5	195	109

**Tabella 6 risultati lettura Gruppo 5**

#### 5.4 TERZA FASE DEL LAVORO

Durante questa fase è stato fatto un confronto fra i gruppi esposti al nuovo e al vecchio sistema di irraggiamento applicando il test del  $t$  di **Student**, usato per il confronto fra due medie osservate o fra una media osservata e una media teorica.

Si procede come di seguito:

1. si formula un' **ipotesi nulla o ipotesi di identità ( $H_0$ )**, secondo la quale e' casuale la differenza fra due risultati ottenuti;
2. si valuta la probabilità secondo cui, essendo vera l'ipotesi nulla, si produce una differenza della stessa entità di quella riscontrata;
3. nel caso in cui la probabilità sia abbastanza piccola si è autorizzati a respingere l'ipotesi nulla concludendo che esiste una sostanziale differenza "significativa";
4. nel caso in cui la probabilità sia elevata non è lecito rifiutare l'ipotesi nulla.

Le diverse possibilità possono essere così schematizzate:

		REALTA'	
		$H_0$ vera	$H_0$ falsa
CONCLUSIONI	$H_0$ Vera	Corretto	Errore di 2° tipo (rischio = $\beta$ )
	$H_0$ Falsa	Errore di 1° tipo (rischio = $\alpha$ )	Corretto

Si possono commettere errori di due tipi:

1. **Errore di 1° tipo o errore  $\alpha$**  si respinge l'ipotesi nulla quando in realtà la differenza è solo casuale; cioè prende per valide differenze che in realtà non esistono.
2. **Errore di 2° tipo o errore  $\beta$**  non respinge l'ipotesi nulla mentre esiste una reale differenza, cioè non si accorge di differenze che realmente sono presenti.

In pratica si prende in esame solo l'errore di 1° tipo e la probabilità di commettere questo errore prende il nome di **livello di significatività**.

Convenzionalmente si fissano i livelli del **5% (0.05)** e dell'**1% (0.01)** che altro non sono che livelli accettati come *limiti del tutto convenzionali* per stabilire la significatività di uno scarto dall'ipotesi zero.

Questo significa che il livello del 5 % sta ad indicare che ci sono 95 probabilità su 100 che il campione non derivi dalla popolazione, cioè che sia diverso.

Tuttavia, esistono sempre 5 probabilità su 100 che tali differenze siano casuali e che quindi il campione derivi dalla popolazione.

In sintesi eseguire un test di significatività equivale a domandarsi qual sia la probabilità che, essendo vera l'ipotesi nulla si sia verificata una differenza nella stessa entità di quella osservata, se questa probabilità, cioè  $\alpha$ , è abbastanza piccola l'ipotesi nulla viene respinta.

Dire che **una differenza è significativa** significa solo ammettere che essa probabilmente non è casuale.

Nel nostro caso sono state prese in esame due medie osservate, cioè le medie di più determinazioni eseguite sullo stesso materiale (i rivelatori) esposti con due sistemi di irraggiamento diversi fra di loro.

Il test è stato effettuato seguendo i confronti fra:

- **Gruppo 1 e Gruppo 2**

Da precedenti esperienze era risultato che i rivelatori compresi nel range 17844-19591 (gruppo 1) avevano un numero di tracce su  $\text{cm}^2$  inferiore agli altri rivelatori dell'intero stock testati ad intervalli regolari.

- **Gruppo 1 e Gruppo 3-Gruppo 2 e Gruppo 4**

Da precedenti esperienze era risultato che i rivelatori esposti all'americio con il vecchio sistema di esposizione avevano un numero di tracce superiore ai rivelatori esposti con il nuovo sistema di esposizione;

- **Gruppo 5 e Gruppo dei fondi di riferimento**

- **Gruppo 5 e Gruppo dei fondi di uno sviluppo chimico effettuato nel corso del 2008 (sviluppo 32).**

**La nostra ipotesi zero ( $H_0$ )** afferma che è statisticamente non significativa, cioè attribuibile al caso la differenza fra:

1. il numero di tracce su  $\text{cm}^2$  dei rivelatori del gruppo anomalo (gruppo 1) e quelli del gruppo residuo dello stock ( gruppo 2) testati con il nuovo sistema di esposizione;
2. il numero di tracce su  $\text{cm}^2$  dei rivelatori del range sospetto testati con il nuovo sistema di esposizione (gruppo 1) e i rivelatori dello stesso range testati con il vecchio sistema (gruppo 3);
3. fra il numero di tracce su  $\text{cm}^2$  dei rivelatori del range conforme testati con il nuovo sistema di esposizione (gruppo 2) e i rivelatori dello stesso range testati con il vecchio sistema (gruppo 4);
4. il numero di tracce su  $\text{cm}^2$  e il numero di tracce radon dei rivelatori di fondo del gruppo anomalo (gruppo 5) e del gruppo dei fondi di riferimento;
5. il numero di tracce radon dei rivelatori di fondo del gruppo 5 e dei rivelatori di fondo dello sviluppo 32.

Se il **t** di **Student** verificherà tale ipotesi  $H_0$  il passaggio al nuovo sistema di esposizione all'americio -241 si potrebbe effettuare senza tener conto del vecchio sistema di irraggiamento, cioè non saranno registrate differenze significative fra i due sistemi.

## 5.5 TEST DEL T DI STUDENT

Qui di seguito sarà spiegato passaggio dopo passaggio come eseguire il confronto fra due medie osservate;

$$t = \frac{\bar{x}_A - \bar{x}_B}{\sqrt{\frac{s_c^2}{n_A} + \frac{s_c^2}{n_B}}}$$

in questo caso

- $\bar{X}_A$  e  $\bar{X}_B$  sono le due medie aritmetiche degli n dati
- $n_A$  e  $n_B$  sono il numero n di dati esaminati
- $S_C^2$  è l'errore standard della differenza.

Si divide, poi, l'errore standard per il numero dei dati dei rispettivi gruppi per ottenere le varianze rispettive di  $X_A$  e  $X_B$ .

L'errore standard  $S_C^2$  si ottiene calcolando una varianza comune ai due insieme di osservazione sfruttando la seguente formula:

$$s_c^2 = \frac{\sum (x_A - \bar{x}_A)^2 + \sum (x_B - \bar{x}_B)^2}{\nu_A + \nu_B}$$

Dove:

$\nu_A$  e  $\nu_B$  sono i gradi di libertà

$X_A - \bar{X}_A$  è la differenza fra il valore singolo e la media dei valori del gruppo A

$X_B - \bar{X}_B$  è la differenza fra il valore singolo e la media dei valori del gruppo B

Si esegue la somma delle devianze e si divide per la somma dei gradi di libertà.

Il valore di  $t$  ottenuto sarà tanto più elevato quanto più grande è la differenza fra le medie dei valori e quanto più piccolo è l'errore standard di tali differenze. Anche in questo caso il valore trovato va messo in relazione con i valori di  $t$  riportati nella tabella 1:

**TABELLA 1**  
Tavola del t di Student  $\alpha$ = possibilità  $\nu$ = gradi di libertà

$\alpha \backslash \nu$	0,90	0,80	0,70	0,60	0,50	0,40	0,30	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01	0,001
1	0,158	0,325	0,510	0,727	1,000	1,376	1,963	3,078	6,314	12,706	31,821	63,657	636,619
2	0,142	0,289	0,445	0,617	0,816	1,061	1,386	1,886	2,920	4,303	6,965	9,925	31,598
3	0,137	0,277	0,424	0,584	0,765	0,978	1,250	1,638	2,353	3,182	4,541	5,841	12,929
4	0,134	0,271	0,414	0,569	0,741	0,941	1,190	1,533	2,132	2,776	3,747	4,604	8,610
5	0,132	0,267	0,408	0,559	0,727	0,920	1,156	1,476	2,015	2,571	3,365	4,032	6,869
6	0,131	0,265	0,404	0,553	0,718	0,906	1,134	1,440	1,943	2,447	3,143	3,707	5,949
7	0,130	0,263	0,402	0,549	0,711	0,896	1,119	1,415	1,895	2,365	2,998	3,499	5,408
8	0,130	0,262	0,399	0,546	0,706	0,889	1,108	1,397	1,860	2,306	2,896	3,355	5,041
9	0,129	0,261	0,398	0,543	0,703	0,883	1,100	1,383	1,833	2,262	2,821	3,250	4,781
10	0,129	0,260	0,397	0,542	0,700	0,879	1,093	1,372	1,812	2,228	2,784	3,169	4,587
11	0,129	0,260	0,396	0,540	0,697	0,876	1,088	1,363	1,796	2,201	2,718	3,106	4,437
12	0,128	0,259	0,395	0,539	0,695	0,873	1,083	1,356	1,782	2,179	2,681	3,055	4,318
13	0,128	0,259	0,394	0,538	0,694	0,870	1,079	1,350	1,771	2,160	2,650	3,012	4,221
14	0,128	0,258	0,393	0,537	0,692	0,868	1,076	1,345	1,761	2,145	2,624	2,977	4,140
15	0,128	0,258	0,393	0,536	0,691	0,866	1,074	1,341	1,753	2,131	2,602	2,947	4,073
16	0,128	0,258	0,392	0,535	0,690	0,865	1,071	1,337	1,746	2,120	2,583	2,921	4,015
17	0,128	0,257	0,392	0,534	0,689	0,863	1,069	1,333	1,740	2,110	2,567	2,898	3,965
18	0,127	0,257	0,392	0,534	0,688	0,862	1,067	1,330	1,734	2,101	2,552	2,878	3,922
19	0,127	0,257	0,391	0,533	0,688	0,861	1,066	1,328	1,729	2,093	2,539	2,861	3,883
20	0,127	0,257	0,391	0,533	0,687	0,860	1,064	1,325	1,725	2,086	2,528	2,845	3,850
21	0,127	0,257	0,391	0,532	0,686	0,859	1,063	1,323	1,721	2,080	2,518	2,831	3,819
22	0,127	0,256	0,390	0,532	0,686	0,858	1,061	1,321	1,717	2,074	2,508	2,819	3,792
23	0,127	0,256	0,390	0,532	0,685	0,858	1,060	1,319	1,714	2,069	2,500	2,807	3,767
24	0,127	0,256	0,390	0,531	0,685	0,857	1,059	1,318	1,711	2,064	2,492	2,797	3,745
25	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,316	1,708	2,060	2,485	2,787	3,725
26	0,127	0,256	0,390	0,531	0,684	0,856	1,058	1,315	1,706	2,056	2,479	2,779	3,707
27	0,127	0,256	0,389	0,531	0,684	0,855	1,057	1,314	1,703	2,052	2,473	2,771	3,690
28	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,855	1,056	1,313	1,701	2,048	2,467	2,763	3,674
29	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,311	1,699	2,045	2,462	2,756	3,659
30	0,127	0,256	0,389	0,530	0,683	0,854	1,055	1,310	1,697	2,042	2,457	2,750	3,646
40	0,126	0,255	0,388	0,529	0,681	0,851	1,050	1,303	1,684	2,021	2,423	2,704	3,551
80	0,126	0,254	0,387	0,527	0,679	0,848	1,046	1,296	1,671	2,000	2,390	2,660	3,460
120	0,126	0,254	0,386	0,526	0,677	0,845	1,041	1,289	1,658	1,980	2,358	2,617	3,373
$\infty$	0,126	0,253	0,385	0,524	0,674	0,842	1,036	1,282	1,645	1,960	2,326	2,576	3,291

A gradi di libertà pari a  $n_A+n_B -2$  se:

1. il valore di  $t$  calcolato è uguale o superiore al valore di  $t$  tabulato corrispondente al livello di significatività scelto si conclude che la differenza fra le medie è significativa e quindi si respinge l'ipotesi  $H_0$ ,
2. il valore di  $t$  calcolato è inferiore al valore di  $t$  tabulato in corrispondenza del livello di significatività scelto la differenza fra le medie è non significativa e quindi l'ipotesi  $H_0$  è accettata.

**RISULTATI OTTENUTI**

Con l'ausilio di Excel abbiamo applicato il calcolo del  $t$  di Student e dal confronto delle medie prese in considerazione abbiamo ottenuto i risultati sotto riportati.

Di seguito sono riportati i risultati per tutti i gruppi compreso il Gruppo dei fondi.

**Capitolo 5 Verifica dell'efficienza dei rivelatori**

	Serie 1	$X_i - X_{m1}$	devianza	Serie 2	$X_i - X_{m2}$	devianza
	Serie 1	$X_i - X_{m1}$	$(X_i - X_{m1})^2$	Serie 2	$X_i - X_{m2}$	devianza
n misure	36			10		
Media	3599			4129		
Somma			3270267			319970
Varianza	93436			35552		
varianza comune	81596					
varianza comune della media			2266.56335			8159.628
t	5.193					
					t tab 0,05	2.021
					t tab 0,01	2.704
						<b>Risultato test</b>
						<b>NON OK</b>
						<b>NON OK</b>
	3512.00	-86.9	7554.5	3971.00	-158.2	25027.2
	3596.00	-2.9	8.5	4156.00	26.8	718.2
	4068.00	469.1	220039.2	4098.00	-31.2	973.4
	3303.00	-295.9	87566.7	3914.00	-215.2	46311.0
	3618.00	19.1	364.2	4126.00	-3.2	10.2
	3012.00	-586.9	344471.2	3929.00	-200.2	40080.0
	3683.00	84.1	7070.0	4056.00	-73	5358
	3648.00	49.1	2409.2	4151.00	22	475
	3735.00	136.1	18518.7	4424.00	295	86907
	3173.00	-425.9	181405.0	4467.00	338	114109
	3532.00	-66.9	4477.8			
	3449.00	-149.9	22475.0			
	3471.00	-127.9	16362.7			
	3644.00	45.1	2032.5			
	3878.00	279.1	77887.5			
	3537.00	-61.9	3833.7			
	3613.00	14.1	198.3			
	3469.00	-129.9	16878.3			
	4078.00	479.1	229520.8			
	3420.00	-178.9	32011.2			
	3664.00	65.1	4235.8			
	3354.00	-244.9	59984.2			
	3382.00	-216.9	47052.8			
	3123.00	-475.9	226496.7			
	3473.00	-125.9	15855.0			
	3687.00	88.1	7758.7			
	3478.00	-120.9	14620.8			
	3557.00	-41.9	1757.0			
	3430.00	-168.9	28532.8			
	3552.00	-46.9	2201.2			
	3093.00	-505.9	255951.7			
	3637.00	38.1	1450.3			
	4104.00	505.1	255109.2			
	4216.00	617.1	380791.8			
	4141.00	542.1	293854.3			
	4231.00	632.1	399529.3			

**Tabella 7: calcolo del t di Student confrontando i total del Gruppo anomalo (Gruppo 1) e quelli del gruppo residuo dello stock (Gruppo 2) nel nuovo sistema di esposizione metallico.**

**Capitolo 5 Verifica dell'efficienza dei rivelatori**

	Serie 1	$X_i - X_{m1}$	devianza	Serie 2	$X_i - X_{m2}$	devianza
	Serie 1	$X_i - X_{m1}$	$(X_i - X_{m1})^2$	Serie 2	$X_i - X_{m2}$	devianza
n misure	36			21		
Media	3599			3416		
Somma			3270267			1283543
Varianza	93436			64177		
varianza comune	82797					
varianza comune della media			2299.90375			3942.6921
t	2.319					
						Risultato test
						NON OK
						OK
	3512.00	-86.9	7554.5	2953.00	-462.7	214060.4
	3596.00	-2.9	8.5	3108.00	-307.7	94658.8
	4068.00	469.1	220039.2	3461.00	45.3	2055.1
	3303.00	-295.9	87566.7	3409.00	-6.7	44.4
	3618.00	19.1	364.2	3446.00	30.3	920.1
	3012.00	-586.9	344471.2	3250.00	-165.7	27445.4
	3683.00	84.1	7070.0	3282.00	-133.7	17866.8
	3648.00	49.1	2409.2	3730.00	314.3	98805.4
	3735.00	136.1	18518.7	2754.00	-661.7	437802.8
	3173.00	-425.9	181405.0	3455.00	39.3	1547.1
	3532.00	-66.9	4477.8	3287.00	-128.7	16555.1
	3449.00	-149.9	22475.0	3715.00	299.3	89600.4
	3471.00	-127.9	16362.7	3769.00	353.3	124844.4
	3644.00	45.1	2032.5	3390.00	-25.7	658.8
	3878.00	279.1	77887.5	3514.00	98.3	9669.4
	3537.00	-61.9	3833.7	3385.00	-30.7	940.4
	3613.00	14.1	198.3	3648.00	232.3	53978.8
	3469.00	-129.9	16878.3	3558.00	142.3	20258.8
	4078.00	479.1	229520.8	3571.00	155.3	24128.4
	3420.00	-178.9	32011.2	3634.00	218.3	47669.4
	3664.00	65.1	4235.8	3410.00	-5.7	32.1
	3354.00	-244.9	59984.2			
	3382.00	-216.9	47052.8			
	3123.00	-475.9	226496.7			
	3473.00	-125.9	15855.0			
	3687.00	88.1	7758.7			
	3478.00	-120.9	14620.8			
	3557.00	-41.9	1757.0			
	3430.00	-168.9	28532.8			
	3552.00	-46.9	2201.2			
	3093.00	-505.9	255951.7			
	3637.00	38.1	1450.3			
	4104.00	505.1	255109.2			
	4216.00	617.1	380791.8			
	4141.00	542.1	293854.3			
	4231.00	632.1	399529.3			

**Tabella 8: calcolo del t di Student confrontando i total dei rivelatori del range sospetto testati con il nuovo sistema di esposizione alla sorgente di Americio (Gruppo 1) e i rivelatori dello stesso range esposti con il vecchio sistema di esposizione (Gruppo 3)**

**Capitolo 5 Verifica dell'efficienza dei rivelatori**

	Serie 1	$X_i - X_{m1}$	devianza	Serie 2	$X_i - X_{m2}$	devianza	
	Serie 1	$X_i - X_{m1}$	$(X_i - X_{m1})^2$	Serie 2	$X_i - X_{m2}$	devianza	
n misure	10			10			
Media	4129			3546			
Somma			319970			79832	
Varianza	35552			8870			
varianza comune	22211						
varianza comune della media			2221.12056			2221.121	
t	8.746						
					t tab 0,05	2.086	<b>Risultato test</b>
					t tab 0,01	2.878	<b>NON OK</b>
	3971.00	-158.2	25027.2	3571.00	24.7	610.1	
	4156.00	26.8	718.2	3645.00	98.7	9741.7	
	4098.00	-31.2	973.4	3573.00	26.7	712.9	
	3914.00	-215.2	46311.0	3597.00	50.7	2570.5	
	4126.00	-3.2	10.2	3494.00	-52.3	2735.3	
	3929.00	-200.2	40080.0	3700.00	153.7	23623.7	
	4056.00	-73.2	5358.2	3384.00	-162.3	26341.3	
	4151.00	21.8	475.2	3442.00	-104.3	10878.5	
	4424.00	294.8	86907.0	3497.00	-49.3	2430.5	
	4467.00	337.8	114108.8	3560.00	13.7	187.7	

**Tabella 9 calcolo del t di Student confrontando i rivelatori del range conforme testati con il nuovo sistema di esposizione (Gruppo 2) e i rivelatori dello stesso range testati con il vecchio sistema (Gruppo 4).**

**Tabella 10: gruppo 5 e gruppo fondo di riferimento**

Codici del Gruppo 5	tracce radon	Codici del Gruppo di riferimento	tracce radon
17887	64	2851	27
17987	48	2852	27
18087	18	2853	60
18187	32	2854	24
18287	41	2879	18
18387	82	2885	25
18487	34	2888	33
18587	20	2892	33
18687	127	2912	20
18787	69	2929	25
18887	14	2940	43
18987	77	2956	29
19087	22	2967	13
19187	22	2978	62
19287	83	2989	16
19387	72	2933	28
19487	48	3001	25
19587	57	3013	8
19687	17	3022	24
19787	51	3034	21
<b>media</b>	<b>50</b>	3046	21
		3056	10
		3067	21
<b>∇ Grad</b>	<b>19</b>	3078	39
		3091	12
		3101	21
		3112	15
		3123	11
		3131	35
		3141	20
		3151	29
		3161	32
		<b>media</b>	<b>26</b>
		<b>∇ Grad</b>	<b>31</b>



Tabella 12: gruppo 5 e sviluppo 32

Codici del Gruppo 5	Tracce radon	Codici dello Sviluppo 32	Tracce radon
17887	64	17847	75
17987	48	17848	66
18087	18	17877	44
18187	32	17883	55
18287	41	17884	72
18387	82	17863	78
18487	34	17859	30
18587	20	17841	73
18687	127	17875	29
18787	69	17846	22
18887	14	17845	45
18987	77	17857	19
19087	22	17843	67
19187	22	17850	25
19287	83	17842	25
19387	72	<b>media</b>	<b>48</b>
19487	48		
19587	57		
19687	17		
19787	51	∇ Grad	<b>14</b>
<b>media</b>	<b>50</b>		
<b>∇ Grad</b>	<b>19</b>		

**Capitolo 5 Verifica dell'efficienza dei rivelatori**

	Serie 1	$X_i - X_{m1}$	devianza	Serie 2	$X_i - X_{m2}$	devianza	
	Serie 1	$X_i - X_{m1}$	$(X_i - X_{m1})^2$	Serie 2	$X_i - X_{m2}$	devianza	
n misure	20			15			
Media	50			48			
Somma			16408			6847	
Varianza	864			489			
varianza comune	705						
varianza comune della media			35.2350505			46.980067	
t	0.173						
					t tab 0,05	2.021	<b>Risultato test</b>
					t tab 0,01	2.75	<b>OK</b>
	64.00	14.1	198.8	75.00	26.7	711.1	
	48.00	-1.9	3.6	66.00	17.7	312.1	
	18.00	-31.9	1017.6	44.00	-4.3	18.8	
	32.00	-17.9	320.4	55.00	6.7	44.4	
	41.00	-8.9	79.2	72.00	23.7	560.1	
	82.00	32.1	1030.4	78.00	29.7	880.1	
	34.00	-15.9	252.8	30.00	-18.3	336.1	
	20.00	-29.9	894.0	73.00	24.7	608.4	
	127.00	77.1	5944.4	29.00	-19.3	373.8	
	69.00	19.1	364.8	22.00	-26.3	693.4	
	14.00	-35.9	1288.8	45.00	-3.3	11.1	
	77.00	27.1	734.4	19.00	-29.3	860.4	
	22.00	-27.9	778.4	67.00	18.7	348.4	
	22.00	-27.9	778.4	25.00	-23.3	544.4	
	83.00	33.1	1095.6	25.00	-23.3	544.4	
	72.00	22.1	488.4				
	48.00	-1.9	3.6				
	57.00	7.1	50.4				
	17.00	-32.9	1082.4				
	51.00	1.1	1.2				

**Tabella 13: calcolo del t di Student confrontando il numero di tracce radon dei rivelatori del gruppo 5 e il numero di tracce radon dei rivelatori del gruppo fondi dello sviluppo 32**

## 5.7 CONFRONTO DEI RISULTATI DEL TEST *t* DI STUDENT

Dopo aver applicato il ***t* di Student** e osservato i risultati si può concludere che:

1. E' statisticamente significativa al 95% e al 99% di probabilità la differenza fra il numero di tracce su cm<sup>2</sup> dei rivelatori del gruppo anomalo (Gruppo 1) e quelli del Gruppo residuo dello stock (Gruppo 2);
2. E' statisticamente significativa al 95% di probabilità la differenza fra il numero di tracce su cm<sup>2</sup> dei rivelatori del range sospetto testati con il nuovo sistema di esposizione (Gruppo 1) e i rivelatori dello stesso range testati con il vecchio sistema (Gruppo 3), mentre al 99% di probabilità la differenza e' non significativa;
3. E' statisticamente significativa al 95% e al 99% di probabilità la differenza fra il numero di tracce su cm<sup>2</sup> dei rivelatori del range conforme testati con il nuovo sistema di esposizione (Gruppo 2) e i rivelatori dello stesso range testati con il vecchio sistema (Gruppo 4).

Il Gruppo 5 è stato confrontato sia con il gruppo dei fondi di riferimento sia con i fondi di uno sviluppo chimico effettuato nel corso del 2008 (sviluppo 32) i risultati ottenuti mostrano che:

- **è statisticamente significativa al 95% e al 99% di probabilità la differenza fra il numero di tracce radon del gruppo 5 e quelle del gruppo dei fondi di riferimento;**
- **è statisticamente non significativa al 95% e al 99% di probabilità la differenza fra il numero di tracce radon del gruppo 5 e quelle dello sviluppo 32.**

## 6.1 CARTE DI CONTROLLO DI SHEWHART

La carta di controllo fu proposta nel 1924 dal Dr Walter Shewhart come un mezzo grafico da applicare ai calcoli di significatività statistica per processi di produzione.

La procedura generale per applicare una carta di controllo è:

1. prelievo del campione (per ottenere informazioni);
2. rilevazione dei dati;
3. calcolo dei limiti di controllo;
4. verifica se il processo è o non è sotto controllo.

Una carta di controllo è un documento che consente di:

1. fornire una registrazione dinamica di un processo di produzione allo scopo di una efficace produzione;
2. controllare la regolarità del processo.

La teoria della carta di controllo studia due tipi di variabilità:

- La **variabilità naturale** o accidentale che indica l'effetto cumulato di un gran numero di piccole cause inevitabili ed incontrollabili;
- La **variabilità sistematica** che indica distorsioni nel processo che possono essere dovute a macchine non regolari, materie prime difettose, errori degli operatori, ecc.

L'obiettivo è quello di individuare la presenza nel processo di variabilità sistematica poiché la presenza della variabilità naturale è impossibile da eliminare e non influenza particolarmente la produzione ed infatti se all'interno di un processo di produzione è presente solo una variabilità naturale il processo si dice ***in controllo***, mentre in presenza di variabilità sistematica il processo è detto ***fuori controllo***.

L'obiettivo del controllo statistico del processo è quello di dare il via e stabilizzare un processo su un livello accettabile per assicurarne la conformità a canoni specifici.

E' proprio a tal fine che viene utilizzata la carta di controllo, che graficamente rappresenta e confronta informazioni basate su un insieme di campioni che indicano lo stato corrente di un processo dopo aver individuato la variabilità intrinseca del processo stesso.

L'utilizzo della carta di controllo permette di avere una conoscenza migliore del processo che si sta valutando e di portare ad un suo miglioramento.

La creazione di una carta di controllo richiede dati provenienti da un processo ed intervalli che possono essere definiti in termini di tempo, ad esempio ogni ora, oppure in termini di quantità.

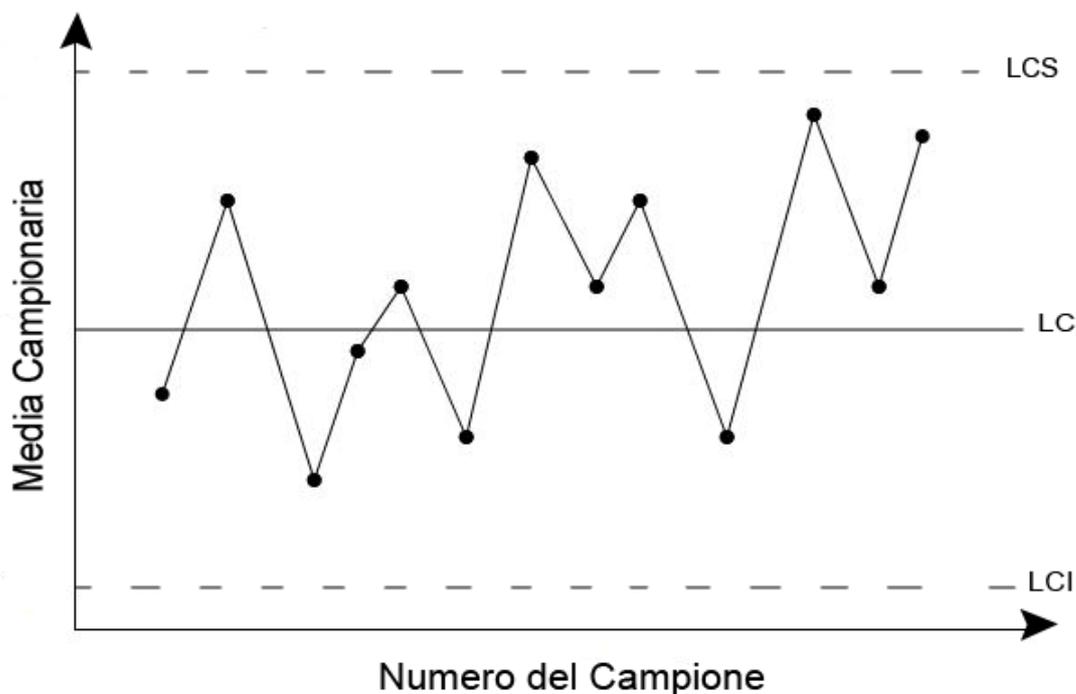
Da ogni gruppo si ricavano diversi parametri quali:

- la media  $\bar{X}$ ;
- lo scarto tipo  $\sigma$ .

Quella mostrata in Figura 6.1 è una tipica carta di controllo (Carta di Shewhart delle medie); in questa carta sono riportate le medie delle misurazioni fatte durante un processo di produzione.

Questa carta ha una linea centrale (LC) che rappresenta il valore attorno al quale le misurazioni della caratteristica che si vuole analizzare dovrebbero trovarsi se nel processo fosse presente solo una variabilità naturale.

Oltre alla linea centrale nella carta sono presenti il limite di controllo inferiore (LCI) e il limite di controllo superiore (LCS) che sono determinati tramite varie considerazioni statistiche; se all'interno del processo è presente una variabilità sistematica, e quindi qualcosa che determina errori nella produzione, uno o più punti verranno plottati all'esterno dell'area delimitata dai limiti di controllo.



**Figura 6.1: tipica carta di controllo**

Questo segnale permetterà di scoprire la causa dell'errore e rimuoverla velocemente dal processo, la bontà degli strumenti utilizzati si misurerà anche in base alla velocità con cui

questi saranno in grado di individuare gli improvvisi cambiamenti di stato (da **in-controllo a fuori-controllo**) in modo da permettere di intervenire velocemente nell'individuazione delle cause ed attivarsi per la correzione.

Si dice che il processo è fuori controllo se:

1. uno o più punti si trovano fuori dei limiti di controllo;
2. dividendo la carta di controllo in zone come riportato nella figura, si notano delle situazioni non casuali:



- Due punti consecutivi su tre cadono all'esterno dei limiti posizionati a  $2\sigma$  ma rimangono all'interno dei limiti  $3\sigma$ .
- Quattro punti su cinque consecutivi cadono oltre la distanza  $1\sigma$ .
- Otto punti consecutivi cadono dalla stessa parte della linea centrale.
- Sei punti consecutivi sono in ordine crescente (o decrescente).
- Quindici punti sono nella zona compresa tra  $\mu + \sigma$  e  $\mu - \sigma$  (sia sopra che sotto la linea centrale).
- Quattordici punti consecutivi si alternano a zig-zag.
- Otto punti consecutivi si alternano all'interno della linea centrale, ma nessuno nella zona compresa tra  $\mu + \sigma$  e  $\mu - \sigma$ .
- Si manifesta un comportamento non casuale dei dati.
- Uno o più punti si posizionano vicino ai limiti di sorveglianza e di controllo.

I limiti di controllo delle carte di Shewhart sono ad una distanza  $3\sigma$  da ciascuna parte della linea centrale, dove  $\sigma$  è lo scarto tipo della popolazione entro i sottogruppi della grandezza

statistica rappresentata graficamente. I limiti  $3\sigma$  indicano che, supponendo che il processo sia sotto controllo statistico, approssimativamente il 99,7% dei valori ricade nei limiti di controllo, praticamente si può dire che c'è un rischio dello 0,3%, che, quando il processo è sotto controllo, un punto sul grafico possa ricadere al di fuori dal limite superiore o inferiore di controllo. I limiti di controllo superiore e inferiore  $\pm 3\sigma$  vengono, spesso, chiamati "limiti di azione", perché nel momento in cui un punto ricade al di fuori dei limiti si deve intraprendere un'azione atta a riportare il processo sotto controllo. In seguito all'utilizzo delle carte di controllo si possono avere due tipi di errori:

1. **l'errore di I specie**, si verifica quando un punto cade casualmente al di fuori dai limiti di controllo ma il processo considerato rimane sotto controllo. In tal caso si potrebbe concludere erroneamente che il processo è fuori controllo, e si affronta una spesa per eliminare la causa di un problema che in realtà è inesistente;
2. **l'errore di II specie** è l'opposto dell'errore di I specie: cioè il punto generato cade casualmente all'interno dei limiti di controllo ma il processo considerato è fuori controllo. In questo caso si conclude erroneamente che il processo è sotto controllo statistico.

Il rischio di un errore di II specie, dipende da tre variabili:

- ampiezza dei limiti di controllo;
- l'entità del processo fuori controllo;
- la numerosità del campione.

Il metodo di Shewhart considera solo l'errore di I specie e l'ammontare di questo errore è 0,3% con i limiti  $3\sigma$ . Quando un valore cade fuori da uno dei limiti di controllo o in presenza di un andamento inusuale, lo stato di controllo statistico non può più essere accettato. In questo caso si ferma o si corregge il processo e si procede con un'indagine per individuare la causa; ed eliminarla in modo che il processo è pronto a ricominciare. Nel momento in cui le carte di controllo sono introdotte in un processo, capita spesso che il processo risulti fuori controllo; da ciò ne consegue che i limiti di controllo calcolati su dati di un processo fuori controllo possono portare a conclusioni sbagliate; ciò implica che è sempre necessario, prima di individuare i parametri della carta di controllo, far rientrare un processo sotto controllo.

## 6.2 DUE TIPI DI CARTE DI CONTROLLO

Le carte di controllo di Shewhart sono fondamentalmente di due tipi:

- carte di controllo per variabili;
- carte di controllo per attributi;

legate a due situazioni distinte:

- quando non sono forniti i valori di riferimento;

Questo tipo di carte viene usata per capire se i valori di qualsiasi grandezza statistica rappresentati graficamente, variano tra loro più di quanto dovrebbe essere attribuito dal solo caso.

- quando sono forniti i valori di riferimento.

Si tratta di verificare se i valori osservati di  $X$ , ecc., differiscono dai rispettivi valori di riferimento più di quanto ci si aspetti come conseguenza della casualità.

I valori di riferimento, dovrebbero essere compatibili con la variabilità intrinseca del processo. Le carte di controllo basate sui suddetti valori di riferimento sono utilizzate per mantenere sotto controllo i processi e l'uniformità del prodotto al livello desiderato.

### 6.3 TIPI DI CARTE DI CONTROLLO PER VARIABILI E PER ATTRIBUTI

Le carte di controllo per variabili si suddividono in:

- 1) carta delle medie ( $\bar{X}$ ) o carta delle escursioni ( $R$ ) o degli scarti tipo ( $s$ );
- 2) carte delle singole osservazioni ( $\bar{X}$ ) e delle escursioni mobili ( $R$ );
- 3) carta della mediana ( $Me$ ) e carta della escursione ( $I$ ).

Le carte di controllo per attributi comprendono le:

- 1) carta della frazione non conforme ( $p$ ) o carta del numero delle unità non conformi
- 2) carta del numero di non conformità ( $c$ ) o carta del numero di non conformità per unità

#### 6.4 CARTA DI CONTROLLO CON TRACCE DI $^{241}\text{Am}$

In presenza di molti rivelatori da analizzare per monitorare la correttezza dei dati e delle procedure si costruisce una carta di controllo prendendo in considerazione il numero di tracce prodotte da particelle  $\alpha$  emesse dalla sorgente di  $^{241}\text{Am}$  in condizioni di esposizione controllate.

##### Primo passo

Il laboratorio ha iniziato ad utilizzare il nuovo sistema di esposizione metallico per l'irraggiamento dei rivelatori con sorgente di  $^{241}\text{Am}$  dal febbraio 2007. Per ogni sviluppo chimico effettuato da quella data, si è proceduto a irraggiare con la sorgente di  $^{241}\text{Am}$ , 3 rivelatori con il vecchio sistema di esposizione e 3 con il nuovo. Così per il presente lavoro il primo passo è consistito nella lettura di 55 rivelatori irraggiati con il nuovo sistema di esposizione dal febbraio 2007 (gruppo A). Tali rivelatori sottoposti ad una nuova lettura con il TASLIMAGE sono stati confrontati con quelle di 59 rivelatori esposti ad americio (gruppo B) che verranno utilizzati per la creazione di una nuova carta di controllo. I rivelatori del gruppo B appartengono ad uno nuovo stock di CR 39 acquistato dal laboratorio nel luglio 2008 e sottoposto a taratura nel settembre 2008.

**Capitolo 6 Carte di controllo di Shewhart**

Gruppo A	Total
14569	4210
10267	4146
15892	4455
15897	4116
15890	4119
10627	4743
11254	3994
14352	4355
11870	3935
11102	4359
9436	4130
11889	3896
15889	4276
10085	4675
15901	4244
15907	4292
15927	3903
15900	4499
15930	4046
14676	5013
9575	4309
16065	4462
15925	4188
15909	4352
15928	4847
15915	4253
15904	4253
15912	4141
18950	3688
18167	3403
17986	3932
17939	3770
18132	3567
18975	3708
9853	4441
14520	4201
11397	3797
14975	4314
15924	3927
15903	4354
15908	3970
16018	4302
17869	3460
17856	3552
14534	3797
19664	3971
19691	4156
19742	4098
19791	3914
19817	4126
19841	3929
19891	4056
19941	4151
19978	4424
19987	4467

Gruppo B	Total
22468	4312
22664	4504
22847	4426
23000	3784
23204	3932
23286	4066
23398	4549
23635	4413
23831	4355
24282	3589
24376	3799
24542	4452
24722	4366
24799	4508
24906	3990
25084	4263
25281	4557
25434	3710
25892	4748
26000	4424
26278	4324
26541	3596
26669	4355
26890	3669
27009	4254
27183	3875
27403	3706
27989	4490
28073	4514
28328	4515
28560	4257
28998	3935
29142	4345
29378	4356
29591	4511
28628	4713
28660	3577
28659	4479
28682	4490
28672	4513
28823	3980
28824	4277
29955	4358
29928	4552
29930	4184
30040	4316
30030	4476
30144	4519
30134	3979
30438	4349
30626	3865
30682	4265
30899	4224
30969	4375
31009	4924
31093	3734
31343	4291
31537	4233
31592	4419

**Tabella 14: Risultati della lettura per il Gruppo A e Gruppo B**

**Secondo passo**

Sono state calcolate le medie aritmetiche dei due gruppi grazie all'ausilio di Excel.

Media Gruppo A ( $\bar{X}_A$ )	<b>4140</b>
Media Gruppo B ( $\bar{X}_B$ )	<b>4246</b>

**Terzo Passo**

È stato effettuato il test del t di Student fra le due medie seguendo la procedura precedentemente esposta, per verificarne la compatibilità e confermare il controllo statistico dei dati, ottenendo i seguenti risultati (Tabella 15).

	Serie 1	$X_i - X_{m1}$	devianza	Serie 2	$X_i - X_{m2}$	devianza
	Serie 1	$X_i - X_{m1}$	$(X_i - X_{m1})^2$	Serie 2	$X_i - X_{m2}$	devianza
n misure	59			55		
Media	4246			4140		
Somma			5828513			5763558
Varianza	100492			106733		
Varianza comune	103501					
Varianza comune della media			1754.24804			1881.8297
t	1.770					
						<b>Risultato test</b>
					t tab 0,05 2.000	<b>OK</b>
					t tab 0,01 2.660	<b>OK</b>
4312.00	65.5	4295.8	4210.00	70.3	4935.7	
4504.00	257.5	66328.1	4146.00	6.3	39.1	
4426.00	179.5	32235.5	4455.00	315.3	99385.4	
3784.00	-462.5	213867.1	4116.00	-23.7	563.8	
3932.00	-314.5	98883.6	4119.00	-20.7	430.4	
4066.00	-180.5	32565.0	4743.00	603.3	363916.0	
4549.00	302.5	91531.9	3994.00	-145.7	21241.7	
4413.00	166.5	27736.4	4355.00	215.3	46334.5	
4355.00	108.5	11781.4	3935.00	-204.7	41920.7	
3589.00	-657.5	432250.5	4359.00	219.3	48072.6	
3799.00	-447.5	200218.3	4130.00	-9.7	95.0	
4452.00	205.5	42247.7	3896.00	-243.7	59411.8	
4366.00	119.5	14290.4	4276.00	136.3	18565.3	
4508.00	261.5	68404.4	4675.00	535.3	286497.4	
3990.00	-256.5	65770.5	4244.00	104.3	10869.0	
4263.00	16.5	273.7	4292.00	152.3	23181.4	
4557.00	310.5	96436.6	3903.00	-236.7	56048.4	
3710.00	-536.5	287786.8	4499.00	359.3	129063.8	
4748.00	501.5	251544.8	4046.00	-93.7	8788.2	
4424.00	177.5	31521.3	5013.00	873.3	762573.5	
4324.00	77.5	6012.8	4309.00	169.3	28647.1	
3596.00	-650.5	423095.1	4462.00	322.3	103848.0	
4355.00	108.5	11781.4	4188.00	48.3	2328.5	
3669.00	-577.5	333457.3	4352.00	212.3	45052.0	
4254.00	7.5	56.9	4847.00	707.3	500209.0	
3875.00	-371.5	137980.8	4253.00	113.3	12826.6	
3706.00	-540.5	292094.4	4253.00	113.3	12826.6	
4490.00	243.5	59312.9	4141.00	1.3	1.6	
4514.00	267.5	71578.9	3688.00	-451.7	204074.0	
4515.00	268.5	72115.0	3403.00	-736.7	542793.9	
4257.00	10.5	111.1	3932.00	-207.7	43158.2	

**Capitolo 6 Carte di controllo di Shewhart**

3935.00	-311.5	97005.9	3770.00	-369.7	136711.7
4345.00	98.5	9710.6	3567.00	-572.7	328037.4
4356.00	109.5	11999.5	3708.00	-431.7	186404.1
4511.00	264.5	69982.7	4441.00	301.3	90754.3
4713.00	466.5	217661.8	4201.00	61.3	3752.1
3577.00	-669.5	448173.5	3797.00	-342.7	117474.4
4479.00	232.5	54076.0	4314.00	174.3	30364.6
4490.00	243.5	59312.9	3927.00	-212.7	45260.6
4513.00	266.5	71044.8	4354.00	214.2545	45905.01
3980.00	-266.5	70999.7	3970.00	-169.7455	28813.519
4277.00	30.5	932.8	4302.00	162.2545	26326.538
4358.00	111.5	12441.7	3460.00	-679.7455	462053.88
4552.00	305.5	93356.1	3552.00	-587.7455	345444.72
4184.00	-62.5	3901.0	3797.00	-342.7455	117474.45
4316.00	69.5	4836.1	3971.00	-168.7455	28475.028
4476.00	229.5	52689.7	4156.00	16.25455	264.21025
4519.00	272.5	74279.3	4098.00	-41.74545	1742.683
3979.00	-267.5	71533.6	3914.00	-225.7455	50961.01
4349.00	102.5	10514.9	4126.00	-13.74545	188.93752
3865.00	-381.5	145509.9	3929.00	-210.7455	44413.647
4265.00	18.5	343.8	4056.00	-83.74545	7013.3012
4224.00	-22.5	504.3	4151.00	11.25455	126.66479
4375.00	128.5	16523.1	4424.00	284.2545	80800.647
4924.00	677.5	459063.7	4467.00	327.2545	107095.54
3734.00	-512.5	262612.8			
4291.00	44.5	1984.0			
4233.00	-13.5	181.1			
4419.00	172.5	29770.9			

**Tabella 15: Calcolo del  $t$  di Student tra i due gruppi A e B**

**Quarto passo**

Dopo aver concluso che le due medie sono confrontabili fra di loro e che il comportamento all'americio è paragonabile in due stock differenti di CR-39, sono stati eseguiti i calcoli per costruire la carta di controllo per il  $^{241}\text{Am}$  con i rivelatori della taratura di settembre 2008 (Gruppo B).

I passi da seguire per la composizione grafica della Carta di Controllo sono i seguenti:

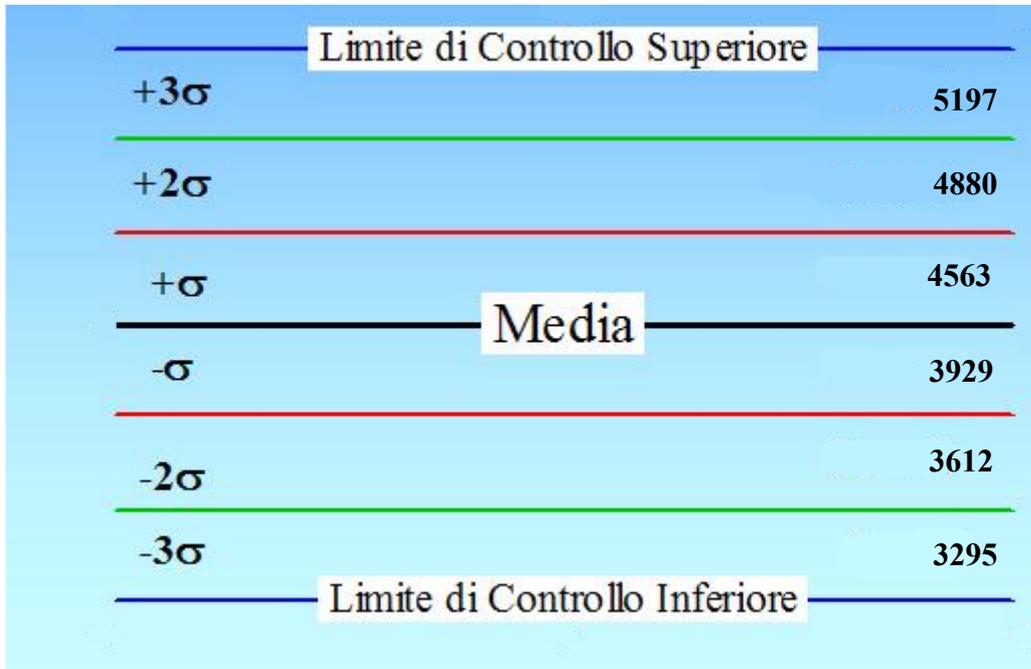
1. calcolare il valore di riferimento, che corrisponde alla media di tutti i valori considerati (nel nostro caso 59);
2. calcolare il valore della deviazione standard  $\sigma$ ;
3. calcolare il valore  $2\sigma$ ;
4. calcolare il valore  $3\sigma$ ;
5. calcolare l'intervallo di riferimento che corrisponde alla differenza fra il valore di riferimento e il valore di  $\pm \sigma$ ;
6. calcolare l'intervallo di attenzione che corrisponde alla differenza fra il valore di riferimento e il valore di  $\pm 2\sigma$ ;
7. calcolare l'intervallo di azione che corrisponde alla differenza fra il valore di riferimento e il valore di  $\pm 3\sigma$ .

Capitolo 6 Carte di controllo di Shewhart

<b>MEDIA DI TUTTI I VALORI</b>	<b>4246</b>	
<b>DEVIAZIONE STANDARD <math>\sigma</math></b>	<b>317</b>	
<b><math>2\sigma</math></b>	<b>634</b>	
<b><math>3\sigma</math></b>	<b>951</b>	
<b>INTERVALLO DI RIFERIMENTO</b>	<b><math>-\sigma</math></b>	<b><math>+\sigma</math></b>
	<b>3929</b>	<b>4563</b>
<b>INTERVALLO DI ATTENZIONE</b>	<b><math>-2\sigma</math></b>	<b><math>+2\sigma</math></b>
	<b>3612</b>	<b>4880</b>
<b>INTERVALLO DI AZIONE</b>	<b><math>-3\sigma</math></b>	<b><math>+3\sigma</math></b>
	<b>3295</b>	<b>5197</b>

**Quinto Passo**

Si disegna la carta di controllo basata sul numero di tracce totali calcolato su rivelatori irraggiati con  $1^{241}\text{Am}$ , per avere sempre a portata di mano un range i valori e un intervallo di accettabilità entro il quale non è necessario applicare alcuna correzione.



## 7.1 CONCLUSIONI

Come già è stato detto precedentemente con questo lavoro abbiamo si è cercato di studiare e analizzare statisticamente la possibilità di usare un nuovo sistema di esposizione per l'americio-241 per il controllo dell'attacco chimico dei rivelatori CR-39 per la misura della concentrazione dell'attività di radon.

L'utilizzo del calcolo del  $t$  di Student è un passo importante per valutare la significatività statistica, e quindi valutare la correttezza dei dati.

I risultati ottenuti mostrano una significatività non casuale e consentono di affermare che esiste una differenza tra il vecchio sistema di irraggiamento all'americio dei rivelatori CR-39 e il nuovo sistema.

In conseguenza di ciò è necessario costruire una nuova carta di controllo basata sul nuovo sistema di esposizione.

Discorso a parte va fatto per i fondi che come sappiamo consistono nel contributo di tracce nucleari create sia nella fase di produzione dei rivelatori sia durante i transiti o i periodi di stoccaggio; e il loro valore dopo essere stato calcolato va sottratto ai risultati ottenuti dall'esposizione.

Il calcolo del  $t$  di Student e il confronto fra il gruppo 5 e quello dei fondi sia di riferimento che dello sviluppo 32 è servito per controllare se il numero di tracce con il passare del tempo è aumentato oppure è rimasto invariato.

I calcoli che sono stati fatti evidenziano che fra il gruppo 5 e i fondi di riferimento è presente una differenza significativa. Ciò dimostra che il fondo durante lo stoccaggio dei rivelatori aumenta e deve essere aggiornato almeno una volta ogni anno. Dal confronto con i fondi dello sviluppo 32 è confermato che il numero di tracce è aumentato quindi, per un utilizzo futuro di questo set di rivelatori, bisognerà tener conto di questo aumento.

Inoltre l'analisi del numero di tracce su  $\text{cm}^2$  di un gruppo di rivelatori esposti all'americio è servita per la creazione di una nuova carta di controllo, che vada a sostituire quella precedente.

Il nuovo sistema di irraggiamento è stato utilizzato per creare una carta di controllo relativa ad un nuovo stock di circa 9000 rivelatori CR-39.

Le caratteristiche della carta di controllo sono: media 4246, intervallo di attenzione ( $2\sigma$ ) 3612 -4880; intervallo di azione ( $3\sigma$ ) 3295 – 5197.

## Capitolo 6 Carte di controllo di Shewhart

Nel caso i risultati di rivelatori di controllo esposti ad americio-241 ricadano entro l'intervallo di attenzione non sono necessarie ulteriori azioni.

Nel caso in cui i rivelatori di controllo ricadano oltre l'intervallo di attenzione, ma entro l'intervallo di azione i risultati sono accettati, ma devono essere individuate le cause di tale scostamento.

Nel caso in cui i rivelatori di controllo ricadano oltre l'intervallo di azione, i risultati sono sospesi e devono essere messe in atto azioni per ricondurre il processo sotto controllo ed eventualmente azioni per il recupero dei risultati.