

Metodi di misura

Strumenti di misura del Radon in aria ed in acqua

Caratteristiche generali

I sistemi di misura per la rivelazione del Radon possono essere suddivisi principalmente in due tipi:

- **sistemi a campionamento attivo:** il Radon e i suoi prodotti di decadimento sono portati in prossimità del rivelatore attraverso un sistema di pompaggio meccanico;
- **sistemi a campionamento passivo:** il Radon e i suoi figli sono raccolti naturalmente dal dispositivo contenente il rivelatore o il materiale assorbitore. In questo caso sono sfruttati diversi fenomeni come l'assorbimento (vedi par 4.2.5), la solubilità, la diffusione e la permeabilità al Radon dei vari materiali.

Si possono distinguere inoltre:

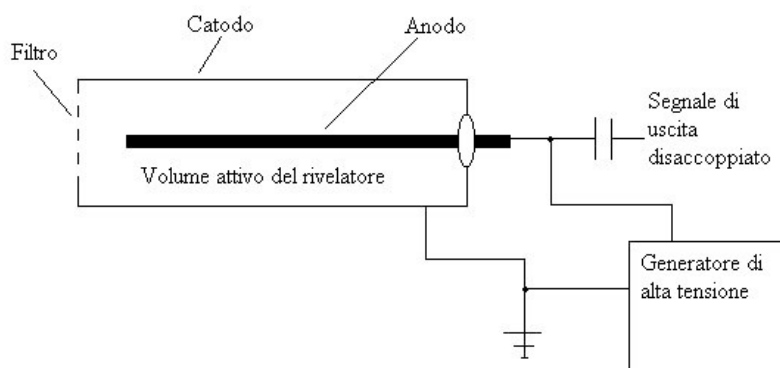
- **tecniche a campionamento discreto,** in cui vengono misurati singoli campioni di aria o acqua raccolti in brevi intervalli di tempo;
- **tecniche a campionamento continuo,** utilizzate per rivelare la variazione temporale della concentrazione di Radon;
- **tecniche ad integrazione,** che forniscono un valore medio temporale della concentrazione di Radon in un periodo che può variare da alcuni giorni ad anni.

Strumenti e metodi di misura del Radon in aria

In questo paragrafo analizzeremo i principali metodi utilizzati per la misura del Radon in aria, soffermandoci sulla descrizione degli strumenti più diffusi.

Camera a ionizzazione

Le particelle emesse dal decadimento del Radon ^{222}Rn e dei suoi discendenti, possono essere rivelate in camere a ionizzazione. La camera a ionizzazione, come mostrato nello schema seguente (fig 4.1), è costituita da un contenitore cilindrico metallico (catodo) che si trova ad un diverso potenziale rispetto all'elettrodo centrale (anodo), sul quale viene prelevato il segnale prodotto dal rivelatore.



Schema di una camera a ionizzazione

Il campione di aria contenente Radon viene introdotto nel volume del rivelatore attraverso un filtro in grado di rimuovere le particelle di aerosol a cui sono legati i prodotti di decadimento del Radon; una volta introdotto all'interno del rivelatore il Radon decade nuovamente nei suoi figli, ma l'attività totale misurata è legata solamente al quantitativo di Radon iniziale.

Le particelle emesse dal decadimento del Radon e dai suoi figli ionizzano l'aria creando delle coppie ione-elettrone. Queste cariche vengono raccolte dal campo elettrico esistente nella camera e durante il loro percorso inducono una corrente elettrica sul filo, che varia a seconda del tipo di particella ionizzante. La misura può essere eseguita dopo alcune ore dall'introduzione del campione d'aria all'interno della camera, affinché sia raggiunto l'equilibrio secolare tra il Radon e i suoi prodotti di

decadimento come già visto nel capitolo 2. La sensibilità di questo strumento è dell'ordine di 10^{-14} A Bq⁻¹, l'incertezza di misura è dell'ordine del 10- 20%, mentre la minima concentrazione rivelabile dipende fortemente dal tempo di misura e dal volume della camera e, per una camera con un volume di 1 litro, con un tempo di misura di circa 1000 minuti, è di poco minore di 1 Bq/m³.

Metodi che utilizzano lo scintillatore ZnS(Ag)

Il solfuro di zinco attivato in argento è uno scintillatore inorganico utilizzato fin dai primi esperimenti sulla radioattività. Nella tabella 4.1 sono riportate le sue principali caratteristiche:

Proprietà dello ZnS(Ag)	
Densità (g/cm ³)	4.09
Struttura	Policristallina
Lunghezza d'onda di emissione (nm)	450
Indice di rifrazione alla massima emissione	2.36
Efficienza di scintillazione (% di NaI(Tl))	130
Costante di decadimento (ns)	110

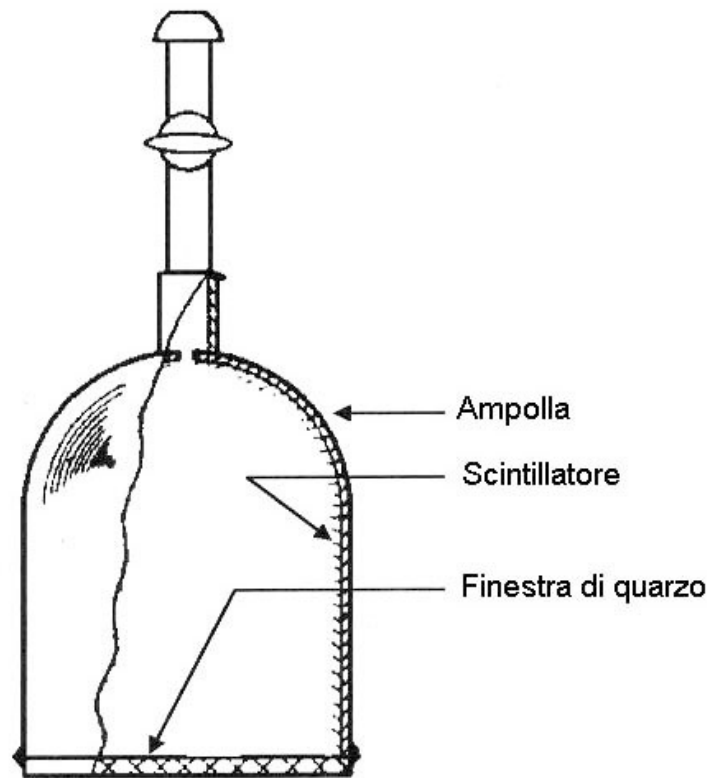
Proprietà del solfuro di zinco attivato in argento

Va notata la grande efficienza di scintillazione [37], cioè la frazione dell'energia della particella incidente che è convertita in luce visibile, pari al 130% rispetto a quella dell'NaI(Tl). Questo scintillatore è disponibile unicamente in forma policristallina e di conseguenza si può usare esclusivamente in sottili strati, sensibili solo a particelle e a ioni pesanti. Spessori maggiori di 25 mg/cm² diventano inutilizzabili a causa della sua opacità alla propria radiazione di luminescenza.

La cella di Lucas

La cella di Lucas è uno dei più semplici e utilizzati strumenti di misura della concentrazione del Radon. La tecnica di misura è stata sviluppata da Lucas nel 1957.

Il gas contenente il Radon viene introdotto in un contenitore di forma cilindrica le cui pareti sono ricoperte di un sottile spessore (20 mg/cm²) di ZnS(Ag). Il contenitore è dotato di una finestra di quarzo trasparente ai fotoni di luminescenza prodotti dallo scintillatore che viene accoppiato otticamente con un fotomoltiplicatore, come indicato nella figura:



Cella di Lucas

Per evitare che i prodotti di decadimento si depositino sul quarzo, attirati dalla carica negativa indotta dal fotomoltiplicatore, si riveste la finestra di un sottile strato di ossido di stagno. L'efficienza di rivelazione di questo tipo di celle, cioè il rapporto tra il numero di impulsi elettrici che fuoriescono dal fotomoltiplicatore e il numero di decadimenti all'interno della cella, è tipicamente del 70-80%. Le particelle per essere rivelate devono raggiungere la parete della cella e, a causa delle brevi distanze che possono percorrere in aria (circa 10 cm), la grandezza delle celle di Lucas è limitata a poche centinaia di centimetri cubici rendendone possibile l'uso solo con concentrazioni di Radon superiori ai $40 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$.

La cella di Lucas può essere utilizzata per un campionamento continuo, con periodi di misura di circa 30 minuti, facendo fluire l'aria al suo interno con una velocità di $3 \text{ l}/\text{min}$.

Questo tipo di misura ha bisogno di una correzione a causa della deposizione dei prodotti di decadimento sulle pareti della cella. A tale proposito si effettua una misura preliminare del fondo prima di introdurre il campione; tale misura verrà successivamente sottratta a quella ottenuta con il campione di Radon [3]. Ovviamente l'accumulo dei prodotti di decadimento costituisce un notevole svantaggio nell'utilizzo di tale metodo di misura, poiché la contaminazione della cella aumenta ogni volta che viene utilizzata per una nuova misura.

La raccolta elettrostatica

La tendenza dei figli del Radon a depositarsi sulle superfici può essere utilizzata vantaggiosamente. La misura della concentrazione di Radon può essere eseguita, infatti, tramite la raccolta elettrostatica dei prodotti di decadimento sul rivelatore: in questo modo si ha un aumento dell'efficienza perché vengono raccolte anche le alfa emesse dal ^{218}Po e dal ^{214}Po . Anche in questo caso, però, lo svantaggio consiste nel rischio di contaminare il rivelatore con alte concentrazioni dei figli del Radon che possono non essere completamente rimosse per la misura successiva.

Questa tecnica di misura presenta molte varianti; l'elemento comune è la camera elettrostatica che consiste in un recipiente metallico nel cui interno viene posizionato il rivelatore, ricoperto solitamente da un sottile strato di un materiale conduttore, in modo da mantenere un potenziale negativo rispetto alle pareti della camera.

La raccolta elettrostatica, e di conseguenza l'efficienza di rivelazione, risente fortemente dell'umidità dell'aria; quindi questo tipo di apparecchiatura è di solito accoppiata con dispositivi deumidificanti. Negro e Watnik [14], effettuando una spettrometria, hanno mostrato nel loro modello di camera che il rapporto tra i conteggi del ^{214}Po e quelli del ^{218}Po passa da 1.2 con un umidità del 10% a 2 con un umidità dell'80%.

Metodo dei due filtri

Questo metodo permette la misura separata della concentrazione del Radon e di quella dei suoi prodotti di decadimento. Il campione d'aria da misurare viene fatto passare attraverso un lungo cilindro alle cui estremità sono inseriti due filtri. Il primo impedisce l'ingresso nel cilindro dei figli del Radon bloccando le particelle di aerosol presenti; il secondo raccoglie i figli del Radon formati nel volume attivo del cilindro durante il passaggio dell'aria. I due filtri sono poi contati separatamente e permettono di risalire alla concentrazione del Radon (secondo filtro) e a quella dei suoi prodotti di decadimento (primo filtro). La misura può essere eseguita per esempio per mezzo di uno scintillatore di ZnS(Ag) . Per aumentare l'efficienza di raccolta, sul secondo filtro può essere applicato un opportuno campo elettrico per attirare i prodotti di decadimento (raccolta elettrostatica).

Scintillatore liquido

Una differente tecnica di conteggio utilizza al posto dello ZnS(Ag) uno scintillatore liquido.

Il campione d'aria da misurare è fatto passare attraverso un solvente organico nel quale il Radon è altamente solubile anche a basse temperature; il solvente è poi introdotto in un recipiente contenente uno scintillatore liquido con il quale viene miscelato.

Questa tecnica permette la misura di grandi campioni d'aria con celle di conteggio di volume ridotto e può essere una valida alternativa alle celle di Lucas, nonostante la presenza di un conteggio di fondo relativamente elevato.

Tecniche di misura ad integrazione

Le tecniche di misura ad integrazione sono utilizzate per monitoraggi che richiedono un lungo periodo di osservazione e si basano sul fatto che le particelle alfa attraversando determinati materiali lasciano una traccia del loro passaggio che viene misurata in un secondo momento.

Carboni attivi

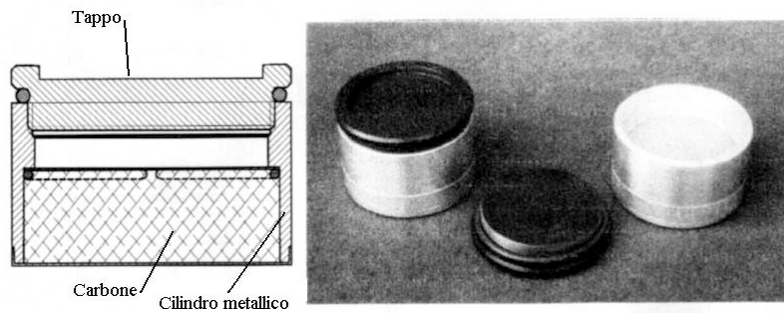
Rutherford fu il primo a mostrare che il carbone può essere utilizzato per trattenere il Radon mediante adsorbimento e fare una misura della sua concentrazione in aria. Per adsorbimento si intende la ritenzione superficiale della sostanza da parte di un liquido o di un solido, mentre la penetrazione della sostanza all'interno del materiale è chiamato assorbimento.

L'attività del Rn-222 è determinata mediante spettrometria, di solito con un rivelatore di NaI(Tl) [6]. I picchi analizzati sono quelli corrispondenti alle diseccitazioni dei nuclei prodotti nei decadimenti di Pb-214 (242, 295 e 352 KeV) e Bi-214 (609 KeV).

Questo metodo risulta piuttosto semplice ed economico, ma richiede rigorosi controlli sui fattori di correzione e di calibrazione. L'accuratezza della misura può infatti essere influenzata dal tempo di esposizione, dal peso del carbone, dalla accuratezza con cui viene eseguita la spettrometria e dall'eventuale adsorbimento dell'acqua presente nell'atmosfera. La correzione per la ritenzione dell'acqua, che di solito è valutata pesando il rivelatore prima e dopo l'esposizione, può essere superiore al 50%.

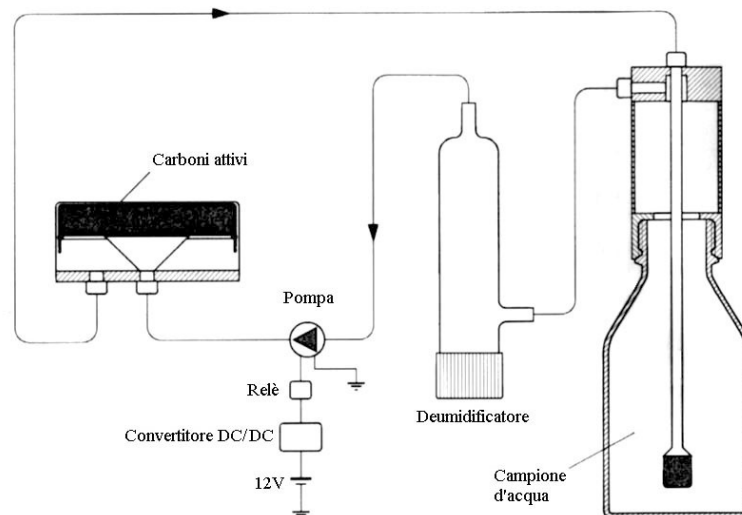
I rivelatori in uso sono contenitori di metallo cilindrici con un diametro compreso tra 5 e 10 cm e un'altezza tra i 2 e i 5 cm, riempiti con una quantità di carbone variabile da 25 a 250 g.

Nella figura è illustrato un esempio di tali rivelatori.



Rivelatore a carboni attivi

I rivelatori a carboni attivi possono inoltre essere riutilizzati per ulteriori esposizioni, dopo aver perso memoria della loro precedente misura, in seguito ad un riscaldamento ad alte temperature che elimina il Radon residuo. Tali rivelatori vengono anche utilizzati per misure di Radon in acqua. Come visibile dalla figura il campione d'acqua viene introdotto nel recipiente di destra dal quale viene estratto il Radon tramite un processo di degassamento. Il Radon estratto misto a vapore acqueo subisce quindi un processo di deumidificazione e, tramite una pompa, è poi introdotto nel cilindro contenente i carboni attivi dove viene accumulato. La misura è eseguita in un secondo momento.

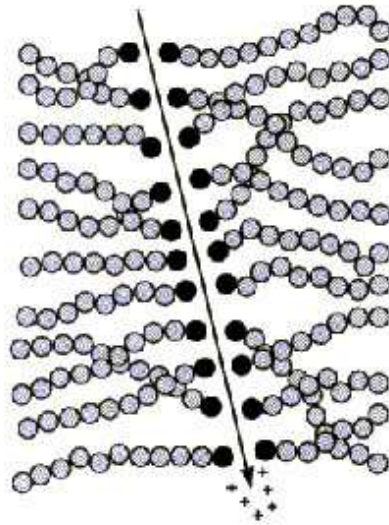


Schema di utilizzo di un rivelatore a carboni attivi per misure di Radon in acqua

Rivelatori nucleari a tracce

I rivelatori nucleari a tracce o SSNTD (Solid State Nuclear Track Detector) sono costituiti da lastre composte da particolari materiali plastici e sono largamente utilizzati per monitorare l'esposizione al radon della popolazione. I rivelatori più usati sono: CR39 [12] (Allildigolcarbonato), LR115 [11] (nitrato di cellulosa) e il Makrofol (policarbonato).

Il passaggio di una particella carica pesante attraverso queste particolari plastiche produce delle fratture ai legami polimerici del sensore lungo la traiettoria della particella e provoca delle tracce che, a temperature ambiente, si conservano per un determinato tempo.

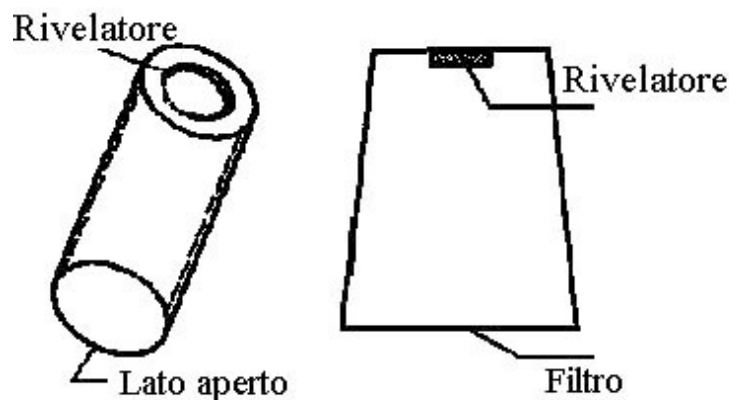


Traccia prodotta da una particella

La larghezza della traccia varia a seconda del mezzo e dell'intensità della ionizzazione e risulta più marcata in prossimità della parte finale della traccia in corrispondenza del picco di Bragg.

La lastra dopo essere stata esposta (per il CR39 si attendono solitamente 10-14 giorni) deve subire un processo di sviluppo chimico che evidenzia e fissa in modo permanente la traccia della particella. Per il CR39 lo sviluppo consiste nell'immersione della lastra in una soluzione di NaOH ad alta concentrazione ad una temperatura di 70°C per circa 7 ore [8]. In questo caso il tipico diametro di una traccia provocata da una particella dopo lo sviluppo è di circa 10-20 μ m. I dosimetri che utilizzano i rivelatori nucleari sono di varie geometrie e possono prevedere o meno l'utilizzo di filtri per determinare una differenziazione nelle tracce.

Nella figura ne vediamo alcuni tipi.



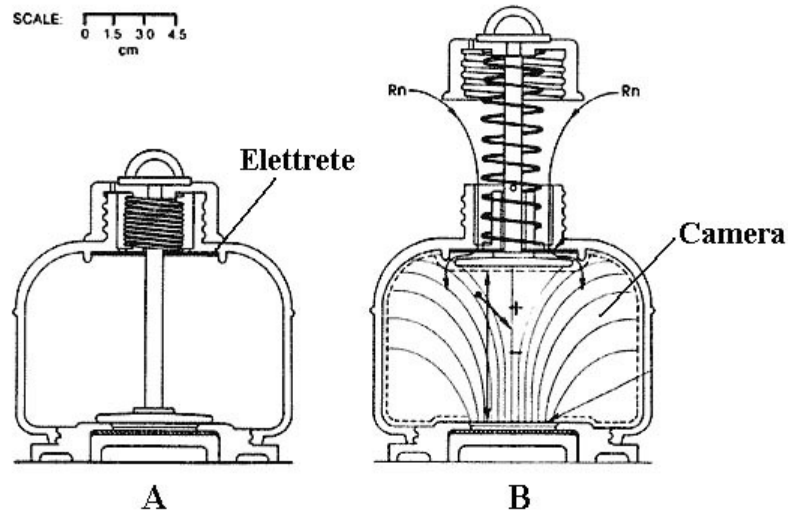
Alcuni tipi di detector basati su rivelatori nucleari a tracce

Rivelatori a elettrete

Questo tipo di rivelatori si basa sull'uso di un voltmetro digitale per misurare la variazione di potenziale indotta su un elettrete dalla raccolta degli ioni prodotti dal decadimento del Radon e dei suoi figli. L'elettrete è un disco di materiale dielettrico, generalmente Teflon, che presenta una carica elettrica stabile se rimane imperturbato.

Nella figura possiamo vedere un esempio di un rivelatore ad elettrete. Il rivelatore, inizialmente chiuso (vedi fig. 4.7A) viene aperto per permettere l'ingresso del campione di aria contenente il Radon da

misurare (vedi fig. 4.7B). L'elettretto è posto in una camera contenente un certo volume di aria e raccoglie gli ioni prodotti dalle particelle emesse nel decadimento del Radon e dei suoi figli. In seguito a tale fenomeno il potenziale elettrostatico si riduce in modo proporzionale alla radioattività presente nella camera. Misurando la perdita di potenziale durante un certo intervallo di tempo e utilizzando appropriati fattori di calibrazione si determina la concentrazione media di Radon

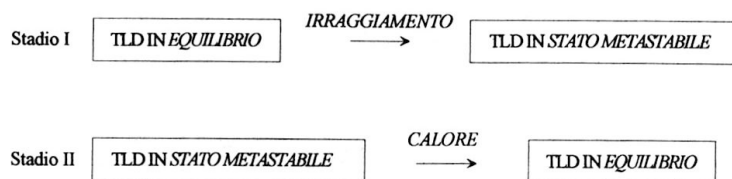


Rivelatore ad elettretto

Rivelatori a termoluminescenza (TLD)

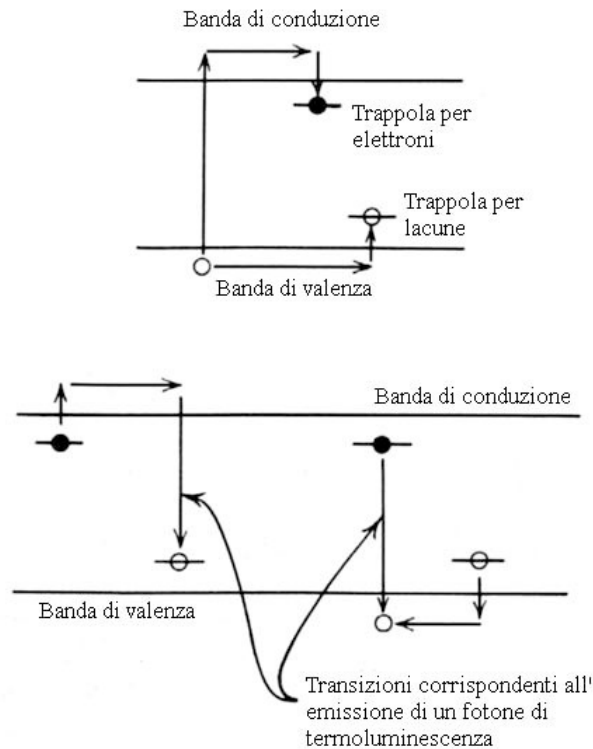
I materiali termoluminescenti sono materiali isolanti (LiF, BeO, CaF₂, CaSO₄) che, dopo essere stati irraggiati, a seguito di riscaldamento emettono luce. Il fenomeno della termoluminescenza è caratterizzato da due stadi:

- **Stadio I:** una perturbazione, come l'esposizione alle radiazioni, porta il sistema da uno stato stabile ad uno metastabile;
- **Stadio II:** la stimolazione termica riporta il sistema ad uno stato stabile con emissione di luce di termoluminescenza correlata all'energia assorbita durante l'esposizione.



Per questi materiali la banda di valenza è separata da quella di conduzione e la presenza di difetti e di impurezze, anche aggiunte volutamente dal cosiddetto drogaggio, porta alla presenza di livelli intermedi, detti *trappole*, normalmente vuoti. A seguito di irraggiamento, gli elettroni in equilibrio in banda di valenza possono ricevere dalla radiazione l'energia sufficiente a passare in banda di conduzione. Di qui o ritornano subito in banda di valenza o possono finire in una trappola ove permangono se questa risulta sufficientemente profonda da non ricevere dal calore ambiente l'energia necessaria per tornare nella banda di conduzione.

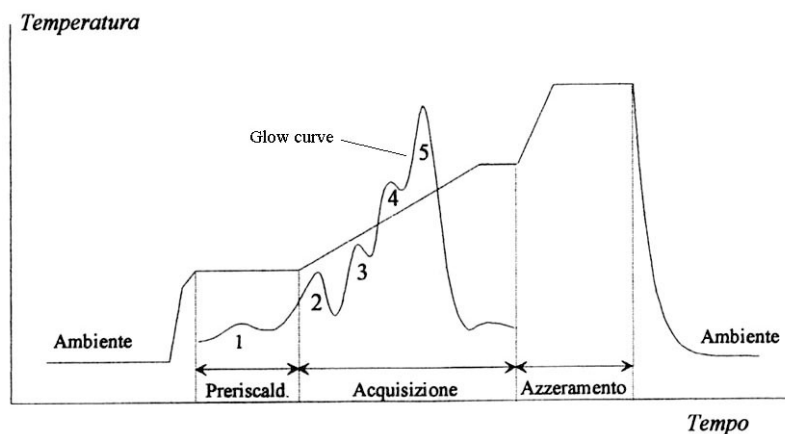
L'elettrone liberato dalla banda di valenza lascia una lacuna che ha un comportamento simmetrico a quello dell'elettrone e può finire in una trappola per lacune. Il ritorno dallo stato metastabile allo stato di equilibrio è stimolato dall'incremento della temperatura del campione. Se tale incremento è sufficientemente alto, l'elettrone e la lacuna intrappolati possono ricevere l'energia sufficiente per uscire dalle trappole e ricombinarsi. Il processo di ricombinazione è radiativo con emissione di luce caratteristica.



Meccanismi di termoluminescenza

La rivelazione della luce di termoluminescenza, emessa durante l'innalzamento della temperatura, dà la cosiddetta *glow curve* caratterizzata da picchi in successione, in quanto vengono progressivamente coinvolti nella transizione alla banda di conduzione elettroni posti in livelli energetici delle trappole sempre più profondi.

Nella figura è riportato il trattamento termico completo di un dosimetro che, dopo il processo di azzeramento (annealing) ad alta temperatura ed il ritorno a temperatura ambiente, secondo un rateo di raffreddamento controllato, perde l'informazione e può essere riutilizzato; il preriscaldamento serve a svuotare completamente i livelli meno profondi che possono essere stati inficiati dal calore ambiente; nel processo di acquisizione si ha la formazione della "glow curve".



Trattamento termico di un TLD

È necessario tener conto di due fenomeni che possono far perdere informazione al TLD:

Fading termico: perdita di informazione imputabile al rilascio di elettroni che acquistano dal calore ambiente energia sufficiente ad uscire dalle trappole; il processo è probabilistico e caratterizzato da una

costante di tempo tipica del materiale. Tale costante di tempo deve essere diverse volte maggiore del tempo di esposizione e di attesa prima della lettura.

Fading ottico: perdita di informazione per esposizioni a radiazione luminosa che statisticamente può fornire l'energia necessaria per l'eccitazione degli elettroni intrappolati.

Strumenti e metodi di misura del Radon in acqua

Scintillatore liquido

Un metodo rapido di misura della concentrazione di Radon è quello realizzato mediante l'utilizzo di uno scintillatore liquido. Il campione di acqua viene prelevato, facendo bene attenzione ad evitare il contatto di questa con l'aria [23], e viene trasferito direttamente in una fiala riempita preventivamente con uno scintillatore liquido solubile in acqua. Si ha l'accortezza di iniettare il campione al di sotto del livello dello scintillatore per evitare ogni contatto con l'aria; come risultato si ottiene una soluzione di scintillatore e acqua.

L'ermeticità della fiala con cui si effettua il conteggio è critica a causa del fatto che il Radon può fuoriuscire da essa. Belloni et al. [36] hanno valutato 16 diversi tipi di fiale riempiendole con una concentrazione elevata di Radon e misurando con un rivelatore a stato solido il numero delle tracce rivelate. Il tipo di fiala che ha riportato un risultato migliore è stata la Zinsser 600. Il cocktail scintillante deve essere scelto in base alle seguenti caratteristiche:

- capacità di massimizzare le differenze tra gli impulsi generati dalle radiazioni α e β ;
- buona risoluzione dello spettro
- capacità di minimizzare le interferenze da parte di altri radionuclidi.

L'attività del campione di acqua può essere misurata usando i sistemi convenzionali a scintillatore liquido impiegati per i campioni di gas in aria, avendo cura di pulire l'esterno della fiala dalla polvere per evitare fenomeni di chemiluminescenza, fenomeno dovuto alla reazione dell'ossido di azoto (NO) e dell'ozono (O₃) che produce una luminescenza.

La concentrazione del Radon A_0 che si vuole ottenere è distribuita in tre fasi:

$$A_0 = (A_{sc} + A_w + A_a)(Bq)$$

dove A_{sc} è il Radon misurato con lo scintillatore, $w A$ è il Radon residuo in acqua e A_a è il Radon perso in aria. Il rateo di estrazione R è definito come:

$$R_\alpha = \frac{A_{sc}}{A_0}$$

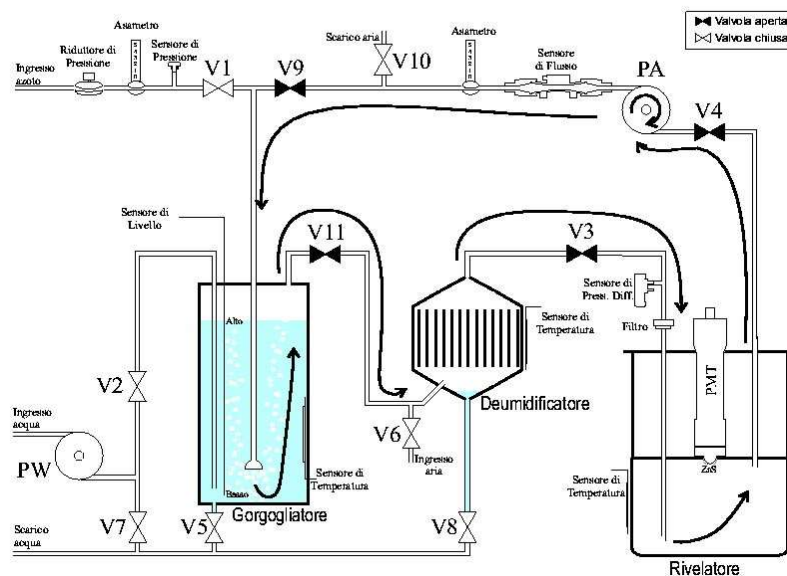
Il metodo necessita quindi di una calibrazione per ottenere il valore di R in modo da poter ricavare il valore cercato A_0 a partire da quello misurato A_{sc} .

Metodi di estrazione del gas

Un altro metodo di misura consiste nell'estrazione del Radon gas dal campione di acqua e nella successiva misura dell'attività. Durante il prelievo del campione è necessario porre particolare attenzione nell'evitare il contatto tra aria e acqua e la possibile dispersione del Radon a causa della particolare volatilità di quest'ultimo.

L'estrazione del Radon avviene tramite gorgogliamento (*bubbling*) di un gas, di solito elio o azoto, nell'acqua. Le caratteristiche di solubilità del Radon rendono possibile il passaggio dall'acqua al gas fino al raggiungimento di un rapido equilibrio. Un diffusore microporoso permette la produzione di bolle piccole e regolari in modo da aumentare così il rapporto superficie/volume del gas. In questa fase un sensore di portata controlla la quantità di gas flussato, in modo da terminare il gorgogliamento quando è stata utilizzata una quantità di gas predefinita. Dopo l'estrazione la miscela ottenuta viene fatta passare in un deumidificatore.

Infatti il raffreddamento del gas al disotto della temperatura di condensazione (temperatura di rugiada o *dew point*) consente di ridurre il contenuto di acqua. La parte di vapore acqueo che condensa viene raccolta sul fondo del deumidificatore e, alla fine del processo di gorgogliamento, è scaricata attraverso una valvola.



Schema di un rivelatore a estrazione di gas

Nella figura è possibile notare sulla parte sinistra il cilindro in cui viene introdotto il campione di acqua, dotato di un gorgogliatore in cui viene fatto fluire il gas azoto. Il Radon estratto viene fatto passare poi, attraverso la valvola V11, nel deumidificatore da cui, attraverso la V3, viene introdotto in una camera di raccolta a diretto contatto con lo scintillatore ZnS accoppiato con un PMT. Alla fine della misura viene svuotato il recipiente contenente il campione di acqua attraverso la V5 e successivamente viene fatto fluire azoto che provvede alla rimozione dei prodotti di decadimento e del gas residuo attraverso la V10.

A questo punto il gas può essere trasferito direttamente in una camera di conteggio per la misurazione, come una cella di Lucas [1], oppure fatto passare attraverso una trappola, ad esempio carboni attivi [7]; in questo secondo caso il conteggio avverrà successivamente.

Un'altra possibilità è quella di lasciare diffondere il Radon nell'aria o nel vuoto fino a raggiungere l'equilibrio come nell'apparecchio automatico di Bella et al. [29] o nello strumento di misura ad elettretti di Kotrappa [30].

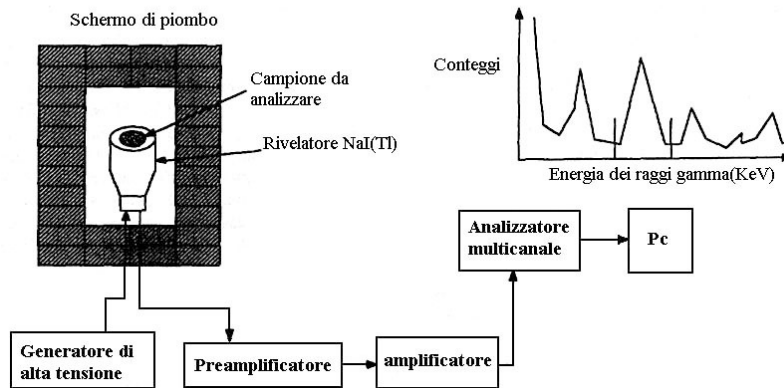
Metodi che utilizzano il conteggio gamma

Tramite il conteggio dei raggi emessi dai figli del Radon è possibile risalire alla concentrazione di tale gas utilizzando le tecniche di spettrometria standard.

Si campiona l'acqua evitando sempre il contatto con l'aria, poi la si ripone in una fiala evitando di agitarla e rimuovendo l'aria rimasta [33].

La misura è eseguita dopo circa quattro ore la raccolta del campione, per permettere al Radon e ai suoi discendenti di arrivare all'equilibrio secolare, cioè di raggiungere la condizione in cui hanno tutti la stessa attività. Il rivelatore consiste in uno scintillatore NaI accoppiato ad un fototubo o in un rivelatore al germanio. Il tutto deve essere ben schermato per limitare i gamma non provenienti dal campione e deve essere eseguita una misura del fondo per lo stesso periodo di tempo in cui si misura il campione. Questo fondo andrà poi sottratto alla misura del campione di acqua.

Nella figura vediamo uno schema classico di rivelatore per spettroscopia:



Schema di una catena spettroscopica

La misura della concentrazione C_0 del Radon può essere ricavata dalla seguente formula:

$$C_0 = \frac{\varepsilon \cdot A_{figli} \cdot 1000}{e^{-\lambda_0 \cdot t} \cdot V_m} (Bq \cdot l^{-1})$$

dove A_{figli} è l'attività dei figli -emettitori, λ_0 è la costante di decadimento del Radon ($2.098 \cdot 10^{-6} s^{-1}$), t è l'intervallo di tempo in secondi passato dalla campionatura dell'acqua, ε è l'efficienza di rivelazione e V_m è il volume del campione di acqua.

Comparazione dei metodi

È stato condotto uno studio di comparazione da P. Belloni et al. [36] tra vari metodi di misura del Radon in acqua:

- degassificazione seguita da conteggio attraverso celle di Lucas;
- conteggio usando uno scintillatore liquido;
- conteggio gamma.

Per comparare le tre tecniche di rivelazione sono stati prelevati 21 campioni di acqua con differenti attività di Rn-222. Il campionamento, per i tre metodi, è stato simultaneo e dall'analisi dei risultati sono state tratte le seguenti conclusioni:

- le tecniche di investigazione mostrano un buon accordo nel range delle attività misurate, specialmente considerando la qualità differente dei campioni;

- non si sono avuti particolari problemi nei tre metodi; secondo l'opinione degli autori i metodi di scintillazione liquida e di conteggio gamma sono risultati più semplici rispetto al metodo della degassificazione;
- i risultati relativi ai tre metodi sono confrontati nella tabella.

	Conteggi (cpm/dpm)	Estrazione del Radon (%)	Sensibilità (cmp/Bq/l)	Fondo (cpm)	LLD (Bq/l)
Cella di Lucas	0.745±0.020	0.925±0.025	23.57±0.90	1.0±0.1	0.02
Scintillazione liquida	0.912±0.009	No	1.64±0.16	0.29±0.07	0.20
Conteggio gamma	0.044±0.001	No	5.33±0.02	105±2	1.75

Risultati della comparazione tra i diversi metodi di rivelazione del Radon in acqua

Nella prima colonna sono riportati i valori ottenuti per il rapporto cpm/dpm tra il numero di conteggi al minuto e il numero reale di decadimenti al minuto, ottenuto tramite una calibrazione dei diversi strumenti. Nella seconda colonna è riportato il valore della percentuale di Radon estratta nel caso della cella di Lucas.

La sensibilità di ciascun metodo di rivelazione è intesa come il rapporto tra il numero di conteggi al minuto e l'attività specifica del campione in esame.

Nella quarta colonna è riportata la misura del fondo, che risulta particolarmente alto nel caso del conteggio gamma. L'ultima colonna è relativa ai valori di LLD (*Low Level Detectable*), cioè della minima variazione apprezzabile dell'attività specifica del campione (*resolving power*), espressa in Bq/l. Si vuole sottolineare che tutti e tre i metodi elencati, sebbene diversi per metodologie di misura e risultati, presentano il comune svantaggio di dover effettuare le misurazioni in un tempo successivo al campionamento dell'acqua. In pratica, cioè, le misurazioni possono essere eseguite solo prelevando un certo campione di acqua e introducendolo successivamente nel rivelatore, con il rischio di eventuali contaminazioni, perdite di Radon e introduzione di errori dovuti al tempo trascorso tra il campionamento e la misurazione che rendono necessaria l'applicazione di opportune correzioni.

A questo proposito il rivelatore YAP-GEO utilizzato in questo lavoro di tesi e descritto nel capitolo 5 risulta decisamente innovativo in quanto si propone come uno strumento per la rivelazione di Radon in un qualsiasi fluido e permette in particolare la misura in situ del Radon presente nell'acqua.

Bibliografia

- H.F. Lucas, Improved Low-Level alpha scintillation counter for Radon, Rev.Sci. Instruments 28 (1957).*
J.W. Thomas and R.J. Countess, Continuos Radon monitor, Health Phis. 36 (1979).
A. Busigin et al., Interpretation of the response of continuos Radon monitors to transient Radon concentration, Health Phis. 37 (1979).
U.S. EPA, EERF standard operating procedures for Rn-222 measurement using charcoal canistres, EPA520/5-87-005,(1987).
A. De Luca and C. Mancini, The measurement system for Rn-222 monitoring with charcoal absorption,Health Phisycs, 45 (1983) 501-508.
C.Mancini et al., Misura della concentrazione di Radon in aria e acqua mediante la spettrometria gamma, Acqua aria,2 (1995) 543-546.
C.Galli et al., Radon grab sampling in water by means of Radon transfer in activated charcoal collector, Il nuovo cimento vol.22 (1999).

D. Mazur et al., Measurement of Radon concentration in soil gas by CR-39 detectors, *Radiation measurement* 31 (1999) 295-300.

R. Andriamanatena et al., Modelling of solid state nuclear track detector devices for Radon measurement, *Rad. Meas.* (1997) 28 657-662

S.A. Durrani Radon measurement by etched track detectors: application in radiation protection, *Earth sciences and environment*, (1997).

G. Jonsson, Experience from using plastic film in Radon measurement, *Radiation measurement* 31 (1999) 265-270.

J.C. Hadler et al. Indoor Radon daughter contamination monitoring : the absolute efficiency of CR-39 taking into Account the plate effect and environment conditions, *Radiat. Prot. Dosim.*, 51 (1994) 283-296.

P. Kotrappa et al., An electret-passive environmental Rn monitor based on ionization measurement, *Health Phys.* 54 (1988).

A.V. Negro e S. Watnik, A Radon measuring instrument with fast response, *IEEE Trans. Nucl. Sci.* 22 (1978) 757.

J.R. Cameron et al., Thermoluminescent dosimetry, University of Wisconsin Press, Madison (1968).

M. Oberhofer and A. Scharmann, Applied Thermoluminescent dosimetry, Adam Hilger Ltd., Bristol (1981).

Y.S. Horowitz Thermoluminescence and Thermoluminescent dosimetry Vols. I, II, III, CRC Press, Boca Raton, FL, (1984).

B.B. Rossi and H.H. Staub, Ionization chambers and counters, McGraw-Hill, New York 1949.

D.H. Wilkinson, Ionization chambers and counters. Cambridge University Press, Cambridge, 1950.

J.W. Boag, Ionization chambers, *Radiation dosimetry Vol. II*, New York, 1966.

L. Miller et al., *Phys. Rev.*, 166 (1968) 871.

E. Shibamura et al., *Nucl. Instrum. Meth.*, 131 (1975) 249.

US EPA, EERF Manual 78-1, Radon in water sampling program (1978).

S. Hamanaka et al., Radon concentration measurement in water by means of liquid-scintillation spectrometry with a PERALS spectrometer, *Nucl. Instrum. Meth.* 410 (1998) 314-318

W.J. McDowell, *Organic Scintillators and Liquid Scintillation Counting*, D.L. Horrocks, C.T. Peng (Eds.), Academic Press, New York, 1971, p. 937.

W.J. McDowell, B.L. McDowell, *Liquid Scintillation Alpha Spectrometry*, CRC press. Boca Raton, 1994.

E. Schònhofer, Measurement of ^{226}Ra in water and ^{222}Rn in water and air by liquid scintillation counting, *Radiat. Protect. Dosim.*, 45(1/4) (1992) 123-125.

H. Bem et al., An improved method for low level ^{222}Rn determination in environmental waters by liquid scintillation counting with pulse shape analysis. *J. Radioanal. Nucl. Chem. Lett.* 186(2) (1994), 119.

F. Bella et al., Automatic equipment to monitor groundwater Radon, *Pageoph. Vol 141* (1993) 125.

P. Kotrappa et al., An electret-passive environmental Rn monitor based on ionization measurement, *Health Phys.* 54 (1988) 47.

A. Aksoy et al., Elemental analysis using natural gamma-ray spectroscopy, *Nuclear instrument e methods* 353(1994), 558-561.

G. Galli et al., Continuous measurement system of Radon concentration in water by gamma radiation detection emitted by ^{214}Bi and ^{214}Pb decay, *Il nuovo cimento Vol. 22 C, N. 3-4*.

K. Shizuma et al., A method for measuring accurate Radon concentration in water by means of α -ray spectrometry, *Nuclear instrument e methods* 410 (1998) 309-313.

E. Pohl, V. Pohl-Ruling, Determination of environmental or occupational ^{222}Rn in air and water and ^{226}Ra in water with feasible and rapid methods of sampling and measurements. *Health Physics*, 31, (1976) 343.

G. G. Mastinu, An emanation apparatus with simple operational procedure for measurements of low levels of ^{226}Ra . *Health physics*, 28 (1975), 97-100.

P. Belloni et al., Optimization and comparison of three different methods for the determination of ^{222}Rn in water. *The Science of the Total Environment*, (1995), 173/174, 61/67.

G.F. Knoll, *Radiation detections and measurement*, John Wiley & Sons, 1979.