

theremino
•the•real•modular•in-out•

Sistema theremino

Una camera a ioni per il radon

La camera a ioni finita



Per chi dovesse cercare letteratura sull'argomento le parole da cercare sono: **"Camera a ioni di tipo a diffusione per la misura continua del radon, tramite conteggio, secondo il metodo CR della EPA"**

Questo documento parla delle caratteristiche delle camere a ioni in generale e della misurazione della attività del radon. Per i particolari sulla costruzione meccanica e elettronica, le caratteristiche tecniche e informazioni dettagliate sul radon si consultino i documenti allegati:

Una camera a ioni per il radon (questo stesso documento in formato PDF):

Radon_IonChamber_ITA
Radon_IonChamber_ENG
Radon_IonChamber_JPN
Radon_IonChamber_ESP

Meccanica:

Radon_IonChamberConstruction_ITA
Radon_IonChamberConstruction_ENG
Radon_IonChamberConstruction_JPN

Elettronica:

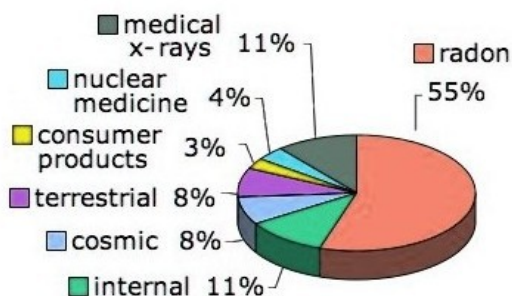
Radon_IonChamberElectronics_ITA
Radon_IonChamberElectronics_ENG
Radon_IonChamberElectronics_JPN

Informazioni sul radon:

Radon_Info_ITA
Radon_Info_ENG
Radon_Info_JPN

Prima di tutto perché misurare il radon?

Negli ultimi anni si è scoperto che il radon è molto più pericoloso di quello che si credeva in passato e che ha la stessa importanza del fumo di sigarette come causa del cancro al polmone.



In passato ci si preoccupava molto dei raggi X (radiografie) ma queste e tutte le altre fonti di radiazione messe insieme non arrivano nemmeno alla metà delle radiazioni che mediamente riceviamo, tutto il resto è legato al radon.

La pericolosità del radon è dovuta al fatto che si tratta di un gas incolore ed inodore, chimicamente non reattivo presente in tutte le abitazioni in modo occulto e che spesso è molto concentrato, anche fino a cento volte il limite che si considera pericoloso.

In una buona percentuale di abitazioni (una su dieci) e in alcune stanze (soprattutto a piano terra) la concentrazione di radon arriva anche a 10000 Bq/m³ (400 pCi/l 270 pCi/l) Chi vive e fuma tutta la vita in quelle stanze (per effetto dell'azione sinergica di fumo e radon) ha una probabilità altissima di ammalarsi di cancro ai polmoni.

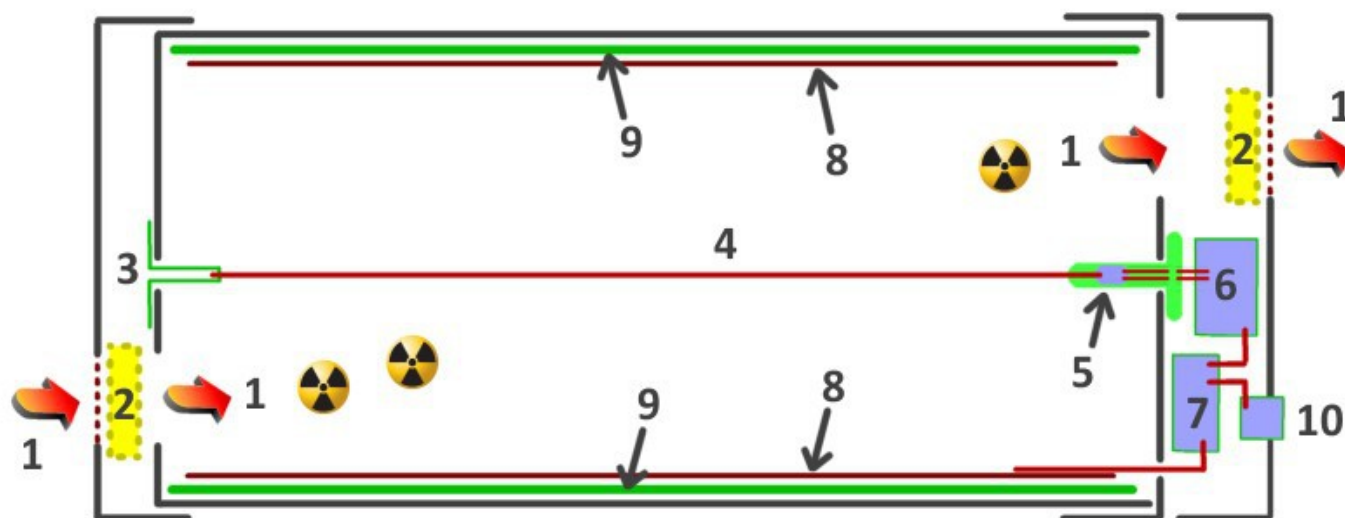
Sapendo di questo pericolo esistono soluzioni, ad esempio cambiare disposizione alle stanze o aerarle di più, oppure far uscire il radon prima che diffonda nelle altre stanze, con un aspiratore in cantina. Anche continuando a fumare, ma eliminando il radon, il rischio non solo si dimezza ma si riduce del 90 %.

Esistono documenti, trascurati da tutti, che avvertono di questo rischio da molti anni ma ultimamente le statistiche sul radon si moltiplicano e non ci sono più dubbi sulla sua pericolosità.

- <http://www.lastampa.it/2012/11/23/scienza/benessere/radon-il-pericolo-nascosto-che-uccide-una-persona-ogni-due-giorni-VW1sHEpwjUas259etvsTSL/pagina.html>
- <http://fgmambiente.it/wp-content/uploads/2013/03/rischio-radon-come-contenerlo.pdf>
- <http://www.ispesl.it/ossvita/pdf/radon.pdf>
- http://www.asca.it/news-Veneto_Ambiente_approvata_legge_contro_rischi_gas_radon-1296348.html
- <http://www.edilitaly.com/radon/radon.php3>
- <http://w3.uniroma1.it/medicinadellavoro/Struttura/Articoli/Nuova%20cartella/radon.pdf>
- http://www.corriere.it/salute/sportello_cancro/09_settembre_30/rischio-radon-case-italiane_e5f488c8-ad14-11de-a07d-00144f02aabc.shtml
- <http://www.meteogenova.it/meteo/documenti/mapparadon.pdf>
- <http://www.beppegrillo.it/listeciviche/liste/lazio/2013/02/gas-radon-da-risorsa-naturale-a-pericolo-invisibile.html>

Questi documenti spiegano la pericolosità del radon molto meglio di quanto possiamo fare noi qui. Il nostro contributo sarà soprattutto di facilitare le misurazioni con un misuratore "fai da te" che può essere costruito con materiali economici e reperibili in ogni ferramenta. Un apparecchio portatile che, una volta costruito, potrà misurare non solo tutte le stanze di casa, ma anche essere prestato agli amici e fare centinaia di test a costo zero. Purtroppo i test "ufficiali" costano molto (oltre 50 Euro ogni test) e vengono fatti solo in locali pubblici come le scuole. Ma raramente, e solo su richiesta, nelle abitazioni private.

Schema della camera a ioni



La camera a ioni consiste in un cilindro di 8 cm di diametro a 20 cm di altezza, per un volume totale di un litro e da tre coperchi che proteggono i componenti elettronici dai disturbi elettrici e dalla polvere. Il cilindro e i coperchi (**righe di colore nero**) sono in **lamiera stagnata** e sono tutti connessi elettricamente tra loro e uniti meccanicamente con fili di rame saldati a stagno.

L'aria esterna e gli isotopi radioattivi entrano nella camera (**1 frecce rosse**) per diffusione e per convezione attraverso due fori da 25 mm con griglie di ottone per i disturbi elettrici e filtri per la polvere (**2 gialli**)

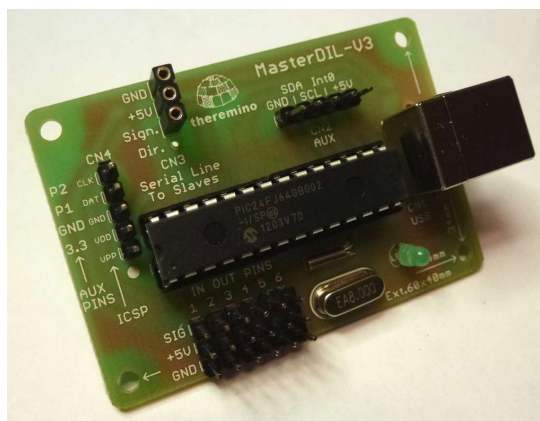
Internamente il cilindro è foderato con un elettrodo composto da nastro di alluminio (o rame) adesivo (**8 rosso**) isolato dal cilindro esterno per mezzo di un foglio di plastica isolante (**9 verde**) e caricato con 400 Volt positivi creati dal generatore di alta tensione (**7 viola**)

Un elettrodo centrale (**4 rosso**) viene mantenuto teso tra le due estremità della camera tra un tirante in nylon (**3 verde**) e un FET a basso rumore (**5 viola**). Il FET, che si trova dentro alla camera stessa per minimizzare il rumore, produce un segnale robusto, non più influenzabile da disturbi elettrici.

L'amplificatore e discriminatore della ampiezza degli impulsi (**6 viola**) isola gli impulsi prodotti dal radon e dai suoi discendenti e invia in uscita impulsi squadrati, di larghezza costante, robusti e facili da contare.

Il connettore di uscita (**10 viola**) è collegabile direttamente a un PIN standard del sistema Theremino. Normalmente si usa un modulo Master che provvede l'alimentazione per la camera a ioni e invia i conteggi, via USB, al software ThereminoGeiger.

Un solo Master potrebbe alimentare fino a sei camere a ioni, con collegamenti lunghi centinaia di metri e raccogliere contemporaneamente tutti i dati. Alcune delle sei camere potrebbero anche essere sostituite con sonde Geiger per raggi Alfa, Beta e Gamma o con altri sensori ambientali.



Contare le disintegrazioni con una camera a ioni

Esistono due tipi di camere a ioni, a conteggio e a integrazione. Quelle normalmente considerate nella letteratura sono a integrazione e misurano la corrente media prodotta da molte disintegrazioni. Le camere a integrazione sono estremamente dipendenti dai fattori ambientali come umidità, temperatura e pressione dell'aria. Per cui sovente si leggono notizie fuorvianti sulla instabilità e imprecisione delle camere a ioni. Queste notizie non sono applicabili al nostro metodo che non è basato sulla misura della corrente media (integrazione) ma sul conteggio dei singoli eventi.

La giusta definizione per il metodo da noi usato è "Counting ionization chamber" e il suo funzionamento è simile a un tubo geiger, cioè un conteggio digitale. Per una precisa definizione della nostra tecnologia si legga la Appendice 1 (alla fine di questo documento) che lista tutti i metodi classificati dalla EPA (Environmental Protection Agency). Il nostro metodo è classificato come "CR"

Dato che si contano le disintegrazioni in un tempo preciso e in un volume noto, la taratura è stabile e facilmente ripetibile.

Questa tecnologia è semplice come l'uovo di Colombo ma è stata usata raramente perché secondo la letteratura necessita di "costosi e delicati circuiti elettronici". Questo era vero in passato ma attualmente esistono FET a bassissimo rumore di corrente e circuiti integrati operazionali con ottime caratteristiche. Con questi componenti diventa facile isolare i singoli eventi e contarli.

Differenza tra "contare" e "misurare la corrente media"

Dato che il dato da conoscere è un numero di disintegrazioni non esiste modo migliore che contarle una per una. L'alternativa di cercare di risalire al loro numero misurando la corrente media e poi dividendo per quel che si presume sia la corrente prodotta da ogni disintegrazione è imprecisa e si fa anche ingannare da variabili come l'umidità, la temperatura, la pressione dell'aria e il fumo.

L'aria umida può produrre una corrente anche maggiore di quella che si vuole misurare. Anche altre variabili ambientali influiscono molto e basta la minima presenza di fumo nell'aria per ridurre notevolmente la corrente che si misura.

Infine il numero di atomi ionizzati (e quindi la corrente prodotta) cambia a seconda che la disintegrazione avvenga vicino a una parete oppure nel centro della camera e cambia anche a seconda della direzione casuale della particella beta che causa la ionizzazione. Se la particella nasce vicino a una parete e viaggia verso il centro sviluppa tutta la sua energia e produce il massimo numero di atomi ionizzati. Se invece viaggia in direzione opposta si scontra subito con la parete della camera e produce pochi atomi ionizzati e quindi una corrente elettrica molto piccola. Differenti eventi di disintegrazione possono quindi contribuire alla corrente media in modo diverso, con differenze tra un evento e l'altro che possono essere anche di dieci volte.

Come sia possibile fare misure precise con camere a integrazione è un mistero. A parte gli scherzi è davvero difficile compensare tutto e si dovrebbe anche controllare la presenza di fumo (ma non lo fa nessuno)

I brevetti sulle camere a ioni

Fortunatamente le camere a ioni che contano gli impulsi sono "arte nota" da gran tempo. Le prime versioni conosciute (ma non brevettate) risalgono al 1954, ed esistono anche i brevetti 4,827,224 e 4,859,854 di Carl J. Kershner e Edward T. Burgess di Maggio e Agosto del 1989 (che oggi - nel 2013 - sono scaduti da 4 anni). Per consultare i brevetti si consiglia l'ottimo Google Patents. Sia in Italia che negli USA i brevetti hanno una durata di 20 anni e una volta scaduti il metodo è pubblico e non più brevettabile. Quindi le camere a ioni (sia a conteggio che a integrazione) sono ormai liberamente utilizzabili.

Si deve effettuare una taratura?

Il conteggio non dipende dalla umidità e dalla pressione dell'aria ma solo dal volume effettivo della zona attiva che, a sua volta, dipende solo dalle dimensioni geometriche. Tutti questi fattori non cambiano da un esemplare all'altro, quindi una taratura individuale non è necessaria.

Se si rispettano le dimensioni esatte da noi indicate è sufficiente impostare un coefficiente di taratura per ottenere una precisione anche migliore del +/- 20%. Per andare sul sicuro dichiareremo una precisione del +/- 50% e ci limiteremo a misure dell'ordine di grandezza, come da tabella seguente:

pCi/litro	Bq/m3	Impulsi/minuto	Impulsi/secondo	Risultato
0.01	0.4	0.02	-	sei in un serbatoio sigillato
0.1	3.7	0.2	-	stai tranquillo
1	37	2	0.03	controlla sovente
10	370	22	0.3	preoccupati
100	3700	220	3	fai subito qualcosa
1000	37000	2200	33	difficile da credere

Poco importa se si misura 0.33 o 1.22 piuttosto che 0.88 pCi/litro. Per il rischio di danni biologici non cambia praticamente nulla. Ma dobbiamo essere sicuri che non si tratti di 50 pCi/litro o peggio ancora di 500. Questa sicurezza la nostra camera può darla, anche senza taratura. E dato che la misura e il calcolo sono semplici è difficile fare errori grossolani che potrebbero essere pericolosi.

Dimensioni della camera a ioni

Perché fare una camera a ioni da un litro? Si potrebbe anche fare una camera da 4 x 4 cm alta 1 centimetro che sarebbe più facile da costruire e meno sensibile alle vibrazioni. Tutti i costruttori di apparecchi commerciali con prezzi inferiori a 2000 dollari fanno camere da poche decine di centimetri cubi. Purtroppo però con camere piccole la precisione di misura si abbassa e diventa necessario usare tempi troppo lunghi.

Con tempi di uno o due giorni diventa difficile misurare tutte le stanze di una abitazione, sperimentare con aspiratori o vedere cosa succede aprendo le finestre. Per fare un numero ragionevole di prove ci vorrebbe un mese e si sarebbe impegnati tutti i giorni. Invece con tempi brevi diventa possibile fare molti test nella stessa giornata e anche fare modifiche all'impianto di aspirazione e vedere immediatamente il loro effetto. Abbiamo quindi tentato di ridurre il tempo di misura il più possibile aumentando al massimo il volume.

Il rapporto di sensibilità tra camere grandi e piccole è maggiore del rapporto tra i due volumi perché in camere piccole il volume attivo è percentualmente minore. Il cammino libero dei raggi alfa nell'aria è circa 4 centimetri e quando la camera si avvicina a queste dimensioni gran parte del suo volume si trova vicino alle pareti le quali impediscono alle disintegrazioni di trasformare in ioni tutta la loro energia.

Le tabelle della prossima pagina mostrano i risultati in termini di prestazioni.

Effetti dovuti alla dimensione della camera a ioni

Per mostrare gli effetti dovuti alla dimensione della camera confrontiamo le caratteristiche con l'ottimo strumento Rstone, sviluppato presso Università & INFN di Pisa, che usa una delle tecniche più recenti: "rivelazione a stato solido in camera a diffusione" e con il molto noto Safety Siren Pro3.

Caratteristiche dovute alla dimensione della camera

	Dimensione della camera	Sensibilità (cpm/pCi/l)	Sensibilità (conteggi/ora a 100 Bq/m3)	Conteggi spuri di fondo	Note
Safety Syren Pro3 (1)	20 cm3	0.03	2.5	(Nota 1)	In 2 ore si ha una misura affidabile per livelli pericolosi > 400 Bq/m3
Rstone (2)	50 cm3	0.06	5	1.2 Bq/m3 0.03 pCi/l	In 1 ora si ha una misura affidabile per livelli pericolosi > 400 Bq/m3
Theremino Ion Chamber (3)	1000 cm3	2	160	0.4 Bq/m3 0.01 pCi/l	In 1 ora si ha una misura affidabile anche del fondo ambiente < 10 Bq/m3

Tempo necessario per ottenere una misura ragionevolmente stabile (ondulazioni minori del 20%)

	Safety Syren Pro3 (1)	Rstone (2)	Theremino Ion Chamber (3)	Note
10 000 Bq/m3	12 - 24 minuti	6 - 12 minuti	3 - 6 secondi	Livelli mai misurati in abitazioni
1000 Bq/m3	2 - 4 ore	1 - 2 ore	40 - 80 secondi	Questi livelli sono rarissimi
500 Bq/m3	4 - 8 ore	2 - 4 ore	1 - 2 minuti	Solo in rari casi
100 Bq/m3	20 - 40 ore	10 - 20 ore	6 - 12 minuti	Questi sono i livelli che si incontrano normalmente
10 Bq/m3	8 - 16 giorni	4 - 8 giorni	1 - 2 ore	

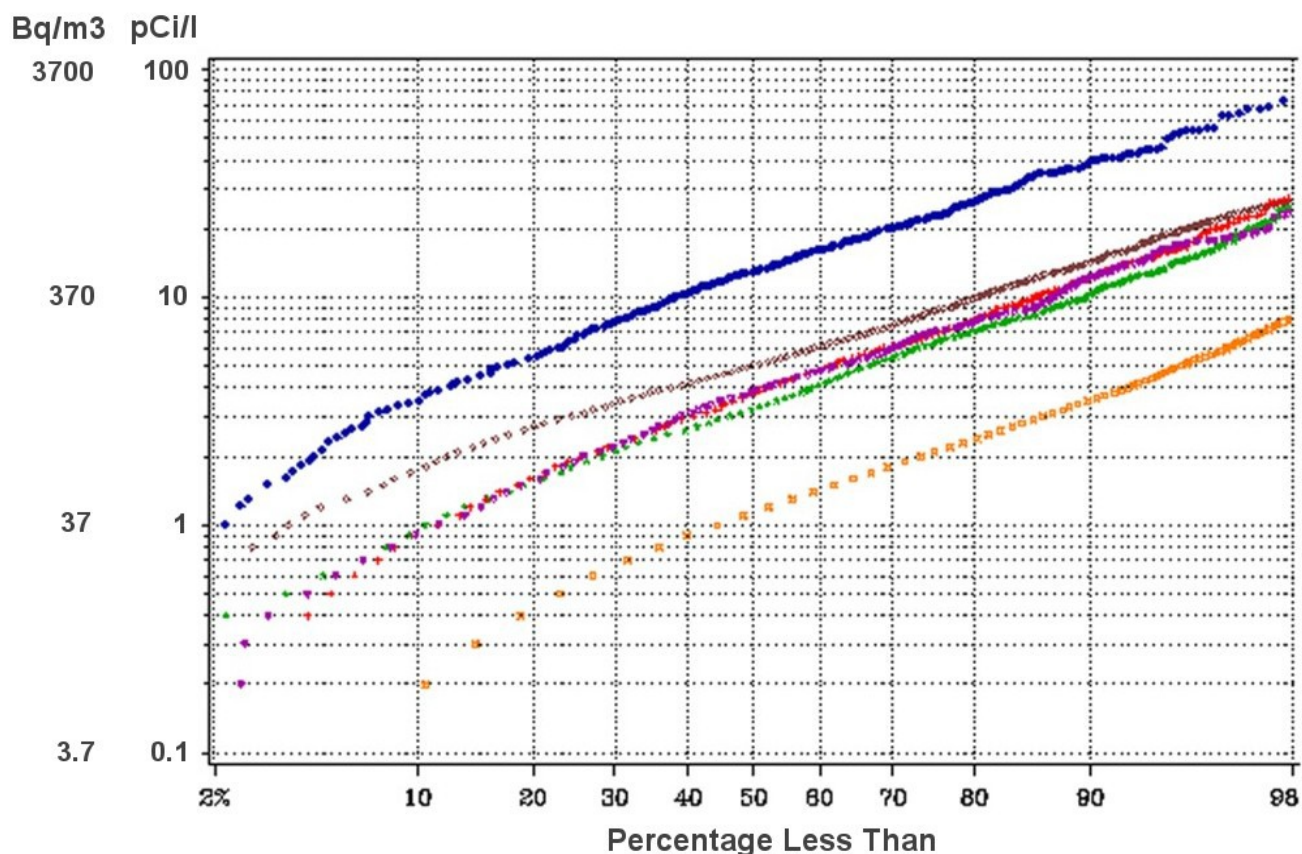
(1) Secondo i dati pubblicati nel manuale di uso del Safety Siren Pro3. I conteggi di fondo non sono specificati sia nel manuale che nei documenti reperibili Internet.

(2) Secondo i dati su Rstone pubblicati nel documento "Radioattività naturale: tecniche di misura attuali e prospettive di sviluppo (Parte III) - G. Batignani, Università & INFN Pisa" e secondo le caratteristiche pubblicate nel "Flyer RStone"

(3) Il rapporto tra le sensibilità e quindi tra i tempi è molto maggiore delle 20 volte che ci si potrebbero attendere dal rapporto dei due volumi perché in una camera piccola l'area attiva è proporzionalmente minore a causa delle molte ionizzazioni che avvengono vicino alle pareti.

Quali sono i valori minimi e massimi da misurare?

Questa immagine mostra i dati raccolti da una estesa campagna di campionamento fatta negli USA su un gran numero di abitazioni, magazzini e scuole (le scuole sono in giallo, gli asili in verde, i magazzini in blu e le abitazioni in marrone, rosso e viola) Molti studi in tutto il mondo hanno dato questi stessi risultati ma questo grafico evidenzia meglio di altri i livelli minimi e massimi che si possono incontrare nelle misure.



Su un campione di migliaia di casi nessuna misurazione è risultata inferiore ai classici 0.2 pCi/litro (8 Bq/m³) che si misurano all'aperto o ha superato i 70 pCi/litro (2600 Bq/m³)

Per cui possiamo stabilire con certezza che il campo di valori da misurare va da 0.1 pCi/l (4 Bq/m³) a 100 pCi/l (3700 Bq/m³)

La nostra camera a ioni misura da 0.01 pCi/l (0.4 Bq/m³) a 2800 pCi/l (100'000 Bq/m³), quindi da un decimo del minimo richiesto fino a circa trenta volte il massimo.

Controllo del funzionamento e del fondo di disturbo

Un semplice test di funzionamento si effettua ponendo la camera a ioni all'aperto o in luogo ben aerato. In queste condizioni si devono misurare circa 10 Bq/m³ (0.3 pCi/l). Questa non è una taratura, non importa se la concentrazione effettivamente misurata è 10.2 o 15.9 oppure 7 Bq/m³, basta avere una curva visibilmente a posto, senza salti provocati dai disturbi, in modo da controllare che l'elettronica conti regolarmente e che il fondo sia abbastanza basso da non influenzare le misure. Le linee guida della EPA specificano che il fondo deve essere inferiore a 40 Bq/m³ (1 pCi/litro) e questo è facile da ottenere. La nostra camera a ioni all'esterno misura normalmente circa 10 Bq/m³ (circa 0.3 pCi/litro)

Impulsi di background

Le linee guida della EPA dicono che gli impulsi di background devono essere inferiori a 40 Bq/m³ (circa 1 pCi/litro). Questo controllo è importante anche per assicurarsi che non si verifichino falsi conteggi provocati da disturbi elettrici o meccanici.

Per eliminare gli impulsi dovuti al radon si dovrebbe sigillare la camera e attendere che il radon all'interno decada ad un livello sufficientemente basso. Ma purtroppo è molto difficile sigillare la camera perché il radon attraversa quasi tutti i materiali, si dovrebbe chiuderla in un grosso cilindro di alluminio, con tappo a vite sempre in alluminio e curare molto bene il connettore di uscita dei fili. Anche il più piccolo spazio di giunzione in resina o plastica potrebbe fare entrare il radon nei 15 giorni e più che ci vogliono per farlo decadere abbastanza.

Fortunatamente esiste un altro metodo, tenere una riserva d'aria nella bombola di un normale compressore senza più accendere il compressore per circa un mese. Dato che il radon decade in 3.8 giorni e che i suoi discendenti hanno un tempo molto più breve, in un mese la radioattività scende a un duecentocinquantesimo della radioattività iniziale, un livello praticamente non misurabile. L'EPA nelle sue note la chiama "aria invecchiata". Con questa aria è facile pulire la camera e poi mantenerla pulita, con un filo di aria, per tutto il tempo della misura.

Le prove preliminari indicano che con una camera ben costruita si possono ottenere conteggi inferiori a un impulso ogni ora che vogliono dire meno di 0.4 Bq/m³ (meno di un centesimo di pCi/litro).

La circolazione dell'aria e del radon

Il funzionamento della camera di ionizzazione si basa sul presupposto che l'aria all'interno della camera sia un campione rappresentativo di aria nell'ambiente che viene monitorato. Il radon diffonde molto facilmente nell'aria, nell'acqua e anche attraverso molti materiali solidi, per cui entra facilmente nella camera per diffusione e in breve tempo porta in equilibrio la concentrazione interna con quella esterna.

Naturalmente le variazioni di concentrazione all'interno seguono solo con un certo ritardo le variazioni di concentrazione dell'ambiente esterno. Dalle nostre prove **il tempo di ritardo è trascurabile**, poche decine di minuti, **anche se la camera ha aperture piccole e coperte da filtri per la polvere**.

Un ricambio sufficientemente veloce con la sola diffusione permette di lavorare senza pompa dell'aria. La pompa porterebbe svariati problemi, primo fra tutti il rapido accumularsi di polvere nei filtri. Questo oltre a essere costoso come manutenzione, impedirebbe di fare misure automatiche per tempi molto lunghi.

Ioni o elettroni?

Le camere "a conteggio" a loro volta si dividono in due sottotipi a seconda che vengano amplificati gli impulsi elettrici prodotti dagli elettroni o dagli ioni.

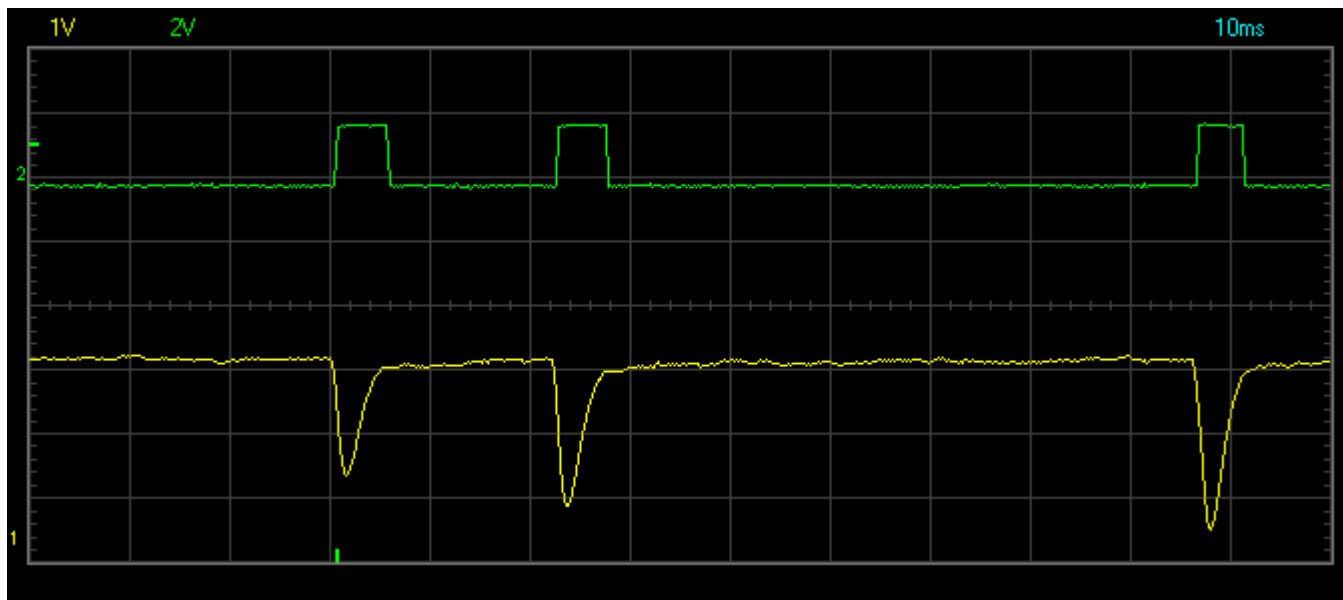
All'inizio credevamo che la scelta tra ioni ed elettroni dipendesse dalla polarità con il seguente ragionamento: Se l'esterno è negativo allora l'elettrodo centrale è positivo e cattura gli elettroni, viceversa catturerebbe gli ioni. Ma dato che si misura la corrente elettrica come "differenza di potenziale", in prima analisi si potrebbe pensare che non esiste differenza tra amplificare la corrente elettronica e quella ionica.

Ma una differenza dovrebbe esistere, gli elettroni sono piccolissimi e viaggiano più veloci dei grossi e pesanti ioni, per cui gli impulsi elettrici prodotti dagli elettroni sono brevi (qualche micro-secondo) invece quelli degli ioni sono mille volte più lunghi (qualche milli-secondo)

Per cui ci siamo attrezzati con generatori di alta tensione positivi e negativi in modo da poter cambiare polarità rapidamente e verificare pregi e difetti di amplificare la corrente ionica o quella elettronica.

E qui abbiamo fatto una scoperta interessante, amplificare la corrente prodotta dagli elettroni è difficilissimo, si deve amplificare una banda passante di molti MHz (e questo è già difficile di per se) ma, peggio ancora, il rumore dei componenti elettronici aumenta con l'aumentare della la banda passante e questo rende quasi impossibile distinguere gli impulsi prodotti dagli elettroni, dal rumore di fondo del circuito di ingresso (nel nostro caso un FET a bassissimo rumore)

Quindi abbiamo limitato la banda passante a qualche centinaio di Hz e abbiamo ottimizzato il circuito di amplificazione per ottenere il massimo rapporto tra segnale e rumore per gli impulsi prodotti dagli ioni. Abbiamo quindi ottenuto un rapporto segnale / rumore di circa 40 dB (100 volte) e questo permette di isolare gli impulsi prodotti dalle disintegrazioni dal rumore in modo assolutamente affidabile. Per gli elettroni la banda passante dovrebbe essere 10 MHz e il rapporto scenderebbe a pochi dB e sarebbe molto difficile isolare gli impulsi dal rumore.



*Da notare la pulizia degli impulsi gialli (alcuni volt) in rapporto al rumore di fondo (decine di millivolt)
Gli impulsi verdi sono l'uscita squadrata e normalizzata a 5 millisecondi con trigger di schmitt per evitare i doppi conteggi.*

Contare gli ioni riduce la massima frequenza di conteggio?

Questo è vero. Teoricamente con gli elettroni si potrebbe arrivare a qualche MHz quindi fino a circa **22 milioni di pico Curie** per litro, invece se contiamo gli ioni possiamo arrivare **solo a 100 Hz**, pari a circa **2800 pico Curie** per litro (che sono circa **103600 Becquerel per metro cubo**)

Ma dato che per misurare il Radon basta contare fino a 100 pCi/l, abbiamo un margine di ventotto volte.

Avvicinandosi alla massima frequenza di conteggio il numero di impulsi persi aumenta gradualmente ma questo effetto può essere compensato regolando il parametro "BKG" del software di conteggio (Theremino_Geiger) che fa un calcolo statistico e ripristina quasi perfettamente la linearità della parte alta della scala.

Polarità della tensione

Una volta deciso di amplificare la corrente degli ioni, la teoria direbbe che sia meglio raccogliere gli ioni sull'elettrodo centrale. Quindi alta tensione positiva sull'esterno della camera e elettrodo centrale negativo per attirare gli ioni positivi.

Ma siccome siamo pignoli abbiamo voluto verificare e così abbiamo fatto un'altra interessante scoperta:

Se si amplifica la corrente ionica con banda passante ottimizzata per impulsi di qualche milli-secondo non esiste nessuna differenza tra le due polarità (o talmente piccola da essere irrilevante)

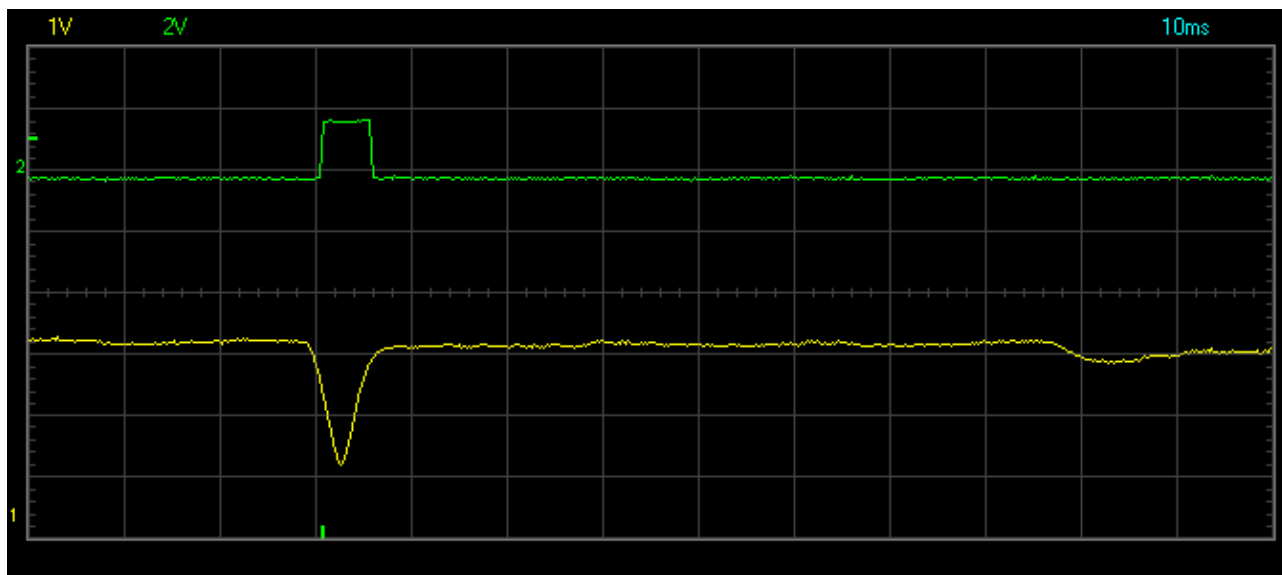
Probabilmente non ci sono differenze perché quello che misuriamo non è la corrente ma la "differenza di potenziale" prodotta dalla corrente, se qualcuno trova una spiegazione migliore, per piacere, ce la faccia sapere.

Concludendo: dato che le considerazioni teoriche lo preferiscono e che fare alimentatori ad alta tensione positiva risulta anche più facile, abbiamo deciso di **polarizzare il rivestimento esterno con tensione positiva**.

Un ulteriore vantaggio dell'usare tensione positiva è che il FET si stabilizza in un tempo molto più breve (pochi secondi) dopo aver dato tensione alla elettronica. Questo avviene perché in positivo la giunzione limita la tensione sul gate a meno di un Volt. Invece con alta tensione negativo non essendoci limitazione il gate scende a 30 Volt negativi e oltre e ci mette quasi un minuto prima che la corrente di perdite lo riporti a tensione zero.

Discriminazione delle energie

Nella nostra implementazione il circuito di amplificazione contiene un trigger di schmitt temporizzato che oltre a impedire doppi conteggi causati dal rumore determina anche una soglia di tensione minima sotto alla quale gli impulsi non vengono contati.



La traccia in superiore è l'uscita squadrata prodotta dal trigger discriminatore di impulsi.

La traccia inferiore mostra il segnale prima del trigger. A sinistra un impulso prodotto dal radon e a destra uno (o forse due impulsi ravvicinati) che essendo di ampiezza inferiore ai 500 mV non vengono contati.

La soglia è approssimativamente regolata a 500 mV

Le disintegrazioni alfa del radon e discendenti (da 5 o 8 MeV) producono impulsi con ampiezza da 1 a 3 Volt

Le disintegrazioni beta e gamma producono impulsi molto piccoli, di ampiezza inferiore a 0.1 Volt

Le disintegrazioni beta e gamma oltre ad avere energie massime minori di 1 MeV, creano un numero di coppie ione-elettrone 100 volte minore rispetto alle disintegrazioni alfa.

Anche gli ioni presenti nell'aria non provocano conteggi perché sono sempre o singoli ioni o agglomerati di un piccolo numero di essi e la tensione prodotta è minima. Una disintegrazione alfa del radon produce circa centomila coppie ione-elettrone e quindi genera segnali almeno mille volte maggiori.

Anche se si posizionasse un generatore di ozono proprio vicino alla camera di misura, i conteggi non aumenterebbero perché gli ioni e gli elettroni liberi non possono attraversare la reticella di ottone a maglie fitte che è collegata a massa e entrare nella camera.

Discriminazione del radon dai suoi discendenti

Per discriminare i discendenti dal radon stesso si dovrebbe aggiungere uno strato di polietilene sottile e trasparente (sacchetto di plastica) in aggiunta ai due filtri per la polvere. Il polietilene lascia passare il Radon ma non i suoi discendenti. Ma con questi filtri, dato che il Radon diffonde lentamente attraverso il polietilene, il tempo di stabilizzazione della camera diventa molto più lungo della sua normale mezz'ora.

Sembra poco intuitivo ma anche se si mettono i filtri che lasciano fuori i discendenti del radon non si deve modificare il coefficiente di taratura. Questo perché il radon che entra sviluppa presto una condizione di equilibrio tra produzione di discendenti e la loro disintegrazione.

Alcune ricerche hanno dimostrato che in particolari condizioni la concentrazione del radon e dei suoi figli potrebbe essere anormale a causa della diversa velocità di diffusione causata dal loro diverso peso atomico. Questo accade solo se l'aria è perfettamente ferma. In una casa reale e abitata il trasporto convettivo prevale su quello diffusivo e gli errori di misura dovuti alla mancanza di equilibrio tra radon e discendenti sono minimi, molto al di sotto del +/- 30% cui siamo interessati.

La precisione a scapito della velocità non ci interessa. Fare una misura precisissima che richiede un giorno porta alla fine a fare una sola misura. E questa singola misura sarà pure precisa al 10% ma bastava aprire una porta o andare in un'altra stanza per misurare tutt'altri valori, anche il 300% in più o in meno. Quindi, secondo noi, è meglio accontentarsi del 30% ma fare molte misure in condizioni diverse, finestre aperte e chiuse, stanze differenti etc...

Oltretutto le disintegrazioni prodotte dal Radon hanno energia molto simile a quella dei suoi discendenti (5.5, 6 e 8 MeV) per cui i discendenti fanno circa lo stesso danno biologico delle disintegrazioni del babbo Radon. Questo ci porta a pensare che sia giusto misurare la miscela di aria, radon e discendenti così come è presente nell'ambiente, senza modificare le proporzioni dei componenti per mezzo di filtri e d'altra parte la normativa prevede che il valore sia espresso in termini di attività rapportata all'unità di volume, ossia dall'insieme indistinto dei decadimenti direttamente ed indirettamente imputabili al radon.

Equilibrio tra radon e discendenti

Il rapporto tra la concentrazione di radon e discendenti si esprime normalmente come:

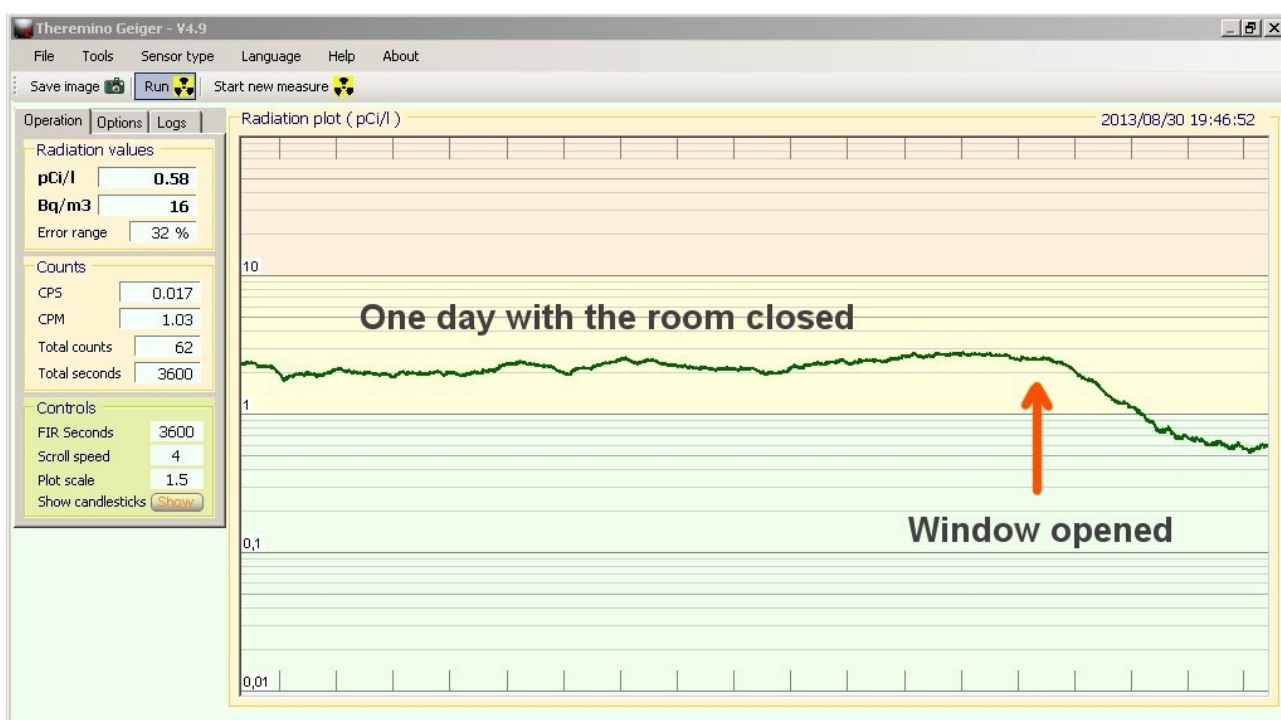
$F = \text{Concentrazione di radon in equilibrio} / \text{Concentrazione effettiva di radon nell'aria}$

F (in ambienti indoor) vale normalmente da 0.4 a 0.5

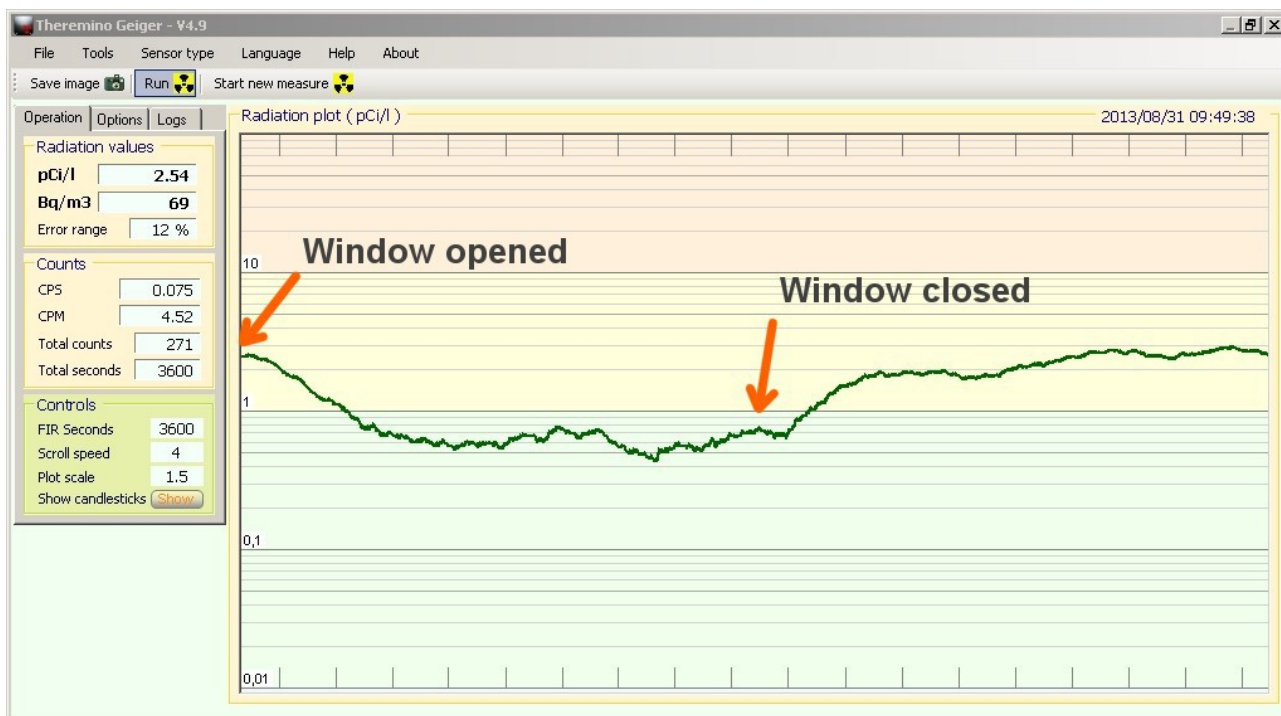
Solo in ambienti molto particolari (ad esempio miniere) questo valore assume valori significativamente diversi dal normale.

Una camera a ioni senza filtri per i discendenti del radon viene influenzata dal valore F ma negli ambienti di nostro interesse questo influsso è minimo.

Grafici di test



In questo grafico si vede una stanza abbastanza normale che è stata chiusa per un giorno e che si è stabilizzata a quasi 3 pCi/l (circa 100 Bq/m3). Nella parte destra si vede che appena la finestra è stata aperta la concentrazione ha iniziato a scendere e in poche ore si è portata a circa 0.5 pCi/l (circa 20 Bq/m3) che è poco più della normale concentrazione dell'aria esterna.



Qui si vede che chiudendo nuovamente la finestra la concentrazione comincia a salire ma più lentamente perchè la stanza intera deve gradualmente riempirsi di radon.

Grafici di test di apparecchi commerciali

Questi grafici danno una idea di quali valori ci si devono attendere e quali siano le normali variazioni nel tempo della concentrazione di radon.

RS300 Radon Test

Serial #01394

Calib. #31022

TestID #30008

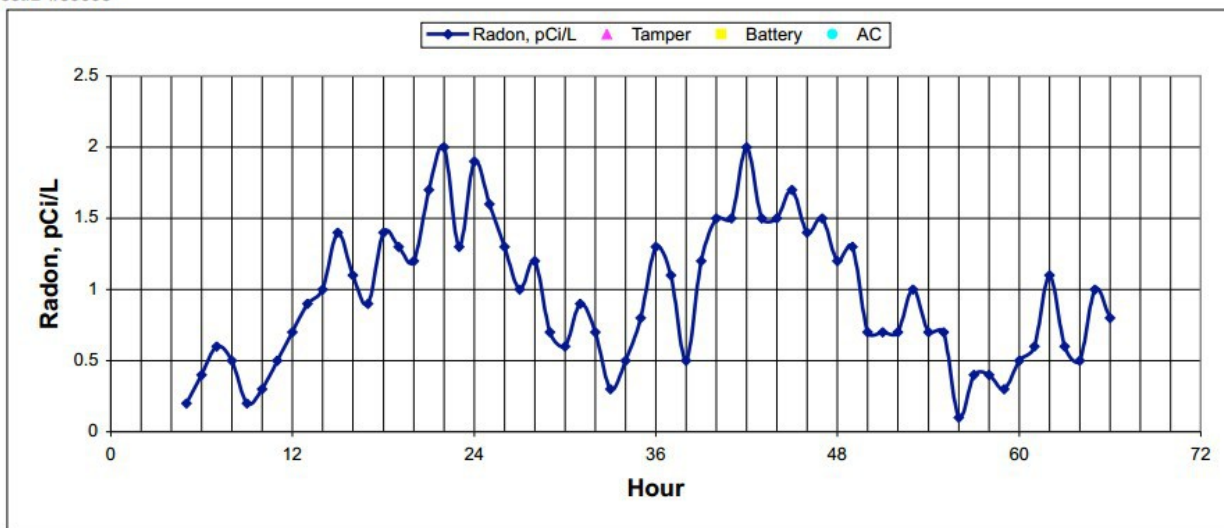
Address

Location Living Room

Technician DeWitt Kimball

Average Radon Level, pCi/L:

0.9



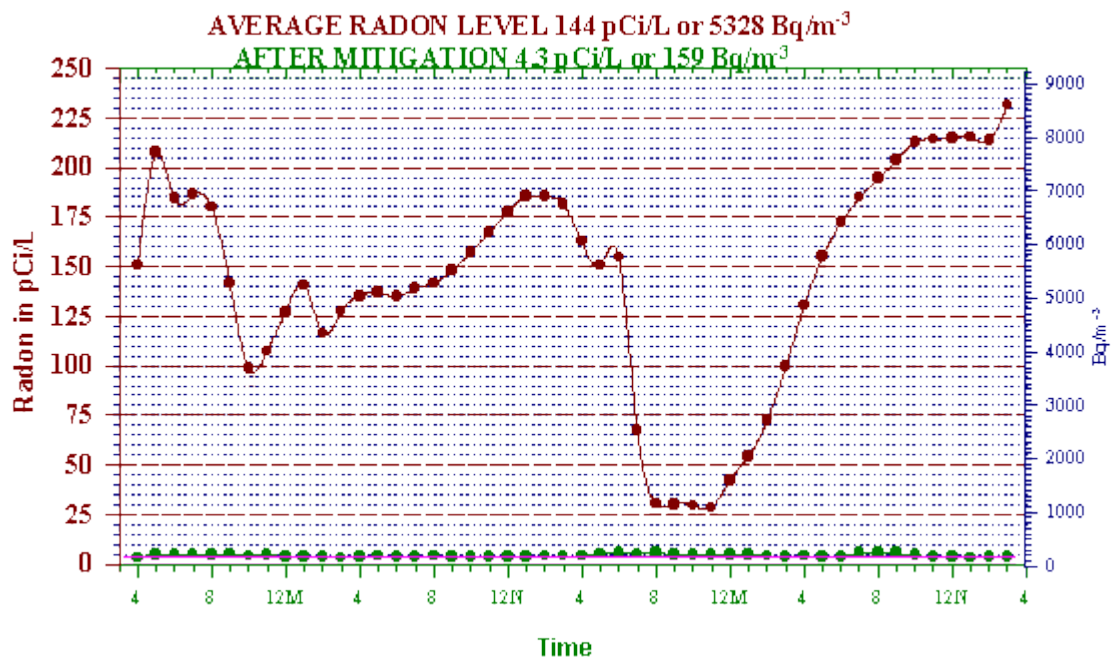
Come si vede in questo grafico è abbastanza normale osservare variazioni anche molto ampie durante la giornata. In poche ore si passa da un massimo di 2 pCi/l (74 Bq/m³) a un minimo di 0.1 pCi/l (3.7 Bq/m³) con un rapporto tra il minimo e il massimo di ben 20 volte. Questo è un apparecchio molto costoso (circa 200 \$) e abbastanza veloce per un apparecchio commerciale. Gli apparecchi commerciali solitamente danno un dato ogni ora nei nostri grafici invece sono uno per secondo.

Queste variazioni sono dovute ai cambiamenti di temperatura che, a loro volta, provocano cambiamenti di pressione tra le varie parti della casa. Anche il vento e le persone che si muovono portano il radon, il quale tenderebbe a ristagnare in basso, a mischiarsi con gli strati di aria superiori. Da non trascurare sono anche la apertura e la chiusura di porte e finestre. Un grafico come questo, senza indicazioni ulteriori lascia solo immaginare che vi siano stati movimenti delle persone e altri fattori di disturbo.

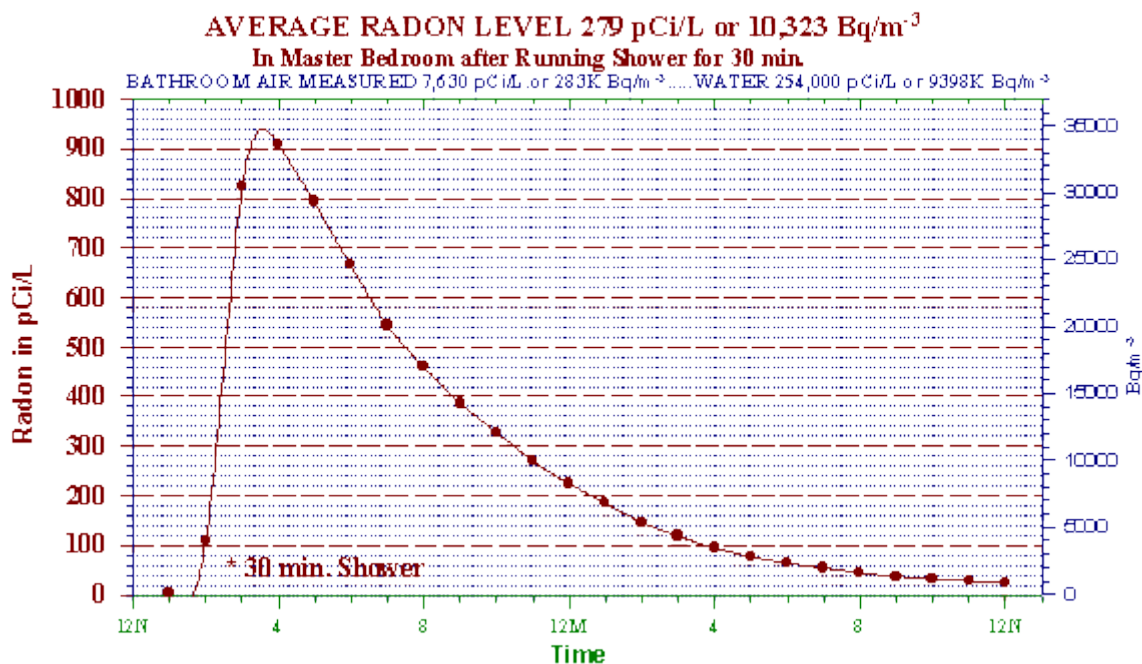
Come confronto ecco qui un grafico di una stanza lasciata chiusa per quasi un giorno.

Si noti la stabilità della misurazione nel tempo, le ondulazioni residue sono dovute più alla casualità delle disintegrazioni che alle variazioni della concentrazione di radon.





Questa immagine è un buon esempio di cosa ci si può attendere in caso di vero pericolo. Il grafico è stato effettuato da una ditta americana che esegue interventi su richiesta e si riferisce a una abitazione che richiedeva un intervento di "mitigazione". Prima dell'intervento il livello era venti volte i 400 Bq/m³ che la EPA considera come massimo per le vecchie abitazioni. Dopo l'intervento il radon è sceso a circa 200 Bq/m³ (circa 5 pCi/l) quindi ad un livello perfettamente sicuro.



Questo invece è un grafico veramente curioso e mostra che il radon spesso si comporta in modo inatteso. In una stanza da bagno (piccola e completamente chiusa) il solo aprire la doccia per trenta minuti ha fatto salire la concentrazione fino a livelli incredibili. Questo accade solo se si usa l'acqua proveniente da un pozzo, con l'acqua degli acquedotti normalmente non succede.

Caratteristiche

Caratteristiche della Theremino IonChamber

Rivelatore	camera a ionizzazione a impulsi
Campionamento	passivo a diffusione
Range di misura	da 0.5 a 74000 Bq/mc (0.01 to 2000 pCi/l)
Sensibilità	0.05 cpm/Bq/mc (2.0 cpm/pCi/l)
Precisione	+/-50% (taratura non richiesta)
Volume camera	1000 cc
Memoria	illimitata e in intervalli regolabili
Costo	circa 30 Euro (in fai da te)



Caratteristiche di un apparecchio professionale - Il Monitor CRM 510

Rivelatore	camera a ionizzazione a impulsi
Campionamento	passivo a diffusione
Range di misura	da 36 a 7400 Bq/m3 (1 to 200 pCi/l)
Sensibilità	0.008 cpm/Bq/mc (0.3 cpm/pCi/l)
Precisione	+/-10% (richiede frequenti tarature)
Volume camera	circa 150 cc
Memoria	100 intervalli di un'ora (4 giorni)
Costo	circa 4000 dollari (con accessori)



Caratteristiche di un apparecchio molto conosciuto - Il Safety Syren Pro3

Rivelatore	camera a ionizzazione a impulsi
Campionamento	passivo a diffusione
Range di misura	da 5 a 37000 Bq/m3 (0.1 to 999.9 pCi/l)
Sensibilità	0.0008 cpm/Bq/mc (0.03 cpm/pCi/l)
Precisione	+/-20% (taratura iniziale in fabbrica)
Volume camera	circa 20 cc
Memoria	5 anni
Costo	circa 130 dollari



I misuratori più noti (in ordine di sensibilità)

Instrument	Principle of Detection	Sensitivity (cpm/pCi/l)	Cost (approx)
Safety Syren Pro3	Pulse Ioniz.	0.03	\$ 130
Rsens-Rstone	Solid-State	0.06	\$ 1500
Passive-Sun Nuclear	Solid-State	0.17	\$ 925
Passive RS500	Solid state	0.30	\$ 2145
Passive Femto CRM-510	Pulse Ioniz.	0.30	\$ 3000
Passive-Radon Scout	Solid-State	0.31	\$ 1000
Passive-E-Smart	Current Ioniz.	1.2	\$ 2000
Active Radonics	Scintill. Cell	2.0	\$ 8000
Theremino IonChamber	Pulse Ioniz.	2.0	\$ (*)
Passive Alpha Guard	Pulse ioniz.	2.8	\$ 6000
Active Durridge	Solid-State	2.8	\$ 4500
Active Pylon AB-5	Scintill. Cell	5.7	\$ 3500
Active DOE	Scintill. Cell	8.4	\$ 3000
Active Eberline	Scintill. Cell	24.0	\$ 6000

I tipi con cella a scintillazione non forniscono una misura continua. Ogni volta si deve caricare un filtro con la polvere e poi misurarlo, cambiare il filtro ad ogni misura e usare una pompa con flusso di aria calibrato e tempo costante.

() Il prezzo non è confrontabile perché Theremino è un oggetto "fai da te" mentre gli altri sono apparecchi finiti, con custodia e accessori.*

Appendice 1 - I metodi listati dalla EPA

L'EPA (Environmental Protection Agency) lista 15 metodi per la misura del Radon e li abbrevia con sigle di due lettere.

I primi tredici sono metodi discontinui e consistono in due fasi separate di raccolta e misura. Sono metodi costosi e poco affidabili, che richiedono personale esperto e procedure difficili da seguire. Ma sono metodi molto popolari perché in passato gli apparecchi di misura erano così grandi e costosi che si cercava di mantenerli in laboratorio e trasportare solo i campioni.



AC - Activated Charcoal Absorption - Assorbimento con carbone attivo

LS - Charcoal Liquid Scintillation - Carbone liquido e scintillazione

AT - Alpha Track Detection (filtered) - Rivelazione di tracce alfa (filtrato)

UT - Unfiltered Track Detection - Rivelazione di tracce alfa (non filtrato)

EL - Electret Ion Chamber (Long-Term) - Camera a ioni con Electret (Tempo lungo)

ES - Electret Ion Chamber (Short-Term) - Camera a ioni con Electret (Tempo breve)

GC - Grab Radon/Activated Charcoal - Cattura del Radon e carbone attivo

GB - Grab Radon/Pump-Collapsible Bag - Cattura del Radon e Sacco-pompa pieghevole

GS - Grab Radon/Scintillation Cell - Cattura del Radon e cellula e Scintillazione

SC - Three-Day Integrating Evacuated Scintillation Cell - Integrazione di tre giorni e cellula e Scintillazione

PB - Pump-Collapsible Bag (1-day) - Sacco-pompa pieghevole (1 giorno)

GW - Grab Working Level - Cattura e lavorazione temporizzate

RP - Radon Progeny Integrating Sampling Unit - Unità integrata per il campionamento dei discendenti del Radon

Gli ultimi due metodi (**CW** e **CR**) consentono la misura continua del Radon.

CW - Continuous Working Level Monitoring (24-hrs) - Monitoraggio del livello che lavora continuamente (per 24 ore)

Questo metodo si basa su una pompa che accumula polvere in un filtro e per quanto classificato come "continuo" lo è per 24 o 48 ore al massimo. Prima di ogni misura (solitamente di 24 ore) si deve sostituire il filtro, tarare la risposta con sorgente campione e misurare la portata della pompa. Per queste operazioni si deve disporre di: Filtri di ricambio - Sorgente di particelle alfa di test - Misuratore di flusso d'aria. Apparecchi di questo tipo costano migliaia di euro e anche il costo dei filtri non è trascurabile.



CR - Continuous Radon Monitoring - Monitoraggio Continuo del Radon

Il metodo CR comprende la nostra camera a ioni e alcune variazioni più complesse con pompa per aria e/o con cellula a scintillazione. Nelle prossime pagine si può leggere una breve spiegazione per ogni metodo. Si noti la semplicità del metodo CR rispetto a tutti gli altri.



Metodi discontinui per la misura del radon

AC - Activated Charcoal Absorption - Assorbimento con carbone attivo

Per questo metodo, un contenitore ermetico con carbone attivo viene aperto nell'area da campionare e il radon nell'aria viene assorbito dai granuli di carbone. Al termine del periodo di campionamento, il contenitore è sigillato e può essere inviato ad un laboratorio per l'analisi. Il decadimento gamma dal radon assorbito nel carbone viene contato su un rivelatore a scintillazione e si utilizza un calcolo basato sulle informazioni di calibrazione effettuata presso un sito di esempio, per calcolare la concentrazione di radon. I rivelatori a carbone vengono esposti da 2 a 7 giorni. Dato che il carbone assorbe il radon, ma può anche cederlo, il metodo non dà una vera misura integrata nel corso del tempo di esposizione. L'uso di una barriera di diffusione sopra il carbone riduce gli effetti di correnti d'aria e umidità elevata.

LS - Charcoal Liquid Scintillation - Carbone liquido e scintillazione

Questo metodo si avvale di un piccolo flacone contenente carbone attivo per il campionamento del radon. Dopo un periodo di esposizione di 2 a 7 giorni (a seconda del modello), il flacone viene sigillato e inviato ad un laboratorio di analisi. L'assorbimento del radon sul carbone è lo stesso del metodo AC ma l'analisi viene ottenuta trattando la brace con un fluido di scintillazione, quindi analizzando il fluido utilizzando un contatore a scintillazione. La concentrazione radon del sito campione è determinata dalla conteggio di impulsi al minuto e la conversione si effettua con tabelle.

AT - Alpha Track Detection (filtered) - Rivelazione di tracce alfa (filtrato)

Il rivelatore è un piccolo pezzo di plastica o pellicola speciale all'interno di un piccolo contenitore. L'aria da misurare diffonde attraverso un filtro che copre un foro nel contenitore. Quando le particelle alfa di radon e dei suoi prodotti di decadimento colpiscono il rivelatore, provocano danni a forma di tracce. Alla fine del test il contenitore viene sigillato e inviato ad un laboratorio per la lettura. Il rivelatore di plastica (o pellicola) viene trattata per evidenziare le tracce e poi vengono contate le tracce, su un'area predeterminata, utilizzando un microscopio. Il numero di tracce viene utilizzato per calcolare la concentrazione del radon nel sito testato. L'esposizione dei rivelatori di tracce alfa è di solito da 3 a 12 mesi. Questi rivelatori sono veri e propri dispositivi che integrano e quindi possono essere esposti per periodi di tempo più brevi quando si misurano concentrazioni di radon elevate.

UT - Unfiltered Track Detection - Rivelazione di tracce alfa (non filtrato)

Questo rivelatore opera con lo stesso principio del rivelatore AT, tranne che non è presente il filtro per rimuovere i prodotti di decadimento del radon. Senza filtro, la concentrazione dei prodotti di decadimento del radon misurata dal rivelatore dipende dal rapporto di equilibrio dei prodotti di decadimento del radon presente nella zona in prova, e non semplicemente dalla concentrazione di radon. Rilevatori non filtrati che utilizzano pellicola di nitrato di cellulosa mostrano una dipendenza energetica. Questo fenomeno riduce, ma non compensa totalmente la dipendenza del fattore di taratura dal rapporto di equilibrio. Per questo motivo, EPA raccomanda di non usare questi dispositivi quando la frazione di equilibrio è minore di 0,35 o maggiore di 0,60 senza regolare il fattore di calibrazione. EPA sta attualmente valutando questo dispositivo ulteriormente per determinare con maggiore precisione gli effetti della frazione di equilibrio e di altri fattori sulle prestazioni. Queste valutazioni porteranno a una decisione relativa alla possibilità di mettere a punto il protocollo corrente o rimuovere il metodo dall'elenco dei metodi.

EL - Electret Ion Chamber (Long-Term) - Camera a ioni con Electret (Tempo lungo)

Per questo metodo, un disco rivelatore caricato elettrostaticamente (electret) è situato all'interno di un piccolo contenitore (camera in litio). Durante il periodo di misurazione, il radon diffonde nella camera attraverso un'apertura coperta da un filtro. La ionizzazione derivante dal decadimento del radon e della sua progenie riduce la tensione sull'elettret. Un fattore di calibrazione rapporta la caduta di tensione misurata alla concentrazione di radon. Variazioni nella progettazione dell'elettret determinano se il rivelatore è appropriato per effettuare misurazioni a lungo termine o di breve durata. I rivelatori di questo tipo possono essere esposti da 1 a 12 mesi.

ES - Electret Ion Chamber (Short-Term) - Camera a ioni con Electret (Tempo breve)

La procedura è esattamente la stessa del precedente metodo EL ma dal momento che le camere a elettret di litio sono veri rivelatori a integrazione, possono essere esposti per intervalli più brevi, se i livelli di radon sono sufficientemente elevati.

GC - Grab Radon/Activated Charcoal - Cattura del Radon e carbone attivo

Questo metodo richiede un tecnico specializzato che campiona il radon aspirando aria con una pompa o un ventilatore attraverso una cartuccia riempita di carbone attivo. A seconda della struttura della cartuccia e del flusso d'aria, il campionamento dura da 15 minuti a 1 ora. Dopo il campionamento, la cartuccia viene posta in un contenitore sigillato e portata in un laboratorio di analisi che è approssimativamente la stessa che per i metodi AC o LS.

GB - Grab Radon/Pump-Collapsible Bag - Cattura del Radon e Sacco-pompa pieghevole

Questo metodo utilizza un sacchetto di campionamento in materiale impermeabile al radon. Un tecnico specializzato utilizzando una pompa portatile riempie il sacchetto con aria, poi lo trasporta al laboratorio per l'analisi. Solitamente si trasferisce l'aria dal sacchetto a una cella a scintillazione e si esegue l'analisi nel modo GS.

GS - Grab Radon/Scintillation Cell - Cattura del Radon e cellula e Scintillazione

Per questo metodo, un operatore esperto aspira aria attraverso un filtro per rimuovere prodotti di decadimento del radon in una cella a scintillazione, aprendo una valvola in una cella a scintillazione che è stata precedentemente evacuata mediante una pompa a vuoto o aspirando aria attraverso la cella finché l'aria all'interno sia in equilibrio con l'aria esterna, poi lo sigilla. Per analizzare il campione di aria, la finestra terminale della cella è posta su un tubo fotomoltiplicatore per contare le scintillazioni prodotte quando particelle alfa del decadimento del radon colpiscono il rivestimento in solfuro di zinco della cellula. I conteggi vengono convertiti in concentrazione di Radon con un calcolo.

SC - Three-Day Integrating Evacuated Scintillation Cell - Integrazione di tre giorni e cellula e Scintillazione

Per questo metodo, una cella di scintillazione è dotata di una valvola di limitazione e un misuratore di pressione negativa. Prima della distribuzione, la cella a scintillazione viene evacuata. Presso il sito un tecnico specializzato osserva la lettura di pressione negativa e apre la valvola. Il flusso attraverso la valvola è abbastanza lento quindi ci vuole un periodo di campionamento di oltre 3 giorni. Al termine del periodo di campionamento, il tecnico chiude la valvola, prende nota del valore di pressione e ritorna con la cellula al laboratorio. Le procedure di analisi sono approssimativamente le stesse del metodo GS descritto sopra. Una variante di questo metodo comporta l'uso della valvola su un contenitore rigido e richiede che l'aria campionata sia trasferita in una cella a scintillazione per l'analisi.

PB - Pump-Collapsible Bag (1-day) - Sacco-pompa pieghevole (1 giorno)

Per questo metodo, una borsa campione impermeabile al radon è riempita in un periodo di 24 ore con una pompa programmata per pompare piccole quantità di aria ad intervalli predeterminati durante il periodo di campionamento. Dopo il campionamento le procedure di analisi sono simili a quelle del metodo GB.

GW - Grab Working Level - Cattura e lavorazione temporizzata

Per questo metodo, un volume noto di aria viene tirata attraverso un filtro che raccoglie i prodotti di decadimento del radon. Il tempo di campionamento di solito è di 5 minuti. I prodotti di decadimento sono conteggiati utilizzando un rivelatore alfa. Il conteggio deve essere fatto con tempi precisi dopo che il campione è stato preso. Le due procedure di conteggio più comunemente usate sono quelle di Kusnitz e Tsivoglou.

RP - Radon Progeny Integrating Sampling Unit - Unità integrata per il campionamento dei discendenti del Radon

Per questo metodo, una pompa a basso flusso d'aria tira aria continuo attraverso un filtro. A seconda del rivelatore utilizzato, la radiazione emessa dai prodotti di decadimento intrappolati sul filtro è registrata su due dosimetri termo (TLD), un rivelatore di traccia alfa, o un elettret. I dispositivi attualmente disponibili richiedono l'accesso a una presa di alimentazione elettrica, ma non richiedono un operatore esperto. Il periodo di campionamento deve essere di almeno 72 ore. Dopo il campionamento il rivelatore viene spedito a un laboratorio che esegue l'analisi delle tracce alfa e electret utilizzando le procedure descritte per i dispositivi AT, EL e ES. I rivelatori TLD sono analizzati da uno scaldandoli e misurando la luce emessa. Un calcolo converte la misurazione della luce in concentrazioni di radon.

Metodi continui per la misura del radon

L'agenzia EPA (Environmental Protection Agency) lista solo due metodi per la misura continua del Radon, il CW e il CR

CW - Continuous Working Level Monitoring (24-hrs) - Monitoraggio del livello che lavora continuamente (24 ore)

Questo metodo comprende quei dispositivi che registrano in tempo reale la misura di prodotti di decadimento del radon. I prodotti di decadimento del radon sono campionati dal continuo pompaggio di aria attraverso un filtro. Un rivelatore a giunzione diffusa oppure a barriera di superficie, conta le particelle alfa prodotte dai prodotti di decadimento del radon mentre si deteriorano in questo filtro. Il monitor contiene tipicamente un microprocessore che memorizza il numero di conteggi per intervalli di tempo predeterminati per un successivo richiamo. Il tempo di misura per il test di misurazione del programma è di circa 24 ore.



Difetti:

- Alto costo dell'apparecchio di misura e degli accessori.
- La pompa deve garantire una portata costante.
- La misura dipende anche dalla umidità dell'aria.
- Il continuo pompaggio di aria accumula rapidamente polvere per cui necessita di pulizia periodica.
- Il filtro deve essere cambiato prima di ogni misura (al massimo ogni 24 o 48 ore).
- La portata diminuisce gradualmente con l'accumularsi della polvere e quindi la misura cambia nel tempo.
- Non si misura in un volume definito per cui la taratura deve essere fatta - ad ogni misura - con sorgente di test.
- La dotazione di filtri, sorgente di taratura e misuratore di flusso rendono ulteriormente costosi questi apparecchi.
- Per quanto si parli di misura "continua" in realtà la misura va interrotta periodicamente per cambiare il filtro.

E infine, sempre traducendo dalle note EPA, ecco il metodo CR che comprende la nostra camera a ioni e due variazioni simili.

CR - Continuous Radon Monitoring - Monitoraggio Continuo del Radon

Questi dispositivi misurano in modo continuo le variazioni della concentrazione di radon. L'aria viene pompata **o diffonde** in una camera di conteggio che è tipicamente una cellula a scintillazione **o una camera a ionizzazione**. Circuiti elettronici **contano le disintegrazioni in un volume noto** e la concentrazione di radon si calcola con un coefficiente.

Abbiamo evidenziato in grassetto le parti che si riferiscono alla nostra camera a ioni che quindi si classifica come: **"Camera a ioni di tipo a diffusione per la misura continua del radon, tramite conteggio, secondo il metodo CR"**

