

MISURE DI RADIOATTIVITA' AMBIENTALE MEDIANTE $ZaNaI$ DETECTOR

INFN-LNL 275/2023

Cristina Arienti¹, Alessia Balanzino², Carlo Bertoni³, Leonardo Botto⁴,
Alessia Carboni⁵, Simona Cardone⁶, Giovanni Casolari⁷.

1 Docente di matematica e fisica presso ISIS Einaudi di Dalmine (BG)

2 Docente di fisica presso IIS Sobrero di Alessandria (AL)

3 Docente di matematica presso Liceo Copernico di Bologna (BO)

4 Docente di matematica presso IIS Grandis di Cuneo (CN)

5 Docente di Matematica e Fisica presso IIS G. A. Pischredda Bosa (OR)

6 Docente di matematica e fisica al Liceo Scientifico G. Casiraghi di Cinisello Balsamo (MI)

7 Docente di matematica e fisica presso IIS A. Paradisi di Vignola (MO)

Abstract: In questo lavoro mostriamo la strumentazione, le procedure e i risultati di misure di radioattività ambientale condotte nell'area in cui sorgono i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN. Le misure, effettuate mediante uno spettrometro gamma portatile a ioduro di sodio ($ZaNaI$ detector) messo a punto nell'ambito del progetto ITALRAD (ITALian Radioactivity Project), avevano lo scopo di rilevare la presenza e l'abbondanza di Uranio-238 e Torio-232, responsabili della produzione del gas Rn molto pericoloso per la salute pubblica, e di Potassio-40. A causa delle avverse condizioni atmosferiche che hanno impedito un uso ottimale del rivelatore, i risultati ottenuti devono essere considerati solo qualitativi.

Per la semplicità metodologica e strumentale, misure di questo tipo possono essere attuate nell'ambito della didattica laboratoriale scolastica contribuendo allo sviluppo di conoscenze e competenze di fisica nucleare, alla promozione della consapevolezza ambientale e allo sviluppo di competenze trasversali tra varie discipline. A tal scopo viene proposto il progetto Radiolab, promosso dall'INFN, rivolto agli studenti della Scuola Secondaria di Secondo Grado.

Parole chiave: Radioattività, Spettroscopia gamma, Uranio, Torio, Potassio, Monitoraggio ambientale, RadioLab, $ZaNaI$, ITALRAD.

Introduzione

Per “radioattività ambientale” si intende la totalità delle radiazioni ionizzanti presenti nell’ambiente. Tali radiazioni possono avere origine sia da fenomeni naturali che antropici: sono “naturali” quelle dovute ai raggi cosmici che superano la barriera atmosferica o quelle dovute alla disintegrazione dei radionuclidi primordiali presenti nella crosta terrestre fin dalla sua formazione; sono antropiche (o artificiali) quelle dovute a residui di test e incidenti nucleari, a scorie prodotte nelle centrali nucleari, a isotopi radioattivi prodotti per uso medico, ecc.

Come è noto, la radioattività ambientale influisce negativamente sulla salute umana, animale e sull’integrità degli ecosistemi, con conseguenze spesso irreversibili e a lungo termine. L’interazione tra radiazioni ionizzanti e organismi viventi può causare, in quest’ultimi, danni irreversibili alle cellule e al DNA determinando mutazioni genetiche e favorendo l’insorgenza del cancro.

Tra le fonti di radioattività naturale di origine terrestre più pericolose per la salute umana vi è il Radon (Rn) [1], un gas nobile radioattivo, inodore, incolore, elettricamente neutro, 7,5 volte più pesante dell’aria, estremamente volatile, presente in quantità diverse in tutta la crosta terrestre, prodotto dal decadimento di tre nuclidi capostipiti che danno luogo a tre diverse famiglie radioattive: il Torio-232 (^{232}Th), l’Uranio-235 (^{235}U) e l’Uranio-238 (^{238}U).

Ciascuna famiglia genera un isotopo radioattivo del Radon, in particolare:

- L’Uranio-238 (il più abbondante in natura) è responsabile della produzione dell’isotopo ^{222}Rn con emivita (o Tempo di dimezzamento) pari a 3.824 giorni;
- Il ^{232}Th genera l’isotopo ^{220}Rn , detto anche Thoron, con emivita di 55.61 secondi;
- L’Uranio-235 produce il ^{219}Rn , chiamato anche Actinon, che ha una emivita di soli 3,96 secondi e per tale motivo non ha un impatto rilevante dal punto di vista della radioattività ambientale.

I tre isotopi decadono con emissione di una particella alpha.

L’esposizione al Rn è considerata dall’Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) la seconda causa di tumore al polmone dopo il fumo di sigaretta [2]. In Italia l’esposizione al radon è responsabile (secondo la stima del 2010 dell’Istituto Superiore di Sanità) di circa 3200 casi di tumore polmonare all’anno [3].

Mediante il Decreto Legislativo del 31 luglio 2020 n. 101 e s.m., di recepimento della Direttiva 2013/59/EURATOM del Consiglio europeo, il nostro Paese ha adeguato la normativa nazionale a quanto previsto in sede europea. Una novità introdotta dal decreto riguarda gli ambienti residenziali che sono stati inquadrati al pari dei luoghi di lavoro, come zone di esposizione al Rn¹.

Nel decreto viene indicato il valore medio annuo ammesso della concentrazione di attività di radon in aria; tale valore è fissato a 300 Bq/m³ sia per i luoghi di lavoro (tra cui sono inserite anche le scuole) sia per le abitazioni esistenti. Per le abitazioni costruite dopo il 31 dicembre 2024 il valore è ulteriormente ridotto a 200 Bq/m³. Per i luoghi di lavoro è inoltre fissato un livello di riferimento in termini di dose efficace annua pari a 6 mSv.

L'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) suggerisce un limite ancora più basso di quello previsto dal Dlgs. 101 e pari a 100 Bq/m³ al fine di ridurre al minimo il rischio di cancro ai polmoni [4].

Il monitoraggio della radioattività ambientale e in particolare del Rn è dunque di grande importanza ai fini della salvaguardia della salute pubblica e in tale contesto si pone il progetto ITALRAD (ITALian Radioactivity Project) [5], nato nell'ambito delle attività dell'INFN, dedicato alla mappatura della radioattività naturale del territorio italiano. La mappatura è effettuata mediante misure di spettroscopia gamma sulle rocce e sui suoli italiani per determinare l'abbondanza dei radioisotopi naturali (²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K).

Il progetto ITALRAD prevede inoltre lo sviluppo di rivelatori prototipali da installare su velivoli e la realizzazione di software di analisi spettrale.

Spettroscopia gamma e analisi spettrale

Dato che i materiali soggetti a decadimenti nucleari emettono fotoni (raggi gamma) le cui energie sono diverse per ogni radionuclide emettitore, l'analisi delle energie di tali fotoni, ovvero la spettroscopia gamma, consente di risalire al tipo e alla concentrazione dei radionuclidi presenti nei materiali stessi.

I dispositivi che consentono di effettuare la spettroscopia gamma (spettroscopi gamma) sono sostanzialmente costituiti da:

¹ Per i luoghi di lavoro era già in vigore Dlgs. 26 maggio 2000, n. 241 che fissava i livelli di concentrazione di radon a 500 Bq/m³ annuo.

- Uno scintillatore, ovvero un dispositivo tipicamente formato da un cristallo semiconduttore che converte le energie dei gamma in luce visibile;
- Un fotomoltiplicatore che raccoglie questa luce e la trasforma in un segnale elettrico, amplificandolo per renderlo rilevabile;
- Un analizzatore multicanale (MCA) che riceve il segnale elettrico prodotto dal fotomoltiplicatore e lo divide in canali, ognuno dei quali corrisponde a una specifica energia dei raggi gamma raccolti;
- Un sistema di acquisizione dati, di solito costituito da hardware e software dedicati, che fornisce in uscita lo spettro gamma, cioè il grafico del numero di fotoni rilevati in funzione dell'energia.

Le energie dei picchi dello spettro (fotopicchi) consentono di individuare i radionuclidi responsabili dell'emissione: tali energie, infatti, corrispondono alle energie dei gamma emessi dai radionuclidi e raccolti dal rivelatore che non hanno subito perdite dovute a interazioni secondarie.

L'ampiezza dei fotopicchi è invece legata, anche se in maniera indiretta, all'abbondanza degli elementi radioattivi ad essi corrispondenti.

Per risalire all'abbondanza di un elemento a partire dall'ampiezza del fotopicco corrispondente è necessario attuare una procedura iterativa partendo dal fotopicco di energia maggiore. Mediante tale procedura viene stimato il fondo Compton da rimuovere nella determinazione delle energie dei vari fotopicchi, per avere stime migliori dell'abbondanza dei corrispondenti radionuclidi.

I software di analisi dei sistemi di acquisizione dati attuano queste operazioni in modo automatico fornendo direttamente le percentuali dell'elemento rilevato.

E' da sottolineare che mentre in alcuni casi si possono osservare direttamente le radiazioni emesse dal radionuclide presente in un dato materiale, come per esempio le radiazioni del ^{40}K emesse dal terreno, in altri casi è necessario indire la presenza del radionuclide dal decadimento gamma di un nucleo figlio che si trova all'interno della sua catena di decadimento, come nel caso del ^{214}Bi che si trova nella catena di decadimento dell' ^{238}U e del ^{208}Tl che si trova nella catena di decadimento del ^{232}Th . Misurando l'attività specifica del ^{214}Bi e del ^{208}Tl si ricavano quindi i contenuti equivalenti di Uranio (eU) e di Torio (eTh).

Strumentazione utilizzata per la misura

Lo strumento utilizzato per le misure è uno spettrometro gamma portatile (ZaNaI detector) che consente la determinazione quantitativa in situ della radioattività gamma di origine naturale e antropica, progettato e realizzato nell'ambito del progetto ITALRAD [6].

Il rivelatore è in grado di acquisire spettri gamma in configurazione statica e dinamica, registrando sia la posizione Global Positioning System (GPS) che i principali parametri ambientali. Le misure condotte in modalità statica sono realizzate appoggiando lo zaino al suolo: in questa configurazione il rivelatore riceve il 90% del segnale da un'area di raggio pari a circa 0.5 m. Le misure realizzate in modalità dinamica prevedono che il rivelatore si trovi approssimativamente a 1 m dal livello del suolo; in tal caso riceve il 90% del segnale da un'area di raggio pari circa a 7.5 m.

Le caratteristiche tecniche del ZaNAI detector rendono possibile rilevare abbondanze di Potassio, Uranio e Torio con incertezze (1 s) del 5%, 15% e 7%, rispettivamente². Esso è costituito da:

- Un cristallo di NaI, drogato con Tl, di forma cubica, avente una risoluzione energetica di 12.5% all'energia di 662.5 keV (¹³⁷Cs) e 15% all'energia di 122 keV (⁵⁷Co);
- Un tubo fotomoltiplicatore standard a 14 pin;
- Una base integrata a processamento digitale per rivelatori a scintillazione che fornisce alimentazione, preamplificatore e analizzatore digitale multicanale (MCA).

Il detector è contenuto in uno zaino opportunamente imbottito ed è collegato in modalità real time con un tablet su cui è installato un software di acquisizione, gestione ed elaborazione dati (Fig. 1).



Fig.1: zaino contenente lo ZaNaI detector e tablet con software di elaborazione dei dati.

² Mus, civ. Rovereto – Atti del Workshop in geofisica, 10/12/2010

Luogo, data e tipo di misure effettuate, metodo di misura

Le misure di radioattività ambientale sono state attuate all'aperto, in tre punti di un'area ampia circa 100 m² appartenente al complesso di edifici dell'INFN di Legnaro, Viale dell'Università, 2 (Padova), il giorno 24/10/2023.

Sono stati rilevati i valori di concentrazione dei radionuclidi: ²³⁸U, ²³²Th, ⁴⁰K. Le concentrazioni di ²³⁸U e ²³²Th sono state determinate per via indiretta misurando il numero di disintegrazioni del ²⁰⁸Tl e ²¹⁴Pb, rispettivamente.

Ogni misura è stata condotta ponendo lo zainetto contenente lo ZnNaI detector su un supporto (sedia) a circa 40/50 cm dal suolo, impostando un tempo di acquisizione di 3 minuti (180 s). Al termine della misura, il file dei dati corrispondente è stato memorizzato nel software di gestione dello ZnNaI detector.

Dati di misura

Misura 1	All'aperto sotto la tettoia di un gazebo. Il rivelatore è stato posto su una sedia collocata sul pavimento di cemento del gazebo.		
Tempo (min)	Ambiente	Latitudine	Longitudine
3	Esterno	45° 21' 9" N	11° 57' 2" E
Isotopo	Conteggi x s⁻¹	Elemento	Abbondanza
⁴⁰ K	10.0 ± 0.2	K	0.6 ± 0.1 %
²⁰⁸ Tl	4.2 ± 0.2	Th	4.3 ± 0.8 ppm
²¹⁴ Pb	1.8 ± 0.1	U	4.3 ± 0.6 ppm

Misura 2	All'aperto su un prato. Il rivelatore è stato posto su una sedia coperto da un ombrello.		
Tempo (min)	Ambiente	Latitudine	Longitudine
3	Esterno	45° 21' 9" N	11° 57' 2" E
Isotopo	Conteggi x s⁻¹	Elemento	Abbondanza
⁴⁰ K	22.1 ± 0.4	K	1.5 ± 0.1 %
²⁰⁸ Tl	7.3 ± 0.2	Th	11.4 ± 1.3 ppm

^{214}Bi	4.6 ± 0.3	U	6.9 ± 0.8 ppm
Misura 3	All'aperto su un prato. Il rivelatore è stato posto su una sedia collocata su uno stretto marciapiede in cemento a ridosso di un muro.		
Tempo (min)	Ambiente	Latitudine	Longitudine
3	Esterno	45° 21' 9" N	11° 57' 2" E
Isotopo	Conteggi x s⁻¹	Elemento	Abbondanza
^{40}K	15.7 ± 0.3	K	1.0 ± 0.1 %
^{208}Tl	5.8 ± 0.2	Th	7.8 ± 1.1 ppm
^{214}Bi	3.2 ± 0.1	U	5.8 ± 0.7 ppm

Misura 4	Ambiente chiuso (caffetteria del complesso dell'INFN). Il rivelatore è stato posizionato su un tavolo.		
Tempo (min)	Ambiente	Latitudine	Longitudine
3	Esterno	45° 21' 9" N	11° 57' 2" E
Isotopo	Conteggi x s⁻¹	Elemento	Abbondanza
		K	1.2 ± 0.1 %
		eTh*	3.1 ± 0.6 ppm
		eU**	7.6 ± 1.1 ppm
Attività totale: 460 ± 35 Bq/kg			

*eU: contenuto di Uranio equivalente.

**eTh: contenuto di Torio equivalente.

Analisi dei dati

La radiazione naturale di fondo, essenzialmente dovuta a raggi cosmici e alla radioattività naturale ambientale, non è costante ma varia in base a diversi fattori: altitudine, latitudine, composizione geologica del suolo, materiali da costruzione e condizioni meteorologiche.

Durante le precipitazioni gli elementi radioattivi presenti in atmosfera tendono ad avvicinarsi al suolo e ciò comporta un aumento dei valori di radiazioni misurati.

La giornata del 24/10/2023 è stata caratterizzata da forti precipitazioni e bassa pressione e il terreno da monitorare era molto bagnato. Per tale motivo, nelle misure in esterno, il rivelatore non è stato posto a terra ma su un supporto (sedia) a circa 40/50 cm dal suolo e protetto da un ombrello.

A causa delle particolari condizioni meteo ci aspettiamo di aver ottenuto valori più elevati di quelli che si avrebbero negli stessi luoghi in una giornata senza precipitazioni.

Tra le misure effettuate nella stessa mattinata riscontriamo alcune differenze: confrontando la misura 1 e la 2, quelle effettuate sotto il gazebo nel prato, rispettivamente, notiamo sensibili differenze nelle concentrazioni di K e Th. Questo è dovuto al fatto che, con buona probabilità, le mattonelle in cemento con cui è pavimentato il gazebo hanno bloccato gran parte delle radiazioni provenienti dal suolo.

Nella Misura 3, in cui il detector è stato posto tra marciapiede e muro, i valori di concentrazione dei radionuclidi sono intermedi. Il marciapiede potrebbe aver bloccato parte delle radiazioni provenienti dal terreno, ma lo zaino posto a circa 50 cm dal suolo potrebbe aver comunque catturato radiazioni provenienti dal suolo vicino. Occorre inoltre considerare che i materiali di cui era costituito il muro a cui era vicino il detector potrebbero aver contribuito ad aumentare i conteggi gamma.

La misura 4, presa all'interno della caffetteria, presenta dei valori di concentrazione quasi paragonabili alla terza: tali valori sono inferiori a quelli misurati nel prato ma superiori a quelli rilevati sotto il gazebo.

Ricadute didattiche

Le misure di radioattività ambientale possono rivelarsi strumenti didattici efficaci per comprendere la fisica nucleare, apprendere metodologie tecniche scientifiche, promuovere la consapevolezza ambientale e sviluppare competenze trasversali tra varie discipline.

Allo scopo, misure simili a quelle descritte nel presente articolo, per la loro semplicità operativa, possono essere proposte a classi di scuola secondaria, al fine di raggiungere varie competenze-obiettivi relativi:

- alle discipline dell'area scientifica (fisica, matematica, chimica, scienze naturali, biologia, geologia, informatica);
- alle discipline, non considerate dell'area scientifica (diritto, educazione civica);

- a progetti specifici e percorsi competenze trasversali e orientamento.

Tra gli obiettivi di apprendimento, calibrati in base alle conoscenze, al tipo di scuola e alla classe frequentata dagli studenti, si possono considerare i seguenti:

- Comprensione dei concetti e dei fenomeni fisici legati alla radioattività (struttura dell'atomo e del nucleo; concetto di isotopo e stabilità/instabilità nucleare; i tipi di decadimenti [alpha, beta, gamma]; catene di decadimento; unità di misura della radioattività; effetti della radioattività sulla materia; ecc.).
- Apprendimento degli strumenti e delle tecniche di misura della radioattività (spettrometro gamma, contatore Geiger, rivelatori a scintillazione, ecc.; metodologia di misura comprese le tecniche di calibrazione degli strumenti e la loro precisione; decodifica di uno spettro di misura);
- Applicazioni reali e consapevolezza dei rischi (impatto ambientale e sanitario legato all'esposizione prolungata alle radiazioni, valutazione del rischio, radioprotezione, ecc.);
- Sviluppo di competenze scientifiche (raccolta, elaborazione e interpretazione dei dati sperimentali; analisi degli spettri di decadimento; Individuazione dei fotopicchi e calcolo dell'abbondanza relativa degli elementi radioattivi, ecc.);
- Interdisciplinarietà (esplorazione delle connessioni tra fisica nucleare, chimica delle reazioni nucleari e gli effetti biologici delle radiazioni sugli organismi viventi; misure di radioattività ai fini dello studio di fenomeni geologici [es. datazione con isotopi]; l'influenza dei radionuclidi sulla qualità dell'aria e delle acque, ecc.)
- Responsabilità sociale e ambientale (comprensione pratica dei rischi ambientali sviluppo di una consapevolezza e responsabilità in merito alla protezione dell'ambiente e alla sicurezza pubblica);
- Lavoro in gruppo.

Progetto RadioLab

Una possibilità concreta per sviluppare un percorso didattico sulla radioattività ambientale è il progetto RadioLab [7], nato come parte delle attività di terza missione (CC3M) dell'INFN.

Il progetto, oltre a fornire all'INFN uno strumento da utilizzare a livello istituzionale per la comunicazione scientifica sul tema della radioattività, mira ad avvicinare le nuove generazioni e la popolazione a ciò che attiene le radiazioni ionizzanti e alle sue ricadute sulla salute dell'uomo.

La partecipazione al progetto prevede che i partecipanti, studenti e docenti, svolgano attività di monitoring di radon indoor e di radionuclidi nell'ambiente, sia di origine naturale che antropica.

I destinatari del progetto sono prevalentemente studenti della Scuola Secondaria di Secondo Grado; ad essi è offerta l'opportunità di acquisire alcune competenze nel campo della Fisica Nucleare ed in particolare della misura della radioattività partendo da quella ambientale mediante l'apprendimento di alcune tecniche di misura, diventano familiari con l'utilizzo di strumenti di rivelazione delle radiazioni ionizzanti. In particolare, viene applicata questa finalità alla misurazione con rivelatori prevalentemente passivi ma anche attivi del gas radon-222 indoor.

È previsto che le attività del progetto vengano realizzate nel corso di due anni scolastici:

- inizialmente gli studenti affrontano i temi di radioattività, radioattività naturale, normativa italiana di radioprotezione guidati dai referenti del progetto;
- successivamente predispongono la campagna di misura e mettono a punto gli strumenti per l'analisi dei dati, con la strumentazione donata alla scuola da parte di INFN e/o università;
- infine, provvedono alla raccolta e all'analisi dei dati e alla presentazione dei risultati.

Il progetto viene solitamente proposto agli studenti nel corso del secondo quadrimestre della classe quarta e realizzato in modo completo durante la classe quinta.

Conclusioni

Sebbene le condizioni atmosferiche abbiano impedito di recarsi in aree aperte lontane da strutture antropiche di grandi dimensioni in cui sarebbe stato possibile effettuare misure corrette di radioattività ambientale naturale, è stato comunque possibile determinare la presenza e l'abbondanza dei due radionuclidi responsabili della produzione di Rn, ^{232}Th e ^{238}U , e del ^{40}K .

Le misure hanno fornito valori di abbondanza negli intervalli seguenti:

$[0.6 \pm 0.1 \%, 1.5 \pm 0.1 \%]$ per il ^{40}K ;

$[3.1 \pm 0.6 \text{ ppm}, 7.8 \pm 1.1 \text{ ppm}]$ per il Th;

$[4.3 \pm 0.6 \text{ ppm}, 7.8 \pm 1.1 \text{ ppm}]$ per l'U.

I dati sono poco confrontabili a causa dei materiali antropici diversi presenti nei luoghi in cui sono stati fatti i rilievi.

Sia il metodo di misura sia l'uso degli strumenti di misura si sono rivelati semplici e proponibili a studenti di scuola secondaria, in particolare ad allievi della quarta e quinta classe di secondaria di secondo grado. Misure di radioattività ambientale attuate con questa metodologia possono rivelarsi strumenti didattici efficaci per lo sviluppo di competenze scientifiche, la sensibilizzazione verso la tutela dell'ambiente e della salute e lo sviluppo di competenze trasversali tra varie discipline.

A questo proposito è stato fornito un riferimento al progetto RadioLab sviluppato dall'INFN e proposto nelle scuole.

ALLEGATI: Immagini dello schermo del tablet in dotazione al ZaNAI detector delle tre misure compiute in esterno.

Misura 1



Misura 2



Misura 3



Bibliografia/sitografia

- [1] ISPRA, “*Qualità dell’aria indoor e rischio radon in Italia e realtà confrontabili: la normativa, la letteratura scientifica, le certificazioni energetiche*”, QUADERNI AMBIENTE E SOCIETÀ 27/2023.
- [2] <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/radioattivita/radon-1>
- [3] <https://radon.iss.it/>
- [4] OMS Handbook on Indoor Radon (OMS, 2009) - <https://www.who.int/publications/i/item/9789241547673>
- [5] <https://www.fe.infn.it/italrad/>
- [6] Liliana Mou, Marica Baldoncini, Gian Piero Bezzon, et altri, *Nuovo spettrometro gamma per il monitoraggio della radioattività in situ*, Atti del Workshop in geofisica, Mus. Civ. Rovereto, 10/12/2010.
- [7] <https://web.infn.it/RadioLAB/>