# RADIOATTIVITÀ AMBIENTALE
# CON LO SPETTROMETRO GAMMA PORTATILE SP5640 Gamma-EDU

## INFN - LNL 280/2024

*Serena Barbi*[1], *Alessandro Forieri*[2], *Anna Teresa Mulazzani*[3], *Angela Pendino*[4], *Giovanna Veronese*[5],

[1]Docente di Matematica e Fisica, IISS “G. Galilei “, Ostiglia (MN)

[2]Docente di Matematica e Fisica, LS “P. Frisi”, Monza (MB)

[3]Docente di Matematica e Fisica, I.O. “Montefeltro”, Sassocorvaro (PU)

[4]Docente di Matematica e Fisica, IISS “L. Pirandello”, Bivona (AG),

[5]Docente di Matematica e Fisica, LS “ Rambaldi-Valeriani-Alessandro da Imola”, Imola (BO)

## Abstract

Dopo una introduzione ai concetti di radioattività e spettroscopia gamma, questo lavoro presenta gli strumenti impiegati, le modalità operative adottate e i risultati di un’indagine condotta il 23 ottobre 2024 negli spazi esterni dei Laboratori Nazionali di Legnaro dell’INFN. L’obiettivo era identificare e quantificare la presenza nell’ambiente di isotopi radioattivi come uranio-238, torio-232 e potassio-40. Le misurazioni, guidate da due ricercatori dell’Università di Ferrara, sono state eseguite da un gruppo di partecipanti al Programma INFN per Docenti (PID). Il tema della radioattività ha subito suscitato interesse tra i partecipanti, che ne hanno riconosciuto il potenziale educativo, sia per approfondimenti teorici interdisciplinari che, ove possibile, per attività sperimentali da proporre in classe. Una di queste viene descritta nel contributo.

**Parole chiave**: *radioattività - spettroscopia gamma - isotopi radioattivi - ricadute didattiche - geostatistica - dialogo tra scuola e ricerca - salute e ambiente - mappatura e GIS*

## Introduzione

Agli inizi dell’800 H. Becquerel, Pierre e Marie Curie con la scoperta della radioattività spalancarono una finestra sul mondo dell’atomo e fecero un ulteriore passo nella ricerca fondamentale della fisica. Si osservò che i sali di uranio emettono delle radiazioni capaci di ionizzare i gas e di agire sull’emulsione

fotografica, attraversando corpi opachi alla luce, come era appena stato constatato con i raggi X. [1]

La radioattività è un fenomeno fisico naturale che si verifica quando il nucleo di un atomo instabile raggiunge un nuovo stato di equilibrio emettendo radiazioni. Si stabilì in seguito che tali radiazioni si suddividono in tre specie differenti, α, β, γ. Le prime due sono di natura corpuscolare, dotate di carica elettrica, le radiazioni gamma, più debolmente ionizzanti, sono radiazioni elettromagnetiche con frequenze ben definite. [2, 3]

Si definisce come attività di un preparato radioattivo il numero di particelle α, β o di fotoni γ (a seconda dei processi sotto descritti) che esso emette nell'unità di tempo. L'unità di misura è il becquerel (Bq), che corrisponde a 1 decadimento al secondo.

I decadimenti radioattivi sono processi statistici che seguono leggi esponenziali e si suddividono in:

- **decadimento Alpha α -** tipico dei nuclidi che hanno un numero elevato sia di protoni che di neutroni, ossia Z > 83 e A > 220

$$^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow ^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + ^{4}_{2}\mathrm{He}$$

- **decadimento Beta β** - caratteristico dei nuclei in cui vi è un eccesso di protoni rispetto ai neutroni. Il decadimento avviene per la stabilizzazione del nucleo: un protone decade in neutrone emettendo un elettrone energetico

$$^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow ^{A}_{Z+1}\mathrm{Y} + \mathrm{e}^{-} + \bar{\nu}_{\mathrm{e}}$$

- **decadimento Gamma γ** - avviene con emissione di fotoni, raggi γ, dopo un decadimento α o β; in questo decadimento non cambiano numero atomico o di massa.

$$^{A}_{Z}\mathrm{X}^{*} \rightarrow ^{A}_{Z}\mathrm{X} + \gamma$$

La radioattività è un fenomeno naturale: per questo motivo qualsiasi cosa sulla Terra, inclusi i nostri corpi, contiene una certa percentuale di elementi radioattivi.

I radioisotopi naturali si sono prodotti tramite reazioni nucleari al centro delle stelle o esplosioni di supernovae. Alcuni di questi nuclei, come il potassio-40, il torio-232 e l'uranio-235/238 sono attivi ancora oggi, in quanto il loro tempo di dimezzamento è di vari miliardi di anni. La misura dell'abbondanza residua di questi isotopi sulla Terra permette di risalire all'età del nostro pianeta.

La radioattività nell'aria è dovuta alla presenza del radon (Rn). Questo elemento viene prodotto dal decadimento dell'uranio e del torio, che si trovano in moltissimi materiali, soprattutto nelle rocce. Esempi di rocce con attività dei radionuclidi che le compongono sono il granito, il gesso, il tufo e il marmo. Essendo gassoso, il radon si diffonde nell'aria. In 1 $m^3$ di aria in un edificio chiuso avvengono in media 30 decadimenti di radon al secondo.

Un altro protagonista della radioattività naturale è il potassio-40, presente nel nostro corpo e in generale nella materia biologica, nei cibi, nella crosta terrestre e nell'acqua di mare. Per esempio, nel corpo umano si hanno circa 5000 decadimenti di $^{40}K$ al secondo. Altri nuclei radioattivi si sono formati in seguito alle interazioni dei raggi cosmici con alcuni elementi.

Alla radiazione ambientale si somma la radiazione artificiale dovuta alle attività dell'uomo: nuclei radioattivi sono creati in reattori nucleari o laboratorio, il fenomeno fisico è comunque il medesimo.

Le radiazioni prodotte dai radioisotopi interagiscono con la materia con cui vengono a contatto, trasferendo energia. Tale apporto di energia, negli organismi viventi, produce una ionizzazione delle molecole: da qui la definizione di radiazioni ionizzanti. La dose di energia assorbita dalla materia caratterizza questo trasferimento di energia. Gli effetti possono essere irrilevanti o più o meno dannosi, a seconda della dose di radiazioni ricevuta e della loro tipologia.

L'unità di misura della dose assorbita dalla materia a seguito dell'esposizione alle radiazioni ionizzanti è il gray (Gy). Un Gy corrisponde a una quantità di energia di un joule (J) assorbita da un chilogrammo di materia. Per la misura delle dosi di radiazioni assorbite dall'uomo, o più precisamente per una misura degli effetti biologici dovuti alla dose di radiazioni assorbita, è stato introdotto il concetto di dose equivalente, che tiene conto della dannosità più o meno grande, a parità di dose, dei vari tipi di radiazioni ionizzanti.

In questo caso, l'unità di misura è il sievert (Sv). Di uso più comune è il sottomultiplo millisievert (mSv). Ad esempio, una radiografia al torace comporta l'assorbimento di una dose di circa 0,14 mSv. La dose annualmente assorbita da ogni individuo per effetto della radioattività naturale è in media di 2,4 mSv per anno.

Il limite massimo di dose stabilito dalla legge italiana per le persone è 1 mSv per anno al di sopra della dose naturale di radiazioni (20 mSv per lavoratori impegnati in attività che prevedono l'uso o la manipolazione di radioisotopi).

**Spettroscopia gamma e analisi spettrale [4]**

La spettroscopia gamma è una tecnica fondamentale per la caratterizzazione delle emissioni di fotoni ad alta energia, fornendo informazioni essenziali su processi

nucleari, radionuclidi e interazioni radiazione-materia. L'analisi spettrale gamma permette di determinare energie, intensità e linee spettrali. Essa è uno strumento chiave per la caratterizzazione e il monitoraggio di radionuclidi presenti nell'ambiente e, in quest'ambito, l'obiettivo principale è l'identificazione e l'insieme di dati qualitativi relativamente ai radionuclidi presenti in suolo, acqua, aria e in generale negli organismi viventi.

Il principio base su cui si fonda questa tecnica sta nel fatto che i rivelatori misurano fotoni gamma emessi da processi nucleari o atomici. Ogni fotone ha un'energia specifica e definita che crea una risposta nel rivelatore. Misurando l'energia dei fotoni, si ottiene uno spettro energetico che identifica gli isotopi presenti e le transizioni coinvolte.

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

- uno scintillatore, ovvero un rivelatore formato da un cristallo semiconduttore, che converte le energie dei raggi gamma in luce visibile; questo è caratterizzato da una buona efficienza a bassa energia, risoluzione energetica moderata, tempi di risposta veloci ed è utilizzato nei sistemi all-scan e portatili;
- un fotomoltiplicatore che ha la funzione di raccogliere la luce e di trasformarla 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.

I principali meccanismi nell'interazione gamma con la materia [5, 6] sono l'effetto fotoelettrico, l'effetto Compton e la produzione di coppie.
L'effetto fotoelettrico è quello più efficace, in quanto assorbe tutta l'energia del raggio gamma incidente. L'assorbimento completo di energia è possibile anche quando si verifica una serie di questi meccanismi di interazione all'interno del volume del rivelatore.

Quando un raggio gamma subisce un'interazione Compton o una produzione di coppie, una porzione dell'energia fuoriesce dal volume del rivelatore senza essere assorbita; questa situazione viene risolta con lo strumento e con rivelatori di grande volume. Il segnale prodotto dal rivelatore (o dal fotomoltiplicatore in un contatore a scintillazione) è analizzato da un analizzatore multicanale (MCA). L'analizzatore multicanale prende un piccolo segnale in tensione prodotto dal rivelatore, lo rimodella in una forma gaussiana o trapezoidale e lo converte in un segnale digitale.

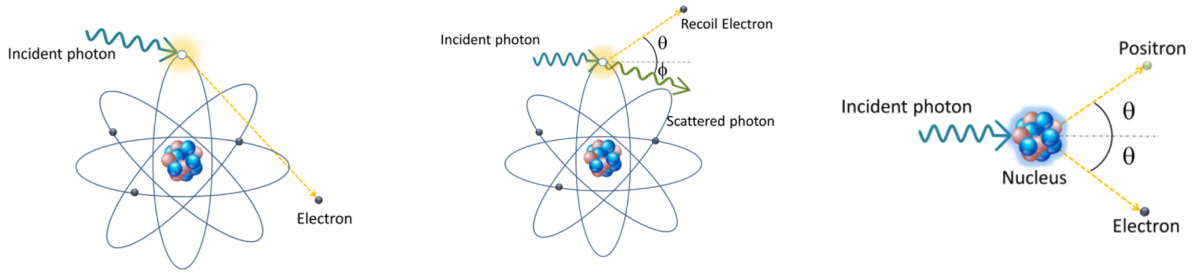


Fig. 1 Rappresentazioni schematiche dell'effetto fotoelettrico (sinistra), dell'effetto Compton (al centro) e della produzione di coppie (a destra). Tratto da [5]

## Strumentazione

Il rilevatore utilizzato nell'indagine ambientale condotta in situ per ottenere i dati da analizzare è il **detector ZaNaI**, uno spettrometro gamma portatile a ioduro di sodio, che consente di effettuare misure di radioattività naturale e di origine antropica per scopi geofisici.

Le **parti che lo costituiscono** sono:
- un *cristallo NaI(Tl)* di forma cubica, con un volume complessivo di 1 litro, caratterizzato da 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).

Lo spettrometro gamma a scintillazione portatile è alloggiato in uno **zaino** [figura 4] all'interno di un termoisolante che protegge il sistema dalle variazioni di temperatura durante il processo di misurazione in situ. Lo zaino include un **Tablet da 10"** tramite il quale è possibile effettuare una serie di misurazioni outdoor. Con l'applicazione **Android GammaEDU** è possibile acquisire e analizzare in tempo reale uno spettro di raggi gamma per ottenere le abbondanze di K, U e Th, monitorare l'ambiente circostante, acquisire le coordinate GPS e scattare una foto delle misurazioni in corso. I dati vengono salvati in un file .kml pronto per essere visualizzato su Google Earth e condiviso per produrre una mappa della radioattività dell'area; ogni spettro acquisito viene memorizzato nella memoria interna dell'analizzatore multicanale per ulteriori elaborazioni.
La descrizione dettagliata del funzionamento dello strumento esula dagli scopi di questo report ed è riportata in [6, 7, 8].

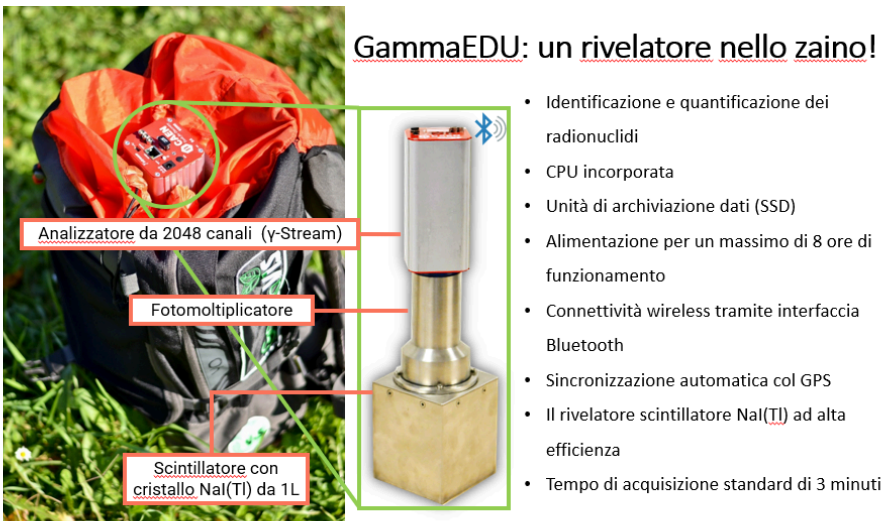


Fig. 4 Lo strumento di misura SP5640-GammaEDU [6]

Lo ZaNaI (con GammaEDU) è in grado di identificare isotopi radioattivi industriali, medicali e naturali e di acquisire spettri gamma sia in configurazione statica che in configurazione dinamica.

**Luogo, data, tipo di misure effettuate, metodo di misura, analisi dei dati**

L'attività di misura è stata svolta il giorno 23 ottobre 2024 dagli autori del presente contributo a cui si è aggiunto il prof. Giuseppe Augello del LSS Cannizzaro di Palermo, partecipante al corso PID-LNL. Lo scopo principale dell'attività era sicuramente quello di prendere confidenza con lo strumento a nostra disposizione, comprendere come poter effettuare una misura fisicamente "sensata", da quali fattori fosse influenzata la misura e quale fosse la presentazione dello strumento del risultato di misura.

La misura è stata effettuata in modalità statica ponendo lo zaino con la strumentazione direttamente a terra (su asfalto e su prato) con un tempo di acquisizione di 3 oppure 5 minuti. In questa maniera, il segnale percepito dal rilevatore proviene quasi esclusivamente da una piccola area circolare omogenea di qualche metro di raggio. Innalzando lo strumento, l'area di provenienza del segnale sarebbe maggiore (ad esempio, come mostrato in figura 5, posizionando il rivelatore su una sedia a circa 50 cm di altezza il 95% del segnale proverrebbe da un'area circolare di circa 8 metri, ad una altezza di 150 cm il raggio dell'area acquisita sarebbe di circa 20 m – [7]).

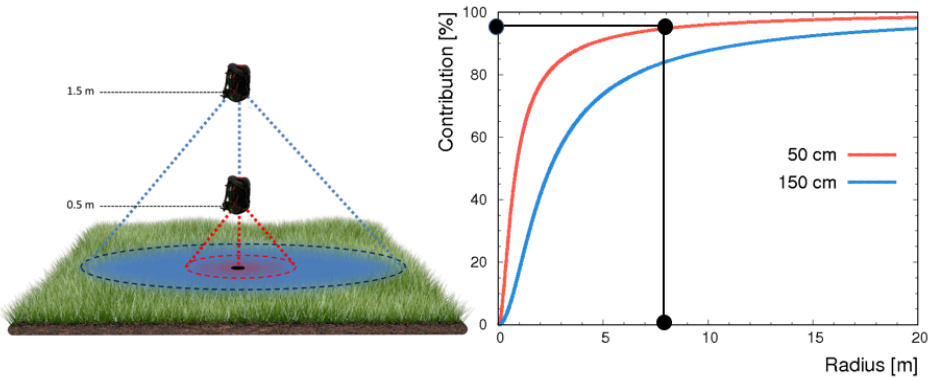


Fig. 5 Dipendenza dell'area di rilevazione dall'altezza dello strumento

Sul tablet dello strumento, tenuto in mano dallo sperimentatore, viene visualizzato lo spettro di acquisizione del rilevatore, in un grafico in cui sull'asse delle ascisse sono riportati i canali di acquisizione e sull'asse delle ordinate il numero di fotoni che sono stati "contati" dallo strumento durante la finestra temporale di acquisizione. Sono evidenti tre picchi di misura dovuti al decadimento radioattivo del potassio, del bismuto e del tallio (figura 6). Sulla base di strutture spettrali bene note, il software di gestione del sistema di acquisizione effettua la calibrazione energetica della misura associando ad ogni canale la corrispondente energia e, sulla base dei conteggi, fornisce le abbondanze di potassio, uranio-equivalente e torio-equivalente con il corrispondente errore di misura. La tabella 1 mostra i risultati, estrapolati dai file *.kml prodotti dallo strumento, di due diverse misure effettuate nel corso della giornata.

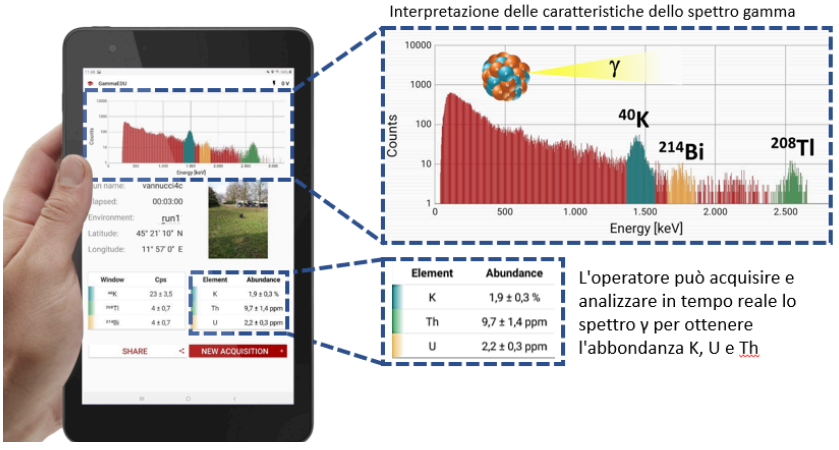


Fig. 6 Visualizzazione sul tablet del risultato di una misura

Nel corso della giornata, e con la guida e la supervisione dei ricercatori dell'Università di Ferrara, l'attività del gruppo si è concentrata sulla comprensione di quale fosse il tempo "ottimale" di misura e se, appoggiando lo zaino su superfici diverse (asfalto e prato) i risultati fossero sostanzialmente diversi (figura 7).

Fig. 7 Alcuni momenti della rilevazione dei dati con lo zaino contenente lo strumento posizionato su prato e su asfalto

Per quanto concerne il primo “quesito”, abbiamo effettuato misure con campionamenti di 3, 5, 10 minuti, per cercare di capire quale fosse la finestra temporale minima per poter avere una misura significativa. Intervalli temporali troppo brevi, infatti, possono condurre a poche acquisizioni di fotoni e quindi a valori numerici che non consentono un'analisi statistica accurata da parte del software. Misure troppo lunghe, per contro, potrebbero essere dispendiose dal punto di vista della durata di una campagna di misure. Abbiamo quindi effettuato nello stesso punto misure con diversi tempi di acquisizione e osservato che il risultato non era sostanzialmente differente, quindi riteniamo plausibile che il tempo di acquisizione di 3 minuti fosse adeguato.

Per quanto riguarda il secondo “quesito”, come ci aspettavamo i risultati cambiano a seconda della superficie di acquisizione. Questo perché il terreno, o l’asfalto, hanno composizioni chimiche differenti e pertanto il numero di decadimenti sarà diverso. Riportiamo qui di seguito i valori da noi registrati per le misure su prato e su asfalto. Se confrontati tra loro, si vede come varino non solo l’attività complessiva, ma anche le attività di K, e-U, e-Th.

| Superficie di appoggio | | PRATO | |
|---|---|---|---|
| Tempo di acquisizione (s) | | 180 | |
| Posizione | | Long 45°21’09’’ N – Lat 11°56’57’’ E | |
| Attività totale (Bq/kg) | Abbondanza K (%) | Abbondanza e-Th (ppm) | Abbondanza e-U (ppm) |
| 603 ± 78 | 1.7 ± 0.2 | 3.5 ± 0.5 | 10.6 ± 1.6 |

| Superficie di appoggio | | ASFALTO | |
|---|---|---|---|
| Tempo di acquisizione (s) | | 180 | |
| Posizione (Long/Lat) | | Long 45°21’10’’ N – Lat 11°56’58’’ E | |
| Attività totale (Bq/kg) | Abbondanza K (%) | Abbondanza e-Th (ppm) | Abbondanza e-U (ppm) |
| 305 ± 38 | 0.8 ± 0.1 | 3.1 ± 0.5 | 4.6 ± 0.7 |

Tab. 1 Risultati delle misure eseguite su diverse superfici

**Ricadute didattiche**

Acquistando il Backpack Radiation Detector [6], l’attività di misura effettuata lo scorso ottobre ai LNL - INFN può essere proposta anche agli studenti delle scuole secondarie di secondo grado. Gli obiettivi di apprendimento dell’esperienza, imparare a pianificare le misure in situ con uno spettrometro gamma, misurare le abbondanze e l’attività specifica dei radionuclidi, trasferire i dati su Google Earth, interpretare criticamente i risultati [3], concorrono al raggiungimento delle competenze in fisica previste, ad esempio, dai percorsi liceali [9] nonché al conseguimento delle competenze n.5 e n.6 dell’insegnamento trasversale di educazione civica [10]. Pertanto l’esperienza risulterebbe altamente formativa per gli studenti oltre che stimolante e coinvolgente. Gli studenti in fase di analisi dei dati raccolti, opportunamente guidati dai docenti, potrebbero: ricostruire la curva di calibrazione, interrogarsi sull’influenza del tempo di misura, dell’altezza dello zaino da terra e della superficie di appoggio dello zaino sulla misura o sull’influenza di vicinanza a muri o edifici, effettuare misure puntuali lungo una linea o misure sui nodi di una griglia e cimentarsi nella realizzazione di una “mappa”.

Simulare una vera attività di ricerca scientifica ed elaborare dati reali è sempre entusiasmante per i ragazzi: stimola la curiosità, sviluppa il pensiero critico e rende la scienza un’esperienza concreta e appassionante. Gli studenti si confrontano con problemi autentici, imparano a interpretare risultati, a gestire l’incertezza e a collaborare in modo consapevole, come in un vero laboratorio di ricerca. Proprio questo è ciò che emerso dall’esperienza degli studenti della II B ad indirizzo scientifico dell’IISS Pirandello di Bivona (AG) condotta tra novembre e dicembre 2024. Nel laboratorio STEM della scuola, la prof.ssa Angela Pendino, dopo aver partecipato al PID presso i LNL dell’INFN, ha guidato gli studenti in attività di misura della radioattività ambientale utilizzando un monitor di radiazione. Il sensore, probabilmente acquistato circa dieci anni fa e mai utilizzato, è stato riscoperto proprio al rientro da Padova: una coincidenza che ha stimolato entusiasmo e curiosità, trasformando un’attrezzatura dimenticata in un’occasione concreta per rendere la fisica più coinvolgente e vicina agli studenti di una seconda liceo.

L'attrezzatura era composta dall'interfaccia Science Cube Pro, che metteva in collegamento il sensore (Radiation Monitor II) e un computer con sistema operativo Windows [11]. Attraverso il software Science Cube Studio II, installato sul PC, l'apparato sperimentale permetteva di acquisire conteggi di radioattività ogni 5 secondi, per una durata massima di 15 minuti.

In diverse giornate, sempre nella stessa aula (il laboratorio per le STEM), gli studenti hanno acquisito conteggi di radioattività del fondo ambientale (per un totale di 7 ore), oppure hanno posizionato il sensore sotto lastre di granito (7 ore), vicino a un chiodino di tungsteno contenente torio (7 ore) e sotto un casco di circa 30 banane (3,5 ore). La figura 8 mostra alcuni momenti dell'attività svolta. Poiché il software non permetteva alcuna analisi dei dati né consentiva di copiare e incollare le tabelle, i conteggi acquisiti sono stati trascritti manualmente su fogli Excel condivisi. In questa fase, gli studenti hanno lavorato in coppie, riportando su Excel i conteggi per minuto (CPM), ottenuti sommando quelli acquisiti dal rivelatore ogni 5 secondi.

Fig. 8 Alcuni momenti dell'attività svolta in aula STEM dell'IISS "Pirandello" di Bivona (AG)

Gli studenti, che inizialmente non avevano alcuna conoscenza della radioattività, hanno potuto constatarne la presenza sia in assenza di sorgenti ben precise, sia in presenza di materiali noti per la loro emissione. Hanno concluso che la radioattività è un fenomeno naturale e che siamo ovunque circondati da sostanze radioattive. Hanno osservato che le lastre di granito e il chiodino contenente torio facevano aumentare i conteggi, mentre non sono state rilevate differenze significative tra le misure del fondo ambientale e quelle effettuate sotto il casco di banane.

| | |
|---|---|
| **max** | 47 |
| **min** | 11 |
| **media** | 26 |
| **dev st** | 6 |
| **LiveTime (m)** | 420 (7h) |
| | |
| **moda** | 21 |
| **mediana** | 26 |

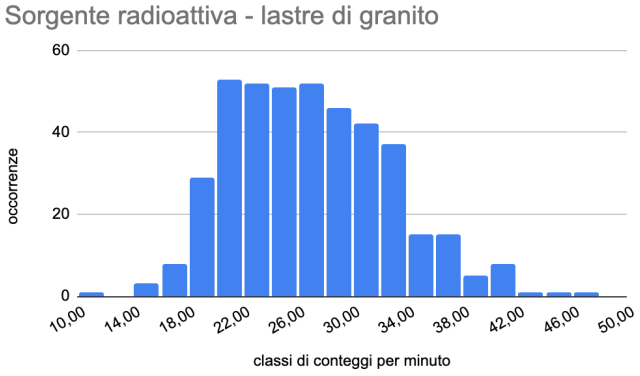


Fig. 9 Esempio di dati raccolti ed elaborati dagli studenti dell'IISS "Pirandello" di Bivona (AG)

Solo dopo la raccolta e l'elaborazione matematica dei dati statistici (figura 9), gli studenti sono stati guidati nella ricerca dell'origine della radioattività, approfondendo il ruolo della litosfera terrestre e dei raggi cosmici. È stato fondamentale sottolineare che i nuclidi responsabili della radioattività rilevata in aula STEM hanno una concentrazione molto bassa e che il loro decadimento non rappresenta un pericolo per la salute umana. A tal proposito, è stato fatto riferimento alla normativa vigente, in particolare al D.Lgs. 101/2020 [12], che stabilisce i limiti di esposizione alle radiazioni ionizzanti nei luoghi di lavoro. Per la popolazione generale, il limite di dose efficace è fissato a 1 mSv per anno solare.

L'esperienza si è conclusa con la realizzazione di un poster coi risultati ottenuti di cui gli studenti hanno esposto il contenuto durante eventi di orientamento aperti al pubblico organizzati dalla scuola.

Prima ancora che nei risultati sperimentali, l'attività ha avuto una rilevanza enorme dal punto di vista metodologico. L'esperienza ha messo alla prova anche la pazienza dei più distratti, che con cura dovevano riattivare ogni 15 minuti l'acquisizione dei dati da parte del software, prestando poi attenzione a riportare correttamente i dati sui file condivisi senza sovrascrivere quelli registrati dagli altri. L'attività ha avuto senz'altro una ricaduta didattica positiva, poiché ha introdotto studenti ancora al secondo anno del liceo al pensiero scientifico, stimolando curiosità, rigore e capacità di osservazione. Il tema affrontato, ovvero la radioattività, ha offerto un terreno fertile per sviluppi futuri, che nel secondo biennio e nel quinto anno potranno essere approfonditi sotto molteplici aspetti interdisciplinari. Inoltre, non meno importante, l'esperienza ha favorito un clima di collaborazione, sia tra gli studenti che tra studenti e docente, trasformando il laboratorio STEM in uno spazio di ricerca autentica.

L'acquisizione di conteggi di radioattività, analoga a quella realizzata dagli studenti del liceo Pirandello, potrebbe essere svolta con il contatore Geiger RockyRAD (figura 10) Dotando il laboratorio della propria scuola del kit che comprende, assieme allo strumento, diversi tipi di rocce e minerali [13] si potrebbero effettuare delle misure da mettere a confronto e interrogarsi, successivamente, sulla composizione chimica delle rocce e dei minerali esaminati.

Fig. 10 Strumenti di misura presentati al PID - LNL 2024 dai ricercatori dell'Università di Ferrara: Backpack Radiation Detector e contatore Geiger RockyRAD

## Conclusioni

Il tema della radioattività e le proposte sperimentali descritte nell'articolo possiedono un valido potenziale educativo per studenti delle scuole superiori di qualunque indirizzo di studi. Questo è dovuto sia alla natura interdisciplinare della tematica, che si presta ad approfondimenti di grande attualità, sia, ove possibile, alla replicabilità delle attività sperimentali, fondamentali per lo sviluppo del pensiero scientifico. L'attrezzatura utilizzata a Legnaro può infatti essere acquistata dai laboratori scolastici, sfruttando i finanziamenti che le scuole ricevono periodicamente per l'aggiornamento delle tecnologie. Affinché gli acquisti non si traducano in un semplice accumulo di materiali poco utilizzati o non pienamente valorizzati, è fondamentale mantenere vivo il dialogo con università ed enti di ricerca, attraverso progetti rivolti agli studenti come Lab2Go e RadioLab [14,15], e programmi come il PID – Programma INFN per Docenti o l'ITP – Italian Teacher Programme del CERN [16, 17], che offrono una formazione avanzata per insegnanti di materie scientifiche, necessaria a supportare scelte didattiche innovative nelle loro classi.

## Ringraziamenti

Gli autori di questo articolo ringraziano il dott. Giorgio Chiarelli e la dott.ssa Silvia Miozzi per le valide proposte formative offerte ai docenti di materie scientifiche. Ringraziano tutti i relatori e lo staff dei LNL e, in particolare, la dott.ssa Luisa Pegoraro per aver curato nei dettagli l'attività formativa a Legnaro. Ringraziano altresì dott. Michele Franceschi e dott. Andrea Maino, ricercatori dell'Università degli Studi di Ferrara e INFN Ferrara, che con competenza hanno curato l'attività sulla radioattività, dall'introduzione teorica in aula alle misure negli spazi esterni dei LNL. Infine un ringraziamento speciale al dott. Andrea Gozzelino, tecnologo INFN LNL, che ha organizzato e coordinato con passione e dedizione tutto il programma di formazione 2024 ed ha seguito con interesse anche l'attività sperimentale condotta dagli studenti dell'IISS Pirandello di Bivona (AG), offrendo alla docente preziosi spunti metodologici.

## Bibliografia e sitografia

[1] Antonio Rostagni - Fisica generale, Utet
[2] https://viaggiolabinfn.ts.infn.it/laboratori-nazionali-del-gran-sasso-lngs/radioattivita
[3] materiali corso PID-LNL 2024: "*Laboratorio di radioattività ambientale* - Alla scoperta della radioattività che ci circonda: un percorso didattico per i ragazzi delle scuole secondarie di secondo grado".
[4] https://www.lnf.infn.it/edu/stagelnf/rinvernali02/aluisicastagnaromacchi.pdf
[5] https://www.fe.infn.it/radioactivity/educational/detection.html
[6] www.caen.it/products/gamma-edu/
[7] https://www.fe.infn.it/radioactivity/educational/instrumentation.html
[8] https://www.fe.infn.it/italrad/strumenti.html
[9] Obiettivi specifici di apprendimento licei scientifici, D.M. 211 del 7 ottobre 2010

[10] Linee guida per l’insegnamento dell’educazione civica D.M. 183 del 7 settembre 2024
[11] https://file.koreadigital.com/sciencecube/doc/ScienceCube_Catalogue_2020.pdf
[12] https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2020/08/12/20G00121/sg
[13] https://www.caen.it/products/sp5660/
[14] https://web.infn.it/lab2go/
[15] https://web.infn.it/RadioLAB/
[16] https://pid.web.roma2.infn.it/
[17] https://itp.web.cern.ch/