

SCIENZA E FANTASCIENZA

Il dato come indizio

Firenze, 7-8 maggio 2025

SEZIONE TESINE TRIENNIO

Terzo classificato

L'ora dei raggi gamma

Studenti

Romeo Dario - Errani Francesco - Zaccaro Francesco

Grazioli Consuelo - Hatefi Tehrani Barsam

Classe 5D

Istituto di Istruzione Superiore

Liceo scientifico Alfredo Oriani - Ravenna (RA)

Docente Coordinatore

Baroni Maurizio

Il lavoro riguarda la ricerca del Radio 226, un radionuclide ritenuto responsabile della retroilluminazione in una antica sveglia da comodino trovata in un vecchio baule. L'attività è stata svolta analizzando le emissioni gamma del radionuclide mediante un rivelatore al Germanio iperpuro disponibile presso i laboratori del Politecnico di Milano. Il lavoro sperimentale, che ha riguardato la calibrazione dello strumento, l'esecuzione delle misure e l'analisi dei risultati, evidenziano padronanza della tecnica strumentale e buona conoscenza della fisica dei materiali radioattivi.

L'ora dei raggi gamma

Concorso ScienzaFirenze
XXII Edizione

"Scienza e fantascienza.
Il dato come indizio"

Relazione del Docente referente

Scienza e Fantascienza: accostamento coinvolgente e affascinante, spinta verso la volontà di capire e scoprire ciò che i sensi vedono e percepiscono, ma che l'intelletto intuisce e rende spiegabile.

Pur appartenendo a mondi apparentemente distanti, scienza e fantascienza sono legate da una relazione complessa e affascinante. Mentre la scienza si basa su osservazioni, esperimenti e dati verificabili, la fantascienza esplora le frontiere dell'immaginazione, dando forma a mondi e tecnologie che spesso sfidano le leggi conosciute della natura.

Punto di incontro tra queste due discipline è la ricerca e la riflessione sul dato sperimentale: in effetti, il dato, se compreso e verificato, è capace di trasformare ciò che era pura immaginazione in scienza.

Nasce qui il piacere della nostra scoperta nel cammino di questa edizione del concorso ScienzaFirenze. Abbiamo così accettato la sfida che si cela dietro quel titolo.

Hanno aderito con entusiasmo alla proposta cinque studenti e studentesse di una classe quinta del nostro Liceo.

Gli studenti hanno pienamente collaborato a tutte le fasi realizzative con entusiasmo e dedizione, raccogliendo dati, ipotizzando percorsi di analisi, effettuando misurazioni sperimentale, discutendo i risultati, traendo le conclusioni del percorso condiviso.

E così i nostri occhi hanno potuto vedere oltre e, come dice Asimov:

"Lo spettacolare successo della scienza nello svelare i segreti dell'universo ha reso la fantascienza non solo possibile, ma inevitabile."

Sommario

Introduzione	1
Esplorazione alla ricerca del dato	2
La misura e ... il dato. Il rivelatore al Germanio HPGe	4
Raccolta analisi e discussione dei dati sperimentali.....	10
Calibrazione del rivelatore	11
Analisi dati emissione gamma della sveglietta.....	11
Analisi degli errori sperimentali.....	15
Conclusioni.....	16
Sitografia e Bibliografia	i

Tutto è iniziato con una scoperta inaspettata.

Aperto un vecchio baule rimasto chiuso per anni, ci siamo imbattuti in un'antica sveglia da comodino, apparentemente normale, ma con un dettaglio sorprendente: le lancette e i numeri del quadrante brillavano debolmente nel buio, nonostante non fossero stati esposti alla luce da molto tempo.

A prima vista sembrava un comune orologio, con il quadrante in vetro danneggiato e leggermente opacizzato e una cassa di metallo brunito dal tempo.



In teoria, un materiale fosforescente tradizionale avrebbe dovuto perdere la sua luminescenza dopo poche ore di oscurità. Eppure, la sveglia continuava a emanare una luce fioca e persistente, come un segnale proveniente da un'altra epoca o da un mondo fantascientifico.

Incuriositi, ci siamo chiesti quale fosse la causa di questo fenomeno.

Poteva trattarsi di un'antica vernice luminescente? Oppure di un materiale radioattivo, come quelli utilizzati nel secolo scorso per rendere visibili strumenti e orologi al buio? Sappiamo infatti che, fino alla metà del XX secolo, era pratica comune l'impiego di sostanze radioattive nei quadranti di orologi, strumenti aeronautici e strumenti di misura. Tra queste, il radio-226 era uno degli elementi più utilizzati: mescolato con un materiale fosforescente, come il solfuro di zinco (ZnS), permetteva di ottenere una luminescenza costante, poiché la radiazione emessa dal radio eccitava il composto, facendolo brillare senza bisogno di una carica luminosa esterna.

Ma se la nostra sveglia conteneva davvero radio-226, allora il suo bagliore era il segno di qualcosa di più profondo: una continua emissione di radiazioni, invisibili all'occhio umano ma rilevabili con gli strumenti adeguati.

Oppure la luce aveva un'origine a noi sconosciuta? Scienza o Fantascienza?

Abbiamo dibattuto a lungo su quale potesse essere la natura di questo fenomeno apparentemente inspiegabile. L'emissione apparentemente fantascientifica doveva essere studiata e analizzata in modo approfondito.

Per fare luce sulla luce della sveglia serviva senza dubbio ... il dato. Da indizio a prova.

Per fare una prova servono però ... tre indizi.

In questo lavoro avremo modo di condividere la ricerca del dato, che da indizio diventerà prova provata, trasformando fantascienza in scienza.

Esplorazione alla ricerca del dato

La nostra ricerca del dato parte da una analisi approfondita sul periodo storico della sveglietta che abbiamo in mano. Emerge quanto vi riportiamo nel seguito.

La luminescenza osservata nelle lancette della sveglietta non è dovuta a un normale materiale fosforescente, che necessita di essere esposto alla luce per poi rilasciare lentamente l'energia accumulata.

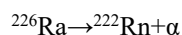
Al contrario quindi potrebbe essere il risultato di un fenomeno ben più affascinante: la luminescenza radioattiva, un effetto ottenuto combinando un materiale radioattivo con una sostanza fluorescente.

Fino agli anni '60 infatti, nei quadranti di orologi e strumenti da misurazione era comune l'uso di una speciale vernice luminescente composta da:

- Radio-226: un radionuclide con un'emivita di circa 1600 anni, che emette particelle alfa ad alta energia e una modesta quantità di radiazione gamma
- Solfuro di zinco (ZnS): un materiale fluorescente, capace di emettere luce visibile quando eccitato da particelle cariche ad alta energia

L'interazione tra il radio-226 e il solfuro di zinco crea la luce

Il radio-226 decade naturalmente secondo la reazione:



Questo decadimento genera una particella alfa con un'energia di circa 4.8–5 MeV. Le particelle alfa, pur avendo un raggio d'azione molto limitato (pochi micrometri nell'aria), sono altamente ionizzanti e interagiscono con il solfuro di zinco, eccitandone gli atomi. Quando gli atomi del solfuro di zinco tornano al loro stato fondamentale, emettono fotoni nel visibile, producendo la tipica luminescenza verdognola.

Questo processo avviene continuamente, perché il radio-226 decade molto lentamente e i suoi prodotti di decadimento, come il radon-222 e il bismuto-214, contribuiscono a ulteriori emissioni radioattive, alimentando la luminescenza per decenni. Un materiale fosforescente tradizionale (come quello usato nei moderni orologi con lancette luminescenti) funziona trattenendo energia dalla luce ambientale e rilasciandola lentamente. Dopo alcune ore al buio, l'effetto svanisce perché il materiale non riceve più energia esterna. Al contrario, nella vernice al radio, la luminescenza è autonoma e continua a lungo, poiché l'energia necessaria per eccitare il solfuro di zinco proviene direttamente dal decadimento radioattivo, un processo spontaneo e costante.

Quadrante di orologio anni '50 verniciato con una vernice radioluminescente contenente il radioisotopo ^{226}Ra .

Nonostante sia stata realizzata molti anni fa, la sveglietta continua a emettere una debole luminescenza per due motivi principali:



1. Il radio-226 ha un'emivita molto lunga (1600 anni); anche dopo decenni, la quantità di radio presente nella vernice è ancora significativa e continua a emettere particelle alfa.
2. Il solfuro di zinco si degrada nel tempo, ma il radio rimane attivo. Col passare degli anni, l'efficienza del solfuro di zinco nel convertire l'energia delle particelle alfa in luce visibile si riduce, causando un indebolimento della luminescenza. Tuttavia, il radio-226 è ancora presente e continua a emettere radiazioni, che possono essere rivelate con strumenti adeguati. Negli anni '40 e '50 si scoprì che l'esposizione prolungata al radio-226 era estremamente pericolosa. Le famose Radium Girls, lavoratrici che dipingevano quadranti di orologi con pennelli imbevuti di vernice al radio (che spesso inumidivano con la bocca), svilupparono gravi malattie da radiazione, tra cui tumori ossei e anemia aplastica.

Per questo motivo, l'uso del radio nelle vernici luminescenti venne progressivamente vietato e sostituito con materiali più sicuri, come:

- Tritio: un isotopo radioattivo a bassa energia usato ancora oggi in orologi militari.
- Materiali fosforescenti non radioattivi, che si caricano con la luce ambientale.

L'antica sveglietta trovata nel baule rappresenta quindi una testimonianza di un'epoca in cui la radioattività era utilizzata senza piena consapevolezza dei rischi?

Il suo bagliore persistente è la prova di un fenomeno fisico affascinante, che unisce il decadimento nucleare alla fluorescenza? Queste nostre ipotesi andavano confermate. Il dato da indizio doveva diventare prova.

Inizia da qui la nostra indagine scientifica, che ci ha portato ad analizzare le emissioni gamma del radio-226 e dei suoi prodotti di decadimento attraverso la spettrometria gamma ad alta risoluzione.

Per verificare tutto ciò, abbiamo deciso di sottoporre la sveglietta ad un'analisi spettrometrica gamma, utilizzando un rivelatore al germanio iperpuro (HPGe).

Questo strumento, noto per la sua elevata risoluzione energetica, ci avrebbe permesso di individuare con precisione le emissioni gamma caratteristiche del radio-226 e dei suoi prodotti di decadimento e capire così se le nostre ipotesi erano corrette.

Ma dove trovare un rivelatore al germanio iperpuro?

... si parte per il politecnico di Milano

Il radio-226 è un radionuclide appartenente alla serie di decadimento dell'uranio-238, caratterizzato da un'emivita di circa 1600 anni.

Questo isotopo decade per emissione alfa a radon-222, il quale, a sua volta, subisce una serie di decadimenti producendo isotopi radioattivi come 214Pb e 214Bi, responsabili delle emissioni gamma più intense e facilmente rivelabili.

L'analisi spettrometrica delle emissioni gamma permette di identificare e quantificare la presenza di Radio 226 in un campione grazie alla rilevazione dei fotoni gamma caratteristici. Tuttavia, la misura diretta del Radio è limitata dall'intensità relativamente bassa della sua emissione gamma diretta (186.2 keV, 3.59% di probabilità). Per questo motivo, si analizzano principalmente i picchi gamma dei suoi prodotti di decadimento, che hanno una maggiore intensità e risultano più facilmente identificabili.

Le emissioni gamma caratteristiche del 226Ra e della sua catena di decadimento sono:

Radionuclide	Energia (keV)	Probabilità di emissione (%)	Note
Radio 226	186.2	3.59%	Picco caratteristico del radio-226, ma sovrapposto a quello del U235(185.7 keV).
Piombo 214	242.0	7.43%	Emissione secondaria utile per conferma.
Piombo 214	295.2	18.5%	Picco significativo, spesso presente in spettro.
Piombo 214	351.9	35.6%	Uno dei picchi più intensi del Pb 214, molto utile per l'identificazione.
Bismuto 214	609.3	45.5%	Uno dei picchi più intensi della catena di decadimento, fondamentale per la rivelazione del Ra 226.
Bismuto 214	768.4	4.91%	Picco secondario, meno usato.
Bismuto 214	934.1	3.05%	Bassa intensità, ma può confermare l'analisi.
Bismuto 214	1120.3	14.9%	Utile nelle misure con alta risoluzione.
Bismuto 214	1238.1	5.80%	Emissione secondaria del Bi214
Bismuto 214	1377.7	4.00%	Picco meno frequente.
Bismuto 214	1764.5	15.9%	Uno dei segnali chiave per la presenza del Ra226

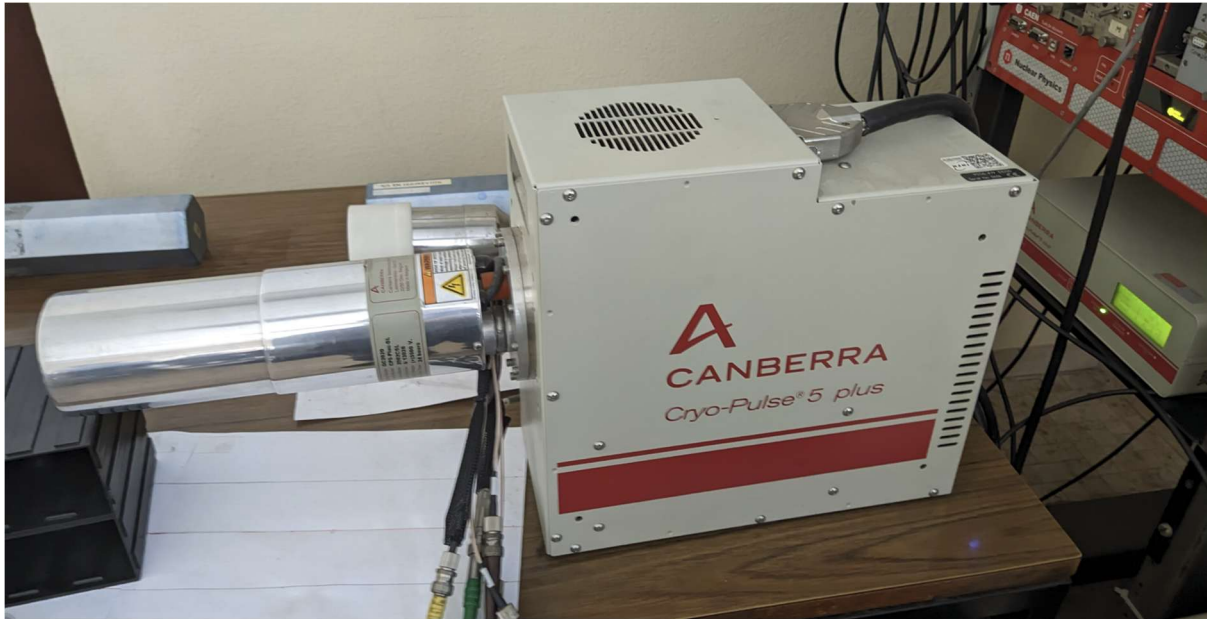
L'identificazione del ²²⁶Ra si basa sull'analisi combinata di questi picchi. In particolare, il 609 keV e il 1764 keV del ²¹⁴Bi sono tra i segnali più forti e affidabili per confermare la presenza del radio nel campione analizzato.

Rivelazione dei raggi gamma con un rivelatore HPGe

Per misurare con precisione queste emissioni gamma, si utilizza un rivelatore al germanio iperpuro (HPGe), che offre una risoluzione energetica molto superiore rispetto ai rivelatori a scintillazione come NaI(Tl).

Il rivelatore HPGe sfrutta un cristallo di germanio altamente puro, mantenuto a temperature criogeniche (~77 K) usando azoto liquido o un sistema di refrigerazione a stato solido.

Il rivelatore al germanio intrinseco è un dispositivo utilizzato per rilevare e misurare le radiazioni gamma sfruttando le proprietà fisiche del germanio allo stato di semiconduttore ad elevata purezza (HPGe).

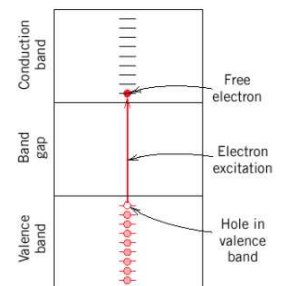


Il germanio intrinseco è un materiale semiconduttore purissimo, cioè privo di altre specie chimiche all'interno della struttura cristallina. Queste impurità possono introdurre livelli energetici non desiderati che causerebbero una elevata produzione di cariche spurie (→ rumore) o una risposta meno lineare alla radiazione. Perciò, questa sua caratteristica migliora la sua capacità di rispondere in modo preciso e sensibile alla stimolazione proveniente dai fotoni gamma.

In un materiale semiconduttore intrinseco il numero degli elettroni di conduzione nella relativa banda è pari a quello delle lacune nella banda di valenza. Questo implica che anche se non sono presenti cariche libere dovute a drogaggio esterno, il materiale può comunque condurre elettricità grazie alle transizioni elettroniche causate dalla temperatura. In questo materiale, gli elettroni vengono spontaneamente eccitati quando si trovano ad una certa temperatura dalla banda di valenza alla banda di conduzione.

La densità di portatori di carica intrinseci (n_i) è determinata dal *energy band gap* (E_g), e cresce esponenzialmente all'aumentare della temperatura $\rightarrow n = C T^{3/2} \exp(-E_g/2kT)$ in cui:

- $T \rightarrow$ temperatura assoluta (K)
- $C \rightarrow$ costante del materiale
- $E_g \rightarrow$ band gap energy (J)
- $k \rightarrow$ costante di Boltzmann (circa 8.617×10^{-5} V/K)

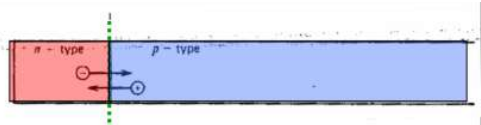


La dipendenza esponenziale di n rispetto al gap energetico riflette l'effetto della temperatura sulla probabilità che un elettrone possa essere eccitato dalla banda di valenza alla banda di conduzione. Più grande è il gap energetico, meno facilmente gli elettroni vengono eccitati a temperature più basse. Il rivelatore al germanio viene mantenuto ad una temperatura criogenica di 77 K (-196 °C) per renderlo molto meno conduttivo rispetto alla temperatura ambiente, poiché a causa del moto di agitazione termico, si comporterebbe essenzialmente come un conduttore. A questa temperatura si riduce la corrente di *leakage* intrinseca dovuta al movimento termico degli elettroni. Questa corrente può compromettere le misurazioni, poiché è molto più intensa rispetto al segnale prodotto da radiazioni ionizzanti, rendendo difficile distinguere il segnale voluto da quello di disturbo. Questa temperatura rende la corrente di leakage molto bassa, migliorando la risoluzione energetica e la sensibilità del rivelatore. Mantenere n_i permette anche di ridurre le fluttuazioni termiche che potrebbero interferire con la misurazione del segnale della radiazione. Questo effetto contribuisce a una maggiore precisione nella misurazione dell'energia depositata nel cristallo, migliorando la risoluzione energetica del rivelatore.

Per risolvere il problema del rumore di fondo si utilizza una giunzione p-n, ovvero una struttura che si forma quando due regioni del materiale semiconduttore, una positiva (p) e una negativa (n), vengono in contatto. Quando le due regioni si uniscono, si verificano diversi fenomeni fisici che definiscono il comportamento della giunzione. In una giunzione p-n, le cariche maggioritarie (elettroni nella regione n e lacune nella regione p) diffondono nella regione opposta. Gli elettroni della regione n, infatti, si spostano verso la regione p, dove si ricombinano con le lacune, e viceversa. Questo processo di diffusione crea una carica spaziale (un accumulo di carica) alla

giunzione: nella regione n si accumulano cariche positive (le lacune), mentre nella regione p si accumulano cariche negative (gli elettroni). Questa carica spaziale genera un campo elettrico che agisce come un "blocco" alla diffusione delle cariche maggioritarie.

Quando il processo di diffusione arriva all'equilibrio, si forma la zona di svuotamento e si stabilisce una carica spaziale bilanciata, senza portatori di carica liberi nella regione della giunzione, ma solo cariche che non partecipano alla conduzione.



La legge che regola la distribuzione delle impurità nella giunzione è definita come $n_i p_i = n_p$, ma, dato che il germanio intrinseco è un materiale puro, la formula vale comunque ma bisogna

fare una precisazione, cioè che la formula diventa $n_p = n_i^2$ in cui:

- n_p è il prodotto della concentrazione degli elettroni e delle lacune in una giunzione p-n
- n_i^2 è il quadrato della concentrazione di portatori di carica intrinseci (n_i), che è determinata dalla natura del materiale (in questo caso il germanio) e dalla temperatura.

Quando la giunzione raggiunge uno stato di equilibrio, le cariche maggioritarie nella regione n tendono a diffondere nella regione p, in cui la concentrazione di elettroni è bassa. Allo stesso modo, le lacune tendono a diffondere nella regione n. Questa reciproca diffusione avviene per cercare di raggiungere un equilibrio di concentrazione delle cariche.

Dato che le cariche maggioritarie si spostano nella regione opposta, entrano in contatto con le cariche minoritarie, elettroni nella regione p o lacune nella regione n. Quando si incontrano, queste cariche si ricombinano. La ricombinazione è un processo che annulla la presenza di portatori di carica liberi, in quanto un elettrone si annulla con una lacuna.

Durante il processo di diffusione e ricombinazione, si genera un campo elettrico che quindi si oppone al moto delle cariche maggioritarie. Questo campo è causato dalla carica spaziale che si forma nelle regioni vicine alla giunzione. La carica spaziale si forma a causa dell'accumulo di cariche fisse (ionizzazioni incomplete) nelle regioni vicine alla giunzione. Gli ioni positivi restano nella regione n dove gli elettroni si sono diffusi e ioni negativi rimangono nella regione p dove le lacune si sono diffuse. Questa separazione di cariche crea una zona di svuotamento vicino alla giunzione, dove non ci sono portatori di carica liberi. Con l'aumento della carica spaziale, il campo elettrico risultante impedisce ulteriori movimenti di cariche maggioritarie. Questo blocca la diffusione e limita l'effetto di ricombinazione. Nella zona di svuotamento o nella regione vicina alla giunzione, rimangono principalmente le cariche minoritarie. Le cariche minoritarie sono in quantità molto inferiore rispetto alle cariche maggioritarie, ma sono quelle che attraversano la giunzione in modo significativo. La loro concentrazione è dell'ordine di circa 10^3 portatori di carica, molto inferiore alla concentrazione dei portatori maggioritari (che possono essere dell'ordine di 10^{17} - 10^{18} portatori di carica per centimetro cubo in materiali drogati).

A differenza di altri semiconduttori (come il silicio), il germanio ha una maggiore capacità di produrre segnali elettrici in risposta all'assorbimento di radiazioni gamma, avendo numero atomico maggiore e quindi maggiore capacità di assimilare la radiazione gamma incidente.

Confronto con il silicio: il germanio è un semiconduttore di gruppo IV nella tavola periodica (così come il silicio) ma possiede alcune caratteristiche fisiche e chimiche che lo rendono più adatto rispetto al silicio nella rilevazione di radiazioni gamma.

Innanzitutto, la prima differenza che si riscontra è la lunghezza della *band gap*, che è la distanza energetica tra la banda di valenza e la banda di conduzione. Infatti il band gap del germanio è relativamente piccolo rispetto a quello del silicio. Il valore di quello del germanio vale circa 0.66 eV a temperatura ambiente, mentre quello del silicio è 1,1 eV. Ciò implica che a temperature relativamente basse, il germanio conduce elettricità più facilmente rispetto al silicio ed è, di conseguenza, più sensibile alla generazione di cariche libere all'assorbimento di fotoni gamma. In secondo luogo, il germanio ha numero atomico 32, che lo rende denso e con maggiore probabilità di interazione e assorbimento di fotoni gamma e la conseguente produzione di cariche elettriche. Questo lo rende un materiale migliore rispetto al silicio ($Z=14$).

All'interno del cristallo di germanio sono presenti due elettrodi, l'anodo e il catodo. Questi elettrodi sono attaccati alle superfici del cristallo e sono responsabili della raccolta delle cariche elettriche generate durante l'interazione del fotone gamma con il materiale. L'applicazione di una tensione (di tipo inverso) tra questi elettrodi permette di creare un campo elettrico che facilita il movimento delle cariche libere generate dall'interazione della radiazione gamma.

sistema di raffreddamento

dato che il germanio è un materiale semiconduttore, la sua conduttività è strettamente legata alla temperatura. In una situazione di temperatura elevata, le cariche libere (elettroni e lacune) sarebbero elevate in numero compromettendo la precisione della misurazione poiché causano rumore di fondo. Infatti i rivelatori a germanio sono generalmente mantenuti a temperature criogeniche (circa 77K) con azoto liquido (in alternativa elio liquido) così da migliorare la risoluzione energetica del dispositivo.

circuito elettrico

il segnale generato dal germanio è a bassa intensità perciò necessita di un amplificatore e di un sistema di analisi per essere elaborato e convertito in un segnale comprensibile (come un picco nell'analisi spettrale → spettroscopia). I circuiti elettronici collegati al rivelatore includono amplificatori, discriminatori e analizzatori spettrali, che determinano l'energia dei fotoni gamma rilevati e producono uno spettro gamma.

sistema di acquisizione dei dati

Il sistema acquisisce e registra gli spettri energetici dei raggi gamma, che sono poi analizzati per determinare la composizione del materiale che emette la radiazione, la sua intensità, e altre caratteristiche fisiche della radiazione

Funzionamento del rivelatore

Il principio fisico di base del rivelatore a germanio intrinseco riguarda il comportamento del cristallo di germanio rispetto all'interazione con le radiazioni gamma.

1) INTERAZIONE TRA FOTONI GAMMA E ATOMI DI GERMANIO

Quando un fotone gamma interagisce con il germanio, la sua energia viene trasferita al cristallo. Il trasferimento può causare l'eccitazione di un elettrone dalla banda di valenza alla banda di conduzione, permettendo la creazione di una coppia elettrone-lacuna.

I fotoni gamma sono particelle ad altissima energia che possiedono lunghezze d'onda (λ) molto corte ma energia molto alta (da centinaia di keV fino a decine di MeV). A causa di questo dislivello, il trasferimento di energia avviene attraverso diversi meccanismi che variano non solo in base all'energia del fotone, ma anche alle caratteristiche del materiale.

- effetto fotoelettrico ($E < 100$ keV): un fotone gamma interagisce con un elettrone nella banda di valenza di un atomo di germanio, trasferendo tutta la sua energia a quest'ultimo e rimuovendolo dalla banda di valenza e causando l'espulsione dell'elettrone. L'energia del fotone gamma viene quindi assorbita dal cristallo e utilizzata per eiettare un elettrone. In pratica, l'elettrone espulso lascia una lacuna nella banda di valenza.
- scattering Compton: ($E > 100$ keV): il fotone scatena un elettrone dalla banda di valenza, ma perde solo una parte della sua energia, continuando a viaggiare in una direzione diversa. In questo caso, la parte di energia del fotone che non viene trasferita all'elettrone diventa energia cinetica del fotone disperso. Questo effetto non porta direttamente all'eccitazione di un elettrone alla banda di conduzione, ma fornisce comunque energia sufficiente per la creazione di cariche libere nel cristallo.
- produzione di coppie ($E > 1,02$ MeV): l'energia del fotone viene convertita in una coppia particella-antiparticella (un elettrone e un positrone) che interagiscono con il materiale.

Nel caso del rivelatore a germanio intrinseco l'interazione più frequente è l'effetto fotoelettrico, cioè per fotoni gamma di energia compresa fra 100keV e 1MeV perchè è l'intervallo di interesse per la maggior parte delle applicazioni scientifiche.

2) GENERAZIONE DI COPPIE ELETTRONE-LACUNA

Questo passaggio è fondamentale per la rilevazione della radiazione gamma, poiché la creazione di coppie di cariche libere permette di raccogliere il segnale misurabile che rappresenta l'energia del fotone gamma incidente.

Quando un fotone gamma interagisce con un atomo di germanio, elettrone e lacuna sono creati. La lacuna è semplicemente il posto vuoto che si crea nella banda di valenza, risultante dall'uscita dell'elettrone. La lacuna agisce come una carica positiva e si comporta in modo simile a una particella che si muove nel cristallo. Di conseguenza, la creazione di una coppia di cariche opposte (elettrone negativo e lacuna positiva) è un passaggio essenziale per l'elettrificazione del cristallo di germanio e il successivo processo di rilevamento.

Coppia elettrone-lacuna: coppia di cariche libere che si generano quando un fotone gamma trasferisce la sua energia a un elettrone nella banda di valenza del cristallo. L'energia trasferita dal fotone permette all'elettrone di "saltare" dalla banda di valenza (dove gli elettroni sono normalmente legati agli atomi) alla banda di conduzione (dove gli elettroni sono liberi di muoversi attraverso il materiale). La banda di conduzione è quella zona energetica superiore che consente agli elettroni di trasportare carica attraverso il cristallo.

Processo di generazione:

- Un fotone gamma interagisce con il cristallo di germanio e trasferisce tutta la sua energia a un elettrone nella banda di valenza.
- L'energia fornita dal fotone è sufficiente a rimuovere l'elettrone dalla banda di valenza e a spingerlo nella banda di conduzione, creando una coppia elettrone-lacuna (ogni coppia richiede circa 4 eV per essere prodotta).
- L'elettrone, una volta nella banda di conduzione, è libero di muoversi attraverso il cristallo di germanio, mentre la lacuna, pur essendo priva di elettrone, si comporta come una carica positiva e si muove nella direzione opposta all'elettrone.

- Questo processo crea due cariche libere che possono muoversi separatamente sotto l'influenza di un campo elettrico applicato (che vedremo nel passaggio successivo, quando queste cariche saranno indirizzate verso gli elettrodi).

3) SEPARAZIONE DEI PORTATORI DI CARICA

Per raccogliere i portatori di carica, si applica una differenza di potenziale attraverso il cristallo. Il cristallo di germanio collegato a due elettrodi, è sottoposto ad un intenso campo elettrico che separa gli elettroni dalle lacune, dirigendo gli elettroni verso l'elettrodo positivo e le lacune verso l'elettrodo negativo.

4) REAZIONE DEL SEGNALE ELETTRICO

Quando il campo elettrico separa gli elettroni e le lacune, si genera una corrente elettrica. La quantità di carica raccolta è proporzionale all'energia iniziale del fotone gamma. Più alta è l'energia del fotone, maggiore sarà la quantità di carica prodotta. Il segnale generato è un impulso elettrico che rappresenta l'energia del fotone gamma che ha interagito con il cristallo. Questo impulso viene poi raccolto e misurato.

5) RILEVAZIONE E ANALISI

Il segnale viene successivamente analizzato tramite un preamplificatore che lo amplifica per renderlo più facile da misurare. Un sistema di analisi spettrale (spettrometro) converte gli impulsi in un grafico (spettro) che mostra l'energia dei fotoni gamma ricevuti. La risoluzione energetica di un rivelatore HPGe è molto alta. Ciò significa che è in grado di distinguere fotoni con energie molto simili, grazie alla precisione con cui vengono misurati gli impulsi generati.

Il sistema multicanale (MCA) per l'analisi dello spettro gamma

Dopo che il rivelatore HPGe ha convertito l'energia del fotone gamma in un segnale elettrico, un analizzatore multicanale (MCA) elabora e organizza questi dati per costruire lo spettro gamma, che mostra l'intensità del segnale in funzione dell'energia.

Funzionamento dell'MCA

1. Digitalizzazione del segnale

- Il segnale amplificato viene convertito in digitale mediante un convertitore analogico-digitale (ADC), che associa a ciascun impulso un numero proporzionale all'energia depositata nel rivelatore.

2. Distribuzione in canali energetici

- Il MCA suddivide l'intero intervallo di energia in un certo numero di canali (tipicamente da 1024 a 8192), ciascuno corrispondente a una specifica energia.

3. Accumulo dello spettro

- Ogni evento viene registrato nel canale corrispondente alla sua energia, formando un istogramma che rappresenta lo spettro gamma.
- Analisi dello spettro: l'operatore analizza i picchi nello spettro per identificare i radionuclidi presenti nel campione e determinarne la concentrazione.

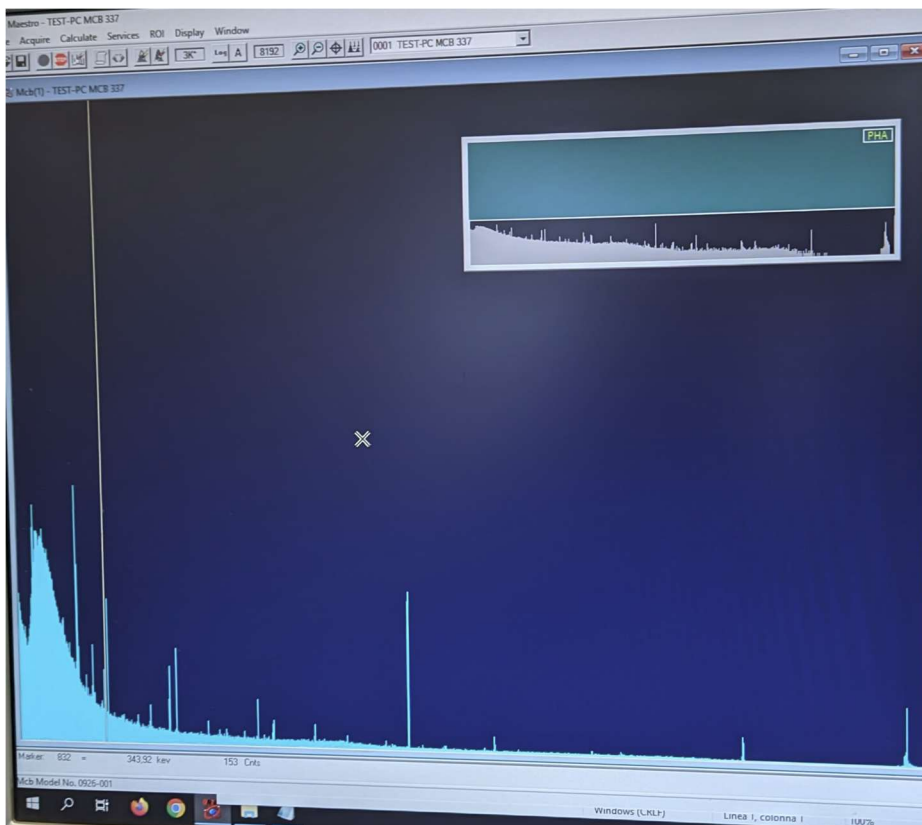


Sveglietta in prossimità del rivelatore gamma HPGe e sistema di acquisizione multicanale.

Risoluzione energetica: la risoluzione energetica rappresenta la capacità del dispositivo di discriminare tra fotoni gamma di energie differenti. Indica la precisione con cui il rivelatore è in grado di misurare l'energia dei fotoni gamma che interagiscono con il cristallo. All'aumentare della risoluzione aumenta la capacità di distinguere tra fotoni di energie vicine, mentre se la risoluzione diminuisce, si presenta una difficoltà nella distinzione fra fotoni con energie simili. Nel caso di un rivelatore a germanio intrinseco, la risoluzione energetica è influenzata da vari fattori che variano dalla qualità del cristallo stesso alle condizioni in cui opera il rivelatore.

La risoluzione energetica (R) si definisce come la larghezza alla metà dell'altezza massima (*Full Width at Half Maximum, FWHM*) di un picco nello spettro di energia. Questo picco rappresenta l'energia del singolo fotone gamma assorbito dal rivelatore. Quindi la larghezza di questo picco fornisce una misura della precisione con cui il rivelatore è in grado di misurare l'energia del fotone incidente.

FWHM → rappresenta la differenza di energia tra i due punti in cui l'intensità del picco scende al 50% rispetto al valore massimo. Un valore di FWHM più stretto indica risoluzione migliore, mentre un valore più alto indica risoluzione peggiore. Nel caso in analisi i picchi evidenziati presentano elevata risoluzione in accordo con la qualità del rivelatore utilizzato, come evidenziato in figura sotto.



Spettro di emissione gamma di un campione radioattivo in fase di acquisizione.

In fase di analisi dei dati, quindi, andranno ricercati picchi corrispondenti ai figli del radio 226:

- ^{218}Po
- ^{214}Pb
- ^{214}Bi
- ^{214}Po
- ^{210}Pb

Ed ora si inizia la ricerca del dato sul ... RADIO 226!

Raccolta analisi e discussione dei dati sperimentali

La sveglietta viene sottoposta ad analisi di spettrometria gamma.



I dati prodotti da un rivelatore al germanio intrinseco (HPGe) vengono generalmente salvati in formato **SPE** (Spectra File Format), uno standard comunemente utilizzato nei sistemi di spettroscopia gamma. Questo file contiene le informazioni relative allo spettro acquisito, tra cui il numero di conteggi registrati per ciascun canale del rivelatore. Il tracciato, convertito in file csv e importato in Excel è formattato come in figura a fianco:

Canale	Conteggi
1	360
2	366
3	309
4	341
5	289
6	373
7	307
8	286
9	285
10	291
11	299
12	271

Per ottenere informazioni significative dallo spettro acquisito, è necessario elaborare questi dati per associare a ciascun canale una corrispondente energia e individuare i picchi di emissione caratteristici delle sorgenti radioattive analizzate. Questa operazione richiede una **calibrazione energetica**, che permette di convertire i canali in valori di energia espressi in keV, e l'applicazione di algoritmi di **fitting dei picchi**, essenziali per identificare e quantificare i radionuclidi presenti nel campione.

L'analisi dei dati ottenuti consente di determinare con precisione la composizione isotopica della sorgente e valutare parametri fondamentali come l'attività e la concentrazione degli elementi radioattivi.

Per identificare l'energia di ogni canale del rivelatore al germanio intrinseco, abbiamo utilizzato il **Cobalto-60 (Co-60)**, un isotopo radioattivo che emette radiazioni gamma ad energie ben definite. Il Co-60 è una delle sorgenti più comuni per la calibrazione dei rivelatori gamma, poiché emette due fotoni gamma principali con energie caratteristiche di **1,173 MeV** e **1,332 MeV**. Queste due linee spettrali sono ben separate e di alta intensità, rendendole ideali per l'utilizzo come punti di calibrazione.

La calibrazione consiste nell'associare i canali registrati dal rivelatore, che sono numeri discreti che rappresentano le registrazioni di conteggi in specifici intervalli di energia, ai valori di energia corrispondenti delle emissioni gamma conosciute. In questo caso, le due linee spettrali principali del Co-60, con energie di **1,173 MeV** e **1,332 MeV**, vengono utilizzate per creare una **retta di calibrazione**. Questo processo consente di mappare i canali del rivelatore su valori energetici assoluti, garantendo che lo spettro acquisito rifletta correttamente l'energia dei fotoni gamma intercettati dal rivelatore.

Per ottenere una calibrazione ottimale, è fondamentale che il rivelatore sia operato in condizioni stabili e che siano ridotti al minimo gli errori legati a fattori esterni, come la temperatura e le variazioni del campo elettrico. Inoltre, la calibrazione dovrebbe essere eseguita periodicamente, poiché il rivelatore potrebbe subire modifiche nel tempo a causa di fenomeni di invecchiamento del materiale o variazioni nelle condizioni operative.

Una volta completata la calibrazione con Co-60, i canali del rivelatore vengono convertiti in unità di energia, permettendo di ottenere uno spettro energetico corretto. Questo spettro può quindi essere utilizzato per identificare con precisione i picchi di emissione gamma provenienti da altre sorgenti radioattive. Il processo di calibrazione è cruciale per garantire l'affidabilità e la precisione delle misurazioni spettroscopiche, specialmente quando si tratta di analizzare sorgenti sconosciute o deboli.

Calibrazione del rivelatore

Dall'analisi del file .spe in Excel del ^{60}Co emerge la seguente sequenza canale/conteggi. Il rivelatore multi canale ha circa 10.000 canali.

numero canale	conteggi
1	651
2	646
3	622
4	623
5	602
6	590
7	634
8	630
9	590

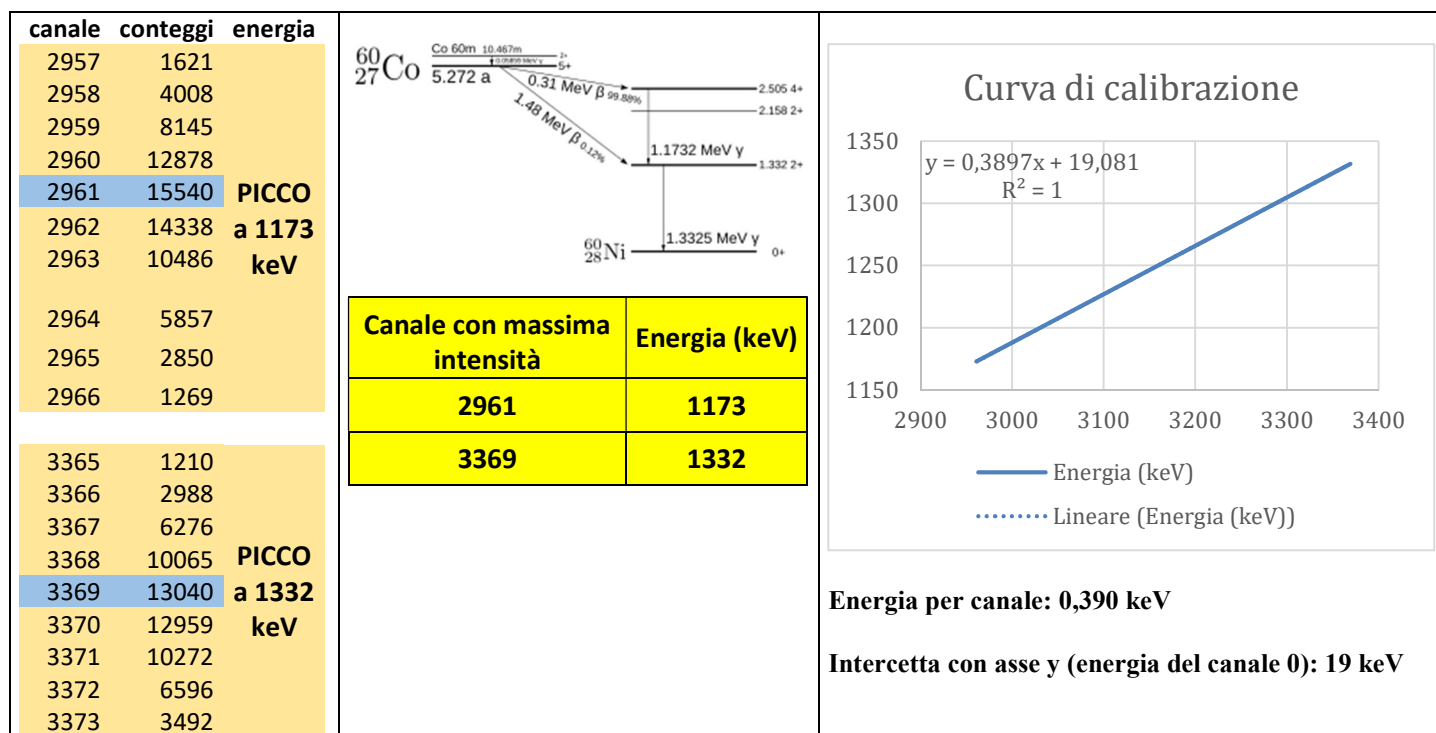
(tabella con canali del ^{60}Co)

Per associare ad ogni canale l'energia caratteristica si procede con la ricerca all'interno del file dei canali con un numero di conteggi superiore di almeno un ordine di grandezza al fondo di radiazione gamma.

Si associano quindi tali conteggi all'energia dei picchi di emissione del cobalto 60 (**1173 keV e 1332 keV**). Si riporta soltanto la parte che evidenzia tali picchi di emissione del cobalto. Dal numero del canale relativo al picco (si tratta di una sequenza di alcuni canali consecutivi in considerazione della estensione del picco, come riportato nel capitolo relativo all'analisi del FWHM del rivelatore) si procede associando al canale con il numero massimo di conteggi, l'energia caratteristica di emissione; si crea quindi la curva di calibrazione interpolando linearmente i valori canale/energia; dall'equazione di tale retta si associa infine ad ogni canale l'energia relativa.

La relazione tra l'energia E e il numero di canale C è generalmente descritta da un'equazione di tipo **lineare**: $E(C)=a\cdot C+b$, in cui a è il coefficiente di scala (energia per canale) e b è l'intercetta ovvero l'energia associata al canale 0.

Nella tabella seguente si riportano i canali con i conteggi massimi; si associa quindi ad essi l'energia dei due picchi del cobalto 60 a 1173 keV e 1332 keV. Infine si crea la retta di calibrazione. **Dalla sua equazione si deduce l'energia per canale, pari a 0,390 keV e l'intercetta con l'asse y, pari a 19 keV, che andrà sommata a tutti i canali per ottenere la tabella energia/conteggi.**



Analisi dati emissione gamma della sveglia

La calibrazione del rivelatore sopra effettuata permette ora di studiare lo spettro di emissione della sveglia, associando ad ogni canale consecutivo la sua energia e avendo così la corretta relazione tra canale/energia/conteggi; il sistema multicanale di acquisizione, a fronte di una misurazione di circa 10 minuti sulla sveglia, genera un file di output in formato .spe, con la sequenza dei conteggi, canale per canale. Abbiamo quindi convertito il file in formato .csv importandolo in Excel per l'elaborazione. I canali sono stati numerati in modo consecutivo, ottenendo la struttura a fianco di cui si riportano le prime righe. In ogni riga abbiamo quindi inserito il valore dell'energia del canale grazie alla formula di calibrazione: $E(\text{canale})=0,390\text{keV} \cdot (\text{numero del canale}) + 19 \text{ keV}$.

	A	B	C
1	Energia (keV)	Canale	Conteggi
2	=0,39*B2+19	1	360

Energia (keV)	Canale	Conteggi
19,39	1	360
19,78	2	366
20,17	3	309
20,56	4	341
20,95	5	289
21,34	6	373
21,73	7	307
22,12	8	286
22,51	9	285
22,9	10	291
23,29	11	299
23,68	12	271
24,07	13	288
24,46	14	291
24,85	15	289
25,24	16	294
25,63	17	297
26,02	18	259
26,41	19	274
26,8	20	277

(tabella con canali della sveglia)

Dallo studio meticoloso delle righe di emissione su Excel, abbiamo isolato i canali con il numero di conteggi più elevato, evidenziando, uno ad uno, i picchi di caratteristici del radio 226; se ne riportano le relative porzioni di dati, su un totale di circa 10.000 righe. Abbiamo analizzato le singole energie dei canali consecutivi che riportassero un numero di conteggi di almeno un ordine di grandezza superiori al fondo (ordine di grandezza di 10^3 conteggi, con un fondo dell'ordine di 10^2 conteggi). Tali righe sono state quindi confrontate con le energie della emissione gamma del ^{226}Ra e dei suoi figli di decadimento, individuando i singoli picchi caratteristici come segue:

Energia	Canale	Conteggi	Ref RADIO 226
185,53	427	213	
185,92	428	251	
186,31	429	393	
186,7	430	1007	Picco GAMMA a 186 keV
187,09	431	1941	Picco GAMMA a 186 keV
187,48	432	1764	Picco GAMMA a 186 keV
187,87	433	831	
188,26	434	285	
188,65	435	238	

Energia	Canale	Conteggi	Ref RADIO 226
241,3	570	132	
241,69	571	176	
242,08	572	316	
242,47	573	872	Picco GAMMA a 242 keV
242,86	574	1437	Picco GAMMA a 242 keV
243,25	575	1172	Picco GAMMA a 242 keV
243,64	576	515	
244,03	577	188	
244,42	578	150	

Energia	Canale	Conteggi	Ref RADIO 226
294,34	706	95	
294,73	707	140	
295,12	708	290	
295,51	709	1140	Picco GAMMA a 295 keV
295,9	710	2536	Picco GAMMA a 295 keV
296,29	711	2696	Picco GAMMA a 295 keV
296,68	712	1446	Picco GAMMA a 295 keV
297,07	713	426	
297,46	714	133	
297,85	715	80	

Energia	Canale	Conteggi	Ref RADIO 226
350,89	851	78	
351,28	852	102	
351,67	853	304	
352,06	854	1257	Picco GAMMA a 352 keV
352,45	855	3298	Picco GAMMA a 352 keV
352,84	856	4291	Picco GAMMA a 352 keV
353,23	857	2938	Picco GAMMA a 352 keV
353,62	858	1018	Picco GAMMA a 352 keV
354,01	859	246	
354,4	860	99	
354,79	861	66	

Energia	Canale	Conteggi	Ref RADIO 226
608,29	1511	62	
608,68	1512	171	
609,07	1513	579	
609,46	1514	1557	Picco GAMMA a 609 keV
609,85	1515	2343	Picco GAMMA a 609 keV
610,24	1516	2142	Picco GAMMA a 609 keV
610,63	1517	1329	Picco GAMMA a 609 keV
611,02	1518	466	
611,41	1519	133	
611.8	1520	53	

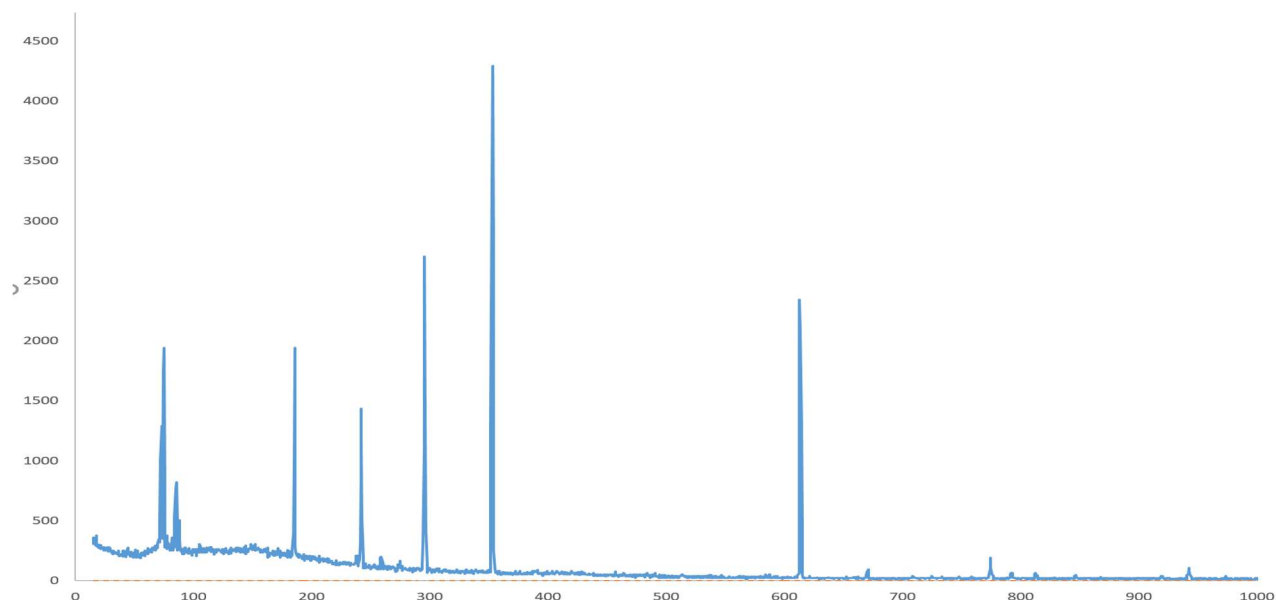
Dalle tabelle riportate si evidenziano chiaramente i seguenti picchi di emissione γ riconducibili al Radio 226, che vengono rappresentati tramite Excel in un grafico a dispersione x/y, con l'energia in keV sull'asse x e il numero di conteggi sull'asse y.

Picchi di emissione gamma in keV:

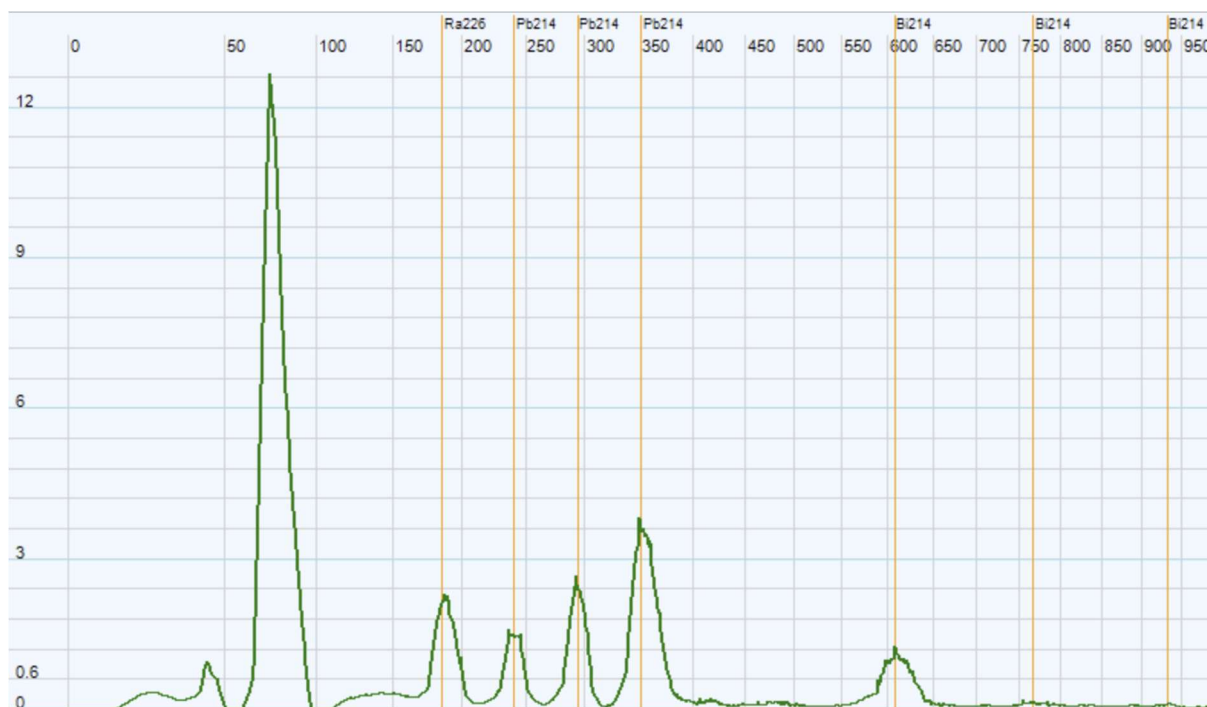
186 keV (^{226}Ra); 242 keV (^{214}Pb); 295 keV (^{214}Pb);

352 keV (^{214}Pb); 609 keV (^{214}Bi)

Grafico conteggi/energia



Per confermare tale andamento abbiamo fatto una ricerca approfondita degli spettri caratteristici del radio 226, ricavando dalla letteratura i seguenti spettri di emissione, che vengono quindi confrontati con il nostro spettro ottenuto da Excel, in base ai dati sopra riportati.



SPETTRO GAMMA DEL RADIO 226 e livelli peculiari di energia.



Abbiamo discusso approfonditamente sulla presenza del picco a 50 keV che non fa parte delle righe di emissione del Radio. Le ricerche effettuate sui testi scientifici citati in bibliografia, ci hanno permesso di concludere che il picco a 50 keV che compare nello spettro di un campione è generalmente dovuto alla presenza di **contaminazioni o interazioni con altre sorgenti radioattive**, o anche a fenomeni come la **fluorescenza X**.

Il Ra-226, in particolare, è un isotopo radioattivo della serie del **Uranio-238**, che emette principalmente radiazioni alfa e beta, ma può anche generare fotoni gamma tramite processi di decadimento. Tuttavia, il picco a 50 keV non è una delle emissioni tipiche di Ra-226. Ecco alcune possibili cause per cui può apparire questo picco:

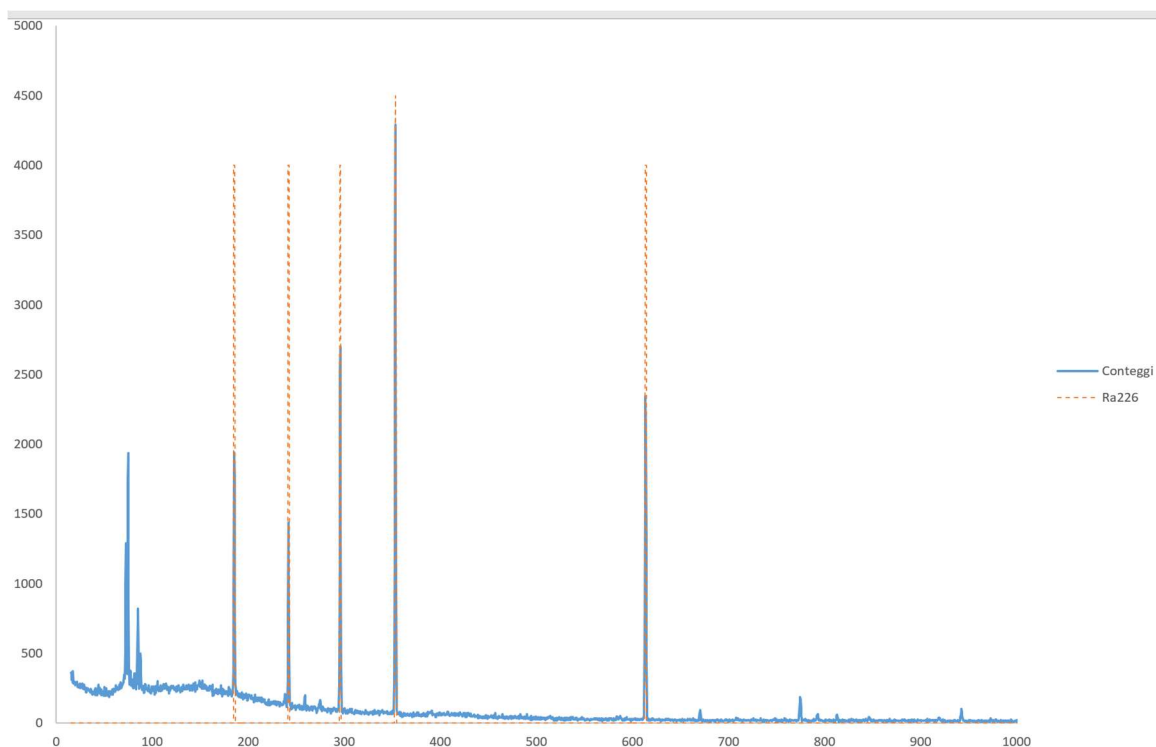
1. **Emissività di radiazioni secondarie (fluorescenza X):** Quando un fotone ad alta energia colpisce un atomo di un materiale circostante, può essere innescata una fluorescenza X, dove gli elettroni degli atomi vengono spostati dai loro orbitali, e quando tornano al livello energetico precedente, emettono fotoni X. Se i fotoni di alta energia (come quelli emessi da Ra-226 o da un altro radionuclide) interagiscono con materiali contenenti **piombo (Pb)** o **zinco (Zn)**, si potrebbero generare fotoni X a circa 50 keV, che corrispondono a un livello energetico tipico per il **piombo**.
2. **Interazione con il materiale del rivelatore:** Se il rivelatore è influenzato da materiali circostanti o da contaminazioni da altre sorgenti, è possibile che si generino fotoni a basse energie, come quello a 50 keV. Ad esempio, un effetto di

fluorescenza o altre interazioni con i materiali del rivelatore (come il boro o l'alluminio) potrebbe produrre un picco a questa energia.

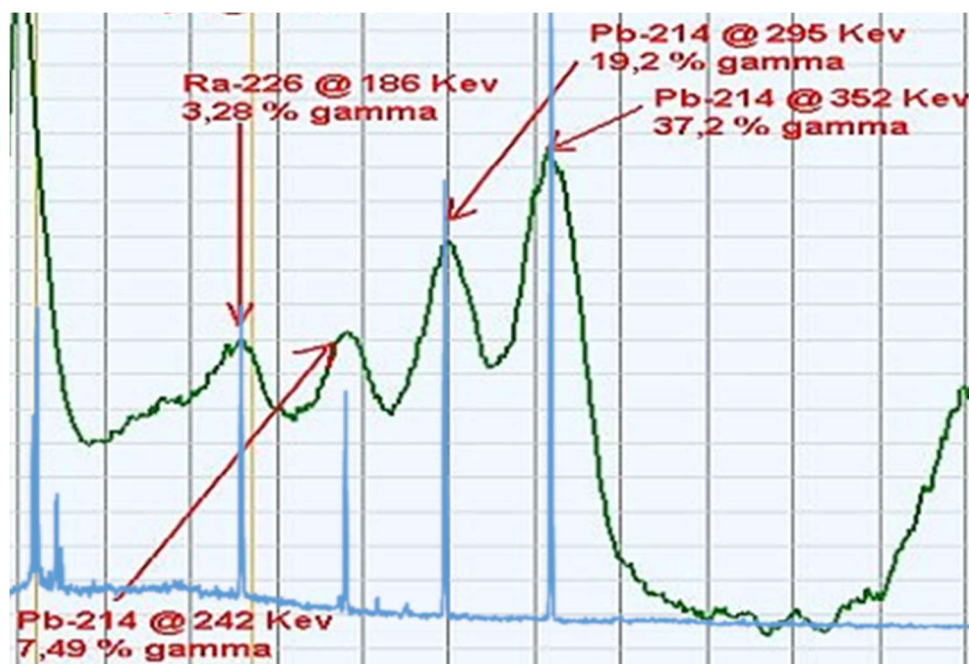
3. **Contaminazioni radioattive:** Se nel campione o nell'ambiente circostante sono presenti altre sorgenti radioattive, ad esempio **K-40** (Potassio-40) o **Ra-228** (che può essere presente come contaminazione nel Ra-226), potrebbero esserci emissioni gamma a basse energie che causano l'apparizione di un picco a 50 keV.
4. **Effetti di attenuazione e scattering:** In alcuni casi, i fotoni gamma emessi da Ra-226 possono interagire con l'ambiente circostante (ad esempio, attraverso fenomeni di **scattering Compton**), perdendo energia e creando picchi a basse energie come quello a 50 keV.

In sintesi, il picco a 50 keV nello spettro di Ra-226 è più probabile che sia dovuto a fenomeni di **fluorescenza X** o **scattering** innescati dalle interazioni tra i fotoni gamma emessi dal Ra-226 e i materiali circostanti. La sua identificazione e caratterizzazione richiede una calibrazione accurata e una comprensione del sistema di rilevamento e delle possibili contaminazioni nel campione.

Pertanto sovrapponendo tali picchi di energia caratteristici del radio 226 (in rosso tratteggiato) al nostro campione analizzato (in blu), si ottiene quanto segue:



Ulteriore conferma si ha sovrapponendo i picchi delle immagini presenti in letteratura con la nostra ricavata in Excel (linee blu):



Analisi degli errori sperimentali

Per quantificare gli errori associati alla misura dei picchi nel contesto di una spettrometria gamma, dobbiamo considerare diversi tipi di incertezze che possono influire sul risultato. L'errore totale in genere dipende dalla combinazione di vari fattori che analizziamo in dettaglio.

1. Errore di calibrazione dello strumento:

L'errore di calibrazione dello strumento dipende dalla precisione con cui lo spettrometro gamma è stato calibrato. Se la calibrazione non è perfetta, il picco potrebbe essere spostato in energia di un certo valore. Tipicamente, l'errore di calibrazione è lo 0,1% dell'energia del picco.

2. Errore dovuto alla risoluzione dell'analizzatore (effetto di risoluzione strumentale)

Una risoluzione comune per uno spettrometro gamma è dell'1-2% dell'energia del picco.

3. Errore statistico (fluttuazioni nei conteggi)

L'errore statistico si verifica a causa della natura casuale del rilevamento delle particelle. In pratica, questo errore è associato alla distribuzione di Poisson dei conteggi di radiazione. Il numero di conteggi raccolti in un determinato intervallo di energia determina la precisione della misura. L'errore statistico è proporzionale alla radice quadrata del numero di conteggi (N).

Errore totale:

Per ottenere l'errore totale, possiamo sommare quadraticamente gli errori sistematici e statistici (presupponendo che siano indipendenti). Questo è valido se gli errori non sono correlati. La somma dei quadrati (e la radice quadrata del risultato) è usata per calcolare l'errore totale quando gli errori sono indipendenti e casuali, perché ogni errore contribuisce in modo quadratico alla varianza totale.

L'errore totale associato alla misura dei picchi del radio 226 è per ogni picco dell'ordine di grandezza di ± 10 keV. Questo errore deriva principalmente dall'incertezza statistica (fluttuazioni nei conteggi) e dai piccoli errori di calibrazione e risoluzione dello strumento. La prima colonna in tabella riporta le energie rilevate sperimentalmente; l'ultima colonna le energie attese, come presenti in letteratura, secondo le ricerche sitografiche e bibliografiche. L'accordo tra i risultati ottenuti e quelli attesi è di ottimo livello e pienamente rispondente agli errori riportati in tabella.

Energia rilevata (keV)	Canale centrale	Conteggi	Errore di calibrazione in keV	Errore di risoluzione strumentale in keV	Errore statistico (fluttuazione conteggi) keV	ERRORE TOTALE (keV)	Energia attesa per i picchi (keV)
187	431	1941	2	2	4	5	186
243	574	1437	2	2	6	7	242
296	711	2696	3	3	6	7	295
353	856	4291	4	4	5	7	352
610	1515	2343	6	6	13	15	609

Conclusioni

Il percorso di ricerca che abbiamo effettuato ha avuto inizio da una sveglietta scoperta per caso in un vecchio baule.

Da quel momento è iniziata una attività di gruppo intensa, condivisa, entusiasmante, che ci ha portato a scoprire le cause dell'emissione di luce, fino alla individuazione del fenomeno della radioluminescenza.

L'analisi dei dati ricavati tramite rivelatore al Germanio intrinseco HPGe ha confermato le ipotesi iniziali e ci ha permesso di avvalorare la tesi tramite il metodo scientifico: dalla formulazione dell'ipotesi alla sua conferma sperimentale con i dati scientifici ricavati ed elaborati.

I grafici ricavati sui picchi di emissione del radio 226 presentano una corrispondenza decisamente molto buona con quanto presente in letteratura scientifica.

La nostra sveglietta emette i gamma caratteristici del Radio 226 e ciò conferma la nostra ipotesi.

La luminescenza è dovuta proprio alla presenza di Radio 226 nel quadrante e nelle lancette.

Tre indizi fanno una prova. Nel nostro caso gli indizi sono addirittura 5!

Ovvero i 5 picchi in piena corrispondenza tra Radio 226 della sveglietta e picchi presenti in letteratura per il medesimo elemento:

- 186 KeV : 3.6 % (226Ra)
- 242 KeV: 7,49% (214Pb)
- 295 KeV : 18.4 % (214Pb)
- 352 KeV : 35.6 % (214Pb)
- 609 KeV : 45.5 % (214Bi)

Il dato come indizio. La scienza conferma che la sveglietta contiene radio 226 e quindi è radioluminescente.

Le possibili applicazioni del nostro lavoro e del metodo di ricerca utilizzato, possono spaziare dall'analisi dell'emissione di oggetti luminescenti comprati o rinvenuti, di cui non si conosca la provenienza, fino all'analisi dei materiali da costruzione per valutarne la radioattività, la sicurezza e il possibile contenuto di Uranio o dei suoi figli di decadimento.

Il rivelatore al Germanio intrinseco può essere in grado infatti di mettere in luce la presenza di radio in materiali di uso comune, quali il tufo o le piastrelle ceramiche. Alcune piastrelle in particolare, nel passato venivano smaltate utilizzando come coloranti sali di uranio che erano in grado di fornire anche colorazioni caratteristiche (giallo e verde brillante) e colori vividi, nonché ... l'emissione di luce fluorescente.

La fantascienza diventa scienza se si sa interpretare il dato.

Come sostiene il fisico statunitense Brian Greene: "La scienza non è solo per gli scienziati, è per tutti. La scienza è il modo in cui comprendiamo l'universo."

Sitografia e Bibliografia

<https://physicsopenlab.org/2019/04/08/hpge-gamma-ray-spectroscopy/>

[https://physicsopenlab.org/2016/02/02/spettrometria-gamma-di-radioisotopi/#:~:text=Radio%20\(226Ra\)&text=Di%20colore%20bianco%2C%20annerisce%20per,anni%20e%20decade%20in%20radon.](https://physicsopenlab.org/2016/02/02/spettrometria-gamma-di-radioisotopi/#:~:text=Radio%20(226Ra)&text=Di%20colore%20bianco%2C%20annerisce%20per,anni%20e%20decade%20in%20radon.)

<http://www.lnhb.fr/Laraweb/index.php>

<https://www.radongas.eu/schede-tecniche/u-238/>

<https://physicsopenlab.org/2017/06/30/gamma-activity-measures/>

https://uotechnology.edu.iq/appsciences/filesPDF/material/lectures/2c/3-Materials_prperties6.pdf

<http://www.lnhb.fr/Laraweb/index.php>

<https://hep.ph.liv.ac.uk/~gcasse/Phys389/PHYS389-lecture13.pdf>

"Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry" di Herman Cember

"Gamma-Ray Spectrometry in the Environment" di E. B. V. Godwin

National Nuclear Data Center (NNDC) (<https://www.nndc.bnl.gov>)