

## **IMPIEGO DI UN SISTEMA SPETTROMETRICO GAMMA PORTATILE BASATO SU UNO SCINTILLATORE $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$**

P. Buffa, S. Rizzo, E. Tomarchio<sup>1</sup>

*Dipartimento di Ingegneria Nucleare – Università degli Studi di Palermo  
Viale delle Scienze – Parco d'Orleans – Edificio 6 – 90128 PALERMO (Italy)*

### **INTRODUZIONE**

I rivelatori a scintillazione sono ancora molto impiegati in spettrometria gamma e sono ritenuti preziosi strumenti di indagine nella ricerca scientifica, nella diagnostica medico-nucleare, nel monitoraggio di radioattività ambientale, nella rivelazione di sorgenti disperse in rottami metallici e in molti altri campi di applicazione. Gli scintillatori offrono il vantaggio di poter essere impiegati a temperatura ambiente e sono prevalentemente utilizzati in quelle applicazioni in cui è importante la portabilità e la versatilità della strumentazione. Negli anni trascorsi dalla loro introduzione diversi tipi di scintillatori sono stati studiati e realizzati, ciascuno con proprietà adatte per determinate tipologie di misurazioni, come ad es. per la realizzazione di sistemi di rivelazione scintigrafica nei moderni impianti di diagnostica medico-nucleare. La recente introduzione dello scintillatore a bromuro di lantanio attivato con Cerio, in diverse percentuali,  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ , ha suscitato un particolare interesse per la sua risoluzione energetica decisamente migliore (<3% a 662 keV) di quella di un tradizionale scintillatore  $\text{NaI}(\text{Tl})$ , anche se ancora decisamente non comparabile con quella dei rivelatori a Ge. Alla buona risoluzione energetica si associano inoltre altre caratteristiche, quali l'elevata efficienza di conteggio, una elevata resa di scintillazione e un breve tempo di risposta, alta stabilità termica, chimica e meccanica, etc. che rendono questo strumento quasi un rivelatore ideale. Sfortunatamente, presenta un notevole fondo intrinseco dovuto alla radioattività dei costituenti, che ne limita significativamente le possibilità di impiego in determinati range di energia.

Le caratteristiche di questa tipologia di rivelatori sono state ampiamente studiate in [1-5] e applicazioni nel campo della fisica nucleare e delle alte energie [6], in procedure di diagnostica medica [7-8], nel campo delle salvaguardie nucleari [9-11], nel riconoscimento di isotopi in vari campioni [12], nella caratterizzazione di rifiuti radioattivi [13] sono state già prese in esame. In questo lavoro, dopo aver predisposto un sistema spettrometrico gamma portatile basato su uno scintillatore  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  BrilLianCe™-380 della Saint-Gobain®, associato a una interfaccia USB-Multicanale (1024 canali) Digibase™ della ORTEC®, sono state valutate le possibilità di impiego e la sua versatilità effettuando diverse misure spettrometriche gamma.

### **MATERIALI E METODI**

Il rivelatore preso in considerazione per questo studio è un cristallo  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ , fornito da Saint-Gobain™, tipo BrilLanCe-380 [14], dimensioni  $\varnothing 2'' \times 2''$ , accoppiato direttamente a un fotomoltiplicatore PMT Photonis XP5500. Lo scintillatore, il fotomoltiplicatore e lo schermo magnetico sono ermeticamente sigillati in un contenitore di alluminio per evitare problemi di igroscopicità. Nella Tabella 1 sono poste a confronto alcune delle caratteristiche dello scintillatore  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  con quelle di altri scintillatori, scelti tra quelli maggiormente impiegati. L'esame dei dati consente di individuare immediatamente le proprietà che rendono questo rivelatore particolarmente adatto per determinati campi di applicazioni. Tra queste è rimarchevole la ridotta risoluzione energetica, ma altrettanto degne di nota sono l'elevata resa luminosa, la densità e il brevissimo tempo di risposta, che consente di effettuare misure con elevate frequenze di conteggio senza particolari problemi correlati al tempo morto o a fenomeni di pile-up.

---

<sup>1</sup> E-mail:tomarchio@din.unipa.it

Scintillatore Parametro	BrilLanCe® 380 <sup>1</sup> [14]	BrilLanCe® 350 <sup>2</sup> [15]	NaI(Tl)	BGO <sup>3</sup>	LSO <sup>4</sup>	GSO <sup>5</sup>	BaF <sub>2</sub>	YAP <sup>6</sup>
Densità (g/cm <sup>3</sup> )	5,29	3,85	3,67	7,1	7,4	6,7	4,88	5,37
Tempo di risposta (ns)	26	28	230	300	47	56/ 400 <sup>7</sup>	0,6/ 630 <sup>7</sup>	25
Resa luminosa (fotoni/MeV)	63000	49000	38000	8200	25000	9000	1400/ 9500 <sup>7</sup>	10000
Risoluzione energetica (% @ 662 keV)	<3	<4	7	~10,2	~10	9	~9	~5
Lunghezza d'onda di emissione (nm)	380	350	415	480	420	440	310/ 220 <sup>7</sup>	370
Igroscopticità	Si	Si	Si	No	No	No	Modesta	No

<sup>1</sup> LaBr<sub>3</sub>(Ce); <sup>2</sup> LaCl<sub>3</sub>(Ce); <sup>3</sup> Bi<sub>4</sub>Ge<sub>3</sub>O<sub>12</sub>; <sup>4</sup> Lu<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>(Ce); <sup>5</sup> Gd<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>(Ce); <sup>6</sup> YAlO<sub>3</sub>; <sup>7</sup> Componente veloce e lenta. Molti dati sono tratti da [16] e [17], riferimenti indicati anche per confronti con altri scintillatori.

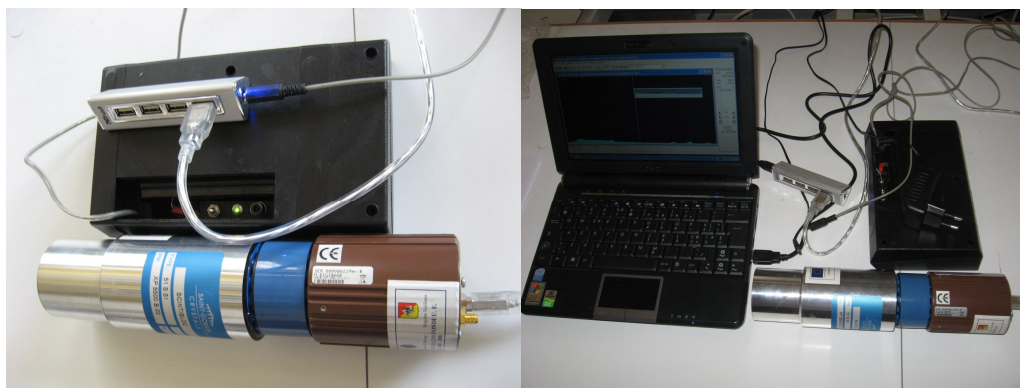
**Tabella 1.** Confronto delle principali caratteristiche dei rivelatori a scintillazione maggiormente impiegati.

Per rendere il sistema portatile l'uscita del rivelatore è direttamente connessa con un sistema multicanale portatile a 1024 canali della ORTEC® mod. Digibase™ con connessione USB, già configurato per l'alimentazione del partitore di tensione e per l'elaborazione degli impulsi in uscita dal sistema. Per l'introduzione dei parametri di misura e per la selezione di quelli del multicanale, viene associato al sistema un pocket computer ASUS EEEPC 1000 H, ottimizzato nelle prestazioni con implementazione della RAM a 2GB e batterie a litio ad alta capacità (durata complessiva circa 6 h). La conservazione e l'analisi dei dati spettrometrici viene effettuata tramite un programma di simulazione MCA ORTEC Maestro™ per ambiente Windows™ e alcune analisi sono state effettuate mediante l'uso del software specifico ORTEC Scinti-Vision™ versione 2.0 [18]. Per rivelazioni in campo, dopo avere impostato i parametri della misura (alta tensione, amplificazione, tempo di misura, etc), il collegamento USB con il computer può essere disconnesso in quanto il rivelatore resta comunque alimentato, tramite un HUB USB, da batterie ricaricabili al piombo sigillate (con tempi di misura compresi tra 24 e 30 ore). Per misure di più lunga durata, la strumentazione può essere alimentata e le batterie ricaricate tramite adatti pannelli fotovoltaici. Questa soluzione rende indipendente l'alimentazione del dispositivo dalla capacità dei moderni computer portatili il cui collegamento è necessario solo durante la fase di preparazione, inizio del conteggio, fine del conteggio e conservazione dei dati. Nella Fig. 1 sono riportate fotografie del sistema nella sua configurazione minima, con alimentazione da batterie ricaricabili, o con la connessione a computer.

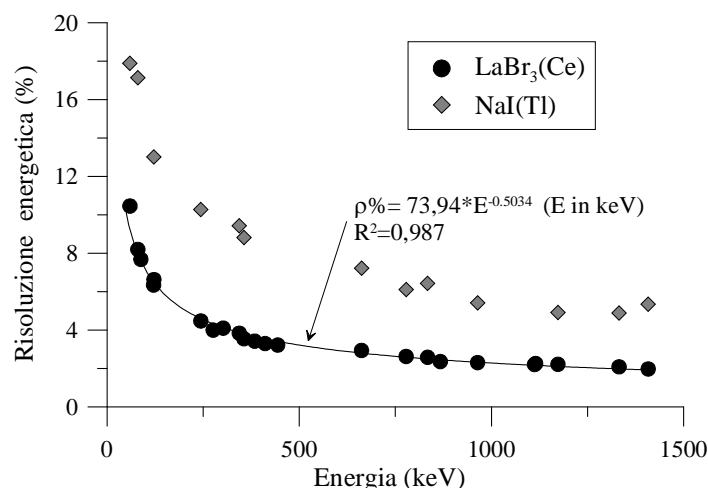
La risposta del sistema è stata confrontata con quella di un tipico scintillatore NaI(Tl), di dimensioni Ø3"×3", fornito dalla Tennelec® e accoppiato tramite una base ORTEC mod. 276L a un sistema multicanale trasportabile ORTEC Nomad Plus. La determinazione sperimentale delle principali caratteristiche del sistema spettrometrico è stata effettuata con l'ausilio di sorgenti puntiformi calibrate di <sup>241</sup>Am, <sup>109</sup>Cd, <sup>57</sup>Co, <sup>133</sup>Ba, <sup>152</sup>Eu, <sup>137</sup>Cs, <sup>54</sup>Mn, <sup>65</sup>Zn, <sup>60</sup>Co fornite da CEA e Amersham, oltre a misure di alcune sorgenti volumetriche. La scelta dei tempi di conteggio ha consentito di ottenere incertezze statistiche delle misurazioni inferiori al 3% (1σ).

Un primo confronto ha riguardato la risoluzione energetica. In Fig. 2 sono riportati, per alcune delle emissioni gamma delle sorgenti puntiformi standard prima elencate, i valori della risoluzione energetica (in % a 662 keV), posti a confronto con alcuni valori relativi allo scintillatore NaI(Tl). La conversione tra il valore di FWHM (Full Width at Half Maximum) in canali e la FWHM in keV è stata realizzata con una calibrazione in energia di tipo quadratico. Il fit dei dati, rappresentato da una legge di potenza con un esponente di circa 0,5, conferma che l'incertezza della risposta è

essenzialmente caratterizzata da rumore statistico. L'efficienza relativa del rivelatore è stata valutata pari a circa il 36% misurando a 25 cm una sorgente puntiforme di  $^{60}\text{Co}$  e confrontando la risposta con quella di uno scintillatore NaI(Tl) di dimensioni  $\varnothing 3'' \times 3''$ . Tale valore è, a parità del volume del cristallo, superiore rispetto al corrispondente valore di un rivelatore a Ge.

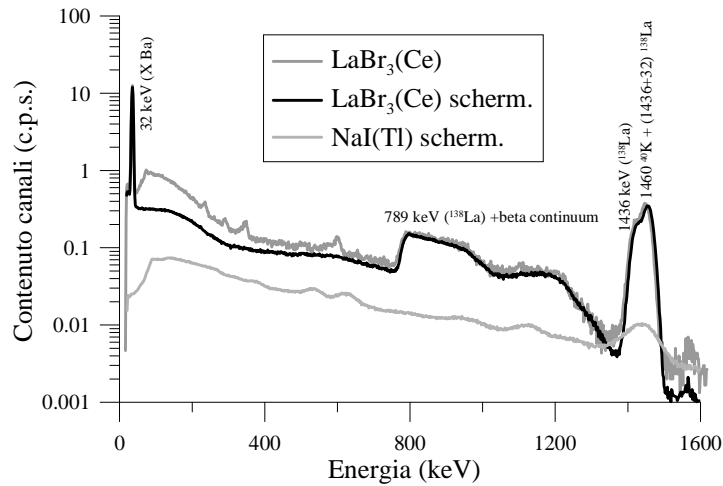


**Fig. 1.** Fotografie del sistema di misura nella sua configurazione minima con batterie ricaricabili o con connessione a un pocket computer.

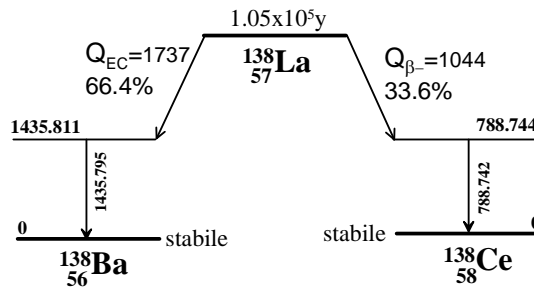


**Fig. 2.** Confronto tra i valori della risoluzione energetica in % all'energia 662 keV del  $^{137}\text{Cs}$  per i rivelatori  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  e  $\text{NaI}(\text{Tl})$ .

Un aspetto negativo nell'uso di tale rivelatore è rappresentato dall'elevato fondo intrinseco correlato ai nuclidi radioattivi degli elementi costituenti il cristallo. In Fig. 3 sono riportati gli andamenti degli spettri di fondo rilevati con lo scintillatore  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ , non schermato o posto all'interno di un pozzetto di piombo di 2 cm di spessore, posti a confronto con quello di uno scintillatore NaI(Tl) posizionato all'interno della stessa schermatura adottata per ridurre il fondo ambientale. Si notano valori abbastanza elevati della frequenza di conteggio per il  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  che, per valori di energia più elevati, risultano poco influenzati dalla presenza o meno dello schermo. Le principali manifestazioni dello spettro sono facilmente identificabili con riferimento allo schema di decadimento di Fig. 4. Infatti, oltre un picco significativo intorno a 32 keV (correlato alle emissioni X del Ba), è individuabile un largo multipletto tra 1430 e 1470 keV, da attribuire all'emissione fotonica a 1436 keV del  $^{138}\text{La}$  (decadimento EC) e alla coincidenza della stessa emissione con quella X del Bario a 32 keV. Questo picco è particolarmente significativo perché, non essendo risolvibile dal fotopicco a 1460 keV attribuibile a  $^{40}\text{K}$ , presente in molte misure di campioni ambientali, compromette in qualche modo l'impiego dello strumento per la misura di composti potassici.



**Fig. 3.** Confronto degli andamenti degli spettri gamma di fondo per il rivelatore  $LaBr_3(Ce)$ , senza alcuna schermatura e con schermatura di piombo di spessore 2 cm, e  $NaI(Tl)$  all'interno dello stesso schermo .



**Fig. 4.** Schema di decadimento del  $^{138}La$ .

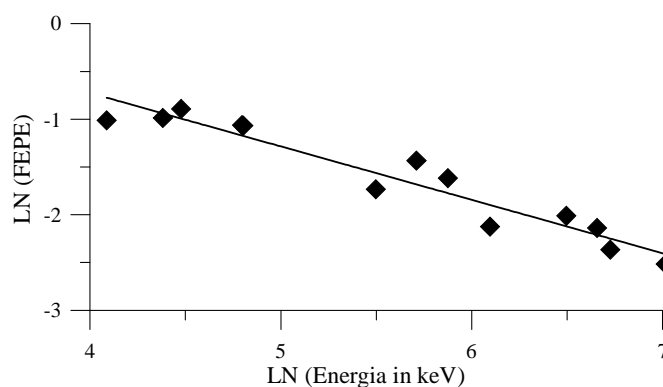
Pur non desiderabili, queste caratteristiche del fondo intrinseco dello strumento possono risultare comunque utili qualora si volesse stabilizzare lo spettro, nei dispositivi che lo consentono, utilizzando il picco a 32 keV come “zero” e il picco a 1436-1468 keV come “gain”. Nel range di energia 750-1000 keV si evidenzia inoltre una distribuzione larga corrispondente alla riga gamma di 789 keV del  $^{138}La$  (decadimento  $\beta^-$ ), la cui emissione viene spesso rivelata in coincidenza con le particelle beta. Per completezza, si vuole far notare che nel range energetico 1850 - 3000 keV, non evidenziato in Fig. 3, risultano evidenti diverse manifestazioni da attribuire ad  $^{227}Ac$ [19] che possono rendere problematiche l'individuazione dei picchi a più elevata energia, come ad es. quello a energia 2614 keV del  $^{208}Tl$ , radionuclide prodotto di decadimento del  $^{232}Th$ .

Per valutare le possibilità di impiego dello strumento, nella sua configurazione non schermata, si è voluto valutare la sensibilità dello strumento calcolando i limiti di rivelazione per alcuni comuni radioisotopi, in termini di Minima Attività Rivelabile (*Minimun Detectable Activity* – MDA). La geometria di misura di riferimento è stata assunta quella relativa a sorgenti puntiformi poste a contatto con il rivelatore. In tal modo la valutazione delle prestazioni del sistema spettrometrico corrisponde alla massima possibile, pur non essendo strettamente applicabile a misurazioni di altri tipi di campioni o a misure effettuate a distanze diverse da quella presa in considerazione.

Una rapida analisi dei dati riportati in Tabella 2 ci fa osservare che i valori di MDA sono comunque inferiori rispetto ad analoghe valutazioni effettuate con lo scintillatore  $NaI(Tl)$  ma risultano circa 5 volte superiori rispetto a determinazioni con rivelatori a Ge di pari volume. Questa conclusione è diretta conseguenza della valutazione delle efficienze puntiformi, il cui andamento è riportato in Fig. 5, che risultano prossime a quelle dello scintillatore  $NaI(Tl)$ , e della migliore risoluzione energetica nel range di energie considerato.

Radioisotopo	Energia (keV)	Intensità (%)	MDA ( per Tc=3600s) (Bq)	MDA (per Tc=80000s) (Bq)
<sup>7</sup> Be	477,5	10,5	7,5	1,6
<sup>51</sup> Cr	320,1	9,92	7,4	1,6
<sup>57</sup> Co	122,7	85,6	0,9	0,2
<sup>60</sup> Co	1173,2	99,97	1,1	0,2
	1332,5	99,99	0,5	0,1
<sup>99</sup> Mo	181,1	5,99	14,2	3,0
	739,5	12,13	6,8	1,5
<sup>103</sup> Ru	497,0	91	0,9	0,2
<sup>131</sup> I	364,4	81,7	0,9	0,2
<sup>137</sup> Cs	661,6	85,1	1,1	0,2

**Tabella 2.** Valutazione dei valori della Minima Attività rivelabile (MDA) con rivelatore LaBr<sub>3</sub>(Ce) non schermato e sorgenti puntiformi posti a contatto con il rivelatore.



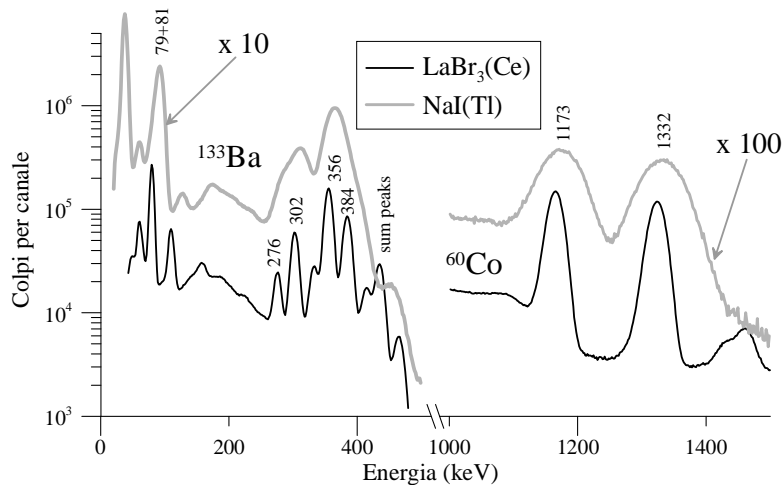
**Fig. 5.** Efficienze fotoelettriche per sorgenti puntiformi poste a contatto con il rivelatore LaBr<sub>3</sub>(Ce) e fit lineare.

Le proprietà del LaBr<sub>3</sub>(Ce) non cambiano sostanzialmente al variare della temperatura di impiego, parametro la cui variazione risulta significativa per altri tipi di scintillatori. Come riportato in [20] si è notata una variazione dell'emissione luminosa di 0,01%/°C in un largo range di temperatura, comunque inferiore alla variazione correlata ai componenti del fotomoltiplicatore. La linearità di risposta con la frequenza di conteggio, elemento molto sensibile con altra strumentazione, è evidente fino a circa 10<sup>6</sup> colpi per secondo, con una leggera perdita di conteggio tra 1 e 2×10<sup>6</sup> colpi/s. Come è noto, invece, la risposta di un NaI(Tl) si riduce drammaticamente ad elevate frequenze di conteggio propria a causa di un elevato tempo morto di conteggio. Altre caratteristiche sono riportate più in dettaglio in [16,17,20] cui si rimanda per ulteriori approfondimenti.

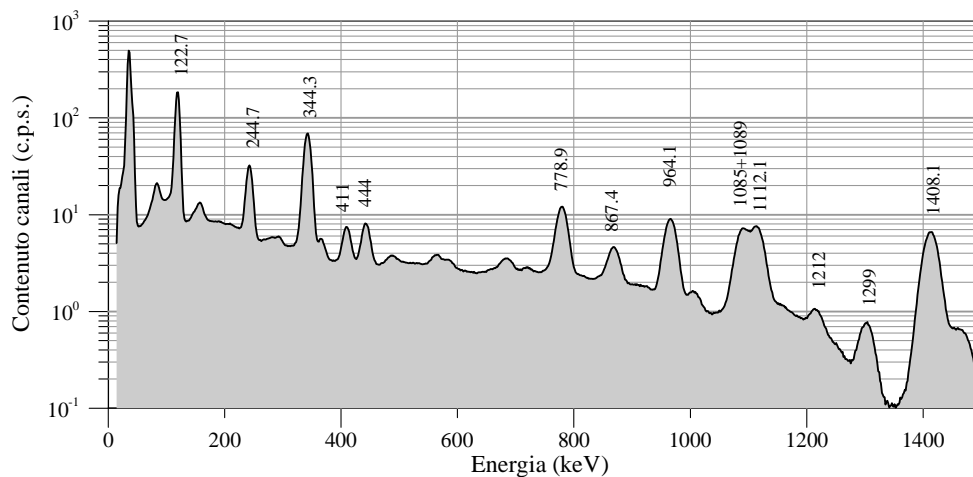
## RISULTATI E DISCUSSIONE

In quel che segue saranno riportati alcuni risultati di tipiche misurazioni sperimentali atte a dimostrare la facilità di impiego della strumentazione, la sua versatilità nelle varie applicazioni, l'affidabilità anche con diversificate condizioni di impiego. La buona risoluzione energetica e la velocità di risposta dello strumento lo rendono adatto per misure su campioni caratterizzati da elevata intensità di emissione senza che questo conduca a un elevato tempo morto, come invece si verifica per esempio con i rivelatori NaI(Tl). Ad es., per una sorgente puntiforme di <sup>137</sup>Cs misurata con LaBr<sub>3</sub>(Ce) e NaI(Tl), la variazione del tempo morto è significativa, dal 4% al 21%, non giustificabile con la diversità dei parametri dei differenti sistemi spettrometrici adottati. Questa circostanza migliora l'accuratezza delle calibrazioni in energia ed FWHM, per le quali si impiegano solitamente sorgenti calibrate di attività dell'ordine delle centinaia di kBq: infatti, come si può

evincere dal confronto degli spettri di sorgenti puntiformi di  $^{133}\text{Ba}$  e  $^{60}\text{Co}$  riportati in Fig. 6 ma specialmente dallo spettro di una sorgente di  $^{152}\text{Eu}$  di Fig. 7, i fotopicchi sono nettamente separati e senza significative distorsioni spettrali, potendosi derivare accuratamente i parametri fisici di ogni fotopicco (FWHM, count-rate, ...) tramite le usuali procedure di best fit ai dati sperimentali. E' evidente, anche perché familiare allo sperimentatore, la separazione dei picchi del  $^{60}\text{Co}$ , contrariamente a quanto invece può aversi con misure eseguite con il rivelatore NaI(Tl), eliminando le difficili computazioni dei contributi delle aree correlate alle due emissioni gamma.



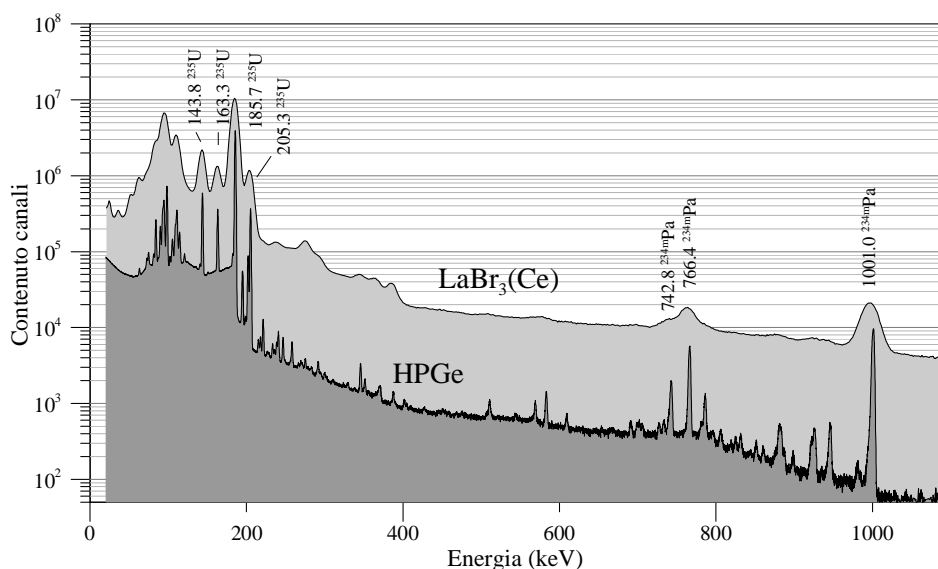
**Fig. 6.** Confronto degli spettri gamma di sorgenti puntiformi di  $^{133}\text{Ba}$  e  $^{60}\text{Co}$  rilevati con un  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  di dimensioni  $2'' \times 2''$  e con uno scintillatore  $\text{NaI}(\text{Tl})$   $3'' \times 3''$ , le cui ordinate sono amplificate per evitare sovrapposizioni.



**Fig. 7.** Spettro gamma di una sorgente di  $^{152}\text{Eu}$ .

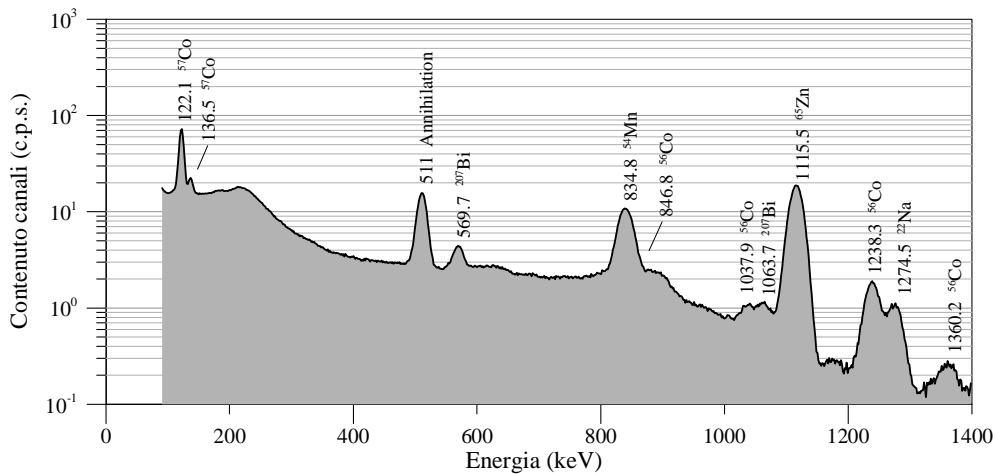
La strumentazione portatile sopra descritta è particolarmente indicata per misure spettrometriche gamma nel campo delle salvaguardie nucleari, ad esempio per la quantificazione di radionuclidi in composti di Uranio (e del relativo arricchimento), di Torio, in materie fissili e prime fonti. A titolo di esempio, in Fig. 8 sono riportati gli spettri rilevati su una pasticca di  $\text{UO}_2$  e polietilene, dello stesso tipo del combustibile impiegato nel nostro reattore di ricerca AGN-201 COSTANZA, già oggetto di altri tipi di analisi [21], rilevati con lo scintillatore  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  e con un tipico rivelatore HPGe. La durata delle misure, volutamente breve con tempi di conteggio tipici delle operazioni di verifica effettuate nel corso delle consuete ispezioni di controllo, non condiziona significativamente i risultati delle misure stesse se non per la precisione statistica dei risultati.

Dal confronto con lo spettro rilevato con un tipico rivelatore HPGe (ORTEC mod. GEM 50195), si può notare che le principali emissioni dell' $^{235}\text{U}$  e del  $^{234\text{m}}\text{Pa}$  sono nettamente individuabili con lo scintillatore e il contributo aggiuntivo dello spettro HPGe risiede nella possibilità di discernere emissioni di debole intensità, che risultano non importanti nelle valutazioni. Si può verificare facilmente la presenza dell' $^{235}\text{U}$  e, nel caso di combustibile nucleare, determinare l'arricchimento tramite le usuali procedure basate sull'intensità di conteggio in adatte Regioni di interesse (ROIs) [9,10]. Pur con qualche limitazione è possibile anche applicare la metodologia di calcolo proposta in [22] per misure spettrometriche gamma con rivelatori a Ge, essendo risolvibili le righe gamma a 143, 163, 185 e 205 keV dell' $^{235}\text{U}$  e quelle del  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ , radionuclide originato dal decadimento dell' $^{238}\text{U}$  e con questo supposto in equilibrio secolare. L'analisi dei risultati delle misure spettrometriche sulla pasticca consente di valutare un valore di arricchimento  $\mu = 19,4 \pm 0,3 \%$  con il rivelatore HPGe e circa  $19 \pm 0,6 \%$  per il  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ , contro il valore nominale indicato dalla casa costruttrice di circa il 20% [23]. Una misura analoga su un campione di uranio naturale, caratterizzato da una maggiore imprecisione statistica, fornisce con il  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  il valore di  $0,65 \pm 0,04\%$  (contro il valore teorico di 0,7%).



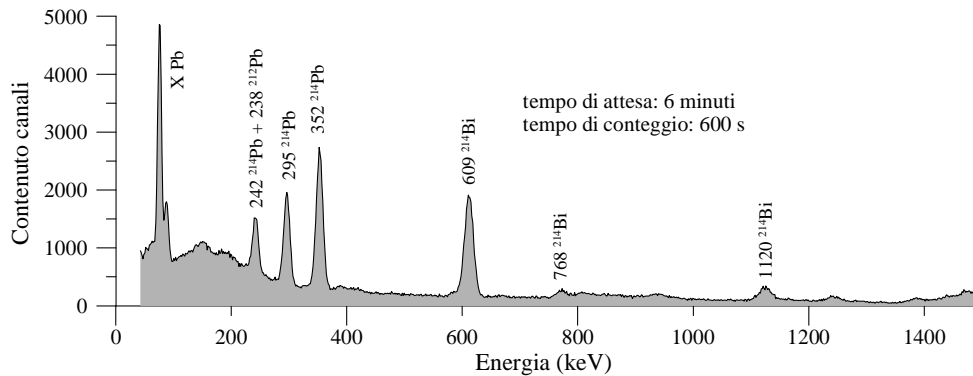
**Fig. 8 -** Spettri gamma rilevati su una pasticca di  $\text{UO}_2$ , analoga a quelle impiegate come combustibile nel reattore di ricerca AGN-201 Costanza dell'Università di Palermo.

Una seconda interessante applicazione riguarda la caratterizzazione in campo dei rifiuti radioattivi prima del loro confezionamento e spedizione. Molti componenti, ad es. quelli utilizzati in acceleratori impiegati per la produzione di radiofarmaci, sono sottoposti a intensi flussi neutronici e l'attività radionuclidica indotta risulta molto elevata anche dopo parecchi giorni di decadimento, il che non consente alcuna movimentazione degli stessi dal luogo di conservazione temporanea. Presso le diverse strutture spesso non è disponibile una strumentazione di misura con rivelatore HPGe se non per misurazioni di routine di contaminazioni in aria o di liquidi in geometria Marinelli. La rivelazione di uno spettro come quello di Fig. 9, con il campione posto a distanza tale da essere considerato puntiforme e potere quindi utilizzare una curva di calibrazione in efficienza facilmente ottenibile con le sorgenti di taratura disponibili presso un reparto di Medicina Nucleare (es.  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,...), consente di caratterizzare le quantità presenti nei rifiuti da conferire a ditta autorizzata. In precedenti lavori sono stati identificati e valutate le attività dei principali radionuclidi presenti in alcune parti di un target di ciclotrone (foglia di Havar, finestre di titanio, carousels, etc) [13]. Qui, a titolo di esempio, è riportato lo spettro rilevato su un componente (chimney) di risulta dalle operazioni di manutenzione effettuate su un ciclotrone IBA Cyclone 18/9. È rimarchevole la separazione dei due fotopicchi del  $^{57}\text{Co}$  a 122 keV e 136 keV, le cui aree possono essere valutate tramite una risoluzione del doppietto.

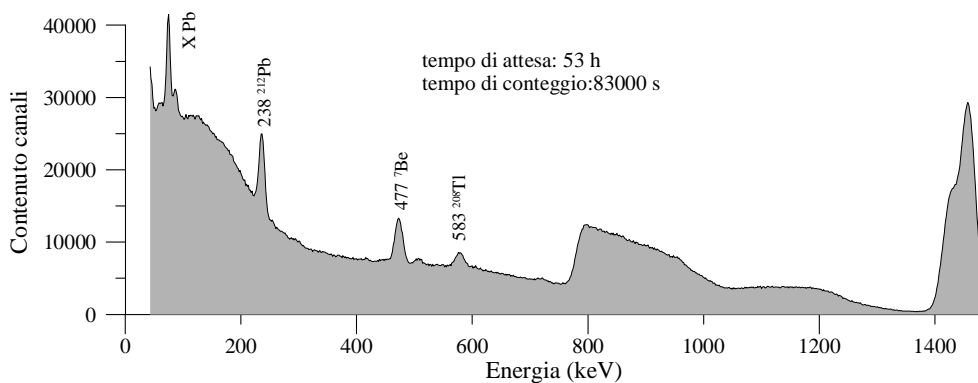


**Fig.9** – Spettro gamma rilevato su un” chimney” estratto da un ciclotrone impiegato per produzione di radiofarmaci.

Le considerazioni che sono state prima riportate sul fondo intrinseco del rivelatore potrebbero suggerire la non opportunità di impiegare questo rivelatore in misure di campioni ambientali. Tuttavia, l’elevata risoluzione energetica consente ancora di individuare radionuclidi presenti in diverse matrici ambientali, come ad esempio nello spettro riportato in Fig. 10, relativo a un filtro di particolato atmosferico misurato poco dopo la fine del campionamento, ove sono evidenti le manifestazioni dei prodotti dal decadimento del <sup>222</sup>Rn (radon) e <sup>220</sup>Rn (thoron) nel range energetico tra 200 e 1400 keV. Anche dopo un congruo tempo di attesa, la misura del filtro consente di rilevare fopiechi correlati alla catena radioattiva del <sup>232</sup>Th e quello a 477 keV del <sup>7</sup>Be (Fig. 11).



**Fig. 10.** Spettro gamma rilevato su un filtro di particolato atmosferico subito dopo la fine dell’aspirazione.



**Fig.11** – Spettro rilevato su un filtro di particolato atmosferico dopo circa 53 h di attesa.



In ultimo vogliamo porre l'accento sulla possibilità, già analizzata da altri ricercatori [12], di utilizzare lo scintillatore per la identificazione di radionuclidi in varie matrici o nel corso di diverse attività lavorative, quali il rilevamento di sorgenti radioattive tra rottami metallici, individuazione di contaminazioni localizzate, la ricerca di impurezze radioattive, etc. A titolo di esempio si riporta qui solo lo spettro rilevato su un campione di roccia vulcanica di composizione non nota, la cui elevata radioattività si può facilmente attribuire alla presenza di  $^{226}\text{Ra}$  e dei prodotti di decadimento del radon (Fig. 12).

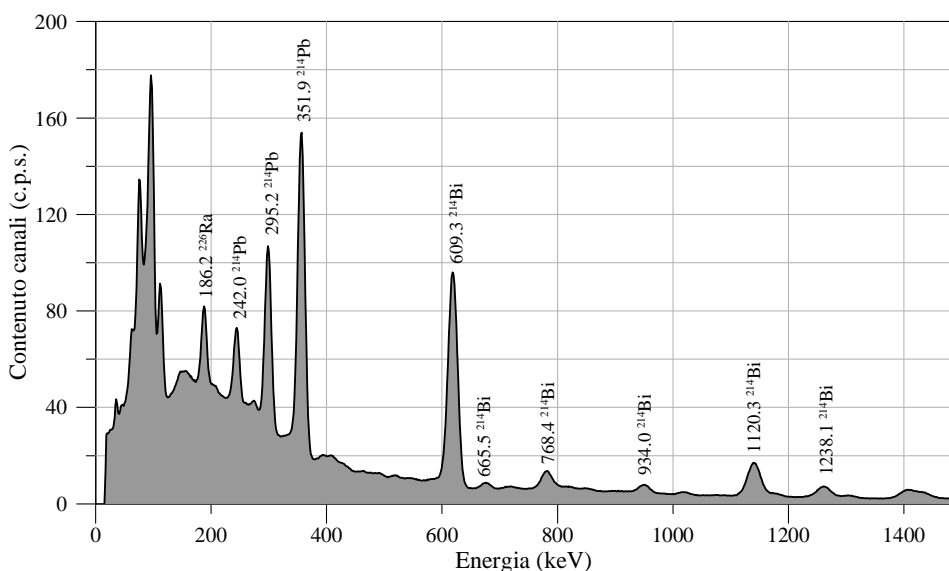


Fig. 12. Spettro di un campione di roccia di origine vulcanica.

## CONCLUSIONI

Il sistema spettrometrico con  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  è risultato, in conclusione, particolarmente versatile potendosi ritenere molto promettente il suo impiego in tutte quelle applicazioni ove non è possibile o risulta molto complicato impiegare un rivelatore a semiconduttore. La sensibilità dello strumento, per le dimensioni degli scintillatori che oggi si riescono a costruire, risulta molto prossima se non superiore ai sistemi di misura portatili più comuni mentre la compattezza, leggerezza e i contenuti consumi energetici ne favoriscono l'utilizzo in campo. Il costo del rivelatore è ancora relativamente più elevato rispetto ad altra tipologia di strumentazione di misura ma si ha ragione di ritenere che una maggiore diffusione e una standardizzazione delle procedure di produzione dei cristalli consentirebbero una significativa diminuzione dei costi che, unitamente a quella della associata strumentazione multicanale, rendono questo sistema attraente per diverse tipologie di applicazione. I risultati delle misure e le potenzialità della strumentazione sono giudicate più che soddisfacenti e conducono a poter considerare questo rivelatore uno dei principali strumenti di riferimento per la spettrometria gamma.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Alzimami K., Abuelhia E., Podolyak Z., Ioannou A., Spyrou N.M., Characterization of  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  and  $\text{LaCl}_3:\text{Ce}$  scintillators for gamma-ray spectroscopy, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 278 No. 3 (2008) 755-759.
- [2] Nicolini R., Camera F., et al. , Investigation of the properties of a 1'' $\times$ 1''  $\text{LaBr}_3:\text{Ce}$  scintillator, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 582 (2007), 554-561.

- [3] Van Loef E.V.D., Dorenbos P., Van Eijk C.W.E., Kramer K.W., Gudel H.U., Scintillation properties of LaBr<sub>3</sub>:Ce<sup>3+</sup> crystals: fast, efficient and high-energy resolution scintillators, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 486 (2002), 254-258.
- [4] Iltis A., Mayhugh M.R., Menge P., Rozsa C.M., Selles O., Solovveyev V., Lanthanum Halide scintillators: Properties and applications, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 563 (2006), 359-363.
- [5] Quarati F., Bos A.J.J., Brandenburg S., Dathy C., Dorenbos P et al., X-ray and gamma-ray response of a 2"×2" LaBr<sub>3</sub>:Ce scintillation detector, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 574 (2007), 115-120.
- [6] Weisshaar D., Wallace M.S., Adrich P., et al., LaBr<sub>3</sub>:Ce scintillators for in-beam gamma-ray spectroscopy with fast beams of rare isotopes, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 594(2008), 56-60.
- [7] Pani R., Bennati P., Betti M. et al., Lanthanum scintillation crystals for gamma ray imaging, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 567 (2006), 294-297.
- [8] Pani R., Pellegrini R., Cinti M.N. et al., "LaBr<sub>3</sub>:Ce crystal: The latest advance for scintillation cameras, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 572 (2007), 268-269.
- [9] Sullivan J.P., Rawool-Sullivan M.W., Wenz T.R., LaCl<sub>3</sub>(Ce) and LaBr<sub>3</sub>(Ce) gamma-ray spectra with various plutonium isotopic and uranium enrichment standards, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 276 No. 3 (2008) 699-705.
- [10] Duc T.Vo, Comparison of portable detectors for uranium enrichment measurements, *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, Vol. 276 No. 3 (2008) 693-698.
- [11] Ottmar H., Amador P., Eberle H., Erdmann N., Schorlè H., Uranium Enrichment Assay with a LaBr<sub>3</sub>(Ce) Scintillation Detector : a promising option for the 2<sup>nd</sup> generation of COMPUCEA, ESARDA Bulletin N0. 38, June 2008, 32-39.
- [12] Milbrath B.D., Choate B.J., Fast J.E., Hensley W.K., Kouzes R.T., Schweppe J.E., Comparison of LaBr<sub>3</sub>:Ce and NaI(Tl) scintillators for radioisotope identification devices, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 572 (2007), 774-784.
- [13] Guarino P., Rizzo S., Tomarchio E., Measurement of activity of the predominant gamma-emitting radionuclides in activated components of a medical cyclotron plant", *Proceedings 12<sup>th</sup> International Congress of the International Radiation Protection Association (IRPA-12)*, Buenos Aires (ARG), 19-24 October 2008.
- [14] Saint-Gobain, BrillanCe-380 data sheet.
- [15] Saint-Gobain, BrillanCe-350 data sheet.
- [16] Knoll F.K., Radiation Detection and Measurements, 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley & Sons, 2000.
- [17] Baccaro S., Blazek K., De Notaristefani F, et al., Scintillation properties of YAP:Ce, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 361 (1995), 209-215.
- [18] ORTEC, ScintiVision™-32, A35-B52 Software User's Manual, ORTEC, Oak Ridge, TN, 2002.
- [19] Saint-Gobain Crystals, BrillanCe Scintillators Performance Summary, *Scintillation Product Technical Note*, rev. January 2009.
- [20] Mozzyszynski M., Nassalski A., Syntfeld-Kazuch A., Szczesniak T., Czarnacki W., Wolski D., Pausch G., Stein J., Temperature dependences of LaBr<sub>3</sub>(Ce), LaCl<sub>3</sub>(Ce) and NaI(Tl) scintillators, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, A 568 (2006), 739-751.
- [21] Tomarchio E., Spettrometria gamma su una barra di combustibile del reattore AGN-201 Costanza, Convegno Nazionale AIRP di Radioprotezione, Catania, 15-17 settembre 2005.
- [22] Korob R.O., Blasiyh Nuno G.A., A simple method for the absolute determination of uranium enrichment by high-resolution  $\gamma$  spectrometry, *Applied radiation and Isotopes*, 64 (2006), 525-531.
- [23] Biehl A.T., Fayram R., Henley R. et al., Compact, Low-Cost Reactor Emphasizes Safety, *Nucleonics*, Vol. 14, No.9 (1956), 100-103.