



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Validazione di una metodologia di analisi per la valutazione
dell'efficienza di trasmutazione dei prodotti di fissione a lunga
emivita e degli attinidi minori in campi neutronici misti (termici e
veloci)

*A. Borio, D. Alloni, J. Bruni, M. Cagnazzo, M. Coniglio, G. Margotti, S. Manera,
F. Panza, M. Prata, A. Salvini*

VALIDAZIONE DI UNA METODOLOGIA DI ANALISI PER LA VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA DI TRASMUTAZIONE DEI PRODOTTI DI FISSIONE A LUNGA EMIVITA E DEGLI ATTINIDI MINORI IN CAMPI NEUTRONICI MISTI (TERMICI E VELOCI)

A. Borio, D. Alloni, J. Bruni, M. Cagnazzo, M. Coniglio, G. Margotti, S. Manera, F. Panza, M. Prata, A. Salvini (Università di Pavia)

Novembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Fissione nucleare: metodi di analisi e verifica di progetti nucleari di generazione evolutiva ad acqua pressurizzata

Responsabile Progetto: Massimo Sepielli, ENEA

Titolo

Validazione di una metodologia di analisi per la valutazione dell'efficienza di trasmutazione dei prodotti di fissione a lunga emivita e degli attinidi minori in campi neutronici misti (termici e veloci)

Descrittori
Tipologia del documento:

Collocazione contrattuale: ACCORDO DI PROGRAMMA Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico PIANO ANNUALE DI REALIZZAZIONE 2010 Progetto 1.3.2.a: Fissione nucleare: Metodi di analisi e verifica di progetti nucleari di generazione evolutiva ad acqua pressurizzata.

Argomenti trattati: Combustibile nucleare, Trasmutazione e Partizione nucleari

Sommario

Il Progetto di ricerca ha come obiettivo sviluppare e validare, mediante codici di calcolo e misure dirette, metodologie flessibili per lo studio della produzione e trasmutazione degli elementi transuranici (TRU) e dei prodotti di fissione (FP) a lunga emivita presenti nel combustibile irraggiato.

La conoscenza della composizione del combustibile nucleare, durante la permanenza in reattore e allo scarico, è di fondamentale importanza per l'economia di gestione del nocciolo e del ciclo di *back-end*. Lo sviluppo di una metodologia di analisi flessibile dal punto di vista della composizione del combustibile nucleare e della geometria del nocciolo del reattore risulta quindi di particolare importanza ed utilità.

E' stata pertanto sviluppata una metodologia di analisi, mediante impiego di codici di calcolo Monte Carlo (MCB e MCNP ver. 4C) e misure dirette, per la valutazione dei tassi di produzione dei FP a lunga emivita e dei TRU in campi neutronici con diverso spettro energetico e in materiali nucleari diversi (uranio naturale e torio).

Note

Co-autori: D. Alloni, J. Bruni, M. Cagnazzo, M. Coniglio, G. Magrotti, S. Manera, F. Panza
M. Prata, A. Salvini

Copia n.
In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	14.11.11	NOME	Andrea Borio	<i>[Signature]</i>	<i>[Signature]</i>
			FIRMA		<i>M. Sepielli</i>	<i>M. Sepielli</i>
REV.	DESCRIZIONE	DATA		REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	PAR2010-UNI_PV-LB3-002	0		2	48

INDICE

1. Introduzione	3
2. Strumentazione	4
2.1 Sistema di digestione ETHOS ONE	4
2.2 Scintillatore liquido Triathler	5
2.3 Catena di misura per spettrometria gamma	6
2.4 Misuratore di PH OAKTON 2700.....	8
2.5 Pipette PIPETMAN Concept®	9
2.6 Allestimento Glove Box	9
3. Tarature e Test apparecchiature.....	11
3.1 Sistema di digestione a microonde.....	11
3.2 Misuratore di PH OAKTON 2700.....	14
3.3 Triathler™ Liquid Scintillation Counter (LSC)	15
4. Calcolo delle attività degli isotopi prodotti mediante codice MCB	21
5. Irraggiamento ed Analisi delle targhette.....	33
5.1 Premessa	33
5.2 Descrizione dell'apparato di misura.....	33
5.3 Caratterizzazione delle targhette	34
5.4 Stima del coefficiente di autoassorbimento gamma mediante MCNP	40
5.5 Irraggiamento di Targhette in campo neutronico	42
5.6 Analisi delle Targhette irraggiate in campo neutronico.....	43
6. Conclusioni	47
7. Bibliografia	48

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	PAR2010-UNI_PV-LB3-002	0		3	48

1. INTRODUZIONE

Il Progetto di ricerca ha come obiettivo sviluppare e validare, mediante codici di calcolo e misure dirette, metodologie flessibili per lo studio della produzione e trasmutazione degli elementi transuranici (TRU) e dei prodotti di fissione (FP) a lunga emivita presenti nel combustibile irraggiato.

La conoscenza della composizione del combustibile nucleare, durante la permanenza in reattore e allo scarico, è di fondamentale importanza per l'economia di gestione del nocciolo e del ciclo di *back-end* del combustibile. Lo sviluppo di una metodologia di analisi flessibile dal punto di vista della composizione del combustibile nucleare e della geometria del nocciolo del reattore risulta quindi di particolare importanza ed utilità.

E' stata pertanto sviluppata una metodologia di analisi, mediante impiego di codici di calcolo Monte Carlo (MCB e MCNP ver. 4C) e misure dirette, per la valutazione dei tassi di produzione dei FP a lunga emivita e dei TRU in campi neutronici con diverso spettro energetico e in materiali nucleari diversi (uranio naturale e torio).

Sono state quindi acquisite e caratterizzate targhette di uranio naturale e torio mediante spettrometria gamma ad alta risoluzione. Le targhette sono state irraggiate presso il reattore nucleare di ricerca TRIGA Mark II del LENA e presso l'impianto nucleare sottocritico SM1 dell'Università di Pavia (impianto dotato di sorgente iniettante di PuBe e, pertanto, di uno spettro neutronico più duro rispetto a quello di reattore).

La validazione è stata realizzata confrontando i risultati delle simulazioni Monte Carlo con i risultati delle analisi delle targhette irraggiate. I risultati delle analisi che, data la complessità degli spettri richiedono misure ripetute nel tempo (anche a distanza di alcune settimane), mostrano un sostanziale accordo con i valori calcolati.

2. STRUMENTAZIONE

Al fine dello svolgimento dell'attività di ricerca è stato necessario procedere all'acquisto della seguente strumentazione.

2.1 Sistema di digestione ETHOS ONE

Sistema a microonde della potenza complessiva di 1.600 W.

L'apparecchiatura è dotata di un sistema di aspirazione integrato, posizionato sopra la cavità a microonde che permette la ventilazione dei caroselli ed il rapido raffreddamento dei reattori al termine del programma di lavoro. Un tubo flessibile resistente agli acidi è connesso al ventilatore di aspirazione alla cappa esistente in laboratorio, assicurando così un ambiente di lavoro sicuro.

L'apparecchiatura è dotata di un controllo software delle principali funzioni di programmazione e automazione delle attività (ad esempio programmazione dei profili di riscaldamento al fine di mantenere costante la temperatura di reazione).

Un sistema automatico di bloccaggio del portellone, impedisce l'apertura durante le fasi di riscaldamento e raffreddamento del campione, garantendo la massima sicurezza di utilizzo. Risulta inoltre possibile il controllo della temperatura in tutti i contenitori grazie a un sensore di controllo della temperatura diretto, un sensore ad infrarossi e dal controllo di posizionamento del rotore tramite microprocessore. In questo modo è possibile visualizzare sul display del terminale di controllo i profili di temperatura reali in tutti i contenitori, garantendo il completo controllo e la massima sicurezza operativa del processo di preparazione del campione.

Il corpo rotore (tipo SK) può contenere fino a 12 contenitori realizzati in TFM ad alta purezza con un volume di 100 ml, garantiti per una tenuta fino a 300°C e 100Bar.



CARATTERISTICHE PRINCIPALI

Potenza installata	1600 Watt (2 magnetron da 800 Watt) potenza massima erogabile in cavità di lavoro pari a 1500 Watt, controllata direttamente attraverso processore e regolabile con incrementi di 1 Watt
Visualizzazione	telecamera digitale ad alta definizione combinata con uno schermo TFT-LCD da 5.6"
Connettività	3 porte RS232 1 USB 1PS2
Aspirazione interna	sistema integrato di aspirazione e smaltimento dei fumi completamente separato dai circuiti elettronici
Modalità emissione microonde	Continuo o pulsato

2.2 Scintillatore liquido Triathler

Lo strumento permette di effettuare le seguenti misure:

- *Conteggio Alfa*
- *Conteggio dei positroni*
- Conteggio di P-32
- Conteggio Cerenkov

ottenendo differenti tipi di risultato:

- **Counts:** conteggi registrati senza alcuna manipolazione matematica.
- **Count rate:** numero di conteggi registrati nei limiti di un tempo di conteggio. Può essere espresso come CPM (conteggi al minuto) o cps (conteggi al secondo). I valori di CPM (cps) sono corretti per il fondo e tempo morto.
- **DPM:** rateo di disintegrazione al minuto



Lo strumento è provvisto di due porte che consentono di comunicare con periferiche utilizzando una connessione con cavo seriale RS232. La periferica in questione è utilizzata normalmente per collegare una stampante e un personal computer, attraverso il quale è possibile controllare tutte le funzionalità dello strumento.

CARATTERISTICHE PRINCIPALI	
Display	LCD 2 righe , 16 caratteri
Light detector	Tubo fotomoltiplicatore
Processore	Intel 80196 NU, 50 MHz clock
Memoria	128 Kbytes EPROM, 64 Kbytes SRAM, 32Kbytes of NVRAM
Analizzatore multicanale:	12 bit, 700 ns con ADC per elaborazione segnale
Interfacce:	2x RS-232
PMT bias supply	Controllato dal microprocessore interno, regolabile da 0 a 1250V
Conteggio di luminescenza	
Rivelatore	Diffuse white reflector on aluminium.
Campioni	Microtubes (e.g. Eppendorf type), LSC-vials o test tubes.
Massimo rate di conteggio:	20,000,000 CPS
Conteggio LSC alfa/beta	
Rivelatore	Diffuse white reflector on aluminium.
Campioni	Microtubes (e.g. Eppendorf type), LSC-vials o test tubes.

Energy range	2 keV .. 2000 keV.
Efficienza conteggio beta	>20% for H-3
Max. count rate	2,000,000 CPM
Efficienza conteggio alfa	> 80 % for Rn-222.
LDD	< 3 Bq/l for Rn-222 in water sample with alpha/beta separation
Misurazioni dirette P-32	
Rivelatore	Plastic scintillator, wall thickness app. 5mm
Efficienza	>40%

2.3 Catena di misura per spettrometria gamma

La catena di misura opera in condizioni di bassofondo ed è installata presso la sala conteggio del Dipartimento di Chimica Generale dell'Università di Pavia. La catena di misura è costituita da:

- Rivelatore al germanio iperpuro ORTEC GEM-FX7025P4-CW tipo P coassiale
- Analizzatore multicanale ORTEC DSPEC LS
- Sistema di raffreddamento ad azoto liquido
- PC dotato di software Gammavision
- Schermatura a pozzetto in piombo



CARATTERISTICHE PRINCIPALI CATENA DI MISURA BASSOFONDO	
CRISTALLO HPGe	
Risoluzione FWHM @ 14.4 keV	≤ 575 eV
Risoluzione FWHM @ 122 keV	≤ 650 eV
Risoluzione FWHM @ 1.33 MeV	≤ 1.9 keV
Rapporto picco - compton:	$\geq 40:1$
Efficienza relativa a 1.33 MeV	26%
Rapporto risoluzioni FW.1M/FWHM	≤ 1.95
Rapporto risoluzioni FW.02M/FWHM	≤ 2.75
ANALIZZATORE MULTICANALE DSPEC LF	
Display	240 x 160 pixel LCD retroilluminato
Throughput	Max. $>100,000$ cps.
Preamplificazione	resistiva o TRP, selezionabile da PC
System Conversion Gain	512 to 16k canali. Controllo via software
Digital Filter Shaping-Time Constants	Rise Times: 0.8 μ s to 23 μ s in steps di 0.2 μ s. Flat Tops: 0.3 to 2.4 in step di 0.1 μ s.
Correzione tempo morto	correzione secondo il metodo Gedcke-Hale.
Linearità	$\leq \pm 0.025\%$ sul 99.5% dello spettro, misurato con sorgente ^{55}Fe @ 5.9 keV to ^{88}Y @ 1836 keV
System Temperature Coefficient	Guadagno: <50 ppm/ $^{\circ}\text{C}$. [Tipico 30 ppm/ $^{\circ}\text{C}$.] Offset: <3 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ sul campo di misura, Rise e Fall time: 12 μ s
Regolazione poli-zeri	Controllata dal software.
Connessione Detector	Connettore multipolare (13W3): Preamp Power: 1 W (+12 V, -12 V, +24 V, -24 V, 2 GND, ingresso amplificatore.
Connessione a PC	USB

2.4 Misuratore di PH OAKTON 2700

Lo strumento è un misuratore di PH elettronico da laboratorio dotato di 500 punti di memoria; consente la misura di pH multipli e la visualizzazione di offset. L'elettrodo può essere montato su entrambi i lati del dispositivo e può comprendere inoltre l'installazione di un sensore di temperatura. E' possibile inoltre interfacciare lo strumento con il PC per lo scarico dei dati.



CARATTERISTICHE PRINCIPALI	
MISURE DI PH	
Campo di misura	-2.000 to 20.000 pH
Risoluzione	0.1 / 0.01 / 0.001 pH
Precisione	±0.002 pH
Punti di calibrazione	6 preimpostati e 5 configurabili
Compensazione temperatura	Automatico o manuale
MISURE DI mV	
Campo di misura	±2000.0 mV
Risoluzione	0.1 mV
Precisione	±0.2 mV
MISURE DI TEMPERATURA	
Risoluzione	0.1 °C / 0.1 °F
Precisione	±0.3 °C / ±0.5 °F
ELETTRODO	
Diametro	12mm
Diaframma	ceramico
Elettrolita	3 M KCl
Membrana	vetro
Range temperatura	-10 -- 100°C
Sensibilità	57 ... 59 mV / pH a 25°C

2.5 Pipette PIPETMAN Concept®

Pipette motorizzate configurabili da PC per la realizzazione di diverse configurazioni di utilizzo. Dispongono di software interno che permette la gestione della calibrazione e manutenzione nonché di registrare i dati di utilizzo per la creazione di reportistica. Sono stati acquistate due pipette con le seguenti capacità nominali:

- 20-300 μ l
- 100-1200 μ l



2.6 Allestimento Glove Box

La glove box utilizzata ai fini della presente attività di ricerca (tipo: COMECER BOX GBS n. 32134), già nella disponibilità del Laboratorio è dotata di 4 posizioni per la manipolazione del materiale interno.



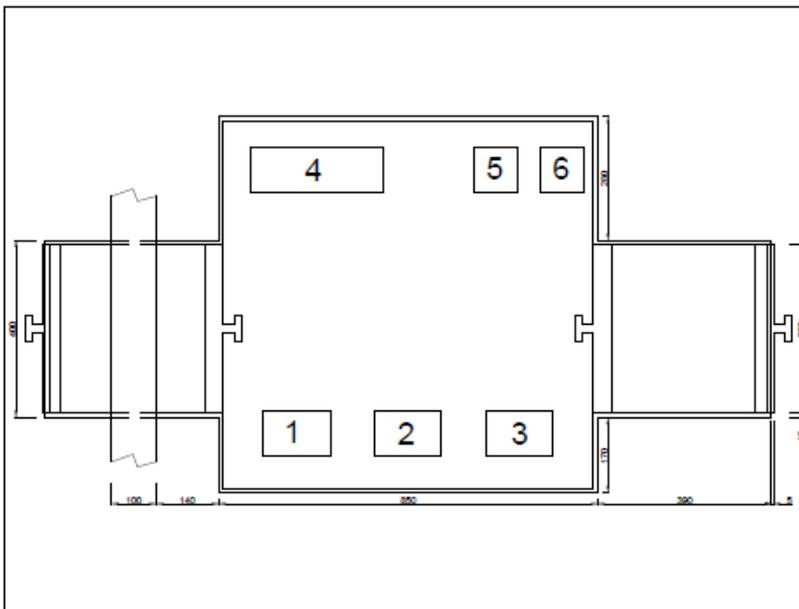
Il sistema di aspirazione e filtrazione dell'aria interna è costituito da doppio sistema di filtraggio avente le seguenti caratteristiche:

CAMFIL
Ref. 3204.01.00
N° 12/960
Portata 50 mc/h
Delta p = 200 Pa +/- 20%

CAMFIL
Ref. 3202.04.00
Eff. 99.99%
N° 123/79
Portata 50 mc/h
Delta p = 200 Pa +/- 20%



Allestimento strumentazione interna:



1. Preparazione soluzione (micro-pipette)
2. Rack colonne di separazione
3. Piastra agitatore + elettrodo ph-metro
4. Mini-centrifuga
5. Contenitore per rifiuti liquidi
6. Contenitore per rifiuti solidi

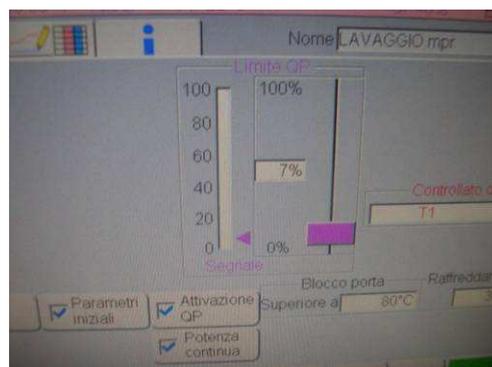
3. TARATURE E TEST APPARECCHIATURE

3.1 Sistema di dissoluzione a microonde

Il Laboratorio è stato attrezzato in modo da minimizzare i trasferimenti del materiale irraggiato mantenendo vicina la zona di dissoluzione da quella dedicata alla separazione radiochimica e alla preparazione del campione per la misura.



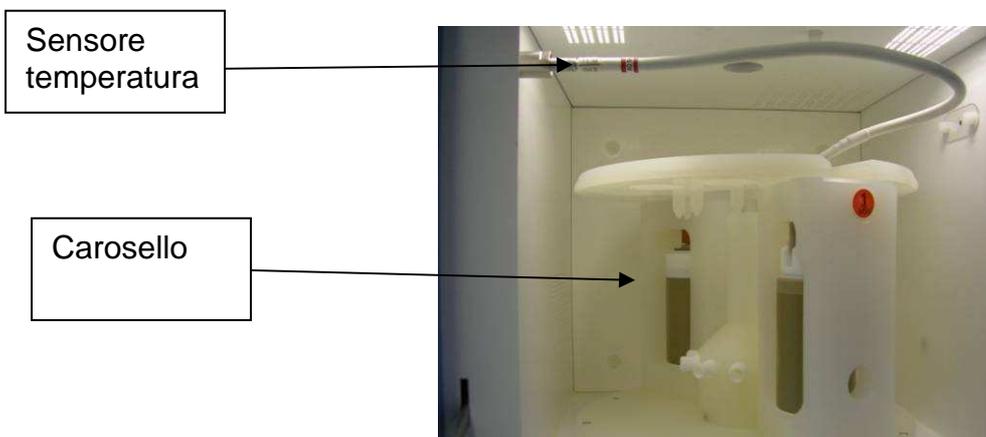
Per la dissoluzione è stato acquistato un forno a microonde della Milestone ML 44204 - ETHOS ONE. Il sistema è stato posizionato a lato della cappa di manipolazione calda connessa con la glove-box dove saranno eseguite le operazioni di radiochimica. I vassel per la dissoluzione sono a tenuta ed il forno è dotato di un sistema di ventilazione con il controllo in uscita dei fumi che sono scaricati all'interno della cappa calda. Il sensore fumi rivela la presenza di vapori acidi allo scarico ed interrompe la rampa di riscaldamento del campione evitando la perdita di campione e la contaminazione della cappa. Per regolare il livello di intervento del sistema di sicurezza fumi sono stati eseguiti diversi test nelle condizioni di utilizzo. Alla fine la miscela di attacco acido risulta costituita da 10ml di HNO₃ al 65% e 2ml di HF al 40%, ed i lavaggi del vassel da 10ml di HNO₃ al 65% e 5ml H₂O₂ al 30%. Il limite sui fumi è fissato al 7%.



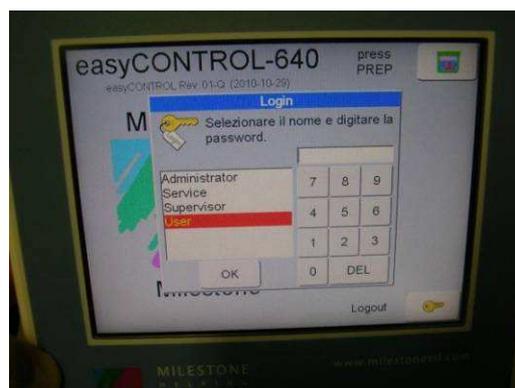
La rampa di temperatura è programmata con i seguenti parametri:

Step	Time	T1	T2	P	Power
1	00:20:00	220	120	45	Max
2	00:15:00	220	120	45	Max

T1 è la temperatura impostata di sicurezza, T2 è quella richiesta e P è la pressione massima. Al termine del ciclo il forno non è apribile fino alla temperatura impostata di 80°C. Il vassel è trasferito sotto cappa solo quando raggiunge la temperatura ambiente.



L'uso del microonde è protetto da password con diversi livelli di accesso alle funzioni; il metodo è così protetto da accidentali modifiche.



L'apertura del vassel avviene sotto cappa e ad ogni utilizzo si procede alla verifica del disco di rottura e al lavaggio.

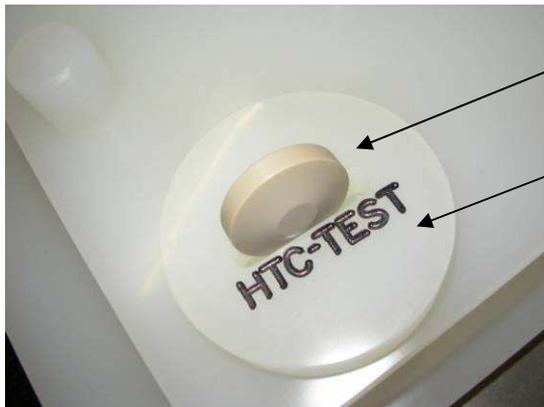


Vassel



Disco di rottura

Dima



Il campione una volta dissolto è trasferito nella glove-box dove sarà effettuata la separazione radiochimica dei vari analiti; a questo scopo è stata attrezzata con una linea elettrica di passaggio per alimentare le micropipette elettroniche e con un passaggio di segnale per utilizzare un elettrodo di misura del PH mantenendo l'elettronica esterna.

Passaggio contatti



3.2 Misuratore di PH OAKTON 2700

Il piaccametro è tarato con due soluzioni tampone di riferimento a PH4 e PH10; l'elettrodo è mantenuto bagnato per preservare il suo buon funzionamento. Le micropipette sono predisposte all'interno della glove-box insieme ai supporti per la ricarica. I test di buon funzionamento sono stati eseguiti per confronto con pesata usando una bilancia analitica con sensibilità al decimo di milligrammo.

Una prova fondamentale per verificare la corretta predisposizione della glove-box è consistita nell'effettuare delle manipolazioni a freddo utilizzando i guanti e sistemando l'attrezzatura nei punti più comodi all'operatore.



Elettronica
piaccametro

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	PAR2010-UNI_PV-LB3-002	0		15	48

3.3 Triathler™ Liquid Scintillation Counter (LSC)

Per effettuare l'analisi alfa/beta dei campioni contenenti frammenti di fissione, ottenuti mediante irraggiamento delle targhette campione di Uranio e Torio nel reattore TRIGA MARK II del LENA e nel complesso sottocritico SM1, è stato installato uno scintillatore modello *Triathler™ Liquid Scintillation Counter (LSC)*.



Figura 1: Triathler™ Liquid Scintillation Counter (LSC)

Lo strumento, rappresentato in Figura 1, è stato posizionato nel Laboratorio ex Nadir, ospitante anche un cristallo al germanio per conteggi gamma a bassofondo, dove saranno eseguite le misure relative ai campioni irraggiati. Lo strumento è connesso ad un PC per la raccolta dei dati e la visualizzazione degli spettri acquisiti. I risultati delle analisi possono essere inoltre trasferiti direttamente al PC o ad una stampante sia durante la fase di conteggio o dopo il completamento del conteggio.

Modalità di conteggio a scintillazione liquida

In questa metodologia di misura, i campioni ricavati dalla dissoluzione delle targhette irraggiate e contenenti radioisotopi con emissione beta a bassa energia sono, mescolati con un cocktail di scintillazione. Poiché il campione mescolato con il cocktail produce luce, il rivelatore è lo stesso del conteggio di luminescenza. Tuttavia i principi di misura differiscono; nella scintillazione liquida il TRIATHLER rileva la emissione di luce (da alcuni ad alcune centinaia dei fotoni), nelle misure di luminescenza vengono contati i diversi fotoni. Il modello LSC deve essere usato per misurare i campioni beta con le emissioni che hanno un'energia inferiore di 1000 keV. In pratica tutti i componenti beta comuni tranne il P-32 appartengono a questa categoria.

La procedura di conteggio dei campioni contenenti alfa emettitori è la stessa di quella usata per quanto riguarda la misura di beta emettitori, mentre i risultati ottenuti dal conteggio di campioni alfa/beta emettitori possono essere visualizzati sia come attività totale sia mediante il protocollo di separazione alfa-beta che consente di visualizzare graficamente gli spettri separando i due differenti contributi.

Protocolli di misura

I radioisotopi più comuni (ad es. ^3H , ^{14}C) possono essere misurati senza alcuna calibrazione preventiva in efficienza di conteggio dello strumento, ma solamente premendo il pulsante relativo al radioisotopo in questione nella tastiera frontale (vedi Figura 2). La calibrazione dello strumento LSC è garantita dalla casa costruttrice ed è stata effettuata con unquenched standard di ^3H e ^{14}C in volume standard di 4 mL (vedi TABELLA I)

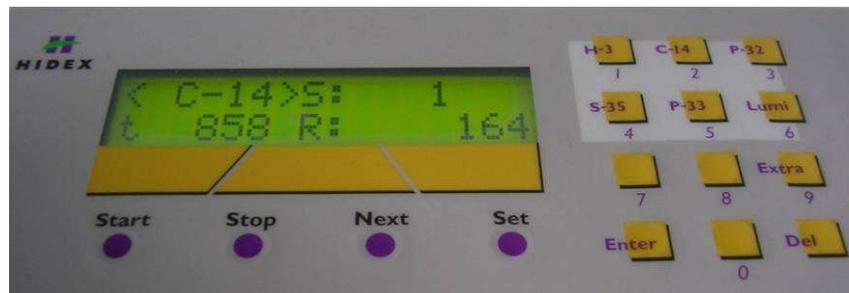


Figura 2: Tastiera dei comandi del Triathler per programmare i protocolli di ed effettuare il trasferimento dei dati per la visualizzazione degli spettri.

Il TRIATHLER è in grado di misurare le emissioni alfa e beta di molti isotopi differenti, ma per effettuare delle misure sicure, si deve conoscere la tipologia di isotopo che si misura (in particolare il tipo di spettro).

L'isotopo selezionato per il conteggio è indicato nella riga superiore del display quando lo strumento è nella fase *ready*. Tuttavia, per selezionare un isotopo differente se ne può scegliere uno tra quelli preimpostati premendo i pulsanti da 1 a 8 oppure creare un protocollo di misura personalizzato. Il protocollo di misura dello strumento contiene un certo numero di parametri che sono usati nei modelli di controllo della misura e indicano il nome del protocollo che sarà usato nel conteggio. Altri parametri dello strumento includono: il nome di protocollo (i protocolli di misura comprendono 13 dei tipi di elementi più comuni), il tempo di conteggio e il settaggio delle "finestre" energetiche (lower and higher channel), la sottrazione del fondo ambientale, la modalità di separazione alfa/beta.

	³ H	¹⁴ C	³² P	Lumin.
<i>Background (CPM)</i>	53	73	-	35 CPS
<i>Counting Eff (%)</i>	43.4	87.4	-	-
<i>Counting Window (lower – higher)</i>	30 – 120	50 – 900	5 - 1023	-

Tabella I: Parametri di conteggio dello strumento LSC relativi ai radioisotopi standard utilizzati per la calibrazione riportati nel certificato (24 Agosto 2011, serial n° 2111145.)

A seconda delle caratteristiche del radioisotopo che si dovrà analizzare è possibile inoltre cambiare la durata e l'unità di misura (minuti o secondi) del conteggio.

Il protocollo di misura dello Stronzio-90 utilizzato per i test e il controllo dello strumento (misura di attività e linearità) in *samples* a concentrazioni differenti è quello per il Carbonio-14, in quanto la finestra energetica di conteggio è la stessa per i due radioisotopi.

Il TRIATHLER è in grado inoltre di sottrarre automaticamente dal conteggio finale, il valore di fondo ambientale precedentemente misurato, semplicemente inserendo il valore nella riga di comando corrispondente oppure di correggere il valore finale di conteggio moltiplicando il valore in CPM per una costante determinata (ad esempio per determinare i DPM in conteggio di luminescenza). E' possibile inoltre scegliere l'unità CPM o CPS a seconda delle esigenze di conteggio.

Materiale in dotazione con lo scintillatore

Lo scintillatore è stato fornito con il seguente materiale per effettuare le misure e le calibrazioni:

- ✓ *PerkinElmer Unquenched Standard* da 15 mL (³H, 258000 DPM, < 0.2 µCi; ¹⁴C, 129400 DPM, < 0.1 µCi; Background)



Figura 3: Standard di calibrazione

- ✓ due Flaconi di liquido Scintillante (*Aqualight* per campioni acquosi e non acquosi, *Maxilight* per campioni non acquosi)
- ✓ vials in polietilene da 7 mL e 20 mL e rispettivi adattatori per LSC



Figura 4: Vials in polietilene per il confezionamento dei campioni

Lo strumento è stato inoltre fornito con il software per l'analisi dei dati per conteggio beta e per l'analisi in modalità separazione alfa/beta

Preparazione dei campioni e test di controllo dello strumento

Per testare il corretto funzionamento dello strumento LSC e per validare il protocollo di misura scelto, sono stati preparati diversi vials di polietilene da 20 mL contenenti ciascuno 15 mL di liquido scintillante *Aqualight* a differenti concentrazioni di ^{90}Sr . Di seguito è riportato lo schema di decadimento dello ^{90}Sr ($t_{1/2} = 28.79$ y):



I campioni preparati a diverse concentrazioni (riportate in Tabella II) sono stati successivamente contati con lo strumento LSC per la determinazione della MDA (Minimum Detectable Activity) e per verificare la linearità dello strumento in funzione della concentrazione del radioisotopo.



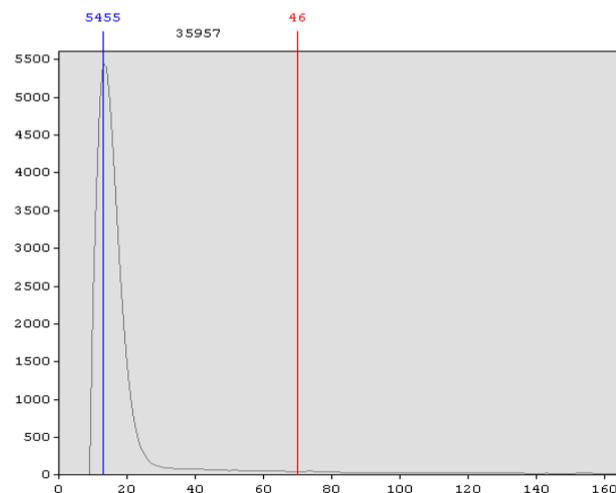
Figura 5: preparazione delle vials con 15 mL di Aqualight.



Figura 6: Preparazione dei campioni. Sinistra: Sorgente di Stronzio-90. Destra: Matracci sotto cappa nel Laboratorio di Radiochimica contenenti differenti diluizioni della sorgente.

Soluzione	Volume prelevato (μL)	Attività
4Bq/mL	10	40 mBq
4Bq/mL	100	400 mBq
4Bq/mL	1000	4 Bq
4Bq/mL	2000	8 Bq
4Bq/mL	5000	20 Bq
800Bq/mL	250	200 Bq
40kBq/mL	10	400 Bq

Tabella II: caratteristiche dei campioni preparati per il conteggio in Scintillazione



Spettro beta ottenuto con LSC da uno dei campioni contenente ^{90}Sr .

Nel grafico di Figura 7 sono riportati i risultati dei conteggi in CPM delle misurazioni ottenuti in funzioni delle diverse attività (concentrazioni) dei campioni e per una durata di conteggio di 3600 sec per ciascun campione.

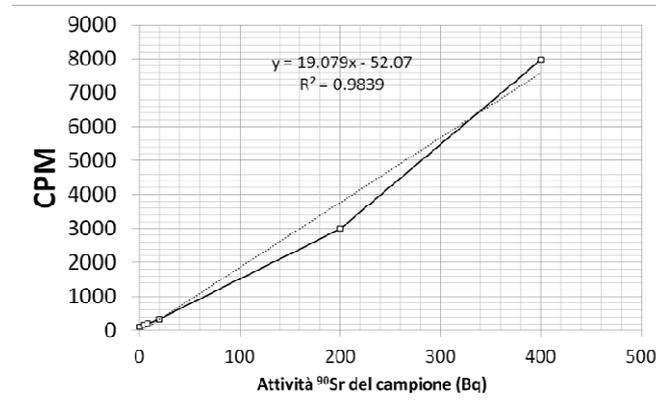


Figura 7: curva di risposta dello strumento LSC

Dalle misure effettuate è stata verificata la corrispondenza tra i dati dichiarati nel certificato dello strumento LSC dalla casa costruttrice e i dati sperimentali. Inoltre l'efficienza risulta essere quella certificata con un errore entro il 10 %, mentre la risposta dello strumento risulta lineare con un $R^2 = 0.9839$ nel campo di misure da 4 Bq a 2 MBq assoluti. La sensibilità dello strumento risulta sperimentalmente uguale a quella deducibile dai dati forniti da HIDEX.

4. CALCOLO DELLE ATTIVITÀ DEGLI ISOTOPI PRODOTTI MEDIANTE CODICE MCB

Utilizzando il codice di calcolo Monte Carlo MCB, si è proceduto alla valutazione delle attività delle targhette irraggiate sia nel canale centrale de reattore TRIGA Mark II del LENA sia nel complesso moltiplicate sottocritico SM1 dell'Università di Pavia.

Le simulazioni sono state effettuate in una configurazione geometrica (Figura 8) costituita da:

- ✓ cilindro di Uranio/Torio con diametro 0.635 cm, e di spessore e di massa rispettivamente 0.01cm e 0.00951 cm, 0.3889 g e 0.1412 g.
- ✓ Sfera esterna di raggio 2 cm.

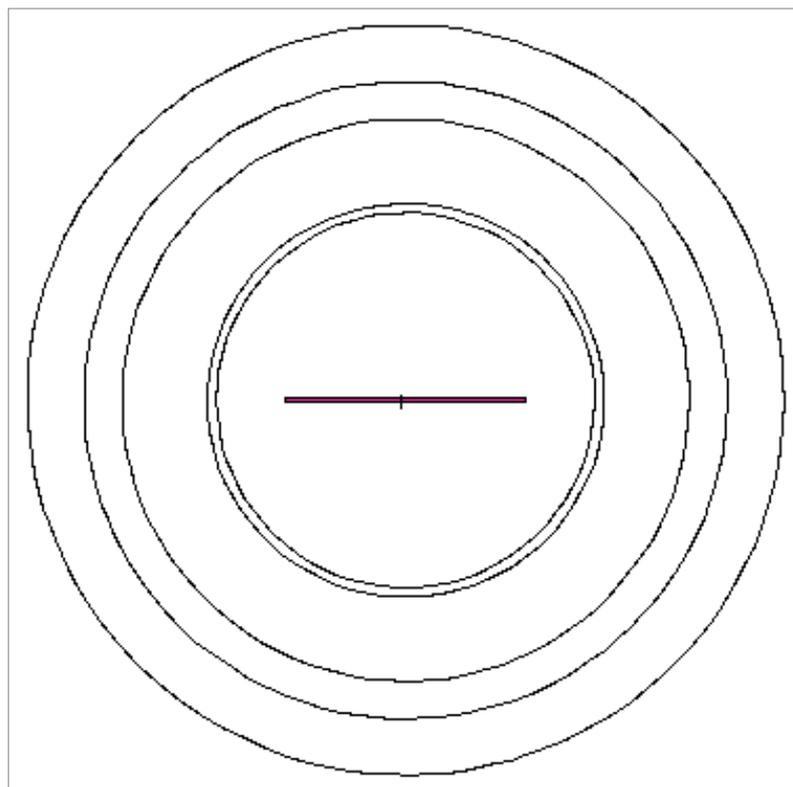


Figura 8: schema della geometria dei campioni irraggiati

I neutroni provengono dalla superficie della sfera più esterna, con distribuzione di flusso costante verso l'interno pari a $2.16 \times 10^{13} \text{ n/cm}^2 \text{ s}$.

Sono stati simulati i seguenti processi:

- 1) Irraggiamento nel canale centrale del reattore nucleare TRIGA del LENA per complessive 6 ore alla potenza di 250 Watt (fluenza neutronica totale $\sim 4.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) – **Targhetta di Uranio naturale**
- 2) Irraggiamento nel canale centrale del reattore nucleare TRIGA del LENA per complessive 6 ore alla potenza di 250 Watt (fluenza neutronica totale $\sim 4.5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) – **Targhetta di Torio**

I risultati delle simulazioni sono di seguito riportati.

Processo 1)

Isotopo	Mass (g)	T_{1/2} (s)	Attività (Bq)
Sn 119	Sn119m 9.72100000e-16	2.53200000e+07	1.34668646e-01
Dy 168	Dy1683.40200000e-20	5.22000000e+02	1.61927547e-01
Ho 168	Ho1681.28500000e-20	1.79400000e+02	1.77966238e-01
Ho 167	Ho1671.11800000e-18	1.11600000e+04	2.50395979e-01
Ga 72	Ga72 2.72700000e-18	5.07600000e+04	3.11456386e-01
Dy 167	Dy1675.37700000e-20	3.72000000e+02	3.61282427e-01
Te 127	Te127m 1.0650000e-15	9.41800000e+06	3.71666496e-01
Eu 155	Eu1552.96100000e-14	1.56500000e+08	5.09516884e-01
Np 240	Np2401.33100000e-18	3.88800000e+03	5.95397175e-01
Nb 95	Nb95m 5.8380000e-17	3.11900000e+05	8.22415568e-01
Pm 147	Pm147 2.5120000e-14	8.26800000e+07	8.62716381e-01
Tb 161	Tb1612.06800000e-16	5.97000000e+05	8.98083132e-01
Dy 165	Dy1654.05200000e-18	8.38800000e+03	1.22206212e+00
Y 90	Y90 7.07400000e-17	2.30700000e+05	1.42213611e+00
Tb 165	Tb1657.79500000e-20	1.26600000e+02	1.55763136e+00
Kr 85	Kr85 1.08900000e-13	3.39400000e+08	1.57566297e+00
Sb 125	Sb1254.48200000e-14	8.74200000e+07	1.71205317e+00
Zn 69	Zn69 9.90800000e-19	3.42000000e+03	1.75257662e+00
Cu 69	Cu69 5.31200000e-20	1.71000000e+02	1.87922628e+00
Cd 115	Cd115m 2.006000e-15	3.85300000e+06	1.88973232e+00
Zn 72	Zn72 5.79000000e-17	1.67600000e+05	2.00280315e+00
Y 90	Y90m 5.45100000e-18	1.14800000e+04	2.20220628e+00
Tb 164	Tb1642.41800000e-19	1.80000000e+02	3.41905554e+00
Sn 123	Sn1231.99000000e-14	1.11500000e+07	6.05674528e+00
Eu 156	Eu1563.21600000e-15	1.31300000e+06	6.55379613e+00
Sb 126	Sb1262.24100000e-15	1.07100000e+06	6.93183239e+00
Tb 163	Tb1633.36800000e-18	1.17000000e+03	7.37165207e+00
Nb 95	Nb95 6.11600000e-15	3.03300000e+06	8.86008061e+00
Zn 71	Zn71 2.37400000e-19	1.47000000e+02	9.49448130e+00
Tb 162	Tb1622.82400000e-18	4.56000000e+02	1.59569927e+01
Gd 162	Gd162 3.18300000e-18	5.04000000e+02	1.62726131e+01
Cs 137	Cs1375.64100000e-12	9.46700000e+08	1.81547122e+01

Sr	90	Sr90	4.34100000e-12	9.18300000e+08	2.19244599e+01
Ga	73	Ga73	1.03000000e-16	1.76800000e+04	3.33118165e+01
Gd	161	Gd161	3.12200000e-18	2.19600000e+02	3.68587752e+01
Gd	159	Gd159	9.49800000e-16	6.69600000e+04	3.72379537e+01
Th	231	Th231	1.97000000e-15	9.15800000e+04	3.88704725e+01
Th	234	Th234	4.72000000e-14	2.08200000e+06	4.04400448e+01
Ru	106	Ru106	3.55800000e-13	3.18700000e+07	4.39626869e+01
Ag	111	Ag111	1.57400000e-14	6.43700000e+05	9.19526929e+01
Te	129	Te129m	8.9460000e-14	2.90300000e+06	9.97145101e+01
In	115	In115m	5.1710000e-16	1.61600000e+04	1.16145277e+02
Cs	135	Cs135m	1.2870000e-16	3.17900000e+03	1.25175825e+02
Sn	125	Sn125	3.66200000e-14	8.32900000e+05	1.46818802e+02
Ga	74	Ga74	1.41700000e-17	4.87200000e+02	1.64057868e+02
As	77	As77	4.68000000e-15	1.40000000e+05	1.81214650e+02
Eu	159	Eu159	8.36800000e-17	1.08600000e+03	2.02283721e+02
U	235	U235	2.80000000e-03	2.22200000e+16	2.23826924e+02
Sb	126	Sb126m	7.95000000e-17	1.14100000e+03	2.30821974e+02
Eu	157	Eu157	5.33900000e-15	5.43600000e+04	2.61124146e+02
Cd	115	Cd115	1.62900000e-14	1.92700000e+05	3.06837010e+02
Ge	77	Ge77	2.38400000e-15	4.06800000e+04	3.17687988e+02
Ge	75	Ge75	3.35500000e-16	4.96800000e+03	3.75851152e+02
Ag	112	Ag112	1.16400000e-15	1.12300000e+04	3.86297070e+02
Ga	75	Ga75	9.66400000e-18	1.26000000e+02	4.26865765e+02
Eu	158	Eu158	4.79900000e-16	2.75400000e+03	4.60358259e+02
Sm	158	Sm158	5.62300000e-17	3.18000000e+02	4.67143262e+02
Te	127	Te127	5.63600000e-15	3.36600000e+04	5.50325154e+02
Sn	121	Sn121	1.77000000e-14	9.76300000e+04	6.25418637e+02
Pr	144	Pr144	2.54700000e-16	1.03700000e+03	7.11957237e+02
Ce	144	Ce144	6.23000000e-12	2.45400000e+07	7.35897298e+02
Pd	112	Pd112	1.57500000e-14	7.57100000e+04	7.75310207e+02
Y	91	Y91	8.62800000e-13	5.05400000e+06	7.83068436e+02
Sm	156	Sm156	1.15200000e-14	3.38400000e+04	9.10885395e+02
Pr	143	Pr143	4.42700000e-13	1.17500000e+06	1.09976990e+03
Sm	157	Sm157	2.04200000e-16	4.82000000e+02	1.12635492e+03
La	140	La140	5.72600000e-14	1.45200000e+05	1.17577143e+03
Cd	117	Cd117m	4.80400000e-15	1.21000000e+04	1.41643934e+03
Se	81	Se81m	1.13000000e-15	3.43400000e+03	1.69574032e+03
In	117	In117	1.34700000e-15	2.62800000e+03	1.82861629e+03
Rh	103	Rh103m	1.54400000e-15	3.36600000e+03	1.85892630e+03
Cd	119	Cd119	9.98000000e-17	1.61400000e+02	1.95551751e+03
In	117	In117m	3.86300000e-15	6.98400000e+03	1.97333504e+03
Ag	113	Ag113	1.10200000e-14	1.93300000e+04	2.10589886e+03
Sm	153	Sm153	1.31900000e-13	1.68500000e+05	2.13559882e+03
Pd	109	Pd109	2.69500000e-14	4.82400000e+04	2.13939603e+03
Ru	103	Ru103	2.17100000e-12	3.39600000e+06	2.59072389e+03
Ag	116	Ag116	1.19400000e-16	1.60800000e+02	2.67193879e+03
Ce	141	Ce141	2.79300000e-12	2.80800000e+06	2.94456355e+03
Cd	117	Cd117	7.88300000e-15	8.96400000e+03	3.13740099e+03

Zr	95	Zr95	3.97000000e-12	5.53000000e+06	3.15433622e+03
Sb	127	Sb127	3.25300000e-13	3.32600000e+05	3.21458053e+03
Ag	115	Ag115	1.09400000e-15	1.19900000e+03	3.31181837e+03
In	119	In119m	1.03500000e-15	1.08000000e+03	3.36152113e+03
I	132	I132m	5.70700000e-15	5.00400000e+03	3.60647439e+03
Xe	133	Xe133	5.23400000e-13	4.53000000e+05	3.62618609e+03
Sr	89	Sr89	3.60000000e-12	4.36300000e+06	3.86984431e+03
Sn	123	Sn123m	2.81200000e-15	2.40500000e+03	3.96790565e+03
As	78	As78	4.33900000e-15	5.43600000e+03	4.27151378e+03
Pd	111	Pd111	1.64200000e-15	1.40400000e+03	4.39793978e+03
U	237	U237	1.53300000e-12	5.83200000e+05	4.62958973e+03
Cd	118	Cd118	4.07300000e-15	3.01800000e+03	4.77396664e+03
U	238	U238	3.86100000e-01	1.41100000e+17	4.79912479e+03
Pd	114	Pd114	1.92100000e-16	1.45200000e+02	4.84420049e+03
In	119	In119	2.00100000e-16	1.44000000e+02	4.87420563e+03
Ge	78	Ge78	5.22900000e-15	5.22000000e+03	5.36067833e+03
Sm	155	Sm155	2.89100000e-15	1.32500000e+03	5.87579625e+03
Rh	105	Rh105	2.56100000e-13	1.27000000e+05	8.01646260e+03
Nd	147	Nd147	2.82700000e-12	9.50400000e+05	8.44633414e+03
Pm	154	Pm154	3.92000000e-16	1.03800000e+02	1.02360926e+04
Pm	151	Pm151	4.36300000e-13	1.02000000e+05	1.18242691e+04
Nb	98	Nb98m	9.05500000e-15	3.08900000e+03	1.24856364e+04
Pm	149	Pm149	8.54400000e-13	1.90900000e+05	1.25382018e+04
I	131	I131	2.84700000e-12	6.94700000e+05	1.30582532e+04
As	79	As79	1.38600000e-15	5.40600000e+02	1.35464753e+04
Rh	108	Rh108	1.62000000e-15	3.60000000e+02	1.73922180e+04
Ru	108	Ru108	1.22900000e-15	2.73000000e+02	1.73992966e+04
Te	131	Te131m	6.43200000e-13	1.08000000e+05	1.89765473e+04
Ba	140	Ba140	7.00900000e-12	1.09700000e+06	1.90496767e+04
Tc	99	Tc99m	1.14200000e-13	2.16700000e+04	2.22197010e+04
Pm	153	Pm153	3.06500000e-15	3.24000000e+02	2.58083506e+04
Rh	107	Rh107	1.36300000e-14	1.30300000e+03	4.08069255e+04
Ru	107	Ru107	2.36100000e-15	2.25000000e+02	4.09351045e+04
I	132	I132	1.27500000e-13	8.28000000e+03	4.86936275e+04
Nd	152	Nd152	1.22000000e-14	6.84000000e+02	4.89808540e+04
Pm	152	Pm152	4.42300000e-15	2.46000000e+02	4.93746985e+04
Sn	127	Sn127	1.21200000e-13	7.56000000e+03	5.26918341e+04
Se	81	Se81	1.17000000e-14	1.10900000e+03	5.43670175e+04
Te	132	Te132	5.07100000e-12	2.81700000e+05	5.69244764e+04
Sb	128	Sb128	5.82600000e-13	3.24400000e+04	5.85660424e+04
Mo	99	Mo99	4.55800000e-12	2.37600000e+05	8.08833075e+04
Nd	151	Nd151	2.46800000e-14	7.45200000e+02	9.15506799e+04
Se	83	Se83	2.61900000e-14	1.35000000e+03	9.75640567e+04
Ru	105	Ru105	4.40700000e-13	1.59800000e+04	1.09633477e+05
Sn	129	Sn129	4.57000000e-15	1.33800000e+02	1.10518909e+05
Br	83	Br83	2.18500000e-13	8.60400000e+03	1.27714192e+05
Ce	143	Ce143	3.17400000e-12	1.19200000e+05	1.51189122e+05
Te	129	Te129	1.95600000e-13	4.17600000e+03	1.51560093e+05

Sb	130	Sb1301.18700000e-13	2.40100000e+03	1.58738188e+05
Xe	135	Xe1351.75200000e-12	3.29000000e+04	1.64653379e+05
Sn	128	Sn1281.85600000e-13	3.54600000e+03	1.70685050e+05
Sb	128	Sb128m 3.29200000e-14	6.22800000e+02	1.72372296e+05
Tc	105	Tc105 2.23700000e-14	4.56000000e+02	1.95019507e+05
I	133	I133 4.82700000e-12	7.48800000e+04	2.02314045e+05
Nb	97	Nb97 2.04500000e-13	4.32000000e+03	2.03706104e+05
Nd	149	Nd1494.84400000e-13	6.22800000e+03	2.17889085e+05
Sb	129	Sb1291.05600000e-12	1.55500000e+04	2.19740459e+05
Y	91	Y91m 1.55900000e-13	2.98100000e+03	2.39888241e+05
Pr	149	Pr149 1.24000000e-14	1.35600000e+02	2.56178064e+05
Zr	97	Zr97 3.73900000e-12	6.08400000e+04	2.64460453e+05
Se	84	Se84 1.02200000e-14	1.86000000e+02	2.73039121e+05
Br	84	Br84 1.05800000e-13	1.90800000e+03	2.75546071e+05
Sb	133	Sb1331.65500000e-14	1.50000000e+02	3.46275137e+05
Tc	104	Tc1049.81100000e-14	1.09100000e+03	3.60928684e+05
Sn	130	Sn1302.58100000e-14	2.23200000e+02	3.71292925e+05
Pr	148	Pr148 1.92600000e-14	1.36200000e+02	3.98826192e+05
Br	85	Br85 1.47800000e-14	1.74000000e+02	4.17131005e+05
Y	93	Y93 3.62000000e-12	3.63600000e+04	4.46856377e+05
Sb	132	Sb1322.44800000e-14	1.67400000e+02	4.62432385e+05
Pr	145	Pr145 3.56300000e-12	2.15300000e+04	4.76398080e+05
Te	133	Te133m 5.14200000e-13	3.32300000e+03	4.85642071e+05
Sr	91	Sr91 3.70700000e-12	3.42000000e+04	4.97188758e+05
I	135	I135 4.06500000e-12	2.38000000e+04	5.28099841e+05
Y	92	Y92 1.56900000e-12	1.27400000e+04	5.58768481e+05
Pr	147	Pr147 1.66200000e-13	8.17200000e+02	5.77499402e+05
Sb	131	Sb1313.03800000e-13	1.37900000e+03	7.01969786e+05
Rb	88	Rb88 1.62000000e-13	1.06900000e+03	7.18821154e+05
Te	131	Te1313.44400000e-13	1.50100000e+03	7.31100982e+05
Kr	88	Kr88 1.59000000e-12	1.02200000e+04	7.37954811e+05
Kr	87	Kr87 7.12100000e-13	4.57800000e+03	7.46297793e+05
Pr	146	Pr146 3.94100000e-13	1.44900000e+03	7.77591323e+05
Ce	146	Ce1462.22000000e-13	8.11200000e+02	7.82417200e+05
La	141	La141 4.07500000e-12	1.41500000e+04	8.52546887e+05
Mo	102	Mo102 1.42100000e-13	6.78000000e+02	8.57690154e+05
Ce	145	Ce1456.30200000e-14	1.80600000e+02	1.00452064e+06
Te	134	Te1348.23400000e-13	2.50600000e+03	1.02350793e+06
Rb	90	Rb90 3.60300000e-14	1.58000000e+02	1.05762298e+06
Sr	92	Sr92 2.27700000e-12	9.75600000e+03	1.05893578e+06
Tc	101	Tc101 2.28100000e-13	8.53200000e+02	1.10489060e+06
Mo	101	Mo101 2.34900000e-13	8.78400000e+02	1.10518639e+06
Xe	138	Xe1383.09900000e-13	8.44800000e+02	1.10957023e+06
Kr	89	Kr89 4.51800000e-14	1.89000000e+02	1.12114201e+06
Ba	139	Ba1391.88000000e-12	4.96800000e+03	1.13639071e+06
Te	133	Te1332.69900000e-13	7.45200000e+02	1.13669673e+06
Xe	137	Xe1378.54800000e-14	2.29100000e+02	1.13680263e+06
I	134	I134 1.17600000e-12	3.15400000e+03	1.16146746e+06

Cs	138	Cs138	7.55300000e-13	1.93000000e+03	1.18372086e+06
Y	95	Y95	1.75500000e-13	6.40800000e+02	1.20336458e+06
Rb	89	Rb89	2.36300000e-13	9.10800000e+02	1.21679357e+06
La	142	La142	2.32100000e-12	5.54400000e+03	1.23063649e+06
Y	94	Y94	3.24800000e-13	1.14500000e+03	1.25964710e+06
Cs	139	Cs139	2.37500000e-13	5.56200000e+02	1.28228346e+06
La	143	La143	3.98900000e-13	8.53200000e+02	1.36471940e+06
Sr	93	Sr93	1.35900000e-13	4.45400000e+02	1.36946995e+06
Ba	142	Ba142	3.06800000e-13	6.37200000e+02	1.41532916e+06
Ba	141	Ba141	5.40100000e-13	1.09800000e+03	1.45619299e+06
Np	239	Np239	4.61400000e-10	2.03900000e+05	3.95210683e+06
U	239	U239	5.03400000e-11	1.41100000e+03	6.23095348e+07

Attività totale: 1.12e+8 Bq

Processo 2)

Isotopo	Mass (g)	T_{1/2} (s)	Attività (Bq)		
Ru	106	Ru106	1.01400000e-15	3.18700000e+07	1.25289951e-01
Cs	137	Cs137	4.08600000e-14	9.46700000e+08	1.31501780e-01
Te	129	Te129m	1.34800000e-16	2.90300000e+06	1.50251687e-01
Sr	90	Sr90	3.13900000e-14	9.18300000e+08	1.58536926e-01
Cd	115	Cd115m	2.43400000e-16	3.85300000e+06	2.29292546e-01
Sn	123	Sn123	8.82500000e-16	1.11500000e+07	2.68596870e-01
Zn	72	Zn72	9.43400000e-18	1.67600000e+05	3.26328927e-01
Zn	69	Zn69	2.37200000e-19	3.42000000e+03	4.19571229e-01
Cu	69	Cu69	1.27200000e-20	1.71000000e+02	4.49995450e-01
Eu	159	Eu159	1.93400000e-19	1.08600000e+03	4.67515197e-01
Eu	157	Eu157	1.23300000e-17	5.43600000e+04	6.03045649e-01
Rh	103	Rh103m	5.13000000e-19	3.36600000e+03	6.17635487e-01
Ru	103	Ru103	7.21000000e-16	3.39600000e+06	8.60392410e-01
Eu	158	Eu158	1.11300000e-18	2.75400000e+03	1.06767815e+00
Sm	158	Sm158	1.34000000e-19	3.18000000e+02	1.11323488e+00
Sn	125	Sn125	2.95200000e-16	8.32900000e+05	1.18353114e+00
Te	127	Te127	1.24100000e-17	3.36600000e+04	1.21176990e+00
Zn	71	Zn71	4.73500000e-20	1.47000000e+02	1.89369709e+00
Sm	156	Sm156	2.71600000e-17	3.38400000e+04	2.14753883e+00
Sm	157	Sm157	4.76700000e-19	4.82000000e+02	2.62944853e+00
I	132	I132m	4.94700000e-18	5.00400000e+03	3.12620095e+00
Pr	144	Pr144	1.48900000e-18	1.03700000e+03	4.16216853e+00
Nb	98	Nb98m	3.01900000e-18	3.08900000e+03	4.16279804e+00
Ga	73	Ga73	1.30500000e-17	1.76800000e+04	4.22057482e+00
Ce	144	Ce144	3.77500000e-14	2.45400000e+07	4.45908876e+00
Y	91	Y91	5.72300000e-15	5.05400000e+06	5.19413614e+00
Sm	153	Sm153	3.77700000e-16	1.68500000e+05	6.11535765e+00
Pr	143	Pr143	2.82500000e-15	1.17500000e+06	7.01795793e+00
Sb	127	Sb127	7.33000000e-16	3.32600000e+05	7.24342923e+00
La	140	La140	3.85600000e-16	1.45200000e+05	7.91787398e+00
Rh	105	Rh105	2.97000000e-16	1.27000000e+05	9.29671766e+00

As	77	As77	2.42200000e-16	1.40000000e+05	9.37824535e+00
Xe	133	Xe133	1.58000000e-15	4.53000000e+05	1.09464540e+01
Ag	111	Ag111	1.90200000e-15	6.43700000e+05	1.11114372e+01
Se	81	Se81m	7.56300000e-18	3.43400000e+03	1.13494549e+01
Ge	77	Ge77	9.85100000e-17	4.06800000e+04	1.31272834e+01
In	115	In115m	6.27300000e-17	1.61600000e+04	1.40897181e+01
Sm	155	Sm155	7.10000000e-18	1.32500000e+03	1.44303540e+01
Zr	95	Zr95	1.99200000e-14	5.53000000e+06	1.58272991e+01
Ga	74	Ga74	1.37800000e-18	4.87200000e+02	1.59542514e+01
Tc	99	Tc99m	9.16700000e-17	2.16700000e+04	1.78360770e+01
Ce	141	Ce141	1.91600000e-14	2.80800000e+06	2.01997270e+01
Te	131	Te131m	7.35600000e-16	1.08000000e+05	2.17026558e+01
I	131	I131	5.05200000e-15	6.94700000e+05	2.31718634e+01
Ge	75	Ge75	2.50500000e-17	4.96800000e+03	2.80628059e+01
Pm	154	Pm154	1.15300000e-18	1.03800000e+02	3.01076907e+01
Ga	75	Ga75	7.21700000e-19	1.26000000e+02	3.18780031e+01
Sr	89	Sr89	2.97800000e-14	4.36300000e+06	3.20122121e+01
Cd	115	Cd115	1.97600000e-15	1.92700000e+05	3.72197625e+01
Pm	151	Pm151	1.51900000e-15	1.02000000e+05	4.11667770e+01
Nd	147	Nd147	1.42300000e-14	9.50400000e+05	4.25155058e+01
Sn	121	Sn121	1.29300000e-15	9.76300000e+04	4.56873615e+01
Ag	112	Ag112	1.52300000e-16	1.12300000e+04	5.05438520e+01
Pm	149	Pm149	3.64100000e-15	1.90900000e+05	5.34311713e+01
Mo	99	Mo99	3.65700000e-15	2.37600000e+05	6.48947467e+01
Pm	153	Pm153	8.76600000e-18	3.24000000e+02	7.38127248e+01
I	132	I132	2.26400000e-16	8.28000000e+03	8.64646060e+01
Sb	128	Sb128	9.24400000e-16	3.24400000e+04	9.29255914e+01
Pd	112	Pd112	2.06000000e-15	7.57100000e+04	1.01405652e+02
Pd	109	Pd109	1.40500000e-15	4.82400000e+04	1.11534375e+02
Te	132	Te132	1.12500000e-14	2.81700000e+05	1.26286799e+02
Ru	105	Ru105	5.10800000e-16	1.59800000e+04	1.27072340e+02
Ba	140	Ba140	4.99700000e-14	1.09700000e+06	1.35812861e+02
Cd	117	Cd117m	5.02700000e-16	1.21000000e+04	1.48218995e+02
Sn	127	Sn127	3.45400000e-16	7.56000000e+03	1.50163032e+02
Nd	152	Nd152	3.88900000e-17	6.84000000e+02	1.56136509e+02
Pm	152	Pm152	1.40300000e-17	2.46000000e+02	1.56619267e+02
Sn	129	Sn129	6.88300000e-18	1.33800000e+02	1.66455503e+02
As	78	As78	1.75700000e-16	5.43600000e+03	1.72967267e+02
Cd	119	Cd119	8.11400000e-18	1.61400000e+02	1.76339954e+02
Sn	123	Sn123m	1.29600000e-16	2.40500000e+03	1.82873603e+02
In	117	In117	1.41000000e-16	2.62800000e+03	1.91414178e+02
Sb	130	Sb130	1.44200000e-16	2.40100000e+03	1.92839484e+02
Tc	104	Tc104	5.39800000e-17	1.09100000e+03	1.98582513e+02
Te	129	Te129	2.65300000e-16	4.17600000e+03	2.05566936e+02
In	117	In117m	4.04400000e-16	6.98400000e+03	2.06579521e+02
Ge	78	Ge78	2.13000000e-16	5.22000000e+03	2.18363833e+02
Tc	105	Tc105	2.59300000e-17	4.56000000e+02	2.26055245e+02
Mo	102	Mo102	3.81100000e-17	6.78000000e+02	2.30025136e+02

Ag	113	Ag1131.44200000e-15	1.93300000e+04	2.75563172e+02
Sn	128	Sn1283.08300000e-16	3.54600000e+03	2.83524789e+02
Sb	128	Sb128m 5.42500000e-17	6.22800000e+02	2.84058233e+02
Sb	129	Sb129 1.41900000e-15	1.55500000e+04	2.95276241e+02
Ag	116	Ag116 1.34000000e-17	1.60800000e+02	2.99865828e+02
In	119	In119m 9.28700000e-17	1.08000000e+03	3.01627504e+02
Rh	107	Rh107 1.05600000e-16	1.30300000e+03	3.16156370e+02
Ru	107	Ru107 1.82900000e-17	2.25000000e+02	3.17112690e+02
Nd	151	Nd151 8.60000000e-17	7.45200000e+02	3.19017766e+02
Cd	117	Cd117 8.25100000e-16	8.96400000e+03	3.28386345e+02
Tc	101	Tc101 6.94000000e-17	8.53200000e+02	3.36165749e+02
Mo	101	Mo101 7.14800000e-17	8.78400000e+02	3.36307889e+02
Ru	108	Ru108 2.63500000e-17	2.73000000e+02	3.73044318e+02
Rh	108	Rh108 3.47700000e-17	3.60000000e+02	3.73288531e+02
Ag	115	Ag115 1.32400000e-16	1.19900000e+03	4.00808731e+02
In	119	In119 1.78400000e-17	1.44000000e+02	4.34561862e+02
Cd	118	Cd118 3.95200000e-16	3.01800000e+03	4.63214244e+02
As	79	As79 4.80200000e-17	5.40600000e+02	4.69337478e+02
Nb	97	Nb97 5.07000000e-16	4.32000000e+03	5.05031760e+02
Pd	111	Pd111 1.98300000e-16	1.40400000e+03	5.31127563e+02
Th	232	Th232 1.41300000e-01	4.41800000e+17	5.75432885e+02
Sn	130	Sn130 4.07700000e-17	2.23200000e+02	5.86501843e+02
Pd	114	Pd114 2.39100000e-17	1.45200000e+02	6.02940311e+02
I	133	I133 1.45800000e-14	7.48800000e+04	6.11091523e+02
Zr	97	Zr97 9.44500000e-15	6.08400000e+04	6.68047333e+02
Xe	135	Xe135 8.09100000e-15	3.29000000e+04	7.60394115e+02
Nd	149	Nd149 2.06000000e-15	6.22800000e+03	9.26613366e+02
Ce	143	Ce143 3.93500000e-14	1.19200000e+05	9.63604137e+02
Pr	149	Pr149 5.34300000e-17	1.35600000e+02	1.10383822e+03
Te	133	Te133m 1.18100000e-15	3.32300000e+03	1.11540896e+03
Te	131	Te1316.12900000e-16	1.50100000e+03	1.30107953e+03
Sb	131	Sb1315.79800000e-16	1.37900000e+03	1.33970402e+03
Se	81	Se81 3.07400000e-16	1.10900000e+03	1.42841207e+03
Sb	132	Sb132 8.09400000e-17	1.67400000e+02	1.52897374e+03
Y	91	Y91m 1.03300000e-15	2.98100000e+03	1.58950964e+03
Se	83	Se83 4.45300000e-16	1.35000000e+03	1.65884973e+03
Sb	133	Sb133 8.73600000e-17	1.50000000e+02	1.82783057e+03
Pr	148	Pr148 8.93200000e-17	1.36200000e+02	1.84959270e+03
Br	83	Br83 4.43900000e-15	8.60400000e+03	2.59461463e+03
Y	93	Y93 2.22000000e-14	3.63600000e+04	2.74038993e+03
Pr	145	Pr145 2.05200000e-14	2.15300000e+04	2.74366786e+03
Pr	147	Pr147 8.34400000e-16	8.17200000e+02	2.89931108e+03
I	135	I135 2.27900000e-14	2.38000000e+04	2.96073687e+03
Sr	91	Sr91 2.45700000e-14	3.42000000e+04	3.29536762e+03
Y	92	Y92 9.87400000e-15	1.27400000e+04	3.51643084e+03
Te	133	Te1338.56200000e-16	7.45200000e+02	3.60592715e+03
Pr	146	Pr146 2.12900000e-15	1.44900000e+03	4.20069000e+03
Ce	146	Ce1461.20400000e-15	8.11200000e+02	4.24337977e+03

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione PAR2010-UNI_PV-LB3-002		Rev. 0	Distrib.	Pag. 29	di 48

I	134	I134	4.77100000e-15	3.15400000e+03	4.71204188e+03
Te	134	Te134	3.81900000e-15	2.50600000e+03	4.74711776e+03
Br	84	Br84	1.94700000e-15	1.90800000e+03	5.07077695e+03
Se	84	Se84	1.91100000e-16	1.86000000e+02	5.10545754e+03
Ce	145	Ce145	3.62500000e-16	1.80600000e+02	5.77814552e+03
La	141	La141	2.79100000e-14	1.41500000e+04	5.83916162e+03
Y	95	Y95	8.88900000e-16	6.40800000e+02	6.09499018e+03
Br	85	Br85	2.22800000e-16	1.74000000e+02	6.28801001e+03
Sr	92	Sr92	1.43600000e-14	9.75600000e+03	6.67822479e+03
Rb	88	Rb88	1.56700000e-15	1.06900000e+03	6.95304166e+03
Y	94	Y94	1.82300000e-15	1.14500000e+03	7.07000206e+03
Kr	88	Kr88	1.56300000e-14	1.02200000e+04	7.25423503e+03
La	142	La142	1.53000000e-14	5.54400000e+03	8.11233874e+03
Rb	90	Rb90	2.78000000e-16	1.58000000e+02	8.16039933e+03
Ba	139	Ba139	1.38100000e-14	4.96800000e+03	8.34763600e+03
Xe	137	Xe137	6.34400000e-16	2.29100000e+02	8.43691610e+03
Kr	87	Kr87	8.09500000e-15	4.57800000e+03	8.48375317e+03
Sr	93	Sr93	8.45400000e-16	4.45400000e+02	8.51913096e+03
La	143	La143	2.54300000e-15	8.53200000e+02	8.70012892e+03
Xe	138	Xe138	2.50700000e-15	8.44800000e+02	8.97609736e+03
Cs	138	Cs138	5.74300000e-15	1.93000000e+03	9.00054138e+03
Ba	142	Ba142	2.06700000e-15	6.37200000e+02	9.53548039e+03
Cs	139	Cs139	1.77400000e-15	5.56200000e+02	9.57798258e+03
Kr	89	Kr89	3.93200000e-16	1.89000000e+02	9.75726074e+03
Ba	141	Ba141	3.71200000e-15	1.09800000e+03	1.00081251e+04
Rb	89	Rb89	1.95300000e-15	9.10800000e+02	1.00566984e+04
Th	231	Th231	6.70100000e-13	9.15800000e+04	1.32218800e+04
Pa	233	Pa233	2.20900000e-10	2.33300000e+06	1.69625550e+05
Th	233	Th233	2.12000000e-11	1.33800000e+03	2.83850745e+07

Attività totale: 2.88e+7 Bq

Nel complesso moltiplicante SM1 sono stati irraggiati un campione di Uranio naturale ed uno di Torio.

Il campione di Uranio è stato irraggiato nel canale di irraggiamento A ($\phi=5.9 \cdot 10^4$ n/cm² s), posizionato nel secondo anello del reticolo del reattore, mentre il campione di Torio è stato irraggiato nel canale di irraggiamento B ($\phi=2.59 \cdot 10^4$ n/cm² s), nel quarto anello.

I campioni cilindrici di Uranio e Torio, di geometria simile ai precedenti (Figura 8), hanno entrambi raggio di 0.635 cm, spessore rispettivamente 0.0162 cm e 0.00874 cm e massa rispettivamente 0.3921 g e 0.1298 g.

Sono stati simulati i seguenti processi:

- 3) Irraggiamento nell'impianto nucleare sottocritico SM1 dell'Università di Pavia per complessive 341 ore (fluenza neutronica totale $\sim 7.2 \cdot 10^{10}$ cm⁻²) – **Targhetta di Uranio naturale**

4) Irraggiamento nell'impianto nucleare sottocritico SM1 dell'Università di Pavia per complessive 341 ore (fluenza neutronica totale $\sim 3.2 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-2}$) – **Targhetta di Torio**

I risultati delle simulazioni sono di seguito riportati.

Processo 3)

Isotopo	Mass (g)	T_{1/2} (s)	Attività (Bq)
Pr 144	Pr144 4.84800000e-20	1.03700000e+03	1.35515064e-01
Ce 144	Ce144 1.14800000e-15	2.45400000e+07	1.35603547e-01
Ru 107	Ru107 8.02500000e-21	2.25000000e+02	1.39137744e-01
Rh 107	Rh107 4.64800000e-20	1.30300000e+03	1.39156705e-01
Nd 152	Nd152 4.12000000e-20	6.84000000e+02	1.65410753e-01
Pm 152	Pm152 1.49300000e-20	2.46000000e+02	1.66666120e-01
Se 81	Se81 3.86700000e-20	1.10900000e+03	1.79689963e-01
Sn 127	Sn127 5.00400000e-19	7.56000000e+03	2.17549454e-01
Te 127	Te127 2.66200000e-18	3.36600000e+04	2.59930014e-01
Sb 127	Sb127 3.05600000e-17	3.32600000e+05	3.01990719e-01
Nd 151	Nd151 8.27300000e-20	7.45200000e+02	3.06887672e-01
Pm 151	Pm151 1.13700000e-17	1.02000000e+05	3.08141050e-01
Se 83	Se83 8.60300000e-20	1.35000000e+03	3.20482466e-01
Sn 129	Sn129 1.51300000e-20	1.33800000e+02	3.65897394e-01
Rh 103	Rh103m 3.30500000e-19	3.36600000e+03	3.97911362e-01
Ru 103	Ru103 3.68000000e-16	3.39600000e+06	4.39146195e-01
Te 131	Te131m 1.69000000e-17	1.08000000e+05	4.98606419e-01
Sb 130	Sb130 3.99100000e-19	2.40100000e+03	5.33718710e-01
Br 83	Br83 9.71400000e-19	8.60400000e+03	5.67787487e-01
Zr 95	Zr95 7.24900000e-16	5.53000000e+06	5.75964313e-01
Sn 128	Sn128 6.54900000e-19	3.54600000e+03	6.02271762e-01
Sb 128	Sb128m 1.17700000e-19	6.22800000e+02	6.16288553e-01
U 237	U237 2.04300000e-16	5.83200000e+05	6.16976635e-01
Rh 105	Rh105 2.08600000e-17	1.27000000e+05	6.52961381e-01
Tc 105	Tc105 7.56900000e-20	4.56000000e+02	6.59858136e-01
Ru 105	Ru105 2.65400000e-18	1.59800000e+04	6.60238821e-01
Sb 128	Sb128 6.73200000e-18	3.24400000e+04	6.76736349e-01
Sr 89	Sr89 6.58300000e-16	4.36300000e+06	7.07644031e-01
Y 91	Y91 7.81600000e-16	5.05400000e+06	7.09372148e-01
Pm 149	Pm149 5.77200000e-17	1.90900000e+05	8.47033014e-01
Pr 149	Pr149 4.12100000e-20	1.35600000e+02	8.51378873e-01
Nd 149	Nd149 1.92400000e-18	6.22800000e+03	8.65438891e-01
Se 84	Se84 3.35600000e-20	1.86000000e+02	8.96594219e-01
Br 84	Br84 3.53300000e-19	1.90800000e+03	9.20136361e-01
Nd 147	Nd147 3.74300000e-16	9.50400000e+05	1.11831018e+00
Te 129	Te129 1.44900000e-18	4.17600000e+03	1.12275345e+00
Sb 133	Sb133 3.64800000e-20	1.50000000e+02	1.18172929e+00
Tc 104	Tc104 3.31300000e-19	1.09100000e+03	1.21879190e+00
Sn 130	Sn130 8.56100000e-20	2.23200000e+02	1.23155317e+00

Sb	129	Sb1295.98100000e-18	1.55500000e+04	1.24457167e+00
Ce	141	Ce1411.18200000e-15	2.80800000e+06	1.24614182e+00
Pr	148	Pr148 6.38000000e-20	1.36200000e+02	1.32113765e+00
Br	85	Br85 4.84700000e-20	1.74000000e+02	1.36795263e+00
Sb	132	Sb1328.23500000e-20	1.67400000e+02	1.55560894e+00
Te	133	Te133m 1.80200000e-18	3.32300000e+03	1.70191951e+00
Pr	147	Pr147 5.49400000e-19	8.17200000e+02	1.90901427e+00
I	131	I131 4.44600000e-16	6.94700000e+05	2.03923406e+00
Pr	143	Pr143 8.36100000e-16	1.17500000e+06	2.07706712e+00
Pa	234	Pa2342.80900000e-17	2.41200000e+04	2.07742231e+00
La	140	La140 1.06600000e-16	1.45200000e+05	2.18891433e+00
Sb	131	Sb1311.01100000e-18	1.37900000e+03	2.33604824e+00
Ba	140	Ba1409.23800000e-16	1.09700000e+06	2.51078489e+00
Ce	146	Ce1467.33100000e-19	8.11200000e+02	2.58373896e+00
Pr	146	Pr146 1.31500000e-18	1.44900000e+03	2.59460185e+00
Kr	87	Kr87 2.60600000e-18	4.57800000e+03	2.73115019e+00
Y	91	Y91m 1.79600000e-18	2.98100000e+03	2.76356177e+00
Mo	102	Mo1024.76600000e-19	6.78000000e+02	2.87667225e+00
Te	131	Te1311.37500000e-18	1.50100000e+03	2.91888458e+00
Ce	145	Ce1452.07900000e-19	1.80600000e+02	3.31386608e+00
Pr	145	Pr145 2.48000000e-17	2.15300000e+04	3.31593387e+00
Kr	88	Kr88 7.30000000e-18	1.02200000e+04	3.38809442e+00
Rb	88	Rb88 7.74500000e-19	1.06900000e+03	3.43658632e+00
Rb	90	Rb90 1.18500000e-19	1.58000000e+02	3.47844360e+00
Xe	133	Xe1335.04300000e-16	4.53000000e+05	3.49385870e+00
Te	132	Te1323.11800000e-16	2.81700000e+05	3.50010880e+00
Te	134	Te1342.84400000e-18	2.50600000e+03	3.53516704e+00
I	132	I132 9.33400000e-18	8.28000000e+03	3.56475544e+00
Kr	89	Kr89 1.48400000e-19	1.89000000e+02	3.68254703e+00
Xe	138	Xe1381.03100000e-18	8.44800000e+02	3.69140661e+00
Mo	101	Mo1017.85100000e-19	8.78400000e+02	3.69383497e+00
Tc	101	Tc101 7.63500000e-19	8.53200000e+02	3.69830763e+00
Tc	99	Tc99m1.93200000e-17	2.16700000e+04	3.75905975e+00
Xe	137	Xe1372.84400000e-19	2.29100000e+02	3.78224927e+00
Te	133	Te1339.29600000e-19	7.45200000e+02	3.91505475e+00
I	135	I135 3.03100000e-17	2.38000000e+04	3.93768910e+00
Y	95	Y95 5.82300000e-19	6.40800000e+02	3.99270197e+00
Rb	89	Rb89 7.75700000e-19	9.10800000e+02	3.99435789e+00
Cs	138	Cs1382.57400000e-18	1.93000000e+03	4.03402290e+00
Zr	97	Zr97 5.80000000e-17	6.08400000e+04	4.10235525e+00
Nb	97	Nb97 4.13400000e-18	4.32000000e+03	4.11795127e+00
Y	94	Y94 1.07600000e-18	1.14500000e+03	4.17296885e+00
Cs	139	Cs1397.86900000e-19	5.56200000e+02	4.24854256e+00
I	133	I133 1.02400000e-16	7.48800000e+04	4.29189108e+00
Xe	135	Xe1354.56900000e-17	3.29000000e+04	4.29395713e+00
Mo	99	Mo99 2.42400000e-16	2.37600000e+05	4.30147296e+00
Ba	139	Ba1397.17200000e-18	4.96800000e+03	4.33520966e+00
I	134	I134 4.46400000e-18	3.15400000e+03	4.40883566e+00

La	143	La143	1.31600000e-18	8.53200000e+02	4.50230816e+00
Ce	143	Ce143	1.84100000e-16	1.19200000e+05	4.50824706e+00
Sr	93	Sr93	4.49300000e-19	4.45400000e+02	4.52761479e+00
Y	93	Y93	3.74700000e-17	3.63600000e+04	4.62533382e+00
Ba	142	Ba142	1.01300000e-18	6.37200000e+02	4.67316963e+00
Sr	91	Sr91	3.55100000e-17	3.42000000e+04	4.76265789e+00
Sr	92	Sr92	1.03000000e-17	9.75600000e+03	4.79009159e+00
La	142	La142	9.05200000e-18	5.54400000e+03	4.79953531e+00
Y	92	Y92	1.34900000e-17	1.27400000e+04	4.80419809e+00
Ba	141	Ba141	1.78600000e-18	1.09800000e+03	4.81533176e+00
La	141	La141	2.31500000e-17	1.41500000e+04	4.84330317e+00
Np	239	Np239	1.41900000e-14	2.03900000e+05	1.21543988e+02
U	239	U239	9.97500000e-17	1.41100000e+03	1.23467940e+02
U	235	U235	2.82100000e-03	2.22200000e+16	2.25505626e+02
Th	231	Th231	1.14300000e-14	9.15800000e+04	2.25527665e+02
Th	234	Th234	1.91000000e-12	2.08200000e+06	1.63645097e+03
U	238	U238	3.89000000e-01	1.41100000e+17	4.83517105e+03

Attività totale: 9.01e+3 Bq

Processo 4)

Isotopo	Mass (g)	T_{1/2} (s)	Attività (Bq)		
Ac	228	Ac228	2.92800000e-17	2.20700000e+04	2.42884670e+00
Ra	228	Ra228	2.47200000e-13	1.81500000e+08	2.49346457e+00
Pa	233	Pa233	1.61600000e-14	2.33300000e+06	1.24090036e+01
Th	233	Th233	3.03600000e-17	1.33800000e+03	4.06495690e+01
Th	232	Th232	1.29800000e-01	4.41800000e+17	5.28600060e+02

Attività totale: 5.50e+2 Bq

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	PAR2010-UNI_PV-LB3-002	0		33	48

5. IRRAGGIAMENTO ED ANALISI DELLE TARGHETTE

5.1 Premessa

Scopo dell'attività è l'analisi qualitativa e quantitativa dei prodotti di fissione misurabili in targhette di Uranio e Torio naturale in forma metallica. Le targhette sono state irraggiate in campo neutronico presso il reattore TRIGA Mark II del LENA e presso il complesso moltiplicante sottocritico SM-1 del Dipartimento di Chimica dell'Università di Pavia.

5.2 Descrizione dell'apparato di misura

La determinazione radiometrica dei radionuclidi gamma emittenti è stata effettuata mediante spettrometria gamma ad alta risoluzione in condizioni di basso fondo, utilizzando due rivelatori HPGe ORTEC, accoppiati ad analizzatori multicanali computerizzati, di cui di seguito si riportano le caratteristiche tecniche e le modalità di impiego:

Risoluzione: 1.9 FWHM (1332.5 keV)

Efficienza relativa: 26-30 %

Rapporto picco/compton 55/1

Geometria di conteggio: Disco diametro 12.7 mm posizionato a 5 e 23 cm dal rivelatore, in asse con lo stesso (*TE*)

Gli standard di riferimento per la taratura e calibrazione in energia e in efficienza in funzione dell'energia dei fotoni sono i seguenti:

- ENEA BMS - 1417/1419/1420/1429/1431/1432 - 1997 (1);
- AREVA - LEA/CERCA- 9ML01ELMB45 - 2008 (2);
- AREVA - LEA/CERCA- 9ML01EGMA[15] - 7694-22467 - 2010 (3);
- QCY48 - SN R1/6/26 – 2011 (4),

e sono certificati per contenuto specifico di radioattività nell'intervallo di energia [0.059 - 1.836] MeV.

L'incertezza della metodologia di analisi è valutata separatamente per le sue componenti statistiche e sistematiche e riportata nei risultati finali in termine di incertezza estesa con fattore di copertura $k=2$ (livello di confidenza del 95%).

La MDA è calcolata nelle zone dello spettro corrispondenti secondo libreria ai radionuclidi guida, in accordo al metodo NuReg 4.16 (95% di confidenza):

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	PAR2010-UNI_PV-LB3-002	0		34	48

$$MDA = \frac{2.71 + 4.65 * \sigma_{Background}}{LT * \varepsilon * Yield}$$

dove:

- $\sigma_{Background}$ è la deviazione standard del fondo strumentale nell'ipotesi di statistica di Poisson;
- LT = tempo di conteggio;
- ε = efficienza di misura in funzione dell'energia;
- Yield = branching ratio del radionuclide sul canale;

I risultati delle misure sono espressi in Bq totali nella massa della targhetta.

Il LENA partecipa da anni a campagne ed esercizi di interconfronto nazionali (ENEA) ed internazionali (IAEA) per la standardizzazione delle misure di spettrometria gamma ad alta risoluzione.

5.3 Caratterizzazione delle targhette

Il set di targhette disponibili per questa analisi si compone di 2 set di 5 targhette prodotte dalla Reactor Experiments [1]. Esse sono dischi metallici di Uranio e Torio naturale di diametro 12.7 mm e spessore 0.18 mm (Uranio) e 0.089 mm (Torio). Il grado di purezza certificato è 99.9645% (Uranio) e 99.8503% (Torio).

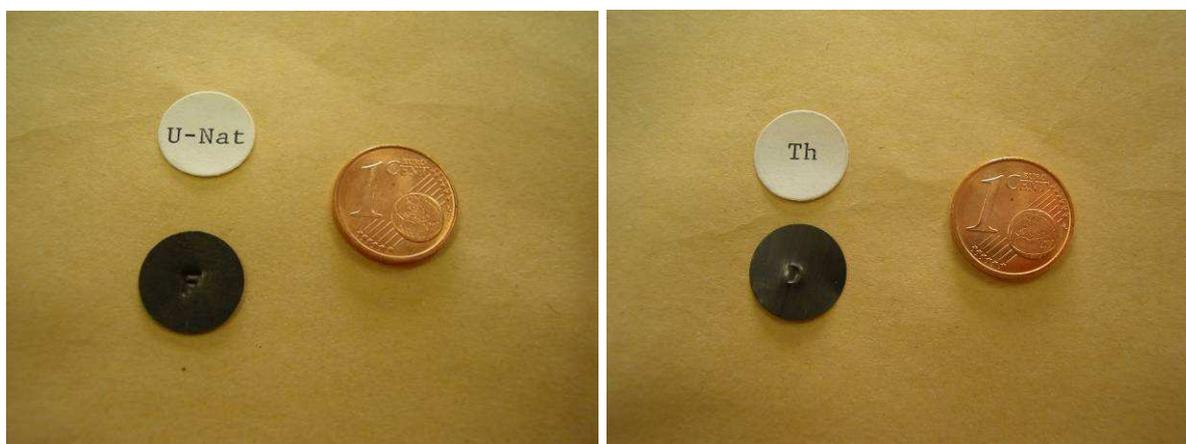


Figura 9: targhette **F** di Uranio naturale e **D** di Torio naturale

Nonostante la certificazione della misura di peso dei 2 set di targhette, esse sono state pesate mediante una bilancia analitica Mettler Toledo AX105 Deltarange la cui sensibilità di misura è 0.1 mg.

Nelle Tabelle III e IV sono riportati il peso certificato, gli esiti delle misure di peso con la relativa incertezza, lo scostamento percentuale dal valore di peso certificato dal

costruttore e le attività teoriche di: ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th e ^{228}Ra calcolate a partire dal peso certificato secondo i dati di letteratura [6].

Targhetta Uranio Nat.	Peso Certificato (g)	Peso Misurato (g)	Attività Teorica ^{238}U (Bq)	Attività Teorica ^{235}U (Bq)
Uranium Disk E	0,3876	0,3879 ± 0.0002	4788.2	223.4
Uranium Disk F	0,3664	0,3666 ± 0.0002	4526.3	211.1
Uranium Disk G	0,3695	0,3694 ± 0.0002	4564.6	212.7
Uranium Disk D	0,3889	0,3892 ± 0.0002	4804.2	224.1
Uranium Disk J	0,3921	0,3923 ± 0.0002	4843.8	225.9

Tabella III: Pesi certificati e misurati delle targhette di Uranio naturale e attività teoriche

Targhetta Torio Nat.	Peso Certificato (g)	Peso Misurato (g)	Attività Teorica Th-232 (Bq)	Attività Teorica Ra-228 (Bq)
Thorium Disk B	0,1298	0,1299 ± 0.0002	526,5	526,5
Thorium Disk D	0,1177	0,1178 ± 0.0002	477,5	477,5
Thorium Disk F	0,1432	0,1432 ± 0.0002	580,9	580,9
Thorium Disk G	0,1412	0,1415 ± 0.0002	572,8	572,8
Thorium Disk H	0,1232	0,1235 ± 0.0002	499,8	499,8

Tabella IV: Pesi certificati e misurati delle targhette di Torio naturale e attività teoriche

Prima dell'irraggiamento il set di targhette è stato caratterizzato mediante spettrometria γ ad alta risoluzione al fine di determinare sperimentalmente:

1. la corrispondenza con il contenuto di radioattività di ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th e ^{228}Ra desumibile dal certificato delle targhette;
2. la validazione sperimentalmente della curva di auto-assorbimento gamma per targhette spesse di Uranio e Torio metallico determinata con metodo Montecarlo;
3. ogni altra possibile fonte di incertezza sistematica da considerare per le misure con targhette irraggiate e per l'ottimizzazione delle condizioni di misura.

A questo scopo sono stati impiegati entrambi gli spettrometri gamma (di seguito denominati BFO e BFN). La targhetta è stata posizionata in asse con il rivelatore a 5 cm dalla superficie della finestra. Per ciascuna targhetta è stato acquisito lo spettro con tempo di conteggio di 80000 s. Per l'analisi degli spettri è stata effettuata la sottrazione dello spettro di bianco del rivelatore (anch'esso acquisito per 80000 s) ed è stato utilizzata come calibrazione in efficienza quella determinata con sorgente multigamma CERCA a disco (n.3), di attività certificata.

In figura 10 e 11 sono riportati gli spettri delle targhetta D e J acquisiti con il rivelatore BFO.

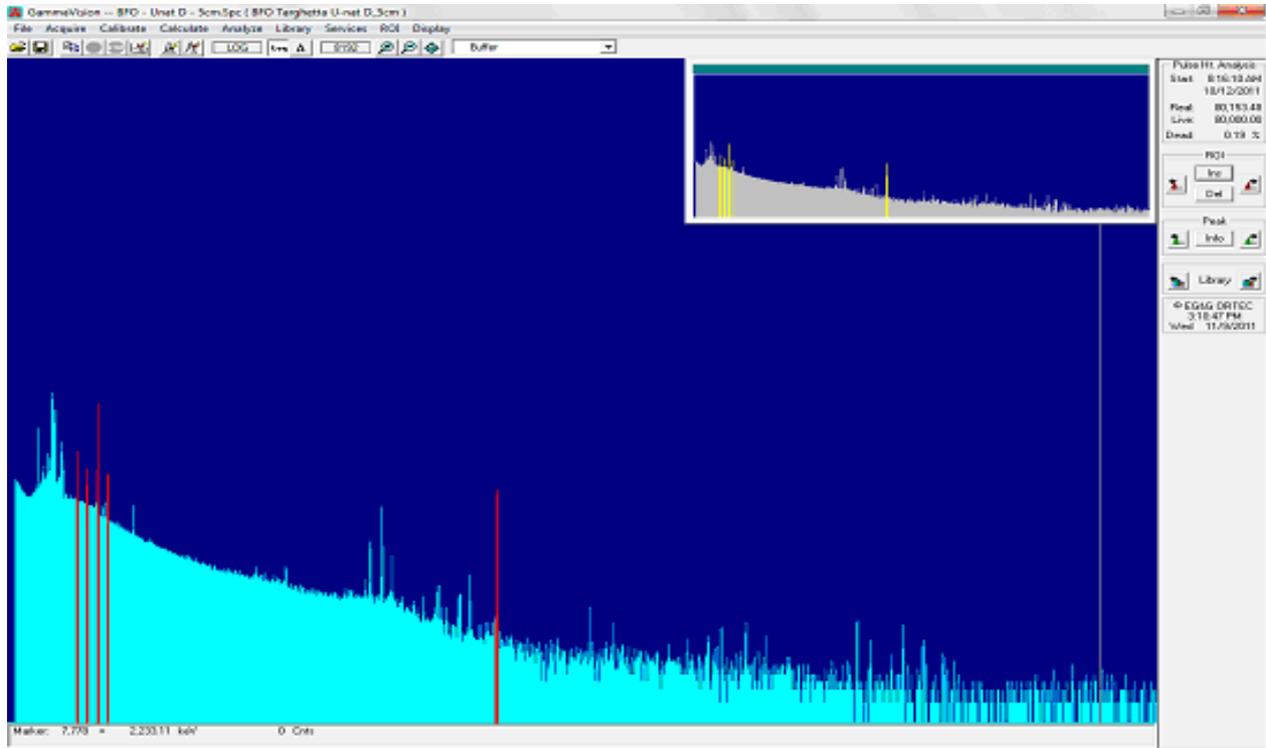


Figura 10: spettro gamma della targhetta D di Uranio naturale acquisita con il rivelatore BFO. In evidenza il fotopicco a 1001 keV del ^{234m}Pa e i 4 fotopicchi del ^{235}U .

Per ciascuna delle 5 targhette di Uranio naturale è stata misurata l'attività del ^{238}U a partire dal fotopicco di energia 1001 keV del ^{234m}Pa in equilibrio secolare con esso e l'attività dell' ^{235}U a partire dai fotopicchi di energia 143.8 keV, 163.4 keV, 185.7 keV e 205.3 keV [2].

Per ciascuna delle 5 targhette di Torio naturale è stata misurata l'attività del ^{228}Ra a partire dai fotopicchi principali del ^{228}Ac (911 e 969 keV) in equilibrio secolare con esso e l'attività del ^{228}Th a partire dai fotopicchi principali di ^{212}Pb (236.6 keV) e ^{208}Tl (583.1 e 860.4 keV). I risultati sono riportati nelle Tabelle V e VI.

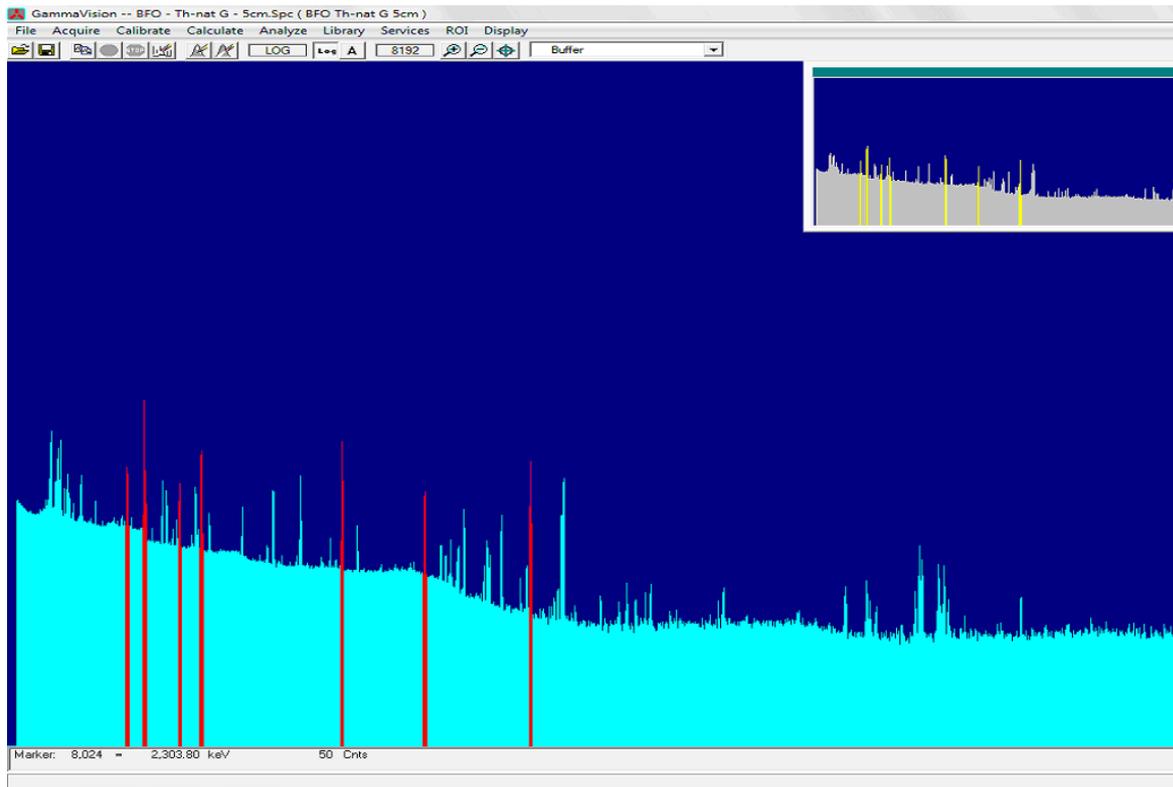


Figura 11: spettro gamma della targhetta G di Torio naturale acquisita con il rivelatore BFO. In evidenza alcuni fotopicchi caratteristici di ^{228}Ac , ^{212}Pb e ^{208}Tl .

Per la determinazione delle attività nelle targhette di Uranio si è fatto uso di una correzione sistematica per auto-assorbimento gamma da parte della targhetta stessa secondo la curva riportata in Figura 12. Essa è stata ottenuta mediante simulazione Montecarlo impiegando il codice di calcolo MCNP-4C2 [3] e successivamente validata per punti con le misure delle targhette prima dell'irraggiamento. La medesima curva è stata utilizzata per le misure con le targhette irraggiate. Per le misure nella targhetta di Torio non è stato necessario ricorrere a questo tipo di correzione in quanto queste targhette sono "sottili".

L'incertezza riportata nelle Tabelle V e VI è quella estesa con fattore di copertura $k=2$ (livello di confidenza del 95%) e comprende i contributi statistici poissoniani di conteggio e tutti i contributi all'incertezza sistematica (principali fonti: posizionamento della targhetta sul rivelatore, efficienza del rivelatore, attività degli standard multigamma, effetti somma, etc.).

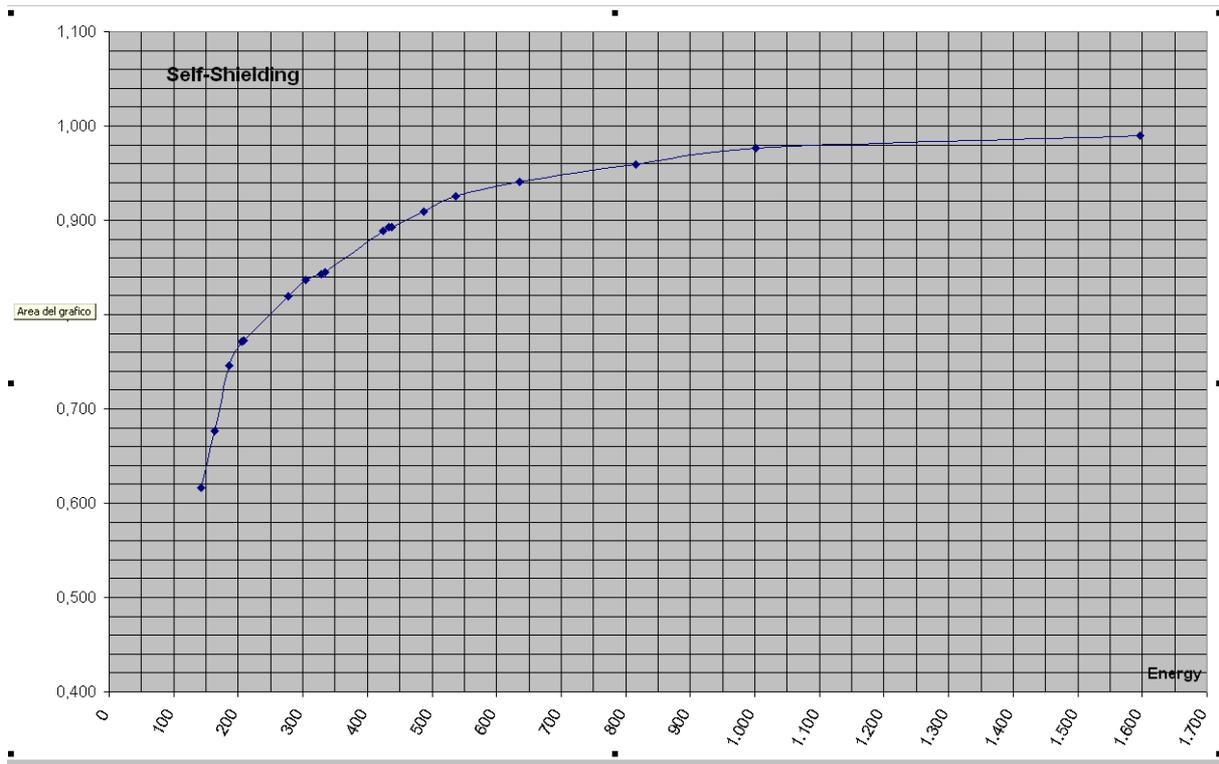


Figura 12: curva di auto-assorbimento

ID Targhetta	Attività Teorica U-238 (Bq)	Misura BFO (Bq)	Scostamento %
Uranium Disk E	4.788,2	4.827 ± 106	0,8%
Uranium Disk F	4.526,3	4.516 ± 99	-0,2%
Uranium Disk G	4.564,6	4.559 ± 100	-0,1%
Uranium Disk D	4.804,2	4.808 ± 105	0,1%
Uranium Disk J	4.843,8	4.812 ± 105	-0,7%
ID Targhetta	Attività Teorica U-235 (Bq)	Misura BFO (Bq)	Scostamento %
Uranium Disk E	223,4	224 ± 5	0,1%
Uranium Disk F	211,1	212 ± 5	0,6%
Uranium Disk G	212,7	215 ± 5	1,2%
Uranium Disk D	224,1	224 ± 5	0,1%
Uranium Disk J	225,9	221 ± 5	-2,2%

Tabella V: Misura attività ^{238}U e ^{235}U con rivelatore BFO. Le misure di attività effettuate con il secondo rivelatore (BFN) sono in ottimo accordo con quelle ottenute con il rivelatore BFO. Per brevità si riportano le sole misure effettuate con il rivelatore BFO

ID Targhetta	Attività Teorica Th-232 (Bq)	Misura BFO (Bq)	Scostamento %	Incertezza Totale (Bq)
Thorium Disk B	526,5	474 ± 10	-9,9%	9,7
Thorium Disk D	477,5	420 ± 9	-12,0%	8,6
Thorium Disk F	580,9	545 ± 11	-6,3%	11,1
Thorium Disk G	572,8	536 ± 11	-6,5%	10,9
Thorium Disk H	499,8	467 ± 10	-6,5%	9,5

ID Targhetta	Attività Teorica Ra-2228 (Bq)	Misura BFO (Bq)	Scostamento %	Incertezza Totale (Bq)
Thorium Disk B	526,5	505 ± 10	-4,1%	10,4
Thorium Disk D	477,5	440 ± 9	-7,9%	9,1
Thorium Disk F	580,9	578 ± 12	-0,6%	11,8
Thorium Disk G	572,8	568 ± 12	-0,8%	11,6
Thorium Disk H	499,8	495 ± 10	-1,0%	10,2

Tabella VI: Misura attività ^{232}Th e ^{228}Ra con rivelatore BFO. Dalle misure di ^{232}Th effettuate sul radionuclide ^{228}Th ad esso in equilibrio secolare appare evidente l'effetto della mancata correzione sistematica per fughe di gas Toron tra il capostipite ^{228}Th e il figli pronti gamma emittenti utilizzati per la misura.

In Tabella VII sono riportati, per ciascuna targhetta di Uranio naturale, i rapporti fra le attività misurate dell' ^{238}U e ^{235}U . Nel caso di un campione di Uranio naturale il rapporto fra queste attività vale 21.5.

Id Targhetta	$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ Naturale	$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$ Misurato
E	21.5	21.6 ± 0.6
F		21.3 ± 0.6
G		21.2 ± 0.6
D		21.4 ± 0.6
J		21.8 ± 0.6

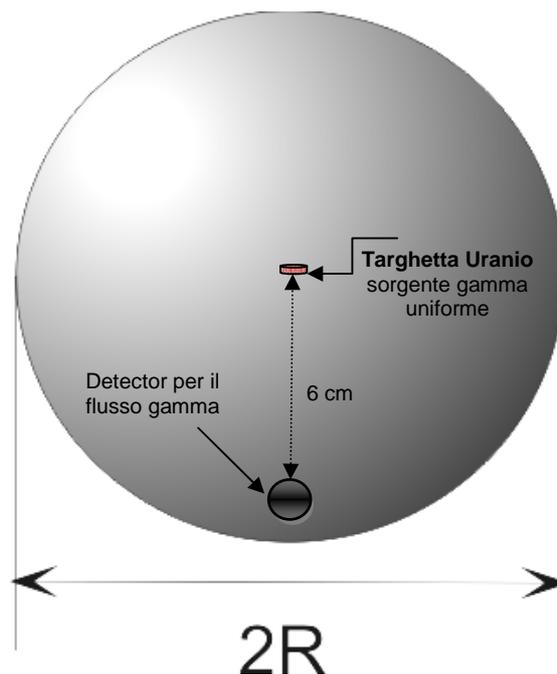
Tabella VII: Misura del rapporto di attività degli isotopi dell'Uranio con rivelatore BFO

5.4 Stima del coefficiente di autoassorbimento gamma mediante MCNP

La percentuale di ^{235}U nel campione di uranio si può dedurre dall'intensità dei gamma da 186 keV emessi dal campione stesso. Se il campione di uranio è abbastanza grande, solo una frazione dei gamma da 186 keV raggiunge il rivelatore a causa del forte assorbimento, a questa energia, dei tipici materiali contenenti uranio. Questo "volume visibile" del campione è determinato oltre che dalla geometria del rivelatore, anche dal libero cammino medio ($\lambda \sim 0.04$ cm) del gamma da 186 keV nel campione di materiale. Al fine di evitare di sottostimare l'attività, si rende perciò necessaria una correzione per questo effetto.

Per calcolare il coefficiente di autoassorbimento gamma della targhetta campione di uranio metallico, sono state effettuate alcune simulazioni Monte Carlo con il codice MCNP (Versione 4C2).

La targhetta è stata simulata con una cella cilindrica di uranio avente le dimensioni della targhetta campione e distribuendo uniformemente nel volume la sorgente gamma (vedi Figura).



Configurazione geometrica delle simulazioni per la determinazione del flusso

Per ogni valore dell'energia E_γ (vedi Tabella seguente) corrispondente alle righe di emissione del campione, è stato quindi calcolato il flusso gamma attraverso una cella sferica (di raggio 0.5 cm) posizionata 6 cm al di sotto della targhetta di Uranio, variando la densità del campione dal valore reale ($\rho = 18.7$ gr/cm³) ad un valore ρ_0 corrispondente ad una diluizione infinita ($\rho_0 = 10^{-6} \rho$). Per ogni valore di E_γ , il flusso è

stato calcolato nel range energetico [$E_\gamma - 3 \text{ keV}$, $E_\gamma + 3 \text{ keV}$] corrispondente tre volte la larghezza di risoluzione in energia del cristallo di germanio nel canale E_γ . Per ogni simulazione, sono stati generati 10^7 fotoni nel volume della targhetta.

Targhetta	Densità (gr/cm^3)	Raggio (cm)	Spessore (cm)
U	18.7	0.635	0.018

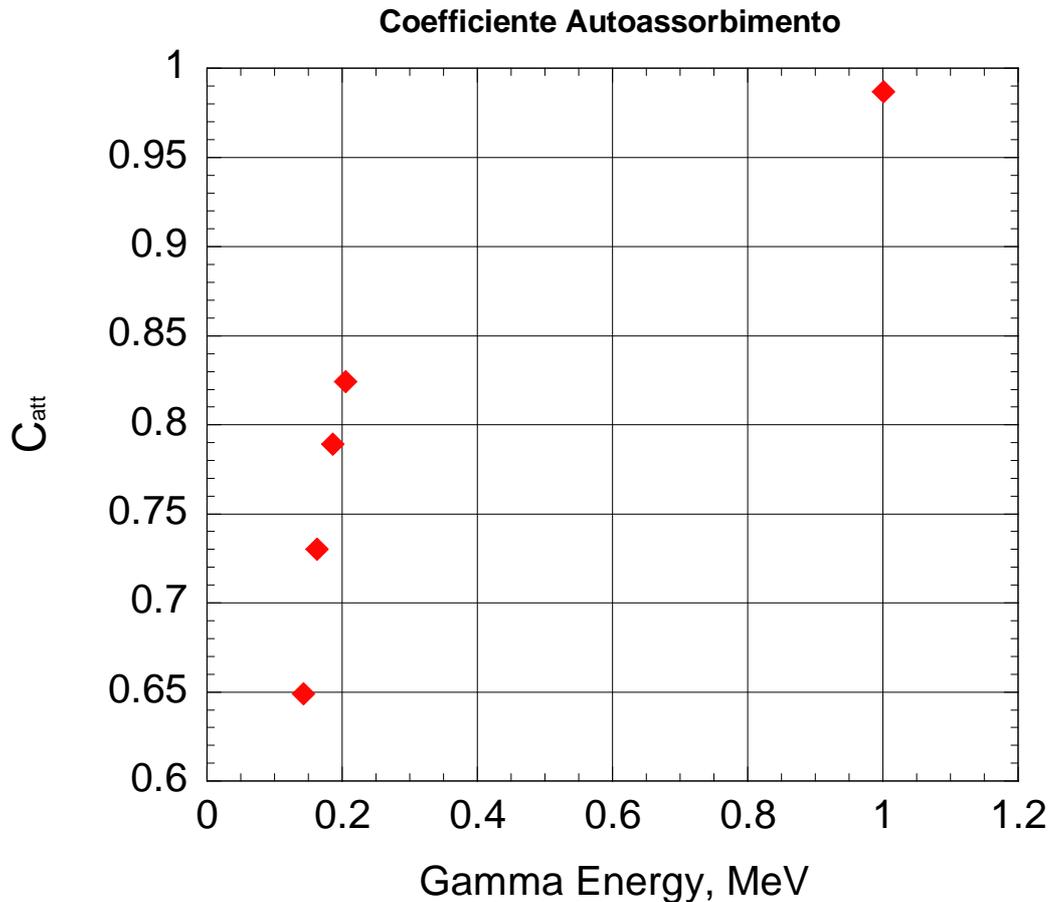
Caratteristiche della targhetta di Uranio

Dal rapporto fra il flusso ottenuti per l'uranio metallico e quello per l'uranio diluito si ottiene, per ogni valore di E_γ , il corrispondente valore del coefficiente di attenuazione. Il risultato fornito dalle simulazioni è riportato in Tabella seguente.

Per ottenere il valore corretto di attività e quindi l'efficienza di rivelazione, nella configurazione rappresentata in Figura seguente, in corrispondenza del gamma misurato, il valore di attività misurata per l'uranio va quindi ulteriormente diviso per il corrispondente coefficiente di attenuazione C_{att} .

Gamma energy, E_γ (MeV)	C_{att}
0.143	0.649
0.163	0.730
0.1857	0.789
0.205	0.824
1.001	0.987

Coefficienti di attenuazione per diversi valori di E_γ



Andamento del coefficiente di autoassorbimento C_{att} in funzione di E_γ ottenuto dalle simulaoni con MCNP.

5.5 Irraggiamento di Targhette in campo neutronico

La targhetta D di Uranio naturale e la targhetta G di Torio naturale sono state irraggiate presso il reattore TRIGA Mark II del LENA in canale centrale alla potenza termica di 250 W per un tempo di irraggiamento di 6 ore. In questa posizione il flusso totale stimato è pari a $(2.16 \pm 10\%) \cdot 10^{10}$ neutroni·cm⁻²·s⁻¹, le targhette sono state quindi esposte ad una fluena neutronica di $(4.67 \pm 10\%) \cdot 10^{14}$ neutroni·cm⁻².

In tabella VIII sono riportate le componenti dell'integrale del flusso neutronico su 3 gruppi energetici [4] alla potenza termica di 250 W.

Zona Energetica	Intervallo in energia (MeV)	Flusso integrale ($n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)
termica	$< 0.55 \cdot 10^{-6}$	$7.26 \cdot 10^{+09} \pm 10\%$
epitermica	$0.55 \cdot 10^{-6} \div 0.1$	$7.52 \cdot 10^{+09} \pm 10\%$
veloce	> 0.1	$6.78 \cdot 10^{+09} \pm 10\%$
TOTALE		$2.16 \cdot 10^{+10} \pm 10\%$

Tabella VIII: Integrale del flusso neutronico su 3 gruppi energetici alla potenza termica di 250 W [4]

La targhetta J di Uranio naturale e la targhetta B di Torio naturale sono state irradiate nei canali di irraggiamento nel complesso moltiplicante sottocritico SM-1 installato presso l'Area di Radiochimica del Dipartimento di Chimica dell'Università degli Studi di Pavia. La targhetta J di Uranio è stata collocata nel canale di irraggiamento A dell'anello 2, mentre la targhetta B di Torio è stata posizionata nel canale di irraggiamento B dell'anello 4. Esse sono state irradiate simultaneamente per 14 giorni, per un tempo di irraggiamento di 341 ore. In canale A il flusso totale stimato è pari a $(5.9 \pm 0.2) \cdot 10^4$ neutroni $\cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ [5], la targhetta J di Uranio è stata quindi esposta ad una fluenza neutronica di circa $(7.2 \pm 0.2) \cdot 10^{10}$ neutroni $\cdot cm^{-2}$.

In canale B il flusso totale stimato è pari a $(2.59 \pm 0.08) \cdot 10^{10}$ neutroni $\cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$ [5], la targhetta B di Torio è stata quindi esposta ad una fluenza neutronica di circa $(3.2 \pm 0.1) \cdot 10^{10}$ neutroni $\cdot cm^{-2}$.

In tabella IX sono riportate le intensità flusso neutronico [5] in SM-1.

Anello	Canale	Flusso totale ($n \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}$)
2	A	$(5.9 \pm 0.2) \cdot 10^4$
4	B	$(2.59 \pm 0.08) \cdot 10^4$

Tabella IX: Flusso integrale nei due canali di irraggiamento utilizzati del complesso moltiplicante sottocritico SM-1 [5]

5.6 Analisi delle Targhette irradiate in campo neutronico

Le targhette irradiate sono state analizzate, dopo adeguato tempo di raffreddamento, sempre a mezzo di spettrometria gamma ad alta risoluzione, nelle condizioni più simili possibili di geometria rispetto ai conteggi delle targhette prima dell'irraggiamento. L'attività specifica delle targhetta D di Uranio naturale ha reso

necessario di distanziare la targhetta di 23.5 cm per ridurre il tempo morto del rivelatore (DT=7%).

Nelle Tabelle da X a XIII si riportano i risultati delle misure.

Radionuclide	Attività (Bq)	Incertezza (Bq)	Note
²³⁸ U	4814	101	Attività teorica = 4804.2 Bq
²³⁵ U	244	5	Attività teorica = 224.1 Bq
²³⁹ Np	3.36E+06	0.07E+06	Misura diretta attivazione neutronica
²³⁹ Pu	0.90	-	Stima ad equilibrio su ²³⁹ Np
¹⁴⁰ Ba	21300	455	Diretto da fissione
¹⁴⁰ La	38850	3885	Diretto da fissione
¹³² Te	57115	2855	Diretto da fissione (misurato con ¹³² I)
¹³² I	-	-	Equilibrio con ¹³² Te
^{131m} Te	17525	860	Diretto da fissione
¹³¹ I	14575	725	Diretto da fissione (scorporato ^{131m} Te)
⁹⁹ Mo	94100	4700	Diretto da fissione
^{99m} Tc	18700	950	Equilibrio con ⁹⁹ Mo
⁹⁵ Zr	4870	245	Diretto da fissione
¹²⁷ Sb	1660	80	Diretto da fissione
¹⁴⁴ Ce	545	55	Diretto da fissione (misurato con ¹⁴⁴ Pr)

Tabella X: Targhetta di Uranio naturale irraggiata in reattore

Radionuclide	Attività (Bq)	Incertezza (Bq)	Note
²³² Th	527	14	Attività teorica = 572.8 Bq (perdita Toron)
²²⁸ Ra	554	16	Attività teorica = 572.8 Bq
²³³ Pa	177800	3600	Misura diretta attivazione neutronica
²³³ U	8.3E-02	-	Stima ad equilibrio su ²³³ Pa
¹⁴⁰ Ba	127	7	Diretto da fissione
¹⁴⁰ La	87	5	Equilibrio al 70% con ¹⁴⁰ Ba
¹³² Te	284	94	Diretto da fissione (misurato con ¹³² I)
¹³² I	-	-	Equilibrio con ¹³² Te
¹³¹ I	44	6	Diretto da fissione
⁹⁹ Mo	205	25	Diretto da fissione

Tabella XI: Targhetta di Torio irraggiata in reattore

Radionuclide	Attività (Bq)	Incertezza (Bq)	Note
²³⁸ U	4668	92	Attività teorica = 4843.8 Bq
²³⁵ U	216	6	Attività teorica = 225.9 Bq
²³⁹ Np	156	12	Misura diretta attivazione neutronica
²³⁹ Pu	4.8E-05	-	Stima ad equilibrio su ²³⁹ Np
¹⁴⁰ Ba	4.2	0.2	Diretto da fissione
¹⁴⁰ La	3.85	0.45	Diretto da fissione + Accumulo da ¹⁴⁰ La
¹³² Te	3.78	0.48	Diretto da fissione (misurato con ¹³² I)
¹³² I	-	-	Equilibrio con ¹³² Te
^{131m} Te	4.0	0.5	Diretto da fissione
¹³¹ I	2.6	0.3	Diretto da fissione (scorporato ^{131m} Te)
⁹⁹ Mo	5.4	0.8	Diretto da fissione
^{99m} Tc	4.4	1.4	Equilibrio con ⁹⁹ Mo
⁹⁵ Zr	0.84	0.14	Diretto da fissione
¹²⁷ Sb	-	-	Diretto da fissione
¹⁴⁴ Ce	-	-	Diretto da fissione (misurato con ¹⁴⁴ Pr)

Tabella XII: Targhetta di Uranio naturale irraggiata in impianto SM1

Radionuclide	Attività (Bq)	Incertezza (Bq)	Note
²³² Th	481	11	Attività teorica = 526.5 Bq (perdita Toron)
²²⁸ Ra	511	11	Attività teorica = 526.5 Bq
²³³ Pa	12.2	0.4	Misura diretta attivazione neutronica
²³³ U	5.7E-06	-	Stima ad equilibrio su ²³³ Pa
¹⁴⁰ Ba	-	-	Diretto da fissione
¹⁴⁰ La	-	-	Equilibrio al 55% con ¹⁴⁰ Ba
¹³² Te	-	-	Diretto da fissione (misurato con ¹³² I)
¹³² I	-	-	Equilibrio con ¹³² Te
¹³¹ I	-	-	Diretto da fissione
⁹⁹ Mo	-	-	Diretto da fissione

Tabella XIII: Targhetta di Torio irraggiata in impianto SM1

In merito alla determinazione dei radionuclidi riportati nelle tabelle da X a XIII, occorre precisare che:

1. Nelle targhette irraggiate sono stati confermati, entro le incertezze, i valori di attività di ²³⁸U, ²³⁵U, ²³²Th e ²²⁸Ra misurati prima dell'irraggiamento;
2. La misura del ²³⁹Np nelle targhette di Uranio è diretta;
3. La misura del ²³³Pa nelle targhette di Torio è diretta;
4. La stima delle attività prodotte di ²³⁹Pu e ²³³U è effettuata sulla base del rapporto dei T_{1/2} ad equilibrio;
5. La misura del ¹⁴⁰Ba è diretta mentre quella del ¹⁴⁰La è stata estrapolata all'istante di fine irraggiamento previa sottrazione dell'attività dello stesso ¹⁴⁰La derivante da decadimento del ¹⁴⁰Ba;
6. La misura del ¹³²Te è diretta mentre quella del ¹³²I è relativa all'equilibrio con il ¹³²Te all'istante di misura;
7. La misura del ^{131m}Te è diretta mentre quella del ¹³¹I è stata estrapolata all'istante di fine irraggiamento previa sottrazione dell'attività dello stesso ¹³¹I derivante da decadimento del ^{131m}I;
8. La misura del ⁹⁹Mo è diretta mentre quella del ^{99m}Tc è relativa all'equilibrio con il ⁹⁹Mo all'istante di misura;
9. La misura del ¹²⁷Sb è diretta;
10. La misura del ¹⁴⁴Ce è determinata con la misura del ¹⁴⁴Pr ad esso in equilibrio all'istante di misura.

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	PAR2010-UNI_PV-LB3-002	0		47	48

6. CONCLUSIONI

Il Progetto di ricerca ha come obiettivo sviluppare e validare, mediante codici di calcolo e misure dirette, metodologie flessibili per lo studio della produzione e trasmutazione degli elementi transuranici (TRU) e dei prodotti di fissione (FP) a lunga emivita presenti nel combustibile irraggiato.

E' stata pertanto sviluppata una metodologia di calcolo, mediante impiego di codici di calcolo Monte Carlo (MCB e MCNP ver. 4C), per la valutazione dei tassi di produzione dei FP a lunga emivita e dei TRU in campi neutronici con diverso spettro energetico e in materiali nucleari diversi (uranio naturale e torio).

Sono state quindi irraggiate presso il reattore nucleare di ricerca TRIGA Mark II del LENA e presso l'impianto nucleare sottocritico SM1 dell'Università di Pavia (impianto dotato di sorgente iniettante di PuBe e, pertanto, di uno spettro neutronico più duro rispetto a quello di reattore) targhette di uranio naturale e torio.

I risultati delle successive analisi, riportati nelle tabelle da X a XIII, hanno mostrato che tra i valori calcolati e quelli misurati esiste un sostanziale accordo, fatta eccezione per alcuni nuclidi. Questa discrepanza dovrà essere ulteriormente indagata, così come sarà necessario analizzare le targhette a distanza di diverse settimane (o mesi) al fine di determinare la presenza di altri nuclidi a lunga emivita.

Successivi sviluppi della linea di ricerca prevedono anche di trattare le targhette irraggiate con metodi radiochimici di separazione al fine di affinare l'analisi con tecniche spettrometriche alfa e beta. Inoltre, al fine di valutare i tassi di trasmutazione, saranno irraggiati in futuro, in entrambi gli impianti, standard liquidi di TRU e FP (tra i quali: ^{239}Pu , ^{241}Am , ^{237}Np , ^{129}I , ^{90}Sr , ^{99}Tc , ^{137}Cs).

 Ricerca Sistema Elettrico	Sigla di identificazione	Rev.	Distrib.	Pag.	di
	PAR2010-UNI_PV-LB3-002	0		48	48

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Reactor Experiments, Inc. 1275 Hammerwood Avenue Sunnyvale, CA 94089-2231 U.S.A.
- [2] I. Adsley, J. S. Backhouse, A. L. Nichols and J. Toole *U-238 Decay Chain: Resolution of Observed Anomalies in the Measured Secular Equilibrium Between Th-234 and Daughter Pa-234m* Appl. Radiat. Isot. Vol. 49, No. 9-11, pp. 1337-1344, 1998
- [3] X-5 Monte Carlo Team *MCNP Manual*
- [4] Tesi di laurea di Marco Dabbene *Interpretazione di misure di attivazione per la valutazione del flusso neutronico nel reattore sperimentale TRIGA* Politecnico di Torino - A.A. 2008/2009
- [5] Tesi di Laurea di Andrea Cazzola *Caratterizzazione del flusso neutronico nel complesso moltiplicante sottocritico SM1 dell'Università di Pavia* Università degli Studi di Pavia - A.A. 2009/2010
- [6] NIST Standard Reference Database for Atomic Weights and Isotopic Compositions with Relative Atomic masses - NIST Pub.