

Titolo

**Panoramica dei rivelatori di neutroni
potenzialmente alternativi ai contatori
proporzionali a ³He**

Descrittori

Tipologia del documento: **Rapporto Tecnico**
 Collocazione contrattuale: **Accordo di Programma ENEA-MSE**
 Argomenti trattati: **Caratterizzazione Rifiuti Radioattivi**

Sommario

Lo scopo del presente lavoro è stato lo studio di rivelatori di neutroni alternativi ai contatori proporzionali a He3, resi necessari data la difficoltà di reperimento e il conseguente alto costo di tali contatori, legati alla produzione di Trizio.

E' stato fatto uno studio sui rivelatori di neutroni attualmente in commercio e su quelli cosiddetti innovativi.

Le proprietà dei rivelatori sono state studiate anche con il codice di calcolo MCNP, al fine di confrontare e capire le reali prestazioni di tali sistemi.

Note

Autori: N. Cherubini, A. Compagno, A. Dodaro

Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP4, Obiettivo C dell'AdP ENEA-MSE

Tema di ricerca: "Nuovo nucleare da fissione"

Copia n.

In carico a:

2			NOME			
			FIRMA			
1			NOME			
			FIRMA			
0	EMISSIONE	13/09/2011	NOME	A. Dodaro	A. Luce	P. Meloni
			FIRMA			
REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDAZIONE	CONVALIDA	APPROVAZIONE	

<i>Premessa</i>	3
<i>1 Generalità sulla rivelazione dei neutroni</i>	3
1.1 Le reazioni di conversione	4
<i>2 Principali convertitori</i>	5
2.1 Elio-3	5
2.2 Boro-10	6
2.3 Litio-6	7
2.4 Materiali fissili e fertili	8
2.5 Efficienza di rivelazione dei neutroni basata su reazioni esoenergetiche.....	10
<i>3 Rivelatori a scintillazione</i>	13
3.1 Scintillatori inorganici	14
3.2 Scintillatori organici	15
3.2.1 Scintillatori organici solidi	15
3.2.2 Scintillatori organici liquidi	16
3.2.3 Scintillatori organici gassosi	16
<i>4 Rivelatori a stato solido</i>	16
<i>5 Rivelatori a gas</i>	16
<i>6 Emulsioni surriscaldate</i>	17
<i>7 Rivelatori alternativi agli ³He disponibili sul mercato</i>	20
7.1 Rivelatori con trifloruro di boro	20
7.2 Rivelatori Boron-coated.....	20
7.3 Scintillatori.....	20
<i>8. Prestazioni ottenibili con sistemi di misura per manufatti contenenti rifiuti radioattivi utilizzando rivelatori al ¹⁰B</i>	22
<i>9. Conclusioni</i>	24
<i>Ringraziamenti</i>	25
<i>Bibliografia</i>	25

PREMESSA

Negli ultimi anni, a livello mondiale, si è registrata una crescente carenza di ^3He che sta mettendo in difficoltà la ricerca scientifica e la sicurezza nucleare (nel campo delle misure di materiale fissile ai fini delle salvaguardie, la maggior parte dei rivelatori utilizzati sono contatori proporzionali a ^3He). L'elio-3 è il prodotto del decadimento radioattivo del trizio e svolge un ruolo critico nella criogenia, nella ricerca sulla fusione nucleare e viene massicciamente usato per la rivelazione di neutroni. Per decenni il gas è stato sufficiente ai bisogni ma ora le scorte si sono ridotte, mentre la domanda è fortemente cresciuta.

L'elio-3 è stabile, inerte ed è molto raro in natura.

Attualmente una parte delle scorte di ^3He deriva dallo smantellamento delle armi nucleari; ingenti quantitativi di ^3He sono stati ottenuti, a partire dal 1955, dal decadimento del trizio per le testate nucleari di produzione statunitense.

Dopo la guerra fredda, gli Stati Uniti avevano decine di migliaia di armi nucleari e per tutti gli anni '90 l'offerta è stata superiore alla domanda. Nel 2000 gli USA avevano accumulato più di 200.000 litri di ^3He ed a quel punto la tendenza di accumulo si è invertita in concomitanza con l'azzeramento della produzione di testate nucleari.

La situazione degli approvvigionamenti è attualmente molto incerta, il DOE ha in programma di rilasciare qualche migliaio di litri nel prossimo biennio, ma si tratta di quantitativi minimi che non possono soddisfare la domanda di gas per i rivelatori di neutroni.

Tali rivelatori sono fondamentali specialmente nel settore della caratterizzazione radiologica dei materiali speciali, delle materie prime e dei rifiuti radioattivi contenenti materiali α -contaminati (plutonio): quest'ultima è l'area maggiormente penalizzata in quanto i sistemi di misura sono di notevoli dimensioni (la cavità di rivelazione deve alloggiare manufatti di volume fino a 500 litri) e quindi, per avere efficienza di rivelazione adeguata, necessitano di un numero di rivelatori che varia dai 40 ai 150 (25-80 litri di ^3He).

L'obiettivo di questo lavoro è analizzare le potenziali alternative ai rivelatori proporzionali ad ^3He nell'ambito della caratterizzazione radiologica di manufatti contenenti rifiuti radioattivi α -contaminati.

1 GENERALITÀ SULLA RIVELAZIONE DEI NEUTRONI

La rivelazione delle radiazioni avviene tramite l'interazione delle stesse con la materia, sia essa in forma solida, liquida o aeriforme, che viene confinata in un rivelatore. Le particelle cariche, quindi direttamente ionizzanti, interagiscono continuamente con la materia e per essere rivelate debbono avere energie cinetiche almeno di qualche decina di keV. I neutroni, invece, sono particelle in grado di penetrare nel nucleo ignorandone la barriera coulombiana, e interagiscono occasionalmente mediante le sole reazioni nucleari: possono essere rivelati anche se dotati di energie cinetiche estremamente basse quali quelle che caratterizzano il moto di agitazione termica. In particolare alcuni tipi di interazione sono caratterizzate da sezioni d'urto molto alte proprio per energie termiche (0.025 eV).

I meccanismi da utilizzare per rivelare neutroni devono essere basati su metodi indiretti perché, a differenza della radiazione gamma, che pure non ionizza direttamente, i neutroni non interagiscono nemmeno con gli elettroni del mezzo attraversato (processo che rende particolarmente semplice la rivelazione di radiazione gamma).

L'efficienza di rivelazione dei neutroni, quindi, dipende fortemente sia dal materiale di cui è composto il rivelatore, sia dall'energia cinetica dei neutroni stessi.

Nella progettazione di un rivelatore per neutroni è necessario tener presente inoltre il fatto che la maggior parte delle sorgenti produce anche raggi gamma. Sarà dunque necessario determinare fino a che punto il sistema di rivelazione è in grado di discriminare i neutroni dal fondo gamma.

I principali meccanismi mediante i quali ha luogo l'interazione dei neutroni con la materia sono:

- Reazioni (n, α) (n, p) $(n, \text{fissione})$ dove viene espulsa una particella carica che viene rivelata in vece del neutrone.
- Reazioni nucleari di attivazione determinate da urti tra neutroni e nuclei inizialmente stabili che si trasformano in isotopi radioattivi. Il flusso di neutroni può essere ricavato dalla misura successiva dell'attività degli isotopi radioattivi prodotti con l'attivazione. La rivelazione non è istantanea ma viene effettuata dopo che si è finito di irradiare la sostanza in esame.
- Urto elastico tra neutrone ed un nucleo. L'esempio più importante di questo processo è l'urto elastico tra neutrone ed idrogeno perché in questo caso la particella bersaglio, avendo la stessa massa della particella incidente, le può sottrarre il 100% dell'energia cinetica.

1.1 LE REAZIONI DI CONVERSIONE

La rivelazione dei neutroni termici è principalmente basata sull'utilizzo di rivelatori adoperati per la rivelazione delle particelle cariche, con materiali detti convertitori, che reagiscono in modo efficiente con i neutroni, consentendone la rivelazione. Quale che sia la tecnica o lo stato del rivelatore, ovvero a scintillazione, a stato solido o a gas, è chiaro che un buon convertitore deve avere essenzialmente le seguenti caratteristiche:

- grande sezione d'urto per massimizzare l'efficienza del rivelatore e ridurre così le dimensioni spaziali;
- grande valore dell'energia liberata nella reazione Q , per avere prodotti che lascino nel rivelatore segnali ben distinti da quelli provenienti dal fondo dei γ , che sono sempre associati ai neutroni.

I convertitori le cui reazioni con neutroni soddisfano tali requisiti, e che quindi trovano più comunemente applicazione, sono:

- ${}^6\text{Li} (n, \alpha)\text{T}$, a cui è associata un'energia Q pari a 4.78 MeV;
- ${}^{10}\text{B} (n, \alpha)\text{Li}$ a cui è associata un'energia Q pari a 2.79 MeV con branching ratio del 6% ed energia Q pari a 2.31 MeV con branching ratio del 94%;
- ${}^3\text{He} (n, p)\text{T}$ a cui è associata un'energia Q pari a 0.76 MeV e branching ratio del 100%.

Gli andamenti delle sezioni d'urto per ciascuna delle tre reazioni sono mostrati in figura 1.

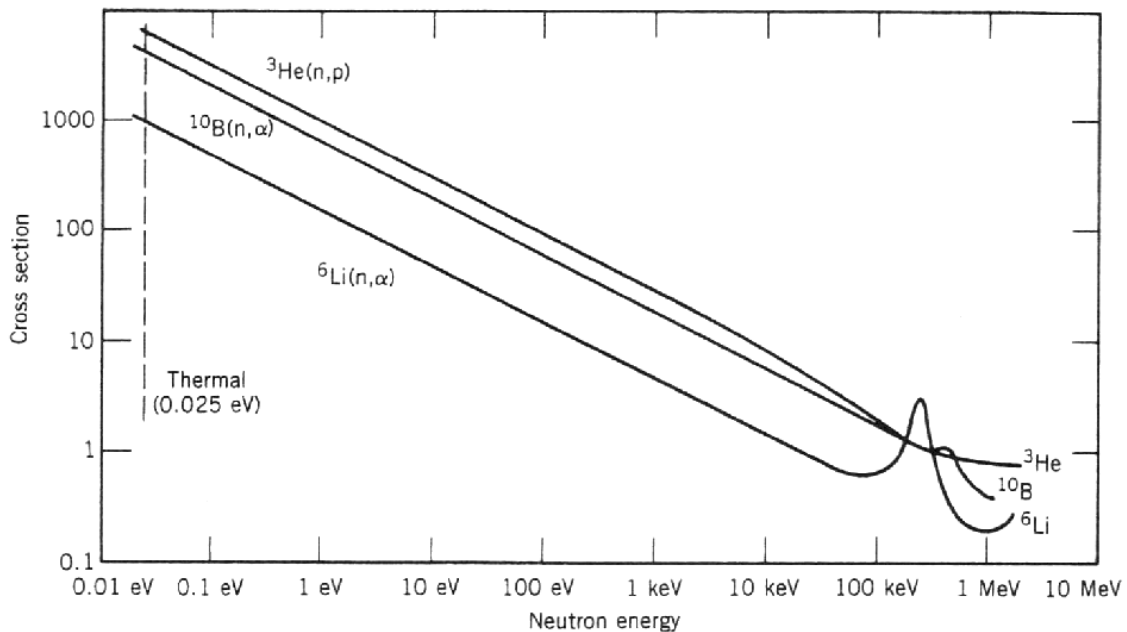


Figura 1 - Sezione d'urto delle principali reazioni usate per la rivelazione dei neutroni.

In tutti e tre i casi l'andamento è inversamente proporzionale all'energia. I valori della sezione d'urto di ${}^6\text{Li}$, ${}^{10}\text{B}$ e ${}^3\text{He}$, in corrispondenza delle energie dei neutroni termici sono rispettivamente 940 barn, 3840 barn e 5330 barn, valori interessanti anche quando il flusso di neutroni termici non è molto elevato.

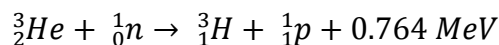
Per l'altissimo valore della sezione d'urto merita anche una menzione la reazione di cattura del gadolinio, il cui isotopo ${}^{157}\text{Gd}$ ha una sezione d'urto di cattura neutronica per neutroni termici pari a 255.000 barns. Tuttavia i prodotti della reazione sono raggi X e elettroni di conversione e questo rende tale reazione meno interessante, specie se è richiesta una discriminazione n/γ .

Infine, sfruttando le reazioni di fissione indotte da neutroni, di elementi come ${}^{235}\text{U}$ o ${}^{239}\text{Pu}$, reazioni che hanno, nel range dei neutroni termici, sezioni d'urto di 600-700 barn e Q-valore (energia rilasciata ai prodotti di fissione) di circa 200 MeV, sono stati realizzati rivelatori caratterizzati da buone performance, sebbene dai costi elevati e di gestione non immediata.

2 PRINCIPALI CONVERTITORI

2.1 ELIO-3

Il gas nobile ${}^3\text{He}$ è largamente impiegato per la rivelazione di neutroni attraverso la reazione



Per neutroni termici, il Q-valore della reazione conduce ad energie del protone pari a 0.573 MeV e per il T pari a 0.191 MeV. La sezione d'urto è relativamente alta, pari a 5330 barn, e mostra una dipendenza tipo $1/v$ rispetto all'energia.

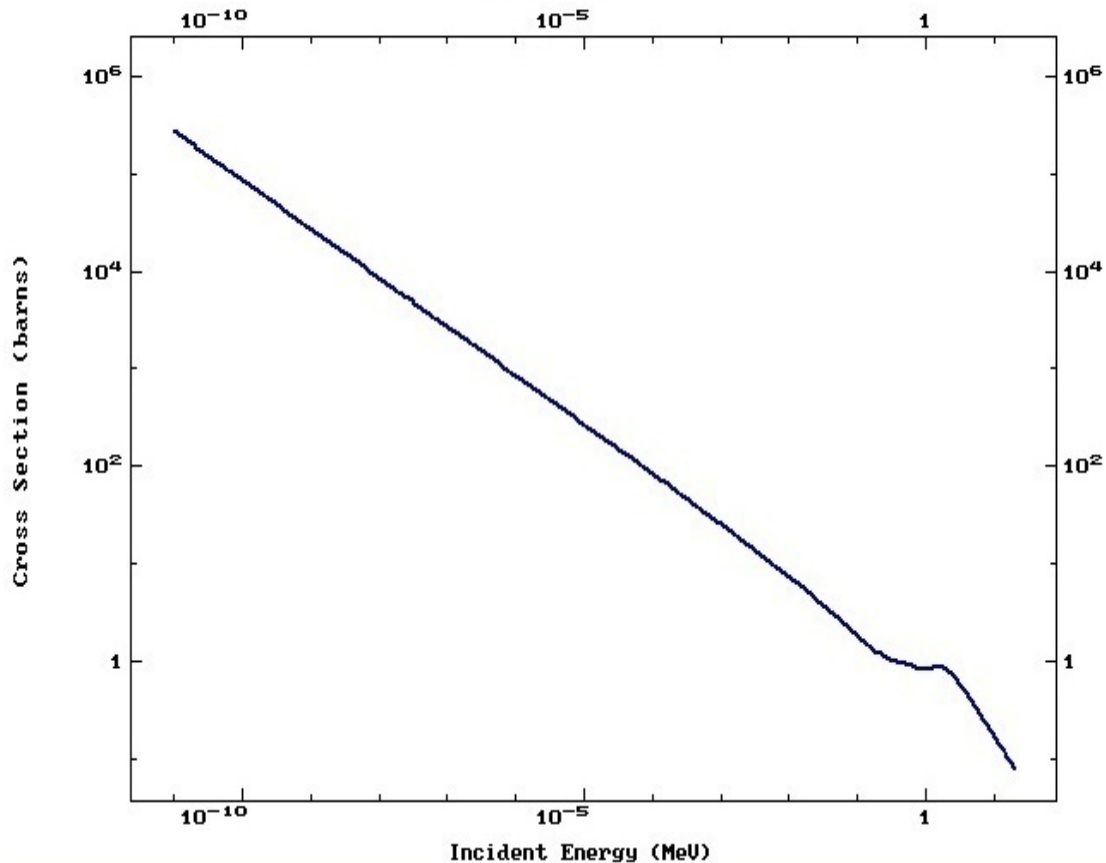
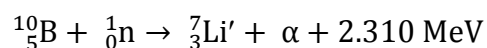
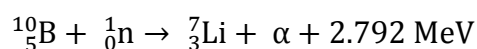


Figura 2 - Sezione d'urto della reazione ${}^3\text{He}(n, p)\text{T}$

La sezione d'urto del processo, è pressoché costante per energie del neutrone comprese fra 0.4 e 1.2 MeV.

2.2 BORO-10

Con il ${}^{10}\text{B}$ si possono avere le seguenti reazioni:



a seconda che il Litio si trovi nello stato fondamentale o in uno stato eccitato.

Per le reazioni indotte da neutroni termici, nel 94% dei casi il Li è prodotto allo stato eccitato, nel 6% allo stato fondamentale. In entrambi i casi il valore Q dell'energia della reazione è molto elevato se comparato con l'energia dei neutroni incidenti.

La sezione d'urto del processo ${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$ è molto elevata e varia al variare dell'energia con una legge molto semplice valida in un ampio intervallo energetico. Per

neutroni da 0.025 eV la sezione d'urto vale rispettivamente 4010 barn e ≈ 755 barn secondo che si consideri il solo ^{10}B od il miscuglio isotopico naturale che contiene soltanto il 19.9% di ^{10}B e lo 80.1% di ^{11}B .

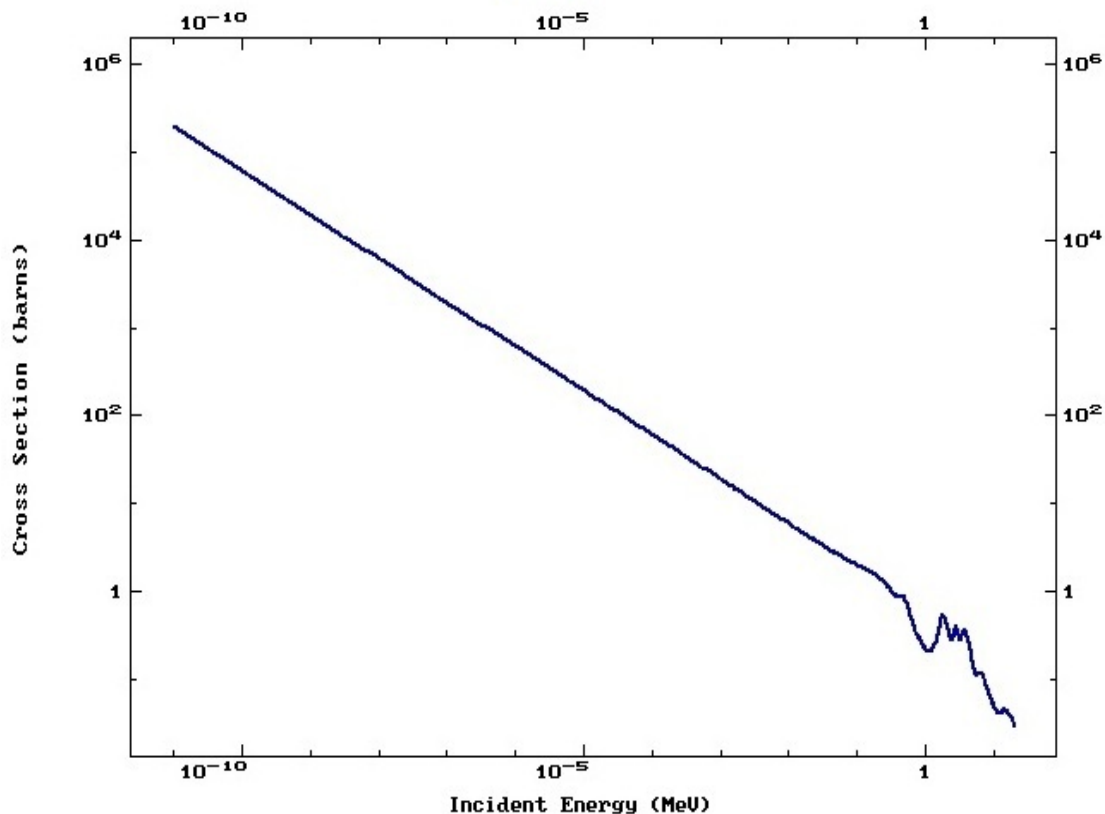
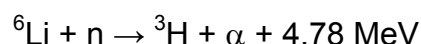


Figura 3 - Sezione d'urto della reazione $^{10}\text{B}(n,\alpha)\text{Li}$

La reazione è esoenergetica con un rilascio di energia di 2.78 MeV. Poiché nella maggioranza dei casi il litio viene formato in uno stato eccitato seguito dalla emissione di un raggio γ da 0.48 MeV l'energia cinetica effettivamente a disposizione dei prodotti di reazione vale (per i neutroni termici) 2.30 MeV.

2.3 LITIO-6

Altro elemento utile per la rivelazione dei neutroni è il litio con la seguente relazione



Le energie dei prodotti della reazione, per una energia dei neutroni incidenti trascurabile, risultano $E({}^3\text{H}) = 2.73 \text{ MeV}$ e $E(\alpha) = 2.05 \text{ MeV}$. La sezione d'urto per questa reazione è 940 barn. La percentuale del Li-6 nel Litio naturale è del 7.40 %.

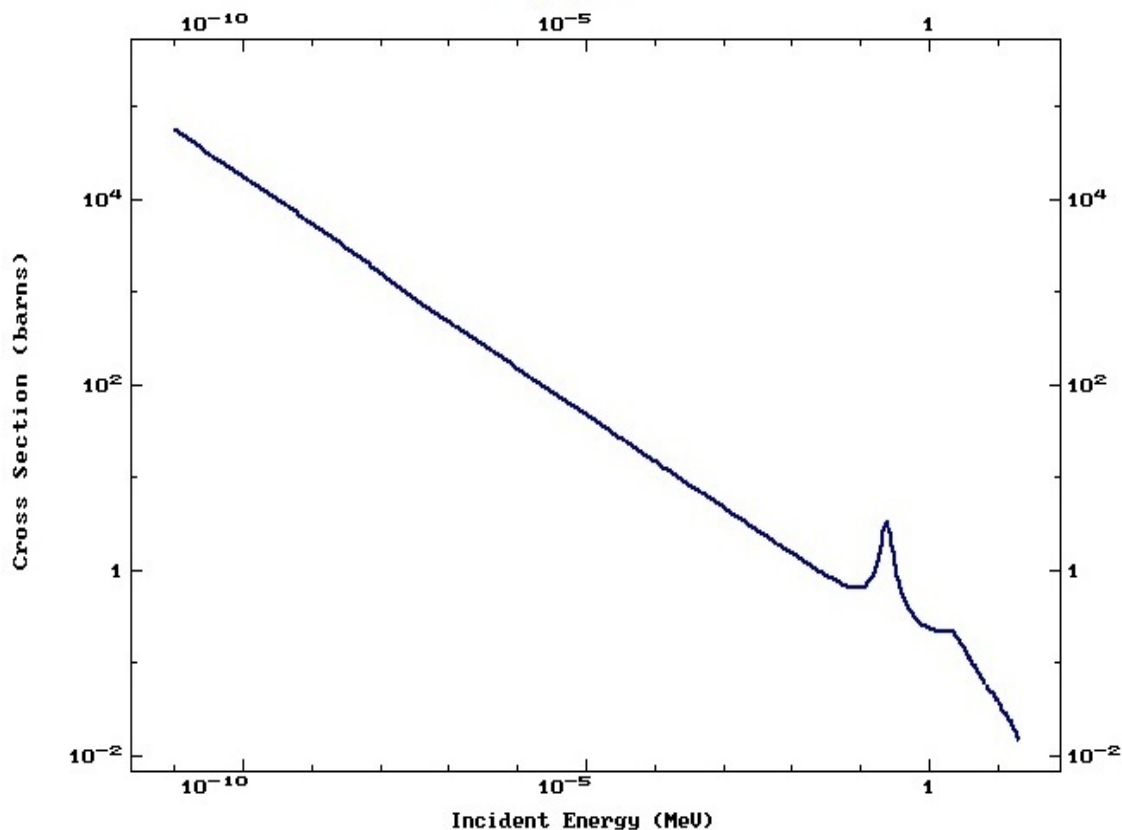


Figura 4 - Sezione d'urto della reazione ${}^6\text{Li}(n,\alpha)\text{T}$

Come si vede l'energia rilasciata nella reazione è molto elevata e quindi gli impulsi prodotti da uno scintillatore allo ioduro di litio da parte dei neutroni sono molto ampi e consentono una facile discriminazione dal fondo.

La rivelazione della particella α è fatta con uno scintillatore nel quale la particella α produce un flash di luce rivelata da un fotomoltiplicatore.

Per i neutroni termici la sezione d'urto vale ~ 3840 barn e segue la legge $1/v$ fino a circa 100 keV, così la dipendenza della sezione d'urto dalla energia incidente è regolare (non ci sono risonanze) e predicibile con buona approssimazione.

La rivelazione dei neutroni termici viene effettuata con cristalli di ioduro di litio oppure con le miscele di polvere di solfuro di zinco.

2.4 MATERIALI FISSILI E FERTILI

Si tratta di un metodo utilizzabile sia per la rivelazione di neutroni veloci sia per quella di neutroni termici.

In Tabella 1 sono indicati per i diversi nuclidi le sezioni d'urto per fissione con neutroni termici, i valori di soglia (se la fissione avviene con neutroni veloci), le sezioni d'urto per fissione per neutroni di 3 MeV ed, infine, i tempi di dimezzamento (tutti i nuclidi riportati sono instabili). ${}^{238}\text{U}$, ${}^{235}\text{U}$ e ${}^{239}\text{Pu}$ sono particolarmente adatti a rivelare i neutroni termici perché le corrispondenti sezioni d'urto per fissione sono di gran lunga superiori a quelle relative ai neutroni veloci.

Tabella 1 - Sezione d'urto di fissione

Nuclide	Sezione d'urto per neutroni termici	Soglia (Mev)	Sezione d'urto a 3 Mev (barn)	Tempo di dimezzamento (anni)
Th^{232}	< 0,2 mb	1,3	0,14	$1,4 \times 10^{10}$
Pa^{231}	10 mb	0,5	1,1	$3,4 \times 10^4$
U^{233}	530 b	-	1,9	$1,6 \times 10^5$
U^{234}	< 0,6 b	0,4	1,5	$2,5 \times 10^5$
U^{235}	580 b	-	1,3	$7,1 \times 10^8$
U^{238}	-	0,8	0,85	$2,4 \times 10^7$
U^{238}	< 0,5 mb	1,2	0,55	$4,5 \times 10^9$
Np^{237}	19 mb	0,4	1,5	$2,2 \times 10^6$
Pu^{239}	750 b	-	2	$2,4 \times 10^4$

$1b = 10^{-24} \text{ cm}^2$; $1mb = 10^{-27} \text{ cm}^2$

Adatti per la rivelazione dei neutroni veloci sono invece ^{236}U , ^{238}U e ^{237}N i quali hanno una sezione d'urto molto piccola per neutroni termici.

Il vantaggio per la rivelazione dei neutroni offerto dai processi di fissione è basato sull'elevato valore dell'energia che si libera nella fissione stessa e che viene dissipata in ionizzazione da parte dei frammenti, originando, nel rivelatore, un impulso di valore molto elevato rispetto al fondo.

I composti gassosi, di ^{236}U e ^{238}U (composti generalmente a base di fluoro) sono poco adatti dal punto di vista del funzionamento delle camere o dei contatori proporzionali; si preferiscono invece strati sottili del metallo o di un suo ossido, depositi sulle pareti interne del contatore. Tenuto presente che i frammenti di fissione, hanno un percorso molto piccolo nella materia, gli strati devono essere sottilissimi (da $50 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ a $1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ a seconda dello scopo cui è destinato il rivelatore) per evitare l'autoassorbimento. I processi per ottenere strati così sottili di uranio o di nettunio sono essenzialmente tre:

- elettrodeposizione,
- evaporazione metallica,
- sospensione in composti organici.

Per quanto riguarda la cinematica del processo, nella fissione dovuta ai neutroni termici i frammenti sono espulsi in direzioni opposte, mentre nella fissione per neutroni veloci i frammenti vengono emessi con un angolo minore di 180° .

Quindi nel caso di neutroni veloci occorre orientare il contatore in base alla direzione di provenienza dei neutroni in modo che almeno uno dei prodotti della fissione venga rivelato.

2.5 EFFICIENZA DI RIVELAZIONE DEI NEUTRONI BASATA SU REAZIONI ESOENERGETICHE

Le particelle cariche prodotte in queste reazioni possono avere un'energia notevolmente maggiore di quella posseduta dal neutrone incidente. In tabella 2 sono riportate le reazioni di interesse, il Q-valore e la relativa sezione d'urto σ .

TABELLA 2 - Processi esoenergetici utilizzati per la rivelazione di neutroni

Reazione	Q (MeV)	σ (barn)
$^{10}\text{B} + n \rightarrow ^7\text{Li} + \alpha$	0.764	5400
$^3\text{He} + n \rightarrow ^3\text{H} + p$	2.792	4010
$^6\text{Li} + n \rightarrow ^3\text{H} + \alpha$	4.8	940

L'energia cinetica, acquisita dalle particelle risultanti dalla reazione e sfruttabile per la rivelazione, è data da:

$$E = E_n + Q$$

ove E_n è l'energia cinetica posseduta dal neutrone e Q , l'energia liberata nella reazione, è uguale o minore di Q_0 a seconda che il nucleo vada allo stato fondamentale o resti in uno stato eccitato.

Il calcolo dell'efficienza di rivelazione viene effettuato come nell'esempio seguente (riferito al Boro, ma facilmente adattabile agli altri isotopi di interesse).

In figura 3 è riportato l'andamento della sezione d'urto del boro naturale in funzione dell'energia: per energie da zero a circa 10^2 eV la sezione d'urto risulta proporzionale all'inverso della velocità v

$$1) \quad \sigma = \sigma_0 v_0 \frac{1}{v}$$

dove $v_0 = 2,2 \cdot 10^3$ m/s è la velocità più probabile che compete ad un neutrone di energia kT a temperatura ambiente (~ 293 °K) cioè per un neutrone termico di 0,025 eV.

Da ricordare che i neutroni termici seguono la legge di distribuzione di Maxwell-Boltzmann da cui discende che le energie corrispondenti alla velocità quadratica media ed alla velocità media valgono rispettivamente

$$\frac{3 kT}{2} \quad \text{e} \quad \frac{4 kT}{\pi}$$

La costante $\sigma_0 = 4010$ barn rappresenta la sezione d'urto alla suddetta energia.

Il numero di processi (n, α) nell'unità di tempo in un rivelatore contenente ^{10}B può essere calcolato nel modo seguente.

Se si indica con v la velocità media di un neutrone nella regione considerata, la probabilità che esso interagisca nell'unità di tempo sarà data da v/λ dove λ , il libero cammino medio del neutrone, è l'inverso della sezione d'urto macroscopica Σ :

$$\frac{1}{\lambda} = \Sigma = N \sigma \quad (N = \text{numero di atomi/cm}^3 \text{ di } ^{10}\text{B})$$

Se infine con n si indica il numero di neutroni per unità di volume, il numero di reazioni che hanno luogo nell'unità di tempo e di volume sarà dato da:

$$2) \quad \frac{R}{V} = \frac{nv}{\lambda} = nv\Sigma = \Phi\Sigma$$

$n*v = \Phi$ è il flusso neutronico, mentre V rappresenta il volume entro il quale hanno avuto luogo le reazioni.

Il numero di reazioni per unità di tempo dovute a neutroni di energia tra E ed $E + dE$ vale:

$$dR = N(x, y, z) \sigma(E) \Phi(E, x, y, z) dV dE$$

dove N e Φ dipendono dalla posizione e σ e lo stesso Φ dipendono dalla energia del neutrone.

Il numero totale di reazioni che hanno luogo nell'unità di tempo entro un volume V sarà dato allora da:

$$R = \int_V \int_0^\infty N \sigma \Phi dV dE$$

Se il flusso neutronico può considerarsi indipendente dalla posizione nel rivelatore, si avrà, indicando con N_T il numero totale di atomi di ^{10}B :

$$R = N_T \int_0^\infty \sigma \Phi dE$$

Supponiamo ora che lo spettro neutronico considerato si estenda da zero a 10^2 eV. In tal caso si potrà applicare la (1) e quindi, ricordando la (2):

$$3) \quad R = N_T \sigma_0 v_0 \int_0^{10^2 \text{ eV}} \frac{\Phi}{v} dE = N_T \sigma_0 v_0 \int_0^{10^2 \text{ eV}} n(E) dE = N_T \sigma_0 v_0 n$$

dove n è il numero di neutroni per unità di volume e con energie comprese tra zero e 10^2 eV.

Se inoltre è nota la velocità media dei neutroni si può calcolare il valore del flusso totale:

$$4) \quad \Phi = n \bar{v} = \frac{R\bar{v}}{N_T \sigma_0 v_0}$$

La reazione (n,α) è impiegata in molti sistemi di rivelazione quali le camere a ionizzazione, i contatori proporzionali, gli scintillatori ecc.

Il boro può essere impiegato nel rivelatore sotto forma di sottile rivestimento solido depositato sulle pareti o sugli elettrodi. In questo caso il gas impiegato per il riempimento può essere argon, azoto o elio.

In luogo del boro solido molti contatori impiegano come riempimento un composto del boro in forma gassosa, in questo caso la reazione (n,α) può avvenire in qualunque punto del volume sensibile del rivelatore. Il gas impiegato è il trifluoruro di boro (BF_3) e generalmente la camera (o il contatore proporzionale) è di tipo cilindrico.

Il boro impiegato nei contatori (sia come solido che come gas) può essere costituito dal miscuglio isotopico naturale di ^{10}B e ^{11}B oppure può essere fortemente arricchito in ^{10}B eliminando l'isotopo non desiderato con arricchimenti fino al 98%.

Indichiamo con $p(E)$ la probabilità che nel contatore sia generato un impulso prodotto dalla reazione (n,α) causata da un neutrone di energia E . Il numero di impulsi al secondo registrati dal contatore quando si trova in un flusso di $\Phi(E)$ neutroni $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ è allora dato, in base alla (3), da

$$C = N_T \sigma_0 v_0 \int_0^{\infty} p(E) n(E) dE$$

Il contatore è abitualmente impiegato in una catena elettronica caratterizzata da una certa soglia V_s corrispondente ad una energia di taglio E_T .

Poiché l'energia cinetica disponibile, nella reazione del ^{10}B è ≥ 2.3 MeV si ha la formazione di circa $7.6 \cdot 10^4$ coppie di ioni mentre l'impulso di fondo dovuto ai raggi γ corrisponde in genere a non più di $500 \div 600$ coppie di ioni. Si ha quindi nelle condizioni ideali un rapporto segnale/fondo intorno a 100

Di conseguenza è richiesto che la particella α ed il nucleo di litio prodotti nella reazione dissipino nella camera una energia $> E_T$. Questa condizione è agevolmente soddisfatta per le reazioni che hanno luogo ad una certa distanza dalle pareti della camera, perché come si è visto l'energia cinetica posseduta dalle due particelle è ≥ 2.30 MeV.

Il fatto che un certo numero di reazioni hanno luogo in prossimità delle pareti, e quindi non tutta l'energia disponibile è dissipata nel gas, fa sì che la probabilità p sia teoricamente minore dell'unità. In pratica sia perché $E_T \ll 2.30$ MeV sia perché i percorsi delle particelle α e del Li sono molto minori delle dimensioni del rivelatore si può porre con buona approssimazione:

$$5) \quad p(E) = 1$$

Questo assunto è anche confortato dal fatto che, se in analogia con i contatori di Geiger, si esegue una curva della frequenza degli impulsi in funzione della tensione di alimentazione, si trova un ben netto pianerottolo.

La sensibilità S di un contatore al boro è definita come il numero di impulsi al secondo prodotti da un flusso neutronico unitario. Nella zona in cui vale la legge $1/v$ la sensibilità, tenendo presente la (4) e la (5) e nell'ipotesi che il flusso sia costante entro il contatore, è data da :

$$6) \quad S = N_T \frac{\sigma_0 v_0}{\bar{v}}$$

Come si è detto la (6) è valida se il flusso non cambia sensibilmente passando attraverso il contatore. Ciò è vero se l'assorbimento dei neutroni nel contatore può essere trascurato. La probabilità che un neutrone passi attraverso il contatore senza essere assorbito è data da :

$$7) \quad \exp [-\Sigma_a d]$$

dove Σ_a è la sezione d'urto macroscopica d'assorbimento e d è il percorso del neutrone nel volume sensibile. Per il $^{10}\text{BF}_3$ a pressione atmosferica si ha:

$$\Sigma_a = 0.1 \sqrt{\frac{0.025}{E}} \text{ cm}^{-1}$$

dove E è l'energia del neutrone espressa in eV.

Si chiama efficienza di un contatore la percentuale di neutroni che, entrando nel rivelatore, dà luogo ad un impulso. Questa efficienza si calcola facilmente dalla (7): la probabilità che un neutrone sia assorbito quando percorre un tratto dentro il contatore è data da

$$8) \quad 1 - \exp [-\Sigma_a d]$$

La (8) rappresenta l'efficienza del contatore nel caso particolare in cui il fascio neutronico sia collimato e risulti parallelo all'asse del contatore. In questo caso d rappresenta la lunghezza del volume sensibile misurata lungo l'asse del rivelatore.

3 RIVELATORI A SCINTILLAZIONE

Per realizzare rivelatori di neutroni termici di grande superficie, hanno trovato notevole applicazione diverse tipologie di scintillatori inorganici o organici, siano essi solidi, liquidi o gassosi.

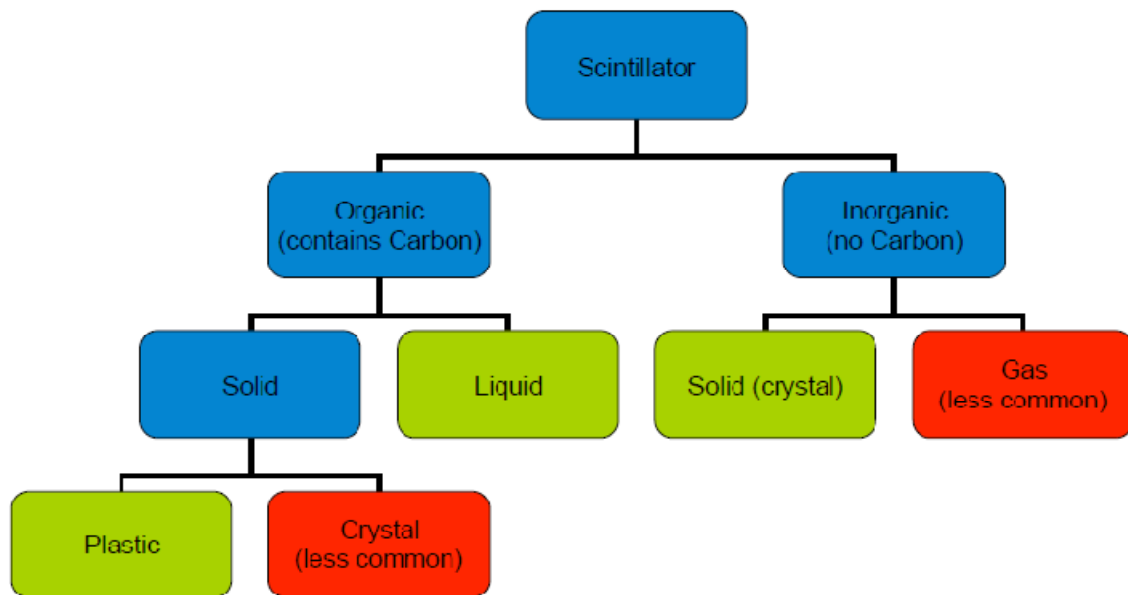


Figura 5 - Tipologie di scintillatori utilizzabili per la rivelazione di neutroni

Ogni tipologia di scintillatore ha pro e contro dipendenti dalle condizioni di misura, dall'intensità dei flussi neutronici e del fondo di radiazione gamma che, come detto, accompagna sempre l'emissione di neutroni e la loro rivelazione.

A seconda della struttura chimica dello scintillatore, i convertitori possono essere o depositati sulla superficie o anche inseriti nella struttura dello stesso materiale.

3.1 SCINTILLATORI INORGANICI

Per la misura di neutroni di bassa energia sono molto impiegati alcuni scintillatori inorganici basati su materiali con alto contenuto di Litio (${}^6\text{Li}$) o Boro (${}^{10}\text{B}$), accoppiato intrinsecamente con un materiale scintillante (es. ZnS). Possono essere considerati scintillatori inorganici quelli che sfruttano la presenza di ${}^{10}\text{B}$ in una miscela di ossido di boro (B_2O_3) e solfuro di zinco (ZnS). Questi scintillatori sono solitamente molto sottili (1-2 mm) a causa della relativa opacità del materiale e per minimizzare l'incertezza della traccia. Scintillatori di questo tipo sono pure realizzati in fogli o vetri miscelando polvere (circa 100 mg) di ${}^{10}\text{B}_2\text{O}_3$ con H_2O , e circa 40 mg di ZnS:Ag, trattata termicamente e poi sinterizzata per preparare il vetro.

Uno scintillatore molto impiegato per la rivelazione di neutroni termici è lo ioduro di litio (LiI, o anche ${}^6\text{LiI}$), in forma di cristallo (molto simile a quella del più comune NaI), attivato con altri materiali (es. Eu, LiI(Eu)) per ottenere una resa luminosa di circa il 35% di quella di un cristallo di NaI(Tl) e un tempo di risposta di circa 0.3 μs .

Poiché i cristalli di ioduro di litio hanno generalmente dimensioni molto più grandi dei percorsi medi dei prodotti della reazione, non si hanno gli effetti (tipo effetto parete) caratteristici dei rivelatori a gas. La raccolta della carica è quindi completa per tutte le interazioni. Poiché la densità è abbastanza elevata, si hanno efficienze del 100% per i neutroni termici ($E < 0,5$ eV) anche con dimensioni non molto grandi (10 mm).

Questo scintillatore, tuttavia, non si può ritenere esente da una sensibilità ai fotoni, come invece si può assumere per un rivelatore a gas. Una tipica configurazione di questo rivelatore prevede la sigillatura del cristallo in un cappuccio metallico perché è

igroscopico. In un lato del rivelatore è previsto un accoppiamento ottico con fotodiodi a silicio o altro elemento sensibile per la rivelazione della scintillazione.

Una applicazione molto interessante prevede scintillatori in fibra di vetro caricata con litio (arricchito in ^6Li) nella quale, visti i differenti range di energia dei prodotti della reazione dai gamma, si possono discriminare facilmente i gamma dai neutroni.

Un altro vantaggio della fibra di vetro consiste nella possibilità di trasportare, con un rivestimento di materiale riflettente, la luce a qualche metro di distanza anche se si nota un certo grado di attenuazione della luce di scintillazione.

3.2 SCINTILLATORI ORGANICI

Gli scintillatori organici sono usati principalmente per la rivelazione di neutroni veloci e hanno una risposta veloce (ordine del ns). Sono molto indicati a rivelare nuclei di rinculo a seguito di interazione di scattering di neutroni veloci essendo costituiti per gran parte da materiali idrogenati. Sebbene il meccanismo per cui il neutrone trasferisce la sua energia cinetica ai protoni è il medesimo nei contatori a scintillazione ed in quelli a gas, la differenza risiede principalmente nella densità del mezzo (0.001 g/cm^3 contro circa 1 g/cm^3) che influenza il processo di interazione.

Lo svantaggio degli scintillatori organici è, purtroppo, la loro alta sensibilità ai raggi gamma, e quindi la difficile discriminazione del segnale neutronico da quello gamma.

A differenza dei materiali inorganici, in cui si ha una struttura reticolare ben precisa (quale quella di un cristallo), nei materiali organici il fenomeno della luminescenza è associata alla struttura energetica delle molecole (livelli, orbitali molecolari), e pertanto il processo risulta indipendente dallo stato fisico del materiale scintillante.

Scintillatori organici possono essere:

- solidi,
- liquidi,
- gas.

3.2.1 SCINTILLATORI ORGANICI SOLIDI

Come scintillatori organici cristallini sono largamente impiegati gli scintillatori organici di antracene ($\text{C}_{14}\text{H}_{10}$) e/o stilbene ($\text{C}_{14}\text{H}_{12}$).

L'Antracene ha la resa luminosa più alta tra gli scintillatori organici (circa il 50% di un NaI), la densità è pari a 1.26 g/cm^3 e la costante di tempo è di 30 ns.

A volte può essere preferibile lo stilbene, che ha una resa luminosa di circa il 60% dell'antracene, per la più elevata capacità di discriminazione della radiazione gamma. Questo scintillatore ha densità di 1.16 g/cm^3 e costante di tempo è pari a 4 ns.

Questi rivelatori hanno diversi svantaggi quali:

- non si possono ottenere cristalli organici di grandi dimensioni,
- sono costosi,
- sono fragili,
- in base alla direzione della particella incidente rispetto all'asse del cristallo varia la resa luminosa.

Proprio la variazione di resa luminosa, che può arrivare fino al 25%, complica l'impiego di questo strumento in applicazioni di spettrometria, mentre non si hanno particolari controindicazioni per il conteggio di neutroni.

Sono utilizzabili anche scintillatori plastici, così chiamati perchè formati da una base di materie plastiche polimeriche come il PVT (poliviniltoluene), in cui sono disciolte opportune sostanze scintillanti con una concentrazione dell'ordine del per cento rispetto alla matrice.

Gli scintillatori plastici hanno una risposta molto veloce (risoluzioni dell'ordine dei 100 ps), sono relativamente poco costosi, hanno buone caratteristiche meccaniche e possono essere realizzati in varie forme (prismi, barre, fogli, ...).

3.2.2 SCINTILLATORI ORGANICI LIQUIDI

Si possono scintillatori liquidi ottenere sciogliendo uno scintillatore organico in un appropriato solvente. In questo modo si ottengono scintillatori liquidi a due componenti, ove spesso si aggiunge un terzo componente per adattare la risposta spettrale ai fotomoltiplicatori scelti.

Scintillatori liquidi sono spesso forniti in contenitori di vetro sigillati e possono essere realizzati anche in grossi volumi, con costi relativamente contenuti.

L'introduzione di additivi organico-metallici consente anche la rivelazione di neutroni di bassa energia con buona efficienza.

Le costanti di tempo sono molto brevi e ciò consente l'impiego di questi scintillatori in campi con elevate intensità di fluensa. Una de-ossidazione della soluzione facendo fluire un gas inerte, come per es. azoto, aumenta la resa luminosa della soluzione.

3.2.3 SCINTILLATORI ORGANICI GASSOSI

Questi rivelatori risultano meno utilizzati rispetto agli altri. Anche questo tipo di rivelatore ha una costante di tempo molto breve ma la risposta spettrale è emessa nell'ultravioletto e si rende quindi necessario l'utilizzo di fotomoltiplicatori sensibili a tale lunghezza d'onda.

4 RIVELATORI A STATO SOLIDO

La rivelazione dei neutroni a partire da rivelatori a stato solido è stata inizialmente ottenuta depositando su una superficie dell'area sensibile di un cristallo di silicio o di germanio, dei composti chimici contenenti un convertitore quale ${}^6\text{LiF}$, ${}^6\text{Li}$ puro o ${}^{10}\text{B}$.

In questo genere di rivelatori un importante aspetto è rappresentato dalla competizione tra la sezione d'urto macroscopica e l'autoassorbimento cui i prodotti della reazione vanno incontro attraversando lo spessore di convertitore stesso. Da questo punto di vista, a causa soprattutto della minore densità di atomi per centimetro cubo, un rivestimento di ${}^6\text{Li}$ puro è più indicato; tuttavia la sua natura altamente reattiva e corrosiva lo rendono scarsamente utilizzato nella maggior parte dei casi. È stato verificato che una mistura di LiF (arricchito con ${}^6\text{Li}$) e ${}^{10}\text{B}$ triplica l'efficienza del rivelatore rispetto alla configurazione con un solo convertitore.

5 RIVELATORI A GAS

Si tratta di camere a ionizzazione in cui il gas contenuto serve sia da convertitore che da rivelatore per le particelle provenienti dalla conversione; poiché non è possibile

ottenere un gas stabile contenente litio, i gas più usati sono BF_3 opportunamente arricchito con ^{10}B , o ^3He .

Il vantaggio di tale tipologia di rivelatori è l'altissima efficienza ai neutroni termici che è possibile raggiungere se hanno dimensioni che sono sufficientemente più grandi rispetto al range dei prodotti della conversione nel gas stesso, range che tipicamente è dell'ordine delle decine di millimetri (wall effect). Inoltre, poiché l'interazione dei gamma con il rivelatore avviene soprattutto alle pareti della camera e gli elettroni ivi prodotti perdono poca energia nel gas, il segnale dei gamma può essere eliminato con una opportuna soglia nell'elettronica.

Problematiche che ne hanno limitato l'uso nel tempo sono tipiche di tutti i rivelatori a gas, ovvero l'alta tensione di alimentazione per avere un regime di contatore proporzionale o le questioni legate alla purezza del gas e alla pressione.

Un'altra configurazione in cui sono stati realizzati rivelatori di neutroni, a partire da rivelatori a gas, è quella in cui un rivestimento di convertitore è depositato sullo strato metallico delle pareti di una camera a ionizzazione, contenente un gas quale ad esempio CH_4 . Questa configurazione fornisce il vantaggio di poter scegliere opportunamente il gas, in modo da evitare il deterioramento chimico riscontrato in BF_3 e in ^3He ma, poiché solo uno dei due prodotti della reazione di conversione rilascia energia nel gas, la discriminazione dal fondo gamma è più problematica. In alternativa sulle pareti può essere depositato un sottilissimo strato di materiale fissionabile ed ottenere così una camera a fissione. Ciò azzerava in pratica il problema della discriminazione con i gamma in virtù del Q della reazione ma diminuisce anche l'efficienza stessa del rivelatore perché il deposito deve essere molto sottile, in modo da permettere ai pesanti frammenti di fissione di passare nel gas senza perdere una parte considerevole della loro energia all'interno del deposito in cui sono prodotti.

6 EMULSIONI SURRISCALDATE

Il sistema contiene una fiala (rivelatore) con una emulsione estremamente fine (diametro circa $70\mu\text{m}$) di gocce surriscaldate di diclorodifluorometano (Freon-12, CCl_2F_2) disperse in una matrice di gel inerte quasi tessuto equivalente. I nuclei di rinculo ad alto LET, Linear Energy Transfer, prodotti dai neutroni possono far scattare l'ebollizione della goccia che cresce fino a diventare una bolla visibile.

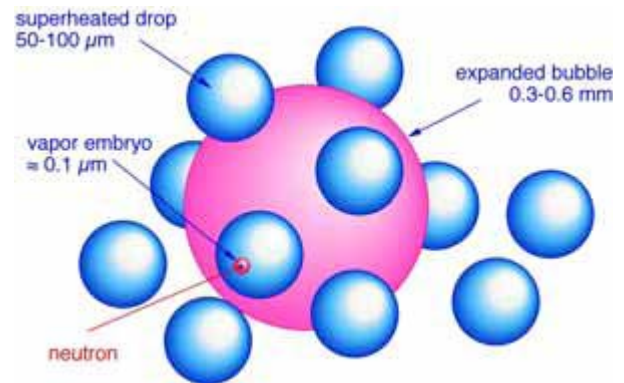


Figura 6 - Meccanismo di formazione della bolla

La reazione che avviene all'interno è la seguente:



il protone riceve 598 keV mentre lo ^{35}S riceve 17 keV per cui ha un range (percorso medio della particella nel mezzo prima di essere assorbita) di 0,04 μm .

Per questi rivelatori sono stati proposti due sistemi di misura: uno acustico e l'altro luminoso. Il sistema acustico fornisce i conteggi tramite un sistema ad ultrasuoni mentre il sistema luminoso utilizza un sistema a LED, che illumina l'emulsione, e fotodiodi.

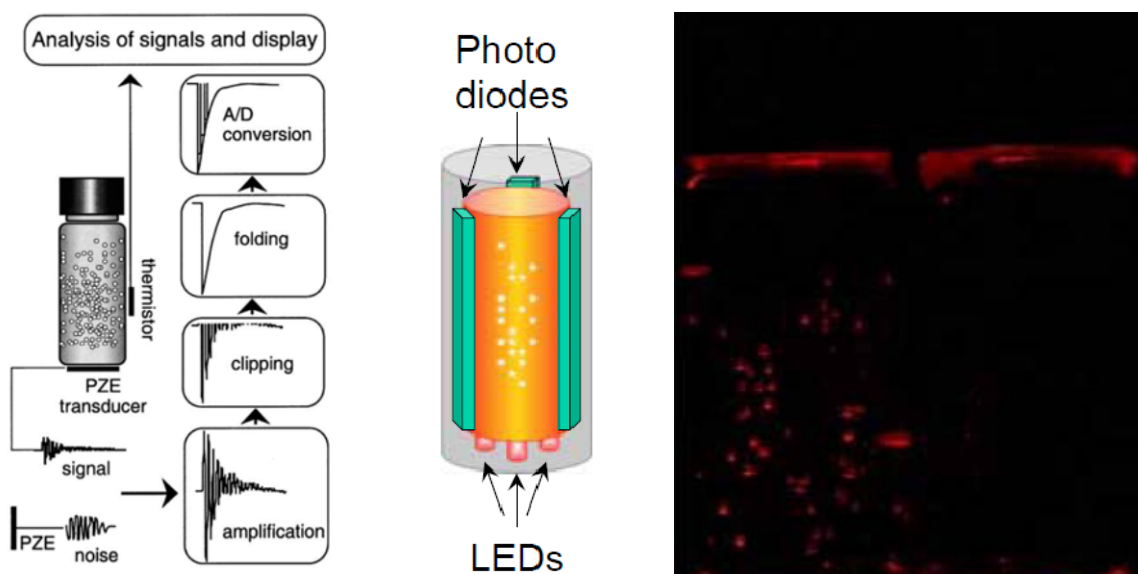


Figura 7 - Esempio di emulsione surriscaldata post irraggiamento e schema dell'elettronica di misura associata

Sono state provate diverse miscele, ognuna con una differente risposta al variare dell'energia dei neutroni e della temperatura. E' importante sottolineare che le emulsioni sono insensibili ai fotoni.

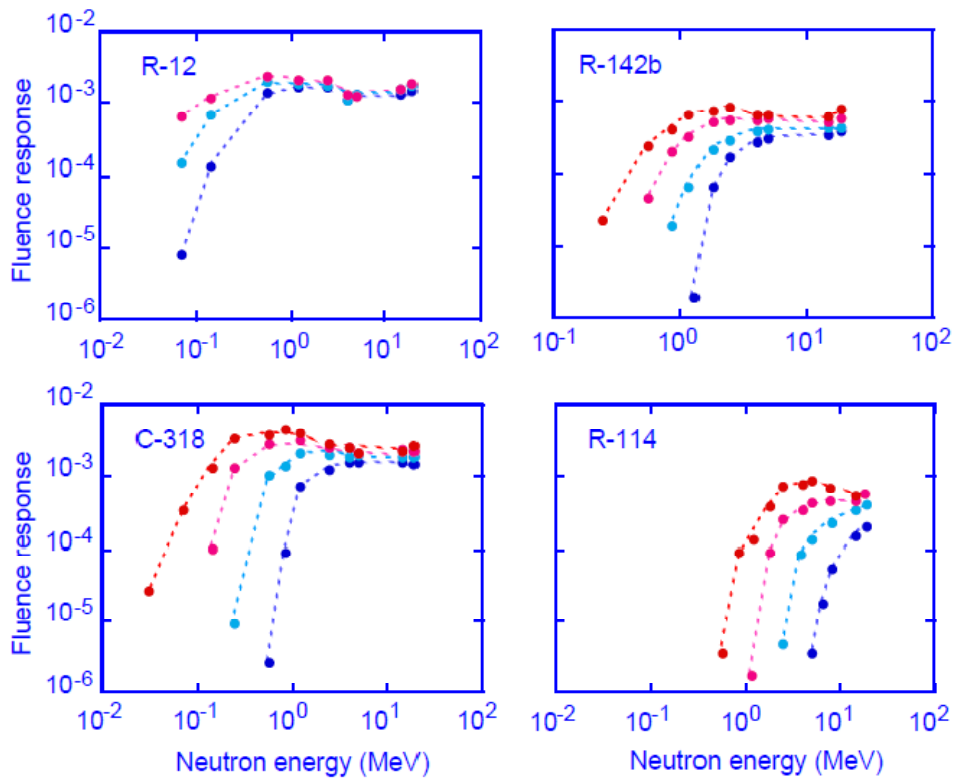


Figura 8 - Risposta di alcune emulsioni in funzione dell'energia dei neutroni e della temperatura

7 RIVELATORI ALTERNATIVI AGLI ^3He DISPONIBILI SUL MERCATO

7.1 RIVELATORI CON TRIFLORURO DI BORO

In questi rivelatori il gas impiegato è il trifloruro di boro (BF_3) che agisce sia come target, per la conversione dei neutroni lenti in particelle secondarie, che come matrice gassosa "proporzionale". In gran parte dei rivelatori commerciali il gas è appositamente arricchito (96%) in ^{10}B , consentendo così di ottenere un'efficienza superiore circa cinque volte a quella ottenibile con gas contenenti concentrazioni naturali di ^{10}B .

Le dimensioni tipiche del tubo sono da qualche decina di centimetri fino al metro di lunghezza per qualche centimetro di diametro, mentre la pressione è generalmente 0.5 - 1 atm. L'efficienza di rivelazione, sufficientemente elevata per i neutroni termici, crolla per i neutroni da un centinaio di eV e questo rende inutilizzabili i tubi a BF_3 per la rivelazione di neutroni veloci. Questi rivelatori hanno una buona capacità di discriminare i neutroni dai fotoni, in quanto i secondi interagiscono prevalentemente sulle pareti del tubo e dunque una buona parte degli elettroni liberati non deposita energia nel gas.

In passato sono stati sviluppati anche altri gas a base di boro ma il BF_3 viene scelto nella maggior parte delle applicazioni per l'ottimo compromesso tra le proprietà di assorbitore e quelle di gas proporzionale.

La tossicità del boro, però, rende sempre più limitato l'uso di questi rivelatori, in quanto in caso di rottura, il gas si diffonde nell'ambiente del laboratorio superando le concentrazioni massime ammissibili in aria.

7.2 RIVELATORI BORON-COATED

Un'alternativa ai rivelatori precedenti è rappresentata da contatori proporzionali classici le cui pareti interne siano rivestite di vernice borata. La reazione neutrone-boro avviene nella parte solida del contatore e il gas viene ionizzato dalle particelle emesse. Ovviamente, poichè il percorso massimo delle particelle α emesse è dell'ordine di 1 mg/cm^2 , sarà necessario produrre spessori di boro inferiori a questo valore (circa 0.2 mg/cm^2). Questi strumenti sono riempiti con gas standard (ad esempio gas nobili o miscele come argon o metano) adatti per la proporzionalità. L'uso di questi gas consente un minore deterioramento chimico del rivelatore rispetto ai contatori precedenti.

L'efficienza è molto inferiore rispetto a quella dei contatori a gas con ^3He , ma sono praticamente insensibili alle radiazioni γ . La tossicità del boro in questo caso è trascurabile, in quanto esso si trova imprigionato come solido sulla superficie interna del rivelatore e, in caso di incidente, la sua diffusione nell'ambiente del laboratorio è del tutto trascurabile.

7.3 SCINTILLATORI

Gli scintillatori organici sono caratterizzati da alta resa in luce, tempo di risposta veloce, ma modesta resistenza alle radiazioni. Essendo composti da materiale plastico, sono facilmente realizzabili in una grande varietà di forme e dimensioni e sono particolarmente maneggevoli, in confronto, ad esempio, agli scintillatori liquidi. Alcuni di essi sono drogati con boro naturale per il 5% del peso, il che significa la presenza di una concentrazione di ^{10}B pari circa all'1% in peso. Grazie al boro è possibile ottenere

la rivelazione di neutroni lenti. L'osservazione dei neutroni veloci, invece, è possibile grazie alla presenza dell'idrogeno.

Tabella 3 - Proprietà dei principali scintillatori per la rivelazione di neutroni

Scintillator	Type	Decay Time ns	Gamma Ray Response	Loading Elements	Application
BC-702	Disc	110	Very small	⁶ Li	Thermal Neutron, Gamma Insensitive
BC-704	Rectangular	110	Very small	⁶ Li	Thermal Neutron, Radiography
BC-720	Disc	110	Very small	H	Fast Neutron, Gamma Insensitive
GS20	Glass	Various	Small	⁶ Li	Thermal Neutron
KG2	Glass	Various	Small	⁶ Li	Thermal Neutron
BC-408	Plastic	2.4	Yes	H	Fast Neutron, Time of Flight
BC-501A	Liquid	3.2	Yes	H	Fast Neutron, Gamma PSD
BC-509	Liquid	3.1	Yes	F	Neutron Insensitive
BC-523A	Liquid	3.7	Yes	¹⁰ B	Neutron Spectroscopy
BC-521	Liquid	3.8	Yes	Gd	Neutrino Experiments
BC-525					

In Tabella 4 si trovano alcuni dati riguardanti alcuni cristalli inorganici commercialmente disponibili (come per esempio ZnS:Ag/⁶LiF, Bicron BC-704) insieme ad altre combinazioni più o meno sperimentali e altrettanto utili.

Tabella 4 - Proprietà dei principali cristalli per la rivelazione di neutroni

Host	Dopant conc (mol%)	Density ρ (g/cm ³)	ρZ_{eff}^4 ($\times 10^{-6}$) ^a	Abs. length at 1 Å (mm)	Light yield photons per		α/β ratio	λ_{em} (nm)	τ (ns)
					Neutron	MeV gamma			
⁶ Li- lass	Ce	2.5		0.52	~6000	~4000	0.3	395	75
⁶ LiI	Eu	4.1	31	0.54	50,000	12,000	0.87	470	1400
⁶ LiF/ZnS	Ag	2.6	1.2	0.8	160,000	75,000	0.44	450	> 1000
LiBaF ₃	Ce,K	5.3	35		3500	5000	0.14	190-330	1/34/2100
LiBaF ₃	Ce,Rb	5.3	35		3600	4,500	0.17	190-330	1/34/2400
⁶ Li ₆ Gd(BO ₃) ₃	Ce	3.5	25	0.35	40,000	14,000	0.59	385/415	200/800
⁶ Li ₆ Gd(BO ₃) ₃ + Y ₂ SiO ₅	Ce	3.9		1	—	20,000			70
Cs ₂ LiYCl ₆	Ce	3.3		3.2	70,000	22,000	0.66	380	1000
					—	700		255-470	2.7

^aAs an indication of gamma-ray detection efficiency by photoelectric effect ρZ_{eff}^4 values are presented.

C.W.E. van Eijk*, A. BessiÈre, P. Dorenbos - Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 529 (2004) 260-267

Molto interessanti sono alcuni vetri scintillanti (silicati) nella cui matrice è stato inserito del litio o del boro, attivati con Ce. Adatti alla rivelazione di neutroni termici, sono caratterizzati da risposta molto rapida e dalla facilità di realizzazione, buona resistenza

meccanica e chimica. Le proprietà di alcuni vetri di questo tipo sono riassunte nella tabella seguente.

Tabella 5 - Proprietà dei principali vetri scintillanti per la rivelazione di neutroni

Tipo	NE902	NE905	NE908	NE912
Densità (g/cm ³)	2,6	2,48	2,67	2,55
Indice di rifrazione	1,58	1,55	1,57	1,55
Resa luminosa (assunta 100% antracene)	22-34%	20-30%	2%	25%
Costante di decadimento (ns)	75	100	5 - 75	75
Percentuale di Li	2,2% in peso	6,6%	7,5%	7,7%
Arricchimento in ⁶ Li	95%	95%	95%	95%
Fondo alfa (cpm per 100g di scintillatore)	100-200	100-200	100-200	20
Risoluzione (neutroni termici)	13-22%	15-25%	20-30%	20-30%

8. PRESTAZIONI OTTENIBILI CON SISTEMI DI MISURA PER MANUFATTI CONTENENTI RIFIUTI RADIOATTIVI UTILIZZANDO RIVELATORI AL ¹⁰B

Per la caratterizzazione di manufatti contenenti rifiuti radioattivi α -contaminati, sono necessari sistemi di misura caratterizzati da un'ampia cavità di rivelazione (per alloggiare manufatti fino a 500 litri) e da una efficienza di rivelazione sufficientemente elevata per rendere i tempi di misura ragionevoli e una statistica di conteggio tale da minimizzare i limiti di rivelazione.

Per questi motivi i sistemi utilizzati attualmente hanno un gran numero di rivelatori (da 40 a 120) che "avvolgono" la cavità di rivelazione in modo da ottenere una geometria di rivelazione 4π .

Per gli scopi di questo lavoro è stata simulata, tramite codice MCNP¹, una testa di misura in forma di parallelepipedo a base quadrata avente 10 rivelatori proporzionali a ³He (1 pollice di diametro per 1 metro di lunghezza) per lato, moderata con polietilene

¹ L'MCNP (Monte Carlo Neutron and Photon transport code), sviluppato presso il Laboratorio Nazionale di Los Alamos, è un codice di trasporto per neutroni, fotoni ed elettroni che utilizza il metodo Monte Carlo. Il codice Monte Carlo fa parte della famiglia dei metodi statistici non parametrici. È utile per superare i problemi computazionali legati ai test esatti. La simulazione Monte Carlo calcola una serie di realizzazioni possibili del fenomeno in esame, con il peso proprio della probabilità di tale evenienza, esplorando tutto lo spazio dei parametri del fenomeno. La simulazione esegue, quindi, delle 'misure' delle grandezze di interesse. L'algoritmo Monte Carlo è un metodo numerico che viene utilizzato per trovare le soluzioni di problemi matematici, che possono avere molte variabili e che non possono essere risolti facilmente, per esempio il calcolo integrale.

ad alta densità, e che rappresenta il riferimento per l'efficienza di rivelazione del sistema.

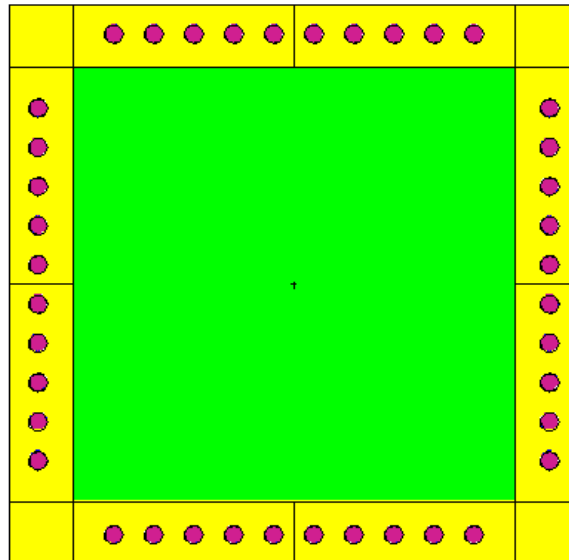


Figura 9 - Sezione orizzontale della testa di misura di riferimento

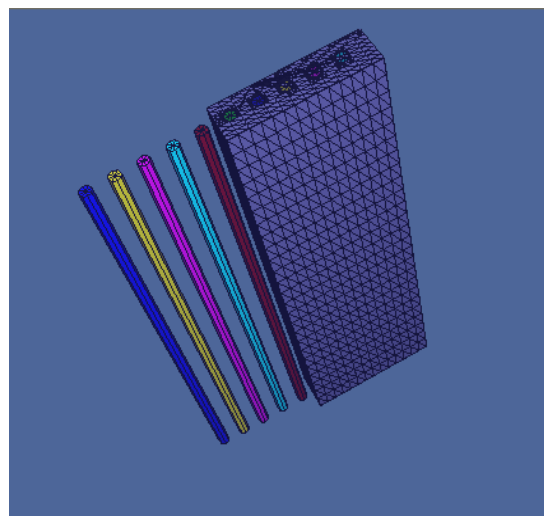
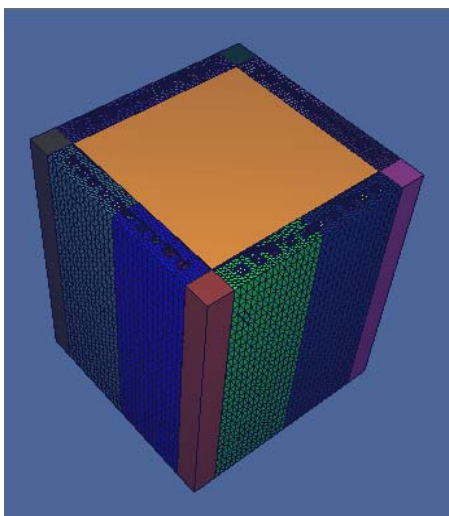


Figura 10 - Vista tridimensionale della testa di misura e di un blocco rivelatori

La prima fase delle simulazioni ha avuto l'obiettivo di ottimizzare i parametri geometrici (quali, ad esempio, lo spessore di polietilene per la termalizzazione dei neutroni) ed ottenere l'efficienza di rivelazione da utilizzarsi come riferimento per il confronto con le altre tipologie di rivelatori.

Il risultato ottenuto per una cavità di rivelazione di dimensioni in centimetri 62x62x100 (sufficiente per alloggiare un fusto da 200 litri), uno spessore di polietilene pari a 3.5 cm e 40 rivelatori verticali ad ^3He è stato pari al 13.33 %.

Successivamente sono state effettuate le stesse simulazioni ipotizzando la sostituzione dei rivelatori a ^3He con rivelatori commerciali più economici quali i contatori

proporzionali a gas BF₃ ed i rivelatori boron-coated, in quanto queste sono attualmente le uniche tipologie di rivelatori che possono sostituire gli ³He senza sostanziali modifiche nell'elettronica e nei principi concettuali del sistema di misura.

Per quanto riguarda i BF₃ l'unica modifica fatta nell'input del codice Montecarlo riguarda il gas di riempimento (considerato con la composizione naturale, e quindi non arricchito in ¹⁰B) e la reazione richiesta come risultato, che per il boro è una (n,α) mentre per ³He è (n,p).

Per i rivelatori boron-coated, invece, oltre al gas di riempimento (in questo caso argon) ed alla reazione, è stato aggiunto sulla parete interna dei rivelatori (che costituisce il vero volume sensibile del rivelatore) uno strato di vernice polifenilica borata con il boro nella sua composizione naturale.

Il confronto fra le efficienze di rivelazione (Tabella 6) è stato fatto mantenendo inalterate tutte le caratteristiche geometriche della testa di misura.

Tabella 6 - Risultati delle simulazioni

Rivelatori	Efficienza (%)	Incertezza (%)	rapporto ³ He	Costo singolo tubo (k€)
³ He	13.33	0.1	1.00	>10
BF ₃	2.19	0.1	6.08	3-4
boron-coated	1.94	0.1	6.88	1

Dai dati riportati in tabella, risulta chiaro che se si paragonano sistemi di rivelazione caratterizzati dallo stesso numero di rivelatori, nessuno dei due rivelatori al boro commerciali può realisticamente essere considerato come un sostituto di quello ad ³He. Sicuramente un arricchimento del tenore di ¹⁰B (che è circa il 20% del boro totale) può portare ad un miglioramento della situazione in entrambi i casi, ma è necessario verificare il costo di tale operazione e l'effettivo arricchimento raggiungibile.

Riguardo ai rivelatori boron-coated, comunque, bisogna segnalare il fatto che la simulazione del processo di rivelazione non è immediato come nel caso di BF₃ ed ³He (per i quali il codice Montecarlo fornisce direttamente l'efficienza di rivelazione), ma passa attraverso integrazioni matematiche che tengono conto del range delle particelle alfa prodotte nella vernice borata e della conversione in segnale di tensione della ionizzazione indotta nell'argon: data la loro estrema economicità (anche rispetto ai BF₃) si è scelto di acquistare 4 tubi boron-coated, in modo da migliorare l'affidabilità del processo di simulazione e procedere, nella prossima annualità, ad ipotizzare e progettare una geometria del sistema di rivelazione che possa portare l'efficienza di rivelazione almeno al 10% nel caso considerato.

9. CONCLUSIONI

Le possibili alternative ai contatori proporzionali a ³He cosiddette "as they are" (cioè con la semplice sostituzione dei tubi di un tipo di rivelatore con quelli di un altro, ma senza alterare l'elettronica e la filosofia delle tecniche di misura), sono molto limitate: in pratica l'elenco si conclude con le due versioni (gassosa e sotto forma di strato sottile) dei rivelatori basati sul convertitore ¹⁰B. Le altre possibilità (essenzialmente gli scintillatori di

vario tipo) comportano modifiche radicali sia nell'elettronica di misura che nelle tecniche di analisi da applicarsi.

I rivelatori basati sul boro, però, hanno dei limiti tecnici di efficienza che potranno certamente essere migliorati, senza però raggiungere l'eccellenza dei contatori a ^3He .

Nel prosieguo delle attività verranno approfondite sia le tematiche legate all'ottimizzazione di sistemi di misura basati sul boro, che le problematiche relative all'adattabilità di scintillatori plastici o di sistemi basati sulle emulsioni al campo della caratterizzazione di manufatti contenenti rifiuti radioattivi.

RINGRAZIAMENTI

Ringraziamenti sono rivolti ai colleghi del Gruppo di Lavoro dell'Accordo di Programma ENEA – MSE, LP4, Task C e in particolare al Responsabile della Linea Progettuale Ing. Alfredo Luce, per la disponibilità alla discussione e al confronto.

BIBLIOGRAFIA

1. Sciuti, S. 1981. Rivelatori delle radiazioni nucleari, C.N.E.N.;
2. Igielski A. et al. Preliminary test of the scintillator with optical fiber (SOS) detector in a pulsed thermal neutron experiment, Report N°1986/PN;
3. Matsumoto T. et al. 2005. Development of a Novel Small-sized Neutron Detector Based on a ^6Li -glass Scintillator, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, N35-22;
4. Miller M.C., Biddle R.S., P.A. Russo et al. Neutron detection and application using a BC454/BGO array, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, Volume 422, Issues 1-3, 11 February 1999, Pages 89-94;
5. Leo William R., Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer Science, ISBN 3-540-57280-5 2;
6. McGregor D.S. et al. Design consideration for thin film coated semiconductor thermal neutron detectors – I: basics regarding alpha particle emitting neutron reactive films Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment Volume 500, Issues 1-3, 11 March 2003, Pages 272-308;
7. Breismeister, J.F., Ed., 1993. MCNP-A General Monte Carlo N-particle Transport Code, Version 4A. LA-12625.