

Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

---

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E  
NATURALI

Corso di Laurea Triennale in Fisica

Risposta di nuovi scintillatori organici a  
radiazione alfa e gamma e tecnica IBIL, in  
previsione del loro utilizzo in esperimenti di  
fisica nucleare

Relatore:

Chiar.mo Prof. Mauro Bruno

Correlatori:

Dott.ssa Sara Carturan

Dott. Vladimir Kravchuk

Candidata: Giulia Guastalla

N. matricola: 0000243890

Sessione II

Anno Accademico 2007/2008



# Introduzione

Gli scintillatori plastici sono rivelatori di particelle ampiamente diffusi negli esperimenti di fisica nucleare, grazie alle loro caratteristiche di alta efficienza e praticità. Tuttavia, nel caso degli scintillatori organici commerciali, spesso si possono incontrare problemi connessi a materiali fortemente degradabili che, specialmente a partire dagli anni '80 e '90, in relazione agli esperimenti di alta energia presso gli acceleratori SSC ed LHC, hanno portato a ricercare materiali per rivelatori che fossero resistenti alle alte temperature ed a forti dosi di radiazione. La ricerca si è indirizzata verso lo sviluppo di nuovi scintillatori plastici i quali, oltre ad avere una buona efficienza di rivelazione per particelle cariche e radiazione gamma, minimizzassero il problema del danneggiamento del materiale, e quindi del degrado dell'efficienza di scintillazione in particolari condizioni di irraggiamento e temperatura. Una possibile soluzione è la produzione di scintillatori contenenti una base di polisilossano, un polimero capace di scintillare, ma che nello stesso tempo rende il campione molto resistente, ed additivi in basse percentuali, che migliorano le caratteristiche di emissione della luce, per il loro utilizzo come rivelatori di radiazione ionizzante.

Lo scopo di questo lavoro di tesi è lo studio del comportamento di alcuni nuovi tipi di rivelatori, prodotti presso i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN, e la verifica delle loro effettive proprietà, ponendoli a confronto con uno scintillatore commerciale e largamente utilizzato come l'NE102.

Nel Capitolo 1, verrà presentata una trattazione molto generale dei rivelatori a scintillazione e dei meccanismi di emissione che intervengono, in particolare, negli scintillatori plastici. La precisa composizione dei materiali studiati viene

invece spiegata nel Capitolo 2, dove verranno anche fornite tutte le informazioni sui processi di produzione e le principali caratteristiche delle sostanze utilizzate.

La ricerca effettuata sui campioni è stata svolta principalmente sottoponendo i campioni a raggi alfa e gamma, al fine di valutare la resa in luce e l'efficienza, in funzione della loro composizione. Nel Capitolo 3, sono stati riportati i passaggi delle operazioni di misura e i dettagli dell'apparato sperimentale utilizzato, mentre nel Capitolo 4 vengono presentati i grafici degli spettri acquisiti e le analisi effettuate su di essi.

Un'ulteriore analisi è stata possibile tramite l'impiego della tecnica IBIL (Ion Beam Induced Luminescence), che ha permesso lo studio degli spettri di emissione dei diversi campioni, quando sottoposti a bombardamento con ioni leggeri (particelle alfa da 5 MeV). Nel Capitolo 5, si è voluto presentare il principio fisico sfruttato da questa tecnica, l'apparato sperimentale utilizzato ed i risultati delle misure effettuate in Luglio 2008, presso l'acceleratore CN dei Laboratori Nazionali di Legnaro. Infine, la discussione dei risultati ottenuti e la valutazione complessiva degli scintillatori in questione, viene presentata nelle Conclusioni. In questo capitolo si discute anche del futuro impiego dei rivelatori esaminati, in relazione alla sperimentazione in corso e in vista di un loro possibile utilizzo anche nella rivelazione di neutroni.

# Indice

<b>Introduzione</b>	<b>i</b>
<b>1 Materiali scintillanti e fenomeni di luminescenza</b>	<b>1</b>
1.1 Introduzione. . . . .	1
1.2 Materiali scintillanti. . . . .	4
1.2.1 Gli organici. . . . .	5
1.2.2 I plastici. . . . .	7
<b>2 Chimica degli scintillatori</b>	<b>11</b>
2.1 Introduzione. . . . .	11
2.2 Composizione e reazione di reticolazione. . . . .	13
2.3 Preparazione. . . . .	18
<b>3 L'esperimento</b>	<b>19</b>
3.1 Introduzione . . . . .	19
3.2 Le sorgenti . . . . .	20
3.3 La catena elettronica . . . . .	21
3.3.1 Il fotomoltiplicatore . . . . .	21
3.3.2 L'alimentatore del fotomoltiplicatore . . . . .	26
3.3.3 L'amplificatore . . . . .	27
3.3.4 Acquisizione dati. . . . .	28
<b>4 Analisi dati</b>	<b>29</b>
4.1 Sottrazione del rumore di fondo . . . . .	30

4.2 Spettri raggi alfa . . . . .	32
4.3 Spettri raggi gamma . . . . .	34
4.4 Fit gaussiano . . . . .	35
4.5 Risultati. . . . .	38
4.6 Discussione dei risultati . . . . .	40
<b>5 Analisi Ibil</b>	<b>43</b>
5.1 Introduzione . . . . .	43
5.2 Ionoluminescenza . . . . .	44
5.3 L'Apparato sperimentale. . . . .	48
5.4 Analisi dati. . . . .	52
<b>Conclusioni</b>	<b>55</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>57</b>

# Capitolo 1

## Materiali scintillanti e fenomeni di luminescenza

### 1.1 Introduzione

I materiali scintillanti sono rivelatori di particelle che sfruttano un fenomeno di conversione indiretta della radiazione incidente, la *luminescenza*. Quando una particella attraversa il materiale, cede una parte della propria energia eccitando un elettrone, che si porta cioè ad un livello di energia superiore. Tornando poi l'elettrone nello stato stabile, riemette l'energia sotto forma di fotone, tipicamente come luce visibile (detta *luce di scintillazione*).

In prima approssimazione l'evoluzione del processo di riemissione può essere descritto da un semplice decadimento esponenziale:

$$N = \frac{N_0}{\tau_d} \cdot e^{-t/\tau_d}$$

dove

$N$  = numero di fotoni emessi all'istante  $t$

$N_0$  = numero totale di fotoni emessi

$\tau_d$  = tempo di decadimento

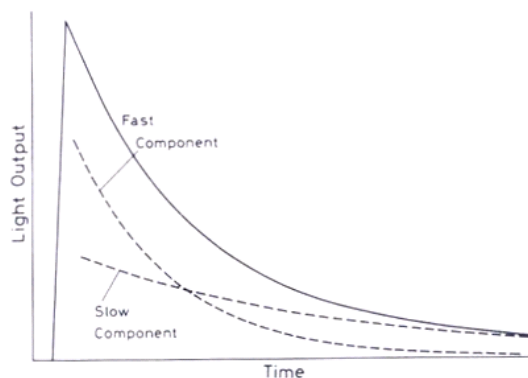
Più precisamente, la luminescenza si può distinguere in due fenomeni, in base al tempo di vita della radiazione: se tra assorbimento e riemissione c'è solo l'intervallo di tempo necessario per la transizione atomica ( $\tau_c < 10^{-8}$ s) il processo viene chiamato *fluorescenza*; se invece lo stato di eccitazione è metastabile, cioè

la riemissione è ritardata e la luminescenza persiste anche dopo aver cessato di irradiare il campione, in tal caso il processo è detto *fosforescenza*.

Se questi processi si possono identificare in due componenti ( $\tau_{\text{fast}}$  e  $\tau_{\text{slow}}$ ), la legge che descrive l'intensità della luce emessa in funzione del tempo è data dalla sovrapposizione di due esponenziali:

$$N(t) = A \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{fast}}}\right) + B \exp\left(-\frac{t}{\tau_{\text{slow}}}\right)$$

Le ampiezze relative delle due componenti variano da uno scintillatore all'altro, ma in genere deve prevalere la componente veloce della fluorescenza immediata su quella lenta, che rappresenta la fosforescenza.



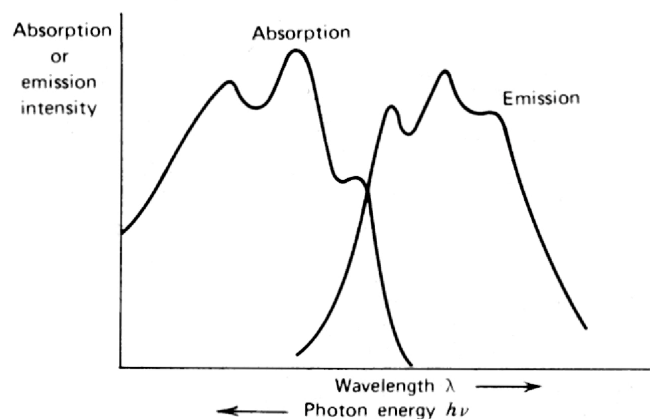
**Figura 1.1.** Rappresentazione delle due componenti del segnale.

La frazione di luce emessa dalla componente slow può dipendere dal tipo di particella e si può usare per rigettare, per esempio, eventi  $\gamma$  in scintillatori organici per neutroni.

L'impulso luminoso prodotto viene poi raccolto e convertito in segnale elettrico attraverso l'utilizzo di un fotodiode o di un fotomoltiplicatore, strumenti in grado di riportare informazioni sulla quantità di energia ceduta in base all'intensità della luce raccolta.

Le caratteristiche principali di uno scintillatore ideale sono:

- *efficienza di rivelazione*, cioè il numero di particelle rivelate per numero di particelle che lo colpiscono o, in modo equivalente, la frazione di energia incidente che viene trasformata in luce visibile. I motivi per cui non si ha una efficienza del 100% sono indicati generalmente con il termine *quenching* e possono essere prodotti da svariate cause: energia insufficiente della particella per essere rivelata o discriminata dal rumore, energia troppo grande per lasciare un segnale, spazi morti dovuti a montaggi meccanici oppure trasferimenti termici che, favoriti dalla presenza di difetti nel materiale, fanno sì che l'energia assorbita venga rilasciata sotto forma di calore.
- conversione lineare dell'energia cinetica della particella in luce.
- trasparenza del mezzo alla luce da esso stesso emessa (vedi Figura 1.2).
- tempo di decadimento del segnale abbastanza breve da generare segnali veloci (per misure di tempo di volo, trigger, ecc...).
- il materiale deve essere facilmente lavorabile e modellabile in forme e dimensioni che consentano di fare un rivelatore di opportuna grandezza.
- indice di rifrazione non molto diverso da quello del vetro ( $n=1.5$ ), in quanto la luce emessa deve essere accoppiata alla finestra di ingresso di un fotomoltiplicatore, attraverso una guida di luce o anche direttamente.
- emissione di uno spettro che sia quanto più simile a quello a cui è sensibile il fotocatodo del fotomoltiplicatore.
- in alcuni casi può permettere l'identificazione della particella attraverso la tecnica detta "pulse shape discrimination".



**Figura 1.2.** Spettri di assorbimento ed emissione, a seconda della sovrapposizione varia la trasparenza del rivelatore.

## 1.2 Materiali scintillanti

Gli scintillatori si possono distinguere in inorganici e organici, differenti per il materiale di cui sono composti e quindi per meccanismi di scintillazione e proprietà .

Gli inorganici sono cristalli ionici drogati con impurità. Le principali caratteristiche sono alta efficienza di scintillazione, elevato potere d'arresto (che li rendono adatti per radiazioni molto penetranti, come spettroscopia  $\gamma$ ) ma tempi di emissione piuttosto lunghi (centinaia di nanosecondi). Il livello di drogaggio, inoltre, è determinante in quanto permette di aumentare l'efficienza, ridurre l'autoassorbimento e avere la luce in uscita della lunghezza d'onda voluta.

Per gli scintillatori organici, invece, si tratta di soluzioni o di basi plastiche (idrocarburi aromatici, generalmente il benzene) contenenti molecole con proprietà di fluorescenza (fluorofori).

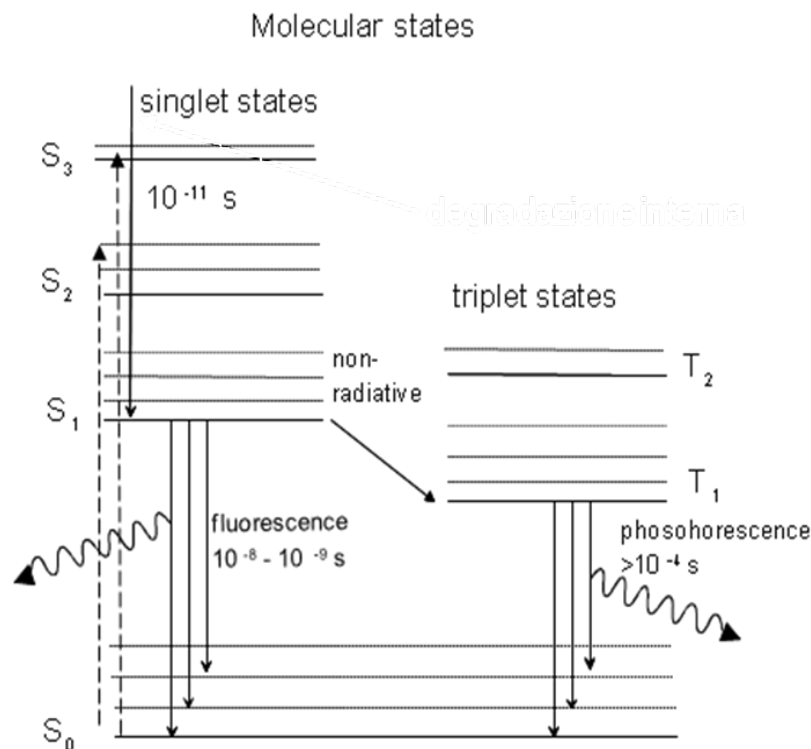
Essendo oggetto di questo lavoro, si procede ad uno studio più approfondito delle proprietà che li riguardano e dei meccanismi di scintillazione.

### 1.2.1 Gli organici

Il processo di fluorescenza è dovuto all'interazione di una singola molecola con il fotone incidente, il quale sia eccita modi rotazionali e vibrazionali, sia provoca transizioni elettroniche degli elettroni di valenza.

La molecola che forma la base, costituita da gruppi come il benzene che possiedono legami  $\pi$ , presenta la struttura dei livelli energetici mostrata in Figura 1.3. Si possono osservare una serie di stati di singoletto, chiamati S, e una serie di stati di tripletto, chiamati T, ciascuno poi suddiviso in un certo numero di sottolivelli energetici, generati dai modi vibrazionali delle molecole. Da questa configurazione si possono quindi determinare diversi processi e le relative caratteristiche: le diseccitazioni dagli stati di singoletto superiori a S<sub>1</sub> (S<sub>2</sub>, S<sub>3</sub>, ...) avvengono in meno di 10 ps ma la transizione non provoca emissione di radiazione (*internal conversion - degradazione interna*); lo stato S<sub>1</sub> può decadere facilmente nello stato fondamentale S<sub>0</sub>, in tempi brevi (1÷10 ns), provocando emissione di luce (*fluorescenza istantanea*, il fenomeno principale); oppure si può verificare la transizione da S<sub>1</sub> a T<sub>1</sub> (*intersystem crossing*) e, dallo stato di tripletto, si verifica una transizione allo stato S<sub>0</sub>, con emissione di luce in tempi di circa 10<sup>-4</sup> s (*fosforescenza*). In più si può verificare, per elettroni eccitati termicamente, il passaggio dallo stato T<sub>1</sub> allo stato S<sub>1</sub> producendo un impulso luminoso (*fluorescenza ritardata*).

Il processo di fluorescenza avviene quindi per transizioni energetiche nella struttura molecolare, indipendentemente dallo stato fisico in cui esse si trovano. Questo permette di osservare fluorescenza in solidi organici, vapori e soluzioni a molte componenti, a differenza dei materiali inorganici, dove è richiesta una precisa struttura cristallina.



**Figura 1.3.** Struttura dei livelli elettronici di una molecola con legami  $\pi$ .

Gli scintillatori organici si dividono quindi a loro volta a seconda della struttura: cristalli, liquidi e plastici.

Tra i cristalli, i più diffusi sono l'antracene, caratterizzato da alta efficienza, e lo stilbene, ma per questi si ha lo svantaggio che la risposta può dipendere dall'orientazione.

Per i liquidi si ha un solvente organico (toluene, benzene, xylene) che trasferisce velocemente l'eccitazione ad uno o più soluti, costituiti da molecole organiche ad alta resa di fluorescenza, come p-terphenyl e POPOP (tempo di risposta di qualche ns). Sono inoltre adatti per volumi elevati di rivelazione.

I plastici, infine, sono tipicamente composti da una matrice polimerica (tipicamente polistirene o polivinil toluene), su cui la radiazione incidente perde quasi tutta l'energia, un materiale scintillatore inglobato in essa, a cui è trasferita questa energia ed emette radiazione UV, e una sostanza chiamata *wavelength shifter*, che assorbe nell'UV ed emette nell'ottico.

## 1.2.2 I plastici

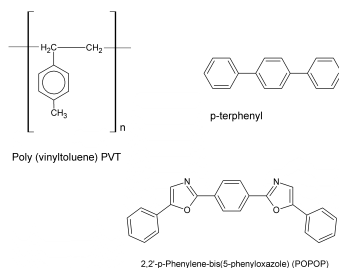
Le principali caratteristiche dei plastici sono la produzione di un segnale molto veloce (costante di decadimento di circa 2-3 ns), che li rende adatti a misure temporali, un'alta uscita in luce (a patto che siano estremamente puri, in quanto la presenza di contaminanti abbassa il rendimento luminoso), la flessibilità, che li rende facilmente manipolabili, e il loro costo non eccessivo, utile nel caso siano necessari ampi volumi di scintillatori. Tuttavia la loro composizione (elementi leggeri: C, H), fa sì che nella rivelazione di fotoni l'effetto Compton sia dominante, e quindi si osservi una scarsa resa in luce per questo tipo di radiazione.

Come campione di riferimento per le misure effettuate è stato scelto il materiale NE102, uno scintillatore plastico largamente usato in esperimenti di fisica nucleare. Attualmente questo scintillatore è venduto dalla Saint Gobain, con la sigla BC400.

Sono di seguito riportati i parametri principali dello scintillatore NE102:

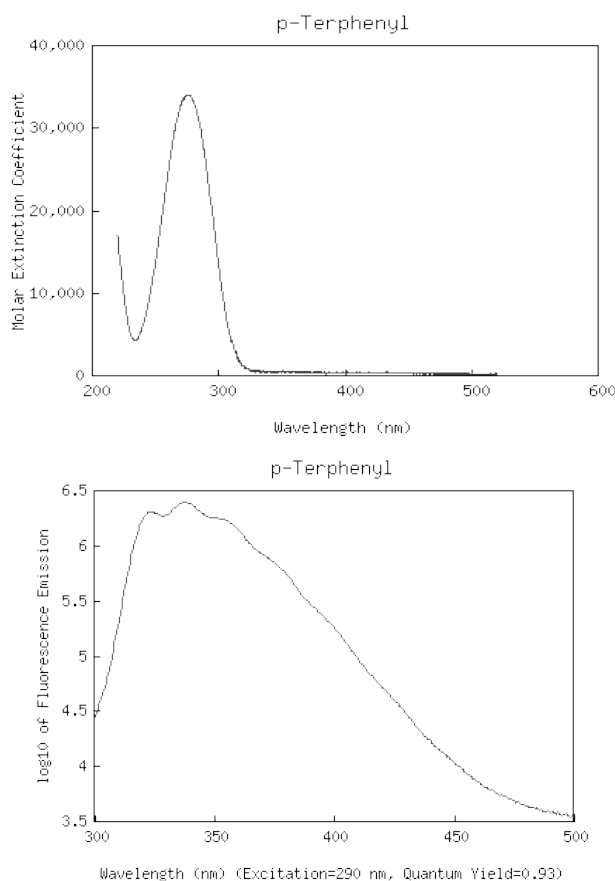
- densità :  $1.032 \text{ g/cm}^3$  (bassa)
- indice di rifrazione 1.58
- costante di decadimento  $t$  : 2.4 ns (veloce)
- lunghezza d'onda della luce emessa:  $4250 \text{ \AA}$  (luce blu corrispondente a 3 eV)
- numero di fotoni emessi:  $1 \gamma/3000 \text{ eV}$  (di energia depositata per ionizzazione)
- numero di fotoni al cm (vista la  $dE/dx$  rilasciata da una particella in NE102):  $500 \gamma/ \text{cm}$ .

Questo scintillatore è costituito da una base polimerica in poliviniltoluene (PVT) e da due soluti, il p-terphenyl (presente in concentrazione pari a 1-4 % in peso) ed il POPOP (presente in concentrazione pari o minore di 0.1% in peso). Le strutture chimiche dei tre componenti sono riportate nella Figura 1.4.



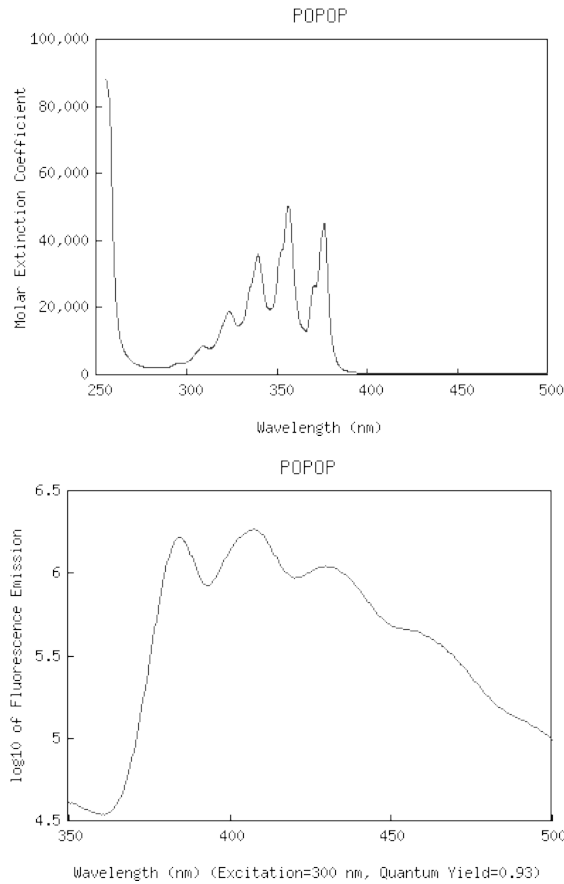
**Figura 1.4.** Strutture chimiche delle tre componenti dello scintillatore NE102.

La matrice (PVT) assorbe l'energia dalla radiazione incidente ed emette con ottima resa di fluorescenza a circa 300 nm. Il primo dye fluorescente (fluoroforo primario, p-terphenyl) assorbe la luce emessa dal PVT e la riemette a circa 350 nm. In Figura 1.5 sono riportati gli spettri di assorbimento e di emissione del p-terphenyl.



**Figura 1.5.** Spettro di assorbimento (in alto) e di emissione (in basso) del dye primario dell'NE102 (p-terphenyl).

Infine, il secondo dye (POPOP, wavelength shifter) assorbe la luce emessa dal p-terphenyl e la riemette a circa 420 nm, come risulta evidente dalla Figura 1.6.



**Figura 1.6.** Spettro di assorbimento (in alto) e di emissione (in basso) del dye secondario dell'NE102 (POPOP).

Gli scintillatori plastici sono affidabili, robusti e convenienti. Tuttavia, possiedono alcuni svantaggi, che devono essere tenuti in debito conto.

- Invecchiamento (*ageing*): l'esposizione dei rivelatori plastici a vapori di solventi o ad alte temperature, oppure il semplice maneggiarli con poca cautela, provocandone una leggera flessione, e infine l'irraggiamento, inducono negli scintillatori plastici a base di PVT, o anche di polistirene (PS), una significativa diminuzione nella resa di luce. In particolare,

l'NE102 sviluppa molto facilmente delle microcricche superficiali che diminuiscono in modo drastico la luce emessa, dovuta alla diminuzione della trasparenza per la dispersione indotta dalla disomogeneità superficiale.

- *Afterglow*: gli scintillatori plastici hanno una luminescenza ritardata che non segue un decadimento semplicemente esponenziale. Tale fenomeno può perdurare per centinaia di nanosecondi.
- Danno da radiazione: nel corso del loro funzionamento sotto fascio, i rivelatori plastici a base di PVT o PS subiscono un danno da radiazione che induce la formazione di centri di colore. Questi aggregati di molecole con la presenza di doppi legami, assorbono luce nella regione del vicino UV, ma anche intorno ai 400 nm, nel visibile. Il materiale ingiallisce quindi progressivamente e la resa di luce diminuisce in modo drastico, fino a rendere inutilizzabile il rivelatore. Il danno da radiazione dipende non solo dalla dose integrata di ioni, ma anche dal *dose rate*, dall'atmosfera e dalle proprietà del polimero base (temperatura di transizione vetrosa, lunghezza della catena polimerica, etc.). La strategia usuale per aggirare questo problema consiste nell'utilizzare waveshifters, cioè dyes secondari che emettono luce a più alta lunghezza d'onda (maggiore Stokes shift), in modo che l'assorbimento nel blu causato dal danno da radiazione non costituisca un serio problema per la rivelazione. Tuttavia, allo stato attuale, non esistono in commercio dyes secondari con le caratteristiche ricercate (elevata resa di luce ed elevato Stokes shift), e normalmente l'introduzione di dyes secondari che emettono nel verde o nel rosso va a discapito della resa di luce di scintillazione.

# Capitolo 2

## Chimica degli scintillatori

### 2.1 Introduzione

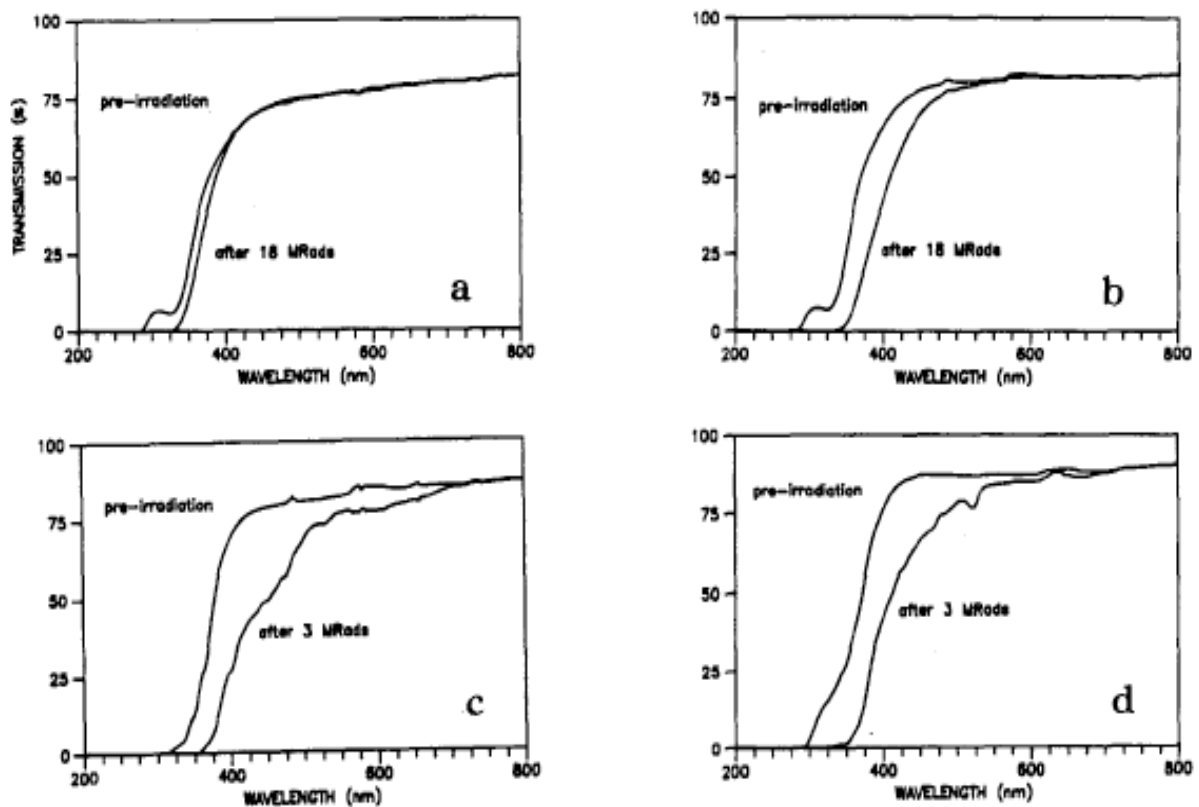
Gli scintillatori plastici di cui si vogliono studiare le caratteristiche di scintillazione, formati da una base di polidimetilsilossano con gruppi funzionali fenile, sono rivelatori che hanno avuto un'importanza sempre maggiore a partire dagli anni '80 – '90, per via del loro uso in esperimenti di alta energia. In acceleratori di particelle, come SSC e LHC, sono necessari, infatti, materiali capaci di resistere a grandi dosi di radiazione, mentre gli scintillatori allora utilizzati, come il PVT, subivano un forte danneggiamento proprio nella “regione” di lunghezza d'onda della luce emessa, così da subire un effetto catastrofico sulla luce in uscita. Plastici drogati, invece, con un fluoroforo con Stokes shift maggiore, hanno mostrato uno spostamento dello spettro di emissione sopra i 500 nm, così da risultare rivelatori resistenti ad alte dosi di radiazione.

I polisilossani presentano, dal punto di vista della produzione, il vantaggio di polimerizzare a temperatura ambiente (o poco sopra questa), di non subire significative variazioni di volume, ma di restare elastici, in seguito a questo processo. Inoltre, altri problemi come il trasporto di calore o la presenza di sforzi residui, dovuti al processo di fabbricazione, possono essere rimossi nella produzione di grandi quantità di queste basi.

In aggiunta, hanno dimostrato grande stabilità sopra i 200 °C, così da poter essere utilizzati anche in esperimenti che presentano queste particolari condizioni sfavorevoli. La presenza del forte legame a ponte Si-O-Si , che ha una energia pari a 421 KJ/mole (mentre un legame C-C come nel PVT o nel PS ha un'energia

di soli 48 KJ/mole), determina la resistenza termica dei polisilossani, che hanno una forte analogia strutturale con il vetro, che, come si sa, è il materiale a più elevata resistenza alle radiazioni. Un pannello di plexiglass (polimetilmetacrilato) normalmente ingiallisce dopo pochi anni di utilizzo come finestra, mentre non si è mai visto un vetro ingiallire, anche dopo centinaia di anni.

La resistenza termica e la resistenza alle radiazioni sono intimamente correlate. A dimostrazione, sono riportati gli spettri di trasmissione prima e dopo l'irraggiamento di materiali a base polimetil-fenil silossano (PMPS), simili a quelli preparati in questo lavoro di tesi, in Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Spettri di trasmissione prima e dopo l'irraggiamento con raggi  $\gamma$  di vari materiali: PMPS in argon (a), PMPS in aria (b), PVT in argon (c), PS in argon (d). Si noti che a 400 nm la trasmissione non si riduce in (a), mentre in (c) passa dal 75% al 25% e in (d) passa da 75% al 40 %.

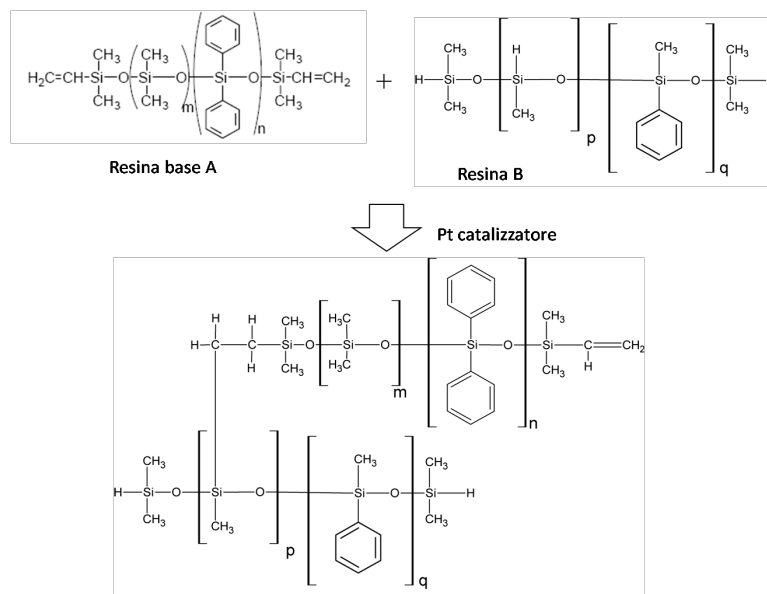
Un ultimo aspetto che rende questi materiali interessanti è la possibilità di addizionarli con composti del gadolinio, una sostanza che li rende adatti alla rivelazione di neutroni.

## 2.2 Composizione e reazione di reticolazione

Il campione è composto principalmente da una base plastica di polisilossano, che rappresenta la componente sensibile alla ionizzazione (cioè lo “scintillatore”) ed è prodotta a partire da due pre-polimeri:

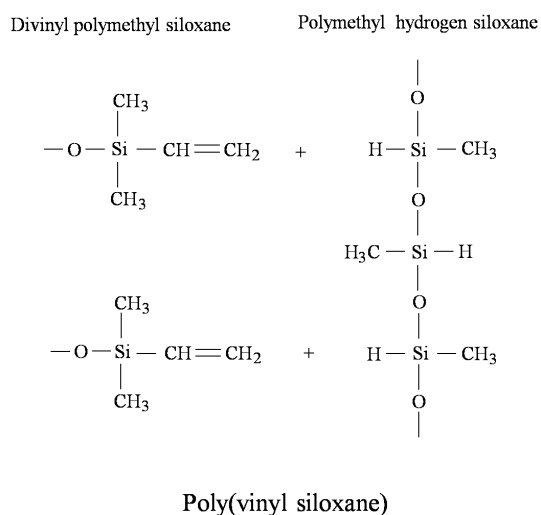
- Dimethyl-diphenylsilossano, la cui catena termina con un gruppo vinile -  $\text{CH}=\text{CH}_2$  (resina A), rappresenta la “resina base”. La percentuale in moli di gruppi fenile nella macromolecola può essere cambiata dal 4 % al 22 %, a seconda del polimero di partenza utilizzato, come specificato in Tabella 2.1.
- phenylmethylsilossano, terminato con idruro (resina B). In questa resina la percentuale in moli di gruppi fenile è circa il 50% ( $p=q$ )

Il processo di reticolazione, tramite addizione del legame Si-H al doppio legame del gruppo vinile della resina base, può essere schematizzato in tre passaggi, come mostrato nelle figure seguenti.



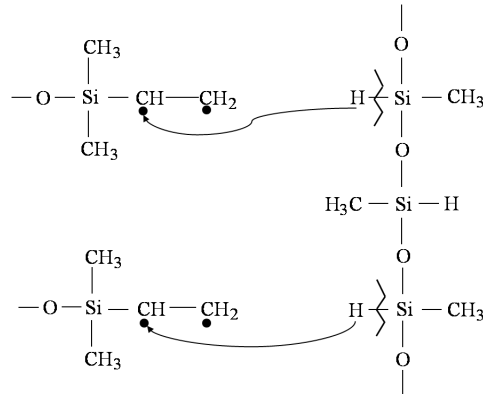
**Figura 2.2.** Resine base di partenza e molecola polimerizzata.

Dopo che i gruppi chimici reattivi (doppi legami e legami idruro Si-H) si avvicinano durante la fase di mescolamento, il composto di Pt si coordina con i doppi legami, indebolendoli.



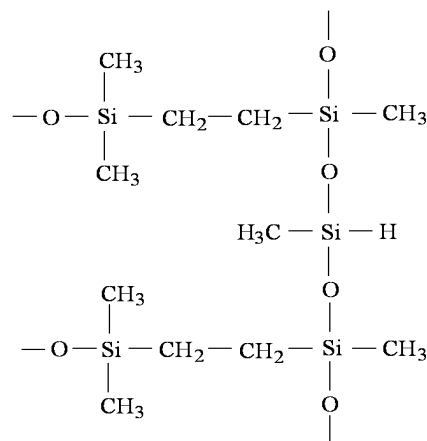
**Figura 2.3.** Addizione del legame idruro Si – H al doppio legame del gruppo vinile.

I doppi legami dei gruppi vinilici quindi si rompono, formando dei radicali carbonio molto reattivi (Gli elettroni spaiati sull'atomo di carbonio sono facilmente aggredibili).



**Figura 2.4.** Rottura dei doppi legami dei gruppi vinilici e formazione dei radicali carbonio.

Il legame Si-H si rompe a sua volta e l'idrogeno migra sul radicale carbonio vicino al silicio, mentre il carbonio radicale terminale si lega al silicio della catena di idrosilossano.



Poly(vinyl siloxane) after setting

**Figura 2.5.** Molecola finale, in seguito alla reticolazione.

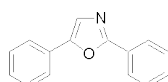
Progressivamente, il liquido molto viscoso, formato dal mescolamento delle due resine, comincia a reticolare formando nuovi legami chimici sia nelle posizioni finali della catena di polidimetil-fenil silossano (resina A), sia nelle posizioni intermedie nella catena di idrosilossano (resina B), creando così una vera e propria rete di legami chimici covalenti molto forti. Il materiale si trasforma dunque in un solido elastico con elevata resistenza termica e meccanica.

**Tabella 2.1.** Parti in peso di ciascun reagente utilizzato per la polimerizzazione.

Nome campione	Resina base A	Resina base B	Catalizzatore	Inibitore
4% phenyl	100	6	0.05	1
15% phenyl	100	5.2	0.05	1
22% phenyl	100	8	0.05	1

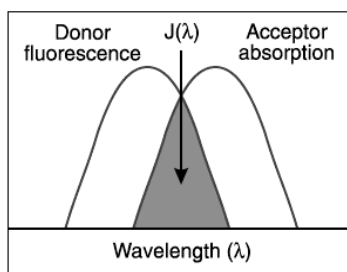
Oltre alla resina base A (vinilsilossano) e alla resina B (idrosilano), nelle proporzioni indicate in Tabella 2.1, si aggiunge dunque il platino (complesso cyclovinilmethylidisilossano) per lo 0.05% del peso di resina A. Il suo ruolo è di catalizzatore, cioè favorire la reazione di addizione tra il carbonio del gruppo vinilico (parte A) e l'idruro (parte B), così da creare il legame tra le due molecole. Tuttavia, questo composto del platino è considerato un catalizzatore "hot", nel senso che promuove la reazione anche a temperatura ambiente ed in tempi rapidissimi. Poiché questa rapida reticolazione, lascia poco tempo per la manipolazione del liquido (distribuzione in barattolo di polietilene, de-aerazione mediante inserimento del campione liquido in stufa da vuoto a 10 mm Hg), si aggiunge anche un inibitore (1% in peso) che gioca il ruolo di coordinarsi con il composto di Pt, la cui azione viene quindi rallentata. Il processo di de-aerazione è importante: se bolle d'aria rimangono intrappolate nel polimero dopo la reticolazione, esse agiranno per la luce come centri di diffusione, con il risultato di diminuire anche di molto la trasparenza del materiale finale.

Per ottenere invece un'emissione di luce nel visibile, generalmente si dissolve nella resina base un fluoroforo (wavelength shifter) in concentrazione variabile. In questi campioni è stato usato il composto PPO ( 2,5-diphenyl oxazole, vedi Figura 2.6), nelle concentrazioni di 0.1%, 0.5%, 1%, 1.5% del peso della base vinilica A. Il PPO, infatti, è in grado di assorbire la radiazione di lunghezza d'onda di 300 nm emessa dalla base, e riemetterla a 400-420 nm. Oltre a questa funzione, tuttavia, l'aggiunta di questa sostanza ha conseguenze sulla capacità di scintillazione del materiale, come verrà mostrato nel Capitolo 4.



**Figura 2.6.** Molecola del PPO ( 2,5-diphenyl oxazole).

La presenza del gruppo phenyl (  $-C_6H_5$  ) nella base, infine, è necessaria in quanto permette alla matrice di essere essa stessa fluorescente, con emissione a circa 300 nm, proprio come il PVT ad il PS, polimeri contenenti il benzene come gruppo funzionale. La possibilità che parte dell'energia emessa dalla matrice, a seguito di eccitazione da radiazione, venga assorbita dal fluoroforo e riemessa nel campo del visibile, si definisce *energy transfer*, e questo processo è tanto più efficiente quanto maggiore è la sovrapposizione dello spettro di emissione della matrice con quello di assorbimento del fluoroforo ( vedi Figura 2.7).



**Figura 2.7.** Energy transfer (ET) tra la matrice (donatore) e il fluoroforo (accettore). La sovrapposizione dei due spettri di emissione e assorbimento è condizione necessaria per il verificarsi di ET.

## 2.3 Preparazione

La preparazione dei campioni avviene per fasi successive, in cui le quantità delle varie sostanze vengono misurate con strumenti di precisione (micropipette di diversa portata e sensibilità), sciolte in un'unica soluzione e poste ai trattamenti necessari per avere un composto omogeneo. Inizialmente si pesano 2 g di resina base A e si aggiunge la quantità prescelta di PPO, quindi si aggiunge la resina B (idrosilano) e si lascia sotto agitazione per una intera notte. Poi si aggiunge l'inibitore, che serve ad aumentare il tempo di lavorabilità (almeno qualche minuto) ed il catalizzatore al platino. Il liquido viene versato, dopo 30 secondi di vigorosa agitazione, in barattoli di polietilene, e quindi i campioni, ancora liquidi, vengono trasferiti in una stufa da vuoto e lasciati in vuoto (10 mm Hg) per 2 ore, a temperatura ambiente, fino alla totale scomparsa delle bolle d'aria. Infine, la temperatura viene alzata fino a 60°C e il campione viene mantenuto a questa temperatura in vuoto per 12 ore, portando così a termine la reazione di reticolazione. Il risultato è un materiale morbido, trasparente e molto flessibile. Il distacco dal barattolo di polietilene è abbastanza agevole, mentre prove precedenti con recipienti in polistirene o policarbonato non davano buoni risultati. .

Esempio di calcolo: resina base al 15% in moli di gruppi fenile.

Composizione        100 (A) : 5.2 : 0.1

- 2.000 g resina (15% fenile) ; bilancia con sensibilità 0.001 g
- 0.104 g Si-H , densità 1.08 g/ml, 96 µL, prelevati con micro pipetta da 200 µL
- 0.0100/0.0200/0.0300/0.0400 g di PPO , bilancia con sensibilità 0.0001 g
- 10 µL di inibitore, micro pipetta da 20 µL
- 1 µL di catalizzatore, micro pipetta da 2 µL

# Capitolo 3

## L'esperimento

### 3.1 Introduzione

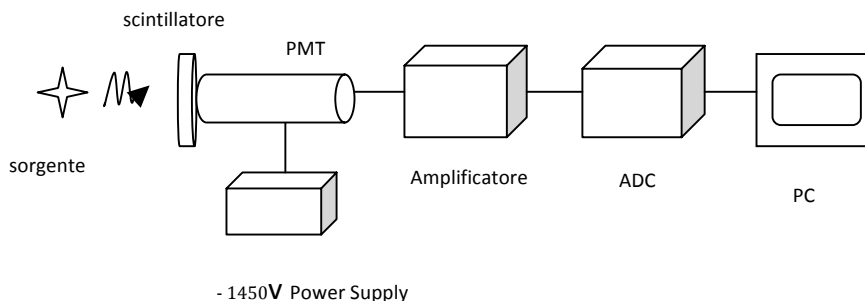
Le misure effettuate hanno lo scopo di studiare la risposta dei materiali, se sottoposti a radiazione alfa e gamma, in funzione della concentrazione di PPO e Phenyl. Si è utilizzato quindi un set-up sperimentale capace di evidenziare le caratteristiche di efficienza e di risoluzione dei rivelatori.

I diversi campioni di scintillatore sono stati accoppiati ad un fotomoltiplicatore, adatto a raccogliere la luce prodotta, convertirla in corrente elettrica ed inviarla ad un sistema di elettronica di lettura, capace di produrre un segnale in tensione con caratteristiche dipendenti dal tipo e dall'energia della radiazione incidente.

Mentre per la radiazione gamma, grazie alla debole interazione con la materia e quindi alla conseguente alta capacità di penetrazione, è stato sufficiente porre la sorgente nelle vicinanze dello scintillatore, opportunamente fasciato per proteggerlo dalla luce esterna, per le particelle alfa è stato necessario porre la sorgente a diretto contatto con il materiale scintillante. L'accoppiamento ottico con il fotomoltiplicatore si è ottenuto tramite contatto diretto con il materiale scintillante, che si presenta piuttosto gommoso ed a facile adesione. Per ovviare al problema della luce esterna tutto il sistema fototubo-scintillatore è stato fasciato insieme utilizzando del nastro di teflon, che serviva anche da fissaggio del sistema di accoppiamento. Il tutto poi è stato poi chiuso in una camera di reazione.

L'impulso raccolto dal fototubo, è stato inviato a un amplificatore, che produce un segnale in uscita di tipo gaussiano, da poter inviare successivamente ad un

sistema multicanale per l'acquisizione dello spettro. La disposizione della catena elettronica è mostrata in Figura 3.1.



**Figura 3.1.** Setup sperimentale.

Le misure sono state effettuate nei mesi di aprile e maggio 2008, presso i Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN.

## 3.2 Le sorgenti

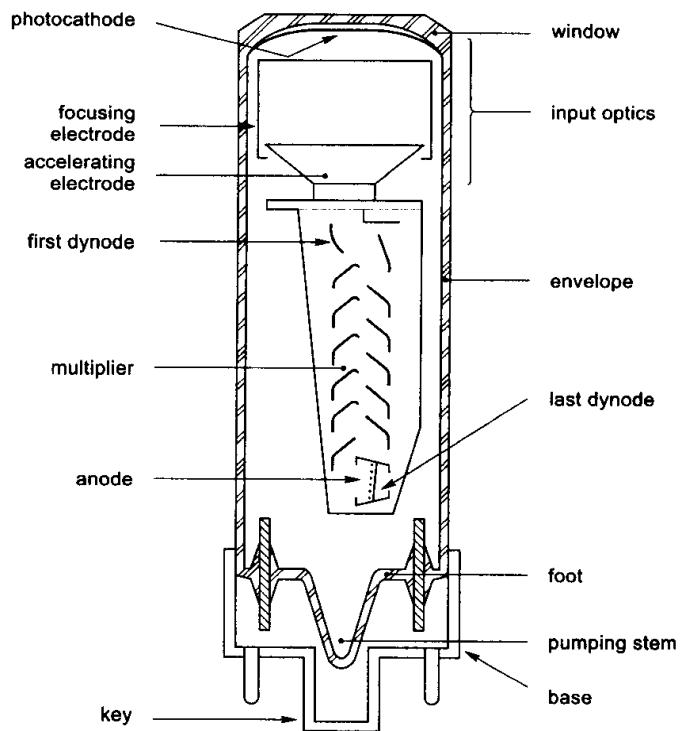
Per la caratterizzazione dello scintillatore sono state utilizzate due sorgenti radioattive. La prima è costituita da  $^{241}\text{Am}$  ( $t_{1/2}=432\text{ y}$ ), che emette particelle alfa con energia pari a 5.484 MeV. La seconda è di  $^{60}\text{Co}$  ( $t_{1/2}=5.2714\text{ y}$ ), un elemento che emette radiazione gamma in seguito al decadimento  $\beta^-$  in stati eccitati del  $^{60}\text{Ni}$ . La sorgente utilizzata emette gamma di due energie: 1.173 MeV e 1.332 MeV.

## 3.3 La catena elettronica

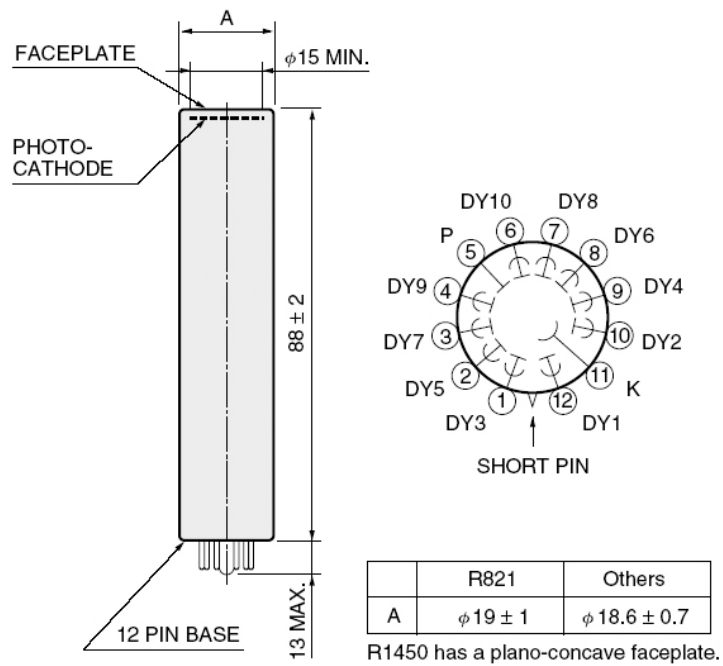
### 3.3.1 Il fotomoltiplicatore

Per la raccolta della luce emessa dallo scintillatore è stato utilizzato un fotomoltiplicatore PMT H6524 Hamamatsu. La sua funzione è quella di convertire l'impulso luminoso in segnale elettrico, sfruttando l'effetto fotoelettrico: attraverso una finestra di ingresso, il fotone entra nel tubo a vuoto del fotomoltiplicatore e incide su una superficie con basso lavoro di estrazione, detto fotocatodo, provocando l'emissione di un elettrone. Questo viene poi accelerato verso un altro elettrodo a tensione leggermente più alta, detto "dinodo", dove provoca l'estrazione di un certo numero di elettroni secondari, e così via su tutti gli altri dinodi, fino a che tutti gli elettroni vengono raccolti su un anodo e producono un segnale elettrico. La corrente anodica generata è dunque proporzionale al numero di fotoni prodotti, ed è quindi possibile l'analisi spettroscopica del segnale entrante.

Il PMT H6524, in particolare, è costituito dal fototubo modello R1450 (risponso spettrale: 350 – 600 nm), di cui è riportato uno schema in Figura 3.3.



**Figura 3.2.** Schema generale del fotomoltiplicatore.



**Figura 3.3.** Fotomoltiplicatore R1450.

Sono di seguito riportate le informazioni fornite dal produttore:

Part Number	H6524
Type	PMT
Head on / Side on	HO
Size	19mm
Effective Area	23.5mm
Cathode Type	Bialkali
Peak Wavelength	420nm
Window Material	Borosilicate Glass
Min Wavelength	300nm
Max Wavelength	650nm
Cathode Luminous Sensitivity	115 $\mu$ A/lm
Cathode Blue Sensitivity	11 $\mu$ A/lmb
Red White Ratio x Radiant Sensitivity at Peak	xV/nW
Anode Luminous Sensitivity	200A/lm
Gain	1.7E+06
Dark Current	3nA typ.
Rise Time	1.8ns
Transit Time Spread	0.76ns
Dynode Structure/ Number of Stages	L/10
Multi Anode	N
Output Type	Current Output
A/D Converter	N
Photon Counting	N
Amplifier	N

Notes Voltage divider and other components all integrated into a single case

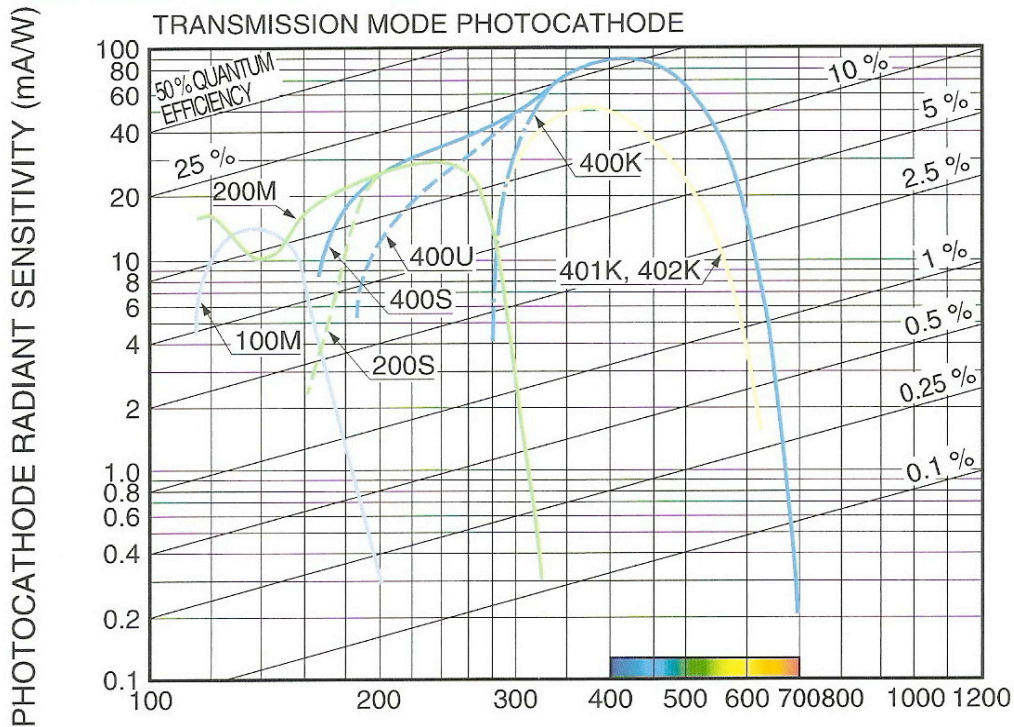
L'ingresso dei fotoni nello strumento avviene tramite una finestra di vetro borosilicato, un materiale molto robusto e resistente ad alte temperature e a forti sbalzi termici. Spesso all'interno è posto un materiale fotosensibile, così da favorire il passaggio della luce.

Determinante per l'efficienza dello strumento risulta poi il tipo di fotocatodo. In esso avviene il passaggio da fotone a fotoelettrone, mediante tre passaggi: assorbimento del fotone incidente e trasferimento di energia all'elettrone, spostamento dell'elettrone attraverso il materiale del fotocatodo verso la superficie, superamento della barriera di potenziale e dunque emissione dell'elettrone. L'energia del fotoelettrone è espressa dalla relazione

$$E = h\nu - \phi$$

dove  $\nu$  è la frequenza del fotone incidente e  $\phi$  è l'energia necessaria per l'estrazione.

Serve quindi una energia minima per avere effetto fotoelettrico ma, anche sopra questa soglia, la probabilità di estrazione è inferiore a uno. Questo avviene in relazione sia alla quantità di energia della luce incidente sia al materiale del fotocatodo. Si utilizzano dunque spesso metalli alcalini, come nel nostro caso, o superconduttori, essendo questi dotati di una struttura che facilita l'emissione. Il parametro che esprime questa capacità è detta *efficienza quantica*, ovvero il rapporto tra fotoelettroni prodotti e fotoni incidenti. Il grafico in Figura 3.4 riporta la sensibilità del fotocatodo in funzione della lunghezza d'onda della radiazione incidente. Il modello da noi usato, corrispondente alla sigla 400K, ha un massimo di efficienza quantica per lunghezze d'onda di 400 nm, esattamente la stessa emessa dagli scintillatori (come detto nel Capitolo 2).



**Figura 3.4.** Sensibilità del fotocatodo (400K).

Dopo l'emissione nel vuoto, gli elettroni devono essere focalizzati verso la sezione di moltiplicazione (dinodi) tramite dei campi elettrici configurati opportunamente. E' importante che la raccolta di elettroni sul primo dinodo sia il più efficiente possibile ed indipendente dal punto di origine sul fotocatodo. In questo stadio, inoltre, la debole corrente prodotta dal fotocatodo deve essere amplificata in modo da diventare misurabile all'anodo, per cui i dinodi sono tali da assicurare un'alta emissione secondaria. Per energie degli elettroni da 100 a 200 eV (tipici voltaggi di accelerazione fra i vari dinodi) si hanno dai 3 ai 5 elettroni secondari emessi, per ogni elettrone primario. Se il guadagno di ogni dinodo è indicato con  $g_i$ , in un PM con N dinodi si ha un guadagno totale G pari a

$$G = \prod_{i=1}^N g_i$$

Nel nostro caso il N è pari a 10, per cui si dovrebbe ottenere un guadagno totale di circa  $10^6 \div 10^7$ .

### 3.3.2 L'alimentatore del fotomoltiplicatore

E' necessario evitare variazioni nella differenza di potenziale fra i dinodi, dovute a variazioni di corrente nel fotomoltiplicatore, in quanto provocherebbero cambiamenti nel guadagno e linearità di risposta. A tale scopo si utilizza un alimentatore stabilizzato e un partitore di tensione (catena di resistenze).

L'alimentazione è stata fornita da un generatore Hamamatsu C4840, (output voltage di  $\pm 3$  kV), regolato ad una tensione di -1450V.

**Tabella 3.1.** Caratteristiche del generatore Hamamatsu C4840.

Parameter	Value/Description	
Output Voltage	0 V to $\pm 3000$ V	
Specification Guaranteed Output Voltage	$\pm 250$ V to $\pm 3000$ V	
Maximum Output Current	10 mA	
Line Regulation Against $\pm 10$ % Line Voltage Change <sup>A B</sup> Max.	$\pm(0.005$ % + 10 mV)	
Load Regulation Against 0 % to 100 % Load Change <sup>A</sup> Max.	$\pm(0.01$ % + 50 mV)	
Ripple/Noise (p-p) <sup>A B</sup> Max.	0.0007 %	
Drift (after 1 h Warm-up) <sup>A B</sup> Max.	$\pm(0.02$ % + 10 mV)/8 h	
Temperature Coefficient <sup>A B</sup> Max.	$\pm 0.01$ %/°C	
Output Voltage Monitor	4-digit digital meter	
Output Voltage Monitoring Accuracy <sup>A</sup> Max.	$\pm(0.1$ % $\pm 3$ V)	
Protection Circuit	For short circuit and excess output current	
AC Input Voltage	C4840-01	120 V ( $\pm 10$ %) (50/60 Hz)
	C4840-02	230 V ( $\pm 10$ %) (50/60 Hz)
Power Consumption <sup>A B</sup>	Approx. 100 V·A	
Operating Ambient Temperature/Humidity <sup>C</sup>	0 °C to +40 °C / 80 % RH Max.	
Specification Guaranteed Temperature/Humidity <sup>A B C</sup>	+5 °C to +35 °C / 80 % RH Max.	
Storage Temperature/Humidity <sup>C</sup>	-20 °C to +50 °C / 85 % RH Max.	
Output Receptacles	Two SHV receptacles	
Weight	10 kg	
CE Marking	Conforms to EMC directive (89/336/EEC)/EN61326: 1997 + A1: 1998 + A2: 2001 Class B Conforms to low voltage directive (73/223/EEC)/EN61010-1: 2001	

**NOTE:** <sup>A</sup>At maximum output voltage. <sup>B</sup>At maximum output current. <sup>C</sup>No condensation

#### Accessories

① AC line cable (2.4 m long) .....	1
② High voltage output cable (1.5 m long) terminated with SHV-P plugs E1168-19 .....	1
③ Spare fuses .....	1
④ 3P/2P connector AC adapter (C4840-01 only) .....	1



**Figura 3.5.** Generatore Hamamatsu C4840.

### 3.3.3 L'amplificatore

Il segnale in uscita dal fototubo è stato poi inviato ad un amplificatore, Fast Spectroscopy Amplifier CANBERRA 2024, che produce i segnali finali da inviare ad un ADC, per la conversione numerica e il salvataggio su disco.

Si tratta di uno strumento funzionale per l'analisi del segnale: un amplificatore lineare con filtro passa-banda, cioè con il segnale di uscita proporzionale a quello del fotomoltiplicatore (quindi conserva l'informazione sulla quantità di carica dell'evento) e, allo stesso tempo, in grado di confinarlo in un breve intervallo di tempo, evitando che si abbia il fenomeno di impilamento dei segnali (*pile-up*). Il tempo  $t_s$ , detto *shaping time*, è determinato dal filtro che costituisce il passa-banda, ma la sua scelta dipende dal tipo di segnale proveniente dal rivelatore. Osservando l'ampiezza dell'impulso e la dipendenza della risoluzione energetica del segnale (FWHM) al variare dello shaping time  $t_s$ , è stato deciso di fissare il valore di  $0.5 \mu\text{s}$  per tutte le nostre misure. Queste impostazioni del circuito elettronico dell'amplificatore determinano la forma gaussiana del segnale di uscita (unipolare).



**Figura 3.1.** Fast spectroscopy amplifier CANBERRA 2024.

### 3.3.4 Acquisizione dati

Il segnale in uscita dall'amplificatore viene mandato ad un Analizzatore Multicanale che, provvisto di una scheda ADC (Analog to Digital Converter), converte il segnale analogico gaussiano in un segnale digitale e lo salva nella memoria di un PC, per la successiva analisi.

Il valore in bit del segnale digitale è proporzionale all'ampiezza massima di quello di ingresso, così che, accumulando i diversi segnali corrispondenti ad una fase di misura, otteniamo uno spettro monodimensionale su 4096 canali. Lo spettro riproduce così la distribuzione di energia degli eventi di sorgente che hanno prodotto un segnale di luce nello scintillatore.

Ogni misura è soggetta ad eventuali instabilità su tempi brevi della catena elettronica o nella conversione in unità digitali, al rumore elettronico e a fluttuazioni poissoniane della quantità di luce prodotta e di carica raccolta: tutti questi elementi causano un allargamento dei picchi, che assumono un andamento di tipo gaussiano. Per minimizzare l'errore statistico i dati sono stati raccolti per un tempo di circa 2000 secondi.

# Capitolo 4

## Analisi dati

Sono di seguito presentate le risposte di scintillatori siliconici, descritti nel capitolo 2, a confronto con lo scintillatore commerciale NE102.

I campioni analizzati, caratterizzati da differenti percentuali di gruppo fenile e di PPO, sono stati prodotti in due serie differenti:

1) Aprile 2008

15% Phenyl: a1) 0.1%, a2) 0.5%, a3) 1% di PPO

2) Giugno 2008

4% Phenyl: b1) 0.5%, b2) 1%, b3) 1.5% PPO

15% Phenyl: c1) 0.5%, c2) 1%, c3) 1.5%, c4) 2% PPO

22% Phenyl: d1) 0.5%, d2) 1%, d3) 1.5% PPO

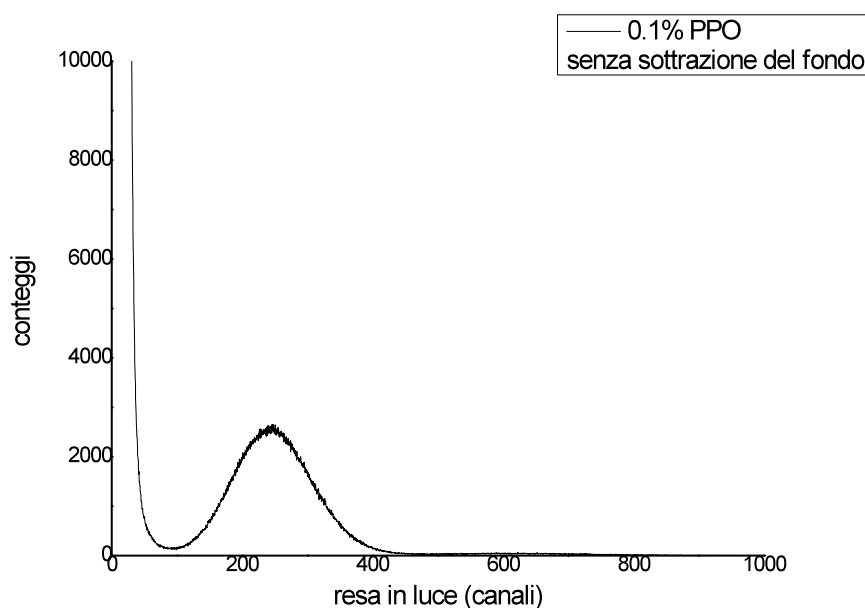
E' necessario distinguere tra diverse serie di produzione, in quanto si è visto che campioni nominalmente dello stesso tipo possono presentare differenze di funzionamento. Questo si verifica per piccole variazioni accidentali nel processo di produzione, come, per esempio, disomogeneità dell'inibitore al platino disciolto.

Per ogni campione sono stati acquisiti gli spettri prodotti da raggi alfa e gamma. I grafici seguenti, riferiti alla prima serie, sono il risultato sia della sottrazione, dagli spettri acquisiti con le sorgenti, dello spettro dovuto al fondo (rumore elettronico, fondo ambientale), sia di una procedura di normalizzazione del numero dei conteggi rilevati, per omogeneizzare e confrontare direttamente i dati, in relazione a parametri come il tempo di

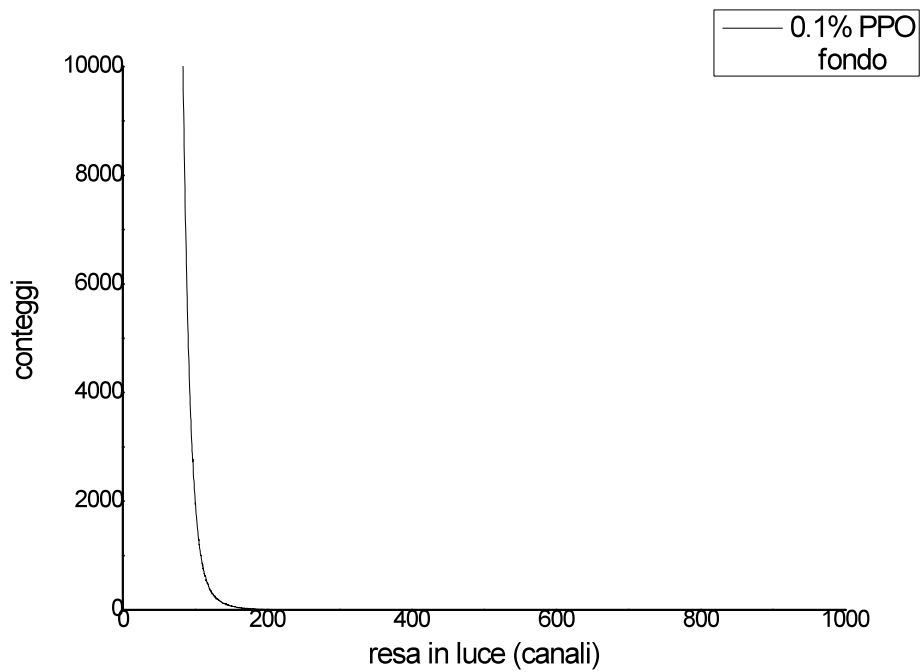
acquisizione ed il guadagno dell'amplificatore. I valori riportati si riferiscono infatti ad una esposizione per un tempo di 1000 s, ad una amplificazione con *coarse gain* 100 e *shaping time* fissato a 0.5  $\mu$ s.

## 4.1 Sottrazione del rumore di fondo

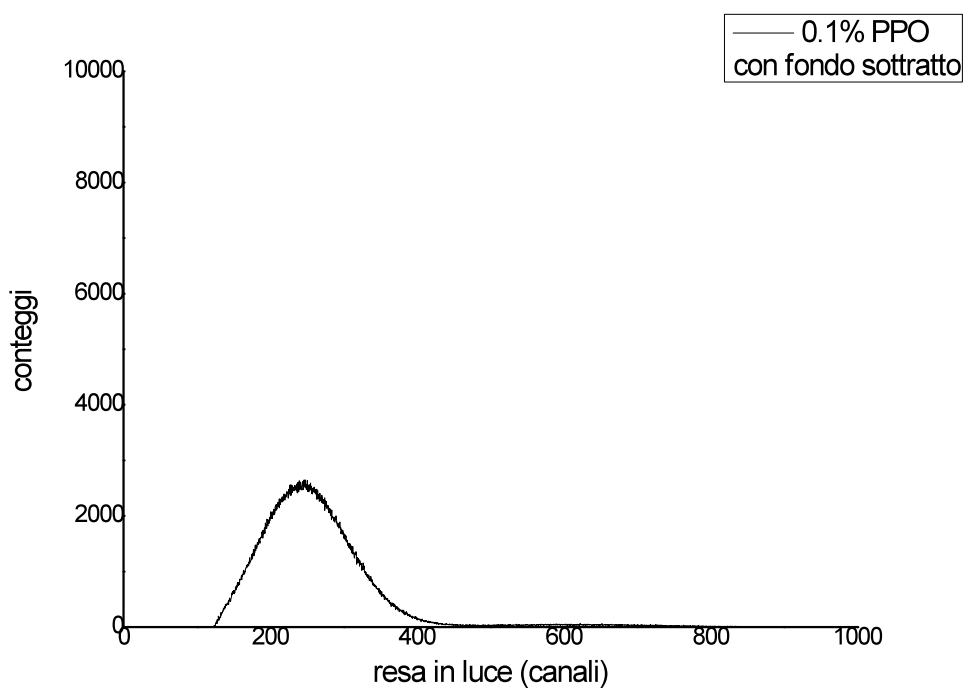
Con le figure sotto riportate si propone un esempio dei passaggi effettuati per ottenere gli spettri finali, che sono stati quindi analizzati. I grafici di seguito presentati sono quelli relativi al campione a1) della prima serie, contenente 0.1% di PPO e 15% di Phenyl.



**Figura 4.1.** Esempio di spettro di raggi alfa, senza sottrazione del fondo.

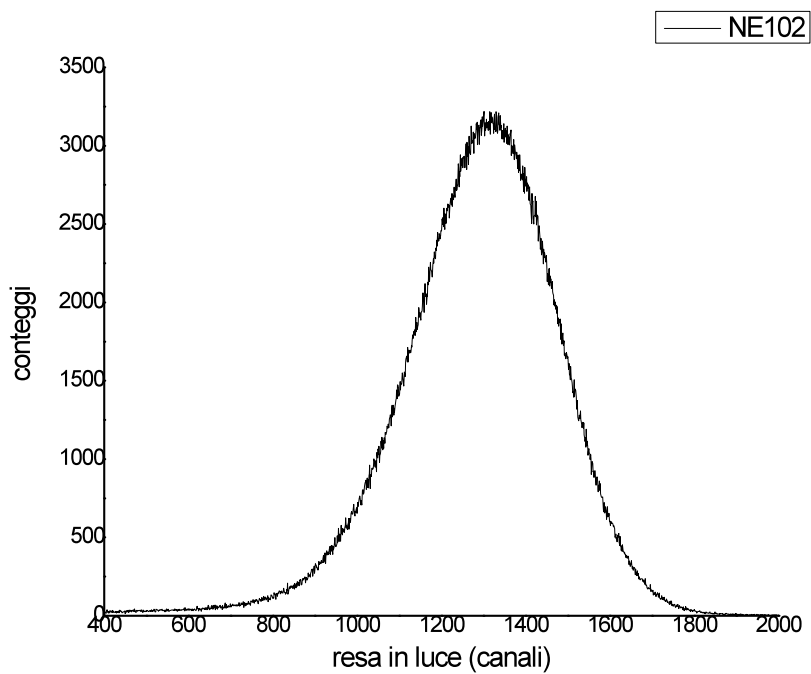


**Figura 4.2.** Esempio di spettro di fondo.

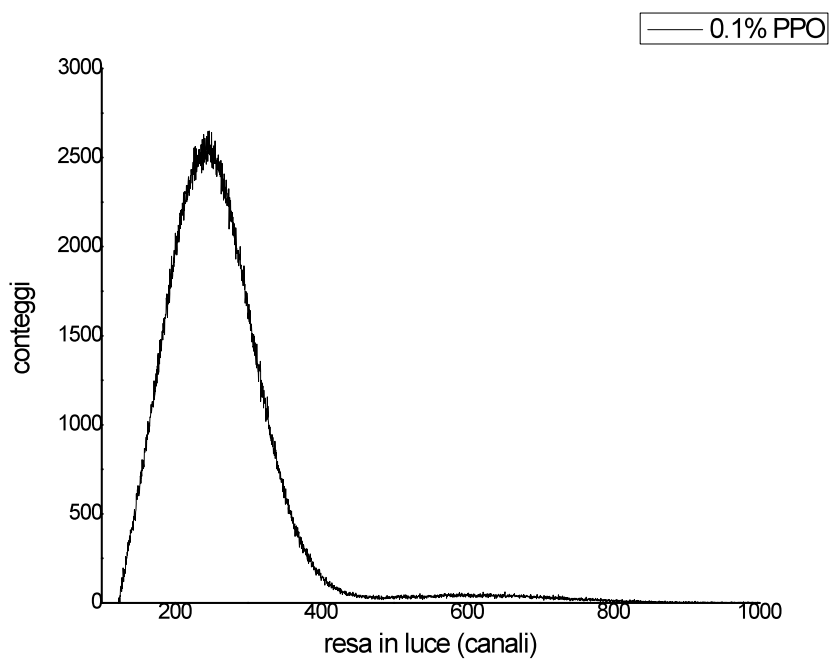


**Figura 4.3.** Esempio di spettro di raggi alfa con il fondo sottratto.

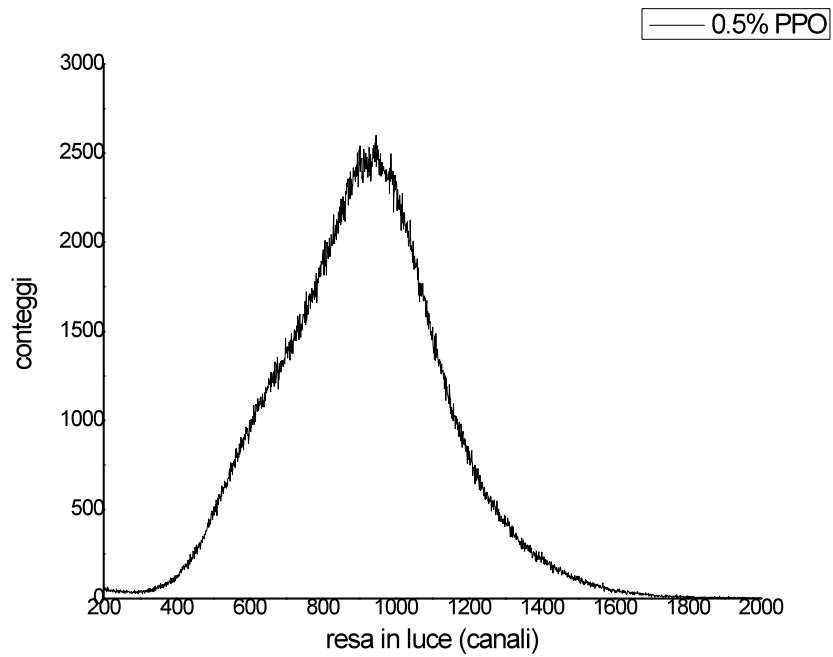
## 4.2 Spettri raggi alfa



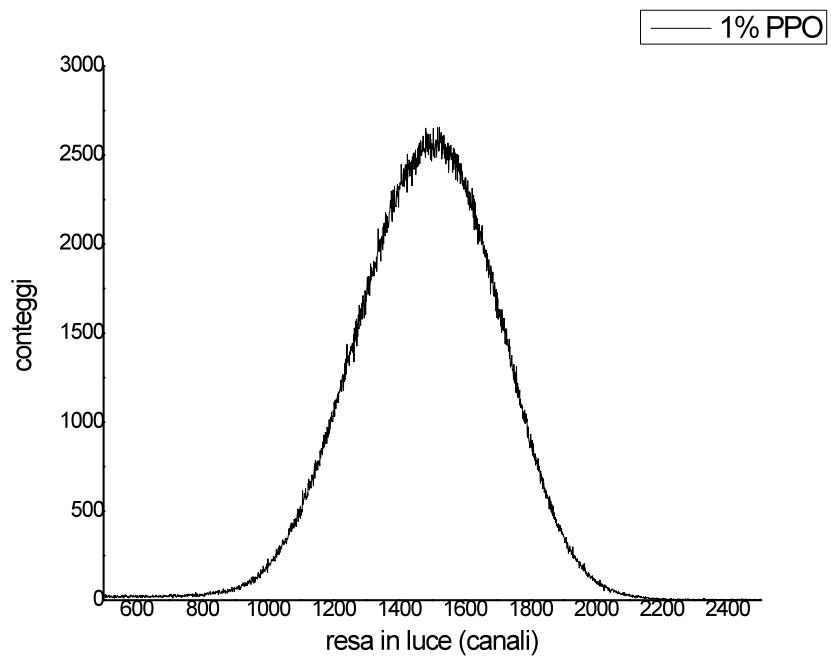
**Figura 4.4.** Spettro di raggi alfa per il campione di NE102.



**Figura 4.5.** Spettro di raggi alfa per il campione con 0.1% di PPO.



**Figura 4.6.** Spettro di raggi alfa per il campione con 0.5% di PPO.



**Figura 4.7.** Spettro di raggi alfa per il campione con 1% di PPO.

### 4.3 Spettri raggi gamma

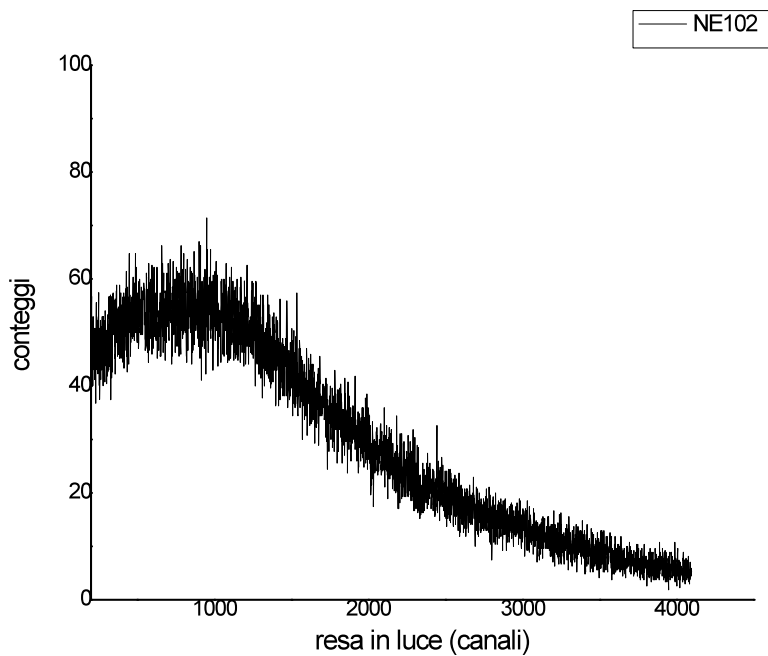


Figura 4.8. Spettro di raggi gamma per il campione di NE102.

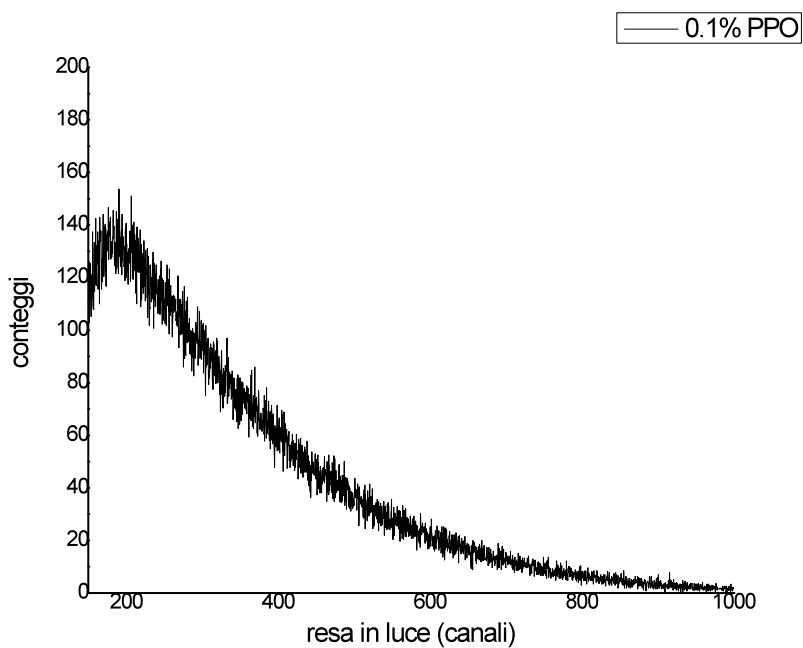
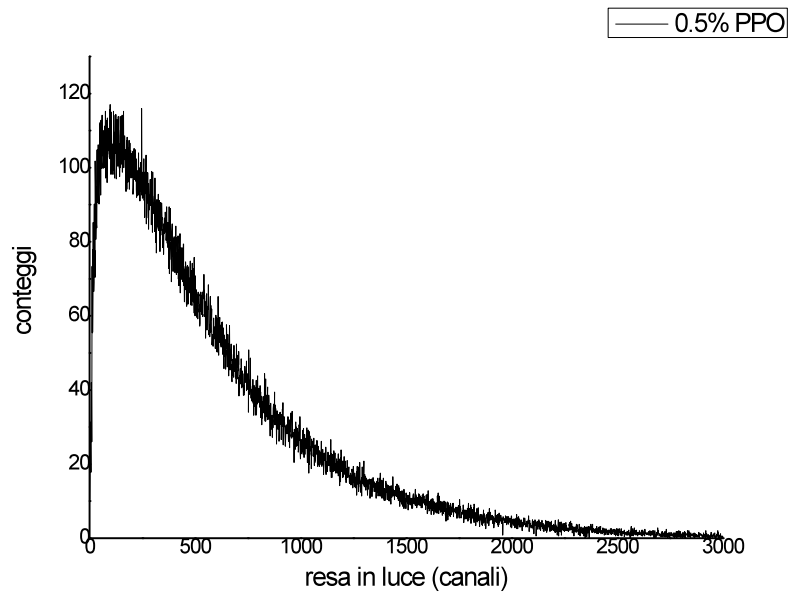
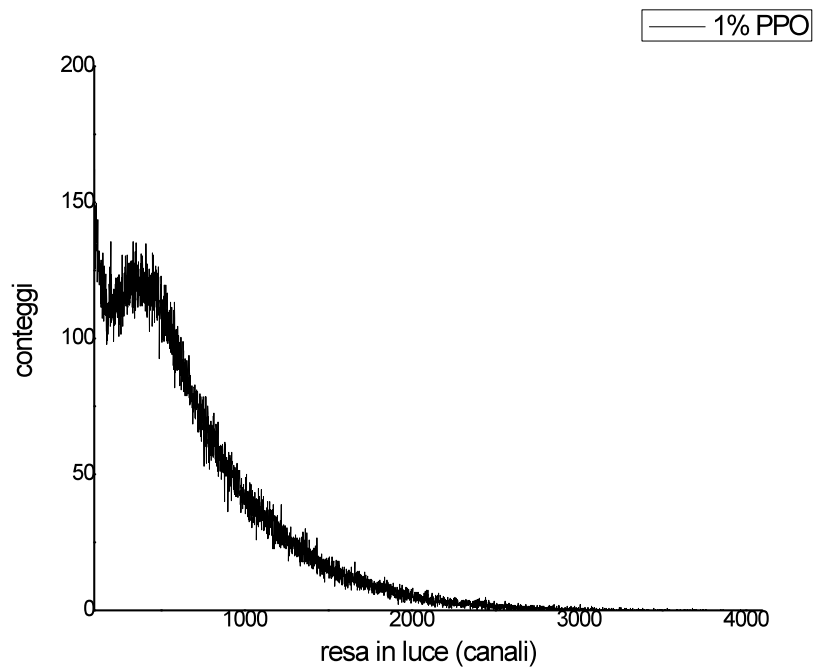


Figura 4.9. Spettro di raggi gamma per il campione con 0.1% di PPO.



**Figura 4.10.** Spettro di raggi gamma per il campione con lo 0.5% di PPO.



**Figura 4.11.** Spettro di raggi gamma per il campione con 1% di PPO.

## 4.4 Fit gaussiano

La funzione di Gauss è la distribuzione che descrive la maggior parte dei fenomeni fisici. Se la misurazione di un fenomeno fisico è soggetta a errori accidentali, quindi di diversa natura ma di ugual peso, i dati si distribuiscono secondo la caratteristica curva a campana, centrata attorno al valore medio, detta Gaussiana.

La funzione Gaussiana è espressa dalla formula

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-\frac{2(x-x_0)^2}{w^2}}$$

dove:

$y_0$  = offset

$A$  = area totale sotto la curva

$x_0$  = centro del picco

$w = 2\sigma$  approssimativamente 0.849 la larghezza del picco a metà altezza

Con le misure effettuate si intende valutare la risoluzione in energia di ciascun campione, per verificarne l'eventuale dipendenza dalle percentuali di PPO o del gruppo fenile presenti nel materiale. A tale scopo si considera il parametro FWHM (larghezza a metà altezza), legato alla funzione di Gauss tramite la relazione

$$\text{FWHM} = 2.35 \cdot \sigma = 2.35 \cdot w/2$$

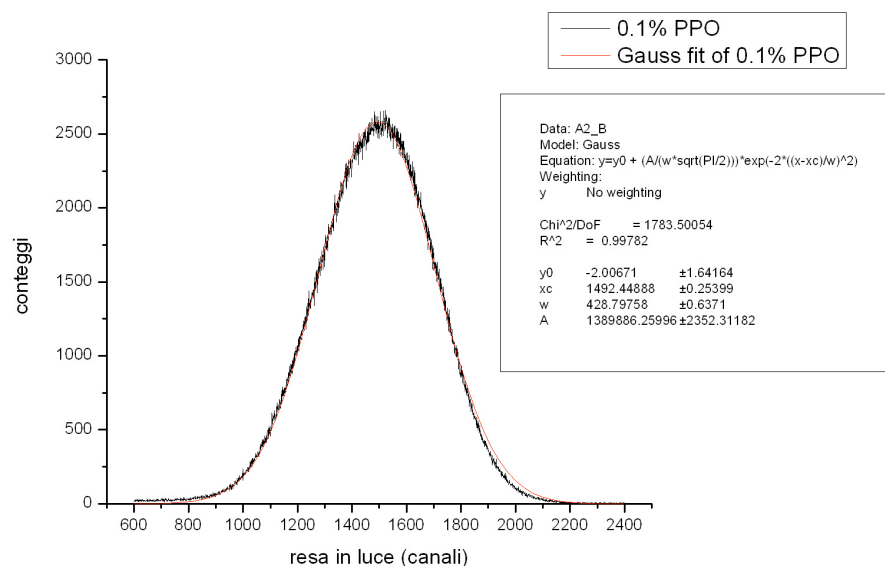
Più è basso il suo valore, più la campana della gaussiana è stretta e tende a una delta di Dirac, e quindi si ha una risoluzione migliore.

Per maggiore chiarezza si utilizza l'espressione percentuale data da

$$FWHM(\%) = \frac{FWHM(\text{canali})}{x_0} * 100$$

dove  $x_0$  è il canale del massimo.

L'errore che affligge  $FWHM(\%)$  è  $\sqrt{x_0}$ .



**Figura 4.12.** Esempio di fit gaussiano per raggi gamma con campione con 1% di PPO.

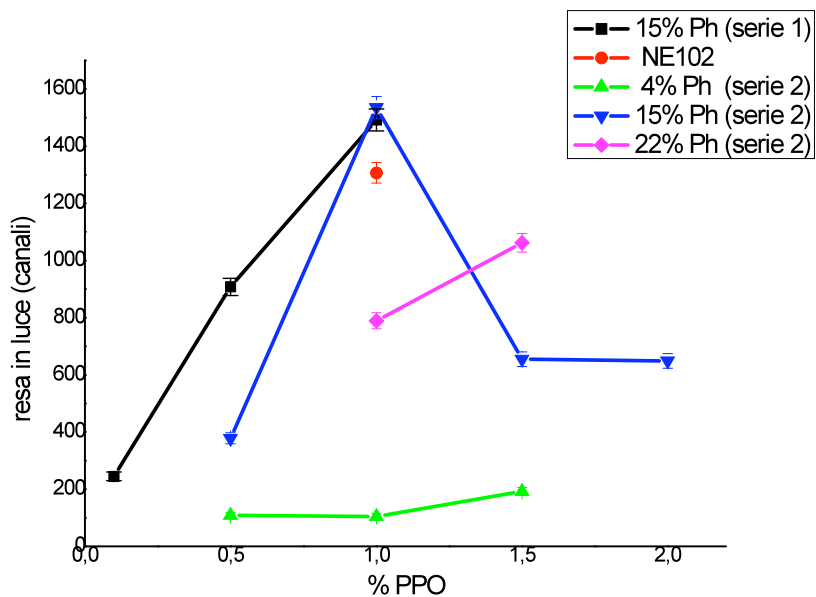
## 4.5 Risultati

**Tabella 4.1.** Riassunto dei parametri analizzati per la prima serie di campioni.

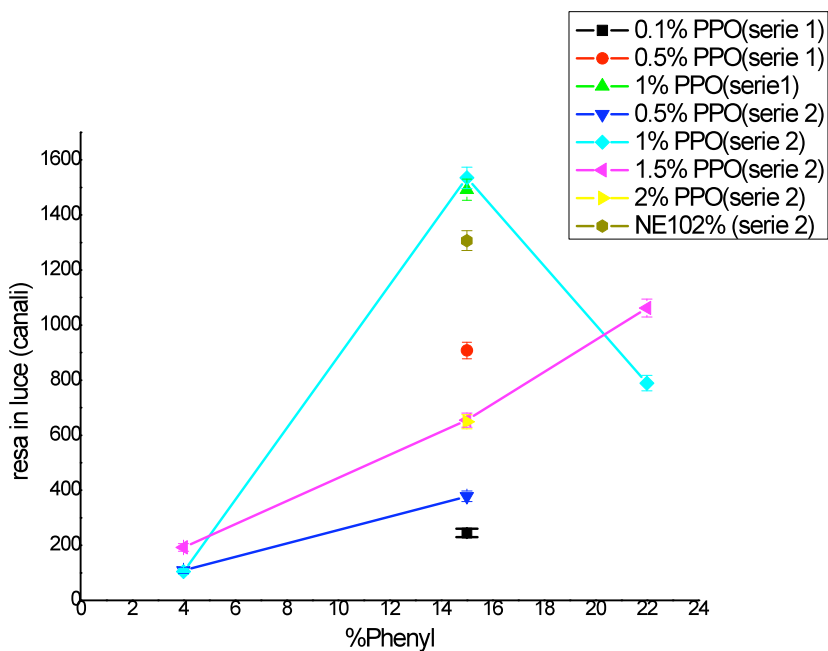
<b>Campione</b>	<b>Posizione massimo picco (canali)</b>	<b>FWHM (%)</b>
<b>0.1% PPO 15% Ph</b>	<b>245</b>	<b>41</b>
<b>0.5% PPO 15% Ph</b>	<b>908</b>	<b>45</b>
<b>1% PPO 15% Ph</b>	<b>1492</b>	<b>29</b>
<b>NE102</b>	<b>1307</b>	<b>25</b>

**Tabella 4.2.** Riassunto dei parametri analizzati per la seconda serie di campioni.

<b>Campione</b>	<b>Posizione massimo picco (canali)</b>		
	<b>4% Ph</b>	<b>15% Ph</b>	<b>22% Ph</b>
<b>0,5% PPO</b>	<b>108</b>	<b>378</b>	<b>-</b>
<b>1% PPO</b>	<b>105</b>	<b>1535</b>	<b>789</b>
<b>1,5% PPO</b>	<b>192</b>	<b>655</b>	<b>1062</b>
<b>2% PPO</b>	<b>-</b>	<b>649</b>	<b>-</b>
<b>NE102</b>	<b>1309</b>		



**Figura 4.13.** Dipendenza della posizione del picco massimo dalla concentrazione di PPO nel campione.



**Figura 4.14.** Dipendenza della posizione del picco massimo dalla concentrazione di Phenyl nel campione.

## 4.6 Discussione dei risultati

Il range delle particelle alfa da 5 MeV, legato al tipo di interazione che esse hanno con il materiale del rivelatore, è di pochi micron. Esse vengono quindi completamente arrestate e l'informazione relativa al loro deposito di energia (risoluzione) dipende essenzialmente dai primi micron del materiale scintillatore, mentre il resto dello spessore (in relazione alla trasparenza e al riassorbimento) influenza solo la trasmissione della luce prodotta fino al fotomoltiplicatore (resa in luce). Come dunque ci si può aspettare, gli spettri prodotti presentano picchi piuttosto definiti ed è stato possibile approssimarli ad una curva gaussiana. La larghezza della curva, attraverso il parametro FWHM, rappresenta la capacità risolutiva del sistema rivelatore-fotomoltiplicatore, come spiegato nel paragrafo 4.4, dove il maggior contributo è dovuto al processo di deposito di energia nello scintillatore. La posizione del massimo del picco indica invece la resa in luce, ovvero la capacità di emettere luce a parità di energia depositata.

Nella maggior parte dei campioni si nota come, pur cambiando la resa in luce, la forma dello spettro appare simmetrica e gaussiana, mentre nel caso del campione della prima serie con 0.5% PPO si vede una risposta non omogenea, riscontrata dalla formazione di una seconda gobba a più bassa resa in luce. Tale effetto può essere dovuto ad un difetto nella preparazione del campione, che ne ha provocato una disomogeneità finale. Il campione analogo della seconda serie è più omogeneo perché presenta un picco gaussiano, ma la sua risposta in luce alle particelle alfa è notevolmente ridotta rispetto al primo. Anche questo problema è probabilmente adducibile a differenze (se pur minime) dei contaminanti e dei dopanti nel momento della preparazione, e sottolinea la sensibilità di questi oggetti, quando si preparano campioni di piccole dimensioni.

Gli spettri per l'esposizione alla radiazione gamma mostrano in generale una peggiore risoluzione, dovuto al diverso modo di interagire di questo tipo di radiazione con il materiale. I raggi gamma interagiscono con i materiali tramite diversi effetti (effetto fotoelettrico, effetto Compton, produzione di coppia), la cui competizione relativa dipende dall'energia del gamma incidente e dallo Z del materiale rivelatore. Nel nostro caso (materiale organico a basso Z) e nel piccolo spessore di materiale del rivelatore, si ha per lo più effetto Compton, e dunque solo una parte dell'energia del fotone incidente viene rivelata, con una funzione che dipende dall'interazione del gamma con gli elettroni orbitali. Gli spettri ottenuti mostrano quindi esclusivamente la spalla Compton, la curva tipica di questo effetto, ovvero la maggior parte dei conteggi per canali corrispondenti a basse energie, e una rapida diminuzione degli stessi per energie maggiori.

Dai risultati ottenuti dagli spettri alfa, è stato possibile tracciare gli andamenti della resa dei campioni in funzione della percentuale di fenile e di PPO, mostrati in Figura 4.13 e Figura 4.14. Da entrambi i grafici appare una risposta scarsa per basse percentuali sia di gruppo fenile sia di PPO, e una crescita della resa all'aumentare di queste componenti. Nonostante la mancanza di una vera e propria sistematicità e riproducibilità, per gli effetti sopra menzionati, ancora non completamente sotto controllo nella preparazione dei campioni, è risultato evidente che quelli contenenti il 15% di gruppo fenile e l'1% di PPO sono gli scintillatori che, per le particelle alfa, forniscono il miglior rendimento sia in termini di resa di luce che di risoluzione, indipendentemente dalla serie di produzione a cui appartengono. In particolare, è estremamente rilevante notare come questi, a confronto con lo scintillatore NE102, presentino circa la stessa risoluzione e una resa in luce addirittura superiore (vedi Tabella 4.1 e Tabella 4.2).

A differenza della resa in luce ottenuta con le alfa, la risposta ai raggi gamma risulta essere meno efficiente rispetto al NE102, anche per il caso dell'1%

PPO, come se l'interazione con il nostro scintillatore fosse meno efficace. Ulteriori campioni sono stati prodotti tenendo conto dei risultati ottenuti in queste prime misure di test e facendo quindi maggior attenzione alle tecniche di preparazione, pulizia delle pipette, etc., e sono in fase di test ed analisi.

# Capitolo 5

## Analisi IBIL

### 5.1 Introduzione

La tecnica IBIL (Ion Beam Induced Luminescence) è una procedura che permette l'analisi dello spettro di emissione di un materiale luminescente, in seguito al bombardamento di un fascio di ioni noto. Le analisi che si possono ottenere riguardano l'intensità di emissione del campione, la variazione di questa in funzione del tempo di esposizione al fascio (degrado) e la distribuzione delle lunghezze d'onda della luce emessa (forma dello spettro). Vengono qui illustrate le misure effettuate nel mese di Luglio 2008, presso l'acceleratore CN dei Laboratori Nazionali di Legnaro.

In questo lavoro, si è proceduto al confronto fra le diverse forme degli spettri di emissione dei campioni, per verificarne la coerenza con i valori aspettati, e a misure del degrado del segnale luminoso.

I campioni esaminati sono lo scintillatore commerciale NE102, e i campioni siliconici della serie 2 (descritti nel Capitolo 2 e 4) contenenti:

\_ 15% di Phenyl, 0.5, 1 e 1.5% di PPO.

\_ 22% di Phenyl, 1 e 1.5 % di PPO.

## 5.2 Ionoluminescenza

Per l'applicazione della tecnica IBIL si sfrutta la ionoluminescenza, un processo di emissione per irraggiamento, come la fluorescenza, ma dovuto al bombardamento del materiale da parte di ioni di qualche MeV.

Nel caso di scintillatori inorganici, l'interazione degli ioni con atomi del campione e l'eccitazione delle impurità presenti, generano una radiazione elettromagnetica nella regione del visibile e dell'infrarosso.

Per le sostanze organiche, è ben noto che gli spettri di fluorescenza corrispondono a transizioni dal primo stato elettronico eccitato allo stato fondamentale, indipendentemente dalla lunghezza d'onda di eccitazione. Gli esperimenti mostrano che questa regola è valida anche per l'eccitazione da fasci di ioni ad alta energia e che gli spettri di radioluminescenza indotta da particelle coincidono quindi con gli spettri di fluorescenza. In particolare, questo è vero per le sostanze che normalmente formano la base di uno scintillatore plastico (ad esempio il poliviniltoluene o il polistirene).

Tuttavia, la situazione è più complicata nel caso degli scintillatori plastici. La radiazione ionizzante, fonte di eccitazione, è assorbita principalmente dentro la componente base (matrice polimerica), dato che la concentrazione degli additivi non supera solitamente qualche per cento in peso. L'energia di eccitazione elettronica è solo parzialmente trasferita alle molecole dell'additivo (fluoroforo) in modo non radiativo e si ha quindi essenzialmente fluorescenza della componente base. Se la concentrazione di additivi nello scintillatore plastico è molto piccola o se lo scintillatore è sottile, lo spettro esterno di ionoluminescenza contiene quindi questa fluorescenza, anche se attenuata dall'assorbimento nell'additivo. Ad esempio, nel caso di NE102, se lo scintillatore è sottile si potrà evidenziare la luminescenza intrinseca del PVT (320 nm).

E' già stato sottolineato nel Capitolo 2, che uno dei principali problemi nella progettazione di uno scintillatore plastico riguarda il fenomeno del re-assorbimento. In pratica, esiste una sovrapposizione tra lo spettro di assorbimento e lo spettro di emissione di una sostanza organica che causa una diminuzione della resa di luce emessa e deve dunque essere minimizzato. Il grado di re-assorbimento dipende dalle dimensioni dello scintillatore plastico e dal tipo di fluoroforo, ma anche negli scintillatori di piccolo volume (ovvero di circa  $1 \text{ cm}^3$ ), provoca la perdita di una frazione considerevole dei fotoni emessi. Sperimentalmente, si trova che questo è sostanzialmente ridotto negli scintillatori plastici con due additivi luminescenti, come nel NE102, dove si trova il p-terphenyl ed il POPOP. In questo scintillatore l'energia di eccitazione è trasferita in modo non radiativo dalla sostanza di base al primo additivo (al massimo 3% in peso) e da esso al secondo additivo (al massimo 0.1% in peso) via il meccanismo di energy transfer. La concentrazione del secondo additivo è quindi sufficiente per l'assorbimento quasi completo della fluorescenza dal primo additivo, ma è tuttavia molto bassa ed il fenomeno di re-assorbimento risulta minimo.

Nello studio della ionoluminescenza di sostanze organiche è necessario distinguere due fasi del fenomeno. La prima fase, in cui avviene la decelerazione della particella ionizzante, è accompagnata dalla ionizzazione ed eccitazione delle molecole del mezzo. La seconda fase, include tutti i processi che accadono nella porzione irradiata della sostanza, fino a che le molecole attivate perdono la loro carica e la loro energia.

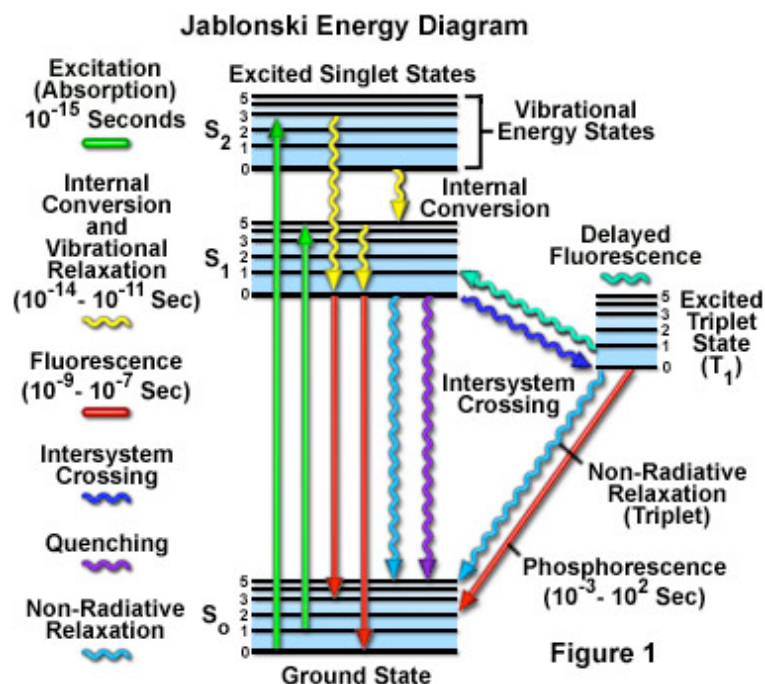
E' importante sottolineare che non sono consequenziali nel tempo, dato che il tempo necessario per il rallentamento totale, e quindi l'arresto, della particella può essere comparabile o addirittura notevolmente più lungo rispetto alla durata di certi processi della seconda fase. Inoltre, va considerato che l'interazione diretta tra le molecole attivate è significativa per distanze corte

(meno di 100 Angstrom), che corrispondono al cammino libero medio dell'eccitone.

Una caratteristica della prima fase, che sostanzialmente distingue la radioluminescenza dalla fotoluminescenza, è la non selettività di azione della radiazione eccitante. Questa non selettività ha due conseguenze: in primo luogo, l'energia della particella è in grado di eccitare la molecola ad un qualsiasi stato eccitato o di ionizzarla, mentre il secondo aspetto è che le attivazioni primarie, quelle causate dal passaggio della particella, sono correlate in tempo e spazio. La densità spaziale di attivazione dipende sostanzialmente dalla velocità della particella e dalla sua carica, quindi anche la cinetica della seconda fase dovrà dipendere da questi parametri. Dunque, la resa di radioluminescenza dipende dall'ammontare di energia necessaria per eccitare una molecola e dal rapporto tra le velocità dei processi di emissione e di quenching.

Infine, negli scintillatori con uno o più fluorofori, la resa dipende anche dall'efficienza del processo di energy transfer tra la matrice ed i fluorofori.

In Figura 5.1 è riportato lo schema della struttura elettronica e dei processi che intervengono in essa. Il fenomeno di quenching, anche chiamato rilassamento interno non radiativo, è il processo che de-eccita le molecole dello scintillatore, senza emissione di fluorescenza. Nel caso degli scintillatori organici, il processo di quenching è causato principalmente dalla elevata densità di ionizzazioni.



**Figura 5.1.** Schema delle transizioni nella struttura elettronica.

La ionizzazione porta a stati eccitati di singoletto e tripletto, causando sia emissione di fluorescenza rapida ( $10^{-9}$  s) sia fluorescenza ritardata dallo stato di tripletto (delayed fluorescence,  $10^{-7}$  s), dando luogo a profili di decadimento temporali nella luce di scintillazione a due componenti (fast e slow). L'eccitazione UV (fotoluminescenza) produce principalmente emissione di fluorescenza con una sola costante di decadimento (single time decay), mentre in radioluminescenza sono possibili entrambi i processi. Si verifica dunque che

- un'elevata densità di ionizzazioni aumenta il quenching della componente fast (fluorescenza da singoletto).
- la componente fast è sensibilmente ridotta in caso di particelle ad elevata perdita di energia  $dE/dx$ .

Ciò avviene per la sovrapposizione degli stati eccitati che interferiscono l'uno con l'altro, e ne derivano tre importanti conseguenze:

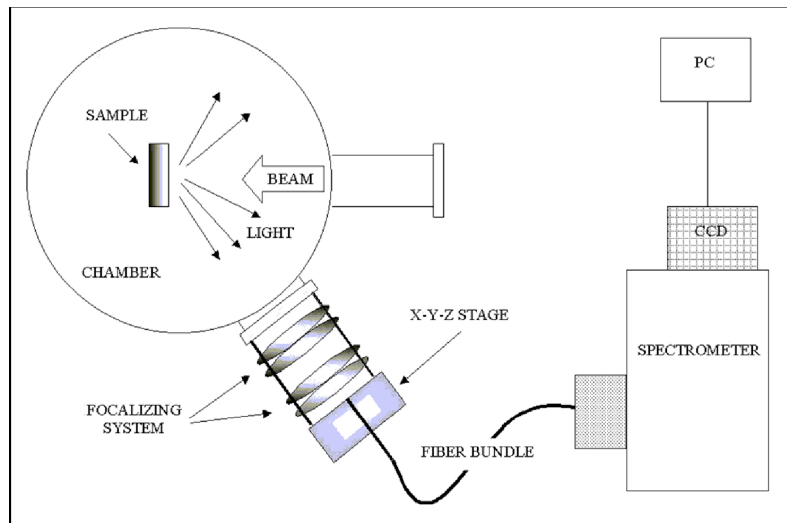
- non linearità nella risposta dello scintillatore vs energia persa.
- particelle pesanti con elevato  $dE/dx$  (come le  $\alpha$ ) producono meno luce a parità di energia depositata.
- la forma dell'impulso di scintillazione (pulse shape), che dipende dalle componenti fast e slow, è diversa a seconda del tipo di particelle, permettendone quindi la discriminazione.

In questo lavoro di tesi, la ionoluminescenza è stata utilizzata come tecnica diagnostica per studiare le proprietà ottiche di fluorescenza sotto fascio degli scintillatori preparati, a confronto con lo scintillatore commerciale NE102, e per evidenziare eventuali differenze nel degrado della resa di luce, in funzione del tempo di irraggiamento (*radiation damage*). Pur essendo tecnicamente possibile anche l'analisi della forma dell'impulso (*pulse shape analysis*), non c'è stato il tempo necessario in questo periodo di tesi per allestire il necessario set-up sperimentale.

### 5.3 L'apparato sperimentale

L'acceleratore CN dei Laboratori Nazionali di Legnaro dell'INFN è un Van Der Graaf da 7 MV, generalmente utilizzato per studi interdisciplinari di scienza dei materiali, fisica dello stato solido, fisica ambientale e geofisica. Sono disponibili fasci continui di ioni  $^1,2\text{H}^+$ ,  $^{3,4}\text{He}^+$ ,  $^{3,4}\text{He}^{++}$ ,  $\text{D}^{++}$ ,  $^{1,2}\text{H}^{++}$ ,  $^{15}\text{N}^{++}$ , con energia massima tra i 7 MeV e i 14 MeV.

Le misure qui trattate sono state effettuate con un fascio di  $^4\text{He}^+$  di 5 MeV. In Figura 5.2 si può osservare uno schema dell'apparato sperimentale utilizzato, posto in una delle sette linee sperimentali dell'acceleratore.

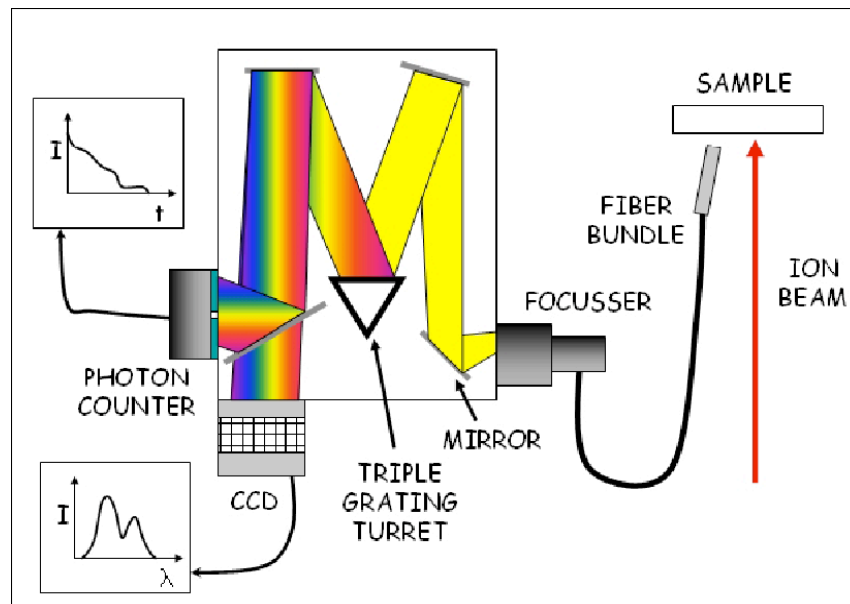


**Figura 5.2.** Apparato sperimentale.

Per le nostre misurazioni, i campioni vengono fissati ad un supporto mobile, in modo da poterli allineare verticalmente con il fascio, e posti in una camera a vuoto. In questa è posizionata una fibra ottica da vuoto, quasi a contatto con i campioni, così da raccogliere la luce emessa e convogliarla nello spettrometro. E' opportuno che tutta la sala sperimentale sia buia, per evitare che radiazioni diverse da quelle emesse dal campione alterino la misurazione.

Per la rivelazione della radiazione prodotta dal campione si usa uno spettrometro (Acton SP300) a reticolo, che riesce a distinguere lunghezze d'onda nel visibile e nel vicino infrarosso ( $\lambda \approx 200 \div 800 \text{ nm}$ ) con banda passante  $\Delta\lambda = 15 \text{ nm}$ .

La luce entrante nello strumento attraversa una fenditura di larghezza variabile, in modo da regolare l'intensità, e viene deviata da un sistema di specchi verso il reticolo di diffrazione. L'apparato permette di scegliere tra tre reticoli di diffrazione, montati su una torretta motorizzata, a seconda della risoluzione desiderata (nella misure effettuate si è utilizzato quello da 150 griglie/mm).



**Figura 5.3.** Schema dello spettrometro.

Ora separata nelle sue componenti cromatiche, la luce è diretta, tramite uno specchio motorizzato, verso uno dei due sensori, il CCD o il photon counter.

Il sensore CCD (Charge Coupled Device) consiste in un circuito integrato formato da una matrice di elementi semiconduttori (photosites) in grado di accumulare una carica elettrica proporzionale all'intensità della radiazione elettromagnetica che li colpisce. Questi elementi sono accoppiati in modo che ognuno di essi, sollecitato da un impulso elettrico, possa trasferire la propria carica ad un altro elemento adiacente. Inviando al dispositivo una sequenza temporizzata d'impulsi, si ottiene in uscita un segnale elettrico grazie al quale è possibile ricostruire la matrice dei pixel che compongono l'immagine proiettata sulla superficie del CCD stesso (matrice di 1340 x 100 pixels, ognuno di  $20 \times 20 \mu\text{m}$ ). Si ottiene quindi lo spettro completo della radiazione nell'intervallo di lunghezze d'onda di interesse (visibile + infrarosso).

Tutti gli spettri sono stati acquisiti con tempi di esposizione di un secondo.

Il photon counter è, invece, un dispositivo che permette di contare il numero di fotoni che lo colpiscono con una determinata energia; in questo modo si ottiene l'andamento dell'intensità della luce emessa dallo scintillatore, alla lunghezza d'onda selezionata, in funzione del tempo. I dati raccolti in questo modo sono utili per verificare la variazione di efficienza del rivelatore, a causa dell'esposizione al fascio, e quindi il degrado subito dal materiale scintillatore. In questa configurazione lo spettrometro viene anche detto monocromatore.

L'acquisizione dei dati e la gestione dei controlli dello spettrometro (movimento reticolo e specchi) avvengono tramite un PC posizionato nella sala controllo dell'acceleratore. Ogni sensore viene gestito da un programma dedicato, con il quale si interfaccia tramite apposite schede elettroniche.

L'ultima grandezza che si può misurare, è la carica depositata dal fascio sul campione. Per fare questo è sufficiente conoscere la corrente del fascio durante l'esposizione ed il tempo di esposizione oppure, tramite un integratore di carica, si può effettuare la misura direttamente. Gli strumenti di controllo dell'acceleratore CN consentono entrambe le possibilità.

Tra le operazioni da effettuare nel processo di misura vi sono anche la calibrazione dello spettroscopio e l'acquisizione del rumore di fondo.

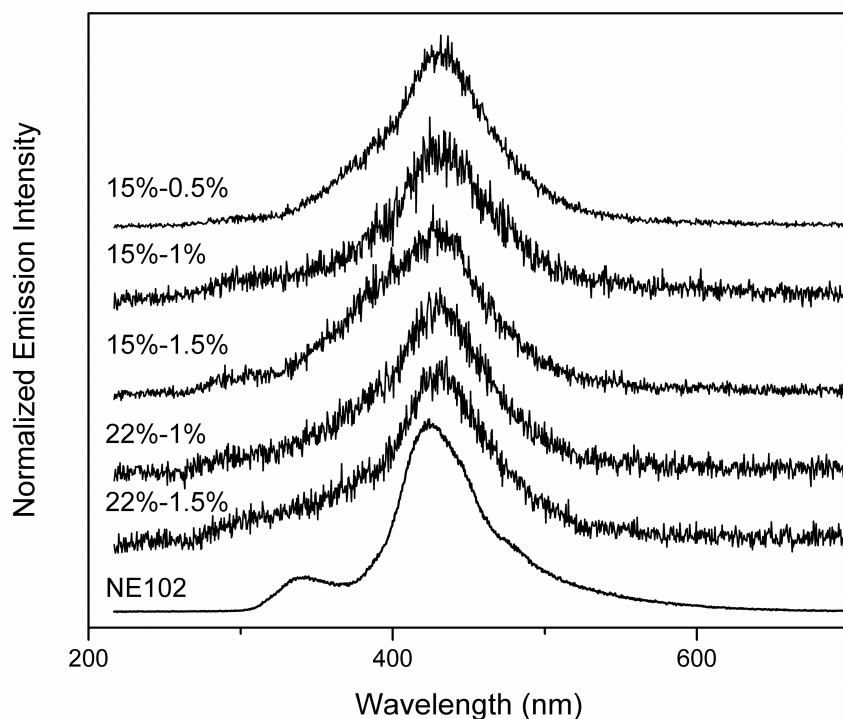
Il test di calibrazione sulle lunghezze d'onda lette dallo spettrometro si effettua analizzando lo spettro di una sorgente nota (lampada allo Xe): si imposta la scala dello strumento sul confronto tra i picchi osservati ed i valori dichiarati nei datasheet della sorgente luminosa.

Infine, dato che non è possibile ignorare il rumore elettronico dell'apparato, è necessario fare una misurazione in assenza di radiazione incidente, per poi poter correggere ogni spettro sottraendogli uno spettro di fondo.

## 5.4 Analisi dati

I dati raccolti sono stati analizzati per ottenere informazioni sull'intervallo di lunghezze d'onda della luce emessa dai rivelatori e sul degrado che questi subiscono per l'esposizione al fascio.

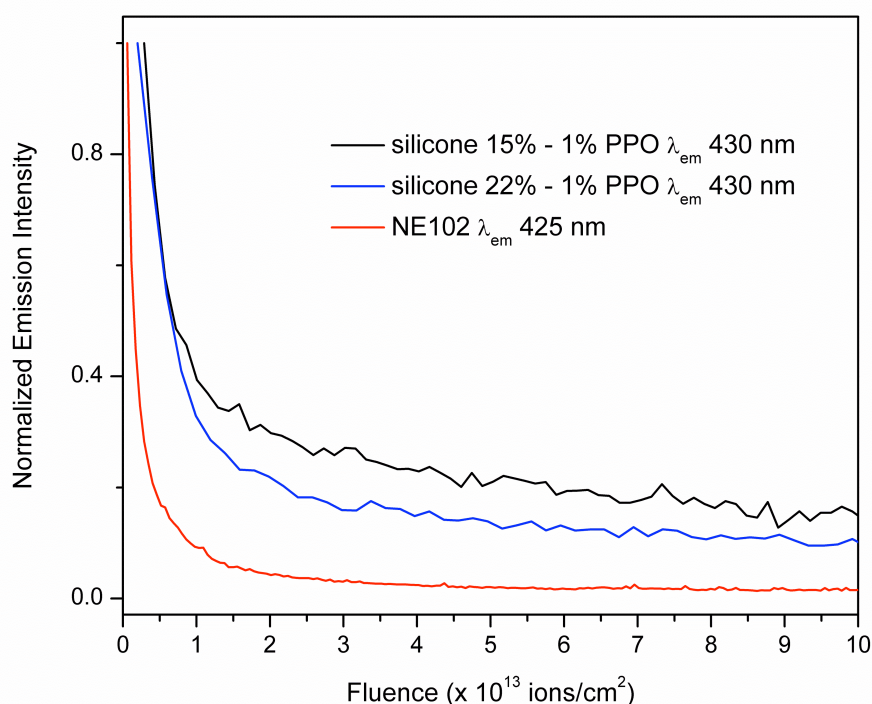
Per il primo scopo, lo spettro prodotto da ciascun campione ha subito varie operazioni: sottrazione del rumore di fondo, calibrazione per la taratura dello spettrometro, normalizzazione al valore di conteggi del picco massimo. E' stato così possibile effettuare il confronto della forma degli spettri, mostrato in Figura 5.4.



**Figura 5.4.** Spettri di emissione IBIL degli scintillatori analizzati e del campione NE102 di riferimento, colpiti in punti mai esposti al fascio.

Dalla Figura 5.4 si vedono chiaramente i due picchi tipici del rivelatore NE102, corrispondenti alle lunghezze d'onda  $\lambda=335$  nm e  $\lambda=417$  nm, che corrispondono all'emissione dei due fluorofori (p-terphenyl e POPOP), mentre per gli altri scintillatori si osserva una sovrapposizione degli spettri, con un massimo per  $\lambda=420$  nm, che corrisponde all'emissione del fluoroforo disperso nella matrice siliconica, il PPO.

L'effetto del danneggiamento, invece, si ricava seguendo l'evoluzione nel tempo dell'intensità della luce emessa, ad una certa lunghezza d'onda. L'intensità è stata normalizzata alla carica depositata e al punto iniziale, per poter confrontare i diversi campioni, e la sua diminuzione è mostrata dal grafico in Figura 5.5.



**Figura 5.5** Misura del degrado di tre diversi campioni: diminuzione dell'intensità di luce emessa in funzione della dose di irraggiamento (ioni/cm<sup>2</sup>).

Si può notare come per tutti i campioni si abbia una rapida diminuzione dell'intensità luminosa nei pochi istanti dopo l'inizio del bombardamento da parte degli ioni, comportamento comune a tutti gli scintillatori organici.

Tuttavia è possibile osservare come entrambi i siliconici siano più resistenti del campione di NE102 e, in particolare, il campione contenente il 15% di gruppi fenili degrada più lentamente di quello che ne contiene il 22%.

Questo risultato si può spiegare proprio grazie alla minor presenza di anelli benzenici che, essendo molto ingombranti, sfavoriscono la reticolazione completa del polimero. La minor resistenza quindi è spiegata dalla presenza di catene meno reticolate, quindi meno rigide e con minor energia di legame per unità di volume.

Al fine di evidenziare ulteriormente la maggiore resistenza alla radiazione dei campioni siliconici sintetizzati in questo lavoro di tesi rispetto al tradizionale NE102, si può considerare la diversa intensità di emissione (vedi valori riportati in Tabella 5.1) per una stessa dose di irraggiamento. Dall'analisi del grafico si può notare come, a parità di dose di radiazione (fluence), si abbia una maggiore intensità residua per i campioni con 15% di fenile.

**Tabella 5.1.** Intensità di emissione relativa dei campioni.

CAMPIONI	FLUENCE	INTENSITÀ DI EMISSIONE (relativa)
15% Phenyl 1% PPO	$1 \cdot 10^{13}$ ioni/cm <sup>2</sup>	0,39
22% Phenyl 1% PPO	$1 \cdot 10^{13}$ ioni/cm <sup>2</sup>	0,33
Ne102	$1 \cdot 10^{13}$ ioni/cm <sup>2</sup>	0,09

# Conclusioni

Dalle analisi delle misure compiute sui diversi campioni tramite esposizione a sorgenti di raggi alfa e gamma, si possono ottenere diverse considerazioni circa il comportamento degli scintillatori trattati e, in particolare, la dipendenza delle risposte dalle concentrazioni del gruppo fenile e del PPO dei campioni.

Innanzitutto, i siliconici considerati si sono dimostrati in grado di rivelare il passaggio sia di particelle alfa sia di raggi gamma ma, mentre per le prime si ha una buona risoluzione ed efficienza, per i gamma, che interagiscono per effetto Compton, si evidenzia una minor resa rispetto allo scintillatore di riferimento.

In particolare, dall'analisi degli spettri per raggi alfa, si è potuto osservare come la risoluzione e la resa in luce sia migliore per i campioni contenenti il 15% del gruppo fenile e l'1% di PPO, indipendentemente dalla serie in cui sono stati prodotti. I valori ottenuti per la resa in luce di questi campioni, oltre che essere i migliori tra quelli avuti dagli altri siliconici, sono addirittura superiori ai valori misurati per lo scintillatore commerciale NE102. Questo risultato è di notevole rilevanza ed incoraggia l'avanzamento della ricerca in tale direzione.

Dai risultati fin qui ottenuti si è tuttavia riscontrato un problema legato alla ripetibilità delle misure su campioni nominalmente uguali, ma prodotti in serie diverse. Ciò è probabilmente dovuto a piccole variazioni non ancora del tutto controllabili nelle ricette di preparazione. Tali variazioni si rendono maggiormente evidenti su campioni di dimensioni ridotte, dove le quantità di materiale utilizzato, anche per il drogaggio, sono piccolissime e quindi maggiormente sensibili a piccole differenze.

E' comunque già in corso un ulteriore studio sistematico su vari campioni dello stesso tipo ed una sperimentazione nuova, per la verifica di un possibile impiego di questi campioni nella rivelazione di neutroni termici. Questo si renderebbe possibile mediante drogaggio di questi campioni con gadolinio, boro o altri materiali adatti alla cattura neutronica. Il gadolinio, in particolare, è un metallo caratterizzato dalla più grande sezione d'urto per la cattura dei neutroni termici (70 kbarn).

Attualmente, la rivelazione di neutroni avviene tramite rivelatori liquidi, caratterizzati da alcuni vantaggi ed alcuni svantaggi. Essi sono ben utilizzati per la misura di neutroni veloci ed hanno la notevole caratteristica di permettere la discriminazione n-gamma tramite l'analisi di forma dell'impulso. Fra gli svantaggi vi è il fatto che per la loro preparazione è necessario l'utilizzo di grosse capsule sigillate, data l'elevata tossicità del materiale scintillante. Se quindi gli scintillatori siliconici drogati con gadolinio o altro materiale opportuno, maggiormente flessibili, maneggevoli e di facile produzione, risultassero effettivamente in grado di rivelare almeno i neutroni termici, si otterrebbe un risultato di chiara importanza.

Un problema, legato alla natura di tutti gli scintillatori organici, resta il degrado del materiale in seguito all'esposizione ad un fascio di ioni pesanti. Le misure riportate in questo lavoro, effettuate tramite tecnica IBIL, hanno confermato la scarsa resistenza degli scintillatori, se sottoposti ad elevate dosi di particelle alfa (fascio diretto). Si è tuttavia osservato come il degrado dei campioni sia, ancora una volta, diverso in relazione alla loro composizione, ed, in particolare, scintillatori contenenti il 15% del gruppo fenile siano risultati più resistenti dei siliconici con percentuali maggiori di questa molecola e soprattutto dello scintillatore commerciale NE102.

# Bibliografia

[1] Z. W. Bell, G. M. Brown, C. H. Ho; *Gadolinium- loaded plastic and rubber scintillators*; 2000, presented at the INMM 41st Annual Meeting, Riverside Hilton Hotel, New Orleans, LA, July 17-20 (Y/DW-1824).

[2] M. Bowen, S. Majewski, D. Pettey, J. Walker, R. Wojcik, C. Zorn; *A new radiation-resistant plastic scintillator*; IEEE Transactions on Nuclear Science; Volume 36, Issue 1 pt 1, February 1989.

[3] Canberra; [www.canberra.com](http://www.canberra.com).

[4] S. Carturan, A. Quaranta, A. Vomiero, M. Bonafini, G. Maggioni, G. Della Mea; *Polymide-based scintillators studied by ion beam induced luminescence*; IEEE Transactions on Nuclear Science, Volume 52, No. 3, June 2005.

[5] S.Y.F. Chu, L.P. Ekström, R.B. Firestone; *The Lund/LBNL Nuclear Data Search*; <http://nucleardata.nuclear.lu.se>.

[6] Gelest; *Reactive silicones 2007: forging new polymer link*, [www.gelest.com](http://www.gelest.com).

[7] Hamamatsu; <http://sales.hamamatsu.com>.

[8] G.F. Knoll; *Radiation Detection and Measurement*; John Wiley & Sons, 2000.

[9] W.R. Leo; *Techniques for nuclear and particle physics experiments*; Springer-Verlag, 1987.

[10] Saint-Gobain Ceramics & Plastics; [www.saint-gobain.it](http://www.saint-gobain.it).

[11] L. Torrisi; *luminescence degrading in polyvinyltoluene by ion beam irradiations*; *Radiation Effects & Defects in Solids*, Vol. 154,2001.

[12] L. Torrisi; *Radiation damage in polyvinyltoluene (PVT)*; *Radiation Physics and Chemistry* 63, 2002.