

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

Dottorato di Ricerca  
INGEGNERIA ENERGETICA NUCLEARE E  
DEL CONTROLLO AMBIENTALE

Ciclo XIX

Settore/i scientifico disciplinare di afferenza: ING-IND-20

**METROLOGIA DEI CAMPI  
DI RADIAZIONI DI BASSA  
ENERGIA**

Presentato da:  
**Dott.ssa Francesca Mariotti**

Coordinatore del Dottorato:  
**Prof. Ing. Alessandro Cocchi**

Relatore:  
**Dott.ssa Elena Fantuzzi**

Esame finale anno 2008



A Leonardo e Linda



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Stato dell'arte della metrologia delle radiazioni di bassa energia . . . . .	1
1.2	Obiettivo della tesi . . . . .	3
1.3	Struttura della tesi . . . . .	4
<b>2</b>	<b>L'impianto radiologico: tubo a raggi X SEIFERT ISOVOLT M2 160/0.4-1.5</b>	<b>6</b>
2.1	Introduzione . . . . .	6
2.2	Radiazione X: descrizione dell'impianto radiologico . . . . .	6
2.2.1	Parete schermante: radiazione diffusa . . . . .	11
2.2.2	Gruppo otturatore: uniformità del fascio . . . . .	11
2.2.3	Sistema porta filtri . . . . .	13
2.2.4	Camera a ionizzazione ad aria libera . . . . .	18
2.3	Messa a punto dell'impianto radiologico: condizioni geometriche . . . . .	18
2.3.1	Metodo di allineamento . . . . .	19
2.3.2	Il banco ottico . . . . .	19
<b>3</b>	<b>Caratterizzazione di una camera a ionizzazione ad aria libera per il controllo della stabilità dei fasci X di bassa energia</b>	<b>20</b>
3.1	Introduzione . . . . .	20
3.2	Misura dell'esposizione . . . . .	21
3.3	Descrizione della camera monitor . . . . .	22
3.4	Sistema di misura della carica . . . . .	25
3.5	Sistema di misura dei parametri ambientali . . . . .	25
3.6	Prestazioni della camera monitor . . . . .	26
3.7	Determinazione del volume di raccolta della camera . . . . .	27
3.8	Curva di dipendenza dall'energia della camera monitor . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Determinazione dei dati caratteristici dei fasci ISO 4037-1 di bassa energia con il metodo dosimetrico</b>	<b>34</b>
4.1	Introduzione . . . . .	34
4.2	Realizzazione dei filtri per i fasci standard ISO 4037-1 . . . . .	35
4.3	Misure di primo e secondo spessore emivalente (SEV) . . . . .	39
<b>5</b>	<b>Caratteristiche nominali dei campi di irraggiamento e grandezze dosimetriche associate</b>	<b>42</b>
5.1	Grandezze fisiche in radiometria . . . . .	42

5.2	Dipendenza degli spettri fotonici di bassa energia dalla distanza sorgente-rivelatore . . . . .	43
5.3	Grandezze operative: definizioni . . . . .	44
5.4	Grandezze operative per la dosimetria individuale: problematiche legate alle basse energie . . . . .	56
<b>6</b>	<b>Qualificazione della catena spettrometrica</b>	<b>59</b>
6.1	Introduzione . . . . .	59
6.2	La catena di acquisizione . . . . .	59
6.3	Il rivelatore al Germanio iperpuro (HPGe) . . . . .	60
6.4	Perchè un rivelatore al Germanio Ultra LEGE? . . . . .	63
6.5	Calibrazione del sistema di acquisizione . . . . .	64
6.5.1	Calibrazione in energia . . . . .	64
6.5.2	La risoluzione in energia . . . . .	69
6.5.3	Calibrazione in efficienza . . . . .	69
6.6	Funzione della modellazione Monte Carlo nello studio dei campi di radiazione fotonica . . . . .	72
6.6.1	Studio della geometria del rivelatore . . . . .	73
6.6.2	Determinazione Monte Carlo della curva di efficienza e dello spessore dello strato morto (dead layer) del rivelatore	77
6.7	Acquisizione degli spettri RX sperimentali . . . . .	80
<b>7</b>	<b>Ricostruzione dello spettro di raggi X primario</b>	<b>84</b>
7.1	Introduzione . . . . .	84
7.2	Interazione delle radiazioni elettromagnetiche . . . . .	84
7.3	Funzione di stripping . . . . .	86
7.4	Frazione dei conteggi persi per diffusione Compton . . . . .	87
7.5	Frazione di conteggi dovuti al picco di fuga K . . . . .	87
7.6	Curva di efficienza del rivelatore . . . . .	91
7.7	Confronto tra le distribuzioni degli spettri degli impulsi e gli spettri ricostruiti . . . . .	91
7.8	La matrice risposta del rivelatore . . . . .	92
<b>8</b>	<b>Determinazione dei coefficienti di conversione fra kerma in aria e grandezze operative per spettri X di bassa energia</b>	<b>97</b>
8.1	Introduzione . . . . .	97
8.2	Considerazioni dimensionali relative allo spettro dei fotoni . . . . .	99
8.3	Determinazione dei parametri tipici degli spettri . . . . .	100
8.3.1	Normalizzazione degli spettri alle condizioni di riferimento	100
8.3.2	Determinazione del primo e secondo spessore emivalente .	101
8.3.3	Determinazione dell'energia media dello spettro ricostruito	102
8.3.4	Fattore di Kerma . . . . .	103
8.4	I coefficienti di conversione . . . . .	103
8.4.1	Coefficienti di conversione $h(10; R, \alpha^\circ)$ per il fantoccio a slab . . . . .	108
8.4.2	Coefficienti di conversione $h(0,07; R, \alpha)$ per la pelle . . . . .	110
8.4.3	Coefficienti di conversione $h(3; R, \alpha^\circ)$ . . . . .	112

8.4.4	Coefficienti di conversione $h^*(10; R)$ . . . . .	113
8.4.5	Coefficienti di conversione $h'(0,07; R, \alpha^\circ)$ . . . . .	116
8.5	Parametri caratteristici e loro incertezze . . . . .	117
<b>9</b>	<b>Risultati</b>	<b>121</b>
9.1	Tabelle riassuntive dei dati caratteristici degli spettri . . . . .	121
9.2	Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm . . . . .	123
9.2.1	La serie ISO "Low Air-Kerma Rate series" . . . . .	123
9.2.2	La serie ISO "Narrow-Spectrum series" . . . . .	128
9.2.3	La serie ISO "High Air-Kerma Rate series" . . . . .	133
9.3	Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm . . . . .	138
9.3.1	La serie ISO "Low Air-Kerma Rate series" . . . . .	138
9.3.2	La serie ISO "Narrow-Spectrum series" . . . . .	143
9.3.3	La serie ISO "High Air-Kerma Rate series" . . . . .	148
<b>10</b>	<b>Considerazioni riassuntive sui risultati ottenuti</b>	<b>153</b>
<b>11</b>	<b>Conclusioni e prospettive</b>	<b>162</b>
<b>A</b>	<b>Distribuzioni degli spettri degli impulsi (PHD)</b>	<b>163</b>
A.1	Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	164
A.1.1	Serie L . . . . .	164
A.1.2	Serie N . . . . .	166
A.1.3	Serie H . . . . .	169
A.2	Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . .	171
A.2.1	Serie L . . . . .	171
A.2.2	Serie N . . . . .	173
A.2.3	Serie H . . . . .	176
<b>B</b>	<b>Spettri ricostruiti</b>	<b>178</b>
B.1	Distanza sorgente - rivelatore = 50 cm. . . . .	179
B.1.1	Serie L . . . . .	179
B.1.2	Serie N . . . . .	187
B.1.3	Serie H . . . . .	204
B.1.4	Spettro 5 kV e 7,5 kV. . . . .	215
B.2	Distanza sorgente - rivelatore = 200 cm. . . . .	218
B.2.1	Serie L . . . . .	218
B.2.2	Serie N . . . . .	229
B.2.3	Serie H . . . . .	241

# Elenco delle figure

2.1	Tubo a raggi X Seifert ISOVOLT 160 M2/0.4-1.5. . . . .	7
2.2	Andamento della potenza dissipata dall'anodo in funzione della tensione e corrente applicata al tubo a raggi X. . . . .	9
2.3	Dimensioni in mm del tubo. . . . .	9
2.4	Alloggiamento schermante del tubo a raggi X, sistema porta-filtri, camera a ionizzazione ad aria libera e banco ottico per il posizionamento della strumentazione di misura della radiazione ionizzante. . . . .	10
2.5	(a) Dettaglio dei punti di misura per la valutazione della radiazione diffusa dentro e fuori fascio e della penombra dovuta alla sorgente non puntiforme (disegno non in scala). (b) Dettaglio della penombra ottenuta dopo irraggiamento su lastra fotografica MIN-R Kodak 18 x 24 cm. . . . .	13
2.6	Verifica della proporzionalità dei valori dei ratei di esposizione assiali all'inverso del quadrato della distanza tra la superficie da irraggiare ed il fuoco in due diverse condizioni di misura. . . . .	14
2.7	Otturatore a tre stadi (tipo macchina fotografica). . . . .	15
2.8	Variazione percentuale ( $\Delta$ ) dell'intensità (I) del fascio di radiazione X rispetto all'intensità ( $I_0$ ) ad 1.5 m nominale dalla sorgente sul banco ottico, in funzione della distanza radiale dal punto di riferimento. Tale variazione risulta inferiore a $\pm 0.5\%$ entro un diametro di 5 cm. . . . .	16
2.9	(a) Immagine della lastra irraggiata. (b) Variazione percentuale ( $\Delta$ ) dell'intensità (I) del fascio di radiazione X rispetto all'intensità ( $I_0$ ) a 80 cm nominali dalla sorgente sul banco ottico, in funzione della distanza radiale dal punto di riferimento ottenuta con l'analizzatore di immagini IMAQ Visual Builder. Tale variazione risulta inferiore a $\pm 0,5\%$ entro un diametro di 5 cm. . . . .	17
2.10	Sistema porta-filtri. . . . .	18
3.1	Vista frontale dell'alloggiamento schermante del tubo a raggi X e della camera monitor per il controllo della stabilità del fascio di radiazioni. . . . .	22
3.2	Sezione longitudinale e trasversale della camera a ionizzazione ad aria libera, con particolare degli elettrodi (A) e (B), dell'elettrodo di raccolta (C) e dei materiali di cui è composta (misure in mm). . . . .	23

3.3	Curva di saturazione della camera monitor. Ogni punto è il valore medio di tre misure. Gli errori sperimentali non sono apprezzabili sulla scala. u.a. = lettura camera monitor. . . . .	26
3.4	Curva di saturazione per la camera monitor della radiazione H20, H30 e H60, H100 della serie H. . . . .	28
3.5	Schema della camera monitor e particolare del volume di raccolta e degli elementi indispensabili al calcolo dello stesso con metodo analitico. . . . .	29
3.6	Camera cilindrica ad aria libera (SM1) impiegata come camera di riferimento per la misura di spessori emivalenti per ogni fascio di radiazione. . . . .	30
3.7	Curva di dipendenza dall'energia della camera cilindrica ad aria libera (SM1). . . . .	33
3.8	Curva di dipendenza dall'energia della camera monitor (FM1). . . . .	33
4.1	Condizioni sperimentali per la misura del SEV. . . . .	37
5.1	Spettro L10. . . . .	45
5.2	Spettro L20. . . . .	46
5.3	Spettro L30. . . . .	47
5.4	Spettro N10. . . . .	48
5.5	Spettro N15. . . . .	49
5.6	Spettro N20. . . . .	50
5.7	Spettro N25. . . . .	51
5.8	Spettro N30. . . . .	52
5.9	Spettro H20. . . . .	53
5.10	Spettro H30. . . . .	54
5.11	Andamento del coefficiente di conversione monoenergetico in aria $H_p(10; E)/k_a$ in Sv/Gy. . . . .	58
6.1	Rivelatore al Ge di tipo planare. . . . .	60
6.2	Diverse configurazioni geometriche di rivelatori al germanio. Intervalli di energia di impiego. . . . .	62
6.3	Vista del rivelatore al germanio e criostato. . . . .	63
6.4	Andamento dell'efficienza intrinseca di rivelazione per rivelatori di silicio e di germanio con la stessa geometria (piana, con spessore d=5 mm. . . . .	64
6.5	Sorgente tipo X.245 (dimensioni in mm). . . . .	66
6.6	Report della calibrazione in energia del sistema di acquisizione. . . . .	67
6.7	a) Calibrazione in energia - regressione lineare. b) Calibrazione in energia - regressione polinomiale. . . . .	68
6.8	a) Geometria assunta nella definizione dell'efficienza intrinseca. b) Geometria assunta nella definizione dell'efficienza assoluta. . . . .	70
6.9	a) Sezione del rivelatore ottenuta con MCNP 4C. b) Particolari degli strati morti considerati per i calcoli dell'efficienza di rivelazione. . . . .	74

6.10	Particolari della geometria del rivelatore e della sorgente impiegata per il calcolo della funzione risposta del sistema di rivelazione utilizzato. . . . .	75
6.11	Spaccati della geometria con particolare della finestra di berillio e della posizione del cristallo rispetto alla stessa. . . . .	76
6.12	Esempio delle traiettorie delle particelle all'ingresso del rivelatore. . . . .	77
6.13	Curve di efficienza simulate e sperimentali al variare dello spessore dello strato morto del rivelatore HPGe. . . . .	78
6.14	Rapporto tra l'efficienza di rivelazione simulata e misurata sperimentalmente per diversi spessori di dead layer. . . . .	79
6.15	Confronto tra i dati sperimentali e la curva ottenuta dalla simulazione per lo strato morto scelto. . . . .	79
6.16	Fascio N15 ottenuto applicando uno smoothing di media pesata. . . . .	82
6.17	Fascio N15 ottenuto applicando un filtro di Savitzky-Golay. . . . .	83
7.1	Schema dell'operazione eseguita per determinare il contributo Compton. Il contributo da attribuirsi al fenomeno della diffusione Compton è stato valutato canale per canale come rapporto tra i conteggi nel canale $i$ -esimo ed il totale dei conteggi del picco di assorbimento totale (full-peak). . . . .	88
7.2	Frazione dei conteggi persi nel picco di assorbimento totale per la presenza dei picchi di fuga K. Confronto tra i dati ottenuti sperimentalmente con sorgenti radioattive sigillate (nero) e dati Monte Carlo (rosso). Curva di interpolazione esponenziale. . . . .	91
7.3	Curva di efficienza determinata dalla simulazione del rivelatore al germanio HPGe (i valori sono normalizzati alla riga dell' $^{241}\text{Am}$ a 59,54 keV). . . . .	92
7.4	Confronto tra gli spettri degli impulsi acquisiti e ottenuti dopo l'applicazione della matrice risposta agli spettri ricostruiti con la funzione di stripping . . . . .	94
7.5	Confronto tra gli spettri degli impulsi acquisiti e ottenuti dopo l'applicazione della matrice risposta agli spettri ricostruiti con la funzione di stripping . . . . .	95
7.6	La funzione risposta del rivelatore HPGe utilizzato. La matrice è suddivisa in zone: A) picchi di fuga $K_\alpha$ e $K_\beta$ del germanio, B) picchi con energia pari alla differenza tra l'energia del picco di assorbimento totale e l'energia dei picchi di fuga e C) picchi di assorbimento totale. . . . .	96
8.1	Definizione di corrente ( $J$ ) e fluensa ( $\phi$ ). . . . .	100
8.2	Coefficiente di trasferimento e assorbimento di energia massico dell'aria (scala log-log). . . . .	102
8.3	Coefficiente di assorbimento di energia massico dell'alluminio. . . . .	103
8.4	Rappresentazione schematica della geometria e della procedura impiegata per i calcoli dei coefficienti di conversione monenergetici. . . . .	108
8.5	Andamento del coefficiente di conversione $R(\Theta) = h(0,07; E, \alpha)/h(0,07; E, 0)$ in funzione dell'angolo $\alpha$ e dell'energia del fotone $E$ . . . . .	112

8.6	Coefficienti di conversione monoenergetici $h^*(10; E)$ in Sv/Gy in funzione dell'energia dei fotoni E. . . . .	115
8.7	Coefficienti di conversione monoenergetici $h'(0, 07; E, \alpha^\circ)$ in funzione dell'energia del fotone E e dell'angolo di incidenza della radiazione. . . . .	116
A.1	Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L10 (a) e L20 (b) della serie "Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	164
A.2	Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L30 (a) e L35 (b) della serie "Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	165
A.3	Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N10 (a) e N15 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	166
A.4	Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N20 (a) e N25 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	167
A.5	Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N30 (a) e N40 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	168
A.6	Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H10 (a) e H20 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	169
A.7	Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H30 (a) e H60 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	170
A.8	Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L10 (a) e L20 (b) della serie "Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . .	171
A.9	Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L30 (a) e L35 (b) della serie "Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . .	172
A.10	Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N10 (a) e N15 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . .	173
A.11	Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N20 (a) e N25 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . .	174
A.12	Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N30 e N40 della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . .	175
A.13	Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H10 (a) e H20 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . .	176

A.14	Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H30 (a) e H60 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . .	177
B.1	L10, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	179
B.2	L20, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. . . . .	180
B.3	L30, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	182
B.4	L35, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. . . . .	184
B.5	N10, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	187
B.6	N15, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	189
B.7	N20, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. . . . .	191
B.8	N25, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. . . . .	194
B.9	N30, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. . . . .	198
B.10	N40, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. . . . .	201
B.11	H10, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. . . . .	204
B.12	H20, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. . . . .	206
B.13	H30, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. . . . .	209
B.14	H60, distanza sorgente rivelatore = 50 cm. . . . .	212
B.15	Spettro 5 kV, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	215
B.16	Spettro 7,5 kV, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	216
B.17	L20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. . . . .	218
B.18	L20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. . . . .	220
B.19	L30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. . . . .	223
B.20	L35, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. . . . .	226
B.21	N10, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. . . . .	229
B.22	N15, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. . . . .	231
B.23	N20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. . . . .	232
B.24	N25, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. . . . .	235
B.25	N30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. . . . .	237
B.26	N40, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. . . . .	239
B.27	H10, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. . . . .	241
B.28	H20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. . . . .	243
B.29	H30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. . . . .	245
B.30	H60, distanza sorgente rivelatore = 200 cm. . . . .	248

# Elenco delle tabelle

2.1	Principali caratteristiche del tubo a raggi X Seifert ISOVOLT 160 M2/0.4-1.5. . . . .	8
2.2	Valori di esposizione della radiazione diffusa lungo l'asse del fascio (a) e all'esterno del fascio(2·raggio + penombra) di radiazione X (b). . . . .	12
2.3	Proprietà dei metalli. . . . .	17
3.1	Principali caratteristiche costruttive della camera a ionizzazione ad aria libera per campi di radiazioni X di bassa energia. . . . .	25
3.2	Fattore di taratura della camera cilindrica ad aria libera ( $FT_{SM1}$ ) in funzione dell'energia dei fasci di radiazione studiati. . . . .	31
3.3	Fattore di taratura della camera monitor ( $FT_{FM1}$ ) in funzione dell'energia dei fasci di radiazione studiati. . . . .	32
4.1	Caratteristiche delle radiazioni di riferimento. . . . .	36
4.2	Caratteristiche dei filtri impiegati per la misure di I° e II° SEV. . . . .	37
4.3	Tensioni e filtrazioni aggiuntive determinate sperimentalmente da impostare per i fasci caratterizzati. . . . .	38
4.4	Riassunto delle caratteristiche dei fasci caratterizzati mediante il metodo classico degli spessori emivalenti (metodo dosimetrico). . . . .	40
4.5	Misure di riferimento in (mGy/nC) sia per la taratura delle camere a ionizzazione (40 cm) sia per la taratura dei dosimetri (2 m).I fasci che nella prima tabella sono stati evidenziati sono quelli per cui è stato necessario impiegare una diversa camera a ionizzazione nelle misure di riferimento. . . . .	41
5.1	Fantocci di riferimento secondo le raccomandazioni ISO. . . . .	56
6.1	Caratteristiche generali del rivelatore al Germanio. . . . .	61
6.2	Principali caratteristiche delle sorgenti di raggi gamma impiegate nella calibrazione del sistema di rivelazione. . . . .	65
6.3	Verifica sperimentale dell'efficienza del rivelatore per diverse energie. . . . .	71
7.1	Righe di fluorescenza caratteristiche del germanio. . . . .	85
7.2	ROI delle sorgenti impiegate per la valutazione dei conteggi persi per i picchi K del germanio. . . . .	89

7.3	Valutazione percentuale della frazione di conteggi persi per i picchi di fuga K del germanio. . . . .	90
8.1	Dati caratteristici della serie “Low Air-Kerma Rate series” (L): energia media ( $E_{media}$ ), energia massima ( $E_{max}$ ), primo e secondo spessore emivalente ( $I^\circ$ e $II^\circ$ SEV), fattore di kerma ( $k(R)$ ). (a) Distanza sorgente - punto di misura = 50 cm. (b) Distanza sorgente - punto di misura = 200 cm. . . . .	104
8.2	Dati caratteristici della serie “Narrow-Spectrum” (N): energia media ( $E_{media}$ ), energia massima ( $E_{max}$ ), primo e secondo spessore emivalente ( $I^\circ$ e $II^\circ$ SEV), fattore di kerma ( $k(R)$ ). (a) Distanza sorgente - punto di misura = 50 cm. (b) Distanza sorgente - punto di misura = 200 cm. . . . .	105
8.3	Dati caratteristici della serie “High Air-Kerma Rate” (H): energia media ( $E_{media}$ ), energia massima ( $E_{max}$ ), primo e secondo spessore emivalente ( $I^\circ$ e $II^\circ$ SEV), fattore di kerma ( $k(R)$ ). (a) Distanza sorgente - punto di misura = 50 cm. (b) Distanza sorgente - punto di misura = 200 cm. . . . .	106
8.4	Coefficienti di conversione $h(10; E, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per diversi angoli di incidenza . . . . .	109
8.5	Coefficienti di conversione $h(0,07; E, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per diversi angoli di incidenza . . . . .	111
8.6	Coefficienti di conversione $h(3; E, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy per diversi angoli di incidenza . . . . .	114
8.7	Coefficienti di conversione monoenergetici $h^*(10; E)$ in Sv/Gy. . . . .	115
8.8	Variazione percentuale dei dati caratteristici primo e secondo spessore emivalente ( $I^\circ$ e $II^\circ$ SEV), energia media ( $E_{media}$ ), fattore di kerma ( $k(R)$ ) e coefficienti di conversione $h(0,07; R)$ , $h^*(10; R)$ , $h(10; R, 0)$ e $h(0,07; R, 0)$ per una variazione della tensione del tubo a raggi X del $\pm 1\%$ . . . . .	118
8.9	Variazione percentuale dei dati caratteristici primo e secondo spessore emivalente ( $I^\circ$ e $II^\circ$ SEV), energia media ( $E_{media}$ ), fattore di kerma ( $k(R)$ ) e coefficienti di conversione $h(0,07; R)$ , $h^*(10; R)$ , $h(10; R, 0)$ e $h(0,07; R, 0)$ per una variazione della densità dell’aria del $\pm 10\%$ . . . . .	120
9.1	Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie “Low Air-Kerma Rate series” (L) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media, $E_{media}$ ed energia massima, $E_{max}$ dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ( $h = ISEV/IISEV$ ), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$ . Coefficiente di conversione da kerma in aria, $K_a$ , all’equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$ , per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 50. cm . . . . .	123

9.2	Coefficienti di conversione $h(10; L, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all'equivalente di dose personale, $H_p(10)$ , per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	124
9.3	Coefficienti di conversione $h(0,07; L, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all'equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$ , per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	125
9.4	Coefficiente di conversione $h(3; L, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all'equivalente di dose personale, $H_p(3)$ , per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" [15]. . . . .	126
9.5	Coefficienti di conversione $h'(0,07; L, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all'equivalente di dose direzionale, $H'(0,07, \Omega)$ , per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	127
9.6	Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "Narrow-Spectrum series" (N) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media, $E_{media}$ ed energia massima, $E_{max}$ dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ( $h = ISEV/IISEV$ ), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$ . Coefficiente di conversione da kerma in aria, $K_a$ , all'equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$ , per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 50. cm . . . . .	128
9.7	Coefficienti di conversione $h(10; N, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all'equivalente di dose personale, $H_p(10)$ , per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	129
9.8	Coefficienti di conversione $h(0,07; N, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all'equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$ , per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	130
9.9	Coefficiente di conversione $h(3; N, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all'equivalente di dose personale, $H_p(3)$ , per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" [15].	131
9.10	Coefficienti di conversione $h'(0,07; N, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all'equivalente di dose direzionale, $H'(0,07, \Omega)$ , per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	132

9.11	Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie “High Air-Kerma Rate series” (H) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media $E_{media}$ ed energia massima $E_{max}$ dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ( $h = ISEV/IISEV$ ), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$ . Coefficiente di conversione da kerma in aria, $K_a$ , all’equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$ , per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 50. cm . . . . .	133
9.12	Coefficienti di conversione $h(10; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all’equivalente di dose personale, $H_p(10)$ , per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie “High Air-Kerma Rate series” (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	134
9.13	Coefficienti di conversione $h(0,07; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all’equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$ , per la pelle e per le qualità della radiazione della serie “High Air-Kerma Rate series” (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	135
9.14	Coefficiente di conversione $h(3; H, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all’equivalente di dose personale, $H_p(3)$ , per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie High Air-Kerma Rate series” (H) [15]. . . . .	136
9.15	Coefficienti di conversione $h'(0,07; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all’equivalente di dose direzionale, $H'(0,07, \Omega)$ , per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie “High Air-Kerma Rate series” (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm. . . . .	137
9.16	Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie “Low Air-Kerma Rate series” (L) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media $E_{media}$ ed energia massima $E_{max}$ dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ( $h = ISEV/IISEV$ ), risoluzione in %, fattore di kerma $k(R)$ in $pGy \cdot cm^2$ . Coefficiente di conversione da kerma in aria, $K_a$ , all’equivalente di dose ambientale, $H^*(10)$ , per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 200. cm . . . . .	138
9.17	Coefficienti di conversione $h(10; L, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all’equivalente di dose personale, $H_p(10)$ , per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie “Low Air-Kerma Rate series” (L) come specificato nella ISO 4037-1 [1]. Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . .	139
9.18	Coefficienti di conversione $h(0,07; L, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all’equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$ , per la pelle e per le qualità della radiazione della serie “Low Air-Kerma Rate series” (L) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . .	140

9.19 Coefficiente di conversione  $h(3; L, \alpha)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(3; L, \alpha)$ , per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" [15]. . . . . 141

9.20 Coefficienti di conversione  $h'(0,07; L, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose direzionale,  $H'(0,07, \Omega)$ , per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . . 142

9.21 Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "Narrow-Spectrum series" (N) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media  $E_{media}$  ed energia massima  $E_{max}$  dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ( $h = ISEV/IISEV$ ), risoluzione in %, fattore di kerma  $k(R)$  in  $pGy \cdot cm^2$ . Coefficiente di conversione da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose ambientale,  $H^*(10)$ , per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 200. cm . . . . . 143

9.22 Coefficienti di conversione  $h(10; N, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(10)$ , per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . . 144

9.23 Coefficienti di conversione  $h(0,07; N, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(0,07)$ , per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . . 145

9.24 Coefficiente di conversione  $h(3; N, \alpha)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(3)$ , per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) [15]. . . . . 146

9.25 Coefficienti di conversione  $h'(0,07; R, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose direzionale,  $H'(0,07, \Omega)$ , per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . . 147

9.26 Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media  $E_{media}$  ed energia massima  $E_{max}$  dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ( $h = ISEV/IISEV$ ), risoluzione in %, fattore di kerma  $k(R)$  in  $pGy \cdot cm^2$ . Coefficiente di conversione da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose ambientale,  $H^*(10)$ , per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 200. cm . . . . . 148

9.27	Coefficienti di conversione $h(10; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all'equivalente di dose personale, $H_p(10)$ , per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . .	149
9.28	Coefficienti di conversione $h(0,07; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all'equivalente di dose personale, $H_p(0,07)$ , per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . .	150
9.29	Coefficiente di conversione $h(3; H, \alpha)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all'equivalente di dose personale, $H_p(3)$ , per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) [15]. . . . .	151
9.30	Coefficienti di conversione $h'(0,07; H, \alpha^\circ)$ in Sv/Gy da kerma in aria, $K_a$ , all'equivalente di dose direzionale, $H'(0,07, \Omega)$ , per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm. . . . .	152
10.1	Confronto tra i valori di spessore emivalente ottenuti dalla misura con camera a ionizzazione e calcolati dagli spettri ricostruiti. . . . .	155
10.2	Differenza percentuale tra primo e secondo spessore emivalente ottenuto dalla misura diretta con camera a ionizzazione e dal calcolo sullo spettro ricostruito. . . . .	156
10.3	Energia media ( $E_m$ ) e risoluzione spettrale ( $R_E$ ) per i fasci X filtrati utilizzati nel Centro di Metrologia ENEA. . . . .	157
10.4	Confronto dei coefficienti di conversione da kerma in aria alle grandezze $H_p(10)$ , $H_p(0,07)$ , $H'(0,07)$ , $H^*(10)$ . I valori confrontati sono quelli ottenuti ad una distanza sorgente - punto di misura pari a 200 cm. . . . .	158

# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Stato dell'arte della metrologia delle radiazioni di bassa energia

La ricerca in radioprotezione ha principalmente lo scopo di sviluppare tecniche di rivelazione e dosimetria delle radiazioni ionizzanti in attuazione di raccomandazioni internazionali (International Commission in Radiological Protection) e, tenendo conto dell'evoluzione tecnologica, anche nel campo della produzione artificiale di radiazioni: come, per esempio, il sempre maggiore utilizzo delle radiazioni per scopi sanitari e di tecniche diagnostiche su materiali. Ciò comporta spesso il ricorso ad un sistema integrato di conoscenze: matematico-numerico per simulazioni modellistiche insieme a tecniche sperimentali più o meno prototipali.

Le attuali linee di attività dell'Istituto di Radioprotezione dell'ENEA di Bologna (ENEA-IRP), presso cui è stata svolta l'attività di ricerca, sono infatti sia sperimentali sia modellistiche, mediante l'utilizzo di metodi computazionali Monte Carlo (MCNP-4C) per rispondere ad esigenze specifiche di radioprotezione operativa per impianti e laboratori, alla qualificazione ed al miglioramento delle tecniche dosimetriche per il monitoraggio della esposizione esterna ed interna ed al mantenimento e all'ampliamento degli standard di misura per la taratura della strumentazione. Le suddette attività sono svolte anche in collegamento con gli altri paesi europei mediante collaborazioni ed azioni di interconfronto.

In particolare, il programma di ricerca svolto ha riguardato la qualificazione metrologica dei campi di radiazioni X di bassa energia ( $\leq 30$  keV) con particolare attenzione all'impiego di tecniche di rivelazione innovative e strumenti di misura di ultima generazione. L'attività sperimentale è stata effettuata presso il laboratorio secondario di metrologia delle radiazioni ionizzanti. Il Centro di Taratura dell'ENEA di Bologna opera nel campo della metrologia secondaria da quasi quaranta anni ed è stato il primo Centro nel 1985 ad essere riconosciuto dal SIT (Servizio di Taratura in Italia) per tutte le grandezze dosimetriche. Attualmente svolge attività di calibrazione operando con riferibilità metrologica ai campioni primari nazionali per le radiazioni X, gamma, beta e neutroni.

La caratterizzazione di un tubo a raggi X di bassa energia ha permesso quindi al Centro di Taratura di estendere la disponibilità di sorgenti di riferimento fino

a 5 keV, tipicamente associati ad applicazioni di ricerca (luce di sincrotrone, linea di luce di cristallografia e SAXS-Diffrazione di raggi X a piccolo angolo tecniche che consentono di analizzare la struttura geometrica di materiali su scala microscopica) e di medicina (mammografia, radioterapie superficiali). Le applicazioni dei raggi X sono ormai molto diffuse oltre che per applicazione alla radiologia medica anche per modalità d'indagine sulle proprietà microscopiche dei materiali, estendendo al livello atomico la capacità di analizzare gli oggetti.

In questa più bassa regione energetica la qualificazione metrologica dei fasci X (in particolar modo la determinazione sperimentale dei coefficienti di conversione da kerma in aria alle grandezze operazionali,  $H_p(d)$ ,  $H^*(10)$  e  $H'(0,07)$ ), richiede necessariamente anche l'uso di analisi spettrometriche, in quanto la sola determinazione degli spessori emivalenti (metodo dosimetrico) non assicura il controllo ed una accurata determinazione di tutte le componenti spettrali.

Il risultato di una misura spettrometrica è dato dalla distribuzione dello spettro degli impulsi. Per ottenere il reale spettro incidente sul rivelatore è necessario definire ed applicare precise procedure di deconvoluzione dello spettro per tenere conto delle perturbazioni prodotte dal rivelatore. Ogni spettro è stato misurato mediante un rivelatore al germanio iperpuro (HPGe) e grazie all'allestimento di una particolare catena spettrometrica e disposizione sperimentale. Al fine di ottenere, quindi, la reale distribuzione dei fotoni incidenti sul rivelatore è stata definita una procedura iterativa di ricostruzione che tiene conto di tutte le caratteristiche della catena spettrometrica utilizzata e delle reali condizioni di misura (procedura di stripping). Tale procedura è stata validata mediante il confronto con i dati spettrali ( $I^\circ$  e  $II^\circ$  spessore emivalente, SEV) ottenuti con il metodo dosimetrico e basandosi sulla conoscenza della funzione risposta del rivelatore calcolata con il metodo Monte Carlo.

Ogni qualità di radiazione è stata caratterizzata in termini di primo e secondo spessore emivalente, energia media, energia massima, coefficienti di conversione da kerma in aria alle grandezze operazionali usando gli spettri precedentemente ricostruiti. Ogni parametro caratteristico è stato normalizzato alle condizioni di riferimento in quanto a temperatura, pressione e umidità (densità dell'aria).

Mediante questo lavoro è stato verificato che, laddove i coefficienti di conversione presentano una forte dipendenza dall'energia e cioè per le basse energie, come nel caso dei coefficienti di conversione  $H_p(d)/k_a$  e  $H^*(d)/k_a$  è molto importante conoscere la distribuzione spettrale propria dell'impianto usato per la determinazione degli stessi. Questa considerazione è sostenuta da dati di letteratura, in cui vengono riportati valori di coefficienti di conversione che differiscono di circa il 90% rispetto a quanto riportato sulla normativa di riferimento.

Tali considerazioni hanno fatto nascere l'esigenza, come Centro di Taratura, di caratterizzare i fasci nel campo delle basse energie prodotti da un proprio impianto. Sono state misurate tutte le distribuzioni spettrali con tensioni inferiori a 30 kV indicate dalla normativa ISO 4037-4. Lo studio è stato esteso, inoltre, a fasci di energia superiore, L35, N40 e H60 (dando la possibilità di confronti con gli stessi fasci prodotti da impianti diversi e precedentemente caratterizzati) e due fasci non ancora standardizzati rispettivamente di 5 kV e 7,5 kV, in modo da permettere interconfronti con altri Laboratori di metrologia che a loro volta si sono spinti ad energie X di questa entità. Ogni spettro è stato misurato a

50 cm e 200 cm dalla sorgente di radiazione: rispettivamente punto utile per la taratura con strumentazione di radioprotezione e per irraggiamenti di dosimetri su specifici fantocci. La necessità di misurare ogni spettro anche a 200 cm dalla sorgente di radiazione è dovuto alla calibrazione in termini di  $H_p(10)$ . I dosimetri sono infatti irraggiati su di un fantoccio a slab (30 cm x 30 cm x 15 cm), perciò per irraggiare in modo omogeneo l'intera superficie del fantoccio è stato necessario impostare una distanza tra fuoco e punto di misura pari a 200 cm.

Grazie a questo lavoro ENEA-IRP costituisce al momento il primo Centro di Taratura in Italia che dispone di una serie di fasci interamente caratterizzati nel campo delle basse energie.

## 1.2 Obiettivo della tesi

L'attività di ricerca, si inserisce, in particolare, nel settore della qualificazione e sviluppo degli standard di misura per la dosimetria, rispondendo a nuove esigenze operative e di accreditamento del centro SIT relativamente alla messa a punto di campi X di riferimento per la taratura di dosimetri personali e strumentazione di radioprotezione. Lo scopo del lavoro consiste nella qualificazione metrologica dei campi di radiazioni di bassa energia (5-30 kV). In questa più bassa regione energetica la qualificazione metrologica dei fasci X richiede necessariamente anche l'uso di analisi spettrometriche, in quanto la sola determinazione degli spessori emivalenti non assicura il controllo e la corrispondenza di tutte le componenti spettrali.

Il lavoro terminato permetterà di poter disporre di fasci X delle più basse energie per collaborazioni in altri campi di ricerca e di una catena spettrometrica qualificata per diversi impieghi e necessità in radioprotezione. Sono stati valutati i seguenti obiettivi:

- Allestimento e collaudo dell'impianto radiologico come sorgente standardizzata [3].
- Caratterizzazione e taratura della camera di controllo ad aria libera ([52]-[56]).
- Realizzazione ed accreditamento dei fasci X filtrati in base alle raccomandazioni ISO 4037-1 [1] mediante il metodo degli spessori emivalenti (metodo dosimetrico).
- Taratura dei campioni di misura presso l'Istituto Nazionale di Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti (INMRI-ENEA).
- Taratura della camera di controllo (monitor) anche come campione operativo per la taratura della strumentazione di radioprotezione e dei dosimetri personali.
- Analisi della variazione degli spettri fotonici di bassa energia dalla distanza sorgente-rivelatore (assorbimento dell'aria) in riferimento alle grandezze radioprotezionistiche.

- Determinazione, mediante codice MCNP-4C, dei coefficienti di conversione monoenergetici da kerma in aria ad equivalente di dose personale  $H_p(10, \alpha^\circ)$ ,  $H_p(3, \alpha^\circ)$  e  $H_p(0,07, \alpha^\circ)$  per energie inferiori a 10 keV, non tabulati sull'ICRU Report 57 [2].
- Definizione di un metodo per l'acquisizione degli spettri di raggi X sperimentali nel campo delle basse energie, realizzazione di collimatori puntiformi (*pin-hole*) associati a distanze sorgenti-bersaglio al fine di ridurre la fluenza fotonica.
- Qualificazione della catena spettrometrica, caratterizzazione del rivelatore al Germanio iperpuro (HPGe) con sorgenti radioisotopiche.
- Determinazione sperimentale della curva di efficienza al variare dell'energia e simulazioni Monte Carlo MCNP-4C per la validazione di una funzione continua da utilizzare nella spettrometria dei fasci X.
- Definizione della matrice risposta contenente tutte le informazioni del processo di rivelazione.
- Analisi delle diverse tecniche matematiche per la deconvoluzione degli spettri.
- Verifica dei parametri caratteristici degli spettri per basse energie analizzati nella fase di caratterizzazione dell'impianto impiegando il metodo dosimetrico degli spessori emivalenti e mediante spettrometria X.

### 1.3 Struttura della tesi

Il presente lavoro di tesi è suddiviso in capitoli, di seguito brevemente descritti:

Il secondo capitolo contiene una descrizione dell'impianto radiologico Seifert ISOVOLT MXR 160/0.4-1.5 e dell'attrezzatura necessaria per la realizzazione di fasci di riferimento X. Allestimento e collaudo dell'impianto che consiste nella centratura e caratterizzazione del fascio mediante l'impiego di camere a ionizzazione e lastre fotografiche.

Nel capitolo tre sono descritte in dettaglio le caratteristiche costruttive della camera a ionizzazione ad aria libera (camera monitor), progettata e realizzata nell'ambito delle attività di metrologia dell'Istituto di Radioprotezione dell'E-NEA di Bologna, impiegata nel controllo delle fluttuazioni del fascio di fotoni prodotti dal tubo a raggi X di bassa energia. Sono riportati, inoltre, i risultati delle misure effettuate per determinare le caratteristiche dello strumento costruito.

Il capitolo quattro contiene le procedure impiegate nella realizzazione ed accreditamento dei fasci X filtrati di bassa energia in accordo con le raccomandazioni ISO 4037 mediante il metodo dosimetrico.

Nel capitolo cinque vengono descritte le caratteristiche nominali dei campi di irraggiamento e le grandezze dosimetriche associate; particolare attenzione è stata data all'analisi della dipendenza degli spettri fotonici di bassa energia dalla distanza sorgente-rivelatore.

La determinazione, mediante codice MCNP-4C, dei coefficienti di conversione da kerma in aria ad equivalente di dose personale  $H_p(10,\alpha^\circ)$ ,  $H_p(3,\alpha^\circ)$  e  $H_p(0,07,\alpha^\circ)$  per energie inferiori a 10 keV, non tabulati sull'ICRU Report 57 [2].

Il capitolo sei contiene una descrizione dettagliata della catena spettrometrica e dei suoi componenti, il procedimento sperimentale impiegato per l'acquisizione della distribuzione degli impulsi con un rivelatore al germanio iperpuro (HPGe) di tipo Ultra LEGE (Ultra Low Energy GERmanium) completo di pre-amplificatore e di un elaboratore digitale di segnali (Digital Signal Processor, DSP). Contiene, inoltre, la calibrazione del sistema di rivelazione, includendo la calibrazione in energia ed in efficienza.

Nel capitolo sette è spiegato in modo dettagliato il metodo sviluppato per la ricostruzione degli spettri dei fasci X filtrati nel dominio energetico di interesse e la sua validazione mediante l'applicazione della funzione risposta del rivelatore ottenuta con codice Monte Carlo (MCNP-4C).

Nel capitolo otto viene descritto il metodo usato per la determinazione dei dati caratteristici di ogni spettro ricostruito in modo particolare dei coefficienti di conversione da kerma in aria alle grandezze operative.

Nel capitolo nove sono riportati in tabelle i valori ottenuti dei coefficienti di conversione in funzione dell'angolo per ogni fascio X filtrato.

Il capitolo dieci è dedicato a confronti dei risultati ottenuti con quanto riportato dalla normativa ISO 4037-3 di riferimento e da altri laboratori europei.

Le conclusioni e le prospettive future sono riportate nel capitolo undici.

In appendice A sono riportate tutte le distribuzioni degli impulsi acquisite mentre in appendice B sono riportati tutti gli spettri ricostruiti (in conteggi).

## Capitolo 2

# L'impianto radiologico: tubo a raggi X SEIFERT ISOVOLT M2 160/0.4-1.5

### 2.1 Introduzione

Il seguente capitolo contiene una descrizione dettagliata dell'impianto radiologico Seifert ISOVOLT M2 160/0.4-1.5 e del suo allestimento e collaudo.

Il sistema di misura è stato interamente progettato e collaudato presso il Centro di Taratura dell'ENEA di Bologna per tutte le applicazioni nel campo della metrologia e dosimetria dei fasci di radiazione X filtrati, in particolare per il suo impiego per le radiazioni ionizzanti di bassa energia.

L'impianto è il risultato di un incontro fra l'esperienza più che ventennale dell'Istituto di Radioprotezione come Centro di Taratura SIT e le capacità realizzative della Ditta ITECO ENGINEERING che opera dal 1987 in questo settore.

L'obiettivo è stato quello di realizzare un oggetto completo che permettesse di eseguire tutte le procedure operative, in ottemperanza ai migliori standard di misura nazionali ed internazionali, per le operazioni di taratura sia dei dosimetri personali sia della strumentazione di radioprotezione.

Gli strumenti di cui è possibile la taratura sono le camere a ionizzazione normali ed in pressione, i Geiger-Muller, gli scintillatori ed i contatori proporzionali ed i rivelatori a semiconduttore.

Il sistema è inoltre progettato ed ottimizzato per eseguire irraggiamenti frontali ed angolari sia in aria sia per i dosimetri personali anche su specifici fantocci.

### 2.2 Radiazione X: descrizione dell'impianto radiologico

Per sorgenti di radiazioni fotoniche è necessario fare una distinzione fra macchina radiogena ed attrezzature di supporto (filtrazione aggiuntiva, gruppo otturatore, pareti schermanti). A determinare l'idoneità del sistema al suo utilizzo per ra-



**Figura 2.1:** *Tubo a raggi X Seifert ISOVOLT 160 M2/0.4-1.5.*

diagoni di riferimento in determinati intervalli energetici sono le caratteristiche del tubo a raggi X, in modo particolare nel dominio energetico di interesse.

Le caratteristiche dell'impianto a raggi X devono essere tali da garantire innanzitutto una elevata stabilità della fluenza energetica dei fasci a raggi X da esso generati. In particolare è richiesto un elevato grado di stabilità dell'alta tensione dell'impianto a raggi X, in quanto l'energia media del fascio di radiazione X è proporzionale a circa il quadrato della tensione applicata [3].

La normativa tecnica ISO 4037 [1] richiede che un tubo a raggi X per potere essere impiegato in campo metrologico per radiazioni X di bassa energia debba possedere determinate caratteristiche: una finestra di uscita sottile e realizzata in materiale a basso numero atomico in modo da assicurare un valore molto basso della filtrazione inerente ed una stabilità dell'alta tensione inferiore a  $\pm 1\%$ , per garantire la riproducibilità spettrale dei fasci di radiazione.

Il sistema di collimazione del fascio di radiazione X deve essere tale da garantire sul piano di irraggiamento una omogeneità del fascio inferiore all'1% (condizioni che si sono verificate nel nostro caso ad una distanza sorgente-piano di riferimento pari a 40 cm con un campo di radiazione avente un diametro di circa 8 cm). In campo metrologico un aspetto di fondamentale importanza riguarda appunto l'omogeneità del fascio di radiazione.

Il sistema impiegato presenta caratteristiche conformi a quelle richieste: è costituito da un tubo a RX ad anodo fisso a finestra di Berillio della Seifert (Figura 2.1), raffreddato ad acqua, capace di operare fino a 160 kV, dotato di un fuoco grande delle dimensioni di  $1,5 \times 1,5 \text{ mm}^2$  e di un fuoco piccolo di  $0,4 \times 0,4 \text{ mm}^2$ , dal gruppo di trasformazione ad alta tensione e da una unità di comando a console.

Non essendoci alcun vantaggio nell'usare un fuoco piccolo, tutte le misure sono state effettuate utilizzando il fuoco grande in modo da avere una maggiore intensità di emissione utilizzando correnti più elevate senza avere problemi

**Tabella 2.1:** *Principali caratteristiche del tubo a raggi X Seifert ISOVOLT 160 M2/0.4-1.5.*

Tensione massima	160 kV	
	<i>fuoco grande</i>	<i>fuoco piccolo</i>
Massima potenza dissipabile (Figura 2.2)	1600 W	640 W
Corrente alla tensione massima 160 kV	10 mA	4 mA
Dimensioni fuoco (mm) (EN 12 543)	3.0 ( $\approx 1.5$ IEC 336)	0.85 ( $\approx 0.4$ IEC 336)
Angolo di emissione del fascio	40°	
Filtrazione inerente	1 mm Be	

di surriscaldamento dell'intero sistema di misura. Le caratteristiche principali dell'impianto sono riportate in Tabella 2.1.

La struttura di supporto, prevalentemente in alluminio, è costituito da quattro parti principali (Figura 2.4):

1. il telaio per il fissaggio, la regolazione e la schermatura del tubo;
2. un sistema automatico porta filtri per l'assorbimento di fasci di radiazioni in base alle raccomandazioni;
3. una camera a ionizzazione ad aria libera per monitorare la stabilità della radiazione X prodotta;
4. un banco ottico per la movimentazione degli strumenti di misura portatili e degli eventuali fantocci.

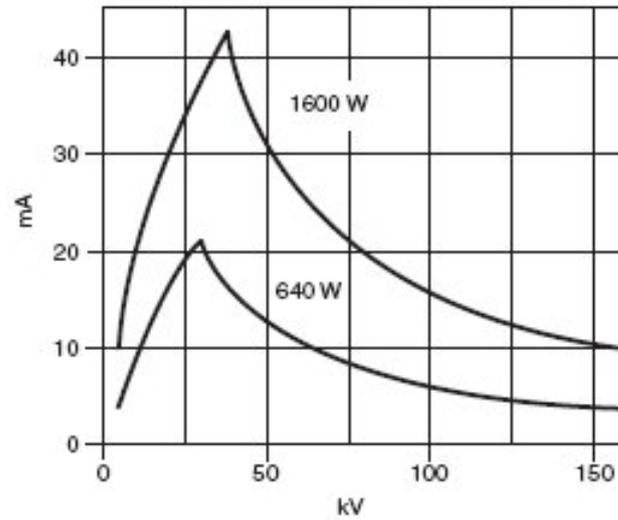
La potenza del tubo a raggi X è data dal prodotto tra la differenza di potenziale applicata e la corrente anodica (mA·kV) (Figura 2.2).

Una volta installato il sistema, al fine di renderlo operativo agli scopi, è stato necessario effettuare determinate misure e prove. Le norme di riferimento che si sono seguite sono state le ISO 4037 [1, 4, 5, 6].

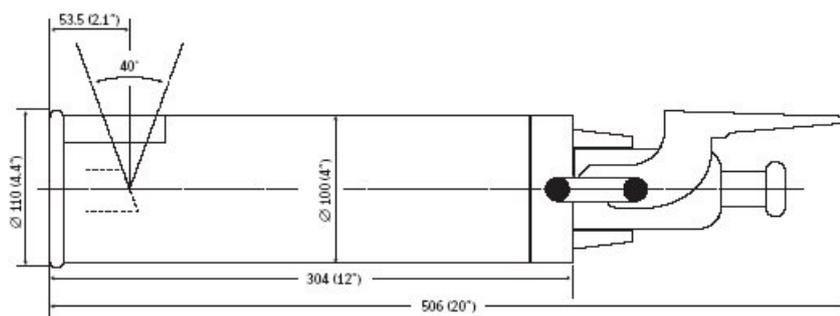
Per rientrare nei limiti imposti dalla norma sulle caratteristiche spettrali e geometriche dei fasci X filtrati di bassa energia è stato necessario realizzare una attrezzatura specifica attorno all'impianto a raggi X.

La prima necessità è quella di ridurre sotto il 5% la radiazione diffusa e di fuga prodotta dall'impianto e dalle pareti della stanza in cui l'impianto è sistemato. Questo si è reso possibile con la realizzazione di una schermatura supplementare attorno al tubo radiogeno e con l'uso di appositi diaframmi (chiamati, spesso impropriamente, in campo radiologico collimatori) fra l'anodo del tubo ed il punto di misura.

Altre caratteristiche importanti sono la disponibilità di appositi diaframmi per delimitare il fascio mantenendone una buona omogeneità, la possibilità di poter scegliere il filtro e non ultimo di potere agire su un otturatore veloce e senza problemi di tempo morto.



**Figura 2.2:** *Andamento della potenza dissipata dall'anodo in funzione della tensione e corrente applicata al tubo a raggi X.*



**Figura 2.3:** *Dimensioni in mm del tubo.*



**Figura 2.4:** *Alloggiamento schermante del tubo a raggi X, sistema porta-filtri, camera a ionizzazione ad aria libera e banco ottico per il posizionamento della strumentazione di misura della radiazione ionizzante.*

### 2.2.1 Parete schermante: radiazione diffusa

Il contributo della radiazione, causata dalla diffusione del fascio da parte dell'ambiente al Rateo di Esposizione totale, non deve superare il 5% del Rateo di Esposizione sull'asse centrale in corrispondenza della superficie da irraggiare [1]. L'entità dell'esposizione dovuta alla radiazione diffusa è stata valutata mediante l'ausilio di una camera a ionizzazione le cui variazioni di sensibilità nell'intervallo di energia fotonica considerato sono risultate essere piccole e comunque note.

In base a quanto richiesto dalla normativa [1] sono state effettuate due diverse verifiche:

1. La prima verifica consiste nella misura della radiazione diffusa e di fuga lungo l'asse centrale del fascio di radiazione a diverse distanze dal centro della superficie da irraggiare dal fuoco (Ratei di Esposizione assiali). In un intervallo assiale sufficientemente ampio, avente il centro sulla superficie da irraggiare, i valori dei Ratei di Esposizione assiali devono essere proporzionali, tenendo conto dell'attenuazione dell'aria, all'inverso del quadrato della distanza tra la superficie da irraggiare ed il fuoco (Figura 2.6).
2. La seconda verifica consiste nella misura del Rateo di Esposizione ad una distanza radiale pari al doppio del raggio del fascio più l'intervallo di penombra (Ratei di Esposizione radiali).

In Figura 2.5 sono riportati in modo dettagliato i punti di misura sia per la prima che per la seconda verifica richieste dalla normativa riguardo la valutazione della radiazione diffusa, entrambe effettuate con una camera a ionizzazione PTW mod. M23331 (Physikalisch-Technische Werkstatte GmbH, Freiburg, Germany) di 1 cm<sup>3</sup> di volume.

I risultati ottenuti dalle due verifiche richieste sono riassunti in Tabella 2.2.

La radiazione diffusa rispetto a quella diretta è risultata essere, in entrambe le verifiche, sempre minore dell'1%, molto inferiore ai limiti imposti dalla normativa. Questo denota l'idoneità dell'alloggiamento schermante del tubo a raggi X realizzato appositamente per ridurre le fughe di radiazione nella direzione di emissione.

### 2.2.2 Gruppo otturatore: uniformità del fascio

Per considerare trascurabile l'incertezza introdotta dalla non uniformità d'irraggiamento e dal tempo morto di apertura e di chiusura dell'otturatore, i tempi di transito per la chiusura e l'apertura dello stesso dovrebbero risultare circa mille volte minori del tempo di esposizione.

Il fenomeno della possibile disomogeneità d'irraggiamento è stato invece eliminato ricorrendo ad un sistema di apertura e chiusura a tre stadi (Figura 2.7). Ogni ciclo viene compiuto sempre nello stesso verso in modo tale da compensare, sulla superficie in esposizione, nella chiusura la disomogeneità creata al momento dell'apertura.

Il tempo di transito dell'otturatore è comunque risultato essere inferiore a  $(0,1 \pm 0,01)$ s. Per rendere trascurabile ( $< 1\%$ ) l'incertezza associata al tempo

**Tabella 2.2:** Valori di esposizione della radiazione diffusa lungo l'asse del fascio (a) e all'esterno del fascio (2-raggio + penombra) di radiazione X (b).

(a)

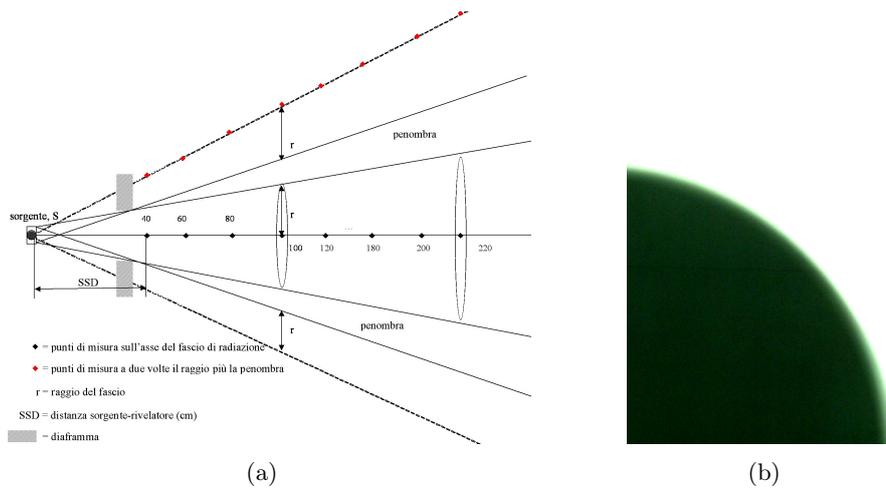
80 kV, 20 mA, 4 mm di Al + 2 mm di Cu		
distanza (cm)	diffusa* (%)	incertezza (95%)
40	0.2%	1.2%
60	0.2%	0.8%
80	0.3%	0.6%
100	0.4%	0.5%
120	0.4%	0.4%
140	0.5%	0.3%
160	0.6%	0.3%
180	0.7%	0.3%
200	0.8%	0.2%
220	0.8%	0.2%
100 kV, 10 mA, 4 mm di Al + 2 mm di Cu		
distanza (cm)	diffusa (%)	incertezza (95%)
40	0.2%	1.1%
60	0.2%	0.7%
80	0.3%	0.6%
100	0.4%	0.4%
120	0.5%	0.4%
140	0.6%	0.3%
160	0.7%	0.3%
180	0.8%	0.2%
200	0.8%	0.2%
220	0.9%	0.2%

\* misura integrate su intervalli di 6 s.

(b)

Dist. (cm)	Esposizione (R/min)	Esposizione (R/min)	diffusa/diretta (%)	err (95%) (%)
	asse fascio*	2r + penombra*		
40	782	29	0.004%	2.3%
60	345	27	0.008%	4.3%
80	192	24	0.013%	1.4%
100	122	18	0.015%	3.5%
120	86	16	0.019%	3.9%
140	62	13	0.021%	5.1%
160	48	12	0.025%	6.0%
180	38	12	0.032%	5.4%
200	30	11	0.037%	3.7%
220	25	11	0.044%	4.2%

\* misura integrate su intervalli di 6 s.



**Figura 2.5:** (a) Dettaglio dei punti di misura per la valutazione della radiazione diffusa dentro e fuori fascio e della penombra dovuta alla sorgente non puntiforme (disegno non in scala). (b) Dettaglio della penombra ottenuta dopo irraggiamento su lastra fotografica MIN-R Kodak 18 x 24 cm.

di apertura e chiusura dell'otturatore, il tempo dell'irraggiamento deve essere almeno 100 volte più della riproducibilità di apertura e chiusura ( $100 \times 0,01$ ) = 1 s. Tali condizioni permettono quindi di tenere conto ed usare il temporizzatore automatico anche per irraggiamenti di pochi secondi.

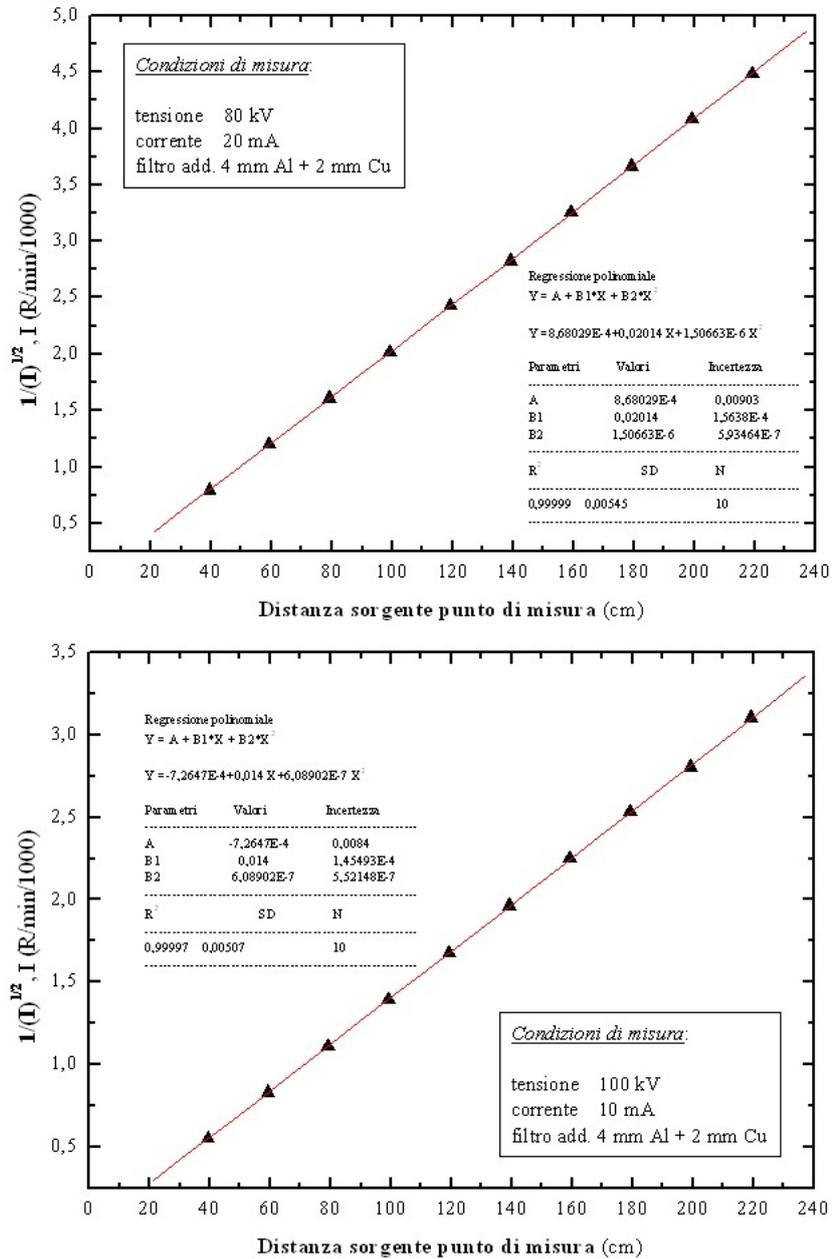
L'uniformità spaziale del fascio di radiazione X è stata verificata mediante una camera a ionizzazione PTW mod. M23331 e una lastra radiografica MIN-R 2000 KODAK (lastre per mammografia). La camera ha un diametro esterno inferiore a 10 mm come compromesso fra sensibilità e definizione spaziale dell'area misurata.

Nelle condizioni di lavoro, la variazione percentuale dell'Esposizione, rispetto al centro del fascio, è risultata essere non superiore al  $\pm 0,5\%$  entro il diametro utile, come riportato in Figura 2.8, per entrambe gli assi.

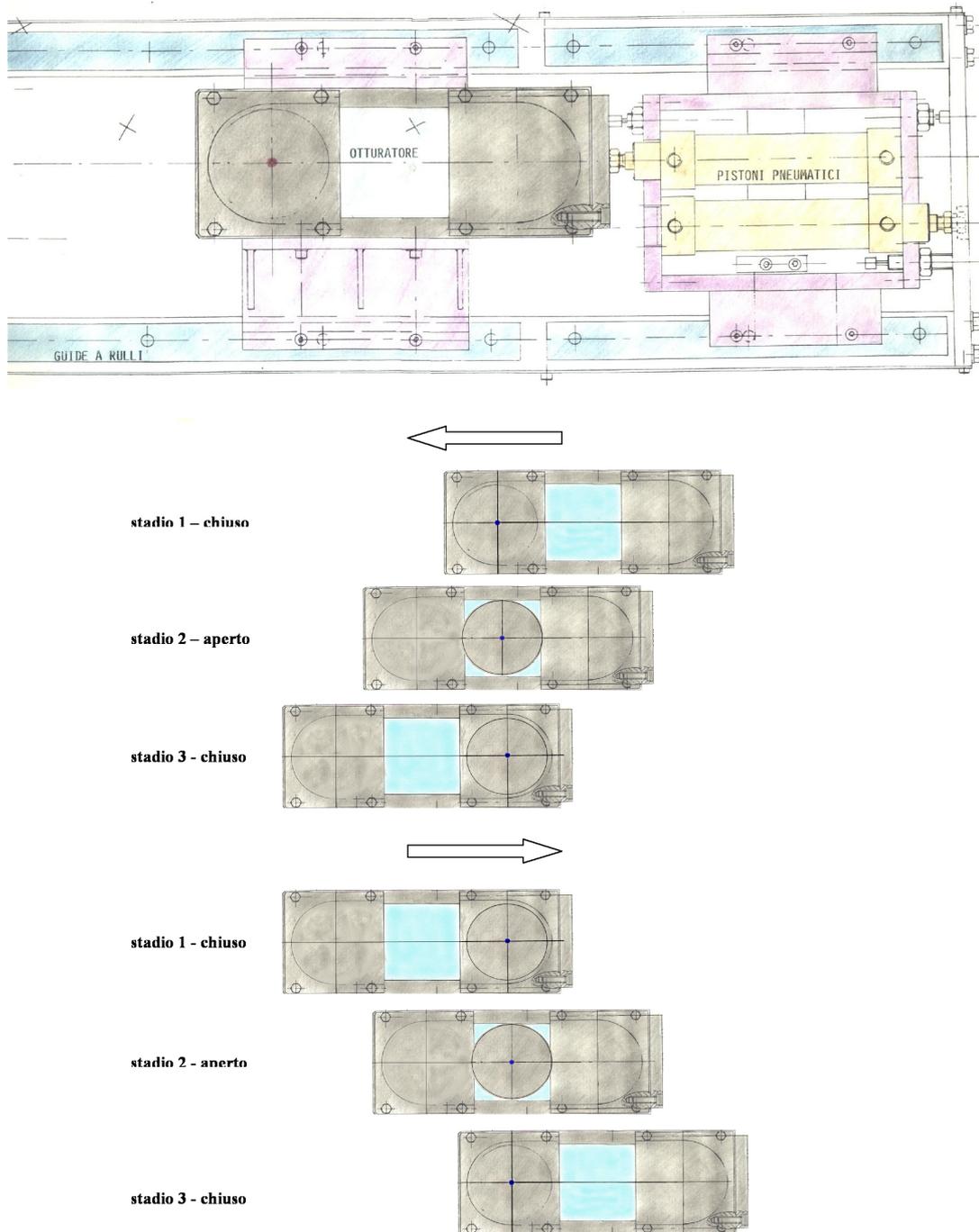
E' stata inoltre effettuata una mappatura di una lastra fotografica esposta per 40 s a 30 kV e 5 mA ad una distanza nominale lungo il banco ottico pari ad 80 cm. Il programma utilizzato per l'analisi dell'immagine è IMAQ Visual Builder della National Instruments. I risultati ottenuti, riportati in Figura 2.9, sono confrontabili con quelli ottenuti mediante una misura puntuale con la camera a ionizzazione.

### 2.2.3 Sistema porta filtri

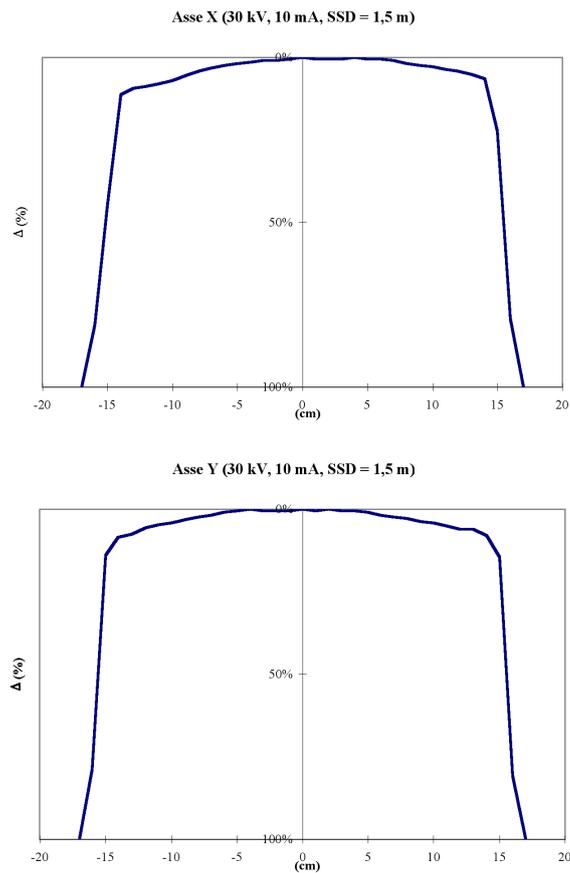
Un diaframma in piombo di spessore pari a 4 mm all'uscita del tubo e due diaframmi fissi di 3 mm ai lati della camera a ionizzazione limitano le dimensioni del fascio di radiazione. La filtrazione totale del fascio è dovuta a tutti i materiali presenti tra la sorgente di radiazione (corrispondente al fuoco del tubo) ed il punto di misura. Essa, come è noto, è costituita dalla filtrazione inerente del tubo, dalla filtrazione addizionale, dall'eventuale spessore delle pareti della



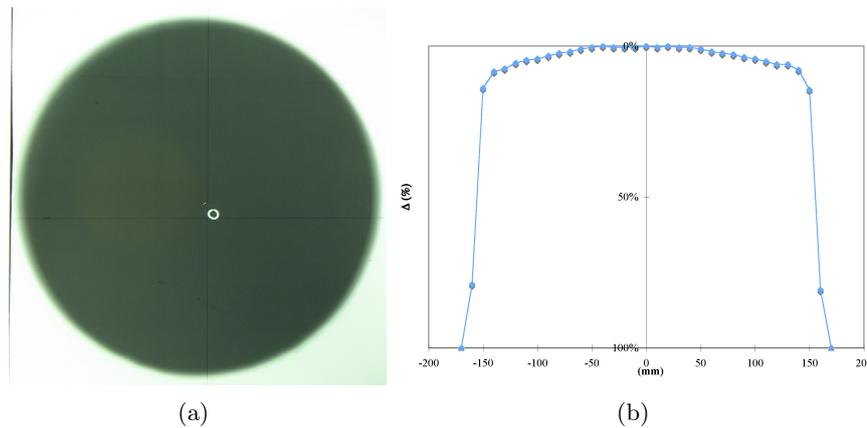
**Figura 2.6:** Verifica della proporzionalità dei valori dei ratei di esposizione assiali all'inverso del quadrato della distanza tra la superficie da irraggiare ed il fuoco in due diverse condizioni di misura.

**Sistema di apertura e chiusura di un otturatore a tre stadi**

**Figura 2.7:** *Otturatore a tre stadi (tipo macchina fotografica).*



**Figura 2.8:** *Variazione percentuale ( $\Delta$ ) dell'intensità ( $I$ ) del fascio di radiazione X rispetto all'intensità ( $I_0$ ) ad 1.5 m nominale dalla sorgente sul banco ottico, in funzione della distanza radiale dal punto di riferimento. Tale variazione risulta inferiore a  $\pm 0.5\%$  entro un diametro di 5 cm.*



**Figura 2.9:** (a) Immagine della lastra irraggiata. (b) Variazione percentuale ( $\Delta$ ) dell'intensità ( $I$ ) del fascio di radiazione X rispetto all'intensità ( $I_0$ ) a 80 cm nominali dalla sorgente sul banco ottico, in funzione della distanza radiale dal punto di riferimento ottenuta con l'analizzatore di immagini IMAQ Visual Builder. Tale variazione risulta inferiore a  $\pm 0,5\%$  entro un diametro di 5 cm.

camera di controllo e dallo strato d'aria che si trova tra la finestra di uscita del tubo ed il punto di misura.

La realizzazione dei fasci di riferimento avviene attraverso la selezione di combinazioni opportune fra tensioni applicate al tubo e filtri di assorbimento realizzati con piombo (Pb), stagno (Sn), rame (Cu) ed alluminio (Al).

Poiché l'emissione di radiazioni caratteristiche di fluorescenza può aver luogo anche da parte dei materiali che costituiscono la filtrazione fissa del fascio di radiazione X, è necessario disporre la serie dei filtri dei diversi materiali ordinati secondo il numero atomico con il filtro di numero atomico più basso posto verso l'esterno, in modo tale che ogni filtro assorba la radiazione caratteristica emessa dal filtro precedente. La radiazione caratteristica emessa dall'ultimo filtro, generalmente costituito da alluminio, ha una energia tale da essere assorbita da pochi centimetri di aria.

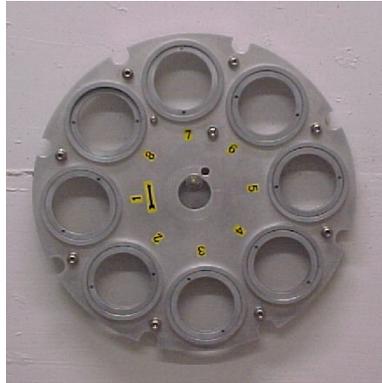
I materiali utilizzati per le filtrazioni addizionali, grazie ai quali sono realizzate le diverse qualità di radiazione X, sono caratterizzati da un elevato grado di purezza (Tabella 2.3) ed il loro spessore è noto con un'accuratezza di  $\pm 0,01$  mm.

**Tabella 2.3:** Proprietà dei metalli.

Tipo di metallo*	Densità nominale (g/cm <sup>3</sup> )
Alluminio (Al)	2,70
Rame (Cu)	8,94
Piombo (Pb)	11,3
Stagno (Sn)	7,2

\* Purezza minima: 99,9%

La selezione del filtro appropriato avviene attraverso un sistema rotante elettro-meccanico il quale sorregge un disco intercambiabile contenente 8 combinazioni possibili di filtri (Figura 2.10).



**Figura 2.10:** *Sistema porta-filtri.*

#### 2.2.4 Camera a ionizzazione ad aria libera

Lungo l'asse del fascio di radiazione, oltre il sistema porta-filtri, è disposta una camera a ionizzazione ad aria libera. Questa è fissata su di un supporto indipendente solidale, in modo diretto, con il pavimento al fine di eliminare le vibrazioni derivanti dall'apertura e chiusura dell'otturatore.

Il braccio di sostegno è regolabile per una centratura fine nelle tre coordinate spaziali. La camera è necessaria per il controllo delle variazioni di intensità di emissione dovute alle fluttuazioni della tensione del tubo a raggi X ed è anche utilizzata come limitatore del fascio.

La camera a ionizzazione ha enorme importanza per l'accuratezza delle misure e per un controllo diretto della stabilità nell'emissione dell'impianto durante il tempo di esposizione. La camera deve avere grande stabilità e bassa dipendenza dall'energia nell'intervallo spettrale di interesse.

### 2.3 Messa a punto dell'impianto radiologico: condizioni geometriche

Il campo di radiazioni varia nello spazio per diverse cause: la distanza assoluta dalla sorgente, la dimensione e la forma della sorgente, l'assorbimento dell'aria (in modo particolare nel dominio energetico considerato), le interazioni sui collimatori e la presenza di radiazione diffusa dalla cuffia, dalle pareti della stanza in cui si trova l'impianto e dall'aria stessa.

Risulta chiaro perciò come l'accuratezza dei valori di esposizione misurabili sia legata all'accuratezza di posizionamento. E' quindi indispensabile disporre di un sistema che possa posizionare con estrema accuratezza, in tutte le tre coordinate spaziali, i punti di riferimento di strumentazione e/o dosimetri, qualsiasi sia la loro forma geometrica.

### 2.3.1 Metodo di allineamento

L'impianto dispone di un banco ottico che è stato allineato con l'asse del fascio di radiazione X. La procedura che si è utilizzata consiste nell'allineare il banco ottico al fascio di luce emessa da un laser ad esso solidale, posto su di una colonnina. Si esegue poi la centratura del fuoco della sorgente di radiazioni ionizzanti sul fascio emesso dal laser. Successivamente si è regolato l'impianto in modo che il punto di emissione della luce laser si trovasse al centro del fascio di radiazione X. In questo modo il fascio laser rappresenta sempre il centro del fascio di radiazioni ionizzanti ed il carrello del banco ottico mantiene anche proporzionalmente negli spostamenti la sua posizione nel fascio.

L'allineamento del fascio di radiazione X con il fascio laser è stato verificato in diversi modi: sia con l'effettuazione di misure puntuali mediante una camera a ionizzazione posizionata in diversi punti lungo il diametro orizzontale e verticale della sezione del fascio sia mediante radiografie del fascio effettuate a diverse distanze in modo da garantire, con la medesima precisione, l'allineamento del campione a diverse possibili distanze dalla sorgente.

### 2.3.2 Il banco ottico

Il carrello è progettato per sostenere tutti gli strumenti necessari alle tarature ed agli irraggiamenti utilizzando, a scelta, un ripiano adatto sia per gli strumenti portatili che per i fantocci standard ISO, due morsetti contrapposti per alternare campioni di misura con sonde in taratura ed un ripiano ruotabile per prove angolari. Il carrello è realizzato in modo da ridurre al minimo la perturbazione dello stesso sul fascio primario di radiazione X rimanendo quasi totalmente fuori dal fascio.

Il posizionamento verticale è motorizzato e per la centratura degli oggetti sul fascio di radiazione X viene impiegato il laser posto su di un supporto al termine del banco ottico provvisto di una regolazione per l'allineamento tra fascio e banco ottico.

Il carrello scorre su guide rettificata di lunghezza pari a 2500 mm. La distanza dal tubo a raggi X può essere fatta in modo automatico con preimpostazione o manualmente con una accuratezza pari a 0,1 mm. L'accuratezza indicata è ottenuta mediante un aggiustamento fine (facilitato dalla movimentazione a cremagliera) e da un *encoder*<sup>1</sup> incrementale sull'ingranaggio e dagli accurati allineamenti delle movimentazioni del carrello.

---

<sup>1</sup>Apparato elettromeccanico che converte la posizione angolare del suo asse rotante in un segnale elettrico digitale. Esso è un trasduttore di posizione economico, preciso, robusto ed affidabile.

## Capitolo 3

# Caratterizzazione di una camera a ionizzazione ad aria libera per il controllo della stabilità dei fasci X di bassa energia

### 3.1 Introduzione

Storicamente i fasci di raggi X, impiegati nelle ricerche di dosimetria, erano generati da impianti originariamente progettati per impieghi terapeutici e/o industriali. Tali impianti non avevano elevate caratteristiche di stabilità e potevano avere fluttuazioni dell'intensità del fascio anche del 5-10%, legate soprattutto alla instabilità della tensione di alimentazione del tubo. Tali variazioni non sono accettabili nelle misure in campo metrologico. D'altra parte la tecnologia non permetteva la realizzazione di dispositivi elettronici capaci di controllare e correggere tali fluttuazioni se non utilizzando generatori statici (es. Van der Graff) molto costosi. Per ovviare a tale inconveniente si è introdotto l'uso di una camera monitor che viene, in modo permanente, attraversata dal fascio di radiazione. Essa deve avere caratteristiche tali da non perturbare il fascio e da permettere una misura della carica raccolta con una precisione inferiore a qualche per mille. In tal modo lo strumento permetterà di ricavare le esposizioni corrette per le eventuali fluttuazioni dell'impianto a raggi X.

Attualmente nelle ricerche di dosimetria si utilizzano tubi a raggi X molto stabili con una variazione dell'intensità del fascio molto minore all'1%, ma la camera monitor non perde la sua importanza in quanto indispensabile comunque a ridurre le incertezze di misura, a verificare che non ci siano errori nella procedura e come campione secondario per irraggiamenti su dosimetri.

La camera di controllo è una camera a ionizzazione la cui funzione è quella di controllare la stabilità del Rateo di Esposizione durante l'irraggiamento e tramite la quale tutte le misure effettuate con fasci di radiazione X possono essere normalizzate ad un valore di riferimento dell'intensità e dell'energia della radiazione. Questo permette di tenere conto delle possibili variazioni di tensione

del tubo a raggi X e di confrontare le misure, eseguite in irraggiamenti successivi, sia con un campione secondario che con un dosimetro da tarare.

La caratteristica principale della camera di controllo è la elevata riproducibilità delle misure con essa effettuate, sia a breve che a lungo termine. La stabilità complessiva della camera di controllo e del sistema di misura associato deve, infatti, consentire di effettuare misure con una riproducibilità di almeno qualche per mille [48].

Nel capitolo sono descritte, in dettaglio, le caratteristiche costruttive della camera a ionizzazione ad aria libera impiegata per il controllo della stabilità dei fasci di raggi X prodotti dal tubo a raggi X SEIFERT ISOVOLT M2 160/0.4-1.5 di bassa energia. Sono riportati, inoltre, i risultati delle misure effettuate per determinare le caratteristiche dello strumento costruito in oggetto.

## 3.2 Misura dell'esposizione

La determinazione sperimentale della grandezza kerma in aria,  $K_a$ , richiede la misura della ionizzazione per unità di massa prodotta da tutti gli elettroni originati in un certo volume di aria intorno al punto di interesse. Affinché ciò sia possibile è necessario che vengano soddisfatte le condizioni di equilibrio di particelle cariche<sup>1</sup> condizione necessaria da assicurare quando si voglia fare una misura di esposizione [49].

I rivelatori che meglio si prestano a tale scopo sono le camere a ionizzazione aria equivalenti.

Affinché una camera monitor possa adempiere alle funzioni precedentemente descritte è necessario che soddisfi determinati requisiti:

1. non deve produrre nel volume di misura radiazione diffusa;
2. la presenza della camera monitor non deve indurre, per assorbimento, variazioni apprezzabili nella distribuzione spettrale emessa;
3. è necessario che la camera sia termicamente isolata dal tubo, che l'aria al suo interno circoli liberamente e che sia presente una rivelazione costante dei parametri ambientali (temperatura, pressione ed umidità) in modo da potere apportare la necessaria correzione per la massa volumica dell'aria.

Per temperature tra 15°C e 25°C, la densità dell'aria  $\rho$  è data dalla seguente formula (Drake e Böhm) [8]:

$$\rho = \rho_0 \cdot \left[ 1.005699 \cdot \frac{p}{p_0} - \frac{1}{175.7} \cdot \frac{r}{r_0} \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{17.79} \right] \cdot \frac{T_0}{T} \quad (3.1)$$

<sup>1</sup>Si parla in genere di equilibrio di radiazione o di equilibrio completo di radiazione in un certo punto di un mezzo irradiato quando il valore atteso dell'energia radiante che entra in un volume infinitesimo intorno a quel punto è uguale a quello dell'energia radiante che ne esce. Talvolta può accadere che in un certo punto dello spazio le condizioni sopra richiamate siano verificate soltanto per un particolare gruppo di particelle. Non si avrà in tal caso l'equilibrio completo di radiazione, ma soltanto l'equilibrio relativo a quel particolare gruppo di particelle.

dove  $p$  è la pressione dell'aria,  $p_0 = 101.3$  kPa;

$T$  è la temperatura dell'aria,  $T_0 = 293.15$  (equivalente a  $20^\circ\text{C}$ )

$r$  è l'umidità relativa dell'aria  $r_0 = 0.65$  (equivalente a 65%)

$\rho$  è la densità dell'aria al momento della misura,  $\rho_0 = 1.974$  kg/m<sup>3</sup>.

### 3.3 Descrizione della camera monitor

La necessità che per la camera monitor siano rispettate le condizioni di equilibrio elettronico per le energie dei raggi X in esame pone dei limiti sulla distanza tra il piano di definizione dell'esposizione ed il volume di raccolta, e quindi tra il diaframma delimitante il fascio ed il centro dell'elettrodo di raccolta: tale distanza deve essere pari al massimo percorso in aria degli elettroni secondari liberati dalla radiazione in esame.

Rispettando tale condizione è stata progettata e realizzata presso il Centro di Taratura, la camera a ionizzazione ad aria libera presentata in Figura 3.1.



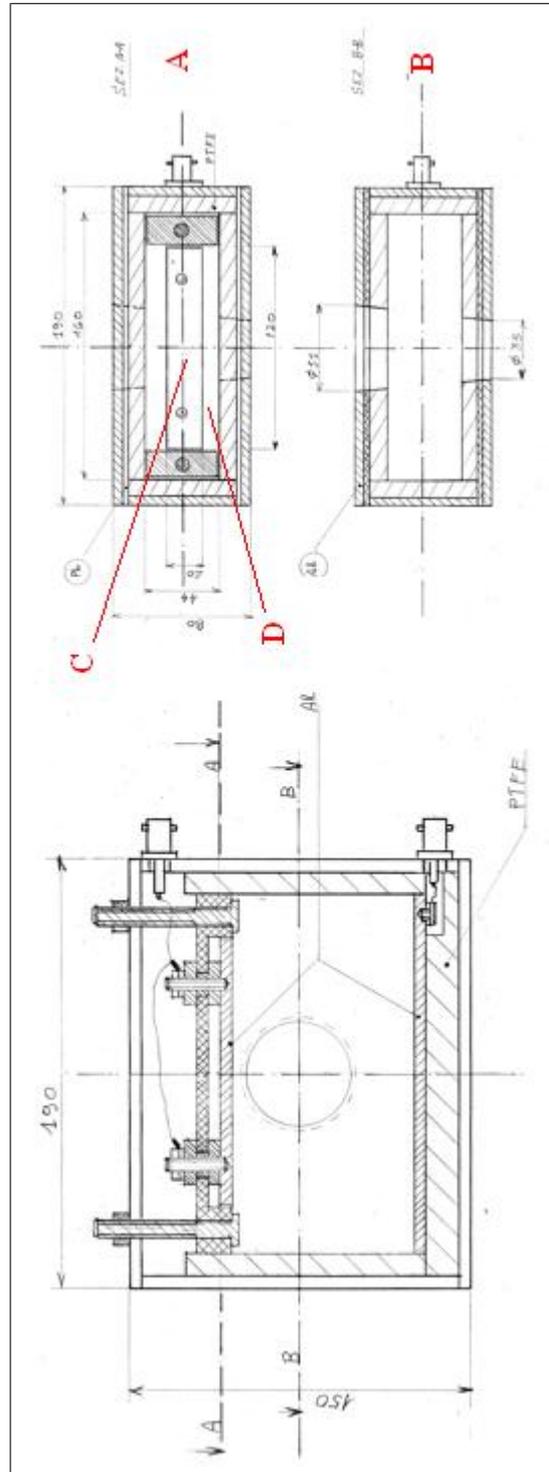
**Figura 3.1:** Vista frontale dell'alloggiamento schermante del tubo a raggi X e della camera monitor per il controllo della stabilità del fascio di radiazioni.

Le dimensioni lineari della camera (Figura 3.1) e degli elettrodi sono ottimizzati alla raccolta degli elettroni secondari prodotti indirettamente dalla radiazione ionizzante.

La camera monitor consiste di una camera ad elettrodi piani paralleli, l'uno collegato all'alta tensione, l'altro connesso a terra attraverso uno strumento per la misura della carica. I fotoni penetrano nel volume sensibile della camera attraverso un diaframma realizzato in Piombo. Il volume di misura è individuato dall'intersezione del volume di raccolta con il cono di radiazione proveniente dall'apertura del diaframma.

La carica misurata è uguale a quella prodotta nel volume di misura e divisa per la massa di questo ultimo permette di ottenere il valore dell'esposizione che descrive la capacità della radiazione elettromagnetica di produrre ionizzazione in aria.

La camera a ionizzazione ha un volume di raccolta di  $19$  cm<sup>3</sup> circa che la ren-



**Figura 3.2:** Sezione longitudinale e trasversale della camera a ionizzazione ad aria libera, con particolare degli elettrodi (A) e (B), dell'elettrodo di raccolta (C) e dei materiali di cui è composta (misure in mm).

de sufficientemente sensibile anche per l'impiego dei più bassi ratei richiesti in radioprotezione.

L'isolamento in PTFE<sup>2</sup> della camera a ionizzazione permette l'applicazione agli elettrodi di una tensione di polarizzazione anche superiore a 10 kV.

Questa tensione può essere necessaria per evitare ricombinazioni significative delle cariche elettriche prodotte dalla radiazione ionizzante come nel caso della produzione di fasci più intensi, di interesse nella terapia medica.

Il supporto della camera è indipendente dalle altre parti del sistema per evitare la trasmissione delle vibrazioni delle parti in movimento ed è dotato di una regolazione fine per la centratura con il fascio di radiazione. La camera è facilmente smontabile per un'eventuale pulizia del PTFE.

La camera ha forma di parallelepipedo ed è contenuta in un involucro di Piombo (Pb) di spessore pari a 3 mm.

Affinché il fascio di raggi X attraversi la camera monitor senza essere attenuato da materiale diverso dall'aria e senza dare luogo a radiazione diffusa, è stato necessario ricavare un foro di ingresso di diametro  $\varnothing = 35$  mm e uno di uscita di diametro  $\varnothing = 51$  mm perfettamente coassiali, in modo inoltre da ridurre al minimo la presenza di penombra.

Dei due elettrodi, quello tenuto ad alta tensione è costituito da una semplice lastrina a forma di parallelepipedo, mentre la struttura dell'elettrodo collettore (Figura 3.2) è più complessa, risultando suddivisa in due parti: un anello che funge da elettrodo di guardia (D) in quanto tenuto a potenziale di terra, riduce la distorsione delle linee di campo elettriche ai bordi del volume di raccolta delle cariche, e l'elettrodo di raccolta (C) vero e proprio inserito in una sede rettangolare ricavata in detto parallelepipedo.

L'elettrodo ad alta tensione ed elettrodo collettore, mantenuti isolati dall'involucro esterno tramite una struttura di teflon, sono collegati a due connettori montati sull'involucro esterno, a loro volta connessi rispettivamente all'alta tensione ed al sistema di misura della carica; l'elettrodo di guardia è messo a terra tramite l'involucro esterno cui è collegato.

La camera monitor non deve consentire una misura assoluta di esposizione, ma deve solo fornire un riferimento lineare per la normalizzazione delle misure effettuate con altre camere di riferimento. Non è quindi necessario valutare tutti quei fattori correttivi che si applicano ad una camera ad aria libera, quale *standard primario* di misura, per la misura dell'esposizione (correzione per lo scattering, per la ricombinazione, per l'assorbimento dell'aria, . . .) [55]. L'unico fattore correttivo indispensabile è quello relativo alla massa volumica dell'aria del volume di raccolta: a tale scopo ad ogni misura è stata monitorata pressione e temperatura.

---

<sup>2</sup>Materiale appartenente al gruppo delle olefiniche, il politetrafluoroetilene (commercialmente detto teflon) è ottimo per la realizzazione di componenti meccanici per scorrimento, visto il suo basso coefficiente d'attrito, la sua elevata resistenza al calore, la non infiammabilità. Ottimo materiale isolante, con elevata resistenza agli agenti chimici ed ai solventi.

**Tabella 3.1:** *Principali caratteristiche costruttive della camera a ionizzazione ad aria libera per campi di radiazioni X di bassa energia.*

Distanza elettrodi (cm)	6
Larghezza elettrodo di raccolta (cm)	1,4
Lunghezza elettrodo di raccolta (cm)	12
Diametro del fascio definito dal diametro del foro di ingresso (cm)	3,5
Volume di raccolta (cm <sup>3</sup> )	19

### 3.4 Sistema di misura della carica

La carica raccolta dalla camera monitor è accumulata su di un condensatore di capacità  $C$  misurato con una accuratezza migliore dell'uno per mille (il condensatore è sostituibile ma normalmente viene utilizzato un condensatore di capacità  $C_m = 50$  nF), posto in serie all'elettrodo di raccolta della camera monitor: la differenza di potenziale letta ai capi del condensatore, corretta per la massa volumica dell'aria, serve come valore di normalizzazione per la lettura effettuata alternativamente con lo standard o con il campione secondario di misura da tarare. La precisione del sistema di misura della carica deve essere la stessa sia per la camera di controllo che per il campione secondario di misura. La acquisizione dei dati di carica delle due camere deve avvenire contemporaneamente per potere effettuare le operazioni di normalizzazione ad un irraggiamento di riferimento. Il sistema di misura impiegato, completamente automatizzato, sfrutta due elettrometri Keithley Model 6514 che lavorano contemporaneamente in feedback esterno con i condensatori di raccolta della camera di controllo e del campione secondario di misura.

### 3.5 Sistema di misura dei parametri ambientali

Nelle misure di carica relative ad irraggiamenti non contemporanei è necessario normalizzare i valori ottenuti in differenti condizioni ambientali (temperatura pressione ed umidità) ad identiche condizioni ambientali di riferimento. Infatti la carica prodotta dalla radiazione all'interno di una camera a ionizzazione varia con il variare della densità dell'aria all'interno della camera stessa.

Le condizioni ambientali di riferimento sono  $T_0 = 293,15$  K per la temperatura,  $P_0 = 101,3$  kPa per la pressione e  $U_{r0} = 50\%$  per l'umidità.

Il Centro di Taratura dispone di strumenti idonei per la rilevazione dei dati ambientali, e di un adeguato impianto di climatizzazione che mantenga tali parametri il più possibile stabili.

Gli strumenti per la rivelazione dei dati ambientali sono costituiti da opportune sonde il cui segnale viene acquisito direttamente dall'unità di controllo esterna alla sala di irraggiamento.

### 3.6 Prestazioni della camera monitor

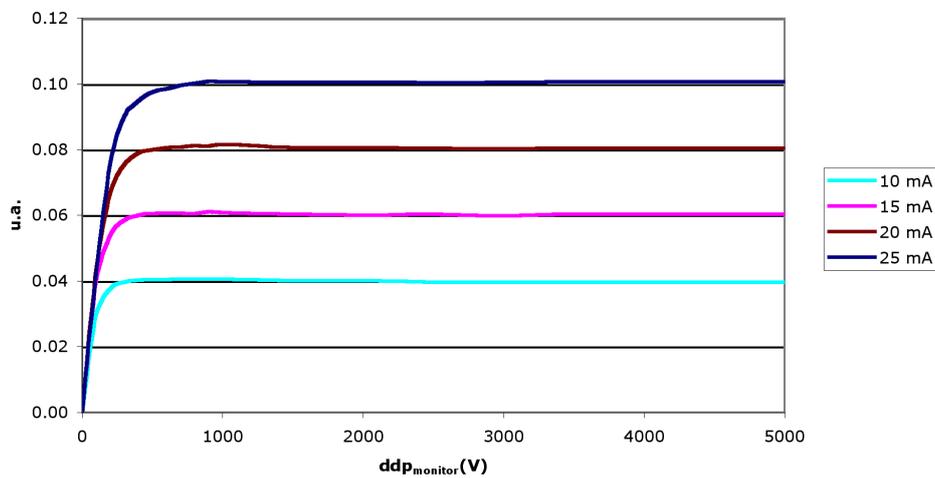
L'impiego della camera monitor è avvenuto a seguito della determinazione della curva di saturazione in funzione della differenza di potenziale applicata alla stessa, misurata per ogni fascio di radiazione nell'intervallo energetico di interesse e della tensione di lavoro della camera.

In seguito, è stato verificato che la risposta in funzione dell'energia del fascio incidente della camera monitor fosse indipendente da essa per tutte le energie di interesse.

Preliminare all'impiego della camera monitor è la determinazione della tensione di lavoro della camera, corrispondente alla differenza di potenziale che deve essere applicata tra gli elettrodi per assicurare la completa raccolta delle cariche formatesi all'interno del volume di raccolta. E' necessario quindi determinare la curva di saturazione della camera riportando in grafico la carica raccolta (in pratica la differenza di potenziale ai capi del condensatore) in funzione della differenza di potenziale applicata alla monitor.

La curva ottenuta, all'inizio rapidamente crescente, da un certo valore di differenza di potenziale in poi tende asintoticamente ad una retta orizzontale, che rappresenta le condizioni di saturazione, in corrispondenza delle quali la carica raccolta è indipendente dal valore di differenza di potenziale applicata.

Le misure sono state effettuate utilizzando la camera a ionizzazione PTW Freigurg mod. M23331 ad una distanza sorgente-rivelatore pari a 1 m, con misure integrate di 60 s.



**Figura 3.3:** Curva di saturazione della camera monitor. Ogni punto è il valore medio di tre misure. Gli errori sperimentali non sono apprezzabili sulla scala. u.a. = lettura camera monitor.

In pratica, il punto di lavoro della camera viene scelto in modo tale che

eventuali fluttuazioni dell'intensità del fascio non influenzino in maniera significativa il valore della carica raccolta. Una tipica curva di saturazione per la camera monitor, oggetto del presente capitolo, è riportata in Figura 3.3. Dalla figura si ricava che già una ddp di 1500 V rappresenta una conveniente tensione di lavoro.

E' stato però necessario misurare una curva di saturazione per ogni qualità di radiazione nel dominio energetico studiato al variare della corrente, in quanto per fasci di radiazione appartenenti alla famiglia *High Air-Kerma Rate series* (H) si è verificata la necessità di impiegare una tensione di lavoro maggiore al fine di raggiungere la saturazione (Figura 3.4 ).

Nonostante la tensione di lavoro scelta, 5000 V, sia abbastanza elevata per la Serie H è stato necessario applicare delle limitazioni sulla corrente, scelta giustificata dalla necessità di evitare eventuali perdite di carica anche in presenza di intensità di radiazioni molto elevate. Alla tensione di lavoro scelta, il valore della corrente di perdita è risultato dell'ordine di  $10^{-14}$  A, trascurabile rispetto a quelle che generalmente vengono misurate, e comunque pari ai minimi valori riscontrati in qualsiasi camera a ionizzazione.

### 3.7 Determinazione del volume di raccolta della camera

Il volume di raccolta della camera di controllo è stato calcolato sia con metodo analitico sia indirettamente mediante misura della carica raccolta.

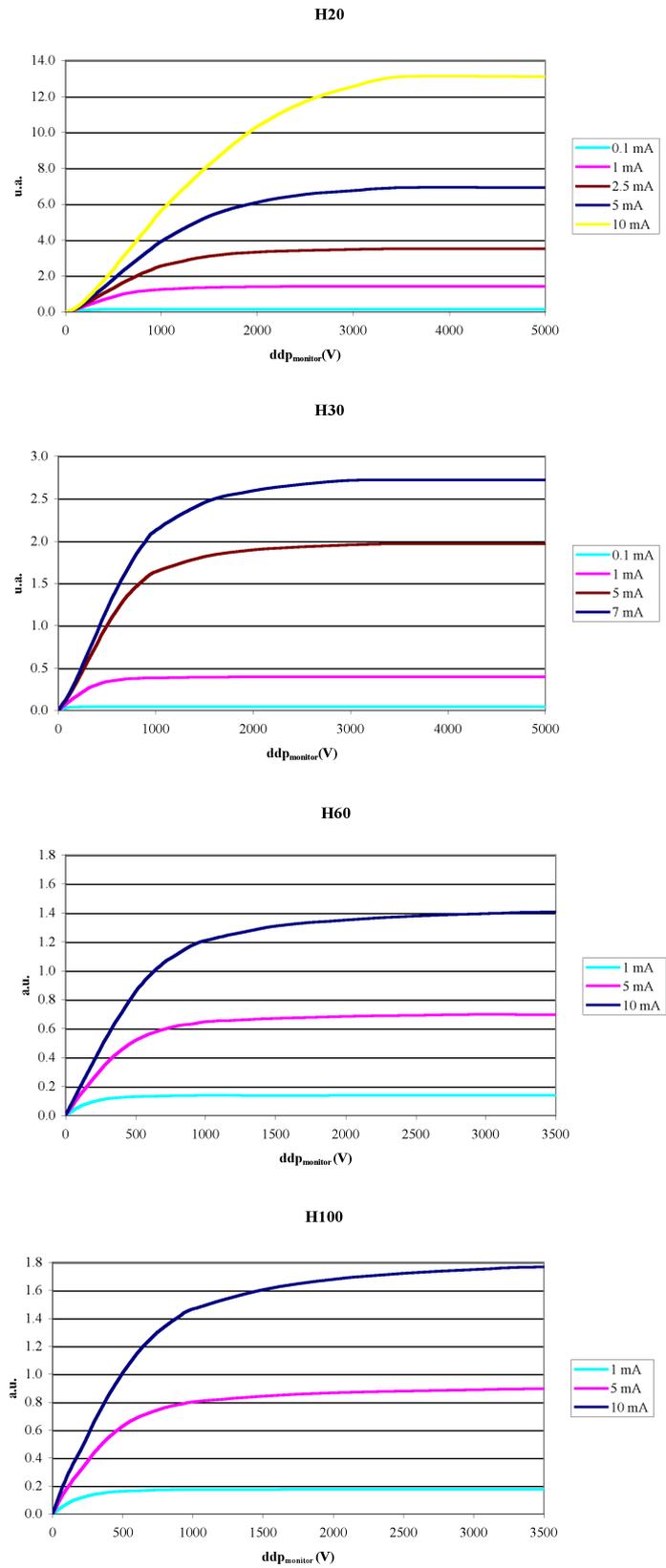
Le differenze ottenute applicando i due metodi sono da attribuirsi ai seguenti fattori:

- una possibile distorsione del campo elettrico;
- il non perfetto allineamento fra il foro di ingresso della radiazione X e quello di uscita creando possibili effetti di radiazione diffusa;
- la presenza di penombra causata dalla sorgente di radiazione non puntiforme.

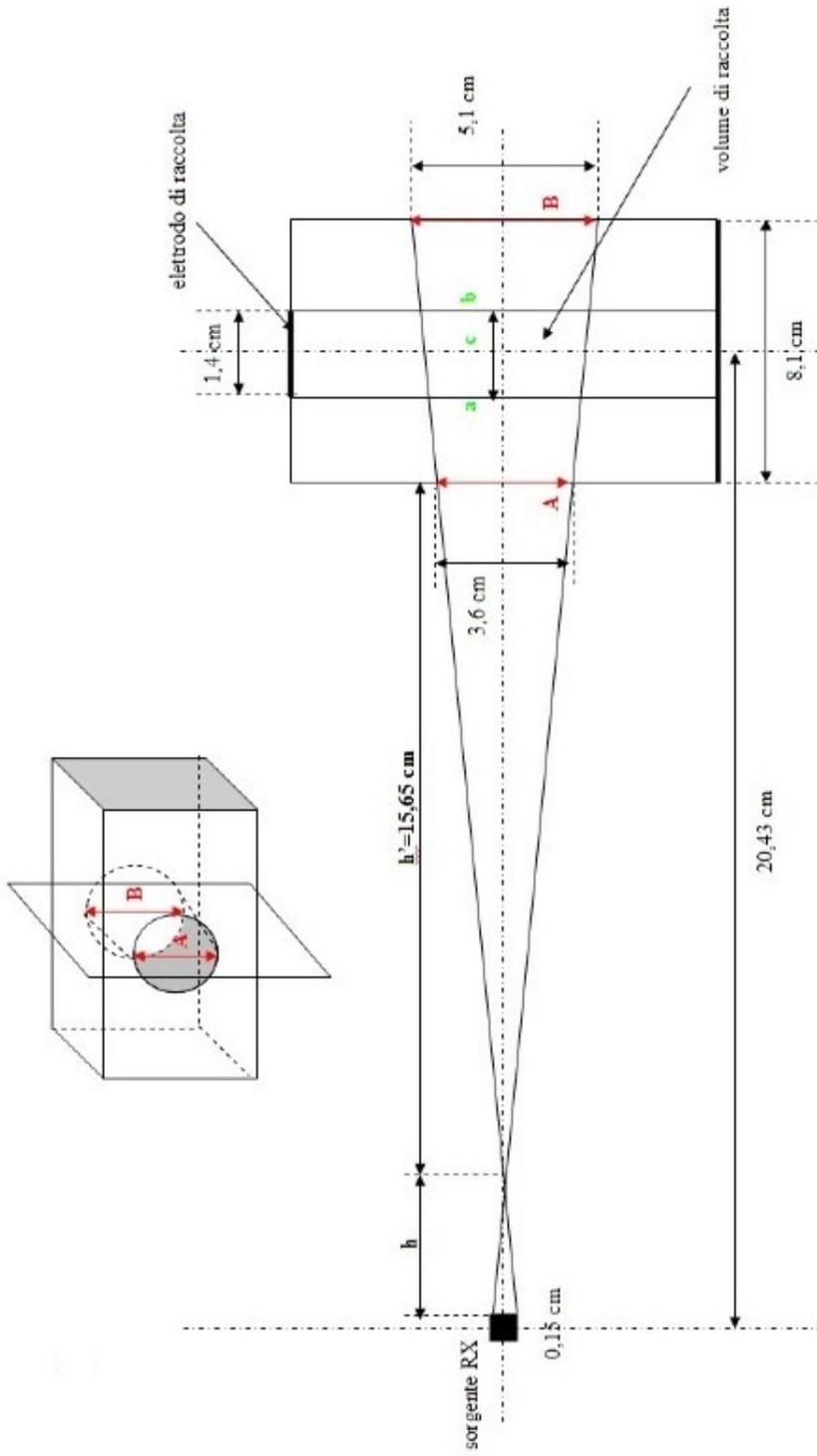
In Figura 3.5 è mostrato in modo schematico la posizione della sorgente rispetto la camera monitor ed il particolare del volume di raccolta per quanto riguarda le dimensioni e la forma.

Il volume,  $V_{\text{tronco di cono retto}} = \pi \cdot \frac{c}{3} (a^2 + b^2 + a \cdot b)$  è stato calcolato sia considerando la sorgente non puntiforme sia il non perfetto allineamento dei fori di ingresso ed uscita.

I risultati ottenuti con il metodo analitico confermano entro l'1% quelli ottenuti con una misura diretta della carica raccolta all'interno della camera stessa.



**Figura 3.4:** Curva di saturazione per la camera monitor della radiazione H20, H30 e H60, H100 della serie H.



**Figura 3.5:** Schema della camera monitor e particolare del volume di raccolta e degli elementi indispensabili al calcolo dello stesso con metodo analitico.



**Figura 3.6:** Camera cilindrica ad aria libera (SM1) impiegata come camera di riferimento per la misura di spessori emivalenti per ogni fascio di radiazione.

### 3.8 Curva di dipendenza dall'energia della camera monitor

E' necessario prima di impiegare una camera di controllo per effettuare misure in un determinato dominio energetico, conoscere in modo dettagliato la sua risposta in funzione dell'energia. Essendo la camera monitor (FM1) fissa non è stato possibile effettuare una sua caratterizzazione diretta. A tale scopo è stata utilizzata una camera campione cilindrica ad aria libera (SM1) con riferibilità metrologica ai campioni primari (tarata con accuratezza del 2%) (Figura 3.6). Tale camera è stata impiegata, anche, nelle misure di spessori emivalenti (metodo dosimetrico). Anch'essa è stata interamente progettata e sviluppata presso il Centro di Metrologia. La camera ad aria libera cilindrica è risultata indipendente dall'energia per  $E \leq 30 \text{ keV}$ . In Tabella 3.2 e 3.3 sono riportati rispettivamente i fattori di taratura della camera a ionizzazione cilindrica ad aria libera (SM1) e della camera monitor (FM1). E' evidente come la camera monitor risulti indipendente dall'energia fino a 30 keV, per energie superiori è stata utilizzata una camera a pareti aria-equivalenti (o a ditale).

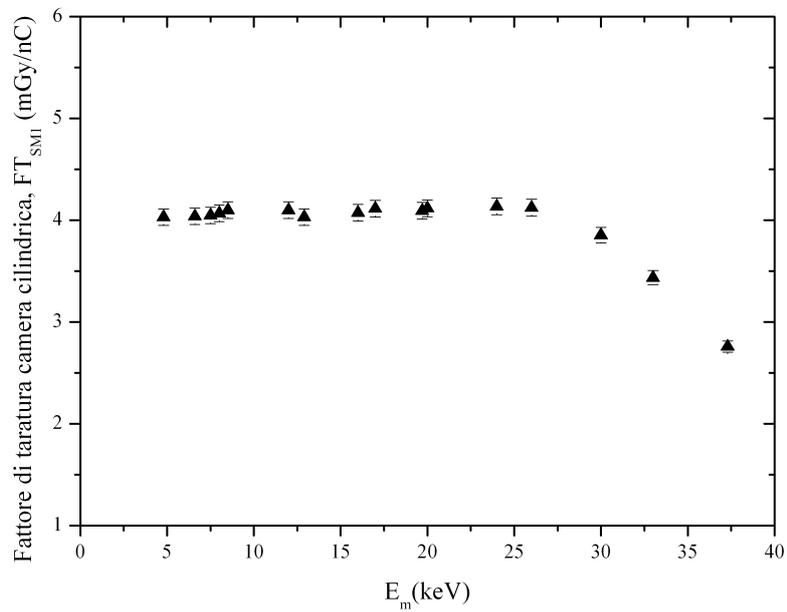
I risultati ottenuti sono riportati in Figura 3.7 e 3.8 per tutti i fasci X filtrati considerati.

**Tabella 3.2:** *Fattore di taratura della camera cilindrica ad aria libera ( $FT_{SM1}$ ) in funzione dell'energia dei fasci di radiazione studiati.*

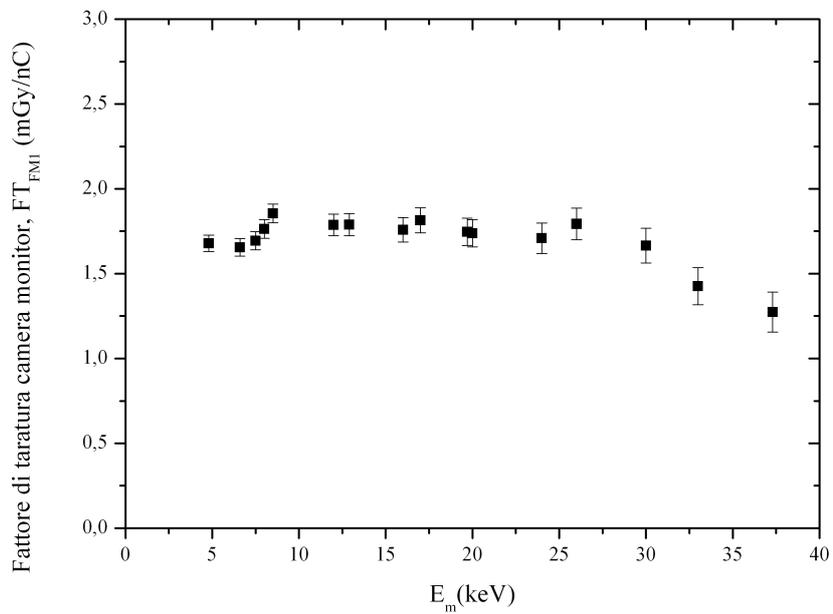
<b>Qualità radiazione</b>	<b><math>FT_{SM1}</math> (mGy/nC)</b>
N10	4,069
N15	4,098
N20	4,074
N25	4,117
N30	4,136
N40	3,435
5 kV	4,031
7,5 kV	4,038
H10	4,047
H20	4,030
H30	4,093
H60	2,758
L10	4,100
L20	4,114
L30	4,123
L35	3,853

**Tabella 3.3:** *Fattore di taratura della camera monitor ( $FT_{FM1}$ ) in funzione dell'energia dei fasci di radiazione studiati.*

<b>Qualità radiazione</b>	<b><math>E_m</math> (keV)</b>	<b><math>FT_{FM1}</math> (mGy/nC)</b>
5 kV	4,8	1,6786
7,5 kV	6,6	1,6553
L10	8,5	1,8556
L20	17	1,8144
L30	26	1,7929
L35	30	1,6652
N10	8	1,7637
N15	12	1,7873
N20	16	1,7581
N25	20	1,7380
N30	24	1,7087
N40	33	1,4262
H10	7,5	1,6940
H20	12,9	1,7890
H30	19,7	1,7467
H60	37,3	1,2734



**Figura 3.7:** Curva di dipendenza dall'energia della camera cilindrica ad aria libera (SM1).



**Figura 3.8:** Curva di dipendenza dall'energia della camera monitor (FM1).

## Capitolo 4

# Determinazione dei dati caratteristici dei fasci ISO 4037-1 di bassa energia con il metodo dosimetrico

### 4.1 Introduzione

In un tubo a raggi X, le grandezze che lo caratterizzano sono: la differenza di potenziale applicata al tubo, la filtrazione propria del tubo (filtrazione inerente) e la filtrazione aggiuntiva, la corrente che passa nel tubo ed il Rateo di Esposizione ad una distanza prestabilita per determinate condizioni di impiego (la cosiddetta erogazione del tubo o output). La differenza di potenziale applicata al tubo e le filtrazioni sono espressioni della qualità del fascio. Alla differenza di potenziale applicata al tubo (kV) corrisponde l'energia massima dei raggi X prodotti. La distribuzione dello spettro dei raggi X è evidentemente una espressione più precisa della qualità del fascio ma è sicuramente di più complessa determinazione. La distribuzione spettrale dei raggi X è modificata da qualsiasi filtrazione e schermatura interposta sul percorso del fascio, in modo particolare nel campo delle basse energie dove anche un piccolo spessore d'aria può chiaramente modificare lo spettro. La filtrazione indurisce il fascio, nel senso che esso diventa più penetrante, ma il Rateo di Esposizione misurato ad una data distanza dal tubo diventa più debole.

La filtrazione totale del fascio è dovuta a tutti i materiali presenti tra la sorgente di radiazione (corrispondente al fuoco del tubo) ed il punto di misura. Essa è costituita dalla filtrazione inerente del tubo, dalla filtrazione addizionale, dall'eventuale spessore delle pareti della camera di controllo e dallo strato d'aria che si trova tra la finestra di uscita del tubo ed il punto di misura. Un diaframma in piombo di spessore pari a 4 mm all'uscita del tubo e due diaframmi fissi di 3 mm ai lati della camera a ionizzazione di controllo limitano le dimensioni del fascio di radiazione.

La *capacità di penetrazione* di un fascio di raggi X è descritta chiaramente dalla sua distribuzione spettrale. Un indice più pratico e di più immediata

comprensione, per caratterizzare il fascio di raggi X, è lo spessore emivalente (SEV).

In genere per differenze di potenziale applicate al tubo inferiori a 120 kV si utilizzano filtri di Alluminio e Rame; tra 120 e 300 kV anche Piombo e Stagno.

## 4.2 Realizzazione dei filtri per i fasci standard ISO 4037-1

La realizzazione dei fasci di riferimento per le basse energie, le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 4.1, avviene attraverso la selezione di combinazioni opportune fra tensioni applicate al tubo e filtri di assorbimento realizzati con rame (Cu) ed alluminio (Al), detta *filtrazione addizionale o aggiuntiva*.

Poiché l'emissione di radiazioni caratteristiche di fluorescenza può aver luogo anche da parte dei materiali che costituiscono la filtrazione fissa del fascio di radiazione X, è necessario disporre la serie dei filtri dei diversi materiali ordinati secondo il numero atomico con il filtro di numero atomico più alto posto verso la sorgente, in modo tale che ogni filtro assorba la radiazione caratteristica emessa dal filtro precedente. La radiazione caratteristica emessa dall'ultimo filtro, generalmente costituito da alluminio, ha una energia tale da essere assorbita da pochi centimetri di aria.

Le qualità delle radiazioni indicate in Tabella 4.1 fanno parte delle Radiazioni di Riferimento raccomandate dalla ISO. Tali qualità possono ritenersi rappresentative delle qualità più idonee per la taratura di strumentazioni e dosimetri nel campo delle basse energie.

Una preliminare determinazione della qualità del fascio di radiazione, per la maggior parte delle applicazioni pratiche, può essere effettuata, una volta fissata la tensione del tubo a raggi X e la filtrazione totale, a partire da misure di assorbimento. Il parametro normalmente utilizzato è lo spessore emivalente definito come lo spessore di un dato materiale che attenua il fascio di radiazione in esame fino a ridurlo al Rateo di Esposizione alla metà del valore originario.

I materiali utilizzati per le filtrazioni addizionali mediante le quali sono realizzate le diverse qualità di radiazione X sono caratterizzati da un elevato grado di purezza (circa 99,9%) ed il loro spessore è noto con una accuratezza di  $\pm 0,01$  mm.

Per ciascuna qualità di radiazione è importante che i fasci messi a punto abbiano gli spessori emivalenti uguali a quelli riportati dalla normativa entro il  $\pm 1\%$ . Le filtrazioni addizionali risultanti in corrispondenza dei suddetti SEV possono invece differire entro il  $\pm 5\%$  da quelle riportate in tabella in relazione alle caratteristiche dell'impianto utilizzato.

Le misure sono state effettuate con la camera cilindrica ad aria libera (SM1) posta ad un metro di distanza dalla sorgente. A 50 cm dalla quale è stato posto un diaframma in piombo con un foro di diametro pari a 1,5 cm, maggiore della metà del diametro della parte sensibile della camera cilindrica, attaccato al quale si sono messi le diverse combinazioni di filtri impiegati per la misura del primo e secondo spessore emivalente per ogni qualità di radiazione. Nell'effettuare le misure del SEV va tenuto conto della eventuale dipendenza dall'energia della

Tabella 4.1: Caratteristiche delle radiazioni di riferimento.

**CARATTERISTICHE DELLA SERIE "LOW AIR-KERMA RATE"****L10-L30**

Qualità radiazione	Tensione (kV)	Filtrazione aggiuntiva (mm)	I° SEV (mm)
L10	10	0.3 di Al	0.058 Al
L20	20	2 di Al	0.42 Al
L30	30	0.18 di Cu	1.46 Al

**CARATTERISTICHE DELLA SERIE "NARROW SPECTRUM"****N10-N30**

Qualità radiazione	Tensione (kV)	Filtrazione aggiuntiva (mm)	I° SEV (mm)	II° SEV (mm)
N10	10	0.1 di Al	0.047 Al	0.052 Al
N15	15	0.5 di Al	0.14 Al	0.16 Al
N20	20	1 di Al	0.32 Al	0.37 Al
N25	25	2 di Al	0.66 Al	0.73 Al
N30	30	4 di Al	1.15 Al	1.3 Al

**CARATTERISTICHE DELLA SERIE "HIGH AIR-KERMA RATE"****H10-H30**

Qualità radiazione	Tensione (kV)	I° SEV (mm)	II° SEV (mm)
H10	10	0.04 di Al	
H20	20	0.11 di Al	
H30	30	0.35 di Al	

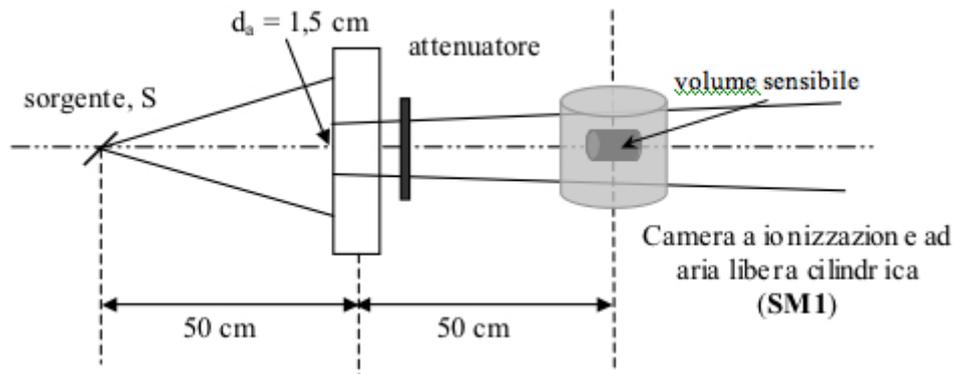


Figura 4.1: Condizioni sperimentali per la misura del SEV.

Tabella 4.2: Caratteristiche dei filtri impiegati per la misure di I° e II° SEV.

Codice filtro <sup>(a)</sup>	Peso <sup>(b)</sup> (g)	Area (cm <sup>2</sup> )	Spessore (mm)
A	2.62382	100	0.097
B	2.62409	101	0.096
C	2.62403	100	0.097
D	2.44672	93	0.097
E	13.94118	101	0.511
F	13.57890	101	0.498
G	13.81586	101	0.507

<sup>(a)</sup>densità alluminio = 2.699 g/cm<sup>3</sup>

purezza alluminio = 99.9999%

<sup>(b)</sup>i filtri sono stati pesati con una bilancia METTLER TOLEDO (precisione 10<sup>-5</sup>)

camera (vedi Capitolo 3) a ionizzazione impiegata e, come tale dipendenza, può influire sul risultato.

E' opportuno tenere presente inoltre che la radiazione diffusa sull'attenuatore influenza il valore del SEV. Il valore misurato del SEV può infatti risultare maggiore di quello effettivo in quanto esso dipende in modo apprezzabile dal diametro del fascio sui filtri attenuatori e dalla distanza sorgente-rivelatore. Il punto in cui la radiazione diffusa risulta essere minima è a metà tra la sorgente e la camera a ionizzazione con cui si effettua la misura, è a causa di tale effetto che devono essere soddisfatte alcune condizioni relative alla geometria dell'impianto di irraggiamento (Figura 4.1).

In Tabella 4.2 sono riportati i dati caratteristici dei filtri impiegati per la misura dei SEV, la combinazione dei quali, una volta fissati tensione e filtrazione aggiuntiva, ha dato l'esatto spessore emivalente per ogni qualità di radiazione.

Una volta ottenuto il primo ed il secondo spessore emivalente come richiesto dalla normativa, impostata la tensione caratteristica di ogni fascio si ha direttamente la verifica della correttezza del filtro addizionale scelto. I valori della filtrazione aggiuntiva ottenuti sono riassunti in Tabella 4.3 per ogni qualità di radiazione.

**Tabella 4.3:** Tensioni e filtrazioni aggiuntive determinate sperimentalmente da impostare per i fasci caratterizzati.

**L10-L35**

Qualità radiazione	Tensione (kV)	Filtrazione aggiuntiva determinata sperimentalmente	
		(mm)	(mm)
		<u>totale</u>	<u>composizione di filtri</u>
L10	9	0,25	-
L20	18,1	1,998	1+0,998
L30	29,3	4,142	3,952 Al+0,190 Cu
L35	35	4,203	3,950 Al+0,253 Cu

**N10-N40**

Qualità	Tensione (kV)	Filtrazione aggiuntiva determinata sperimentalmente	
		(mm)	(mm)
		<u>totale</u>	<u>composizione di filtri</u>
N10	9,6	0,05	0,025+0,025
N15	14,1	0,45	-
N20	18,5	0,95	-
N25	24	1,99	0,995+0,995
N30	29	3,957	
N40	40	4,169	0,216 Al+3,953 Cu

**H10-H60**

Qualità radiazione	Tensione (kV)	Filtrazione aggiuntiva determinata sperimentalmente	
		(mm)	(mm)
		<u>totale</u>	<u>composizione di filtri</u>
H10	10	-	-
H20	20	0,11	-
H30	30	0,45	-
H60	60	3,207	-

### 4.3 Misure di primo e secondo spessore emivalente (SEV)

Una volta realizzati i filtri addizionali, una ulteriore prova a conferma dell'idoneità di ogni fascio rispetto a quanto richiesto dalla normativa consiste nella misura, mediante camera a ionizzazione, del primo e secondo spessore emivalente. I risultati sono riportati in Tabella 4.4.

I dati ottenuti sono confrontabili, all'interno delle incertezze, con quanto richiesto dalla normativa.

Si è scelto di caratterizzare anche due fasci sotto i 10 keV rispettivamente a 5 keV e 7,5 keV, come estensione delle qualità di radiazioni raccomandate, in modo da avere la possibilità di ulteriori confronti con Laboratori di ricerca [12] che a loro volta hanno qualificato tali fasci.

Una volta realizzati i fasci si è misurato il Rateo di Esposizione in due diversi punti di misura con la camera a ionizzazione cilindrica (SM1) e la Kethley mod. 96035 per i fasci L35, N40 e H60 per i quali la camera standard era fuori dai range previsti per il normale impiego: 40 cm distanza sorgente-rivelatore punto utile per la taratura di camere a ionizzazione e 2 m per l'irraggiamento di dosimetri su fantoccio, punto in cui il diametro del fascio è risultato idoneo al suo impiego.

I risultati ottenuti sono riassunti per qualità del fascio in Tabella 4.5.

**Tabella 4.4:** Riassunto delle caratteristiche dei fasci caratterizzati mediante il metodo classico degli spessori emivalenti (metodo dosimetrico).

Disco (n)	Filtro (n)	Radiation quality	H.T. (kV)	Max current (mA)	Additional filtrations (mm di Al)	I° HVL 1m (mm di Al)	I° HVL 2m (mm di Al)	IP° HVL 1m (mm di Al)	IP° HVL 2m (mm di Al)
2	1	5	5	-	-	0.011	-	0.011	-
2	1	7.5	7.5	-	-	0.032	-	0.033	-
2	4	L10	9	-	0.25	0.058	0.070	-	-
2	5	L20	18.1	-	1.998	0.42	0.44	-	-
2	6	L30	29.3	-	4.142	1.49	1.68	-	-
2	7	L35	35	-	4.203	2.26	2.62	-	-
1	1	N10	9.6	-	0.05	0.047	0.058	0.054	0.063
1	2	N15	14.1	-	0.45	0.14	0.16	0.17	0.18
1	3	N20	18.5	-	0.95	0.32	0.34	0.37	0.37
1	4	N25	24	-	1.99	0.67	0.67	0.74	0.77
1	5	N30	29	-	3.957	1.15	1.22	1.27	1.25
1	6	N40	40	-	0.216 di Cu+3.953	2.80	2.81	2.97	3.04
2	1	H10	10	≤2	-	0.04	0.05	0.048	0.065
2	2	H20	20	≤2	0.11	0.12	0.145	0.15	0.192
1	2	H30	30	≤2	0.45	0.36	0.41	0.54	0.59
2	3	H60	60	≤2	3.207	2.4	2.4	3.26	3.32

**Tabella 4.5:** Misure di riferimento in (mGy/nC) sia per la taratura delle camere a ionizzazione (40 cm) sia per la taratura dei dosimetri (2 m). I fasci che nella prima tabella sono stati evidenziati sono quelli per cui è stato necessario impiegare una diversa camera a ionizzazione nelle misure di riferimento.

Camera di riferimento: camera a ionizzazione ad aria libera cilindrica (SAD)

Energia media (keV)	Energia equivalente (keV)	Qualità radiazione	tensione (kV)	corrente (µA)	tamburo/fibro (n/n)	distanza 40 cm (mGy/nC)	incertezza 95% (%)	distanza 2m (mGy/nC)	incertezza 95% (%)
	5	5	5	-	-	1.7E-01	0.4%	-	-
	7.5	7.5	7.5	-	-	3.0E-01	0.6%	-	-
8.5	8.5	L10	9	-	2/4	5.0E-01	0.1%	3.3E-03	0.4%
17	17	L20	18.1	-	2/5	5.9E-01	0.1%	1.5E-02	0.1%
26	26	L30	29.3	-	2/6	5.8E-01	0.0%	1.7E-02	0.0%
30	30	L35	35	-	2/7	5.6E-01	0.1%	2.0E+00	0.1%
8		N10	9.6	-	1/1	4.3E-01	0.9%	1.7E-03	0.6%
12	12	N15	14.1	-	1/2	5.5E-01	0.3%	8.8E-03	0.2%
16	15	N20	18.5	-	1/3	5.7E-01	0.2%	1.3E-02	0.2%
20	19	N25	24	-	1/4	5.7E-01	0.1%	1.5E-02	0.6%
24	23	N30	29	-	1/5	5.6E-01	0.1%	1.6E-02	0.1%
33	31	N40	40	-	1/6	5.4E-01	0.1%	1.9E-02	0.1%
7.5		H10	10	≤ 2	2/1	3.5E-01	0.3%	9.9E-04	0.0%
12.9	11	H20	20	≤ 2	2/2	5.3E-01	0.5%	6.5E-03	0.5%
19.7	16	H30	30	≤ 2	1/2	5.7E-01	0.4%	1.2E-02	0.3%
37.3	31	H60	60	≤ 2	2/3	5.2E-01	0.5%	2.0E-02	0.5%
30*	30	L35	35	-	2/7	5.3E-01	0.0%	2.2E+00	0.0%
33**	31	N40	40	-	1/6	5.4E-01	0.1%	2.1E-02	0.5%
37.3**	31	H60	60	-	2/3	5.3E-01	0.1%	2.0E-02	0.1%

\* Camera di riferimento: Keithley mod. 96035

## Capitolo 5

# Caratteristiche nominali dei campi di irraggiamento e grandezze dosimetriche associate

### 5.1 Grandezze fisiche in radiometria

Il modo più semplice per descrivere un campo di radiazioni è quello di contare punto per punto il numero di particelle presenti nello spazio delle fasi (spazio geometrico, energia). Ciò è legato al concetto di fluena di particelle.

Si definisce fluena di particelle in un certo punto di un mezzo materiale irraggiato e si indica con il simbolo  $\Phi$  la quantità:

$$\Phi = \frac{dN}{da} \quad (5.1)$$

dove  $dN$  rappresenta il numero di particelle incidenti su di una sfera di sezione massima  $da$  avente centro nel punto considerato.

Nell'indicare con  $dN$  il numero di particelle che attraversa l'area  $da$  si deve pensare questa sempre perpendicolare alla direzione di incidenza delle particelle.

La 5.1 presenta la notazione differenziale in quanto la definizione deve potersi applicare anche nel caso di campi non uniformi nei quali la fluena varia da punto a punto. A causa della natura statistica propria dei campi di radiazione, le variabili con le quali si tratta sono sempre di tipo casuale. Tale è anche il numero di particelle  $N$  il cui differenziale  $dN$  deve intendersi come differenziale del numero medio atteso di particelle.

La fluena di particelle si esprime nel SI in  $m^{-2}$ .

In molte occasioni è di maggiore interesse conoscere l'energia totale trasportata in una certa regione. Facendo uso dell'energia radiante  $R$  che coincide con l'energia delle particelle emessa, trasferita e ricevuta, il trasporto dell'energia della radiazione nello spazio può essere allora descritto mediante la fluena di energie delle particelle  $\psi$

$$\psi = \frac{dR}{da} \quad (5.2)$$

dove  $dR$  è l'energia radiante incidente su una sfera infinitesima di sezione massima  $da$  centrata nel punto considerato. La fluena di energia si misura nel SI in  $J \cdot m^2$ .

Le distribuzioni differenziali di fluena (o spettri) di particelle e di fluena di energia sono definite rispettivamente come

$$\Phi_E = \frac{d\Phi(E)}{dE} \quad (5.3)$$

$$\psi_E = \frac{d\psi(E)}{dE} \quad (5.4)$$

dove con  $\Phi_E$  e  $\psi_E$  si intendono rispettivamente la fluena di particelle e la fluena di energia relative a particelle di energia cinetica non superiore ad  $E$ .

Le due grandezze introdotte sono legate dalla seguente relazione

$$\psi_E = E \cdot \Phi_E \quad (5.5)$$

E' utile calcolare l'energia media delle particelle presenti, pesando la media sia sulla fluena di particelle che sulla fluena di energia

$$\bar{E}_\Phi = \frac{\int_0^{E_{max}} E \cdot \Phi_E dE}{\int_0^{E_{max}} \Phi_E dE} \quad (5.6)$$

$$\bar{E}_\psi = \frac{\int_0^{E_{max}} E \cdot \psi_E dE}{\int_0^{E_{max}} \psi_E dE} \quad (5.7)$$

dove gli integrali che compaiono nella 5.6 e nella 5.7 sono estesi a tutte le possibili energie e i loro valori coincidono rispettivamente con la fluena di particelle e con la fluena di energie totali.

## 5.2 Dipendenza degli spettri fotonici di bassa energia dalla distanza sorgente-rivelatore

Nei capitoli precedenti sono stati approfonditi in modo dettagliato tutti i parametri in gioco che garantiscono una elevata stabilit  della fluena energetica dei fasci a raggi X generati dall'impianto da caratterizzare. Oltre ad una analisi delle diverse caratteristiche dell'impianto, nel campo delle basse energie,   di fondamentale importanza tenere monitorati anche i parametri ambientali quali temperatura, pressione ed umidit : infatti in questo dominio di energie fotoniche particolarmente basse, piccole variazioni dei parametri test  citati possono avere una significativa influenza sulle distribuzioni spettrali dei fotoni. Di particolare criticit    lo spessore dell'aria, cio  la distanza tra la sorgente di radiazione (intesa come fuoco del tubo a raggi X) ed il punto di misura [57].

Allo scopo di analizzare l'influenza dello spessore di aria tra sorgente e punto di misura sullo spettro,   stata fatta una campagna parametrica (in funzione dello spessore) di calcoli Monte Carlo di spettro in aria. Gli spettri in fluena,  $\phi(E)$ , utilizzati sono stati misurati in due Laboratori primari europei e sono

definiti a 100 cm e 250 cm dalla sorgente di radiazione [12, 7]. Per ottenere la distribuzione in fluena dei fotoni emessi alla sorgente è stata applicata agli spettri a 100 cm, canale per canale, l'inverso della legge di attenuazione esponenziale<sup>1</sup> in base allo spessore di aria considerato. Per ogni spettro e distanza è stato calcolato il valore di kerma in aria associato alla fluena totale,  $\frac{K_a}{\phi}$ , con il rispettivo coefficiente di conversione per unità di fluena. Le distanze considerate sono: 40 cm, 50 cm, 60 cm, 80 cm, 100 cm, 150 cm e 200 cm. Al fine di rendere immediato il confronto, ogni spettro è stato normalizzato allo spettro a 40 cm (imposta area =1) rispettivamente per ogni famiglia di radiazione (da Fig.5.1 a Fig.5.10).

Osservando gli spettri è evidente come allontanandosi dalla sorgente ci sia un *indurimento* dello spettro, inteso come diminuzione della componente di bassa energia. Questo fenomeno è però evidente solo per fasci a più bassa energia come L10, L20, N10, N15, N20, H20, cioè per  $E \lesssim 20$  keV. Infatti all'aumentare dell'energia media dello spettro l'influenza dello spessore d'aria sulla distribuzione spettrale diminuisce notevolmente lasciando la forma dello spettro pressochè invariato.

### 5.3 Grandezze operative: definizioni

L'ICRU (International Commission on Radiological Units and Measurements) dal 1925 svolge la sua attività, con il principale obiettivo di stabilire raccomandazioni internazionalmente accettate riguardanti le quantità e le unità da adottare per la misura della radiazione e della radioattività, e di identificare procedure adatte per la misura delle quantità proposte in diverse discipline tra le quali la radioprotezione.

In quest'ultimo campo il suo lavoro si svolge in stretta collaborazione con la Commissione Internazionale di Radioprotezione (ICRP).

La validità di una grandezza operativa in radioprotezione è commisurata al grado con cui essa soddisfa determinate caratteristiche. La scelta dell'ICRU è stata fatta, oltre che sulla base della possibilità che sia riferibile ad uno standard di taratura primario, anche in relazione alla sua applicabilità come buona stima dei limiti protezionistici. Inoltre si è tenuta ben presente la necessità di individuare due tipi di grandezze operative, un tipo da usare nel caso di radiazioni fortemente penetranti e l'altro tipo da usare con radiazioni debolmente penetranti.

La scelta della quantità operativa proposta è anche legata alle diverse condizioni reali nelle quali si usa. Nella pratica si verificano due situazioni possibili, in un caso il dosimetro è a contatto con il mezzo o la persona a cui si intende riferire la misura, nell'altro il dosimetro può effettuare la misura in un ambiente in assenza del corpo a cui si vuole riferire la misura stessa.

Alla luce delle precedenti considerazioni, le grandezze operative proposte

$$^1 I(E) = I_0(E) \cdot \exp(-(\mu/\rho)_{aria} \cdot \rho_{aria} \cdot x)$$

dove  $I_0(E)$  è la fluena dei fotoni emessi alla sorgente (valore incognito);  $I(E)$  è la fluena dei fotoni alla distanza  $x$  dalla sorgente;  $x$  è pari a 100 cm;  $(\mu/\rho)_{aria}$  è il coefficiente di assorbimento massico dell'aria e  $\rho_{aria}$  è la densità dell'aria pari a  $1,2050 \cdot 10^{-3}$  g/cm<sup>3</sup>.

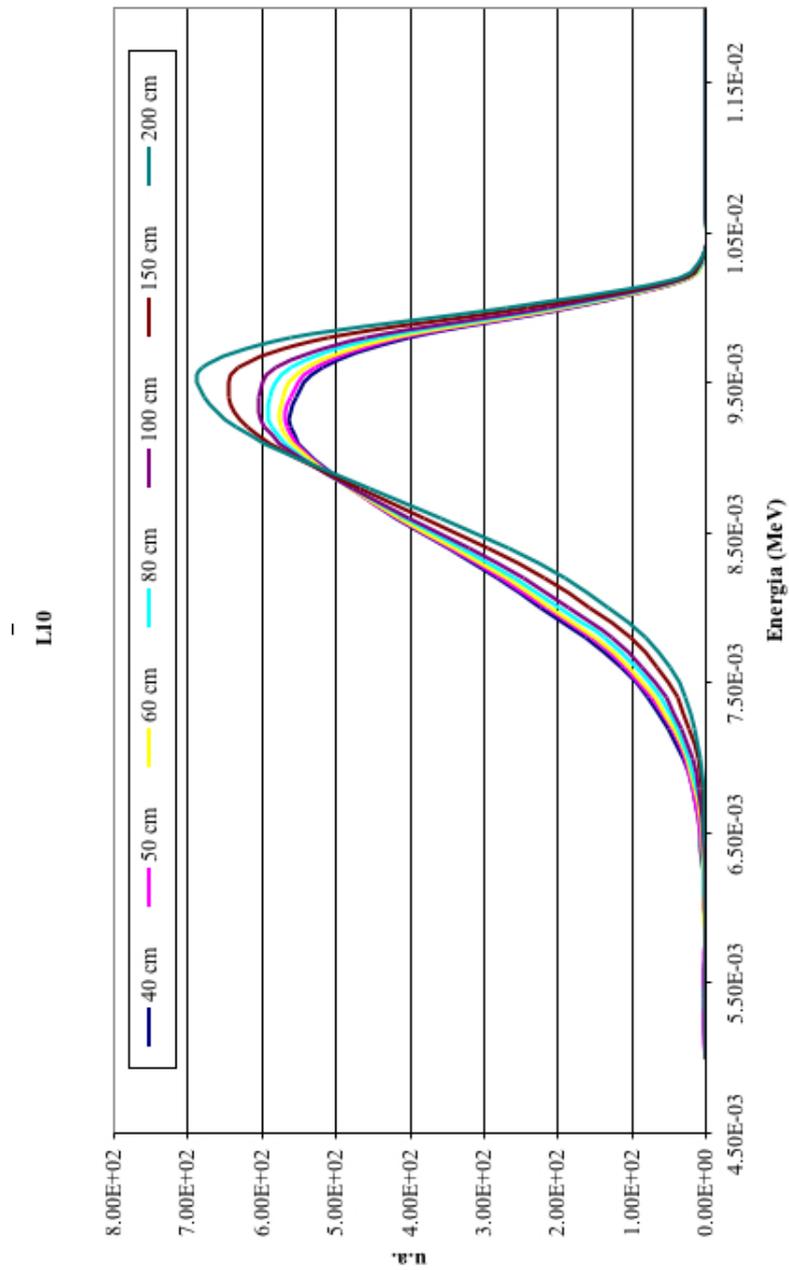


Figura 5.1: Spettro L10.

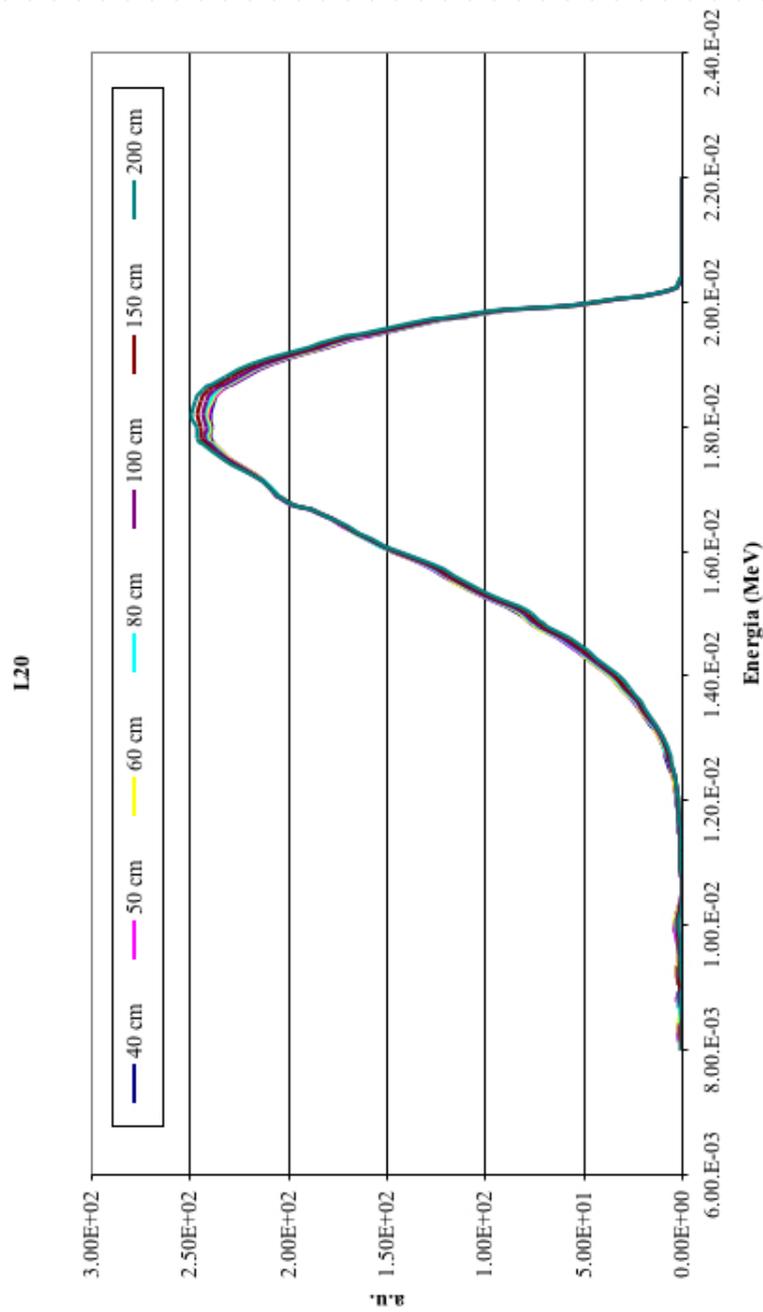


Figura 5.2: Spettro L20.

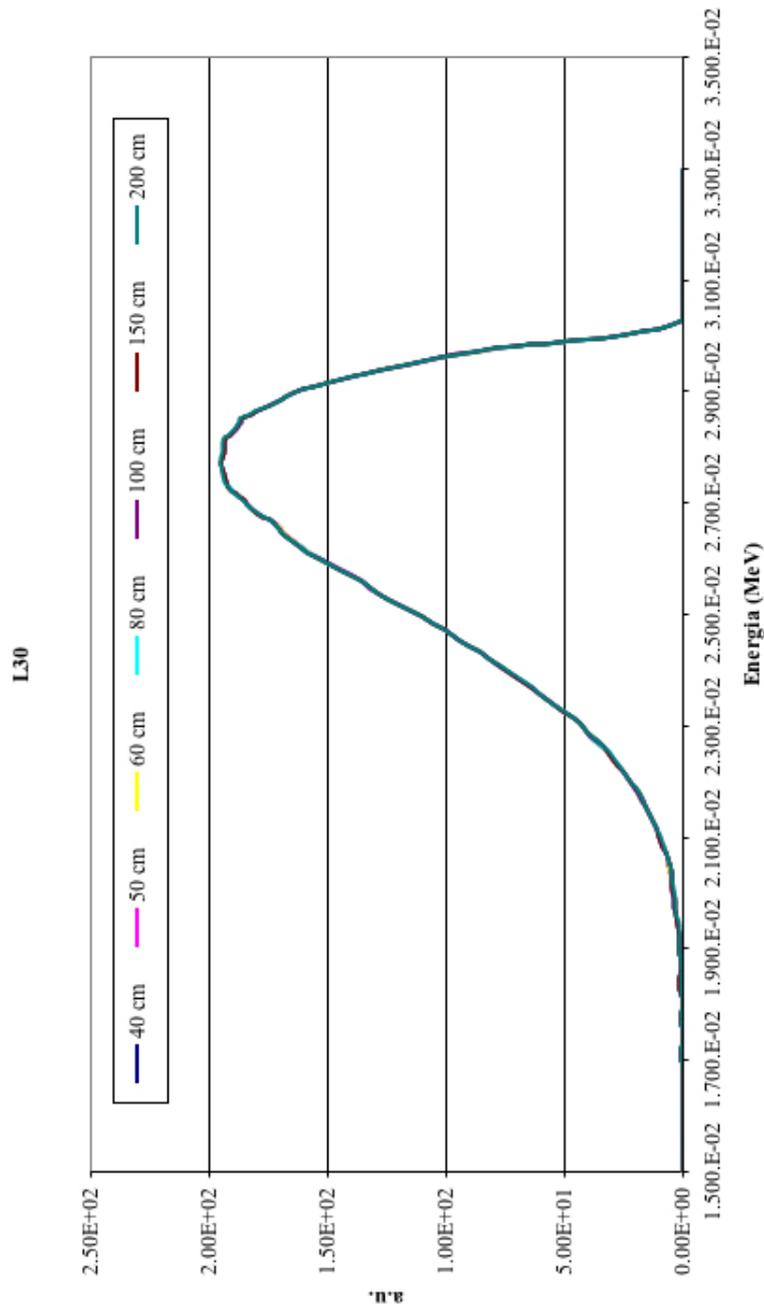


Figura 5.3: Spettro L30.

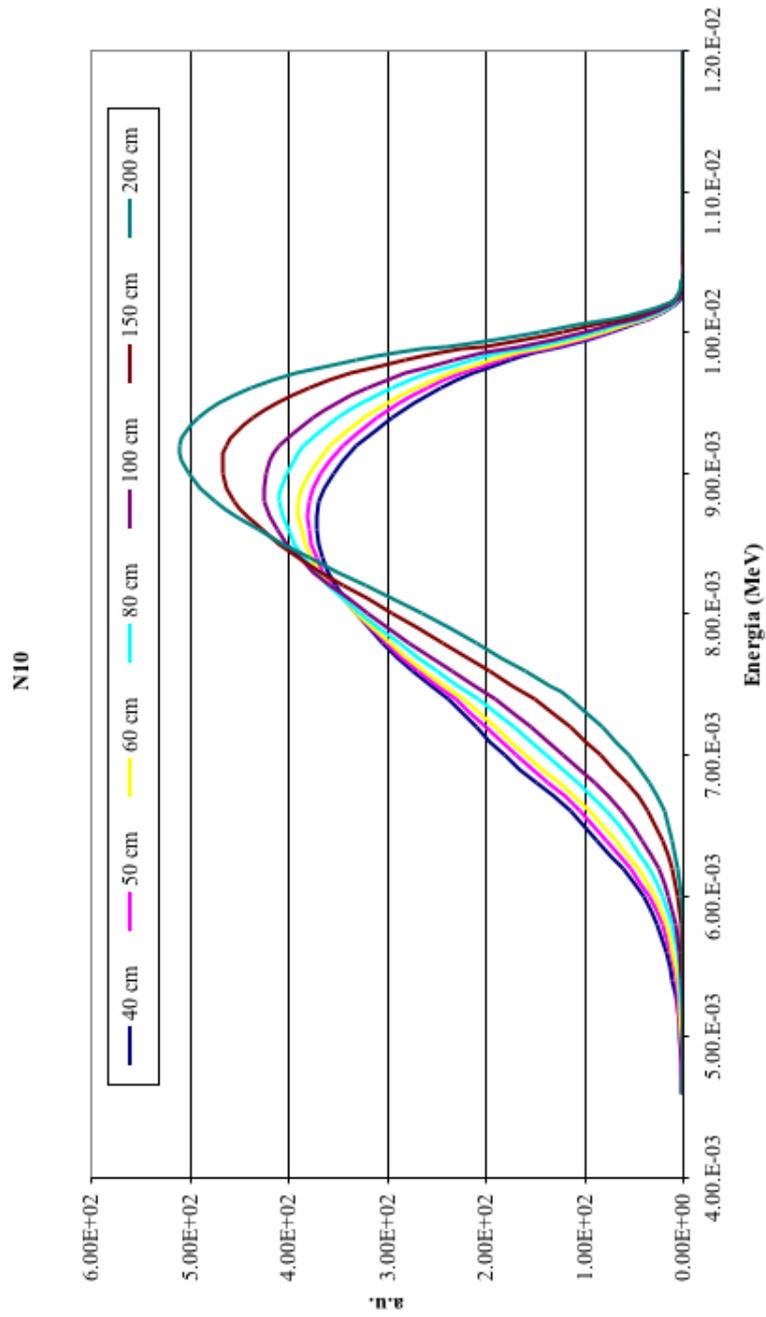


Figura 5.4: Spettro N10.

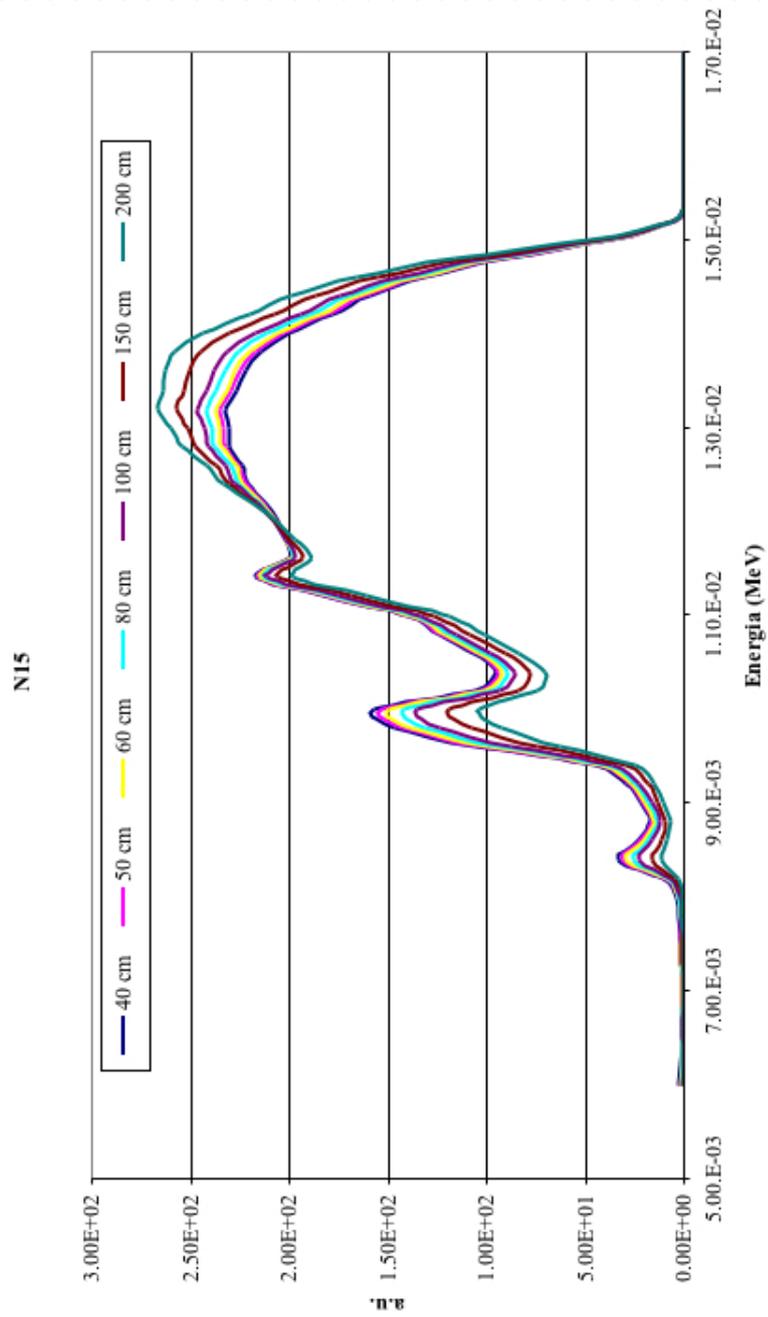


Figura 5.5: Spettro N15.

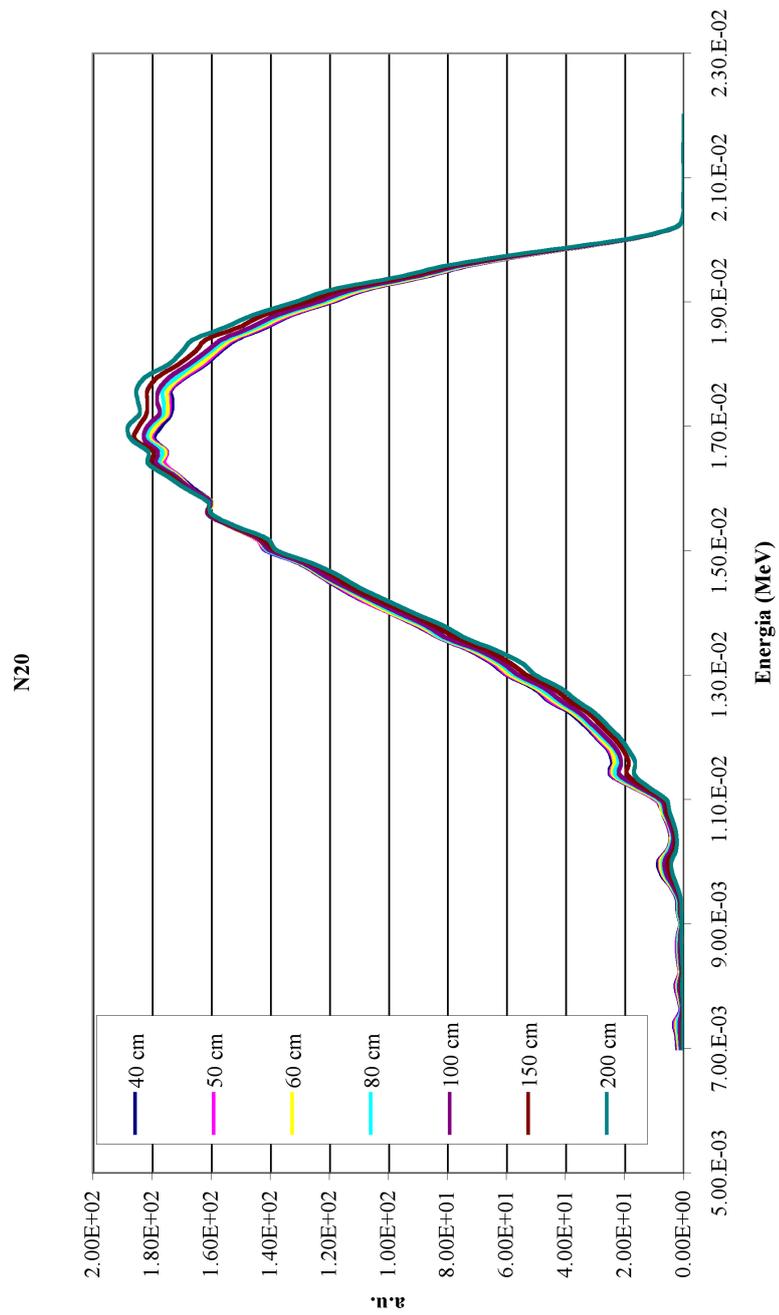


Figura 5.6: Spettro N20.

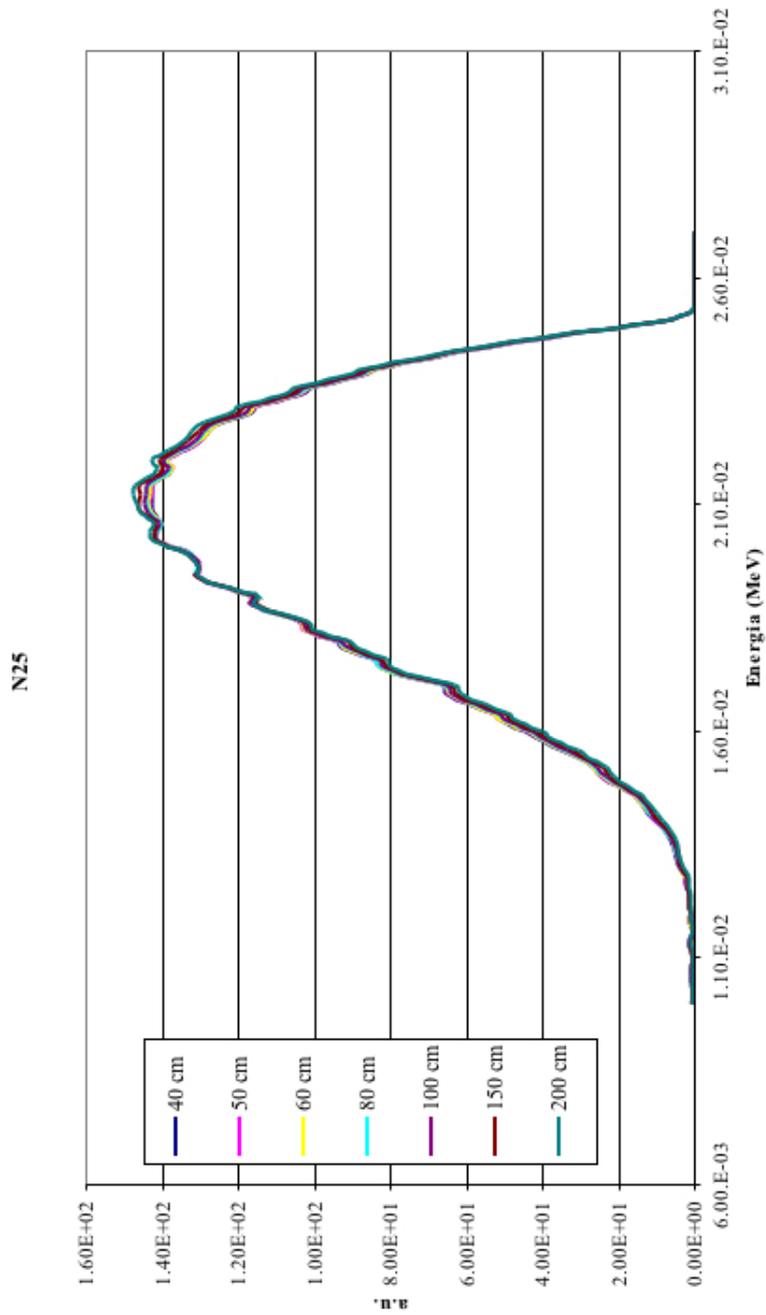


Figura 5.7: Spettro N25.

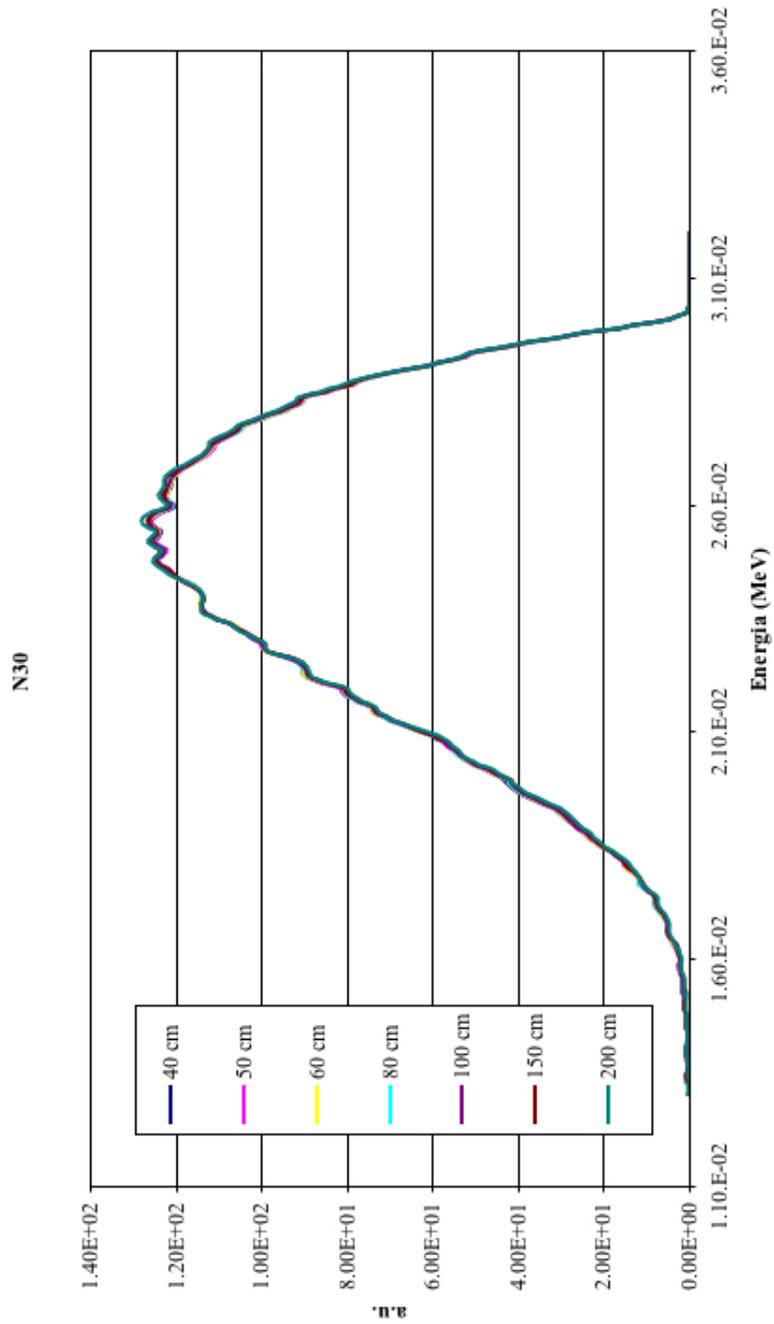
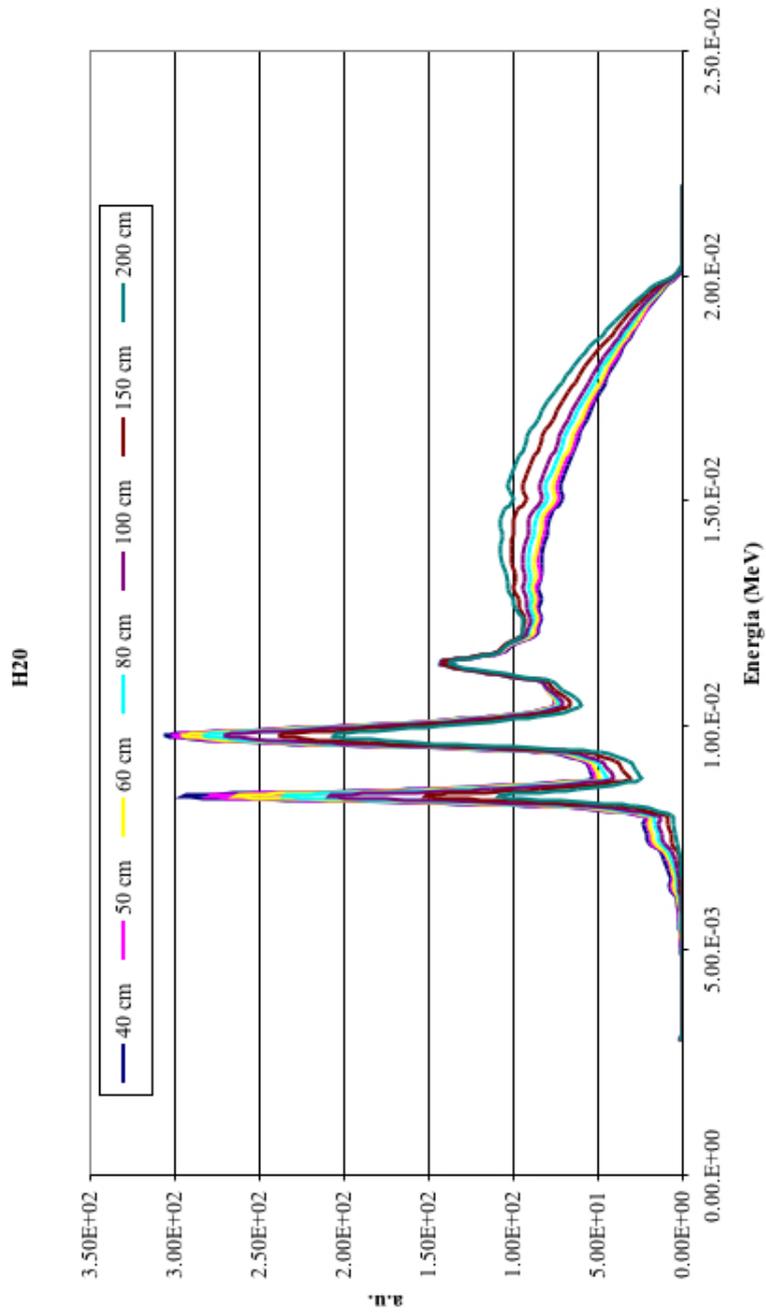


Figura 5.8: Spettro N30.

Figura 5.9: Spettro H<sub>2</sub>O.

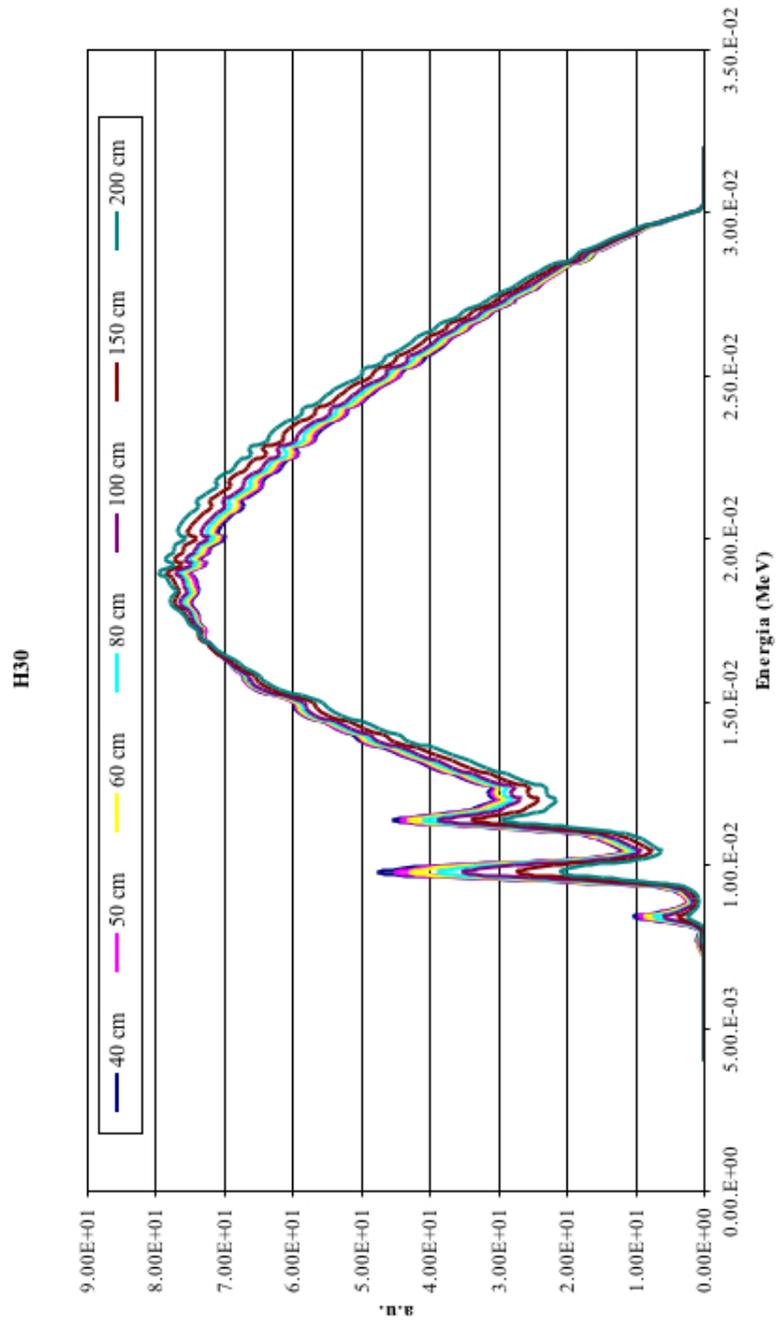


Figura 5.10: Spettro H30.

dall'ICRU per il controllo dell'irradiazione esterna, sono state innanzitutto suddivise in due categorie, rispettivamente al monitoraggio ambientale ed al monitoraggio individuale.

1. Le misure radioprotezionistiche in ambienti come le zone controllate o sorvegliate vengono effettuate per fornire una informazione a priori o a posteriori sul valore della dose equivalente assorbita da una persona che potrebbe trovarsi in quella zona. L'informazione fornita dalla misura deve perciò essere tale da consentire la conoscenza della dose equivalente che si avrebbe in quel dato campo di radiazione con la persona presente. E' noto infatti che la presenza della persona modifica in modo apprezzabile le caratteristiche del campo di radiazione esistente nella zona occupata. E' necessario quindi misurare una grandezza che sia definita in appropriati punti all'interno di un recettore adatto.

A tale riguardo l'ICRU raccomanda come fantoccio una sfera di 30 cm di diametro (sfera ICRU) di materiale equivalente al tessuto molle composto da 10,1% di idrogeno, 11,1% di carbonio, 2,6% di ossigeno e 76,2% di azoto, dove i componenti sono dati come frazione di densità atomica. La somma di queste dà l'effettiva densità del materiale teorico ( $1 \text{ g/cm}^3$ ).

La definizione delle grandezze raccomandate per il monitoraggio ambientale, richiede qualche precisazione preliminare riguardo al significato di alcuni termini.

Con la notazione di *campo espanso* si intende il campo di radiazione avente per tutto il volume di interesse, (la sfera ICRU), la stessa fluena di particelle, la stessa distribuzione angolare e la stessa distribuzione di energia del campo effettivamente presente nel punto di riferimento.

Si parlerà invece di *campo allineato ed espanso* quando, nel volume di interesse, si mantengono inalterate la fluena di particelle, mentre la distribuzione angolare del campo di radiazione viene assunta unidirezionale (allineamento).

Ciò premesso l'ICRU propone per scopi di monitoraggio ambientale l'*equivalente di dose ambiente*,  $H^*(d)$  e l'*equivalente di dose direzionale*,  $H'(d)$ .

La quantità  $H^*(10)$ , è definita come l'equivalente di dose in un punto del campo di radiazione che sarebbe prodotta dal corrispondente campo allineato ed espanso nella sfera ICRU alla profondità di 10 mm, sul raggio della sfera situato nella direzione opposta a quella del campo allineato. Il valore di  $H^*(10)$  risulta quindi indipendente dalla distribuzione angolare della radiazione incidente. Il sistema di rivelazione deve quindi essere isotropo.

La quantità  $H'(0,07; \vec{\Omega})$  è definita come l'equivalente di dose direzionale in un punto di un campo di radiazione che sarebbe prodotta dal corrispondente campo espanso nella sfera ICRU alla profondità di 0,07 mm, lungo un raggio della sfera situato in una specifica direzione. L'equivalente di dose direzionale è previsto per radiazioni debolmente penetranti per le quali non sarebbe corretto non considerare l'attenuazione che comporta una sovrastima dell'equivalente di dose agli organi superficiali. La grandezza  $H'(0,07; \vec{\Omega})$ , definita nella sfera ICRU per un campo di radiazioni soltanto espanso, a differenza di  $H^*(10)$ , viene a dipendere dalla distribuzione angolare della radiazione incidente. In particolare il valore di  $H'(0,07; \vec{\Omega})$  decresce all'aumentare dell'angolo della radiazione rispetto alla direzione di riferimento.

**Tabella 5.1:** *Fantocci di riferimento secondo le raccomandazioni ISO.*

Fantoccio di riferimento	Fantoccio ISO
Parallelepipedo 30 cm x 30 cm x 15 cm di tessuto ICRU (per corpo intero)	Parallelepipedo 30 cm x 30 cm x 15 cm di H <sub>2</sub> O con parete frontale di 0,25 cm di PMMA e le restanti di 1 cm di PMMA
Cilindro Ø 7,3 cm x 30 cm di tessuto ICRU (per polso e caviglia)	Cilindro Ø 7,3 cm x 30 cm di H <sub>2</sub> O con parete circolare di 0,25 cm di PMMA e basi di 1 cm di PMMA
Cilindro Ø 1,9 cm x 30 cm di tessuto ICRU (per dito)	Cilindro Ø 1,9 cm x 30 cm di PMMA

2. La grandezza operativa di riferimento per la dosimetria individuale è l'*Equivalente di Dose Personale*,  $H_p(d)$ , appropriata per radiazioni fortemente e debolmente penetranti, ed è definita come:

$H_p(d)$  = equivalente di dose in tessuto molle ad una profondità  $d$  sotto uno specificato punto del corpo.

L'equivalente di dose individuale  $H_p(d)$  deve includere la specificazione della profondità di riferimento (espressa in mm). Le profondità raccomandate per radiazioni debolmente penetranti sono 0,07 mm per la pelle e 3 mm per il cristallino, mentre 10 mm è la profondità raccomandata per radiazioni fortemente penetranti per il corpo intero.

L'equivalente di dose personale,  $H_p(d)$ , non è misurabile nel corpo, dove è definito, pertanto è stato introdotto un fantoccio a slab  $30 \times 30 \times 15$  cm<sup>3</sup> tessuto equivalente ICRU (76.2% O, 11,1% C, 10.1% H, 2.6% N) che simula il tronco del corpo. Nel caso della dosimetria per estremità sono stati introdotti fantocci cilindrici di dimensioni opportune per la simulazione delle dita delle mani e del polso. I valori di  $H_p(d)$  si determinano attraverso la "conversione" di valori misurabili di  $k_a$  o  $\Phi$ , con fattori di conversione calcolati con metodi Monte Carlo, con cui viene valutata la distribuzione di dose alle varie profondità stabilite nei fantocci di tipo teorico appropriati (Tabella 5.1).

## 5.4 Grandezze operative per la dosimetria individuale: problematiche legate alle basse energie

Per spettri a raggi X con tensioni inferiori a 30 kV ed in particolare in quegli spettri in cui sono presenti picchi caratteristici, il contributo predominante alla grandezza kerma in aria è dato dalla componente di più bassa energia [57]. Viceversa, il valore di equivalente di dose personale o ambientale ad una profondità di 10 mm,  $H_p(10)$ , è determinato dalla parte dello spettro ad alta energia. Di conseguenza, il valore del coefficiente di conversione tra queste due grandezze dipende in modo critico dall'esatta forma dello spettro incidente sul punto di calibrazione. L'applicazione dei coefficienti di conversione standard per tipologia di spettro potrebbe portare ad una errata calibrazione, in quanto lo spettro ad un ipotetico punto di calibrazione potrebbe non essere necessariamente identico a quello usato nella determinazione dei coefficienti di conversione stessi. La maggiore discrepanza fra i valori di  $\frac{H_p}{k_a}$  tabulati in letteratura e quelli calcolati

nelle condizioni reali di impiego è riscontrato per spettri di fasci X filtrati con tensioni inferiori a 10 kV, per i quali anche un metro di aria tra la sorgente ed il punto di calibrazione può causare un aumento del 100% nel valore del coefficiente di conversione. E' nella norma invece, per spettri di energie medie superiori, riscontrare, nei valori dei coefficienti di conversione, variazioni dell'ordine del 5% da attribuirsi alle tensioni applicate, alla filtrazione addizionale e non ultimo alle possibili fluttuazioni della densità dell'aria, funzione della temperatura e pressione.

Nelle pubblicazioni ICRP 74, nei rapporti ICRU 57 e ICRU 51 [14] e nella ISO 4037-3 [5] sono tabulate le serie dei coefficienti di conversione monoenergetici da kerma in aria alle grandezze operazionali  $H_p(d,E)/k_a$ , ambientali e direzionali  $H^*(10,E)/k_a$ , e  $H'(0,07,E)/k_a$ , per energie superiori a 10 keV. Gli spettri, impiegati nella determinazione dell'influenza sulla distribuzione spettrale dello spessore di aria sono stati usati successivamente per ottenere i coefficienti di conversione da kerma in aria alle grandezze operative, ambientale e direzionali per energie inferiori a 10 keV, necessari per la determinazione degli stessi sugli spettri ricostruiti.

Il calcolo dei coefficienti di conversione può essere effettuato soltanto per mezzo di simulazioni Monte Carlo che consentono una rappresentazione dettagliata sia del fantoccio (corpo umano, sfera ICRU o eventuali altri fantocci semplificati) che delle relative condizioni di irraggiamento.

In questo caso, in accordo con le raccomandazioni ICRU, è stato simulato un fantoccio a slab teorico-4 elementi  $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$  con fotoni di energia  $E_{ph} = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$  e 10 keV ed angoli  $\alpha = 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$  e  $80^\circ$ .

Considerando che in letteratura sono riportati i coefficienti di conversione monoenergetici per energie superiori a 10 keV, i calcoli Monte Carlo hanno permesso di ottenere i valori di equivalente di dose personale per unità di fluena,  $\frac{H_p}{\phi}$ .

Come è ben visibile in figura 5.11, alle energie sotto i 20 keV la pendenza della curva che descrive il coefficiente di conversione  $\frac{H_p}{k_a}$  è molto pronunciata. Perciò un piccolo cambiamento nello spettro dei fotoni (ad esempio causato da un diverso spessore di aria interposto) può comportare una significativa variazione nel coefficiente associato al fascio in esame.

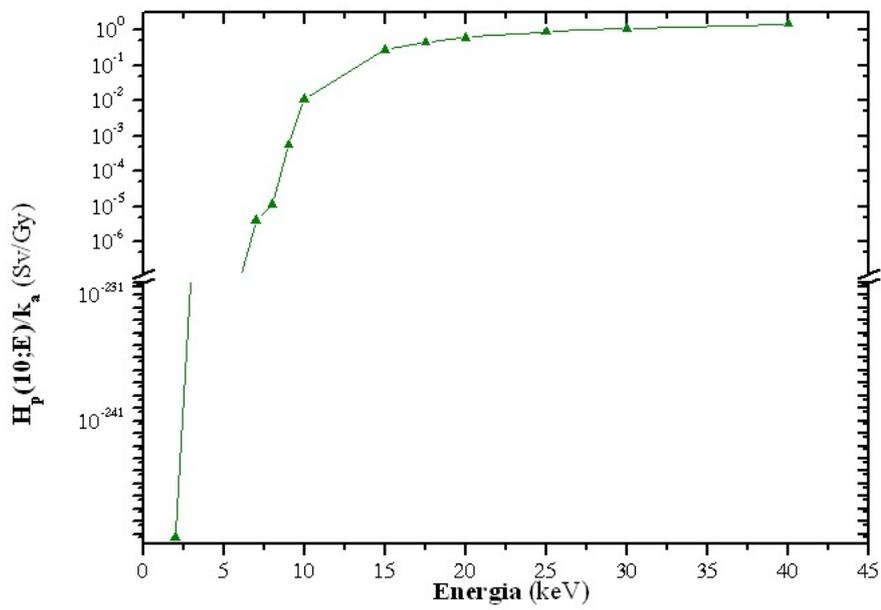


Figura 5.11: Andamento del coefficiente di conversione monoenergetico in aria  $H_p(10; E)/k_a$  in Sv/Gy.

## Capitolo 6

# Qualificazione della catena spettrometrica

### 6.1 Introduzione

In questo capitolo è discussa la qualificazione della catena spettrometrica, in modo particolare è dato rilievo allo studio effettuato mediante simulazione numerica per determinare la curva di efficienza del rivelatore.

La curva di efficienza di un rivelatore al germanio può infatti essere determinata, per una geometria specifica ed un intervallo di energia fissato, sia sperimentalmente, usando sorgenti standard di calibrazione, sia mediante simulazioni numeriche.

Nel campo della metrologia di bassa energia risulta però essere molto difficile ottenere buoni risultati sperimentalmente nella determinazione di tale curva, in quanto la variazione dell'efficienza in funzione dell'energia è molto elevata.

E' stato quindi necessaria una modellazione del rivelatore nelle reali condizioni di impiego ed una analisi parametrica per conoscere l'esatto spessore dello strato morto (*dead layer*) non trascurabile per tali energie e generalmente non fornito dalla casa costruttrice [41].

### 6.2 La catena di acquisizione

La catena spettrometrica utilizzata è composta da: un rivelatore al germanio iperpuro (HPGe) di tipo Ultra LEGE (Ultra Low Energy GERmanium) completo di preamplificatore e di un elaboratore digitale di segnali (Digital Signal Processor, DSP) detto DSA-1000 che sostituisce l'accoppiata amplificatore - convertitore analogico digitale (Analog to Digital Converter - ADC) al fine di ridurre tempi di raccolta altrimenti lunghi ed ottimizzare l'elaborazione degli impulsi.

L'unità DSA-1000 rappresenta una innovazione nel settore della spettrometria gamma: essa infatti realizza la digitalizzazione del segnale in uscita dal preamplificatore con un ADC molto veloce. Il segnale digitalizzato viene poi elaborato dal processore DSP con una funzione trapezoidale simmetrica e

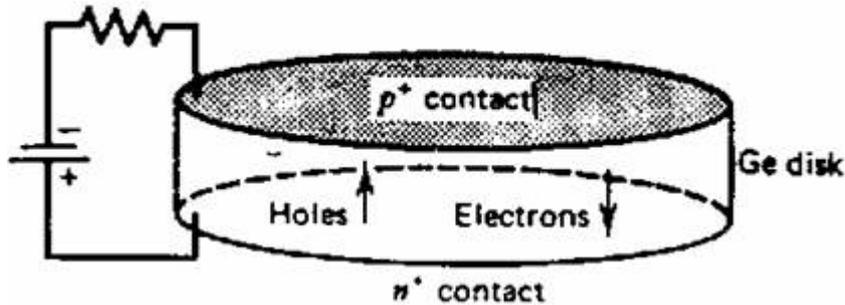


Figura 6.1: Rivelatore al Ge di tipo planare.

quasi-ideale. L'adozione della funzione trapezoidale implica minor tempo di elaborazione rispetto quella semi-gaussiana a parità di risoluzione (oppure consente migliore risoluzione a parità di tempo di elaborazione). Ciò permette un minore tempo morto, minore *pile-up* e più conteggi, oppure maggiore risoluzione.

La messa a punto dello spettrometro ha costituito una significativa parte del lavoro in quanto le condizioni in cui viene effettuata la misura ed il dominio energetico considerato comportano numerosi problemi sia di posizionamento, di centratura del rivelatore rispetto al fascio di radiazione ed al banco ottico sia di scelta degli opportuni diaframmi al fine di eliminare problemi di saturazione del rivelatore a causa degli alti ratei.

La dinamica del DSP è stata fissata a 2048 canali con una amplificazione regolata in modo da ottenere una conversione di 30 eV/canale circa e visualizzare sullo spettro l'intervallo energetico di interesse comprendente, ovviamente, le energie di emissione gamma dei radionuclidi impiegati nella calibrazione in energia ed efficienza del rivelatore. L'intervallo energetico totale ottenuto risulta compreso tra 0 e 60 keV, sufficientemente ampio per visualizzare gli spettri considerati.

Sono stati inoltre considerati il tempo di formazione dell'impulso (*shaping time*), la regolazione di cancellazione automatica di polo-zero ed il ripristino della linea di base di picco (*baseline restore*) in quanto non esistono procedure standard da seguire che impongano valori o intervalli precisi di impostazione dei suddetti parametri.

### 6.3 Il rivelatore al Germanio iperpuro (HPGe)

I rivelatori al germanio iperpuro (HPGe) sono rivelatori a semiconduttore di produzione relativamente recente. L'inconveniente di questo tipo di rivelatore riguarda l'alto grado di purezza necessario al suo funzionamento. Attualmente si è riusciti a realizzare cristalli con bassissime concentrazioni di impurezze (fino a  $10^8$  atomi/cm<sup>3</sup>) tali da ottenere una buona zona di svuotamento (*depletion layer*). Un rivelatore a Ge del tipo planare, si può ottenere a forma di disco, come mostrato in Figura 6.1.

Su di uno strato di Ge-n viene generata una barriera di potenziale attraverso

un contatto con un materiale di tipo p. La barriera viene polarizzata in modo inverso con il generatore. Per creare all'interno del cristallo una zona compensata il più ampia possibile, è necessario applicare una tensione di polarizzazione inversa rispetto ai contatti elettrici del cristallo (n+ e p+). Il contatto n+ si crea diffondendo ioni di litio all'interno della superficie del cristallo, mentre quello p+ si ottiene impiantando ioni di boro sulla superficie del cristallo. Il processo di diffusione del litio crea una zona di spessore considerevole, pari a circa 700  $\mu\text{m}$  mentre l'impianto di boro crea uno spessore di soli 0,3  $\mu\text{m}$ . L'impianto di tali contatti provoca la formazione di una zona, detta strato morto (*dead layer*). L'energia depositata in questa regione dalla radiazione incidente non crea alcuna carica e pertanto si perde tale informazione che non contribuisce alla risposta. La determinazione dello spessore dello strato morto è stato oggetto di uno approfondito studio, in quanto, nel dominio energetico di interesse, anche uno spessore di poche decine di micron provoca una attenuazione non trascurabile della radiazione.

I rivelatori HPGe possono avere due diverse configurazioni geometriche: planari o cilindrico coassiali. In Figura 6.2 sono schematizzati alcuni rivelatori in configurazione planare e coassiale e la suddivisione degli stessi in base agli intervalli di energia di impiego. La temperatura di lavoro è approssimativamente 77 K (temperatura corrispondente all'azoto liquido usato come refrigerante).

Il rivelatore usato è un rivelatore al germanio a stato solido iperpuro di tipo Ultra LEGE in configurazione planare prodotto dalla Canberra connesso ad un piccolo criostato portatile atto a contenere l'azoto liquido necessario a raffreddare sia il cristallo di Ge sia l'elettronica costituita dal FET del preamplificatore (Figura 6.3). Il cristallo ha un diametro ed uno spessore rispettivamente di 8,5 mm e 5 mm. Sulla finestra di ingresso è presente un collimatore ad anello di Al di spessore pari a 0,5 mm e diametro di 6,5 mm. Il cristallo è montato ad una distanza di 5 mm dalla finestra di spessore pari a 25,4  $\mu\text{m}$ . Le caratteristiche generali del rivelatore e criostato sono riassunte in Tabella 6.1.

**Tabella 6.1:** *Caratteristiche generali del rivelatore al Germanio.*

Tipo	Ultra LEGE
Superficie attiva	30 mm <sup>2</sup>
Spessore	5 mm
Risoluzione	140 eV a 5,9 keV 550 eV a 122 keV
Finestra di berillio (Be)	8 $\mu\text{m}$
Criostato portatile	Big MAC-Five Day*

\*peso: 7,9 kg (vuoto); 13,6 kg (pieno)

capacità LN<sub>2</sub>: 7 l

durata: 5 gg

tempo di raffreddamento: 2 h

La finestra di entrata della radiazione è composta di uno strato sottile di berillio che consente di operare alle basse energie con elevata efficienza.

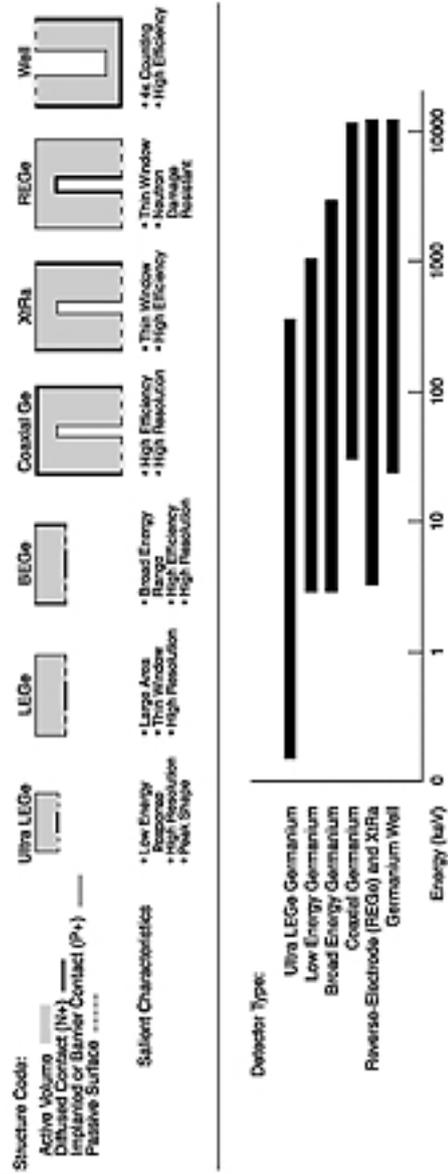


Figura 6.2: Diverse configurazioni geometriche di rivelatori al germanio. Intervalli di energia di impiego.

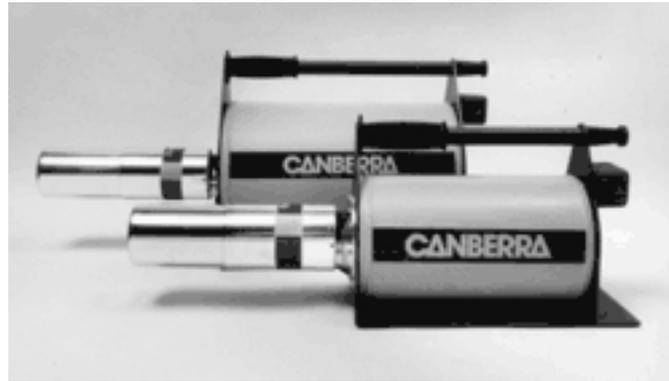


Figura 6.3: Vista del rivelatore al germanio e criostato.

## 6.4 Perché un rivelatore al Germanio Ultra LEGE?

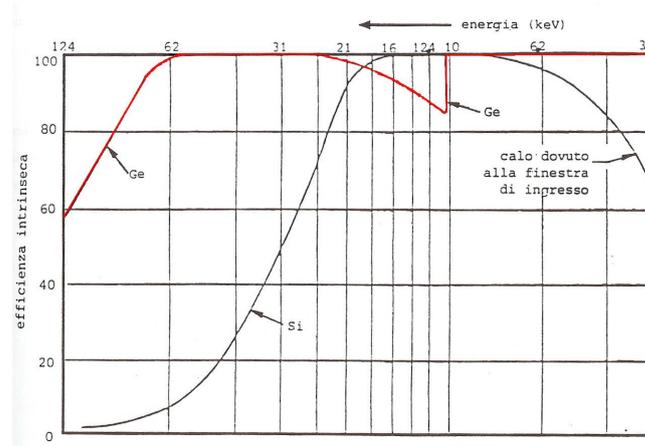
La rivelazione di radiazioni elettromagnetiche richiede l'impiego di rivelatori opportuni alle varie energie [31].

Se ad esempio si è interessati alla rivelazione delle radiazioni gamma con energie di centinaia di keV o superiori è necessario utilizzare il germanio, il cui numero atomico  $Z$  superiore ( $Z=32$  Ge,  $Z=14$  Si) assicura un netto aumento della probabilità di interazione per una fissata geometria.

Qualora le radiazioni da rivelare siano di energia molto bassa, dell'ordine delle decine di keV, il materiale più idoneo è il silicio, che assicura anche in piccoli spessori un'efficienza intrinseca prossima al 100%.

Il valore elevato del coefficiente di interazione del germanio nella zona da 11 a 20 keV fa sì che pressochè tutte le interazioni avvengano nel primo strato del rivelatore e quindi la radiazione X di riassetamento dell'atomo di germanio che ha subito un effetto fotoelettrico ha una probabilità non trascurabile di fuoriuscire dalla zona sensibile. In questo caso l'impulso contribuisce al picco di fuga (*escape peak*) che ha una energia pari a 9,9 keV. L'efficienza di rivelazione nel picco principale ha pertanto un brusco calo a partire da 11,1 keV che è l'energia  $E_K$  di legame dell'elettrone K nel germanio. Nel caso di un rivelatore al silicio l'energia  $E_K$  è di 1,84 keV, quindi in un intervallo energetico di minore interesse. Inoltre le interazioni nel silicio sono distribuite maggiormente in profondità e quindi il fenomeno della fuga del quanto di riassetamento è poco importante.

E' evidente che un rivelatore per energie molto basse deve possedere una finestra di ingresso estremamente sottile e quindi molto delicata per non causare una forte attenuazione del fascio prima del suo ingresso nel rivelatore. La figura 6.4 mostra l'efficienza intrinseca di un rivelatore al germanio e di un rivelatore al silicio al variare dell'energia, in cui l'effetto della finestra è importante per energie inferiori a 10 keV.



**Figura 6.4:** Andamento dell'efficienza intrinseca di rivelazione per rivelatori di silicio e di germanio con la stessa geometria (piana, con spessore  $d=5$  mm).

A partire da 11,1 keV si ha una depressione nell'efficienza del germanio dovuto al fenomeno dell'escape ma ad energie superiori l'efficienza del germanio si mantiene nettamente più elevata di quella del silicio. Per diversi motivi, tra cui la disponibilità di germanio di purezza elevata e la possibilità di conservare i rivelatori a temperatura ambiente, si è sempre più diffuso l'impiego di rivelatori di germanio, cosiddetti Ultra LEGE, in grado di rivelare con efficienze ragionevoli radiazioni da pochi keV a centinaia di keV. Unico problema del loro impiego è tenere conto sempre del fenomeno dell'escape, come si vedrà nella procedura di ricostruzione degli spettri. [25]

## 6.5 Calibrazione del sistema di acquisizione

Prima di iniziare le misure sui fasci X di bassa energia, già caratterizzati con il metodo dosimetrico, sono stati acquisiti spettri di sorgenti radioattive per la calibrazione in energia ed efficienza ed, in seguito, per eseguire controlli periodici nelle varie giornate di misura onde evitare di acquisire spettri che presentassero parametri non uniformi. In Tabella 6.2 sono riportate le sorgenti di riferimento usate nella calibrazione con le relative caratteristiche spettrometriche.

Le sorgenti sono del tipo Amersham X.245<sup>1</sup> montate su di un supporto in plastica di spessore pari a 0,5 mm (Figura 6.5).

### 6.5.1 Calibrazione in energia

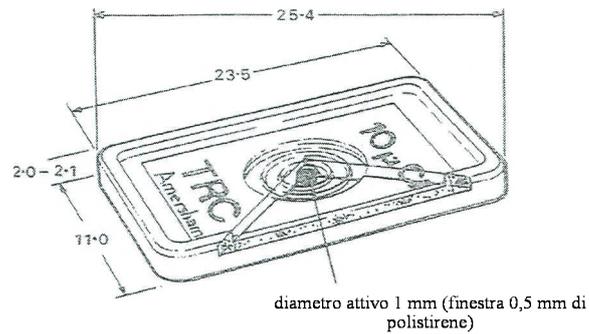
Sfruttando le sorgenti Amersham, le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 6.2, si è proceduto alla taratura in energia del sistema. Le sorgenti sono state posizionate su di un supporto autocentrante a due diverse distanze dal rivelatore (6 cm e 12 cm in modo da assicurare la riproducibilità del sistema) [45]. Si è poi proceduto ad acquisire gli spettri e all'analisi dei relativi picchi. Il software GENIE2000 di "emulazione multicanale" consente l'acquisizione degli spettri e

<sup>1</sup>Sorgenti puntiformi elettrodeposte della dimensione di 1 mm sigillate.

**Tabella 6.2:** *Principali caratteristiche delle sorgenti di raggi gamma impiegate nella calibrazione del sistema di rivelazione.*

<b>Sorgenti</b>	<b>Attività*, kBq</b>	<b>Emissione gamma, keV</b>	<b>Probabilità di emissione, %</b>
<sup>241</sup> Am	441 ± 5%	13.93	13.2
		17.74	18.61
		20.80	4.82
		26.35	2.4
	59.54	35.9	
<sup>133</sup> Ba	60.6 ± 5%	30.625 (k <sub>α2</sub> )	35.1
		30.973 (k <sub>α1</sub> )	64.3
		34.92 (k <sub>β3</sub> )	6.09
		34.987 (k <sub>β1</sub> )	11.8
		35.818 (k <sub>β2</sub> )	3.64
	53.1625	2.199	
<sup>137</sup> Cs	194 ± 5%	31.817 (k <sub>α2</sub> )	1.96
		32.194 (k <sub>α1</sub> )	3.58
		36.304 (k <sub>β3</sub> )	0.342
		36.378 (k <sub>β1</sub> )	0.66
		37.255 (k <sub>β2</sub> )	0.209
<sup>55</sup> Fe	64.6 ± (-5% ÷ +30%)	5.888 (k <sub>α2</sub> )	8.2
		5.898 (k <sub>α1</sub> )	16.2
		6.49 (k <sub>β3</sub> )	0.96
		6.49 (k <sub>β1</sub> )	1.89

\* Le attività si riferiscono ad un certificato del 1-2-1976 (Am, Ba, Cs) e del 1-12-1992 (Fe).



**Figura 6.5:** *Sorgente tipo X.245 (dimensioni in mm).*

la loro manipolazione. Il programma localizza il centroide dei picchi e stabilisce una corrispondenza canale-energia per ognuno di questi. Le relazioni canale-energia del centroide analizzate sono riportate nel report di calibrazione (Figura 6.6).

Da una analisi dei dati si è ottenuta una relazione sia lineare sia quadratica (Fig. 6.7). E' possibile osservare che è sufficiente una interpolazione lineare essendo nella regressione polinomiale il contributo di secondo grado dell'ordine di  $10^{-8}$  circa [22].

```

*****
***** ENERGY CALIBRATION REPORT *****
*****
Detector Name: LEGE1
Sample Title: 5 d= 50 cm

***** ENERGY CALIBRATION COEFFICIENTS *****
Energy Calibrate Performed on: 23/12/2005 15.56.22
by:
Energy Calibrate Type: POLY
Energy (keV) = -0.035 + 0.031*ch + -2.27E-008*ch^2 + 0.00E+000*ch^3

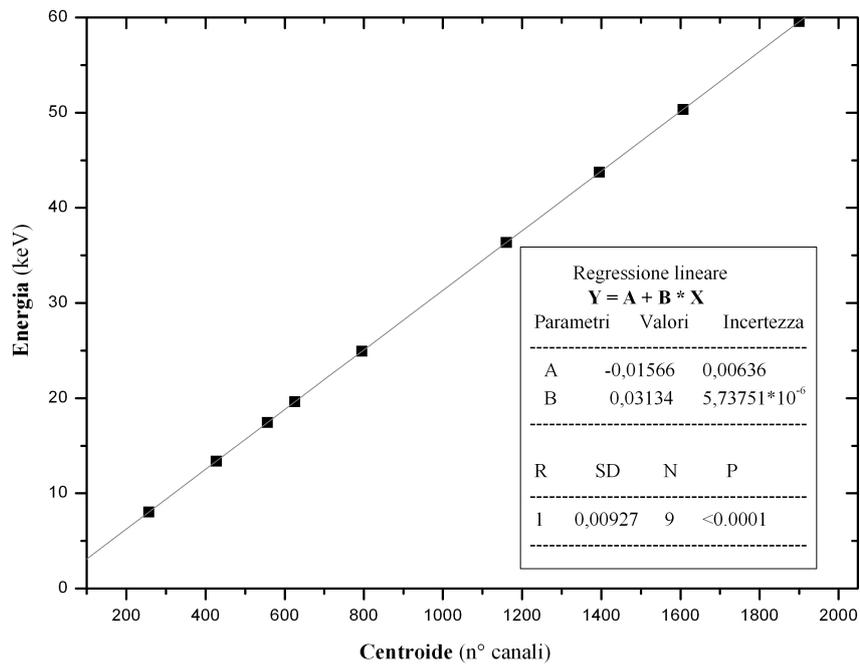
***** SHAPE CALIBRATION COEFFICIENTS *****
Shape Calibrate Performed on: 23/12/2005 15.56.22
by:
FWHM = 0.029 + 0.042*E^1/2
LOW TAIL = 8.3E-002 + 3.7E-003*E

***** ENERGY CALIBRATION RESULTS TABLE *****
Centroid Centroid Energy
Channel error (keV )
257.28 0.05 8.04
427.29 0.00 13.38
557.01 0.00 17.44
626.05 0.00 19.60
795.51 0.00 24.93
1160.25 0.00 36.35
1395.59 0.00 43.74
1606.58 0.00 50.33
1900.37 0.00 59.54

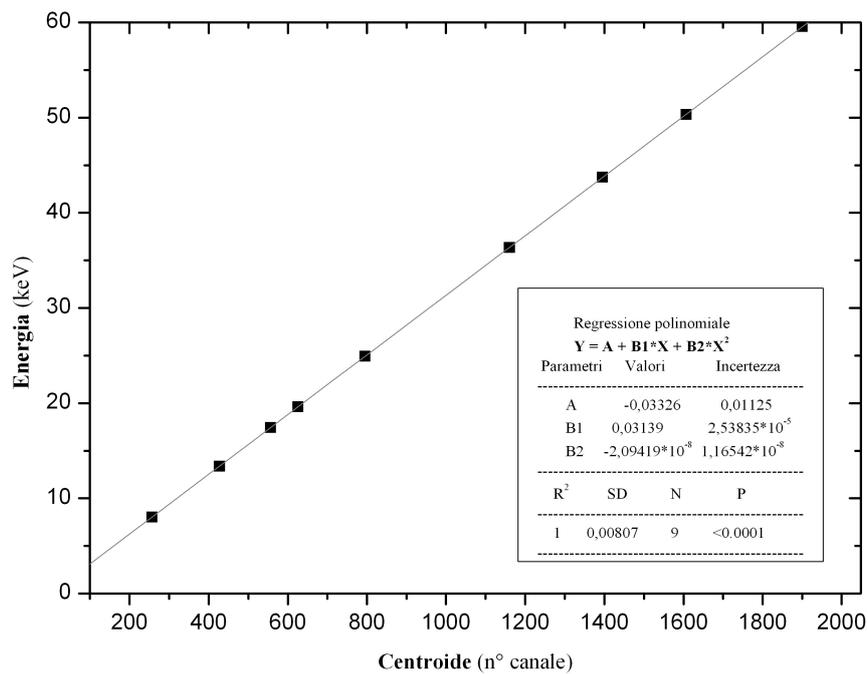
***** SHAPE CALIBRATION RESULTS TABLE *****
Energy FWHM FWHM TAIL TAIL
(keV ) channels error channels error
8.04 4.74 0.11 3.59 0.50
13.38 6.15 0.00 4.17 0.00
17.44 7.45 0.00 5.97 0.00
19.60 7.17 0.00 7.89 0.00
24.93 6.85 0.00 4.59 0.00
36.35 9.27 0.00 6.73 0.00
43.74 8.60 0.00 5.56 0.00
50.33 12.03 0.00 10.76 0.00
59.54 10.64 0.00 9.08 0.00

```

Figura 6.6: Report della calibrazione in energia del sistema di acquisizione.



(a)



(b)

**Figura 6.7:** a) Calibrazione in energia - regressione lineare.  
 b) Calibrazione in energia - regressione polinomiale.

### 6.5.2 La risoluzione in energia

La risoluzione energetica, ossia la capacità di distinguere nel modo migliore tra due valori di energia diversi ma molto prossimi, è un parametro molto importante in spettrometria. Se il rivelatore avesse una risposta alla radiazione incidente simile ad una delta di Dirac, fosse cioè un picco di larghezza nulla, qualsiasi differenza di energia sarebbe rivelabile. Purtroppo non è questo il caso reale. Infatti a causa delle fluttuazioni sul numero medio di eventi di ionizzazione ed eccitazione prodotti per una data energia incidente, la risposta avrà una larghezza finita. Possiamo allora definire la risoluzione  $R$  come  $\Delta E/E$ . Essa viene generalmente data in termini di larghezza totale  $\Delta E$  misurata a metà altezza in corrispondenza del massimo,  $E$  (FWHM, *Full Width Half Maximum*).

L'ampiezza a metà altezza può essere generalizzata mediante la seguente formula:

$$FWHM = a + b\sqrt{E + cE^2} \quad (6.1)$$

Nel caso in esame, i valori di questi parametri (calcolati mediante il software GENIE2000) sono i seguenti:

$$FWHM = 0,029 + 0,042 \cdot \sqrt{E}$$

con  $a = 0,029$ ,  $b = 0,042$  e  $c = 0$ .

### 6.5.3 Calibrazione in efficienza

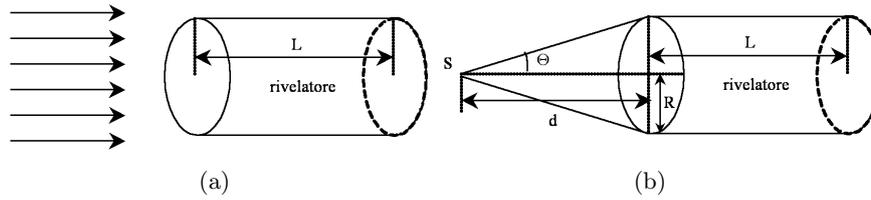
In letteratura [18] sono riportate quattro tipi diverse di efficienza:

1. Efficienza totale del rivelatore
2. Efficienza del picco di assorbimento totale (*full-peak*)
3. Efficienza del picco di doppia fuga (*double escape-peak*)
4. Efficienza del picco di singola fuga (*single escape-peak*)

Tutte e quattro le efficienze sopra elencate possono essere intrinseche, assolute o relative.

L'efficienza totale intrinseca di un rivelatore è definita come la probabilità che un gamma di energia,  $E$ , incidente sul rivelatore contribuisca alla risposta. La geometria assunta per il calcolo o la misura di questa efficienza è riportata in Figura 6.8(a).

L'efficienza totale assoluta è definita come la probabilità che un gamma emesso da una sorgente,  $S$ , sia contata nel rivelatore (Fig. 6.8(b)). L'efficienza intrinseca dipende dall'energia della radiazione gamma e dalle dimensioni del rivelatore mentre l'efficienza totale dipende oltre che dall'energia e dalla dimensione del rivelatore, dal raggio dello stesso e dalla distanza sorgente-rivelatore. Di conseguenza l'efficienza totale è definita come il prodotto tra la percentuale dei fotoni che raggiungono il rivelatore rispetto al totale dei fotoni emessi dalla



**Figura 6.8:** a) Geometria assunta nella definizione dell'efficienza intrinseca.  
b) Geometria assunta nella definizione dell'efficienza assoluta.

sorgente (efficienza geometrica) e la geometria di raccolta (ovvero l'angolo solido sotto cui il rivelatore vede la sorgente).

L'efficienza del picco di assorbimento totale è definita come:

$$efficienza\ full\ peak = \frac{conteggi\ full\ peak}{conteggi\ totali} \quad (6.2)$$

Al punto 3 e 4 si fa riferimento ad efficienze significative per  $E > 1,5$  MeV non contemplate in questo studio. L'efficienza relativa è definita come rapporto tra efficienza totale e efficienza standard di riferimento.

Poichè l'efficienza di raccolta di un rivelatore non è né costante su tutto l'intervallo energetico considerato né del 100%, ovvero non tutti i fotoni emessi da una sorgente risultano contribuire alla risposta, è necessario determinare una curva che evidenzi l'andamento del parametro efficienza,  $\varepsilon$ , in funzione dell'energia, dove:

$$\varepsilon = \frac{\gamma_{raccolti}}{\gamma_{emessi}}$$

La funzione di efficienza di full peak [33] è stata determinata sperimentalmente mediante l'uso di sorgenti sigillate Amersham  $^{55}\text{Fe}$ ,  $^{241}\text{Am}$  e  $^{133}\text{Ba}$  e applicando la seguente equazione.

$$\varepsilon = \frac{n}{t \cdot P_{\gamma}(E) \cdot N_0 \cdot \exp^{-\lambda t_d}} \quad (6.3)$$

dove

$n$  è l'area netta sotto il full peak di energia  $E$ ;

$t$  è il tempo di conteggio;

$P_{\gamma}(E)$  probabilità di emissione di radiazione  $\gamma$  di energia  $E$ ;

$N_0$  è l'attività della sorgente (Bequerel);

$\lambda$  è la costante di decadimento =  $\ln 2/T_{1/2}$ ;

$T_{1/2}$  è la vita media del radionuclide;

$t_d$  è il tempo di decadimento.

I risultati ottenuti sperimentalmente sono riportati in Tabella 6.3.

Tabella 6.3: Verifica sperimentale dell'efficienza del rivelatore per diverse energie.

Radionuclide	E (keV)	Probabilità Emissione (%)	$\gamma$ emessi (gamma/s)	$\gamma$ raccolti (gamma/s)	Efficienza full peak ( $Y_{raccolti}/Y_{emessi}$ )
$^{55}\text{Fe}$	5,89	24,4	15763 (-5%+30%)	0,472 $\pm$ 0,7%	2,9 $\cdot$ 10 <sup>-5</sup> (-5%+30%)
	6,49	2,85	1841 (-5%+30%)	0,1068 $\pm$ 1,4%	5,8 $\cdot$ 10 <sup>-5</sup> (-5%+30%)
$^{241}\text{Am}$	13,9	13,2	58174 $\pm$ 2909	21,7 $\pm$ 0,3%	3,7 $\cdot$ 10 <sup>-4</sup> $\pm$ 5%
	26,34	2,4	10577 $\pm$ 529	7,5 $\pm$ 0,6%	7,1 $\cdot$ 10 <sup>-4</sup> $\pm$ 5%
	33,196	0,119	524 $\pm$ 26	0,395 $\pm$ 2,5%	7,5 $\cdot$ 10 <sup>-4</sup> $\pm$ 5,6%
$^{133}\text{Ba}$	59,54	35,7	157335 $\pm$ 7867	138,5 $\pm$ 0,1%	8,8 $\cdot$ 10 <sup>-4</sup> $\pm$ 5%
	53,1625	2,199	1333 $\pm$ 67	1,32 $\pm$ 1,4%	9,9 $\cdot$ 10 <sup>-4</sup> $\pm$ 5,2%

## 6.6 Funzione della modellazione Monte Carlo nello studio dei campi di radiazione fotonica

E' necessario premettere che gli studi condotti nella presente tesi sono stati in gran parte centrati su misure sperimentali allo scopo di acquisire secondo standard metrologici gli spettri X di bassa energia in esame e di definirne le quantità dosimetriche associate allo scopo di utilizzarle per la calibrazione di strumentazione di radioprotezione.

A supporto di queste analisi sperimentali è però di grande importanza potere disporre di un adeguato strumento di simulazione numerica, tipicamente basato sul metodo Monte Carlo, che consenta di valutare parametri essenziali allo studio e comunque non determinabili sperimentalmente.

A tale scopo si è optato per l'uso del codice Monte Carlo MCNP (versione 4-C) [58], sviluppato presso i laboratori di Los Alamos, che da diversi anni viene impiegato presso l'Istituto di radioprotezione dell'ENEA nei diversi campi della dosimetria.

Il codice, che si basa su operatori di algebra booleana per la descrizione di geometrie di notevole complessità (dispone di funzioni spaziali fino al quarto ordine, torii) è provvisto di librerie di sezioni d'urto per fotoni, neutroni ed elettroni e dispone di un significativo supporto grafico che permette di analizzare le geometrie descritte. Il codice, provvisto di una efficace interfaccia-utente, è in grado di simulare il trasporto della radiazione fotonica da sorgenti di diversa complessità attraverso regioni dello spazio nelle quali è possibile individuare punti, porzioni di superficie o volumi entro cui ricavare risposte di interesse per lo studio condotto.

Nello specifico, per citare gli estimatori utilizzati nel presente studio (il codice dispone di una vasta serie di risposte che possono essere calcolate oltre a quelle usate nel presente lavoro), elenchiamo:

1. fluenza di fotoni,  $\Phi(E)$ , che si ottiene attraverso un estimatore di conteggi di attraversamenti di una data superficie ("boundary crossing tally", F2) o attraverso la valutazione delle lunghezze di traccia in un dato volume ("track-length tally", F4). E' possibile calcolare la dipendenza energetica della fluenza, cioè il suo spettro. Tale estimatore è stato fondamentale nella valutazione degli spettri di bassa energia alle diverse distanze dalla sorgente radiogena.
2. estimatore dello spettro dei conteggi in un rivelatore ("pulse height estimator", F8). Tale estimatore permette di riprodurre, date le caratteristiche fisiche di un rivelatore (ad esempio NaI o HPGe) la distribuzione degli impulsi in una predefinita scansione energetica che simula quella di un analizzatore multicanale. Tale estimatore è stato largamente impiegato per valutare l'efficienza del rivelatore al germanio impiegato e per calcolarne la matrice risposta in una scansione energetica molto fine (250 eV/canale). I parametri fisici necessari per completare l'operazione di ricostruzione degli spettri degli impulsi acquisiti sperimentalmente tramite una tecnica

di stripping sono stati in parte determinati attraverso simulazioni Monte Carlo.

In generale lo strumento modellistico si è rivelato di particolare utilità per l'accuratezza dello studio condotto.

### 6.6.1 Studio della geometria del rivelatore

Nel campo della metrologia di bassa energia risulta essere molto difficile ottenere buoni risultati nella determinazione sperimentale della curva di efficienza di rivelazione, in quanto la variazione della stessa nell'intervallo energetico considerato è molto elevata, in modo particolare sotto i 10 keV.

Per caratterizzare il rivelatore in termini di efficienza ed anche a validazione di quanto ottenuto mediante sorgenti elettro-depositate è stato necessario sviluppare un modello Monte Carlo dello stesso.

Grazie alle informazioni reperite sui certificati forniti dalla casa costruttrice si è definita una regione spaziale per simulare la capsula esterna di alluminio contenente il cristallo, una per il germanio e non ultima una per la finestra di berillio. Non avendo a disposizione informazioni dettagliate riguardo lo spessore dello strato morto del rivelatore, all'interno del germanio si sono inoltre simulati un certo numero di spessori; quindi si è fatta l'assunzione che lo spessore corrispondente ad una curva di efficienza calcolata che meglio si adatta ai valori ottenuti sperimentalmente corrisponda allo spessore dello strato morto del rivelatore. In figura 6.9 è riportata la geometria MCNP 4C impiegata per i calcoli dell'efficienza del rivelatore in funzione della variazione dello spessore dello strato morto:  $0,1 \mu m$ ,  $0,3 \mu m$ ,  $1 \mu m$ ,  $2 \mu m$ ,  $3 \mu m$ ,  $4 \mu m$ ,  $5 \mu m$ ,  $7 \mu m$ ,  $10 \mu m$ ,  $13 \mu m$  e  $15 \mu m$ .

Una particella emessa dalla sorgente di radiazione ha una certa probabilità di depositare nel cristallo tutta la sua energia. Ciò dipenderà dall'energia stessa nonché dalle dimensioni e dal tipo di rivelatore. Nel caso in cui l'impulso registrato dal sistema rivelatore-analizzatore multicanale non corrispondesse all'energia del fotone incidente, per ottenere la reale distribuzione è necessario effettuare correzioni che dipendono dallo spessore dello strato morto, dalla finestra di berillio e dallo spessore d'aria tra fuoco e punto di misura.

Il primo passo per ottenere lo spettro reale, prodotto dalla sorgente di raggi X, consiste nell'ottenere la distribuzione degli impulsi (PHD) registrata dal rivelatore. Il programma MCNP 4C dispone di un estimatore F8 che permette di ottenere tale distribuzione.

In figura 6.10 è riportata la geometria del rivelatore e della sorgente radioattiva impiegata per ottenere la curva di efficienza e la funzione risposta del rivelatore, ottenuta con il programma SABRINA, che permette una visualizzazione 3D del sistema utilizzato.

In figura 6.11 sono mostrati due spaccati con il particolare della finestra di berillio (giallo) il cui spessore è tale da rendere minimi gli assorbimenti delle famiglie di radiazioni considerate.

Infine, in figura 6.12 è riportato un esempio delle traiettorie delle particelle simulate con questo modello.

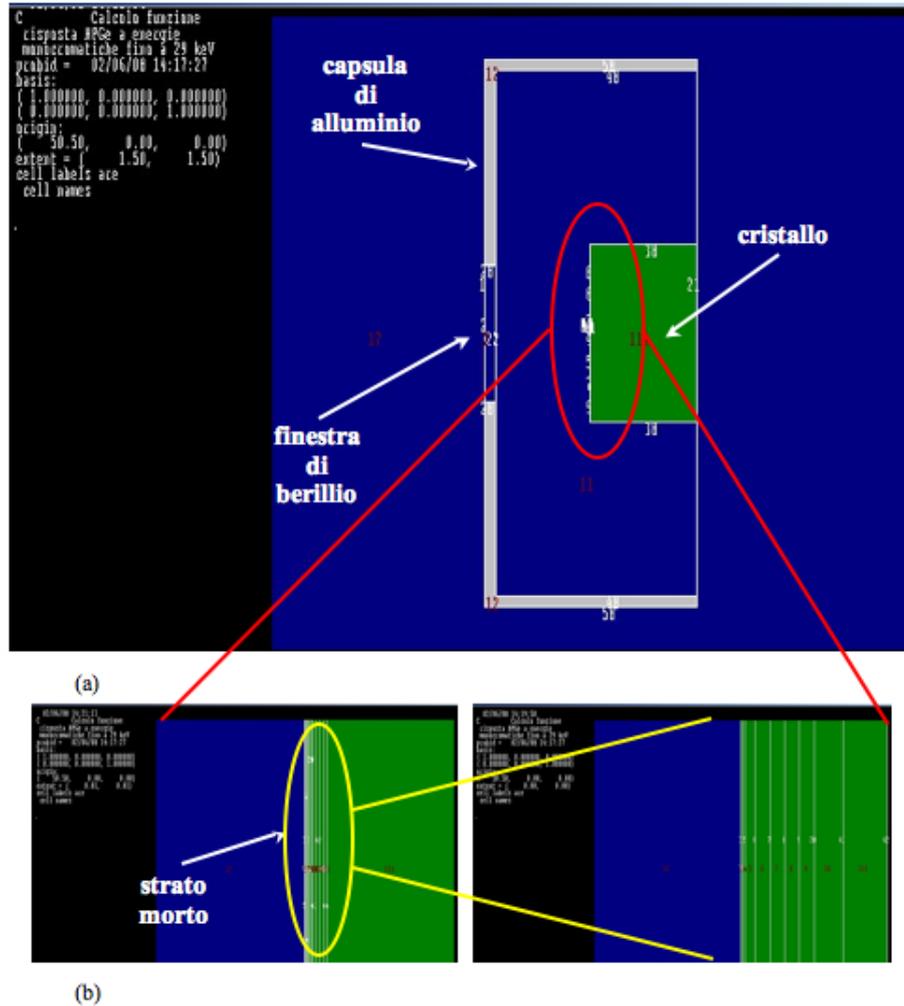
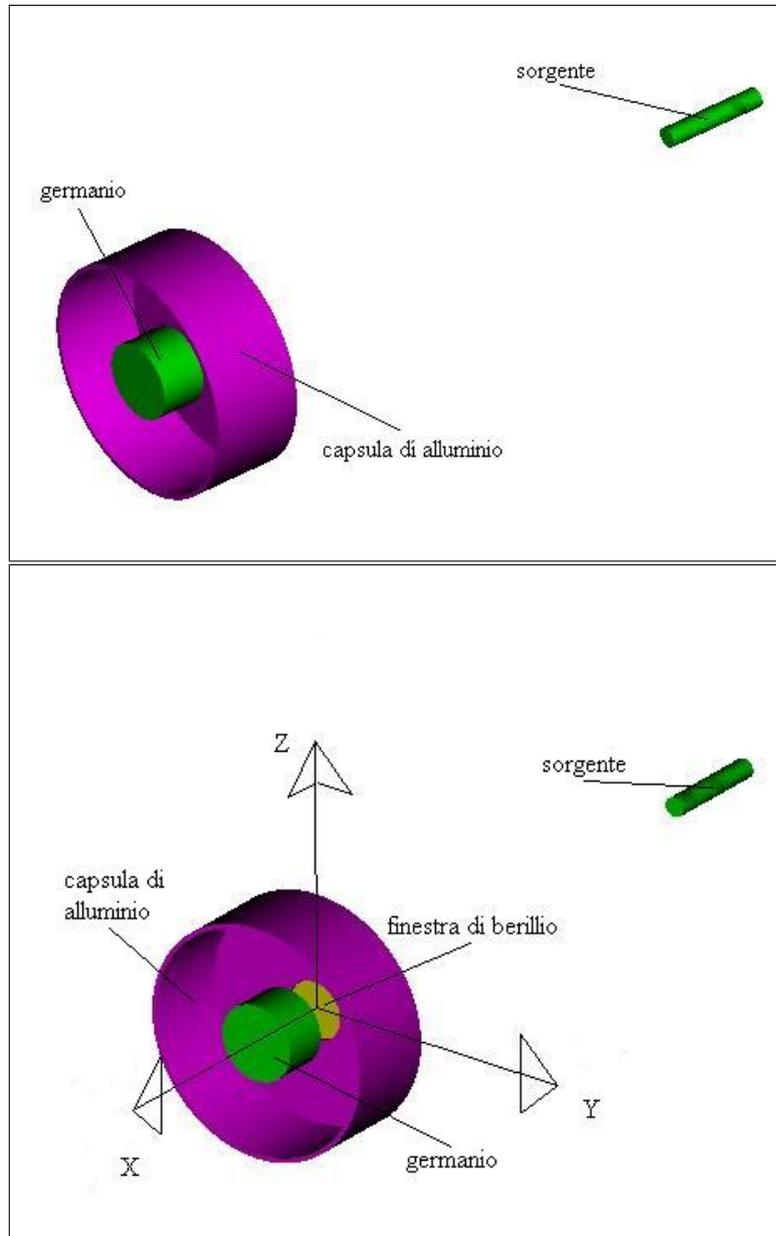


Figura 6.9: a) Sezione del rivelatore ottenuta con MCNP 4C.  
b) Particolari degli strati morti considerati per i calcoli dell'efficienza di rivelazione.



**Figura 6.10:** Particolari della geometria del rivelatore e della sorgente impiegata per il calcolo della funzione risposta del sistema di rivelazione utilizzato.

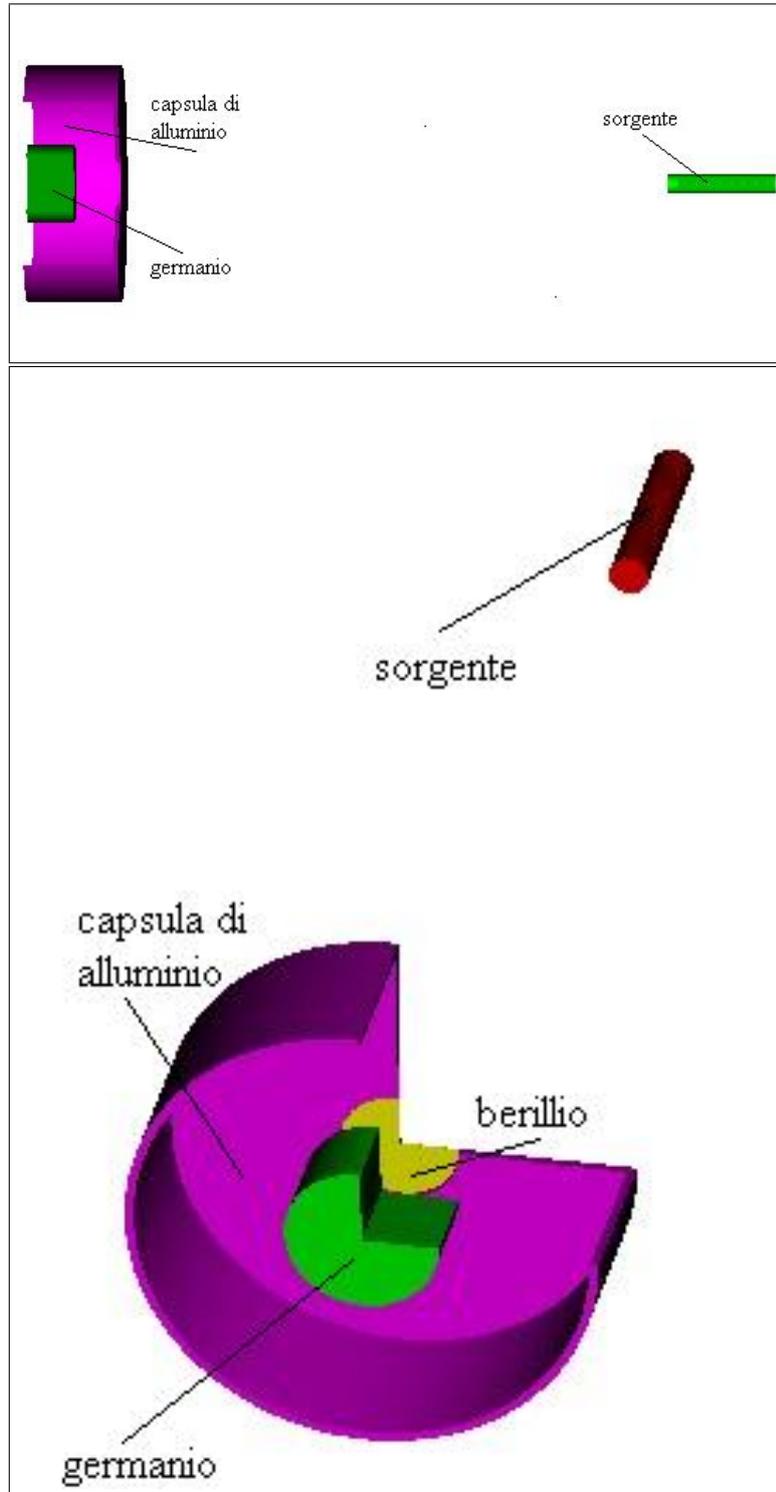
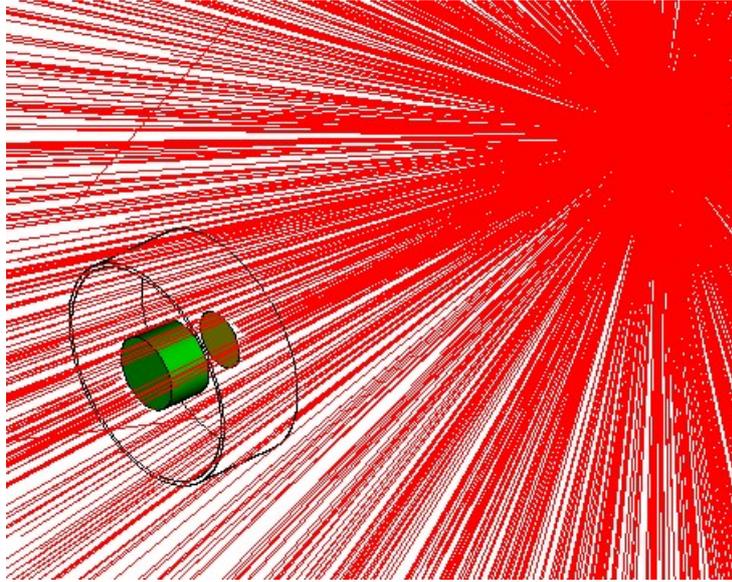


Figura 6.11: Spaccati della geometria con particolare della finestra di berillio e della posizione del cristallo rispetto alla stessa.



**Figura 6.12:** *Esempio delle traiettorie delle particelle all'ingresso del rivelatore.*

Non avendo a disposizione informazioni dettagliate dalla casa costruttrice sullo spessore dello strato morto si è effettuato uno studio parametrico, andando ad esaminare la risposta in efficienza del rivelatore in funzione dell'energia della radiazione incidente.

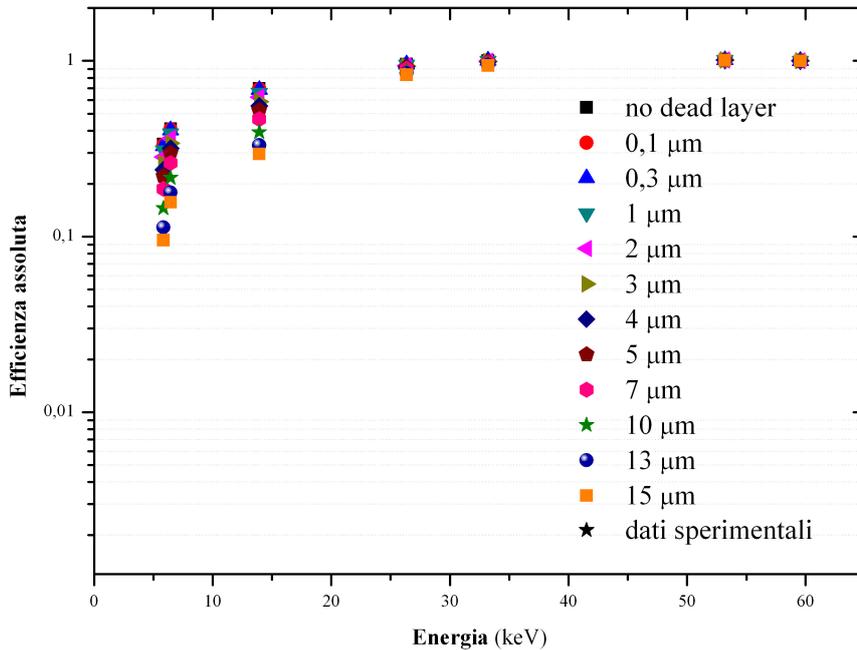
### 6.6.2 Determinazione Monte Carlo della curva di efficienza e dello spessore dello strato morto (dead layer) del rivelatore

Numerosi sono i laboratori che hanno impiegato ed impiegano tutt'ora simulazioni numeriche per ottenere la funzione risposta ad un flusso di fotoni di un rivelatore irraggiato con fotoni.

Storicamente, i primi furono ricercatori come Wainio e Knoll (1966) che usarono il codice Monte Carlo per la determinazione della curva di efficienza di full-peak (FEPE), mentre altri ottennero buoni risultati confrontando i dati sperimentali ottenuti con interpolazioni semi-empiriche (Owens, 1989; Kamboj e Kahn, 1994). Bronson e Wang (1996) riportarono un'esaustiva descrizione sull'uso del codice Monte Carlo N-Particle (MCNP) nella determinazione dell'efficienza calcolata a diverse geometrie e distanze sorgente-rivelatore [21].

L'importanza di utilizzare il codice Monte Carlo nasce dal fatto che è fondamentale, nella ricostruzione degli spettri X, la conoscenza di una curva di efficienza ottenuta in funzione di punti energetici monocromatici, altrimenti non ottenibili sperimentalmente, se non introducendo forti semplificazioni. I problemi incontrati sono dovuti alle informazioni insufficienti fornite dalla casa costruttrice in relazione alle caratteristiche del rivelatore fornito.

Sono state calcolate diverse curve di efficienza al variare dello spessore dello strato morto (Figura 6.13). I risultati ottenuti dalle simulazioni sono stati



**Figura 6.13:** Curve di efficienza simulate e sperimentali al variare dello spessore dello strato morto del rivelatore HPGc.

confrontati con i dati sperimentali ottenuti con le sorgenti di  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{133}\text{Ba}$  e  $^{55}\text{Fe}$ . Il migliore accordo tra i dati sperimentali e quelli ottenuti dalla simulazione è stato ottenuto per uno spessore dello strato morto compreso tra 7 e 10  $\mu\text{m}$ . Il risultato si discosta in modo significativo da quanto indicato dalla casa costruttrice.

In Figura 6.14 è riportato il rapporto tra il valore di efficienza simulato e misurato sperimentalmente al variare dello spessore dello strato morto. È evidente come tale rapporto si avvicini ad uno all'interno delle incertezze per spessori compresi fra 7 e 10  $\mu\text{m}$ .

I dati ottenuti sperimentalmente sono affetti da incertezze dell'ordine di  $\pm 5\%$ . In Figura 6.15 si riportano i valori dei dati sperimentali e la curva di efficienza ottenuta dalla simulazione numerica. L'intervallo di energia della simulazione è compreso fra 1 keV (energia di cut-off del Monte Carlo) e 60 keV. È possibile osservare il buon accordo tra i valori sperimentali e quelli ottenuti dal calcolo.

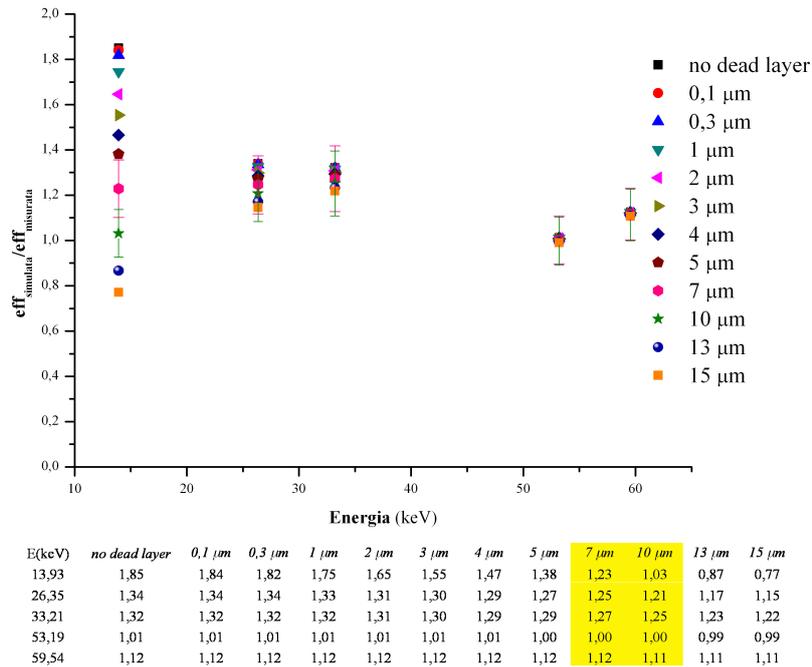


Figura 6.14: Rapporto tra l'efficienza di rivelazione simulata e misurata sperimentalmente per diversi spessori di dead layer.

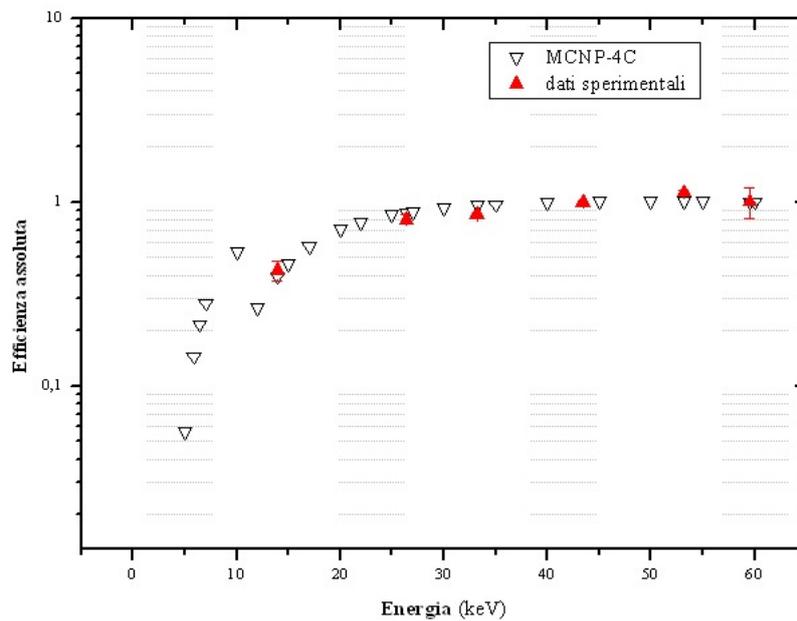


Figura 6.15: Confronto tra i dati sperimentali e la curva ottenuta dalla simulazione per lo strato morto scelto.

## 6.7 Acquisizione degli spettri RX sperimentali

Una volta effettuata la calibrazione in energia ed efficienza del sistema di misura si è proceduto all'acquisizione degli spettri. Il fascio prodotto dal tubo a raggi X è collimato con una serie di diaframmi posizionati prima e dopo la camera monitor tali da produrre un fascio di 8 cm di diametro a 50 cm di distanza dal fuoco del tubo e di 32 cm di diametro a 200 cm di distanza. Davanti alla superficie del rivelatore sono stati posizionati due diaframmi disassati in piombo con diametro risultante di circa 0,1 mm. Tale collimatore ha il compito di ridurre il numero di fotoni entranti nel rivelatore e di eliminare effetti di *pile-up* e di radiazione diffusa. I fasci laser posti sul banco ottico sono stati utilizzati per allineare il diaframma e l'intero sistema spettrometrico sull'asse del fascio.

Le misure di spettro degli impulsi sono state effettuate a due diverse distanze già più volte menzionate. La corrente del tubo è stata posta a 0,1 mA al fine di rendere nulli i conteggi dovuti al *pile-up*. A monte di ogni acquisizione di spettro è stata effettuata una misura di fondo.

I dati spettrali sono stati pre-elaborati onde ridurre il rumore elettronico ed esaltare le differenze fra gli spettri. Il metodo che è stato applicato per ottenere un filtro di smoothing delle distribuzioni acquisite è quello di Savitzky-Golay [24] con 5 punti di smoothing. Questo metodo è il migliore per rimuovere dagli spettri il rumore presente mantenendo la forma del segnale.

Un tipico filtro digitale di una serie di dati

$$f_i \equiv f(t_i), t_i = t_0 + i\Delta, \Delta = \text{passo del campionamento} \quad (6.4)$$

sostituisce ogni  $f_i$  con un'opportuna combinazione lineare di elementi della serie

$$g_i = \sum_{n=-N_l}^{N_r} c_n \cdot f_{i+n} \quad (6.5)$$

dove  $N_l$  e  $N_r$  sono rispettivamente il numero di elementi della serie precedenti e successivi all' $i$ -esimo, per una finestra di valori  $[f_{i-N_l}, f_{i+N_r}]$ . Viene così prodotta una nuova serie  $g_i$  che costituisce la serie filtrata.

La scelta più semplice dei coefficienti è prenderli uguali alla costante  $c_n = (N_l + N_r + 1)^{-1}$ , che significa porre  $g_i$  uguale alla media di  $f_i$  sulla finestra  $[f_{i-N_l}, f_{i+N_r}]$ . Il vantaggio di tale scelta, talvolta detta *Moving Window Averaging*, consiste nella proprietà di invarianza del momento zero (l'area sotto il grafico) e del momento primo (la media) se  $N_r = N_l$ , nella trasformazione  $f \rightarrow g$ . I limiti di questa scelta sono invece la modifica dei momenti di ordine superiore: ad esempio applicare un Moving Window Averaging nell'intorno di un massimo locale  $f_M$  comporta sicuramente la riduzione del massimo nella serie filtrata ovvero  $g_M \leq f_M$ , e intuitivamente l'appiattimento e l'allargamento della funzione  $g$  rispetto alla funzione  $f$ .

Una scelta diversa dei coefficienti  $c_n$  che preservi i momenti di ordine superiore è l'idea base dei *Savitzky-Golay smoothing filters* che è stato utilizzato per ogni spettro ed in modo particolare in quelli che presentavano picchi (picchi caratteristici).

I Savitzsky Golay smoothing filters invece di utilizzare in ogni finestra un polinomio di grado zero (la costante) utilizzano polinomi di grado  $M$  (in generale  $M=2$  o  $M=4$ ): per ogni punto  $f_i$  si determina il polinomio  $p_i^M$  per mezzo del fit dei minimi quadrati sui valori della nestra  $[f_{i-N_l}, f_{i+N_r}]$ , e si pone

$$g_i = p_i^M(i) \quad (6.6)$$

Il valore del polinomio viene calcolato solamente nel punto  $i$ -esimo; per il punto  $(i+1)$ -esimo viene calcolato un nuovo polinomio  $p_{i+1}^M$ .

Anche se questo procedimento sembra molto dispendioso algebricamente, il fit dei minimi quadrati coinvolge solamente inversioni di matrici, e genera quindi i coefficienti polinomiali  $a_j$  come combinazione lineare delle  $f_k$  nella nestra  $[f_{i-N_l}, f_{i+N_r}]$ . Naturalmente questo assicura l'esistenza di un insieme  $c_n$  per il quale la serie filtrata

$$g_i = p_i^M(i) = \sum_{k=0}^M c_n \cdot f_{n+1} \quad (6.7)$$

viene formata mediante elementi adiacenti della serie originale e automaticamente genera i coefficienti del polinomio soddisfacente il fit.

Mediante il polinomio  $a_0 + a_1 i + a_2 i^2 + \dots + a_M i^M$  otteniamo la seguente espressione per i coefficienti  $c_n$  e  $a_j$ :

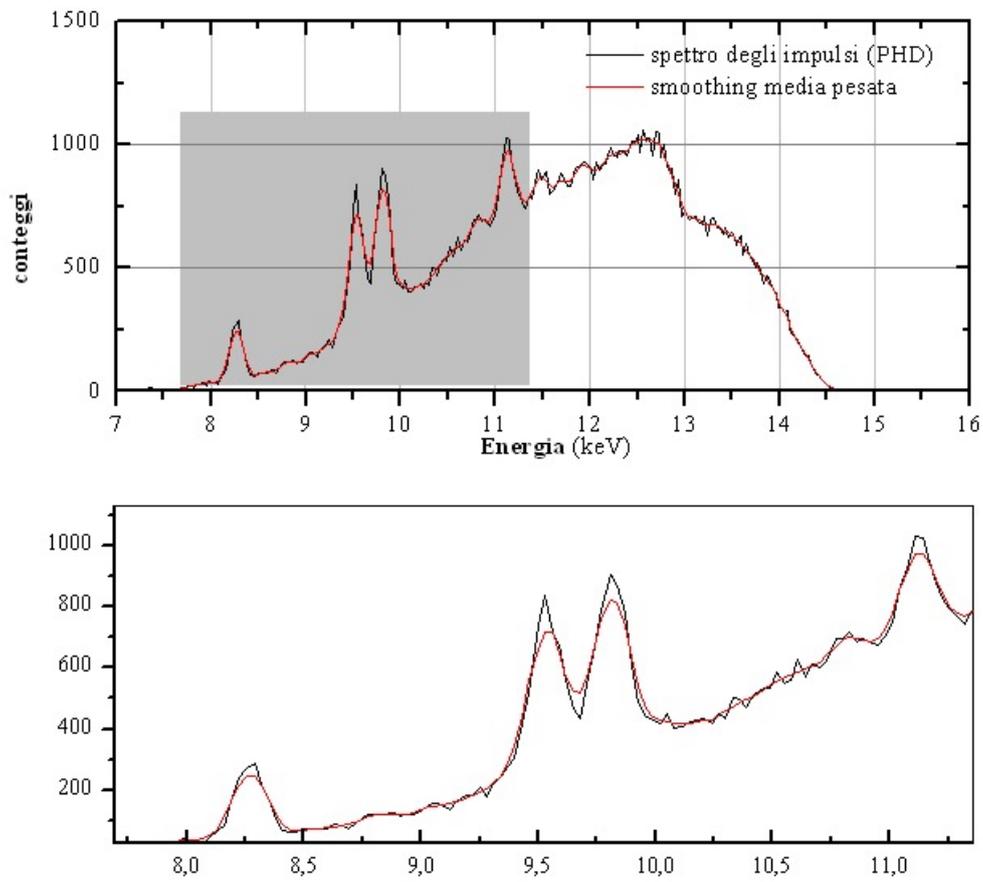
$$c_n = \sum_{k=0}^M (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})_{0k}^{-1} \cdot n_k \quad (6.8)$$

$$\mathbf{a} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{f}) \quad (6.9)$$

dove  $\mathbf{A}_{ji} = j^l$ ;  $j = -N_l, \dots, N_r$ ;  $l = 0, \dots, M$ ;  $\mathbf{a}_l = a_l$ ;  $\mathbf{f}_k = f_k$ .

Quanto riportato sopra è molto evidente in Figura 6.16 e 6.17 dove è messo a confronto lo smoothing su di uno stesso spettro ottenuto con un filtro di media mobile pesato (Moving Window Averaging) ed un filtro di smoothing di Savitzky-Golay. E' evidente come applicando una semplice operazione di media mobile si perdano le informazioni realtive ai picchi di fluorescenza pur eliminando il rumore.

Gli spettri degli impulsi acquisiti, con  $E_{\max}$  inferiore a 60 keV, e dopo l'applicazione del filtro di Savitzky-Golay (ottenuto con un software commerciale ORIGIN 8) sono riportati in Appendice A.



**Figura 6.16:** Fascio N15 ottenuto applicando uno smoothing di media pesata.

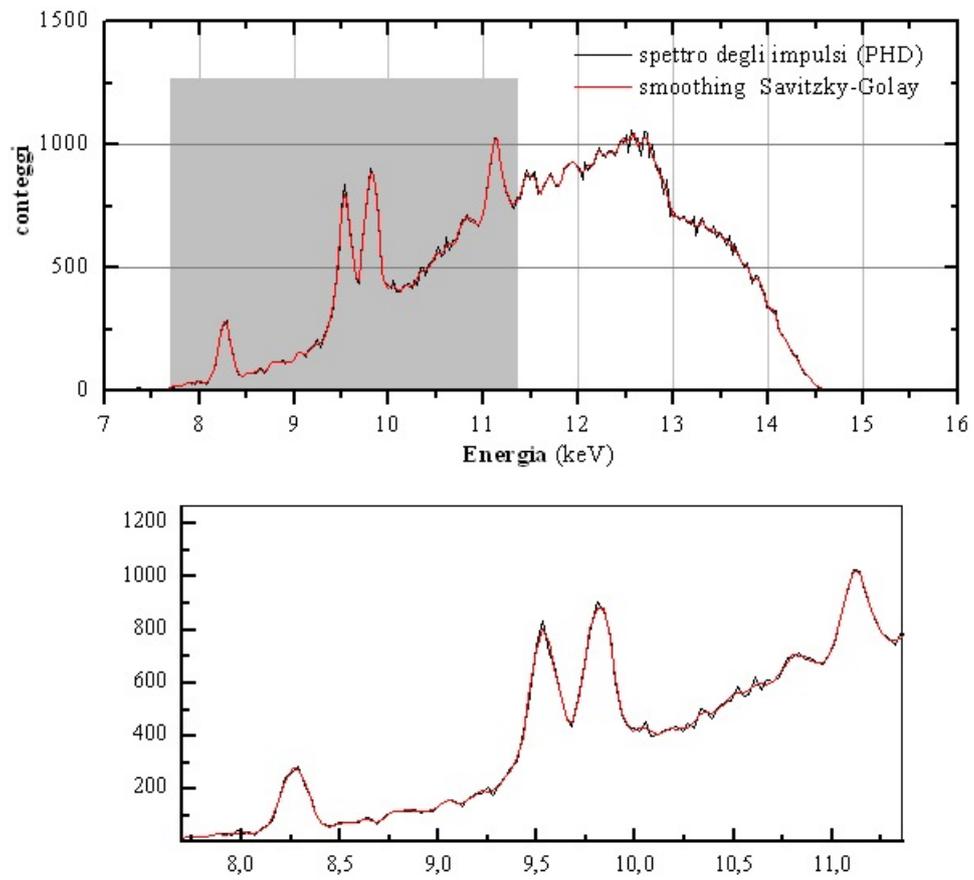


Figura 6.17: Fascio N15 ottenuto applicando un filtro *fi* Savitzky-Golay.

## Capitolo 7

# Ricostruzione dello spettro di raggi X primario

### 7.1 Introduzione

Il risultato di una misura spettrometrica è dato dalla distribuzione dello spettro degli impulsi. Come è noto i raggi gamma cedono la loro energia al rivelatore principalmente secondo i tre effetti: fotoelettrico, diffusione Compton e creazione di coppie. La prevalenza dell'uno e dell'altro dipende essenzialmente dall'energia dei quanti incidenti [18].

Per energie inferiori a 300 keV le correzioni da applicare al fine di ottenere lo spettro fotonico incidente sul rivelatore sono: le correzioni per il picco di fuga K del rivelatore al germanio e per la diffusione Compton.

In letteratura, numerosi sono i laboratori che hanno riportato misure di spettri a raggi X ottenuti con rivelatori del tipo NaI(Tl) o Ge (HPGe). Come riportato nei paragrafi precedenti, le caratteristiche dell'impianto radiologico come filtrazione, tensione applicata al tubo a raggi X, materiale componente l'anodo, spessore e materiale della finestra del tubo vanno ad influire sulla forma della distribuzione dello spettro. Per ricostruire il reale spettro incidente sul rivelatore è necessario applicare specifiche procedure di deconvoluzione dello spettro o *stripping* canale per canale [26, 29].

### 7.2 Interazione delle radiazioni elettromagnetiche

Le radiazioni elettromagnetiche di interesse in questo lavoro sono comprese da 1 keV a 60 keV

Il risultato diretto di una misura spettrometrica consiste di una distribuzione degli impulsi e non di uno spettro fotonico. Per capire la differenza di tale affermazione, è necessario considerare le possibili interazioni di un fotone incidente sul rivelatore [34, 38].

1. **Assorbimento fotoelettrico:** consiste nell'interazione di un fotone con un elettrone orbitale che ha come conseguenza il completo assorbimento del fotone e l'espulsione dell'elettrone con un'energia cinetica  $T_{el} = h\nu -$

Tabella 7.1: Righe di fluorescenza caratteristiche del germanio.

Energia (keV)	Elemento	Linee caratteristiche	Intensità Relativa (%)	Media pesata (keV)
9,8553	<sup>32</sup> Ge	K $\alpha_2$	51	9,876
9,8864	<sup>32</sup> Ge	K $\alpha_1$	100	
10,978	<sup>32</sup> Ge	K $\beta_3$	6	10,982
10,9821	<sup>32</sup> Ge	K $\beta_1$	60	

$E_{leg}$ . A seconda delle dimensioni e del tipo di rivelatore utilizzato ci possono essere diverse situazioni:

- (a) Il fotone incidente deposita completamente la sua energia all'interno del rivelatore (non si produce un fotone di fluorescenza o non viene assorbito da successive interazioni fotoelettriche).
- (b) Il fotone non è assorbito all'interno del volume del rivelatore al momento dell'interazione in quanto la sua energia è associata ad un fotone che si produce ed esce dal rivelatore. In questo caso il fotone incidente è contato con una energia inferiore pari a  $E = E_0 - E_k$  dove  $E_0$  e  $E_k$  sono rispettivamente le energie del fotone incidente e dei fotoni k che escono dal rivelatore. La probabilità che si formi un picco di fuga con un rivelatore al Ge è piuttosto alta (dal 20% al 3%) nell'intervallo energetico fra 11-35 keV a causa del piccolo spessore medio di penetrazione dei fotoni a queste energie. Questi spessori sono comparabili con i percorsi medi dei fotoni corrispondenti alle energie delle righe caratteristiche del Ge (circa 10 keV) (Tabella 7.1).

2. **Diffusione incoerente (Compton) e coerente (Rayleigh):** da un punto di vista sperimentale l'effetto Compton consiste nell'interazione di un fascio di radiazione elettromagnetica con un materiale dal quale la radiazione viene diffusa con energie inferiori e decrescenti al crescere dell'angolo di diffusione. Il fenomeno è immediatamente interpretabile come il risultato dell'interazione dei singoli fotoni con gli elettroni del mezzo, che possono essere considerati liberi e la loro energia di legame è molto inferiore all'energia dei fotoni. Se poi l'interazione avviene con elettroni molto legati, il fotone viene diffuso elasticamente con energia quasi inalterata. A questo fenomeno si dà il nome di **effetto Rayleigh**: è molto importante nella pratica solo a basse energie e in materiali con alto Z.

- (a) Con l'aumentare delle dimensioni del rivelatore aumenta la probabilità che il fotone diffuso subisca una sequenza di interazioni che lo portano a una deposizione completa della sua energia all'interno del volume del rivelatore. In questo caso il fotone è contato nel canale corretto, corrispondente all'energia del fotone incidente.
- (b) Il fotone diffuso potrebbe uscire dal rivelatore. In questo caso il fotone è contato con l'energia che è stata trasferita all'elettrone Compton.

Questa energia sarà più bassa dell'energia del Compton edge,  $E_e$  (keV):

$$E_e = \frac{2E_0^2}{(2E_0 + 511)} \quad (7.1)$$

Questo effetto porterà ad un continuo Compton inferiore a  $E_e$  che diventa considerevole nella distribuzione dello spettro degli impulsi per tensioni applicate al tubo superiroi a 100 kV.

Nei rivelatori al germanio il continuo Compton dovuto ai fotoni diffusi è l'effetto spurio più importante per energie oltre i 100 keV. L'unico modo per conoscere la frazione di continuo Compton prodotto dai diversi fotoni incidenti di energia  $E_0$  è mediante simulazioni Monte Carlo.

3. Il fotone non interagisce affatto con il rivelatore.

Gli effetti sopra descritti portano ad applicare due tipi di correzioni:

1. I conteggi nei canali corrispondenti alle energie dei picchi formati a causa della presenza dei picchi di fuga del germanio ( $E_{\text{picco totale di assorbimento}} - E_{\text{picchi di fluorescenza}}$ ) (1(b)) e al processo di diffusione Compton (2(b)) devono essere sottratti.
2. Solo una frazione  $I$  di un numero  $I_0$  di fotoni incidenti di una data energia sono contati nel canale corretto. Il rapporto  $\varepsilon = I/I_0$  è riferito all'efficienza del picco di assorbimento totale (full peak). Il numero di conteggi, ripuliti dei conteggi da attribuirsi alla presenza del picco di fuga K ed al fenomeno Compton, devono essere infine corretti per l'efficienza del rivelatore.

### 7.3 Funzione di stripping

Per potere ripulire lo spettro dei conteggi acquisito dai conteggi spuri dovuti ai fenomeni sopra illustrati è necessario mettere a punto una procedura iterativa denominata stripping.

Tale procedura per gradi, che inizia dal canale di energia più alto fino a quello di energia più bassa, è multifunzionale per spettri con un numero elevato di canali. Una volta ottenuta una dettagliata informazione della frazione di conteggi persi per diffusione Compton e per i picchi di fuga K, correggendo inoltre il numero dei conteggi per l'efficienza di full peak, si ottiene il vero numero di fotoni corrispondente a quel canale di energia  $E_0$ . Questi step sono ripetuti per tutti i canali fino alle energie più basse (1 keV). L'equazione che è stata applicata ad ogni canale è la seguente:

$$N_t(E_0) = [N_m(E_0) - \eta_k(E_0 + 10)N_t(E_0 + 10) - \sum_{E=E^*}^{E_{max}} h(E)N_t(E)]/\varepsilon(E_0) \quad (7.2)$$

dove

$N_t$ =numero di fotoni reali,

$N_m$ =numero di fotoni misurati (distribuzione degli impulsi),  
 $\eta_k(E)$ =frazione di conteggi da attribuirsi ai picchi di fuga K,  
 $h(E)$ =fattore di correzione del continuo Compton,  
 $\varepsilon(E)$ =efficienza di full peak,  
 $E^*$ =energia del Compton edge (MeV),  
 $E_{max}$ =energia massima dello spettro.

Per un rivelatore di 5 mm di spessore e per energie tra l'energia del Compton edge del germanio ( $\sim 10$  keV) e 60 keV circa, si può assumere che la fuga K sia l'unica fonte significativa di perdita di conteggi. L'efficienza full peak potrebbe quindi essere calcolata una volta nota la frazione di fotoni K,  $\eta_k$ , come  $\varepsilon = 1 - \eta_k$ . I canali che vengono corretti per i picchi di fuga K sono quelli che vanno da 1 keV a 50 keV.

Il primo passo è consistito, mediante calcoli Monte Carlo, nella verifica dei conteggi dei fotoni persi per diffusione Compton, risultati pressochè trascurabili e successivamente nella valutazione, sia sperimentale sia Monte Carlo, della percentuale dei conteggi da attribuirsi ai picchi di fuga K [32, 42, 43].

## 7.4 Frazione dei conteggi persi per diffusione Compton

Per determinare i conteggi persi per diffusione Compton sono stati effettuati calcoli Monte Carlo per energie monocromatiche da 1 keV a 60 keV, con scansione di 1 keV. Da ogni calcolo si è ottenuto il numero di conteggi per canale e l'area totale del picco di assorbimento a seconda dell'energia monocromatica considerata.

Prima di tutto ogni spettro dei conteggi per fotoni incidenti monocromatici ottenuto dal calcolo Monte Carlo è stato ripulito dei picchi di fuga K. Successivamente, per stimare i fotoni persi per diffusione Compton, ad ogni canale, è stata applicata la seguente operazione matriciale:

$$h(E) = \frac{c_{i,i=1,\dots,2048}}{C_{FP,E_n,n=1,\dots,60}} \quad (7.3)$$

dove

$c_i$  è il totale dei conteggi al canale  $i$ -esimo,

$C_{FP,E_n}$  è il totale dei conteggi nel full-peak.

In sintesi  $h(E)$  esprime la percentuale dei fotoni persi per diffusione Compton rispetto al totale dei conteggi nel picco di assorbimento totale (full peak).

Applicando tale operazione ad ogni canale e per ogni energia monocromatica si è ottenuto la percentuale dei fotoni persi per diffusione Compton. In Figura 7.1 è riportato uno schema dell'operazione eseguita.

## 7.5 Frazione di conteggi dovuti al picco di fuga K

Per determinare la frazione di conteggi persi a causa dei picchi di fuga K sono stati acquisiti spettri di sorgenti sigillate elettro-depositate Amersham ( $^{241}\text{Am}$ ,  $^{133}\text{Ba}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ) poste su di un supporto autocentrante a 6 cm dalla superficie del

		Energia monocromatica (keV)				
		$E_1$	$E_2$	...	$E_{59}$	$E_{60}$
Totale conteggi per canale $c_i$ <small>**ogni spettro monocromatico è ripulito dai picchi di fuga k</small>	$c_1$	$c_1 / C_{FP,E1}$	$c_1 / C_{FP,E2}$	...	$c_1 / C_{FP,E59}$	$c_1 / C_{FP,E60}$
	$c_2$	0	$c_2 / C_{FP,E2}$	...	$c_2 / C_{FP,E59}$	$c_2 / C_{FP,E60}$
	...	...	...	...	...	...
	$c_{2047}$	0	0	...	$c_{2047} / C_{FP,E59}$	$c_{2047} / C_{FP,E60}$
	$c_{2048}$	0	0	...	0	$c_{2048} / C_{FP,E60}$
	Per ogni calcolo:	area full peak, $E_1$ $C_{FP,E1}$	area full peak, $E_2$ $C_{FP,E2}$	...	area full peak, $E_{59}$ $C_{FP,E59}$	area full peak, $E_{60}$ $C_{FP,E60}$

**Figura 7.1:** Schema dell'operazione eseguita per determinare il contributo Compton. Il contributo da attribuirsi al fenomeno della diffusione Compton è stato valutato canale per canale come rapporto tra i conteggi nel canale  $i$ -esimo ed il totale dei conteggi del picco di assorbimento totale (full-peak).

**Tabella 7.2:** ROI delle sorgenti impiegate per la valutazione dei conteggi persi per i picchi K del germanio.

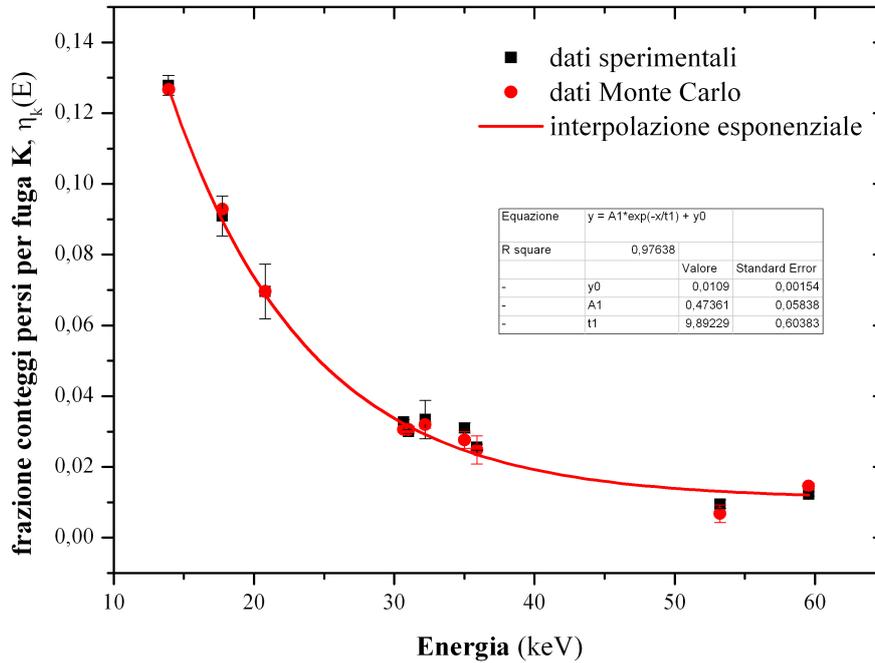
Sorgente	Energy (keV)	Region Of interest inizio	Region of interest fine	Centroide picco
<sup>241</sup> Am	59.54	1877	1930	1900
	49.66	1501	1599	1584
	48.56	1501	1599	1551
	13.93	417	550	442
	4.05	98	136	126
	2.95	98	136	120
	17.74	550	609	563
	7.86	235	263	248
	20.80	609	747	661
	10.92	323	404	345
	9.82	266	314	309
<sup>137</sup> Cs	32.21	997	1053	1026
	22.33	687	723	710
	21.23	667	683	677
<sup>133</sup> Ba	35.01	1098	1131	115
	25.13	783	813	798
	24.03	751	775	763
	12.59	391	408	399
	2.71	80	98	84
	53.22	1677	1717	1698
	43.34	1370	1392	1381

rivelatore, le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 7.1. Ogni spettro è stato acquisito per 4000 s in modo da ridurre le incertezze associate al canale. I picchi considerati nei calcoli Monte Carlo con le relative ROI (Region Of Interest) per la valutazione dei conteggi persi, sono riportate in Tabella 7.2. Il rapporto tra i conteggi totali nei picchi con energia pari all'energia del picco di assorbimento ( $E_{FullPeak}$ ) totale meno l'energia dei picchi di fuga K ( $E_{Picchi DiFuga}$ ) (Tabella 7.1) e i conteggi totali del picco di assorbimento della sorgente (a cui ci si riferisce) corrisponde alla frazione di conteggi che si sarebbero dovuti contare nei canali appartenenti al picco di assorbimento e che invece sono stati contati in canali di energie inferiori ( $E_{FullPeak} - E_{Picchi DiFuga}$ ). I dati ottenuti con le relative incertezze sono riassunti in Tabella 7.3.

I dati sperimentali sono stati confrontati con quelli ottenuti dai calcoli Monte Carlo [20]. Entro le incertezze si è ottenuto un buon accordo fra i dati (le incertezze Monte Carlo non sono riportate in quanto dell'ordine del per mille) (Figura 7.2).

Tabella 7.3: Valutazione percentuale della frazione di conteggi persi per i picchi di fuga K del germanio.

Sorgente	Energia (keV)	Area netta picco	Incertezza assoluta	Incertezza (%)	K <sub>a</sub> (9,876 keV)	K <sub>b</sub> (10,982 keV)	K <sub>a</sub> +K <sub>b</sub>	Incertezza (%)
<sup>241</sup> Am	59,54	6E+05	744	1,34E-03	0,92%	0,31%	1%	2,38E-02
	49,66	5E+03	93	1,82E-02				
	48,56	2E+03	60	3,51E-02				
	13,9	4E+06	12847	2,97E-03	11,76%	1,86%	13,61%	1,04E-02
	4,02	5E+05	3787	7,44E-03				
	2,92	8E+04	586	7,29E-03				
	17,74	1E+05	740	6,72E-03	9,09%			3,11E-02
7,86	1E+04	244	2,44E-02					
<sup>133</sup> Ba	20,80	3E+04	239	7,60E-03	6,29%	0,67%	7%	5,55E-02
	10,92	2E+03	82	4,16E-02				
	9,82	2E+02	23	1,07E-01				
	35,01	2,00E+06	2431	1,22E-03	2,64%	0,46%	3%	2,34E-02
	25,13	5,28E+04	755	1,43E-02				
	24,03	9,22E+03	620	6,73E-02				
	53,22	2,68E+05	539	2,01E-03	0,76%	0,19%	1%	6,44E-02
43,34	2,03E+03	127	6,24E-02					
42,24	500	31	6,24E-02					
<sup>137</sup> Cs	31,02	7060000	5522	7,82E-04	3,00%			8,65E-03
	21,14	2,12000	1668	7,87E-03				
	30,67	3550000	3877	1,09E-03	3,27%			1,09E-02
<sup>137</sup> Cs	20,794	1,16000	1132	9,76E-03				
	32,21	2,51E+04	403	1,61E-02	2,87%	0,47%	3%	8,09E-02
	22,33	7,20E+02	33	4,52E-02				
	21,23	1,18E+02	22	1,85E-01				



**Figura 7.2:** *Frazione dei conteggi persi nel picco di assorbimento totale per la presenza dei picchi di fuga K. Confronto tra i dati ottenuti sperimentalmente con sorgenti radioattive sigillate (nero) e dati Monte Carlo (rosso). Curva di interpolazione esponenziale.*

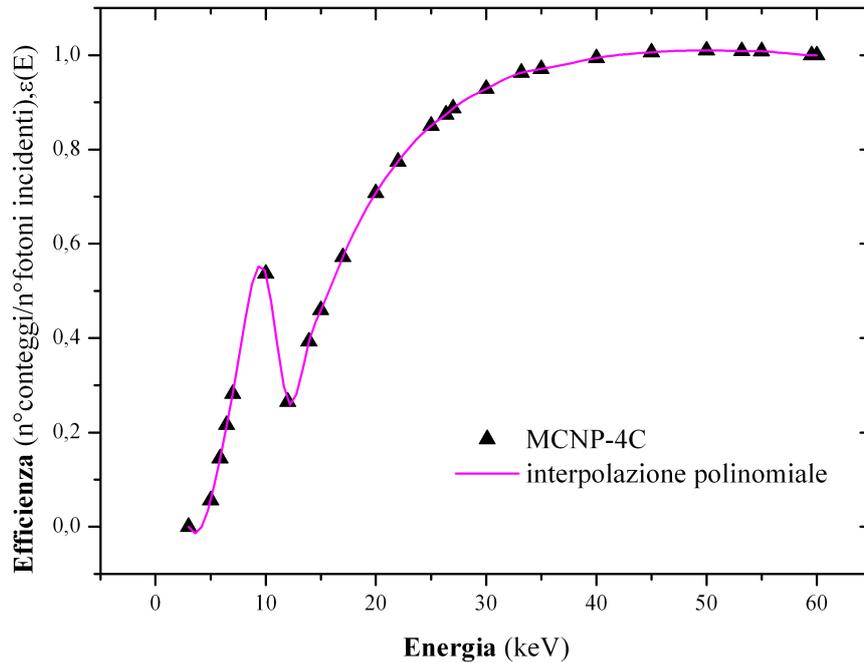
## 7.6 Curva di efficienza del rivelatore

Per energie inferiori a 50 keV l'efficienza dipende fortemente dalle dimensioni del rivelatore utilizzato. In Figura 7.3 si riporta la curva di efficienza utilizzata nel calcolo degli spettri primari. E' molto importante sottolineare il fatto che è stata necessaria la simulazione per le bassissime energie ( $< 10$  keV), che possono essere molto critiche a causa delle fluorescenze del rivelatore al germanio [21].

Ottenuti i parametri necessari per la risoluzione dell'equazione 7.2 per ogni spettro, partendo dal canale di energia superiore si è corretto il relativo conteggio per la presenza dei picchi di fuga K e poi per l'efficienza  $\varepsilon(E)$  del rivelatore. Si è deciso di non correggere per il processo di diffusione Compton in quanto trascurabile nel dominio energetico considerato.

## 7.7 Confronto tra le distribuzioni degli spettri degli impulsi e gli spettri ricostruiti

Applicando l'equazione 7.2 ad ogni spettro acquisito si sono ottenuti tutti gli spettri realmente incidenti sul rivelatore (vedi Appendice B).



**Figura 7.3:** Curva di efficienza determinata dalla simulazione del rivelatore al germanio HPGe (i valori sono normalizzati alla riga dell' $^{241}\text{Am}$  a 59,54 keV).

## 7.8 La matrice risposta del rivelatore

Lo spettro dei conteggi in un rivelatore è abbastanza complesso a causa fondamentalmente dei processi di interazione dei fotoni all'interno del cristallo, come spiegato nei paragrafi precedenti. Inoltre, anche i dispositivi necessari alla rivelazione della radiazione, possono creare distorsioni ed alterazioni nella distribuzione spettrale degli impulsi. Tali distorsioni possono essere attribuite al rumore elettronico, all'efficienza di rivelazione, allo spessore dello strato morto del cristallo, ecc...

Per questo motivo le informazioni che vengono registrate sull'analizzatore multicanale non trovano una reale corrispondenza con la distribuzione energetica dello spettro primario [27, 28]. Per caratterizzare in modo realistico lo spettro incidente sul rivelatore a partire dalla distribuzione degli impulsi (Pulse High Distribution, PHD) è necessario tenere in considerazione tali effetti, come già fatto nel caso della procedura di stripping precedentemente illustrata.

Un metodo alternativo rispetto allo stripping che permette di ricostruire in modo completo dallo spettro degli impulsi lo spettro fotonico incidente sul rivelatore consiste nel deconvolvere lo spettro degli impulsi attraverso l'inversione della matrice risposta del rivelatore ottenuta mediante simulazione Monte Carlo per una fitta serie di energie fotoniche monocromatiche. Questa tecnica di deconvoluzione generalmente conosciuta con il nome di *unfolding* è concettualmente applicata a molte tecniche spettrometriche come, ad esempio, la spettrometria

dei neutroni.

Nel presente lavoro ci si è limitati a verificare la congruenza della matrice risposta calcolata applicandola agli spettri ottenuti dallo stripping per verificare se venivano riottenute le stesse distribuzioni degli impulsi ed inoltre può essere inoltre considerato un metodo indipendente a validazione del metodo di stripping sviluppato per la ricostruzione degli spettri.

Alcuni esempi di risultati, da ritenersi molto soddisfacenti, sono riportati nelle figure 7.4 e 7.5.

Un modo per ottenere la matrice risposta con MCNP, consiste nello studiare la distribuzione degli impulsi prodotta da singoli calcoli per energie monocromatiche [41]. In Figura 7.6 sono rappresentate, in un grafico 3D, tutte le distribuzioni ottenute dai 225 calcoli Monte Carlo da 4 keV a 60 keV, con una scansione pari a 250 eV (si è deciso come limite inferiore di scegliere 4 keV perchè per energie inferiori la distribuzione degli impulsi è affetta da una incertezza anche dell'ordine del 70%). In figura 7.6 sono evidenziate le tre zone che sono state prese in esame anche per valutare la componente del continuo Compton da sottrarre canale per canale alle distribuzioni degli spettri degli impulsi. La zona A contiene i picchi di fuga del germanio,  $K_\alpha$  e  $K_\beta$ , la zona B i picchi con energia pari all'energia del picco di assorbimento totale meno quella dei picchi di fuga ed infine la zona C contenente tutti i picchi di assorbimento totale.

Formalmente, il problema della ricostruzione spettrale è rappresentato dalla soluzione di un set di equazioni della forma:

$$\sum_{j=1}^k E_{ij} \cdot S_j = M_j \quad (7.4)$$

$$\text{con } j = 1, m \quad (7.5)$$

dove

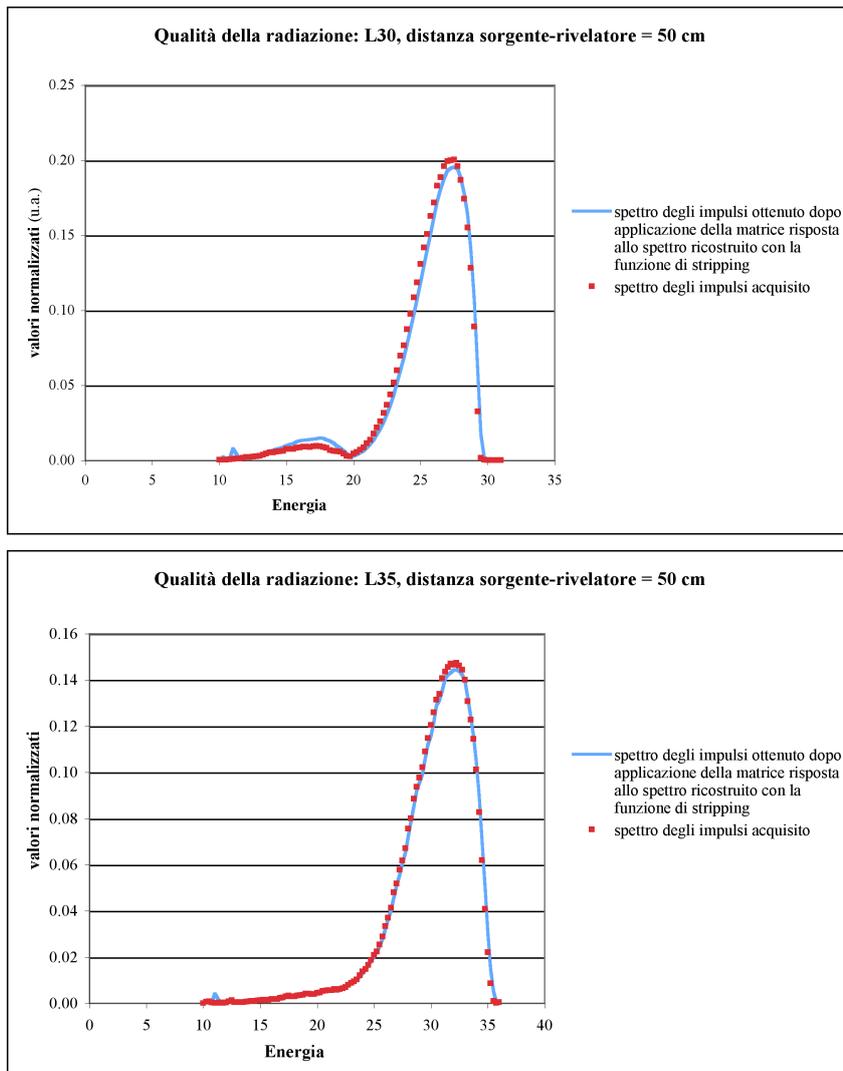
$E_{ij}$  = elemento della matrice risposta del sistema;

$S_j$  = elemento j-esimo dello spettro reale;

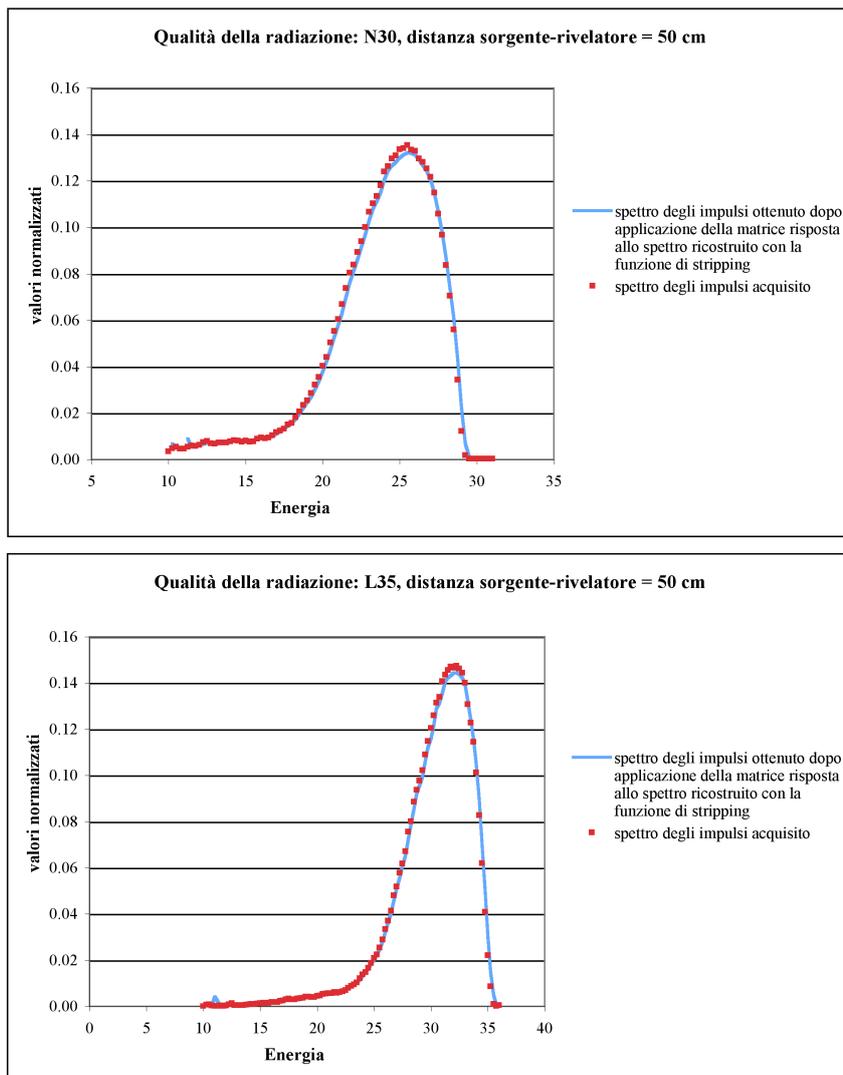
$M_i$  = valore del segnale misurato dell' i-esimo canale;

k = totale degli intervalli energetici in cui è suddiviso lo spettro;

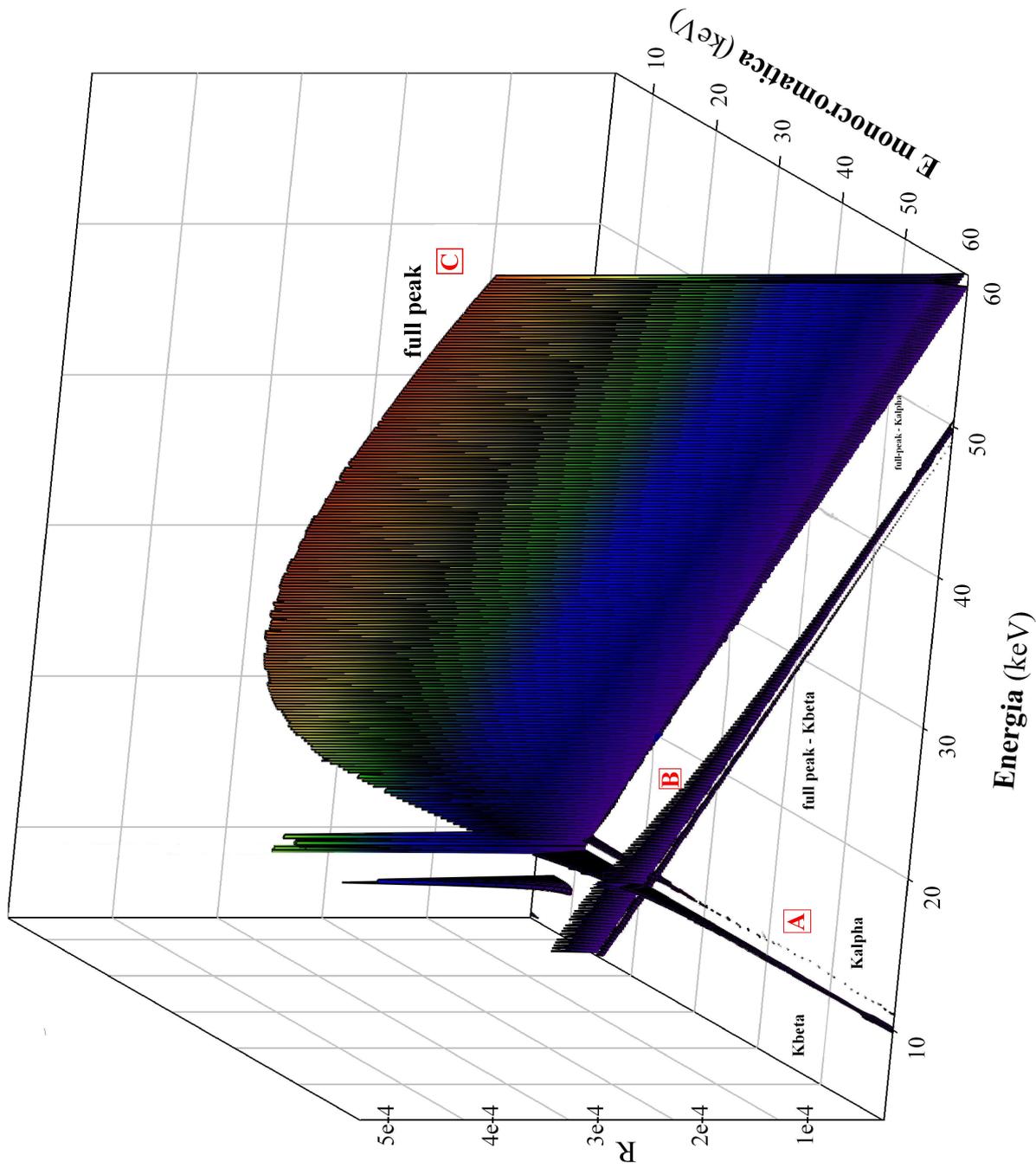
m = totale canali dello spettro acquisito.



**Figura 7.4:** Confronto tra gli spettri degli impulsi acquisiti e ottenuti dopo l'applicazione della matrice risposta agli spettri ricostruiti con la funzione di stripping



**Figura 7.5:** Confronto tra gli spettri degli impulsi acquisiti e ottenuti dopo l'applicazione della matrice risposta agli spettri ricostruiti con la funzione di stripping



**Figura 7.6:** La funzione risposta del rivelatore HPGe utilizzato. La matrice è suddivisa in zone: A) picchi di fuga  $K_{\alpha}$  e  $K_{\beta}$  del germanio, B) picchi con energia pari alla differenza tra l'energia del picco di assorbimento totale e l'energia dei picchi di fuga e C) picchi di assorbimento totale.

## Capitolo 8

# Determinazione dei coefficienti di conversione fra kerma in aria e grandezze operative per spettri X di bassa energia

### 8.1 Introduzione

La normativa internazionale ISO 4037(1-4) [1, 4, 5, 6], più volte citata nel corso del lavoro, descrive le tecniche per la calibrazione di dosimetri personali e di strumentazione per radioprotezione impiegando fasci di radiazione X e  $\gamma$  di riferimento.

In particolare, nella ISO 4037-1 [1] sono descritte in modo dettagliato le caratteristiche delle radiazioni X e  $\gamma$  di riferimento da utilizzarsi nella taratura degli strumenti di misura dell'esposizione. Gli spettri sono caratterizzati in termini di primo e secondo spessore emivalente, di energia media e di risoluzione spettrale  $\frac{\Delta E}{E}$  (definito come rapporto tra  $\Delta E$  che rappresenta la larghezza dello spettro in corrispondenza della metà dell'ordinata massima della distribuzione spettrale ed  $E$  valore modale dell'energia). I fasci di radiazioni riportati sono suddivisi in quattro gruppi: la serie Low Air-Kerma rate (L), la serie Narrow-Spectrum (N), la serie Wide-Spectrum (W) e la serie High Air-Kerma rate (H) in base alle loro caratteristiche.

La seconda parte ISO 4037-2 [4] descrive la dosimetria dei fasci di radiazioni di riferimento mentre la terza parte ISO 4037-3 [5] presenta le procedure per la calibrazione e determinazione della risposta dei dosimetri e della strumentazione in termini delle grandezze operative ICRU. In particolare la ISO 4037-4 considera le procedure di calibrazione di dosimetri personali e monitori di radioprotezione da impiegare nel campo delle basse energie (tensioni del tubo inferiore a 30 kV).

In base a quanto richiesto dalla normativa ISO 4037-3 [5], la calibrazione di dosimetri personali e di strumentazione per radioprotezione è basata sulla misura della quantità fisica kerma in aria,  $K_a$ , sempre al kerma in aria si riferisce la determinazione della loro risposta in funzione dell'energia dei fotoni incidenti e dell'angolo di incidenza in termini di  $H_p(d)$ .

I valori di  $H_p(d)$  si determinano attraverso la conversione di valori misurabili di kerma in aria,  $K_a$ , mediante fattori di conversione:

$$H_p(d) = [H_p(d)/k_a] \cdot k_a \quad (8.1)$$

Considerando spettri con una parte considerevole di fotoni con energia inferiore a 10 keV, è stato necessario effettuare calcoli Monte Carlo per energie pari a 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 keV. La tabulazione ICRU-ICRP ha infatti come limite inferiore i 10 keV. Questo ha permesso di valutare tutti i coefficienti di conversione sugli spettri ricostruiti dei fasci X filtrati ( $R$ ).

Nel caso di misure di kerma in aria, si assume che, per la calibrazione di dosimetri personali e strumentazione di radioprotezione e test di tipo, differenze negli spettri ottenuti da tubi a raggi X diversi, possano essere considerate trascurabili. Nel caso di  $H_p(d)$ , invece, tale affermazione è da considerarsi vera solo se le differenze nei coefficienti di conversione determinati da spettri diversi a loro volta generati da impianti diversi, possono considerarsi trascurabili. Questo però non è il caso per gli spettri con una considerevole componente di bassa energia, nei quali i coefficienti di conversione ottenuti da spettri prodotti da impianti diversi possono differire anche del 90% rispetto a quanto riportato dalla normativa o dai documenti di riferimento a causa della forte dipendenza dall'energia. Nasce quindi l'esigenza da parte dei vari Laboratori di Metrologia di caratterizzare i propri fasci di radiazioni, andando a valutare per ognuno di esso i rispettivi coefficienti di conversione.

Nella ISO 4037-3, i coefficienti di conversione da  $K_a$  a  $H_p(10, \alpha^\circ)$  per fasci di radiazioni di energia inferiore a 30 keV (in particolare per i fasci L20, L30 della serie Low Air-Kerma rate, N15, N20, N25 della serie Narrow-Spectrum e H30 della serie High Air-Kerma rate) sono riportati con a margine la seguente nota

**“With these radiation qualities care needs to be taken as variations in energy distribution may have a substantial influence on the numerical values of conversion coefficients”.**

Questa nota vuole sottolineare quanto sia importante nella determinazione dei coefficienti di conversione dei fasci X filtrati conoscere la corrispondente distribuzione spettrale in quanto una piccola variazione della stessa può causare una sostanziale differenza sul valore di tali coefficienti.

Si potrebbe pensare che i coefficienti di conversione da kerma in aria,  $K_a$  a  $H_p(10; R, \alpha^\circ)$  per spettri con energia media bassa siano di poco interesse dosimetrico in quanto definiti come radiazioni debolmente penetranti. Tale affermazione è però solo parzialmente corretta. Secondo la ICRU, infatti, i fotoni con energie molto basse (inferiori a circa 11 keV) sono radiazioni debolmente penetranti e di conseguenza la loro grandezza rappresentativa in termini di equivalente di dose personale è  $H_p(0, 07)$ . D'altro canto esistono spettri con energia media molto bassa ma con un elevato numero di fotoni con energia al di sopra di 11 keV, in questo caso, è comunque necessario calcolare  $H_p(10)$  e, spesso, il contributo di fotoni con energie inferiori a 11 keV non può essere trascurato.

Al fine di verificare le misure effettuate ed i metodi di ricostruzione degli spettri impiegati, sono stati determinati i parametri caratteristici di ogni spettro (primo e secondo spessore emivalente, energia media, energia massima, risoluzione, coefficiente di omogeneità) ed infine confrontati con i valori riportati in letteratura [7, 10, 11, 12, 13]. Per ogni fascio di radiazione,  $R$ , sono stati poi valutati i coefficienti di conversione da kerma in aria,  $k_a$  alle grandezze operative ICRU  $H_p(10; R, \alpha^\circ)$ ,  $H_p(0, 07; R, \alpha^\circ)$ ,  $H_p(3; R, \alpha^\circ)$ ,  $H'(0, 07; R, \vec{\Omega})$  e  $H^*(10; R)$  per diversi angoli di incidenza  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$  e  $80^\circ$ .

Poiché gli spettri considerati sono, inoltre, fortemente influenzati dalla densità dell'aria, in modo per le basse energie, tutti gli spettri degli impulsi acquisiti prima della ricostruzione sono stati normalizzati alle condizioni di riferimento (temperatura e pressione).

## 8.2 Considerazioni dimensionali relative allo spettro dei fotoni

Uno spettro di fotoni sorgente, emesso da un tubo a raggi X viene determinato mediante misura con un contatore a stato solido in grado di discriminare in energia la popolazione di fotoni emessi.

La lettura fornita dal multicanale a cui è collegato il rivelatore fornisce quindi uno *yield*, che rappresenta i fotoni appartenenti a ciascun intervallo di energia. Perciò la distribuzione che si misura, dopo aver operato le opportune correzioni (*procedure di stripping*) rappresenta una popolazione fotonica per intervallo di energia  $dN/dE$ .

Questa informazione prescinde quindi dalla direzionalità del campo incidente sullo spettrometro ed è quindi legata concettualmente alla quantità fisica denominata *corrente* (J) definita come il numero di particelle che attraversano una superficie (nel caso specifico la finestra del rivelatore) indipendentemente dall'angolo di incidenza.

La considerazione precedente è necessaria in quanto spesso gli spettri dei fotoni vengono riportati da vari Laboratori come spettri in fluenza che è definita in modo sostanzialmente diverso da una popolazione o una corrente di particelle.

Infatti nel Report ICRU 51 [14] la fluenza di particelle è definita come una quantità pesata sull'inverso del coseno dell'angolo di incidenza  $\Theta$  della radiazione ( $\phi = J / \cos \Theta$ ) e fornisce una informazione sulla potenzialità ionizzante della traccia della particella associata (più l'angolo di incidenza è alto più la traccia compie un percorso maggiore nel rivelatore, maggiore è quindi la sua possibilità di ionizzare).

*Nel caso specifico della misura in condizioni metrologiche dello spettro dei fotoni è però possibile assimilare in prima approssimazione lo spettro ottenuto dai conteggi a quello in fluenza in quanto, trattandosi di un campo di radiazione allineato ed espanso e quindi normale alla finestra del rivelatore, le distribuzioni in energia della corrente entrante e quella della rispettiva fluenza si possono considerare uguali essendo il coseno dell'angolo di incidenza  $\Theta$  pari a 1.*

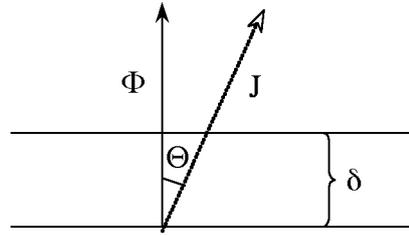


Figura 8.1: Definizione di corrente ( $J$ ) e fluena ( $\phi$ ).

## 8.3 Determinazione dei parametri tipici degli spettri

### 8.3.1 Normalizzazione degli spettri alle condizioni di riferimento

Nella determinazione dei parametri caratteristici degli spettri, ottenuti con il medesimo impianto ma con irraggiamenti non contemporanei, è stato necessario normalizzare i valori ottenuti in differenti condizioni ambientali (temperatura ( $T$ ), pressione ( $p$ ) ed umidità relativa ( $r$ )) ad identiche condizioni ambientali di riferimento. In particolare nel dominio energetico considerato una variazione della densità dell'aria,  $\rho$ , al momento della misura influenza, in modo significativo, la distribuzione spettrale. Per valori di temperatura compresi tra  $15^\circ C$  e  $25^\circ C$ , una buona approssimazione della densità dell'aria,  $\rho$ , è data dalla formula di Drake e Böhm [8]:

$$\rho = \rho_0 \left[ 1,005699 \frac{p}{p_0} - \frac{1}{175,7} \frac{r}{r_0} \left( \frac{T}{T_0} \right)^{17,97} \right] \left( \frac{T}{T_0} \right) \quad (8.2)$$

dove

$p$  è la pressione dell'aria,  $p_0 = 101,3$  kPa;

$T$  è la temperatura dell'aria  $T_0 = 293,15$  K (equivalente a  $20^\circ C$ );

$r$  è l'umidità relativa dell'aria,  $r_0 = 0,65$  (equivalente a 65%);

$\rho$  è la densità dell'aria alle condizioni di riferimento,  $\rho_0 = 1.1974$  kg/m<sup>3</sup>.

Una variazione della densità dell'aria pari all'1% corrisponde ad una variazione nella pressione da 100 kPa a 101 kPa se il valore della temperatura e pressione rimane invariato, oppure ad una variazione nel valore di temperatura da 293 K a 296 K se il valore della pressione e dell'umidità relativa rimane il medesimo. La pressione dell'aria varia sotto i 1000 m da  $-20\%$  a  $+10\%$  circa. Gli spettri sono stati riportati alle stesse condizioni ambientali nelle quali si sono effettuate le misure di spessori emivalenti con camera a ionizzazione usando la seguente legge di attenuazione esponenziale:

$$C_E(E) = C_{E,m}(E) \cdot \exp[-(\mu(E)/\rho_0) d(\rho_0 - \rho)] \quad (8.3)$$

dove

$E$  è l'energia del fotone;

$C_E(E)$  sono i conteggi del canale  $i$ -esimo corrispondenti all'energia  $E$  alle condizioni di riferimento;

$C_{E,m}(E)$  sono i conteggi al momento dell'acquisizione dello spettro;  
 $\mu(E)/\rho_0$  è il coefficiente di attenuazione massico dell'aria tabulato da Hubble et al. [9];

$d$  è la distanza tra il rivelatore ed il punto di emissione della radiazione (50 cm o 200 cm).

### 8.3.2 Determinazione del primo e secondo spessore emivalente

Per verificare le misure effettuate con la camera a ionizzazione ad aria libera (metodo dosimetrico) e la correttezza del metodo impiegato per la ricostruzione degli spettri sono stati calcolati il primo ed il secondo spessore emivalente (I° e II° SEV) per ogni spettro ricostruito, alle 2 distanze rivelatore-sorgente di radiazione rispettivamente pari a 50 cm e 200 cm.

Per scopi dosimetrici è conveniente descrivere il campo di radiazioni in termini di intensità di kerma per un opportuno materiale (aria o tessuto). Per calcolare tutti i parametri caratteristici dello spettro ad eccezione dell'energia media dei fotoni  $\bar{E}_{\text{media}}$ , gli spettri sono stati pesati per il corrispondente fattore di kerma  $k(E)$ <sup>1</sup> monoenergetico definito come:

$$k(E) = E \cdot \frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} \quad (8.4)$$

I valori di  $(\mu_{\text{tr}}/\rho)$  sono riassunti nelle tabelle riportate da Hubbel et al. [9] ed interpolati con funzione Lagrangiana in modo da ottenere una funzione continua utile agli scopi.

Il primo spessore emivalente è definito come quello spessore in grado di attenuare il fascio di radiazione in esame fino a ridurne il rateo di esposizione alla metà del valore originario, con esclusione della radiazione diffusa ad eccezione di quella già contenuta nel fascio originario. Il secondo spessore emivalente è invece quello spessore, di un determinato materiale, che aggiunto al primo riduce il rateo di kerma da un mezzo ad un quarto del valore originario.

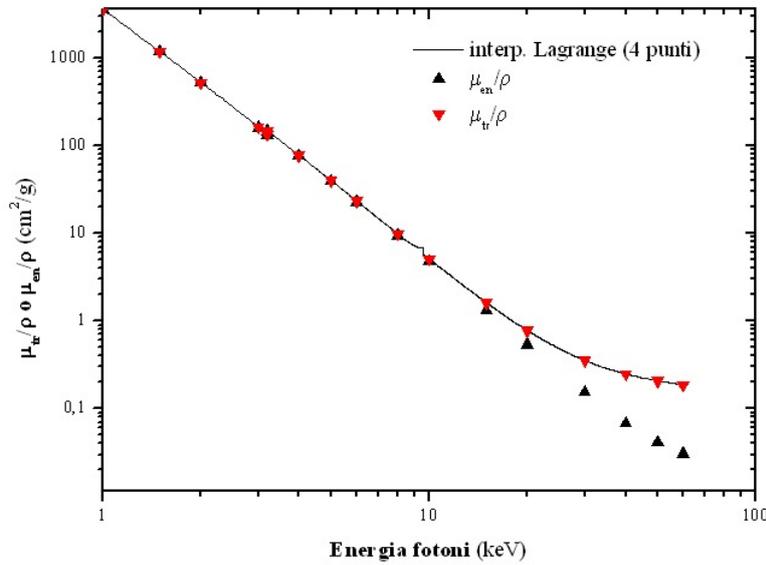
<sup>1</sup>Il coefficiente di trasferimento di energia massico è definito come:

$$\frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} = \frac{1}{\rho EN} \frac{dE_{\text{tr}}}{dl}$$

dove  $dE_{\text{tr}}/EN$  rappresenta appunto la frazione dell'energia dei fotoni incidenti trasferita in energia cinetica alle particelle cariche secondarie a causa delle interazioni subite nel tratto  $dl$  del mezzo di densità  $\rho$ . Alcuni laboratori ([12]) hanno usato nella determinazione dei parametri caratteristici dei loro spettri il coefficiente di assorbimento di energia massico,  $(\mu_{\text{en}}/\rho)$ , in quanto nel dominio energetico di interesse le differenze possono considerarsi trascurabili. I valori di  $(\mu_{\text{tr}}/\rho)$  e  $(\mu_{\text{en}}/\rho)$  sono, infatti, apprezzabilmente diversi soltanto quando le energie delle particelle cariche secondarie sono molto maggiori delle loro particelle di quiete, specialmente in materiali ad elevato numero atomico. Il coefficiente di assorbimento di energia massico è definito come:

$$\frac{\mu_{\text{en}}}{\rho} = \frac{\mu_{\text{tr}}}{\rho} (1 - g)$$

avendo indicato con  $g$  la frazione di energia che i secondari cariche dissipano in radiazione di frenamento nel materiale di interesse (Brehmsstrahlung).



**Figura 8.2:** Coefficiente di trasferimento e assorbimento di energia massico dell'aria (scala log-log).

Essendo l'attenuazione di un fascio di fotoni da parte di un materiale di spessore,  $d$ , descritta tramite una semplice legge esponenziale, il primo e secondo spessore emivalente possono essere calcolati mediante la seguente formula:

$$\int_0^{E_{max}} C_E^*(E) \cdot k(E) dE = \int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) \cdot \exp^{-\left(\frac{\mu(E)}{\rho}\right) \cdot \rho d} dE \quad (8.5)$$

dove  $C_E(E)$  e  $C_E^*(E)$  sono lo spettro ricostruito in kerma prima e dopo lo spessore di attenuazione.  $(\mu(E)/\rho)$  è il coefficiente di assorbimento di energia massico dell'alluminio (materiale utilizzato per i filtri addizionali),  $\rho$  la densità dell'alluminio e  $d$  lo spessore del filtro.

I valori di primo e secondo spessore emivalente sono riassunti in Tabella 8.1, 8.2 e 8.3 rispettivamente per i fasci X filtrati della serie L, N e H.

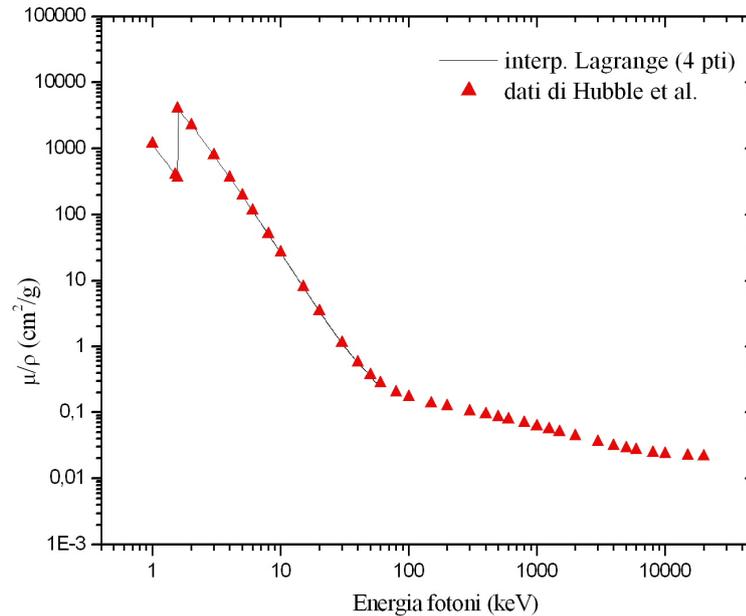
### 8.3.3 Determinazione dell'energia media dello spettro ricostruito

L'energia media di ogni spettro ricostruito è stata calcolata come segue:

$$\bar{E}_{media} = \frac{\int_0^{E_{max}} E \cdot C_E(E) dE}{\int_0^{E_{max}} C_E(E) dE} \quad (8.6)$$

dove  $C_E(E)$  è lo spettro ricostruito (in conteggi) ed  $E_{max}$  l'energia massima dello spettro.

I valori di  $E_{max}$  e  $E_{media}$  sono riassunti in Tabella 8.1, 8.2 e 8.3 rispettivamente per i fasci X filtrati della serie L, N e H.



**Figura 8.3:** *Coefficiente di assorbimento di energia massico dell'alluminio.*

### 8.3.4 Fattore di Kerma

Il fattore di Kerma,  $k(R)$ , è definito come il rapporto tra il totale di KERMA in aria,  $k_a$ , ed il totale dei conteggi dello spettro ricostruito.

È data dalla seguente equazione:

$$k(R) = \frac{\int_0^{E_{max}} k(E) \cdot C_E(E) dE}{\int_0^{E_{max}} C_E(E) dE} \quad (8.7)$$

dove  $C_E(E)$  è lo spettro ricostruito (in conteggi),  $E_{max}$  l'energia massima dello spettro e  $k(E)$  fattore di kerma monoenergetico definito precedentemente.

I dati caratteristici di ogni fascio di radiazione (energia media, energia massima, primo e secondo spessore emivalente, fattore di kerma) calcolati come descritto nei precedenti paragrafi sono riassunti per ogni qualità di radiazione considerata nelle tabelle di seguito riportate.

## 8.4 I coefficienti di conversione

I coefficienti di conversione per energie monocromatiche di fotoni sono disponibili per energie superiori a 10 keV nella pubblicazione ICRP 74 [17], nel Report ICRU 57 [2] e nella ISO 4037-3 [5] per diversi angoli di incidenza. Per ottenere tali coefficienti per energie inferiori a quelle riportate, indispensabili per la deter-

**Tabella 8.1:** Dati caratteristici della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L): energia media ( $E_{media}$ ), energia massima ( $E_{max}$ ), primo e secondo spessore equivalente ( $I^\circ$  e  $II^\circ$  SEV), fattore di kerma ( $k(R)$ ). (a) Distanza sorgente - punto di misura = 50 cm. (b) Distanza sorgente - punto di misura = 200 cm.

	$E_{media}$ (keV)	$E_{max}$ (keV)	$I^\circ$ SEV (mm)	$II^\circ$ SEV (mm)	Coefficiente di omogeneità	Risoluzione (%)	$k(R)$ (pGy·cm <sup>2</sup> )
<b>L10</b>	8,2	9,4	0,057	0,058	0,98	19	12,29
<b>L20</b>	16,1	18,4	0,40	0,41	0,98	19	3,51
<b>L30</b>	26,1	29,5	1,51	1,55	0,97	18	1,89
<b>L35</b>	30,5	35,4	2,28	2,30	0,99	21	1,71
	$E_{media}$ (keV)	$E_{max}$ (keV)	$I^\circ$ SEV (mm)	$II^\circ$ SEV (mm)	Coefficiente di omogeneità	Risoluzione (%)	$k(R)$ (pGy·cm <sup>2</sup> )
<b>L10</b>	8,5	9,4	0,06	0,06	1,00	18	11,6
<b>L20</b>	16,2	19,5	0,44	0,48	0,92	19	3,52
<b>L30</b>	26,1	29,5	1,57	1,63	0,96	18	1,89
<b>L35</b>	30,3	35,4	2,25	2,27	0,99	22	1,72

**Tabella 8.2:** Dati caratteristici della serie "Narrow-Spectrum" (N): energia media ( $E_{media}$ ), energia massima ( $E_{max}$ ), primo e secondo spessore equivalente ( $I^{\circ}$  e  $II^{\circ}$  SEV), fattore di kerma ( $k(R)$ ). (a) Distanza sorgente - punto di misura = 50 cm. (b) Distanza sorgente - punto di misura = 200 cm.

	$E_{media}$ (keV)	$E_{max}$ (keV)	$I^{\circ}$ SEV (mm)	$II^{\circ}$ SEV (mm)	Coefficiente di omogeneità	Risoluzione (%)	$k(R)$ (pGy·cm <sup>2</sup> )
<b>N10</b>	8,2	9,3	0,048	0,053	0,91	27	12,38
<b>N15</b>	11,7	14,5	0,14	0,16	0,88	28	6,46
<b>N20</b>	15,3	18,9	0,32	0,35	0,91	32	3,98
<b>N25</b>	19,4	24,6	0,66	0,74	0,89	30	1,78
<b>N30</b>	24,0	29,2	1,15	1,27	0,91	30	2,07
<b>N40</b>	33,5	40,0	2,80	2,97	0,94	28	1,66
	$E_{media}$ (keV)	$E_{max}$ (keV)	$I^{\circ}$ SEV (mm)	$II^{\circ}$ SEV (mm)	Coefficiente di omogeneità	Risoluzione (%)	$k(R)$ (pGy·cm <sup>2</sup> )
<b>N10</b>	8,4	9,3	0,056	0,063	0,89	27	11,93
<b>N15</b>	11,9	14,5	0,16	0,17	0,94	28	6,15
<b>N20</b>	15,5	18,9	0,34	0,36	0,94	32	3,81
<b>N25</b>	19,3	24,5	0,67	0,75	0,89	30	1,78
<b>N30</b>	23,8	29,2	1,22	1,24	0,98	30	2,10
<b>N40</b>	33,2	40,0	2,80	3,04	0,92	28	1,66

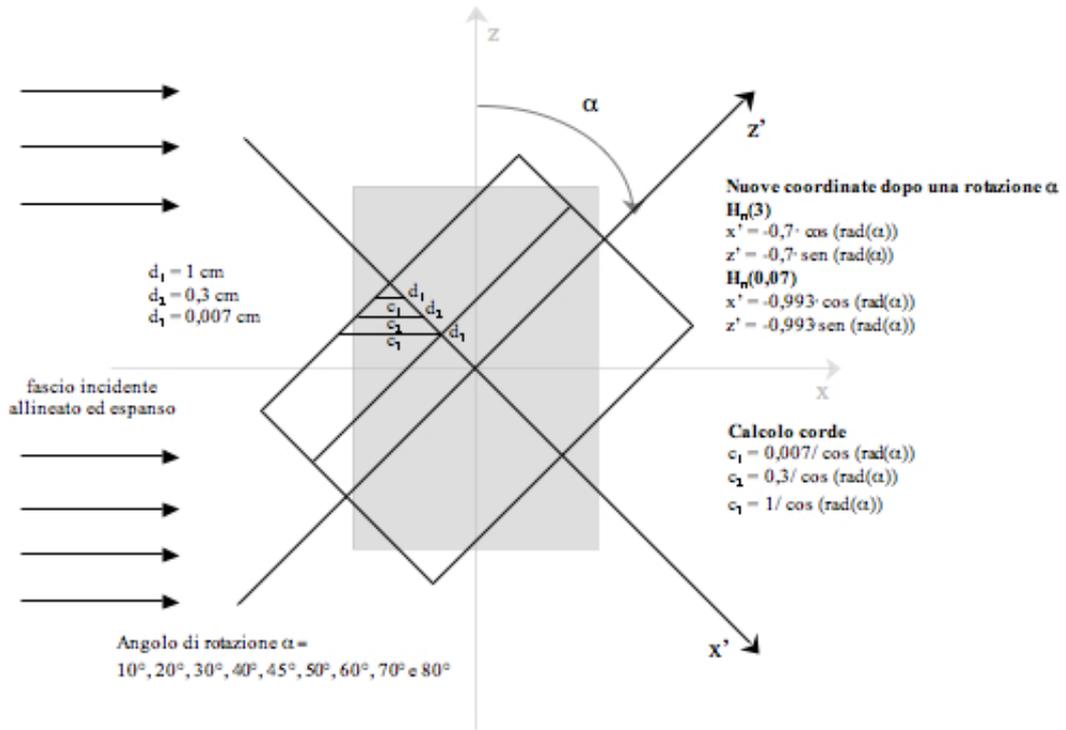
**Tabella 8.3:** Dati caratteristici della serie "High Air-Kerma Rate" (H): energia media ( $E_{media}$ ), energia massima ( $E_{max}$ ), primo e secondo spessore equivalente ( $I^\circ$  e  $II^\circ$  SEV), fattore di kerma ( $k(R)$ ). (a) Distanza sorgente - punto di misura = 50 cm. (b) Distanza sorgente - punto di misura = 200 cm.

	$E_{media}$ (keV)	$E_{max}$ (keV)	$I^\circ$ SEV (mm)	$II^\circ$ SEV (mm)	Coefficiente di omogeneità	Risoluzione (%)	$k(R)$ (pGy·cm <sup>2</sup> )
<b>H10</b>	7,7	10,4	0,04	0,04	0,974	52	15,40
<b>H20</b>	11,9	20,2	0,12	0,15	0,800	89	8,61
<b>H30</b>	19,9	30,1	0,36	0,58	0,621	70	3,05
<b>H60</b>	38,2	59,9	2,4	3,48	0,689	76	1,70
	$E_{media}$ (keV)	$E_{max}$ (keV)	$I^\circ$ SEV (mm)	$II^\circ$ SEV (mm)	Coefficiente di omogeneità	Risoluzione (%)	$k(R)$ (pGy·cm <sup>2</sup> )
<b>H10</b>	8,6	10,4	0,050	0,065	0,77	45	11,78
<b>H20</b>	13,3	20,2	0,145	0,192	0,76	82	5,72
<b>H30</b>	20,1	30,1	0,41	0,60	0,68	75	2,90
<b>H60</b>	37,3	59,9	2,50	3,34	0,75	78	1,73

minazione dei coefficienti di conversione delle qualità di radiazioni considerate, sono stati effettuati calcoli Monte Carlo [10, 13].

In figura 8.4 si riporta una immagine schematica della situazione che è stata simulata a tale scopo: è stato considerato un fantoccio a slab di dimensioni  $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$  di tessuto ICRU. Una volta ottenuti dai calcoli Monte Carlo i valori di  $H_p/\phi$  rispettivamente per  $H_p(0,07)$ ,  $H_p(3)$  e  $H_p(10)$  per incidenza normale del fascio di radiazione ( $0^\circ$ ), sono stati ottenuti successivamente i valori dei coefficienti di conversione per le stesse grandezze in funzione degli angoli di incidenza ( $10^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $40^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $50^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $70^\circ$  e  $80^\circ$ ). A tale scopo sono state applicati analiticamente fattori di attenuazione esponenziali dipendenti dalle lunghezze delle corde  $c_1$ ,  $c_2$  e  $c_3$ , funzioni delle tre profondità e del rispettivo angolo di rotazione  $\alpha$  [16].

L'assunzione fatta implica che si consideri l'effetto fotoelettrico come dominante rispetto alla diffusione incoerente nel dominio di energia studiato. Tale assunzione è senz'altro valida, per cui si può considerare del tutto trascurabile il contributo di *buil-up* dovuto alla piccolissima frazione di fotoni diffusa nello slab tessuto equivalente.



	$H_n(0,07)$	$H_n(3)$	$H_n(10)$
$0^\circ$	$c_1(0^\circ)$	$c_2(0^\circ) - c_1(0^\circ)$	$c_3(0^\circ) - c_1(0^\circ)$
$10^\circ$	$c_1(10^\circ)$	$c_2(10^\circ) - c_1(10^\circ)$	$c_3(10^\circ) - c_1(10^\circ)$
$20^\circ$	$c_1(20^\circ)$	$c_2(20^\circ) - c_1(20^\circ)$	$c_3(20^\circ) - c_1(20^\circ)$
...	...	...	...
$80^\circ$	$c_1(80^\circ)$	$c_2(80^\circ) - c_1(80^\circ)$	$c_3(80^\circ) - c_1(80^\circ)$

Figura 8.4: Rappresentazione schematica della geometria e della procedura impiegata per i calcoli dei coefficienti di conversione monenergetici.

### 8.4.1 Coefficienti di conversione $h(10; R, \alpha^\circ)$ per il fantoccio a slab

Per ogni qualità di radiazione in esame sono stati calcolati i corrispondenti coefficienti di conversione  $h(10; R, \alpha^\circ)$  per diversi angoli di incidenza  $\alpha^\circ$  tra la direzione del campo fotonico di calibrazione e la normale alla superficie frontale del fantoccio.

I coefficienti di conversione  $h(10; R, \alpha^\circ)$  per ogni qualità di radiazione, R, considerata nel dominio energetico di interesse e angolo di incidenza  $\alpha$  sono stati determinati applicando la seguente equazione:

$$h(10; R, \alpha^\circ) = \frac{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) \cdot h(10; E, \alpha^\circ) dE}{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) dE} \quad (8.8)$$

La distribuzione spettrale di ogni qualità di radiazione, in particolare quelle

**Tabella 8.4:** Coefficienti di conversione  $h(10; E, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy per diversi angoli di incidenza

Energia (keV)	Angolo di incidenza $\alpha^\circ$									
	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°
2										
3										
4	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$
5										
6										
7										
8	$1.19 \cdot 10^{-5}$	$1.01 \cdot 10^{-5}$								
9	$5.51 \cdot 10^{-4}$	$4.94 \cdot 10^{-4}$	$3.51 \cdot 10^{-4}$	$1.86 \cdot 10^{-4}$	$6.45 \cdot 10^{-5}$	$1.35 \cdot 10^{-5}$				
10*	$1.10 \cdot 10^{-2}$	$1.01 \cdot 10^{-2}$	$7.77 \cdot 10^{-3}$	$4.78 \cdot 10^{-3}$	$2.13 \cdot 10^{-3}$	$4.80 \cdot 10^{-4}$	$2.23 \cdot 10^{-4}$	$2.02 \cdot 10^{-5}$		
15*	$2.78 \cdot 10^{-1}$	$2.71 \cdot 10^{-1}$	$2.50 \cdot 10^{-1}$	$2.14 \cdot 10^{-1}$	$1.66 \cdot 10^{-1}$	$8.79 \cdot 10^{-2}$	$6.90 \cdot 10^{-2}$	$3.23 \cdot 10^{-2}$	$6.66 \cdot 10^{-2}$	$5.24 \cdot 10^{-5}$

\* i valori a 10 e 15 keV sono i accordi con i dati pubblicati sulla ISO 4037-3 entro un fattore  $\pm 5\%$ .

che presentano numerosi fotoni di bassa energia, dipende in modo significativo dalla filtrazione totale del fascio (spessore dei filtri, spessore dell'aria, densità dell'aria, ecc.) e dalle caratteristiche dell'impianto utilizzato (inclinazione dell'anodo, materiale di cui è composta la finestra, stabilità della tensione, ecc.). Inoltre i coefficienti di conversione monoenergetici  $h(10; E, \alpha^\circ)$  sono fortemente dipendenti dall'energia, soprattutto per quei fasci che presentano una quantità non trascurabile di fotoni di bassa energia. Questo implica che i valori dei coefficienti di conversione ottenuti dagli spettri ricostruiti possano differire anche fino al 100% da valori ottenuti da spettri prodotti da impianti diversi e, nel caso in cui si sia utilizzata la medesima facility, a causa di una variazione della densità dell'aria o dello spessore d'aria tra la sorgente ed il punto di misura.

#### 8.4.2 Coefficienti di conversione $h(0, 07; R, \alpha)$ per la pelle

La ISO 4037-3 [5] riporta un paragrafo in cui viene discussa l'influenza della variazione dell'angolo di rotazione del fantoccio sul valore di  $H_p(0, 07)$ . Per un angolo di rotazione pari a  $60^\circ$  il valore di  $h(0, 07; E, 60)/h(0, 07; E, 0)$  in funzione dell'energia dei fotoni rimane compreso fra 0,95 e 1,05 del valore normale di incidenza [15, 16]. Per angoli inferiori a  $60^\circ$  queste variazioni risultano ancora più trascurabili, per questo motivo nella normativa si assume che per il fantoccio a polso  $H_p(0, 07)$  risulta indipendente dalla direzione di incidenza della radiazione.

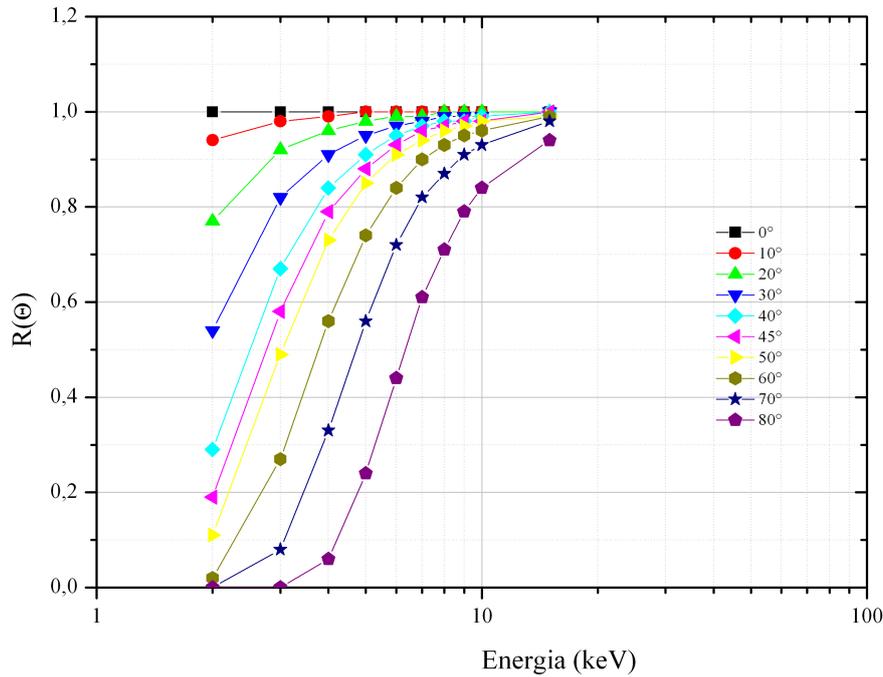
Nel presente lavoro sia a verifica di quanto riportato nella normativa di riferimento sia avendo necessità di spingersi ad energie inferiori a 7 keV, si sono valutati i coefficienti di conversione  $h(0, 07; R, \alpha)$  per i seguenti angoli di incidenza  $0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 45^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$  e  $80^\circ$ . L'angolo di incidenza  $\alpha$  è formato dal campo di fotoni monodirezionali e la normale alla superficie del fantoccio (perpendicolare all'asse longitudinale del fantoccio).

In Tabella 8.5 sono riportati i coefficienti di conversione monoenergetici  $h(0, 07; E, \alpha)$  normalizzati a  $0^\circ$  ottenuti dai calcoli Monte Carlo e graficati in Figura 8.5.

**Tabella 8.5:** Coefficienti di conversione  $h(0,07; E, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy per diversi angoli di incidenza

Energia (keV)	Angolo di incidenza $\alpha^\circ$									
	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°
2	0,02	0,02	0,01	0,01	< 1·10 <sup>-2</sup>	< 1·10 <sup>-2</sup>	< 1·10 <sup>-2</sup>	< 1·10 <sup>-3</sup>	< 1·10 <sup>-2</sup>	< 1·10 <sup>-2</sup>
3	0,30	0,30	0,28	0,25	0,20	0,18	0,15	0,08	0,03	< 1·10 <sup>-2</sup>
4	0,57	0,57	0,55	0,52	0,48	0,45	0,41	0,32	0,19	0,04
5	0,75	0,74	0,73	0,71	0,68	0,66	0,63	0,55	0,42	0,18
6	0,84	0,84	0,83	0,82	0,80	0,78	0,76	0,71	0,60	0,37
7	0,89	0,89	0,89	0,89	0,88	0,88	0,88	0,88	0,87	0,86
8	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90
9	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92
10*	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,95	0,93	0,90	0,81
15*	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,95	0,92

\* i valori a 10 e 15 keV sono i accordi con i dati pubblicati sulla ISO 4037-3 entro un fattore  $\pm 5\%$ .



**Figura 8.5:** Andamento del coefficiente di conversione  $R(\Theta) = h(0,07; E, \alpha)/h(0,07; E, 0)$  in funzione dell'angolo  $\alpha$  e dell'energia del fotone  $E$ .

I coefficienti di conversione  $h(0,07; R, \alpha^\circ)$  per ogni qualità di radiazione,  $R$ , considerata nel dominio energetico di interesse e angolo di incidenza  $\alpha$  sono stati determinati applicando la seguente equazione:

$$h(0,07; R, \alpha^\circ) = \frac{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) \cdot h(0,07; E, \alpha^\circ) dE}{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) dE} \quad (8.9)$$

A differenza dei coefficienti di conversione monoenergetici  $h(10; E, \alpha)$ , i coefficienti di conversione  $h(0,07; E, \alpha)$  non dipendono fortemente dall'energia; di conseguenza, differenze nella distribuzione spettrale dovute a diverse facility o a variazioni dei parametri ambientali, influenzano i valori di  $h_{pk}(0,07; R, \alpha)$  in modo pressochè trascurabile. Quindi al fine di valutare  $H_p(0,07)$  è possibile applicare come coefficiente di conversione  $h_{pk}(0,07; R, \alpha)$  anche un valore ottenuto da un impianto diverso da quello usato per la calibrazione o direttamente quanto riportato sulla normativa di riferimento.

### 8.4.3 Coefficienti di conversione $h(3; R, \alpha^\circ)$

Le raccomandazioni internazionali ICRU 47 [17] e ICRU 51 [14] definiscono l'equivalente di dose personale  $H_p(3)$  come la grandezza operativa indicata per la dosimetria al cristallino. Essendo una grandezza ancora alquanto discussa, al momento i coefficienti di conversione monoenergetici  $H_p(3)/K_a$  sono stati valutati solo dal GSG (Forschungszentrum für Umwelt und Gesundheit) di Monaco [15], mediante simulazioni Monte Carlo su di un fantoccio teorico  $30 \times 30 \times 15$

cm<sup>3</sup> - 4 elementi ICRU per varie energie e angoli di incidenza e da ENEA-IRP per un fantoccio ridotto meglio rappresentativo delle reali dimensioni della testa. In base ai valori riportati dal GSF per energie superiori a 10 keV ( $E > 10$  keV) e ai valori ottenuti con simulazioni Monte Carlo per energie inferiori a 10 keV è stato possibile calcolare i coefficienti di conversione  $h(3; R, \alpha^\circ)$  sugli spettri ricostruiti.

I valori dei coefficienti di conversione monoenergetici ottenuti sono riassunti in sono riassunti in Tabella 8.6.

I coefficienti di conversione  $h(3; R, \alpha^\circ)$  per ogni qualità di radiazione,  $R$ , considerata nel dominio energetico di interesse e angolo di incidenza  $\alpha$  sono stati determinati applicando la seguente equazione:

$$h(3; R, \alpha^\circ) = \frac{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) \cdot h(3; E, \alpha^\circ) dE}{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) dE} \quad (8.10)$$

#### 8.4.4 Coefficienti di conversione $h^*(10; R)$

Le grandezze operative definite dalla ICRU, riportate nella ICRU 51 [14] sono: per la dosimetria ambientale, l'equivalente di dose ambientale,  $H^*$  e l'equivalente di dose direzionale,  $H'$ .

Nella Pubblicazione ICRU 57 [2] e nella ISO 4037-3 [5] sono riportati i coefficienti di conversione  $h^*(10; E)$  per fotoni di energia inferiore a 10 keV ( $E_{ISO}$ ). Per ottenere i coefficienti di conversione monoenergetici per  $E < E_{ISO}$  è stata applicata la seguente equazione di attenuazione:

$$h^*(10; E < E_{ISO}) = h^*(10; E_{ISO}) \cdot \frac{\exp\left(-\left(\frac{\mu(E)}{\rho}\right) \cdot \rho_{ICRU} \cdot d\right)}{\exp\left(-\left(\frac{\mu(E_{ISO})}{\rho}\right) \cdot \rho_{ICRU} \cdot d\right)} \quad (8.11)$$

dove  $(\mu(E)/\rho)_{ISO,E}$  è il coefficiente di assorbimento massico monoenergetico del tessuto ICRU,  $d = 10$  mm e  $\rho_{ICRU} = 1,0$  cm<sup>3</sup> densità della sfera ICRU.

I risultati ottenuti sono riassunti in Tabella 8.7.

Al fine di ottenere una funzione continua di  $h^*(10; E)$  da applicare per la valutazione di  $h^*(10; R)$  mediante l'equazione è stata fatta una interpolazione lagrangiana (4 punti) (Figura 8.6).

I coefficienti di conversione  $h^*(10; R)$  per ogni qualità di radiazione,  $R$ , considerata nel dominio energetico di interesse sono stati determinati applicando la seguente equazione:

$$h^*(10; R) = \frac{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) \cdot h^*(10; R) dE}{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) dE} \quad (8.12)$$

Come i coefficienti di conversione monoenergetici  $h(10; E, \alpha^\circ)$  anche i coefficienti  $h^*(10; E)$  sono fortemente dipendenti dall'energia, soprattutto per fotoni di bassa energia. Questo comporta che i coefficienti di conversione calcolati sugli spettri ricostruiti possano differire anche del 100% da un impianto ad un altro e, nel caso in cui si utilizzi la medesima facility, si possono riscontrare differenze

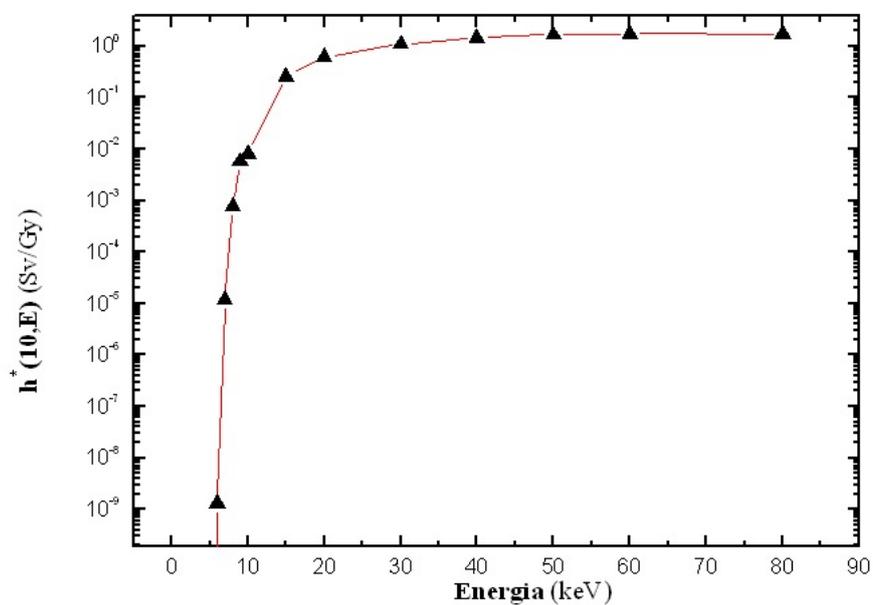
**Tabella 8.6:** Coefficienti di conversione  $h(3; E, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy per diversi angoli di incidenza

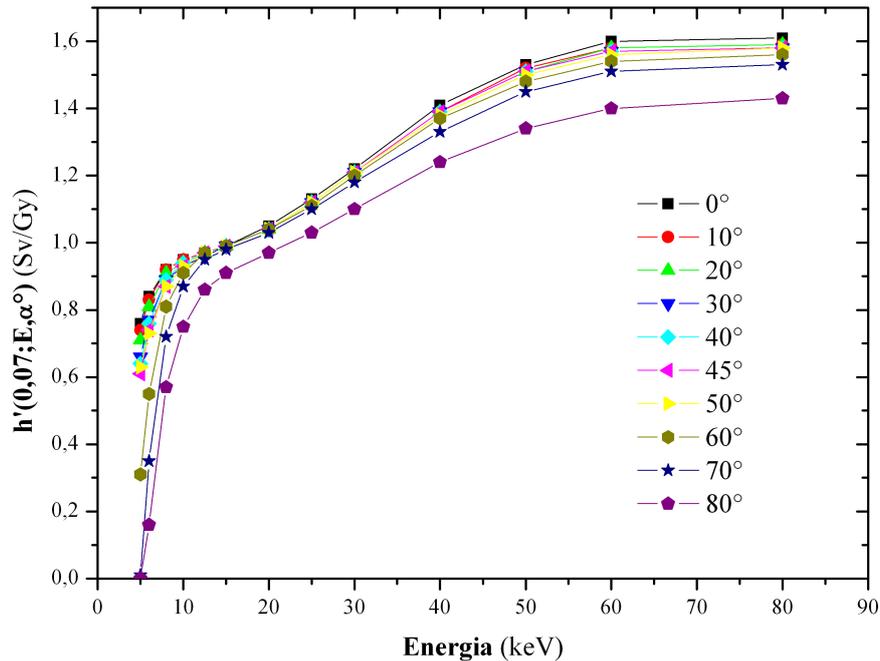
Energia (keV)	Angolo di incidenza $\alpha^\circ$									
	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°
2										
3										
4	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$	$< 1 \cdot 10^{-6}$
5										
6	$1,31 \cdot 10^{-3}$	$1,17 \cdot 10^{-3}$	$8,22 \cdot 10^{-4}$	$4,27 \cdot 10^{-4}$	$1,44 \cdot 10^{-4}$	$2,85 \cdot 10^{-5}$	$1,00 \cdot 10^{-5}$			
7	$4,16 \cdot 10^{-3}$	$3,88 \cdot 10^{-3}$	$3,14 \cdot 10^{-3}$	$2,11 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-3}$	$4,46 \cdot 10^{-4}$	$2,37 \cdot 10^{-4}$	$3,23 \cdot 10^{-5}$		
8	$6,76 \cdot 10^{-3}$	$6,45 \cdot 10^{-3}$	$5,55 \cdot 10^{-3}$	$4,21 \cdot 10^{-3}$	$2,66 \cdot 10^{-3}$	$1,20 \cdot 10^{-3}$	$7,68 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-5}$	
9	$5,49 \cdot 10^{-2}$	$5,32 \cdot 10^{-2}$	$4,81 \cdot 10^{-2}$	$3,98 \cdot 10^{-2}$	$2,91 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$1,30 \cdot 10^{-2}$	$5,06 \cdot 10^{-3}$	$7,13 \cdot 10^{-4}$	
10*	0,264	0,258	0,239	0,207	0,163	0,102	0,081	0,039	0,009	0,000
15*	0,688	0,683	0,667	0,637	0,591	0,477	0,444	0,354	0,220	0,051

\* i valori a 10 e 15 keV sono i accordi con i dati pubblicati sulla ISO 4037-3 entro un fattore  $\pm 5\%$ .

Tabella 8.7: Coefficienti di conversione monoenergetici  $h^*(10; E)$  in Sv/Gy.

nota	energia fotoni (keV)	$h_k^*(10; E)$ in Sv/Gy
calcolati con legge di attenuazione esponenziale	3	$< 1 \cdot 10^{-6}$
	4	
	5	
	6	
	7	$1,2 \cdot 10^{-5}$
	8	$7,8 \cdot 10^{-4}$
	9	$5,8 \cdot 10^{-3}$
ISO 4037-3	10	0,01
	15	0,26
	20	0,61
	30	1,10
	40	1,47
	50	1,67
	60	1,74
	80	1,72

Figura 8.6: Coefficienti di conversione monoenergetici  $h^*(10; E)$  in Sv/Gy in funzione dell'energia dei fotoni  $E$ .



**Figura 8.7:** Coefficienti di conversione monoenergetici  $h'(0,07; E, \alpha)$  in funzione dell'energia del fotone  $E$  e dell'angolo di incidenza della radiazione.

causa di una possibile fluttuazione della densità o dello spessore dell'aria tra la sorgente ed il punto di misura.

#### 8.4.5 Coefficienti di conversione $h'(0,07; R, \alpha)$

La quantità  $H'(0,07; \vec{\Omega})$  è definita come l'equivalente di dose direzionale in un punto di un campo di radiazione che sarebbe prodotta dal corrispondente campo espanso nella sfera ICRU alla profondità di 0,07 mm, lungo un raggio della sfera situato in una specifica direzione. L'equivalente di dose direzionale è previsto per radiazioni debolmente penetranti per le quali non sarebbe corretto non considerare l'attenuazione che comporta una sovrastima dell'equivalente di dose agli organi superficiali. La grandezza  $H'(0,07; \vec{\Omega})$ , definita nella sfera ICRU per un campo di radiazioni soltanto espanso, a differenza di  $H^*(10)$ , viene a dipendere dalla distribuzione angolare della radiazione incidente. In particolare il valore di  $H'(0,07; \vec{\Omega})$  decresce all'aumentare dell'angolo della radiazione rispetto alla direzione di riferimento.

Al fine di ottenere i coefficienti di conversione  $h'(0,07; R, \alpha)$  per i fasci di radiazioni considerati, i coefficienti di conversione monocromatici riportati nella ISO 4037-3 [5] sono stati interpolati con una funzione lagrangiana su quattro punti. I valori utilizzati sono riportati in figura 8.7.

I coefficienti di conversione  $h'(0,07; R, \alpha)$  per ogni qualità di radiazione,  $R$ , considerata nel dominio energetico di interesse sono stati determinati applicando la seguente equazione:

$$h'(0, 07; R, \alpha^\circ) = \frac{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) \cdot h'(0, 07; R, \alpha^\circ) dE}{\int_0^{E_{max}} C_E(E) \cdot k(E) dE} \quad (8.13)$$

I coefficienti di conversione  $h'(0, 07; E, \alpha)$  non presentano una forte dipendenza dall'energia; di conseguenza, differenze nella distribuzione spettrale dovute ad impianti con caratteristiche diverse o a variazioni dei parametri ambientali, influenzano i valori di  $h'(0, 07; R, \alpha)$  in modo pressochè trascurabile. Quindi al fine di valutare  $H'(0, 07; \vec{\Omega})$  è possibile applicare come coefficiente di conversione  $h'(0, 07; E, \alpha)$  anche valori ottenuti in diverse condizioni di impiego.

## 8.5 Parametri caratteristici e loro incertezze

I dati caratteristici ( $I^\circ$  e  $\Pi^\circ$  spessore emivalente, energia media, fattore di kerma e coefficienti di conversione) di ogni fascio X filtrato preso in esame sono influenzati da diversi fattori tra cui:

- la tensione dell'impianto usato;
- la densità dell'aria;
- la statistica di conteggio degli spettri acquisiti;
- il metodo di ricostruzione dello spettro usato.

L'influenza della variabilità di ognuno di questi parametri sulla determinazione dei dati caratteristici è stata analizzata singolarmente, cioè, facendo variare uno solo dei fattori, è stato osservato come tale fluttuazione andava ad influenzare il valore del dato caratteristico esaminato [5].

Ogni spettro è stato acquisito per un tempo tale da avere una statistica molto buona e ridurre quindi al minimo le incertezze di conteggio. Gli spettri sono stati misurati impostando una corrente del tubo a raggi X molto bassa (circa 0,1 mA) per ridurre un possibile effetto somma del segnale (*pile-up*).

Il metodo di ricostruzione usato è stato validato per ogni spettro applicando la funzione risposta del rivelatore ottenuta con metodo Monte Carlo.

Una analisi dettagliata della variabilità dei dati caratteristici è stata invece fatta per una variazione della densità dell'aria e della tensione dell'impianto, avendo considerato trascurabile tutto ciò che è legato all'acquisizione degli spettri ed alla loro ricostruzione. Gli spettri sono stati suddivisi in tre gruppi in base alla loro energia media: il primo gruppo comprende gli spettri con energia media compresa fra 6,0 e 14,0 keV, il secondo gruppo fra 14,0 e 25,5 keV ed il terzo da 25,5 a 58,0 keV. I dati caratteristici ottenuti sono riportati in Tabella 8.8 e 8.9 per ogni gruppo.

I coefficienti di conversione  $h_p(10; R)$  e  $h^*(10; R)$  presentano una variazione molto elevata per energie basse. Questo è dovuto alla elevata dipendenza dall'energia dei coefficienti di conversione monoenergetici  $h_p(10; E)$  e  $h^*(10; E)$ , in modo particolare per le basse energie. Come dimostrano i dati riportati in

**Tabella 8.8:** *Variazione percentuale dei dati caratteristici primo e secondo spessore emivalente ( $I^\circ$  e  $II^\circ$  SEV), energia media ( $E_{media}$ ), fattore di kerma ( $k(R)$ ) e coefficienti di conversione  $h(0,07;R)$ ,  $h^*(10;R)$ ,  $h(10;R,0)$  e  $h(0,07;R,0)$  per una variazione della tensione del tubo a raggi X del  $\pm 1\%$ .*

$E_{media}$ in keV del fascio X filtrato, R	$\Delta I^\circ$ SEV in %	$\Delta II^\circ$ SEV in %	$\Delta E_{media}$ in %	$\Delta k(R)$ in %	$\Delta h_p(0,07;R)$ in %	$\Delta h^*(10;R)$ in %
6,0 - 14,0	2 - 3	2 - 3	1	2 - 4	0,1 - 0,2	4 - 40
14,0 - 25,5				1 - 2		1 - 4
25,5 - 58,0						0,2 - 0,1	0,2 - 1

<sup>^</sup>Nessuna incertezza è stata determinata per valori inferiori a  $1 \cdot 10^{-4}$  Sv/Gy

$E_{media}$ in keV del fascio X filtrato, R	$\Delta h_p(10;R,0^\circ)$ in %	$\Delta h^*(0,07;R,0^\circ)$ in %
6,0 - 14,0	4 - 40 <sup>^</sup>	0,2 - 1 <sup>^</sup>
14,0 - 25,5	2 - 4	
25,5 - 58,0	1 - 2	

<sup>^</sup>Nessuna incertezza è stata determinata per valori inferiori a  $1 \cdot 10^{-4}$  Sv/Gy

tabella, la variazione dei dati caratteristici va diminuendo all'aumentare dell'energia media degli spettri. I valori ottenuti dimostrano quanto sia importante che l'impianto utilizzato per la determinazione dei coefficienti di conversione sia il medesimo ed il più possibile stabile durante tutte le misure.

Il parametro ambientale, densità dell'aria, influenza la distribuzione spettrale in modo particolare per quegli spettri che presentano un numero elevato di fotoni di bassa energia. Per avere una stima dell'influenza della densità dell'aria sui dati caratteristici sono state determinate le fluttuazioni andando a correggere gli spettri per valori di densità dell'aria con una variabilità del  $\pm 10\%$  rispetto ai valori di riferimento.

Come dimostrato dai dati riportati in Tabella 8.9 all'aumentare dell'energia una possibile variazione della densità dell'aria sulla determinazione dei dati caratteristici diviene trascurabile. Le variazioni maggiori sui dati si hanno per quei parametri che presentano una forte dipendenza dall'energia. Quindi diventa molto importante per fasci X di bassa energia mantenere le stesse condizioni ambientali durante le misure. Per ogni spettro acquisito è stata sempre monitorata sia la temperatura sia la densità dell'aria e non ci sono state variazioni superiori all'1%. Di conseguenza si può affermare rispetto a quanto riportato in tabella che l'influenza di tale variazione sui parametri caratteristici è da considerarsi pressochè trascurabile.

L'analisi delle incertezze sui parametri caratteristici riportata si è basata sui dati riportati in letteratura e ricavati presso altri Laboratori di riferimento [12, 10].

**Tabella 8.9:** *Variatione percentuale dei dati caratteristici primo e secondo spessore emivalente ( $I^\circ$  e  $II^\circ$  SEV), energia media ( $E_{media}$ ), fattore di kerma ( $k(R)$ ) e coefficienti di conversione  $h(0,07;R)$ ,  $h^*(10;R)$ ,  $h(10;R)$ ,  $h^*(0,07;R,0)$  e  $h(0,07;R,0)$  per una variazione della densità dell'aria del  $\pm 10\%$ .*

$E_{media}$ in keV del fascio X filtrato, R	$\Delta I^\circ$ SEV in %	$\Delta II^\circ$ SEV in %	$\Delta E_{media}$ in %	$\Delta k(R)$ in %	$\Delta h_p(0,07;R)$ in %	$\Delta h^*(10;R)^\wedge$ in %
6,0 - 14,0	2,5 - 5	1,5 - 5,5	0,3 - 1,5	3 - 7	0,2 - 1,5	2,5 - 11 <sup>^</sup>
14,0 - 25,5	0,3 - 3	0,3 - 2		0,4 - 2,5		0,6 - 2,5
25,5 - 58,0	0,2 - 1	0,2 - 0,5	0,1 - 0,3	0,1 - 0,4	0,02 - 0,1	0,1 - 0,6

<sup>^</sup>Nessuna incertezza è stata determinata per valori inferiori a  $1 \cdot 10^{-4}$  Sv/Gy

$E_{media}$ in keV del fascio X filtrato, R	$\Delta h_p(10;R,0^\circ)$ in %	$\Delta h^*(0,07;R,0^\circ)$ in %
6,0 - 14,0	2,5 - 12 <sup>^</sup>	0,3 - 0,7 <sup>^</sup>
14,0 - 25,5	0,5 - 3	
25,5 - 58,0	0,1 - 0,8	

<sup>^</sup>Nessuna incertezza è stata determinata per valori inferiori a  $1 \cdot 10^{-4}$  Sv/Gy

# Capitolo 9

## Risultati

### 9.1 Tabelle riassuntive dei dati caratteristici degli spettri

Per ogni radiazione di riferimento ( $R$ ) raccomandata dall'ISO [1] a livello internazionale, nel dominio energetico di interesse, è stata effettuata, direttamente sui fasci di radiazione, una analisi completa della qualità del fascio con uno spettrometro con rivelatore al Germanio [7]. Per ogni qualità di radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L), "Narrow-Spectrum series" (N), "High Air-Kerma rate series" (H) e per due fasci di energia inferiori a quelle riportate dalla normativa, pari rispettivamente a 5 kV e 7,5 kV, sono stati analizzati i seguenti parametri:

- primo e secondo spessore emivalente ( $I^\circ$  SEV,  $II^\circ$  SEV)
- energia media dello spettro ( $\bar{E}_{\text{media}}$ )
- fattore di kema  $k(R)$
- coefficiente di conversione  $h(0,07; R, \alpha)$  da kerma in aria,  $k_a$ , alla grandezza operativa equivalente di dose personale,  $H_p(0,07)$ , per la pelle a diversi angoli di incidenza
- coefficiente di conversione  $h(3; R, \alpha^\circ)$  da kerma in aria,  $k_a$ , alla grandezza operativa equivalente di dose personale,  $H_p(3)$ , per il cristallino a diversi angoli di incidenza
- coefficiente di conversione  $h(10; R, \alpha^\circ)$  da kerma in aria,  $k_a$ , alla grandezza operativa equivalente di dose personale,  $H_p(10)$ , per un fantoccio a slab a diversi angoli di incidenza
- coefficiente di conversione  $h^*(10; R)$  da kerma in aria,  $k_a$ , alla grandezza operativa equivalente di dose ambientale,  $H^*(10)$
- coefficiente di conversione  $h'(0,07; R, \vec{\Omega})$  da kerma in aria,  $k_a$  alla grandezza operativa equivalente di dose direzionale,  $H'(0,07; \vec{\Omega})$ , per diversi angoli di incidenza

Vengono inoltre riportati i parametri caratteristici di spettri non filtrati (senza alcuna filtrazione addizionale) ottenuti impostando una tensione al tubo pari a 5 kV e 7,5 kV.

Ogni spettro è stato misurato a due diverse distanze dalla sorgente di radiazioni; rispettivamente a 50 cm e 200 cm, in modo da ottenere un fascio omogeneo e delle dimensioni sufficienti rispettivamente alla taratura di strumentazione di radioprotezione e irraggiamento di dosimetri personali su fantoccio.

Per potere disporre di tutte le qualità di radiazione X nel campo nel campo delle basse energie previsto per il riconoscimento, è richiesto che i fasci appartenenti alle serie L e N con energia media inferiore a 30 keV abbiano una energia media entro il  $\pm 5\%$  ed una risoluzione entro il  $\pm 15\%$  dei valori riportati nella ISO 4037-1 Tab. 3 e 4 [1].

## 9.2 Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm

## 9.2.1 La serie ISO "Low Air-Kerma Rate series"

**Tabella 9.1:** Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "Low Air-Kerma Rate series" ( $L$ ) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media,  $E_{media}$  ed energia massima,  $E_{max}$  dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ( $h = ISEV/IISEV$ ), risoluzione in %, fattore di kerma  $k(R)$  in  $pGy \cdot cm^2$ . Coefficiente di conversione da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose ambientale,  $H^*(10)$ , per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore ( $SDD$ ) = 50. cm

	$E_{media}$ (keV)	$E_{max}$ (keV)	I° SEV (mm)	II° SEV (mm)	Coefficiente di omogeneità	Risoluzione (%)	$k(R)$ ( $pGy \cdot cm^2$ )	$h^*(10;L)$ (Sv/Gy)
<b>L10</b>	8,2	9,4	0,057	0,058	0,98	19	12,29	0,011
<b>L20</b>	16,1	18,4	0,40	0,41	0,98	19	3,51	0,39
<b>L30</b>	26,1	29,5	1,51	1,55	0,97	18	1,89	0,97
<b>L35</b>	30,5	35,4	2,28	2,30	0,99	21	1,71	1,44

**Tabella 9.2:** Coefficienti di conversione  $h(10; L, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(10)$ , per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

	<b><math>h(10; L, \alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math>:</b>									
	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°
<b>L10</b>	0,001	0,001	0,001	-	-	-	-	-	-	-
<b>L20</b>	0,34	0,33	0,31	0,28	0,23	0,16	0,13	0,08	0,03	-
<b>L30</b>	0,92	0,92	0,91	0,88	0,81	0,79	0,74	0,62	0,42	0,18
<b>L35</b>	1,46	1,45	1,43	1,40	1,34	1,29	1,24	1,11	0,89	0,49

**Tabella 9.3:** Coefficienti di conversione  $h(0,07; L, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(0,07)$ , per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

<b><math>h(0,07; L, \alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math> :</b>		0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°
<b>L10</b>		0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,88
<b>L20</b>		1,00	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,95	0,87
<b>L30</b>		1,04	1,04	1,04	1,04	1,03	1,04	1,03	1,02	1,02	1,02
<b>L35</b>		1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,04	1,04

**Tabella 9.4:** Coefficiente di conversione  $h(3;L,\alpha)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(3)$ , per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" [15].

**$h(3;L,\alpha^\circ)$  in Sv/Gy per angolo di incidenza  $\alpha^\circ$ :**

	0°	15°	30°	45°	60°	75°
L10	0,02	0,02	0,01	0,01	-	-
L20	0,81	0,79	0,74	0,64	0,48	0,43
L30	1,10	1,09	1,08	1,03	0,95	0,73
L35	1,48	1,48	1,46	1,40	1,29	1,06

**Tabella 9.5:** Coefficienti di conversione  $h'(0,07;L,\alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose direzionale,  $H'(0,07,\Omega)$ , per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°
<b>L10</b>	0,92	0,92	0,91	0,89	0,89	0,87	0,87	0,81	0,72	0,58
<b>L20</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,92
<b>L30</b>	1,15	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,13	1,11	1,04
<b>L35</b>	1,39	1,38	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,35	1,32	1,23

## 9.2.2 La serie ISO "Narrow-Spectrum series"

**Tabella 9.6:** Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "Narrow-Spectrum series" (N) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media,  $E_{media}$  ed energia massima,  $E_{max}$  dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ( $h = ISEV/IISEV$ ), risoluzione in %, fattore di kerma  $k(R)$  in  $pGy \cdot cm^2$ . Coefficiente di conversione da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose ambientale,  $H^*(10)$ , per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore ( $SDD$ ) = 50. cm

	$E_{media}$ (keV)	$E_{max}$ (keV)	I° SEV (mm)	II° SEV (mm)	Coefficiente di omogeneità	Risoluzione (%)	$k(R)$ ( $pGy \cdot cm^2$ )	$h^*(10;N)$ ( $Sv/Gy$ )
<b>N10</b>	8,2	9,3	0,048	0,053	0,91	27	12,38	0,006
<b>N15</b>	11,7	14,5	0,14	0,16	0,88	28	6,46	0,113
<b>N20</b>	15,3	18,9	0,32	0,35	0,91	32	3,98	0,322
<b>N25</b>	19,4	24,6	0,66	0,74	0,89	30	1,78	0,574
<b>N30</b>	24,0	29,2	1,15	1,27	0,91	30	2,07	0,856
<b>N40</b>	33,5	40,0	2,80	2,97	0,94	28	1,66	1,264

**Tabella 9.7:** Coefficienti di conversione  $h(10; N, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(10)$ , per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

		<b><math>h(10; N, \alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math>:</b>										
		0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	
<b>N10</b>		<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	
<b>N15</b>		0,07	0,07	0,06	0,05	0,03	0,01	0,01	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	
<b>N20</b>		0,27	0,26	0,24	0,21	0,17	0,11	0,09	0,06	0,02	<1·10 <sup>-3</sup>	
<b>N25</b>		0,57	0,55	0,53	0,52	0,48	0,44	0,35	0,30	0,10	0,09	
<b>N30</b>		0,80	0,80	0,79	0,76	0,70	0,67	0,62	0,50	0,33	0,13	
<b>N40</b>		1,24	1,22	1,21	1,18	1,12	1,08	1,04	0,91	0,72	0,35	

**Tabella 9.8:** Coefficienti di conversione  $h(0,07;N,\alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(0,07)$ , per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

		<b><math>h(0,07;N,\alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math> :</b>										
		0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	
<b>N10</b>		0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,88	
<b>N15</b>		1,00	1,00	1,00	1,01	0,99	0,98	0,97	0,94	0,86	0,63	
<b>N20</b>		1,00	1,00	1,00	1,01	0,99	0,99	0,98	0,97	0,92	0,77	
<b>N25</b>		1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,01	1,01	
<b>N30</b>		1,11	1,11	1,11	1,11	1,09	1,09	1,09	1,08	1,05	1,00	
<b>N40</b>		1,30	1,29	1,29	1,29	1,27	1,26	1,25	1,22	1,18	1,11	

**Tabella 9.9:** Coefficiente di conversione  $h(3; N, \alpha)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(3)$ , per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" [15].

**$h(3; N, \alpha)$  in Sv/Gy per angolo di incidenza  $\alpha^\circ$ :**

	0°	15°	30°	45°	60°	75°
<b>N10</b>	0,02	0,02	0,01	0,01	-	-
<b>N15</b>	0,62	0,59	0,49	0,34	0,16	0,16
<b>N20</b>	0,81	0,79	0,71	0,59	0,40	0,37
<b>N25</b>	0,95	0,84	0,80	0,60	0,50	0,46
<b>N30</b>	1,02	1,02	1,01	0,95	0,87	0,65
<b>N40</b>	1,32	1,31	1,30	1,25	1,15	0,93

**Tabella 9.10:** Coefficienti di conversione  $h'(0,07;N,\alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose direzionale,  $H'(0,07,\Omega)$ , per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

	<b><math>h'(0,07;N,\alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math>:</b>										
	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	
<b>N10</b>	0,92	0,92	0,91	0,89	0,89	0,87	0,87	0,81	0,72	0,58	
<b>N15</b>	1,00	0,96	0,96	0,94	0,95	0,95	0,95	0,94	0,91	0,80	
<b>N20</b>	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,97	0,90	
<b>N25</b>	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,01	
<b>N30</b>	1,11	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,09	1,08	1,01	
<b>N40</b>	1,30	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,26	1,23	1,15	

## 9.2.3 La serie ISO "High Air-Kerma Rate series"

**Tabella 9.11:** Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media  $E_{media}$  ed energia massima  $E_{max}$  dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ( $h = ISEV/IISEV$ ), risoluzione in %, fattore di kerma  $k(R)$  in  $pGy \cdot cm^2$ . Coefficiente di conversione da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose ambientale,  $H^*(10)$ , per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore (SDD) = 50. cm

	$E_{media}$ (keV)	$E_{max}$ (keV)	I° SEV (mm)	II° SEV (mm)	Coefficiente di omogeneità	Risoluzione (%)	k(R) ( $pGy \cdot cm^2$ )	$h^*(10;H)$ (Sv/Gy)
<b>H10</b>	7,7	10,4	0,04	0,04	0,974	52	15,40	0,005
<b>H20</b>	11,9	20,2	0,12	0,15	0,800	89	8,61	0,11
<b>H30</b>	19,9	30,1	0,36	0,58	0,621	70	3,05	0,50
<b>H60</b>	38,2	59,9	2,4	3,48	0,689	76	1,70	1,32

**Tabella 9.12:** Coefficienti di conversione  $h(10; H, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(10)$ , per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

		<b><math>h(10; H, \alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math>:</b>										
		0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	
<b>H10</b>		0,001	$<1 \cdot 10^{-4}$									
<b>H20</b>		0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,03	0,02	0,01	0,01	$<1 \cdot 10^{-4}$	
<b>H30</b>		0,45	0,45	0,43	0,41	0,36	0,32	0,29	0,23	0,14	0,05	
<b>H60</b>		1,33	1,32	1,30	1,27	1,21	1,17	1,12	0,99	0,78	0,42	

**Tabella 9.13:** Coefficienti di conversione  $h(0,07; H, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(0,07)$ , per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

		<b><math>h(0,07; H, \alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math>:</b>										
		0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	
<b>H10</b>		0,88	0,88	0,87	0,87	0,85	0,85	0,84	0,82	0,78	0,67	
<b>H20</b>		0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,95	0,95	0,93	0,90	0,78	
<b>H30</b>		1,04	1,04	1,04	1,04	1,03	1,02	1,02	1,01	0,97	0,87	
<b>H60</b>		1,37	1,37	1,36	1,36	1,34	1,33	1,32	1,28	1,22	1,13	

**Tabella 9.14:** *Coefficiente di conversione  $h(3; H, \alpha)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(3)$ , per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie High Air-Kerma Rate series" (H) [15].*

**$h(3; H, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy per angolo di incidenza  $\alpha^\circ$  :**

	0°	15°	30°	45°	60°	75°
<b>H10</b>	0,021	0,020	0,016	0,010	0,004	0,004
<b>H20</b>	0,381	0,366	0,317	0,238	0,136	0,127
<b>H30</b>	0,829	0,817	0,769	0,679	0,547	0,437
<b>H60</b>	1,381	1,376	1,357	1,302	1,198	0,973

**Tabella 9.15:** Coefficienti di conversione  $h'(0,07;H,\alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose direzionale,  $H'(0,07,\Omega)$ , per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

	<b><math>h'(0,07;H,\alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math>:</b>										
	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	
<b>H10</b>	0,84	0,84	0,83	0,80	0,80	0,78	0,77	0,67	0,54	0,39	
<b>H20</b>	0,95	0,95	0,94	0,93	0,94	0,93	0,93	0,90	0,85	0,74	
<b>H30</b>	1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,00	0,92	
<b>H60</b>	1,33	1,32	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,29	1,26	1,17	

### 9.3 Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm

#### 9.3.1 La serie ISO "Low Air-Kerma Rate series"

**Tabella 9.16:** Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "Low Air-Kerma Rate series" ( $L$ ) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media  $E_{media}$  ed energia massima  $E_{max}$  dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ( $h = ISEV/IISEV$ ), risoluzione in %, fattore di kerma  $k(R)$  in  $pGy \cdot cm^2$ . Coefficiente di conversione da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose ambientale,  $H^*(10)$ , per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore ( $SDD$ ) = 200. cm

	$E_{media}$ (keV)	$E_{max}$ (keV)	I° SEV (mm)	II° SEV (mm)	Coefficiente di omogeneità	Risoluzione (%)	$k(R)$ ( $pGy \cdot cm^2$ )	$h^*(10;L)$ (Sv/Gy)
<b>L10</b>	8,5	9,4	0,06	0,06	1,00	18	11,6	0,010
<b>L20</b>	16,2	19,5	0,44	0,48	0,92	19	3,52	0,37
<b>L30</b>	26,1	29,5	1,57	1,63	0,96	18	1,89	0,97
<b>L35</b>	30,3	35,4	2,25	2,27	0,99	22	1,72	1,44

**Tabella 9.17:** Coefficienti di conversione  $h(10; L, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(10)$ , per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L) come specificato nella ISO 4037-1 [1]. Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

	<b><math>h(10; L, \alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math> :</b>									
	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°
<b>L10</b>	0,001	0,001	0,001	-	-	-	-	-	-	-
<b>L20</b>	0,41	0,40	0,39	0,36	0,30	0,27	0,23	0,16	0,04	-
<b>L30</b>	0,93	0,92	0,91	0,88	0,82	0,79	0,74	0,62	0,42	0,17
<b>L35</b>	1,46	1,44	1,43	1,40	1,34	1,29	1,24	1,11	0,89	0,37

**Tabella 9.18:** Coefficienti di conversione  $h(0,07;L,\alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(0,07)$ , per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

		<b><math>h(0,07;L,\alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math> :</b>										
		0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	
<b>L10</b>		0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,88	
<b>L20</b>		1,00	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99	0,98	0,98	0,95	0,87	
<b>L30</b>		1,04	1,04	1,04	1,04	1,03	1,04	1,03	1,02	1,02	1,02	
<b>L35</b>		1,06	1,06	1,06	1,06	1,05	1,05	1,05	1,05	1,04	1,04	

**Tabella 9.19:** Coefficiente di conversione  $h(3; L, \alpha)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(3; L, \alpha)$ , per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" [15].

**$h(3; L, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy per angolo di incidenza  $\alpha^\circ$ :**

	0°	15°	30°	45°	60°	75°
L10	0,03	0,03	0,02	0,01	0,006	0,006
L20	0,81	0,79	0,74	0,64	0,48	0,43
L30	1,09	1,09	1,08	1,03	0,95	0,73
L35	1,48	1,48	1,45	1,39	1,29	1,06

**Tabella 9.20:** Coefficienti di conversione  $h'(0,07;L,\alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose direzionale,  $H'(0,07,\Omega)$ , per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Low Air-Kerma Rate series" (L) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

	<b><math>h'(0,07;L,\alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math> :</b>										
	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	
<b>L10</b>	0,93	0,93	0,92	0,90	0,90	0,88	0,89	0,83	0,76	0,62	
<b>L20</b>	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,92	
<b>L30</b>	1,15	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,14	1,13	1,12	1,04	
<b>L35</b>	1,39	1,38	1,37	1,37	1,37	1,37	1,37	1,35	1,32	1,23	

## 9.3.2 La serie ISO "Narrow-Spectrum series"

**Tabella 9.21:** Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "Narrow-Spectrum series" (N) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media  $E_{media}$  ed energia massima  $E_{max}$  dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ( $h = ISEV/IISEV$ ), risoluzione in %, fattore di kerma  $k(R)$  in  $pGy \cdot cm^2$ . Coefficiente di conversione da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose ambientale,  $H^*(10)$ , per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore ( $SDD$ ) = 200. cm

	$E_{media}$ (keV)	$E_{max}$ (keV)	I° SEV (mm)	II° SEV (mm)	Coefficiente di omogeneità	Risoluzione (%)	$k(R)$ ( $pGy \cdot cm^2$ )	$h^*(10;N)$ ( $Sv/Gy$ )
<b>N10</b>	8,4	9,3	0,056	0,063	0,89	27	11,93	0,009
<b>N15</b>	11,9	14,5	0,16	0,17	0,94	28	6,15	0,127
<b>N20</b>	15,5	18,9	0,34	0,36	0,94	32	3,81	0,342
<b>N25</b>	19,3	24,5	0,67	0,75	0,89	30	1,78	0,574
<b>N30</b>	23,8	29,2	1,22	1,24	0,98	30	2,10	0,843
<b>N40</b>	33,2	40,0	2,80	3,04	0,92	28	1,66	1,253

**Tabella 9.22:** Coefficienti di conversione  $h(10; N, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(10)$ , per il fantoccio a slab e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

		<b><math>h(10; N, \alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math> :</b>										
		0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	
	<b>N10</b>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	
	<b>N15</b>	0,08	0,08	0,07	0,05	0,04	0,01	0,01	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	<1·10 <sup>-3</sup>	
	<b>N20</b>	0,29	0,28	0,26	0,23	0,19	0,12	0,10	0,06	0,03	<1·10 <sup>-3</sup>	
	<b>N25</b>	0,55	0,55	0,53	0,50	0,44	0,41	0,37	0,28	0,15	0,09	
	<b>N30</b>	0,79	0,79	0,77	0,74	0,68	0,65	0,60	0,49	0,31	0,12	
	<b>N40</b>	1,22	1,21	1,20	1,17	1,11	1,07	1,03	0,90	0,71	0,35	

**Tabella 9.23:** Coefficienti di conversione  $h(0,07;N,\alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(0,07)$ , per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

	<b><math>h(0,07;N,\alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math> :</b>										
	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	
<b>N10</b>	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,87	
<b>N15</b>	1,01	1,01	1,00	1,02	0,99	0,98	0,97	0,95	0,86	0,61	
<b>N20</b>	1,00	1,00	1,00	1,01	0,99	0,99	0,98	0,97	0,92	0,79	
<b>N25</b>	1,03	1,03	1,03	1,03	1,02	1,02	1,01	1,01	1,00	0,98	
<b>N30</b>	1,11	1,10	1,10	1,10	1,09	1,09	1,09	1,08	1,05	1,00	
<b>N40</b>	1,29	1,29	1,28	1,29	1,27	1,26	1,25	1,21	1,18	1,10	

**Tabella 9.24:** Coefficiente di conversione  $h(3; N, \alpha)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(3)$ , per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) [15].

**$h(3; N, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy per angolo di incidenza  $\alpha^\circ$ :**

	0°	15°	30°	45°	60°	75°
<b>N10</b>	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01
<b>N15</b>	0,68	0,65	0,55	0,38	0,17	0,17
<b>N20</b>	0,82	0,80	0,73	0,61	0,43	0,39
<b>N25</b>	0,95	0,84	0,80	0,60	0,50	0,46
<b>N30</b>	1,02	1,01	1,00	0,94	0,86	0,65
<b>N40</b>	1,31	1,30	1,29	1,24	1,14	0,93

**Tabella 9.25:** Coefficienti di conversione  $h'(0,07; R, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose direzionale,  $H'(0,07, \Omega)$ , per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "Narrow-Spectrum series" (N) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

		<b><math>h'(0,07; N, \alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math>:</b>										
		0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	
N10		0,92	0,92	0,91	0,89	0,89	0,88	0,88	0,82	0,73	0,59	
N15		0,96	0,96	0,96	0,95	0,96	0,95	0,95	0,95	0,92	0,82	
N20		0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,91	
N25		1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,01	
N30		1,11	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,09	1,08	1,01	
N40		1,28	1,27	1,27	1,27	1,27	1,27	1,26	1,25	1,23	1,14	

## 9.3.3 La serie ISO "High Air-Kerma Rate series"

**Tabella 9.26:** Caratteristiche delle radiazioni di riferimento della serie "High Air-Kerma Rate series" ( $H$ ) misurate sperimentalmente con un rivelatore al Germanio (metodo spettrometrico) specificate nella ISO 4037-1 [1]: energia media  $E_{media}$  ed energia massima  $E_{max}$  dello spettro in keV, coefficiente di omogeneità ( $h = ISEV/IISEV$ ), risoluzione in %, fattore di kerma  $k(R)$  in  $pGy \cdot cm^2$ . Coefficiente di conversione da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose ambientale,  $H^*(10)$ , per la sfera ICRU. Distanza sorgente-rivelatore ( $SDD$ ) = 200. cm

	$E_{media}$ (keV)	$E_{max}$ (keV)	I° SEV (mm)	II° SEV (mm)	Coefficiente di omogeneità	Risoluzione (%)	$k(R)$ ( $pGy \cdot cm^2$ )	$h^*(10;H)$ (Sv/Gy)
<b>H10</b>	8,6	10,4	0,050	0,065	0,77	45	11,78	0,011
<b>H20</b>	13,3	20,2	0,145	0,192	0,76	82	5,72	0,16
<b>H30</b>	20,1	30,1	0,41	0,60	0,68	75	2,90	0,54
<b>H60</b>	37,3	59,9	2,50	3,34	0,75	78	1,73	1,31

**Tabella 9.27:** Coefficienti di conversione  $h(10; H, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(10)$ , per il fantoccio a slabb e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

		<b><math>h(10; H, \alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math>:</b>										
		0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	
<b>H10</b>		0,001	$<1 \cdot 10^{-4}$									
<b>H20</b>		0,12	0,12	0,11	0,10	0,08	0,05	0,04	0,03	0,01	$<1 \cdot 10^{-4}$	
<b>H30</b>		0,48	0,48	0,46	0,43	0,39	0,35	0,31	0,24	0,14	$<1 \cdot 10^{-4}$	
<b>H60</b>		1,31	1,30	1,29	1,26	1,19	1,15	1,10	0,98	0,77	0,41	

**Tabella 9.28:** Coefficienti di conversione  $h(0,07; H, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(0,07)$ , per la pelle e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

	<b><math>h(0,07; H, \alpha^\circ)</math> in Sv/Gy per angolo di incidenza <math>\alpha^\circ</math>:</b>										
	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°	
<b>H10</b>	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,89	0,79	
<b>H20</b>	0,98	0,98	0,98	0,99	0,98	0,97	0,96	0,94	0,90	0,85	
<b>H30</b>	1,04	1,04	1,04	1,04	1,04	1,03	1,02	1,00	0,98	0,94	
<b>H60</b>	1,36	1,36	1,36	1,35	1,34	1,32	1,31	1,29	1,22	1,12	

**Tabella 9.29:** Coefficiente di conversione  $h(3; H, \alpha)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose personale,  $H_p(3)$ , per il cristallino e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) [15].

**$h(3; H, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy per angolo di incidenza  $\alpha^\circ$  :**

	0°	15°	30°	45°	60°	75°
<b>H10</b>	0,05	0,05	0,04	0,03	0,01	0,01
<b>H20</b>	0,53	0,51	0,45	0,34	0,21	0,19
<b>H30</b>	0,87	0,86	0,81	0,72	0,59	0,47
<b>H60</b>	1,38	1,37	1,36	1,30	1,20	0,97

**Tabella 9.30:** Coefficienti di conversione  $h'(0,07; H, \alpha^\circ)$  in Sv/Gy da kerma in aria,  $K_a$ , all'equivalente di dose direzionale,  $H'(0,07, \Omega)$ , per la sfera ICRU e per le qualità della radiazione della serie "High Air-Kerma Rate series" (H) come specificato nella ISO 4037-1 [1]; distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

	0°	10°	20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	80°
<b>H10</b>	0,84	0,84	0,83	0,80	0,80	0,78	0,77	0,67	0,54	0,39
<b>H20</b>	0,95	0,95	0,94	0,93	0,94	0,93	0,93	0,90	0,85	0,74
<b>H30</b>	1,03	1,03	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,00	0,92
<b>H60</b>	1,33	1,32	1,31	1,31	1,31	1,31	1,31	1,29	1,26	1,17

## Capitolo 10

# Considerazioni riassuntive sui risultati ottenuti

Una prima verifica a conferma dell'esattezza del metodo di ricostruzione messo a punto, consiste in generale nel confrontare la quantità integrale *spessore emivalente* ottenuta sperimentalmente per ogni fascio studiato con la stessa quantità ricavata applicando il metodo spettrometrico. Tale tipo di confronto permette di giudicare, a valle dell'applicazione della metodologia di ricostruzione, la validità della stessa a fronte di una quantità macroscopica tradizionalmente impiegata per fornire un indice correlato alla qualità del fascio specifico.

I valori delle misure di primo e secondo spessore emivalente ottenuti con la camera a ionizzazione cilindrica ad aria libera su ogni fascio X filtrato (metodo dosimetrico) e dal calcolo sugli spettri ricostruiti (metodo spettrometrico) sono riassunti in Tabella 10.1. Come riportato in dettaglio in Tabella 10.2 è evidente il buon accordo tra i dati ottenuti con i due diversi metodi con una discrepanza massima dell'ordine di  $\pm 5\%$ , fluttuazioni che rientrano nelle incertezze di misura. Questo permette di affermare che gli spettri ricostruiti con la procedura messa a punto corrispondono agli spettri reali.

Gli spettri sono stati inoltre caratterizzati anche in termini di energia media e risoluzione spettrale [1] come richiesto dalla normativa (Tab. 10.3). In tabella è riportato anche, per ogni fascio, il valore della tensione applicata al tubo, in modo da avere una informazione di quanto percentualmente si discosta dal valore di tensione nominale, nonostante non ci siano raccomandazioni in merito.

I fasci da noi caratterizzati concordano con quanto raccomandato dalla normativa ISO 4037-1 [1] di riferimento (unica norma disponibile che riporta i valori di energia media e risoluzione): deviazione massima del  $\pm 5\%$  in termini di energia media e  $\pm 15\%$  in termini di risoluzione. Per quanto riguarda i valori di energia media ottenuti sugli spettri ricostruiti, i fasci a più bassa energia della serie L e N presentano valori più bassi rispetto a quanto riportato dalla normativa ISO 4037-1 [1].

In Tabella 10.4 sono tabulati, per ogni fascio X filtrato, i risultati ottenuti per quanto riguarda i coefficienti di conversione, con angolo di incidenza normale al punto di misura. I valori sono stati confrontati con quanto riportato dalla

normativa ISO 4037-3 [5] per tutte le serie analizzate e, laddove i dati non erano disponibili nella ISO, sono stati confrontati con quelli ottenuti da altri laboratori europei [10, 12].

I coefficienti di conversione determinati presentano un buon accordo con i citati dati di letteratura per quanto riguarda  $H_p(0,07)$  e  $H'(0,07)$  con una variabilità generalmente all'interno del  $\pm 5\%$ . Per quanto riguarda invece  $H_p(10)$  e  $H^*(10)$  esistono discordanze anche dell'ordine del 100%. L'accordo fra i dati è sicuramente peggiore per i fasci X filtrati di più bassa energia sia rispetto alla normativa sia ai valori pubblicati da altri laboratori, ma questo non è sorprendente in quanto legato alla forte dipendenza dall'energia dei coefficienti di conversione  $h_p(10; R)$  e  $h^*(10; R)$ . Per quanto riguarda i coefficienti di conversione  $h_p(3; R)$  per il cristallino non è stato possibile effettuare alcun confronto non essendo riportati nè nella normativa nè da altro laboratorio.

Una dettagliata analisi delle incertezze da associare ai coefficienti di conversione è molto complessa in quanto potenzialmente sono molti i fattori (legati alla misura dello spettro o alla sua ricostruzione) che possono influenzare il risultato tra cui: una corretta acquisizione degli spettri, la calibrazione in energia ed efficienza dello spettrometro, la variabilità stocastica del numero di fotoni osservati. Da dati di letteratura [12, 10], è possibile comunque affermare che l'incertezza da associare al valore dei coefficienti di conversione di 1,5% suggerita nella ISO 4037-4 [6] costituisca una visione troppo ottimistica.

I risultati presentati hanno dimostrato inoltre l'importanza di caratterizzare, nel dominio energetico studiato, ogni fascio in modo individuale, in quanto il solo metodo dosimetrico, cioè la misura classica degli spessori emivalenti, non permette la completa conoscenza di tutte le caratteristiche dello spettro stesso. In particolare, nonostante alcuni spettri presentino una energia media elevata, la presenza di una componente non trascurabile di bassa energia si ripercuote sul valore del coefficiente di conversione da kerma in aria all'equivalente di dose personale o ambientale in maniera preponderante. Tali analisi sono state rese possibili solo grazie all'applicazione di una tecnica di ricostruzione (stripping), mediante la quale si è ottenuta la reale distribuzione dello spettro incidente sul rivelatore. Per una ulteriore verifica indipendente è stata applicata ad ogni fascio ricostruito la funzione risposta del rivelatore ottenuta con simulazioni numeriche (MCNP-4C). Applicando la matrice risposta ad uno spettro precedentemente ricostruito si è ottenuto lo spettro dei conteggi, il quale è stato poi confrontato con il corrispondente spettro acquisito sperimentalmente. I risultati ottenuti hanno confermato che il metodo di ricostruzione applicato è corretto.

Per quanto riguarda i valori ottenuti per i coefficienti di conversione, è stato ampiamente dimostrato che, laddove presentano una forte dipendenza dall'energia e cioè per energie inferiori a 20 keV circa è indispensabile conoscere la distribuzione spettrale dei fotoni emessi dal tubo impiegato.

Lo studio è stato esteso, inoltre, a fasci di energia superiore, L35, N40 e H60 (dando la possibilità di confronti con gli stessi fasci prodotti da impianti diversi e precedentemente caratterizzati) e due fasci non ancora standardizzati rispettivamente di 5 kV e 7,5 kV, in modo da permettere interconfronti con altri Laboratori di metrologia spingendoci verso energie molto basse.

**Tabella 10.1:** Confronto tra i valori di spessore emivalente ottenuti dalla misura con camera a ionizzazione e calcolati dagli spettri ricostruiti.

Fascio X filtrato	Spessori emivalenti misurati con camera a ionizzazione (a)				Spessori emivalenti calcolati dagli spettri ricostruiti (b)				ISO 4037-1					
	100 cm*		200 cm*		100 cm*		200 cm*		1° SEV		II° SEV		III° SEV	
	I° SEV	II° SEV	I° SEV	II° SEV	I° SEV	II° SEV	I° SEV	II° SEV	I° SEV	II° SEV	I° SEV	II° SEV	I° SEV	II° SEV
L10	0,058	-	0,07	-	0,057	0,058	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,058	
L20	0,42	-	0,44	-	0,4	0,41	0,44	0,44	0,48	0,48	0,48	0,48	0,42	
L30	1,49	-	1,68	-	1,51	1,55	1,57	1,57	1,63	1,63	1,63	1,63	1,46	
L35	2,26	-	2,62	-	2,28	2,3	2,60	2,60	2,62	2,62	2,62	2,62	2,20	
N10	0,047	0,054	0,058	0,063	0,048	0,053	0,056	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,047	0,052
N15	0,14	0,17	0,16	0,18	0,14	0,16	0,16	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,14	0,16
N20	0,32	0,37	0,34	0,37	0,32	0,35	0,34	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,32	0,37
N25	0,67	0,74	0,67	0,77	0,66	0,74	0,67	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,66	0,73
N30	1,15	1,27	1,22	1,25	1,15	1,27	1,22	1,24	1,24	1,24	1,24	1,24	1,15	1,30
N40	2,80	2,97	2,81	3,04	2,80	2,97	2,80	3,04	3,04	3,04	3,04	3,04	2,70	3,00
H10	0,04	0,04	0,05	0,065	0,04	0,04	0,05	0,065	0,065	0,065	0,065	0,065	0,04	
H20	0,12	0,15	0,145	0,192	0,12	0,15	0,145	0,192	0,192	0,192	0,192	0,192	0,11	
H30	0,36	0,54	0,41	0,59	0,36	0,58	0,41	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,35	
H60	2,40	3,26	2,40	3,32	2,40	3,48	2,50	3,34	3,34	3,34	3,34	3,34	2,40	

\* distanza sorgente di radiazione - punto di misura

**Tabella 10.2:** *Differenza percentuale tra primo e secondo spessore emivalente ottenuto dalla misura diretta con camera a ionizzazione e dal calcolo sullo spettro ricostruito.*

Fascio X filtrato	Confronto a/b			
	100 cm		200 cm	
	I° SEV	II° SEV	I° SEV	II° SEV
L10	1,02	-	1,17	-
L20	1,05	-	1,00	-
L30	0,99	-	1,07	-
L35	0,99	-	1,00	-
N10	0,98	1,02	1,04	1,00
N15	1,00	1,06	1,00	1,06
N20	1,00	1,06	1,00	1,03
N25	1,02	1,00	1,00	1,03
N30	1,00	1,00	1,00	1,01
N40	1,00	1,00	1,00	1,00
H10	1,00	1,00	1,00	1,00
H20	1,00	1,00	1,00	1,00
H30	1,00	0,93	1,00	0,98
H60	1,00	0,94	0,96	0,99

**Tabella 10.3:** *Energia media ( $E_m$ ) e risoluzione spettrale ( $R_E$ ) per i fasci X filtrati utilizzati nel Centro di Metrologia ENEA.*

<b>Fascio X filtrato</b>	<b>Spettri ENEA</b>			<b>ISO 4037-1</b>	
	Tensione (kV)	$E_m$ (keV)	$R_E$ (%)	$E_m$ (keV)	$R_E$ (%)
L10	9,0	8,2	19	8,5	-
L20	18,1	16,1	19	17	21
L30	29,3	26,1	18	26	21
L35	35,0	30,5	21	30	21
N10	9,6	8,2	27	8	28
N15	14,1	11,7	28	12	33
N20	18,5	15,3	32	16	34
N25	24,0	19,4	30	20	33
N30	29,0	24,0	30	24	32
N40	40,0	33,5	28	33	30
H10	10,0	8,6	45	7,5	-
H20	20,0	13,3	82	12,9	-
H30	30,0	20,1	75	19,7	-
H60	60,0	37,3	78	37,3	-

**Tabella 10.4:** Confronto dei coefficienti di conversione da kerma in aria alle grandezze  $H_p(10)$ ,  $H_p(0,07)$ ,  $H'(0,07)$ ,  $H^*(10)$ . I valori confrontati sono quelli ottenuti ad una distanza sorgente - punto di misura pari a 200 cm.

Fasci X filtrati	$h_p(10;R,0^\circ)^{\wedge}$				R(0°) (dato ENEA/ISO)
	Determinati dallo spettro ricostruito in conteggi, ENEA	ISO 4037-3	Altri Laboratori		
L10	0,000416	-	Ankerhold et al. (PTB, Germany)	0,00236	0,18*
L20	0,41	0,37		0,405	1,11
L30	0,93	0,91		0,944	1,02
L35	1,10	1,09		1,11	1,01
N10	0,000756	-		0,002	0,38*
N15	0,08	0,06		0,101	1,33
N20	0,29	0,27		0,333	1,07
N25	0,55	0,55		0,581	1,00
N30	0,79	0,79		0,818	1,00
N40	1,22	1,17		1,21	1,04
H10	0,001	-		0,000726	1,38*
H20	0,08	-		0,0995	0,80*
H30	0,45	0,39		0,389	1,15
H60	1,21	1,19		1,22	1,02

<sup>^</sup>distanza sorgente-punto di misura = 200 cm

\* in mancanza di un dato ISO il confronto è stato fatto tra Laboratori.

Fasci X filtrati	$h_p(0,07;R,0)^\wedge$					R(0°) (dato ENE/ISO)
	Determinati dallo spettro ricostruito in conteggi, ENE/EA	ISO 4037-3	Altri Laboratori			
			Ankerhold et al. (PTB, Germany)	Hakanen et al. (STUK, Finland)		
L10	0,92	0,91	0,936	-		1,01
L20	1,00	0,99	0,992	-		1,01
L30	1,04	0,03	1,04	-		1,00
L35	1,06	1,06	1,06	-		1,00
N10	0,92	0,91	0,861	-		1,01
N15	1,01	0,95	0,922	0,96		1,06
N20	1,00	0,98	0,959	0,99		1,02
N25	1,03	1,00	0,983	1,04		1,03
N30	1,11	1,03	1,03	1,11		1,08
N40	1,29	1,07	1,07	1,27		1,21
H10	0,93	0,89	0,000726	-		1,04
H20	0,98	0,95	0,0995	-		1,03
H30	1,04	0,99	0,389	-		1,05
H60	1,36	1,07	1,22	-		1,27

(b) <sup>^</sup>distanza sorgente-punto di misura = 200 cm

(c)

Fasci X filtrati	h'(0,07;R,00)^					R(0°) (dato ENE/ISO)
	Determinati dallo spettro ricostruito in conteggi, ENE/EA	ISO 4037-3	Altri Laboratori		Hakanen et al. (STUK, Finland)	
L10	0,92	0,93	0,907	-	-	0,99
L20	1,00	1,01	1,02	-	-	0,99
L30	1,15	1,13	1,16	-	-	1,02
L35	1,39	1,22	1,22	-	-	1,14
N10	0,92	0,91	0,885	-	-	1,01
N15	1,00	0,96	0,967	0,96	-	1,04
N20	1,00	1,00	1,01	1,00	-	1,00
N25	1,03	1,03	1,05	1,03	-	1,00
N30	1,11	1,10	1,12	1,10	-	1,01
N40	1,30	1,25	1,26	1,59	-	1,04
H10	0,84	0,89	0,863	-	-	0,94
H20	0,95	0,96	0,953	-	-	0,99
H30	1,03	1,02	1,02	-	-	1,01
H60	1,33	1,26	1,27	-	-	1,06

^distanza sorgente-punto di misura = 200 cm

(d)

Fasci X filtrati	h*(10;R)^					R(0°) (dato ENEA/ISO)
	Determinati dallo spettro ricostruito in conteggi, ENEA	ISO 4037-3	Altri Laboratori			
			Ankerhold et al. (PTB, Germany)	Hakanen et al. (STUK, Finland)		
L10	0,008	-	0,00210	-	-	3,80*
L20	0,37	0,37	0,393	-	-	1,00
L30	0,97	0,90	0,937	-	-	1,08
L35	1,44	1,08	1,09	-	-	1,33
N10	0,006	-	0,001	-	-	6,00*
N15	0,11	-	0,0872	0,064	-	1,26*
N20	0,32	-	0,307	0,27	-	1,04*
N25	0,57	0,52	0,566	0,55	-	1,10
N30	0,86	0,80	0,810	0,78	-	1,08
N40	1,26	1,18	1,19	1,18	-	1,07
H10	0,011	-	0,000646	-	-	17,03*
H20	0,16	-	0,0972	-	-	1,65*
H30	0,54	-	0,383	-	-	1,41*
H60	1,31	1,15	1,19	-	-	1,14

^distanza sorgente-punto di misura = 200 cm

\* in mancanza di un dato ISO il confronto è stato fatto tra Laboratori.

## Capitolo 11

# Conclusioni e prospettive

Il lavoro svolto ha messo in luce la complessità delle procedure necessarie per la caratterizzazione in termini metrologici di fasci X di riferimento di bassa energia. Il campo di ricerca associato a questo dominio di energia è piuttosto vasto come già nella parte introduttiva è stato illustrato.

Dovendo operare a valori così bassi di energia, è stato evidenziato come ogni parametro (trascurato nel caso di energia più elevata) può giocare un ruolo molto significativo nella caratterizzazione di questi campi fotonici.

E' stato perciò di particolare importanza un accoppiamento delle potenzialità sperimentali con le competenze di tipo modellistico (metodo Monte Carlo). Ciò ha permesso di condurre uno studio accurato, che ha prodotto una serie di risultati particolarmente soddisfacenti.

In particolare in questo tipo di studio, la modellazione numerica ha consentito una valutazione abbastanza precisa dello strato morto (*dead layer*) di cui devono essere però evidenziati alcuni limiti metodologici. Infatti non è stato possibile disporre di un sufficiente numero di valori sperimentali a bassa energia che avvalorassero in modo totalmente esauriente le stime numeriche.

Una futura linea di studio consiste nella ricerca dello strato morto del rivelatore HPGe avvalendosi di irraggiamenti laterali con luce di sincrotrone molto collimata [30].

E' inoltre pensabile lo sviluppo di una completa procedura automatica di deconvoluzione degli spettri dei conteggi (*unfolding*) basata su algoritmi di inversione della matrice risposta valutata con metodo Monte Carlo e già presentata in questo lavoro.

In definitiva il lavoro qui presentato ha consentito la qualificazione ed il possibile impiego di una catena di acquisizione sperimentale di X di bassa energia con possibilità di uso in diversi campi di ricerca, non solo legati alla dosimetria per la radioprotezione. Grazie a questo lavoro ENEA-IRP costituisce al momento il primo Centro di Taratura in Italia che dispone di una serie di fasci interamente caratterizzati nel campo delle basse energie.

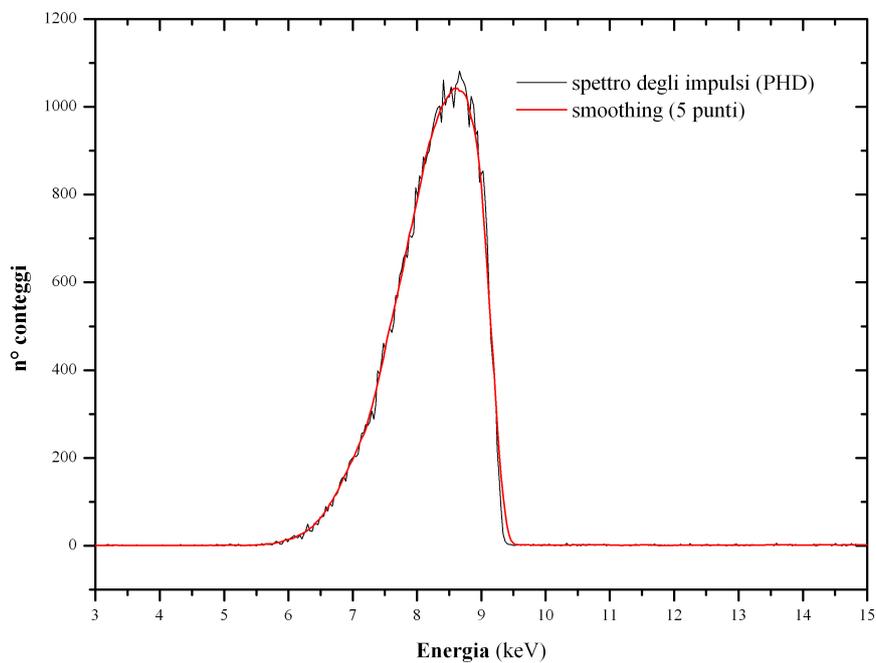
## Appendice A

# Distribuzioni degli spettri degli impulsi (PHD)

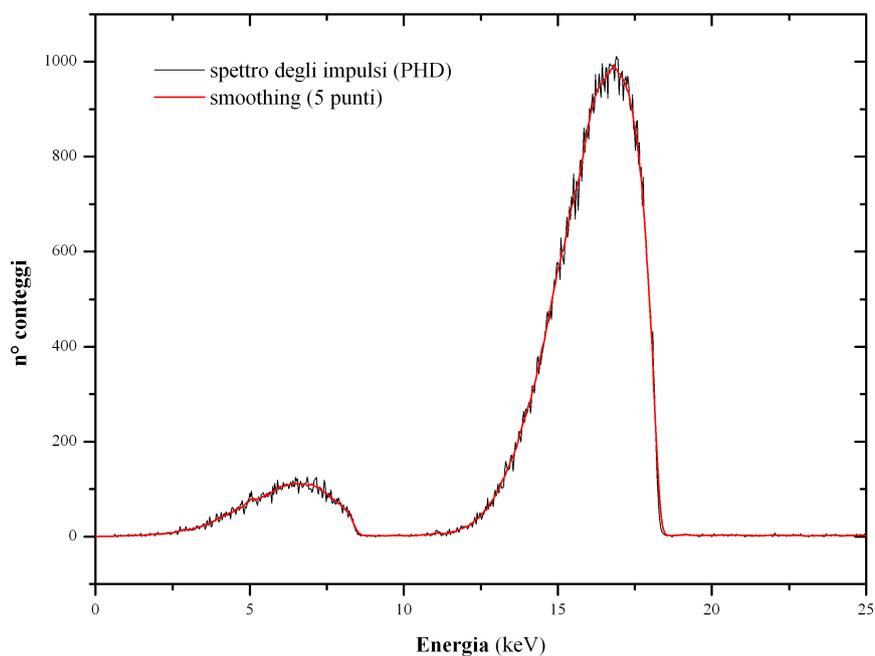
Qui di seguito vengono presentati tutti gli spettri degli impulsi acquisiti, con  $E_{\max}$  inferiore a 60 keV, e dopo l'applicazione del filtro di Savitzky-Golay (ottenuto con un software commerciale ORIGIN 8) in modo da eliminare il rumore elettronico mantenendo la forma dello spettro.

## A.1 Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

### A.1.1 Serie L

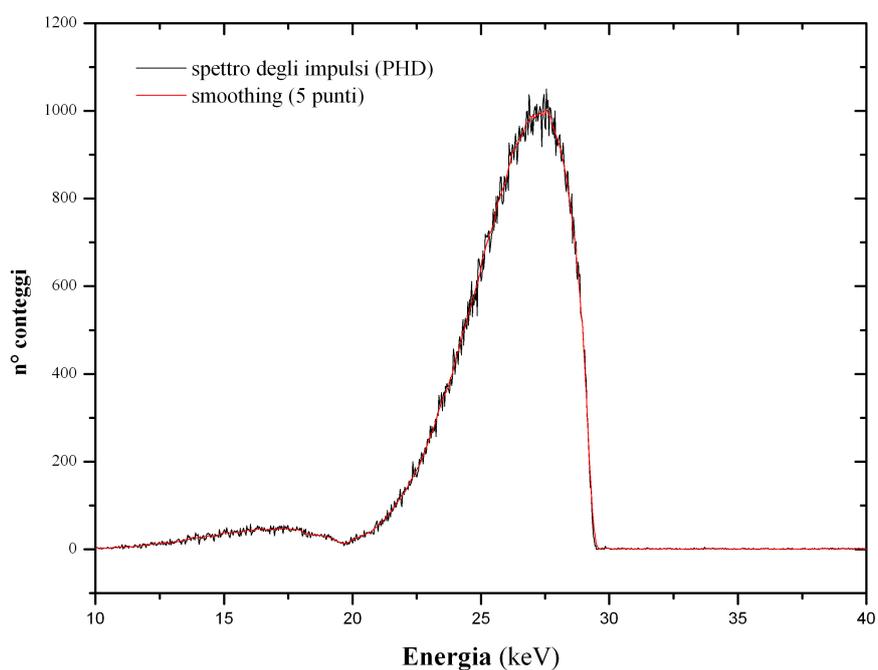


(a) L10

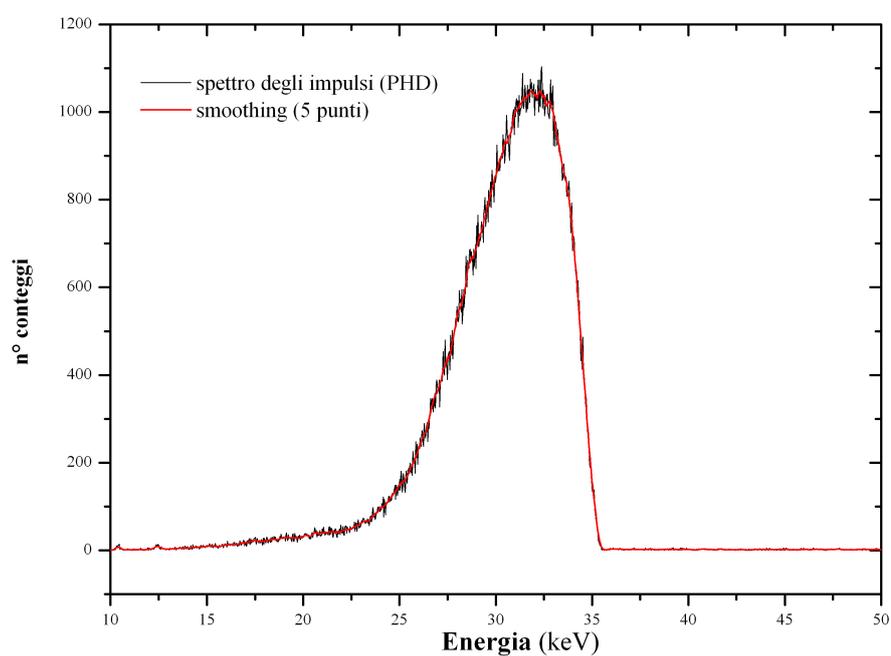


(b) L20

**Figura A.1:** Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L10 (a) e L20 (b) della serie "Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.



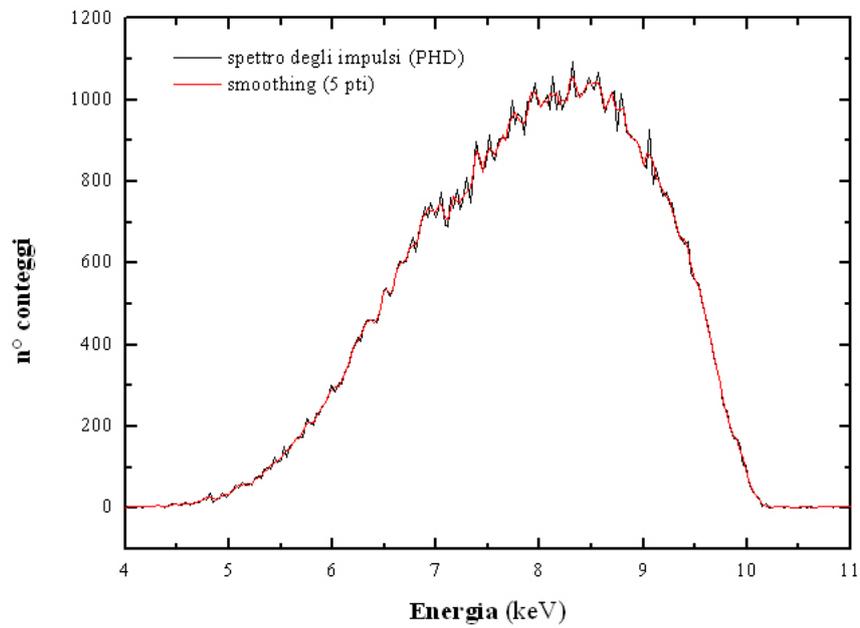
(a) L30



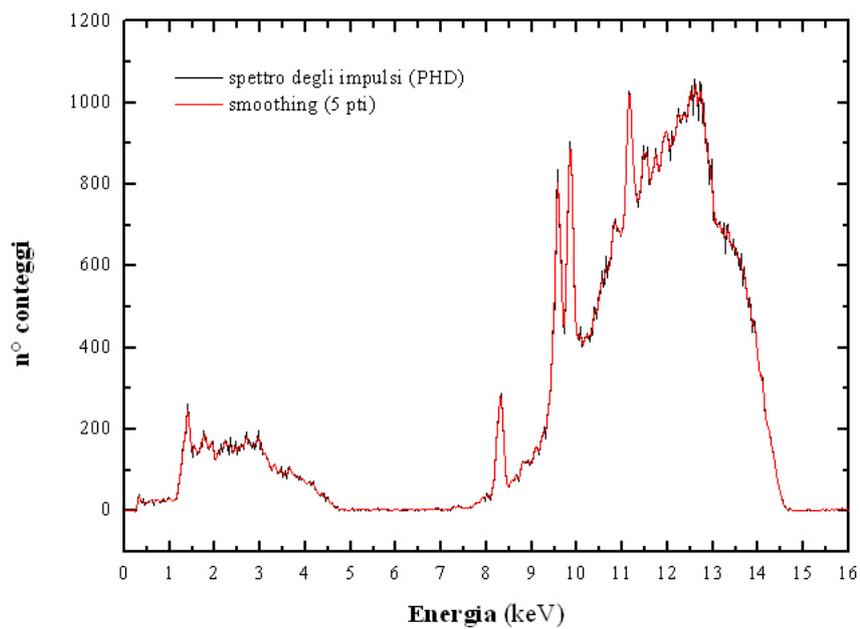
(b) L35

**Figura A.2:** Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L30 (a) e L35 (b) della serie "Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

## A.1.2 Serie N

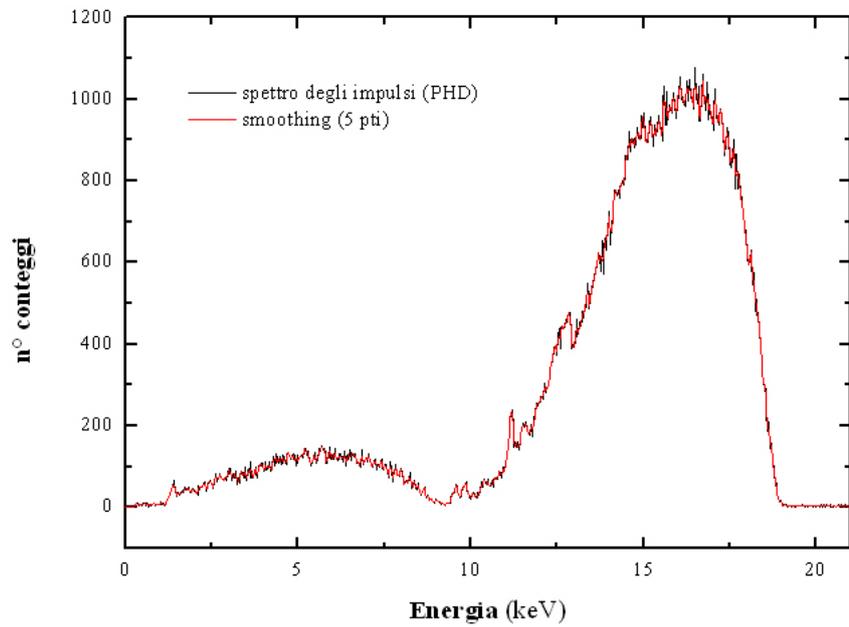


(a) N10

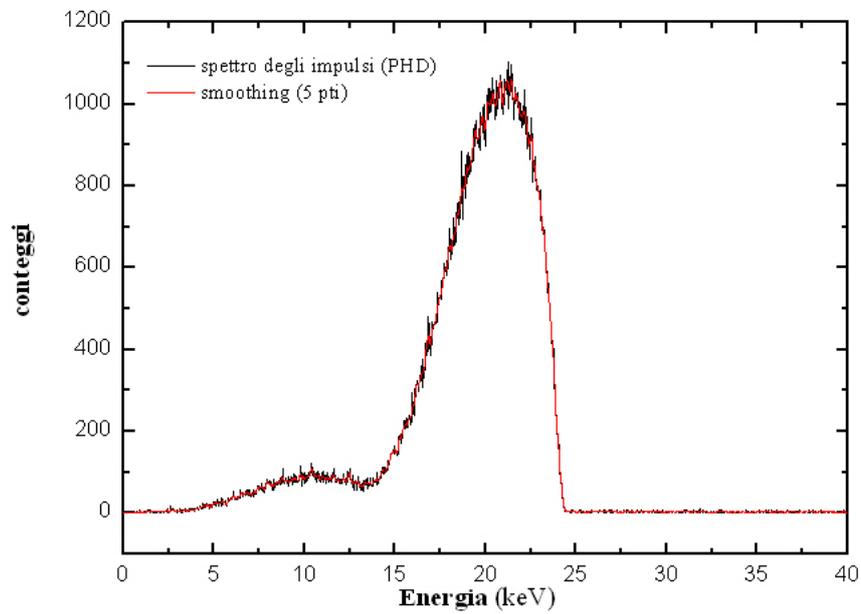


(b) N15

**Figura A.3:** Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N10 (a) e N15 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

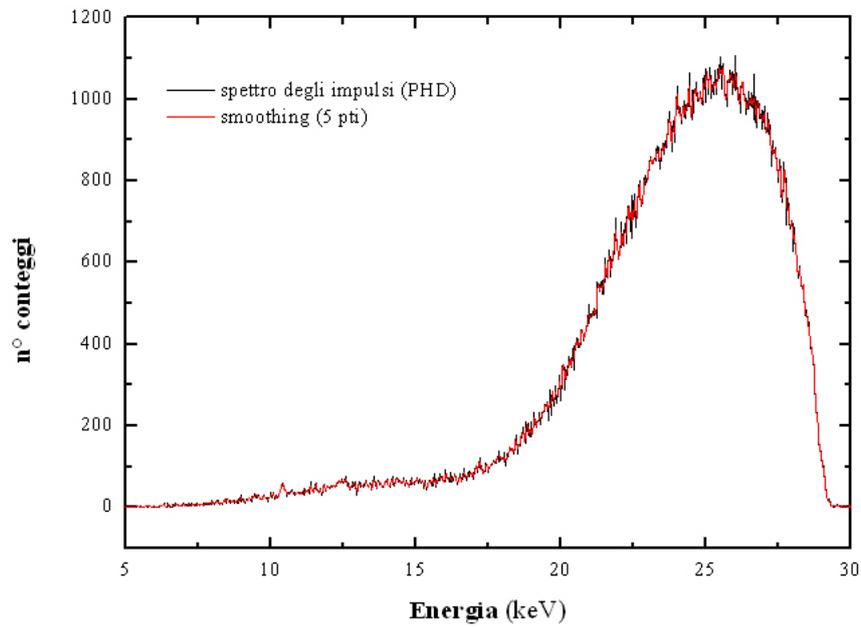


(a) N20

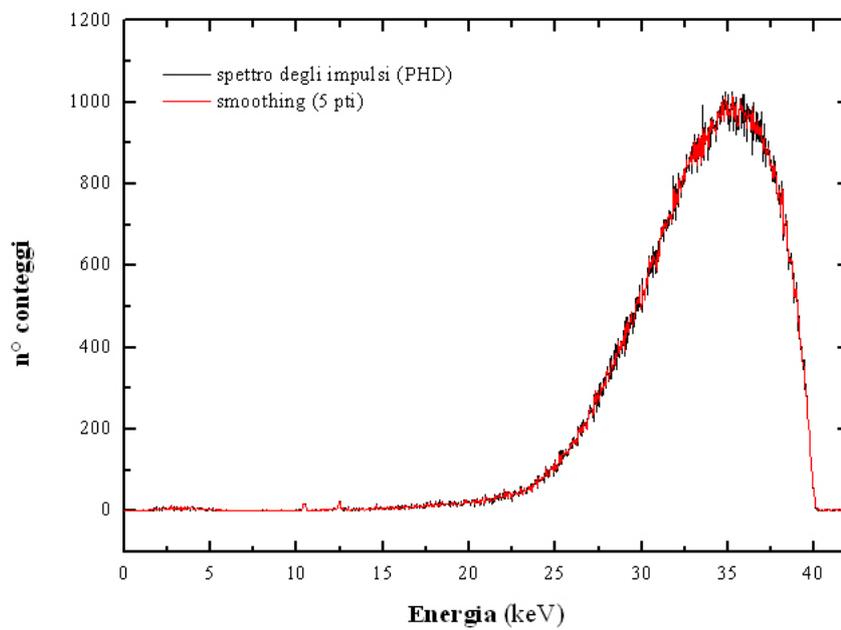


(b) N25

**Figura A.4:** Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N20 (a) e N25 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.



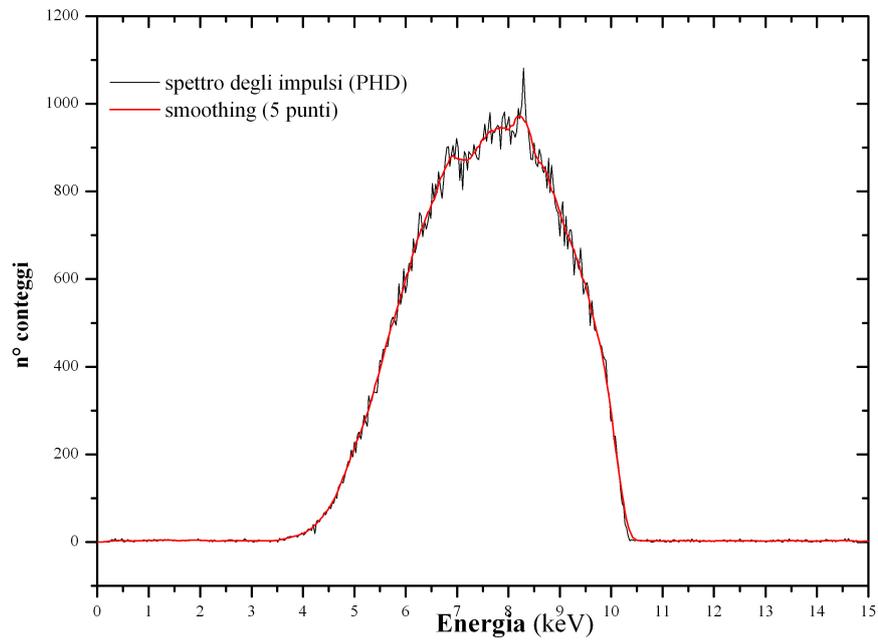
(a) N30



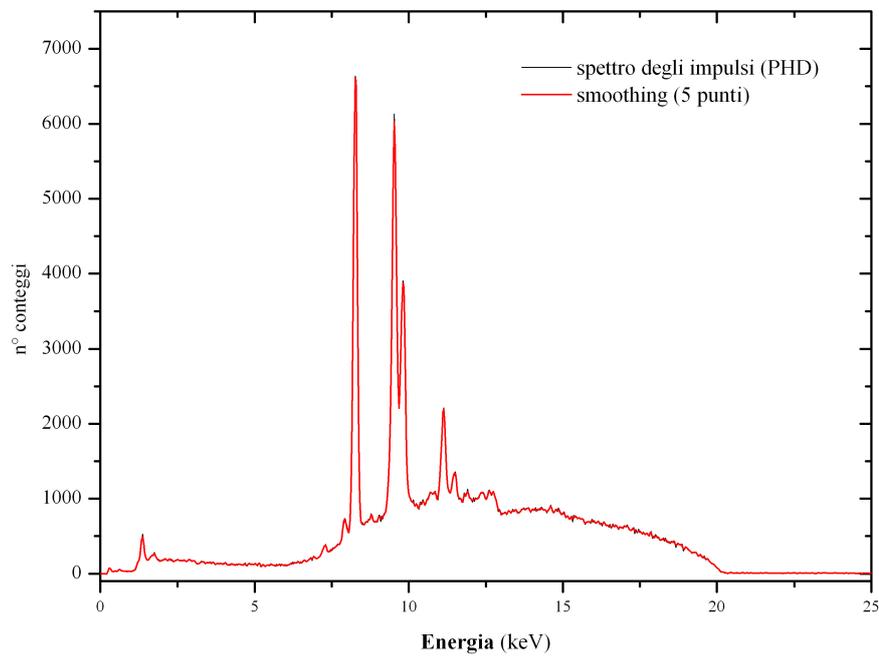
(b) N40

**Figura A.5:** Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N30 (a) e N40 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

### A.1.3 Serie H

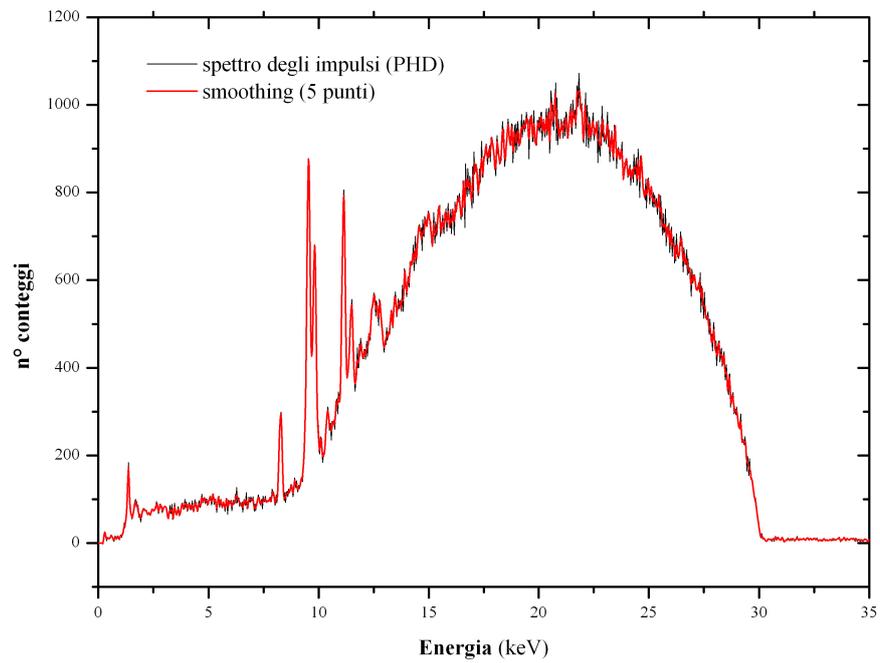


(a) H10

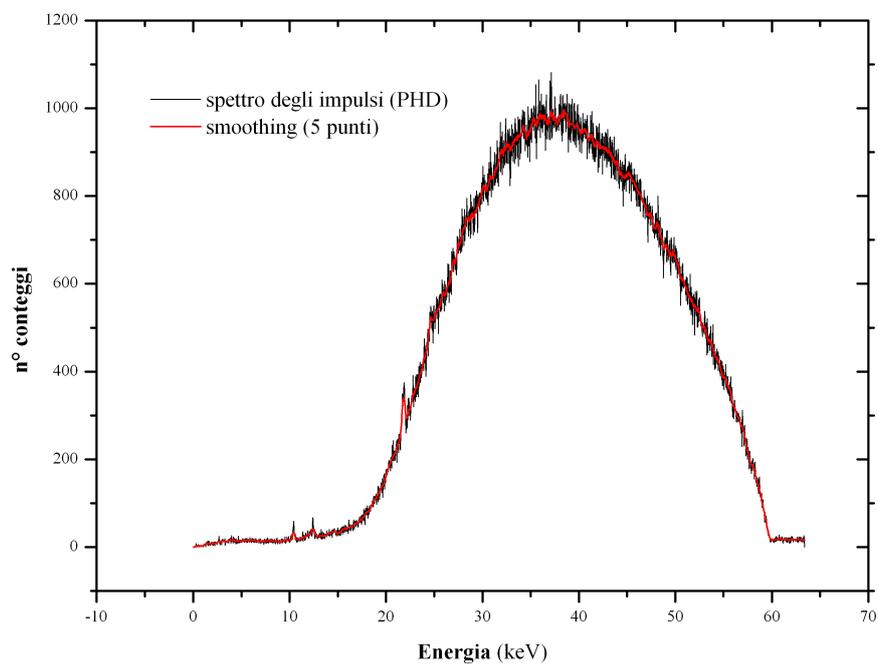


(b) H20

**Figura A.6:** Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H10 (a) e H20 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.



(a) H30

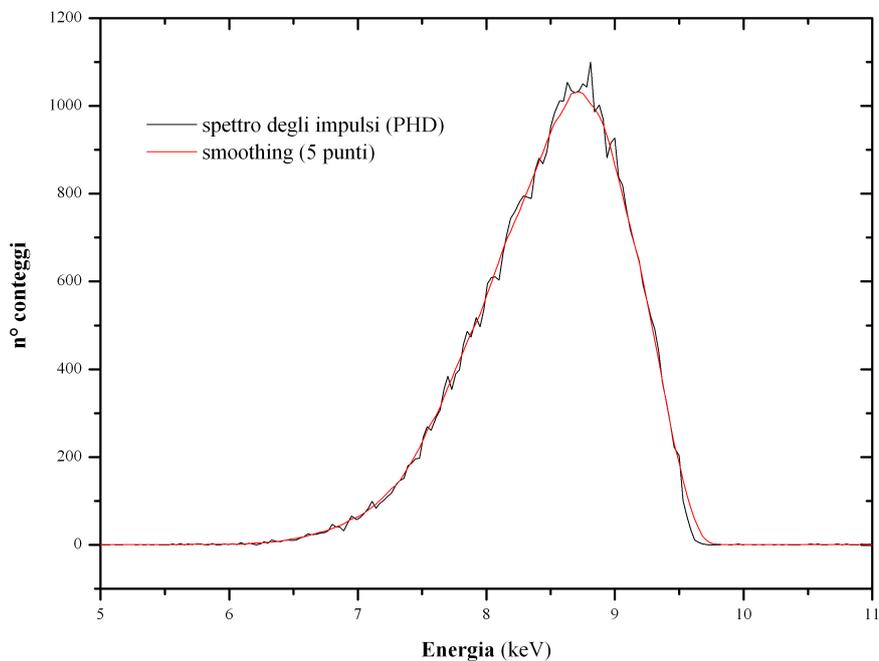


(b) H60

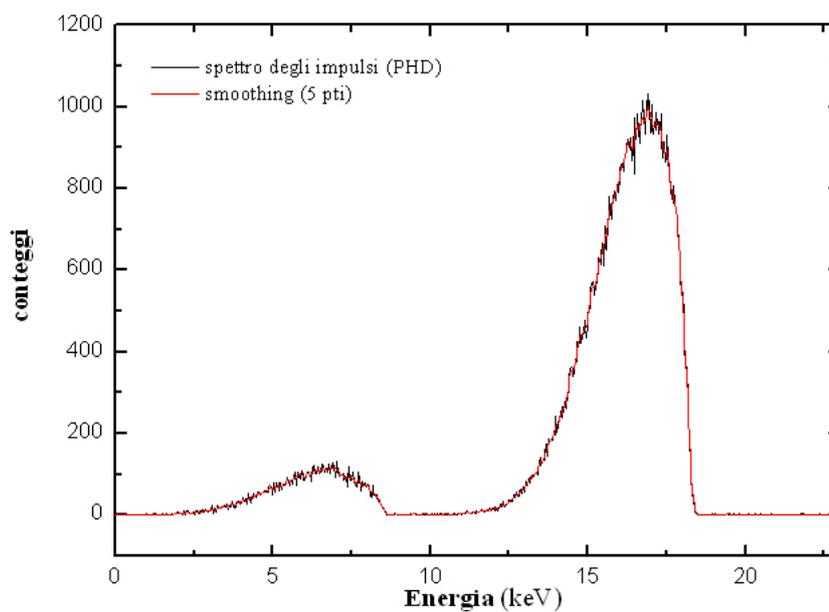
**Figura A.7:** Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H30 (a) e H60 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

## A.2 Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

### A.2.1 Serie L

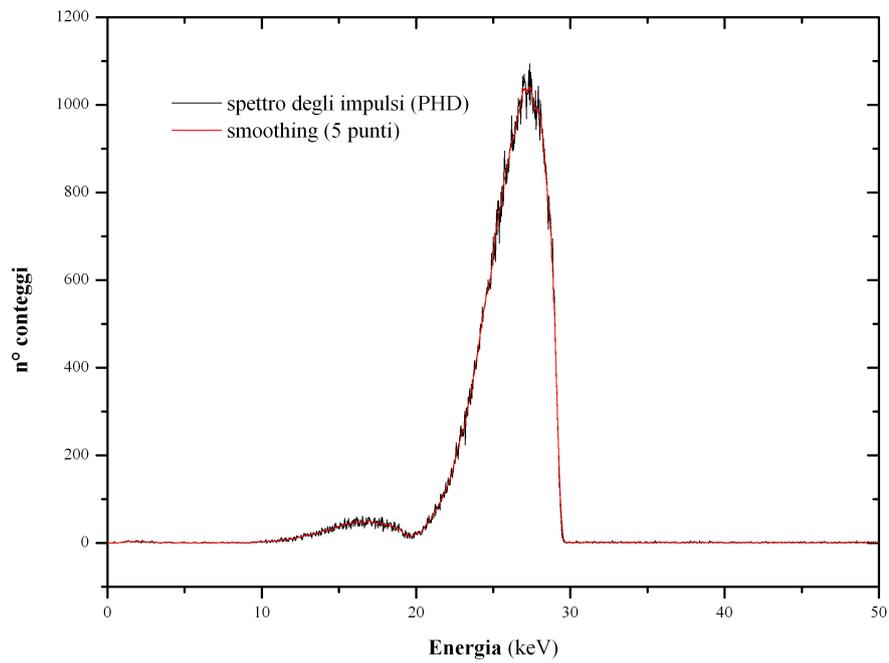


(a) L10

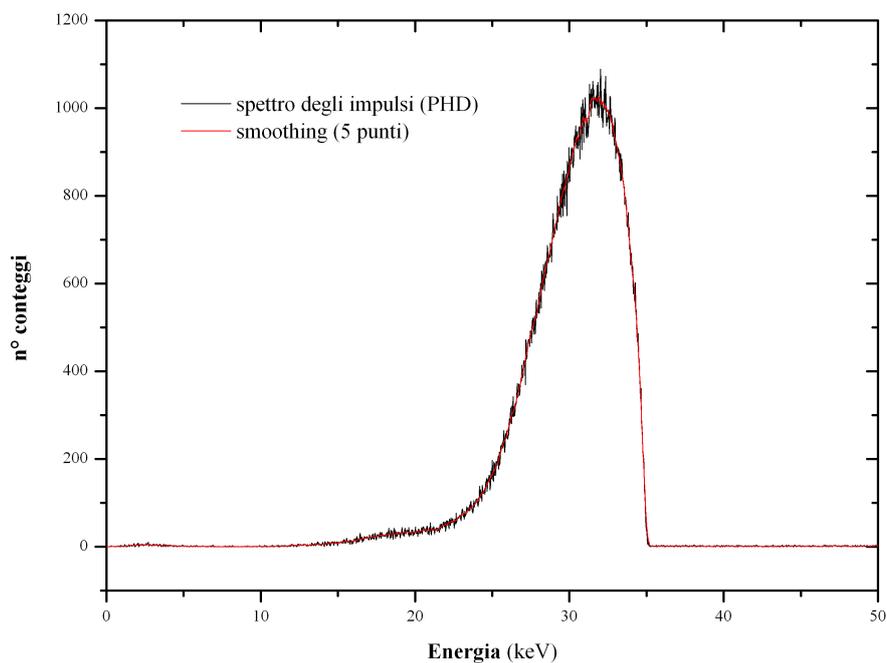


(b) L20

**Figura A.8:** Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L10 (a) e L20 (b) della serie "Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.



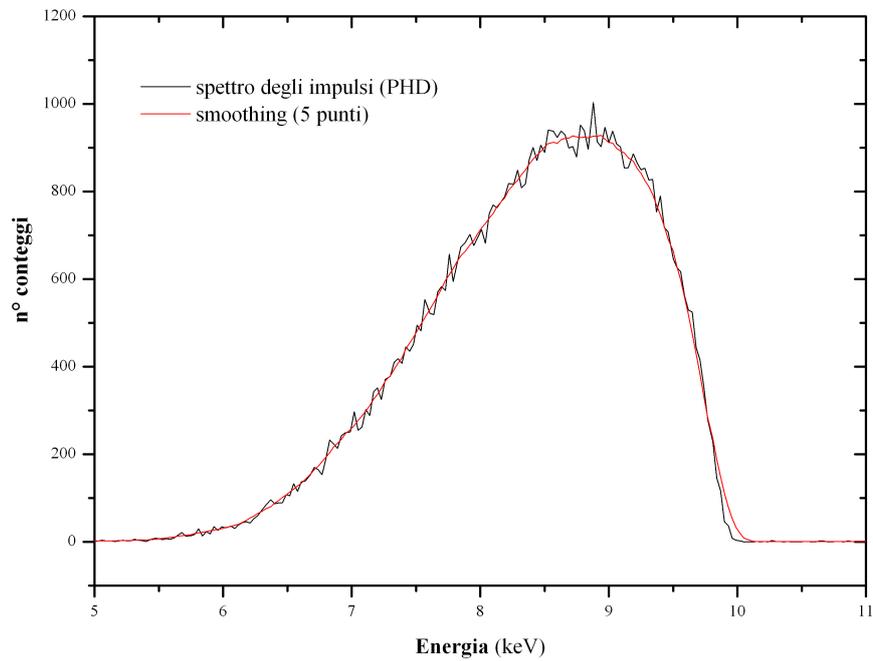
(a) L30



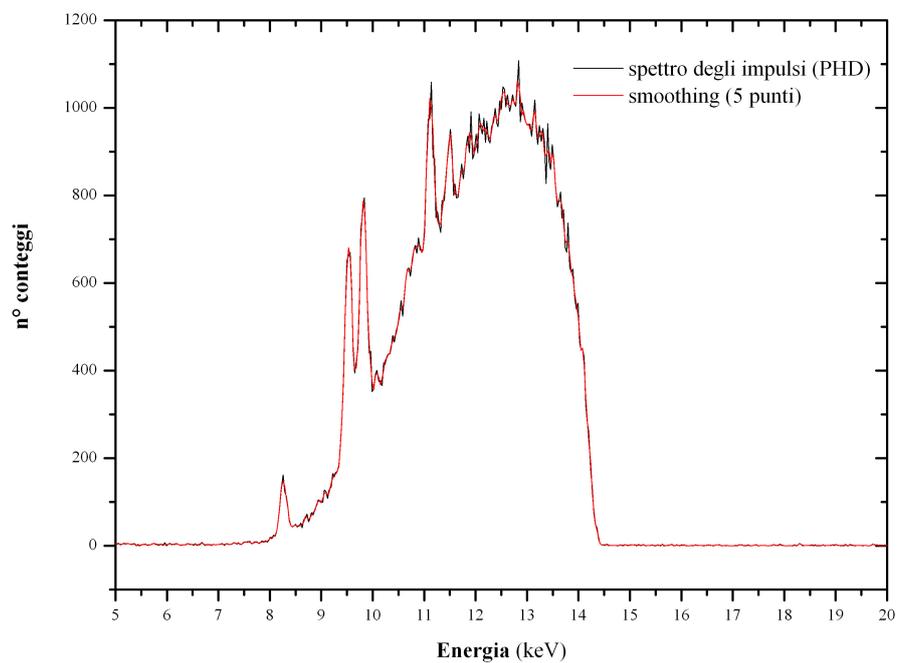
(b) L35

**Figura A.9:** Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci L30 (a) e L35 (b) della serie "Low air-kerma rate series" (L). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

### A.2.2 Serie N

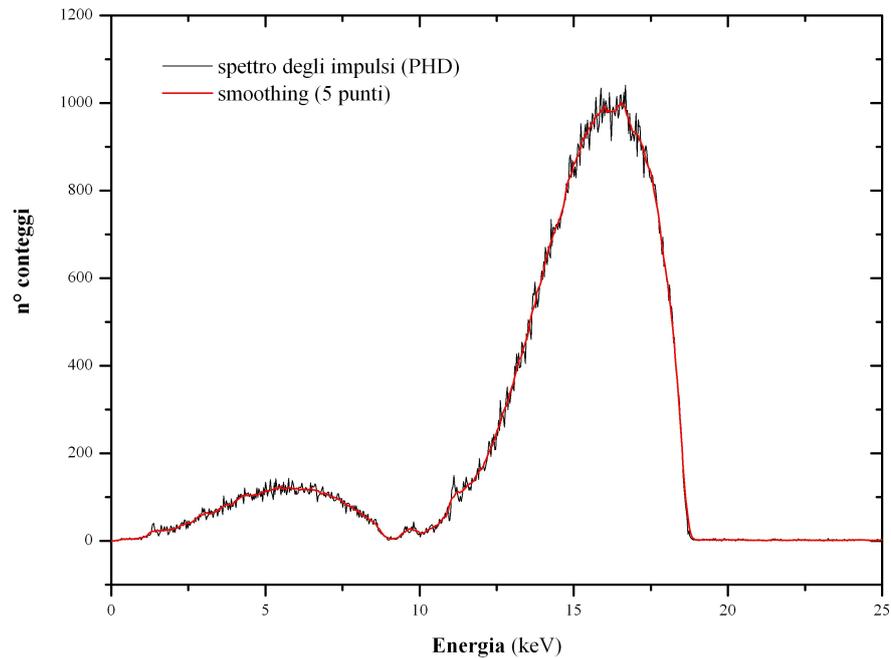


(a) N10

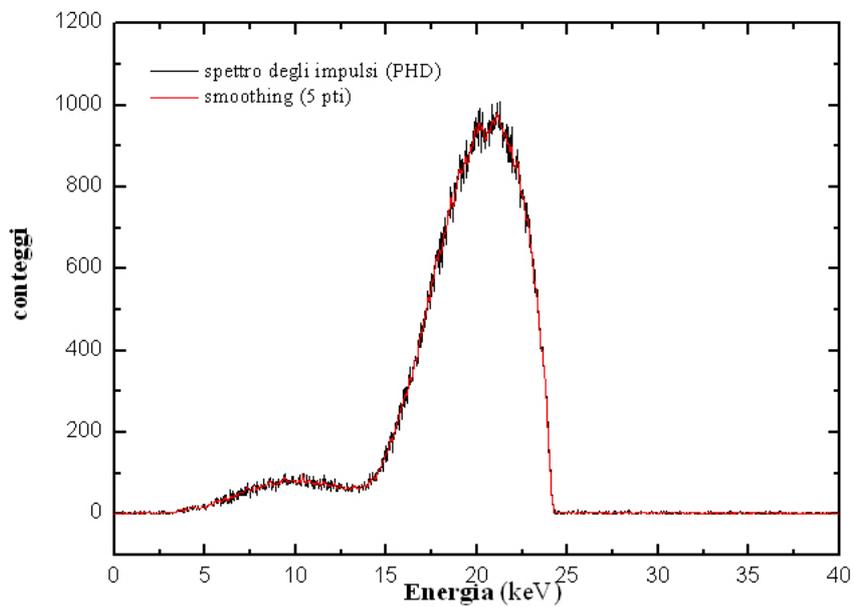


(b) N15

**Figura A.10:** Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N10 (a) e N15 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

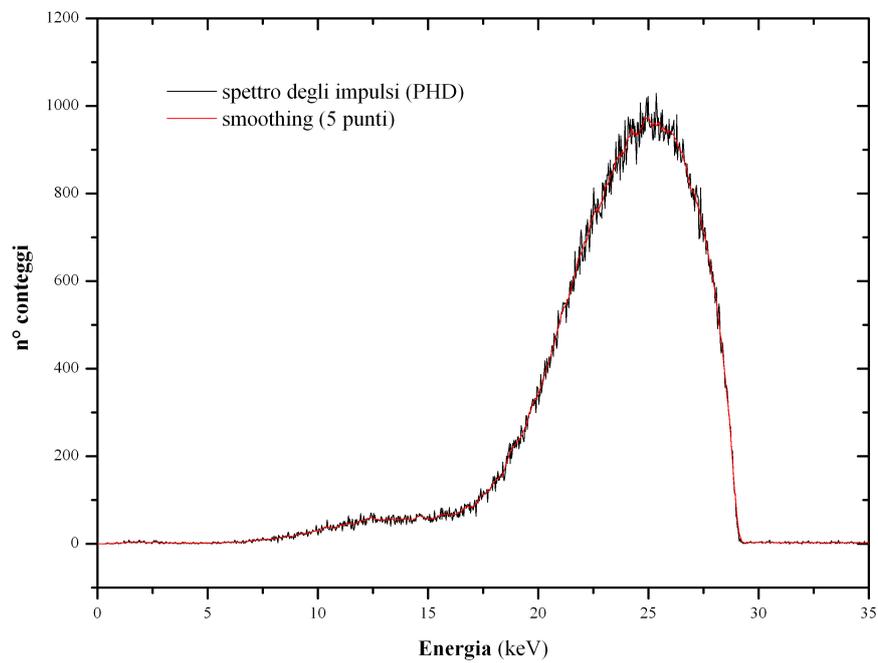


(a) N20

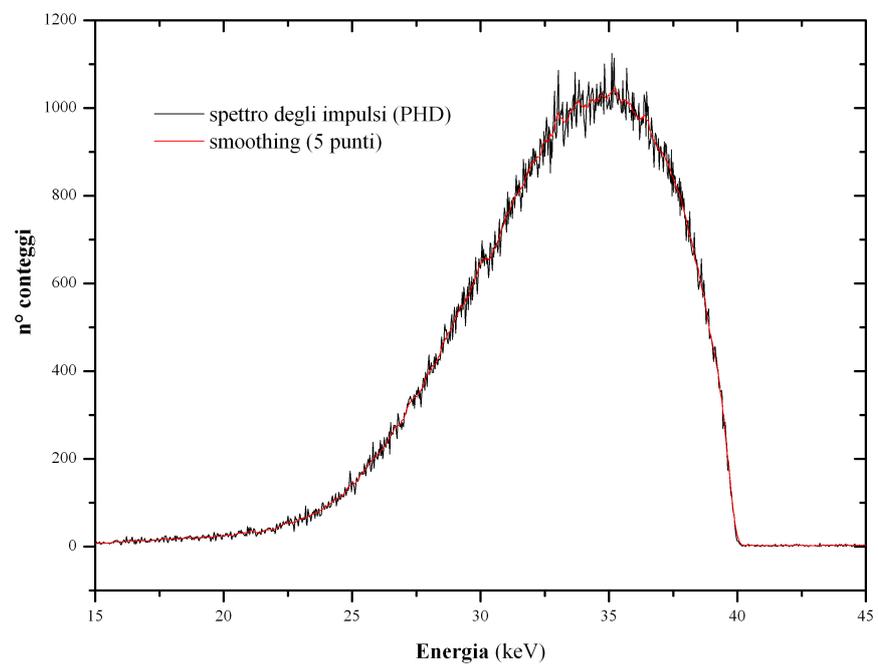


(b) N25

**Figura A.11:** Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N20 (a) e N25 (b) della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.



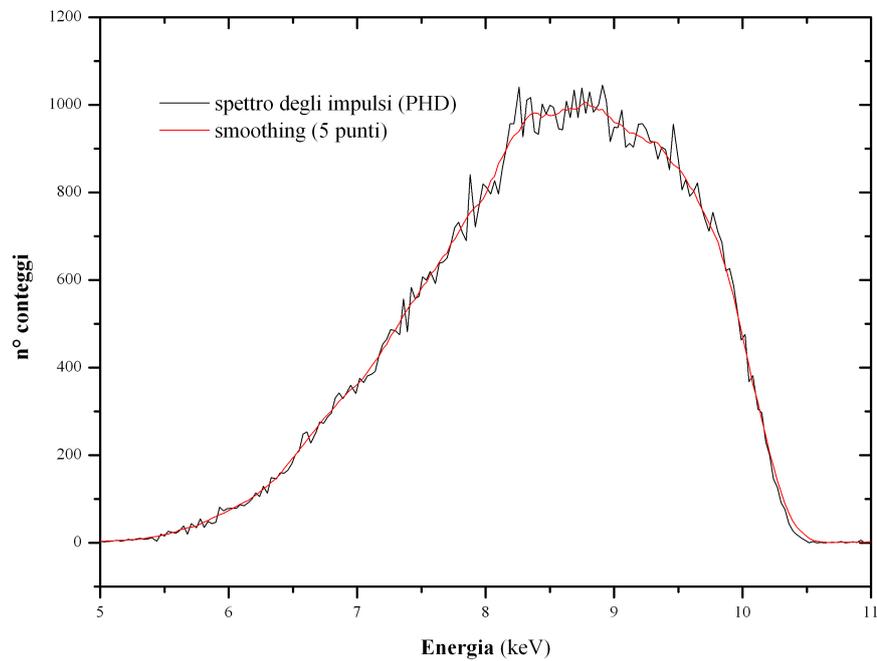
(a) N30



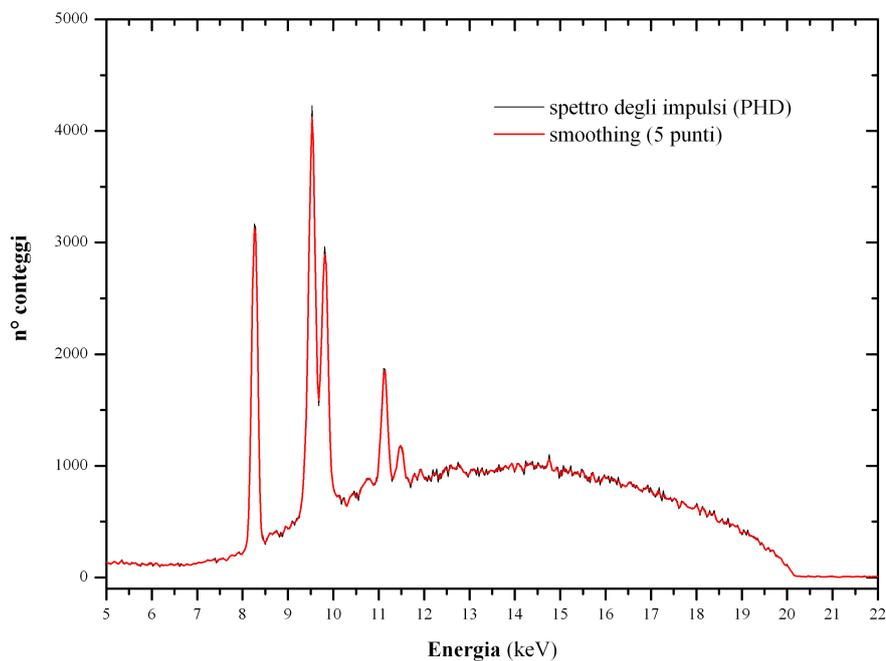
(b) N40

**Figura A.12:** Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci N30 e N40 della serie "Narrow-spectrum series" (N). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

### A.2.3 Serie H

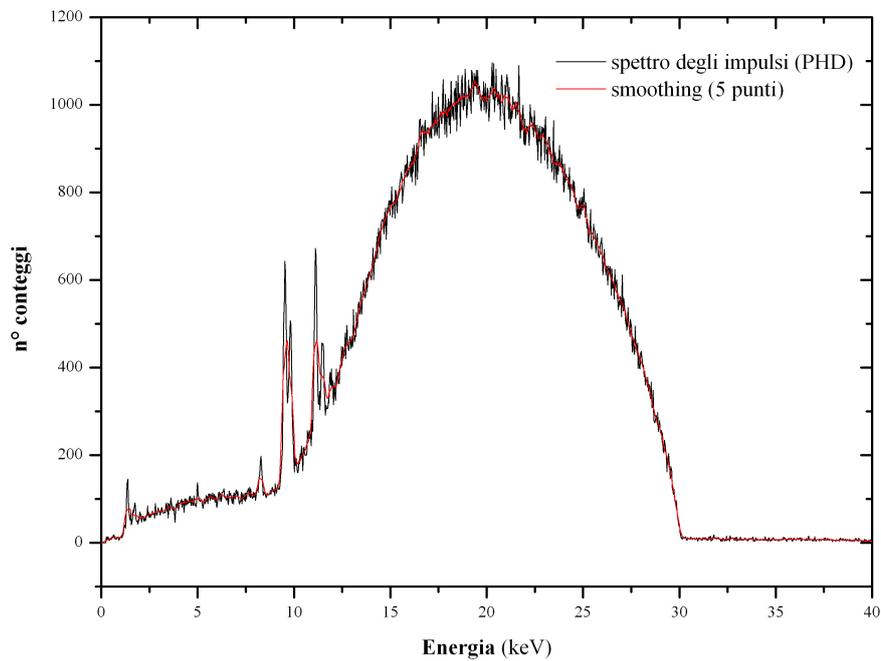


(a) H10

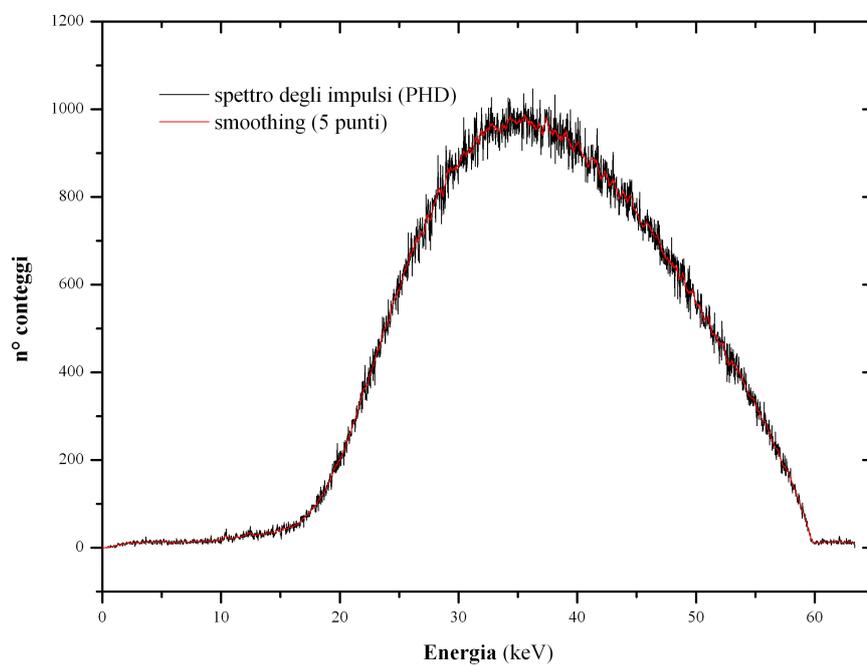


(b) H20

**Figura A.13:** Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H10 (a) e H20 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.



(a) H30



(b) H60

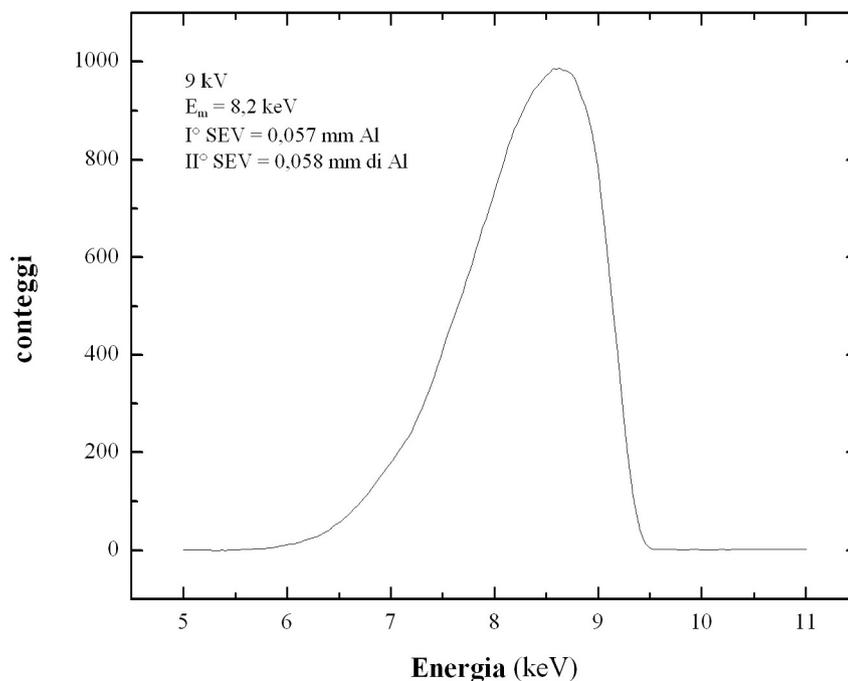
**Figura A.14:** Spettro degli impulsi (PHD = Pulse High Distribution) dei fasci H30 (a) e H60 (b) della serie "High air-kerma rate series" (H). Distanza sorgente-rivelatore = 200 cm.

## Appendice B

# Spettri ricostruiti

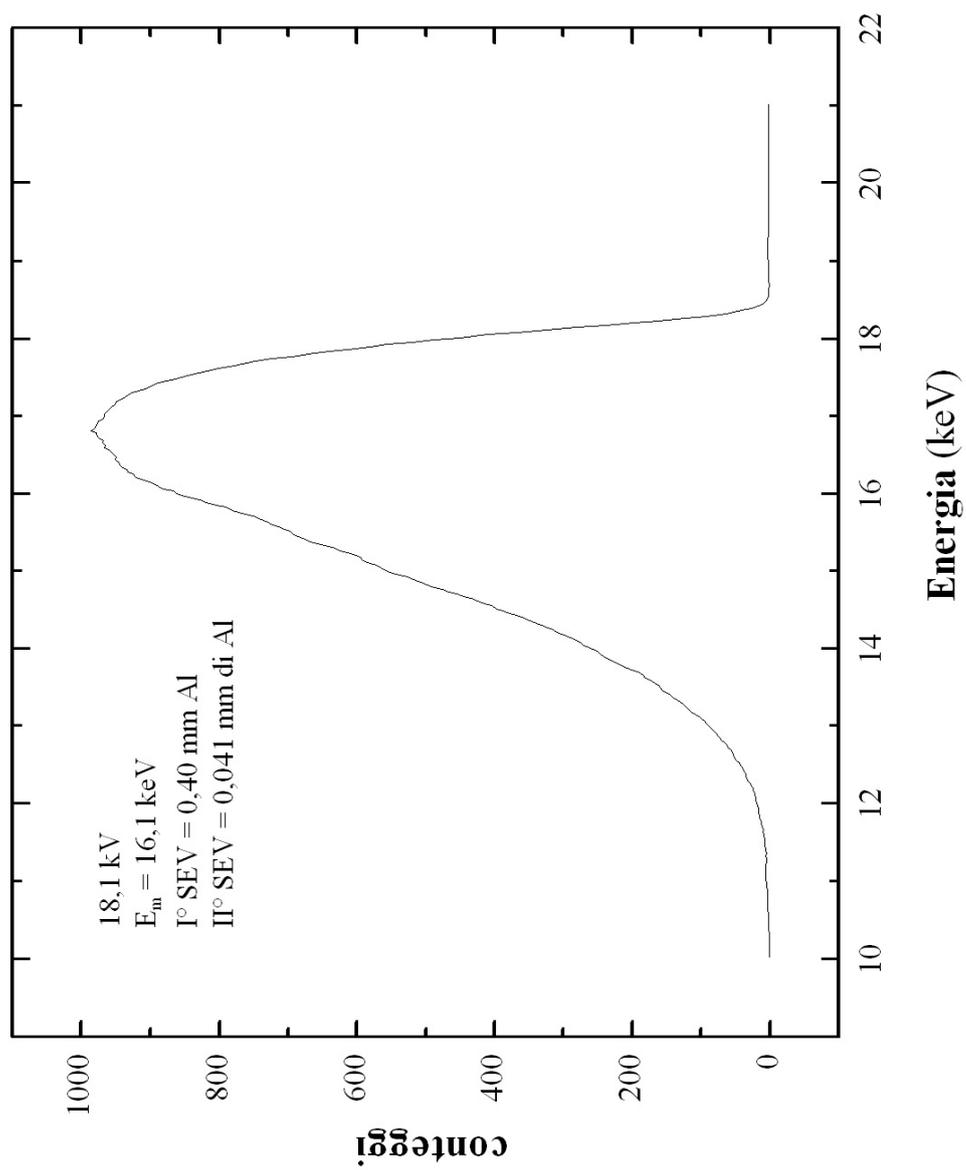
## B.1 Distanza sorgente - rivelatore = 50 cm.

### B.1.1 Serie L



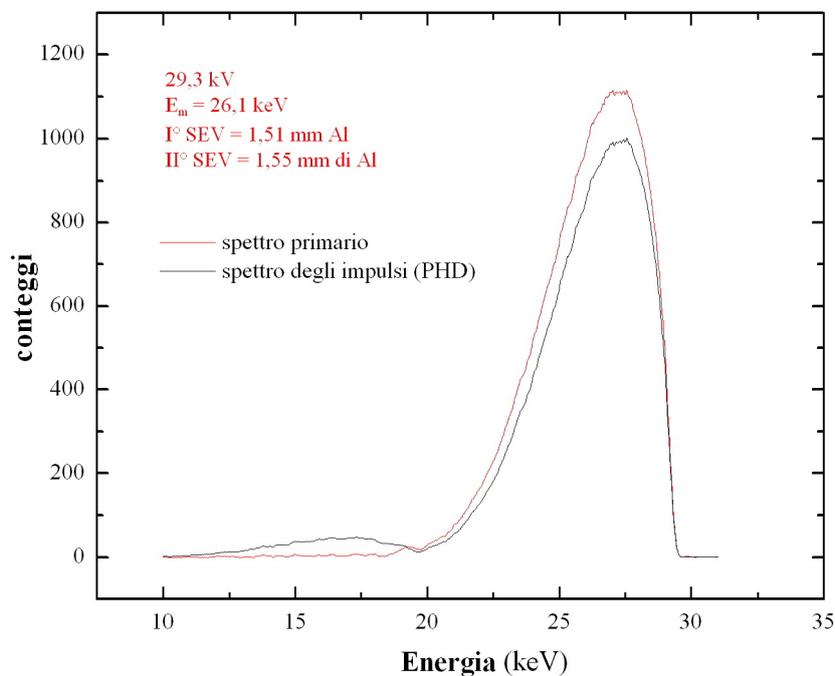
E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
5,00	1	6,09	15	7,17	231	8,26	893	9,34	110	10,42	2
5,03	1	6,12	17	7,20	241	8,29	904	9,37	76	10,46	2
5,06	1	6,15	20	7,23	258	8,32	918	9,40	44	10,49	2
5,09	1	6,18	22	7,26	273	8,35	929	9,43	26	10,52	2
5,13	1	6,21	23	7,30	289	8,38	943	9,46	12	10,55	2
5,16	1	6,24	26	7,33	306	8,41	949	9,50	5	10,58	2
5,19	1	6,27	28	7,36	322	8,44	957	9,53	3	10,61	2
5,22	1	6,30	30	7,39	339	8,47	963	9,56	2	10,64	2
5,25	1	6,33	34	7,42	358	8,50	971	9,59	2	10,67	2
5,28	1	6,37	37	7,45	375	8,53	977	9,62	2	10,70	2
5,31	1	6,40	42	7,48	393	8,57	986	9,65	2	10,73	2
5,34	1	6,43	47	7,51	417	8,60	985	9,68	2	10,77	2
5,37	1	6,46	51	7,54	438	8,63	987	9,71	2	10,80	2
5,40	1	6,49	54	7,57	456	8,66	981	9,74	2	10,83	2
5,44	1	6,52	59	7,61	476	8,69	982	9,77	2	10,86	2
5,47	1	6,55	65	7,64	497	8,72	979	9,81	2	10,89	2
5,50	1	6,58	71	7,67	514	8,75	974	9,84	2	10,92	2
5,53	2	6,61	77	7,70	532	8,78	965	9,87	2	10,95	2
5,56	2	6,64	84	7,73	552	8,81	946	9,90	2	10,98	2
5,59	2	6,68	92	7,76	570	8,84	926	9,93	2	11,01	2
5,62	2	6,71	99	7,79	590	8,88	908	9,96	2		
5,65	3	6,74	106	7,82	616	8,91	886	9,99	1		
5,68	4	6,77	113	7,85	636	8,94	857	10,02	2		
5,71	4	6,80	122	7,88	660	8,97	821	10,05	2		
5,75	4	6,83	131	7,92	679	9,00	779	10,08	1		
5,78	4	6,86	140	7,95	701	9,03	726	10,12	1		
5,81	5	6,89	148	7,98	720	9,06	671	10,15	1		
5,84	6	6,92	156	8,01	740	9,09	609	10,18	2		
5,87	7	6,95	166	8,04	761	9,12	540	10,21	2		
5,90	8	6,99	175	8,07	781	9,15	476	10,24	1		
5,93	10	7,02	184	8,10	804	9,19	405	10,27	2		
5,96	11	7,05	194	8,13	828	9,22	332	10,30	2		
5,99	11	7,08	205	8,16	844	9,25	264	10,33	2		

Figura B.1: L10, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.



**Figura B.2:** *L20*, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

E (keV)	conteggi														
10,02	1	11,42	7	12,81	70	14,20	310	15,60	726	16,99	966	18,39	27	19,78	3
10,05	1	11,45	7	12,84	72	14,24	315	15,63	729	17,02	967	18,42	17	19,81	3
10,08	1	11,48	8	12,87	75	14,27	323	15,66	739	17,05	964	18,45	10	19,84	3
10,12	1	11,51	8	12,90	78	14,30	332	15,69	748	17,09	958	18,48	7	19,87	2
10,15	1	11,54	8	12,93	81	14,33	342	15,72	756	17,12	955	18,51	5	19,90	2
10,18	1	11,57	10	12,97	85	14,36	348	15,75	773	17,15	950	18,54	3	19,94	3
10,21	1	11,60	10	13,00	89	14,39	357	15,78	781	17,18	949	18,57	3	19,97	3
10,24	2	11,63	10	13,03	92	14,42	368	15,82	791	17,21	942	18,60	2	20,00	2
10,27	2	11,66	10	13,06	94	14,45	377	15,85	805	17,24	936	18,63	2	20,03	2
10,30	2	11,70	11	13,09	98	14,48	389	15,88	819	17,27	931	18,67	2	20,06	2
10,33	2	11,73	13	13,12	103	14,51	398	15,91	828	17,30	926	18,70	2	20,09	2
10,36	2	11,76	13	13,15	108	14,55	404	15,94	838	17,33	917	18,73	2	20,12	3
10,39	2	11,79	14	13,18	114	14,58	415	15,97	855	17,36	903	18,76	2	20,15	3
10,42	2	11,82	15	13,21	118	14,61	425	16,00	863	17,40	895	18,79	2	20,18	3
10,46	2	11,85	16	13,24	121	14,64	434	16,03	867	17,43	888	18,82	2	20,21	3
10,49	3	11,88	17	13,28	125	14,67	444	16,06	881	17,46	871	18,85	2	20,24	3
10,52	3	11,91	17	13,31	130	14,70	455	16,09	888	17,49	860	18,88	2	20,28	3
10,55	3	11,94	18	13,34	135	14,73	467	16,13	897	17,52	847	18,91	3	20,31	3
10,58	3	11,97	19	13,37	141	14,76	476	16,16	904	17,55	836	18,94	3	20,34	3
10,61	4	12,01	20	13,40	144	14,79	488	16,19	917	17,58	818	18,97	3	20,37	3
10,64	4	12,04	21	13,43	150	14,82	498	16,22	921	17,61	802	19,01	3	20,40	3
10,67	4	12,07	21	13,46	156	14,86	507	16,25	924	17,64	785	19,04	4	20,43	3
10,70	4	12,10	22	13,49	158	14,89	518	16,28	932	17,67	768	19,07	4	20,46	3
10,73	4	12,13	23	13,52	162	14,92	525	16,31	934	17,71	748	19,10	4	20,49	3
10,77	4	12,16	25	13,55	167	14,95	539	16,34	941	17,74	724	19,13	4	20,52	3
10,80	4	12,19	25	13,59	175	14,98	551	16,37	944	17,77	695	19,16	4	20,55	3
10,83	4	12,22	28	13,62	181	15,01	559	16,40	945	17,80	671	19,19	4	20,59	3
10,86	4	12,25	30	13,65	184	15,04	565	16,44	950	17,83	640	19,22	4	20,62	3
10,89	5	12,28	32	13,68	189	15,07	571	16,47	949	17,86	614	19,25	4	20,65	3
10,92	5	12,31	34	13,71	196	15,10	581	16,50	953	17,89	580	19,28	4	20,68	3
10,95	6	12,35	35	13,74	208	15,13	591	16,53	955	17,92	556	19,32	3	20,71	3
10,98	6	12,38	36	13,77	214	15,17	596	16,56	959	17,95	520	19,35	3	20,74	3
11,01	7	12,41	38	13,80	220	15,20	602	16,59	966	17,98	488	19,38	3	20,77	3
11,04	7	12,44	40	13,83	227	15,23	613	16,62	965	18,01	450	19,41	3	20,80	3
11,08	7	12,47	41	13,86	234	15,26	625	16,65	968	18,05	411	19,44	2	20,83	3
11,11	7	12,50	43	13,89	241	15,29	632	16,68	968	18,08	367	19,47	2	20,86	3
11,14	7	12,53	46	13,93	246	15,32	641	16,71	974	18,11	323	19,50	2	20,90	2
11,17	7	12,56	49	13,96	251	15,35	658	16,74	976	18,14	281	19,53	2	20,93	2
11,20	7	12,59	51	13,99	258	15,38	671	16,78	978	18,17	239	19,56	2	20,96	2
11,23	6	12,62	53	14,02	266	15,41	675	16,81	985	18,20	197	19,59	2	20,99	2
11,26	6	12,66	54	14,05	272	15,44	686	16,84	980	18,23	161	19,63	2	21,02	2
11,29	6	12,69	57	14,08	275	15,47	692	16,87	978	18,26	123	19,66	2		
11,32	6	12,72	60	14,11	284	15,51	697	16,90	976	18,29	91	19,69	2		
11,35	6	12,75	62	14,14	289	15,54	706	16,93	975	18,32	63	19,72	2		
11,39	6	12,78	66	14,17	299	15,57	714	16,96	969	18,36	42	19,75	3		

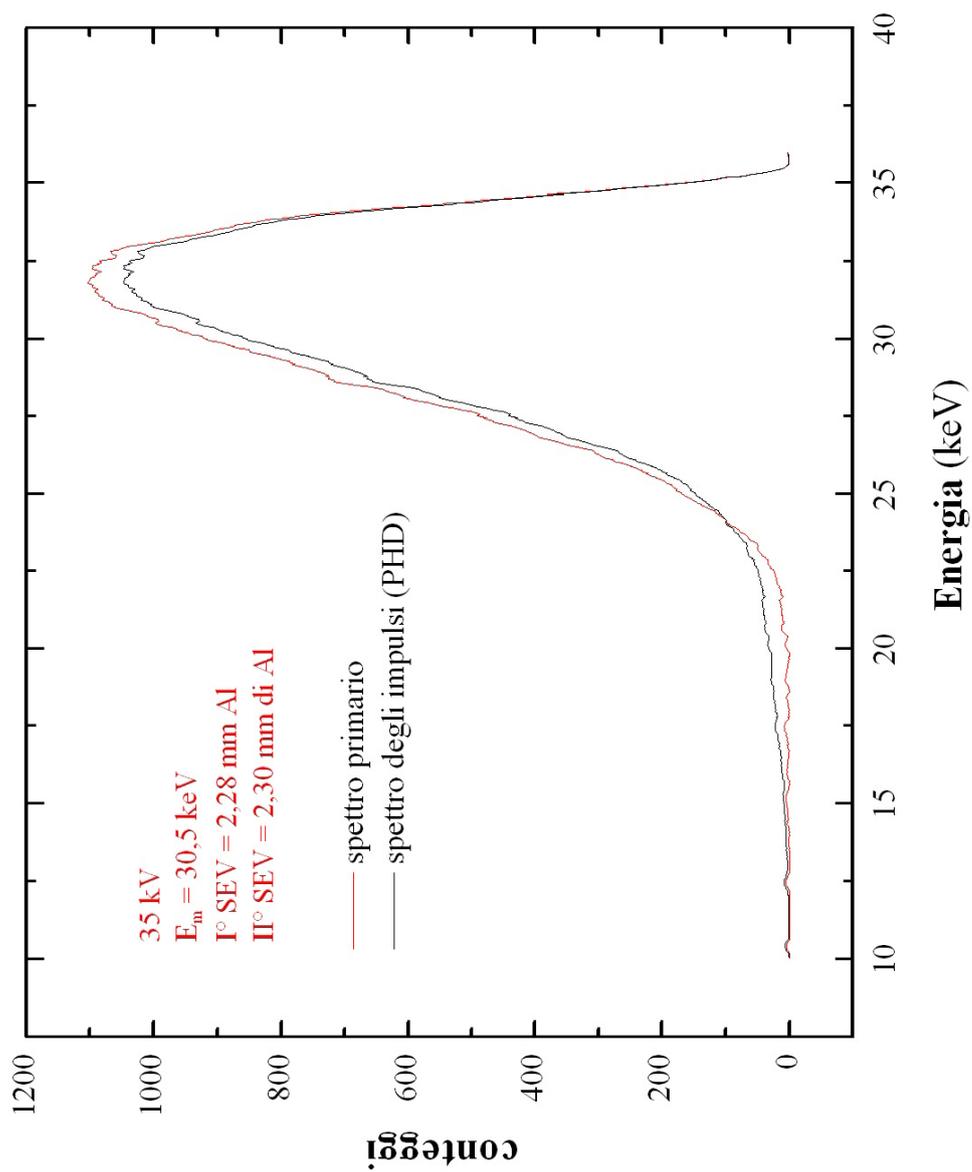


E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
17,02	5	18,88	14	20,74	55	22,60	241	24,46	624	26,31	1040	28,17	982	30,03	2
17,05	5	18,91	16	20,77	58	22,63	244	24,49	633	26,35	1046	28,20	974	30,06	1
17,09	6	18,94	16	20,80	61	22,66	251	24,52	639	26,38	1050	28,23	966	30,09	1
17,12	6	18,97	18	20,83	61	22,69	257	24,55	647	26,41	1051	28,26	952	30,12	1
17,15	6	19,01	19	20,86	63	22,72	262	24,58	650	26,44	1054	28,30	941	30,15	1
17,18	7	19,04	20	20,90	65	22,75	269	24,61	658	26,47	1061	28,33	929	30,18	1
17,21	7	19,07	22	20,93	68	22,78	274	24,64	664	26,50	1063	28,36	916	30,21	1
17,24	8	19,10	22	20,96	70	22,82	280	24,67	669	26,53	1063	28,39	904	30,25	1
17,27	7	19,13	23	20,99	74	22,85	284	24,70	671	26,56	1063	28,42	884	30,28	1
17,30	8	19,16	24	21,02	76	22,88	291	24,73	680	26,59	1069	28,45	874	30,31	1
17,33	8	19,19	25	21,05	78	22,91	295	24,77	693	26,62	1078	28,48	863	30,34	1
17,36	8	19,22	26	21,08	79	22,94	305	24,80	701	26,65	1082	28,51	849	30,37	2
17,40	7	19,25	25	21,11	80	22,97	310	24,83	704	26,69	1080	28,54	832	30,40	1
17,43	6	19,28	26	21,14	81	23,00	315	24,86	712	26,72	1090	28,57	810	30,43	2
17,46	6	19,32	25	21,17	84	23,03	321	24,89	716	26,75	1098	28,61	789	30,46	2
17,49	7	19,35	25	21,20	88	23,06	329	24,92	728	26,78	1099	28,64	776	30,49	2
17,52	6	19,38	25	21,24	89	23,09	329	24,95	734	26,81	1097	28,67	761	30,52	1
17,55	6	19,41	24	21,27	91	23,12	334	24,98	743	26,84	1101	28,70	746	30,56	1
17,58	5	19,44	24	21,30	95	23,16	341	25,01	754	26,87	1099	28,73	719	30,59	2
17,61	5	19,47	24	21,33	95	23,19	347	25,04	773	26,90	1104	28,76	702	30,62	1
17,64	5	19,50	22	21,36	100	23,22	355	25,08	778	26,93	1110	28,79	678	30,65	1
17,67	5	19,53	21	21,39	103	23,25	363	25,11	783	26,96	1111	28,82	655	30,68	1
17,71	5	19,56	20	21,42	106	23,28	367	25,14	790	27,00	1108	28,85	633	30,71	1
17,74	6	19,59	21	21,45	108	23,31	377	25,17	799	27,03	1114	28,88	608	30,74	1
17,77	6	19,63	20	21,48	112	23,34	381	25,20	805	27,06	1107	28,91	585	30,77	1
17,80	7	19,66	19	21,51	116	23,37	390	25,23	813	27,09	1103	28,95	562	30,80	1
17,83	7	19,69	19	21,55	116	23,40	396	25,26	817	27,12	1105	28,98	527	30,83	1
17,86	8	19,72	19	21,58	121	23,43	403	25,29	825	27,15	1110	29,01	495	30,86	1
17,89	7	19,75	19	21,61	125	23,47	411	25,32	836	27,18	1111	29,04	456	30,90	1
17,92	6	19,78	21	21,64	129	23,50	417	25,35	836	27,21	1108	29,07	422	30,93	1

Figura B.3: L30, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

(segue)L30, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
17,95	7	19,81	21	21,67	133	23,53	425	25,39	842	27,24	1108	29,10	384
17,98	6	19,84	22	21,70	137	23,56	426	25,42	845	27,27	1109	29,13	346
18,01	10	19,87	24	21,73	140	23,59	430	25,45	854	27,30	1111	29,16	307
18,05	8	19,90	25	21,76	140	23,62	433	25,48	855	27,34	1110	29,19	268
18,08	6	19,94	25	21,79	144	23,65	437	25,51	863	27,37	1103	29,22	226
18,11	4	19,97	27	21,82	147	23,68	444	25,54	875	27,40	1110	29,26	189
18,14	4	20,00	30	21,86	150	23,71	446	25,57	885	27,43	1111	29,29	151
18,17	4	20,03	32	21,89	155	23,74	451	25,60	899	27,46	1113	29,32	122
18,20	1	20,06	33	21,92	158	23,78	465	25,63	911	27,49	1106	29,35	93
18,23	2	20,09	34	21,95	160	23,81	472	25,66	913	27,52	1106	29,38	70
18,26	4	20,12	33	21,98	163	23,84	475	25,69	918	27,55	1114	29,41	50
18,29	3	20,15	35	22,01	165	23,87	479	25,73	921	27,58	1113	29,44	36
18,32	3	20,18	36	22,04	167	23,90	487	25,76	931	27,61	1106	29,47	22
18,36	2	20,21	37	22,07	172	23,93	496	25,79	935	27,65	1096	29,50	13
18,39	3	20,24	38	22,10	177	23,96	503	25,82	942	27,68	1097	29,53	7
18,42	4	20,28	39	22,13	180	23,99	512	25,85	944	27,71	1095	29,56	5
18,45	5	20,31	41	22,16	183	24,02	522	25,88	950	27,74	1089	29,60	3
18,48	5	20,34	40	22,20	192	24,05	532	25,91	951	27,77	1078	29,63	2
18,51	5	20,37	41	22,23	194	24,08	536	25,94	958	27,80	1069	29,66	1
18,54	7	20,40	43	22,26	198	24,12	539	25,97	963	27,83	1066	29,69	2
18,57	8	20,43	45	22,29	203	24,15	548	26,00	974	27,86	1057	29,72	2
18,60	8	20,46	46	22,32	206	24,18	555	26,04	983	27,89	1051	29,75	2
18,63	9	20,49	47	22,35	209	24,21	564	26,07	996	27,92	1045	29,78	2
18,67	9	20,52	48	22,38	211	24,24	572	26,10	1002	27,95	1038	29,81	2
18,70	10	20,55	48	22,41	215	24,27	577	26,13	1006	27,99	1031	29,84	3
18,73	10	20,59	50	22,44	221	24,30	586	26,16	1016	28,02	1022	29,87	3
18,76	12	20,62	51	22,47	226	24,33	595	26,19	1027	28,05	1021	29,91	2
18,79	13	20,65	50	22,51	231	24,36	597	26,22	1033	28,08	1009	29,94	2
18,82	12	20,68	51	22,54	233	24,39	607	26,25	1039	28,11	1005	29,97	2
18,85	14	20,71	53	22,57	238	24,43	616	26,28	1035	28,14	993	30,00	2



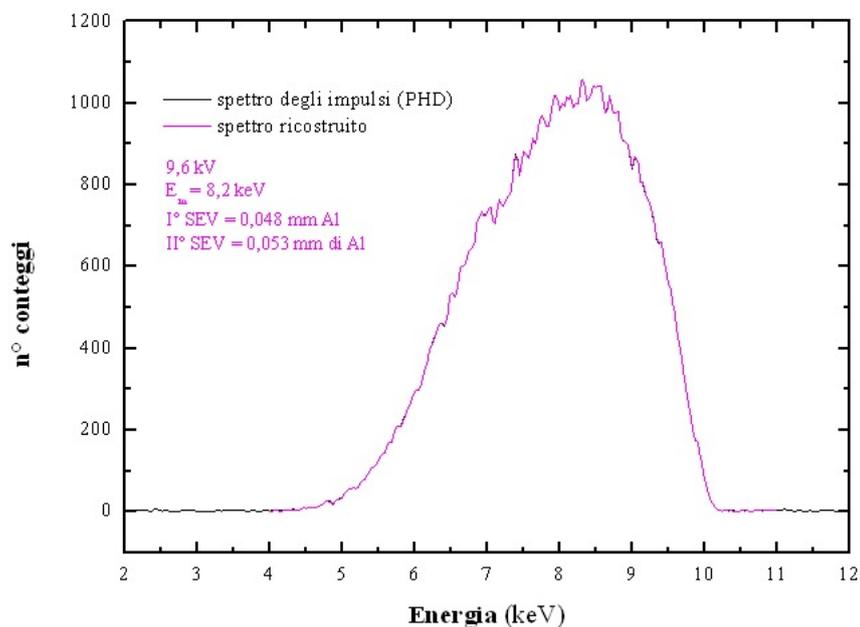
**Figura B.4:** *L35*, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

E conteggi (keV)																	
20,00	4	21,86	14	23,71	73	25,57	219	27,43	481	29,29	797	31,14	1070	33,00	1034	34,86	237
20,03	6	21,89	13	23,74	76	25,60	220	27,46	476	29,32	801	31,17	1069	33,03	1020	34,89	218
20,06	7	21,92	16	23,78	78	25,63	224	27,49	484	29,35	806	31,21	1074	33,06	1015	34,92	201
20,09	7	21,95	17	23,81	78	25,66	222	27,52	491	29,38	811	31,24	1080	33,09	1004	34,95	189
20,12	8	21,98	16	23,84	80	25,69	230	27,55	488	29,41	819	31,27	1079	33,12	993	34,98	173
20,15	7	22,01	18	23,87	82	25,73	231	27,58	495	29,44	818	31,30	1078	33,16	980	35,01	157
20,18	6	22,04	19	23,90	83	25,76	237	27,61	496	29,47	827	31,33	1078	33,19	979	35,04	143
20,21	5	22,07	19	23,93	88	25,79	238	27,65	502	29,50	834	31,36	1086	33,22	971	35,07	132
20,24	4	22,10	20	23,96	90	25,82	241	27,68	513	29,53	842	31,39	1086	33,25	962	35,11	118
20,28	4	22,13	19	23,99	95	25,85	248	27,71	519	29,56	849	31,42	1087	33,28	958	35,14	107
20,31	5	22,16	20	24,02	94	25,88	249	27,74	524	29,60	848	31,45	1087	33,31	945	35,17	94
20,34	4	22,20	21	24,05	97	25,91	254	27,77	531	29,63	851	31,48	1092	33,34	936	35,20	83
20,37	3	22,23	21	24,08	98	25,94	258	27,80	542	29,66	863	31,51	1091	33,37	932	35,23	71
20,40	3	22,26	19	24,12	97	25,97	261	27,83	548	29,69	869	31,55	1091	33,40	922	35,26	59
20,43	5	22,29	22	24,15	99	26,00	271	27,86	553	29,72	876	31,58	1087	33,43	915	35,29	47
20,46	7	22,32	23	24,18	101	26,04	273	27,89	561	29,75	875	31,61	1088	33,46	910	35,32	39
20,49	9	22,35	23	24,21	103	26,07	277	27,92	564	29,78	885	31,64	1094	33,50	903	35,35	32
20,52	10	22,38	22	24,24	105	26,10	277	27,95	579	29,81	887	31,67	1096	33,53	893	35,38	26
20,55	11	22,41	22	24,27	108	26,13	286	27,99	588	29,84	891	31,70	1096	33,56	886	35,41	19
20,59	12	22,44	24	24,30	111	26,16	291	28,02	594	29,87	897	31,73	1095	33,59	878	35,45	13
20,62	13	22,47	24	24,33	110	26,19	293	28,05	598	29,91	905	31,76	1100	33,62	873	35,48	9
20,65	12	22,51	26	24,36	115	26,22	297	28,08	607	29,94	914	31,79	1103	33,65	872	35,51	7
20,68	13	22,54	26	24,39	115	26,25	300	28,11	605	29,97	918	31,82	1103	33,68	866	35,54	5
20,71	13	22,57	28	24,43	117	26,28	305	28,14	609	30,00	917	31,86	1101	33,71	855	35,57	4
20,74	13	22,60	31	24,46	122	26,31	306	28,17	612	30,03	923	31,89	1100	33,74	842	35,60	2
20,77	11	22,63	29	24,49	125	26,35	307	28,20	615	30,06	925	31,92	1099	33,77	836	35,63	2
20,80	9	22,66	31	24,52	128	26,38	308	28,23	621	30,09	935	31,95	1099	33,81	829	35,66	1
20,83	10	22,69	33	24,55	131	26,41	313	28,26	626	30,12	938	31,98	1095	33,84	813	35,69	1
20,86	9	22,72	34	24,58	134	26,44	320	28,30	633	30,15	944	32,01	1092	33,87	804	35,72	1
20,90	11	22,75	34	24,61	138	26,47	326	28,33	637	30,18	948	32,04	1092	33,90	793	35,76	1
20,93	12	22,78	34	24,64	137	26,50	332	28,36	640	30,21	957	32,07	1089	33,93	782	35,79	2
20,96	11	22,82	35	24,67	142	26,53	341	28,39	651	30,25	957	32,10	1090	33,96	767	35,82	2
20,99	11	22,85	35	24,70	144	26,56	348	28,42	656	30,28	963	32,13	1087	33,99	747	35,85	2

(segue) L35, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

21,02	12	22,88	37	24,73	146	26,59	351	28,45	668	30,31	963	32,16	1082	34,02	732	35,88	2
21,05	11	22,91	38	24,77	150	26,62	356	28,48	681	30,34	966	32,20	1091	34,05	715	35,91	2
21,08	12	22,94	39	24,80	152	26,65	364	28,51	690	30,37	971	32,23	1097	34,08	702	35,94	3
21,11	13	22,97	42	24,83	154	26,69	371	28,54	700	30,40	983	32,26	1096	34,11	685	35,97	3
21,14	12	23,00	44	24,86	158	26,72	376	28,57	710	30,43	988	32,29	1095	34,15	664	36,00	3
21,17	13	23,03	44	24,89	159	26,75	383	28,61	717	30,46	992	32,32	1096	34,18	653		
21,20	12	23,06	45	24,92	164	26,78	391	28,64	716	30,49	995	32,35	1095	34,21	635		
21,24	12	23,09	47	24,95	166	26,81	393	28,67	717	30,52	997	32,38	1087	34,24	615		
21,27	12	23,12	48	24,98	168	26,84	397	28,70	726	30,56	991	32,41	1087	34,27	590		
21,30	13	23,16	50	25,01	169	26,87	398	28,73	724	30,59	992	32,44	1081	34,30	570		
21,33	15	23,19	51	25,04	173	26,90	402	28,76	725	30,62	992	32,47	1083	34,33	550		
21,36	14	23,22	50	25,08	177	26,93	403	28,79	730	30,65	1000	32,51	1084	34,36	536		
21,39	13	23,25	51	25,11	178	26,96	407	28,82	726	30,68	1005	32,54	1079	34,39	519		
21,42	14	23,28	50	25,14	176	27,00	412	28,85	731	30,71	1009	32,57	1069	34,42	502		
21,45	15	23,31	50	25,17	179	27,03	416	28,88	734	30,74	1009	32,60	1062	34,46	481		
21,48	15	23,34	52	25,20	182	27,06	422	28,91	742	30,77	1014	32,63	1060	34,49	462		
21,51	15	23,37	52	25,23	184	27,09	424	28,95	744	30,80	1015	32,66	1058	34,52	439		
21,55	16	23,40	52	25,26	184	27,12	431	28,98	747	30,83	1022	32,69	1063	34,55	423		
21,58	14	23,43	55	25,29	185	27,15	434	29,01	754	30,86	1029	32,72	1064	34,58	406		
21,61	13	23,47	59	25,32	190	27,18	437	29,04	756	30,90	1041	32,75	1067	34,61	391		
21,64	12	23,50	61	25,35	193	27,21	449	29,07	763	30,93	1050	32,78	1066	34,64	373		
21,67	10	23,53	61	25,39	196	27,24	453	29,10	771	30,96	1056	32,81	1068	34,67	358		
21,70	11	23,56	64	25,42	198	27,27	462	29,13	774	30,99	1061	32,85	1057	34,70	332		
21,73	14	23,59	64	25,45	201	27,30	465	29,16	783	31,02	1061	32,88	1052	34,73	312		
21,76	13	23,62	67	25,48	208	27,34	465	29,19	779	31,05	1066	32,91	1051	34,76	293		
21,79	14	23,65	68	25,51	209	27,37	470	29,22	785	31,08	1065	32,94	1043	34,80	273		
21,82	15	23,68	69	25,54	213	27,40	476	29,26	786	31,11	1064	32,97	1042	34,83	255		

### B.1.2 Serie N

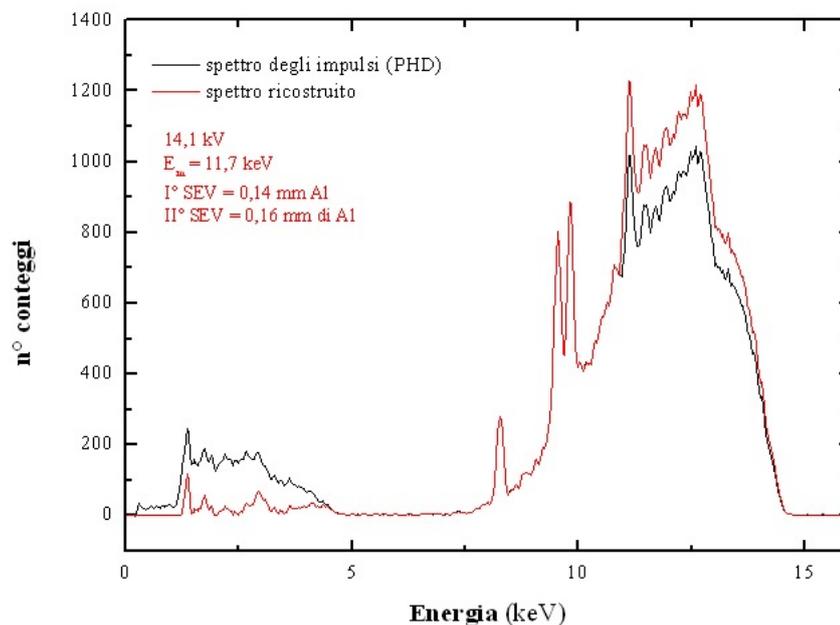


E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
4,01	2	5,87	236	7,73	958	9,59	483
4,04	2	5,90	244	7,76	970	9,62	452
4,07	3	5,93	259	7,79	955	9,65	412
4,10	3	5,96	279	7,82	942	9,68	375
4,13	2	5,99	289	7,85	944	9,71	346
4,17	2	6,02	298	7,88	966	9,74	303
4,20	4	6,06	296	7,92	1019	9,77	263
4,23	5	6,09	313	7,95	1017	9,81	230
4,26	5	6,12	326	7,98	1005	9,84	202
4,29	5	6,15	352	8,01	983	9,87	175
4,32	5	6,18	372	8,04	999	9,90	169
4,35	4	6,21	399	8,07	993	9,93	149
4,38	3	6,24	407	8,10	1015	9,96	122
4,41	4	6,27	420	8,13	1009	9,99	92
4,44	8	6,30	437	8,16	1019	10,02	70
4,48	9	6,33	458	8,19	988	10,05	43
4,51	6	6,37	462	8,22	1000	10,08	32
4,54	9	6,40	456	8,26	999	10,12	19
4,57	11	6,43	461	8,29	1053	10,15	10
4,60	11	6,46	491	8,32	1058	10,18	5
4,63	9	6,49	528	8,35	1038	10,21	4
4,66	12	6,52	535	8,38	1004	10,24	2
4,69	13	6,55	525	8,41	1012	10,27	3
4,72	17	6,58	535	8,44	1028	10,30	4
4,75	19	6,61	571	8,47	1041	10,33	2

Figura B.5: N10, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

(segue) N10, distanza sorgente rivelatore = 50 cm

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	<b>E (keV)</b>	<b>conteggi</b>
4,78	28	6,64	598	8,50	1038	10,36	3
4,82	25	6,68	604	8,53	1043	10,39	2
4,85	23	6,71	608	8,57	1040	10,42	1
4,88	18	6,74	636	8,60	1011	10,46	0
4,91	28	6,77	644	8,63	976	10,49	1
4,94	30	6,80	647	8,66	987	10,52	3
4,97	31	6,83	658	8,69	1019	10,55	2
5,00	32	6,86	704	8,72	988	10,58	3
5,03	43	6,89	719	8,75	977	10,61	2
5,06	50	6,92	735	8,78	977	10,64	1
5,09	56	6,95	726	8,81	980	10,67	2
5,13	57	6,99	726	8,84	930	10,70	4
5,16	59	7,02	741	8,88	907	10,73	4
5,19	55	7,05	745	8,91	904	10,77	3
5,22	60	7,08	711	8,94	897	10,80	2
5,25	70	7,11	704	8,97	877	10,83	3
5,28	75	7,14	731	9,00	841	10,86	4
5,31	80	7,17	764	9,03	867	10,89	4
5,34	89	7,20	752	9,06	864	10,92	3
5,37	96	7,23	748	9,09	848	10,95	3
5,40	105	7,26	762	9,12	808	10,98	3
5,44	112	7,30	775	9,15	805	11,01	3
5,47	115	7,33	782	9,19	778		
5,50	125	7,36	823	9,22	760		
5,53	134	7,39	873	9,25	758		
5,56	140	7,42	860	9,28	730		
5,59	143	7,45	823	9,31	700		
5,62	161	7,48	857	9,34	669		
5,65	169	7,51	882	9,37	658		
5,68	170	7,54	875	9,40	658		
5,71	187	7,57	864	9,43	633		
5,75	205	7,61	892	9,46	595		
5,78	210	7,64	913	9,50	558		
5,81	211	7,67	900	9,53	542		
5,84	221	7,70	936	9,56	513		



E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
7,02	1	8,88	115	10,73	590	12,59	1002	14,45	57
7,05	1	8,91	114	10,77	620	12,62	1027	14,48	45
7,08	3	8,94	113	10,80	659	12,66	978	14,51	33
7,11	3	8,97	110	10,83	689	12,69	982	14,55	20
7,14	3	9,00	116	10,86	682	12,72	1009	14,58	12
7,17	2	9,03	128	10,89	680	12,75	1007	14,61	8
7,20	2	9,06	144	10,92	668	12,78	977	14,64	5
7,23	4	9,09	151	10,95	661	12,81	941	14,67	4
7,26	7	9,12	141	10,98	658	12,84	915	14,70	5
7,30	8	9,15	138	11,01	676	12,87	884	14,73	5
7,33	8	9,19	152	11,04	735	12,90	852	14,76	2
7,36	9	9,22	169	11,08	822	12,93	842	14,79	1
7,39	10	9,25	184	11,11	926	12,97	784	14,82	0
7,42	10	9,28	180	11,14	993	13,00	748	14,86	0
7,45	7	9,31	187	11,17	992	13,03	694	14,89	1
7,48	7	9,34	202	11,20	929	13,06	700	14,92	1
7,51	7	9,37	239	11,23	854	13,09	688	14,95	1
7,54	6	9,40	257	11,26	801	13,12	692	14,98	1
7,57	6	9,43	306	11,29	768	13,15	689	15,01	2
7,61	7	9,46	378	11,32	744	13,18	676		
7,64	8	9,50	524	11,35	741	13,21	681		
7,67	8	9,53	692	11,39	747	13,24	664		
7,70	10	9,56	766	11,42	778	13,28	658		
7,73	15	9,59	720	11,45	824	13,31	667		
7,76	17	9,62	627	11,48	858	13,34	685		
7,79	18	9,65	541	11,51	854	13,37	663		
7,82	18	9,68	445	11,54	857	13,40	639		
7,85	20	9,71	434	11,57	842	13,43	645		
7,88	24	9,74	515	11,60	809	13,46	638		
7,92	30	9,77	642	11,63	783	13,49	636		
7,95	28	9,81	773	11,66	804	13,52	625		
7,98	31	9,84	853	11,70	835	13,55	611		

Figura B.6: N15, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

(segue) N15, distanza sorgente rivelatore = 50 cm

<b>E (keV)</b>	<b>conteggi</b>	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
8,01	33	9,87	849	11,73	856	13,59	608		
8,04	37	9,90	738	11,76	846	13,62	585		
8,07	29	9,93	595	11,79	819	13,65	583		
8,10	32	9,96	474	11,82	815	13,68	560		
8,13	42	9,99	424	11,85	844	13,71	559		
8,16	58	10,02	406	11,88	874	13,74	518		
8,19	87	10,05	417	11,91	895	13,77	510		
8,22	151	10,08	415	11,94	903	13,80	503		
8,26	219	10,12	404	11,97	910	13,83	478		
8,29	263	10,15	393	12,01	905	13,86	451		
8,32	256	10,18	407	12,04	870	13,89	453		
8,35	218	10,21	418	12,07	871	13,93	449		
8,38	154	10,24	412	12,10	881	13,96	419		
8,41	102	10,27	417	12,13	899	13,99	376		
8,44	66	10,30	414	12,16	890	14,02	351		
8,47	55	10,33	442	12,19	910	14,05	327		
8,50	60	10,36	469	12,22	938	14,08	330		
8,53	66	10,39	478	12,25	954	14,11	304		
8,57	70	10,42	471	12,28	945	14,14	267		
8,60	68	10,46	488	12,31	938	14,17	226		
8,63	74	10,49	509	12,35	952	14,20	211		
8,66	82	10,52	534	12,38	952	14,24	192		
8,69	78	10,55	546	12,41	943	14,27	166		
8,72	74	10,58	544	12,44	960	14,30	149		
8,75	84	10,61	558	12,47	984	14,33	132		
8,78	104	10,64	574	12,50	1010	14,36	116		
8,81	113	10,67	585	12,53	989	14,39	89		
8,84	113	10,70	576	12,56	1000	14,42	72		

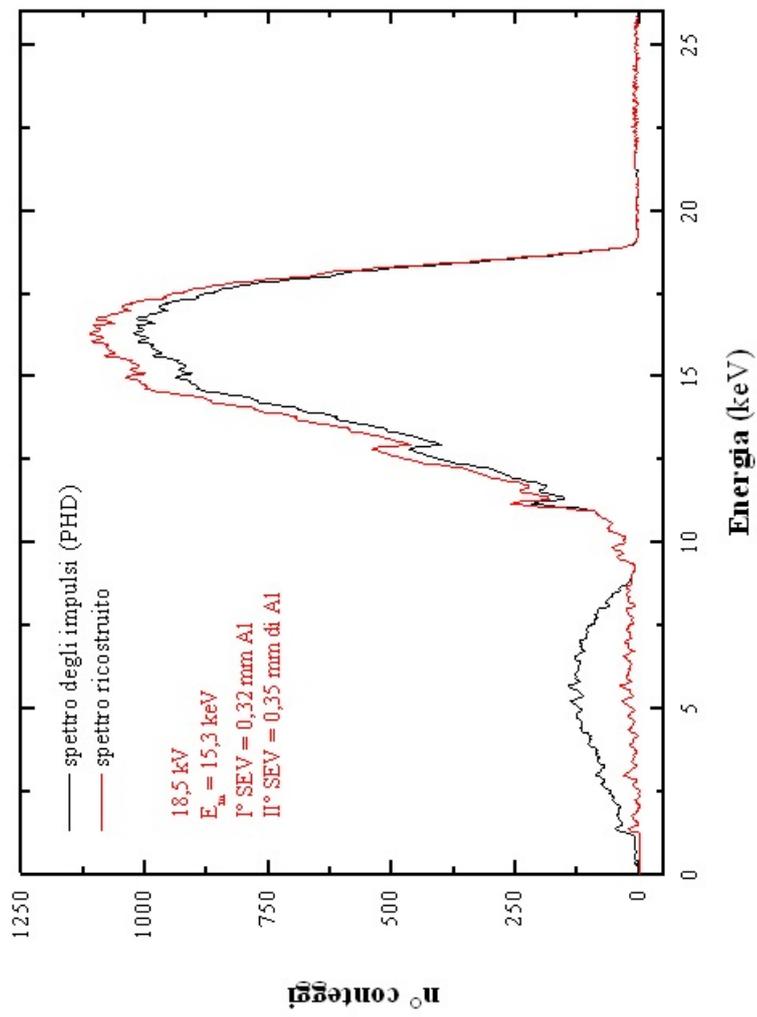


Figura B.7: N20, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

| E cont. (keV) |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 2.00          | 3             | 3.86          | 14            | 5.71          | 43            | 7.57          | 14            | 9.43          | 20            | 11.29         | 149           | 13.15         | 441           | 15.01         | 939           | 16.87         | 999           | 18.73         | 129           |               |
| 2.03          | 0             | 3.89          | 25            | 5.75          | 37            | 7.61          | 0             | 9.46          | 30            | 11.32         | 157           | 13.18         | 451           | 15.04         | 923           | 16.90         | 976           | 18.76         | 109           |               |
| 2.06          | 0             | 3.92          | 23            | 5.78          | 25            | 7.64          | 14            | 9.50          | 34            | 11.35         | 149           | 13.21         | 462           | 15.07         | 898           | 16.93         | 982           | 18.79         | 88            |               |
| 2.09          | 0             | 3.95          | 22            | 5.81          | 8             | 7.67          | 25            | 9.53          | 42            | 11.39         | 149           | 13.24         | 470           | 15.10         | 895           | 16.96         | 960           | 18.82         | 64            |               |
| 2.12          | 1             | 3.98          | 12            | 5.84          | 9             | 7.70          | 20            | 9.56          | 51            | 11.42         | 156           | 13.28         | 478           | 15.13         | 905           | 16.99         | 946           | 18.85         | 49            |               |
| 2.15          | 6             | 4.01          | 8             | 5.87          | 17            | 7.73          | 3             | 9.59          | 50            | 11.45         | 176           | 13.31         | 480           | 15.17         | 933           | 17.02         | 939           | 18.88         | 40            |               |
| 2.18          | 6             | 4.04          | 12            | 5.90          | 33            | 7.76          | 4             | 9.62          | 39            | 11.48         | 193           | 13.34         | 513           | 15.20         | 943           | 17.05         | 976           | 18.91         | 21            |               |
| 2.21          | 8             | 4.07          | 18            | 5.93          | 29            | 7.79          | 23            | 9.65          | 29            | 11.51         | 201           | 13.37         | 526           | 15.23         | 937           | 17.09         | 995           | 18.94         | 16            |               |
| 2.24          | 6             | 4.10          | 11            | 5.96          | 29            | 7.82          | 26            | 9.68          | 25            | 11.54         | 202           | 13.40         | 519           | 15.26         | 909           | 17.12         | 979           | 18.97         | 12            |               |
| 2.27          | 11            | 4.13          | 7             | 5.99          | 14            | 7.85          | 25            | 9.71          | 30            | 11.57         | 202           | 13.43         | 494           | 15.29         | 913           | 17.15         | 943           | 19.01         | 9             |               |
| 2.31          | 5             | 4.17          | 6             | 6.02          | 23            | 7.88          | 15            | 9.74          | 39            | 11.60         | 203           | 13.46         | 507           | 15.32         | 916           | 17.18         | 947           | 19.04         | 5             |               |
| 2.34          | 0             | 4.20          | 2             | 6.06          | 26            | 7.92          | 18            | 9.77          | 48            | 11.63         | 194           | 13.49         | 534           | 15.35         | 926           | 17.21         | 957           | 19.07         | 5             |               |
| 2.37          | 0             | 4.23          | 0             | 6.09          | 28            | 7.95          | 24            | 9.81          | 51            | 11.66         | 179           | 13.52         | 542           | 15.38         | 915           | 17.24         | 972           | 19.10         | 6             |               |
| 2.40          | 1             | 4.26          | 15            | 6.12          | 16            | 7.98          | 34            | 9.84          | 60            | 11.70         | 183           | 13.55         | 550           | 15.41         | 933           | 17.27         | 962           | 19.13         | 4             |               |
| 2.43          | 6             | 4.29          | 18            | 6.15          | 19            | 8.01          | 31            | 9.87          | 57            | 11.73         | 197           | 13.59         | 559           | 15.44         | 945           | 17.30         | 914           | 19.16         | 3             |               |
| 2.46          | 7             | 4.32          | 25            | 6.18          | 20            | 8.04          | 17            | 9.90          | 48            | 11.76         | 192           | 13.62         | 580           | 15.47         | 944           | 17.33         | 887           | 19.19         | 2             |               |
| 2.49          | 4             | 4.35          | 19            | 6.21          | 24            | 8.07          | 4             | 9.93          | 35            | 11.79         | 193           | 13.65         | 594           | 15.51         | 912           | 17.36         | 872           | 19.22         | 4             |               |
| 2.52          | 0             | 4.38          | 27            | 6.24          | 21            | 8.10          | 5             | 9.96          | 27            | 11.82         | 204           | 13.68         | 615           | 15.54         | 926           | 17.40         | 901           | 19.25         | 3             |               |
| 2.55          | 0             | 4.41          | 18            | 6.27          | 17            | 8.13          | 10            | 9.99          | 24            | 11.85         | 222           | 13.71         | 624           | 15.57         | 982           | 17.43         | 918           | 19.28         | 3             |               |
| 2.58          | 6             | 4.44          | 21            | 6.30          | 19            | 8.16          | 12            | 10.02         | 27            | 11.88         | 231           | 13.74         | 604           | 15.60         | 997           | 17.46         | 901           | 19.32         | 3             |               |
| 2.62          | 14            | 4.48          | 10            | 6.33          | 23            | 8.19          | 14            | 10.05         | 33            | 11.91         | 247           | 13.77         | 615           | 15.63         | 992           | 17.49         | 870           | 19.35         | 3             |               |
| 2.65          | 9             | 4.51          | 17            | 6.37          | 16            | 8.22          | 30            | 10.08         | 34            | 11.94         | 256           | 13.80         | 604           | 15.66         | 966           | 17.52         | 846           | 19.38         | 2             |               |
| 2.68          | 7             | 4.54          | 11            | 6.40          | 11            | 8.26          | 29            | 10.12         | 31            | 11.97         | 256           | 13.83         | 613           | 15.69         | 967           | 17.55         | 848           | 19.41         | 2             |               |
| 2.71          | 16            | 4.57          | 17            | 6.43          | 17            | 8.29          | 20            | 10.15         | 24            | 12.01         | 263           | 13.86         | 621           | 15.72         | 953           | 17.58         | 863           | 19.44         | 3             |               |
| 2.74          | 18            | 4.60          | 10            | 6.46          | 30            | 8.32          | 11            | 10.18         | 26            | 12.04         | 268           | 13.89         | 647           | 15.75         | 979           | 17.61         | 878           | 19.47         | 4             |               |
| 2.77          | 12            | 4.63          | 7             | 6.49          | 23            | 8.35          | 25            | 10.21         | 31            | 12.07         | 267           | 13.93         | 658           | 15.78         | 979           | 17.64         | 833           | 19.50         | 5             |               |
| 2.80          | 5             | 4.66          | 6             | 6.52          | 28            | 8.38          | 26            | 10.24         | 33            | 12.10         | 279           | 13.96         | 672           | 15.82         | 970           | 17.67         | 818           | 19.53         | 4             |               |
| 2.83          | 1             | 4.69          | 20            | 6.55          | 28            | 8.41          | 21            | 10.27         | 43            | 12.13         | 287           | 13.99         | 712           | 15.85         | 988           | 17.71         | 814           | 19.56         | 4             |               |
| 2.86          | 6             | 4.72          | 30            | 6.58          | 33            | 8.44          | 21            | 10.30         | 53            | 12.16         | 295           | 14.02         | 689           | 15.88         | 1003          | 17.74         | 823           | 19.59         | 4             |               |
| 2.89          | 10            | 4.75          | 22            | 6.61          | 35            | 8.47          | 28            | 10.33         | 56            | 12.19         | 288           | 14.05         | 681           | 15.91         | 986           | 17.77         | 786           | 19.63         | 3             |               |
| 2.93          | 18            | 4.78          | 18            | 6.64          | 29            | 8.50          | 28            | 10.36         | 59            | 12.22         | 292           | 14.08         | 677           | 15.94         | 969           | 17.80         | 780           | 19.66         | 3             |               |
| 2.96          | 30            | 4.82          | 21            | 6.68          | 18            | 8.53          | 16            | 10.39         | 65            | 12.25         | 301           | 14.11         | 709           | 15.97         | 977           | 17.83         | 762           | 19.69         | 4             |               |

(segue)N20, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

E cont. (keV)																			
2.99	4.85	21	6,71	9	8,57	15	10,42	61	12,28	320	14,14	735	16,00	995	17,86	748	19,72	3	
3.02	4,88	23	6,74	13	8,60	18	10,46	61	12,31	339	14,17	767	16,03	1021	17,89	721	19,75	2	
3.05	23	4,91	10	6,77	6	8,63	30	10,49	62	12,35	347	14,20	776	16,06	1032	17,92	689	19,78	4
3.08	20	4,94	11	6,80	16	8,66	31	10,52	60	12,38	366	14,24	772	16,09	1016	17,95	685	19,81	5
3.11	15	4,97	5	6,83	30	8,69	24	10,55	52	12,41	385	14,27	766	16,13	995	17,98	660	19,84	5
3.14	17	5,00	13	6,86	29	8,72	15	10,58	57	12,44	396	14,30	770	16,16	997	18,01	626	19,87	4
3.17	21	5,03	12	6,89	15	8,75	16	10,61	55	12,47	382	14,33	777	16,19	988	18,05	594	19,90	2
3.20	15	5,06	24	6,92	17	8,78	16	10,64	59	12,50	387	14,36	794	16,22	1001	18,08	608	19,94	3
3.24	9	5,09	23	6,95	28	8,81	13	10,67	63	12,53	415	14,39	794	16,25	1026	18,11	625	19,97	2
3.27	0	5,13	26	6,99	28	8,84	15	10,70	73	12,56	419	14,42	795	16,28	1024	18,14	599	20,00	2
3.30	8	5,16	29	7,02	32	8,88	16	10,73	69	12,59	415	14,45	820	16,31	1018	18,17	577		
3.33	9	5,19	38	7,05	28	8,91	13	10,77	73	12,62	423	14,48	848	16,34	1021	18,20	536		
3.36	18	5,22	34	7,08	24	8,94	12	10,80	82	12,66	445	14,51	852	16,37	1019	18,23	518		
3.39	12	5,25	35	7,11	15	8,97	15	10,83	89	12,69	438	14,55	873	16,40	999	18,26	482		
3.42	19	5,28	28	7,14	14	9,00	18	10,86	81	12,72	445	14,58	889	16,44	984	18,29	488		
3.45	20	5,31	26	7,17	15	9,03	16	10,89	82	12,75	452	14,61	899	16,47	1014	18,32	464		
3.48	12	5,34	13	7,20	24	9,06	13	10,92	86	12,78	460	14,64	888	16,50	1032	18,36	440		
3.51	3	5,37	8	7,23	21	9,09	11	10,95	91	12,81	465	14,67	903	16,53	1025	18,39	394		
3.55	14	5,40	8	7,26	14	9,12	10	10,98	90	12,84	479	14,70	893	16,56	1005	18,42	356		
3.58	13	5,44	14	7,30	15	9,15	11	11,01	106	12,87	465	14,73	894	16,59	997	18,45	329		
3.61	17	5,47	24	7,33	21	9,19	9	11,04	125	12,90	428	14,76	888	16,62	967	18,48	306		
3.64	12	5,50	23	7,36	22	9,22	7	11,08	151	12,93	397	14,79	907	16,65	952	18,51	297		
3.67	6	5,53	15	7,39	29	9,25	5	11,11	185	12,97	391	14,82	911	16,68	1012	18,54	276		
3.70	0	5,56	13	7,42	29	9,28	7	11,14	213	13,00	394	14,86	917	16,71	1043	18,57	236		
3.73	11	5,59	25	7,45	19	9,31	10	11,17	232	13,03	420	14,89	900	16,74	1030	18,60	206		
3.76	16	5,62	31	7,48	16	9,34	11	11,20	228	13,06	437	14,92	922	16,78	987	18,63	181		
3.79	8	5,65	36	7,51	26	9,37	10	11,23	195	13,09	434	14,95	934	16,81	1004	18,67	169		
3.82	4	5,68	42	7,54	22	9,40	13	11,26	160	13,12	428	14,98	957	16,84	992	18,70	136		

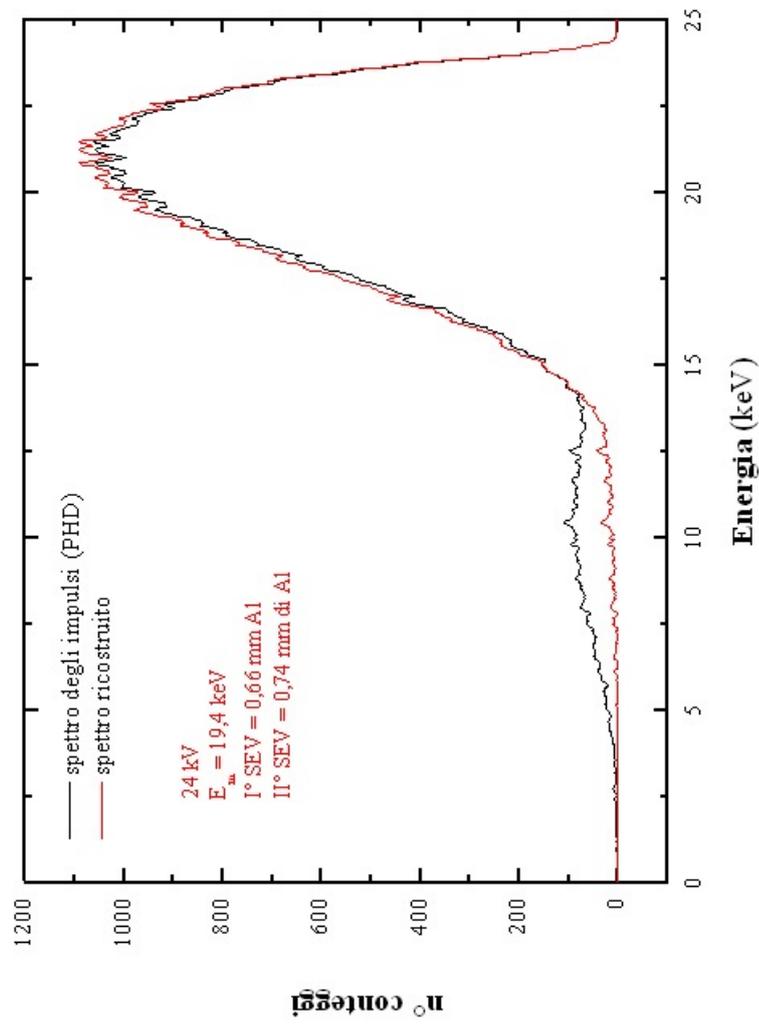


Figura B.8: N25, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

E conteggi (keV)															
4,01	0	7,11	1	10,21	16	13,31	33	16,40	331	19,50	932	22,60	884	25,69	2
4,04	1	7,14	3	10,24	19	13,34	36	16,44	333	19,53	924	22,63	867	25,73	3
4,07	1	7,17	5	10,27	21	13,37	41	16,47	338	19,56	913	22,66	855	25,76	3
4,10	2	7,20	6	10,30	23	13,40	40	16,50	342	19,59	913	22,69	846	25,79	3
4,13	1	7,23	7	10,33	27	13,43	41	16,53	344	19,63	917	22,72	848	25,82	3
4,17	1	7,26	8	10,36	32	13,46	44	16,56	344	19,66	917	22,75	836	25,85	4
4,20	1	7,30	6	10,39	36	13,49	44	16,59	348	19,69	926	22,78	824	25,88	4
4,23	1	7,33	4	10,42	37	13,52	43	16,62	351	19,72	937	22,82	811	25,91	4
4,26	1	7,36	6	10,46	34	13,55	45	16,65	364	19,75	944	22,85	804	25,94	5
4,29	2	7,39	8	10,49	30	13,59	48	16,68	383	19,78	957	22,88	797	25,97	4
4,32	1	7,42	10	10,52	25	13,62	50	16,71	395	19,81	970	22,91	795	26,00	4
4,35	1	7,45	13	10,55	23	13,65	52	16,74	403	19,84	965	22,94	789		
4,38	3	7,48	15	10,58	21	13,68	51	16,78	415	19,87	968	22,97	785		
4,41	4	7,51	13	10,61	21	13,71	48	16,81	427	19,90	964	23,00	776		
4,44	5	7,54	12	10,64	18	13,74	47	16,84	432	19,94	948	23,03	758		
4,48	5	7,57	13	10,67	17	13,77	52	16,87	435	19,97	937	23,06	737		
4,51	4	7,61	13	10,70	18	13,80	56	16,90	432	20,00	939	23,09	719		
4,54	4	7,64	14	10,73	20	13,83	61	16,93	416	20,03	948	23,12	701		
4,57	5	7,67	13	10,77	19	13,86	64	16,96	413	20,06	970	23,16	695		
4,60	5	7,70	10	10,80	18	13,89	65	16,99	422	20,09	996	23,19	694		
4,63	5	7,73	6	10,83	14	13,93	66	17,02	431	20,12	1005	23,22	688		
4,66	4	7,76	4	10,86	11	13,96	71	17,05	439	20,15	1001	23,25	679		
4,69	4	7,79	4	10,89	12	13,99	72	17,09	451	20,18	1002	23,28	666		
4,72	1	7,82	7	10,92	14	14,02	72	17,12	454	20,21	1002	23,31	650		
4,75	0	7,85	11	10,95	18	14,05	72	17,15	456	20,24	998	23,34	628		
4,78	0	7,88	14	10,98	23	14,08	72	17,18	460	20,28	1001	23,37	602		
4,82	0	7,92	17	11,01	22	14,11	72	17,21	465	20,31	1008	23,40	576		
4,85	0	7,95	20	11,04	21	14,14	77	17,24	469	20,34	1009	23,43	560		
4,88	0	7,98	19	11,08	19	14,17	80	17,27	471	20,37	1020	23,47	544		
4,91	0	8,01	17	11,11	15	14,20	83	17,30	482	20,40	1024	23,50	536		
4,94	2	8,04	17	11,14	11	14,24	88	17,33	493	20,43	1024	23,53	524		
4,97	3	8,07	16	11,17	11	14,27	94	17,36	503	20,46	1017	23,56	505		
5,00	5	8,10	15	11,20	12	14,30	99	17,40	514	20,49	1009	23,59	480		
5,03	7	8,13	15	11,23	14	14,33	104	17,43	523	20,52	996	23,62	458		
5,06	8	8,16	13	11,26	17	14,36	105	17,46	523	20,55	998	23,65	439		
5,09	8	8,19	9	11,29	18	14,39	105	17,49	528	20,59	1000	23,68	425		
5,13	9	8,22	8	11,32	18	14,42	105	17,52	529	20,62	1005	23,71	416		

(segue)N25, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

E conteggi (keV)													
5,16	8	8,26	10	11,35	16	14,45	103	17,55	534	20,65	1016	23,74	396
5,19	5	8,29	9	11,39	14	14,48	103	17,58	540	20,68	1023	23,78	369
5,22	4	8,32	11	11,42	15	14,51	104	17,61	546	20,71	1022	23,81	335
5,25	4	8,35	10	11,45	14	14,55	107	17,64	557	20,74	1033	23,84	300
5,28	2	8,38	8	11,48	16	14,58	113	17,67	571	20,77	1046	23,87	270
5,31	2	8,41	7	11,51	20	14,61	117	17,71	582	20,80	1053	23,90	250
5,34	2	8,44	10	11,54	23	14,64	120	17,74	592	20,83	1057	23,93	227
5,37	3	8,47	12	11,57	24	14,67	124	17,77	597	20,86	1051	23,96	205
5,40	5	8,50	13	11,60	28	14,70	127	17,80	599	20,90	1032	23,99	186
5,44	5	8,53	14	11,63	27	14,73	132	17,83	596	20,93	1011	24,02	168
5,47	5	8,57	13	11,66	27	14,76	138	17,86	603	20,96	999	24,05	149
5,50	5	8,60	12	11,70	24	14,79	143	17,89	608	20,99	994	24,08	130
5,53	4	8,63	11	11,73	20	14,82	145	17,92	617	21,02	1007	24,12	110
5,56	3	8,66	12	11,76	15	14,86	147	17,95	625	21,05	1024	24,15	91
5,59	3	8,69	13	11,79	16	14,89	148	17,98	642	21,08	1038	24,18	78
5,62	1	8,72	14	11,82	17	14,92	150	18,01	649	21,11	1041	24,21	68
5,65	0	8,75	18	11,85	18	14,95	153	18,05	653	21,14	1047	24,24	57
5,68	0	8,78	20	11,88	19	14,98	154	18,08	651	21,17	1053	24,27	45
5,71	0	8,81	20	11,91	19	15,01	154	18,11	649	21,20	1059	24,30	32
5,75	0	8,84	18	11,94	17	15,04	153	18,14	641	21,24	1055	24,33	21
5,78	3	8,88	16	11,97	17	15,07	149	18,17	646	21,27	1053	24,36	13
5,81	6	8,91	11	12,01	16	15,10	147	18,20	661	21,30	1043	24,39	8
5,84	8	8,94	12	12,04	16	15,13	148	18,23	673	21,33	1032	24,43	6
5,87	8	8,97	12	12,07	18	15,17	155	18,26	680	21,36	1037	24,46	4
5,90	7	9,00	11	12,10	20	15,20	164	18,29	681	21,39	1052	24,49	4
5,93	7	9,03	12	12,13	23	15,23	173	18,32	684	21,42	1058	24,52	4
5,96	6	9,06	11	12,16	25	15,26	180	18,36	688	21,45	1060	24,55	4
5,99	7	9,09	8	12,19	26	15,29	183	18,39	705	21,48	1050	24,58	3
6,02	8	9,12	9	12,22	24	15,32	184	18,42	722	21,51	1026	24,61	3
6,06	12	9,15	9	12,25	21	15,35	185	18,45	733	21,55	1009	24,64	3
6,09	13	9,19	9	12,28	17	15,38	188	18,48	729	21,58	1008	24,67	4
6,12	12	9,22	12	12,31	20	15,41	194	18,51	732	21,61	1013	24,70	4
6,15	10	9,25	14	12,35	22	15,44	201	18,54	730	21,64	1022	24,73	4
6,18	6	9,28	14	12,38	28	15,47	208	18,57	737	21,67	1029	24,77	4
6,21	3	9,31	12	12,41	34	15,51	213	18,60	744	21,70	1021	24,80	4
6,24	3	9,34	10	12,44	38	15,54	215	18,63	771	21,73	1017	24,83	4

(segue)N25, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
6,27	4	9,37	11	12,47	41	15,57	218	18,67	778	21,76	1015	24,86	4
6,30	4	9,40	11	12,50	45	15,60	218	18,70	792	21,79	1012	24,89	4
6,33	5	9,43	10	12,53	40	15,63	218	18,73	792	21,82	1004	24,92	3
6,37	5	9,46	13	12,56	36	15,66	218	18,76	794	21,86	995	24,95	3
6,40	6	9,50	13	12,59	31	15,69	216	18,79	790	21,89	980	24,98	2
6,43	9	9,53	13	12,62	25	15,72	218	18,82	800	21,92	975	25,01	2
6,46	12	9,56	13	12,66	26	15,75	223	18,85	794	21,95	974	25,04	1
6,49	14	9,59	13	12,69	25	15,78	228	18,88	799	21,98	972	25,08	1
6,52	14	9,62	11	12,72	23	15,82	230	18,91	808	22,01	973	25,11	2
6,55	14	9,65	11	12,75	23	15,85	232	18,94	817	22,04	971	25,14	3
6,58	11	9,68	11	12,78	25	15,88	231	18,97	835	22,07	975	25,17	4
6,61	11	9,71	13	12,81	26	15,91	239	19,01	845	22,10	983	25,20	5
6,64	10	9,74	19	12,84	29	15,94	248	19,04	843	22,13	982	25,23	5
6,68	8	9,77	22	12,87	28	15,97	254	19,07	838	22,16	978	25,26	4
6,71	7	9,81	20	12,90	29	16,00	262	19,10	843	22,20	970	25,29	4
6,74	9	9,84	18	12,93	30	16,03	264	19,13	842	22,23	958	25,32	3
6,77	8	9,87	14	12,97	29	16,06	266	19,16	846	22,26	958	25,35	3
6,80	8	9,90	11	13,00	29	16,09	274	19,19	853	22,29	951	25,39	3
6,83	9	9,93	16	13,03	30	16,13	284	19,22	859	22,32	937	25,42	2
6,86	8	9,96	18	13,06	26	16,16	293	19,25	868	22,35	930	25,45	2
6,89	7	9,99	17	13,09	25	16,19	308	19,28	887	22,38	912	25,48	2
6,92	7	10,02	15	13,12	27	16,22	312	19,32	897	22,41	898	25,51	1
6,95	8	10,05	12	13,15	28	16,25	315	19,35	903	22,44	905	25,54	1
6,99	6	10,08	11	13,18	28	16,28	313	19,38	913	22,47	908	25,57	2
7,02	5	10,12	13	13,21	27	16,31	312	19,41	922	22,51	914	25,60	2
7,05	4	10,15	15	13,24	27	16,34	315	19,44	929	22,54	923	25,63	3
7,08	3	10,18	16	13,28	30	16,37	321	19,47	938	22,57	909	25,66	2

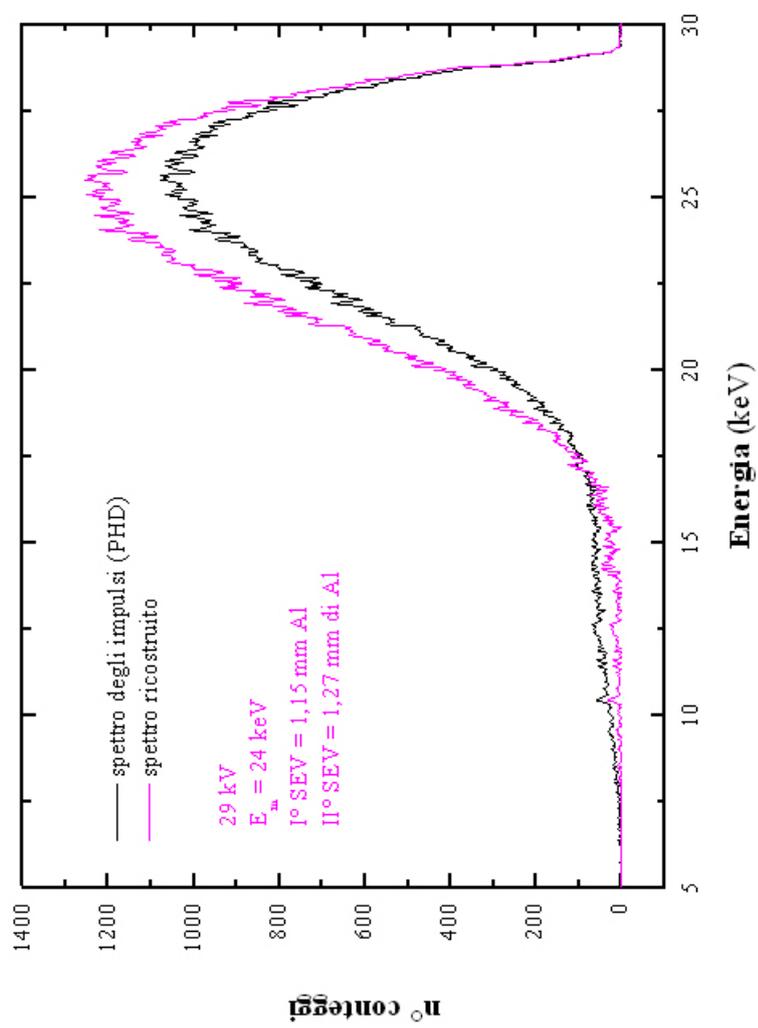


Figura B.9: N30, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

E (keV)	cont.																				
10.02	7	11.88	2	13.74	11	15.60	18	17.46	118	19.32	319	21.17	645	23.03	1017	24.89	1177	26.75	1073	28.61	446
10.05	5	11.91	1	13.77	9	15.63	42	17.49	102	19.35	325	21.20	632	23.06	1040	24.92	1222	26.78	1101	28.64	422
10.08	7	11.94	10	13.80	10	15.66	31	17.52	98	19.38	345	21.24	655	23.09	1063	24.95	1219	26.81	1127	28.67	419
10.12	9	11.97	14	13.83	6	15.69	40	17.55	102	19.41	342	21.27	701	23.12	1059	24.98	1214	26.84	1105	28.70	399
10.15	3	12.01	11	13.86	2	15.72	22	17.58	116	19.44	350	21.30	730	23.16	1046	25.01	1226	26.87	1088	28.73	370
10.18	2	12.04	10	13.89	3	15.75	32	17.61	122	19.47	360	21.33	708	23.19	1042	25.04	1252	26.90	1084	28.76	327
10.21	4	12.07	9	13.93	7	15.78	42	17.64	129	19.50	365	21.36	716	23.22	1051	25.08	1209	26.93	1076	28.79	288
10.24	4	12.10	8	13.96	12	15.82	50	17.67	131	19.53	371	21.39	714	23.25	1051	25.11	1216	26.96	1067	28.82	262
10.27	1	12.13	9	13.99	13	15.85	52	17.71	132	19.56	344	21.42	718	23.28	1056	25.14	1235	27.00	1079	28.85	247
10.30	5	12.16	13	14.02	31	15.88	49	17.74	127	19.59	359	21.45	701	23.31	1074	25.17	1225	27.03	1088	28.88	208
10.33	12	12.19	11	14.05	19	15.91	54	17.77	131	19.63	352	21.48	718	23.34	1073	25.20	1192	27.06	1065	28.91	181
10.36	24	12.22	10	14.08	3	15.94	41	17.80	143	19.66	370	21.51	754	23.37	1071	25.23	1198	27.09	1032	28.95	159
10.39	32	12.25	9	14.11	6	15.97	30	17.83	144	19.69	368	21.55	784	23.40	1047	25.26	1201	27.12	1053	28.98	138
10.42	31	12.28	13	14.14	18	16.00	48	17.86	155	19.72	406	21.58	761	23.43	1045	25.29	1214	27.15	1069	29.01	119
10.46	25	12.31	18	14.17	44	16.03	63	17.89	157	19.75	387	21.61	735	23.47	1054	25.32	1211	27.18	1048	29.04	115
10.49	19	12.35	21	14.20	46	16.06	66	17.92	158	19.78	374	21.64	774	23.50	1083	25.35	1200	27.21	1032	29.07	95
10.52	13	12.38	20	14.24	28	16.09	52	17.95	144	19.81	396	21.67	804	23.53	1089	25.39	1199	27.24	997	29.10	70
10.55	5	12.41	18	14.27	15	16.13	44	17.98	153	19.84	402	21.70	786	23.56	1073	25.42	1228	27.27	992	29.13	50
10.58	3	12.44	22	14.30	27	16.16	56	18.01	147	19.87	391	21.73	760	23.59	1078	25.45	1237	27.30	969	29.16	41
10.61	6	12.47	22	14.33	44	16.19	56	18.05	155	19.90	389	21.76	774	23.62	1077	25.48	1253	27.34	984	29.19	25
10.64	8	12.50	21	14.36	48	16.22	45	18.08	143	19.94	436	21.79	793	23.65	1082	25.51	1245	27.37	974	29.22	22
10.67	8	12.53	18	14.39	39	16.25	35	18.11	152	19.97	419	21.82	790	23.68	1089	25.54	1252	27.40	977	29.26	17
10.70	8	12.56	22	14.42	30	16.28	44	18.14	151	20.00	410	21.86	841	23.71	1137	25.57	1234	27.43	972	29.29	12
10.73	11	12.59	27	14.45	28	16.31	52	18.17	165	20.03	429	21.89	882	23.74	1154	25.60	1249	27.46	937	29.32	5
10.77	10	12.62	24	14.48	31	16.34	59	18.20	166	20.06	480	21.92	877	23.78	1143	25.63	1211	27.49	903	29.35	3
10.80	8	12.66	18	14.51	21	16.37	71	18.23	187	20.09	492	21.95	826	23.81	1093	25.66	1179	27.52	905	29.38	3
10.83	3	12.69	6	14.55	22	16.40	51	18.26	196	20.12	454	21.98	800	23.84	1085	25.69	1156	27.55	933	29.41	3
10.86	3	12.72	2	14.58	39	16.44	40	18.29	193	20.15	443	22.01	786	23.87	1107	25.73	1165	27.58	919	29.44	3
10.89	4	12.75	3	14.61	36	16.47	36	18.32	192	20.18	442	22.04	798	23.90	1122	25.76	1189	27.61	861	29.47	3
10.92	5	12.78	8	14.64	21	16.50	56	18.36	185	20.21	456	22.07	849	23.93	1109	25.79	1212	27.65	843	29.50	5
10.95	5	12.81	13	14.67	16	16.53	56	18.39	184	20.24	467	22.10	867	23.96	1119	25.82	1216	27.68	887	29.53	6
10.98	3	12.84	11	14.70	27	16.56	51	18.42	197	20.28	489	22.13	847	23.99	1194	25.85	1219	27.71	917	29.56	6
11.01	3	12.87	10	14.73	20	16.59	33	18.45	232	20.31	504	22.16	822	24.02	1220	25.88	1230	27.74	919	29.60	4
11.04	4	12.90	12	14.76	4	16.62	60	18.48	220	20.34	487	22.20	859	24.05	1200	25.91	1201	27.77	850	29.63	2
11.08	3	12.93	6	14.79	4	16.65	75	18.51	206	20.37	478	22.23	862	24.08	1173	25.94	1203	27.80	822	29.66	2

(segue)N30, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

E cont. (keV)																					
11,11	7	12,97	0	14,82	29	16,68	76	18,54	197	20,40	498	22,26	855	24,12	1160	25,97	1183	27,83	808	29,69	3
11,14	5	13,00	0	14,86	41	16,71	65	18,57	211	20,43	497	22,29	879	24,15	1146	26,00	1226	27,86	820	29,72	3
11,17	6	13,03	9	14,89	30	16,74	60	18,60	220	20,46	511	22,32	923	24,18	1140	26,04	1220	27,89	776	29,75	2
11,20	7	13,06	9	14,92	16	16,78	60	18,63	231	20,49	511	22,35	940	24,21	1172	26,07	1213	27,92	763	29,78	2
11,23	11	13,09	8	14,95	19	16,81	59	18,67	259	20,52	554	22,38	898	24,24	1177	26,10	1160	27,95	773	29,81	4
11,26	5	13,12	6	14,98	22	16,84	75	18,70	257	20,55	547	22,41	918	24,27	1158	26,13	1164	27,99	747	29,84	3
11,29	3	13,15	7	15,01	25	16,87	75	18,73	258	20,59	559	22,44	890	24,30	1152	26,16	1137	28,02	731	29,87	1
11,32	1	13,18	4	15,04	38	16,90	81	18,76	230	20,62	545	22,47	914	24,33	1163	26,19	1141	28,05	729	29,91	1
11,35	11	13,21	4	15,07	35	16,93	71	18,79	256	20,65	544	22,51	891	24,36	1166	26,22	1159	28,08	736	29,94	3
11,39	17	13,24	11	15,10	35	16,96	74	18,82	269	20,68	553	22,54	950	24,39	1201	26,25	1194	28,11	698	29,97	2
11,42	18	13,28	14	15,13	26	16,99	64	18,85	297	20,71	583	22,57	915	24,43	1231	26,28	1192	28,14	674	30,00	1
11,45	6	13,31	13	15,17	29	17,02	67	18,88	280	20,74	593	22,60	910	24,46	1210	26,31	1171	28,17	643		
11,48	0	13,34	7	15,20	29	17,05	82	18,91	266	20,77	573	22,63	892	24,49	1141	26,35	1153	28,20	634		
11,51	3	13,37	2	15,23	35	17,09	108	18,94	268	20,80	565	22,66	939	24,52	1158	26,38	1125	28,23	644		
11,54	14	13,40	7	15,26	16	17,12	97	18,97	276	20,83	565	22,69	977	24,55	1171	26,41	1123	28,26	639		
11,57	19	13,43	10	15,29	12	17,15	90	19,01	273	20,86	578	22,72	998	24,58	1189	26,44	1113	28,30	609		
11,60	14	13,46	7	15,32	21	17,18	114	19,04	263	20,90	584	22,75	969	24,61	1193	26,47	1138	28,33	590		
11,63	2	13,49	0	15,35	18	17,21	125	19,07	305	20,93	624	22,78	930	24,64	1212	26,50	1139	28,36	599		
11,66	0	13,52	0	15,38	3	17,24	120	19,10	323	20,96	634	22,82	936	24,67	1216	26,53	1134	28,39	573		
11,70	5	13,55	15	15,41	2	17,27	99	19,13	312	20,99	636	22,85	975	24,70	1208	26,56	1127	28,42	537		
11,73	4	13,59	19	15,44	19	17,30	92	19,16	294	21,02	624	22,88	995	24,73	1195	26,59	1147	28,45	520		
11,76	0	13,62	11	15,47	24	17,33	79	19,19	302	21,05	634	22,91	1003	24,77	1176	26,62	1122	28,48	521		
11,79	1	13,65	1	15,51	30	17,36	83	19,22	308	21,08	632	22,94	999	24,80	1194	26,65	1136	28,51	503		
11,82	15	13,68	8	15,54	19	17,40	100	19,25	323	21,11	631	22,97	1006	24,83	1193	26,69	1138	28,54	496		
11,85	13	13,71	11	15,57	26	17,43	112	19,28	319	21,14	639	23,00	1000	24,86	1172	26,72	1112	28,57	475		

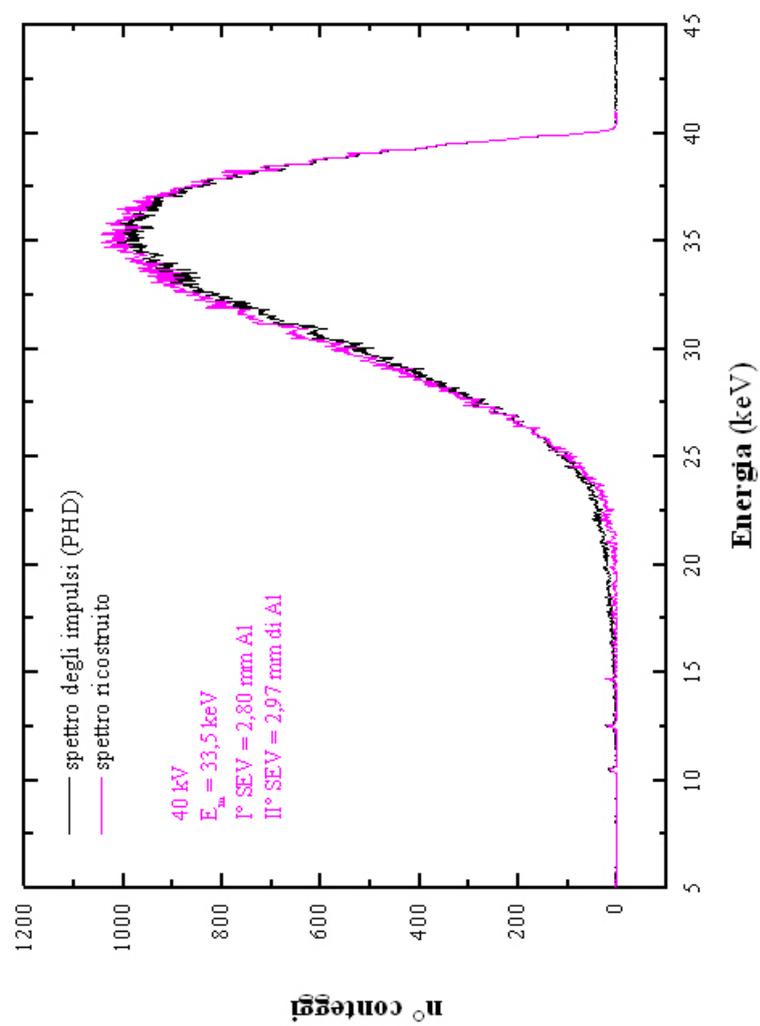


Figura B.10:  $N/0$ , distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

	E cont, (keV)																				
20	5	21.86	11	23.71	45	25.57	136	27.43	307	29.29	494	31.14	729	33	929	34.86	1044	36.71	967	38.57	617
20.03	5	21.89	13	23.74	46	25.6	143	27.46	288	29.32	493	31.17	739	33.03	942	34.89	1044	36.75	978	38.6	621
20.06	1	21.92	20	23.78	56	25.63	142	27.49	294	29.35	506	31.21	718	33.06	925	34.92	1030	36.78	949	38.63	624
20.09	2	21.95	18	23.81	58	25.66	138	27.52	291	29.38	504	31.24	724	33.09	890	34.95	999	36.81	940	38.66	619
20.12	6	21.98	15	23.84	55	25.69	138	27.55	286	29.41	519	31.27	728	33.12	897	34.98	1000	36.84	946	38.7	619
20.15	8	22.01	28	23.87	58	25.73	144	27.58	278	29.44	494	31.3	745	33.16	929	35.01	1023	36.87	955	38.73	595
20.18	5	22.04	34	23.9	55	25.76	137	27.61	313	29.47	494	31.33	737	33.19	934	35.04	1022	36.9	939	38.76	596
20.21	6	22.07	21	23.93	44	25.79	143	27.65	322	29.5	487	31.36	751	33.22	893	35.07	993	36.93	951	38.79	559
20.24	11	22.1	16	23.96	49	25.82	149	27.68	306	29.53	503	31.39	740	33.25	879	35.11	989	36.96	960	38.82	545
20.28	5	22.13	21	23.99	60	25.85	159	27.71	308	29.56	509	31.42	734	33.28	916	35.14	1017	36.99	953	38.85	531
20.31	0	22.16	30	24.02	70	25.88	157	27.74	327	29.6	516	31.45	738	33.31	951	35.17	1000	37.02	900	38.88	547
20.34	2	22.2	22	24.05	64	25.91	157	27.77	322	29.63	524	31.48	742	33.34	945	35.2	998	37.05	918	38.91	528
20.37	9	22.23	14	24.08	65	25.94	161	27.8	316	29.66	542	31.51	754	33.37	924	35.23	1028	37.09	931	38.94	539
20.4	3	22.26	15	24.12	59	25.97	163	27.83	328	29.69	547	31.55	767	33.4	913	35.26	1045	37.12	919	38.97	546
20.43	4	22.29	24	24.15	59	26	170	27.86	334	29.72	541	31.58	768	33.43	885	35.29	1041	37.15	892	39	547
20.46	8	22.32	30	24.18	63	26.04	167	27.89	324	29.75	553	31.61	758	33.46	931	35.32	1003	37.18	896	39.04	494
20.49	10	22.35	27	24.21	68	26.07	175	27.92	330	29.78	551	31.64	756	33.5	968	35.35	1000	37.21	906	39.07	470
20.52	3	22.38	26	24.24	70	26.1	167	27.95	354	29.81	546	31.67	767	33.53	968	35.38	987	37.24	888	39.1	468
20.55	5	22.41	22	24.27	66	26.13	167	27.99	361	29.84	568	31.7	761	33.56	896	35.41	1010	37.27	898	39.13	477
20.59	9	22.44	12	24.3	67	26.16	171	28.02	357	29.87	577	31.73	755	33.59	906	35.45	1023	37.3	897	39.16	439
20.62	7	22.47	8	24.33	74	26.19	174	28.05	351	29.91	553	31.76	743	33.62	952	35.48	1012	37.33	904	39.19	416
20.65	0	22.51	16	24.36	69	26.22	170	28.08	347	29.94	536	31.79	788	33.65	969	35.51	987	37.36	899	39.22	405
20.68	0	22.54	23	24.39	67	26.25	158	28.11	338	29.97	530	31.82	832	33.68	949	35.54	965	37.4	892	39.25	397
20.71	2	22.57	19	24.43	79	26.28	176	28.14	356	30	554	31.86	830	33.71	934	35.57	969	37.43	865	39.28	382
20.74	8	22.6	20	24.46	95	26.31	192	28.17	363	30.03	580	31.89	781	33.74	941	35.6	968	37.46	852	39.31	376
20.77	12	22.63	25	24.49	88	26.35	209	28.2	375	30.06	592	31.92	796	33.77	942	35.63	989	37.49	855	39.34	364
20.8	15	22.66	26	24.52	74	26.38	196	28.23	380	30.09	572	31.95	819	33.81	960	35.66	1006	37.52	862	39.38	360
20.83	2	22.69	25	24.55	76	26.41	202	28.26	390	30.12	571	31.98	800	33.84	941	35.69	1015	37.55	848	39.41	357
20.86	0	22.72	27	24.58	77	26.44	195	28.3	370	30.15	568	32.01	784	33.87	922	35.72	1036	37.58	835	39.44	344
20.9	0	22.75	24	24.61	76	26.47	206	28.33	364	30.18	555	32.04	802	33.9	922	35.76	1009	37.61	826	39.47	306
20.93	12	22.78	22	24.64	74	26.5	211	28.36	389	30.21	569	32.07	813	33.93	963	35.79	1005	37.64	848	39.5	303
20.96	19	22.82	19	24.67	80	26.53	210	28.39	390	30.25	597	32.1	792	33.96	987	35.82	1015	37.67	863	39.53	288
20.99	20	22.85	19	24.7	89	26.56	194	28.42	386	30.28	605	32.13	820	33.99	968	35.85	1016	37.7	857	39.56	275
21.02	14	22.88	22	24.73	94	26.59	203	28.45	376	30.31	613	32.16	848	34.02	959	35.88	1011	37.74	833	39.59	250
21.05	11	22.91	24	24.77	97	26.62	219	28.48	411	30.34	596	32.2	855	34.05	969	35.91	989	37.77	833	39.62	237
21.08	9	22.94	30	24.8	92	26.65	222	28.51	401	30.37	611	32.23	837	34.08	994	35.94	999	37.8	829	39.65	216
21.11	9	22.97	32	24.83	98	26.69	217	28.54	406	30.4	636	32.26	822	34.11	988	35.97	981	37.83	799	39.69	203

(segue)N40, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.

	E cont, (keV)																				
21,17	5	23,03	31	24,89	91	26,75	217	28,61	423	30,46	645	32,32	830	34,18	977	36,03	999	37,89	773	39,75	176
21,2	6	23,06	29	24,92	83	26,78	212	28,64	432	30,49	636	32,35	844	34,21	969	36,06	985	37,92	783	39,78	149
21,24	11	23,09	21	24,95	94	26,81	204	28,67	440	30,52	635	32,38	850	34,24	967	36,1	959	37,95	783	39,81	123
21,27	4	23,12	30	24,98	115	26,84	207	28,7	415	30,56	639	32,41	872	34,27	953	36,13	962	37,98	795	39,84	104
21,3	3	23,16	32	25,01	111	26,87	222	28,73	410	30,59	644	32,44	865	34,3	954	36,16	1003	38,01	765	39,87	91
21,33	1	23,19	37	25,04	95	26,9	236	28,76	422	30,62	671	32,47	855	34,33	964	36,19	999	38,05	753	39,9	76
21,36	5	23,22	33	25,08	91	26,93	251	28,79	437	30,65	650	32,51	846	34,36	975	36,22	991	38,08	740	39,93	63
21,39	5	23,25	33	25,11	94	26,96	253	28,82	434	30,68	652	32,54	865	34,39	981	36,25	990	38,11	780	39,96	54
21,42	8	23,28	26	25,14	97	27	258	28,85	424	30,71	656	32,57	891	34,42	1001	36,28	988	38,14	801	39,99	43
21,45	5	23,31	32	25,17	113	27,03	251	28,88	430	30,74	662	32,6	897	34,46	1011	36,31	994	38,17	792	40,03	30
21,48	12	23,34	29	25,2	125	27,06	257	28,91	455	30,77	654	32,63	884	34,49	996	36,34	958	38,2	726	40,06	19
21,51	19	23,37	31	25,23	133	27,09	257	28,95	450	30,8	649	32,66	876	34,52	1000	36,37	952	38,23	694	40,09	11
21,55	19	23,4	36	25,26	127	27,12	255	28,98	414	30,83	646	32,69	879	34,55	998	36,41	952	38,26	683	40,12	6
21,58	12	23,43	43	25,29	125	27,15	240	29,01	433	30,86	628	32,72	885	34,58	996	36,44	1011	38,29	710	40,15	6
21,61	14	23,47	40	25,32	106	27,18	253	29,04	477	30,9	664	32,75	888	34,61	988	36,47	982	38,32	714	40,18	7
21,64	13	23,5	35	25,35	118	27,21	247	29,07	463	30,93	680	32,78	895	34,64	1020	36,5	965	38,35	723	40,21	4
21,67	13	23,53	41	25,39	132	27,24	261	29,1	453	30,96	666	32,81	891	34,67	1037	36,53	946	38,39	713	40,24	3
21,7	16	23,56	44	25,42	135	27,27	275	29,13	485	30,99	655	32,85	916	34,7	1016	36,56	957	38,42	690	40,27	3
21,73	24	23,59	37	25,45	132	27,3	309	29,16	494	31,02	670	32,88	902	34,73	984	36,59	971	38,45	659	40,3	2
21,76	21	23,62	27	25,48	134	27,34	281	29,19	465	31,05	702	32,91	892	34,76	998	36,62	963	38,48	645	40,33	0
21,79	20	23,65	37	25,51	138	27,37	270	29,22	467	31,08	714	32,94	883	34,8	1016	36,65	944	38,51	630	40,37	1
21,82	16	23,68	45	25,54	133	27,4	284	29,26	485	31,11	728	32,97	906	34,83	1032	36,68	945	38,54	618	40,4	1

### B.1.3 Serie H

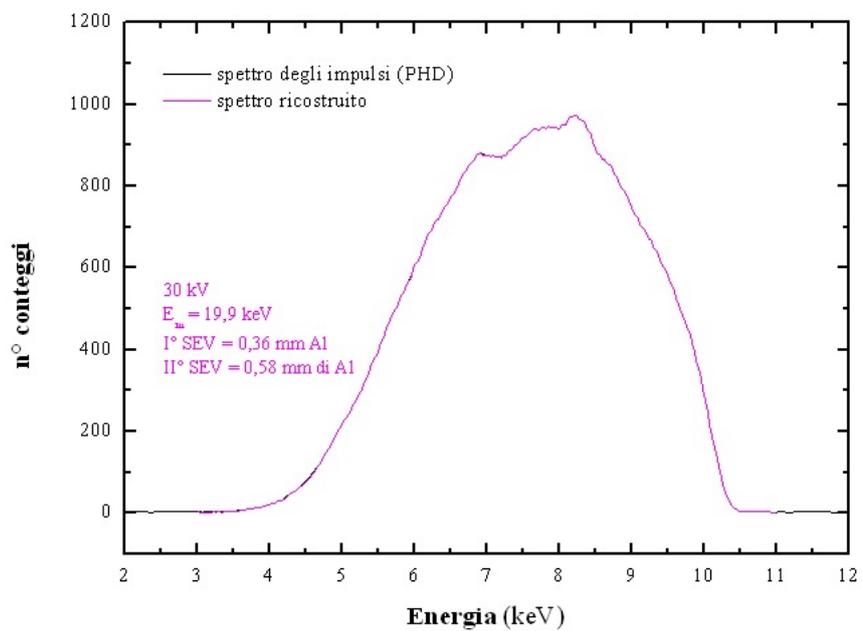


Figura B.11: H10, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

<b>E (keV)</b>	<b>conteggi</b>								
3,02	1	4,88	130	6,74	754	8,60	818	10,46	7
3,05	1	4,91	139	6,77	762	8,63	819	10,49	4
3,08	1	4,94	147	6,80	770	8,66	813	10,52	3
3,11	1	4,97	155	6,83	777	8,69	809	10,55	4
3,14	1	5,00	163	6,86	786	8,72	804	10,58	4
3,17	1	5,03	172	6,89	790	8,75	797	10,61	3
3,20	1	5,06	179	6,92	795	8,78	786	10,64	3
3,24	1	5,09	186	6,95	790	8,81	774	10,67	3
3,27	1	5,13	195	6,99	791	8,84	762	10,70	2
3,30	1	5,16	205	7,02	790	8,88	755	10,73	3
3,33	1	5,19	212	7,05	790	8,91	748	10,77	3
3,36	1	5,22	223	7,08	792	8,94	737	10,80	3
3,39	1	5,25	231	7,11	791	8,97	726	10,83	3
3,42	1	5,28	239	7,14	793	9,00	715	10,86	3
3,45	1	5,31	250	7,17	793	9,03	702	10,89	3
3,48	1	5,34	262	7,20	793	9,06	694	10,92	2
3,51	1	5,37	272	7,23	798	9,09	686	10,95	2
3,55	2	5,40	285	7,26	799	9,12	673	10,98	2
3,58	2	5,44	299	7,30	809	9,15	665	11,01	2
3,61	3	5,47	309	7,33	812	9,19	660		
3,64	3	5,50	319	7,36	816	9,22	649		
3,67	4	5,53	332	7,39	826	9,25	640		
3,70	5	5,56	345	7,42	829	9,28	636		
3,73	5	5,59	358	7,45	835	9,31	621		
3,76	5	5,62	372	7,48	844	9,34	614		
3,79	6	5,65	382	7,51	845	9,37	603		
3,82	7	5,68	392	7,54	850	9,40	591		
3,86	8	5,71	406	7,57	855	9,43	576		
3,89	8	5,75	415	7,61	862	9,46	571		
3,92	9	5,78	426	7,64	866	9,50	559		
3,95	10	5,81	440	7,67	869	9,53	546		
3,98	11	5,84	451	7,70	868	9,56	534		
4,01	12	5,87	461	7,73	870	9,59	517		
4,04	13	5,90	472	7,76	876	9,62	505		
4,07	14	5,93	483	7,79	877	9,65	495		
4,10	16	5,96	492	7,82	875	9,68	481		
4,13	18	5,99	509	7,85	881	9,71	466		
4,17	19	6,02	520	7,88	880	9,74	452		
4,20	22	6,06	528	7,92	881	9,77	440		
4,23	24	6,09	542	7,95	881	9,81	421		
4,26	27	6,12	558	7,98	879	9,84	400		
4,29	29	6,15	569	8,01	879	9,87	382		
4,32	32	6,18	580	8,04	888	9,90	360		
4,35	35	6,21	593	8,07	889	9,93	340		
4,38	38	6,24	601	8,10	891	9,96	318		
4,41	42	6,27	609	8,13	904	9,99	293		
4,44	45	6,30	621	8,16	910	10,02	267		
4,48	49	6,33	626	8,19	909	10,05	238		
4,51	53	6,37	640	8,22	913	10,08	208		
4,54	58	6,40	650	8,26	911	10,12	181		
4,57	63	6,43	660	8,29	906	10,15	155		
4,60	68	6,46	665	8,32	903	10,18	132		
4,63	73	6,49	674	8,35	901	10,21	107		
4,66	79	6,52	684	8,38	891	10,24	87		
4,69	85	6,55	690	8,41	882	10,27	66		
4,72	93	6,58	700	8,44	874	10,30	49		
4,75	100	6,61	713	8,47	857	10,33	35		

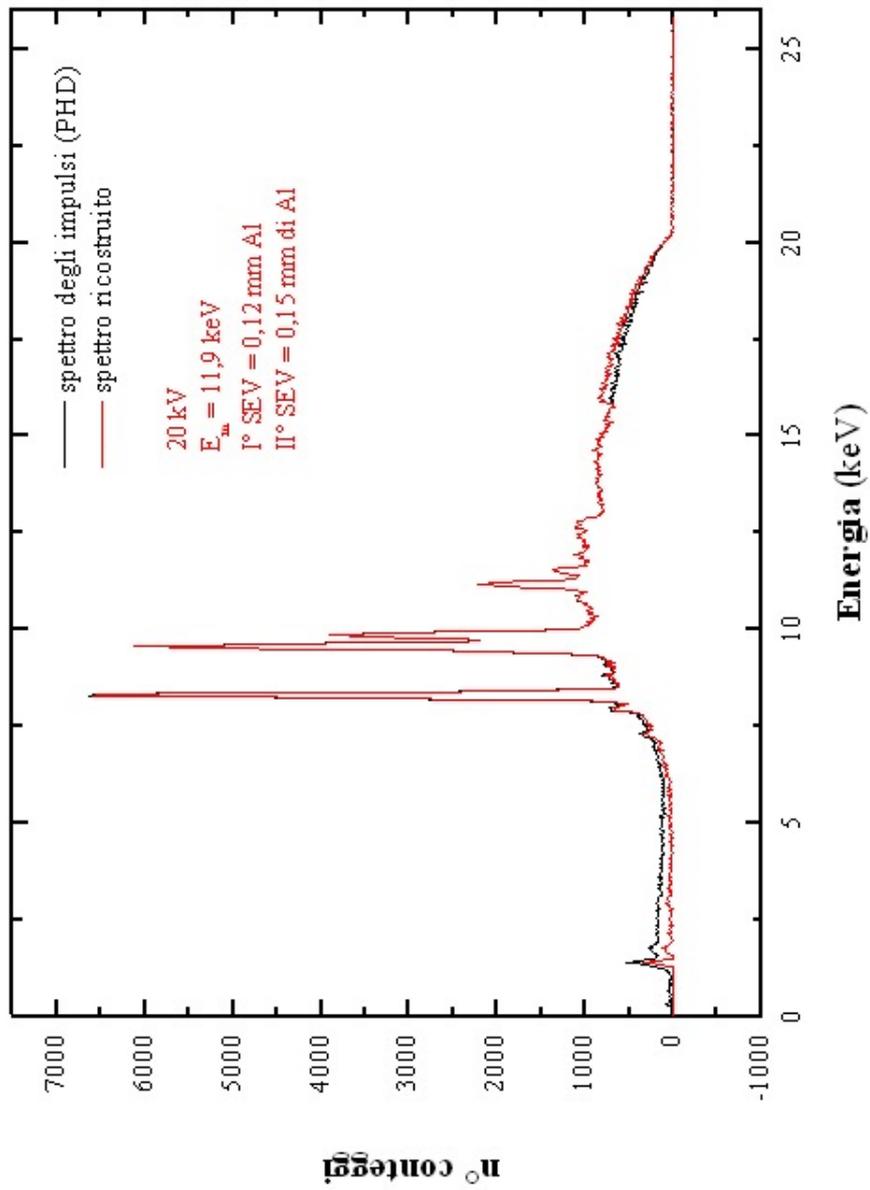
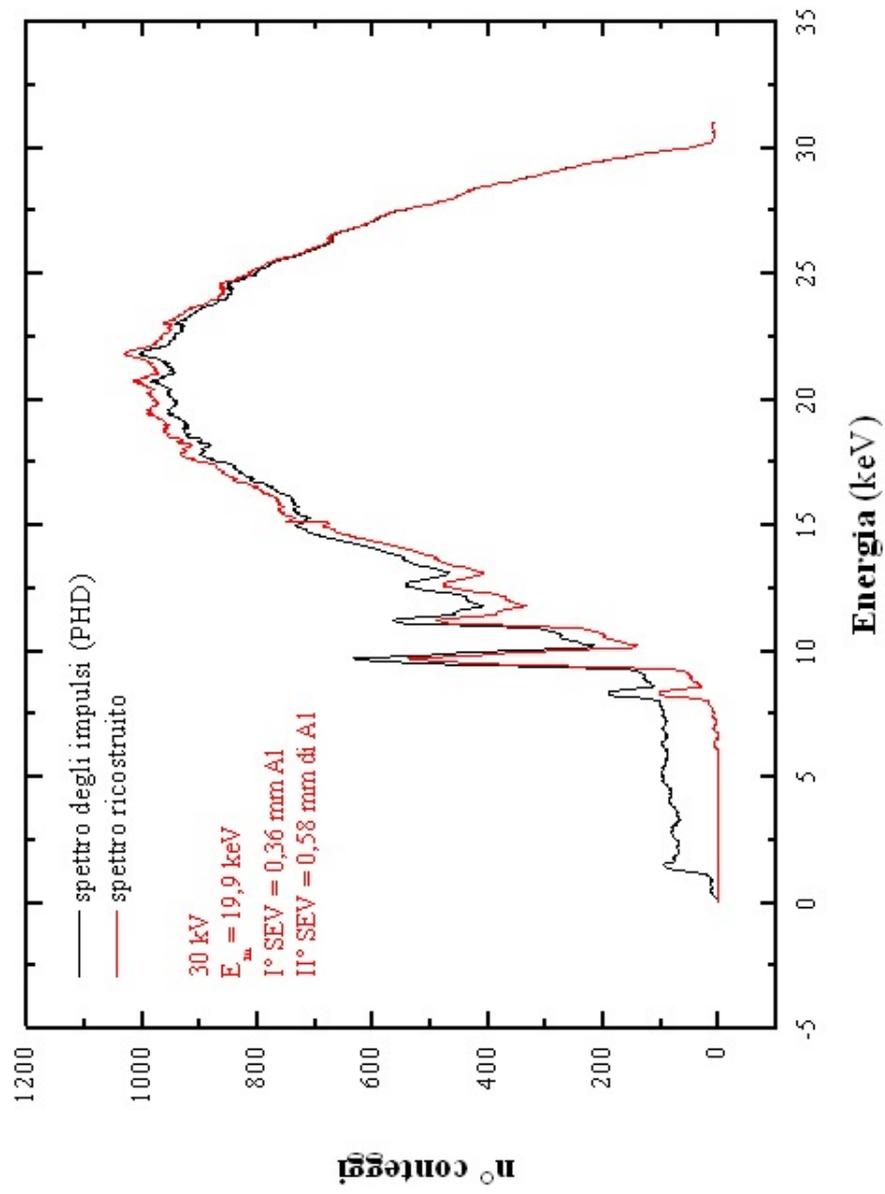


Figura B.12: H20, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
1,00	0	4,10	18	7,20	253	10,30	873	13,40	827	16,50	617	19,59	236
1,03	0	4,13	11	7,23	282	10,33	861	13,43	839	16,53	658	19,63	185
1,07	0	4,17	16	7,26	303	10,36	950	13,46	847	16,56	609	19,66	196
1,10	0	4,20	4	7,30	332	10,39	951	13,49	857	16,59	612	19,69	201
1,13	0	4,23	30	7,33	291	10,42	921	13,52	809	16,62	664	19,72	187
1,16	0	4,26	18	7,36	251	10,46	989	13,55	823	16,65	628	19,75	169
1,19	0	4,29	24	7,39	234	10,49	944	13,59	809	16,68	620	19,78	153
1,22	0	4,32	12	7,42	255	10,52	907	13,62	828	16,71	656	19,81	148
1,25	0	4,35	14	7,45	239	10,55	938	13,65	860	16,74	642	19,84	127
1,28	50	4,38	8	7,48	275	10,58	983	13,68	847	16,78	616	19,87	136
1,31	135	4,41	29	7,51	255	10,61	1008	13,71	866	16,81	587	19,90	126
1,34	276	4,44	9	7,54	298	10,64	988	13,74	876	16,84	624	19,94	98
1,38	348	4,48	34	7,57	290	10,67	1065	13,77	847	16,87	619	19,97	92
1,41	182	4,51	28	7,61	294	10,70	1076	13,80	867	16,90	616	20,00	78
1,44	68	4,54	15	7,64	320	10,73	1087	13,83	860	16,93	617	20,03	64
1,47	7	4,57	16	7,67	319	10,77	1058	13,86	873	16,96	599	20,06	68
1,50	0	4,60	6	7,70	350	10,80	1071	13,89	880	16,99	641	20,09	33
1,53	0	4,63	13	7,73	338	10,83	1074	13,93	841	17,02	628	20,12	33
1,56	19	4,66	24	7,76	342	10,86	1098	13,96	815	17,05	623	20,15	17
1,59	33	4,69	47	7,79	387	10,89	1017	13,99	851	17,09	651	20,18	27
1,62	61	4,72	9	7,82	429	10,92	1026	14,02	861	17,12	610	20,21	19
1,65	78	4,75	14	7,85	470	10,95	983	14,05	852	17,15	590	20,24	8
1,69	95	4,78	18	7,88	658	10,98	1159	14,08	842	17,18	584	20,28	16
1,72	93	4,82	48	7,92	657	11,01	1299	14,11	883	17,21	579	20,31	5
1,75	137	4,85	20	7,95	681	11,04	1555	14,14	829	17,24	575	20,34	7
1,78	86	4,88	34	7,98	563	11,08	1898	14,17	861	17,27	601	20,37	4
1,81	63	4,91	26	8,01	571	11,11	2161	14,20	843	17,30	617	20,40	11
1,84	51	4,94	34	8,04	511	11,14	2210	14,24	868	17,33	533	20,43	18
1,87	17	4,97	31	8,07	503	11,17	1997	14,27	849	17,36	591	20,46	12
1,90	20	5,00	37	8,10	728	11,20	1664	14,30	888	17,40	544	20,49	10
1,93	3	5,03	43	8,13	1080	11,23	1304	14,33	859	17,43	549	20,52	10
1,96	21	5,06	40	8,16	1992	11,26	1164	14,36	854	17,46	594	20,55	3
2,00	30	5,09	16	8,19	3502	11,29	1126	14,39	846	17,49	547	20,59	13
2,03	29	5,13	53	8,22	5455	11,32	1081	14,42	851	17,52	567	20,62	7
2,06	52	5,16	59	8,26	6596	11,35	1068	14,45	851	17,55	544	20,65	14
2,09	41	5,19	13	8,29	6533	11,39	1139	14,48	808	17,58	523	20,68	3
2,12	58	5,22	20	8,32	5147	11,42	1244	14,51	848	17,61	557	20,71	10
2,15	25	5,25	30	8,35	3126	11,45	1319	14,55	860	17,64	535	20,74	5
2,18	27	5,28	41	8,38	1690	11,48	1314	14,58	873	17,67	515	20,77	6
2,21	41	5,31	29	8,41	925	11,51	1358	14,61	914	17,71	541	20,80	16
2,24	52	5,34	9	8,44	710	11,54	1266	14,64	878	17,74	539	20,83	10
2,27	28	5,37	23	8,47	624	11,57	1091	14,67	825	17,77	514	20,86	12
2,31	38	5,40	32	8,50	646	11,60	1067	14,70	810	17,80	497	20,90	5
2,34	5	5,44	25	8,53	616	11,63	987	14,73	828	17,83	547	20,93	10
2,37	11	5,47	37	8,57	618	11,66	1008	14,76	853	17,86	566	20,96	11
2,40	10	5,50	23	8,60	660	11,70	1003	14,79	859	17,89	508	20,99	11
2,43	20	5,53	52	8,63	656	11,73	955	14,82	825	17,92	469		
2,46	35	5,56	37	8,66	653	11,76	951	14,86	879	17,95	500		
2,49	38	5,59	37	8,69	694	11,79	1075	14,89	828	17,98	476		
2,52	49	5,62	30	8,72	680	11,82	1057	14,92	827	18,01	522		
2,55	31	5,65	35	8,75	699	11,85	1028	14,95	782	18,05	481		
2,58	16	5,68	22	8,78	770	11,88	1058	14,98	805	18,08	478		
2,62	23	5,71	56	8,81	746	11,91	1127	15,01	798	18,11	494		
2,65	22	5,75	31	8,84	679	11,94	1042	15,04	827	18,14	448		
2,68	23	5,78	42	8,88	658	11,97	1003	15,07	762	18,17	447		
2,71	37	5,81	56	8,91	673	12,01	1009	15,10	749	18,20	455		

(segue) H20, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
2,77	8	5,87	57	8,97	674	12,07	956	15,17	770	18,26	474
2,80	37	5,90	42	9,00	668	12,10	1013	15,20	726	18,29	434
2,83	37	5,93	34	9,03	747	12,13	963	15,23	724	18,32	478
2,86	53	5,96	35	9,06	751	12,16	1015	15,26	758	18,36	425
2,89	82	5,99	48	9,09	671	12,19	996	15,29	764	18,39	439
2,93	53	6,02	28	9,12	745	12,22	993	15,32	688	18,42	411
2,96	49	6,06	49	9,15	703	12,25	1021	15,35	780	18,45	429
2,99	66	6,09	46	9,19	780	12,28	1006	15,38	745	18,48	399
3,02	61	6,12	43	9,22	786	12,31	1059	15,41	772	18,51	432
3,05	62	6,15	57	9,25	794	12,35	1089	15,44	760	18,54	415
3,08	43	6,18	77	9,28	866	12,38	1070	15,47	727	18,57	428
3,11	24	6,21	55	9,31	1054	12,41	1085	15,51	746	18,60	417
3,14	22	6,24	85	9,34	1215	12,44	1069	15,54	746	18,63	433
3,17	33	6,27	66	9,37	1557	12,47	1001	15,57	729	18,67	347
3,20	28	6,30	82	9,40	2024	12,50	1008	15,60	730	18,70	394
3,24	27	6,33	77	9,43	2919	12,53	988	15,63	730	18,73	411
3,27	57	6,37	74	9,46	4063	12,56	1032	15,66	724	18,76	388
3,30	46	6,40	104	9,50	5305	12,59	1103	15,69	697	18,79	386
3,33	48	6,43	96	9,53	6113	12,62	1115	15,72	656	18,82	392
3,36	48	6,46	71	9,56	5708	12,66	1055	15,75	685	18,85	373
3,39	23	6,49	98	9,59	4478	12,69	1044	15,78	688	18,88	390
3,42	26	6,52	75	9,62	3395	12,72	1095	15,82	687	18,91	301
3,45	45	6,55	103	9,65	2457	12,75	1096	15,85	696	18,94	329
3,48	31	6,58	102	9,68	2188	12,78	1051	15,88	686	18,97	361
3,51	33	6,61	120	9,71	2416	12,81	999	15,91	674	19,01	346
3,55	54	6,64	110	9,74	2886	12,84	986	15,94	728	19,04	326
3,58	28	6,68	102	9,77	3427	12,87	915	15,97	687	19,07	336
3,61	35	6,71	98	9,81	3898	12,90	827	16,00	710	19,10	305
3,64	40	6,74	126	9,84	3826	12,93	860	16,03	693	19,13	303
3,67	49	6,77	122	9,87	3211	12,97	842	16,06	679	19,16	294
3,70	14	6,80	146	9,90	2201	13,00	779	16,09	667	19,19	268
3,73	13	6,83	157	9,93	1614	13,03	807	16,13	696	19,22	284
3,76	17	6,86	115	9,96	1287	13,06	796	16,16	704	19,25	285
3,79	33	6,89	160	9,99	1074	13,09	812	16,19	658	19,28	277
3,82	24	6,92	176	10,02	1039	13,12	810	16,22	660	19,32	289
3,86	12	6,95	159	10,05	1004	13,15	817	16,25	676	19,35	275
3,89	32	6,99	148	10,08	965	13,18	785	16,28	634	19,38	232
3,92	30	7,02	134	10,12	943	13,21	814	16,31	679	19,41	239
3,95	19	7,05	153	10,15	984	13,24	845	16,34	695	19,44	246
3,98	30	7,08	157	10,18	909	13,28	832	16,37	650	19,47	257
4,01	20	7,11	177	10,21	894	13,31	802	16,40	650	19,50	220
4,04	45	7,14	186	10,24	934	13,34	820	16,44	644	19,53	230
4,07	25	7,17	217	10,27	923	13,37	862	16,47	644	19,56	208

Figura B.13:  $H\beta$ , distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

E (keV)	conteggi																										
5.00	0	6.86	11	8.72	44	10.58	179	12.44	473	14.30	605	16.16	698	18.01	831	19.87	901	21.73	1024	23.59	896	25.45	792	27.30	596	29.16	275
5.03	0	6.89	10	8.75	46	10.61	187	12.47	487	14.33	590	16.19	712	18.05	835	19.90	920	21.76	1021	23.62	891	25.48	766	27.34	574	29.19	252
5.06	0	6.92	15	8.78	48	10.64	203	12.50	496	14.36	604	16.22	732	18.08	870	19.94	943	21.79	1025	23.65	885	25.51	760	27.37	569	29.22	230
5.09	0	6.95	13	8.81	40	10.67	202	12.53	501	14.39	619	16.25	719	18.11	893	19.97	952	21.82	1027	23.68	877	25.54	753	27.40	559	29.26	232
5.13	0	6.99	14	8.84	37	10.70	195	12.56	479	14.42	614	16.28	736	18.14	884	20.00	951	21.86	1024	23.71	875	25.57	762	27.43	578	29.29	228
5.16	0	7.02	10	8.88	45	10.73	199	12.59	476	14.45	599	16.31	746	18.17	866	20.03	944	21.89	987	23.74	894	25.60	721	27.46	541	29.32	231
5.19	8	7.05	0	8.91	62	10.77	217	12.62	467	14.48	629	16.34	749	18.20	857	20.06	955	21.92	993	23.78	887	25.63	726	27.49	540	29.35	230
5.22	2	7.08	0	8.94	57	10.80	247	12.66	477	14.51	647	16.37	753	18.23	847	20.09	968	21.95	986	23.81	863	25.66	722	27.52	539	29.38	228
5.25	0	7.11	0	8.97	54	10.83	240	12.69	451	14.55	672	16.40	748	18.26	846	20.12	961	21.98	961	23.84	826	25.69	718	27.55	539	29.41	197
5.28	0	7.14	0	9.00	52	10.86	245	12.72	459	14.58	672	16.44	723	18.29	865	20.15	937	22.01	919	23.87	839	25.73	725	27.58	515	29.44	187
5.31	0	7.17	0	9.03	46	10.89	233	12.75	474	14.61	661	16.47	710	18.32	905	20.18	939	22.04	920	23.90	851	25.76	723	27.61	512	29.47	184
5.34	0	7.20	6	9.06	41	10.92	262	12.78	491	14.64	658	16.50	709	18.36	922	20.21	957	22.07	943	23.93	864	25.79	709	27.65	516	29.50	174
5.37	0	7.23	15	9.09	46	10.95	252	12.81	469	14.67	642	16.53	740	18.39	921	20.24	939	22.10	995	23.96	868	25.82	697	27.68	515	29.53	174
5.40	0	7.26	19	9.12	52	10.98	273	12.84	449	14.70	653	16.56	766	18.42	886	20.28	930	22.13	970	23.99	874	25.85	713	27.71	497	29.56	169
5.44	2	7.30	17	9.15	53	11.01	347	12.87	432	14.73	638	16.59	790	18.45	865	20.31	958	22.16	966	24.02	855	25.88	720	27.74	490	29.60	163
5.47	0	7.33	8	9.19	60	11.04	467	12.90	417	14.76	665	16.63	732	18.48	855	20.34	963	22.20	948	24.05	837	25.91	701	27.77	492	29.63	145
5.50	0	7.36	3	9.22	66	11.08	596	12.93	396	14.79	662	16.65	747	18.51	885	20.37	944	22.23	943	24.08	835	25.94	686	27.80	481	29.66	146
5.53	0	7.39	7	9.25	62	11.11	691	12.97	386	14.82	683	16.68	777	18.54	900	20.40	937	22.26	921	24.12	852	25.97	678	27.83	467	29.69	139
5.56	3	7.42	5	9.28	76	11.14	711	13.00	393	14.86	691	16.71	796	18.57	922	20.43	977	22.29	948	24.15	844	26.00	711	27.86	456	29.72	127
5.59	0	7.45	8	9.31	101	11.17	662	13.03	398	14.89	676	16.74	779	18.60	937	20.46	958	22.32	954	24.18	832	26.04	695	27.89	457	29.75	117
5.62	0	7.48	8	9.34	131	11.20	541	13.06	409	14.92	677	16.78	796	18.63	927	20.49	912	22.35	927	24.21	831	26.07	679	27.92	475	29.78	104
5.65	0	7.51	11	9.37	182	11.23	417	13.09	411	14.95	692	16.81	792	18.67	904	20.52	931	22.38	924	24.24	849	26.10	681	27.95	486	29.81	102
5.68	1	7.54	10	9.40	232	11.26	328	13.12	416	14.98	703	16.84	778	18.70	891	20.55	998	22.41	938	24.27	835	26.13	679	27.99	458	29.84	95
5.71	0	7.57	11	9.43	354	11.29	307	13.15	411	15.01	705	16.87	789	18.73	904	20.59	997	22.44	959	24.30	847	26.16	666	28.02	445	29.87	82
5.75	0	7.61	9	9.46	523	11.32	315	13.18	424	15.04	691	16.90	790	18.76	932	20.62	974	22.47	952	24.33	853	26.19	647	28.05	435	29.91	64
5.78	0	7.64	6	9.50	701	11.35	330	13.21	420	15.07	688	16.93	750	18.79	916	20.65	958	22.51	942	24.36	855	26.22	674	28.08	433	29.94	54
5.81	8	7.67	10	9.53	765	11.39	365	13.24	436	15.10	668	16.96	768	18.82	880	20.68	971	22.54	927	24.39	853	26.25	672	28.11	426	29.97	46
5.84	0	7.70	10	9.56	749	11.42	406	13.28	460	15.13	654	16.99	769	18.85	875	20.71	969	22.57	938	24.43	852	26.28	677	28.14	448	30.00	33
5.87	0	7.73	9	9.59	624	11.45	442	13.31	470	15.17	633	17.02	808	18.88	921	20.74	1021	22.60	940	24.46	828	26.31	651	28.17	456	30.03	24
5.90	0	7.76	15	9.62	472	11.48	466	13.34	447	15.20	663	17.05	810	18.91	911	20.77	988	22.63	957	24.49	839	26.35	656	28.20	449	30.06	16
5.93	6	7.79	15	9.65	362	11.51	470	13.37	440	15.23	683	17.09	835	18.94	915	20.80	986	22.66	922	24.52	871	26.38	656	28.23	427	30.09	17
5.96	0	7.82	8	9.68	338	11.54	432	13.40	465	15.26	674	17.12	819	18.97	897	20.83	942	22.69	916	24.55	842	26.41	681	28.26	427	30.12	16
5.99	6	7.85	13	9.71	356	11.57	375	13.43	486	15.29	659	17.15	829	19.01	921	20.86	958	22.72	914	24.58	822	26.44	687	28.30	429	30.15	14

(segue) H30, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.

E (keV)	conteggi (keV)																										
6.02	0	7.88	24	9.74	427	11.60	333	13.46	501	15.32	664	17.18	823	19.04	922	20.90	928	22.75	912	24.61	847	26.47	694	28.33	417	30.18	10
6.06	0	7.92	29	9.77	517	11.63	301	13.49	502	15.35	669	17.21	796	19.07	927	20.93	938	22.78	902	24.64	880	26.50	683	28.36	408	30.21	11
6.09	0	7.95	26	9.81	584	11.66	295	13.52	489	15.38	677	17.24	769	19.10	897	20.96	920	22.82	911	24.67	863	26.53	656	28.39	428	30.25	9
6.12	5	7.98	20	9.84	565	11.70	304	13.55	468	15.41	702	17.27	781	19.13	894	20.99	939	22.85	951	24.70	840	26.56	642	28.42	426	30.28	7
6.15	3	8.01	11	9.87	469	11.73	338	13.59	479	15.44	716	17.30	800	19.16	900	21.02	947	22.88	944	24.73	809	26.59	650	28.45	399	30.31	4
6.18	7	8.04	14	9.90	337	11.76	344	13.62	489	15.47	725	17.33	801	19.19	928	21.05	956	22.91	963	24.77	795	26.62	658	28.48	387	30.34	4
6.21	7	8.07	15	9.93	235	11.79	339	13.65	492	15.51	707	17.36	827	19.22	934	21.08	939	22.94	931	24.80	786	26.65	635	28.51	388	30.37	5
6.24	19	8.10	16	9.96	191	11.82	339	13.68	492	15.54	683	17.40	849	19.25	935	21.11	934	22.97	931	24.83	803	26.69	645	28.54	381	30.40	8
6.27	14	8.13	24	9.99	166	11.85	336	13.71	498	15.57	665	17.43	831	19.28	931	21.14	942	23.00	919	24.86	792	26.72	640	28.57	348	30.43	9
6.30	14	8.16	63	10.02	145	11.88	380	13.74	481	15.60	691	17.46	813	19.32	940	21.17	946	23.03	918	24.89	797	26.75	640	28.61	351	30.46	9
6.33	7	8.19	110	10.05	134	11.91	378	13.77	497	15.63	693	17.49	838	19.35	941	21.20	952	23.06	919	24.92	796	26.78	623	28.64	378	30.49	8
6.37	7	8.22	162	10.08	152	11.94	383	13.80	499	15.66	683	17.52	854	19.38	934	21.24	964	23.09	950	24.95	827	26.81	626	28.67	367	30.52	9
6.40	1	8.26	198	10.12	161	11.97	365	13.83	502	15.69	681	17.55	857	19.41	952	21.27	964	23.12	951	24.98	824	26.84	620	28.70	336	30.56	6
6.43	2	8.29	201	10.15	136	12.01	358	13.86	516	15.72	691	17.58	874	19.44	956	21.30	932	23.16	940	25.01	801	26.87	623	28.73	318	30.59	7
6.46	4	8.32	164	10.18	123	12.04	359	13.89	560	15.75	715	17.61	881	19.47	956	21.33	920	23.19	900	25.04	787	26.90	593	28.76	330	30.62	9
6.49	5	8.35	105	10.21	121	12.07	371	13.93	565	15.78	699	17.64	862	19.50	953	21.36	939	23.22	900	25.08	798	26.93	588	28.79	337	30.65	8
6.52	0	8.38	56	10.24	129	12.10	367	13.96	534	15.82	694	17.67	852	19.53	920	21.39	957	23.25	891	25.11	810	26.96	594	28.82	328	30.68	8
6.55	0	8.41	25	10.27	135	12.13	360	13.99	518	15.85	704	17.71	853	19.56	912	21.42	983	23.28	923	25.14	787	27.00	608	28.85	309	30.71	12
6.58	0	8.44	24	10.30	151	12.16	372	14.02	530	15.88	717	17.74	872	19.59	926	21.45	976	23.31	929	25.17	781	27.03	599	28.88	297	30.74	13
6.61	11	8.47	22	10.33	180	12.19	377	14.05	550	15.91	707	17.77	860	19.63	963	21.48	944	23.34	916	25.20	776	27.06	610	28.91	300	30.77	8
6.64	3	8.50	24	10.36	200	12.22	380	14.08	542	15.94	683	17.80	871	19.66	963	21.51	947	23.37	877	25.23	783	27.09	604	28.95	301	30.80	8
6.68	7	8.53	27	10.39	221	12.25	390	14.11	550	15.97	702	17.83	882	19.69	948	21.55	977	23.40	889	25.26	778	27.12	591	28.98	303	30.83	12
6.71	5	8.57	30	10.42	224	12.28	412	14.14	569	16.00	692	17.86	901	19.72	918	21.58	983	23.43	925	25.29	778	27.15	578	29.01	292	30.86	12
6.74	4	8.60	29	10.46	211	12.31	404	14.17	590	16.03	695	17.89	891	19.75	925	21.61	971	23.47	948	25.32	774	27.18	576	29.04	274	30.90	9
6.77	0	8.63	31	10.49	195	12.35	411	14.20	583	16.06	700	17.92	883	19.78	948	21.64	964	23.50	902	25.35	766	27.21	576	29.07	263	30.93	7
6.80	2	8.66	37	10.52	195	12.38	438	14.24	588	16.09	724	17.95	870	19.81	939	21.67	956	23.53	881	25.39	763	27.24	583	29.10	263	30.96	6
6.83	10	8.69	37	10.55	183	12.41	465	14.27	608	16.13	697	17.98	856	19.84	909	21.70	978	23.56	874	25.42	766	27.27	579	29.13	277	30.99	7

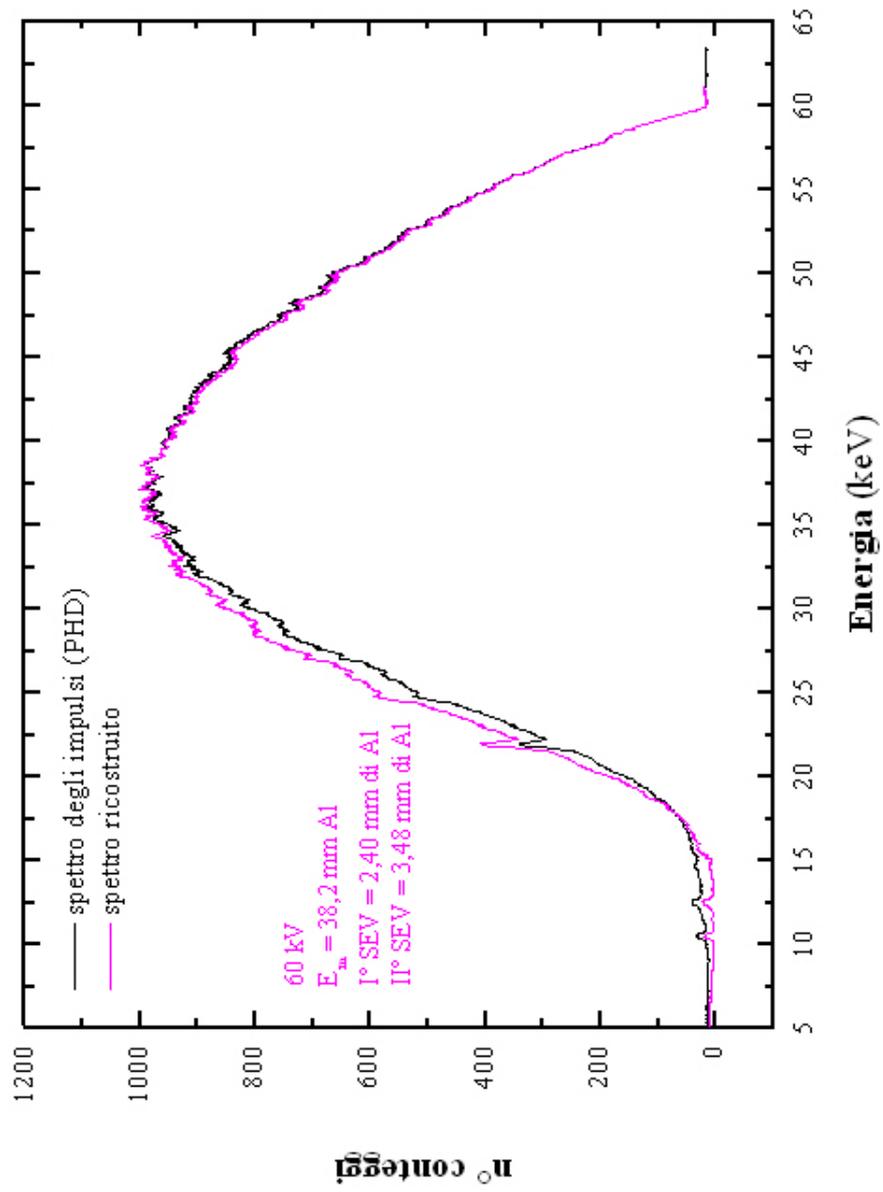
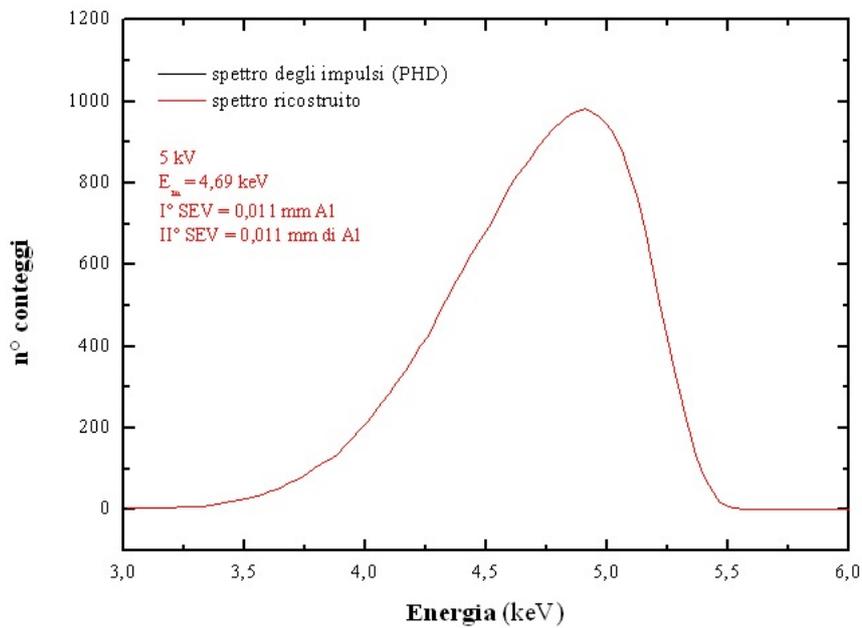


Figura B.14: H60, distanza sorgente rivelatore = 50 cm.



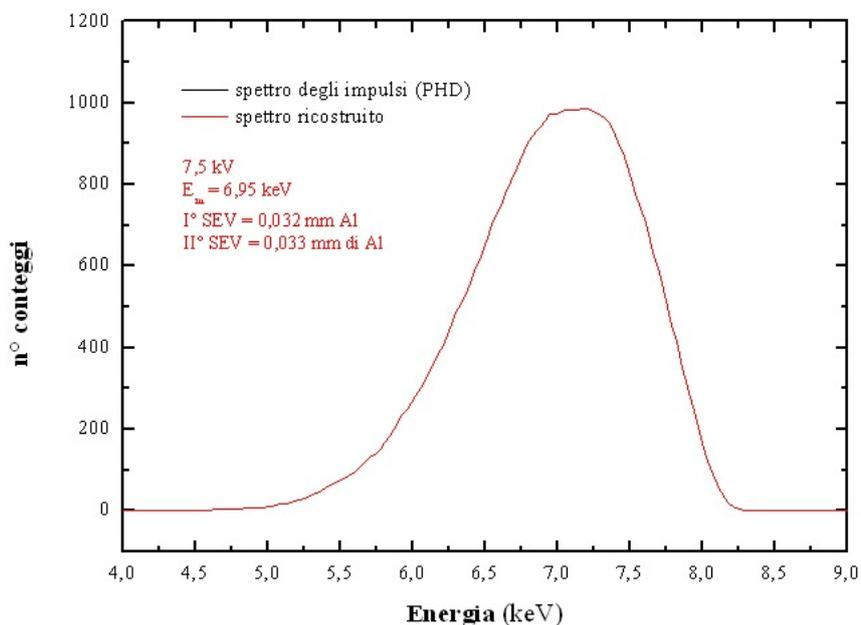


### B.1.4 Spettro 5 kV e 7,5 kV.



E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
3,02	3	3,95	175	4,88	977	5,81	2
3,05	3	3,98	197	4,91	981	5,84	2
3,08	3	4,01	217	4,94	972	5,87	2
3,11	4	4,04	238	4,97	965	5,90	1
3,14	4	4,07	262	5,00	943	5,93	2
3,17	4	4,10	285	5,03	920	5,96	1
3,20	5	4,13	310	5,06	881	5,99	1
3,24	6	4,17	342	5,09	830	6,02	1
3,27	6	4,20	371	5,13	761		
3,30	8	4,23	401	5,16	677		
3,33	9	4,26	426	5,19	591		
3,36	11	4,29	461	5,22	506		
3,39	13	4,32	496	5,25	419		
3,42	16	4,35	530	5,28	342		
3,45	19	4,38	563	5,31	262		
3,48	23	4,41	596	5,34	197		
3,51	28	4,44	628	5,37	134		
3,55	34	4,48	663	5,40	82		
3,58	38	4,51	692	5,44	43		
3,61	45	4,54	722	5,47	18		
3,64	51	4,57	756	5,50	8		
3,67	59	4,60	792	5,53	3		
3,70	68	4,63	820	5,56	2		
3,73	77	4,66	843	5,59	1		
3,76	90	4,69	865	5,62	2		
3,79	101	4,72	890	5,65	2		
3,82	112	4,75	913	5,68	2		
3,86	125	4,78	934	5,71	2		
3,89	139	4,82	954	5,75	2		
3,92	159	4,85	970	5,78	2		

Figura B.15: Spettro 5 kV, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.



E (keV)	conteggi										
3,02	1	3,95	1	4,88	6	5,81	166	6,74	857	7,67	625
3,05	1	3,98	1	4,91	7	5,84	182	6,77	881	7,70	585
3,08	1	4,01	1	4,94	8	5,87	201	6,80	906	7,73	541
3,11	2	4,04	1	4,97	9	5,90	217	6,83	921	7,76	501
3,14	2	4,07	1	5,00	10	5,93	235	6,86	933	7,79	456
3,17	2	4,10	1	5,03	12	5,96	247	6,89	945	7,82	414
3,20	2	4,13	1	5,06	13	5,99	264	6,92	958	7,85	367
3,24	2	4,17	1	5,09	16	6,02	282	6,95	973	7,88	326
3,27	2	4,20	1	5,13	17	6,06	302	6,99	974	7,92	278
3,30	1	4,23	1	5,16	19	6,09	322	7,02	975	7,95	233
3,33	1	4,26	1	5,19	22	6,12	342	7,05	982	7,98	193
3,36	1	4,29	1	5,22	26	6,15	364	7,08	984	8,01	154
3,39	2	4,32	1	5,25	30	6,18	387	7,11	984	8,04	120
3,42	2	4,35	1	5,28	34	6,21	405	7,14	983	8,07	90
3,45	2	4,38	1	5,31	40	6,24	430	7,17	985	8,10	65
3,48	1	4,41	1	5,34	44	6,27	456	7,20	985	8,13	46
3,51	1	4,44	1	5,37	50	6,30	487	7,23	981	8,16	29
3,55	1	4,48	1	5,40	55	6,33	507	7,26	976	8,19	17
3,58	1	4,51	1	5,44	62	6,37	532	7,30	968	8,22	9
3,61	1	4,54	2	5,47	69	6,40	560	7,33	960	8,26	4
3,64	1	4,57	2	5,50	75	6,43	589	7,36	949	8,29	1
3,67	1	4,60	2	5,53	80	6,46	616	7,39	932	8,32	0
3,70	2	4,63	2	5,56	85	6,49	644	7,42	905	8,35	0
3,73	2	4,66	3	5,59	93	6,52	671	7,45	878	8,38	0
3,76	1	4,69	3	5,62	102	6,55	703	7,48	846	8,41	0
3,79	1	4,72	3	5,65	111	6,58	729	7,51	814	8,44	0
3,82	1	4,75	4	5,68	122	6,61	749	7,54	777	8,47	0
3,86	1	4,78	4	5,71	131	6,64	776	7,57	742	8,50	0
3,89	1	4,82	5	5,75	141	6,68	808	7,61	706	8,53	0
3,92	1	4,85	6	5,78	152	6,71	832	7,64	663	8,57	0

Figura B.16: Spettro 7,5 kV, distanza sorgente-rivelatore = 50 cm.



## B.2 Distanza sorgente - rivelatore = 200 cm.

### B.2.1 Serie L

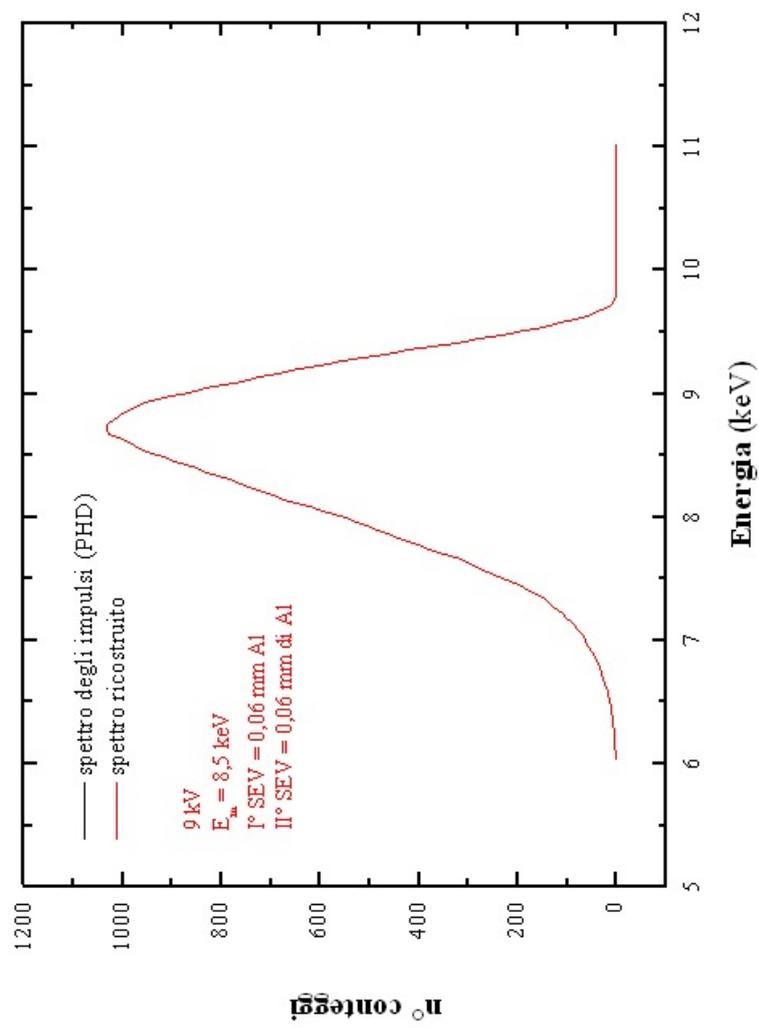


Figura B.17: L20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

<b>E (keV)</b>	<b>conteggi</b>	<b>E (keV)</b>	<b>conteggi</b>	<b>E (keV)</b>	<b>conteggi</b>
6,02	1	7,88	364	9,74	4
6,06	1	7,92	382	9,77	2
6,09	1	7,95	398	9,81	1
6,12	1	7,98	418	9,84	1
6,15	1	8,01	437	9,87	1
6,18	2	8,04	456	9,90	1
6,21	2	8,07	477	9,93	1
6,24	2	8,10	497	9,96	1
6,27	3	8,13	519	9,99	1
6,30	3	8,16	539	10,02	1
6,33	4	8,19	554	10,05	1
6,37	4	8,22	573	10,08	1
6,40	5	8,26	594	10,12	1
6,43	6	8,29	614	10,15	0
6,46	7	8,32	633	10,18	1
6,49	8	8,35	652	10,21	0
6,52	9	8,38	671	10,24	0
6,55	10	8,41	691	10,27	0
6,58	11	8,44	709	10,30	0
6,61	13	8,47	729	10,33	0
6,64	15	8,50	748	10,36	1
6,68	16	8,53	768	10,39	1
6,71	18	8,57	782	10,42	1
6,74	19	8,60	796	10,46	1
6,77	21	8,63	811	10,49	1
6,80	24	8,66	828	10,52	1
6,83	26	8,69	832	10,55	1
6,86	29	8,72	835	10,58	1
6,89	31	8,75	833	10,61	1
6,92	35	8,78	825	10,64	1
6,95	39	8,81	816	10,67	1
6,99	42	8,84	809	10,70	1
7,02	45	8,88	796	10,73	1
7,05	49	8,91	782	10,77	1
7,08	54	8,94	762	10,80	1
7,11	58	8,97	739	10,83	1
7,14	63	9,00	709	10,86	1
7,17	69	9,03	684	10,89	1
7,20	75	9,06	654	10,92	0
7,23	82	9,09	624	10,95	0
7,26	89	9,12	598	10,98	0
7,30	95	9,15	567	11,01	0
7,33	103	9,19	531		
7,36	113	9,22	496		
7,39	125	9,25	459		
7,42	135	9,28	423		
7,45	147	9,31	386		
7,48	158	9,34	350		
7,51	173	9,37	309		
7,54	189	9,40	269		
7,57	201	9,43	230		
7,61	215	9,46	192		
7,64	229	9,50	155		
7,67	248	9,53	122		
7,70	265	9,56	94		
7,73	279	9,59	70		
7,76	298	9,62	50		

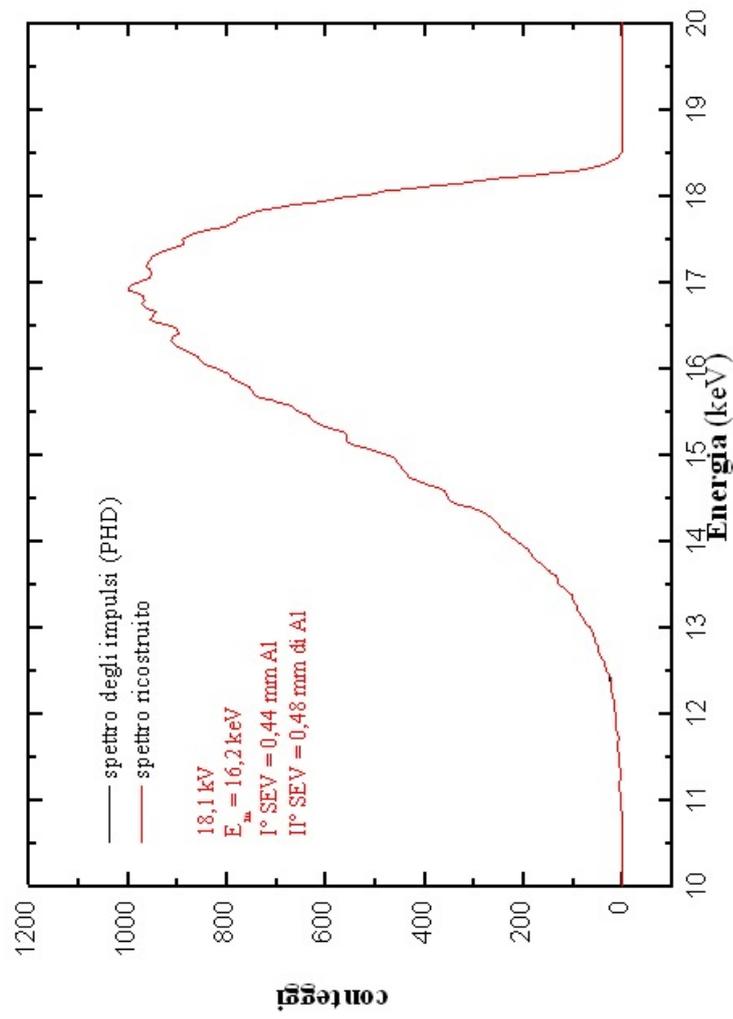


Figura B.18:  $L20$ , distanza sorgente rivelatore = 200 cm.



(serie) L20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

E (keV)	conteggi																		
3.14	0	5.00	7	6.86	20	8.72	1	10.58	2	12.44	28	14.30	276	16.16	867	18.01	517	19.87	1
3.17	0	5.03	4	6.89	21	8.75	1	10.61	2	12.47	31	14.33	283	16.19	878	18.05	474	19.90	1
3.20	3	5.06	5	6.92	21	8.78	0	10.64	2	12.50	33	14.36	294	16.22	892	18.08	429	19.94	0
3.24	4	5.09	7	6.95	19	8.81	1	10.67	2	12.53	35	14.39	311	16.25	901	18.11	381	19.97	1
3.27	5	5.13	7	6.99	20	8.84	1	10.70	2	12.56	35	14.42	332	16.28	909	18.14	334	20.00	1
3.30	6	5.16	8	7.02	21	8.88	2	10.73	2	12.59	36	14.45	346	16.31	914	18.17	291	20.03	1
3.33	5	5.19	9	7.05	19	8.91	2	10.77	2	12.62	38	14.48	354	16.34	910	18.20	239	20.06	1
3.36	4	5.22	7	7.08	19	8.94	2	10.80	2	12.66	43	14.51	355	16.37	908	18.23	186	20.09	1
3.39	4	5.25	7	7.11	14	8.97	2	10.83	2	12.69	47	14.55	356	16.40	898	18.26	137	20.12	1
3.42	5	5.28	5	7.14	9	9.00	1	10.86	2	12.72	49	14.58	360	16.44	899	18.29	96	20.15	1
3.45	5	5.31	4	7.17	8	9.03	2	10.89	3	12.75	49	14.61	373	16.47	905	18.32	62	20.18	0
3.48	6	5.34	3	7.20	7	9.06	2	10.92	3	12.78	50	14.64	390	16.50	922	18.36	40	20.21	0
3.51	5	5.37	7	7.23	6	9.09	1	10.95	3	12.81	52	14.67	404	16.53	940	18.39	24	20.24	1
3.55	5	5.40	10	7.26	3	9.12	1	10.98	3	12.84	55	14.70	420	16.56	957	18.42	13	20.28	1
3.58	4	5.44	14	7.30	3	9.15	2	11.01	3	12.87	57	14.73	430	16.59	950	18.45	8	20.31	2
3.61	4	5.47	14	7.33	1	9.19	2	11.04	4	12.90	60	14.76	433	16.62	949	18.48	4	20.34	2
3.64	4	5.50	11	7.36	5	9.22	2	11.08	5	12.93	59	14.79	438	16.65	945	18.51	2	20.37	1
3.67	7	5.53	8	7.39	8	9.25	2	11.11	6	12.97	63	14.82	445	16.68	951	18.54	1	20.40	1
3.70	7	5.56	5	7.42	11	9.28	1	11.14	7	13.00	67	14.86	449	16.71	965	18.57	1	20.43	1
3.73	5	5.59	5	7.45	10	9.31	2	11.17	7	13.03	71	14.89	454	16.74	973	18.60	1	20.46	2
3.76	4	5.62	8	7.48	12	9.34	2	11.20	6	13.06	75	14.92	457	16.78	968	18.63	1	20.49	2
3.79	1	5.65	11	7.51	9	9.37	2	11.23	5	13.09	80	14.95	462	16.81	968	18.67	1	20.52	2
3.82	0	5.68	10	7.54	8	9.40	2	11.26	5	13.12	81	14.98	470	16.84	968	18.70	1	20.55	1

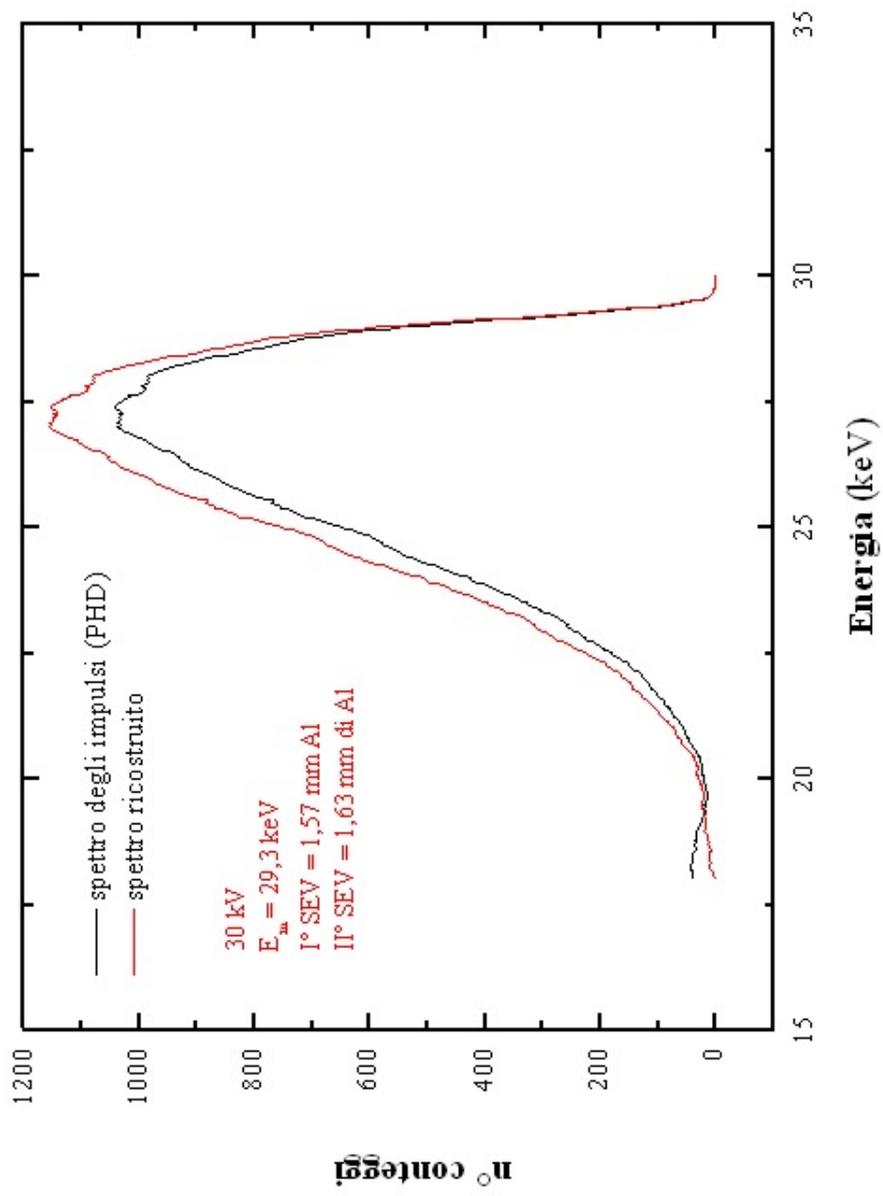
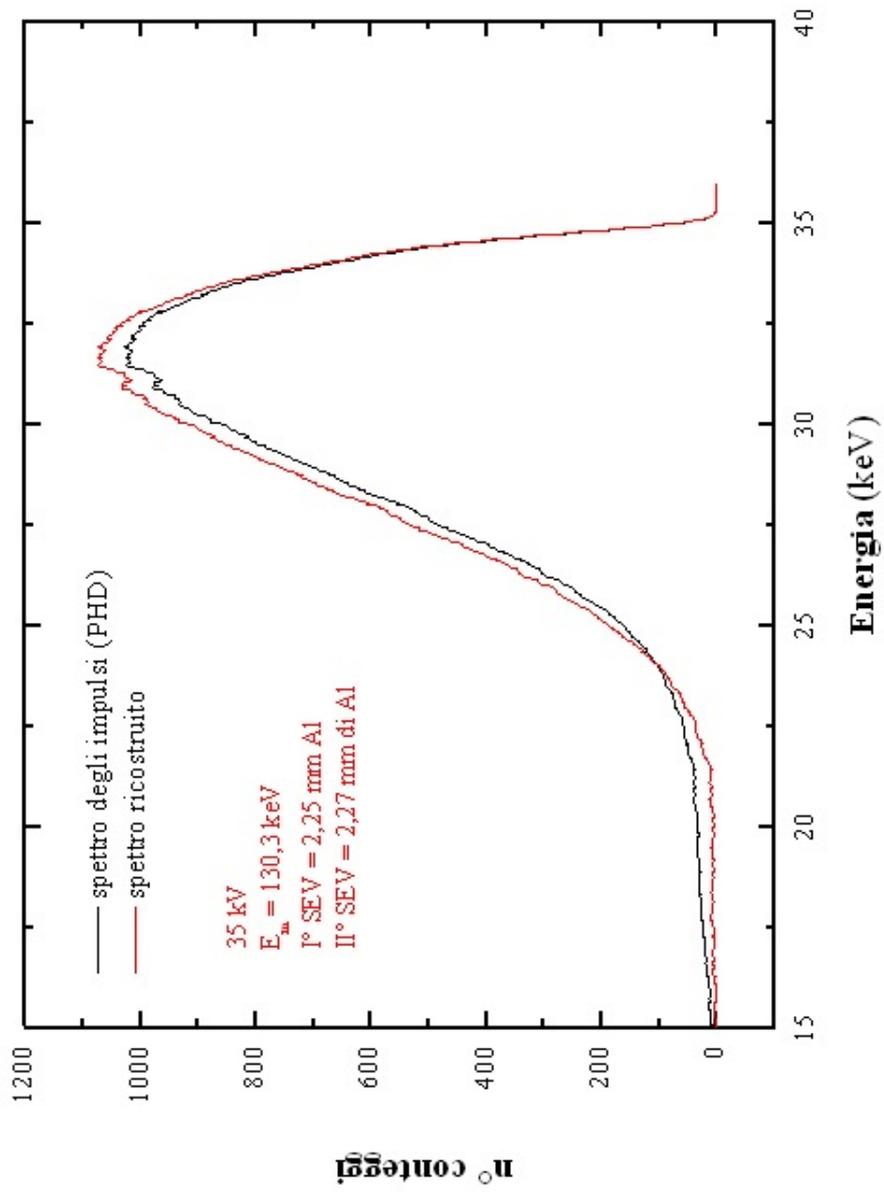


Figura B.19: L30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	<b>E (keV)</b>	<b>conteggi</b>
18,01	1	21,11	84	24,21	577	27,30	1146
18,05	3	21,14	88	24,24	587	27,34	1154
18,08	4	21,17	91	24,27	597	27,37	1152
18,11	5	21,20	93	24,30	606	27,40	1149
18,14	6	21,24	97	24,33	613	27,43	1144
18,17	8	21,27	98	24,36	618	27,46	1142
18,20	9	21,30	100	24,39	625	27,49	1134
18,23	10	21,33	102	24,43	634	27,52	1131
18,26	10	21,36	104	24,46	643	27,55	1118
18,29	8	21,39	105	24,49	646	27,58	1121
18,32	9	21,42	107	24,52	656	27,61	1107
18,36	9	21,45	113	24,55	661	27,65	1099
18,39	9	21,48	114	24,58	665	27,68	1092
18,42	11	21,51	117	24,61	670	27,71	1089
18,45	11	21,55	120	24,64	675	27,74	1088
18,48	12	21,58	122	24,67	678	27,77	1094
18,51	10	21,61	127	24,70	682	27,80	1090
18,54	8	21,64	129	24,73	691	27,83	1085
18,57	8	21,67	132	24,77	697	27,86	1077
18,60	9	21,70	136	24,80	702	27,89	1081
18,63	11	21,73	140	24,83	709	27,92	1077
18,67	12	21,76	143	24,86	718	27,95	1079
18,70	11	21,79	143	24,89	725	27,99	1076
18,73	14	21,82	145	24,92	733	28,02	1070
18,76	13	21,86	147	24,95	745	28,05	1065
18,79	14	21,89	149	24,98	750	28,08	1054
18,82	13	21,92	154	25,01	761	28,11	1042
18,85	14	21,95	156	25,04	776	28,14	1029
18,88	17	21,98	158	25,08	786	28,17	1023
18,91	18	22,01	163	25,11	792	28,20	1015
18,94	19	22,04	164	25,14	807	28,23	1000
18,97	18	22,07	168	25,17	821	28,26	986
19,01	16	22,10	170	25,20	829	28,30	972
19,04	18	22,13	176	25,23	833	28,33	960
19,07	17	22,16	181	25,26	843	28,36	944
19,10	16	22,20	184	25,29	849	28,39	927
19,13	16	22,23	188	25,32	858	28,42	909
19,16	18	22,26	190	25,35	868	28,45	895
19,19	18	22,29	194	25,39	868	28,48	885
19,22	19	22,32	200	25,42	873	28,51	870
19,25	18	22,35	204	25,45	884	28,54	860
19,28	18	22,38	210	25,48	882	28,57	844
19,32	19	22,41	216	25,51	882	28,61	829
19,35	22	22,44	224	25,54	887	28,64	811
19,38	23	22,47	227	25,57	908	28,67	793
19,41	22	22,51	232	25,60	917	28,70	783
19,44	24	22,54	239	25,63	926	28,73	766
19,47	24	22,57	242	25,66	934	28,76	750
19,50	23	22,60	247	25,69	940	28,79	728
19,53	22	22,63	252	25,73	948	28,82	703
19,56	21	22,66	258	25,76	951	28,85	678
19,59	21	22,69	264	25,79	957	28,88	648
19,63	21	22,72	272	25,82	966	28,91	617
19,66	22	22,75	279	25,85	972	28,95	582
19,69	21	22,78	281	25,88	977	28,98	551
19,72	20	22,82	285	25,91	977	29,01	517
19,75	22	22,85	291	25,94	981	29,04	473

(serie) L30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
19,81	24	22,91	300	26,00	995	29,10	399
19,84	24	22,94	304	26,04	1006	29,13	355
19,87	25	22,97	309	26,07	1015	29,16	317
19,90	26	23,00	315	26,10	1019	29,19	278
19,94	28	23,03	313	26,13	1024	29,22	240
19,97	29	23,06	315	26,16	1027	29,26	206
20,00	30	23,09	319	26,19	1034	29,29	173
20,03	30	23,12	323	26,22	1037	29,32	141
20,06	32	23,16	330	26,25	1043	29,35	113
20,09	32	23,19	333	26,28	1046	29,38	90
20,12	32	23,22	343	26,31	1050	29,41	68
20,15	31	23,25	350	26,35	1053	29,44	51
20,18	30	23,28	358	26,38	1052	29,47	39
20,21	30	23,31	367	26,41	1056	29,50	27
20,24	32	23,34	369	26,44	1060	29,53	18
20,28	32	23,37	379	26,47	1068	29,56	12
20,31	34	23,40	386	26,50	1077	29,60	7
20,34	35	23,43	392	26,53	1085	29,63	5
20,37	37	23,47	396	26,56	1094	29,66	4
20,40	38	23,50	403	26,59	1097	29,69	3
20,43	40	23,53	409	26,62	1099	29,72	2
20,46	41	23,56	414	26,65	1104	29,75	2
20,49	44	23,59	422	26,69	1108	29,78	1
20,52	45	23,62	431	26,72	1111	29,81	1
20,55	49	23,65	436	26,75	1121	29,84	1
20,59	53	23,68	444	26,78	1130	29,87	1
20,62	55	23,71	454	26,81	1133	29,91	1
20,65	55	23,74	459	26,84	1139	29,94	1
20,68	59	23,78	465	26,87	1143	29,97	1
20,71	60	23,81	475	26,90	1147	30,00	1
20,74	61	23,84	482	26,93	1151		
20,77	63	23,87	493	26,96	1156		
20,80	65	23,90	498	27,00	1151		
20,83	66	23,93	504	27,03	1154		
20,86	69	23,96	507	27,06	1155		
20,90	69	23,99	515	27,09	1150		
20,93	70	24,02	526	27,12	1148		
20,96	73	24,05	535	27,15	1151		
20,99	74	24,08	545	27,18	1144		
21,02	75	24,12	552	27,21	1148		
21,05	78	24,15	564	27,24	1142		
21,08	83	24,18	570	27,27	1144		



**Figura B.20:** *L35, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.*

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
14,02	0	17,12	5	20,21	4	23,31	66	26,41	352	29,50	857	32,60	1022	35,69	1
14,05	0	17,15	5	20,24	4	23,34	67	26,44	359	29,53	859	32,63	1019	35,72	1
14,08	0	17,18	5	20,28	5	23,37	71	26,47	363	29,56	866	32,66	1016	35,76	1
14,11	0	17,21	5	20,31	5	23,40	71	26,50	368	29,60	867	32,69	1010	35,79	1
14,14	0	17,24	6	20,34	6	23,43	75	26,53	368	29,63	872	32,72	1006	35,82	1
14,17	1	17,27	6	20,37	8	23,47	78	26,56	375	29,66	878	32,75	999	35,85	2
14,20	0	17,30	6	20,40	9	23,50	80	26,59	381	29,69	870	32,78	1002	35,88	2
14,24	1	17,33	5	20,43	8	23,53	80	26,62	383	29,72	880	32,81	996	35,91	2
14,27	1	17,36	5	20,46	9	23,56	80	26,65	391	29,75	882	32,85	983	35,94	2
14,30	3	17,40	5	20,49	9	23,59	80	26,69	395	29,78	889	32,88	977	35,97	2
14,33	2	17,43	5	20,52	10	23,62	81	26,72	401	29,81	894	32,91	971	36,00	2
14,36	0	17,46	5	20,55	10	23,65	83	26,75	406	29,84	896	32,94	963		
14,39	0	17,49	5	20,59	11	23,68	85	26,78	413	29,87	901	32,97	959		
14,42	0	17,52	6	20,62	11	23,71	86	26,81	414	29,91	905	33,00	956		
14,45	2	17,55	6	20,65	13	23,74	88	26,84	419	29,94	909	33,03	952		
14,48	3	17,58	6	20,68	11	23,78	88	26,87	426	29,97	914	33,06	946		
14,51	2	17,61	7	20,71	10	23,81	89	26,90	431	30,00	920	33,09	940		
14,55	3	17,64	7	20,74	8	23,84	92	26,93	436	30,03	935	33,12	932		
14,58	2	17,67	9	20,77	8	23,87	94	26,96	443	30,06	934	33,16	919		
14,61	1	17,71	10	20,80	8	23,90	96	27,00	442	30,09	934	33,19	920		
14,64	1	17,74	9	20,83	10	23,93	98	27,03	452	30,12	939	33,22	912		
14,67	2	17,77	9	20,86	10	23,96	99	27,06	459	30,15	940	33,25	910		
14,70	4	17,80	9	20,90	10	23,99	100	27,09	464	30,18	946	33,28	904		
14,73	3	17,83	9	20,93	10	24,02	105	27,12	467	30,21	955	33,31	897		
14,76	3	17,86	9	20,96	9	24,05	107	27,15	474	30,25	962	33,34	891		
14,79	3	17,89	9	20,99	8	24,08	111	27,18	481	30,28	967	33,37	883		
14,82	2	17,92	8	21,02	10	24,12	112	27,21	486	30,31	967	33,40	876		
14,86	1	17,95	7	21,05	11	24,15	114	27,24	491	30,34	973	33,43	869		
14,89	0	17,98	8	21,08	13	24,18	114	27,27	495	30,37	973	33,46	859		
14,92	2	18,01	6	21,11	11	24,21	118	27,30	503	30,40	976	33,50	855		
14,95	1	18,05	6	21,14	12	24,24	121	27,34	515	30,43	983	33,53	844		
14,98	1	18,08	6	21,17	10	24,27	124	27,37	516	30,46	990	33,56	838		
15,01	1	18,11	5	21,20	10	24,30	127	27,40	516	30,49	991	33,59	824		
15,04	1	18,14	7	21,24	12	24,33	130	27,43	524	30,52	985	33,62	813		
15,07	2	18,17	7	21,27	11	24,36	128	27,46	531	30,56	989	33,65	806		
15,10	1	18,20	8	21,30	11	24,39	130	27,49	537	30,59	988	33,68	794		
15,13	1	18,23	7	21,33	11	24,43	132	27,52	538	30,62	995	33,71	785		
15,17	2	18,26	8	21,36	11	24,46	136	27,55	542	30,65	994	33,74	772		
15,20	2	18,29	7	21,39	9	24,49	140	27,58	547	30,68	997	33,77	763		
15,23	3	18,32	8	21,42	8	24,52	143	27,61	550	30,71	1006	33,81	748		
15,26	4	18,36	9	21,45	11	24,55	145	27,65	549	30,74	1015	33,84	735		
15,29	5	18,39	8	21,48	11	24,58	148	27,68	555	30,77	1013	33,87	725		
15,32	4	18,42	7	21,51	12	24,61	152	27,71	562	30,80	1016	33,90	712		
15,35	4	18,45	8	21,55	13	24,64	157	27,74	568	30,83	1019	33,93	703		
15,38	3	18,48	7	21,58	14	24,67	161	27,77	570	30,86	1032	33,96	694		
15,41	4	18,51	7	21,61	15	24,70	163	27,80	572	30,90	1033	33,99	677		
15,44	5	18,54	8	21,64	16	24,73	165	27,83	573	30,93	1031	34,02	666		
15,47	5	18,57	8	21,67	17	24,77	168	27,86	582	30,96	1024	34,05	651		
15,51	4	18,60	7	21,70	19	24,80	170	27,89	584	30,99	1030	34,08	639		
15,54	5	18,63	8	21,73	21	24,83	171	27,92	586	31,02	1029	34,11	632		
15,57	3	18,67	6	21,76	23	24,86	180	27,95	595	31,05	1021	34,15	622		
15,60	3	18,70	5	21,79	23	24,89	180	27,99	606	31,08	1016	34,18	611		
15,63	1	18,73	6	21,82	23	24,92	181	28,02	605	31,11	1021	34,21	596		
15,66	2	18,76	8	21,86	23	24,95	186	28,05	611	31,14	1026	34,24	581		
15,69	2	18,79	7	21,89	23	24,98	186	28,08	621	31,17	1029	34,27	566		
15,72	2	18,82	6	21,92	23	25,01	189	28,11	625	31,21	1029	34,30	552		

(serie) L35, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
15,75	0	18,85	6	21,95	26	25,04	194	28,14	631	31,24	1029	34,33	538		
15,78	0	18,88	3	21,98	27	25,08	197	28,17	641	31,27	1039	34,36	523		
15,82	0	18,91	5	22,01	27	25,11	199	28,20	645	31,30	1045	34,39	507		
15,85	0	18,94	5	22,04	25	25,14	203	28,23	650	31,33	1047	34,42	489		
15,88	0	18,97	5	22,07	27	25,17	205	28,26	658	31,36	1056	34,46	464		
15,91	1	19,01	7	22,10	28	25,20	205	28,30	665	31,39	1064	34,49	447		
15,94	1	19,04	8	22,13	28	25,23	211	28,33	666	31,42	1072	34,52	423		
15,97	2	19,07	7	22,16	31	25,26	214	28,36	676	31,45	1075	34,55	402		
16,00	2	19,10	6	22,20	32	25,29	216	28,39	675	31,48	1071	34,58	382		
16,03	0	19,13	5	22,23	32	25,32	218	28,42	682	31,51	1070	34,61	357		
16,06	2	19,16	5	22,26	34	25,35	218	28,45	690	31,55	1068	34,64	331		
16,09	4	19,19	7	22,29	35	25,39	223	28,48	694	31,58	1072	34,67	308		
16,13	3	19,22	8	22,32	35	25,42	230	28,51	696	31,61	1068	34,70	281		
16,16	4	19,25	7	22,35	35	25,45	234	28,54	700	31,64	1073	34,73	254		
16,19	4	19,28	8	22,38	35	25,48	237	28,57	707	31,67	1071	34,76	229		
16,22	3	19,32	8	22,41	35	25,51	243	28,61	712	31,70	1070	34,80	204		
16,25	2	19,35	7	22,44	35	25,54	245	28,64	714	31,73	1070	34,83	174		
16,28	5	19,38	8	22,47	36	25,57	250	28,67	720	31,76	1064	34,86	151		
16,31	6	19,41	8	22,51	37	25,60	259	28,70	720	31,79	1064	34,89	127		
16,34	6	19,44	9	22,54	37	25,63	258	28,73	727	31,82	1062	34,92	104		
16,37	7	19,47	9	22,57	38	25,66	261	28,76	729	31,86	1070	34,95	85		
16,40	6	19,50	8	22,60	38	25,69	268	28,79	737	31,89	1074	34,98	66		
16,44	5	19,53	7	22,63	39	25,73	271	28,82	743	31,92	1069	35,01	48		
16,47	6	19,56	6	22,66	40	25,76	273	28,85	747	31,95	1068	35,04	36		
16,50	5	19,59	6	22,69	41	25,79	276	28,88	753	31,98	1064	35,07	25		
16,53	5	19,63	6	22,72	44	25,82	278	28,91	758	32,01	1061	35,11	17		
16,56	7	19,66	6	22,75	46	25,85	279	28,95	762	32,04	1055	35,14	11		
16,59	7	19,69	6	22,78	47	25,88	282	28,98	768	32,07	1052	35,17	8		
16,62	6	19,72	4	22,82	48	25,91	283	29,01	773	32,10	1058	35,20	4		
16,65	5	19,75	5	22,85	48	25,94	285	29,04	780	32,13	1056	35,23	3		
16,68	5	19,78	3	22,88	51	25,97	292	29,07	789	32,16	1058	35,26	2		
16,71	5	19,81	4	22,91	53	26,00	300	29,10	792	32,20	1056	35,29	1		
16,74	5	19,84	4	22,94	56	26,04	306	29,13	793	32,23	1049	35,32	1		
16,78	6	19,87	6	22,97	56	26,07	310	29,16	799	32,26	1047	35,35	1		
16,81	7	19,90	6	23,00	57	26,10	312	29,19	803	32,29	1045	35,38	1		
16,84	7	19,94	7	23,03	57	26,13	318	29,22	807	32,32	1040	35,41	1		
16,87	6	19,97	6	23,06	58	26,16	322	29,26	817	32,35	1043	35,45	1		
16,90	6	20,00	5	23,09	58	26,19	332	29,29	822	32,38	1043	35,48	2		
16,93	6	20,03	3	23,12	58	26,22	336	29,32	824	32,41	1041	35,51	1		
16,96	5	20,06	5	23,16	61	26,25	340	29,35	832	32,44	1031	35,54	1		
16,99	5	20,09	6	23,19	63	26,28	343	29,38	837	32,47	1034	35,57	1		
17,02	4	20,12	7	23,22	63	26,31	344	29,41	841	32,51	1033	35,60	1		
17,05	5	20,15	6	23,25	63	26,35	347	29,44	842	32,54	1023	35,63	1		
17,09	4	20,18	6	23,28	64	26,38	348	29,47	850	32,57	1020	35,66	1		

## B.2.2 Serie N

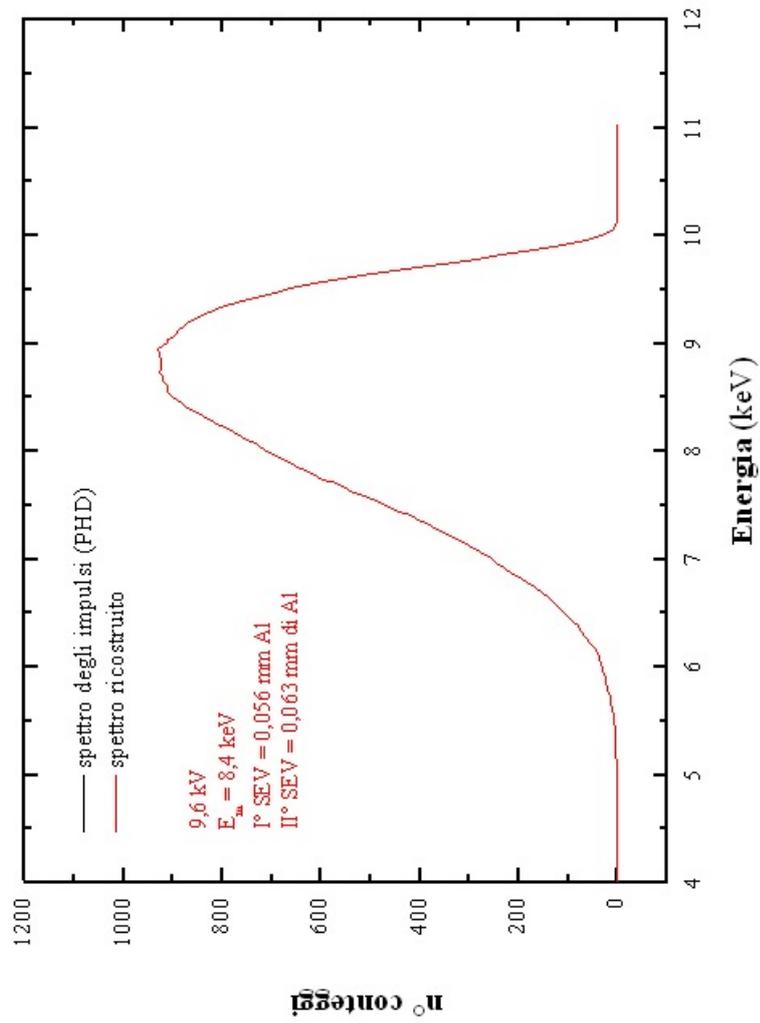
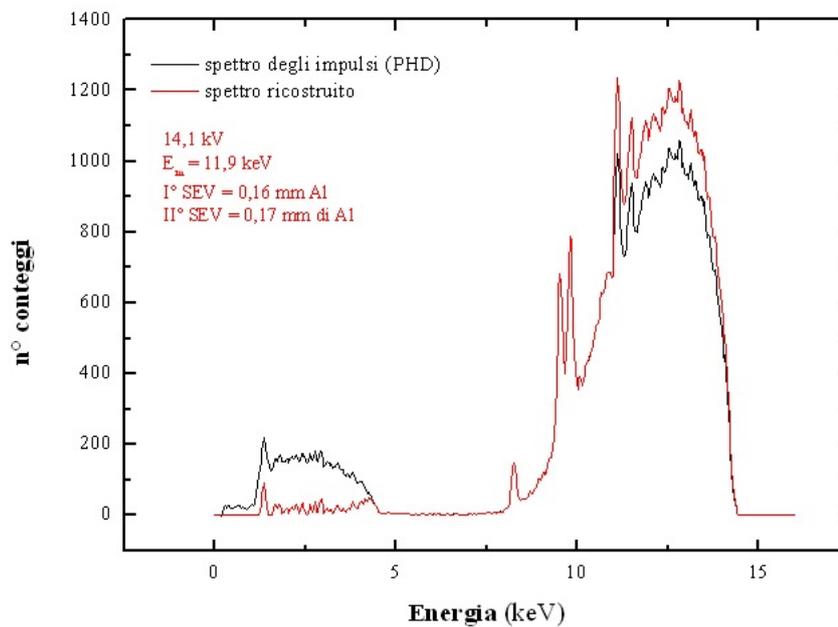


Figura B.21: N10, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	<b>E (keV)</b>	<b>conteggi</b>
4,01	0	5,87	12	7,73	441	9,59	464
4,04	0	5,90	13	7,76	453	9,62	443
4,07	0	5,93	14	7,79	465	9,65	407
4,10	0	5,96	15	7,82	479	9,68	368
4,13	0	5,99	16	7,85	490	9,71	329
4,17	0	6,02	18	7,88	498	9,74	285
4,20	0	6,06	19	7,92	512	9,77	244
4,23	0	6,09	21	7,95	522	9,81	203
4,26	0	6,12	22	7,98	535	9,84	163
4,29	0	6,15	25	8,01	547	9,87	128
4,32	0	6,18	27	8,04	556	9,90	96
4,35	0	6,21	31	8,07	567	9,93	68
4,38	0	6,24	34	8,10	577	9,96	46
4,41	0	6,27	37	8,13	591	9,99	28
4,44	0	6,30	40	8,16	601	10,02	17
4,48	0	6,33	43	8,19	610	10,05	8
4,51	0	6,37	47	8,22	625	10,08	4
4,54	0	6,40	52	8,26	638	10,12	2
4,57	0	6,43	56	8,29	647	10,15	1
4,60	0	6,46	60	8,32	658	10,18	1
4,63	0	6,49	65	8,35	668	10,21	1
4,66	0	6,52	69	8,38	681	10,24	1
4,69	0	6,55	74	8,41	691	10,27	1
4,72	0	6,58	78	8,44	700	10,30	1
4,75	0	6,61	83	8,47	709	10,33	1
4,78	0	6,64	89	8,50	719	10,36	1
4,82	0	6,68	96	8,53	727	10,39	1
4,85	1	6,71	104	8,57	730	10,42	1
4,88	1	6,74	109	8,60	730	10,46	0
4,91	1	6,77	117	8,63	738	10,49	0
4,94	1	6,80	125	8,66	742	10,52	1
4,97	1	6,83	132	8,69	744	10,55	1
5,00	1	6,86	141	8,72	750	10,58	0
5,03	1	6,89	147	8,75	749	10,61	1
5,06	1	6,92	154	8,78	749	10,64	1
5,09	1	6,95	163	8,81	751	10,67	1
5,13	1	6,99	170	8,84	751	10,70	1
5,16	1	7,02	178	8,88	755	10,73	1
5,19	1	7,05	187	8,91	756	10,77	1
5,22	1	7,08	194	8,94	759	10,80	1
5,25	1	7,11	203	8,97	753	10,83	1
5,28	1	7,14	212	9,00	748	10,86	1
5,31	1	7,17	223	9,03	748	10,89	1
5,34	2	7,20	232	9,06	738	10,92	1
5,37	2	7,23	243	9,09	734	10,95	1
5,40	2	7,26	255	9,12	731	10,98	1
5,44	2	7,30	265	9,15	723	11,01	1
5,47	2	7,33	277	9,19	717		
5,50	3	7,36	288	9,22	704		
5,53	3	7,39	297	9,25	696		
5,56	4	7,42	313	9,28	682		
5,59	5	7,45	324	9,31	672		
5,62	5	7,48	335	9,34	657		
5,65	6	7,51	347	9,37	638		
5,68	6	7,54	359	9,40	619		
5,71	7	7,57	371	9,43	598		
5,75	8	7,61	387	9,46	573		



E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
7,02	1	8,88	115	10,73	590	12,59	1002	14,45	57
7,05	1	8,91	114	10,77	620	12,62	1027	14,48	45
7,08	3	8,94	113	10,80	659	12,66	978	14,51	33
7,11	3	8,97	110	10,83	689	12,69	982	14,55	20
7,14	3	9,00	116	10,86	682	12,72	1009	14,58	12
7,17	2	9,03	128	10,89	680	12,75	1007	14,61	8
7,20	2	9,06	144	10,92	668	12,78	977	14,64	5
7,23	4	9,09	151	10,95	661	12,81	941	14,67	4
7,26	7	9,12	141	10,98	658	12,84	915	14,70	5
7,30	8	9,15	138	11,01	676	12,87	884	14,73	5
7,33	8	9,19	152	11,04	735	12,90	852	14,76	2
7,36	9	9,22	169	11,08	822	12,93	842	14,79	1
7,39	10	9,25	184	11,11	926	12,97	784	14,82	0
7,42	10	9,28	180	11,14	993	13,00	748	14,86	0
7,45	7	9,31	187	11,17	992	13,03	694	14,89	1
7,48	7	9,34	202	11,20	929	13,06	700	14,92	1
7,51	7	9,37	239	11,23	854	13,09	688	14,95	1
7,54	6	9,40	257	11,26	801	13,12	692	14,98	1
7,57	6	9,43	306	11,29	768	13,15	689	15,01	2
7,61	7	9,46	378	11,32	744	13,18	676		
7,64	8	9,50	524	11,35	741	13,21	681		
7,67	8	9,53	692	11,39	747	13,24	664		
7,70	10	9,56	766	11,42	778	13,28	658		
7,73	15	9,59	720	11,45	824	13,31	667		
7,76	17	9,62	627	11,48	858	13,34	685		
7,79	18	9,65	541	11,51	854	13,37	663		
7,82	18	9,68	445	11,54	857	13,40	639		
7,85	20	9,71	434	11,57	842	13,43	645		
7,88	24	9,74	515	11,60	809	13,46	638		
7,92	30	9,77	642	11,63	783	13,49	636		
7,95	28	9,81	773	11,66	804	13,52	625		
7,98	31	9,84	853	11,70	835	13,55	611		

Figura B.22: N15, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

(segue) N15, distanza sorgente rivelatore = 200 cm

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
8,01	33	9,87	849	11,73	856	13,59	608		
8,04	37	9,90	738	11,76	846	13,62	585		
8,07	29	9,93	595	11,79	819	13,65	583		
8,10	32	9,96	474	11,82	815	13,68	560		
8,13	42	9,99	424	11,85	844	13,71	559		
8,16	58	10,02	406	11,88	874	13,74	518		
8,19	87	10,05	417	11,91	895	13,77	510		
8,22	151	10,08	415	11,94	903	13,80	503		
8,26	219	10,12	404	11,97	910	13,83	478		
8,29	263	10,15	393	12,01	905	13,86	451		
8,32	256	10,18	407	12,04	870	13,89	453		
8,35	218	10,21	418	12,07	871	13,93	449		
8,38	154	10,24	412	12,10	881	13,96	419		
8,41	102	10,27	417	12,13	899	13,99	376		
8,44	66	10,30	414	12,16	890	14,02	351		
8,47	55	10,33	442	12,19	910	14,05	327		
8,50	60	10,36	469	12,22	938	14,08	330		
8,53	66	10,39	478	12,25	954	14,11	304		
8,57	70	10,42	471	12,28	945	14,14	267		
8,60	68	10,46	488	12,31	938	14,17	226		
8,63	74	10,49	509	12,35	952	14,20	211		
8,66	82	10,52	534	12,38	952	14,24	192		
8,69	78	10,55	546	12,41	943	14,27	166		
8,72	74	10,58	544	12,44	960	14,30	149		
8,75	84	10,61	558	12,47	984	14,33	132		
8,78	104	10,64	574	12,50	1010	14,36	116		
8,81	113	10,67	585	12,53	989	14,39	89		
8,84	113	10,70	576	12,56	1000	14,42	72		

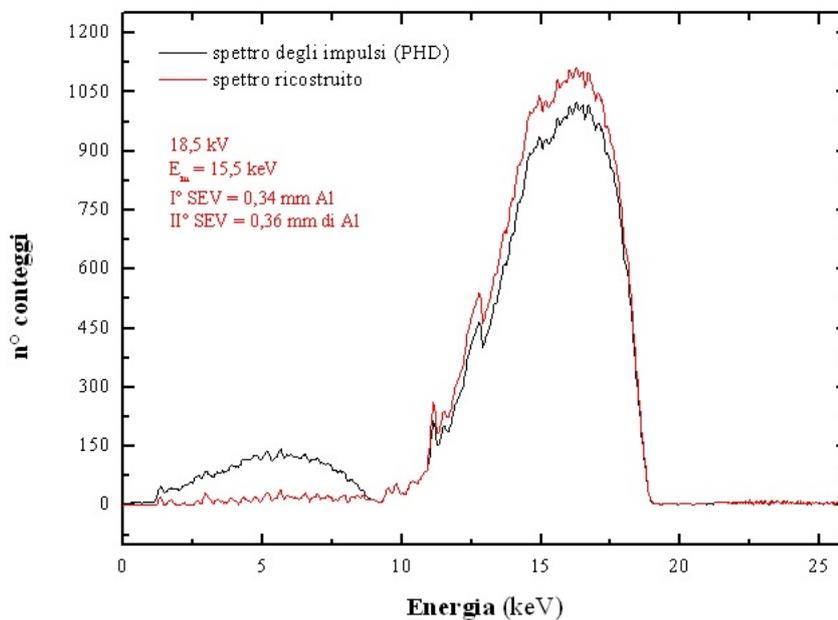
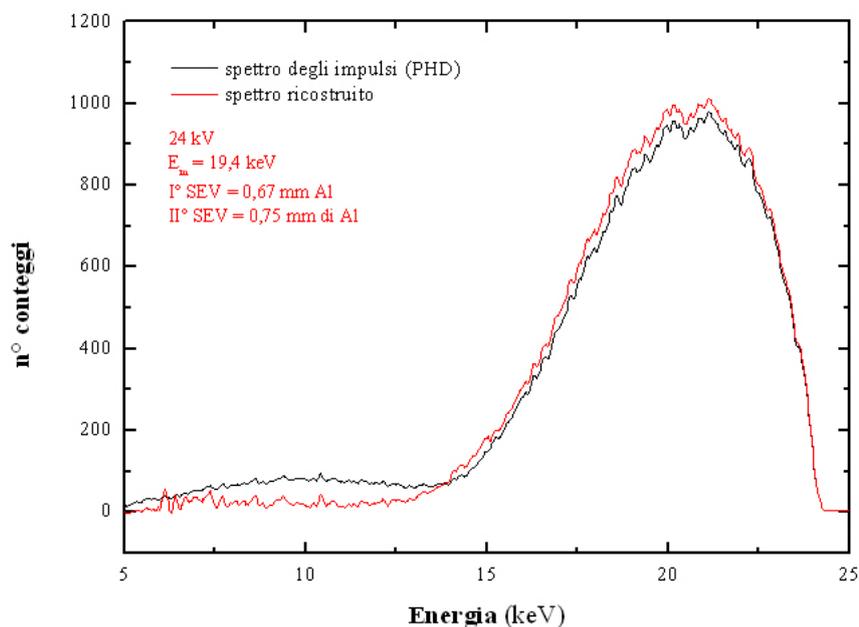


Figura B.23: N20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	<b>E (keV)</b>	<b>conteggi</b>
8,01	0	11,11	91	14,20	637	17,30	855
8,04	1	11,14	94	14,24	646	17,33	845
8,07	1	11,17	99	14,27	650	17,36	839
8,10	2	11,20	101	14,30	656	17,40	833
8,13	1	11,23	101	14,33	663	17,43	826
8,16	3	11,26	102	14,36	669	17,46	825
8,19	3	11,29	100	14,39	674	17,49	819
8,22	4	11,32	100	14,42	682	17,52	809
8,26	5	11,35	103	14,45	683	17,55	797
8,29	7	11,39	104	14,48	690	17,58	787
8,32	8	11,42	105	14,51	695	17,61	774
8,35	9	11,45	107	14,55	701	17,64	764
8,38	10	11,48	110	14,58	708	17,67	752
8,41	13	11,51	111	14,61	716	17,71	738
8,44	14	11,54	115	14,64	723	17,74	726
8,47	17	11,57	118	14,67	730	17,77	709
8,50	16	11,60	118	14,70	743	17,80	693
8,53	18	11,63	119	14,73	757	17,83	676
8,57	19	11,66	121	14,76	766	17,86	658
8,60	19	11,70	121	14,79	777	17,89	644
8,63	18	11,73	124	14,82	786	17,92	626
8,66	18	11,76	125	14,86	792	17,95	615
8,69	18	11,79	131	14,89	798	17,98	600
8,72	17	11,82	135	14,92	803	18,01	585
8,75	15	11,85	139	14,95	807	18,05	573
8,78	13	11,88	141	14,98	817	18,08	552
8,81	11	11,91	144	15,01	826	18,11	537
8,84	9	11,94	146	15,04	825	18,14	519
8,88	8	11,97	149	15,07	831	18,17	498
8,91	7	12,01	152	15,10	839	18,20	479
8,94	7	12,04	155	15,13	842	18,23	456
8,97	6	12,07	158	15,17	845	18,26	437
9,00	5	12,10	166	15,20	854	18,29	410
9,03	5	12,13	169	15,23	863	18,32	385
9,06	4	12,16	171	15,26	871	18,36	357
9,09	4	12,19	177	15,29	880	18,39	325
9,12	3	12,22	182	15,32	883	18,42	297
9,15	4	12,25	188	15,35	882	18,45	264
9,19	4	12,28	192	15,38	891	18,48	234
9,22	5	12,31	196	15,41	890	18,51	205
9,25	5	12,35	202	15,44	895	18,54	173
9,28	6	12,38	207	15,47	902	18,57	145
9,31	6	12,41	213	15,51	906	18,60	117
9,34	8	12,44	215	15,54	908	18,63	93
9,37	10	12,47	224	15,57	914	18,67	71
9,40	12	12,50	231	15,60	918	18,70	52
9,43	14	12,53	236	15,63	916	18,73	38
9,46	15	12,56	241	15,66	917	18,76	27
9,50	16	12,59	243	15,69	927	18,79	18
9,53	17	12,62	251	15,72	934	18,82	12
9,56	18	12,66	261	15,75	936	18,85	7
9,59	20	12,69	270	15,78	936	18,88	6
9,62	21	12,72	275	15,82	939	18,91	4
9,65	23	12,75	280	15,85	942	18,94	3
9,68	23	12,78	286	15,88	946	18,97	2
9,71	23	12,81	288	15,91	945	19,01	2
9,74	23	12,84	294	15,94	946	19,04	2

(segue) N20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
9,77	22	12,87	299	15,97	950	19,07	2
9,81	21	12,90	304	16,00	957	19,10	2
9,84	21	12,93	316	16,03	954	19,13	2
9,87	20	12,97	324	16,06	944	19,16	2
9,90	20	13,00	332	16,09	946	19,19	2
9,93	19	13,03	335	16,13	948	19,22	3
9,96	18	13,06	346	16,16	946	19,25	2
9,99	16	13,09	351	16,19	946	19,28	3
10,02	15	13,12	359	16,22	946	19,32	2
10,05	15	13,15	368	16,25	947	19,35	2
10,08	15	13,18	377	16,28	946	19,38	3
10,12	16	13,21	384	16,31	946	19,41	3
10,15	16	13,24	392	16,34	946	19,44	3
10,18	17	13,28	392	16,37	951	19,47	3
10,21	19	13,31	400	16,40	957	19,50	3
10,24	21	13,34	403	16,44	958	19,53	2
10,27	22	13,37	413	16,47	961	19,56	2
10,30	22	13,40	419	16,50	962	19,59	2
10,33	23	13,43	427	16,53	968	19,63	2
10,36	25	13,46	432	16,56	966	19,66	2
10,39	25	13,49	439	16,59	964	19,69	2
10,42	26	13,52	449	16,62	961	19,72	2
10,46	27	13,55	460	16,65	961	19,75	2
10,49	29	13,59	474	16,68	952	19,78	2
10,52	31	13,62	485	16,71	943	19,81	2
10,55	31	13,65	493	16,74	939	19,84	2
10,58	32	13,68	500	16,78	933	19,87	3
10,61	33	13,71	504	16,81	924	19,90	3
10,64	36	13,74	511	16,84	919	19,94	2
10,67	39	13,77	521	16,87	914	19,97	3
10,70	41	13,80	535	16,90	906	20,00	3
10,73	44	13,83	541	16,93	904		
10,77	48	13,86	547	16,96	906		
10,80	49	13,89	551	16,99	903		
10,83	49	13,93	558	17,02	901		
10,86	50	13,96	569	17,05	900		
10,89	56	13,99	574	17,09	897		
10,92	63	14,02	587	17,12	888		
10,95	71	14,05	596	17,15	886		
10,98	77	14,08	602	17,18	883		
11,01	81	14,11	614	17,21	876		
11,04	86	14,14	619	17,24	875		
11,08	89	14,17	630	17,27	865		

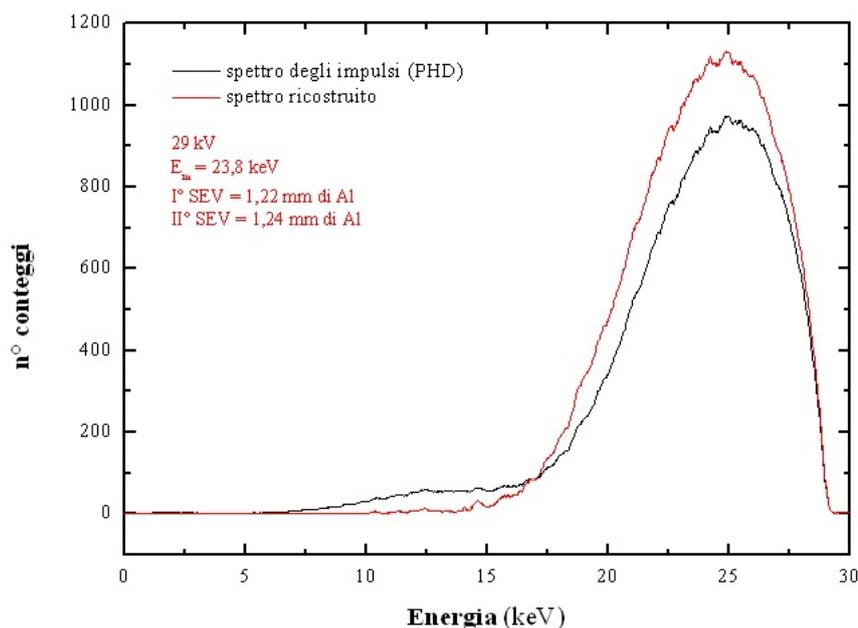


E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
5,00	0	8,10	10	11,20	14	14,30	91	17,40	522	20,49	914	23,59	404
5,03	0	8,13	9	11,23	11	14,33	90	17,43	532	20,52	916	23,62	396
5,06	0	8,16	7	11,26	10	14,36	87	17,46	541	20,55	928	23,65	386
5,09	0	8,19	8	11,29	11	14,39	86	17,49	553	20,59	939	23,68	375
5,13	0	8,22	9	11,32	13	14,42	87	17,52	565	20,62	941	23,71	358
5,16	0	8,26	11	11,35	13	14,45	89	17,55	570	20,65	937	23,74	342
5,19	1	8,29	11	11,39	12	14,48	95	17,58	569	20,68	933	23,78	322
5,22	1	8,32	11	11,42	10	14,51	101	17,61	573	20,71	932	23,81	296
5,25	3	8,35	7	11,45	10	14,55	105	17,64	580	20,74	938	23,84	270
5,28	3	8,38	8	11,48	15	14,58	107	17,67	590	20,77	947	23,87	249
5,31	5	8,41	8	11,51	19	14,61	109	17,71	607	20,80	958	23,90	222
5,34	5	8,44	10	11,54	19	14,64	110	17,74	623	20,83	963	23,93	198
5,37	4	8,47	11	11,57	17	14,67	110	17,77	627	20,86	962	23,96	175
5,40	2	8,50	12	11,60	17	14,70	114	17,80	624	20,90	962	23,99	146
5,44	2	8,53	13	11,63	17	14,73	118	17,83	622	20,93	962	24,02	117
5,47	1	8,57	16	11,66	16	14,76	120	17,86	626	20,96	955	24,05	93
5,50	3	8,60	18	11,70	16	14,79	123	17,89	638	20,99	955	24,08	71
5,53	5	8,63	17	11,73	13	14,82	127	17,92	641	21,02	956	24,12	53
5,56	7	8,66	14	11,76	12	14,86	132	17,95	648	21,05	962	24,15	40
5,59	9	8,69	9	11,79	13	14,89	136	17,98	648	21,08	973	24,18	30
5,62	9	8,72	8	11,82	15	14,92	141	18,01	637	21,11	978	24,21	21
5,65	9	8,75	8	11,85	14	14,95	146	18,05	637	21,14	976	24,24	13
5,68	7	8,78	10	11,88	16	14,98	146	18,08	651	21,17	976	24,27	8
5,71	6	8,81	10	11,91	14	15,01	146	18,11	658	21,20	968	24,30	5
5,75	5	8,84	8	11,94	15	15,04	152	18,14	670	21,24	962	24,33	4
5,78	6	8,88	5	11,97	16	15,07	155	18,17	680	21,27	960	24,36	3
5,81	6	8,91	4	12,01	17	15,10	156	18,20	686	21,30	956	24,39	3
5,84	5	8,94	5	12,04	16	15,13	164	18,23	685	21,33	948	24,43	4
5,87	3	8,97	7	12,07	19	15,17	170	18,26	686	21,36	951	24,46	4
5,90	3	9,00	8	12,10	20	15,20	174	18,29	694	21,39	944	24,49	5
5,93	2	9,03	8	12,13	23	15,23	182	18,32	702	21,42	937	24,52	4
5,96	0	9,06	8	12,16	22	15,26	182	18,36	712	21,45	930	24,55	4
5,99	2	9,09	8	12,19	20	15,29	181	18,39	727	21,48	927	24,58	3
6,02	4	9,12	10	12,22	14	15,32	181	18,42	736	21,51	925	24,61	3
6,06	4	9,15	13	12,25	11	15,35	183	18,45	735	21,55	933	24,64	3
6,09	7	9,19	14	12,28	10	15,38	184	18,48	739	21,58	931	24,67	3
6,12	10	9,22	15	12,31	15	15,41	191	18,51	751	21,61	927	24,70	3
6,15	8	9,25	15	12,35	18	15,44	196	18,54	764	21,64	913	24,73	3
6,18	6	9,28	16	12,38	21	15,47	204	18,57	774	21,67	909	24,77	3
6,21	4	9,31	16	12,41	22	15,51	211	18,60	773	21,70	904	24,80	3
6,24	1	9,34	18	12,44	21	15,54	217	18,63	764	21,73	907	24,83	3
6,27	0	9,37	20	12,47	20	15,57	219	18,67	755	21,76	903	24,86	3
6,30	0	9,40	22	12,50	21	15,60	219	18,70	751	21,79	896	24,89	3
6,33	3	9,43	19	12,53	22	15,63	227	18,73	759	21,82	888	24,92	3
6,37	7	9,46	18	12,56	22	15,66	230	18,76	771	21,86	888	24,95	3
6,40	9	9,50	16	12,59	21	15,69	231	18,79	780	21,89	897	24,98	3
6,43	7	9,53	13	12,62	20	15,72	236	18,82	790	21,92	899	25,01	3
6,46	7	9,56	12	12,66	19	15,75	243	18,85	797	21,95	893	25,04	4
6,49	3	9,59	12	12,69	20	15,78	248	18,88	801	21,98	879	25,08	4
6,52	1	9,62	10	12,72	19	15,82	254	18,91	810	22,01	866	25,11	4
6,55	2	9,65	10	12,75	18	15,85	262	18,94	816	22,04	853	25,14	4
6,58	4	9,68	11	12,78	19	15,88	267	18,97	826	22,07	848	25,17	3
6,61	4	9,71	13	12,81	21	15,91	272	19,01	840	22,10	846	25,20	3
6,64	7	9,74	15	12,84	24	15,94	273	19,04	840	22,13	850	25,23	4
6,68	9	9,77	14	12,87	25	15,97	280	19,07	844	22,16	855	25,26	4
6,71	9	9,81	13	12,90	25	16,00	283	19,10	839	22,20	863	25,29	5

Figura B.24:  $N_{25}$ , distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

(segue) N25, distanza sorgente rivelatore = 200 cm

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
6,74	7	9,84	13	12,93	23	16,03	289	19,13	833	22,23	866	25,32	5
6,77	7	9,87	12	12,97	22	16,06	295	19,16	833	22,26	863	25,35	4
6,80	6	9,90	13	13,00	23	16,09	293	19,19	837	22,29	853	25,39	3
6,83	7	9,93	13	13,03	24	16,13	289	19,22	835	22,32	844	25,42	2
6,86	7	9,96	11	13,06	27	16,16	291	19,25	843	22,35	822	25,45	2
6,89	10	9,99	10	13,09	29	16,19	299	19,28	853	22,38	806	25,48	2
6,92	10	10,02	10	13,12	31	16,22	315	19,32	859	22,41	790	25,51	4
6,95	10	10,05	9	13,15	33	16,25	326	19,35	876	22,44	784	25,54	5
6,99	10	10,08	8	13,18	35	16,28	332	19,38	875	22,47	779	25,57	5
7,02	9	10,12	8	13,21	36	16,31	334	19,41	871	22,51	779	25,60	5
7,05	9	10,15	10	13,24	38	16,34	332	19,44	863	22,54	776	25,63	4
7,08	9	10,18	12	13,28	38	16,37	328	19,47	859	22,57	770	25,66	3
7,11	7	10,21	15	13,31	37	16,40	332	19,50	854	22,60	764	25,69	2
7,14	7	10,24	14	13,34	36	16,44	339	19,53	860	22,63	751	25,73	2
7,17	10	10,27	11	13,37	36	16,47	348	19,56	866	22,66	738	25,76	2
7,20	9	10,30	9	13,40	37	16,50	360	19,59	878	22,69	723	25,79	3
7,23	11	10,33	13	13,43	37	16,53	369	19,63	888	22,72	721	25,82	3
7,26	12	10,36	19	13,46	38	16,56	375	19,66	897	22,75	719	25,85	3
7,30	14	10,39	26	13,49	40	16,59	378	19,69	898	22,78	723	25,88	3
7,33	15	10,42	29	13,52	41	16,62	380	19,72	894	22,82	722	25,91	3
7,36	17	10,46	25	13,55	42	16,65	378	19,75	895	22,85	712	25,94	3
7,39	15	10,49	19	13,59	45	16,68	375	19,78	904	22,88	693	25,97	4
7,42	12	10,52	15	13,62	47	16,71	377	19,81	911	22,91	683	26,00	5
7,45	9	10,55	10	13,65	48	16,74	388	19,84	923	22,94	671	26,04	4
7,48	6	10,58	11	13,68	48	16,78	401	19,87	935	22,97	658	26,07	4
7,51	4	10,61	13	13,71	49	16,81	420	19,90	940	23,00	648	26,10	3
7,54	3	10,64	13	13,74	50	16,84	430	19,94	943	23,03	637	26,13	2
7,57	4	10,67	14	13,77	52	16,87	436	19,97	946	23,06	618	26,16	2
7,61	6	10,70	17	13,80	55	16,90	441	20,00	940	23,09	600	26,19	2
7,64	10	10,73	17	13,83	56	16,93	444	20,03	929	23,12	590	26,22	3
7,67	12	10,77	19	13,86	55	16,96	446	20,06	934	23,16	579	26,25	4
7,70	14	10,80	17	13,89	56	16,99	451	20,09	940	23,19	566	26,28	4
7,73	13	10,83	15	13,93	56	17,02	454	20,12	956	23,22	558	26,31	4
7,76	10	10,86	13	13,96	60	17,05	458	20,15	956	23,25	549	26,35	4
7,79	6	10,89	10	13,99	63	17,09	468	20,18	956	23,28	542	26,38	3
7,82	5	10,92	10	14,02	70	17,12	472	20,21	943	23,31	537	26,41	3
7,85	5	10,95	9	14,05	75	17,15	480	20,24	942	23,34	526	26,44	3
7,88	7	10,98	10	14,08	79	17,18	486	20,28	941	23,37	511	26,47	3
7,92	9	11,01	10	14,11	79	17,21	498	20,31	949	23,40	489	26,50	3
7,95	9	11,04	9	14,14	78	17,24	509	20,34	943	23,43	462		
7,98	7	11,08	8	14,17	77	17,27	523	20,37	939	23,47	442		
8,01	9	11,11	10	14,20	82	17,30	530	20,40	926	23,50	425		
8,04	10	11,14	11	14,24	87	17,33	531	20,43	919	23,53	411		
8,07	10	11,17	14	14,27	89	17,36	524	20,46	914	23,56	406		

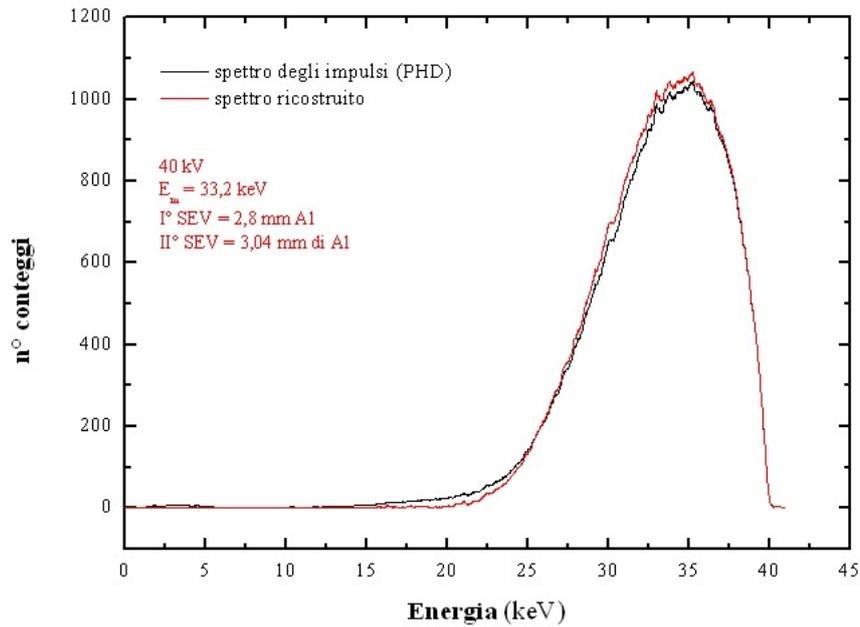


E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
10.02	2	13.12	6	16.22	45	19.32	369	22.41	920	25.51	1105	28.61	345
10.05	2	13.15	5	16.25	46	19.35	372	22.44	927	25.54	1093	28.64	327
10.08	2	13.18	5	16.28	48	19.38	378	22.47	930	25.57	1087	28.67	312
10.12	1	13.21	6	16.31	52	19.41	380	22.51	936	25.60	1086	28.70	293
10.15	1	13.24	7	16.34	54	19.44	384	22.54	944	25.63	1081	28.73	271
10.18	3	13.28	8	16.37	58	19.47	389	22.57	947	25.66	1085	28.76	247
10.21	3	13.31	7	16.40	56	19.50	398	22.60	945	25.69	1086	28.79	227
10.24	3	13.34	7	16.44	56	19.53	407	22.63	950	25.73	1084	28.82	204
10.27	5	13.37	6	16.47	55	19.56	414	22.66	950	25.76	1076	28.85	181
10.30	6	13.40	6	16.50	60	19.59	423	22.69	943	25.79	1078	28.88	159
10.33	6	13.43	5	16.53	63	19.63	427	22.72	938	25.82	1071	28.91	136
10.36	5	13.46	6	16.56	68	19.66	429	22.75	944	25.85	1070	28.95	116
10.39	5	13.49	7	16.59	69	19.69	437	22.78	947	25.88	1070	28.98	95
10.42	6	13.52	6	16.62	75	19.72	441	22.82	955	25.91	1072	29.01	76
10.46	5	13.55	6	16.65	77	19.75	442	22.85	961	25.94	1071	29.04	60
10.49	5	13.59	6	16.68	78	19.78	449	22.88	958	25.97	1072	29.07	46
10.52	4	13.62	4	16.71	77	19.81	456	22.91	962	26.00	1072	29.10	35
10.55	5	13.65	4	16.74	82	19.84	460	22.94	965	26.04	1066	29.13	24
10.58	4	13.68	5	16.78	82	19.87	460	22.97	974	26.07	1064	29.16	18
10.61	2	13.71	5	16.81	85	19.90	462	23.00	983	26.10	1062	29.19	12
10.64	2	13.74	5	16.84	85	19.94	462	23.03	995	26.13	1062	29.22	9
10.67	2	13.77	6	16.87	85	19.97	469	23.06	1000	26.16	1057	29.26	5
10.70	2	13.80	6	16.90	83	20.00	472	23.09	997	26.19	1052	29.29	4
10.73	1	13.83	6	16.93	85	20.03	474	23.12	1004	26.22	1048	29.32	4
10.77	1	13.86	6	16.96	87	20.06	479	23.16	1000	26.25	1044	29.35	2
10.80	1	13.89	6	16.99	87	20.09	488	23.19	1006	26.28	1039	29.38	2
10.83	2	13.93	6	17.02	83	20.12	491	23.22	1011	26.31	1030	29.41	2
10.86	2	13.96	7	17.05	86	20.15	498	23.25	1014	26.35	1020	29.44	2
10.89	2	13.99	7	17.09	87	20.18	500	23.28	1021	26.38	1019	29.47	3
10.92	3	14.02	14	17.12	91	20.21	510	23.31	1023	26.41	1019	29.50	3
10.95	2	14.05	17	17.15	95	20.24	519	23.34	1023	26.44	1020	29.53	3
10.98	3	14.08	16	17.18	98	20.28	525	23.37	1028	26.47	1009	29.56	3
11.01	4	14.11	13	17.21	101	20.31	526	23.40	1032	26.50	1007	29.60	3
11.04	4	14.14	11	17.24	109	20.34	536	23.43	1037	26.53	1003	29.63	3
11.08	4	14.17	8	17.27	110	20.37	540	23.47	1036	26.56	996	29.66	3
11.11	4	14.20	11	17.30	112	20.40	546	23.50	1050	26.59	990	29.69	3
11.14	4	14.24	9	17.33	115	20.43	551	23.53	1056	26.62	981	29.72	3
11.17	4	14.27	9	17.36	124	20.46	557	23.56	1056	26.65	976	29.75	3
11.20	4	14.30	9	17.40	127	20.49	560	23.59	1062	26.69	969	29.78	3
11.23	5	14.33	12	17.43	130	20.52	566	23.62	1063	26.72	964	29.81	3
11.26	5	14.36	16	17.46	134	20.55	575	23.65	1065	26.75	955	29.84	3
11.29	7	14.39	15	17.49	134	20.59	580	23.68	1064	26.78	943	29.87	3
11.32	7	14.42	17	17.52	138	20.62	590	23.71	1058	26.81	934	29.91	3
11.35	6	14.45	23	17.55	137	20.65	597	23.74	1060	26.84	928	29.94	3
11.39	5	14.48	24	17.58	137	20.68	598	23.78	1070	26.87	919	29.97	3
11.42	6	14.51	28	17.61	140	20.71	604	23.81	1074	26.90	915	30.00	4
11.45	6	14.55	29	17.64	143	20.74	618	23.84	1066	26.93	904	30.03	4
11.48	4	14.58	32	17.67	146	20.77	627	23.87	1063	26.96	900	30.06	4
11.51	4	14.61	33	17.71	147	20.80	632	23.90	1069	27.00	898	30.09	4
11.54	5	14.64	32	17.74	150	20.83	637	23.93	1073	27.03	898	30.12	3
11.57	3	14.67	32	17.77	152	20.86	648	23.96	1080	27.06	892	30.15	3
11.60	3	14.70	30	17.80	157	20.90	653	23.99	1082	27.09	887	30.18	3
11.63	3	14.73	28	17.83	162	20.93	658	24.02	1094	27.12	885	30.21	3
11.66	2	14.76	26	17.86	166	20.96	666	24.05	1098	27.15	875	30.25	3
11.70	3	14.79	24	17.89	170	20.99	675	24.08	1102	27.18	863	30.28	3

Figura B.25: *N30*, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

(segue) N30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
11,73	4	14,82	23	17,92	174	21,02	686	24,12	1101	27,21	865	30,31	3
11,76	4	14,86	21	17,95	177	21,05	696	24,15	1104	27,24	855	30,34	4
11,79	5	14,89	19	17,98	182	21,08	697	24,18	1114	27,27	851	30,37	4
11,82	6	14,92	20	18,01	188	21,11	696	24,21	1116	27,30	847	30,40	4
11,85	7	14,95	18	18,05	190	21,14	702	24,24	1121	27,34	834	30,43	4
11,88	6	14,98	19	18,08	191	21,17	708	24,27	1113	27,37	823	30,46	4
11,91	8	15,01	16	18,11	196	21,20	710	24,30	1103	27,40	815	30,49	4
11,94	8	15,04	17	18,14	196	21,24	710	24,33	1105	27,43	807	30,52	4
11,97	7	15,07	17	18,17	199	21,27	716	24,36	1101	27,46	794	30,56	4
12,01	8	15,10	18	18,20	199	21,30	721	24,39	1104	27,49	793	30,59	4
12,04	8	15,13	21	18,23	208	21,33	723	24,43	1103	27,52	792	30,62	4
12,07	7	15,17	21	18,26	209	21,36	728	24,46	1096	27,55	777	30,65	3
12,10	8	15,20	21	18,29	211	21,39	731	24,49	1102	27,58	768	30,68	3
12,13	7	15,23	21	18,32	211	21,42	737	24,52	1098	27,61	760	30,71	3
12,16	8	15,26	19	18,36	211	21,45	744	24,55	1097	27,65	745	30,74	3
12,19	8	15,29	22	18,39	216	21,48	748	24,58	1099	27,68	741	30,77	3
12,22	9	15,32	23	18,42	225	21,51	760	24,61	1101	27,71	733	30,80	3
12,25	9	15,35	26	18,45	229	21,55	766	24,64	1112	27,74	720	30,83	3
12,28	10	15,38	26	18,48	237	21,58	774	24,67	1109	27,77	710	30,86	2
12,31	11	15,41	30	18,51	245	21,61	780	24,70	1109	27,80	703	30,90	3
12,35	10	15,44	35	18,54	256	21,64	782	24,73	1112	27,83	693	30,93	2
12,38	12	15,47	31	18,57	256	21,67	788	24,77	1123	27,86	679	30,96	2
12,41	12	15,51	35	18,60	266	21,70	796	24,80	1128	27,89	668	30,99	2
12,44	13	15,54	38	18,63	274	21,73	799	24,83	1128	27,92	663	31,02	2
12,47	12	15,57	40	18,67	281	21,76	808	24,86	1131	27,95	651		
12,50	12	15,60	41	18,70	291	21,79	823	24,89	1133	27,99	639		
12,53	11	15,63	43	18,73	297	21,82	834	24,92	1129	28,02	625		
12,56	10	15,66	41	18,76	303	21,86	831	24,95	1130	28,05	617		
12,59	9	15,69	44	18,79	308	21,89	835	24,98	1129	28,08	609		
12,62	8	15,72	47	18,82	313	21,92	840	25,01	1128	28,11	593		
12,66	7	15,75	45	18,85	314	21,95	844	25,04	1125	28,14	577		
12,69	8	15,78	42	18,88	314	21,98	845	25,08	1117	28,17	562		
12,72	8	15,82	47	18,91	323	22,01	856	25,11	1112	28,20	553		
12,75	8	15,85	44	18,94	326	22,04	858	25,14	1108	28,23	540		
12,78	6	15,88	44	18,97	329	22,07	871	25,17	1100	28,26	522		
12,81	7	15,91	45	19,01	334	22,10	872	25,20	1105	28,30	509		
12,84	7	15,94	44	19,04	334	22,13	869	25,23	1108	28,33	495		
12,87	7	15,97	41	19,07	340	22,16	865	25,26	1107	28,36	480		
12,90	6	16,00	44	19,10	343	22,20	871	25,29	1109	28,39	461		
12,93	7	16,03	42	19,13	347	22,23	882	25,32	1102	28,42	444		
12,97	7	16,06	43	19,16	347	22,26	891	25,35	1099	28,45	430		
13,00	6	16,09	46	19,19	349	22,29	894	25,39	1101	28,48	416		
13,03	6	16,13	48	19,22	353	22,32	903	25,42	1106	28,51	400		
13,06	6	16,16	45	19,25	354	22,35	911	25,45	1100	28,54	381		
13,09	6	16,19	46	19,28	360	22,38	919	25,48	1106	28,57	364		



E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
19.01	0	22.10	21	25.20	144	28.30	443	31.39	843	34.49	1043	37.58	840
19.04	2	22.13	22	25.23	146	28.33	451	31.42	844	34.52	1044	37.61	826
19.07	2	22.16	25	25.26	149	28.36	456	31.45	845	34.55	1040	37.64	829
19.10	2	22.20	27	25.29	154	28.39	457	31.48	845	34.58	1040	37.67	819
19.13	2	22.23	28	25.32	160	28.42	463	31.51	855	34.61	1047	37.70	819
19.16	1	22.26	28	25.35	161	28.45	470	31.55	857	34.64	1044	37.74	813
19.19	1	22.29	30	25.39	162	28.48	477	31.58	854	34.67	1054	37.77	808
19.22	2	22.32	31	25.42	166	28.51	485	31.61	861	34.70	1052	37.80	803
19.25	4	22.35	34	25.45	170	28.54	489	31.64	859	34.73	1054	37.83	796
19.28	5	22.38	33	25.48	173	28.57	493	31.67	863	34.76	1053	37.86	784
19.32	5	22.41	34	25.51	175	28.61	497	31.70	865	34.80	1050	37.89	780
19.35	3	22.44	35	25.54	179	28.64	502	31.73	873	34.83	1050	37.92	771
19.38	2	22.47	37	25.57	179	28.67	501	31.76	881	34.86	1047	37.95	765
19.41	1	22.51	36	25.60	180	28.70	507	31.79	884	34.89	1047	37.98	759
19.44	1	22.54	36	25.63	183	28.73	515	31.82	893	34.92	1043	38.01	753
19.47	2	22.57	36	25.66	188	28.76	516	31.86	889	34.95	1051	38.05	741
19.50	3	22.60	34	25.69	190	28.79	516	31.89	895	34.98	1052	38.08	732
19.53	2	22.63	35	25.73	194	28.82	521	31.92	903	35.01	1050	38.11	720
19.56	2	22.66	36	25.76	197	28.85	524	31.95	903	35.04	1057	38.14	712
19.59	2	22.69	35	25.79	199	28.88	525	31.98	911	35.07	1057	38.17	710
19.63	2	22.72	36	25.82	200	28.91	534	32.01	915	35.11	1060	38.20	707
19.66	2	22.75	36	25.85	201	28.95	539	32.04	916	35.14	1062	38.23	699
19.69	4	22.78	36	25.88	202	28.98	545	32.07	912	35.17	1063	38.26	690
19.72	5	22.82	37	25.91	206	29.01	552	32.10	914	35.20	1061	38.29	684
19.75	5	22.85	38	25.94	213	29.04	555	32.13	916	35.23	1065	38.32	667
19.78	4	22.88	39	25.97	214	29.07	556	32.16	919	35.26	1067	38.35	658
19.81	3	22.91	40	26.00	213	29.10	561	32.20	926	35.29	1057	38.39	650
19.84	3	22.94	43	26.04	216	29.13	569	32.23	926	35.32	1056	38.42	644
19.87	4	22.97	42	26.07	217	29.16	568	32.26	925	35.35	1048	38.45	643
19.90	4	23.00	42	26.10	220	29.19	575	32.29	925	35.38	1043	38.48	636
19.94	4	23.03	45	26.13	222	29.22	583	32.32	929	35.41	1039	38.51	622
19.97	4	23.06	45	26.16	224	29.26	579	32.35	929	35.45	1037	38.54	617
20.00	5	23.09	45	26.19	230	29.29	580	32.38	936	35.48	1035	38.57	607
20.03	4	23.12	48	26.22	231	29.32	582	32.41	948	35.51	1031	38.60	597
20.06	4	23.16	48	26.25	234	29.35	587	32.44	956	35.54	1038	38.63	586
20.09	4	23.19	48	26.28	236	29.38	588	32.47	959	35.57	1038	38.66	582
20.12	7	23.22	49	26.31	236	29.41	594	32.51	961	35.60	1039	38.70	576
20.15	6	23.25	50	26.35	241	29.44	601	32.54	963	35.63	1036	38.73	570
20.18	5	23.28	50	26.38	247	29.47	599	32.57	957	35.66	1036	38.76	557
20.21	5	23.31	52	26.41	251	29.50	606	32.60	959	35.69	1037	38.79	541
20.24	5	23.34	54	26.44	252	29.53	603	32.63	960	35.72	1028	38.82	531
20.28	5	23.37	53	26.47	257	29.56	607	32.66	959	35.76	1032	38.85	522
20.31	4	23.40	54	26.50	262	29.60	617	32.69	967	35.79	1026	38.88	508
20.34	4	23.43	58	26.53	264	29.63	624	32.72	975	35.82	1028	38.91	496
20.37	5	23.47	57	26.56	267	29.66	632	32.75	972	35.85	1028	38.94	487
20.40	5	23.50	56	26.59	268	29.69	635	32.78	969	35.88	1020	38.97	482
20.43	6	23.53	58	26.62	273	29.72	639	32.81	974	35.91	1014	39.00	473
20.46	6	23.56	60	26.65	282	29.75	640	32.85	979	35.94	1009	39.04	464
20.49	7	23.59	61	26.69	281	29.78	646	32.88	991	35.97	1007	39.07	452
20.52	9	23.62	61	26.72	283	29.81	655	32.91	1001	36.00	1009	39.10	445
20.55	10	23.65	60	26.75	285	29.84	657	32.94	1004	36.03	1002	39.13	434
20.59	11	23.68	62	26.78	286	29.87	665	32.97	1014	36.06	1000	39.16	425
20.62	11	23.71	64	26.81	287	29.91	674	33.00	1018	36.10	994	39.19	414
20.65	11	23.74	67	26.84	287	29.94	679	33.03	1021	36.13	995	39.22	405
20.68	11	23.78	66	26.87	289	29.97	686	33.06	1010	36.16	990	39.25	397
20.71	11	23.81	68	26.90	293	30.00	684	33.09	1007	36.19	989	39.28	381

Figura B.26:  $N_40$ , distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

(segue) N40, distanza sorgente rivelatore = 200 cm

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
20,74	10	23,84	70	26,93	298	30,03	688	33,12	1008	36,22	992	39,31	367
20,77	11	23,87	71	26,96	299	30,06	697	33,16	1008	36,25	994	39,34	351
20,80	10	23,90	71	27,00	302	30,09	699	33,19	1005	36,28	990	39,38	338
20,83	12	23,93	75	27,03	306	30,12	698	33,22	998	36,31	996	39,41	323
20,86	10	23,96	77	27,06	312	30,15	696	33,25	995	36,34	993	39,44	308
20,90	12	23,99	79	27,09	317	30,18	695	33,28	998	36,37	1000	39,47	290
20,93	12	24,02	78	27,12	325	30,21	699	33,31	998	36,41	996	39,50	274
20,96	13	24,05	79	27,15	330	30,25	698	33,34	999	36,44	991	39,53	258
20,99	13	24,08	82	27,18	336	30,28	699	33,37	996	36,47	987	39,56	238
21,02	15	24,12	83	27,21	337	30,31	694	33,40	998	36,50	987	39,59	218
21,05	16	24,15	85	27,24	342	30,34	698	33,43	1008	36,53	986	39,62	204
21,08	17	24,18	87	27,27	343	30,37	697	33,46	1015	36,56	977	39,65	185
21,11	14	24,21	90	27,30	347	30,40	702	33,50	1018	36,59	963	39,69	168
21,14	13	24,24	90	27,34	349	30,43	705	33,53	1026	36,62	961	39,72	149
21,17	12	24,27	91	27,37	353	30,46	708	33,56	1022	36,65	953	39,75	131
21,20	12	24,30	92	27,40	354	30,49	715	33,59	1024	36,68	948	39,78	113
21,24	11	24,33	96	27,43	356	30,52	719	33,62	1026	36,71	940	39,81	99
21,27	9	24,36	98	27,46	356	30,56	721	33,65	1029	36,75	939	39,84	82
21,30	9	24,39	98	27,49	358	30,59	726	33,68	1035	36,78	940	39,87	68
21,33	10	24,43	98	27,52	356	30,62	726	33,71	1038	36,81	934	39,90	56
21,36	9	24,46	99	27,55	359	30,65	733	33,74	1040	36,84	928	39,93	46
21,39	9	24,49	100	27,58	361	30,68	737	33,77	1042	36,87	924	39,96	36
21,42	9	24,52	101	27,61	368	30,71	745	33,81	1041	36,90	919	39,99	28
21,45	10	24,55	101	27,65	371	30,74	746	33,84	1046	36,93	921	40,03	21
21,48	11	24,58	105	27,68	372	30,77	754	33,87	1036	36,96	915	40,06	14
21,51	12	24,61	105	27,71	376	30,80	761	33,90	1035	36,99	913	40,09	10
21,55	13	24,64	109	27,74	380	30,83	766	33,93	1033	37,02	909	40,12	7
21,58	14	24,67	109	27,77	380	30,86	770	33,96	1030	37,05	909	40,15	5
21,61	15	24,70	111	27,80	386	30,90	778	33,99	1029	37,09	910	40,18	4
21,64	17	24,73	114	27,83	395	30,93	777	34,02	1026	37,12	902	40,21	3
21,67	17	24,77	120	27,86	402	30,96	789	34,05	1031	37,15	901	40,24	3
21,70	17	24,80	124	27,89	408	30,99	795	34,08	1034	37,18	899	40,27	3
21,73	17	24,83	125	27,92	413	31,02	797	34,11	1027	37,21	893	40,30	2
21,76	17	24,86	129	27,95	415	31,05	802	34,15	1028	37,24	888	40,33	3
21,79	18	24,89	132	27,99	416	31,08	803	34,18	1028	37,27	889	40,37	3
21,82	17	24,92	132	28,02	420	31,11	805	34,21	1035	37,30	884	40,40	3
21,86	16	24,95	132	28,05	424	31,14	808	34,24	1041	37,33	880	40,43	3
21,89	17	24,98	132	28,08	426	31,17	811	34,27	1044	37,36	872	40,46	3
21,92	18	25,01	135	28,11	433	31,21	820	34,30	1046	37,40	865	40,49	3
21,95	17	25,04	137	28,14	435	31,24	823	34,33	1043	37,43	859	40,52	3
21,98	17	25,08	138	28,17	433	31,27	829	34,36	1045	37,46	854	40,55	3
22,01	17	25,11	136	28,20	436	31,30	832	34,39	1040	37,49	852	40,58	3
22,04	19	25,14	138	28,23	438	31,33	835	34,42	1039	37,52	846	40,61	3
22,07	20	25,17	142	28,26	439	31,36	843	34,46	1045	37,55	839	40,64	3

### B.2.3 Serie H

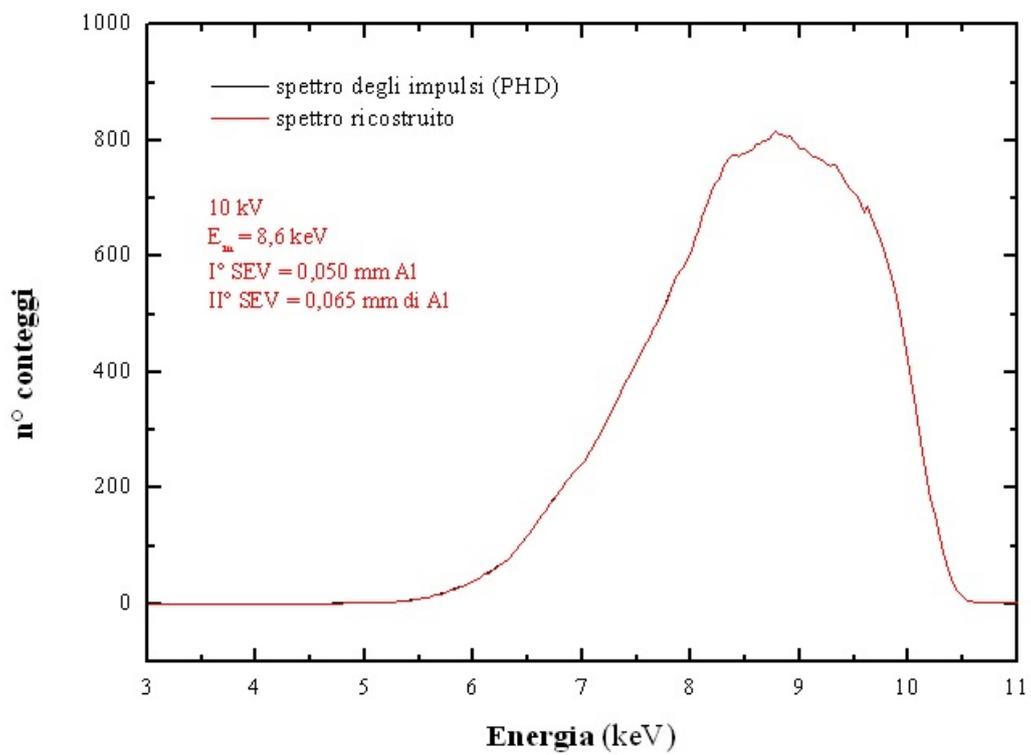
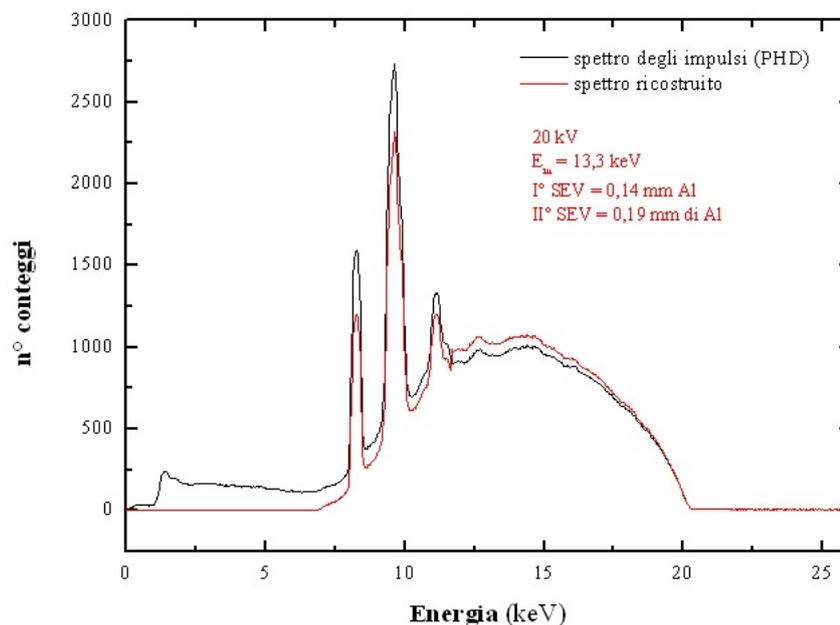


Figura B.27: H10, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
3,02	0	4,57	0	6,12	50	7,67	480	9,22	764
3,05	0	4,60	0	6,15	53	7,70	487	9,25	758
3,08	0	4,63	0	6,18	57	7,73	505	9,28	755
3,11	0	4,66	0	6,21	61	7,76	514	9,31	758
3,14	0	4,69	0	6,24	66	7,79	528	9,34	756
3,17	0	4,72	0	6,27	70	7,82	542	9,37	745
3,20	0	4,75	0	6,30	75	7,85	555	9,40	736
3,24	0	4,78	0	6,33	80	7,88	567	9,43	725
3,27	0	4,82	1	6,37	86	7,92	579	9,46	717
3,30	0	4,85	1	6,40	92	7,95	586	9,50	710
3,33	0	4,88	1	6,43	100	7,98	597	9,53	702
3,36	0	4,91	1	6,46	108	8,01	612	9,56	689
3,39	0	4,94	1	6,49	115	8,04	632	9,59	675
3,42	0	4,97	1	6,52	121	8,07	643	9,62	688
3,45	0	5,00	1	6,55	129	8,10	667	9,65	669
3,48	0	5,03	1	6,58	137	8,13	680	9,68	656
3,51	0	5,06	1	6,61	145	8,16	695	9,71	642
3,55	0	5,09	1	6,64	153	8,19	712	9,74	627
3,58	0	5,13	2	6,68	163	8,22	724	9,77	612
3,61	0	5,16	2	6,71	172	8,26	733	9,81	592
3,64	0	5,19	2	6,74	180	8,29	750	9,84	564
3,67	0	5,22	2	6,77	186	8,32	761	9,87	542
3,70	0	5,25	3	6,80	194	8,35	770	9,90	514
3,73	0	5,28	3	6,83	202	8,38	775	9,93	489
3,76	0	5,31	3	6,86	210	8,41	776	9,96	454
3,79	0	5,34	4	6,89	217	8,44	771	9,99	422
3,82	0	5,37	5	6,92	224	8,47	778	10,02	386
3,86	0	5,40	5	6,95	232	8,50	777	10,05	354
3,89	0	5,44	6	6,99	239	8,53	780	10,08	316
3,92	0	5,47	7	7,02	246	8,57	784	10,12	280
3,95	0	5,50	8	7,05	254	8,60	794	10,15	245
3,98	0	5,53	9	7,08	263	8,63	794	10,18	215
4,01	0	5,56	10	7,11	274	8,66	799	10,21	181
4,04	0	5,59	11	7,14	283	8,69	799	10,24	154
4,07	0	5,62	13	7,17	292	8,72	801	10,27	125
4,10	0	5,65	14	7,20	305	8,75	810	10,30	102
4,13	0	5,68	16	7,23	314	8,78	817	10,33	78
4,17	0	5,71	17	7,26	328	8,81	811	10,36	60
4,20	0	5,75	18	7,30	341	8,84	811	10,39	44
4,23	0	5,78	21	7,33	353	8,88	806	10,42	32
4,26	0	5,81	23	7,36	366	8,91	808	10,46	22
4,29	0	5,84	25	7,39	377	8,94	799	10,49	15
4,32	0	5,87	28	7,42	389	8,97	795	10,52	9
4,35	0	5,90	30	7,45	397	9,00	787	10,55	5
4,38	0	5,93	33	7,48	409	9,03	786	10,58	3
4,41	0	5,96	35	7,51	421	9,06	783	10,61	2
4,44	0	5,99	38	7,54	429	9,09	777	10,64	1
4,48	0	6,02	41	7,57	444	9,12	771	10,67	1
4,51	0	6,06	44	7,61	455	9,15	771	10,70	1
4,54	0	6,09	48	7,64	468	9,19	767	10,73	1



E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
6,80	0	8,66	266	10,52	672	12,38	865	14,24	954	16,09	848	17,95	602	19,81	177
6,83	0	8,69	275	10,55	683	12,41	874	14,27	949	16,13	850	17,98	603	19,84	166
6,86	3	8,72	278	10,58	696	12,44	882	14,30	950	16,16	842	18,01	600	19,87	152
6,89	5	8,75	283	10,61	708	12,47	882	14,33	948	16,19	835	18,05	598	19,90	138
6,92	8	8,78	288	10,64	718	12,50	893	14,36	953	16,22	831	18,08	591	19,94	127
6,95	10	8,81	294	10,67	731	12,53	898	14,39	960	16,25	823	18,11	585	19,97	113
6,99	12	8,84	299	10,70	738	12,56	905	14,42	955	16,28	821	18,14	584	20,00	98
7,02	14	8,88	304	10,73	751	12,59	911	14,45	956	16,31	813	18,17	577	20,03	84
7,05	17	8,91	308	10,77	756	12,62	915	14,48	952	16,34	812	18,20	568	20,06	70
7,08	22	8,94	316	10,80	766	12,66	917	14,51	950	16,37	809	18,23	568	20,09	58
7,11	24	8,97	324	10,83	772	12,69	915	14,55	948	16,40	808	18,26	565	20,12	49
7,14	27	9,00	333	10,86	793	12,72	919	14,58	946	16,44	807	18,29	556	20,15	40
7,17	31	9,03	344	10,89	836	12,75	913	14,61	959	16,47	801	18,32	544	20,18	30
7,20	33	9,06	357	10,92	887	12,78	908	14,64	959	16,50	798	18,36	535	20,21	24
7,23	37	9,09	367	10,95	969	12,81	902	14,67	957	16,53	801	18,39	527	20,24	18
7,26	37	9,12	382	10,98	1050	12,84	899	14,70	951	16,56	798	18,42	527	20,28	13
7,30	40	9,15	401	11,01	1112	12,87	899	14,73	949	16,59	794	18,45	521	20,31	11
7,33	42	9,19	431	11,04	1161	12,90	898	14,76	949	16,62	792	18,48	511	20,34	10
7,36	45	9,22	483	11,08	1186	12,93	894	14,79	948	16,65	788	18,51	504	20,37	9
7,39	47	9,25	558	11,11	1199	12,97	893	14,82	941	16,68	784	18,54	502	20,40	9
7,42	49	9,28	670	11,14	1197	13,00	887	14,86	938	16,71	779	18,57	489	20,43	8
7,45	52	9,31	849	11,17	1199	13,03	888	14,89	932	16,74	774	18,60	484	20,46	8
7,48	52	9,34	1092	11,20	1188	13,06	885	14,92	932	16,78	776	18,63	481	20,49	8
7,51	54	9,37	1372	11,23	1158	13,09	887	14,95	918	16,81	769	18,67	478	20,52	9
7,54	56	9,40	1625	11,26	1122	13,12	891	14,98	916	16,84	770	18,70	475	20,55	8
7,57	58	9,43	1824	11,29	1065	13,15	894	15,01	913	16,87	764	18,73	470	20,59	9
7,61	64	9,46	1949	11,32	1010	13,18	892	15,04	912	16,90	761	18,76	465	20,62	9
7,64	68	9,50	2032	11,35	971	13,21	893	15,07	916	16,93	755	18,79	460	20,65	8
7,67	72	9,53	2086	11,39	947	13,24	890	15,10	910	16,96	752	18,82	452	20,68	8
7,70	75	9,56	2139	11,42	934	13,28	889	15,13	904	16,99	750	18,85	444	20,71	8
7,73	80	9,59	2198	11,45	927	13,31	888	15,17	910	17,02	751	18,88	435	20,74	8
7,76	85	9,62	2310	11,48	931	13,34	892	15,20	907	17,05	745	18,91	432	20,77	8
7,79	88	9,65	2322	11,51	930	13,37	890	15,23	911	17,09	736	18,94	423	20,80	8
7,82	93	9,68	2257	11,54	920	13,40	893	15,26	904	17,12	731	18,97	418	20,83	9
7,85	98	9,71	2111	11,57	912	13,43	895	15,29	900	17,15	726	19,01	410	20,86	8

Figura B.28: H20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

(segue) H20, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

E (keV)	conteggi														
7,88	104	9,74	1948	11,60	899	13,46	892	15,32	900	17,18	719	19,04	402	20,90	8
7,92	111	9,77	1801	11,63	880	13,49	900	15,35	902	17,21	714	19,07	395	20,93	8
7,95	121	9,81	1701	11,66	858	13,52	903	15,38	898	17,24	709	19,10	385	20,96	8
7,98	146	9,84	1628	11,70	836	13,55	904	15,41	891	17,27	709	19,13	380	20,99	7
8,01	201	9,87	1573	11,73	820	13,59	909	15,44	887	17,30	702	19,16	373	21,02	7
8,04	306	9,90	1493	11,76	821	13,62	913	15,47	885	17,33	699	19,19	371		
8,07	470	9,93	1379	11,79	828	13,65	917	15,51	877	17,36	691	19,22	361		
8,10	677	9,96	1237	11,82	829	13,68	920	15,54	878	17,40	687	19,25	351		
8,13	885	9,99	1064	11,85	830	13,71	921	15,57	877	17,43	687	19,28	345		
8,16	1041	10,02	896	11,88	839	13,74	927	15,60	873	17,46	673	19,32	333		
8,19	1135	10,05	772	11,91	838	13,77	931	15,63	870	17,49	666	19,35	323		
8,22	1176	10,08	694	11,94	840	13,80	937	15,66	861	17,52	663	19,38	312		
8,26	1191	10,12	649	11,97	835	13,83	931	15,69	857	17,55	661	19,41	301		
8,29	1199	10,15	625	12,01	831	13,86	933	15,72	851	17,58	657	19,44	294		
8,32	1188	10,18	615	12,04	840	13,89	937	15,75	849	17,61	652	19,47	282		
8,35	1143	10,21	611	12,07	839	13,93	942	15,78	850	17,64	647	19,50	274		
8,38	1051	10,24	612	12,10	836	13,96	942	15,82	852	17,67	641	19,53	264		
8,41	898	10,27	613	12,13	836	13,99	943	15,85	856	17,71	634	19,56	255		
8,44	701	10,30	618	12,16	832	14,02	942	15,88	852	17,74	627	19,59	246		
8,47	506	10,33	617	12,19	837	14,05	938	15,91	849	17,77	622	19,63	236		
8,50	363	10,36	626	12,22	837	14,08	942	15,94	846	17,80	622	19,66	226		
8,53	286	10,39	625	12,25	846	14,11	940	15,97	850	17,83	623	19,69	218		
8,57	260	10,42	632	12,28	848	14,14	941	16,00	851	17,86	621	19,72	213		
8,60	261	10,46	644	12,31	858	14,17	948	16,03	849	17,89	615	19,75	202		
8,63	263	10,49	659	12,35	870	14,20	952	16,06	853	17,92	606	19,78	188		

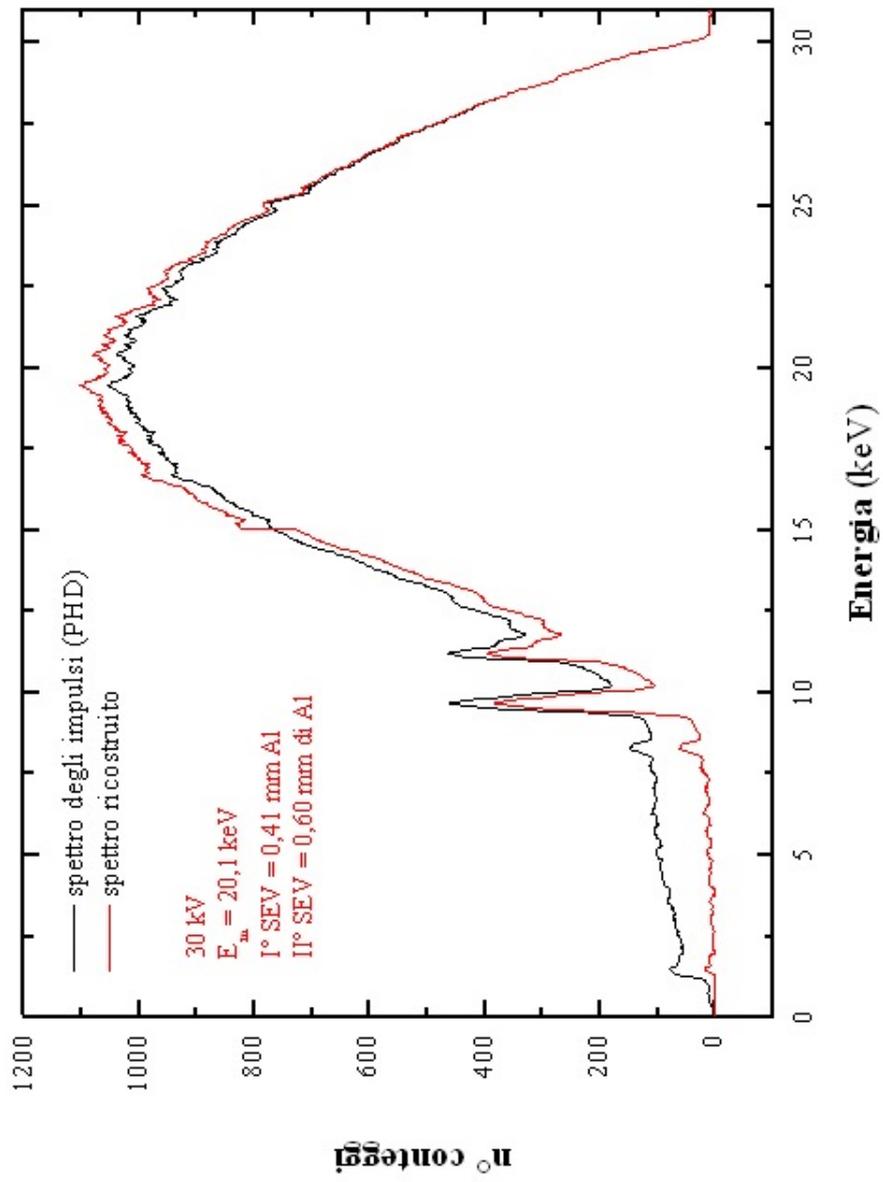


Figura B.29: H30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

E (keV)	conteggi														
2,74	4	6,46	14	10,18	106	13,89	562	17,61	962	21,33	994	25,04	766	28,76	288
2,77	4	6,49	13	10,21	108	13,93	567	17,64	965	21,36	988	25,08	765	28,79	284
2,80	6	6,52	12	10,24	111	13,96	573	17,67	957	21,39	990	25,11	758	28,82	278
2,83	6	6,55	11	10,27	113	13,99	576	17,71	967	21,42	995	25,14	749	28,85	275
2,86	7	6,58	11	10,30	110	14,02	580	17,74	967	21,45	993	25,17	744	28,88	273
2,89	7	6,61	10	10,33	113	14,05	583	17,77	963	21,48	997	25,20	738	28,91	272
2,93	6	6,64	9	10,36	119	14,08	587	17,80	964	21,51	1007	25,23	733	28,95	267
2,96	8	6,68	11	10,39	124	14,11	591	17,83	965	21,55	1004	25,26	725	28,98	264
2,99	7	6,71	10	10,42	126	14,14	599	17,86	970	21,58	997	25,29	719	29,01	257
3,02	6	6,74	11	10,46	128	14,17	603	17,89	965	21,61	990	25,32	711	29,04	251
3,05	6	6,77	13	10,49	130	14,20	610	17,92	961	21,64	989	25,35	704	29,07	245
3,08	6	6,80	13	10,52	130	14,24	618	17,95	958	21,67	983	25,39	705	29,10	242
3,11	6	6,83	14	10,55	137	14,27	621	17,98	964	21,70	983	25,42	703	29,13	237
3,14	5	6,86	15	10,58	139	14,30	625	18,01	975	21,73	983	25,45	705	29,16	229
3,17	4	6,89	15	10,61	143	14,33	630	18,05	971	21,76	975	25,48	707	29,19	221
3,20	4	6,92	16	10,64	152	14,36	637	18,08	973	21,79	969	25,51	703	29,22	216
3,24	5	6,95	17	10,67	154	14,39	646	18,11	978	21,82	965	25,54	701	29,26	209
3,27	6	6,99	18	10,70	157	14,42	653	18,14	976	21,86	949	25,57	696	29,29	207
3,30	6	7,02	15	10,73	159	14,45	661	18,17	981	21,89	943	25,60	695	29,32	200
3,33	3	7,05	16	10,77	167	14,48	665	18,20	984	21,92	945	25,63	693	29,35	196
3,36	5	7,08	14	10,80	172	14,51	670	18,23	985	21,95	947	25,66	690	29,38	191
3,39	5	7,11	15	10,83	177	14,55	678	18,26	990	21,98	945	25,69	686	29,41	185
3,42	5	7,14	14	10,86	189	14,58	678	18,29	990	22,01	945	25,73	682	29,44	180
3,45	7	7,17	14	10,89	207	14,61	687	18,32	986	22,04	939	25,76	679	29,47	172
3,48	8	7,20	13	10,92	236	14,64	685	18,36	987	22,07	933	25,79	676	29,50	165
3,51	10	7,23	12	10,95	275	14,67	693	18,39	990	22,10	941	25,82	676	29,53	160
3,55	8	7,26	11	10,98	312	14,70	697	18,42	991	22,13	946	25,85	674	29,56	154
3,58	7	7,30	12	11,01	342	14,73	699	18,45	995	22,16	946	25,88	667	29,60	146
3,61	8	7,33	11	11,04	363	14,76	703	18,48	994	22,20	952	25,91	660	29,63	136
3,64	6	7,36	14	11,08	378	14,79	707	18,51	993	22,23	954	25,94	660	29,66	128
3,67	4	7,39	15	11,11	382	14,82	708	18,54	994	22,26	953	25,97	659	29,69	122
3,70	2	7,42	17	11,14	388	14,86	715	18,57	1004	22,29	951	26,00	657	29,72	115
3,73	2	7,45	18	11,17	396	14,89	717	18,60	999	22,32	955	26,04	653	29,75	105
3,76	3	7,48	21	11,20	393	14,92	725	18,63	1004	22,35	954	26,07	649	29,78	95
3,79	1	7,51	20	11,23	384	14,95	723	18,67	1006	22,38	958	26,10	644	29,81	87
3,82	2	7,54	22	11,26	369	14,98	730	18,70	1000	22,41	958	26,13	635	29,84	79
3,86	0	7,57	21	11,29	350	15,01	733	18,73	1008	22,44	950	26,16	629	29,87	72
3,89	1	7,61	24	11,32	331	15,04	735	18,76	1012	22,47	948	26,19	627	29,91	62
3,92	2	7,64	23	11,35	322	15,07	734	18,79	1008	22,51	940	26,22	627	29,94	54
3,95	2	7,67	25	11,39	318	15,10	737	18,82	1010	22,54	938	26,25	627	29,97	47
3,98	5	7,70	23	11,42	316	15,13	739	18,85	1010	22,57	935	26,28	623	30,00	39
4,01	9	7,73	25	11,45	317	15,17	742	18,88	1008	22,60	933	26,31	616	30,03	31
4,04	10	7,76	24	11,48	315	15,20	740	18,91	1007	22,63	935	26,35	616	30,06	26
4,07	10	7,79	24	11,51	312	15,23	741	18,94	1008	22,66	924	26,38	613	30,09	22
4,10	11	7,82	23	11,54	312	15,26	740	18,97	1013	22,69	924	26,41	609	30,12	18
4,13	9	7,85	22	11,57	308	15,29	744	19,01	1011	22,72	923	26,44	605	30,15	16
4,17	9	7,88	21	11,60	301	15,32	749	19,04	1010	22,75	924	26,47	603	30,18	13
4,20	11	7,92	23	11,63	290	15,35	754	19,07	1010	22,78	927	26,50	602	30,21	11
4,23	9	7,95	24	11,66	278	15,38	759	19,10	1012	22,82	927	26,53	598	30,25	10
4,26	10	7,98	24	11,70	271	15,41	769	19,13	1018	22,85	927	26,56	596	30,28	10
4,29	10	8,01	26	11,73	267	15,44	771	19,16	1022	22,88	927	26,59	593	30,31	10
4,32	9	8,04	31	11,76	268	15,47	769	19,19	1028	22,91	932	26,62	588	30,34	10
4,35	8	8,07	35	11,79	274	15,51	771	19,22	1030	22,94	928	26,65	586	30,37	10
4,38	8	8,10	42	11,82	281	15,54	776	19,25	1031	22,97	924	26,69	578	30,40	10
4,41	9	8,13	50	11,85	287	15,57	780	19,28	1034	23,00	922	26,72	575	30,43	10

(segue) H30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

E (keV)	conteggi														
2,74	4	6,46	14	10,18	106	13,89	562	17,61	962	21,33	994	25,04	766	28,76	288
2,77	4	6,49	13	10,21	108	13,93	567	17,64	965	21,36	988	25,08	765	28,79	284
2,80	6	6,52	12	10,24	111	13,96	573	17,67	957	21,39	990	25,11	758	28,82	278
2,83	6	6,55	11	10,27	113	13,99	576	17,71	967	21,42	995	25,14	749	28,85	275
2,86	7	6,58	11	10,30	110	14,02	580	17,74	967	21,45	993	25,17	744	28,88	273
2,89	7	6,61	10	10,33	113	14,05	583	17,77	963	21,48	997	25,20	738	28,91	272
2,93	6	6,64	9	10,36	119	14,08	587	17,80	964	21,51	1007	25,23	733	28,95	267
2,96	8	6,68	11	10,39	124	14,11	591	17,83	965	21,55	1004	25,26	725	28,98	264
2,99	7	6,71	10	10,42	126	14,14	599	17,86	970	21,58	997	25,29	719	29,01	257
3,02	6	6,74	11	10,46	128	14,17	603	17,89	965	21,61	990	25,32	711	29,04	251
3,05	6	6,77	13	10,49	130	14,20	610	17,92	961	21,64	989	25,35	704	29,07	245
3,08	6	6,80	13	10,52	130	14,24	618	17,95	958	21,67	983	25,39	705	29,10	242
3,11	6	6,83	14	10,55	137	14,27	621	17,98	964	21,70	983	25,42	703	29,13	237
3,14	5	6,86	15	10,58	139	14,30	625	18,01	975	21,73	983	25,45	705	29,16	229
3,17	4	6,89	15	10,61	143	14,33	630	18,05	971	21,76	975	25,48	707	29,19	221
3,20	4	6,92	16	10,64	152	14,36	637	18,08	973	21,79	969	25,51	703	29,22	216
3,24	5	6,95	17	10,67	154	14,39	646	18,11	978	21,82	965	25,54	701	29,26	209
3,27	6	6,99	18	10,70	157	14,42	653	18,14	976	21,86	949	25,57	696	29,29	207
3,30	6	7,02	15	10,73	159	14,45	661	18,17	981	21,89	943	25,60	695	29,32	200
3,33	3	7,05	16	10,77	167	14,48	665	18,20	984	21,92	945	25,63	693	29,35	196
3,36	5	7,08	14	10,80	172	14,51	670	18,23	985	21,95	947	25,66	690	29,38	191
3,39	5	7,11	15	10,83	177	14,55	678	18,26	990	21,98	945	25,69	686	29,41	185
3,42	5	7,14	14	10,86	189	14,58	678	18,29	990	22,01	945	25,73	682	29,44	180
3,45	7	7,17	14	10,89	207	14,61	687	18,32	986	22,04	939	25,76	679	29,47	172
3,48	8	7,20	13	10,92	236	14,64	685	18,36	987	22,07	933	25,79	676	29,50	165
3,51	10	7,23	12	10,95	275	14,67	693	18,39	990	22,10	941	25,82	676	29,53	160
3,55	8	7,26	11	10,98	312	14,70	697	18,42	991	22,13	946	25,85	674	29,56	154
3,58	7	7,30	12	11,01	342	14,73	699	18,45	995	22,16	946	25,88	667	29,60	146
3,61	8	7,33	11	11,04	363	14,76	703	18,48	994	22,20	952	25,91	660	29,63	136
3,64	6	7,36	14	11,08	378	14,79	707	18,51	993	22,23	954	25,94	660	29,66	128
3,67	4	7,39	15	11,11	382	14,82	708	18,54	994	22,26	953	25,97	659	29,69	122
3,70	2	7,42	17	11,14	388	14,86	715	18,57	1004	22,29	951	26,00	657	29,72	115
3,73	2	7,45	18	11,17	396	14,89	717	18,60	999	22,32	955	26,04	653	29,75	105
3,76	3	7,48	21	11,20	393	14,92	725	18,63	1004	22,35	954	26,07	649	29,78	95
3,79	1	7,51	20	11,23	384	14,95	723	18,67	1006	22,38	958	26,10	644	29,81	87
3,82	2	7,54	22	11,26	369	14,98	730	18,70	1000	22,41	958	26,13	635	29,84	79
3,86	0	7,57	21	11,29	350	15,01	733	18,73	1008	22,44	950	26,16	629	29,87	72
3,89	1	7,61	24	11,32	331	15,04	735	18,76	1012	22,47	948	26,19	627	29,91	62
3,92	2	7,64	23	11,35	322	15,07	734	18,79	1008	22,51	940	26,22	627	29,94	54
3,95	2	7,67	25	11,39	318	15,10	737	18,82	1010	22,54	938	26,25	627	29,97	47
3,98	5	7,70	23	11,42	316	15,13	739	18,85	1010	22,57	935	26,28	623	30,00	39
4,01	9	7,73	25	11,45	317	15,17	742	18,88	1008	22,60	933	26,31	616	30,03	31
4,04	10	7,76	24	11,48	315	15,20	740	18,91	1007	22,63	935	26,35	616	30,06	26
4,07	10	7,79	24	11,51	312	15,23	741	18,94	1008	22,66	924	26,38	613	30,09	22
4,10	11	7,82	23	11,54	312	15,26	740	18,97	1013	22,69	924	26,41	609	30,12	18
4,13	9	7,85	22	11,57	308	15,29	744	19,01	1011	22,72	923	26,44	605	30,15	16
4,17	9	7,88	21	11,60	301	15,32	749	19,04	1010	22,75	924	26,47	603	30,18	13
4,20	11	7,92	23	11,63	290	15,35	754	19,07	1010	22,78	927	26,50	602	30,21	11
4,23	9	7,95	24	11,66	278	15,38	759	19,10	1012	22,82	927	26,53	598	30,25	10
4,26	10	7,98	24	11,70	271	15,41	769	19,13	1018	22,85	927	26,56	596	30,28	10
4,29	10	8,01	26	11,73	267	15,44	771	19,16	1022	22,88	927	26,59	593	30,31	10
4,32	9	8,04	31	11,76	268	15,47	769	19,19	1028	22,91	932	26,62	588	30,34	10
4,35	8	8,07	35	11,79	274	15,51	771	19,22	1030	22,94	928	26,65	586	30,37	10
4,38	8	8,10	42	11,82	281	15,54	776	19,25	1031	22,97	924	26,69	578	30,40	10
4,41	9	8,13	50	11,85	287	15,57	780	19,28	1034	23,00	922	26,72	575	30,43	10

(segue) H30, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi	E (keV)	conteggi
4,44	8	8,16	55	11,88	288	15,60	787	19,32	1038	23,03	921	26,75	571	30,46	10
4,48	11	8,19	60	11,91	290	15,63	792	19,35	1040	23,06	919	26,78	568	30,49	9
4,51	9	8,22	61	11,94	296	15,66	797	19,38	1049	23,09	918	26,81	568	30,52	9
4,54	8	8,26	60	11,97	297	15,69	798	19,41	1044	23,12	913	26,84	558	30,56	9
4,57	9	8,29	59	12,01	298	15,72	803	19,44	1041	23,16	909	26,87	561	30,59	10
4,60	7	8,32	60	12,04	300	15,75	802	19,47	1041	23,19	909	26,90	556	30,62	10
4,63	8	8,35	58	12,07	298	15,78	803	19,50	1041	23,22	900	26,93	550	30,65	10
4,66	8	8,38	54	12,10	298	15,82	811	19,53	1035	23,25	889	26,96	549	30,68	9
4,69	7	8,41	50	12,13	297	15,85	816	19,56	1029	23,28	887	27,00	549	30,71	9

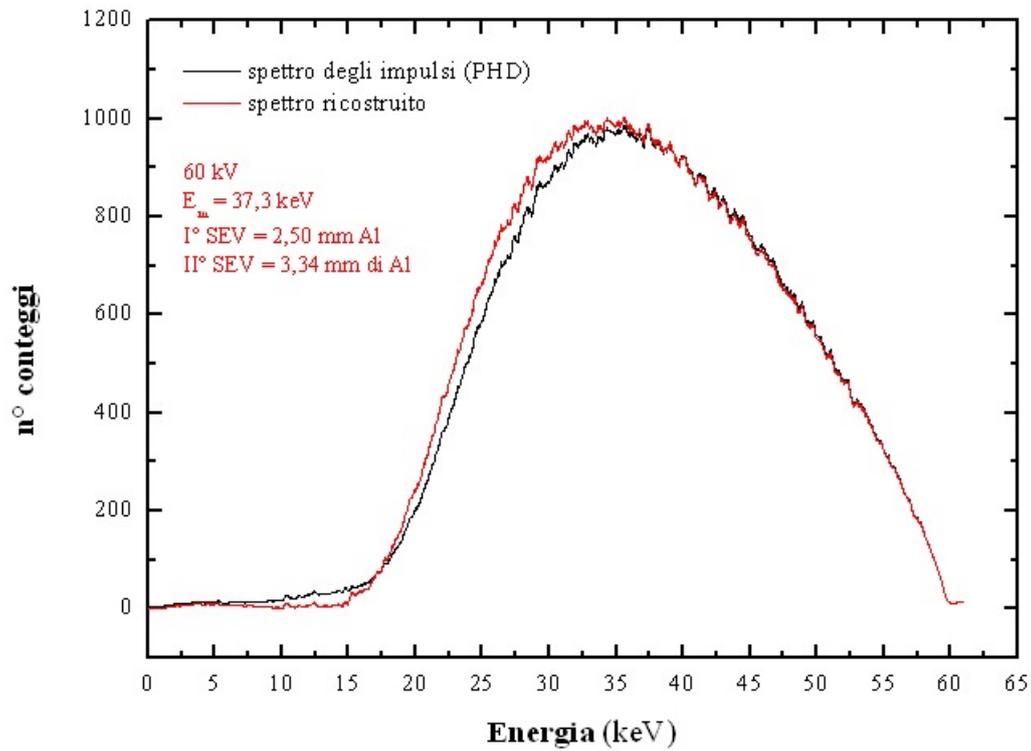


Figura B.30: H60, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.



(segue) H60, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

E conteggi (keV)																			
4.10	8	10.30	10	16.50	42	22.69	479	28.88	885	35.07	987	41.26	881	47.45	654	53.64	393	59.82	14
4.13	8	10.33	11	16.53	40	22.72	481	28.91	887	35.11	992	41.29	878	47.48	649	53.67	395	59.85	13
4.17	8	10.36	11	16.56	45	22.75	482	28.95	899	35.14	995	41.33	880	47.51	649	53.70	393	59.88	13
4.20	8	10.39	11	16.59	47	22.78	482	28.98	898	35.17	991	41.36	880	47.54	651	53.73	396	59.91	12
4.23	8	10.42	11	16.62	49	22.82	485	29.01	903	35.20	986	41.39	877	47.57	653	53.76	393	59.94	12
4.26	8	10.46	11	16.65	51	22.85	485	29.04	909	35.23	985	41.42	878	47.60	654	53.79	388	59.97	11
4.29	7	10.49	10	16.68	52	22.88	490	29.07	916	35.26	989	41.45	873	47.64	649	53.82	386	60.00	11
4.32	8	10.52	9	16.71	54	22.91	496	29.10	922	35.29	984	41.48	871	47.67	645	53.85	383	60.04	12
4.35	8	10.55	8	16.74	55	22.94	501	29.13	916	35.32	992	41.51	879	47.70	645	53.88	381	60.07	12
4.38	9	10.58	7	16.78	60	22.97	499	29.16	911	35.35	992	41.54	875	47.73	645	53.91	383	60.10	12
4.41	10	10.61	5	16.81	57	23.00	505	29.19	911	35.38	993	41.57	872	47.76	642	53.94	381	60.13	12
4.44	9	10.64	4	16.84	60	23.03	505	29.22	911	35.41	992	41.60	879	47.79	646	53.98	378	60.16	12
4.48	9	10.67	5	16.87	63	23.06	513	29.26	918	35.45	990	41.63	869	47.82	648	54.01	375	60.19	12
4.51	9	10.70	5	16.90	64	23.09	515	29.29	915	35.48	990	41.67	869	47.85	642	54.04	372	60.22	11
4.54	9	10.73	4	16.93	65	23.12	522	29.32	925	35.51	994	41.70	866	47.88	640	54.07	371	60.25	11
4.57	9	10.77	5	16.96	64	23.16	524	29.35	921	35.54	1001	41.73	865	47.91	639	54.10	371	60.28	11
4.60	9	10.80	4	16.99	66	23.19	529	29.38	919	35.57	1003	41.76	857	47.94	636	54.13	369	60.31	11
4.63	9	10.83	4	17.02	70	23.22	527	29.41	917	35.60	997	41.79	854	47.98	639	54.16	367	60.34	12
4.66	9	10.86	3	17.05	69	23.25	524	29.44	913	35.63	1002	41.82	852	48.01	643	54.19	367	60.38	11
4.69	9	10.89	3	17.09	73	23.28	524	29.47	914	35.66	992	41.85	846	48.04	641	54.22	365	60.41	11
4.72	9	10.92	3	17.12	72	23.31	527	29.50	913	35.69	994	41.88	846	48.07	634	54.25	360	60.44	11
4.75	8	10.95	3	17.15	76	23.34	530	29.53	911	35.72	993	41.91	841	48.10	635	54.28	355	60.47	12
4.78	9	10.98	3	17.18	74	23.37	536	29.56	915	35.76	995	41.94	832	48.13	629	54.32	355	60.50	12
4.82	9	11.01	2	17.21	74	23.40	535	29.60	916	35.79	993	41.97	833	48.16	630	54.35	353	60.53	13
4.85	9	11.04	2	17.24	75	23.43	541	29.63	917	35.82	988	42.01	837	48.19	632	54.38	352	60.56	13
4.88	9	11.08	3	17.27	74	23.47	545	29.66	913	35.85	982	42.04	838	48.22	633	54.41	346	60.59	14
4.91	9	11.11	3	17.30	74	23.50	548	29.69	916	35.88	982	42.07	837	48.25	633	54.44	346	60.62	14
4.94	9	11.14	5	17.33	75	23.53	550	29.72	919	35.91	979	42.10	841	48.29	635	54.47	343	60.65	14
4.97	9	11.17	5	17.36	74	23.56	560	29.75	919	35.94	986	42.13	843	48.32	626	54.50	345	60.68	14
5.00	10	11.20	6	17.40	77	23.59	566	29.78	916	35.97	985	42.16	843	48.35	624	54.53	344	60.72	14
5.03	10	11.23	6	17.43	77	23.62	572	29.81	911	36.00	989	42.19	837	48.38	628	54.56	342	60.75	15
5.06	10	11.26	6	17.46	79	23.65	571	29.84	918	36.03	981	42.22	840	48.41	633	54.59	342	60.78	15
5.09	10	11.29	6	17.49	84	23.68	570	29.87	922	36.06	975	42.25	847	48.44	628	54.62	342	60.81	14
5.13	9	11.32	7	17.52	86	23.71	571	29.91	919	36.10	979	42.28	850	48.47	623	54.66	340	60.84	14
5.16	10	11.35	7	17.55	90	23.74	576	29.94	917	36.13	980	42.32	850	48.50	615	54.69	338	60.87	14
5.19	10	11.39	6	17.58	91	23.78	576	29.97	918	36.16	982	42.35	852	48.53	609	54.72	337	60.90	14
5.22	10	11.42	5	17.61	94	23.81	578	30.00	918	36.19	985	42.38	844	48.56	609	54.75	339	60.93	14
5.25	10	11.45	5	17.64	97	23.84	578	30.03	920	36.22	979	42.41	842	48.59	605	54.78	337	60.96	13
5.28	10	11.48	4	17.67	100	23.87	577	30.06	922	36.25	981	42.44	844	48.63	605	54.81	339	60.99	13
5.31	10	11.51	4	17.71	102	23.90	573	30.09	922	36.28	974	42.47	841	48.66	608	54.84	336	61.02	13
5.34	9	11.54	3	17.74	104	23.93	580	30.12	926	36.31	975	42.50	837	48.69	607	54.87	336		
5.37	8	11.57	4	17.77	103	23.96	582	30.15	933	36.34	970	42.53	839	48.72	607	54.90	334		
5.40	8	11.60	3	17.80	101	23.99	589	30.18	933	36.37	976	42.56	836	48.75	604	54.93	330		
5.44	8	11.63	3	17.83	100	24.02	592	30.21	930	36.41	975	42.59	833	48.78	604	54.96	329		
5.47	8	11.66	4	17.86	98	24.05	591	30.25	930	36.44	966	42.62	828	48.81	610	55.00	322		
5.50	8	11.70	4	17.89	101	24.08	590	30.28	939	36.47	970	42.66	821	48.84	615	55.03	322		
5.53	7	11.73	5	17.92	102	24.12	587	30.31	943	36.50	967	42.69	816	48.87	621	55.06	322		
5.56	7	11.76	5	17.95	104	24.15	595	30.34	943	36.53	964	42.72	822	48.90	617	55.09	319		
5.59	7	11.79	6	17.98	106	24.18	597	30.37	943	36.56	965	42.75	821	48.93	615	55.12	315		
5.62	6	11.82	6	18.01	109	24.21	604	30.40	950	36.59	965	42.78	818	48.97	611	55.15	312		

(segue) H60, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

E conteggi (keV)																			
4.10	8	10.30	10	16.50	42	22.69	479	28.88	885	35.07	987	41.26	881	47.45	654	53.64	393	59.82	14
4.13	8	10.33	11	16.53	40	22.72	481	28.91	887	35.11	992	41.29	878	47.48	649	53.67	395	59.85	13
4.17	8	10.36	11	16.56	45	22.75	482	28.95	899	35.14	995	41.33	881	47.51	649	53.70	393	59.88	13
4.20	8	10.39	11	16.59	47	22.78	482	28.98	898	35.17	991	41.36	880	47.54	651	53.73	396	59.91	12
4.23	8	10.42	11	16.62	49	22.82	485	29.01	903	35.20	986	41.39	877	47.57	653	53.76	393	59.94	12
4.26	8	10.46	11	16.65	51	22.85	485	29.04	909	35.23	985	41.42	878	47.60	654	53.79	388	59.97	11
4.29	7	10.49	10	16.68	52	22.88	490	29.07	916	35.26	989	41.45	873	47.64	649	53.82	386	60.00	11
4.32	8	10.52	9	16.71	54	22.91	496	29.10	922	35.29	984	41.48	871	47.67	645	53.85	383	60.04	12
4.35	8	10.55	8	16.74	55	22.94	501	29.13	916	35.32	992	41.51	879	47.70	645	53.88	381	60.07	12
4.38	9	10.58	7	16.78	60	22.97	499	29.16	911	35.35	992	41.54	875	47.73	645	53.91	383	60.10	12
4.41	10	10.61	5	16.81	57	23.00	505	29.19	911	35.38	993	41.57	872	47.76	642	53.94	381	60.13	12
4.44	9	10.64	4	16.84	60	23.03	505	29.22	911	35.41	992	41.60	879	47.79	646	53.98	378	60.16	12
4.48	9	10.67	5	16.87	63	23.06	513	29.26	918	35.45	990	41.63	869	47.82	648	54.01	375	60.19	12
4.51	9	10.70	5	16.90	64	23.09	515	29.29	915	35.48	990	41.67	869	47.85	642	54.04	372	60.22	11
4.54	9	10.73	4	16.93	65	23.12	522	29.32	925	35.51	994	41.70	866	47.88	640	54.07	371	60.25	11
4.57	9	10.77	5	16.96	64	23.16	524	29.35	921	35.54	1001	41.73	865	47.91	639	54.10	371	60.28	11
4.60	9	10.80	4	16.99	66	23.19	529	29.38	919	35.57	1003	41.76	857	47.94	636	54.13	369	60.31	11
4.63	9	10.83	4	17.02	70	23.22	527	29.41	917	35.60	997	41.79	854	47.98	639	54.16	367	60.34	12
4.66	9	10.86	3	17.05	69	23.25	524	29.44	913	35.63	1002	41.82	852	48.01	643	54.19	367	60.38	11
4.69	9	10.89	3	17.09	73	23.28	524	29.47	914	35.66	992	41.85	846	48.04	641	54.22	365	60.41	11
4.72	9	10.92	3	17.12	72	23.31	527	29.50	913	35.69	994	41.88	846	48.07	634	54.25	360	60.44	11
4.75	8	10.95	3	17.15	76	23.34	530	29.53	911	35.72	993	41.91	841	48.10	635	54.28	355	60.47	12
4.78	9	10.98	3	17.18	74	23.37	536	29.56	915	35.76	995	41.94	832	48.13	629	54.32	355	60.50	12
4.82	9	11.01	2	17.21	74	23.40	535	29.60	916	35.79	993	41.97	833	48.16	630	54.35	353	60.53	13
4.85	9	11.04	2	17.24	75	23.43	541	29.63	917	35.82	988	42.01	837	48.19	632	54.38	352	60.56	13
4.88	9	11.08	3	17.27	74	23.47	545	29.66	913	35.85	982	42.04	838	48.22	633	54.41	346	60.59	14
4.91	9	11.11	3	17.30	74	23.50	548	29.69	916	35.88	982	42.07	837	48.25	633	54.44	346	60.62	14
4.94	9	11.14	5	17.33	75	23.53	550	29.72	919	35.91	979	42.10	841	48.29	635	54.47	343	60.65	14
4.97	9	11.17	5	17.36	74	23.56	560	29.75	919	35.94	986	42.13	843	48.32	626	54.50	345	60.68	14
5.00	10	11.20	6	17.40	77	23.59	566	29.78	916	35.97	985	42.16	843	48.35	624	54.53	344	60.72	14
5.03	10	11.23	6	17.43	77	23.62	572	29.81	911	36.00	989	42.19	837	48.38	628	54.56	342	60.75	15
5.06	10	11.26	6	17.46	79	23.65	571	29.84	918	36.03	981	42.22	840	48.41	633	54.59	342	60.78	15
5.09	10	11.29	6	17.49	84	23.68	570	29.87	922	36.06	975	42.25	847	48.44	628	54.62	342	60.81	14
5.13	9	11.32	7	17.52	86	23.71	571	29.91	919	36.10	979	42.28	850	48.47	623	54.66	340	60.84	14
5.16	10	11.35	7	17.55	90	23.74	576	29.94	917	36.13	980	42.32	850	48.50	615	54.69	338	60.87	14
5.19	10	11.39	6	17.58	91	23.78	576	29.97	918	36.16	982	42.35	852	48.53	609	54.72	337	60.90	14
5.22	10	11.42	5	17.61	94	23.81	578	30.00	918	36.19	985	42.38	844	48.56	609	54.75	339	60.93	14
5.25	10	11.45	5	17.64	97	23.84	578	30.03	920	36.22	979	42.41	842	48.59	605	54.78	337	60.96	13
5.28	10	11.48	4	17.67	100	23.87	577	30.06	922	36.25	981	42.44	844	48.63	605	54.81	339	60.99	13
5.31	10	11.51	4	17.71	102	23.90	573	30.09	922	36.28	974	42.47	841	48.66	608	54.84	336	61.02	13
5.34	9	11.54	3	17.74	104	23.93	580	30.12	926	36.31	975	42.50	837	48.69	607	54.87	336		
5.37	8	11.57	4	17.77	103	23.96	582	30.15	933	36.34	970	42.53	839	48.72	607	54.90	334		
5.40	8	11.60	3	17.80	101	23.99	589	30.18	933	36.37	976	42.56	836	48.75	604	54.93	330		
5.44	8	11.63	3	17.83	100	24.02	592	30.21	930	36.41	975	42.59	833	48.78	604	54.96	329		
5.47	8	11.66	4	17.86	98	24.05	591	30.25	930	36.44	966	42.62	828	48.81	610	55.00	322		
5.50	8	11.70	4	17.89	101	24.08	590	30.28	939	36.47	970	42.66	821	48.84	615	55.03	322		
5.53	7	11.73	5	17.92	102	24.12	587	30.31	943	36.50	967	42.69	816	48.87	621	55.06	322		
5.56	7	11.76	5	17.95	104	24.15	595	30.34	943	36.53	964	42.72	822	48.90	617	55.09	319		
5.59	7	11.79	6	17.98	106	24.18	597	30.37	943	36.56	965	42.75	821	48.93	615	55.12	315		
5.62	6	11.82	6	18.01	109	24.21	604	30.40	950	36.59	965	42.78	818	48.97	611	55.15	312		

(segue) H60, distanza sorgente rivelatore = 200 cm.

E conteggi (keV)																	
5.65	6	11.85	5	18.05	107	24.24	610	30.43	952	36.62	967	42.81	819	49.00	608	55.18	311
5.68	7	11.88	5	18.08	111	24.27	605	30.46	949	36.65	967	42.84	824	49.03	605	55.21	307
5.71	7	11.91	5	18.11	112	24.30	609	30.49	950	36.68	972	42.87	827	49.06	600	55.24	309
5.75	7	11.94	6	18.14	115	24.33	613	30.52	944	36.71	975	42.90	826	49.09	595	55.27	308
5.78	6	11.97	6	18.17	119	24.36	618	30.56	945	36.75	979	42.93	823	49.12	596	55.30	308
5.81	6	12.01	6	18.20	124	24.39	627	30.59	944	36.78	977	42.96	828	49.15	587	55.34	311
5.84	6	12.04	6	18.23	126	24.43	633	30.62	937	36.81	967	43.00	834	49.18	589	55.37	307
5.87	6	12.07	6	18.26	127	24.46	640	30.65	935	36.84	967	43.03	829	49.21	580	55.40	302
5.90	7	12.10	6	18.29	130	24.49	639	30.68	938	36.87	968	43.06	825	49.24	578	55.43	301
5.93	7	12.13	7	18.32	129	24.52	642	30.71	943	36.90	968	43.09	826	49.27	582	55.46	298
5.96	7	12.16	7	18.36	126	24.55	640	30.74	941	36.93	962	43.12	826	49.31	581	55.49	294
5.99	7	12.19	8	18.39	132	24.58	643	30.77	941	36.96	961	43.15	828	49.34	580	55.52	293
6.02	6	12.22	8	18.42	133	24.61	649	30.80	946	36.99	958	43.18	818	49.37	574	55.55	290
6.05	6	12.25	9	18.45	136	24.64	652	30.83	944	37.02	956	43.21	811	49.40	575	55.58	290
6.09	7	12.28	9	18.48	141	24.67	655	30.86	949	37.05	949	43.24	812	49.43	577	55.61	289
6.12	8	12.31	11	18.51	140	24.70	654	30.90	952	37.09	949	43.27	810	49.46	575	55.65	288
6.15	9	12.35	11	18.54	140	24.73	648	30.93	951	37.12	955	43.31	807	49.49	578	55.68	287
6.18	8	12.38	11	18.57	142	24.77	652	30.96	949	37.15	964	43.34	800	49.52	573	55.71	289
6.21	8	12.41	12	18.60	146	24.80	653	30.99	949	37.18	969	43.37	804	49.55	579	55.74	287
6.24	8	12.44	12	18.63	146	24.83	656	31.02	953	37.21	970	43.40	798	49.58	579	55.77	286
6.27	8	12.47	10	18.67	149	24.86	656	31.05	946	37.24	973	43.43	795	49.62	575	55.80	287
6.30	8	12.50	11	18.70	151	24.89	661	31.08	941	37.27	980	43.46	791	49.65	575	55.83	286
6.33	8	12.53	10	18.73	151	24.92	665	31.11	940	37.30	983	43.49	788	49.68	576	55.86	285
6.37	8	12.56	9	18.76	153	24.95	665	31.14	939	37.33	987	43.52	787	49.71	582	55.89	284
6.43	7	12.62	7	18.82	154	25.01	662	31.21	946	37.40	988	43.58	790	49.77	577	55.95	277
6.46	7	12.66	5	18.85	158	25.04	668	31.24	952	37.43	989	43.61	791	49.80	573	55.99	277
6.49	7	12.69	5	18.88	158	25.08	672	31.27	953	37.46	981	43.65	792	49.83	571	56.02	274
6.52	8	12.72	5	18.91	157	25.11	672	31.30	960	37.49	981	43.68	796	49.86	569	56.05	268
6.55	8	12.75	4	18.94	159	25.14	673	31.33	964	37.52	980	43.71	793	49.89	563	56.08	268
6.58	8	12.78	4	18.97	163	25.17	676	31.36	969	37.55	979	43.74	795	49.92	558	56.11	266
6.61	7	12.81	4	19.01	167	25.20	682	31.39	972	37.58	975	43.77	798	49.96	552	56.14	264
6.64	7	12.84	5	19.04	173	25.23	687	31.42	977	37.61	965	43.80	800	49.99	553	56.17	264
6.68	6	12.87	5	19.07	177	25.26	686	31.45	974	37.64	966	43.83	799	50.02	553	56.20	260
6.71	6	12.90	5	19.10	177	25.29	692	31.48	972	37.67	960	43.86	804	50.05	550	56.23	262
6.74	7	12.93	5	19.13	177	25.32	694	31.51	966	37.70	958	43.89	806	50.08	549	56.26	257
6.77	7	12.97	5	19.16	177	25.35	697	31.55	967	37.74	954	43.92	800	50.11	549	56.29	254
6.80	8	13.00	5	19.19	182	25.39	702	31.58	963	37.77	953	43.95	798	50.14	550	56.33	251
6.83	8	13.03	5	19.22	189	25.42	706	31.61	968	37.80	957	43.99	792	50.17	549	56.36	246
6.86	7	13.06	5	19.25	192	25.45	707	31.64	963	37.83	949	44.02	789	50.20	544	56.39	247
6.89	7	13.09	5	19.28	195	25.48	712	31.67	962	37.86	951	44.05	794	50.23	548	56.42	244
6.92	8	13.12	5	19.32	196	25.51	713	31.70	958	37.89	947	44.08	791	50.26	549	56.45	241
6.95	8	13.15	6	19.35	198	25.54	710	31.73	959	37.92	945	44.11	790	50.30	549	56.48	240
6.99	8	13.18	6	19.38	201	25.57	707	31.76	966	37.95	958	44.14	784	50.33	548	56.51	237
7.02	8	13.21	5	19.41	203	25.60	717	31.79	975	37.98	947	44.17	786	50.36	542	56.54	239
7.05	7	13.24	5	19.44	209	25.63	716	31.82	983	38.01	951	44.20	782	50.39	539	56.57	233
7.08	7	13.28	6	19.47	214	25.66	719	31.86	985	38.05	952	44.23	776	50.42	537	56.60	231
7.11	7	13.31	6	19.50	216	25.69	723	31.89	986	38.08	958	44.26	782	50.45	534	56.63	232
7.14	6	13.34	6	19.53	220	25.73	721	31.92	981	38.11	988	44.29	782	50.48	530	56.67	228
7.17	5	13.37	5	19.56	217	25.76	726	31.95	981	38.14	953	44.33	784	50.51	528	56.70	227

# Bibliografia

- [1] International Organization for Standardization, *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 1: Radiation characteristics and production methods*, International Standard ISO 4037-1, 1997.
- [2] International Commission on Radiation Units and Measurements, *Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation, ICRU Report 57*, Bethesda, MD, 1 August 1998.
- [3] Laitano R.F., Toni M.P., *Condizioni e procedure sperimentali per il riconoscimento dei centri secondari di taratura per le grandezze esposizione ( $X$ ) e kerma in aria ( $K_a$ ) relative alla radiazione X e gamma*, ENEA, Serie Edizione Scientifiche, 1992.
- [4] International Organization for Standardization, *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges 8 keV to 1.3 MeV and 4 MeV to 9 MeV*, International Standard ISO 4037-2, 1997.
- [5] International Organization for Standardization, *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 3: Area and personal dosimeters*, International Standard ISO 4037-3, 1996.
- [6] International Organization for Standardization, *X and gamma reference radiation for calibrating dosimeters and dose rate meters and for determining their response as a function of photon energy - Part 4: Calibration of area and personal dosimeters in low energy reference radiation fields*, International Standard ISO 4037-4 (2000).
- [7] Laitano R.F., Toni M.P., Pani R., Pellegrini R., *Energy distributions and air Kerma rates of ISO and BIPM reference filtered X-radiations*, ENEA, Serie Edizione Scientifiche, 1990.
- [8] Drake, K.-H and Böhm, J., *Automatisierter Meßstand für die Dosimetrie mit Betastrahlung*. PTB-Bericht, PTB-Dos-19 (1990).

- [9] Hubbel, J.H. and Seltzer, S.M., Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy absorption coefficients 1 keV to MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest, NIST, NISTIR 5632, 1995.
- [10] Hakanen A., Kosunen A., Pory P., Tapiovaara M., *Determination of conversion factors from air kerma to operational dose equivalent quantities for low-energy X-ray spectra*, Radiat. Prot. Dosim. ,2006.
- [11] Ankerhold U., Behrens R. and Ambrosi P., *X-ray spectrometry of low energy photons for determining conversion coefficients from air kerma,  $K_a$ , to personal dose equivalent,  $H_p(10)$ , for radiation qualities of the ISO narrow spectrum series*, Radiat. Prot. Dosim. **81**(4), 247-258 (1999).
- [12] Ankerhold U., *Catalogue of X-ray and their characteristic data-ISO and DIN radiation qualities, therapy and diagnostic radiation qualities, unfiltered X-ray spectra*, PTB-Bericht, PTB-Dos-34 (2000).
- [13] Kharrati H., Zarrad B., *Computation of conversion coefficients relating air kerma to  $H_p(0,07,\alpha)$ ,  $H_p(10,\alpha)$  and  $H^*(10)$  for X-ray narrow spectrum from 40 to 140 keV*, Med. Phys. **31**(2), 277-284 (2004).
- [14] International Commission on Radiation Units and Measurements, *Quantities and units in radiation protection dosimetry, ICRU Report 51*, Bethesda, MD, 1 september 1992.
- [15] Till E., Zankl M., Drexler G., *Angular dependence of depth doses in a tissue slab irradiated with monoenergetic photons*, GSF-Bericht 27/95, Munchen, (1995).
- [16] Grobwendt B., *Angular dependence factors and kerma to dose equivalent conversion coefficients for cylindrical phantoms irradiated by planeparallel extended monoenergetic photon beams*, Radiat. prot. Dosim, **59**, (1995).
- [17] International Commission on Radiation Units and Measurements, *Measurement of dose equivalent from external photon and electron radiations, ICRU Report 47*, Bethesda, MD, 1992.
- [18] Tsoufanidis N., *Measurement and detection of radiation*, Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
- [19] Burns P.A., Lindsay J. Martin and John R. Moroney, *Needle Beam Studies Of HPGe Detectors For Photon Efficiency Calibration From 6 To 25 keV*, 480 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A286 (1990) 480-489 North-Holland.
- [20] Salgado, Conti, Becker, *Determination of HPGe detector response using MCNP5 for 20-150 keV X-rays*, Applied radiation and Isotopes 64 (2006), 700-705.

- [21] Ewa I.O.B., Bodizs D., Czifrus Sz., Molnar Zs., *Monte Carlo determination of full energy peak efficiency for a HPGe detector*, Applied Radiation and Isotopes 55 (2001) 103–108.
- [22] Debertain and Pefara, *Calibration of High-purity Germanium Detectors in the Energy Range from 25 to 122 keV*, Nuclear Instruments And Methods I40 (I977) 337-340.
- [23] Debertain K., Furnari J.C. and Walz K.F. *Standard Sources for the Efficiency Calibration of Photon Detectors in the Energy Range from 5 to 40 keV*, Int. J. Appl Radiat. Isor. Vol. 36, No. 12, pp. 977-980, 1985.
- [24] Savitzky A., Golay M.J.E., *Smoothing and Differentiation of data by simplified least squares procedures*, Analytical Chemistry 36(8): 1627-1639, July 1964.
- [25] Para Foglio A., *Misure e strumentazione nucleare*, Edizioni CUSL, 1996.
- [26] Seelentag W.W., Panzer W., *Stripping of X-ray bremsstrahlung spectra up to 300 kV<sub>p</sub> on a desk type computer*, Phys. Med. Biol., 1979, vol. 24, No.4, 767-780.
- [27] Zevallos-Chavez J.Y., da Cruz M.T.F., et al., *Response function of a germanium detector to photon energies between 6 and 120 keV*, Nuclear Instruments and methods in physics Research A 457, 212-219, 2001.
- [28] Kluson J., *Environmental monitoring and in situ gamma spectrometry, Radiation Physics and chemistry*, 61, 209-216, 2001.
- [29] Beach S.M., DeWerd L.A., *Deconvolution and reconstruction techniques of closely spaced low-energy spectra from high-purity germanium spectrometry*, Nuclear Instruments and methods in physics Research A 572, 794-803, 2007.
- [30] Plagnard J., Bobin C., Lépy MC, *Accurate efficiency calibration of a low-energy HPGe detector using a monochromatic x-ray source*, X-ray spectrometry 2007; 36, 191-198.
- [31] Lépy MC, Campbell JL, Laboire JM, Plagnard J., Stemmler P., Teesdale WJ, *Experimental study of the response of semiconductor detectors to low-energy photons*, Nuclear Instruments and methods in physics Research A 439, 239-246, 2000.
- [32] Yilamz E., Can C., *Photoelectron, Compton and characteristic x-ray escape from an HPGe Detector in the range 8-52 keV*, X-ray spectrometry 2004; 33, 439-446.
- [33] Rajput MU, Ahmad M., Amhad W., *Characteristic absolute efficiency response curves of a high purity detector in the energy range 50-1500 keV*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol. 251, No 3 (2002), 457-462.

- [34] Rosner B., Mingay DW, *Properties of intrinsic germanium detectors at low energies by escape peak spectroscopy*, X-ray spectrometry 1983; No 2, 82-86.
- [35] Nogueira MS, Mota HC, Campos LL, *(HP)Ge measurement of spectra for diagnostic x-ray beams*, Radiat. Prot. Dosim. Vol 111, No 1, 105-110 (2004).
- [36] Ankerhold U., *X reference radiation qualities produced with tube voltages above 300 kV for the calibration and testing of dosimeters*, Radiat. Prot. Dosim. Vol 123, No 2, 137-142 (2006).
- [37] Fehrenbacher G., Meckbach R., Jacob P., *Unfolding the response of a Ge detector used for in-situ gamma-ray spectrometry*, Nuclear Instruments and methods in physics Research A 383, 454-462, 1996.
- [38] Kmboj S., Kahn B., *Use of Monte Carlo simulation to examine gamma-ray interactions in germanium detectors*, Radiation Measurements 37 (2003) 1-8.
- [39] Keyser RM, *Resolution and sensitivity as a function of energy and incident geometry for germanium detectors*, Nuclear Instruments and methods in physics Research B 213, 236-240, 2004.
- [40] Birch R., Marshall M., *Computation of bremsstrahlung x-ray spectra and comparison with spectra measured with a Ge(Li) detector*, Phys. Med. Biol., 1979, Vol.24, No 3, 505-517.
- [41] Peroz R., Can C., *Components of detector response function: Monte Carlo simulations and experiment*, X-ray spectrometry 2006; 35, 347-351.
- [42] Can C., Bilgici SZ, *An investigation of x-ray escape for an HPGe detector*, X-ray spectrometry 2003; 32, 276-279.
- [43] Can C., *Escape of photoelectrons and Compton-scattered photons from an HPGe detector*, X-ray spectrometry 2003; 32, 280-284.
- [44] Delgado Martinez V., Mainardi RT, Barrea RA, Martinez Hidalgo C., Derosa PA, Arbolí MM, *Parametric equation for the efficiency curve of germanium detectors*, X-ray spectrometry 1998; 27, 321-324.
- [45] Debertain K., Furnari JC, Walz KF, *Standard sources for the efficiency calibration of photon detectors in the energy range from 5 to 40 keV*, Int. J. Appl. Radiat. Isot. Vol. 36, No 12, pp. 970-980, 1985.
- [46] Pani R., Laitano RF, Pellegrini R, *Diagnostic x-ray spectra measurements using a silicon surface barrier detector*, Phys. Med. Biol., 1987, Vol. 32, No 9, 1135-1149.
- [47] Lépy MC, Plagnad J., Ferreux L., *Study of the response function of a HPGe detector for low-energy X-rays*, Nuclear Instruments and methods in physics Research A 505, 290-293, 2003.

- [48] Lembo L., I. Sermenghi, *Realizzazione di una camera monitor per il controllo della stabilità dei fasci di raggi X*, CNEN, 1973.
- [49] Bartolotta A., Pugliani L., Salvadori P., *Realizzazione di una camera a ionizzazione ad aria libera per il controllo di stabilità di un fascio di raggi X di bassa energia*, ISSN 0390-6485, 1983.
- [50] Ankerhold U., Behrens R. Ambrosi P., *A prototype ionisation chamber as a secondary standard for the measurement of the personal dose equivalent,  $H_p(10)$ , on a slab phantom*, Radiat. Prot. Dosim. Vol 86, No 3, 167-173 (1999).
- [51] Ankerhold U., Ambrosi P., Eberle T., *A chamber for determining the conventionally true value of  $H_p(10)$  and  $H^*(10)$  needed by calibration laboratories*, Radiat. Prot. Dosim. Vol 96, Nos 1-3, 133-137 (2001).
- [52] Fabrizi FR, Pugliani L., Bartolotta A., *Realization of reference x-ray beams and of an exposure secondary standard in the medium energy range*, Physica Medica Vol VII, N 1, 1991.
- [53] Bartolotta A., Pugliani L., *A new italic calibration facility in the soft x-ray region*, IAEA-SM-298/91.
- [54] Bartolotta A. et al, *The free-air ionization chamber for low energy x-rays of the Istituto Superiore di Sanità*, Physica Medica Vol 1, pp 9-17, 1987.
- [55] Bartolotta A., Pugliani L., Salvadori P., *A primary exposure standard for x-rays in the (30-150) keV range*, Il Nuovo Cimento Vol 4D, No 4, 1984.
- [56] Bartolotta A., Fabrizi FR, Pugliani L., *ISS-BIPM intercomparison between exposure primary standards in the soft x-ray region (10 to 50 kV)*, Physica Medica Vol 3-4, pp 185-192, 1988.
- [57] Kramer HM, *On the use of conversion coefficients from air kerma to the ICRU quantities for low energy X ray spectra*, Radiat. Prot. Dosim. Vol 54, Nos 3-4, pp 213-215 (1994).
- [58] Briesmeister J.F., (Editor), MCNP4C, *A General Monte Carlo N-Particle Transport Code*, Version 4C, LA-13709-M, Los Alamos, NM, USA (April 2000).