

# **Calibratore per rivelatori di raggi X tra 10 e 200 keV**

**Presso il TeSRE-CNR**

---

## **Manuale d'uso**

**E. Celesti<sup>1</sup>, C. Labanti<sup>1</sup>, A. Traci<sup>1</sup>, M. Cappi<sup>1</sup>, G.G.C. Palumbo<sup>2,3</sup>**

- 1- Istituto TeSRE – CNR Bologna**
- 2- Dipartimento di Astronomia – Università di Bologna**
- 3- Attualmente presso: ASI – Agenzia Spaziale Italiana**

**Rapporto Tecnico n. 303  
Febbraio 2001**

Versione 1.0  
26 Febbraio 2001

# Indice

<b>INTRODUZIONE .....</b>	<b>4</b>
<b>1 IL CALIBRATORE E LE SUE COMPONENTI.....</b>	<b>5</b>
1.1 La sorgente X .....	7
1.2 Il sistema di collimazione .....	7
1.3 Il cristallo monocromatore.....	8
1.4 Elettronica di controllo del tubo radiogeno e sicurezza del sistema .....	10
1.5 Area sperimentale .....	11
<b>2 CARATTERIZZAZIONE DEL CALIBRATORE.....</b>	<b>12</b>
2.1 Spettro primario .....	12
2.2 Selezione in energia.....	13
2.3 Risoluzione energetica del picco a 60 keV .....	14
2.4 Spettro generato in funzione dei parametri del calibratore.....	15
2.5 Fondo della sorgente.....	17
<b>3 FATTORI CHE INFLUISCONO SULLE PRESTAZIONI DEL SISTEMA.....</b>	<b>18</b>
3.1 Il sistema di collimazione .....	18
3.2 Monocromaticità del fascio .....	20
3.3 Riduzione in intensità del fascio dovuta all'assorbimento dei raggi X in aria.....	21
<b>4 MECCANICA ED ELETTRONICA DEL SISTEMA DI CALIBRAZIONE .....</b>	<b>22</b>
4.1 Il banco ottico.....	22
4.2 Piastra di supporto .....	22
4.3 Sorgente e staffa di supporto .....	23
4.4 Collimatori.....	23
4.5 Sistema di selezione dell'energia.....	24
4.6 Sistema di movimentazione del rivelatore .....	24
4.7 Interfaccia meccanica rivelatore-sistema di movimentazione.....	25
4.8 Controllo dei movimenti motorizzati .....	26
4.9 Elettronica di controllo del sistema di movimentazione .....	26

<b>5</b>	<b>SOFTWARE PER IL CONTROLLO DELLA CALIBRAZIONE ED ISTRUZIONI PER L'USO .....</b>	<b>28</b>
5.1	Accesso alla facility .....	29
5.2	Selezione funzione .....	29
5.3	Centratura degli assi motorizzati .....	30
5.4	Fase di Preriscaldamento.....	31
5.5	Elaborazione parametri .....	32
5.6	Settaggio dei parametri della calibrazione .....	33
5.7	Movimentazione assi.....	34
5.8	Emissione di raggi X.....	35
<b>6</b>	<b>SICUREZZA: DISPOSIZIONE DEL SISTEMA DEI CONSENSI E DELLE SEGNALAZIONI LUMINOSE ED ACUSTICHE.....</b>	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>CONFRONTO CON ALTRE FACILITY NEL MONDO.....</b>	<b>38</b>
<b>8</b>	<b>POSSIBILI MODIFICHE AL SISTEMA DI CALIBRAZIONE.....</b>	<b>40</b>
	<b>RINGRAZIAMENTI .....</b>	<b>42</b>

# Introduzione

L'Istituto Tecnologia e Studio della Radiazione Extraterrestre (TeSRE) del Consiglio Nazionale delle Ricerche di Bologna vanta una attività trentennale nella costruzione, operazione e sfruttamento scientifico di telescopi per X e gamma Astronomia. La tradizione del TeSRE fonda le sue radici nei pionieristici esperimenti per pallone della fine degli anni '60 e si estende nella partecipazione, in ruoli determinanti, ai più moderni programmi di osservatori internazionali su satelliti basti citare per tutti SAX, INTEGRAL ed AGILE.

Il ruolo del TeSRE nei moderni progetti è diretta conseguenza della continua attività di sperimentazione di nuove tecnologie per la rivelazione della radiazione X e gamma. L'impiego di queste tecnologie nel disegno di rivelatori che siano scientificamente all'avanguardia non può prescindere da una completa padronanza della tecnologia stessa se non dalla sua concezione e sperimentazione fin dalle prime fasi di utilizzo.

Per mantenere gli standard di padronanza della tecnologia raggiunti è spesso necessario dotarsi di strumentazione di test con caratteristiche specifiche dell'ambiente sperimentale in cui si vuole operare.

In questa ottica rientra la costruzione del calibratore per raggi X descritto nel seguito. Date le sue caratteristiche e la vasta trama di collaborazioni nazionali ed internazionali del TeSRE si presume che lo strumento sarà utilizzato da vasta comunità di ricercatori.

# 1 Il calibratore e le sue componenti

Il calibratore (figura 1-1) è un apparato in grado di produrre in area test un fascio di radiazione collimato e di energia selezionabile con continuità tra 10 e 200 keV.

Il principio di funzionamento si basa sulla rifrazione della radiazione in un cristallo (legge di Bragg). Di un fascio incidente sul cristallo 'monocromatore' con angolo  $\theta$  vengono riflesse solo le lunghezze d'onda che soddisfano la condizione:

$$(1) \quad n\lambda = 2d \sin\theta$$

dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda del fascio riflesso,  $d$  è la distanza fra i piani reticolari del cristallo,  $\theta$  è sia l'angolo di incidenza che l'angolo di diffrazione ed  $n$  è un numero intero.

Le componenti del sistema sono le seguenti (Fig. 1-1):

- La cuffia radiogena S che emette il fascio di radiazione X con spettro di energia continuo.
- Tre collimatori meccanici C1-C2-C3 posti in sequenza la cui funzione è di ridurre le dimensioni e la divergenza del fascio.
- Un cristallo monocromatore C che riflette solo la parte del fascio con lunghezza d'onda che soddisfa alla condizione di Bragg.
- Il rivelatore R sotto test posizionato in modo tale da seguire la condizione di Bragg.
- Un sistema di movimentazione M1 che permette di posizionare il cristallo C ed un quarto collimatore C4.
- Un sistema di movimentazione M2 per il posizionamento del rivelatore R.

I movimenti necessari per soddisfare la condizione di Bragg ad una data energia e per esporre al fascio un punto voluto del rivelatore R sono eseguiti con un movimento a 6 assi indipendenti, e sono:

- Rotazione del cristallo C intorno ad un asse normale al fascio incidente e parallelo alla faccia del cristallo.
- Rotazione del collimatore C4 per selezionare l'energia, intorno ad un asse parallelo al precedente.
- Traslazioni X, Y e Z del rivelatore R sia per permettere di fare incidere perpendicolarmente su R il fascio diffratto ai diversi angoli, che per una eventuale scansione di R.
- Rotazione di R per mantenerlo ortogonale al fascio diffratto.

Il sistema è installato nei locali 105a e 105b (vedi par. 1.5) dell' Istituto TESRE via Gobetti 101 Bologna.

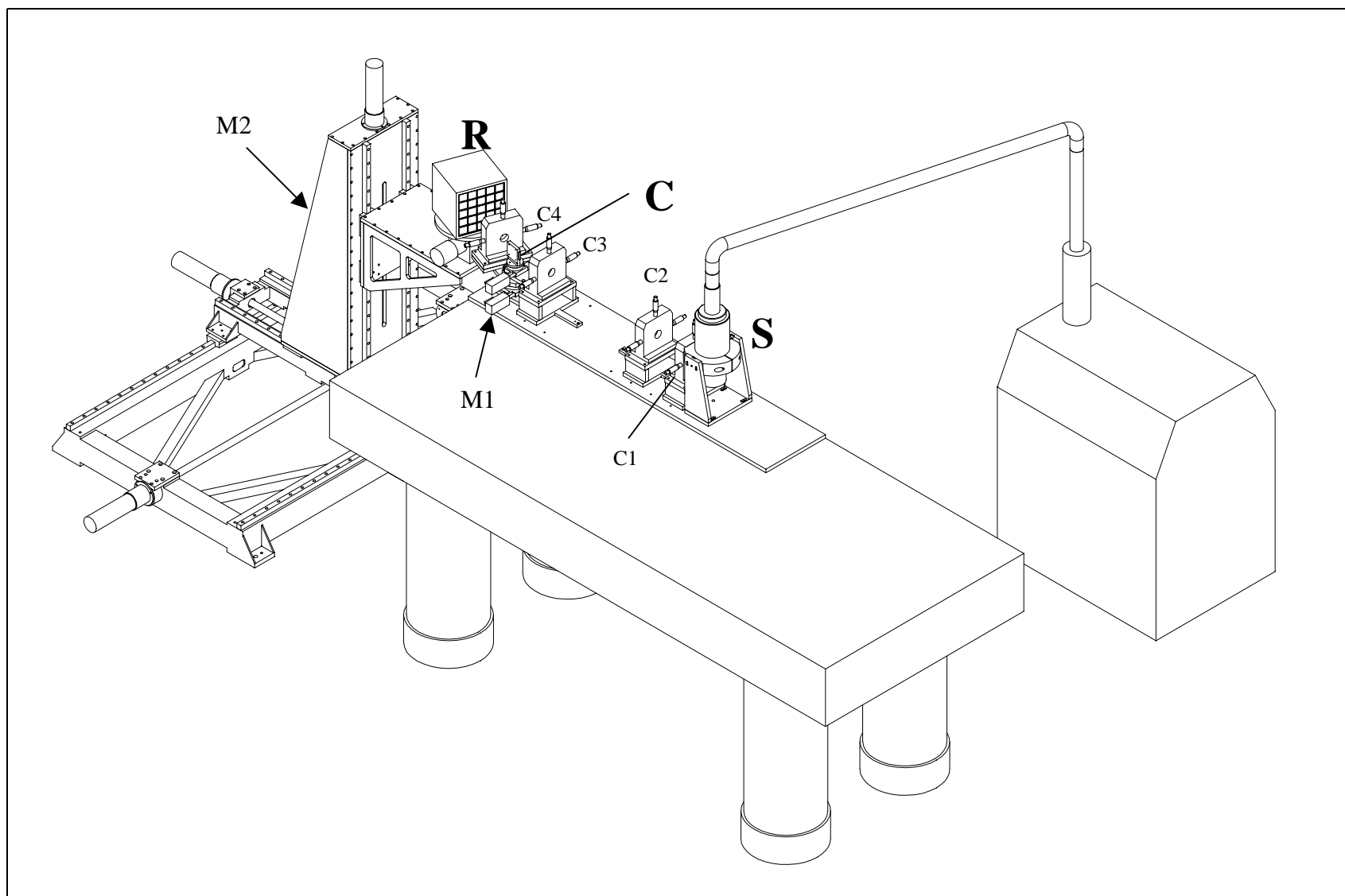


Fig. 1-1: Prospettiva dello strumento per la calibrazione di rivelatori di raggi X.

## 1.1 La sorgente X

La sorgente di raggi X del sistema è un apparecchio radiologico commerciale, modello Gilardoni CHF 225, cui può essere applicata una tensione compresa tra i 20 ed i 200 kV con corrente regolabile tra alcuni mA e 30 mA.

Le tipiche componenti della radiazione emessa da questa macchina (Kahn F. M., 1984) sono quella di bremsstrahlung, cui si sommano le righe di emissione tipiche dell' anodo in Tungsteno del tubo (vedi cap. 2).

In tabella 1.1-1 sono riassunte le principali caratteristiche del tubo.

Descrizione Generatore Alta Tensione		Descrizione Cuffia Radiogena	
Potenza (Watt costanti)	640/1600	Spot Sorgente (mm)	0.4×0.4 (SF) 1.5×1.5 (SG)
Regolazione kV	20-200 kV	Max mA (alla tensione max)	3 (SF) 7 (SG)
Regolazione mA	0-30	Filtrazione	2 mm Be
Precisione	2% per i kV 1% per i mA	Penetrazione	50 mm Fe
Stabilità KV e mA	0.05÷0.1%/h	Angolo del fascio	40°

Tabella 1.1-1: Caratteristiche del tubo radiogeno mod. Gilardoni CHF225.

## 1.2 Il sistema di collimazione

Il fascio di radiazione X emessa dal tubo è divergente con un angolo di apertura  $\alpha \sim 40^\circ$ . Poichè la divergenza del fascio ha conseguenze sulla monocromaticità dei raggi rifratti dal cristallo è stato necessario inserire un sistema di collimazione, realizzato utilizzando 4 collimatori con aperture variabili manualmente, la cui disposizione è illustrata in Fig. 1.2-1.

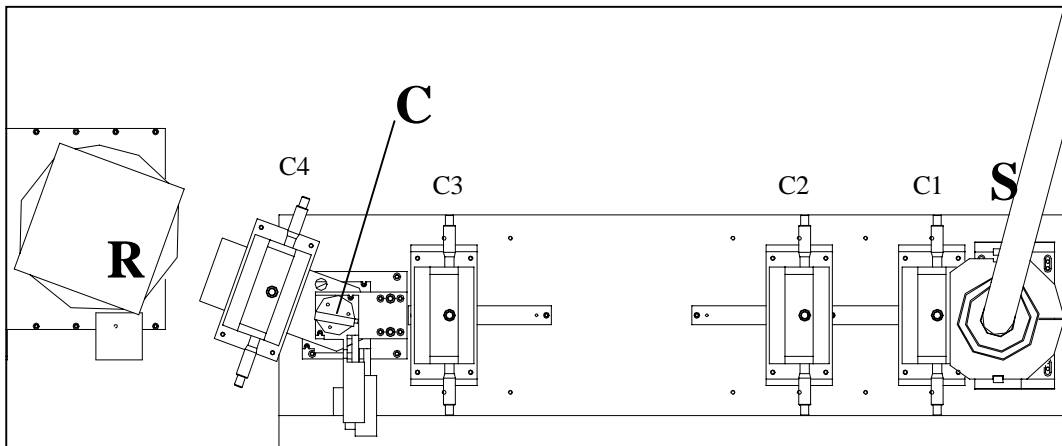


Fig. 1.2-1: Vista dall'alto del sistema di collimatori.

- I primi due, C1 e C2, servono a contenere l'ampiezza del fascio entro un raggio fissato. In particolare C1 può essere usato per regolare la dimensione della macchia focale S della sorgente.
- C3 è posto immediatamente prima del cristallo; la sua apertura serve per controllare la divergenza del fascio in uscita dal collimatore.
- C4, posto immediatamente prima del rivelatore, determina con la sua apertura la FWHM del fascio sul rivelatore. C4 è fissato ad una staffa solidale con il goniometro G posto sotto il cristallo. Grazie a G si dispone C4 in modo che formi un angolo  $2\alpha$  con la direzione della radiazione X uscente dal tubo, ed un angolo  $\alpha$  con il piano del cristallo.

L'ampiezza delle aperture di C3 e C4 va da 50  $\mu\text{m}$  a 1 mm, con passo dell'ordine dei 10  $\mu\text{m}$ . I primi tre collimatori sono stati montati su di un binario che consente di variarne la posizione lungo la direzione del fascio.

### 1.3 Il cristallo monocromatore

In questa analisi si considera  $n=1$  nella (1), cui corrisponde il primo ordine di diffrazione che produce il raggio riflesso con intensità maggiore.

Per selezionare tutte le energie prodotte dalla sorgente (10 – 200 keV) con sufficiente precisione e con angoli  $\theta$  facilmente impostabili si è scelto di operare con due cristalli:

- Germanio (111) con passo reticolare  $2d = 6.532 \text{ \AA}$  e dimensioni 60mm x 30mm x 2mm.
- Fluoruro di Litio (220) con passo reticolare  $2d = 2.848 \text{ \AA}$  e dimensioni 60mm x 30mm x 3.5mm.

E (keV)	Angolo di rifrazione (°)		E (keV)	Angolo di rifrazione (°)	
	Ge (111)	LiF (220)		Ge (111)	LiF (220)
10	10.94	25.86	15	7.27	16.91
20	5.44	12.60	25	4.32	10.05
30	3.63	8.36	35	3.11	7.16
40	2.72	6.26	45	2.42	5.56
50	2.17	5.01	55	1.98	4.55
60	1.81	4.17	65	1.67	3.85
70	1.55	3.57	75	1.45	3.33
80	1.36	3.13	85	1.28	2.94
90	1.21	2.78	95	1.14	2.63
100	1.09	2.50	105	1.04	2.38
110	0.99	2.27	115	0.95	2.17
120	0.91	2.08	125	0.87	2.00
130	0.84	1.92	135	0.81	1.85
140	0.78	1.79	145	0.75	1.72
150	0.72	1.67	155	0.70	1.61
160	0.68	1.56	165	0.66	1.51
170	0.64	1.47	175	0.62	1.43
180	0.60	1.39	185	0.59	1.35
190	0.57	1.32	195	0.56	1.28
200	0.54	1.25			

Tabella 1.3-1 – Angoli di rifrazione (in °)



In tabella 1.3-1 sono riportati gli angoli di incidenza fascio-cristallo necessari per ottenere varie energie in uscita.

I due cristalli in dotazione permettono di impostare angoli di rifrazione ben al di sopra dell'angolo critico a cui si ha riflessione totale di raggi X; è stato valutato che l'angolo critico è quasi sempre un centesimo dell'angolo di diffrazione della Tab. 1.3-1.

La radiazione incidente sul cristallo che non soddisfa la condizione di Bragg subisce gli effetti di assorbimento da parte del cristallo stesso che sono più marcati alle basse energie secondo la relazione (vedi tabella 1.3-2 e fig. 1.3-1):

$$(2) \quad \frac{I}{I_0} = e^{-\mu X}$$

$\mu$  = Coefficiente di assorbimento del materiale (1/cm).

$X$  = Spessore di materiale attraversato dalla radiazione.

L'interazione con il cristallo della radiazione non diffratta produce radiazione di fondo scatterata anche verso la zona del rivelatore R. Questo fondo è ridotto sia dalla presenza del collimatore C4 sia da una schermatura posta nella zona del cristallo.

<b>Ge (111)</b> $\rho = 5.325 \text{ g/cm}^3$				
E (keV)	$\alpha$ (°)	$\mu$ (1/cm)	X (mm)	I/I <sub>0</sub>
10	10.9	199	10.6	0
50	2.2	17.8	30.0	6.4E-24
100	1.1	2.96	30.0	1.4E-04
200	0.5	0.88	30.0	7.1E-02
<b>LiF (220)</b> $\rho = 2.639 \text{ g/cm}^3$				
E (keV)	$\alpha$ (°)	$\mu$ (1/cm)	X (mm)	I/I <sub>0</sub>
10	25.9	16.1	8.0	2.5E-06
50	5.0	0.53	30.1	2.0E-01
100	2.5	0.38	30.0	3.2E-01
200	1.25	0.30	30.0	4.0E-01

Tabella 1.3-2: Quantità di radiazione trasmessa dai cristalli, tenendo conto dell'angolo di inclinazione rispetto al fascio incidente a varie energie (vedi anche fig. 1.3-1).

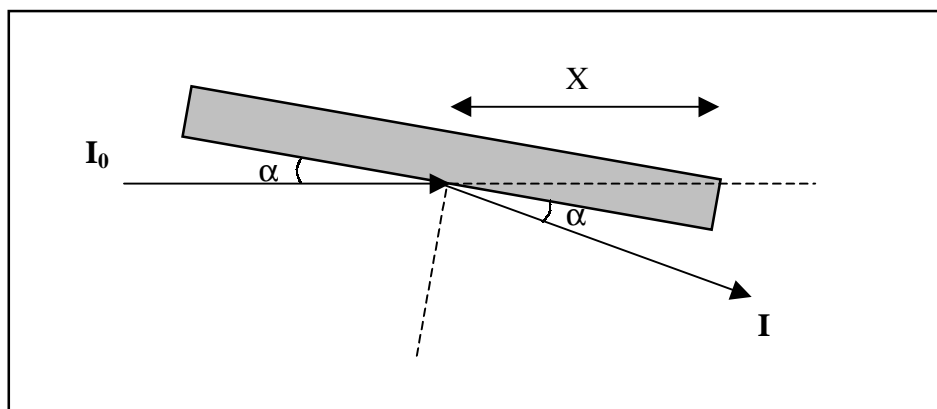


Fig. 1.3-1: Schema dell'assorbimento dei raggi X da parte dei cristalli.

## 1.4 Elettronica di controllo del tubo radiogeno e sicurezza del sistema

Il sistema per l'emissione di raggi X è composto da:

- Un generatore di alta tensione in grado di produrre una tensione variabile tra 5 e 200 kV.
- Un tubo radiogeno.
- Uno scambiatore acqua\olio per il raffreddamento della cuffia.
- La consolle di controllo.

Per la descrizione dettagliata delle componenti vedere il manuale d'uso del tubo radiogeno. Lo schema di funzionamento del sistema è il seguente (fig. 1.4-1):

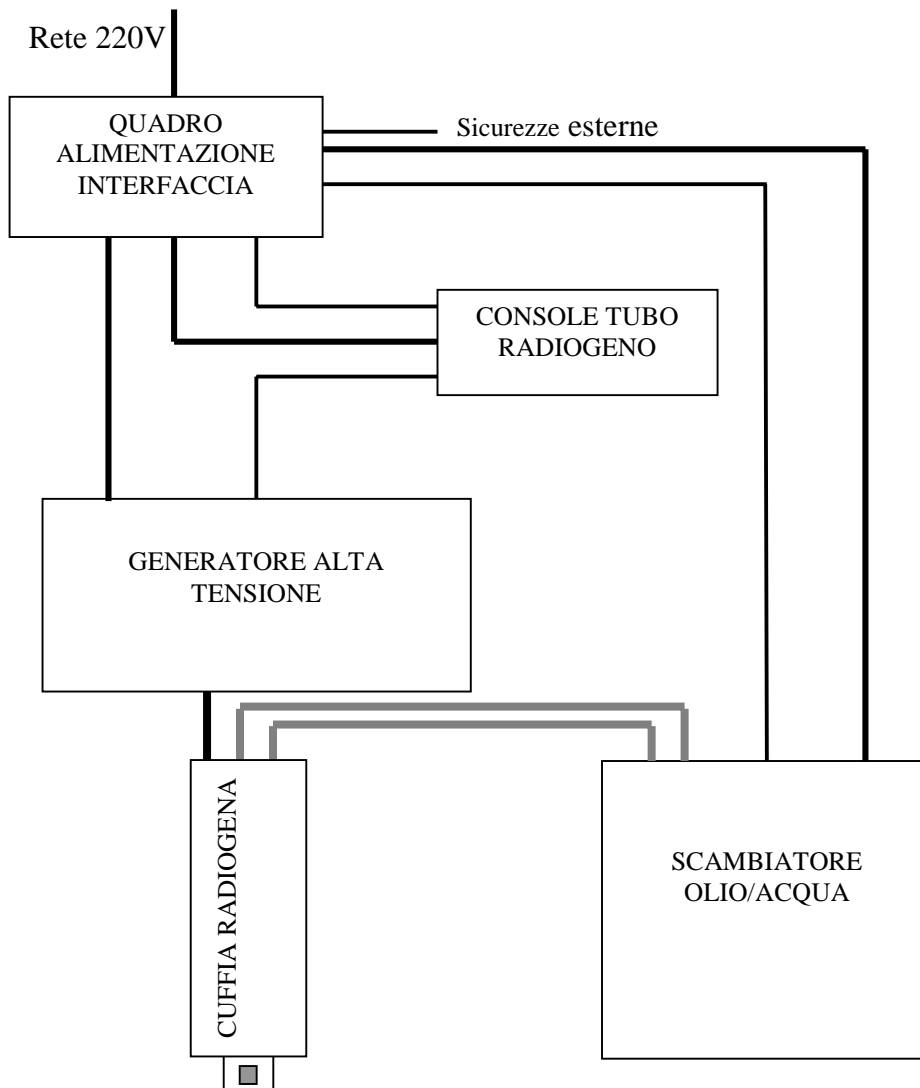


Fig. 1.4-1: Schema di funzionamento del sistema di emissione Raggi-X.

L'alimentazione del tubo a raggi X è condizionata dalla osservanza di regole di sicurezza, in particolare essa può essere attivata solo da posizione remota, quando l'operatore si trova in zona adeguatamente schermata. La verifica delle condizioni di sicurezza è affidata ad una serie di interlock ed interruttori descritti nel capitolo 6.

## 1.5 Area sperimentale

Il calibratore per raggi X è ospitato nel locale schermato 105a (fig. 1.5.1) mentre la console di comando del sistema è posta nel locale 105b separato dal precedente da una porta scorrevole con schermi al Pb.

Le dimensioni del locale 105a sono  $7.2 \times 11.6 \text{ m}^2$  in grado quindi di ospitare apparati sperimentali di dimensioni considerevoli.

Il locale 105a è dotato di servizi come aria compressa, gas ed accesso alla rete informatica dell'Istituto.

Il locale 105b è dotato di accesso alla rete informatica dell'Istituto.

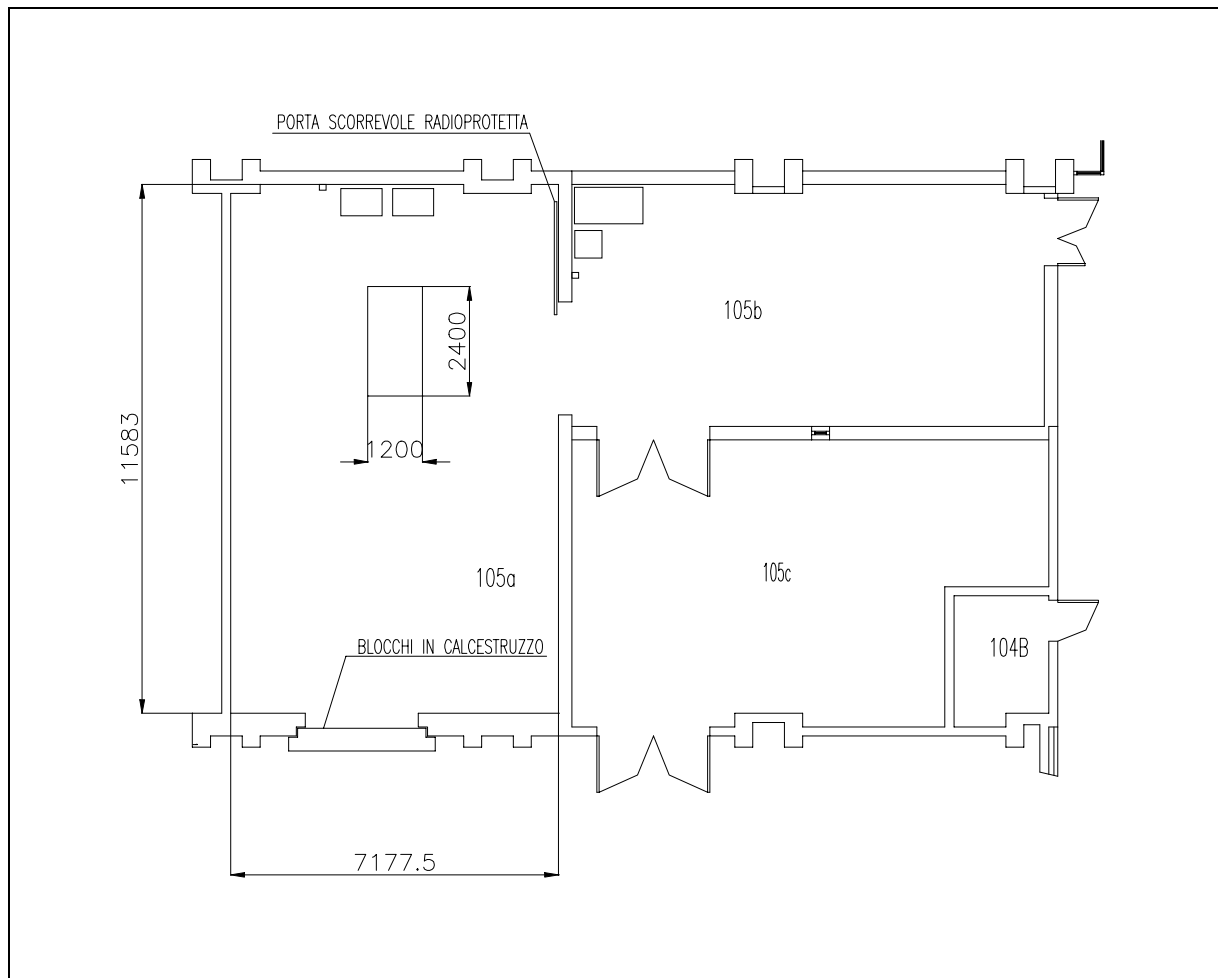


Fig. 1.5.1 : Pianta dei locali 105: 105a Sala Macchine Radiogene e 105b Sala Controllo.

## 2 Caratterizzazione del calibratore

Vengono brevemente illustrate le caratteristiche dei fasci che si possono ottenere con il calibratore; esse vanno intese come esempi parziali delle possibilità del calibratore.

Ogni esperimento che utilizzi il calibratore dovrà necessariamente prevedere una fase di caratterizzazione del fascio essendo numerosi i parametri del sistema su di cui si può intervenire durante la fase di settaggio.

E' dapprima illustrato lo spettro primario originato dalla sorgente, quindi vengono mostrate e discusse le caratteristiche del fascio all'energia di riferimento di 60 keV, confrontabile con lo spettro della sorgente  $^{241}\text{Am}$  monocromatica nello stesso range.

Segue una valutazione delle caratteristiche del fascio quali intensità e monocromaticità in funzione dei valori di tensione e corrente del tubo e apertura dei collimatori.

Infine è discussa la radiazione di fondo generata dal fascio.

### 2.1 Spettro primario

Lo spettro primario generato dal tubo radiogeno è dato da più componenti sovrapposte:

- Una componente di bremsstrahlung.
- Le righe caratteristiche di emissione dell'anodo di Tungsteno.
- Assorbimento alle basse energie dovuto alla finestra di Berillio del tubo radiogeno dello spessore di 2 mm.

In fig. 2.1-1 è mostrato lo spettro registrato da un rivelatore HPGe di 13 mm di profondità, e quindi con buona efficienza fino a 200 keV (68% @ 200 keV). In figura il tubo radiogeno è alimentato a 200 kV, 3 mA ed il rivelatore è posto fuori dall'asse del fascio per evitare di saturarlo.

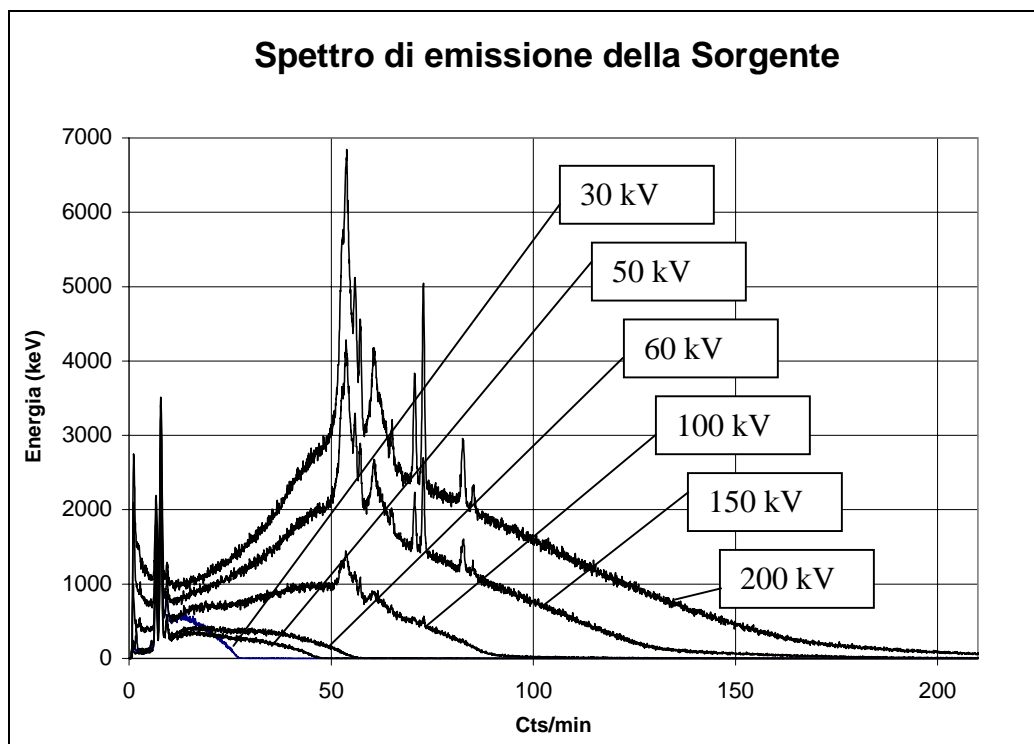


Fig. 2.1-1: Spettro visto da un rivelatore di tipo HPGe (posto 20° fuori asse) dell'emissione della macchina a varie tensioni, 3 mA di corrente (10 mA per la misura a 30 kV).

## 2.2 Selezione in energia

La figura 2.2-1 illustra la capacità del sistema di operare una selezione in energia. Come riferimento si è preso uno spettro a 30 keV raccolto da un rivelatore tipo HPGe.

Le caratteristiche operative erano:

Tensione tubo	100 kV
Corrente tubo	5 mA
Apertura collimatore C1	1 mm
Apertura collimatore C2	1 mm
Apertura collimatore C3	0.5 mm
Apertura collimatore C4	1 mm
Angolo rotazione cristallo	8.32°

Si possono notare le seguenti caratteristiche del picco:

- Picco principale all'energia selezionata (30 keV) con FWHM=530 eV (che varia al variare dell'energia selezionata come descritto in 3.2). Da notare che la risoluzione dello strumento a 30 keV è di circa 500 eV.
- Picco secondario ad energia doppia di quello principale perché corrisponde al secondo ordine della rifrazione di Bragg. Il rapporto delle intensità tra picco principale e picco secondario varia a seconda dell'energia selezionata ( $I/I_{\text{secondario}} \cong 40$  con fascio a 30 keV, a 100 keV  $I/I_{\text{secondario}} \geq 100$ ).
- Picchi di bassa intensità, ad energie inferiori a quella selezionata. La loro energia varia al variare dell'energia selezionata per il fascio.
- La forma del picco è generalmente quasi gaussiana, ma può presentare discostamenti più o meno marcati da questa, questi portano ad un peggioramento del FWHM. Si verificano soprattutto ad energie elevate (angoli piccoli) quindi è probabile siano dovuti ad imperfezioni del cristallo.

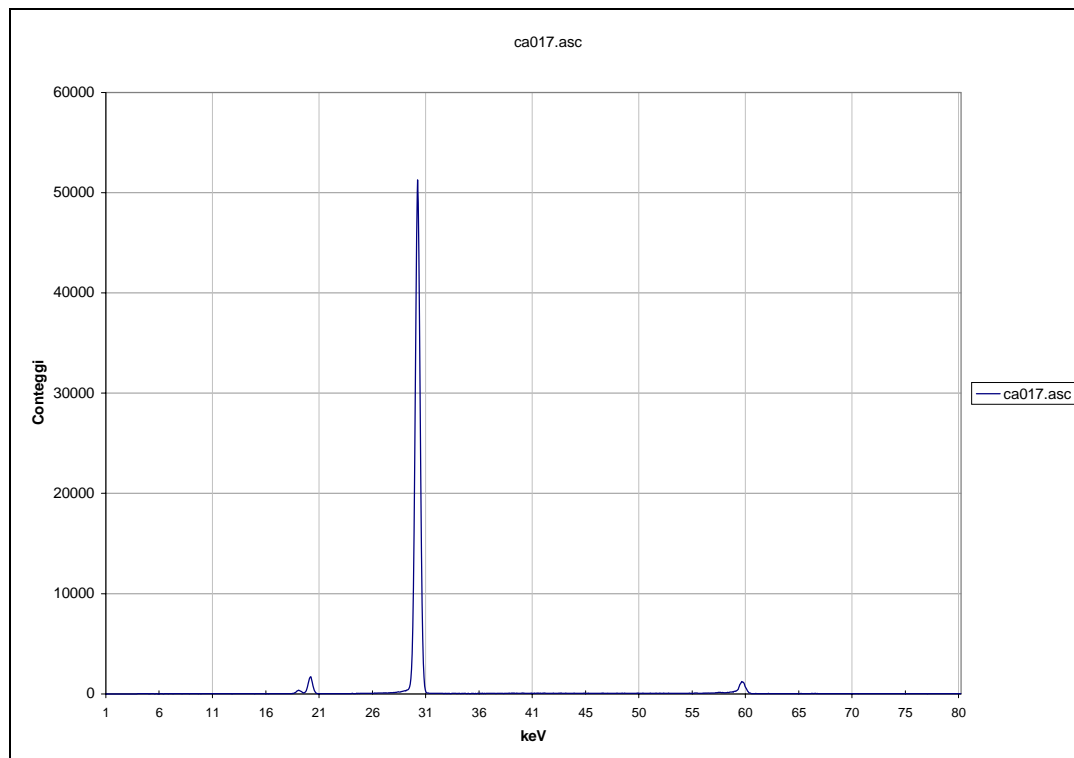


Fig. 2.2-1: Picco tipico generato dal calibratore a 30 keV.

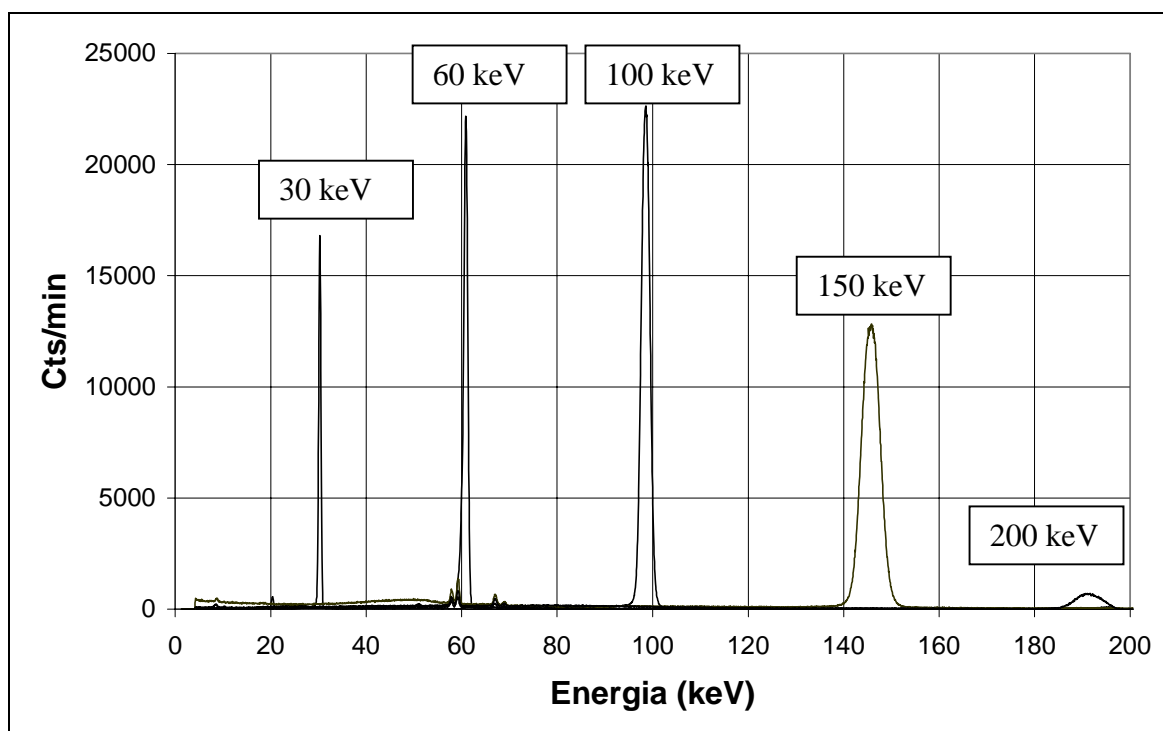


Fig. 2.2-2: Picchi campione ottenuti dopo avere impostato varie energie.

### 2.3 Risoluzione energetica del picco a 60 keV

Poiché la larghezza in energia dei picchi prodotti dal sistema può essere più stretta di quella risolta dal rivelatore HPGe utilizzato per i test, si è confrontato un picco a 60 keV ottenuto dal calibratore con quello ottenuto da una sorgente di Am-241 a 59.54 keV (vedere fig. 2.3-1). Per risalire alla FWHM effettiva del picco generato col calibratore si è utilizzata la seguente espressione:

$$FWHM_{Cal} = \sqrt{(FWHM_{60keV})^2 - (FWHM_{Am})^2}$$

Dove:

$FWHM_{Cal}$  = Larghezza del picco generato dal calibratore.

$FWHM_{60keV}$  = Larghezza del picco a 60 keV generato dal calibratore e visto dal rivelatore HPGe.

$FWHM_{Am}$  = Larghezza del picco a 60 keV di Am241 visto dal rivelatore HPGe.

Dopo avere esaminato i due spettri sono stati ottenuti i seguenti valori:

$$FWHM_{Am} = 520 \text{ eV} \quad FWHM_{60keV} = 590 \text{ eV}^*$$

$$FWHM_{Cal} = 280 \text{ eV}$$

\*Con aperture dei collimatori:

C1=0.1 mm, C2=1 mm, C3=1 mm e C4=1 mm.

e parametri del calibratore:

Tensione=100 kV, Corrente=5 mA, Angolo del cristallo=4.32°.

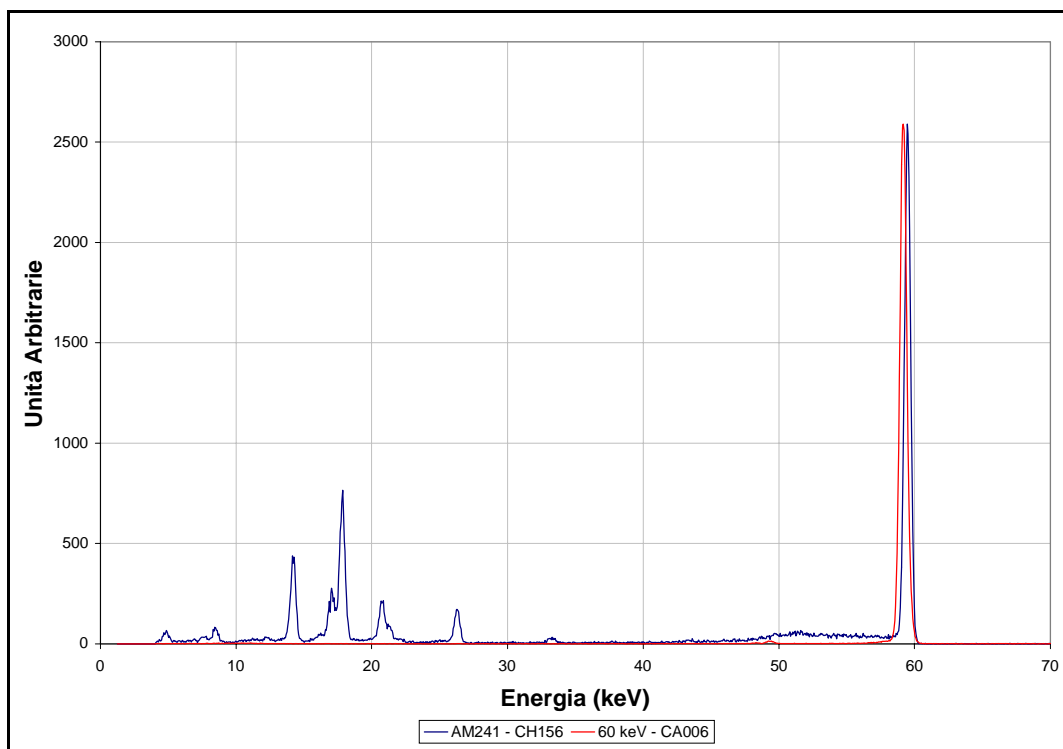


Fig. 2.3-1: Confronto tra picco 60 keV del calibratore e picco dell'Am-241, visti da rivelatore HPGe. I picchi secondari visibili a tra 10 e 20 keV sono emessi dalla sorgente di Am-241.

## 2.4 Spettro generato in funzione dei parametri del calibratore

Dopo avere eseguito vari test con un rivelatore tipo HPGe, risulta che l'andamento del numero di conteggi sotto il fotopicco varia in modo lineare con il variare della **corrente** del filamento del tubo, a parità di tensione. In figura 2.4-1 viene mostrato tale andamento per diversi valori della corrente e della tensione del tubo, per un fascio monocromatico di 30 keV di energia.

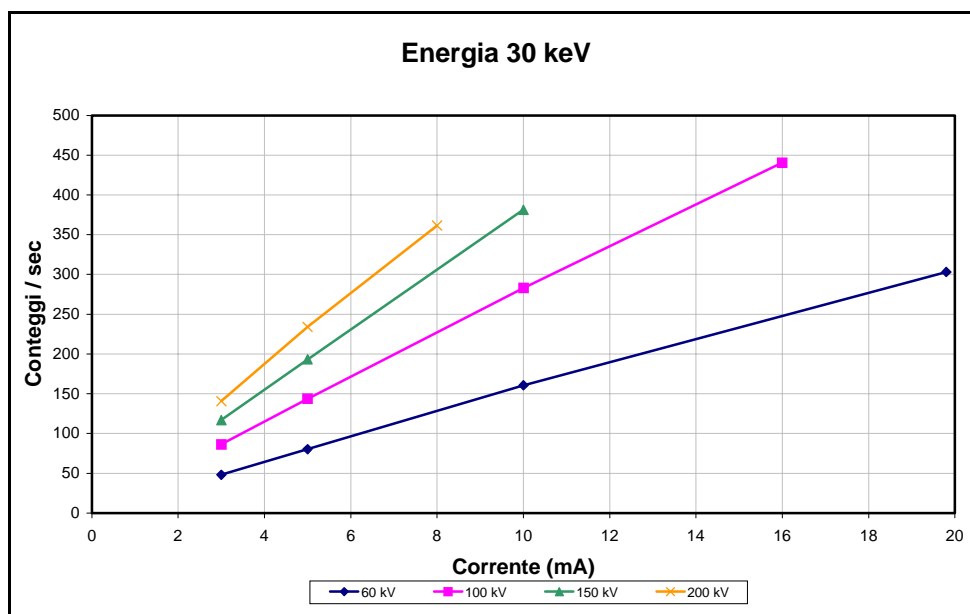


Fig. 2.4-1: Andamento del flusso della radiazione sul rivelatore all'aumentare della corrente, per un'energia del fascio di 30 keV.

Agendo sulla **tensione** del tubo si varia la ‘durezza’ dello spettro generato, aumentando la tensione applicata al tubo radiogeno aumenta infatti in proporzione anche l’energia massima dei fotoni emessi. Ad esempio a 150 kV di tensione applicata al tubo corrisponde un’energia massima dei fotoni emessi di 150 keV.

Ogni variazione della tensione del tubo influisce inoltre sul flusso di radiazione emesso dalla macchina ad una data energia, come si può vedere in fig. 3.4-2 per un fascio di 30 keV.

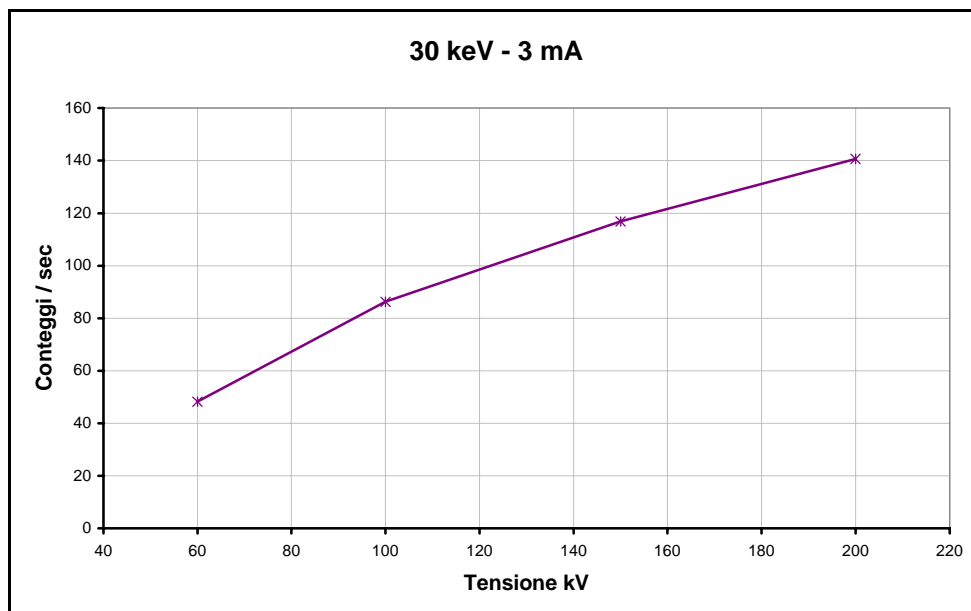


Fig. 2.4-2: Andamento del flusso della radiazione in funzione della tensione applicata al tubo.

La variazione dell’**apertura dei collimatori** incide sia sulla FWHM dello spettro al rivelatore (come mostrato in par. 3.2 e fig. 2.4-3) che sul flusso della radiazione incidente. Quest’ultimo viene ridotto al diminuire dell’apertura dei collimatori.

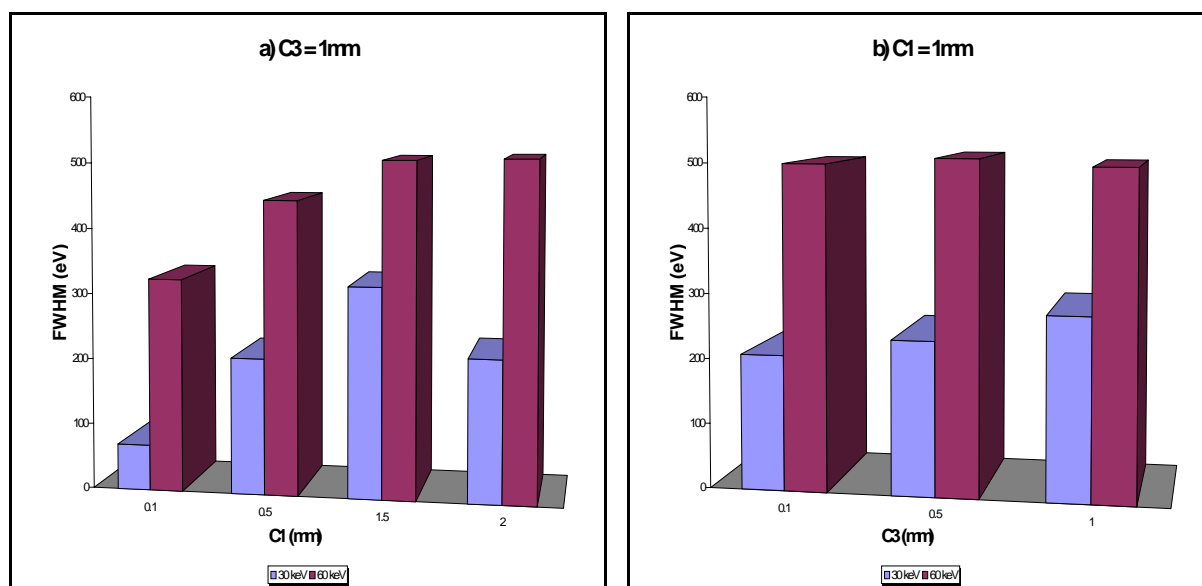


Fig. 2.4-3-a, 2.4-3-b: Andamento della risoluzione energetica del fascio prodotto in funzione dell’apertura dei collimatori C1 (a) e C3 (b).



## 2.5 Fondo della sorgente

Per minimizzare la presenza di radiazione esterna sul rivelatore, è stata applicata una schermatura di Piombo lungo il percorso ottico dei raggi X emessi dal tubo. Per misurare l'entità del fondo residuo sono state effettuate misure con un rivelatore di tipo HPGe a  $20^\circ$  dalla direzione del fascio, e con il rivelatore sul fascio ed il collimatore C4 chiuso. Da questi dati è risultato che il fondo misurato è trascurabile rispetto allo spettro generato dal calibratore, anche dopo avere impostato i valori massimi di tensione e corrente del tubo (situazione più svantaggiosa).

È da notare infine che lo spettro rifratto dal cristallo risulta polarizzato linearmente, e quindi adatto a misure di polarimetria.

# 3 Fattori che influiscono sulle prestazioni del sistema

## 3.1 Il sistema di collimazione

L'apertura determinata dai collimatori influenza sia l'intensità sia la monocromaticità del fascio al rivelatore R. L'apertura dei collimatori si determina facendo un compromesso tra la qualità spettrale del fascio che si vuole ottenere e la sua intensità.

Considerazioni generali sul sistema di collimazione sono:

- Il percorso del fascio da S a R è di circa 120 cm (vedi cap. 8 per eventuali modifiche al percorso).
- La divergenza del fascio all'uscita di ogni collimatore può quindi essere calcolata.

Se si indica con  $2S$  la dimensione della sorgente (che è quadrata), che coincide con la dimensione della macchia sorgente del tubo a raggi X utilizzato, e con  $L$  la distanza tra la sorgente ed il collimatore, la divergenza del fascio si può determinare da (fig. 3.1-1):

$$\alpha = \arctg\left(\frac{S + C}{L}\right)$$

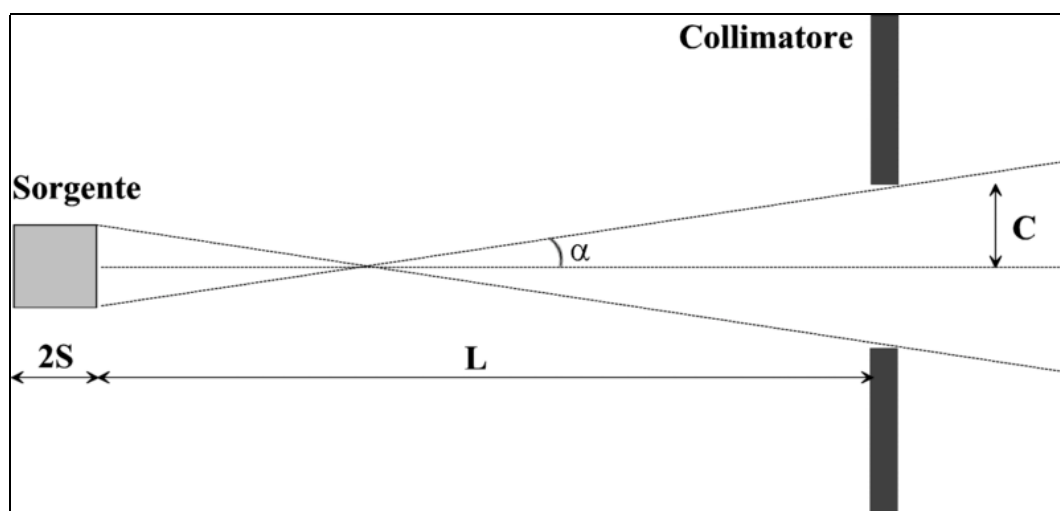


Fig. 3.1-1: Divergenza del fascio di raggi X dopo un collimatore.

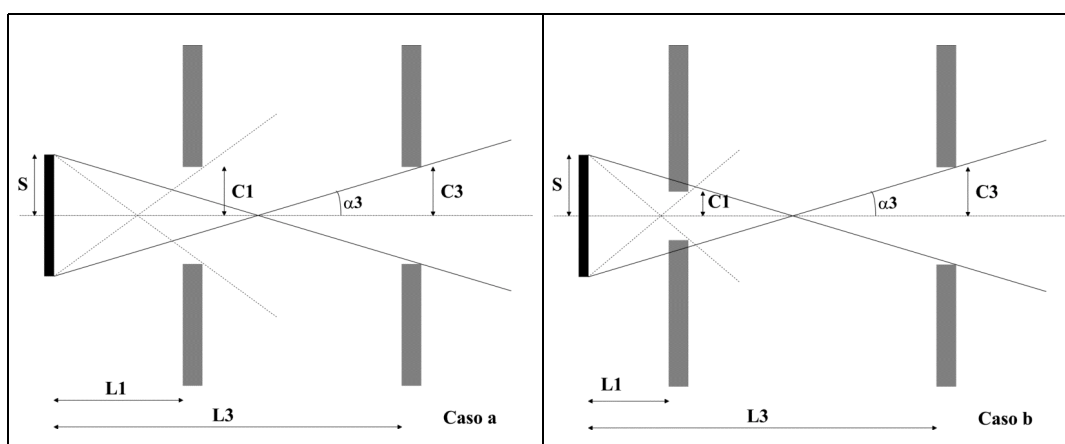


Fig. 3.1-2: Divergenza del fascio di raggi X dopo 2 collimatori.

Se invece si considera un sistema composto da due collimatori (fig. 3.1-2) si trova:

- Caso a: C1 non riduce l'area attiva di S vista da C3 ma assorbe la radiazione emessa a grandi angoli, in questo caso la divergenza del fascio in uscita dal sistema é :

$$\alpha_3 = \arctg\left(\frac{S + C_3}{L_3}\right)$$

- Caso b: C1 riduce l'area attiva di S vista da C2 riducendone anche il flusso, in questo caso C2 vede l'apertura del primo come area della sorgente del fascio e la divergenza diventa:

$$\alpha_3 = \arctg\left(\frac{C_1 + C_3}{L_3 - L_1}\right)$$

Fino qui si è assunto che l'apertura dei collimatori sia circolare di raggio  $C$ , però nessuna delle considerazioni fatte perde di validità se invece si considera un'apertura quadrata di lato  $2C$ .

Per il calcolo delle divergenze del fascio si possono utilizzare diversi valori di  $2S$ , e cioè diverse dimensioni della macchia sorgente. La sorgente radiogena dispone di due tipi di macchia:

- Una fine, con dimensioni di circa  $0.6 \times 0.6 \text{ mm}^2$ .
- Una grande, con dimensioni di circa  $1.6 \times 1.6 \text{ mm}^2$ .

L'utilizzo della macchia fine migliora le prestazioni in termini di divergenza del fascio, l'utilizzo della macchia grande, d'altra parte, consente l'utilizzo di radiazione di intensità più elevate. Si sceglierà quindi quale configurazione sia più conveniente usare a seconda delle misure da effettuare (vedi fig. 3.1-3).

La dimensione della macchia apparente della sorgente può essere ridotta regolando l'apertura di C1, in questo modo si possono ottenere prestazioni ottimali in termini di rapporto risoluzione/flusso del fascio emesso.

In tabella 3.1-1 é riportata come esempio la semi ampiezza del fascio sui diversi collimatori e sul rivelatore, nella configurazione descritta nella tabella stessa.

Collimatore	Distanza sorgente-collimatore (mm)	Raggio di apertura del collimatore (mm)	Semi-ampiezza del fascio X al collimatore/rivelatore (mm)	Semi-apertura del fascio in uscita da collimatore (gradi)
C1	100	10	36.8	6.14
C2	300	10	31.5	2.05
C3- Cristallo	900-1000	0.5	31.5	0.08
C4	1100	0.5	0.8	0.01
R	1200		0.6	

Tabella 3.1-1: Valori del fascio in una configurazione tipo.

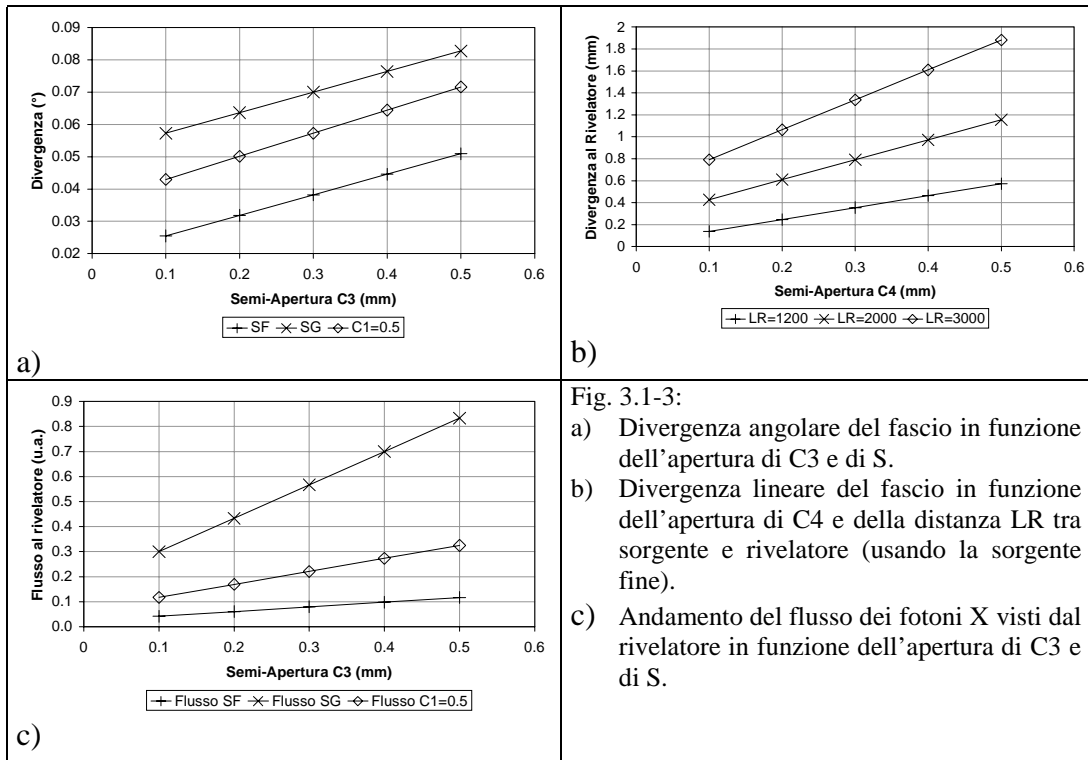


Fig. 3.1-3:  
a) Divergenza angolare del fascio in funzione dell'apertura di C3 e di S.  
b) Divergenza lineare del fascio in funzione dell'apertura di C4 e della distanza LR tra sorgente e rivelatore (usando la sorgente fine).  
c) Andamento del flusso dei fotoni X visti dal rivelatore in funzione dell'apertura di C3 e di S.

### 3.2 Monocromaticità del fascio

Il fascio rifratto non è perfettamente monocromatico, ma contiene lunghezze d'onda comprese tra  $\lambda_1 = \lambda - \Delta\lambda$  e  $\lambda_2 = \lambda + \Delta\lambda$  sia a causa di difetti intrinseci del cristallo, che non sono eliminabili, sia perché il sistema di collimazione non produce un fascio perfettamente parallelo incidente sul cristallo (fig. 4.2-1).

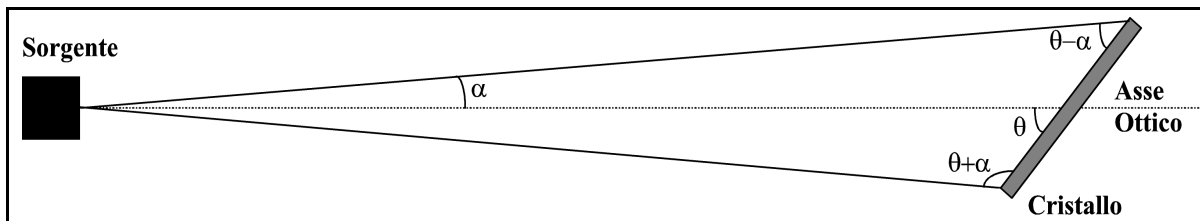


Fig. 3.2-1: Divergenza del fascio che incide sul cristallo.

Applicando la condizione di Bragg, il fascio riflesso comprenderà un intervallo di energie del tipo  $E_1 \geq E \geq E_2$  con:

$$E_1 = hc/\lambda_1 \quad \text{e} \quad E_2 = hc/\lambda_2$$

La divergenza  $\alpha$  dipende sia dalla distanza tra la sorgente ed il collimatore C3 posto prima del cristallo, sia dall'apertura di C3. In tabella 3.2-1 sono riportati i valori di  $\Delta E = E_2 - E_1$  calcolati con alcune configurazioni geometriche del sistema (dove  $\Delta E = E_2 - E_1$ ).

E (keV)	10	100	150	200
$\Delta E$ Ge (keV)	0.04	4.3	9.7	17.2
$\Delta E$ LiF (keV)	0.02	1.9	4.2	7.5

Tabella 3.2-1: Risoluzione in energia del fascio riflesso. Per il calcolo dei  $\Delta E$  sono stati adottati una apertura di C3 di 50  $\mu\text{m}$ , la macchia sorgente fine ( $S=0.3$  mm) e le distanze di tab. 2.1-1

### 3.3 Riduzione in intensità del fascio dovuta all'assorbimento dei raggi X in aria

Per energie comprese tra i 10 ed i 20 keV, va considerato l'assorbimento di raggi X in aria. In fig. 3.3-1 è rappresentato l'andamento dell'assorbimento dei raggi X lungo un percorso di 1200 mm, considerando l'aria come una miscela di gas con la seguente composizione: 78% N, 21% O, 1% Ar (ref. Handbook of Chemistry and Physics 66<sup>th</sup> edition, CRC press).

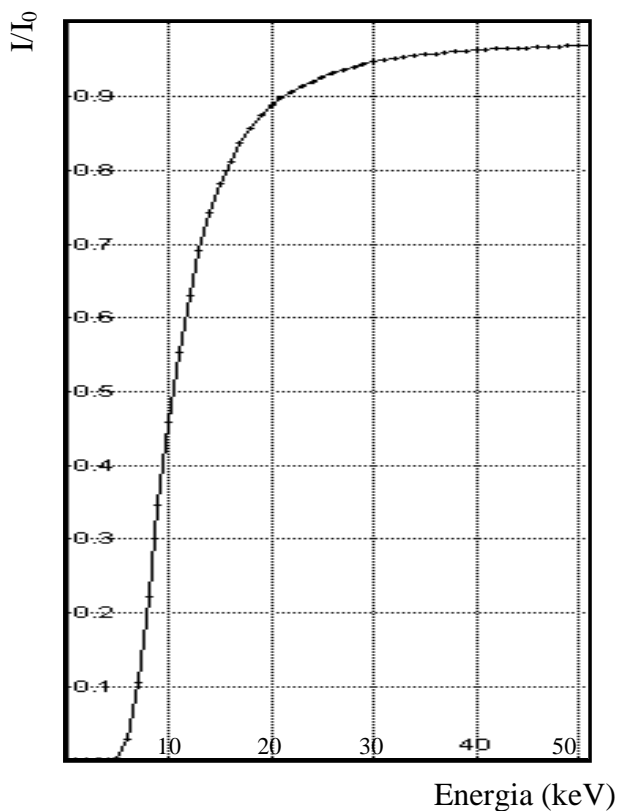


Fig. 3.3-1: Assorbimento dei raggi X dovuto all'attraversamento di 1200 mm di aria (0-50 keV).

# 4 Meccanica ed elettronica del sistema di calibrazione

Parti meccaniche che compongono il sistema (vedi fig. 1-1 e 1.2-1):

- Banco Ottico
- Piastra metallica di supporto su cui sono alloggiati:
  - La sorgente X con relativa staffa di supporto
  - I collimatori C1, C2 e C3
  - Il sistema motorizzato per la rotazione del cristallo monocromatore
  - Il sistema motorizzato per la rotazione del collimatore C4
- Sistema di movimentazione del rivelatore (X, Y, Z e rotazione)

Tutti i movimenti, per un totale di 6 gradi di libertà, sono necessari per portare il sistema a soddisfare la condizione di Bragg per la rifrazione dei raggi X, descritta in precedenza.

## 4.1 Il banco ottico

Il banco ottico ha dimensioni di  $2400 \times 1200 \text{ mm}^2$  ed è di altezza regolabile. Esso è dotato di quattro piedi stabilizzanti, che provvedono un isolamento del banco da vibrazioni ed oscillazioni del pavimento tramite un meccanismo ad aria compressa. Le valvole di livellamento che fanno parte del banco ottico, controllano l'altezza del piano del tavolo con un errore di  $\pm 0.3 \text{ mm}$ .

## 4.2 Piastra di supporto

La cuffia radiogena, i collimatori ed il cristallo sono posizionati su una piastra di Al dello spessore di 15 mm, delle dimensioni di  $300 \times 1300 \text{ mm}^2$ . La disposizione dei vari elementi è illustrata in fig. 4.2-1. I primi tre collimatori sono posizionati utilizzando una staffa meccanica che può scorrere nella direzione della dimensione maggiore della piastra lungo un binario di riferimento in acciaio (B in fig. 4.2-1) parallelo al cammino ottico del fascio fino al cristallo monocromatore.

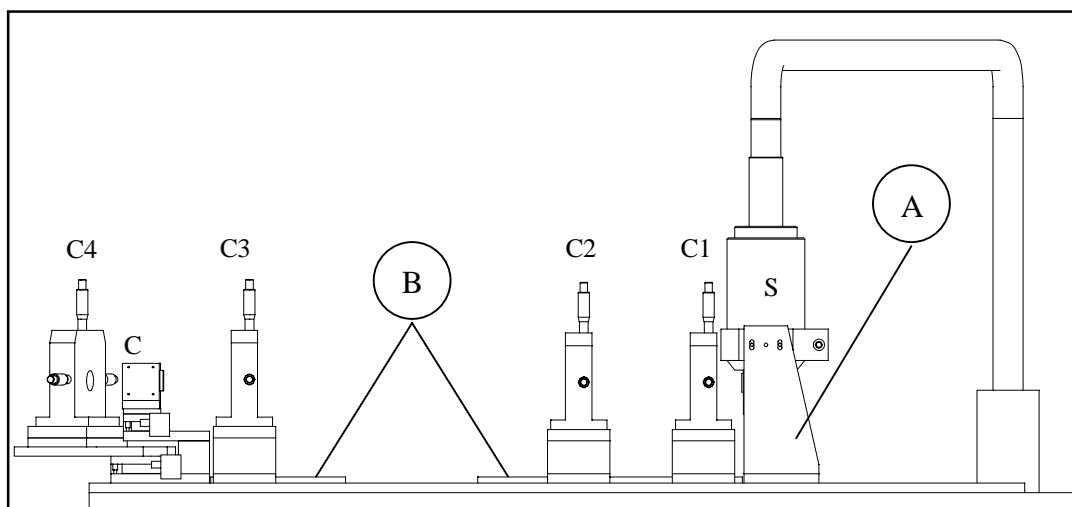


Fig. 4.2-1: Piastra di supporto con sorgente S, collimatori C1-C4, e cristallo C.

### 4.3 Sorgente e staffa di supporto

Il tubo a raggi X, il cui ingombro meccanico è mostrato in fig. 4.3-1, è sostenuto da una staffa (A in fig. 4.2-1) che permette limitati aggiustamenti per la centratura della macchia focale. È possibile ruotare la cuffia attorno all'asse verticale per centrare la macchia focale lungo l'asse ottico del sistema.

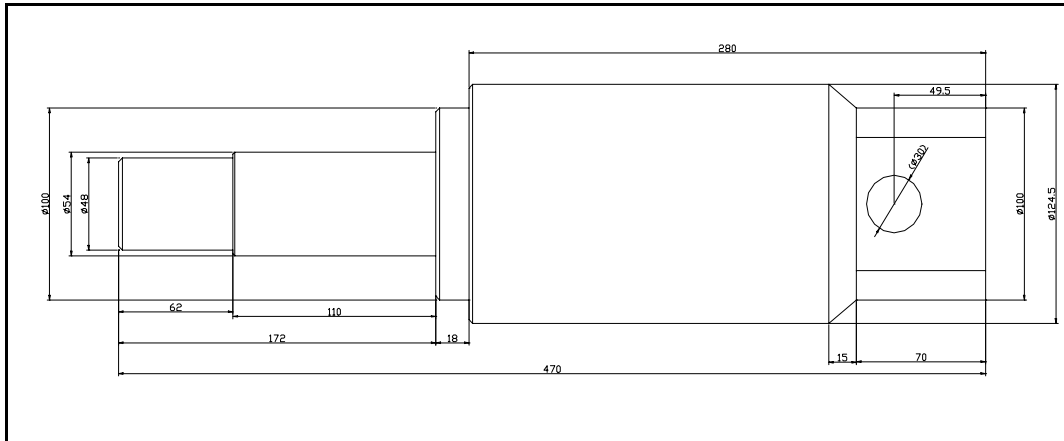


Fig. 4.3-1: Disegno schematico della cuffia radiogena.

### 4.4 Collimatori

I collimatori sono costruiti con materiale opaco ai raggi X. È stata valutata analiticamente una trasparenza dei collimatori dell'1 % per le componenti del fascio di energia massima di 200 keV.

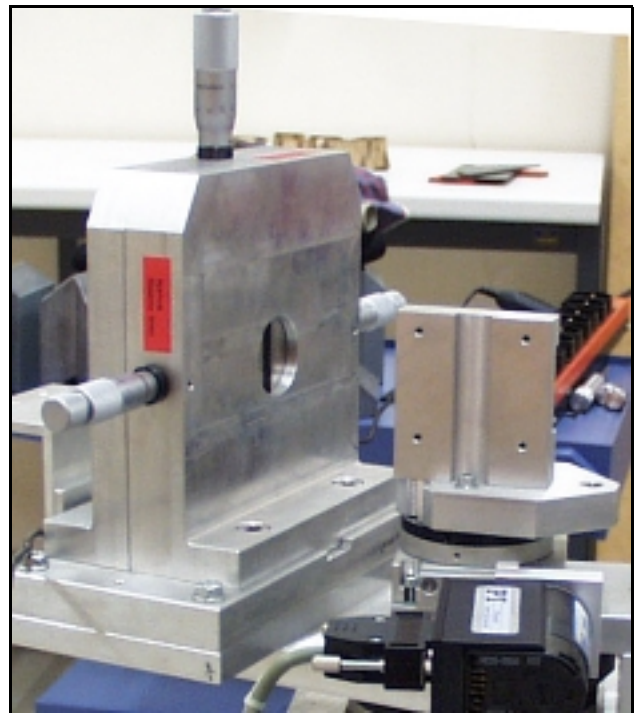
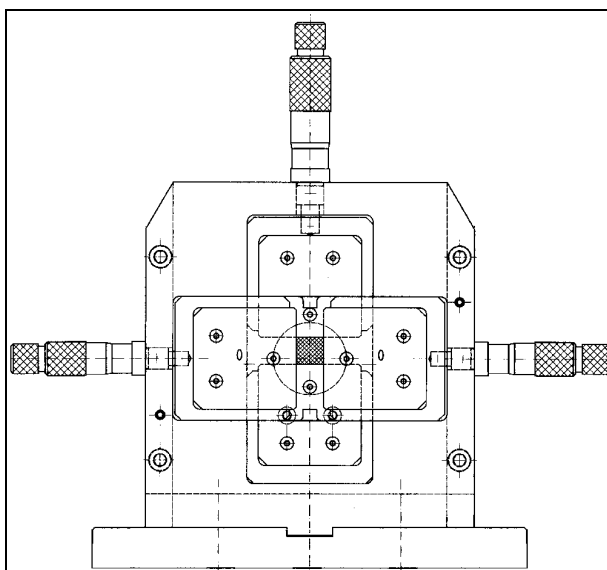


Fig. 4.4-1: Prospetto in trasparenza e foto di un collimatore.

I collimatori sono costituiti principalmente da quattro piastrine di piombo (vedi figura 5.4-1), di 45 x 45 mm con 5 mm di spessore, disposte a coppie in modo da formare due fenditure perpendicolari tra di loro (una verticale ed una orizzontale), di ampiezza regolabile con una precisione di 10  $\mu\text{m}$ . Delle quattro piastrine, quella inferiore è fissa, mentre le altre possono essere fatte scorrere per mezzo di tre micrometri. I due micrometri laterali hanno una corsa di 15 mm, mentre quello superiore di 25 mm. Tutte le viti di fissaggio delle piastrine sono state ricoperte con piombo.

#### 4.5 Sistema di selezione dell'energia

Il gruppo meccanico che permette la rotazione del cristallo monocromatore e del collimatore C4 (fig. 4.5.1-a e 4.5.1-b ) si basa sull'utilizzo di tavolette meccaniche commerciali che permettono rotazioni controllate.

Le due tavolette hanno un montaggio coassiale:

- Alla prima è demandata la rotazione  $\theta$  del cristallo monocromatore.
- La seconda esegue una rotazione  $2\theta$  del collimatore C4 collegato a sbalzo alla tavoletta per mezzo di una staffa.

Le scelte delle tavolette sono state guidate dai parametri che caratterizzano gli spostamenti in rotazione, ossia le corse e le precisioni meccaniche richieste. Le principali caratteristiche di queste tavolette sono illustrate in Tabella 4.8-1.

Nelle figure che seguono sono mostrati i dettagli del montaggio dei collimatori C3 e C4, e del cristallo. Si può notare il binario metallico su cui può scorrere C3 che è servito per allineare quest'ultimo con il cristallo. Il successivo allineamento con C4 è stato fatto per mezzo di un micrometro con precisione di 1/100 mm.

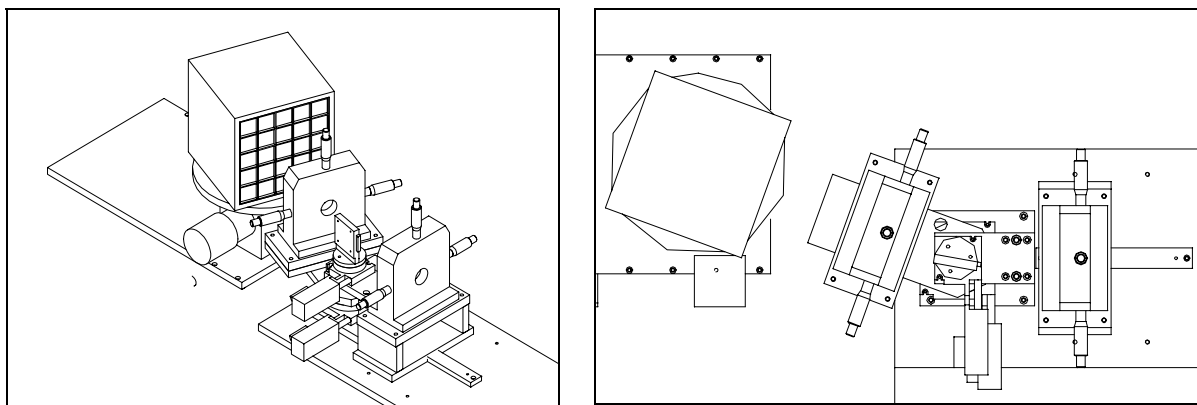


Fig. 4.5.1-a e 4.5.1-b: Dettaglio dei collimatori C3 e C4, del cristallo e del rivelatore.

#### 4.6 Sistema di movimentazione del rivelatore

Il sistema di movimentazione (figura 4.6-1) ha le dimensioni di 1600x1000x1200 mm e sviluppa una corsa nei tre assi di 1150x620x700 mm; esso è composto da una struttura piana su cui si sviluppa il movimento in X e Y, e da una struttura verticale per il moto lungo l'asse Z.



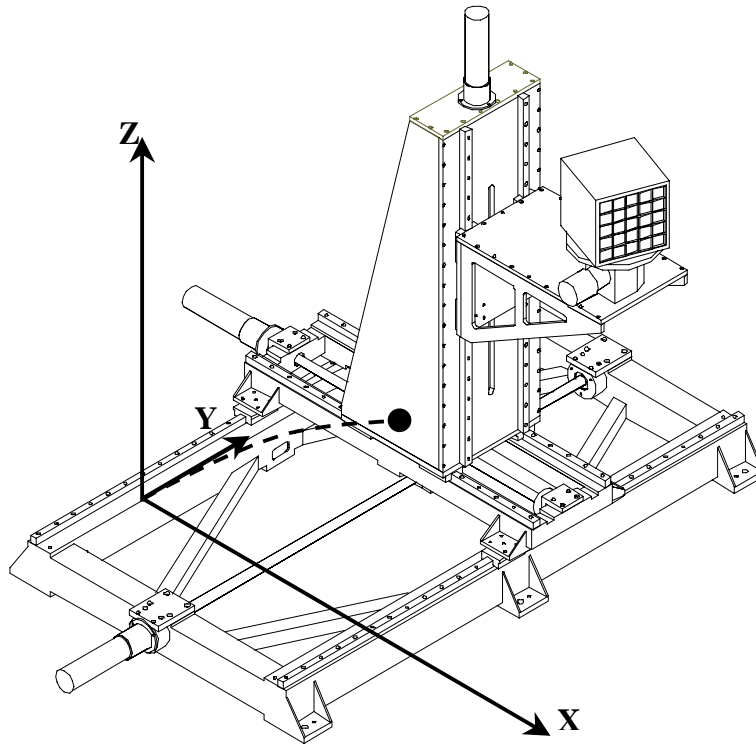


Fig. 4.6-1: Sistema di movimentazione del rivelatore.

Il moto del rivelatore lungo i tre assi cartesiani è ottenuto per mezzo di tre motori, con una precisione di posizionamento dell'ordine di  $1/100$  di mm. La rotazione del rivelatore avviene con una precisione di  $1/100^\circ$ .

#### 4.7 Interfaccia meccanica rivelatore-sistema di movimentazione

Una interfaccia standard è rappresentata dalla flangia mostrata nel dettaglio in figura 4.7-1-a e 4.7-1-b. Se necessario, interfacce particolari devono essere studiate e realizzate appositamente per l'utilizzatore.

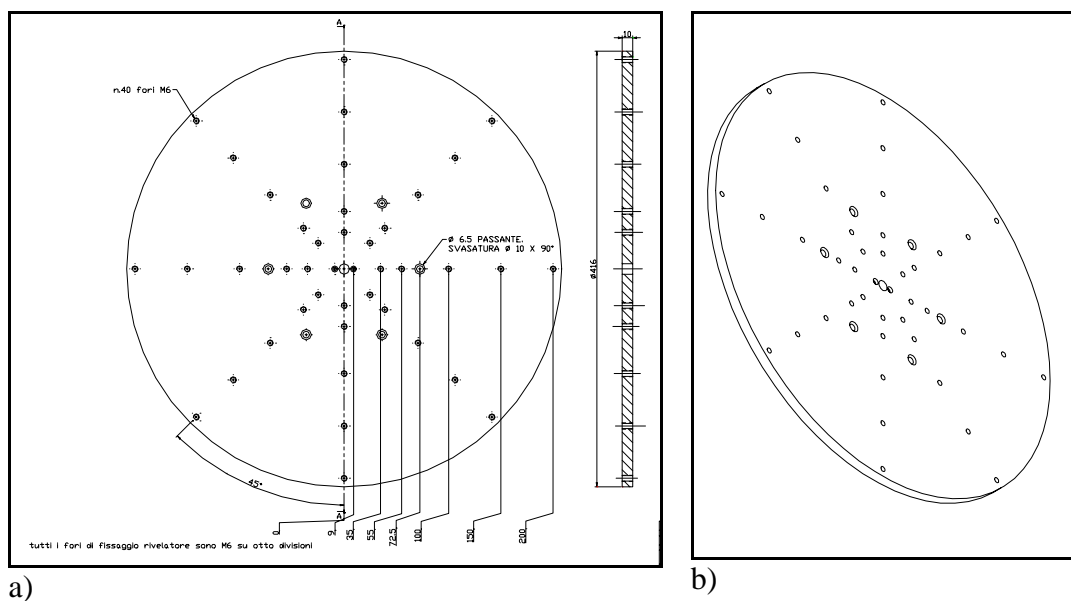


Fig. 4.7-1-a e -b: Disegni della flangia di supporto del rivelatore.

## 4.8 Controllo dei movimenti motorizzati

Le caratteristiche elettriche delle tavolette motorizzate sono riportate in tabella 4.8-1. Il controllo dei movimenti è gestito da una scheda (tipo National Instruments FlexMotion 6c) collegata ad un PC asservito allo strumento e rappresentato in figura 5.9-1. La scheda è comandata da un apposito software di controllo sviluppato in ambiente LabVIEW.

<i>Asse Motore</i>	<i>Tipo</i>	<i>Tensione (V)</i>	<i>Potenza (W)</i>	<i>Massa (Kg)</i>	<i>Risoluzione encoder</i>
<b>Rotazione cristallo</b>	Corrente Continua	24	6	0.62	1000 cont/°
<b>Rotazione C4</b>	Corrente Continua	24	30	1.35	1000 cont/°
<b>Rivelatore X</b>	Corrente Continua	48	80	1.3	100 cont/mm
<b>Rivelatore Y</b>	Corrente Continua	48	80	1.3	100 cont/mm
<b>Rivelatore Z</b>	Corrente Continua	48	80	1.3	100 cont/mm
<b>Rotazione rivelatore</b>	Passo Passo	n.d.	3.7	n.d.	100 cont/°

Tabella 4.8-1: Caratteristiche dei motori adottati per la movimentazione del sistema.

## 4.9 Elettronica di controllo del sistema di movimentazione

Il controllo del sistema di calibrazione è costituito da un rack (fig. 4.9-1) che contiene i circuiti di potenza e da un PC che contiene una scheda National Instrument di controllo dei motori.

Il PC ed il rack sono collegati con cavi della lunghezza di un paio di metri; il rack ed i motori sono collegati con cavi della lunghezza di circa 20 metri che permettono il posizionamento remoto del controllo.

Il rack contiene:

- I trasformatori per le alimentazioni dei 6 assi.
- I driver dei 4 motori del sistema di movimentazione. Di questi, il driver del motore passo-passo incorpora un display per la visualizzazione della posizione assoluta del relativo motore.
- L'interfaccia UMI, che funziona da collegamento tra la scheda National Instruments di controllo dei motori (installata sul PC) ed i motori stessi.
- connettori, installati sulla parete laterale, dai quali partono i 4 cavi che vanno agli assi del sistema di movimentazione ed i 2 che vanno agli assi posti sul banco ottico.
- Un interruttore generale per l'abilitazione delle alimentazioni ai motori.
- LED che segnalano la presenza dei vari tipi di alimentazione ai motori.
- 3 interruttori per la disabilitazione degli switch di limite sugli assi 3, 4 e 5. Sono necessari per riportare le alimentazioni ai motori che hanno superato il fine corsa e farli rientrare entro i limiti consentiti.
- La console per il controllo del tubo radiogeno, installata su di un ripiano del rack.

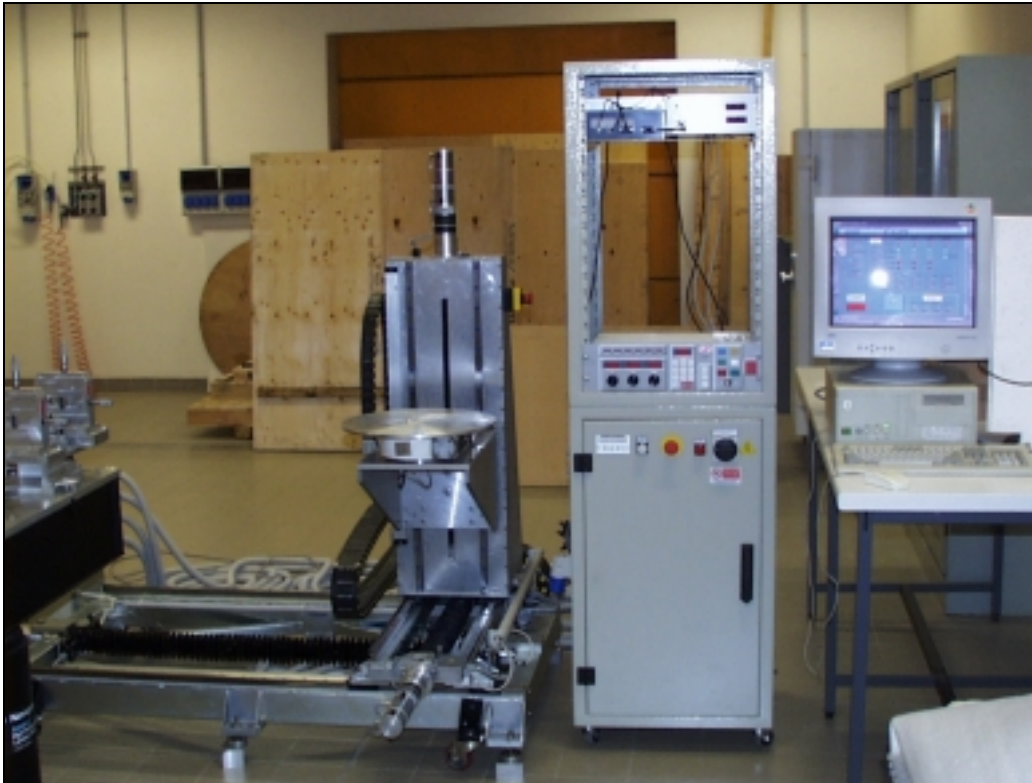


Fig. 4.9-1: Sistema di movimentazione del rivelatore e rack con le diverse parti elettriche .

## 5 Software per il controllo della calibrazione ed istruzioni per l'uso

Il calibratore può trovarsi in diversi stati descritti in figura 5-1. Le varie fasi sono controllate da un software dedicato, programmato con il linguaggio di tipo visuale LabVIEW. Il programma è suddiviso in diverse parti chiamate vi, Virtual Instrument.

Il software gestisce successivamente le seguenti fasi della calibrazione:

- Accesso all'uso del software tramite *username* e *password* (start.vi).
- Centrazione degli assi meccanici per la movimentazione del sistema (centratura.vi).
- Preriscaldamento della sorgente di raggi X (preriscaldamento.vi).
- Impostazione dei parametri della calibrazione (parametri.vi, settaggio.vi, esecuzione.vi).
- Movimento degli assi per portare il rivelatore in posizione (movimento.vi).
- Emissione di raggi X dal tubo radiogeno (emissionex.vi).

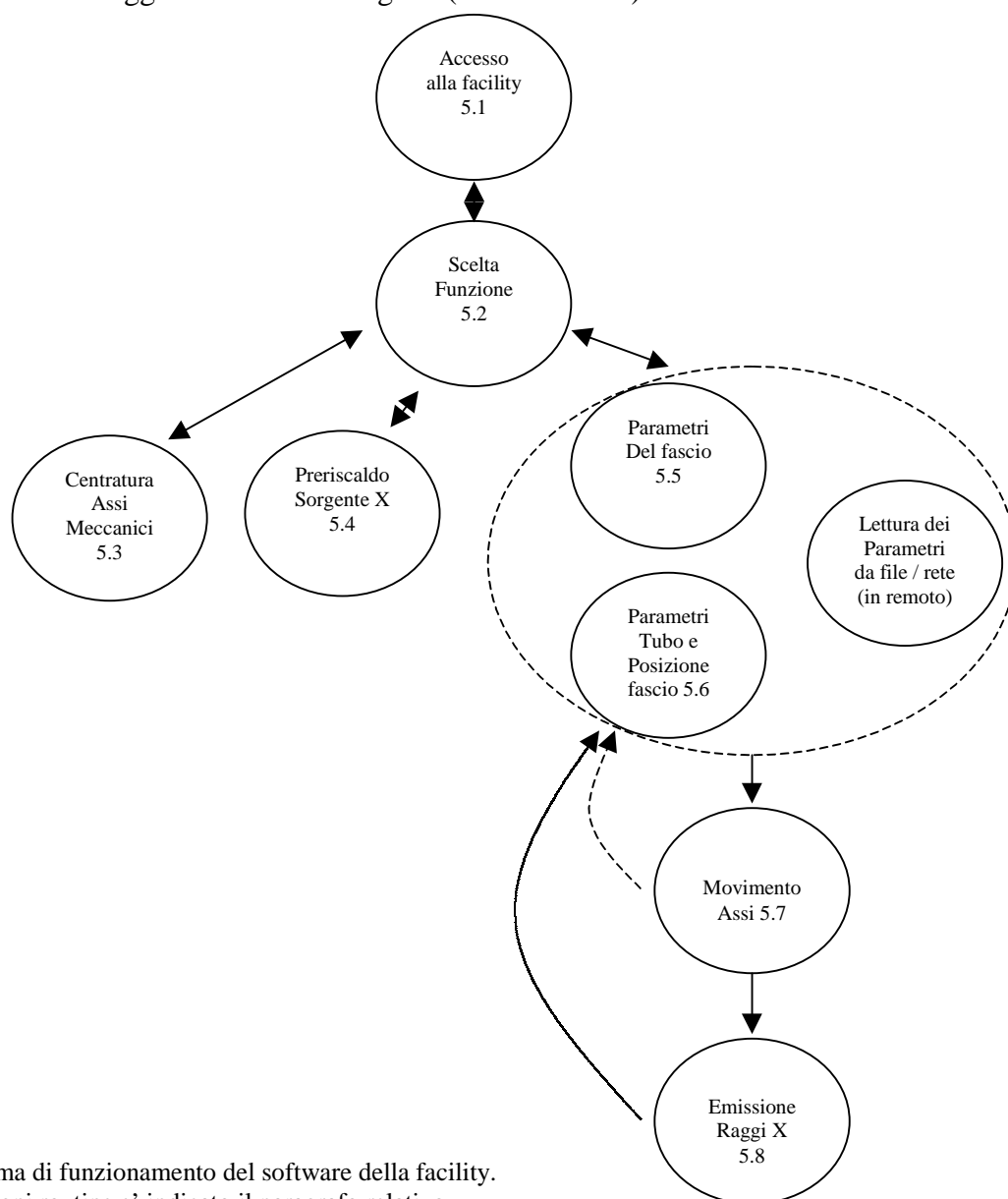


Fig. 5-1: Schema di funzionamento del software della facility. Per ogni routine è indicato il paragrafo relativo.

## 5.1 Accesso alla facility

La schermata d'avvio del programma fig 5.1-1 (start.vi) richiede l'immissione di nome utente e password per inibire l'accesso al personale non autorizzato. Se un utente è autorizzato viene registrata la data e l'ora dell'accesso e si passa ad una schermata da cui si può accedere a diverse funzioni del programma (main.vi). In caso contrario si richiedono di nuovo i dati di accesso.

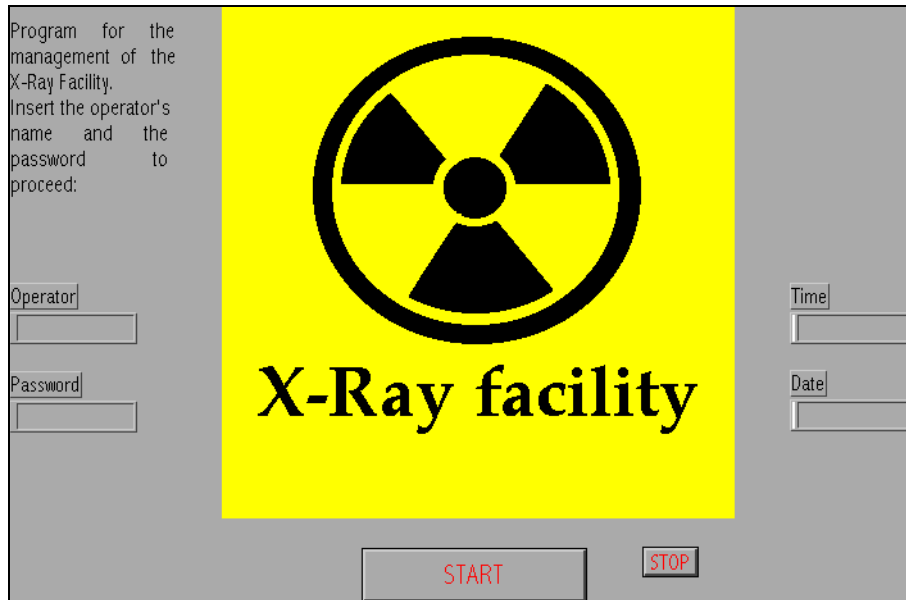


Fig. 5.1-1: Schermata di richiesta password (start.vi).

## 5.2 Selezione funzione

Attraverso il pannello di controllo di main.vi. (fig. 5.2-1) è possibile accedere alle funzioni :

- Operazioni di **centratura** degli assi motorizzati (*centering*).
- Fase di **preriscaldamento** del tubo X.
- Elaborazione dei **parametri** della calibrazione.
- Immissione e **Settaggio** finale dei parametri.

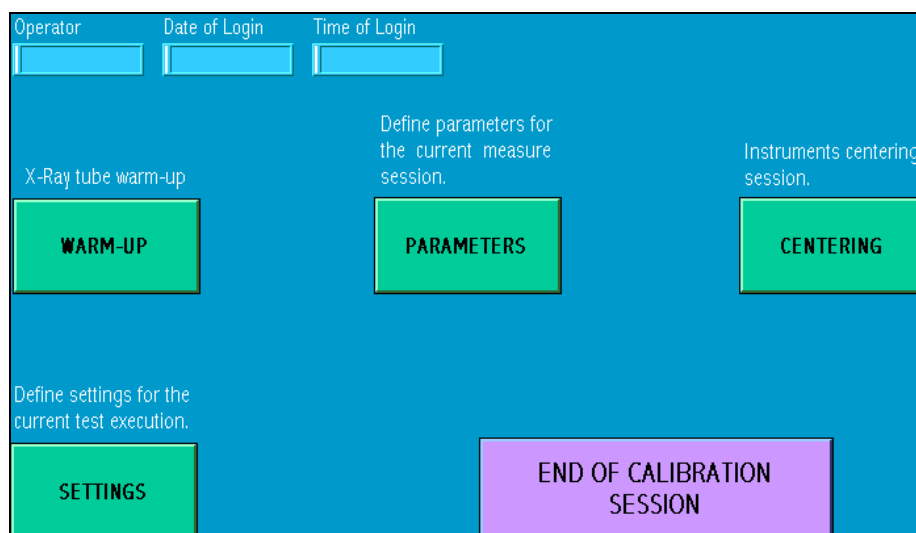


Fig. 5.2-1: Schermata per la selezione delle funzioni.

### 5.3 Centrazione degli assi motorizzati

Prima di operare il calibratore, è necessario azzerare le posizioni dei sistemi di movimento, e definire un preciso posizionamento del rivelatore rispetto ai riferimenti del calibratore.

Le tavolette di rotazione che muovono il cristallo monocromatore e l'ultimo collimatore vengono allineate con mezzi meccanici. La routine di centratura suppone che questo allineamento sia stato eseguito correttamente. Attraverso il pannello di fig. 5.3-1 il programma gestisce solo le fasi di centratura degli assi che sono relative a:

Asse 1 (rotazione cristallo) – Da centrare manualmente

Asse 2 (rotazione collimatore 4) – Da centrare manualmente

Asse 3 (asse X)

Asse 4 (asse Y)

Asse 5 (asse Z)

Asse 6 (rotazione rivelatore) – Da centrare sempre individualmente rispetto agli assi 3, 4 e 5.

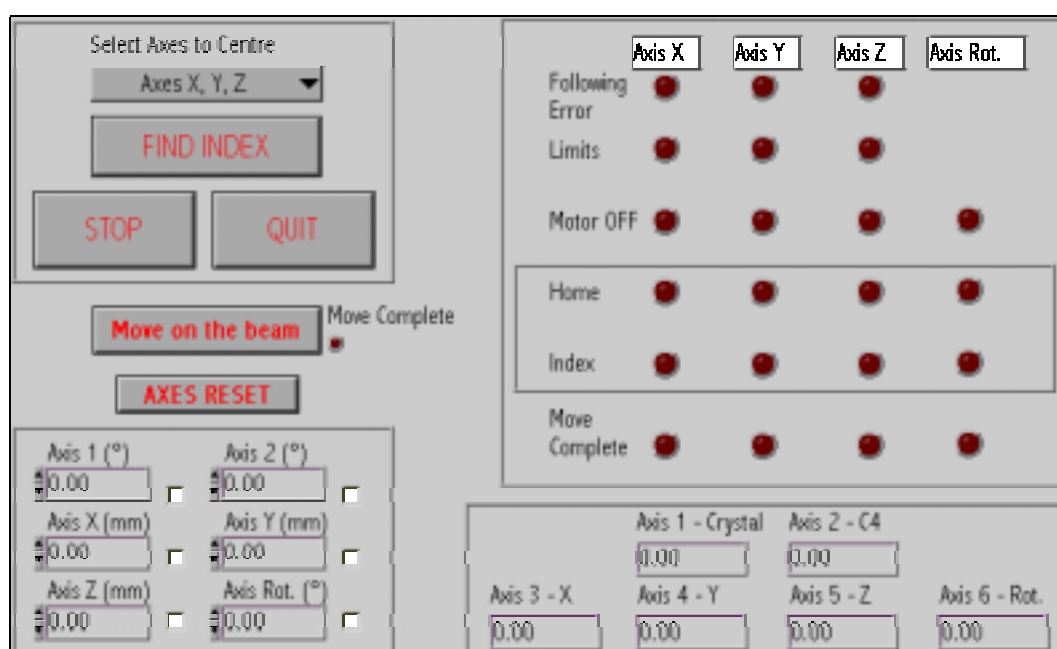


Fig. 5.3-1: Pannello di controllo della fase di centratura (centratura.vi).

È possibile selezionare se centrare solo un asse alla volta oppure gli assi X,Y,Z (3,4,5) contemporaneamente (*Select axes to centre*). Visto che l'asse 6 (rotazione rivelatore) è di tipo passo-passo la sua centratura deve sempre essere eseguita in modo indipendente dagli altri assi.

6 display mostrano la posizione istantanea di ogni asse rispetto a quella di partenza.

La posizione di un asse viene azzerata a centratura effettuata, e le posizioni successive riferite a questa posizione centrale.

È possibile attribuire alla posizione di un asse un valore voluto. Per questa operazione:

- Si seleziona la casella relativa all'asse da resettare.
- Si assegna il valore della posizione .
- Si preme il tasto *Axes reset*.

In alternativa si deve cercare per ogni asse la posizione di zero facendola coincidere con una posizione di riferimento assoluta inglobata negli encoders di misura.

Queste posizioni assolute sono marcate in fig. 4.6-1 e coincidono con l'origine degli assi.

Per questa operazione:

- L'asse da centrare deve essere selezionato premendo il tasto *Axes X, Y, Z*
- Si deve premere il tasto *Find Index*
- La/e tavola/e selezionata/e cerca la posizione di riferimento ed una volta raggiunta azzerare il valore della posizione.

Centrata del motore passo–passo: Procedura manuale.

Premendo il pulsante '*Quit*' si torna in selezione funzione.

## 5.4 Fase di Preriscaldamento

La fase di preriscaldamento del tubo X è propedeutica alle operazioni di misura e deve necessariamente essere avviata manualmente quando il tubo è rimasto inattivo per molto tempo, durante questa fase la tensione del tubo viene lentamente innalzata da 100 a 200 kV. Attraverso il pannello di fig. 5.4-1 il programma indica le istruzioni da seguire per eseguire il preriscaldamento della cuffia radiogena, e visualizza, attraverso diversi indicatori sotto forma di caselle di testo, scale graduate o LED, lo stato istantaneo dell'operazione.

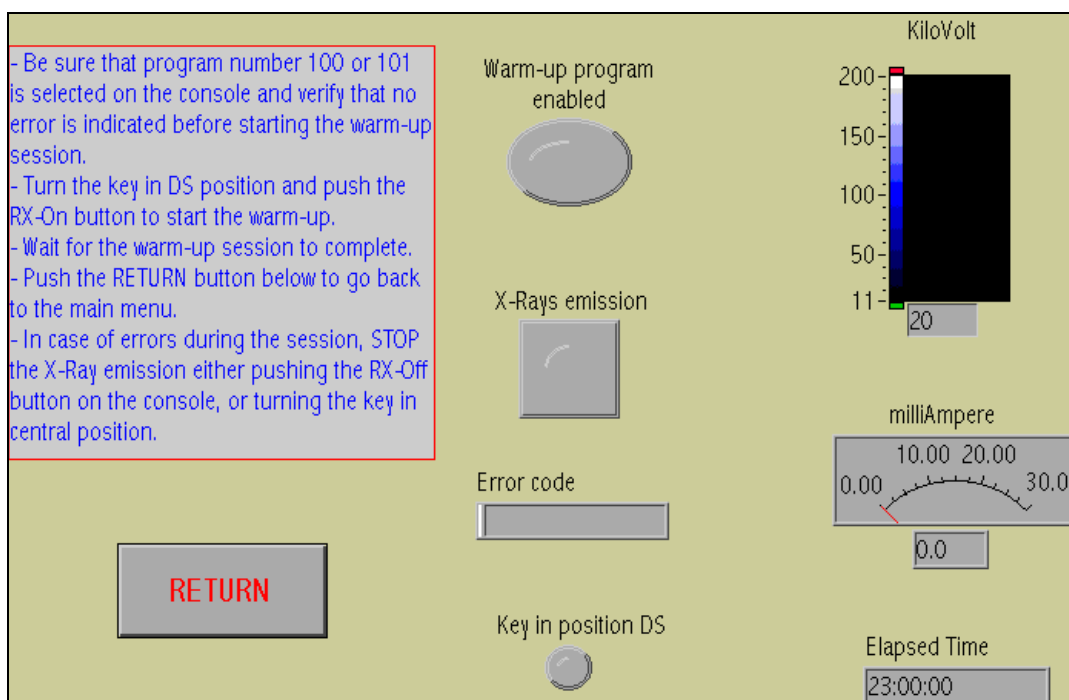


Fig. 5.4-1: Pannello di controllo del programma di monitoraggio durante la fase di preriscaldamento del tubo X (preriscaldo.vi).

Gli indicatori sono:

- L'indicatore a LED *Warm-up program enabled* mostra se il programma per l'esecuzione del preriscaldamento è stato attivato nella consolle della macchina radiogena.
- Il LED *X-Rays emission* indica se la cuffia radiogena sta emettendo radiazione.
- L'indicatore *Error code* elenca, in una finestra di testo, gli errori eventualmente verificatisi durante il processo di preriscaldamento, del tipo tra quelli previsti dallo strumento radiogeno CHF-225.

- Il LED *Key in position DS*, indica se la chiave della consolle macchina radiogena è girata in modo da abilitare l'emissione di raggi X (verso destra).
- La scala graduata *kiloVolt* mostra il valore attuale di tensione in kiloVolt del tubo X.
- La scala graduata *milliAmpere* mostra il valore attuale dell'intensità di corrente del tubo X (che in questa fase viene impostata automaticamente dalla macchina in funzione della tensione di utilizzo).
- *Elapsed time* indica, in una finestra di testo, il tempo trascorso dall'inizio della fase di preriscaldamento.

A questo punto è necessario **attivare l'accettazione dei comandi della consolle sorgente dalla porta seriale** inserendo il programma 800 della consolle) a tal fine è necessario operare sulla consolle come segue:

- Girare la *chiave* della consolle in posizione DS.
- Premere tasto *SET*.
- Scrivere *800* (compare sul display).
- Premere *Enter*.

Premendo il pulsante '*Return*' sul pannello di controllo si torna in selezione funzione.

## 5.5 Elaborazione parametri

Questa routine aiuta a determinare le caratteristiche del fascio utilizzando le formule già riportate nel secondo capitolo, avendo in ingresso i seguenti parametri (fig. 5.5-1):

- Il tipo di *crystal monocromatore* usato (LiF 220 o Ge 111).
- Il tipo di *fuoco* (fine o grande) della sorgente da utilizzare.
- Il valore di *energia* voluto al rivelatore.
- *La risoluzione energetica* voluta della radiazione di test al rivelatore.
- *L'ampiezza del fascio* voluta al rivelatore.

E (keV)	C3 (mm)	ΔE (eV)	Theta (°)
10	0.25	25	25.863
20	0.25	109	12.598
30	0.25	249	8.361
40	0.25	446	6.261
50	0.25	698	5.005
60	0.25	1006	4.169
70	0.25	1370	3.573
80	0.25	1791	3.126
90	0.25	2267	2.778
100	0.25	2800	2.500
110	0.25	3388	2.273
120	0.25	4033	2.083
130	0.25	4734	1.923
140	0.25	5491	1.786
150	0.25	6304	1.667
160	0.25	7174	1.562
170	0.25	8099	1.470
180	0.25	9081	1.389
190	0.25	10119	1.316
200	0.25	11213	1.250
100	0.25	2800	2.500

Fig. 5.5-1: Pannello di controllo per l'inserimento e l'elaborazione dei parametri della facility.



L'operatore procede secondo i seguenti passi:

- 1) Inserisce il tipo di cristallo
- 2) Inserisce le dimensioni del fuoco della sorgente X
- 3) Inserisce la risoluzione energetica voluta o in alternativa inserisce l'apertura del collimatore C3
- 4) Inserisce l'apertura del fascio al rivelatore o in alternativa inserisce l'apertura del collimatore C4.
- 5) Su tutto lo spettro di energia 10 – 200 keV ha una stima dei risultati che si possono ottenere (risoluzione e apertura fascio al rivelatore) o in alternativa fissati i risultati voluti ha una stima dei parametri da impostare. Inoltre viene stimata per ogni energia l'angolo di rotazione dei cristalli
- 6) **Seleziona l'energia voluta**

Il programma memorizza i parametri impostati e ritorna alla parte principale *main.vi*.

## 5.6 Settaggio dei parametri della calibrazione

In questa routine si definisce la sequenza operativa della misura. Una volta definite le caratteristiche del fascio quali energia, risoluzione energetica ed ampiezza spaziale dello spot utilizzando il pannello di fig 5.6.1, l'operatore procede secondo i seguenti passi per ogni esposizione prevista:

- 1) Nella sezione A imposta le coordinate (rispetto al punto di riferimento ottenuto nella fase di centratura, vedi paragrafo 5.3) del punto del rivelatore su cui fare incidere il fascio di raggi X. Si impostano inoltre le caratteristiche di tensione e corrente a cui far operare il Tubo radiogeno ed il tempo di esposizione (0 corrisponde a tempo illimitato, vedi capitolo 1.1 per le caratteristiche del tubo).
- 2) Nella sezione B verifica i parametri principali del fascio selezionati nella routine *parametri.vi*; è ancora possibile modificare questi valori premendo il tasto "change parameters settings".
- 3) Inizia l'esposizione premendo il tasto 'perform the calibration'. Nel momento in cui si comanda al programma di eseguire la calibrazione, viene eseguita la movimentazione degli assi, che sarà poi seguita dall'emissione dei raggi X.

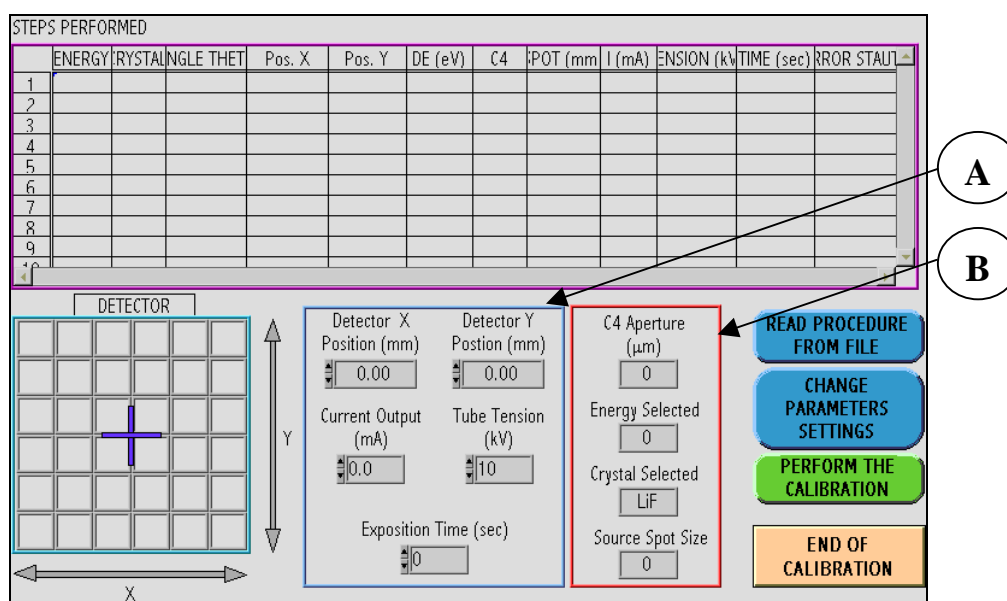


Fig. 5.6-1: Pannello di controllo della fase di settaggio dei parametri (settaggio.vi).

## 5.7 Movimentazione assi

Il pannello di controllo ha solo la funzione di display e mostra la posizione attuale degli assi durante il movimento, in più una serie di LED indica lo stato delle operazioni.

Durante questa fase, il cristallo viene ruotato di un angolo  $\alpha$  attorno al suo asse verticale, il collimatore C4 viene ruotato di un angolo pari a  $2\alpha$  rispetto alla direzione dei raggi X incidenti, mentre contemporaneamente il rivelatore viene fatto traslare lungo i suoi tre assi (X,Y e Z) e fatto ruotare di un angolo pari a  $2\alpha$ . In questo modo si porta il rivelatore in posizione, in modo tale da fare cadere il fascio collimato di radiazione X sul pixel del rivelatore da calibrare.

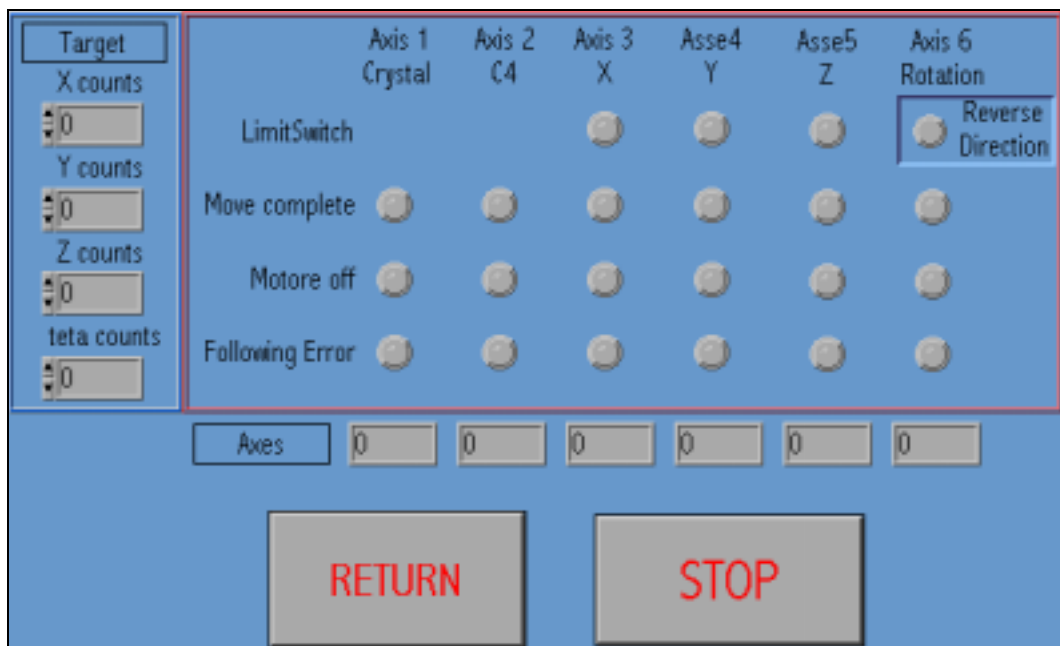


Fig. 5.7-1: Pannello di controllo durante le operazioni di movimento assi (movimento.vi).

Il pannello di controllo di questa *vi* visualizza una serie di LED che tengono conto dello stato del sistema durante le operazioni di allineamento:

- *Limit Switch* (3 LED) si accende quando viene raggiunto il fine corsa di uno degli assi X, Y o Z, il movimento dell'asse relativo all'interruttore viene bloccato.
- *Move Complete* (6 LED) si illumina quando il motore relativo all'asse cui fa riferimento ha raggiunto la posizione prestabilita.
- *Motore off* (6 LED) si attiva quando uno dei motori risulta spento.
- *Following Error* (6 LED) segnala un conflitto tra la traiettoria impostata dal computer e la traiettoria vera. Causa il blocco dell'asse interessato.
- *Reverse direction* (1 LED) indica che il motore passo-passo ruota in senso antiorario.

La velocità angolare delle tavolette di rotazione del cristallo e di C4 è fissa, C4 ruota con velocità angolare doppia rispetto al cristallo, in modo che entrambi arrivino in posizione nello stesso momento.

Gli assi X ed Y modulano rispettivamente le loro velocità in base al punto in cui si trovano lungo l'arco di circonferenza che devono percorrere (con centro sul cristallo), in modo tale che la velocità angolare del rivelatore si mantenga costante nel tempo.

Una serie di indicatori numerici tiene conto della posizione istantanea delle tavole motorizzate (*posizione*), confrontata con quella finale che dovranno raggiungere per effettuare la misurazione (riquadro a sinistra dello schermo).

Il movimento può essere interrotto in qualsiasi momento premendo il tasto *Ferma*, terminando l'operazione di misura corrente. Il programma in questo caso ritorna automaticamente in *settaggio.vi*.

Per proseguire con la misura e passare alla fase di emissione di raggi X, si deve attendere il termine delle operazioni di posizionamento (tutti i LED *move complete* accesi), e premere il pulsante *Ritorno* che porta alla parte di emissione di raggi X.

## 5.8 Emissione di raggi X

Il pannello di controllo di fig. 5.8.1 controlla il processo di emissione di raggi X. Affinché ciò avvenga è necessario che la consolle della macchina radiogena preveda la lettura dei comandi dalla sua porta seriale. Il settaggio della consolle può essere fatto una sola volta per sessione (vedi par 5.4), successivamente si deve girare la chiave della consolle in posizione DS.

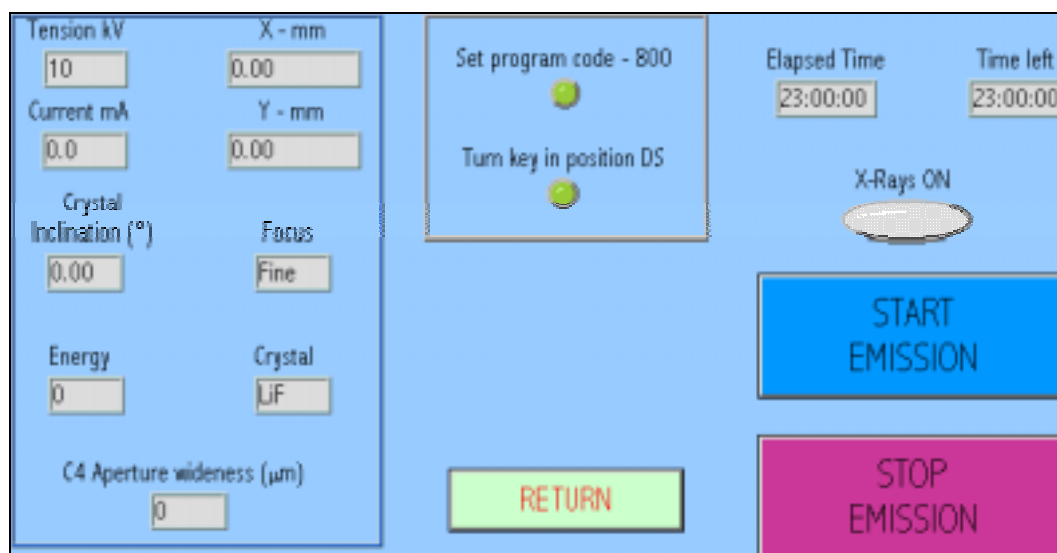


Fig. 5.8-1: Pannello di controllo di emissione X.vi.

Il pannello di controllo visualizza in una sezione a sinistra dello schermo tutti i parametri principali della calibrazione già visti in 5.5 e 5.6.

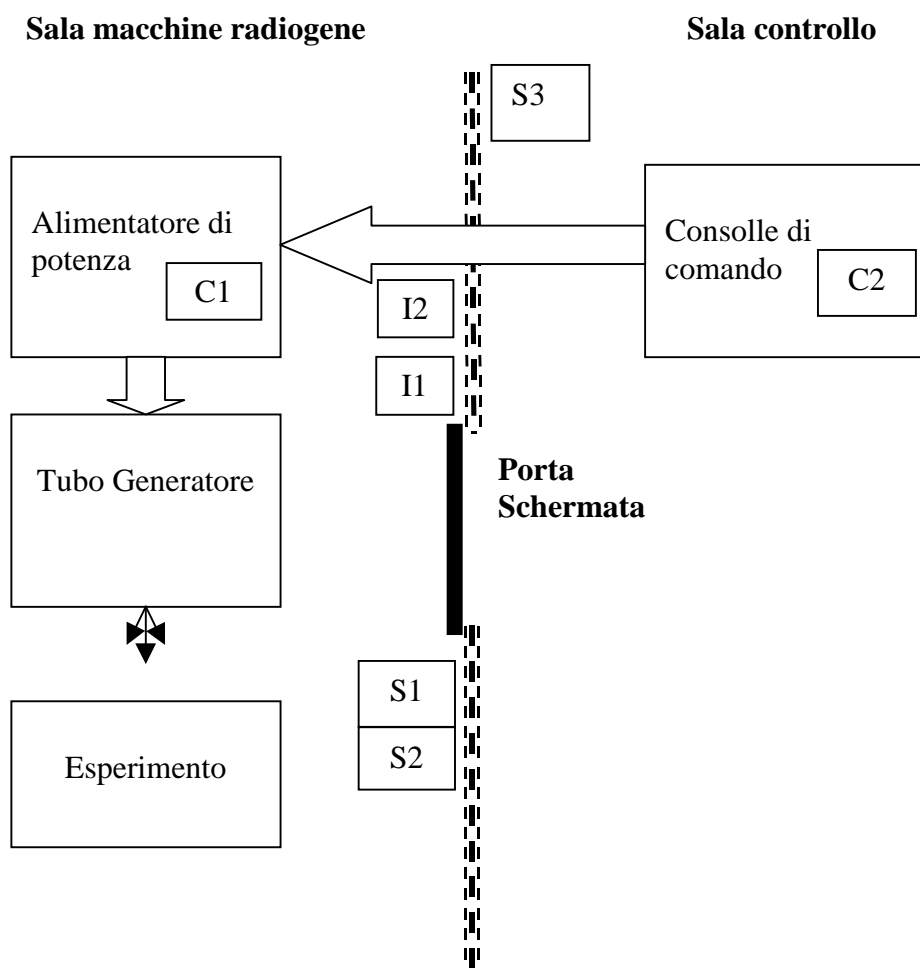
Per attivare l'emissione di raggi X si deve selezionare il comando *START EMISSION*.

L'emissione di radiazione continua finché non è trascorso il tempo impostato. È comunque sempre possibile bloccare l'emissione di radiazione in qualsiasi momento selezionando il comando *STOP EMISSION*, oppure agendo direttamente sul pulsante *X Ray Off* del pannello di comando della consolle del tubo X.

Una volta terminata l'esposizione, il programma torna automaticamente in *settaggio.vi* e riporta nella tabella del pannello di controllo i dati relativi alla misura appena completata.

## 6 Sicurezza: Disposizione del sistema dei consensi e delle segnalazioni luminose ed acustiche

Nella figura è mostrata schematicamente la disposizione del sistema di sicurezza e delle segnalazioni relative all'impianto di Raggi X.



Disposizione dei consensi e dei segnali dell'impianto:

- C1 Interruttore a chiave (attivo con chiave assente)
- C2 Interruttore a chiave (attivo con chiave presente)
- I1 Interblocchi che bloccano e/o inibiscono il funzionamento dell'impianto con porta non completamente chiusa
- I2 Pulsante di emergenza di arresto rapido
- S1 Segnale luminoso di predisposizione al funzionamento
- S2 Segnale acustico di predisposizione al funzionamento
- S3 Segnale luminoso con indicazione "radiazioni" di predisposizione al funzionamento.

Durante le varie fasi di utilizzo dell'impianto (vedi sopra) i consensi ed i segnali hanno le seguenti configurazioni:

1. Quando lo sperimentatore opera nel locale Macchine radiogene per il setting dell'esperimento l'**unica** chiave che comanda C1 e C2 è inserita in C1 ed impedisce il funzionamento del generatore. I segnali luminosi S1 ed S3 ed il segnale acustico S2 sono disattivati.
2. Quando il locale Macchine radiogene viene evacuato, l'operatore dovrà:
  - Girare la chiave C1 ed estrarla dalla sede, il segnale luminoso S1 ed il segnale acustico S2 sono attivi.
  - Azionare la chiusura della porta schermata motorizzata. Alla chiusura, verificata dall'interblocco I1 chiuso, il segnale S1 (luminoso) ed il segnale S2 (acustico) sono disattivati.
  - Inserire la chiave in C2.
3. Quando tutti i consensi sono ottenuti, la consolle di comando dell'impianto in sala controllo è abilitata a spedire i comandi che permettono la generazione della radiazione, il segnale luminoso S3 è acceso quando vengono emessi raggi X.
4. Al termine dell'esperimento il generatore è spento, si ritorna alla situazione descritta in 1.

Le operazioni descritte in 2 e 3 possono essere interrotte in qualunque momento premendo il pulsante di emergenza I2 posto nel locale Macchine radiogene.

Il non completamento dell'intera sequenza di consensi o la sua interruzione (apertura della porta schermata, azionamento del pulsante di emergenza rapido I2) rende necessario riprendere dall'inizio l'intera sequenza.

## 7 Confronto con altre facility nel mondo.

Lista (incompleta) e descrizione delle facilities operanti tra  $10 \text{ keV} < E < 200 \text{ keV}$ . Di seguito elenchiamo un certo numero di facilities usate per la calibrazione di rivelatori e/o specchi per fotoni ad energie tra 10-200 keV, per un confronto con la facility presso il TeSRE-CNR.

Vengono fornite alcune delle loro caratteristiche principali quali il paese e la città ospitanti, il tipo di facility, la banda energetica di lavoro, la possibilità di calibrare specchi, ecc. Tale lista non si può considerare esaustiva ma bensì permettere di collocare la facility presente al TeSRE-CNR in un ambito internazionale.

### ITALIA

- Trieste: Sincrotrone, facility completamente dedicata all'ottica non disponibile, varie facilities non specificamente dedicate con  $E < 20 \text{ keV}$ .
- Ferrara:  
2 possibili set-up:
  - a) Fascio policromatico (pencil-beam) con rivelatore spettroscopico al Germanio (risoluzione energetica: circa 0.2 keV a 30 keV). Tubo RX con anodo in Tungsteno (banda operativa tra 15 e 140 keV). Adatta per misure di riflettività ad alta energia di specchi per raggi X (per es. cristalli a mosaico).
  - b) Fascio monocromatico (monocromatore ad uscita fissa munito di due cristalli leggermente mosaicizzati). Tubo RX con anodo in Tungsteno (banda operativa tra 15 e 140 keV) o in Cu (8 keV). Bassa intensità: ideale per calibrazione di rivelatori.
- Frascati:  
DAPHNE, 2 linee con  $E < 15 \text{ keV}$ . Al momento non sono mai state usate per calibrazioni e test (le due beamline lavorano in modo 'ancillare' rispetto all'uso attualmente principale del sincrotrone, cioè nel campo della fisica particellare).
- Milano:  
Osservatorio di Brera. Minifacility (Bede D1 System) con  $E_1 = 8 \text{ keV}$  ed  $E_2 = 17 \text{ keV}$  per studi di riflettività e scattering con pencil-beam monocromatico.
- Palermo:  
XACT – CNR e Osservatorio Astronomico. Intervallo di energia 0.1–10 keV, multianodo, con la possibilità di usare un monocromatore. Adatta per specchi con risoluzioni angolari peggiori di circa 3 arcmin e per studi di filtri per detectors a bassa energia (per esempio XMM e Chandra).

### EUROPA

#### Francia

- Grenoble:  
ESFR, Beamline ottica (pencil beam); mono  $E < 30 \text{ keV}$ , luce bianca  $E < 100 \text{ keV}$ , "public" facility (proposals). Vi sono già state effettuate caratterizzazioni di mandrini e specchi durante la realizzazione di XMM. Attualmente è utilizzata anche da ESTEC e Brera per la caratterizzazione di ottiche X.
- Toulouse: beam di 20m per alte energie:  $100 \text{ keV} < E < 500 \text{ keV}$ .  $\Delta E/E$  bassa

#### Germania

- Munich:  
MPE:
  - a) PUMA test facility;  $E \sim 0.1\text{-}20 \text{ keV}$ .
  - b) PANTER test facility;  $E < 25 \text{ keV}$ , beam largo  $E < 55 \text{ keV}$ .

- Bessy:  
BESSY Lab.: Pencil beam  $E < 30-40$  keV

#### *UK*

- Daresbury:  
Daresbury Laboratory, Sincrotrone pencil beam  $E < 18$  keV. E' stata utilizzata nel passato per la calibrazione di SODART. La strumentazione è stata fornita completamente dal DSRI e quindi è stata rimossa. Durante tali misure, per mezzo di un particolare tipo di monocromatore con cristallo in Si 'a taglio asimmetrico' il pencil-beam era trasformato in una lama (larghezza circa 1 cm, lunghezza 10-15 cm), in modo da permettere misure sulla qualità di imaging con una full-illumination parziale.

#### *Danimarca*

- DSRI – 2 facilities:
  - a) Una sotto vuoto per le energie molto basse (0.1–2 keV) – test di riflettività e scattering con pencil-beam di campioni di piccole dimensioni.
  - b) Una operativa in aria da 5 a 22 keV. Pencil-beam monocromatico. Usato anche per la stima di area efficace di SODART usando un apparato meccanico appositamente sviluppato per questo scopo.

#### *USA*

- Caltech (HEFT): Test facility per rivelatori basato su sorgenti radioattive.
- Marshall Laboratories: Beam di 500m usato per Chandra:  $E < 10$  keV. Full illumination sensibile fino a 0.5 arcsec di risoluzione angolare.
- Ramsay: Beam di 100m usato per Con-X:  $E < 50-60$  keV (full illumination).
- CfA: Facility per  $E < 17$  keV (simile a quella di Brera Milano).
- Brookhaven: Sincrotrone, studi di riflettività per  $E < 40-50$  keV.
- GSFC/LHEA: Full illumination beam,  $E < 20-30$  keV, divergenza di qualche primo.

#### *GIAPPONE*

- Spring-8: Facility per  $E < 100$  keV.

Notiamo infine che l'accesso all'ESRF (Grenoble) ed a Trieste è vincolato a dei 'call for proposal' che si ripetono ogni 6 mesi, e che l'unico beam con full-illumination ad alte energie si trova al Marshall (NASA).

## 8 Possibili modifiche al sistema di calibrazione.

Potrebbe essere possibile modificare, previo studio delle modifiche da apportare al sistema, la posizione del sistema di movimentazione del rivelatore (M2 in figura 1-1), per fare spazio a rivelatori di tipo diverso da quello previsto durante la fase di progettazione del sistema di calibrazione.

Nel caso si renda necessario installare rivelatori o concentratori di radiazione che rendano necessario spostare il sistema di movimentazione, si deve tenere conto sia delle dimensioni della sala macchine radiogene (vedi par. 1.5) che delle limitazioni che questa modifica comporta in termini di:

- Diminuzione di intensità del fascio al rivelatore.
- Maggiori dimensioni del fascio che incide sul rivelatore.
- Minore range di energia selezionabile.
- Minore accuratezza nella localizzazione del fascio che incide sul rivelatore, causata dal maggiore percorso che la radiazione deve seguire dopo la riflessione sul cristallo prima di giungere sul rivelatore.

Per quanto riguarda la diminuzione di intensità del fascio che incide sul rivelatore, la relazione usata è la (2) descritta al paragrafo 1.3, in cui si prendono in considerazione valori diversi della lunghezza del percorso attraversato dalla radiazione. I risultati sono mostrati in figura 8-1.

L'intervallo di energia selezionabile diminuisce a causa della maggiore distanza dal cristallo del sistema di movimentazione, che gli consente di inseguire il fascio solo per un angolo ridotto. Questo implica che solo le energie più elevate rimarranno disponibili all'utilizzatore, al contrario di quelle più basse, che richiedono un angolo di rifrazione del fascio sul cristallo maggiore.

Mentre è difficile quantificare la minore accuratezza nel posizionamento del fascio, è invece possibile impostare una relazione che tenga conto dell'allargamento del fascio in funzione della maggiore distanza 'collimatore C4-Rivelatore', che segue l'andamento lineare dato da:

$$L'r/Lr = d'/d$$

Dove:

$L_r$  ed  $L'r$  sono le dimensioni del fascio sul rivelatore prima e dopo lo spostamento del sistema di movimentazione.

$d$  e  $d'$  sono la distanza tra rivelatore e cristallo prima e dopo lo spostamento del sistema di movimentazione.



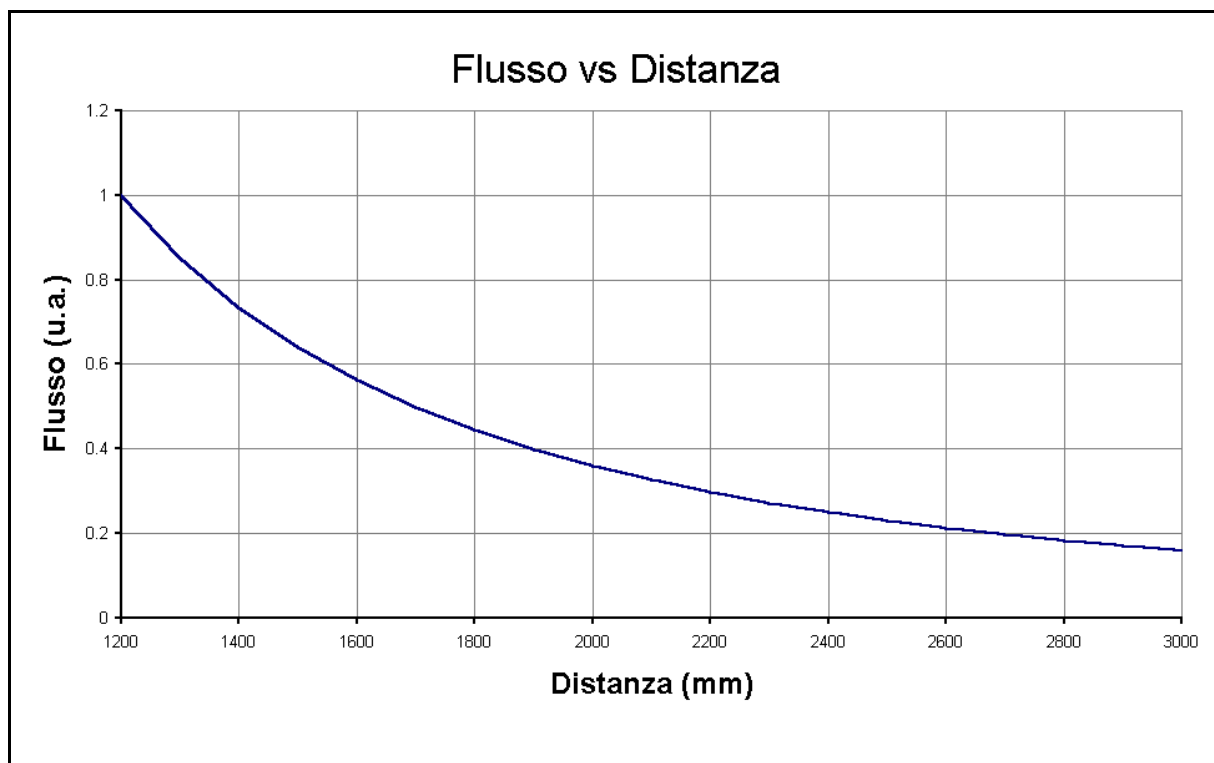


Figura 8-1: Andamento del flusso della radiazione incidente sul rivelatore in funzione della distanza Sorgente–Rivelatore.

# Ringraziamenti

Questo lavoro è stato supportato dall'Agenzia Spaziale Italiana (contratto n. ASI 95-RS-04). Gli autori vogliono inoltre ringraziare A. Mauri ed E. Rossi dell'Istituto TeSRE-C.N.R. per il contributo nello sviluppo di alcune delle parti elettroniche e G. Pareschi per le informazioni forniteci sulle altre facilities nel mondo.