



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FERRARA

Corso di Laurea in Fisica ed Astrofisica

LENTI DI LAUE PER RAGGI GAMMA: PROPRIETÀ FISICHE DEGLI SVILUPPI IN CORSO NEL LABORATORIO LARIX

Relatore:
Prof. Filippo Frontera

Laureando:
Filippo Nobili

Anno Accademico 2012-2013

*Alla mia famiglia
A Beatrice*

Indice

1	ASTRONOMIA X E GAMMA	1
1.1	I fenomeni dell'Universo	1
1.1.1	La radiazione di fondo	1
1.1.2	Nuclei Galattici Attivi	2
1.1.3	Coppie elettroni-positroni a 511 keV	3
1.1.4	Esplosioni di supernovae	3
1.1.5	Buchi neri e Gamma-ray bursts	4
1.2	I successi dell'Astronomia X e Gamma	5
2	LE LENTI DI LAUE	7
2.1	La diffrazione da cristalli	7
2.2	Il progetto di lenti di Laue	10
2.3	I prototipi realizzati	11
2.4	Gli sviluppi futuri	12
3	IL LABORATORIO LARIX	17
3.1	La struttura	17
3.2	I sistemi radiogeni	18
3.3	I rivelatori	19
4	I CONTROLLER	21
4.1	Le automazioni in Larix	21
4.2	Il sistema di controllo Newport	22
4.3	L'ambiente LabView	23
4.4	Lo sviluppo del programma	24
4.5	Primi utilizzi e miglioramenti	25
5	IL FRAME DELLALENTE	33
5.1	Il supporto di una lente di Laue	34
5.2	Possibili materiali	34

5.3	Determinazione del coefficiente di assorbimento	35
5.3.1	Procedimento di misura	36
5.3.2	Analisi dati	37
5.3.3	Fase preliminare	38
5.4	Il coefficiente di assorbimento del CeSiC	38
5.4.1	Misure ed analisi	39
5.5	Il coefficiente di assorbimento della fibra di carbonio	40
5.5.1	Misure ed analisi	42
5.6	Sviluppi tecnologici	43
6	CONCLUSIONI	47
	Bibliografia	49

Introduzione

Da 50 anni la ricerca astronomica è proiettata verso la frontiera dei raggi X e Gamma quali sonde di un Universo ancora poco conosciuto ed esplorato. Oggi, dopo anni di successi dell'astronomia X e Gamma, la comunità scientifica è pronta per una nuova sfida (tecnologica e conoscitiva): costruire telescopi focalizzanti per raggi X-duri / Gamma-molli (> 70 - 100 keV) in grado di amplificare il segnale ed estendere la conoscenza verso nuovi confini. Questa sfida si chiama lente di Laue e si gioca su vari campi:

- tecnologico, per la richiesta di grande precisione nell'allineamento delle varie parti che la compongono,*
- spaziale, per la complessità di gestire una fase di lancio di satellite ed il successivo progetto di volo,*
- fisico, per lo studio dei materiali e delle geometrie che possono garantire la maggior efficienza del risultato finale.*

Questo progetto di tesi è stato svolto presso il laboratorio Larix (LARge Italian X-ray facility) del dipartimento di Fisica e Scienze della Terra dell'Università di Ferrara, dove è attualmente in fase di realizzazione un prototipo di lente di Laue per uso astronomico.

La tesi è organizzata nel seguente modo: nel Capitolo 1 vengono descritti alcuni fenomeni dell'astrofisica X e Gamma che ancora non hanno trovato risposta con l'utilizzo di telescopi tradizionali (a vista diretta). Tali fenomeni arriveranno presumibilmente a comprensione attraverso l'utilizzo di lenti di Laue il cui principio di funzionamento viene descritto nel Capitolo 2. Nel Capitolo 3 viene riportata una dettagliata descrizione della strumentazione presente nel laboratorio LARIX nel quale mi sono inizialmente occupato dello sviluppo di un'applicazione in ambiente LabView per la gestione remota delle movimentazioni sulla linea del fascio (Capitolo 4). Successivamente sono state svolte misure del coefficiente di assorbimento del CeSiC e della fibra di carbonio, materiali che potrebbero essere utilizzati come supporto della lente di Laue. Tali misure vengono riportate e discusse nel Capitolo 5. Nell'ultimo capitolo vengono tratte alcune conclusioni riguardo i migliori materiali da impiegare in un progetto di lente di Laue.

Capitolo 1

ASTRONOMIA X E GAMMA

Le possibilità di osservare, indagare e conoscere l'Universo hanno viaggiato nei secoli alla stessa velocità dello sviluppo tecnologico. Se inizialmente lo strumento di osservazione era l'occhio nudo, per diventare poi un cannocchiale provvisto di lenti ottiche, si è arrivati nel '900 a studiare il cosmo nello spettro delle onde radio, l'infrarosso e l'ultravioletto. Da 50 anni è iniziata l'osservazione in raggi X e, ancora più in profondità, in raggi Gamma: finora con rivelatori a vista diretta e focalizzanti a basse energie, in futuro con telescopi in grado di focalizzare raggi X "duri" (>70 keV) e Gamma molli (lenti di Laue).

1.1 I fenomeni dell'Universo

La maggior parte della radiazione visibile (o di quella nelle bande di frequenza contigue al visibile) proveniente dal cosmo è prodotta in processi termici. Osservare l'Universo nella banda dei raggi X e Gamma significa puntare lo sguardo su sorgenti di grande potenza e fenomeni molto più violenti. In generale queste radiazioni provengono da processi non termici, con campi magnetici che accelerano le particelle ad energie relativistiche, o da processi esplosivi in cui si sintetizzano gli elementi di cui è composto l'Universo. Inoltre, in virtù della maggior potenza di penetrazione di queste frequenze, è possibile arrivare ad indagare anche regioni altrimenti oscure, come le zone del disco Galattico nascoste da dense nubi interstellari o le regioni di accrescimento di materia attorno a buchi neri. Allo stato attuale molta della radiazione X e Gamma proveniente dall'Universo è stata mappata, restano però da identificare con esattezza le sorgenti di tale radiazione ed i fenomeni fisici che ne sono responsabili.

1.1.1 *La radiazione di fondo*

In aggiunta alle sorgenti discrete, il cosmo è pervaso da un fondo di radiazione X diffuso (Figura 1.1). L'origine di tale fondo alle basse energie (<10 keV) è stata affrontata e risolta

[1]: si è potuto stabilire che esso è dovuto all'emissione di Nuclei Galattici Attivi (quasar molto luminose e/o galassie di Seyfert). Ad energie superiori a 10 keV ci si aspetta che sia dovuto a nuclei galattici attivi molto assorbiti, mentre attorno i 100 keV senz'altro c'è un forte contributo di blazar, cioè radio sorgenti variabili altamente energetiche associate a buchi neri supermassicci al centro di galassie peculiari.

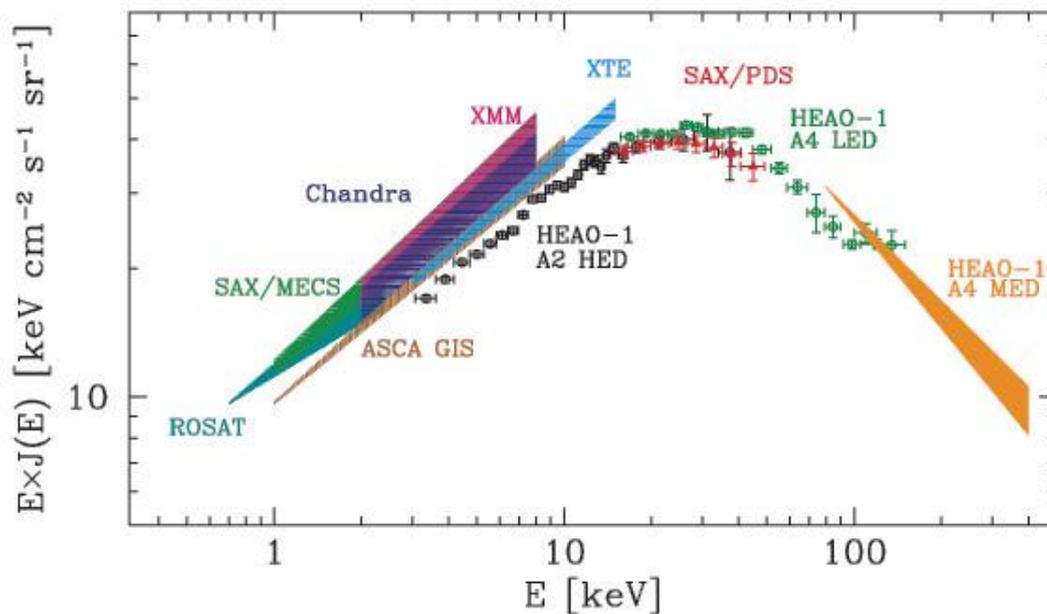


Figura 1.1: Spettro del fondo cosmico rivelato dal satellite BeppoSAX (punti rossi) comparato con i risultati di altre missioni.

1.1.2 Nuclei Galattici Attivi

I nuclei galattici attivi (AGN) comprendono sia galassie cosiddette “radio quiet” che “radio loud”. Oltre i 100 keV prevalgono i blazar di cui non è ancora definito quali possano essere i processi di produzione di radiazione. Il modello più gettonato è il cosiddetto “synchrotron self Compton”, ma per una verifica bisogna studiare in profondità la loro emissione spettrale nella banda 100 keV - 1 MeV. Esempi di radio quiet sono le galassie di Seyfert, mentre esempi di radio loud sono i blazar. Nel caso dei radio quiet, per capire il meccanismo di produzione dell'emissione, è cruciale studiare i cut-off alle alte energie (>100 keV). Per tutti gli AGN è importante misurare il grado e il livello di polarizzazione dei fotoni ad alta energia emessi. Nel caso dei blazars si presume che siano sorgenti polarizzate. [2]

1.1.3 Coppie elettrone-positroni a 511 keV

All'energia di 511 keV dello spettro della regione del Centro Galattico si è osservata la traccia dell'annichilazione della coppia elettrone-positrone. Nonostante che da alcuni decenni sia nota la provenienza di questa radiazione, rimane ancora un mistero l'origine dei positroni. La missione INTEGRAL ha mostrato un'evidente asimmetria nella distribuzione dell'emissione a 511 keV (Figura 1.2), che non può essere dovuta a differenze nella densità del mezzo interstellare in cui i positroni annichilano [3]. Inoltre, poiché i positroni potrebbero essere emessi da buchi neri in accrescimento o stelle di neutroni, una plausibile spiegazione iniziale era che l'emissione diffusa osservata potesse essere dovuta a tali sorgenti che sembrarono mostrare un'analogia distribuzione spaziale asimmetrica. Recentemente però si è visto che questa asimmetria spaziale nella distribuzione delle sorgenti non è confermata e rimane il mistero sull'origine della riga di annichilazione di positroni a 511 keV. Per individuare definitivamente le sorgenti di positroni del centro galattico sono necessari Telescopi Gamma con una maggior sensibilità in energia ed angolare.

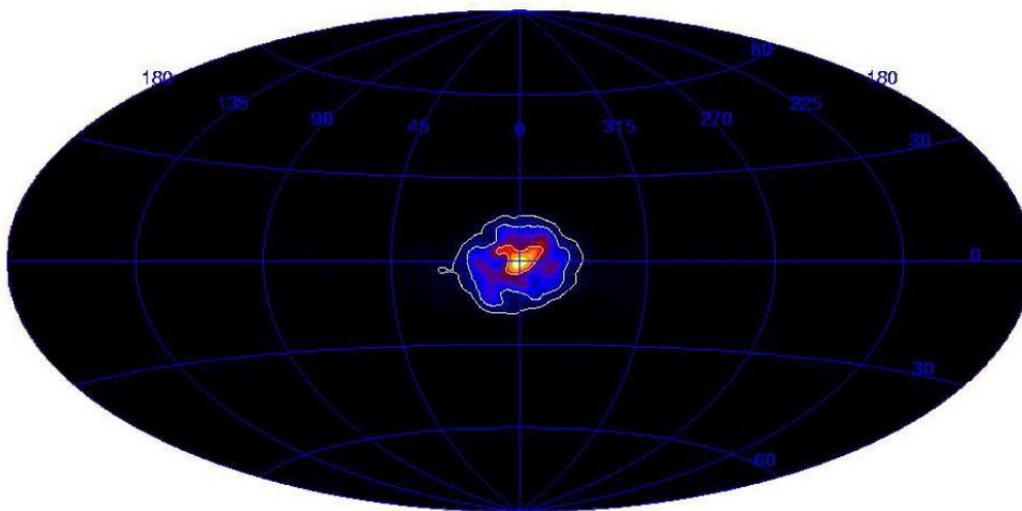


Figura 1.2: Una mappa di cielo in coordinate Galattiche che mostra la distribuzione spaziale della linea di annichilazione elettrone-positrone a 511 keV.

1.1.4 Esplosioni di supernovae

Le esplosioni di supernovae originano in sconvolgimenti termoneucleari di nane bianche, con massa prossima al limite di Chandrasekhar, all'interno di sistemi binari. Per quanto le esplosioni di supernovae siano, con gli strumenti di oggi, individuate ed osservate con facilità, ancora non si conoscono come questi corpi raggiungano l'instabilità e come l'esplosione si propaghi all'interno

della stella. Misurare gli spettri Gamma dei nuclei radioattivi e dei prodotti di decadimento, permetterebbe di conoscere la quantità di questi elementi, la loro distribuzione e la velocità di propagazione e quindi consentirebbe di ricondurre la misura a ben definiti modelli teorici di evoluzione stellare. Gli "indizi" da ricercare sono ad esempio la riga a 847 keV del decadimento del ^{56}Co o quella dell'annichilazione elettrone-positrone a 511 keV (Figura 1.3) [2].

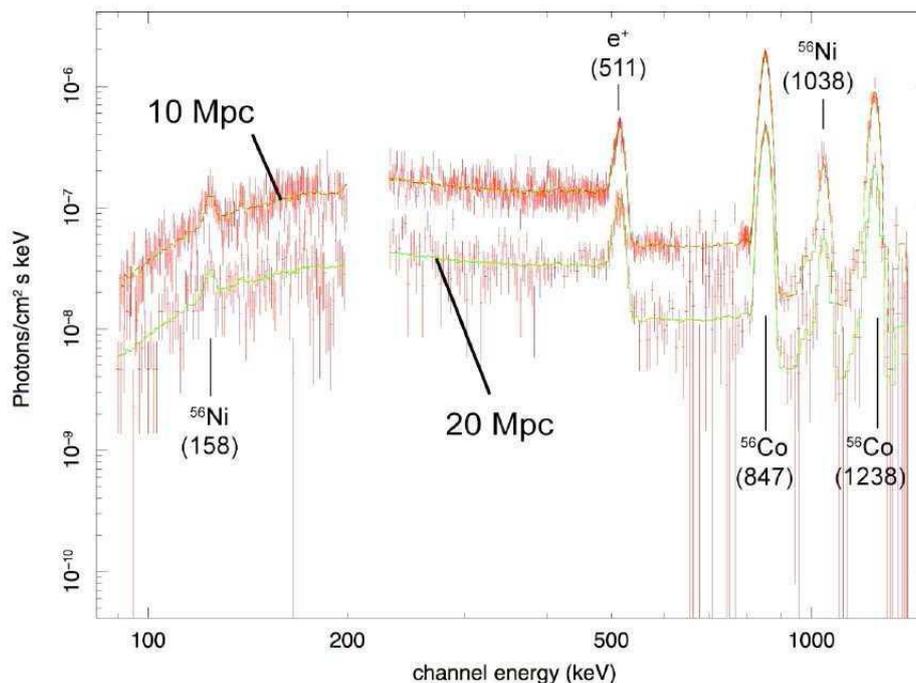


Figura 1.3: Simulazione di spettro di una Supernova di tipo Ia a 10 Mpc e 20 Mpc.

1.1.5 Buchi neri e Gamma-ray bursts

Per quanto i buchi neri siano per definizione di difficile osservazione (in ottico), nelle bande X e Gamma lasciano tracce molto evidenti. Se si pensa ad un buco nero in accrescimento di massa, magari perché in un sistema binario, è possibile misurare il flusso di radiazione della materia proveniente dal disco di accrescimento associato. Infatti la materia di accrescimento forma un disco caldo in cui gli effetti della presenza di buchi neri si notano meglio, fornendo importanti prove nello studio della fisica di questi fenomeni di ancora così difficile interpretazione. Inoltre si ritiene [4] che siano gli stessi buchi neri in accrescimento i responsabili dei Gamma-ray bursts (lampi di raggi Gamma), le manifestazioni energetiche più intense dell'Universo su cui ancora si sa poco ma sul cui studio l'astronomia X e Gamma ha dimostrato di essere molto proiettata realizzando satelliti quali BeppoSAX, INTEGRAL e Swift dedicati allo studio di questi fenomeni.

1.2 I successi dell'Astronomia X e Gamma

L'anno di nascita dell'astronomia X è il 1962, quando la scoperta di una sorgente di raggi-X SCO X-1 nella costellazione dello Scorpione e della radiazione di fondo in questa banda ha mostrato la presenza nell'Universo di sorgenti di energia così elevata. I primi strumenti di localizzazione di sorgenti erano semplici contatori Geiger con collimatori meccanici a cui si sono aggiunti successivamente spettrometri, anch'essi collimati, a vista diretta del cielo. La prima missione di grandi dimensioni interamente dedicata all'osservazione dell'Universo in queste frequenze risale al 1977 con il satellite HEAO-1 (Figura 1.4) mentre all'inizio degli anni '80 con il satellite Einstein per la prima volta è stato osservato il cielo nella banda 0,1 - 4 keV con telescopi focalizzanti. Ad "Einstein", negli anni '90, è seguito ROSAT. Queste prime missioni hanno consentito la catalogazione di migliaia di sorgenti di raggi X-molli.

Un grande progresso nell'osservazione dei fenomeni energetici nell'Universo è avvenuto dalla

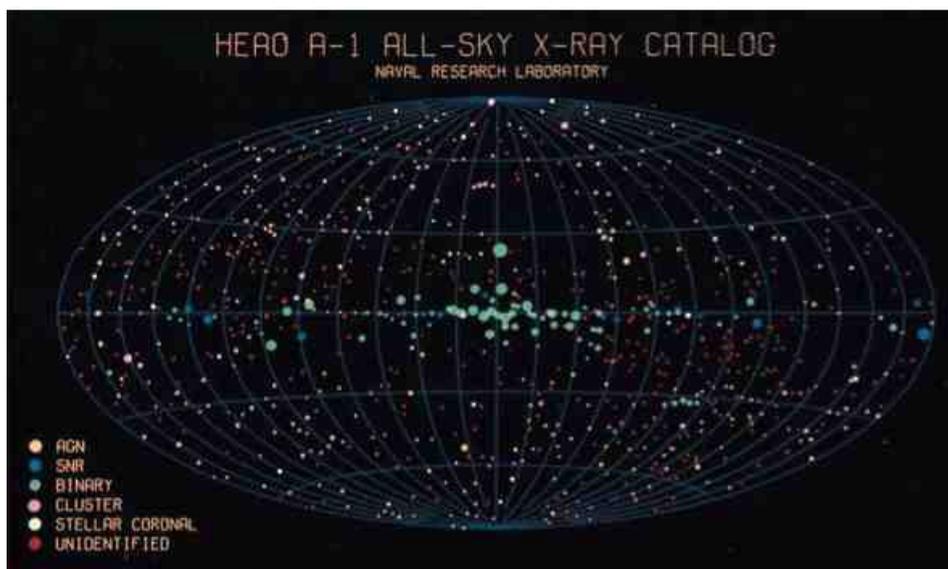


Figura 1.4: Mappa delle sorgenti di raggi X realizzata dal satellite HEAO-1 nella banda 0,5 - 25 keV. La dimensione dei punti indica l'intensità della sorgente ed il colore indica il tipo. [5]

metà degli anni '90 fino al primo decennio del XXI Secolo con i satelliti in grado di focalizzare la radiazione X fino a 10 keV (Chandra, BeppoSAX, Swift) e fino a 70 keV (NuSTAR). Con BeppoSAX e Rossi XTE si è potuto osservare le sorgenti oltre i 100 keV, attraverso rivelatori a vista diretta fornendo i primi importanti dati sulle sorgenti Gamma quali buchi neri e Gamma-ray bursts. Un importante contributo per l'astronomia di raggi X-duri e Gamma-molli è stato dato anche dalla missione INTEGRAL dotata di rivelatori in grado di acquisire spettro e immagine a vista diretta. Da questa breve esposizione appare chiaro che, nonostante gli sforzi, la banda 100 keV - 1 MeV è molto importante ma anche poco esplorata a causa della bassa sensibilità degli strumenti a vista diretta. È per questa ragione che si vogliono sviluppare le lenti di Laue. [6]

Capitolo 2

LE LENTI DI LAUE

Una lente di Laue è costituita da un insieme di cristalli opportunamente orientati in grado di focalizzare i raggi Gamma per diffrazione di Bragg in attraversamento (geometria Laue). La banda passante di una lente dipende dalle sue dimensioni geometriche e dalle proprietà fisiche dei cristalli impiegati.

2.1 La diffrazione da cristalli

La possibilità che un cristallo possa deviare un fascio di raggi X o Gamma si esprime mediante due equazioni equivalenti, tanto semplici quanto importanti:

$$\mathbf{k}_i - \mathbf{k}_d = \mathbf{G} \quad (2.1)$$

$$2d_{hkl} \sin\theta_B = n\lambda \quad (2.2)$$

La prima è opera di Max von Laue (1912) e \mathbf{k}_i e \mathbf{k}_d rappresentano i vettori d'onda del fascio incidente e di quello diffratto, mentre \mathbf{g} rappresenta il vettore del reticolo reciproco perpendicolare ai piani reticolari, di modulo $2\pi/d_{hkl}$, in cui d_{hkl} è la distanza tra i piani del reticolo cristallino di cui $[hkl]$ rappresentano gli indici di Miller. Nella seconda equazione, dovuta a William Lawrence Bragg (1913), θ_B è l'angolo di diffrazione (angolo di Bragg), n è l'ordine di diffrazione e λ è la lunghezza d'onda dei fotoni incidenti. L'energia E dei fotoni dipende dalla lunghezza d'onda secondo la relazione $E = hc/\lambda$ con $hc=12.4 \text{ keV}\cdot\text{\AA}$.

Quando un fascio di fotoni paralleli e policromatici raggiunge la superficie di un cristallo (Figura 2.1), la diffrazione tra l'onda elettromagnetica ad esso associata ed i piani del reticolo cristallino seleziona un fascio monocromatico deviato di un angolo θ_B . Fissata una distanza reticolare d (e quindi considerando di fare diffrazione all'interno di un solo cristallo omogeneo e perfetto) ogni angolo θ_B seleziona una sola energia del fascio diffratto.

La diffrazione in geometria Bragg prevede che i piani di diffrazione siano paralleli alla superficie

esterna del cristallo. Quando invece si lavora in “geometria Laue” (Figura 2.1) si considerano i piani cristallini perpendicolari alla superficie di incidenza ed il fascio attraversa il cristallo nella sua sezione: proprietà fisiche come lo spessore e la capacità di assorbimento dei fotoni (funzione dell’energia) diventano quindi parametri importanti nell’efficienza della diffrazione.

Si è accennato a come la diffrazione all’interno di un cristallo perfetto produca un fascio mo-

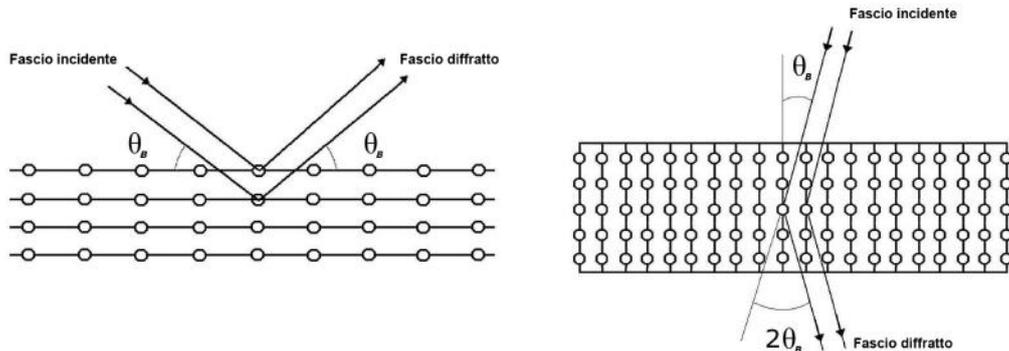


Figura 2.1: Confronto tra la configurazione di Bragg in riflessione (a sinistra) e di Laue in trasmissione (a destra).

nocromatico il cui spettro misurato avrà un picco molto stretto in prossimità di questa energia. Eventuali imperfezioni nel reticolo cristallino producono un allargamento dello spettro in uscita. Ancora più interessanti sono i cristalli a mosaico. In questi cristalli non si ha un unico reticolo cristallino che si ripete in modo periodico, ma è come se la struttura originaria fosse spezzata in tanti piccoli cristallini perfetti (cristalliti) della dimensione di $10^{-6}\text{m} - 10^{-5}\text{m}$ disallineati tra loro (Figura 2.2).

Se si indica con δ l’angolo di disallineamento tra i cristalliti ed il piano reticolare medio, allora la diffrazione di un fascio parallelo monocromatico agente sul cristallo a mosaico non selezionerà più un’unica energia corrispondente all’angolo θ_B ma l’intervallo di energie corrispondenti all’intervallo $[\theta_B, \theta_B \pm \delta]$ con un conseguente allargamento del picco nello spettro di diffrazione che

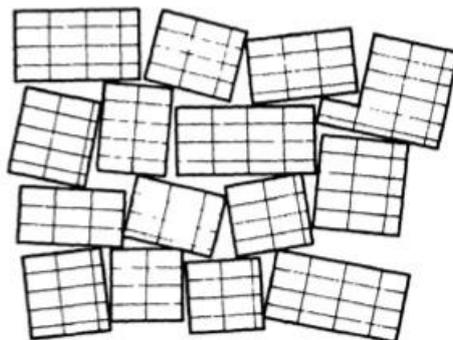


Figura 2.2: Disposizione dei cristallini in un cristallo a mosaico.

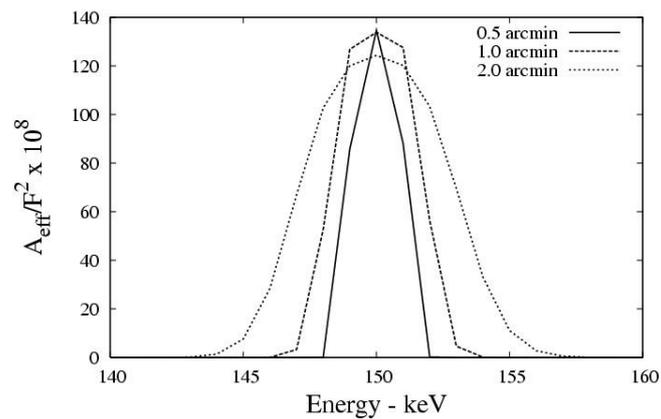


Figura 2.3: Confronto della larghezza dello spettro di diffrazione con diverse mosaicità di un cristallo di rame (111).

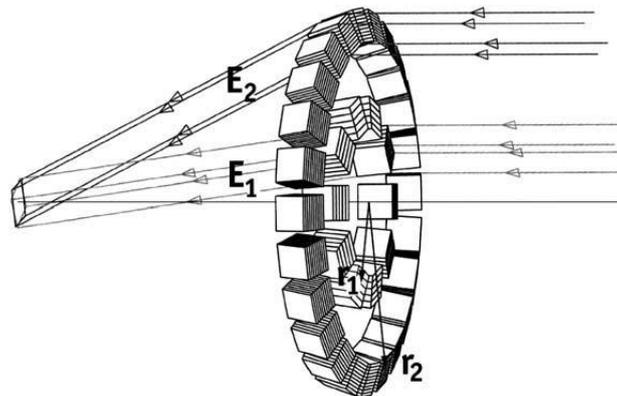


Figura 2.4: Principio di funzionamento di una lente di Laue. I raggi Gamma provenienti dall'infinito sono diffratti nel punto focale da cristalli posizionati su anelli concentrici.

diventa approssimabile con la Gaussiana

$$W(\delta) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\eta}} \exp\left(\frac{-\delta^2}{2\eta^2}\right) \quad (2.3)$$

in cui $\beta = 2,35\eta$ rappresenta la larghezza a metà altezza (FWHM) della Gaussiana. Maggiore è la mosaicità di un cristallo, più larga risulterà la FWHM dello spettro di diffrazione (Figura 2.3).

L'importanza della mosaicità risiede nella necessità di ottenere sul fuoco della lente uno spettro quanto più possibile continuo facendo sovrapporre le larghezze dei picchi di diffrazione. Se, come è allo studio in questo momento, si sostituiscono i cristalli a mosaico con cristalli incurvati si ottengono picchi di maggior efficienza e di forma rettangolare che consentono una migliore sovrapposizione eliminando i contributi delle "code" della funzione gaussiana.

2.2 Il progetto di lente di Laue

Basandosi sulla teoria di Bragg, posizionando una serie di cristalli su una superficie sferica è possibile focalizzare un fascio parallelo, incidente sulla lente, in un fuoco in cui vengono sommati i contributi di tutti i cristalli. Un esempio di configurazione di lente è mostrato in Figura 2.4. Al variare dell'angolo tra la tangente alla superficie della lente ed il fascio incidente, si focalizzano tutte le energie comprese nell'intervallo $[E_{min}, E_{max}]$ dipendente unicamente dalla distanza reticolare d_{hkl} e dalla geometria della lente (Figura 2.5):

$$E_{min} = \frac{hc}{2d \sin \theta_{max}} \approx \frac{hcf}{d_{hkl} r_{max}} \quad (2.4)$$

$$E_{max} = \frac{hc}{2d \sin \theta_{min}} \approx \frac{hcf}{d_{hkl} r_{min}} \quad (2.5)$$

in cui h è la costante di Planck, c è la velocità della luce, f è la distanza focale e r il raggio della lente.

Per realizzare lenti di Laue in grado di osservare il cielo Gamma sono quindi necessari raggi di

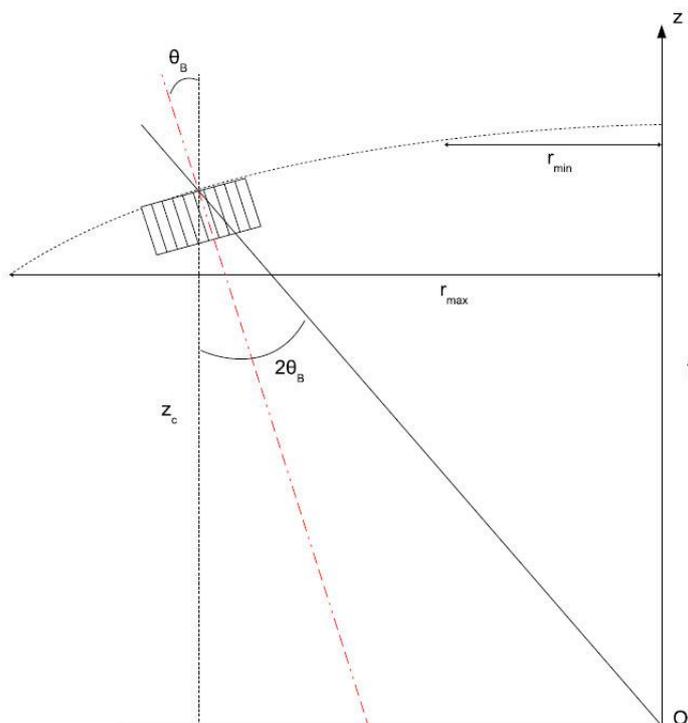


Figura 2.5: Dimostrazione schematica del funzionamento di una lente di Laue con cristalli su superficie sferica.

curvatura e distanze focali che consentano angoli di diffrazione compatibili con la banda di lavoro della lente (60 - 600 keV nel caso della lente in corso di sviluppo a Ferrara). Utilizzando cristalli a mosaico o cristalli incurvati è possibile sovrapporre le energie dei fotoni focalizzati dai singoli cristalli ed ottenere una larghezza di banda della lente senza buchi di efficienza (Figura 2.6).

È possibile legare la mosaicità all'intervallo di energia dei fotoni focalizzati da ogni cristallo, derivando l'equazione di Bragg ed ottenendo:

$$\frac{\Delta\theta_B}{\theta_B} = \frac{\Delta E}{E} \quad (2.6)$$

Poiché per piccoli angoli di diffrazione $\sin\theta_B \approx \theta_B$, allora

$$2d_{hkl}\theta_B \approx \frac{hc}{E} \quad (2.7)$$

e quindi la larghezza ΔE in energia del diffratto di ogni cristallo cresce con il quadrato di E

$$\Delta E \approx 2d_{hkl} \frac{\Delta\theta_B}{hc} E^2 \quad (2.8)$$

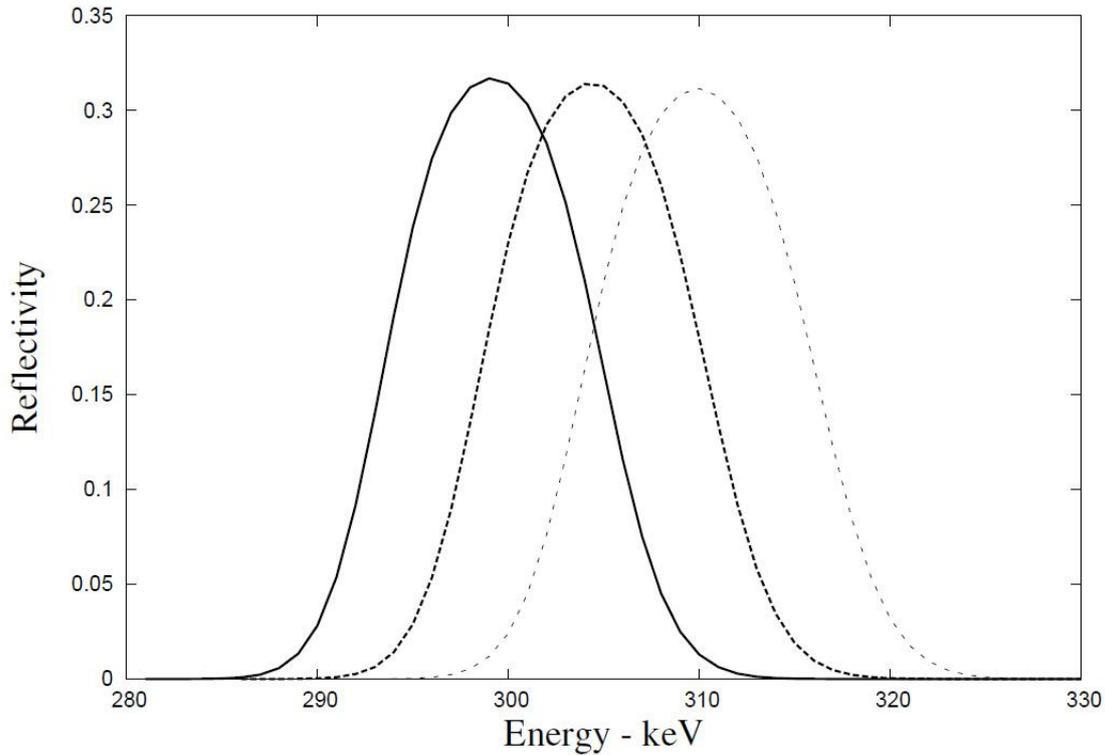


Figura 2.6: Esempio di sovrapposizione del contributo di tre cristalli contigui con mosaicità di 1,5 arcmin su superficie sferica.

2.3 I prototipi realizzati

Negli ultimi anni nel Laboratorio Larix sono stati realizzati prototipi di lenti in grado di dimostrare la fattibilità (dal punto di vista tecnologico, dei materiali e dell'analisi dati) di una lente di Laue per uso astrofisico. I primi due prototipi hanno impiegato 20 cristalli a mosaico di Cu [111]

incollati su un supporto in fibra di carbonio. Nel secondo prototipo si è potuto migliorare, rispetto al primo, la tecnologia di allineamento dei cristalli sul fascio.

Tutti i prototipi sono stati realizzati con un diametro di 36 cm in modo da poter effettuare dif-

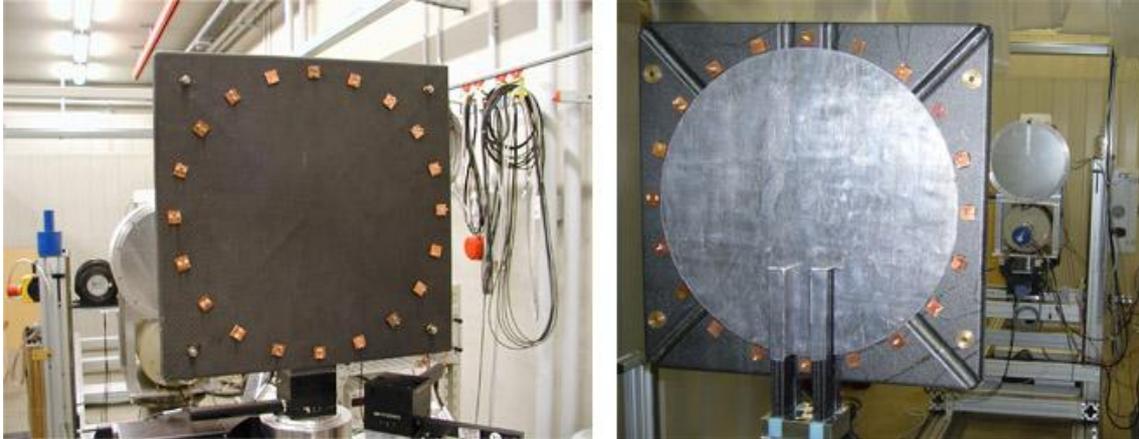


Figura 2.7: I primi due prototipi realizzati.

frazione a 100 keV con una distanza focale (congruente alla distanza dalla sorgente) di 6 m. È necessario infatti ricordare che, a differenza di una sorgente astronomica, per il test dei prototipi il fascio incidente realizzato in laboratorio è ottenuto da un tubo a raggi X che fornisce una distribuzione quasi isotropa delle direzioni di uscita dei fotoni. Di conseguenza il fascio è divergente. Incollando i cristalli su una superficie piana verticale con i piani reticolari perpendicolari alla superficie e tangenti alla circonferenza su cui giacciono, si ottiene una lente in grado di convergere in un fuoco il fascio divergente che incide su di essa. In accordo con la legge di Bragg, l'energia del fascio diffratto dipende solo dalla distanza reticolare e dalla geometria della lente.

I risultati ottenuti (in spettrografia e immagini) dei primi due prototipi sono stati soddisfacenti anche se non completamente in accordo con i risultati attesi attraverso simulazioni Monte Carlo in cui veniva assunto un perfetto orientamento dei cristalli sul frame della lente.

2.4 Gli sviluppi futuri

Come è stato affermato nell'introduzione, telescopi focalizzanti, e perciò molto sensibili fino a 70 - 80 keV, sono già stati sviluppati e sono già in orbita. L'obiettivo principale ora è effettuare misure approfondite nella banda oltre i 70 keV e, per farlo, è necessario installare a bordo di un satellite un telescopio focalizzante per raggi Gamma. Questo è l'obiettivo del Progetto Laue (proseguimento del Progetto HAXTEL) all'interno del quale si sta assemblando un prototipo di petalo di lente nel laboratorio Larix del Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra di Ferrara. In aggiunta allo sviluppo della tecnica di assemblaggio, con Laue si vogliono raggiungere i seguenti obiettivi:

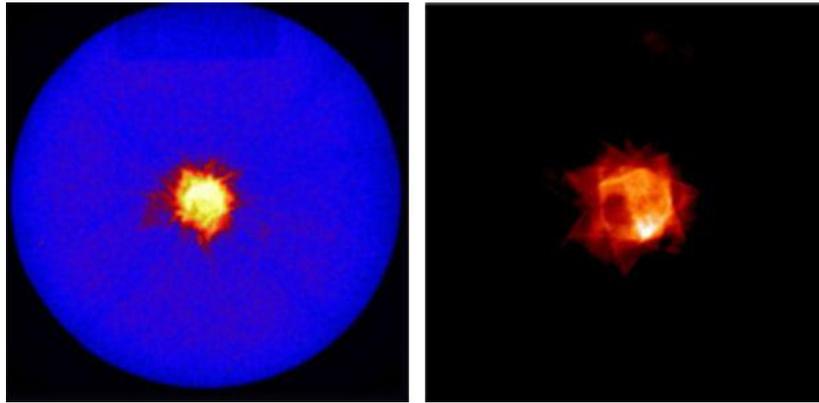


Figura 2.8: Immagini di focalizzazione dei primi due prototipi.

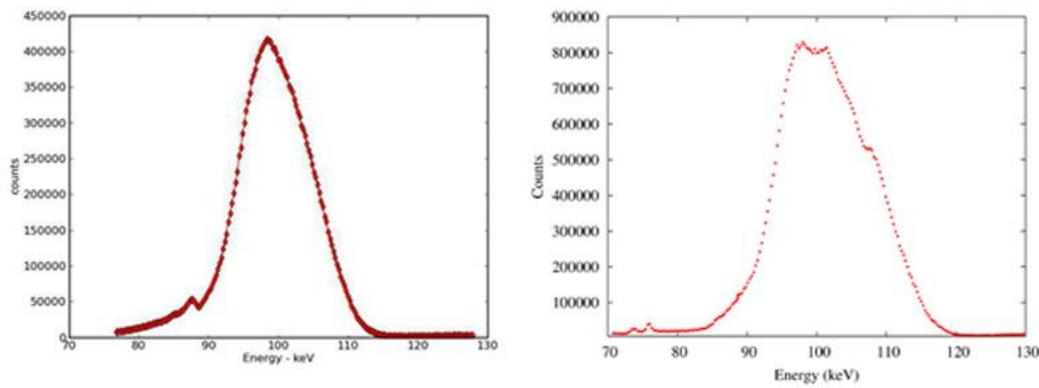


Figura 2.9: Spettri di focalizzazione dei primi due prototipi misurati con rivelatore al germanio.

- sviluppo di cristalli curvi;
- ottimizzazione del materiale di supporto dei cristalli;
- fattibilità di una lente fatta di petali per applicazioni spaziali.

L'analisi e la gestione di tutti questi aspetti è fondamentale prima di procedere alla realizzazione della lente di Laue che potrà essere montata su un satellite.

Il progetto di sviluppo di lenti di Laue è iniziato (Progetto HAXTEL) utilizzando cristalli a mosaico di rame a sezione quadrata, con la realizzazione di 2 prototipi. Dai risultati ottenuti è emerso come fosse opportuno impiegare cristalli curvi di Germanio e Arseniuro di Gallio e cambiare la tecnologia per l'assemblaggio della lente. L'impiego di questi materiali garantisce una miglior efficienza della lente alle diverse energie, mentre l'incurvatura del cristallo riduce l'area dello spot focalizzato dalla lente (Figura 2.10).

Il Progetto Laue è ormai alla fase finale con lo sviluppo di un settore di lente (petalo) con supporto in fibra di carbonio su cui disporre un fitto tassellamento di cristalli (Figura 2.11). La lunghezza focale di questo prototipo è di 20 m.

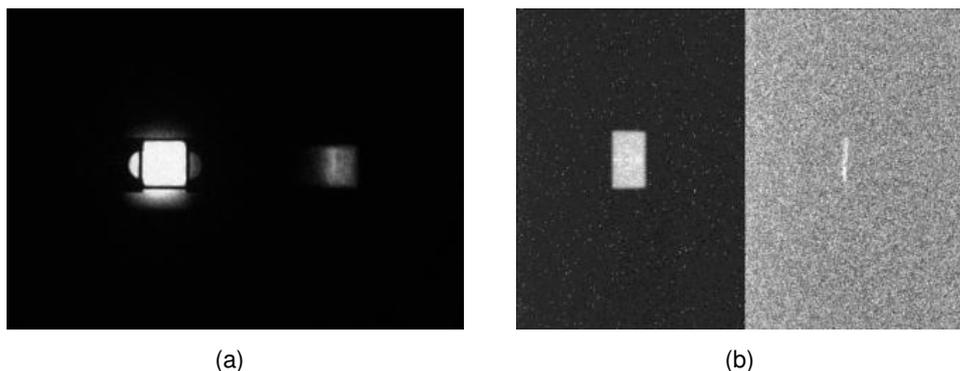


Figura 2.10: A sinistra la sovrapposizione tra fascio trasmesso e diffratto di un cristallo di rame piano. A destra la comparazione tra fascio trasmesso e diffratto di un cristallo di germanio incurvato. È evidente come, confrontandolo con il fascio incidente, il diffratto relativo a cristalli incurvati risulti focalizzato in uno spot più stretto.

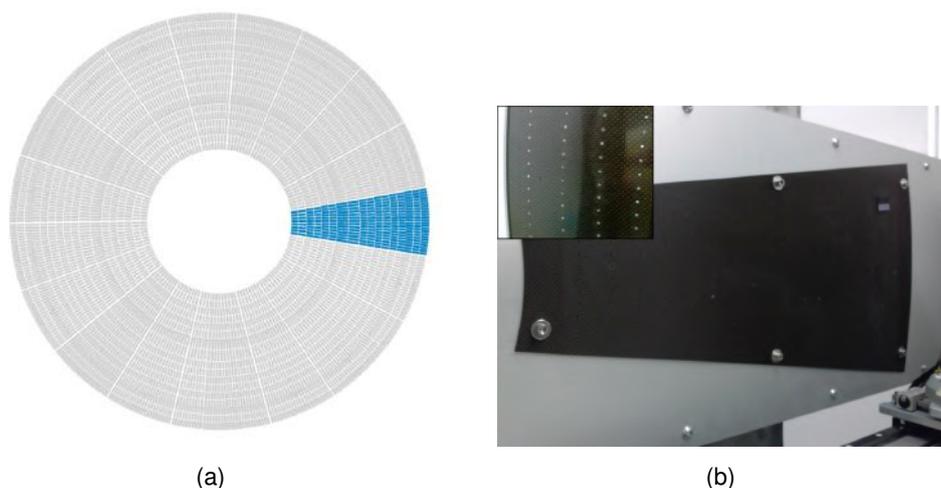


Figura 2.11: A sinistra una rappresentazione del settore circolare in corso di realizzazione. A destra un'immagine del supporto in fibra di carbonio su cui saranno incollati i cristalli.

Il fissaggio dei cristalli al supporto della lente richiede un grande sforzo tecnologico. Grazie all'esperienza maturata con il progetto HAXTEL si è ora in grado, con Laue, di ottenere disallineamenti angolari nel posizionamento dei cristalli inferiori a 10 arcsec. Il controllo dell'orientamento dei cristalli con il fascio Gamma, l'impiego di motori in grado di compiere movimenti molto fini e la maggior precisione dell'accoppiamento delle varie parti del sistema tra loro (per esempio tra cristallo e porta-cristallo) sono la chiave del miglioramento del posizionamento dei cristalli sulla lente. (Figura 2.12).

L'obiettivo finale è la realizzazione di un satellite con a bordo un telescopio fatto di petali (Figura 2.13) che al lancio sono tutti ripiegati e vengono dispiegati una volta in orbita. La focale di 20 m può essere raggiunta utilizzando un sistema espandibile che al lancio è contenuto all'interno del "fairing" del razzo. È una sfida interessante che può aprire le porte a nuove frontiere della conoscenza dell'Universo.



Figura 2.12: Dettaglio del porta-cristallo motorizzato in grado di ruotare i cristalli per effettuare diffrazione e posizzionarli nell'esatta posizione di incollaggio sul petalo.



Figura 2.13: Progetto di lente ottenuta attraverso la composizione di 8 petali.

Capitolo 3

IL LABORATORIO LARIX

Le prove descritte nei successivi capitoli sono state realizzate presso il LARge Italian X-ray facility (LARIX), laboratorio dedicato alla fisica dei raggi X e Gamma presso il Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra dell'Università di Ferrara. Gli aspetti strutturali e la strumentazione contenuta nella zona "A" del LARIX (LARIX-A) e nel tunnel da 100 m saranno trattati nei prossimi paragrafi.

3.1 La struttura

Il laboratorio LARIX, per quanto concerne l'utilizzo da parte del gruppo di Astrofisica, comprende due ambienti sperimentali principali: una linea di fascio da 12 m nel reparto LARIX-A ed una linea di 50 m all'interno di un tunnel lungo 100 m.

Nella linea da 12 m (Figura 3.1) sono presenti due tubi radiogeni, un Philips da 20-60 kV ed un Siemens da 40-150 kV. Davanti ai tubi radiogeni, proseguendo nella linea di fascio, è collocato un monocromatore a cristalli di silicio che utilizza una doppia diffrazione di Bragg per monocromatizzare il fascio. Tale monocromatore è racchiuso in un box di plexiglass riempibile con elio per minimizzare gli effetti dell'assorbimento dei raggi X da parte dell'aria nelle misure ad energie di pochi keV. Oltre il monocromatore, è presente un collimatore in tungsteno con apertura regolabile che consente di selezionare le dimensioni desiderate del fascio da inviare sui campioni. Al centro della stanza è collocata una clean room all'interno della quale è presente il tavolo porta campioni completamente automatizzato ed il tavolo porta detector predisposto per un imager, uno spettrometro e un rivelatore che combina entrambe le caratteristiche.

La linea di fascio all'interno del tunnel (Figura 3.2) utilizza un tubo radiogeno da 320 kV davanti al quale si estende un tubo a vuoto lungo 21 m che consente al fascio di non essere assorbito dall'aria. Al termine di questo percorso è installata una clean room contenente un collimatore automatico ed il tavolo porta-campioni (in questo momento il frame del petalo di lente). Oltre la clean room si trova un tavolo porta-rivelatori (imager e spettrometro) che può essere posizionato

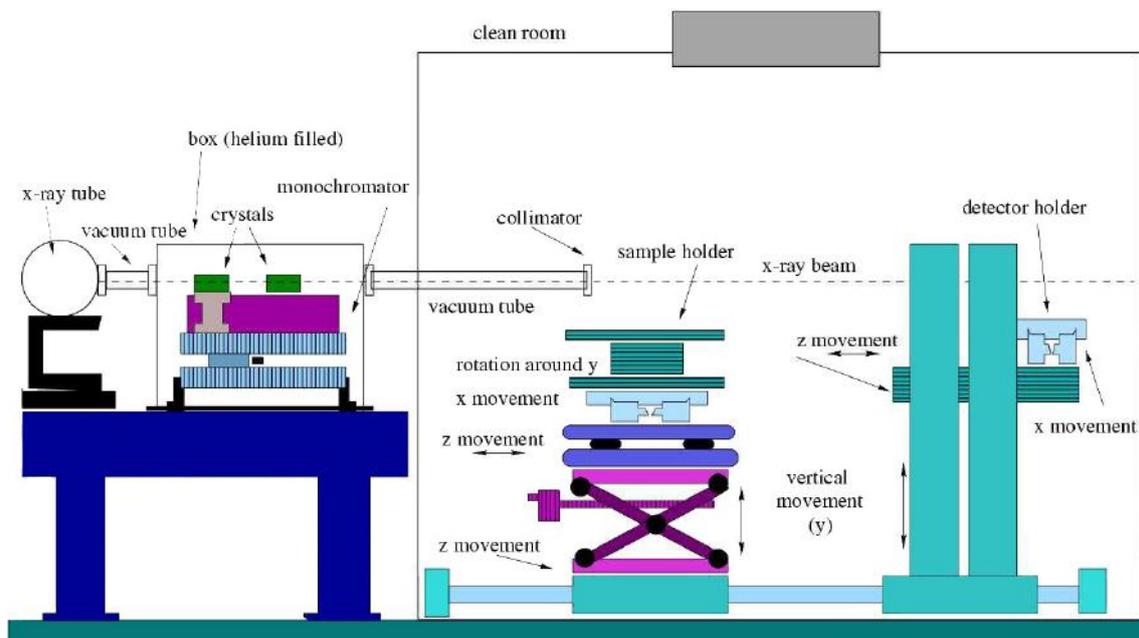


Figura 3.1: Rappresentazione schematica non in scala della linea di fascio da 12 m presente nel LARIX-A.

a diverse distanze dal campione facendolo scorrere su un binario.

Nella zona del Larix-A si trova la sala comandi di entrambe le linee di fascio con tutti gli strumenti necessari alla movimentazione dei tavoli automatizzati ed alla raccolta e analisi dei dati.

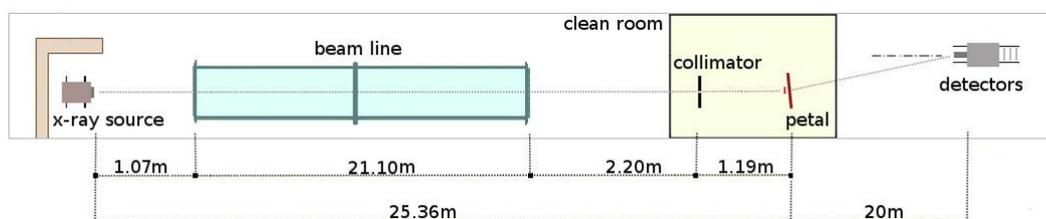


Figura 3.2: Rappresentazione dei principali componenti della linea di fascio da circa 50 m all'interno del tunnel.

3.2 I sistemi radiogeni

In LARIX sono attualmente attivi 3 tubi radiogeni che permettono di lavorare in diffrazione da cristalli nella banda dei raggi X e dei raggi Gamma, le cui caratteristiche principali sono riportate in Tabella 3.1. Tali tubi emettono fasci policromatici prodotti tramite Bremsstrahlung di elettroni accelerati all'interno di un forte campo elettrico. L'energia cinetica persa dagli elettroni nell'urto contro l'anodo si trasforma in radiazione elettromagnetica.

La linea di fascio all'interno del tunnel è predisposta anche per l'alloggiamento di un betatrone portatile che produce fasci Gamma di energia massima regolabile tra 1 e 2,5 MeV.

Modello	Anodo	Voltaggio (kV)	Corrente (mA)	Potenza max. (kW)
Philips	Molibdeno	20 - 60	10 - 60	3
Siemens	Tungsteno	40 - 140	0,1 - 5	0,3
Bosello	Tungsteno	320	$(4,1 - 4,6) \times 10^3$	1,8

Tabella 3.1: Proprietà dei tubi radiogeni in uso nel laboratorio Larix.

3.3 I rivelatori

Ciascuna delle due facility dispone un rivelatore di spettro e di un “imager” X.

Per la spettroscopia si fa uso di rivelatori al germanio ad alta purezza (HPGe, Figura 3.3) la cui risoluzione è 0,44% a 122 keV. L'HPGe è raffreddato mediante un vaso Dewar portatile riempito con azoto liquido ($\sim 78^\circ \text{K}$). La finestra di entrata dei raggi X è in Berillio ed ha uno spessore di 0,254 mm.

L'immagine X è ottenuta mediante l'imager XRII Thales TH 59432HD. Il rivelatore è costituito



Figura 3.3: Vista del rivelatore per immagini Thales (sopra) e del rivelatore spettroscopico al germanio (sotto).

da uno scintillatore di CsI(Na) accoppiato ad un intensificatore di immagine (X-Ray Image Intensifier, XRII). La luce intensificata è vista da un CCD ad alta risoluzione attraverso un sistema ottico compatto che include un iride motorizzato e un fotodiode. La finestra di entrata dell'imager, in alluminio spesso 1 mm e con il diametro di 320 mm, mantiene il sistema sotto vuoto. Lo

scintillatore di CsI(Na) è visto da un fotocatodo composto di $SbCs_3$ con efficienza al 10 - 15 %. Vi sono anche varie lenti elettrostatiche focalizzanti, un anodo e uno schermo di uscita.

Il rivelatore per immagini Perkin Elmer XRD 0822 (Figura 3.4), utilizzato per la linea Gamma di 50 m, ha una finestra quadrata di 20 cm di lato e un range di misura esteso da 40 keV a 15 MeV. La finestra usa la tecnologia a film sottile con silicio amorfo. Il rivelatore è composto da uno scintillatore di CsI(Tl), depositato direttamente sui fotodiodi. Ogni pixel del rivelatore ha le dimensioni dei fotodiodi. Questi sono sensibili alla luce e sono provvisti di un transistor a film sottile che funge da interruttore.

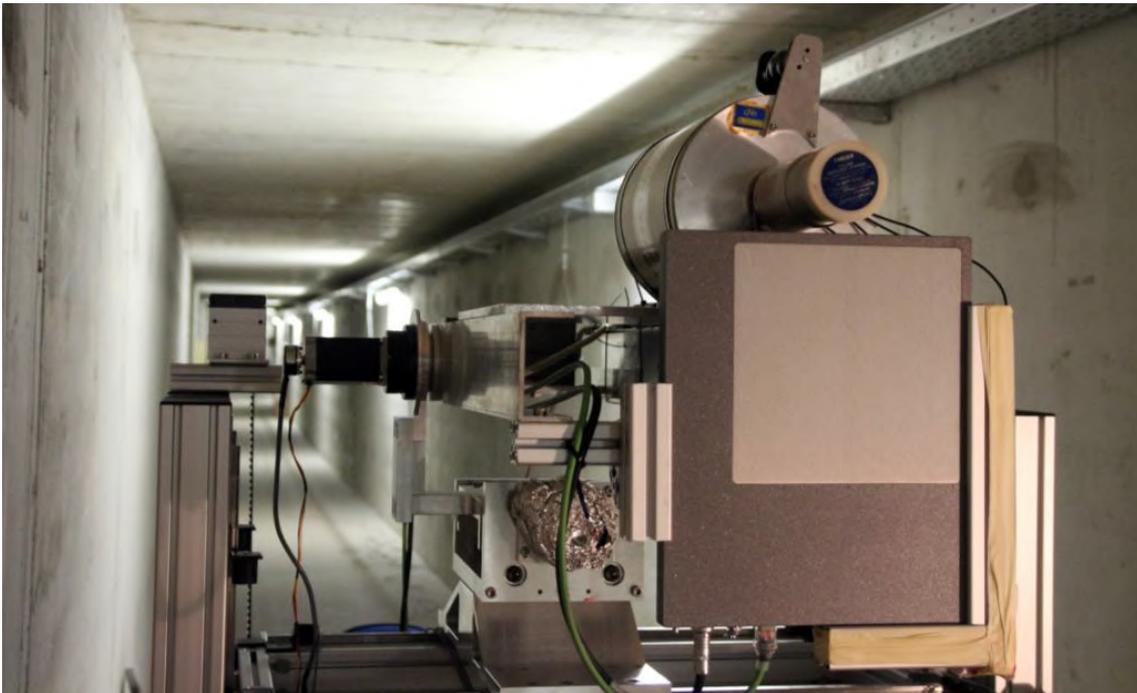


Figura 3.4: Rivelatore per immagini XRD 0822 AO installato nel tunnel al di sotto del rivelatore al germanio.

Capitolo 4

I CONTROLLER

La necessità di muovere da remoto campioni e detectors, quando il fascio è attivo, unitamente alla necessità di effettuare movimentazioni di grande precisione, ha richiesto la realizzazione di carrelli portanti, di stages di rotazione e/o traslazione motorizzati, e di software in grado di gestire le operazioni richieste durante la fase di misura. In questo capitolo saranno analizzati gli attuatori Newport della linea di fascio LARIX-A e sarà mostrato lo sviluppo del programma in ambiente LabView utilizzato per il controllo totale delle operazioni.

4.1 Le automazioni in Larix

Facendo riferimento alla descrizione fornita nel paragrafo 3.1 ed alla Figura 3.1, nella linea di fascio Larix-A sono installati 7 motori Newport:

- M-ILS150CC con driver XPS-DRV01 deputato alla traslazione del collimatore posto davanti ai tubi radiogeni: ha una corsa di 150 mm con risoluzione $0,5 \mu\text{m}$ e ripetibilità unidirezionale tipica di $0,7 \mu\text{m}$ (garantita di $1,5 \mu\text{m}$);
- RV120PP con driver XPS-DRV01 per la rotazione del porta-cristallo attorno all'asse verticale: possibilità di rotazione di 360° con un incremento minimo di $0,001^\circ$ e una ripetibilità unidirezionale tipica di $0,001^\circ$ (garantita di $0,002^\circ$);
- RV240CC con driver XPS-DRVM2 per la rotazione dei rivelatori attorno all'asse verticale: possibilità di rotazione di 360° con un incremento minimo di $0,001^\circ$ e una ripetibilità unidirezionale tipica di $0,001^\circ$ (garantita di $0,002^\circ$);
- due coppie M-GON65-U (Upper) e M-GON65-L (Lower) con driver XPSDRV01 per i movimenti di basculamento del porta-cristallo e del porta-spine rispetto all'asse perpendicolare e parallelo al fascio: intervalli di rotazione di $\pm 10^\circ$ per l'Upper e $\pm 5^\circ$ per il Lower in quanto

accoppiati ad attuatori motorizzati CMA-25CCCL con corsa 25 mm, risoluzione 0,048828 μm , incremento minimo 0,2 μm e ripetibilità bidirezionale di 3 μm .

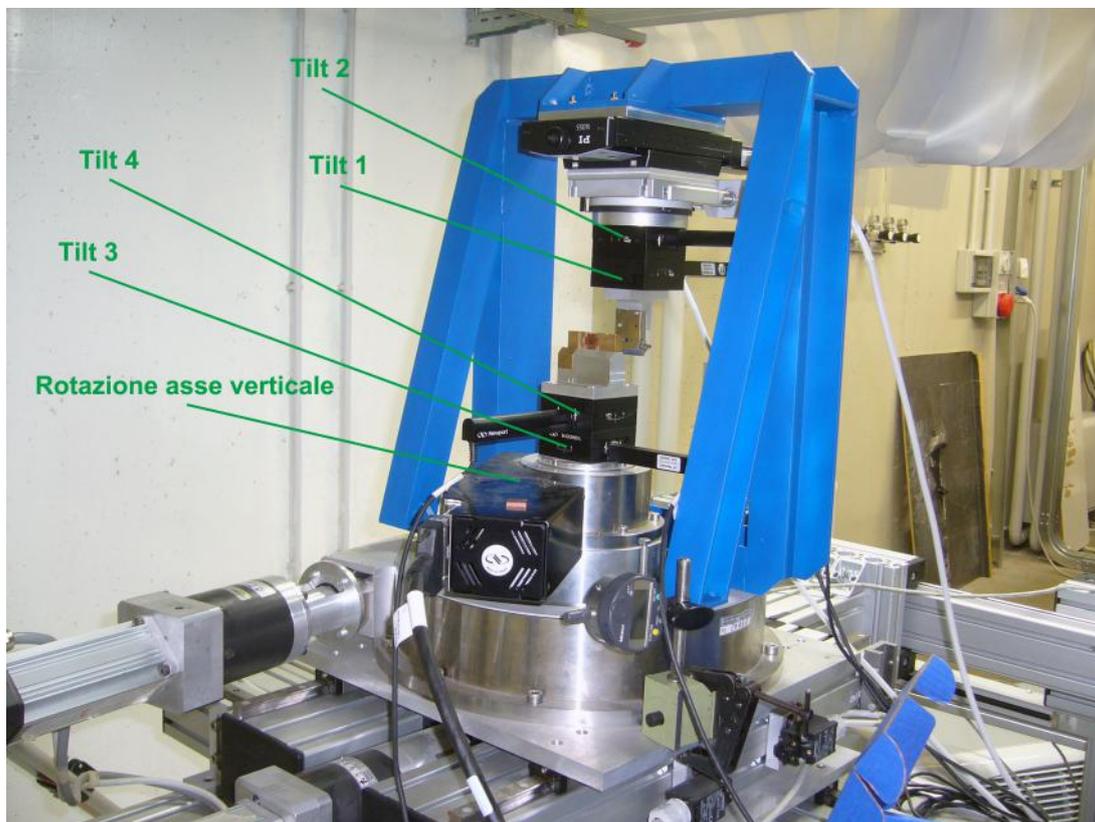


Figura 4.1: Vista dei 5 motori presenti sul tavolo porta-campioni.

4.2 Il sistema di controllo Newport

Newport fornisce una unità di controllo XPS-C8 (Universal High-Performance Motion Controller/Driver), che permette di comandare i motori da remoto attraverso una porta high-speed 10/100 Base-T Ethernet con interfaccia di comunicazione TCP/IP. L'XPS può contenere fino ad un massimo di 8 schede driver, ciascuna abbinata ad un singolo motore. Attraverso il collegamento tramite browser all'indirizzo <http://192.168.0.254> si accede all'interfaccia remota (Figura 4.2) che consente il controllo completo dei motori attivi: installazione dei drivers, diagnostica dei problemi e movimentazione.

Insieme alle schede drivers vengono forniti anche dei pacchetti LabView con semplici applicazioni in grado di connettersi all'XPS ed effettuare movimentazioni di base dei motori.



Newport®
Experience | Solutions

Motion Controller / Driver - XPS-C8

Give your name, password and status to log on

Name:

Password:

Rights: User Administrator

Newport®
Experience | Solutions

Figura 4.2: Interfaccia grafica del controllo remoto tramite browser.

4.3 L'ambiente LabView

LabView (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) è un ambiente di programmazione di tipo grafico (G language) ad oggetti per la realizzazione di programmi nella forma di diagrammi a blocchi. È concepito per interfacciarsi, attraverso porte seriali o mediante il protocollo di comunicazione TCP/IP, con hardware e strumentazione esterna per la gestione degli apparati, l'acquisizione o l'analisi dei dati. Come tutti gli ambienti di programmazione, LabView permette il processamento di dati, l'esecuzione di cicli e costrutti, l'inserimento di variabili e l'aggiunta di librerie per l'esecuzione di particolari operazioni.

L'ambiente di sviluppo consente di costruire programmi che prendono il nome di strumenti virtuali (Virtual Instrument, VI). Questi permettono l'interazione tra computer e strumentazione fornendo all'utente un opportuno pannello frontale grafico per il dialogo con il VI stesso. In questo modo l'operatore interagisce con un nuovo dispositivo (Instrument) che riunisce in un'unica interfaccia (Virtual) il calcolatore e tutta la strumentazione fisica che compone il sistema stesso. Ogni VI è composto da tre elementi fondamentali: il front panel, il block diagram e l'icon/connector.

- Il front panel (pannello frontale) è l'interfaccia grafica tra il programma e l'utilizzatore. Su di esso trovano posto i controllori (per l'inserimento di variabili di ingresso) e gli indicatori (che rappresentano le variabili di uscita processate dal programma).
- Il block diagram (diagramma a blocchi funzionale) contiene il codice (G language) nella forma di diagramma a blocchi ed è costituito essenzialmente da nodi in cui avviene

l'elaborazione dei dati e da collegamenti tra questi per lo scambio delle informazioni.

- L'icon/connector (coppia icona/connettore) è il terzo elemento fondamentale di un programma LabView. L'icona è un simbolo grafico di piccole dimensioni che rappresenta simbolicamente un programma utilizzato all'interno di un altro come subVI. Il connettore stabilisce la corrispondenza tra aree dell'icona e controllori o indicatori del pannello frontale.

La facilità di utilizzo, la potenza e la versatilità e la capacità di dialogo con strumenti esterni hanno reso LabView uno degli strumenti di calcolo più utilizzati nei processi scientifici.

4.4 Lo sviluppo del programma

L'obiettivo del programma realizzato in ambiente LabView è gestire contemporaneamente con un solo terminale (ed una sola interfaccia) tutte le 7 movimentazioni utilizzate in LARIX-A durante un processo di misura. Il primo passo è stato studiare i Virtual Instruments messi a disposizione dalla ditta produttrice dei motori, Newport, capirne la modalità di connessione al server XPS, la gestione dei comandi ed il metodo di importazione come icone all'interno di un nuovo programma.

Il sistema di movimentazione ideato si compone di tre stadi principali:

1. connessione al server XPS, inizializzazione dei motori e ricerca della posizione di *home*;
2. interazione con l'operatore;
3. ritorno dei motori alla *home position* e chiusura della connessione con il server.

Si è scelto di correlare gli stadi tra loro con l'inserimento di una *sequence structure* (Figura 4.3) con tre frames. In questo modo ogni operazione viene eseguita una sola volta all'interno del programma ed unicamente dopo il completamento di quella precedente. Gli stadi 1 e 3 sono transitori e si è lasciato il programma libero di passare al frame successivo al completamento delle operazioni. È stato invece necessario inserire all'interno del frame 2, relativo all'interazione con l'operatore, un ciclo *While* sempre negativo fino alla selezione di un pulsante di "Stop" in modo tale da bloccare la *sequence structure* in questo stadio e permettere l'esecuzione di un numero qualsiasi di comandi inviati dal *front panel* senza che fosse ogni volta necessario attendere la chiusura e la riapertura della connessione con il server. La pressione del pulsante "Stop" verifica la condizione imposta al ciclo *While* ed il programma procede al frame 3 con la chiusura delle connessioni.

Poiché ognuno dei 7 motori è stato accreditato sul server XPS con un codice alfanumerico progressivo [GROUP1, . . . , GROUP7], il programma esegue all'avvio un ciclo *For* (Figura 4.4) che

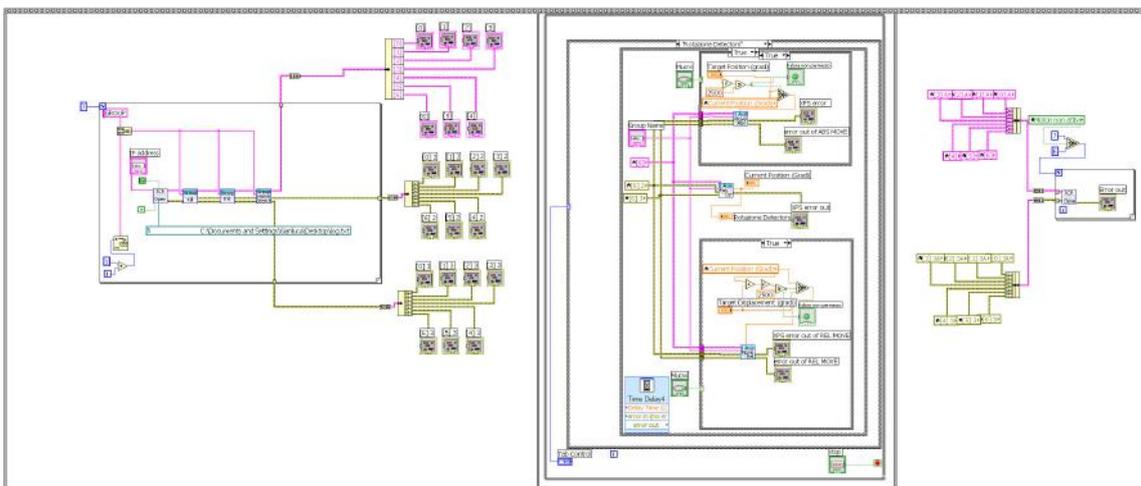


Figura 4.3: Vista di insieme del programma suddiviso in tre frame della sequence structure.

si connette al server mediante protocollo TCP/IP e, al variare dell'indice i , esegue l'inizializzazione e la ricerca della posizione di *home* per ciascun GROUP i . Il risultato di queste operazioni viene scritto in sette variabili (a cui si aggiungono altre 14 per i controlli degli errori) che saranno poi richiamate nel frame successivo.

Nello stadio dedicato all'interazione con l'operatore, sono inseriti due "case structure" paralleli (Figura 4.5), attivati da altrettanti pulsanti sul *front panel*, con all'interno i controllori ed i moduli per il movimento assoluto o relativo di ciascun motore. Gli output di entrambi i *case structure* convergono ad un unico indicatore che mostra sullo schermo la posizione (in gradi o millimetri) in cui si trova il motore al termine dello spostamento.

Alla pressione del tasto "Stop", come già detto in precedenza, si interrompe il ciclo *While* che mantiene bloccato il frame di movimentazione ed il programma procede all'ultimo stadio in cui un ciclo *For* (Figura 4.6) analogo a quello descritto in precedenza porta ogni motore alla posizione di *home* ed interrompe la connessione con il server.

4.5 Primi utilizzi e miglioramenti

In seguito ai primi utilizzi del programma, si sono resi necessari alcuni miglioramenti. I quattro motori relativi ai basculamenti del porta-cristallo e del porta-spine (tilt), hanno per costruzione una posizione di *home* particolarmente scomoda rispetto alle operazioni normalmente eseguite in laboratorio in quanto lo "zero" corrisponde ad un'inclinazione dei motori di 5° e 10° (si veda la descrizione nel paragrafo 4.1). È stato quindi inserito un nuovo frame nella *sequence structure*, successivo all'inizializzazione dei motori, in cui, attraverso controller lato *block panel*

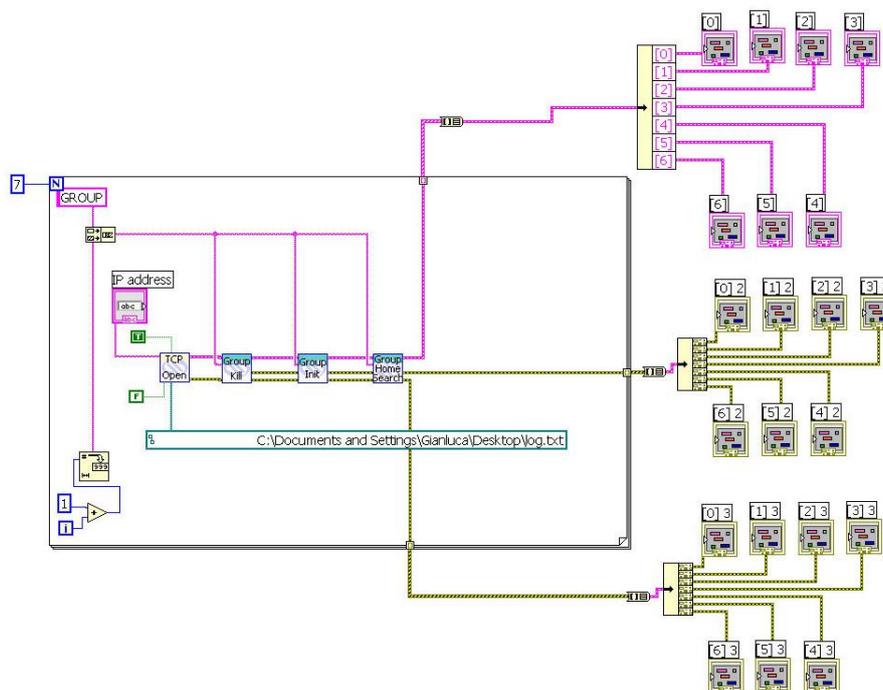


Figura 4.4: Ciclo For di inizializzazione dei motori e raggiungimento della posizione di home.

(Figura 4.8), i motori potessero ruotare portandosi in posizione orizzontale rispetto al laboratorio.

È stato, inoltre, necessario inserire all'interno del ciclo While un operatore di ritardo (Figura 4.9) affinché il programma terminasse la movimentazione dei motori prima di procedere alla richiesta di nuove operazioni evitando, in questo modo, la sovrapposizione tra il rapporto di avvenuto spostamento e l'invio di nuovi input. I ritardi inseriti sono stati calcolati in modo empirico effettuando movimentazioni successive ravvicinate dei vari motori e ricercando l'assenza di messaggi di errore.

Come ultimo accorgimento si è deciso di inserire nel programma la possibilità di scelta se inizializzare, e quindi rendere disponibile per tutto il ciclo di lavoro, la rotazione dei detectors. La riflessione alla base di questa scelta è scaturita dall'evidenza di alcune rapide piccole rotazioni, in fase di inizializzazione di tale motore, che avrebbero potuto creare spostamenti o danni ai rivelatori (tra cui il detector al germanio con il vaso Dewar riempito di azoto liquido). È stata allora inserita una finestra di dialogo (Figura 4.10), all'apertura del programma, in cui l'operatore potesse scegliere se attivare tale motore: questa scelta si ripercuote, a livello di *block diagram*, nel valore massimo della variabile contatore del ciclo For di inizializzazione (e chiusura sessione) dei motori (Figura 4.11).

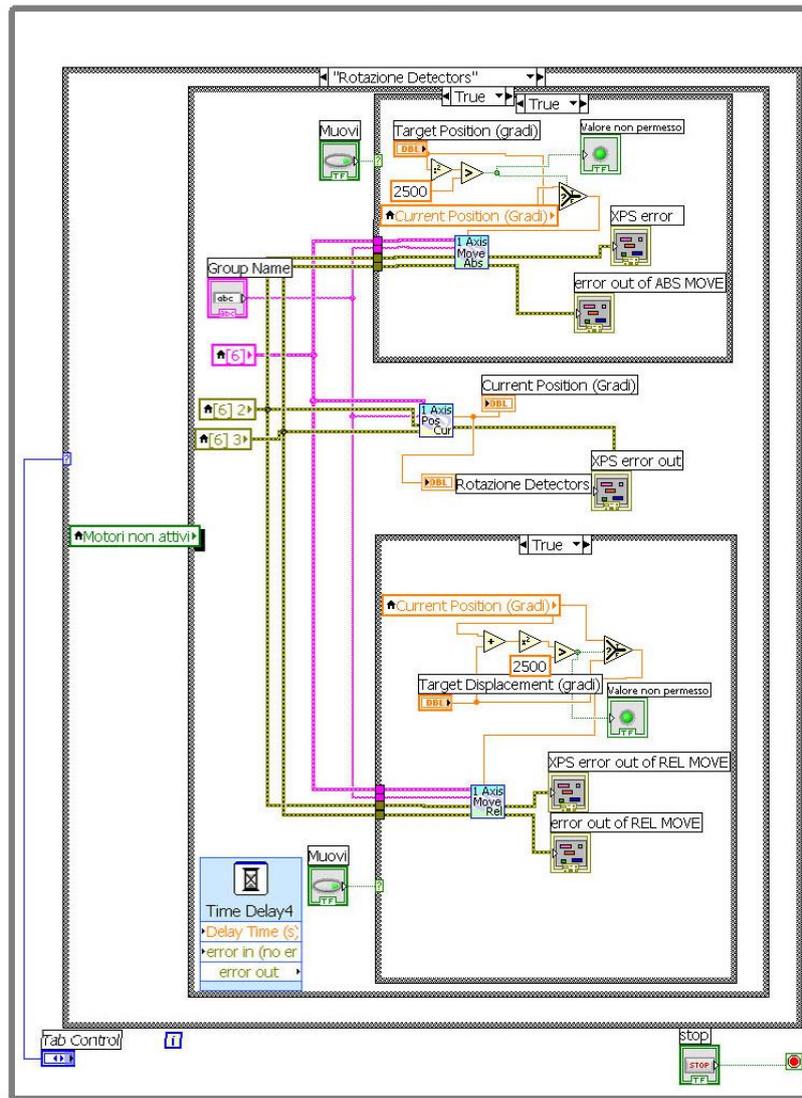


Figura 4.5: Frame centrale dedicato alla movimentazione dei motori. L'immagine si riferisce, in particolare, alla rotazione dei rivelatori.

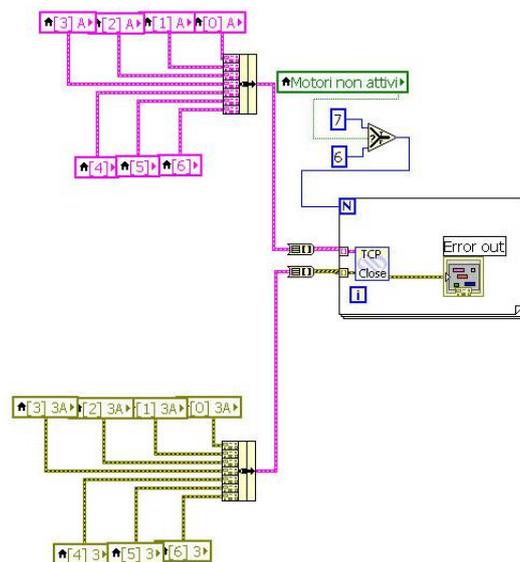


Figura 4.6: Frame di ritorno dei motori alla home position e chiusura della connessione.

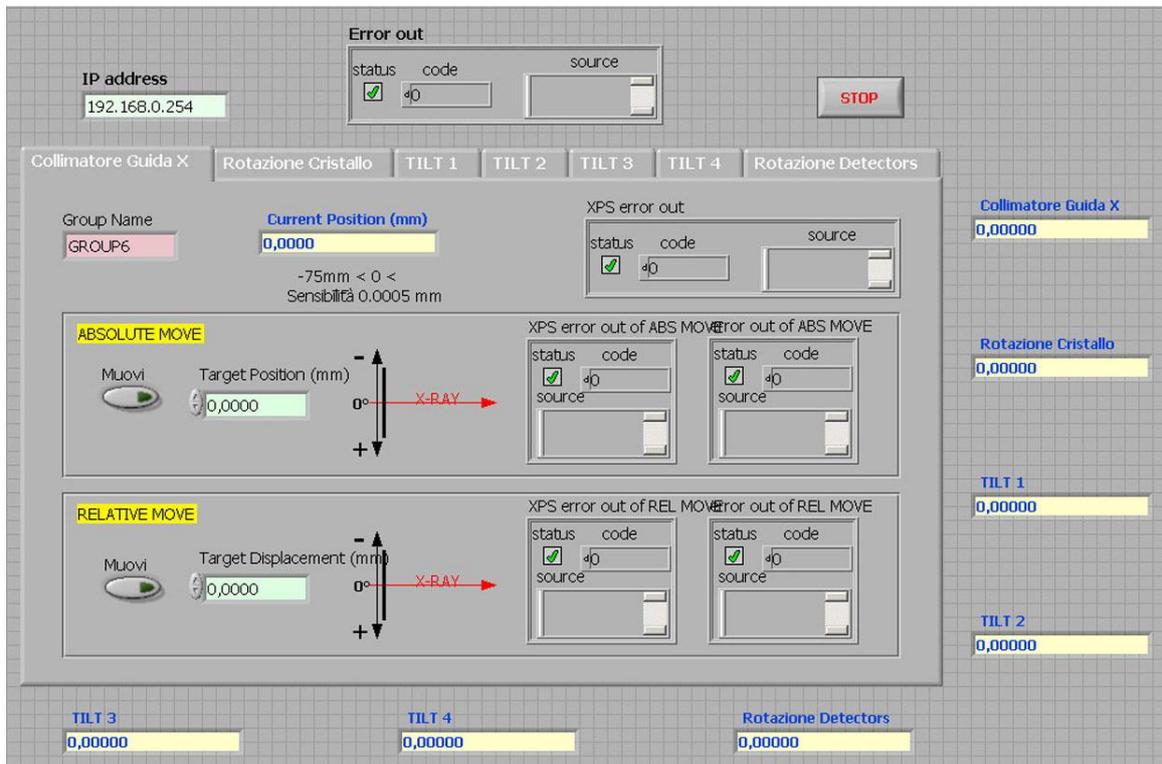


Figura 4.7: Front panel del programma realizzato.

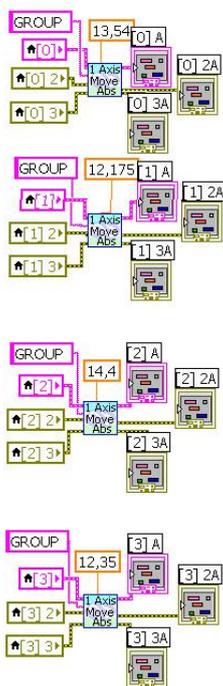


Figura 4.8: Orizzontalizzazione dei quattro tilt relativi al basculamento del porta-cristallo e porta-spine.

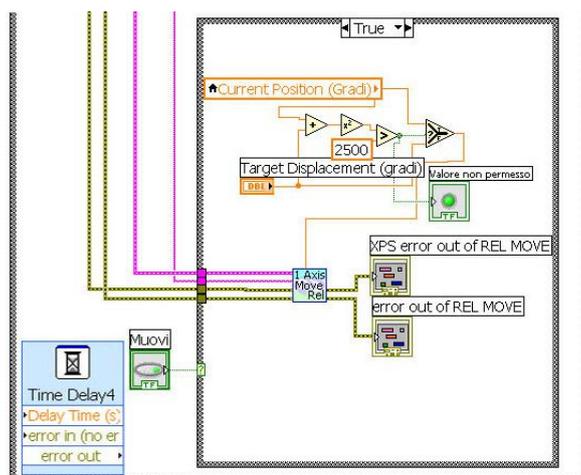


Figura 4.9: Operatore di ritardo nel ciclo While di movimentazione visibile in basso a sinistra nell'immagine.

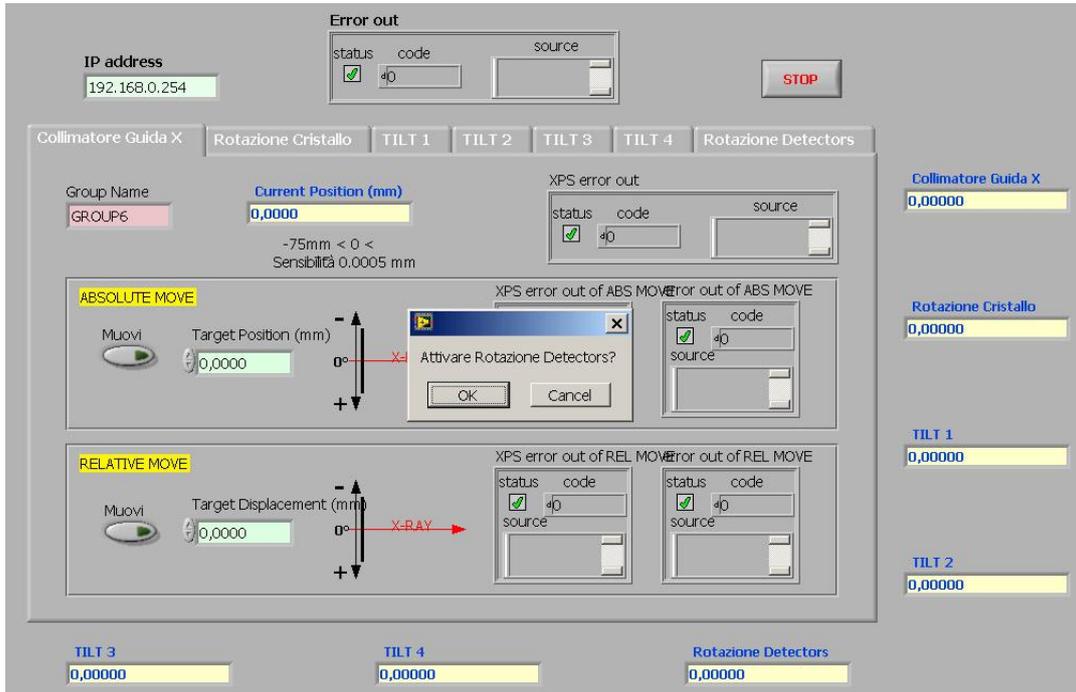


Figura 4.10: Finestra di dialogo con richiesta di attivazione del motore di rotazione dei rivelatori.

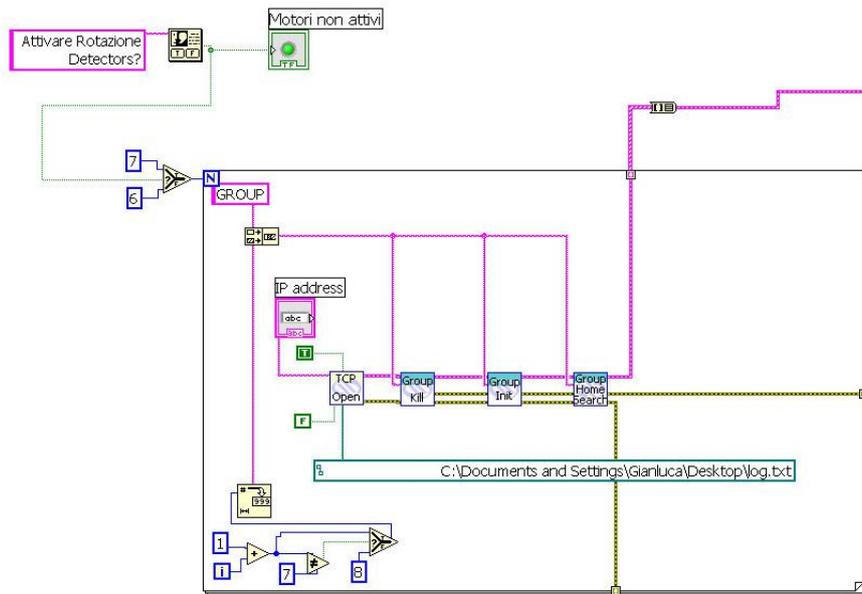


Figura 4.11: Discrezione del massimo valore della variabile contatore collegata alla scelta di attivazione della rotazione dei detector.

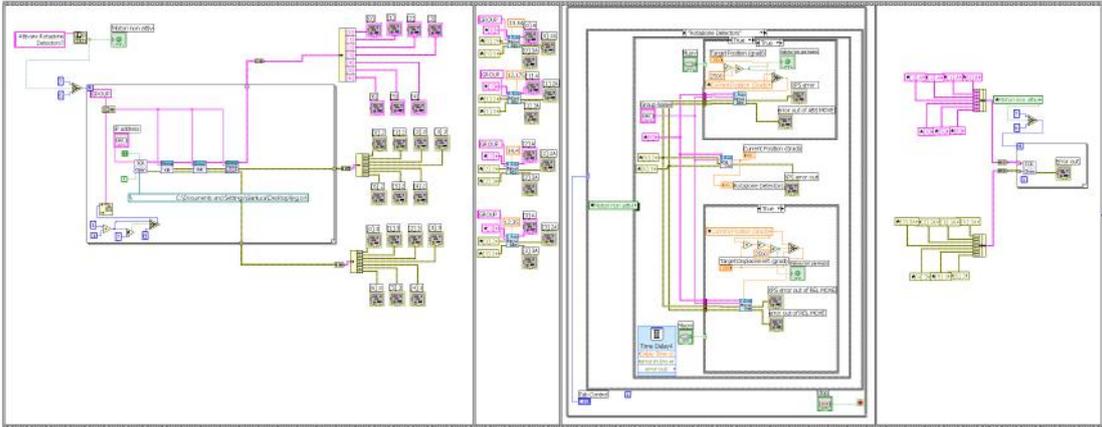


Figura 4.12: Versione finale del programma.

Capitolo 5

PROPRIETÀ DEL “FRAME” DI UNALENTE DI LAUE

Un fotone incidente su un qualunque materiale interagisce con questo principalmente mediante tre processi di assorbimento:

- effetto fotoelettrico, in cui un fotone interagisce con un sistema atomico cedendo la propria energia $E_\gamma = h\nu$ ad un elettrone legato che viene espulso dall'atomo con energia cinetica $T_e = E_\gamma - B_n$, in cui B_n rappresenta l'energia di legame dell'elettrone nell' n -esimo livello atomico. Questo fenomeno è preponderante in materiali densi ed a basse energie ($E_\gamma \leq 0,5$ MeV);
- effetto Compton, ovvero la collisione inelastica tra un fotone ed un elettrone libero con conseguente deviazione del fotone rispetto alla direzione di incidenza e variazione di energia. L'effetto Compton fornisce contributi importanti tra 0,5 MeV e 1 MeV e predomina fino a 4 MeV.
- produzione di coppie, in cui fotoni di energia relativamente elevata $E_\gamma \geq 2m_e = 1,02$ MeV (con m_e massa dell'elettrone) interagiscono con il campo elettrico di un nucleo atomico dando origine ad una coppia formata da elettrone e positrone. Questo effetto diventa importante con energie dell'ordine dei 10 MeV;

Il risultato macroscopico di questi effetti è l'attenuazione di un fascio trasmesso attraverso un materiale di un fattore $\mu(E)$ detto coefficiente di assorbimento tipico di ogni sostanza. Se $D(E)$ è l'intensità del fascio incidente su un materiale di spessore x e $T(E)$ è l'intensità del fascio trasmesso dopo l'attraversamento, si ha

$$D(E)e^{-\mu(E)x} = T(E) \quad (5.1)$$

L'efficienza di una lente di Laue si basa sulle caratteristiche di riflettività intrinseche di ogni cristallo (materiale, piani reticolari, mosaicità, superficie), sulla precisione dell'incollaggio nella loro sede e sulle qualità del rivelatore. La scelta di un materiale con assorbimento troppo elevato da utilizzarsi come supporto dei cristalli può però vanificare gli sforzi tecnologici e gli studi di fattibilità.

Questo capitolo prenderà in esame il comportamento di due materiali, il Cesic e la fibra di carbonio, come supporti per i cristalli.

5.1 Il supporto di una lente di Laue

Il materiale a supporto dei cristalli che compongono una lente di Laue deve avere proprietà fisiche ben precise:

- coefficiente di dilatazione termica (CTE) piccolo per evitare che un mutamento (anche transitorio) della geometria della struttura per effetto della temperatura modifichi il punto di focalizzazione;
- CTE comparabile con quella dei cristalli e dei petali di lente per non creare stress su parti che potrebbero staccarsi o spostarsi;
- elevata conduttività termica che contribuisca alla veloce ed uniforme dissipazione del calore (dovuto, per esempio, all'esposizione alla luce diretta del Sole);
- elevata durezza ed indeformabilità che si oppongano alle forze agenti sulle strutture durante le fasi di lancio e di dispiegamento del satellite;
- alta lavorabilità perché sia possibile realizzare una lente con geometria sferica dell'ordine di grandezza del metro;
- coefficiente di assorbimento della radiazione X e Gamma più piccolo possibile.

5.2 Possibili materiali

All'interno del progetto Laue, impegnato nello studio di fattibilità di un satellite focalizzante per raggi Gamma, sono stati proposti alcuni materiali candidati come possibili supporti dei cristalli:

- titanio
- alluminio
- CeSiC

- fibra di carbonio

Il titanio è un'ipotesi molto interessante. È un materiale molto ben conosciuto ed utilizzato perché largamente impiegato da decenni nell'industria aeronautica. Inoltre il valore del CTE e la durezza meccanica sono adatti all'uso previsto dal progetto. Tuttavia l'elevata densità induce un potere di assorbimento dei fasci diffratti alle basse energie troppo elevato (Figura 5.1) e farebbe aumentare considerevolmente il peso della struttura.

L'alluminio per leggerezza e lavorabilità si presterebbe molto all'utilizzo come supporto della lente. È anche dotato di un basso coefficiente di assorbimento indispensabile per un supporto dei cristalli. Tuttavia il suo elevato CTE potrebbe creare problemi per lenti con cristalli di germanio e arseniuro di gallio che hanno un coefficiente di dilatazione termica molto differente rispetto a quello dell'alluminio.

Il CeSiC sarebbe altamente raccomandato per questo tipo di soluzioni strutturali, in particolare per il suo CTE (molto vicino a quello del Silicio), la bassa densità e la semplicità con cui può essere lavorato. Ha però dei difetti: risulta particolarmente fragile e, allo stato tecnologico attuale, è possibile realizzare solo componenti di piccole dimensioni.

La fibra di carbonio ha caratteristiche meccaniche (resistenza, modulo di Young) e fisiche (bassa densità) che, se unite alla possibilità di ottenere il desiderato coefficiente di espansione termica attraverso l'utilizzo dei giusti polimeri, lo rendono molto adatto come supporto di una lente di Laue. Tuttavia però il corretto CTE è ottenibile solo con un particolare angolo e una precisa sovrapposizione delle fibre che lasciano temere alcuni problemi di produzione. Inoltre il degassamento spontaneo potrebbe creare alcuni problemi di pulizia delle superfici e l'igroscopia di questo materiale potrebbe causare deformazioni che minerebbero le prestazioni della lente.

Nelle analisi esposte in questa tesi si è scelto di non considerare il titanio, a causa dell'elevata densità, e l'alluminio, per l'eccessivo coefficiente di dilatazione termica. Gli unici candidati per la realizzazione del supporto della lente di Laue sono l'alluminio, il CeSiC e la fibra di carbonio. Questi materiali saranno analizzati nei prossimi paragrafi.

5.3 Determinazione del coefficiente di assorbimento

Mentre per i materiali fatti di un singolo elemento è possibile determinare la loro trasparenza ai raggi X-duri / Gamma-molli utilizzando i coefficienti di assorbimento disponibili anche in Rete (es. X-Com), per i materiali compositi è importante avere delle misure del campione a disposizione in quanto non è sempre possibile conoscere accuratamente la loro composizione. Perciò, nelle misure descritte in questo paragrafo e nei successivi è stato determinato il coefficiente di assorbimento del CeSiC, dell'alluminio e della fibra di carbonio utilizzando diversi spessori di questi materiali posti sulla linea di fascio installata nel tunnel del laboratorio Larix. La configurazione della linea di fascio impiegata fa riferimento a quanto descritto nel Capitolo 3: raggi X

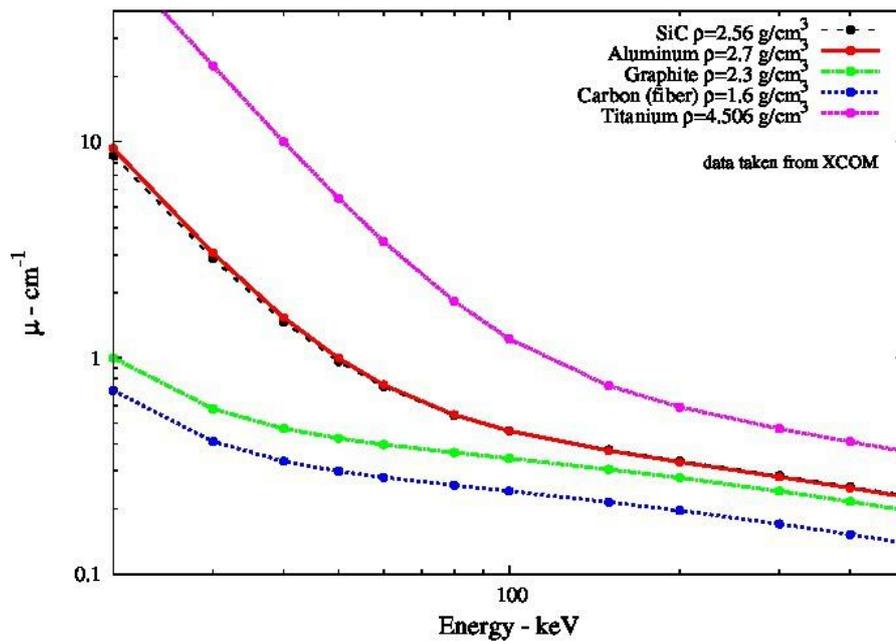


Figura 5.1: Confronto tra i coefficienti di assorbimento di titanio, alluminio, carburo di silicio e carbonio (in forma grafica e di fibra) - Fonte X-Com [11].

emessi da tubo radiogeno da 320 kV con anodo in tungsteno e fascio policromatico, un tubo a vuoto di 21 m che previene l'assorbimento dei raggi X da parte dell'aria, clean room con tavolo porta-campioni motorizzato e rivelatore al germanio (HPGe) per spettrometria posizionato a 20 m dal campione. In totale la distanza tra sorgente e rivelatore è di circa 45 m.

5.3.1 Procedimento di misura

Il fascio attivo all'interno del tunnel, anche con sorgente alimentata con corrente minima di 0,2 mA, è di intensità tale da provocare problemi di saturazione, tempo morto e pile-up sul rivelatore al germanio. Si è quindi reso necessario, prima dell'inizio delle misure, ridurre il numero dei fotoni incidenti sul rivelatore posizionando un collimatore circolare di 5 mm di diametro davanti ai campioni. Ritenendo questa dimensione del fascio insufficiente per poter assumere l'omogeneità del materiale esaminato (per struttura, spessore, densità e quindi per coefficiente di assorbimento), la trasparenza di ogni campione è stata testata in due zone diverse poste a 2 cm di distanza misurando l'intensità dei fasci trasmessi $\tilde{T}_{ki}(E)$, in cui $k=1, 2$ indica le due zone del campione irradiate e l'indice i indica l' i -esimo campione testato. Si è ritenuto necessario misurare l'intensità del diretto $\tilde{D}_k(E)$ a diverse energie nelle due diverse posizioni di misura spostando il collimatore di 2 cm nella direzione perpendicolare al fascio. Ad ogni misura è stato sottratto il rumore di fondo $B_k(E)$ ottenuto schermando il fascio con una spessa lastra di piombo. Si è così

ottenuta l'intensità del fascio diretto e del fascio trasmesso:

$$D_k(E) = \tilde{D}_k(E) - B_k(E) \quad (5.2)$$

$$T_{ki}(E) = \tilde{T}_{ki}(E) - B_k(E) \quad (5.3)$$

Tutte le prese dati sono state effettuate con tubo radiogeno alimentato a 200 kV e 0,2 mA con periodo di acquisizione del rivelatore al germanio di 800 secondi per ottenere un numero di conteggi sufficientemente elevato e minimizzare il contributo dell'incertezza Poissoniana. Sono stati analizzati i dati relativi all'intervallo di energia tra 30 keV e 190 keV.

La propagazione degli errori delle misure 5.2 e 5.3 è stata calcolata come

$$\sigma_{D_k}(E) = \sqrt{\sigma_{\tilde{D}_k}^2(E) + \sigma_{B_k}^2(E)} = \sqrt{\tilde{D}_k(E) + B_k(E)} \quad (5.4)$$

$$\sigma_{T_{ki}}(E) = \sqrt{\sigma_{\tilde{T}_{ki}}^2(E) + \sigma_{B_k}^2(E)} = \sqrt{\tilde{T}_{ki}(E) + B_k(E)} \quad (5.5)$$

in cui si è assunta una distribuzione Poissoniana dei conteggi. Dopo aver visto che i risultati ottenuti nelle due diverse posizioni erano del tutto confrontabili, si è potuto considerare un'unica posizione di misura per ogni campione. Le misure del fascio trasmesso hanno riguardato sia campioni di CeSiC sia di fibra di carbonio e di Alluminio, utilizzando diversi spessori di questi materiali e ricorrendo anche all'accoppiamento di alcuni campioni per ottenere spessori altrimenti non disponibili. Tuttavia, in fase di analisi dati, si è scelto di considerare solo le misure ottenute con gli spessori maggiori per massimizzare gli effetti di assorbimento e migliorare la statistica. Tale scelta è dovuta in particolare a vincoli legati al tubo radiogeno che non consente di accumulare statistica per intervalli maggiori di 900 secondi. Si rimanda ai relativi paragrafi per maggiori approfondimenti sulla disponibilità dei campioni.

5.3.2 Analisi dati

Al termine dell'acquisizione dei dati, dopo aver calcolato le intensità incidenti (5.2) e trasmesse (5.3), si è potuto procedere al calcolo del coefficiente di assorbimento $\mu_i(E)$ definito da:

$$e^{-\mu_i(E)x_i} = \frac{T_i(E)}{D(E)} = R_i(E) \quad (5.6)$$

in cui x_i rappresenta lo spessore dell' i -esimo campione attraversato dal fascio e $R_i(E)$ è la trasparenza. L'incertezza sul calcolo di $R_i(E)$ è stata stimata con la propagazione degli errori

$$\sigma_{R_i}(E) = \sqrt{\left(\frac{\partial R_i}{\partial D} \sigma_D\right)^2 + \left(\frac{\partial R_i}{\partial T_i} \sigma_{T_i}\right)^2} = \frac{1}{D(E)} \sqrt{\frac{T_i^2(E)}{D^2(E)} \sigma_D^2(E) + \sigma_{T_i}^2(E)} \quad (5.7)$$

Passando attraverso il logaritmo si arriva ad esprimere il valore del coefficiente di assorbimento, misurato in cm^{-1}

$$\mu_i(E) = \frac{-\ln R_i(E)}{x_i} \quad (5.8)$$

la cui incertezza vale:

$$\sigma_{\mu_i}(E) = \sqrt{\left(\frac{\partial \mu_i}{\partial R_i} \delta_{R_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial \mu_i}{\partial x_i} \delta_{x_i}\right)^2} = \frac{1}{x_i} \sqrt{\frac{1}{R_i^2(E)} \sigma_{R_i}^2(E) + \frac{\ln^2 R_i}{x_i^2} \sigma_{x_i}^2} \quad (5.9)$$

Poiché le misure effettuate hanno portato al calcolo di un valore indipendente del coefficiente di assorbimento per i vari campioni dello stesso materiale (si vedano i paragrafi successivi per ulteriori informazioni), tutti i μ_i di CeSiC e fibra di carbonio sono stati suddivisi in 10 classi $j=[1,10]$ di ampiezza 2,23 keV. Il valore finale di $\mu_j(E)$ relativo ad ogni classe è stato ottenuto attraverso la media pesata con la varianza dei coefficienti dei campioni nella medesima classe

$$\bar{\mu}_j(E) = \frac{\sum_{i=1_j}^{n_j} \mu_{ij} / \sigma_i^2}{\sum_{i=1_j}^{n_j} 1 / \sigma_i^2} \quad (5.10)$$

La varianza è stata inoltre utilizzato per il calcolo dell'incertezza del valore di μ relativo ad ogni classe

$$\sigma_{\bar{\mu}_j} = \sqrt{\frac{1}{\sum_{i=1_j}^{n_j} 1 / \sigma_i^2}} \quad (5.11)$$

5.3.3 Fase preliminare

Prima di procedere alla determinazione del coefficiente di assorbimento del CeSiC e della fibra di carbonio, si è proceduto a testare il procedimento di misura e di calcolo utilizzando un campione di alluminio spesso 8 mm. I valori ottenuti per questo materiale sono del tutto confrontabili con i dati teorici ottenibili da X-Com (Figura 5.2).

5.4 Il coefficiente di assorbimento del CeSiC

Il CeSiC è un composto ceramico ottenuto attraverso l'infiltrazione di silicio liquido ad alta temperatura in un impasto di carbonio inducendo così la creazione di legami tra questi due

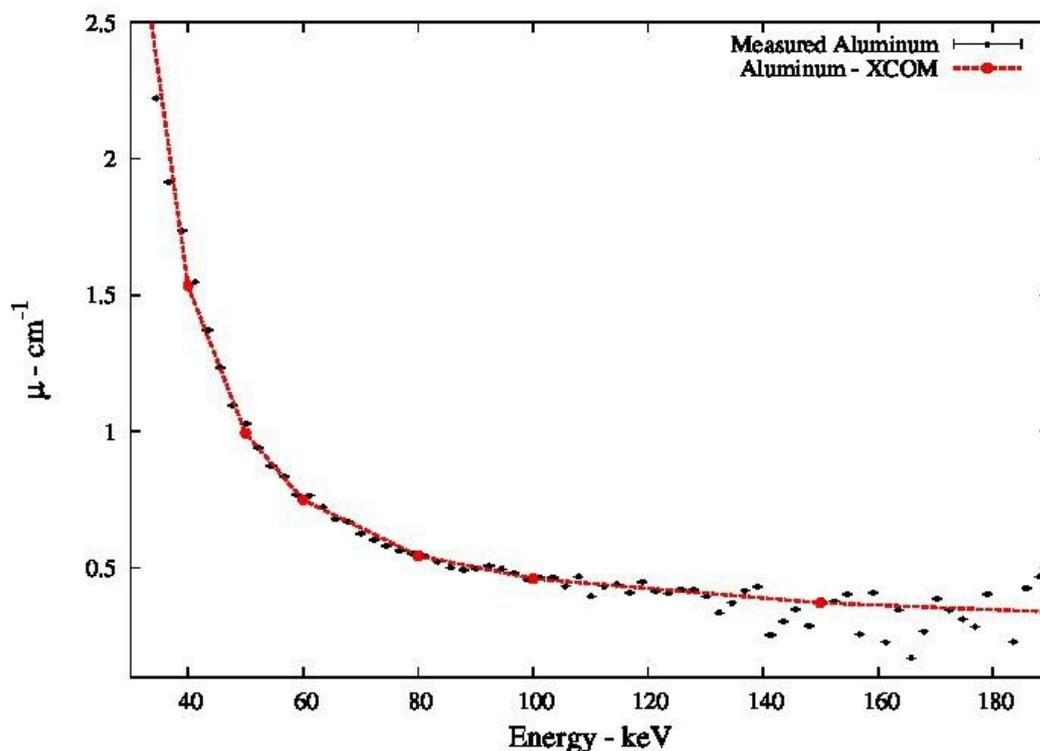


Figura 5.2: Confronto tra coefficiente di assorbimento teorico (X-Com) e misurato dell'Alluminio [11].

elementi. Il materiale finale è quindi composto principalmente da carburo di silicio (SiC) con alcune tracce residue di Silicio e Carbonio. L'impasto iniziale è un materiale poroso e, prima dell'infiltrazione di silicio, è facile da lavorare ottenendo strutture anche complesse. L'infiltrazione converte l'impasto di carbonio in un monolite di CeSiC riducendo le dimensioni totali solo dello 0,2% rispetto a quelle iniziali. Al termine del processo di trasformazione, viene rimosso per abrasione il silicio in eccesso sulla superficie e levigato con frese e punte in diamante.

5.4.1 Misure ed analisi

Per la determinazione del coefficiente di assorbimento del CeSiC sono stati utilizzati quattro differenti campioni (Figura 5.3) di diverso spessore posizionati sul fascio diretto singolarmente ma anche in accoppiamento per ottenere nuovi spessori come mostrato in tabella 5.1.

Dopo aver verificato che il coefficiente di assorbimento calcolato nelle prove fosse coerente tra tutti i campioni, si è scelto di utilizzare solo la misura (Figura 5.4) relativa allo spessore massimo (dovuto all'accoppiamento dei 4 campioni) perché meno affetta da incertezze.

Attraverso l'analisi descritta nel paragrafo 5.3.2 si sono ottenuti i valori di $\mu(E)$ visibili in Tabella 5.2. Come si può notare dalla Figura 5.5, il coefficiente di assorbimento del CeSiC misurato si discosta molto poco rispetto a quello del carburo di silicio ricavabile con X-Com.



Figura 5.3: Campioni di CeSiC utilizzati per le misure numerati da 1 a 4. Veduta superficiale a sinistra, veduta di taglio a destra.

Campione	Spessore [mm]
C1	$8,12 \pm 0,02$
C2	$4,10 \pm 0,02$
C3	$2,10 \pm 0,02$
C4	$1,60 \pm 0,02$
C1 + C2	$12,22 \pm 0,02$
C1 + C3	$10,24 \pm 0,02$
C2 + C3 + C4	$7,80 \pm 0,02$
C1 + C2 + C3 + C4	$15,92 \pm 0,02$

Tabella 5.1: Spessori dei 4 campioni di CeSiC e loro accoppiamento.

Energia [keV]	$\mu(E)$ [cm^{-1}]
40	$1,37 \pm 0,01$
70	$0,56 \pm 0,01$
100	$0,43 \pm 0,01$
130	$0,39 \pm 0,01$
160	$0,35 \pm 0,02$

Tabella 5.2: Valori significativi per il coefficiente di assorbimento del CeSiC.

5.5 Il coefficiente di assorbimento della fibra di carbonio

La fibra di carbonio è un polimero di atomi strutturati in forma esagonale e legati tra loro in piani di carbonio grafittico. Questi piani sono lunghi e stretti e si prestano ad essere raccolti in fasci

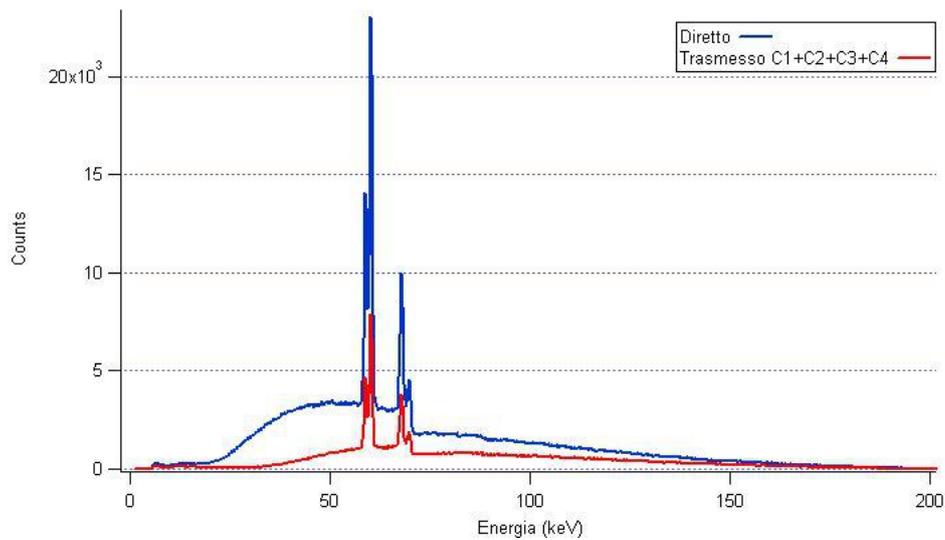


Figura 5.4: Confronto tra fascio diretto e fascio trasmesso dai 4 campioni di CeSiC accoppiati insieme.

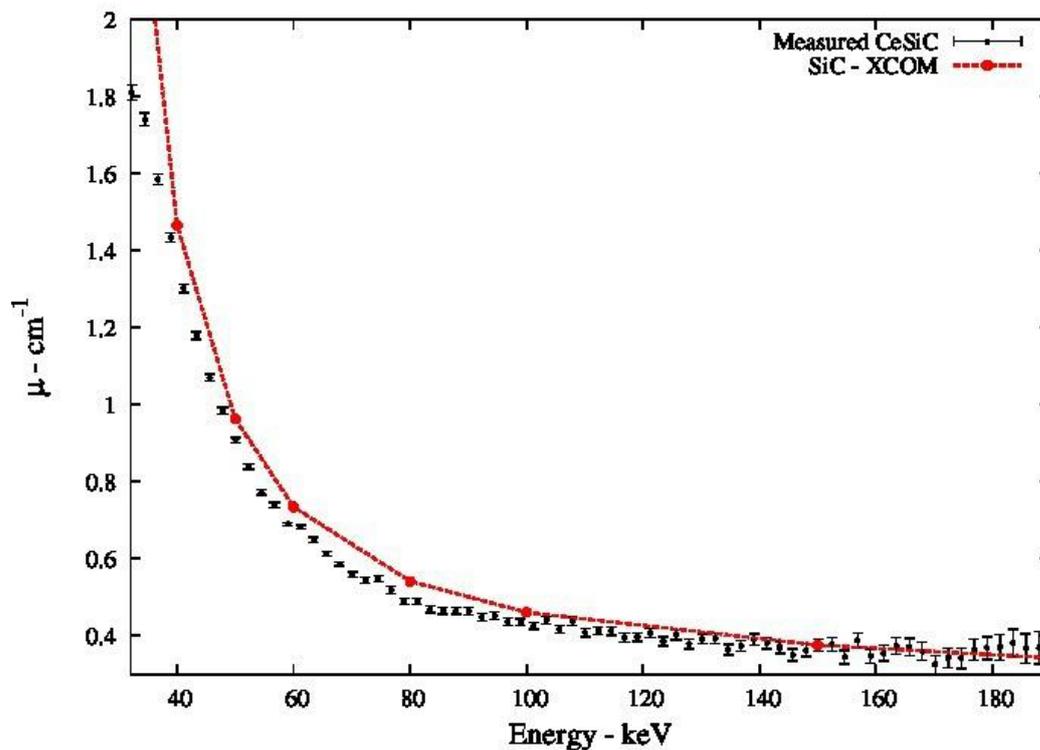


Figura 5.5: Confronto tra coefficiente di assorbimento misurato del CeSiC ed il valore teorico del SiC (X-Com) [11].

per formare le fibre. In genere queste fibre non vengono utilizzate da sole ma combinate con altri materiali (polimeri come resine epossidiche o composti termoindurenti) che attribuiscono ad esse grande resistenza in un peso limitato: sono chiamati polimeri rinforzati con fibre di carbonio (CFRP). La realizzazione di questi materiali prevede che vengano alloggiati all'interno di stampi diversi strati di fibre di carbonio orientando i filamenti in modo tale da distribuire al meglio le

sollecitazioni che la struttura finita dovrà dissipare. Agli strati di fibra viene aggiunto un polimero autoindurente che, attraverso l'azione di un'autoclave ad alte temperature e pressioni, lega le fibre tra loro donando resistenza al composto.



Figura 5.6: Campioni di fibra di carbonio utilizzati per le misure.

5.5.1 Misure ed analisi

È stato utilizzato, per la determinazione del coefficiente di assorbimento, un campione di fibra di carbonio fornito dalla ditta DTM Technologies di Modena ed appartenente allo stesso stampo da cui è stato ritagliato il supporto a forma di petalo attualmente in fase di assemblaggio nel progetto Laue. Il campione (M18 / AS4-K) è composto da 10 strati di fibre di spessore di $\approx 0,22$ mm orientate secondo la tabella 5.3 In questa prova, non avendo a disposizione campioni di diverso spessore, si è scelto di procedere accoppiando più volte il materiale in oggetto, facendo prove con 1, 3, 6 e 12 accoppiamenti. Poiché la fibra di carbonio ha un basso assorbimento, le misure effettuate con pochi accoppiamenti sono risultate affette da incertezza statistica troppo elevata per poter essere giudicate attendibili. Si è scelto, anche in questo caso, di utilizzare l'accoppiamento con il massimo spessore: 12 campioni per 2,64 cm con un' differenza evidente in conteggi tra fascio diretto e trasmesso (Figura 5.7).

Il coefficiente di assorbimento misurato, di cui si riportano in tabella 5.4 alcuni valori significativi, risulta inferiore al valore atteso per il carbonio in forma grafitica e calcolato rispetto al valore medio di densità delle fibre di carbonio. Tale risultato è probabilmente dovuto agli spazi vuoti presenti nella matrice di fibre (Figura 5.8).

Strato	Orientamento
1	0°
2	45°
3	0°
4	-45°
5	0°
6	0°
7	-45°
8	0°
9	45°
10	0°

Tabella 5.3: Orientamento dei piani di fibre di carbonio del campione analizzato.

Energia [keV]	$\mu(E)$ [cm^{-1}]
40	$0,305 \pm 0,004$
70	$0,23 \pm 0,004$
100	$0,213 \pm 0,005$
130	$0,205 \pm 0,007$
160	$0,20 \pm 0,01$

Tabella 5.4: Valori significativi misurati per il coefficiente di assorbimento della fibra di carbonio.

5.6 Sviluppi tecnologici

La realizzazione di una struttura di supporto per una lente di Laue deve scontrarsi necessariamente con la più comune ma, al contempo, più problematica proprietà fisica dei materiali: la dilatazione termica. Questa caratteristica rappresenta il mutamento di lunghezza lineare, di superficie o di volume di un solido, liquido o gas sottoposti ad una variazione di temperatura. A livello microscopico, l'energia fornita dal calore ad un corpo si traduce in energia cinetica degli atomi che lo compongono a scapito dell'energia di legame. Questo allentamento dei legami molecolari consente agli atomi di distanziarsi ulteriormente rispetto ai punti di equilibrio governati dalle forze elettromagnetiche generando, a livello macroscopico, una espansione del mezzo. Supponendo che la lente di laue appoggi su un piatto di un dato materiale, la variazione di su-

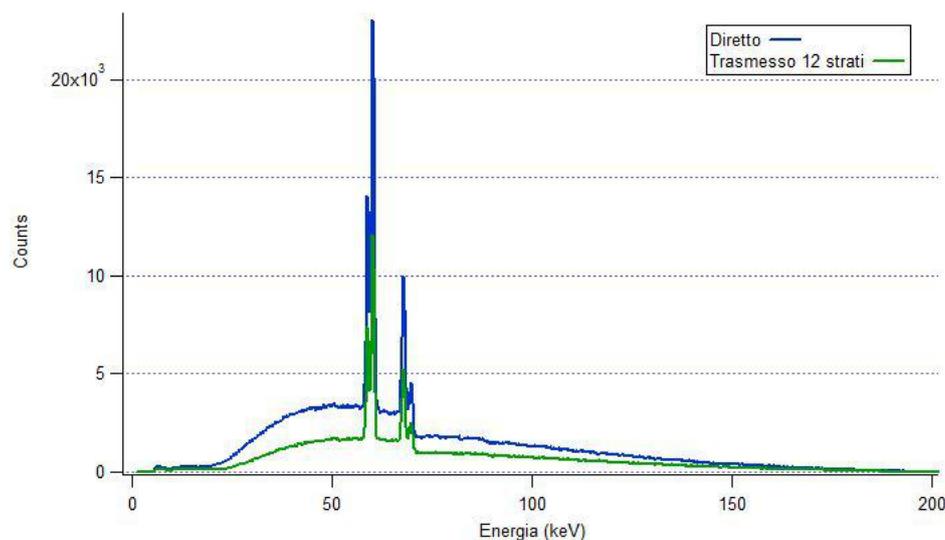


Figura 5.7: Confronto tra fascio diretto e fascio trasmesso da 12 campioni di fibra di carbonio accoppiati.

perficie ΔS dovuta alla temperatura è descritta dalla legge

$$\Delta S = \sigma S_0 \Delta T \quad (5.12)$$

in cui S_0 è la superficie iniziale e σ è detto coefficiente di dilatazione superficiale ed è una caratteristica intrinseca di ogni materiale e funzione della temperatura.

Come è noto, nella regione di spazio prossima al nostro pianeta in cui è ipotizzabile che possa essere collocato un telescopio orbitante con lente di Laue, la temperatura oscilla in un range tra -20°C e 40°C su cui influisce unicamente l'esposizione diretta ai raggi del Sole. Il buon comportamento di un supporto alla variazione di temperatura diventa quindi importante per la riuscita del progetto.

Utilizzando un prototipo di lente focalizzante con 20 cristalli di rame montati su un supporto in fibra di carbonio presente nel laboratorio Larix, è stato eseguito un importante test per osservare l'incidenza della dilatazione termica sulla focalizzazione. Il prototipo è stato inizialmente posizionato sulla linea del fascio ed è stata acquisita, attraverso il rivelatore per immagini Thales, un'immagine dei fasci diffratti a metà lunghezza focale in modo da poter facilmente identificare la posizione di ogni cristallo. Successivamente è stata abbassata di 4°C la temperatura della clean room in cui il prototipo era posizionato, passando da 22°C a 18°C . Una nuova acquisizione dell'immagine a metà distanza focale ha rivelato una contrazione superficiale del supporto. Tale contrazione, a causa della presenza di nervature diagonali (Figura 5.9-b) di sostegno della lente e della giunzione della base di appoggio, è risultata disomogenea rispetto al raggio della lente, generando una variazione di posizione dei cristalli proporzionale con la distanza rispetto al bordo inferiore della lente: questo si è tradotto nella rottura della simmetria circolare dei cristalli

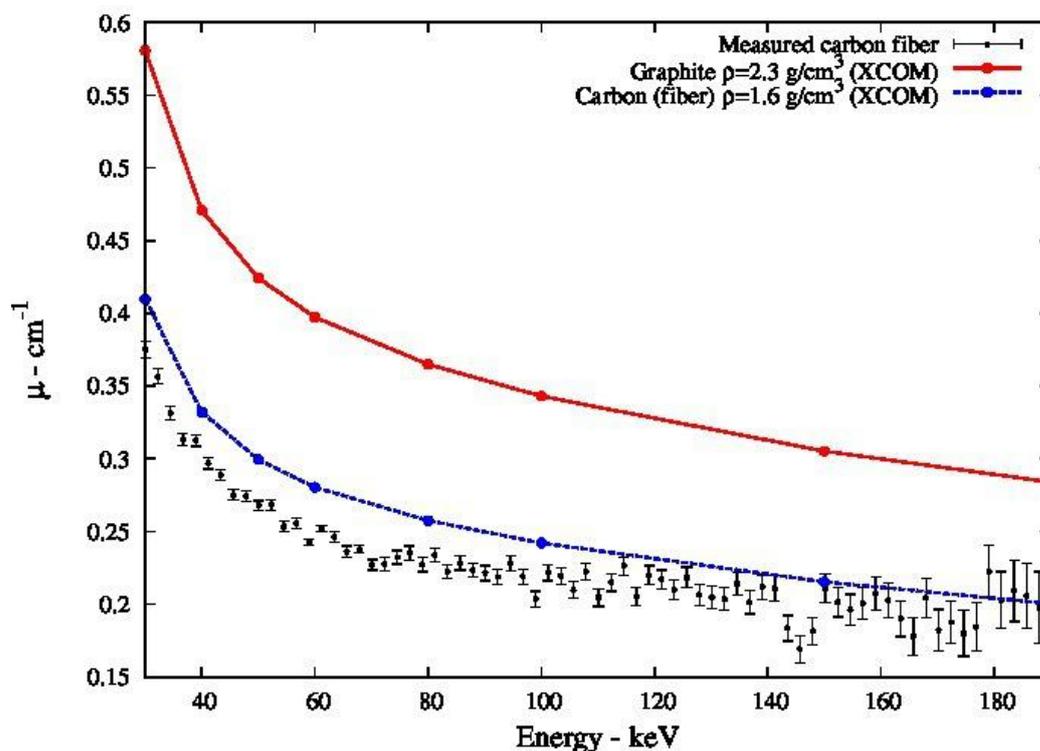


Figura 5.8: Confronto tra coefficiente di assorbimento misurato della fibra di carbonio ed il valore atteso per il carbonio in forma grafitica (densità $2,3 \text{ g/cm}^3$) e con densità media delle fibre ($1,6 \text{ g/cm}^3$) [11].

con conseguenze sulla capacità di focalizzazione (Figura 5.10).

Il progetto Laue, per lo studio di fattibilità di una lente focalizzante per raggi X e Gamma, deve farsi carico delle problematiche dovute alla dilatazione termica attraverso:

- materiali con coefficiente di dilatazione termica nullo
- materiali che minimizzino il contributo della dilatazione
- prevenzione delle variazioni di temperatura.

Sebbene sia nota l'impossibilità di annullare il coefficiente di dilatazione termica, sono attualmente allo studio materiali compositi che, dosando il contributo di diversi elementi nei confronti della temperatura, riducono fortemente le variazioni di dimensione. Le fibre di carbonio di nuova concezione, variando opportunamente l'angolo tra le fibre e scegliendo con particolare attenzione il polimero di supporto, potrebbero dare risultati soddisfacenti sotto questo profilo, preservando le qualità di leggerezza e resistenza proprie di questo materiale. L'altra unica alternativa possibile è realizzare un satellite termoregolato che consenta di operare preservando le medesime condizioni di temperatura in cui la lente è stata assemblata.

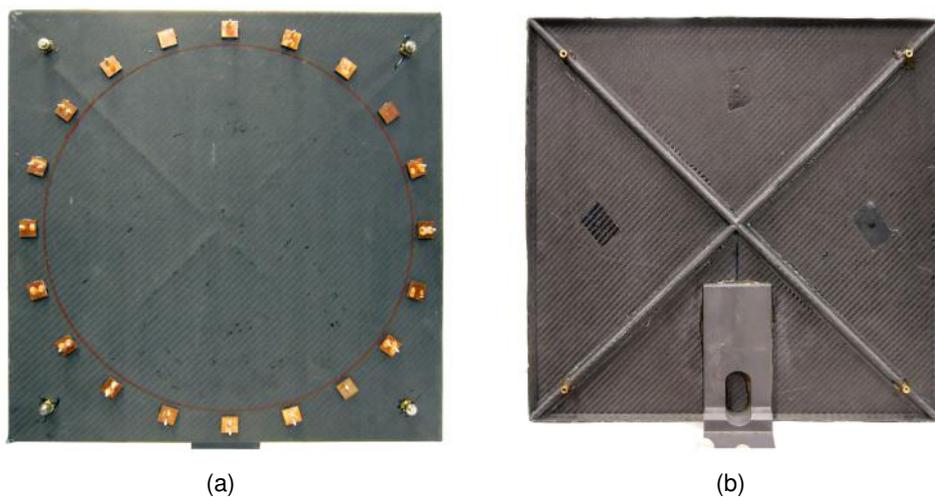


Figura 5.9: Vista frontale (a) del prototipo con frame in fibra di carbonio e vista posteriore (b) delle nervature diagonali di sostegno.

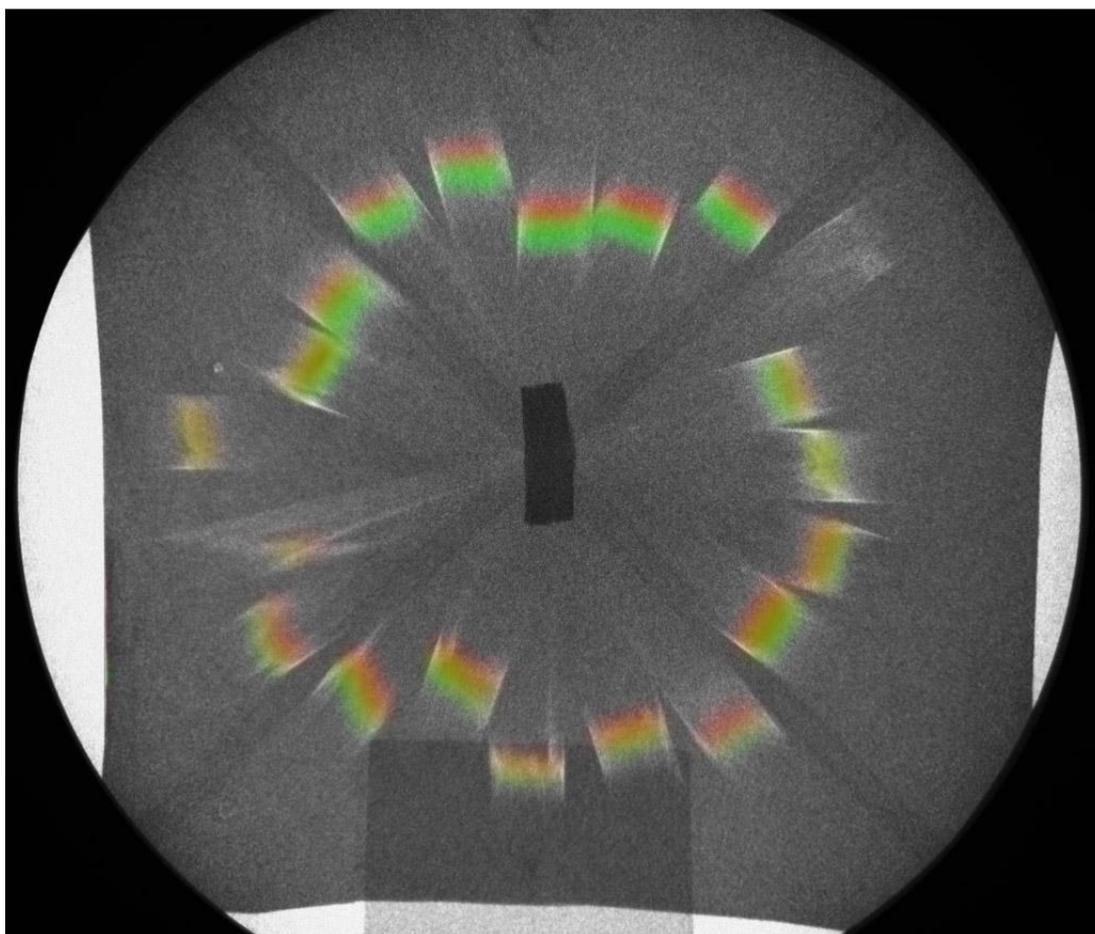


Figura 5.10: Effetti della temperatura su prototipo di lente a 20 cristalli con supporto in fibra di carbonio. I diffratti in colore rosso sono stati acquisiti alla temperatura di 22°C con l'imager detector posizionato a metà distanza focale. I diffratti di colore verde si riferiscono alla temperatura di 18°C. È evidente come l'abbassamento della temperatura abbia modificato in modo disomogeneo la geometria della lente.

Capitolo 6

CONCLUSIONI

Il nostro percorso ci ha portato a valutare le caratteristiche fisiche di alcuni materiali affinché potessero essere utilizzati come supporto di una lente di Laue. Tra i materiali proposti il titanio non è stato oggetto di studio perché troppo opaco nella banda di lavoro in cui può operare una lente di Laue (70 - 600 keV), mentre l'alluminio è stato scartato per considerazioni relative alla sua durezza ed al coefficiente di dilatazione termica relativo a quello dei cristalli. In figura 6.1 vengono confrontati i risultati delle misure effettuate: è evidente che la fibra di carbonio mostra le prestazioni migliori sia per i bassi valori, sia per l'uniformità del coefficiente di assorbimento nella banda di interesse.

Inoltre, dal punto di vista della dilatazione termica il CeSiC ($CTE = 2,1 \times 10^{-6} K^{-1}$) ha un buon comportamento nei confronti della temperatura ma risulta tuttora difficile da lavorare. Ancora una volta è la fibra di carbonio a garantire le prestazioni migliori: orientando con particolare cura gli strati di fibre sovrapposti è possibile realizzare supporti in grado di opporsi alle variazioni di temperatura.

Per questo motivo, per il Progetto Laue attualmente in corso presso il laboratorio LARIX del Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra di Ferrara, è stata scelta la fibra di carbonio per la realizzazione del petalo di supporto dei cristalli. Come è visibile in figura 6.2, è in fase di assemblaggio un petalo di lente con cristalli di germanio e arseniuro di gallio che mostrano alta efficienza di diffrazione ed elevata capacità di focalizzazione. Tali materiali hanno anche un coefficiente di dilatazione termica ($CTE \sim 6 \times 10^{-6} K^{-1}$) dello stesso ordine di grandezza di quello del supporto in fibra di carbonio ($CTE = 2 \times 10^{-6} K^{-1}$).

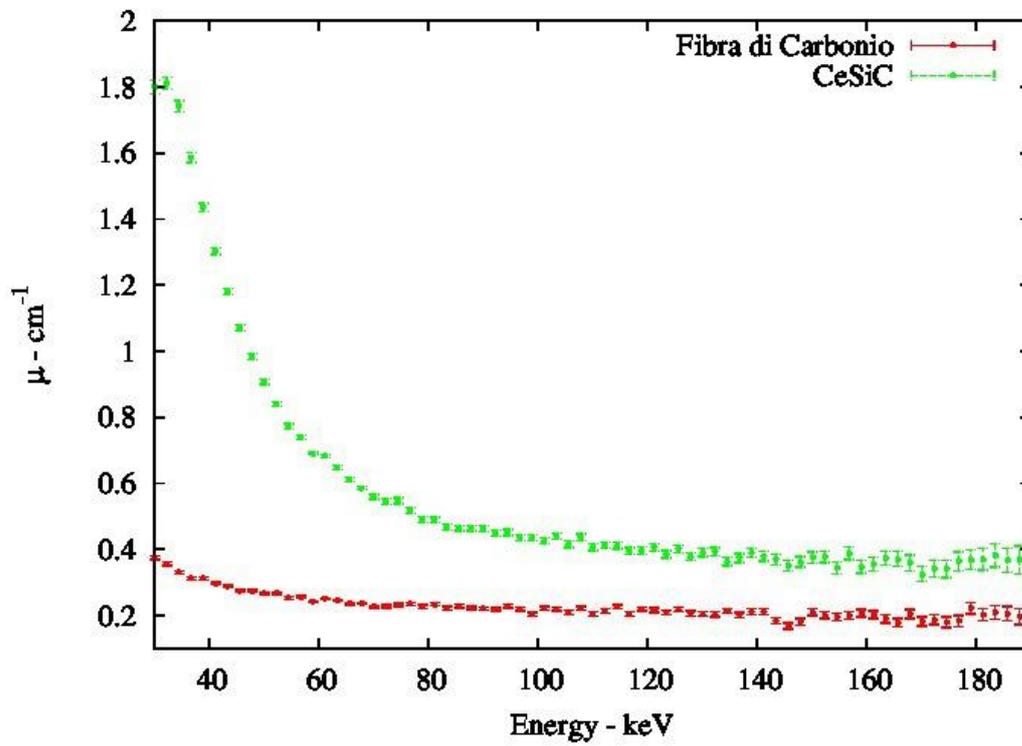


Figura 6.1: Comparazione delle misure del coefficiente di assorbimento effettuate. La fibra di carbonio è il materiale che meglio si comporta nell'intervallo di energia considerato.

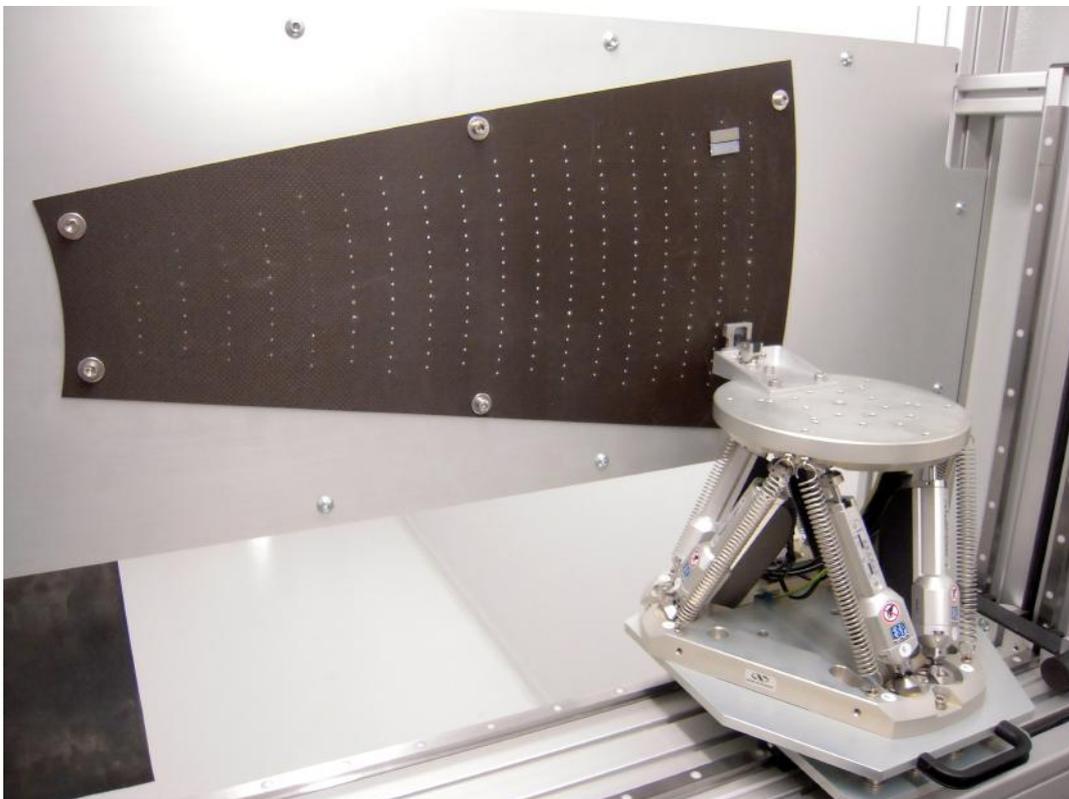


Figura 6.2: Petalo in fibra di carbonio con due cristalli di germanio e arseniuro di gallio incollati.

Bibliografia

- [1] F. Frontera, M. Orlandini, R. Landi, A. Comastri, F. Fiore, G. Setti, L. Amati, E. Costa, N. Masetti, and E. Palazzi. *The cosmic x-ray background and the population of the most heavily obscured agns*. *Astrophysical Journal*, 666:86–95, September 2007.
- [2] J. Knodleseder, P. Von Ballmoos, F. Frontera, A. Bazzano, F. Christensen, M. Hernanz and C. Wunderer. *Gri: focusing on the evolving violent universe*. *Optics for EUV, X-Ray and Gamma-Ray Astronomy III*. SPIE, Vol 6688 (2007).
- [3] J. Knodlseder, P. Jean, V. Lonjou, G. Weidenspointner. *The all-sky distribution of 511 keV electron-positron annihilation emission*, *Astronomy and Astrophysics*, Volume 441, Issue 2, pp.513-532 (2005).
- [4] Boella, G. and Butler, R. C. and Perola, G. C. and Piro, L. and Scarsi, L. and Bleeker. *BeppoSAX, the wide band mission for X-ray astronomy*, *A&A Supplement series*, Vol. 122, 299-307 (1997).
- [5] A.M. Levine, et al. *The HEAO 1 Catalog of High-Energy X-Ray Sources*, *Astrophysical Journal Supplement Series* vol. 54, p. 581-617 (1984).
- [6] Vincenzo Liccardo. *Gamma-ray Lens: Development and Test*. PhD thesis, Università degli studi di Ferrara - Università de Nice Sophia Antipolis, 2013.
- [7] H.Halloin, P.von Ballmoos, J.Evrard, et al. *CLAIRE gamma-ray lens: flight and long distance test results*, SPIE, Vol. 5168, pp. 471-48 (2004).
- [8] E. Virgilli, F. Frontera, V. Valsan, V. Liccardo. *Laue lenses for hard X-/soft rays: new prototype results*, SPIE Vol. 8147 (2011).
- [9] F. Frontera, G. Loffredo, A. Pisa, L. Milani, F. Nobili, N. Auricchio, V. Carassiti. *Development status of a Laue lens project for gamma-ray astronomy*, SPIE Vol. 6688 (2007).
- [10] F. Frontera, G. Loffredo, A. Pisa, F. Nobili, V. Carassiti, F. Evangelisti, L. Landi, S. Squerzanti, E. Caroli, J.B. Stephen, K.H. Andersen, P. Courtois, N. Auricchio, L. Milani, B. Negri. *Focusing of gamma-rays with Laue lenses: first results*. SPIE Vol. 7011 (2008)

- [11] Xcom - National Institute of Standards and Technology, <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html>
- [12] F. Frontera and Peter von Ballmoos. *Laue gamma-ray lenses: status and prospects*, X-Ray Optics and Instrumentation Volume 2010 (2010).
- [13] Cullity B. D., *X-ray diffraction*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc. (1956).
- [14] R. Camattari, V. Guidi, I. Neri, *Quasi-mosaicity as a tool for focusing hard x-rays*, SPIE Vol. 8443 (2012).
- [15] Vincenzo Guidi, Valerio Bellucci, Riccardo Camattari and Ilaria Neri, *Proposal for a Laue lens with quasi-mosaic crystalline tiles*, JJ. Appl. Cryst. 44, 1255-1258. (2011).
- [16] V. Liccardo, E. Virgilli, F. Frontera, V. Valsan, *Characterization of bent crystals for Laue lenses*, SPIE Vol. 8443 (2012).
- [17] F. Frontera, E. Virgilli, V. Valsan, V. Liccardo, V. Carassiti, E. Caroli, F. Cassese, C. Ferrari, V. Guidi, S. Mottini, M. Pecora, B. Negri, L. Recanatesi, L. Amati, N. Auricchio, *Scientific prospects in soft gamma-ray astronomy enabled by the LAUE project*, SPIE Vol. 8861 (2013).
- [18] E. Virgilli, F. Frontera, V. Valsan, V. Liccardo, E. Caroli, J.B. Stephen, F. Cassese, L. Recanatesi, M. Pecora, S. Mottini, P. Attina, B. Negri, *The LAUE project for broadband gamma-ray focusing lenses*, SPIE Vol. 8147 (2011).
- [19] E. Virgilli, F. Frontera, V. Valsan, V. Liccardo, V. Carassiti, S. Squerzanti, M. Statera, M. Parise, S. Chiozzi, F. Evangelisti, E. Caroli, J. Stephen, N. Auricchio, S. Silvestri, A. Basili, F. Cassese, L. Recanatesi, V. Guidi, V. Bellucci, R. Camattari, C. Ferrari, A. Zappettini, E. Buffagni, E. Bonnini, M. Pecora, S. Mottini, and B. Negri, *The LAUE project and its main results*, SPIE Vol. 8861 (2013).
- [20] *LabVIEW - Manuale Corso Base I*, National Instrumens.
- [21] N. Auricchio, E. Caroli, John B. Stephen, A. Basili, *Progetto LAUE – Una lente per i raggi Gamma - EGSE Detectors Calibration Report*, Internal Report INAF/IASF-Bo n. 637/2014

Ringraziamenti

Desidero ringraziare il Prof. Filippo Frontera per la disponibilità e l'impegno che mi ha dedicato e per avermi permesso di lavorare nel laboratorio Larix accumulando esperienze che vanno oltre quanto possa essere raccontato in una tesi. Un ringraziamento importante è anche per il Dott. Enrico Virgilli ed il Dott. Gianluca Loffredo con cui ho avuto modo di collaborare e che si sono dedicati a me con pazienza superiore ad ogni aspettativa. Questa tesi è stata realizzata anche con il contributo del Dott. Gianluigi Cibirnetto, Dott.ssa Fauzia Albertin, Ing. Vito Carassiti ed i tecnici dell'officina del Dipartimento di Fisica e Scienze della Terra (che molto probabilmente stanno ancora aspettando che gli restituisca qualche brugola): a tutte queste persone dedico un ringraziamento sincero.

Ringrazio mamma e papà per avermi dato la possibilità di cadere e rialzarmi mille volte senza mai aver smesso di credere in me: spero che questa tesi sia la prima di una lunga e continua serie di soddisfazioni. Ringrazio mia sorella (insieme a Christian, Leonardo, Tommaso ed Alice) per la vicinanza ed il supporto nei momenti difficili. Prima o poi troveremo il modo per vederci maggiormente.

Ringrazio Beatrice (Beatrisce!), la mia correttrice di bozze ed unica responsabile di eventuali refusi all'interno di questo lavoro di tesi: hai stupidamente creduto in me più di quanto abbia fatto io ...E un po' mi scoccia dire che avevi ragione.

Ringrazio gli amici Valeria, Marina, Ruggero, Davide, Laura, Biagio, Sara, Leo, i Gatti di Schrödinger (Tasso e Stoppa), gli amici del mondo della pallavolo e tutte le persone con cui in questi anni ho avuto modo di ridere e stare bene. Sono cambiate tante cose in questi anni ma ho avuto la fortuna di essere sempre stato circondato da belle persone.

E infine, per un tocco di sano egocentrismo, ringrazio me stesso: ho bruciato decine di possibilità ma almeno questa volta sembra che io sia riuscito a non fare danni.