

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E
NATURALI

Corso di Laurea in Fisica

Alfio Domenico Pappalardo

**Nuove tecniche di microdiagnostica con
scintillatori per fasci ionici di bassa intensità**

TESI DI LAUREA

Relatori:

Chiar.mo Prof. G. BELLIA

Dr. P. FINOCCHIARO

ANNO ACCADEMICO 2001-2002

INDICE

INTRODUZIONE **4**

CAPITOLO 1 **6**

1.1	DIAGNOSTICA DI FASCI STABILI E INSTABILI	6
1.2	TECNICHE STANDARD DI DIAGNOSTICA DI FASCI	9
1.3	DIAGNOSTICA CON RILEVATORI	10
1.3.1	RILEVATORI A SCINTILLAZIONE	10
1.3.2	FIBBS E GFIBBS	13
1.4	IMAGING	17
1.4.1	LEBI	21
1.4.2	SERSE	24

CAPITOLO 2 **26**

2.1	SISTEMA SFOP-CCD	26
2.1.1	SFOP	27
2.1.2	LA TELECAMERA	34
2.1.3	LA SCHEDA DI ACQUISIZIONE IMMAGINI	35
2.2	ACQUISIZIONE IMMAGINE	35
2.2.1	OPERAZIONI SULLE IMMAGINI	36
2.3	L'INGRANDIMENTO	39

2.4	TEST PRELIMINARI CON LA TELECAMERA	40
2.5	CALIBRAZIONE	43
2.6	RISOLUZIONE	46
2.6.1	RESOLUTION TARGET USAF 1951	46
2.6.2	RISOLUZIONE DEL SISTEMA	48

CAPITOLO 3 **50**

3.1	DISPOSITIVO SBBS	50
3.2	IL CRISTALLO DI CsI(Tl)	56

CAPITOLO 4 **60**

4.1	DLP (LITOGRAFIA PROFONDA CON PROTONE)	60
4.2	SET-UP D'IRRAGIAMENTO	65

CAPITOLO 5 **71**

5.1	APPARATO SPERIMENTALE	71
5.2	PROCEDURA D'ALLINEAMENTO	72
5.3	PROTONI ATTRAVERSO LA LIGA-MASK	77
5.4	MISURE E RISULTATI	79
5.4.1	ACQUISIZIONI SFOP NELLA CONFIGURAZIONE DI MINIMO INGRANDIMENTO	81

5.4.2 ACQUISIZIONI SFOP NELLA CONFIGURAZIONE DI MASSIMO INGRANDIMENTO	85
--	----

CAPITOLO 6	98
-------------------	-----------

6.1 MISURE CON SBBS	98
6.2 SBBS COME SENSORE DI CORRENTE DEL FASCIO	103
6.3 SCANSIONE SBBS	106

CAPITOLO 7	111
-------------------	------------

7.1 IRRAGGIAMENTO PMMA ED ETCHING	111
-----------------------------------	-----

CAPITOLO 8	114
-------------------	------------

8.1 CONCLUSIONI	114
BIBLIOGRAFIA	116
RINGRAZIAMENTI	119

Introduzione

Nel presente lavoro di tesi descriverò lo sviluppo e utilizzo, condotto ai LNS, di due dispositivi, basati sull'utilizzo di scintillatori, in grado di permettere la caratterizzazione dei fasci di ioni mediante parametri come la distribuzione in corrente, la posizione, la corrente totale.

La nostra attività ha preso il via sotto l'impulso di una tecnologia che fa uso di fasci di protoni in processi litografici.

I due dispositivi utilizzati, SFOP-CCD e SBBS, sviluppati negli anni passati ai Laboratori Nazionali del Sud, saranno impiegati per la microdiagnostica di fasci di protoni nella collaborazione con il dipartimento di fisica applicata del Vrije Universiteit Brussel (VUB), nell'ambito del progetto di Litografia Profonda con Protoni (DLP) per la fabbricazione di strutture micro-ottiche e micro-meccaniche da utilizzare nella realizzazione di dispositivi opto-elettronici, con applicazioni che vanno dalla trasmissione dati alla medicina. La collaborazione consiste sull'uso e miglioramento dei dispositivi sopra menzionati per realizzare una ricostruzione in tempo reale del profilo trasverso dei fasci di protoni, con risoluzioni spaziali dell'ordine di qualche decina di micron. Il raggiungimento di tali obiettivi consentirà di realizzare i componenti in questione con una accuratezza superiore

a quanto si riesca a fare attualmente e di ridurre la dimensione in maniera consistente, al fine di favorire un aumento della scala di integrazione.

Il primo capitolo dà una visione della problematica della diagnostica rivolta a fasci di bassa intensità ed energia, nonché delle soluzioni raggiunte ai LNS.

Il secondo e terzo capitolo descrivono i dispositivi, SFOP-CCD e SBBS, nelle loro linee caratteristiche.

Il quarto capitolo è dedicato alla descrizione della tecnica DLP e dei componenti ottenibili.

Nel quinto capitolo è descritto l'apparato sperimentale utilizzato durante le misure con i risultati raggiunti mediante il sistema di imaging SFOP-CCD.

Nel sesto capitolo vengono presentati i risultati raggiunti con il dispositivo SBBS, mentre il settimo capitolo mostra alcune immagini delle applicazioni della tecnica DLP. Infine nell'ottavo capitolo sono presentate le conclusioni.

Capitolo 1

1.1 Diagnostica di fasci stabili e instabili

Alla luce del crescente interesse per la produzione e l'accelerazione di fasci di ioni radioattivi (RIB), oltre che il rinnovato interesse nell'impiego di fasci a bassa intensità per scopi terapeutici (TIB), si rende necessario lo sviluppo di speciali strumenti di diagnostica adatti a rivelare intensità di fascio spesso molto basse e, qualche volta, anche a bassa energia [1].

Misure affidabili di posizione e profilo trasverso del fascio sono fondamentali per le applicazioni sopra menzionate. In particolare si richiedono dispositivi di diagnostica con un intervallo in sensibilità di diversi ordini di grandezza. Nel rispetto di tali specifiche vengono studiati, ai LNS ed altrove, dispositivi che soddisfano queste richieste, ma che tuttavia rimangano semplici ed affidabili sia nella loro implementazione che nel loro uso.

Le tecniche di rivelazione di particelle, comunemente usate in fisica nucleare, sembrano promettenti sotto molti aspetti e possono fornire la base per lo sviluppo di nuovi dispositivi di diagnostica per fasci di ioni stabili e instabili. Nel contesto della produzione di fasci di ioni radioattivi, nell'ambito della facility EXCYT (Exotics with Cyclotron and Tandem) dei LNS [2], i fasci da produrre possono avere

bassa intensità, principalmente a causa della piccola sezione d'urto per la produzione di svariate specie nucleari, ma anche per la limitazione nell'intensità del fascio primario. Sfortunatamente non esiste una soluzione generale che vada bene per ogni esigenza; ciascuna specie ha una sezione d'urto di produzione differente e diversa vita media. La corrente di fascio finale può variare di diversi ordini di grandezza, divenendo già critica per la diagnostica "classica" quando scende al di sotto di 10^8 particelle per secondo (pps), sebbene ci si possa aspettare intensità anche inferiori a 10^5 pps [3].

Nel caso di un uso terapeutico di fasci di ioni, la bassa intensità è una caratteristica fondamentale per questioni di dosimetria. Questo aspetto rende ancor più importante una diagnostica di fascio veloce ed affidabile.

In un tale intervallo di intensità le normali tecniche diagnostiche raggiungono le loro intrinseche limitazioni elettromagnetiche dovute principalmente al rumore elettronico, che limita il rapporto segnale-rumore ottenibile. Un fattore critico è anche la contaminazione del segnale utile a causa di emissione secondaria di elettroni da parti del sensore esposte al fascio.

Le caratteristiche richieste sono dunque: migliore sensibilità, non intercettività del fascio, affidabilità, facilità d'uso e robustezza;

quest'ultima caratteristica deve garantire da improvvise variazioni dell'intensità del fascio, errori da parte dell'operatore o malfunzionamenti improvvisi. Infine bisogna tenere in considerazione l'eventuale possibilità di realizzare dispositivi autocalibranti, cioè in grado di effettuare misure assolute.

Esistono due possibili strategie per tentare di aumentare la sensibilità di un sensore di fascio:

- Ridurre il rumore
- Aumentare il segnale.

La prima dovrebbe essere ottenuta migliorando l'elettronica e la schermatura dei dispositivi usuali, mentre la seconda può essere perseguita prendendo a prestito alcune tecniche tipiche della fisica nucleare sperimentale. In tale ottica, un buon metodo per aumentare il segnale utile è l'utilizzo di un rivelatore di particelle, che è generalmente sensibile all'energia rilasciata dalla particella piuttosto che alla carica trasportata. Pur tuttavia, l'inconveniente principale dei dispositivi basati sui rivelatori di particelle è la loro risposta fortemente dipendente dal tipo di fascio e dall'energia, infatti non misuriamo più la carica elettrica trasportata dal fascio. Inoltre lo spessore di eventuali "strati morti" può introdurre una soglia in energia sui fasci rivelabili. La resistenza al danno da radiazioni è uno

dei più importanti parametri che devono condurre alla scelta di un tipo di rivelatore piuttosto che un altro [4].

1.2 Tecniche standard di diagnostica di fasci

Il tipico dispositivo abitualmente utilizzato ai LNS per ricostruire il profilo trasverso di un fascio di ioni, è basato su due fili di tungsteno mutuamente ortogonali che operano la scansione del fascio sul piano trasversale [5]. La corrente misurata sui fili nel momento in cui intersecano il fascio, è proporzionale al numero delle particelle incidenti; una semplice correlazione con la posizione dei fili permette di ricostruire il profilo orizzontale e verticale.

La principale limitazione nelle misure con corrente bassa, usando fili o griglie, deriva dal rumore elettromagnetico. Nell'esperienza maturata ai LNS con questo genere di dispositivi di diagnostica, si è osservato come la maggiore limitazione venga dal rumore elettrico prodotto dalla frizione del cavo in movimento che trasporta il segnale.

Dato che i dispositivi ordinari sono generalmente sensibili ad intensità dell'ordine di 10^8 - 10^9 pps, sono stati studiati e realizzati monitor per il profilo di fascio (BPM, beam profile monitors) adatti a caratterizzare intensità di fascio molto basse. Anziché tentare di migliorare le prestazioni dei sensori tradizionali basati su fili, che

diverrebbero molto complessi, delicati e costosi, è stata avviata un'intensa attività di ricerca e sviluppo basata sull'uso di rivelatori di particelle per rendere possibile una efficace diagnostica dei fasci di bassa intensità prodotti ed accelerati ai LNS [6].

1.3 Diagnostica con rivelatori.

Le tecniche di diagnostica attualmente disponibili basate su rivelatori, si basano su diversi tipi di rivelatori: a semiconduttore, a gas, scintillatori, etc. In questo contesto ci occuperemo in dettaglio dei rivelatori a scintillazione, (dato che per i nostri scopi utilizzeremo due dispositivi basati su tali rivelatori).

1.3.1 Rivelatori a scintillazione.

Gli scintillatori sono ben conosciuti dai fisici sperimentali e la loro caratteristica di base è la proprietà di emettere luce quando una radiazione incidente rilascia la sua energia all'interno del materiale. Per molto tempo il materiale maggiormente utilizzato è stato lo NaI (Ioduro di Sodio). Esso possiede una ottima resa di luce e l'energia media per la produzione di un fotone di scintillazione è circa 10 eV. Sfortunatamente lo NaI è fortemente igroscopico ed ha bisogno di essere utilizzato con speciali precauzioni.

Oggigiorno è disponibile sul mercato un'ampia famiglia di scintillatori plastici veloci. Essi sono generalmente piuttosto economici e facili da produrre in qualsiasi forma, inoltre possono essere scelti tra un'ampia varietà di caratteristiche: tempo di decadimento, lunghezza d'onda d'emissione, lunghezza di attenuazione, etc. Il loro principale aspetto negativo è rappresentato dalla scarsa resistenza al danno da radiazioni e al calore. L'uso di uno scintillatore plastico per i fasci è praticamente limitato ad un regime di bassa intensità e per brevi periodi di tempo: infatti dopo un irraggiamento con 10^{12} - 10^{13} particelle per cm^2 gran parte degli atomi di idrogeno sono completamente espulsi lasciando quasi esclusivamente atomi di carbonio. Quindi deve essere usata estrema cura quando si intende utilizzare tali rivelatori per applicazioni in cui si ha un'alta corrente.

Durante gli ultimi quindici anni nuove famiglie di scintillatori inorganici hanno attirato l'attenzione dei fisici. Questi nuovi cristalli hanno dimostrato di possedere buone proprietà meccaniche, resistenza alle radiazioni e buona efficienza di scintillazione. Alcuni di essi hanno un tempo di decadimento sorprendentemente breve.

Molti degli scintillatori attualmente utilizzati necessitano di una energia media di 10-100 eV per produrre un fotone di scintillazione. Il costo varia a seconda del tipo, forma, quantità, drogaggio. Tra gli scintillatori inorganici possiamo anche annoverare alcuni materiali amorfi: vetri drogati con terre rare come Terbio, Gadolinio, Cerio, etc.

Sul mercato esistono molti tipi di dispositivi atti alla rivelazione della luce prodotta dai cristalli. Alcuni di essi sono adatti per una lettura in corrente (fotodiodi), altri per il conteggio dei singoli impulsi di luce (fotomoltiplicatori, fotodiodi, fotodiodi a valanga). Fino ad ora l'uso di scintillatori per diagnostica di fascio è stato limitato ai plastici, che hanno un limite di conteggio dell'ordine di 10^6 pps. I plastici, usati in forma di fibra ottica scintillante, possono anche servire come visualizzatori del fascio, permettendo la ricostruzione del profilo trasverso.

Gli scintillatori basati su CsI(Tl) sono molto adatti per la rivelazione delle radiazioni grazie alle loro eccellenti prestazioni. L'efficienza di scintillazione (85% di quella del NaI(Tl)) e l'emissione di luce con lunghezza d'onda attorno a 565 nm ne fanno uno dei migliori materiali scintillanti presenti attualmente sul mercato. Inoltre esso risulta scarsamente igroscopico, e piuttosto resistente al danno da radiazioni. La sua costante di decadimento della luce pari a circa 1 μ s,

senza bagliore residuo apprezzabile (afterglow), lo rende adatto all'utilizzo come contatore di particelle fino a 10^5 Hz [7].

1.3.2 FIBBS e GFIBBS

Fino ad oggi sono stati sviluppati e testati diversi dispositivi per la diagnostica di fasci di bassa intensità, nati nell'ambito della facility EXCYT. I primi dispositivi in tal senso si basano sull'uso di fibre ottiche scintillanti. Il principio di funzionamento è alquanto semplice: ogni volta che la fibra è colpita da una particella essa produce un piccolo flash di luce. In tal modo è possibile sostituire i tradizionali BPM basati su fili, con quelli che utilizzano fibre. In questo caso, anziché misurare la corrente su un filo è possibile misurare la luce in una fibra, la quale è sensibile a ciascuna particella incidente. La possibilità reale di rivelare e misurare la luce prodotta dipende dalla scelta del fotorivelatore.

Lungo questa linea di ricerca sono stati realizzati due dispositivi, FIBBS (Fibre Based Beam Sensor) [8] e GFIBBS (Glass Fibre Based Beam Sensor) [9] entrambi basati sul medesimo principio fisico e disegno tecnico, con la sola differenza di utilizzare come rivelatori due differenti tipi di fibre di materiale scintillante.

I due dispositivi sono costituiti nelle loro linee essenziali da: due fibre scintillanti, di diametro 0.5 mm per una lunghezza pari a 10 cm, poste perpendicolarmente una all'altra ed entrambe otticamente accoppiate allo stesso fotomoltiplicatore. Esso è montato su un opportuno sistema di movimentazione che rende possibile l'inserimento all'interno della linea di fascio e il movimento in un piano perpendicolare a tale direzione, essendo così possibile con una sola scansione, ricostruire le distribuzioni d'intensità lungo gli assi X e Y. (vedi fig.1.1). Un convertitore I-V trasforma la corrente indotta sul fotomoltiplicatore in un segnale in tensione, che viene acquisito da un ADC.

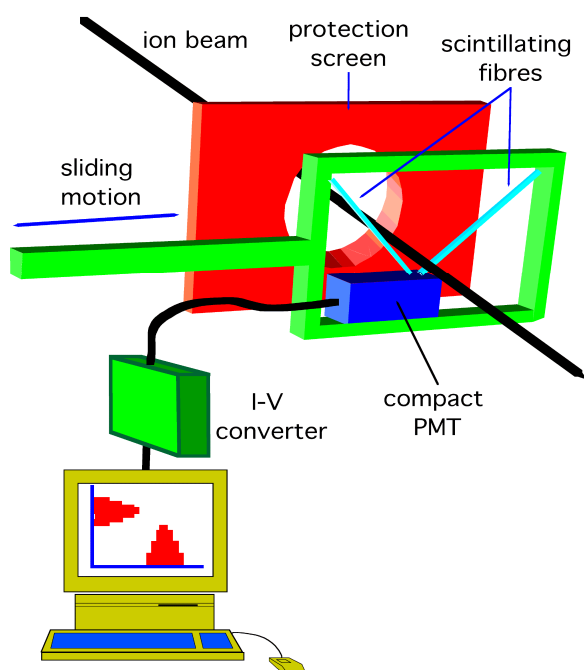


Figura 1.1-Rappresentazione schematica FIBBS e GFIBBS.

Per i test dei dispositivi precedentemente menzionati sono stati impiegati due tipi diversi di fibre, una di materiale plastico e l'altra in vetro (drogato al Terbio), le cui caratteristiche sono riportate nella tabella sottostante.

Fibre Scintillanti			
Tipo di fibra	Tempo di decadimento	Robustezza Radiazioni	λ [nm] d'emissione
Plastico	3 ns	NO	435
Tb-glass	4 ms	SI	550

Tabella 1.1-Nella seguente tabella sono messe a confronto le principali caratteristiche delle fibre considerate.

Il dispositivo con la fibra in materiale plastico, FIBBS, si è mostrato adatto per le intensità di fascio previste, sebbene la fibra si è dimostrata non abbastanza resistente al danneggiamento da radiazioni. Invece, l'utilizzo della fibra di vetro scintillante drogato con Terbio permette di impiegare tale dispositivo, GFIBBS, anche per intensità di fascio non eccessivamente basse. Infatti, contrariamente alle fibre plastiche, la resistenza al danneggiamento da radiazioni è buona: dopo aver bombardato la fibra di Terbio con circa 10^{13} particelle/mm² non

si osservano variazioni sensibili nella resa di luce. Nondimeno, deve essere posta molta cura nell'evitare che una lunga esposizione a fasci intensi possa danneggiare la fibra di vetro a causa dell'alta temperatura raggiunta. Tale inconveniente non è però rilevante come nel caso della fibra plastica.

Questo apre la possibilità di usare il GFIBBS anche con fasci di ioni di intensità ordinarie.

Ecco una breve lista di vantaggi del GFIBBS:

- basso rumore;
- alto rapporto segnale-rumore
- basso costo;
- insensibilità intrinseca a rumore elettromagnetico;
- facilità d'uso;
- affidabilità e linearità;
- velocità d'operazione;
- scarsa interferenza meccanica con il fascio.

I test condotti, mostrano che può essere facilmente costruito ed impiegato un semplice ed affidabile sensore di profilo di fascio basato su fibre scintillanti e come si evince dalla lista il dispositivo soddisfa pienamente le richieste generali per un dispositivo di diagnostica.

1.4 Imaging

Per la diagnostica di fasci di ioni, vengono anche utilizzate tecniche di imaging, mediante l'utilizzo di scintillatori. La tecnica trova un ampio campo di applicabilità data la sua relativa facilità d'uso e versatilità. Essa fa uso di (come vedremo nei dettagli al capitolo 2) di uno schermo di materiale scintillante, direttamente colpito dalle particelle del fascio, da una telecamera che inquadra lo schermo e invia l'immagine prodottasi su un monitor. Qui di seguito nella figura è mostrato uno schema a blocchi dell'apparato.

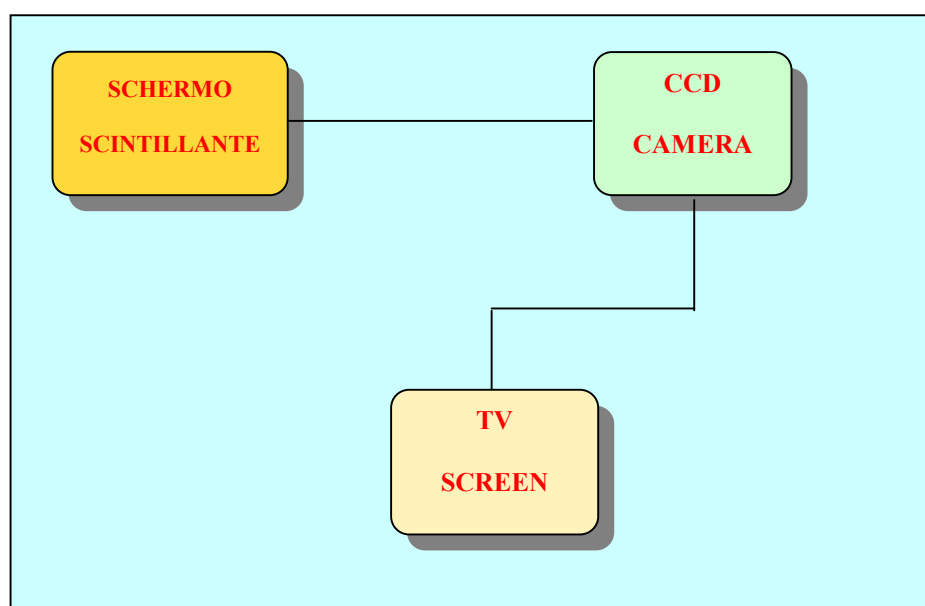


Figura 1.2-Rappresentazione schematica della tecnica di imaging.

Con l'ausilio di tale tecnica, applicata alla diagnostica dei fasci, siamo in grado di visualizzare l'immagine dello spot del fascio che colpisce lo scintillatore, e ciò risulta di estrema utilità durante la fase di preparazione del fascio stesso e del suo controllo lungo la linea da parte degli operatori dell'acceleratore.

Gli schermi scintillanti adatti allo scopo sono diversi e l'utilizzo di uno rispetto ad un altro dipende da diversi fattori. Ecco una breve lista di tali schermi:

- Quarzo
- CHROMOX6, uno schermo di allumina drogato al cromo
- SFOP (Scintillanting Fiber Optic Plate), consistente in un fascio di fibre scintillanti, vetro drogato al Terbio, assemblate per costituire un vero e proprio "plate" (vedi fig 1.3).
- Scintillatori inorganici NaI(Tl), CsI(Tl) e altri.

Lo schermo di CHROMOX6 possiede caratteristiche eccellenti nei riguardi della resistenza al calore e alle radiazioni, esso è però soggetto all'effetto memoria, cioè la luce di scintillazione prodotta si mantiene a lungo dopo l'esposizione (afterglow). E' relativamente costoso ma ciò è contraccambiato dal fatto di essere molto durevole nel tempo [7].

L'altro schermo utilizzato è un piatto di fibre scintillanti (SFOP).

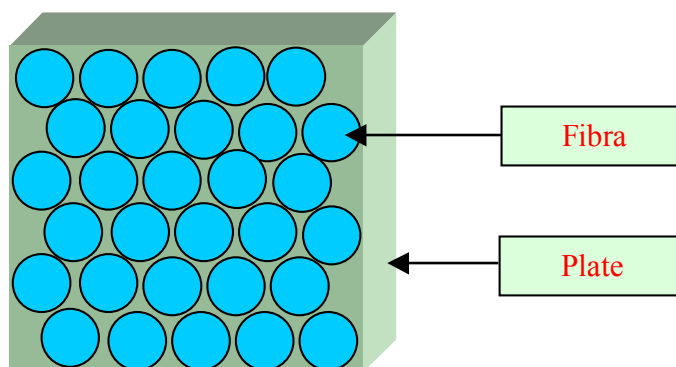


Figura 1.3-Rappresentazione schematica di come sono disposte le fibre all'interno del plate.

L'impiego di questo dispositivo ha molti vantaggi, come vedremo in seguito, soprattutto nei riguardi della diffusione della luce, poiché la costringe a rimanere confinata nella dimensione della fibra ($\sim 10\mu\text{m}$). La luce prodotta permette di percepire immagini di fascio fino 10^5 pps senza effetto memoria, grazie al suo tempo di decadimento di circa 4 ms e alla sua notevole efficienza di 4×10^4 fotoni prodotti per MeV di energia rilasciata.

Sono anche adoperati plate di CsI(Tl), grazie alla sua ottima efficienza luminosa, tempo di decadimento della luce, resistenza alle radiazioni ed elevata densità.

PROPRIETÀ	Chromox	SFOP	CsI(Tl)	NaI(Tl)
Densità [g/cm³]	1.8	3.27	4.51	3.67
λ emissione [nm]	700	550	550	415
Tempo decadimento	~1 min	4 ms	1 μs	0.23 μs
Afterglow	Si	No	No	No
Efficienza [fotoni/Mev γ]	Molto bassa	4×10^4	$5.2-5.6 \times 10^4$	3.8×10^4
Igroscopico	No	No	Leggermente	Si

Tabella.1.2-Caratteristiche degli scintillatori messi a confronto.

1.4.1 LEBI

Il dispositivo LEBI (Low Energy Beam Imager/Identifier) [10] è nato nell'ambito del progetto EXCYT per il monitoraggio di un fascio di ioni radioattivi negli stadi di preaccelerazione. Esso permette di conoscere in tempo reale i vari parametri utili per la caratterizzazione del fascio come la posizione e la misura del suo profilo trasverso.

LEBI permette di ottenere l'immagine e l'identificazione del fascio dalla esplorazione della radiazione emessa dagli ioni radioattivi. Il cuore del dispositivo è uno scintillatore di CsI(Tl) dello spessore di 1 o 2 mm, e da un sottile nastro di mylar, spesso 6 μm , posizionato di fronte al cristallo (vedi fig.1.6). Quando il dispositivo, scintillatore e mylar sono collocati lungo la linea per intercettare il fascio, gli ioni vanno ad impiantarsi su una piccola regione del nastro a causa della loro bassa energia (da 50 a 300 keV). Quando tali ioni decadono, circa metà dei raggi β o γ emessi attraverseranno il nastro e andranno a colpire il cristallo di CsI(Tl) che convertirà l'energia rilasciata in luce di scintillazione. L'immagine prodotta è acquisita mediante una telecamera posta di fronte al cristallo. L'intensità dello spot è in

relazione all'intensità del fascio, all'attività dei nuclei impiantati e al tipo di radiazione ed energia prodotta dal decadimento.

Qui di seguito sono riportate le immagini degli spot acquisiti durante alcuni test effettuati con una sorgente beta di ^{90}Sr .

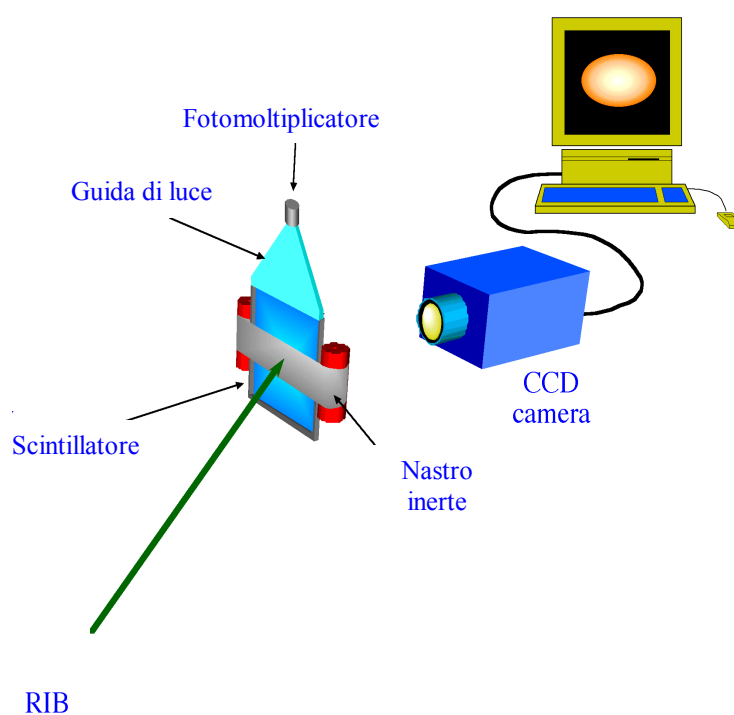


Figura 1.4-Schema del dispositivo LEBI



Figura 1.5-Immagine ripresa con LEBI usando una sorgente ^{90}Sr 31 MBq non collimata.

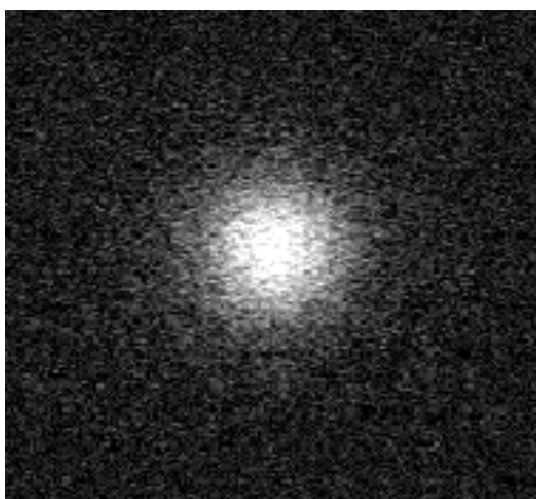


Figura.1.6-Immagine presa con LEBI usando una sorgente ^{90}Sr 31 MBq collimata.

1.4.2 SERSE

Sempre nell'ambito delle basse energie sono stati effettuati dei test con un fascio di $^{16}\text{O}^{4+}$ dall'iniettore SERSE (Superconducting EcR ion SourceE) [11] del ciclotrone, con una energia di 80 KeV e una corrente $I \approx 1 \mu\text{A}$.

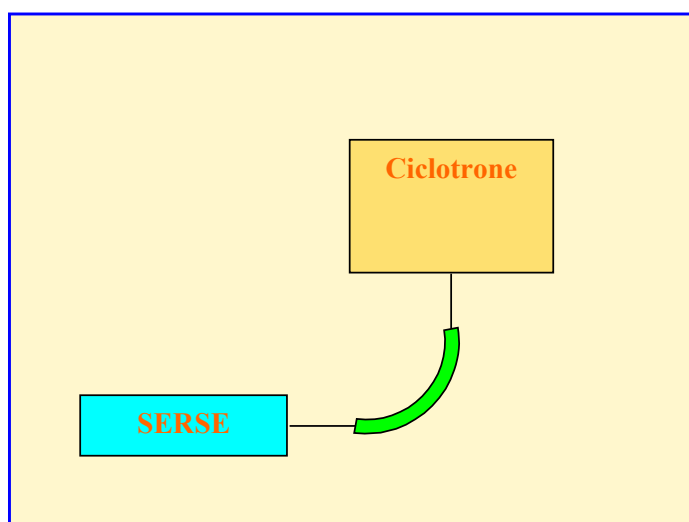


Figura 1.7-Schema SERSE e ciclotrone

In queste condizioni di così basse energie e alte correnti, lo scintillatore CsI(Tl), essendo un materiale isolante, avrebbe raggiunto rapidamente un alto valore di tensione in quanto colpito da un fascio di particelle cariche. Il campo elettrico così prodotto avrebbe perturbato le traiettorie impedendo alle particelle del fascio di colpirlo ulteriormente (vedi fig 1.8). Per risolvere il problema sul cristallo è

stato avvolto un filo conduttore opportunamente collegato a terra così da scaricare le cariche raccolte dal cristallo durante l'irraggiamento.

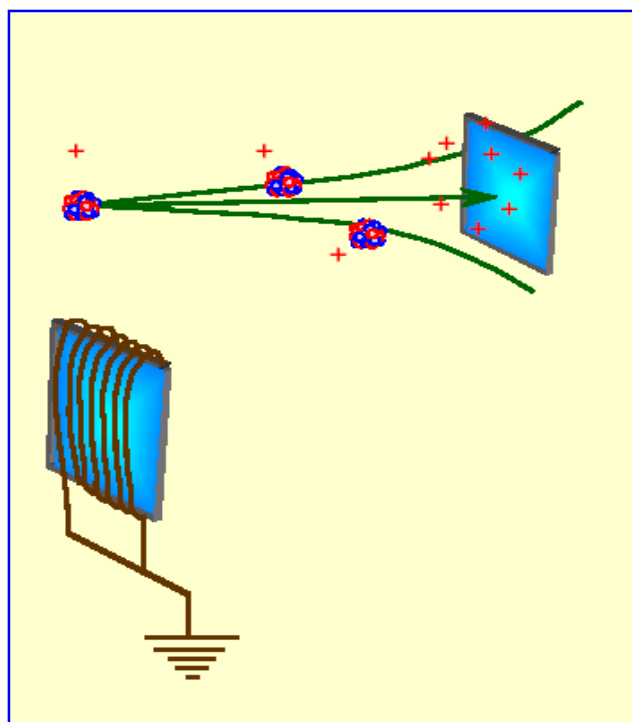


Figura 1.8-Rappresentazione schematica della deviazione delle particelle da parte del cristallo e della soluzione attuata per scaricare le cariche raccolte.

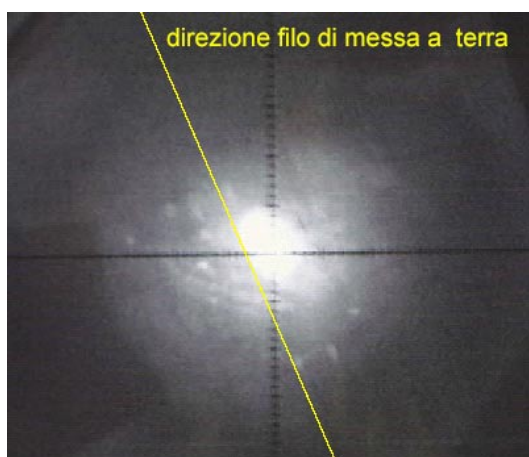


Figura 1.9-Immagine del fascio a energia di 80 KeV con il cristallo di CsI avvolto da un filo conduttore per scaricare le cariche raccolte.

Capitolo 2

2.1 Sistema SFOP-CCD

Il dispositivo di imaging da noi utilizzato è costituito nelle sue linee essenziali da uno schermo scintillante denominato SFOP che, direttamente colpito dalle particelle del fascio che rilasciano la loro energia, emette luce nella regione del visibile. Una telecamera a CCD ad elevata sensibilità che inquadra lo schermo, invia l'immagine prodottasi su un monitor mediante una scheda d'acquisizione immagini (*Frame Grabber*) e allo stesso tempo trasferisce le immagini digitalizzate a un computer per una successiva analisi. Il tutto è corredato da un software di cattura ed elaborazione delle immagini. Con tale sistema è possibile visualizzare in tempo reale la luce prodotta dallo SFOP in seguito all'irraggiamento permettendoci, se si rende necessario, di agire su diversi parametri modificabili dall'esterno. Qui di seguito nella figura è mostrato uno schema della tecnica di imaging appena descritta.

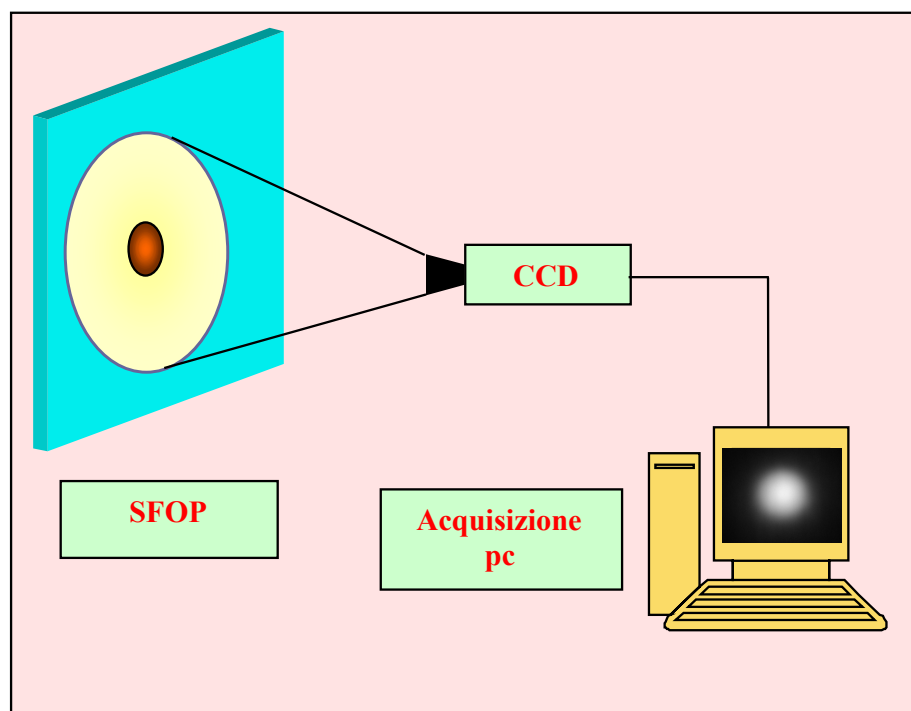


Figura 2.1-Diagramma a blocchi del dispositivo di *imaging*.

2.1.1 SFOP

Lo SFOP [7], acronimo di Scintillating Fiber Optic Plate, è costruito mediante l'assemblaggio di un fascio di fibre scintillanti di vetro drogato al terbio, disposte in geometria esagonale.

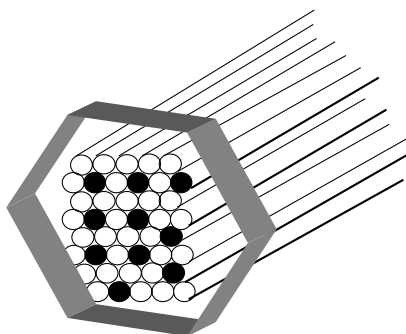


Figura 2.2-Fetta trasversale di un fascio di fibre.

Con questa struttura, la luce prodotta all'interno di ciascuna fibra rimane in buona parte intrappolata nella medesima; inoltre, l'interposizione di fibre nere denominate EMA (extra mural absorber) all'interno dello schermo, comporta l'assorbimento della luce che può eventualmente essere emessa da ciascuna fibra. Conseguenza di ciò è il netto miglioramento della risoluzione spaziale rispetto ad uno schermo convenzionale.

Nelle fig 2.3 e fig 2.4 sono riportate le foto ingrandite dello SFOP adoperato nelle nostre misure, acquisite facendo uso di un microscopio. Risulta evidente la struttura a nido d'ape con cui sono disposte le fibre e gli EMA interposti con regolarità.

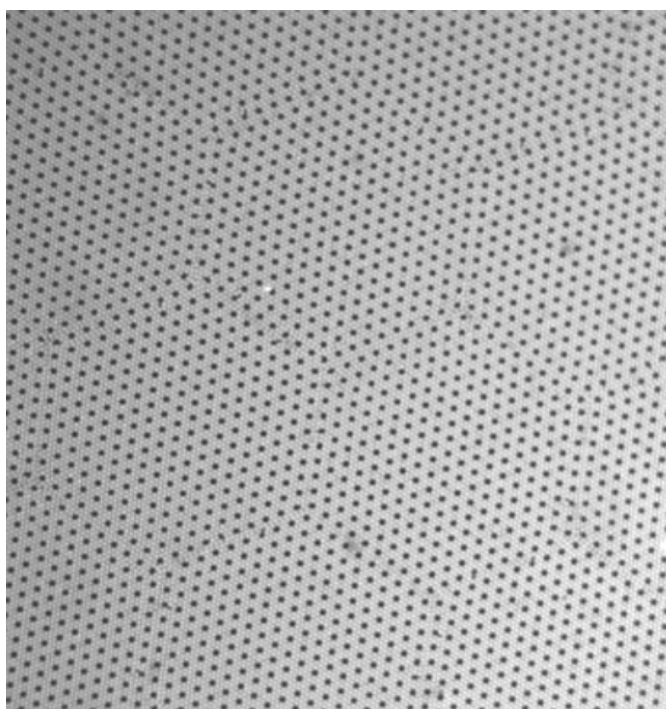


Figura 2.3-Particolare dello SFOP ripreso al microscopio.

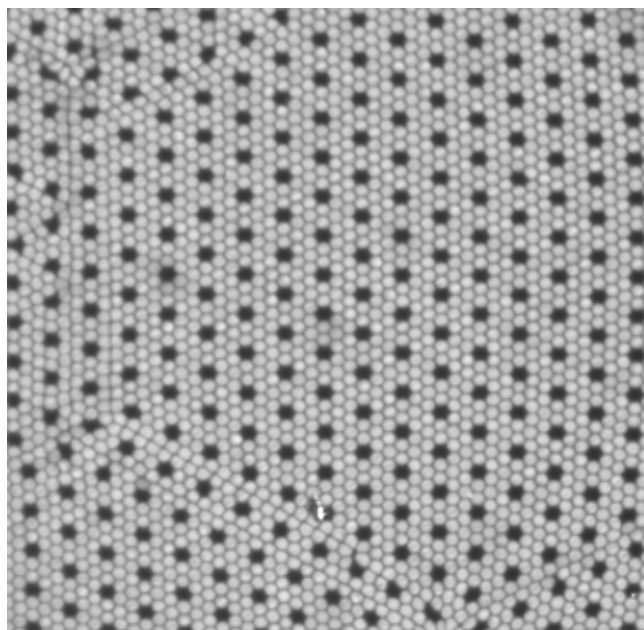


Figura 2.4-Particolare dello SFOP ripreso al microscopio. E' evidente la struttura a nido d'api.

Adesso esporrò più in dettaglio il principio su cui si basa l'intrappolamento della luce all'interno di ciascuna fibra. Questa è costituita da un nucleo interno in vetro drogato con terbio, chiamato “core”, e da un rivestimento trasparente detto “cladding”. La luce che si produce nel processo di scintillazione nella fibra si propaga nel core per riflessioni multiple, procedendo entro un cono di apertura θ_{tr} (angolo di trapping, cioè di “intrappolamento” della luce).

Dalla conoscenza degli indici di rifrazione del core e del cladding è possibile calcolare l'angolo di accettanza (θ), cioè l'angolo massimo

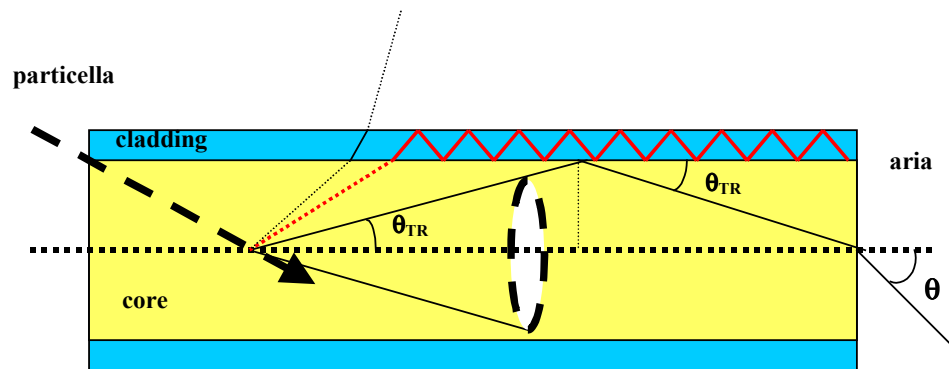


Figura 2.5-Schema di funzionamento della singola fibra scintillante.

Al quale deve essere immesso il raggio luminoso all'interno della fibra in modo che sia garantita la propagazione per riflessioni interne senza rifrazione esterna verso il cladding, mediante la relazione:

$$N.A = n \cdot \sin \theta = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Dove:

- n : indice di rifrazione dell'aria;
- n_1 : indice di rifrazione del core;
- n_2 : indice di rifrazione del cladding;

il prodotto $n \cdot \sin \theta$ è chiamata apertura numerica (N.A). Qualunque raggio di luce che entra con un angolo superiore all'angolo di accettazione, penetra nel cladding e viene disperso.

L'angolo di trapping θ_{tr} e l'angolo di accettazione sono messi in relazione mediante la legge:

$$\frac{\sin \theta}{\sin \theta_{tr}} = \frac{n_1}{n}$$

dove n è l'indice di rifrazione dell'aria ed n_1 è l'indice di rifrazione del core.

Le fibre scintillanti presentano una attenuazione esponenziale della luce trasmessa in funzione della distanza percorsa, in base alla relazione:

$$I(x) = I_0 * e^{-x/\lambda} \quad [2.1.2]$$

dove: x è la distanza percorsa dalla luce e λ è la lunghezza di attenuazione. La lunghezza di attenuazione è la distanza per cui la luce inizialmente prodotta si è attenuata di un fattore e .

Per quanto riguarda la lunghezza di attenuazione delle fibre dello SFOP, si ha un valore di $\lambda \approx 10$ cm [11], quindi in base alla relazione [2.1.2] e tenendo conto dello spessore dello schermo adoperato, pari a 2 mm esso presenta una attenuazione della luce trasmessa al suo interno pari a $\approx 2\%$.

Lo SFOP a nostra disposizione ha geometria quadrata, di dimensioni $25 \times 25 \times 2$ mm³. Le dimensioni della singola fibra sono di 10 μ m in larghezza per 2 mm di lunghezza.

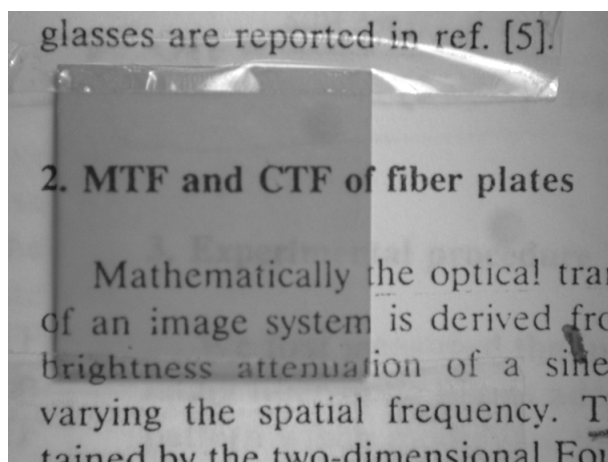


Figura 2.6-Attenuazione della luce nello SFOP.



Figura 2.7-Foto dello schermo SFOP.

L'efficienza luminosa dello SFOP è pari 4×10^4 fotoni per MeV di energia rilasciata, avente il picco d'emissione alla lunghezza d'onda di 550 nm, con un tempo di decadimento di circa 4 ms. Mentre l'efficienza di intrappolamento per luce emessa isotropicamente è di $\approx 3\%$.

Per quanto riguarda il comportamento nei confronti della resistenza alle radiazioni, tali schermi presentano una resistenza soddisfacente, come risulta da test effettuati ai LNS, esponendo lo SFOP a diverse ore di irraggiamento a un fascio di ${}^7\text{Li}$ a 50 MeV, con una corrente di circa 200pA [7] (vedi fig.2.8).

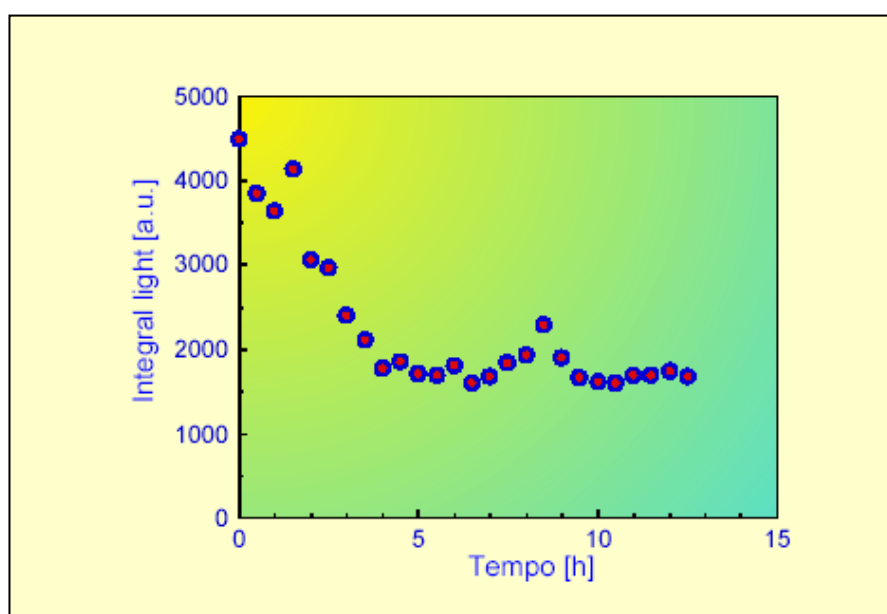


Figura.2.8-Plot rappresentante il danno da radiazioni

Come si nota dal grafico dopo un iniziale diminuzione dell'efficienza luminosa avutasi all'incirca nelle prime tre ore, raggiunge un andamento piuttosto costante.

L'aspetto sfavorevole di tale plate è la sua fragilità ad alte temperature con la possibile rottura. E' quindi necessario evitare di irraggiarlo con correnti intense per tempi prolungati, che possono produrre localmente dei notevoli gradienti di temperatura.

2.1.2 La telecamera

Il CCD a nostra disposizione è un sensore della Watec¹ modello 902H da ½ di pollice, dalla elevata sensibilità. Le sue caratteristiche sono:

- Numero di pixel effettivi 768x576
- Dimensioni singolo pixel 8.6x8.3 µm
- Controllo automatico del guadagno 5-50dB
- Minima illuminazione 3×10^{-4} lux



Figura.2.9-Vista della telecamera e obiettivo

¹ www.Watec.com

2.1.3 La scheda di acquisizione immagini (*Frame Grabber*)

All'interno del nostro computer è stata installata la scheda di acquisizione della Data Translation², modello DT 3155 con formato video CCIR/PAL, dalle seguenti caratteristiche:

- quattro canali di input monocromatici
- risoluzione di 768 O x 576 V
- digitalizzazione 8 bit a 256 livelli di grigio
- velocità di acquisizione 1/25 s
- regione di interesse (ROI) programmabile
- velocità trasferimento dati da 10 a 12 Mb/s

2.2 Acquisizione immagine

Le acquisizioni delle immagini è possibile attraverso l'ausilio di una scheda cattura immagini (*frame grabber*) installata sul computer, gestita da un opportuno software, (Global Lab Image). Il programma

² www.datatraslation.com

consente di sviluppare degli script per automatizzare la procedura d'acquisizione delle immagini. Lo script realizzato si basa sui seguenti comandi:

1. assegna il numero di acquisizioni (frame) da registrare;
2. apre una immagine (file bitmap) come immagine di partenza per permettere al programma di iniziare l'acquisizione;
3. esegue un ciclo (For-Next) di acquisizioni. In tale ciclo il programma acquisisce un'immagine dopo l'altra, pari al numero di frame assegnato al primo punto, tale che l'immagine finale ne è la somma mediata.
4. L'immagine finale è visualizzata sul monitor e successivamente memorizzata su disco

2.2.2 Operazioni sulle immagini

Per l'acquisizione di una immagine si procede nel seguente modo:

- Acquisire una immagine di un dato numero di frame in presenza di fascio, che costituisce il segnale;
- Acquisire una immagine dello stesso numero di frame in assenza di fascio per avere il rumore del CCD (dark-noise);

Le immagini acquisite in entrambi i casi, in presenza di fascio o no, sono file *Bitmap* a 8 bit. Una tale immagine è rappresentata matematicamente da una matrice con un numero di elementi pari a 768×576 pixel, di cui ogni singolo pixel rappresenta il livello medio di grigio che va dal valore 0 (assenza di luce) a 255 (saturazione).

Mediante il software Mathcad è possibile estrarre dai file *bitmap* le rispettive matrici con la quale è poi possibile eseguire le opportune operazioni. Nel caso a noi d'interesse, per l'elaborazione delle immagini, è sufficiente eseguire la sottrazione fra l'immagine, ottenuta in presenza di fascio, e il rumore del CCD avendo cura che entrambe le immagini siano state ottenute con lo stesso numero di *frame*. In questo modo è possibile ripulire l'immagine acquisita dal rumore del CCD (dark-noise) che naturalmente va a sommarsi al segnale ricevuto dallo SFOP, ottenendo l'immagine finale su cui è possibile effettuare, diversi tipi di analisi.

Nel nostro caso l'analisi da effettuare è l'estrazione dei profili integrali proiettati lungo gli assi x e y. Per eseguire tale compito è stato scritto un opportuno script su Mathcad che permette di estrarre la matrice rappresentante l'immagine in esame e di calcolare successivamente i due vettori colonna rappresentanti rispettivamente i profili orizzontali e verticali. Le relazioni utilizzate per tale calcolo sono:

$$V_i = \sum_{j=0}^{575} S_{j,i} \quad V_j = \sum_{i=0}^{767} S_{j,i} \quad (2.1)$$

dove:

- $S_{j,i}$ rappresenta la matrice dell'immagine;
- V_i profilo orizzontale con $i \in [0,767]$
- V_j profilo verticale con $j \in [0,575]$

2.3 L'ingrandimento

Nell'imaging un ruolo di primo piano, oltre alle qualità del CCD, è occupato dall'obiettivo da utilizzare.

Caratteristiche principali come l'ingrandimento e l'apertura numerica dell'obiettivo (N.A) sono essenziali per una buona ripresa, l'uno legato al raggiungimento di dettagli sempre più piccoli e l'altro legato alla quantità di luce che può entrare dall'obiettivo (efficienza geometrica).

Conoscendo la dimensione dei pixel del CCD e l'ingrandimento dell'obiettivo possiamo conoscere la dimensione equivalente del singolo pixel, quantità importante nella determinazione della risoluzione ottenibile del sistema, CCD-obiettivo.

Il valore della dimensione equivalente del pixel è data dal seguente rapporto:

$$D_{eq} = \frac{D_{pixel-CCD}}{I_o}$$

dove:

D_{eq} : dimensione pixel equivalente

$D_{\text{pixel-CCD}}$: dimensione pixel del CCD

I_o : ingrandimento obiettivo

In accordo col teorema di Nyquist sul campionamento, la risoluzione massima, espressa in linee/mm, è data da:

$$R_{\text{max}} = \frac{1}{2 * D_{eq}} \quad [2.3.3]$$

Per frequenze spaziali superiori a R_{max} il sistema ottico non è più in grado di discriminare due linee adiacenti e si verificano dei fenomeni di aliasing [12].

2.4 Test preliminari con la telecamera

Prima di effettuare le misure con lo SFOP sono stati condotti dei test con la telecamera e l'obiettivo, al fine di caratterizzare il sistema di *imaging* e le condizioni d'operatività più adatte per le misure.

La telecamera è stata equipaggiata con un obiettivo macro della Rodenstock da 0.3x. Con tale configurazione si è in grado di inquadrare una porzione dello SFOP di dimensioni 21x16 mm con un CCD da ½ pollice, come garantisce la casa costruttrice dell'obiettivo. Esso deve essere posizionato ad una distanza di 90 mm dal piano dello SFOP, affinché sia nella corretta posizione di messa a fuoco.

In queste condizioni operative si è vincolati a lavorare ad ingrandimento fisso, cioè l'ingrandimento dell'obiettivo, trovandoci così in una situazione di limitata flessibilità d'uso. Pertanto è stata eseguita una procedura per determinare aree inquadrabili di differenti dimensioni con il sensore CCD da ½ pollice e l'obiettivo da 0.3x.

Per ottenere ingrandimenti maggiori a nostra disposizione, telecamera con annesso obiettivo sono stati installati su di un microposizionatore che garantisce spostamenti con precisione dell'ordine di 10 µm. Con l'ausilio di tale strumento si è proceduto ad avvicinare il sistema costituito da telecamera e obiettivo, all'oggetto investigato, una porzione di carta millimetrata collocata su di un piano perpendicolare all'asse dell'obiettivo. Diminuendo la distanza fra obiettivo e carta millimetrata, l'immagine va fuori fuoco, perché essa va a formarsi dietro il piano focale della lente. Sono stati quindi utilizzati degli anelli di prolunga inseriti tra obiettivo e telecamera, permettendo così all'immagine di formarsi nella esatta posizione e ottenendo allo stesso tempo un ingrandimento maggiore con l'immagine correttamente messa a fuoco (vedi fig 2.10).

Tale procedura ha consentito di determinare diversi fattori d'ingrandimento in funzione della lunghezza degli anelli inseriti e delle distanze obiettivo-SFOP. In questo modo sono state realizzate

diverse configurazioni disponibili per i test da realizzare. Esse sono state utilizzate soprattutto nella fase preparatoria, cioè durante le procedure di allineamento del fascio con i collimatori (vedi tab 2.1).

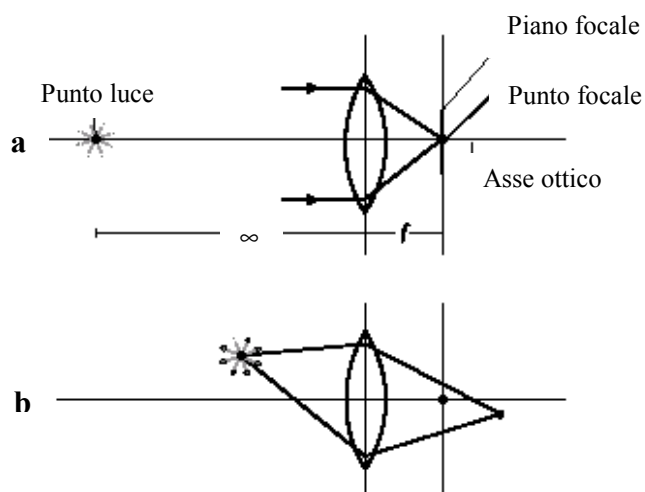


Figura 2.10- Schematizzazione del principio delle lenti. In (a) l'immagine si forma esattamente sul piano focale. In (b) l'immagine si forma posteriormente il piano focale, da qui l'esigenza di aumentare la distanza fra chip e lente.

Obiettivo Macro Rodenstock 0.3X		
DISTANZA OBIETTIVO- PLATE mm	TUBO DI PROLUNGA mm	AREA INQUADRATA mm²
90	/	21X16
28	30	4.7x3.6
25.5	35	4.1x3.1
24	40	3.5x2.7
22	45	3.1x2.44
21	50	2.87x2.23

Tabella 2.1-Tabella rappresentativa delle aree inquadrabili del CCD in funzione degli anelli di prolunga e della distanza obiettivo-plate.

2.5 Calibrazione

La calibrazione del sistema telecamera-obiettivo, nelle differenti configurazioni precedentemente esposte, è un parametro indispensabile al fine di misurare il diametro del microfascio. Per ogni ingrandimento è necessario misurare la rispettiva calibrazione, e ciò viene effettuato acquisendo le immagini di un piccolo foglio di carta millimetrata disposta sul piano perpendicolare all'asse della telecamera, avendo ovviamente cura di posizionare l'obiettivo e carta millimetrata nelle medesime condizioni operative, così come esposto

nel paragrafo precedente. In questa maniera, facendo uso del riferimento apportato dalla carta millimetrata, si ricava il fattore di calibrazione riportato in $\mu\text{m}/\text{pixel}$ per gli assi orizzontale e verticale.

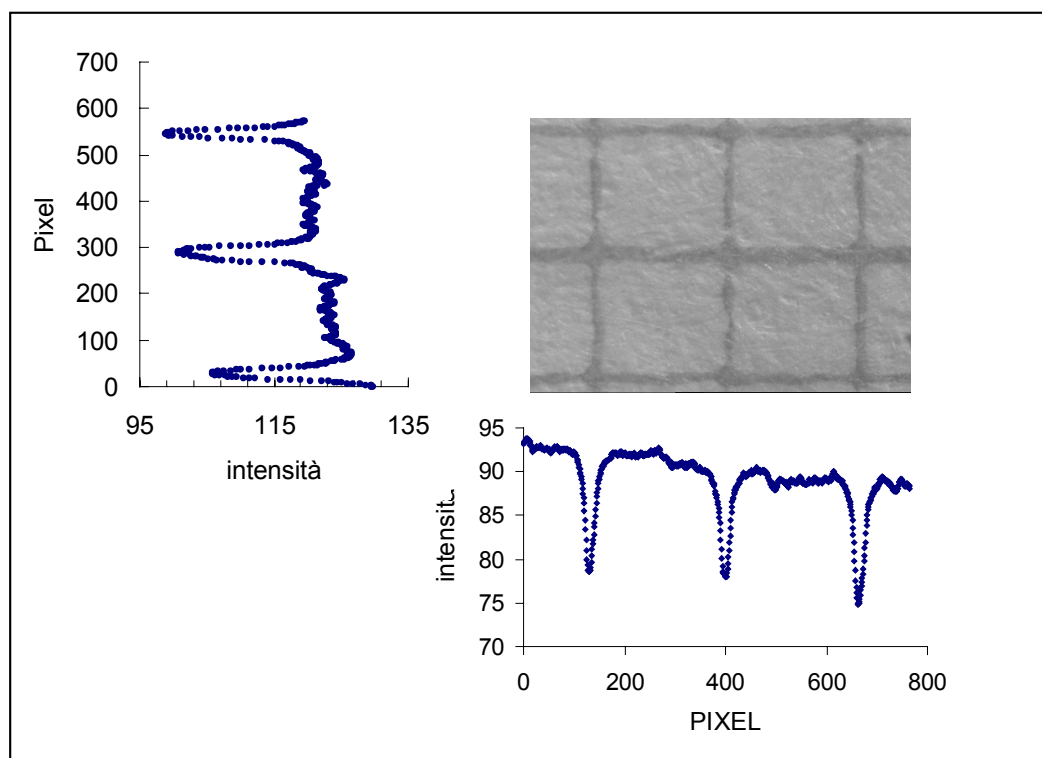


Figura 2.11-Schema delle proiezioni lungo gli assi x e y.

Al fine di procedere alla suddetta operazione, ho estratto i profili integrali dell'immagine della carta millimetrata lungo i due assi (vedi fig 2.12), facendo uso del software Mathcad, mediante la procedura descritta nel paragrafo 2.2.2. Da ciascun profilo così estratto, ho eseguito il fit gaussiano di equazione:

$$y = a + b * e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^2 \right]}$$

per i due picchi alle estremità.

Ottenute le coordinate dei centroidi, effettuo la differenza tra le posizioni espressa in micron e la divido per il numero dei pixel presenti tra i due picchi in questione. I risultati ottenuti sono stati riportati nella tabella sottostante.

Distanza Obiettivo- plate mm	Calibrazione orizzontale µm/pixel	Calibrazione verticale µm/pixel
21	3.74	3.87
22	4.11	4.24
24	4.65	4.77
25.5	5.26	5.42
28	6.11	6.30
90	27.25	27.90

Tabella 2.2- Dati della calibrazione in funzione della distanza obiettivo-SFOP

2.6 Risoluzione

Nel contesto dell'imaging la risoluzione è un elemento indispensabile nella valutazione di una qualunque immagine, così si sono sviluppati diversi metodi d'indagine a tale scopo. Dei diversi esistenti i più usati sono due:

- Misure di MTF [12]
- Ispezione visuale con Resolution Target USAF 1951³

La prima di queste tecniche, Modulation Transfer Function, gioca un ruolo importante come misura diretta e quantitativa della qualità dell'immagine. Descrive l'abilità del sistema ottico a trasferire i vari livelli di dettaglio dall'oggetto all'immagine, vale a dire descrive la struttura dell'immagine in funzione delle frequenze spaziali mediante una analisi di Fourier.

Di tale tecnica non è stato possibile eseguirne alcuna misura, pertanto si è fatto uso del Resolving Power Test USAF 1951 per avere una stima del grado di separabilità dei dettagli.

2.6.1 Resolution Target USAF 1951

Il protocollo dell'aviazione americana, conosciuto come Resolving Power Test USAF 1951, consiste in una serie di patterns

³ www.edmundoptics.com

decrementi in dimensioni con un ampio range per coprire le richieste del sistema sotto esame. In un target con tali patterns vi sono diversi gruppi, ogni gruppo consiste in sei elementi progressivamente più piccoli. Gli elementi all'interno di un gruppo sono numerati da 1 a 6. Con il loro utilizzo è possibile avere una indicazione della risoluzione dall'esame del gruppo ed elemento più nitidamente risolto mediante la relazione:

$$x=2^{\text{Gruppo}+(\text{elemento}-1)/6} \quad [2.3.1]$$

dove x indica proprio le linee “risolte” per mm. Qui di seguito è riportata una tabella delle varie risoluzioni ottenibili con tali test target in funzione del numero di gruppo e dell'elemento, in più una immagine delle resolution target USAF 1951.

Numero di linee / mm in USAF Resolving Power Test Target 1951									
Group Number									
Element	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
1	0.250	0.500	1.00	2.00	4.00	8.00	16.00	32.0	64.0
2	0.280	0.561	1.12	2.24	4.49	8.98	17.95	36.0	71.8
3	0.315	0.630	1.26	2.52	5.04	10.10	20.16	40.3	80.6
4	0.353	0.707	1.41	2.83	5.66	11.30	22.62	45.3	90.5
5	0.397	0.793	1.59	3.17	6.35	12.70	25.39	50.8	102.0
6	0.445	0.891	1.78	3.56	7.13	14.30	28.50	57.0	114.0

Tabella n° 2.3-La tabella riporta la risoluzione in linee/mm in funzione del gruppo e dell'elemento.

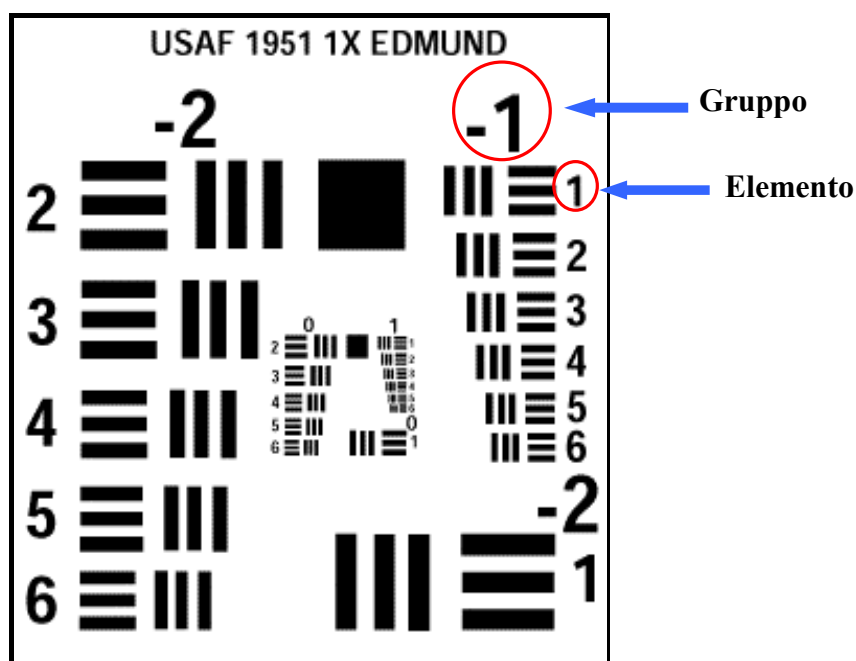


Figura 2.12-Vista del target di risoluzione

2.6.2 Risoluzione del sistema

Attraverso dei test su banco ottico ho eseguito una serie di acquisizioni con il sistema telecamera-obiettivo, al fine di avere una stima sulla risoluzione raggiunta dal nostro sistema. Per le suddette misure ho utilizzato:

- una lampada a luce diffusa;
- un campione del Resolving Power Test Chart USAF 1951

Il campione è stato collocato su un supporto posizionato di fronte alla telecamera, con la sorgente di luce posizionata sul retro. L'ottica è

stata impostata nella configurazione di massimo ingrandimento al fine di massimizzarne la risoluzione spaziale. In queste condizioni sono state acquisite alcune immagini che hanno consentito di valutare quale fosse il gruppo ed elemento più piccolo nel quale è possibile distinguere le righe scure da quelle chiare.

Dall'ispezione dell'immagine acquisita (vedi fig.2.12) si nota che il gruppo n°5 ed elemento n°1 è sufficientemente risolto, fornendo una risoluzione, come da tabella 2.3, pari a 32 linee/mm, cioè $\sim 31\mu\text{m}$.

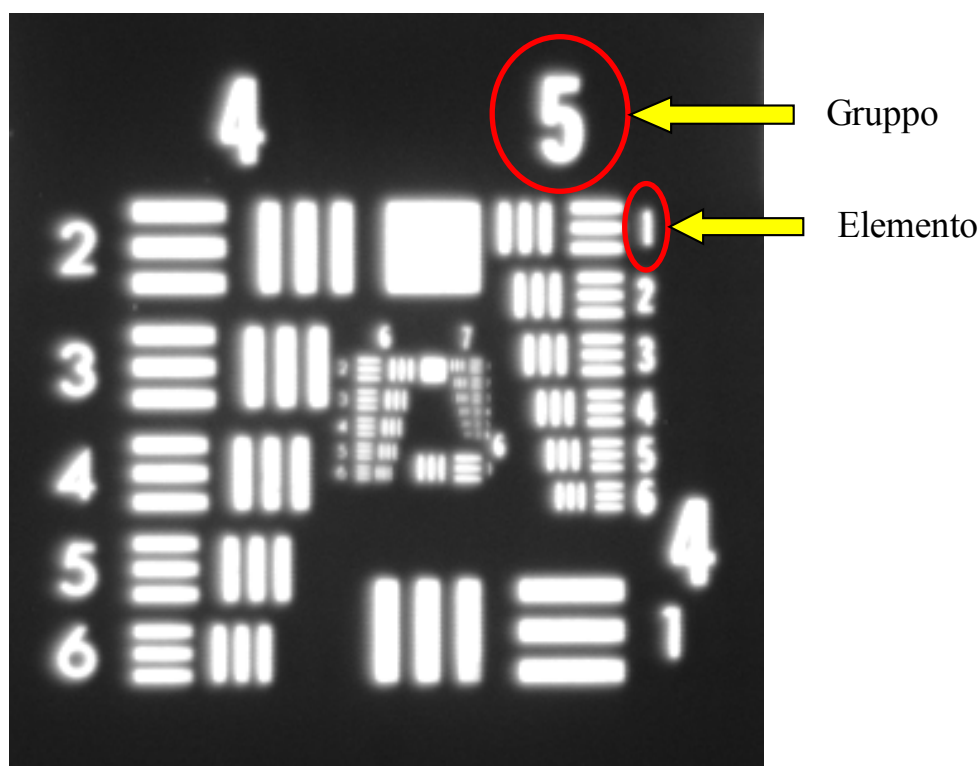


Figura 2.13-Immagine acquisita col test chart per la risoluzione del sistema.

Capitolo 3

3.1 Dispositivo SBBS

Fra i dispositivi di diagnostica, utilizzando gli scintillatori come mezzi di rivelazione, insieme a FIBBS e GFIBBS, si colloca il dispositivo SBBS (Scintillator Based Beam-Sensor) realizzato ai LNS [13], che come vedremo più avanti, risulta particolarmente efficace come strumento di microdiagnostica.

Il dispositivo è costituito da uno scintillatore di CsI(Tl) accoppiato ad un fotomoltiplicatore compatto della Hamamatsu. Di fronte allo scintillatore viene posta una maschera di grafite di spessore sufficiente ad arrestare il fascio, con una fenditura larga 0.5 mm, tutto il sistema viene fatto scorrere lungo una data direzione sul piano trasverso del fascio, così da ricostruirne il profilo monodimensionale trasverso. Lo scintillatore è un cristallo di CsI(Tl) di dimensioni 1 x 1 x 0.5 cm³. La luce di scintillazione prodotta quando viene colpito dal fascio, è convogliata tramite una guida di luce in plexiglas sulla finestra del fotomoltiplicatore, un Hamamatsu H5773, di dimensioni 5 x 2.2 x 2.2 cm³. Il segnale prelevato dall'uscita è suddiviso in due canali: in uno è inviato ad un convertitore corrente-tensione e da qui acquisito da un ADC, nell'altro è inviato direttamente a un discriminatore e a un successivo sistema di conteggio per la misura

della corrente in particelle al secondo. Il dispositivo lavora così in modalità di corrente nel primo caso e in modalità a impulsi nel secondo.

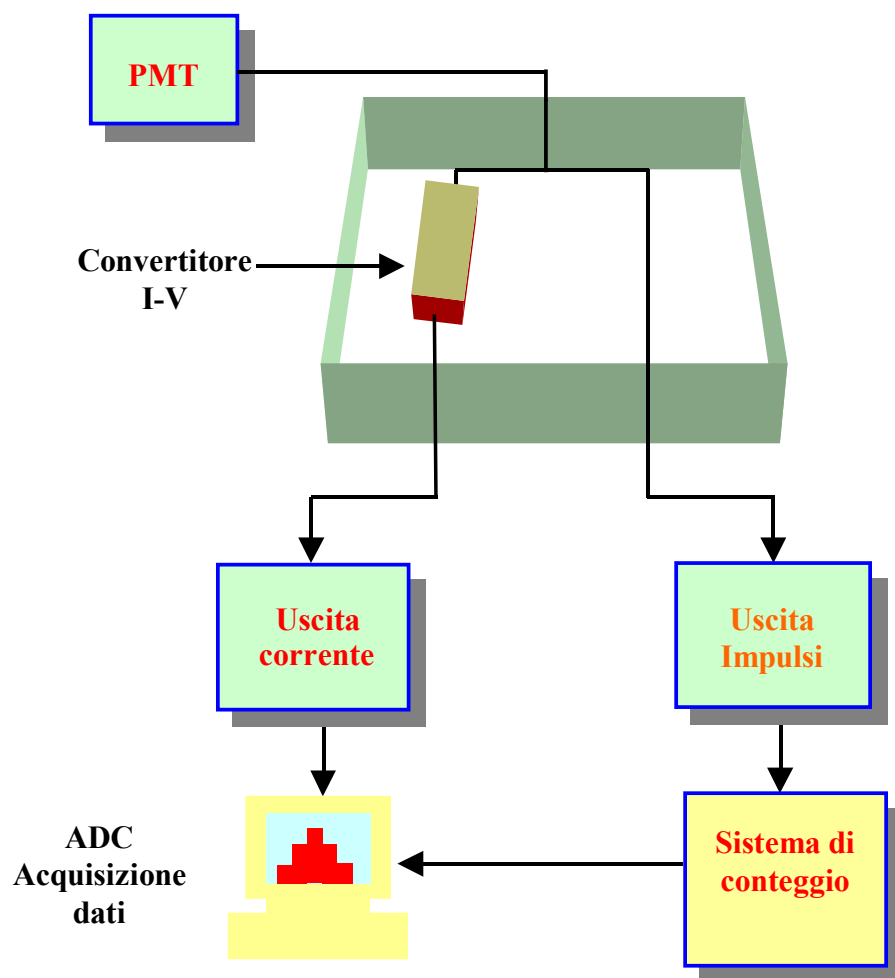


Figura 3.1-Schema dell'elettronica annessa al fotomoltiplicatore

Il segnale inviato al convertitore I/V consente di fare misure della corrente media del fascio, per tutti quei valori che consentono di produrre un segnale discriminabile dal livello del rumore. Mentre, nell'altro caso, è inviato direttamente al discriminatore solo per correnti non superiori a 10^5 pps, in quanto ad intensità maggiori si potrebbero verificare sovrapposizioni tra due impulsi contigui, a causa della lunga vita media della luce prodotta dal CsI(Tl), 10^{-6} sec. L'utilizzo del discriminatore con la soglia settata opportunamente, consente di selezionare solo gli impulsi di interesse e rigettare di conseguenza il fondo.

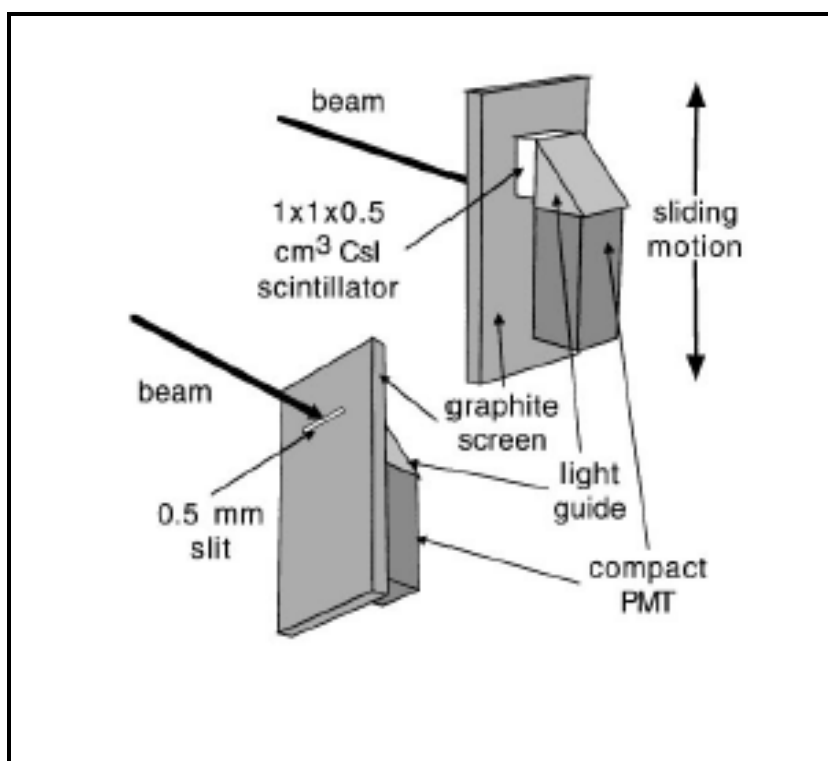


Figura 3.2-Schema del dispositivo SBBS sviluppato ai LNS.

Per un ampio intervallo di energie, lo spessore di grafite è capace di arrestare completamente il fascio di ioni. L'uso della guida di luce a forma di prisma, permette di raccogliere la luce di scintillazione a 90° rispetto al fascio incidente, così che il fotomoltiplicatore può facilmente essere posto su di un supporto mobile guidato da un motore passo-passo di elevata precisione. Il fotomoltiplicatore è totalmente protetto dal fascio dietro lo schermo di grafite, e quando deve essere installato sotto vuoto, all'interno della linea di fascio, l'uso di una lastra metallica consente di favorire la dispersione di calore.

Il dispositivo risulta essere lineare anche ad intensità molto basse (vedi fig 3.3 e fig 3.4). Difatti se entrambi i segnali in uscita dal fotomoltiplicatore vengono utilizzati al disotto di 10^5 pps, è possibile eseguire una autocalibrazione del dispositivo, in termini di resa di luce media in funzione del numero di particelle rivelate per secondo. Ad intensità ancora minori si opera soltanto in regime di conteggi.

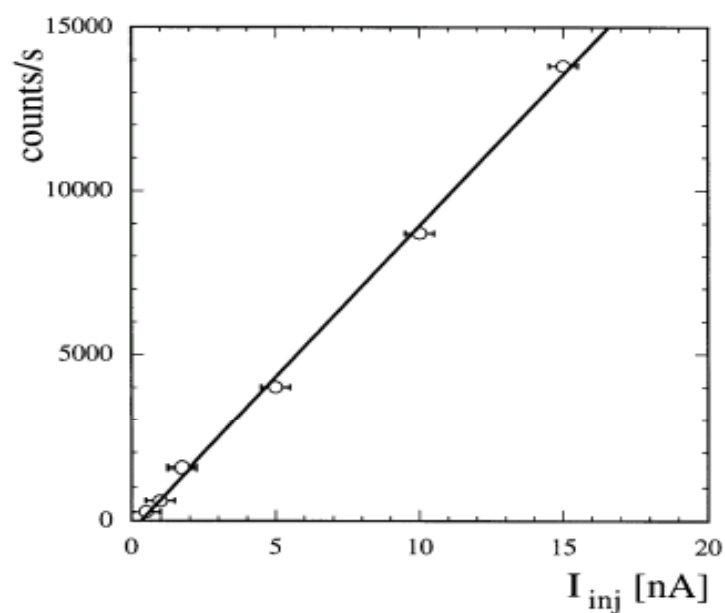


Figura.3.3-Nel grafico è riportato il tasso di conteggio in una data posizione del sensore in funzione della corrente iniettata nell'acceleratore I_{inj} . Non è possibile riportare la corrente effettiva perché non misurabile.

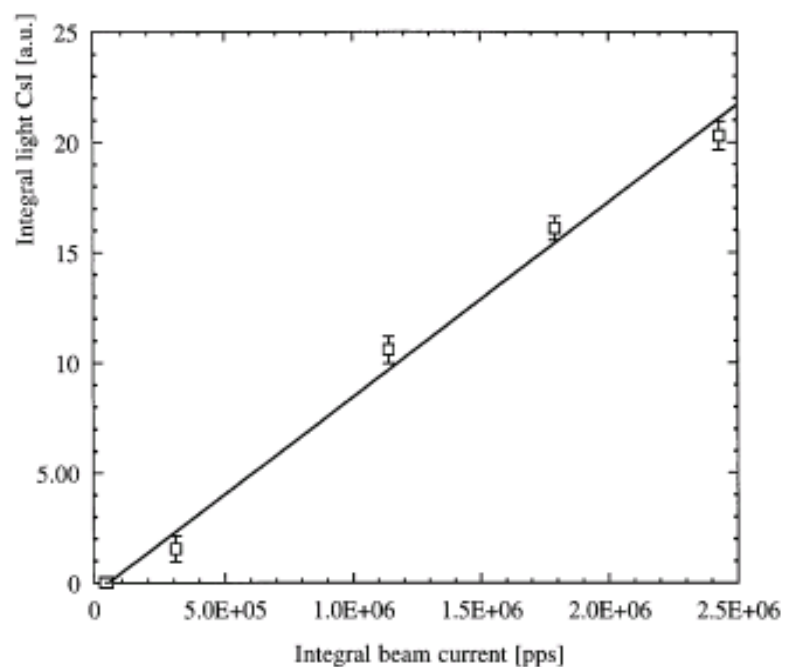


Figura 3.4- Nel grafico è rappresentata l'autocalibrazione del sistema, il segnale in funzione del tasso di conteggio per cinque valori d'intensità del fascio.

Con SBBS è stato eseguito anche un test a bassa energia con fascio di ^{12}C a 50 KeV: esso è stato installato all'uscita dell'iniettore del Tandem. Questo test ha mostrato che il dispositivo è efficace anche per energie molto basse. In questo caso la presenza della grafite è molto importante, infatti senza collegamento a terra lo scintillatore, essendo un isolante elettrico, avrebbe raggiunto rapidamente un alto valore di tensione in quanto colpito da un fascio di particelle cariche. Il campo elettrico così prodotto avrebbe perturbato le traiettorie impedendo alle particelle del fascio di colpirlo (vedi figura 1.8).

I test condotti hanno fatto vedere che l'uso di scintillatori accoppiati con un fotomoltiplicatore compatto rende il dispositivo economico e semplice, e l'abbinamento col cristallo di CsI(Tl) apre interessanti prospettive nei regimi a bassa intensità di corrente e bassa energia.

Le principali caratteristiche del SBBS sono brevemente elencate sotto:

- calibrazione assoluta;
- alta affidabilità e linearità nella risposta;
- elevato rapporto segnale-rumore nel modo in corrente;
- nel modo conteggio è affetto in pratica solo da errore statistico;

- insensibilità intrinseca al rumore di origine elettromagnetica, essendo esso sensibile all'energia delle particelle del fascio e non alla carica elettrica;
- facilità d'uso;
- in linea di principio non è affetto da alcuna soglia energetica;
- basso costo.

Il dispositivo intercetta ed arresta completamente il fascio durante la misura producendo un segnale luminoso che è maggiore rispetto a qualunque altro dispositivo di scintillazione sottile. Inoltre, la combinazione della resa di luce, lunghezza d'onda della luce prodotta, bassa igroscopicità e basso costo del CsI(Tl) indica che con questa tecnica si possono raggiungere ottime prestazioni.

3.2 Il cristallo di CsI(Tl)

Il processo di scintillazione rimane uno dei metodi più utili disponibili per la rivelazione e la spettroscopia di molti tipi di radiazione [14].

Il materiale di scintillazione ideale dovrebbe possedere le seguenti proprietà:

- 1) dovrebbe convertire l'energia cinetica delle particelle cariche in luce rivelabile con un'alta efficienza di scintillazione;
- 2) questa conversione dovrebbe essere lineare, la resa in luce dovrebbe essere proporzionale all'energia depositata;
- 3) il mezzo dovrebbe essere trasparente alla lunghezza d'onda della sua stessa emissione per una buona raccolta di luce;
- 4) il tempo di decadimento della luminescenza indotta dovrebbe essere breve, in modo da poter sostenere tassi di conteggio elevati senza sovrapposizione apprezzabile tra segnali consecutivi;
- 5) il materiale dovrebbe essere di buona qualità ottica, e costruito in forme e dimensioni abbastanza grandi per essere d'interesse come rivelatore;
- 6) il suo indice di rifrazione dovrebbe essere vicino a quello del vetro per consentire un accoppiamento efficiente della luce di scintillazione con un tubo fotomoltiplicatore.

Nessun materiale possiede contemporaneamente tutte queste caratteristiche e la scelta di un particolare scintillatore è sempre un compromesso tra i diversi fattori. Lo scintillatore usato, nel nostro caso, è uno CsI(Tl) monocristallino con la caratteristica di propagare

in modo uniforme la luce permettendo nel contempo un ottimo accoppiamento con una guida di luce.

L'efficienza di scintillazione è pari $5,2 \times 10^4$ fotoni per MeV di energia rilasciata, con lunghezza d'onda d'emissione di 565 nm (vedi fig-3.6). Per quanto riguarda le sue caratteristiche chimico-fisiche, esso è un materiale tenero e malleabile che è possibile tagliare in sottili fogli e piegare in varie forme senza fratturarlo. E' leggermente igroscopico e piuttosto resistente al danneggiamento da radiazioni. Il tempo di decadimento della luce di scintillazione è di circa 1 μ s senza apprezzabili bagliori residui. Nella tabella 3.1 sono riportate le sue caratteristiche.

Tipo di cristallo	CsI(Tl)
Densità [g/cm ³]	4.51
Temperatura di fusione [°K]	894
Coefficiente di espansione termica [K ⁻¹]	54×10^{-6}
Igroscopico	leggermente
Lunghezza d'onda alla massima emissione [nm]	565
Indice di rifrazione alla massima emissione	1.79
Tempo di decadimento [μ s]	1
Bagliore (afterglow) (dopo 6 ms) [%]	0.5-5
Efficienza [fotoni/MeV c]	$5.2-5.6 \times 10^4$

Tabella 3.1-Proprietà dello ioduro di cesio

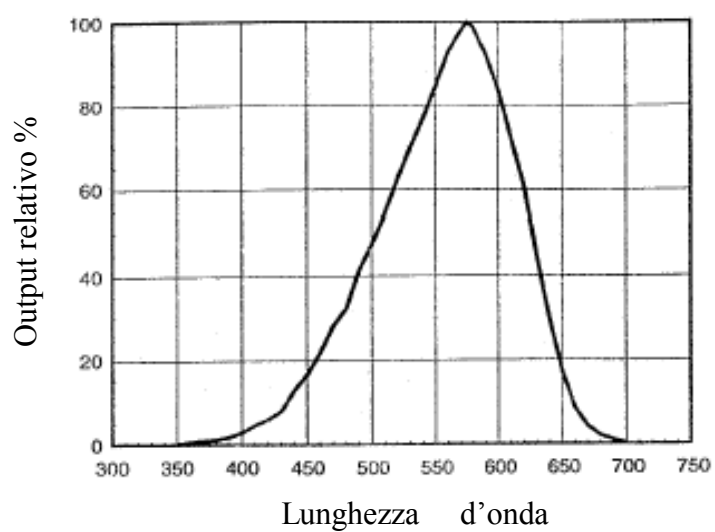


Figura 3.6- Risposta del cristallo in funzione della lunghezza d'onda.

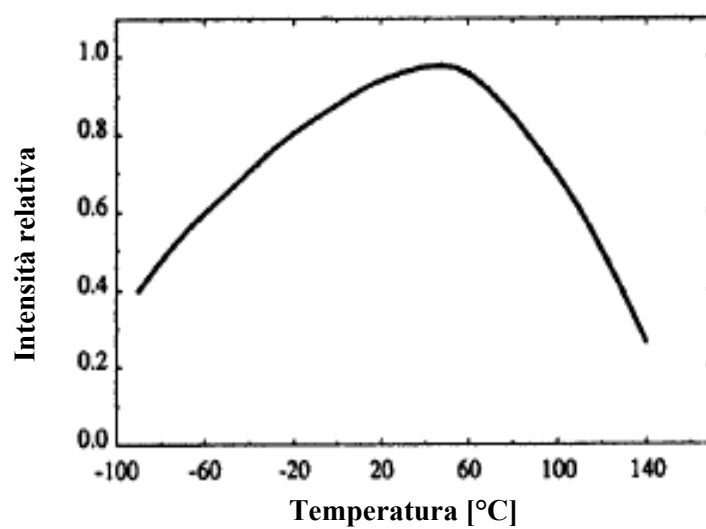


Figura 3.7- Risposta del Csl(Tl) in funzione della temperatura.

Capitolo 4

4.1 DLP (Litografia profonda con protoni)

Durante gli ultimi decenni l'uso della luce nella trasmissione dei dati e numerose altre applicazioni industriali hanno aperto differenti campi di ricerca. La costruzione di strutture micro-ottiche come matrici bidimensionali di micro-lenti sferiche, micro-prismi, o strutture meccaniche di posizionamento per fibre ottiche, gioca un ruolo chiave nella realizzazione di dispositivi optoelettronici, per applicazioni che vanno dalla trasmissione dati alla medicina.

Tutt'oggi esistono differenti tecnologie che permettono la realizzazione e fabbricazione di tali componenti di alta qualità, e una di esse è la Litografia Profonda con Protoni (DLP). Essa consiste nell'irraggiamento di un substrato di PMMA (Poli (Metil Metacrilato)) con un fascio di protoni di energia compresa tra 10 MeV e 20 MeV, collimato tramite maschere circolari di diametro compreso tra 20 μm e 1 mm, in una ben determinata regione del campione, seguita da uno sviluppo della zona irraggiata con un solvente selettivo o tramite una espansione di volume della zona colpita prodotta tramite diffusione di vapori di monomeri organici. Se necessario entrambi i

processi possono essere applicati a differenti regioni dello stesso campione.

Il processo è basato sul fatto che il campione irraggiato con protoni, formato da lunghe catene polimeriche di alto peso molecolare, subisce una rottura in tale struttura. Come conseguenza il peso molecolare medio della zona sottoposta a irraggiamento sarà ridotto e saranno creati radicali liberi, modificando le proprietà chimico-fisiche rispetto a quelle dell'intero campione.

La zona irraggiata avrà una più alta solubilità permettendo di conseguenza l'incisione del campione in modo selettivo, usando solventi speciali.

Nella fig.4.1 è riportato uno schema delle fasi relative alla realizzazione di dispositivi mediante il processo di asportazione delle regioni irraggiate, col quale è possibile realizzare matrici di microcavità per l'alloggiamento di fibre ottiche, microspecchi, microprismi e dispositivi meccanici di precisione per gli allineamenti delle parti ottiche e delle fibre.

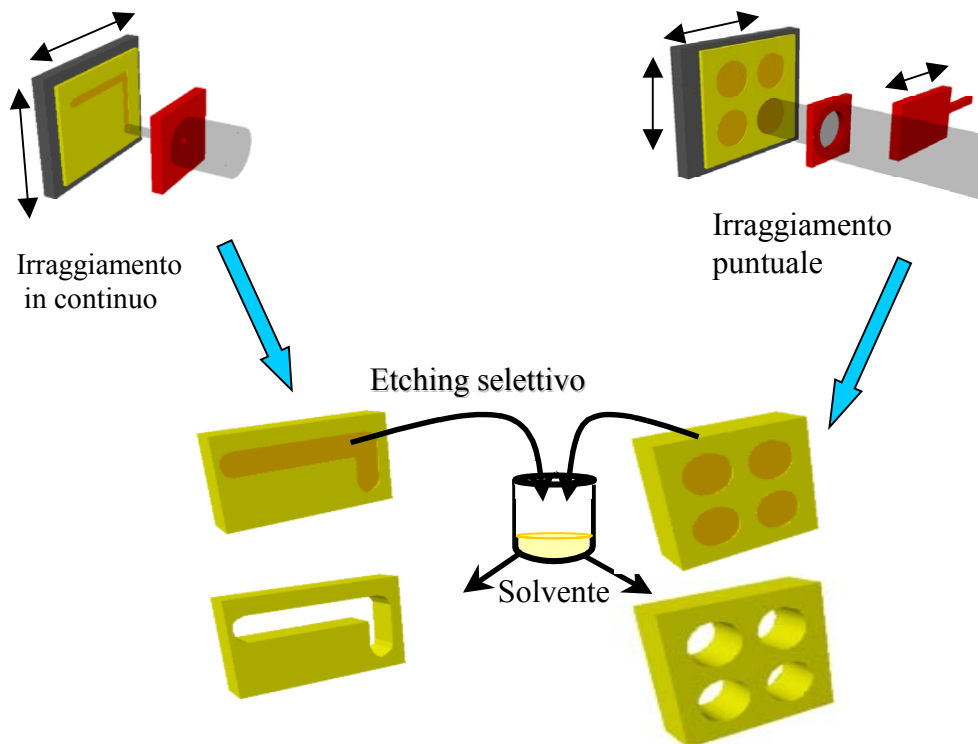


Figura 4.1-Processi base per la fabbricazione di matrici di microcavità per l'alloggiamento delle fibre ottiche e di strutture con superfici di elevata qualità ottica, mediante il processo di asportazione con solvente delle parti esposte al fascio di protoni.

Nella realizzazione di tali microfori utili per il posizionamento delle fibre ottiche, l'interazione del fascio di protoni col PMMA fa sì di produrre incavi con profilo conico, molto utile per l'alloggiamento delle fibre. Tale profilo conico dei posizionatori nasce dallo straggling angolare dei protoni, la dimensione del foro sulla superficie dove fuoriescono i protoni sarà maggiore di quella di entrata, ottenendo così il profilo conico (vedi fig-4.2).

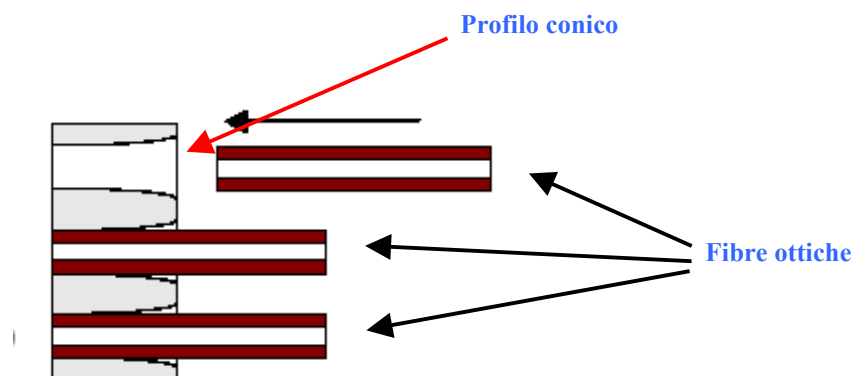


Figura 4.2-Inserimento delle fibre ottiche negli incavi di precisione.

In fig.4.3 sono mostrate le fasi per la produzione delle microlenti sferiche.

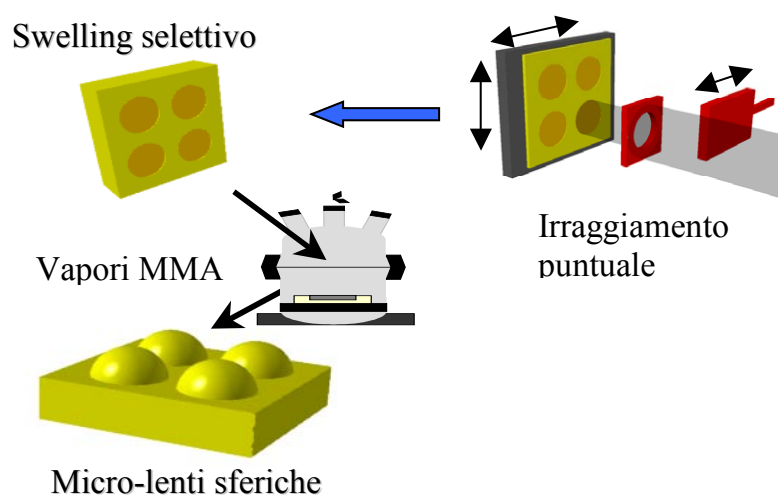


Figura 4.3 -Processi base per la fabbricazione di microlenti sferiche, mediante diffusione di monomeri (MMA) nella zona irraggiata

La zona colpita dal fascio presenta un peso molecolare ridotto rispetto al resto del campione e questo fa sì che la velocità di diffusione di piccole molecole di monomeri, sia molto maggiore rispetto alla parte non esposta al fascio.

Ciò porta ad una espansione di volume delle regioni irraggiate, che assumono una conformazione con profilo sferico. I monomeri che causano tale rigonfiamento si legano tra l'altro con le valenze dovute alla produzione dei radicali liberi, realizzando delle microlenti sferiche permanenti. Attualmente queste hanno un diametro pari a 200 μm , ma se si disporrà di un sistema di diagnostica in grado di effettuare una misura della dose impiantata con estrema accuratezza, sarà possibile ridurre il diametro a 125 μm , che è la dimensione standard delle fibre ottiche adoperate per trasmissione dati. Analogo discorso vale per la dimensione delle microcavità.

In fig.4.4 sono riportate le foto di alcuni dispositivi ottenuti con la tecnica DLP [15].

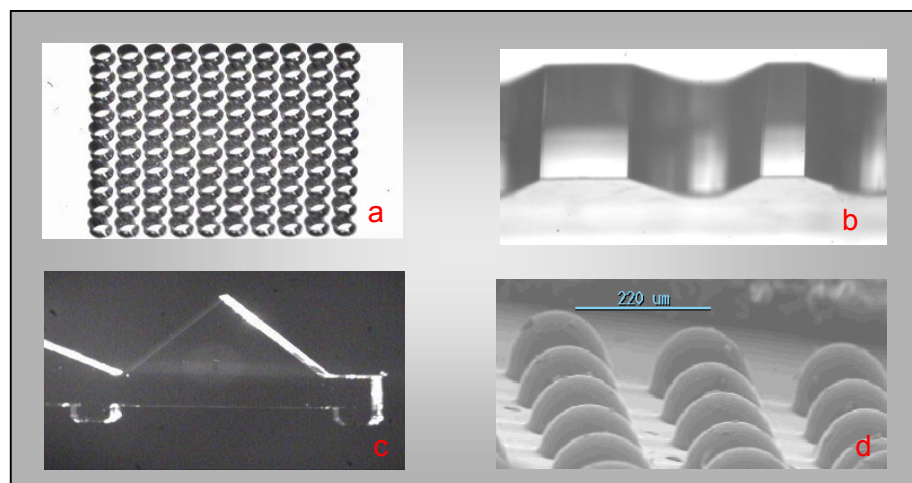


Figura 4.4 -Componenti micro-ottici realizzati con la tecnica DLP. Da sinistra: matrice di microcavità per l'inserimento di fibre ottiche (a), micro-lenti cilindriche (b), microprismi (c) e micro-lenti sferiche (d).

4.2 Set up d'irraggiamento

In figura. 4.5 è schematizzato il set-up sperimentale relativo al processo inerente l'esposizione del PMMA al fascio di protoni. La dimensione del fascio viene gradualmente ridotta utilizzando due collimatori posti in successione. Una prima apertura, dalla superficie di 1 mm^2 , permette di fare passare solo una parte del fascio. L'apertura finale è una maschera in nichel spessa 260 micron. Tale ultima maschera è costruita mediante tecniche litografiche con un array di aperture circolari che vanno dai 20 micron a 1 mm.

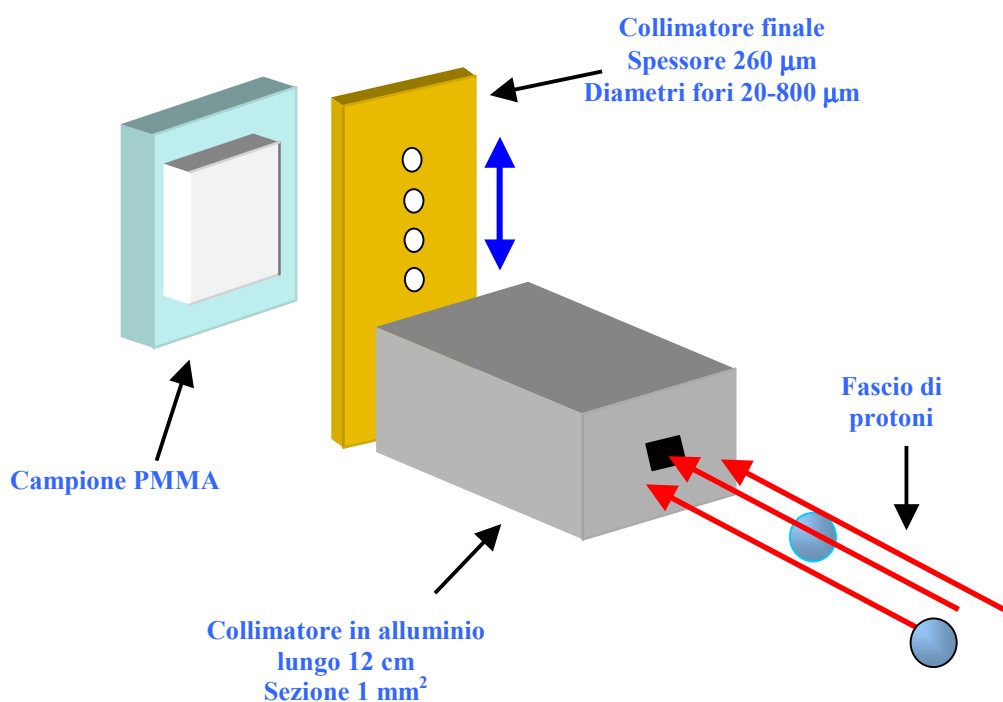


Figura 4.5-Schema del set up d'irraggiamento del campione di PMMA.

La maschera è posizionata su una struttura che le permette quattro tipi di movimenti differenti, due lungo le direzioni X-Y, con passo di 50 nm e due movimenti di rotazione (tip and tilt) che permettono di selezionare l'apertura con l'appropriato diametro e garantire la perfetta perpendicolarità della maschera al fascio.

È abbastanza chiaro che al fine di ottenere campioni di elevata qualità, è necessario garantire la corretta distribuzione della dose assorbita nei campioni irraggiati, cercando di mantenere la maschera allineata all'asse del fascio. Eventuali disallineamenti provocano infatti una alterazione nella distribuzione della dose assorbita rispetto a quella voluta, con la conseguenza di ottenere dei campioni di cattiva qualità, fig.4.6 [16].

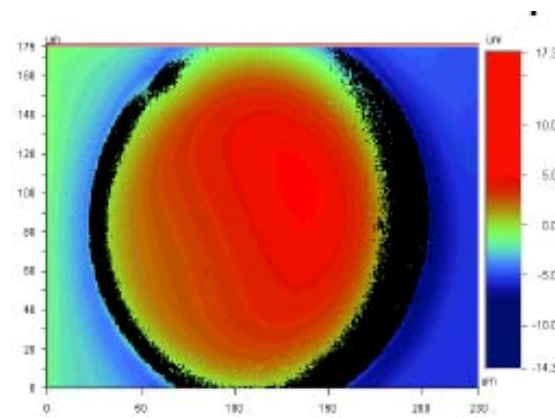


Figura 4.6-Esempio di distribuzione non omogenea della dose impiantata, dovuta ad un cattivo allineamento tra la maschera e il fascio. A destra si osserva una asimmetria nella microlente, dovuta alla distribuzione della dose assorbita che non è concentrica al profilo della lente.

Al fine di assicurare un allineamento con precisione dell'ordine di qualche decina di micron, è necessario disporre di sistemi di diagnostica da installare dopo l'ultima maschera, che in tempo reale ci diano informazioni sulla dose assorbita dal campione e permettano di ricostruire il profilo trasverso del fascio che incide sul PMMA.

Questo consentirà di verificare on-line l'allineamento della maschera, sì da garantire un corretto irraggiamento con continuità.

Mediante il set up precedentemente esposto, si può optare per due differenti tecniche di irraggiamento per creare zone accuratamente degradate. In una si fa uso di un otturatore azionato tramite comando remoto, posto fra le due maschere, che interrompe il fascio di protoni ogni qualvolta si è raggiunto il livello di dose desiderata. Il campione è allora spostato nella sua posizione successiva e può ripartire nuovamente l'irraggiamento aprendo l'otturatore. Dopo l'irraggiamento dei campioni si passa alla fase di etching delle zone danneggiate per ottenere gli array di microfori (fig 4.4a), oppure al processo di "swelling" della zona danneggiata, mediante vapori di monomeri organici, per ottenere micro-lenti sferiche (fig 4.4d).

L'altra via per effettuare l'irraggiamento è di tenere aperto l'otturatore mentre il campione viene spostato seguendo un profilo prestabilito, in modo da irraggiare un contorno, la cui ampiezza è determinata dal diametro dell'apertura dell'ultima maschera. I

campioni poi saranno incisi con l'utilizzo del solvente (etching) per fabbricare incavi di allineamento di precisione e piedini di posizionamento per fibre ottiche ulteriormente assemblate con array di micro-lenti ed emettitori laser.

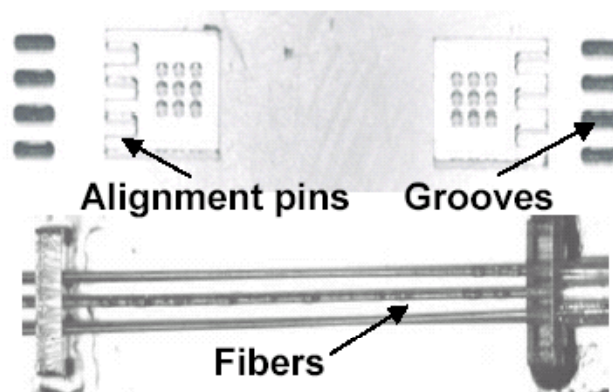


Figura 4.7-Posizionatori per fibre ottiche

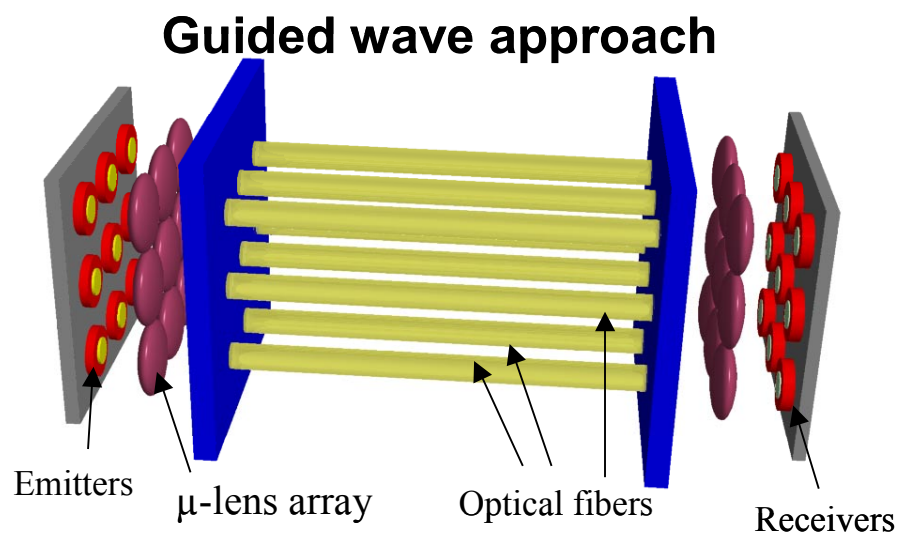


Figura 4.8-Schema di accoppiamento fra emettitori e ricevitori mediante fibre ottiche assemblate con accurati posizionatori.

Lenti cilindriche e matrici di lenti sono elementi essenziali per correggere l'astigmatismo di fasci laser. Per raggiungere lo scopo si muove il campione di PMMA durante l'irraggiamento in accordo con la predeterminata forma curva della lente cilindrica. Qui si prende vantaggio dall'utilizzo dei sistemi di movimentazione con passo di 50 nm per strutturare uniformemente il profilo della lente. Successivamente applicando il processo di etching selettivo su questi campioni, è possibile ottenere matrici di micro-lenti

Accanto alla loro potenzialità nelle telecomunicazioni ottiche, le micro-lenti cilindriche possono essere usate anche per aumentare l'efficienza di trasmissione ottica nei sistemi di comunicazioni dati a spazio libero. La tecnica DLP permette l'integrazione di tali componenti con micro-specchi e micro-lenti: micro-lenti cilindriche affacciate sugli emettitori fungono da collimatori del fascio mentre una seconda matrice di micro-lenti rifocalizza il fascio verso i rivelatori. Due micro-specchi, ad un angolo reciproco di 45° , permettono di deflettere la luce di un angolo di 90° . Con questi componenti di interconnessione ottica intra-chip, è stata dimostrata la possibilità di trasmettere dati a 2.48 Gb/s (vedi figure) [15].

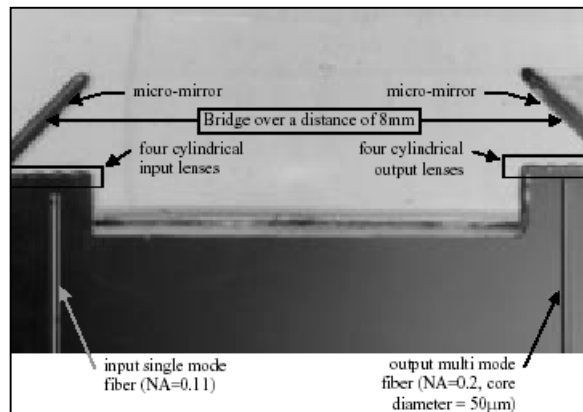


Figura 4.9-Modulo di interconnessione multicanale con micro-lenti cilindriche

Free space approach

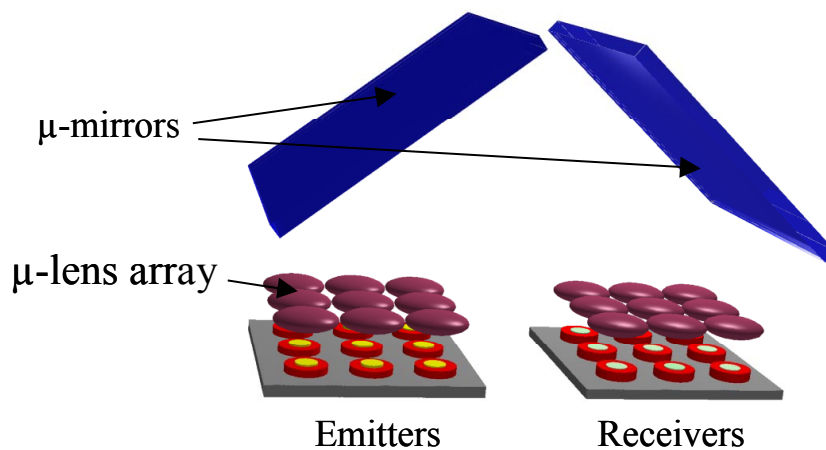


Figura 4.10-Schema del ponte ottico con emettitori e ricevitori accoppiati con array di micro-lenti cilindriche.

Capitolo 5

5.1 Apparato sperimentale

Al fine di procedere alla realizzazione dei dispositivi di microdiagnostica precedentemente menzionati, si è fatto uso di un set-up come schematizzato in fig-4.4 (I sensori vengono sempre posti dopo l'ultimo collimatore). Nella parte dell'esperienza riguardante le misure con SFOP, il rivelatore è stato posto subito dopo l'ultimo collimatore (Liga-mask). Nelle foto che seguono si vede la struttura dell'apparato sperimentale utilizzato durante le misure.

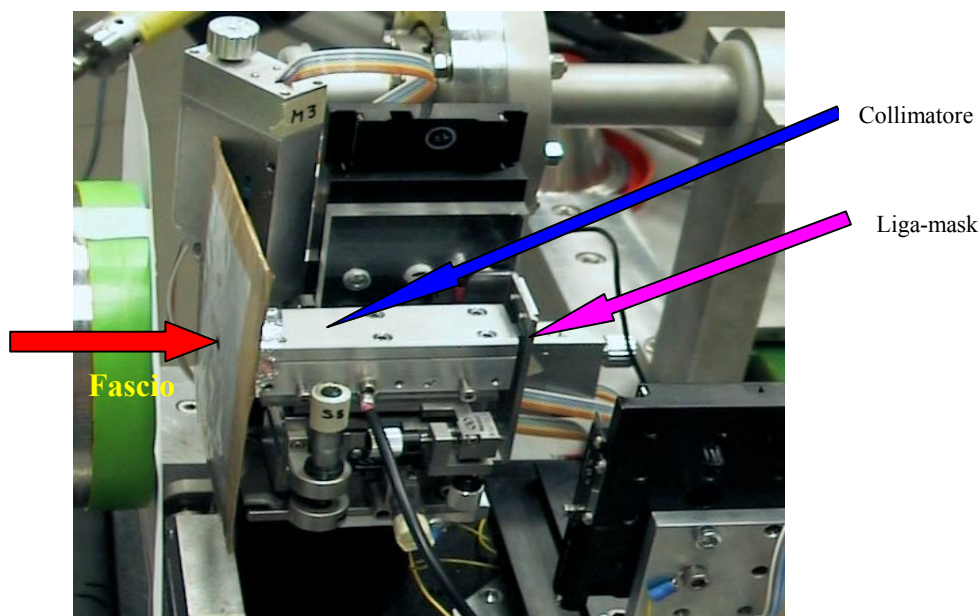


Figura 5.1 -Particolari del collimatore e della Liga-mask posti lungo la linea di fascio.

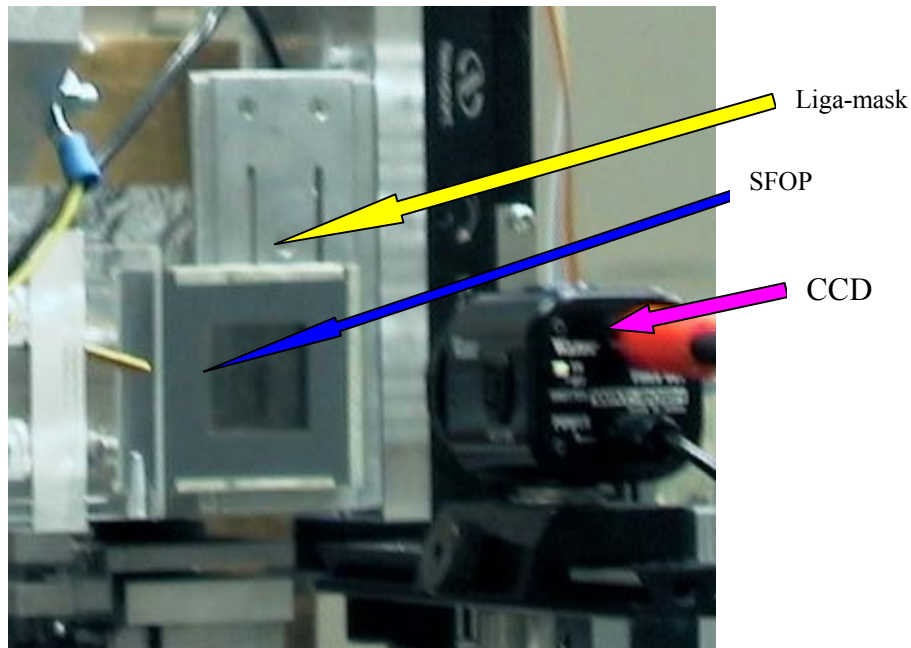


Figura 5.2 -Vista dello SFOP, della Liga-mask,e della telecamera lungo la linea di fascio.

5.2 Procedura d'allineamento

Gli elementi di base che costituiscono il sistema sono:

1. Un sistema di collimazione composto da due parti, ossia di un primo collimatore lungo 12 cm denominato “pre-mask”, con foro a sezione quadrata di superficie pari a 1 mm^2 e un secondo collimatore che presenta un array di fori di diametro variabile da $20 \text{ }\mu\text{m}$ a $800 \text{ }\mu\text{m}$ e dallo spessore di $260 \text{ }\mu\text{m}$, denominato “Liga-mask”
2. Una telecamera a CCD da $\frac{1}{2}$ ” della Watec 902H

3. Una piastra multiforo (Breadboard) sulla quale sono alloggiate le piastre di micro-movimentazione che supportano i componenti sopra descritti.

Per comodità di operazione i test sono stati effettuati in aria, difatti l'apparato sperimentale è stato collocato lungo la linea di fascio LNS a 60° , all'esterno della stessa, prima della camera di scattering denominata camera 2000. A partire da tale posizione è iniziata la procedura di allineamento di tutto il sistema, con particolare riguardo ai due collimatori (pre-mask e Liga-mask) ed alla telecamera (fig.5.2).

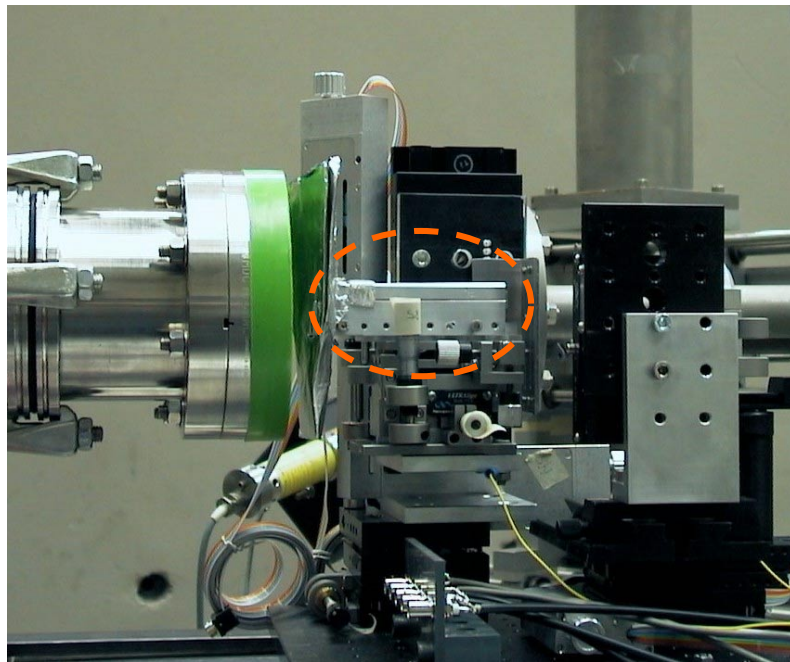


Figura 5.3-Vista dell'apparato di misura lungo la linea di fascio. La pre-mask è cerchiata in rosso, il tappo verde è la fine della linea di fascio.

Durante la prima fase di tale procedura all'interno della camera duemila, è stato collocato un laser facendo in modo che esso risultasse allineato con l'asse del fascio. A tale scopo è stato usato come riferimento lo schermo in allumina collocato circa un metro a monte del foro di uscita del fascio, che prima dell'esecuzione delle misure è stato chiuso con una finestra in alluminio da 75 μm di spessore, per permettere di fare il vuoto all'interno della linea stessa.

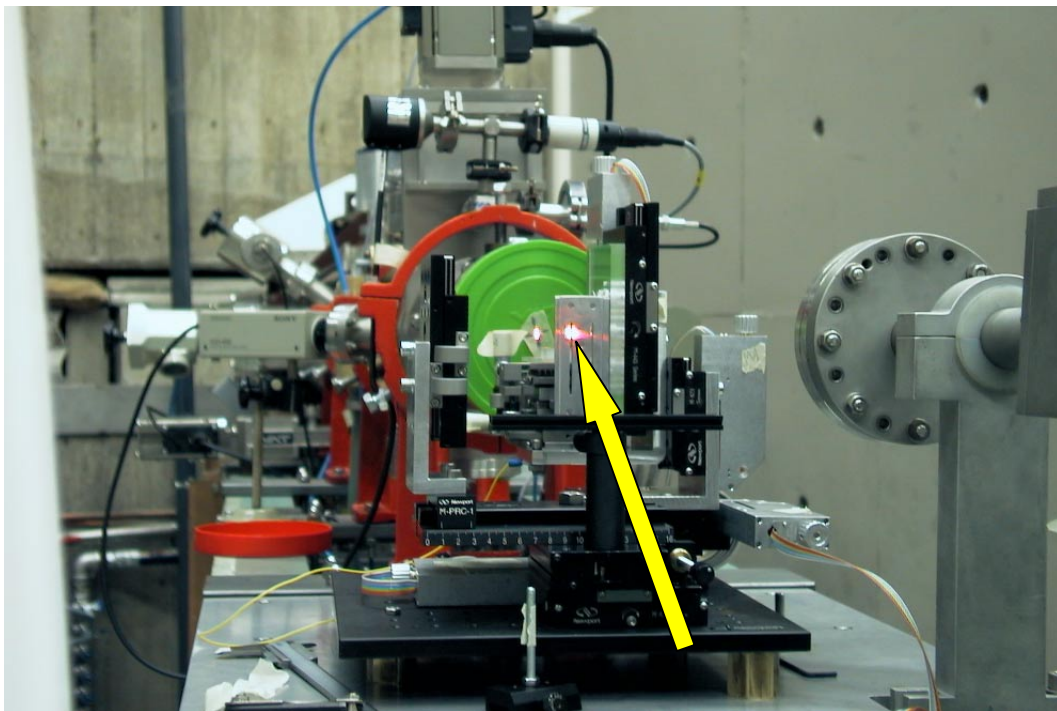


Figura 5.4-Particolare della procedura d'allineamento. La freccia indica lo spot luminoso del laser.

L'utilizzo del laser ha anche consentito di effettuare un allineamento preliminare tra i due collimatori (premask e Liga-mask),

mediante micro-traslazioni lungo gli assi X Y e micro-rotazioni (tip and tilt), al fine di massimizzare la trasmissione del fascio laser. L'allineamento definitivo è stato eseguito con i rivelatori mediante l'utilizzo del fascio di protoni.

A tale scopo è stata seguita la seguente procedura:

- 1 Dal set-up sono stati rimossi i due collimatori in modo tale da visualizzare il profilo trasverso del fascio nella sua interezza e posizionare la telecamera in asse col fascio mediante i motorini di precisione su cui è installata.
- 2 Sono quindi stati reintrodotti i due collimatori, nella posizione precedentemente ottimizzata mediante la luce laser, e si è selezionata l'apertura da 800 μm della ligamask.
- 3 Gli operatori dell'acceleratore hanno eseguito delle correzioni nei parametri dell'acceleratore allo scopo di modificare la direzione d'entrata e la posizione del fascio utilizzando l'informazione proveniente dallo SFOP visualizzata mediante la telecamera.
- 4 Modifica dell'ingrandimento della telecamera mediante l'inserimento dei tubi di prolunga.

- 5 Con l'ausilio dei motorini di precisione (passo 50nm), installati sulla breadboard, azionati in remoto è stato possibile realizzare l'allineamento di precisione. Infatti per la Liga-mask sono possibili oltre al movimento lungo il piano X-Y anche la rotazione attorno a due assi (tip and tilt) garantendo così la perfetta planarità sul piano perpendicolare alla direzione del fascio.

5.3 Protoni attraverso la Liga-mask

Il fascio di protoni accelerato dal Tandem ad una energia di 11.2 MeV attraversa, lungo il suo cammino verso il rivelatore diversi materiali di spessori differenti, subendo in tal modo una degradazione in energia in accordo con la legge di Bethe-Bloch [14].

Prima di arrivare sull'ultimo collimatore, Liga-mask, il fascio attraversa i seguenti materiali:

1. Finestra in alluminio da 75 μm che chiude la linea di fascio;
2. 50 mm di aria
3. 40 μm di alluminio;
4. 113 mm di aria;

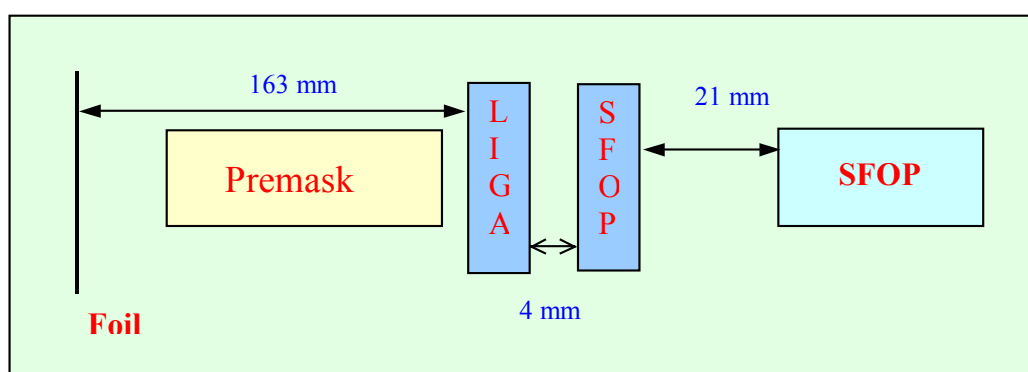


Figura 5.5-Schema della disposizione del set up durante le misure con SFOP.

Attraversando codesti materiali, il fascio giunge sull'ultimo collimatore con una energia residua di 9.3 MeV. Tale valore è insufficiente affinché i protoni possano attraversare lo spessore del collimatore, pari a 260 μm di nichel. Infatti il range dei protoni, della data energia, nel nichel è pari a 198 μm ben al di sotto dello spessore utilizzato (vedi fig-5.6) [17]. Pertanto il fascio che raggiunge il sensore è solamente quello che attraversa il collimatore dalle fenditure selezionate.

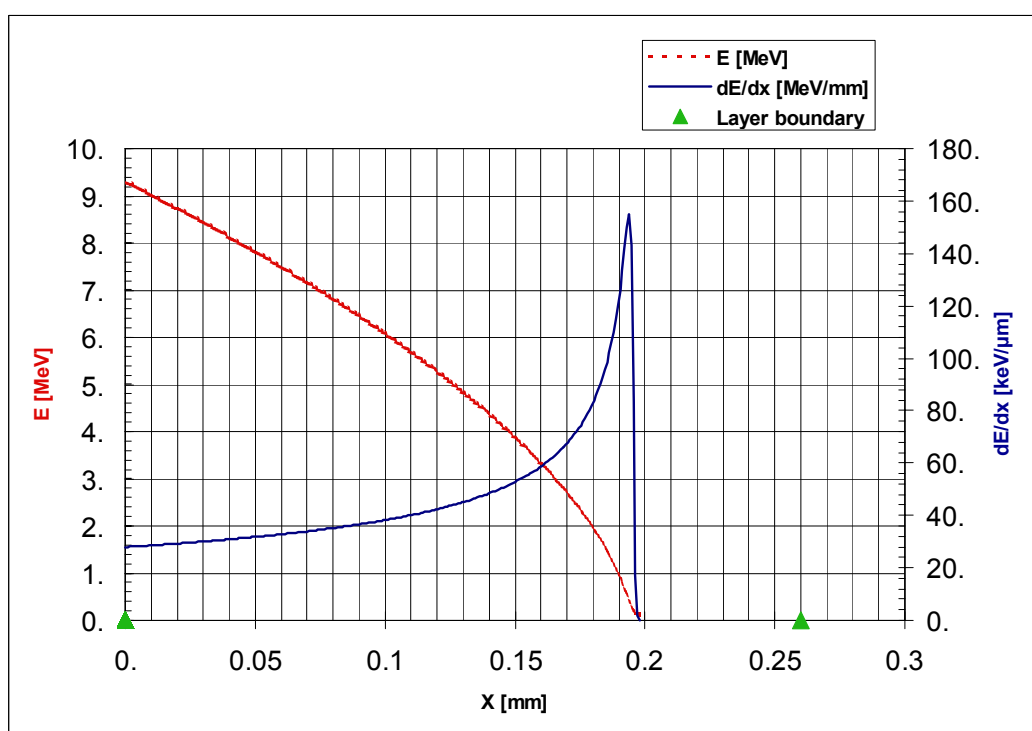


Figura 5.6-Range e perdita d'energia dei protoni da 9.3 MeV in Nichel. I due triangolini di colore verde rappresentano lo spessore del collimatore in nichel utilizzato.

5.4 Misure e risultati

Le misure con lo SFOP, sono state realizzate con il suddetto fascio di protoni accelerati dal Tandem, di energia pari a 11.2 MeV e inviati lungo la linea di fascio a 60°. Come detto sono state realizzate in aria con l'apparato di misura collocato all'interno di una camera opportunamente oscurata, per evitare la contaminazione dalla luce esterna. Ovviamente nella camera è stata ricavata una finestra per l'ingresso del fascio, e tutta è stata foderata da un foglio di alluminio spesso 40 μm , per isolare l'elettronica posta all'interno dai disturbi di origine elettromagnetica (vedi fig.5.7).

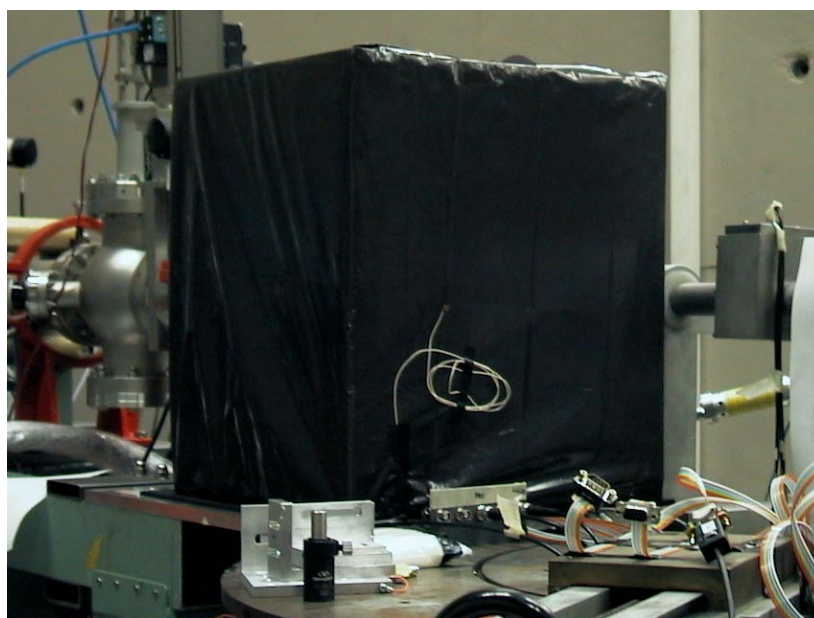


Figura 5.7-Vista della camera che racchiude l'apparato di misura.

Il fascio viene ridotto di dimensione grazie all'uso dei due collimatori, ovvero la pre-mask e la Liga-Mask (vedi fig.4.5), i cui fori vengono selezionati di volta in volta mediante controllo remoto.

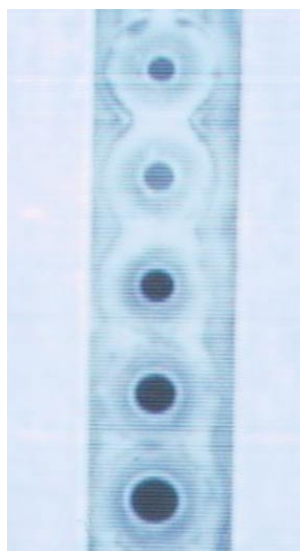


Figura 5.8-Particolare della Liga-mask

Dopo aver effettuato l'allineamento fra i due collimatori e l'asse del fascio, è possibile selezionarne la parte centrale agendo sull'ultimo collimatore che ne determina la dimensione. La parte di fascio così selezionata, micro-fascio, colpisce lo schermo scintillante (SFOP) producendo uno spot luminoso rappresentante il profilo bidimensionale trasverso del micro-fascio. Mediante l'utilizzo della telecamera, Watec 902H, equipaggiata con un obiettivo della Rodenstock da 0.3x, si è in grado di riprendere l'immagine dello spot luminoso prodottosi. Tale profilo può essere visualizzato on-line su un monitor mediante il programma Global Lab Image (GLI) della Data Traslation, inoltre consente tramite la Frame Grabber di acquisire immagini mediate (bianco e nero a 256 livelli di grigio) su un numero

assegnato di frames. In più è possibile eseguire l'operazione di sottrazione fra le due immagini acquisite in presenza dello spot luminoso e in assenza di fascio rispettivamente, allo scopo di ripulire l'immagine e migliorarne la qualità, come descritto al capitolo 2. Durante le misure eseguite col fascio di protoni a 11.2 MeV, sono stati acquisiti i profili trasversi per tutti i fori della Liga-mask, per correnti corrispondenti che vanno da qualche nA sino a decimi di pA.

In tutte le immagini acquisite si osserva uno spot luminoso più intenso, dovuto al fascio che attraversa la fenditura selezionata, circondato da un alone di luce meno intensa dovuta probabilmente a radiazione elettromagnetica prodottasi dall'interazione del fascio con i due collimatori [NIMB (1987) 199].

5.4.1 Acquisizioni con SFOP nella configurazione di minimo ingrandimento.

Nella prima fase delle misure con SFOP, telecamera ed obiettivo sono stati posti nella configurazione di minimo ingrandimento (vedi tabella 2.1) inquadrando una superficie dello schermo (SFOP) pari a $21 \times 16 \text{ mm}^2$. Inizialmente dal set-up, sono stati rimossi i due collimatori e si è operato in modo da allineare il fascio di protoni con l'asse della telecamera. Al fine di eseguire tale operazione è stata adoperata la funzione “live” del programma GLI, permettendoci così di visualizzare on-line su un monitor, la luce di scintillazione prodotta

dal fascio nello SFOP, senza apprezzabile afterglow. Ad allineamento concluso sono state acquisite diverse immagini del fascio al variare della corrente del Tandem. Ecco qui di seguito una di tali immagini.

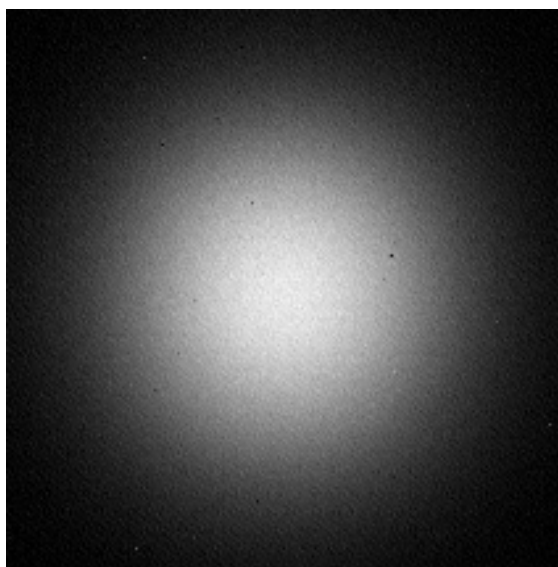


Figura 5.9-Immagine del fascio acquisita nella configurazione di minimo ingrandimento senza nessun collimatore. Corrente Tandem minore di 5 pA.

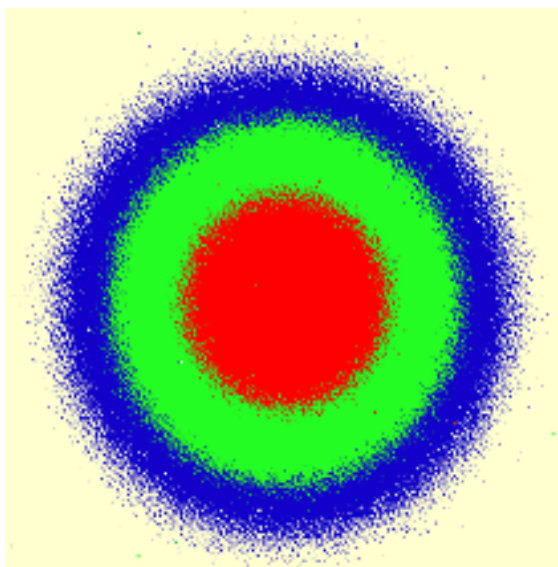


Figura 5.10- Medesima immagine di prima dove sono marcati, in falsi colori, i vari livelli d'intensità.

La figura 5.9 è l'immagine del fascio di protoni nella sua interezza, acquisita nella configurazione di minimo ingrandimento, con una corrente del Tandem minore di 5 pA, mentre nella figura successiva (5.10), sono stati messi in risalto i vari livelli d'intensità della stessa immagine.

Mediante l'immagine suddetta è stato possibile, tramite il software Mathcad, come descritto al capitolo 2, estrarre le proiezioni integrali lungo gli assi x e y, al fine di riportare su grafico i profili del fascio. Successivamente con i dati ottenuti si è eseguito un fit gaussiano di equazione:

$$y = a + b * e^{\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x-c}{\sigma} \right)^2 \right]}$$

che ha consentito di calcolare la larghezza a mezza altezza (FWHM) dei due profili mutuamente ortogonali. Come si nota dai grafici (fig 5.11 e 5.12), il fit riproduce perfettamente i dati ottenuti delle proiezioni, fornendo un valore di FWHM di 6.7 mm per il profilo orizzontale e di 7.25 mm per quello verticale. Si è considerato un errore pari $\pm 56 \mu\text{m}$, ossia il doppio della dimensione equivalente del singolo pixel.

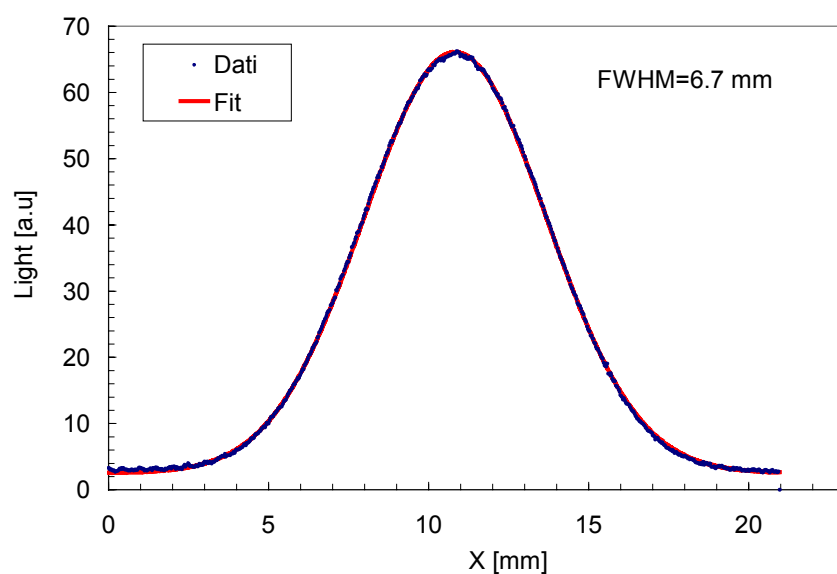


Figura 5.11-Profilo orizzontale e relativo fit gaussiano dello spot del fascio con corrente tandem minore di 30 pA

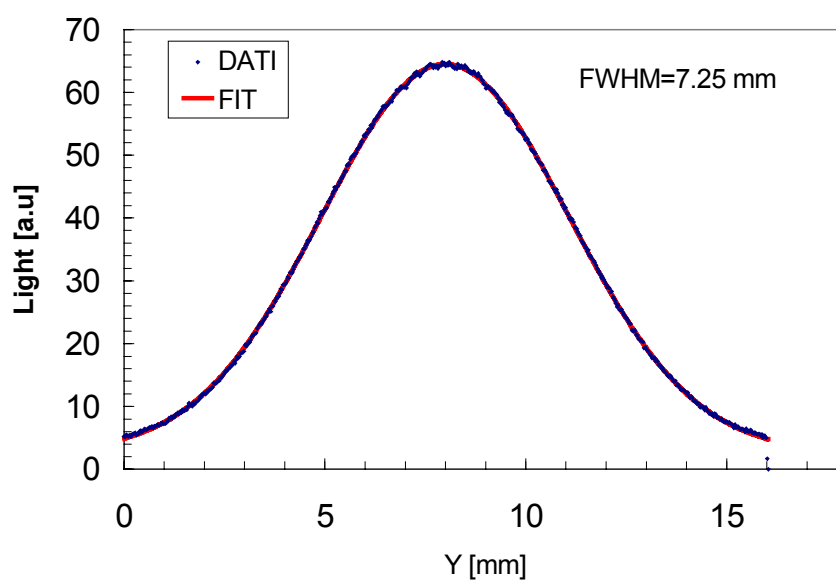


Figura 5.12-Profilo verticale e relativo fit gaussiano dello spot. del fascio con corrente tandem minore di 30 pA

5.4.2 Acquisizioni con SFOP nella configurazione di massimo ingrandimento

Dopo aver acquisito le immagini del fascio che colpisce direttamente lo schermo (SFOP) senza l'ausilio di nessun collimatore, sono stati reintrodotti la pre-mask e la Liga-mask e cambiato l'ingrandimento della telecamera al massimo valore disponibile, inserendo i tubi di prolunga e posizionando l'obiettivo ad una distanza di 21 mm dallo SFOP (vedi tab 2.2). Con questa configurazione del set-up sono state acquisite immagini del fascio, collimate per mezzo delle due maschere, al variare della corrente di iniezione del Tandem e dei fori selezionati. Si è iniziato con il selezionare il foro da 800 μm nell'ultimo collimatore ed acquisire immagini del fascio corrispondenti al variare della corrente di iniezione del Tandem.

Le figure che seguono sono le immagini acquisite del fascio di protoni che attraversa il foro da 800 μm . Dalla fig 5.13 è possibile vedere abbastanza evidentemente gli EMA dello SFOP, mentre la successiva (5.14) rappresenta la medesima immagine del fascio, dove sono marcati in diversi colori i vari livelli d'intensità.

Per i profili di tali immagini non è stato possibile effettuare un fit attendibile, in quanto la dimensione del fascio collimato dalla pre-mask che va a colpire l'ultimo collimatore (Liga-Mask) è comparabile

con la dimensione selezionata del foro. Dai profili estratti ho eseguito un fit gaussiano solo sul fondo e poi l'ho sottratto dai dati. Come errore in queste misure si è considerato il doppio della dimensione della singola fibra di cui è costituito lo SFOP, cioè $\pm 20 \mu\text{m}$.

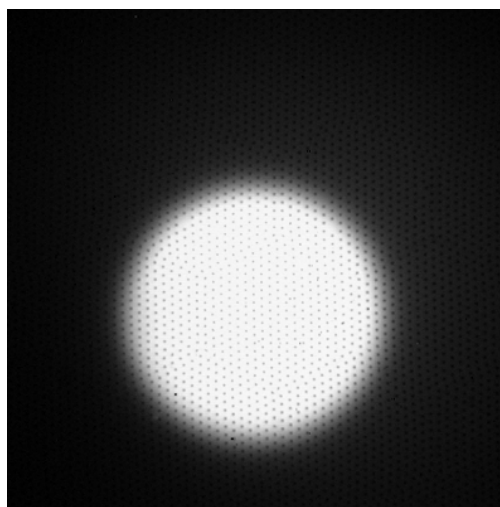


Figura 5.13-Immagine del fascio mediante la configurazione di massimo ingrandimento, dopo essere stato collimato dalle varie maschere. Il foro della Liga-mask è di $800 \mu\text{m}$ con corrente al Tandem di 500 pA . Dalla foto si possono notare abbastanza evidentemente gli EMA dello SFOP.

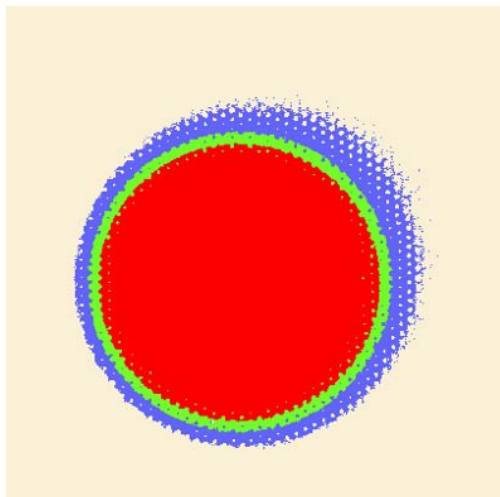


Figura 5.14-Medesima immagine di prima dove sono marcati in falsi colori i vari livelli di intensità.

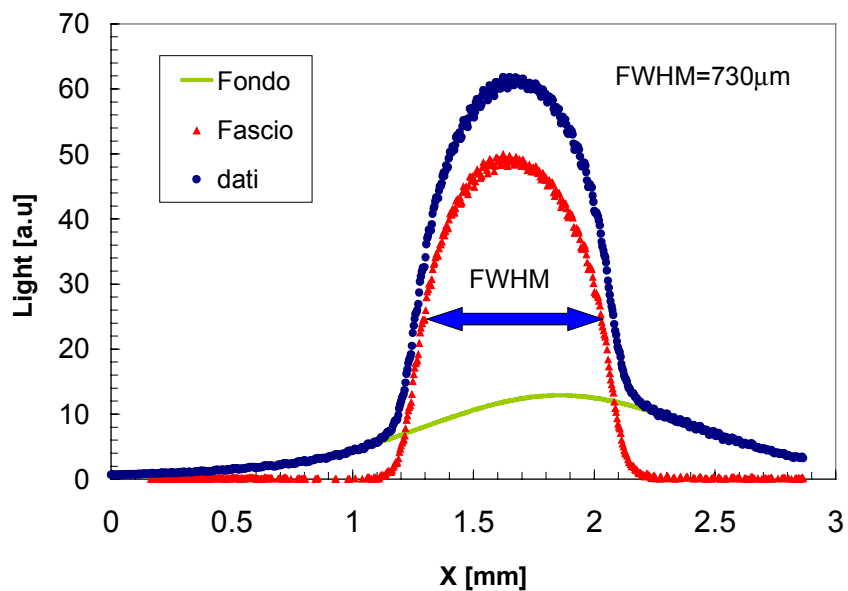


Figura 5.15 -Proiezione sull'asse X, la linea in verde rappresenta il fondo dovuto ai gamma.

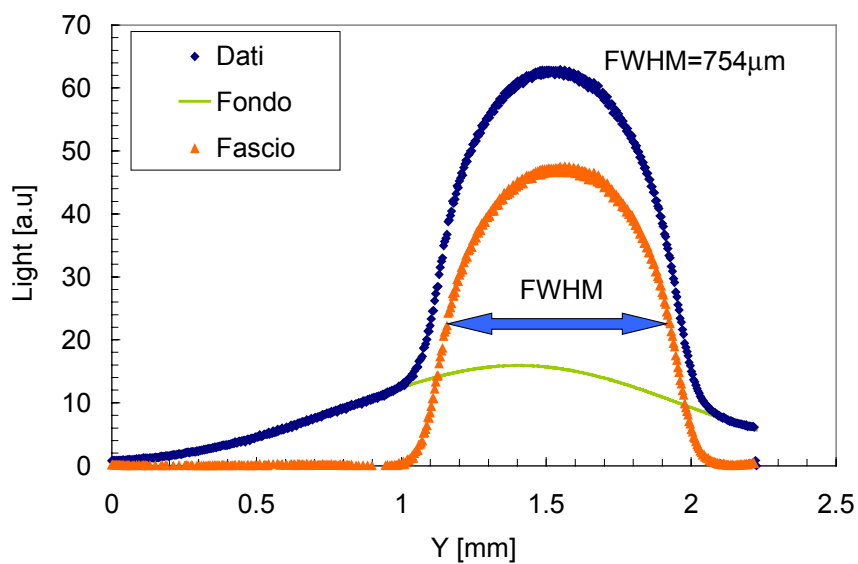


Figura 5.16-Proiezione sull'asse Y la linea in verde rappresenta il fondo dovuto ai gamma.

Sempre nelle medesime condizioni operative sono state eseguite altre acquisizioni, cambiando la dimensione del foro della Liga-Mask e variando la corrente di iniezione del Tandem. Le fig. 5.17 e 5.18 sono le immagini del fascio dopo essere stato collimato mediante la fenditura da 150 μm con una corrente del Tandem di 30 pA. Nell'immagine 5.17 è possibile ancora vedere chiaramente gli EMA dello SFOP, mentre nella immagine successiva in falsi colori è possibile vedere nitidamente lo spot del fascio dovuto ai protoni che passano attraverso la fenditura selezionata, con intorno un alone di luce meno intenso.

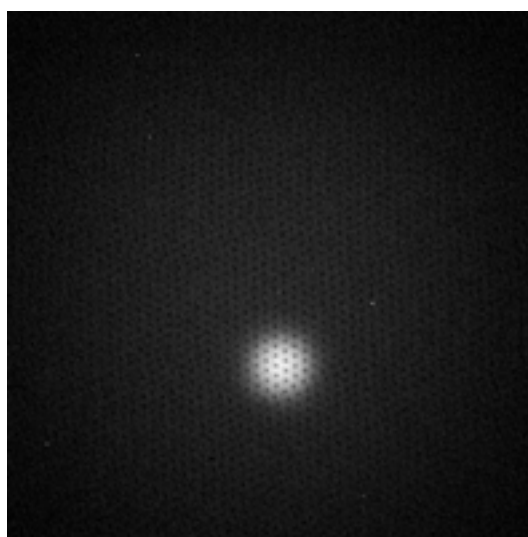


Figura 5.17-Immagine del fascio, mediante la configurazione di massimo ingrandimento, dopo essere stato collimato dalle varie maschere. Il foro della Liga-mask è di 150 μm con corrente al Tandem di 30 pA. Dalla foto si possono notare abbastanza evidentemente gli EMA dello SFOP.

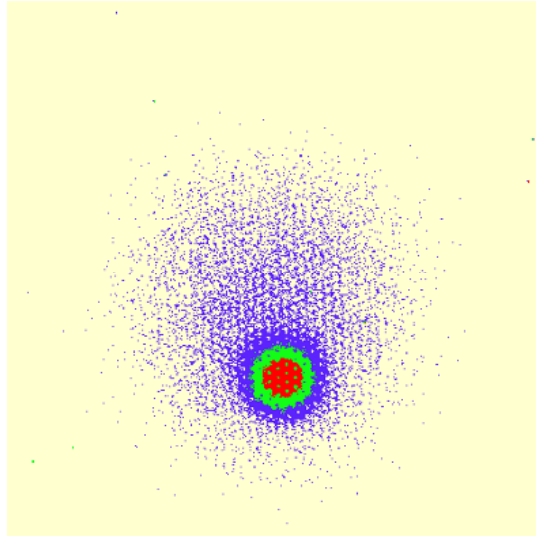


Figura 5.18-Medesima immagine di prima dove sono marcati in falsi colori i vari livelli di intensità.

Dopo aver estratto i profili integrali per entrambe le direzioni, ho eseguito un fit sui dati mediante la somma di due gaussiane, per tenere in considerazione sia il contributo dovuto al fascio che al fondo.

L'equazione del fit utilizzata è:

$$y = a + b_1 * e^{-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x-c_1}{\sigma_1} \right)^2 \right]} + b_2 * e^{-\frac{1}{2} \left[\left(\frac{x-c_2}{\sigma_2} \right)^2 \right]}$$

dove: c_1 e c_2 sono rispettivamente i parametri che rappresentano le coordinate dei centroidi del fondo e del picco; σ_1 e σ_2 rappresentano le rispettive deviazioni standard; b_1 e b_2 sono le altezze. Dai grafici si evince in modo evidente il contributo del fascio più un notevole contributo del fondo. I due fit dove sono stati riportati separatamente su grafico.

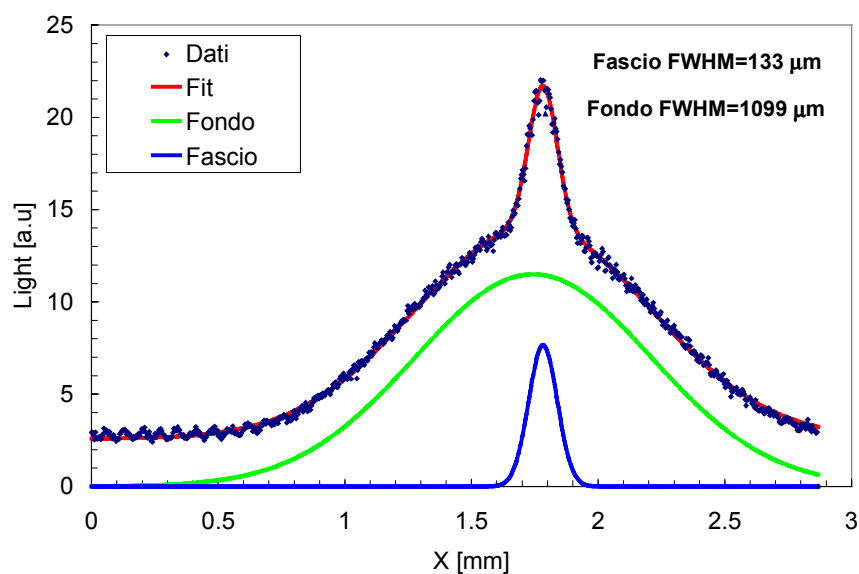


Figura 5.19- Proiezione sull'asse X, la curva in verde rappresenta il fondo molto evidente e la curva in blu il fascio attraverso il foro da 150 μm .

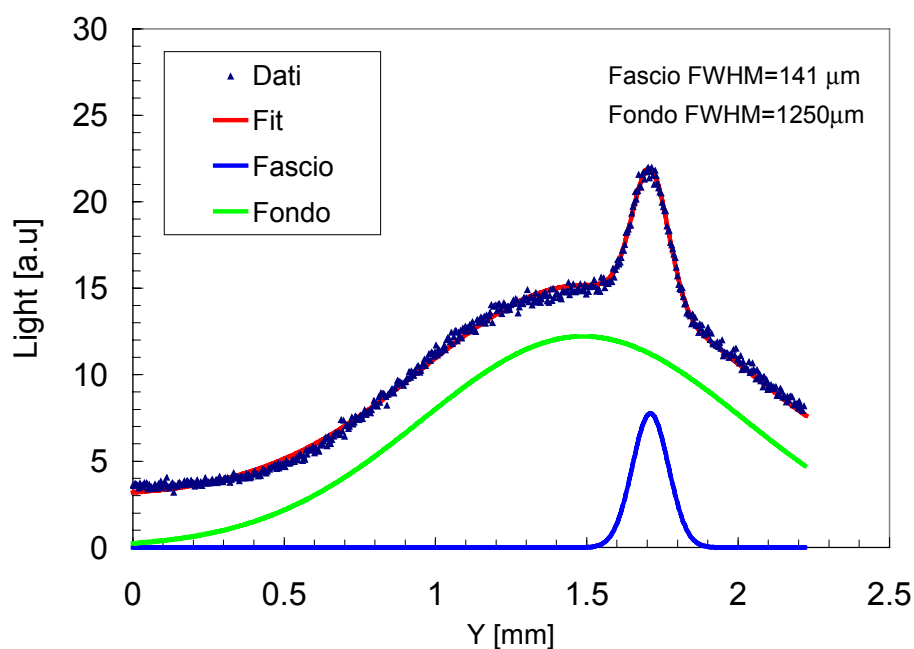


Figura 5.20- Proiezione sull'asse X, la curva in verde rappresenta il fondo molto evidente e la curva in blu il fascio attraverso il foro da 150 μm .

Altre immagini del fascio collimato con fori più piccoli della Liga-Mask e relativi profili:

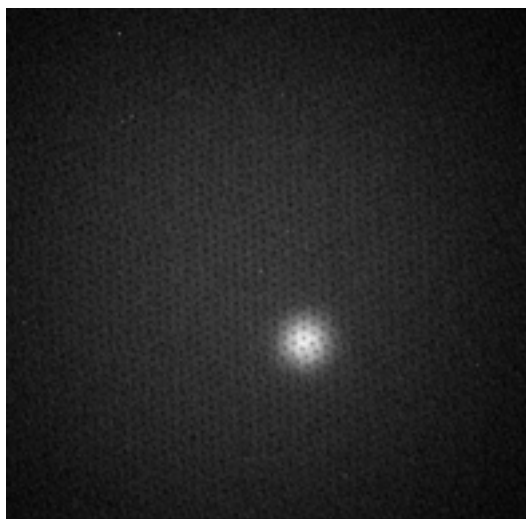


Figura 5.21-Immagine del fascio, mediante la configurazione di massimo ingrandimento, dopo essere stato collimato dalle varie maschere. Il foro della Liga-mask è di 100 μm con corrente al Tandem di 30 pA.

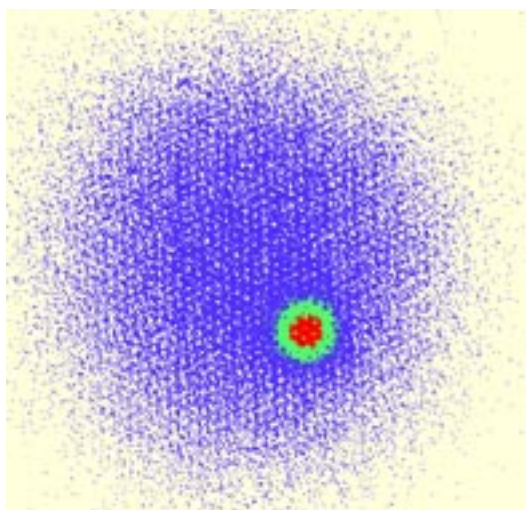


Figura 5.22-Medesima immagine di prima dove sono marcati in falsi colori i vari livelli di intensità.

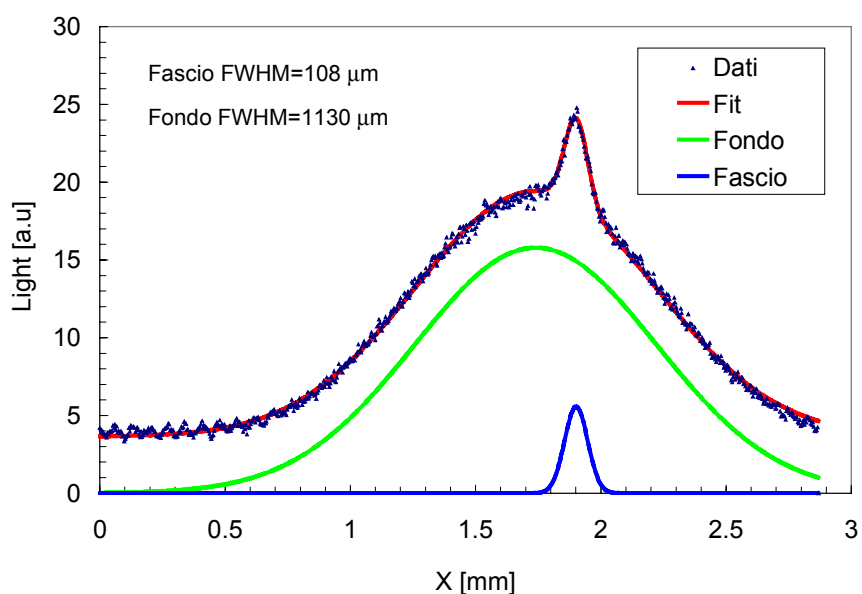


Figura 5-23 - Proiezione sull'asse X, la curva in verde rappresenta il fondo molto evidente e la curva in blu il fascio attraverso il foro da 100 μm . Le FWHM calcolate sono di 108 μm per il contributo del fascio e di 1130 μm per il fondo.

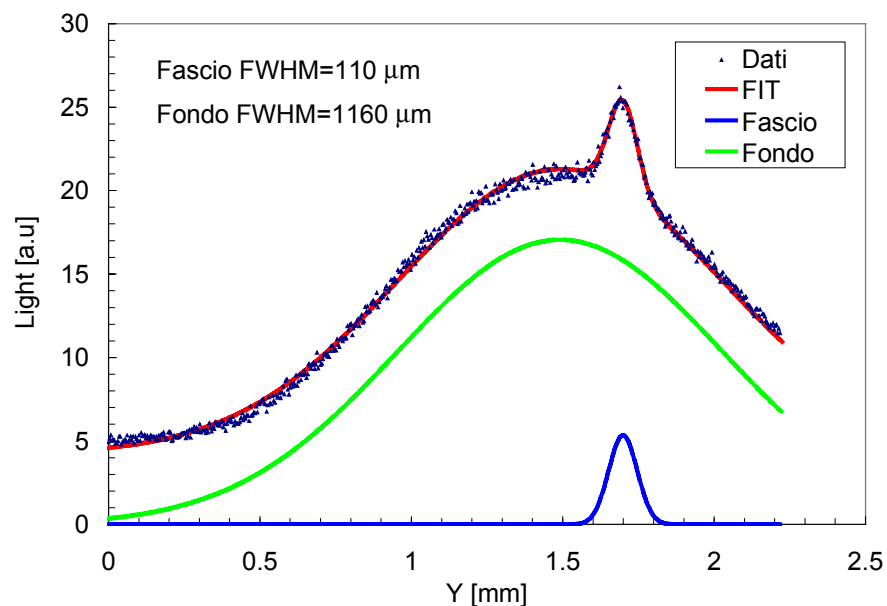


Figura 5-24 - Proiezione sull'asse Y, la curva in verde rappresenta il fondo molto evidente e la curva in blu il fascio attraverso il foro da 100 μm . Le FWHM calcolate sono di 110 μm per il contributo del fascio e di 1160 μm per il fondo.

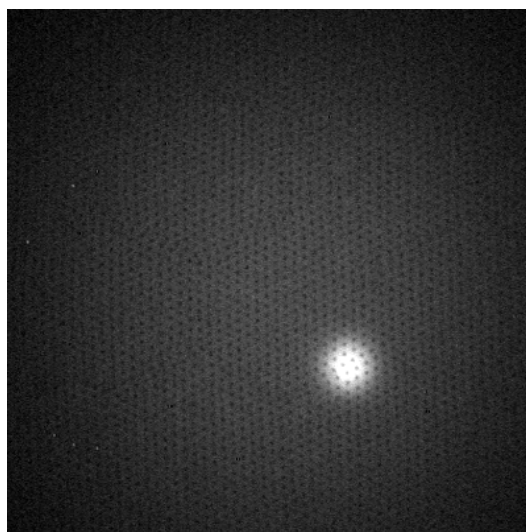


Figura 5.25-Immagine del fascio, mediante la configurazione di massimo ingrandimento, dopo essere stato collimato dalle varie maschere. Il foro della Liga-mask è di 100 μm con corrente al Tandem di 60 pA. Dalla foto si possono notare abbastanza evidentemente gli EMA dello SFOP.

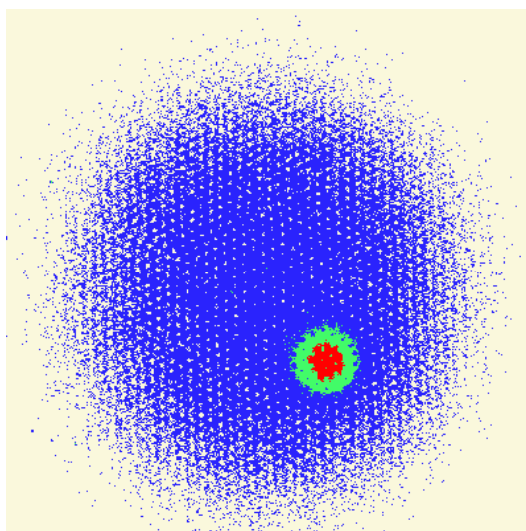


Figura 5.26- Medesima immagine di prima dove sono marcati in falsi colori i vari livelli di intensità.

Con l'immagine del fascio collimato dal foro da 100 μm e con una corrente del Tandem di 60 pA, ho eseguito un fit gaussiano bidimensionale sui dati la cui equazione è:

$$z = a + b * e^{-\left[\frac{1}{2} * \left(\frac{x - c_x}{\sigma_x} \right)^2 + \frac{1}{2} * \left(\frac{y - c_y}{\sigma_y} \right)^2 \right]}$$

dove a è l'offset, b è l'altezza, c_x e c_y sono rispettivamente le coordinate lungo gli assi x e y del centroide della gaussiana; σ_x e σ_y le rispettive deviazioni standard.

Calcolando le larghezze a mezza altezza (FWHM) dello spot, in entrambe le direzioni x e y , si sono ottenuti i valori di 125 μm nella direzione x e di 126 μm nella direzione y , il ch  sta a significare che la il secondo collimatore   perfettamente perpendicolare all'asse del fascio.

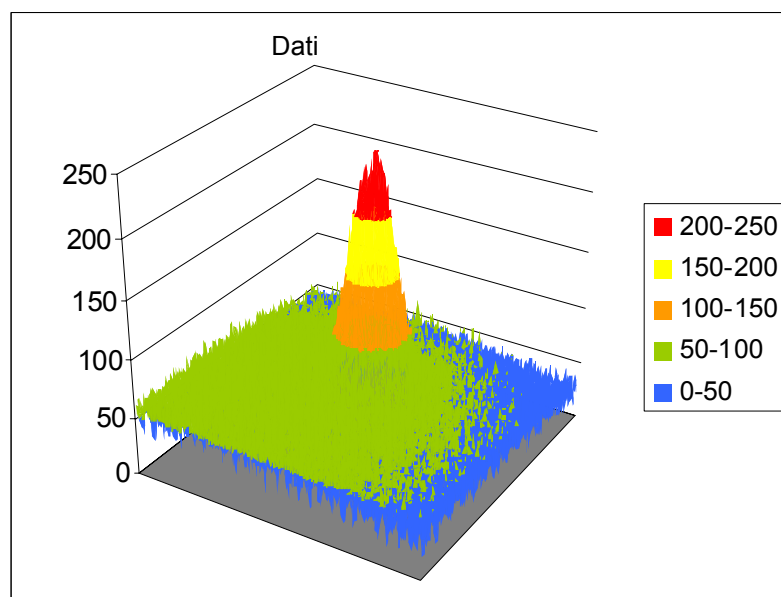


Figura 5.27-Grafico bidimensionale dello spot luminoso dovuto al fascio che attraversa il foro da 100 μm con corrente del Tandem di 60 pA.

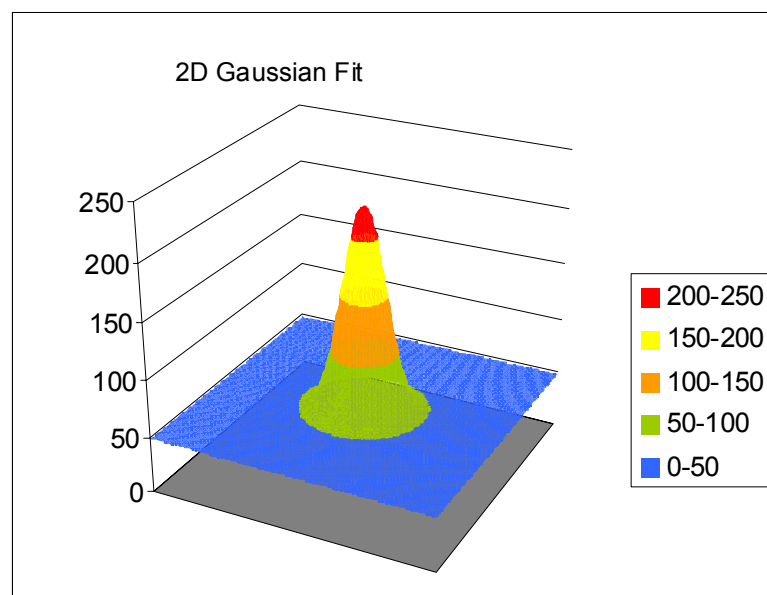


Figura 5.28-Fit gaussiano bidimensionale dello spot luminoso attraverso il foro da 100 μm , con corrente al Tandem di 60 pA.

Come si è visto dai grafici rappresentanti i profili integrali proiettati lungo le due direzioni x e y , oltre al contributo del fascio vi è un notevole contributo del fondo dovuto, come già detto, alla possibile produzione di gamma da parte del fascio quando va a colpire l'ultimo collimatore (Liga-mask). Le larghezze a mezza altezza dei profili rappresentanti il contributo del fondo sono comparabili con la dimensione del foro della Pre-mask, pari a 1 mm. Se ipotizziamo che il profilo dell'alone rappresenta quello del fascio incidente sulla Liga-mask, la presenza di codesta radiazione ci permette di rendere più efficace la procedura di allineamento fra i due collimatori. Infatti, è possibile eseguire una ricostruzione on-line dei due profili, orizzontale e verticale controllando on-line lo scostamento fra l'asse del foro della Liga-mask e l'asse del fascio incidente (vedi fig 5.29). A questo punto, facendo in modo di fare coincidere le coordinate dei centroidi dei profili dovuti al fondo e al fascio, per entrambe le direzioni x e y , si ottiene un allineamento molto accurato.

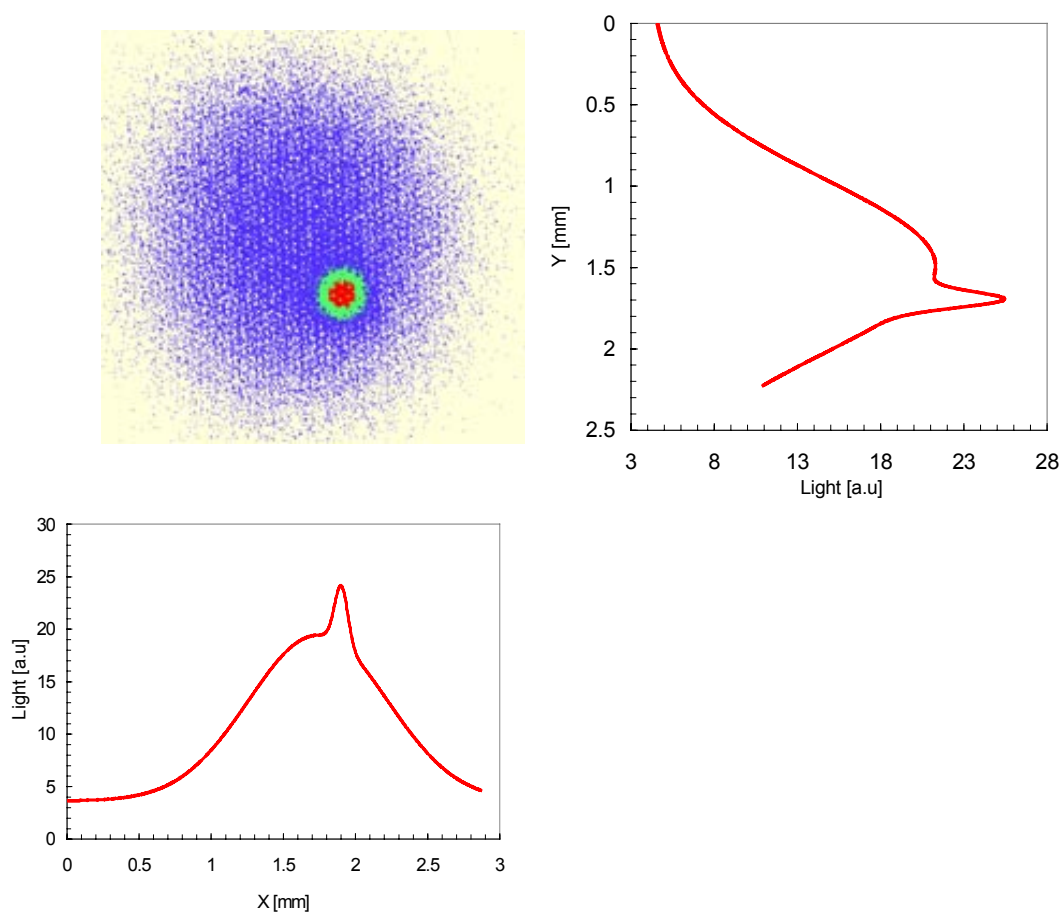


Figura 5.29-Procedura per l'analisi in tempo reale del profilo del fascio. Aggiornando l'immagine e i grafici in tempo reale, è possibile mantenere sotto controllo l'allineamento dei due collimatori.

Capitolo 6

6.1 Misure con SBBS

Sempre nell'ambito dell'esperimento "SIMPLE", nell'ottica di disporre di rivelatori che consentano di controllare le proprietà del fascio da utilizzare per il processo litografico, è stato utilizzato il dispositivo μ -SBBS, derivato da quello descritto al capitolo 3. Esso è stato ridisegnato e perfezionato per essere utilizzato come strumento di diagnostica per un micro-fascio di protoni.

Lo strumento è molto sensibile, atto a misurare intensità di fascio molto basse ed è in grado di estendere la sensibilità del nostro sistema di diagnostica fino al livello di conteggio delle singole particelle.

Nel nostro ambito è stato utilizzato in due modalità differenti, da una parte per la ricostruzione del profilo trasverso del micro-fascio e dall'altra come sensore di corrente di fascio.

Durante le misure esso è stato collocato subito dopo l'ultimo collimatore (Liga-mask) ad una distanza pari a 21 mm (vedi fig.6.2 e fig.6.3). Lo scintillatore usato, uno schermo monocristallino di CsI(Tl), di spessore 2 mm, è più che sufficiente ad arrestare il fascio di protoni utilizzato da 11.2 MeV di energia. In realtà il fascio, prima di colpire il cristallo, subisce una diminuzione di energia a causa dei

vari materiali interposti lungo il suo cammino per cui l'energia cinetica dei protoni che incidono nel cristallo di CsI(Tl) è 9.3 MeV. Eseguito il calcolo del range, si trova un valore poco superiore a mezzo millimetro, come si nota dal grafico [17].

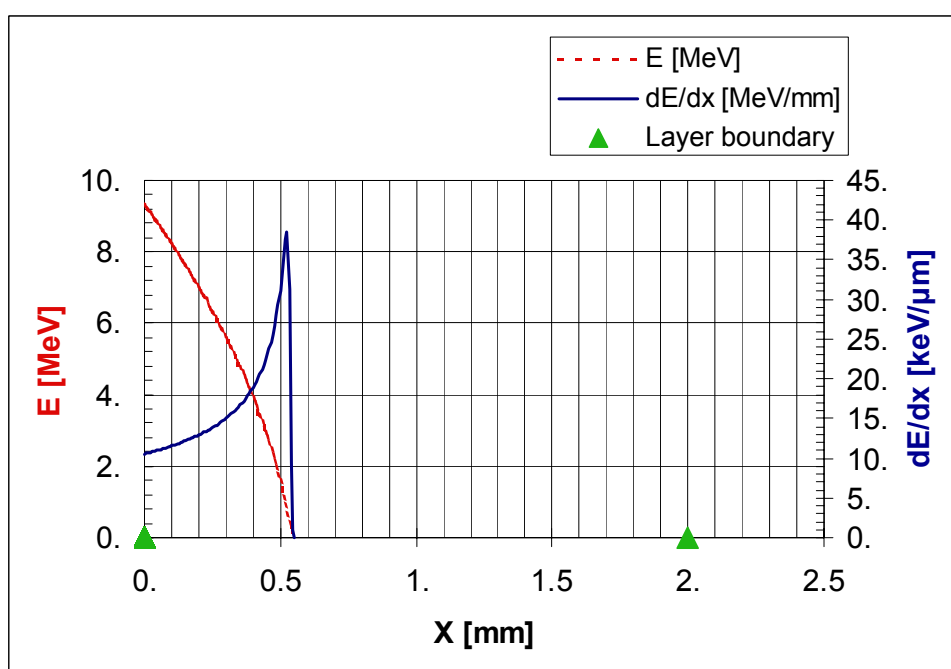


Figura 6.1- Grafico della perdita d'energia e del range dei protoni in CsI(Tl) i due triangolini rappresentano lo spessore del cristallo.

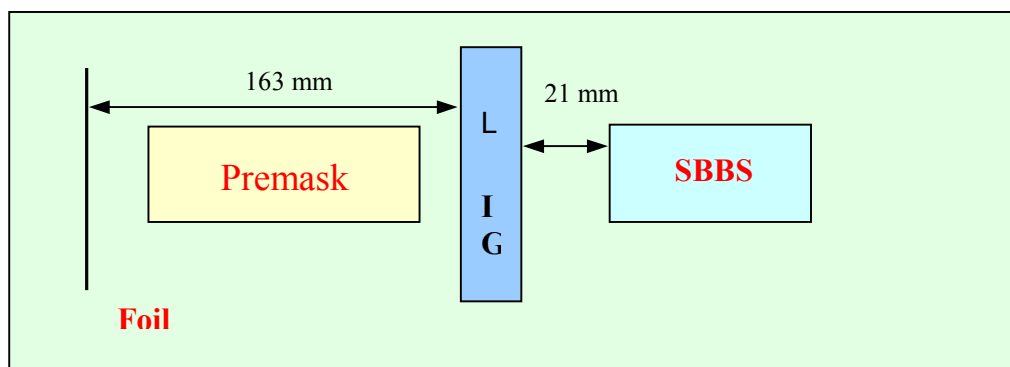


Figura 6.2- Schema della disposizione del set up delle misure con SBBS.

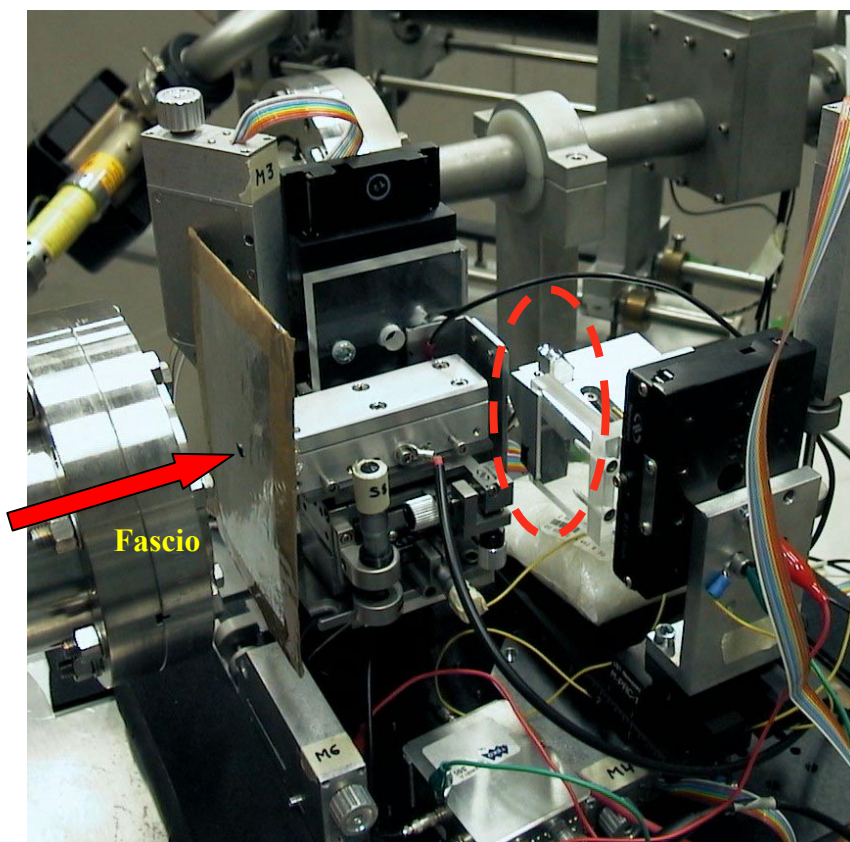


Figura 6.3- Vista del set up con l'impiego di SBBS (cerchiato in rosso) posto di fronte alla Liga-mask.

In una prima fase è stata condotta una serie di misure che ha permesso di riportare su grafico l'andamento dell'uscita del fotomoltiplicatore in funzione del valore della corrente incidente, al variare della tensione del fotomoltiplicatore. I diversi valori di corrente sono stati ottenuti variando la corrente di iniezione del Tandem e selezionando differenti fori della liga-mask.

Qui di seguito sono riportati i risultati di tali misure:

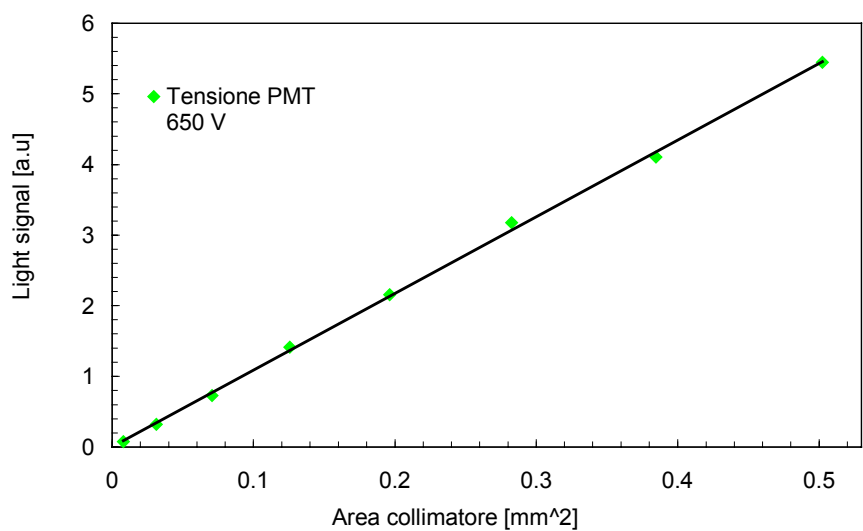


Figura 6.4- Uscita al fotomoltiplicatore in funzione della intensità di fascio incidente per una tensione del PMT di 650V (le barre di errore sono all'interno dei simboli).

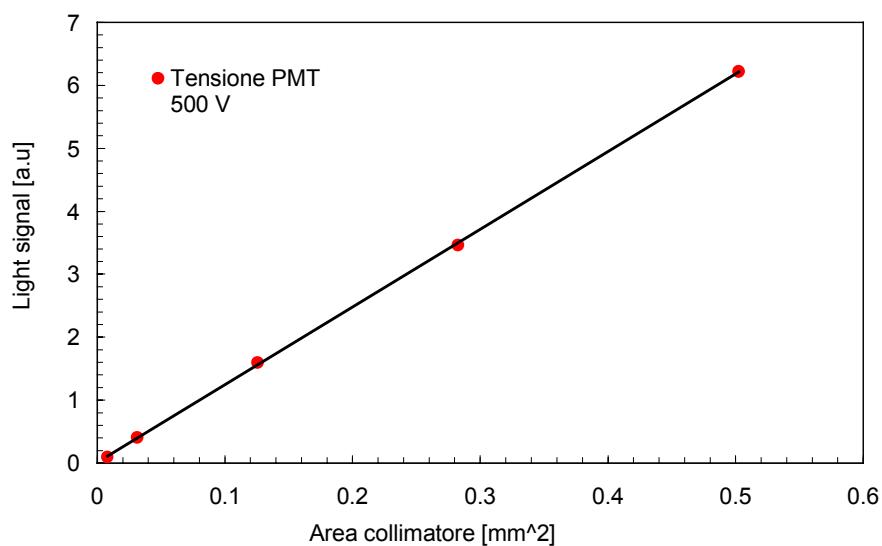


Figura 6.5- Uscita al fotomoltiplicatore in funzione della intensità di fascio incidente per una tensione del PMT di 500V (le barre di errore sono all'interno dei simboli).

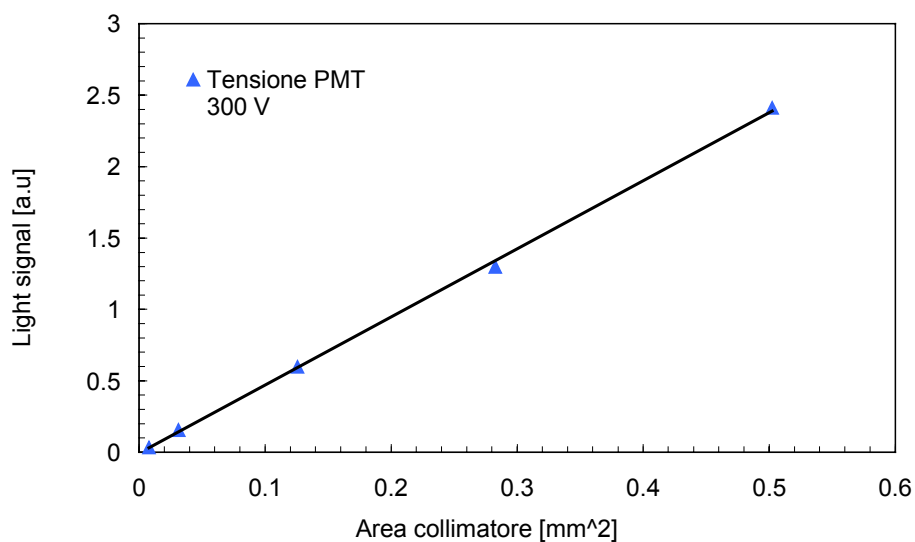


Figura 6.6- Uscita al fotomoltiplicatore in funzione della intensità di fascio incidente per una tensione del PMT di 300V (le barre di errore sono all'interno dei simboli).

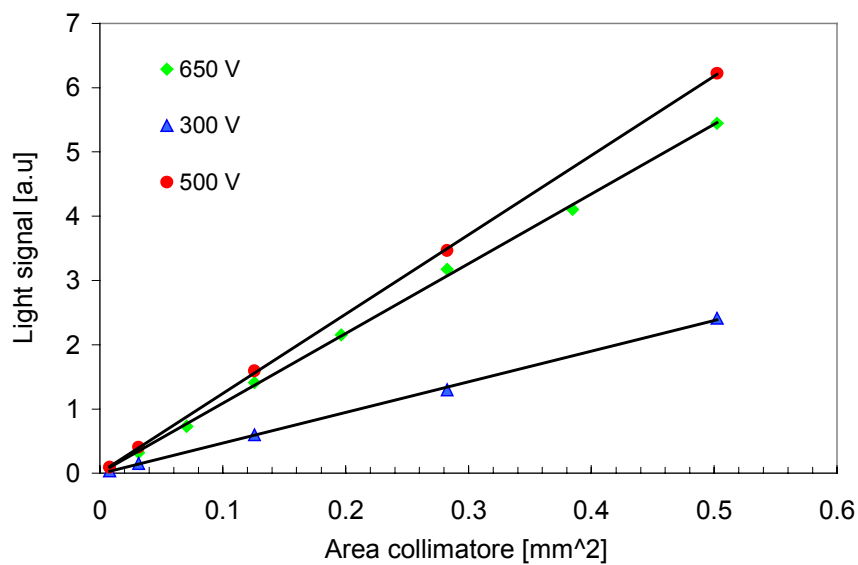


Figura 6.7-Uscita di SBBS in funzione dell'area del collimatore (le barre di errore sono all'interno del simbolo).

6.2 SBBS come sensore di corrente del fascio

Per intensità del fascio al disotto delle 10^5 pps si è in grado di eseguire misure in modalità di conteggio degli impulsi. Il valore 10^5 pps è scelto per evitare che gli impulsi luminosi dovuti a due particelle che arrivano in successione si sovrappongano. Difatti l'intensità luminosa a partire dall'istante in cui la luce di scintillazione è prodotta, $t=0$ è data dalla legge:

$$I(t) \propto e^{-\frac{t}{\tau}} \quad [6.1]$$

dove τ è il tempo di decadimento [16]. In tal modo, poiché la vita media della luce di scintillazione nello CsI(Tl) è 10^{-6} s, scegliendo un intervallo temporale medio fra gli impulsi pari a 10^{-5} s, la luce prodotta dalla prima particella, dopo un tempo pari a 10 volte 10^{-6} s, cioè 10^{-5} s, sarà attenuata di un fattore $1/e^{10}$, ossia è praticamente nulla.

In tale ambito, l'uscita del fotomoltiplicatore è stata collegata ad un discriminatore, con la soglia appropriata a selezionare solamente gli impulsi dovuti ai protoni e rigettare di conseguenza il fondo, al fine di effettuare un accurato conteggio delle particelle.

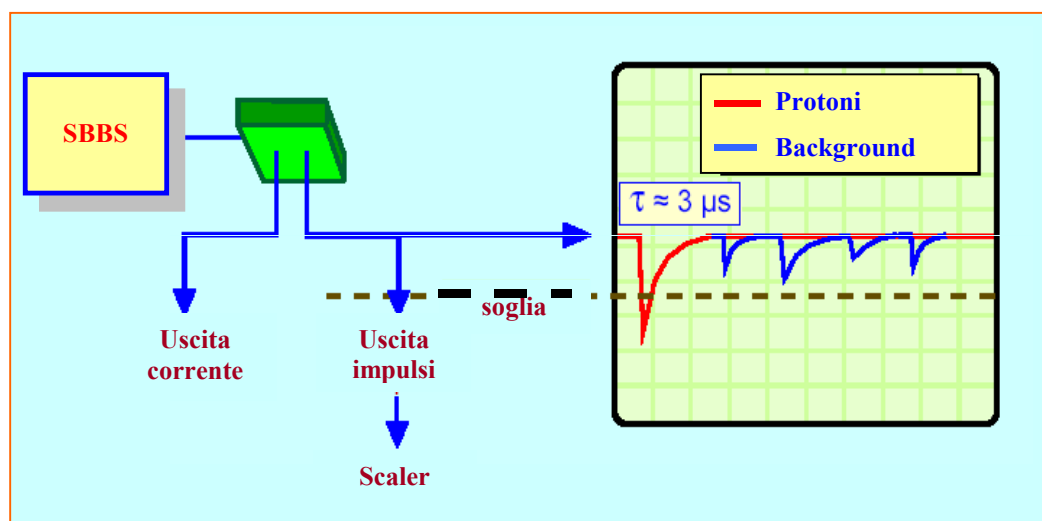


Figura 6.8-Schema d'acquisizione nel modo a impulsi.

La misura è stata eseguita mantenendo costante la corrente del Tandem e rivelando le particelle che attraversano ogni foro selezionato della Liga-mask. Si è così potuto riportare su grafico il tasso di conteggio delle particelle del fascio in funzione dell'area del foro, e si evince come atteso un andamento lineare, in quanto la corrente totale è direttamente proporzionale all'area del foro, nell'ipotesi che essa sia distribuita omogeneamente. Si è provato a misurare contemporaneamente la corrente con strumenti convenzionali, ossia tramite una faraday cup, ma ad intensità così basse il segnale prodotto non era discriminabile dal fondo.

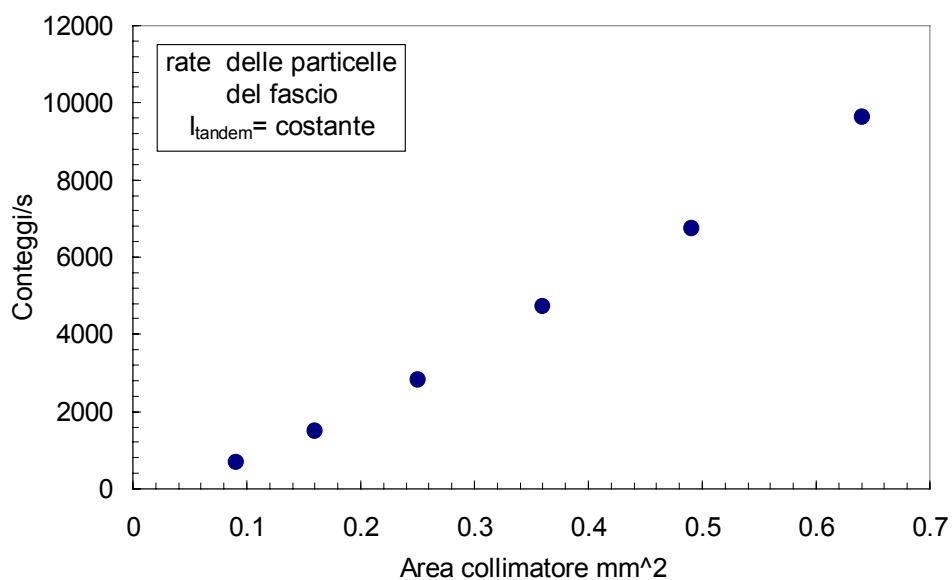


Figura 6.9-Tasso di conteggio misurato, delle particelle del fascio in funzione dell'area del collimatore (le barre di errore sono all'interno del simbolo).

Foro liga mm ²	Conteggi/s	errore
0.09	678	± 26
0.16	1510	± 39
0.25	2815	± 53
0.36	4738	± 69
0.49	6745	± 82
0.64	9642	± 98

Tabella.6.1-Conteggi delle particelle rivelate in funzione del foro selezionato della Liga-mask. L'errore è stato stimato mediante la radice quadrata del numero dei conteggi, in accordo con la statistica di Poisson.

6.3 Scansione SBBS

Il dispositivo SBBS è stato utilizzato per eseguire una ricostruzione del profilo trasverso del fascio mediante una scansione dello stesso sul piano perpendicolare ad esso.

L'idea originaria per attuare tale operazione era quella di utilizzare una maschera di nichel posta a contatto con l'elemento sensibile, il cristallo di CsI(Tl), di spessore almeno 300 μm per arrestare il fascio. Due fenditure praticate sulla maschera larghe 20 μm , disposte perpendicolarmente l'una rispetto all'altra, avrebbero selezionato solo una porzione di fascio (vedi fig-6.10). Facendo uso di un sistema di acquisizione sincronizzato con il sistema di movimentazione, con una sola scansione sarebbe stato possibile estrarre i due profili ortogonali. Purtroppo a causa dell'estrema difficoltà a realizzare nei tempi previsti una maschera con tali caratteristiche, al momento delle misure non è stato possibile averne una a disposizione, pertanto la si è sostituita con una maschera di alluminio, a forma di triangolo rettangolo, con i bordi perfettamente squadri. Tale maschera è spessa 4 mm ed è in grado di arrestare completamente il fascio di protoni di energia 9.3 MeV, il cui range è pari a 543 μm [17].

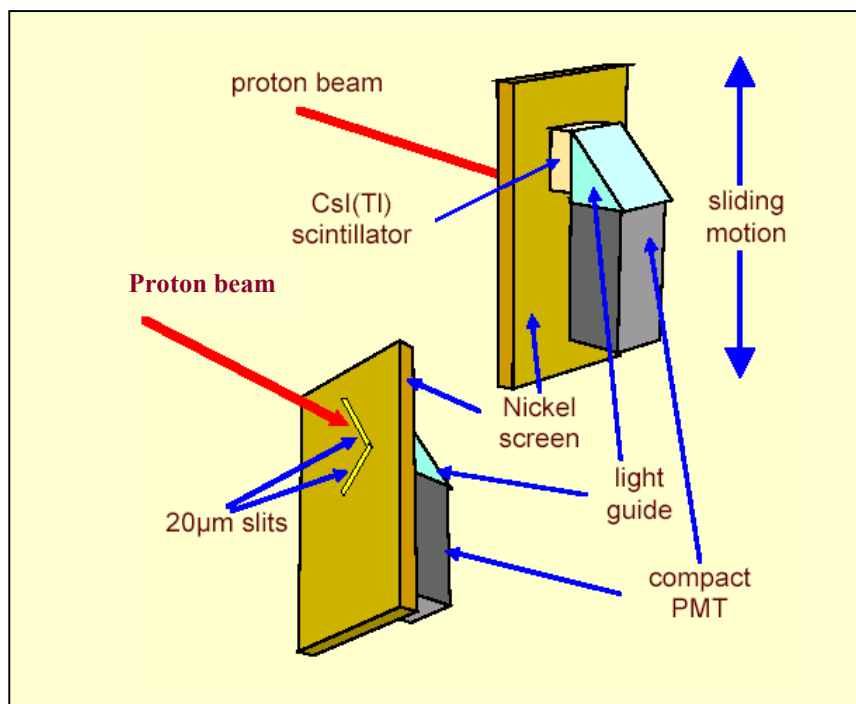


Figura 6.10-Schema di SBBS con le due fenditure.

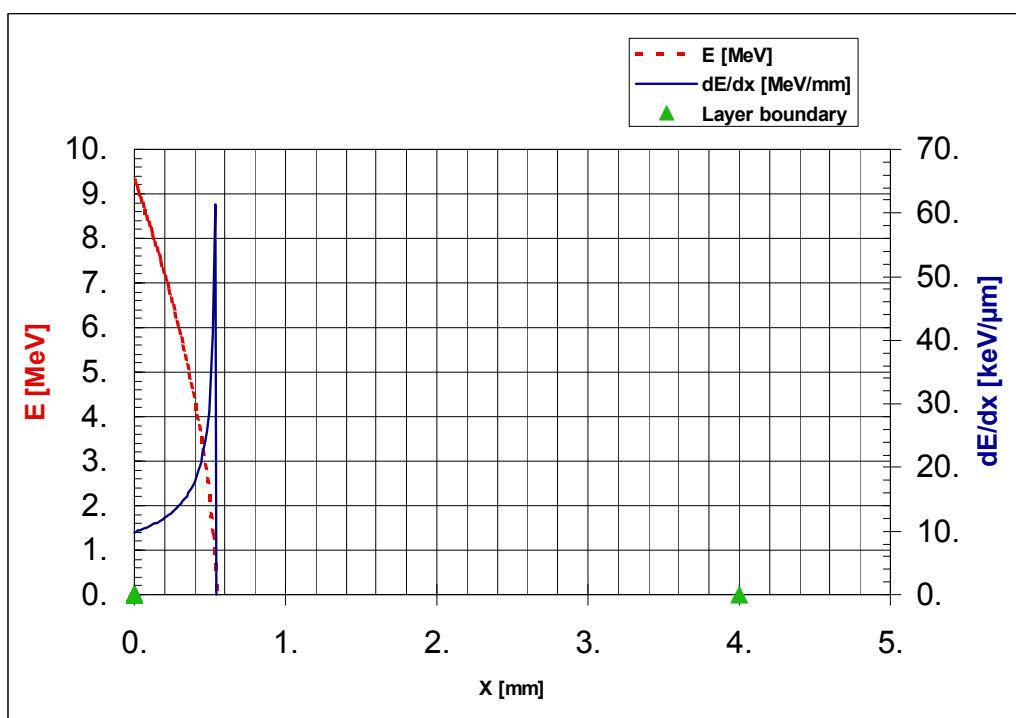


Figura 6.11-Grafico della perdita d'energia e del range dei protoni nell'alluminio, i due triangolini rappresentano lo spessore della maschera

L'operazione di scansione del fascio si può così descrivere:

il μ -SBBS, con la maschera triangolare posta di fronte al sensore, è traslato lungo una direzione in modo tale da intercettare il fascio. Durante questo movimento, la maschera si frapperà fra il fascio e il sensore arrestandone una parte con una conseguente diminuzione dell'intensità rivelata fino al punto in cui il fascio è completamente arrestato dalla maschera e non vi è più produzione di luce di scintillazione. Continuando la scansione, il fascio andrà di nuovo a colpire gradualmente il cristallo, permettendo di produrre e rivelare luce di scintillazione, aumentando sempre più in intensità man mano che la maschera si allontana dal fascio, finché il sensore viene nuovamente colpito per intero riottenendo così l'intensità massima (vedi fig.6.12).

Calcolando la derivata di tale profilo incrementale, si ottengono i profili trasversi del fascio lungo gli assi X e Y. Ciascuno di questi è stato fittato da una gaussiana, e per entrambi si è trovato una FWHM pari a 280 μm , che indica un fascio a simmetria circolare come atteso, visto il perfetto allineamento effettuato precedentemente. Nell'analizzare i dati della scansione si è tenuto conto del fatto che i bordi della maschera sono inclinati di 45° rispetto alla direzione di

avanzamento, così la dimensione del passo è stata scalata di un fattore

$$\frac{\sqrt{2}}{2}.$$

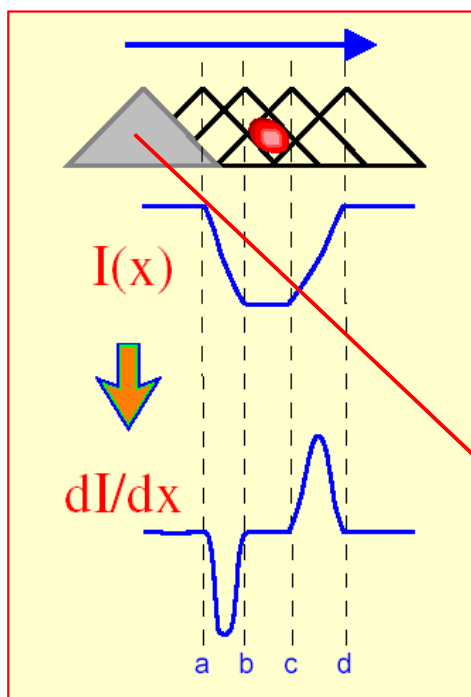


Figura 6.12-Rappresentazione grafica dell'operazione di scansione mediante μ -SBBS. E' possibile vedere l'informazione incrementale e la relativa derivata, che consente di estrarre i profili nel piano trasverso, lungo gli assi x e y.

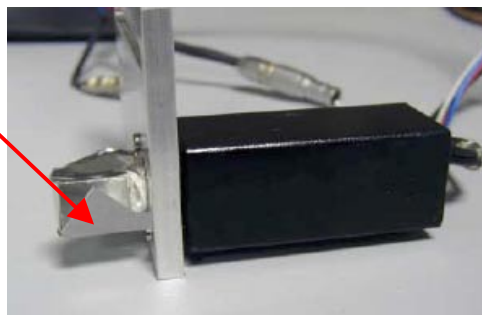


Figura 6.13-Sensore μ -SBBS

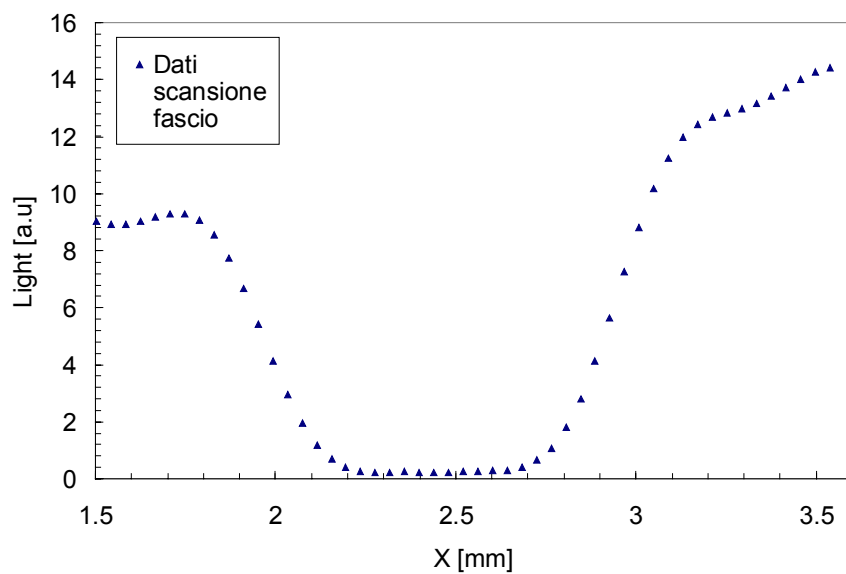


Figura.6.14-Dati scansione del fascio attraverso il foro da 500 μm

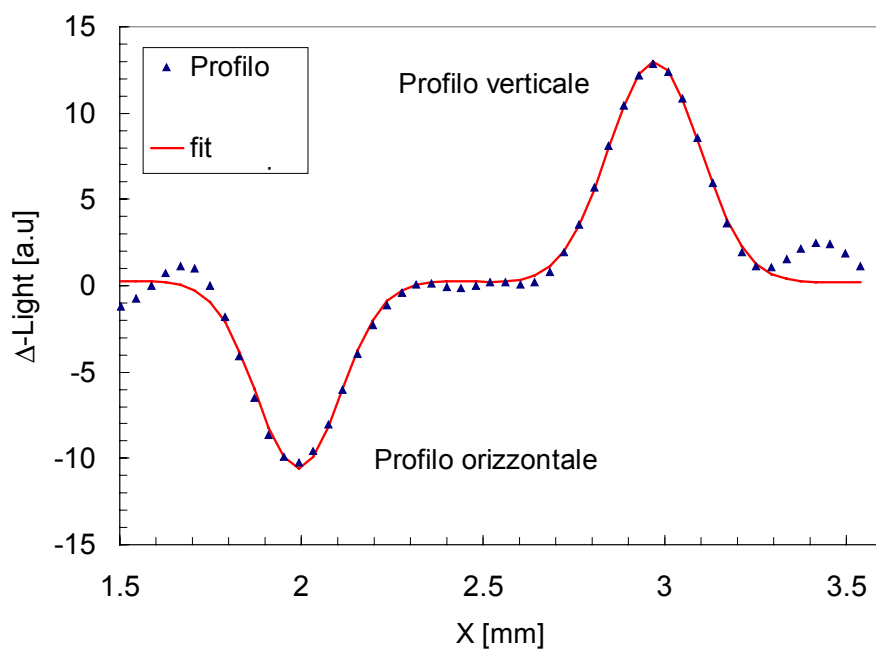


Figura.6.15-Profilo della scansione e relativo fit.

Capitolo 7

7.1 Irraggiamento PMMA ed Etching

A conclusione dei test dei dispositivi menzionati, sono stati eseguiti alcuni irraggiamenti su campioni di PMMA, dello spessore di 500 micron.

I campioni utilizzati sono stati disposti su un piano perpendicolare al fascio subito dopo la Liga-mask, ed esposti all'irraggiamento per un determinato intervallo di tempo dopo di che sono stati trattati chimicamente per la fase di etching, in modo tale da asportare il materiale che ha subito il danno molecolare al passaggio delle particelle.

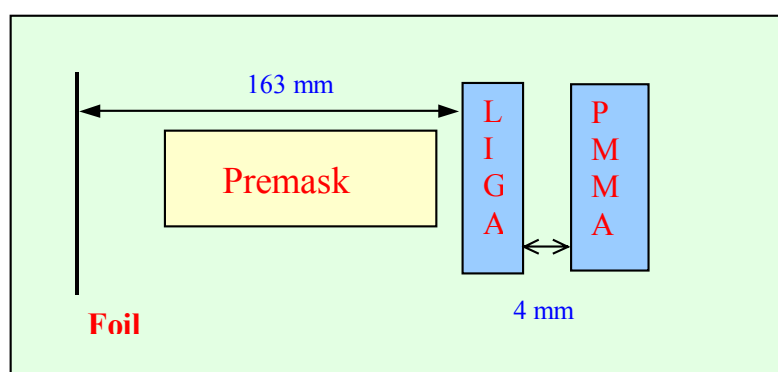


Figura 7.1-Set up d'irraggiamento del PMMA.

Qui di seguito sono mostrate alcune immagini dei campioni irraggiati e trattati chimicamente.

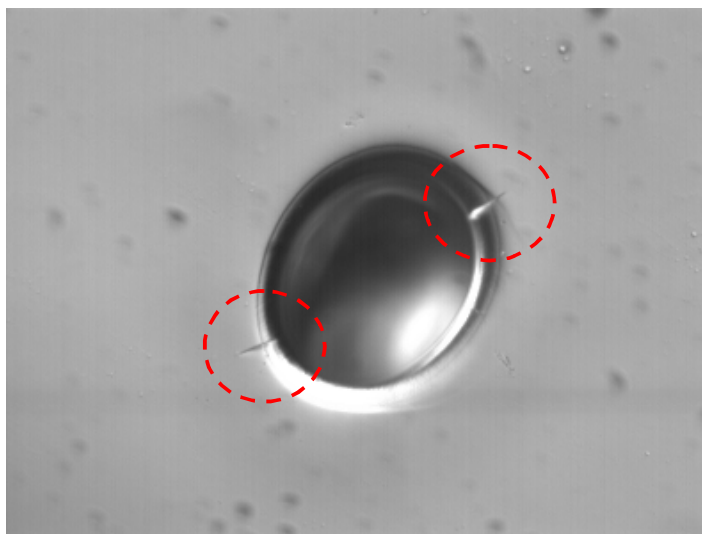


Figura 7.2- Immagine di un foro sul PMMA dopo la fase di etching; all'interno delle zone cerchiare in rosso si possono notare delle piccole fratture probabilmente causate da calore.

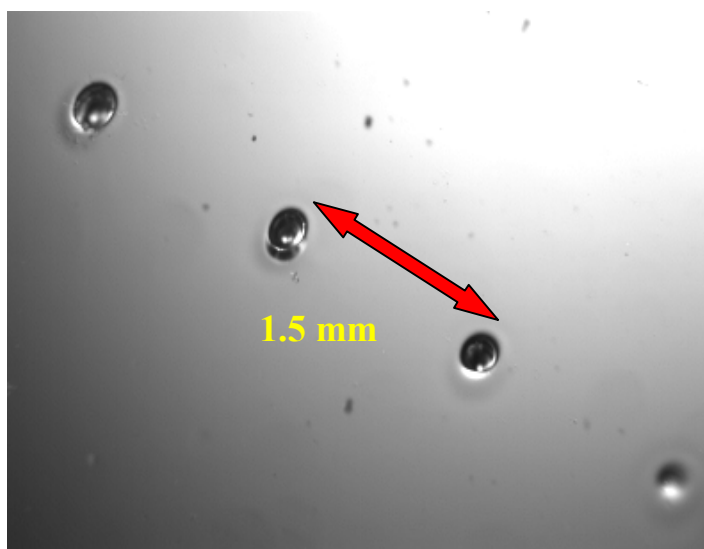


Figura 7.3- Immagine di una serie di fori di dimensioni decrescenti.

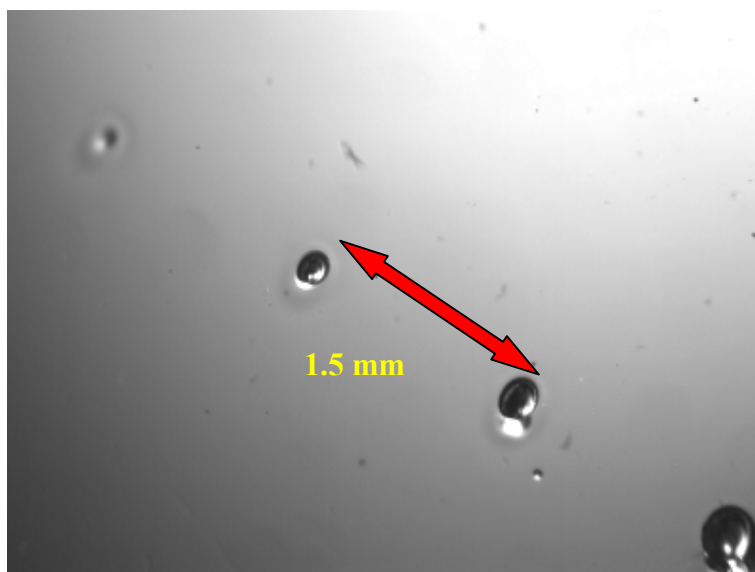


Figura 7.4 Immagine di una serie di fori di dimensioni decrescenti più piccoli dei precedenti.

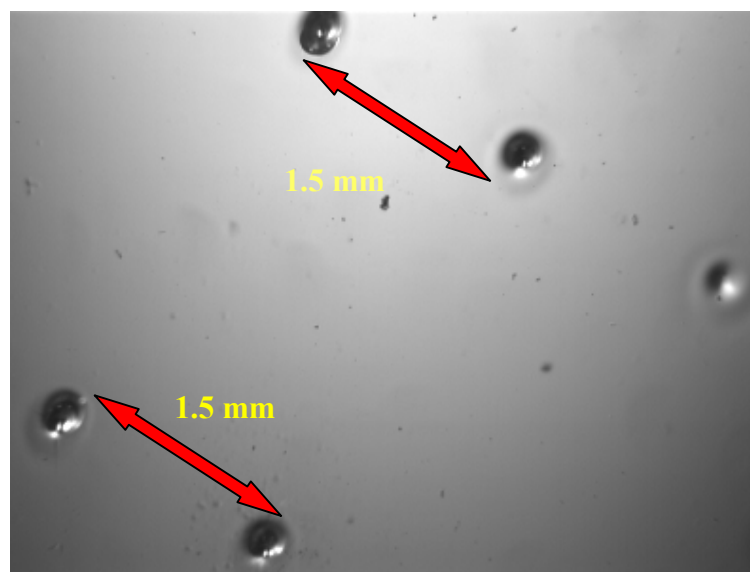


Figura 7.5-Immagine dei fori sullo stesso campione di PMMA eseguiti in due passi successivi mediante traslazione del medesimo.

Capitolo 8

8.1 Conclusioni

La necessità di apportare un significativo contributo al controllo del processo della Litografia Profonda con Protoni (DLP), ha portato all'adozione di tecniche di diagnostica per fasci di dimensioni dell'ordine delle decine di micron, che consentano di ricostruire con estrema precisione il profilo della distribuzione della carica trasportata e la relativa corrente. I dispositivi che abbiamo testato sotto fascio, hanno mostrato di possedere le caratteristiche appropriate ad un utilizzo nell'ambito della DLP, sia in termini di risoluzione spaziale che di sensibilità, ed anche per la semplicità di utilizzo. I risultati delle misure effettuate hanno mostrato che il sensore per la visualizzazione del profilo trasverso bidimensionale (beam imaging) denominato SFOP, è in grado di lavorare con fasci di diametro sino a poche decine di micron, che trasportano correnti dell'ordine delle decine di femtoAmpere. Tale dispositivo ha consentito di semplificare in maniera molto significativa le procedure di allineamento dei collimatori adoperati per ottenere i microfasci, diminuendo considerevolmente i tempi necessari e migliorando la precisione. E' stato anche possibile osservare on line, le fluttuazioni in intensità,

forma e posizione che subiva il fascio nel tempo. Questo grazie al breve tempo di decadimento, circa 4 ms, delle fibre in vetro drogate al Terbio.

Il dispositivo atto a misurare la corrente del fascio, denominato μ -SBBS, ha presentato una sensibilità che nella modalità di conteggio degli impulsi è limitata solamente da fattori statistici. Questo è un aspetto molto importante per l'utilizzo nella DLP, in quanto l'accuratezza della stima per la dose depositata nel campione irraggiato, è un aspetto cruciale per l'ottenimento di micro-componenti di elevata qualità. Inoltre, la possibilità di procedere ad una autocalibrazione con le procedure già descritte, fa sì che μ -SBBS possa essere in grado di fornire una misura assoluta della corrente del fascio incidente.

È chiaro che limitare l'utilizzo dei suddetti sensori alla sola DLP potrebbe apparire riduttivo, e infatti non escludo che si possano trovare altri ambiti di applicazione, laddove si debba fare uso di micro-fasci per le più svariate applicazioni.

Bibliografia

- [1] P.Finocchiaro et al., “Particle Detectors for Low Intensity Ion Beam Diagnostics”, Invited talk at the 15th International Conference on the application of Accelerators in research and Industry, 4-7 Novembre 1998, Denton, Texas, USA.
- [2] G. Ciavola “Fasci di ioni radioattivi ai Laboratori Nazionali del Sud dell’INFN il progetto EXCYT. Il Saggiatore 1999.
- [3] P.Finocchiaro et al., “Low intensity ion-beam diagnostic with particle detectors”, Invited talk at the DIPAC 97, 12-14 Ottobre 1997, Frascati (Roma).
- [4] G.Cuttone et al., “Radioactive Ion Beam Diagnostic for the EXCYT project at LNS”, proceedings of the 7th International Conference on Heavy Ion Accelerator Technology, 18-22 September 1995, Camberra, Australia.
- [5] L. Calabretta et al., Nucl. Instr. And Meth. A268 (1998) 496.
- [6] A. Rovelli et al., “beam diagnostic at LNS”, proceedings of the DIPAC 97, 12-14 October 1997, Frascati (Roma).
- [7] P.Finocchiaro et al., “Scintillanting Detectors for Low Intensity Ion Beam Monitoring”, IEEE Transaction on Nuclear Science”, Vol 45, No.3, June 1998.

- [8] P.Finocchiaro et al., “A scintillating fibre-based profiler for low intensity ion beam”, Nuclear Instruments & Methods A 385 (1997) 31 FIBBS.
- [9] P.Finocchiaro et al., “Low Intensity Ion Beam Profiling with Glass Scintillanting Fibres”, Nuclear Instruments & Methods A419 (1998) 83 GFIBBS.
- [10] S. Cappello et al., “Low Beam Imager & Identifier”, Nuclear Instruments & Methods A 479 (2002) 243 LEBI.
- [11] P.Finocchiaro “Particle Detectors for Low Intensity Ion Beam Diagnostic” invited talk at the CIAE Beijng, Pechino, 28 Marzo, 3 Aprile 2002.
- [12] Tesi di laurea P.Oliva “proprietà di imaging di sistemi radiografici” A.A 1998-99, Pisa.
- [13] P.Finocchiaro et al., “A self-calibrating ion beam profiler based on a CsI scintillator”, Nuclear Instruments & Methods A 437 (1999) 552-556 SBBS.
- [14] G.F.knoll. “Radiation detection and measurements”, 1979
- [15] B. Volckaerts et al., “Deep lithography with Protons : a generic fabrication tecnology for refractive micro.optical components and modules”

- [16] B. Volckaerts et al., “Optmizing deep Lithography with Protons using low-intensity ion beam monitors and stable tandem acceleration proton beam at LNS” Catania 15/06/01
- [17] P.F Eloss and Bragg <http://pfmac.lns.infn.it/eloss> version 2.04.

Ringraziamenti

Porgo i miei ringraziamenti al mio Relatore, Prof. G. Bellia per avermi dato l'opportunità di svolgere il presente lavoro di tesi.

Ringrazio con sincero affetto il Dr Paolo Finocchiaro, per i preziosi consigli datemi durante lo svolgimento del lavoro di tesi, per la sua amicizia e pazienza dimostratami durante tutto il periodo di permanenza ai LNS.

Un ringraziamento di cuore va all'amico Dr G.Cosentino per tutto quello che egli ha fatto durante tutto il lavoro di tesi, dai semplici consigli all'incitarmi ad andare avanti nei momenti di sconforto, gli sarò sempre riconoscente.

Ringrazio i miei genitori e la famiglia tutta per essermi sempre stato accanto e sostenutomi in tutti questi anni.

Un sincero grazie va al mio amico Dr C.Anzalone per avermi sopportato durante gli ultimi mesi.

Voglio ricordare anche tutti gli amici che hanno condiviso con me gioie e dolori dello studio universitario.

Grazie a tutti.