

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DELL'INSUBRIA

Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali

Anno Accademico 2006-2007

Laurea Triennale in Fisica



*UN TRACCIATORE A FIBRE SCINTILLANTI PER MONITORING
E TRACKING DI FASCI DI ALTA INTENSITÀ*

Laureanda: Daniela Lietti

Matricola 617710

Relatore: Dr.ssa Michela Prest
Università degli Studi dell'Insubria

Correlatore: Dr. Davide Bolognini
Università degli Studi dell'Insubria



*a mio nonno Antonio,
...perché saresti stato fiero di me.*

Indice

Introduzione	1
1 LE FIBRE SCINTILLANTI	3
1.1 Gli scintillatori	3
1.1.1 Gli scintillatori organici	4
1.1.2 Il meccanismo di scintillazione nei materiali organici	5
1.2 Le fibre scintillanti	6
1.2.1 I fotomoltiplicatori	9
1.3 I tracciatori a fibre	12
1.3.1 Esperimenti con tracciatori a fibre	13
2 ERPA	17
2.1 Le caratteristiche di ERPA	17
2.1.1 Il detector	18
2.1.2 Procedura di costruzione	19
2.1.3 Le fibre scintillanti	21
2.1.4 I fotomoltiplicatori	21
2.1.5 Le maschere di accoppiamento	23
2.1.6 L'elettronica di frontend e l'elettronica di lettura	25
2.2 Le camere al silicio	28
2.3 Caratterizzazione in laboratorio	29
3 ALLE PRESE CON UN VERO ACCELERATORE: la BTF e l'SPS	31
3.1 La Beam Test Facility dei Laboratori Nazionali di Frascati	31
3.1.1 Caratteristiche e settaggio del fascio	35
3.1.2 Molteplicità e beam profile	39
3.2 La linea H8 dell'SPS del CERN	42
3.2.1 Il Super Proton Synchrotron	42
3.2.2 La linea H8	42
3.2.3 Forma e divergenza del fascio di protoni	44

4	ANALISI DATI E RISULTATI	47
4.1	Procedura di analisi	47
4.1.1	Piedestallo e common mode	48
4.1.2	Identificazione del cluster	49
4.1.3	Ricostruzione delle tracce	53
4.2	Misure alla BTF	53
4.2.1	Il setup sperimentale	53
4.2.2	Risoluzione spaziale	55
4.2.3	Multiplo scattering	57
4.3	Misure all'SPS	58
4.3.1	Il fenomeno del channeling e la collaborazione H8RD22	58
4.3.2	Il setup sperimentale	61
4.3.3	Profilo del fascio	62
4.3.4	L'uso del fibrometro per misure di channeling	62
	Conclusioni	70
	A Cenni teorici sul fenomeno del multiplo scattering	71
	Lista degli acronimi	79
	Lista delle figure	80
	Lista delle tabelle	81
	Bibliografia	83

Introduzione

I rivelatori a scintillazione sono entrati nel mondo della fisica nucleare e delle particelle circa 60 anni fa, diventando ben presto uno degli elementi fondamentali di ogni esperimento. Sono costituiti da materiali in grado di assorbire energia, sotto forma di calore o di radiazione elettromagnetica, e successivamente di riemetterla attraverso un debole flash luminoso, detto *luce di scintillazione*. Accoppiando questi particolari materiali a dei sistemi di amplificazione (i fotomoltiplicatori) è possibile convertire la luce di scintillazione in segnale elettrico e ottenere, dalla successiva analisi dei segnali, informazioni sulla posizione e sulle caratteristiche della radiazione incidente.

Tali rivelatori nascono agli inizi del secolo scorso, ma inizialmente il loro utilizzo è limitato dalla mancanza di un oggetto in grado di rivelare ed amplificare il segnale prodotto: l'occhio umano, infatti, risultava insufficiente a distinguere segnali molto deboli. La successiva invenzione, da parte di Curran e Baker, dei tubi fotomoltiplicatori permise agli scintillatori di diventare uno degli strumenti maggiormente utilizzati nel mondo della fisica.

In particolare, tra tutti i tipi di rivelatori organici a scintillazione, le fibre scintillanti occupano un posto fondamentale, grazie al fatto che coniugano le caratteristiche tipiche di questi materiali (basso costo e rapida risposta temporale) con la praticità di utilizzo (in termini di diametro, lunghezza e superfici copribili). In alcuni casi, la risposta temporale dell'ordine del ns e l'elevata flessibilità li fa preferire ai tradizionali rivelatori a semiconduttore a discapito, però, della precisione sulla risoluzione spaziale e della peggiore risoluzione energetica.

Questo lavoro di tesi illustra la progettazione, la realizzazione e la caratterizzazione di un tracciatore a fibre scintillanti. Le caratteristiche principali di questi tipi di scintillatori, insieme alle proprietà generali dei materiali scintillanti e dei rivelatori a scintillatori organici, verranno riassunte nel capitolo 1: le loro performance in termini di risoluzione spaziale e temporale, insieme al basso costo di produzione, li rendono particolarmente adatti al tracciamento e al monitoraggio di fasci di diverse intensità.

Il tracciatore ERPA (Enhanced Radiation and Particle Apparatus) consta di due moduli, ciascuno equipaggiato con un piano x e un piano y per la corretta ri-

costruzione delle tracce delle particelle incidenti. Ciascun piano è costituito da 2 strati di 64 fibre scintillanti da 1 mm di diametro (Bicron, BCF-10), disposte a formare una geometria detta *doublet ribbon* ed accoppiate ad un fotomoltiplicatore multianodo da 64 canali della HAMAMATSU. L'elettronica di readout dei 2 fotomoltiplicatori si basa sull'utilizzo della coppia di ASIC VA64TAP2.1 e LS64_2 (Gamma Medica-IDEAS, Norvegia), che amplificano i segnali, li formano e permettono sia una lettura analogica che la generazione del trigger, dal momento che ciascun canale è provvisto anche di un discriminatore. La necessaria fase preliminare di caratterizzazione di ERPA è stata svolta presso il Laboratorio Didattico di Fisica dell'Università degli Studi dell'Insubria di Como sfruttando i raggi cosmici. La descrizione dettagliata della realizzazione, installazione e caratterizzazione del tracciatore verrà mostrata nel capitolo 2.

Il tracciatore a fibre inoltre è stato testato presso la Beam Test Facility (BTF) dei Laboratori Nazionali di Frascati dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare e presso la linea H8 del Super Proton Synchrotron (SPS) del CERN di Ginevra: la descrizione delle aree sperimentali e delle caratteristiche dei fasci utilizzati sarà oggetto del capitolo 3.

Date le ottime caratteristiche del tracciatore, si è deciso di utilizzarlo presso la linea H8 dell'SPS del CERN di Ginevra per misure di channeling di cristalli di silicio incurvati. Il fenomeno del channeling descrive l'interazione di particelle all'interno di cristalli: rispetto a quanto accade in un materiale amorfo, nei cristalli la perdita di energia per scattering multiplo o per ionizzazione è molto piccola. Sotto opportune condizioni, l'interazione delle particelle con il cristallo può quindi essere descritta come il moto delle particelle stesse all'interno di un canale. Nel caso di cristalli incurvati, le particelle seguono la curvatura del cristallo e possono quindi essere deviate dalla direzione del fascio incidente.

L'ultimo capitolo della tesi presenterà infine, oltre al metodo di analisi dei dati, i risultati sperimentali ottenuti nei due beam test. La presa dati presso la BTF di Frascati ha permesso di misurare la risoluzione spaziale e di studiare il fenomeno del multiplo scattering a basse energie e la sua influenza sulla risoluzione spaziale. Nel beam test all'SPS invece è stato possibile studiare il fenomeno del channeling per un fascio di protoni da 400 GeV/c. Una parte del capitolo 4 sarà quindi dedicata ad una descrizione più dettagliata del fenomeno del channeling in cristalli incurvati e della possibilità di sfruttarlo in un sistema di collimazione.

Capitolo 1

LE FIBRE SCINTILLANTI

Le fibre scintillanti rappresentano uno dei possibili detector per il tracciamento e il monitoraggio di fasci di particelle cariche di diverse intensità, grazie al basso costo di produzione, ai tempi di risposta molto rapidi e all'elevata flessibilità. Questo capitolo è dedicato alla descrizione del meccanismo di scintillazione nei materiali organici e, in particolare, delle principali proprietà delle fibre scintillanti. Verranno analizzate in dettaglio la struttura interna delle fibre, il trasporto della luce attraverso la fibra stessa, ed infine la necessità di accoppiamento con un fotomoltiplicatore per amplificare il segnale in uscita. Nella seconda parte del capitolo si parlerà, invece, delle caratteristiche e delle performance dei tracciatori a fibre scintillanti.

1.1 Gli scintillatori

Uno scintillatore è un materiale capace di emettere impulsi di luce, in genere visibile o ultravioletta, quando viene attraversato da fotoni di alta energia o da particelle cariche. La particella incidente cede parte della propria energia allo scintillatore causando l'eccitazione di un elettrone che si sposta in un livello ad energia superiore; la successiva diseccitazione causa l'emissione di un fotone di energia relativamente bassa, tipicamente nel visibile. Tale impulso di luce viene poi rivelato ed amplificato da opportuni sensori, i fotomoltiplicatori, di cui si parlerà in modo dettagliato nel paragrafo 1.2.1. Esistono diverse tipologie di scintillatori che si distinguono principalmente per il tipo di materiale di cui sono composti, i tempi di risposta, le lunghezze d'onda emesse, l'efficienza di scintillazione (cioè quanta energia viene convertita in luce). La figura 1.1 mostra una foto di alcune delle svariate forme che si possono realizzare utilizzando gli scintillatori.

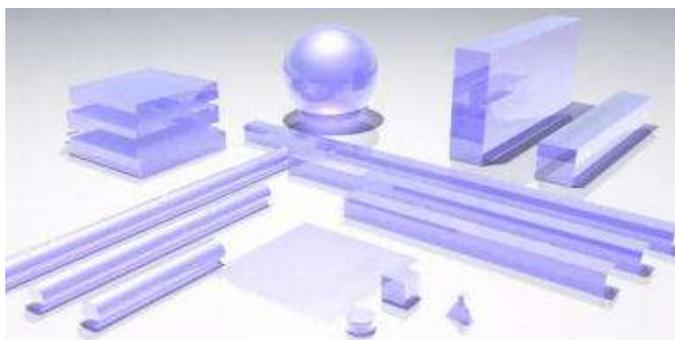


Figura 1.1: Esempio di materiali scintillanti: gli scintillatori organici più comunemente utilizzati sono gli scintillatori plastici che possono essere lavorati fino ad assumere svariate forme.

1.1.1 Gli scintillatori organici

Negli scintillatori organici la luminescenza è dovuta a singole molecole [1], tipicamente poste in una soluzione dove anche il solvente è costituito da una sostanza organica¹, in forma solida o liquida. Nel caso solido, come per esempio nelle fibre scintillanti, si tratta solitamente di un polimero (polistirene, poliviniltoluene o polimetilmetacrilato - PMMA²) o di un cristallo.

La molecola responsabile della scintillazione (o *fluorescenza*) è chiamata fluoro primario. Tipicamente la lunghezza di attenuazione della luce emessa da tale molecola è molto piccola e la radiazione viene riassorbita dallo stesso fluoro primario dopo pochi centimetri. Per questo motivo spesso viene inserita una seconda molecola scintillante, detta fluoro secondario: questo secondo elemento ha il compito di assorbire la luce emessa dal fluoro primario e di riemetterla ad una lunghezza d'onda maggiore in modo tale da garantirne la trasmissione fino all'estremità dello scintillatore. Solitamente il rapporto tra le concentrazioni dei due elementi è di 1:100.

Le proprietà degli scintillatori organici possono essere così riassunte:

- l'emissione della radiazione luminosa avviene in tempi molto brevi, minori di 10 ns [2], il che rende gli scintillatori organici i rivelatori più veloci di questa categoria;
- la risposta luminosa è inferiore rispetto ai migliori scintillatori inorganici e sono quindi necessari amplificatori più performanti per l'acquisizione della luce emessa;

¹Solitamente vengono impiegati materiali debolmente scintillanti.

²Si tratta di molecole organiche dotate di anelli aromatici, in cui il fotone incidente eccita livelli rotazionali o vibrazionali.

- sono molto flessibili; grazie a questa proprietà sono realizzabili configurazioni geometriche non possibili con le rigide strutture cristalline degli scintillatori inorganici.

1.1.2 Il meccanismo di scintillazione nei materiali organici

Nella maggior parte dei casi, il fenomeno della luminescenza nelle sostanze organiche è dovuto alla transizione degli elettroni degli orbitali π in molecole costituite da anelli benzenici; le vibrazioni di queste molecole aromatiche causano la degenerazione degli orbitali π e il successivo splitting dei livelli di singoletto e di tripletto in sotto-livelli vibrazionali (figura 1.2).

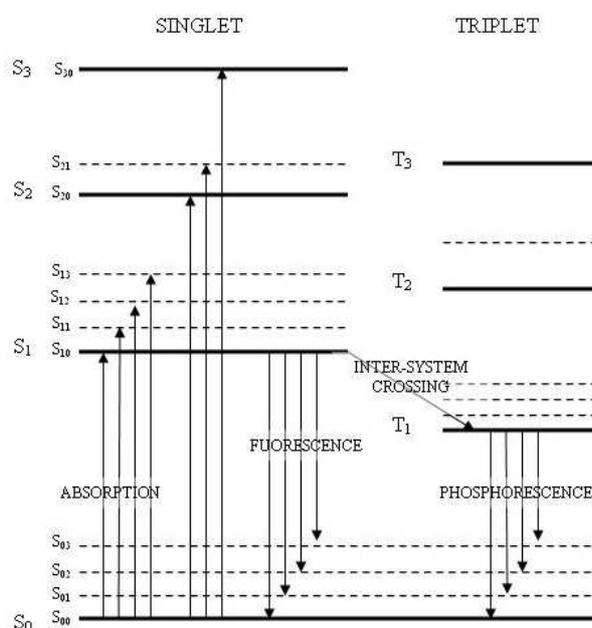


Figura 1.2: Transizioni di elettroni negli orbitali π di una molecola di materiale scintillante organico: nella parte a sinistra è raffigurato il processo di *fluorescenza*, dovuto alla transizione di livelli di singoletto, mentre nella parte a destra è rappresentato quello della *fosforescenza*, dovuto alla transizione di livelli di tripletto.

Il passaggio di una particella all'interno dello scintillatore causa una transizione dal livello fondamentale (S_{00} in figura 1.2) ad un livello eccitato di singoletto (S_{1n}). Il decadimento ad un livello vibrazionale eccitato (S_{10}) avviene nell'arco di qualche picosecondo in maniera non radiativa; la successiva transizione ad uno dei sotto-livelli dello stato fondamentale (S_{0n}) comporta l'emissione di fotoni nel

range del visibile. Questo processo è noto come *fluorescenza*. Un altro processo dovuto alla transizione da livelli di tripletto, la *fosforescenza*, è presente quando la transizione tra i livelli è proibita da regole di selezione sugli spin degli elettroni: in questo caso la scala temporale di emissione è nettamente maggiore (può arrivare anche a qualche ora) a causa della bassa probabilità di transizione per unità di tempo dovuta alla modifica dello spin. Esistono quindi due componenti principali nell'evoluzione temporale dell'emissione di radiazione: la componente *fast* dovuta alla transizione da livelli di singoletto, e la componente *slow* o ritardata, dovuta alla transizione da livelli di tripletto; solitamente però, la componente *slow* risulta trascurabile nel computo totale della luce emessa dal materiale organico. In virtù di quanto appena detto l'andamento temporale della luce emessa in base ai tempi tipici di decadimento può essere descritta con una legge di tipo esponenziale:

$$N(t) = A \exp\left(\frac{-t}{\tau_F}\right) + B \exp\left(\frac{-t}{\tau_S}\right) \quad (1.1)$$

dove τ_F e τ_S sono i tempi di risposta rispettivamente della componente *fast* e di quella *slow*, mentre le costanti A e B variano al variare del materiale e permettono di distinguere tra materiali fluorescenti e fosforescenti.

1.2 Le fibre scintillanti

Le fibre scintillanti (figura 1.3) sono sostanzialmente fibre ottiche alle quali sono state aggiunte molecole di sostanze scintillanti.

Le fibre sono composte da un nucleo interno trasparente, detto *core*, rivestito da un materiale, anch'esso trasparente, detto *cladding* (figura 1.4(a)). Nelle fibre scintillanti più comuni, il core è costituito da polistirene, drogato con molecole organiche, mentre il cladding esterno è realizzato con PMMA. A volte è presente anche un ulteriore rivestimento esterno, chiamato *Extra Mural Absorber* (EMA) che funge da guaina protettiva e limita gli effetti di cross-talk tra fibre contigue. I due materiali interni sono coassiali ed hanno indici di rifrazione diversi (polistirene $n=1.59$, PMMA $n=1.49$) per consentire il trasporto della luce all'interno delle fibre stesse ed evitarne la perdita lungo le pareti. Alcuni tipi di fibre, infine, sono dotati di un ulteriore strato di cladding, con indice di rifrazione inferiore rispetto al primo cladding, la cui funzione è quella di incrementare l'efficienza di trasporto della luce nella fibra stessa [3].

La luce emessa dal fluoro primario rimane all'interno delle fibre grazie al principio della riflessione totale sulla superficie di separazione tra core interno e cladding esterno. Considerando un'emissione isotropa di luce, l'angolo limite θ_C (o angolo

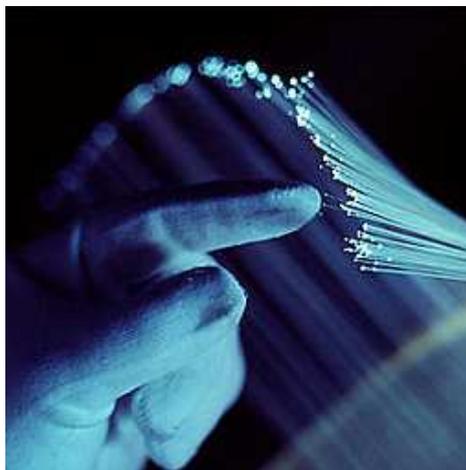


Figura 1.3: Grazie alla loro praticità di utilizzo, le fibre scintillanti sono ampiamente sfruttate per il tracking di fasci di particelle cariche di diverse intensità.

di *trapping*) per cui si ha riflessione totale si ricava dalla legge di Snell e vale:

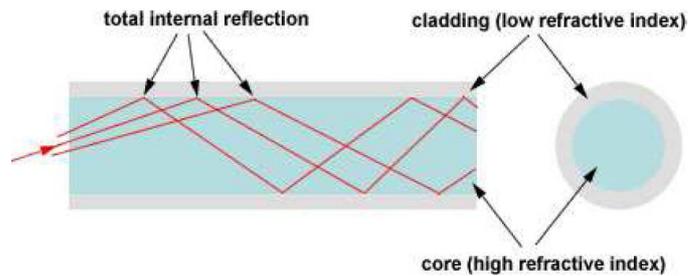
$$\theta_C = \arcsin\left(\frac{n_{\text{clad}}}{n_{\text{core}}}\right) \quad (1.2)$$

Se l'angolo di emissione ($\alpha = \pi/2 - \theta_C$ in figura 1.4(b)) è minore dell'angolo di trapping avviene la trasmissione dell'impulso luminoso lungo la fibra; la frazione di luce che giunge all'estremità della fibra dipende quindi dall'angolo solido definito dall'angolo α di emissione. Nel caso limite α_C la quantità di luce trasmessa è data da:

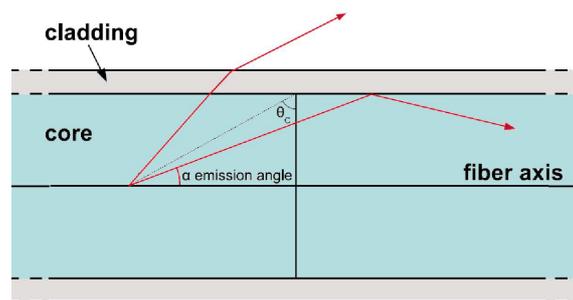
$$\epsilon = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{n_{\text{clad}}}{n_{\text{core}}}\right) \quad (1.3)$$

Tale formula è però valida solo se si considerano emissioni di luce sull'asse della fibra. Il rapporto del numero di fotoni catturati e di fotoni prodotti dipende quindi anche dalla posizione di emissione rispetto all'asse della fibra; i valori tipici vanno da un minimo di 3.4% vicino all'asse fino ad un massimo di 7% in prossimità del cladding. Inoltre le fibre presentano un'attenuazione esponenziale della luce con la distanza: percorrendo la fibra per un tratto z la luce viene attenuata di un fattore $\exp(-z/\lambda_{\text{att}})$. Nel polistirene, una MIP (Minimum Ionizing Particle) rilascia ~ 2 MeV/cm [4]; in una fibra da 500 μm di raggio³, il libero cammino medio risultante è $r \times \pi/2$, cioè 785 μm . Una MIP rilascia quindi ~ 157 keV all'interno della fibra. Considerando un'uscita luce tipica di ~ 8000 fotoni per MeV e una

³Il conto viene fatto per le fibre BCF-10 da 1 mm di diametro della Bicron ($\lambda_{\text{att}} \approx 2$ m), utilizzate per realizzare il tracciatore.



(a)



(b)

Figura 1.4: Le fibre scintillanti. (a) Struttura interna: le fibre sono composte da un filamento trasparente interno, detto *core*, rivestito da un materiale diverso, anch'esso trasparente, detto *cladding*. I due materiali coassiali hanno indici di rifrazione diversi per consentire il trasporto della luce all'interno delle fibre stesse per riflessione totale ed evitarne la perdita lungo le pareti. (b) Principio di riflessione su cui si basa il trasporto del segnale luminoso all'interno delle fibre: un raggio di luce emesso sull'asse della fibra si propaga all'interno del core solo se l'angolo di emissione è inferiore all'angolo critico θ_C .

efficienza di cattura di circa il 5%, il numero di fotoni prodotti è ~ 1260 , di cui solo ~ 63 rimangono intrappolati nella fibra e si propagano verso un'estremità di essa (un numero uguale procede nella direzione opposta). Per una fibra di 1 m di lunghezza solo ~ 40 dei 63 fotoni generati giungono all'estremità della fibra, dove un altro 10% viene perso per riflessione: in totale i fotoni prodotti dall'interazione di una MIP sono quindi solamente ~ 35 .

1.2.1 I fotomoltiplicatori

Come accennato nel paragrafo precedente, il numero di fotoni che arrivano all'estremità della fibra è molto piccolo; è quindi necessario un sistema di amplificazione in grado di generare un segnale abbastanza grande da poter essere letto. I device solitamente utilizzati per questo scopo sono i *fotomoltiplicatori* (PMT). Un tubo fotomoltiplicatore è un rivelatore elettronico di luce estremamente sensibile nell'ultravioletto, nel range del visibile e nel vicino infrarosso.

Lo schema di un fototubo è mostrato in figura 1.5: è costituito da un tubo di vetro, in cui è praticato il vuoto, contenente un fotocatodo, diversi elettrodi (i dinodi) e un anodo.

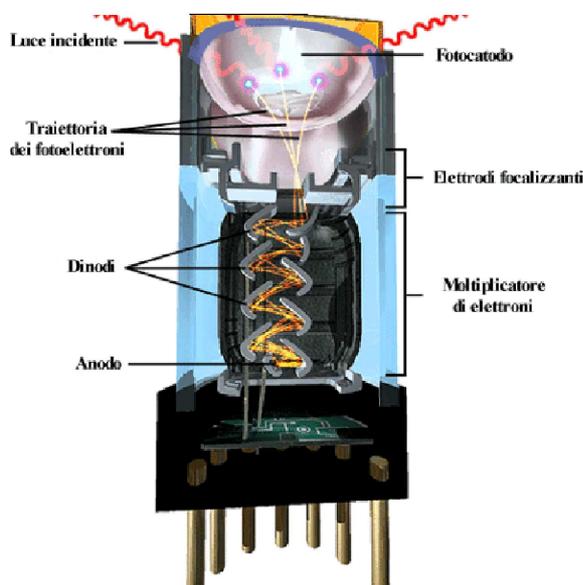


Figura 1.5: Schema di un tubo fotomoltiplicatore: i fotoni che incidono sul fotocatodo, convertiti per effetto fotoelettrico in fotoelettroni, vengono focalizzati sul sistema di moltiplicazione dei dinodi; il segnale viene poi rivelato da un anodo, a sua volta connesso all'elettronica di lettura.

Il funzionamento del fotomoltiplicatore è basato sull'interazione per effetto fotoelettrico della luce di scintillazione con il materiale del fotocatodo e sulla successiva emissione secondaria di elettroni da parte dei dinodi [5]. La superficie del fotocatodo è ricoperta di uno strato di materiale che favorisce l'effetto fotoelettrico; l'emissione di elettroni, detti *fotoelettroni*, in seguito all'interazione con il catodo, dipende dall'efficienza di quest'ultimo. Gli elettroni vengono quindi focalizzati da un apposito elettrodo verso lo stadio di moltiplicazione, costituito da una serie di dinodi, ciascuno connesso ad un potenziale superiore al precedente. Il primo elettrone emesso dal catodo subisce un'accelerazione a causa del campo elettrico tra il catodo e il primo dinodo, ed acquista energia cinetica sufficiente per giungere al primo dinodo dove provoca l'emissione secondaria di diversi elettroni di minore energia. Tali elettroni vengono a loro volta accelerati dalla differenza di potenziale, maggiore, tra il primo e il secondo dinodo e il processo si ripete per ciascuno dei dinodi presenti nel fototubo. Si ha così un fenomeno a cascata per cui un singolo fotone che colpisce il catodo provoca la produzione di moltissimi elettroni. Al termine della sequenza di dinodi, gli elettroni vengono raccolti da un anodo generando un impulso elettrico, che indica la rivelazione del fotone. L'amplificazione del dispositivo può arrivare fino a 10^8 e avviene in un intervallo di tempo dell'ordine del nanosecondo; la tipica efficienza quantica, cioè la percentuale di fotoelettroni prodotti nell'interazione con il materiale del catodo, è del 20% o 30% a circa 400 nm [2, 6]. L'alto guadagno, il basso rumore intrinseco, l'elevata risposta in frequenza e l'ampia superficie sensibile fanno sì che questi dispositivi siano largamente usati in fisica delle particelle associati agli scintillatori.

I fotomoltiplicatori del tipo descritto in precedenza risultano però poco pratici nel caso si utilizzino rivelatori a fibre scintillanti, a causa dell'elevato numero di canali presenti. Il problema può essere risolto utilizzando i fotomoltiplicatori multianodo (MAPMT, Multi Anode PhotoMultiplier Tube), apparsi sul mercato nei primi anni '80. Il MAPMT (figura 1.6(a)) è costituito da un singolo tubo contenente un fotocatodo, connesso ad un sistema di moltiplicazione di dinodi, e un anodo segmentato: in questo modo il dispositivo equivale a diversi fotomoltiplicatori che lavorano in parallelo, alimentati alla stessa tensione, ma più compatti e meno costosi (figura 1.6(b)).

Le caratteristiche dei fotomoltiplicatori multianodo sono le stesse dei PMT con l'eccezione di un minore guadagno, tipicamente dell'ordine di $10^5 - 10^6$; alcune caratteristiche del MAPMT della HAMAMATSU⁴ [6] usato per questo lavoro di tesi sono riassunte nella tabella 1.1.

⁴Sito internet: <http://www.hamamatsu.com>

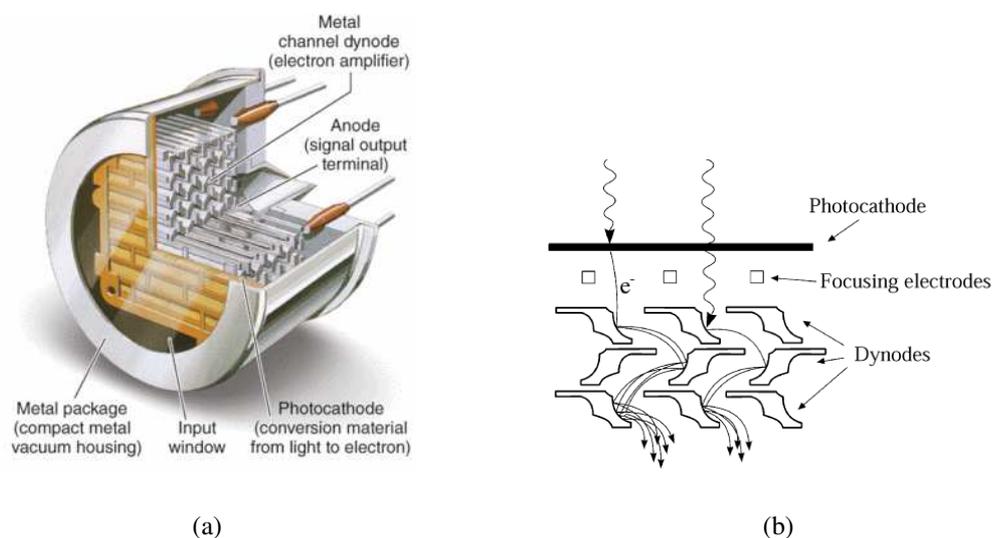


Figura 1.6: Schema di un fotomoltiplicatore multianodo. (a) Il MAPMT è costituito da un tubo con un fotocatodo, connesso ad un sistema di moltiplicazione di dinodi, e un anodo segmentato. (b) Il processo di moltiplicazione è identico a quello di un fotomoltiplicatore a singolo canale: ciascuno dei canali del fotomoltiplicatore multianodo lavora in parallelo con gli altri.

numero di canali	64 (8×8)
dimensioni dell'anodo	2×2 mm ²
guadagno	3.0×10 ⁵
corrente di buio anodica	0.2 nA
tempo di risposta	1.0 ns
efficienza quantica a 390 nm	21 %

Tabella 1.1: Alcune caratteristiche del fotomoltiplicatore multianodo R7600-M64 della HAMAMATSU.

1.3 I tracciatori a fibre

Grazie alla loro velocità di risposta (l'emissione di luce in seguito all'interazione con una particella carica avviene dopo meno di 10 ns), al loro basso costo e alla loro flessibilità (possono essere modellate in svariate forme e dimensioni), le fibre scintillanti sono ampiamente utilizzate in fisica delle particelle per realizzare rivelatori di tracking e monitoring.

La struttura principale di un tracciatore a fibre scintillanti è mostrata in figura 1.7: esso è costituito da un'area efficace, sensibile alla radiazione incidente (1), da una guida di luce, che nel caso delle fibre è costituita dal prolungamento delle fibre stesse (2) o da fibre non scintillanti, da un sistema di accoppiamento (3) tra fibre e fotomoltiplicatore (4) ed infine dalla catena di lettura (5) per l'acquisizione del segnale amplificato generato dal fotomoltiplicatore.

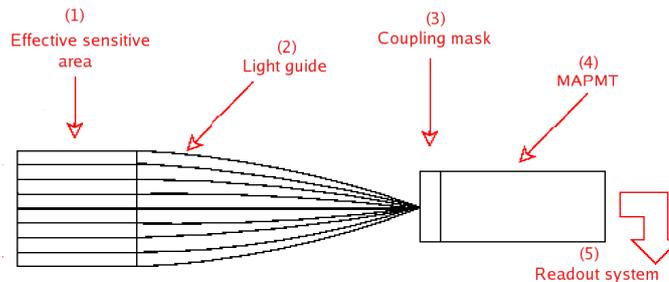


Figura 1.7: Schema di un tracciatore a fibre: (1) area sensibile del rivelatore, (2) guide di luce per trasportare il segnale fino al fotomoltiplicatore (4) (l'accoppiamento fibre-fotomoltiplicatore viene solitamente realizzato con una maschera (3) metallica o di plastica), (5) catena di lettura collegata ad un PC.

Le fibre che costituiscono la superficie sensibile di un rivelatore possono essere ordinate in diversi modi. La geometria più semplice consiste nel posizionare le fibre una accanto all'altra disposte su una superficie planare. Questa disposizione comporta, però, un'elevata presenza di zone morte nel tracciatore: le regioni buie tra coppie di fibre hanno dimensioni pari a due volte quelle dello strato di cladding delle fibre stesse (tipicamente dell'ordine di $50 \mu\text{m}$). Inoltre, se una particella carica interagisce troppo lontano dall'asse della fibra, i fotoni prodotti non sono in numero sufficiente per generare un segnale nel fotomoltiplicatore.

Esistono quindi due configurazioni migliori, ampiamente sfruttate nel campo dei rivelatori a tracciamento, che permettono di ridurre la presenza di zone morte e di incrementare la risoluzione spaziale del rivelatore: geometria a *doublet ribbon* e geometria a *tilted square fibers*, entrambe mostrate in figura 1.8.

Nella prima configurazione (figura 1.8(a)) le fibre vengono disposte in due strati sovrapposti e sfasati di una distanza pari alla metà del diametro delle fibre stesse:

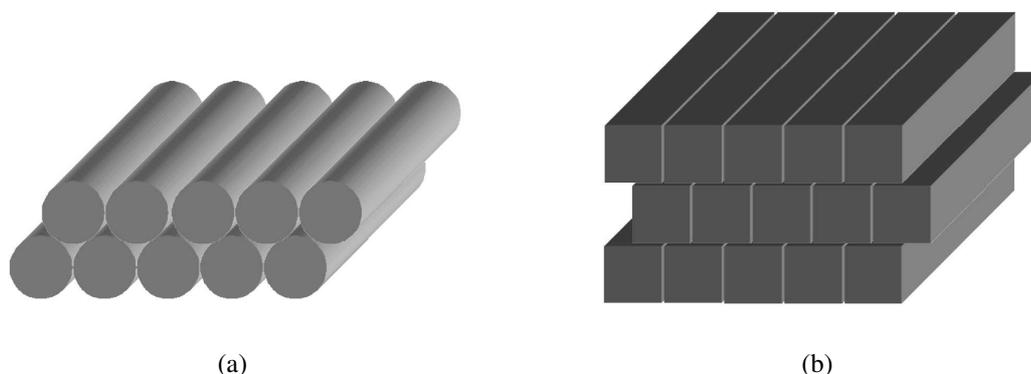


Figura 1.8: Esempio di due disposizioni possibili per le fibre di un tracciatore: (a) doublet ribbon; (b) tilted square fibers.

in questo modo lo spessore di materiale attraversato da una particella è praticamente costante in tutta la zona sensibile del tracciatore.

Anche nella seconda configurazione (figura 1.8(b)) le fibre vengono disposte su più strati sfasati, ma dal momento che la sezione delle fibre è quadrata è possibile ottenere una struttura più compatta. Lo svantaggio delle fibre a sezione quadrata è, però, duplice: una minore lunghezza di attenuazione e la limitata flessibilità meccanica le rende scarsamente utilizzate nel caso di rivelatori di elevate dimensioni, che necessitano di guide di luce molto lunghe.

I fotomoltiplicatori tipicamente utilizzati sono quelli multianodo, grazie alla loro rapida risposta temporale, ad un basso rumore, ad un guadagno abbastanza buono ed alla loro compattezza.

1.3.1 Esperimenti con tracciatori a fibre

In questo paragrafo si descriveranno brevemente due importanti rivelatori a fibre scintillanti utilizzati come sistemi di tracciamento: il tracciatore a fibre scintillanti per UA2 (SFD, Scintillating Fiber Detector), che fu uno dei primi sistemi di tracking realizzato con fibre scintillanti, e FAST (Fiber Antiproton Scintillating Tracker).

- **Il tracciatore di UA2:** Il tracciatore SFD dell'esperimento UA2 [7] è stato uno dei primi sistemi di tracciamento a fibre scintillanti ad essere utilizzati all'SPS (Super Proton Synchrotron) del CERN di Ginevra. Il rivelatore a fibre è stato sviluppato per il tracciamento esterno e per l'identificazione degli sciami di elettroni e adroni. Lo schema del tracciatore è mostrato in

figura 1.9: esso era composto da più di 60000 fibre da 1 mm di diametro, di circa 240 cm di lunghezza disposte a geometria cilindrica (il diametro del cilindro era di 82 cm). Le fibre erano disposte su 24 strati: i primi 16 strati erano realizzati con un piano di fibre posto nella direzione longitudinale, alternato a due piani di fibre in direzioni stereo a $\pm 15.8^\circ$; gli ultimi 8 erano posti dopo uno strato di piombo di spessore pari a 1.5 lunghezze di radiazione, e gli strati stereo erano inclinati di $\pm 21^\circ$.

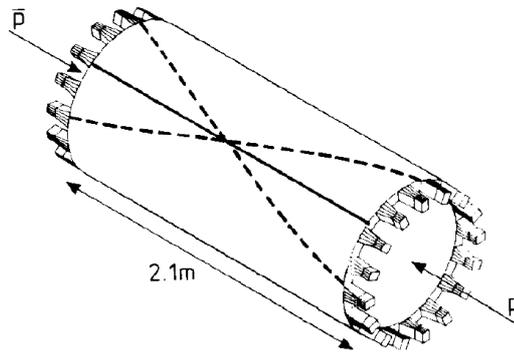


Figura 1.9: Schema del tracciatore a fibre scintillanti utilizzato per UA2.

Il core delle fibre utilizzate era di polistirene, mentre il cladding esterno era realizzato in polivinilacetato (PVA); le fibre erano anche dotate di un rivestimento in alluminio per limitare effetti di cross-talk⁵. La luce prodotta dalle fibre veniva raccolta da 32 moduli a due stadi, che contenevano un intensificatore di immagini e un CCD (Charged Coupled Device).

La risoluzione spaziale raggiunta da questo sistema è stata di circa $350 \mu\text{m}$, leggermente peggiore di quella digitale a causa di effetti di cross-talk. Considerando i primi 18 strati come un tutt'uno si è raggiunta un'efficienza del 96%.

- **FAST:** FAST [8] è un tracciatore a fibre scintillanti realizzato per misure di sezione d'urto di annichilazione di antiprotoni su nuclei [9] nell'ambito della collaborazione ASACUSA presso l'Antiproton Decelerator (AD [10]) del CERN. Lo scopo di FAST è quello di tracciare pioni carichi (π^\pm) provenienti da annichilazione di antiprotoni su protoni/neutroni di nuclei di varia natura [11].

FAST consta di 6 strati concentrici di fibre scintillanti da 1 mm di diametro organizzati in due gusci (shell) cilindrici di raggio 12.2 cm e 15.6 cm. Ogni

⁵Il termine cross-talk indica il fenomeno per cui la luce di una fibra può "fluire" anche in quelle contigue.

shell è a sua volta costituito da 3 strati di fibre, uno assiale (lungo la direzione del fascio) e due stereo a $\pm 20^\circ$ (figura 1.10(a)). Una foto del rivelatore completo è mostrata in figura 1.10(b).

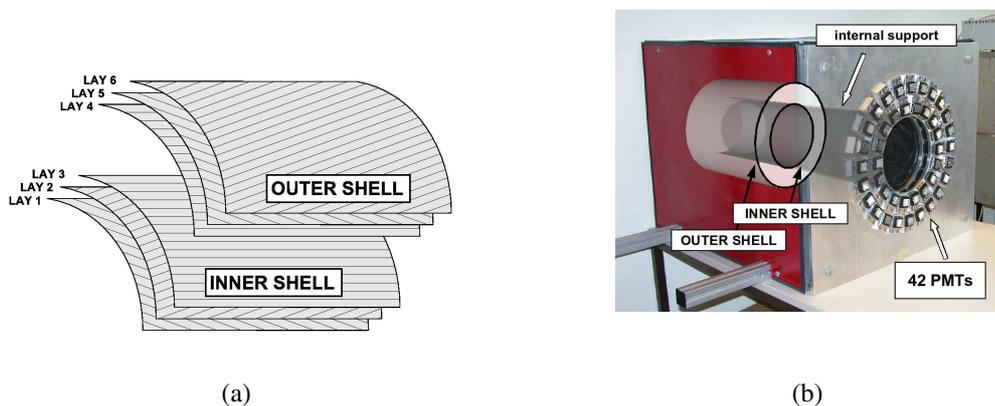


Figura 1.10: (a) Schema della disposizione degli strati di fibre nel tracciatore; (b) foto del tracker completo.

Le fibre scintillanti sono lette da fotomoltiplicatori multianodo a 64 canali (HAMAMATSU) e da una catena di lettura identica a quella utilizzata per ERPA e descritta nel capitolo 2. FAST è stato costruito con più di 10 km di fibre per un totale di 2405 canali.

La prima fase di presa dati è avvenuta nel luglio 2007 e l'analisi è ancora in corso.

Capitolo 2

ERPA

In questo capitolo verrà presentata una descrizione dettagliata del tracciatore a fibre realizzato. In particolare ci si soffermerà sulle procedure di costruzione del rivelatore, le caratteristiche delle fibre e dei fotomoltiplicatori utilizzati, la loro disposizione e il loro interfacciamento. Si darà anche una descrizione della catena di lettura dei segnali per i successivi test in laboratorio e su fascio, e delle camere a semiconduttore utilizzate, oltre che come monitor di fascio nei beam test condotti, anche come riferimento per calcolare la risoluzione spaziale del tracciatore. La parte finale del capitolo sarà infine rivolta alle misure preliminari di caratterizzazione con i raggi cosmici presso il Laboratorio Didattico di Fisica dell'Università dell'Insubria.

2.1 Le caratteristiche di ERPA

La scelta di realizzare un tracciatore a fibre scintillanti è stata dettata principalmente dalle ottime caratteristiche di questi materiali e dalle performance che si è in grado di raggiungere accoppiandoli a dei fotomoltiplicatori multianodo.

Il rivelatore ERPA (Enhanced Radiation and Particle Apparatus) è stato progettato nell'ambito dell'attività didattica del corso di Laboratorio di Fisica IV, attività che si è conclusa con la presa dati presso la Beam Test Facility dei Laboratori Nazionali dell'INFN di Frascati (paragrafo 3.1). Viste le ottime performance e il suo potenziale, si è deciso di utilizzarlo anche come tracciatore e beam monitor presso il Super Proton Synchrotron del CERN di Ginevra (paragrafo 3.2).

Dal momento che non si presentavano particolari problematiche riguardanti la geometria del sistema, è stata scelta la soluzione più semplice e veloce: una geometria planare. Si è cercato inoltre di realizzare un rivelatore abbastanza compatto e facile da trasportare; per questo motivo sono stati scelti dei materiali leggeri e facili da modellare.

2.1.1 Il detector

Lo schema del rivelatore è mostrato in figura 2.1: esso è costituito da 2 moduli (*modulo A e modulo B*), posti ad una distanza fissa di 20 cm. Ogni modulo è equipaggiato con una coppia x-y di rivelatori a fibre scintillanti con un'area sensibile di $6.4 \times 6.4 \text{ cm}^2$.

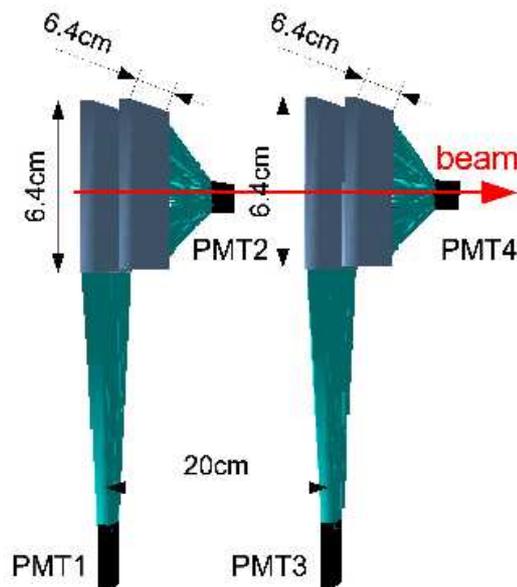


Figura 2.1: Schema del tracciatore a fibre: esso è costituito da due moduli in PVC posti ad una distanza fissa di 20 cm, ciascuno equipaggiato con due piani di fibre scintillanti, posizionati in modo x-y.

I detector di ciascuna coppia sono disposti su un supporto di PVC (Polyvinyl cloruro) di 0.5 cm di spessore e sono realizzati con 128 fibre da 1 mm di diametro (BCF-10, Bicon¹), le cui caratteristiche verranno riassunte nel paragrafo 2.1.3. Le fibre di ogni piano sono state disposte su 2 strati a geometria doublet ribbon e connesse a fotomoltiplicatori multianodo della HAMAMATSU (le performance principali di questi dispositivi verranno descritte nel paragrafo 2.1.4). Questa geometria permette di ridurre il numero di zone morte del rivelatore e di incrementare l'efficienza che risulta, infatti, inversamente proporzionale al numero di zone morte e direttamente proporzionale alla quantità di materiale scintillante attraversato. Lo schema della disposizione delle fibre di ciascun piano dei 2 moduli è mostrato in figura 2.2.

I supporti in PVC, infine, hanno dimensioni di $55 \times 55 \text{ cm}^2$ e sono stati utilizzati

¹Sito internet: <http://www.bicon.com>

anche per l'installazione dell'elettronica di frontend e della scheda (detta *repeater*) di collegamento tra l'elettronica di frontend e quella di readout.

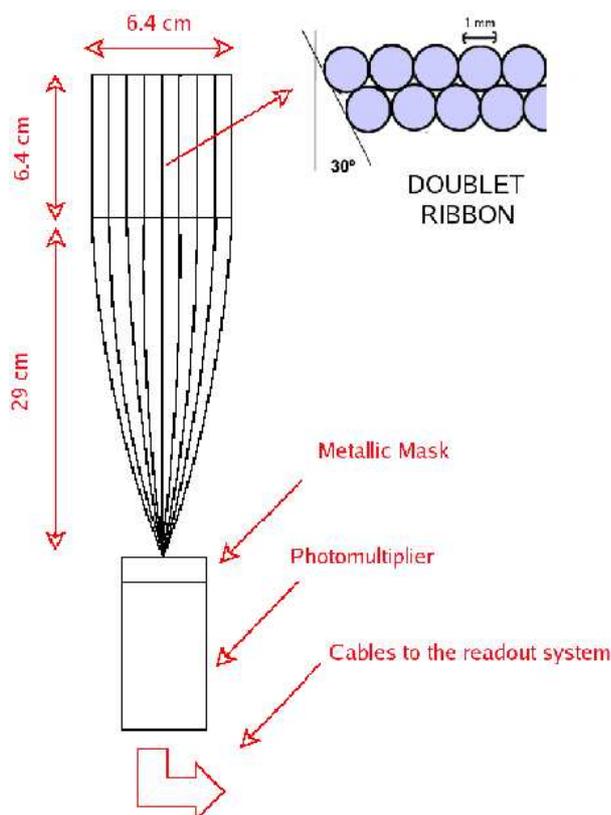


Figura 2.2: Schema della disposizione e dell'accoppiamento delle fibre al fotomoltiplicatore di ciascuno dei piani dei 2 moduli: le fibre sono state disposte in due strati da 64 elementi, seguendo una geometria detta doublet ribbon per limitare le zone morte, ed accoppiate ad un fotomoltiplicatore a 64 canali tramite una maschera metallica realizzata appositamente.

2.1.2 Procedura di costruzione

La procedura di costruzione del tracciante a fibre è stata suddivisa in tre fasi: (1) posizionamento e fissaggio delle fibre sui moduli; (2) disposizione delle fibre nelle maschere, installazione ed accoppiamento con i fotomoltiplicatori; (3) connessione all'elettronica di frontend e collegamento dei due moduli. La figura 2.3 mostra alcune foto del tracciante durante le fasi di costruzione.

Le fibre di ciascun piano dei due moduli sono state posizionate ed incollate, utilizzando nastro biadesivo e colla cianoacrilica, al supporto di PVC secondo la

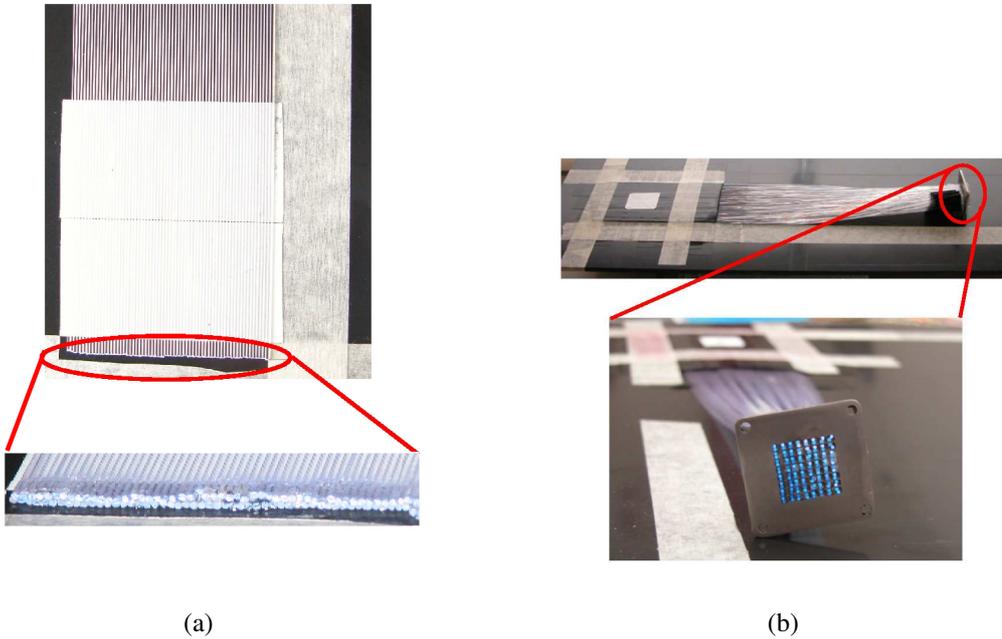


Figura 2.3: Alcune fasi di costruzione del tracciatore. (a) Posizionamento delle fibre sul supporto di PVC: la geometria utilizzata è quella a doublet ribbon in cui i due strati di fibre sono sfasati di 0.5 mm. (b) Disposizione delle fibre nelle maschere di ferro per l'accoppiamento con il fotomoltiplicatore: le fibre sono state lucidate solo all'estremità connessa al fotomoltiplicatore in modo da incrementare l'uscita luce. (c) Connessione all'elettronica di frontend e collegamento dei due moduli.

geometria stabilita. I due strati di fibre sono poi stati ricoperti con del nastro isolante nero per evitare la luce. Le fibre sono state inserite nelle apposite maschere metalliche, lucidate con carta vetrata (di grana variabile da 400 a 1200) e pasta abrasiva, ed accoppiate al fotomoltiplicatore. La fase successiva è stata la connessione dei fotomoltiplicatori al sistema di frontend ed ai cavi per l'alimentazione. Ognuno dei piani di fibre, con i rispettivi fotomoltiplicatori e le guide di luce, è stato quindi ricoperto con un sottile foglio di plastica nera. Si è passati quindi all'unione dei due moduli attraverso l'utilizzo di distanziali cilindrici di 20 cm di lunghezza. Infine, tutto il rivelatore è stato ricoperto con un ulteriore strato di materiale accoppiato (alluminio e cartoncino nero) per evitare la luce e proteggere l'elettronica durante il trasporto. Il rivelatore è stato dotato anche di una maniglia, per facilitarne lo spostamento, e di fori per far passare l'alimentazione delle schede di frontend e dei fotomoltiplicatori.

2.1.3 Le fibre scintillanti

La geometria dei fotomoltiplicatori utilizzati (che verranno descritti nel paragrafo 2.1.4) permette di ospitare fibre aventi al massimo 2 mm di diametro, dato che le dimensioni della superficie di ogni catodo sono di $2 \times 2 \text{ mm}^2$. Tra le configurazioni possibili, la scelta ottimale è quella di disporre in ciascun canale 2 o 4 fibre da 1 mm di diametro, raggiungendo un'efficienza di quasi il 99% [12], dal momento che la quantità di materiale attraversato è praticamente costante.

Le fibre scintillanti sono state fornite dalla Bicron; il modello utilizzato (BCF-10) ha sezione circolare ed è costituito da un core interno di polistirene (indice di rifrazione 1.6) e da uno strato di cladding in acrilico (indice di rifrazione 1.49) [13]. Il cladding esterno costituisce circa il 3% del diametro della fibra. Altre caratteristiche delle fibre scintillanti utilizzate sono riassunte nella tabella 2.1.

Le estremità delle fibre non connesse ai fotomoltiplicatori non sono state lucidate in modo tale che fungessero da assorbitori per i fotoni che giungevano a quel lato delle fibre stesse.

In totale sono stati utilizzati quasi 180 m di fibre per realizzare i 4 piani del rivelatore.

2.1.4 I fotomoltiplicatori

La necessità di leggere il segnale in uscita da un numero abbastanza elevato di fibre e di discriminare la posizione di arrivo delle particelle, realizzando un sistema abbastanza compatto, sono alla base della scelta di utilizzare fotomoltiplicatori multianodo per la lettura dei piani dei due moduli di ERPA. Si sono usati 4 fotomoltiplicatori a 64 canali forniti dalla HAMAMATSU (modello R7600-00-M64), le cui caratteristiche principali sono riportate nella tabella 2.2.

densità	$1.05 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
uscita luce	$\sim 8000 \text{ fotoni/MeV}$
tempo di risposta	0.9 ns
tempo di decadimento	2.7 ns
lunghezza d'onda di emissione massima	432 nm (blu)
lunghezza di attenuazione	220 cm
efficienza di cattura dei fotoni	3.44%
densità atomica di H	$4.74 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$
densità atomica di C	$5.23 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$
temperature di lavoro	da -20° a $+50^\circ\text{C}$

Tabella 2.1: Proprietà delle fibre scintillanti BCF-10 della Bicron utilizzate per realizzare i piani del tracciatore.

numero di canali	64 (8×8)
dimensioni dell'anodo	$2 \times 2 \text{ mm}^2$
area effettiva	$18.1 \times 18.1 \text{ mm}^2$
numero di dinodi	12
range spettrale	300-650 nm
lunghezza d'onda di picco	420 nm
efficienza quantica a 390 nm	0.21
guadagno	3.0×10^5
corrente di buio anodica	0.2 nA
alimentazione	800 V
tempo di risposta	1.0 ns

Tabella 2.2: Principali caratteristiche del fotomoltiplicatore multianodo R7600-00-M64 della HAMAMATSU [6] utilizzato per la realizzazione del rivelatore a fibre.

Il fotomoltiplicatore R7600-00-M64 contiene 64 anodi di $2 \times 2 \text{ mm}^2$ (figura 2.4) con un'efficienza quantica intorno al 20% nel range di lunghezze d'onda comprese tra 300 e 650 nm. È dotato di un contenitore plastico isolante e di un unico partitore di tensione per l'alimentazione dei dinodi. Il guadagno varia da 2.5×10^5 a 775 V fino a 7×10^5 a 850 V ma non è uniforme su tutti i canali: se l'anodo con il massimo guadagno ha un valore di 100, per tutti gli altri canali il valore sarà in media² pari a 79 ± 10 . Nell'analisi offline sarà quindi necessario considerare le tabelle di guadagno (fornite dal costruttore) di ciascun anodo per equalizzare le risposte. Il numero totale di canali a disposizione era quindi 256, ma ne sono stati utilizzati solamente 232 (nel paragrafo 2.1.5 si chiarirà il motivo di questa scelta).

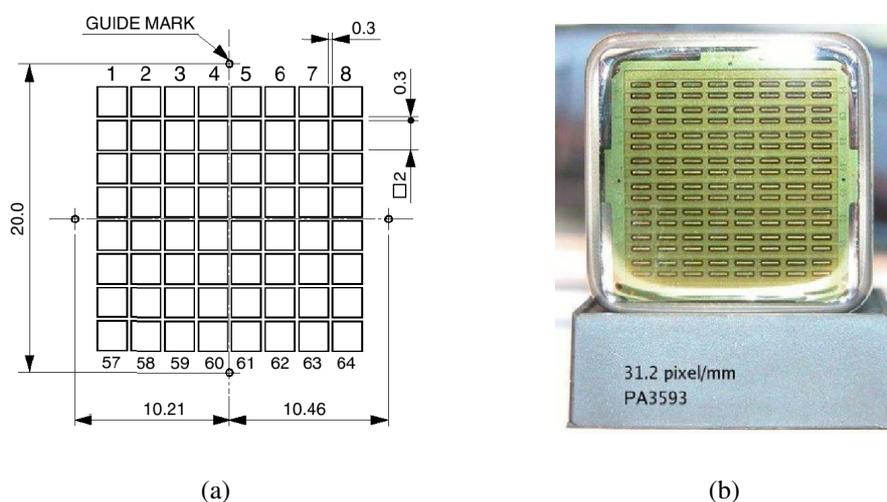


Figura 2.4: Fotomoltiplicatore R7600-00-M64 della HAMAMATSU: (a) schema della disposizione degli anodi (in mm); (b) foto della finestra di vetro borosilicato in cui si vede la griglia davanti ai primi 64 dinodi del fotomoltiplicatore.

2.1.5 Le maschere di accoppiamento

Le maschere di interfacciamento tra le fibre e i fotomoltiplicatori sono fondamentali per garantire il corretto allineamento delle fibre con i canali del MAPMT. Le maschere utilizzate per i 4 fotomoltiplicatori di ERPA sono di due tipi e sono mostrate in figura 2.5. Entrambe sono realizzate in ferro e hanno una dimensione di $3 \times 3 \text{ cm}^2$. La tipologia utilizzata nel modulo A (figura 2.5(a)) contiene 64 fori

²Questo valore è stato ottenuto nell'ambito della fase di commissioning dell'esperimento ASACUSA [11].

quadrati di dimensione $2 \times 2 \text{ mm}^2$ in ciascuno dei quali sono state inserite 2 fibre: tutti i canali del fotomoltiplicatore sono quindi stati utilizzati. La tipologia del modulo B (figura 2.5(b)), invece, presenta 8 fessure rettangolari di dimensione $2 \times 20 \text{ mm}^2$. Nelle prime 6 fessure sono state inserite 20 fibre, nella settima 8 fibre mentre l'ultima fessura non è stata usata: solo 52 canali del fotomoltiplicatore sono quindi stati utilizzati.

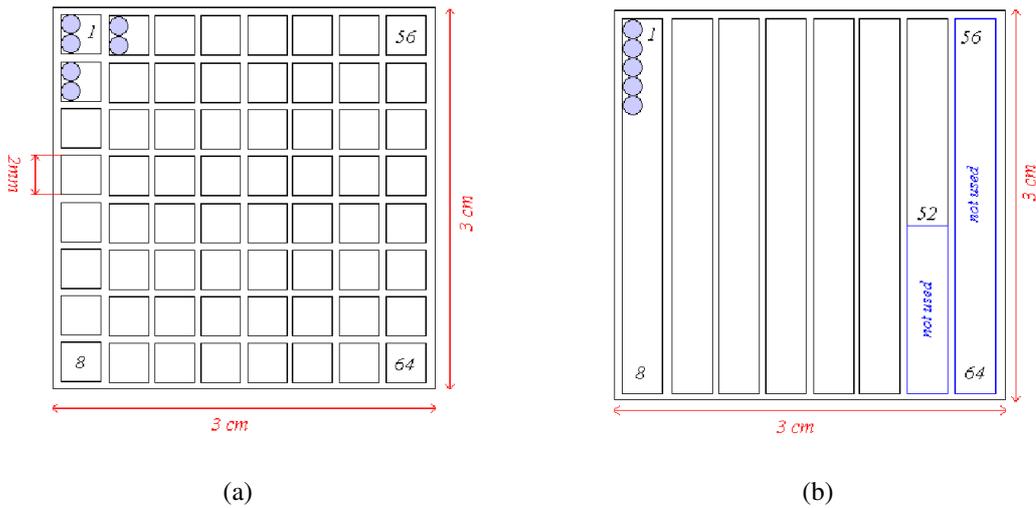


Figura 2.5: Maschere utilizzate per l'accoppiamento fibre-fotomoltiplicatori. (a) La maschera utilizzata per i fotomoltiplicatori del modulo A presenta 64 fori quadrati di dimensione $2 \times 2 \text{ mm}^2$ in ciascuno dei quali sono state inserite 2 fibre. (b) La maschera utilizzata per i fotomoltiplicatori del modulo B, invece, contiene 8 fessure rettangolari di dimensione $2 \times 20 \text{ mm}^2$; nelle prime 6 fessure sono state inserite 20 fibre, nella settima 8 fibre mentre l'ultima fessura non è stata utilizzata.

Nei fotomoltiplicatori del modulo A, quindi, un canale corrisponde esattamente a 2 fibre, una per ognuno dei due strati (figura 2.6(a)); nei fotomoltiplicatori del modulo B, invece, ad un canale corrispondono circa 3 fibre: in questo caso il canale può essere formato da due fibre dello strato superiore e parte di una di quello inferiore, oppure da una fibra dello strato superiore e da due di quello inferiore (figura 2.6(b)).

Il passo di lettura nei due casi è risultato rispettivamente 1 mm per il modulo A e 1.3 mm per il modulo B. La risoluzione digitale del rivelatore è legata al passo delle fibre dalla seguente relazione:

$$\sigma = \frac{p}{\sqrt{12}} \quad (2.1)$$

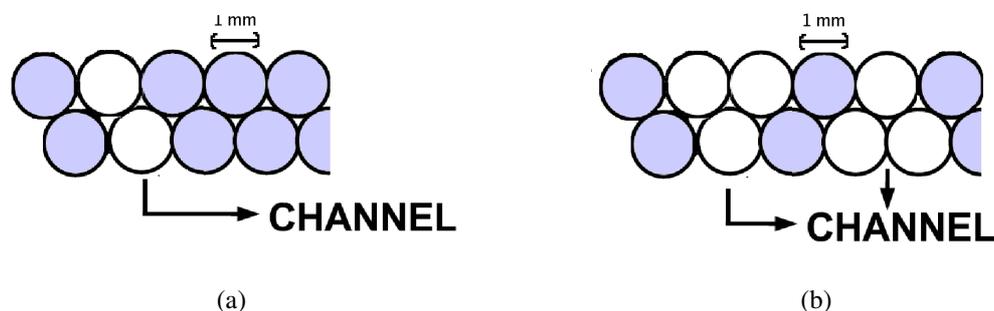


Figura 2.6: Canali di lettura delle fibre. (a) Nei rivelatori del modulo A un canale del fotomoltiplicatore corrisponde a due fibre, una per ognuno dei due strati; (b) nei rivelatori del modulo B, invece, il canale può essere formato da due fibre dello strato superiore e da una di quello inferiore, o viceversa.

dove $\sqrt{12}$ deriva dal fatto che la probabilità di colpire la fibra in una certa posizione segue una distribuzione uniforme; risulta quindi $289 \mu\text{m}$ per il modulo A e $375 \mu\text{m}$ per il modulo B.

2.1.6 L'elettronica di frontend e l'elettronica di lettura

La catena di acquisizione dei segnali in uscita dai 4 fotomoltiplicatori può essere suddivisa in due parti: il frontend e la lettura vera e propria. Lo schema dell'elettronica è mostrato in figura 2.7.

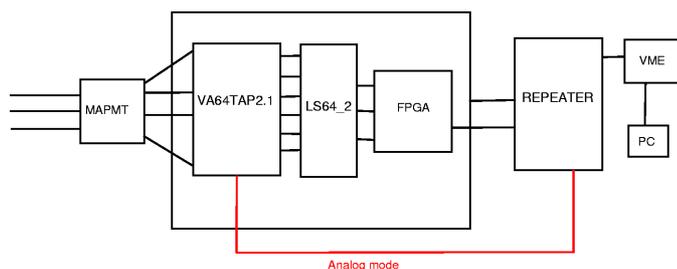


Figura 2.7: Schema della catena di acquisizione dei segnali provenienti da ciascun fotomoltiplicatore.

L'elettronica di frontend è costituita da due schede PCB (Printed Circuit Board) di $125 \times 230 \text{ mm}^2$ (figura 2.8(a)) in grado di controllare ciascuna due fotomoltiplicatori. Ogni PCB contiene dunque 2 catene di frontend complete, ognuna delle quali vanta la parte di amplificazione e generazione dell'eventuale segnale di trig-

ger tramite due ASIC (il VA64TAP2.1 e l'LS64_2, Gamma Medica-IDEAS³) e la parte di controllo (FPGA Cyclone II della ALTERA⁴).

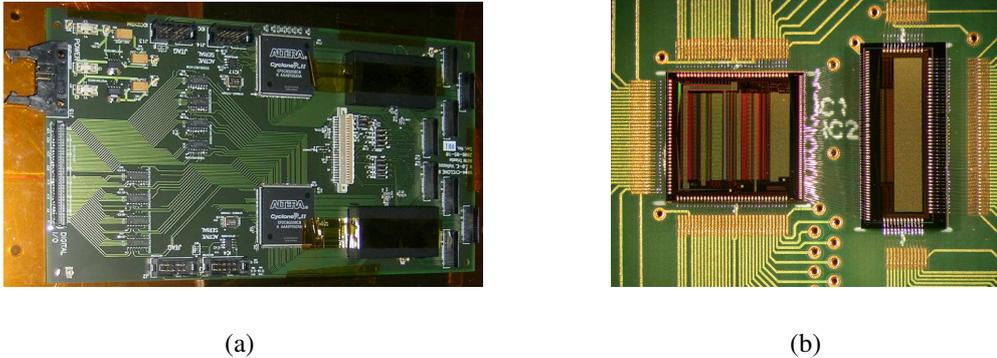


Figura 2.8: (a) Scheda PCB per l'elettronica di frontend: è basata sui due ASIC VA64TAP2.1 e LS64_2 che amplificano e formano i segnali e permettono sia una lettura analogica che la generazione del trigger. (b) Particolare dei due ASIC: a sinistra il VA64TAP2.1 e a destra l'LS64_2.

I segnali dei 64 canali di ciascun MAPMT sono trasportati ai 2 ASIC di amplificazione attraverso dei cavi ERNI a 26 pin (16 pin trasportano il segnale e gli altri 10 le masse); qui i segnali vengono amplificati e discriminati da un ASIC⁵ analogico-digitale a 64 canali, il VA64TAP2.1 [14]. Ogni canale contiene un pre-amplificatore, uno shaper veloce CR-RC (con tempo di picco di 50-75 ns) e un discriminatore con una soglia globale per l'intero ASIC e una soglia specifica per ciascun canale (regolabile tramite un DAC, Digital to Analog Converter, a 4 bit), per ridurre l'offset tra i vari canali. Lo schema circuitale di questo ASIC è mostrato in figura 2.9. Il VA64TAP2.1 può essere letto sia in modalità analogica, connettendo l'uscita di ogni shaper ad un buffer analogico, sia in modalità digitale attraverso l'utilizzo di un secondo ASIC (l'LS64_2).

In modalità analogica, il segnale in uscita dallo shaper viene campionato tramite un circuito sample&hold; la lettura dei segnali campionati avviene in modo multiplexato⁶ con un clock a frequenza massima di 10 MHz. In modalità digitale, l'LS64_2 ha come unico compito quello di adattare i livelli dei segnali discriminati da open drain a low voltage CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) 1.5 V.

³Sito internet: <http://www.ideas.no>

⁴Sito internet: <http://www.altera.com>

⁵Application Specific Integrated Circuit

⁶In elettronica il multiplexing si riferisce a processi in cui più segnali analogici o flussi di dati digitali sono combinati in un solo segnale lungo un singolo collegamento fisico.

Il segnale digitalizzato viene quindi inviato ad una FPGA (Field Programmable Gate Array) al cui interno si possono implementare, tramite programmazione in VHDL (Very high speed integrated circuits Hardware Description Language) diverse tipologie di circuiti (ad esempio contatori o TDC, Time to Digital Converter).

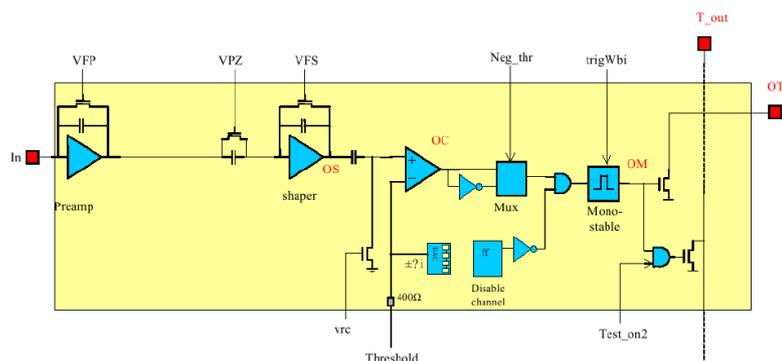


Figura 2.9: Schema circuitale di un canale del VA64TAP2.1 della IDEAS (datasheet).

La catena di lettura è a sua volta composta da due blocchi: una scheda detta *repeater*, per l'interfacciamento tra i PCB e il DAQ (Data Acquisition), e il sistema di acquisizione stesso. La repeater è in grado di controllare i segnali di entrambi i PCB e svolge le seguenti funzioni:

- provvede a fornire l'alimentazione e i segnali di controllo di ciascun ASIC, di cui fissa anche le soglie;
- amplifica i segnali analogici provenienti dall'elettronica di frontend attraverso un NE592;
- controlla e sincronizza i segnali di trigger.

I segnali analogici sono digitalizzati da un ADC (Analog to Digital Converter) a 10 o 12 bit (V550, CAEN⁷ o VFAS, Strasburgo).

L'acquisizione dati, basata sullo standard VME⁸ (Versa Module Eurocard), è una versione semplificata di quella utilizzata per ASACUSA. Il sistema VME è controllato da un PC Linux tramite una scheda PCI (Protocol-Control Information) SBS Bit 3 [15]. Il programma di controllo è scritto in C con un'interfaccia grafica

⁷Sito internet: <http://www.caen.it>

⁸Il sistema VME è uno standard industriale per la comunicazione tra periferiche di acquisizione e computer.

basata sul pacchetto Tcl/Tk. I dati sono memorizzati in ntuple HBOOK leggibili tramite PAW (Physics Analysis Workstation); l'analisi dati, sviluppata nell'ambito di questo programma di tesi, è scritta in FORTRAN.

2.2 Le camere al silicio

Per ricostruire in modo preciso la posizione e la direzione del fascio di elettroni proveniente dal LINAC di DAΦNE (paragrafo 3.1) sono stati utilizzati due rivelatori a semiconduttore, detti *camere*. Ciascuna camera è costituita da due rivelatori planari a microstrip di silicio, prodotti dalla HAMAMATSU su disegno dell'INFN di Trieste ed originariamente progettati per il satellite AGILE [16][17]. I detector sono posti perpendicolarmente tra di loro per ottenere due coordinate ortogonali e sono disposti su un supporto di vetronite dello spessore di 5 mm forato in corrispondenza del rivelatore stesso. Ogni silicio (figura 2.10(a)) ha una dimensione di $9.5 \times 9.5 \text{ cm}^2$, uno spessore di $410 \mu\text{m}$ ed è costituito da 768 microstrip con passo fisico di $121 \mu\text{m}$ e passo di lettura di $242 \mu\text{m}$; i canali letti sono quindi 384 (tecnica della strip floating). La risoluzione spaziale ottenuta risulta quindi pari a circa $20 \mu\text{m}$. Le strip sono connesse tramite bonding con un filo di Al da $17 \mu\text{m}$ a circuiti VLSI (Very Large Scale Integration) TAA1 (IDEAS). Ogni ASIC è costituito da 128 canali a basso rumore e basso consumo, ciascuno contenente un preamplificatore, uno shaper CR-RC, un circuito sample&hold per campionare il segnale stesso, e un discriminatore per la generazione del segnale di trigger. Il trigger in uscita dall'ASIC è l'OR di tutti i segnali di trigger dei canali attivati da un insieme di bit detti maschera, che viene caricata nel registro di configurazione. La soglia dei discriminatori viene regolata in due modi: una soglia globale per l'intero ASIC e un aggiustamento fine (tramite un DAC a 3 bit) per ogni canale. Nell'acquisizione alla BTF e presso il CERN, non è stata comunque utilizzata questa capacità di auto-trigger dei silici, sfruttando in un caso il trigger di macchina e nell'altro il trigger generato da un sistema di scintillatori.

La lettura delle camere è gestita dallo stesso sistema descritto per il tracciatore a fibre. Per interfacciare i rivelatori a microstrip al sistema di lettura è presente una scheda detta *repeater* che adatta i livelli dei segnali digitali (da 0/+5 V differenziale a -2/+2 V per gli ASIC, single ended), genera le correnti e le tensioni per gli ASIC stessi, fornisce l'alimentazione e gestisce il segnale analogico di output. La lettura degli ASIC è multiplexata ed è controllata da un clock con frequenza massima di 10 MHz; i dati sono poi digitalizzati da un ADC a 10 bit (CAEN V550). Ciascuna coppia di piani di silicio, insieme a parte dell'elettronica di lettura, è contenuta in una scatola di alluminio di dimensioni $60 \times 40 \times 5.2 \text{ cm}^3$, mostrata in figura 2.10(b).

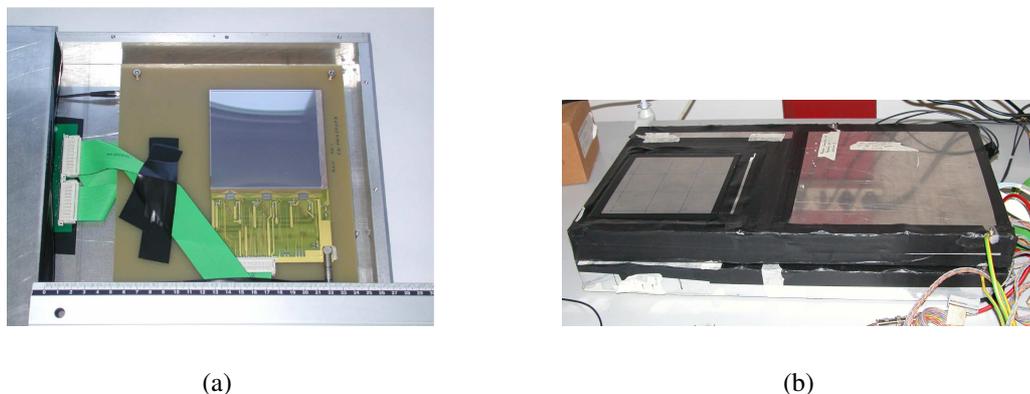


Figura 2.10: Foto delle camere al silicio. (a) Ciascuno dei due detector delle camere al Si ha un'area di $9.5 \times 9.5 \text{ cm}^2$, uno spessore di $410 \mu\text{m}$ ed un passo di lettura di $242 \mu\text{m}$ per un totale di 384 canali. (b) Ciascuna coppia di piani di silicio in modalità x-y, insieme a parte dell'elettronica di lettura, è contenuta in una scatola di alluminio, per l'oscuramento e la protezione da disturbi elettromagnetici.

2.3 Caratterizzazione in laboratorio

La prima fase della caratterizzazione del rivelatore è stata svolta presso il Laboratorio Didattico di Fisica dell'Università degli Studi dell'Insubria⁹, sfruttando i raggi cosmici. I moduli del rivelatore a fibre sono stati testati singolarmente prima di completare la fase di assemblaggio del tracciatore. Il setup utilizzato è schematizzato in figura 2.11; oltre ai moduli a fibre, sono state utilizzate le camere al silicio (paragrafo 2.2) per tracciare i singoli raggi cosmici e verificare in questo modo il funzionamento del sistema a fibre, uno scintillatore per fornire il trigger alla catena di lettura, e un calorimetro a campionamento. L'analisi dati effettuata per ottenere i seguenti grafici verrà presentata nel dettaglio nel paragrafo 4.1.

La figura 2.12 mostra il profilo del fascio ottenuto per i piani x di entrambi i moduli: la presenza di valli equispaziate di 0.8 cm è stata ricondotta ad un non perfetto posizionamento delle maschere rispetto al fotomoltiplicatore. Per questo motivo l'allineamento è stato testato con un sistema di 2 LED: un LED è stato connesso alla fibra 1 e l'altro alla fibra 64, e la posizione della maschera è stata modificata fino a massimizzare il segnale di entrambi i canali osservandoli su un oscilloscopio. Questa procedura è stata ripetuta per tutti i 4 fotomoltiplicatori del tracciatore e ha permesso di ottenere un ottimo allineamento tra le maschere e i MAPMT (come si vedrà nei grafici del capitolo 4).

⁹Sito internet: <http://www.uninsubria.it>

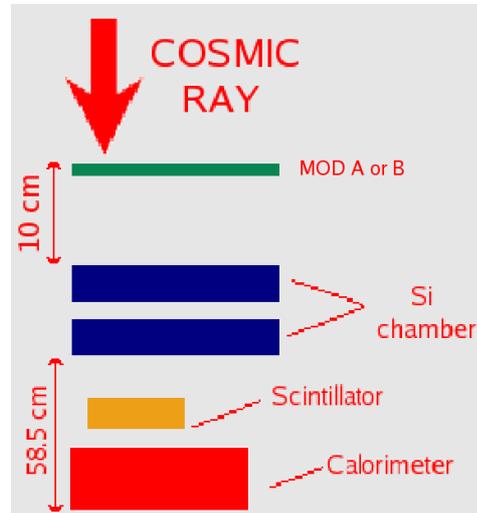
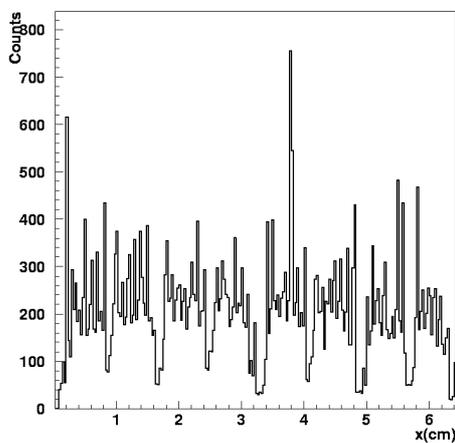
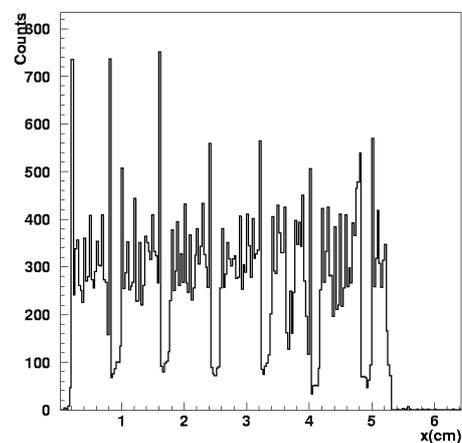


Figura 2.11: Setup utilizzato per la caratterizzazione con i raggi cosmici presso il Laboratorio Didattico di Fisica dell'Università dell'Insubria di Como.



(a)



(b)

Figura 2.12: Profilo di raggi cosmici ottenuto con i piani x di entrambi i moduli del tracciatore: (a) modulo A; (b) modulo B. In entrambi i casi si può notare che l'allineamento tra fotomoltiplicatori e maschere non risulta corretto.

Capitolo 3

ALLE PRESE CON UN VERO ACCELERATORE: la BTF e l'SPS

Questo capitolo è dedicato alla descrizione delle aree sperimentali dove sono stati condotti i beam test con il tracciatore a fibre: la Beam Test Facility (BTF) dei Laboratori Nazionali dell'INFN di Frascati e la linea H8 del Super Proton Synchrotron del CERN di Ginevra. La parte iniziale di questo capitolo contiene la descrizione dell'area sperimentale della BTF, del fascio di elettroni utilizzato durante la presa dati e della sua caratterizzazione. La seconda parte presenta brevemente l'SPS, la linea H8 e le caratteristiche del fascio di protoni utilizzato.

3.1 La Beam Test Facility dei Laboratori Nazionali di Frascati

La Beam Test Facility¹ è un'area sperimentale situata presso i Laboratori Nazionali di Frascati² dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare³ e fa parte del complesso “ Φ -Factory” di DAΦNE. La figura 3.1(a) mostra una veduta aerea dell'intera struttura: essa è composta da un LINAC (Linear Accelerator) in grado di accelerare fasci di elettroni e positroni fino ad un anello di accumulazione dal quale vengono successivamente trasferiti all'anello principale di DAΦNE dove sono situati gli esperimenti di collisione di fasci circolanti, KLOE [18] e FINUDA [19].

La BTF è stata commissionata nel Febbraio del 2002 ed è diventata operativa nel Novembre dello stesso anno [20]; è stata progettata per fornire un numero defi-

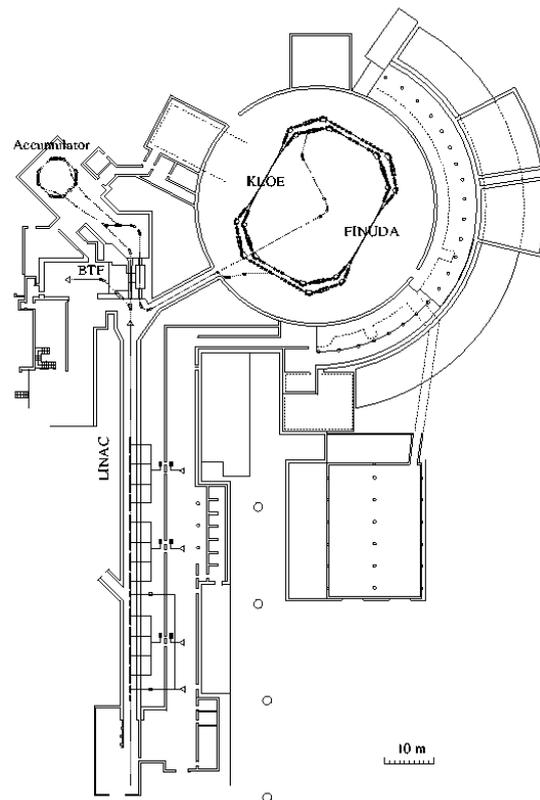
¹Sito internet: <http://www.lnf.infn.it/acceleratori/btf>

²Sito internet: <http://www.lnf.infn.it>

³Sito internet: <http://www.infn.it>



(a)



(b)

Figura 3.1: (a) Veduta aerea del complesso “ Φ -Factory” di DAΦNE. (b) Posizione della BTF rispetto al LINAC e a DAΦNE.

nito di particelle in un range di energie comprese tra 20 e 800 MeV con diverse molteplicità, soprattutto per scopi di calibrazione e test di rivelatori.

Il LINAC che serve la BTF si estende per una lunghezza di 60 m ed è formato da 4 klystron da 45 MW che operano ad una radio frequenza di 2.865 GHz. È in grado di accelerare sia fasci di elettroni che fasci di positroni. I positroni vengono prodotti a partire dagli elettroni che raggiungono l'energia di 250 MeV passando attraverso le 5 sezioni acceleranti dell'acceleratore lineare e che interagiscono con un bersaglio rimovibile. Tale interazione genera uno sciame elettromagnetico da cui viene selezionato un fascio di positroni grazie ad un sistema di magneti che focalizza il fascio stesso; le restanti 10 sezioni del LINAC accelerano il fascio di positroni fino ad un'energia massima di 550 MeV. In modalità elettroni, invece, il bersaglio viene rimosso e gli elettroni possono essere accelerati dall'intera struttura fino ad un'energia massima di 800 MeV. La tabella 3.1 mostra le caratteristiche dei due tipi di fascio.

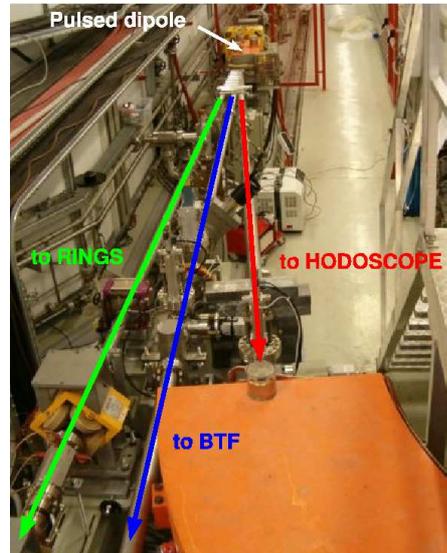
	Positroni	Elettroni
sezioni acceleranti	10	5
massima energia	550 MeV	800 MeV
corrente	36 mA	180 mA
dispersione energetica	2% FWHM	1% FWHM

Tabella 3.1: Caratteristiche dei due fasci di particelle prodotti dal LINAC.

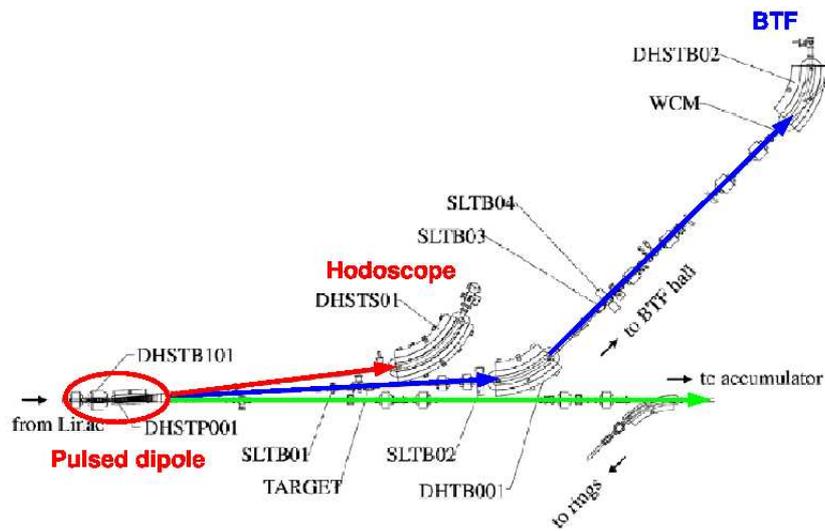
Il LINAC produce pacchetti di 10^{10} particelle per bunch funzionando in modo pulsato ad una frequenza di 50 Hz. Il monitoraggio dell'energia media e della dispersione dei fasci avviene tramite un odoscopio: un pacchetto ogni 50 viene indirizzato dal magnete pulsato verso un magnete curvante a 60° e verso l'odoscopio che ne misurano le caratteristiche energetiche. Lo stesso magnete può anche essere utilizzato per dirigere i fasci verso la linea di trasferimento che conduce alla BTF o verso l'anello di accumulazione per DAΦNE. Il magnete pulsato e lo schema delle linee di trasferimento dei fasci sono mostrati in figura 3.2.

Lungo la linea di trasferimento del fascio all'area della BTF sono presenti anche diverse componenti, quadrupoli, dipoli e collimatori (paragrafo 3.1.1), che permettono di attenuare drasticamente i fasci del LINAC entro i limiti di sicurezza per gli utilizzi specifici della BTF, di selezionare l'energia e la molteplicità, e di definirne le caratteristiche spaziali.

L'area sperimentale della BTF, infine, si estende per circa 100 m^2 ed è dotata di due ingressi indipendenti (figura 3.3); quasi tutto il suo perimetro è rivestito da uno scudo protettivo di blocchi rimovibili di cemento ed è anche presente una gru da 20 tonnellate. La linea di trasferimento dal LINAC incontra, all'ingresso della BTF, un magnete curvante a 45° necessario per utilizzare le due linee di test



(a)



(b)

Figura 3.2: (a) Magnete pulsato per monitorare e deviare i fasci del LINAC. (b) Linee di trasferimento dei fasci verso la BTF, l'odoscopio e l'anello di DAΦNE.

presenti nell'area sperimentale. All'interno dell'area è anche presente un tavolo mobile, utilizzato per l'installazione dei rivelatori e il loro corretto allineamento con il fascio, che può essere controllato in remoto. La sala di controllo (*Control Room*) è adiacente alla BTF e dispone di diversi terminali, tra cui quelli necessari per il controllo remoto dei vari componenti della linea di trasferimento e l'analisi dati.

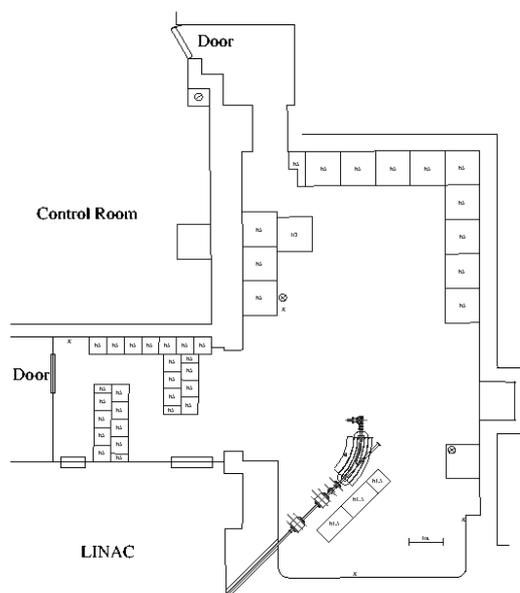


Figura 3.3: Pianta dell'area sperimentale della BTF.

3.1.1 Caratteristiche e settaggio del fascio

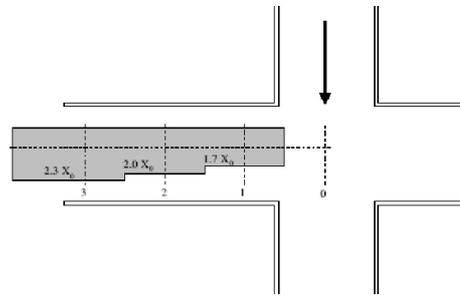
Il fascio che arriva nell'area sperimentale della BTF può essere modificato in intensità, energia e caratteristiche spaziali utilizzando le varie componenti disposte lungo la linea di trasferimento.

I pacchetti di 10^{10} particelle provenienti dal LINAC incidono su un bersaglio di rame (TARGET, figura 3.4(a)), venendo conseguentemente attenuati; anche se è possibile muoverlo con continuità gli unici tre valori impostabili sono 50, 100 e 150 mm, che corrispondono a 1.7, 2.0 e 2.3 lunghezze di radiazione (figura 3.4(b)). Il flusso di particelle che ne deriva ha uno spettro energetico come quello mostrato in figura 3.4(c), ottenuto da una simulazione della linea di trasferimento per un fascio proveniente dal LINAC di 510 MeV di energia e 1 mA di corrente. Aumentare l'energia del LINAC fa spostare tale curva verso destra, mentre un aumento in corrente la fa spostare verso l'alto; per esempio se a 500 MeV

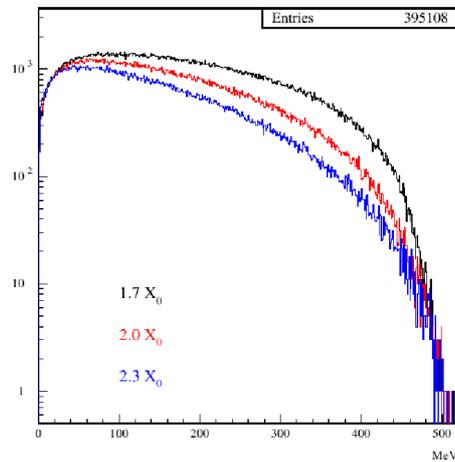
si trova mediamente 1 singolo elettrone per impulso, a 200-300 MeV ce ne sono tipicamente $10^2 - 10^3$. Di conseguenza, nel primo caso (modalità di singolo elettrone) è necessaria un'alta stabilità in energia del LINAC, in modo da non far variare di molto la distribuzione finale; le fluttuazioni in corrente risultano invece poco importanti. Al contrario, quando si lavora ad alta molteplicità (secondo caso) è più importante la stabilità in corrente di quella in energia.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.4: (a) Bersaglio di rame su cui incide il fascio proveniente dal LINAC. (b) Posizioni possibili per il bersaglio di rame: le tre configurazioni corrispondono a 1.7, 2.0 e 2.3 lunghezze di radiazione. (c) Simulazione dello spettro energetico in uscita dopo il bersaglio nelle tre configurazioni possibili.

L'energia del fascio che raggiunge la BTF può essere regolata impostando la corrente del magnete dipolo DHTB001 (figura 3.5(a)) posto appena dopo il bersaglio di rame. La relazione energia-corrente, in prima approssimazione, è la seguente:

$$I_{\text{DHTB001}} = \frac{E \cdot 324.7}{510} \quad (3.1)$$

Per assicurare la stabilità in energia e la posizione del fascio estratto è opportuno ciclare il magnete ogni che volta questo viene spento per gli accessi all'area sperimentale, per esempio portandolo fino a 500 A, poi a 0, ed infine applicare la corrente per ottenere l'energia scelta.

La corrente minima del LINAC, facilmente misurabile dai monitor di DAΦNE, è di 1 mA che corrisponde, tenendo conto della durata tipica di una pulsazione del magnete pulsato che genera i fasci ($t = 10$ ns), ad un numero di particelle di:

$$N = \frac{I \cdot t}{e} = 6.24 \times 10^7 \quad (3.2)$$

Per ridurre il numero di particelle di quasi 8 ordini di grandezza si agisce principalmente sull'energia del fascio prodotto dal LINAC: oltre a modificare la corrente del magnete dipolo DHSTB01, è possibile impostare la corrente dell'ultimo magnete dipolo (DHSTB02) posto all'ingresso della BTF stessa. Anche in questo caso la relazione energia-corrente ha un'espressione simile alla precedente:

$$I_{\text{DHTB002}} = \frac{E \cdot 346.28}{510} \quad (3.3)$$

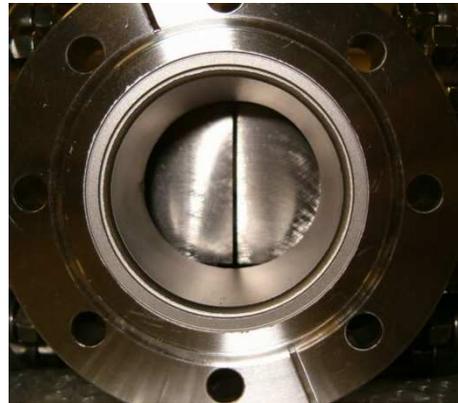
Per regolare il numero di particelle di ciascun pacchetto è anche disponibile un sistema di collimatori verticali ed orizzontali del tipo mostrato in figura 3.5(b). Una particolare configurazione di questi collimatori è quella che permette di lavorare in modalità di singola particella, cioè con una media di un elettrone per impulso. Lungo la linea di trasferimento del fascio verso la BTF, si possono distinguere quattro gruppi di collimatori che hanno le seguenti funzioni:

- Collimatori verticali SLTB01; si trovano prima del bersaglio in rame e permettono di modulare il fascio primario proveniente dal LINAC.
- Collimatori orizzontali SLTB02; sono i più efficaci per diminuire la molteplicità del fascio. I valori tipici con cui si lavora quando il test richiede la modalità di singolo elettrone sono 27-28 mm, mentre nel caso di alta molteplicità possono essere anche completamente aperti.
- Collimatori verticali SLTB03; rappresentano l'unico strumento per ridurre le dimensioni del fascio nel piano verticale. Possono essere anche utilizzati per modulare la molteplicità.

- Collimatori orizzontali SLTB04; il loro compito è quello di ridurre la divergenza introdotta sul fascio dal magnete dipolo DHSTB001 e possono essere utilizzati per impostare la molteplicità. I valori tipici stanno nel range 24-27 mm. Hanno due effetti osservabili sul fascio: il primo è una piccola variazione della distribuzione in energia (comunque sempre al di sotto di qualche %), il secondo, più evidente, è sulle dimensioni orizzontali del fascio stesso.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.5: Componenti utilizzabili per impostare le caratteristiche del fascio della BTF in termini di energia, molteplicità e dimensioni spaziali: (a) magnete dipolo (DHSTB01) della linea di trasferimento; (b) uno dei collimatori verticali utilizzati per selezionare l'intensità del fascio; (c) magnete quadrupolo per il settaggio delle caratteristiche spaziali del fascio.

Infine le caratteristiche spaziali del fascio possono essere modificate agendo su una serie di sei magneti quadrupoli (un esempio è mostrato in figura 3.5(c)). I valori dei quadrupoli sono fondamentali per l'efficienza di trasporto del fascio, ed in particolare i due posti prima dei collimatori SLTB02 devono foccheggiare il fascio altamente divergente che esce dal bersaglio di rame.

3.1.2 Molteplicità e beam profile

L'utilizzo di questi componenti per il settaggio del fascio ha permesso di stabilire i parametri migliori per lavorare in modalità di singolo elettrone o in modalità di alta molteplicità. Le tracce ottenute con le camere al silicio (descritte nel paragrafo 2.2) sono mostrate in figura 3.6 per il caso di singolo elettrone (figura 3.6(a)) e per quello ad alta molteplicità (figura 3.6(b)).

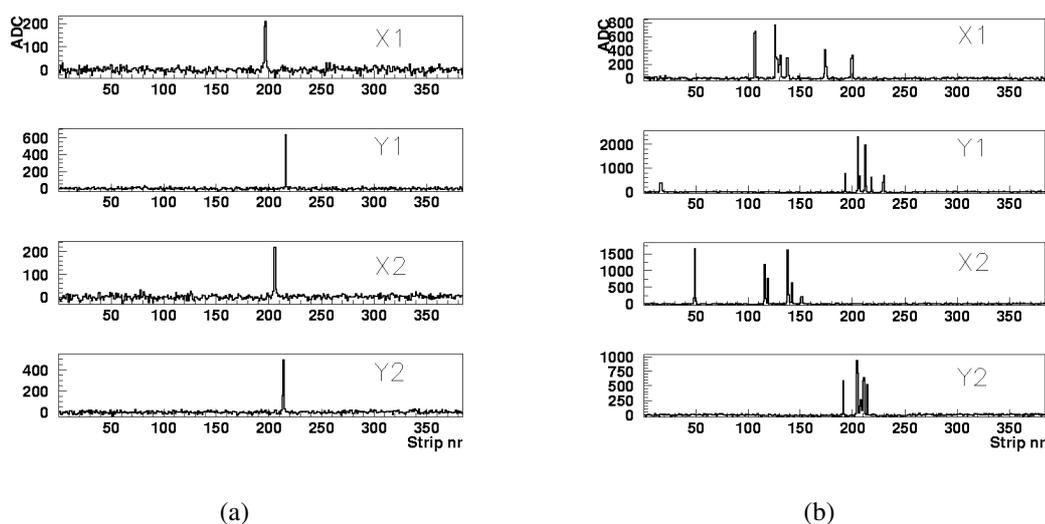


Figura 3.6: Tracce sulle camere al silicio di un singolo pacchetto di elettroni: (a) fascio in modalità di singola particella; (b) fascio con alta molteplicità. Con gli indici 1 e 2 si indica rispettivamente la camera che viene investita per prima dal fascio di elettroni e quella posta subito dietro. L'asse delle x è espresso in numero di strip, mentre l'asse delle y rappresenta il valore in ADC della carica depositata dalla particella nella strip.

La distribuzione della molteplicità segue un andamento poissoniano che sperimentalmente può essere ricavato contando il numero di tracce (e quindi di particelle) che attraversano il rivelatore. I grafici che si ottengono operando nelle due diverse modalità sono mostrati in figura 3.7, dove il numero di tracce è sta-

to calcolato dal numero di *cluster* presenti (nel paragrafo 4.1.2 si chiarirà il significato di cluster). Nel grafico della modalità di singolo elettrone (figura 3.7(a)) la curva poissoniana assume un valor medio di 1. Nel caso di alta molteplicità (figura 3.7(b)) invece è presente un numero maggiore di eventi a multi-traccia: in media i pacchetti di elettroni che arrivano alla BTF contengono 4 o 5 particelle.

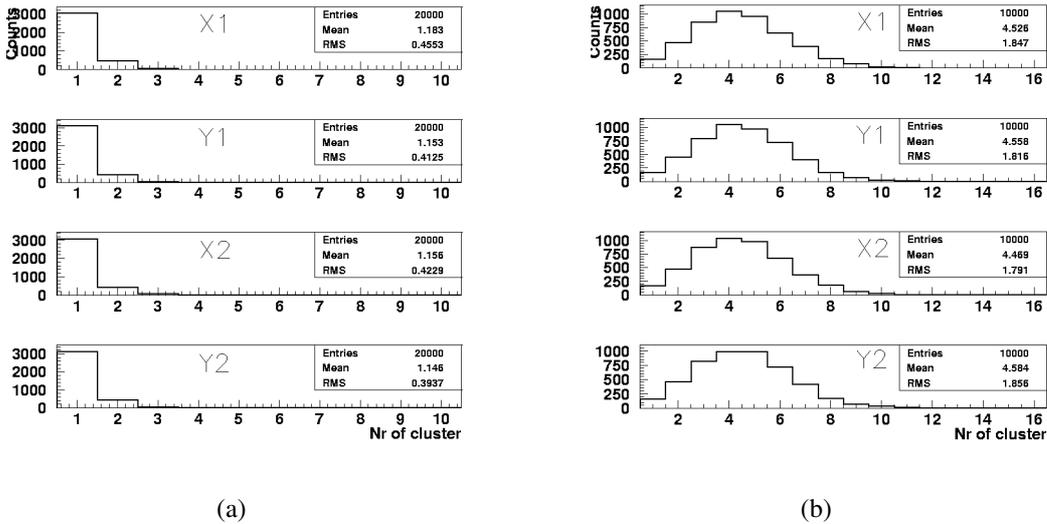
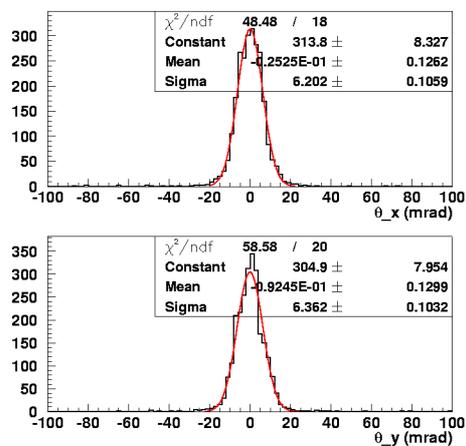
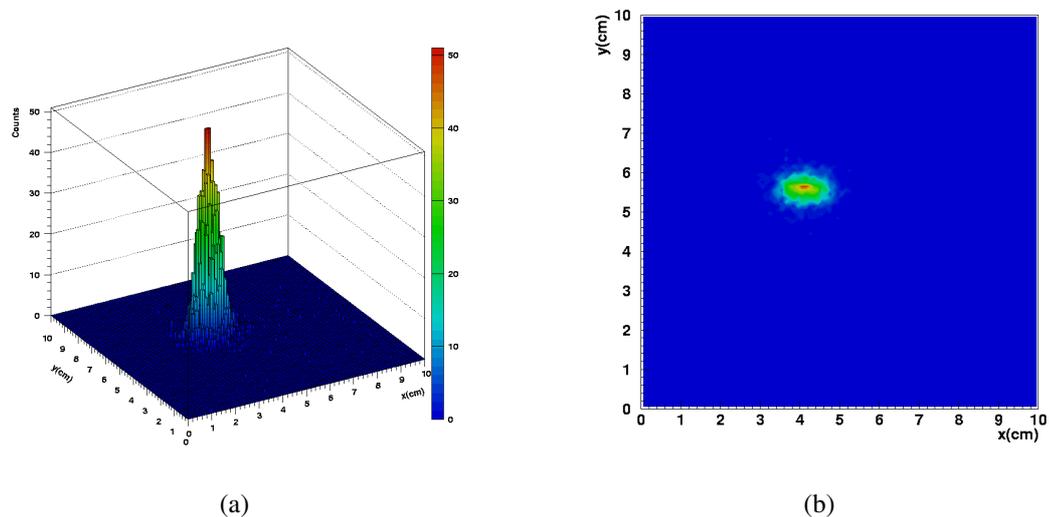


Figura 3.7: Andamento poissoniano della molteplicità (espressa in numero di cluster) in entrambe le modalità: (a) fascio in modalità di singola particella; (b) fascio con alta molteplicità. Anche in questo caso, gli indici 1 e 2 indicano rispettivamente la camera che viene investita per prima dal fascio di elettroni e quella posta subito dietro.

Effettuata la caratterizzazione del fascio in termini di intensità, energia e molteplicità è stato possibile acquisire il profilo del fascio successivamente utilizzato per determinare le performance principali del rivelatore a fibre, quali la risoluzione spaziale (paragrafo 4.1). I beam profile⁴ e la divergenza del fascio ottenuti con le camere al silicio sono mostrati in figura 3.8. I profili tridimensionale e bidimensionale sono stati ricavati riempiendo degli istogrammi con le posizioni delle tracce accumulate in un run acquisito in modalità di singola particella ad un'energia di circa 463 MeV. La divergenza è invece definita dall'angolo di uscita dell'elettrone rispetto alla prima camera: dal fit riportato in figura si ricava che il fascio è leggermente più divergente in direzione verticale ($\theta_x = 6.2$ mrad, $\theta_y = 6.4$ mrad).

⁴L'analisi dati che permette di ottenere le posizioni in cui avviene il passaggio delle particelle verrà descritta nel paragrafo 4.1.



(c)

Figura 3.8: (a) Beam profile tridimensionale in modalità di singolo elettrone, ottenuto con la camera al silicio posta più vicino alla fine della beam pipe; (b) proiezione bidimensionale del beam profile ottenuto con la stessa camera; (c) divergenza del fascio in entrambe le direzioni calcolata con le camere al silicio.

3.2 La linea H8 dell'SPS del CERN

3.2.1 Il Super Proton Synchrotron

Il Super Proton Synchrotron fa parte del complesso sperimentale del CERN di Ginevra; è il secondo acceleratore per dimensione dell'intera struttura (ha una circonferenza di quasi 7 km) e provvede all'accelerazione di fasci di particelle per gli esperimenti di LHC⁵, di COMPASS⁶ [21] e del progetto CNGS⁷ [22]. Oltre ad aver permesso di comprendere, almeno in parte, la natura della struttura interna dei protoni e della materia nei primi istanti di vita del nostro universo, uno dei risultati più importanti conseguito da questa macchina, utilizzata in modo collider protone-antiprotone, è stata la scoperta dei bosoni W^\pm e Z_0 nel 1983 [23].

Lungo l'anello dell'SPS sono disposti 1317 magneti convenzionali, inclusi i 744 dipoli per curvare il fascio attorno al suo percorso; l'energia tipica a cui opera questa macchina è di 400 GeV/c (per LHC l'energia dei protoni può arrivare fino a 450 GeV) e può accelerare svariati tipi di particelle: nuclei di ossigeno e zolfo, elettroni, positroni, protoni e antiprotoni. I protoni vengono generati tramite una sorgente ionica. Successivamente iniziano il loro percorso nell'acceleratore lineare (LINAC2, figura 3.9(a)), dove vengono accelerati fino a 50 MeV. Per aumentarne l'energia, i protoni vengono iniettati all'interno del Proton Synchrotron Booster (PSB) dove raggiungono l'energia di 1 GeV. Successivamente passano prima dal Proton Synchrotron (PS), che li accelera fino a 26 GeV e poi nell'SPS. Il fascio di protoni può essere estratto in due zone, la North e la West Area (figura 3.9(b)), e successivamente inviato alle varie aree sperimentali attraverso sistemi di collimatori e di magneti di focalizzazione.

La West area non è più in funzione.

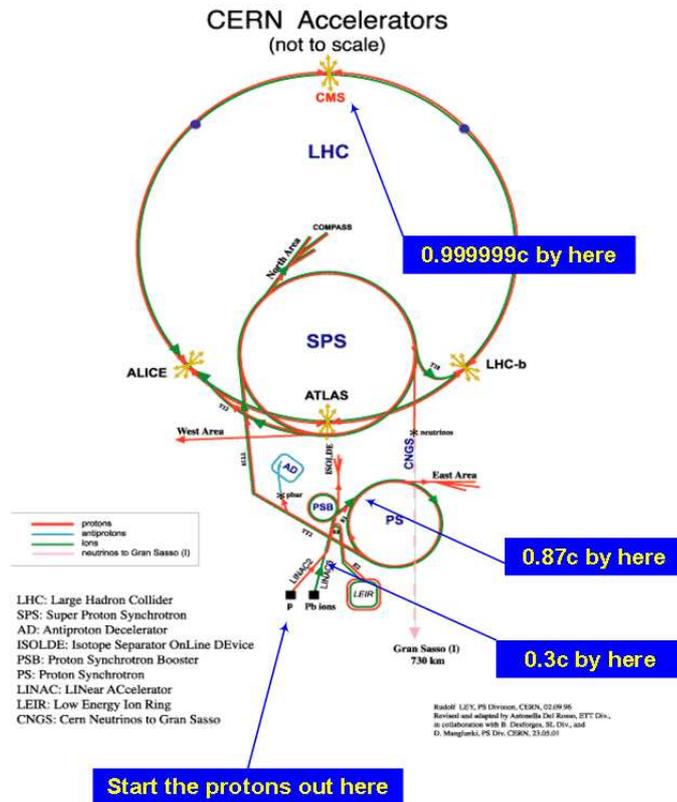
3.2.2 La linea H8

La linea H8 è una linea di fascio dell'SPS, situata nella North Area presso la zona sperimentale di Preveessin (EHN1, edificio 887); su questa linea possono essere utilizzati diversi fasci secondari di adroni, elettroni e muoni, di energie comprese tra 10 e 400 GeV/c, e fasci di protoni fino a 450 GeV/c. Dall'SPS il fascio di protoni viene estratto verso la North Area; successivamente viene suddiviso in tre fasci di cui uno viene fatto incidere su un bersaglio primario (T4): la tipica intensità di questo fascio è di circa 10^{12} particelle. Il fascio in uscita dal bersaglio viene a sua volta suddiviso in tre fasci secondari: il fascio P0 per ECN3, il fascio di H6 e quello di H8.

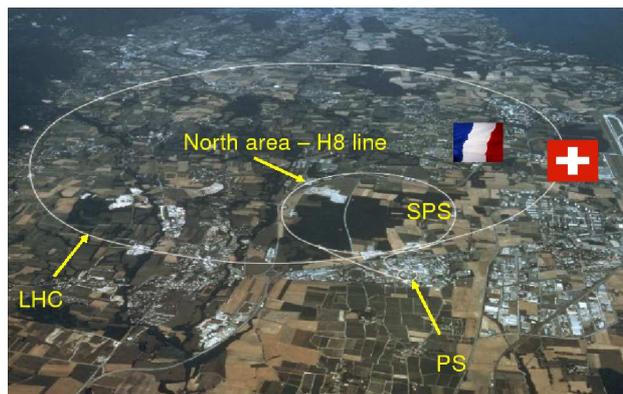
⁵Sito internet: <http://public.web.cern.ch/Public/en/LHC/LHC-en.html>

⁶Sito internet: <http://www.compass.cern.ch/>

⁷Sito internet: <http://proj-cngs.web.cern.ch/proj%2Dcngs/>



(a)



(b)

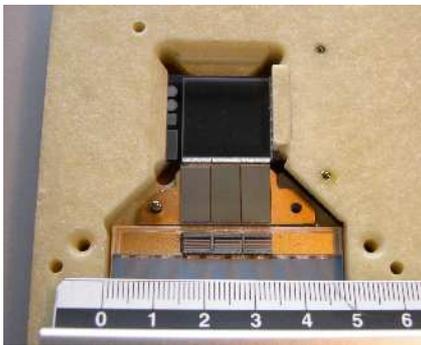
Figura 3.9: (a) Schema delle linee di fascio del complesso del CERN di Ginevra. (b) Veduta aerea del CERN di Ginevra: la linea H8 dell' SPS è situata presso il complesso sperimentale di Preveessin.

Lungo la linea di fascio sono posizionati diversi magneti dipoli e quadrupoli per lo steering e il focusing del fascio stesso. Sono presenti anche dei collimatori per selezionarne l'intensità e il momento. Scintillatori, calorimetri, camere a fili e altri rivelatori disposti lungo la linea H8 permettono di monitorare la posizione e la forma del fascio: controllando il fascio grazie a questi detector e agendo sui magneti, sui quadrupoli e sui collimatori a disposizione, è possibile ottenere fasci dalle caratteristiche ben definite. I calorimetri e gli scintillatori sono dotati di un sistema di controllo remoto per rimuoverli dalla linea durante la presa dati.

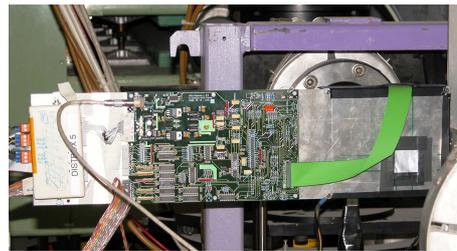
Il fascio utilizzato nel beam test con il tracciatore a fibre è un fascio di protoni da 400 GeV/c, emesso in spill di 4.8 s ogni 16.8 s; l'intensità nominale è stata ridotta fino a circa 5×10^5 durante l'esperimento.

3.2.3 Forma e divergenza del fascio di protoni

Il profilo del fascio è stato misurato con un *telescopio*: esso è costituito da 4 moduli sviluppati dall'INFN di Trieste [24] (1995) per la fase di commissioning di BaBar [25]; ognuno di essi è posizionato all'interno di una scatola di Al che contiene anche parte dell'elettronica di lettura. Il detector è un rivelatore doppia faccia a microstrip di silicio ad alta resistività, di spessore 300 μm e con un'area sensibile di $1.92 \times 1.92 \text{ cm}^2$ (figura 3.10(a)).



(a)



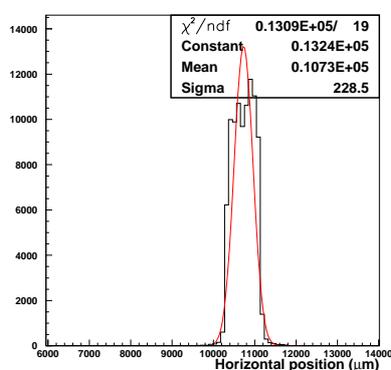
(b)

Figura 3.10: Il telescopio: (a) il rivelatore a microstrip di silicio; (b) il modulo completo durante la presa dati alla linea H8 dell'SPS.

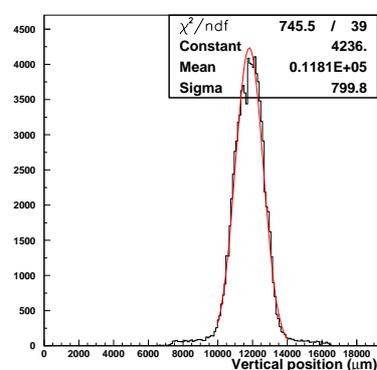
Lo strato p presenta delle strip p+ ogni 25 μm e un passo di lettura di 50 μm ; il lato n (perpendicolare allo strato p) presenta invece delle impiantazioni n+ ogni 50 μm . Entrambi i lati sono letti tramite gli ASIC VA2 (Gamma Medica-IDEAS),

ciascuno con 128 canali a basso rumore a basso consumo. L'accoppiamento AC è realizzato tramite condensatori su quarzo, esterni al rivelatore. La migliore risoluzione spaziale ottenuta (lato p) è stata di circa $5 \mu\text{m}$. La figura 3.10(b) mostra uno dei 4 moduli durante la presa dati all'SPS.

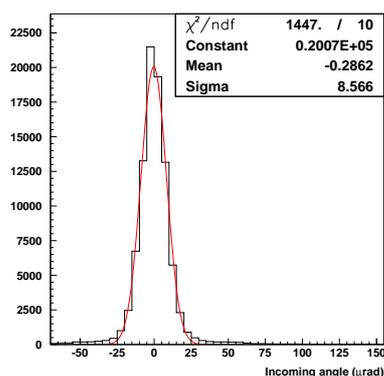
La figura 3.11 presenta il profilo del fascio in entrambe le direzioni: si noti che lungo la coordinata orizzontale il fascio risulta molto più stretto e ben collimato (si osservino in proposito i valori dell'asse x). La figura 3.11(c), infine, presenta la divergenza misurata in direzione orizzontale: il valore ottenuto è di circa $9 \mu\text{rad}$.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.11: Il fascio dell'SPS: (a) profilo orizzontale; (b) profilo verticale; (c) divergenza del fascio in direzione orizzontale.

Capitolo 4

ANALISI DATI E RISULTATI

Questo capitolo è dedicato all'analisi dati ed ai risultati ottenuti nei beam test presso la BTF di Frascati e la linea H8 dell'SPS del CERN. La parte iniziale del capitolo illustra la procedura di analisi dati necessaria per discriminare il segnale dal rumore e per ricostruire le posizioni in cui le particelle rilasciano la propria energia all'interno del rivelatore. La seconda parte è invece dedicata alle misure sperimentali svolte presso i due acceleratori: il setup alla BTF, la misura della risoluzione spaziale presso quest'area sperimentale e lo studio del multiplo scattering (non trascurabile per elettroni di energia massima di 500 MeV), il setup all'SPS e l'utilizzo del tracciatore per misure di channeling in cristalli di silicio incurvati.

4.1 Procedura di analisi

L'analisi dati per il rivelatore a fibre e per le camere segue la stessa procedura, trattandosi di rivelatori letti da un'elettronica equivalente nei due casi. Tale procedura può essere così riassunta:

1. calcolo dei piedestalli e del rumore (paragrafo 4.1.1): come è stato descritto nel capitolo 2 (paragrafi 2.1.1 e 2.2) il segnale delle strip (o delle fibre) viene campionato tramite un segnale di hold, multiplexato e letto da un ADC a 10 o 12 bit. Questo avviene anche in assenza di segnale per campionare la baseline del sistema;
2. il passaggio di una particella in un rivelatore provoca un deposito di energia e quindi la generazione di una carica che viene raccolta ed amplificata: l'identificazione delle strip (o delle fibre) che presentano un segnale viene fatta valutando il segnale di ciascuna strip (fibra), considerando il rapporto tra il segnale e il rumore della strip (fibra) (paragrafo 4.1.2).

4.1.1 Piedestallo e common mode

In assenza di segnale, la catena di lettura dei rivelatori campiona la baseline di uscita del sistema, che dipende dai rivelatori stessi e dall'elettronica, e che prende il nome di *piedestallo*. Il run di piedestallo viene acquisito generando 200 trigger casuali: il valore medio di ogni canale rappresenta il piedestallo, mentre la deviazione standard corrisponde all'rms del rumore.

La figura 4.1(a) mostra il piedestallo delle camere al silicio: le 6 zone che si distinguono sono dovute al fatto che si stanno considerando 6 ASIC (3 per ciascun piano di una camera). La figura 4.1(b) presenta in nero l'rms del rumore di ogni canale. La linea rossa della stessa figura mostra, invece, la deviazione standard del piedestallo una volta sottratto il contributo del rumore coerente (modo comune o *common mode*), che si presenta come variazione della baseline di tutti i canali attorno al valor medio.

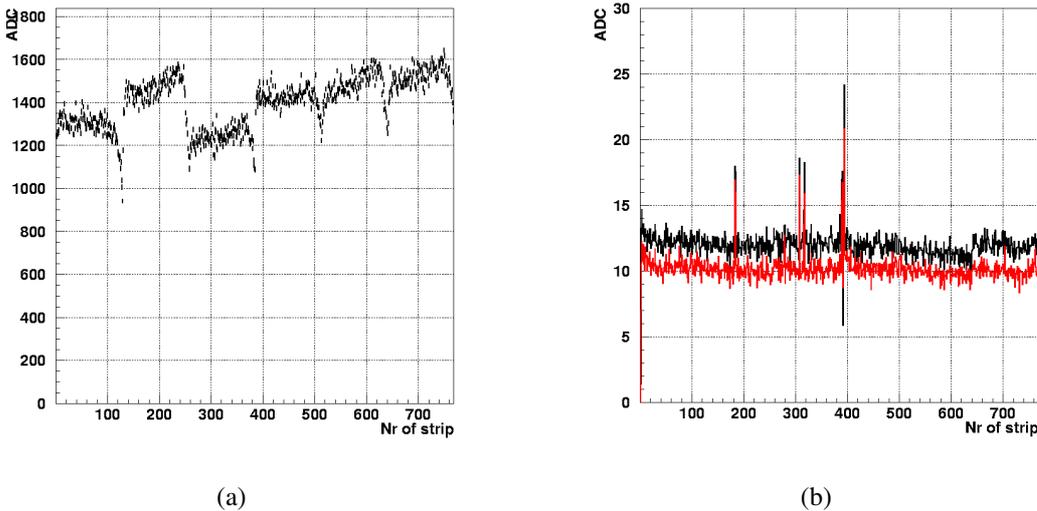


Figura 4.1: Analisi del rumore nelle camere. (a) Esempio di piedestallo: il piedestallo è dato dal valor medio dei segnali registrati in assenza di fascio generando 200 trigger casuali. (b) Rumore rms del piedestallo, in nero; in rosso è rappresentato il rumore rms una volta sottratto il rumore coerente, dovuto al fatto che il segnale di tutti i canali oscilla attorno al valor medio a causa di disturbi che arrivano al silicio tramite l'alimentazione.

Il calcolo del modo comune va effettuato per ciascun ASIC per ogni evento con il seguente metodo:

- calcolo e sottrazione del piedestallo;

- calcolo del valore medio della baseline dei canali di un ASIC; i canali difettosi (strip morte o con un rumore estremamente elevato) vengono esclusi a priori;
- sottrazione del valor medio dal dato raw e calcolo del piedestallo e dell'rms del rumore.

La figura 4.2(a) mostra la distribuzione del common mode di un ASIC; la figura 4.2(b) presenta invece la correlazione tra i valori del common mode di 2 ASIC di lettura di uno dei piani di silicio; la correlazione indica che il common mode è un effetto che riguarda l'intero rivelatore. La figura 4.3 mostra il piedestallo e il

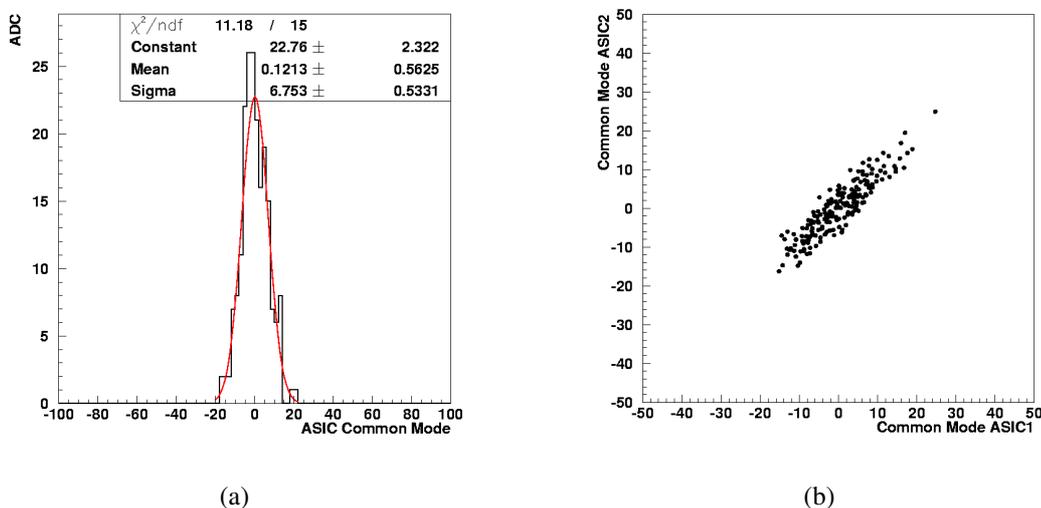


Figura 4.2: (a) Common mode di un singolo ASIC: il common mode è dovuto al fatto che tutti i canali di uno stesso ASIC oscillano attorno al valore della baseline. (b) La correlazione tra i common mode di due ASIC della stessa camera.

rumore rms calcolato per il rivelatore a fibre: anche in questo caso, in figura 4.3(a) è possibile distinguere le 4 zone corrispondenti ai 4 ASIC di lettura. Il valore dell'rms (figura 4.3(b)) presenta, invece, una serie di picchi equispaziati di 16 fibre: i segnali più esterni nei cavi ERNI di collegamento tra i canali del fotomoltiplicatore e la scheda di lettura risentono infatti di un rumore maggiore, dovuto ad interferenze esterne, cioè si comportano come antenne.

4.1.2 Identificazione del cluster

Entrambi i rivelatori hanno un'elettronica di frontend capace di "leggere" la carica depositata nel passaggio della particella, cioè funzionano in modalità analogica.

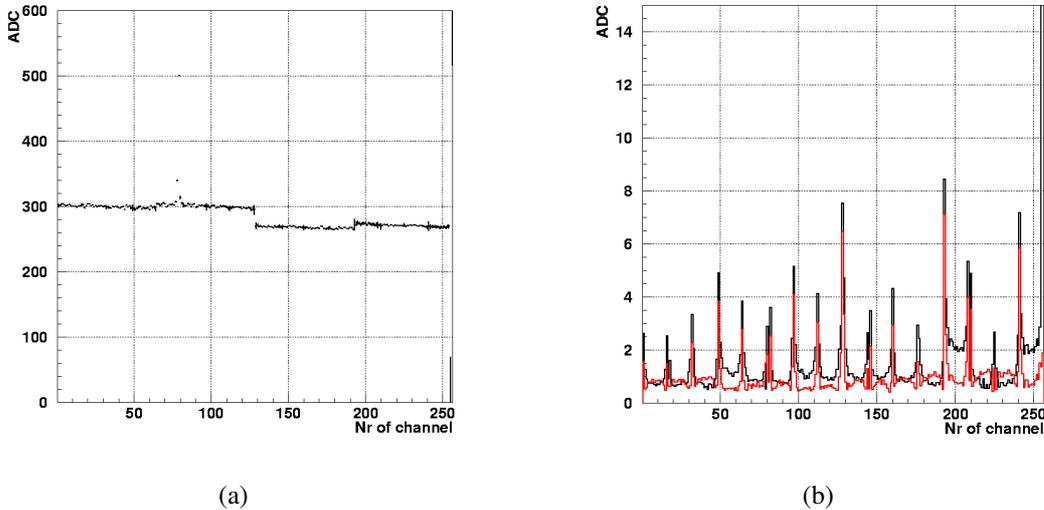


Figura 4.3: Analisi del rumore nel tracciatore a fibre. (a) Piedestallo; (b) rms del rumore prima (linea nera) e dopo (linea rossa) la sottrazione del common mode. Il rumore più alto e periodico ogni 16 canali è dovuto al fatto che i bordi dei cavi ERNI non portano le masse ma i segnali e non sono schermati.

Ogni particella deposita in realtà energia in una serie di strip (fibre) contigue, che costituiscono il cosiddetto *cluster*. Considerando la carica raccolta da ogni singola strip (fibra), è possibile ricavare l'esatta posizione del passaggio della particella stessa con il metodo del baricentro, ottenendo una risoluzione spaziale decisamente migliore del passo delle strip (fibre).

Per individuare le strip (fibre) interessate dal rilascio di energia è necessaria una soglia, che viene espressa in termini dell'rms del rumore, al di sopra della quale l'ampiezza del segnale analogico registrato si possa considerare buono. Per fissare questa soglia si utilizza il grafico del *pull*, cioè il rapporto tra il segnale e il rumore della strip (fibra) con la massima ampiezza nell'evento. Il pull (in scala logaritmica) per una delle due camere al silicio è riportato in figura 4.4(a): in pratica questo plot rappresenta il segnale in unità di rms. Nel grafico in alto della figura 4.4(a) si può notare il picco a bassi valori che corrisponde ad eventi in cui non c'è stato passaggio di particelle, cioè per cui si ha solo rumore. Il successivo taglio a 10σ permette di vedere meglio la forma del pull (figura 4.4(a) in basso): i due picchi sono dovuti al fatto che si è utilizzata la tecnica della strip floating per la lettura delle camere (quando la particella interagisce con una strip non letta, l'energia è indotta sulle due strip contigue per accoppiamento capacitivo e quindi ognuna di esse legge un segnale che è il 38% del totale [17]).

Come già detto, l'insieme di strip (fibre) contigue che vedono la carica rilasciata

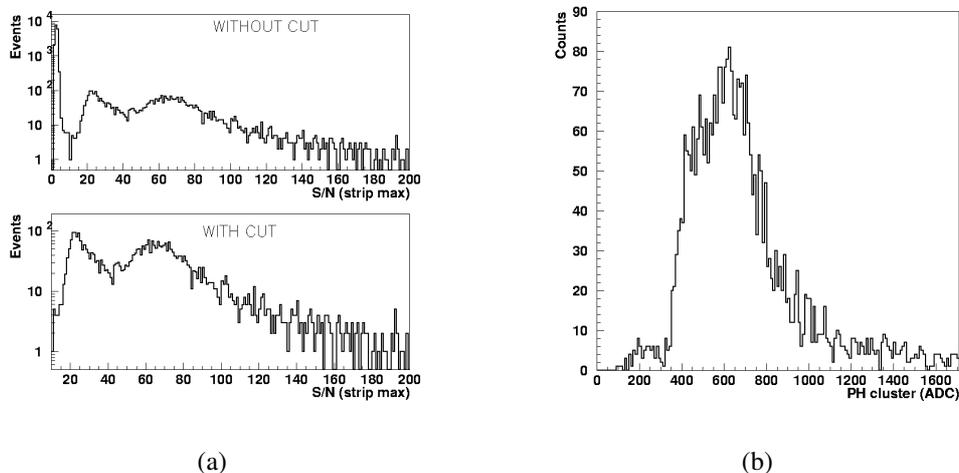


Figura 4.4: Camera al silicio: (a) grafico del pull in scala logaritmica: rapporto tra segnale e rumore della strip con la massima ampiezza nell'evento; nel grafico in basso è stato effettuato un taglio a 10σ ; (b) grafico della pulse height: l'altezza dell'impulso registrato dalla catena di lettura corrisponde alla quantità di energia rilasciata dalla particella all'interno del rivelatore; la carica può essere descritta con una distribuzione di Landau [26].

dal passaggio della particella è definito *cluster*: il cluster è formato da almeno una strip con segnale superiore a 10σ e da tutte le strip contigue con segnale superiore a 6σ (taglio sulle strip laterali). In media i cluster nelle camere sono costituiti da 2-3 strip, mentre nel tracciatore la maggior parte dei cluster presenta un'unica fibra. Per i silici, quindi, la posizione nel rivelatore in cui la particella rilascia la sua energia è data dal baricentro pesato sul segnale di ogni strip del cluster. Gli eventi *multi-cluster*, cioè gli eventi in cui sono presenti più strip (fibre) non contigue che soddisfino le condizioni sulle soglie del pull, non sono stati considerati nell'analisi.

Potendo usufruire della lettura analogica, si può misurare l'ampiezza di impulso o *pulse height*, che è definita come il segnale registrato dalla strip (fibra) con il massimo. In figura 4.4(b) è mostrata la pulse height per le camere.

La figura 4.5 mostra, infine, i grafici del pull e della pulse height per il tracciatore a fibre: in questo caso il taglio sul pull per l'identificazione del cluster è stato portato a 20σ . Uno spettro così ampio di valori del pull è dato dalla notevole differenza tra gli rms dei vari canali.

Il profilo bidimensionale del fascio ottenuto con entrambi i moduli del tracciatore utilizzando il metodo dei cluster, è mostrato in figura 4.6. Nel grafico (a) si nota che il fascio risulta più largo che nel caso (b): la spiegazione sta nel fatto che

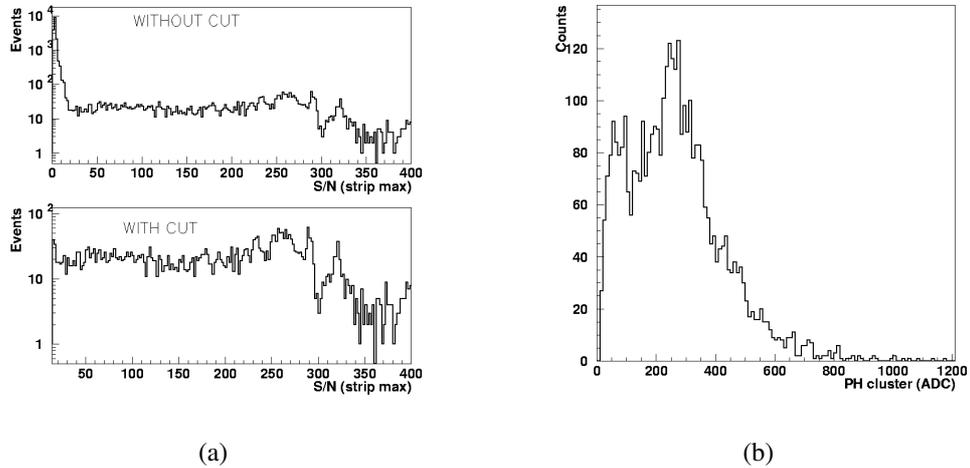


Figura 4.5: Tracciatore a fibre. (a) Grafico del pull in scala logaritmica: in questo caso, rispetto a quello della camera, il taglio è stato posto a 20σ (grafico in basso); (b) grafico di pulse height.

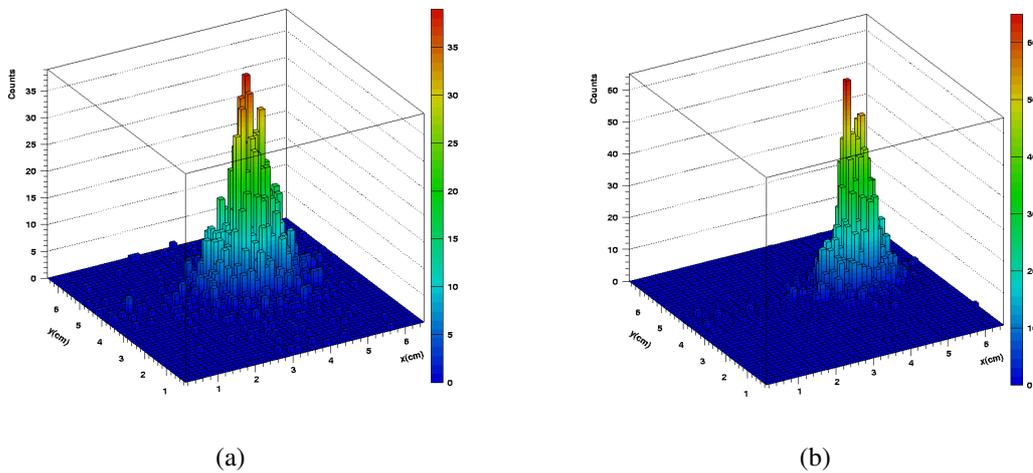


Figura 4.6: Beam profile tridimensionale ricavato con il tracciatore a fibre in modalità di singolo elettrone: (a) modulo A; (b) modulo B. Il profilo del fascio ottenuto con il modulo A risulta più largo a causa dell'effetto del multiple scattering dato dal modulo B posto davanti.

l'energia del fascio di elettroni non è sufficientemente alta da poter trascurare il fenomeno del multiplo scattering. Di questo problema si discuterà in dettaglio nel paragrafo 4.2.3.

4.1.3 Ricostruzione delle tracce

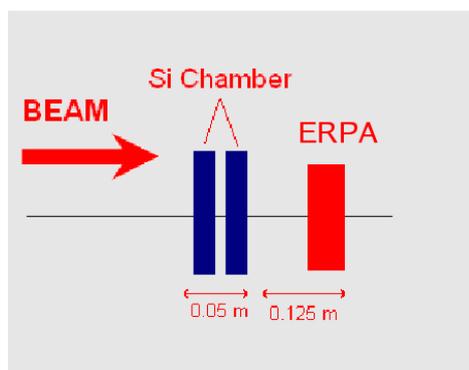
Il risultato della procedura di analisi è l'identificazione delle strip delle camere e delle fibre del tracciatore in cui la particella ha rilasciato energia. Considerando due piani di silicio con la stessa direzione (per esempio i due piani orizzontali) si è identificata la traccia dell'elettrone come il segmento che unisce le due posizioni individuate su questi piani; questa traiettoria è stata poi estrapolata fino ai piani del tracciatore e la traccia è stata ricostruita anche per i piani del rivelatore a fibre. La risoluzione spaziale del tracciatore a fibre scintillanti, cioè la precisione con cui la posizione del passaggio di una particella viene ricostruita, è stata calcolata con il metodo dei residui: la differenza tra la posizione ricostruita dal rivelatore a fibre e quella ricavata prolungando le tracce ottenute dalle camere, permette di ottenere la distribuzione dei residui, dal cui fit gaussiano si ricava la risoluzione spaziale del tracciatore¹. Le misure di risoluzione spaziale effettuate alla BTF verranno presentate nel paragrafo 4.2.2.

4.2 Misure alla BTF

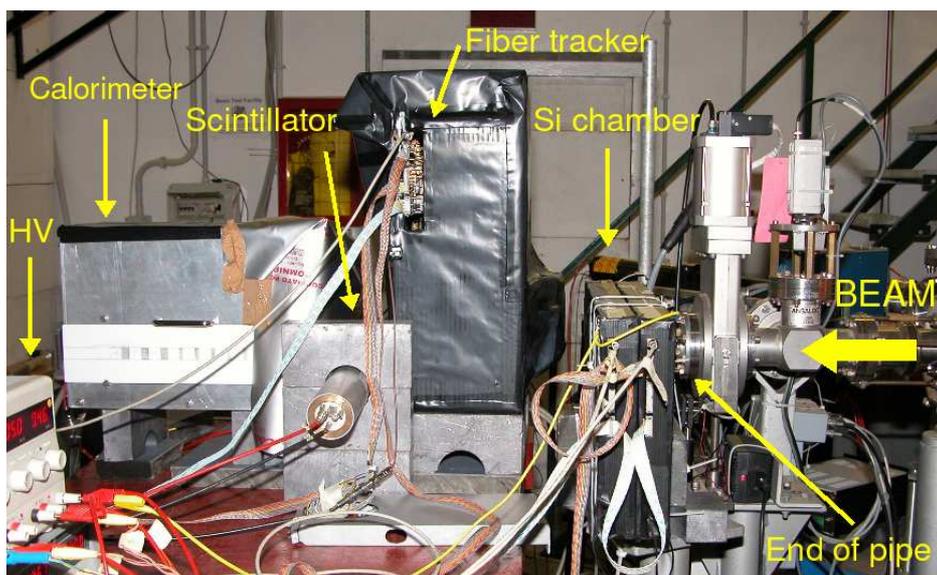
4.2.1 Il setup sperimentale

Il setup utilizzato durante il beam test svoltosi alla BTF è schematizzato in figura 4.7(a): oltre al tracciatore a fibre scintillanti (presentato nel capitolo 2), il setup constava anche delle due camere al silicio descritte nel paragrafo 2.2, di uno scintillatore e di un calorimetro a campionamento. Una foto di tutti i rivelatori durante l'acquisizione è mostrata in figura 4.7(b). A differenza del setup per le misure con i raggi cosmici (paragrafo 2.3), lo scintillatore è stato utilizzato esclusivamente per controllare che il fascio secondario fosse stato trasferito alla BTF, mentre l'avvio dell'acquisizione dati era fornito dal trigger di macchina, opportunamente ritardato dal momento che arriva circa $8 \mu\text{s}$ prima dell'arrivo delle particelle.

¹La risoluzione spaziale è infatti definita come la σ del fit gaussiano della distribuzione dei residui.



(a)



(b)

Figura 4.7: Setup presso la BTF: (a) schema del setup; (b) foto del rivelatore sotto test: le camere al Si (con risoluzione spaziale di $20\ \mu\text{m}$) poste a circa 10 cm dal rivelatore a fibre, sono state utilizzate per calcolare la risoluzione spaziale del tracciatore.

4.2.2 Risoluzione spaziale

I grafici dei residui ottenuti con il metodo presentato nel paragrafo 4.1.3 sono mostrati nelle figure 4.8 e 4.9. Dal fit di ciascun plot sono stati ricavati i valori di risoluzione riportati nella tabella 4.1.

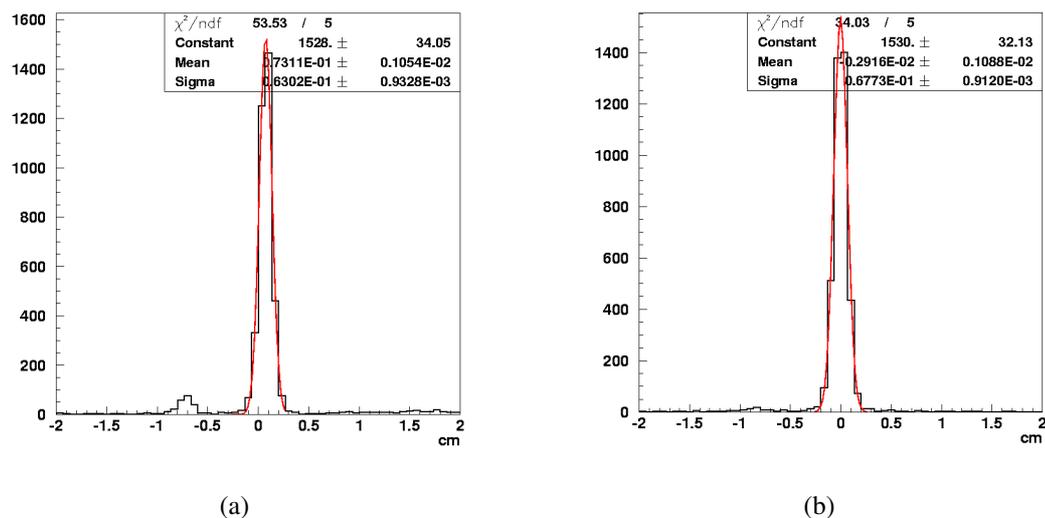


Figura 4.8: Risoluzione del modulo A del tracciatore a fibre: (a) direzione orizzontale; (b) direzione verticale.

Modulo	Direzione	Risoluzione (μm)
A	x	630.2 ± 9.3
A	y	677.3 ± 9.1
B	x	713.3 ± 1.3
B	y	641.1 ± 1.1

Tabella 4.1: Valori ottenuti per la risoluzione spaziale del tracciatore a fibre in ciascuna delle 4 direzioni.

Facendo la media dei valori di risoluzione ottenuti con il metodo dei residui di ciascun modulo si ottiene $(653.8 \pm 9.2) \mu\text{m}$ per il modulo A e $(677.2 \pm 1.2) \mu\text{m}$ per il modulo B. L'utilizzo di maschere diverse per l'interfacciamento tra fibre e fotomoltiplicatore nei due casi causa la differenza del passo fisico delle fibre e, di conseguenza, del valore della risoluzione; questa disparità è comunque molto piccola, intorno al 4%. È quindi pensabile l'impiego delle maschere a fessure per un progetto su larga scala: la riduzione del tempo di fabbricazione delle stesse e del

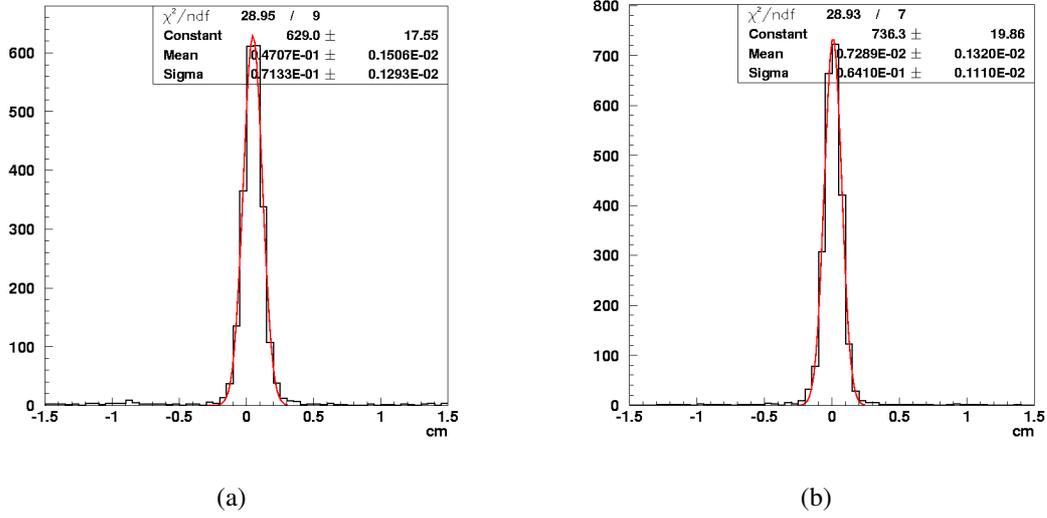


Figura 4.9: Risoluzione del modulo B del tracciatore a fibre: (a) direzione orizzontale; (b) direzione verticale.

numero di canali utilizzati non comprometterebbe le performance del tracciatore in termini di risoluzione spaziale.

Il passo fisico nei due moduli del tracciatore è risultato rispettivamente 1 mm per il modulo A e 1.3 mm per il modulo B; in questo modo le rispettive risoluzioni, considerando un comportamento digitale, dovrebbero essere dell'ordine di $289 \mu\text{m}$ e $375 \mu\text{m}$ (si veda in proposito il capitolo 2 dedicato alla costruzione del tracciatore). Il fatto che i valori sperimentali ottenuti siano quasi il doppio di quelli che ci si aspetta dalla relazione 2.1 è riconducibile alla presenza dell'effetto del multiple scattering (appendice A).

Lo studio del multiple scattering è quindi fondamentale per valutare correttamente la risoluzione dei due moduli: l'angolo totale di diffusione multipla è la somma dei contributi dati dai piani di silicio delle camere, dalle scatole in Al delle camere stesse e dall'aria presente tra i rivelatori. In questo caso per utilizzare l'equazione A.12 è necessario calcolare il numero totale di lunghezze di radiazione presenti nel tratto tra il primo piano di silicio e il primo piano di fibre (17 cm):

$$\left(\frac{x}{X_0}\right)_{\text{total}} = \sum \left(\frac{x}{X_0}\right)_i = 0.02045 \quad \Rightarrow \quad \theta_{\text{scat}} = 3.57 \text{ mrad} \quad (4.1)$$

Utilizzando questo valore si ottiene la seguente risoluzione spaziale:

$$\sigma_{\text{tracker}} = \sqrt{\sigma_{\text{misurata}}^2 - \sigma_{\text{scat}}^2} = 188.3 \pm 67.1 \mu\text{m} \quad (4.2)$$

che risulta entro 2.1σ dal valore medio di risoluzione digitale di $332 \mu\text{m}$ dato dall'equazione 2.1: l'acquisizione dei segnali in modalità analogica e l'utilizzo della geometria doublet ribbon hanno quindi permesso di ottenere una risoluzione spaziale migliore di quella digitale.

4.2.3 Multiplo scattering

Considerando l'energia massima raggiungibile dal fascio di elettroni utilizzato alla BTF, il fenomeno del multiplo scattering non può essere trascurato, anzi diventa fondamentale per ottenere delle misure corrette della risoluzione spaziale del rivelatore a fibre, come dimostrato nel paragrafo precedente. La descrizione teorica del multiplo scattering è presentata nell'appendice A.

Sperimentalmente l'angolo di deflessione dovuto alla diffusione multipla può essere calcolato considerando l'allargamento del profilo del fascio sul modulo del tracciante posto più lontano, cioè quello che viene investito per secondo dagli elettroni.

Si consideri per esempio la configurazione per cui il modulo B del tracciante è il primo ad essere investito dal fascio di particelle: la larghezza del beam profile sul modulo A sarà quindi data dalla somma in quadratura della larghezza iniziale del fascio, cioè quella misurata dal modulo B, e del contributo del multiplo scattering. Esprimendo la larghezza del profilo del fascio attraverso la risoluzione dei due moduli si può scrivere:

$$\sigma_A^2 = \sigma_B^2 + \sigma_{\text{scat}}^2 \quad (4.3)$$

Dall'equazione A.12 e dalla definizione di Einstein per l'energia di una particella si ricava l'andamento dell'angolo medio di multiplo scattering in funzione dell'energia del fascio incidente:

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \approx pc \quad (4.4)$$

dove l'approssimazione è giustificata dal fatto che la massa a riposo dell'elettrone può essere trascurata rispetto alla sua energia cinetica. Di conseguenza l'equazione A.12 è esprimibile come:

$$\Theta' \propto \frac{K}{E} \quad (4.5)$$

dove K rappresenta l'insieme dei parametri che dipendono dal tipo di diffusore. Per verificare questo andamento in funzione dell'energia sono stati eseguiti dei run di acquisizione in modalità di singola particella con energia nel range 77-463 MeV. Calcolando l'angolo di diffusione multipla invertendo la formula 4.3

$$\sigma_{\text{scat}}^2 = \sigma_A^2 - \sigma_B^2 \quad (4.6)$$

si sono ottenuti i grafici mostrati in figura 4.10, che rappresentano l'andamento dell'angolo di deflessione dovuto alla diffusione multipla (sia nella direzione orizzontale che in quella verticale) in funzione dell'energia: in entrambi i casi il contributo del multiplo scattering diventa sempre meno importante man mano che si aumenta l'energia della particella incidente.

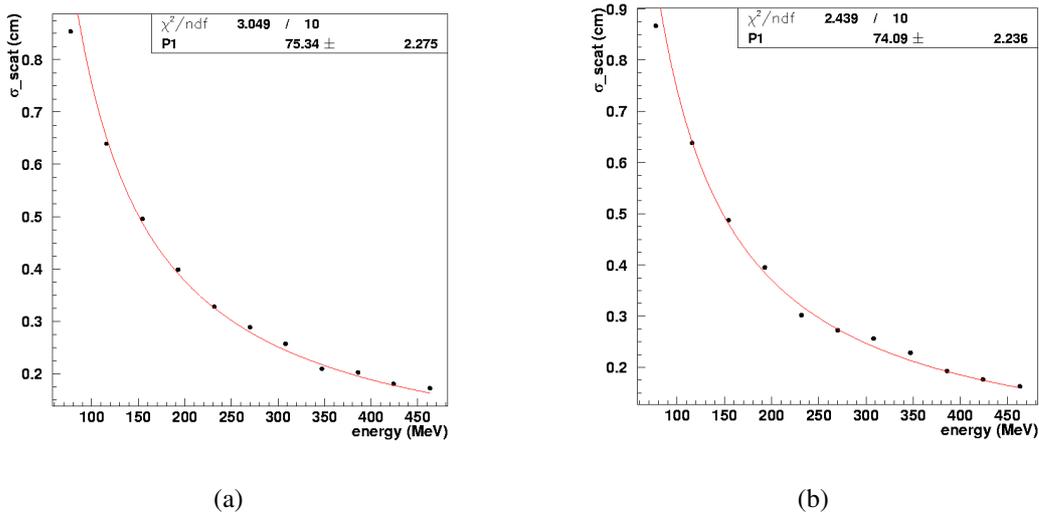


Figura 4.10: Andamento del multiplo scattering misurato in uno scan in energia da 77 a 463 MeV: (a) direzione orizzontale; (b) direzione verticale. Sperimentalmente l'angolo del multiplo scattering è stato calcolato come la differenza dell'allargamento del profilo del fascio sui due moduli del tracciatore.

Utilizzando il parametro P1 del fit è stato ottenuto un angolo di deflessione a 463 MeV pari a 4.3 mrad che si discosta dal valore teorico dato dall'equazione A.12 di circa 2.3σ .

4.3 Misure all'SPS

4.3.1 Il fenomeno del channeling e la collaborazione H8RD22

Il fenomeno del *channeling* fu ipotizzato già nel 1912 da Stark [27], il quale si rese conto che in un cristallo alcune direzioni potevano essere più trasparenti al passaggio di particelle cariche rispetto a quanto accade in un materiale amorfo. Fu però solo agli inizi degli anni Sessanta che il channeling venne verificato sperimentalmente ed iniziò ad essere studiato in modo approfondito [28].

Se la traiettoria della particella è allineata con un piano cristallino, essa subisce per

lo più scattering coerente: l'interazione di particelle con gli atomi del cristallo può essere descritta come il movimento della particella in un campo elettrico medio che, formando una buca di potenziale (figura 4.11), è in grado di confinare la particella stessa. Questo confinamento prende il nome di channeling e può aver luogo solo se l'energia della particella in direzione trasversale al piano cristallino è molto piccola. In altre parole, l'angolo di incidenza della particella deve risultare più piccolo del valore critico dato dall'angolo di Lindhard [29]:

$$\theta_L = \sqrt{\frac{2E_c}{pv}} \quad (4.7)$$

dove E_c è il massimo valore del potenziale, mentre p e v sono rispettivamente il momento e la velocità della particella incidente.

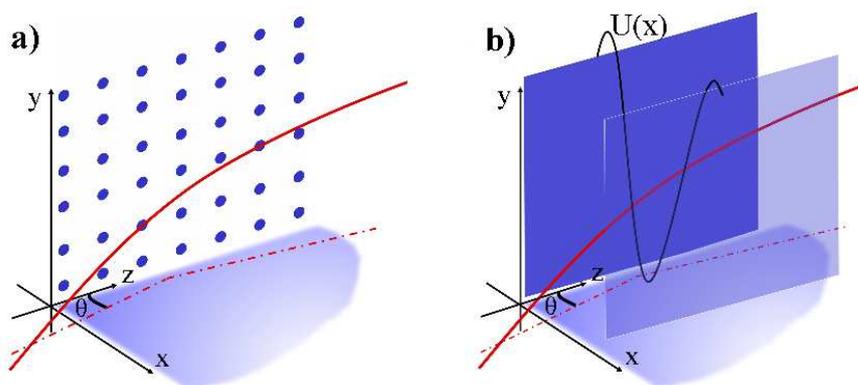


Figura 4.11: Anche se una particella (linea rossa) non è allineata con l'asse del cristallo può essere confinata dal potenziale dovuto ai piani cristallini (piani z-y in figura (a)). (b) Potenziale interatomico (linea nera) sentito dalla particella.

La capacità di confinamento mostrata dai cristalli può essere sfruttata per deviare la traiettoria delle particelle che li attraversano: piegando il cristallo in modo da produrre una curvatura dei piani atomici, è possibile deviare le particelle lungo direzioni che dipendono dalla natura e dalla curvatura del cristallo stesso.

La prima idea di sfruttare il channeling per deviare fasci di particelle ultrarelativistiche fu di Tsyganov (1976) [30]; la sua teoria trovò poi conferma 3 anni dopo (1979) al Fermilab [31], aprendo la strada a numerose applicazioni del channeling, tra cui la più innovativa è quella di utilizzarlo come sistema di collimazione "intelligente".

In un cristallo curvato si possono distinguere diversi effetti, oltre a quello del channeling, a seconda dell'orientazione del fascio di particelle incidenti rispetto

ai piani cristallini. Se il cristallo non è allineato esso si comporta come un materiale amorfo: l'unico effetto è quello di multiplo scattering all'interno del cristallo stesso. Se il punto di tangenza del fascio si trova all'interno del volume cristallino si possono verificare due fenomeni: la cattura in un canale del cristallo (*volume capture*) o, con maggiore probabilità, la riflessione della particella dal lato opposto (*volume reflection*). In figura 4.12 è mostrato lo schema dei fenomeni appena descritti: il channeling ha luogo quando l'angolo di incidenza è minore dell'angolo critico θ_L ; negli altri casi si ha cattura o riflessione della particella.

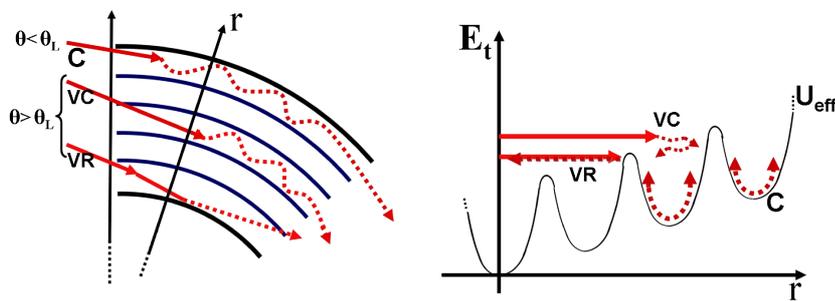


Figura 4.12: Schema del channeling e dei fenomeni ad esso correlati: se l'angolo di incidenza è minore dell'angolo critico θ_L , la particella viene intrappolata all'interno di un canale del cristallo; se l'angolo di incidenza è invece maggiore dell'angolo di Lindhard, il punto di tangenza si sposta all'interno del cristallo dove la particella può essere catturata (VC) o riflessa (VR) dal potenziale interatomico dovuto ai piani cristallini. La scala angolare è estremamente ingrandita: tipicamente gli angoli di deflessione della particella sono intorno ai $100 \mu\text{rad}$. La parte destra della figura presenta il potenziale atomico e i diversi effetti in funzione dell'energia trasversale della particella.

Gli studi condotti finora dalla collaborazione internazionale H8RD22 sul channeling e sui processi ad esso connessi [32] hanno dimostrato l'elevata efficienza [33, 34] (superiore al 98%) ed accettazione angolare della volume reflection: le proprietà di questo fenomeno lo rendono quindi particolarmente indicato per lo sviluppo di un innovativo sistema di collimazione; in particolare il sistema è finalizzato al raggiungimento della luminosità ottimale di LHC [35]. L'idea di base di questo sistema consiste nell'usare un cristallo curvato come un collimatore primario "intelligente", che estragga le particelle dall'alone del fascio dirigendole su un assorbitore (figura 4.13 a sinistra). In questo modo si raggiungerebbe una efficienza molto più elevata di quella ottenibile con un tradizionale sistema di collimazione multi stadio in cui si utilizza un bersaglio amorfo come collimatore primario. L'utilizzo di più cristalli posti in serie (figura 4.13 a destra) permette, invece, di incrementare la deflessione della particella e migliorare il sistema di

collimazione stesso.

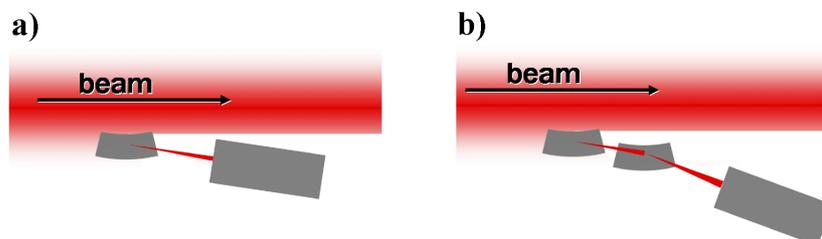


Figura 4.13: Sistema di collimazione basato sui cristalli curvati: utilizzando più cristalli posti in sequenza è possibile aumentare la deflessione della particella e migliorare la collimazione.

La figura 4.14 mostra, infine, il profilo bidimensionale del fascio di protoni dell'SPS in funzione dell'angolo di orientazione del cristallo: il beam profile è stato ottenuto tramite i rivelatori a microstrip di silicio (descritti nel paragrafo 3.2.3) utilizzando un cristallo quasi-mosaico² (QM1). Le zone all'inizio e alla fine del beam profile corrispondono alla condizione per cui il cristallo si comporta come un materiale amorfo (il fascio passa all'interno del cristallo subendo solo multiplo scattering). Nella regione centrale invece si possono distinguere i vari fenomeni descritti in precedenza: tra $-2980 \mu\text{rad}$ e $-2910 \mu\text{rad}$ la particella subisce la riflessione di volume da parte dei piani cristallini; nella regione tra $-2900 \mu\text{rad}$ e $-2890 \mu\text{rad}$ invece si ha un picco corrispondente al channeling.

4.3.2 Il setup sperimentale

Lo schema completo utilizzato per le misure all'SPS è mostrato in figura 4.15(a): esso comprendeva, oltre al tracciatore a fibre (ERPA) e alle camere (Si-chamber) precedentemente utilizzati alla BTF, il telescopio (T1-T4) descritto nel paragrafo 3.2.3, un profilometro al silicio (Si-prof) e un odoscopio (Hodoscope, INFN Ferrara). I rivelatori sono stati disposti lungo la linea H8 suddividendo il setup in due zone principali: l'area *upstream* e quella *downstream*. Nella zona *upstream* sono stati disposti i 4 moduli a microstrip del telescopio, un goniometro ad alta precisione per ruotare il cristallo e diversi tipi di cristalli, tra cui i quasimosaiici e i multi-strip. Nella zona *downstream* (detta *hall*) sono stati utilizzati gli altri rivelatori. Una foto dei rivelatori nella hall è mostrata in figura 4.15(b). I due setup erano letti da due sistemi di acquisizione distinti; gli unici segnali condivisi erano quelli del trigger (generati da uno scintillatore) e quelli della spill (in modo

²Un cristallo quasi-mosaico si realizza tagliando un cristallo parallelamente ad un suo asse e poi curvandolo [36].

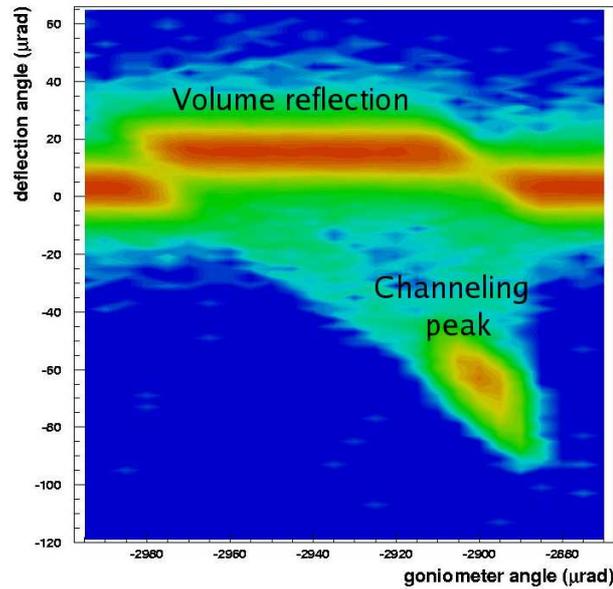


Figura 4.14: Scan angolare di un cristallo quasi-mosaico: grazie all'elevata risoluzione spaziale del telescopio è possibile distinguere le regioni di volume reflection e channeling.

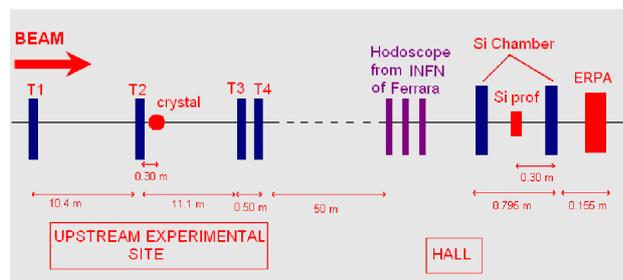
da raccogliere i dati durante la spill ed effettuare tutte le operazioni di monitoring nella fase temporale priva di particelle).

4.3.3 Profilo del fascio

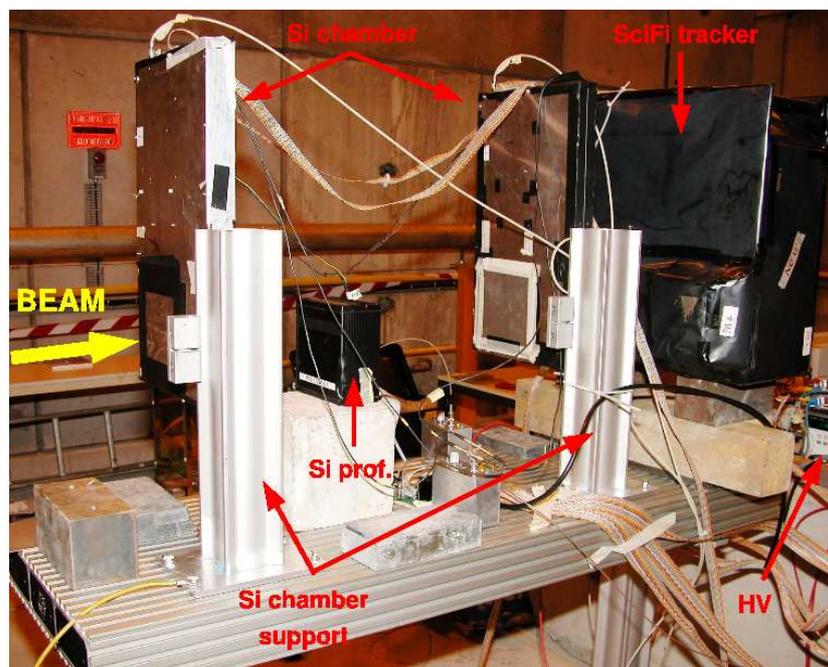
Il profilo del fascio dell'SPS misurato con le camere al silicio e con il tracciatore a fibre è riportato in figura 4.16: in entrambi i casi, la forma delle code è dovuta al sistema di collimatori lungo la linea di fascio. Il beam profile del tracciatore (grafico in basso in entrambe le figure) è riportato in numero di canali anziché in centimetri. Il modulo utilizzato è quello con passo da 1 mm.

4.3.4 L'uso del fibrometro per misure di channeling

La risoluzione spaziale del tracciatore a fibre risulta troppo piccola per effettuare misure di channeling sui cristalli quasimosaici (il cui angolo di deflessione è molto minore di $100 \mu\text{rad}$); per questo motivo il cristallo utilizzato è in realtà un cristallo multi-strip: esso è costituito da 8 strip di silicio ($5 \text{ cm} \times 2 \text{ mm}$) di $500 \mu\text{m}$ di spessore (figura 4.17(a)). Il cristallo sfrutta il fenomeno della multi-riflessione nella quale una particella riflessa nella prima strip entra nella seconda con il giusto



(a)



(b)

Figura 4.15: Setup presso la linea H8 dell'SPS al CERN di Ginevra: (a) schema del setup (si veda il testo per la spiegazione); (b) foto dei rivelatori durante l'acquisizione dati; tutti i rivelatori sono posizionati su un tavolo in Al ad una altezza da terra di circa 130 cm.

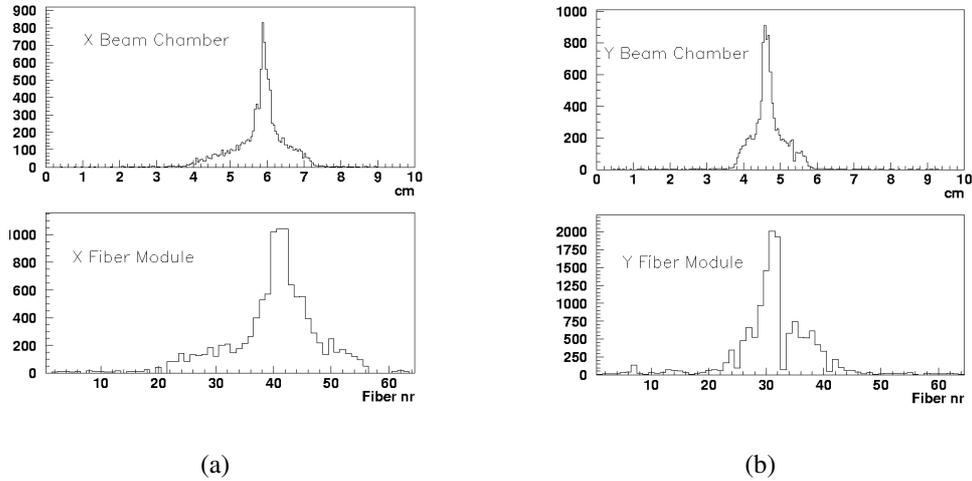


Figura 4.16: Profilo del fascio dell'SPS misurato con una camera e con un modulo del tracciatore: (a) direzione x, (b) direzione y. In entrambi si notano delle code non trascurabili.

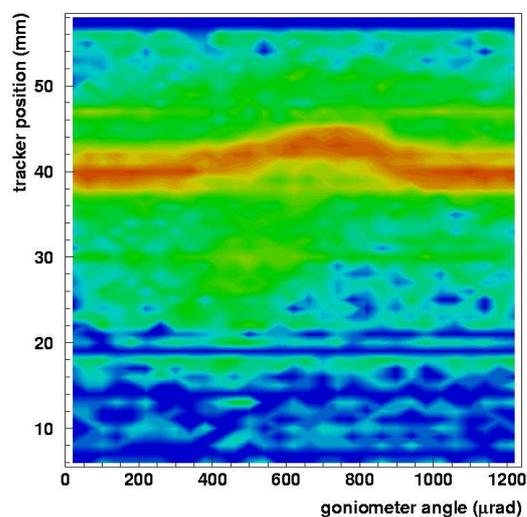
angolo per una seconda riflessione, e così via. Per il cristallo testato solo 5 delle 8 strip sono state allineate. Il goniometro è stato ruotato di $1200 \mu\text{rad}$ rispetto alla posizione di allineamento con il fascio (ottenuta con un sistema laser [32]) e per ciascuna posizione è stato acquisito il profilo del fascio. Dato che il fascio dell'SPS è più largo dello spessore del cristallo, le camere al silicio sono state utilizzate per selezionare solo gli eventi in cui la particella è passata per il cristallo (in questo modo è stato ridotto il contributo del fascio amorfo).

La figura 4.17(b) mostra lo scan angolare del cristallo (i profili acquisiti ad ogni angolo sono stati sommati in un unico grafico): nella regione compresa tra 600 e $800 \mu\text{rad}$ è possibile distinguere chiaramente la presenza di una deflessione dovuta alla riflessione all'interno dei 5 cristalli.

Se da un lato il tracciatore a fibre non è assolutamente comparabile con la risoluzione di un sistema al silicio, dall'altro è un rivelatore radiation hard, con capacità di monitoring rapide e di uso anche con particelle diverse (quali, ad esempio, ioni Pb). Rappresenta quindi una valida alternativa per i test di massa e per usi con fasci con caratteristiche spinte.



(a)



(b)

Figura 4.17: (a) Foto del cristallo multi-strip M8-2. (b) Scan angolare di M8-2 (scala logaritmica): anche se il tracciante a fibre ha una risoluzione spaziale peggiore di quella dei rivelatori a microstrip di silicio è stato possibile vedere almeno la regione di volume reflection, posizionando il rivelatore a circa 60 m di distanza dal cristallo.

Conclusioni

ERPA (Enhanced Radiation and Particle Apparatus) è un tracciatore a fibre scintillanti realizzato nell'ambito dell'attività didattica del corso di Laboratorio IV. Le ottime caratteristiche di questi materiali, quali l'elevata flessibilità meccanica e, in alcuni casi, la risposta temporale dell'ordine del ns, unite al basso costo di produzione sono state determinanti nella scelta di realizzare un tracciatore a fibre scintillanti.

ERPA è stato testato e studiato in modo completo: la necessaria fase di commissioning è stata svolta presso il Laboratorio Didattico dell'Università degli Studi dell'Insubria utilizzando i raggi cosmici, e ha permesso di verificare il corretto funzionamento del rivelatore e di ottimizzare le sue performance, dimostrando la necessità di un accurato allineamento tra fibre e fotomoltiplicatori.

Successivamente il rivelatore è stato testato presso la Beam Test Facility dei Laboratori Nazionali di Frascati e, grazie agli ottimi risultati ottenuti durante questa presa dati, si è deciso di utilizzare ERPA anche per misure di channeling in cristalli di silicio incurvati.

La BTF è un'area sperimentale che fa parte del complesso "Φ Factory" di DAΦNE in cui è possibile operare con fasci di positroni o di elettroni, di energia massima rispettivamente di 500 e 800 MeV e di intensità e dimensioni spaziali variabili.

Durante la presa dati presso la BTF si è misurata una risoluzione spaziale di $(635.8 \pm 9.2) \mu\text{m}$ per il modulo A e $(667.2 \pm 1.2) \mu\text{m}$ per il modulo B. Il fatto che entrambi questi valori risultino quasi il doppio della risoluzione teorica media (circa $332 \mu\text{m}$) è stato ricondotto alla presenza del fenomeno del multiplo scattering non trascurabile per il fascio di elettroni della BTF. La valutazione del contributo del multiplo scattering (dovuto principalmente ai piani di silicio e di alluminio delle camere utilizzate come monitor di fascio e per ricostruire la traccia della particella sui moduli del tracciatore) è stato valutato sfruttando la teoria di Molière e la sua approssimazione a distribuzione gaussiana; l'angolo di diffusione multiplo è infatti legato sia allo spessore dei materiali posti prima di ERPA sia alla loro reciproca distanza. Una volta sottratto questo contributo si è ottenuto un valore di risoluzione spaziale di $(188.3 \pm 67.1) \mu\text{m}$. Si è quindi verificato che l'acquisizione in modalità analogica e la geometria doublet ribbon permettono di ottenere una

risoluzione spaziale migliore di quella digitale (entro 2σ).

Nel beam test alla BTF si è inoltre dimostrato che l'utilizzo di diverse tipologie d'interfacciamento tra fibre e fotomoltiplicatori (maschere a 64 fori quadrati o maschere a 8 fessure) non compromette le performance del rivelatore in termini di risoluzione spaziale: è quindi pensabile l'utilizzo delle maschere a fessure per futuri progetti su larga scala, riducendo sia il tempo di fabbricazione sia il numero di canali di lettura.

Infine la presa dati presso la BTF ha permesso di verificare l'andamento inversamente proporzionale rispetto all'energia dell'angolo di multiplo scattering: eseguendo uno scan nel range di energie comprese tra 77 e 463 MeV è stato possibile valutare l'angolo medio di diffusione multipla che è risultato entro 2.3σ dal valore teorico dato dalla formula di Molière.

La linea H8 del Super Proton Synchrotron del CERN di Ginevra è una linea di fascio dove possono operare particelle di diversa natura (protoni, elettroni e anche ioni) ad energie ultrarelativistiche (fino a 450 GeV/c per i protoni e fino a 400 GeV/c per gli altri tipi di particelle). Il fascio di protoni da 400 GeV/c utilizzato durante il beam test all'SPS è stato monitorato con un sistema di tracciamento basato su microstrip di silicio: la divergenza misurata è stata di circa $9\mu\text{rad}$.

La presa dati presso la linea H8 ha permesso di ottenere risultati promettenti per lo studio del fenomeno del channeling: l'interazione di una particella che risulta allineata con un asse cristallino può essere descritta come il moto della particella stessa all'interno di un canale del cristallo. Nel caso di cristalli curvati, la particella segue la curvatura del cristallo e può essere deflessa, anche in modo consistente, dalla direzione di incidenza.

La collaborazione internazionale H8RD22 si occupa dello sviluppo di un innovativo sistema di collimazione basato su cristalli curvati e di un suo possibile impiego nell'ambito della seconda fase di LHC. I risultati finora ottenuti da questa collaborazione hanno permesso di verificare l'elevata efficienza della volume reflection, cioè della riflessione della particella all'interno del volume del cristallo. Attraverso il tracciante a fibre è stato possibile osservare questo fenomeno per un cristallo multi-riflettore costituito da 8 strip di silicio di $500\mu\text{m}$ di spessore.

Anche se le caratteristiche di ERPA in termini di risoluzione spaziale non sono minimamente paragonabili a quelle dei rivelatori a microstrip di silicio e non permettono uno studio approfondito del fenomeno del channeling, l'alta velocità di monitoring e l'elevata radiation hardness lo rendono un ottimo candidato per test di fasci di particelle dalle caratteristiche spinte.

Infine, la capacità di lavorare con particelle di diversa natura (protoni, elettroni, ioni) fa sì che il rivelatore a fibre scintillanti sia particolarmente adatto per futuri test di massa sui cristalli: nuovi cristalli multi-riflettori sono infatti in fase di costruzione e necessiteranno di un test approfondito prima del loro impiego sui fasci circolanti dell'SPS e nel possibile sistema di collimazione per LHC.

Incrementando la risoluzione spaziale utilizzando fibre da $250\ \mu\text{m}$ di diametro sarà possibile ottenere un sistema di tracciamento rapido e sufficientemente preciso da poter essere utilizzato per misure di channeling.

Appendice A

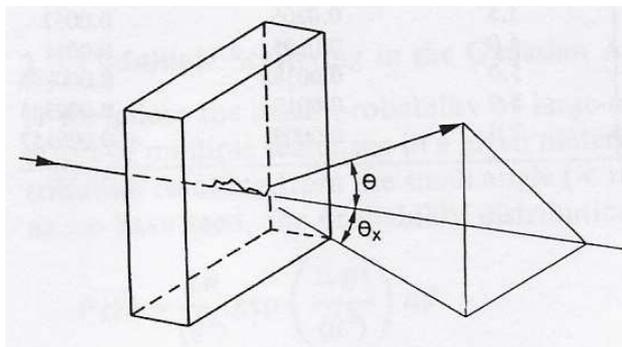
Cenni teorici sul fenomeno del multiplo scattering

Si definiscono fenomeni di scattering multiplo quei casi dove le particelle subiscono, all'interno di un mezzo, un numero molto alto di eventi di scattering coulombiano con i nuclei atomici che costituiscono il mezzo diffusore¹. In questi casi gli effetti complessivi sono spesso dominati più da effetti di media che dalle proprietà particolari dei singoli eventi. Di seguito, la formula teorica per l'angolo di scattering multiplo verrà presentata seguendo la teoria di Molière e l'approssimazione a distribuzione gaussiana [37] dell'angolo medio di diffusione multipla. La formula che descrive lo scattering coulombiano, trascurando i contributi di spin e di screening da parte degli elettroni atomici, è la seguente:

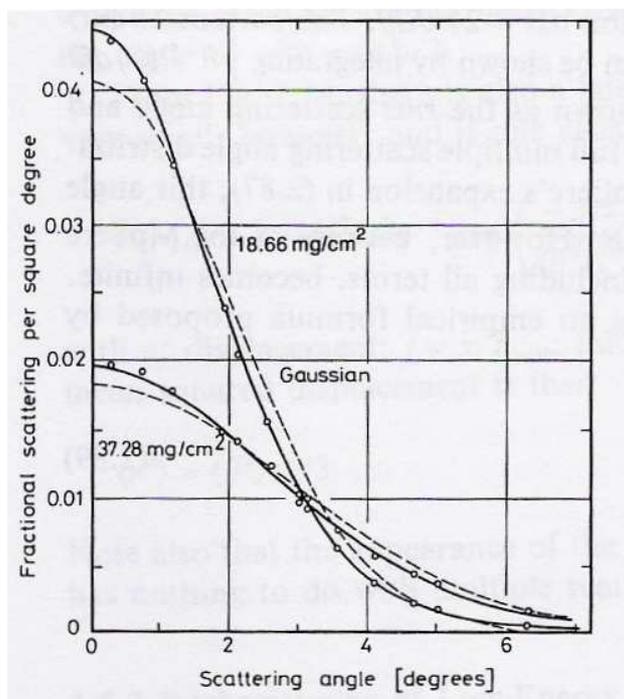
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = z_1^2 z_2^2 r_e^2 \cdot \frac{(m_e c / \beta p)^2}{4 \sin^4(\theta/2)} \quad (\text{A.1})$$

dove z_1 e z_2 sono rispettivamente la carica dell'elettrone e la carica del materiale diffusore, r_e è il raggio classico dell'elettrone, m_e è la massa dell'elettrone, c è la velocità della luce, β e p sono rispettivamente la velocità in unità di c e il momento della particella incidente, e θ è l'angolo di deflessione per scattering multiplo. Data la dipendenza da $1/\sin^4(\theta/2)$, la maggior parte delle collisioni coulombiane causa una piccola deflessione della particella all'interno del materiale diffusore. Assumendo che i nuclei atomici siano molto più massivi delle particelle incidenti, la quantità di energia trasferita in un singolo urto è molto piccola e le particelle all'interno del diffusore seguono una traiettoria a zig-zag. L'effetto complessivo di queste successive deflessioni a piccoli angoli è, tuttavia, una netta deviazione dalla traiettoria iniziale della particella, come mostra la figura A.1(a).

¹Nel caso degli adroni si deve tener conto, oltre che della forza coulombiana tra elettroni del mezzo diffusore e quark dell'adrone incidente, anche del contributo dovuto all'interazione forte tra nucleoni.



(a)



(b)

Figura A.1: Multiple scattering coulombiano. (a) Il numero elevato di collisioni che una particella carica subisce in un mezzo diffusore causa una netta deflessione della particella dalla sua traiettoria iniziale. (b) Distribuzione angolare di un fascio di elettroni da 15.7 MeV diffusi da un foglio di alluminio: la curva sperimentale (linea continua) risulta in accordo con la teoria approssimata di distribuzione gaussiana (linea tratteggiata).

In generale è possibile distinguere tre “tipi” di diffusione all’interno della materia:

- *Scattering singolo*: se il mezzo assorbente è abbastanza sottile, la probabilità che una particella subisca più di una collisione al suo interno è piuttosto bassa e mediamente avviene una sola deflessione. In questo caso la formula di Rutherford (equazione A.1) è sufficiente a descrivere la distribuzione angolare della particella;
- *Scattering plurimo*: se il mezzo assorbente è tale per cui il numero medio di collisioni è minore di 20, si parla di *scattering plurimo*. Né la formula di Rutherford né metodi matematici sono in grado di descrivere completamente il fenomeno;
- *Scattering multiplo*: se il mezzo assorbente è tale per cui il numero medio di collisioni al suo interno è maggiore di 20 e la perdita di energia ad ogni collisione è piccola o trascurabile, il fenomeno del multiplo scattering può essere trattato attraverso metodi statistici ed è possibile ottenere una distribuzione di probabilità.

L’espressione più utilizzata per la distribuzione di probabilità nel caso dello scattering multiplo è quella data dalla formula di Molière, valida per tutti i tipi di particelle nell’approssimazione di piccoli angoli (fino a 30°)²:

$$P(\theta)d\Omega = \eta d\eta \left(2\exp(-\eta^2) + \frac{F_1(\eta)}{B} + \frac{F_2(\eta)}{B^2} + \dots \right) \quad (\text{A.2})$$

$$\eta = \theta / (\theta_1 \sqrt{B})$$

$$\theta_1 = 0.3965(zQ/p\beta) \sqrt{\rho \delta x / A}$$

Il parametro B e le funzioni $F_k(\eta)$ sono definiti da:

$$g(B) = \ln B - B + \ln \gamma - 0.154 = 0$$

$$\gamma = 8.831 \times 10^3 \frac{qz^2 \rho \delta x}{\beta^2 A \Delta}$$

$$\Delta = 1.13 + 3.76 \cdot \left(\frac{Zz}{137\beta} \right)^2 \quad (\text{A.3})$$

$$F_k(\eta) = \frac{1}{k!} \int J_0(\eta y) \exp\left(\frac{-y^2}{4}\right) \left[\frac{y^2}{4} \ln\left(\frac{y^2}{4}\right) \right]^k y dy$$

dove J_0 è la funzione di Bessel di primo tipo; i termini rimanenti sono:

²La formula di Molière non è in grado di descrivere, però, il comportamento di elettroni di energia troppo bassa ($\beta < 0.05$) o di elettroni in materiali con Z troppo elevato.

- Z : numero atomico del materiale diffusore;
- A : numero di massa del materiale diffusore;
- δx : spessore in cm del materiale diffusore;
- ρ : densità del materiale diffusore (g/cm^3);
- p : momento della particella incidente;
- β : rapporto v/c della particella incidente;
- z : carica della particella incidente;
- $Q = \sqrt{Z(Z+1)}$;
- $q = (Z+1)Z^{1/3}$

Normalmente non si supera il terzo termine per dare una descrizione sufficientemente completa del fenomeno di multiplo scattering. La distribuzione angolare data dalle precedenti formule per un fascio di elettroni da 15.7 MeV che incidono su un foglio di alluminio è mostrata in figura A.1(b).

Data l'estrema complicazione matematica, questo fenomeno viene di solito trattato usando ipotesi semplificative; la più semplice è quella di ignorare la probabilità che avvengano singoli urti a grandi angoli e di considerare solo la sovrapposizione di collisioni ad angoli minori di 10° tali per cui la sezione d'urto Rutherford possa essere scritta nel modo seguente:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \frac{1}{4 \sin^4(\theta/2)} \approx \frac{1}{(\theta/2)^4} \quad (\text{A.4})$$

Integrando l'equazione A.4 tra l'angolo massimo e l'angolo minimo di diffusione, legati rispettivamente alle dimensioni nucleari e alle dimensioni atomiche del diffusore, si ottiene l'espressione per l'angolo quadratico medio di diffusione singola:

$$\begin{aligned} \theta_{min} &= \frac{Z^{1/3}}{192} \left(\frac{mc}{p} \right) \\ \theta_{max} &= \frac{275}{A^{1/3}} \left(\frac{mc}{p} \right) \\ \Rightarrow \langle \theta^2 \rangle &= 4 \theta_{min}^2 \ln \left(\frac{204}{Z^{1/3}} \right) \end{aligned} \quad (\text{A.5})$$

Grazie al Teorema Fondamentale della Statistica³, l'angolo di deflessione dopo un numero n elevato di collisioni sarà dato da:

$$\langle \Theta^2 \rangle = n \langle \theta^2 \rangle \quad (\text{A.6})$$

Il numero n di collisioni dipende dalla natura del materiale che costituisce il bersaglio: considerando il suo spessore ed il numero medio di "centri diffusori" (molecole) in esso presenti, si ottiene la seguente espressione per n :

$$n = N \sigma t \quad (\text{A.7})$$

dove N è il numero di molecole per unità di volume, σ è la sezione d'urto integrale di Rutherford e t è lo spessore del diffusore. L'angolo quadratico medio di diffusione multipla è quindi dato dalla seguente espressione:

$$\langle \Theta^2 \rangle = 4 N \sigma t \theta_{min}^2 \ln \left(\frac{204}{Z^{1/3}} \right) \quad (\text{A.8})$$

Solitamente questo angolo viene espresso in funzione della lunghezza di radiazione X_0 , della costante di struttura fine α e del raggio classico dell'elettrone r_e :

$$\begin{aligned} X_0 &= \frac{3}{4\pi} \frac{1}{4r_e^2 \alpha N_a Z^2} A \\ \alpha &= \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 hc} \approx \frac{1}{137} \\ r_e &= \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 m_e c^2} \\ \Rightarrow \Theta &= \sqrt{\langle \Theta^2 \rangle} = z \frac{21\text{MeV}}{\beta pc} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

La proiezione dell'angolo di deflessione Θ' in un piano contenente la traiettoria della particella (si osservi in proposito la figura A.1(a)), è data da:

$$\begin{aligned} \Theta'^2 &= \frac{\Theta^2}{2} \\ \Rightarrow \Theta' &= z \frac{15\text{MeV}}{\beta pc} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \end{aligned} \quad (\text{A.10})$$

³Data x variabile comunque distribuita con valor medio $\langle x^2 \rangle$, e dato $X = \sum_{i=1}^n x_i$, con n numero molto elevato di eventi statisticamente indipendenti, allora X è una distribuzione normale con valor medio pari a $\langle X^2 \rangle = n \langle x^2 \rangle$.

L'angolo Θ' rappresenta quindi il valor medio della distribuzione gaussiana con la quale è possibile approssimare la distribuzione angolare di Molière per l'effetto di scattering multiplo a piccoli angoli:

$$P(\theta') = \frac{1}{\Theta' \sqrt{\pi}} \exp \left[- \left(\frac{\theta'}{\Theta'} \right)^2 \right] \quad (\text{A.11})$$

In realtà l'espressione precisa dell'angolo di diffusione multipla data dalla teoria di Molière è la seguente:

$$\Theta' = z \frac{13.6 \text{MeV}}{\beta p c} \sqrt{\frac{x}{X_0}} \left[1 + 0.038 \ln \left(\frac{x}{X_0} \right) \right] \quad (\text{A.12})$$

Dalla figura A.1(b) si può notare che tale approssimazione risulta ben verificata: quasi il 95% delle particelle subiscono una deflessione angolare che segue una distribuzione gaussiana.

Lista degli acronimi

AC	Alternating Current - Corrente Alternata
AD	Antiproton Decelerator
ADC	Analog to Digital Converter
AGILE	Astro-rivelatore Gamma a Immagini LEggero
ASACUSA	Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiproton
ASIC	Application Specific Integrated Circuit
BaBar	B/B-bar system of mesons produced at SLAC's PEP-II collider
BTF	Beam Test Facility
CCD	Charged-Coupled Device
CERN	Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire - Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare
CNGS	CERN Neutrinos to Gran Sasso
CMOS	Complementary Metal Oxide Semiconductor
COMPASS	COmmon Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy
DAC	Digital to Analog Converter
DAΦNE	Double Annular Φ factory for Nice Experiments
DAQ	Data AcQuisition
EMA	Extra Mural Absorber
ERPA	Enhanced Radiation and Particle Apparatus
FAST	Fiber Antiproton Scintillating Tracker
FINUDA	Fisica NUcleare a DAΦNE
FORTTRAN	FORmula TRANslation system
FPGA	Field Programmable Gate Array
INFN	Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

KLOE	K LOng Experiment
LHC	Large Hadron Collider
LINAC	LINear ACcelerator - Acceleratore Lineare
MAPMT	MultiAnode PhotoMultiplier Tube - Fotomoltiplicatori multianodo
MIP	Minimun Ionizing Particle
PAW	Physics Analysis Workstation
PC	Personal Computer
PCB	Printed Circuit Board
PCI	Protocol-Control Information
PMMA	PoliMetilMetAcrilato (C ₈ H ₈ O ₂)
PMT	PhotoMultiplier Tube
PVA	PolyVinyl Acetate
PVC	PolyVinyl Chloride
PS	Proton Synchrotron
PSB	Proton Synchrotron Booster
SFD	Scintillating Fiber Detector
SPS	Super Proton Synchrotron
TDC	Time to Digital Converter
Tcl/Tk	Tool Command Language/Toolkit
VHDL	VHSIC Hardware Description Language
VHSIC	Very High Speed Integrated Circuits
VLSI	Very Large Scale Integration
VME	Versa Module Eurocard
UA2	Underground Area 2

Elenco delle figure

1.1	Esempio di materiali scintillanti.	4
1.2	Transizioni di elettroni negli orbitali π	5
1.3	Le fibre scintillanti.	7
1.4	Le fibre scintillanti: struttura interna e principio di riflessione.	8
1.5	Schema di un tubo fotomoltiplicatore.	9
1.6	Schema di un fotomoltiplicatore multianodo.	11
1.7	Schema di un tracciatore a fibre.	12
1.8	Arrangiamenti possibili per le fibre.	13
1.9	Il tracciatore di UA2.	14
1.10	Schema e foto di FAST.	15
2.1	Schema del tracciatore a fibre.	18
2.2	Schema dell'accoppiamento fibre-fotomoltiplicatore.	19
2.3	Alcune fasi di costruzione del tracciatore.	20
2.4	Fotomoltiplicatore R7600-00-M64 della HAMAMATSU.	23
2.5	Maschere utilizzate per l'accoppiamento fibre-fotomoltiplicatori.	24
2.6	Canali di lettura delle fibre.	25
2.7	Schema della catena di acquisizione.	25
2.8	Scheda di frontend e particolare degli ASIC.	26
2.9	Schema circuitale di un canale dell'ASIC VA64TAP2.1.	27
2.10	Foto delle camere al silicio.	29
2.11	Setup utilizzato per la caratterizzazione con i raggi cosmici.	30
2.12	Profilo dei raggi cosmici con il modulo A.	30
3.1	(a) Veduta aerea di DAΦNE. (b) Posizione della BTF.	32
3.2	(a) Magnete pulsato. (b) Linee di trasferimento dei fasci.	34
3.3	Pianta dell'area sperimentale della BTF.	35
3.4	Posizioni del bersaglio di rame - Simulazione dello spettro energetico.	36
3.5	Componenti utilizzabili per impostare le caratteristiche del fascio.	38
3.6	Tracce sulle camere al silicio di un singolo pacchetto di elettroni.	39

3.7	Andamento poissoniano della molteplicità.	40
3.8	Beam profile e divergenza in modalità di singolo elettrone.	41
3.9	Schema e veduta aerea del CERN di Ginevra.	43
3.10	Il telescopio.	44
3.11	Il fascio dell'SPS.	45
4.1	Analisi del rumore nelle camere: piedestallo e rumore rms.	48
4.2	Common mode.	49
4.3	Analisi del rumore nel tracciatore: piedestallo e rumore rms.	50
4.4	Grafico del pull e della pulse height di una camera.	51
4.5	Grafico del pull e della pulse height di un modulo del tracciatore.	52
4.6	Beam profile tridimensionale in modalità di singolo elettrone.	52
4.7	Setup presso la BTF.	54
4.8	Risoluzione del modulo A del tracciatore a fibre.	55
4.9	Risoluzione del modulo B del tracciatore a fibre.	56
4.10	Andamento del multiplo scattering in funzione dell'energia.	58
4.11	Particella intrappolata in un potenziale interatomico.	59
4.12	Schema del channeling e dei fenomeni ad esso correlati.	60
4.13	Sistema di collimazione basato sui cristalli curvati.	61
4.14	Scan angolare di un cristallo quasi-mosaico.	62
4.15	Setup presso la linea H8.	63
4.16	Profilo del fascio dell'SPS.	64
4.17	Foto del cristallo M8-2 e suo scan angolare.	65
A.1	Multiplo scattering coulombiano.	72

Elenco delle tabelle

1.1	Alcune caratteristiche del fotomoltiplicatore R7600-M64.	11
2.1	Proprietà delle fibre BCF-10.	22
2.2	Caratteristiche del fotomoltiplicatore R7600-00-M64.	22
3.1	Caratteristiche dei due fasci di particelle prodotti dal LINAC. . . .	33
4.1	Valori ottenuti per la risoluzione spaziale del tracciatore a fibre. . .	55

Bibliografia

- [1] I. B. Berlman. *Handbook of fluorescence spectra of aromatic molecules*. Academic Press-New York and London, 1971.
- [2] G. F. Knoll. *Radiation and detection Measurement*. Wiley, 2006.
- [3] R. Ruchti. *Tracking with scintillating fibers*. Nucl. Instr. and Meth. B (Proc. Suppl.), 44:308–319, 1995.
- [4] W. M. Yao et al. *Review of Particle Physics*. Journal of Physics G, 33:1+, 2006.
- [5] J. B. Birks. *Theory and Practice of Scintillation Counting*. New York, MacMillan, 1964.
- [6] HAMAMATSU. Photomultiplier tube datasheet.
- [7] J. Alitti. *Performance of the scintillating fiber detector for the UA2 upgrade*. Nucl. Instr. and Meth. B (Proc. Suppl.), 279:364–375, 1989.
- [8] A. Mozzanica. *FAST: a scintillating tracker for antiproton cross section measurements*. Ph. D. Thesis, 2007.
- [9] C. Amsler and F. Myhrer. *Low energy antiproton physics*. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci, 41(1):219–267, 1991.
- [10] S. Maury. *The Antiproton Decelerator: AD*. Hyperfine Interact., 109:43–52, 1997.
- [11] V. Mascagna. *Design and performance of FAST, a tracker for antiproton physics*. Master Thesis, Università dell’Insubria, 2007.
- [12] A. Mozzanica et al. *Design and prototype results of the FAST detector*. Nucl. Instr. and Meth. A, 567:315–318, 2006.
- [13] Bicron. Plastic scintillating fibers datasheet.

- [14] IDEAS. Va64tap2.1 datasheet.
- [15] PCI SBS bit 3 Datasheet.
- [16] G. Barbiellini et al. *The AGILE silicon tracker: testbeam results of the prototype silicon detector*. Nucl. Instr. and Meth. A, 490:146–158, 2002.
- [17] M. Prest et al. *The AGILE silicon tracker: an innovative γ -ray instrument for space*. Nucl. Instr. and Meth. A, 501:280–287, 2003.
- [18] The KLOE Collaboration. *KLOE: A General Purpose Detector for DAFNE*. LNF-92/019 (IR), 1992.
- [19] M. Agnello et al. *The FINUDA Technical Report*. LNF-95/024 (IR), 1995.
- [20] G. Mazzitelli et al. *Commissioning of the DAΦNE Beam Test Facility*. Nucl. Instr. and Meth. A, 515(3), 524-542. 2003.
- [21] The COMPASS Collaboration. *Common Muon and Proton Apparatus for Structure and Spectroscopy*. CERN/SPSLC 96-14, SPSC/P 297, 1996.
- [22] G. Acquistapace et al. *The CERN Neutrino Beam to Gran Sasso - Conceptual Technical Design*. CERN 98-02 and INFN/AE-98/05.
- [23] UA1 Collaboration. *Further Evidence for Charged Intermediate Vector Bosons at the SPS Collider*. Phys. Lett., 129B:nr 3,4, 1983.
- [24] M. de Palma. *A high resolution beam telescope built with double sided silicon strip detectors*. Nucl. Instr. and Meth. A, 381:49–56, 1996.
- [25] M. Bari et al. *Results from the BaBar Silicon Vertex Test Beam*. BaBar Note, 278, 1996.
- [26] W. R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. pages 50–53, 1994. Springer-Verlag.
- [27] J. Stark. Phys. Zs., 13:973, 1912.
- [28] G. R. Piercy et al. Phys. Rev. Lett. 10(4):399, 1963.
- [29] J. Lindhard. Phys. Lett.:12(126), 1964.
- [30] E. N. Tsyganov. *Fermilab reports*. TM:682–684, 1976.
- [31] A. A. Elishev et al. Phys. Lett. B,88:387, 1979.

-
- [32] S. Hasan. *Bent silicon crystals for the LHC collimation: studies with an ultrarelativistic proton beam*. Master Thesis, Università dell'Insubria, 2007.
- [33] W. Scandale et al. *High-Efficiency Volume Reflection of an Ultrarelativistic Proton Beam with a Bent Silicon Crystal*. *Phys. Rev. Lett.*, 98:154801, 2007.
- [34] W. Scandale and A. M. Taratin. *Volume Reflection of high-energy protons in short bent crystal*. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B*, 262:340–347, 2007.
- [35] A. Vomiero. *Characterization of crystal for relativistic channeling*. Workshop talk: Crystal Channeling for Large Collider: Machine and Physics Application, 2007.
- [36] Yu. M. Ivanov et al. *JETP Lett.*, 81:99–101, 2005.
- [37] W. R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*. pages 44–48, 1994. Springer-Verlag.