

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Corso di Laurea in Fisica

**Caratterizzazione di un rivelatore
MCP-PMT per misure di risoluzione
temporale e spaziale**

Relatore:
Prof. Maurizio Basile

Presentata da:
Giulia Giannini

Correlatore:
Dott.ssa Gilda Scioli

Sessione I
Anno Accademico 2013/2014

Indice

Introduzione	iii
1 Aspetti teorici	1
1.1 Fotomoltiplicatori	1
1.2 <i>Micro Channel Plates</i>	2
1.3 MCP-PMTs	5
1.4 <i>Silicon Photomultipliers</i>	7
2 Apparato Sperimentale	9
2.1 Configurazione per l'acquisizione dei dati	9
2.2 MCP-PMT Planacon	11
2.3 MCP-PMT a singolo anodo	14
2.4 <i>Silicon Photomultipliers</i>	15
2.5 Laser	16
2.6 Oscilloscopio	17
3 Presa dati	21
3.1 Attenuazione ampiezza laser	21
3.2 Uniformità	22
3.3 <i>Cross Talk</i> rispetto a una cella definita	26
3.4 <i>Cross talk</i> con <i>scan</i> di posizione	31
3.5 MCP-PMT a singolo anodo	33
3.6 <i>Silicon Photomultipliers</i>	36
4 Conclusioni	39
Bibliografia	41

Introduzione

Questa tesi descrive una prima serie di misure effettuate per caratterizzare le prestazioni di un rivelatore di fotoni MCP-PMT a multi anodo, con particolare enfasi sulla risoluzione temporale e spaziale. I risultati sono stati confrontati con quelli relativi a tre ulteriori rivelatori (un MCP-PMT a singolo anodo e due fotomoltiplicatori a silicio). Le misure sono state effettuate presso i Laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN - Sezione di Bologna) per conto del Dipartimento di Fisica dell'Università di Bologna.

La rivelazione della luce ha sempre occupato un posto fondamentale nella Fisica Nucleare e Subnucleare. Il principio base della rivelazione consiste nel trasformare la luce incidente in un segnale elettrico misurabile e i primi strumenti storicamente utilizzati furono i fotomoltiplicatori.

Successivamente furono introdotti dei nuovi rivelatori di fotoni chiamati *Micro Channel Plates*, composti da un *array* di canali di dimensioni microscopiche, ciascuno in grado di moltiplicare gli elettroni prodotti per effetto fotoelettrico dai fotoni incidenti. Questo nuovo modello presenta ottime prestazioni in particolare per quanto riguarda la risoluzione temporale, e questa insieme ad altre caratteristiche (come la segmentazione degli anodi, che permette una risoluzione spaziale migliore), ha spinto a studiarne il funzionamento.

Capitolo 1

Aspetti teorici

1.1 Fotomoltiplicatori

La scoperta dei fotomoltiplicatori [1] è da ricercare nei primi studi sull'emissione secondaria di elettroni che colpiscono un determinato materiale: nel 1902, L. W. Austin e J. Stark scoprirono che superfici metalliche colpite da raggi catodici emettevano un numero di elettroni molto maggiore rispetto a quelli incidenti. L'uso dell'emissione secondaria come un modo per amplificare un segnale fu proposta nel 1919 da J. Slepian.

Nel 1935 fu prodotto il primo fotomoltiplicatore che era composto da un singolo emettitore secondario e che offriva un guadagno di 8.

Il maggiore sviluppo si ebbe negli anni '50 e '60, grazie ad una continua ricerca di nuovi materiali per il fotocatodo e efficienti per l'emissione secondaria.

Schematicamente, come mostrato in Figura 1.1, un fotomoltiplicatore è composto da un catodo costituito da un materiale fotosensibile, un sistema di raccolta degli elettroni, una sezione di moltiplicazione degli elettroni (una serie di elettrodi chiamati dinodi adibiti all'emissione secondaria) e un anodo da cui è trasmesso il segnale elettrico [2]. L'intera struttura è situata in un tubo a vuoto.

Quando un fotone incide sul fotocatodo, un elettrone è emesso per effetto fotoelettrico e a causa della differenza di potenziale applicata tra catodo e anodo l'elettrone è accelerato verso il primo dinodo; l'interazione con il primo dinodo causa l'emissione di ulteriori elettroni i quali a loro volta sono accelerati verso il secondo dinodo. Lo sciame di elettroni è infine raccolto sull'anodo e la corrente prodotta può quindi essere amplificata e analizzata.

Spesso in Fisica Nucleare e Subnucleare sono associati con scintillatori (materiali che emettono luce al passaggio di una particella ionizzante), ma in generale

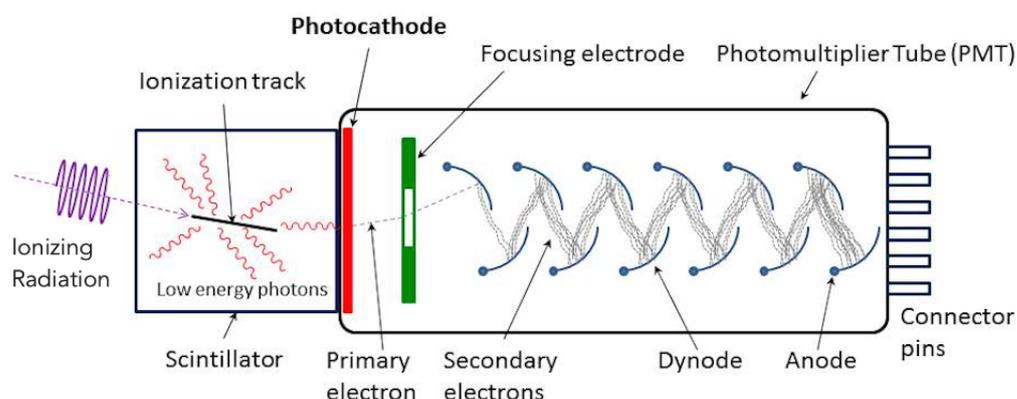


Figura 1.1: Schema di funzionamento di un fotomoltiplicatore.

il loro uso è molto vario. La combinazione di fattori come alto guadagno, basso rumore e risposta ultra-veloce hanno consentito ai fotomoltiplicatori di ottenere un posto importante anche nel campo della diagnostica medica, in astrofisica, nei dispositivi per la visione notturna e altri.

1.2 *Micro Channel Plates*

Con l'avvento dei *Micro Channel Plates* (MCP) i fotomoltiplicatori si sono evoluti in oggetti più versatili.

Nel 1930 Farnsworth propose il *channel electron multiplier* [3], una struttura in un tubo a vuoto che moltiplica le particelle cariche incidenti secondo il fenomeno già descritto di emissione secondaria di elettroni. Fu ulteriormente sviluppato negli anni '60, fino ad ottenere le seguenti caratteristiche:

- un canale vuoto rimpiazzava la serie di dinodi dei fotomoltiplicatori;
- le sostanze usate come emettitori secondari erano AgMgO (Cs) e GaP (O);
- l'energia di emissione dell'elettrone primario era di pochi eV;
- guadagno fino a 10^8 ;
- risoluzioni temporali fino a circa 500 ps;

- *lifetime* fino a 5000 Gcounts.

Il passaggio da singolo canale di grandi dimensioni ad un array di canali molto piccoli collegati in parallelo fu supportato dalla ricerca di nuovi materiali resistivi e adatti alla moltiplicazione degli elettroni. Le proprietà intrinseche del vetro come un solido amorfo lo elessero come principale materiale da utilizzare per la produzione dei *Micro Channel Plates*.

Per la costruzione sono utilizzati due tipi di vetro, uno chiamato *core glass* e uno chiamato *cladding glass* [4]. Rispettivamente, si tratta del vetro che comporrà la parte centrale (il cuore, *core*) del canale e che sarà eliminato, e del vetro che comporrà la parte cava e estremamente resistente dell'MCP.

Il vetro per la parte esterna dei canali deve presentare un'alta concentrazione di piombo e deve poter essere sottoposto a trattamenti chimici per produrre un sottile strato conduttivo all'interno dei canali. Applicare direttamente uno strato conduttivo di materiale è infattibile a causa della dimensione ridotta dei canali stessi (pochi micron).

Il vetro utilizzato per il cuore dei canali deve poter essere inciso e rimosso in modo tale da ottenere la parte vuota. Le fasi della produzione sono le seguenti:

- preparazione di asticelle sottili composte dal *core glass*;
- preparazione di tubi cavi composti da *cladding glass*;
- assemblaggio delle due componenti in un'unica fibra;
- fusione della fibra e riduzione della sua dimensione di 1/50 dell'originale per trazione, con particolare attenzione all'uniformità della fusione per evitare distorsioni geometriche;
- fusione di migliaia di fibre in un pacchetto esagonale, e riduzione della dimensione del pacchetto di 1/50 dell'originale;
- assemblaggio di varie fibre multiple in una struttura composta chiamata *boule*;
- pressaggio, rifilamento dei bordi e affettamento della *boule* per formare un sottile wafer a forma di disco;
- rifiniture per ottimizzare gli aspetti ottici;
- rimozione del vetro *core glass* interno ai canali;

1. Aspetti teorici

- trattamento chimico internamente ai canali e riduzione a idrogeno, questo serve a ridurre l'ossido di piombo (PbO) distribuito sulla parete interna dei canali e a trasformarlo in una superficie conduttiva;
- esposizione delle facce laterali a materiale conduttivo evaporato e creazione degli elettrodi sulle superfici di *input* e *output* dell'MCP.

Utilizzando la tecnologia per la produzione delle fibre ottiche, apportando alcune modifiche, fu possibile produrre i *Micro Channel Plates*.

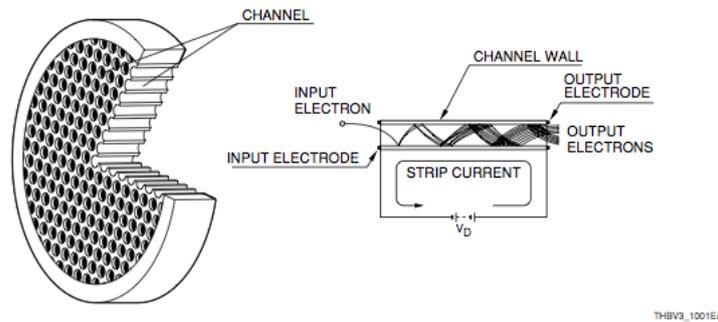


Figura 1.2: Struttura di un *Micro Channel Plate* e schema di funzionamento di un singolo canale.

Un MCP quindi consiste in un *array* bi-dimensionale di vetro composto da un gran numero di capillari cavi (i canali di moltiplicazione degli elettroni di cui sopra) agglomerati in parallelo.

Ogni canale ha un diametro interno che può variare tra i 6 e i 25 μm , la parete offre una sufficiente resistenza elettrica rispetto ai canali adiacenti e presenta proprietà di emissione secondaria di elettroni. In questo modo, ogni canale si comporta come un moltiplicatore di elettroni indipendente dagli altri.

Il funzionamento è analogo a quanto già visto per il fotomoltiplicatore ed è illustrato in Figura 1.2: quando l'elettrone primario interagisce con la parete interna di un canale sono emessi elettroni secondari. Accelerati dal campo elettrico creato dalla differenza di potenziale applicata ai capi dell'MCP, gli elettroni secondari bombardano a loro volta la parete del canale producendo ulteriori emissioni di elettroni, con il risultato che in uscita dal canale si ottiene uno sciame di elettroni che sono poi raccolti sull'anodo.

Gli MCPs sono piuttosto diversi sia nella struttura che nella operatività dai dinodi discreti tradizionali. Presentano le seguenti caratteristiche [5]:

- alto guadagno nonostante le dimensioni compatte;
- risposta veloce in tempo;
- rivelazione bi-dimensionale con risoluzione spaziale anche elevata;
- stabilità anche in forti campi magnetici (in direzione assiale);
- basso consumo.

I *Micro Channel Plates* possiedono una combinazione di caratteristiche eccezionali come alto guadagno, buona risoluzione spaziale e ottima risoluzione temporale; queste caratteristiche ne permettono l'utilizzo in una grande varietà di applicazioni come spettroscopia ad immagini, spettroscopia di elettroni, spettrometria di massa, astronomia, fisica nucleare e subnucleare, e altre ancora.

1.3 MCP-PMTs

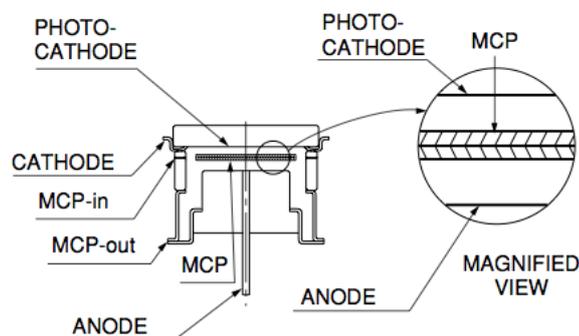


Figura 1.3: Struttura di un fotomoltiplicatore a *Micro Channel Plate* (MCP-PMT).

Gli MCP-PMTs, sono fotomoltiplicatori che incorporano un MCP al posto dei convenzionali dinodi discreti [5]. Gli MCP-PMTs sono composti da una finestra di *input*, un fotocatodo, un MCP e un anodo. I fotoelettroni emessi per effetto fotoelettrico dal catodo entrano nei canali dell'MCP e all'uscita un gran numero di elettroni sono raccolti sull'anodo come segnale di *output*.

Solitamente gli MCP utilizzati sono due, posti a contatto a formare una configurazione detta Chevron per massimizzare il guadagno, come mostrato in Figura 1.3. Una sottile barriera chiamata barriera a ioni è spesso posta sul lato di *input* degli MCP in modo da evitare che ioni generati all'interno dei canali

1. Aspetti teorici

ritornino al fotocatodo. Sono sensibili al singolo fotone e hanno una efficienza di rivelazione di circa il 60%, inoltre sono utilizzabili come rivelatori di posizione, nel caso sia stata effettuata una segmentazione degli anodi.

Il guadagno di un MCP-PMT è dato dal rapporto tra la lunghezza dei canali e il loro diametro L/d , secondo la seguente relazione approssimata:

$$g = e^{G\frac{L}{d}},$$

dove G è chiamato *gain factor* ed è relativo alle caratteristiche di emissione secondaria del materiale di cui è composta la parete del canale ed è funzione del campo elettrico applicato. Solitamente il rapporto L/d è circa 40, il che produce un guadagno di 10^4 con un voltaggio applicato di 1 kV.

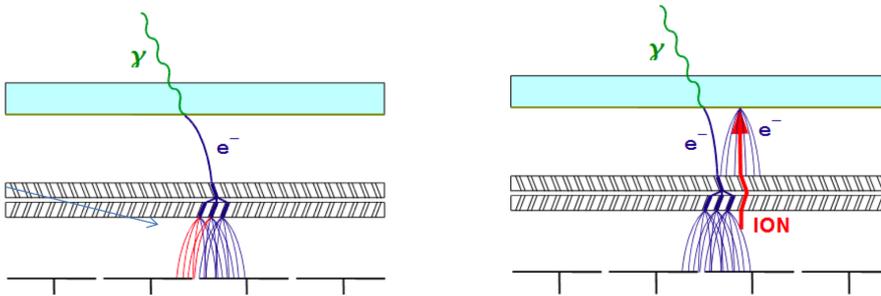


Figura 1.4: a) Dispersione dello sciame di elettroni su diversi anodi e b) emissione di un'ione verso il fotocatodo con successiva produzione di elettroni.

Gli aspetti negativi di questi sensori sono i seguenti.

In presenza di più anodi, alcuni elettroni dello sciame in uscita dal secondo MCP potrebbero colpire più di un anodo andando così a distribuire la carica e peggiorando la risoluzione spaziale e creando il problema di *cross talk* (vedi Figura 1.4 a). Durante il processo di amplificazione inoltre alcuni atomi del gas residuo possono essere ionizzati e tornare indietro verso il fotocatodo producendo impulsi secondari. Questo processo danneggia il fotocatodo e va a ridurre l'efficienza e il guadagno (vedi Figura 1.4 b).

Ulteriori miglioramenti richiesti per gli MCP-PMT potrebbero essere aumentare la qualità del vuoto, costruire fotocatodi più resistenti o studiare un modo per introdurre una barriera per ioni più efficiente.

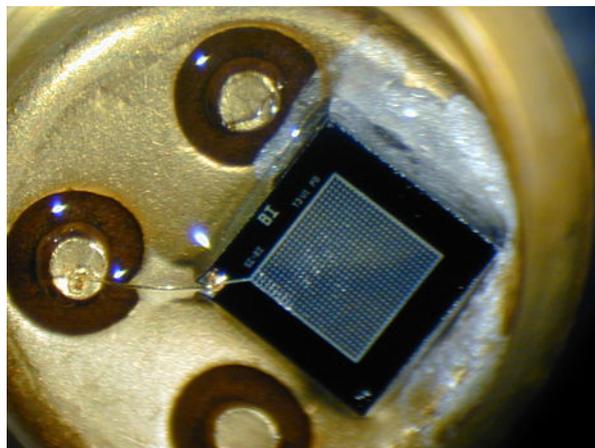


Figura 1.5: Uno dei primi SiPM prodotti in Italia dall'IRST di Trento.

1.4 *Silicon Photomultipliers*

Il SiPM è un nuovo tipo di fotomoltiplicatore al silicio. Diversamente dai fotomoltiplicatori tradizionali i SiPM sono prodotti direttamente da un wafer di silicio impiantando su di esso un *array* di fotodiodi a valanga [6]. La dimensione di un singolo fotodiodo a valanga (APD) varia tra $20\mu\text{m}$ e $50\mu\text{m}$. Essendo composti da migliaia di APD, e considerando che in media una cella sarà colpita da un singolo fotone, è possibile ricavare il numero di fotoni incidenti dal numero di celle attivate, ottenendo un segnale proporzionale alla luce incidente. I vantaggi rispetto ai tradizionali PMT sono la bassa tensione di funzionamento e la capacità di lavorare imperturbati in un campo magnetico. Il principale limite è il rumore termico che risulta proporzionale all'area attiva.

Capitolo 2

Apparato Sperimentale

2.1 Configurazione per l'acquisizione dei dati



Figura 2.1: Apparato sperimentale. Sulla destra è posizionato il laser, al centro la scatola nera al cui interno è contenuto il rivelatore, sulla sinistra l'oscilloscopio.

Lo scopo di questa tesi è la caratterizzazione del rivelatore di fotoni di tipo MCP-PMTs Planacon multianodo (8x8) prodotto dalla ditta Photonis [7]. È interessante studiare il funzionamento di questo rivelatore in quanto è presentato come un oggetto con una risoluzione temporale eccezionale.

Sono state effettuate prove di:

- uniformità di risposta delle celle;
- *cross talk* tra le celle vicine;

2. Apparato Sperimentale

- risoluzione temporale.

Oltre alle misure effettuate sul Planacon sono state effettuate misure di confronto con altri rivelatori, un MCP-PMT a singolo anodo e due fotomoltiplicatori a silicio (SiPM).

Come fonte di illuminazione è stato utilizzato un laser, in modo tale da avere una buona ripetibilità delle misure e la possibilità di ottenere eventuali ottimi risultati in termini di *timing*.

In origine si era pensato di utilizzare un LED a luce blu come sorgente di fotoni, ma le prove effettuate non hanno prodotto risultati soddisfacenti: il LED non garantisce un'emissione di fotoni ben limitata nel tempo, il che va a discapito della precisione temporale. La risoluzione ottenuta infatti si aggirava tra i 300 e i 400 ps, valori ben lontani dalle decine di picosecondi ottenuti tramite l'utilizzo del laser.

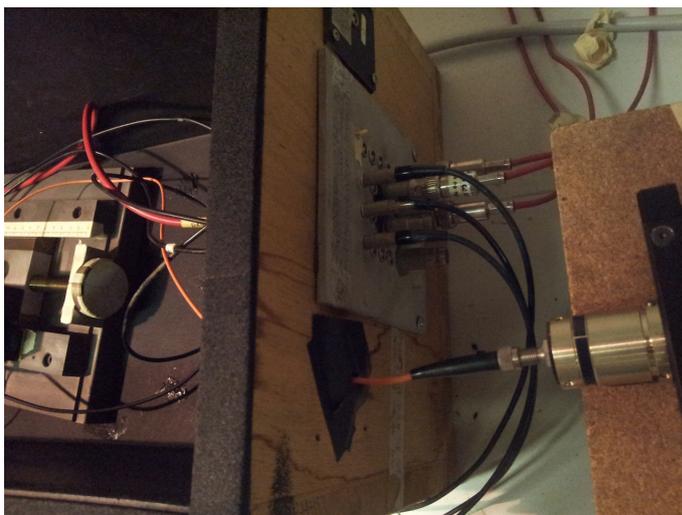


Figura 2.2: *Input* e *output* alla scatola nera; in primo piano la testa di emissione del laser e la fibra ottica.

Durante tutte le prove il rivelatore è stato protetto all'interno di una scatola nera per ridurre al minimo l'esposizione a fotoni esterni. In ingresso abbiamo la fibra ottica che trasporta la luce del laser e l'alimentazione del sensore; in uscita l'*output* delle celle acquisite che per mezzo di cavi LEMO è trasmesso all'oscilloscopio per l'analisi.

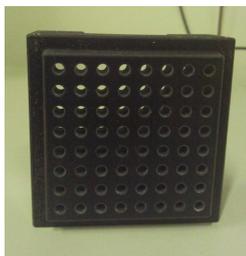


Figura 2.3: Maschera in resina costruita dalla stampante 3D. Sono visibili i fori per l'inserimento della testa del laser.

Per assicurarsi che il laser fosse posizionato esattamente al centro di ciascuna cella è stata costruita una maschera per il rivelatore in resina, mostrata in Figura 2.3 , con 64 fori tanti quanti sono le celle del rivelatore. Le maschere per entrambi i rivelatori MCP-PMT sono state costruite con una stampante 3D Objet Eden250.

Di seguito descrivo le specifiche di ciascun elemento dell'apparato sperimentale.

2.2 MCP-PMT Planacon

Il rivelatore di fotoni su cui verte principalmente questa tesi è Planacon della ditta Photonis.

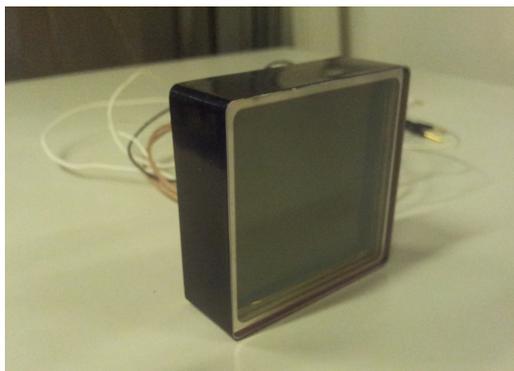


Figura 2.4: MCP-PMT Planacon.

In Tabella 2.1 sono riportate le specifiche del rivelatore Planacon XP85112, $10\mu\text{m}$ MCP-PMT, 53 mm Square, 8x8 Anode [7].

2. Apparato Sperimentale

Parametri	Valori
Finestra di ingresso	Schott 8337B
Fotocatodo	Biakali
Struttura di moltiplicazione	MCP chevron (2), canali $10\ \mu\text{m}$, 60:1 L:d
Struttura anodi	<i>array</i> 8x8, dimensione 5,9 mm, passo 6,5 mm
Area attiva	53x53 mm
Range spettrale	da 200 nm a 650 nm
Picco di massima efficienza quantica	22% a 380 nm
Guadagno tipico a 2.6 kV	10^6
Sdev tempo di transito	35 ps (max 60 ps)

Tabella 2.1: Specifiche MCP-PMT Planacon.

Questo rivelatore ha due eccellenti caratteristiche che lo distinguono da modelli precedenti: una elevata immunità a campi magnetici (fino a 2 T) e una performance temporale potenziata (*pulse width* di 0.7 ns e *pulse rise time* di 500 ps per singolo fotone).

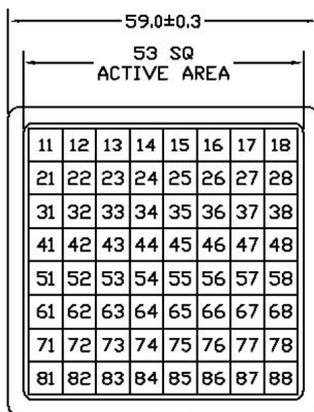


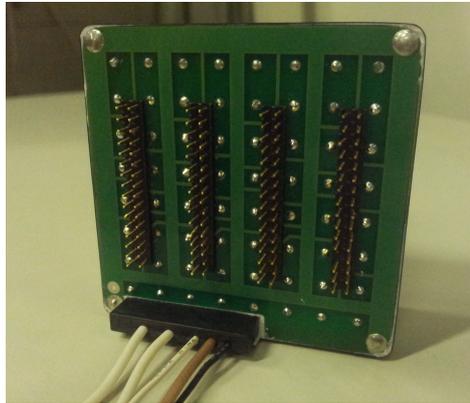
Figura 2.5: Matrice 8x8 delle celle del Planacon.

Composto da una matrice 8x8 di anodi, questo rivelatore ha sensibilità spaziale, in quanto ciascun canale ha la sua uscita, e può essere letto e analizzato in modo indipendente dagli altri.

Le celle sono conteggiate con una coppia di numeri, il primo dei quali rappresenta la riga della matrice e il secondo la colonna (es. la cella 48 si trova all'incrocio tra la 4 riga e la 8 colonna, si veda la Figura 2.5).

Sul retro del rivelatore sono presenti 4 blocchi di connettori ciascuno con 32 *pin*; ogni coppia di *pin* è relativa ad una diversa cella: da uno dei due *pin* si preleva il segnale, nell'altro va il ground.

Il circuito di alimentazione, illustrato in Figura 2.7, è stato preparato seguendo le disposizioni del costruttore, utilizzando connettori a innesto rapido.



CONN 4	CONN 3	CONN 2	CONN 1
18 GND	16 GND	14 GND	12 GND
GND 17	GND 15	GND 13	GND 11
28 GND	26 GND	24 GND	22 GND
GND 27	GND 25	GND 23	GND 21
38 GND	36 GND	34 GND	32 GND
GND 37	GND 35	GND 33	GND 31
48 GND	46 GND	44 GND	42 GND
GND 47	GND 45	GND 43	GND 41
58 GND	56 GND	54 GND	52 GND
GND 57	GND 55	GND 53	GND 51
68 GND	66 GND	64 GND	62 GND
GND 67	GND 65	GND 63	GND 61
78 GND	76 GND	74 GND	72 GND
GND 77	GND 75	GND 73	GND 71
88 GND	86 GND	84 GND	82 GND
GND 87	GND 85	GND 83	GND 81

Figura 2.6: Retro dell'MCP-PMT Planacon e schema dei pin di uscita dai 64 anodi.

Valori limite	
Tensione massima Catodo-MCP in	500 V
Tensione massima MCP in-MCP out	2400 V
Tensione massima MCP out-Anodo	500 V
Tensione massima totale	2800 V

Tabella 2.2: Valori limite di tensione per il circuito di alimentazione del Planacon.

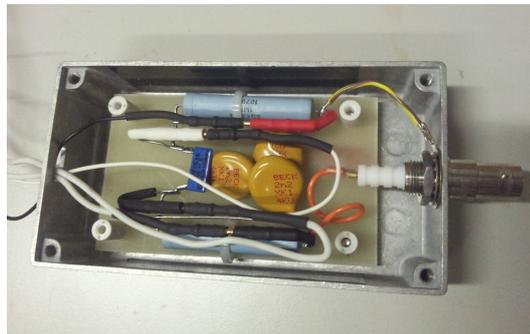
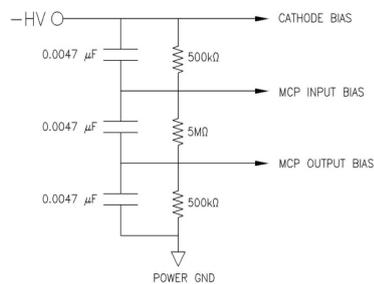


Figura 2.7: Schema del circuito di alimentazione consigliato dal costruttore e sua realizzazione.

2.3 MCP-PMT a singolo anodo

Per avere possibilità di confrontare i risultati ottenuti, è stato scelto di utilizzare un rivelatore della stessa famiglia (quindi un MCP-PMT) ma a cella singola, anche questo prodotto dalla ditta Photonis. Questo sensore è ancora nella fase di sperimentazione e non è ancora disponibile sul mercato, ma essendo già stato utilizzato precedentemente per altri propositi dai Laboratori dell'INFN, era un buon candidato per fornire un confronto.



Figura 2.8: MCP-PMT Image Intensifier PP0365E.

MCP-PMT Image Intensifier PP0365E [8]. In Tabella 2.3 si riportano le specifiche del sensore.

Parametri	Valori
Finestra ingresso	quarzo
Fotocatodo	S20
Struttura di moltiplicazione	MCP chevron (2), canali $6 \mu\text{m}$, 50:1 L:d
Struttura anodi	Anodo singolo, connettore SMA.
Diametro area sensibile	17,5 mm
Guadagno tipico	7×10^5

Tabella 2.3: Specifiche MCP-PMT a singolo anodo.

Valori limite	
Tensione massima Catodo-MCP in	240 V
Tensione massima MCP in-MCP out	non indicato
Tensione massima MCP out-Anodo	1000 V
Tensione massima totale	2600 V

Tabella 2.4: Valori limite di tensione per il circuito di alimentazione dell'MCP-PMT a singolo anodo.

2.4 Silicon Photomultipliers

I due Fotomoltiplicatori a silicio utilizzati sono M CCP (*Multi Pixel Photon Counter*) entrambi prodotti dalla ditta Hamamatsu [10][9].

Il SiPM S12572-050P è stato richiesto con particolari prestazioni in termini di *timing*.

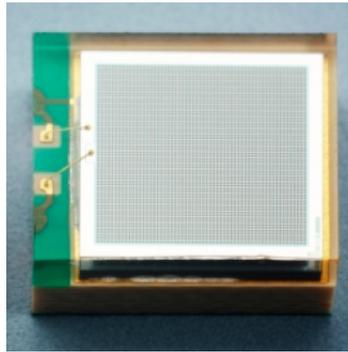


Figura 2.9: Il fotomoltiplicatore a silicio S12572-050P. (Courtesy of Hamamatsu)

Specifiche SiPM	S10931-100P	S12572-050P
Area effettiva	3x3 mm	3x3 mm
Grandezza pixel	100x100 μm	50x50 μm
Numero pixel	900	3600
Range Spettrale	320-900 nm	320-900 nm
Guadagno	$2,4 \times 10^6$	$1,25 \times 10^6$
Voltaggio raccomandato	70-75 V	60-80 V
Risoluzione temporale (FWHM per singolo fotone)	500-600 ps	300 ps

Tabella 2.5: Specifiche SiPM.

2.5 Laser



Figura 2.10: Il laser Pilas utilizzato e il suo *controller*.

In tutta la fase sperimentale è stato utilizzato un laser Pilas (modello PiL040X) assieme al Controller EIG2000DX prodotto dalla ditta Advanced Laser Diode System [11].

Il *controller* permette di regolare la frequenza degli impulsi, il trigger e l'attenuazione (*tune*) dell'ampiezza dell'impulso del raggio: con il *tune* al 100% si ha un'ampiezza minore, con il *tune* allo 0% sia ha l'ampiezza massima, mentre il *tune* standard è 35,2%. Tutte le misure sono state effettuate ad un tasso di ripetizione dell'impulso laser di 100 kHz. In uscita dalla testa che produce il laser, il raggio è incanalato in una fibra ottica da 50 μm schermata, alla cui estremità è collegata la testina che emette il raggio e che quindi produce un *light spot* di 50 μm . La testina va quindi inserita nel vano della maschera in resina appositamente costruita corrispondente alla cella da illuminare.

Specifiche Laser	
Potenza media irradiata al max. tasso di ripetizione	100 mW
Picco massimo di potenza irradiata	1000 mW
Larghezza impulso	45 ps
Massimo tasso di ripetizione dell'impulso	1.5 MHz
Lunghezza d'onda	407 nm.

Tabella 2.6: Specifiche Laser Pilas.

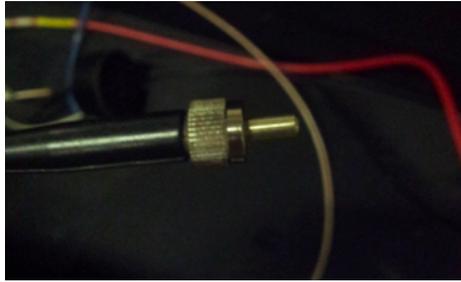


Figura 2.11: Testa di emissione del laser collegata alla fibra ottica con *light spot* di 50 μm .

2.6 Oscilloscopio

A seconda della misura da effettuare, sono stati acquisiti i segnali di una o più celle e inviati ad un oscilloscopio Le Croy - SDA 3010 Serial Data Analyzer (Dual 20 GS/s, Quad 10 GS/s).

Nella maggior parte delle misure è stata utilizzata la modalità *dual*, ma nelle prove di *cross talk* per poter acquisire più canali contemporaneamente è stata utilizzata la modalità *quad* a 10 GS/s. Non è stata notata una variazione rilevante dei valori in acquisizione e degli errori associati, quindi questa impostazione deve aver influito in maniera trascurabile. Per tutte le serie di misure il trigger utilizzato è il trigger interno del laser, acquisito direttamente dal *controller* del laser. L'impedenza in ingresso ai canali è 50 Ω .

La forma di un segnale tipico (si veda la Figura 2.12) è la seguente: il segnale presenta un picco piuttosto ampio (alcuni Volts in negativo) e con fronti di discesa e salita ben definiti, a seguire sono presenti alcune piccole oscillazioni che poi vanno ad azzerarsi tornando alla soglia del rumore.

Per l'analisi dati sono state utilizzate le funzioni presenti nell'oscilloscopio. Le misure effettuate sono state:

- ampiezza del picco in Volt (-V);
- integrale del segnale, misurato in -Vs (da notare che il valore dell'integrale del segnale è proporzionale alla carica dallo sciame di elettroni);
- ritardo del segnale dell'MCP rispetto al segnale di trigger, misurato in s.

Per ogni misura è stata acquisita una statistica di circa $3-4 \times 10^3$ valori, numero scelto osservando che a quel punto il valor medio e la deviazione standard della serie di dati erano stabili.

2. Apparato Sperimentale

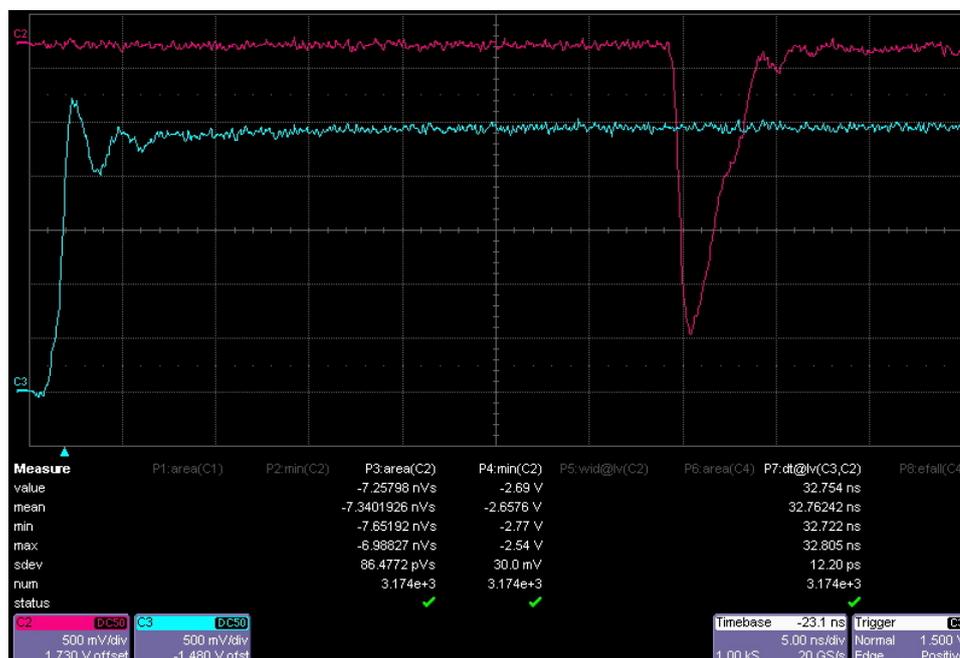


Figura 2.12: Segnale tipico di una cella dell'MCP-PMT Planacon. Il segnale azzurro è il trigger mentre quello rosso il segnale della cella illuminata. Nella parte inferiore si notano la statistica di misure prese dall'oscilloscopio.

Nella prima fase per le misure di tempo è stato necessario trovare la configurazione migliore: era necessario avere un ritardo sufficientemente piccolo in modo da avere contemporaneamente sullo schermo entrambi i segnali (trigger e MCP) e poter aumentare la risoluzione della base dei tempi. Per la misura di tempo è stato considerato il ritardo a schermo tra il punto in cui il segnale di trigger supera la soglia di 1,5 V e il punto in cui il segnale acquisito scende sotto i 200 mV.

Il dato da considerare in questa misura non è il valore del ritardo stesso, dovuto a mille fattori non correlati con la velocità di risposta del rivelatore, ma l'errore associato alla misura che rappresenta il *jitter* del segnale, cioè indica la precisione temporale raggiunta dal rivelatore.

Nella seconda serie di misure, dove è stato studiato il *cross talk* ed era quindi necessario acquisire più segnali contemporaneamente, la misura di tempo non è stata effettuata in quanto superflua, quindi il trigger è stato mantenuto fuori schermo ed è stato possibile ampliare la base dei tempi e ottenere delle deviazioni standard leggermente più piccole.

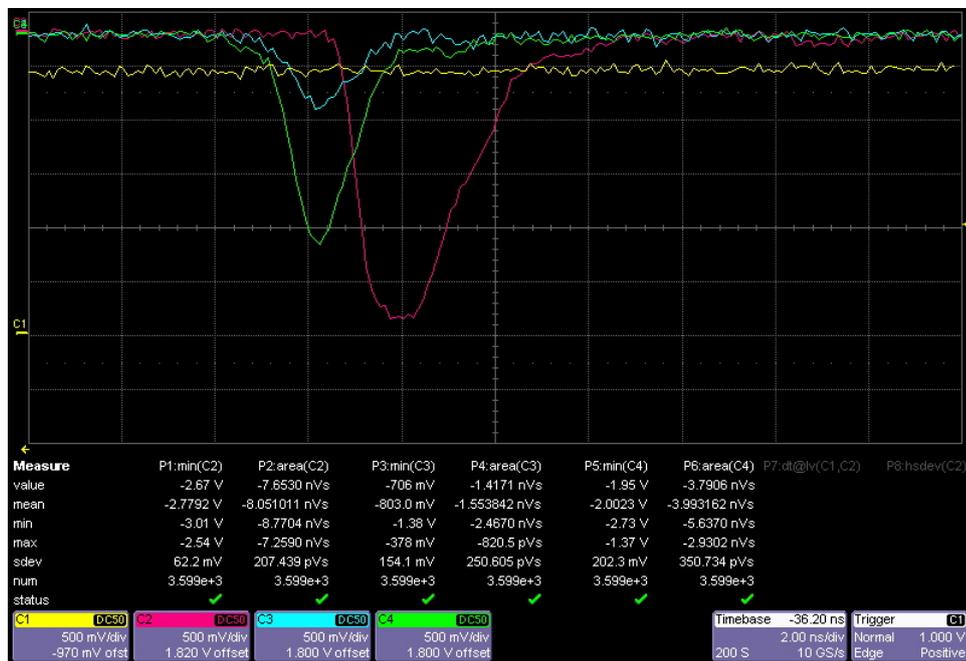


Figura 2.13: Esempio di segnali di tre celle adiacenti per la misura di *cross talk*. Nella parte inferiore si notano la statistica di misure prese dall'oscilloscopio.

Capitolo 3

Presenza dati

3.1 Attenuazione ampiezza laser

La prima prova effettuata è stata quella di verificare la risposta delle celle all'attenuazione del laser, in modo da poter decidere quale valore di *tune* utilizzare per le successive misure.

Scelta una cella, la 45, e fissata una tensione di 2600 V abbiamo studiato la risposta alla variazione di attenuazione del laser. Partendo da un'attenuazione nulla fino ad arrivare all'assenza di segnale aumentando di 5% ogni volta il *Tune*, sono stati misurati l'ampiezza del picco, l'integrale del segnale e deviazione standard del ritardo.

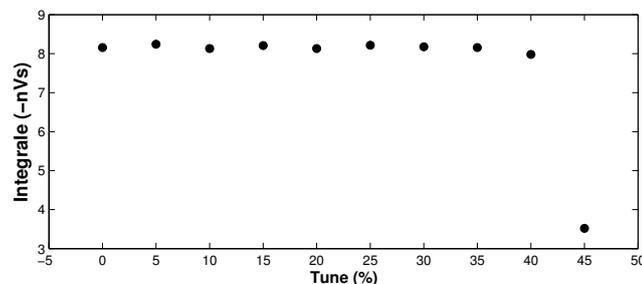


Figura 3.1: Valori di integrale del segnale per la cella 45 a varie attenuazioni del laser.

Nelle Figure 3.1, 3.2 e 3.3 osserviamo una variazione minima di valori tra 0% e il 40% di attenuazione. Poi bruscamente ad attenuazione di 45% è presente un notevole diminuzione dell'ampiezza del picco e conseguentemente della sua area, insieme ad un aumento degli errori associati alle misure e quindi anche della risoluzione temporale.

La fase a valori costanti rappresenta un risultato anomalo, in quanto ci si aspetterebbe che i valori acquisiti siano proporzionali alla variazione di ampiezza del

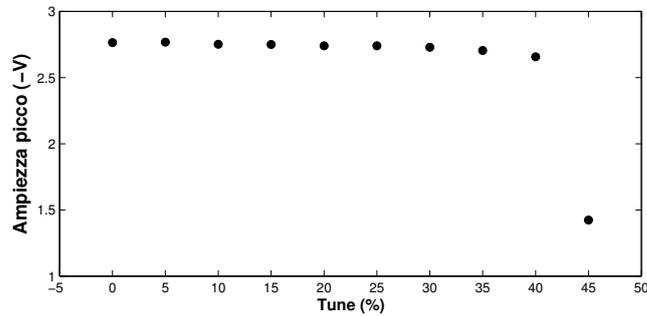


Figura 3.2: Valori di ampiezza del picco del segnale per la cella 45 a varie attenuazioni del laser.

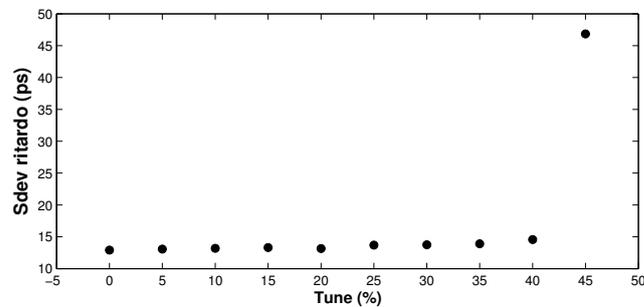


Figura 3.3: Valori di deviazione standard del ritardo del segnale per la cella 45 a varie attenuazioni del laser.

laser. Le spiegazioni più probabili, che creano la necessità di ulteriori studi, riguardano la saturazione dell'MCP-PMT oppure della fibra ottica che non trasporta debitamente la luce emessa dal laser in condizioni di ampiezza maggiore. Per le misure di uniformità abbiamo deciso di utilizzare quindi il valore di *tune* di *default*, alto ma inferiore al limite, mentre per le prove di *cross talk* sono stati impiegati valori anche superiori al 40%.

3.2 Uniformità

Per capire se la risposta delle celle può essere considerata uniforme sono state effettuate misure di ampiezza del picco, integrale del segnale e ritardo su tutte le 64 celle dell'MCP. Inizialmente sono state scelte cinque celle posizionate in diversi punti dell'area attiva, i cui *output* sono stati campionati a cinque diverse tensioni di alimentazione del rivelatore. Per il campionamento completo abbiamo scelto di utilizzare solo le tre tensioni di alimentazione maggiormente significative, il tutto all'attenuazione standard del laser di 35,2%.

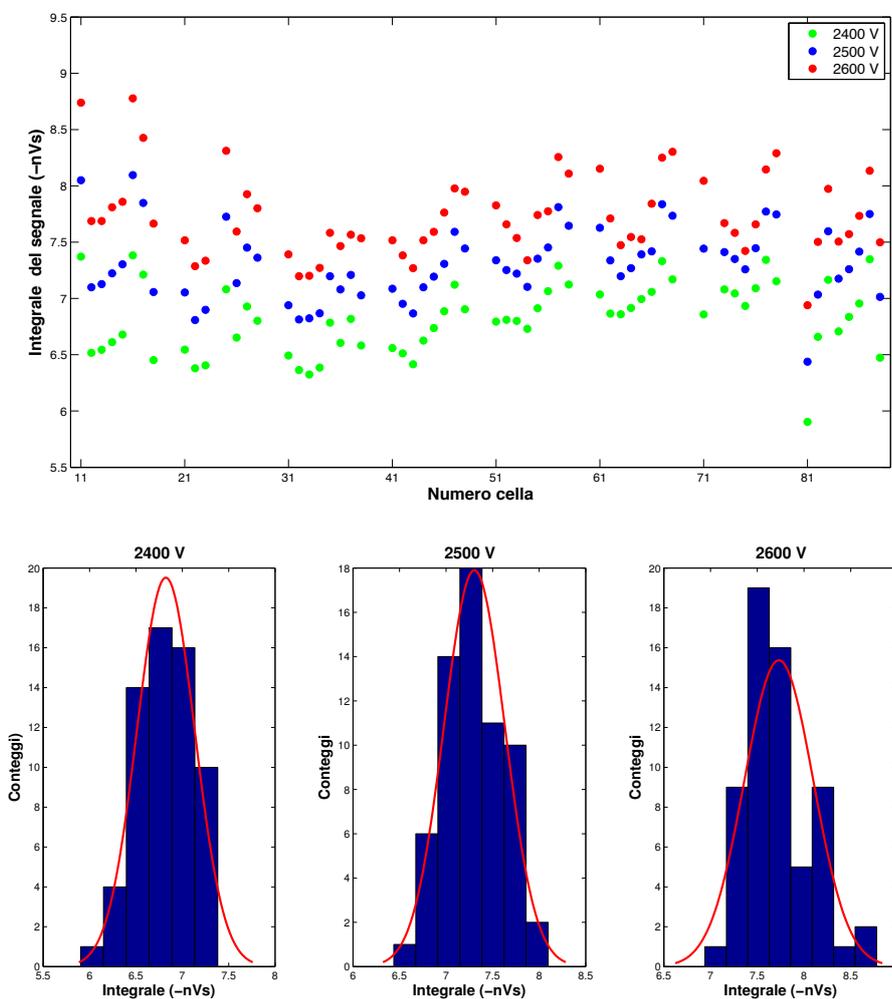


Figura 3.4: Dispersione dei valori di integrale del segnale per tutte le 64 celle alle tre tensioni applicate. I tre istogrammi, fittati da una funzione gaussiana, rappresentano la distribuzione dei valori.

Tensione	Media (-nVs)	Sdev (-nVs)
2400 V	6.8222	0.31211
2500 V	7.3039	0.32726
2600 V	7.7308	0.36941

Tabella 3.1: Valore medio e deviazione standard per i tre istogrammi.

3. Presa dati

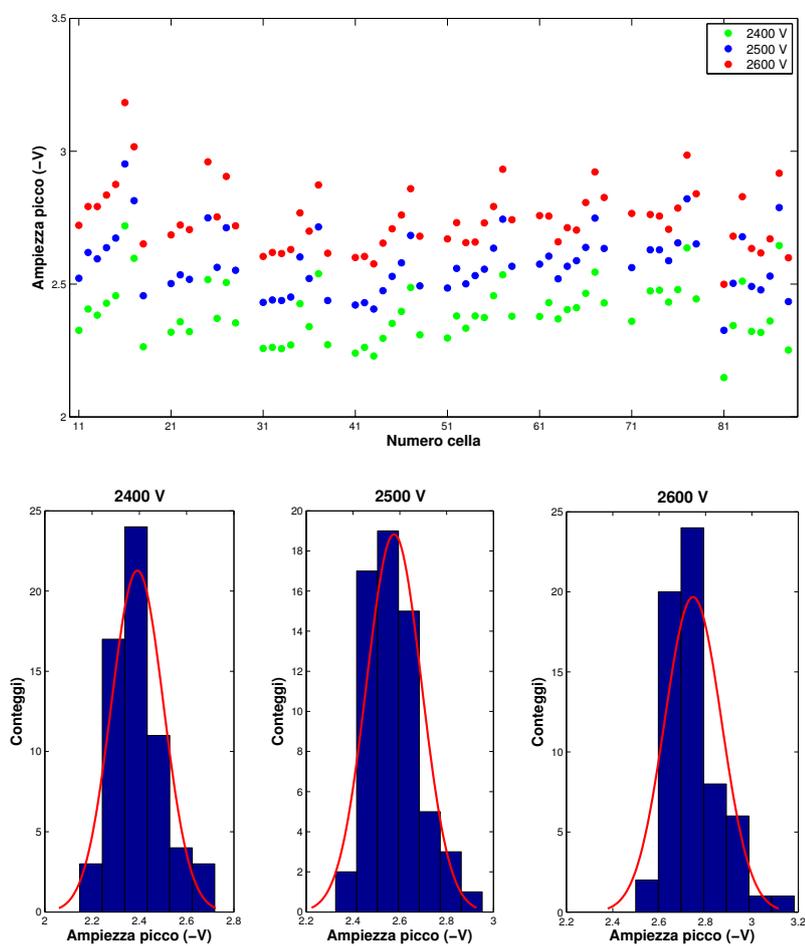


Figura 3.5: Dispersione dei valori di ampiezza del picco del segnale per tutte le 64 celle alle tre tensioni applicate. I tre istogrammi, fittati da una funzione gaussiana, rappresentano la distribuzione dei valori.

Tensione	Media (-V)	Sdev (-V)
2400 V	2.3918	0.1106
2500 V	2.5753	0.1174
2600 V	2.7465	0.1228

Tabella 3.2: Valore medio e deviazione standard per i tre istogrammi.

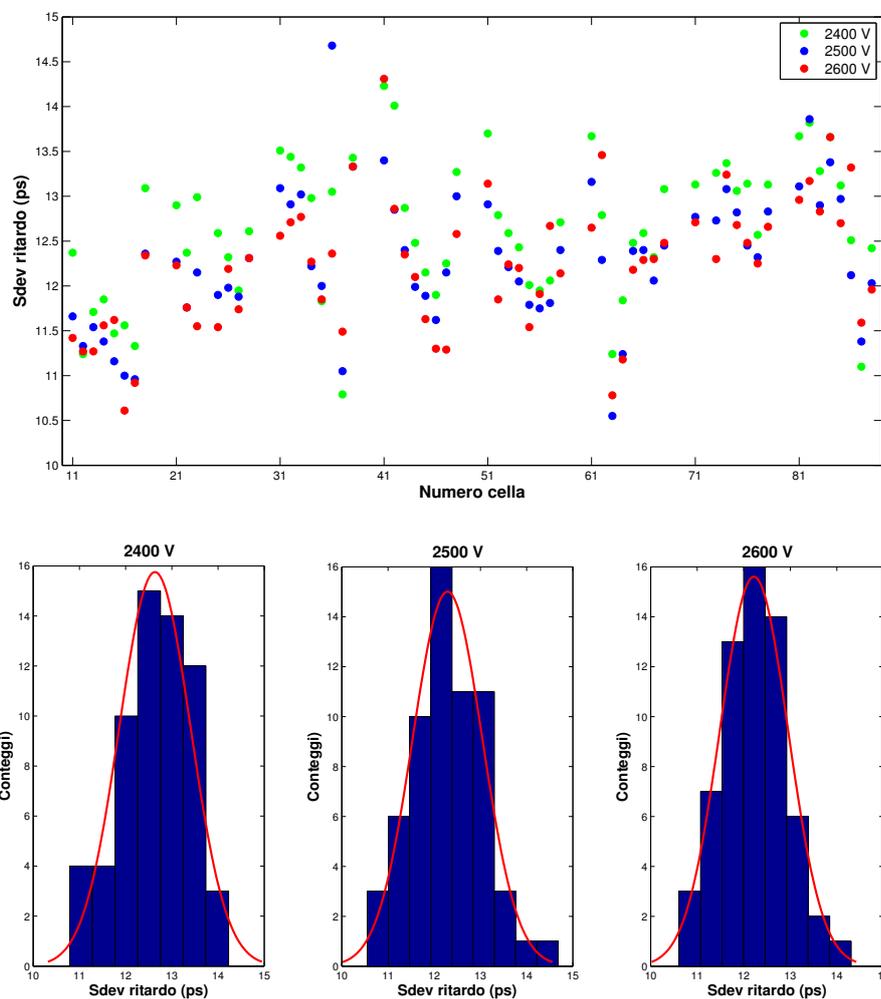


Figura 3.6: Dispersione dei valori di deviazione standard del ritardo per tutte le 64 celle alle tre tensioni applicate. I tre istogrammi, fittati da una funzione gaussiana, rappresentano la distribuzione dei valori.

Tensione	Media (ps)	Sdev (ps)
2400 V	12.6347	0.7714
2500 V	12.2877	0.75597
2600 V	12.2195	0.73273

Tabella 3.3: Valore medio e deviazione standard per i tre istogrammi.

Osservando le Figure 3.4 e 3.5, notiamo che l'andamento della dispersione dei valori evidenzia una simmetria della matrice: le celle centrali in una riga rilevano un segnale più intenso di quelle periferiche sulla stessa riga (5-6% in più). Anche per quanto riguarda la Figura 3.6 in cui sono riportate le misure sulla risoluzione temporale è visibile la simmetria dell'oggetto: anche in questo caso le celle centrali rispetto a una riga offrono prestazioni migliori di quelle laterali. Alcune celle hanno registrato valori anomali rispetto all'andamento generale e questo potrebbe essere dovuto a una variazione casuale nell'apparato sperimentale o ad un funzionamento diverso della cella stessa.

Gli istogrammi rappresentano le distribuzioni dei valori per le tre tensioni per tutte e tre le misure. Osservando i valori delle funzioni gaussiane adattate agli istogrammi nelle Tabelle 3.1 e 3.2 notiamo che il valore medio dell'integrale e del picco relativo a ciascun istogramma cresce con la tensione, come ci si aspettava. Per quanto riguarda la Tabella 3.3 invece, la deviazione standard del ritardo risulta circa indipendente dall'aumento di tensione, entro gli errori.

3.3 *Cross Talk* rispetto a una cella definita

Per valutare il problema di *cross talk* abbiamo illuminato con il laser una cella e abbiamo osservato la risposta delle 8 celle circostanti.

In questo modo è possibile studiare se il *cross talk* sia un problema dovuto alla vicinanza fisica dei connettori di uscita degli anodi oppure se sia un problema interno, forse relativo allo sciame di elettroni che colpisce anche gli anodi attigui o forse a riflessioni ottiche dei fotoni entranti. Il processo è stato ripetuto per una cella centrale e una periferica modificando ad ogni acquisizione la tensione di alimentazione e l'attenuazione dell'ampiezza del laser. Il *tune* è stato aumentato notando che minimizzava il rapporto tra il segnale della cella illuminata e quello di una cella limitrofa.

Il primo risultato di questa analisi è che il *cross talk* ha una forte dipendenza dalla vicinanza delle celle. Celle che si trovano in diagonale rispetto a quella centrale ricevono una quantità molto ridotta di segnale rispetto alle celle adiacenti. Per esempio in Figura 3.10, per la cella 54, a 2600 V e con attenuazione 35.2%, il valore del segnale è il 67% di quello della cella 55, mentre per la cella 44, posta in diagonale rispetto alla 55, il valore scende al 33%.

È chiara inoltre la dipendenza del *cross talk* dalla quantità di luce in ingresso al sensore; l'attenuazione gioca un ruolo fondamentale, e da origine a variazioni maggiori del calo di tensione applicata. Prendiamo sempre come esempio le

3.3. Cross Talk rispetto a una cella definita

11	12	13	14	15	16	17	18
21	22	23	24	25	26	27	28
31	32	33	34	35	36	37	38
41	42	43	44	45	46	47	48
51	52	53	54	55	56	57	58
61	62	63	64	65	66	67	68
71	72	73	74	75	76	77	78
81	82	83	84	85	86	87	88

Figura 3.7: Le due celle scelte per la misura di *cross talk* sono la cella 55 e la 22, evidenziate in figura.

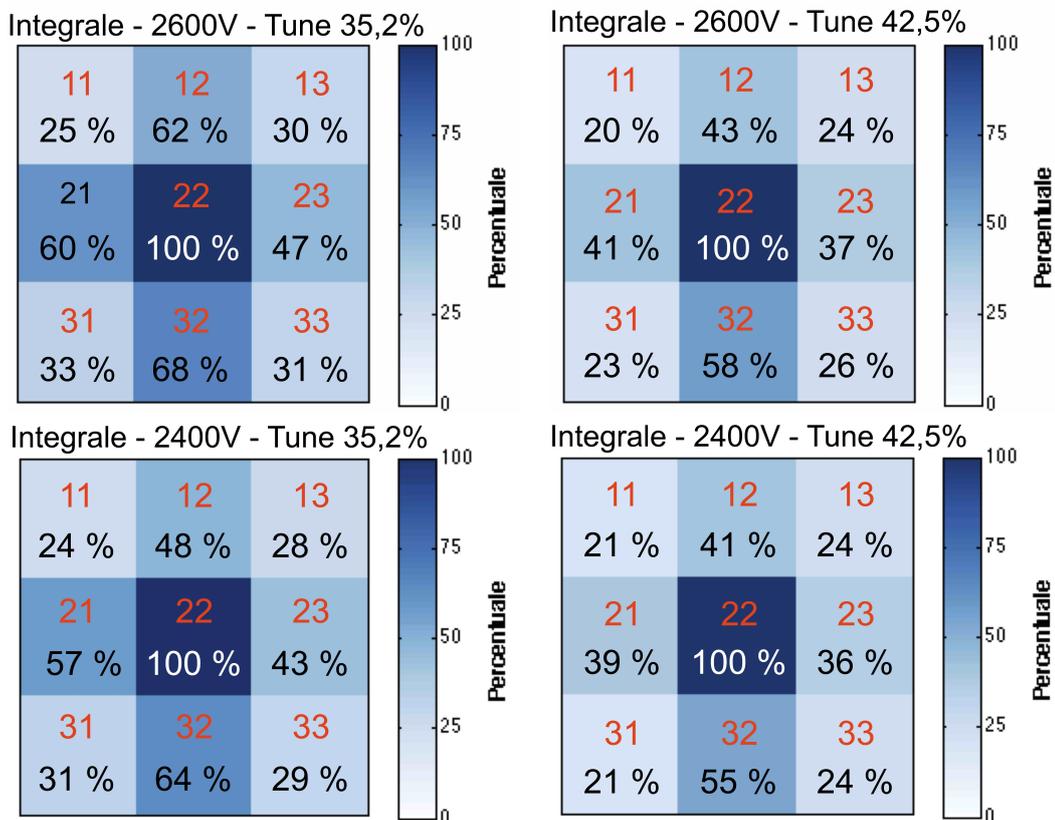


Figura 3.8: Percentuali di *Cross Talk* del valore dell'integrale del segnale per la cella 22.

celle 54 e 44 di Figura 3.10 : ad una tensione di 2400 V ma ad attenuazione di 35.2% i valori sono rispettivamente 63% e 32%, mentre alla tensione di 2600 V e con attenuazione di 43.4% i valori diventano 50% e 19%.

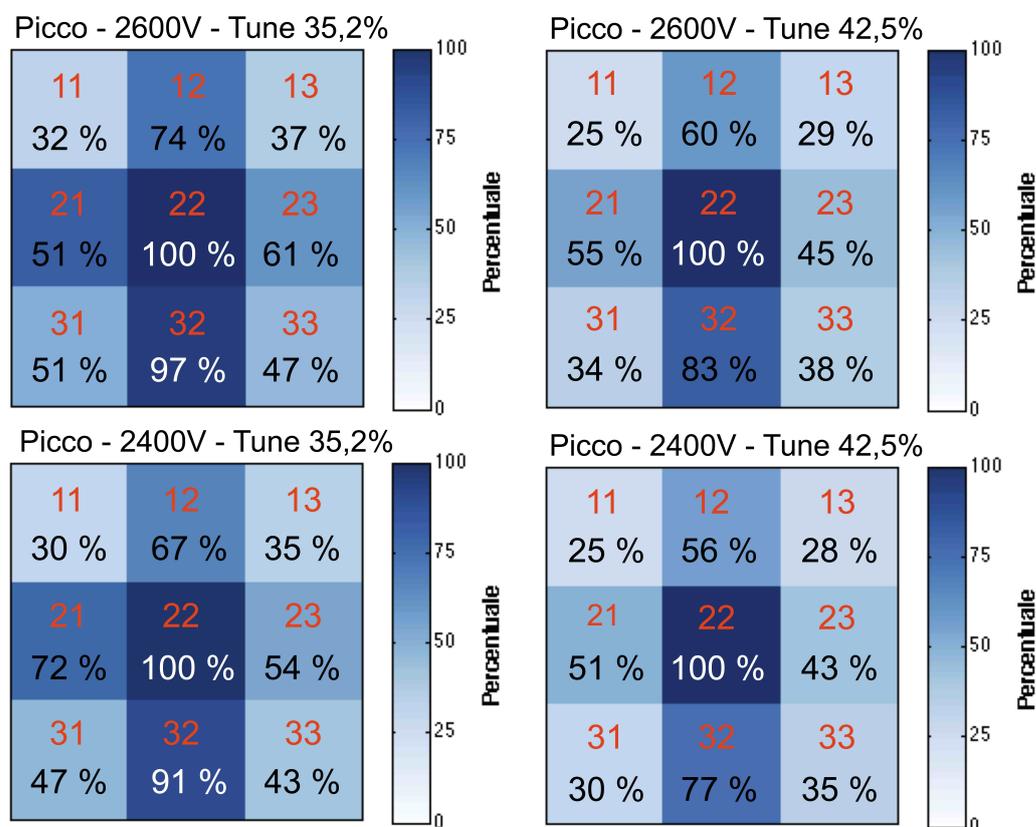


Figura 3.9: Percentuali di *Cross Talk* del valore dell'ampiezza del picco del segnale per la cella 22.

È rilevante la differenza tra i valori di integrale e quelli di ampiezza del picco: questi ultimi generano un *cross talk* molto più intenso, in alcuni casi il valore di una cella limitrofa a quella illuminata riceve un segnale pari a oltre il 95%, vedi Figura 3.11.

Per quanto riguarda il *cross talk* causato dall'induzione elettrica tra i *pin* di uscita, non è stato possibile trarre conclusioni. I *pin* delle celle 11 e 21 sono a fianco di quelli della cella illuminata e si nota un leggero aumento di percentuale di *cross talk* in queste due celle rispetto alle altre. D'altro canto nel caso delle celle (56 e 66) con *pin* vicini a quelli della cella 55, non si nota nessun aumento di *cross talk* rispetto a quelle con *pin* distanziati. Si veda la Figura 2.6 nel Capitolo 2 per lo schema dei connettori di uscita.

3.3. *Cross Talk* rispetto a una cella definita

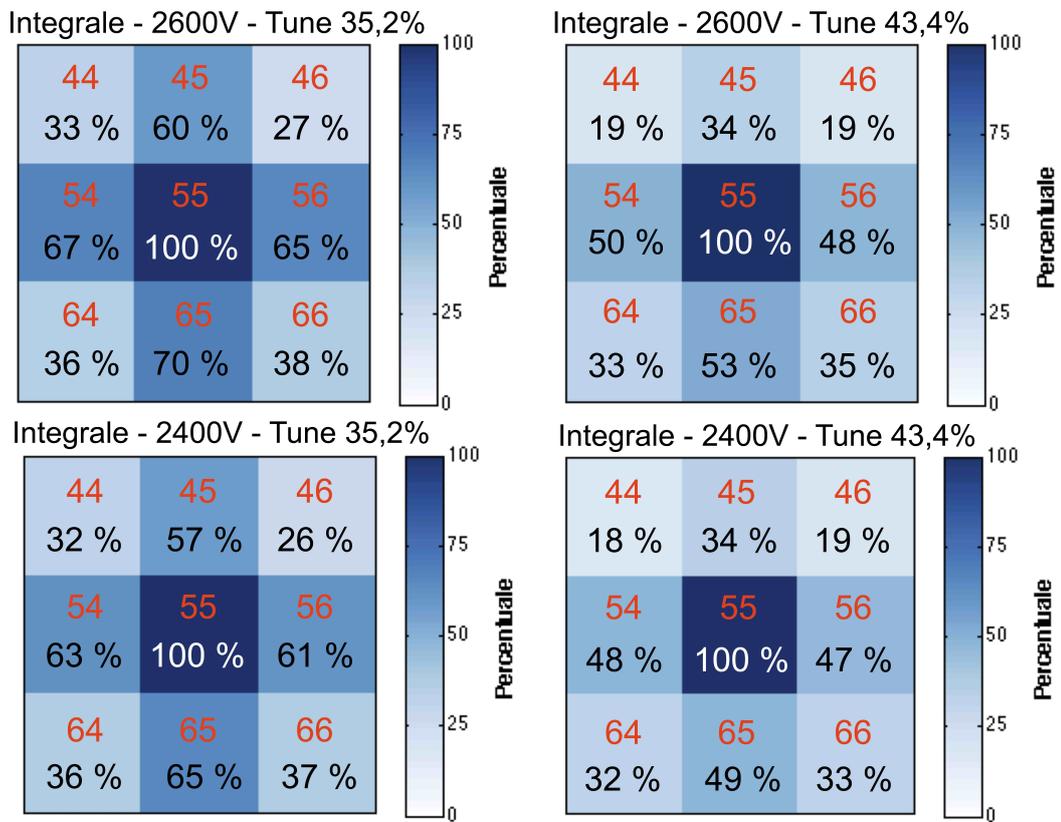


Figura 3.10: Percentuali di *Cross Talk* del valore dell'integrale del segnale per la cella 55.

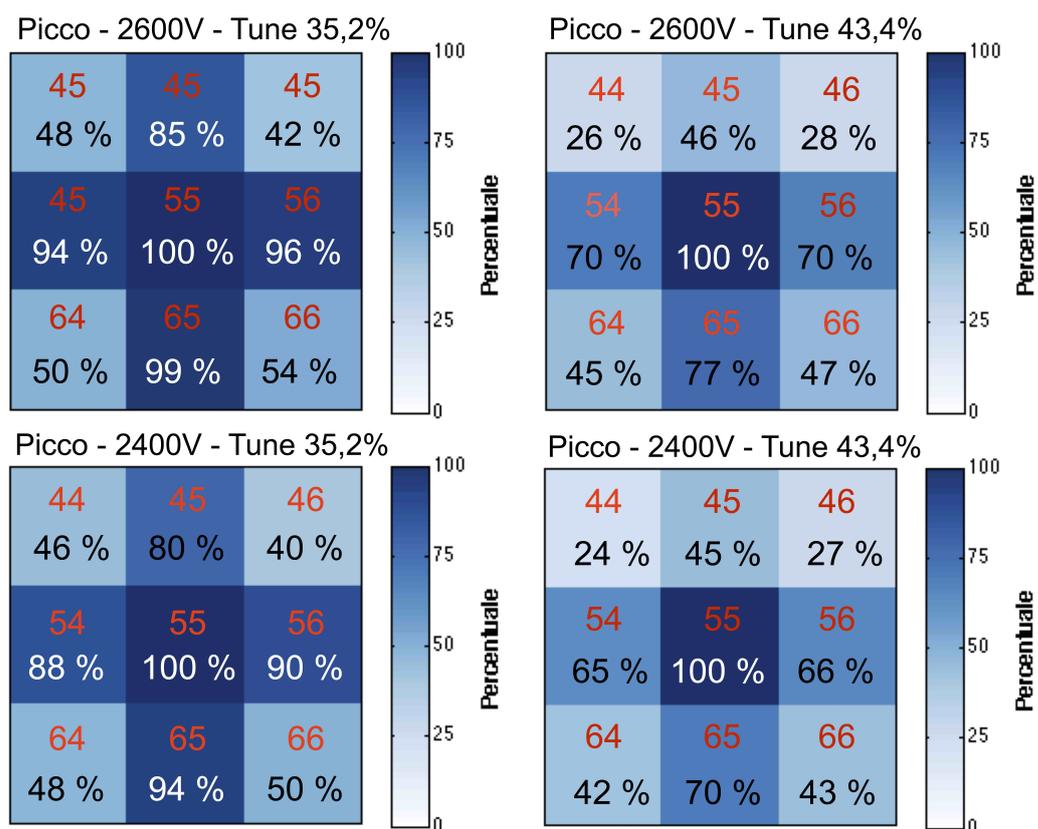


Figura 3.11: Percentuali di *Cross Talk* del valore dell'ampiezza del picco del segnale per la cella 55.

3.4 *Cross talk* con *scan* di posizione

Uno studio ulteriore del *cross talk* è stato effettuato con uno *scan* in posizione su tre celle vicine: il laser stato inizialmente posizionato in modo tale da illuminare il bordo laterale dell'area attiva del rivelatore e grazie ad un sistema di movimentazione micrometrica ogni 0,5 mm è stata effettuata una misura della risposta dei tre canali in lettura.

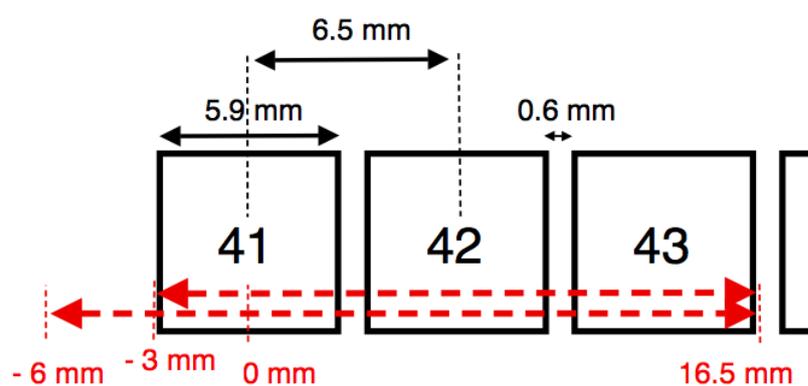


Figura 3.12: Schema dello *scan* in posizione sulle celle 41, 42 e 43.

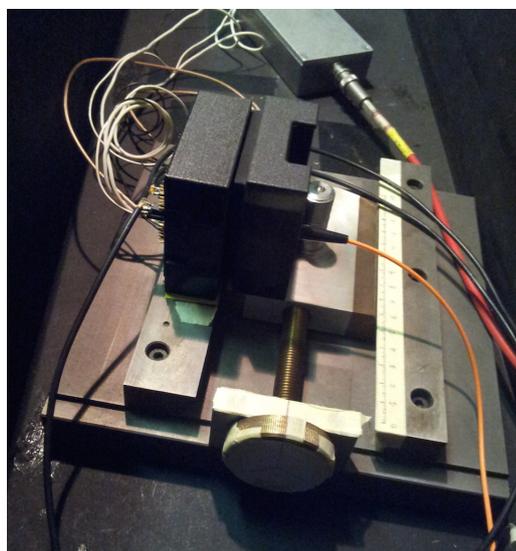


Figura 3.13: Apparato sperimentale per lo *scan* in posizione: sulla sinistra è posizionato il rivelatore, mentre sulla destra si nota la fibra ottica che porta il laser, inserita.

Per la prova è stata costruita una maschera per l'MCP completamente aperta sul davanti, in modo tale da non avere interruzioni durante la presa dati; l'MCP

3. Presa dati

è stato mantenuto fisso mentre il laser (inserito in un foro di una mascherina apposita) è stato posizionato sulla parte regolabile del sistema di movimentazione, come chiarificato dalla Figura 3.11. Le misure sono state prese a partire da -6 mm rispetto al centro della prima pad fino a +16.5 mm, cioè fino alla fine della terza pad, con passo di 0.5 mm. In Figura 3.12 è illustrato uno schema dello *scan*. Il tutto è stato effettuato ad una tensione fissa di 2400 V e sia con attenuazione del laser standard (35,2%) che con attenuazione maggiore (50%).

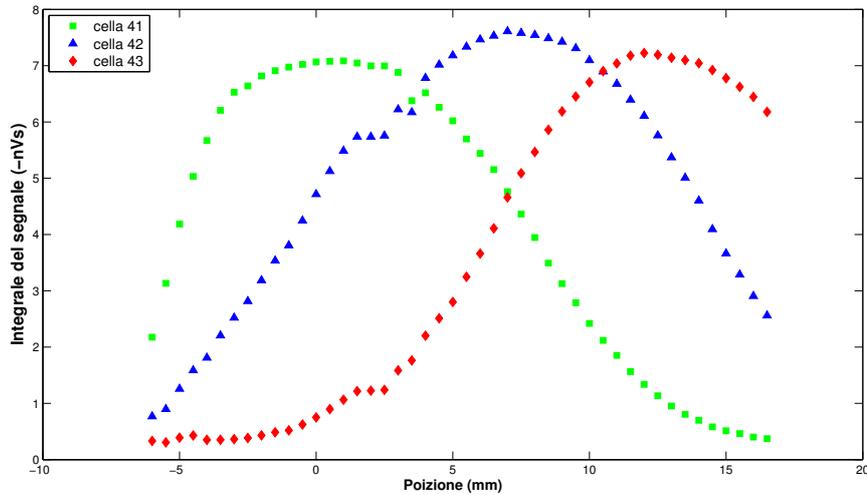


Figura 3.14: *Scan* in posizione per misurare la variazione del valore dell'integrale del segnale effettuato all'attenuazione di 35,2% lungo le celle 41, 42 e 43.

Il segnale che produce una cella quando la sua adiacente è illuminata al suo centro è molto elevato, circa il 70% del segnale per quanto riguarda il grafico con *tune* standard (Figura 3.14). Nel grafico con attenuazione 50% (Figura 3.15) si vede una notevole diminuzione di *cross talk*, con valori che si aggirano intorno al 15%. In Tabella 3.4 sono riportati i valori di *cross talk* misurati quando ciascuna cella è illuminata al suo centro e riferiti all'adiacente.

Percentuale <i>Cross talk</i>	42 (41)	41 (42)	43 (42)	42 (43)
<i>Tune</i> 35,2%	66.7	68.4	54.6	75.2
<i>Tune</i> 50%	11.7	17.2	15.5	11.7

Tabella 3.4: Percentuale di *cross talk* calcolata al centro di ciascuna cella e riferita alle adiacenti. Il numero della cella illuminata è quello tra parentesi, mentre il primo indica la cella misurata.

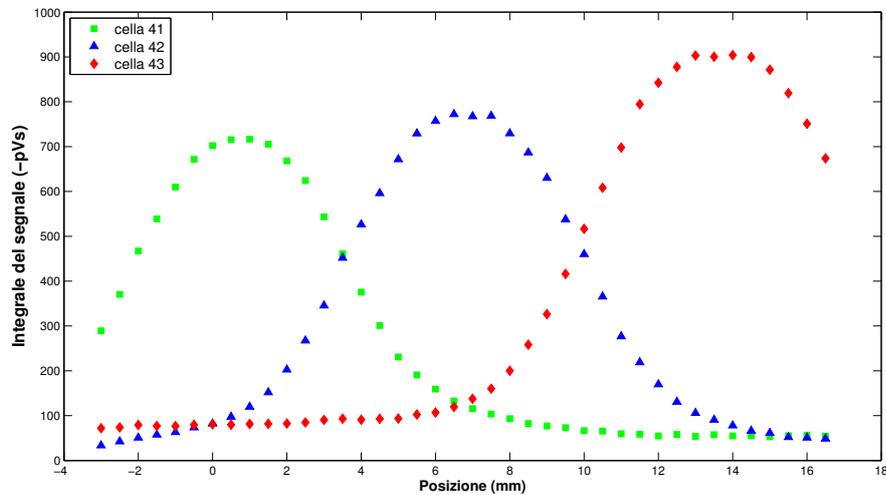


Figura 3.15: *Scan* in posizione per misurare la variazione del valore dell'integrale del segnale effettuato all'attenuazione di 50% lungo le celle 41, 42 e 43. Notare il cambio di scala sull'asse delle ordinate rispetto al grafico precedente.

Abbiamo verificato che lo stesso tipo di misura di *cross talk* con *scan* in posizione è stato effettuato da altri enti di ricerca [12] sullo stesso rivelatore Planacon ma con un metodo diverso, quello dei conteggi con discriminatore. La misura consiste nel porre un valore di soglia e conteggiare gli eventi in cui il segnale supera la soglia. La differenza con il metodo da noi utilizzato riguarda le informazioni ottenute dalla misura. In alcune applicazioni è sufficiente ottenere dati di tipo digitale (sopra soglia/sotto soglia), mentre in altri casi è necessario mantenere la maggior quantità di informazioni contenute in un segnale di tipo analogico, come nel nostro caso del valore dell'integrale del segnale.

3.5 MCP-PMT a singolo anodo

A termine delle misure sull'MCP-PMT Planacon per fare un confronto è stata effettuata una prova con l'MCP-PMT a singola cella. Essendo di forma cilindrica, la mascherina costruita per assicurare una buona illuminazione con il laser è stata forata radialmente. Sono stati utilizzati solo cinque fori disposti a forma di croce, denominati C, N, S O, E (Centrale, Nord, Sud, Ovest, Est), considerando come Nord il foro posizionato sul lato di uscita dei cavi di alimentazione del rivelatore.

Abbiamo effettuato misure ad attenuazione fissa poiché la variazione in questo

3. Presa dati

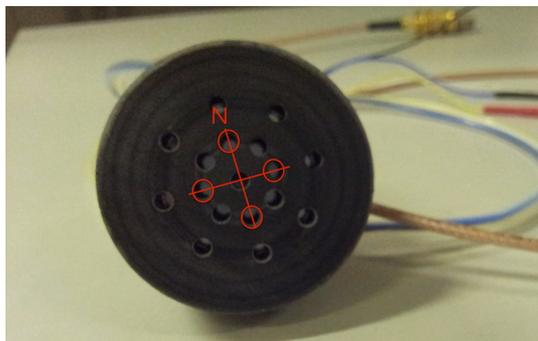


Figura 3.16: Maschera per l'MCP-PMT a singolo anodo. Sono evidenziati i fori utilizzati per le misure.

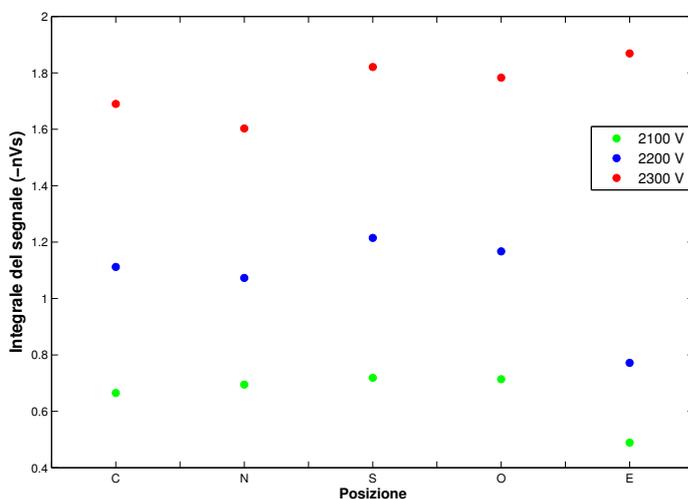


Figura 3.17: Valori di integrale del segnale per l'MCP-PMT a singolo anodo alle varie tensioni. In ascissa sono riportate le posizioni dei fori utilizzati (Centro, Nord, Sud, Ovest, Est).

caso era meno rilevante. Sono state utilizzate le tensioni di alimentazione di 2100, 2200 e 2300 V.

In Figura 3.19 notiamo una risoluzione temporale migliore rispetto al rivelatore Planacon, ovviamente sempre inversamente dipendente dalla tensione applicata (vedi Tabella 3.5). Quindi in termini di *timing* possiamo affermare che l'Image Intensifier è più adatto ad effettuare misure di tempo, anche se, essendo composto da un solo anodo, non può fornire la stessa risoluzione spaziale del Planacon.

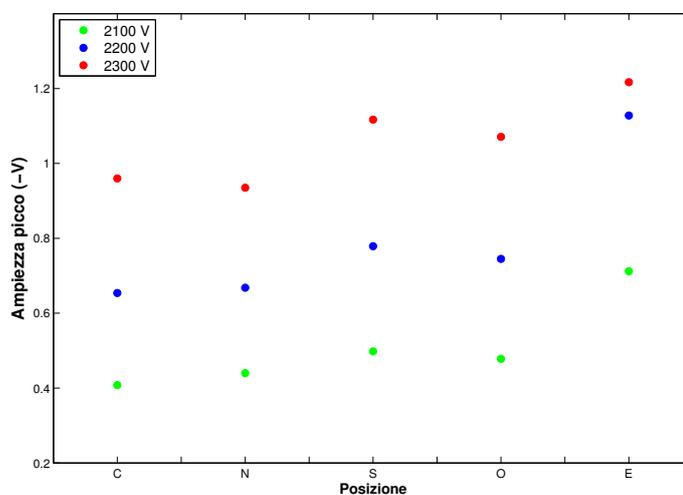


Figura 3.18: Valori di ampiezza del picco del segnale per l'MCP-PMT a singolo anodo alle varie tensioni. In ascissa sono riportate le posizioni dei fori utilizzati (Centro, Nord, Sud, Ovest, Est).

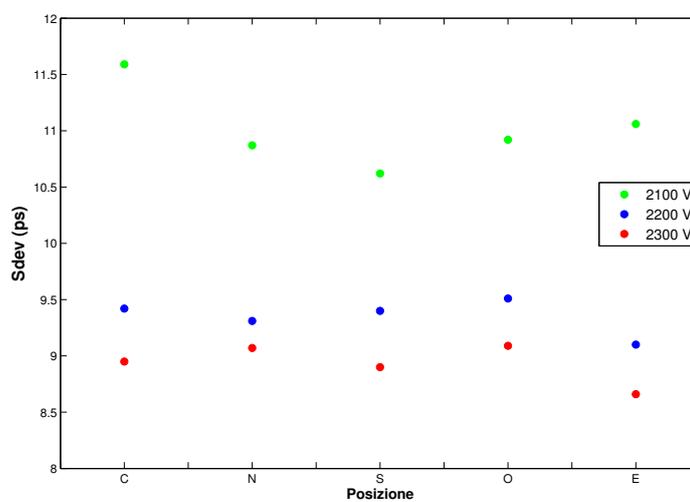


Figura 3.19: Risoluzione temporale dell'MCP-PMT a singolo anodo alle varie tensioni. In ascissa sono riportate le posizioni dei fori utilizzati (Centro, Nord, Sud, Ovest, Est).

Risoluzione temporale	2100V	2200V	2300V
ps	11.012	9.348	8.934

Tabella 3.5: Media della risoluzione temporale dell'MCP-PMT a singola cella alle tre tensioni.

3.6 *Silicon Photomultipliers*

Come ulteriore prova è stato effettuato uno studio della risoluzione temporale di due fotomoltiplicatori a silicio.



Figura 3.20: Fotografia dell'apparato sperimentale per le misure sui SiPM. Sulla destra si nota la fibra ottica del laser, inserita in un foro della maschera. Di fronte al foro è fissato il SiPM, al quale è collegata la scheda di amplificazione.

Il SiPM è stato fissato di fronte a uno dei fori della maschera in resina utilizzata per l'MCP-PMT Planacon e in corrispondenza è stata inserita la testa del laser. Il SiPM era collegato ad un amplificatore ad alta frequenza. Il ritardo è stato misurato sull'oscilloscopio utilizzando una soglia molto bassa rispetto all'ampiezza del picco, in modo da misurare il *jitter* del ritardo tra il trigger e l'accensione del SiPM, diminuendo eventuali fluttuazioni dovute ad un segnale con tempo di salita più lungo.

Risoluzione temporale	67.88V	68.38V	68.88V
ps	13.26	12.27	12.15

Tabella 3.6: Risoluzione temporale del SiPM 50P con attenuazione 35,2%.

I dati riportati in Figura 3.21 sottolineano la dipendenza della risoluzione temporale dalla attenuazione del laser.

I valori del SiPM 50P sono confrontabili con quelli dell'MCP Planacon solo per quanto riguarda la attenuazione di 35,2% (vedi Tabella 3.6) e quindi per una grande quantità di luce incidente, mentre il SiPM 100P presenta valori più alti per entrambe le attenuazioni.

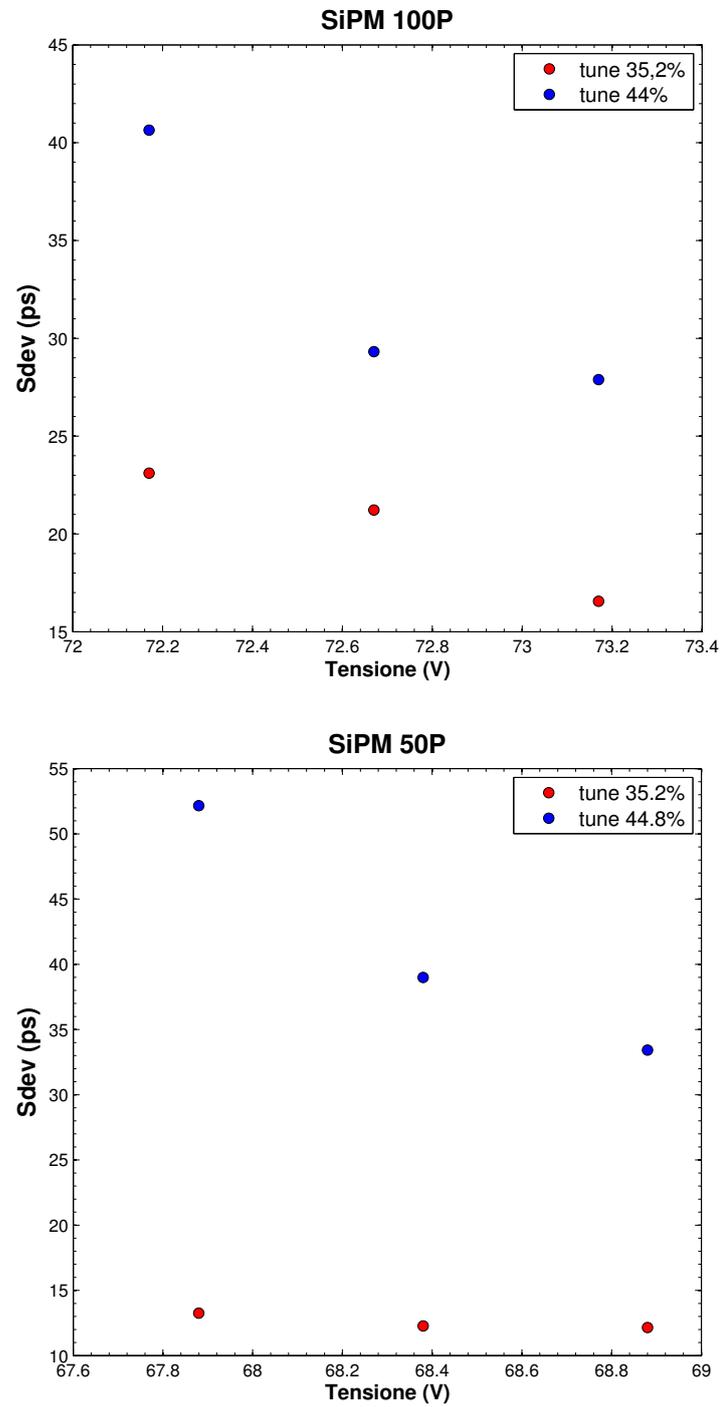


Figura 3.21: Risoluzione temporale dei due SiPM utilizzati.

Capitolo 4

Conclusioni

Dai risultati ottenuti possiamo trarre le seguenti considerazioni:

- il Planacon permette di raggiungere un'ottima risoluzione temporale, circa 12 ps;
- il difetto principale è la risoluzione spaziale che non è soddisfacente (diversi millimetri). Il problema del *cross talk* impedisce una precisa collocazione spaziale del punto di impatto dei fotoni incidenti e questo rende difficile l'utilizzo del Planacon quando è richiesta anche una buona risoluzione spaziale;
- l'MCP-PMT a singola cella possiede anch'esso ottime caratteristiche in termini di *timing* (8-10 ps) ed essendo formato da un solo anodo non presenta il problema di *cross talk* ma ovviamente non ha risoluzione spaziale;
- i SiPM offrono il vantaggio di funzionare a basso voltaggio, ma presentano una risoluzione temporale peggiore rispetto a quelle degli MCP-PMT, anche se pur sempre molto buone (12-25 ps).

Bibliografia

- [1] Engstrom, Ralph W. (1980), *Photomultiplier Handbook*, RCA.
- [2] Leo, W. R. (1994), *Techniques for Nuclear and particle Physics Experiments*, Springer, ISBN 354057280W.
- [3] T. Gys (2014), *MCP PMTs for fast photon detection*, CERN Detector Seminar.
- [4] Walter B. Morrow (1988), *Development and manufacture of the Micro Channel Plate (MCP)*.
- [5] Hamamatsu Photonics K.K. (2007), *Photomultiplier Tubes*, World Technical Writing Inc.
- [6] P. Buzhan et al. (2001), *An advanced study of silicon photomultiplier*, ICFA Instrumentation Bulletin.
- [7] Datasheet PHOTONIS USA Pennsylvania, *Photon Detector XP85112*.
- [8] Datasheet PHOTONIS USA Pennsylvania, *PP0365E*.
- [9] Datasheet Hamamatsu Photonics K. K., *MPPC (Multi Pixel Photon Counter) S12572 series*.
- [10] Datasheet Hamamatsu Photonics K. K., *MPPC (Multi-pixel Photon Counter) S10931 series*.
- [11] Datasheet Advanced Laser Diode System A.L.S. Gmbh (2013), *PiLas PiL040X*.
- [12] A. Britting et al. (2011), *Lifetime-issues of MCP-PMTs*.