



Università degli Studi di Padova
DIPARTIMENTO DI FISICA ED ASTRONOMIA
Corso di Laurea Triennale in Fisica

TESI DI LAUREA

**Studio della risposta temporale di fotomoltiplicatori di grandi
dimensioni per esperimenti sulla fisica del neutrino**

Relatore:

PROF. ALBERTO GARFAGNINI

Laureando:

ENRICO TUZZA

Correlatore:

PROF. FLAVIO DAL CORSO

ANNO ACCADEMICO
2015-2016

Sommario

Con questo lavoro si vuole caratterizzare la risposta temporale di tre fotomoltiplicatori utilizzati nei rivelatori per lo studio della fisica del neutrino; in particolare il modello XP2020 della ditta Philips, il fotomoltiplicatore da 20" R12860, prodotto dalla Hamamatsu Photonics ed infine il fototubo da 20" MCP-PMT della North Night Vision Thecnologies (NNTV). Inizialmente sono state svolte delle misure volte a quantificare la capacità dei rivelatori a discriminare gli eventi di rumore elettrico da quelli che costituiscono invece il segnale. Ciò è stato possibile tramite la misura di due parametri: la fluttuazione della baseline, e il Peak to Valley ratio ricavato dagli spettri dei segnali. Per caratterizzare la risposta temporale invece sono stati studiati il tempo di salita e discesa dell'impulso, la sua larghezza e il transit-time spread, ovvero la fluttuazione della differenza fra l'istante in cui viene emesso un fotoelettrone e l'istante in cui viene misurata la rispettiva corrente all'anodo. Per fare ciò è stato utilizzato un laser impulsato della Hamamatsu che emette impulsi molto precisi di larghezza è dell'ordine delle decine di ps.

Indice

1	Descrizione dei fotomoltiplicatori	1
1.1	Philips XP2020	1
1.2	Hamamatsu R12860-HQE	2
1.3	NNTV MCP-PMT	2
2	Descrizione dell'apparato e della strumentazione	4
3	Caratterizzazione del fotomoltiplicatore XP2020	7
3.1	Curva di "pulse counting" ed emissione di buio	7
3.2	Misura del P/V ratio ottenuta con una sorgente LED	9
3.3	Misure di timing effettuate con il laser	10
4	Calibrazione del laser PLP-10	15
5	Caratterizzazione del fotomoltiplicatore MCP-PMT	17
5.1	Emissione di buio	17
5.2	Misura del P/V ratio con il laser	18
5.3	Misure di timing effettuate con il laser	19
6	Caratterizzazione del fotomoltiplicatore R12860-HQE	21
6.1	Emissione di buio	21
6.2	Misura del P/V ratio con il laser	22
6.3	Misure di timing effettuate con il laser	23
7	Conclusioni	25

Capitolo 1

Descrizione dei fotomoltiplicatori

In questo capitolo segue una breve descrizione dei PMT in esame.

1.1 Philips XP2020

Il Philips XP2020 [1] é un fototubo di piccole dimensioni dotato una finestra in vetro borosilicato di 44 mm di diametro ed un fotocatodo bialcalino semi-trasparente sensibile alla luce con lunghezza d'onda compresa tra 270 e 650 nm, che permette di avere una sensibilità massima alla lunghezza d'onda di 400 nm ed un'efficienza quantica attorno al 25%. Il moltiplicatore di elettroni ha una geometria detta "linear focusing", che consente di ottenere ad una tensione di 2 kV un guadagno nominale di $G = 3 \times 10^7$. Nella geometria linear focusing i dinodi sono disposti in modo da focalizzare i percorsi degli elettroni all'interno del moltiplicatore, per ridurre la differenza di tempo di transito al suo interno. Lo schema del PMT è riportato in Figura 1.1.

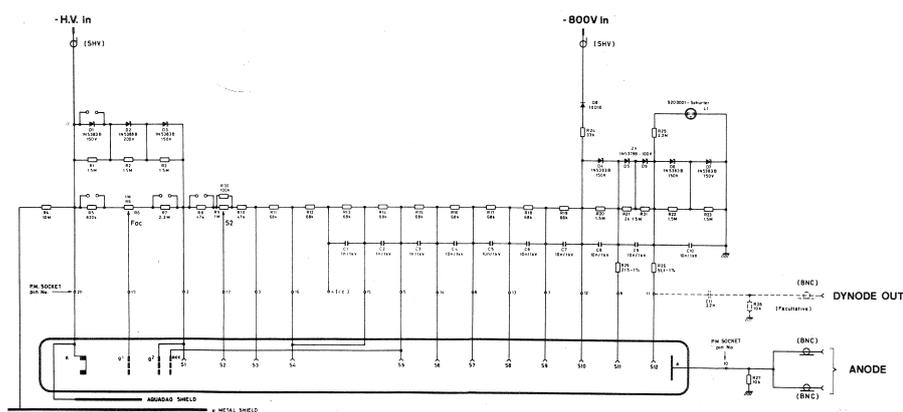


Figura 1.1: Schema del partitore di tensione del fotomoltiplicatore Philips XP2020, ove **k** indica il catodo, **a** l'anodo e **d1-d10** sono i dinodi.

1.2 Hamamatsu R12860-HQE

L'Hamamatsu R12860-HQE é un fotomoltiplicatore di grandi dimensioni che presenta una finestra di 20" con un fotocatodo bialcalino emisferico con diametro di 460 mm sensibile alla luce con lunghezza d'onda compresa tra i 300 nm e i 650 nm, con un massimo di sensibilità attorno a 400 nm per cui l'efficienza quantica risulta essere attorno al 30% [2]. La catena di amplificazione è strutturata con la geometria linear focusing, che a 2 kV presenta un guadagno nominale $G = 1 \times 10^7$. La tensione di alimentazione, come si vede in Figura 1.2, prevede il catodo a massa e l'anodo a tensione positiva. Lo schema del PMT è riportato in Figura 1.2.

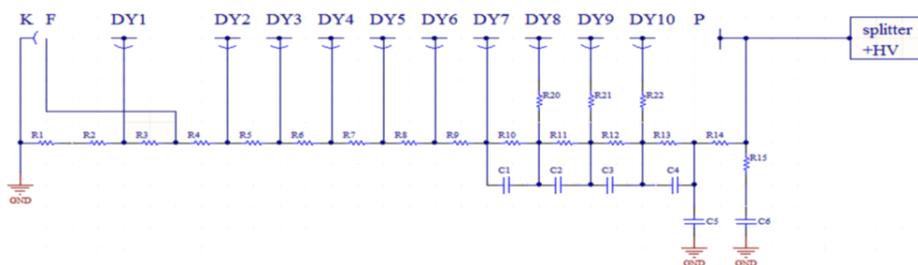


Figura 1.2: Schema del partitore di tensione del fotomoltiplicatore Hamamatsu R12860-HQE, ove **K** identifica il catodo e **DY1-DY10** indicano i dinodi.

1.3 NNTV MCP-PMT

Il dispositivo MCP-PMT é un fotomoltiplicatore di grandi dimensioni della ditta cinese NNVT (North Night Vision Technologies). Presenta una finestra in vetro a basso contenuto di potassio di 20" ed un moltiplicatore composto da un MicroChannelPlate, dove i dinodi discreti sono sostituiti da micro canali da 6-25 μm disposti su una piastra, sulle cui facce è applicata una differenza di potenziale. Le pareti dei microchannel fungono sia da partitore di tensione tra le due facce della piastra, sia da dinodi, dato l'alto coefficiente di emissione secondaria del vetro di cui sono composti. L'efficienza quantica di questo fotomoltiplicatore è leggermente più bassa rispetto all'R12860, 22.86%, mentre il guadagno è uguale, 1×10^7 . Lo schema del PMT è riportato in Figura 1.3.

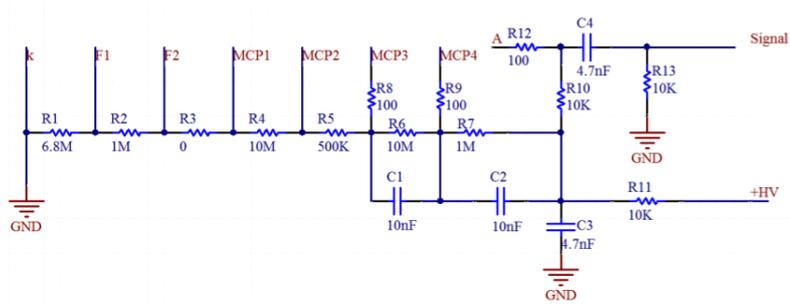


Figura 1.3: Schema del partitore di tensione del fotomoltiplicatore NNTV MCP-PMT, ove **K** indica il catodo, **A** l'anodo e **MCP1-MCP4** identificano i micro channel plates.

Capitolo 2

Descrizione dell'apparato e della strumentazione

L'apparato strumentale utilizzato per le misure (indicato in Figura 2.1) è composto da:

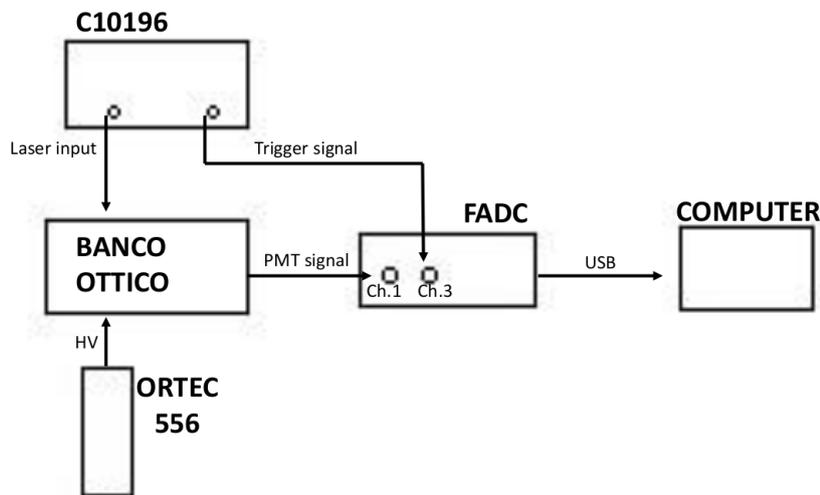


Figura 2.1: Setup sperimentale utilizzato per le misure

- un modulo NIM di alimentazione ad alta tensione ORTEC-556 [3] che consente di erogare una tensione positiva, oppure negativa, fino ad un massimo di 3 kV regolabile sia manualmente che tramite una tensione compresa tra 0 V e ± 6.9 V;
- un banco ottico, schematizzato in Figura 2.2 e descritto più nel dettaglio successivamente, composto da una sorgente laser, dei filtri ($O.D. = 3^1$) ed una fibra ottica;
- un FADC (Flash Analog to Digital Converter) modello CAEN-DT5730 [4] dotato di 8 canali di input con una frequenza di campionamento di

¹Filtro assorbente che ha la particolarità di diminuire il numero di fotoni che lo attraversano di un fattore 10^3 .

500 MS/s (un'acquisizione ogni 2 ns), range di tensione di $2V_{pp}$ e risoluzione di 14 bit, ovvero $1ADCstep = 122.07 \mu V$;

- un computer per registrare i dati raccolti dal FADC, effettuare il controllo della strumentazione e l'analisi dati.

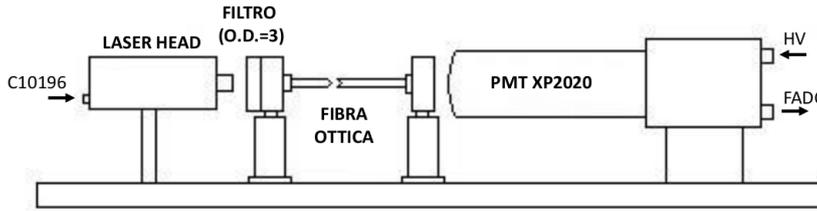


Figura 2.2: Banco ottico utilizzato per le misure. Sono rappresentati, da sinistra a destra, la testa del laser, il filtro attenuante del fascio, la fibra ottica e il fotomoltiplicatore di riferimento XP2020

Infine è stato utilizzato un oscilloscopio LECROY MS-250 [5] con una frequenza di campionamento di 1 GS/s e banda passante di 250 MHz.

La sorgente di fotoni utilizzata è un laser pulsato Hamamatsu PLP-10-040 [6] composto da un controller C10196, il quale permette di regolare sia la frequenza di emissione degli impulsi da 2 Hz a 100 MHz che la potenza mediante un apposito potenziometro con un range di scala compreso fra 5.00 e 15.00 a.u. (arbitrary unit) e fornisce un segnale di trigger TTL della durata di circa 5 ns, e da una testa a diodi M10306 che consente di avere impulsi di 52 ps alla frequenza di 403 nm con una potenza media di picco pari a 456 mW.

Si osservi che l'energia media dell'impulso può essere stimata come

$$E = P \Delta t \simeq 2.37 \times 10^{-11} \text{J} \simeq 1.48 \times 10^8 \text{eV}$$

dove P e' la potenza media del picco e Δt la durata dell'impulso. Così facendo è possibile calcolare il numero di fotoni N ; sapendo infatti che per un singolo fotone, $E = h\nu$, si ha

$$N = \frac{E}{h\nu} = \frac{E\lambda}{hc} \simeq 4.8 \times 10^7 \frac{\text{fotoni}}{\text{impulso}}.$$

Dovendo utilizzare la sorgente laser su fotomoltiplicatori, è necessario attenuare il fascio per non danneggiare i rivelatori. Si noti che non essendo stati utilizzati collimatori per interfacciare il fascio con la fibra si viene ad avere una perdita di una parte consistente del fascio. Ciò che rimane dopo tale perdita è stata stimata misurando la potenza del fascio in uscita dalla

fibra con l'apposito strumento COHERENT FieldMaxII-TO [7] ottenendo un valore di circa 160 nW. Si noti che è stata impostata la frequenza di impulsi del laser a 1 MHz. Perciò l'energia media per impulso risulta

$$E = \frac{P}{f} = \frac{160 \text{ nW}}{1 \text{ MHz}} = 160 \times 10^{-15} \text{ J}.$$

E dunque il numero medio di fotoni in uscita dalla fibra risulta

$$N = \frac{E}{h\nu} = \frac{E\lambda}{hc} \simeq \frac{160 \times 10^{-15} \text{ J}}{4.9 \times 10^{-19} \text{ J}} = 32.6 \times 10^4 \frac{\text{fotoni}}{\text{impulso}}.$$

Perciò è stato sufficiente utilizzare due filtri (O.D.=2 + O.D.=1) per attenuare il fascio di un fattore $\sim 10^3$.

Poiché il fotomoltiplicatore XP2020 é di piccole dimensioni é stato possibile montarlo direttamente sul banco ottico. I PMT Hamamatsu R12860-HQE e MCP-PMT invece essendo piú grandi sono stati inseriti in una scatola per proteggerli dalla radiazione luminosa dell'ambiente e la fibra ottica é stata portata all'interno della scatola stessa.

Capitolo 3

Caratterizzazione del fotomoltiplicatore XP2020

3.1 Curva di "pulse counting" ed emissione di buio

Le prime misure effettuate sul sistema sono state eseguite a sorgente spenta per studiare gli eventi di buio del PMT.

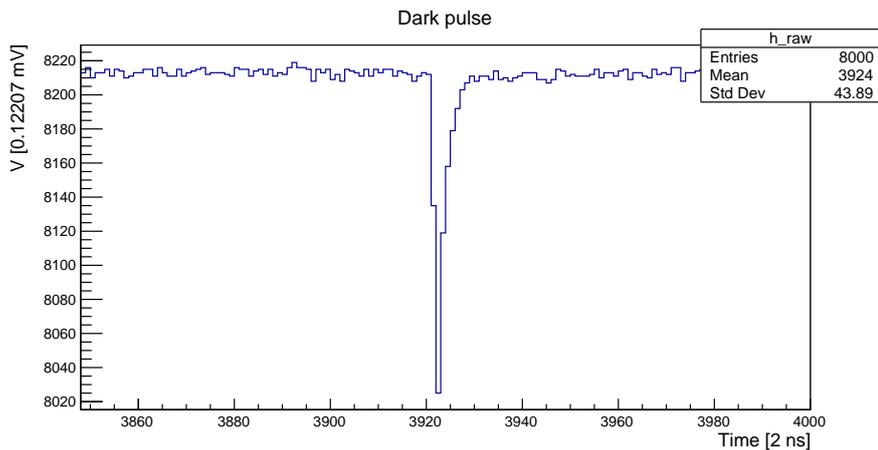


Figura 3.1: Esempio di impulso di buio per il fotomoltiplicatore XP2020.

La Figura 3.1 mostra un tipico evento di buio. In essa si distinguono un segnale di fondo continuo con un'ampiezza ridotta ed un segnale impulsivo di breve durata. La parte continua è dovuta prevalentemente al rumore elettronico generato dalla catena e dal fotomoltiplicatore, i picchi invece sono riconducibili principalmente a tre cause [8] [9]:

- il fotocatodo e i dinodi sono soggetti ad emissione termoionica, pertanto rilasciano elettroni che entrano nella catena di amplificazione e vengono raccolti all'anodo. L'emissione termoionica è descritta dalla legge di Richardson:

$$J = AT^2 \exp\left(-\frac{W}{k_B T}\right)$$

dove J è la densità di corrente, A è una costante del materiale con unità di misura $A/(m^2K^2)$, T è la temperatura assoluta e W è il lavoro di estrazione del materiale;

- i campi elettrici tra i componenti a diverso potenziale presenti nel dispositivo possono estrarre elettroni (emissione ad effetto di campo) che, urtando con le pareti o la finestra del PMT possono emettere fotoni. Se questi incidono sul catodo si ha un segnale di buio;
- un altro fattore che può contribuire alla componente impulsiva della corrente di buio è la radioattività ambientale, ovvero particelle cariche presenti nell'ambiente (es. raggi cosmici) o emesse dai materiali stessi di cui è composto il PMT.

Buona parte di queste cause dipendono quindi dalla tensione che viene applicata al PMT, pertanto è utile conoscere come varia la frequenza di eventi di buio al secondo, misurato in Hz, in funzione della tensione per poter operare nelle migliori condizioni. Per questo sono state svolte misure di conteggi di eventi di buio in funzione della tensione applicata ai dinodi del PMT. Questo tipo di curva è chiamata di "pulse counting". In particolare sono state eseguite misure di rate tra -1.93 kV e -2.90 kV. Per fare la misura il segnale in uscita dal fotomoltiplicatore è stato mandato ad un modulo discriminatore che produce un segnale TTL (tra 0 e 5 V) tutte le volte che il segnale in ingresso supera una soglia fissata. L'output del discriminatore è stato inviato in ingresso ad un modulo "scaler" CEAN-N145, in grado di contare gli impulsi all'interno di una finestra temporale prestabilita. Le misure riportate sono state effettuate con un tempo di 100 s. Il valore della tensione invece è stato invece letto dal modulo NIM di alimentazione. I risultati sono stati riportati in Figura 3.2.

Si è scelto quindi di fissare il punto di lavoro ad una tensione di 2.00 kV così da avere un rate di circa 3 Hz.

Successivamente sono stati acquisiti diversi campioni con un numero variabile di eventi compreso tra 10^3 e 2×10^4 , ciascuno con una finestra di 1 μ s attorno al picco di buio. Da questi dati è stato ricavato, per ogni campione, il valor medio della baseline tramite un fit gaussiano della baseline calcolata per ogni evento.

Si osservi che il valore della baseline dipende dai parametri d'acquisizione del FADC impostati dall'operatore, perciò non è un parametro che caratterizza il fotomoltiplicatore ma può cambiare da un campione ad un altro. La $\sigma_{baseline}$ invece rimane costante a patto che si utilizza lo stesso setup e ci fornisce una misura della stabilità del segnale. Essa è stata calcolata, per ogni campione tramite fit gaussiano delle $\sigma_{baseline,i}$ calcolate come errore delle baseline per ogni singolo evento. È poi stata fatta una media ponderata dei valori ottenuti trovando che $\sigma_{baseline} = (0.300 \pm 0.008)$ mV.

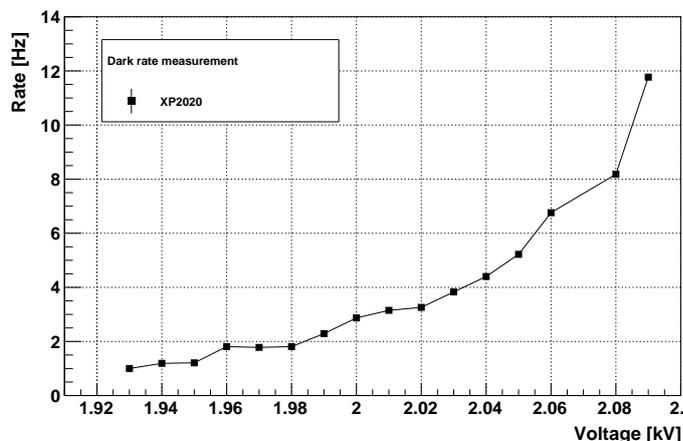


Figura 3.2: Misura del rate di eventi di buio in funzione del modulo della tensione applicata al PMT XP2020

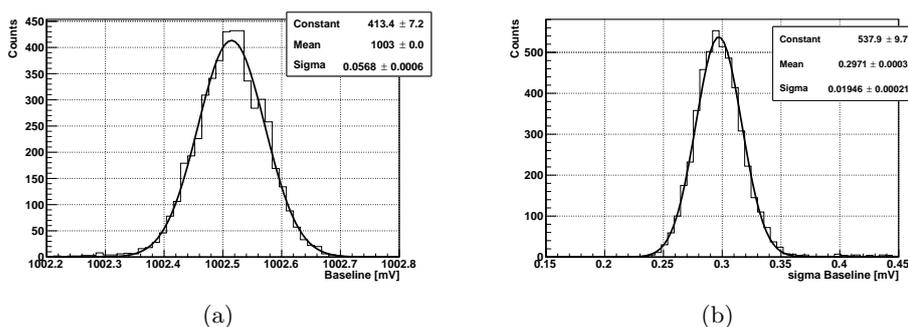


Figura 3.3: Esempi di istogramma rispettivamente, della baseline (a) e della $\sigma_{baseline}$ (b) di un campione di 5000 eventi per il PMT XP2020.

3.2 Misura del P/V ratio ottenuta con una sorgente LED

Per studiare la risposta del PMT a sollecitazioni luminose si è illuminato il fotocatodo direttamente con un LED, modello FNL-U300B22WCSL [11], avente lunghezza d'onda dominante $\lambda_d = 460$ nm con semplice circuito annesso e la cui luce viene collimata da una guida in plastica che termina in un foro di 1 mm di diametro.

Il LED è stato alimentato da un generatore di funzioni HP 8110A, utilizzato per produrre impulsi alla frequenza nominale di 10 kHz, con ampiezza fissata sul generatore $V_{pulse} = 6.5$ V e durata temporale nominale $t_{pulse} = 61$ ns. Il generatore fornisce anche un segnale di trigger in modo da acquisire in sincronia con la produzione di fotoni. Tale acquisizione è stata

fatta con l'oscilloscopio LECROY MS-250.

Con il setup descritto sopra sono stati acquisiti circa 10^6 eventi da cui si è potuto ricavare un istogramma con le ampiezze, Figura 3.4.

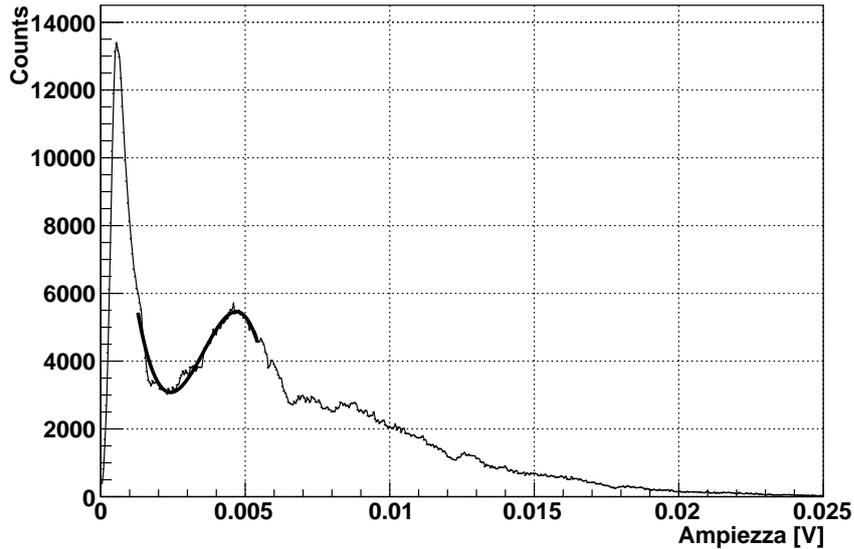


Figura 3.4: Istogramma delle ampiezze per i fotoelettroni del LED su cui è stato fatto un fit con un polinomio di terzo grado attorno al massimo e minimi relativi.

Sull'istogramma si è poi eseguito un fit con un polinomio di terzo grado attorno alla regione interessata che ha permesso di individuare il massimo, $(546 \pm 8) \times 10^1$, e il minimo, $(308 \pm 6) \times 10^1$, relativi della distribuzione per valutare il Peak to Valley ratio, in particolare si è trovato $P/V = (1.77 \pm 0.04)$.

3.3 Misure di timing effettuate con il laser

Per eseguire le misure che seguono si è utilizzato il laser PLP-10 come sorgente luminosa. La frequenza di emissione del fascio di fotoni è stata impostata a 1 kHz.

Parlando di risposta temporale si fa riferimento ad una serie di grandezze che permettono di definire il comportamento del fotomoltiplicatore. Questo studio è fondamentale nell'ambito degli esperimenti sulla fisica dei neutrini perchè un'adeguata conoscenza della risposta temporale dei PMT permetterà di ricostruire con una maggiore precisione la posizione in cui è avvenuta l'interazione. In particolare sono stati studiati i seguenti parametri:

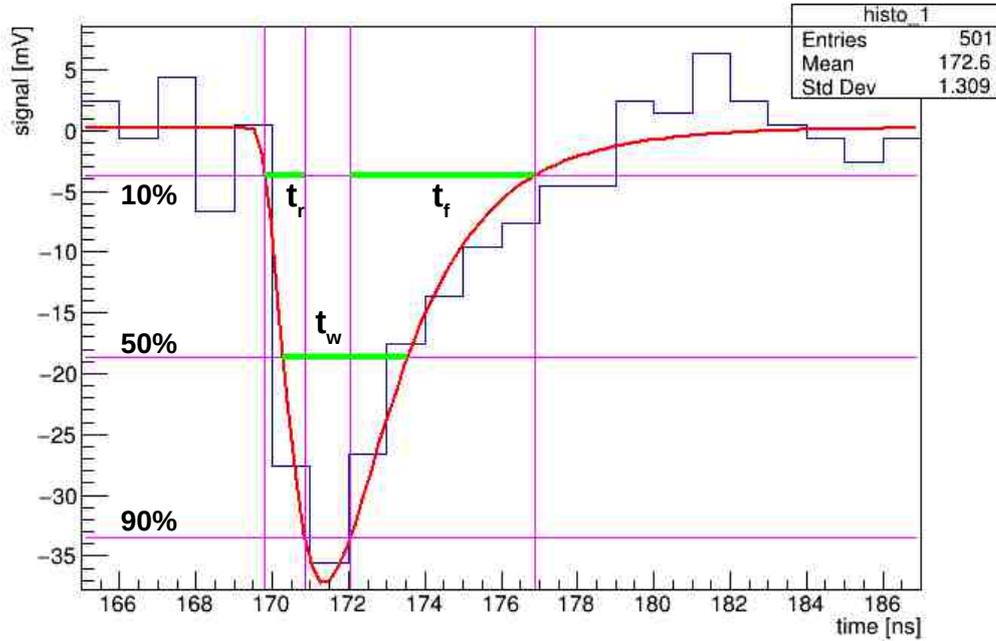


Figura 3.5: Esempio di un evento interpolato con una funzione log-normale

- *Rise time* (o tempo di salita), t_r (si veda Figura 3.5), è definito come il tempo richiesto al segnale per andare dal 10% al 90% dell'ampiezza finale del picco in risposta ad un impulso luminoso a forma di delta. Può essere definito anche un rise time per una impulso a gradino θ ; in questo caso si distingue tra $t_{r,\delta}$ e $t_{r,\theta}$;
- *Fall time* (o tempo di discesa), t_f (si veda Figura 3.5), è definito come il tempo che il segnale impiega per andare dal 90% al 10% dell'ampiezza del picco una volta superato il massimo. Si osservi che se il segnale fosse rappresentabile da una funzione delta il rise time e il fall time risulterebbero uguali. Essendo però il segnale di uscita del PMT asimmetrico ci si aspetta che $t_f > t_r$.
- *Response pulse width* (ovvero larghezza dell'impulso), t_w (si veda Figura 3.5), è definito come la larghezza a metà altezza (FWHM) del segnale in risposta ad un impulso luminoso a forma di delta.
- *Transit-time differences* (o tempo di transizione), TTD , è definito come la differenza tra l'istante in cui il fotoelettrone viene emesso dal fotocatodo e quello in cui la corrente di elettroni secondari prodotti dalla catena di amplificazione arrivano all'anodo. In questo caso

specifico si è andati a misurare la differenza tra l'inizio del segnale di trigger del laser e la posizione del rispettivo picco.

- *Transit-time spread, TTS*, è definito come la fluttuazione del Transit-time osservate quando uno stesso impulso luminoso colpisce lo stesso punto del fotocatodo. Nel caso specifico non potendo controllare in maniera così precisa la posizione di incidenza dei fotoni il *TTS* è stato preso come dispersione dei valori calcolati di Transit-time differences.

Tutti i parametri temporali risultano difficili da misurare in quanto confrontabili con il clock del FADC, perciò si è utilizzato l'oscilloscopio LE-CROY MS-250 che, essendo più rapido nel campionamento ha permesso di eseguire misure più accurate. Lo strumento consente di impostare delle funzioni, tracciare istogrammi e di salvare quindi direttamente le grandezze cercate. I valori di rise time, fall time e response pulse width sono stati calcolati come tramite fit gaussiano dei rispettivi istogrammi per ogni campione come si può vedere dalla Figura 3.6(a), dalla Figura 3.6(b) e dalla Figura 3.6(c).

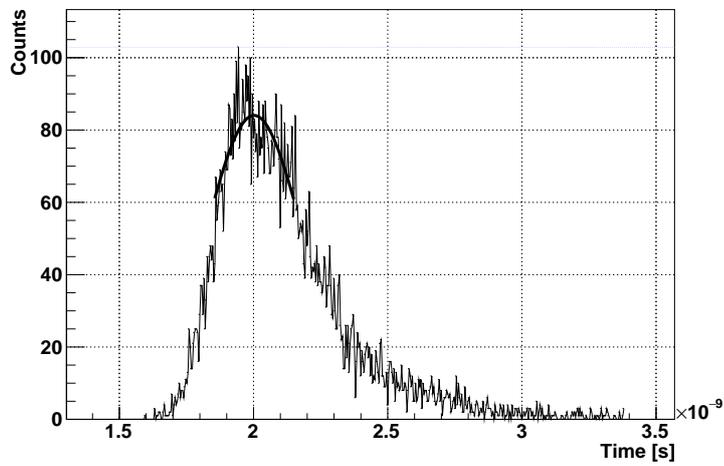
I risultati di tale misura sono riportati in Tabella 3.1.

<i>Rise time</i>	<i>Fall time</i>	<i>Response pulse width</i>
(2.0 ± 0.2) ns	(7.4 ± 0.4) ns	(3.4 ± 0.1) ns

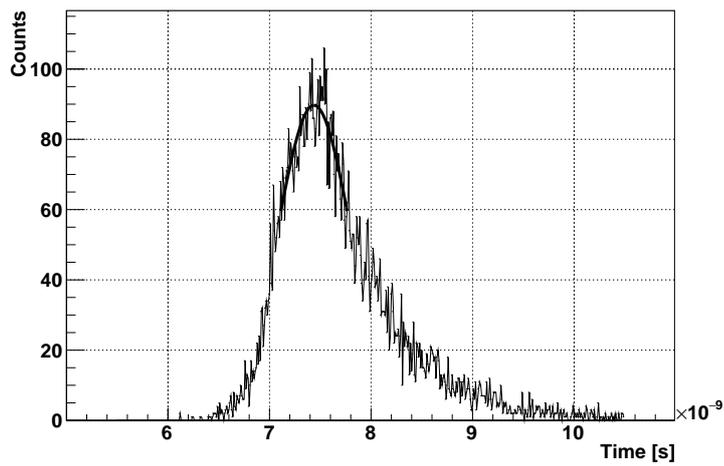
Tabella 3.1: Tempo di salita e di discesa e larghezza dell'impulso per il PMT XP2020

La distribuzione del Transit-time è riportata in Figura 3.7.

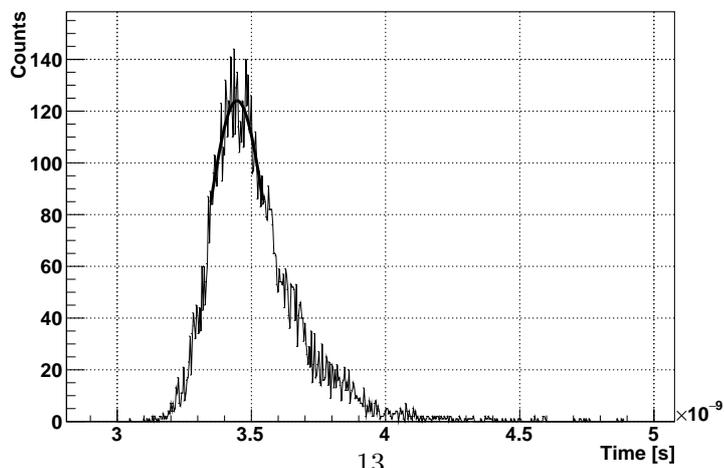
Eseguendo sul grafico un fit gaussiano si è potuto ricavare il Transit-time spread, ricavato come σ della distribuzione, ovvero $TTS = (0.203 \pm 0.001)$ ns.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.6: Sono riportate le distribuzioni del rise time (a), del fall time (b) e del response pulse width (c) per il fotomoltiplicatore XP2020.

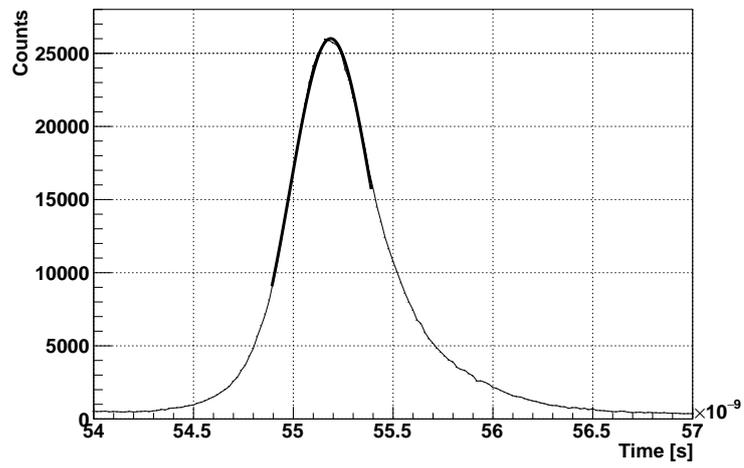


Figura 3.7: Distribuzione del Transit-time differences misurato per gli eventi raccolti con il PMT XP2020.

Capitolo 4

Calibrazione del laser PLP-10

Prima di iniziare le misure sui grandi fototubi utilizzando il laser, è stata effettuata una calibrazione relativa del laser con il fotomoltiplicatore XP2020. L'unico parametro della sorgente modificabile dall'utente è la potenza del fascio, tramite un potenziometro con scala tra 6 e 15 a.u..

Per ogni valore intero della potenza sono stati acquisiti 10^5 eventi è stata calcolata l'ampiezza per ogni evento e poi si è fatto un istogramma di tali stime. Sono poi stati ricavati dagli istogrammi la posizione del massimo e la larghezza a metà altezza (FWHM) dell'istogramma delle ampiezze, ottenendo i valori riportati nella Tabella 4.1

Potenza del laser [a.u.]	Ampiezza [mV]	FWHM [mV]
15.0	22	21
14.0	19	18
13.0	15	15
12.0	13	15
11.0	9	13
10.0	4	10
09.0	4	6
08.0	4	6
07.0	3	2
06.0	3	1

Tabella 4.1: Valori misurati della posizione del massimo, del numero di conteggi normalizzato e della FWHM in funzione del valore di potenza indicato dal potenziometro.

Tracciando il grafico di ogni grandezza in funzione del valore del potenziometro si è osservato che:

- l'andamento della larghezza a metà altezza è lineare, come si evince dalla Figura 4.1, ed eseguendo un fit con $FWHM = m \cdot (\text{valore}) + q$ si trova che $m = (2.2 \pm 0.1) \text{ mV}$ e $q = (-13 \pm 1) \text{ mV}$;
- infine il grafico del valore dell'ampiezza corrispondente al massimo del relativo istogramma, Figura 4.2, non mostra una relazione costante fra

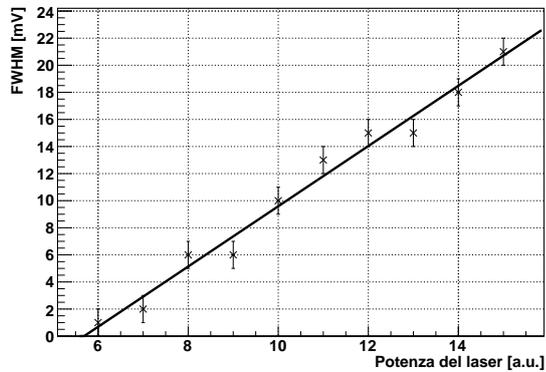


Figura 4.1: Andamento dell'ampiezza a metà altezza in funzione del valore della potenza del laser.

i due parametri, sembrano infatti esserci due zone di linearità separate per una potenza inferiore a 10 a.u. o superiore. La prima, quasi costante, viene ben interpolata da una retta del tipo $y = 0.3 \cdot x + 1.2$ mentre la seconda presenta un andamento del tipo $y = 3.5 \cdot x - 30$. Sembra dunque che per un valore della potenza minore di 10 a.u. si abbia una saturazione dell'ampiezza del segnale.

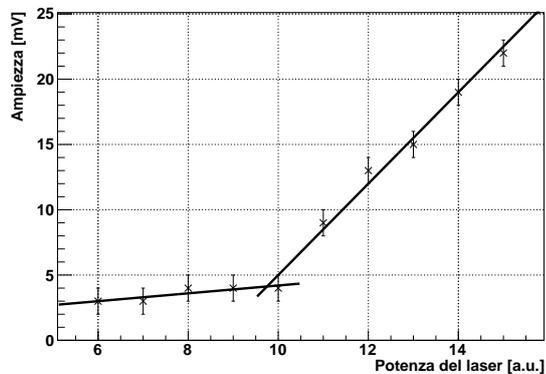


Figura 4.2: Andamento del valore dell'ampiezza del massimo in funzione del valore della potenza del laser.

Capitolo 5

Caratterizzazione del fotomoltiplicatore MCP-PMT

Come già descritto nel Capitolo 2, il fotomoltiplicatore MCP-PMT è di grandi dimensioni pertanto è stato inserito in una scatola esterna al banco ottico.

5.1 Emissione di buio

Per il fotomoltiplicatore MCP-PMT non è stata costruita una curva di pulse counting perchè già ottenuta con studi precedenti. Si è pertanto deciso di impostare la tensione di alimentazione del fototubo a circa 1.51 kV con un rate di singola attorno a 10^2 Hz. Come per il PMT XP2020 prima di iniziare

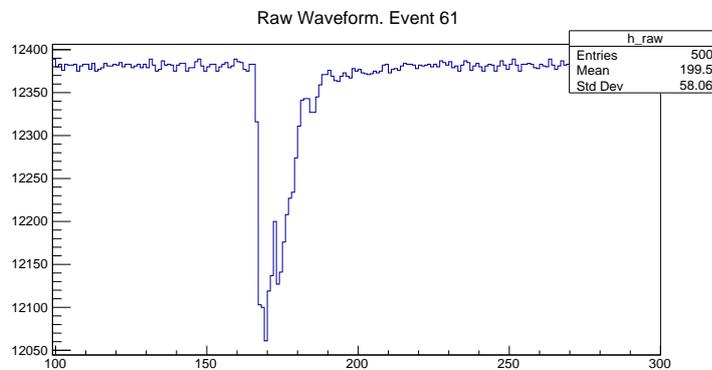


Figura 5.1: Tipico esempio di un evento di buio per il fototubo MCP-PMT acquisito con il FACD DT5730 impostando il trigger sul segnale stesso.

la caratterizzazione della risposta temporale si è andati a studiare la stabilità della baseline andando a campionare gli eventi di buio (un esempio ne è la Figura 5.1). Pertanto sono stati acquisiti 10^5 eventi con il digitizer DT-5730 da cui si è ricavata la distribuzione delle baseline e delle $\sigma_{baseline}$ calcolate per ogni evento (si veda la Figura 5.2).

Eseguendo su entrambe le distribuzioni un fit gaussiano si è ottenuto un valore per la $\sigma_{baseline} = (0.42 \pm 0.02)$ mV. Si ricorda che la baseline

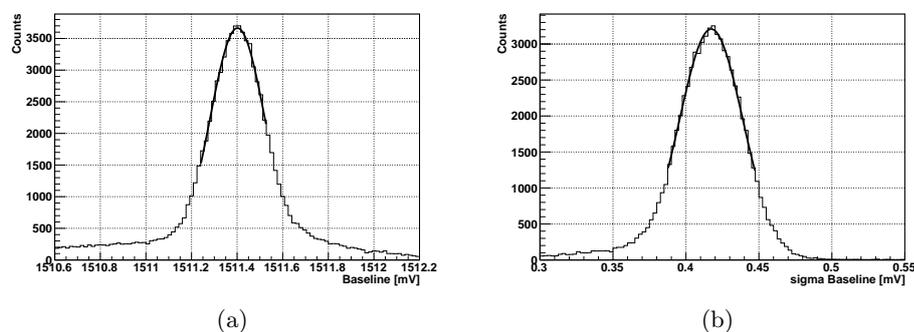


Figura 5.2: Esempi di istogramma delle distribuzione della baseline (a) e della $\sigma_{baseline}$ (b) per un campione di 100000 eventi.

dipende dai valori impostati per l'acquisizione con il digitizer, ciò che invece è indipendente dal sistema di acquisizione, e quindi rilevante è la $\sigma_{baseline}$.

5.2 Misura del P/V ratio con il laser

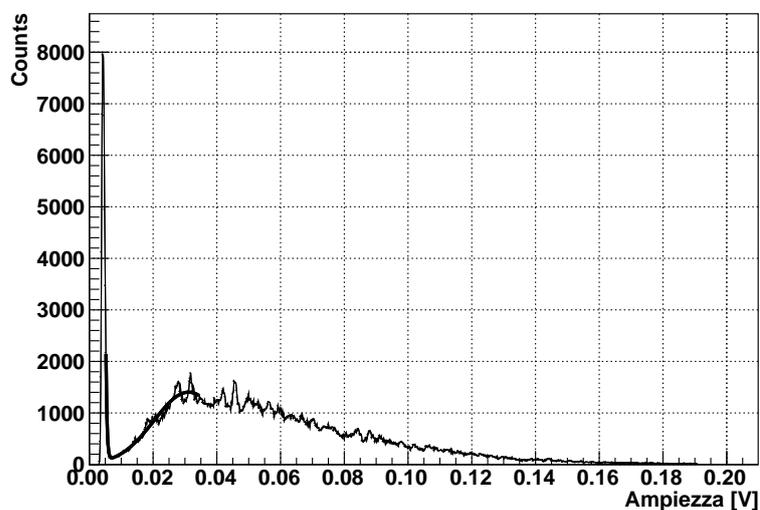


Figura 5.3: Distribuzione delle ampiezze da cui è stato ricavato il Peak to Valley ratio per l'MCP-PMT

Per misurare le ampiezze di ogni evento si è utilizzato l'oscilloscopio LECROY MS-250 impulsando con il laser PLP-10 a ad una frequenza di 1kHz ed una potenza di 10 a.u. È quindi stato acquisito un campione di 10^6 eventi per ricavare la distribuzione riportata nella Figura 5.3.

Su tale istogramma è stato eseguito un fit utilizzando come funzione una gaussiana sommata ad un esponenziale e si è ottenuto un valore del Peak to Valley ratio pari a $P/V = (11 \pm 2)$.

5.3 Misure di timing effettuate con il laser

Le misure che seguono, acquisite tramite l'oscilloscopio LECROY MS-250, sono state effettuate irraggiando il fotomoltiplicatore con il laser PLP-10 impostando la potenza a 10 a.u. e la frequenza di impulsi ad 1 kHz. In questo modo è stato possibile ricavare anche per il MCP-PMT gli stessi parametri, che caratterizzano la risposta temporale di un PMT, studiati per l'XP2020 nella Sezione 3.3.

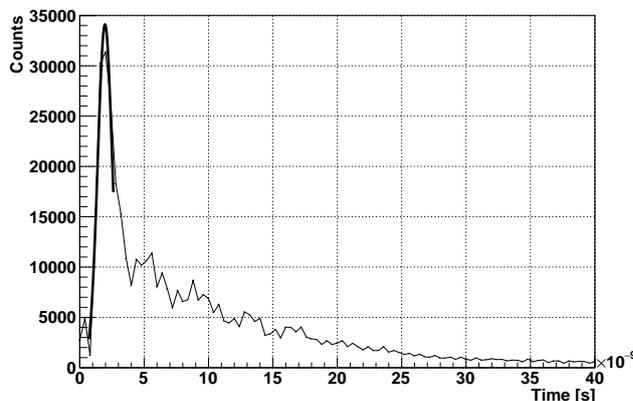


Figura 5.4: Distribuzione del rise time misurato con l'oscilloscopio

L'MCP-PMT presenta un rise time molto breve, infatti da un campione di circa 5×10^5 eventi si è ricavata la distribuzione del tempo di salita riportata in Figura 5.4. Nel grafico si osserva un picco dominante a circa 2 ns e poi una lunga coda dovuta ad eventi in cui sono stati raccolti più fotoelettroni in rapida successione, questo porta ad avere in uscita dall'anodo impulsi più lunghi. Fittando il picco principale con una gaussiana si trova che il rise time riportato in Tabella 5.1. Anche il fall time è stato ricavato tramite fit gaussiano dalla Figura 5.5. Si osserva però che è presente un fondo con un andamento esponenziale, rappresentabile tramite la funzione $BG(x) = e^{7.7-3x}$, ed un secondo picco, molto più piccolo di quello principale. Il valore misurato del tempo di discesa è riportato in Tabella 5.1.

<i>Rise time</i> [ns]	<i>Fall time</i> [ns]	<i>Response pulse width</i> [ns]
(2.0 ± 0.6)	(25 ± 2)	—

Tabella 5.1: Valori del rise time, fall time e della larghezza dell'impulso ricavati per il modello MCP-PMT.

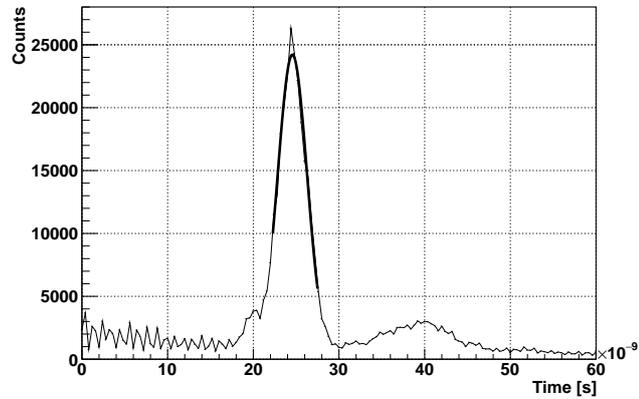


Figura 5.5: Distribuzione del fall time acquisiti con l'oscilloscopio LECROY MS-250

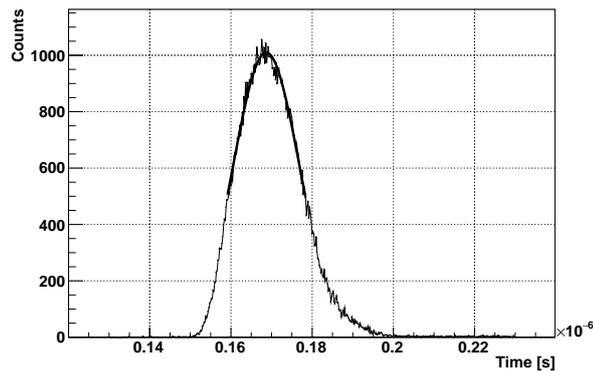


Figura 5.6: Distribuzione del transit-time di tutti gli eventi del campione su cui è stato eseguito un fit gaussiano

Il transit-time spread è stato ricavato da un campione di eventi ridotto (circa 10^4) di cui è riportata la distribuzione del transit-time nella Figura 5.6. Osservando l'istogramma si nota che la distribuzione non è del tutto simmetrica ma un fit gaussiano attorno al centroide permette di stimare comunque in buona approssimazione la grandezza cercata. Pertanto con tale operazione si è ottenuto $TTS = (8.12 \pm 0.07)$ ns.

Capitolo 6

Caratterizzazione del fotomoltiplicatore R12860-HQE

6.1 Emissione di buio

Anche per il fotomoltiplicatore R12860-HQE la prima cosa fatta è stata quella di osservare gli eventi di buio, di cui si è riportato un esempio in Figura 6.1.

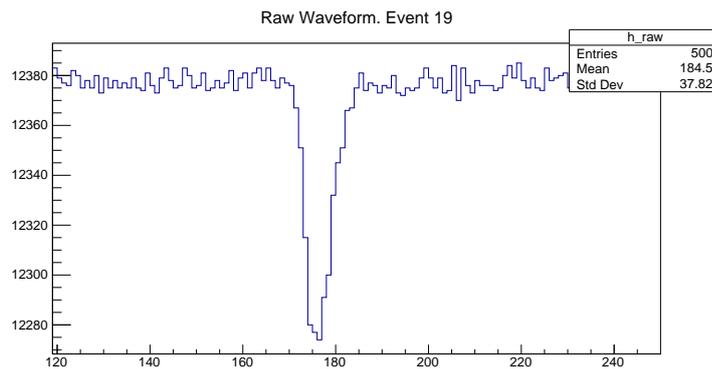


Figura 6.1: Tipico esempio di un evento di buio per l'R12860 acquisito con il FADC DT5730 impostando il trigger sul segnale stesso.

Anche per il fotomoltiplicatore R12860 non è stata studiata la curva di pulse counting ma si è fatto riferimento a studi precedenti per essa. Si è quindi scelto di procedere alle misure utilizzando una tensione di 2 kV ed ottenendo un rate di singola maggiore di 10^3 Hz. Lo studio della baseline è stato svolto acquisendo 10^5 eventi utilizzando il FADC come spiegato nel Capitolo 2. La baseline e la $\sigma_{baseline}$ sono state calcolate per ciascuno di essi e riportate nel rispettivo istogramma in Figura 6.2 da cui, tramite un fit gaussiano si è trovato che $\sigma_{baseline} = (0.39 \pm 0.02)$ mV.

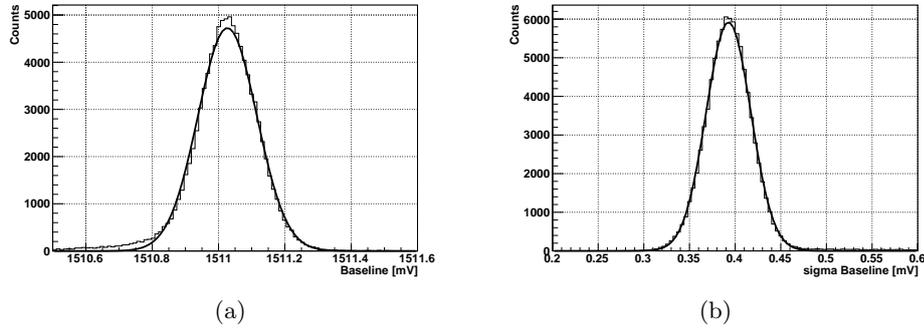


Figura 6.2: Esempi di istogramma delle distribuzione della baseline (a) e della $\sigma_{baseline}$ (b) per un campione di 100000 eventi raccolti con il PMT R12860-HQE.

6.2 Misura del P/V ratio con il laser

Per tutte le misure che seguono la frequenza dei picchi emessi dal laser è stata impostata a 1 kHz e la potenza a 10 a.u. così da poter confrontare i due fototubi di grandi dimensioni a parità di sorgente luminosa.

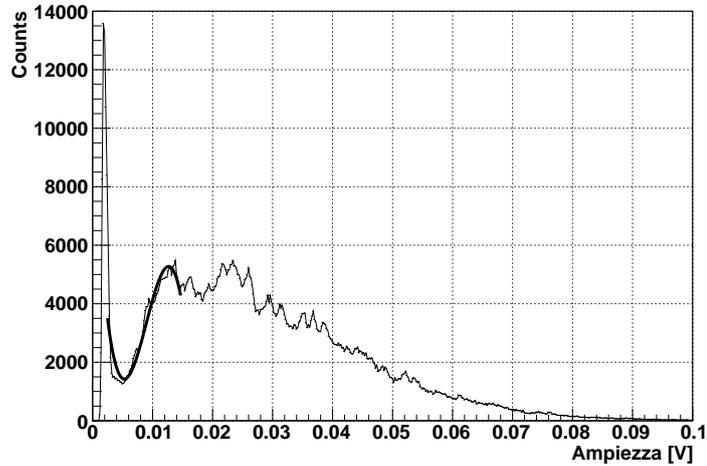


Figura 6.3: Distribuzione delle ampiezze da cui è stato ricavato il Peak to Valley ratio per l'R12860 tramite un fit con un polinomio di terzo grado limitato alla zona interessata.

Per calcolare il Peak to Valley ratio si è proceduto come per il fotomoltiplicatore MCP-PMT, ovvero è stato acquisito un campione di 10^6 e tramite l'oscilloscopio LECROY MS-250 sono state misurate le ampiezze per ciascun

evento. Riportando tali valori in un istogramma si ottiene la distribuzione presente nella Figura 6.3.

Eseguendo su tale istogramma un fit come mostrato nella Sezione 3.2 si è ottenuto un valore del Peak to Valley ratio pari a $P/V = (3.7 \pm 0.1)$.

6.3 Misure di timing effettuate con il laser

La risposta temporale del fotomoltiplicatore R12860-HQE è stata studiata utilizzando l'oscilloscopio LECROY MS-250 con cui sono stati misurati i vari parametri raccogliendo un campione di 10^6 eventi, fatta eccezione per il transit-time dove si ha un ordine di grandezza in meno.

Il rise time è stato ottenuto eseguendo un fit gaussiano limitando il range su cui svolgere tale operazione per escludere la coda presente a destra del picco, come si può vedere in Figura 6.4(a). Le stesse operazioni sono state compiute per la distribuzione del fall time (Figura 6.4(b)) e quella della larghezza dell'impulso (Figura 6.4(c)).

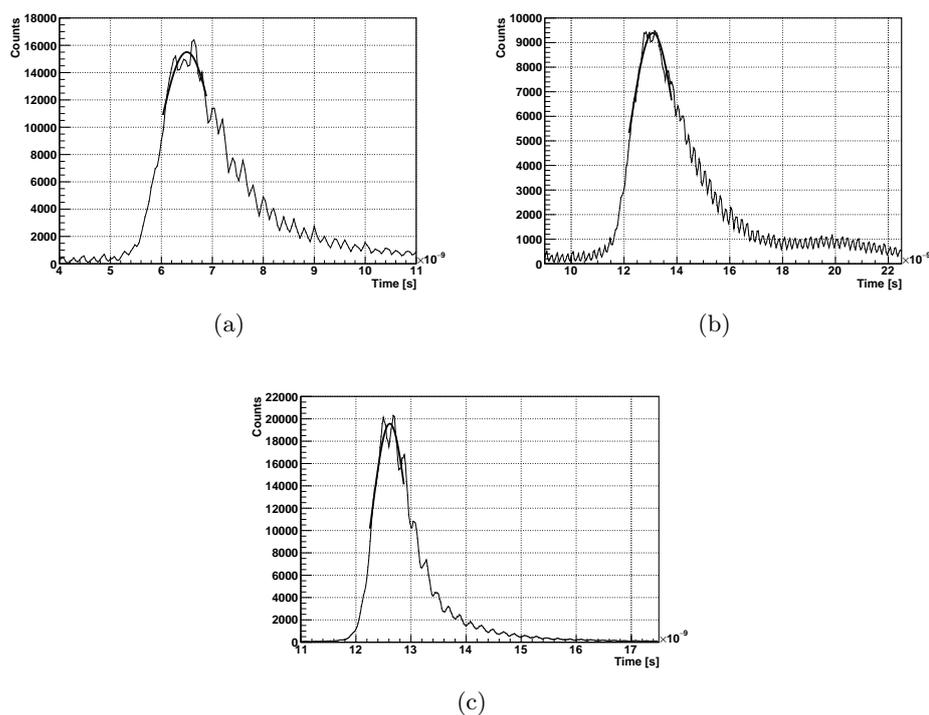


Figura 6.4: Sono riportati i grafici delle distribuzioni del rise time (a), del fall time (b) e del response pulse width (c) del campione di un milione eventi.

I risultati ottenuti dai fit appena descritti sono riportati in Tabella 6.1.

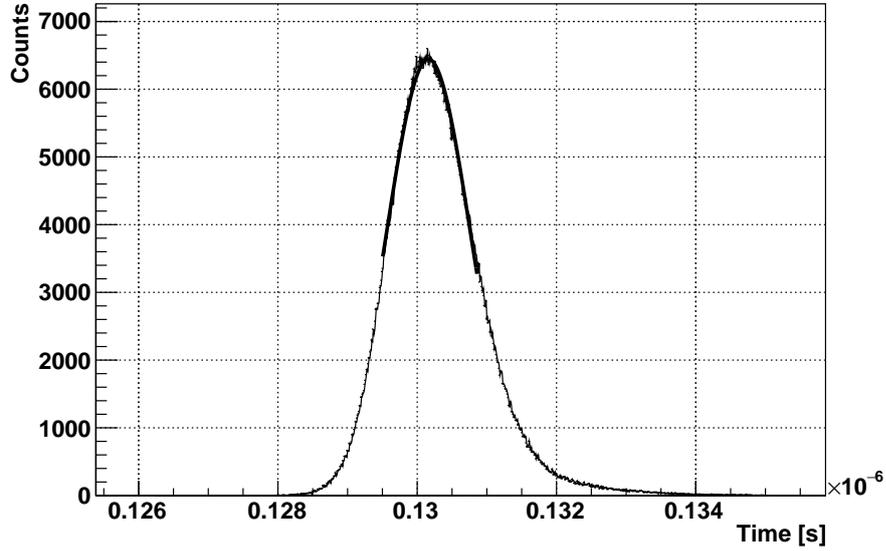


Figura 6.5: Distribuzione del transit-time misurata per un campione di 100000 eventi.

<i>Rise time</i> [ns]	<i>Fall time</i> [ns]	<i>Response pulse width</i> [ns]
(6.5 ± 0.5)	(13.1 ± 0.8)	(12.6 ± 0.3)

Tabella 6.1: Valori del rise time, fall time e della larghezza dell'impulso ricavati per l'Hamamatsu R12860-HQE.

La distribuzione del transit-time trovata per il fotomoltiplicatore R12860 (Figura 6.5) presenta lo stesso problema di asimmetria già osservato studiando l'MCP-PMT nel capitolo precedente, ma anche in questo caso il fit gaussiano ci consente di identificare il centroide e la sua dispersione con una buona approssimazione.

Il risultato del fit ha portato a trovare $TTS = (0.598 \pm 0.003)$ ns.

Capitolo 7

Conclusioni

Nella presente tesi si sono analizzati i segnali prodotti dai fotomoltiplicatori di grandi dimensioni R12860-HQE della Hamamatsu Photonics e MCP-PMT dell'azienda NNTV, e il fotomoltiplicatore di piccole dimensioni XP2020 prodotto dalla Philips allo scopo di poterli utilizzare in esperimenti sulla fisica del neutrino. Per tutti i fotomoltiplicatori sono state studiate le fluttuazioni della baseline per eventi di buio, lo spettro, ricavando per ciascuno il valore del Peak to Valley ratio, e i parametri che caratterizzano la risposta temporale dei fototubi a seguito di segnali luminosi impulsivi.

Dallo studio degli eventi di buio sono state ricavate le fluttuazioni della componente continua della dark current per ciascun fotomoltiplicatore, riportati in Tabella 7.1, mostrando che è possibile discriminare la componente impulsiva dovuta ad eventuali segnali da quella continua della dark current.

<i>XP2020</i>	<i>MCP-PMT</i>	<i>R12860-HQE</i>
$(0.300 \pm 0.008) \text{ mV}$	$(0.42 \pm 0.02) \text{ mV}$	$(0.39 \pm 0.02) \text{ mV}$

Tabella 7.1: Risultati della fluttuazione, $\sigma_{baseline}$, della baseline per ogni fotomoltiplicatore.

Lo spettro del PMT XP2020 è stato ricavato impulsando con la sorgente LED (Figura 3.4) mentre per i fotomoltiplicatori di grandi dimensioni si è utilizzato il laser (Figura 5.3 e Figura 6.3). Come si può notare essi non rappresentano spettri di singolo elettrone ma la dimostrazione che, con l'apparato utilizzato, non si è ancora riusciti ad ottenere il singolo elettrone incidente sul fotocatodo. Si è dunque calcolato da tali spettri il Peak to Valley ratio, che quantifica la capacità di distinguere il rumore elettronico dagli impulsi di segnale del PMT, ottenendo i seguenti valori

$$\begin{aligned}
 P/V_{XP2020}^{460 \text{ nm}} &= 1.77 \pm 0.04 \\
 P/V_{MCP-PMT}^{403 \text{ nm}} &= 11 \pm 2 \\
 P/V_{R12860-HQE}^{403 \text{ nm}} &= 3.7 \pm 0.1
 \end{aligned}$$

dove si è riportata in apice la lunghezza d'onda della sorgente utilizzata e in pedice il modello del PMT. Si osserva che il fotomoltiplicatore MCP-PMT presenta un P/V maggiore rispetto al modello R12860-HQE. Si ricorda che

i questi valori non sono stati ricavati utilizzando funzioni che riproducono esattamente l'andamento dei rispettivi grafici ma sono approssimazioni limitate alla regione interessata.

La risposta temporale dei fotomoltiplicatori è stata caratterizzata misurando il rise time (t_r), il fall time (t_f), la larghezza dell'impulso (t_w) e il transit-time spread (TTS). Tali valori sono riportati in Tabella 7.2.

	<i>XP2020</i>	<i>MCP-PMT</i>	<i>R12860-HQE</i>
t_r	(2.0 ± 0.2)	(2.0 ± 0.6)	(6.5 ± 0.5)
t_f	(7.4 ± 0.4)	(25 ± 2)	(13.0 ± 0.7)
t_w	(3.4 ± 0.1)	–	(12.5 ± 0.3)
TTS	(0.203 ± 0.001)	(8.12 ± 0.07)	(0.546 ± 0.003)

Tabella 7.2: Valori riassuntivi dei parametri, in ns, che caratterizzano la risposta temporale per ciascun fotomoltiplicatore.

Inoltre è stato possibile studiare la linearità fra l'unico parametro modificabile dall'utente della sorgente laser, la potenza, con grandezze ricavabili dallo spettro delle ampiezze dei segnali di output dei fotomoltiplicatori che possono essere legate al numero di fotoni incidenti sul fotocatodo.

Bibliografia

- [1] Philips XP2020 Datasheet:
https://wwwusers.ts.infn.it/~rui/univ/Acquisizione_Dati/Manuals/Philips%20XP2020.pdf.
- [2] Xiang-Cui Lei et al, Chinese Phys. C 40 (2016) *Evaluation of new large area PMT with high quantum efficiency*, Chinese Physics C 40 (2016), 026002
- [3] ORTEC-556 Datasheet:
<http://www.ortec-online.com/searchresults.aspx?Keywords=ortec%20556>.
- [4] Sito CAEN:
<http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?parent=14&idmod=757>.
- [5] LECROY MS-Series Datasheet:
http://cdn.teledynelecroy.com/files/pdf/lecroy_ms_series_datasheet.pdf
- [6] Hamamatsu PLP-10 Datasheet:
http://www.hamamatsu.com.cn/UserFiles/DownFile/Product/SOCS0003E13_PLP-10.pdf
- [7] Sito COHERENT:
<https://www.coherent.com/measurement-control/measurement/fieldmaxii-to>
- [8] Photonis, *PHOTOMULTIPLIER TUBES - principes & applications*, Brive, France, 2002.
- [9] Hamamatsu Photonics, *PHOTOMULTIPLIER TUBES - principes & applications*, 2007.
- [10] CAEN-N145 Datasheet:
http://www.tunl.duke.edu/documents/public/electronics/CAEN/caen_n145.pdf.
- [11] Led FNL-U300B22WCSL Datasheet:
http://www.farnell.com/datasheets/1508743.pdf?_ga=1.70993808.1623913478.1479751605