

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento di Fisica e Astronomia “Galileo Galilei”

Corso di Laurea in Fisica

Tesi di Laurea

Studio del sistema di monitoring della calibrazione del
rivelatore iTOP dell’esperimento Belle II

Relatore

Prof. Roberto Stroili

Correlatore

Dott. Flavio Dal Corso

Laureando

Benedetta Santoro

Anno Accademico 2018/2019

Indice

Prefazione	v	
1	Introduzione	1
1.1	Belle II	1
1.2	Rivelatore iTOP	1
2	Apparato strumentale	3
3	Calibrazione	4
3.1	Determinazione dei fattori di conversione per la tensione	4
3.2	Verifica della lettura della tensione di bias	7
3.3	Dipendenza tensione-corrente e prima stima della tensione di breakdown	9
3.4	Determinazione delle curve di calibrazione della temperatura	9
4	Monitoring del funzionamento del laser	13
4.1	Stima della tensione di breakdown	13
4.2	Andamento del guadagno in funzione della temperatura	14
4.3	Andamento del tempo di arrivo dei fotoni in funzione della temperatura	16
4.4	Test di stabilità	17
5	Conclusioni	22
6	Appendice	23
6.1	Calcolo degli errori	23
6.2	Fit fotopicchi	23

Prefazione

L'obiettivo di questa tesi è lo studio del sistema di calibrazione del rivelatore iTOP utilizzato, all'interno del detector Belle II, per l'identificazione delle particelle cariche emesse dal decadimento dei mesoni B . I canali dei fotomoltiplicatori presenti su iTOP (si veda la sezione 1) vanno illuminati con un laser ad alta precisione temporale, le cui prestazioni vanno monitorate al variare delle condizioni ambientali. Per la calibrazione è stato messo a punto un circuito che prevede l'utilizzo di due Silicon Photomultiplier (SiPM), illustrato in sezione 2. Tramite una scheda Arduino si è provveduto al controllo delle grandezze caratteristiche dei SiPM: tensione, corrente e temperatura. In sezione 3 si illustrerà la procedura di calibrazione dell'Arduino, mentre in sezione 4 si riporteranno i risultati ottenuti dalle misure effettuate con il laser. Infine in sezione 5 si trarranno le conclusioni sui risultati ottenuti.

1 Introduzione

1.1 Belle II

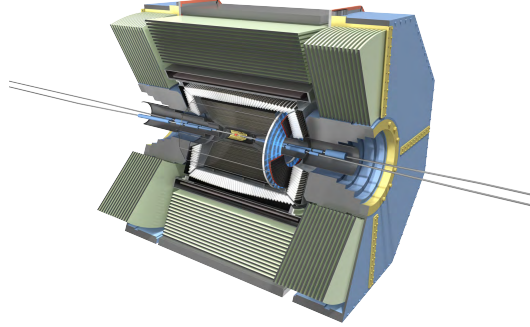


Figura 1: Belle II ¹

Il rivelatore Belle II è installato nell'unico punto di collisione dell'acceleratore SuperKEKB nel complesso della Japanese High-Energy Accelerator Research Organisation (KEK) a Tsukuba in Giappone. L'esperimento prevede lo studio dei mesoni B prodotti a partire dalla collisione asimmetrica, ovvero ad energie differenti, tra un fascio di elettroni e uno di positroni, rispettivamente all'energia di 8 e 3.5 GeV. Uno degli obiettivi dell'esperimento è lo studio della violazione della simmetria CP allo scopo di capire l'asimmetria tra le quantità di materia e antimateria nell'Universo. Belle II, di cui si riporta uno schema rappresentativo in figura 1, è un rivelatore multi-strato costituito da:

- Pixel e Silicon Vertex Detector: rivelatori a semiconduttore, situati nello strato più interno del rivelatore, individuano il vertice della traiettoria delle particelle cariche prodotte del decadimento dei mesoni B ;
- Central Drift Chamber: camera a deriva, riempita di gas che viene ionizzato al passaggio delle particelle cariche, serve a misurare il momento delle particelle;
- contatori iTOP e Aerogel RICH: ricostruiscono che tipo di particella è stata prodotta nel decadimento, per una descrizione dettagliata del primo si veda la sezione 1.2;
- calorimetro elettromagnetico: misura l'energia dei fotoni e degli elettroni;
- rivelatore di muoni e mesoni K neutri: è lo stato più esterno del rivelatore e individua i muoni μ e i mesoni neutri K^0 che non vengono identificati dai rivelatori più interni.

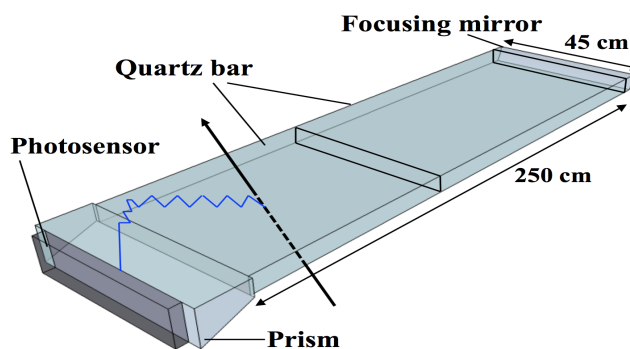
1.2 Rivelatore iTOP

Il rivelatore iTOP è costituito da 16 moduli, ognuno dei quali è formato da due barre di quarzo incollate tra loro; all'estremità di una di esse è posizionato uno specchio, mentre all'estremità dell'altra un blocco di quarzo a forma di cuneo su cui sono installati 32 micro-channel-plate photomultiplier tubes (MCP-PMT's) come mostrato in figura 2 [1], ogni MCP-PMT è dotato di 16 canali. Le particelle cariche quando interagiscono con il rivelatore emettono fotoni Cherenkov che vengono riflessi diverse volte, sia dal cristallo che dallo specchio, per poi arrivare ai MCP-PMTs attraverso i quali possono essere misurati il tempo e la posizione di arrivo dei fotoni. Affinchè avvenga l'identificazione delle particelle è necessaria una misura del tempo di arrivo dei fotoni con una precisione inferiore a 100 ps [1]. Da queste informazioni si ricava l'angolo θ di emissione dei fotoni Cherenkov e da questo la velocità v delle particelle, secondo relazione:

$$\cos(\theta) = \frac{1}{\beta n}$$

¹L'immagine è stata scaricata dal sito ufficiale dell'esperimento: <https://www.belle2.org/archives/>

ove $\beta = v/c$ e n è l'indice di rifrazione del quarzo; noto il momento dalle misure degli strati più interni del rivelatore, si riesce a calcolare la massa delle particelle [1]. Per monitorare la risoluzione temporale e il corretto funzionamento dei fotomoltiplicatori è necessario un sistema di calibrazione che prevede l'utilizzo di un laser ad altissima precisione. Questo emette la luce che viene convogliata attraverso una serie di fibre ottiche fino ai MCP-PMTs. Si utilizzano, per un tratto di circa 20 m, fibre ottiche monomodali, che si dividono in 16 fibre, una per ogni modulo, e in prossimità del rivelatore si collegano a queste ultime un insieme di fibre multimodali, alla cui estremità è collocato un componente ottico per aumentare l'angolo di emissione della luce e illuminare in maniera più efficace i canali dei fotomoltiplicatori [1].

Figura 2: iTOP ²

Il laser ha bisogno a sua volta di essere monitorato, in quanto è stato osservato che alcune delle sue caratteristiche dipendono dalle condizioni ambientali, ed è ciò di cui ci occuperemo nel prosieguo del testo.

²L'immagine è tratta dal sito: <http://inspirehep.net/record/1627616>

2 Apparato strumentale

Il sistema di controllo del laser è realizzato tramite una scheda elettronica su cui è stato montato un circuito elettronico che prevede l'utilizzo di una scheda Arduino Due e di due Silicon Photomultiplier (SiPM), indicati di seguito con SiPM #0 e SiPM #1, di alimentatori per i SiPM e di amplificatori a basso rumore e ampia banda passante. La tensione di alimentazione dei SiPM è, per il modello adoperato, di 55 V ed è fornita da un alimentatore e controllata dalla scheda. L'Arduino è provvisto al suo interno di un sistema di modulazione di larghezza d'impulso (PWM dall'inglese *pulse-width modulation*), e di un convertitore digitale-analogico (DAC, *digital to analogue converter*); entrambi con una precisione di 12 bit perciò con un range da 0 a 4096 conteggi. Tramite il PWM viene impostata la tensione di riferimento dei SiPM a cui va sottratto il valore del DAC per ottenere il voltaggio effettivo fornito dall'Arduino; nello specifico il range del PWM è: 0-3.3 V, mentre quello del DAC è: 0.55-2.75 V; questi valori vanno poi moltiplicati da un opportuno generatore. È noto il comportamento lineare del DAC su tutto il range di valori, mentre quello del PWM è da verificare. Il segnale in tensione viene poi mandato al circuito all'interno della scatola per essere amplificato ed alimentare i SiPM. Questi sono stati scelti perchè permettono di generare un segnale anche a partire da un singolo fotone incidente [2] e inoltre non hanno un fotocatodo soggetto ad invecchiamento per l'utilizzo prolungato. Tuttavia questi rivelatori sono sensibili alla variazione di temperatura, perciò sono state installate due celle di Peltier, una per canale, controllate dall'Arduino, per mantenerla stabile; tutto il circuito è stato inserito all'interno di una scatola in lega d'alluminio pressofusa provvista, nella parte frontale, di uno schermo LCD.

L'Arduino è collegato al computer per programmarlo e procedere con l'acquisizione dei dati. Nel computer sono presenti due software, sviluppati appositamente per l'esperimento, di cui uno è un demone per il controllo della scheda e l'altro permette di attivare un'interfaccia grafica dalla quale possono essere svolte diverse funzioni: l'accensione e lo spegnimento, la variazione della temperatura e della tensione e il monitoring della corrente dei SiPM e l'attivazione del demone. Per la calibrazione del sistema, la cui procedura è descritta in dettaglio nel paragrafo 3, sono stati utilizzati anche due multimetri *Fluke 111*, collegati ad un punto di prova nel circuito. Al fine di ridurre il più possibile il rumore elettronico, si è deciso di introdurre un piccolo schermo di separazione tra l'Arduino e la circuitazione restante. Per la seconda parte dell'esperimento, la scatola è stata inserita all'interno di una scatola nera dove erano presenti le fibre provenienti dal laser in modo tale da ridurre gli effetti dovuti all'illuminazione dell'ambiente. Un altro computer, dotato degli stessi software del precedente e di uno ulteriore per il controllo del laser, è stato utilizzato per la presa dati descritta in sezione 4. Si riporta di seguito in figura 3 una foto della scatola.

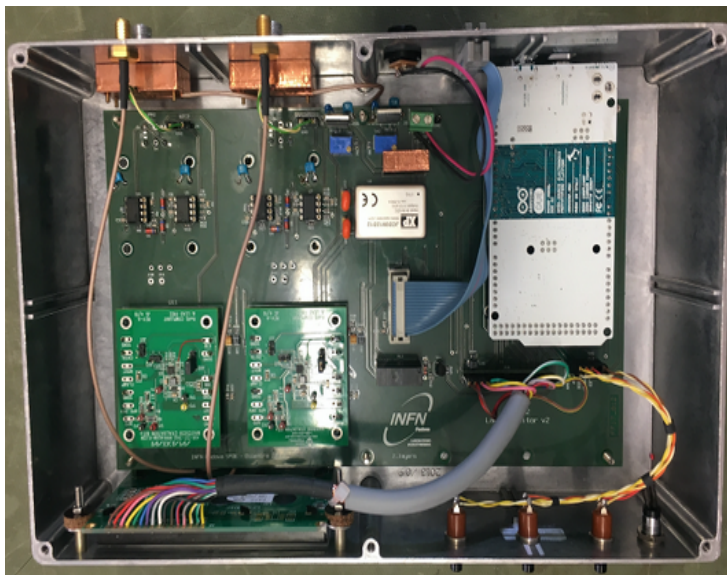


Figura 3: Scatola

3 Calibrazione

Di seguito si procederà ad illustrare la procedura di calibrazione dell'Arduino. Dal momento che alcuni problemi tecnici hanno portato alla modifica del circuito, si riporteranno soltanto i risultati relativi all'assetto finale della strumentazione. La metodologia di calcolo degli errori associati alle grandezze analizzate in questa sezione e in tutte quelle successive sarà descritta nella sezione 6.1.

3.1 Determinazione dei fattori di conversione per la tensione

Per la corretta calibrazione della scheda è stato necessario determinare i fattori di conversione tra il segnale analogico in tensione, ottenuto collegando i multimetri ad un punto di prova del circuito, e i valori digitali del PWM e del DAC. Si è proceduto variando il valore del PWM a passi di 50 conteggi da 0 a 4050 con il DAC fisso 0 e aumentando quest'ultimo per ogni nuovo set di dati di 500 conteggi. Inoltre è stata eseguita una presa dati tenendo fisso il PWM e variando il DAC; in questo caso si è deciso di spazzare il range tra 1000 e 4050 conteggi per il PWM, variandolo ogni volta di 100 conteggi, mentre il DAC è stato variato di 50. La scelta del range per il PWM è stata dettata dal fatto che è stata posta attenzione su valori della tensione vicini alla tensione di lavoro. Di seguito sono riportate le ultime misure eseguite con il DAC fisso a 0 e con il PWM a 1000 rispettivamente in tabella 1 e 2; gli errori sono stati ricavati dalla formula 1 in sezione 6.1.

PWM [cont.]	Tensione [V]	
	SiPM #0	SiPM #1
3300	48.28± 0.02	48.71± 0.02
3350	49.01± 0.02	49.44± 0.02
3400	49.73± 0.02	50.17± 0.02
3450	50.46± 0.02	50.90± 0.02
3500	51.18± 0.02	51.64± 0.02
3550	51.91± 0.02	52.37± 0.02
3600	52.87± 0.02	53.34± 0.02
3650	53.60± 0.02	54.07± 0.02
3700	54.31± 0.02	54.80± 0.02
3750	55.03± 0.02	55.52± 0.02
3800	55.73± 0.02	56.23± 0.02
3850	56.43± 0.02	56.92± 0.02
3900	57.11± 0.02	57.61± 0.02
3950	57.76± 0.02	58.26± 0.02
4000	58.57± 0.02	59.07± 0.02
4050	59.10± 0.02	59.62± 0.02

Tabella 1: Tensione-PWM

DAC [cont.]	Tensione [V]	
	SiPM #0	SiPM #1
3300	8.68± 0.04	8.84± 0.04
3350	8.62± 0.03	8.78± 0.04
3400	8.55± 0.03	8.73± 0.04
3450	8.48± 0.03	8.67± 0.04
3500	8.40± 0.03	8.60± 0.03
3550	8.33± 0.03	8.53± 0.03
3600	8.25± 0.03	8.47± 0.03
3650	8.19± 0.03	8.39± 0.03
3700	8.10± 0.03	8.31± 0.03
3750	8.04± 0.03	8.23± 0.03
3800	7.97± 0.03	8.16± 0.03
3850	7.89± 0.03	8.09± 0.03
3900	7.81± 0.03	8.01± 0.03
3950	7.74± 0.03	7.94± 0.03
4000	7.67± 0.03	7.88± 0.03
4050	7.60± 0.03	7.80± 0.03

Tabella 2: Tensione-DAC

Per ognuno di questi gruppi di dati è stata effettuata un'interpolazione lineare del tipo $y = a_{d,i} + b_{d,i} \cdot x$ (con $i=0,1$), ove sull'asse delle ordinate sono stati posti i valori della tensione e su quello delle ascisse i conteggi del PWM, eliminando i dati iniziali con la tensione residua, ricavando le coppie $(a_{d,i}, b_{d,i})$ ad un valore di DAC fissato. Un fit analogo è stato eseguito per i dati raccolti per conteggi di PWM fissati ottenendo le coppie $(a_{p,i}, b_{p,i})$.

Successivamente sono stati eseguiti due fit lineari: $y = c_{d,i} + d_{d,i} \cdot x$ con le intercette $a_{d,i}$ del fit precedente come ordinate e i conteggi del DAC come ascisse e $y = c_{p,i} + d_{p,i} \cdot x$ con le $a_{p,i}$, prima calcolate, in funzione dei conteggi del PWM. Questi parametri sono riportati nelle tabelle 3 e 4.

SiPM #0		SiPM #1	
Intercetta $c_{d,0}$ [V]	Pendenza $d_{d,0}$ [V/cont.]	Intercetta $c_{d,1}$ [V]	Pendenza $d_{d,1}$ [V/cont.]
-1.456 ± 0.008	$(-1.472 \pm 0.003) \cdot 10^{-3}$	-1.5 ± 0.01	$(-1.472 \pm 0.006) \cdot 10^{-3}$

Tabella 3: DAC-intercette

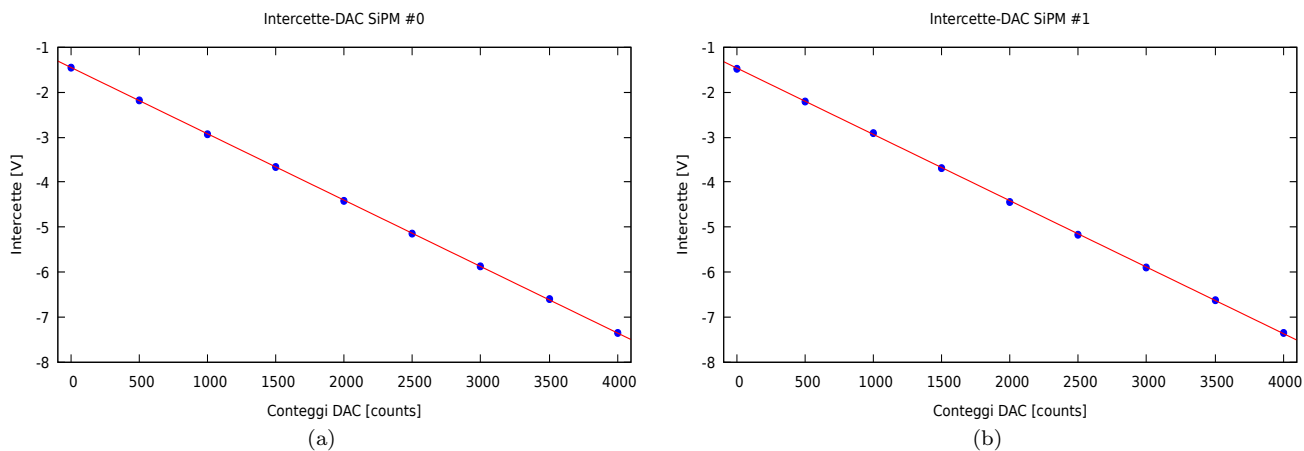


Figura 4: DAC-intercette

SiPM #0		SiPM #1	
Intercetta $c_{p,0}$ [V]	Pendenza $d_{p,0}$ [V/cont.]	Intercetta $c_{p,1}$ [V]	Pendenza $d_{p,1}$ [V/cont.]
-1.45 ± 0.05	$(1.505 \pm 0.005) \cdot 10^{-3}$	-1.38 ± 0.05	$(1.518 \pm 0.002) \cdot 10^{-3}$

Tabella 4: PWM-intercette

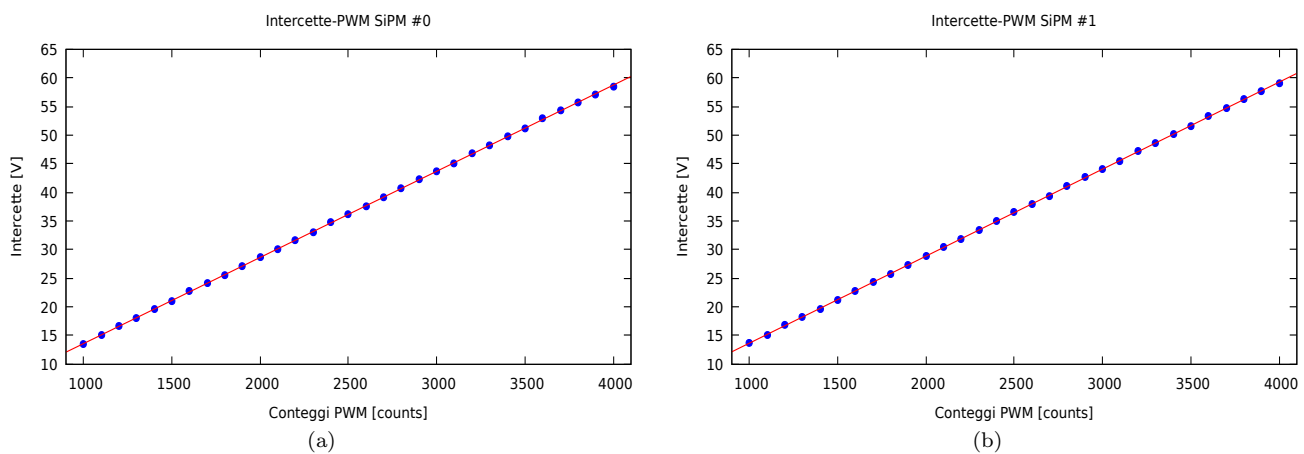


Figura 5: PWM-intercette

Nelle figure 4 e 5 sono riportati i grafici dei fit lineari $(DAC, intercette)_{0,1}$ e $(PWM, intercette)_{0,1}$

Successivamente sono state calcolate le medie $\bar{b}_{d,i}$ e $\bar{b}_{p,i}$ delle pendenze dei fit precedenti e i loro reciproci $1/\bar{b}_{d,i}$ e $1/\bar{b}_{p,i}$. Infine, sono stati ricavati i coefficienti delle curve $PWM = e_{d,i} + f_{d,i} \cdot tensione$ per conteggi del DAC nulli e $DAC = e_{p,i} + f_{p,i} \cdot tensione$ per PWM=1000. Si vedano le tabelle 5 e 6 per i risultati.

SiPM #0		SiPM #1	
$\bar{b}_{d,0}$	$1/\bar{b}_{d,0}$	$\bar{b}_{d,1}$	$1/\bar{b}_{d,1}$
$(1.50347 \pm 0.00006) \cdot 10^{-2}$	66.51516 ± 0.00002	$(1.51640 \pm 0.00009) \cdot 10^{-2}$	65.94583 ± 0.00002
$e_{d,0}$	$f_{d,0}$	$e_{d,1}$	$f_{d,1}$
97 ± 2	66.47 ± 0.05	98 ± 2	65.87 ± 0.05

Tabella 5: Coefficienti DAC

SiPM #0		SiPM #1	
$\bar{b}_{p,0}$	$1/\bar{b}_{p,0}$	$\bar{b}_{p,1}$	$1/\bar{b}_{p,1}$
$(-0.14855 \pm 0.00003) \cdot 10^{-2}$	-673.16771 ± 0.00001	$(-0.1483 \pm 0.00003) \cdot 10^{-2}$	-674.11858 ± 0.00001
$e_{p,0}$	$f_{p,0}$	$e_{p,1}$	$f_{p,1}$
$(90.8 \pm 0.3) \cdot 10^2$	-669 ± 2	(93.2 ± 0.3)	-684 ± 3

Tabella 6: Coefficienti PWM

3.2 Verifica della lettura della tensione di bias

Dal momento che la risposta dei SiPM è estremamente sensibile alla tensione di lavoro, è stato necessario far in modo che ci fosse un'ottima corrispondenza tra tensione impostata e tensione effettivamente fornita ai SiPM.

Per controllare che la tensione di polarizzazione impostata tramite l'Arduino coincidesse con quella letta con i multimetri si è deciso di provare a impostare da terminale una tensione, grazie l'apposito programma di acquisizione dati, e di registrare i corrispondenti valori analogici per poi effettuare un fit lineare: $y = g_i + h_i \cdot x$ con le tensioni misurate in ordinata e quelle impostate in ascissa. Prima si è deciso di fare uno scan da 0 V a 56 V per il SiPM #0 e da 0 a 54 V per il SiPM #1³, a passi di 2 V⁴. I coefficienti ottenuti sono in tabella 7, mentre in figura 6 sono riportati i grafici delle interpolazioni.

Intercetta g_0 [V]	Pendenza h_0 [adim.]	Intercetta g_1 [V]	Pendenza h_1 [adim.]
0.13 ± 0.02	0.999 ± 0.001	0.15 ± 0.02	0.999 ± 0.001

Tabella 7: Risultati fit 1

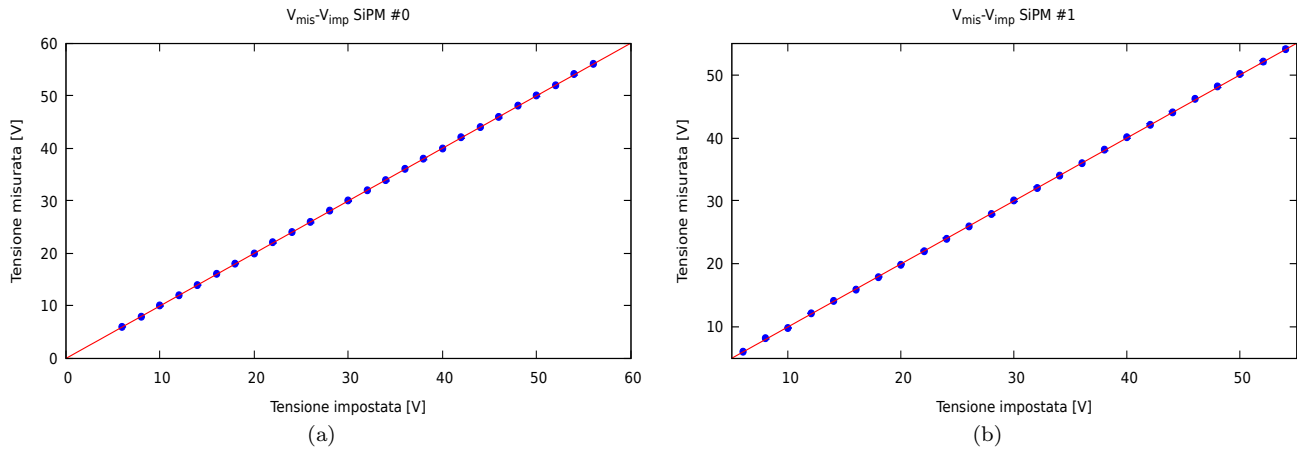


Figura 6: Tensione misurata-tensione impostata 1

I valori attesi per le intercette e per le pendenze sono, rispettivamente, 0 V e 1; sono stati calcolati gli errori percentuali tra le pendenze delle rette e il valore teorico: $\sigma_0 = \sigma_1 = 0.1\%$. Successivamente, dopo aver modificato opportunamente il software di acquisizione dati si è deciso di fare uno scan più fine per il range: (6-53.8) V a intervalli di 0.2 V (non si riportano le misure per questioni di spazio)⁵. Nuovamente è stato eseguito un fit con le stesse modalità del precedente i cui risultati e le cui rappresentazioni grafiche sono, rispettivamente, in tabella 8 e in figura 7. Gli errori percentuali in tabella 8 si riferiscono, come prima, alle pendenze delle rette.

SiPM #0			SiPM #1		
Intercetta [V]	Pendenza [adim.]	Errore %	Intercetta [V]	Pendenza [adim.]	Errore %
-0.02 ± 0.02	0.9970 ± 0.0006	0.3	0.004 ± 0.02	0.9992 ± 0.0006	0.08

Tabella 8: Risultati fit 2

³Si è impostata una tensione inferiore per il SiPM #1 perchè al momento della presa dati era l'unico completamente collegato e perciò non si voleva rischiare di danneggiarlo.

⁴Non si riportano le misure per motivi di spazio

⁵In questo caso non si è impostata la tensione da terminale ma si è avviato un programma in C++

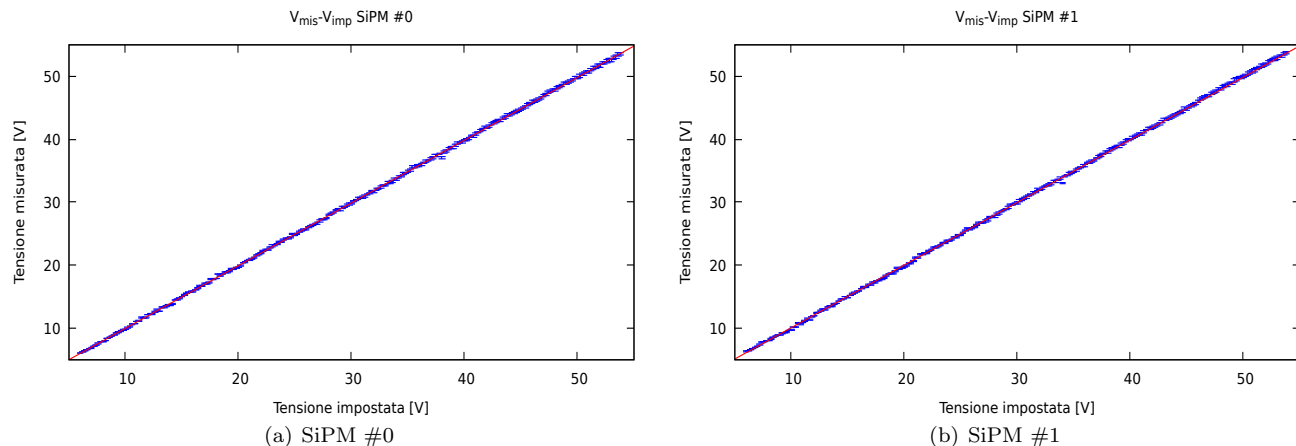


Figura 7: Tensione misurata-tensione impostata 2

Da quest'ultimo set di dati sono state calcolate le differenze $V_{diff} = V_{misurata} - V_{impostata}$ e ne sono stati calcolati la media e l'errore quadrato medio, si veda la tabella sottostante. Questi ultimi sono stati inseriti nel codice dell'Arduino per migliorarne la lettura delle tensioni di polarizzazione. Per verificare la correttezza della procedura di calibrazione è stata effettuata una presa dati analoga a quella descritta ad inizio paragrafo, ovvero con la tensione impostata da terminale.

SiPM #0		SiPM #1	
$\bar{V}_{diff,0}$ [V]	$\sigma_{\bar{V}_{diff,0}}$ [V]	$\bar{V}_{diff,1}$ [V]	$\sigma_{\bar{V}_{diff,1}}$ [V]
-0.113 ± 0.009	0.1335967	-0.020 ± 0.009	0.1384497

Tabella 9: Differenze tensioni

3.3 Dipendenza tensione-corrente e prima stima della tensione di breakdown

Successivamente è stata analizzata la curva tensione-corrente dei SiPM per fornire una prima stima della tensione di breakdown. Come si vede dai grafici in figura 8, fino ad una tensione di circa 50 V il dispositivo è attraversato da una corrente piccola, ma non nulla, detta corrente di saturazione I_S (inversa dato che lavoriamo in regime di polarizzazione inversa) e poi aumenta rapidamente con un voltaggio quasi costante; questo è l'effetto valanga. La tensione a cui c'è il passaggio da regime d'interdizione e valanga è detta tensione di breakdown V_B . Sono stati effettuati due fit: $y = i_i + l_i \cdot x$ e $y = m_i + n_i \cdot x$, sulle due parti della curva V-I che presentano andamento lineare, non considerando i dati nella parte in cui la corrente aumenta esponenzialmente, si tratta delle curve evidenziate in rosso in figura 8. L'intersezione tra le due rette ha dato la stima della tensione di breakdown dei SiPM, si vedano le tabelle 10 e 11. L'errore associato alla tensione V_B è stata ricavato per propagazione degli errori casuali (si veda la sezione 6.1).

Intercetta i_0 [μA]	Pendenza l_0 [$\mu\text{A}/\text{V}$]	Intercetta m_0 [μA]	Pendenza n_0 [$\mu\text{A}/\text{V}$]	V_B
0.01273 ± 0.00006	$(4.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$	-2.0 ± 0.1	0.039 ± 0.003	51.96 ± 0.02

Tabella 10: Tensione di breakdown SiPM #0

Intercetta i_1 [μA]	Pendenza l_1 [$\mu\text{A}/\text{V}$]	Intercetta m_1 [μA]	Pendenza n_1 [$\mu\text{A}/\text{V}$]	V_B
0.01915 ± 0.00007	$(1.7 \pm 0.2) \cdot 10^{-5}$	-1.2 ± 0.2	0.023 ± 0.002	51.95 ± 0.05

Tabella 11: Tensione di breakdown SiPM #1

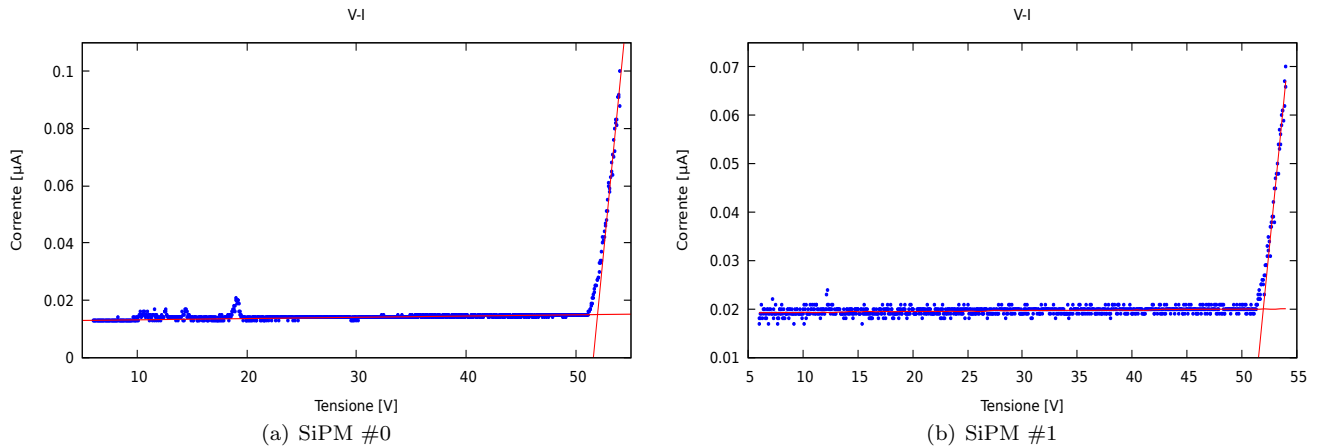


Figura 8: Tensione-Corrente

La corretta determinazione della tensione di breakdown sarà illustrata in sezione 4.1.

3.4 Determinazione delle curve di calibrazione della temperatura

L'ultima grandezza caratteristica da monitorare con l'Arduino è la temperatura dei SiPM ai cui cambiamenti questi sono molto sensibili. Non è stato possibile fare una calibrazione assoluta della temperatura, tuttavia, essendo le due sonde molto simili, si è deciso di assumere come temperatura di riferimento la media tra le temperature in quanto è stato posto l'interesse sulla variazione di temperatura e non sulla temperatura stessa. Prima si è analizzata la

variazione della temperatura in un range limitato di circa 3.5 °C e sono stati calcolati i parametri $(o;p)_{0,1}$, $(q;r)$, $(s;v)$ di tre fit lineari, rispettivamente, della temperatura del SiPM in funzione della media, delle differenze tra le temperature dei due canali in funzione della media delle stesse e della temperatura del SiPM #1 in funzione di quella del SiPM #0. Come si vede dal grafico in figura 9, relativo al primo dei fit lineari, c'è un certo gap tra i dati dei due canali che con la procedura di calibrazione si vuole ridurre. Si riportano nel grafico i dati di entrambi i canali: quelli relativi al canale #0 sono i punti in blu, mentre quelli relativi al canale #1 sono in verde. I coefficienti dei fit sono indicati con (*) e riportati in tabella 12 e 13.

$t_0(\bar{t})$		$t_1(\bar{t})$	
Intercetta o_0^* [°C]	Pendenza p_0^* [adim.]	Intercetta o_1^* [°C]	Pendenza p_1^* [adim.]
0.30 ± 0.02	0.9923 ± 0.0008	-0.26 ± 0.02	1.006 ± 0.001

Tabella 12: Fit temperatura 1

$t_{diff}(\bar{t})$		$t_1(t_0)$	
Intercetta q^* [°C]	Pendenza r^* [adim.]	Intercetta s^* [°C]	Pendenza v^* [adim.]
0.53 ± 0.03	-0.013 ± 0.001	-0.53 ± 0.03	1.013 ± 0.002

Tabella 13: Fit temperatura 1

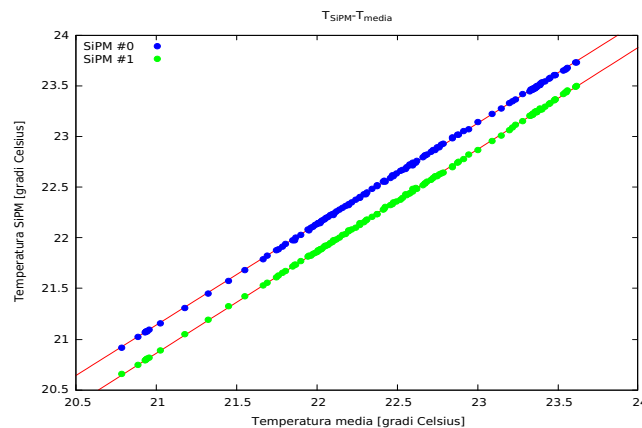


Figura 9: Temperatura SiPM-temperatura media

Successivamente è stata avviata una presa dati di circa 16 h così da poter analizzare anche dei dati acquisiti con l'escursione termica, anche se ridotta, verificatasi durante la notte. Si riportano soltanto i coefficienti delle rette indicati con $(def,*)$ nelle tabelle 14, 15. Non è stato inserito il grafico perchè è risultato simile a quello in figura 9.

$t_0(\bar{t})$		$t_1(\bar{t})$	
Intercetta $o_0^{def,*}$ [°C]	Pendenza $p_0^{def,*}$ [adim.]	Intercetta $o_1^{def,*}$ [°C]	Pendenza $p_1^{def,*}$ [adim.]
0.25 ± 0.02	0.9948 ± 0.0008	-0.25 ± 0.02	1.0052 ± 0.0008

Tabella 14: Fit temperatura 2

$t_{diff}(\bar{t})$		$t_1(t_0)$	
Intercetta $q^{def,*}$ [°C]	Pendenza $r^{def,*}$ [adim.]	Intercetta $s^{def,*}$ [°C]	Pendenza $v^{def,*}$ [adim.]
0.50 ± 0.04	-0.010 ± 0.002	-0.50 ± 0.04	1.010 ± 0.002

Tabella 15: Fit temperatura 2

Infine si è eseguita una regressione lineare $y = j_i + k_i \cdot x$ ponendo in ordinata le temperature medie \bar{t} e in ascissa la temperatura del SiPM $t_{0,1}$ dell'ultimo set di dati. A partire dai parametri $(j,k)_{0,1}$ è stato possibile ricavare i coefficienti di conversione per la curva di calibrazione, infatti la temperatura letta è data da:

$$T_V = T^* \cdot k_{0,1} + j_{0,1} \quad T^* = \frac{4.67 - V}{0.101} \quad \Rightarrow \quad T_V = A_{0,1} - V \cdot B_{0,1}$$

$$A_{0,1} = \frac{4.67 \cdot k_{0,1}}{0.101} + j_{0,1} \quad B_{0,1} = \frac{k_{0,1}}{0.101}.$$

I coefficienti $(j,k,A,B)_{0,1}$ sono riportati di seguito nelle tabelle 16 e 17.

j_0 [°C]	k_0 [adim.]	A_0 [°C]	B_0 [adim.]
-0.25 ± 0.02	1.0051 ± 0.0008	46.23 ± 0.04	9.95 ± 0.04

Tabella 16: Coefficienti SiPM #0

j_1 [°C]	k_1 [adim.]	A_1 [°C]	B_1 [adim.]
0.25 ± 0.02	0.9947 ± 0.0008	46.24 ± 0.04	9.85 ± 0.04

Tabella 17: Coefficienti SiPM #1

I parametri $A_{0,1}$ e $B_{0,1}$ sono stati inseriti nel codice dell'Arduino ed è stata effettuata una presa dati, simile a quella precedente, per verificare la corretta lettura della temperatura dei SiPM. Come si può vedere dal grafico in figura 10 il gap tra le due rette è stato notevolmente ridotto.

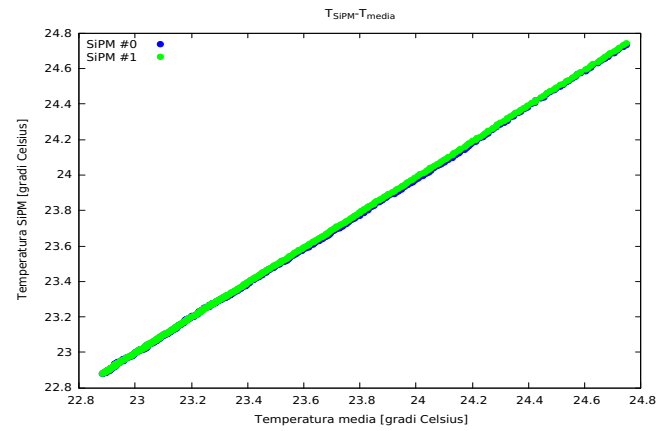


Figura 10: Temperatura SiPM-temperatura media (stabilità)

4 Monitoring del funzionamento del laser

Dopo aver ultimato la programmazione dell'Arduino per la lettura delle grandezze caratteristiche dei SiPM si è proceduto con le misure che prevedevano l'utilizzo del laser. Le misure che si riportano in sezione 4.1 sono relative all'assetto finale della strumentazione. Per questa fase dell'acquisizione, l'utilizzo del laser è stato gestito dagli appositi programmi e non è stato necessario un intervento diretto sull'apparecchio.

4.1 Stima della tensione di breakdown

Per prima cosa si è proceduto con l'individuare la tensione di breakdown dei due SiPM di cui si era fornita una prima stima nella sezione 3.3. Per far ciò sono state raccolte delle misure degli spettri d'ampiezza forniti dai SiPM, si veda un esempio in figura 11, al variare della tensione di polarizzazione tra 52 V e 54 V a passi di 0.1 V ad una temperatura di 20 °C. Per avere una statistica sufficiente sono stati presi centomila dati per ogni set. Per determinare la tensione di lavoro, sono state sovrapposte a cinque picchi dello spettro delle gaussiane, si veda l'esempio in figura 12, e sono state calcolate le differenze tra i centroidi delle curve così da ottenere una stima del guadagno degli strumenti; di queste differenze è stata calcolata la media pesata con relativo errore.

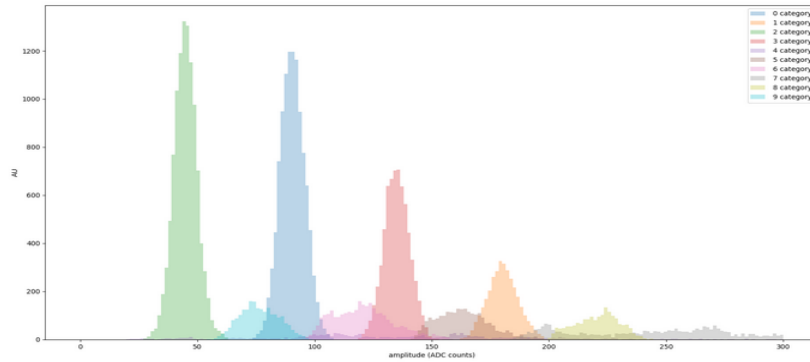


Figura 11: Spettri di ampiezza

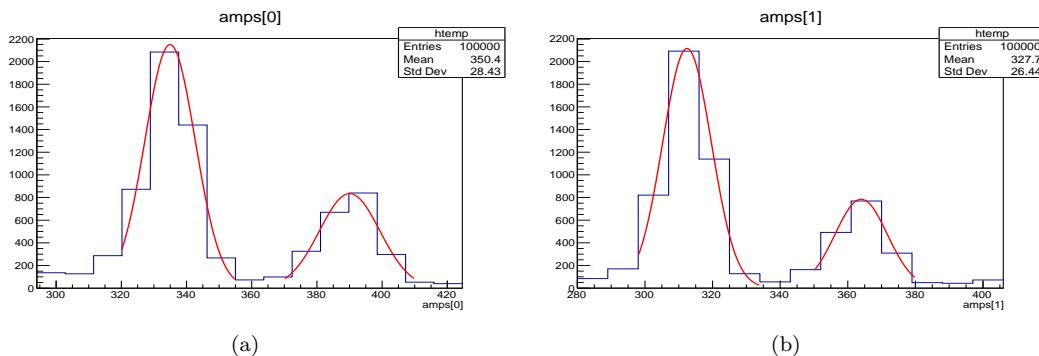


Figura 12: Fit gaussiani

Per ognuno dei canali è stato eseguito un fit lineare (in figura 13) ponendo sull'asse delle ascisse le medie pesate delle distanze tra i picchi e su quello delle ordinate le tensioni di polarizzazione effettive dei SiPM ricavate dai file ROOT [4], generati dal programma di acquisizione dati.

SiPM #0		SiPM #1	
Intercetta [V]	Pendenza [V/cont.]	Intercetta [V]	Pendenza [V/cont.]
50.86 ± 0.02	0.0471 ± 0.0005	50.95 ± 0.02	0.04897 ± 0.0005

Tabella 18: Coefficienti V_{nom} -guadagno

SiPM #0		SiPM #1	
Intercetta [V]	Pendenza [V/cont.]	Intercetta [V]	Pendenza [V/cont.]
50.99 ± 0.02	0.0454 ± 0.0005	51.00 ± 0.02	0.04734 ± 0.0005

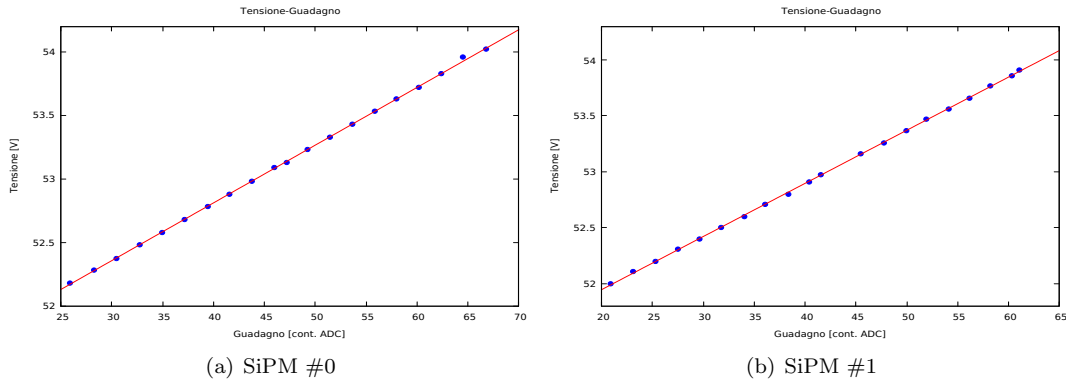
Tabella 19: Coefficienti V_{eff} -guadagno

Figura 13: Fit tensione-guadagno

Le intercette delle rette forniscono la tensione di breakdown, i quattro risultati sono in accordo con i dati forniti dal costruttore che per una temperatura di $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ indica una tensione di breakdown di 51 V . Le tensioni di lavoro ottenute nella sezione 3.3 sono in buon accordo con quelle appena calcolate perchè si discostano di circa 1 V con errore relativo del 2% circa.

4.2 Andamento del guadagno in funzione della temperatura

Successivamente si è indagata la dipendenza tra guadagno e temperatura del laser e dei SiPM. Si è allora proceduto a raccogliere dati a diversi valori della tensione, in particolare in questo testo si analizzeranno i dati presi alla tensione di 53.5 V e 54 V , variando di $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ la temperatura dei SiPM a partire da $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ fino a $27\text{ }^{\circ}\text{C}$. Da questi dati è stato ricavato il guadagno dei SiPM con l'utilizzo di uno script in *python*, si veda la sezione 6.2 per il dettaglio della funzione utilizzata. Un esempio del grafico ottenuto dal fit è riportato in figura 14.

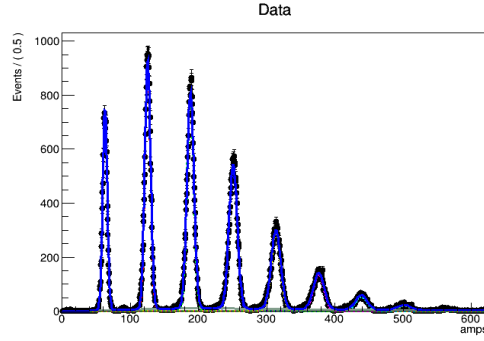


Figura 14: Fit multipicco

Successivamente sono stati posti in grafico il guadagno, ricavato dai fit precedenti, in funzione della temperatura dei SiPM, ottenuta dai file ROOT [4]. Come ci si aspetta, il guadagno diminuisce in maniera lineare all’aumento della temperatura dei SiPM. In figura 15 sono riportati in blu i dati raccolti alla tensione di 53.5 V, mentre in verde quelli a 54 V. Come si può vedere dai grafici in figura 15, variando la tensione c’è anche una variazione considerevole del guadagno inoltre, tra i due canali, si nota una differenza sullo stesso di circa 6 mV, nota dalle specifiche fornite dal costruttore.

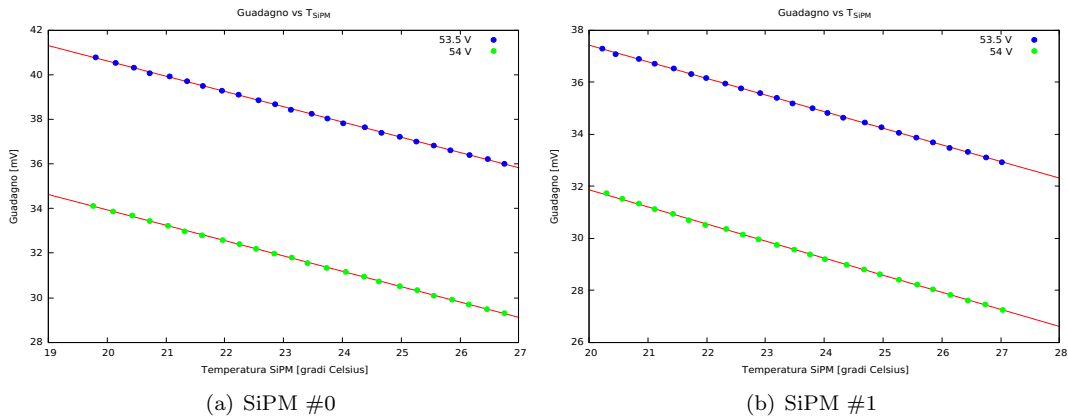


Figura 15: Relazione guadagno-temperatura SiPM

SiPM #0		SiPM #1	
Intercetta [mV]	Pendenza [mV/°C]	Intercetta [mV]	Pendenza [mV/°C]
54.30±0.05	-0.684±0.002	50.19±0.04	-0.639±0.002

Tabella 20: Coefficienti guadagno-temperatura SiPM

SiPM #0		SiPM #1	
Intercetta [mV]	Pendenza [mV/°C]	Intercetta [mV]	Pendenza [mV/°C]
47.71±0.04	-0.688±0.002	44.99±0.06	-0.656±0.002

Tabella 21: Coefficienti guadagno-temperatura SiPM 2

4.3 Andamento del tempo di arrivo dei fotoni in funzione della temperatura

In modo analogo a quanto descritto nella sezione precedente per il guadagno, si è vista la dipendenza del tempo di arrivo dei fotoni, ricavato da un fit gaussiano sull'istogramma dei tempi eseguito con uno script in *python*, in funzione della temperatura dei SiPM e di quella del laser. Anche in questo caso si è riscontrata una dipendenza lineare dalla temperatura dei fotorivelatori, ma con pendenza positiva. Come detto in precedenza, le misure riportate sono state raccolte per le tensioni di polarizzazione di 53.5 e 54 V, rispettivamente in blu e in verde in figura 16. Anche per questa grandezza si riscontrano delle piccole differenze tra i due canali, inoltre per la tensione di 54 V si evidenzia una maggiore dispersione delle misure rispetto alla retta interpolante.

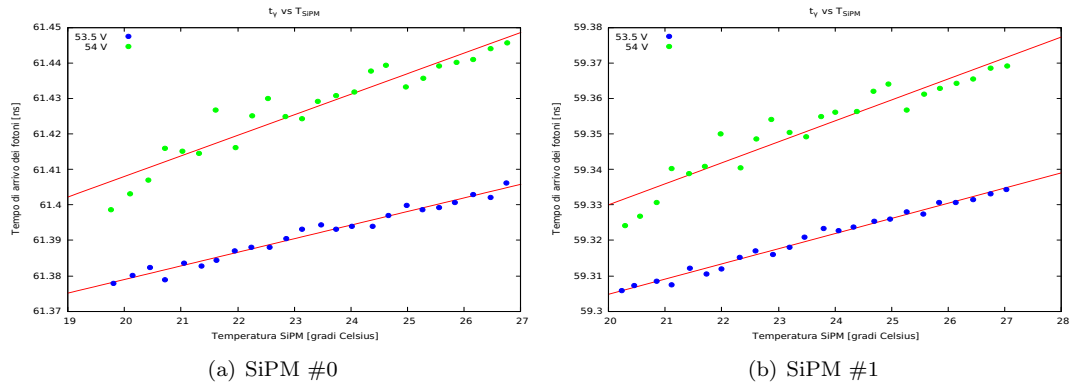


Figura 16: Relazione tempo di arrivo dei fotoni-temperatura SiPM

SiPM #0		SiPM #1	
Intercetta [ns]	Pendenza [ns/°C]	Intercetta [ns]	Pendenza [ns/°C]
61.302±0.003	0.0038±0.0001	59.219±0.003	0.0043±0.0001

Tabella 22: Coefficienti tempo di arrivo dei fotoni-temperatura SiPM

SiPM #0		SiPM #1	
Intercetta [ns]	Pendenza [ns/°C]	Intercetta [ns]	Pendenza [ns/°C]
61.292±0.009	0.0058±0.0004	59.21±0.01	0.0059±0.0004

Tabella 23: Coefficienti tempo di arrivo dei fotoni-temperatura SiPM 2

4.4 Test di stabilità

Durante il corso dell'esperimento sono stati eseguiti dei test per monitorare la stabilità della strumentazione; in particolare sono state analizzate le variazioni del guadagno e del tempo di arrivo dei fotoni. Si è deciso di riportare due di questi test, l'uno per i risultati ottenuti, l'altro per le particolari condizioni in cui è stato svolto, un test del tempo di arrivo dei fotoni in funzione della temperatura del laser e, infine, un test specifico solo del guadagno per il particolare risultato ottenuto.

Primo test di stabilità

In figura 17 è riportato il primo test di stabilità per il tempo di arrivo dei fotoni; da questo sembrerebbe che il sistema risulti molto stabile. Tuttavia, analizzando singolarmente i plot relativi ai due canali in figura 18, si vede come entrambi i canali presentino delle fluttuazioni, anche se quelle del canale 0 sono meno evidenti.

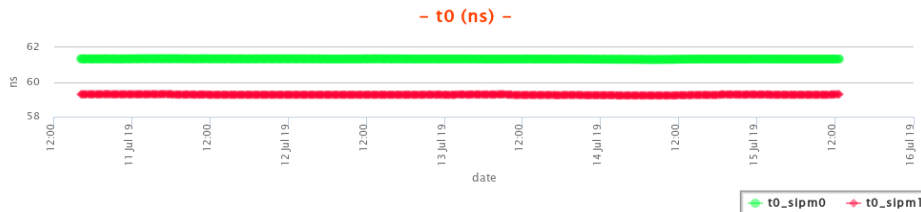


Figura 17: Stabilità tempo di arrivo dei fotoni

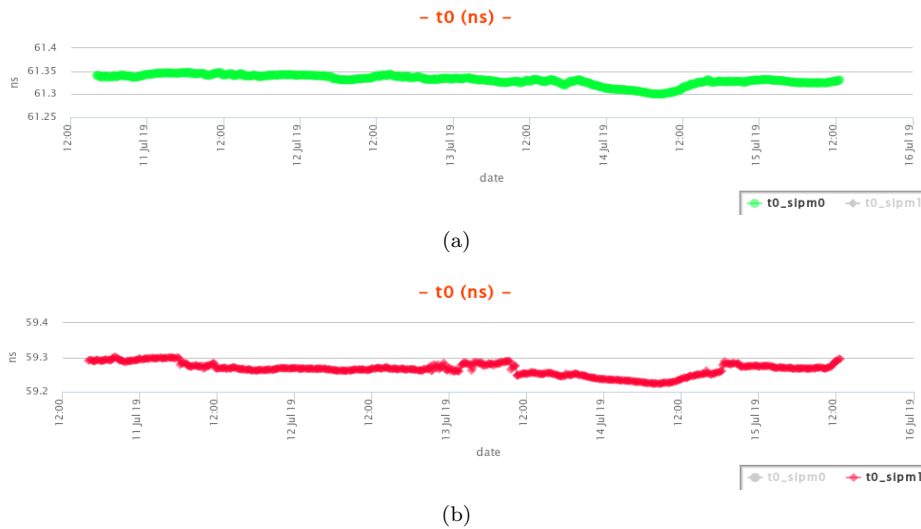
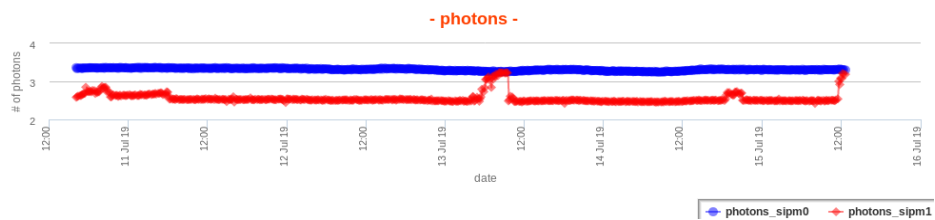
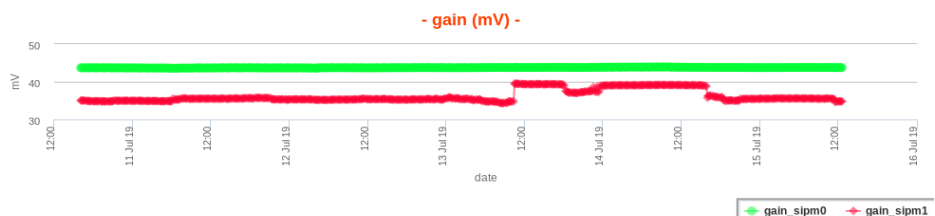


Figura 18: Stabilità tempo di arrivo dei fotoni singoli canali

Di seguito in figura 19(a) viene riportato un grafico che rappresenta il numero medio di fotoni rivelato dai SiPM, esso è legato al numero di fotoni presenti nell'impulso laser da un fattore di scala che dipende dall'efficienza dei rivelatori. Come in precedenza, anche in questo caso il SiPM #1 presenta delle instabilità più evidenti rispetto a quelle dell'altro canale. Tali fluttuazioni non possono essere dovute a cambiamenti nel set up dell'attrezzatura poichè, in tal caso, sarebbero state individuate anche nel plot relativo al canale 0; per questo motivo si tratta di un problema che riguarda il SiPM #1 e si dovranno valutare delle soluzioni al problema. Le medesime conclusioni possono essere tratte per l'andamento del guadagno nel corso dell'acquisizione, il cui grafico è in figura 19(b).



(a) Numero medio di fotoni rivelati



(b) Guadagno

Figura 19: Altri test di stabilità

Secondo test di stabilità

Si riportano i plot di un test di stabilità che evidenziano gli stessi problemi di quello precedente e che, inoltre, è stato eseguito in condizioni ambientali particolari; infatti nel corso dell'acquisizione si sono verificati dei black-out con conseguente interruzione della fornitura di corrente alla strumentazione.

Sia dai grafici in figura 20 che quelli in figura 22 si notano dei periodi, più o meno lunghi, di interruzione della presa dati corrispondenti all'interruzione dell'alimentazione. Analizzando singolarmente per i due canali i test di stabilità del tempo di arrivo dei fotoni, si nota in entrambi i casi un aumento del tempo di arrivo in corrispondenza della ripresa dell'acquisizione dopo l'interruzione, inoltre il SiPM #1 presenta numerose fluttuazioni, soprattutto nella parte finale, che denotano una maggiore instabilità rispetto all'altro canale, soprattutto per quel che riguarda il guadagno.

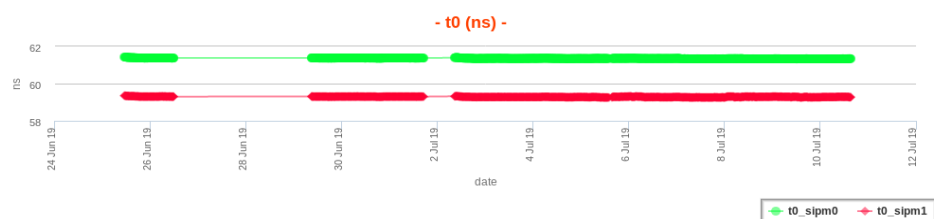


Figura 20: Stabilità tempo di arrivo dei fotoni 2

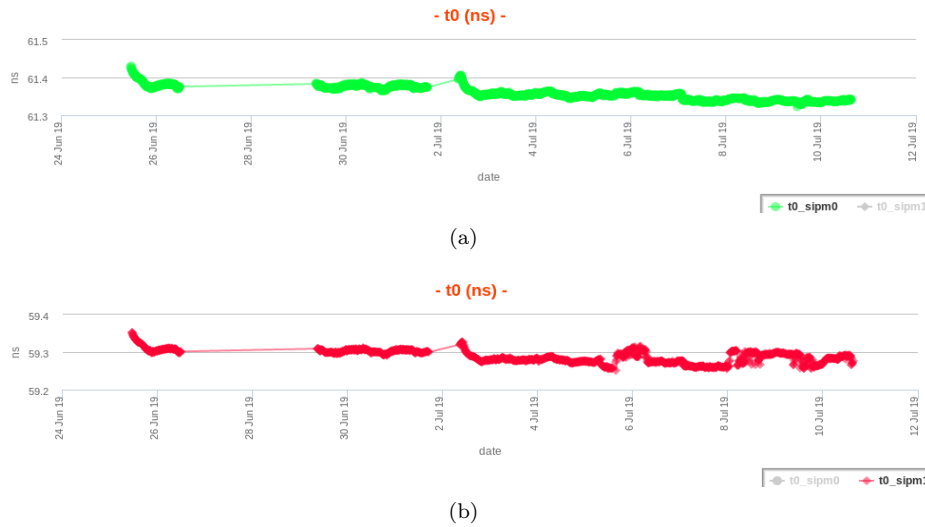


Figura 21: Singoli canali

Le instabilità del canale 1 sono ancora più evidenti se si analizzano i grafici relativi al tempo di arrivo dei fotoni e del guadagno in figura 22. Si notano dei salti di entrambe le grandezze in corrispondenza delle interruzioni, nonostante nella parte finale l'andamento dei dati relativi al SiPM #1 sia, ancora una volta, poco chiaro e pieno di fluttuazioni. Non si è riuscito a spiegare il perchè di questi cambiamenti nella misura delle grandezze caratteristiche in seguito alla ripresa dell'acquisizione, per questo motivo dovranno essere condotti altri test di stabilità, ma si suppone che il SiPM #1 sia rimasto danneggiato a causa del black-out.

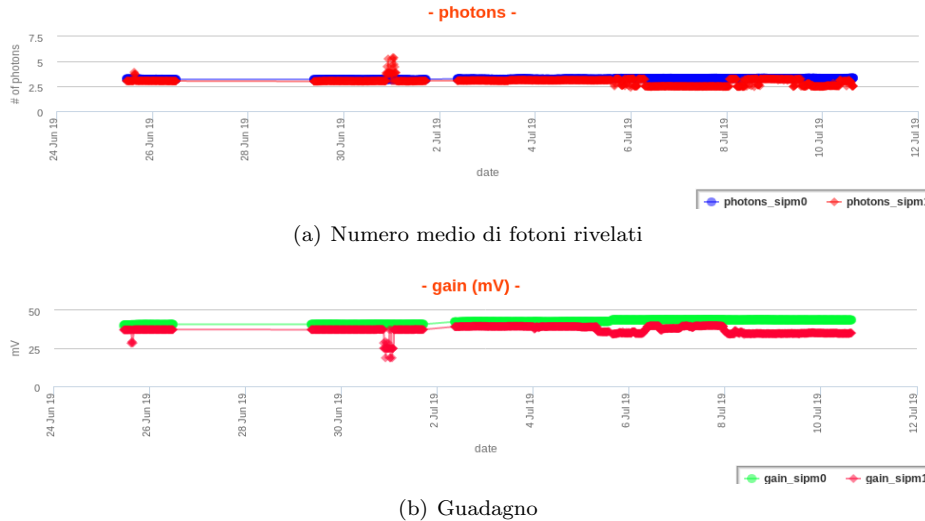
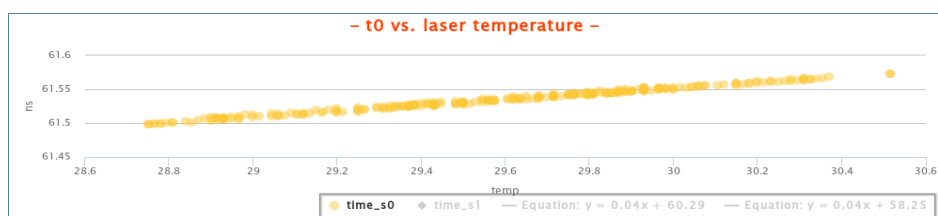


Figura 22: Altri test di stabilità 2

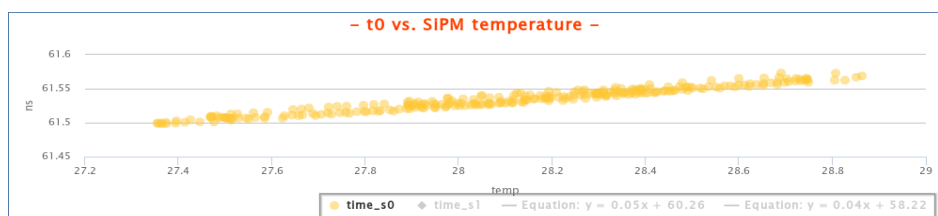
Test sulla dipendenza tra tempo di arrivo dei fotoni e temperatura del laser

Si riportano in seguito i risultati di due test di stabilità, si è deciso di inserire i plot relativi ad uno solo dei due canali a titolo d'esempio. In entrambi i casi è stata analizzata la dipendenza del tempo di arrivo dei fotoni sia dalla temperatura del laser, sia da quella del SiPM; l'unica differenza tra le due acquisizioni è che nella prima si è lasciata la temperatura dei SiPM libera di variare, mentre nella seconda è stata tenuta fissa. Come si può vedere dal grafico in figura 23 il tempo di arrivo dei fotoni aumenta sia con l'aumento della temperatura

del laser che con l'aumento di quella dei SiPM. Dai grafici in figura 24, invece, si deduce che pur tenendo fissa la temperatura dei SiPM c'è ancora una dipendenza lineare tra il tempo di arrivo dei fotoni e la temperatura del laser, ma in questo caso ci sono maggiori fluttuazioni rispetto alla figura 23(a).

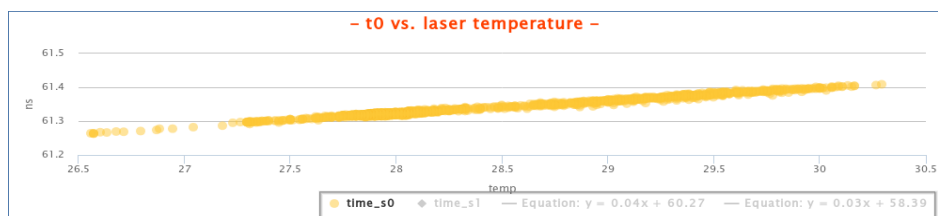


(a) Dipendenza tempo di arrivo dei fotoni-temperatura laser

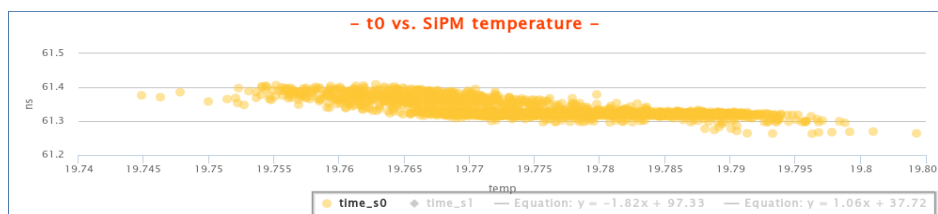


(b) Dipendenza tempo di arrivo dei fotoni-temperatura SiPM

Figura 23: Test con temperatura dei SiPM variabile



(a) Dipendenza tempo di arrivo dei fotoni-temperatura laser



(b) Dipendenza tempo di arrivo dei fotoni-temperatura SiPM

Figura 24: Test con temperatura dei SiPM fissa

Da entrambi i plot in figura 23(a) e 24(a) risulta che il tempo di arrivo dell'impulso è ritardato di 40 ps per ogni grado di aumento della temperatura. Si tratta di un parametro critico dal momento che il sistema sviluppato deve dare una misura del tempo di arrivo con un errore inferiore ai 100 ps.

Test sul guadagno

Di seguito sono riportati due plot sulla stabilità relativi al canale 0. Come si può vedere dal grafico in figura 25 ad un certo punto dell'acquisizione si è verificata una diminuzione sensibile del guadagno del fotodivelatore, pur non avendo modificato la tensione e la temperatura. Si è allora andato ad analizzare lo spettro, riportato in figura 26 dell'ampiezza in corrispondenza dell'ultimo punto in cui il guadagno risulta di 35 mV. Dal grafico si nota che a partire dal picco corrispondente all'arrivo del secondo fotone c'è una seconda popolazione di picchi più bassi che si distanziano sempre di più all'aumentare del numero di fotoni. Non è chiaro il motivo di tale risultato.

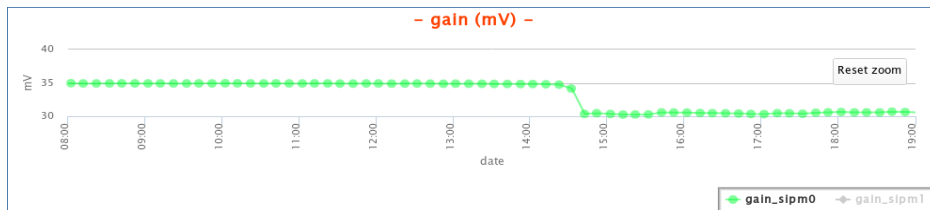


Figura 25: Test di stabilità sul guadagno

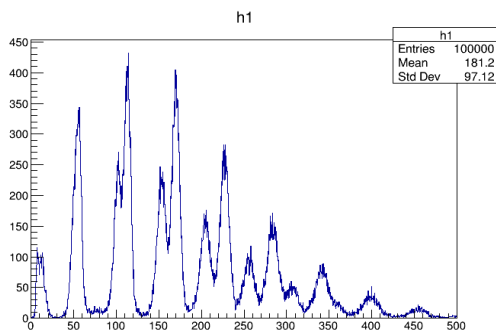


Figura 26: Spettro d'ampiezza

5 Conclusioni

Questo esperimento ha portato alla corretta calibrazione della scheda Arduino che è necessaria per il sistema di monitoring del laser. Dalle misure con il laser sono state estrapolate le tensioni di breakdown dei SiPM e sono state analizzate le relazioni che legano il guadagno e il tempo di arrivo dei fotoni alla temperatura dei SiPM. Infine sono stati effettuati dei test di stabilità che tuttavia hanno evidenziato una serie di problemi nell'utilizzo dei SiPM. Per questo motivo in seguito dovranno essere approfondite le ragioni di tali instabilità e si dovrà cercare una soluzione al problema. Questa tesi è soltanto un punto di partenza per ulteriori sviluppi e migliorie di questo apparato strumentale.

6 Appendice

6.1 Calcolo degli errori

Errori sulle tensioni lette da multimetro Alle misure di tensione sono associati due tipologie di errori: uno casuale dato dal numero di digit del multimetro moltiplicato per la precisione dello strumento, che tiene conto dell'incertezza di troncamento, e uno sistematico espresso in percentuale dovuto alla moltiplicazione delle grandezze misurate, da parte dello strumento, per un fattore costante e incognito. Il numero di digit, la precisione e l'errore percentuale sono stati estrapolati dal manuale dello strumento disponibile on-line. Detta V la tensione, l'errore associato alla misura è quindi dato da:

$$\sigma_V = \sqrt{\left(\frac{V \cdot \sigma\%}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{digit}}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (1)$$

dove si è diviso ogni contributo per $\sqrt{3}$ per trasformare l'errore in casuale, ipotizzando una distribuzione uniforme.

Errore sulle grandezze derivate A questi valori sono associati errori dati dalla formula di propagazione degli errori casuali. Data una grandezza $F(z_1, \dots, z_N)$, l'incertezza è data da:

$$\sigma_F \approx \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial F}{\partial z_i}\right)_{|z_1^*, \dots, z_N^*}^2 \sigma_{z_i}^2}. \quad (2)$$

Si noti che nella formula completa sarebbe presente un contributo proporzionale alla covarianza tra le grandezze che è stato trascurato perchè non ricavabile a partire dai dati.

Errore sui coefficienti dei fit Tutti i fit presenti in questa tesi sono stati realizzati con il software ROOT [4], perciò gli errori riportati sono quelli calcolati automaticamente dal programma.

6.2 Fit fotopicchi

Il numero di fotoni incidenti, che si suppone in media essere costante, segue una distribuzione di Poisson e solo una parte di questi viene convertito in elettroni con un processo casuale di tipo binario. Allora la probabilità che n fotoni vengano osservati è data da [3]:

$$P(n; \mu) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!} \quad (3)$$

ove μ è la media del numero di fotoelettroni. Detta x la variabile che indica la carica raccolta e quindi la risposta del fotorivelatore ai fotoni incidenti, Q_1 e σ_1 rispettivamente la media e la deviazione standard ad essa associate, la funzione utilizzata per fittare i picchi è approssimabile con una gaussiana della forma [3]:

$$G_n(x) = \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2n\pi}} e^{\left(-\frac{(x-nQ_1)^2}{2n\sigma_1^2}\right)}. \quad (4)$$

Allora la forma del segnale è dato dal prodotto di convoluzione tra le equazioni 3 e 4 [3]:

$$S(x) = P(n; \mu) \otimes G_n(x) = \sum_{n=0}^{+\infty} \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!} \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2n\pi}} e^{\left(-\frac{(x-nQ_1)^2}{2n\sigma_1^2}\right)}. \quad (5)$$

Infine, per il fondo si devono considerare due contributi [3]: uno, detto *pedestral*, che tiene conto dei processi di carica che producono un segnale non nullo anche se non si ha emissione, e quindi amplificazione, di fotoelettroni, l'altro dovuto a processi secondari, come il rumore, che seguono una distribuzione esponenziale decrescente. Per modellizzare il fondo, dopo una serie di prove con diverse distribuzioni, si è deciso di usare una gaussiana e una distribuzione di Landau.

Bibliografia

- [1] BENETTONI M., GAZ A., LACAPRARA L., POSOCCO M., SARTORI P., STROILI R., TORASSA E. (INFN-University of Padova, Padova, Italy and Nagoya University, Nagoya, Japan), MUSSA R., TAMPONI U. (INFN-University of Torino, Torino, Italy), *The laser calibration system of the TOP detector*, Maggio 2016.
- [2] RENKER D. *Geiger-mode avalanche photodiodes, history, properties and problems*, 2006.
- [3] QING He, *Fitting Single Photo-electron peak*, Princeton University, August 30, 2010
- [4] ROOT, <https://root.cern.ch/>