

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE
Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali

Tesi di Laurea Triennale in Fisica

**CALIBRAZIONE DEL SISTEMA DI
SCINTILLATORI NEUCAL**

Candidato: **Alessio Tiberio**

Relatore: **Prof. Oscar Adriani**

Anno Accademico 2008/09

Indice

1	Introduzione	3
2	Neucal	5
3	Interazione di particelle cariche con la materia	9
3.1	Formula di Bethe-Bloch	10
3.2	Fluttuazioni nella perdita di energia	11
3.3	Raggi cosmici a terra	11
4	Acquisizione dati	13
4.1	Circuito di trigger	14
4.2	ADC	14
5	Analisi dati	16
5.1	Efficienza di raccolta	22
5.2	Equalizzazione dei guadagni	23
	Bibliografia	25

Capitolo 1

Introduzione

L'argomento di questo lavoro di tesi è la calibrazione del sistema di scintillatori di Neucal mediante la misura del guadagno in funzione della tensione di alimentazione dei fotomoltiplicatori; questo permetterà di risalire all'efficienza di raccolta e alla tensione da applicare ad ogni fotomoltiplicatore per far sì che tutti i moduli abbiano lo stesso guadagno. L'analisi è stata fatta acquisendo raggi cosmici in laboratorio.

CALET

Neucal è il prototipo di un rivelatore di neutroni che potrà essere utilizzato nell'esperimento CALET (CALorimetric Electron Telescope), che è una delle missioni candidate ad essere utilizzate sulla JEM_EF (Japanese Experiment Module Exposure Facility) della Stazione Spaziale Internazionale. CALET è essenzialmente un calorimetro concepito per la misura di elettroni con energia compresa tra 1GeV e 10TeV, e raggi γ tra 20 MeV e qualche TeV. Gli obiettivi principali della missione sono:

- localizzazione di sorgenti di accelerazione di raggi cosmici vicine (non più lontane di $\sim 1\text{kpc}$) tramite lo studio dello spettro energetico degli elettroni nella regione al di sopra del TeV;
- ricerca di materia oscura tramite la misura dello spettro di elettroni+positroni nella regione al di sotto del TeV
- ricerca di SUSY dark matter attraverso fotoni di alta energia;
- studio della composizione dei raggi cosmici fino a circa 1 PeV.

CALET è composto da un array di silicio (SIA), un calorimetro a immagine (IMC), un calorimetro ad assorbimento (WCAL) e un rivelatore di neutroni (NEUCAL). Un prototipo di CALET (CALET-POLAR, mostrato

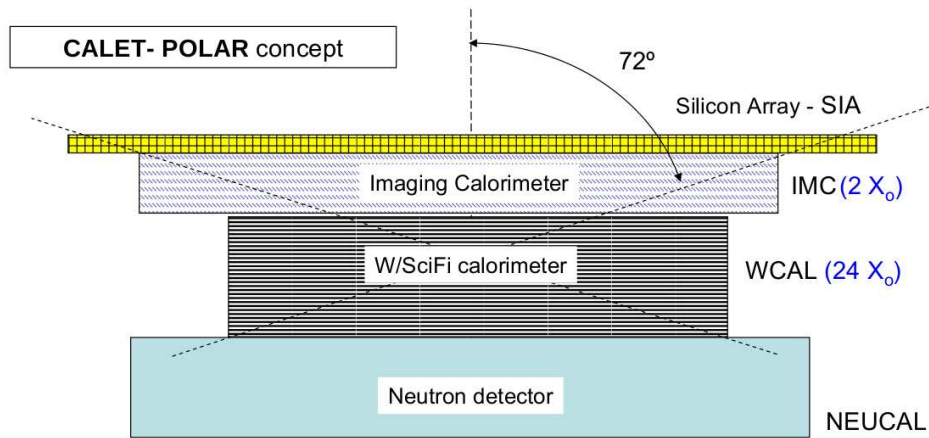


Figura 1.1: Disegno schematico del rivelatore CALET, nella configurazione che potrebbe essere utilizzata per voli su pallone (CALET-POLAR)

nella figura 1.1) potrebbe essere utilizzato per voli su pallone di lunga durata dall'artico.

Il problema fisico per cui sarà usato Neucal è quello di migliorare la discriminazione tra sciame elettronici e sciame adronici: in questo modo sarà quindi possibile riconoscere più facilmente gli elettroni nel fondo di protoni e nuclei (che sono $\sim 99\%$ dei raggi cosmici primari). Il metodo tradizionalmente utilizzato per questa discriminazione consiste nello studio della topologia della perdita di energia all'interno del calorimetro; l'idea nuova è invece di contare i neutroni che arrivano al di sotto del calorimetro, che saranno molto più numerosi in caso di particelle adroniche.

Se la missione sarà accettata, il lancio è previsto per il 2014.

Capitolo 2

Neucal

Il rivelatore Neucal (vedi Figura 2.1) è composto da nove moduli: ogni modulo è costituito da 3 scintillatori plastici (ELJEN EJ-230) 250mm x 85mm x 10mm sovrapposti, collegati a un fotomoltiplicatore (Hamamatsu R5946) tramite una guida di luce trapezoidale in plexiglas. Per l'accoppiamento tra i componenti è stato utilizzato del grasso ottico; non sono state utilizzate colle per permettere un eventuale riassettaggio in forma diversa dei componenti, a seguito delle prime misure effettuate sul prototipo. Dato che sarà usato come rivelatore di neutroni, oltre agli scintillatori sono presenti anche 5 tubi a ^3He , che però non sono stati usati in questo lavoro di tesi. Le dimensioni geometriche di Neucal sono riportate nelle Figure 2.2 e 2.3.

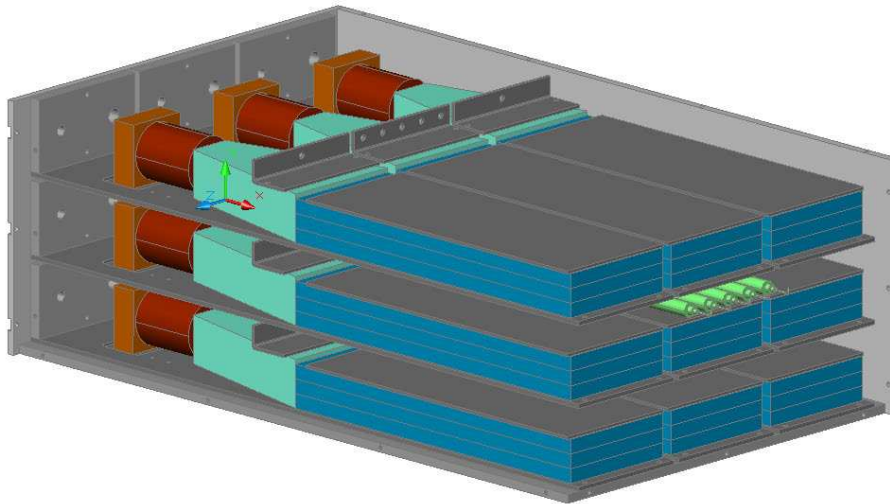


Figura 2.1: Disegno schematico di Neucal

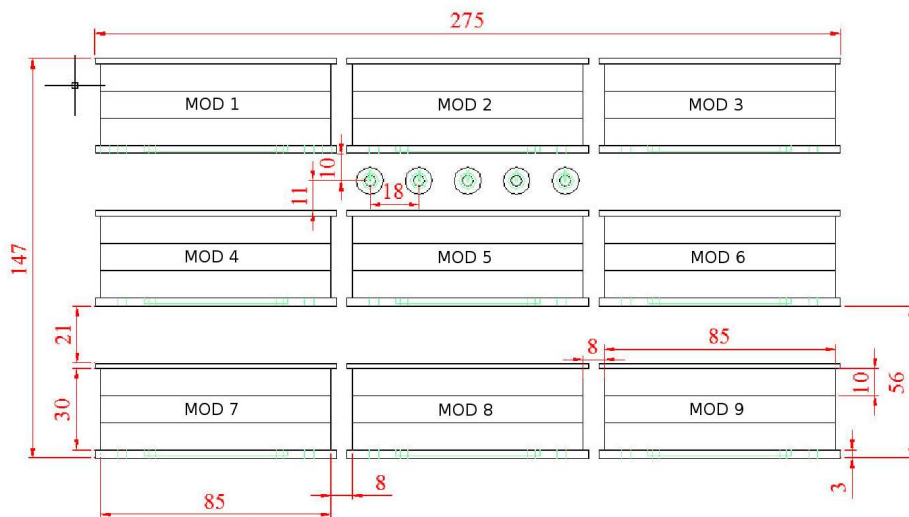


Figura 2.2: Neucal: proiezione frontale con l'indicazione della numerazione utilizzata per i vari moduli. Le misure sono espresse in mm

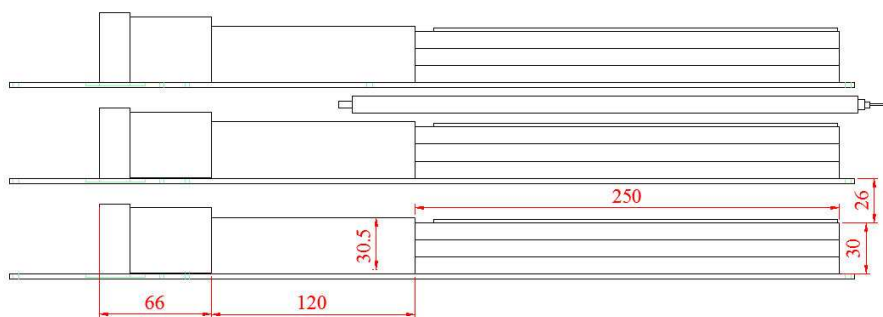


Figura 2.3: Neucal: proiezione laterale

L'alimentazione ai PMT (fotomoltiplicatori) è fornita da un modulo NIM di alta tensione a 4 canali: dovendo alimentare 9 PMT, sono stati usati solo i primi 3 canali del modulo; ogni canale è utilizzato per alimentare in parallelo 3 PMT.

HV Ch	0	1	2
PMT	1, 2, 3	4, 5, 6	7, 8, 9

Tabella 2.1: Cablaggio delle alimentazioni

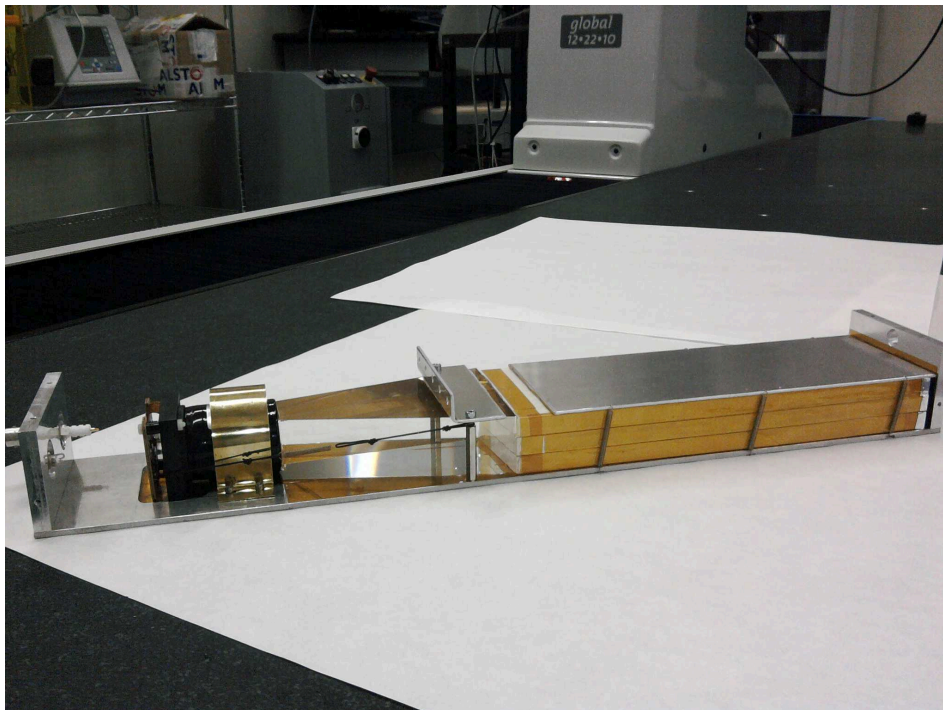


Figura 2.4: Fotografia di un modulo di Neucal

Le Figure 2.5 e 2.6 riportano alcune delle caratteristiche principali degli scintillatori EJ-230 e dei fotomoltiplicatori R5946, che verranno utilizzate nel corso dell'analisi dei dati descritta nei capitoli successivi.

Physical and Scintillation Constants:		EJ-228	EJ-230
Light Output, % Anthracene		67	64
Scintillation Efficiency, photons/1 MeV e ⁻¹		10,200	9,700
Wavelength of Max. Emission, nm		391	391
Rise Time, ns		0.5	0.5
Decay Time, ns		1.4	1.5
Pulse Width, FWHM, ns		1.2	1.3
No. of H Atoms per cm ³ , x 10 ²²		5.15	5.15
No. of C Atoms per cm ³ , x 10 ²²		4.69	4.69
No. of Electrons per cm ³ , x 10 ²³		3.33	3.33
Density, g/cc:		1.023	1.023

Polymer Base:	Polyvinyltoluene	Light Output vs. Temperature:	
Refractive Index:	1.58	At +60°C, L.O. = 95% of that at +20°C	
Vapor Pressure:	Is vacuum-compatible	No change from +20°C to -60°C	
Coefficient of Linear Expansion:	7.8 x 10 ⁻⁵ below +67°C		

Chemical Compatibility: Is attacked by aromatic solvents, chlorinated solvents, ketones, solvent bonding cements, etc. It is stable in water, dilute acids and alkalis, lower alcohols and silicone greases. It is safe to use most epoxies with EJ-228 and EJ-230.

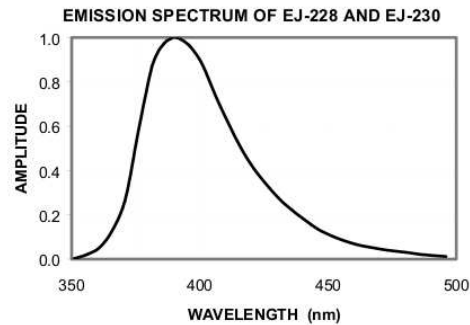


Figura 2.5: EJ-230 data sheet

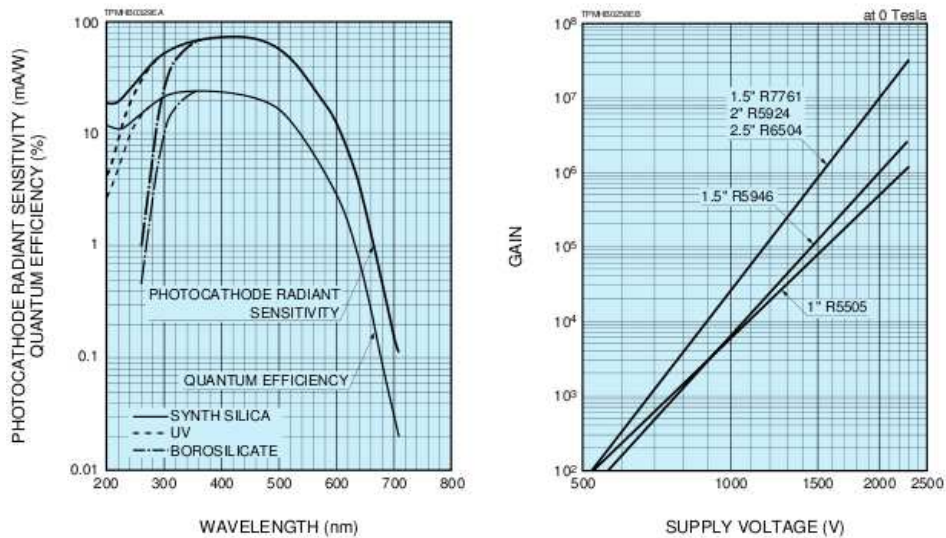


Figura 2.6: R5946 data sheet: efficienza quantica e variazione del guadagno con la tensione applicata

Capitolo 3

Interazione di particelle cariche con la materia

In questo capitolo daremo una breve descrizione dei meccanismi di interazione delle particelle cariche con la materia e delle caratteristiche dei raggi cosmici a terra, funzionali al lavoro presentato nei capitoli successivi. Le particelle cariche possono perdere energia nella materia con modalità diverse:

Ionizzazione ed eccitazione di un atomo: la particella incidente interagisce con un elettrone atomico, provocando la ionizzazione dell'atomo o la sua eccitazione; con la successiva diseccitazione viene emesso un fotone in genere di bassa energia.

Bremsstrahlung: la particella è accelerata dal campo elettrico dei nuclei del materiale e di conseguenza emette parte della sua energia cinetica sotto forma di fotoni.

Produzione di coppie elettrone-positrone: una particella carica di alta energia può produrre un fotone reale o virtuale nel campo elettrico dei nuclei, che in seguito dà luogo a una coppia $e^+ e^-$.

Interazione fotonucleare: particella e nuclei interagiscono anelasticamente, principalmente attraverso l'interazione nucleare, producendo particelle secondarie.

Per particelle elettromagnetiche pesanti (come i muoni) il meccanismo di ionizzazione ed eccitazione rimane dominante fino ad energie dell'ordine di centinaia di GeV, quando iniziano a dare contributi anche gli altri 3 modi che crescono con l'energia. Per gli elettroni invece il bremsstrahlung diventa importante già a decine di MeV, in quanto la perdita di energia è inversamente proporzionale a m^2 .

3.1 Formula di Bethe-Bloch

La perdita di energia media di una particella pesante (rispetto all'elettrone) per ionizzazione è descritta dalla formula di Bethe-Bloch [1] (riportata nella Figura 3.1):

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi N_A r_e^2 m_e c^2 z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e c^2 \gamma^2 \beta^2}{I} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\gamma)}{2} \right]$$

dove: N_A è il numero di Avogadro, r_e e m_e sono il raggio classico e la massa dell'elettrone, z è la carica della particella incidente, Z e A sono la carica e il peso atomico del materiale bersaglio, $\beta = \frac{v}{c}$ con v e c velocità della particella e della luce, γ è il fattore di Lorentz, I è la costante di ionizzazione (dipendente dal materiale, $\sim 16 Z^{0.9}$ eV per $Z > 1$) e δ rappresenta l'azione di schermo del campo elettrico da parte degli elettroni atomici; dx rappresenta la densità di superficie: $dx = \rho ds$ con ρ densità del materiale (in g cm^{-3}) e ds lunghezza (in cm). L'equazione di Bethe-Bloch descrive un andamento che per basse energie va come $\frac{1}{\beta^2}$ e ha un ampio minimo per $\beta\gamma \sim 4$; in questa condizione le particelle sono relativistiche ($\beta \sim 1$), vengono dette *minimum ionizing particles (mip)* e rilasciano tutte la stessa quantità di energia ($\sim 2 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$). Dopo il minimo la perdita di energia ha una crescita logaritmica, che però satura per via del termine con δ (proporzionale a $\ln\gamma$ per alte energie). In prima approssimazione si può quindi pensare che tutte le particelle ultrarelativistiche si comportino come *mip*.

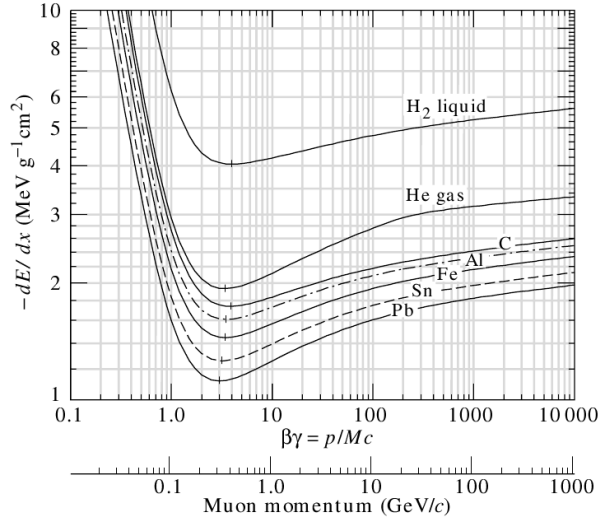


Figura 3.1: Andamento della formula di Beth-Bloch in funzione dell'impulso dei muoni [2]

3.2 Fluttuazioni nella perdita di energia

La formula di Bethe-Bloch dà solo il valore medio dell'energia rilasciata da una particella carica che attraversa un materiale. In realtà le perdite di energia sono distribuite intorno a questo valore: nel caso di spessori sottili seguono la distribuzione di Landau (vedi Figura 3.2), che presenta una lunga coda per alti rilasci energetici, e che si può approssimare come $f(E) = P_0 e^{\frac{1}{2}(\lambda + e^{-\lambda})}$ con $\lambda = \frac{E - P_1}{P_2}$; P_0 è collegata all'altezza del massimo, P_1 è l'ascissa del massimo (il *Most Probable Value* o *MPV*) e P_2 è un parametro di larghezza ($\sim \frac{1}{4}$ della larghezza a metà altezza).

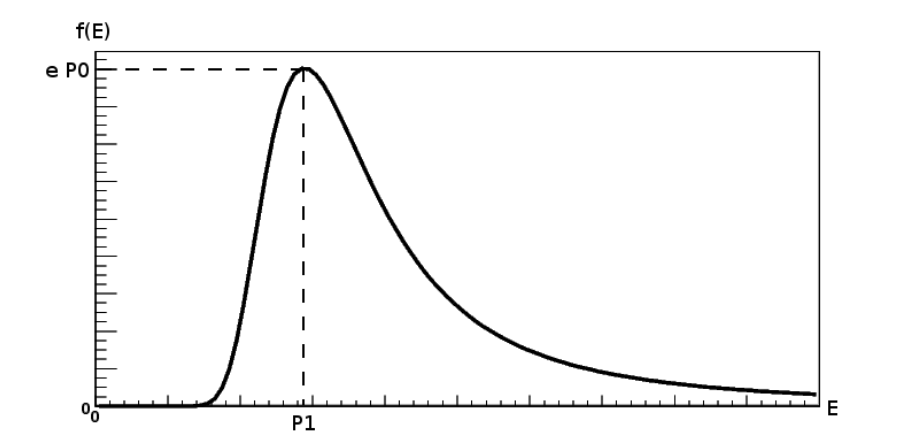


Figura 3.2: Una distribuzione di Landau con indicati i parametri P_0 e P_1

3.3 Raggi cosmici a terra

I raggi cosmici che arrivano a terra (vedi Figura 3.3) sono composti per la maggior parte da muoni, con un flusso di $\sim 90 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$, molto maggiore di quello di protoni ed elettroni (rispettivamente ~ 2 e $0.2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$).

Dallo spettro in energia dei muoni che arrivano a terra riportato in Figura 3.4 si vede che praticamente tutti sono *mip* e che il flusso di particelle a energie di centinaia di GeV è trascurabile: per queste particelle si ha quindi praticamente solo perdita di energia per ionizzazione.

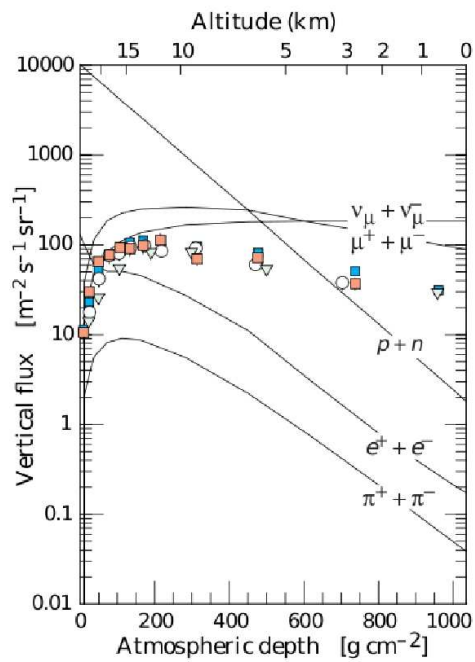


Figura 3.3: Composizione dei raggi cosmici in funzione dell'altitudine

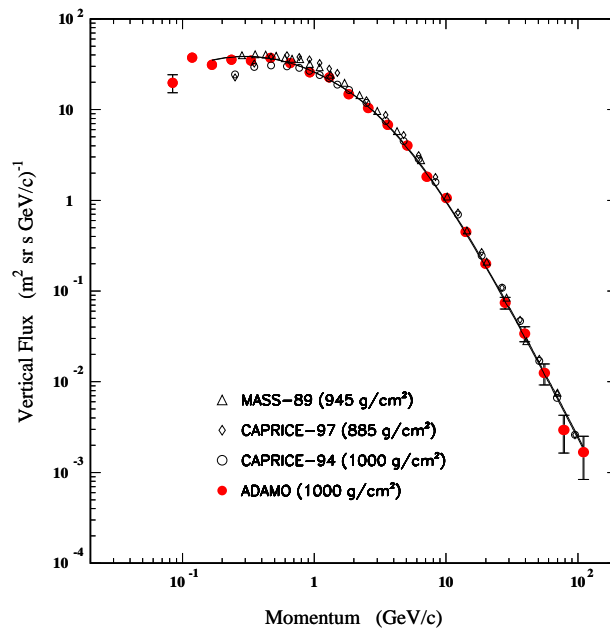


Figura 3.4: Spettro in impulso dei muoni che arrivano a terra

Capitolo 4

Acquisizione dati

Le misure per caratterizzare il prototipo di Neucal al variare della tensione di alimentazione applicata ai PMT sono state fatte a partire da 1700 V, a passi di 50 V, fino ad arrivare a 2000 V. Avendo 9 fotomoltiplicatori e solo 8 canali nell'ADC utilizzato per la conversione analogico/digitale dei segnali dei PMT (la scheda usata è la scheda VME CAEN V1731 [3]), si sono rese necessarie 2 acquisizioni per ogni tensione, in ognuna delle quali sono stati usati i primi 6 canali della scheda ADC. Tutta la procedura è stata poi ripetuta per avere a disposizione 2 set di misure. La tabella 4.1 riporta la descrizione delle connessioni Canale ADC-PMT nelle due configurazioni.

Config 1		Config 2	
ADC Ch	PMT	ADC Ch	PMT
0	7	0	9
1	4	1	6
2	1	2	3
3	8	3	8
4	5	4	5
5	2	5	2

Tabella 4.1: Cablaggio delle due configurazioni utilizzate. Per la definizione del posizionamento geometrico dei PMT si veda la Figura 2.2

Per generare il segnale di trigger sono stati usati 2 ulteriori scintillatori (uno sopra e uno sotto il sistema), posti in modo da coprire quasi interamente una delle colonne laterali e metà di quella centrale, come riportato in Figura 4.1.

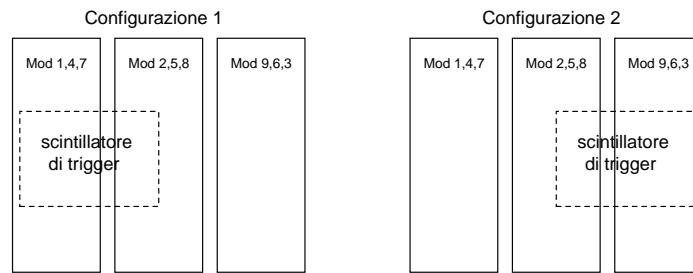


Figura 4.1: Posizionamento degli scintillatori di trigger rispetto ai moduli di Neucal (non in scala)

4.1 Circuito di trigger

I segnali degli scintillatori di trigger vengono mandati a due discriminatori con soglia impostata a 35 mV, dopodiché ne viene fatto l'AND per triggerare solo sulle loro coincidenze (vedi Figura 4.2). Quando c'è una coincidenza viene generato un segnale di busy per evitare che durante il tempo di acquisizione arrivino altri trigger all'ADC: questo è ottenuto attraverso una logica programmabile che dà uscita a 1 solo quando i due segnali di trigger sono a 1 e il busy è a 0. Quando l'acquisizione è finita, il sistema di acquisizione manda un segnale di reset che annulla il busy. Il segnale di busy deve essere ritardato (~ 20 ns) per dare tempo all'ADC di ricevere il trigger.

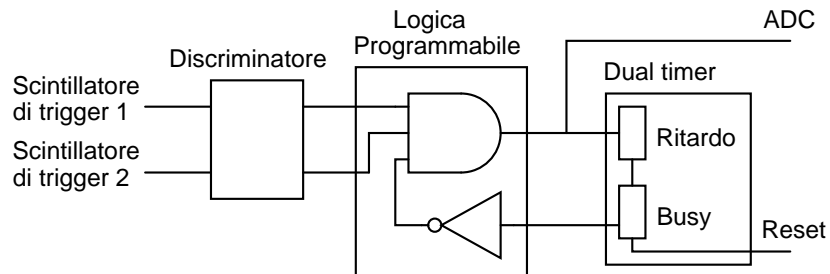


Figura 4.2: Circuito di trigger

4.2 ADC

La scheda CAEN V1731 è un modulo VME che permette di campionare segnali analogici su un range di 1 V con una frequenza di campionamento di 500 MHz: decidendo di coprire un intervallo di tempo di $1 \mu\text{s}$ si sono resi necessari 500 campionamenti. Il range temporale di acquisizione è stato scelto in modo da centrare il segnale che ha dato il trigger per quell'evento.

L'ADC ha un fondo scala di 1 V ed una dinamica di 8 bit (0-255): ogni unità ADC corrisponde quindi a ~ 4 mV. Dato che i segnali dei PMT sono negativi, la scheda è usata in logica negativa, con un piedistallo impostato a 250 unità ADC. Per l'acquisizione è stata usata la modalità *zero suppression*: sul file dati vengono salvati solo i segnali che scendono sotto la soglia di 247 unità ADC (corrispondenti a una ampiezza del segnale di ~ 12 mV), insieme agli 80 campionamenti precedenti e successivi.

Complessivamente sono stati acquisiti 28 files di dati (in due diversi set, a e b), ognuno contenente circa 5000 eventi. L'elenco dei files acquisiti è mostrato in tabella 4.2.

File dati	Config	# eventi	HV[V]
cosmic_V1731_HV1700_1a.dat	1	5000	1700
cosmic_V1731_HV1750_1a.dat	1	5000	1750
cosmic_V1731_HV1800_1a.dat	1	5000	1800
cosmic_V1731_HV1850_1a.dat	1	5000	1850
cosmic_V1731_HV1900_1a.dat	1	5000	1900
cosmic_V1731_HV1950_1a.dat	1	5000	1950
cosmic_V1731_HV2000_1a.dat	1	5000	2000
cosmic_V1731_HV1700_2a.dat	2	5000	1700
cosmic_V1731_HV1750_2a.dat	2	5000	1750
cosmic_V1731_HV1800_2a.dat	2	5000	1800
cosmic_V1731_HV1850_2a.dat	2	5000	1850
cosmic_V1731_HV1900_2a.dat	2	5000	1900
cosmic_V1731_HV1950_2a.dat	2	5000	1950
cosmic_V1731_HV2000_2a.dat	2	5000	2000
cosmic_V1731_HV1700_1b.dat	1	5000	1700
cosmic_V1731_HV1750_1b.dat	1	5000	1750
cosmic_V1731_HV1800_1b.dat	1	5000	1800
cosmic_V1731_HV1850_1b.dat	1	5000	1850
cosmic_V1731_HV1900_1b.dat	1	5000	1900
cosmic_V1731_HV1950_1b.dat	1	5000	1950
cosmic_V1731_HV2000_1b.dat	1	5000	2000
cosmic_V1731_HV1700_2b.dat	2	5000	1700
cosmic_V1731_HV1750_2b.dat	2	5000	1750
cosmic_V1731_HV1800_2b.dat	2	5000	1800
cosmic_V1731_HV1850_2b.dat	2	5000	1850
cosmic_V1731_HV1900_2b.dat	2	5000	1900
cosmic_V1731_HV1950_2b.dat	2	5000	1950
cosmic_V1731_HV2000_2b.dat	2	5000	2000

Tabella 4.2: Files acquisiti

Capitolo 5

Analisi dati

Per analizzare i dati è stato usato il programma di analisi ROOT, sviluppato al CERN [4]. Il primo compito del programma di analisi dati è quello di calcolare le energie rilasciate dalle particelle negli scintillatori e trovarne la distribuzione. Per trovare l'energia rilasciata nello scintillatore è necessario integrare il segnale dei PMT; per farlo sono stati sommati i valori dei singoli campionamenti della scheda ADC (dopo aver sottratto il piedistallo, che è stato calcolato come media dei primi 30 campionamenti di ogni evento): in questo modo abbiamo un valore del segnale espresso in unità ADC, che dovrà poi essere opportunamente convertito in $V \cdot s$. Con questi valori (per ora sempre espressi in unità ADC) è stato riempito un istogramma per ogni PMT e per ogni tensione, che poi è stato fittato con una distribuzione di Landau; per i moduli 2, 5 e 8 (quelli centrali) per ogni tensione sono stati presi i dati da entrambi i files acquisiti (corrispondenti alle configurazioni 1 e 2) e inseriti nello stesso istogramma.

Per un esempio degli istogrammi ottenuti per un solo modulo e per tutti i 9 moduli (in questo caso rispettivamente a 1900V e 1800V di tensione applicata) si vedano le Figura 5.1 e 5.2.

Quello che si nota subito in quasi tutti gli istogrammi è un picco vicino allo 0: la bassa soglia dell'algoritmo di zero suppression (3 conteggi ADC, circa 12 mV) fa sì che a volte il rumore provochi dei segnali spuri e quindi il relativo integrale sia molto piccolo; per questo motivo è stato deciso di prendere come primo estremo del fit il punto in cui la distribuzione di Landau ha come valore circa metà del massimo e come secondo estremo il punto a distanza 8 volte il parametro P_2 dal picco (per prendere solo la prima parte della coda); questi punti sono stati trovati facendo prima un fit di prova su tutto l'intervallo e poi iterando il processo 5 volte. Una volta effettuati i fit per tutti i moduli a tutte le tensioni, è stato scelto come valore da riportare in grafico in funzione della tensione il MPV ottenuto dal fit, piuttosto che il valor medio dell'istogramma, perché quest'ultimo è troppo dipendente dai valori della coda della distribuzione e quindi dall'intervallo in cui si effettua

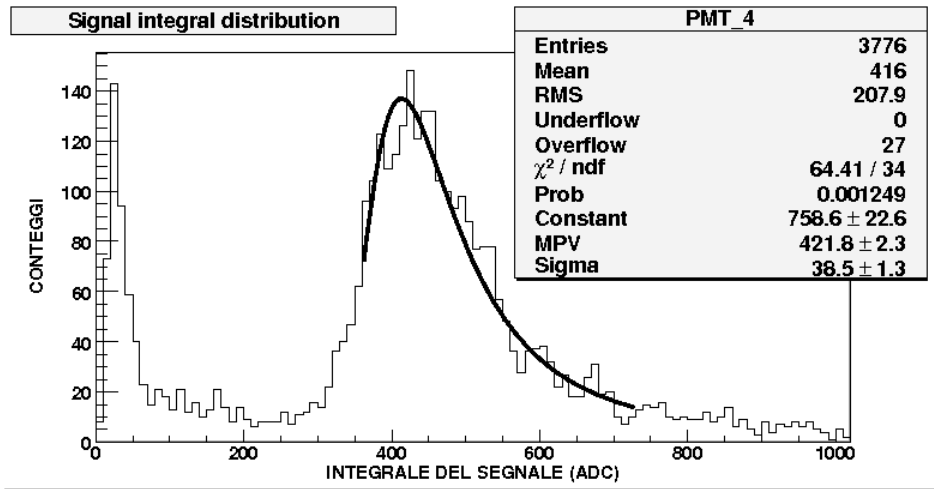


Figura 5.1: Fit della distribuzione del segnale del Modulo 4 a 1900V relativo al secondo set di dati

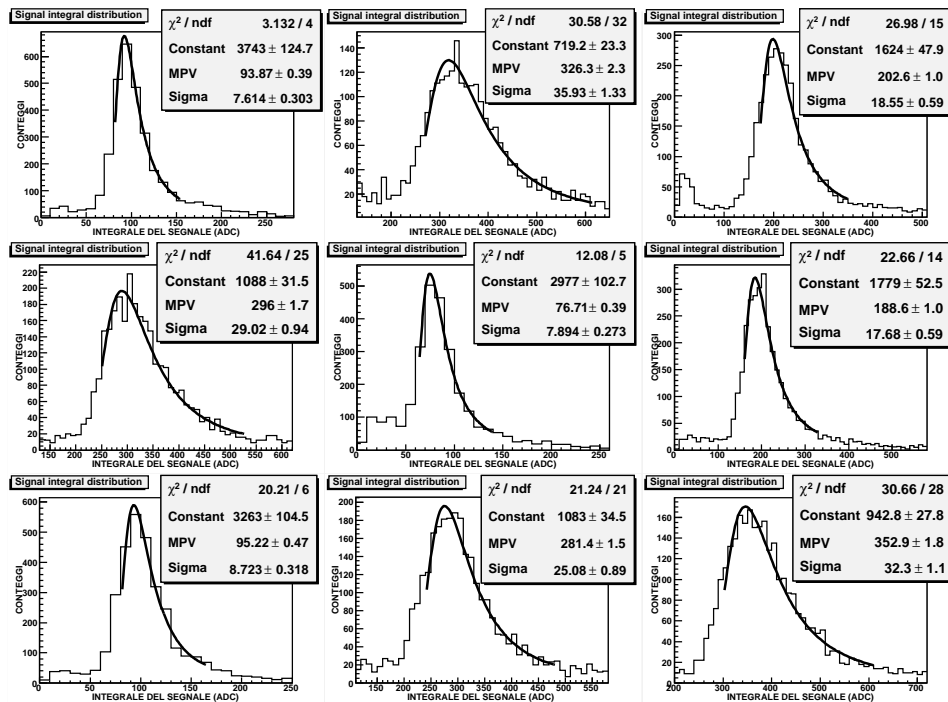


Figura 5.2: Fit delle distribuzioni dei segnali ottenuti a 1800V relativi al primo set di dati

la media.

I risultati ottenuti sono riportati nelle Figure 5.3, 5.4 e 5.5, che riportano l'andamento dell'ampiezza del segnale (per la precisione il *Most Probable Value* della distribuzione di Landau che meglio approssima i dati sperimentali) al variare della tensione applicata, in scala doppio logaritmica. Su questi grafici è stato effettuato anche un fit lineare, per trovare la retta che meglio interpola i dati sperimentali.

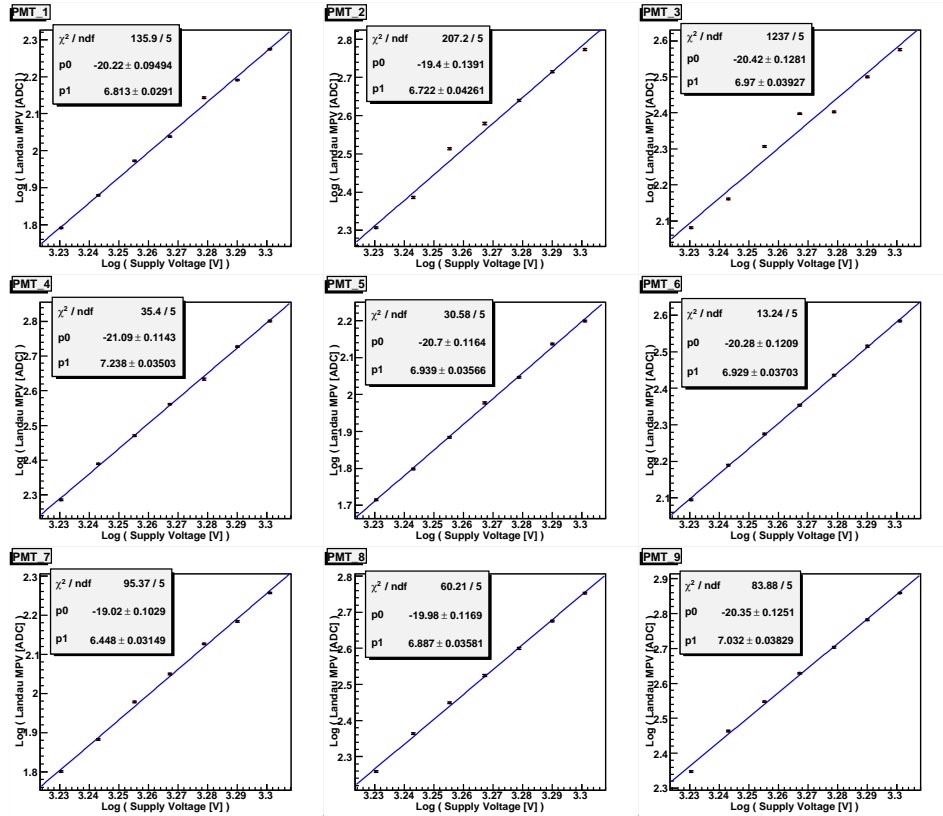


Figura 5.3: Andamenti *MPV*-tensione relativi al primo set di dati per tutti i 9 moduli

Dai grafici del guadagno dei fotomoltiplicatori in funzione della tensione dati dal costruttore (riportati in Figura 2.6) ci si aspetta infatti un andamento con legge di potenza, quindi lineare per i logaritmi: $\text{Log}(S) = p_0 + p_1 \text{Log}(HV)$.

Come si vede dai grafici, per 6 dei 9 moduli l'andamento ottenuto è in accordo entro gli errori con quello previsto. Per 3 moduli (moduli 1, 2 e 3), però, ci sono punti fuori dall'andamento lineare ben al di là delle barre d'errore; inoltre confrontando questi dati con quelli del secondo set di misure si trovano deviazioni molto più grandi degli errori ottenuti dal fit. Per inda-

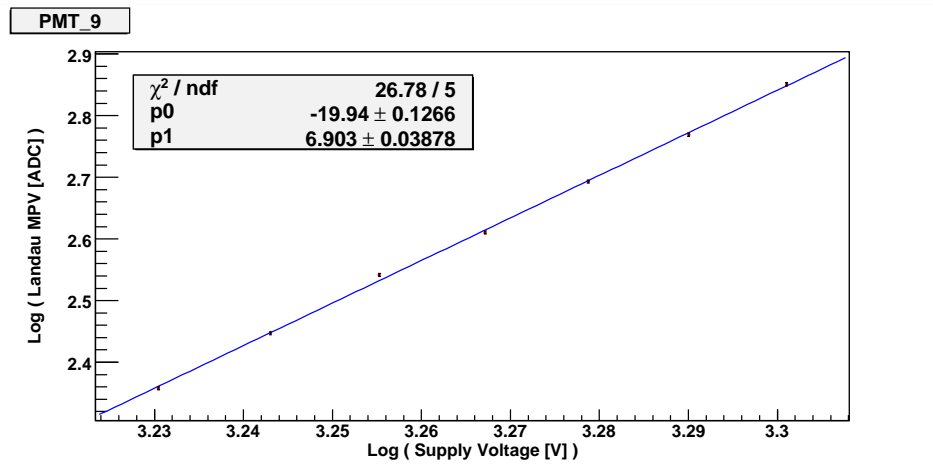


Figura 5.4: Andamento *MPV*-tensione del Mod 9 relativo al secondo set di dati

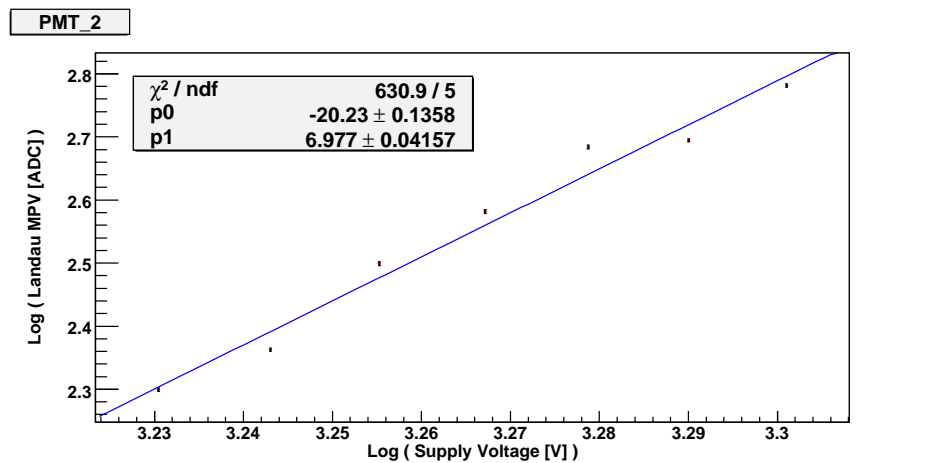


Figura 5.5: Andamento *MPV*-tensione del Mod 2 relativo al secondo set di dati

gare su questo fatto, ogni singolo file è stato diviso in 3 parti temporalmente successive, ognuna delle quali elaborata separatamente: i dati ottenuti nei 3 periodi sono risultati incompatibili tra loro, il che fa pensare a una variazione che dipende dal tempo (un'acquisizione di 5000 eventi dura circa 3 ore e 15 minuti); per avere conferma dell'ipotesi di dipendenza dal tempo di queste fluttuazioni, sono stati analizzati prima solo gli eventi pari e poi solo quelli dispari: i dati sono risultati compatibili; questo sembra confermare l'ipotesi di una lenta dipendenza temporale. A causa di questa variazione temporale della risposta dei PMT, abbiamo quindi deciso di assegnare un errore sistematico sulla stima del *MPV*.

Per cercare di dare una stima di questo errore sistematico nella stima del *MPV*, per ogni tensione sono stati presi i 2 files corrispondenti e divisi ognuno in 3 parti; dei 6 valori *MPV* ottenuti dai fit è stata fatta la media pesata con l'inverso del quadrato degli errori per dare la migliore stima del *MPV*:

$$\bar{y} = \frac{\sum_i y_i \frac{1}{\sigma_{y_i}^2}}{\sum_i \frac{1}{\sigma_{y_i}^2}}$$

Come errore sistematico sulla stima del *MPV* per ogni modulo e per ogni tensione è stato preso lo scarto massimo da questo valor medio. Come errore statistico invece è stata presa la stima ottenuta dalla media pesata:

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{\sum_i \frac{1}{\sigma_{y_i}^2}}}$$

Per essere conservativi, i due errori (statistico e sistematico) sono stati sommati linearmente. Mettendo in grafico questi valori del *MPV* con il loro errore complessivo (statistico+sistematico) e ripetendo i fit lineari in scala doppio-logaritmica, abbiamo ottenuto i risultati mostrati nelle Figure 5.6 e 5.7.

Come si vede dai grafici, adesso le deviazioni dall'andamento lineare sono dell'ordine dell'errore. La tabella 5.1 riporta i risultati finali dei fit lineari ($p_0 + p_1 x$).

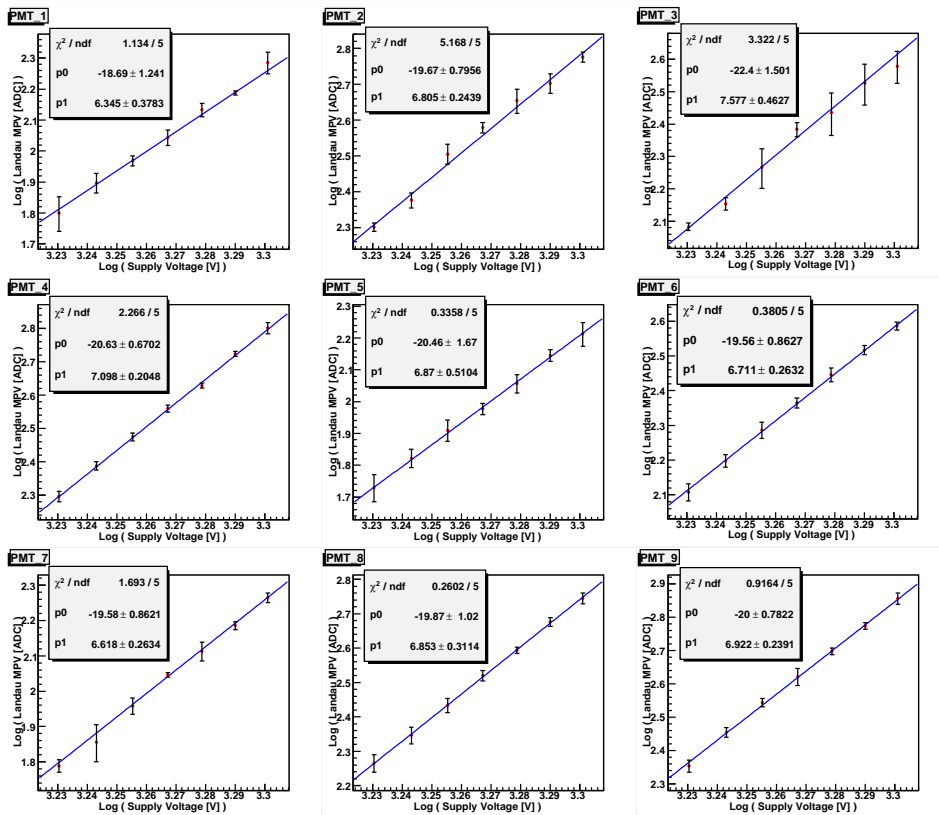


Figura 5.6: Andamento *MPV*-tensione con errore sistematico e statistico

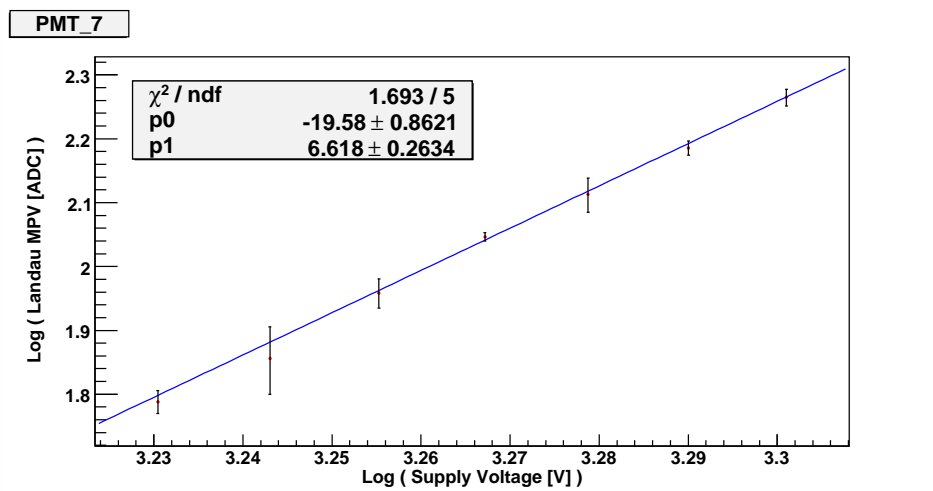


Figura 5.7: Andamento *MPV*-tensione con errore sistematico e statistico del Mod 7

Mod #	p_0	p_1
1	-18.7 ± 1.2	6.3 ± 0.4
2	-19.7 ± 0.8	6.8 ± 0.2
3	-22.4 ± 1.5	7.6 ± 0.5
4	-20.6 ± 0.7	7.1 ± 0.2
5	-20.5 ± 1.7	6.9 ± 0.5
6	-19.6 ± 0.9	6.7 ± 0.3
7	-19.6 ± 0.9	6.6 ± 0.3
8	-19.9 ± 1.0	6.9 ± 0.3
9	-20.0 ± 0.8	6.9 ± 0.2

Tabella 5.1: Parametri dei fit lineari $\text{Log}(S) = p_0 + p_1 \text{Log}(\text{HV})$

5.1 Efficienza di raccolta

Una volta trovato l'andamento della risposta dei moduli in funzione della tensione di alimentazione, è possibile dare una stima dell'efficienza di raccolta della luce nel sistema scintillatori - guida di luce; infatti l'integrale del segnale (in tensione) in uscita dal PMT può essere espresso come:

$$\int V dt = n_\gamma \varepsilon^R \varepsilon^{QE} M e R$$

dove:

n_γ = numero di fotoni creati dalla particella incidente;

ε^R = efficienza di raccolta del sistema ottico scintillatore-guida di luce (fotoni incidenti sul fotocatodo / fotoni creati dalla particella);

ε^{QE} = efficienza quantica del fotocatodo del PMT (elettroni creati al catodo / fotoni incidenti sul fotocatodo);

M = guadagno del fotomoltiplicatore;

e = carica dell'elettrone;

R = resistenza da 50Ω su cui si chiude il circuito (ai capi della quale si misura il segnale in tensione).

Dato che i raggi cosmici che arrivano a terra sono quasi tutte *mip*, il numero di fotoni creato è sempre lo stesso; infatti il numero di fotoni è

$$n_\gamma = \varepsilon^{SC} \left(\frac{dE}{dx} \right)_{mip} x$$

che è una quantità costante: gli scintillatori usati hanno un'efficienza di scintillazione ε^{SC} di 9700 MeV^{-1} (vedi Figura 2.5), uno spessore x di 1 cm (quindi 3 cm per tre sovrapposti) e le *mip* hanno una perdita di energia di $2.019 \text{ MeV cm}^{-1}$ nel materiale; abbiamo quindi $n_\gamma = 5.88 \cdot 10^4$. ε^{QE} è data dal costruttore ed è del 22% (si veda la Figura 2.6), $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$,

$R = 50\Omega$ e M è stato misurato per ogni PMT dal Gruppo AMS di Bologna (che ci ha fornito i fotomoltiplicatori) [5]; i guadagni M ottenuti per $HV = 2000V$ sono riportati in Tabella 5.2.

PMT	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$M[10^6]$	0.89	3.51	0.92	0.68	0.89	2.29	1.04	0.82	0.86

Tabella 5.2: Guadagni dei PMT misurati a una tensione di 2000V

L'integrale del segnale espresso in $V \cdot s$ si ottiene moltiplicando il valore S (in unità ADC) per $1/256 \frac{V}{ADC}$ (la conversione ADC-Volt) e per 2 ns (l'intervallo tra i campionamenti). Dai fit lineari descritti in precedenza, che ci hanno permesso di ricavare i parametri p_0 e p_1 della retta, è possibile conoscere il logaritmo di S (e quindi S) per un particolare valore della tensione; ponendo $HV=2000V$ (valore della tensione per la quale sono stati misurati i guadagni dei PMT) si ottengono i seguenti valori per ϵ^R :

Mod #	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ϵ^R [%]	1.53	1.33	3.45	6.91	1.41	1.28	1.33	5.17	6.03

Tabella 5.3: Efficienza di raccolta di ogni modulo

Si osservi che le efficienze di raccolta della luce ottenute (comprese tra l'1% e il 7%) non sono molto uniformi, ma presentano grosse differenze tra di loro. Questo è probabilmente dovuto a difetti negli accoppiamenti ottici tra scintillatore, guida di luce e PMT, dovuti al fatto che non sono state utilizzate colle ma solo grasso ottico. Si noti infine che l'efficienza ϵ^R massima che si potrebbe ottenere sarebbe dell'ordine del 10%, valore ottenuto da una simulazione della propagazione dei fotoni di scintillazione nel sistema ottico.

5.2 Equalizzazione dei guadagni

Una volta trovato l'andamento del guadagno in funzione della tensione di alimentazione, è possibile risalire alla tensione da fornire ad ogni fotomoltiplicatore per ottenere un certo guadagno (fissato) interpolando la retta del fit lineare sui logaritmi. Fissando un guadagno \hat{S} , il corrispondente logaritmo della tensione è

$$\text{Log}(\hat{HV}) = \frac{\text{Log}\hat{S} - p_0}{p_1}$$

Per quanto riguarda l'errore su questa quantità bisogna fare attenzione al fatto che i parametri p_0 e p_1 non sono indipendenti: quando si effettua la propagazione dell'errore si deve quindi considerare anche la covarianza dei

due parametri p_0 e p_1 . Ponendo per semplicità $\text{Log}S \equiv y$ e $\text{Log}(HV) \equiv x$ la varianza di \hat{y} puo' essere stimata come [6]:

$$\text{Var}(\hat{y}) = \frac{\sigma_y^2}{N} \left[1 + \frac{(\hat{x} - \bar{x})^2}{\text{Var}(x)} \right]$$

dove σ_y è l'errore sulle y , N è il numero di misure, $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N x_i$ e $\text{Var}(x) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=0}^N (x_i - \bar{x})^2$ sono media e varianza delle x ; nel nostro caso $N = 7$, $\bar{x} = 3.27$ e $\text{Var}(x) = 6.5 \cdot 10^{-4}$. La formula semplificata sopra indicata vale solo per errori sulle y tutti uguali, condizione non verificata nel nostro caso. Per dare comunque una stima dell'incertezza su \hat{y} si è deciso di prendere l'errore medio ottenuto per ogni modulo, come riportato nella Tabella 5.4.

Mod #	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\bar{\sigma}_y [10^{-2}]$	2.7	2.1	4.2	1.2	3.0	1.8	2.2	1.8	1.5

Tabella 5.4: Errore medio su $y = \text{Log}S$ di ogni modulo

L'errore su \hat{x} puo' essere quindi ricavato come

$$\sigma_{\hat{x}} = \frac{\sigma_{\hat{y}}}{p_1} = \frac{\sqrt{\text{Var}(\hat{y})}}{p_1}$$

Fissando $\hat{y} = \text{Log}\hat{S} = 2.5$ come guadagno di riferimento (che corrisponde a $\hat{S} \sim 316$ unità ADC = $2.47 \cdot 10^{-9}$ V · s) abbiamo ottenuto per i valori delle tensioni che equalizzano la risposta dei moduli i risultati riportati nella Tabella 5.5.

Mod #	\hat{HV}
1	2186±25
2	1811±5
3	1933±12
4	1814±3
5	2198±26
6	1937±6
7	2169±18
8	1838±4
9	1780±4

Tabella 5.5: Tensioni di alimentazione che equalizzano il guadagno di tutti i moduli

Si prevede nel prossimo periodo di effettuare delle acquisizioni con questi valori di tensioni per verificare che effettivamente i guadagni dei 9 moduli siano compatibili tra di loro.

Bibliografia

- [1] C. Grupen, *Particle Detectors*, Cambridge University Press.
- [2] C. Amsler *et al.*, *The Review of Particle Physics*, Physics Letters B667, 1 (2008) and 2009 partial update for the 2010 edition.
- [3] <http://www.caen.it>.
- [4] <http://root.cern.ch>.
- [5] <http://ams.bo.infn.it/database>.
- [6] M. Loreti, *Teoria degli Errori e Fondamenti di Statistica*, Edizione privata fuori commercio (<http://wwwcdf.pd.infn.it/labo/INDEX.html>), Dicembre 2006.