



Esperienza preliminare

Samuele Chiarugi e Julia Favaro

Laboratorio Interazioni Fondamentali 2024-2025

Indice

1	Introduzione	1
2	Apparato Sperimentale	1
3	Caratterizzazione individuale dei PMT	1
3.1	Conteggi al variare della tensione di alimentazione	3
4	Sistema di coincidenza	4
4.1	Stima dell'efficienza dei PMT	4
A	Riflessione degli impulsi	6
Ottobre 2024.....		Relazione di laboratorio

1 Introduzione

In questa relazione esponiamo il lavoro da noi svolto durante l'esperienza preliminare del corso di Laboratorio di Interazioni Fondamentali 2024-2025, tenuto dai professori E. Paoloni e G. Punzi.

Scopo di questa esperienza era quello di prendere confidenza con l'apparato sperimentale per l'individuazione e il conteggio dei raggi cosmici. Nel seguito di questa relazione ci riferiamo al SetUp04 (sezione 2) del Lab IV del Dipartimento di Fisica dell'Università di Pisa ed in particolare ai fotomoltiplicatori (o PMT) 03, 04 e 05.

Nella sezione 3 illustreremo l'andamento dell'uscita dei PMT al variare delle tensioni di alimentazione, le caratteristiche principali dei loro segnali discriminati e i loro conteggi.

Successivamente in sezione 4 presenteremo l'apparato di coincidenza e i conteggi per ciascuna coppia di fotomoltiplicatori. Infine nella sezione 4.1 stimeremo l'efficienza dei singoli nostri PMT, tenendo conto dei conteggi tripli e delle doppie accidentali che non corrispondono all'arrivo di un vero raggio cosmico.

Per completezza, nell'appendice A faremo una piccola digressione sull'importanza delle resistenze di terminazione e sull'utilizzo corretto dei cavi LEMO nella detection per evitare riflessione dei segnali.

2 Apparato Sperimentale

Alla nostra postazione sperimentazione, era presente una struttura (in figura 1) con una serie di scintillatori sovrapposti l'uno sull'altro, di dimensione 55.2 ± 0.1 cm x 26.8 ± 0.1 cm, collegati con delle guide d'onda a dei fotomoltiplicatori. Per questa esperienza ci siamo limitati ai PMT03 (EMI9954B type), PMT04 (EMI9814 type) e PMT05 (XP2262 type). Tutte le componenti di questo sistema erano appositamente schermate dalla luce ambientale.

Avevamo poi a disposizione un rack (figura 2) su cui erano disposti i seguenti strumenti:

- un oscilloscopio digitale Tektronics (TEK1012C-Edu),
- alimentatori e cavi di alimentazione per i fotomoltiplicatori

- e un crate NIM con i seguenti moduli :
 - un discriminatore,
 - un sistema di coincidenza,
 - e un contatore.

L'alimentazione dei fotomoltiplicatori è controllata da computer con il software General Control Software GECO.

Disponevamo infine di un multimetro e cavi LEMO (con un ritardo di 2 e 3 ns e resistenza caratteristica 50Ω) con i rispettivi adattatori LEMO/BNC. Abbiamo avuto cura di inserire le resistenze di terminazione da 50Ω in corrispondenza di ogni T, per evitare la dispersione e la riflessione degli impulsi.



Figura 1: Sistema di detection costituito da 3 scintillatori plastici sovrapposti, con delle guide d'onda che portano a 3 fotomoltiplicatori.

3 Caratterizzazione individuale dei PMT

Per questa sezione iniziale, abbiamo utilizzato il PMT05. Per prima cosa abbiamo collegato l'uscita del fotomoltiplicatore al CH1 dell'oscilloscopio in modo da poter visualizzare il segnale, impostando un fondoscala di 20 mV/div e una scala temporale di 25 ns/div. Abbiamo inizialmente impostato la condizione di trigger su AUTO per poi spostarci su MANUALE con rampa negativa e soglia -30.4 mV. Abbiamo poi aumentato gradualmente l'alimentazione cercando il V_{set} al quale si iniziano a visualizzare i

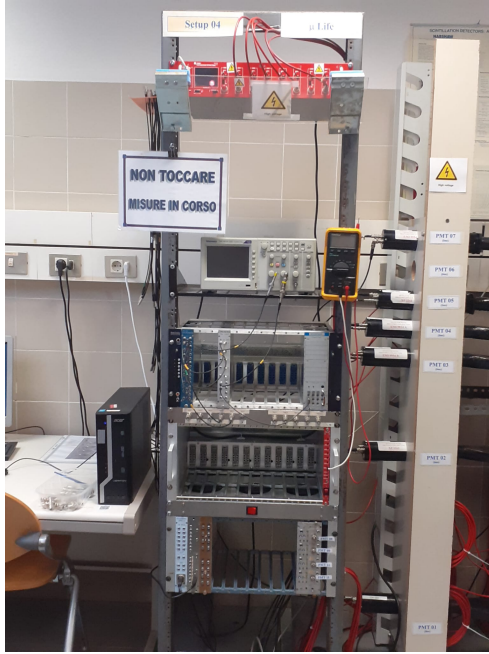


Figura 2: Rack del nostro SetUp04. Dall'alto verso il basso: alimentazioni per i PMT, un oscilloscopio Tektronics, un crate con un discriminatore e un modulo di coincidenza a sinistra e a destra un contatore. Al di sotto ulteriori moduli di coincidenza e discriminatori, che non abbiamo utilizzato. Appesi al rack: a sinistra cavi coassiali LEMO con diversi tempi di ritardo, un multimetro a destra.

segnale: $V_{set} \approx 1450V$ con una frequenza di trigger < 10 Hz.

A frequenze basse di trigger, la misura riportata su schermo dall'oscilloscopio perde di accuratezza e stabilità. Ad esempio, ad una tensione di alimentazione impostata a 1600.00 V, considerando la media statistica e la deviazione standard di un set di 3 misure dell'oscilloscopio, si registra una frequenza di trigger di 45 ± 22 Hz.

Abbiamo in seguito misurato l'andamento della frequenza di trigger al variare della sua soglia. E' stata impostato un voltaggio di alimentazione pari a 1680.00 V su GECO, e sono state svolte le misurazioni presenti nella seguente tabella 1. Anche in questo caso i valori di f_{trig} sono la media di tre misurazioni.

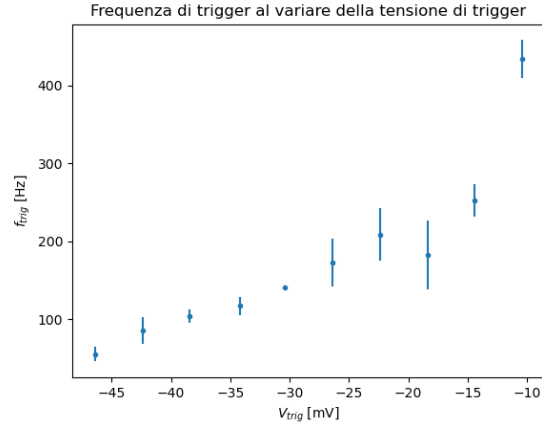


Figura 3: Andamento crescente della frequenza di trigger al variare della sua tensione di soglia.

V_{trig} [mV]	f_{trig} [Hz]
-10.4 ± 0.1	434 ± 24
-14.4 ± 0.1	253 ± 21
-18.4 ± 0.1	183 ± 45
-22.4 ± 0.1	209 ± 34
-26.4 ± 0.1	172 ± 31
-30.4 ± 0.1	141 ± 5
-34.2 ± 0.1	117 ± 11
-38.4 ± 0.1	104 ± 8
-42.4 ± 0.1	85 ± 17
-46.4 ± 0.1	55 ± 9

Tabella 1: I dati sono riferiti al PMT05, con un voltaggio di alimentazione impostato su GECO di 1680.00 V. Si assume come errore sul voltaggio di trigger metà della risoluzione o scatto della manopola dell'oscilloscopio. Dato che la frequenza di trigger riportata dall'oscilloscopio è poco stabile: i dati riportati sono quindi riferiti alla media e deviazione standard di 3 valori casualmente scelti e visti su schermo a tale voltaggio.

Come ci aspettavamo, nel grafico 3, la frequenza di trigger aumenta ma mano che il V_{trig} si avvicina allo zero. Questo perchè diventa più semplice per il segnale soddisfare la condizione di trigger rispetto a voltaggi di soglia in valore assoluto più elevata.

PMT3		PMT4		PMT5	
V_{Alim} [V]	Counts [in 10 s]	V_{Alim} [V]	Counts [in 10 s]	V_{Alim} [V]	Counts [in 10 s]
		1600	234 ± 15	1600	632 ± 25
		1620	477 ± 22	1620	780 ± 28
1640	126 ± 11	1640	740 ± 27	1640	987 ± 31
1660	200 ± 14	1660	1199 ± 35	1660	1256 ± 35
1680	379 ± 19	1680	1689 ± 41	1680	1710 ± 41
1700	487 ± 22	1700	4076 ± 64	1700	2218 ± 47
1720	666 ± 26	1710	12362 ± 111	1720	3182 ± 56
1740	939 ± 31			1740	5396 ± 73
1760	1212 ± 35			1760	8386 ± 92
1780	1673 ± 41			1780	11568 ± 108
1800	3355 ± 58				
1810	5925 ± 77				
1815	7945 ± 89				

Tabella 2: Conteggi in singola per ogni singolo PMT a valori diversi di voltaggio di alimentazione diversi. Supponiamo idealmente per i nostri scopi che il valore del voltaggio impostato su GECO non sia affetto da rumore, ma nella realtà si visualizza una fluttuazione tra 0.5 V. Supponiamo infine una distribuzione poissoniana per i conteggi.

Si ribadisce che la frequenza di trigger è poco stabile: questo è dovuto sia alla scarsa precisione dello strumento e anche al fatto che il segnale non è in realtà periodico.

Gli errori percentuali risultano piuttosto elevati con questo procedimento da noi utilizzato e non possiamo escludere che la selezione delle frequenze da schermo non siano affettati da bias umani.

Nel seguito dell'esperienza ci siamo limitati a una tensione di soglia di -30.4 ± 0.1 V, per la quale abbiamo una frequenza di trigger con incertezza minore.

3.1 Conteggi al variare della tensione di alimentazione

In questa parte della caratterizzazione degli strumenti, abbiamo iniziato ad utilizzare la logica NIM.

Si è sconnessa l'uscita del fotomoltiplicatore dall'oscilloscopio per poi connetterlo all'ingresso del discriminatore, dove avevamo impostato una soglia di discriminazione di circa -30 mV e una durata del segnale digitale in uscita pari a 50 ns.

Abbiamo visualizzato sull'oscilloscopio, utilizzando rispettivamente i canali CH1 e CH2, sia il segnale

in uscita che quello in entrata al discriminatore. Per ogni collegamento abbiamo utilizzato un cavo con un ritardo di circa 2 ns. Con i cursori del nostro oscilloscopio misuriamo un ritardo tra il segnale analogico del PMT e il segnale discriminato di 16.40 ± 0.01 ns. Per misurare il numero di conteggi abbiamo poi portato una delle uscite del discriminatore al contatore ed eseguito acquisizioni di durata pari a 10 s (utilizzando il clock dello strumento, di periodo di circa 1ms), al variare della tensione di alimentazione, fin tanto che il rate non superi 1kHz. Assumiamo un rumore poissoniano sui conteggi. Abbiamo eseguito queste operazioni per tutti i fotomoltiplicatori e riportiamo i risultati nella tabella 2.

L'andamento riportato in figura 4 è compatibile con le aspettative. Come atteso, i conteggi accidentali, e quindi non fisicamente rilevanti, rappresentano una gran parte dei dati raccolti e sovrastano gli eventi cosmici (atteso 1 CR/(cm²min)). All'aumentare del voltaggio di alimentazione aumenta sempre di più il rumore dato dai tali eventi e dalla corrente di buio a temperatura finita e si osserva un comportamento praticamente lineare. Le differenze tra le curve sono da ricondursi al fatto che si tratta di 3 modelli diversi

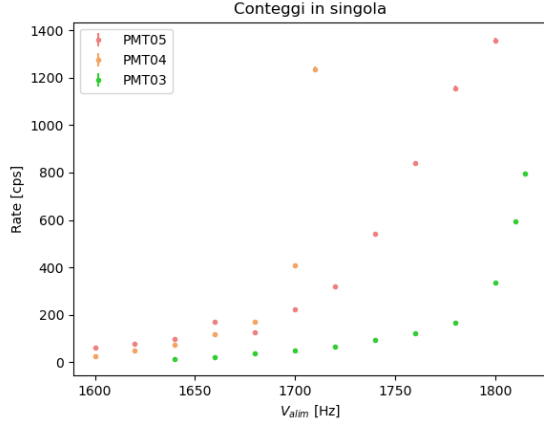


Figura 4: Rate ottenuto come conteggi per secondo al variare della tensione di alimentazione per i 3 PMT.

di fotomoltiplicatori.

Per il resto della relazione supponiamo che la condizione di lavoro ottimale, per questo valore di soglia del discriminatore, sia rappresentata dal valore della tensione di alimentazione che corrisponde al "ginocchio" di questa curva, per avere una buona stabilità dell'efficienza di rivelazione.

4 Sistema di coincidenza

Abbiamo poi esplorato il sistema di coincidenza NIM del nostro rack, usando come esempio il PMT03 e PMT05, e visualizzando le sue uscite da oscilloscopio. In particolare, l'uscita LIN risulta di durata più lunga rispetto all'uscita OUT, che rimane al livello True logico solo per un impulso prefissato appena la coincidenza si verificava.

Da oscilloscopio, risulta inoltre che il segnale dal PMT03 sia in ritardo rispetto a quello del PMT05, per cui è il fotomoltiplicatore 3 è quello che guida la coincidenza. Il ritardo tra il segnale PMT03 discriminato e il segnale della coincidenza risulta essere di 7.1 ± 0.1 ns.

4.1 Stima dell'efficienza dei PMT

Successivamente, è stata effettuata la stima delle efficienze dei vari PMT. Avendo la necessità di effettuare sia conteggi di "doppie" che di "triple" contemporaneamente, abbiamo posizionato un ulteriore modulo di coincidenza nel crate. Siamo partiti misurando l'efficienza del fotomoltiplicatore PMT04 (posizionato nel mezzo agli altri due). I due fotomoltiplicatori su cui non si intendeva fare la misura di coincidenza sono stati impostati ad un voltaggio che per entrambi si trovasse intorno al flesso della funzione di conteggi in singola in figura 4. In questo caso abbiamo impostato un voltaggio di 1680 V dal software GECO. Si è poi fatto variare il voltaggio del fotomoltiplicatore su cui veniva svolta la misura di efficienza, così da poterla stimare in più punti di lavoro differenti.

Su un unità di coincidenza si sono connessi i due fotomoltiplicatori a voltaggio fissato e la loro uscita LIN è stata connessa al contatore così da poter ottenere una stima delle "doppie". Sulla seconda unità di coincidenza sono stati invece collegati tutti e tre i fotomoltiplicatori così da poter misurare le "triple" al variare della tensione del fotomoltiplicatore su cui si voleva effettuare la misura.

Mediante l'utilizzo della formula

$$\epsilon_4 = \frac{N_{triple}}{N_{doppie} - N_{acc.}} \quad (1)$$

si è ottenuta una stima dell'efficienza al voltaggio fissato, dove si intende

$$N_{acc.} = \Delta t R_3 R_5 (w_3 + w_5 - w_{min}), \quad (2)$$

con Δt lo stesso intervallo di tempo di 10s, $R_{3,5}$ i rate in singola degli altri due PMT, $w_3 = w_5 = 50 \cdot 10^{-9}$ s la durata dei segnali discriminati e $w_{min} = 2 \cdot 10^{-9}$ s il minimo tempo di overlap necessario perché l'unità di coincidenza scatti. Si noti che le doppie accidentali per i voltaggi da noi utilizzati sono trascurabili ($\ll 1$) e i risultati finali sono riportati nella figura 5.

La misura si è svolta in maniera analoga per tutti e tre i fotomoltiplicatori.

Interpretazione dei risultati

L'andamento dell'efficienza atteso risulta rispettato e si raggiunge un plateau ad voltaggi maggiori. Dal

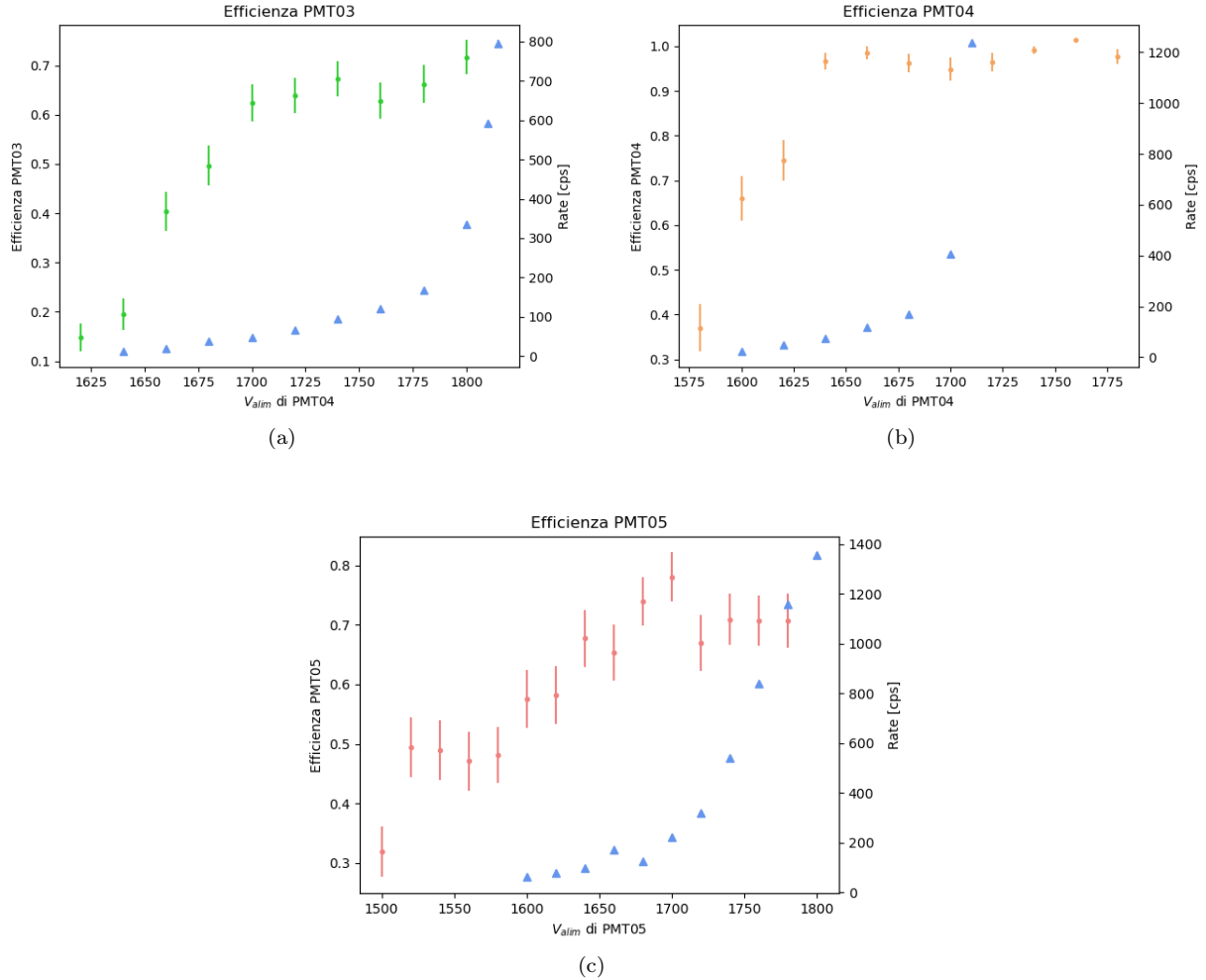


Figura 5: Stima dell'efficienza al variare della tensione di alimentazione per i tre fotomoltiplicatori.
 (a) PMT04 e PMT05 alla tensione di alimentazione fissa di 1660 V da GeCo. Doppie accidentali ~ 0.01
 (b) PMT03 e PMT05 alla tensione di alimentazione fissa di 1680 V da GeCo. Doppie accidentali ~ 0.03
 (c) PMT03 e PMT04 alla tensione di alimentazione fissa di 1670 V da GeCo. Doppie accidentali ~ 0.003
 In ciascun grafico, con dei triangoli blu, sono indicati i conteggi per secondo in singola registrati in sezione 3.1 al variare della tensione di alimentazione.

confronto con la curva di conteggio in singole possiamo osservare quale sia il punto dove il fotomoltiplicatore lavora in maniera corretta senza sovrastimare il numero di conteggi.

Si definisce efficienza ϵ della selezione la frazione di eventi di segnale, nel limite di infiniti eventi prodotti, che soddisfano la selezione stessa. Poiché un evento di segnale o passa la selezione oppure non la passa, il

numero di eventi di segnale selezionati è distribuito in modo binomiale, il cui parametro è per definizione l'efficienza. Per questo motivo supponendo $\hat{\epsilon} = \frac{N_{sel}}{N_{tot}}$ sia un buon estimatore dell'efficienza, nel grafico 5, consideriamo un errore sull'efficienza pari a

$$\sigma_{\hat{\epsilon}} = \sqrt{\frac{\epsilon(1-\epsilon)}{N_{tot}}}. \quad (3)$$

Dalle misure di efficienza effettuate si possono fare alcune osservazioni. Come potevamo attenderci l'efficienza del contatore PM04 risulta essere migliore rispetto agli altri due. Questo è dovuto al fatto che per gli scintillatori PM05 e PM03 il coefficiente di correzione dovuto alla geometria della struttura di rivelazione risulta più rilevante.

Nel grafico del PMT04 (figura 5b) osserviamo un valore maggiore di 1: questo è dovuto a una problematica tecnica del contatore riferito alle "triple", che probabilmente ha iniziato a contare e inserito un conteggio spurio prima rispetto a quello delle doppie.

A Riflessione degli impulsi

Ogni cavo ha parametri elettrici distribuiti, sintetizzati nell'impedenza caratteristica $Z_0 \approx 50\Omega$, indipendente dalla lunghezza del cavo.

Se la resistenza di uscita di un trasmettitore e quella di ingresso di un ricevitore non coincidono con l'impedenza caratteristica della linea, si generano riflessioni del segnale, causando interferenze. Per ridurre questo fenomeno, è importante garantire un'impedenza uniforme lungo l'intero percorso del segnale. Questo può essere fatto selezionando cavi e dispositivi con impedenza compatibile e installando correttamente i connettori. Inoltre, l'uso di dispositivi come gli adattatori di impedenza può aiutare a ridurre le riflessioni in presenza di impedenza non uniforme.

In questa sezione abbiamo come obiettivo quello di osservare il comportamento del segnale di interesse, utilizzando un lungo cavo ritardante con impedenza caratteristica $\approx 50\Omega$.

Abbiamo quindi visualizzato sul CH1 dell'oscilloscopio a nostra disposizione l'uscita di un fotomoltiplicatore, rimuovendo la resistenza di terminazione da

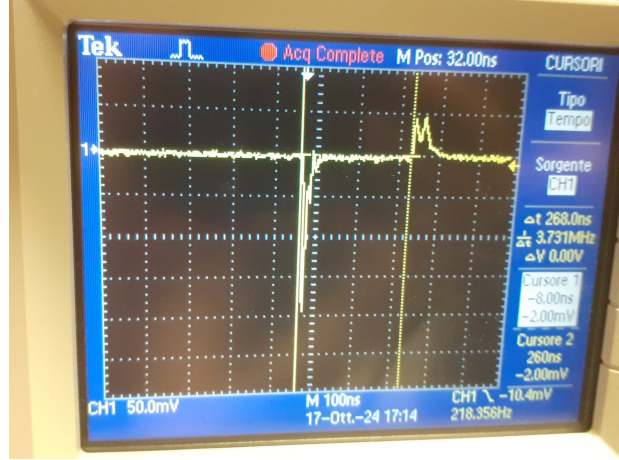


Figura 6: Visualizzazione ad oscilloscopio delle riflessioni del segnale con un cavo lungo ritardante e un resistore terminale $R=50/3 \text{ Ohm}$ (che utilizziamo come approssimazione di una resistenza nulla).

50Ω nel collegamento a T accanto per sostituirla con un altro cavo LEMO.

Se alla fine del cavo inseriamo ancora una volta la resistenza caratteristica, si osserva correttamente il segnale, ma il comportamento interessante scaturisce nel momento in cui ci si trovi in presenza di un corto circuito con una resistenza ideale a 0Ω . Non essendo ciò possibile, abbiamo collegato un parallelo di resistenze da 50Ω , ottenendo una $R = 50/3\Omega$. Come si può vedere nella figura 6, in questo caso si osservava una riflessione di segno opposto e ampiezza $2/5$ volte rispetto a quella del fotomoltiplicatore. Abbiamo misurato il ritardo del segnale del fotomoltiplicatore e quello riflesso ottenendo un valore di $\Delta t = 261 \pm 3 \text{ ns}$.

Considerando che gli elettroni viaggino a circa $2/3$ della velocità della luce nei cavi coassiali, otteniamo che il cavo è lungo:

$$d = \frac{v_e \Delta t}{2} = \frac{c \Delta t}{3} = 26.1 \pm 0.3 \text{ m}, \quad (4)$$

dove il fattore 2 di divisione è dato dal fatto che il segnale si riflette e quindi percorre il doppio della lunghezza del cavo (andata e ritorno).