

Scintillatori e Raggi Cosmici

Michael Maguire, Leonardo Misuraca Giordano, Daniele Pani, Alberto Perro

22 febbraio 2019

Prefazione

L'esperienza è volta allo studio e alla caratterizzazione delle tecnologie di scintillatori per la rivelazione di radiazione ionizzante, in particolare di raggi cosmici. Tramite l'uso di due differenti apparati, si è misurato il flusso di muoni sulla superficie terrestre e le caratteristiche di assorbimento dell'edificio, mentre con un banco di test si è studiata la curva di risposta di un SiPM.

1 Misure con la postazione fissa

1.1 Caratterizzazione dell'apparato rivelatore

Si accende l'alimentazione ad alta tensione e si verifica la forma d'onda in uscita dal fotomoltiplicatore di ogni scintillatore sull'oscilloscopio. Si misura con i cursori l'ampiezza del segnale per impostare la tensione di lavoro, mentre si osserva il rumore di fondo per stabilire il threshold.

Dopo aver stabilito questi parametri, viene configurato il sistema per la misura di efficienza. Per fare ciò, si sovrappongono tre scintillatori e si misurano i conteggi in funzione della tensione di lavoro del rivelatore centrale. Una volta definita e graficata la curva di efficienza, si imposta la tensione di lavoro nel punto di miglior rapporto efficienza-tensione e si caratterizza la risposta in funzione del threshold.

Il procedimento viene ripetuto per i due modelli di scintillatore forniti.

(N,H,I: XP2262;M: XP2232)

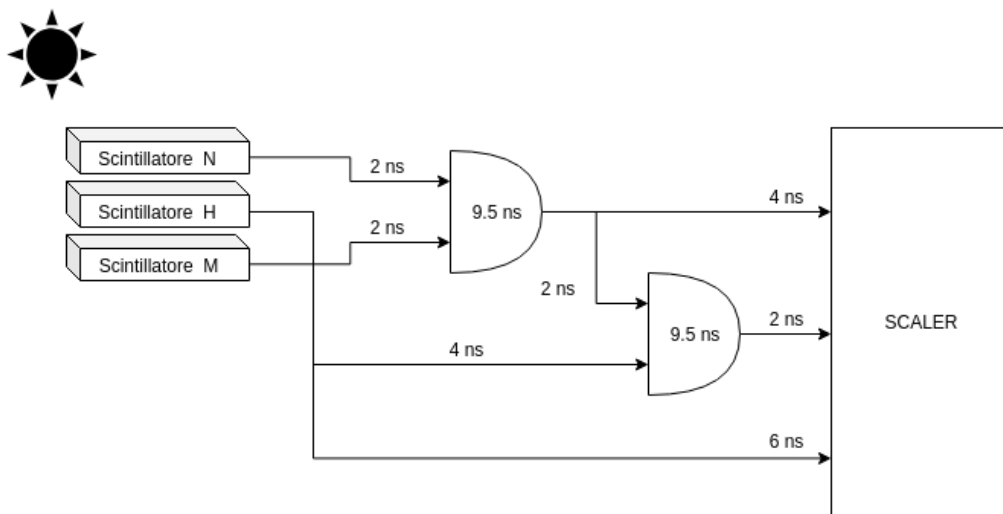


Figura 1: Schema delle connessioni elettriche per la caratterizzazione di H.

I segnali logici NIM dei vari moduli sono stati impostati in modo di avere una durata di circa 25 ns. Le misure di tensione sono state effettuate con il multimetro Meterman 35XP, con un errore di $0.5\% + 1dgt$. Le misure di tempo sono state prese con il timer del modulo scaler, su un intervallo di 120.000 s con un errore di 1 ms; l'errore sui conteggi è stato calcolato come la radice quadrata della misura.

HV [V]	H	NM	NHM	ϵ
1371 \pm 37	95 \pm 10	231 \pm 15	10 \pm 3	0,04 \pm 0,01
1418 \pm 38	246 \pm 16	249 \pm 16	35 \pm 6	0,14 \pm 0,03
1458 \pm 38	502 \pm 22	259 \pm 16	63 \pm 8	0,24 \pm 0,03
1500 \pm 39	878 \pm 30	244 \pm 16	124 \pm 11	0,51 \pm 0,06
1533 \pm 39	1342 \pm 37	259 \pm 16	185 \pm 14	0,71 \pm 0,07
1563 \pm 40	1919 \pm 44	259 \pm 16	200 \pm 14	0,77 \pm 0,07
1601 \pm 40	2898 \pm 54	251 \pm 16	231 \pm 15	0,92 \pm 0,08
1645 \pm 41	4393 \pm 66	245 \pm 16	233 \pm 15	0,95 \pm 0,09
1700 \pm 41	7828 \pm 88	238 \pm 15	232 \pm 15	0,97 \pm 0,09
1390 \pm 37	153 \pm 12	279 \pm 17	21 \pm 5	0,08 \pm 0,02
1435 \pm 38	325 \pm 18	234 \pm 15	50 \pm 7	0,21 \pm 0,03
1482 \pm 38	652 \pm 26	220 \pm 15	76 \pm 9	0,35 \pm 0,05
1626 \pm 40	3825 \pm 62	260 \pm 16	250 \pm 16	0,96 \pm 0,09
1673 \pm 41	6105 \pm 78	256 \pm 16	246 \pm 16	0,96 \pm 0,09
1733 \pm 42	9963 \pm 100	276 \pm 17	270 \pm 16	0,98 \pm 0,08

Figura 2: Misure per la curva di efficienza di H.

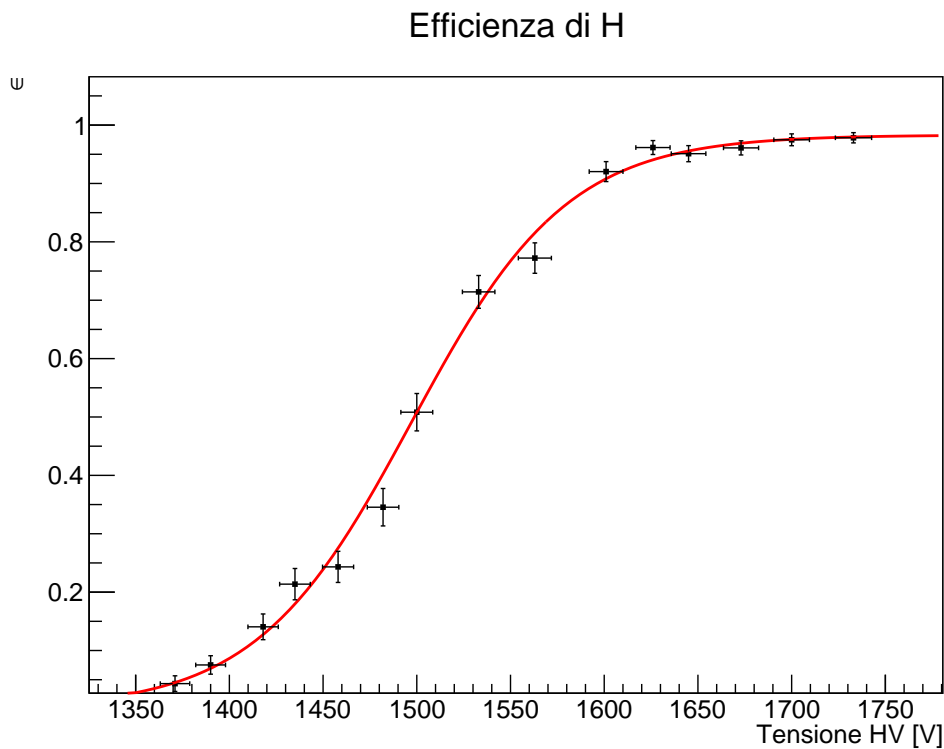


Figura 3: Curva di efficienza di H.

La regressione utilizzata è la funzione:

$$\epsilon(V) = \frac{A}{1 + e^{\frac{B-V}{C}}} \quad (1)$$

dove A,B,C sono parametri liberi. Il parametro A distingue il plateau, B è l'ascissa a metà altezza e C indica la pendenza della curva.

Parametro	Valore	Errore	U.M.
A	0.983	0.007	
B	1497	4	V
C	42	2	V

Tabella 1: Risultati della regressione.

La regressione riporta un χ^2 di 6.677 con 12 gradi di libertà ed un p-value dell'88%; per cui il modello teorico descrive adeguatamente le misure sperimentali.

Thr [mV]	H	NM	NHM	ϵ
100,0 \pm 1,5	4393 \pm 66	245 \pm 16	233 \pm 15	0,95 \pm 0,09
200,5 \pm 2,0	1428 \pm 38	242 \pm 16	183 \pm 14	0,76 \pm 0,07
297,7 \pm 2,5	648 \pm 25	232 \pm 15	92 \pm 10	0,40 \pm 0,05
396,6 \pm 3,0	363 \pm 19	290 \pm 17	58 \pm 8	0,20 \pm 0,03
500 \pm 3,5	226 \pm 15	231 \pm 15	37 \pm 6	0,16 \pm 0,03

Figura 4: Efficienza di H a diverse tensioni di lavoro.

Per questo modello di scintillatore si è scelta una tensione di lavoro di 1645 V e una soglia di 100 mV, in quanto è la configurazione dove il rapporto rumore-efficienza è minimo.

Il medesimo lavoro è stato svolto per lo scintillatore M (modello XP2232).

HV [V]	M	HN	HMN	ϵ
1246 \pm 35	18 \pm 4	255 \pm 16	1 \pm 1	0,00 \pm 0,00
1315 \pm 36	120 \pm 11	261 \pm 16	17 \pm 4	0,07 \pm 0,02
1358 \pm 37	282 \pm 17	260 \pm 16	43 \pm 7	0,17 \pm 0,03
1425 \pm 38	847 \pm 29	251 \pm 16	118 \pm 11	0,47 \pm 0,05
1451 \pm 38	1175 \pm 34	242 \pm 16	154 \pm 12	0,64 \pm 0,07
1472 \pm 38	1543 \pm 39	268 \pm 16	202 \pm 14	0,75 \pm 0,07
1506 \pm 39	2225 \pm 47	243 \pm 16	213 \pm 15	0,88 \pm 0,08
1537 \pm 39	3419 \pm 58	231 \pm 15	215 \pm 15	0,93 \pm 0,09
1559 \pm 39	4850 \pm 70	275 \pm 17	266 \pm 16	0,97 \pm 0,08
1581 \pm 40	5877 \pm 77	246 \pm 16	242 \pm 16	0,98 \pm 0,09
1601 \pm 40	7580 \pm 87	259 \pm 16	249 \pm 16	0,96 \pm 0,09
1625 \pm 40	17847 \pm 134	504 \pm 22	488 \pm 22	0,97 \pm 0,06
1642 \pm 41	10640 \pm 103	278 \pm 17	268 \pm 16	0,96 \pm 0,08
1666 \pm 41	13642 \pm 117	248 \pm 16	236 \pm 15	0,95 \pm 0,09

Figura 5: Misure per la curva di efficienza di M.

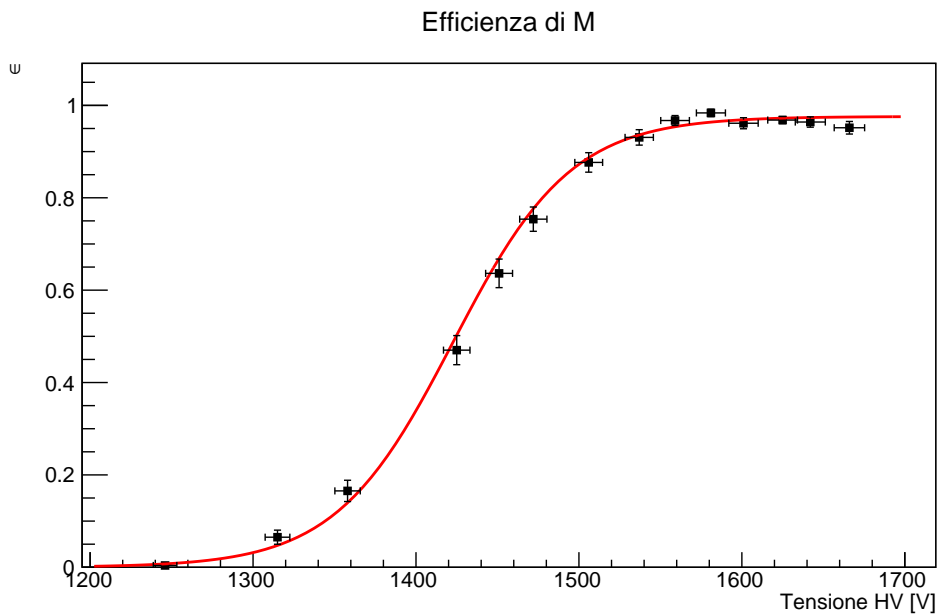


Figura 6: Curva di efficienza di M.

La regressione utilizzata è la funzione (1).

Parametro	Valore	Errore	U.M.
A	0.976	0.005	
B	1423	4	V
C	36	2	V

Tabella 2: Risultati della regressione.

La regressione riporta un χ^2 di 14.23 con 11 gradi di libertà ed un p-value dell'22%; per cui il modello teorico descrive adeguatamente le misure sperimentali.

Thr [mV]	M	HN	HMN	ϵ
80,2 \pm 1,4	6392 \pm 80	252 \pm 16	240 \pm 15	0,95 \pm 0,09
100,4 \pm 1,5	4282 \pm 65	270 \pm 16	254 \pm 16	0,94 \pm 0,08
200,0 \pm 2,0	1092 \pm 33	248 \pm 16	141 \pm 12	0,57 \pm 0,06
300,9 \pm 2,5	526 \pm 23	219 \pm 15	79 \pm 9	0,36 \pm 0,05
400 \pm 3,0	256 \pm 16	258 \pm 16	36 \pm 6	0,14 \pm 0,02
500 \pm 3,5	148 \pm 12	234 \pm 15	22 \pm 5	0,09 \pm 0,02

Figura 7: Efficienza di M a diverse tensioni di lavoro.

Per questo modello di scintillatore si è scelta una tensione di lavoro di 1551 V e una soglia di 100 mV, in quanto è la configurazione dove il rapporto rumore-efficienza è minimo. Per i due scintillatori I e N di tipo XP2262 (come H) si è effettuata una singola misura alla tensione di lavoro di 1645 V e soglia 100 mV.

Thr [mV]	I	HN	HIN	ϵ
100,2 \pm 1,5	5164 \pm 72	232 \pm 15	228 \pm 15	0,98 \pm 0,09
Thr [mV]	N	MH	MNH	ϵ
99,8 \pm 1,5	1823 \pm 43	357 \pm 19	258 \pm 16	0,72 \pm 0,06

Figura 8: Efficienza di I e N.

Come si può notare, lo scintillatore N non risulta essere all'efficienza massima, per cui si è scelto di effettuare una caratterizzazione completa per trovare il punto di lavoro migliore.

HV [V]	N	HM	HNM	ϵ
1402 \pm 37	56 \pm 7	277 \pm 17	9 \pm 3	0,03 \pm 0,01
1462 \pm 38	127 \pm 11	295 \pm 17	15 \pm 4	0,05 \pm 0,01
1531 \pm 39	413 \pm 20	271 \pm 16	66 \pm 8	0,24 \pm 0,03
1603 \pm 40	955 \pm 31	283 \pm 17	146 \pm 12	0,52 \pm 0,05
1652 \pm 41	1630 \pm 40	293 \pm 17	217 \pm 15	0,74 \pm 0,07
1734 \pm 42	3379 \pm 58	279 \pm 17	258 \pm 16	0,92 \pm 0,08
1794 \pm 42	5436 \pm 74	275 \pm 17	263 \pm 16	0,96 \pm 0,08
1840 \pm 43	7663 \pm 88	316 \pm 18	309 \pm 18	0,98 \pm 0,08

Figura 9: Misure per la curva di efficienza di N.

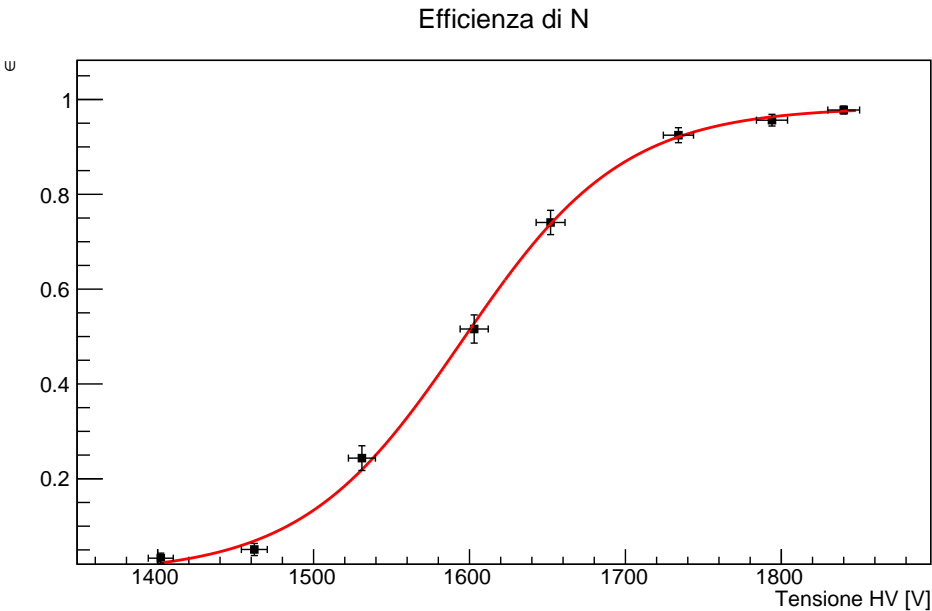


Figura 10: Curva di efficienza di N.

La regressione utilizzata è la funzione (1).

Parametro	Valore	Errore	U.M.
A	0.984	0.009	
B	1595	6	V
C	52	4	V

Tabella 3: Risultati della regressione.

La regressione riporta un χ^2 di 2.85 con 5 gradi di libertà ed un p-value dell'72%; per cui il modello teorico descrive adeguatamente le misure sperimentali.

Per questo modello di scintillatore si è scelta una tensione di lavoro di 1734 V e una soglia di 100 mV, in quanto è la configurazione dove il rapporto rumore-efficienza è minimo.

1.2 Curva di coincidenza

Per determinare quando due eventi sono coincidenti, si utilizza una porta logica AND. Per capire quali combinazioni di segnali vengono considerati coincidenti, si è effettuata una misura variando lo sfasamento fra i segnali. Per fare ciò, si sono utilizzati i moduli delay impostabili tramite selettori. Il circuito è stato costruito come segue:

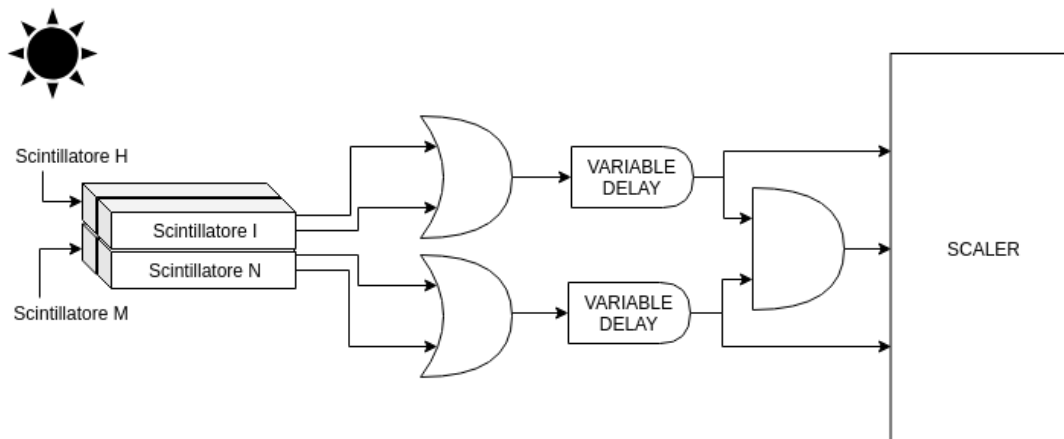


Figura 11: Schema delle connessioni elettriche per la misura di coincidenza.

In questo modo, a coppie di due rivelatori (sopra e sotto), viene operato un OR e ritardato tramite i moduli delay, i segnali in uscita vengono poi valutati tramite un AND e il tutto viene mandato allo scaler. Il delay viene fatto variare a passi di 2 ns da -34 ns a 30 ns e ogni volta il delay viene misurato tramite l'oscilloscopio (con un errore di 0.2 ns). Le misure sono state prese con intervalli di (120.000 ± 0.001) ns tranne per la misura a 2 ns e per quelle inferiori a -27 ns di sfasamento, dove si è scelto un intervallo di 240.000 s per ridurre l'errore relativo dovuto al numero di conteggi ridotto.

Δt [ns] $\pm 0,20$	CH1 (IH)	CH2 (NM)	Coincidenze
30,20	9492 \pm 97	5948 \pm 77	17 \pm 4
29,00	9913 \pm 100	5770 \pm 76	23 \pm 5
28,00	9904 \pm 100	5897 \pm 77	16 \pm 4
26,20	9849 \pm 99	5820 \pm 76	60 \pm 8
24,20	9884 \pm 99	5697 \pm 75	123 \pm 11
21,80	9819 \pm 99	5596 \pm 75	444 \pm 21
20,00	9700 \pm 98	5716 \pm 76	1046 \pm 32
18,20	9698 \pm 98	5720 \pm 76	1391 \pm 37
16,00	10171 \pm 101	5644 \pm 75	1440 \pm 38
14,00	9796 \pm 99	5669 \pm 75	1411 \pm 38
12,00	9962 \pm 100	5830 \pm 76	1508 \pm 39
10,00	9848 \pm 99	5666 \pm 75	1422 \pm 38
8,00	9986 \pm 100	5735 \pm 76	1419 \pm 38
6,00	9936 \pm 100	5727 \pm 76	1459 \pm 38
4,00	9919 \pm 100	5679 \pm 75	1437 \pm 38
2,00	19453 \pm 139	11546 \pm 107	2939 \pm 54
0,00	9661 \pm 98	5807 \pm 76	1478 \pm 38
-1,60	9976 \pm 100	5827 \pm 76	1476 \pm 38
-3,20	9785 \pm 99	5889 \pm 77	1437 \pm 38
-5,20	10302 \pm 101	5853 \pm 77	1516 \pm 39
-7,20	10238 \pm 101	5726 \pm 76	1452 \pm 38
-10,00	10106 \pm 101	5650 \pm 75	1477 \pm 38
-12,00	9753 \pm 99	5765 \pm 76	1465 \pm 38
-14,00	9783 \pm 99	5774 \pm 76	1460 \pm 38
-16,00	9897 \pm 99	5767 \pm 76	1461 \pm 38
-18,00	9805 \pm 99	5532 \pm 74	1430 \pm 38
-20,00	9925 \pm 100	5577 \pm 75	1379 \pm 37
-22,00	9610 \pm 98	5816 \pm 76	1353 \pm 37
-24,00	9798 \pm 99	5764 \pm 76	1089 \pm 33
-26,00	10069 \pm 100	5684 \pm 75	393 \pm 20
-28,00	19662 \pm 140	11473 \pm 107	237 \pm 15
-30,00	19592 \pm 140	11377 \pm 107	112 \pm 11
-32,00	19383 \pm 139	11250 \pm 106	78 \pm 9
-34,00	19291 \pm 139	11416 \pm 107	46 \pm 7

Figura 12: Misure per la curva di coincidenza.

Si sono graficate le misure prese e si sono effettuate tre regressioni: una per la salita, una per il plateau e una per la discesa.

$$c_1(t) = \frac{A}{1 + e^{\frac{B-t}{C}}}, \quad c_2(t) = M * t + Q, \quad c_3(t) = \frac{D}{1 + e^{\frac{t-E}{F}}}, \quad (2)$$

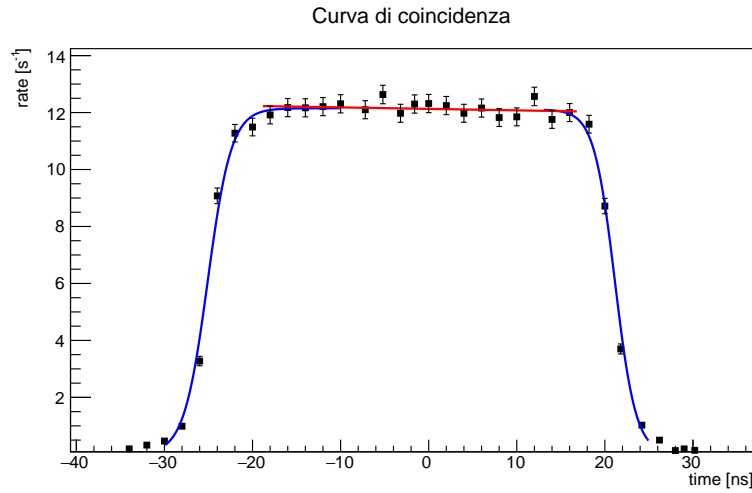


Figura 13: Curva di coincidenza.

Parametro	Valore	Errore	U.M.
A	12.1	0.2	s^{-1}
B	21.1	0.2	$\times 10^{-9} s$
C	1.3	0.07	$\times 10^{-9} s$

Tabella 4: Risultati della regressione sulla salita $[-30.20, -10.00]$ ns.

Il modello teorico risulta compatibile con i dati con un p-value del 13%, $\chi^2 = 5.68$ e 3 gradi di libertà.

Parametro	Valore	Errore	U.M.
M	-0.005	0.007	$\times 10^{-9} s^{-2}$
Q	12.13	0.08	s^{-1}

Tabella 5: Risultati della regressione sul plateau $[-19.00, 17.00]$ ns.

Il modello teorico risulta compatibile con i dati con un p-value del 91%, $\chi^2 = 9.14$ e 16 gradi di libertà.

Parametro	Valore	Errore	U.M.
D	12.2	0.1	s^{-1}
E	-25.1	0.2	$\times 10^{-9} s$
F	1.34	0.07	$\times 10^{-9} s$

Tabella 6: Risultati della regressione sulla discesa $[13.00, 25.00]$ ns. .

Il modello teorico risulta compatibile con i dati con un p-value del 7%, $\chi^2 = 14.37$ e 8 gradi di libertà. Come si può vedere dal grafico in figura 13, la curva di coincidenza non è perfettamente centrata in zero. Lo spostamento di circa 5 ns è probabilmente dovuto a ritardi non considerati nell'elettronica di acquisizione o ad un'impostazione poco precisa

della durata del segnale logico (discriminatore o porte logiche).

Il plateau risulta compatibile con una costante (M compatibile con 0, il test normale riporta un p-value 30%). Come si può notare, l'ampiezza del plateau è circa due volte la durata impostata del segnale NIM, come previsto.

1.3 Rumore di fondo

Mantenendo il setup del paragrafo precedente, si è impostato il delay fra i segnali a (150.0 ± 0.2) ns. In questo modo, si sono misurate le coincidenze completamente casuali durante l'arco notturno di $(20h18m \pm 2m)$. Queste sono state comparate con il rate accidentale, calcolato come $R_{acc} = 2\mu R_{IH} R_{NM}$ dove $\mu = (20.0 \pm 0.2)$ ns durata del segnale NIM.

Rate IH	Rate NM	Rate Accidentale	Rate Notturmo
$(82 \pm 1) s^{-1}$	$(48 \pm 1) s^{-1}$	$(159 \pm 5) \times 10^{-6} s^{-1}$	$(821 \pm 106) \times 10^{-6} s^{-1}$

Tabella 7: Comparazione Rate Accidentale e Rate Notturmo.

Come si può notare, il rate notturno risulta molto più grande di quello accidentale e quindi incompatibile (p-value = 0), sebbene sia dello stesso ordine di grandezza. Questo è possibile ricondurlo al fatto che avvengano altri fenomeni di cui non si è presa considerazione, oltre alle coincidenze accidentali.

2 Misure con il dispositivo portatile

2.1 Distribuzione angolare sul tetto dell'edificio

Per le misure con il dispositivo portatile, si è raggiunto il tetto dell'edificio a quota 254 m (slm). Le condizioni meteo durante la giornata della presa dati erano cielo poco nuvoloso (visibilità 70 km), inoltre sul tetto non erano presenti ostacoli che potessero influenzare le misurazioni.

Impostata la distanza fra i due scintillatori a (30.0 ± 0.1) cm e verificato sul goniometro che l'angolo fosse $(0 \pm 5)^\circ$, abbiamo iniziato a raccogliere i conteggi su un intervallo di 420 secondi circa. La misura è stata ripetuta per gli angoli $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$.



Figura 14: Tetto dell'edificio.

$\vartheta [^\circ] \pm 5$	Scintillatore 1	Scintillatore 2	Coincidenze	t [s] $\pm 0,1$
0	2378 \pm 49	2576 \pm 51	213 \pm 15	420,3
15	2485 \pm 50	2602 \pm 51	205 \pm 14	420,2
30	2359 \pm 49	2454 \pm 50	153 \pm 12	420,2
45	2073 \pm 46	2419 \pm 49	95 \pm 10	420,4
60	2020 \pm 45	2241 \pm 47	48 \pm 7	420,2

Figura 15: Misure della distribuzione angolare dei raggi cosmici.

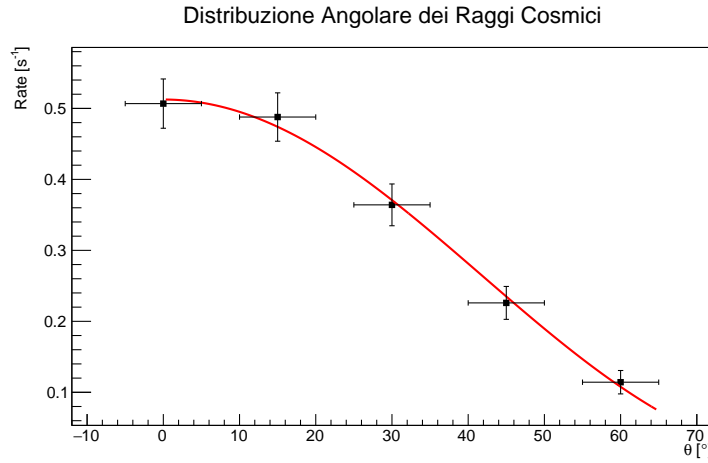


Figura 16: Distribuzione angolare dei raggi cosmici.

La funzione utilizzata per la regressione dei dati è

$$R(\theta) = R_0 \cos^n(\theta) \quad (3)$$

dove R_0 è il rate in posizione verticale e n l'esponente del coseno.

Parametro	Valore	Errore	U.M.
R_0	0.51	0.03	s^{-1}
n	2.3	0.4	

Tabella 8: Risultati della regressione.

Il fit ha dato risultato positivo, con un $\chi^2 = 0.21$, p-value = 0.98 e 3 gradi di libertà. L'esponente del coseno risulta compatibile con il valore atteso di 2 (p-value = 0.28).

2.2 Coefficiente di assorbimento dell'edificio

Per determinare il coefficiente di assorbimento dell'edificio, abbiamo raccolto i conteggi a diversi piani dell'edificio nuovo di fisica fissando la distanza tra gli scintillatori a (12.5 ± 0.1) cm e il tempo a circa 300 secondi; eccetto per i conteggi sul tetto per i quali abbiamo mantenuto i dati già acquisiti.

Piano	Scintillatore 1	Scintillatore 2	Coincidenze	t [s] $\pm 0,1$
6	2495 \pm 50	2743 \pm 52	641 \pm 25	420,2
4	2241 \pm 47	2567 \pm 51	327 \pm 18	299,8
2	2142 \pm 46	2519 \pm 50	273 \pm 17	301,2
0	1782 \pm 42	1709 \pm 41	256 \pm 16	302,9
-2	2017 \pm 45	2442 \pm 49	242 \pm 16	299,8

Figura 17: Conteggi e coincidenze raccolte ai vari piani.

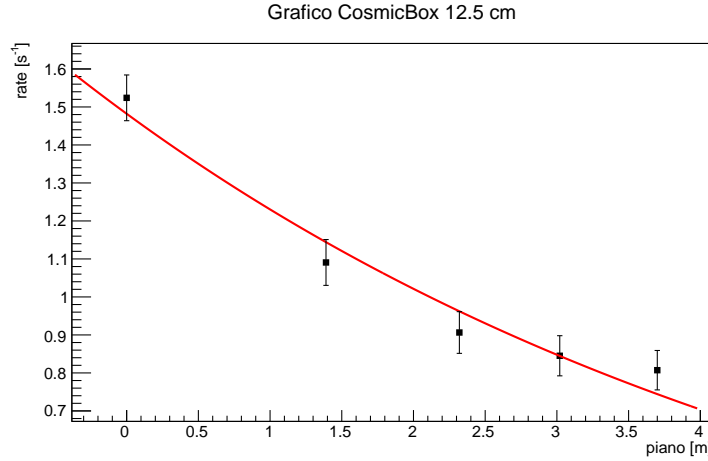


Figura 18: Grafico di assorbimento dei raggi cosmici.

L'altezza dei vari piani è stata determinata tramite la planimetria trasversale dell'edificio, assumendo solamente gli spessori delle solette. La funzione utilizzata per il fit è

$$R(x) = R_0 e^{-\alpha x} \quad (4)$$

dove R_0 è il rate ideale e α è il coefficiente di attenuazione.

Parametro	Valore	Errore	U.M.
R_0	1.48	0.06	s^{-1}
α	0.19	0.02	m^{-1}

Tabella 9: Risultati della regressione.

Quindi si è calcolato il fattore di attenuazione η come R_{-2}/R_6 e come $e^{-\alpha x_{TOT}}$.

$\eta (R_{-2}/R_6)$	$\eta (e^{-\alpha x_{TOT}})$	p-value
(0.53 ± 0.04)	(0.495 ± 0.002)	19%

Tabella 10: Confronto dei fattori di attenuazione

Il calcolo del fattore di attenuazione dà risultati compatibili con entrambi i metodi, benché il risultato ottenuto dalla regressione sia più accurato.

2.3 Accettanza

Per valutare l'accettanza della postazione fissa, si sono utilizzati i dati presi ai vari piani con l'apparato portatile per determinare se il calcolo fosse compatibile con la simulazione statistica. Nonostante la simulazione assuma che i rivelatori abbiano spessore trascurabile, i risultati risultano compatibili, per cui è appropriato utilizzare il risultato statistico per determinare l'accettanza della postazione fissa. La simulazione Monte Carlo è stata svolta con 50'000'000 interazioni.

L'accettanza per la postazione fissa teorica è $G = (0.40168 \pm 0.00007)$.

d [cm]	Accettanza	Norma_G	Rate [s ⁻¹]	Norma_R	z
7,0	0,527336 ± 0,00007	5,6161 ± 0,0025	2,7535 ± 0,0810	5,4332 ± 0,4051	0,45
12,5	0,321988 ± 0,00007	3,4292 ± 0,0016	1,5255 ± 0,0603	3,0101 ± 0,2381	1,76
30,0	0,093897 ± 0,00004	1,0000 ± 0,0006	0,5068 ± 0,0347	1,0000 ± 0,0969	0,00
42,5	0,050751 ± 0,00003	0,5405 ± 0,0004	0,2663 ± 0,0252	0,5254 ± 0,0613	0,25

Figura 19: Comparazione dell'accettanza teorica e il calcolo sperimentale.

Risultati finali

I risultati dei calcoli e delle misure fatte in precedenza sono utilizzati per determinare il valore atteso di rate e confrontarlo con quello misurato sperimentalmente.

$$R_{att} = \eta \cdot R_{slm} , \quad R_{sper} = \frac{R_{mis} - R_{acc}}{\epsilon \cdot G} \quad (5)$$

3 Testbench SiPM

3.1 Misura del rumore di fondo

Utilizzando il kit SiPM della CAEN è stato osservato tramite oscilloscopio il segnale analogico senza sorgente luminosa per individuare la soglia corrispondente al primo, secondo e terzo fotoelettrone. Per tutta l'esperienza la temperatura del SiPM è rimasta stabile a 25°C.

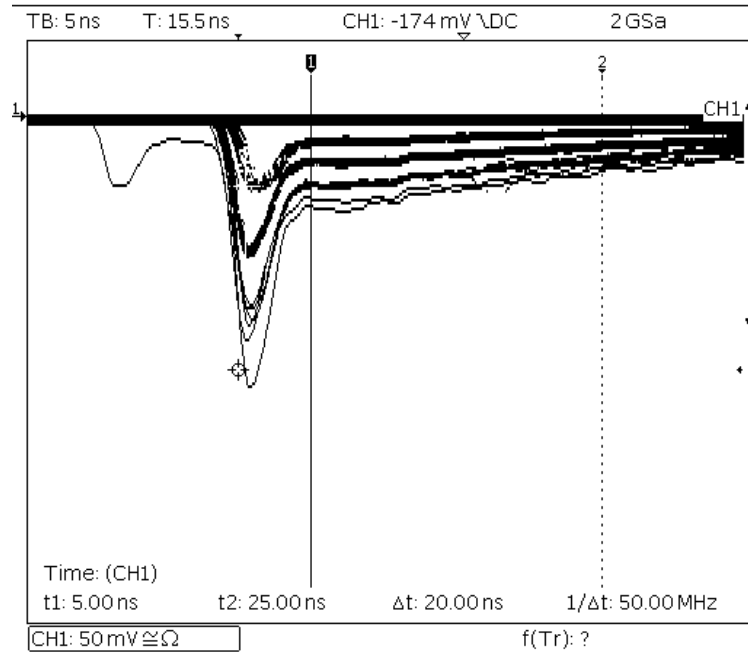


Figura 20: Segnale in uscita dal SiPM, si possono vedere chiaramente i livelli relativi ai fotoelettroni emessi.

Si è verificato che, al variare del Gain, il grafico a scalini riportasse frequenze compatibili per i primi tre livelli energetici. Si sono assunti come errori la cifra meno significativa; per le misure di frequenza, sopra i 10 kHz si è assunto un errore dell'1%, sopra 1 kHz 5%, 10% altrimenti.

Bias [V] ± 1	Gain [dB] ± 1	Thr [mV] ± 1	f [kHz]
55	36	-15	61800 \pm 618
55	36	-45	1600 \pm 80
55	36	-65	45 \pm 5
55	32	-15	61500 \pm 615
55	32	-28	1800 \pm 90
55	32	-44	40 \pm 4
55	28	-7	61600 \pm 616
55	28	-20	1400 \pm 70
55	28	-30	35 \pm 4

Figura 21: Misure di frequenza per i primi tre livelli di energia.

L'Optical Cross Talk ai diversi Gain è costante a circa 3%, come da manuale.

3.2 Misura della distribuzione energetica di una sorgente LED

Rimosso il tappo e connessa la fibra ottica, si sono effettuate due misurazioni dello spettro di fotoelettroni emessi impostando la manopola dell'emettitore LED a 2.5 e 3.3.

La lunghezza d'onda dei fotoni emessi è di 450 nm. Le impostazioni utilizzate per il digitizer sono

Parametro	Valore	Errore	U.M.
Bias	55	1	V
Gain	32	1	dB
Gate	304	5	ns
Pre-Gate	104	5	ns
Hold-off	504	5	ns
Threshold	8	1	mV
No flat	512	5	ns
Rise Time	8	1	ns

Tabella 11: Impostazioni del Digitizer.

In laboratorio è stata svolta una prima parte di analisi approssimativa, per stabilire i valori dei parametri per i fit.

N picco	picco (x)	picco (y)	MeanH sx	MeanH dx	Δ_{pp}	σ
0	0	9970	-25	26	368	22
1	368	20691	336	400	363	27
2	731	25353	701	767	366	28
3	1097	20298	1060	1130	365	30
4	1462	11710	1424	1501	362	33
5	1824	6150	1777	1872	363	40
6	2187	2547	2137	2236	365	42

Figura 22: Misure di spettro per il LED a 2.5, in rosso $\langle \Delta_{pp} \rangle$.

N picco	picco (x)	picco (y)	MeanH sx	MeanH dx	Δ_{pp}	σ
0	-5	30	-20	17	374	16
1	369	233	344	396	358	22
2	727	2037	681	778	373	41
3	1100	3983	1064	1135	368	30
4	1468	6495	1423	1506	363	35
5	1831	8707	1784	1874	362	38
6	2193	10369	2141	2550	364	174
7	2557	10755	2506	2615	362	46
8	2919	10527	2863	2983	362	51
9	3281	9173	3223	3348	363	53
10	3644	7234	3573	3713	360	59
11	4004	5569	3937	4070	364	56

Figura 23: Misure di spettro per il LED a 3.3, in rosso $\langle \Delta_{pp} \rangle$.