

Serini D.^{*(1,2)}, De la Torre Luque P.^(1,2), Di Venere L.⁽¹⁾, Fusco P.^(1,2), Gargano F.⁽¹⁾, Giordano F.^(1,2), Loparco F.^(1,2), Loporchio S.^(1,2), Mazziotta M.N.⁽¹⁾

¹ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare - Sezione di Bari, Bari, Italy,
² Dipartimento di Fisica "M. Merlin" dell'Università e del Politecnico di Bari, Bari, Italy,

*Email: davide.serini@ba.infn.it

ABSTRACT

La prossima generazione di satelliti per lo studio della radiazione cosmica prevede l'utilizzo di scintillatori plastici letti mediante fotomoltiplicatori a silicio (Silicon PhotoMultiplier, SiPM) come sistema di anticoincidenza per la rivelazione di raggi gamma, oppure per l'identificazione dei nuclei carichi. Le proposte di satelliti ASTROGAM e AMEGO, finalizzate allo studio della radiazione gamma nella banda MeV-GeV, prevedono l'utilizzo di un tracciatore a silicio, un calorimetro finemente segmentato a barre di CsI, ed un sistema di anti-coincidenza segmentato in «tile» di scintillatori plastici. In questa applicazione gli scintillatori dovranno assicurare una elevata efficienza di rivelazione per i raggi cosmici carichi, che costituiscono il principale fondo nell'identificazione dei raggi gamma. La configurazione di lettura dei SiPM e la geometria delle tile risulta cruciale per raggiungere tale obiettivo.

Un prototipo di tile equipaggiata con 12 SiPM lungo la superficie laterale è stato caratterizzato in una campagna di test beam condotti al CERN nel 2018 con fasci di elettroni e pioni. I risultati di queste misure verranno illustrati e discussi.

Questi studi sono di interesse anche per la proposta HERD (High Energy Cosmic Radiation Detection), un apparato che verrà installato a bordo della futura stazione spaziale cinese (CSS), per lo studio dei raggi cosmici fino al PeV.

Costruzione della «tile»

Il prototipo è costituito da una tile di scintillatore plastico BC-404, con picco di emissione a 408 nm. La tile ha base quadrata di lato di 15 cm e spessore di 1 cm, con due angoli tagliati a 2.5 cm dal bordo. La tile è equipaggiata con 12 fotomoltiplicatori al Silicio (SiPM) sensibili al vicino ultravioletto (NUV), di cui 6 di dimensione 1x1 mm² («Small SiPM») e 6 di dimensione 4x4 mm² («Large SiPM») posizionati lungo la superficie laterale come mostrato in Fig.1. I SiPM hanno microcelle con un passo delle di 40µm e una «Photon Detection Efficiency» (PDE) massima del 43% a 400 nm, in corrispondenza del picco di emissione del BC-404. Ogni SiPM è stato letto utilizzando un amplificatore di trans-impedenza (stadio di amplificazione x1 «low Gain» e x5 «high Gain») ed un filtro RC per la cancellazione delle code. I 12 segnali analogici sono stati integrati e acquisiti con un modulo QDC Caen V792.

Test Beam @ CERN

La tile è stata testata in una campagna di test condotti al CERN sulle linee di fascio PS-T10 con particelle di 5 GeV/c e SPS-H8 con particelle di 20 GeV/c. I fasci erano composti da pioni ed elettroni. In entrambi i test è stato implementato un sistema di trigger costituito da due scintillatori plastici posti lungo la linea del fascio. Al PS-T10 un ulteriore scintillatore plastico con un foro al centro è stato usato come veto per selezionare uno spot circolare di 3 cm di diametro. La tile è stata irradiata in diverse posizioni per studiare la dipendenza della luce raccolta dai SiPM rispetto alla posizione del fascio incidente. All'SPS-H8 invece la tile è stata irradiata solo nella posizione centrale con un fascio già collimato di 2 cm di diametro.

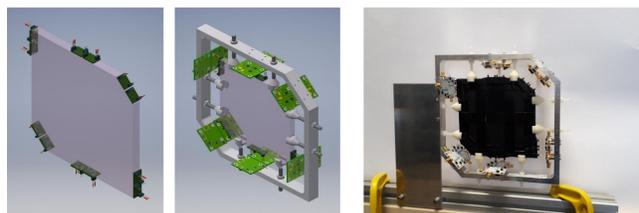


Fig.1 A sinistra: geometria della tile e posizione dei SiPM lungo il perimetro. A destra: fotografia del prototipo di tile di scintillatore equipaggiato con 12 SiPM e scheda di lettura AdvanSID

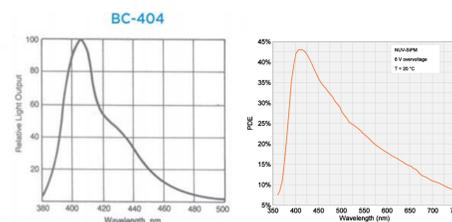


Fig.2 Spettro di emissione dello scintillatore plastico BC-404 (a sinistra) ed efficienza di rivelazione dei fotoni dei SiPM NUV FBK (a destra).

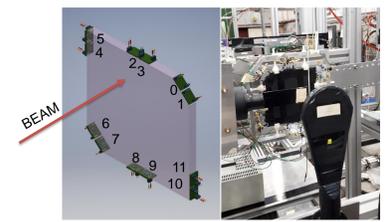


Fig.3 Setup del test Beam: geometria e numerazione dei SiPM sulla tile (a destra) e sistema di trigger (a sinistra)

PS-T10: Studio della risposta dei SiPM rispetto la posizione del fascio incidente

La tile è stata irradiata in 33 posizioni differenti (a step di 2 cm) con un fascio di 3 cm di diametro. La Figura 4 mostra due esempi di spettri di carica ADC per uno «Small SiPM» (in alto a sinistra) e un «Large SiPM» (in basso a sinistra). A entrambi gli spettri sono state sovrapposte le distribuzioni di piedistallo ottenute quando la tile non è irradiata.

Nel caso degli «Small SiPM» (1x1mm²), le distribuzioni di carica sono state fittate con funzioni multi-gaussiane per identificarne i picchi; successivamente, le aree dei picchi sono state fittate con una distribuzione di Poisson, da cui si è valutato il numero medio di fotoni rivelati (Figura 4, in alto a destra).

Nel caso degli «Large SiPM» (area 4x4mm²), nonostante i picchi relativi ai singoli fotoni siano ancora visibili nelle distribuzioni di carica, il fit con la funzione multi-gaussiana non è possibile a causa della bassa statistica. Si è quindi deciso di fittare l'intera distribuzione di segnale usando una distribuzione di Landau convoluta con una gaussiana. La carica corrispondente al picco della funzione di Landau è stata quindi convertita in numero di fotoni utilizzando il fattore di conversione da canali ADC a numero di fotoni ottenuto fittando le distribuzioni di piedistallo per ciascun SiPM (Figura 4, in basso a destra).

La Figura 5 riassume i risultati ottenuti per i «Large SiPM» in funzione della posizione del punto di incidenza del fascio sulla tile. Il numero di fotoni rivelati è quasi costante (~ 30-40 p.e.) in tutte le posizioni e per tutti i SiPM, con valori più alti per le posizioni più vicine ai SiPM. Questo effetto è probabilmente dovuto a un maggiore contributo della luce di scintillazione diretta. Risultati simili sono stati ottenuti per gli «Small SiPM», dove però il numero di fotoni (meno di 3) non è sufficiente per separare il segnale delle particelle dal piedistallo.

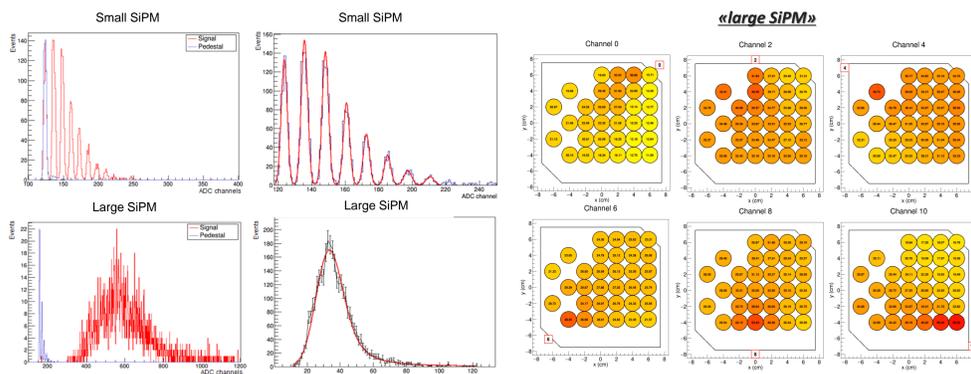


Fig.4: A sinistra: spettri campionati per uno «small SiPM» (in alto) ed un «large SiPM» (in basso). Le distribuzioni del piedistallo (blu) e del segnale (rosso) sono sovrapposte. A destra: spettro di uno «small SiPM» fittato con una funzione multi-gaussiana (in alto) e spettro di un «large SiPM» fittato con una distribuzione di Landau convoluta con una distribuzione gaussiana (in basso).

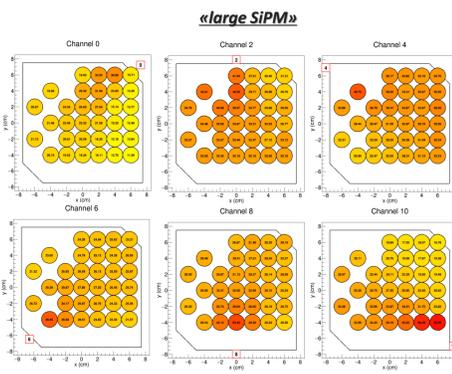


Fig.5: Mappe che riassumono il numero di fotoni rivelati da ciascun SiPM per diverse posizioni del fascio. I numeri nei cerchi indicano i fotoni rivelati, mentre le caselle sul perimetro indicano la posizione del SiPM lungo la superficie laterale. La figura mostra i risultati ottenuti per i «large SiPM»

SPS-H8: studio dell'efficienza di rivelazione

La tile è stata irradiata nella sola posizione centrale. Nei «large SiPM» il segnale è ben separato dal piedistallo e si possono riconoscere i picchi fino a 40-50 p.e., come mostrato in Figura 6. Si sono calcolate le distribuzioni cumulative del segnale e del piedistallo (Figura 7) al fine di valutare rispettivamente l'efficienza di rivelazione di una particella al minimo di ionizzazione tramite la lettura del singolo SiPM e la probabilità di avere un segnale di «dark noise» del SiPM sopra soglia. L'efficienza ed il dark noise sono stati studiati anche combinando la risposta di due SiPM in posizione opposta sulla tile in configurazione di AND e di OR. I risultati sono riassunti in Tabella 1. Nella configurazione AND si osserva una efficienza più bassa (~99.01%@10p.e) ma un dark noise minore (<0.01%@10p.e) rispetto al caso della lettura a singolo SiPM (Figura 7, in basso a sinistra). Nella configurazione OR si osserva una efficienza più alta (~99.99%@10p.e.) ma un dark noise maggiore (~0.02%@10p.e) rispetto al caso della lettura a singolo SiPM (Figura 7, in basso a destra).

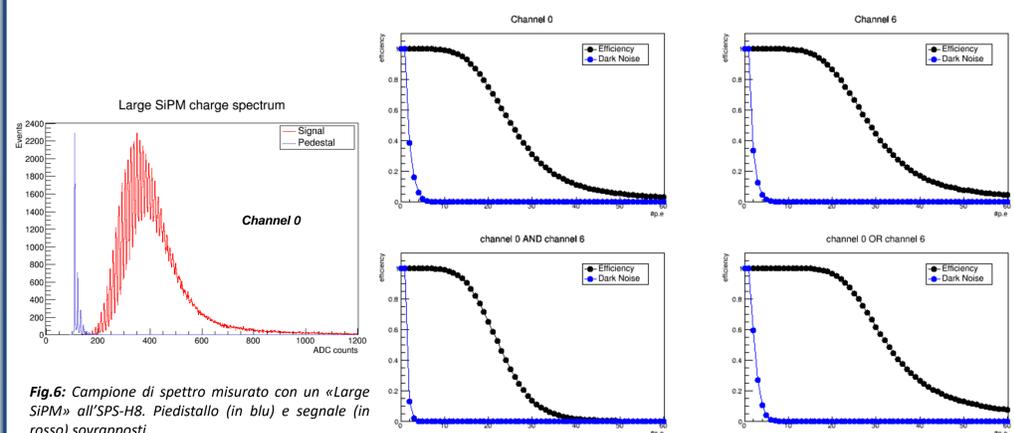


Fig.6: Campione di spettro misurato con un «Large SiPM» all'SPS-H8. Piedistallo (in blu) e segnale (in rosso) sovrapposti.

Fig.7: Efficienza e «dark noise» valutati per due «Large SiPM» (in alto) e in configurazione AND (basso a sinistra) e OR (basso a destra)

Soglia	Canale 0		Canale 6		AND		OR	
	efficienza	dark noise	Efficienza	dark noise	efficienza	dark noise	efficienza	dark noise
3 p.e.	0.99997	0.16229	0.99997	0.12812	0.99997	0.02079	1.00000	0.26962
5 p.e.	0.99984	0.00913	0.99984	0.00554	0.99981	0.00001	1.00000	0.01463
10 p.e.	0.99224	0.00014	0.99224	0.00006	0.99012	< 1x10 ⁻⁵	0.99998	0.00020

Tab.1: Efficienza e «dark noise» valutati per il singolo «Large SiPM» e per le configurazioni di lettura in AND e OR fra due «Large SiPM»

CONCLUSIONI

La scansione in posizione mostra che la risposta è quasi uniforme nella tile, ad eccezione dei punti di impatto vicini alle posizioni dei SiPM, per i quali il contributo della luce diretta è maggiore. Questo aspetto deve essere preso in considerazione quando si misura la deposizione di energia nello scintillatore.

L'efficienza di rivelazione raggiunta con la configurazione implementata nel prototipo di tile testato è vicina ai valori tipici richiesti per i rivelatori di anticoincidenza in esperimenti su satellite. Una maggiore efficienza può essere ottenuta utilizzando la risposta di più SiPM. In particolare, la configurazione di OR tra due SiPM si presta ad una applicazione dello scintillatore come anti-coincidence detector (maggiore efficienza), mentre la configurazione in AND si presta ad una applicazione come discriminatore di carica delle particelle entranti (minore «dark noise»).

References:

- [1] Adriani, O. et al. "HERD proposal", <https://indico.ihep.ac.cn/event/8164/material/1/0.pdf>
[2] Pooth, O. et al. "Scintillator tiles read out with silicon photomultipliers", Journ. Instr. 10, T10007 (2015)
[3] Kaplin, V.A. et al. "Time and amplitude characteristics of large scintillation detectors with SiPM", Phys.Procedia 74, 232 (2015)

- [4] "BC-404 scintillator datasheet", <https://www.crystals.saint-gobain.com/sites/indf.crystals.com/files/documents/bc400-404-408-412-416-data-sheet.pdf>
[5] "AdvanSID NUV SiPM datasheet", https://http://advansid.com/attachment/get/up_28_1432731773.pdf
[6] "CAEN V792 QDC", <https://www.caen.it/products/v792/>