

Abstract: Simulazione e analisi dati delle misure di una stazione di test per i calorimetri ai Future Colliders

Candidata: Julia Scamardella N85001710

1 Introduzione: Calorimetri e setup sperimentale

Uno dei metodi di rivelazione delle particelle prevede la misura dell'energia che essa perde per interazione con la materiale tramite strumenti chiamati Calorimetri, che convertono tale energia in un segnale di varia natura, ad esempio una carica elettrica raccolta, idealmente mantenendo la proporzionalità tra energia rilasciata e segnale misurato. Nell'interazione con la materia del calorimetro, le particelle incidenti, se di energia sufficientemente alta, danno luogo a sciame di particelle secondarie che vengono assorbite nello strumento. Esistono diversi tipi di calorimetri in base alla modalità di interazione delle particelle che indagano (elettromagnetico o adronico) e alla loro struttura costitutiva (omogenei o a campionamento). L'obiettivo del lavoro svolto è di riuscire a effettuare misure simultanee della radiazione di Scintillazione e Čerenkov (Dual readout), utilizzando calorimetri omogenei a cristalli e fotorivelatori SiPM. Tale tecnologia è stata proposta per la realizzazione dei calorimetri ai futuri collider come FCC-ee. In Figura 1 è riportato il setup sperimentale composto da: due scintillatori di "trigger", il cristallo, due SiPM incollati sulle facce laterali del quest'ultimo, e un sistema di lettura (oscilloscopio e moduli di elettronica). I due tipi di cristalli studiati sono il BGO e il PWO, in particolare si sono considerati i muoni cosmici che raggiungono il suolo la cui l'energia è fissata al minimo di ionizzazione E_{MIP} , alla quale essi non producono sciame nel cristallo, ma direttamente luce di scintillazione e luce per effetto Čerenkov. I dati ottenuti sono stati confrontati con una simulazione Monte Carlo (Figura 2), che permette di ricavare la distanza percorsa dai muoni nel cristallo. L'efficienza geometrica dei muoni che passano il *trigger* degli scintillatori e che vengono rivelati nel cristallo è comparabile tra dati e simulazione.

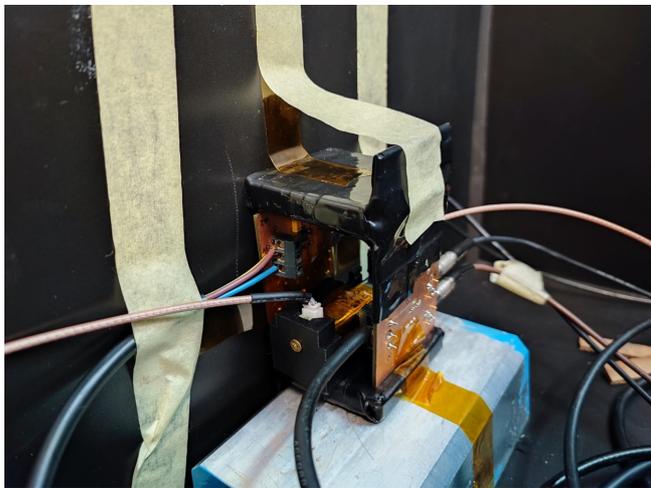


Figure 1: Setup sperimentale.

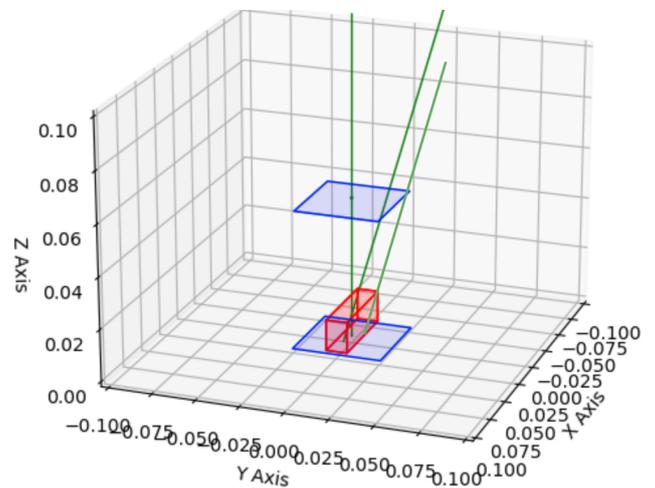


Figure 2: Simulazione geometrica dei muoni che attraversano il cristallo.

2 Meccanismi di produzione di luce ed efficienze

La luce prodotta in seguito al rilascio di energia di un muone al minimo di ionizzazione che passa nel rivelatore può essere di due tipi: di scintillazione o prodotta per Effetto Čerenkov. Nel primo caso, ad indurla sono tutte le particelle ionizzanti che inducendo eccitazioni e diseccitazioni nella materia provocano produzione di fotoni. Il numero di fotoni prodotti per **scintillazione** N_S può essere ricavato come $N_S = E_{Rilasciata} \cdot LY$, dove $E_{Rilasciata} = l \cdot \rho \cdot E_{MIP}$, LY (light yield) è il numero di fotoni prodotti nel materiale per MeV di energia persa, l è la distanza percorsa dal muone e ρ è la densità del materiale. N_S è pari a 108276 per il BGO e 2879 per il PWO.

La luce Čerenkov è invece prodotta dal cosiddetto **effetto Čerenkov**, che consiste nell'emissione di radiazione elettromagnetica da parte di un materiale le cui molecole sono polarizzate da una particella carica in moto che lo attraversa. Si manifesta solo quando la velocità della particella nel mezzo attraversato risulta superiore alla *velocità di fase* della luce nello stesso mezzo. Il numero di fotoni Čerenkov N_{CH} atteso per unità di lunghezza percorsa nel cristallo è $\frac{dN_{CH}}{dx} = 2\pi z^2 \alpha \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right) \left(1 - \frac{1}{n^2 \beta^2} \right)$, dove $\alpha = 1/137$, la carica $z = 1$, $\beta = 0.99$ e gli indici di rifrazione sono $n_{BGO} = 2.15$ e $n_{PWO} = 2.16$. Per studiare i due tipi di radiazione emesse dal cristallo, consideriamo: l'efficienza geometrica, che tiene conto dell'effettiva area sensibile del SiPM, la *Trasmittanza* del cristallo e la *PDE* (photon detection efficiency) del SiPM, rappresentate nel caso del PWO in Figura 3. A questo punto, vogliamo confrontare i risultati dell'esperimento con quelli della simulazione. I fotoni generati vengono rivelati tramite i SiPM dove viene rivelata una carica legata al numero di fotoni incidenti. Tale risposta è stata calibrata con una misura ad hoc dei fotoni prodotti da un PMMA, dove i segnali dei singoli fotoni sono stati individuati studiando la distribuzione delle RMS dei segnali e valutata di volta in volta la significatività del picco. Dal Fit lineare dell'andamento rappresentato in Figura 4 è possibile ricavare il fattore di conversione tra il singolo fotone e la carica (a.u.), pari a *Slope* = 0.25. Infine, si possono confrontare le distribuzioni di carica raccolte attraverso i dati e simulate per entrambi i cristalli, inserendo in quest'ultima i valori di efficienza e il fattore di conversione appena trovato. In Figura 5, relativa al PWO, si nota l'ottimo accordo tra il valor medio della distribuzione simulata quella ricavata dai dati.

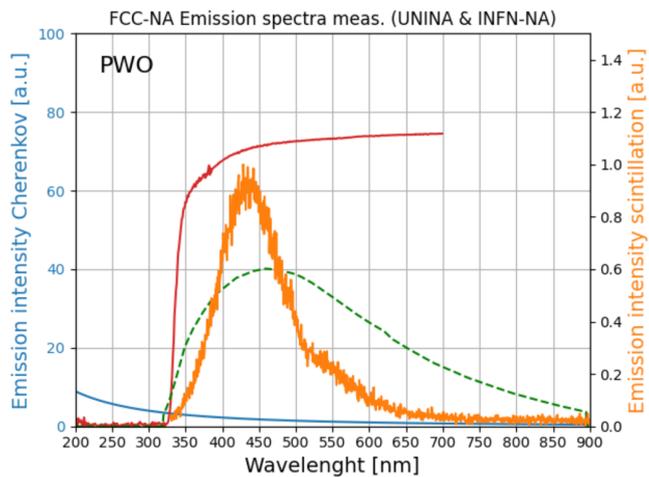


Figure 3: Spettro di emissione PWO, Spettro Čerenkov (in blu), curva di Trasmittanza (in rosso), PDE (in verde)

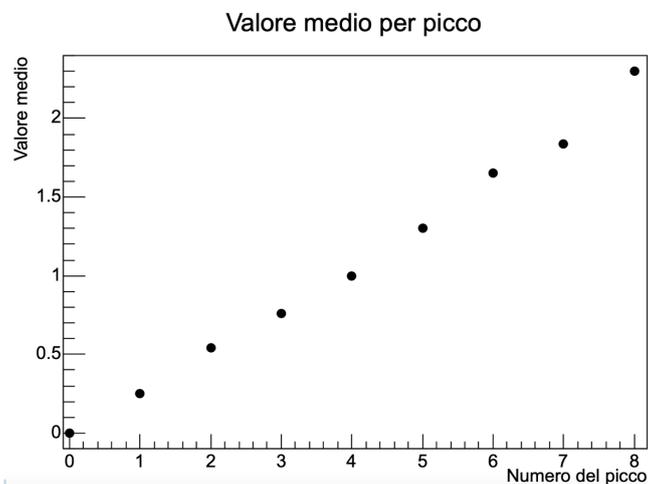


Figure 4: Retta di calibrazione tra segnale raccolto e numero di fotoni.

3 Significatività segnale Čerenkov e applicazione filtri

Vogliamo ora trovare, con un Test d'ipotesi, la regione critica per rigettare l'ipotesi di sola scintillazione nelle misure sopra riportate, sfruttando la simulazione realizzata. Per farlo, scegliamo come test statistic il numero di fotoni atteso, la cui distribuzione simulata viene usata come funzione di probabilità: valutiamo il numero di fotoni critico N_{Cut} al di sopra del quale la probabilità nell'ipotesi di scintillazione è minore di un livello di significatività $\alpha = 0.05$. Questo è stato poi convertito nel numero medio di fotoni necessario per distinguere un segnale Čerenkov al di sopra del valore medio del numero di fotoni di scintillazione, ovvero $N_{Ch\ necessari} = N_{Cut} - N_{S\ medio}$ pari a: 610 per il BGO e 34 per il PWO. Poichè questi valori sono molto maggiori del numero medio di fotoni Čerenkov attesi (10 per il BGO e 8 per il PWO), si è studiato l'effetto di inserire un Filtro passabanda in lunghezza d'onda tra il cristallo e il fotorivelatore per migliorare il rapporto tra i due tipi di segnale. In questo modo il numero di fotoni che siamo in grado di rilevare si abbassa a 13 per il BGO e a 5 per il PWO, mentre i fotoni Čerenkov attesi diventano 2 per entrambi i cristalli. In Tabella 6 è riportata anche un'altra opzione di Filtro e sono riassunte le efficienze di scintillazione e Čerenkov per tutte le configurazioni, e riportate le significatività statistiche trovate in corrispondenza del numero medio di fotoni Čerenkov attesi.

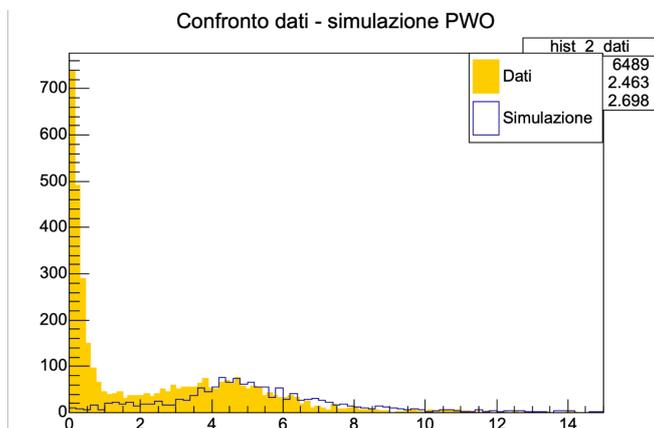


Figure 5: Confronto simulazione-dati per l'ampiezza del segnale relativo al PWO

Filtro	$N_{Ch\ necessari}$		$N_{Ch\ medio}$		z	
	BGO	PWO	BGO	PWO	BGO	PWO
NO	610	34	10	8	$\simeq 0$	0.92
400 nm	13	5	2	2	0.2	0.92
380 nm	6	3	1	1	$\simeq 0$	1.23

Figure 6: Tabella riassuntiva del numero di fotoni necessari per scartare l'ipotesi di sola scintillazione, numero di fotoni Čerenkov attesi e significatività statistica di entrambi i cristalli. La significatività $\simeq 0$ indica valori $\ll 10^{-2}$.

4 Conclusioni

Il lavoro svolto ha l'obiettivo di indagare la possibilità di una tecnica a doppia lettura (scintillazione e Čerenkov) e di caratterizzare i cristalli candidati per effettuarla, e si è sviluppato nei seguenti step:

1. Simulazione Monte Carlo dei muoni attesi, dei fotoni prodotti all'interno del cristallo e delle efficienze di rivelazione. Inoltre, si è ricavata la calibrazione fotone-carica;
2. Confronto dati - simulazione: ottenendo un ottimo accordo tra i valori di picco osservati e quelli simulati, tenendo conto degli effetti dovuti ai fattori di efficienza stimati e alla calibrazione fotone - carica ottenuta;
3. Stima del numero di fotoni Čerenkov e di scintillazione con e senza filtri, derivazione di una soglia di fotoni rivelabile al di sopra del segnale di scintillazione;
4. Promettenti risultati per l'utilizzo dei cristalli studiati, con segnali comparabili ottenuti per luce di scintillazione e Čerenkov.