



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI DI BARI  
ALDO MORO



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BARI  
SCUOLA DI DOTTORATO IN FISICA  
- XXXI CICLO -

Relazione sull'attività svolta durante il terzo anno

**Dottoranda:** Intonti Rosaria Annalisa

**Tutori:** Prof. V. Berardi, Dott. E. Radicioni

### Sommario

L'attività di ricerca del terzo anno di dottorato si è svolta nell'ambito dell'esperimento T2K, un esperimento di oscillazione di neutrino "long baseline" che ha come scopo la misura dei parametri di oscillazione. In T2K, un fascio quasi puro di  $\nu_\mu$  con energia di picco di 600 MeV/c viene prodotto nel complesso di acceleratori per la ricerca, denominato J-PARC (villaggio di Tokai sulla costa est del Giappone); dopo essere stato adeguatamente caratterizzato da un insieme di rivelatori posti nel cosiddetto *Near Detector* (ND280) allo scopo di misurare il flusso di neutrini prima che avvengano i processi di oscillazione, viene successivamente intercettato a 295 km di distanza dal rivelatore Super-Kamiokande [1]. Quest'ultimo, collocato all'interno delle miniere di Kamioka (nella catena alpina che si affaccia sul Mar del Giappone), è composto da 50 kton d'acqua ultra-pura e permette di misurare, tramite effetto Cherenkov, muoni elettroni e pioni prodotti nelle interazioni dei neutrini con l'acqua stessa.

Il rivelatore Super-Kamiokande (SK) è sensibile non solo alle interazioni dei neutrini provenienti da JPARC ma anche a quelli generati per esempio all'interno del sole e/o dalle SuperNovae. In particolare, con una soglia di circa 3.5 MeV, SK è al momento

l'osservatorio più grande e più sensibile a questi fenomeni. Per questo motivo la calibrazione della risposta agli elettroni (o anti-elettroni) prodotti delle interazioni dei neutrini con una energia nell'intervallo 5-20 MeV è particolarmente importante per l'impatto che ha su queste misure.

La calibrazione della risposta agli elettroni in Super-Kamiokande viene effettuata periodicamente grazie ad un LINAC che accelera elettroni di energia nota in predeterminate posizioni all'interno del volume d'acqua. Di questi elettroni è necessario ricostruire la posizione valutando al tempo stesso la corrispondente risoluzione energetica ottenuta. Purtroppo, il sistema attuale soffre di varie limitazioni relative sia alla insufficiente precisione nell'allineamento e puntamento (*steering*) del fascio sorgente di elettroni, sia ai lunghi tempi necessari per ottenerlo. Nell'ambito della mia attività di tesi ho partecipato alle ultime campagne di calibrazione portate a termine con l'attuale sistema.

Poiché una tipica campagna prevede di usare diversi valori di energia e numerose posizioni, essa richiede tempi lunghi oltre che un pesante lavoro: ad esempio, quella dell'estate del 2017 ha richiesto quattro settimane di presa dati durante le quali SK non poteva prendere dati in condizioni ottimali. Dei numerosi elementi che compongono il LINAC, alcuni collimatori si trovano in prossimità del cosiddetto *outer detector*, elemento essenziale per definire quali eventi siano completamente contenuti nel volume fiduciale; lo *scraping* del fascio sui collimatori genera un rumore di fondo di radiazione X considerato eccessivo e che obbliga a operare SK in configurazione ridotta con *outer detector* spento. Questa configurazione impedisce di misurare con l'efficienza abituale le interazioni di neutrino di energia più alta, tra cui quelli atmosferici e rende praticamente impossibile la presa dati con il fascio di T2K. Per questo motivo, le calibrazioni con il LINAC sono sempre effettuate in periodi di *shutdown* del fascio.

Per tutti questi motivi fino ad oggi le campagne di calibrazione sono state poco numerose e in media separate nel tempo di almeno 2 anni. Proprio in questo contesto la mia attività di ricerca prevede oltre che lo studio e la partecipazione attiva alle procedure attuali di calibrazione del rivelatore, il contemporaneo sviluppo di un nuovo monitor del LINAC per Super-Kamiokande (di responsabilità del gruppo INFN). Introducendo l'uso di monitor di fascio con misura della posizione, lo *steering* del fascio può essere rapido e preciso, condizione fondamentali per ottenere una calibrazione ottimale della risposta degli elettroni nel rivelatore risolvendo le limitazioni attuali, in particolar modo accorciando considerevolmente i tempi necessari. Si deve considerare inoltre che tra le operazioni di upgrade di SK in corso attualmente si prevede che l'acqua in esso contenuta venga addizionata con Gadolinio, per facilitare la discriminazione neutrino anti-neutrino attraverso la cattura

dei neutroni e la successiva emissione di gamma da 8 MeV. La concentrazione finale di Gd verrà raggiunta in diverse tappe e a ognuna di queste sarà necessario rifare tutte le calibrazioni. Questa nuova situazione sperimentale renderà quindi essenziale che la calibrazione di cui sopra possa essere effettuata agevolmente e con cadenza almeno bimestrale.

Nel lavoro svolto nel terzo anno di dottorato ho effettuato l'analisi dei dati presi durante la campagna di calibrazione cui ho partecipato ed in contemporanea ho sviluppato ulteriori nuovi codici di simulazione per il monitor che stiamo realizzando e che verrà installato in Super-Kamiokande l'anno prossimo, finalizzandone il design studiato e avviato nei mesi precedenti assieme ai parametri ottimali richiesti.

## **1. Super-Kamiokande**

Il rivelatore Super-Kamiokande è situato in Giappone nella miniera di Kamioka (l'attuale nome dalla città è Hida), miniera inattiva di zinco all'interno del Monte Ikenoyama. Il suo serbatoio di acciaio inossidabile, alto 41 metri e con un diametro di 39.3 metri, contiene 50000 tonnellate di acqua ultra pura, tanto trasparente che la luce deve attraversare circa 70 metri prima di perdere metà della sua intensità. La parte interna ha un volume di circa 32 kton (22 kton fiduciali) ed è circondata da circa 11129 PMT con diametro di 50 cm, che ricoprono circa il 40% della superficie: i fotomoltiplicatori registrano la luce Cherenkov prodotta dalle particelle secondarie delle interazioni tra un neutrino e l'acqua. Per una descrizione dettagliata di SK si rimanda a [5].

Dal tempo di incidenza sul muro di PMT (la risoluzione temporale è di pochi ns) è possibile ricostruire il vertice d'interazione e la direzione della particella mentre il numero totale di fotoelettroni permette di risalire alla sua energia.

La parte esterna ha una massa di circa 18 kton ed è fornita di 1885 PMT del diametro di circa 20 cm che guardano verso l'esterno: essa funziona da schermo e veto per la radioattività ambientale e permette di identificare i raggi cosmici e i muoni prodotti dalle interazioni di neutrino all'esterno del rivelatore, o quegli eventi che non sono completamente contenuti all'interno del volume fiduciale.

SK utilizza lo scattering elastico degli elettroni di rinculo in acqua per osservare i neutrini solari. Infatti ad energie inferiori a 20MeV la possibilità di misurare la direzione ed energia del neutrino è pesantemente limitata nei Water Cherenkov a causa dello scattering multiplo Coulombiano. Una precisa calibrazione del rivelatore in questo intervallo di energie risulta quindi fondamentale.

## 2. Risultati dell'anno 2018 sull'analisi dati relativi alla campagna di calibrazione

Il LINAC impiegato in SK è un Mitsubishi ML-15MIII, prodotto per scopi medici nel 1978. È stato utilizzato presso l'ospedale della Miyazaki Medical University prima della sua installazione presso il rivelatore SK nel 1996. Alcune modifiche sono state apportate per adattare il LINAC al suo nuovo uso ed è ora montato su una solida struttura di supporto in un tunnel laterale, che sovrasta di poco la parte superiore del serbatoio di acciaio contenente il rivelatore Cherenkov (figura 1).

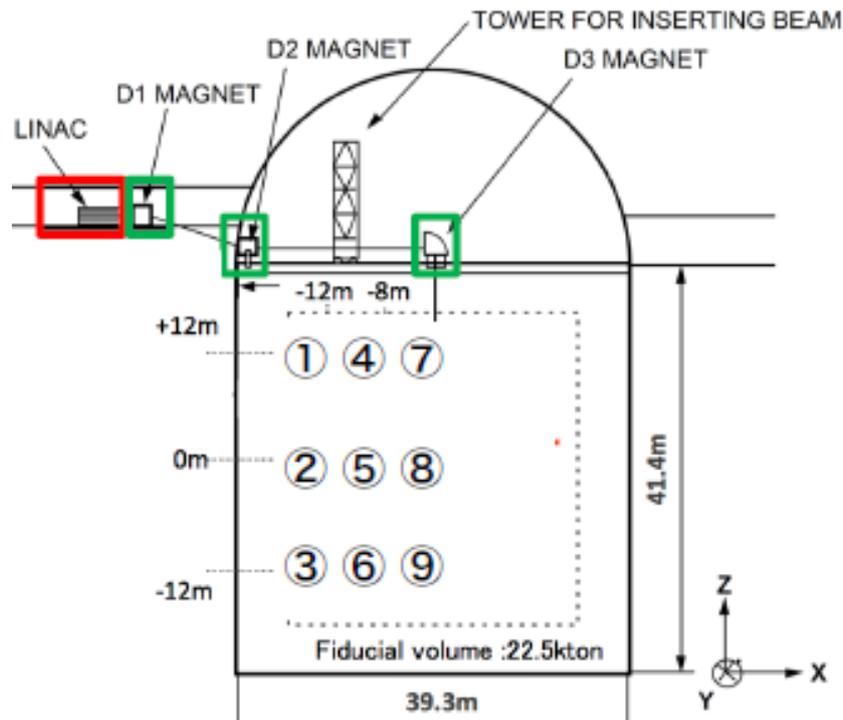


Figura 1: Posizionamento del Linac rispetto la tanica e punti di presa dati

Per la calibrazione di SK è necessario guidare singoli elettroni nel rivelatore tramite una speciale beam pipe, che li immette nel volume fiduciale del rivelatore. La beam pipe può essere montata in diverse posizioni e profondità. L'energia degli elettroni può essere variata in un intervallo compreso da 5 a 18 MeV [2].

Durante la campagna di presa dati, a cui ho partecipato, sono stati iniettati elettroni di energie e posizioni ben definite, così come riportato in tabella 1.

2017	Position[cm]			Target beam energy [MeV]					
	x [cm]	y [cm]	z [cm]	5	6	8	12	15	18
①	-1237	-70.7	1197	●	-	●	●	●	●
②	-1237	-70.7	-6	●	-	●	●	●	●
③	-1237	-70.7	-1209	●	●	●	●	●	●
④	-813.1	-70.7	1197	●	●	●	●	●	●
⑤	-813.1	-70.7	-6	●	-	●	●	●	●
⑥	-813.1	-70.7	-1209	●	●	●	●	●	●
⑦	-388.9	-70.7	1197	●	●	●	●	●	●
⑧	-388.9	-70.7	-6	-	●	●	●	●	●
⑨	-388.9	-70.7	-1209	●	-	●	●	●	●

Tabella 1: posizione del fascio nel volume fiduciale di SK e energia del fascio del LINAC

Un tipico *run* (corrispondente a determinati valori di posizione ed energia) contiene tipicamente un campione di circa 25000 elettroni.

Le due sezioni principali della *beam pipe* sono quella orizzontale, la cui lunghezza determina il raggio al quale si iniettano gli elettroni e quella verticale, che determina la profondità; la parte verticale contiene, nel punto di uscita degli elettroni, un sottile scintillatore usato come *trigger*, utile durante l'analisi a identificare gli eventi di calibrazione. Per minimizzare i fenomeni di *straggling*, la finestra di uscita degli elettroni è un sottile diaframma di titanio (100  $\mu\text{m}$ ).

Dopo che i dati sono stati acquisiti in una determinata posizione (da 1 a 9 in figura1), il magnete D3 viene spento e il fascio inviato orizzontalmente a un rivelatore al germanio; la finestra di uscita in orizzontale riproduce esattamente quella usata nella *beam pipe* verticale. In questo modo è possibile ottenere una misura della effettiva energia del fascio con la massima precisione possibile. La configurazione del LINAC garantisce che lo *spread* in energia sia trascurabile.

La posizione dell'elettrone all'interno del volume (X,Z) viene misurata utilizzando lo stesso programma di ricostruzione (battezzato BONSAI) utilizzato per l'analisi degli eventi di neutrini solari [6].

Dopo questa fase, il magnete D3 viene rimosso e il tubo verticale estratto dal serbatoio può essere inserito nella posizione successiva. Per ciascuna posizione e alle energie riportate in tabella, ho potuto perciò costruire una serie di distribuzioni bidimensionali come quelle mostrate in figura 2, in cui vengono riportate le proiezioni tipiche della distribuzione dei vertici sul piano x, z degli eventi generati dal LINAC. La larghezza delle distribuzioni ci permette di effettuare una prima valutazione della risoluzione spaziale ottenibile dallo strumento, mentre la posizione dei picchi, coincidente con il valore nominale, ci indica che gli eventuali *bias* sono

piccoli e/o trascurabili in quanto compatibili entro una sigma con la posizione nominale.

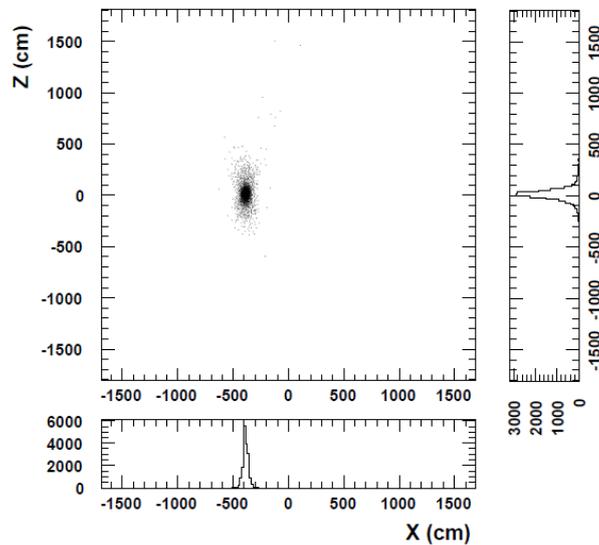


Figura 2: vertice di posizione a  $(x,z)=(-4m,0m)$ , energia del fascio a 15 MeV/c.

Utilizzando poi il Montecarlo ufficiale della collaborazione basato su GEANT è stato possibile confrontare le distribuzioni sperimentali con quelle simulate in condizioni analoghe. Per il Montecarlo sono stati simulati 50000 elettroni per ogni posizione ed energia. Analogamente al caso dei dati sperimentali, i dati prodotti sono stati ricostruiti utilizzando il programma BONSAI. Il confronto è stato in generale soddisfacente come si può notare nell'esempio riportato in figura 3.

I tre plot in alto confrontano i dati (in nero) e il MC rinormalizzato (in rosso) relativi ad una data posizione XZ del run a 8MeV (energia nominale). L'accordo è qui evidente.

In basso, invece, per i dati relativi alla stessa posizione ed energia si possono comparare l'energia ricostruita (in nero) rispetto alle aspettative del MC (in rosso).

Dalla larghezza della distribuzione si può dare una prima stima della risoluzione in energia.

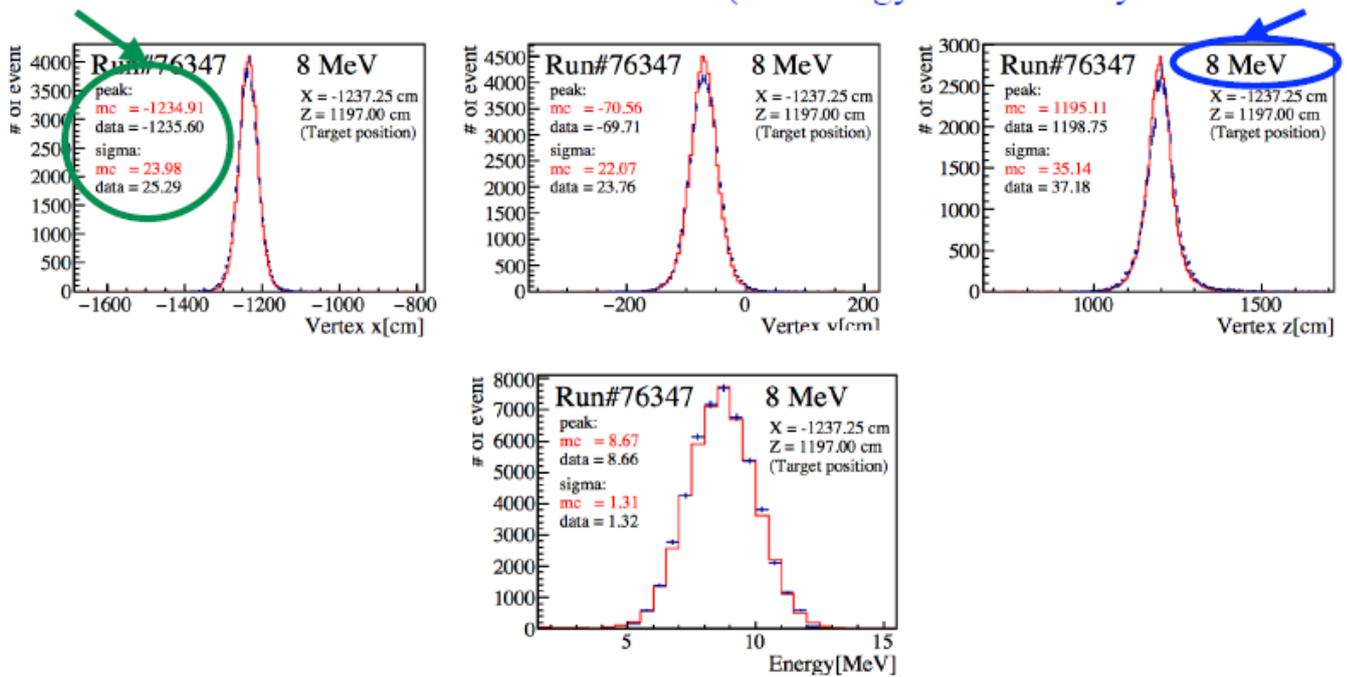


Figura 3: Vertici LINAC e distribuzioni di energia a confronto con un MC per  $(x,z)=(-12m,12m)$  e a energia di 8MeV.

La presa dei dati di calibrazione con il LINAC per le varie posizioni ed energie ha essenzialmente due scopi: innanzitutto, questi dati vengono utilizzati per effettuare una valutazione puntuale degli errori sistematici associati alle misure dei neutrini solari, in secondo luogo permettono di modellizzare al meglio la risposta del rivelatore in modo da poter riprodurre non solo i valori di posizione-energia direttamente misurabili col LINAC, ma anche le caratteristiche di qualsiasi altro elemento del detector.

L'analisi di quest'ultima presa dati di calibrazione è in fase di completamento, ma una prima stima ha permesso di valutare un errore sistematico nella dipendenza dalla posizione della scala di energia pari allo 0.46% in accordo a misure analoghe effettuate nel passato.

Infatti, è in corso anche un confronto fra questi risultati e quelli ottenuti negli anni precedenti. E', infatti, ipotizzabile una deviazione dai risultati del passato, in quanto il guadagno e l'efficienza dei PMT variano col tempo. Normalmente si tiene conto di queste variazioni introducendo opportuni coefficienti correttivi in funzione del periodo di presa dati.

Come accennato nell'introduzione, uno dei problemi nella calibrazione del rivelatore SK è il tempo necessario per la campagna di misure. Ci vogliono infatti circa due ore per raccogliere la statistica necessaria per un determinato valore di energia e molte di

più per il montaggio, spostamento e rimontaggio delle *beam pipe* e il riallineamento del fascio fra una misura ed un'altra.

L'attuale procedura di calibrazione con il LINAC è perciò estremamente laboriosa; una frazione importante del tempo è impiegato per l'allineamento del fascio e la regolazione della corrente dei magneti. Infatti, le energie molto basse e la scarsa stabilità del fascio implicano un'estrema sensibilità a qualunque piccola variazione della corrente nei magneti. L'uso di una sequenza di rivelatori capaci di misurare la posizione e non un semplice conteggio (come avviene ora) permetterebbe di ottenere un profilo del fascio e di capire, di conseguenza, molto meglio la sua ottica e consentirebbe di abbreviare considerevolmente il tempo necessario alla scelta dei parametri operativi. Informazioni sul profilo in diverse posizioni permetterebbe inoltre di perfezionare la simulazione del fascio.

### **3. Monitor di fascio**

Per i motivi sopra descritti, nel corso del 2016 è stata proposta e approvata la realizzazione di un nuovo Position Sensitive Monitor (PSM) del LINAC da utilizzare in Super-Kamiokande (SK) per la calibrazione degli elettroni. Il goal è quello di avere un primo monitor di fascio pronto per la prima presa dati che verrà effettuata con la graduale immissione del gadolinio (al 2%) prevista per il 2019.

Il gadolinio permetterà di distinguere neutrini da anti neutrini grazie al processo di cattura di neutroni con successiva emissione di gamma da 8 MeV. Per questo motivo, la procedura di calibrazione andrà ripetuta svariate volte e questo nuovo sistema permetterà di ridurre i tempi della procedura stessa. Dopo la conferma del corretto funzionamento del primo rivelatore, da installare nella sezione orizzontale, ne seguiranno un secondo da installare subito prima del magnete D3 ed infine uno nella sezione verticale in prossimità della finestra di uscita.

Tale progetto, realizzato in collaborazione tra i gruppi INFN di Bari e Roma, consiste in un set di 3 monitors basati sul concetto di "gamma camera" (dischi di scintillatori di 2-3 cm di diametro con lettura a SiPM). Nell'ambito di questo progetto, quindi, in questo ultimo anno di ricerca ho continuato lo studio già intrapreso nei mesi precedenti attraverso codici di simulazione e misure su una serie di dischi di materiale scintillante di diverso spessore (da 2 a 6 mm), diametro e caratteristiche di raccolta luce, al fine di ottimizzare le performances volute.

Le performances principali richieste da questo nuovo detector sono: una risoluzione spaziale dell'ordine di 1mm, con una quantità di materiale il più possibile ridotta e con un rivelatore sufficientemente compatto da poter essere alloggiato all'interno

della *beam pipe*. L'insieme della risoluzione, della quantità di materiale e dello spazio ridotto rappresenta una difficoltà non indifferente.

Inoltre, l'insieme dei detectors deve essere montato in modo tale da poter essere spostato e/o rimosso in modo remoto. Un PCB ospiterà l'elettronica di front-end, l'interfaccia con il sistema di *readout* e trasmissione dati. Un set of *silicon photo-multipliers* (SiPMs), posizionati come una corona intorno al dischetto di scintillatore, verrà utilizzato per leggere la luce raccolta. La posizione della traccia verrà determinata grazie al baricentro della luce raccolta dai SiPM.

In previsione di questo, nel corso di questo ultimo anno di dottorato ho simulato, nel framework di GEANT4 [4], una configurazione del monitor di fascio riferendomi alla campagna di misure sperimentali su una serie di scintillatori accoppiati a dei SiPMs da me effettuata lo scorso anno, al fine di valutare i parametri ottimali di tali monitor per i nostri scopi.

Per le nostre prime misure sperimentali, perciò, rifacendoci agli ultimi studi relativi a nuovi scintillatori [3], abbiamo scelto dei dischi interamente costituiti da P-Terfenile, le cui caratteristiche principali sono:

- Bassa densità, confrontabile con quella degli scintillatori plastici;
- un alto Light Yield (LY), maggiore di quello dell'antracene;
- una lunghezza di attenuazione corta.

Contrariamente al classico caso di una gamma-camera realizzata con SiPM disposti come matrice X-Y sulla faccia dello scintillatore, nel nostro caso i SiPM verranno posizionati unicamente alla periferia; questo allo scopo di ridurre al minimo possibile la quantità di materiale lungo la linea di fascio. Date le piccole dimensioni del dispositivo però, l'uso di uno scintillatore classico con grande lunghezza di attenuazione rischia di essere uno svantaggio. Infatti, una lunghezza di attenuazione molto più grande della dimensione del dischetto di scintillatore produrrebbe numerose riflessioni prima che i fotoni vengano raccolti alla periferia, di fatto azzerando la capacità di usare la misura del baricentro dei segnali raccolti per calcolare la posizione sul dischetto dell'elettrone incidente.

Da qui l'idea di usare cristalli di P-Terphenyl puro, a causa della sua ridotta lunghezza di attenuazione. Questa tipologia di scintillatori risulta infatti ottima per misure di posizione di particelle cariche a bassa energia poiché emette molta luce anche se la riassorbe velocemente. Il P-Terphenyl è normalmente usato come dopante negli scintillatori plastici ma usato puro emette (ovviamente) un numero molto maggiore di fotoni per MeV. L'idea di usarlo puro è, quindi, quella di avere luce sufficiente nei SiPM periferici nonostante la lunghezza di assorbimento ridotta,

approfitando dell'attenuazione per rendere la corona di SiPM sensibile alla posizione del baricentro.

Sono di seguito riportati i parametri principali dello scintillatore da noi utilizzato:

1. densità: 1.23 g/cm<sup>3</sup>
2. indice di rifrazione: 1.65
3. costante di decadimento: 3.7 ns
4. Light yield 27,000 photons/MeV (135% of Anthracene)
5. lunghezza d'onda della luce emessa: 420 nm

#### **4. Prove di simulazione con Geant4**

Il codice utilizzato per queste simulazioni è stato Geant4 (abbreviazione per GEometry And Tracking), uno strumento per le simulazioni Monte Carlo della propagazione e dell'interazione delle particelle all'interno di un rivelatore sviluppato al CERN. Come dice il nome stesso, Geant4 include strumenti per la definizione e il trattamento della geometria, del tracciamento e della risposta dei rivelatori: da un lato analizza la disposizione fisica dell'esperimento (rivelatori inclusi) e considera come questa disposizione influenzi il percorso delle particelle, dall'altro simula il passaggio delle particelle attraverso la materia assegnando una probabilità a ciascuna delle possibili interazioni o dei possibili processi di decadimento, infine registra quando una particella passa attraverso i volumi dei rivelatori e come un rivelatore reale potrebbe rispondere. Il vantaggio di questo codice rispetto a quelli utilizzati in precedenza (Geant3 e Scidra) consiste nel fatto che, oltre a simulare i processi d'interazione radiazione-materia (come l'effetto fotoelettrico, lo scattering Compton, la produzione di coppie, la ionizzazione, la formazione di elettroni Auger, etc), permette di simulare la formazione e il trasporto dei fotoni ottici generati all'interno di uno scintillatore. L'intero processo della formazione dell'immagine sul SiPM segmentato può essere dunque simulato attraverso un unico codice, riducendo notevolmente le tempistiche e permettendo di simulare un maggior numero di eventi per ottenere una statistica migliore.

Per studiare le prestazioni del monitor da realizzare accoppiato a uno o più SiPM si sono condotte alcune misure con fasci di elettroni ad energie ben definite. Tramite simulazioni sono state studiate le proprietà relative alla raccolta della luce negli scintillatori variando due parametri:

- il punto di impatto degli elettroni nel singolo scintillatore;
- l'utilizzo di uno o due fotomoltiplicatori accoppiati direttamente al singolo plastico.

Infatti, nel prosieguo del mio lavoro che nello scorso anno ha avuto come fulcro lo studio e la realizzazione della geometria del rivelatore, in questa fase finale ho dovuto valutare più approfonditamente due aspetti del sistema, quali la definizione dei parametri del nuovo materiale, il P-Terphenyl e il comportamento della sorgente, cioè un fascio di elettroni con energia della radiazione simulata che può variare tra i 5 MeV e 18 MeV, al variare della sua posizione rispetto alla geometria dello scintillatore stesso, al fine di ricostruirne la traccia con l'utilizzo dei SiPMs.

Le prove di simulazione da me effettuate consistono nel modificare la posizione della sorgente, che genera un certo numero di fotoni, spostandola in più punti e studiando la variazione del numero di fotoni che arrivano al SiPM.

Una prima simulazione è stata effettuata considerando una geometria molto semplice: tale geometria consiste in dischi di scintillatori di diametro (da 2,6 a 3 cm) e spessore variabili, semplicemente inseriti in un volume di aria e dotati di un SiPM posizionato sul perimetro; è in questo modo possibile contare il numero di fotoni di scintillazione che la simulazione prevede arriveranno su di esso.

La sorgente è posizionata in vari punti sulla sua superficie, così come riportato in figura: nello schema sono illustrati i tre punti d'impatto studiati nelle simulazioni: il centro dello scintillatore, la posizione CLOSE in alto vicino al fotomoltiplicatore e quella in basso, FAR lontano dal SiPM (figura 4).

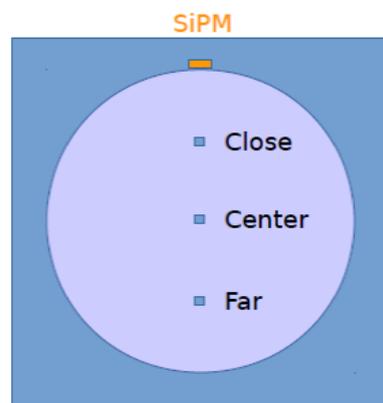


Figura 4: punti di impatto della sorgente sul disco di p-terfenile

Con GEANT4, sono state eseguite delle simulazioni che ci hanno consentito di rivelare il numero di fotoni letto dai SiPM in seguito al rilascio di elettroni a bassa energia da parte di una sorgente posizionata sullo scintillatore: abbiamo potuto osservare un numero di fotoni crescente man mano che la sorgente si avvicinava al SiPM e viceversa man mano che ci si allontanava.

Abilitando un solo fotomoltiplicatore alla volta, ho acquisito i conteggi per ciascun valore di energia e nei tre punti stabiliti per il fascio incidente. In seguito, per

accertare che la simulazione restituisca situazioni analoghe per entrambi i fotomoltiplicatori ho sovrapposto i grafici in cui si riportano il numero di fotoni in funzione della posizione (per fare ciò, è stato necessario ribaltare una delle due curve). Tale prova si è resa necessaria per verificare l'effettiva simmetria della struttura realizzata in Geant4 e come esempio di tali risultati ne riporto un esempio in figura 5.

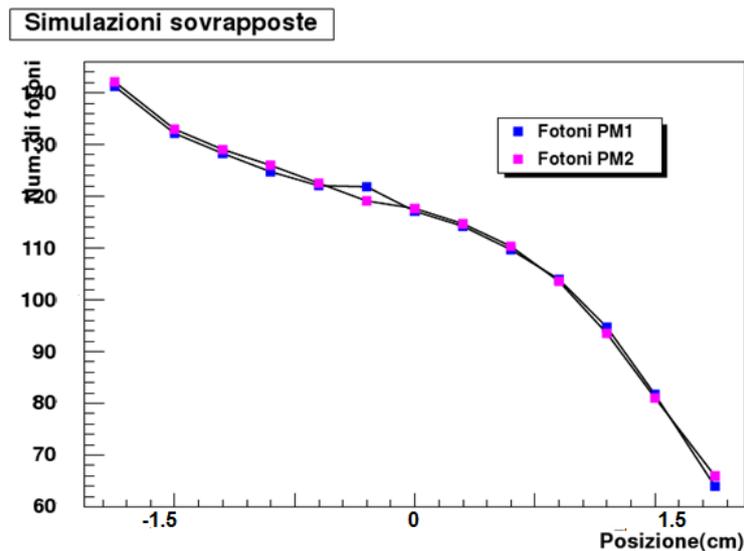


Figura 5: Simulazione della distribuzione dei fotoni in funzione della posizione del fascio in questo caso pari a 5 MeV, puntato nella posizione CLOSE (vicino al SiPM)

In una seconda fase, dopo aver accertato il comportamento simmetrico dello scintillatore e considerando lo stesso accoppiato a due SiPM montati in opposizione, ho simulato il comportamento del monitor acquisendo contemporaneamente i conteggi su entrambi i fotomoltiplicatori per le diverse energie della tabella 1 e nelle diverse posizioni della figura 4, allo scopo di risalire alla posizione del rilascio di energia, con il calcolo del baricentro di carica.

La ricostruzione della posizione della traccia (esempio in figura 6) è ottenuta confrontando l'ampiezza del segnale acquisito dai due SiPM, in particolare, l'algoritmo utilizzato è la media pesata dell'ampiezza del segnale fra rivelatori:

$$X_{rec} = (w_1 X_1 + w_2 X_2) / (w_1 + w_2)$$

dove  $X_i$  sono le posizioni nominali di ogni SiPM e  $w_i$  l'altezza dell'impulso. Questa formula è valida assumendo che l'altezza dell'impulso  $w_i$  sia proporzionale al percorso dei fotoni all'interno degli scintillatori, che a sua volta è proporzionale all'energia depositata dalla particella incidente.

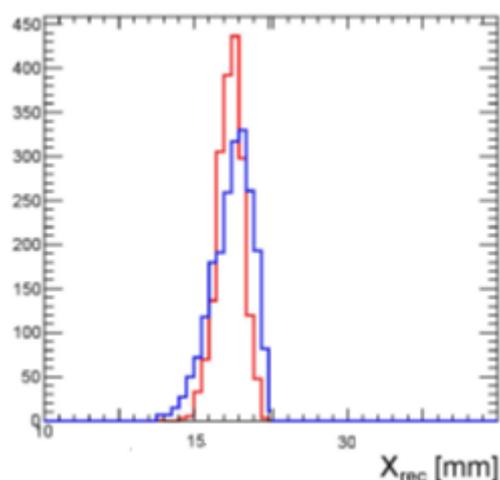


Figura 6: Distribuzione delle posizioni ricostruite per eventi su due SiPM in opposizione: la posizione ricostruita  $X_{rec}$  è riferita prendendo l'origine dell'asse x in corrispondenza di uno dei due bordi esterni disco.

Altre verifiche sono state effettuate ponendo alle estremità dello scintillatore ulteriori fotomoltiplicatori ed effettuando nuove simulazioni in diversi punti per aumentare la precisione nel calcolo del baricentro, a scapito però di un ulteriore ingombro di cui si deve tenere conto in fase di montaggio del monitor di fascio alla fine della beam pipe in SK: questo studio di ottimizzazione è ancora in corso.

Un altro dei parametri studiati è stato la riflettività delle pareti del dischetto in P-Terphenyl: diminuendo il suo valore conseguentemente si riduce anche il numero di fotoni che riescono a raggiungere il fotocatodo; questo si spiega perché la diminuzione della riflettività comporta un minor numero di riflessioni dei fotoni verso l'interno e che quindi si perdono perché escono dal materiale prima di raggiungere il SiPM (o di essere riassorbiti).

In questo caso, in figura 7, ho riportato un esempio delle prove fatte per un valore di rugosità  $R$  pari a 0.005 del disco di scintillatore (comparabile al parametro fornito dal costruttore) e di riflettività pari al 90%. Le prove sperimentali dello scorso anno, infatti, ci hanno consentito di assegnare valori precisi a tali parametri. Ricordiamo che la rugosità rappresenta una proprietà della superficie di un corpo costituita da microimperfezioni geometriche normalmente presenti sulla superficie o anche risultanti da lavorazioni meccaniche. Nel nostro caso tale parametro andrà a caratterizzare la superficie dello scintillatore plastico. La riflettività è una proprietà del materiale stesso e si riferisce alla frazione di potenza incidente elettromagnetica che viene riflessa da un'interfaccia.

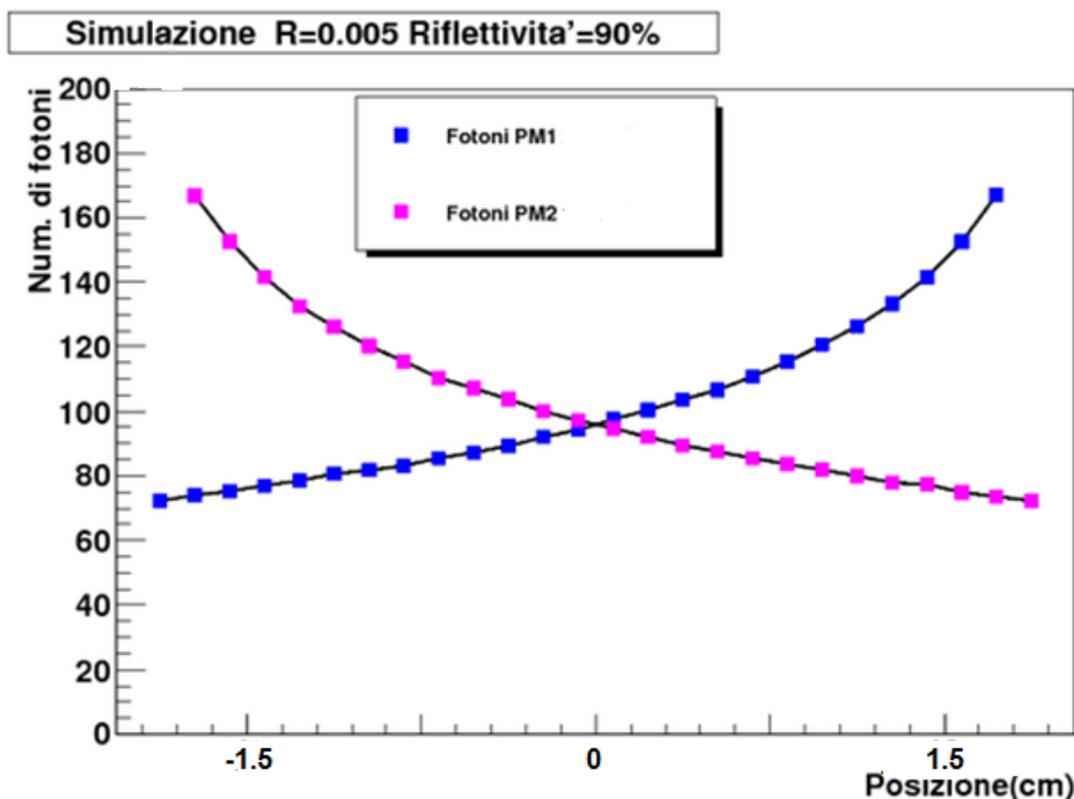


Figura 7: Numero di fotoni rivelati dai due SiPM in funzione della posizione della sorgente per valore della rugosità  $R=0.005$  e riflettività=90%.

Sono stati, infine, confrontati i risultati ottenuti tramite le prove di simulazione con i risultati estratti dalle prove sperimentali. Innanzitutto dobbiamo ricordare che le simulazioni riportano in uscita una grandezza che rappresenta il numero di fotoni che vengono raccolti dai fotocatodi alle estremità del dimostratore, mentre i dati acquisiti sperimentalmente ci riportano dei valori di carica provenienti dai fotomoltiplicatori ed espressi in pC (figura8). In particolare, come descritto dettagliatamente nella relazione dello scorso anno, utilizzando i dati sperimentali, considerando il *range* con un andamento più lineare, è stata calcolata la carica media nei tre punti dello scintillatore e i cui valori sono stati inseriti nella tabella a destra.

In questo modo, è stato possibile valutare anche sperimentalmente la lunghezza di attenuazione per gli scintillatori con diametro 26mm e di 30mm e con spessore di 4mm e 6mm di P-Terphenyl, che è risultato essere dell'ordine di circa 1 cm, comparabile con i valori ottenuti dalle varie simulazioni.

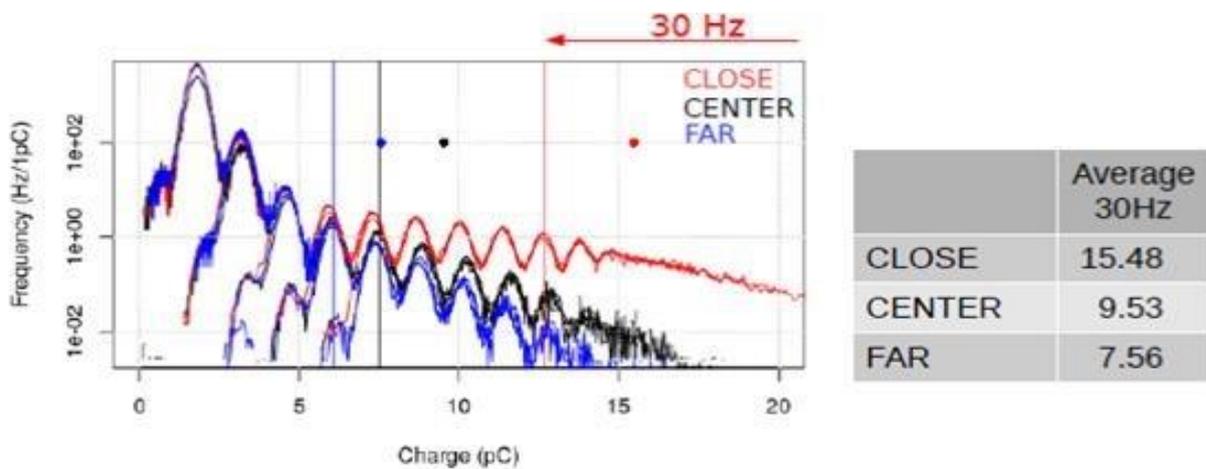


Figura 8: viene riportato come esempio (30Hz -scelto arbitrariamente-) il grafico della frequenza in funzione della carica per le tre posizioni diverse della sorgente rispetto al SiPM

Tutti questi risultati sono perciò compatibili con le dimensioni del monitor di fascio che si vuole realizzare per la calibrazione del rivelatore SK, verificando che un disco scintillante di questo nuovo materiale (P-Terphenyl) e con questa geometria è ottimale per i nostri scopi.

## 5. Conclusioni

Lo scopo di questa campagna di misure sperimentali e di simulazioni è stato essenzialmente verificare che, utilizzando uno scintillatore di P-Terphenyl, la raccolta di luce è sufficiente per i nostri scopi e che la lunghezza di attenuazione risulta essere dello stesso ordine di grandezza della dimensione del monitor che prossimamente verrà montato a SK.

Tale lavoro è stato suddiviso in più fasi. La prima fase ha coinvolto l'analisi dati della campagna di calibrazione attuale a cui ho partecipato proprio presso Super-Kamiokande, mentre in una seconda fase ho sviluppato una simulazione del sistema di monitor di fascio tramite l'utilizzo del software GEANT4 sviluppando una struttura composta da uno scintillatore di P-Terphenyl con alle sue estremità connesso uno e poi due fotomoltiplicatori SiPM. Una sorgente di elettroni, posizionata lungo lo scintillatore, ci ha permesso di acquisire i dati relativi ai fotoni di scintillazione registrati dai fotomoltiplicatori. Il lavoro, infine, ha previsto un'analisi dei dati ed un confronto fra i dati acquisiti nello scorso anno e quelli simulati al fine di ottenere il massimo accordo tra simulazione e dati sperimentali.

Possiamo concludere questo lavoro evidenziando come gli studi svolti durante il periodo di tesi di dottorato abbiano consentito di caratterizzare in modo efficace il

comportamento di un dimostratore utile in futuro per la realizzazione di un set di 3 monitor di fascio per la calibrazione con il LINAC di Super-Kamiokande.

Scelti quindi i parametri ottimali per lo scintillatore e i SiPMs, sarà possibile procedere all'assemblaggio del primo detector che verrà utilizzato anche come prototipo per i due successivi.

## **Pubblicazioni e lavori a stampa 2018**

1. Search for CP violation in Neutrino and Antineutrino Oscillations by the T2K experiment with  $2.2 \times 10^{21}$  protons on target -T2K Collaboration (K. Abe (Kamioka Observ.) et al.)- Jul 20, 2018 - 9 pages-e-Print: arXiv:1807.07891 [hep-ex]
2. Hyper-Kamiokande Design Report -Hyper-Kamiokande Collaboration (K. Abe (Yokohama Natl. U. & Kamioka Observ. & Tokyo U., IPMU) et al.) May 9, 2018 - 333 pages, e-Print: arXiv:1805.04163 [physics.ins-det] |
3. A beam monitor based on MPGD detectors for hadron therapy-P.R. Altieri, D.Di Benedetto, G. Galetta, R.A. Intonti, A. Mercadante, S. Nuzzo, P. Verwilligen 2018 - 4 pages EPJ Web Conf. 174 (2018) 01011 (2018) DOI: 10.1051/epjconf/201817401011 Conference: C15-10-12
4. Characterization of nuclear effects in muon-neutrino scattering on hydrocarbon with a measurement of final-state kinematics and correlations in charged-current pionless interactions at T2K - T2K Collaboration (K. Abe et al.) Feb 14, 2018 - 46 pages Phys.Rev. D98 (2018) no.3, 032003 (2018-08-10) DOI: 10.1103/PhysRevD.98.032003 e-Print: arXiv:1802.05078 [hep-ex]
5. Search for Neutrinos in Super-Kamiokande Associated with the GW170817 Neutron-star Merger-Super-Kamiokande Collaboration (Y. Hayato (Kamioka Observ. & Rutherford) et al.) Feb 12, 2018 - 8 pages Astrophys.J. 857 (2018) no.1, L4 (2018-04-09) DOI: 10.3847/2041-8213/aabacae-Print: arXiv:1802.04379 [astro-ph.HE]
6. Measurement of inclusive double-differential  $\nu_{\mu}$  charged-current cross section with improved acceptance in the T2K off-axis near detector T2K Collaboration (K. Abe (Kamioka Observ.) et al.). Jan 16, 2018. Published in Phys.Rev. D98 (2018) 012004 DOI: 10.1103/PhysRevD.98.012004 e-Print: arXiv:1801.05148 [hep-ex]

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Atsuko K. Ichikawa, the T2K long baseline neutrino oscillation experiment, 2009. 27pp. Lect. Notes Phys. 781: 17-43, 2009.
- [2] Calibration of the Super-Kamiokande detector- Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 737: 253–272, K. Abe; et al. (11 February 2014).
- [3] Properties of para-terphenyl as detector for  $\alpha$ ,  $\beta$  and  $\gamma$  radiation.
- [4] GEANT Detector Description and Simulation Tool, CERN Program Library W5013, 1994.
- [5] The Super-Kamiokande detector Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 501 (2003) 418–462
- [6] Low Energy Event Reconstruction and Selection in Super-Kamiokande-III VOL5 (HE part2) pages 1279-1282