



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 secondo anno

Dottoranda: Intonti Rosaria Annalisa

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

Sommario

L'attività di ricerca del secondo anno di dottorato si è svolta nell'ambito dell'esperimento T2K. T2K è un esperimento "long baseline" che ha come scopo la misura dei parametri di oscillazione dei neutrini. In particolare in T2K, il fascio di ν_μ prodotto nel complesso di acceleratori per la ricerca, denominato J-PARC (villaggio di Tokai sulla costa est del Giappone), viene prima adeguatamente monitorato da un insieme di rivelatori posti nel cosiddetto *Near Detector* (ND280) e, successivamente, inviato ed intercettato a 295 km di distanza dal gigantesco rivelatore Super-Kamiokande. Quest'ultimo rivelatore, collocato all'interno delle miniere di Kamioka (costa ovest del Giappone), è composto da 50kton d'acqua pura e permette di misurare, tramite effetto Cherenkov, muoni, elettroni e pioni, prodotti dalle interazioni deboli dei neutrini con l'acqua.

L'osservatorio Super-Kamiokande in Giappone, così come il Sudbury Neutrino Observatory nell'Ontario (Canada), si è rivelato fondamentale per dimostrare la mutazione dei neutrini, scoperta che nel 2015 è valsa il premio Nobel per la Fisica a Takaaki Kajita e Arthur B. McDonald.

La calibrazione della risposta agli elettroni in Super-Kamiokande viene effettuata periodicamente grazie ad un LINAC che accelera elettroni in predeterminate posizioni all'interno del volume. 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 alla precisione del posizionamento della sorgente di elettroni, e ai lunghi tempi necessari per il posizionamento della stessa. Una campagna di calibrazione, a cui ho personalmente partecipato, con l'attuale sistema richiede tre/quattro settimane di presa dati in cui SK non può prendere dati per la fisica. Proprio in questo contesto la mia attività di ricerca, prevede oltre che lo studio e la partecipazione attiva all'attuale processo di calibrazione del rivelatore, il contemporaneo sviluppo, realizzazione e caratterizzazione di un nuovo monitor del LINAC per Super-Kamiokande (di responsabilità del gruppo INFN), fondamentale per ottenere una calibrazione ottimale della risposta degli elettroni nel rivelatore che possa risolvere le limitazioni attuali.

L'attuale procedura di calibrazione con il LINAC è estremamente laboriosa, a causa soprattutto del tempo richiesto per l'allineamento del fascio e la regolazione della corrente dei magneti. Infatti, le energie essendo molto basse, la scarsa rigidità del fascio implica un'estrema sensibilità a qualunque piccola variazione della corrente nei magneti. L'uso di una sequenza di rivelatori di fascio capaci di misurare la posizione e non solo un conteggio permetterà di ottenere un profilo del fascio e di capire, di conseguenza, molto meglio la sua ottica consentendo di abbreviare considerevolmente il tempo necessario alla scelta dei parametri operativi.

In particolare, il lavoro svolto nel secondo anno di dottorato ha avuto come scopo di, innanzi tutto, stabilire se le proprietà di imaging del materiale scintillante permettono di realizzare il dispositivo; a tal scopo sono stati utilizzati campioni di diverse dimensioni di cui si è studiata la risposta al variare della posizione di un fascio collimato di elettroni originato da una sorgente radioattiva. In un secondo momento ho iniziato a sviluppare nuovi codici di simulazione per finalizzarne il design.

1. Super-Kamiokande

Super-Kamiokande, abbreviato in Super-K o SK, è un osservatorio di neutrini situato in Giappone, nella miniera di Kamioka (l'attuale nome dalla città è Hida), nella provincia di Gifu. Tale rivelatore è un enorme serbatoio di acciaio inossidabile alto 41 metri e con un diametro di 39,3 metri riempito con 50kton di acqua purissima.

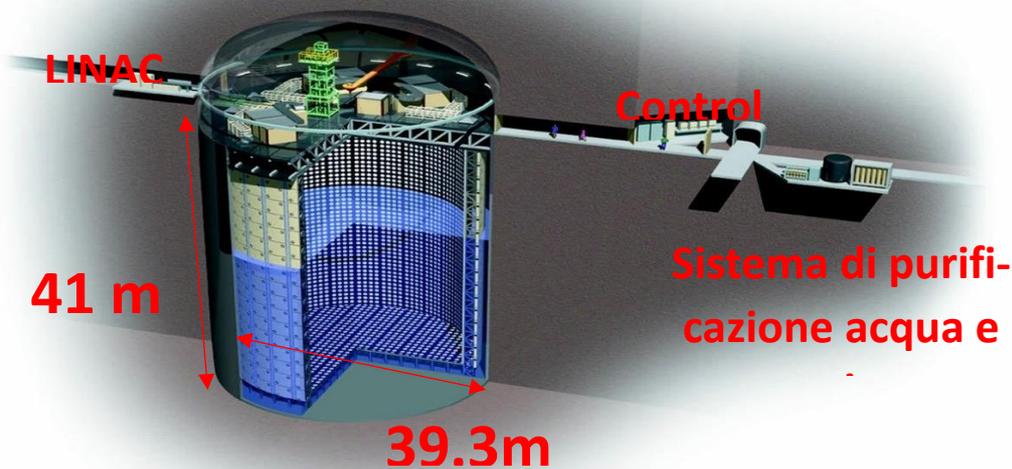


Fig. 1

Attualmente, le sue pareti interne sono ricoperte da 11.129 tubi fotomoltiplicatori (PMT), rilevatori elettronici di luce molto sensibili, al punto da poter rilevare la presenza di un singolo fotone. Ogni PMT assomiglia a una grande lampada di 50 centimetri di diametro. Altri 1.885 PMT, di dimensioni più piccole (20 centimetri), sono collocati sulla parete esterna del serbatoio.

Ad oggi, Super-K è in presa dati, oltre che per l'esperimento T2K, per i seguenti studi:

- 1) Neutrini solari;
- 2) Neutrini atmosferici;
- 3) Neutrini da esplosione di supernovae;
- 4) Vita media di un protone;

5) Supernovae rimanenti nell'universo.

In questo tipo di detector la calibrazione in energia degli elettroni è, quindi, un elemento fondamentale, sia per le misure di oscillazione che per le misure relative ai neutrini solari. In Super-Kamiokande tale calibrazione è effettuata periodicamente grazie ad un LINAC, la cui parte terminale viene inserita in differenti posizioni all'interno dell'enorme detector e tramite la quale vengono iniettati elettroni di energie ben definite (4MeV-6MeV-8MeV-12MeV e 18MeV) tramite i quali è possibile studiare la risposta dei PMT che costituiscono l'intero rivelatore.

3. Risultati dell'anno 2017

Nel corso del 2016 è stata proposta e approvata la realizzazione di un nuovo Position Sensitive Monitor (PSM) del LINAC utilizzato da Super-Kamiokande (SK) per la calibrazione degli elettroni.

Il goal è quello di avere un monitor di fascio testato ed integrato 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.

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 anno di ricerca ho avviato lo studio attraverso codici di simulazione e misure su una serie di dischi di materiale scintillante di diverso spessore, 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 entro cui viaggiano gli elettroni del LINAC. 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 readout system e l'ASICs per la serializzazione del readout verso la fibra. Un set of silicon photo-multipliers (SiPMs) verrà utilizzato per leggere la luce raccolta dagli scintillatori. La posizione della traccia verrà determinata grazie al baricentro della luce raccolta da ogni SiPM.

In previsione di questo, nel corso di questo secondo anno di dottorato ho simulato, nel framework di GEANT4 [3], una versione semplificata della nuova configurazione del monitor di fascio e ho compiuto una campagna di misure sperimentali su una serie di scintillatori accoppiati a dei SiPMs al fine di valutare se il light yield, la lunghezza di attenuazione e la raccolta di luce sono sufficienti per i nostri scopi.

3.1.a. Lo scintillatore

In generale, gli scintillatori organici sono composti di idrocarburi aromatici contenenti strutture ad anello di benzene. Il meccanismo di scintillazione in questi composti è dovuto alla transizione degli elettroni di valenza liberi delle molecole. I materiali che presentano il fenomeno della scintillazione, possono essere in forma di cristalli puri o miscele di uno o più composti in soluzioni liquide o solide. Nella fisica nucleare e delle particelle, tra gli scintillatori organici più usati ci sono quelli definiti plastici, in cui il solvente è un materiale plastico solido. I materiali plastici più comuni e largamente utilizzati sono il polyvinyltoluene, il polyphenylbenzene e il polystyrene. Alcuni soluti primari sono PBD, p-Terphenyl (fig.2) e PBO, che sono disciolti in concentrazioni tipiche dell'ordine di 10 g/l. Molto spesso un soluto secondario viene aggiunto in basse proporzioni per le sue proprietà di shifter in lunghezza d'onda. Gli scintillatori plastici presentano un segnale estremamente rapido con un tempo di decadimento di circa 2-3 ns e un alto segnale luminoso in uscita.

Per le nostre prime misure sperimentali, perciò, rifacendoci agli ultimi studi relativi a nuovi scintillatori [2], 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, nel nostro caso la lettura con SiPM deve essere effettuata alla periferia per ridurre al minimo possibile la quantità di materiale lungo la linea di fascio. In questo caso l'uso di uno scintillatore classico con grande lunghezza di attenuazione rischia di essere uno svantaggio.

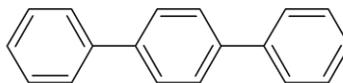
L'idea originale dell'usare cristalli di P-terphenil puro è che la ridotta lunghezza di attenuazione, nel nostro caso, aiuta a differenziare particelle che lo attraversano in posizioni diverse. Infatti, se la lunghezza di attenuazione fosse molto più grande della dimensione del dischetto di scintillatore, la quantità di fotoni raccolti alla periferia sarebbe sostanzialmente la stessa indipendentemente dalla posizione sul dischetto medesimo.

In altri termini, questa tipologia di scintillatori possiede delle proprietà sia degli scintillatori organici, sia di quelli inorganici, risultando ottimi per misure di posizione di particelle cariche a bassa energia poiché emettono tanta luce anche se la riassorbono velocemente, ideali per i nostri scopi.

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

- densità: 1.23 g/cm³
- indice di rifrazione: 1.65
- costante di decadimento: 3.7 ns
- Light yield 27,000 photons/MeV (135% of Anthracene)
- lunghezza d'onda della luce emessa: 420 nm

La lunghezza di attenuazione del P-terphenil è, in aggiunta, non facile da calcolare ed è comunque poco conosciuta; i cristalli di P-terphenil puro si presentano come solidi dall'aspetto opaco dovuto al fatto che la luce, attraversandoli, subisce una forte diffusione; la lucidatura non influenza questa sua caratteristica, dovuta alle proprietà trasmissive del materiale più che alle condizioni delle sue superfici. Si veda, ad esempio, la foto di un dischetto di P-terphenil in figura 5. Per questo motivo è stato indispensabile fare una serie preliminare di misure per verificare che il suo uso sia possibile nel nostro caso.



p-terphenyl

Fig.2

3.1.b. Il fotomoltiplicatore

I fotomoltiplicatori al Silicio (SiPMs) sono degli ottimi dispositivi per la lettura e amplificazione di segnali luminosi emessi da materiali scintillanti.

Essi consistono in una matrice di fotodiodi a valanga disposti in parallelo su un substrato comune di Silicio e operanti in modalità Geiger ($V_{polarizzazione} > V_{breakdown}$); il dispositivo occupa un'area di qualche mm². Ogni fotodiodo costituisce un pixel operante ad una tensione maggiore di quella di breakdown di circa il 10-20%. Un portatore generato da fotoni o termicamente, dà luogo ad una scarica di tipo Geiger confinata

all'interno di un pixel. La scarica viene interrotta, quando la tensione diventa inferiore alla tensione di breakdown a causa di una resistenza esterna in serie ad ogni fotodiodo (quenching passivo). I pixels, che lavorano come dei micro contatori Geiger indipendenti, sono connessi alla stessa linea di uscita; in questo modo, il segnale risultante corrisponde alla somma dei segnali di tutti i pixels accesi ed è una misura del flusso di luce.

Il fotomoltiplicatore al silicio da noi utilizzato è un TO-18 SiPM con le seguenti caratteristiche:

- 1x1 mm size
- 576 microcell of 35um (fill factor 64%)
- Temp stability 21.5mV/°C
- Breakdown voltage ~24.65V
- Bias over-voltage 1-5 V
- Wavelength 300-800nm, peak 420nm
- PDE 31%-41%
- Gain $3 \cdot 10^6$
- Dark current rate 30KHz (<96KHz)

3.1.c. Elettronica di front-end

La scheda di front-end dedicata all'amplificazione e alla lettura del SiPM è stata sviluppata dal servizio di elettronica dell'INFN di Roma: ArduSiPM è una scheda di acquisizione per la lettura di rivelatori SiPM attraverso l'ausilio della scheda Arduino: è costituita da un'interfaccia per la comunicazione e la condivisione dati e da un sensore di temperatura (da -40 °C a +85 °C) attraverso il modulo BMP180.

La scheda ArduSiPM (figura 3) dispone di circuiteria elettronica per l'acquisizione del segnale, in particolare un discriminatore veloce, un pre-amplificatore e un circuito di peak hold. Un preamplificatore in tensione legge il segnale dal rivelatore SiPM e lo adatta alla gamma del discriminatore veloce e a quella del convertitore analogico-digitale. L'amplificatore è veloce per seguire la risposta del SiPM di pochi ns, ed è lineare in tutta la gamma di segnale del rivelatore, con un rumore inferiore a un SiPM single pixel per garantire una discriminazione accurata e una buona misura dell'ampiezza. Il segnale proveniente dal SiPM è molto breve e un circuito (fast discriminator) viene utilizzato per discriminarlo ad un valore di soglia controllato in modo digitale mediante un canale dell'ADC del SAM3X8E. Un'uscita TTL replicata del discriminatore veloce è presente come trigger di uscita. L'uscita del fast discriminator è inviata successivamente ad un contatore per il conteggio degli impulsi derivanti da radiazione ionizzante. Un circuito peak hold viene utilizzato come mantenimento del picco per oltre 1 μ s per essere convertito successivamente dall'ADC 12 bit. Un segnale digitale programmabile controlla il circuito di scarica veloce per ripristinare il circuito peak hold dopo l'acquisizione dell'ADC e settare il sistema per una nuova acquisizione.

Un sistema di LED a forma di matrice è montato per mostrare l'effetto visivo-luminoso della radiazione non appena questa attraversa lo scintillatore.

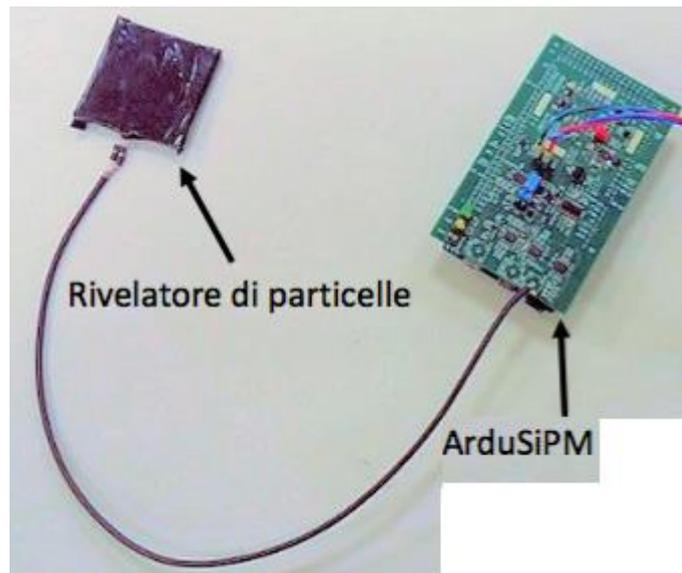


Fig.3

3.2 Set-up sperimentale e misure sperimentali

L'apparato sperimentale usato è mostrato schematicamente in figura 4 e consiste in:

1. una sorgente di Sr90-Y90;
2. uno scintillatore (monocristallo di p-terfenile di diverse dimensioni);
3. scheda ARDUSiPM;
4. SiPM mod.TO-18;
5. oscilloscopio.

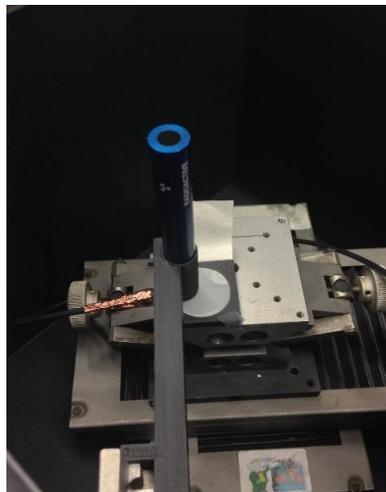


Fig.4

Lo scopo di questa campagna di misure sperimentali è essenzialmente comprendere se, utilizzando uno scintillatore di p-terfenile, la raccolta di luce è sufficiente per i nostri scopi e se la lunghezza di attenuazione risulta essere dello stesso ordine della misura del rivelatore.

Per prima cosa, con l'utilizzo di una stampante 3D, è stato realizzato un supporto per il dischetto di scintillatore dove è stato realizzato anche l'alloggio per il SiPM, come mostrato in figura 5.

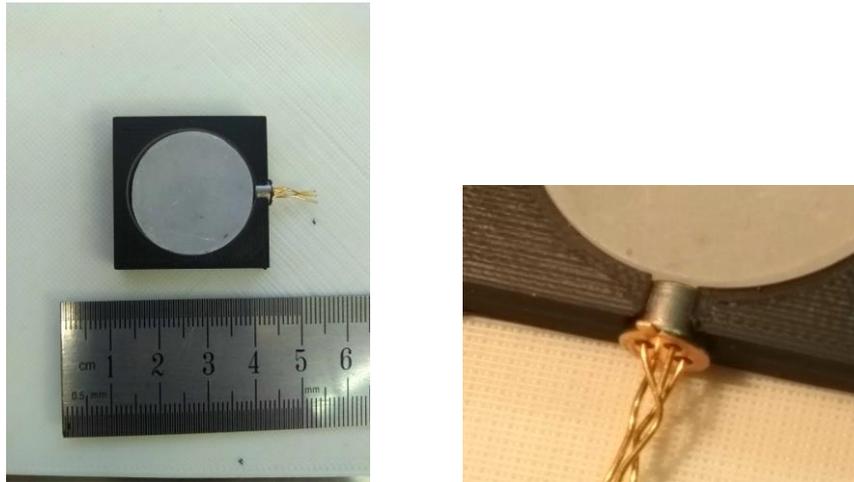


Fig.5

Le misure sono state effettuate utilizzando elettroni prodotti nel decadimento radioattivo dello ^{90}Sr - ^{90}Y , il cui spettro è riportato in figura 6.

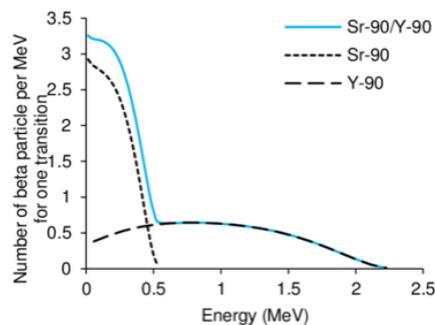


Fig.6

Utilizzando tale sorgente con attività di 74 kBq nominali, è stata studiata la dipendenza della risposta dalla distanza tra il SiPM e il punto di interazione delle particelle.

Per prima cosa, abbiamo verificato l'estensione della sorgente e, per tale ragione, abbiamo utilizzato un collimatore di ottone di diametro pari a 2mm. In questo modo, è stato assemblato il set-up all'interno di una black box con all'interno un sistema di movimentazione manuale in xyz che ha permesso di posizionare la sorgente a 0,05mm al di sopra dello scintillatore (fissa quindi rispetto l'asse z) e di spostarla nel piano xy. In particolare, sono state effettuate delle misure posizionando la sorgente esattamente al centro dello scintillatore, un set di misure posizionando la sorgente a 7 mm a destra e poi a sinistra rispetto al centro (lungo la medesima direzione), in modo tale da studiare la risposta dello scintillatore in punti più o meno lontani rispetto al SiPM (schema in figura 7).

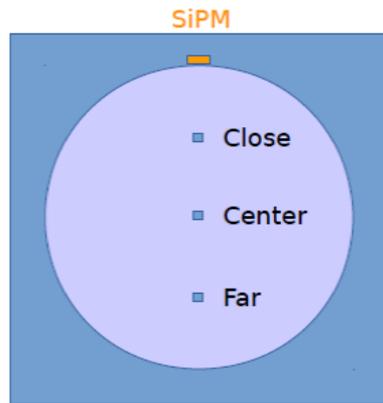


Fig.7

Sono state effettuate delle misure ad una soglia di tensione di acquisizione variabile, da 800 μV a 5 mV, nelle tre posizioni, CLOSE, CENTER e FAR rispetto al SiPM.

Sull'oscilloscopio sono stati acquisiti degli istogrammi in cui ogni picco corrisponde al numero di fotoelettroni che hanno colpito una cella del SiPM (ogni singola cella si accende appena viene attraversata da un fotoelettrone cioè è photon counting): in particolare, escludendo il primo picco che con auto trigger a 500 μV corrisponde al white noise, ogni picco successivo corrisponde ad un fotoelettrone, a due a tre fotoelettroni e così via (esempio in figura 8). Gli elettroni inviati dalla sorgente che non è monocromatica hanno uno spettro di impulso non controllato e non sono propriamente MIP: tutto quello che è al di sotto di 400-500KeV viene assorbito nello scintillatore, ma è, comunque, plausibile l'ipotesi che la coda della distribuzione di energy loss per la sorgente di Sr90-Y90 (fig.9) nei 4mm di spessore nel P-Terfenile è di circa 800-1000KeV (corrispondente a circa una MIP).

Di seguito vengono riportati degli esempi dei dati acquisiti a soglie differenti (fig. 8). In particolare, per ciascuna posizione sono stati acquisiti dei conteggi (corrispondenti al numero di volte che veniva illuminata una cella del SiPM, all'arrivo di un fotoelettrone) in funzione della tensione per secondo. Per ciascuna acquisizione si sono poi normalizzati i conteggi alla frequenza rispetto la soglia più alta (5mV), ed i dati infine presentati come frequenza in funzione della carica. Si è infine ripetuta la procedura per ogni posizione della sorgente rispetto allo scintillatore

- 1) Close position ($\sim 7\text{mm}$ from SiPM)

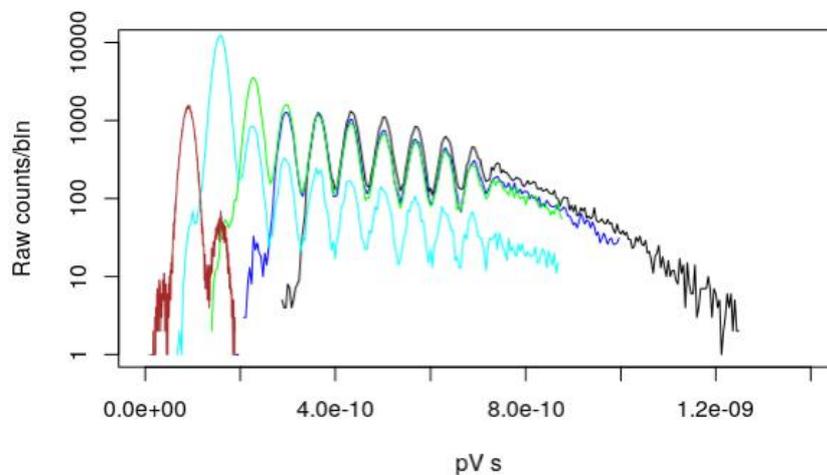
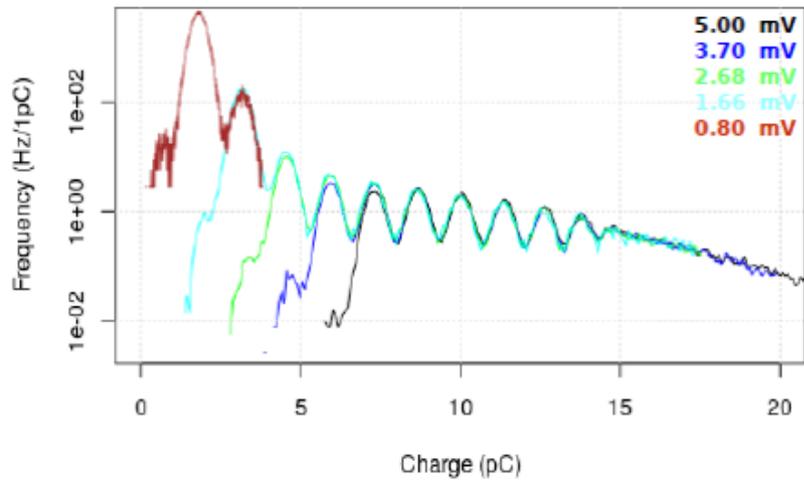
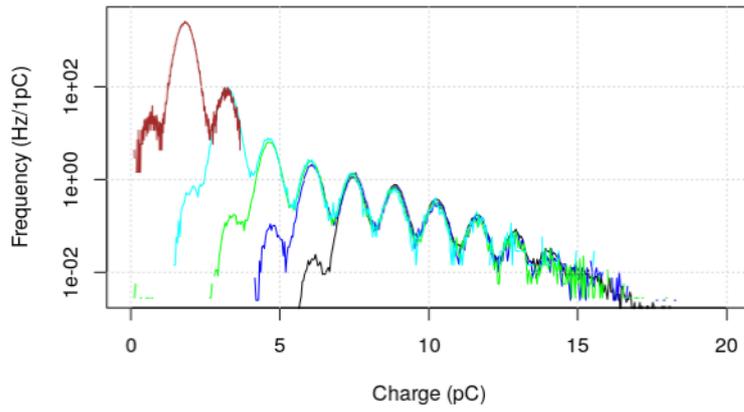


Fig.8



2) Center Position (~14mm from SiPM)



3) Far position (~21mm from SiPM)

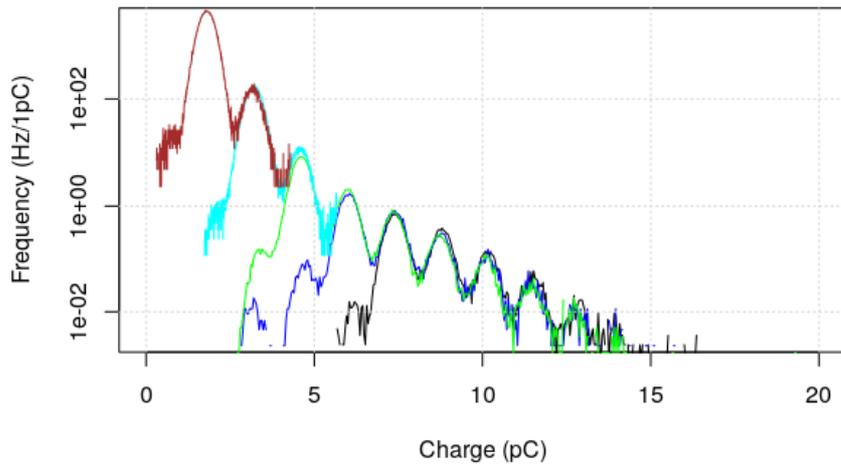


Fig.9

Ottenuto uno spettro completo per ciascuna posizione, si normalizzano i tre spettri prendendo come riferimento il picco corrispondente a un fotoelettrone. Questo ci permette di capire come gli spettri si modificano in funzione della distanza e di quantificare approssimativamente la lunghezza di attenuazione.

In figura 10 viene riportato, come esempio di questa procedura, il grafico della frequenza in funzione della carica per le tre posizioni diverse della sorgente rispetto al SiPM. Prendendo arbitrariamente un valore di frequenza (in questo caso 30Hz) è possibile stabilire per ciascuna distanza quale sia il numero di fotoelettroni corrispondenti a un evento che si presenta con quella determinata frequenza. In particolare, 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 la lunghezza di attenuazione per gli scintillatori con diametro 26mm e 4mm di spessore di p-terfenile utilizzati in questa serie di misure, che è risultato essere dell'ordine di un cm, compatibile 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-terfenile) e con questa geometria è utilizzabile per i nostri scopi. Attualmente è in corso l'approvvigionamento dei materiali necessari per sia per provare diversi spessori del dischetto che per la realizzazione del primo prototipo. Una verifica più precisa sarà poi effettuata usando un fascio di elettroni o un telescopio per trigger di cosmici.

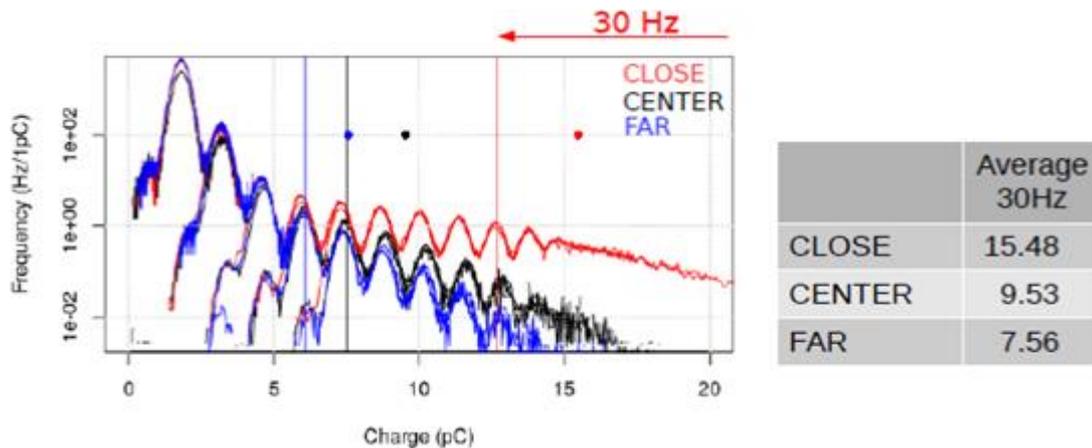


Fig.10

3.3 Simulazione Geant4

Nel corso del secondo anno ho anche studiato e simulato, nel framework di GEANT4 [3], una versione semplificata della nuova configurazione del monitor di fascio.

Infatti, contemporaneamente alle prime misure sperimentali, è necessario riprodurre il rivelatore in una simulazione per meglio capire quanti SiPM sono indispensabili e come disporli sul perimetro del dispositivo; questi dettagli sono importanti per definire il disegno del supporto meccanico e dell'elettronica di lettura.

Il codice utilizzato per queste simulazione 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.

In prima approssimazione, in questo anno ho studiato e realizzato la geometria del rivelatore dove gli scintillatori sono stati definiti come semplici dischi, trascurando i dettagli dei supporti meccanici non ancora ben definiti perchè in fase di studio (figura 11).

Gli altri due aspetti del sistema simulato sono stati la definizione del nuovo materiale, il p-terfenile e la sorgente, cioè un fascio di elettroni con energia della radiazione simulata che può variare tra i 4 MeV e 18 MeV.

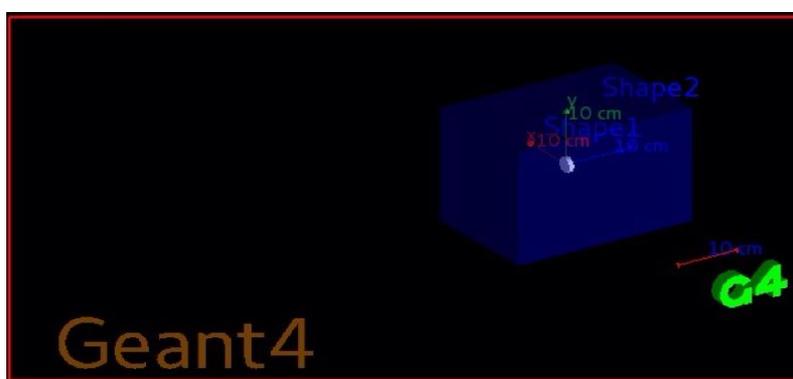


Fig.11

Il fascio di elettroni è orientato lungo l'asse Z (cioè lungo la direzione perpendicolare alle facce del dischetto scintillatore), mentre il read-out dei monitor dovrà essere, nella successiva fase di studio, posizionato sul piano XY (figura12).

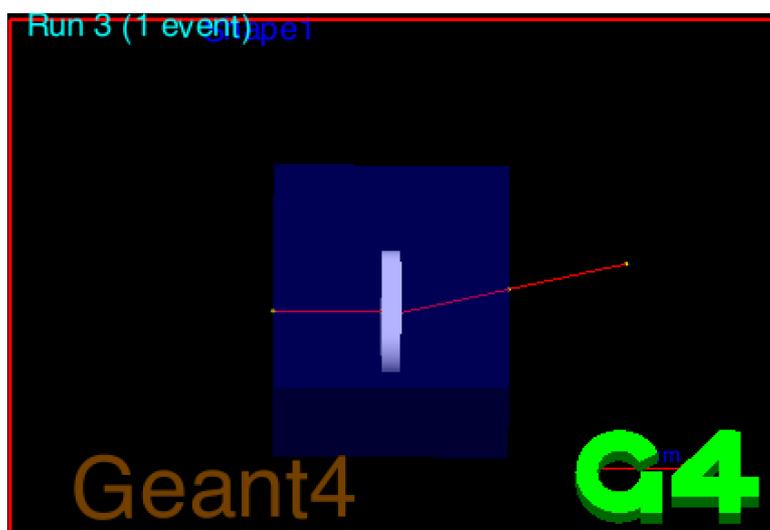


Fig.12

5. Prospettive per l'anno 2018

Come appena preannunciato, la parte finale della simulazione che riguarda l'inserimento dei SiPMs e la loro risposta ai fotoni di scintillazione è ancora in fase di studio.

Perciò, prevedendo di concludere entro dicembre 2017 la campagna di misure descritta nel paragrafo 3, assieme alle simulazioni effettuate in Geant4 relative alle prestazioni del monitor di fascio, nel prossimo anno verranno scelti i parametri ottimali per lo scintillatore e SiPMs e conseguentemente mi occuperò dell'assemblaggio del primo detector che verrà utilizzato anche come prototipo per i due successivi. Seguirò personalmente i test che verranno effettuati in una prima fase in laboratorio, con sorgenti radioattive e, possibilmente, con cosmici o fascio di elettroni. Parteciperò, inoltre, allo sviluppo del "readout" e del sistema di monitor che sarà eventualmente installato presso SK, per essere usato durante le calibrazioni.

Infine, alla conclusione del 2018, si prevede la costruzione e l'installazione dei rimanenti "beam monitors" nel LINAC di SK prima della ripartenza del data taking.

Verranno effettuati test in loco per valutare la qualità e le performances dei rivelatori. Spero, infine, di poter partecipare alla prima campagna per la calibrazione degli elettroni in SK con il nuovo sistema di monitor di fascio.

Nel 2019, è previsto il dopaggio a percentuali crescenti di gadolinio nel volume di acqua di SK. 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.

In queste condizioni, sarà possibile misurare energie e spettri angolari in funzione del dopaggio. Tali dati saranno fondamentali per l'utilizzo futuro del rivelatore.

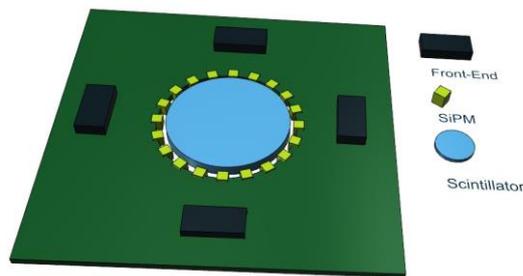


fig. 5

6. Scuole di dottorato

1. VII International Course "Detectors and Electronics for High Energy Physics, Astrophysics, Space Applications and Medical Physics" INFN National Laboratories of Legnaro, 3-7 April 2017
2. XIV Seminar on "Software for Nuclear, Subnuclear and Applied Physics", ALGHERO, 4-9 June 2017

7. Pubblicazioni e lavori a stampa 2017

1. First measurement of the $\nu\mu$ charged-current cross section without pions in the final state on a water target -T2K Collaboration (K. Abe (Kamioka Observ.) et al.). Aug 22, 2017. 15 pp. -e-Print: arXiv:1708.06771
2. Measurement of neutrino and antineutrino oscillations by the T2K experiment including a new additional sample of ν_e interactions at the far detector - T2K Collaboration (K. Abe (Kamioka Observ.) et al.). Jul 4, 2017. 50 pp. - e-Print: arXiv:1707.01048 [hep-ex]

3. Measurement of $\nu^- \mu \nu^- \mu$ and $\nu \mu \nu \mu$ charged current inclusive cross sections and their ratio with the T2K off-axis near detector - T2K Collaboration (K. Abe (Kamioka Observ.) et al.). Jun 13, 2017. 15 pp. - Published in Phys.Rev. D96 (2017) no.5, 052001 - DOI: 10.1103/PhysRevD.96.052001
4. Measurement of the single π^0 production rate in neutral current neutrino interactions on water - T2K Collaboration (K. Abe (Kamioka Observ.) et al.). Apr 24, 2017. 17 pp. - e-Print: arXiv:1704.07467 [hep-ex]
5. Updated T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using 1.5×10^{21} protons on target - T2K Collaboration (K. Abe (Kamioka Observ.) et al.). Apr 21, 2017. 9 pp. - Published in Phys.Rev. D96 (2017) no.1, 011102 - DOI: 10.1103/PhysRevD.96.011102 - e-Print: arXiv:1704.06409
6. Search for Lorentz and CPT violation using sidereal time dependence of neutrino flavor transitions over a short baseline - Ko Abe (Kamioka Observ.) et al.. Mar 3, 2017. 9 pp. - Published in Phys.Rev. D95 (2017) no.11, 111101 - DOI: 10.1103/PhysRevD.95.111101
7. Combined Analysis of Neutrino and Antineutrino Oscillations at T2K - T2K Collaboration (K. Abe (Kamioka Observ.) et al.). Jan 2, 2017. 9 pp. - Published in Phys.Rev.Lett. 118 (2017) no.15, 151801 - DOI: 10.1103/PhysRevLett.118.151801

BIBLIOGRAFIA

- [1] Atsuko K. Ichikawa, the T2K long baseline neutrino oscillation experiment, 2009. 27pp. Lect. Notes Phys. 781: 17-43, 2009.
- [2] Properties of para-terphenyl as detector for α , β and γ radiation.
- [3] GEANT Detector Description and Simulation Tool, CERN Program Library W5013, 1994.
- [4] Calibration of the Super-Kamiokande detector- Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 737: 253–272, K. Abe; et al. (11 February 2014).