

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA

Scuola di Scienze
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

**Misura dei ritardi dei segnali delle
schede OctoPAES per la validazione
dell'elettronica di KM3NeT**

Relatore:
Prof. Maurizio Spurio

Presentata da:
Alice Santarelli

Correlatore:
Dr. Tommaso Chiarusi

I'M LATE, I'M LATE, I'M LATE . . .
(Lewis Carroll)

Introduzione

L'Astrofisica è quel settore delle scienze che studia la costituzione fisica dei corpi celesti, mediante la misura di grandezze fisiche. Sinora, le osservazioni Astrofisiche si sono basate principalmente sulla rivelazione di radiazione elettromagnetica, dal radio sino ai raggi gamma. Recentemente, queste sono estese con l'osservazione di onde gravitazionali, raggi cosmici carichi e neutri (astrofisica multimessaggera). Il progetto presentato si basa su un interessante argomento di ricerca per gli astrofisici: il neutrino. Lo studio dei neutrini si potrebbe rivelare importante, in quanto potrebbe essere in grado di approfondire le conoscenze sulla materia molto densa presente nel cosmo. Alcune questioni che nascono dalla strutturazione del *Modello Standard* (SM) restano tuttora irrisolte e, quest'incompletezza, si sostiene sia legata alle limitazioni imposte dalle basse energie. Lo studio sistematico di sorgenti cosmiche, con energie molto maggiori di quelle con cui è possibile operare sulla Terra, potrebbe aprire nuovi orizzonti per questa fisica detta delle alte energie. Si assiste così alla nascita di nuovi problemi che vanno oltre il Modello Standard come la materia e l'energia oscura (*dark matter*, *dark energy*) e le asimmetrie materia-antimateria presenti nell'Universo. In questa tesi i primi due capitoli riguarderanno il neutrino e il suo legame con i raggi cosmici. Di conseguenza si illustreranno anche le motivazioni che hanno spinto alla realizzazione di telescopi posti a chilometri sotto l'acqua. Nel terzo capitolo, invece, verrà affrontato l'esperimento più recente in quest'ambito: KM3NeT. Prima di effettuare le operazioni marine di immersione della strumentazione, occorrono prolungate fasi di test in laboratorio in condizioni che simulino le operazioni marine. Per poter ricreare al meglio ciò che avviene in acqua durante la rivelazione e permettere la trasmissione ed elaborazione dei dati misurati, sono utilizzati precisi strumenti di sincronizzazione. Lo scopo di questo progetto è misurare il ritar-

do che avviene durante la sincronizzazione delle OCTOPAES, ossia quelle componenti elettroniche in grado di simulare il comportamento del telescopio.

Indice

Introduzione	i
1 Astrofisica con neutrini	1
1.1 Il neutrino nel Modello Standard	1
1.1.1 Neutrino come particella elementare	1
1.1.2 Le interazioni del neutrino	2
1.2 Sorgenti atmosferiche di neutrini	2
1.2.1 I raggi cosmici	2
1.2.2 Modello Adronico Astrofisico	5
1.3 Oscillazioni di Neutrini	6
1.4 Effetto Greisen-Zatsepin-Kuzmin	6
2 I telescopi di Neutrini	8
2.1 Sezione d'urto	8
2.2 Muoni e Neutrini Atmosferici	9
2.3 Radiazione Cherenkov	10
2.4 Proprietà dell'acqua e del ghiaccio	11
2.5 KM3NeT	12
2.5.1 Struttura del telescopio per neutrini	13
2.5.2 Il sistema di acquisizione	15
3 La Bologna Common Infrastructure e la misura dei ritardi delle schede OctoPAES	19
3.1 Setup sperimentale	19

3.2	Sincronizzazione temporale delle CLB	21
3.3	Le schede OctoPAES	22
3.3.1	I ritardi temporali tra gli hit emessi da schede OctoPAES diverse	25
3.4	Misura sperimentale dei ritardi tra le schede OctoPAES	28
3.4.1	Misure dirette con l'oscilloscopio	28
3.4.2	Misure dai dati selezionati dal TriDAS	30
3.4.3	Discussione dei risultati ottenuti	32
	Bibliografia	36
	INDICE	

Capitolo 1

Astrofisica con neutrini

I modelli teorici prevedono che i neutrini ad alta energia siano prodotti dai fenomeni più energetici della nostra Galassia e del nostro Universo. Le ricerche in quest'ambito permetterebbero di affrontare una migliore indagine del cosmo e il raggiungimento di nuove ed importanti teorie scientifiche.

1.1 Il neutrino nel Modello Standard

1.1.1 Neutrino come particella elementare

Il neutrino (ν) è una particella elementare stabile del Modello Standard. Si tratta di un fermione con spin $\hbar/2$ e quindi soggetto alla statistica di Fermi-Dirac. W. Pauli teorizzò questo nuovo leptone nel 1930, mentre analizzava dati sperimentali ricavati dai decadimenti radioattivi nucleari. Questa sua proposta fu accettata da E. Fermi nel 1934 con la formulazione della teoria dei raggi beta. Esistono tre famiglie di neutrini (più comunemente dette "sapori") che variano a seconda della natura del decadimento associato: elettronica (ν_e), muonica (ν_μ) e tauonica (ν_τ). A ciascuna di queste famiglie corrisponde la relativa antiparticella:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

I neutrini sono le particelle più elusive finora scoperte. Sono prive di carica elettrica e hanno una massa estremamente piccola (non ancora misurata sperimentalmente). Essi interagiscono infatti molto raramente con la materia: possono attraversarne senza interazioni enormi spessori. Era il 1954 quando negli USA per merito dei fisici C. Cowan e F. Reines si ottenne la prima verifica sperimentale dell'esistenza del neutrino. In questo esperimento fu utilizzato un reattore nucleare come sorgente dalla potenza di circa 150 Megawatt ed un rivelatore posizionato in sua prossimità.

1.1.2 Le interazioni del neutrino

Il neutrino è soggetto solamente ad una interazione che è quella nucleare debole. Questa particella infatti non possiede carica elettrica (è neutra) e nemmeno carica di colore (si tratta infatti di un leptone). Alla luce di ciò, esistono due processi possibili descritti dai decadimenti sottostanti: quello di Corrente Carica CC (1.2) e quello di corrente neutra CN (1.3).

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \rightarrow l^-(l^+) + X \quad (1.2)$$

$$\nu_l(\bar{\nu}_l) + N \rightarrow \nu^-(\bar{\nu}^+) + X \quad (1.3)$$

Trattandosi di interazione debole, i mediatori di campo sono W^+ e W^- nel processo della 1.2 e Z^0 in quello della 1.3. Le ricerche sui neutrini saranno condotte osservando i prodotti di questi processi.

1.2 Sorgenti atmosferiche di neutrini

1.2.1 I raggi cosmici

I Raggi Cosmici (RC) sono particelle relativistiche fortemente accelerate da sorgenti di origine extra-galattica con uno spettro energetico molto ampio (dai 10^9 eV ai 10^{20} eV). LHC al CERN accelera protoni fino a energie dell'ordine di 10^{13} eV e quindi molto minori delle particelle cariche degli RC. L'origine di questa radiazione è non-termica e si

può esprimere tramite la seguente espressione:

$$\left[\frac{dN}{dE}\right] = K \cdot E^{-\alpha} [cm^{-2}sr^{-1}s^{-1}GeV^{-1}] \quad (1.4)$$

Al di sotto delle energie all'incirca pari a $3 \times 10^{15}eV$ l'indice è $\alpha = 2.7$, mentre al di sopra di tale valore energetico è $\alpha = 3.1$. Questa caratteristica dello spettro energetico è conosciuta come *ginocchio* ("knee"). Tuttavia per energie che vanno oltre i $\sim 10^{19}eV$ vi è un appiattimento dello spettro, detto invece *caviglia* ("ankle"). Fino ad energie pari a $\sim 10^{14}eV$ lo spettro dei CR viene misurato direttamente in atmosfera grazie a satelliti e palloni stratosferici. In questo modo è stato possibile stabilire un modello standard dei raggi cosmici galattici. Le misure stabiliscono che i raggi cosmici sono costituiti dal $\sim 90\%$ di protoni ad alta energia, il 9% da nuclei di elio (particelle α), mentre il restante 1% è costituito da nuclei più pesanti dell'elio, fotoni ed elettroni. I raggi cosmici sono costituiti quindi da una componente carica ed una neutra. La prima, formata principalmente da protoni ad altre energie e nuclei pesanti, è soggetta ai campi magnetici galattici e intergalattici che ne provocano la deflessione. Per quanto riguarda invece la seconda, essa è formata da fotoni e da neutrini. Benché ci sia difficoltà nel rivelare quest'ultima radiazione, essa ha la caratteristica di non subire alcuna deviazione ed è così possibile risalire alle informazioni legate alla sua provenienza. Nel sottoparagrafo seguente si tratterà di come queste radiazioni vengano assorbite dall'atmosfera terrestre. La proprietà di non interagire con la materia interstellare permette al neutrino di giungere inalterato sulla Terra. Verranno definiti primari i RC accelerati direttamente dalle sorgenti astrofisiche ed invece saranno detti secondari quelli che interagiscono con altri nuclei o gas di fotoni, come per esempio quelli presenti nell'atmosfera.

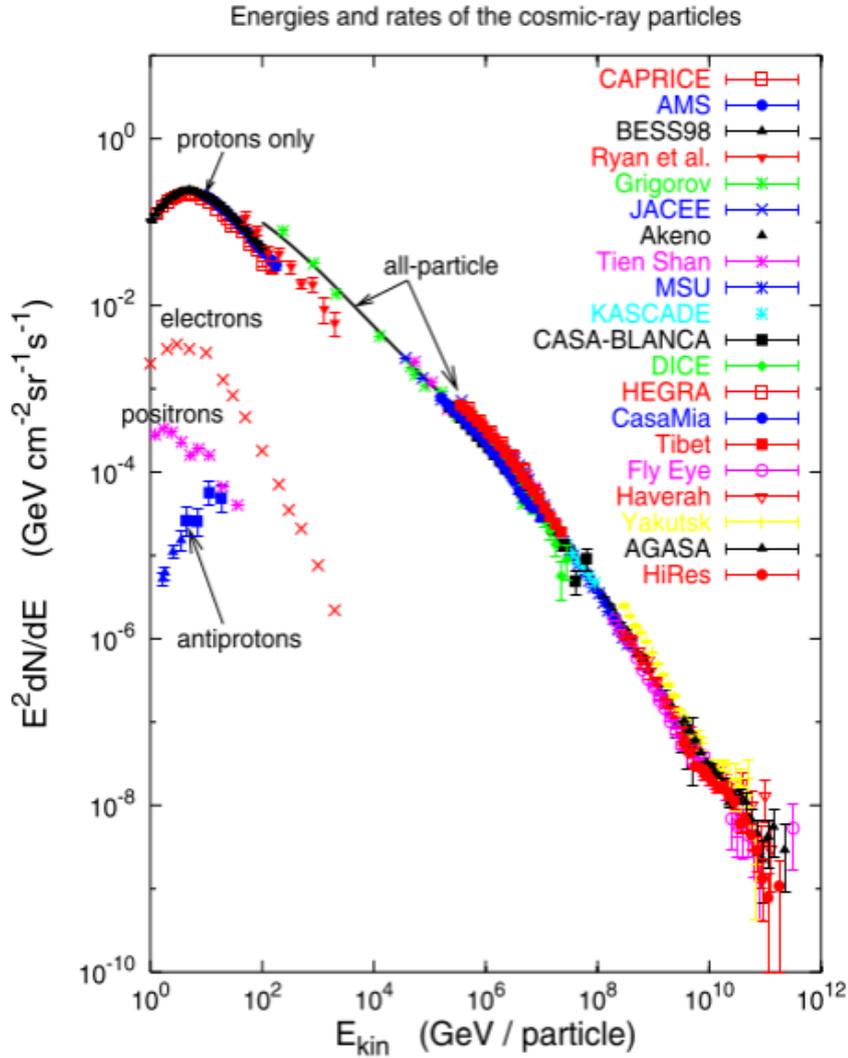


Figura 1.1: Grafico dello spettro dei Raggi Cosmici ($10^9 \div 10^{20} eV$). L'asse delle ordinate è moltiplicato per un fattore di E^2 [1].

Le sorgenti responsabili della produzione di neutrini sono di origine galattica come resti di supernovae (SNR), Pulsar Wind Nebula (PWN) e Microquasar di origine galattica: Nuclei Galattici attivi (AGN) e Gamma Ray-Bursts (GRBs).

1.2.2 Modello Adronico Astrofisico

Le interazioni dei Raggi Cosmici con l'atmosfera terrestre producono neutrini e fotoni ad alta energia secondo il meccanismo descritto dal modello adronico astrofisico. Il flusso di neutrini generato da questo fenomeno è visibile nel grafico in figura 1.1 della pagina seguente. Le particelle elettricamente cariche, una volta urtati i nuclei presenti in alta atmosfera ($10 \div 20km$), producono i cosiddetti sciame (*showers*) di particelle secondarie. I protoni accelerati interagiscono con i fotoni principalmente attraverso la risonanza Δ^+ :



I protoni interagiscono inoltre con neutroni, protoni e nuclei dando luogo alla produzione di mesoni carichi e neutri. Si suppone che i neutrini ad alta energia derivino dal decadimento dei pioni carichi del processo 1.5.

I pioni neutri decadono in fotoni (ossia raggi gamma), mentre i pioni carichi decadono in neutrini:

$$\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma \quad (1.6)$$

$$\pi^+ \rightarrow \nu_\mu + \mu^+ \quad (1.7)$$

$$\pi^- \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \mu^- \quad (1.8)$$

Infine da μ^+ e da μ^- si ha:

$$\mu^+ \rightarrow \bar{\nu}_\mu + \nu_e + e^+ \quad (1.9)$$

$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^- \quad (1.10)$$

Come si approfondirà nel sottoparagrafo 2.3 del capitolo 2, gli sciame di particelle secondarie producono la radiazione Cherenkov che è una radiazione ultravioletta caratterizzata da precisi angoli di incidenza. La tecnica detta di "Imaging Air-Cherenkov Technique (IACT)" sfrutta questa radiazione per rivelare dalla superficie terrestre i raggi γ (componente neutra dei RC).

1.3 Oscillazioni di Neutrini

La produzione di neutrini in siti astrofisici attraverso i decadimenti dei pioni descritti nel paragrafo precedente fa sì che la proporzione dei loro sapori sia:

$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 2 : 0 \quad (1.11)$$

Il fenomeno di oscillazione produce dei cambiamenti di sapore che avvengono durante la propagazione del neutrino nell'Universo. Nel 1962 Pontecorvo predisse questo fenomeno e sulla base di ciò Maki, Nakagawa, Sakata svilupparono la matrice $U_{\alpha i}$ oggi denominata PMNS. Per sintetizzare la trattazione dei neutrini atmosferici è sufficiente considerare la formula:

$$P(\nu_\tau \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m^2 L}{E_\nu} \right) \quad (1.12)$$

dove L è il cammino che percorre il neutrino prima di essere rivelato, E_ν la sua energia e $\Delta m^2 = m_3^2 - m_2^2 (= \pm 2.5 \times 10^{-3} eV)$. L'angolo risultante è: $\theta_{23} \simeq 45^\circ$, $\theta_{12} \simeq 34.4^\circ$, mentre θ_{13} risulta molto piccolo.

Grazie a questi parametri la proporzione della 1.11 diventa :

$$\nu_e : \nu_\mu : \nu_\tau = 1 : 1 : 1 \quad (1.13)$$

e questo fatto sottolinea come i neutrini muonici sulla Terra sono ridotti di un fattore di due.

1.4 Effetto Greisen-Zatsepin-Kuzmin

Per i protoni (o anche per nuclei pesanti) esistono tre principali processi di perdita di energia. A seconda della distanza cosmologica con cui questi oggetti si propagano, si distinguono tre fenomeni: quelli adiabatici, quelli che producono pioni a partire dai fotoni del fondo cosmico a microonde (CMB) e quelli che creano coppie elettrone-positrone a partire sempre da fotoni del CMB. Con lo studio dei raggi cosmici ad alta energia nel CMB, si ipotizzò che il loro flusso (originatosi a distanze cosmologiche) si attenuava drasticamente a energie che avevano come soglia $E_{GZK} \simeq 5 \times 10^{19} eV$. Questo effetto

venne detto *cut-off* di Greisen-Zatsepin-Kuzmin e fa sì che la componente di protoni che compone i CR subisca un brusco calo in corrispondenza di tale energia.

Il processo che coinvolge i protoni dei Raggi Cosmici e i fotoni del CMS (γ_{cmb}) è descritto da:

$$p + \gamma_{cmb} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^+ n \quad (1.14)$$

$$p + \gamma_{cmb} \rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^0 p \quad (1.15)$$

Capitolo 2

I telescopi di Neutrini

I telescopi a neutrini sono composti da matrici di rivelatori di luce e sono posti in un mezzo trasparente come l'acqua o il ghiaccio. I fotoni interessati sono quelli prodotti dall'interazione dei neutrini con il mezzo in cui è collocato l'apparato sperimentale e sono detti fotoni Cherenkov. Siccome la produzione di fotoni avviene a grandi distanze, per poter rivelare il maggior numero possibile di eventi è necessario un telescopio di dimensioni molto estese.

2.1 Sezione d'urto

I neutrini ad alta energia interagiscono con un nucleone N del nucleo attraverso il processo CC (decadimento debole 1.2) o CN (decadimento debole 1.3). La sezione d'urto differenziale nel caso CC è data da:

$$\frac{d^2\sigma_{\nu N}}{dxdy} = \frac{2G_F^2 m_N E_\nu}{\pi} \frac{M_W^4}{(Q^2 + M_W^2)^2} x[xq(x, Q^2) + x(1-y)^2\bar{q}(x, Q^2)] \quad (2.1)$$

dove $x = Q^2/2m_N(E_\nu - E_l)$ e $y = (E_\nu - E_l/E_\nu)$ sono le cosiddette variabili di Feynman-Bjorken, Q^2 è il momento quadro trasferito tra neutrino e leptone, m_N la massa del nucleone, M_W la massa del bosone W e G_F la costante di accoppiamento di Fermi. Le funzioni q e \bar{q} sono le distribuzioni per quark e antiquark. Da questa relazione si può affermare che per basse energie la sezione d'urto del neutrino cresce linearmente con E_ν ($\sim 10^4 GeV$). Invece per le alte energie la massa invariante Q^2 supererà la massa

a riposo del bosone W e ciò comporta la riduzione della sezione d'urto totale. È per questo motivo che queste particelle, come anticipato nei capitoli precedenti, attraversano facilmente grandi spessori di materia, restandone inalterati.

2.2 Muoni e Neutrini Atmosferici

I muoni e i neutrini atmosferici sono i prodotti dei decadimenti di particelle secondarie prodotte dall'interazione dei raggi cosmici primari con i nuclei atmosferici. I primi, i muoni μ , penetrano nell'atmosfera terrestre fino ad arrivare a diversi chilometri sotto l'acqua o sotto il ghiaccio. Come è possibile osservare dalla Figura 2.1, all'aumentare della profondità vi è una relazione di decrescenza del flusso di μ rispetto a quello di ν . Di conseguenza, per poter eliminare il rumore di fondo causato dai muoni che renderebbero confusi i dati estrapolati dal telescopio, è essenziale posizionare i rivelatori di neutrini a grandi profondità.

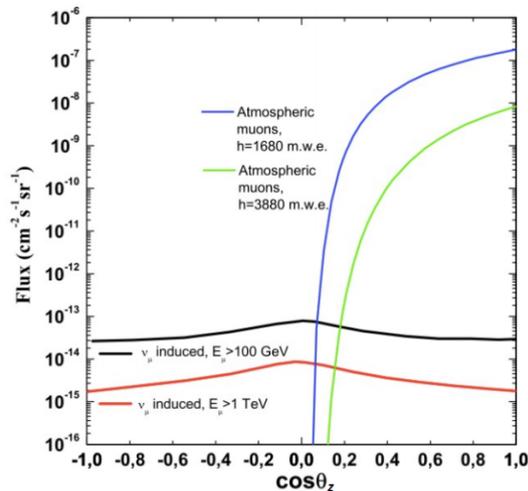


Figura 2.1: In blu e in verde il grafico dei contributi dei muoni atmosferici per due differenti profondità. In nero e in rosso il grafico dell'energia di soglia dei muoni indotti dai neutrini atmosferici. Nota: θ è riferito all'angolo dello zenit.

I telescopi a questo punto devono essere in grado di registrare i dati relativi ai fotoni prodotti dalla radiazione Cherenkov. Per il momento non è possibile osservare differenze di reazioni tra neutrini e antineutrini ma persiste una netta distinzione tra queste due particelle. Un'interessante caratteristica dei telescopi a neutrini è che, diversamente dai telescopi convenzionali, essi indirizzano la loro attenzione "in basso". Questa particolarità permette loro di ridurre enormemente il rumore di fondo causato dai muoni atmosferici. Di grande interesse è lo studio della Nebula Crab, che per la sua favorevole posizione nella galassia, è comunque visibile dai telescopi posti in entrambi gli emisferi. Il flusso di raggi gamma che genera questa sorgente, data la probabilità che un neutrino con energia E_ν produca un muone con energia $E_\mu > E_{thr}^\mu$, è dato dalla legge :

$$E_\gamma^2 \frac{d\Phi_\gamma}{dE_\gamma} = 10^{-11} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{TeV} = 1 \text{C.U.} \quad (2.2)$$

Si assume un flusso di neutrini uguale al flusso di formula 2.2. Per poter condurre ricerche complete riguardanti le sorgenti galattiche di neutrini ad alta energia, è comunque fondamentale posizionare i telescopi in entrambi gli emisferi. ANTARES, KM3NeT sono posizionati nel Mar Mediterraneo, il cui emisfero è caratterizzato dalla capacità di registrare maggiori flussi di neutrini atmosferici provenienti dal centro della nostra galassia. ICECUBE invece si trova nei ghiacci dell'Antartide e studia i neutrini atmosferici che arrivano dalle direzioni opposte. Nel paragrafo 2.4 verranno elencati i vantaggi e gli svantaggi legati alle scelte del mezzo trasparente in cui vengono posizionati i rivelatori.

2.3 Radiazione Cherenkov

Tutti i telescopi a neutrini operanti in TeV e PeV si servono dei fotoni prodotti dall'effetto Cherenkov. Per poter definire il sapore del neutrino, la sua direzione e la sua energia è importante conoscere tempo di arrivo e numero dei fotoni generati da questa radiazione. Per poter manipolare facilmente le informazioni ottenute, viene creata una matrice tridimensionale. La radiazione Cherenkov è emessa dalle particelle che attraversano l'atmosfera che hanno la caratteristica importante di avere una velocità maggiore della velocità della luce nel mezzo. In questo modo le particelle cariche che polarizzano le molecole giacenti sulla loro traiettoria creano dei dipoli, grazie ai quali

verrà infine emessa luce. Si può notare che i muoni prodotti dai processi CC soddisfano i requisiti per produrre questo tipo di radiazione. Una volta ricreato l'equilibrio, si creerà radiazione che verrà emessa in un cono con angolo caratteristico:

$$\cos\theta_C = \frac{c/n}{\beta c} = \frac{1}{\beta n} \quad (2.3)$$

dove n è l'indice di rifrazione del mezzo. Per particelle relativistiche in acqua $\theta_C \simeq 43^\circ$. In generale per lunghezze d'onda dell'ordine dei $300 \div 400$ nm, il numero dei fotoni emessi è $3.5 \times 10^4 m^{-1}$ e questo valore è dato dalla relazione:

$$\frac{d^2N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi}{137\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \quad (2.4)$$

2.4 Proprietà dell'acqua e del ghiaccio

I fotoni rivelati dai telescopi situati nei mezzi trasparenti sono soggetti prevalentemente a due tipi di effetti: quello di assorbimento e quello di scattering. Il primo di questi riduce l'ampiezza dei fronti d'onda della radiazione Cherenkov, mentre lo scattering ne causa la deflessione. Vengono così influenzati i tempi di arrivo e la direzione della luce (in questo caso si parla di fotoni indiretti). I due mezzi utilizzati per condurre queste ricerche, come già precisato nei capitoli precedenti, sono l'acqua e il ghiaccio. Tra le proprietà dell'acqua si ha che essa è meno trasparente del ghiaccio e a parità di massa occupa meno volume. Ciò comporta una maggiore imprecisione nella propagazione della luce in acqua. D'altra parte però, la lunghezza di scattering nel ghiaccio è più piccola che nell'acqua e questo comporta invece che vengano deviate più muoni. Un'altra differenza tra il ghiaccio e l'acqua è che il rivelatore nell'acqua è soggetto ad un rumore di fondo legato alla radioattività del fondale (prevalentemente dovuta al ^{40}K) ed anche alla presenza di organismi viventi che producono luminescenza. Questi fattori tuttavia non rappresentano una minaccia in quanto, grazie all'enorme estensione dell'apparato, è possibile ricostruire una traccia del passaggio del muone, individuare le sorgenti con attività anomala e scartarle. Le proprietà ottiche dell'acqua dipendono inoltre da parametri come la temperatura e la salinità. Questi due fattori permettono l'aggregazione della molecola dell'acqua, deflettendo così i fotoni. La collocazione dei telescopi a grande

profondità è riuscita a rendere ancora più efficienti i fotorivelatori, enormemente compromessi da fattori di incrostazione biologica come la presenza di sedimenti e di particolato galleggiante presenti in superficie.

2.5 KM3NeT

KM3NeT (acronimo di Cubic Kilometre Neutrino Telescope) è un telescopio per la rivelazione dei neutrini. La struttura di quest'apparato sperimentale si distribuisce su due siti: il primo in Italia, 80 km a Sud Est di Capo Passero, in Sicilia, alla profondità di 3500 m sotto il livello del mare, ed il secondo in Francia, 40 km a Sud di Tolone, alla profondità di 2450 m. Come si può osservare in Figura 2.2, viene chiamato ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss) il telescopio del sito italiano, ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss) quello del sito francese. Questi due rivelatori hanno obiettivi di fisica diversi, il primo si occupa di rivelare neutrini ad alta energia di origine cosmica, il secondo invece studierà le proprietà di neutrini atmosferici a energie più basse. Nonostante queste diverse applicazioni, entrambi i telescopi sfruttano la stessa tecnologia.

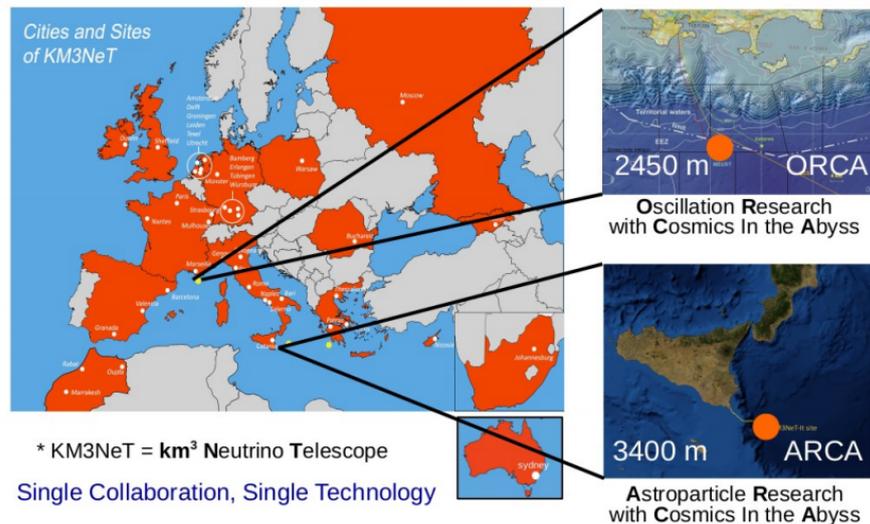


Figura 2.2: Siti in cui si sviluppa KM3NeT.[7]

2.5.1 Struttura del telescopio per neutrini

L'unità di rivelazione del telescopio è il modulo per la misura di fotoni Cherenkov denominato Digital Optical Module (DOM). Si tratta di una sfera di vetro trasparente di 43 cm di diametro contenente 31 fotomoltiplicatori da 3" (PMT, dall'inglese Photo Multiplier Tube): 12 PMT nell'emisfero superiore del DOM e 19 nell'emisfero inferiore. Questa distribuzione asimmetrica dei PMT, ben evidente in Figura 2.3 è legata al fatto che, come specificato nei capitoli precedenti, il telescopio è ottimizzato alla misura di particelle provenienti dal basso.



Figura 2.3: Una DOM con i 31 PMT da collocare in ARCA e in ORCA.

Come è possibile osservare dalla Figura 2.4 diciotto DOM sono sostenute in verticale da opportuni tiranti meccanici e collegati da un cavo elettro-ottico per l'alimentazione di potenza e il trasferimento dei dati. Tale struttura a stringa è denominata Detection Unit (DU). Le detection unit di ARCA sono alte circa 700 m con una spaziatura verticale tra i DOM di 36 m, mentre le DU di ORCA sono alte circa 250m. Ciascuna DU è ancorata sul fondo del mare da un'opportuna struttura meccanica che ospita un elemento attivo, denominato DU-Base, con funzionalità di controllo elettrico della DU stessa. La DU-Base, come gli stessi DOM, ospita diversi strumenti di monitoraggio ambientale.

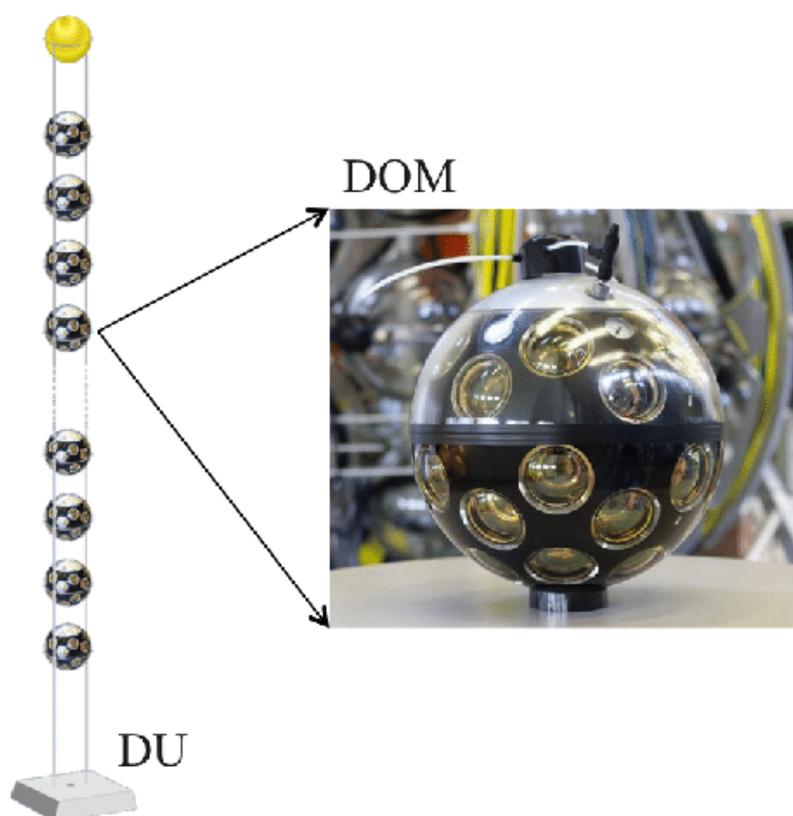


Figura 2.4: Diciotto DOM collegati e poste sulla stessa verticale formano una stringa detta DU.

Ogni DU-Base riceve una tensione di 375 V che viene trasmessa a tutti i DOM della stringa. Ciascuna DU è mantenuta verticale da una boa collocata al suo vertice. Si noti che la perfetta verticalità della stringa non è mai raggiunta in quanto soggetta a spinte da parte delle correnti sottomarine. Queste, pur limitandosi a pochi cm \setminus s, inducono spostamenti del vertice della DU fino a 20 m per ARCA e 5 m per ORCA. La posizione di ciascun DOM è comunque nota con una precisione di pochi cm grazie all'utilizzo di un sistema di posizionamento acustico che si basa sull'utilizzo di opportuni sensori piezometrici nei DOM e di emettitori distribuiti nel volume del telescopio. ARCA comprenderà due "blocchi" ciascuno con 115 DU separate l'una dall'altra da circa 100 m, raggiungendo in questo modo un volume di circa $1km^3$. ORCA avrà lo stesso numero di DU di

ARCA, con la differenza che la distanza tra le stringhe sarà di 20 m. In ORCA inoltre i DOM sono distanziati di 9 cm e questo fatto comporta che le sue stringhe saranno più basse di quelle dell'altro sito. Le infrastrutture ospitano anche strumenti dedicati alla geofisica, all'oceanografia e alle scienze del mare, che consentono un monitoraggio permanente e in tempo reale dell'ambiente sottomarino. Ciascun telescopio, sia ARCA che ORCA, è costantemente monitorato e guidato da una stazione di controllo situata a terra. I comandi operativi emessi dalla stazione ed i dati raccolti dal rivelatore sono trasmessi attraverso una rete informatica di cui l'infrastruttura del telescopio rappresenta una sezione sottomarina. A causa dell'estrema difficoltà di qualsiasi operazione di manutenzione programmabile nei siti abissali, si è scelto di minimizzare la complessità dell'elettronica dei DOM. Questi di fatto registrano qualsiasi segnale ottico o acustico sopra una data soglia prestabilita. Nessuna preselezione dei dati acquisiti viene fatta sott'acqua. Tutti i dati raccolti vengono quindi spediti a terra per essere analizzati da opportune infrastrutture di calcolo.

2.5.2 Il sistema di acquisizione

Il sistema di acquisizione dei dati del telescopio per neutrini gioca un ruolo importante per le attività di laboratorio condotte per questa tesi. Per questo motivo una sua descrizione dettagliata viene qui riportata. I PMT dei DOM sono ottimizzati per uno spettro di luce visibile centrato attorno al verde (circa 460 nm), che rappresenta la lunghezza d'onda media dei fotoni Cherenkov in acqua. Quando uno di questi fotoni incide sul foto-catodo di un PMT, questo può essere trasformato in foto-elettrone secondo un'efficienza quantica del 30 %. I segnali analogici amplificati dai PMT, quando superano una certa soglia preimpostata, sono digitizzati da opportune schede poste alla base dei PMT (le cosiddette "basette"). I segnali digitali dei PMT di ciascun emisfero sono dunque raccolti da una successiva scheda, denominata Octopus, che predispone un canale di trasmissione elettrica per ciascun PMT collegato. Ci sono quindi due Octopus per DOM, la "large", per i PMT dell'emisfero inferiore, e la "small", per i PMT dell'emisfero superiore. Una basetta collegata ad una Octopus è mostrata in Figura 2.5. Entrambe le Octopus in un DOM sono collegate alla sua scheda elettronica principale, denominata "Central Logic Board", CLB. Qui, ad ogni canale di PMT corrisponde un



Figura 2.5: Una Octopus "large", con una basetta collegata ad una delle 19 porte dedicate ai PMT dell'emisfero inferiore del DOM. In questa figura è mostrato anche un sensore piezometrico.

Convertitore Tempo-Digitale (TDC, dall'inglese "Time to Digital Converter") che viene utilizzato per creare l'informazione principale relativa al segnale misurato: il cosiddetto "hit". Ogni hit si compone delle seguenti 3 grandezze: il tempo assoluto della misura del segnale; la durata dell'impulso elettrico sopra soglia, ovvero il "Time over Threshold", ToT; il codice identificativo del PMT nel DOM. Normalmente alle profondità di ARCA e di ORCA si registra per PMT un'occorrenza di hit pari a 5-7 kHz. Tale incidenza di hit è dovuta alla luce Cherenkov indotta dai prodotti di decadimento dell'isotopo ^{40}K omogeneamente disciolto nel mare ed alla luce emessa da agglomerati di organismi viventi, denominata "bioluminescenza". Quest'ultima può innalzare vertiginosamente l'incidenza degli hit fino anche a 1 MHz, anche se soltanto per pochi secondi.

In Figura 2.6 è possibile osservare l'interno di un DOM. Gli hit che sono registrati nel tempo da tutti i PMT in un DOM vengono raccolti in opportuni spazi di memoria della CLB. Poiché tali spazi sono limitati, sono organizzati secondo un buffer circolare. Ogni

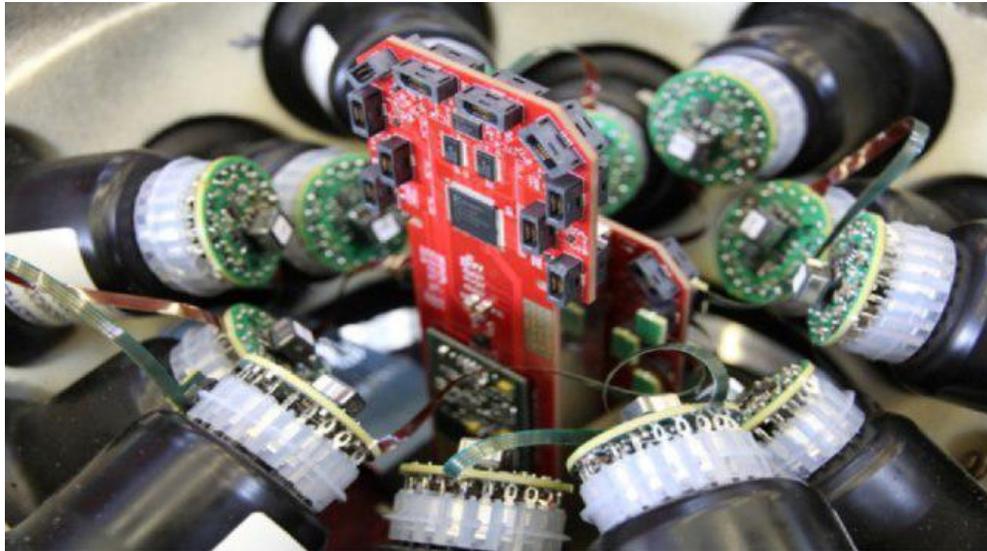


Figura 2.6: Particolare di un DOM in fase di integrazione. In particolare si mostra un emisfero superiore (ribaltato) con i 12 PMT, ciascuno con la propria basetta. Emergono le due Octopus non ancora collegate alle basi. La CLB si trova alla base delle Octopus.

100 ms, i dati memorizzati entro questo intervallo di tempo sono incapsulati in pacchetti ethernet[3] di tipo UDP[5], e spediti a terra attraverso speciali connessioni ottiche capaci di coprire percorsi tra i 50 e i 100 km, tali le distanze di ORCA ed ARCA dalle rispettive stazioni di terra. L'informazione relativa ad un hit consta di 6 byte pertanto, data l'incidenza per PMT menzionata precedentemente, un blocco di rivelatore composto da 115 stringhe produce un flusso di dati che va da diverse decine a una centinaia di gigabit al secondo. Per questo motivo le stazioni di terra sono attrezzate con infrastrutture di rete altamente performanti a banda larga ($\geq 10\text{Gbit}$) e potenti risorse di calcolo. L'insieme di dati collezionati da un DOM in 100 ms viene detto "frame". Il pacchetto ethernet può avere una dimensione massima di 9000 byte (il cosiddetto pacchetto "jumbo"), mentre una frame eccede generalmente i 100 kbyte. Per questo il DOM spedisce a terra ciascuna frame frammentata in vari pacchetti che sono ricomposti successivamente nella stazione di terra da algoritmi appositamente sviluppati. Tutte le CLB del telescopio sono sincronizzate tra loro con una precisione migliore del nanosecondo grazie ad un sistema innovativo denominato "White Rabbit"[4], e la produzione continua di frame da tutti

i DOM avviene in fase per l'intera durata dell'acquisizione dei dati. Le frame di ogni DOM che si riferiscono allo stesso intervallo temporale sono aggregate ulteriormente tra loro in una unica entità denominata Time-Slice. I dati raccolti dal telescopio per neutrini possono essere visti come una successione di Time-Slice, ciascuna della durata di 100 ms ed indipendente dalle altre. Per questo motivo, la ricerca online di candidati di eventi di neutrino può essere condotta in parallelo, inviando ciascuna Time-Slice collezionata a terra ad una risorsa di calcolo dedicata. Il sistema software che ricompone le frame, gestisce le Time-Slice e scrive i dati selezionati è chiamato TriDAS, dall'inglese "Trigger and Data Acquisition System".

Capitolo 3

La Bologna Common Infrastructure e la misura dei ritardi delle schede OctoPAES

La BCI (Bologna Common Infrastructure) è un'infrastruttura che nasce per sviluppare, validare ed ottimizzare il complesso sistema di linee di acquisizione di KM3NeT. Tutta l'apparecchiatura è messa a disposizione della collaborazione internazionale di KM3NeT per effettuare test in locale o da remoto su alcuni punti critici del rivelatore.

3.1 Setup sperimentale

La BCI implementa in laboratorio tutta l'elettronica di una intera stringa più i componenti del sistema di acquisizione: dalle connessioni in fibra ottica agli switch ed alle risorse di calcolo. La Figura 3.1 mostra l'elettronica della stringa disposta su un supporto che ne compatta l'estensione: 17 CLB, poste sui due piani superiori, giocano il ruolo dei DOM mentre un'ulteriore CLB, posta in basso, viene utilizzata in modalità DU-Base, con la relativa scheda di potenza atta ad alimentare tutta la linea. Ciascuna CLB (sia DOM che di DU-Base) è connessa all'infrastruttura di rete che riproduce l'installazione nella Stazione di terra secondo lo schema implementato con il rivelatore vero, illustrato sotto in Figura 3.2. Come illustrato, tutti i DOM e la Base ricevono gli stessi coman-



Figura 3.1: La Detection Unit della BCI. Le schede CLB sono poste orizzontalmente ai piani di supporto. Le CLB che riproducono le funzionalità dei DOM sono poste sui due piani superiori. La CLB di Base è posta al piano più basso. Ciascuna DOM-CLB ospita due schede OctoPAES.

di attraverso la linea (e) di distribuzione a tutti i nodi tramite un divisore del segnale laser che si propaga nella fibra. Tale linea viene chiamata “linea di broadcast”, ed ha origine in uno switch White Rabbit (WRS), appunto denominato WRS-Broadcast. La trasmissione dei dati prodotti dai DOM e dalla Base avviene invece verso switch diversi. La Base è connessa con un secondo switch White Rabbit, denominato WRS-L1, mentre i DOM riversano il loro flusso dati su un sistema di switch DELL ad alta affidabilità che consentono connessioni a banda larga. Le risorse di calcolo implementano tutti i processi del TriDAS, per scrivere i dati dopo la selezione online, e quelli del sistema di controllo del rivelatore della Control Unit (CU).

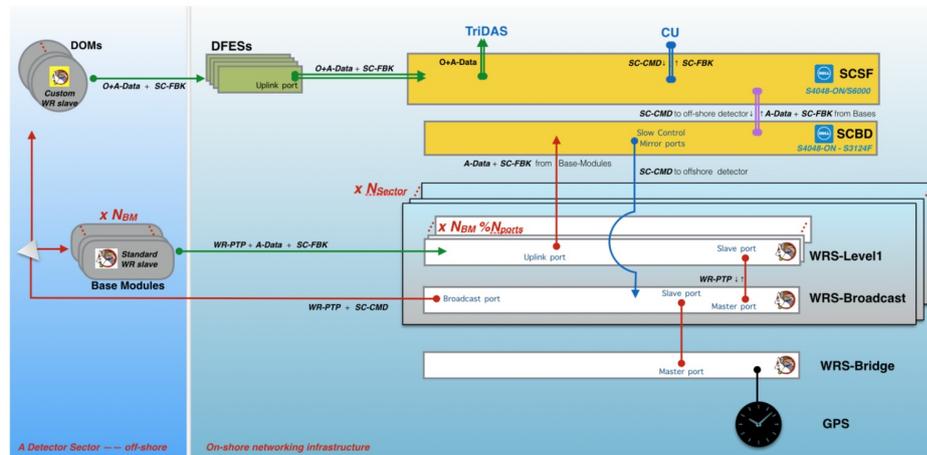


Figura 3.2: Schema delle connessioni di rete della BCI. Le linee terminate con punte rappresentano connessioni bidirezionali, mentre le frecce indicano flussi dati unidirezionali. Tutti i collegamenti sono fatti attraverso fibre ottiche ad 1 GbE (linee singole) o 10 GbE (linee doppie).

3.2 Sincronizzazione temporale delle CLB

La palese asimmetria delle connessioni ha richiesto una personalizzazione del protocollo White Rabbit per la comunicazione e la sincronizzazione temporale. Ciò nonostante il sistema di “broadcast” implementato garantisce la sincronizzazione dei DOM entro poche centinaia di pico secondi, nel rispetto dello standard White Rabbit. Questo viene mostrato in Figura 3.2, dove si riporta un’immagine ottenuta all’oscilloscopio. In questo caso, ad esso sono collegate due CLB della BCI attraverso particolari linee elettriche relative ad un particolare segnale, il cosiddetto “PPS” (dall’Inglese “pulse per second”). Il PPS è un marcatore del tempo che viene generato una volta al secondo dalla CLB e che è influenzato dallo stato di sincronizzazione della stessa. Si può vedere come i segnali PPS di entrambe le CLB hanno una distanza temporale media a metà altezza del fronte di salita di meno di 300 ps. Questa qualità di sincronizzazione è stata verificata per tutte le CLB della BCI, e come si vedrà è molto importante perché è un prerequisito di alcune delle misure presentate in questa tesi.



Figura 3.3: Fronti di salita del segnale di PPS di due CLB della BCI. Come si nota dalla quarta colonna di misura (P4), la differenza temporale misurata attraverso la funzionalità “Skew(C2, C3)”, con C2 e C3 i canali di ingresso dedicati alle 2 CLB, è contenuta entro 300 ps.

3.3 Le schede OctoPAES

Per validare correttamente il sistema di acquisizione dei DOM, oltre alla strumentazione giusta che riproduce il setup sperimentale reale, è necessario disporre di dati altrettanto realistici. Per motivi pratici era impensabile utilizzare i PMT come nei DOM, per produrre hit alla BCI. Infatti sarebbe stata necessaria un’installazione particolarmente estesa ed onerosa per garantire la dovuta oscurità su tutti i DOM. Per risolvere questo problema, con l’aiuto del Servizio di Elettronica della Sezione di Bologna dell’INFN è stata progettata la scheda OctoPAES, dove PAES è l’acronimo per ”Photons and Acoustic

Emulator of Signals” (si veda la Figura 3.4). Come dice il suo nome, la scheda produce nella CLB segnali che simulano in tutto e per tutto il sistema PMT+basetta+Octopus, andando ad introdurre nei TDC della CLB i corretti segnali opportunamente digitalizzati.

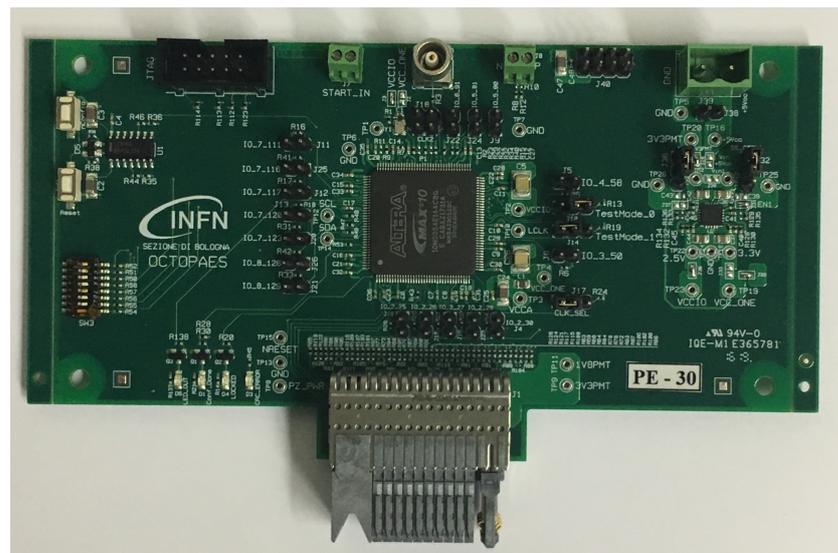


Figura 3.4: La Scheda OctoPAES. Al suo centro il CPLD ALTERA utilizzato per produrre gli hit.

Oltre a questo la OctoPAES è capace di inviare anche segnali che riproducono le forme d'onda degli impulsi emessi dagli emettitori acustici utilizzati dal sistema di posizionamento. Questa funzionalità è ancora in via di sviluppo e non viene tratta in questa tesi. Per ogni CLB sono previste due OctoPAES, opportunamente configurate in modo da riprodurre i segnali gestiti dalle due Octopus nel DOM: la OctoPAES “Small”, che emula gli hit dei 12 PMT dell'emisfero superiore; e la OctoPAES “Large”, per gli hit dei 19 PMT dell'emisfero inferiore. Ogni linea che nel DOM reale collega un PMT al relativo TDC trova nella OctoPAES un corrispettivo che definiamo “canale TDC”. Ogni OctoPAES può passare dalla configurazione “Large” alla “Small” tramite la impostazione di un opportuno selettore. Il cuore delle schede OctoPAES è un particolare dispositivo di elettronica digitale, denominato Complex Programmable Logic Device (CPLD).

Questo elemento, contenendo i costi di realizzazione delle schede, ha permesso di sviluppare un'efficiente meccanismo che simula gli hit di PMT da tutti i 31 canali come in un vero DOM, lasciando all'utente l'impostazione della frequenza di occorrenza degli hit. Il CPLD viene programmato con una particolare sequenza di informazioni, detta "firmware", in cui sono codificate le funzionalità del circuito elettronico digitale atto alla produzione degli hit. Tale firmware viene prima scritto grazie a strumenti di programmazione ad alto livello che utilizzano il linguaggio VHDL[5]. Successivamente, il codice prodotto è sintetizzato in un file binario che viene poi trasferito nelle memorie del CPLD attraverso un dispositivo detto "programmatore". Il meccanismo di produzione degli hit si basa sulla formazione di opportuni segnali digitali nel formato LVDS (Low Voltage Differential Signalling). Un hit corrisponde ad un valore "alto" del segnale differenziale ricombinato, mentre l'assenza di hit ad un valore "basso". Per ciascuno dei 31 canali TDC a disposizione, l'avvicinarsi dei livelli LVDS segue uno schema (o pattern) che viene rappresentato da un'opportuna sequenza di bit. Quando c'è l'hit, ovvero quando il segnale è sopra la soglia, il bit vale 1, mentre vale 0 quando il segnale va sotto soglia (l'hit non c'è più). Il livello di ogni bit del pattern viene mantenuto per un intervallo temporale di 12.5 ns; tale durata corrisponde ad un clock interno alla OctoPAES implementato nel firmware della CPLD e pari a 80 MHz. Ad ogni bit corrisponde un intervallo temporale pari al battito del riferimento temporale della CLB, denominato "clock", anche questo implementato nel firmware dell'OctoPAES che, nel caso specifico, vale 12 ns. In base alla giustapposizione di più bit=1 si possono creare hit con un T.o.T. di lunghezza arbitraria. Il pattern viene ripetuto con la frequenza voluta e compatibile con il clock della OctoPAES. Nella Figura 3.5 sono mostrati i 31 pattern previsti per un DOM; ogni pattern è composto da 128 bit, per una durata totale del pattern di 1.6 s. Il pattern presentato contiene un solo hit ottenuto con 2 bit posti ad 1 (ovvero un T.o.T. di 25 ns). Una volta che l'elaborazione del pattern è stato completato, la OctoPAES si mette in attesa per un tempo prestabilito prima di ripetere l'elaborazione. Tale tempo di attesa può essere deciso dall'utente mediante la commutazione di opportuni collegamenti "volanti", detti "jumper", che interessano alcuni contatti esposti dalla OctoPAES. Per le misure di questa tesi, il suddetto tempo di attesa è stato impostato a 200 s, ottenendo una frequenza di 5 kHz per canale di TDC dato il pattern di figura 3.5.

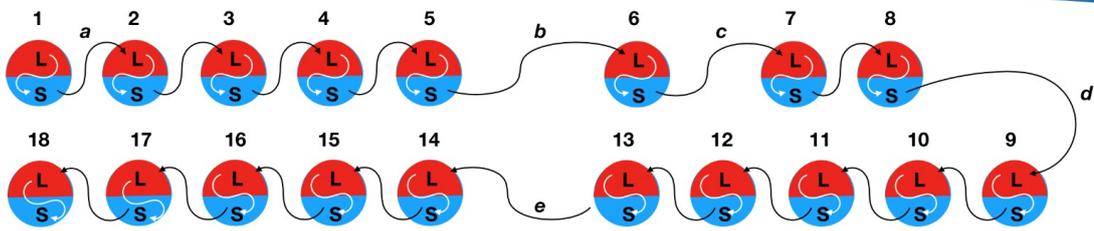


Figura 3.6: Configurazione dei collegamenti di comunicazione di clock e di start/stop delle OctoPAES secondo lo schema di “daisy-chain“. I numeri si riferiscono alle CLB disponibili alla BCI; L ed S indicano se la OctoPAES è rispettivamente in modalità “large” o “small”; le lettere a,b,c,d,e indicano le diverse lunghezze dei cavi di interconnessione tra le schede.

La catena di interconnessione tra le OctoPAES è realizzata con doppini in rame attraverso i quali, le schede trasmettono due tipi di segnali LVDS: un segnale di clock, in modo che tutte le schede siano sintonizzate alla stessa frequenza senza slittamenti di fase; il segnale di inizio e di fine (“start” e “stop”) di produzione degli hit. La Figura 3.7 mostra una misura fatta all’oscilloscopio del segnale di clock emesso da una OctoPAES alla scheda successiva, quando viene trasmesso anche un segnale di “start”. Il segnale LVDS è rappresentato nelle sue componenti differenziali dalle linee blu e fucsia, in alto. L’oscilloscopio permette di ricostruire il segnale in forma integrale mediante la differenza di tali componenti, come viene mostrato dalla linea gialla in basso.

La OctoPAES relativa alla posizione L1 (ovvero posta nella posizione “Large” della CLB1) è configurata come “master”: essa è l’unica che può generare sia i segnali di clock e di start/stop. Tali segnali, attivati premendo opportuni pulsanti collocati sulla scheda, vengono subito propagati a valle di tutta la catena di OctoPAES. Ovviamente tutte le altre schede, sia “Large” che “Small” sono in configurazione “slave”, cioè si aspettano di ricevere un segnale di clock e di doverlo distribuire a valle della catena. Le cause di queste latenze dipendono essenzialmente dal fatto che il firmware della CPLD ha bisogno di tempo per elaborare il segnale LVDS (clock e start/stop) in arrivo ed in uscita. Le latenze nella trasmissione/ricezione del segnale di start impediscono alle OctoPAES che implementano i pattern di Figura 3.5 di fornire hit in simultanea da tutte le schede.



Figura 3.7: Il segnale di clock trasmesso da una OctoPAES alla successiva, interrotto da un segnale di start. In alto le componenti LVDS mentre in basso la loro differenza permessa da un'opportuna funzione matematica dell'oscilloscopio.

Le cause di queste latenze dipendono dal modo in cui il firmware della CPLD è stato progettato. Anche la lunghezza dei cavi di interconnessione tra le OctoPAES ha una sua influenza in termini di 5 ns di latenza per metro di cavo. Determinare l'effetto complessivo dei ritardi tra le varie schede e verificare che questi siano costanti ad ogni succedersi di cicli di start e stop è fondamentale per disegnare i pattern di hit in modo efficace. Questo è vero sia che si voglia la simultaneità di tutti gli hit da tutti i canali di TDC di tutte le OctoPAES, sia che si desideri implementare pattern che rispettino condizioni di causalità come nel caso di un evento di muone o sciame elettromagnetico.

3.4 Misura sperimentale dei ritardi tra le schede OctoPAES

Le misure sperimentali dei ritardi degli hit emessi da diverse schede OctoPAES sono state effettuate in due modi: il primo metodo riguarda la misura diretta, effettuata con l'oscilloscopio, dei i segnali hit (uno dei due canali differenziali) in uscita dalla CPLD su appositi piedini del chip. Il secondo metodo invece ha richiesto l'uso di tutta la catena di acquisizione fino alla scrittura del file di dati selezionati dal TriDAS.

3.4.1 Misure dirette con l'oscilloscopio

La misura è stata effettuata con un oscilloscopio LeCroy WaveSurfer, con le seguenti caratteristiche: 5 GigaSample e frequenza 400MHz e 4 canali (C1, C2, C3 e C4). Poiché sono stati valutati i ritardi tra una OctoPAES di riferimento e, a turno, tutte le altre schede, prese una ad una, soltanto due canali dell'oscilloscopio, C2 e C3 sono stati utilizzati. In questo modo si è potuto usufruire del massimo dei campionamenti possibili: con 4 canali attivi, il numero di campionamenti del segnale su un singolo canale verrebbe dimezzato. I segnali per ciascun canale sono stati ottenuti con una sonda a 50 Ohm, che veniva puntata sul contatto superiore della resistenza R63, come è indicato dalla freccia rossa nel riquadro della Figura 3.8. Attraverso tale resistenza è possibile intercettare il

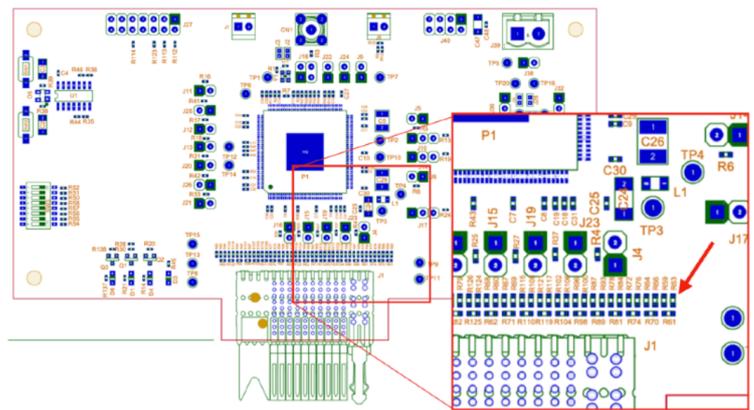


Figura 3.8: Schema della OctoPAES dal lato della CPLD (il quadrato blu centrale). L'ingrandimento mostra quale è la resistenza da puntare con la sonda dell'oscilloscopio

segnale LVDS di uno dei canali di TDC, ovvero è possibile visualizzare gli impulsi degli hit che sono inviati alla CLB. Il ritardo di una scheda rispetto ad un'altra è stato misurato confrontando i segnali prelevati sulle rispettive resistenze R63, come illustrato in Figura 3.9, dove le linee celeste e fucsia indicano rispettivamente i segnali della OctoPAES nella posizione S1 e di quella nella posizione L3.



Figura 3.9: Schermata dell'oscilloscopio con impulsi di hit prodotti dalla OctoPAES in posizione S1 (canale C3, linea celeste) e quella in posizione L3 (canale C2, linea fucsia). Il significato dei valori riportati nella parte bassa dello schermo è spiegato nel testo.

L'oscilloscopio permette di effettuare delle misure dei segnali, presentando i risultati in colonne di parametri indicate con P_i , con i che va da 1 a 6. I numeri riportati sono: il valore istantaneo della misura, la media della misura calcolata sul numero degli eventi acquisiti, il minimo ed il massimo valore della misura sul numero degli eventi, la deviazione standard, il numero di campionamenti ed un segno di stato che indica se la colonna è attiva (una \checkmark) o meno.

Il confronto dei segnali di hit e la misura dei loro ritardi è stato ottenuto con due funzioni messe a disposizione dell'oscilloscopio: e la $\text{skew}(C_x, C_y)$.

- “ $\text{delay}(C_x)$ ”: confronta il segnale di trigger dell'oscilloscopio, ricostruito in base al canale C3, con il successivo fronte di salita al 50% del segnale presente sul canale prescelto C_x . L'operazione effettuata è $t_{C_x} - t_{\text{trigger}}$. Come si vede dalla Figura 3.9, nella seconda colonna di valori indicata con P2, l'uso della funzione “ $\text{delay}(C3)$ ”, ovvero sullo stesso canale di trigger, fornisce valori piccoli, $O(50 \text{ ps})$, che danno il senso della precisione con cui il trigger viene ricostruito.
- $\text{skew}(C_x, C_y)$: confronta i fronti di salita al 50% dei segnali più vicini appartenenti ai due canali. L'operazione effettuata è $t_{C_y} - t_{C_x}$.

Se si mettono a confronto i valori ottenuti nelle colonne P3, P4 e P6 si ottengono valori simili, come aspettato. I valori relativi ai ritardi riportati più avanti in questa Tesi sono il valore medio delle misure della colonna P6, per un numero di eventi pari a 100. Le misure dei ritardi effettuate con l'oscilloscopio sono riportate in Tabella 3.1. Esse sono sempre riferite alla OctoPAES nella posizione S1, collegata al canale C3 dell'oscilloscopio ed utilizzato come trigger. Non ci si riferisce alla OctoPAES “master”, ovvero alla L1, perché questa ha un firmware ancora da ottimizzare e non genera alcun hit.

Si noti che non sono presenti misure per le OctoPAES della CLB6. Infatti tale scheda è attualmente dedicata ad altri test in corso alla BCI, e non è stato possibile utilizzarla in questa Tesi.

3.4.2 Misure dai dati selezionati dal TriDAS

Mantenendo attiva la generazione degli hit in tutte le OctoPAES, si è proceduto a registrare i dati con il sistema di acquisizione ufficiale di KM3NeT introdotto nella Sezione 2.5.2. Dopo circa 2 minuti di funzionamento, i dati raccolti sono stati scritti in un file, prodotto su un apposito disco di stoccaggio. File di questo tipo, detti post-TriDAS, raccolgono gli hit che sono sopravvissuti a speciali algoritmi di selezione implementati nel TriDAS. Tali algoritmi si basano sul verificarsi di opportune coincidenze temporali tra gli hit dei PMT dello stesso DOM (condizione di Livello 1) e successivamente di altre relazioni spazio-temporali tra gli hit di DOM diversi (condizione di Livello 2). Si parla

di seme di coincidenza. Quando una delle condizioni elencate sopra si avvera, che sia di solo Livello 1 o anche di Livello 2, tutti gli hit entro 5 s dall'occorrenza del seme sono salvati su disco. Nel caso dei dati raccolti per questa Tesi, soltanto una la condizione di Livello 1 era attiva: si richiedeva di trovare hit da PMT dello stesso DOM entro finestre temporali di 25 ns. Poiché gli hit di tutti i canali di una OctoPAES sono perfettamente simultanei, questa condizione di coincidenza era sempre verificata per tutti gli hit. Di conseguenza il file registrato riporta tutti gli hit che sono stati prodotti da tutte le OctoPAES durante i due minuti di acquisizione. Tali dati sono stati poi analizzati nel seguente modo: analogamente alle misure dirette con l'oscilloscopio, tutti i ritardi tra gli hit sono stati riportati a quelli prodotti dalla OctoPAES nella posizione S1. Si è scelto poi di utilizzare gli hit del canale di TDC n. 25 per ciascuna scheda "Large" e quelli del canale di TDC n.1 per ciascuna scheda "Small". Il risultato dell'analisi è stato ottenuto grazie a programmi sviluppati non per questa Tesi e il cui dettaglio è qui omissis. Basti menzionare che, prese due serie di hit da due OctoPAES diverse, il programma calcola le differenze di tempo di una serie rispetto all'altra. Riportando in un istogramma il numero di occorrenze dei ritardi calcolati si ottiene una distribuzione triangolare, con il massimo prossimo allo zero (sarebbe esattamente zero se non ci fossero ritardi tra le due serie). Lo spostamento rispetto allo zero del massimo della distribuzione indica il ritardo medio cercato. Sebbene questo metodo di misura possa sembrare molto complesso, la sua attuazione, ovvero l'espletamento di presa dati, la registrazione degli eventi selezionati in un file e la sua successiva analisi comportano un investimento di al massimo 10 minuti. Tale tempo è largamente inferiore alla durata di una sessione di misure indirette all'oscilloscopio. Per questo motivo è importante stabilire se i due approcci sono equivalenti. Nel grafico di Figura 3.10 sono riportati i dati delle misure dirette con l'oscilloscopio e quelli ottenuti dall'analisi del file post-TriDAS. La congruenza trovata è ottima. Questo risultato permette di stabilire che le misure dirette fatte con l'oscilloscopio e quelle ottenute dalle analisi del file post-TriDAS si validano a vicenda. In Figura 3.11 è riportato invece il grafico relativo ai ritardi associati a due OctoPAES consecutive, ricavato attraverso i dati della tabella 3.1.

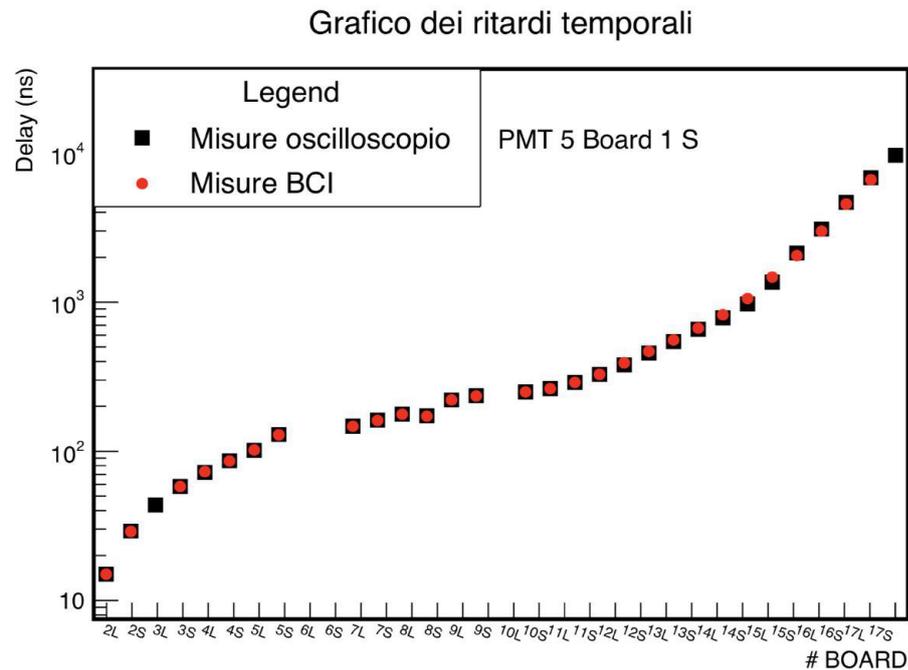


Figura 3.10: Confronto delle misure dirette con l'oscilloscopio (quadrati neri) e quelle ottenute analizzando il file post-TriDAS (cerchi rossi). La congruenza è visibile. Le misure relative alle OctoPAES della CLB6 non sono state effettuate in quanto la CLB6 era in uso su un altro setup. Per un probabile malfunzionamento del ramo "Large" della CLB3, mancano i dati relativi alla posizione 3L ottenuti dall'analisi del file post-TriDAS. Stessa cosa per il ramo "Small" della CBL17. L'asse delle ordinate è in scala logaritmica.

3.4.3 Discussione dei risultati ottenuti

Il grafico in Figura 3.10 mostra che l'andamento cumulativo dei ritardi temporali rispetto alla OctoPAES nella posizione S1 non è lineare ed a intervalli regolari per tutte le schede poste in daisy-chain. Dai valori misurati, l'incremento atteso di 15ns ad ogni nuova scheda vale soltanto per la prima decina di OctoPAES. È possibile osservare meglio questo fatto grazie l'istogramma in Figura 3.11 che rappresenta la distribuzione dei ritardi relativi, ossia il ritardo tra un'OctoPAES e la successiva. Un'indagine successiva sul setup sperimentale della BCI, realizzata da un tecnico del Servizio di Elettronica della Sezione di Bologna dell'INFN, ha mostrato che il segnale di clock trasmesso lungo la daisy-chain perdeva molto in ampiezza. In questo modo gli standard LVDS non sono

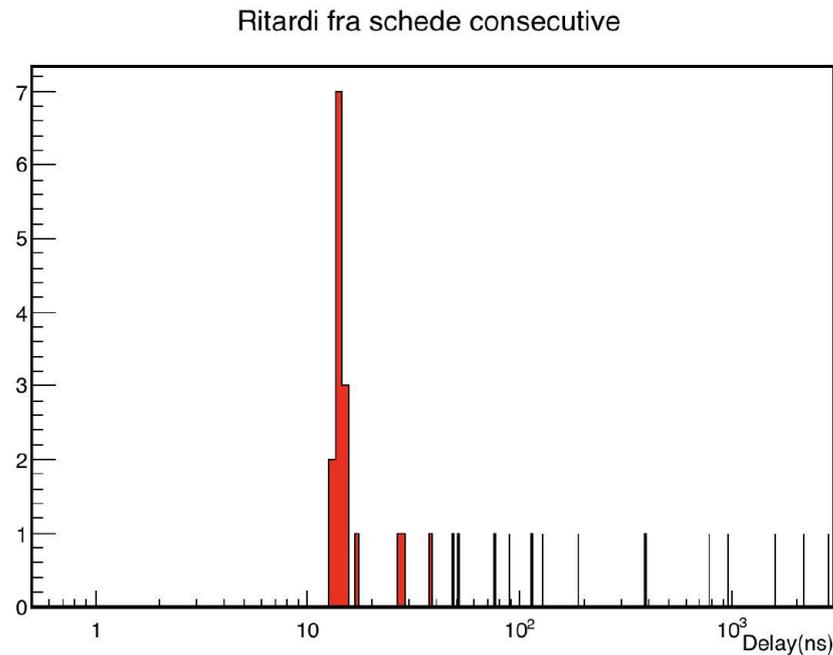


Figura 3.11: Istogramma che grafica il numero di occorrenze relative ad un dato ritardo. L'asse delle ascisse è presentato in scala logaritmica.

più garantiti. Come risultato, il segnale di start viene male interpretato dalle CPLD delle OctoPAES che più distano dalla scheda “master”. Questo causa i ritardi, che sono più consistenti man mano che ci si allontana dalla scheda “master”. La misura trattata in questa Tesi si è rivelata dunque decisiva per caratterizzare le inefficienze del setup sperimentale attualmente allestito alla BCI. In questo momento l'unica soluzione facilmente realizzabile è evitare che la distribuzione del segnale di start/stop abnega lungo la daisy-chain, parassitando la linea di distribuzione del clock delle OctoPAES. È attualmente in sviluppo un design che prevede la distribuzione parallela dello start attraverso ulteriori nuove connessioni.

DOM	trigger	$\langle \Delta t \rangle$ [ns]	Dev.Std.[ns]
DOM2L	DOM1S	15,01	0,03
DOM2S	DOM1S	29,18	0,03
DOM3L	DOM1S	43,73	0,03
DOM3S	DOM1S	58,01	0,03
DOM4L	DOM1S	72,24	0,03
DOM4S	DOM1S	86,49	0,03
DOM5L	DOM1S	101,33	0,03
DOM5S	DOM1S	129,60	0,03
DOM6L	DOM1S	---	---
DOM6S	DOM1S	---	---
DOM7L	DOM1S	147,26	0,03
DOM7S	DOM1S	162,05	0,03
DOM8L	DOM1S	177,28	---
DOM8S	DOM1S	172,86	0,01
DOM9L	DOM1S	221,00	0,03
DOM9S	DOM1S	236,19	0,03
DOM10L	DOM1S	250,00	0,04
DOM10S	DOM1S	263,00	0,03
DOM11L	DOM1S	290,00	0,03
DOM11S	DOM1S	328,00	0,03
DOM12L	DOM1S	379,00	0,03
DOM12S	DOM1S	455,00	0,03
DOM13L	DOM1S	544,00	0,03
DOM13S	DOM1S	657,00	0,03
DOM14L	DOM1S	784,00	0,03
DOM14S	DOM1S	972,00	0,03
DOM15L	DOM1S	1360,94	0,03
DOM15S	DOM1S	2136,51	0,03
DOM16L	DOM1S	3087,68	0,03
DOM16S	DOM1S	4669,50	0,04
DOM17L	DOM1S	6828,85	0,04
DOM17S	DOM1S	9633,99	0,03

Tabella 3.1: Misure dirette, ottenute con l'oscilloscopio, dei ritardi tra schede OctoPAES della BCI. I valori si riferiscono sempre alla scheda OctoPAES nella posizione S1.

Conclusioni

KM3NeT è una collaborazione internazionale impegnata nella costruzione di due telescopi Cherenkov sottomarini nel Mar Mediterraneo per la rivelazione di neutrini di origine astrofisica ed atmosferica. Elemento cruciale dell'esperimento è il sistema di acquisizione che ha il compito di convogliare i dati raccolti dai telescopi nei siti abissali verso le rispettive stazioni di terra dove sono manipolati e selezionati. Presso la Sezione di Bologna dell'INFN è stato realizzato un setup sperimentale formato dall'elettronica di un'intera linea di rivelazione del telescopio e da una replica dell'infrastruttura di calcolo e reti delle stazioni di terra. Per poter ricreare in modo deterministico eventi di neutrino simili a quelli attesi sul rivelatore vero, è stata realizzata la scheda OctoPAES che consente di iniettare segnali realistici nell'elettronica del telescopio. Il sistema di sincronizzazione delle OctoPAES gioca un ruolo importantissimo, dovendo queste produrre segnali che sono correlati tra loro da relazioni spazio-temporali. Il lavoro che ho condotto per questa tesi è consistito nella caratterizzazione dei ritardi temporali intrinseci delle OctoPAES quando sono supposte produrre segnali sincroni. Le misure sono state effettuate con l'ausilio di un oscilloscopio direttamente sul setup di test in fase di acquisizione. I risultati che ho ottenuto sono stati validati con un metodo indipendente che fa uso di tutto il sistema di acquisizione ricreato a Bologna, di cui ho sfruttato alcuni programmi realizzati per l'analisi dei dati raccolti. Grazie a queste mie misure è stato possibile scoprire una degradazione nella trasmissione del segnale di sincronizzazione delle OctoPAES, che si propaga lungo la linea di rivelazione e che aumenta i ritardi via via che ci si allontana dalla sua generazione. La conclusione del mio lavoro ha portato ad una revisione della topologia delle connessioni tra le OctoPAES per la distribuzione ottimizzata del suddetto segnale di sincronizzazione.

Bibliografia

- [1] T.Chiarusi, M.Spurio, High-energy astrophysics with neutrino telescopes, in The European Physical Journal C (2010) 65:649-701
- [2] <https://www.lns.infn.it/it/ricerca/progetti/km3net.html>
- [3] <https://it.wikipedia.org/wiki/Frame-Ethernet>
- [4] <http://white-rabbit.web.cern.ch/>
- [5] <https://it.wikipedia.org/wiki/User-Datagram-Protocol>
- [6] <https://www.ntvn.nl/magazines/2016-3/KM3NeT-2.html>
- [7] <https://indico.ific.uv.es/event/3366/contributions/9936/attachments/6613/7540/Thakore.pdf>
- [8] <https://www.km3net.org/research/computing/>
- [9] <https://en.wikipedia.org/wiki/KM3NeT>

Ringraziamenti

Vorrei cominciare ringraziando il Professor Maurizio Spurio per avermi dato la possibilità di svolgere un'attività in laboratorio che mi ha arricchito e mi ha permesso di conoscere da vicino l'ambiente della ricerca. Un grandissimo ringraziamento è al Professore Tommaso Chiarusi per la grandissima pazienza con cui tutti i giorni mi ha seguito in laboratorio e anche da casa. Un grazie anche a Francesco per i consigli e gli aiuti. Abbraccio tanto i miei genitori e mio fratello, erano sempre al mio fianco nei numerosissimi momenti di difficoltà e sempre pronti ad aiutarmi. Grazie di cuore a Pierluigi, che in queste ultime sessioni mi ha dato la forza di andare avanti fino alla fine, è stato la mia forza. Ringrazio infine tutti coloro che mi hanno accompagnata verso questo piccolo ma enorme traguardo. Un grazie particolare a Vanessa, che in questi anni ha saputo consigliarmi al meglio su come organizzare gli appelli d'esame e sulle lezioni da frequentare. Vorrei anche ringraziare tutti i miei amici di facoltà con cui ho condiviso risate, pianti e momenti di studio disperato: Elisa, Mattia, Gianluca, David. Ringrazio mia nonna per le giornate passate da lei a studiare e gli altri nonni per aver sempre vegliato su di me in questi anni. E dulcis in fundo mia Zia Angela che è sempre riuscita a darmi l'appoggio e il coraggio necessari. Un salutino anche ai miei due cagnolini che hanno alleggerito tutte le mattinate di studio casalingo nei due lunghissimi mesi della mia ultima sessione.