

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE
Corso di Laurea Magistrale in Fisica

Beam Halo Monitor:
il nuovo rivelatore di alone del fascio
per l'esperimento CMS a LHC

Relatore:
Chiar.mo Prof.
Francesco Luigi Navarra

Candidato:
Andrea Manna

Co-relatori:
Dott. Fabrizio Fabbri
Dott. Alessandro Montanari
Dott. Nicolò Tosi

II Sessione
Anno Accademico 2014/2015

Indice

Introduzione	v
1 Il Large Hadron Collider e l'esperimento CMS	1
1.1 LHC	1
1.2 La macchina	4
1.3 CMS	6
2 Il monitoraggio dei fasci in CMS	11
2.1 Produzione dell'alone per il fascio di LHC	13
2.2 I rivelatori di BRIL	14
2.2.1 PLT	14
2.2.2 BCM1F	14
2.2.3 Beam Halo Monitor	16
3 Il rivelatore di alone del fascio BHM	21
3.1 Caratteristiche e funzionamento di BHM	22
3.1.1 Radiazione Cherenkov	23
3.2 Progetto del rivelatore	24
3.3 Progetto delle unità	25
3.3.1 Schermatura del campo magnetico	30
3.4 Sistema di calibrazione	33
3.4.1 Sistema di distribuzione	36
3.5 Caratterizzazione del sistema di calibrazione	37

4	Test di direzionalità	39
4.1	Costruzione del telescopio per raggi cosmici	41
4.2	Sistema di controllo ed acquisizione:	
	VersaBoard	45
4.2.1	Software per il controllo e l'acquisizione da scheda	47
4.3	Descrizione del setup	53
4.4	Test e risultati	56
5	Caratterizzazione dei fotomoltiplicatori di BHM	61
5.1	Fotomoltiplicatori	61
5.2	I Fotomoltiplicatori Hamamatsu R2059	69
5.3	Misure di guadagno	71
5.3.1	Apparato sperimentale	71
5.3.2	Elettronica	72
5.3.3	Software di controllo per il Digitizer	75
5.3.4	Acquisizione dei dati	76
5.3.5	Analisi dei dati e risultati	78
5.4	Misure del tasso di dark count	80
5.4.1	Apparato sperimentale	81
5.4.2	Elettronica	82
5.4.3	Misura e risultati	82
5.5	Determinazione delle tensioni operative per le unità	84
6	Installazione e verifiche di funzionamento	87
6.1	Verifiche di funzionamento	92
7	Risultati preliminari a LHC	97
7.1	Primi risultati con "splashes"	97
A	Caratterizzazione dei fotomoltiplicatori	103
A.1	Grafici di guadagno	103
A.2	Grafici del tasso di dark count	104

Bibliografia

107

Introduzione

Il rivelatore CMS (Compact Muon Solenoid) è uno dei due rivelatori “general purpose” in funzione presso il grande collisionatore LHC del CERN. Durante la prima fase di presa dati (Run I) effettuata dal 2010 al 2012, si è raggiunta una energia massima delle collisioni protone-protone nel centro di massa pari a 8 TeV e una luminosità istantanea massima superiore a $7 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$. Da pochi mesi, dopo il lungo periodo di manutenzione e potenziamento dei magneti superconduttori, il collisionatore ha ripreso a funzionare ad una energia di 13 TeV. In previsione dell’aumento della luminosità della macchina, che potrebbe raggiungere il valore di $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ durante il periodo di presa dati da poco iniziato (Run II), l’esperimento CMS si è dotato recentemente di un nuovo e complesso sistema di rivelatori per monitorare con maggiore precisione ed efficienza le condizioni dei fasci di LHC. Il sistema di rivelatori BRIL (Beam Radiation Instrumentation and Luminosity), è stato costruito per misurare in tempo reale la radiazione di fondo indotta nella caverna sperimentale dai fasci di LHC, assicurando così un’alta qualità della presa dati di CMS, e per ottimizzare la misura della luminosità fornita dall’acceleratore. La luminosità è un parametro fondamentale per un collisionatore, in quanto grandi valori di questo parametro consentono di esplorare processi rari, cioè con piccola sezione d’urto. I rivelatori di BRIL sono stati costruiti durante il lungo periodo di “shutdown”, iniziato nel 2013, ed i lavori di installazione nella caverna sono terminati nel febbraio del 2015. Al momento, questo sistema di rivelazione, assieme al sistema equivalente adottato dall’esperimento ATLAS, rappresenta lo sviluppo più avanzato e performan-

te di monitor dei fasci esistente in esperimenti su collisionatori adronici. La maggiore intensità dei fasci prevista per il Run II implicherà una maggiore chiusura dei collimatori di fascio e quindi una potenziale maggiore produzione di radiazione di fondo indotta. Questo fondo consiste di particelle relativistiche, principalmente muoni, che hanno origine dalle interazioni dei protoni del fascio con il materiale dei collimatori, o con le molecole di gas residuo presenti nel tubo a vuoto. Queste particelle costituiscono quello che generalmente viene chiamato “alone” del fascio e, per come sono prodotte, raggiungeranno il rivelatore CMS in coincidenza con i pacchetti di protoni nel punto di interazione. E’ quindi assolutamente necessario mantenere questo fondo al livello più basso possibile, per garantire un’alta qualità dei dati prodotti dal rivelatore di tracce e dal rivelatore di muoni. Per il monitoraggio in tempo reale dell’alone, BRIL utilizzerà un rivelatore posizionato in prossimità del vertice di interazione, conosciuto col nome di BCM1F, che consiste di 24 sensori di cristalli di diamante singoli, ed un rivelatore posizionato ad una distanza maggiore, BHM (Beam Halo Monitor), costituito da due anelli situati a circa 20 m dal punto di interazione, da parti opposte rispetto al rivelatore principale, e formati ciascuno da 20 contatori Cherenkov di quarzo, disposti ad un raggio di circa 1.8 m dalla linea di fascio. Le informazioni che questi due rivelatori posti a diverse distanze radiali invieranno in tempo reale alle sale controllo di CMS e di LHC, consentiranno di monitorare la qualità dei fasci con una precisione mai raggiunta prima e permetteranno agli operatori di LHC di ottimizzarne velocemente le condizioni. In questo lavoro di tesi viene descritto il rivelatore BHM e il lavoro che ho svolto partecipando alla sua costruzione e alla sua installazione nella caverna sperimentale di CMS. Nel Cap. 1 vengono descritti brevemente il collisionatore LHC e il rivelatore CMS. Nel Cap. 2 viene presentato il nuovo sistema di monitoraggio dei fasci di cui si è dotato CMS, mentre nel Cap. 3 viene descritto in dettaglio il nuovo rivelatore dell’alone. I test effettuati sulle unità prima del loro assemblaggio finale e i risultati ottenuti vengono presentati nei Cap. 4 e 5, mentre nel Cap. 6, dopo aver parlato dell’installazione del rivelatore, sono riportati i risultati

relativi ad alcuni test di funzionalità effettuati prima dell'inizio del Run II. Infine, nel Cap. 7, si espongono alcuni risultati preliminari ottenuti durante il primo periodo di presa dati.

Capitolo 1

Il Large Hadron Collider e l'esperimento CMS

1.1 LHC

Il Large Hadron Collider (LHC), entrato in funzione nel settembre 2008, è il più potente acceleratore di particelle al mondo. LHC è stato installato nello stesso tunnel che ospitò il Large Electron Positron collider (LEP) fino al 2000. L'anello di 27 km di circonferenza che lo ospita incorpora 9300 magneti superconduttori, fra cui 1232 dipoli e 858 quadrupoli, raffreddati con elio liquido. Il collisionatore è costituito da due tubi separati, tenuti ad un vuoto estremamente elevato, racchiusi all'interno dei magneti, nei quali circolano protoni di altissima energia. I fasci viaggiano in direzioni opposte lungo l'anello e possono essere accelerati fino ad un'energia massima di 7 TeV. Nei quattro punti in cui i fasci vengono fatti collidere, sono posizionati i quattro esperimenti principali (Fig. 1.1) : ALICE (A Large Ion Colliding Experiment) nel punto 2 e LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment) nel punto 8 sono esperimenti dedicati. CMS (Compact Muon Solenoid) nel punto 5 e ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) nel punto 1 sono i due esperimenti *multi purpose*. Le posizioni degli esperimenti lungo la struttura dell'anello di LHC sono mostrati in figura 1.1.

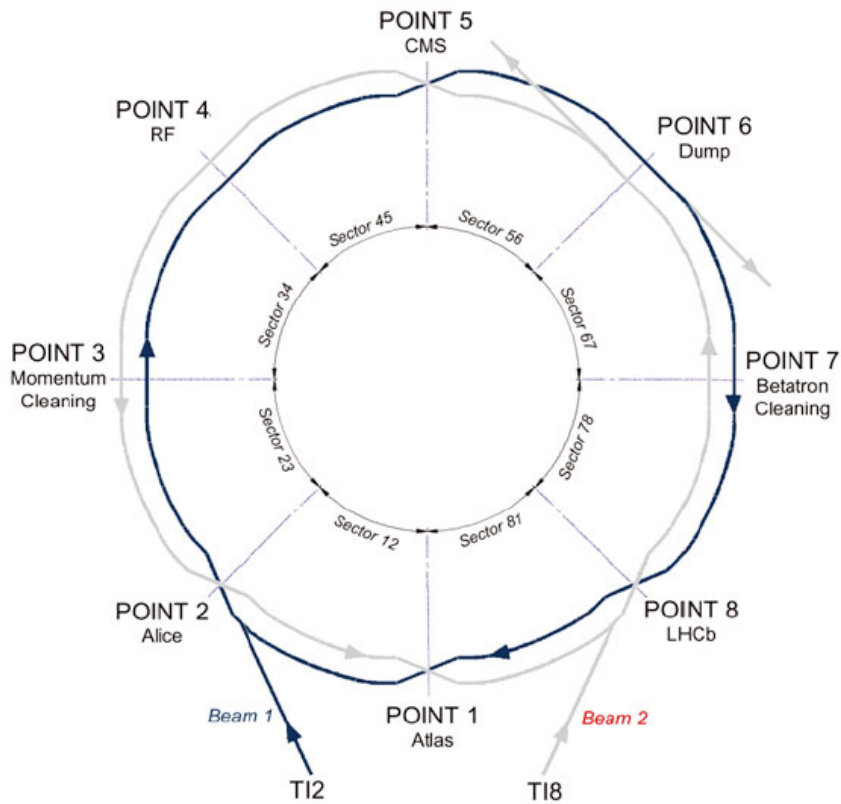


Figura 1.1: LHC ed i suoi esperimenti.

Nella tabella 1.1 sono riportati alcuni parametri operativi di LHC. Di particolare interesse è l'energia dei fasci in quanto permette di generare collisioni con un'energia fino a 14 TeV nel centro di massa. I magneti di LHC operano ad una temperatura di 1.9 K, raggiungibile grazie ad un apparato criogenico ad elio liquido.

Nella figura 1.2 mostrato lo schema del sistema di accelerazione dei fasci al CERN. La catena di iniezione fino ad LHC procede secondo questa sequenza:

1. I protoni sono prodotti con la ionizzazione di atomi di idrogeno nel duoplasmatron con una corrente di fascio di 300 mA all'inizio del nel LINAC 2 dopo essere stati iniettati in questo acceleratore lineare, raggiungono un'energia di 50 MeV, prima di essere iniettati nel Proton

Tipo di collisione	Protone - Protone
Energia di iniezione del fascio	450 GeV
Energia max. del fascio nominale	7 TeV
Temperatura operativa dei magneti	1.9 K
Campo magnetico	8.83 Tesla
Frequenze RF	400.8 MHz
Frequenza di rivoluzione	11.2455kHz

Tabella 1.1: Parametri operativi di LHC

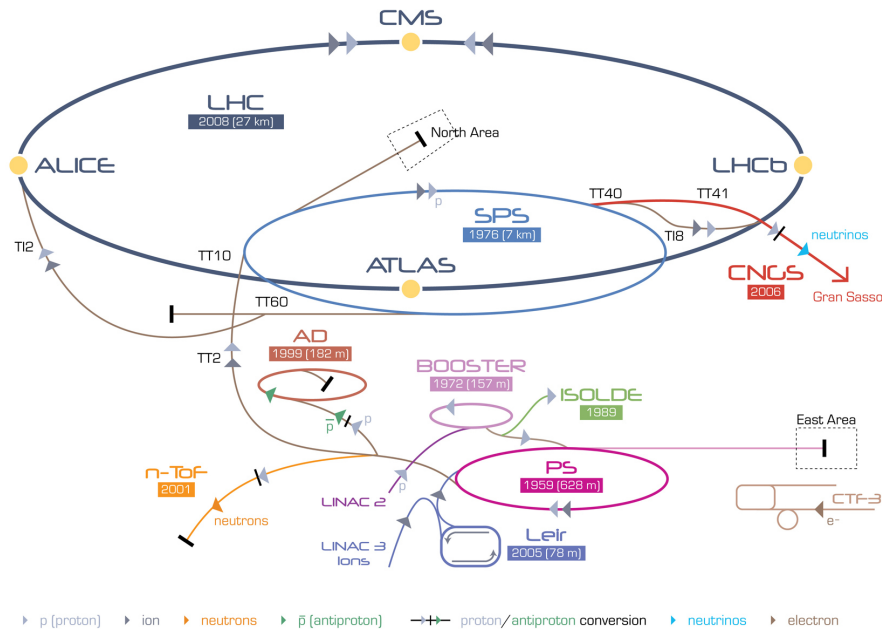


Figura 1.2: Schema di accelerazione del CERN.

Synchrotron Booster (PSB).

- Il PSB accelera i protoni fino ad un' energia di 1.4 GeV e guida il fascio fino al Proton Synchrotron (PS).
- Il PS accelera i protoni fino a 25 GeV e li invia al Super-Proton Synchrotron (SPS). Qui sono infine accelerati all'energia di iniezione in LHC di 450 GeV. Entrano in LHC in entrambi i sensi: orario ed antiorario.

4. Riempire i due anelli di LHC richiede 4 minuti e 20 secondi e, dopo 20 minuti, i protoni raggiungono la massima energia. I due fasci sono fatti collidere in corrispondenza dei quattro detector.

1.2 La macchina

LHC non è un cerchio perfetto: è costituito da otto settori ad arco ed otto inserzioni, come visibile nella figura 1.1. Gli archi contengono i dipoli (154 dipoli per arco) che mantengono i fasci all'interno dell'arco, mentre un'inserzione consiste nel tratto rettilineo più due zone di transizione agli estremi. La struttura di ogni inserzione dipende dalla sua funzione: far collidere i fasci in corrispondenza di un esperimento, iniezione del fascio, *dump* del fascio, pulizia del fascio. Un settore è definito come la parte della macchina compresa tra due inserzioni. Gli otto settori sono le parti operative di LHC: ciascun'attività è svolta settore per settore, dal raffreddamento all'alimentazione. Le principali caratteristiche che fanno di LHC la macchina acceleratrice più complessa e potente al mondo sono brevemente descritte in seguito.

Vuoto

LHC ha la particolarità di avere tre sistemi di vuoto: il vuoto di isolamento per l'apparato criogenico dei magneti, l'isolamento delle linee di distribuzione dell'elio ed il vuoto della linea di fascio. La pressione nella camera a vuoto della linea di fascio è di 10^{-10} - 10^{-11} mbar [1], per ridurre il più possibile le collisioni dei protoni con le molecole del gas residuo, presenti all'interno.

Magneti

In LHC sono presenti diverse tipologie di magneti: dipoli, quadrupoli, sestupoli, ottupoli, decapoli. Ogni tipo di magnete contribuisce ad ottimizzare una traiettoria: i dipoli hanno la funzione di mantenere i fasci nell'orbita

circolare, all'interno dei settori, mentre nelle inserzioni sono posizionati i magneti quadrupolari, che focalizzano il fascio prima dei punti di collisione.

I dipoli hanno rappresentato la più grande sfida tecnologica per la progettazione di LHC. In un acceleratore circolare infatti, l'energia massima raggiungibile è direttamente proporzionale all'intensità del campo magnetico dei dipoli. In LHC i dipoli sono elettromagneti superconduttori che generano, lungo la loro lunghezza, un campo di 8.3 T. Tale intensità non si sarebbe potuta mai raggiungere utilizzando magneti caldi. Questi dipoli utilizzano dei cavi in Niobio-Titanio (NbTi), che diventano superconduttori ad una temperatura al di sotto dei 10 K. Per raggiungere la temperatura di 1.9 sono necessarie tre fasi che si protraggono per alcune settimane. La prima fase consiste nel raffreddare l'elio liquido ad una temperatura di 4.5 K, prima di essere iniettato all'interno dei magneti durante la seconda fase. Nella terza fase l'elio liquido è ulteriormente raffreddato fino ad una temperatura di 1.9 K [1].

Cavità acceleratrici

Lo scopo principale delle cavità a radiofrequenza (RF) è quello di accelerare i protoni contenuti nel fascio. Le cavità sono modellate con una particolare forma tale per cui le onde elettromagnetiche che si propagano all'interno entrano in risonanza e si intensificano. I protoni, attraversandole, sono accelerati lungo la direzione dal campo elettrico risultante, che trasferendogli energia, le spinge in avanti lungo l'acceleratore. Il campo, all'interno delle RF oscilla ad una particolare frequenza (400 MHz) [1], cosicché idealmente, i protoni che arrivano in fase con l'esatta energia, non sentiranno nessun campo accelerante, mentre gli altri saranno accelerati o decelerati fino ad ottenere l'energia voluta. E' in questa maniera che i protoni sono ordinati in pacchetti di particelle chiamati *bunches*.

Le 16 cavità RF di LHC sono alloggiare in quattro cilindri refrigeratori, chiamati criomoduli, due per fascio, che le mantengono in un regime di superconduttività.

1.3 CMS

Il Compact Muon Solenoid (CMS) è uno dei due rivelatori *general purpose* di LHC. Situato al punto *Point 5*. La maggior parte della struttura è stata assemblata in superficie, prima di essere calata a circa 100 m di profondità nella Underground eXperimental Cavern (UXC). CMS è progettato per investigare ampi campi della fisica fra cui: il bosone di Higgs, la supersimmetria e la materia oscura. Può misurare le proprietà delle particelle già scoperte, con una precisione mai raggiunta in precedenza ed essere all'avanguardia per i fenomeni nuovi e totalmente imprevedibili. Pur proponendosi gli stessi argomenti di ricerca di ATLAS, utilizza diverse soluzioni tecniche ed una differente configurazione del magnete: un solenoide superconduttore in grado di generare un campo magnetico di 4 T.

CMS è costituito da diversi rivelatori, come mostrato in figura 1.3, che impiegano differenti materiali e tecnologie, per tracciare le traiettorie e misurare energie e momenti delle particelle generate nelle collisioni alle altissime energie di LHC.

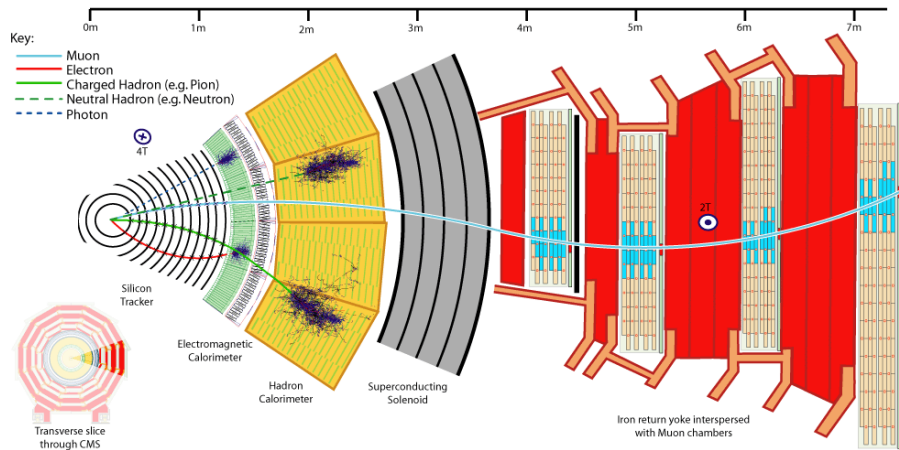


Figura 1.3: Sezione di CMS. Sono tracciati vari tipi di particelle prodotte nelle interazioni, evidenziando la parte del rivelatore utilizzato per la rivelazione.

A grandi linee il rivelatore è formato da:

- un sistema di identificazione dei muoni con una buona risoluzione nella misura del momento su un ampio spettro di energie e di angoli, buona risoluzione nella misura della massa di dimuone ($\sim 1\%$ a 100 GeV)
- una buona risoluzione sulla misura del momento di particelle cariche ed efficienza della ricostruzione delle tracce nel tracker interno
- una buona risoluzione nelle misure dell'energia per sistemi di dielettroni e di difotoni ($\sim 1\%$ a 100 GeV) ed un'ampia copertura geometrica in grado di generare un campo magnet
- una buona risoluzione nella ricostruzione dell'energia trasversa mancante e nella misura della massa di dijet, richiede un calorimetro adronico sufficientemente ampio da contenere gli sciami prodotti, dotato di una fine segmentazione laterale.

I prodotti delle collisioni attraversano inizialmente un *tracker*, costruito interamente in silicio. E' progettato per perturbare le particelle il meno possibile e non causare eccessive perdite di energia. Esternamente al *tracker* si trovano i due calorimetri, che misurano l'energia delle particelle assorbendole totalmente. Come si intuisce dal nome, CMS è stato specificatamente progettato per la rivelazione dei muoni ed utilizza a tale scopo un detector costituito da quattro piano: le camere a muoni. E' inoltre dotato di un potente campo magnetico per misurare con precisione il momento delle particelle prodotte ad altissima energia.

Il sistema di coordinate adottato da CMS ha l'origine nel punto di interazione, l'asse x è orizzontale e punta a sud, verso il centro di LHC, l'asse y è verticale, punta quindi verso la superficie, l'asse z è orizzontale e punta lungo la direzione del fascio 1.

Il magnete

Come si è detto in precedenza il magnete di CMS è un solenoide superconduttore. In CMS il solenoide ha una lunghezza complessiva di 13 m ed

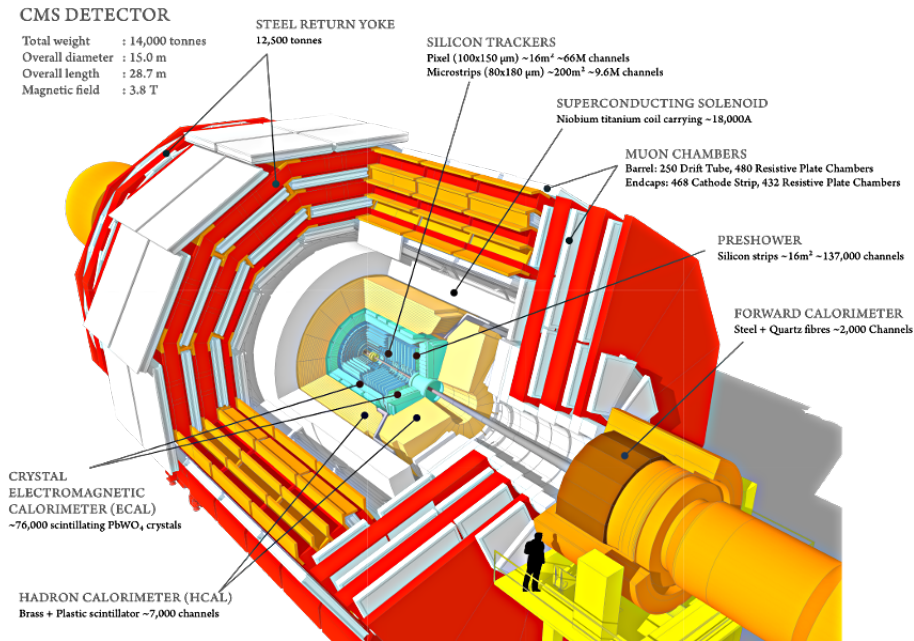


Figura 1.4: Il rivelatore CMS e tutti i sottorivelatori che lo compongono.

un diametro di 6 m. Genera un campo magnetico di 4 T, il più intenso dei quattro esperimenti a LHC. All'interno del magnete sono posizionati sia il tracker che i calorimetri, questo permette di mantenere le dimensioni globali del rivelatore piuttosto contenute.

Il Tracker

La misura del momento è cruciale per individuare i vertici di interazione ed un metodo per valutarlo è quello di ricostruire il percorso della particella generata, all'interno di un campo magnetico. Il tracker di CMS riproduce le tracce di particelle cariche registrando le loro posizioni nell'attraversamento delle sottili lamine di silicio, che costituiscono la parte sensibile del rivelatore. Può così ricostruire le tracce di muoni ad alta energia, oltre che i decadimenti di particelle a vita media breve, come i b-quarks.

Per poter misurare le tracce in maniera accurata e perturbare il moto della particella il meno possibile, le posizioni sono misurate con una grande sensibilità spaziale ($\sim 10 \mu\text{m}$) così da essere sufficienti pochi punti per la

ricostruzione dell'intera traccia. Si tratta della parte del rivelatore più vicina al punto di interazione, che quindi riceve il più alto volume di particelle: sono perciò stati scelti materiali di costruzione resistenti alle radiazioni.

Il tracker è un rivelatore totalmente in silicio: nella parte più interna si trovano i pixel, mentre all'esterno ci sono i rivelatori a microstrip di silicio. Quando una particella attraversa il tracker, i pixel e le microstrip producono piccoli segnali elettrici che, dopo essere stati amplificati sono rilevati e registrati.

ECAL

Per poter ricostruire gli eventi che avvengono nelle collisioni di LHC, CMS deve misurare le energie delle particelle prodotte.

In particolare il calorimetro elettromagnetico (ECAL) misura l'energia dei fotoni e degli elettroni. Le condizioni in cui lavora LHC: un alto *rate* di eventi (25 ns tra ogni collisione) in un intenso campo magnetico e ad un elevato livello di radiazioni, hanno posto vincoli stringenti sulla scelta dei materiali. I cristalli di tungstato di piombo, sono costituiti principalmente da metallo e sono più pesanti dell'acciaio inossidabile. Aggiungendo una piccola quantità di ossigeno, questi diventano trasparenti e producono fotoni di scintillazione in proporzione all'energia di elettroni e fotoni che lo attraversano. I cristalli sono accoppiati a fotorivelatori che convertono la luce prodotta in un segnale elettrico. Questo è successivamente amplificato ed elaborato. ECAL, costituito è da un *barrel* e da due *end-cap*, è posizionato tra HCAL ed il tracker. La parte del barrel è costituita da 61200 cristalli che formano 36 supermoduli, ciascuno del peso di 3 tonnellate. Gli end-cap di ECAL chiudono il barrel ad entrambe le estremità e sono costituiti da circa 15000 cristalli.

HCAL

Seguendo una particella che esce da ECAL, il rivelatore successivo è il calorimetro adronico (HCAL). Misura l'energia degli adroni ed indirettamente,

fornisce misure sulle particelle prive di carica che non hanno interagito, come i neutrini. E' costituito da strati alternati di materiale assorbitore, in cui avviene il decadimento delle particelle e materiali scintillanti, in cui queste danno un segnale che poi, può essere misurato. Delle speciali fibre ottiche raccolgono la luce prodotta e la portano a dei fotomoltiplicatori che ne amplificano il segnale. HCAL deve essere in grado di contenere tutto lo sciame di particelle prodotte, così da misurare con precisione sia l'energia dei prodotti di collisione, sia l'eventuale energia mancante, importante per comprovare teorie oltre il modello standard.

Le camere a muoni

La rivelazione di muoni è uno dei compiti più importanti di CMS. Essendo in grado di superare metri di metallo senza interagire, attraversano i calorimetri senza essere fermati. Perciò, le camere per la rivelazione dei muoni sono posizionate nella zona più esterna di CMS, dove sono le uniche particelle che possono lasciare dei segnali. La traiettoria di una particella viene ricostruita dalla curva che unisce i punti in cui si è registrato un segnale nelle quattro camere. In totale ci sono 1400 camere a muoni: 250 *Drift Tubes* (DTs) e 540 *Cathode Strip Chamber* (CSCc) che tracciano le posizioni delle particelle e generano i segnali di trigger, mentre 610 *Resistive Plate Chamber* (RPCs), forniscono un trigger ridondante, che velocemente permette di decidere se acquisire l'evento o scartarlo. Grazie alla diversità di rivelatori utilizzati, il sistema è robusto ed in grado di filtrare un eventuale rumore di fondo. I DTs e le RPCs sono disposte in cilindri concentrici attorno alla linea di fascio (nella regione del *barrel*), mentre le CSCs e le RPCs costituiscono il disco dell'endcap, che copre le estremità del barrel.

Capitolo 2

Il monitoraggio dei fasci in CMS

Durante il run I CMS ha usato una serie di piccoli rivelatori indipendenti per controllare le condizioni del fascio di LHC e per misurare la luminosità nella zona di collisione. Alcuni di questi rivelatori, come il Beam Condition Monitor (BCM) e il Beam Scintillation Counter (BSC) hanno cominciato a mostrare effetti di invecchiamento e saturazione già alla fine del run, a causa della dose assorbita e dell'alto rate prodotto dalla luminosità record raggiunta. La collaborazione CMS ha sostituito i vecchi rivelatori e consolidare l'intera infrastruttura per il monitoraggio del fascio e la misura della luminosità, durante il lungo periodo di shutdown di LHC (LS1) negli anni 2013-2015. E' nato così il progetto BRIL (Beam Radiation, Instrumentation and Luminosity) con lo scopo di raggruppare in un unico sottomodulo di CMS tutti i rivelatori adibiti al monitoraggio delle condizioni del fascio e alla luminosità.

Per il run II di LHC, la macchina opererà ad una luminosità maggiore di $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$, con un intervallo temporale fra i pacchetti collidenti di 25 ns. I nuovi rivelatori saranno in grado di eseguire una misura della luminosità e della radiazione indotta dal fascio per ogni singolo bunch crossing.

La luminosità è un parametro chiave per gli esperimenti su collisionatori

ed una sua precisa misura è necessaria per determinare le sezioni d'urto dei processi. I nuovi luminometri in BRIL sono il Pixel Luminosity Telescope (PLT), il Fast Beam Condition Monitor (BCM1F), ed un particolare *readout* dedicato del Calorimetro in avanti (HF). Questi luminometri sono indipendenti ed il loro utilizzo simultaneo, oltre a consentire un incrociato, permetterà di ridurre gli errori sistematici legati alla misura.

La grande intensità del fascio run II implica un maggior utilizzo dei collimatori ed una conseguente aumentata vulnerabilità di CMS agli effetti indotti da una maggiore radiazione di fondo.

Il *Fast Beam Condition Monitor* (BCM1F) è stato progettato per misurare l'alone del fascio nelle vicinanze del rivelatore di vertice Il Beam Halo Monitor (BHM) è invece sensibile all'alone lontano dalla beam pipe. Le posizioni rispetto alla caverna di CMS, dei quattro dispositivi che fanno parte del sotto-rivelatore BRIL sono mostrate in figura 2.1.

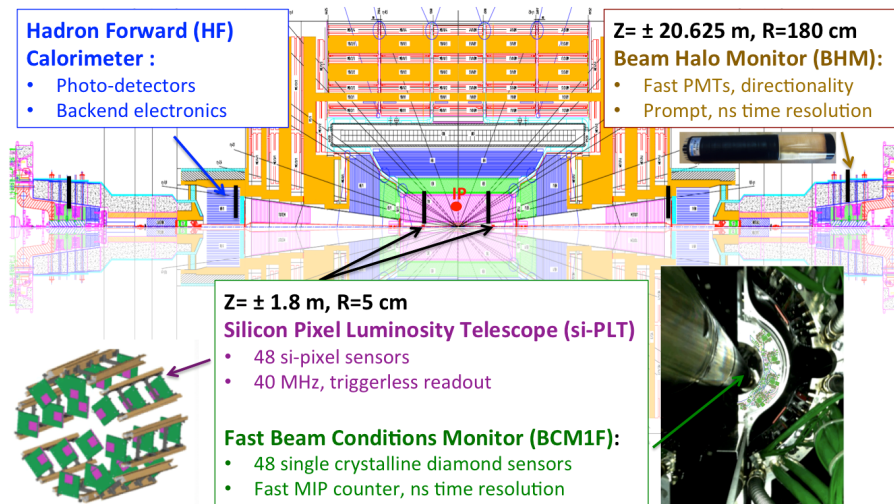


Figura 2.1: Panoramica dei sotto-rivelatori che fanno parte del gruppo BRIL e le loro posizioni rispetto CMS.

2.1 Produzione dell'alone per il fascio di LHC

Per garantire le ottime prestazioni degli esperimenti di LHC è importante individuare le possibili sorgenti di segnali di fondo. Durante le fasi di accelerazione dei fasci, è inevitabile avere perdite di particelle lungo l'acceleratore, che possono depositare la loro energia sulle pareti del collisionatore, in prossimità dei magneti. Con i fasci circolanti a 7 TeV, è sufficiente che lo 0.035% [5] dei protoni depositi la sua energia sulle spire di un magnete superconduttore per generare un transiente di temperatura che ne provochi lo spegnimento. E' quindi necessario proteggere i magneti da eventuali particelle che, sfuggendo dal fascio, possano collidervi contro. Per questo motivo LHC è stato equipaggiato con dei collimatori che ripuliscono il fascio dai protoni che deviano il loro percorso da quello stabilito.

I collimatori consistono in una coppia di ganasce mobili in mezzo alle quali passa il fascio. Il sistema di collimatori è collocato in due inserzioni ad esso dedicate: IR 3 ed IR 7 [6] ed è suddiviso in diverse componenti: il Target Collimator Primary (TCP) vicino al fascio, seguito dal collimatore secondario (TCS) ed un assorbitore, utilizzato per catturare le particelle scatterate dai collimatori precedenti. Inoltre un sistema di collimatori terziari (TCTs), costruiti in tungsteno, sono installati in prossimità della zona sperimentale, a 150 m dal punto di interazione. Questi proteggono i tripletti di quadrupoli utilizzati per focalizzare il fascio prima della collisione e riducono il fondo nella caverna sperimentale.

Nonostante la complessità del sistema utilizzato e la sua alta efficienza, un piccolo numero di protoni che colpisce il TCP non viene assorbito dagli elementi successivi, continuano il loro percorso verso l'area sperimentale dove sono intercettati dai collimatori terziari. Dall'interazione delle particelle con i materiali che compongono le ganasce, si produce una cascata di particelle secondarie quali π^\pm e K^\pm , che, decadendo in muoni lungo le parti finali del tubo, può arrivare alla caverna dell'esperimento.

Un'altra fonte di fondo è dovuta alle interazioni del fascio con le eventuali particelle di gas residuo all'interno del tubo. I protoni possono subire

scattering elastico o inelastico sulle molecole di gas residue. Un'interazione inelastica che avviene in una zona vicino al rivelatore, può portare alla generazione di sciami che arrivino fino ad esso. Interazioni elastiche invece, possono scatterare protoni direttamente sui collimatori terziari, senza passare per il sistema di pulitura del fascio.

Una parte degli sciami così prodotti può viaggiare parallela alla linea di fascio ed arrivare al rivelatore depositando energia nelle parti sensibili e dando quindi segnali di fondo. Questo è particolarmente vero per i muoni di alta energia, per i quali gli schermi posti all'ingresso dell'aria sperimentale sono meno efficienti.

2.2 I rivelatori di BRIL

2.2.1 PLT

Il Pixel Luminosity Telescope (PLT), basato sull'utilizzo di sensori a pixel di silicio, è un monitor dedicato alla misura della luminosità per CMS. Usa sensori ed un sistema di readout simili a quelli utilizzati nel *Pixel Tracker* di CMS. PLT è composto di due *array* di otto telescopi a piccolo angolo situati a ± 1.75 m dal punto di interazione (IP). Ogni telescopio consiste in tre piani di sensori a pixel equamente spaziat, con una lunghezza totale del telescopio di 7.5 cm e posizionati radialmente a 5 cm dalla linea di fascio. PLT è progettato per eseguire una misura della luminosità relativamente ad ogni bunch crossing, su una scala di tempi di pochi secondi ed una misura molto precisa della luminosità integrata nel tempo.

2.2.2 BCM1F

Il Fast Beam Condition Monitor (BCM1F) opera in CMS con successo dal 2008, fornendo una misura di *background* del fascio ed un'ulteriore misura della luminosità online per CMS. BCM1F usa un sistema su sensori ed un'elettronica abbastanza veloci da individuare possibili condizioni di aborto

del fascio, e sufficientemente piccoli da essere inserita nelle zone chiave per le componenti del rivelatore senza l'aggiunta di sostanziali quantità di materiale. Il suo scopo è quello di evidenziare eventuali condizioni problematiche del fascio, che generino improvvise perdite di fascio, in piccolissimi lassi di tempo. Tali perdite sono considerate essere una delle possibili cause di danneggiamento per CMS. Il sistema è costituito da quattro sensori al diamante scCVD (single crystalline Chemical Vapor Deposition, disposti lungo gli assi X ed Y. Ognuno di dimensione $5 \times 5 \times 0.5 \text{ mm}^3$, posizionati ad entrambi i lati del punto di interazione, ad una distanza da questo di 1.8 m, vicino alla beam pipe ed al tracker di silicio, ad una raggio di 45 mm [7]. La posizione, mostrata in figura 2.2, ha un'ottima separazione temporale tra le particelle entranti e quelle uscenti dal punto di interazione.

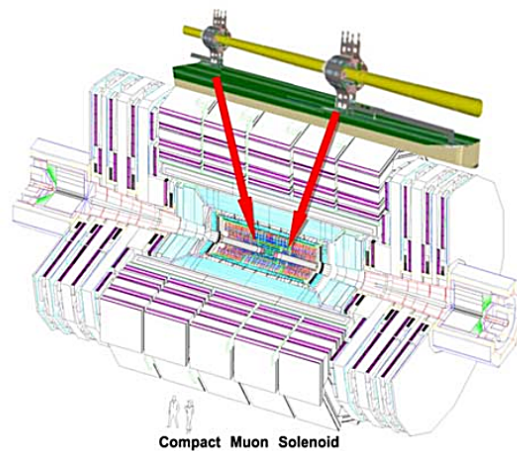


Figura 2.2: Posizione di BCM1F.

I sensori al diamante sono tecnologicamente simili ai rivelatori al silicio, ma hanno il vantaggio di non degradarsi altrettanto velocemente se non raffreddati. Il lavoro di upgrade è servito soprattutto a rendere l'elettronica compatibile con la nuova spaziatura fra i bunch di 25 ns.

HF

Durante il primo Run di LHC, il metodo a riempimento di torri del calorimetro adronico, è stato il sistema principale per ricavare le misurazioni ad alta statistica, bunch per bunch della luminosità per CMS. La frazione media delle torri vuote è utilizzata per inferire il numero medio di interazioni per collisione.

Durante LS1, i fotomoltiplicatori di HF sono stati sostituiti con un modello superiore, che offre un guadagno più stabile ed un numero minore di segnali spuri, migliorando la misurazione della luminosità.

2.2.3 Beam Halo Monitor

BHM è un monitor di CMS per misurare l'alone del fascio a grande distanza dalla linea di fascio. E' installato ad entrambe le estremità di CMS, nella parte esterna, a 20.6 m dal punto di interazione e ad 1.8 m dalla beam pipe. La posizione rispetto al rivelatore CMS è visibile in figura 2.3.

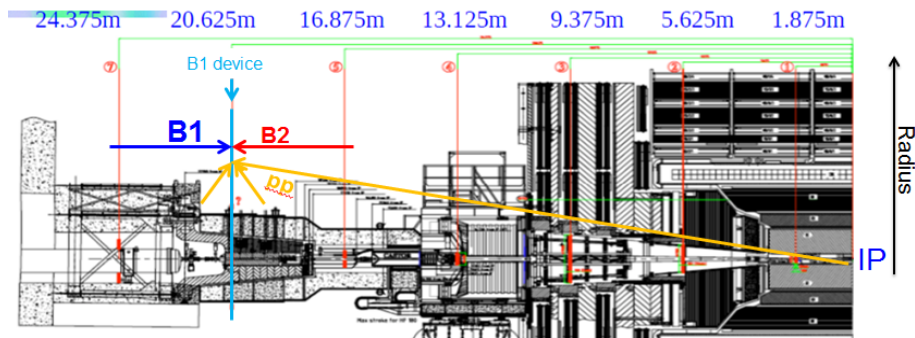


Figura 2.3: Posizione di BHM rispetto CMS nel lato +Z

La misura fornita da BHM complementa quella di BCM1F, che è installato sulla beam pipe molto vicino al punto di interazione, con un'accettanza minore. BHM è posizionato ad una distanza dalla linea di fascio tale da misurare il flusso di muoni dell'alone, incidenti calorimetro adronico e sulle camere a muoni degli *endcap* di CMS I muoni dell'alone infatti possono depositare

considerevoli quantità di energia nel calorimetro, causando errori nella ricostruzione dell'energia depositata dai prodotti di collisione e possono indurre falsi trigger nelle camere a muoni, inficiandone l'efficienza di rivelazione.

BHM è stato progettato per essere sensibile al passaggio di particelle cariche al minimo di ionizzazione (MIB), ma sopprimere il segnale derivante dall'intenso flusso dei prodotti di collisione. Essendo il MIB un flusso di muoni che viaggiano parallelamente ed in sincrono con le particelle del fascio di LHC, può essere discriminato grazie alle differenze dei tempi di arrivo dei due flussi nella zona del rivelatore. A tale scopo si è scelto di installare BHM in una delle 7 *golden location* di CMS: i punti in cui si ha la massima separazione temporale tra l'arrivo dei prodotti di collisione ed i bunches di particelle in arrivo nella caverna di CMS. Durante il run II la spaziatura temporale fra i bunches è di 25 ns, quindi la separazione temporale fra i due flussi nel punto in cui si trova BHM è di 12.5 ns, come illustrato in figura 2.4

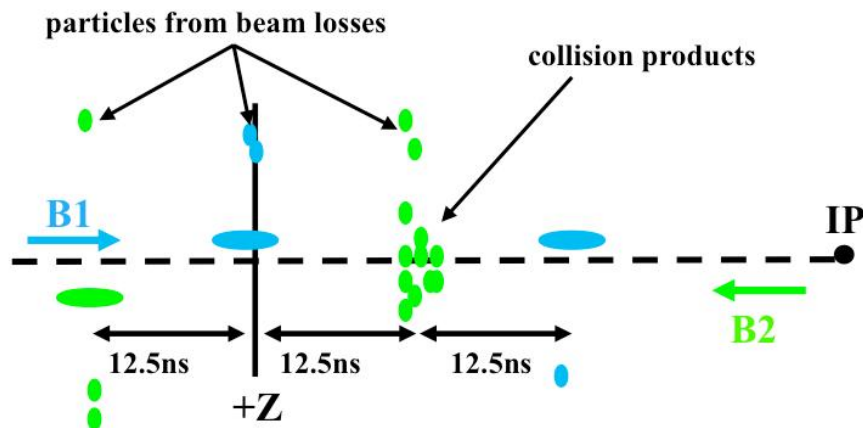


Figura 2.4: Separazione temporale tra le particelle provenienti dal punto di interazione ed i protoni del fascio, nelle Golden location

Il flusso di MIB dal tunnel e delle particelle cariche prodotte nelle collisione è stato stimato grazie a simulazioni col programma FLUKA. In figura 2.5 è mostrato il rapporto tra i due flussi stimati, a differenti distanze della beam

pipe. Alla distanza a cui si trova BHM si ha il massimo rapporto di MIB rispetto ai prodotti di collisione, ma questi ultimi risultano comunque essere 3 ordini di grandezza maggiori, ponendo notevoli vincoli alla progettazione delle unità.

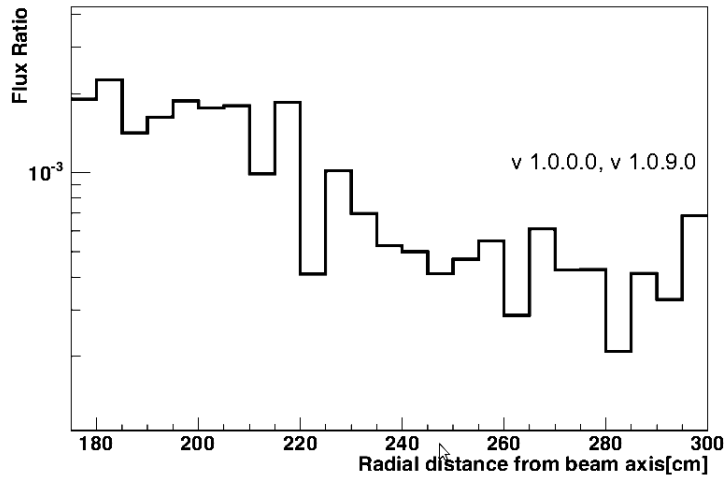


Figura 2.5: Rapporto fra il flusso di MIB ed il flusso di muoni prodotti dalle collisioni, in funzione della distanza dal fascio.

Nell'area in cui opera BHM è presente un campo magnetico residuo di CMS, pari a 18 mT, inclinato di 20° . E' indispensabile tener conto di ciò nella fase di progettazione delle unità per evitare cali di guadagno da parte dei fotomoltiplicatori.

La dose di radiazione che assorbirà BHM nel suo periodo di attività è stata stimata attraverso simulazioni FLUKA dal CMS Radiation Simulation tool [3]. In figura 2.6 sono riportate le simulazioni del flusso istantaneo di tutte le particelle durante le collisioni a 7 TeV. Nella posizione di BHM, si stima una dose minore di 20 rad per fb^{-1} . Alla fine del programma di LHC si prevede una luminosità integrata di $3000 fb^{-1}$ ed una dose assorbita minore di 50 krad. Applicando un margine di sicurezza, i componenti delle unità sono stati scelti, dopo essere stati sottoposti ad un irraggiamento di 100 krad con raggi γ da una sorgente radioattiva di ^{60}Co ed aver verificato che le proprietà non si fossero degradate eccessivamente.

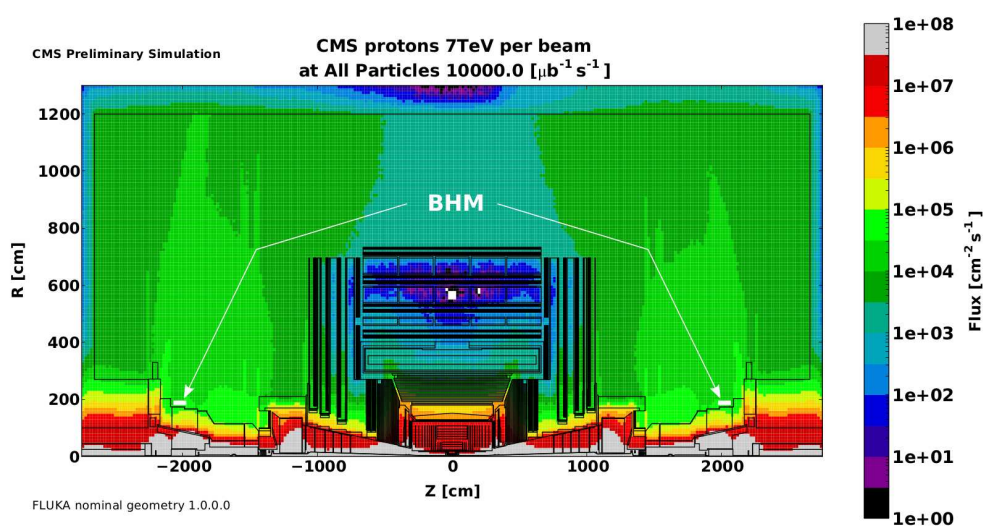


Figura 2.6: Simulazione del flusso di tutte le particelle combinate durante le collisioni a 7 TeV, nella caverna di CMS.

Una descrizione dettagliata del rivelatore BHM viene fatta nel capitolo 3.

Capitolo 3

Il rivelatore di alone del fascio

BHM

Il controllo della qualità dei fasci è un aspetto cruciale per ogni esperimento che utilizzi un collisionatore, in particolare uno come LHC, che raggiunge luminosità estremamente elevate.

CMS si è sempre dotato di un monitor adatto alla rivelazione dell'alone dei fasci. Nei primi anni di attività era stato equipaggiato con il *Beam Scintillation Counter (BSC)*, un rivelatore basato sull'utilizzo di tile in scintillatore plastico accoppiate, mediante fibre ottiche, a tubi fotomoltiplicatori. Era composto da due piani posizionati ad entrambi gli estremi di CMS, a contatto con la faccia frontale del *calorimetro adronico in avanti (HF)* a 10.86 m dal punto di interazione [8]. Durante il periodo di attività ha subito alcune modifiche per far fronte al progressivo aumento di luminosità di LHC. L'ultima versione di questo rivelatore fu installata nel marzo 2012 quando la luminosità istantanea della macchina arrivò a $6 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$. Ciascun piano era composto da 16 tile di scintillatore plastico, posizionate ad un raggio di 94 cm dalla beam pipe. Era previsto rimanere in funzione fino all'inizio del lungo shutdown del 2013, poichè verso la fine del run I il flusso di particelle provenienti dalle interazioni, avrebbe saturato i contatori. Dopo il lungo shutdown 1 (LS1) LHC avrebbe raggiunto una luminosità superiore a

$1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$, rendendo necessaria la costruzione di un nuovo rivelatore: il *Beam Halo Monitor (BHM)*.

3.1 Caratteristiche e funzionamento di BHM

Lo scopo di BHM è quello di misurare il *Machine Induced Background (MIB)* in corrispondenza di ogni *bunch* che compone il fascio di particelle accelerato da LHC come detto in precedenza. Il MIB consiste sostanzialmente in un flusso di muoni che viaggia parallelo alla beam pipe ed arriva a CMS in fase con i bunch di protoni, con una distribuzione in energia che piccata a 10 GeV. La separazione temporale fra i bunches è di 25 ns, e il numero di protoni per bunch pari $\sim 10^{11}$, con un'energia di 6.5 TeV. E' quindi necessario un sistema, con un risoluzione temporale al di sotto dei 12.5 ns, robusto e con un'elevata resistenza alle radiazioni. Come mostrato in figura 2.5, il flusso atteso è un fattore 10^{-3} rispetto a quello proveniente dalla zona di interazione. Il fondo alla misura è costituito in gran parte da particelle generate dalle interazioni nel materiale del rivelatore e dal decadimento di particelle prodotte nelle collisioni primarie, che si muovono dal punto di interazione verso l'esterno di CMS arrivando fino a BHM. Inoltre i prodotti di collisione causano l'attivazione dei materiali presenti nella caverna, che decadendo liberano neutroni e raggi γ che possono a loro volta raggiungere il sito di BHM perturbando le misure.

Il detector quindi, per poter distinguere il MIB dal fondo, oltre ad avere una buona risoluzione temporale ed una forte resistenza alla radiazioni, deve avere una risposta dipendente dalla direzione di arrivo delle particelle, essere sensibile in maniera particolare alle particelle cariche, ma non alle neutre. La maniera più semplice per realizzare un sistema con queste caratteristiche è quella di utilizzare come tecnica di rivelazione l'emissione di radiazione Cherenkov.

3.1.1 Radiazione Cherenkov

In generale, il passaggio di una particella carica attraverso un dielettrico induce una polarizzazione delle molecole del mezzo. Con la diseccitazione si ha un'emissione di fotoni, che nel mezzo si propagano a velocità c/n , dove n è l'indice di rifrazione. Se la velocità della particella è $v < c/n$, i fotoni interferiscono fra loro distruttivamente a causa della simmetria sferica del fenomeno e non si osserva una produzione di radiazione. Nel caso un cui, la particella si muova ad una velocità $v > c/n$, questa risulterà essere in anticipo sul campo di polarizzazione dando luogo ad una zona di polarizzazione netta, rompendo la simmetria sferica. Durante la depolarizzazione vengono emessi fotoni che interagiscono costruttivamente dando origine ad un cono di radiazione che prende il nome di luce Cherenkov.

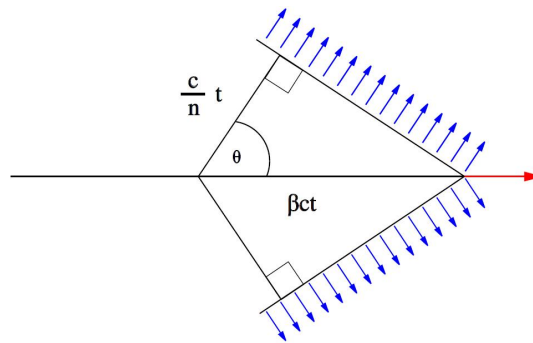


Figura 3.1: Schema di emissione di radiazione Cherenkov

I punti toccati dalla traiettoria della particella diventano così una sorgente di onde sferiche il cui involuppo costituisce un fronte d'onda che si propaga nella direzione della particella che l'ha originato. Il cono di luce ha un'apertura determinata da un angolo θ che dipende dall'indice di rifrazione del mezzo e dalla velocità di propagazione della particella: in un tempo t la particella percorre una distanza pari a: βct , mentre i fotoni una distanza ct/n . Considerando queste distanze come i lati di un triangolo, insieme al fronte d'onda, come mostrato in figura 3.1, l'angolo θ misura

$$\cos\theta = \frac{c}{\beta cn} = \frac{1}{\beta n} \quad (3.1)$$

Come si deduce dall'equazione 3.1 è richiesta alla particella un $\beta > 1/n$ affinché l'emissione di fotoni possa avvenire.

La natura di questa radiazione la rende particolarmente adatta all'utilizzo in BHM in quanto, oltre ad essere emessa in una direzione privilegiata, che è quella del moto della particella, l'emissione Cherenkov avviene istantaneamente durante la propagazione della particella nel materiale, fornendo quindi un segnale estremamente rapido. Inoltre la luce Cherenkov è prodotta massimamente per piccole lunghezze d'onda ed ha il suo massimo di emissione nel range dell'ultravioletto.

3.2 Progetto del rivelatore

BHM è composto da 40 rivelatori Cherenkov distribuiti azimutalmente alle due estremità di CMS, sui *rotating shielding*¹ e posizionati ad una distanza di 20.6 m dal punto di interazione. Le unità, venti per ogni lato, sono costituite da un cilindro di quarzo fuso sintetico di 10 cm di lunghezza e 5.1 cm di diametro accoppiato ad un fotomoltiplicatore. Nella figura 3.2 vengono mostrate 10 delle 40 unità disposte attorno ad uno *rotating shielding*. La superficie è pari a 424 cm² per lato, tale da garantire un'accettazione sufficiente a raccogliere un'adeguata statistica per il monitoraggio dei fasci.

La distribuzione normalizzata del flusso atteso di MIB, nell'area occupata del rivelatore, è mostrata in figura 3.3. Ci si aspetta un flusso piuttosto uniforme, con un conteggio di 10-20 particelle al secondo per unità, con una frequenza leggermente maggiore nel piano orizzontale. In ciascun quarto del rivelatore sono state installate dieci unità, distribuite uniformemente in ϕ , dalla cima del *rotating shielding* fino a $\sim 30^\circ$ al di sotto della beam pipe, come visibile nella figura 3.2. Non sono installate unità ad angoli inferiori poiché le particelle dell'alone sono assorbite dal terreno che costituisce la

¹ Pesanti elementi in metallo e cemento, posti ai due ingressi della caverna sperimentale di CMS, lungo la linea di fascio. Fanno parte del sistema di schermaggio del rivelatore, in particolare sono adibiti ad assorbire le particelle di alone provenienti da LHC.

base del tunnel. Le unità sono sostenute da una struttura in alluminio. In figura 3.4 sono visibili i due archi che compongono una delle due parti del rivelatore, ai quali sono fissate le unità.

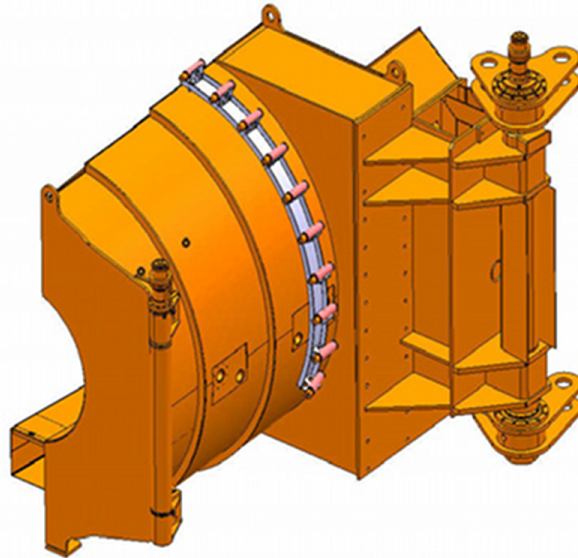


Figura 3.2: Disposizione delle unità che formano un quarto del rivelatore BHM

3.3 Progetto delle unità

Ogni unità del rivelatore, come si è detto nel paragrafo precedente, è composta da un cilindro di quarzo fuso sintetico di 10 cm di lunghezza e 5.1 cm di diametro. Ogni cristallo è accoppiato ad un fotomoltiplicatore Hamamatsu R2059 [24], caratterizzato da una risposta veloce, con un tempo di salita di 1.3 ns.

Due tipologie di quarzo sono state testate: il quarzo naturale ed il quarzo fuso sintetico. Entrambi hanno un'ottima trasparenza alla luce ultravioletta, nella zona di emissione di radiazione Cherenkov, ma il quarzo sintetico è risultato più resistente al deterioramento per radiazioni γ , come mostrato in figura 3.5 dove sono riportati i risultati dei test sul coefficiente di trasmissione

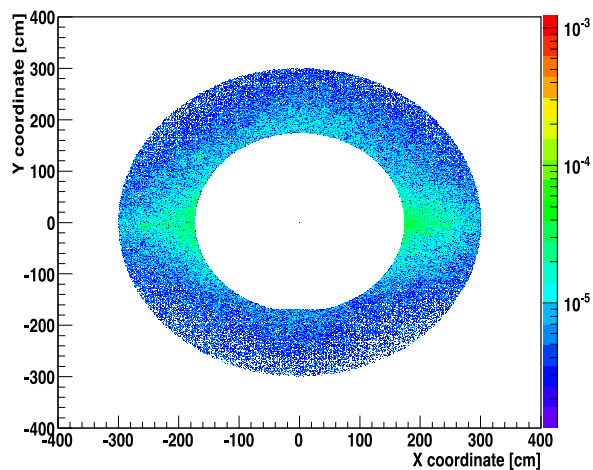


Figura 3.3: Distribuzione normalizzata del flusso di MIB nel piano XY, nell'area occupata dal rivelatore.

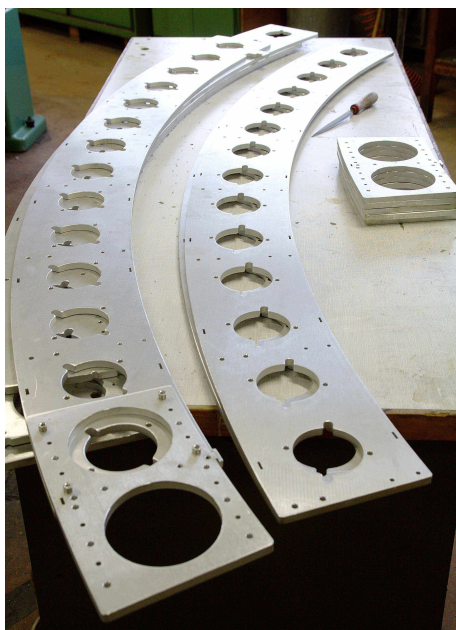


Figura 3.4: I due archi che compongono la struttura di sostegno per BHM

delle due tipologie di quarzo, prima e dopo essere stati irraggiati con una dose di 100 krad di raggi γ . Sulla base di questi risultati, è stato scelto come radiatore il quarzo sintetico SQ0, prodotto da J-plasma®[9].

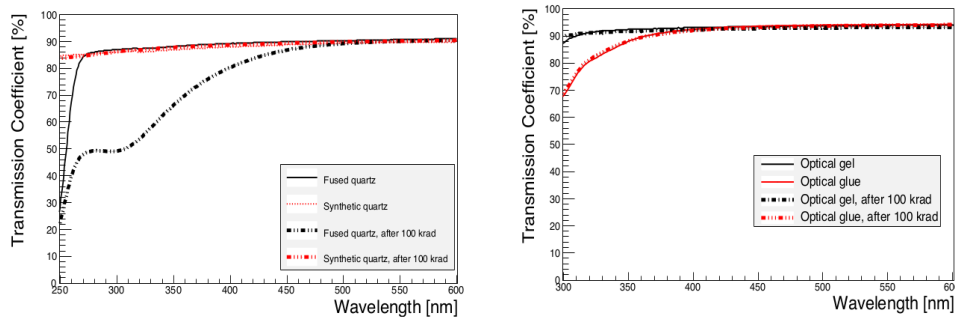


Figura 3.5: Sinistra: Coefficiente di trasmissione in funzione della lunghezza d'onda per il quarzo naturale il quarzo sintetico, prima e dopo un irraggiamento di 100 krad. Destra: Coefficiente di trasmissione in funzione della lunghezza d'onda per i materiali utilizzati nell'accoppiamento ottico, prima e dopo un irraggiamento di 100 krad

La faccia del quarzo rivolta verso il fotomoltiplicatore ha subito un particolare processo di lucidatura che garantisce un'ottima trasmissione della luce verso il fotocatodo.

Per evitare ogni possibile riflessione dovuta alla presenza di bolle d'aria tra la faccia del quarzo e la finestra del fotomoltiplicatore, è stato eseguito un accoppiamento ottico mediante l'utilizzo di un disco di silicone DC-93500®[10] di 1 mm di spessore, con indice di rifrazione simile a quello del quarzo e della finestra del PMT. Anch'esso è stato sottoposto al test per determinare il deterioramento dovuto ad una dose di 100 krad, figura 3.5 a destra, e l'effetto è risultato nullo. Per assicurare la totale assenza di aria, è stata applicata sulle due facce del disco della resina siliconica Rhodorsil® [11] prima di eseguire l'accoppiamento dei pezzi in una camera a vuoto. In figura 3.6 l'unità dopo l'accoppiamento ottico col fototubo.

Quarzo e fotomoltiplicatore costituiscono la parte attiva del rivelatore, che genera il segnale al passaggio del MIB: nella barra di quarzo avviene l'emissione di luce Cherenkov che, direttamente o dopo aver subito riflessioni, arriva al fotomoltiplicatore che la converte in un segnale elettrico. I requisiti di velocità nella produzione del segnale sono garantiti dall'istantaneità

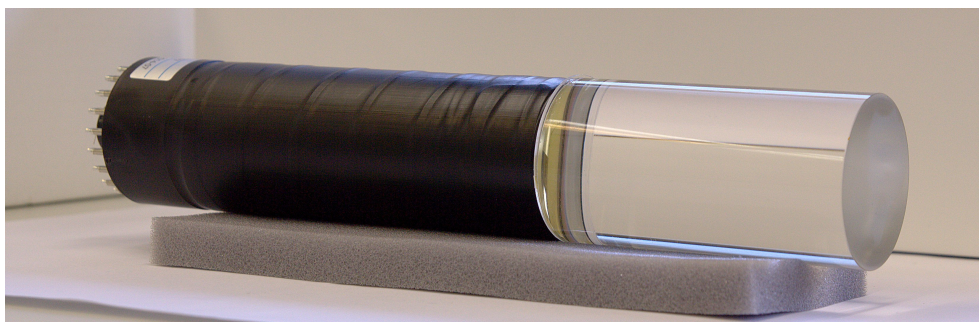


Figura 3.6: Foto dell'unità dopo l'accoppiamento ottico in camera a vuoto, fra il quarzo sintetico ed il fotomoltiplicatore.

dell'emissione Cherenkov e dal breve tempo di salita del PMT che permette di stare abbondantemente entro i 12.5 ns richiesti. La particolare configurazione scelta fa sì che il segnale prodotto dall'unità, sia dipendente dalla traiettoria delle particelle in arrivo, infatti il fotomoltiplicatore, posizionato ad una estremità del quarzo, raccoglie solo i fotoni che si propagano verso il fotocatodo, in particolare quelli prodotti dalle particelle provenienti dal fronte del rivelatore, come schematizzato in figura 3.7.

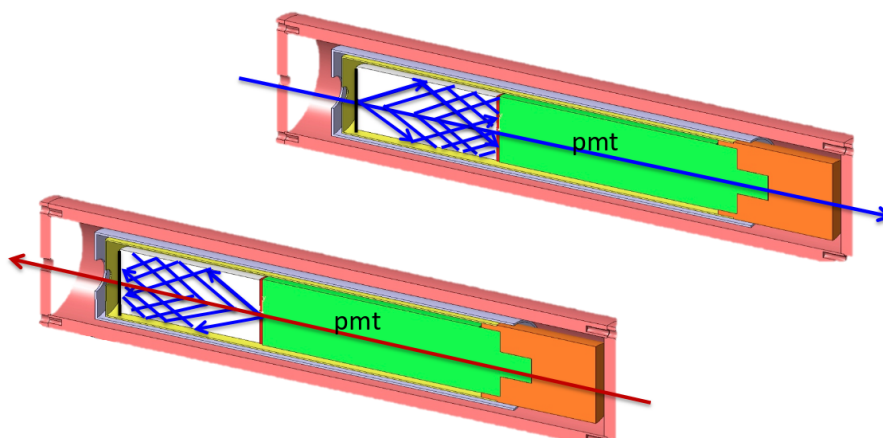


Figura 3.7: Propagazione della luce Cherenkov all'interno dell'unità. Data la direzionalità della luce Cherenkov al fotomoltiplicatore arrivano solamente i fotoni che si propagano verso il fotocatodo.

Ciò, non è però sufficiente ad abbattere adeguatamente il segnale dovuto

ai prodotti di collisione. Parte dei fotoni che viaggiano verso la faccia libera del quarzo possono subire riflessione su questa superficie e tornare verso il fotocatodo del PMT. Sebbene la frazione di fotoni riflessi sia estremamente esigua, la quantità diventa considerevole se rapportata alla molteplicità delle particelle prodotte nelle collisioni. Da simulazioni FLUKA il flusso di MIB è stimato essere 3 ordini di grandezza inferiore rispetto a quello dovuto ai prodotti di collisione (Fig:3.8).

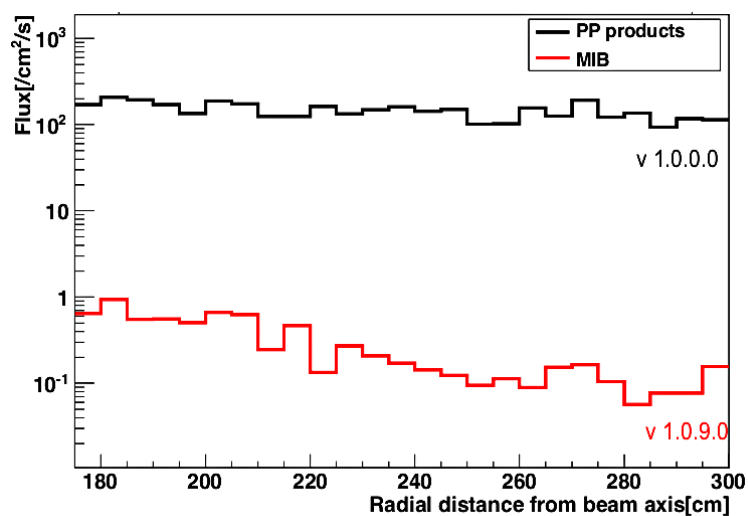


Figura 3.8: Flussi del MIB e delle particelle provenienti dalla zona di collisione, stimati alla distanza alla quale si trova BHM.

Per minimizzare le riflessioni di luce Cherenkov, la faccia libera del quarzo è stata coperta con uno spesso strato di vernice nera, che assorbe gran parte dei fotoni che vi arrivano. Il suo coefficiente di riflessione per le lunghezze d'onda interessate è meno dell'1% [12]. Un foro di 3 mm di diametro al centro della superficie è stato lasciato pulito, per permettere l'arrivo della luce inviata dal sistema di calibrazione, tramite una fibra ottica, come visibile in figura 3.9.

Il PMT è innestato su uno zoccolo da cui escono: un connettore SHV per l'alimentazione del fototubo, ed un connettore BNC da cui prelevare il segnale. All'interno si trova il partitore resistivo a cui sono connessi i pin per

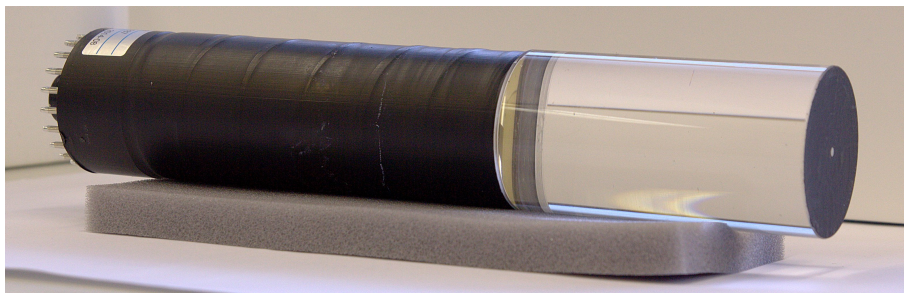


Figura 3.9: Unità dopo la verniciatura della faccia libera del cristallo di quarzo. Al centro è visibile il foro di 3 mm lasciato pulito per il sistema di calibrazione.

l'alimentazione dei dinodi. Anche lo zoccolo è stato prodotto dalla Hamamatsu con la specifica di sostituire le parti isolanti in Teflon con polietilene, più resistente alle radiazioni.

3.3.1 Schermatura del campo magnetico

Come si è accennato precedentemente, nella posizione in cui è installato BHM è presente un campo magnetico residuo, prodotto dal solenoide interno a CMS che genera un campo magnetico di 4 T. Le unità che costituiscono BHM sono soggette ad un campo magnetico residuo minore di 20 mT, leggermente variabile con la posizione nella coordinata ϕ , che forma un angolo tra i 15° ed i 19° con l'asse del fascio. I fotomoltiplicatori però, operano efficientemente con un campo magnetico inferiore a 0.01 mT, per questo motivo ogni unità è stata provvista di un efficace schermo.

Sono state sottoposte a test tre diverse configurazioni, simili nei materiali usati: tutte utilizzavano un sistema con tre cilindri di materiali metallici, di cui due in mu-metal ed il più esterno in acciaio dolce, inseriti l'uno nell'altro, con all'interno l'unità. Ciò che variava erano le lunghezze dei cilindri e la presenza o meno di tappi all'estremità dalla parte del quarzo. Dai test eseguiti nel novembre 2014, durante le prove di accensione del solenoide di CMS, è risultato che i tre prototipi realizzati avessero prestazioni molto simili fino

ad un valore del campo magnetico di 3 T, mentre al valore operativo di 3.8 T uno ha registrato una perdita di guadagno significativamente minore degli altri.

La configurazione finale scelta è illustrata in figura 3.10. L'unità è inserita in un primo cilindro di Permalloy di spessore 0.8 mm, nero per evitare eventuali riflessioni di luce, fornito anch'esso dalla Hamamatsu. Ha una lunghezza di 280 mm ed un diametro interno di 60 mm, è chiuso dal lato del quarzo, dove è stato praticato un foro di 3 mm per il passaggio della luce portata dal sistema di calibrazione, mentre è aperto sull'altro lato, dal quale è inserito a battuta e fissato con tre viti, sullo zoccolo del PMT.

Il cilindro intermedio è in mu-metal, prodotto nei laboratori del CERN, è spesso 1.5 mm con un diametro interno di 67 mm. Copre totalmente il cilindro interno a cui è fissato mediante opportuni spaziatori in polietilene che lo tengono in posizione. Anche sulla faccia di questo cilindro è presente un buco da cui esce una ferrula, fissata sul disco di polietilene che spazia questo dal metallo più interno, a cui avvitare il connettore che porta la fibra ottica del sistema di calibrazione.

L'ultimo strato è un tubo in acciaio dolce, che contiene completamente l'unità. Ha uno spessore di 10 mm, una lunghezza di 400 mm, un diametro interno di 80 mm ed uno esterno di 100 mm. E' chiuso ai lati da due dischi in ferro dolce (ARMCO), spessi 8 mm fissati al tubo da quattro viti. Ha subito esternamente un processo di brunitura come protezione dagli agenti ossidanti, è però stato necessario rimuovere un sottile strato di materiale nelle parti di contatto fra il tubo ed i tappi, per garantire un ottimo contatto metallico ed evitare perdite di efficienza nello schermaggio. Il disco frontale ha un'apertura centrale nella quale inserire la fibra ottica del sistema di calibrazione, mentre il disco posteriore ha due fori per la connessione dei cavi di alimentazione e di segnale del PMT.

Ogni materiale ha una diversa permeabilità magnetica ed ogni spessore è stato ottimizzato al fine di assorbire massimamente le linee del campo magnetico evitando però la saturazione del materiale. Mentre l'acciaio, che

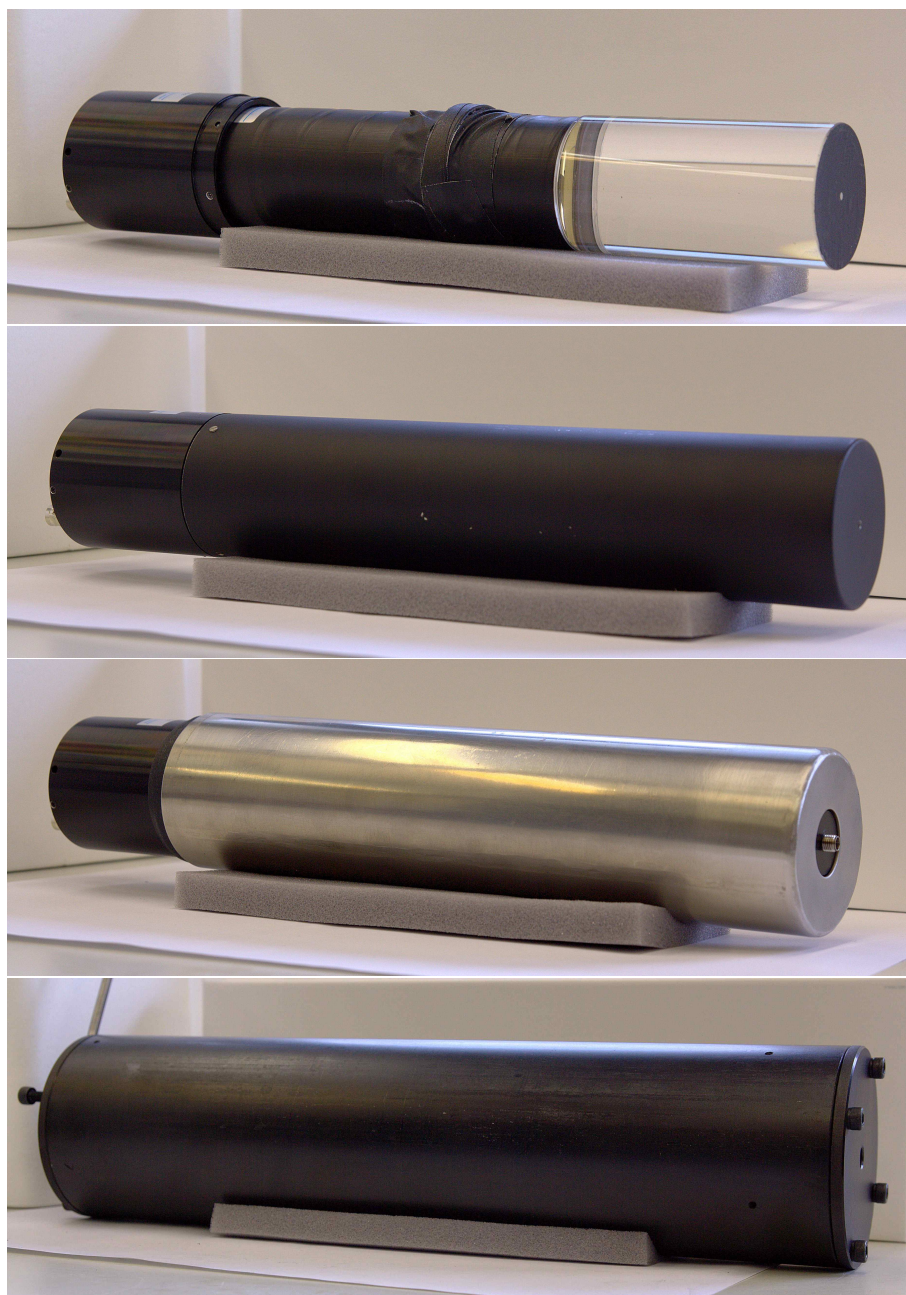


Figura 3.10: Nelle figure sono mostrati i cilindri usati per schermare il campo magnetico. Dall'alto: l'unità con fotomoltiplicatore e quarzo accoppiati inserita nello zoccolo; l'unità con il primo strato: un sottile cilindro di Permalloy; il secondo cilindro di mu-metal; l'ultimo cilindro in acciaio dolce in cui l'unità è inserita completamente.

costituisce il livello più esterno dello schermo, non ha un'altissima permeabilità magnetica ($\sim 10^{-5}\text{H/m}$), ma riesce a sopportare alti campi magnetici senza saturare, i due strati interni hanno una permeabilità magnetica migliore, ($\sim 10^{-2}\text{H/m}$) ma saturano già con campi magnetici di pochi mT per cui, senza uno schermo esterno, non sarebbero efficaci. Con questa configurazione, da simulazioni effettuate con il pacchetto Opera [13], si ottengono valori di campo magnetico al fotocatodo inferiori a 0.001 mT.

Oltre a schermare una parte molto consistente di campo magnetico, il cilindro di acciaio fornisce all'apparato una protezione contro le particelle emesse dai materiali attivati e dai decadimenti dei prodotti di collisione. Sono per lo più elettroni e positroni di bassa energia ($< 1\text{ GeV}$), provenienti da ogni direzione a causa del *multiple scattering* che, se arrivassero sul quarzo, potrebbero produrre un segnale di fondo. Il 97% di quelli che possono arrivare al rivelatore nella stessa direzione del MIB, hanno un'energia inferiore ai 15 MeV e sono quasi totalmente assorbiti dallo spesso strato di metallo.

3.4 Sistema di calibrazione

BHM è stato dotato di un sistema di calibrazione per verificare continuamente le prestazioni di ciascuna unità ed un'eventuale degradazione dovuta alla dose di radiazione assorbita o all'invecchiamento delle componenti. Il sistema si basa sull'analisi del segnale prodotto dalle unità all'invio di luce pulsata da parte di un LED e inviata tramite fibre ottiche. Come mostrato in figura 3.11, si compone di tre parti principali: una scheda elettronica sulla quale sono montati un LED con emissione nell'UV, un fotomoltiplicatore al silicio (SiPM) ed un circuito impulsatore; due fibre ottiche principali per il trasporto della luce; un sistema a fibre ottiche di distribuzione della luce alle unità. L'impulsatore veloce è usato per alimentare il LED affinché generi un impulso di luce estremamente breve (pochi nanosecondi), trasportato, mediante una fibra ottica principale, al sistema di distribuzione. Sono state scelte fibre ottiche in quarzo fuso sintetico poiché hanno un buon coefficiente

di trasmissione nell'ultravioletto ed un'alta tolleranza alle radiazioni.

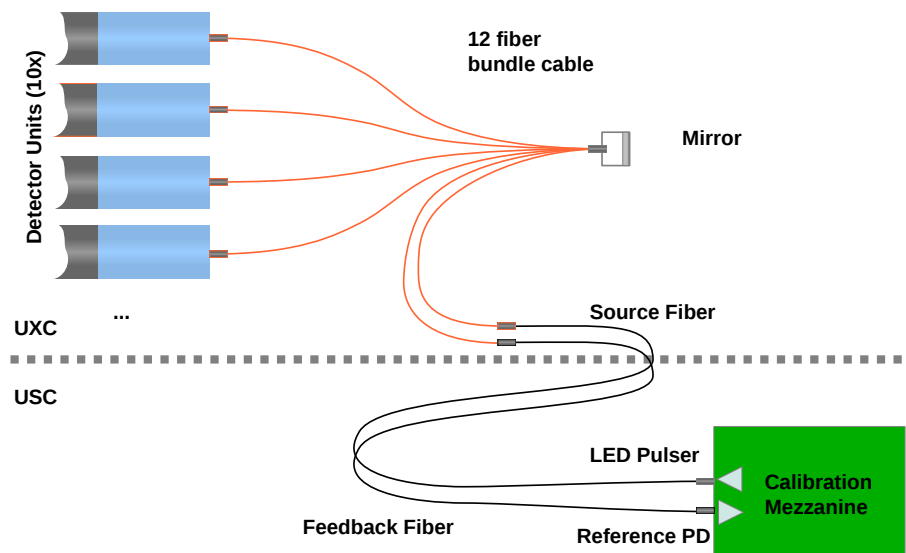


Figura 3.11: Schema del sistema di calibrazione utilizzato per BHM.

Tutte le fibre ottiche utilizzate nel sistema sono Ceramoptec Optran[®] UV [14], hanno un *core* in ossido di silicio di $200\ \mu\text{m}$ di diametro, un *cladding* in quarzo drogato con fluoro di $220\ \mu\text{m}$ di diametro ed un sottile rivestimento esterno in Poliammide, con il quale raggiungono un diametro complessivo di $245\ \mu\text{m}$.

Il sistema di distribuzione della luce è costituito da 12 fibre ottiche raccolte ad una delle due estremità ed inserite all'interno di una ferrula comune. Le fibre sono fissate all'interno della ferrula con una resina (EpoTek[®]). In figura 3.12 sono mostrate le posizioni delle fibre (punti scuri) all'interno della sede. La particolare configurazione deriva dall'esigenza di avere la massima uniformità nella distribuzione delle fibre, lasciando la minor quantità di spazio vuoto possibile tra l'una e l'altra. Attraverso un connettore la ferrula è fissata ad uno specchio cosicché la faccia delle fibre risulta trovarsi proprio di fronte ad esso. In figura 3.13 a sinistra si vedono le fibre arrivare nella ferrula e la connessione con la scatola che contiene lo specchio; a destra lo specchio all'interno della sua sede. Le fibre, lunghe $250\ \text{cm}$, sono poi in-

serite individualmente all'interno di un rivestimento in metallo corrugato e connettorizzate singolarmente all'estremità libera.

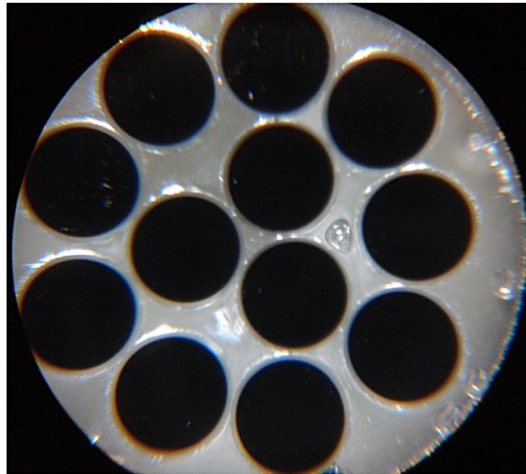


Figura 3.12: Facce delle fibre ottiche (punti scuri) viste dal connettore per il fissaggio allo specchio. Foto fatta attraverso un microscopio.

La fibra principale collegata al LED, è connessa con una delle 12 fibre del sistema di distribuzione. Si è preferito utilizzare una delle fibre centrali, per garantire una miglior uniformità nella riflessione della luce. La luce arriva quindi allo specchio dove viene riflessa verso le altre undici fibre. Dieci di queste vanno alle unità. Ogni sistema di distribuzione chiamato da noi octopus, può quindi servire un quarto di BHM. La luce del LED arriva al fotocatodo grazie al foro lasciato sulla verniciatura nera della faccia del quarzo. L'undicesima è connessa ad una fibra principale di ritorno che arriva al SiPM sulla mezzanine, così da avere una misura di riferimento della luce prodotta dal LED.

Il rapporto fra il segnale prodotto da ogni unità ed il segnale del SiPM di riferimento viene continuamente monitorato. La misura può essere effettuata prima di ogni collisione fra i pacchetti, per questo motivo il sistema deve essere estremamente veloce.

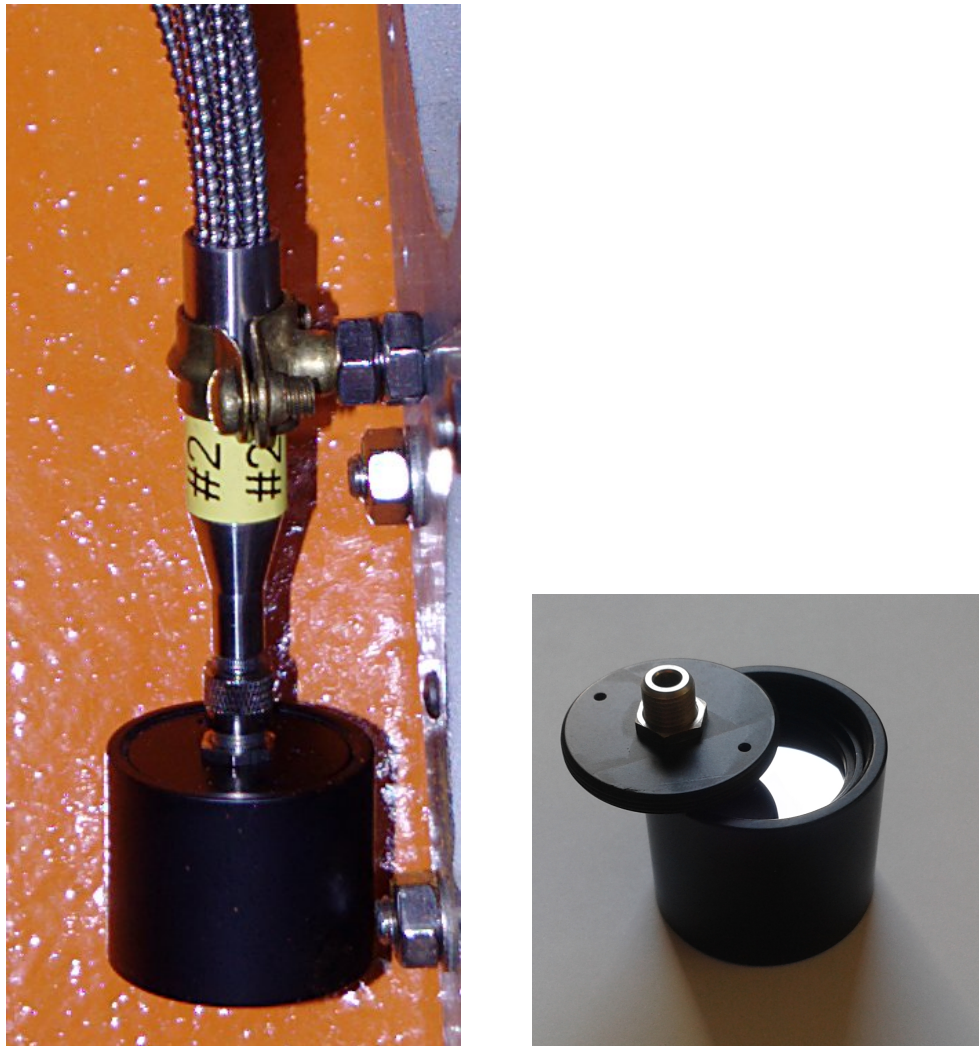


Figura 3.13: Specchio usato nel sistema di calibrazione. A sinistra è mostrato lo specchio all'interno del suo contenitore, sul quale sono connesse le fibre ottiche. A destra il contenitore è aperto ed è visibile lo specchio all'interno.

3.4.1 Sistema di distribuzione

Un aspetto molto delicato riguarda la distribuzione della luce del LED attraverso l'octopus. A causa di effetti geometrici la luce non è distribuita in maniera uniforme a tutte le fibre. Questo è causato da diversi fattori fra cui si possono annoverare eventuali inclinazioni dello specchio rispetto all'asse

delle fibre, possibili differenze di lucidatura delle facce delle fibre, ma sicuramente il più importante deriva dalla disposizione delle fibre all'interno della ferrula, come visibile in figura: 3.12). Non essendo possibile individuare una fibra centrale rispetto alle altre, il cono di luce riflesso non può essere totalmente simmetrico, ma sarà sempre leggermente spostato rispetto all'asse. E' inevitabile che a ciascuna fibra arrivi una differente quantità di luce. Un importante parametro da conoscere è quindi il fattore di frazionamento della luce che arriva allo specchio, per poter stimare la quantità di fotoni che arriva effettivamente a ciascuna unità per ogni impulso. E' stato perciò necessario eseguire la caratterizzazione di ciascun sistema di calibrazione.

3.5 Caratterizzazione del sistema di calibrazione

Per le misure di caratterizzazione, oltre al sistema di distribuzione *octopus*, sono stati utilizzati un LED UVTOP335 con emissione nell'ultravioletto, un generatore di impulsi Agilent 81110A ed un fotomoltiplicatore. Il segnale è stato campionato con un Digitizer CAEN mod. V1721. Una delle fibre centrali (etichettata come **C1**) è stata connessa al LED ed utilizzata come sorgente. Il LED è stato alimentato con il generatore di impulsi, impostato per generare un impulso largo 500 ns, con un leading edge di 50 ns ed un periodo di 50 ms, un livello alto a 4.7 V e basso di -100 mV. E' stato scelto un impulso abbastanza largo per poter avere un buon numero di sample su cui mediare in fase di analisi. L'impulsatore fornisce anche un segnale TTL usato come trigger per il Digitizer. Le altre undici fibre sono state connesse una ad una al fotomoltiplicatore, alimentato a 2000 V e si sono raccolti 1000 eventi per ciascuna.

In fase di analisi si sono calcolate le medie dei valori di carica raccolti per ciascuna fibra sui 1000 eventi, successivamente si è calcolata la carica misurata in media su tutte le fibre e si è normalizzata ciascuna fibra per il valor medio trovato, ottenendo così i coefficienti di trasmissione per ciascuna

Fibra	Segnale mediato (nC)	coefficiente di trasmissione
C2	-14.0 ± 0.3	0.62
C3	-27.4 ± 0.4	1.23
F4	-28.9 ± 0.4	1.30
F5	-29.3 ± 0.5	1.32
F6	-20.3 ± 0.4	0.91
F7	-21.0 ± 0.4	0.94
F8	-23.1 ± 0.4	1.04
F9	-28.7 ± 0.5	1.29
F10	-11.2 ± 0.3	0.50
F11	-12.6 ± 0.3	0.57
F12	-28.0 ± 0.4	1.26
Media	-22.2	1
RMS	7.0	0.31

Tabella 3.1: Misure effettuate sulle fibre ottiche

fibra. I risultati sono riportati in tabella 3.1. Dai risultati si nota che le differenze fra la luce portata dalle diverse fibre non sono affatto trascurabili, con una deviazione standard maggiore del 30%.

Capitolo 4

Test di direzionalità

Un'importante parte del mio lavoro si è svolta, durante la progettazione e la realizzazione dell'apparato utilizzato per i test di direzionalità sulle unità di BHM e successivamente, nella loro realizzazione. Come illustrato nel capitolo precedente, è indispensabile che BHM dia una risposta fortemente dipendente dalla direzione di arrivo delle particelle incidenti, per evitare di conteggiare nel MIB, anche particelle derivanti dai decadimenti dei prodotti di collisione. Prevedendo un flusso di particelle *backward*, cioè provenienti dalla parte posteriore delle unità, di tre ordini di grandezza superiore a quello del MIB, è richiesto un forte abbattimento del segnale da essi prodotto.

Come detto precedentemente, la soluzione adottata è stata quella di coprire la faccia del quarzo non accoppiata al fotomoltiplicatore con uno spesso strato di vernice nera. Al fine di verificare l'adeguatezza della soluzione implementata sono state compiute diverse prove.

Un test preliminare, con un prototipo non ancora definitivo, fu eseguito nel 2012 sulla beam line T9 al protosincrotrone del CERN, dando risultati incoraggianti. Un secondo test si svolse all'inizio del 2014 presso i laboratori di DESY ad Amburgo. Qui fu utilizzato un modello con PMT e radiatore Cherenkov corrispondenti a quelli della configurazione finale. I test confermarono la possibilità di abbattere il segnale prodotto da particelle backward almeno di un fattore 10^3 adottando una soglia adeguata per l'ampiezza dei

segnali raccolti. In figura 4.1 sono riportati i risultati dei test sia in scala lineare (in alto) dove è ben apprezzabile la separazione tra i due segnali, che in scala logaritmica (in basso) dove sono visibili per intero entrambe le distribuzioni. In entrambi i grafici è inoltre tracciato, con una linea blu tratteggiata, il segnale di backward incrementato di un fattore 1000.

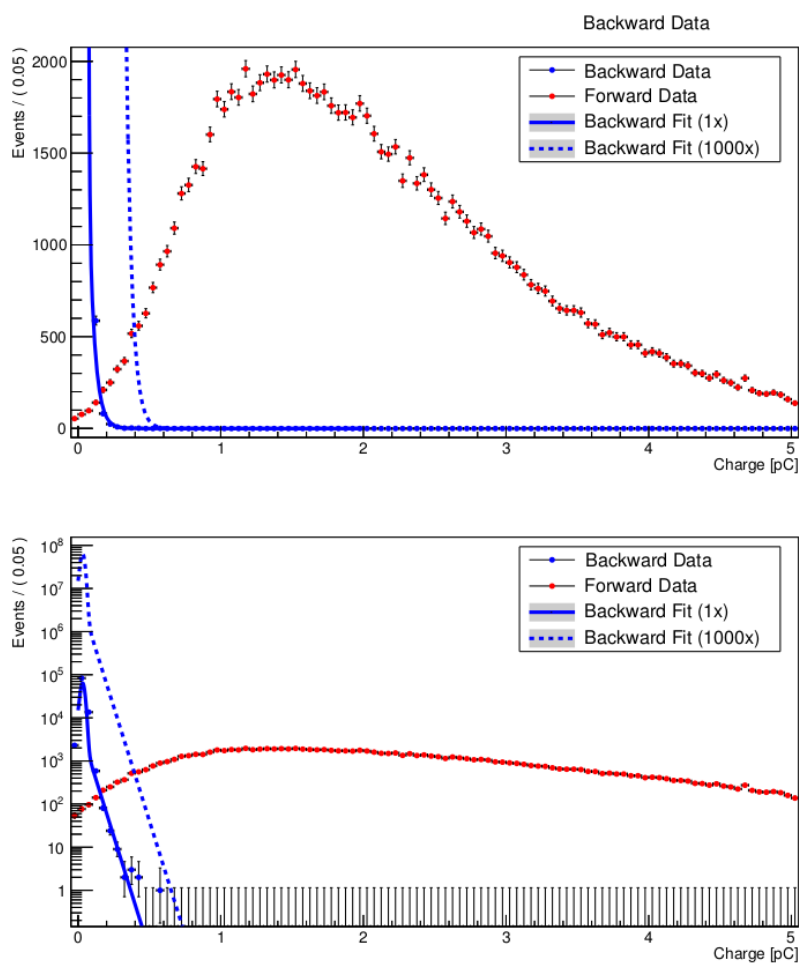


Figura 4.1: Risultati dei test di direzionalità eseguiti al test beam del 2014. In alto il grafico in scala lineare, evidenzia la distanza tra i segnali prodotti da particelle forward (rosso) ed i segnali stimati per le particelle provenienti dal punto di interazione. In basso gli stessi risultati, ma in scala logaritmica.

Questo test non può però essere considerato finale, in quanto il flusso

di particelle era costituito per la maggior parte da elettroni, a differenza del MIB, che è composto quasi esclusivamente da muoni. E' stato quindi necessario progettare un nuovo test per confermare definitivamente la bontà di tale soluzione, anche in questa situazione. Si è optato per utilizzare come apparato di test un telescopio a raggi cosmici.

4.1 Costruzione del telescopio per raggi cosmici

Il telescopio utilizzato nei test, è composto da *tile* di scintillatore plastico, accoppiate a SiPM grazie ad una fibra ottica WLS. La fibra raccoglie i fotoni di scintillazione prodotti nella tile al passaggio della particella e li convoglia direttamente sulla parte sensibile del SiPM, che converte il segnale luminoso in un segnale elettrico. I SiPM sono alimentati da un dispositivo elettronico (chiamato VersaBoard) che si occupa anche di gestire l'acquisizione, raccogliere e trasmettere a PC i dati prodotti, del quale si parlerà nella sezione successiva.

Lo scopo del telescopio è quello di produrre un segnale di trigger al passaggio di un muone cosmico all'interno della barra di quarzo che compone l'unità: un segnale di coincidenza dalle tiles di scintillatore viene utilizzato per generare il trigger e registrare l'evento. E' importante curare la loro geometria sia per ottenere la miglior efficienza possibile, sia per evitare di includere fra gli eventi, segnali in cui il muone ha in realtà evitato, anche solo in parte, il cristallo. La misura deve dare un responso riguardo alla validità della configurazione scelta, è necessario perciò disporre dell'unità assemblata almeno fino al primo tubo di mu-metal. Non è quindi possibile tenere la barra di quarzo tra due tile di scintillatore così da avere una piena efficienza di selezione degli eventi. Un'unità composta dal fotomoltiplicatore accoppiato alla barra di quarzo ed innestato sullo zoccolo di alimentazione, inserita nel primo cilindro di mu-metal (lungo 280 mm), ha una lunghezza complessiva di circa 400 mm. Considerando anche la necessità di avere dello spazio per

cavi e connettori di alta tensione e segnale, si arriva ad un'estensione di 50 cm.

Per ovviare a questo problema si sono vagliate diverse configurazioni. La prima soluzione provata è stata quella di utilizzare due tile di scintillatore quadrate, di lato 3.5 cm, completamente inscritte nella faccia del cilindro di quarzo, così da avere la certezza che ogni muone triggerato vi sia passato attraverso. La situazione è quella mostrata in figura 4.2: per una distanza tra gli scintillatori tale da comprendere tutta l'unità l'angolo solido compreso è piccolo e l'accettanza del sistema limitata. Effettuando delle prove per

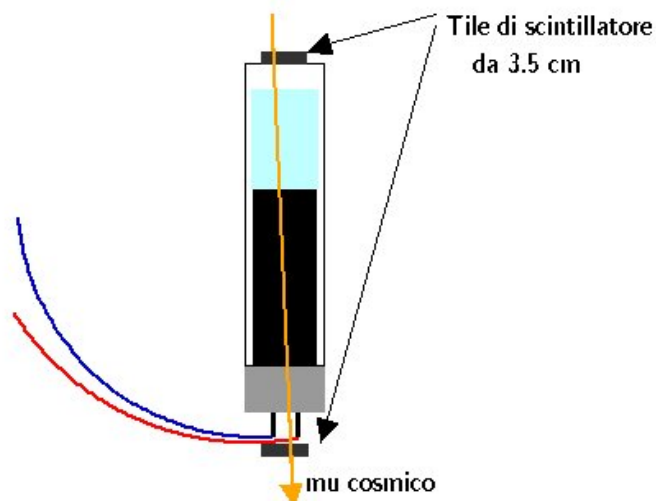


Figura 4.2: Prima configurazione testata come trigger di raggi cosmici.

verificare la frequenza di arrivo dei raggi cosmici si sono ottenuti i seguenti risultati:

Distanza (cm)	conteggi (Hz)
a contatto	0.17
10	0.024
12.5	0.0125
35	0.0015

Questa soluzione non poteva essere intrapresa in quanto, già ad una distanza di 35 cm il numero di conteggi è estremamente basso ed i tempi per una presa dati che accumuli una statistica adeguata, sarebbero stati esageratamente lunghi. La soluzione trovata è stata quella di aumentare l'accettanza del sistema ingrandendo le dimensioni della tile posizionata al di sotto dei connettori. In questa maniera sono conteggiati non solo i muoni che attraversano l'unità per tutta la sua lunghezza, ma anche quelli che escono lateralmente, come mostrato in figura 4.3. All'aumentare delle dimensioni della tile il conteggio cresce, ma vengono inclusi muoni con angoli di arrivo rispetto alla verticale sempre più grandi. Si osservano perciò segnali sempre più piccoli dovuti al fatto che la porzione di quarzo attraversata diminuisce fino ad annullarsi. Il compromesso per avere un rate accettabile e degli eventi che diano un segnale apprezzabile è stato trovato con l'utilizzo di una tile quadrata di 10 cm di lato. Il rate ottenuto in una presa dati con raggi cosmici prendendo un

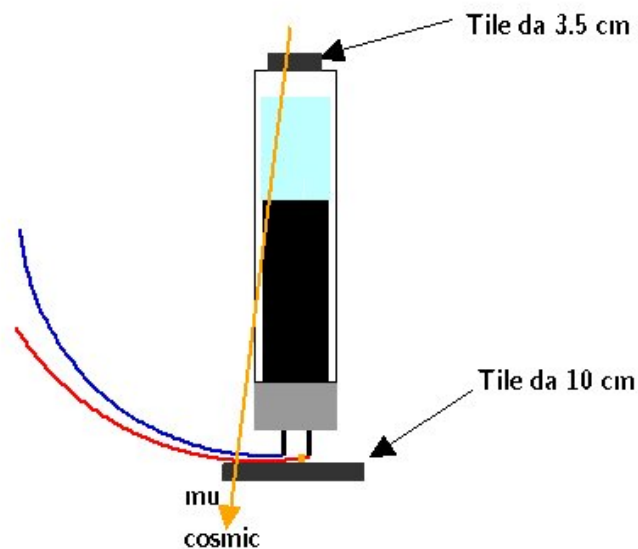


Figura 4.3: Setup definitivo utilizzato come trigger nei test della unità di BHM

segnale di coincidenza fra la tile da 3.5 cm di lato e quella da 10 cm ad una distanza di 45 cm è di 0.009 Hz.

Su questa configurazione è stato effettuato un test al fine di verificare che i muoni così triggerati siano realmente passati all'interno del quarzo. Si è inserita tra le due tile per le coincidenze, un'ulteriore tile da 3.5 cm ad una distanza di 10 cm dalla superiore, a simulare la presenza del quarzo, come mostrato in figura 4.4. Ci siamo messi in una condizione peggiore di quella

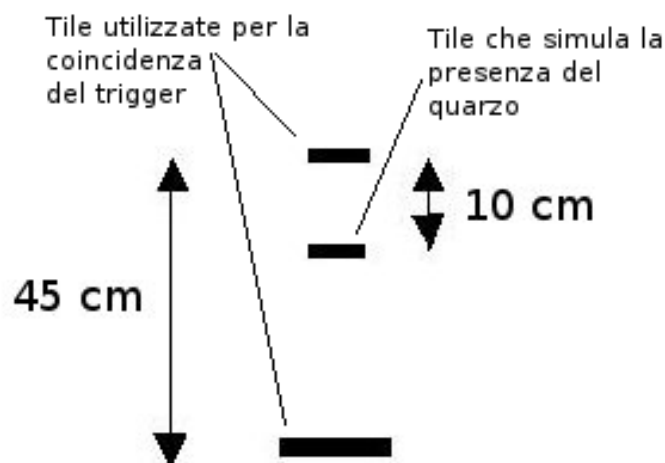


Figura 4.4: Setup del test per la verifica della bontà del sistema di trigger implementato

che avremmo avuto nel test reale in quanto il quarzo ha, sia una superficie maggiore della tile (5 cm di diametro contro 3.5 cm di lato), sia un volume molto maggiore avendo un'altezza di 10 cm contro lo spessore di 1 cm della tile. Si è trovato che $\frac{1}{3}$ degli eventi triggerati ha dato segnale anche sulla tile centrale, ottenendo un rate di eventi buoni di 0.003 Hz. Ritenendo il risultato ottenuto soddisfacente, si è realizzata questa configurazione.

4.2 Sistema di controllo ed acquisizione: VersaBoard

Una parte estremamente importante nell'apparato utilizzato nei test con i raggi cosmici è rappresentata dalla scheda di controllo ed acquisizione dati, chiamata VersaBoard. Questa scheda è stata progettata, assemblata e programmata da un team dell'INFN di Bologna. La sua peculiarità è quella di racchiudere tutte le funzionalità essenziali per operare fino ad 8 SiPM, evitando la necessità di utilizzare numerosi strumenti specifici, quali alimentatori, digitizer, logica NIM per trigger, moduli di acquisizione VME ecc.

E' infatti in grado di generare le tensioni di alimentazioni dei SiPM, elaborare i segnali in uscita dai SiPM amplificando il segnale analogico e convertendolo in un segnale digitale, generare segnali di trigger utili sia in fase di acquisizione, che per eventuali apparecchiature esterne ed infine trasmettere i dati acquisiti al PC per poter essere archiviati in file. Può inoltre monitorare la temperatura dei SiPM ed eseguirne la calibrazione attraverso il controllo di un LED. In figura 4.5 è apprezzabile la semplicità del sistema completo, connesso al PC durante un test di prova con una barra di scintillatore.

Il sistema, mostrato in figura 4.6, è composto internamente da una scheda Xilinx SP605 equipaggiata con una FPGA (Field Programmable Gate Array) Spartan 6, una scheda Mezzanine progettata presso la sezione INFN di Bologna nella quale sono montati un ADC Texas Instrument ADS5282, i generatori di tensione per la polarizzazione dei SiPM, i sensori di temperatura ed i connettori per i trigger interni ed esterni. Il front-end è costituito da schedine rimovibili, 8 al massimo, ognuna delle quali gestisce un SiPM. Su ciascuna schedina sono posizionati 2 connettori MMCX (micro-miniature coaxial) di cui uno porta l'alimentazione al SiPM e l'altro ne raccoglie il segnale in uscita.

Sul front end della scheda comincia il processamento dei segnali: un amplificatore di tipo current feedback costituisce il primo stadio di amplificazione. Successivamente il segnale segue un percorso che permette di analizzarne

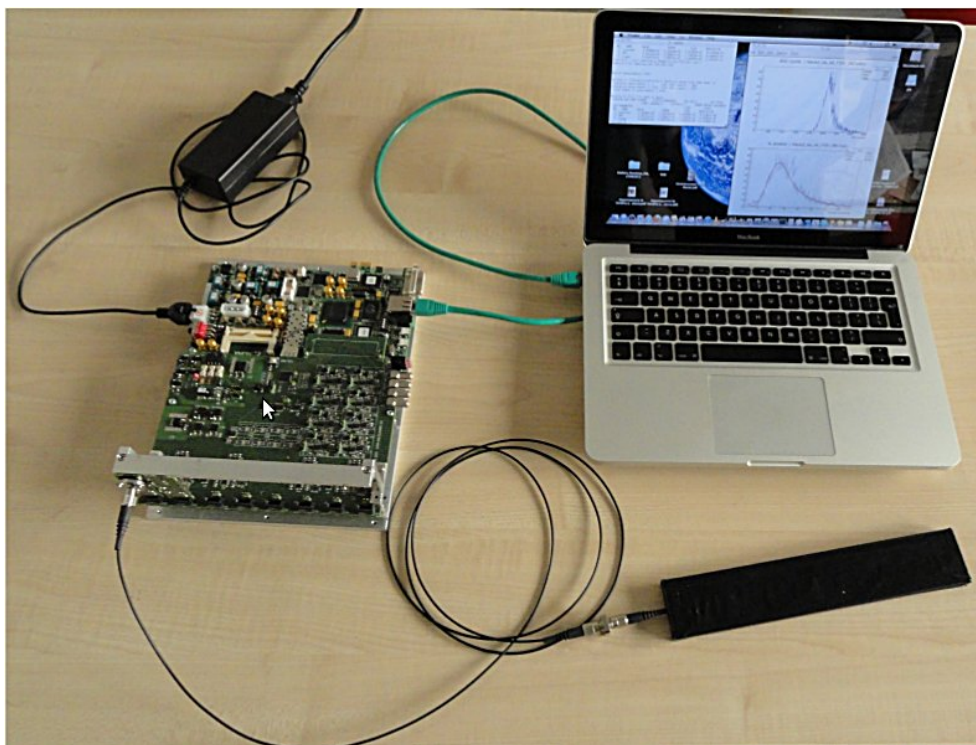


Figura 4.5: Sistema di acquisizione completo durante un test di prova, in cui raccoglie i segnali da uno scintillatore.

la carica, quindi il numero di pixel che si sono accesi nei SiPM. E' realizzato con un amplificatore operazionale di tipo voltage feedback a cui è posto di seguito uno stadio per rendere differenziale, il segnale unipolare, adatto ad essere inviato all'ADC per la conversione in un segnale digitale.

L'ADC utilizzato ha 8 canali, i segnali provenienti dalle 8 schede sono processati contemporaneamente e continuamente. Attraverso una linea di tipo LVDS (Low Voltage Differential Signal) sono trasmessi in maniera seriale al FPGA che si occupa di generare i segnali di trigger globali a partire dai segnali di trigger dei singoli canali o da segnali esterni; ricevere, memorizzare e trasmettere su una linea Gigabit Ethernet verso PC, i dati provenienti dall'ADC; ricevere ed eseguire comandi di controllo e configurazione provenienti da PC attraverso la stessa linea Ethernet e gli stessi protocolli utilizzati per l'invio dei dati.

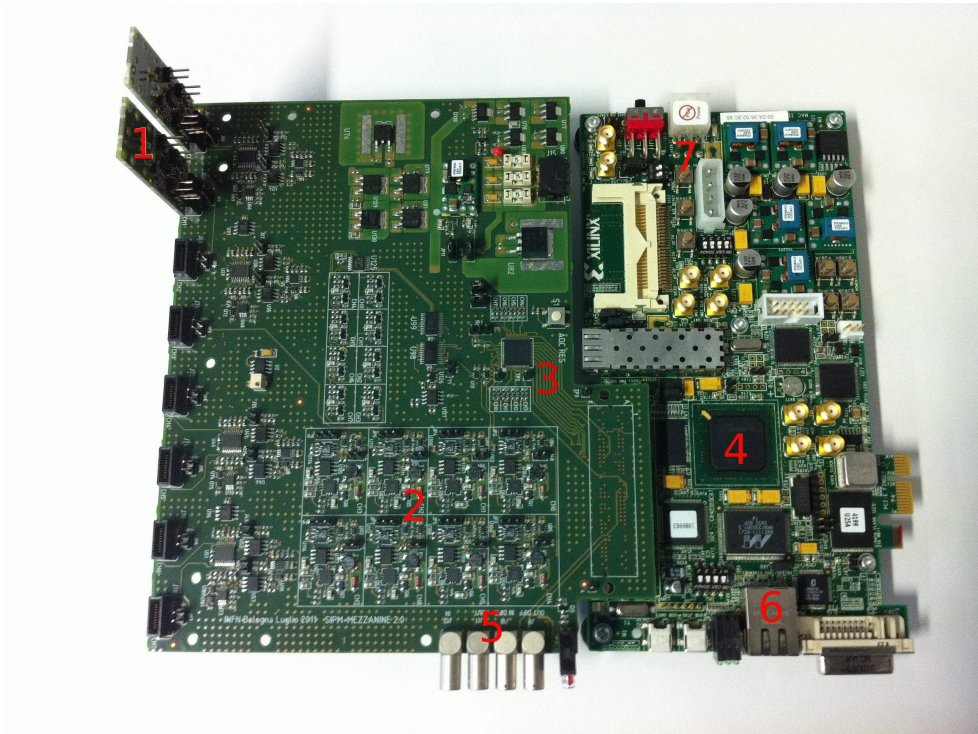


Figura 4.6: Componenti che formano il sistema di acquisizione: 1) Schedini di front-end; 2)Generatori di tensione di polarizzazione; 3)ADC di campionamento; 4)FPGA; 5)connettori di trigger ausiliari; 6) Connettore ethernet; Alimentazione.

4.2.1 Software per il controllo e l'acquisizione da scheda

Per controllare la scheda ho sviluppato un software su piattaforma Lab-View che consente l'invio e la ricezione di dati da PC, per impostare i parametri di acquisizione e gestire il flusso di dati diretto al computer.

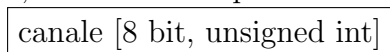
Protocollo per la trasmissione dati

La trasmissione dati avviene mediante cavo ethernet ed interfaccia di tipo Gigabit Ethernet (1000Base-T), ciò rende il sistema portatile e facilmente fruibile da qualsiasi computer. La comunicazione si avvale dei protocolli di

rete User Datagram Protocol (UDP) ed Internet Protocol version 4 (IPv4), inoltre è stato progettato un apposito protocollo di più alto livello, per la trasmissione di dati e comandi. Questo protocollo si basa sullo scambio di *blocchi*. Ciascun blocco è identificato dalla sua lunghezza e dal tipo, è composto da tre campi:



Il campo lunghezza è espresso come un intero senza segno e si riferisce all'intero blocco. Il tipo individua la funzione del blocco trasferito: viene utilizzato il codice 0x44 (ASCII 'D') quando si trasmette un dato, mentre per un blocco messaggio il codice usato è 0x4D (ASCII 'M'). A seconda della tipologia di blocco anche il corpo sarà costruito in maniera differente. Per un blocco dato, la struttura è piuttosto semplice:



Il blocco messaggio ha una struttura più complessa. Un primo campo da 8 bit differenzia i comandi inviati dal software dalle risposte ricevute dal firmware: '0x20' corrisponde ad una richiesta di lettura, mentre un '0x21' ad una di scrittura. Segue un campo da 32 bit usato come numero di identificazione del blocco che permette di controllare l'effettiva esecuzione del comando: il firmware infatti invia una risposta per ogni comando portato a termine, identificata dal numero del blocco inviato. Per i comandi è presente un ulteriore campo da 32 bit che identifica l'indirizzo del registro sul quale scrivere i dati trasmessi Per ultimo un campo da 64 bit contiene i dati.

Software di gestione della scheda

Per poter interfacciare il software con la scheda, è quindi stato necessario costruire delle funzioni in LabView che rispettino questo protocollo .

La prima funzione creata è quella che permette la connessione fra PC e dispositivo, mostrata in figura 4.7. A tal fine viene utilizzata la funzione LabView nativa che esegue l'apertura delle comunicazioni su protocollo UDP. Essa riceve come parametri in entrata la porta su cui aprire la comunicazione e l'indirizzo IP della scheda di rete utilizzata. Viene creato inoltre un tipo di dato che sarà poi trasmesso attraverso tutte le funzioni che si susseguono ed include l'indirizzo IP della scheda, il numero della porta utilizzata per la comunicazione, l'identificativo dei pacchetti UDP trasmessi ed il numero di identificazione del blocco inviato, che in questa prima funzione assume il valore '0'.

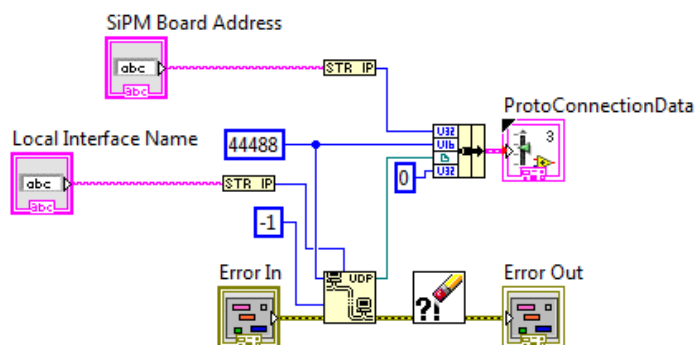


Figura 4.7: Block diagram della funzione di connessione. La funzione UDP apre la connessione sulla porta specificata e, contemporaneamente, è creato il dato *ProtoConnectionData* che identificherà ogni blocco di dati mandato.

Per qualsiasi azione successiva non occorrerà fare altro che scrivere su un particolare registro della scheda, sia per impostare i parametri di acquisizione, che per comandare l'invio dei dati al PC. E' quindi di fondamentale importanza avere delle funzioni di scrittura e di lettura che implementino il particolare protocollo utilizzato dalla scheda.

All'interno della funzione di scrittura viene costruito il dato unendo i campi previsti (lunghezza, '0x4D'[dato: messaggio], '0x21' [scrittura], il numero di blocco che viene immediatamente incrementato, indirizzo del re-

gistro su cui scrivere ed il dato da scrivere). L'intero array è passato alla funzione nativa di LabView che lo invia sul protocollo UDP, insieme all'indirizzo IP della scheda ed al numero di porta della comunicazione. E' inserita consecutivamente la funzione di lettura su UDP, per ricevere il messaggio con conferma dell'esecuzione. La funzione è mostrata in figura 4.8 sopra.

Per leggere un dato bisogna in primo luogo richiederlo, per questo motivo sarà trasmesso su UDP un dato simile alla richiesta di scrittura con il codice di lettura '0x20' ed il registro da verificare. In successione è posta la funzione di lettura che riceve da UDP ciò che invia il firmware in risposta, elimina l'header e restituisce in uscita il dato richiesto (Fig. 4.8 sotto).

Avendo a disposizione la possibilità di scrivere e leggere dai registri possono essere sviluppate le funzioni di controllo ed acquisizione. Quest'ultima risulta essere la parte più complessa da implementare. La funzione che la gestisce deve ricevere i dati spediti dalla scheda e renderli facilmente fruibili. Inoltre è prevista la possibilità di abilitare un *software trigger*, che è facilmente generato con una scrittura sull'apposito registro. Il software si mette in una modalità di ricezione dati continua. Dei blocchi in arrivo è controllato che il codice tipo corrisponda a '0x44' (dato), quindi viene spaccettato l'header di cui timestamp, canali e numero di evento sono parametri in uscita. Ciò che rimane a questo punto sono i sample dell'evento arrivato ed anch'essi sono parametri di uscita della funzione. Queste istruzioni sono eseguite all'interno di un ciclo finché di ciascun pacchetto inviato, non sono stati letti tutti i byte.

Le altre funzioni implementate sono:

- **Get ID string:** funzione utilizzata per ottenere una stringa di risposta di conferma dell'avvenuta connessione
- **Get FW Version:** restituisce in uscita l'attuale versione del firmware utilizzato dalla scheda
- **Get Buffer Parameter:** imposta la grandezza della finestra di acquisizione degli eventi e la posizione del trigger all'interno della finestra

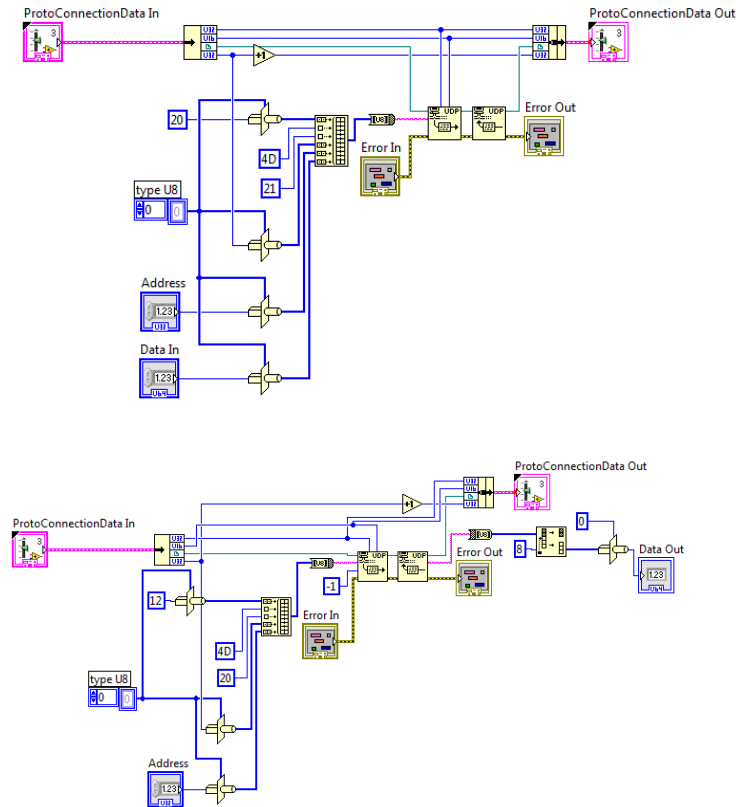


Figura 4.8: Block diagram delle funzioni di lettura e scrittura. Tutti i campi che formano il blocco da inviare sono uniti in un array e passati come parametro alla funzione di scrittura su UDP (sopra). Nella richiesta di lettura (sotto) la risposta, privata dell'header è fornita come uscita.

stessa

- **Set Input Channel:** imposta la maschera dei canali utilizzati
- **Validate trigger:** riceve la condizione di trigger impostata dall'utente e calcola il risultato di tutte le espressioni logiche che ne derivano e che saranno successivamente scritte su una LUT della scheda
- **Set Trigger Parameter:** trasmette le condizioni di trigger precedentemente calcolate dalla funzione Validate Trigger per essere scritte sulla

LUT

- **Set VBias:** imposta i valori di tensione in uscita per ciascun canale
- **Set Threshold:** imposta le soglie di trigger per ciascun canale
- **Set Prescale:** imposta la frazione di eventi che viene effettivamente acquisito (usato solo per acquisizioni ad alto rate)
- **Start Acquisition:** accende l'ADC, ne attiva il clock di campionamento, azzeri i contatori di trigger ed abilita l'acquisizione
- **Stop Acquisition:** disabilita l'acquisizione, legge tutti i contatori di trigger e spegne i SiPM
- **Close Connection:** utilizza la funzione nativa di LabView per chiudere la connessione

All'avvio il software effettua la connessione alla scheda, e riceve da questa una conferma dell'avvenuta connessione e la versione del firmware caricato sulla scheda. E' effettuata inoltre una prima operazione di stop acquisizione per evitare che una sessione non ancora ultimata, possa pregiudicare la possibilità di comunicazione con il dispositivo.

A questo punto sono controllati i dati inseriti dall'utente: l'espressione di trigger e l'abilitazione di almeno un canale. Se le condizioni sono riconosciute valide, il sistema trasmette gli altri parametri impostati (soglia, tensioni di alimentazione, espressioni di trigger, maschera di canali accesi, numero di eventi richiesti, larghezza della finestra e trigger delay). In figura 4.9 sono mostrati i campi compilabili dall'utente.

Dopo tre secondi di attesa, che permettono al dispositivo di stabilizzarsi, si avvia l'acquisizione: il sistema entra in un ciclo nel quale ed elabora tutti i pacchetti di eventi che riceve. Un segnale acustico avvisa dell'arrivo di ogni nuovo evento e la sua forma d'onda è tracciata e mostrata sul monitor. Tutti gli eventi sono scritti su un file opportunamente formattato in csv (Comma-separated values), come mostrato in figura 4.10, così da rendere i dati raccolti facilmente esportabili su qualsiasi foglio elettronico.

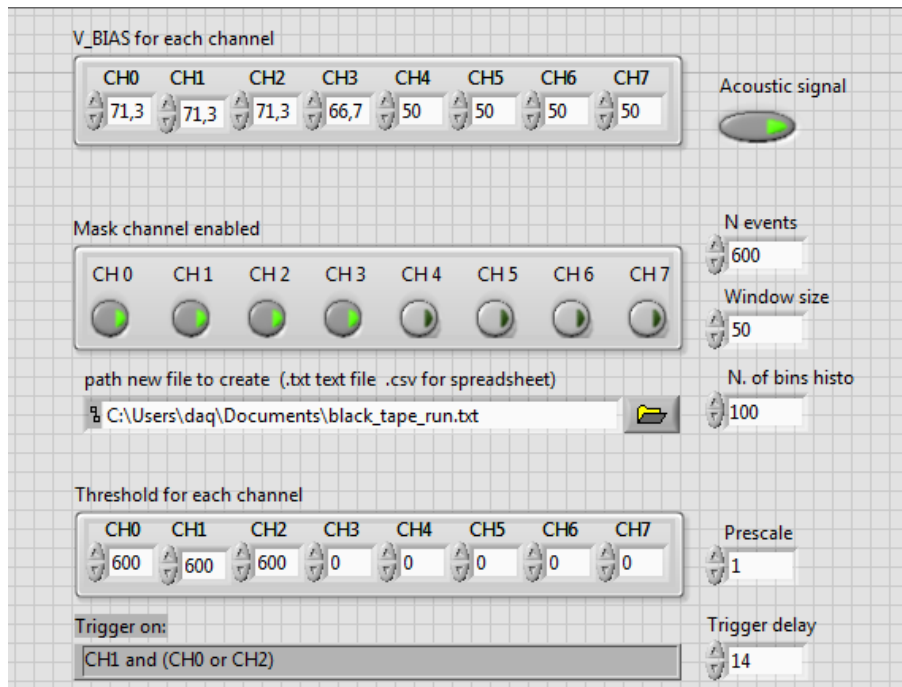


Figura 4.9: Interfaccia grafica del software di controllo per la scheda di acquisizione. Dettaglio in cui sono visibili i campi con i parametri impostati dall'utente.

Il ciclo di acquisizione ha fine quando è raggiunto il numero di eventi attesi, oppure se bloccato dall'utente. Durante il ciclo di acquisizione, nella pagina di controllo, oltre all'ultimo evento raccolto è presente una barra di avanzamento che indica quanti degli eventi attesi sono già stati acquisiti. All'uscita dal ciclo viene fermata l'acquisizione ed interrotta la comunicazione, inoltre è calcolato e mostrato a monitor il rate del *run* e vengono riempiti degli istogrammi (uno per ogni canale) che mostrano la distribuzione dei massimi per gli eventi raccolti.

4.3 Descrizione del setup

L'apparato è composto dalle tile di scintillatore (4 piccole e 2 grandi) e dalla scheda elettronica che controlla i SiPM e gestisce l'acquisizione degli

Intestazione : numero di evento, timestamp,
orario e data

sample: una riga per ogni
canale

```

0,525163893363640,17:20:51,18/12/2014
CH0,33,31,31,31,35,34,31,35,34,29,32,31,30,33,28,32,31,33,33,35,33,33,35,34,32,29,33,33,34,34,33,30,33,33,32,30,25,25,23
CH1,81,81,79,79,81,81,82,81,83,81,80,78,80,81,81,82,81,82,82,83,82,82,80,78,80,80,81,80,81,83,81,81,81,81,83,84,81,80,81
CH2,186,185,186,185,188,188,191,191,191,190,350,887,1239,1343,1274,1135,973,812,666,542,444,369,314,272,245,2240,223,208
CH3,41,40,40,39,40,40,40,39,39,110,1243,2712,3575,3806,3614,3181,2675,2185,1741,1355,1040,787,593,456,369,300,245,203
1,525226729035640,17:21:54,18/12/2014
CH0,34,31,29,30,29,30,31,31,33,32,338,2251,4072,4095,4095,4095,4030,3354,2691,2117,1632,1231,907,671,498,394,319,254,233
CH1,85,85,83,83,82,83,81,82,81,83,253,1404,2651,3292,3414,3286,2973,2545,2091,1660,1304,1083,768,586,449,340,274,222,184
CH2,187,185,188,189,188,189,188,188,186,184,184,181,185,185,185,184,187,185,186,188,188,188,188,186,185,185,184,186,
CH3,40,40,38,39,39,40,39,41,38,37,39,39,38,37,38,38,40,40,40,39,39,40,37,38,37,36,36,38,38,39,41,42,42,43,44,43,42,43
2,525326004793740,17:23:33,18/12/2014
CH0,27,28,29,27,27,28,28,22,26,28,30,26,27,28,30,31,32,31,29,31,31,30,30,31,32,31,29,29,30,26,27,29,29,30,33,33,31,32,32
CH1,82,81,83,81,80,80,80,81,81,81,79,78,80,79,82,82,82,79,77,78,79,78,78,80,81,80,81,81,82,81,82,82,81,80,79,79,80,80
CH2,186,189,188,189,188,186,183,182,183,182,213,604,1031,1251,1274,1183,1074,943,824,715,610,519,456,398,347,305,276,249
CH3,37,38,39,41,38,39,38,39,38,35,140,1550,3426,4095,4095,4095,4095,3629,3006,2419,1902,1463,1115,839,628,470,355,270,20
3,525348557726860,17:23:56,18/12/2014
CH0,30,38,38,38,36,33,36,35,35,33,33,30,31,30,29,30,29,31,30,32,32,32,31,31,31,30,32,30,27,30,31,32,28,31,30,28,30,28,27
CH1,80,81,79,81,80,81,81,80,78,77,77,79,80,79,79,80,78,70,76,77,78,78,80,79,79,81,82,81,81,80,82,81,80,81,82,79,80,80
CH2,189,187,186,187,207,232,246,247,238,231,227,404,707,890,928,873,785,679,575,484,406,345,297,262,241,220,207,200,195,
CH3,38,37,39,41,62,76,80,79,75,68,114,1519,3513,4095,4095,4095,4095,3837,3156,2537,2002,1551,1186,896,673,504,379,290,22
4,525421843992040,17:25:09,18/12/2014
CH0,32,30,32,31,30,31,31,30,31,32,30,31,32,33,34,32,33,34,34,33,33,31,33,32,33,30,35,34,35,31,34,33,30,35,36,30,30,33,33
CH1,81,81,79,79,81,81,82,81,83,81,80,78,80,81,81,82,81,82,82,83,82,82,80,78,80,80,81,80,81,83,81,81,81,81,83,84,81,82,82
CH2,186,185,186,185,188,188,191,191,191,190,350,887,1239,1343,1274,1135,973,812,666,542,444,369,314,272,245,224,210,204,
CH3,38,35,36,33,34,37,36,38,38,38,184,948,1708,2129,2209,2055,1785,1483,1187,931,717,547,413,313,242,205,184,162,142,126

```

Figura 4.10: Esempio di testo prodotto dal software.

eventi. In figura 4.11 è mostrata una delle tile piccole ed i suoi componenti. All'interno di una scatola in plastica nera è alloggiato lo scintillatore plastico, di forma quadrata con lato 3.5 cm e spessore di 1 cm, impacchettato con della carta bianca di protezione. Lo scintillatore utilizzato è l'EJ-200 prodotto dalla Eljen Technology[®], è in Polyvinyltoluene, l'intervallo di lunghezze d'onda in cui avviene l'emissione va dal violetto al verde, con un picco a 425 nm. Il tempo di salita del segnale è di 0.9 ns, mentre il tempo di decadimento è di 2.1 ns, l'impulso ha una larghezza di 2.5 ns [17]. Non dovendo fare misure ad alto rate, le caratteristiche del materiale sono più che adeguate ai nostri scopi. Lo scintillatore è attraversato in tutta la sua lunghezza da una fibra ottica WLS Kuraray Y11 300 MS da 1 mm di diametro. Le fibre ottiche WLS (WaveLength Shifter) hanno la caratteristica di traslare la lunghezza d'onda dei fotoni assorbiti. In particolare queste fibre hanno il picco di emissione a 476 nm [16]. Nella figura 4.12 sono visibili lo spettro di emissione e lo spettro di assorbimento per il tipo Y11. La fibra ottica accoppia lo scintillatore al SiPM raccogliendo i fotoni prodotti per scintillazione e riemmettendoli

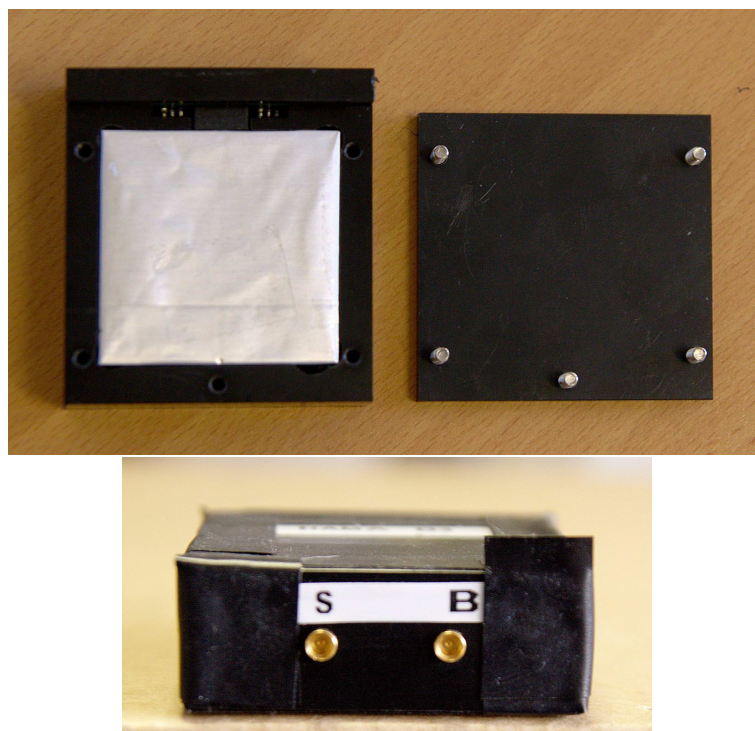


Figura 4.11: Tile piccola disassemblata. All'interno della scatola protettiva in plastica nera è visibile lo scintillatore plastico impacchettato in carta bianca protettiva, la box nera in alto in cui è alloggiato il SiPM. In basso sono visibili i connettori MMCX di alimentazione e segnale.

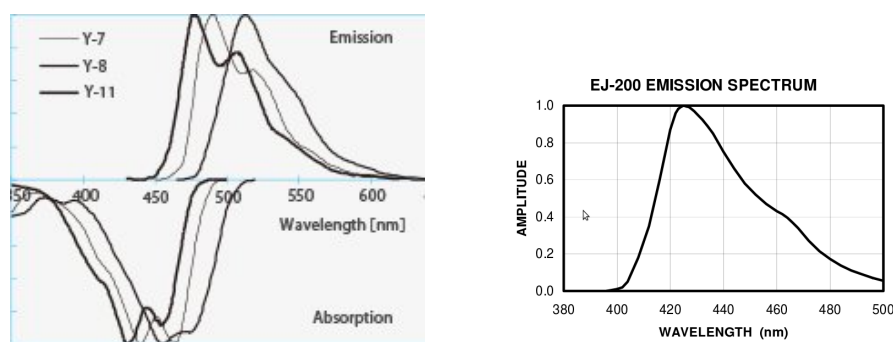


Figura 4.12: a sinistra: Spettro di assorbimento ed emissione delle fibre ottiche Kuraray Y11 [16]. A destra: Spettro di emissione dello scintillatore plastico EJ-200 [17], utilizzato nel telescopio a raggi cosmici.

direttamente sulla area sensibile del SiPM.

Il SiPM impiegato è il modello dell'Hamamatsu S10362-11-050P con un'area attiva di 1×1 mm, 400 pixel di dimensioni $50 \times 50 \mu\text{m}$. La sua sensibilità si estende in un intervallo che va dai 320 nm ai 900 nm ed il picco è a 440 nm [32], in buon accordo con la lunghezza d'onda di emissione della fibra ottica. Nella parte frontale della scatola si trova un Printed Circuit Board (PCB) per l'alimentazione e la lettura del SiPM, a cui sono saldati due connettori MMCX per il collegamento alla scheda, ben visibili in figura 4.11. La tile grande ha come unica differenza l'essere equipaggiata con uno scintillatore plastico quadrato di maggiori dimensioni: $10 \times 10 \text{ cm}^2$.

Il setup è stato ottimizzato per poter testare due unità contemporaneamente utilizzando solamente tre tile: due piccole ed una grande. Come si vede in figura 4.13, su un rack standard 19" è stata installata una struttura in alluminio, a cui è possibile fissare due unità in senso inverso, così da eseguire simultaneamente un test di backward ed uno forward, utilizzando una tile grande in comune e due tile piccole fissate sulle facce delle rispettive unità.

4.4 Test e risultati

I test di direzionalità si sono svolti nel Dicembre 2014 all'interno dei laboratori dell'INFN di Bologna. L'unità utilizzata nelle prove era composta da un fotomoltiplicatore dello stesso modello di quelli utilizzati in BHM, accoppiato ad un cilindro di quarzo con le stesse caratteristiche di quelli della configurazione definitiva, la cui faccia libera era completamente ricoperta di vernice nera. La postazione utilizzata nei test è quella mostrata in figura 4.13.

Il segnale dall'unità era acquisito mediante l'utilizzo di un oscilloscopio LeCroy, che campionava ad una frequenza di 5 GS/s, necessaria per avere una buona risoluzione del breve segnale prodotto al passaggio di un raggio cosmico. La scheda elettronica VersaBoard rilevava le coincidenze di segnale



Figura 4.13: Postazione completa del telescopio per raggi cosmici

fra le due tile, in mezzo a cui era posizionata l'unità, e generava un segnale TTL utilizzato come trigger per l'oscilloscopio. Una schematizzazione dei dispositivi utilizzati e delle loro connessioni è visibile in figura 4.14. Si sono eseguite prese dati di eventi forward: con l'unità rivolta verso l'alto e di eventi backward, semplicemente rovesciando l'unità. Si considerano quindi solo muoni provenienti dall'alto in quanto, per la nostra misura, quelli provenienti

dal basso sono totalmente trascurabili. In figura 4.15 ci sono due esempi di eventi: il primo a sinistra e di un evento forward, mentre quello a destra di uno backward.

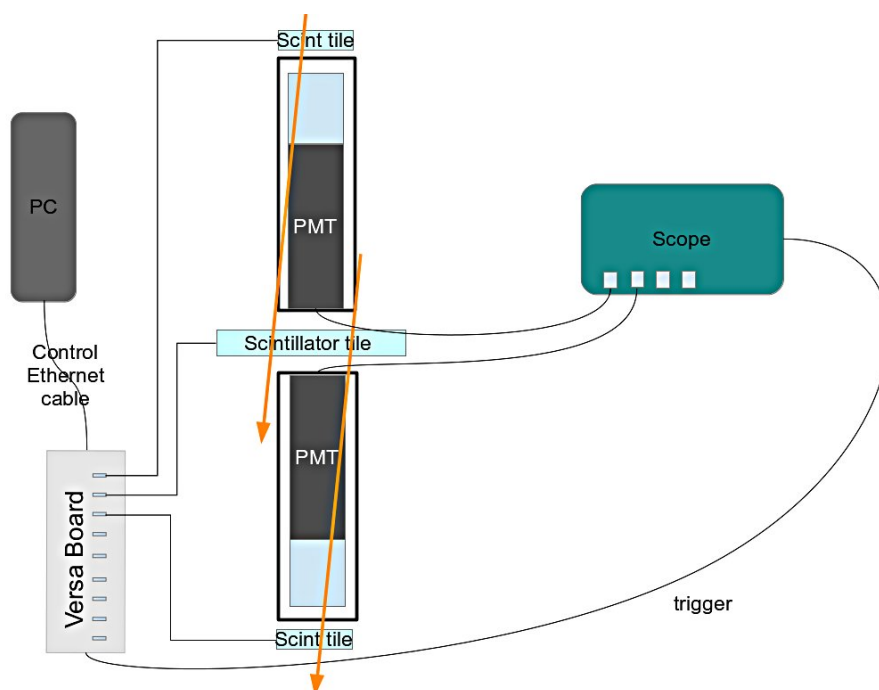


Figura 4.14: Setup utilizzato per il test con il telescopio di raggi cosmici: il passaggio di un raggio cosmico genera un segnale in coincidenza nelle tile di scintillatore al quale, la VersaBoard invia un impulso TTL all'oscilloscopio che acquisisce l'evento dall'unità.

Degli eventi raccolti per le due tipologie, è calcolata la carica integrata all'interno di una finestra temporale in cui sia incluso il segnale. I risultati sono visibili in figura 4.16. In punti rossi formano la distribuzione di carica per gli eventi prodotti da muoni provenienti dalla parte frontale del rivelatore, mentre quelli in blu la distribuzione di carica degli eventi prodotti da muoni provenienti da dietro il rivelatore. La distribuzione di backward è fittata da una combinazione fra una curva gaussiana con una coda esponenziale. La linea blu tratteggiata riporta tale distribuzione aumentata di tre ordini di grandezza a simulare il flusso di delle particelle provenienti dal punto

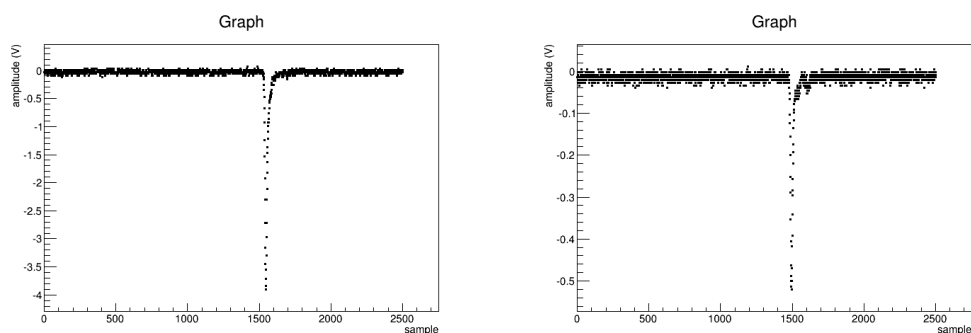


Figura 4.15: Esempi di segnali prodotti da un raggio cosmico: a sinistra il muone proviene dalla parte frontale dell'unità, a destra dalla parte posteriore.

di interazione di CMS. Questo test conferma la bontà della configurazione scelta, le due distribuzioni sono separate ed è possibile individuare una soglia in carica per avere un buon taglio sui segnali di backward.

Sono stati fatti test anche con altre metodologie per rendere opaca la faccia del quarzo: utilizzando di un disco nero in polietilene premuto contro la faccia libera; usando del nastro adesivo nero in PVC che aderisse completamente alla faccia. I risultati non sono però stati altrettanto soddisfacenti.

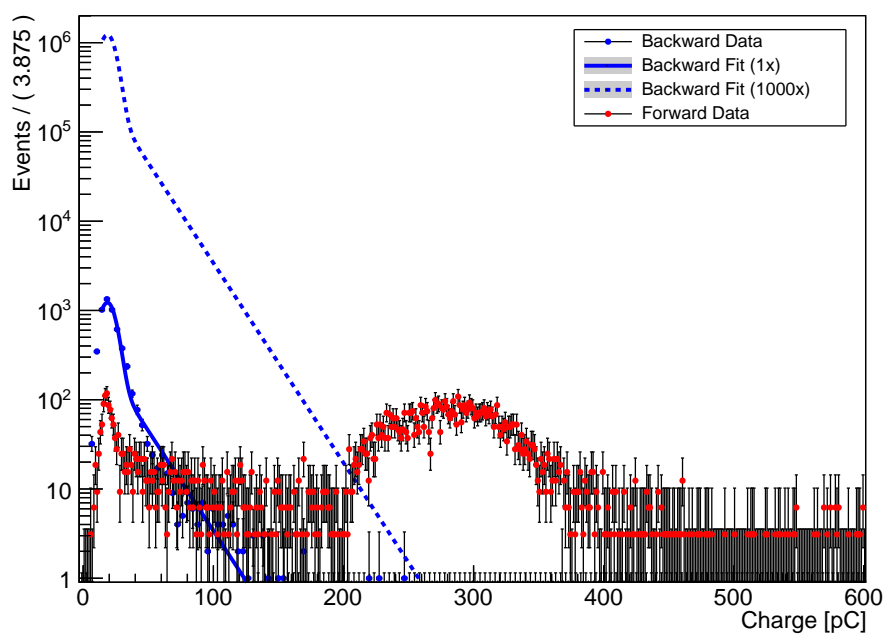


Figura 4.16: Grafico dei risultati ottenuti su un'unità di BHM dai test di direzionalità eseguiti utilizzando muoni cosmici. In rosso il segnale prodotto da muoni proveniente dalla parte frontale del detector, in blu il segnale prodotto da muoni provenienti dalla parte posteriore del detector. La linea tratteggiata amplifica il segnale prodotto dai muoni backward, di un fattore 1000.

Capitolo 5

Caratterizzazione dei fotomoltiplicatori di BHM

Parallelamente alla progettazione sono stati effettuati i test di caratterizzazione delle componenti del rivelatore. Nel presente capitolo sono descritti i test da me compiuti cioè le misure di guadagno e del conteggio di dark count sui fotomoltiplicatori di BHM. Queste analisi sono servite a determinare le prestazioni individuali dei fotomoltiplicatori e ad individuare la tensione di alimentazione ottimale per ogni singola unità del rivelatore.

I fotomoltiplicatori utilizzati in BHM sono gli Hamamatsu R2059. Sono stati scelti per la loro alta sensibilità nel range dell'ultravioletto (la frequenza tipica dell'emissione Cherenkov) e per il loro diametro di 51 *mm* che corrisponde al diametro delle barre di quarzo. La loro caratterizzazione è stata effettuata nei laboratori del CERN nell'Ottobre 2014.

5.1 Fotomoltiplicatori

Il fotomoltiplicatore è un tubo a vuoto che permette di convertire un segnale di luce, in un impulso di corrente elettrica misurabile e proporzionale al numero di fotoni raccolti. Il range di sensibilità di tale strumento copre

la regione dello spettro elettromagnetico che va dall'ultravioletto al vicino infrarosso.

Il principio di funzionamento si basa sull'effetto fotoelettrico prodotto dai fotoni incidenti su un sottile strato di materiale depositato sul catodo del tubo, perciò chiamato fotocatodo. In figura 5.1 è visibile lo schema di costruzione e di funzionamento di un fotomoltiplicatore.

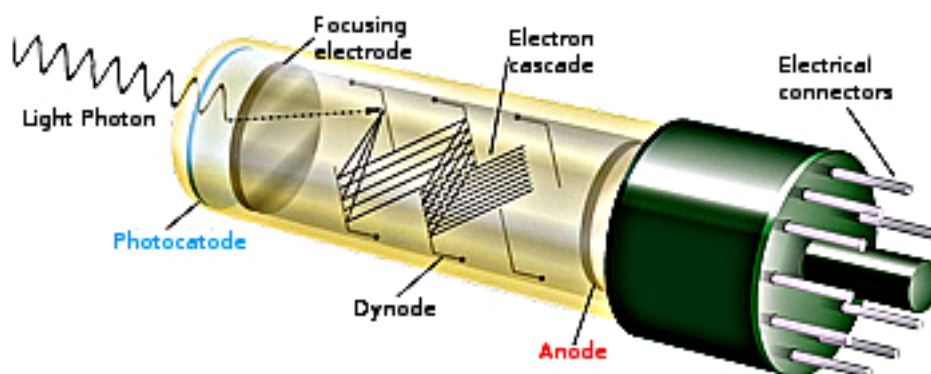


Figura 5.1: Schema di un fotomoltiplicatore [20], sono mostrate le componenti e le funzioni che hanno nel processo di conversione di fotoni in segnali elettrici.

Il fotocatodo consiste in una sottile deposizione di materiale, solitamente una lega di semiconduttori o metalli alcalini [21], sulla finestra di vetro o quarzo del fotomoltiplicatore. I materiali che lo compongono determinano l'intervallo di lunghezze d'onda di sensibilità del fotomoltiplicatore: gli elettroni sono emessi con energia cinetica [18]

$$E = h\nu - \phi$$

dove ν è la frequenza della luce incidente e ϕ è il potenziale di estrazione degli elettroni. ϕ , che dipende dal materiale, determina l'energia minima che deve avere un fotone per poter produrre effetto fotoelettrico.

I fotoelettroni che si originano all'interno dello spessore del fotocatodo, perdono energia nel raggiungerne la superficie, a causa di collisioni con gli elettroni atomici. Solo quelli prodotti a poche decine di nanometri di pro-

fondità hanno un'energia sufficiente a superare la barriera di potenziale, per questo motivo il fotocatodo ha uno spessore di pochi nanometri [22].

I pochi elettroni che lasciano il fotocatodo hanno un'energia di qualche eV [19], perciò il segnale, per essere utilizzabile, dev'essere amplificato. Per questa ragione è posto in successione un sistema di moltiplicazione degli elettroni composto da un sistema di elettrodi, chiamati dinodi, tenuti a potenziali via via crescenti. Il numero di dinodi presenti può variare in base alla tecnologia utilizzata, i sistemi più comuni prevedono un utilizzo dai 10 ai 14 dinodi [18]. L'ultimo dinodo è l'anodo stesso dal quale il segnale viene prelevato. Al sistema è applicato un alto potenziale, circa 1-2 kV e, grazie ad un partitore resistivo, il voltaggio viene distribuito lungo la catena di dinodi, mantenendo la differenza fra due elettrodi successivi di poche centinaia di volt.

Un campo elettrico sagomato con una geometria opportuna serve a raccogliere, concentrare ed accelerare gli elettroni uscenti dal fotocatodo sul primo dinodo. È importante che i tempi di arrivo siano i più simili possibili e che gli elettroni rimangano isocroni anche nei dinodi successivi, così che il segnale prodotto sia un impulso molto stretto e definito.

I fotoelettroni raggiungono così un'energia cinetica di alcune centinaia di eV che, nell'urto, viene trasferita all'elettrodo dando origine all'emissione di un numero di elettroni secondari che va da 3 a 5 [21]. Ciascun elettrone secondario è a sua volta accelerato verso il dinodo successivo dando origine ad un fenomeno di moltiplicazione a valanga. Dopo il passaggio attraverso l'apparato di moltiplicazione dai pochi fotoelettroni iniziali, si possono ottenere dai 10^7 ai 10^{10} elettroni.

Alcuni dei parametri caratteristici per un fotomoltiplicatore sono:

- Efficienza quantica
- Guadagno
- Dark current

Efficienza quantica

La sensibilità del fotocatodo è misurata attraverso l'efficienza nella produzione di corrente per unità di flusso di luce incidente (ampère per lumen). A questa quantità è legata l'efficienza quantica (QE) del fotocatodo, definita come:

$$QE = \frac{\text{numero di fotoelettroni emessi}}{\text{numero di fotoni incidenti}}$$

Questo parametro, dipendente dalla lunghezza d'onda della luce incidente, caratterizza i materiali utilizzati per il fotocatodo e la finestra di entrata della luce. Mentre la sensibilità dei fotocatodi si estende fino alla regione dell'ultravioletto, il materiale utilizzato per la finestra può assorbire i fotoni con le lunghezze d'onda minori. In figura 5.2 è mostrato un grafico con l'efficienza di trasmissione per vari materiali, in funzione della lunghezza d'onda. Le finestre che garantiscono una buona sensibilità già nell'ultravioletto, sono

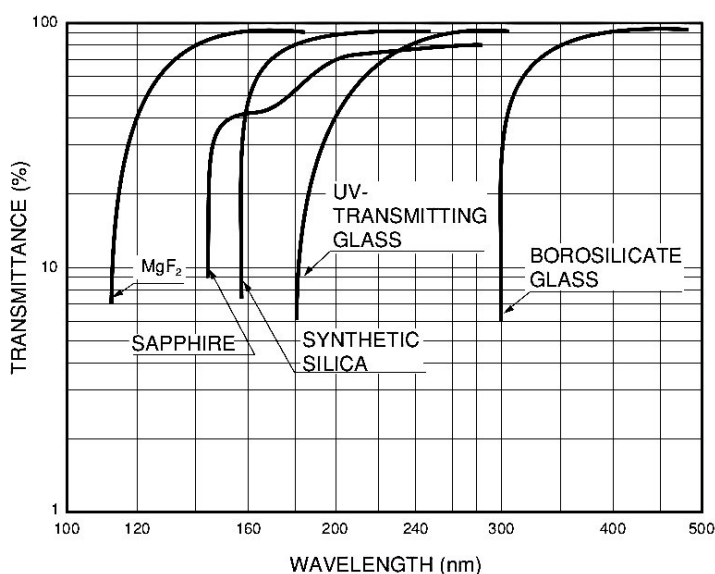


Figura 5.2: Grafico dell'efficienza di trasmissione per diversi materiali utilizzati nella costruzione delle finestre dei fotomoltiplicatori, in funzione della lunghezza d'onda. [23]

quelle costruite in quarzo.

Una soluzione molto praticata nella costruzione dei fotocatodi è quella di utilizzare delle leghe di semiconduttori e metalli alcalini (Na, K, Cs), o metalli del gruppo V (Sb, As). Un'altra tipologia di fotocatodi utilizza una lega di due metalli alcalini (Bialkali cathodes) che conferisce un'efficienza quantica attorno al 30% [21]. In figura 5.3 è presentato un grafico dell'efficienza quantica dei vari materiali utilizzati, in funzione della lunghezza d'onda.

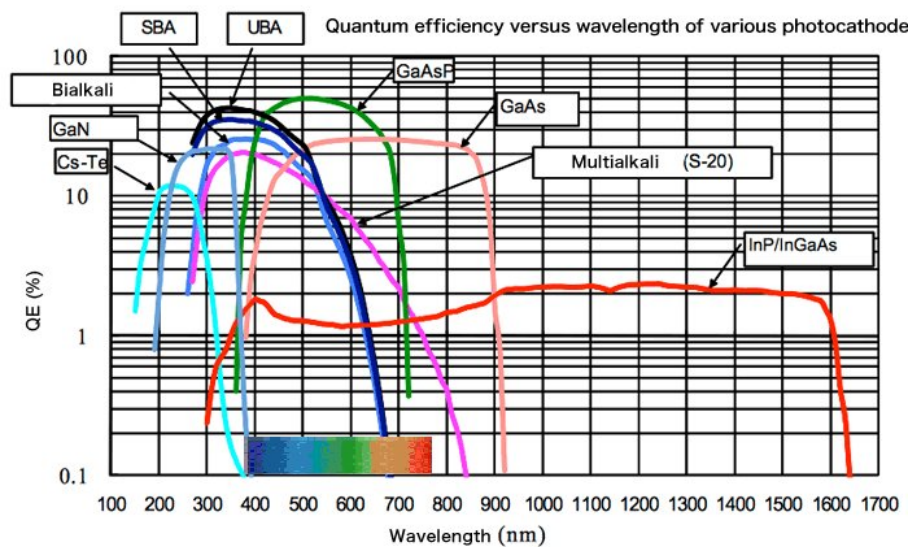


Figura 5.3: Curve di efficienza quantica per diverse tipologie di fotocatodi, della casa costruttrice Hamamatsu, in funzione della lunghezza d'onda. [22]

Guadagno

L'amplificazione complessiva di un fotomoltiplicatore, cioè il numero di elettroni che si ottengono da un singolo fotoelettrone dopo gli stadi di amplificazione, è un parametro che dipende principalmente dal numero di dinodi che sono presenti nella sezione di moltiplicazione e dal fattore di emissione secondaria δ . Tale parametro è chiamato guadagno del fotomoltiplicatore ed è molto importante per determinare la qualità del segnale che esce dallo strumento. Il fattore di emissione secondaria è funzione del voltaggio v presente

tra 2 dinodi consecutivi secondo l'equazione:

$$\delta = a \times v^k$$

dove a è una costante e k è determinata dalle caratteristiche strutturali del dinodo ed ha un valore compreso fra 0.7 e 0.8. Considerando la corrente di fotoelettroni I_{pc} emessa dal fotocatodo che colpisce il primo dinodo generando una corrente di elettroni secondari I_{d1} , il fattore di emissione secondaria per il primo stadio risulta essere:

$$\delta_1 = \frac{I_{d1}}{I_{pc}}$$

Proseguendo lungo la catena dei dinodi l'emissione secondario per ogni stadio è:

$$\delta_n = \frac{I_{dn}}{I_{dn-1}}$$

per cui la corrente all'anodo è data da:

$$I_{ac} = I_{pc} \times \alpha \times \delta_1 \times \delta_2 \times \delta_2 \times \dots \times \delta_n$$

con α l'efficienza di raccolta dei fotoelettroni. Quindi il guadagno (G), che corrisponde al rapporto fra la corrente all'anodo e la fotocorrente prodotta al fotocatodo, è:

$$G = \frac{I_{ac}}{I_{pc}} = \alpha \times \delta_1 \times \delta_2 \times \delta_2 \times \dots \times \delta_n$$

Per un fotomoltiplicatore con $\alpha = 1$ ed un numero di dinodi pari ad n , in cui i guadagni in ogni stadio sono equamente divisi, il guadagno diventa:

$$G = \delta^n = (a \times v^k)^n = a^n \left(\frac{V}{n+1} \right)^{kn} = A \times V^{kn}$$

con $A = \left(\frac{a}{(n+1)^k} \right)^n$ costante moltiplicativa. Si vede come il guadagno è proporzionale alla potenza kn della tensione di alimentazione del fotomoltiplicatore [23].

Nella figura 5.4 è mostrato il grafico, in scala logaritmica, del guadagno in funzione della tensione di alimentazione. La pendenza della retta corrisponde proprio a kn e la moltiplicazione della corrente cresce con la tensione di alimentazione. Questo significa che il guadagno di un fotomoltiplicatore è estremamente sensibile alle variazioni nelle alte tensioni di alimentazione.

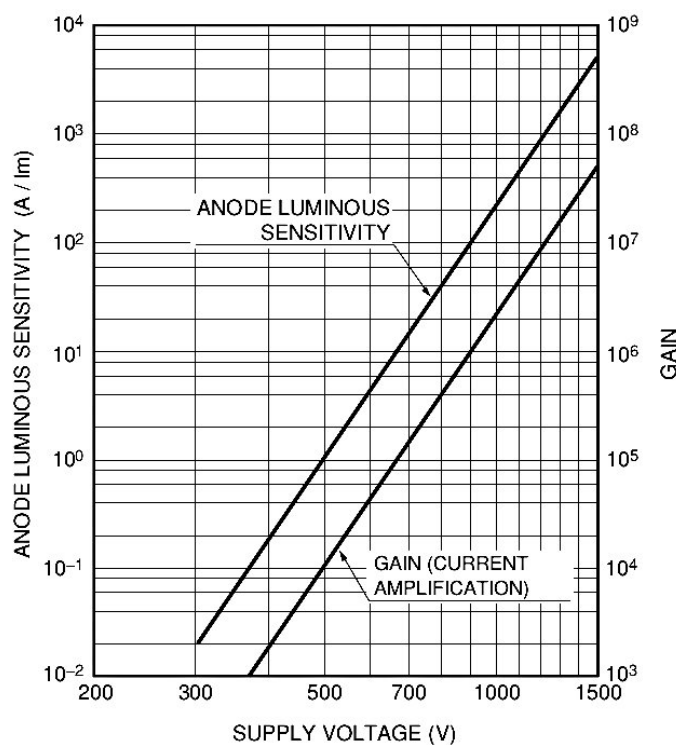


Figura 5.4: Caratteristica di guadagno per un fotomoltiplicatore, della casa costruttrice Hamamatsu, in funzione della tensione di alimentazione. [23]

Dark current

Anche quando il fotomoltiplicatore non è esposto alla luce, si ha in uscita una piccola corrente chiamata *dark current*. Questa risulta essere una fonte di disturbo per il segnale che si vuol misurare, quindi dovrebbe essere la più piccola possibile. Diverse sono le sorgenti, ma la principale risulta essere l'emissione termoionica di elettroni dal fotocatodo e dai dinodi. La corrente che così si genera segue la legge di Richardson [18]:

$$I = AT^2 \exp\left(-\frac{e\phi}{kT}\right)$$

dove A è una costante, ϕ il potenziale di estrazione, T la temperatura [K] e k la costante di Boltzmann. Si ha pertanto un aumento dell'effetto con l'innalzamento della temperatura. Una pratica usata per la riduzione del rumore è

quindi il raffreddamento del fototubo. Solitamente però, l'impulso risultante da questo processo corrisponde a quello prodotto da un singolo fotoelettrone, quindi ha un'ampiezza piuttosto limitata. Per escluderlo è perciò sufficiente discriminare i segnali al di sotto di una determinata ampiezza [19].

Altri fattori che possono portare alla produzione di dark current sono: la corrente di leakage tra l'anodo e gli altri elettrodi all'interno del tubo o fra i pin alla base del bulbo, effetti di campo dovuti alla presenza di punte, correnti di ionizzazione da gas residuo, fotocorrenti prodotte da scintillazioni, o decadimenti di radioisotopi, che avvengono nell'involucro stesso del fotomoltiplicatore, raggi cosmici.

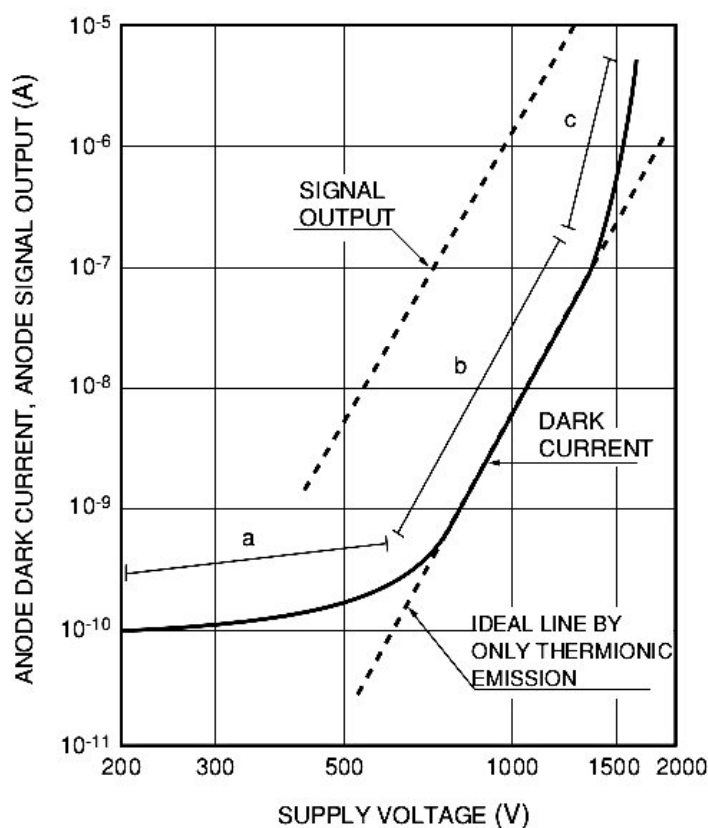


Figura 5.5: Dark current in funzione della tensione di alimentazione per un fotomoltiplicatore Hamamatsu. [23]

Nella figura 5.5 è mostrato un esempio di una caratteristica di dark current in funzione della tensione di alimentazione per un fotomoltiplicatore Hamamatsu. La dark current cresce con la tensione di alimentazione, ma l'aumento non è sempre costante. Sono individuate principalmente tre regioni con diversi comportamenti:

- regione a: regione a basso voltaggio dominata dalla corrente di leakage;
- regione b: regione a medio voltaggio dominata dall'emissione termionica;
- regione c: regione ad alto voltaggio dominata dall'emissione dovuta ad effetti di campo e da scintillazioni nel vetro o nei supporti degli elettrodi.

Si nota come nella regione b sia presente il miglior rapporto segnale rumore, inoltre la retta di dark current è pressoché parallela alla retta del segnale in uscita, ciò significa che all'aumentare della tensione di alimentazione il numero degli elettroni emessi rimane costante e la corrente aumenta proporzionalmente al guadagno del fotomoltiplicatore. Questo è quindi l'intervallo di tensioni in cui è preferibile operare il fotomoltiplicatore, in quanto risulta avere un regime di particolare stabilità.

5.2 I Fotomoltiplicatori Hamamatsu R2059

Il modello di fotomoltiplicatori scelto per essere utilizzato nelle unità di BHM è l'Hamamatsu R2059 mostrato in figura 5.6. E' un fotomoltiplicatore di tipo head on, ha un diametro di 51 mm, è dotato di 12 dinodi e di un fotocatodo circolare bialcalino con diametro di 46 mm.

Altre caratteristiche che risultano essere molto buone per l'utilizzo che se ne andrà a fare sono lo spettro di risposta e la velocità del segnale. Lo spettro di risposta si estende da 160 a 650 nm e la massima risposta si ha per fotoni con lunghezza d'onda di 420 nm. E' pertanto sensibile a tutto lo spettro



Figura 5.6: Fotomoltiplicatore Hamamatsu R2059. [24]

del visibile, e raggiunge il miglior rendimento nell'intervallo dell'ultravioletto, proprio dove l'emissione Cherenkov ha il suo massimo. Nella figura 5.7 a sinistra si può osservare come l'efficienza quantica del PMT nel vicino ultravioletto sia elevata. Questo è possibile anche grazie al fatto che il PMT è equipaggiato di una finestra per il fotocatodo in ossido di silicio sintetico [25] che, grazie al suo elevato grado di purezza, riesce a garantire un'ottima trasmissività in un intervallo che va dall'infrarosso fino all'ultravioletto.

Il tempo di formazione del segnale è di 1.3 ns, abbastanza rapido da consentire una misura ogni bunch crossing, che si verifica ogni 12.5 ns, mentre il tempo di transito degli elettroni all'interno del tubo è di 28 ns.

Inoltre i 12 dinodi garantiscono un guadagno nominale di 2×10^7 ad una tensione di alimentazione di 2500 V. La casa produttrice fornisce una caratteristica di guadagno tipica per questo modello di fotomoltiplicatore che è mostrata in figura 5.7 a destra. Si nota che la risposta del fotomoltiplicatore rimane lineare in un range di tensioni che va dai 600 V ai 3000 V.

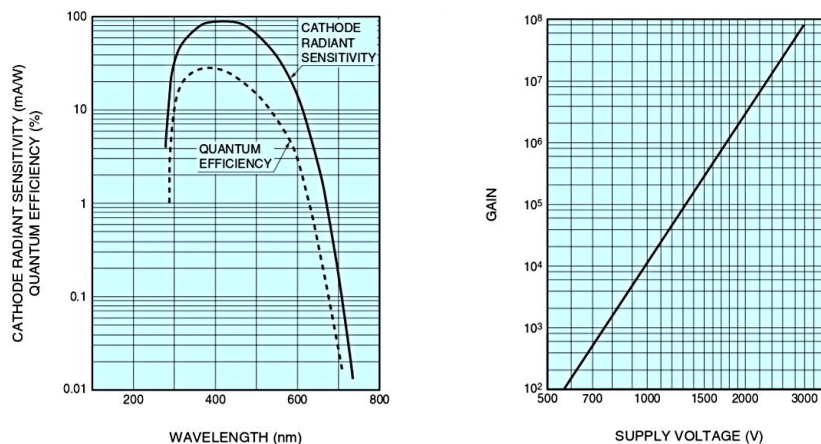


Figura 5.7: A sinistra: efficienza quantica tipica del fotomoltiplicatore Hamamatsu R1828-01, equivalente al R2059. A destra: caratteristica di guadagno tipica per un fotomoltiplicatore Hamamatsu R1828-01, equivalente al R2059 [25]

5.3 Misure di guadagno

Le misure di guadagno sui 40 fotomoltiplicatori sono state eseguite nei laboratori del CERN per un duplice scopo: avere la caratteristica di tutti i fotomoltiplicatori e poter verificare quindi che il funzionamento soddisfi le aspettative; individuare il punto di lavoro corretto di ogni singolo fotomoltiplicatore, affinché sia tutti i PMT abbiano lo stesso guadagno e producano quindi un impulso in uscita simile, a parità di emissione luminosa sia i segnali in uscita siano compatibili con l'elettronica di front end.

5.3.1 Apparato sperimentale

Per effettuare le misure di guadagno su tutti i 40 fotomoltiplicatori utilizzati nel rivelatore BHM, questi sono stati divisi in 8 gruppi, pertanto il test è stato eseguito contemporaneamente su 5 PMT alla volta.

L'apparato sperimentale utilizzato è piuttosto semplice:

- un LED UVTOP335 con emissione nell'ultravioletto e picco a 340 nm [26];
- un contenitore a tenuta di luce per proteggere i fototubi dalla luce ambientale;
- un sistema di distribuzione per la luce del LED ai 5 fotomoltiplicatori da testare;
- un modulo (socket) per ciascun fototubo che permetta di fornirgli la tensione di alimentazione e prelevare i segnali prodotti;
- un sistema che misuri i segnali in uscita dai fotomoltiplicatori.

Per poter utilizzare un singolo LED per tutto il gruppo, la sua luce viene distribuita a tutti i fotomoltiplicatori attraverso l'octopus (lo stesso utilizzato nel sistema di calibrazione) 5.9. Ogni octopus ha dodici gambe: una di queste è connessa con il LED ed altre cinque ai PMT da caratterizzare. E' stato aggiunto al gruppo un ulteriore fotomoltiplicatore, dello stesso tipo di quelli installati in BHM, utilizzato come riferimento per correggere eventuali variazioni nell'emissione di luce.

Ogni PMT è stato inserito individualmente in uno spesso cilindro di metallo di cui è stato chiuso il lato su cui si affaccia il fotocatodo mentre l'altro lato va contro lo zoccolo (Fig.5.8) che fornisce al PMT l'alimentazione e da cui viene prelevato il segnale. Avendo il cilindro ed il socket lo stesso diametro, una volta fissati l'uno all'altro formano un contenitore a tenuta di luce. Al centro della faccia chiusa è posizionata una boccola filettata esternamente che permette l'avvitamento della gamba dell'octopus (Fig.5.8).

5.3.2 Elettronica

L'elettronica utilizzata in questo test consiste in moduli VME e NIM per la gestione dell'alimentazione e dei segnali raccolti, oltre che di un impulsatore per alimentare il LED:



Figura 5.8: Contenitore a tenuta di luce utilizzato per la misura di guadagno dei fotomoltiplicatori *A destra:* particolare del collegamento fra fibra ottica e contenitore. *A sinistra:* particolare del socket da cui escono con i cavi di alta tensione ed il cavo di uscita per il segnale

- impulsatore Agilent 81110A 165/330MHz, per impulsare il LED e fornire il trigger al Digitizer
- CAEN SY 1527 Universal Multichannel Power Supply System - Mainframe [30]

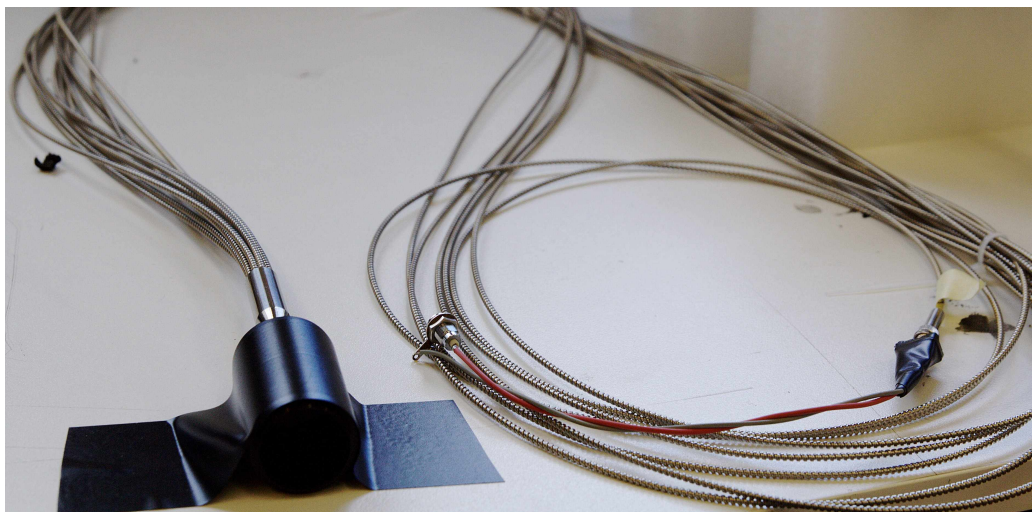


Figura 5.9: Particolare del sistema di distribuzione della luce del LED, è visibile lo specchio su cui arrivano le 12 fibre ottiche ed il LED connesso con una di queste

- CAEN A1535SN 24 Channel 3.5 kV/3 mA (8 W) Common Floating Return Boards [27], per l'alimentazione dei PMT
- Digitizer CAEN mod. V1721 ad 8 canali 8 bit 500 MS/s, 1 Vpp input dynamics (single ended or differential) [28], per prelevare e campionare i segnali provenienti dai fototubi
- Bridge CAEN mod. V2718 controllo da PC attraverso Optical Controllers, Up to 80 MByte/s sustained data transfer rate [31], interfaccia PC crate VME PC

Il LED è pilotato in tensione dall'impulsatore che fornisce in uscita, oltre l'output per il LED, anche un segnale TTL sincrono con questo, utilizzato come trigger per il Digitizer, che è dunque usato con modalità trigger esterno. Il Digitizer è alloggiato in un crate VME standard che si interfaccia al PC attraverso il bridge CAEN mod. V2718, che supporta il collegamento mediante fibra ottica.

5.3.3 Software di controllo per il Digitizer

Per la gestione del Digitizer da computer, mi sono occupato di sviluppare un software in LabView, che fosse funzionale e di immediata comprensione. L'interfaccia grafica è mostrata in figura 5.10. Mediante il software posso essere abilitati i canali per l'acquisizione, impostati il numero di eventi da raccogliere, la grandezza della finestra di acquisizione, cioè il numero di sample campionati per ogni evento ed il trigger da utilizzare.

Il software, dopo avere impostato i parametri scelti dall'utente, riceve gli eventi acquisiti dal Digitizer che sono, sia mostrati sul monitor per mezzo di un apposito indicatore che traccia le forme d'onda, sia salvati sul file indicato dall'utente.

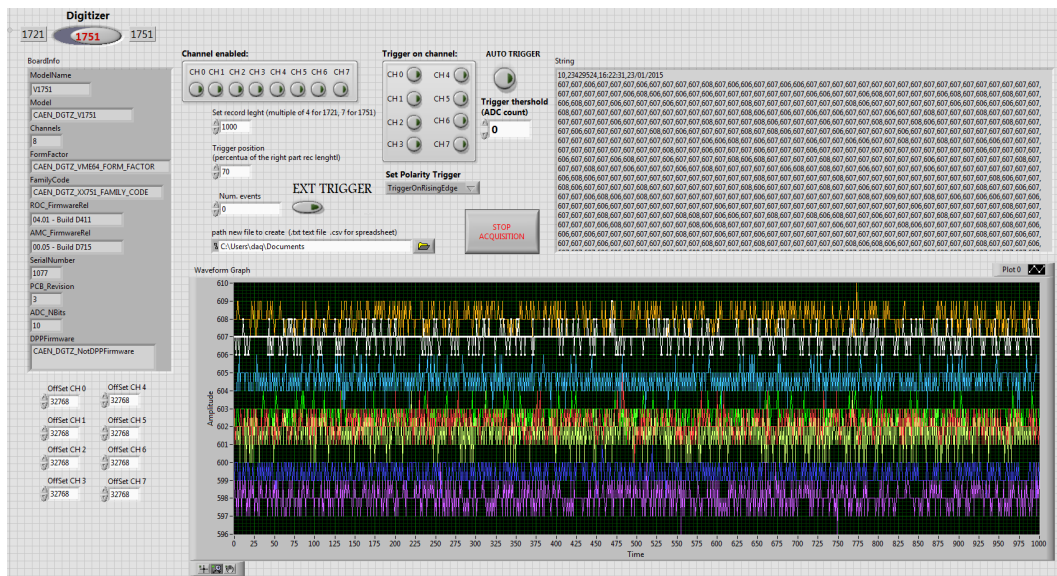


Figura 5.10: Interfaccia grafica del software LabView utilizzato per la gestione del Digitizer.

Le funzioni necessarie sono state costruite grazie alle librerie fornite dalla CAEN, che sono pienamente sufficienti per implementare un programma adeguato, all'utilizzo che si intende fare del Digitizer.

Il programma si divide principalmente in due parti: nella prima parte si utilizzano le librerie CAEN per stabilire la connessione tra computer e

digitizer ed impostare i parametri scelti dall'utente. E' sufficiente fornire l'indirizzo VME del modulo ed il tipo di interfaccia utilizzata tra modulo VME e PC per aprire la connessione. Successivamente sono poste in serie tutte le funzioni atte a trasmettere i valori dei parametri al modulo.

La seconda parte è mostrata in figura 5.11. Avviata l'acquisizione, il sistema si pone in attesa dei dati inviati dal Digitizer. Il ciclo di acquisizione si trova all'interno di un while che ha termine nel momento in cui si raggiunge un numero di eventi raccolti pari a quelli impostati dall'utente o se l'utente ferma l'acquisizione. All'arrivo di ogni evento, si entra in un ciclo for che si occupa di decodificare i dati e scriverli su un file di testo opportunamente formattato. Viene implementata la scrittura di un file in formato csv identico a quello descritto nella sezione 4.2.1.

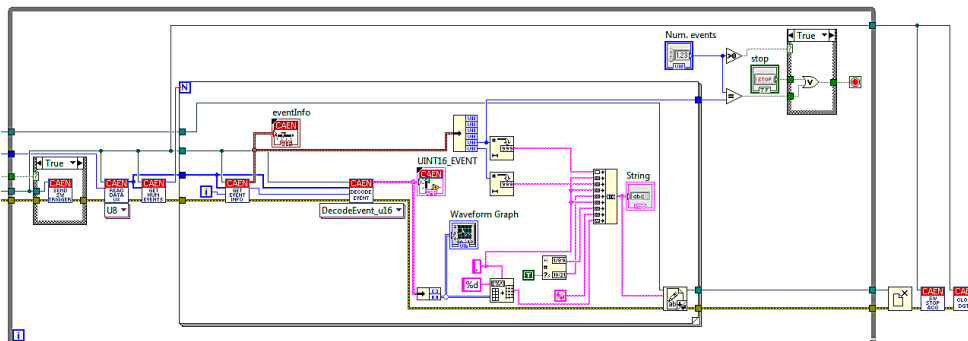


Figura 5.11: Parte del programma che gestisce l'acquisizione dei dati. Il ciclo esterno contiene le funzioni di ricezione degli eventi, mentre il ciclo interno decodifica e scrive i dati ricevuti su file.

5.3.4 Acquisizione dei dati

Per determinare il guadagno dei fototubi sono state fatte misure della carica integrata in uscita all'anodo per diverse tensioni di alimentazione. Partendo da 1400 V il voltaggio è aumentato in passi di 50 V alla volta fino ad

arrivare a 2000 V. Avendo i fototubi un guadagno nominale piuttosto elevato, non è stato necessario arrivare a tensioni maggiori in quanto, a voltaggi più alti il segnale di uscita rischia di saturare l'elettronica di front-end del rivelatore. La Hamamatsu ci ha fornito anche la documentazione per i singoli fototubi in cui è presente il guadagno assoluto a 2500 V che può essere usato come riferimento. Si è quindi deciso di prendere un ulteriore punto a 2500 V da confrontare con le misure del produttore.

Con il nostro apparato sperimentale non è possibile eseguire una misura di guadagno assoluto dei PMT, si è potuta effettuare però una misura del guadagno relativo al fotomoltiplicatore di riferimento. Utilizzando le misure di guadagno assoluto di Hamamatsu a 2500 V si ricava il valore di guadagno assoluto a ciascuna tensione nell'intervallo da noi misurato, attraverso il rapporto dei due valori alla tensione comune.

La misura è stata quindi effettuata scansionando l'intervallo di tensioni per i cinque PMT, mentre si è tenuta fissa (a 2000 V), la tensione di alimentazione del PMT di riferimento. Il LED è stato collegato alla fibra C1 dell'octopus ed alimentato con un impulso largo 500 ns, un leading edge di 50 ns, un periodo di 50 ms ed una tensione che va dai 3 V ai 5.5 V: si sono mantenuti i segnali in uscita dall'anodo dei sei PMT, nella zona centrale della finestra di acquisizione, a valori sufficientemente alti perché tutti i canali rimangano nel range in cui il Digitizer ha una miglior sensibilità, ma non troppo da avere overflow.

Ad ogni presa dati si sono collegati i sei PMT a sei canali del digitizer, tenendo fisso il PMT di riferimento al canale zero e variando gli altri cinque di volta in volta. Durante la presa dati si sono impostati i differenti valori di tensione nel range stabilito, per i fototubi da testare, partendo da 2500 V e scendendo fino al 1400 V nella dinamica già descritta. Per ogni tensione sono stati acquisiti 10000 eventi con una finestra di acquisizione di 1024 sample, in figura 5.12 è mostrato come esempio, uno degli eventi raccolti. Si osservano i segnali dei sei SiPM (i sei colori presenti: bianco, blu, arancio, rosso, verde, viola).



Figura 5.12: Segnale di uscita dei PMT prelevato dal Digitizer, durante un run. In ascissa c'è il numero di sample (il Digitizer campiona il segnale ogni 2 ns) in ordinata c'è l'ampiezza del segnale in conteggi di ADC.

Il segnale analogico viene poi convertito dall'ADC del Digitizer in un segnale digitale e la sua ampiezza espressa in unità di ADC. Il bridge CAEN V2718 connette, mediante un link ottico, il Digitizer con il computer utilizzato nel sistema di acquisizione, su cui viene eseguito il software in LabView che riceve i dati raccolti. Il software è responsabile del salvataggio delle waveform su file. Per ognuno dei 10000 eventi raccolti ad ogni tensione, vengono scritti: numero di evento e timestamp, seguiti dai sample raccolti da ciascuno dei 6 canali (quindi dai 6 fototubi).

5.3.5 Analisi dei dati e risultati

I dati così ottenuti sono stati analizzati attraverso un software appositamente scritto in linguaggio Python. Ciò che si richiede al software è:

- calcolare la carica prodotta in ogni canale per ogni evento e sottrarre la baseline
- calcolare la media dei segnali prodotti per ogni fototubo ad ogni tensione
- normalizzare il segnale rispetto al fotomoltiplicatore di riferimento per rimuovere eventuali instabilità del LED

- normalizzazione rispetto al coefficiente di trasmissione di ciascuna fibra per rimuovere la dipendenza dalle fibre ottiche del bundle.

Per calcolare la carica prodotta vengono primariamente sommati i sample del segnale, si è deciso di integrare solo sull'intervallo che esclude i fronti di salita e di discesa. Viene sommato un ugual numero di sample della baseline per essere poi sottratto al segnale alla carica precedentemente ottenuto. Prendere lo stesso numero di sample per segnale e baseline evita di introdurre delle distorsioni nella misura. Questa procedura viene eseguita batch per batch, per tutti i 10000 eventi raccolti ed i risultati sono memorizzati in un array, uno per ogni canale. Calcolando la media dei dati contenuti in ciascun array si ha quindi il valor medio della carica raccolta in ogni canale, è sufficiente fare il rapporto del valore ottenuto su ciascun canale con quello ottenuto al canale 0 per effettuare la normalizzazione rispetto al fototubo scelto come riferimento.

A causa di fattori geometrici che intervengono nella distribuzione di luce all'interno dello splitter dell'octopus, la luce non si distribuisce equamente fra le sue fibre, quindi a ciascun fototubo arriva un numero di fotoni diverso. Per questa motivazione è stato necessario caratterizzare le fibre ottiche dell'octopus, il procedimento ed i risultati sono riportati alla sezione 3.5. Si sono ottenuti così i coefficienti di trasmissione per ciascuna fibra. Per poter tener conto di ciò in fase di analisi, si sono etichettate tutte le fibre e si è fatta attenzione a mantenere univoca la corrispondenza fibra canale. Conoscendo il coefficiente di trasmissione da applicare a ciascun canale può essere facilmente effettuata l'ultima normalizzazione.

In figura 5.13 è visibile il grafico in scala logaritmica dei guadagni misurati per il primo gruppo di fotomoltiplicatori. In nero è tracciato il guadagno del fotomoltiplicatore di riferimento, essendo soggetto alle stesse normalizzazioni usate per gli altri canali, esso appare identicamente pari ad 1, per tutte le tensioni. Per gli altri cinque fotomoltiplicatori è invece visibile come il guadagno relativo aumenti progressivamente con la tensione di alimentazione.

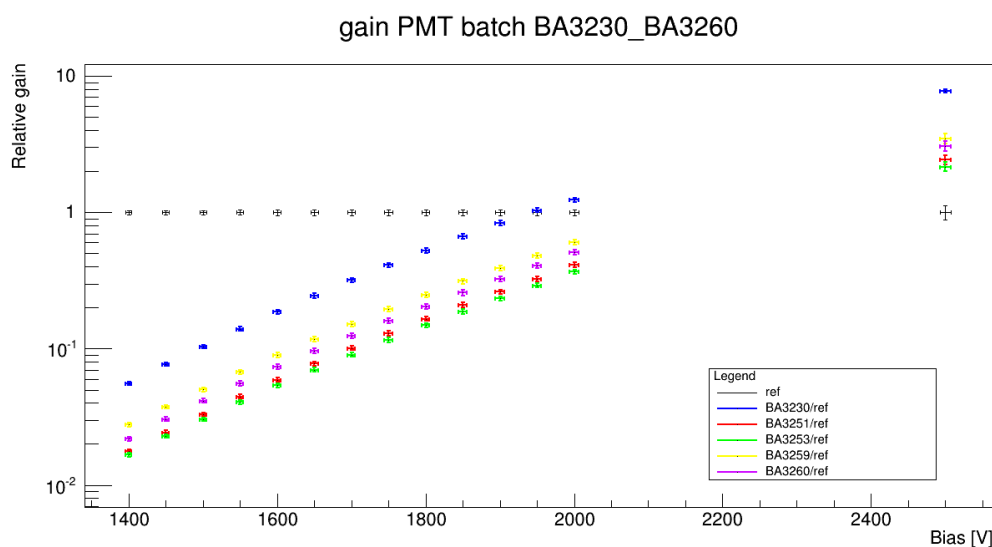


Figura 5.13: Grafico in scala logaritmica del guadagno per il primo gruppo di cinque fotomoltiplicatori. In nero il fotomoltiplicatore di riferimento.

In figura 5.14 è riportato un grafico con i valori di guadagno relativo a 2500 V, misurato durante il test (punti arancio), ed i valori del guadagno assoluto forniti dal costruttore (punti blu) per 15 dei 40 fotomoltiplicatori. Ciò che si può osservare è una buona correlazione dei valori ottenuti. I grafici con i guadagni degli altri gruppi di fotomoltiplicatori sono riportati in appendice A.1

Queste misure sono state quindi utilizzate per trovare i guadagni assoluti dei fotomoltiplicatori a tutte le tensioni considerate nel test.

5.4 Misure del tasso di dark count

Le misure del tasso di dark count sono state eseguite per valutare la produzione di rumore in assenza totale di luce e soprattutto per individuare le tensioni di alimentazione a cui il fotomoltiplicatore opera in un regime di stabilità. Il dark count è un parametro strettamente legato alla dark current, piuttosto che misurare la corrente uscente dai fototubi, si preferisce misurare

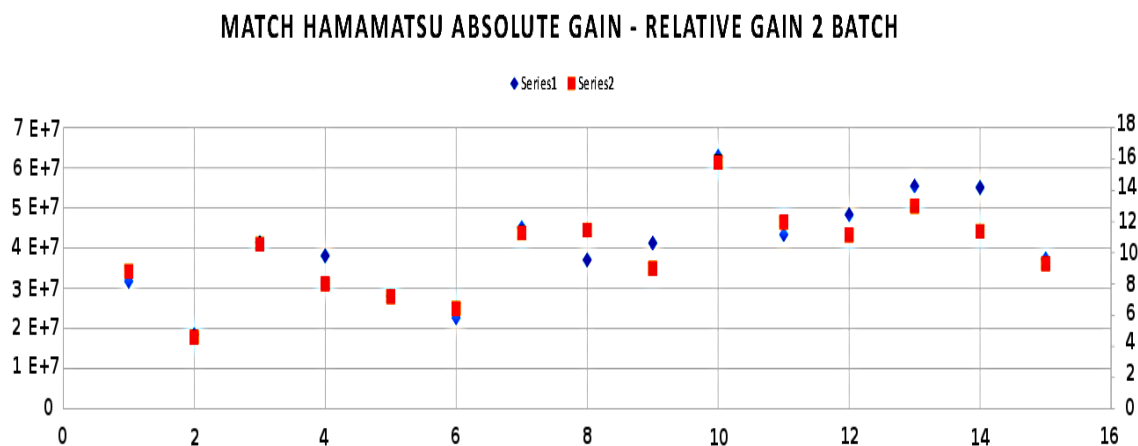


Figura 5.14: Confronto fra i guadagni assoluti forniti da Hamamatsu ed i guadagni relativi a 2500 V per 15 dei 40 fotomoltiplicatori.

il numero di impulsi raccolti all'anodo, avendo così direttamente la misura dei fotoelettroni che sono stati rilasciati dal fotocatodo.

5.4.1 Apparato sperimentale

Essendo misure eseguite in assenza di fotoni l'unica cosa necessaria è il contenitore che protegga i fototubi dalla luce ambientale, quindi è stato utilizzato lo stesso apparato sperimentale della misura dei guadagni, privato del sistema di distribuzione della luce.

- un contenitore a tenuta di luce per proteggere i fototubi dalla luce ambientale;
- un modulo (socket) per ciascun fototubo che permetta di fornirgli la tensione di alimentazione e prelevare i segnali prodotti;
- un sistema che misuri i segnali in uscita dai fotomoltiplicatori.

5.4.2 Elettronica

Anche l'elettronica è molto simile a quella utilizzata nel test del guadagno con moduli VME e NIM.

- CAEN SY 1527 Universal Multichannel Power Supply System - Mainframe [30]
- CAEN A1535SN 24 Channel 3.5 kV/3 mA (8 W) Common Floating Return Boards [27], per l'alimentazione dei PMT
- Scaler CAEN mod. V560 a 16 canali 32 bit 100 MHz [29], per prelevare e campionare i segnali provenienti dai fototubi
- Discriminatore CAEN mod. V814
- Bridge CAEN mod. V2718 controllo da PC attraverso Optical Controllers, Up to 80 MByte/s sustained data transfer rate [31], interfaccia PC crate VME

5.4.3 Misura e risultati

La misura di dark count rate è stata effettuata in un intervallo di tensioni di alimentazione che va da 1400 V a 2000 V. Per effettuarla è stato connesso ogni PMT ad un canale del discriminatore (CAEN mod. V814) e collegate le uscite di questo ad uno scaler (CAEN mod. V560). Ogni volta che il segnale in uscita di uno dei fotomoltiplicatori supera il valore di soglia impostato, questo produce sull'uscita del canale corrispondente un segnale ECL, che, andando allo scaler, fa incrementare il conteggio. La misura è totalmente gestita da un software scritto in C++ che si occupa sia di configurare le soglie del discriminatore, sia di acquisire i dati dallo scaler. Ad ogni tensione di alimentazione, impostata manualmente, vengono scansionate tutte le soglie da 1 mV fino a 13 mV. Il software acquisisce il conteggio incrementando il tempo della presa dati insieme alla soglie impostate.

Le soglie più opportune ad ogni tensione, per ogni fotomoltiplicatore vengono individuate durante l'analisi. In figura 5.15 si osserva il grafico dell'andamento dei conteggi in funzione della soglia alle diverse tensioni impostate per un fotomoltiplicatore. Sono ben visibili le zone di plateau che corrispondono ai conteggi dovuti dall'emissione di 1 fotoelettrone e 2 fotoelettroni. E' possibile da questi grafici individuare la soglia a 0.5 fotoelettroni, ad ogni tensione, per poi utilizzarla per valutare l'andamento del tasso di dark count.

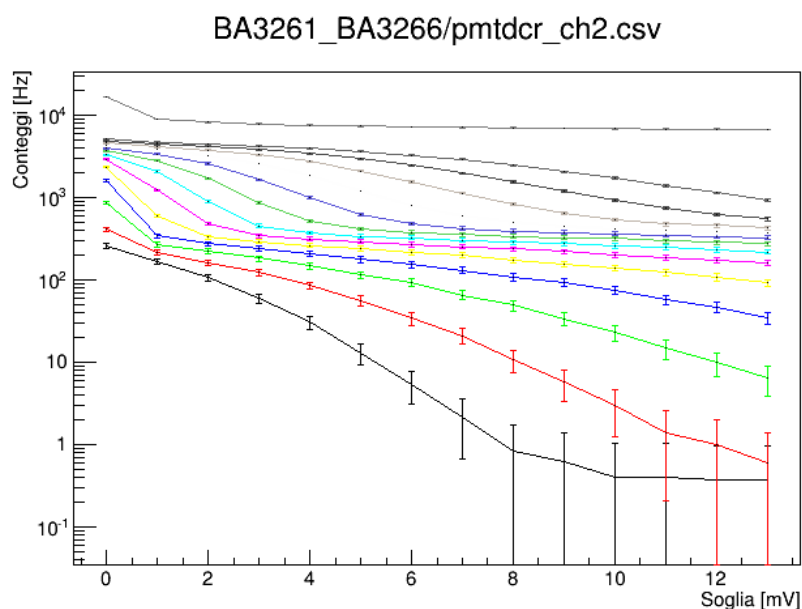


Figura 5.15: Conteggi a diverse tensioni in funzione della soglia applicata, per un fotomoltiplicatore.

Impostate le soglie si ottengono i grafici del tasso di dark count, di cui la figura 5.16 è un esempio. In questi grafici è ben individuabile la zona di plateau di ogni fotomoltiplicatore, che in questo caso è localizzata per tutti attorno ai 1800 V. Invece la parte alle tensioni più basse, non è da considerare una misura affidabile a causa del basso numero di conteggi raccolti, da cui deriva un'alta incertezza. Inoltre, a queste tensioni si sono utilizzate soglie piuttosto basse (1-2 mV), che risultano essere al limite della sensibilità per il discriminatore utilizzato. I grafici delle altre unità sono riportati in appendice

A.2.

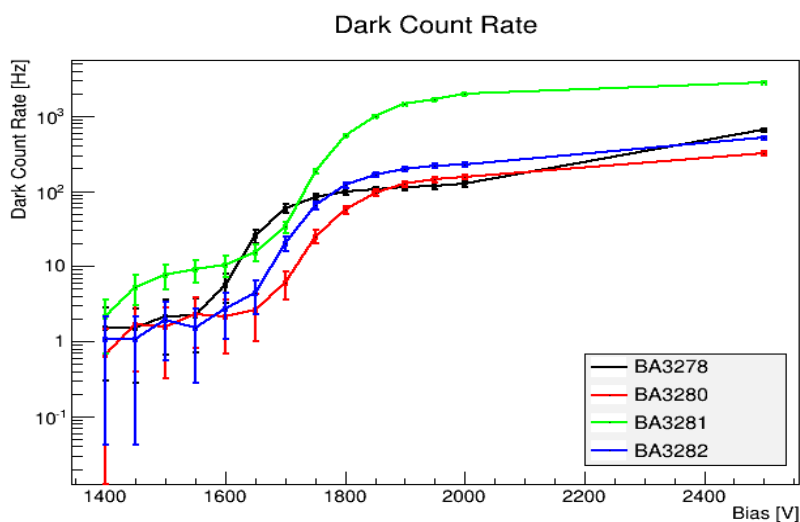


Figura 5.16: Grafico in scala semilogaritmica del dark count rate per un gruppo di fotomoltiplicatori. E' ben visibile la zona di plateau alla tensione di 1800 V.

Nell'intervallo di tensioni scelte per alimentare i fotomoltiplicatori, questi risultano avere un dark count compreso tra 10^3 Hz e 10^4 Hz, producendo una dark current ben al di sotto della soglia a cui è necessario tagliare per eliminare il rumore proveniente dai muoni di backward.

5.5 Determinazione delle tensioni operative per le unità

Le misure di guadagno e di dark count rate sono servite per decidere i valori di tensione a cui operare ciascuna delle unità di BHM, durante il periodo di presa dati.

Le misure di dark count rate servono per individuare la zona in cui ogni fotomoltiplicatore è in un regime di maggior stabilità in quanto, anche se dovessero verificarsi variazioni di tensione, il conteggio, con buona approssi-

mazione, non cambia. Inoltre il fondo misurato deriva in particolar modo dall'emissione termoionica, che dipende esclusivamente dai parametri costruttivi del PMT e dalla temperatura a cui opera, rimanendo quindi costante. Per i PMT misurati la zona di plateau è localizzata per tensioni di alimentazione tra i 1800 V ed i 2000 V. Trovati gli intervalli di tensione a cui è più conveniente operare, si è individuato il guadagno assoluto migliore per tutti i fotomoltiplicatori, quindi le tensioni operative per ciascuno. In questo caso si è scelto di operare i PMT ad una tensione tale per cui il guadagno corrisponda a 5×10^6 .

Capitolo 6

Installazione e verifiche di funzionamento

L'installazione di BHM, a cui ho partecipato attivamente, si è svolta durante la fase finale dell'upgrade di CMS, nei mesi di Gennaio e Febbraio 2015. E' stato necessario attendere il completamento dei lavori nella parte interna del rivelatore cosicché tutte le sezioni che lo compongono fossero state ricomposte, permettendo quindi una buona possibilità di movimento attorno al *rotating shielding*. Tutte le fasi di costruzione sono state infatti eseguite da elevatore mobile o da cherry picker: strumenti che necessitano di un buon spazio di manovra. Inoltre il rotating shielding doveva essere chiuso per poter effettuare i lavori, altrimenti lo spazio su cui montare BHM sarebbe stato totalmente inaccessibile, come visibile in figura 6.7. Per portare a termine l'installazione, è servita una notevole capacità di collaborazione con gli altri gruppi di lavoro che si occupavano del completamento di altre parti di CMS, per non impossibilitarsi a vicenda nelle attività.

La procedura di installazione di ciascuna delle quattro parti in cui è suddiviso l'intero rivelatore BHM è divisa principalmente in tre fasi:

- fissaggio della struttura portante al rotating shielding ed installazione delle unità
- cablatura delle unità con i cavi di alta tensione e di segnale

- connessione del sistema di calibrazione alle unità.

Per fissare la struttura in alluminio è stato utilizzata la saldatura ad arco mediante l'utilizzo di una pistola. Si è dovuto primariamente rimuovere la vernice del rotating shielding per permettere alla pistola di generare un intenso campo elettrico con la struttura stessa. Avendo a che fare con polvere di vernice attivata dai fasci di LHC, tutte le operazioni sono state svolte in assoluta sicurezza sotto la supervisione del *radiation protection group*. Ad essere saldati al rotating shielding sono dei bulloni ai quali è poi avvitata la struttura, figura 6.1.



Figura 6.1: Particolare della struttura fissata su uno dei rotating shielding di CMS. E' visibile la zona da cui è stata precedentemente rimossa la vernice per la saldatura del bullone che assicura la struttura.

Le unità sono inserite nella struttura (Fig.6.2, 6.3 sinistra) e fissate ad essa con due viti nella parte posteriore e con una camma che le impedisce possibili movimenti, posizionata sul corpo del cilindro, figura 6.3 destra.

Prima di effettuare il cablaggio delle unità si è dovuto pianificare il percorso che avrebbero dovuto seguire i cavi sia dell'alta tensione che di segnale. Entrambi i gruppi devono arrivare fino all'elettronica di front-end, situata in



Figura 6.2: Installazione di una della unità di BHM.



Figura 6.3: Fasi di installazione delle unità di BHM. A sinistra: l'inserimento dell'unità nella struttura. A destra: il fissaggio dell'unità mediante una camma che preme sul corpo del cilindro.

un locale accanto alla caverna sperimentale di CMS (USC). Ciò deve avvenire nella maniera più ordinata possibile, per non creare confusioni fra i vari canali durante l'allestimento del *font-end* ed evitare allo stesso tempo che siano di impiccio ai numerosissimi altri cavi che seguono lo stesso percorso. Per questo motivo sono state preparate delle *cable tray* che guidano i cavi dalle unità, lungo il rotating shielding, fino ad arrivare al *rack* in cui sono posizionati gli alimentatori e l'elettronica di read-out. in figura 6.4 si vede un particolare del percorso sul rotating shielding.

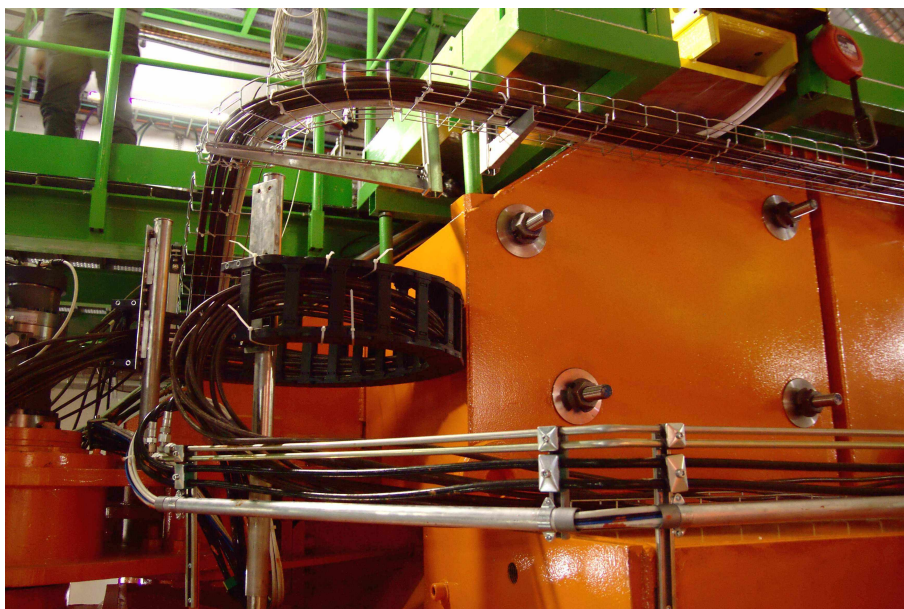


Figura 6.4: Particolare delle cable tray che guidano i cavi di segnale e di alta tensione fino ad USC.

Ogni unità è provvista di un connettore BNC (Bayonet Neill Concelman) per l'uscita del segnale, si è utilizzato un raccordo con adattatore finale di tipo N, per connettere le unità con il cavo che trasporta il segnale fino in USC. L'adattatore è stato ricoperto con una pellicola di plastica per proteggere il contatto e mantenerlo isolato, (Fig. 6.5 sinistra). Durante il cablaggio si è costantemente verificato che tutte le parti fossero isolate elettricamente e che non si verificassero corto circuiti tra i connettori e la struttura di sostegno (Fig. 6.5 destra).



Figura 6.5: A sinistra: connessione dell'unità con il cavo di tipo N usato per portare il segnale in USC. A destra: Controllo che non ci siano corto circuiti fra l'unità e la struttura.

Per ultimo è stato installato il sistema di calibrazione. Si è fissato lo specchio alla struttura (Fig.6.6 sinistra) e si sono connesse le fibre ottiche alle unità (Fig.6.6 destra) ed alle fibre usate come sorgente per la luce del LED e ritorno verso il SiPM.

Prima di effettuare ciascuna connessione si è pulita accuratamente la faccia della fibra, per evitare che eventuali residui compressi nella zona di contatto, potessero rovinare irrimediabilmente la superficie o impedire il passaggio della luce, precludendo la possibilità di utilizzare il dispositivo.

In figura 6.7 sono visibili le unità completamente installate nel lato +Z di CMS.



Figura 6.6: A sinistra: Fissaggio del sistema di calibrazione alla struttura A destra: Distribuzione e connessione delle fibre ottiche alle unità.

6.1 Verifiche di funzionamento

Il rivelatore è stato installato con successo entro i tempi stabiliti. Sono stati eseguiti dei test preliminari, utilizzando il sistema di calibrazione, per accertarsi del loro corretto funzionamento. In figura 6.8 sono mostrati i primi segnali raccolti da alcuni canali di BHM utilizzando il LED come sorgente.

Avendo verificato l'operatività di tutti i canali, si sono eseguite misure sistematiche sulle unità, sempre utilizzando il sistema di calibrazione. Si è alimentando il LED mediante l'impulsatore Agilent, con un impulso lungo 100 ns, un segnale alto di 3.75 V ed uno basso di -100 mV. Il segnale è stato confrontato con quello prodotto da un fotomoltiplicatore di riferimento, collegato alla fibra ottica di ritorno ed alimentato a 900 V. Nelle tabelle 6.1, 6.2 sono riportati i risultati: nella prima i segnali provenienti dai canali localizzati in $-Z$, nella seconda quelli localizzati in $+Z$.

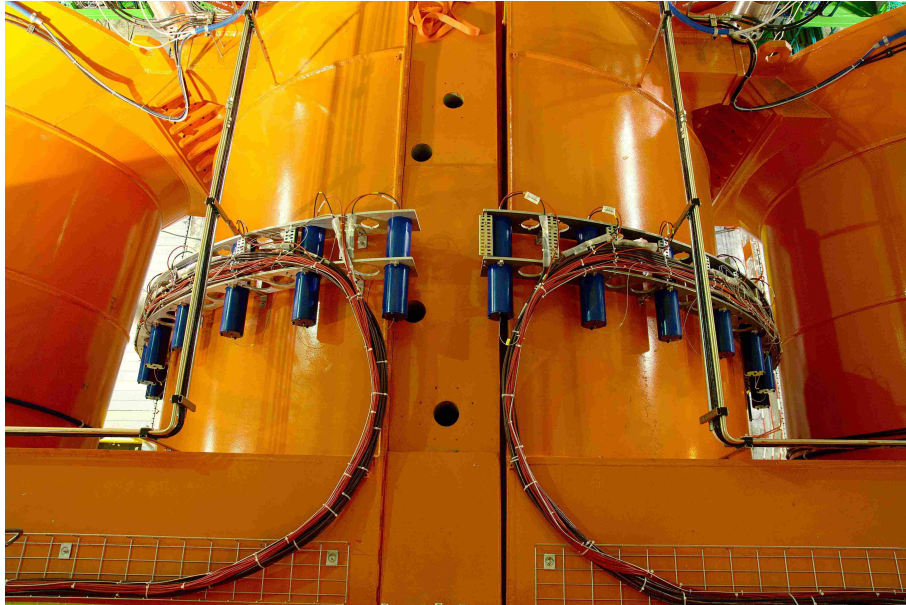


Figura 6.7: Vista sulle unità installate nel lato +Z.

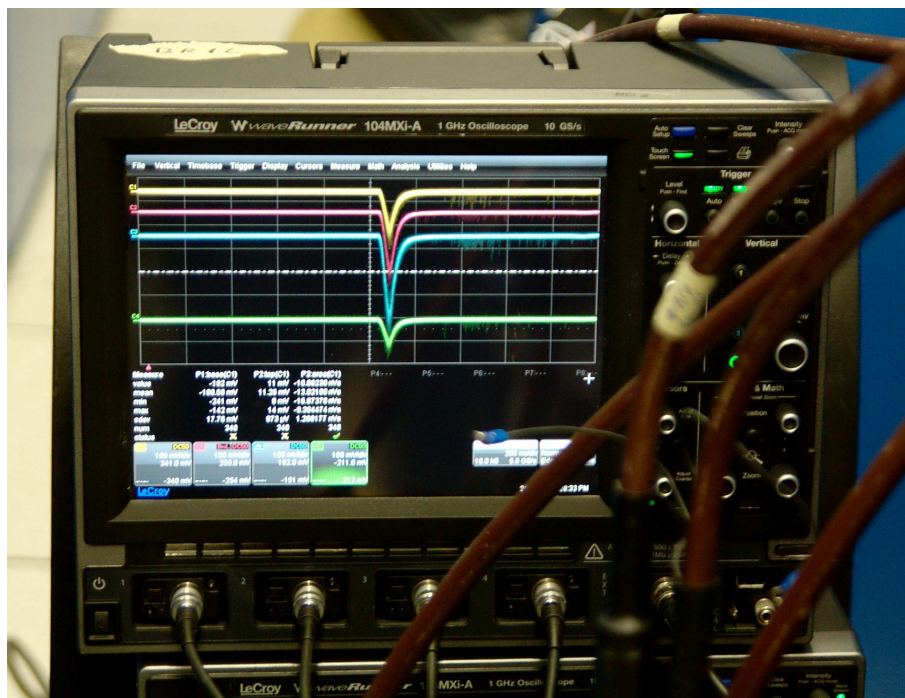


Figura 6.8: Segnali raccolti alla prima accensione di BHM.

Rif. (nVs)	Segnale (nVs)	valore normalizzato	Rif. (nVs)	Segnale (nVs)	valore normalizzato
33.6	18.7	0.56	28.8	6.5	0.23
34.5	6.3	0.18	24.5	8.5	0.35
35.3	14.0	0.40	26.5	8.1	0.31
35.2	6.8	0.19	28.1	5.0	0.18
35.6	8.4	0.24	24.2	3.2	0.13
35.7	10.1	0.28	23.8	7.8	0.33
35.4	18.0	0.51	24.1	6.1	0.25
34.8	16.1	0.46	25.7	6.5	0.25
35.2	18.5	0.53	25.1	9.9	0.39
35.5	26.5	0.75	26.7	12.0	0.45
media	13.0		media	6.84	
dev st	5.14	0.15	dev st	2	0.08

Tabella 6.1: Misure effettuate sulle unità di +Z

Rif. (nVs)	Segnale (nVs)	valore normalizzato	Rif. (nVs)	Segnale (nVs)	valore normalizzato
19.10	6.6	0.35	30.40	6.0	0.20
19.10	4.3	0.23	30.40	3.9	0.13
19.10	12.1	0.63	30.40	6.2	0.20
18.80	11.6	0.62	30.30	4.5	0.15
18.80	6.5	0.35	30.30	6.3	0.21
18.80	10.2	0.54	30.30	7.4	0.24
18.70	10.2	0.55	29.60	6.7	0.23
18.70	10.4	0.56	29.60	8.8	0.3
18.70	9.6	0.51	29.60	11.3	0.38
18.80	7.0	0.37	29.60	9.2	0.31
media	8.85		media	7.03	
dev st	2.57	0.14	dev st	2.23	0.08

Tabella 6.2: Misure effettuate sulle unità di -Z

Si nota come le unità diano segnali piuttosto differenti le une dalle altre, nonostante si siano utilizzati i valori di tensioni trovate con la misura di guadagno di cui si è parlato nel capitolo 5. Ciò è da imputare prevalentemente al diverso numero di fotoni che arriva a ciascun fotomoltiplicatore, a causa delle asimmetrie nel sistema di distribuzione della luce utilizzato, come illustrato nella sezione 3.5. Si è inoltre appurata l'assenza di un perfetto allineamento tra la fibra ottica ed il buco lasciato sulla vernice che ricopre la faccia di quarzo. Ciò può causare l'arrivo di meno luce sul fotocatodo, in alcune unità maggiormente che in altre.

Capitolo 7

Risultati preliminari a LHC

7.1 Primi risultati con “splashes”

I primi risultati del rivelatore BHM sono stati acquisiti con gli splashes prodotti su un collimatore da un fascio di LHC nell’aprile 2015. Durante un evento splash: un pacchetto di protoni è inviato contro il collimatore TCT (Target Collimator Tertiary) a monte dell’esperimento, collidendovi. Ciò produce un flusso di particelle, che arrivano a CMS, molto più grande rispetto a quello atteso per una perdita di fascio sul TCT nelle condizioni normali di funzionamento.

La figura 7.1 mostra i segnali prodotti da due dei canali di BHM, uno per ogni lato, durante l’evento. Il fascio circolante è il *Beam 2*, cioè quello che arriva dal lato -Z di CMS, ed ha un’energia di 450 GeV. E’ evidente dal grafico che il segnale prodotto dall’unità installata sul rotating shielding di -Z, rivolta quindi verso la direzione di provenienza delle particelle prodotte, abbia un’ampiezza decisamente maggiore del segnale prodotto dal canale di +Z. Ciò è un’ulteriore conferma di quanto la risposta di BHM sia dipendente dalla direzione di arrivo delle particelle.

Inoltre la larghezza e l’ampiezza del segnale sono maggiori di quelle attese nelle normali condizioni operative, a causa della notevole molteplicità di eventi durante gli splash test. La differenza temporale fra i due segnali corri-

sponde al tempo di volo di particelle relativistiche che percorrono la distanza che separa le due sezioni del rivelatore.

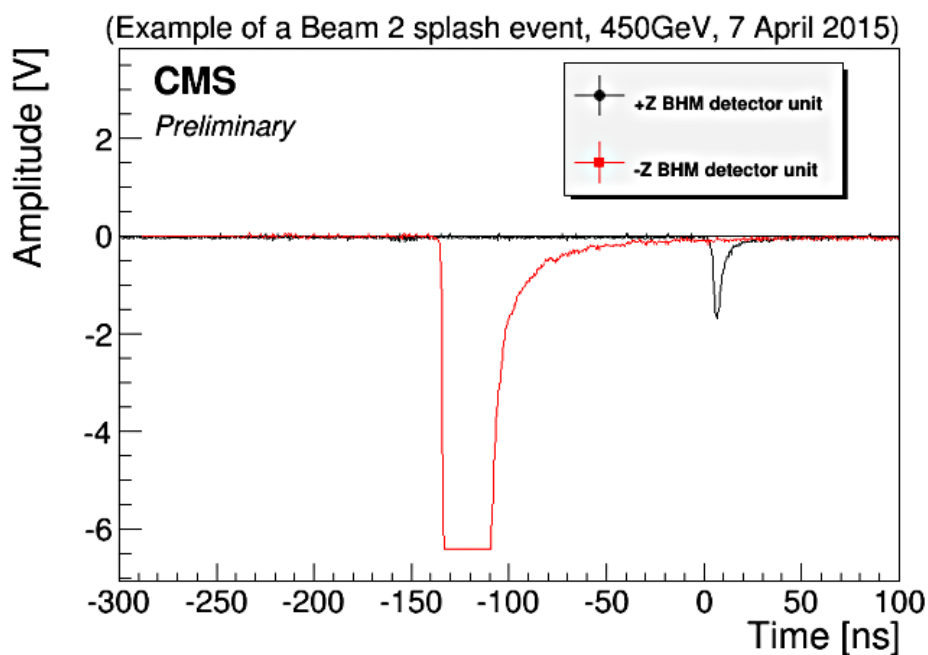


Figura 7.1: Segnale generato dagli eventi splash su due unità di BHM, una posta a -Z (rosso) e l'altra a +Z (nero)

L'immagine 7.2 mostra un'istogramma della carica raccolta da un QIE10 (Charge Integrator and Encoder version 10) prodotta da una delle unità installate a -Z. L'asse x corrisponde alla carica integrata su un bunch crossing (25 ns). Si nota che, in corrispondenza del Beam 2 (segnale verde) la distribuzione si sposta verso valori di carica più alti. Quando invece le particelle provengono dall'altra direzione (Beam 1), la distribuzione di carica è simile a quella che si ha in assenza di fascio.

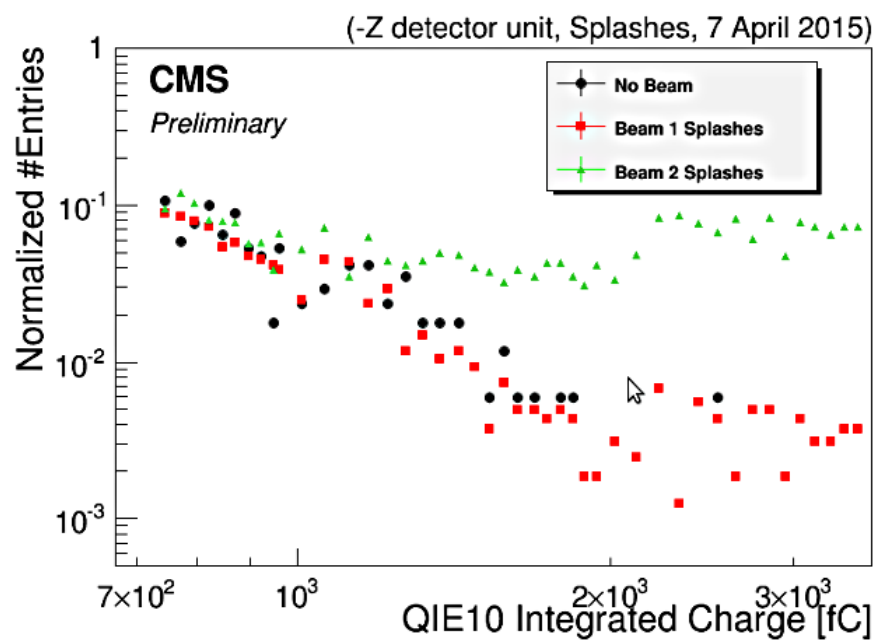


Figura 7.2: Istogramma della carica integrata su un bunch crossig, prodotta da un'unità di BHM installata in -Z, misurata da un QIE10.

Conclusioni

Durante il lungo periodo di shutdown di LHC iniziato nel 2013 e conclusosi nell'aprile 2015, l'acceleratore ha subito un importante lavoro di potenziamento, che gli permetterà di raggiungere una luminosità di $2 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ o superiore ed un'energia di collisione di 13 TeV. Anche CMS, come altri esperimenti all'anello LHC, è stato in parte rinnovato e potenziato per far fronte alle nuove condizioni nelle quali verrà a trovarsi.

In particolare, con l'aumento dell'energia e della luminosità di LHC, ci si aspetta anche un aumento della radiazione indotta dalla macchina nell'area sperimentale, con il pericolo di un deterioramento della qualità dei dati. Per questo motivo, all'interno della collaborazione CMS, si è deciso di costruire nuovi dei rivelatori per il monitoraggio in tempo reale delle condizioni del fascio, oltre che per misurare la luminosità.

Uno di questi rivelatori è il Beam Halo Monitor (BHM), un dispositivo che ha lo scopo di eseguire una misura accurata dell'alone del fascio che entra nell'area sperimentale. BHM è un rivelatore Cherenkov composto da 40 moduli, ciascuno dei quali è costituito da un cilindro di quarzo ed un fotomoltiplicatore. La particolare funzione di BHM gli richiede di avere un carattere fortemente direzionale: per distinguere le particelle di alone deve essere fortemente soppresso il segnale prodotto dalle particelle provenienti dal punto di interazione. Ciò ha portato alla scelta di usare come principio operativo l'emissione di luce Cherenkov.

In questo testo sono stati descritti in dettaglio gli elementi costitutivi e le caratteristiche del rivelatore, alla cui costruzione ho partecipato attivamente

durante il periodo di tesi. In maniera particolare sono state presentate le prove effettuate per verificare che la configurazione finale scelta per il rivelatore, soddisfacesse i requisiti richiesti.

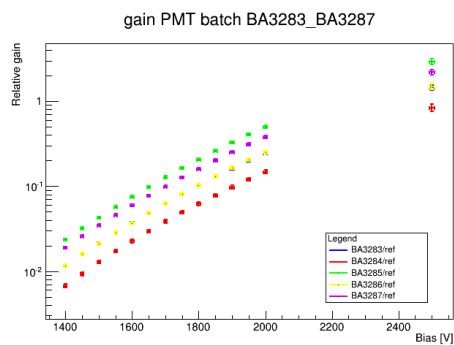
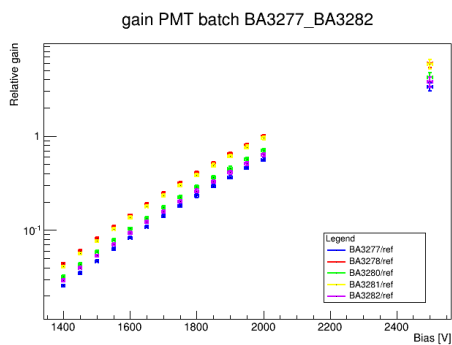
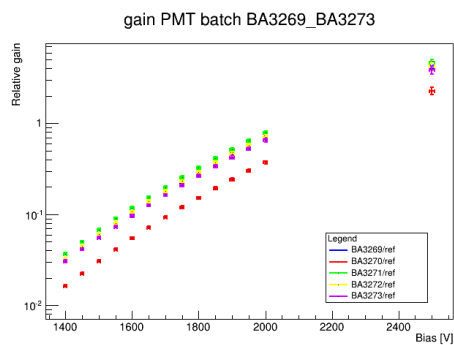
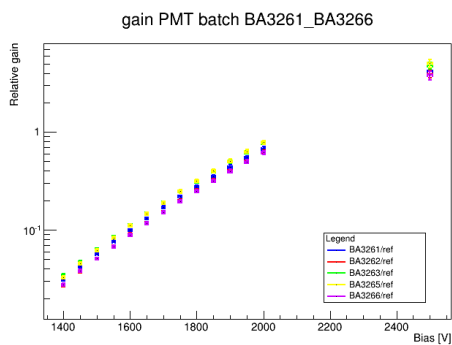
Si è dimostrata innanzitutto l'efficacia del sistema di schermatura del campo magnetico residuo, presente nella posizione in cui è installato BHM. Si è confermata la bontà della soluzione adottata per rendere il rivelatore sufficientemente sensibile alla direzione di arrivo delle particelle. Questo è stato possibile grazie alla costruzione ed alla messa in opera di un telescopio per raggi cosmici, basato sull'utilizzo di scintillatori plastici letti da Silicon PhotoMultiplier (SiPM). Era richiesto che gli elementi attivi del rivelatore avessero un rapporto di soppressione sui segnali dovuti alle particelle generate dalle collisioni, di 10^3 . Sono inoltre descritti i test di caratterizzazione eseguiti sui fotomoltiplicatori, prima dell'assemblaggio dei moduli.

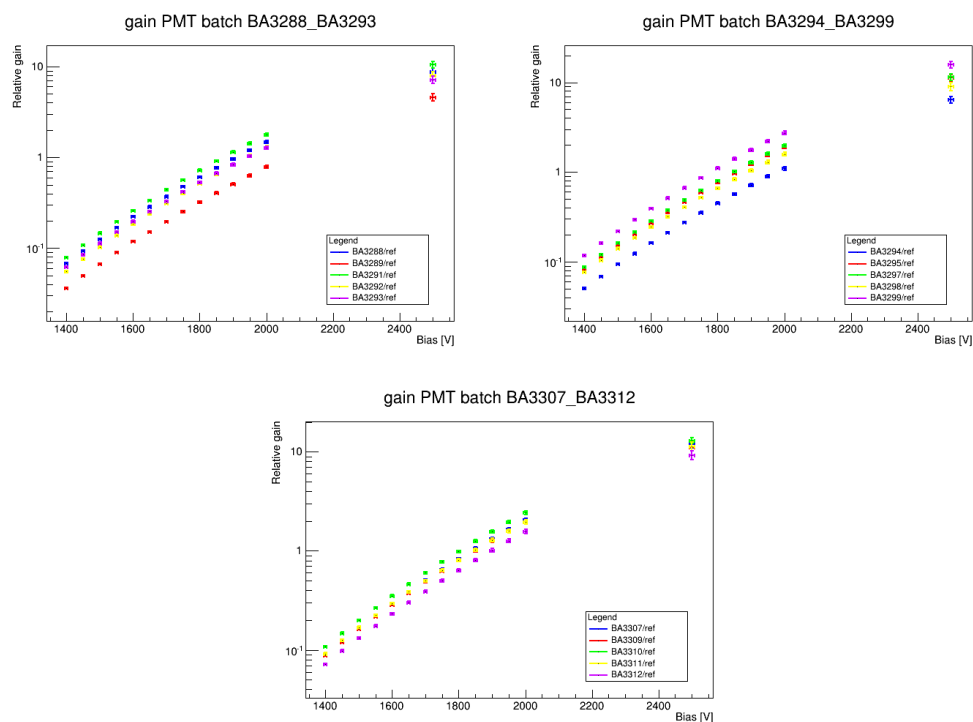
Il rivelatore è infine, stato installato con successo all'inizio del 2015 ed è ora in fase di commissioning.

Appendice A

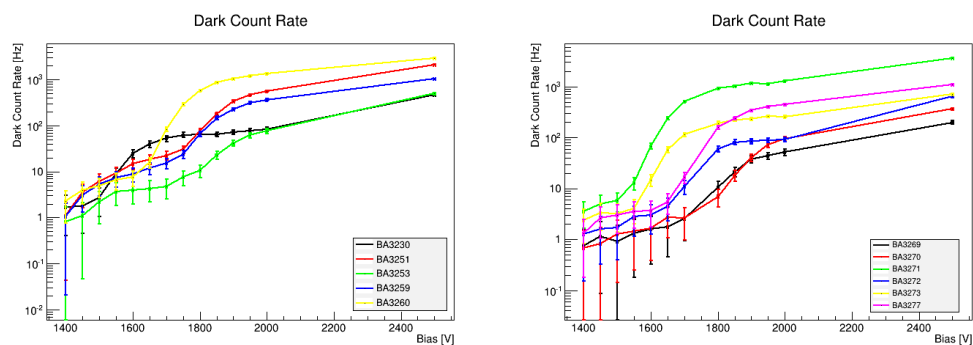
Caratterizzazione dei fotomoltiplicatori

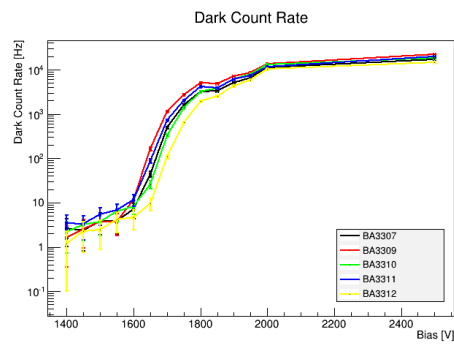
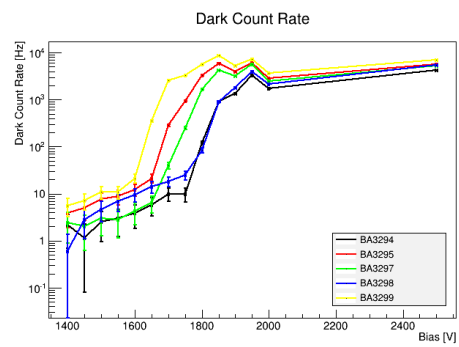
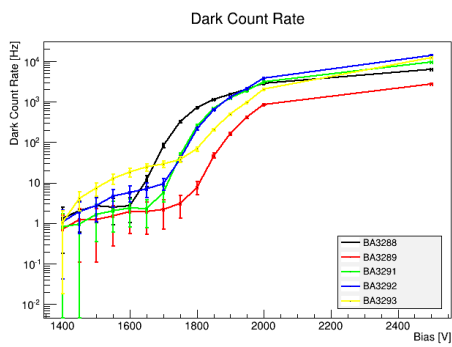
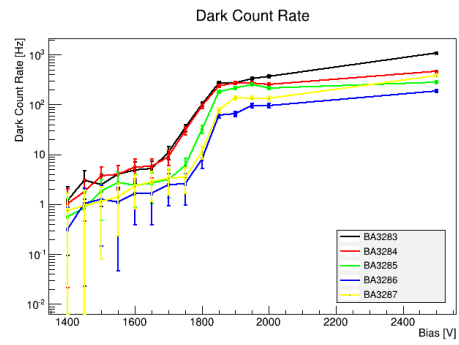
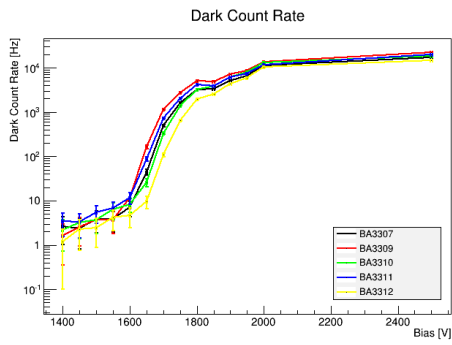
A.1 Grafici di guadagno





A.2 Grafici del tasso di dark count





Bibliografia

- [1] Lyn Evans e Phyl Briant, *LHC Machine*, JINST 3 (2008) S08001.
- [2] The CMS collaboration, *The CMS experiment at the CERN LHC*, JINST 3 (2008) S08004.
- [3] BRIL Radiation Simulation. CMS Online Flux Map,
[https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/
BRILRadiationSimulation](https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/CMSPublic/BRILRadiationSimulation)
- [4] Anne Dabrowski for the CMS Collaboration, *Upgrade of the CMS Instrumentation for luminosity and machine induced background measurements*, Technical Report CMS-CR-2014-362, CERN, Geneva, Oct 2014.
- [5] Beam Cleaning and Collimation System,
[http://lhc-collimation-project.web.cern.ch/
lhc-collimation-project/files/Chapter18b.pdf](http://lhc-collimation-project.web.cern.ch/lhc-collimation-project/files/Chapter18b.pdf)
- [6] Bruce, R. and others, *Machine-Induced Showers Entering the Atlas and CMS Detectors in the LHC*, Particle accelerator. Proceedings, 2nd International Conference, IPAC 2011, San Sebastian, Spain, September 4-9, 2011.
- [7] Bernardino Rodrigues, N. and Hall-Wilton, R. and Lange, W. and Lohmann, W. and Macpherson, A. and Ohlerich, M. and Ryjov, V.

- and Schmidt, R. and Stone, R. L., *Fast beam conditions monitoring (BCM1F) for CMS*, Electronics for particle physics. Proceedings, Topical Workshop, TWEPP-08, Naxos, Greece, 15-19 September 2008.
- [8] Andrea Manna, *Costruzione di un rivelatore a scintillatore plastico per il monitoraggio dell'alone del fascio di LHC nell'esperimento CMS*, tesi triennale.
- [9] Plasma. SQ synthetic quartz,
http://www.j-fiber.com/en/18/download/1542/130930122442_DB-KAP-001-00-0111-j-SQ-Q0-Q1-QT-subgrades.pdf
- [10] Dow Corning. DC 93-500 Space grade encapsulant,
<http://www.centralcoating.com/wp-content/uploads/2014/11/93-500.pdf>
- [11] Rhodorsil,
http://www.silitech.ch/upload/fiche_technique_f/262.pdf
- [12] Lackfabrik J. Albrecht GmbH & Co. KG,
<http://www.lack-albrecht.de/menu/produkte/spezialprodukte/lacke/schultafellack.html>
- [13] OPERA-3d by Vector Fields Ltd.,
<http://www.vectorfields.com>
- [14] Ceramoptec. Ceramoptec optran fibers.,
<http://www.ceramoptec.com/pure-silica-core-fiber.php>
- [15] G. Balbi, M. Boldini, V. Cafaro, I. D'Antone, F. Fabbri, A. Ferri, V. Giordano, I. Lax, A. Montanari, G. Torromeo, N. Tosi, R. Travaglini, *A Versatile Readout and Control System for Silicon Photomultipliers*, Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC), 2011 IEEE

- [16] KURARAY CO., LTD.,
<http://kuraraypsf.jp/psf/ws.html>
- [17] Eljen Technology 1300 W. Broadway, Sweetwater, Texas 79556, United States,
http://mipp-docdb.fnal.gov/cgi-bin/RetrieveFile?docid=281&version=1&filename=EJ200_data_sheet.pdf
- [18] W. R. Leo, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*, Springer-Verlag, 1987 ch. 8
- [19] G.F. Knoll, *Radiation and measurements, 3rd ed.*, John Wiley & Sons, 2000 ch. 9
- [20] BMG LABTECH GmbH,
<http://www.bmglabtech.com/en/technology/microplate-reader-technology/pherastar-detection-system-obj-51-937.html> Allmendgruen 8 — D-77799 Ortenberg, Germany
- [21] K. Kleinknecht, *Detectors for particle radiation*, Cambridge University Press, third edition, 1986, ch. 4
- [22] Hamamatsu Photonics K.K.,
<http://www.hamamatsu.com/jp/en/technology/innovation/photocathode/index.html>
- [23] Hamamatsu Photonics K.K., *Photomultiplier Tubes: Basics and applications*, third edition, 2007, ch. 4
- [24] Hamamatsu Photonics K.K.,
<http://www.hamamatsu.com/us/en/R2059.html>
- [25] Hamamatsu Photonics K.K.,
http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/R1828-01_R2059_TPMH1259E.pdf

- [26] Roithner Lasertechnik GmbH, Wiedner Hauptstraße 76, A-1040 Vienna, Austria,
http://www.roithner-laser.com/datasheets/led_deepuv/uvtop335.pdf
- [27] Alimentatore A1535, C.A.E.N. SPA Via Vetraia, 11 Viareggio (LU),
<http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?parent=20&idmod=533>
- [28] Digitizer V1721, C.A.E.N. SPA Via Vetraia, 11 Viareggio (LU),
<http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?parent=11&idmod=532>
- [29] Scaler V560, C.A.E.N. SPA Via Vetraia, 11 Viareggio (LU),
<http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?idmod=62&parent=11>
- [30] Mainframe alimentatore SY1527, C.A.E.N. SPA Via Vetraia, 11 Viareggio (LU),
<http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?parent=20&idmod=122>
- [31] Bridge V2718, C.A.E.N. SPA Via Vetraia, 11 Viareggio (LU),
<http://www.caen.it/csite/CaenProd.jsp?idmod=445&parent=11#>
- [32] MPPC (multi-pixel photon counter),
http://www.phys.hawaii.edu/~idlab/taskAndSchedule/iTOP/SciFi_doco/s10362-11series_kapd1022e05.pdf