

Università di Pisa

Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali

Corso di Laurea Specialistica in Scienze Fisiche

Anno Accademico 2003–2004



Tesi di Laurea Specialistica

*Studio e caratterizzazione del tracciatore al
silicio del Large Area Telescope di GLAST*

Candidato:
Carmelo Sgrò

Relatore:
Chiar.mo Prof. Ronaldo Bellazzini

INDICE

1. Introduzione	1
2. Astrofisica gamma con GLAST	5
2.1 Breve storia dell'astronomia gamma su satellite	6
2.2 Osservazioni da telescopi terrestri	9
2.3 Sky Map e Sorgenti non identificate	10
2.4 Active Galactic Nuclei (AGN)	12
2.5 Pulsar	13
2.6 Gamma Ray Burst (GRB)	14
2.7 Produzione dei raggi cosmici	15
2.8 Ricerca di materia oscura	16
3. Il Large Area Telescope	17
3.1 Principio di funzionamento	18
3.2 Il tracciatore	19
3.2.1 I rivelatori al silicio	22
3.3 Il calorimetro	23
3.4 Il sistema di anticoincidenza	25
3.5 Il trigger e il flusso di dati	25
4. Costruzione del tracciatore	31
4.1 Test dei sensori	32
4.1.1 Test elettrici	33
4.1.2 Test geometrici	35
4.2 Costruzione dei ladder	38
4.2.1 Assemblaggio e test	38
5. Controllo tracciatore e acquisizione dati	43
5.1 DAQ della torre	44
5.1.1 Descrizione generale	44
5.1.2 Tower Electronic Module	46
5.1.3 TCM	46
5.1.4 GTRC	48
5.1.5 GTFE	49
5.1.6 Studio del rumore nell'elettronica di GLAST	52
5.2 Online software: ambiente di test e di controllo a terra	57

5.2.1	EGSE	58
5.2.2	Run Control	59
5.3	Test elettrici	62
5.3.1	Controlli di funzionalità	62
6.	La Minitorre	69
6.1	Costruzione dello strumento	70
6.1.1	Assemblaggio della minitorre	70
6.1.2	Test elettrici sui singoli MCM	71
6.1.3	Test elettrici sui singoli tray	73
6.2	Caratterizzazione dello strumento	78
6.2.1	Misura del rumore	81
6.2.2	Misure di efficienza	85
6.2.3	Risoluzione spaziale e allineamento	89
6.3	L'analisi dati offline	93
6.3.1	Gleam: l'ambiente di simulazione e analisi offline	93
6.3.2	Distribuzioni angolari	96
6.3.3	Distribuzione delle "hit"	102
6.3.4	Molteplicità delle "hit"	107
6.3.5	Time Over Threshold	111
	<i>Conclusioni</i>	117
	<i>Appendice</i>	119
	<i>Elenco degli acronimi</i>	121
	<i>Bibliografia</i>	123

1. INTRODUZIONE

L'esperimento GLAST (*Gamma-Ray Large Area Telescope*) è una missione internazionale ideata con lo scopo di esplorare il cielo gamma ad altissime energie. Si tratta di un telescopio spaziale in grado di rivelare fotoni nell'intervallo di energia che va da 30 MeV a 300 GeV. GLAST rappresenta la naturale evoluzione delle precedenti missioni spaziali, come ad esempio le pionieristiche SAS-2 e COS-B e la più recente CGRO, oltre che un fondamentale punto di incontro tra esse e gli esperimenti a terra che sono in grado di rilevare fotoni di energie superiori al TeV.

L'interesse verso l'astronomia gamma è andato crescendo negli ultimi decenni. Lo studio dei fotoni di maggiore energia dello spettro elettromagnetico ha mostrato alcuni dei fenomeni celesti più energetici e dinamici conosciuti ad oggi. Inoltre la scarsa probabilità di interazione con la materia che caratterizza i raggi gamma e l'insensibilità ai campi magnetici galattici ed extragalattici permette di osservare, con relativa facilità, sorgenti a distanze notevoli da noi. Sono stati i telescopi montati su satelliti a mostrare quanto ricco e interessante sia il cielo γ : essi sono infatti l'unica tecnologia in grado di raccogliere direttamente i fotoni ad alte energie. Con apparati a terra si può solo osservare lo sciame elettromagnetico che i raggi γ producono interagendo con l'atmosfera.

Prima di GLAST altre missioni spaziali hanno compiuto osservazioni fino ad energie del GeV. La più importante è sicuramente la già citata CGRO (*Compton Gamma Ray Observatory*) con a bordo lo strumento EGRET (*Energetic Gamma Ray Experiment Telescope*), a cui si deve la prima mappatura completa del cielo visto attraverso i raggi γ . Le sorgenti puntiformi individuate da EGRET (circa 270) mostrano una grande varietà di fenomenologie sia come variabilità temporale che come spettro di energie. Solo un centinaio di tali sorgenti sono però state identificate. La maggior parte di esse sono state classificate come AGN (*Active Galactic Nuclei*) ovvero galassie il cui nucleo è molto brillante (più del resto della galassia) ed il cui spettro si estende fino alle alte energie (GeV). Molto interessanti sono state le misure riguardanti fenomeni transienti o periodici come Pulsar, brillamenti solari o Gamma-ray Burst. Su tali fenomeni sono molte le domande ancora senza risposta, ad esempio quale è il meccanismo che li genera, o quale fenomeno fisico è alla base della produzione di energie così elevate. Non bisogna poi dimenticare le altre sorgenti che non hanno ancora un "nome", cioè non hanno una controparte univocamente individuata ad altre lunghezze d'onda, e

la cui natura GLAST contribuirà in modo decisivo a svelare.

Ma non sono solo le sorgenti puntiformi ad interessare la comunità scientifica. Il fondo diffuso di fotoni gamma rappresenta una problematica altrettanto interessante. Già EGRET ha fornito una serie di dati molto precisi che servono ad esempio per comprendere meglio i meccanismi di accelerazione dei raggi cosmici o a cercare tracce di materia oscura e nuove particelle. A GLAST spetta il compito di raffinare i dati di EGRET con osservazioni ad energie più elevate, con una migliore risoluzione e con una sensibilità superiore di quasi due ordini di grandezza.

La soglia massima in energia per EGRET era di 30 GeV. La banda di energia fra 30 e 300 GeV è quindi totalmente inesplorata. GLAST si propone di compiere osservazioni in tale banda e di dare risposta ai numerosi interrogativi posti da EGRET completando e migliorando il suo lavoro. Infatti nonostante l'idea di fondo sia simile nei due esperimenti GLAST dispone di tecnologie più avanzate e di notevoli differenze che lo rendono capace di prestazioni superiori.

A bordo del satellite trovano posto due strumenti: il LAT (*Large Area Telescope*) e il GBM (*Glast Burst Monitor*). Il primo è un telescopio vero e proprio basato su tecniche ampiamente sviluppate nel campo della fisica delle particelle elementari: un tracciatore-convertitore a microstrip di silicio seguito da un calorimetro a scintillatori di CsI(Tl). Il tutto è circondato da un sistema, finemente segmentato, di anticoincidenza (ACD, *Anti Coincidence Detector*) formato da piastrelle di scintillatori plastici che essendo sensibili solo alle particelle cariche consentono di evidenziare e cancellare il fondo di raggi cosmici. Il secondo invece è uno strumento dedicato allo studio di fenomeni transienti in particolare Gamma-Ray Burst. È formato da 12 scintillatori di NaI(Tl) e due di BGO in modo da ottenere una copertura del cielo in ogni direzione, una buona risoluzione in energia e una risposta veloce.

Questo lavoro è dedicato al tracciatore del LAT la cui costruzione è sotto la responsabilità dell'INFN. L'esperimento è già avviato verso la fase di produzione del hardware di volo: la costruzione della prima delle sedici "torri" che costituiscono il tracciatore è prevista entro l'estate di quest'anno. Il lavoro originale presentato in questa tesi è servito da preparazione alla fase di produzione, quasi in serie, dei vari componenti del tracciatore: è stato studiato in dettaglio il sistema di controllo a terra dello strumento e sono state definite e preparate le routine di test che dovranno assicurare il corretto funzionamento dei suoi singoli componenti. Inoltre è stato studiato un prototipo in scala ridotta del tracciatore di cui sono state valutate le prestazioni in termini di rumore, efficienza, allineamento e ricostruzione degli eventi.

Nel primo capitolo sono descritti brevemente i principali obiettivi scientifici di GLAST e sono mostrate le differenze con le precedenti missioni per astronomia gamma e con i telescopi terrestri. Quindi viene descritto in mag-

giore dettaglio il disegno ed il funzionamento del LAT (secondo capitolo). Naturalmente viene dato maggior risalto alle caratteristiche del tracciatore ed ai rivelatori a semiconduttore: è bene ricordare che GLAST è l'esperimento spaziale con la maggior superficie di rivelatori a silicio che sia mai stato costruito, direttamente confrontabile con esperimenti per fisica delle alte energie. Il terzo capitolo è dedicato allo stato della costruzione dei rivelatori. Tutti i wafer di silicio necessari all'esperimento sono già stati acquistati, quasi tutti sono stati testati e sono quindi pronti per l'assemblaggio.

Il sistema di controllo e acquisizione dati è descritto nel dettaglio nel quarto capitolo. Viene mostrato il sistema elettronico ed i suoi vari componenti soprattutto per quanto riguarda la lettura dei segnali dai rivelatori. Poi si passa alla descrizione del sistema dal punto di vista software: l'equipaggiamento di supporto a terra e l'ambiente di controllo. Quindi vengono descritte brevemente le routine di test studiate per controllare la perfetta funzionalità dei componenti. Tali test sono stati sviluppati anche grazie all'esperienza acquisita con un prototipo di torre in scala ridotta. Tale prototipo, la minitorre, è l'oggetto del quinto capitolo. Esso è, dal punto di vista elettrico, quasi identico alla versione finale dello strumento. Ciò ha permesso non solo di acquisire esperienza nei test elettrici, ma anche di caratterizzare le prestazioni dello strumento stesso validando l'intero disegno del tracciatore. Infine vengono mostrati i risultati dei dati raccolti tramite un run di raggi cosmici in modo da esercitare la catena di ricostruzione e la simulazione Monte Carlo dello strumento.

2. *ASTROFISICA GAMMA CON GLAST*

L'osservazione del cielo all'energia dei raggi gamma permette di investigare i fenomeni più estremi dell'universo e di studiare argomenti alla frontiera tra astrofisica e fisica delle particelle. L'astrofisica gamma ha raggiunto notevoli risultati negli ultimi decenni grazie al miglioramento delle tecnologie utilizzate. Il suo sviluppo ha seguito due percorsi paralleli: esperimenti terrestri e satelliti artificiali. A terra sono stati costruiti strumenti in grado di rivelare lo sciame elettromagnetico prodotto dai gamma che interagiscono nell'atmosfera. Tali strumenti sfruttano l'osservazione del cono di luce Cherenkov, proveniente dagli sciami, per rivelare i gamma ad energie di ~ 100 GeV, mentre, ad energie superiori ($\sim 1 - 10$ TeV) si preferisce rivelare direttamente le particelle che giungono a terra. I satelliti artificiali sono preferiti nella fascia dello spettro gamma da \sim MeV a ~ 100 GeV. Essi rivelano direttamente i fotoni campionando e assorbendo lo sciame da essi prodotto.

GLAST sarà il prossimo esperimento spaziale dedicato allo studio di questa disciplina. Le sue caratteristiche costruttive lo rendono in grado di prestazioni decisamente superiori ai suoi predecessori.

Questo capitolo si apre con una introduzione storica con lo scopo di confrontare le caratteristiche tecniche delle varie missioni precedenti GLAST. Il paragrafo successivo è invece dedicato al confronto con gli esperimenti a terra per meglio comprendere quanto siano complementari le due strategie. Verranno quindi descritti brevemente i principali obiettivi scientifici di questo esperimento con particolare enfasi al contributo che potrà dare GLAST.

2.1 Breve storia dell'astronomia gamma su satellite

L'astronomia gamma è una scienza relativamente recente. Il suo sviluppo è strettamente legato allo sviluppo tecnologico degli apparati di rivelazione. Ciò è dovuto al fatto che l'atmosfera è opaca ai raggi gamma ed è quindi necessario l'impiego di satelliti artificiali (per energie fino al centinaio di GeV) o di apparati in grado di "ricostruire" lo sciame elettromagnetico prodotto dall'interazione dei fotoni con l'atmosfera (usati quando l'energia del fotone è così grande da non poter essere contenuta in un calorimetro su satellite). Inoltre ad energie superiori alla ventina di MeV il processo dominante di interazione dei fotoni con la materia è la produzione di coppie elettrone-positrone, bisogna quindi costruire rivelatori che sfruttino questo processo. Tale valore rappresenta anche il limite inferiore dell'energia rivelabile. Il limite superiore in energia è dovuto maggiormente al flusso. Se ad esempio si considera la Crab, per un'area effettiva di $\sim 1m^2$ (il massimo possibile, date le dimensioni di un satellite), si ottengono solo 25 eventi, ad $E > 300GeV$, in un anno di osservazione [5], appena sufficienti per una rivelazione a "5 σ ".

Per fare interagire i gamma si usa in genere un "convertitore": un materiale ad alto Z in cui i fotoni interagiscono producendo coppie e^+e^- che vengono poi rivelate con i sistemi tipici della fisica delle alte energie in modo da ricostruire energia e direzione di provenienza.

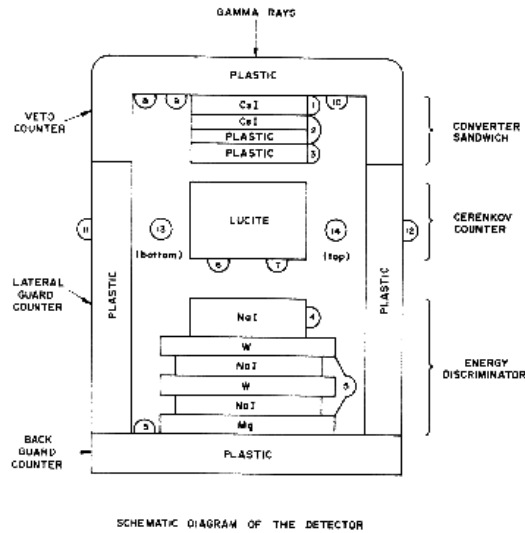


Fig. 2.1: Schema dei componenti del telescopio per raggi gamma a bordo di OSO-III.

Il primo telescopio di successo per la fisica dei raggi gamma fu lanciato a bordo della missione OSO-III (Orbiting Solar Observatory) negli anni 1967-68. Lo schema del rivelatore è mostrato in figura 2.1. Il convertito-

re è costituito da cristalli di CsI, seguito da un contatore Cherenkov e da un calorimetro composto da strati di tungsteno e NaI. Tutto il rivelatore è circondato da uno schermo di anticoincidenza (uno scintillatore plastico) che essendo sensibile al passaggio di particelle cariche consente di separare i fotoni dai raggi cosmici. Tale tecnica di anticoincidenza deve essere estremamente efficiente dal momento che le particelle cariche, a queste energie, sono 1.000.000 volte più numerose dei raggi gamma. Grazie a questo strumento fu scoperta la radiazione gamma proveniente dalla nostra galassia.

Un significativo miglioramento delle prestazioni dei satelliti per astronomia gamma si ebbe con l'utilizzo di "spark chamber". Tali dispositivi consentirono di tracciare le coppie e^+e^- ed individuare quindi, con maggiore precisione, la direzione di arrivo dei fotoni. Le spark chamber sono state ampiamente utilizzate in tutte le missioni precedenti GLAST. Il primo esperimento ad utilizzare tale tecnologia fu SAS-2 (Small Astronomy Satellite), lanciato dalla NASA nel Novembre 1972 funzionò per soli 6 mesi a causa di una avaria elettrica. Tre anni dopo venne lanciato dall'ESA il satellite COS-B che restò operativo per 6 anni e 8 mesi, nonostante la durata prevista della missione fosse di due anni. Oltre all'emissione diffusa proveniente dal piano galattico, COS-B rivelò 25 sorgenti gamma tra cui le pulsar Crab e Vela.

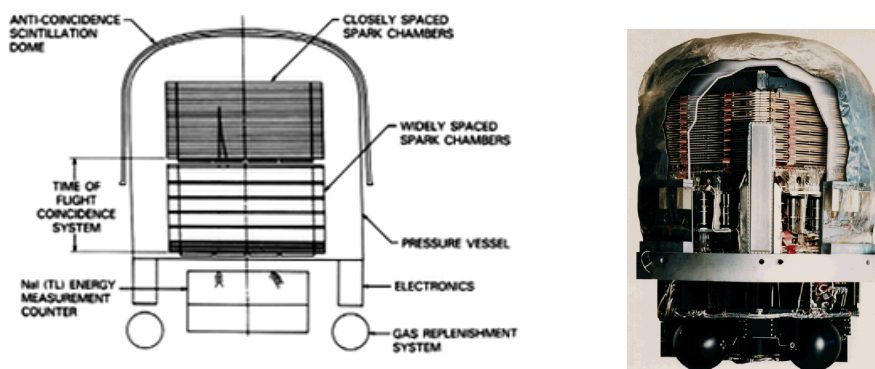


Fig. 2.2: Schema di funzionamento dell'esperimento EGRET (a sinistra) ed uno spaccato del rivelatore (a destra).

In seguito al successo di queste missioni, la NASA, alla fine degli anni '70, approvò la costruzione di un nuovo esperimento, il *Compton Gamma Ray Observatory (CGRO)* con lo scopo di esplorare un più ampio range energetico: da 0.01MeV a 30GeV . A bordo di questo satellite trovarono posto quattro strumenti dedicati a diverse bande energetiche. Il *Burst and Transient Source Experiment (BATSE)* era dedicato alla banda energetica $25\text{keV} - 2\text{MeV}$ ed era composto da otto moduli posti agli angoli del satellite in modo da coprire in modo uniforme tutto il cielo. Alle energie

0.05 – 10 MeV era dedicato lo strumento *Oriented Scintillator Spectrometer Experiment (OSSE)*. Mentre l'esplorazione della banda 1–30 MeV era affidata al *Compton Telescope (COMPTEL)* che sfruttava lo scattering Compton in un primo array di rivelatori e il successivo assorbimento dei fotoni in un secondo array. L'ultimo strumento a bordo del CGRO era l'*Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET)* che sfruttava la produzione di coppie e^+e^- per lo studio dei fotoni di energie 30 MeV – 30 GeV. Quest'ultimo rivelatore utilizzava lo stesso schema di principio dei precedenti SAS-2 e COS-B, ma con prestazioni decisamente superiori. Nella tabella 2.1 sono mostrate le caratteristiche dei tre esperimenti già citati confrontati con il Large Area Telescope a bordo di GLAST. Come già accennato EGRET faceva ampio uso di spark chamber per tracciare lo sciame elettromagnetico. Un fotone che entra nel rivelatore dall'alto incontra subito uno scudo di scintillatori plastici in anticoincidenza e quindi un primo array di spark chamber e piani di conversione molto vicini tra loro. Il fotone, a differenza di una particella carica, non rilascia alcun segnale negli scintillatori e converte in coppie solo dopo averli attraversati. Successivamente le coppie cariche attraversano un sistema per la misura del *time-of-flight* composto da due array 4×4 di scintillatori. Tale sistema identifica le particelle che provengono dall'alto e fornisce il trigger (insieme con il sistema di anticoincidenza) ai rivelatori a gas. L'energia dei fotoni viene misurata in un calorimetro costituito da un blocco unico di NaI(Tl) in cui lo sciame viene completamente assorbito.

EGRET è stato il primo strumento a compiere l'osservazione completa del cielo alle energie 20 MeV–30 GeV, le sorgenti puntiformi che ha scoperto sono circa 270, di cui solo un centinaio sono state identificate. Il LAT a bordo di GLAST si pone come diretto successore di EGRET. La tecnologia più avanzata di cui dispone lo rende in grado di dare risposta ai quesiti posti dalle osservazioni di EGRET e migliorare sensibilmente la conoscenza del cielo gamma. Nel prossimo capitolo verrà descritta in dettaglio la tecnologia impiegata nel LAT e verrà evidenziato l'impatto del miglioramento tecnologico sulle prestazioni dello strumento.

	SAS-2	COS-B	EGRET	LAT
Data di lancio	1972	1975	1991	2007
Intervallo di energia	35MeV-1GeV	30MeV-5GeV	20MeV-30GeV	20MeV-300GeV
Campo di vista	0.25 sr	0.25 sr	0.5 sr	> 2 sr
Area effettiva (picco)	100 cm^2	70 cm^2	1200 cm^2	> 8000 cm^2
Risoluzione angolare	-	-	5.8°	< 3.5°
Risoluzione Energetica	~ 100%	45%	10%	< 10%
Tempo morto	-	-	100 ms	< 100 μs
Sensibilità ($cm^{-2}s^{-1}$)	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-9}

Tab. 2.1: Confronto tra le varie missioni per astronomia gamma. La risoluzione angolare va intesa per singolo fotone (68% di contenimento), la risoluzione energetica come FWHM@100 MeV per SAS-2 e COS-B e 1σ "on axis" per EGRET e LAT.

2.2 Osservazioni da telescopi terrestri

I raggi gamma di alta energia possono essere osservati tramite lo sciame elettromagnetico che producono interagendo nell'atmosfera. La tecnica che ha avuto maggior successo si basa sulla rivelazione della luce Cherenkov prodotta dallo sciame ed è particolarmente efficace per raggi gamma di energie superiori al centinaio di GeV. Tali strumenti vengono denominati *Air Cherenkov Telescope* (ACT). All'aumentare dell'energia dei gamma ($\sim 1 - 10$ TeV) un numero sempre più consistente di particelle dello sciame raggiungono il suolo, rendendo possibile la loro rivelazione diretta.

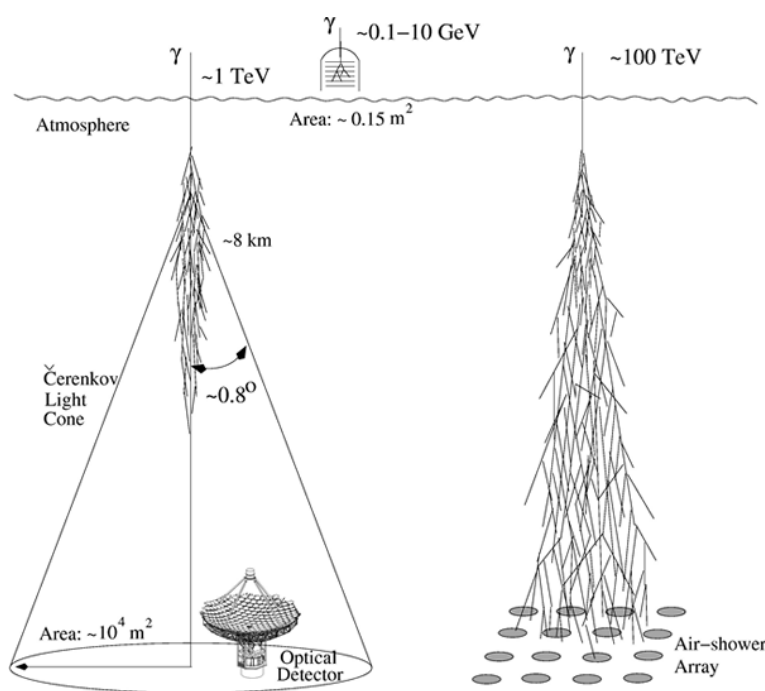


Fig. 2.3: Disegno schematico delle tecniche di rivelazione di fotoni gamma in vari range energetici. Da notare come per i rivelatori Cherenkov, a differenza degli altri, l'area efficace è legata alla larghezza del cono di luce anziché alle dimensioni del rivelatore.

Gli ACT hanno il vantaggio di una ampia area efficace. In un esperimento spaziale la superficie attiva è limitata dalle dimensioni dello strumento, in un ACT l'area efficace non è legata dalla superficie del rivelatore, ma alla larghezza del cono di luce dello sciame. Sono però strumenti con un ridotto campo di vista e "duty cycle" ($\sim 10\%$) e vengono perciò fatti operare in "pointing mode" ovvero osservando in maniera continua una singola sorgente. GLAST al contrario ha un campo di vista molto ampio e viene fatto operare in "scanning mode" ovvero osservando, ad ogni orbita, la maggior porzione

di cielo possibile. Le osservazioni di GLAST possono quindi fungere da trigger e segnalare le porzioni di cielo “interessanti” ad osservatori terrestri che offrono una migliore sensibilità a sorgenti puntiformi.

Altro parametro importante, anch’esso legato alla sensibilità dello strumento, è la capacità di separare il fondo di particelle cariche. Per gli esperimenti nello spazio basta usare uno scudo esterno di scintillatori in anticoincidenza. Per gli ACT la situazione è più complessa: bisogna separare gli sciame elettromagnetici da quelli adronici. La tecnica usata è basata sull’imaging e sfrutta il diverso sviluppo geometrico di sciame prodotti da gamma o particelle cariche.

Gli esperimenti a terra attualmente in costruzione puntano ad aumentare la sensibilità e contemporaneamente a ridurre la soglia inferiore di energia fino ~ 30 GeV. Si potrà così ottenere per la prima volta una banda dello spettro gamma osservabile sia da esperimenti spaziali che terrestri.

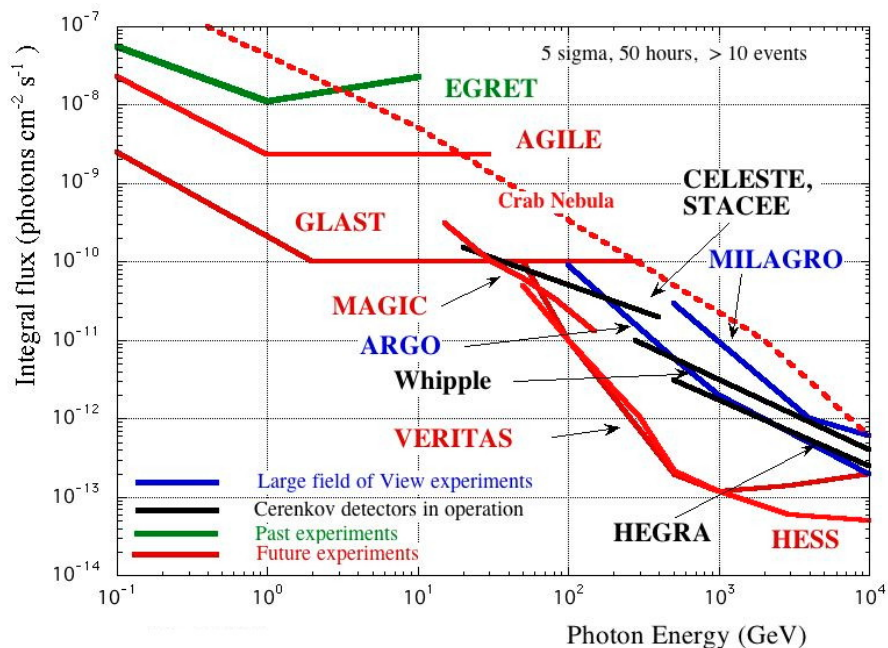


Fig. 2.4: Confronto tra la sensibilità di vari esperimenti per la rivelazione di raggi gamma. (Tutte le sensibilità sono a 5σ . MAGIC, CELESTE, STACEE, VERITAS, Whipple: 50 ore di esposizione su una singola sorgente. EGRET, MILAGRO, GLAST and AGILE: un anno *all sky survey*).

2.3 Sky Map e Sorgenti non identificate

L’eccellente risoluzione angolare e sensibilità del LAT consentirà di mappare l’intero cielo in maniera dettagliata, consentendo di localizzare le sorgenti

a livello del minuto d'arco. Un *survey* dell'intero cielo è pianificato per il primo anno della missione GLAST. In un solo giorno di osservazione (in "scanning mode") GLAST può accumulare statistica sufficiente per rivelare la più debole delle sorgenti di EGRET.

Attualmente delle 271 sorgenti osservate da EGRET a ben 170 non si riesce ad attribuire una controparte ad altre lunghezze d'onda (ottico, radio o X). Ciò rende praticamente impossibile la loro identificazione. GLAST sarà il primo strumento a combinare sensibilità e risoluzione angolare in modo da legare le sorgenti gamma ad oggetti specifici (fig. 2.5).

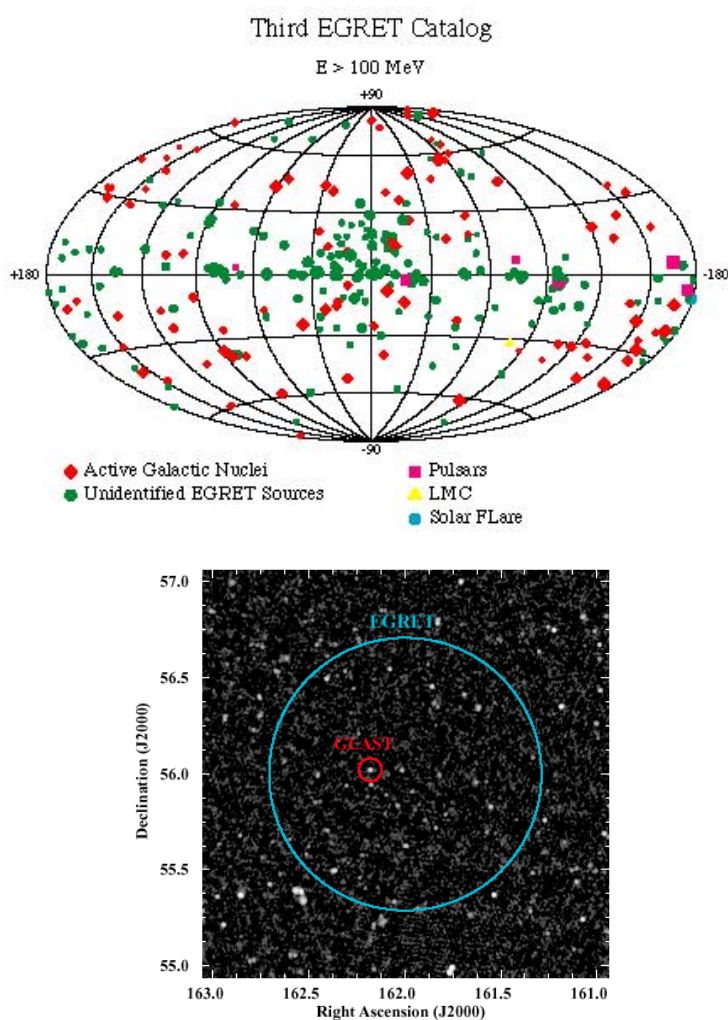


Fig. 2.5: In alto: sorgenti gamma osservate da EGRET.

In basso: confronto tra il contorno al 95% di confidenza tra GLAST (rosso) e EGRET (blu).

Le prestazioni estremamente migliorate di GLAST rispetto ai suoi predecessori aprono la via alla scoperta di nuove sorgenti gamma di varia natura. Inoltre la migliore sensibilità di GLAST è utile per andare incontro alla sensibilità dei nuovi rivelatori a terra. GLAST va nella direzione di colmare il divario energetico tra i telescopi gamma su satellite e quelli a terra.

2.4 Active Galactic Nuclei (AGN)

In alcune galassie, note come “Nuclei Galattici Attivi” (AGN), la zona centrale produce più radiazione del resto della galassia. EGRET mostrò che gli AGN (e in particolare una classe chiamata “blazar”) sono sorgenti di raggi gamma luminose e variabili. Il modello che spesso viene utilizzato per spiegare questi comportamenti coinvolge un buco nero centrale il quale emette getti di materia (*Jets*) in direzioni opposte a velocità relativistiche. Un disco di accrescimento giace su un piano ortogonale alla direzione dei jets (vedi fig. 2.6) circondato da un toroide di materia.

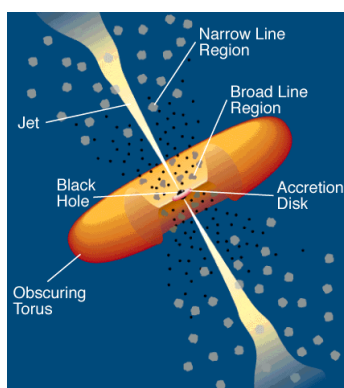


Fig. 2.6: Visione artistica del modello di AGN.

GLAST, con la sua maggiore sensibilità, aumenterà il numero di AGN note da circa 70 alle migliaia. Inoltre, grazie ai ridotti tempi morti e alla migliore risoluzione spaziale, è in grado di osservare il cielo completo in sole tre ore circa e fornire dati più precisi sui tempi di variabilità delle sorgenti oltre ad offrire segnali di allerta in tempo reale ad altri esperimenti ad altre bande energetiche.

La distribuzione in energia delle blazar generalmente mostra due componenti, una a bassa frequenza con un picco tra le frequenze radio e X , l'altra piccata all'energia dei raggi gamma (fig. 2.7). Le osservazioni di GLAST saranno cruciali per validare i modelli leptonici e adronici dei jet. Nel primo modello l'emissione di raggi gamma è dovuto alla diffusione Compton di fotoni di bassa energia con leptoni relativistici nei jet. La sorgente di tali fotoni può essere sia *Synchrotron Self Compton* (SSC) nei jet che *External*

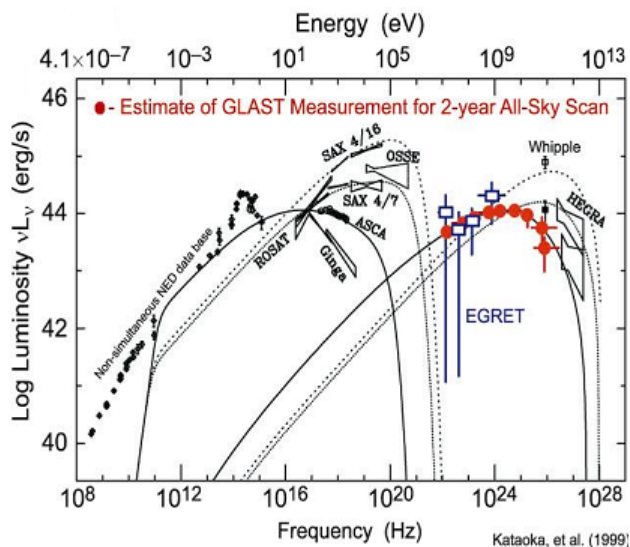


Fig. 2.7: Spettro di emissione tipico per un blazar.

Compton Scattering (ECS) nel disco di accrescimento. Nel modello adronico i raggi gamma possono essere originati dalle cascate elettromagnetiche iniziate dai π^0 o dalle coppie e^+e^- prodotte da interazioni pp o $p\gamma$.

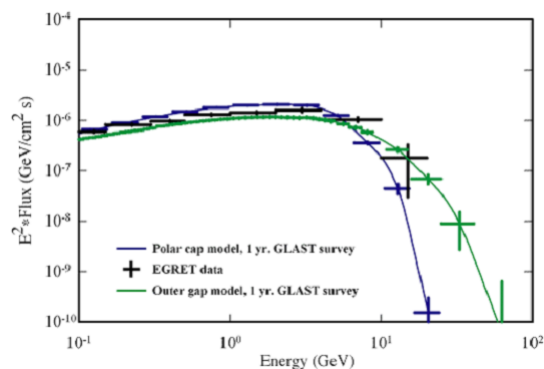


Fig. 2.8: Spettri di emissione simulati di una pulsar. Sono visibili i due modelli di emissione e le potenzialità osservative di GLAST.

2.5 Pulsar

Tra le prime sorgenti astronomiche ad essere rivelate ad energie dei raggi gamma vi sono le Pulsar (stelle di neutroni rotanti). Esse sono tra i migliori

laboratori naturali per studiare condizioni fisiche estreme, come ad esempio fortissimi campi gravitazionali e grandissimi campi magnetici.

GLAST potrà scoprire nuove pulsar e misurare spettri con precisione tale da distinguere tra i due modelli principali proposti per spiegare le emissioni gamma: i cosiddetti “polar gap” e “outer gap”. Nel primo la regione di emissione corrisponde ai poli magnetici della stella di neutroni, nel secondo invece è la magnetosfera, dove il plasma ruota insieme alla stella, ad essere responsabile dell'emissione.

Il parametro chiave in questo tipo di studi è l'elevata statistica di fotoni raccolti dal LAT, grazie alla sua elevata area efficace, accoppiata alla buona risoluzione del calorimetro.

2.6 Gamma Ray Burst (GRB)

I Gamma Ray Burst sono uno degli argomenti più interessanti per GLAST, essi sono le sorgenti di raggi gamma più intense che si conoscono: si calcola che l'energia rilasciata durante un GRB raggiunga i 10^{52} - 10^{54} erg. Furono scoperti negli anni sessanta dai satelliti VELA, la cui missione originaria era controllare che l'Unione Sovietica non effettuasse test nucleari nello spazio.

I GRB si presentano come lampi di radiazione gamma provenienti dallo spazio in istanti casuali e da direzioni casuali. Essi hanno tempi di variabilità che vanno dal secondo al millisecondo e sono distribuiti in maniera isotropa nello spazio. Quest'ultima caratteristica mostra un'origine extragalattica dei GRB, ipotesi confermata anche dall'osservazione di *afterglow* nella banda ottica (HST) e X (BeppoSAX) che permette di identificare una controparte (con risoluzione spaziale maggiore) e misurarne così la distanza.

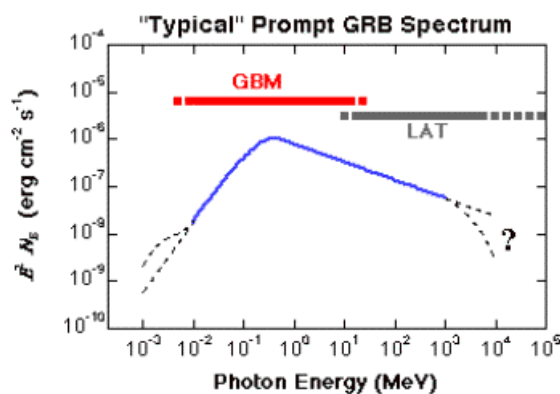


Fig. 2.9: Spettro tipico di un GRB. Da notare la complementarità tra LAT e GBM con una copertura spettrale di oltre sei ordini di grandezza.

Entrambi gli strumenti a bordo di GLAST verranno impiegati per lo

studio dei GRB. Il LAT fornirà dati alle energie più elevate, mentre il GBM, interamente dedicato allo studio di questi fenomeni, fornirà informazioni nella banda 10 keV-25MeV (dove si ha, tipicamente, il picco di emissione). GLAST potrà quindi misurare spettri energetici dal keV fino alle centinaia di GeV e funzionare da allerta veloce per gli altri strumenti in modo da poter avere osservazioni a varie lunghezze d'onda.

Ci si aspetta per il LAT un miglioramento sensibile nelle prestazioni rispetto ad EGRET che rivelò solo quattro GRB che si trovavano nel suo campo di vista. Tali miglioramenti sono dovuti a vari fattori: un'area efficace circa sei volte quella di EGRET, un tempo morto 10^3 volte inferiore e la capacità di monitorare tutto il cielo in breve tempo.

2.7 Produzione dei raggi cosmici

Sebbene il problema dell'origine dei raggi cosmici (CR) sia solo parzialmente spiegato, si ritiene che il sito principale di produzione della componente adronica dei raggi cosmici siano i residui di supernove (SNR). Modelli teorici supportano l'idea che raggi cosmici galattici siano accelerati fino ad energie di qualche TeV nei fronti di shock delle SNR. L'interazione tra le particelle accelerate e quelle presenti nella polvere interstellare nel guscio delle SNR produrrebbe π^0 , il cui successivo decadimento è una segnatura chiara della presenza di raggi cosmici. Importanti progressi nella comprensione dei CR furono compiuti da EGRET che osservò un largo picco a circa 68 MeV nello spettro dei gamma provenienti dalla Via Lattea, chiaro contributo del decadimento dei π^0 .

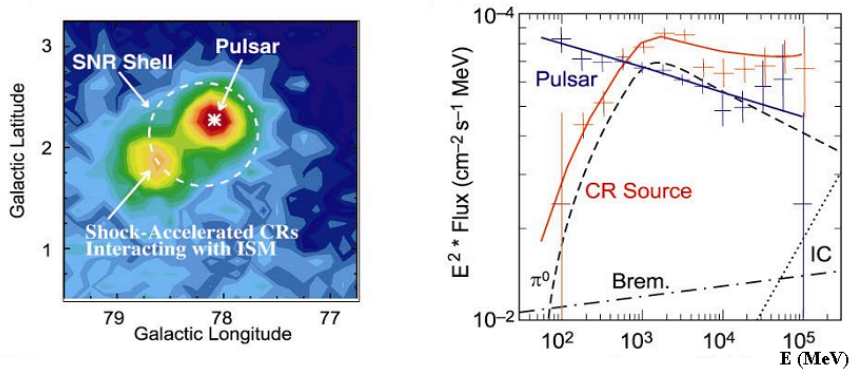


Fig. 2.10: Simulazione di GLAST che mostra le emissioni della SNR γ -Cygni risolta spazialmente (sinistra) ed in energia (destra) da quella pulsar compatta al centro. Una chiara segnatura del decadimento dei π^0 proveniente dal guscio estero indicherebbe la SNR come sito di accelerazione dei raggi cosmici.

GLAST potrà studiare lo spettro di varie SNR, sia galattiche che extragalattiche, con sufficiente risoluzione spaziale ed energetica da evidenziare il contributo del decadimento dei π^0 in modo da distinguere le emissioni dai gusci esterni da quelle di oggetti compatti.

2.8 Ricerca di materia oscura

Un fondo diffuso di raggi gamma, apparentemente isotropo e di energia > 30 MeV, era già stato scoperto da SAS-II e confermato da EGRET. Quale sia l'origine di tali fotoni è ancora un mistero, varie ipotesi sono state fin'ora avanzate. C'è la possibilità che tale fondo sia dovuto alla sovrapposizione di molte sorgenti puntiformi non ancora risolte spazialmente. In tal caso l'elevata risoluzione angolare di GLAST potrebbe essere decisiva. Altri modelli coinvolgono processi più esotici, come il decadimento di particelle massive nelle prime fasi di evoluzione dell'Universo.

Uno dei modelli che sembra particolarmente interessante coinvolge l'annichilazione del neutralino (χ) in $\gamma\gamma$ e γZ che potrebbe essere evidenziato come una linea monocromatica nei gamma provenienti dal centro galattico (fig. 2.11).

I dati di GLAST serviranno a selezionare i vari modelli e forniranno nuovi limiti sull'esistenza di particelle supersimmetriche.

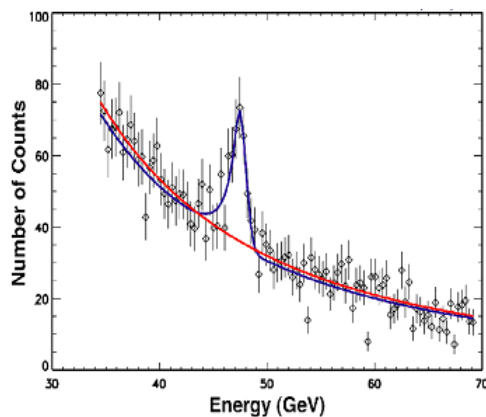


Fig. 2.11: Misura simulata della linea prodotta dall'annichilazione dei neutralini nel centro galattico.

3. *IL LARGE AREA TELESCOPE*

La missione GLAST è un osservatorio di sorgenti celesti nella banda energetica da 20 MeV a 300 GeV con una copertura supplementare ad energie tra i 10 keV e 25 MeV per gamma-ray burst.

Gli obiettivi della missione richiedono uno strumento principale con una grande area di raccolta, ampio campo di vista e risoluzione temporale sufficiente per studiare fenomeni transienti. Fondamentale è inoltre la capacità dello strumento di separare i raggi gamma dal flusso di raggi cosmici e fotoni gamma provenienti dall'albedo terrestre. È necessario un secondo strumento per l'osservazione simultanea di GRB ad energie più basse e fornire una rapida localizzazione del evento. Inoltre l'ambiente spaziale richiede l'utilizzo di tecnologia robusta, collaudata e con bassi consumi di potenza, in modo da poter garantire una lunga vita utile. Per soddisfare questa richieste si è scelto, in fase di progetto, un design il più possibile modulare e ridondante.

Il *Large Area Telescope (LAT)* è lo strumento principale che verrà descritto in modo più dettagliato in questo capitolo. Il secondo strumento si chiama *GLAST Bursts Monitor (GBM)*, è costituito da 12 scintillatori di NaI(Tl) e 2 di BGO disposti in modo da ottenere una copertura del cielo in ogni direzione, una buona risoluzione in energia e una risposta veloce.

3.1 Principio di funzionamento

Come le precedenti missioni per astronomia gamma ad alta energia, il LAT sfrutta la conversione di fotoni in coppie elettrone–positrone (fig. 3.1). La differenza con il passato è ovviamente nella tecnologia attualmente disponibile.

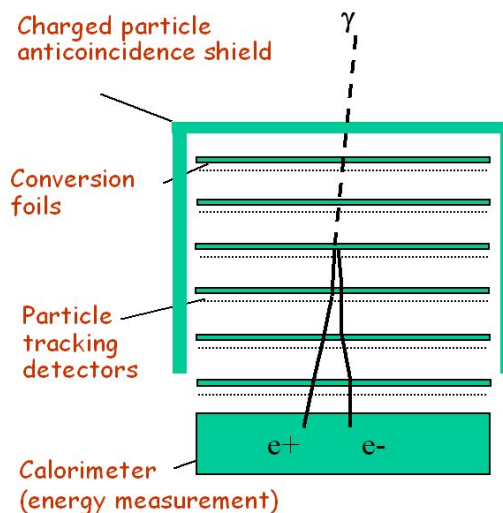


Fig. 3.1: Principio di funzionamento del LAT. I fotoni attraversano lo schermo di anticoincidenza senza interagire, vengono poi convertiti in coppie e^+e^- di cui vengono ricostruiti il percorso (tracciatore) e l'energia (tracciatore + calorimetro).

Il LAT è costituito da quattro sottosistemi. Uno schermo di anticoincidenza (ACD) un tracciatore–convertitore basato sui rivelatori a microstrip al silicio (TKR), un calorimetro a cristalli di CsI (CAL) ed il sistema per la gestione del trigger e il flusso di dati (T&DF).

L'ACD è sensibile alle particelle cariche che attraversano il LAT allo scopo di discriminare ed eliminare tale fondo. Questo sottosistema circonda il LAT ed i suoi dati sono utilizzati dal sistema di trigger (di secondo livello).

Il tracciatore converte i fotoni in particelle cariche e misura con precisione il loro percorso all'interno del tracciatore stesso. I dati provenienti da esso sono utilizzati anche dal sistema di trigger per identificare un "evento" e avviare la sequenza di *read out*.

Il calorimetro assorbe le particelle cariche provenienti dalla conversione dei fotoni e fornisce, insieme con le informazioni del TKR, una misura dell'energia dei gamma. Le informazioni del calorimetro vengono anche utilizzate per discriminare il fondo di raggi cosmici e per formare un trigger in caso di elevato deposito di energia nel CAL.

Il T&DF si occupa della gestione del trigger, della identificazione dei raggi gamma e della gestione del flusso di dati. Il T&DF provvede anche al controllo delle funzionalità dei vari sottosistemi.

Il LAT è studiato in modo tale che i suoi sottosistemi siano il più modulari e ridondanti possibile, in modo da scongiurare eventuali malfunzionamenti una volta in orbita. Esso è costituito da un array 4×4 di torri identiche. Tale scelta permette un aumento dell'area efficace di quasi un ordine di grandezza rispetto a EGRET. Ogni torre è formata da un tracciatore, un calorimetro ed un modulo di elettronica (*Tower Electronic Module, TEM*). Le 16 torri sono circondate dallo schermo di anticoincidenza, a sua volta coperto da uno schermo per la protezione da micrometeoriti e sbalzi termici.

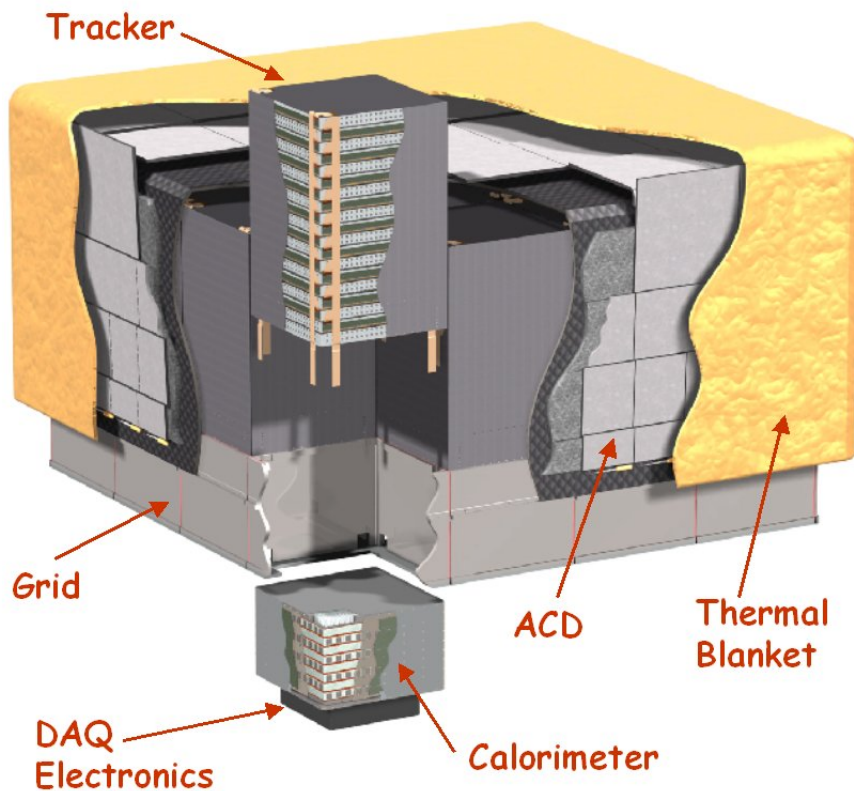


Fig. 3.2: Visione schematica dei vari componenti del LAT.

3.2 Il tracciatore

Il compito del tracciatore è quello di far convertire i fotoni incidenti in coppie e^+e^- e di rivelare le tracce di queste. È bene osservare che nel tracciatore di GLAST vi sono due esigenze contrapposte: per convertire un fotone in

una coppia c'è bisogno che questo attraversi un certo spessore di materiale, mentre per misurare una traccia si richiede il minimo spessore possibile. La scelta dei materiali, del loro spessore e della loro posizione è quindi cruciale per garantire elevate prestazioni.

Per una buona efficienza nella conversione è necessario un materiale ad alto Z , nel caso del LAT è stato scelto il tungsteno. Il rivelatore adoperato è di silicio, di tipo a strip su una sola faccia. I rivelatori a semiconduttore sono stati utilizzati a lungo nel campo della fisica delle particelle elementari, sono quindi una tecnologia affidabile e ben collaudata ed inoltre offrono ottime prestazioni in termini di efficienza e risoluzione spaziale, con un miglioramento sensibile della *Point Spread Function* (PSF) rispetto alle precedenti spark chamber.

I rivelatori a semiconduttore non sono soggetti a deterioramento veloce e non c'è bisogno di conservare gas o altri materiali soggetti a consumo. Questo si traduce in risparmio di spazio prezioso a bordo del satellite e soprattutto in una vita utile maggiore rispetto ai rivelatori a gas in missioni spaziali. Inoltre i rivelatori possono essere letti con un'elettronica veloce e non necessitano di trigger esterni (come nel caso delle spark chamber di EGRET). Si può così ridurre il tempo morto a $< 100 \mu s$ (da confrontare con i $100 ms$ di EGRET).

Tale caratteristica è un punto cruciale nel disegno di GLAST. Con tempi morti piccoli si è sensibili ad eventi che hanno tempi di variabilità ridotti e si può fornire un segnale di allerta per altri esperimenti. Inoltre si possono acquisire eventi ad un rate relativamente elevato che consente di triggerare su tutte le particelle che attraversano il LAT, anche i raggi cosmici, lasciando il compito di eliminare il fondo (tramite l'ACD) ad un secondo, più efficiente, stadio di selezione. I dettagli del sistema di trigger del LAT verranno discussi in seguito (vedi par. 3.5), è però bene evidenziare che i miglioramenti dovuti a questa tecnologia si ripercuotono su tutta la filosofia di utilizzo di GLAST. Infatti si ottiene un notevole miglioramento in termini di area efficace e campo di vista consentendo a GLAST di operare in "scanning mode" diversamente da EGRET e dagli esperimenti a terra.

Come l'intero strumento anche il tracciatore ha una struttura modulare. L'unità fondamentale che compone il tracciatore è il *Silicon Strip Detector* (SSD): il singolo sensore di silicio è un quadrato di 8,95 centimetri per lato ottenuto da wafer circolari di sei pollici di diametro. Ulteriori caratteristiche di questo tipo di detector verranno descritte nel prossimo paragrafo. A gruppi di quattro vengono posti uno di seguito all'altro in modo da avere tutte le strip parallele. Si connettono quindi quelle di un wafer a quelle del wafer adiacente ottenendo così un'unica serie di strisce, un *ladder*. Si affiancano quindi quattro ladder su uno stesso piano e si montano su una struttura chiamata *tray*. Un tray (vedi fig. 3.3) è una struttura composta in fibra di carbonio, materiale scelto per la sua grande lunghezza di radiazione e la sua notevole stabilità termica e meccanica.

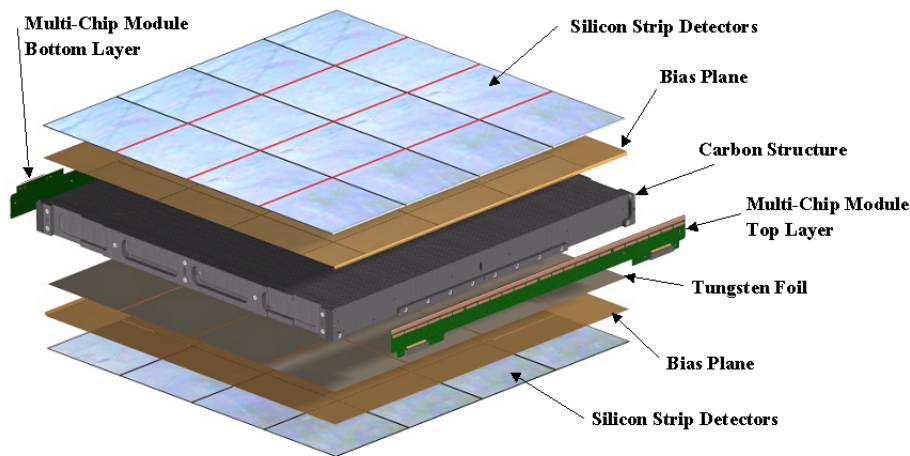


Fig. 3.3: Schema di un tray: il corpo centrale è costituito da una struttura interna a nido d'ape (non mostrata) rivestita da supporti di carbonio; sulle due facce sono montati un foglio di kapton con stampato il circuito di bias ed una matrice 4×4 di rivelatori con le strip parallele tra loro. Il foglio di conversione in tungsteno è posto sul piano inferiore. I moduli di elettronica sono visibili sui due lati del tray.

I rivelatori sono posti sulle due facce del tray con le strip parallele. Infine 19 tray sono montati uno sopra l'altro a distanza di 2 mm per formare una torre. Le strip tra un tray e quello successivo sono ruotate di 90 gradi. In questo modo si ottiene un foglio di conversione immediatamente seguito da un piano xy di rivelatori. I tray sono tutti uguali meccanicamente, tranne il top e il bottom, i quali sono provvisti di sensori su una sola faccia, e possiedono dei supporti meccanici per l'ancoraggio della torre al resto del LAT.

Una torre è divisa in due parti, il "fronte" e il "retro". Lo spessore dei vari fogli di conversione varia con la posizione del tray. Il fronte è formato da i primi 12 piani con i fogli più sottili (0,03 lunghezze di radiazione, R.L.) in modo da migliorare le osservazioni sui fotoni meno energetici. Il retro è formato dai rimanenti piani, i primi 4 con fogli spessi 0,18 R.L., gli altri senza fogli. La parte posteriore è così ottimizzata per i fotoni a più alta energia, a discapito però della risoluzione angolare. Lo spessore totale di tutto il tracciatore è 1,3 R.L.; un valore superiore degraderebbe troppo la misura di energia nel calorimetro posto al di sotto del tracciatore stesso.

L'elettronica di lettura (un modulo per ogni piano) è montata a 90° sul lato del tray in modo da minimizzare lo spazio morto tra una torre e l'altra. Le comunicazioni tra i vari moduli di elettronica avviene tramite cavi piatti multistrato (*flex cable*), due per ogni lato della torre, posti paralleli sui lati della torre stessa e forniti di bracci a forma di cactus per le connessioni con

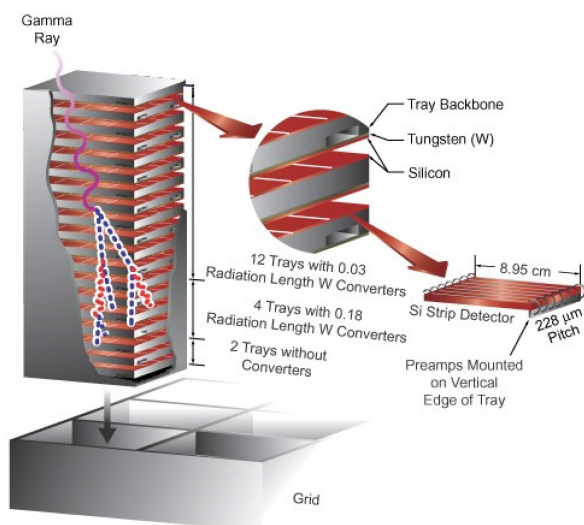


Fig. 3.4: Schema di una torre.

le schede di elettronica. I dati sono digitalizzati all'interno del sistema di read out che provvede anche alla soppressione degli zeri: ogni evento consiste nell'identificatore delle strip colpite e nel *Time Over Threshold (TOT)* del OR logico dei segnali di ogni piano. Per la costruzione dell'intero tracciatore verranno utilizzati circa 10500 sensori al silicio (una superficie di oltre $82 m^2$); un totale di oltre 880000 canali per un consumo di potenza di circa 150 Watt.

3.2.1 I rivelatori al silicio

I rivelatori a semiconduttore hanno una lunga tradizione nel campo della fisica delle alte energie e si adattano particolarmente bene ai requisiti di questa missione. Essi infatti offrono un'alta efficienza di rivelazione con alto rapporto segnale rumore, affidabilità e alta risoluzione spaziale. Consentono di usare elettronica veloce e non hanno bisogno di sistemi di trigger esterni per funzionare (come nel caso delle spark chamber usate in passato).

L'utilizzo di wafer da sei pollici ha consentito la produzione di sensori di maggiori dimensioni, riducendo i costi e i tempi di assemblaggio (rispetto ai "tradizionali" wafer da quattro pollici). Il disegno finale è stato definito nel corso del 2000 (vedi fig 3.5).

Come già discusso, si tratta di un sensore a strip su una sola faccia di dimensioni $8,95cm \times 8,95cm$. Il substrato è di tipo n ad alta resistività ($> 5k\Omega \cdot cm$) spesso $400 \mu m$. Sono presenti 384 strip (impianti di tipo p^+ ricoperti da un sottile strato di alluminio), larghe $56 \mu m$ e distanti tra loro (pitch) $228 \mu m$. Su ogni strip sono presenti due pad accoppiate in AC (ov-

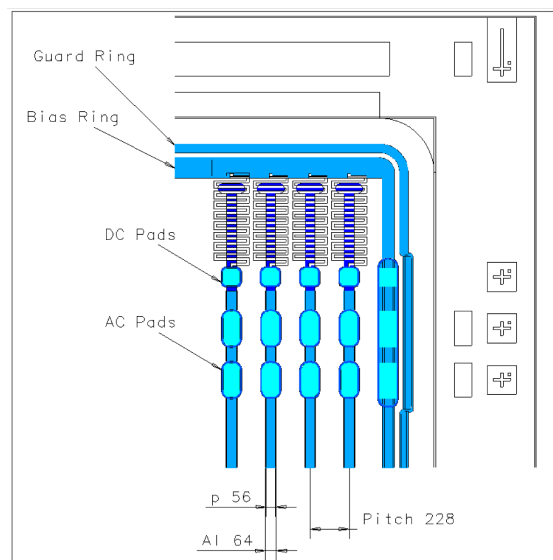


Fig. 3.5: Schema di un angolo di un rivelatore del tracciatore del LAT. Le dimensioni sono in μm

vero attraverso una capacità in modo da eliminare la componente continua del segnale), su cui viene letto il segnale, ed una in DC (ovvero direttamente connessa alla strip), utilizzata per i test in laboratorio. La tensione di bias viene applicata attraverso resistenze in silicio policristallino di circa $40 \text{ M}\Omega$. La scelta dello spessore nasce dal compromesso tra buon rapporto segnale rumore e capacità di *vertexing*, basso scattering multiplo, bassa tensione di svuotamento. Il passo di $228 \mu m$ è stato scelto per ottimizzare la risoluzione spaziale riducendo nel contempo il numero di canali necessari ed il consumo di potenza.

3.3 Il calorimetro

La missione GLAST è stata pensata per esplorare un range energetico di ben quattro ordini di grandezza. Questo pone dei vincoli molto stringenti sulle prestazioni dei vari componenti del calorimetro. D'altra parte l'ambiente spaziale pone dei limiti in termini di potenza elettrica consumata, peso e spazio occupato dallo strumento. Bisogna quindi progettare uno strumento che sia il miglior compromesso tra l'esigenza di ottenere elevate prestazioni (e rivelare fotoni di oltre un centinaio di GeV) e quella di ridurre spazi e consumi.

La scelta che è stata fatta per il LAT è quella di segmentare il calorimetro e sfruttare così la possibilità di campionare lo sciame elettromagnetico in maniera tale da poter ricavare informazioni sul profilo dello sciame stesso.

Tale possibilità non era presente nel predecessore EGRET che utilizzava un calorimetro monolitico.

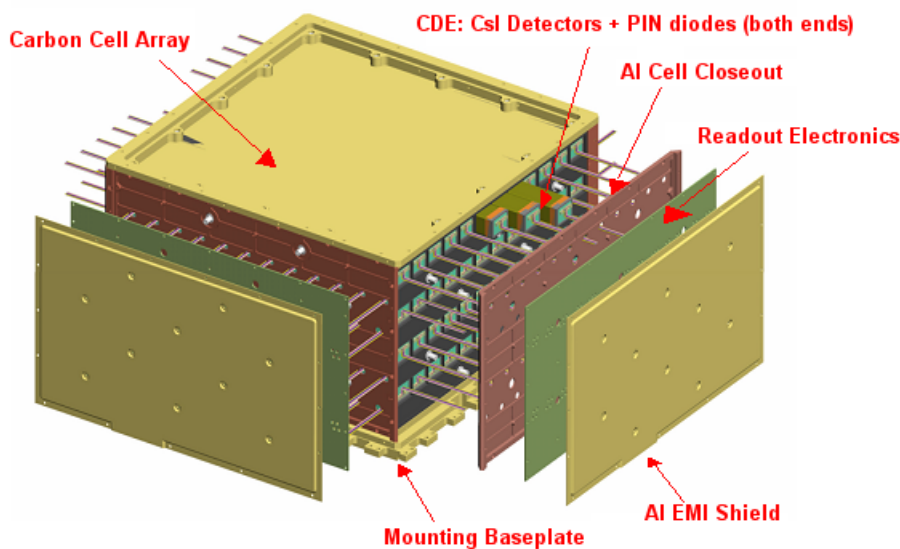


Fig. 3.6: Visione schematica del calorimetro.

Il calorimetro del LAT è costituito da cristalli di CsI(Tl) disposti in senso ortogonale alla direzione di sviluppo dello sciame. Esso è formato da una matrice 4×4 di moduli, uno per torre. Ogni modulo è formato da 8 piani ognuno dei quali è formato da 12 barre di cristallo. Due piani successivi sono ruotati tra loro di 90° in modo da fornire informazioni lungo le due coordinate x e y . Ogni barra ha le dimensioni $2 \text{ cm} \times 2.7 \text{ cm} \times 32.6 \text{ cm}$. Tali valori sono comparabili con la lunghezza di radiazione (1.8 cm) e al raggio di Moliere per sciame elettromagnetici (3.8 cm). La lunghezza totale del calorimetro è di circa 8.5 lunghezze di radiazione.

La lettura delle barre avviene tramite fotodiodi posti su entrambe le sue estremità. Tale sistema garantisce ridondanza, ampio range dinamico, bassi consumi di potenza (~ 4 Watt per modulo). Inoltre si può ricostruire la posizione del punto di interazione all'interno del cristallo stesso dalla misura dell'asimmetria della luce raccolta dai due diodi da entrambi i lati. Il calorimetro è quindi in grado di misurare anche la direzione di provenienza dei fotoni più energetici. Il disegno odoscopico viene sfruttato anche per la ricostruzione dell'energia. In particolare, quando lo sciame elettromagnetico non è completamente assorbito, si utilizza un algoritmo di fit sul profilo del deposito energetico nei vari strati. In questa maniera si possono avere informazioni sui fotoni più energetici anche con un calorimetro di ridotte dimensioni come quello del LAT. È bene ricordare che il limite superiore in energia di un telescopio spaziale è principalmente dovuto al ridursi del flusso

di fotoni con il crescere dell'energia. Il parametro quindi che è necessario ottimizzare è la capacità di isolare e rimuovere gli eventi di fondo senza tagliare i fotoni. È necessario quindi aggiungere statistica ad alta energia. Un aiuto si ottiene utilizzando le informazioni del calorimetro nel trigger di primo livello. In questo modo si riescono ad acquisire e ricostruire (almeno in parte) gli eventi gamma, di alta energia, che non convertono nel tracciatore.

3.4 Il sistema di anticoincidenza

L'*Anticoincidence Detector (ACD)* è il sottosistema dedicato a discriminare le particelle cariche che attraversano il LAT dai fotoni. Come per le precedenti missioni gamma esso è costituito da scintillatori plastici posti intorno alle torri. La novità rispetto al passato è nella segmentazione di questo sistema: mentre in passato lo schermo era un blocco unico, nel LAT esso è formato da varie mattonelle. Tale scelta consente di ridurre falsi segnali dovuti a coincidenze accidentali o *self veto*. Quest'ultimo si ha quando particelle dello sciame elettromagnetico prodotto da un gamma interagiscono nell'ACD simulando il passaggio di un raggio cosmico. Il caso tipico è il *backsplash* dello sciame che colpisce il calorimetro. In EGRET questo era un fenomeno rilevante e ha contribuito a limitare l'energia massima dei fotoni a 30 GeV. Nel LAT si riesce a ridurre il self veto utilizzando le informazioni dell'ACD non per il trigger primario come in EGRET, ma solo in un secondo livello di trigger, individuando la direzione di provenienza della particella e la mattonella di ACD attraversata.

Questo nuovo sistema di ACD (e di trigger) ha degli impatti estremamente positivi sulle prestazioni del LAT. Cresce la capacità di eliminare il fondo (soprattutto ad alte energie) aumentando quindi la sensibilità dello strumento ed il limite superiore della banda energetica rivelabile (legato, come già detto, al calo del flusso di fotoni).

L'ACD è formato da 89 mattonelle di scintillatore plastico (fig. 3.7), ognuno dei quali è letto da due set di fibre *Waveshifting* e fotomoltiplicatori posti alla base del sistema insieme con i moduli di elettronica. Il tutto è ricoperto da una coperta termica e uno scudo per micrometeoriti: una versione migliorata di quello che ha protetto EGRET per nove anni (non mostrata in figura 3.7). Le prestazioni attese per l'ACD sono un'efficienza di rivelazione $\geq 0.9997\%$ sull'intera area dell'ACD e un rate di veto erroneo a causa di *backsplash* dal calorimetro $\leq 20\%$ (a 300GeV).

3.5 Il trigger e il flusso di dati

Il disegno del trigger di un esperimento è sempre uno degli aspetti più delicati, da esso dipendono fortemente le prestazioni del rivelatore ed è intrinsecamente legato alla tecnologia utilizzata nel rivelatore stesso. Nei precedenti telescopi gamma venivano utilizzate *spark chambers* le quali hanno bisogno

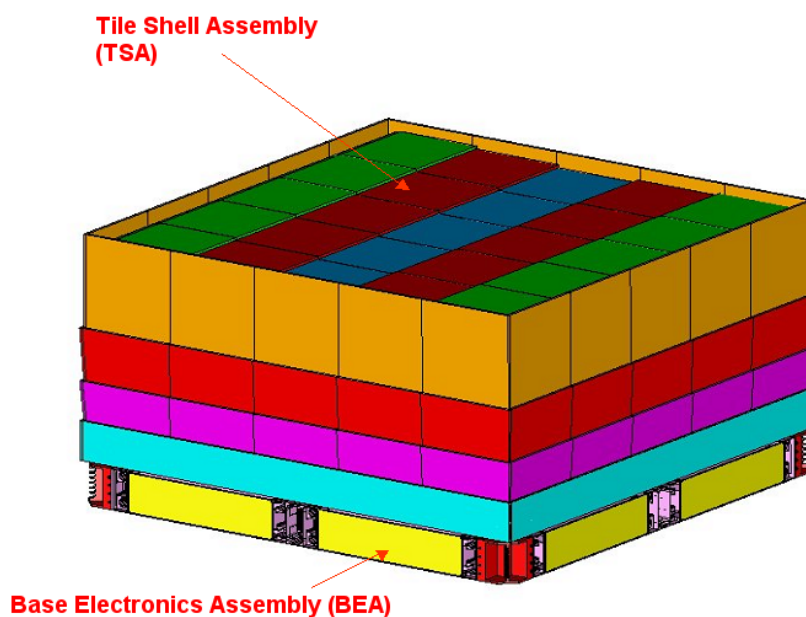


Fig. 3.7: Visione schematica del ACD. Il TSA comprende le 89 mattonelle di scintillatore, le fibre e i rivestimenti di protezione (non mostrati). Il BEA comprende i fototubi, i moduli di elettronica ed i generatori di tensione.

di essere triggerate dall'esterno. In EGRET veniva utilizzato un sistema di scintillatori che misuravano il tempo di volo (TOF) e discriminavano così la direzione di provenienza delle particelle. In GLAST invece vengono utilizzati rivelatori a semiconduttore e può essere utilizzato il segnale proveniente dai rivelatori stessi per avviare la sequenza di lettura. La direzione di arrivo della particella viene studiata ricostruendo, via software, lo sviluppo dello sciame elettromagnetico.

Inoltre in EGRET il rate di eventi doveva necessariamente essere limitato allo stretto necessario, ovvero rivelare soltanto gli eventi ritenuti buoni, per evitare un eccessivo consumo di gas che avrebbe ridotto la vita dello strumento. Le spark chambers soffrivano poi di un tempo morto di ben 100 ms (nel LAT è 1000 volte minore) che limita ulteriormente il rate di eventi. Per tutti questi motivi, il trigger di EGRET era articolato in un singolo stadio: un evento veniva considerato “gamma”, e quindi acquisito, se il TOF lo rilevava e non era presente alcun segnale nello scudo esterno di anticoincidenza.

Nel LAT, che utilizza una tecnologia più avanzata, sono i segnali direttamente ricevuti dai sensori (TKR + CAL) che determinano l'acquisizione degli eventi. In questo modo non è più necessaria la presenza di un sistema per il TOF e l'intero tracciatore può essere costruito con un profilo più

schiacciato e quindi con un campo di vista più ampio (fig. 3.8). Inoltre si ottiene un'area efficace maggiore, specialmente a grandi angoli di incidenza, dove il trigger del LAT è ancora efficiente, mentre un sistema TOF ha una accettazione angolare ridotta. L'utilizzo anche delle informazioni del calorimetro consente inoltre di essere sensibili anche ad eventi energetici che non convertono nel tracciatore ed aumentare l'area efficace e quindi la sensibilità ad alte energie rispetto agli esperimenti passati.

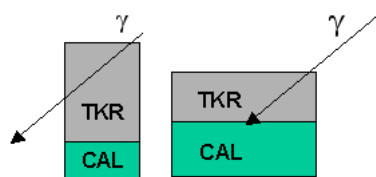


Fig. 3.8: Un tracciatore più schiacciato consente di avere un campo di vista più ampio accettando fotoni con un angolo di incidenza maggiore.

I sensori del LAT hanno anche il vantaggio di offrire un ridotto tempo morto e di non essere limitati dal carico di alcun materiale di consumo. Si può così ottenere un rate di lettura relativamente alto, fino a qualche kHz, molto maggiore di qualche Hz atteso per gli eventi gamma. Ciò ha consentito di organizzare il trigger su tre livelli, analogamente a quanto si ritrova nei moderni esperimenti di fisica delle alte energie. Il trigger di primo livello (L1T) è puramente hardware e determina la lettura dei sensori, mentre il secondo livello (L2T) è di tipo software, è gestito dalle singole torri e seleziona gli eventi gamma da quelli prodotti dal passaggio di raggi cosmici. Gli eventi selezionati dal secondo stadio vengono trasmessi ad un processore che si trova nello Spacecraft Interface Unit (SIU) per un ulteriore filtraggio: il trigger di terzo livello (L3T). Infine i dati vengono passati allo Spacecraft Solid State Recorder (SSSR) per essere poi trasmessi a terra.

Il trigger L1T serve a fare iniziare la lettura dei sensori: ogni torre forma un trigger e l'L1T è l'OR di tutte le torri. Ci si aspetta una frequenza di circa 5 kHz per questo sistema. Due condizioni distinte possono far partire un trigger hardware per una singola torre, una nel tracciatore ed una nel calorimetro che sono entrambi *self-triggering*, ovvero possono "accorgersi" autonomamente di essere attraversati da una particella.

Nel tracciatore: ogni piano invia un segnale formato dal OR logico di tutte le strip (FAST-OR) alla TEM la cui logica controlla la presenza di coincidenze prima nei piani xy, poi tra 3 piani consecutivi. Tale segnale, detto *three in a row*, è la primitiva di trigger fornita dal tracciatore. Si tratta di un sistema asincrono, molto efficiente, secondo le simulazioni, anche per fotoni male allineati alla verticale della torre. Inoltre è sempre possibile, tramite maschere nei chip di *front-end*, nascondere i canali troppo rumorosi o malfunzionanti.

Nel calorimetro: l'elettronica di controllo realizza un conteggio dell'energia rilasciata nei cristalli di CsI. Superata una certa soglia viene generato un segnale di trigger (CAL-LOW) indipendente dal tracciatore e che permette di individuare ad energie superiori ad 1 GeV almeno il 30% dei fotoni che non convertono nel tracciatore. Un altro segnale (CAL-HIGH) viene generato in caso di particelle di alta energia. La scelta di distinguere due diverse primitive di trigger nasce dall'esigenza di rendere il LAT efficiente anche a grandi energie.

Importante sottolineare come il trigger di primo livello non tenga conto delle informazioni dell'ACD. Vengono acquisiti infatti anche le tracce dei raggi cosmici che vengono scartati solo nel secondo livello di trigger. In passato (EGRET) lo scudo esterno di scintillatori veniva usato in anticoincidenza nel trigger primario. In questo modo il rate di eventi è ridotto al minimo, condizione necessaria per limitare il consumo di gas ed aumentare la vita dello strumento. Non è però possibile distinguere i raggi cosmici (che costituiscono il vero fondo) da elettroni (o positroni) prodotti dalla conversione di un fotone che colpiscono accidentalmente lo schermo esterno (self-veto). Questo secondo caso è particolarmente evidente ad alte energie: quando lo sciame elettromagnetico raggiunge il calorimetro una parte di esso rimbalza indietro e colpisce la parte bassa dell'ACD (backsplash). Nel LAT si è scelto di implementare un secondo livello di trigger con lo scopo di utilizzare le informazioni dell'ACD in maniera più efficiente.

Il trigger di secondo livello è un processo software che avviene in maniera parallela in tutte le torri. Viene utilizzato un algoritmo veloce di ricostruzione della traccia che estrapola la direzione di provenienza della particella e quindi il pannello dell'ACD attraversato. Si controlla se tale pannello era acceso: in questo caso l'evento viene scartato perché prodotto da un raggio cosmico. Questo controllo non viene fatto in presenza di un segnale CAL-HIGH in quanto la probabilità di backsplash è molto alta. Si stima che la frequenza di eventi che superano il trigger L2T sia circa 1 kHz.

Il trigger di terzo livello infine ricostruisce in modo dettagliato la traccia utilizzando informazioni da tutti i sottosistemi. Non vengono applicati molti tagli e la sola riduzione significativa riguarda i fotoni di albedo provenienti dalla terra. Tale analisi viene fatta confrontando la direzione ricostruita della particella con la direzione della Terra. La frequenza degli eventi che alla fine sono considerati "buoni" è ridotta a circa 15 Hz. La tabella 3.9 riassume il funzionamento del sistema di trigger.

Level	Type	Location	Components	Function	Pk Rate	Avg. Rate
L1: initiate readout of the detectors.	Hardware	OR of independent triggers in each tower.	TKR: coinc. of x,y planes CAL-LOW: # of hits CAL-HIGH: energy	Two redundant triggers for gamma-rays. Avoid self-veto at high E.	9 kHz (3.4 kHz with ACD veto enabled)	5.5 kHz (2 kHz with ACD veto enabled)
L2: cosmic-ray rejection	Software	Individual towers + ACD	L1 information. Simple track reconstruction. Extrapolation to ACD.	Reject tracks that point to fired ACD tiles, unless CAL energy is high.	1.7 kHz	1 kHz
L3: final on-board background rejection	Software	SIU (Full Instrument)	Full event reconstruction (all subsystems).	Loose cuts to reject background, including Earth albedo, sufficiently for downlink.		<30 Hz

a. Rates are calculated from detailed simulations of the backgrounds, the detector response, and the trigger logic.

Fig. 3.9: Tabella riassuntiva del funzionamento del sistema di trigger

4. *COSTRUZIONE DEL TRACCIATORE*

La costruzione del tracciatore è per lo più di responsabilità Italiana. Solo parte dell'attività di produzione viene portata avanti nei laboratori dell'INFN. La grande quantità di parti da costruire ha richiesto un'organizzazione di tipo industriale ed è stata quindi affidata a società private. In questo capitolo verranno descritti i processi e i test riguardanti i rivelatori a semiconduttore, test dei wafer, costruzione e test dei ladder.

4.1 Test dei sensori

La produzione dei sensori è stata ormai ultimata. Tutti i sensori (circa 11000 SSD), prodotti dalla Hamamatsu Photonics, sono stati ricevuti e circa 80 % di questi sono già stati testati. Il produttore esegue dei test di qualità sui rivelatori per:

- Ricerca di canali difettosi e causa del difetto (tab. 4.1).
- Curva I-V: corrente oscura (*leakage*) in funzione della tensione di bias.
- Curva C-V: capacità totale in funzione della tensione di bias.
- Resistenza di bias e degli impianti di Al (su un campione di SSD).

Defect type	Number
Coupling short	118
Bad isolation	73
Leaky strip	46
Poly-Si break	25
AC-Al open	22
AC-Al short	20
Poly-Si short	14
Implant short	8
Implant open	8
Other	6
Total	340/3629568

Tab. 4.1: Difetti riportati dal produttore. Solo 340 strip difettose su oltre 3 milioni e mezzo, circa 0.01% !

Grazie alla qualità eccezionale della produzione, i test sulle singole strip non vengono ripetuti in fase di accettazione dei sensori. Le misure standard eseguite nei laboratori INFN (Pisa e Terni) riguardano le dimensioni, la corrente di *leakage* e la capacità *bulk* in funzione del potenziale. Tutti i dati vengono salvati in un database insieme ad informazioni di carattere ambientale come temperatura ed umidità. Tali informazioni vengono utilizzate non solo per l'accettazione dei rivelatori, ma anche per selezionare le combinazioni più adatte a formare un ladder. Il tabella 4.2 sono riassunti i risultati dei test di accettazione sui rivelatori. Solo 46 SSD su 8524 testati sono stati definitivamente scartati, circa lo 0.5%. Nei prossimi paragrafi verranno descritti i vari test in dettaglio.

Non conformance type	Number
High leakage current	20
Low breakdown voltage	17
High depletion voltage	2
Mishandling	7
Total	46/8524

Tab. 4.2: Risultati dei test di accettazione. Solo 46 SSD su 8524 sono stati scartati, lo 0.5% del totale.

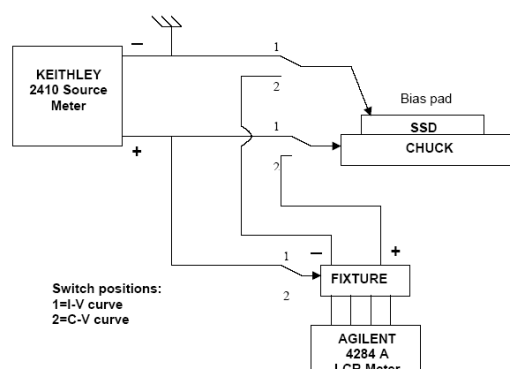


Fig. 4.1: Schema del circuito per i test elettrici.

4.1.1 Test elettrici

I test elettrici misurano la corrente di leakage (I-V) e la capacità totale (C-V) del wafer in funzione delle tensioni di bias. In entrambi i test le strip vengono poste a ground contattando, tramite una micropunta, l'anello di bias (fig. 4.1), mentre il piano inferiore del SSD viene portato a tensioni positive (0-200 V a passi di 5 V). Di ogni wafer deve essere verificata la corrispondenza tra il numero di serie riportato sulla sua confezione, e quello stampato su di esso. Viene inoltre verificata la sua integrità, prestando maggiore attenzione agli angoli ed ai bordi, che sono più soggetti a danneggiamenti.

Le specifiche tecniche per un wafer richiedono una corrente di leakage media minore di 200 nA a 150 V, con un massimo consentito di 500 nA; inoltre vengono scartati SSD in cui viene osservato *breakdown*. Una tipica curva I-V è mostrata in figura 4.2, mentre l'istogramma con i valori della corrente a 150 V è mostrato in figura 4.3.

La curva C-V consente di avere informazioni sulla tensione di svuotamento che deve essere minore di 120 V (100 V "preferred"). Dal momento che lo spessore della zona di svuotamento in funzione della tensione di bias

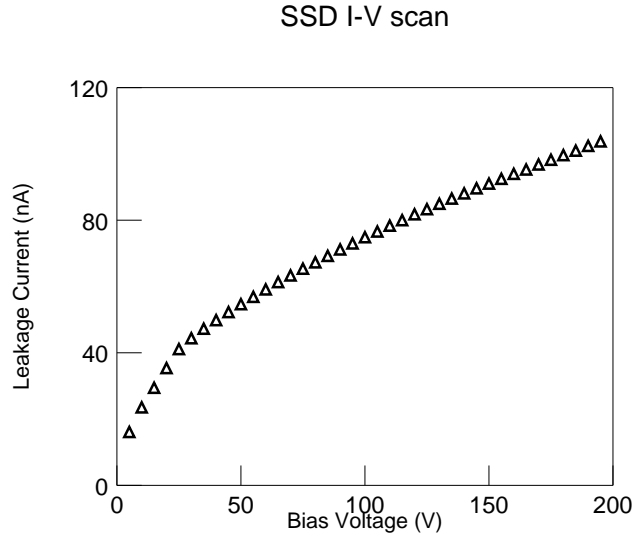


Fig. 4.2: Tipica curva I-V misurata a Pisa. Anche a 200 V la corrente è intorno ai 100 nA.

può essere scritto come [26]:

$$w = \left[\frac{2\epsilon(V_0 + V_{bias})}{eN} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

dove ϵ è la costante dielettrica del silicio, V_0 il potenziale di contatto, e la carica dell'elettrone, N la concentrazione dei dopanti, la capacità del rivelatore è proporzionale all'inverso della radice della tensione:

$$C \propto \frac{1}{w} \propto V_{bias}^{-\frac{1}{2}} \quad (4.2)$$

Per evidenziare tale andamento si è soliti plottare $1/C^2$ in funzione di V (fig. 4.4); in questo modo il raggiungimento della tensione di svuotamento appare come cambiamento di pendenza del plot: da questo valore in poi la capacità è costante e l'equazione 4.2 non è più valida. La definizione di tensione di svuotamento utilizzata è quella suggerita dal produttore:

$$\frac{1}{C^2(V_i)} - \frac{1}{C^2(V_{i-1})} < 3.9 \cdot 10^{-3} nF^{-2} \quad (4.3)$$

In figura 4.5 è mostrata la distribuzione della tensione di svuotamento degli SSD fin ora testati. Il valore medio è di circa 70 V, solo due SSD sono stati scartati per alta tensione di svuotamento.

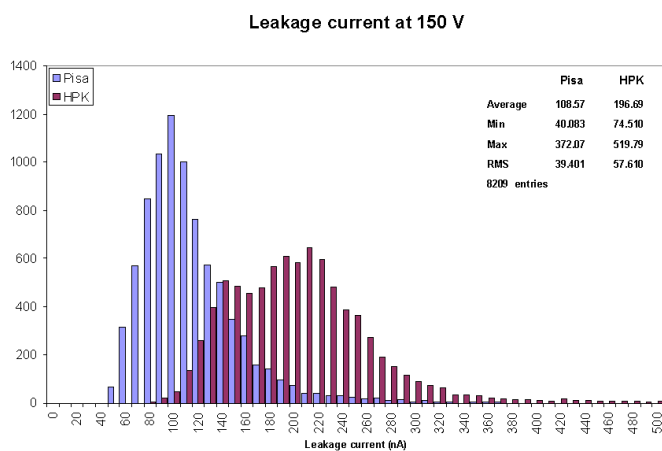


Fig. 4.3: Distribuzione della corrente di leakage a 150 V misurata dal produttore (HPK) e durante i test di accettazione in italia. Le differenze sono dovute diverse condizioni di temperatura/umidità e dal fatto che HPK misura la corrente sul wafer prima del taglio.

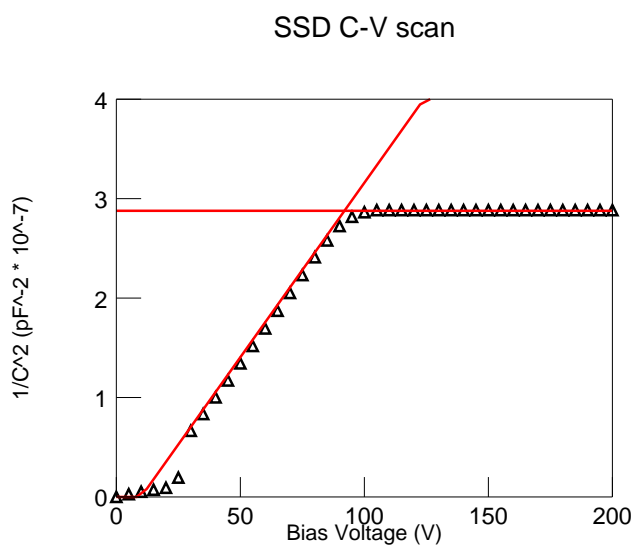


Fig. 4.4: $1/C^2$ al variare di V . La zona lineare è quella in cui vale l'equazione 4.2, quando il silicio è completamente svuotato la capacità resta costante.

4.1.2 Test geometrici

Nella produzione degli SSD si distinguono due processi: la fotolitografia ed il taglio del wafer. Mentre la prima è estremamente precisa, la seconda lo è meno. Può succedere che la stampa non risulta, dopo il taglio, né ben

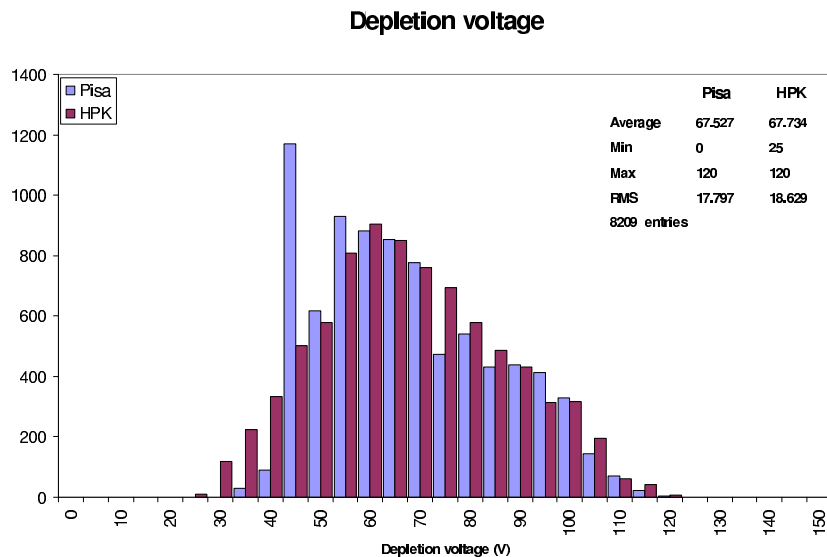


Fig. 4.5: Distribuzione della tensione di svuotamento per gli SSD.

centrata né ben orientata. Nelle misure di carattere geometrico viene preso come punto di riferimento la stampa, che proprio per facilitare operazioni di questo genere è provvista di croci uguali su tutti e quattro gli angoli (fig. 4.6). I test geometrici standard consistono nella misura della distanza tra il

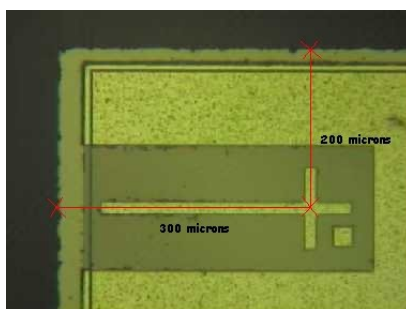


Fig. 4.6: Foto delle croci sul lato dei rivelatori. Le distanze misurate nei test sono indicate con i segmenti rossi, i valori nominali di tali distanze sono $300 \mu\text{m}$ e $200 \mu\text{m}$, mentre le lunghezze dei bracci sono $305 \mu\text{m}$ e $100 \mu\text{m}$.

centro delle croci e i bordi del wafer. L'errore massimo del taglio ammesso dalle specifiche è $20 \mu\text{m}$.

Questo test viene realizzato con l'ausilio di una telecamera montata su un microscopio. Il wafer viene posto su un carrello guidato dall'operatore per mezzo di un'interfaccia grafica. Ogni serie di misure è preceduta dalla calibrazione dello strumento: si misura la lunghezza dei bracci delle croci di riferimento stampate sul wafer, il loro valore nominale è di $305 \mu m$ e $100 \mu m$.

Queste misure permettono inoltre l'analisi delle distribuzioni di grandezze come l'angolo di rotazione, e lo shift del centro. I vari angoli vengono identificati con le lettere A, B, C, D, per ognuno di essi, viene valutata la deviazione dal valore nominale:

$$\begin{aligned}\Delta x_i &= x_i - x_{nom} \\ \Delta y_i &= y_i - y_{nom} \\ i &= A, B, C, D\end{aligned}\quad (4.4)$$

I valori nominali sono: $x_{nom} = 300 \mu m$ e $y_{nom} = 200 \mu m$. Il parametro di rotazione (r) e lo shift (s) sono definiti come

$$\begin{aligned}r &= \Delta y_A - \Delta y_D \\ s &= \frac{\Delta y_A + \Delta y_D}{2}\end{aligned}\quad (4.5)$$

In figura 4.7 sono mostrate le distribuzioni delle misure di shift e rotazione. Nessun rivelatore è stato trovato fuori specifiche. L'elevata qualità del taglio dei wafer ha consentito di eseguire i test geometrici a campione invece che su tutti gli SSD, con notevole risparmio di tempo e risorse.

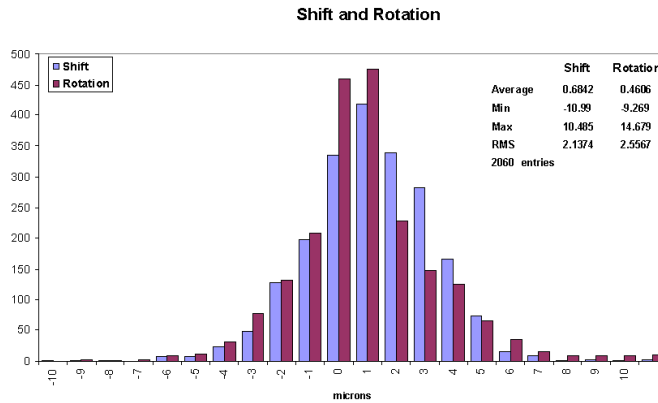


Fig. 4.7: Distribuzione dei parametri di shift e rotazione. Nessun wafer è stato trovato fuori specifiche confermando l'alta qualità della produzione.

4.2 Costruzione dei ladder

Un ladder è formato dall'unione di quattro SSD in modo da formare un singolo rivelatore a microstrip dalle dimensioni $89.5 \text{ mm} \times 358 \text{ mm}$. Gli SSD sono incollati l'uno con l'altro, non viene utilizzato nessun supporto meccanico addizionale, la continuità dei contatti elettrici viene garantita da *wire bond*. In questo paragrafo verranno descritti l'attività di incollaggio, controllo dell'allineamento, microsaldatura e misure elettriche per l'accettazione del ladder.

La costruzione del LAT richiede circa 2600 ladder, un tale numero impone la scelta di un processo costruttivo semplice ed economico, allo stesso tempo deve garantire elevata precisione meccanica ed affidabilità.

La traslazione relativa di due SSD in un ladder non deve superare i $40 \mu\text{m}$, tale valore consente di avere strip ben allineate semplificando la procedura di bonding e lasciando inalterate le capacità di *tracking* del LAT; questo limite serve anche per un incollaggio sicuro dei ladder sui tray garantendo una distanza nominale di $200 \mu\text{m}$ tra due ladder consecutivi. Altro parametro importante è l'altezza delle microsaldature: tutto l'incapsulamento non deve superare i $500 \mu\text{m}$ dal momento che, nella torre, la distanza verticale tra due tray è 2 mm.

Per quanto riguarda le proprietà elettriche di un ladder si seguono gli stessi criteri che si sarebbero seguiti per un gruppo di quattro SSD separati: corrente oscura a 150 V minore di 2000 nA e tensione di svuotamento minore di 120 V. In aggiunta si richiede che la frazione di canali malfunzionanti in un ladder sia minore del 1% in modo che l'efficienza di rivelazione possa essere maggiore del 98% anche accettando un altro 1% di canali morti a causa dell'elettronica.

4.2.1 Assemblaggio e test

La procedura di assemblaggio dei ladder sfrutta l'alta precisione di taglio dei wafer utilizzando proprio il loro bordo come riferimento. È stato costruito un *jig* apposito per posizionare ed allineare tra loro i wafer (fig. 4.8).

Il primo wafer viene posto manualmente sul *chuck* a sinistra, allineato e tenuto fermo da un sistema di aspirazione. A questo punto un secondo wafer viene immerso con il lato da incollare in una "vasca" di colla alta $60 \mu\text{m}$. Viene quindi posto sul secondo *chuck* a distanza di qualche millimetro dal primo. Viene allineato sul lato del scatola con il pistoncino e spinto a mano contro il primo wafer. Si aziona il sistema di aspirazione e si procede con gli altri due wafer.

Quando la colla è indurita si trasferisce il ladder in un'altra box e si procede alle misure geometriche. Si misura la posizione del centro delle croci di riferimento (fig. 4.6) e si valutano i residui dal fit con una retta, il ladder è considerato accettato se tali valori sono minori di $40 \mu\text{m}$. In

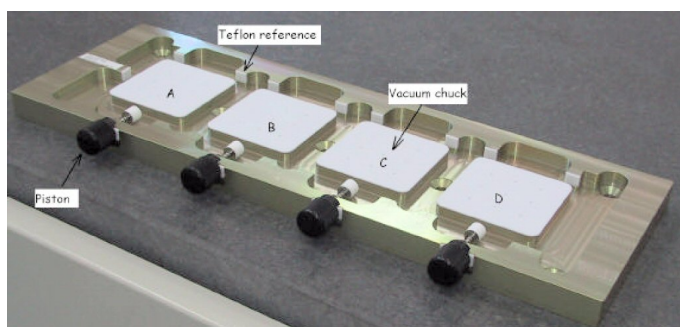


Fig. 4.8: Jig di assemblaggio dei ladder. I pistoncini laterali servono ad allineare il wafer di silicio al bordo della scatola; una volta posizionati vengono tenuti fermi da un sistema di aspirazione (*vacuum chuck*). Tutte le superfici di contatto con i wafer sono rivestite in teflon.

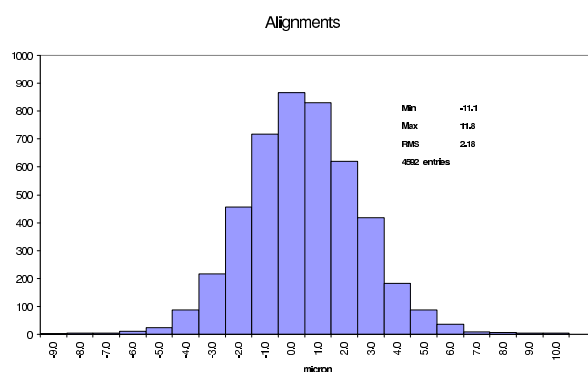


Fig. 4.9: Allineamento relativo degli SSD in 574 ladders. La larghezza della distribuzione è di poco superiore a $2 \mu m$ mentre le specifiche richiedono una precisione di $40 \mu m$.

figura 4.9 sono mostrati i risultati delle misure geometriche per la prima produzione di ladder.

Il passaggio successivo è la microsaldatura delle strip, eseguita da macchine automatiche, e l'incapsulamento tramite la tecnica del *dam-and-fill*: si posa un anello di colla intorno alla zona da incapsulare e quando la colla è seccata si riempie la "diga" con altra colla. Alla fine del processo si controlla l'altezza dell'incapsulamento e si passa alle misure elettriche.

Vengono misurate le curve I-V e C-V come per i singoli rivelatori, inoltre vengono testate tutte le capacità delle pad AC in modo da evidenziare isolamento elettrico e continuità delle strip.

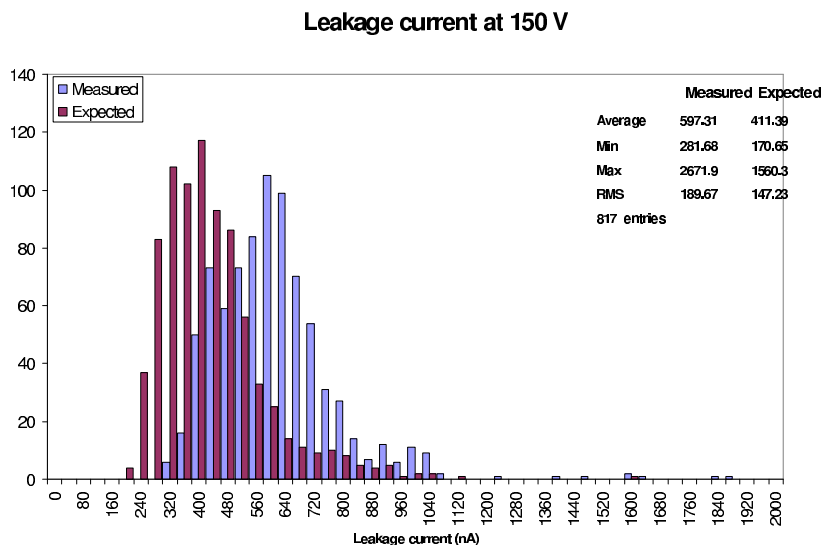


Fig. 4.10: Corrente di leakage a 150 V per 817 ladder. Il valore aspettato è definito come la somma delle correnti nei singoli wafer.

La figura 4.10 mostra la distribuzione delle correnti a 150 V misurate su 817 ladder; viene mostrata anche la distribuzione delle correnti aspettate ovvero la somma delle correnti dei quattro wafer singoli. In figura 4.11 è invece riportata la distribuzione delle tensioni di svuotamento insieme con i valori aspettati (il massimo tra quelli misurati nei singoli wafer).

Non conformance type	Number
High leakage current	6
Broken edge	6
Total	12/513

Tab. 4.3: Tabella riassuntiva dell'attività di assemblaggio dei ladder. Sono stati rigettati solo 12 ladder sui 513 testati (circa il 2%); da notare che una modifica del disegno delle scatole in cui vengono riposti i ladder eviterà possibili danni ai bordi del ladder stesso. Ci si aspetta quindi, per la futura produzione, di ridurre ulteriormente il numero di pezzi difettosi.

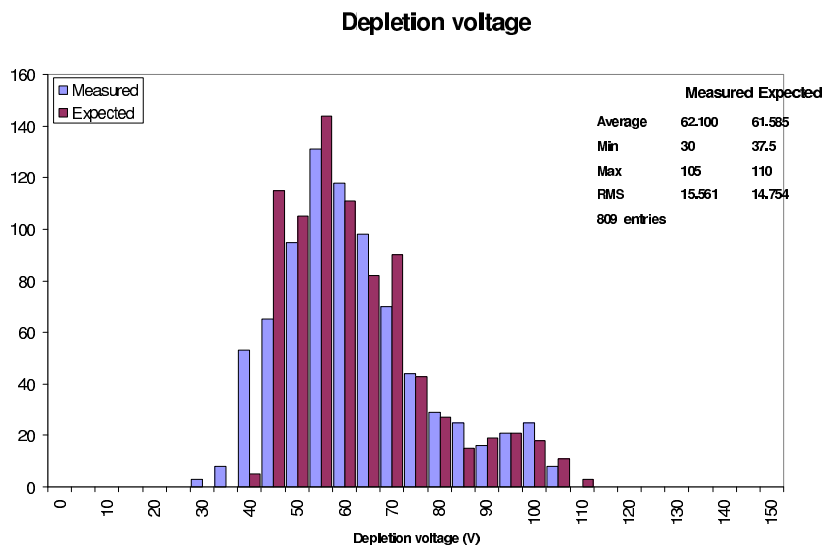


Fig. 4.11: Tensione di svuotamento per 817 ladder. Il valore aspettato è definito come il valore più alto tra quelli dei singoli wafer.

5. CONTROLLO TRACCIATORE E ACQUISIZIONE DATI

Dopo aver visto la struttura del tracciatore e la sua costruzione è bene soffermarsi sul sistema di “lettura” e controllo dello strumento. In questo capitolo verrà mostrato il sistema di acquisizione dati (*DAQ*) del tracciatore ed il sistema di controllo online durante le operazioni a terra. In particolare verrà descritto il sistema utilizzato per i test dei componenti del tracciatore, sia con i prototipi (la minitorre di cui si parlerà in seguito), sia con i componenti “flight” la cui produzione è già cominciata: il completamento della prima torre di volo è previsto entro l’estate.

5.1 DAQ della torre

Il sistema di acquisizione dati è una parte fondamentale di ogni strumento scientifico. Il tracciatore del LAT combina la tecnologia tipica degli esperimenti di fisica delle alte energie alle richieste di una missione spaziale. Tra queste la più stringente è sicuramente la potenza limitata a 150 Watt (vedi pag. 22) che ha imposto una lettura digitale del segnale del tracciatore. In questo paragrafo verrà descritto proprio questo sistema di acquisizione ed i vari moduli che lo compongono, dal sistema di “front-end”, fino al sistema di controllo della torre.

5.1.1 Descrizione generale

Una torre del LAT consiste in 36 piani (18 piani $x-y$) ognuno dei quali possiede 1536 canali da leggere. L'intero sistema di acquisizione dati e di controllo è gestito a livello della torre da un modulo chiamato TEM (*Tower Electronic Module*). I 18 piani x ed i 18 piani y sono ulteriormente divisi in due gruppi, i piani pari e quelli dispari, come schematizzato in figura 5.1. Ogni piano è

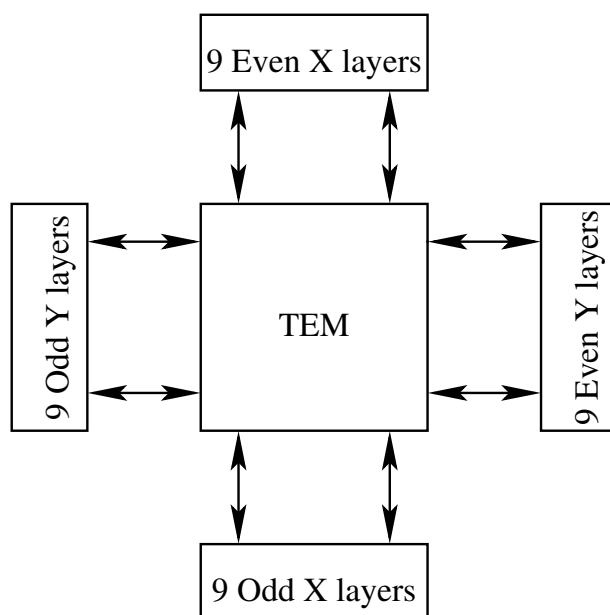


Fig. 5.1: Organizzazione del tracciatore in una torre.

letto da un modulo chiamato *Tracker Multi Chip Module* (TMCM), spesso chiamato solo MCM, che consiste in 24 GTFE ASIC (*Glast Tracker Front End*) e in 2 GTRC ASIC (*Glast Tracker Readout Controller*). Ogni GTFE provvede ad amplificare, digitalizzare e calibrare 64 canali. I due GTRC, posti alle estremità della board, uno a sinistra e l'altro a destra, si occupano

di interfacciare i GTFE con la TEM. Un GTRC può controllare ogni GTFE, cioè si può scegliere, per ogni GTFE, di mandare le informazioni verso destra o verso sinistra. La configurazione standard prevede 12 GTFE letti da destra e 12 da sinistra. La notazione destra e sinistra è priva di ambiguità solo per un singolo MCM, sulla torre invece non è più chiaro se ci si riferisce alla torre o al MCM. È perciò opportuno cambiare notazione e riferirsi al lato “Low” come quello in cui si trova la strip 0 e come lato “High” quello della strip 1536.

Il collegamento tra i piani e la TEM avviene tramite cavi flessibili (*Flex Cable*)[19]. Due cavi ai lati del MCM collegano ogni gruppo di 9 alla TEM (fig. 5.2 e 5.3). Attraverso questi cavi passano le alimentazioni, i comandi, le informazioni sulla temperatura, il trigger e i dati.

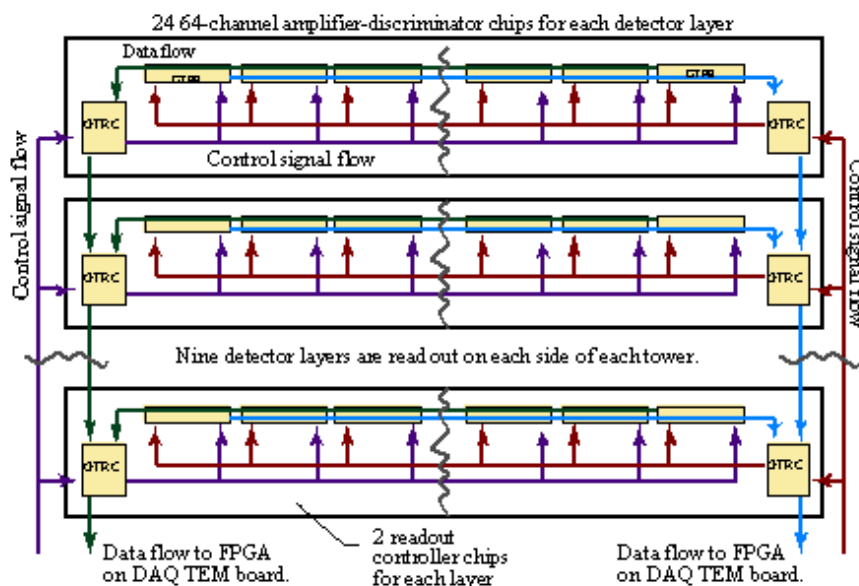


Fig. 5.2: Schema del flusso di dati e comandi tra la TEM e gli MCM. Dai due cavi laterali vengono inviati i comandi ai vari chip. I dati vengono trasmessi in maniera seriale: da un GTFE a quello accanto fino al controller, quindi da un GTRC a quello sottostante fino alla TEM.

Il sistema è stato studiato per essere ridondante nei controlli, veloce e con bassi consumi per via della limitata potenza che deriva dai pannelli solari e dell'impossibilità di sostituire eventuali componenti una volta lanciato il satellite. Per questi motivi si è scelto una lettura digitale del segnale e l'adozione di protocolli seriali per la lettura dei canali. Ogni comando inviato dalla TEM agli MCM è formato da uno start bit, 10 bit di indirizzo (che identificano un GTRC o un GTFE), 5 bit per il comando, un bit di parità

ed eventuali bit per i dati. Quando il sistema di trigger identifica un evento (vedi par. 3.5) viene generato un segnale di *trigger acknowledge* (TACK) che viene inviato a tutti i GTFE, tale segnale include due bit che identificano uno dei buffer dei front end. All'arrivo del TACK i valori di segnale presenti all'uscita dei discriminatori vengono scritti nel buffer. La successiva lettura dell'evento avviene in due passi. Nel primo la TEM manda un comando di `READ_EVENT` che trasferisce i dati dai GTFE ai GTRC: ogni front end trasferisce i suoi dati al front end successivo dopo aver atteso i dati dal precedente, l'ultimo li manda al GTRC che li salva in uno dei suoi due buffer (indirizzato dal segnale di `READ_EVENT`). A questo punto la TEM invia un segnale di `TOKEN` al GTRC 0 il quale trasmette i dati alla TEM e quindi trasferisce il segnale di `TOKEN` al GTRC 1 e così via fino al GTRC 8. L'evento è costituito dal numero del piano, strip colpite e TOT (vedi par. 5.1.4).

5.1.2 Tower Electronic Module

La TEM gestisce l'interfaccia tra la singola torre ed i sistemi di controllo del LAT[18]. Essa è costituita da un *Circuit Card Assembly (CCA)* montato all'interno di un box in alluminio. La TEM è connessa ai cavi di comunicazione con rivelatori (8 flex cables per il tracciatore, 4 per il calorimetro), al *Global trigger and Anticoincidence Spacecraft interface Unit (GASU)* ovvero il sistema di controllo centrale del LAT, ed al *Power Supply Assembly (PSA)*, un modulo posto immediatamente al di sotto della TEM che provvede alle tensioni di alimentazione e di bias di tutti i sottosistemi della torre.

Il cuore della TEM è formato dal *GTIU (GLAST TEM Interface Unit)* il cui compito è gestire le comunicazioni sia verso l'"esterno" (GASU) che con i sottosistemi interni. Questi ultimi vengono controllati tramite i *GLAST Tracker Cable Controller (GTCC)* ed i *GLAST Calorimeter Cable Controller (GCCC)*, uno per ogni cavo.

Il trigger di primo livello è controllato dal *GTIC (GLAST Trigger Interface Controller)* il quale raccoglie i segnali dai sottosistemi e forma le primitive di trigger dirette al GASU. È proprio questo il modulo incaricato del controllo delle coincidenze fra tre piani x-y di rivelatori (3-in-a-row).

Infine la TEM provvede a distribuire le tensioni di alimentazione e di bias ai sottosistemi ed è provvista di ADC per convertire le informazione analogiche riguardanti tensioni, correnti e temperature in formato digitale processabile dal GTIU.

5.1.3 TMCM

Il TMCM, montato in posizione verticale su due lati dei tray, è un circuito stampato multistrato su cui sono montati i chip di lettura dei sensori. Come già mostrato, su di esso trovano posto i due controller ed i 24 GTFE

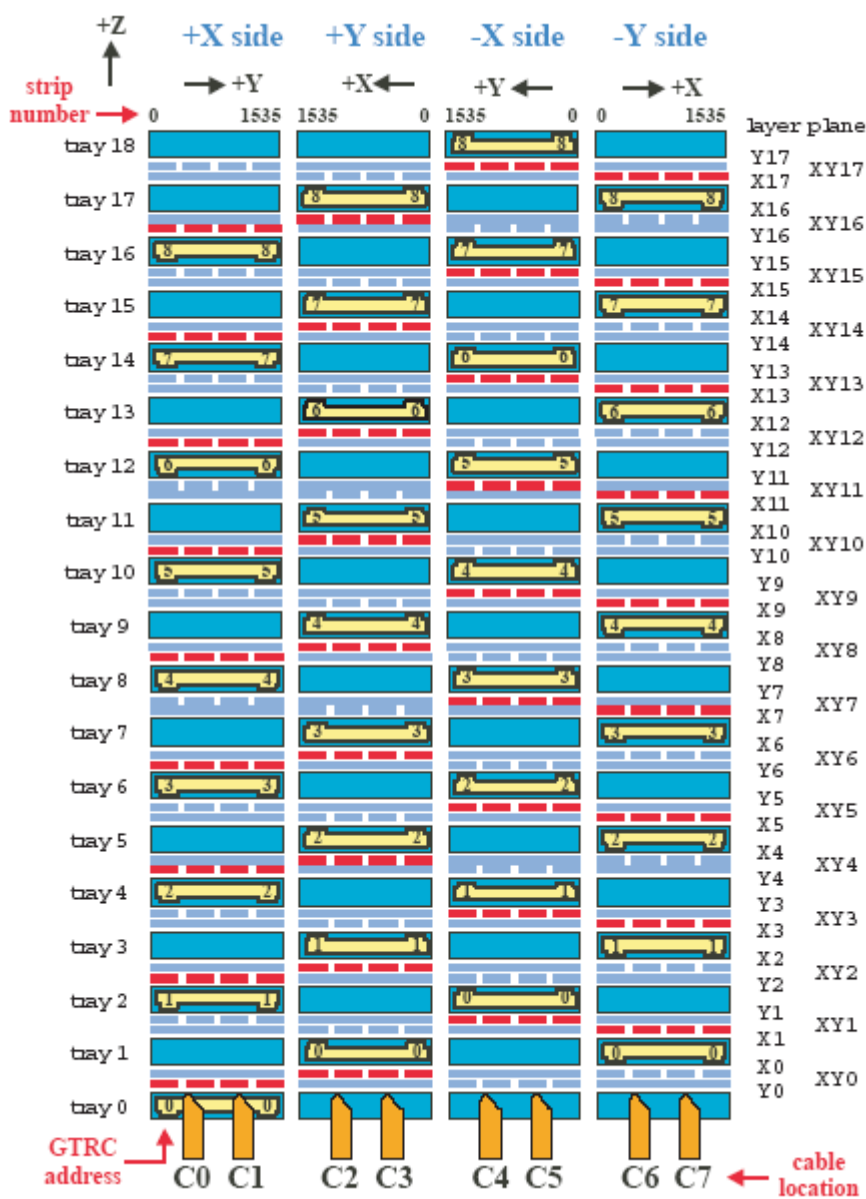


Fig. 5.3: Visione laterale di una torre. Sono mostrate la posizione dei vari MCM nei tray ed i nomi vari piani di rivelatori e dei cavi. Le barre orizzontali tra i tray rappresentano i piani di rivelatori: in rosso quelli letti dall'MCM vicino, in blu chiaro quelli letti da un altro lato.

(64 canali letti da ogni chip per un totale di 1536 strip su un piano). La connessione tra le strip e i chip avviene tramite un *pitch adapter* (fig 5.4): un supporto di kapton, montato sul bordo superiore del TMCM, che forma una curva di 90°. Il TMCM è connesso anche al circuito di bias del pia-

no dei rivelatori, esso fornisce quattro circuiti di bias separati e con filtro passa basso, in tal modo un eventuale rottura di un ladder non influisce sul funzionamento degli altri.

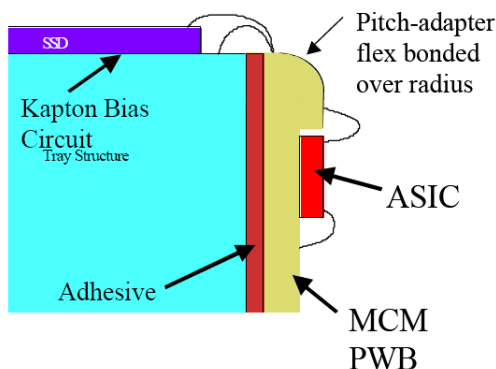


Fig. 5.4: Visione laterale di un MCM montato su un tray. Sono messi in evidenza le connessioni con i GTFE e con gli SSD ed il circuito di bias tramite il pitch adapter.

5.1.4 GTRC

Il GTRC è responsabile delle comunicazioni tra Front End e la TEM. Esso ha un funzionamento sincrono con un clock di 20 MHz e deve provvedere a ricevere e ritrasmettere i comandi verso i vari GTFE, ricevere i segnali di trigger da questi e trasmetterli alla TEM, sincronizzare la lettura dei dati dei GTFE.

I comandi che la TEM invia ai GTRC o tramite questi ai GTFE sono di tre tipi:

1. *Dataless* - sono comandi usati per avviare una qualche operazione come ad esempio la lettura dei dati nel GTRC o nel GTFE, il Reset o la calibrazione
2. *Load* - sono comandi che caricano registri come ad esempio le varie maschere dei front end e il DAC o il "Control Register" nel Controller
3. *Read* - sono i comandi che leggono i vari registri

Il diagramma a blocchi (figura 5.5) spiega (in maniera semplificata) il funzionamento del GTRC. Un sistema di controllo generale decodifica i comandi dalla TEM e li invia (se necessario) ai GTFE. Il sistema di I/O si occupa di sincronizzare la trasmissione delle informazioni con gli altri piani. Il *Time-Over-Threshold* (TOT) è un contatore di 10 bit con un clock di 50 ns che inizia il conteggio all'arrivo del TACK e misura la durata del

FAST-OR (l'OR logico delle uscite dei discriminatori dei canali di tutto un piano, è il segnale di trigger che un piano invia alla TEM), esso può essere disabilitato tramite il registro di controllo del GTRC. La lettura dei dati immagazzinati nei buffer dei GTFE comincia quando viene inviato un comando di READ_EVT, questi dati vengono immagazzinati in uno dei due buffer del GTRC. In fase di progettazione si è deciso che ogni controller possa registrare un massimo di 63 canali: non ci si aspetta una molteplicità superiore di strip colpite in singolo evento. La trasmissione dei dati alla TEM avviene, sempre in modo seriale, quando un segnale di TOKEN viene generato. A questo punto il GTRC del piano 0 trasmette i dati alla TEM e passa il segnale di TOKEN al GTRC superiore il quale ripete al procedura.

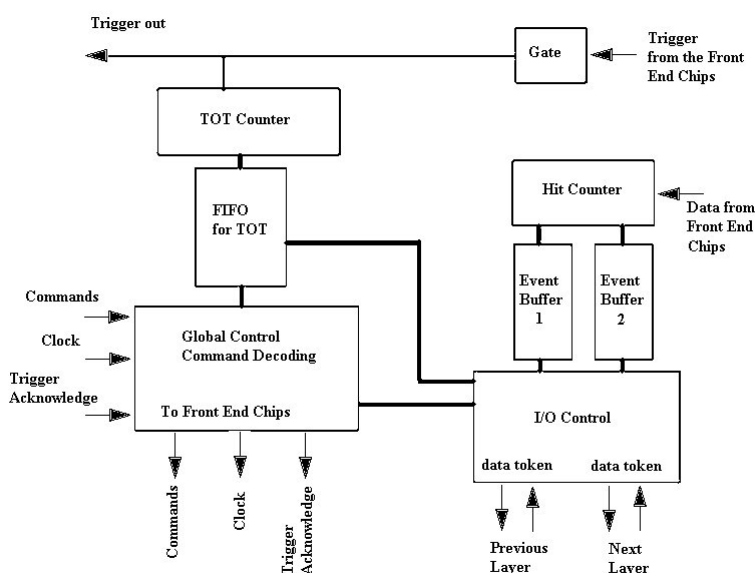


Fig. 5.5: Diagramma a blocchi semplificato del GTRC.

5.1.5 GTFE

Il GTFE legge direttamente le strip dei detector. Esso include preamplificatore, “shaper”, discriminatore, registri per mascherare il trigger e dati, sistema per la generazione di trigger e la lettura dei dati, sistema per la calibrazione, buffer per i dati. Una visione schematica del sistema di amplificazione del segnale per una singola strip è mostrato in figura 5.6. Il segnale da ogni singola strip è convertito in una tensione mediante un preamplificatore di tipo “charge-sensitive”, il cui guadagno è determinato dalla

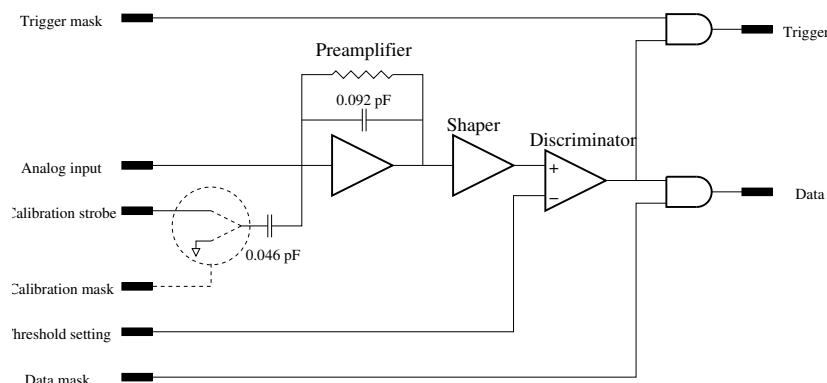


Fig. 5.6: Schema dell'amplificatore - discriminatore per un canale.

capacità di feedback di 0.092 pF e fornisce circa 57 mV per una *Minimum Ionizing Particle (MIP)* che attraversa 400 μm di silicio. Oltre che alle strip esso è collegato anche ad una capacità di 0.046 pF usata per l'iniezione di carica del sistema di calibrazione. Lo stadio successivo, accoppiato in AC, è lo shaper, di tipo $RC - CR$, con un tempo di salita di 1.5 μs . Quindi un discriminatore trasforma il segnale analogico in digitale. Il livello di soglia del discriminatore è controllato da un DAC di 7 bit uno dei quali è usato per scegliere tra due intervalli diversi (range 0 e 1). Lo stesso DAC contiene altri 7 bit che, in maniera analogica, controllano il livello dell'impulso di calibrazione (fig. 5.7).

Ogni canale può essere calibrato indipendentemente, il comando di calibrazione genera un gradino di tensione che dura 512 cicli di clock (25.6 μs), una CALIBRATION MASK viene utilizzata per selezionare i canali in cui viene iniettata la carica. Il sistema di calibrazione può essere utilizzato per lo studio del guadagno e del rumore dei canali, i dettagli di questo test verranno discussi in seguito. L'ampiezza del segnale all'uscita dallo shaper è circa 80 mV per 1 fC. Tale valore può fluttuare tra canale e canale e tra chip e chip. Inoltre, dato che la lettura dei canali è digitale, non ci sono richieste stringenti di linearità di guadagno al variare della carica iniettata: all'aumentare della carica in ingresso il guadagno appare maggiore (fig. 5.8). In realtà tale variazione è confrontabile con la larghezza della distribuzione dei guadagni dei canali in un singolo GTFE per cui non si nota un apprezzabile variazione di linearità almeno fino a cariche iniettate di circa 5 fC (fig. 5.9) sia per un singolo GTFE che in un intero piano, dove le fluttuazioni sono maggiori.

L'uscita del discriminatore è usata per due scopi:

1. Ogni canale è accoppiato, tramite una porta AND, ad un bit della TRIGGER MASK. Questi sono tutti uniti in un OR che, insieme con

Threshold setting								
DAC value	0	10	20	30	40	50	60	Range 0
mV	4.5	50	100	150	200	250		
fC	0.04	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5		
DAC value	0	10	20	30	40	50	60	Range 1
mV	12.9	200	400	600	800			
fC	0.1	2	4	6				

Calibration setting								
DAC value	0	10	20	30	40	50	60	Range 0
mV	1.57	20	40	60	80			
fC	0.07	1	2	3	4			
DAC value	0	10	20	30	40	50	60	Range 1
mV	15	200	400	600	800	1000		
fC	0.7	10	20	30	40			

Fig. 5.7: Conversione in tensione e carica per i valori del DAC di soglia e calibrazione. Ogni DAC ha 6 bit (64 valori) più un bit di range. La conversione in carica utilizza i valori della capacità di calibrazione ed il guadagno all'uscita dello shaper. Da notare che a causa di fluttuazioni di guadagno i valori in carica della soglia sono solo approssimati.

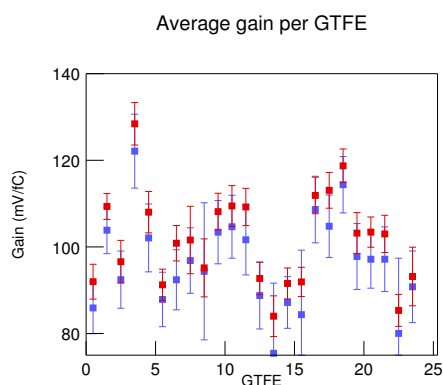


Fig. 5.8: Guadagno medio per GTFE (tray TG02 Down) a carica iniettata di circa 2 fC (rosso) e 1 fC (blu). Le barre di errore rappresentano l'RMS della distribuzione dei guadagni dei vari canali nel GTFE. Notare come la variazione di guadagno sia confrontabile con la larghezza della distribuzione.

l'OR del GTFE precedente, formano un segnale FAST-OR che serve da segnale di trigger

- Ogni canale è accoppiato, tramite una porta AND, ad un bit della DATA MASK. Quando giunge un segnale di trigger acknowledge (TACK) tutti i canali vengono scritti in un buffer, profondo 4x70 bit.

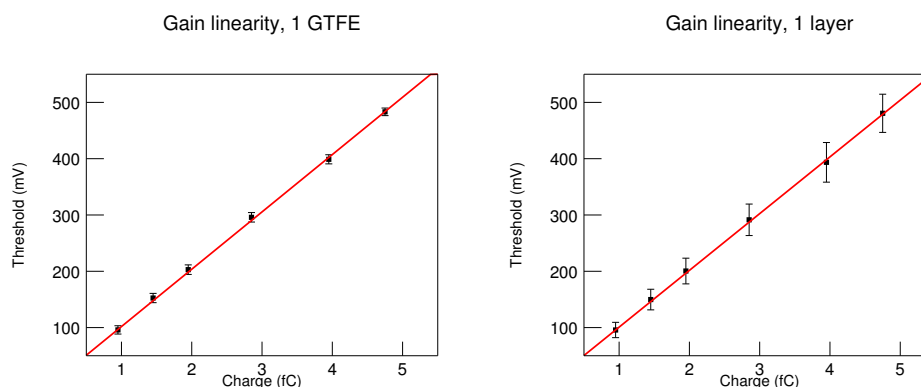


Fig. 5.9: Soglia del discriminatore (mV) corrispondente alla carica iniettata (fC), fittata con una linea retta, per un solo GTFE e per tutto il piano.

Ogni colonna del buffer immagazzina una lettura completa di tutti i 64 canali. Viene inoltre registrato un bit (HIT BIT) che è l'OR di tutti i canali e serve, durante la lettura dei dati, a controllare se ci sono strip colpite. Quando arriva un comando di lettura degli eventi un Read Control carica in un registro a scorrimento i dati contenuti nel buffer. Viene controllato se l'HIT BIT è uguale a 0. In tal caso non viene caricato nessun dato e il registro serve solo alla trasmissione dei dati del precedente GTFE.

La decodifica e l'esecuzione dei comandi è gestita da due controller, uno obbedisce al GTRC dal lato LOW e l'altro al GTRC lato HIGH. Un registro (MODE) decide quale dei due controller è abilitato. In questo modo se un GTRC è malfunzionante si può usare l'altro senza perdita rilevante di prestazioni.

5.1.6 Studio del rumore nell'elettronica di GLAST

Anche in un sistema di acquisizione di tipo "digitale", come nel caso del tracciatore del LAT, lo studio del rumore elettronico è un aspetto fondamentale. Tale studio permette di scegliere bene le soglie dei discriminatori: a soglie troppo basse il rate di conteggi (e di trigger) sarebbe dominato dal rumore, a soglie troppo alte l'efficienza di rivelazione sarebbe ridotta. In seguito verrà mostrato come si possono misurare i parametri necessari ad ottimizzare le prestazioni del tracciatore in tal senso; lo scopo di questo paragrafo è di descrivere, in maniera semplificata, cosa ci si aspetta dai GTFE in termini di rumore.

All'ingresso di un amplificatore ci sono diverse sorgenti di rumore che di solito vengono quantificate in termini di carica equivalente (*ENC, Equivalent Noise Charge*), ovvero la quantità di carica segnale necessaria per produrre un livello di tensione pari al livello di rumore. Tale unità di misura risulta

estremamente comoda nel momento in cui si vuole paragonare il rumore al segnale di una particella, comunemente espresso in elettroni. Nota la capacità del rivelatore C_d , la carica equivalente si ottiene dal valore quadratico medio della tensione di rumore V_{noise} tramite la relazione $ENC = C_d \cdot V_{noise}$.

Il rumore elettronico è dovuto alle fluttuazione del numero di portatori di carica (*rumore shot*) o della velocità dei portatori (*rumore termico o Johnson*). Questi due meccanismi producono rumore bianco, cioè indipendente dalle frequenze. Il loro contributo al rumore totale dipende da come le sorgenti sono collegate alla capacità C_d del rivelatore (serie o parallelo) e dalla banda passante.

Un terzo tipo di rumore è detto $1/f$ dal momento che il suo contributo è rilevante alle basse frequenze. Le ragioni fisiche di tale rumore non è chiara, ma dal momento che esso è rilevante là dove la funzione di trasferimento dell'amplificatore è praticamente nulla, non verrà preso in considerazione in questo paragrafo.

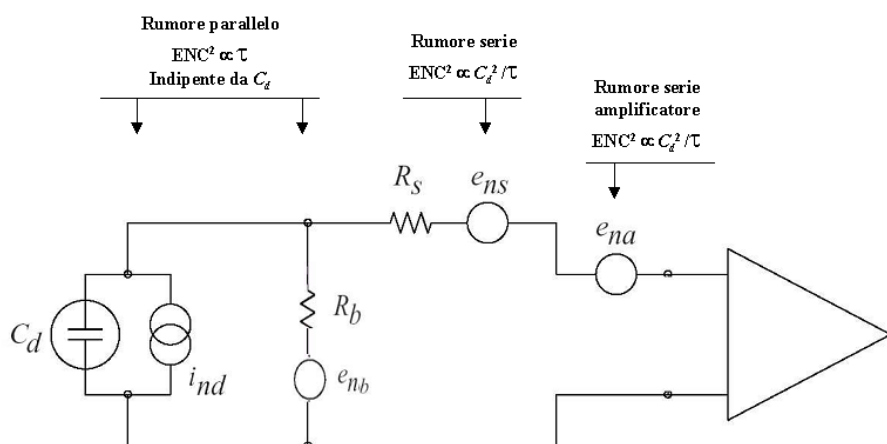


Fig. 5.10: Circuito equivalente di un rivelatore connesso all'elettronica di lettura. Sono evidenziate le varie sorgenti di rumore e la loro dipendenza dalla capacità C_d del rivelatore e dal tempo di picco τ dell'amplificatore.

In figura 5.10 è mostrato il circuito equivalente per una strip connessa all'amplificatore. Sono evidenziati i vari contributi di rumore, in serie o in parallelo con il rivelatore, e la loro dipendenza dalla capacità del rivelatore e dal tempo caratteristico τ dell'amplificatore:

- rumore serie dell'amplificatore, e_{na}
- rumore serie legato alla resistenza della strip, e_{ns}
- rumore parallelo legato alla resistenza di bias, e_{nb}

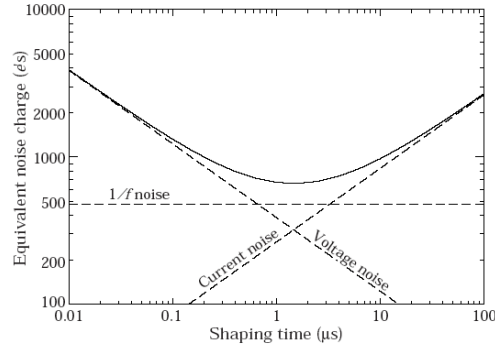


Fig. 5.11: Andamento tipico del rumore elettronico in funzione del tempo di formatura del segnale in un amplificatore.

- rumore parallelo (shot) dovuto alla corrente oscura del rivelatore, i_{nd}

Se esprimiamo la carica equivalente di ogni sorgente come Q_n , la carica totale sarà data dalla somma in quadratura dei vari contributi (indipendenti tra loro):

$$Q_{tot} = \sqrt{Q_{na}^2 + Q_{ns}^2 + Q_{nb}^2 + Q_{nd}^2} \quad (5.1)$$

Il primo contributo da prendere in considerazione è il rumore introdotto dall'amplificatore stesso. Esso dipende fortemente dalle caratteristiche costruttive del dispositivo e può essere rappresentato come un generatore di tensione e_{na} in serie all'ingresso dell'amplificatore. La carica di rumore equivalente è quindi proporzionale alla capacità $C_{tot} = C_d + C_a$, mentre l'integrazione sulla banda passante determina una proporzionalità inversa con τ . Per il sistema implementato nel GTFE si può usare la seguente relazione misurata in precedenti studi durante la fase di progettazione (fig. 5.12).

$$Q_{na} = 174e^- + 32 \cdot C_d(pF) \quad (5.2)$$

Senza avere alcun rivelatore connesso ci si aspetta quindi di misurare un rumore dell'ordine di $174 e^-$ equivalenti; con il rivelatore connesso invece, assumendo una capacità della strip di circa 1 pF/cm ($C_d \simeq 36 \text{ pF}$ per un ladder), ci si aspetta un rumore dell'ordine di $1330 e^-$.

Il secondo contributo al rumore serie è dato dalla resistenza della strip in alluminio (rumore termico). La tensione quadratica media per unità di frequenza del generatore è data da $e_{ns}^2 = 4kTR_s$ e, dal momento che si può considerare infinita l'impedenza d'ingresso dell'amplificatore, tale tensione si ritrova direttamente sulla capacità del rivelatore ($Q_{ns}^2 \propto C_d^2$). In formule:

$$Q_{ns} = \sqrt{\frac{e^2}{8\tau} 4kTR_s C_d^2} = 44.6 \cdot C_d(pF) \sqrt{\frac{R_s(k\Omega) \cdot T(K)}{\tau(ns)}} \simeq 136e^- \quad (5.3)$$

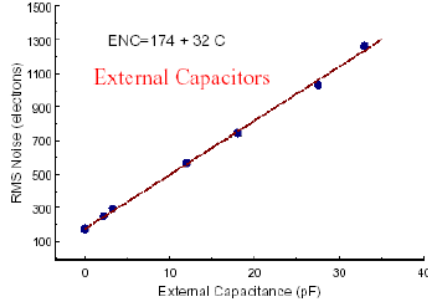


Fig. 5.12: Misura dell'andamento del rumore elettronico di un canale del GTFE al variare della capacità in ingresso.

dove il valore numerico è stato ottenuto con i seguenti dati:

- $T = 300K$ per la temperatura
- $\tau = 1.5\mu s$ per il tempo di formazione del segnale
- $R_s = 36\Omega = \frac{1}{3} \cdot 3(\Omega/cm) \cdot 36(cm)$ per la resistenza della strip. La ragione per cui si considera solo un terzo della resistenza totale sta nel fatto che la resistenza e la capacità dell'elettrodo sono distribuite lungo tutta la lunghezza.

Analogamente alla resistenza della strip un'altra sorgente di rumore termico è la resistenza di bias. Risolvendo l'equazione della maglia si ottiene la tensione ai capi del condensatore:

$$e_{nb}^2 = 4kTR_b \frac{\left(\frac{-i}{\omega C_d}\right)^2}{\left(R_b - \frac{i}{\omega C_d}\right)^2} = 4hTR_b \frac{1}{1 + (\omega C_d R_b)^2} \quad (5.4)$$

Moltiplicando per la capacità del rivelatore ed integrando sul tempo caratteristico dell'amplificatore (tramite il cambiamento di variabile $d\omega = dt/t^2$):

$$Q_{nb}^2 = 4kTR_b \int_0^\tau \frac{(R_b C_d/t)^2}{1 + (R_b C_d/t)^2} \frac{1}{R_b^2} dt \rightarrow \frac{4kT}{R_b} \tau \quad (5.5)$$

dove si è usato il fatto che, con $R_b = 40M\Omega$, $R_b C_d/\tau = 1440(\mu s)/1.5(\mu s) \gg 1$ e quindi la funzione si può approssimare a 1 su tutto l'intervallo di integrazione. Tale formula evidenzia la dipendenza dal tempo caratteristico dell'amplificatore. Con un calcolo più dettagliato si ottiene:

$$Q_{nb} = 44.6 \sqrt{\frac{T(K)\tau(ns)}{R(k\Omega)}} \simeq 150e^- \quad (5.6)$$

L'ultimo contributo è lo shot noise derivante dalle fluttuazioni dei portatori di carica nella corrente di leakage dei rivelatori. Se il numero medio di portatori è $N_e = I_l \tau / q_e$ (con I_l corrente oscura) la fluttuazione sarà $\propto \sqrt{N_e} \propto \sqrt{\tau}$ ovvero il suo contributo sarà tanto maggiore tanto più il tempo caratteristico dell'amplificatore sarà lungo. In GLAST questo è un aspetto cruciale molto importante: rispetto a tracciatori per fisica delle alte energie, dove i tempi di formatura del segnale sono dell'ordine di decine (al massimo centinaia) di nanosecondi, il GTFE ha un tempo tipico di $1.5 \mu s$. È quindi estremamente importante che la corrente oscura resti molto bassa, anche dopo anni di funzionamento.

La densità spettrale di corrente è $i_{nd}^2 = 2q_e I_l$, per ottenere la carica equivalente bisogna considerare la tensione quadratica media ai capi del condensatore ($e_{nd}^2 = i_{nd}^2 / \left(\frac{-i}{\omega C_d}\right)^2$), integrare nella banda dell'amplificatore e moltiplicare per la capacità del rivelatore. In formule:

$$Q_{nd} = C_d \sqrt{\int \frac{1}{(\omega C_d)^2} i_{nd}^2 d\omega} \simeq 3.4 \sqrt{I_l (nA) \tau (ns)} \simeq 130 e^- \quad (5.7)$$

dove è stato usato un valore di 1 nA per la corrente oscura di una singola strip.

È bene osservare che il contributo dominante al rumore totale è dato dal rumore introdotto dall'amplificatore stesso, mentre gli altri contributi sono almeno un ordine di grandezza più piccoli (la somma in quadratura dei vari contributi restituisce $1350 e^-$, solo il 1.5% in più del rumore legato all'amplificatore).

Ma cosa succede col passare del tempo? L'"invecchiamento" dei sensori in orbita è principalmente dovuto a danneggiamento da radiazione il cui effetto principale è l'aumento della corrente di leakage. Secondo le specifiche dei ladder la massima corrente che si può accettare per strip è circa 5.2 nA (@ 150 V) per un rumore elettronico di circa $300 e^-$ equivalenti. La radiazione assorbita da GLAST in 5 anni di missione è 1 krad, le specifiche utilizzano un limite ingegneristico di 5 krad, mentre i test di irraggiamento dei sensori arrivano a 10 krad. Con quest'ultimo valore si misura un aumento della corrente di circa un fattore 10 e quindi il contributo al rumore diventa $950 e^-$. Il rumore totale passa quindi da un valore atteso di 1350 a 1650 elettroni: un aumento del 22%.

L'effetto di un eccesso di rumore è quello di un aumento del numero di strip che "appaiono" sopra soglia senza che sia passata alcuna particella. Se ne possono stimare le conseguenze ricordando che la distribuzione di altezza d'impulso del rumore è una gaussiana. La frazione delle volte che un canale è sopra soglia a causa del rumore si ottiene integrando la gaussiana dalla soglia scelta in poi, come mostrato in figura 5.13. Se prendiamo una soglia di riferimento di 100 mV (tale scelta verrà giustificata nei prossimi capitoli) vediamo che si passa da un occupancy di circa $2 \cdot 10^{-6}$ a $7 \cdot 10^{-5}$, mentre

le specifiche richiedono che tale valore non superi 10^{-4} . In seguito verranno mostrati i risultati delle misure di rumore su un prototipo di tracciatore e verrà discussa la relazione tra noise, occupancy ed efficienza di rivelazione: si potrà osservare, su misure reali, la bontà del progetto generale del sistema di acquisizione.

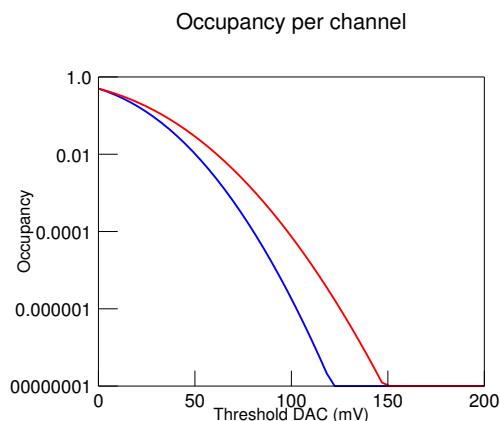


Fig. 5.13: Stima dell'occupancy di noise per un canale, sia per un rumore di 1350 e^- (curva blu) che per 1650 e^- (curva rossa). I valori della soglia sono espressi in mV per agevolare il confronto con le misure effettuate sui prototipi. Anche in condizione di alto rumore si osserva che già a 100 mV l'occupancy è di $7 \cdot 10^{-5}$, meglio di quanto richiesto dalle specifiche (10^{-4}).

5.2 Online software: ambiente di test e di controllo a terra

In questo paragrafo verrà mostrato in dettaglio il sistema di controllo e acquisizione dati usato in fase di costruzione e test del tracciatore. Tale sistema utilizza un ambiente software fornito dal gruppo dell'*I&T (Integration and Test) Online* (SLAC). Il gruppo dell'INFN Pisa ha la responsabilità dello sviluppo dei test del tracciatore sia per il controllo di funzionalità dello strumento, sia per quanto riguarda lo studio delle prestazioni.

L'ambiente è attualmente implementato per gestire i singoli sottosistemi: una singola TEM nel caso del tracciatore. Tutte le routine sono comunque in continuo sviluppo e miglioramento con l'obiettivo finale di costruire un pacchetto software in grado di gestire dal singolo sottosistema all'intero LAT durante le operazioni di test e calibrazione a terra. Tale pacchetto verrà utilizzato sia dai vari sottosistemi durante la fase di produzione, che dal gruppo dell'I&T responsabile dell'integrazione.

5.2.1 EGSE

Con il termine *Electrical Ground Support Equipment* si intende tutto il banco di prova di un particolare sottosistema hardware. Come già detto l'ambiente di controllo evolve in maniera tale da funzionare con sottosistemi sempre più complessi, da un singolo modulo come la TEM a tutto il LAT, in modo da supportare le varie fasi della costruzione del LAT stesso. In questo lavoro verrà descritto il così detto EM1 (Engineering Model 1) EGSE il quale è concepito per quelle situazioni in cui l'hardware e il software usato possono non essere simili al software e hardware di volo in modo tale da controllare in maniera completa il particolare sottosistema da testare. L'EM1 funziona con una singola TEM. È stato l'ambiente di test dei primi tray di volo e continuerà ad essere usato per testare i vari componenti della torre durante la costruzione.

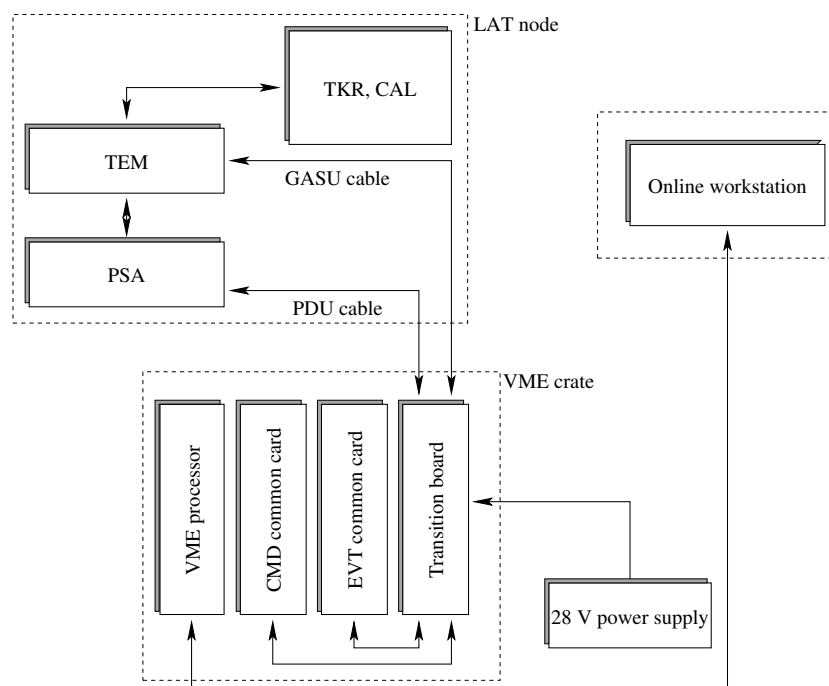


Fig. 5.14: Schema generale del EM1 EGSE. Il suo scopo è il controllo completo di un singolo sottosistema del LAT (una TEM per quanto riguarda il tracciatore) ed è usato in tutta la fase di costruzione del tracciatore per testare le sue varie parti. La gestione dei controlli è affidata a schede VME e ad un processore VME, l'operatore controlla il tutto tramite un PC.

L'EM1 EGSE (fig. 5.14) è composto da:

- Un modulo: TEM o AEM e naturalmente l'elettronica di sistema a

cui possono essere collegate.

- Un modulo PSA (Power Supply Assembly): fornisce sia le basse tensioni (analogiche e digitali) che le alte tensioni al tracciatore ed al calorimetro in maniera analoga all'alimentatore di volo. Esso possiede le stesse caratteristiche meccaniche ed elettriche della sua controparte "flight" con la possibilità ulteriore di variare le alimentazioni per eventuali test.
- Un alimentatore da 28 V: fornisce la tensione che il LAT si aspetta di ricevere dallo spacecraft. Tutti i sistemi dal LAT sono progettati per utilizzare tale tensione.
- Una Transition Board: provvede ad emulare le funzionalità della PDU (*Power Distribution Unit*) e del GASU per un singolo nodo del LAT. Ciò significa che fornisce in clock di sistema a 20 MHz, contiene le funzionalità del "mini-GLT" (GLobal Trigger) e controlla i parametri che, nel sistema finale, sono di competenza della PDU.
- Due Communication Board: sono in pratica due FIFO (First In First Out), una per i comandi e l'altra per gli eventi. Sarà sostituita da una singola LCB (*LAT Communication Board*) in una versione successiva del sistema di test in modo da essere più simile al sistema di volo.
- Una SBC (*Single Board Computer*): una scheda Motorola MVME2304, ovvero il processore che gestisce tutto il sistema di acquisizione tramite bus VME (utilizzato anche dalle altre schede). Il suo sistema operativo (VxWorks) e tutti i driver a basso livello (routine C++ compilate) sono caricate da un PC: al boot il processore monta una parte del disco del PC tramite NFS (*Network File System*).

5.2.2 Run Control

Da punto di vista di controllo software il LAT è suddiviso in una serie di nodi in modo da rispettare una gerarchia (fig. 5.15). Al livello più alto il LAT consiste in 16 TEM, un AEM *ACD Electronic Module* ed un GEM *Global trigger Electronics Module*. Gli ultimi due moduli formano il così detto GASU di cui si è già parlato. Per il controllo del tracciatore i blocchi importanti sono la TEM ed il GEM. Quest'ultimo è usato per gestire in maniera diretta il sistema di trigger: abilitare o meno la lettura degli eventi, selezionare una primitiva di trigger (3-in-a-row, trigger esterno, lettura su comando). La TEM contiene tre nodi: il calorimetro (identificato dal prefisso GC), il tracciatore (con prefisso GT), il GTIC (*GLAST Trigger Interface Controller*). La struttura interna del calorimetro e del tracciatore è molto simile: in ordine gerarchico decrescente si accede ai controller dei cavi, ai

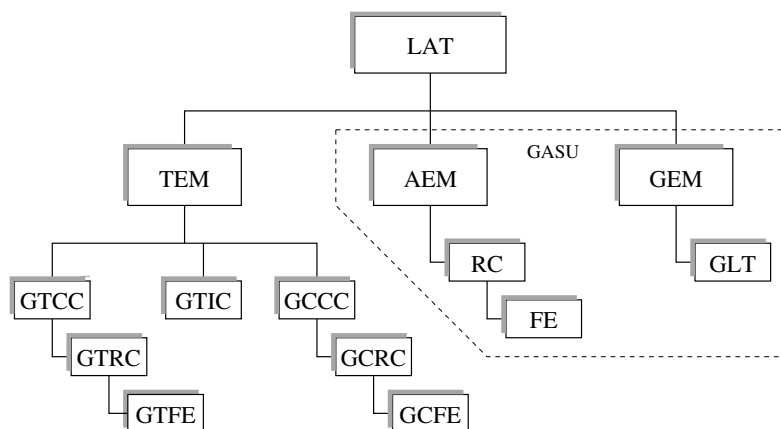


Fig. 5.15: Gerarchia del LAT così come è implementata dal software online. Solo una delle 16 TEM è mostrata.

Readout Controller ed ai Front End. Tutti i vari nodi possiedono dei registri su cui si può accedere sia in lettura che in scrittura.

Il *Run Control* è l'ambiente software che permette di controllare i vari sottosistemi. Esso fornisce un'interfaccia con le routine a basso livello ed implementa la gerarchia del LAT come una collezione di oggetti in maniera tale da poter accedere all'hardware e leggere e scrivere i registri. L'ambiente è comune a tutti i sottosistemi i quali possono scrivere ed eseguire le loro routine di test. Tutto l'ambiente, così come le routine dei vari sottosistemi ed i tool ausiliari (per la grafica) sono scritti utilizzando il linguaggio Python: tale linguaggio consente di avere un ambiente multipiattaforma ed orientato agli oggetti, inoltre è estremamente semplice da imparare e consente una immediata integrazione con pacchetti software esterni (librerie grafiche come QT, gestione di formati di file tipo FITS o XML, ecc...).

Il Run Control funziona come una macchina a stati finiti. Ogni transizione (fig. 5.16) corrisponde ad una serie di azioni. Alcune di esse sono descritte nelle routine di test, altre fanno parte dell'ambiente stesso di test. Il Run Control infatti provvede in maniera autonoma ad alcune funzioni di controllo ed al salvataggio di informazioni utili a caratterizzare le condizioni di test. Possono essere salvati in maniera automatica:

- messaggi di logging generati dal Run Control, dalle routine di test o inseriti dall'operatore in un'apposita finestra. Tali messaggi sono classificati in base ad un livello di guardia (debug, info, warning, error, critical).
- dati riguardanti gli eventi: in caso la routine preveda la lettura dei dati, il Run Control può salvare gli eventi in due formati: LDF (*Lat Data Format*) o FITS (*Flexible Image Transport System*). Gli eventi

che contengono messaggi di errore generati dal sistema testato oppure quelli che contengono errori di formattazione vengono salvati in file diversi rispetto agli eventi “good”.

- dati riguardanti la configurazione dell’hardware sotto test. In genere all’inizio ed alla fine di un run vengono salvati due file XML che contengono i valori di tutti i registri accessibili.
- un file di “report” contenente varie informazioni sui parametri impostati nel Run Control come ad esempio l’operatore, la data, la versione dei vari pacchetti software utilizzati ecc.

La routine di test provvede al salvataggio di informazioni specifiche del test (ntuple, immagini, ecc.) ed un file di report, in formato HTML, con informazioni sull’esito del test.

Per quanto riguarda la grafica e l’analisi dati online viene utilizzato un tool di supporto chiamato *HippoDraw*, scritto a SLAC originariamente in C++, esso consente di manipolare ntuple e plot di vario genere. Altri tool di supporto come un “Event Display” e un “Enviromental Monitor” sono attualmente in fase di sviluppo.

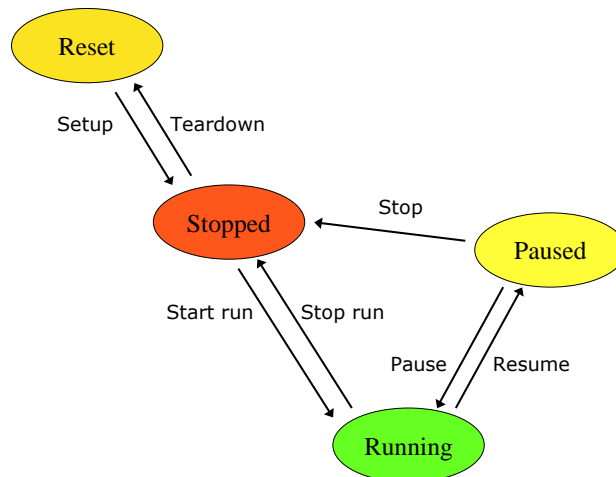


Fig. 5.16: Transizioni del Run Control.

5.3 Test elettrici

Tutto il sistema di controllo finora descritto è stato utilizzato per testare vari componenti elettronici durante la fase di costruzione di un prototipo “flight” del tracciatore. La discussione dettagliata dei risultati di tali test è rimandata al prossimo capitolo. In questo paragrafo verrà descritto l’obiettivo dei vari test e il loro funzionamento soprattutto per quanto riguarda quei controlli che verranno effettuati sui tray prima dell’assemblaggio della torre completa. È bene notare che lo sviluppo delle routine e delle “procedure” è mirato a rendere il più veloce ed efficiente possibile la fase di controllo di funzionalità dei vari componenti in modo da rendere “facile” la produzione quasi in serie dei componenti del tracciatore.

I vari test elettrici a cui sono sottoposti prima i singoli MCM, poi i tray fino alla torre completa sono mirati sia a controllare la funzionalità dei componenti elettronici sia allo studio delle prestazioni in termini di rumore, efficienza, e risoluzione. Mentre la funzionalità è lo scopo principale dei test su singolo MCM o singolo tray, le prestazioni del tracciatore sono più facilmente studiabili sulla torre (o sulla minitore, vedi pag. 78), non si prevede quindi di eseguire alcuna misura di prestazioni se non sulla torre completa (con l’unica eccezione della misura del rumore elettronico dei canali). Efficienza, allineamento e risoluzione spaziale vengono studiate tramite run di dati utilizzando i raggi cosmici e sfruttando la possibilità di poter scegliere quanti e quali piani usare per formare il trigger.

5.3.1 Controlli di funzionalità

I primi test di funzionalità che vengono eseguiti sull’elettronica sono ovviamente il controllo dei registri e dei comandi dei GTRC e dei GTFE:

- *GTRC Register Test*: delle sequenze di bit predefinite vengono caricate nel *Control Status Register* dei controller e successivamente rilette, si controlla la correttezza della lettura e la presenza di eventuali bit di errore. I chip vengono indirizzati sia in maniera sequenziale che tramite un broadcast a tutto il sistema.
- *GTFE Register Test*: delle sequenze di bit predefinite vengono caricate nei registri rilevanti di ogni GTFE (comandati sia dal controller di destra che di sinistra) e successivamente rilette, si controlla la correttezza della lettura e la presenza di eventuali bit di errore. I chip vengono indirizzati sia in maniera sequenziale che tramite un broadcast a tutto il sistema.
- *Reading Configuration Test*: viene utilizzato il sistema di calibrazione interna per verificare la funzionalità di tutte le 25 configurazioni di lettura (che differiscono per il numero di GTFE comandati dal controller

di destra e di sinistra). In questo modo viene verificato il corretto trasferimento di dati e comandi da un GTFE al successivo in entrambe le direzioni (destra e sinistra).

A questo punto si passa alla ricerca di canali “bad” ovvero quei canali che non sono utilizzabili a causa di amplificatori malfunzionanti, di eccessivo rumore, o disconnessi dalle strip del rivelatore. In base alle specifiche richieste in fase di progetto si può accettare al massimo il 2% di canali inutilizzabili: un valore maggiore comprometterebbe l’efficienza del tracciatore. Ci sono vari modi per ricercare questi malfunzionamenti. Un test semplice e veloce consiste nell’utilizzare il sistema interno di calibrazione: si inietta una grossa carica (rispetto alla soglia del discriminatore) nel preamplificatore e si controlla la risposta del canale. In questo modo si controllano difetti del sistema di iniezione o dell’amplificatore.

La ricerca dei canali disconnessi si basa invece sulla crescita del rumore elettronico nei canali una volta connessi alle strip (dal momento che i rivelatori aggiungono carico capacitivo in ingresso). Un modo per sfruttare tale fenomeno è contare il rate di trigger con soglie molto basse, in modo da essere dominati dal rumore: si osserva che canali disconnessi hanno un rate molto più basso rispetto ai canali perfettamente funzionanti (fig. 5.17). Il test principale per la ricerca di canali malfunzionanti è sicuramente la

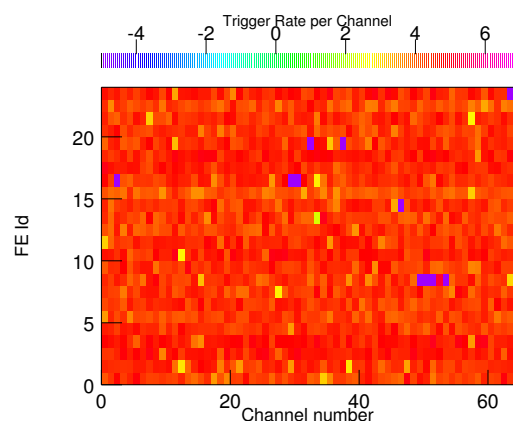


Fig. 5.17: Esempio di rate di trigger per canale. La scala di colori indica il logaritmo del rate di trigger, notare che mentre per molti canali si misura un rate di circa 10^4 per alcuni si scende fino a 10^{-4} , questi ultimi sono quelli sospettati di essere disconnessi.

misura del guadagno e del rumore nei singoli canali. Tale test ha il vantaggio di caratterizzare ogni canale in maniera più completa rispetto ai test già menzionati, il rovescio della medaglia è sicuramente il tempo impiegato per eseguire la misura: circa 20 minuti per un singolo piano, mentre i precedenti

test richiedono meno di un minuto per piano. La misura del guadagno e del rumore (eseguita separatamente per ogni canale) utilizza il sistema di calibrazione. Dal momento che il sistema elettronico del tracciatore è digitale, la misura che si può compiere riguarda l'“occupancy” dei canali, ovvero il numero di volte in cui un canale viene letto diviso il numero totale di eventi. Sia Q la quantità di carica iniettata (che supponiamo perfettamente nota), l'altezza d'impulso H_{out} all'uscita analogica della catena di amplificazione sarà data da:

$$H_{out} = s + n \quad (5.8)$$

dove s è il segnale ed n è il contributo di rumore. La distribuzione di s sarà una funzione delta che possiamo scrivere in termini del guadagno G come:

$$s = \delta(GQ) \quad (5.9)$$

Per quanto riguarda il rumore assumiamo che la sua ampiezza sia distribuita in maniera gaussiana intorno allo zero con una certa larghezza σ_n sconosciuta:

$$n = N(0, \sigma_n) \quad (5.10)$$

in modo tale che la distribuzione della variabile H_{out} sarà:

$$H_{out} = N(GQ, \sigma_n) \quad (5.11)$$

Se quindi misuriamo l'occupancy O in funzione della soglia T al discriminatore ci spettiamo che sia pari alla probabilità di H_{out} di essere maggiore di T , ovvero:

$$O = 1 - erf\left(\frac{T - GQ}{\sigma_n}\right) \quad (5.12)$$

dove la funzione erf è definita come:

$$erf(x) = \int_{-\infty}^x N(0, 1)dx \quad (5.13)$$

Un fit della curva di occupancy fornisce quindi una misura del guadagno e del rumore. Il primo è dato dal punto al 50% di occupancy normalizzato alla carica iniettata, il secondo è legato alla “larghezza” della curva. Dal momento che l'energia rilasciata da una particella nel rivelatore è spesso espressa in termini di carica, è utile esprimere il rumore elettronico in carica equivalente (ENC) rinormalizzandolo al guadagno misurato:

$$ENC = \frac{\sigma_n}{G} \quad (5.14)$$

A questo punto si possono identificare i canali malfunzionanti come quelli aventi guadagni troppo bassi ed i canali disconnessi come quelli il cui rumore è troppo basso.

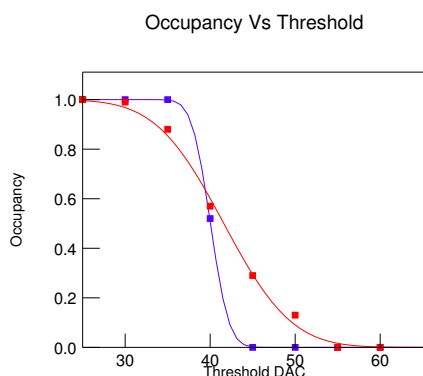


Fig. 5.18: Occupancy in funzione della soglia per un canale funzionante (in rosso) ed uno disconnesso (in blu) entrambi fittati con la funzione 5.12. Notare come la transizione tra 100% e 0% occupancy sia molto più ripida per un canale disconnesso, mentre non c'è grande differenza di guadagno (dato dal punto al 50%).

Per quanto riguarda i canali rumorosi, si preferisce usare una via diversa: si misura nuovamente l'occupancy dei canali, ma a soglia fissata (il più possibile vicino alla soglia di lavoro). Il test si esegue mandando segnali di lettura in maniera random (ovvero asincroni rispetto al passaggio di particelle del rivelatore) e leggendo l'intero sistema: più un canale è rumoroso più la sua occupancy sarà alta (fig. 5.19). È bene notare che, dal momento che il LAT registra solo un'informazione digitale per gli eventi, la definizione di canali rumorosi come quelli per cui l'occupancy è troppo alta diventa una definizione operativa di quali canali vanno mascherati durante l'acquisizione per evitare un eccessivo rate di trigger (di rumore) e la comparsa di hit di rumore che possono rendere inefficiente la ricostruzione degli sciame elettromagnetici.

L'ultimo controllo di funzionalità che è necessario eseguire prima di poter "accettare" un MCM o un tray riguarda il TOT. Si tratta di un controllo molto semplice e veloce: usando il sistema di calibrazione si studia il variare del TOT all'aumentare della carica iniettata (in un numero ragionevole di canali). Variazioni di guadagno tra vari canali (o tra vari GTFE) fanno in modo che a parità di carica iniettata il valore del TOT letto possa variare. Questo test non ha però lo scopo di "calibrare" in qualche modo il TOT, ma solo di verificare il corretto funzionamento dei chip: quello che ci si aspetta è un andamento lineare almeno fino a $25 \mu\text{s}$ (la durata del gradino di tensione del circuito di calibrazione), poco importa la pendenza della curva. Uno studio più approfondito del TOT per una eventuale calibrazione può essere fatto studiando il guadagno del TOT per ogni canale. Un canale alla volta si studia la variazione di TOT all'aumentare della carica iniettata, si può

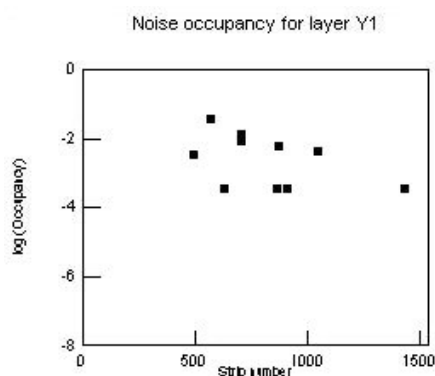


Fig. 5.19: Occupancy di rumore per un piano. In questo test il segnale di lettura è stato mandato per circa 3000 volte: solo i canali con occupancy maggiore di $3 \cdot 10^{-4}$ sono mostrati.

fitte il plot così ottenuto con una linea retta (fig. 5.20). La pendenza della

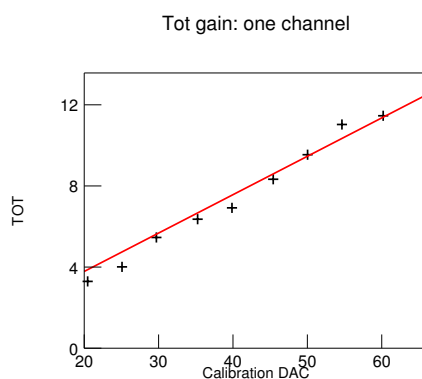


Fig. 5.20: Andamento del TOT (per un canale) al variare della carica iniettata. La pendenza della retta rappresenta il guadagno (esprimibile in $\mu s/fC$)

retta rappresenta il guadagno (in unità $\mu s/fC$), mentre il termine noto è un parametro che dipende dalla soglia del discriminatore: a parità di segnale in ingresso al discriminatore una soglia più alta provoca un TOT minore. In figura 5.21 è mostrato un esempio di guadagno del TOT per canale in un piano e il valor medio per GTFE.

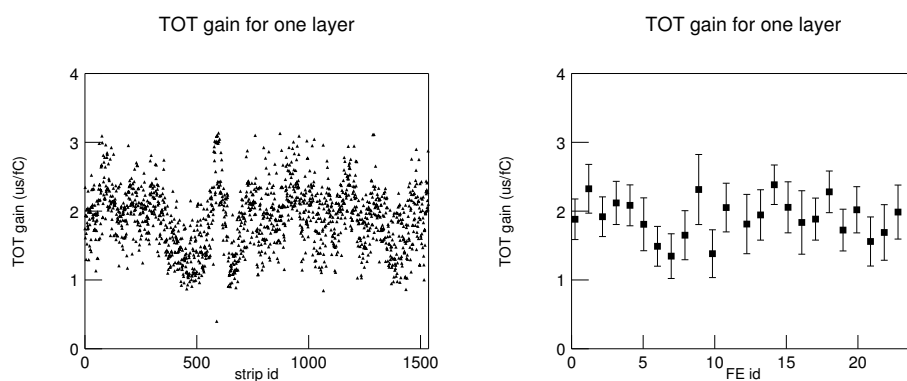


Fig. 5.21: Esempio di guadagno del TOT (in $\mu s/fC$) per un piano (a destra) e valor medio per GTFE (a sinistra), le barre di errore rappresentano RMS dei valori in un chip.

6. LA MINITORRE

La minitorre (MT) è il primo prototipo di torre del LAT instrumentata con hardware “quasi” di volo. Si tratta di una versione ridotta della versione finale di torre del LAT completamente funzionante (tracciatore + calorimetro + TEM + PSA).

Per quanto riguarda il tracciatore, oggetto di questo lavoro, la minitorre è formata da 4 tray, due dei quali hanno sensori su entrambe le facce e gli altri due solo su una, e da un “bottom tray” senza SSD che costituisce l’interfaccia con il calorimetro in maniera analoga alle torri di volo. Sulla minitorre sono presenti 8 MCM, sei di essi sono effettivamente connessi ai sensori (3 piani $x-y$ necessari per formare il *three in a row*) mentre gli altri due sono montati sul bottom tray e sul lato inferiore del primo tray e servono solo per trasferire alla TEM i dati provenienti dai piani superiori.

La costruzione e lo studio delle prestazioni della minitorre sono stati un test cruciale dell’intero disegno dello strumento. La minitorre ha fornito la prima occasione reale per lo sviluppo sia dei tool che delle procedure per testare ed operare con hardware di volo. Per la prima volta sono state valutate le prestazioni dello strumento in termini di rumore, efficienza, risoluzione spaziale e allineamento in una configurazione hardware simile a quella di volo. Per la prima volta l’intero sistema di DAQ della torre è stato testato con tracciatore e calorimetro al lavoro contemporaneamente. Per la prima volta il sistema di analisi e ricostruzione offline è stato utilizzato con dati reali.

La realizzazione della minitorre ha sollevato una serie di problemi “minori” riguardanti sia i singoli sottosistemi sia le interfacce tra loro consentendo un grande passo avanti nella costruzione del LAT. D’altra parte, come verrà mostrato, il risultato generale proveniente da questa esperienza è estremamente positivo, confermando la qualità del disegno e della realizzazione delle varie parti e l’affidabilità del processo di assemblaggio.

6.1 Costruzione dello strumento

In questo paragrafo verrà descritta in dettaglio la struttura della minitorre ed i test elettrici effettuati sui vari componenti.

6.1.1 Assemblaggio della minitorre

Un disegno schematico della minitorre è mostrato in figura 6.1; lo strumento è composto da quattro tray normali ed un bottom tray che costituisce semplicemente un interfaccia meccanica tra tracciatore e calorimetro. Non

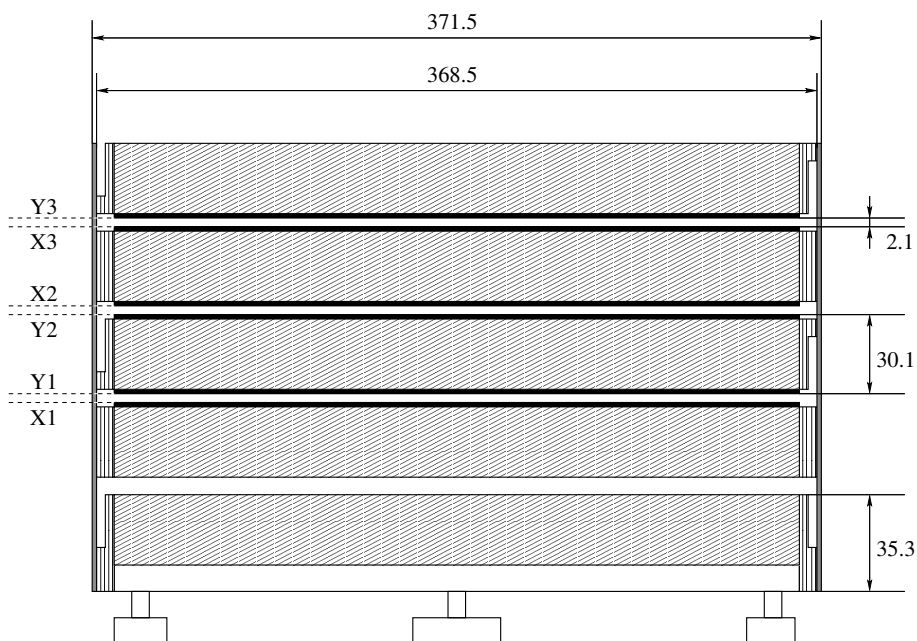


Fig. 6.1: Schema meccanico della minitorre. I sei piani con i rivelatori sono in nero, tutte le dimensioni sono in mm.

tutti i tray sono equipaggiati con rivelatori su entrambi i piani: la minitorre è stata progettata in modo da avere il minimo numero di piani $x-y$ per poter esercitare il trigger (*three in a row*) e allo stesso tempo mantenere indipendente la costruzione e l'assemblaggio del bottom tray in quanto quest'ultimo è fondamentalmente diverso dagli altri. Per ottenere questo risultato il bottom tray non è stato fornito di rivelatori, mentre i due tray più esterni presentano SSD solo su un lato. Inoltre sono stati aggiunti due MCM supplementari, non connessi ad alcun rivelatore, uno sul bottom tray ed uno rivolto verso il lato inferiore del primo tray, in modo da consentire la lettura seriale dei dati.

Sono stati prodotti una serie di flex cable appositamente per la minitorre: sono molto simili alla versione di volo, sia dal punto di vista elettrico

che meccanico, mentre l'unica differenza riguarda la loro lunghezza. Sono ovviamente più corti ed hanno solo 2 o 3 bracci (in base al lato della MT) per la connessione con gli MCM.

Le pareti laterali sono state costruite in semplice alluminio e non in composito in modo da risparmiare su costi e tempi. Le caratteristiche meccaniche dello strumento non sono particolarmente rilevanti dal momento che lo scopo principale della minitorre è la verifica della validità del sistema di acquisizione dati e delle procedure di costruzione e assemblaggio. È bene notare che, parallelamente alla minitorre, è stato costruito un modello ingeneristico di torre completa per lo studio delle proprietà meccaniche e termiche.

6.1.2 Test elettrici sui singoli MCM

Gli MCM utilizzati sulla minitorre provengono da una pre-produzione dedicata. Tutti i componenti elettrici e gli ASICs (GTRC e GTFE) sono “flight hardware”, solo le procedure di assemblaggio (saldatura dei componenti sulla scheda, costruzione e montaggio dei pitch adapter) saranno diverse negli MCM finali. Tutti gli MCM sono stati testati prima del montaggio sui tray e delle connessioni ai sensori. La procedura di test è quella descritta nel capitolo precedente, si tratta di controllare la funzionalità dei comandi (scrittura e lettura dei registri e possibilità di indirizzare i vari GTFE) e ricercare eventuali canali malfunzionanti.

Per quanto riguarda i test di funzionalità, su 10 MCM testati solo due hanno presentato difetti. Il primo difetto riguardava il malfunzionamento del sistema di controllo (Input/Output) di un GTFE. Da notare che questo genere di problemi può essere risolto scegliendo opportunamente la configurazione di lettura: in questo MCM la configurazione standard (12 GTFE controllati dal lato LOW e 12 dal lato HI) non poteva essere usata, ma il modulo funzionava correttamente con meno di 6 GTFE letti dal controller LOW SIDE. In un altro MCM la linea di alimentazione di un GTFE (danneggiato) era stata tagliata per evitare che il chip stesso pilotasse troppa corrente, il risultato è stato che solo i GTRC, ma non i GTFE, di questo MCM funzionavano correttamente. Questo modulo è stato utilizzato su uno dei “finti” piani della minitorre. Entrambi i difetti erano già noti al costruttore prima della spedizione a Pisa delle schede e la loro causa è stata attribuita ad imperizia degli operatori in fase di produzione. Per questo motivo si ritiene che la frazione di componenti difettosi sarà molto minore rispetto a questa pre-produzione.

Lo studio dei canali difettosi (con il sistema di calibrazione interna, vedi pag. 63) ha riportato un solo canale morto su 8 MCM ($\simeq 12000$ canali). Da sottolineare il fatto che questo tipo di test non è sensibile ad eventuali interruzioni delle tracce del pitch adapter che è stato un problema serio nella precedente produzione di MCM, e, in maniera più attenuata, anche di

questa. Dal momento che la lunghezza di tali piste è meno di 1 cm, la sua capacità è troppo piccola per provocare una significativa variazione del rumore elettronico, quindi il numero reale di canali inutilizzabili per la rivelazione delle particelle può essere valutato solo dopo la connessione ai rivelatori.

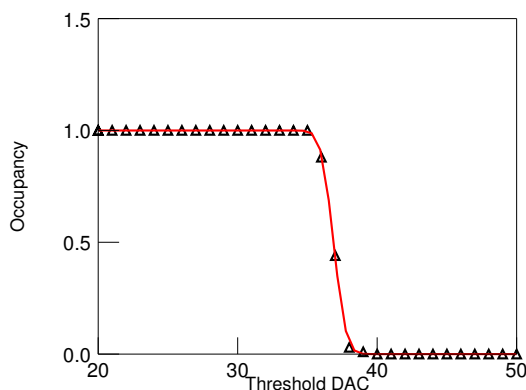


Fig. 6.2: Scan in soglia a carica fissata (1.6 fC) per un canale prima della connessione alle strip. La linea continua è un fit con le funzione 5.12.

Il rumore elettronico è stato misurato, prima dell'assemblaggio sui tray, con il metodo descritto nel paragrafo 5.3.1. Senza il carico capacitivo delle strip le transizioni da 100% occupancy a 0% sono molto ripide come mostrato in figura 6.2. Il guadagno misurato per 1536 canali di un MCM è mostrato in figura 6.3. Come atteso il guadagno medio è dell'ordine di 100 mV/fC. L'uniformità all'interno di un singolo chip è molto buona (5–10%, vedi fig. 6.4) e questo è un punto cruciale dal momento che la soglia al discriminatore può essere fissata solo a livello di GTFE e non di singolo canale. D'altra parte, maggiori variazioni tra chip diversi possono essere compensate, se necessario, aggiustando la soglia.

Il rumore elettronico è valutato dalla larghezza della curva di occupancy. I risultati per un singolo MCM non ancora connesso al detector sono mostrati in figura 6.5. Nel prossimo paragrafo verranno mostrati i risultati dei test dopo la connessione alle strip e sarà evidente come il principale contributo al rumore elettronico è costituito dalla capacità del rivelatore.

Sul singolo MCM è stata anche testata la capacità di misurare il TOT usando il metodo descritto a pagina 65. Un esempio dei risultati è mostrato in figura 6.6. La chiara saturazione a 25 μs , corrispondente a circa 15 fC di carica iniettata, è causata dal sistema di calibrazione che non permette di esplorare tutto il range del TOT (il contatore nel GTRC è studiato per arrivare fino a 50 μs). La tensione di calibrazione ritorna bassa dopo 25 μs ed il preamplificatore riceve un impulso di polarità opposta che in pratica

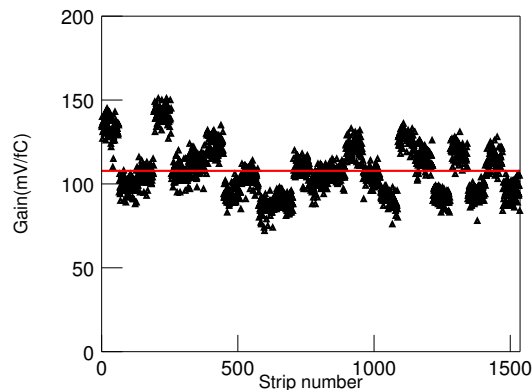


Fig. 6.3: Guadagno misurato di tutti i canali del MCM # 106. Si osserva buona uniformità all'interno dei chip, mentre le variazioni tra i vari chip possono essere compensate aggiustando la soglia. Un fit con una costante da un valore medio di 107 mV/fC.

ferma il TOT. Se la carica iniettata diventa troppo alta accade che il pre-amplificatore saturi in maniera così violenta da impiegare un certo periodo di tempo per ristabilirsi e quindi ritornare nuovamente sotto soglia, con il risultato che il TOT riprende a crescere sopra un certo valore di carica iniettata. Verrà mostrato in seguito, presentando i risultati ottenuti con raggi cosmici, che non si osserva saturazione per tutto il range del contatore. Da sottolineare che bisogna porre attenzione nel comparare il TOT ottenuto tramite calibrazione e quello misurato con particelle reali. Infatti il Time Over Threshold è misurato a partire dall'istante in cui il GTRC riceve il segnale di "Trigger Acknowledge" ed il meccanismo con cui questo segnale è generato è diverso tra calibrazione e acquisizione dati con particelle. Nel primo caso il segnale viene generato in maniera automatica, con un ritardo fissato, dopo il segnale di calibrazione. Nel secondo la TEM aspetta di ricevere le richieste di trigger dai vari piani, controlla la presenza di coincidenze ed eventualmente genera il segnale in questione. La temporizzazione è quindi differente (in modalità self-triggering, il tempo di arrivo della richiesta di trigger dipende anche dalle soglie) e quindi anche il TOT misurato a parità di carica raccolta è differente.

6.1.3 Test elettrici sui singoli tray

Tutti i tray prodotti per la minitorre sono stati testati separatamente prima dell'assemblaggio dello strumento. La sequenza di test è in fase di ottimizzazione in modo da velocizzare e rendere affidabile la procedura in vista della

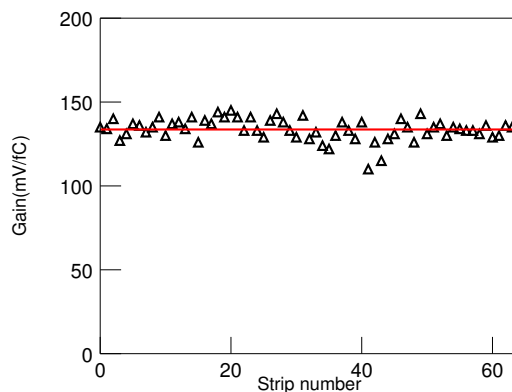


Fig. 6.4: Guadagno misurato dei canali del MCM #106, GTFE #0. Le variazioni dal valor medio sono dell'ordine del 5–10 %

produzione di massa per il LAT. Si tratta sostanzialmente degli stessi test effettuati sui singoli MCM con in più la misura della corrente di leakage dei sensori ed una ricerca più dettagliata di canali morti e rumorosi.

La misura della corrente oscura in funzione della tensione di bias (effettuata in maniera simile alla misura sugli SSD) è il primo test che va eseguito sui tray. Tale misura consente di identificare in maniera diretta eventuali cortocircuiti tra le linee di alta tensione (bias) e ground: le connessioni più delicate da questo punto di vista sono i wire bond tra circuito di bias sul tray e pitch adapter sul MCM. Inoltre si può controllare subito se i sensori al silicio hanno subito danni durante il montaggio dei tray. Subito dopo il controllo della corrente oscura si passa a ricontrollare le funzionalità degli MCM in modo da verificare che la procedura di assemblaggio di questi ultimi sui tray non abbia provocato danni. Particolare attenzione viene posta nella misura del guadagno e del rumore. Il risultato di una misura di guadagno su tray è mostrata in figura 6.7; esse va confrontata con la stessa misura sul MCM (fig 6.3).

Si osserva una leggera diminuzione del guadagno, meglio osservabile in figura 6.8, dovuta alla capacità della strip. Infatti l'impulso di calibrazione vede due capacità in parallelo, quella della strip e quella del preamplificatore, e la carica iniettata viene in qualche modo divisa tra le due; in questo modo una parte della carica (circa il 5%) non raggiunge il preamplificatore. Da sottolineare la perfetta correlazione tra le due misure di guadagno, prima e dopo l'assemblaggio.

La figura 6.9, confrontata con la figura 6.5, mostra come il carico capacitivo dei rivelatori faccia crescere in maniera significativa il rumore elettronico. Tale variazione di rumore consente (come già spiegato a pagina 65) di

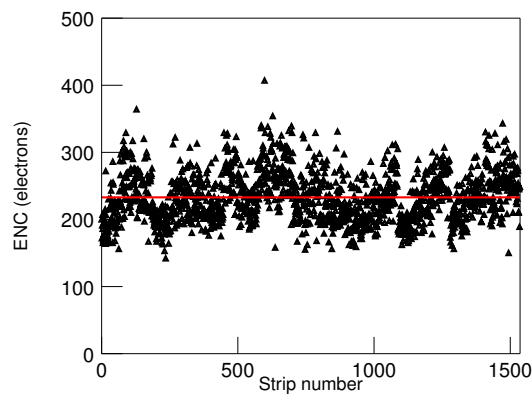


Fig. 6.5: Rumore elettronico (ENC) per uno degli MCM testati. Il valor medio è di 230 elettroni.

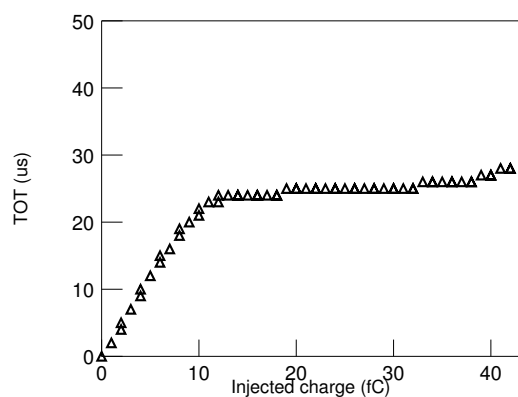


Fig. 6.6: TOT medio in funzione della carica iniettata per il GTRC destro del MCM #111. Il valore che ci si aspetta per una MIP è intorno a $10 \mu s$. La saturazione si osserva a $25 \mu s$, tempo dopo il quale il gradino di tensione di calibrazione ritorna basso; tale saturazione non si osserva con particelle reali.

identificare disconnessioni delle strip dall'elettronica (principalmente dovuti ad eventuali interruzioni delle piste sui pich adapter) prima ancora di un eventuale test con i raggi cosmici.

Una più completa caratterizzazione dello strumento, anche in termini di rumore, verrà mostrata nel prossimo paragrafo. Nella tabella qui riportata sono mostrati il numero di canali classificati come “morti” o “rumorosi” sui

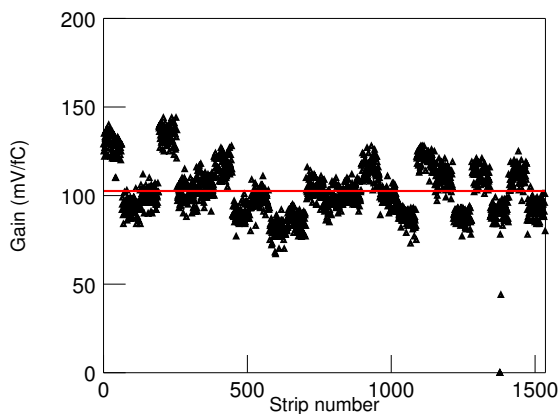


Fig. 6.7: Misura del guadagno (MCM #106) dopo il wire bonding con i rivelatori. I valori sono molto vicini a quelli misurati senza il carico capacitivo delle strip, il valor medio è 102 mV/fC.

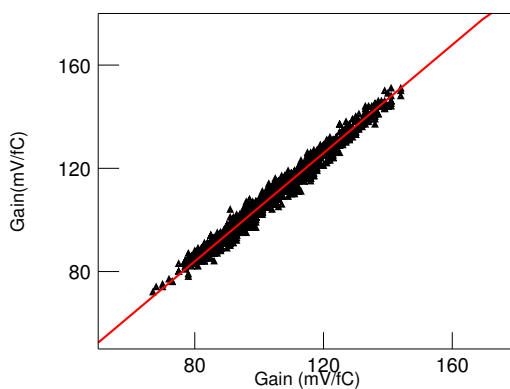


Fig. 6.8: Scatter plot delle misure di guadagno per l'MCM #106 prima (asse y) e dopo (asse x) la connessione (wire bonding) con i rivelatori. La correlazione è molto buona ed il fit con una linea retta indica una diminuzione del guadagno di circa il 5% dovuta alla capacità delle strip

vari tray prima dell'assemblaggio dello strumento. Molte delle inefficienze sono dovute a problemi meccanici localizzati soprattutto nei pitch adapter. La collaborazione sta lavorando insieme al produttore per risolvere tali problemi e rientrare nelle specifiche richieste dal progetto.

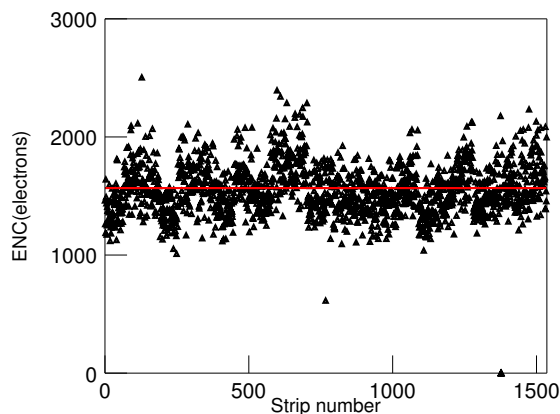


Fig. 6.9: Rumore elettronico misurato per tutti i canali del MCM #106 dopo la connessione con i rivelatori. Il carico capacitivo di questi costituisce chiaramente il contributo dominante al rumore. Il valor medio è $1560 e^-$, da confrontare con i 230 del MCM da solo (fig. 6.5).

layer	number of dead channels	number of noisy channels
X1	1	0
Y1	36	5
X2	25	0
Y2	4	0
X3	7	16
Y3	162	2
Total	235/9216	23/9216

Tab. 6.1: Numero di canali morti e rumorosi identificati durante i test sui tray (ordinati, per semplicità, in base alla loro posizione sulla minitorre). I canali morti sono quelli in cui i difetti (nei preamplificatori, nel pitch adapter o nei rivelatori) si ripercuotono in una completa inefficienza di rivelazione da parte di una strip. Notare che, a causa di problemi meccanici nei pitch adapter, 157 strip nel piano Y3 e 33 nel piano Y1 non è stato possibile connetterle ai rivelatori. Il produttore sta ridefinendo il sistema di produzione e assemblaggio di questo componente per evitare in futuro questi problemi. Tali inefficienze sarebbero inaccettabili in fase di produzione dei tray di volo.

6.2 Caratterizzazione dello strumento

Dopo l'assemblaggio nella clean-room dell'INFN di Pisa, la minitorre è stata dettagliatamente testata per caratterizzare in maniera completa le sue prestazioni. Come per i test descritti in precedenza, l'ambiente software utilizzato è stato quello del Run Control e tutti i risultati mostrati in questa sezione riguardano il monitoring *online* dello strumento. L'esperienza acquisita in questi test, ha permesso di sviluppare ulteriormente i vari tool, per renderli più affidabili e semplici da usare, specialmente per i test sulle torri complete.

In figura 6.10 è mostrato un esempio dei tool utilizzati: un "event display" per il LAT. La figura mostra un raggio cosmico che attraversa la minitorre;

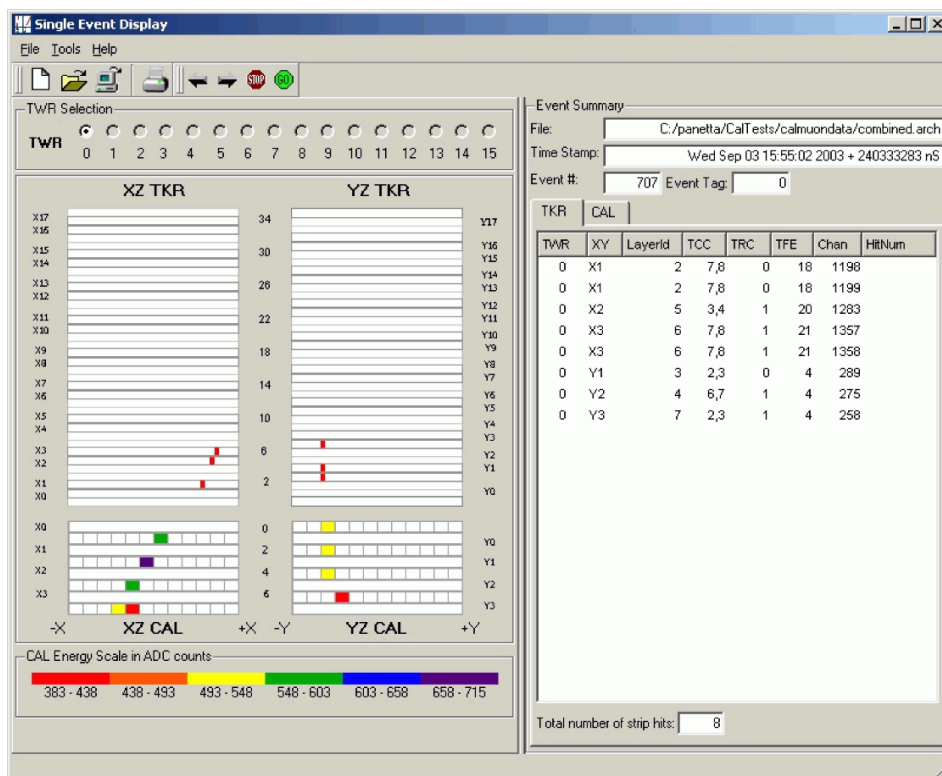


Fig. 6.10: Immagine dell'“event display” raffigurante una paricella (un raggio cosmico) che attraversa le minitorre. Tale evento è stato acquisito subito dopo l'integrazione con il calorimetro: sono visibili sia le hit nel tracciatore che il deposito energetico nel calorimetro.

tale evento è stato preso subito dopo l'integrazione con il calorimetro. Si possono notare le hit nei 6 piani di rivelatore (la cui posizione esatta è descritta nella colonna di destra del display) ed il deposito energetico nel calorimetro. Da notare che, con i raggi cosmici, una linea retta (come quella

mostrata) è la topologia di evento più comune, sebbene occasionalmente si osservi più di una traccia (ad esempio nel caso di emissione di raggi δ). È importante notare che la soglia del discriminatore è di solito posta ad $1/4$ di MIP in fase di raccolta dati (verrà mostrato in seguito la giustificazione di tale scelta). Con tale valore si misura un rate di trigger di circa 14 Hz, in accordo con le previsioni delle simulazioni Monte Carlo.

La distribuzione delle hit (relativa ad un intero run di presa dati) è mostrata in figura 6.11 per due piani della minitorre. Il monitoring online di questa hitmap consente di identificare in maniera precisa i canali morti, da confrontare con i risultati dei test su singolo tray. Anche i canali rumorosi sono identificabili in questo modo: essi appaiono come punti in cui i conteggi sono molto sopra la media. Dopo la loro identificazione, tali canali vengono mascherati in fase di presa dati, per cui non appaiono nella distribuzione mostrata.

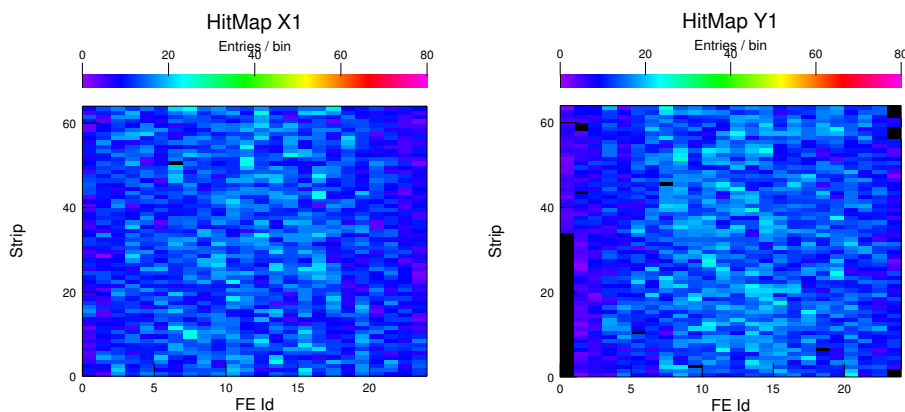


Fig. 6.11: Distribuzione delle hit sui piani X1 e Y1 della minitorre. Per convenienza nella visualizzazione i 1536 canali di ogni piano sono stati organizzati in plot a due dimensioni ed identificati dal numero di GTFE (asse x) e numero di canale, da 0 a 63, del GTFE (asse y). La scala di colori indica il numero di hit per bin. Il numero di canali che non hanno hit va confrontato con i test su singolo tray (tab. 6.1).

In figura 6.12 è invece mostrato un istogramma del numero di hit per evento per piano. Si può chiaramente osservare che nel 50% dei casi una particella che attraversa un piano del tracciatore colpisce solo una strip. I casi in cui le strip colpite sono tre o più sono circa il 10%, e sono dovuti a particelle con grandi angoli di incidenza rispetto alla normale del piano. Il comportamento dello strumento ad angoli grandi verrà mostrato in seguito, tramite un'analisi *offline*.

È interessante mostrare le distribuzioni del TOT (che provengono sia dal GTRC di destra che di sinistra) per i due piani utilizzati come riferimento in questo paragrafo (fig. 6.13). Come atteso per particelle al minimo di

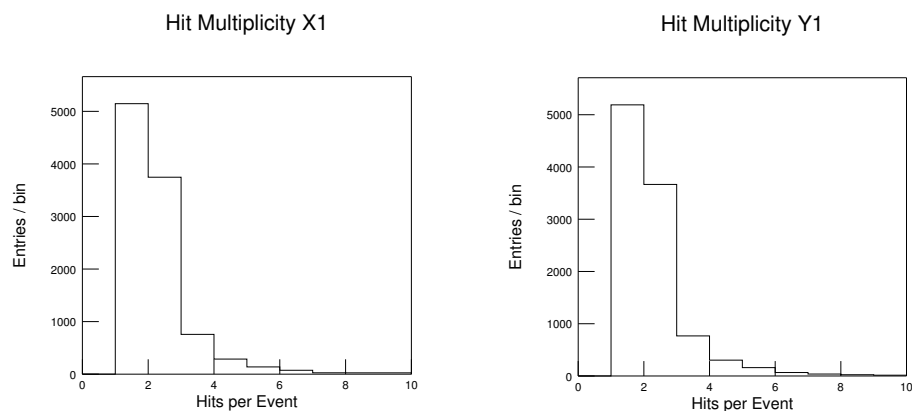


Fig. 6.12: Distribuzione del numero di hit, per evento e per piano, relativo ai piani X1 e Y1 della minitorre. Come ci si attendeva, dato la distanza tra le strip negli SSD, solo una o due strip sono colpite da una particella carica che attraversa il rivelatore.

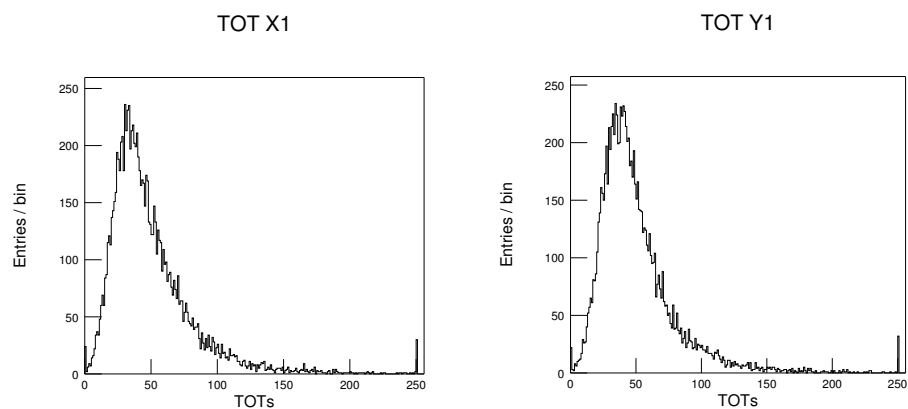


Fig. 6.13: Distribuzione del “Time Over Threshold” per due piani della minitorre. Ogni conteggio (asse x) corrisponde a 200 ns, quindi il fondo della scala, ovvero il tempo massimo misurabile, vale $50 \mu s$.

ionizzazione, le curve seguono un andamento che ricorda la distribuzione della perdita di energia nel silicio o di Landau. Notare che non ci sono segni di saturazione (come quelli, a $25 \mu s$, osservati usando il sistema di calibrazione) e viene sfruttato l'intero range dinamico dei contatori, da 0 a $50 \mu s$.

6.2.1 Misura del rumore

Dal momento che l'elettronica di GLAST è di tipo digitale, non si ha a disposizione l'informazione diretta sull'altezza di impulso del segnale in uscita dalla catena di amplificazione. Ciò nonostante lo studio del rumore dello strumento può essere realizzato, in modo ingegnoso, misurando l'occupancy delle strip al variare della soglia del discriminatore. Tale misura è stata compiuta in modo simile al test descritto nel paragrafo 5.3.1 per la ricerca dei canali rumorosi.

In figura 6.14 è mostrato il numero medio di hit per trigger, per ogni piano, al variare della soglia (notare che, dal momento che viene sommato il contributo delle varie strip, il valore di occupancy può diventare maggiore di uno). A bassa soglia domina il rumore elettronico e la situazione è analoga a quella descritta nella sezione dedicata alla misura del guadagno (par. 5.3.1) con l'eccezione che qui la carica iniettata è 0. Il numero di hit per trigger in funzione della soglia T si può quindi scrivere:

$$O = n_{strips} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{T}{\sigma_n} \right) \right] \quad (6.1)$$

dove σ_n è la deviazione standard della distribuzione di rumore (supposta normale con media zero) e n_{strips} il numero totale di strip attive. In figura 6.15 la funzione (6.1) è sovrapposta ai dati sperimentali (usando il valore di σ_n precedentemente misurato e riportato in figura 6.9) con ottimo accordo. A mano a mano che la soglia aumenta diviene sempre più significativo il contributo delle coincidenze casuali con i raggi cosmici che risulterà il contributo dominante ad alte soglie. In prima approssimazione l'occupancy dovuta alle coincidenze con i raggi cosmici può essere stimata come:

$$O_a = R_c \langle TOT \rangle \langle Hits \rangle \quad (6.2)$$

dove R_c è il rate di particelle che attraversano il piano dei rivelatori, $\langle TOT \rangle$ il valor medio del Time Over Threshold e $\langle Hits \rangle$ il valor medio di hit colpite in un evento. Assumendo un flusso di raggi cosmici di $180 \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ [27], con un area attiva di circa $0.4 \times 0.4 = 0.16 \text{ m}^2$, si ha:

$$R_c \simeq 29 \text{ Hz} \quad (6.3)$$

I valori medi per il TOT ($\simeq 10 \mu\text{s}$) e molteplicità di hit ($\simeq 1.7$) si possono ottenere dalle figure 6.13 e 6.12. Mettendo tutto insieme si ottiene:

$$O_a \simeq 5 \cdot 10^{-4} \quad (6.4)$$

consistente con quanto osservato in figura 6.15.

In figura 6.16 è mostrata l'occupancy di ogni strip nei sei piani della minitorre a soglia fissata (DAC 30, range 0, corrispondente a circa 1/4 di

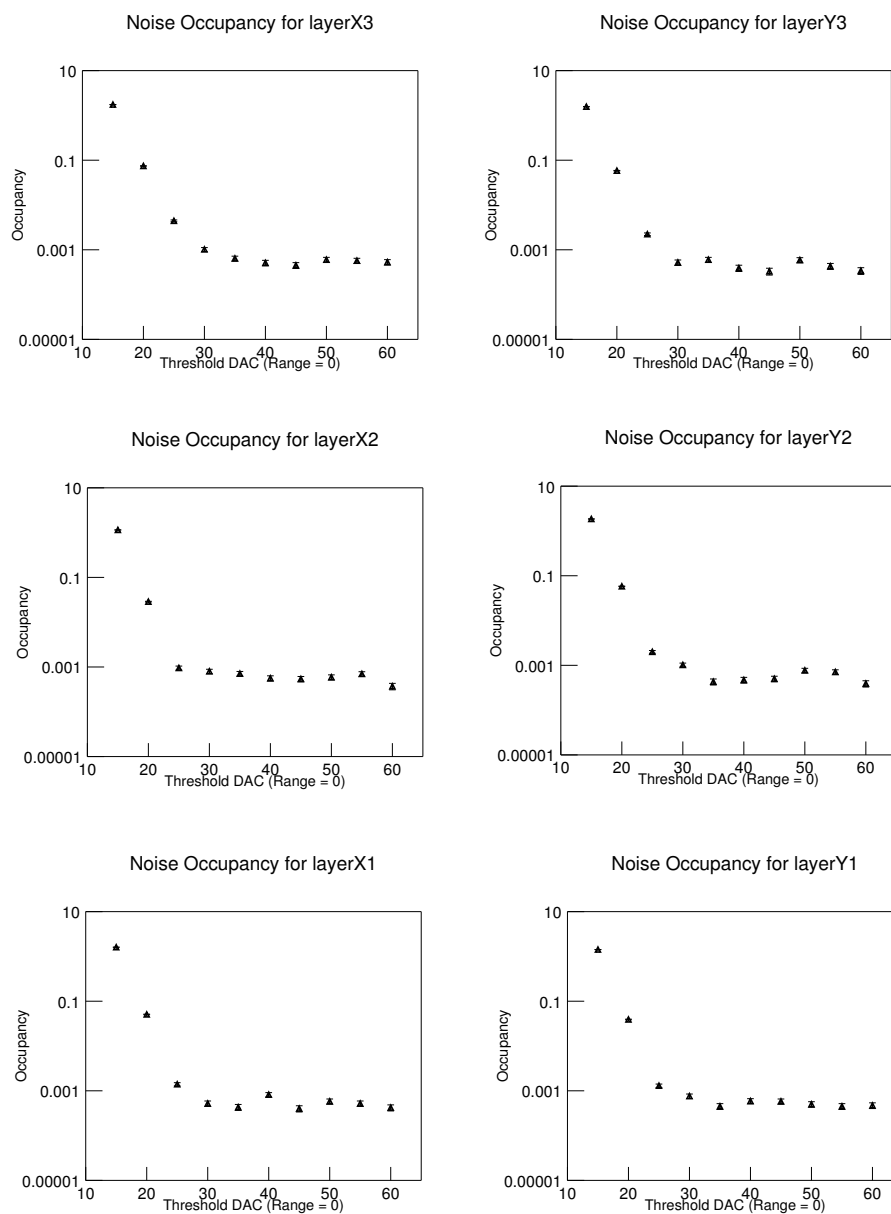


Fig. 6.14: Numero medio di hit per trigger, per ogni piano della minitorre, al variare della soglia del discriminatore. La misura viene compiuta mandando segnali di lettura random, ovvero asincroni rispetto al passare delle particelle.

MIP, che è il punto di lavoro nominale durante la presa dati). Come si nota dalle figura 6.14 a questa soglia il contributo dominante è già dato dalle coincidenze accidentali con i raggi cosmici e non dal rumore (da questo

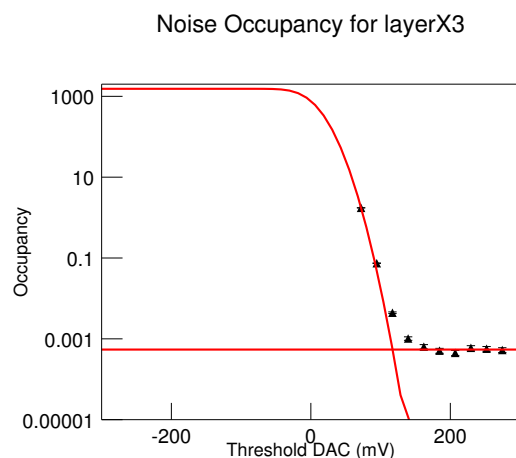


Fig. 6.15: Numero medio di hit per il piano X3 della minitorre in funzione della soglia al discriminatore. Sulla figura sono state sovrapposte la funzione (6.1) con i valori ottenuti nel paragrafo precedente (fig. 6.9) per σ_n e una funzione costante per fittare la regione di *plateau*. Quest'ultimo fit da un valore in $5.2 \cdot 10^{-4}$ che va confrontato con il valore in (6.4).

punto di vista il nome più appropriato sarebbe “accidental occupancy” invece di “noise occupancy”). La relazione tra i valori di occupancy o_a in questo plot e quelli O_a relativi alle hit per piano è piuttosto evidente:

$$o_a = \frac{O_a}{n_{strips}} \simeq 3.5 \cdot 10^{-7} \quad (6.5)$$

dove n_{strips} è il numero di strip attive per piano. Come conseguenza questa misura restituisce solo un limite superiore per l'occupancy di rumore (a cui siamo interessati). Chiaramente non è possibile “spegnere” i raggi cosmici, ma una prima stima dell'occupancy di rumore, ad una soglia vicina a quella di lavoro, può derivare da una estrapolazione della curva (eq. 6.1) che descrive l'andamento delle hit per piano a bassa soglia (mostrata nella figura 6.15). Con questo metodo, si ottiene un valore, per una singola strip, dell'ordine di 10^{-8} che è molto meglio di quanto richiesto dalle specifiche. Alla fine del prossimo paragrafo verrà discusso il ruolo dell'occupancy di rumore e la sua connessione con l'efficienza nel comprendere le prestazioni generali dello strumento.

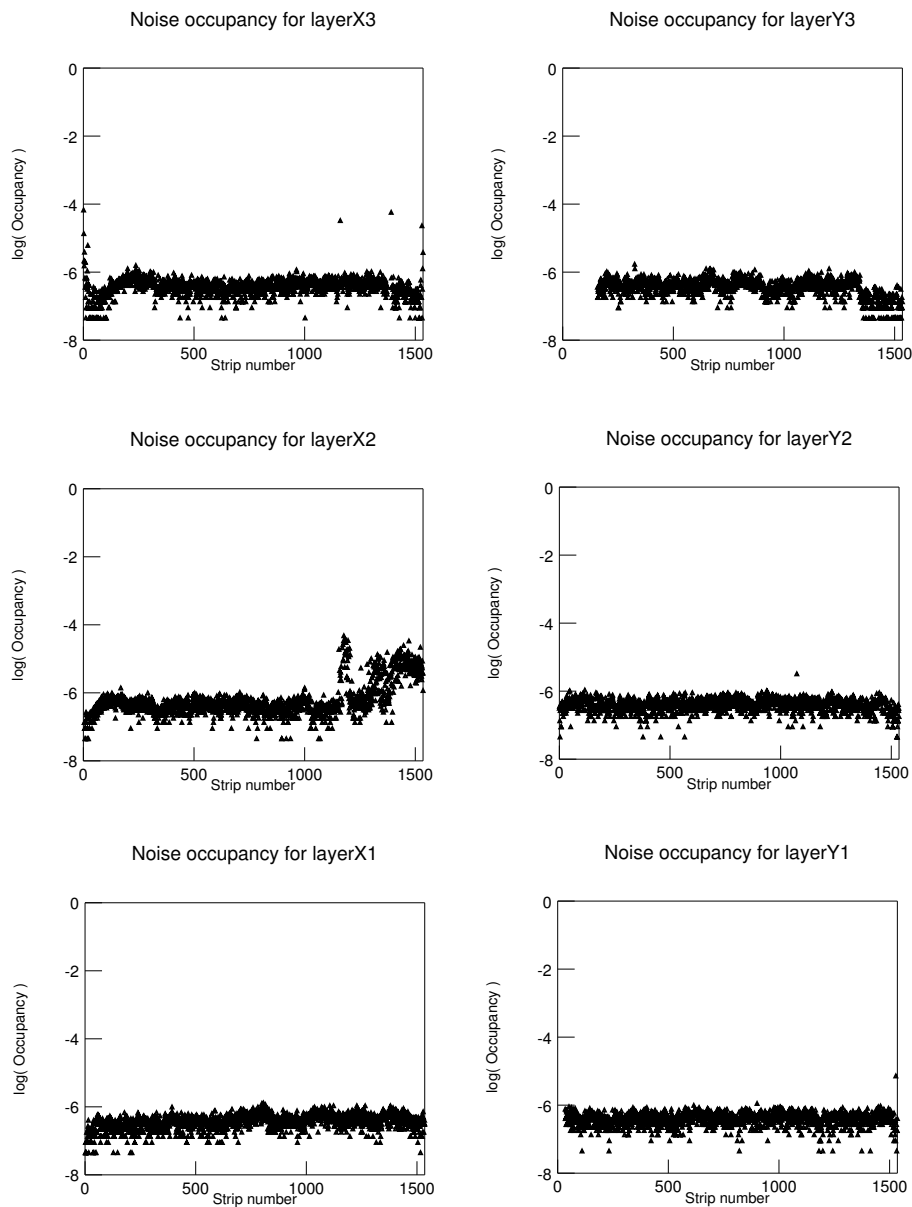


Fig. 6.16: Occupancy delle singole strip (con trigger random) alla soglia di presa dati nominale (1/4 di MIP). Il comportamento particolare del piano X2 è causato da una riparazione eseguita sulla liea di bias del quarto ladder che in qualche modo introduce rumore addizionale. L'occupancy risultante (10^{-4}) è comunque molto bassa. In seguito verrà mostrato che questo leggero aumento di rumore non pregiudica le prestazioni globali dello strumento.

6.2.2 Misure di efficienza

L'efficienza di rivelazione può essere studiata per ogni singolo piano sfruttando la possibilità di mascherarlo per il *three in a row*, ovvero studiando il comportamento di questo specifico piano triggerando il sistema sulla coincidenza degli altri cinque piani. Alcuni risultati per i sei piani attivi della minitorre sono mostrati in figura 6.17. Tale misura è stata eseguita su ogni piano usando, per gli altri cinque piani, il valore nominale della soglia. Le regioni di inefficienza del tracciatore (corrispondenti sia a strip morte o mascherate, sia ai bordi dei ladder) sono state prese in considerazione (cioè escluse) con l'aiuto di una ricostruzione *online* delle tracce (per semplicità sono state utilizzate solo le tracce con esattamente un cluster per ladder). Per ogni traccia è stato calcolato il punto di intersezione con il piano da studiare ed è stata cercata la prima hit all'interno di una finestra di ± 200 strip. Da sottolineare che è possibile utilizzare una finestra così ampia grazie alla bassissima occupancy di rumore: l'effetto di coincidenze accidentali è completamente trascurabile. L'efficienza di rivelazione ¹ è stata quindi calcolata come rapporto tra numero di hit e numero di tracce ricostruite.

Si osserva un ampio plateau a bassa soglia, fino a circa 1/2 MIP (corrispondente, in figura, a DAC 20, range 1), in cui l'efficienza è molto vicina al 100%. Se la distribuzione dell'ampiezza di impulso fosse gaussiana si potrebbe tentare un fit con una "error function"² (fig. 6.18). Si osserva che tale fit rappresenta abbastanza bene l'andamento dell'efficienza a bassa soglia, ma fallisce a soglie alte dove prevede valori inferiori rispetto ai dati sperimentali. Ciò è dovuto al fatto che la differenza tra una distribuzione di Landau (che meglio descrive la distribuzione dell'altezza di impulso) e una gaussiana è più evidente nelle code.

In linea di principio si può sempre aumentare l'efficienza abbassando le soglie del discriminatore, ma questo produrrebbe un aumento del rumore elettronico fino ad avere un occupancy di rumore dominante rispetto agli eventi fisici. Quindi il punto di lavoro delle soglie deve essere scelto come miglior compromesso tra efficienze di rivelazione e basso rumore elettronico. Con la minitorre si è potuto osservare che già a soglie intorno a 1/4 di MIP l'occupancy di rumore è a valori dell'ordine di 10^{-8} su un canale (fig

¹ È bene evidenziare nuovamente, in relazione al sistema di acquisizione di GLAST, la differenza tra efficienza di *rivelazione* ed efficienza di *trigger*. Quando una particella attraversa un piano di rivelatori, il corrispondente GTFE genera una richiesta di trigger che giunge fino alla TEM; questa controlla le coincidenze tra i vari piani e, se è il caso, manda il segnale di lettura. Tutto ciò impiega circa 1–2 μs e può succedere, per impulsi piccoli, che il segnale sia già sotto soglia quando arriva il comando di lettura. In questo caso il piano ha generato la richiesta di trigger, ma nessun evento è stato rivelato.

² Per comodità è bene riportare la definizione che viene usata qui per la "error function":

$$O = N \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{\bar{x} - x}{\sigma_n} \right) \right) \quad (6.6)$$

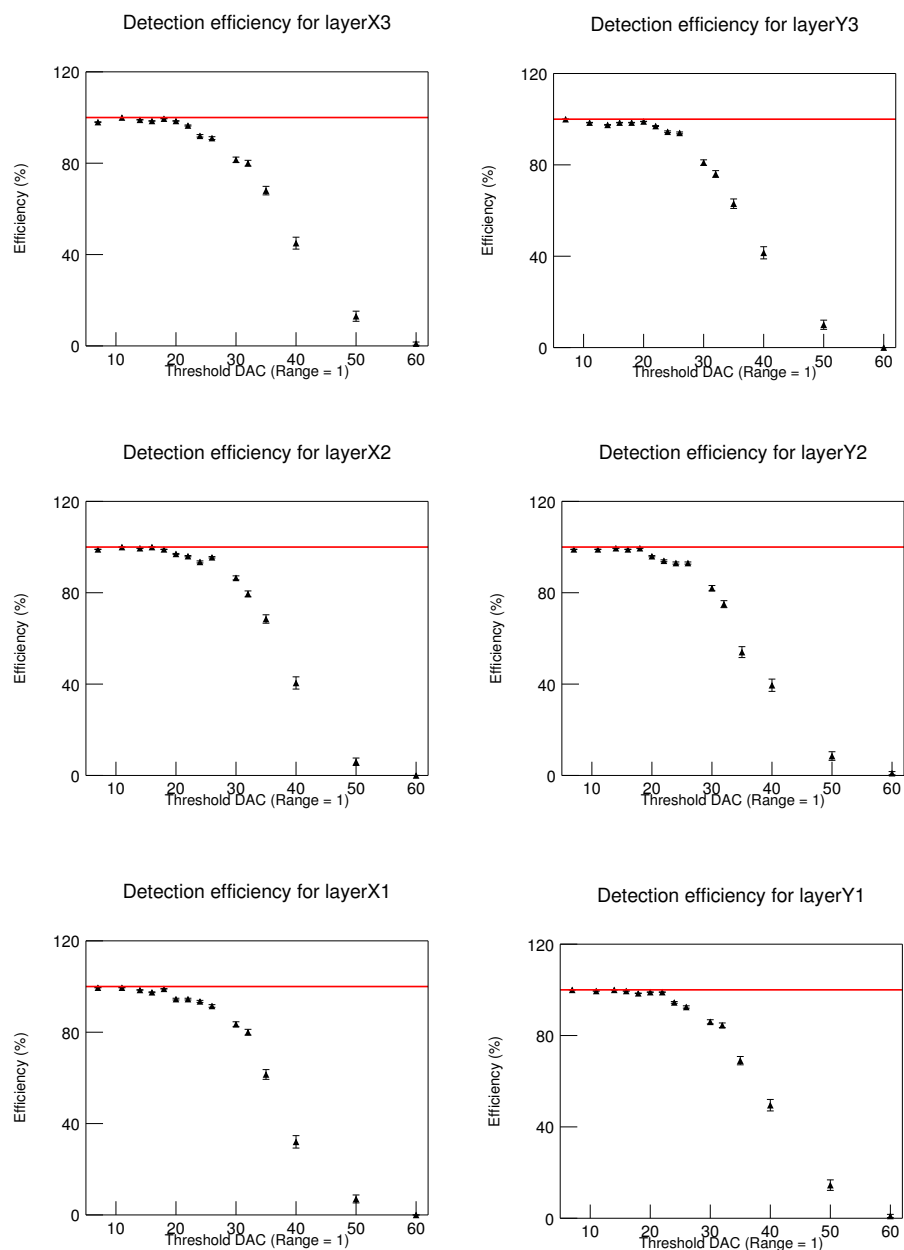


Fig. 6.17: Efficienza di rivelazione, misurata per ognuno dei sei piani della minitorre, in funzione della soglia del discriminatore. La linea rossa rappresenta il 100% di efficienza. In questa misura la soglia è fatta variare a range 1 in modo da esplorare il più ampio intervallo possibile.

6.14 e 6.16); esiste quindi un ampio intervallo di soglia in cui il sistema soddisfa i requisiti del progetto (fig. 6.19). Ciò costituisce una verifica

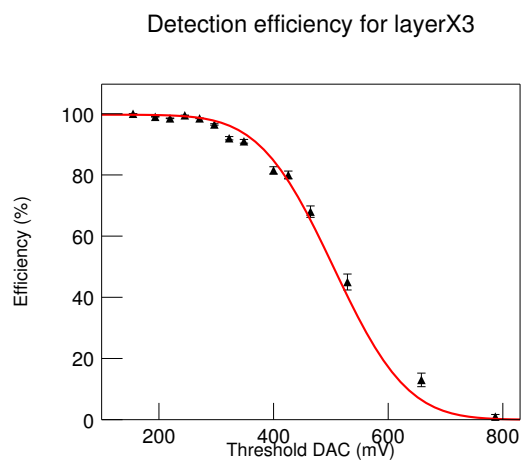


Fig. 6.18: Misura dell'efficienza di rivelazione per il piano X3 in funzione della soglia (in mV). La curva è una funzione *erf*, notare che rappresenta bene i punti a soglia bassa, mentre sottostima i valori ottenuti a soglie più alte dove, a causa delle code nella distribuzione di Landau, l'altezza d'impulso è descritta male da una gaussiana.

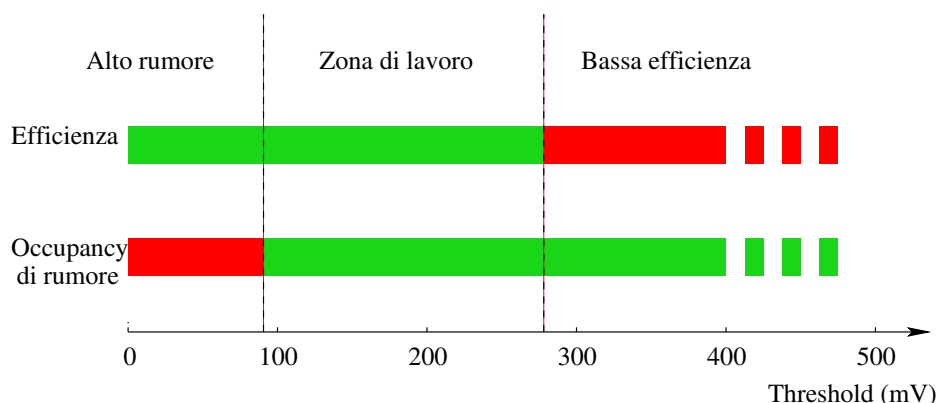


Fig. 6.19: Margini di lavoro per la soglia del discriminatore. La minitorre soddisfa i requisiti in termini di occupancy di rumore ($< 10^{-4}$ per canale) ed efficienza di rivelazione ($> 98\%$) in un ampio intervallo di valori (regione verde in figura).

cruciale della bontà della progettazione dell'intero strumento in termini di sensori ed elettronica associata.

Inoltre si può, a conferma della bontà del progetto, valutare come si riduce questo intervallo utile di soglia, all'aumentare del rumore, facendo uso della relazione (6.1). Se, ad esempio, si vuole ridurre l'intervallo di circa $1/4$, si può "traslare" verso destra il punto della curva corrispondente

a ~ 100 mV di circa 50 mV (fig. 6.20). Si ottiene una nuova curva di occupancy corrispondente ad un rumore elettronico maggiore: $\sim 2290 e^-$, corrispondente ad un aumento del 50% rispetto a quanto è stato misurato.

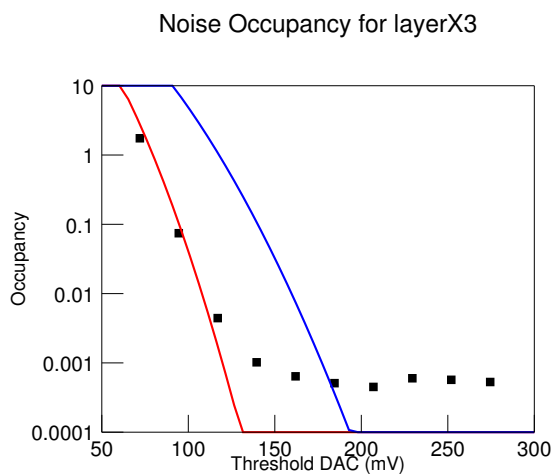


Fig. 6.20: Confronto tra l'occupancy di rumore misurata (in nero, la curva rossa corrisponde ad una stima teorica, come in figura 6.15) e quella che sarebbe necessaria (curva blu) per far sì che l'intervallo in cui può variare la soglia venga ridotto di circa 1/4. L'occupancy più alta corrisponde ad un rumore elettronico di $\sim 2290 e^-$, un aumento del 50% rispetto alle misure sulla minitorre.

6.2.3 Risoluzione spaziale e allineamento

Nonostante la minitorre non sia, dal punto di vista meccanico, completamente identica ed altrettanto rigida e precisa rispetto allo strumento finale (le pareti laterali, per esempio, sono diverse da quelle di volo), sono state compiute delle misure per studiare l'allineamento relativo dei piani e la risoluzione spaziale. Per rendere l'analisi più semplice sono state prese in considerazione solo tracce con una sola strip colpita per piano, inoltre non sono state considerate le zone inattive dello strumento.

Per quanto riguarda l'allineamento, è chiaro che il problema relativo ai tre piani X è completamente disaccoppiato (ed equivalente) a quello dei tre piani Y. Per ogni piano di rivelatori sono state studiate le distribuzioni dei residui (fig. 6.22) confrontando la posizione della strip colpita sul piano in esame con la coordinata del punto di impatto ricavata a partire dalle hit sugli altri due piani che leggono la stessa coordinata (X oppure Y). Per fissare le idee, sia X2 il piano in esame (fig. 6.21): fissato un sistema di riferimento, le hit sono definite dalle coordinate x_1, x_2, x_3 , per quanto riguarda la posizione sui piani, e da z_1, z_2, z_3 che rappresentano le altezze dei piani stessi. In seguito, con un lieve abuso di notazione, verranno utilizzati i simboli x_i per indicare i punti nel piano z - x , considerando implicita la corrispondenza tra x_i e z_i . L'intersezione tra il piano ad altezza z_2 e la linea retta passante

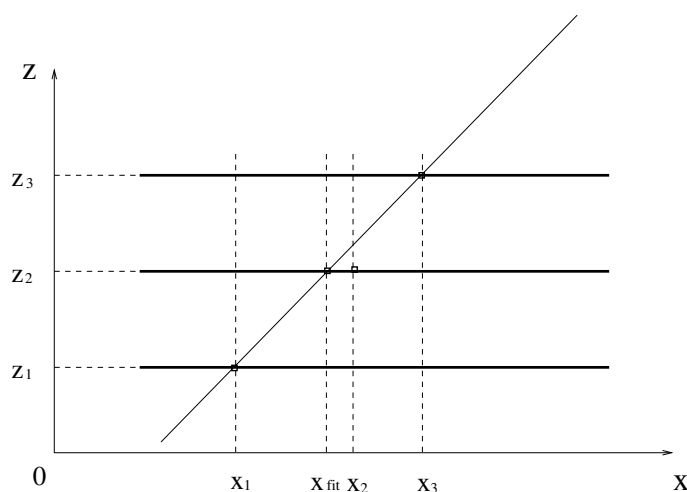


Fig. 6.21: Calcolo del residuo per il piano X2. In questo caso il residuo r_2 è definito come la distanza tra x_2 e l'intersezione tra il piano z_2 e la retta passante per i punti x_1 e x_3 . In maniera analoga vengono definiti i residui per i due piani esterni.

per x_1 e x_3 è data da:

$$x_{fit} = x_3 + (x_1 - x_3) \frac{(z_2 - z_3)}{(z_1 - z_3)} \quad (6.7)$$

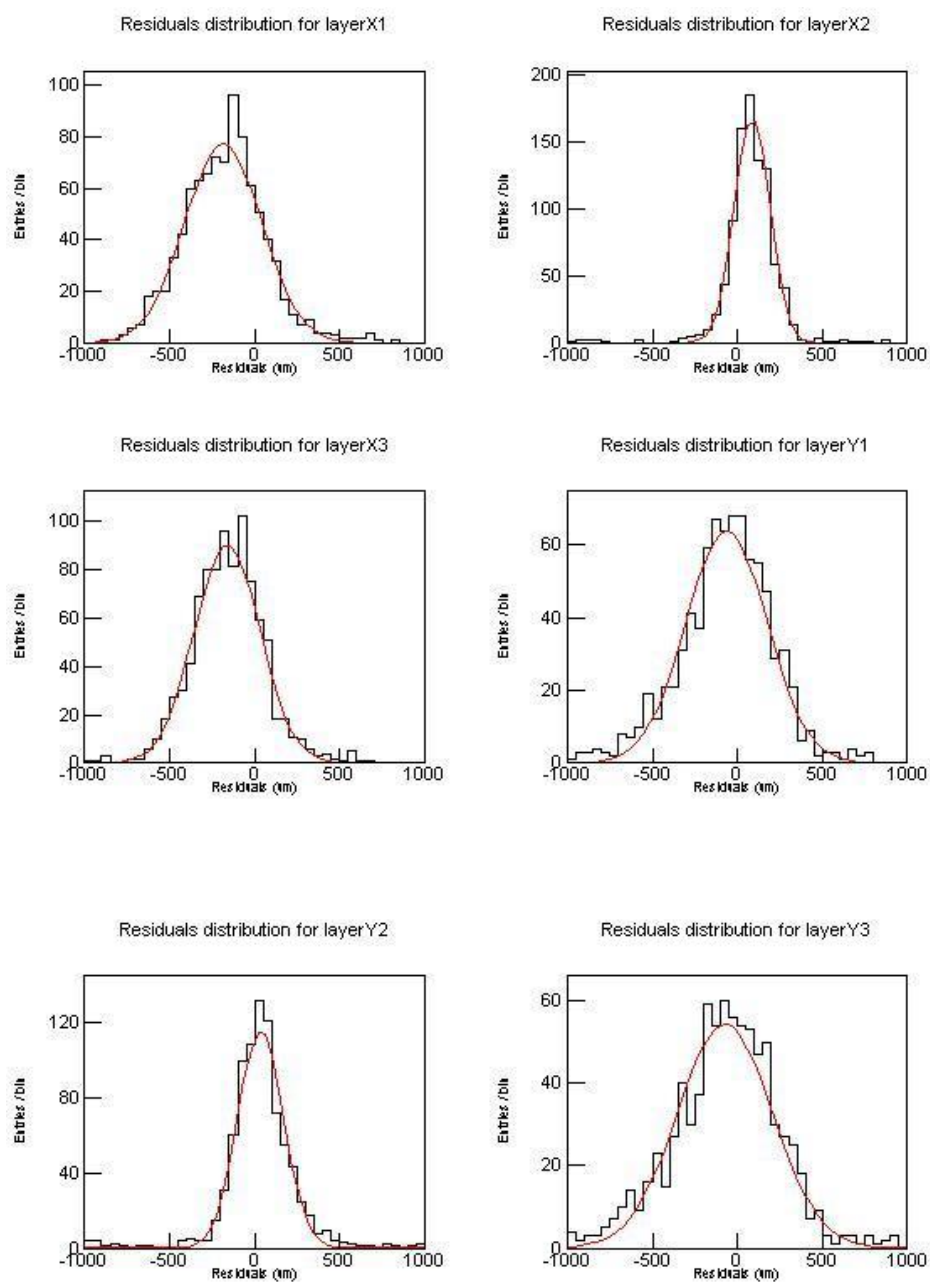


Fig. 6.22: Distribuzioni dei residui per i sei piani attivi della minitorre (sono utilizzati solo eventi con esattamente un hit per piano). L'allineamento relativo è legato al valor medio della distribuzione, mentre la larghezza è legata alla risoluzione spaziale dei rivelatori. Da notare che, a causa del diverso braccio di leva, la larghezza è minore per i due piani interni (X2 ed Y2) rispetto a quelli esterni.

ed il residuo corrispondente è definito come:

$$r_2 = x_2 - x_{fit} \quad (6.8)$$

Lo stesso principio vale per i due piani esterni e si ricavano formule molto simili alla (6.7).

Si vuole ora capire cosa bisogna aspettarsi per queste distribuzioni. Per prima cosa, ci si aspetta che la larghezza delle distribuzioni sia legata alla risoluzione spaziale dei rivelatori. Sempre considerando il piano X2, la deviazione standard della distribuzione r_2 può essere scritta come

$$\sigma_{r_2} = \left[\left(\frac{\partial r_2}{\partial x_1} \right)^2 \sigma_{x_1}^2 + \left(\frac{\partial r_2}{\partial x_2} \right)^2 \sigma_{x_2}^2 + \left(\frac{\partial r_2}{\partial x_3} \right)^2 \sigma_{x_3}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (6.9)$$

dove σ_{x_1} , σ_{x_2} e σ_{x_3} sono le deviazioni standard legate a x_1 , x_2 e x_3 che possono essere espresse in funzione del passo p delle strip come:

$$\sigma_{x_1} = \sigma_{x_2} = \sigma_{x_3} = \frac{p}{\sqrt{12}} \quad (6.10)$$

Eseguendo il calcolo si trova:

$$\sigma_{r_2} = \frac{p}{\sqrt{6}} [1 + \delta^2 - \delta]^{\frac{1}{2}} \quad (6.11)$$

dove

$$\delta = \left| \frac{z_2 - z_3}{z_1 - z_3} \right| \quad (6.12)$$

In maniera analoga si ricavano formule simili alla (6.11) per i due piani esterni. La tabella 6.2 riassume i risultati delle misure sia in termini di valor medio che di deviazione standard delle distribuzioni dei residui. Da notare

	Expected RMS	Measured RMS	Measured mean
X1	180	225	-185
Y1	150	240	-65
X2	80	105	85
Y2	80	135	35
X3	150	195	-160
Y3	180	275	-75

Tab. 6.2: Valor medio e deviazione standard delle distribuzioni dei residui mostrata in figura 6.22, ricavati tramite fit con una gaussiana. I valori attesi per la deviazione standard sono stati valutati usando l'equazione (6.11) ed altre simili. Tutti i valori riportati sono espressi in μm .)

che questo semplice modello non prende in considerazione gli effetti dovuti a scattering multiplo ed a regioni inattive sui piani di rivelazione.

Per quanto riguarda il valor medio delle distribuzioni (μ_{X_1} , μ_{X_2} , μ_{X_3} , μ_{Y_1} , μ_{Y_2} e μ_{Y_3}), esso è chiaramente legato all'allineamento relativo dei piani. Tali valori sono correlati tra loro attraverso le altezze relative. Se infatti si prova ad introdurre una traslazione sistematica nei valori x_i nella formule di x_{fit} come la (6.7), si ottengono delle relazioni che legano tra loro i valor medi relativi a piani diversi. Si può, ad esempio, scegliere il piano z_1 come riferimento ed immaginare che i piani z_2 e z_3 siano traslati in orizzontale rispettivamente di s_2 e s_3 . Ciò equivale a sostituire x_2 con $x_2 - s_2$ e x_3 con $x_3 - s_3$. Tale operazione aggiunge un termine alle formule dei residui, per l'esempio appena citato si ottiene:

$$\begin{aligned} R_2 &= r_2 - s_2 + s_3 \frac{(z_2 - z_1)}{(z_3 - z_1)} \\ R_3 &= r_3 - s_3 + s_2 \frac{(z_3 - z_1)}{(z_2 - z_1)} \end{aligned} \quad (6.13)$$

dove r_i è la formula per il residuo senza tener conto di eventuali disallineamenti. Prendendo il valor medio (in assenza di traslazione ci si aspetta un valor medio nullo) e con algebra elementare, si ottiene:

$$\frac{\mu_{X_2}}{\mu_{X_3}} = -\frac{(z_2 - z_1)}{(z_3 - z_1)} \quad (6.14)$$

Relazioni simili valgono per gli altri piani. Un confronto con i dati è riportato nella tabella 6.3

	Expected	Measured
μ_{X_2}/μ_{X_1}	0.46	0.46
μ_{X_2}/μ_{X_3}	0.54	0.53
μ_{Y_2}/μ_{Y_1}	0.54	0.55
μ_{Y_2}/μ_{Y_3}	0.46	0.48

Tab. 6.3: Rapporti aspettati e misurati tra i valori medi delle distribuzioni dei residui.

6.3 L'analisi dati offline

Un campione di dati, riguardanti l'acquisizione di raggi cosmici, raccolti durante i test sono stati analizzati utilizzando l'intera catena di ricostruzione *offline*, in modo da estrarre le informazioni sulla direzione di provenienza delle particelle stesse. È importante notare che questa è stata la prima volta che il pacchetto di ricostruzione a terra viene usato con dati reali provenienti dalla versione finale del tracciatore. Una simulazione Monte Carlo è stata eseguita, con la geometria della minitorre, come confronto con i dati: come verrà mostrato l'accordo è piuttosto buono. In questa sezione verrà mostrato brevemente il sistema di simulazione/ricostruzione e presentati i risultati principali dell'analisi. Verranno anche mostrate, dove possibile, relazioni analitiche per la descrizione dei comportamenti attesi in modo da mostrare come i principali processi fisici all'interno del rivelatore sono ben capiti e come il Monte Carlo sia perfettamente capace di riprodurli.

6.3.1 Gleam: l'ambiente di simulazione e analisi offline

Gleam (GLAST LAT Event Analysis Machine) è un ambiente di lavoro C++, sviluppato dalla collaborazione GLAST, che fornisce una simulazione dettagliata dello strumento ed implementa gli algoritmi di ricostruzione degli eventi. Esso è utilizzato per lo studio della risposta dello strumento e per valutare e ottimizzare gli algoritmi di ricostruzione e di analisi dati. La figura

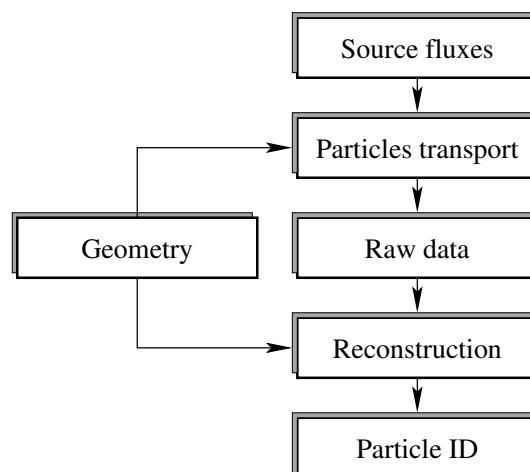


Fig. 6.23: Schema di generale di Gleam, il software offline di simulazione e ricostruzione.

6.23 mostra la struttura di base del pacchetto Gleam. È utile notare che i risultati della simulazione sono nello stesso formato dei dati reali, quindi il pacchetto di ricostruzione li processa in maniera *esattamente* uguale.

Il pacchetto di generazione delle sorgenti “produce” le particelle in accordo con le caratteristiche selezionate dall’utente. Tale pacchetto utilizza le informazioni sul comportamento spettrale e temporale della sorgente (ed anche quelle riguardanti i parametri orbitali di GLAST, sebbene questi non siano rilevanti in questa trattazione) ed è responsabile della generazione di energia, direzione, tipo e tempo di ogni particella. All’interno di questo pacchetto sono implementate una serie di sorgenti standard, tra cui i raggi cosmici al livello del mare, che sono stati utilizzati in questo lavoro come confronto con i dati provenienti dalla minitorre.

Tutti i processi fisici che riguardano l’interazione delle particelle con il rivelatore sono gestiti da un pacchetto specifico basato su Geant4. Tale software è già ampiamente usato nel campo della fisica agli acceleratori ed include una accurata descrizione dei processi elettromagnetici e adronici in un ampio intervallo di energie. Tutte le informazioni riguardanti la geometria ed i materiali del rivelatore sono contenute in una serie di librerie, implementate tramite linguaggio XML, e sono utilizzate sia dall’algoritmo di trasporto delle particelle sia da quello di ricostruzione degli eventi.

Il pacchetto di digitalizzazione è responsabile della conversione dei risultati della simulazione in dati “raw” identici (nel formato) a quelli provenienti dal tracciatore, dal calorimetro e dall’ACD in funzionamento reale. Per il tracciatore, il codice prende in considerazione tutti i processi fisici che avvengono quando una particella attraversa i sensori al silicio, compreso la creazione di coppie elettrone–lacuna e la propagazione verso gli elettrodi. L’impulso di corrente è convertito in un segnale in tensione secondo la funzione di trasferimento dell’elettronica di read–out e sono determinate le strip colpite ed il TOT ponendo una soglia in tensione sul segnale stesso (anche il rumore elettronico è incluso nella simulazione).

Infine il pacchetto di ricostruzione ha la responsabilità di ricostruire le tracce a partire dalle hit nel tracciatore. Esso è organizzato come una serie di algoritmi eseguiti uno dopo l’altro: a partire dall’output della digitalizzazione, vengono riconosciuti i “cluster” che vengono utilizzati per trovare e fittare le tracce, usando metodi di “pattern recognition” ed un algoritmo basato su filtro Kalman, e per identificare i vertici degli eventi di raggi gamma.

Gli eventi ricostruiti vengono salvati in file dati compatibili con l’ambiente di analisi ROOT (che viene utilizzato anche dal Gleam stesso). Sempre attraverso macro di ROOT è stata eseguita l’analisi finale delle varie distribuzioni ed il confronto con il Monte Carlo; sono stati quindi prodotti i plot mostrati in questo lavoro.

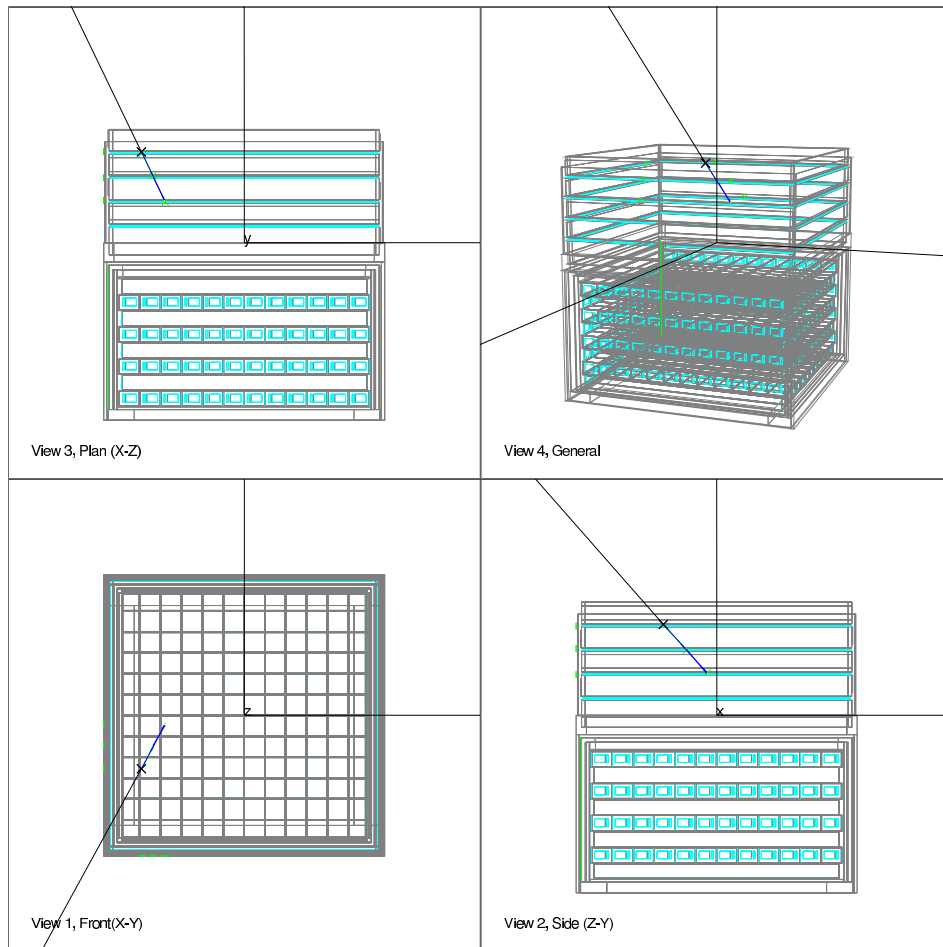


Fig. 6.24: Un esempio di traccia raccolta durante i test così come è mostrata dall'“offline event display”.

6.3.2 Distribuzioni angolari

Nella discussione seguente verrà indicato con $C_p(\theta, \phi)$ la distribuzione angolare attesa per i raggi cosmici che raggiungono un punto fisso al livello del mare e con $C_s(\theta, \phi)$ la distribuzione di raggi cosmici che attraversano una superficie di aria unitaria. In entrambi i casi si intende con θ l'angolo polare rispetto all'asse z (verticale) e ϕ l'angolo azimutale misurato a partire dall'asse x . Da semplici considerazioni geometriche si dimostra che le due distribuzioni sono legate da:

$$C_s(\theta, \phi) = C_p(\theta, \phi) \cos \theta \quad (6.15)$$

Si ricorda che $C_p(\theta, \phi)$ è ben descritta (nell'intervallo $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$) dalla relazione:

$$dC_p(\theta, \phi) = \frac{3}{2\pi} \cos^2(\theta) d\Omega = \frac{3}{2\pi} \cos^2 \theta \sin \theta d\theta d\phi \quad (6.16)$$

Con un piccolo abuso di notazione verrà usata la stessa lettera (C) per indicare la densità di probabilità associata ad ognuna delle variabili:

$$\begin{aligned} C_p(\theta) &= 3 \cos^2 \theta \sin \theta & (6.17) \\ C_p(\phi) &= \frac{1}{2\pi} \\ C_s(\theta) &= 4 \cos^3 \theta \sin \theta \\ C_s(\phi) &= \frac{1}{2\pi} \end{aligned}$$

intendendo, per esempio, che la probabilità che θ sia compresa tra θ_1 e θ_2 , osservando ad un punto fissato, sia data da:

$$P(\theta_1 < \theta < \theta_2) = \int_{\theta_1}^{\theta_2} C_p(\theta) d\theta \quad (6.18)$$

In questo paragrafo (ed anche nel successivo) verranno utilizzate sia le variabili comuni (θ, ϕ) che le proiezioni di θ sui piani $x-z$ e $y-z$ (chiamate rispettivamente θ_{XZ} e θ_{YZ}) definite da:

$$\begin{aligned} \tan \theta_{XZ} &= \tan \theta \cos \phi & (6.19) \\ \tan \theta_{YZ} &= \tan \theta \sin \phi \end{aligned}$$

È utile calcolare le distribuzioni attese per i raggi cosmici nelle nuove variabili (θ_{XZ}, θ_{YZ}). Formalmente si può scrivere:

$$C_s(\theta_{XZ}, \theta_{YZ}) = I \cdot C_s(\theta(\theta_{XZ}, \theta_{YZ}), \phi(\theta_{XZ}, \theta_{YZ})) \quad (6.20)$$

dove I è il determinante Jacobiano della trasformazione:

$$I = \left\| \begin{array}{cc} \frac{\partial \theta}{\partial \theta_{XZ}} & \frac{\partial \phi}{\partial \theta_{XZ}} \\ \frac{\partial \theta}{\partial \theta_{YZ}} & \frac{\partial \phi}{\partial \theta_{YZ}} \end{array} \right\| \quad (6.21)$$

e le vecchie variabili (θ, ϕ) sono espresse in termini delle nuove semplicemente invertendo la relazione (6.19):

$$\begin{aligned}\theta &= \arctan(\tan^2 \theta_{XZ} + \tan^2 \theta_{YZ})^{\frac{1}{2}} \\ \phi &= \arctan\left(\frac{\tan \theta_{XZ}}{\tan \theta_{YZ}}\right)\end{aligned}\quad (6.22)$$

Eseguendo tutti i calcoli (ed omettendo la costante di normalizzazione) si trova:

$$C_s(\theta_{XZ}, \theta_{YZ}) \propto \frac{(1 + \tan^2 \theta_{XZ})(1 + \tan^2 \theta_{YZ})}{(1 + \tan^2 \theta_{XZ} + \tan^2 \theta_{YZ})^3} \quad (6.23)$$

Se si vuole trovare la distribuzione di probabilità associata ad una sola delle due variabili, basta integrare sull'altra:

$$C_s(\theta_{XZ}) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} C_s(\theta_{XZ}, \theta_{YZ}) d\theta_{YZ} \quad (6.24)$$

e si ottiene:

$$C_s(\theta_{XZ}) = \frac{3}{2} \cos^3 \theta_{XZ} \quad (6.25)$$

Ovviamente, data la simmetria del problema, la stessa relazione vale per entrambe le variabili:

$$C_s(\theta_{YZ}) = \frac{3}{2} \cos^3 \theta_{YZ} \quad (6.26)$$

Ci si aspetta che la distribuzione di raggi cosmici *rivelata* dalla minitorre sia ben descritta dalle equazioni (6.25) e (6.26), con in più una modulazione data da una qualche funzione che descriva la risposta angolare del rivelatore. Scopo di questo paragrafo è derivare delle relazioni approssimate per descrivere tale risposta angolare.

Prima di tutto si può, in maniera banale, valutare i limiti geometrici superiori su θ , θ_{XZ} e θ_{YZ} (6.25). Si definisce *aspect ratio* il rapporto tra la

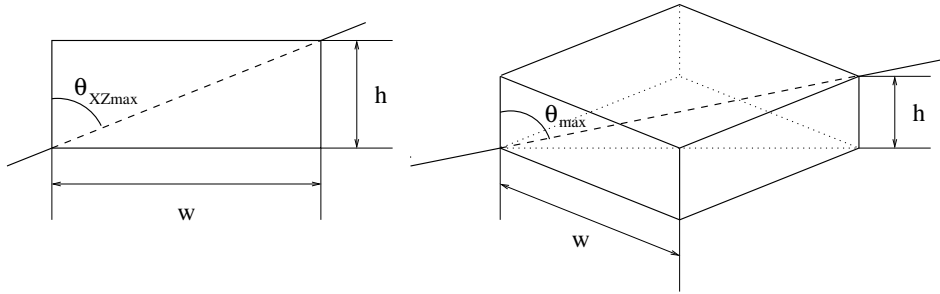


Fig. 6.25: Limiti geometrici su θ_{XZ} e θ che fissano l'accettanza angolare dello strumento. Grazie al grande "aspect ratio", possono essere rivelate particelle che entrano nel rivelatore fino ad angoli di $\sim 80^\circ$ rispetto alla verticale.

larghezza dell'area attiva del rivelatore w e la distanza tra il primo e l'ultimo piano di sensori h (ricordare che, in questo strumento, una particella deve attraversare tutti sei piani per essere rivelata):

$$A_r = \frac{w}{h} = 5.14 \quad (6.27)$$

Questo è l'unico parametro geometrico necessario a descrivere le proprietà del rivelatore. Si ricava immediatamente che:

$$\theta_{XZmax} = \arctan(A_r) \simeq 79^\circ \quad (6.28)$$

(stessa relazione per θ_{YZ}) e:

$$\theta_{max} = \arctan(\sqrt{2}A_r) \simeq 82^\circ \quad (6.29)$$

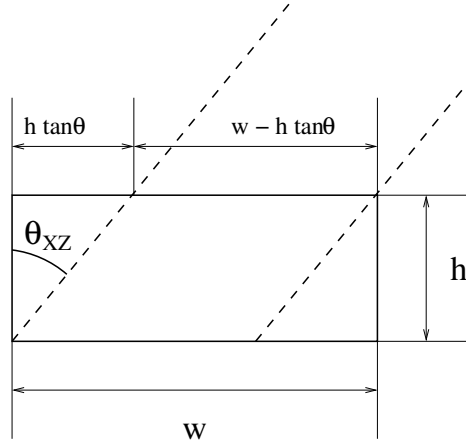


Fig. 6.26: Accettazione angolare della minitorre di GLAST in funzione di θ_{XZ} . Particelle che entrano con grande angolo di incidenza “vedono” una superficie minore.

Usando semplici argomenti geometrici (fig. 6.26) si può stimare l'accettazione geometrica della minitorre, in funzione di θ_{XZ} , come:

$$A(\theta_{XZ}) = \frac{(w - h \tan \theta_{XZ})}{w} = \left(1 - \frac{\tan \theta_{XZ}}{A_r}\right) \quad (6.30)$$

ovvero, per θ_{XZ} fissato, si valuta il rapporto tra il numero di particelle che attraversano tutti i sei piani dello strumento e quelle che attraversano almeno il primo piano. Di nuovo, lo stesso argomento è valido per θ_{YZ} e quindi la distribuzione angolare misurata per i raggi cosmici sarà:

$$C_s^{det}(\theta_{XZ}, \theta_{YZ}) = C_s(\theta_{XZ}, \theta_{YZ}) \left(1 - \frac{\tan \theta_{XZ}}{A_r}\right) \left(1 - \frac{\tan \theta_{YZ}}{A_r}\right) \quad (6.31)$$

Come prima, se si è interessati ad una sola delle due variabili, basta integrare l'altra:

$$C_s^{det}(\theta_{XZ}) = \int_0^{\theta_{YZmax}} C_s^{det}(\theta_{XZ}, \theta_{YZ}) d\theta_{YZ} \simeq \int_0^{\frac{\pi}{2}} C_s^{det}(\theta_{XZ}, \theta_{YZ}) d\theta_{YZ} \quad (6.32)$$

Formalmente bisogna integrare solo fino a θ_{YZmax} definita in (6.28), ma si può estendere il dominio di integrazione (anche dove non accessibile alla minitorre) e trascurare termini di ordine superiore in modo da ottenere una formula più compatta e semplice da usare. Seguendo questo approccio, il numero di raggi cosmici rivelati in funzione di θ_{XZ} (o anche θ_{YZ}) diventa:

$$N^{det}(\theta_{XZ}) = N_0 \left(1 - \frac{\tan \theta_{XZ}}{A_r}\right) \left(\cos^3 \theta_{XZ} - \frac{4\cos^2 \theta_{XZ}}{3\pi A_r}\right) \quad (6.33)$$

dove N_0 è un fattore di normalizzazione, l'unico parametro libero di questa formula. Notare che, per valori sempre più grandi di A_r (corrispondenti ad una maggiore accettanza angolare), l'espressione precedente si riduce a:

$$\lim_{A_r \rightarrow \infty} N^{det}(\theta_{XZ}) = N_0 \cos^3 \theta_{XZ} \quad (6.34)$$

che corrisponde alla distribuzione ideale mostrata in (6.25). La figura 6.27 mostra le distribuzioni di variabili θ_{XZ} e θ_{YZ} ricostruite dal software offline utilizzando sia dati reali che la simulazione Monte Carlo, mostrando un ottimo accordo tra le due. Anche il modello appena descritto è confrontato con i dati reali con buoni risultati.

A questo punto, dalla conoscenza della distribuzione rivelata dei raggi cosmici in funzione di $(\theta_{XZ}, \theta_{YZ})$ (eq. 6.31), si può tornare indietro alle variabili originali (θ, ϕ) :

$$C_s^{det}(\theta, \phi) = I \cdot C_s^{det}(\theta(\theta_{XZ}, \theta_{YZ}), \phi(\theta_{XZ}, \theta_{YZ})) \quad (6.35)$$

dove I è stavolta il determinante Jacobiano della trasformazione inversa. I dettagli del calcolo sono simili al caso precedente e si ottiene per θ (integrando su ϕ):

$$N^{det}(\theta) = N_0 \cos^3 \theta \sin \theta \left(1 + \frac{\tan^2 \theta}{\pi A_r^2} - \frac{\tan \theta}{\pi A_r}\right) \quad (6.36)$$

dove N_0 è di nuovo una costante di normalizzazione. Notare che questa espressione si riduce al caso ideale (6.17) nel limite di grande "aspect ratio":

$$\lim_{A_r \rightarrow \infty} N^{det}(\theta) = N_0 \cos^3 \theta \sin \theta \quad (6.37)$$

La figura 6.28 mostra che, di nuovo, l'accordo tra dati reali e il Monte Carlo è ottimo ed entrambi possono essere descritti tramite la relazione (6.36).

Per completezza è bene mostrare anche la distribuzione nell'angolo azimutale ϕ (fig. 6.29) che ci si aspetta quasi piatta dal momento che lo strumento è *quasi* simetrico rispetto all'asse di rotazione verticale.

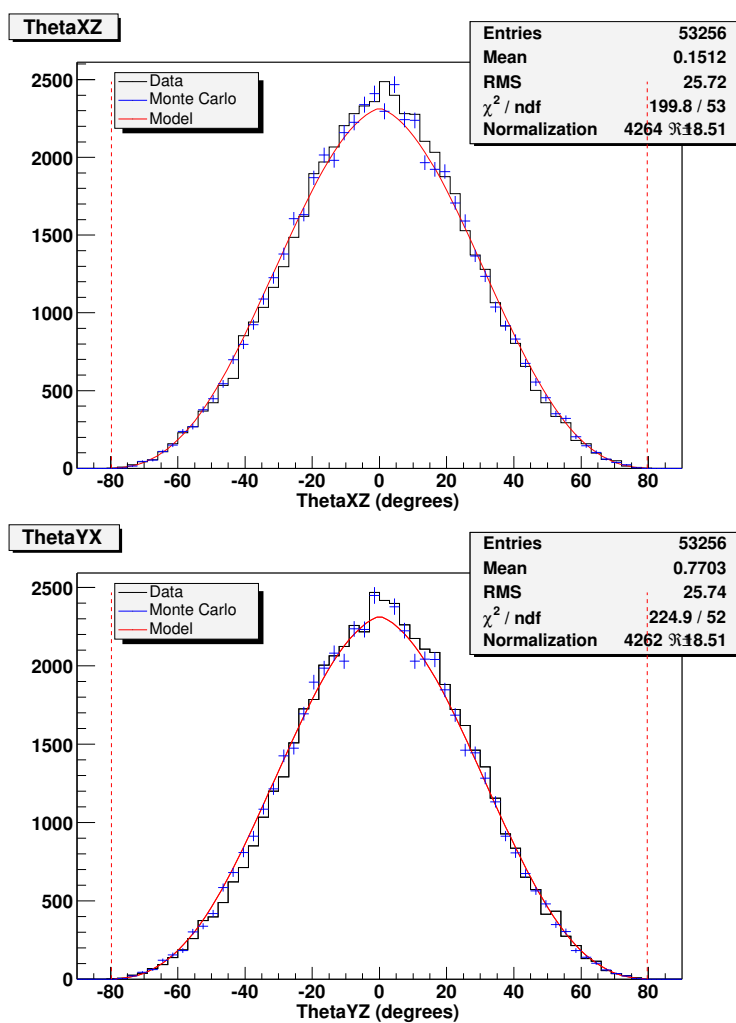


Fig. 6.27: Distribuzione delle variabili θ_{XZ} e θ_{YZ} misurati per i raggi cosmici. I dati sono in nero mentre la simulazione Mont Carlo è in blu. La linea rossa è un fit con la funzione (6.33) e le due linee verticali tratteggiate rappresentano i limiti geometrici per la variabile.

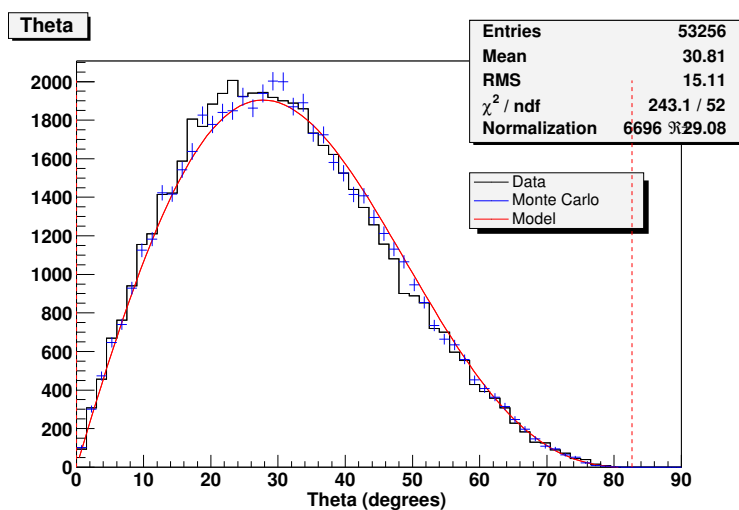


Fig. 6.28: Distribuzione dell'angolo polare θ per i raggi cosmici. L'istogramma nero rappresenta i dati reali mentre le crocette blu si riferiscono al Monte Carlo. La linea rossa è un fit con la funzione (6.36) e la linea verticale tratteggiata indica il limite geometrico per la variabile θ .

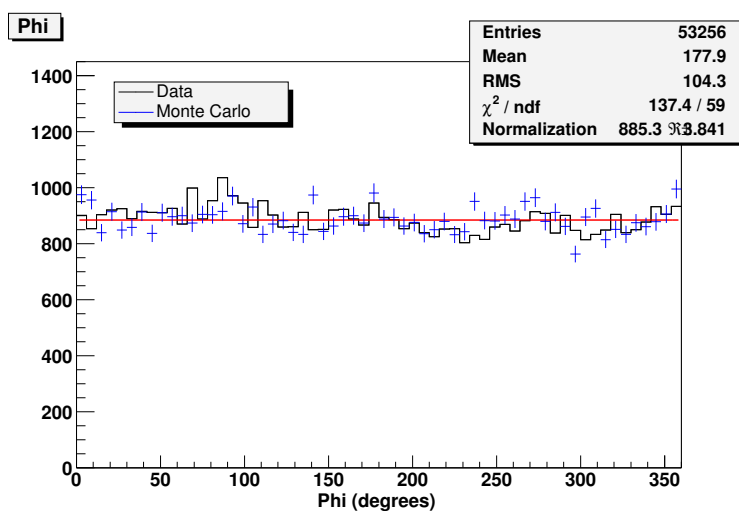


Fig. 6.29: Distribuzione della variabile ϕ ricostruita (dati in nero, Monte Carlo in blu). È visibile una piccola modulazione residua dovuta alla forma del rivelatore.

6.3.3 Distribuzione delle “hit”

Data la distribuzione angolare delle particella in arrivo sul rivelatore (raggi cosmici in questo caso) non è troppo complicato stimare la distribuzione delle hit sui vari piani della minitorre in funzione della posizione delle strip. Nella discussione seguente verranno derivate alcune semplici relazioni assumendo un rivelatore *perfetto* (senza effetti di campionamento nè aree inattive nei piani); inoltre si assume che la distanza verticale tra i piani X1–X2 e X2–X3 (e di conseguenza anche tra Y1–Y2 e Y2–Y3) sia la stessa, il che è una approssimazione abbastanza buona. Il problema per i piani X è completamente disaccoppiato rispetto ai piani Y, inoltre si nota facilmente che la situazione è la stessa per i piani più in alto (X3, Y3) e quelli più in basso (X1, Y1), mentre è leggermente differente per i piani intermedi (X2, Y2).

Consideriamo prima il caso X3 (o Y3), mostrato in figura 6.30. Dato un punto generico sull’area attiva, il flusso di particelle che tale punto “vede” è quello compreso nel cono formato dalle rette passanti per il punto stesso e per gli estremi del piano attivo più in basso. Solo le particelle comprese in questo cono possono passare vicine al punto in questione ed attraversare tutti i piani in modo da fare scattare il trigger. Tutto il problema si concentra quindi

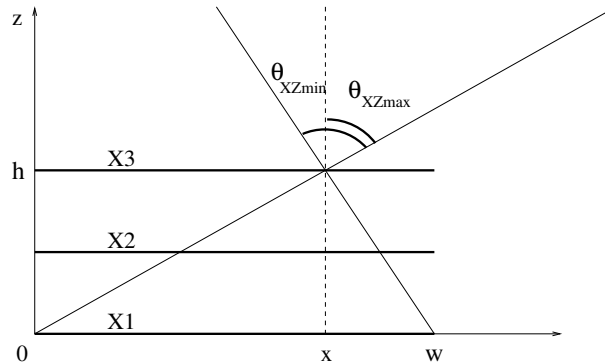


Fig. 6.30: Calculation of the hit map distribution for one of the outer layers (in this case X3). For each point the field of view is limited (in the θ_{XZ} variable) between θ_{XZmin} and θ_{XZmax} shown in the figure.

nella determinazione degli angoli massimi θ_{XZmin} e θ_{XZmax} in funzione del generico punto x . Da semplici considerazioni geometriche:

$$\begin{aligned}\theta_{XZmin}(x) &= -\arctan\left(\frac{w-x}{h}\right) \\ \theta_{XZmax}(x) &= +\arctan\left(\frac{x}{h}\right)\end{aligned}\quad (6.38)$$

e l’espressione generale per la distribuzione delle hit in funzione di x può

essere scritta come:

$$H_{out}(x) = N_0 \int_{\theta_{XZmin}(x)}^{\theta_{XZmax}(x)} C_s(\theta_{XZ}) d\theta_{XZ} \quad (6.39)$$

dove N_0 è un fattore di normalizzazione. Da notare che l'equazione non tiene traccia dell'altra variabile angolare (θ_{YZ}) dal momento che si media su di essa e questa operazione aggiunge semplicemente un fattore moltiplicativo irrilevante in questo modello. Eseguendo i vari calcoli, l'espressione finale che si trova è:

$$H_{out}(x) = N_0 \cdot \left[\frac{x}{[h^2 + x^2]^{1/2}} + \frac{(w-x)}{[h^2 + (w-x)^2]^{1/2}} + \frac{1}{3} \frac{x^3}{[h^2 + x^2]^{3/2}} + \frac{1}{3} \frac{(w-x)^3}{[h^2 + (w-x)^2]^{3/2}} \right] \quad (6.40)$$

Lo schema del calcolo è lo stesso anche per i piani interni, anche se i dettagli sono leggermente più complicati:

$$\begin{aligned} \theta_{XZmin}(x) &= -\arctan \left[\frac{2x}{h} \left(\frac{1}{2} - \left| x - \frac{1}{2} \right| \right) \right] \\ \theta_{XZmax}(x) &= +\arctan \left[\frac{2x}{h} \left(\frac{1}{2} - \left| x - \frac{1}{2} \right| \right) \right] \end{aligned} \quad (6.41)$$

e la distribuzione corrispondente è:

$$H_{in}(x) = N_0 \left[\frac{\left(\frac{1}{2} - \left| x - \frac{1}{2} \right| \right)}{\left[\frac{h^2}{4x^2} + \left(\frac{1}{2} - \left| x - \frac{1}{2} \right| \right)^2 \right]^{1/2}} - \frac{1}{3} \frac{\left(\frac{1}{2} - \left| x - \frac{1}{2} \right| \right)^3}{\left[\frac{h^2}{4x^2} + \left(\frac{1}{2} - \left| x - \frac{1}{2} \right| \right)^2 \right]^{3/2}} \right] \quad (6.42)$$

Da notare che mentre per i piani esterni la distribuzione (6.40) non si riduce a zero sui bordi ($x = 0$ o $x = w$), ciò accade per i piani interni (6.42). La ragione di questo comportamento deriva direttamente da considerazioni geometriche: solo le particelle *esattamente* verticali possono triggerare il sistema colpendo i piani X2 e Y2 sui bordi. Le figure 6.31 e 6.32 mettono a confronto i dati sperimentali con il Monte Carlo e con questo semplice modello. L'accordo è soddisfacente, con l'eccezione dell'effetto dovuto all'ombra delle zone inattive tra i ladder³ che sono invece ben riprodotti dal Monte Carlo.

³ Si può stimare l'ordine di grandezza di questa modulazione con considerazioni geometriche simili a quelle mostrate per i bordi dei piani:

$$\frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max}} \simeq \int_{\Delta\theta_{XZ}} C_s(\theta_{XZ}) d\theta_{XZ} \quad (6.43)$$

dove $\Delta\theta_{XZ}$ è l'apertura angolare (intorno alla verticale) del cono d'ombra dovuto alla regione inattiva tra i ladder. In termini della larghezza g e dell'altezza d tra due piani

consecutivi, si può scrivere:

$$\Delta\theta_{XZ} \simeq \arctan\left(\frac{g}{d}\right) \quad (6.44)$$

e, usando che $\Delta\theta_{XZ}$ è piccolo:

$$\frac{H_{max} - H_{min}}{H_{max}} \simeq C_s(0) \frac{g}{d} = \frac{3}{2} \frac{g}{d} \quad (6.45)$$

Il risultato di questa stima approssimata è qualcosa dell'ordine del 10%, consistente con quanto misurato.

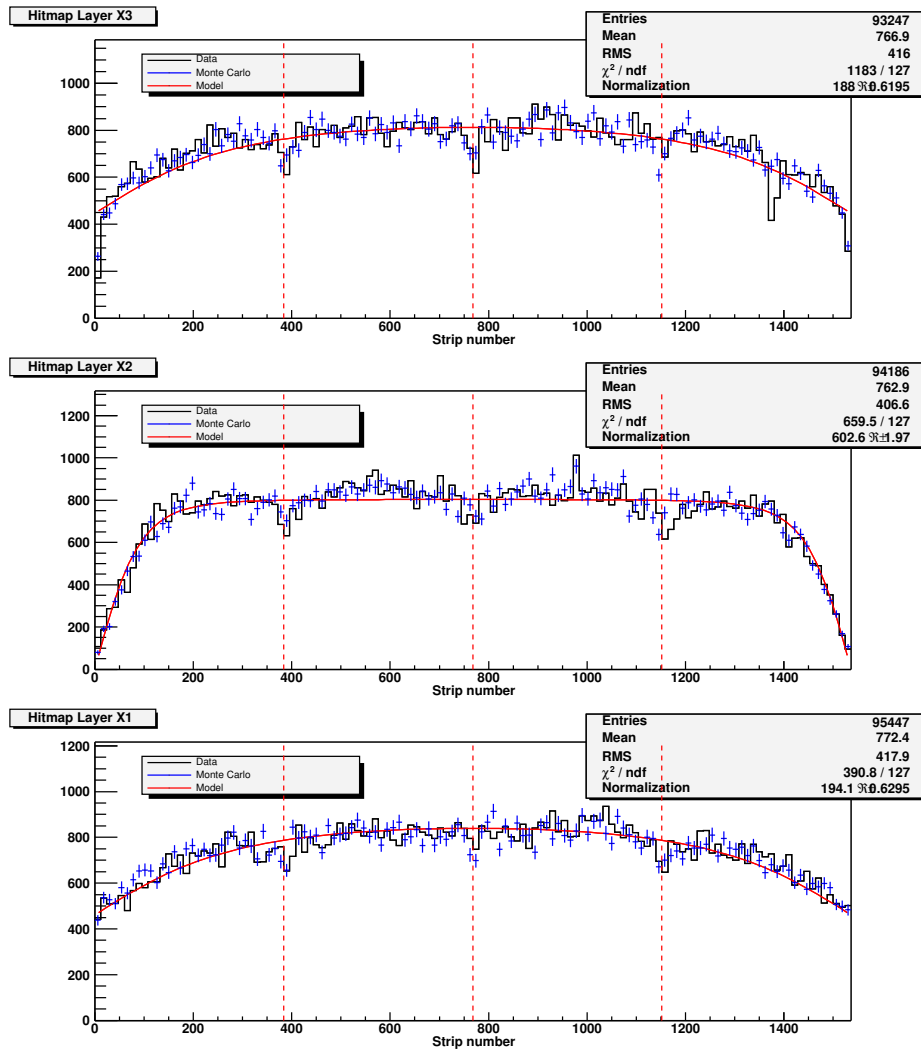


Fig. 6.31: Distribuzione delle hit (ovvero numero di hit per strip) per i tre piani X, per comodità di visualizzazione ogni bin contiene 12 strip. La linea nera rappresenta i dati, mentre le croci blu la simulazione. La linea rossa è un fit con le formule (6.40) e (6.42) lasciando la normalizzazione come unico parametro libero. Notare che il Monte Carlo riproduce bene le ombre dovute alle zone inattive tra i ladder (evidenziati dalle linee tratteggiate verticali).

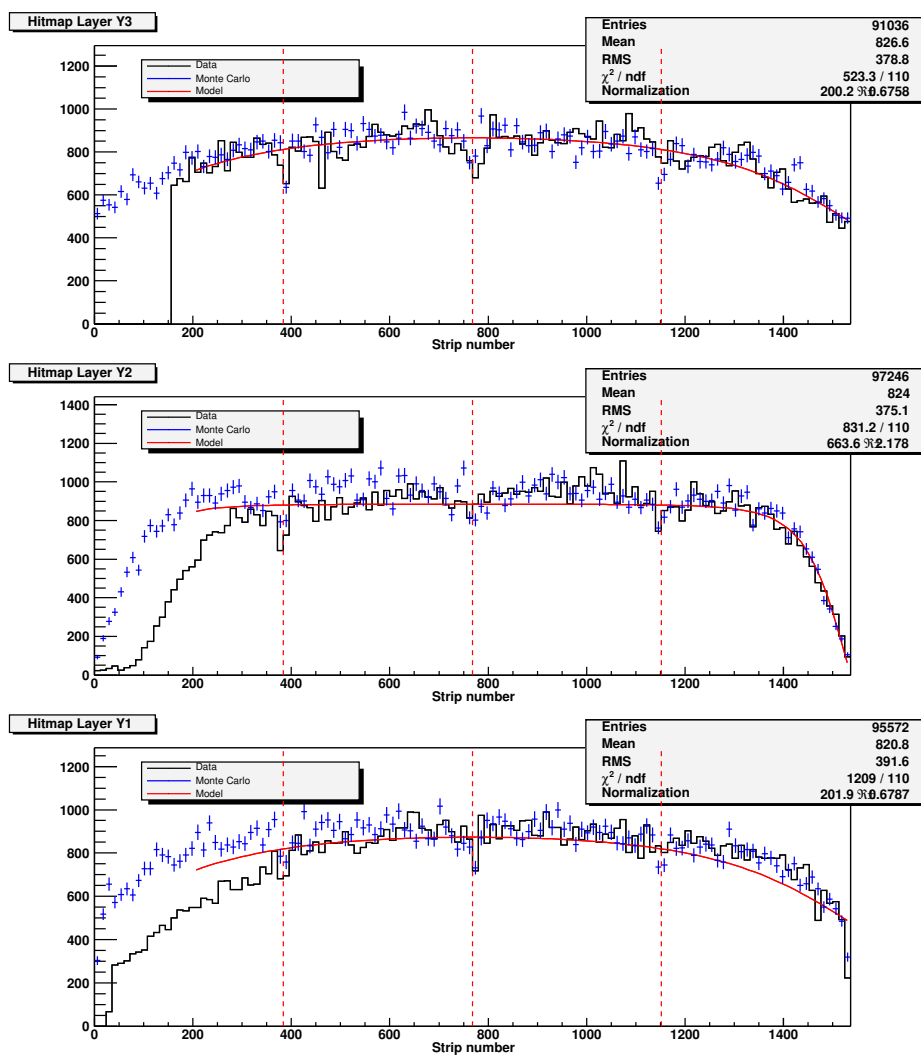


Fig. 6.32: Distribuzione delle hit (ovvero numero di hit per strip) per i tre piani Y, per comodità di visualizzazione ogni bin contiene 12 strip. Di nuovo la figura mostra i dati (nero) il Monte Carlo (blu) e il fit con il modello discusso (rosso), oltre alle linee verticali corrispondenti al bordo dei ladder. Come già detto sul piano Y1 mancano 200 *wire bond* e ciò spiega la distribuzione sul suo lato sinistro e il suo effetto sui piani inferiori.

6.3.4 Molteplicità delle "hit"

Dal momento che il passo tra le strip del rivelatore è abbastanza largo (228 μm), almeno se paragonato ai limiti tecnologici attuali, ci si aspetta che l'effetto di *charge sharing* per tracce verticali sia molto piccolo. D'altra parte il profilo schiacciato del LAT (ed ovviamente anche della minitorre) consente un campo di vista molto ampio e di conseguenza possono essere "triggerate" e rivelate particelle che entrano nel tracciatore con angoli significativi (rispetto alla verticale) e colpiscono quindi più di una strip per piano. Il risultato finale di questi due effetti contrapposti e della bassissima occupancy di rumore, è che il numero medio di strip colpite per piano è comunque piccolo, come già mostrato in precedenza (fig. 6.12). Sebbene ci si aspetti una topologia di eventi profondamente diversa nel caso di fotoni ad energie del GeV, la bassa molteplicità di hit per piano è una delle "caratteristiche" del tracciatore. Essa ha consentito di misurare un TOT che è l'OR di tutte le 1536 strip del piano (in realtà ci sono due TOT per piano): se la strip colpita fosse sempre una sola, si misurerebbe sempre il TOT *della strip*. Ciò rappresenta, in pratica, uno stratagemma (già utilizzato in passato per esperimenti di fisica delle alte energie) per ottenere una misura dell'altezza d'impulso con grande risparmio della quantità di dati che devono essere processati e trasferiti a terra. Il punto importante è che maggiore è l'angolo θ , maggiore è il tratto percorso dalla particella all'interno del silicio; infatti la proiezione orizzontale di questo tratto è:

$$l = t \tan \theta \quad (6.46)$$

dove t è lo spessore del silicio. La molteplicità media di hit in funzione dell'angolo di incidenza θ è mostrata in figura 6.33. Per capire meglio le dipendenze dagli angoli è bene tenere presente le due situazioni limite in cui la direzione delle particelle, proiettata sul piano del rivelatore sia ortogonale o parallelo alle strip:

- Nel caso in cui la direzione di incidenza proiettata sia **parallela** all'orientamento delle strip ci si aspetta che la molteplicità sia indipendente dall'angolo θ e prossima ad uno:

$$N_{\parallel}^{hits} \simeq 1 \quad (6.47)$$

- Nel caso in cui la direzione di incidenza proiettata sia **ortogonale** si può stimare la molteplicità come la lunghezza della traccia nel silicio l misurata in termini del passo p delle strip:

$$N_{\perp}^{hits} \simeq 1 + \frac{t}{p} \tan \theta \quad (6.48)$$

Mediando sull'angolo azimutale (dal momento che la distribuzione di cosmici è piatta in ϕ) si ottiene:

$$N^{hits}(\theta) \simeq 1 + \frac{t}{2p} \tan \theta \quad (6.49)$$

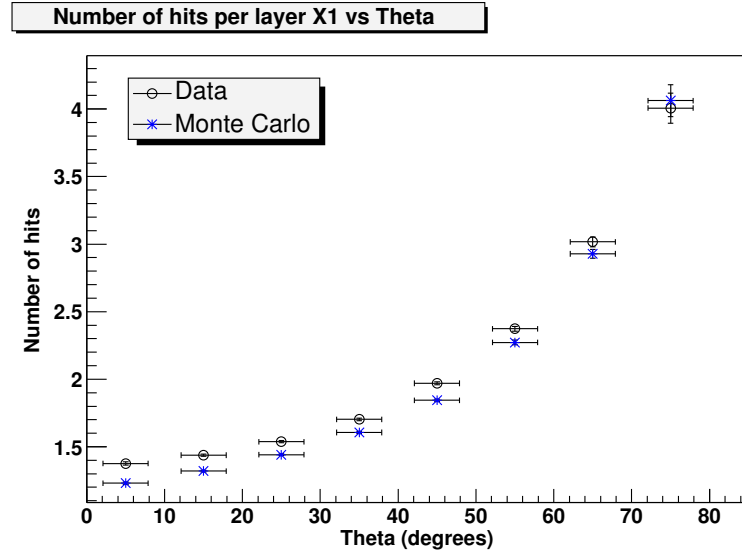


Fig. 6.33: Molteplicità di hit in funzione dell'angolo polare θ per il piano X2. I dati sono stati divisi in otto gruppi in base al valore ricostruito per l'angolo polare della traccia, per ogni gruppo i è stato calcolato il valor medio μ_i e la deviazione standard σ_i . I cerchi neri si riferiscono ai dati, mentre le croci blu al Monte Carlo. La discrepanza tra i singoli punti è da attribuire a fenomeni di *cross talk* non ancora ben descritti dalla simulazione, mentre l'andamento con della curva è molto ben riprodotto.

che mostra come la molteplicità di hit cresce al crescere di θ . Nonostante questo modellino sia estremamente semplice, l'accordo con i dati si può considerare buono.

In figura 6.34, prendendo come esempio un piano X (cioè che legge la coordinata x e quindi con le strip parallele all'asse y), viene mostrata la molteplicità media di hit al variare di θ_{XZ} e θ_{YZ} , in modo da evidenziare meglio i due casi limite appena descritti. Si può chiaramente osservare come la modulazione in termini di θ_{XZ} (ovvero quando la direzione di incidenza è *circa* ortogonale alle strip) sia molto più pronunciata che quella in θ_{YZ} .

Infine, la dipendenza della molteplicità in termini di ϕ (integrando su θ) è mostrata in figura 6.35. Come atteso si osserva un massimo quando la direzione di incidenza è orientata a 90° rispetto alla direzione delle strip, mentre il minimo si ha nell'altro caso. La modulazione ha un periodo di 180° e può essere descritta in maniera empirica da:

$$N^{hits}(\phi) = A + B \sin(\phi + \phi_0) \quad (6.50)$$

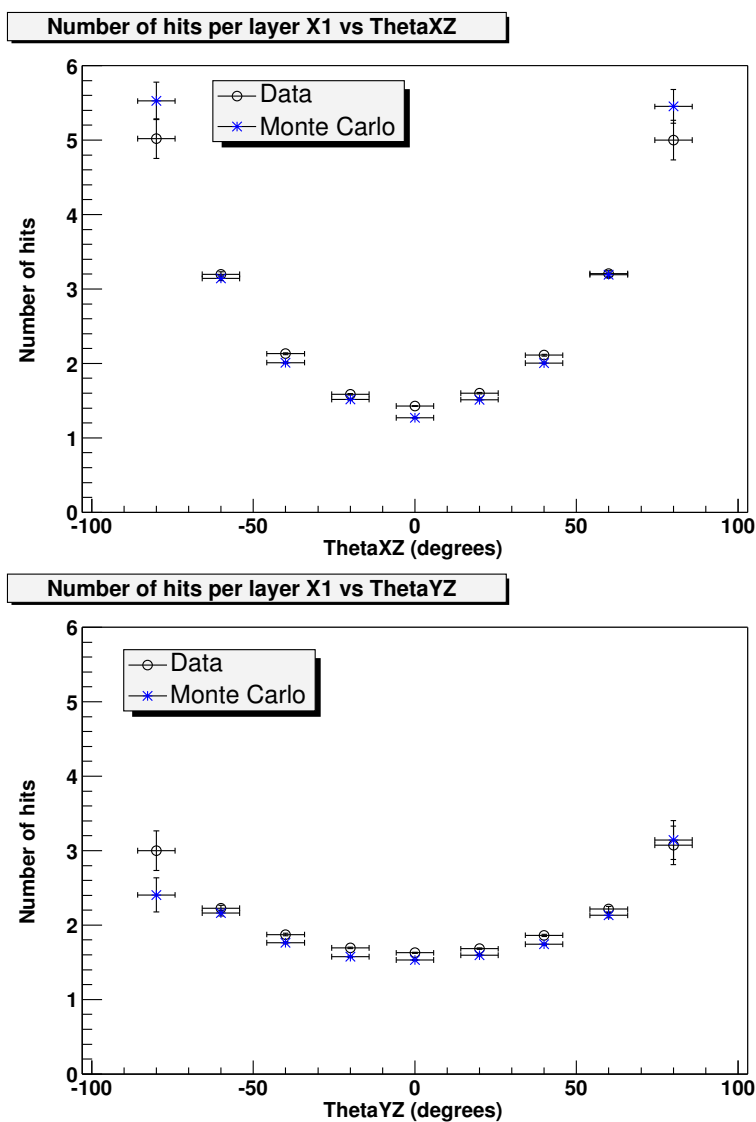


Fig. 6.34: Molteplicità di hit in funzione delle proiezioni di θ sui piani $x-z$ e $y-z$ per il piano X2 (i cerchi neri sono i dati, le croci blu il Monte Carlo). Dal momento che il piano legge la coordinata x (quindi le strip sono lungo y) l'effetto di θ_{XZ} sulla molteplicità media è più pronunciato. Ovviamente i due plot vengono scambiati se si considera un piano Y.

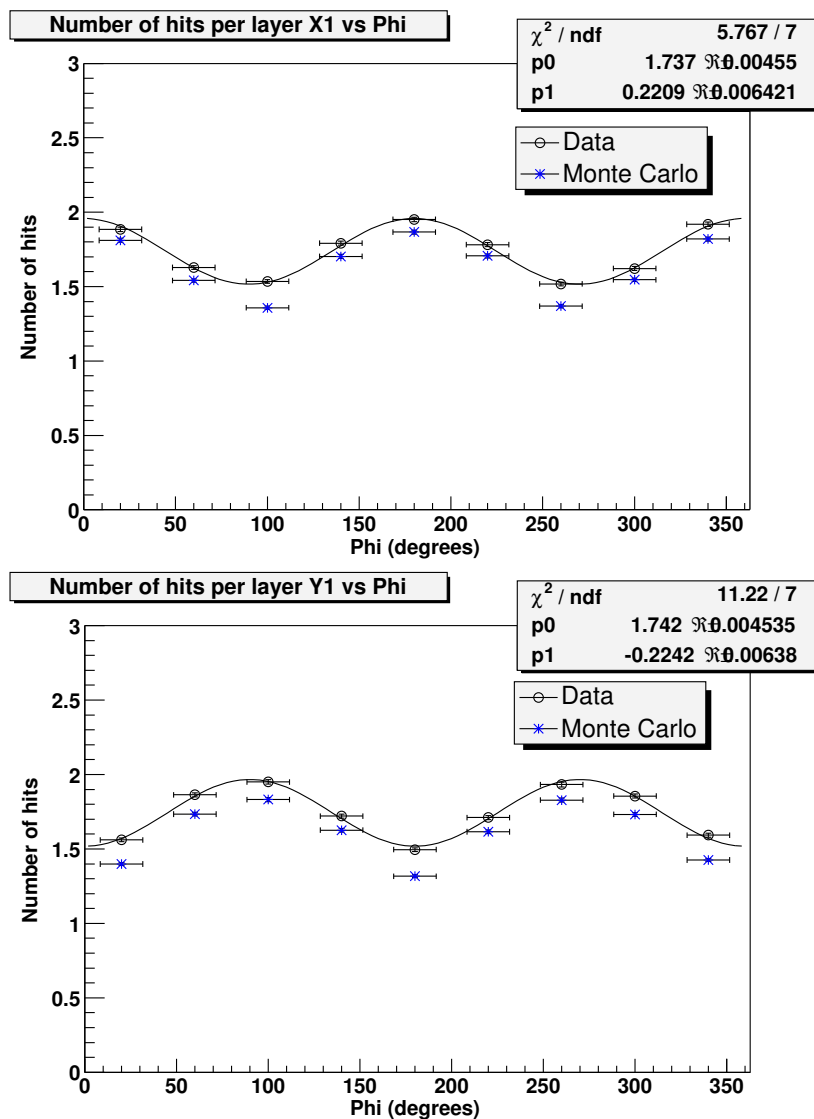


Fig. 6.35: Molteplicità di hit, in funzione di ϕ , per i piani X1 e Y1 (di nuovo i cerchi neri sono i dati e le croci blu la simulazione). Si osserva un massimo quando le particelle entrano in direzione ortogonale alle strip ($\phi = 0^\circ, 180^\circ$ per il piano X, $\phi = 90^\circ, 270^\circ$ per il piano Y) ed un minimo quando la direzione di incidenza è parallela alle strip (notare la fase di 90° tra i due piani). La linea continua è un fit con la funzione(6.50).

6.3.5 Time Over Threshold

Come già mostrato, oltre all'informazione digitale di quale strip viene colpita, GLAST utilizza anche l'informazione contenuta nel Time Over Threshold di ogni GTRC (ovvero il TOT dell'OR logico di tutte le strip lette da quel particolare GTRC – in condizioni normali 12 GTFE per controller: 768 strip). Ancora una volta è bene sottolineare che l'utilizzo di due TOT per piano è possibile grazie alla bassa molteplicità di hit che consente quindi considerare il TOT *quasi equivalente* ad un sistema analogico, con grande risparmio di consumi elettrici e quantità di dati.

Ci si aspetta per il tracciatore un grande aiuto da parte del TOT nella ricostruzione e nell'identificazione del fondo di particelle cariche, consentendo, per fare un esempio, di identificare particelle cariche che rallentano e si fermano nel tracciatore, o identificare il vertice di conversione dei fotoni, dove le coppie e^+e^- non sono abbastanza separate spazialmente e quindi ci si aspetta, su un singolo canale, un TOT compatibile con 2 MIP [8]. Chiaramente i test con i raggi cosmici, in cui la topologia degli eventi è molto semplice, non consente di studiare in dettaglio le prestazioni del TOT in termini di identificazione delle particelle. Tuttavia in questo paragrafo si cercherà di mostrare, per quanto possibile, che il TOT può effettivamente fornire informazioni significative e costituisce un importante strumento di analisi, possibilmente più efficace delle sole informazioni sulle strip colpite.

La figura 6.36 mostra i valori medi del TOT in funzione dell'angolo polare θ , in maniera analoga a quanto visto nel paragrafo precedente. Dal

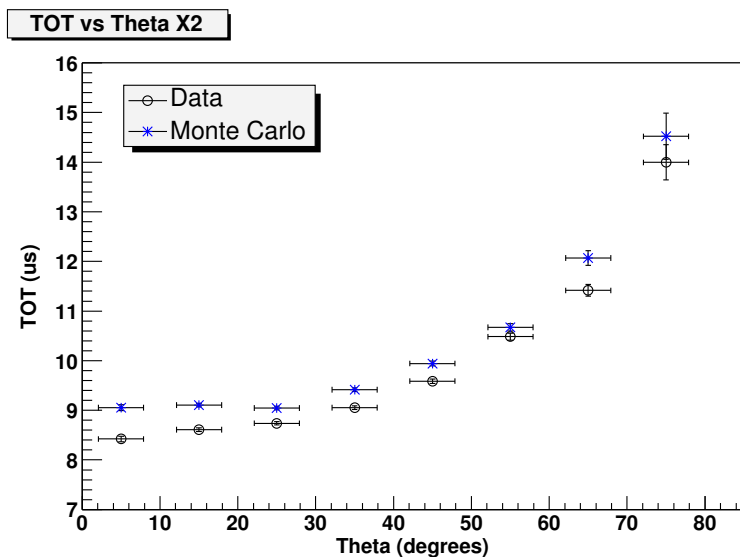


Fig. 6.36: Valori medi del TOT, al variare di θ , per il piano X2. I cerchi neri rappresentano i dati, mentre le croci blu si riferiscono al Monte Carlo.

momento che i valori del TOT sono circa proporzionali alla carica rilasciata nel rivelatore (e quindi alla lunghezza del percorso delle particelle nel silicio), si possono di nuovo distinguere due situazioni limile:

- La direzione di incidenza, proiettata su piano del rivelatore, è **parallela** alle strip: vengono colpiti solo uno o due canali e quindi all'aumentare dell'angolo il TOT cresce sensibilmente (cresce il tratto percorso nel silicio “parallelamente” ad una strip).
- La direzione di incidenza, proiettata su piano del rivelatore, è **ortogonale** alle strip: al crescere dell'angolo, la carica rilasciata è condivisa da più strip ed il TOT (ricordare che è l'OR dei segnali) è in generale minore.

Come prima, si può apprezzare meglio la differenza tra questi due casi limite plottando il TOT in funzione delle variabili angolari θ_{XZ} e θ_{YZ} (fig. 6.37) Da sottolineare che adesso la situazione è opposta rispetto al caso della molteplicità di hit (fig. 6.34): è evidente che nel momento in cui la carica è condivisa tra varie strip il TOT tende a ridursi rispetto alla stessa carica raccolta da una singola strip. In questo senso il TOT e il numero di strip sono quasi *complementari*.

La dipendenza del TOT dall'angolo ϕ è mostrata in figura 6.38 sia per un piano X che per uno Y. Dalle considerazioni geometriche appena mostrate ci si aspetta una modulazione dello stesso tipo di quella per la molteplicità di hit:

$$TOT(\phi) = A + B \sin(\phi - \phi_0) \quad (6.51)$$

ed in più ci si aspetta, per lo stesso piano, uno sfasamento di 90° tra le due.

Infine, per riassumere tutte le considerazioni geometriche, la figura 6.39 mostra l'andamento del TOT al variare di entrambe le variabili (θ, ϕ) .

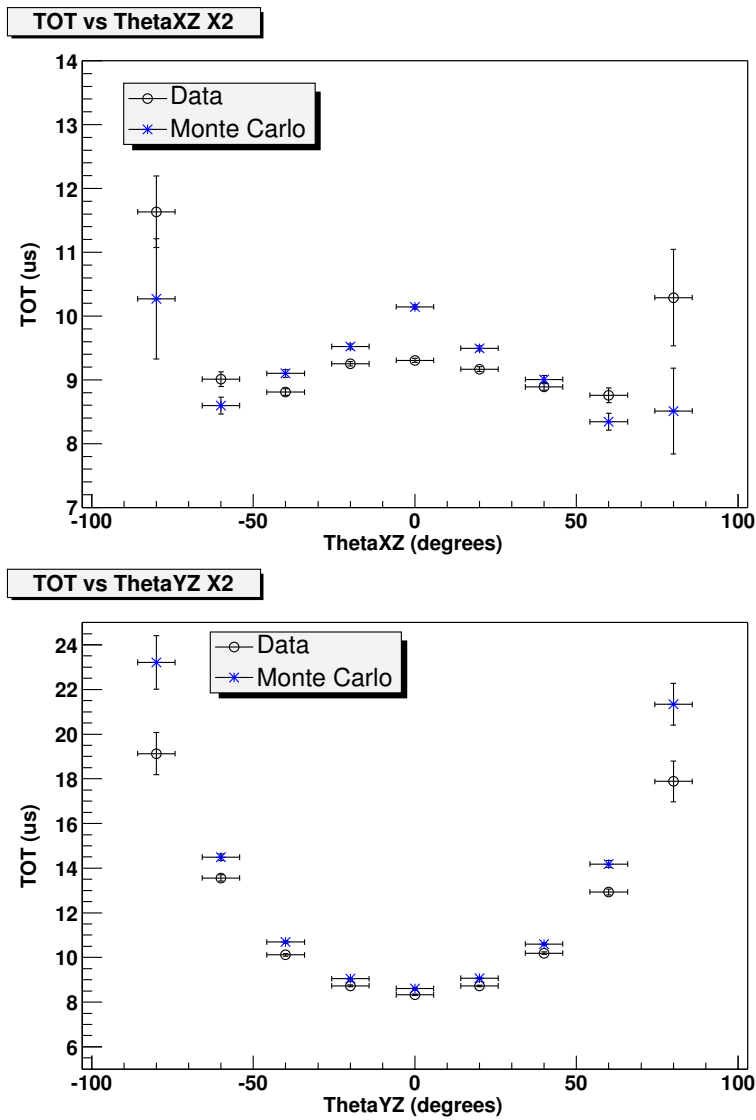


Fig. 6.37: TOT medio, in funzione di θ_{XZ} e θ_{YZ} , per il piano X2 (i dati sono rappresentati da cerchi neri, mentre i risultati della simulazione Monte Carlo dalle croci blu).

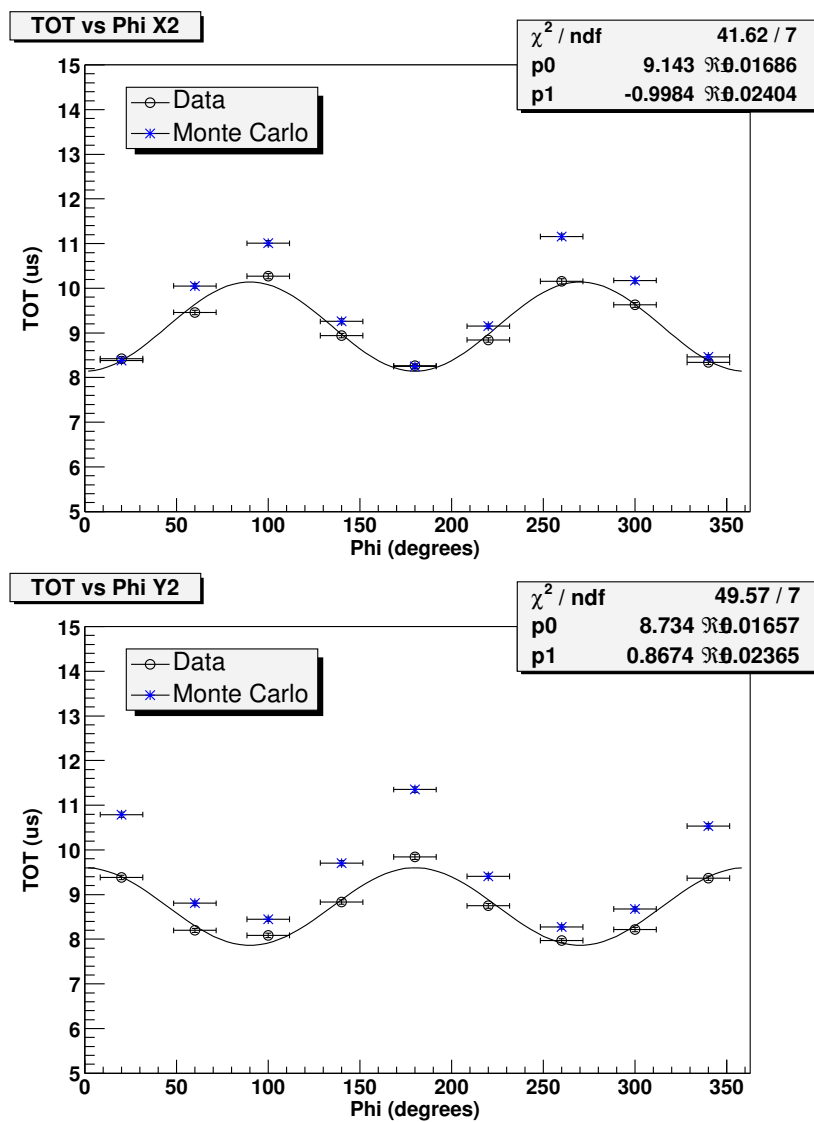


Fig. 6.38: Valore medio del TOT, in funzione di ϕ , per i piani X2 e Y2 (i dati sono ancora rappresentati da cerchi neri, mentre i valori relativi al Monte Carlo dalle croci blu). La linea continua è un fit con la funzione (6.51). Da notare lo sfasamento di 90° tra i due piani X e Y ed anche tra il plot corrispondente alla molteplicità di hit per lo stesso piano (fig. 6.35).

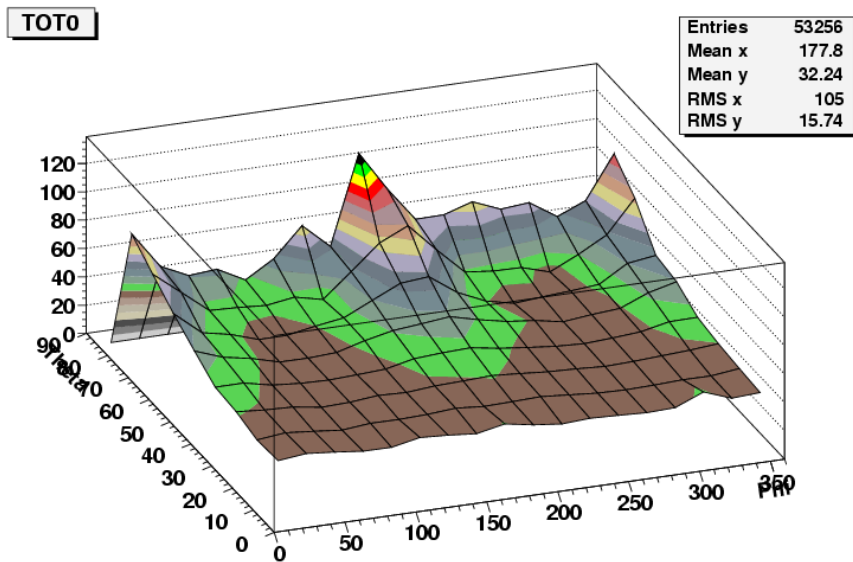
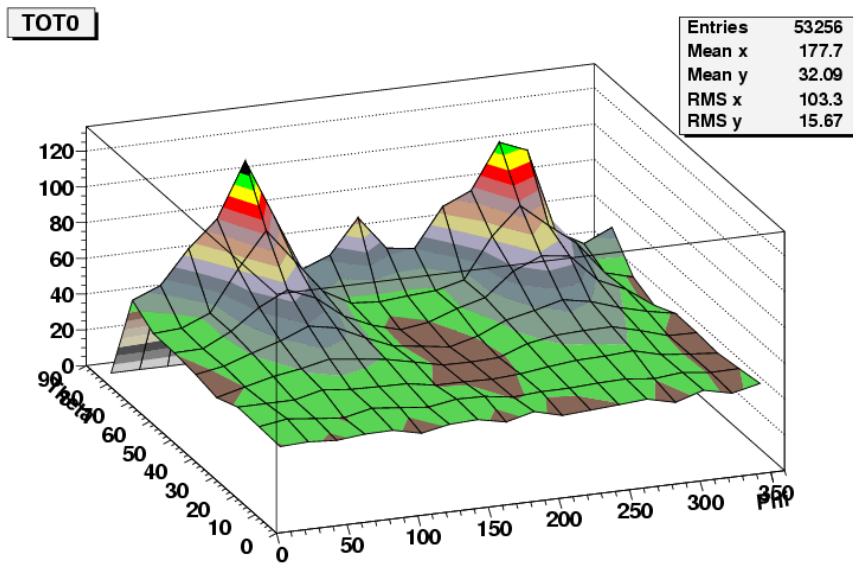


Fig. 6.39: Valore medio del TOT, plottato sul piano (θ, ϕ) , per un piano X ed uno Y.

6. CONCLUSIONI

In questa tesi è descritta la mia attività all'interno del gruppo GLAST presso la sezione di Pisa dell'INFN ed i risultati raggiunti fino ad ora. Il gruppo di Pisa (ed in generale le istituzioni italiane coinvolte nel programma GLAST) ha la responsabilità della costruzione del tracciatore. Il mio lavoro riguarda l'aspetto "elettrico" del tracciatore: lo studio sperimentale dell'elettronica di lettura, delle sue caratteristiche e prestazioni. Lo scopo finale è la preparazione delle routine per i test elettrici e funzionali dei componenti costruiti in Italia, dai singoli tray alle torri di volo.

GLAST è un osservatorio per fotoni Gamma dalle prestazioni estremamente superiori a quelle dei suoi predecessori. Ci si aspetta quindi un significativo passo avanti in questa disciplina grazie ai dati di questo esperimento. Nel primo capitolo, dedicato ai principali temi di ricerca dell'esperimento, si è cercato di mostrare quanto ampio sia il panorama scientifico a cui è dedicato GLAST. Un paragrafo è rivolto alla storia dell'astronomia gamma; esso è stato inserito con lo scopo di chiarire le differenze costruttive tra le varie missioni in modo da rendere ancora più evidente il contenuto tecnologico di GLAST.

È universalmente riconosciuto che molto spesso i progressi scientifici sono conseguenza di progressi tecnologici. Il *Large Area Telescope* (LAT) è stato progettato utilizzando le più moderne tecnologie disponibili, ampiamente sviluppate e collaudate nel campo della fisica delle alte energie. Nel secondo capitolo sono mostrate le caratteristiche ed il funzionamento del LAT, il principale strumento a bordo di GLAST. I miglioramenti più significativi rispetto al passato riguardano il passaggio da "spark chamber" a rivelatori a silicio, il sistema di trigger non più basato su scintillatori, ma sulle informazioni direttamente prese da tracciatore e calorimetro, il sistema di anticoincidenza segmentato in modo da ridurre il "self-veto".

Con il terzo capitolo inizia l'attività svolta in laboratorio. Esso mostra lo stato della produzione dei rivelatori. Tutti i sensori a microstrip (SSD) sono stati ormai ricevuti e quasi tutti sono stati testati confermando un'eccellente qualità della produzione. Il sistema di costruzione dei ladder è ormai ben definito ed avviato verso la produzione di massa dei componenti di volo.

La parte più consistente del lavoro di laboratorio è stata lo sviluppo dei test sui moduli elettronici (TMCM). Tale attività continua ancora per quanto riguarda la definizione delle procedure e delle routine di test destinate alla torre completa. Fino ad ora sono stati testati diversi moduli, confermando

le caratteristiche osservate prima della spedizione in Italia (i moduli vengono prodotti sotto la responsabilità del gruppo di Santa Cruz, California). Otto di questi moduli sono stati utilizzati per la costruzione di un prototipo “flight” di rivelatore (la minitorre).

Alla minitorre è dedicato il quinto capitolo di questa tesi. Tale strumento rappresenta un momento fondamentale per la costruzione del tracciatore, si tratta infatti del primo prototipo costruito con la versione finale dell’hardware. Questo strumento è stato testato in maniera dettagliata, ha permesso di validare il disegno generale dello strumento e di verificarne le prestazioni. Grazie ad esso sono state evidenziate alcune problematiche residue del sistema (fragilità delle piste nei pitch adapter ed errori di “time out” legati ai GTRC) che la collaborazione sta cercando di risolvere.

Diversi run di dati sono stati acquisiti con la minitorre. In questa tesi è stato mostrato una semplice analisi di un run di raggi cosmici con la torre in posizione verticale. Tale analisi ha permesso il confronto della simulazione Monte Carlo con degli eventi reali (che sono stati anche confrontati con dei semplici modelli analitici). Ne è emersa un’immagine generale dello strumento alquanto consistente: ottimo accordo con la simulazione ed interessanti correlazioni tra le variabili. Si è potuto infine toccare con mano la ricchezza di informazione contenuta nel TOT (*Time Over Threshold*).

La costruzione delle 18 torri finali (16 di volo e 2 “spares”) è prevista iniziare entro la prima metà di quest’anno. Ancora prima del grande sforzo che la produzione di massa richiede (l’intero processo durerà circa un anno), occorrerà ancora del lavoro in modo da completare le procedure ed i tool necessari a testare l’hardware e validare lo strumento. È proprio questa la direzione intrapresa negli ultimi mesi del mio lavoro all’interno della collaborazione GLAST.

APPENDICE

ELENCO DEGLI ACRONIMI

ACD :	Anti Coincidence Detector
ADC :	Analog to Digital Converter
AGN :	Active Galactic Nuclei
ASIC :	Application Specific Integrated Circuit chip
BFEM :	Balloon Flight Engineering Model
BTEM :	Beam Test Engineering Model
CAL :	Calorimeter
CCA :	Circuit Card Assembly
CR :	Cosmic Rays
CSR :	Control Status Register
DAC :	Digital to Analog Converter
EGSE :	Electrical Ground Support Equipment
ENC :	Equivalent Noise Charge
FITS :	Flexible Image Transport System
GASU :	Global trigger Anticoincidence electronics module Spacecraft interface Unit
GCCC :	GLAST Calorimeter Cable Controller
GCRC :	GLAST Calorimeter Readout Controller
GLAST :	Gamma-ray Large Area Space Telescope
GTCC :	GLAST Tracker Cable Controller
GTFE :	GLAST Tracker Front End
GTIC :	GLAST Trigger Interface Controller
GTIU :	GLAST TEM Interface Unit
GTRC :	GLAST Tracker Readout Controller
LAT :	Large Area Telescope
LDF :	LAT Data Format
LVDS :	Low Voltage Differential Signal
L1T :	Level 1 Trigger
MCM :	Multi Chip Module (vedi anche TMCM)
MIP :	Minimum Ionizing Particle
PDU :	Power Distribution Unit
PSA :	Power Supply Assembly
PSF :	Point Spread Function
SNR :	SuperNova Remnants
SSD :	Silicon Strip Detector

TACK : Trigger AKNoledge
TEM : Tower Electronics Module
TKR : Tracker
TMCM : Tracker Multi Chip Module
TOF : Time Of Flight
XML : Extensible Markup Language

BIBLIOGRAFIA

- [1] *GLAST Science Document*, 2000. disponibile su <http://glastserver.pi.infn.it>
- [2] *Science Requirements Document*. 433-SRD-0001, 2000.
- [3] M.S.Longair. *High Energy Astrophysics*, 2 ed. Cambridge University Press,1992.
- [4] T. Thurston, W. Davis. *LAT Performance Specification*.LAT-SS-00010-2, 2001.
- [5] J. Buckley ed al. *Gamma-Ray Summary Report*. [astro-ph/0201160](#), 2002.
- [6] E. Atwood et al. *The silicon tracker of the beam test engineering model of the GLAST large-area telescope*. Nucl. Instr. and Meth. A 457 (2001) 126.
- [7] W. B. Atwood et al. *Results from the beam test of the engineering model of the GLAST large area telescope*. Nucl. Instr. and Meth. A 435 (1999) 224-232.
- [8] E. do Couto e Silva et al. *The silicon tracker/converter for the gamma ray large area space telescope*. Nucl. Instr. and Meth. A 474 (2001) 19-37.
- [9] R. Johnson. *Tracker Subsystem Level III Specification*. LAT-SS-00017-05, 2001.
- [10] T. Borden, R. Johnson. *Tracker Subsystem Level IV Specification*.LAT-SS-00134-03, 2003.
- [11] R. Johnson, D. Nelson. *Tracker Subsystem Level IV Electronics Specification*.LAT-SS-00152-05, 2003.
- [12] R. Bellazzini, F. Angelini, R. Bagagli, L. Baldini, A.Brez, M. Ceccanti, J. Cohen Tanugi, M. Kuss, L. Latronico, M. M. Massai, M. Minuti, N. Omodei, G. Spandre, L. Vigiani, F. Zetti. *The silicon-strip tracker of the Gamma Ray Large Area Space Telescope*.Nucl. Instr. and Meth. A 512 (2003) 136-142.

-
- [13] R. Bellazzini. *The GLAST Large Area Telescope: a New Instrument to Explore the High Energy Universe*. 5th International Meeting on Front-End Electronics, Snowmass Village, Colorado, 2003.
- [14] H. Sadrozinski, T. Ohsugi. *GLAST LAT Silicon Detector Specification*. LAT-DS-00011-10, 2001.
- [15] A. Brez. *LAT Tracker SSD Ladder Assembly Procedure*. LAT-PS-00635, 2003.
- [16] A. Brez. *LAT Tracker SSD Dimensional and Electrical Inspection Procedure*. LAT-TD-00527-03, 2002.
- [17] D. Nelson, R. Johnson. *Conceptual Design of the Tracker Electronics System*. LAT-SS-00168-01, 2003.
- [18] L. Sapozhnikov. *LAT TEM Specification and ICD*. LAT-SS-00288-01, 2003.
- [19] D. Nelson, R. Johnson. *Tracker Flex Cable Specification*. LAT-SS-00175-D1, 2001.
- [20] D. Nelson, R. Johnson. *Design and Specification of the Tracker Multi-Chip Module (TMCM)*. LAT-SS-00171-D5, 2003.
- [21] J. Olsen. *Specification of the GLAST Tracker Readout Controller Electronics (GTRC) ASIC*. LAT-SS-00170-6, 2003.
- [22] D. Nelson, R. Johnson. *Conceptual Design and Specification of the GLAST Tracker Front-End Electronics (GTFE) ASIC*. LAT-SS-00169-04, 2003.
- [23] R. Claus (I&T). *Online - Subsystem Interface Control Document*. LAT-SS-00586-D2, 2002.
- [24] M. Huffer. *The Tower Electronic Module (TEM) Programming ICD specification*. LAT-TD-00605 , 2003.
- [25] P. Boinee et al. *Gleam: the GLAST Large Area Telescope Simulation Framework*. [astro-ph/0308120](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0308120), 2003.
- [26] W. R. Leo. *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments* Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994.
- [27] Particle Data Group *Particle Physics Booklet*. July 2002. È disponibile online presso <http://www.cern.ch/library>