

Università degli Studi di Napoli

“Federico II”

**Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e
Naturali**



A.A. 2005-2006

Tesi di Laurea in Fisica

Titolo:

“Analisi dei primi eventi registrati in ARGO-YBJ con il sistema di lettura analogico”

Candidato:

Ruggero Cortini
Matr. 567/208

Relatori:

Prof. Benedetto D’Ettorre Piazzoli

Prof. Michele Iacovacci

Indice

	<u>Pag.</u>
Introduzione	4
Capitolo 1 I Raggi Cosmici e la loro rivelazione	
1.1 Introduzione	7
1.2 Composizione elementale	7
1.3 Isotropia dei Raggi Cosmici	8
1.4 Lo spettro dei Raggi Cosmici	9
1.5 Il Modello Standard	11
1.6 La rivelazione dei Raggi Cosmici: misure dirette ed indirette	13
1.7 La γ – astronomia e la ricerca delle sorgenti	13
Capitolo 2 Gli sciami atmosferici estesi (EAS)	
2.1 Introduzione	16
2.2 Sciami adronici e sciami elettromagnetici	16
2.3 Lo sviluppo e la composizione	17
2.4 Sviluppo longitudinale e laterale e loro schematizzazione analitica	20
Capitolo 3 L’esperimento ARGO-YBJ	
3.1 Introduzione	22
3.3 Descrizione dell’apparato	23
3.3 Il sistema di lettura analogica	28
Capitolo 4 L’analisi dati	
4.1 Introduzione	31
4.2 Verifica del corretto funzionamento del sistema di lettura analogica	31
4.3 Il problema della calibrazione	33
4.4 La selezione degli eventi	37
4.5 Ricostruzione della distribuzione di densità laterale	40

Conclusioni	44
Bibliografia	45
Ringraziamenti	46

Introduzione

Il presente lavoro consiste nell'analisi dei primi dati raccolti nell'esperimento ARGO-YBJ con il sistema di lettura analogica.

L'esperimento ARGO-YBJ prevede la realizzazione di un rivelatore piano di area complessiva pari a $\sim 6500 \text{ m}^2$, costituito da circa 2000 Resistive Plate Chambers (RPC), cui è demandata un'accurata ricostruzione spazio-temporale della componente carica degli sciami estesi atmosferici generati dalla Radiazione Cosmica Primaria. Al momento più di 4/5 del rivelatore ($\sim 5700 \text{ m}^2$) sono installati ed operativi, l'installazione completa è prevista entro Novembre 2006.

L'esperimento ARGO-YBJ, i cui temi principali riguardano:

- la astronomia dei raggi gamma sino ad energie di circa 10 TeV
- la fisica dei Gamma Ray Bursts
- la misura del rapporto antiprotone/protone alle energie del TeV
- la fisica del Sole e dell'Eliosfera

rappresenta un primo passo di un più vasto progetto il cui obiettivo è la realizzazione di un complesso sperimentale che abbia la necessaria sensibilità per risolvere il problema della struttura dello spettro dei raggi cosmici (distribuzione di energia e composizione) su un ampio intervallo di energia (da 10 TeV a 5000 TeV) e la ricerca delle relative sorgenti sia galattiche che extragalattiche mediante osservazioni in astronomia gamma sino ad energia di 100 TeV o più. Entrambi questi obiettivi, la composizione dei raggi cosmici primari ed i loro siti di produzione, rimangono ancora irrisolti nonostante il notevole impegno sperimentale della comunità scientifica internazionale.

Ad oggi l'esistenza di diverse sorgenti galattiche di fotoni con più di 10 TeV, così come documentato dagli esperimenti HESS e Magic, rende impellente la necessità di estendere il limite di energia (circa 10 TeV) degli attuali dispositivi operanti in astronomia gamma.

Per entrambi gli obiettivi l'approccio sperimentale "alla ARGO" (rivelatore a copertura totale, grande granularità, alta quota) ha una notevole e unica potenzialità purché sia aumentata la superficie di rivelazione e sia campionata la componente muonica degli sciami estesi atmosferici.

La dinamica del rivelatore deve ovviamente consentire il campionamento, con buona linearità, di sciami estesi atmosferici con alta densità di elettroni ($>10^3$ particelle/ m^2).

Al tal fine, gli RPC realizzati per ARGO sono equipaggiati oltre che con elettrodi per la lettura digitale ("strip" di dimensioni $6,7 \times 62 \text{ cm}^2$), anche con due elettrodi di grande area ($1,25 \times 1,40 \text{ m}^2$ ciascuno) che consentono la lettura analogica degli RPC ($1.25 \times 2.80 \text{ m}^2$).

Questi elettrodi, detti “Big Pad”, forniscono un segnale la cui ampiezza è attesa essere proporzionale al numero di particelle cariche che hanno attraversato il rivelatore, essendo questo fatto operare in regime streamer. Cruciale per il corretto uso dell’informazione è la calibrazione del rivelatore e della catena elettronica di lettura, nonché la conoscenza del range di linearità intrinseca in regime di streamer.

Sinora, sebbene largamente usati nella fisica degli acceleratori - LHC - e nella fisica dei raggi cosmici - ARGO-, mai è stato fatto uno studio della risposta degli RPC in funzione della densità di particelle. In questo l’esperimento ARGO-YBJ è certamente unico, poiché un’alta densità di particelle cariche ($> 10^4/\text{m}^2$) investe il rivelatore in poche decine di nanosecondi. In questa situazione lo studio del rivelatore è interessante di per sé.

Al momento circa 1000 dei 5700 m^2 di rivelatore sono strumentati con lettura analogica dei segnali. L’elettronica che può operare in diversi intervalli di ampiezza, nella fattispecie è in grado di registrare segnali della Big Pad fino a 20 V, corrispondenti a circa 7000 particelle/ m^2 . Ai fini di questo studio sono stati presi in considerazione anche i dati relativi a fondo scala di 330 mV e 2.5 V.

Scopo di questo lavoro è la verifica del corretto funzionamento del sistema analogico: la correttezza delle informazioni è stata verificata confrontando tra loro vari metodi di calibrazione, a partire dallo studio del segnale della singola particella al minimo di ionizzazione, passando per la correlazione del segnale tra Big Pad adiacenti, per finire con una tecnica di calibrazione relativa tra spettro di molteplicità strip e spettro dell’ampiezza dei segnali analogici. Viene mostrato come l’informazione analogica estende correttamente l’intervallo di misura (energia) di ARGO-YBJ, permettendo di operare intorno al ginocchio dello spettro.

Si è quindi proceduto ad una misura di spettri di densità intorno al core dello sciame. A questo scopo è stata implementata una selezione di eventi con il core all’interno della regione in cui è operativo il sistema analogico, quindi sono stati definiti tre intervalli di densità massima (energia) e, per gli eventi appartenenti a ciascun intervallo, è stata estratta la distribuzione laterale. I dati così ottenuti sono stati confrontati con quanto atteso da Monte Carlo, trovando un ottimo accordo con un modello molto semplice di composizione. Non è stato possibile stimare gli errori sistematici, quindi i risultati contengono margini di incertezza. Tuttavia è interessante notare come ARGO, data la sua caratteristica di rivelatore “continuo” permetta di indagare in regioni inesplorate regioni di elevatissima densità intorno al core.

Tutto quanto conferma l’alta potenzialità di ARGO nello studio della composizione al ginocchio. E’ interessante notare come, per la γ -astronomia alle energie superiori alle decine di TeV, l’informazione analogica diventi fondamentale per la localizzazione del core, e per la discriminazione γ -adroni, aspetto fondamentale che non è stato affrontato in questo lavoro.

La tesi si sviluppa in 4 capitoli. Nel capitolo 1 si descrivono le caratteristiche generali della Radiazione Cosmica Primaria, e, più in generale, delle tecniche di rivelazione. Il capitolo 2 tratta invece degli sciami atmosferici estesi e delle loro caratteristiche, in modo da chiarire il funzionamento di un apparato di rivelazione di sciami al suolo. Nel capitolo 3 si descrive nel dettaglio l'esperimento ARGO, focalizzando in particolare l'attenzione sul sistema di lettura analogica. Nel capitolo 4 si passa alla descrizione generale dell'analisi dati svolta in questo lavoro. Quindi si traggono le conclusioni.

Capitolo 1

I Raggi Cosmici e la loro rivelazione

1.1 Introduzione

I RC consistono in particelle di natura diversa, dette particelle primarie, che arrivano sulla terra da sorgenti galattiche ed extragalattiche. In questo capitolo si descrivono le caratteristiche principali della Radiazione Cosmica Primaria, ovvero la sua composizione, il suo spettro energetico, la sua isotropia per giungere a delineare quello che è il cosiddetto “Modello Standard” dei raggi cosmici, il quale è in grado di dar ragione delle caratteristiche osservate e sopra menzionate. Circa le sorgenti, di esse viene fatta semplicemente una rapida menzione.

1.2 Composizione elementare

I RC sono perlopiù costituiti da protoni e nuclei di elio. La restante percentuale è data da nuclei più pesanti, elettroni e positroni in ragione dell'1% circa. Nei RC sono presenti tutte le specie nucleari fino all'uranio, la cui abbondanza relativa dipende dall'energia. Qualunque sia l'energia che si considera, la componente adronica è sempre quella più significativa. La composizione chimica dei RC è illustrata dalla figura (1.1), in cui la si confronta quella degli elementi del Sistema Solare.

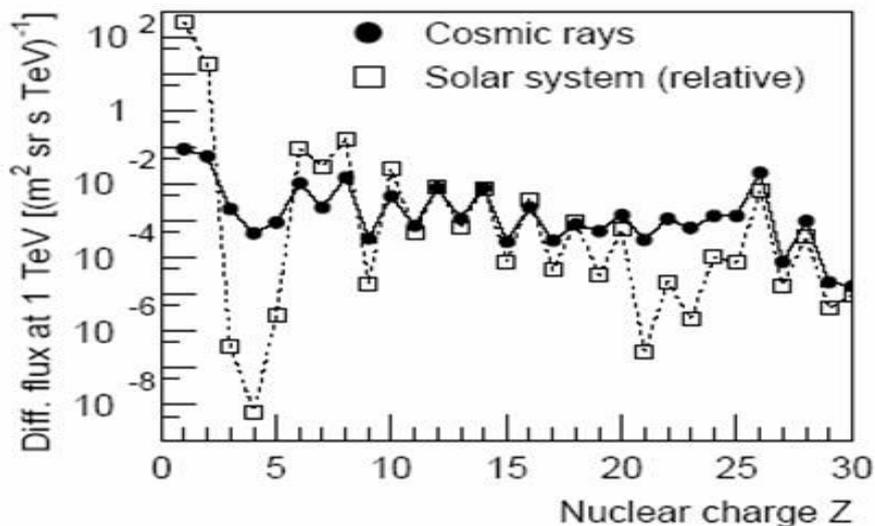


Fig. 1.1 Abbondanza relativa delle specie nucleari nei RC, confrontata con quella del Sistema Solare, all'energia di 1 TeV

Come si vede l'abbondanza relativa degli elementi nei RC e nel Sistema Solare sono simili, ma ci sono differenze importanti. Si può notare un effetto pari-dispari, ovvero maggiore abbondanza di nuclei pari, dovuto alla loro maggiore stabilità, e un'abbondanza di elementi leggeri come litio, berillio e boro di molti ordini di grandezza maggiore nei RC. Questi dati possono essere spiegati con il processo detto di "spallazione" per il quale i nuclei più pesanti dei RC come C O Mg Si e Fe, prodotti della nucleosintesi stellare, attraversando gli spazi galattici ed intergalattici interagiscono con le particelle della Inter-Stellar Matter frammentandosi e producendo gli elementi più leggeri, i quali sono del tutto assenti tra i prodotti finali delle reazioni nucleari all'interno delle stelle e quindi del Sole.

La composizione dei RC è quindi sostanzialmente simile a quella del Sistema Solare, eccetto che per gli elementi più leggeri.

La densità di energia dei RC è dell'ordine dell'eV/cm³, ovvero l'ordine di grandezza delle densità di energia dei campi magnetici galattici e della luce stellare, ed anzi si stima che essa sia maggiore di queste ultime. Segue naturalmente che i RC devono necessariamente giocare un ruolo di prima importanza nel bilancio energetico dell'universo. Questo apre anche l'enorme problematica di individuare sorgenti capaci di mantenere un flusso di energia così elevato [1].

1.3 Isotropia dei Raggi Cosmici

Una caratteristica peculiare dei RC è la loro isotropia. Questo dato contrasta con l'aspettativa che la loro distribuzione angolare sia anisotropa, con un aumento di flusso in corrispondenza delle sorgenti. In realtà viene l'anisotropia misurata è piuttosto bassa, con valori che dipendono dall'energia ma che comunque sono inferiori a 0.1% fino alle energie dei PeV, come è messo in evidenza dalla figura (1.2).

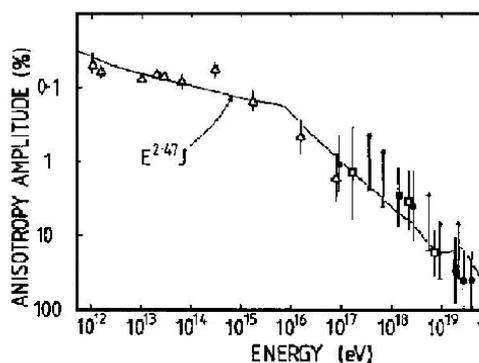


Fig 1.2 Isotropia dei RC come funzione dell'energia delle particelle primarie.

La spiegazione più immediata che si può dare di questo fenomeno è che le particelle cariche, che costituiscono la maggioranza assoluta delle particelle dei RC, subiscono deviazioni dalla loro traiettoria a causa dei campi magnetici galattici ed intergalattici. Si può valutare quantitativamente questa deviazione stimando il campo magnetico galattico a $\sim 3 \mu\text{G}$ e usando la formula di Larmor che esprime il raggio di curvatura di una particella in un campo magnetico:

$$R_L = \frac{E}{300(HZ)} \quad [\text{cm}]$$

Qui E è espresso in eV, H in Gauss e Z è la carica della particella, mentre R_L è espresso in centimetri. L'ordine di grandezza della deviazione naturalmente dipende dall'energia delle particelle. Per basse energie si hanno raggi di curvatura piccoli, e quindi deviazioni sostanziali delle traiettorie. Questa è l'argomentazione principale per giustificare l'alto grado di isotropia osservato dei RC. Questo spiegherebbe anche l'aumento dell'anisotropia osservata ad energie maggiori. Il modello accettato correntemente è che le particelle subiscono deviazioni multiple a causa dei campi magnetici stabili e anche da quelli caotici generati da correnti di gas ionizzati. Questi ultimi sono dello stesso ordine di grandezza di quelli stabili, e sono localizzati nelle cosiddette "nuvole magnetiche".

Poiché, come si è detto, le particelle cariche subiscono deviazioni, le particelle più adatte a localizzare le sorgenti sono i fotoni e i neutrini. Sicuramente i neutrini sono le particelle più adatte alla localizzazione delle sorgenti astrofisiche di RC, poiché sono le particelle che subiscono meno interazioni. Questa loro caratteristica fa sì che essi subiscono deviazioni minime dalla loro traiettoria originaria, ma per contro li rende anche molto difficili da rivelare. Per questo motivo, attualmente la ricerca delle sorgenti porta i risultati migliori grazie alla ricerca di sorgenti puntiformi di raggi gamma.

Gli oggetti astrofisici candidati ad essere sorgenti delle particelle alle più elevate energie sono:

- Sorgenti puntiformi: radio-pulsar, nuclei galattici attivi, sistemi binari, stelle di neutroni, buchi neri, quasar.
- Sorgenti estese: Supernova-Remnants, molecular clouds, sia galattiche che extragalattiche, ed in particolare appartenenti al piano galattico.

1.2 Lo spettro dei Raggi Cosmici

Lo spettro dei RC si estende per una regione vastissima, spaziando su più di 12 ordini di grandezza in energia e circa 30 in intensità. La figura (1.3) mostra il flusso integrale dei RC. La

regione con energia < 10 GeV è particolarmente sensibile alle modulazioni dell'attività solare, per cui esistono molte incertezze sul flusso.

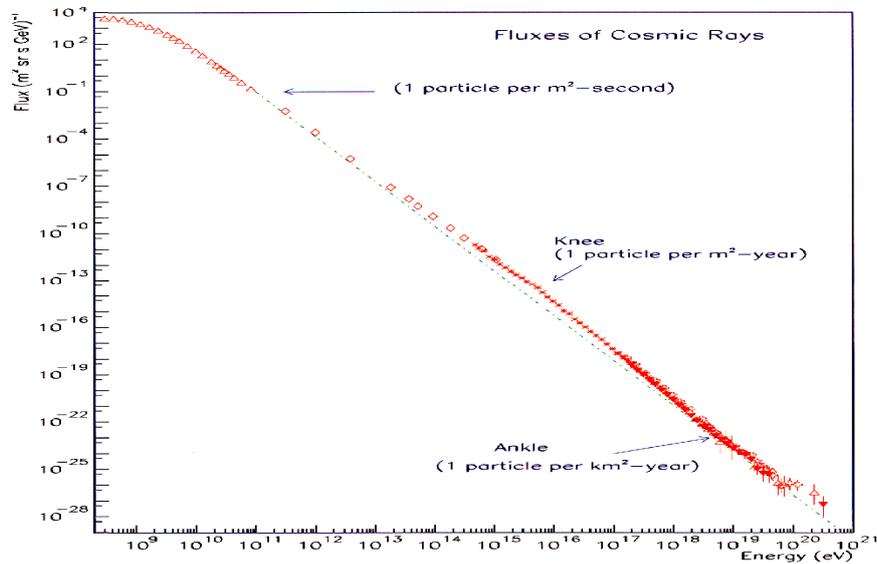


Fig 1.3 Spettro integrale dei RC primari, con il ginocchio e la caviglia in evidenza

Per energie maggiori non si osserva una correlazione stretta tra l'attività solare ed il flusso, e lo spettro può essere descritto accuratamente da una legge di potenza:

$$J(E) = k \cdot E^{-\gamma} \quad [\text{m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1} \text{GeV}^{-1}]$$

Dove $J(E)$ è il flusso differenziale delle particelle primarie con energia E e con indice spettrale γ . Le osservazioni hanno fornito come stima dell'indice spettrale il valore 2.7 nella regione di energia inferiore ai PeV. Di particolare interesse è la regione dello spettro tra 1 e 5 PeV (regione del ginocchio), in cui l'indice spettrale cambia ($\Delta\gamma \approx 0.5$), diventando circa 3.1. L'origine fisica di questo cambiamento non è chiara, infatti si può pensare sia dovuta sia ad una variazione dei meccanismi di accelerazione alla sorgente sia agli effetti della propagazione [2]. Un ulteriore cambiamento dell'indice spettrale, nella fattispecie una diminuzione, si verifica nella regione intorno ai 10^{18} eV, nota come caviglia (ankle) dello spettro. In corrispondenza delle regioni del ginocchio e della caviglia la composizione dei RC mostra anch'essa un sostanziale cambiamento: se infatti a partire dai TeV sino a qualche PeV lo spettro è dominato da elementi leggeri (protoni ed elii), in corrispondenza del ginocchio si osserva un incremento della componente pesante. Questo permane sino alle energie della caviglia, in corrispondenza della quale gli elementi leggeri (protoni) tornano a dominare.

E' da sottolineare la natura non termica della radiazione cosmica primaria, evidenziata dalla forma del suo spettro il quale, seguendo una legge di potenza, differisce molto dallo spettro di emissione della materia in equilibrio termodinamico con la radiazione elettromagnetica.

1.4 Il Modello Standard

Gli elementi salienti appena descritti sono alla base del modello di riferimento che descrive la "storia dei RC", ovvero il Modello Standard. Secondo tale modello i RC, sino ad energie di $\sim 3 \cdot 10^{18}$ eV, sono prevalentemente di origine galattica, mentre ad energie superiori la Radiazione Cosmica sarebbe dominata dalla componente extragalattica. A loro volta i RC galattici sono costituiti da due popolazioni: quelli accelerati dalle onde d'urto delle supernova e quelli (ri)accelerati con meccanismi e in siti diversi. Il ginocchio dello spettro, inequivocabilmente osservato nell'intervallo 1-5 PeV dagli esperimenti sugli sciami estesi rifletterebbe il limite dell'accelerazione da supernova e/o il deconfinamento dal disco galattico. I punti più salienti del Modello Standard possono essere sinteticamente descritti come segue:

- 1) I RC sono prodotti nei processi di nucleosintesi stellare. Ciò è suggerito dalla grande somiglianza tra le abbondanze elementari dei RC con le abbondanze nel Sistema Solare (vedi Figura (1.1)).
- 2) I RC sono accelerati dalle onde d'urto che si generano a seguito dello scoppio di supernovae e poi iniettati nel mezzo interstellare. In questo processo circa 10^{51} erg sono spesi in energia cinetica del materiale espulso. Assumendo una frequenza di supernovae di circa una ogni trenta anni si ottiene una potenza 10^{42} erg/s disponibile di cui sola una piccola frazione e' necessaria per sostenere la luminosità in RC. E' questo uno degli argomenti più forti a favore dell'ipotesi dell'origine dei RC da esplosioni di supernovae [3].

Poiché la scala di tempo in cui l'onda d'urto è efficace è circa 1000 anni, si può stimare in circa trenta il numero medio nel tempo di supernovae attive che stanno accelerando i RC [4]. Se questo scenario è vero, almeno una frazione di supernovae dovrebbe essere sorgente di fotoni d'alta energia, ai TeV, attraverso il processo [5]:



E' importante notare che l'osservazione di fotoni al TeV da SNR è nel programma dell'esperimento ARGO-YBJ e rappresenta uno degli aspetti più rilevanti della ricerca delle sorgenti dei RC.

- 3) Una volta iniettati nel mezzo interstellare, inizia per i RC una complicata storia di propagazione usualmente descritta dall'equazione di trasporto di Ginzburg e Syrovatskii [6]. Sono stati proposti numerosi modelli di propagazione che differiscono l'uno dall'altro per le differenti condizioni al

contorno. Loro scopo è quello di spiegare una numerosa varietà di risultati sperimentali quali lo spettro di potenza e la sua evoluzione con l'energia, l'alto grado di isotropia, le abbondanze relative tra nuclei secondari e primari, lo spettro di elettroni, positroni e antiprotoni ecc (vedi ad esempio [7]).

Il modello più attuale, poiché più predittivo, è il cosiddetto “leaky box model” nel quale si assume che i RC diffondono dalle sorgenti e rimangono intrappolati nella Galassia, avendo una probabilità finita di sfuggire da essa nello spazio extragalattico ogni volta che giungono ai bordi del volume di confinamento (disco o disco con alone). Ne risulta un tempo medio di residenza τ_e (escape time) che decresce con la rigidità definita come rapporto di energia alla carica. Durante la loro permanenza nella Galassia i RC subiscono processi di spallazione interagendo col gas interstellare e generando quei nuclei (RC secondari: elementi leggeri come Li, Be, B, ^3He , gli elementi subito prima del ferro, sub-Fe) che sono osservati tra i RC ma che non sono prodotti nei processi di nucleosintesi stellare.

Il modello riesce a spiegare sufficientemente bene i rapporti $\text{RC}_{\text{secondari}}/\text{RC}_{\text{primari}}$ almeno sino ad energie di 100 GeV/nucleone [8] se si assume per la quantità media di materia attraversata, $\lambda_{\text{esc}} = \rho \beta c \tau_e$ (escape length), la dipendenza [9]

$$\lambda_{\text{esc}} = 10.8 \beta (R/4)^{-0.6} \text{ g/cm}^2 \quad R > 4\text{GV}$$

$$\lambda_{\text{esc}} = 10.8 \text{ g/cm}^2 \quad R < 4\text{GV}$$

Per una densità nominale del disco galattico di $\sim 1 \text{ atomo/cm}^3$ e $\lambda_{\text{esc}} \sim 10 \text{ g/cm}^2$ risulta $\tau_e \sim 6 \cdot 10^6$ anni, un tempo molto più grande di quello che sarebbe necessario per attraversare la Galassia se i RC si propagassero liberamente con velocità $v \sim c$ ($\tau \sim 3 \cdot 10^3 - 3 \cdot 10^4$ anni).

L'estrapolazione alle più alte energie della relazione precedente non è ovvia. Alle energie del ginocchio ($3 \cdot 10^{15} \text{ eV}$), risulterebbe infatti $\lambda_{\text{esc}} \sim 300 \text{ pc}$, corrispondente a circa un attraversamento del disco galattico, e ciò comporterebbe una notevole anisotropia, in contrasto con le risultanze sperimentali che mostrano un'ampiezza della prima armonica $\sim 0.2\%$ (vedi figura (1.2)). La relazione deve essere, quindi, modificata per tener conto di altri effetti quali la turbolenza nel mezzo interstellare ed eventuali processi di riaccelerazione [10] (una semplice modifica empirica valida sino alle energie del ginocchio e oltre è quello di aggiungere un termine costante).

Ciò che è importante osservare è che, in ogni caso, la frazione dei secondari decresce con l'energia cosicché alle energie maggiori del TeV la Radiazione Cosmica risulta costituita essenzialmente dei RC primari prodotti in sorgente. Dalla compilazione di B. Wiebel-Sooth et al. [11] risulta ad esempio a $E=1 \text{ TeV}$:

$$\text{flusso}(\text{Li-Be-B})/\text{flusso}(\text{totale}) \sim 1.26 \cdot 10^{-2}$$

$$\text{flusso}(\text{Mn-Cr-V})/\text{flusso}(\text{totale}) \sim 1.22 \cdot 10^{-2}$$

1.5 La rivelazione dei Raggi Cosmici: misure dirette ed indirette

Le misure dei RC si dividono in due categorie: dirette e indirette. Le prime corrispondono alla rivelazione diretta delle particelle primarie, e vanno quindi effettuate in alta quota, tramite satelliti e palloni aerostatici; l'intervallo di energia delle misure dirette si estende sino a ~ 100 TeV. Per energie superiori, dati i bassissimi i flussi delle particelle primarie, si rendono necessarie misure indirette al suolo con apparati di sciame (Detector-Array), telescopi Cerenkov o rivelatori di fluorescenza. Il basso flusso di particelle rende infatti necessaria una grande area di rivelazione per misure statisticamente significative.

I Detector-Array misurano le particelle degli sciami atmosferici estesi (EAS) che sono il risultato dell'interazione dei RC con l'atmosfera terrestre. Essi consistono in una griglia di rivelatori disposti secondo una certa geometria e permettono, tramite la determinazione di alcuni parametri dello sciame, di ricavare informazioni sulla particella primaria. Parametri fondamentali di un Detector-Array sono la risoluzione angolare e la soglia in energia. Hanno ampio campo di vista e possono operare indipendentemente dalle condizioni atmosferiche.

I telescopi Cerenkov si basano sulla rivelazione della luce Cerenkov prodotta da particelle dello sciame che attraversano il mezzo (l'aria) a velocità superiore a quella della luce in quel mezzo. Pur essendo degli strumenti molto potenti per l'individuazione di sorgenti puntiformi di fotoni, i telescopi Cerenkov hanno due grandi inconvenienti che sono il basso duty-cycle, ovvero la percentuale del tempo utile per la misura (i telescopi devono lavorare durante notti buie e senza luna) e la scarsa accettazione angolare, ovvero la porzione di cielo osservata. Per contro hanno un'ottima risoluzione angolare ed una bassa soglia in energia.

I rivelatori di fluorescenza ricostruiscono i parametri dello sciame misurando la luce isotropa emessa in atmosfera dagli atomi di azoto eccitati nel processo di formazione dello sciame stesso. Questa metodica è utilizzabile solo per sciami di elevatissima energia, $E > 10^{17}$ eV.

1.5 La γ – astronomia e la ricerca delle sorgenti

L'astronomia gamma è lo studio specifico della radiazione elettromagnetica primaria, nella forma di quelli che chiamiamo convenzionalmente “raggi gamma” nell'intervallo di energia che va dai MeV fino alle energie più alte. Come accennato in precedenza, i fotoni sono estremamente importanti ai fini della ricerca delle sorgenti dei RC per il fatto che possono percorrere distanze galattiche ed

intergalattiche senza essere deviati, pertanto la loro direzione indica direttamente la posizione della sorgente nel cielo.

Tradizionalmente si suole dividere lo spettro energetico dei “gamma” in varie regioni [12], come illustrato dalla tabella seguente:

Low/Medium Energy (LE/ME)	0.1 MeV -> 30 MeV
High Energy (HE)	30 MeV -> 100 GeV
Very High Energy (VHE)	100 GeV -> 100 TeV
Ultra High Energy (UHE)	> 100 TeV

La ragione questa classificazione non è legata alla fisica, piuttosto è convenzionale e legata al tipo di interazione considerata e alle sue modalità di rivelazione. Se nella regione sotto i 30 MeV il processo di interazione di riferimento è l’effetto Compton, quindi si opera con telescopi Compton su satellite, alle HE e VHE si fa ricorso al processo di creazione di coppia. Nel caso delle HE la coppia elettrone-positrone viene rivelata direttamente da un telescopio su satellite o pallone, mentre i rivelatori operanti in VHE rivelano la cascata elettromagnetica che la coppia genera in atmosfera, in questo caso le tecniche di rivelazione sono telescopi Cerenkov o i Detector Array: nella regione VHE l’ energia di riferimento è il TeV. Per energie superiori ai 100 TeV (UHE) la tecnica è quella dei Detector Array e dei rivelatori di fluorescenza ($> 10^{17}$ eV).

Essendo i gamma prodotti dal decadimento del π^0 , a sua volta prodotto nelle interazioni del primario con il materiale interstellare, ne consegue una forte correlazione tra lo spettro dei fotoni primari e quello dei RC: entrambi sono rappresentabili da una legge di potenza, tuttavia l’indice spettrale dei γ è leggermente diverso (circa 2.5).

Nonostante i problemi intrinseci dei rivelatori Cerenkov, è proprio grazie a telescopi di questo tipo che la γ -astronomia è diventata una scienza a pieno titolo, da quando il Whipple Observatory (Az, US) ha accertato con grande significatività statistica che la Crab Nebula è una sorgente stabile di raggi gamma [13]. La Crab Nebula è per la γ -astronomia quello che sono le “candele standard” per l’astrofisica, e infatti i flussi delle sorgenti note di raggi gamma vengono misurate in base alla frazione di flusso di essa. A partire dalla scoperta di sorgenti stabili l’interesse per questa disciplina è cresciuto moltissimo, e recentemente sono stati messi a punto molti esperimenti, tra cui il telescopio HESS in Namibia. Esso consiste in 4 telescopi Cerenkov che lavorano in modalità stereo, ovvero puntano tutti la stessa direzione. Grazie a questa tecnologia esso ha individuato una trentina di sorgenti, di questi circa una decina corrispondono a sorgenti non note dal punto di vista astrofisico [14]. La sensibilità di

questo telescopio arriva a un centesimo del flusso della Crab, e la sua risoluzione angolare è del decimo di grado a circa 250 GeV. Questo fa sì che esso sia attualmente tra gli strumenti più potenti per l'osservazione dei raggi gamma nella regione del TeV. Proprio le misure di HESS, mostrando per molte sorgenti uno spettro che si estende ben oltre le decine di TeV senza indizio di un qualche limite intrinseco, hanno indicato come estremamente interessante la regione fino alle centinaia di TeV. L'osservazione e l'identificazione di sciame di fotone a queste energie costituisce una sfida affascinante dal punto di vista scientifico e complessa sul fronte tecnico.

Capitolo 2

Gli sciami atmosferici estesi (EAS)

2.1 Introduzione

Lo studio dei RC ha fatto un grosso passo in avanti da quando si è capito con chiarezza che si potevano ricostruire le caratteristiche della particella primaria grazie alla determinazione di alcuni parametri degli EAS. Si è arrivati a questo grazie ai primi apparati di rivelazione al suolo, che hanno permesso di capire che il risultato dell'interazione delle particelle primarie con l'atmosfera è un disco di particelle, più o meno spesso e più o meno esteso, che evolve nelle dimensioni e nella struttura, che viaggia circa alla velocità della luce e che infine giunge a terra se l'energia del primario è sufficientemente elevata. Questo disco è formato dalle particelle secondarie prodotte nelle interazioni successive alla prima, in cui la particella primaria urta le molecole dell'atmosfera. Una volta prodotte, le particelle dello sciame perdono energia per due processi diversi: per bremsstrahlung e per collisione. La produzione di particelle secondarie, e quindi il processo di moltiplicazione, si arresta quando l'energia persa per bremsstrahlung uguaglia quella persa per collisione, (per elettroni in aria l'energia critica E_c è circa 80 MeV). Questa è la fase dello sviluppo dello sciame in cui il numero di particelle inizia a diminuire, poiché esse iniziano ad essere riassorbite. Fino a questo punto l'evoluzione dello sciame consiste nel progressivo aumento del numero di particelle (size), mentre queste procedono verso il suolo a circa la velocità della luce.

2.2 Sciami adronici e sciami elettromagnetici

Gli EAS possono essere classificati in due categorie: sciami adronici e sciami elettromagnetici. I primi sono prodotti da una particella primaria che solitamente è un protone, ma può essere anche un nucleo di elio o un nucleo più pesante, mentre i secondi sono prodotti da fotoni, elettroni o positroni. Gli sciami adronici e quelli elettromagnetici sono profondamente diversi tra di loro.

Le differenze principali fra i due tipi di sciame sono nella loro topologia e nella loro composizione.

Gli sciame elettromagnetici si sviluppano con grande regolarità sia longitudinalmente, quindi rispetto alla direzione di propagazione, sia lateralmente, ovvero nel piano ortogonale alla direzione di propagazione.

Gli sciame adronici invece, essendo mediati sia dall'interazione forte che da quella elettromagnetica (le cascate secondarie prodotte dai fotoni generati nel decadimento dei π_0) mostrano maggiori irregolarità sia longitudinali che trasversali. Inoltre essendo in questo caso il fenomeno moltiplicativo più rapido, data la maggiore sezione d'urto, anche lo sviluppo ed il successivo riassorbimento dello sciame avvengono più rapidamente. Questo spiega perché, a parità di energia e di quota di rivelazione, uno sciame elettromagnetico abbia maggiore densità di particelle secondarie, rispetto allo sciame adronico: infatti in quest'ultimo le particelle secondarie raggiungeranno più rapidamente l'energia critica, e quindi inizieranno ad essere riassorbite più rapidamente.

2.3 Lo sviluppo e la composizione

In entrambi i tipi di sciame le particelle secondarie saranno principalmente elettroni, positroni e fotoni. Tuttavia negli sciame adronici si avrà in aggiunta una consistente componente di muoni. La figura (2.1) mostra una schematizzazione di questi processi per un protone primario che urta anelasticamente un nucleo, dando origine ad una cascata a adronica.

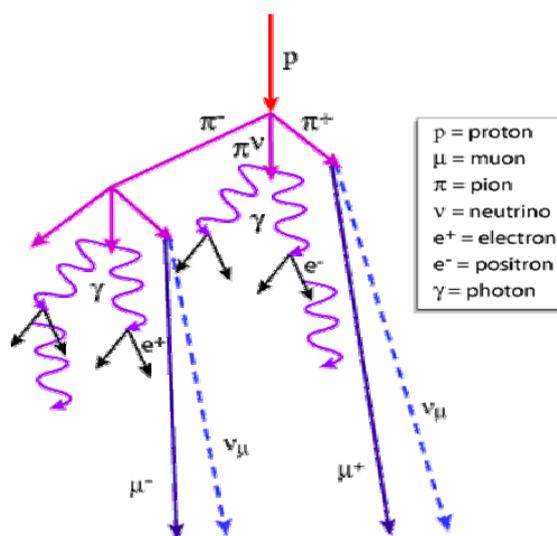


Fig. 2.1 Schematizzazione dell'interazione di un protone con un nucleo e conseguente cascata adronica. Si vede il diverso comportamento dei pioni neutri e quelli carichi.

La produzione continua di pioni indotta dall'interazione forte permette lo sviluppo dello sciame. Tuttavia mentre i pioni carichi decadono in muoni, quelli neutri decadono in coppie di fotoni, che a loro volta generano cascate elettromagnetiche.

Per illustrare lo sviluppo verticale degli sciami è necessario definire alcuni parametri, uno di questi è la “profondità atmosferica”. Questa grandezza rappresenta la quantità di materiale, quindi il possibile numero di interazioni, che un ipotetico primario incontrerebbe attraversando l’atmosfera. Diciamo che se la quota h è la quota sul livello del mare, allora la profondità atmosferica in questo punto è:

$$t(h) = \int_h^{\infty} \rho(h') dh' \quad [\text{g cm}^{-2}]$$

Dove $\rho(h')$ è la densità dell’aria in funzione della quota. Si può dimostrare che in un modello d’atmosfera isoterma ed omogenea la densità dell’aria varia in funzione della quota secondo una legge esponenziale così come mostrato nella relazione che segue:

$$\rho(h) = \rho_0 \exp\left(-\frac{h}{H}\right) \quad [\text{g cm}^{-3}]$$

In questa relazione ρ_0 e H sono rispettivamente la densità alla quota di riferimento h_0 , ed il parametro che modula la variazione della densità; in questo caso il calcolo di $t(h)$ può essere fatto per via esatta ed analitica. Purtroppo H dipende essa stessa dalla quota, allora bisogna procedere per integrazione numerica a partire dai valori tabulati di H . E’ chiaro che se la quota sul livello del mare è maggiore, la profondità atmosferica sarà minore e la particella avrà di conseguenza una minore probabilità di interagire.

Il parametro che esprime quantitativamente la probabilità di interagire è la lunghezza di radiazione (radiation length, r.l.). Essa è definita come la profondità atmosferica media che una particella deve attraversare per ridurre la sua energia di un fattore e , a causa del solo processo di bremsstrahlung. Per come è definita, questa grandezza dipende solo dal mezzo che la particella deve attraversare. Per elettroni in aria essa vale $37,1 \text{ g/cm}^2$. In generale si può definire il libero cammino medio, che dipende dal processo in considerazione e dal mezzo attraversato, definito come:

$$\lambda_i = \frac{A}{N_A \sigma_i} \quad [\text{g cm}^{-2}]$$

In questa relazione σ_i è la sezione d’urto del processo in considerazione, mentre A è il peso atomico del nucleo bersaglio, e N_A è il numero di Avogadro. Questa quantità rappresenta la profondità atmosferica media compresa fra un’interazione e la successiva. Nel caso di collisioni anelastiche di protoni in aria, questo parametro vale circa 70 g/cm^2 . La figura (2.2) illustra chiaramente lo sviluppo longitudinale degli sciami, in funzione della profondità atmosferica o della lunghezza di radiazione. Come si è detto, il numero di particelle per gli sciami adronici, a parità di energia e profondità atmosferica, è minore di quello degli sciami elettromagnetici [15].

Per definire quantitativamente lo sviluppo di uno sciame è utile introdurre un parametro che rappresenti la fase dell'evoluzione o sviluppo dello sciame. Nelle figure (2.2) si vede chiaramente che gli sciame hanno punto di massimo sviluppo (numero di particelle massimo), oltre il quale il numero di particelle inizia a diminuire fino a diventare zero se la profondità atmosferica lo consente. Tale parametro chiamato età è definito in modo da essere inferiore ad uno per sciame "giovani" non ancora giunti al massimo, da valere 1 in corrispondenza del massimo e da essere maggiore di uno per sciame "vecchi" per i quali il riassorbimento delle particelle secondarie prevale sulla loro moltiplicazione.

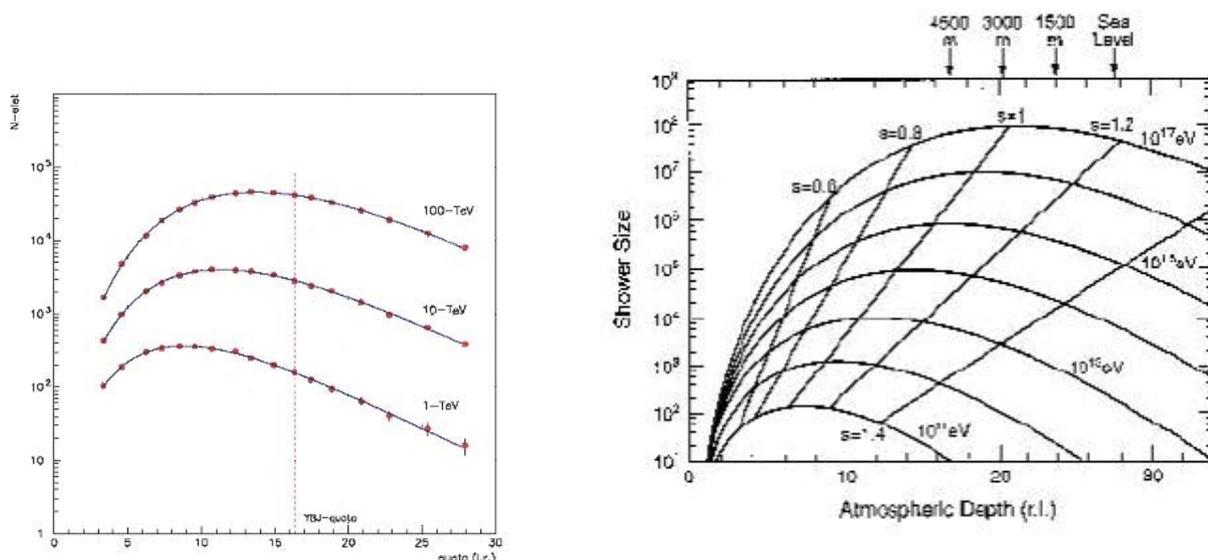


Fig. 2.2 A sinistra: sviluppo longitudinale di sciame adronici ad energia di 1, 10 e 100 TeV. In evidenza la quota di YBJ. A destra: sviluppo longitudinale di sciame elettromagnetici, con le rette di uguale s tracciate.

Come si vede, al livello del mare non arriva quasi niente degli sciame indotti dalle particelle ad energie più basse. Si comprende allora come, per abbassare la soglia in energia, ovvero il valore dell'energia minima rivelabile, sia necessario porre gli apparati di rivelazione in alta quota.

L'esperimento ARGO-YBJ, grazie all'alta quota (4300 m s.l.m., 606 g/cm², 16,1 r.l.) e alla geometria "a copertura integrale" ha ridotto sensibilmente la soglia in energia sino a qualche centinaio di GeV. Questo gli consente di operare nella regione dello spettro che va dai 300 GeV ai 50 TeV, regione ancora poco esplorata essendo compresa fra il limite superiore degli apparati di misura diretti e quello inferiore degli apparati al suolo.

Si può vedere inoltre che alla quota di rivelazione di ARGO si è in prossimità del massimo sviluppo di sciame ad energia più elevata (circa 100 TeV per gli adroni, circa 1 PeV per gli sciame elettromagnetici). Un'altra caratteristica importante degli sciame è la distribuzione laterale di particelle, ovvero la densità di particelle in funzione della distanza dall'asse. L'asse dello sciame corrisponde idealmente al prolungamento della traiettoria del primario, l'intersezione di questo asse con il piano di

rivelazione indica il punto ideale d'impatto del primario qualora non avesse interagito. Questo punto si definisce *core* dello sciame.

La figura (2.3) riporta distribuzioni laterali a varie energie e differenti primari, ricavata simulazioni.

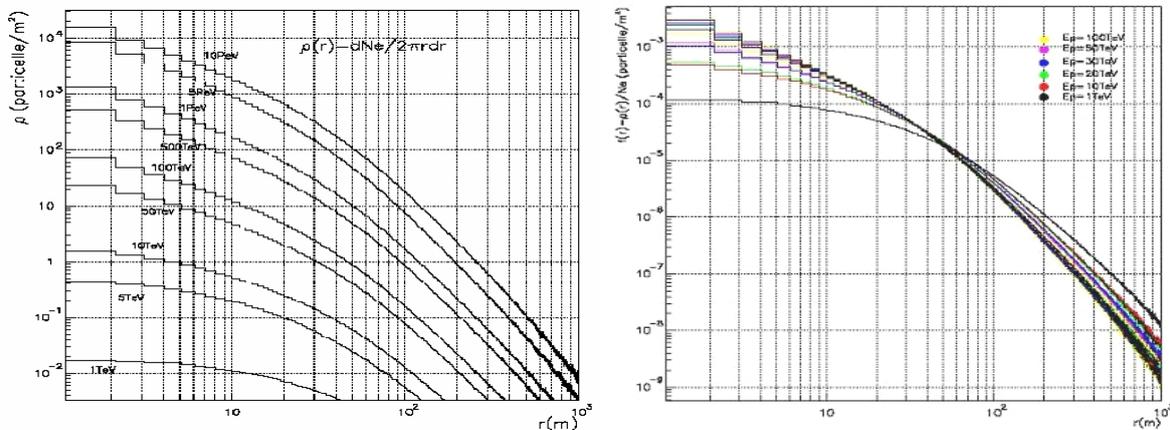


Fig. 2.3 Distribuzione laterale delle particelle negli sciame, a varie energie. A destra abbiamo la stessa distribuzione, ma normalizzata rispetto al numero totale di particelle nello sciame. Dati ottenuti con simulazioni.

La densità massima naturalmente è quella localizzata intorno al core. Rivelare eventi con il core all'interno dell'area del rivelazione è fondamentale per ridurre drasticamente l'errore sistematico nella ricostruzione dello sciame.

2.4 Sviluppo longitudinale e laterale e loro schematizzazione analitica

La rappresentazione puramente analitica dello sviluppo degli sciame atmosferici implica difficoltà legate alla soluzione di complicate equazioni di diffusione. Esistono varie approssimazioni che consentono di ricavare soluzioni analitiche del problema (per una trattazione approfondita si rimanda a [16]). Ovviamente va sempre verificata la rispondenza delle approssimazioni alla specifica situazione. Tipicamente le soluzioni analitiche si basano sulle cosiddette approssimazioni A e B. Nell'approssimazione A si trascurano i processi di ionizzazione e l'effetto Compton. La validità di questa approssimazione è buona quando $E \gg E_c$. Invece nell'approssimazione B, mentre si continua a trascurare l'effetto Compton, si includono le perdite di energia per ionizzazione, ipotizzando che queste valgano una quantità costante per ogni lunghezza di radiazione. Questa approssimazione vale bene per sciame con $E > E_c$. Queste due approssimazioni considerano lo sciame monodimensionale, e quindi non tengono in considerazione gli effetti legati allo scattering multiplo. Per questo motivo si introduce una ulteriore approssimazione, detta approssimazione C in si tiene in conto dello sviluppo

tridimensionale dello sciame, includendo lo scattering multiplo nel limite di piccoli angoli. Greisen ha ricavato una formula per lo sviluppo longitudinale dello sciame, nella forma seguente:

$$N_e(E_0, s, t) = \frac{0.31}{\sqrt{y}} e^{t(1-1.5 \ln(s))}$$

$$s = \frac{3t}{t + 2y}$$

$$y = \ln\left(\frac{E_0}{E_c}\right)$$

In queste relazioni t è la profondità atmosferica espressa in numero di lunghezze di radiazione mentre s è l'età dello sciame. La forma funzionale della distribuzione laterale delle particelle dello sciame è stata ricavata da Nishimura, Kamata e Greisen [17], risolvendo le equazioni in approssimazione C, ed ha la forma:

$$f\left(\frac{r}{r_M}, s, E_0\right) = C(s) \cdot \left(\frac{r}{r_M}\right)^{s-2} \cdot \left(\frac{r}{r_M} + 1\right)^{s-4.5}$$

$$C(s) = \frac{\Gamma(s) \cdot \Gamma(4.5 - 2s)}{\Gamma(4.5 - s)}$$

$$r_M = \frac{75.3}{P - 0.07} \cdot \left(\frac{T}{273}\right) \quad [\text{m}]$$

Qui $C(s)$ è una costante di normalizzazione, r_M è il “raggio di Moliere”, funzione della pressione P e dalla temperatura assoluta T , il cui valore indica la distanza dall'asse dello sciame entro cui è contenuta la maggior parte dell'informazione sullo sciame: in un cerchio di raggio $3.5 r_M$ centrato sull'asse risultano contenute il 99% delle particelle. Da una valutazione quantitativa di questo parametro emerge che tipicamente il raggio dello sciame è dell'ordine del centinaio di metri (a YBJ esso vale 133 m in un ampio range di energie). La NKG consente di ricavare i parametri dello sciame qualora si disponga di una misura della distribuzione laterale. Questo è precisamente quello di cui si occupa l'analisi dati svolta.

Capitolo 3

L'esperimento ARGO – YBJ

3.1 Introduzione

ARGO-YBJ [18] è un apparato di rivelazione al suolo di sciame atmosferici estesi, ed è situato nel Cosmic Ray Laboratory a YangBaJing in Tibet, alla quota di 4300 m (606 g/cm^2 , 16,1 r.l.).

L'alta quota e l'elevata area utile di rivelazione sono le caratteristiche principali che fanno di ARGO un sistema innovativo per la rivelazione di sciame. È stata la mitologia greca a suggerire il nome all'apparato: il nome ARGO-YBJ (acronimo di Astrophysical Radiation with Ground-based Observatory at YangBaJing) deriva dal mostro Argo "Panoptes", ovvero che vede tutto. Infatti il mostro Argo aveva 100 occhi e ne teneva 50 aperti durante il sonno, e da qui ricavava molta sua forza. Il rivelatore, che è costituito da un grandissimo numero di unità di rivelazione (gli occhi), è sempre in condizioni di rivelare, e non s'addormenta mai.

Scopo principale dell'esperimento ARGO-YBJ è la fisica degli sciame indotti da primari con energia compresa tra le centinaia GeV e i TeV. Corrispondentemente gli obiettivi di fisica sono:

- la astronomia dei raggi gamma sino ad energie di circa 10 TeV
- la fisica dei Gamma Ray Bursts
- la misura del rapporto antiprotone/protone alle energie del TeV
- la fisica del Sole e dell'Eliosfera

Le sue caratteristiche costruttive sono dettate dalla necessità di misurare da sciame con poche decine di particelle, con energie delle centinaia di GeV, fino a sciame ben formati e ben contenuti nel rivelatore, i TeV.

Le sue peculiarità sono:

- Alta quota, che permette di abbassare la soglia in energia fino alle centinaia di GeV
- La copertura totale, ovvero l'elevato rapporto tra superficie del rivelatore e area su cui insiste l'apparato. Per Argo questo rapporto vale circa 95%, negli apparati tradizionali, o a campionamento, questo rapporto è inferiore all'1%.
- Elevata risoluzione temporale (circa 1 ns) del rivelatore, che implica alta risoluzione angolare, fondamentale per la sensibilità dell'apparato a sorgenti puntiformi.

- Elevata granularità, ovvero densità di informazioni per unità di superficie, che insieme alla elevata risoluzione temporale forniscono una immagine tridimensionale dettagliata dello sciame mai raggiunta.

3.2 Descrizione dell'apparato

Il rivelatore ARGO prevede un'area continua, realizzata mediante RPC, di circa 5700 m² oltre ad un anello di guardia di circa 1500 m² che migliora le prestazioni del dispositivo aumentando l'area efficace con una migliore discriminazione degli eventi in prossimità del bordo o esterni (figura (3.1)). Esso opera in un range di energia compreso tra 100 GeV e 20 TeV, libero dalle limitazioni delle tecniche Cerenkov.

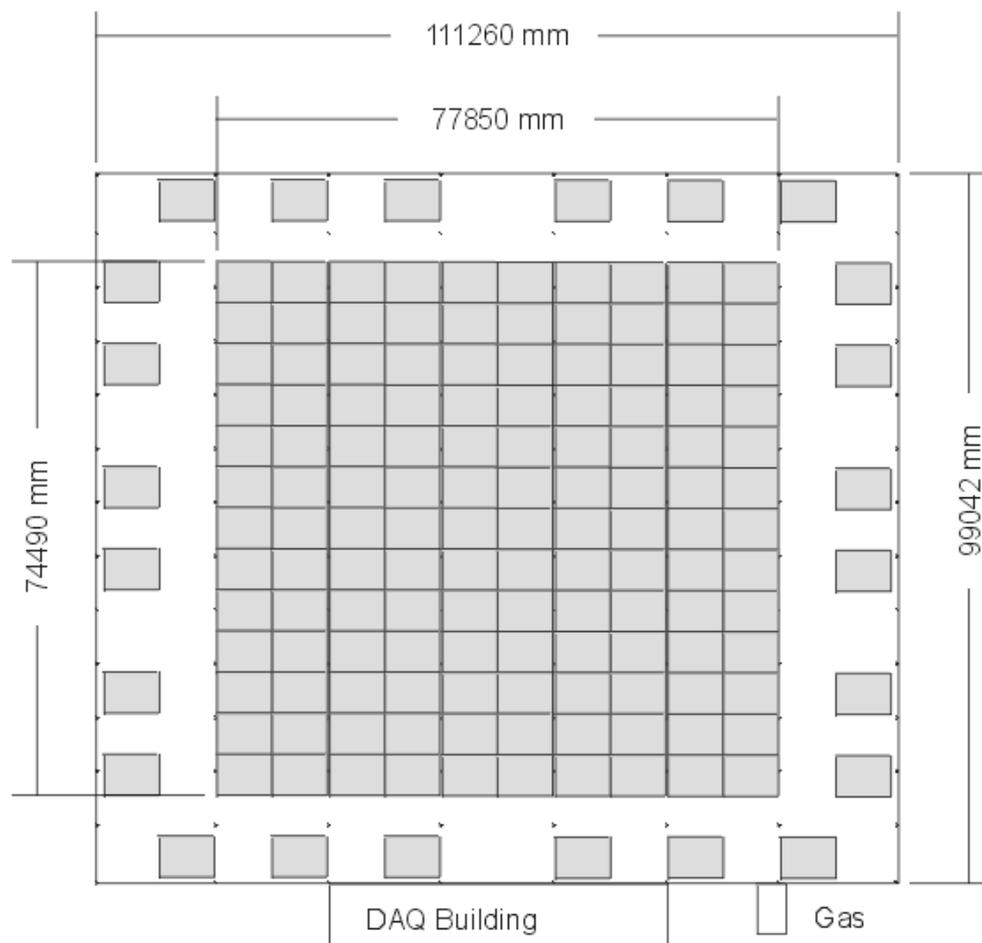


Figura 3.1 Il rivelatore visto dall'alto: l'area annerita è la sua parte attiva, i rettangoli elementari (*CLUSTER*) rappresentano una suddivisione logica del rivelatore.

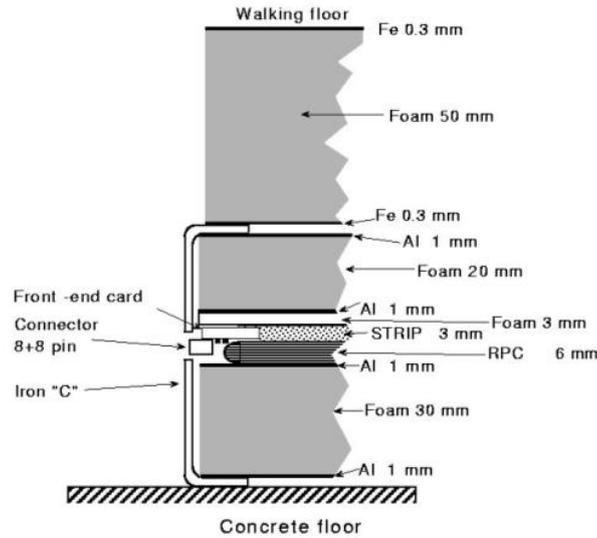


Figura 3.2 Una sezione del rivelatore

Il rivelatore è costituito da 1848 camere (RPC) di dimensioni $125 \times 280 \text{ cm}^2$. Ogni camera è ricoperta con 80 STRIP di dimensioni $6,7 \times 62 \text{ cm}^2$ realizzate in rame. Esse vengono collegate in OR a gruppi di 8 per formare così l'unità elementare del sistema di rivelazione: la PAD. Per questo si parla di PAD logiche e non fisiche.

Il sistema di *Read Out* è quindi costituito da STRIP e PAD. Le STRIP forniscono le coordinate spaziali (risoluzione $\Delta x = 3.35 \text{ cm}$, $\Delta y = 31 \text{ cm}$), mentre le PAD quella temporale. Gli RPC sono inseriti in una "scatola" di dimensioni $128 \times 282 \times 5 \text{ cm}^3$. Le scatole consistono in due strati di *foam* con lamine di alluminio incollate su entrambe le superfici; contengono oltre al rivelatore, le STRIP di lettura e l'elettronica di *Front End* (vedi figura (3.2)). 12 camere vengono assemblate in moduli denominati CLUSTER (figura 3.3); essi costituiscono l'unità elementare per il sistema di acquisizione dati (DAQ).

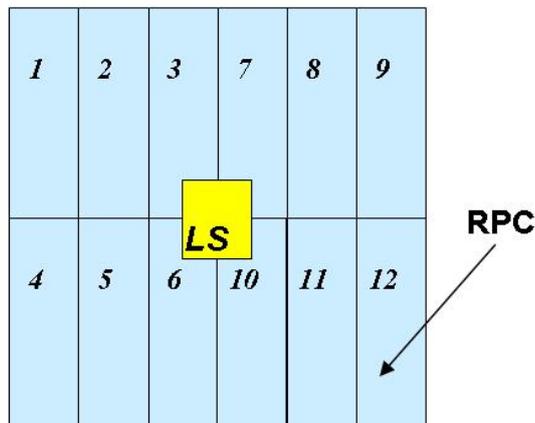


Figura 3.3 Struttura di un CLUSTER

L'RPC (*Resistive Plate Counter*) è un rivelatore a gas, con un'alta percentuale di area utile, con basso costo di realizzazione e che necessita di un'elettronica abbastanza semplice. Il basso costo risulta essere un pregio fondamentale qualora siano necessarie grandi aree di rivelazione come nel caso di ARGO.

Esso è costituito da due elettrodi piani e paralleli di bachelite, caratterizzati da un'elevata resistività ($> 5 \cdot 10^{11}$ Ohm cm), riempiti di gas all'interno e mantenuti ad una differenza di potenziale dell'ordine di svariati kV. Il meccanismo di funzionamento consiste nella ionizzazione del gas ad opera della particella incidente, nella moltiplicazione a valanga (a causa del forte campo elettrico) degli elettroni prodotti e nella loro raccolta per "drift" sull'anodo (figura 3.4).

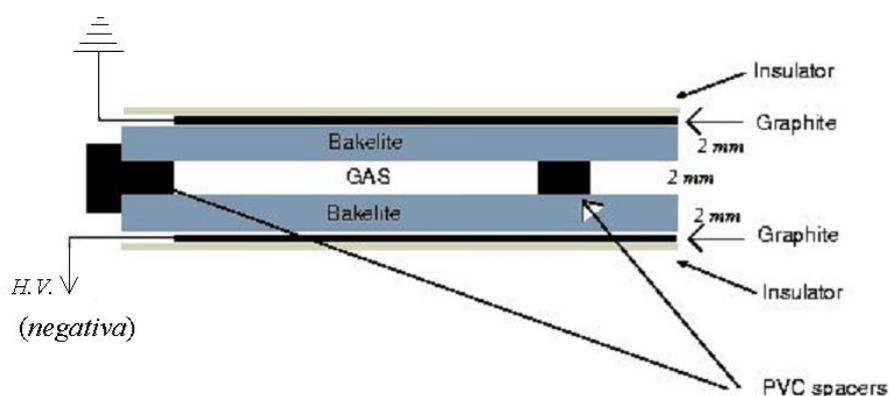


Figura 3.4 Schema semplificato di un RPC

L'utilizzazione degli elettrodi resistivi presenta due importanti vantaggi:

- fa sì che essi risultino trasparenti al transiente di corrente generato dalla valanga nel gas; in tal modo si può raccogliere il segnale induttivamente su elettrodi esterni (STRIP);
- il transiente di corrente non si propaga a tutta la superficie degli elettrodi stessi, ma rimane localizzato; ciò vuol dire che la parte del rivelatore non interessata dal fenomeno continua a rimanere sensibile.

L'efficienza di rivelazione è quindi buona anche in presenza di eventi ad alta densità di particelle, purché il campo elettrico sia sufficientemente elevato (circa 4 kV/mm). Utilizzando una gap tra i due elettrodi molto ridotta (2 mm) si hanno tempi di raccolta della carica prodotta dalla valanga estremamente brevi, in modo da ottenere una risoluzione temporale dell'ordine di 1 ns. La risoluzione spaziale, che dipende dalle dimensioni degli elettrodi di *pick up* e che nel caso di ARGO misurano 6,7 cm di larghezza e 62 cm di lunghezza, garantisce una precisa ricostruzione del fronte dello sciame e del numero di particelle che lo costituiscono.

Gli RPC sono utilizzati in regime di *streamer* con una differenza di potenziale tra gli elettrodi dell'ordine di 10 kV. Per garantire una stabilità dell'efficienza in funzione della differenza di potenziale vengono fatti funzionare nella regione identificata come di *plateau*. La semplicità di funzionamento dei rivelatori e il loro basso costo, rendono questo tipo di tecnologia particolarmente adatta ad un utilizzo per misure riguardanti sciami atmosferici.

La miscela di gas tradizionalmente utilizzata per il funzionamento in regime di *streamer* è costituita all'incirca dal 60% di Argon, il gas che contribuisce in modo predominante alla moltiplicazione, il 38% di Isobutano (C_4H_{10}) e il 2% di Tetrafluoroetano (Freon, $C_2H_2F_4$). Gli ultimi due costituiscono la componente di *quenching*.

Il *quencher* ha la funzione di contenere trasversalmente la scarica, sottraendo fotoni UV (Isobutano) ed elettroni (Freon) che altrimenti potrebbero produrre nuove valanghe, aumentando notevolmente le dimensioni della scarica stessa. Tuttavia questo tipo di miscela deve essere modificato nelle sue frazioni percentuali in condizioni di misura in alta quota, caratterizzate da pressione ridotta. Infatti, a causa dell'abbassamento della pressione, il gas è meno denso e il cammino libero medio di ionizzazione aumenta di un fattore P_0/P (con P pressione ad alta quota e P_0 , pari a 1 atm, quella al livello del mare), con conseguente perdita di efficienza. Dato che il numero medio di elettroni che si liberano per unità di cammino nella ionizzazione cresce con il peso molecolare del gas, questo problema può essere affrontato prendendo in considerazione miscele "pesanti": cioè con poco Argon e più ricche di Freon.

Il Freon, a causa della sua elevata elettronegatività, è però anche un gas che tende a contrastare lo sviluppo della scarica, la quale richiede quindi una tensione più alta per innescarsi. Questo aumento della tensione di lavoro è compensato in alta quota da un effetto contrario dovuto alla bassa pressione, cioè la crescita del coefficiente di moltiplicazione α con il rapporto E/P tra campo elettrico e pressione. In linea di principio è quindi necessario utilizzare miscele di gas che a livello del mare richiedono una tensione di lavoro molto alta per funzionare correttamente. Inoltre le miscele di gas sono da individuare possibilmente tra quelle non infiammabili (cioè contenenti una percentuale di Isobutano al di sotto del 10%) in modo da garantire all'esperimento anche un elevato grado di sicurezza. Sono state testate due miscele con alto contenuto di Freon del tipo Argon/Isobutano/Freon: 15/10/75 e 15/5/80 (in %); la seconda non è infiammabile. I risultati sperimentali, ottenuti con misure di laboratorio al livello del mare non mostrano evidenti differenze tra di loro.

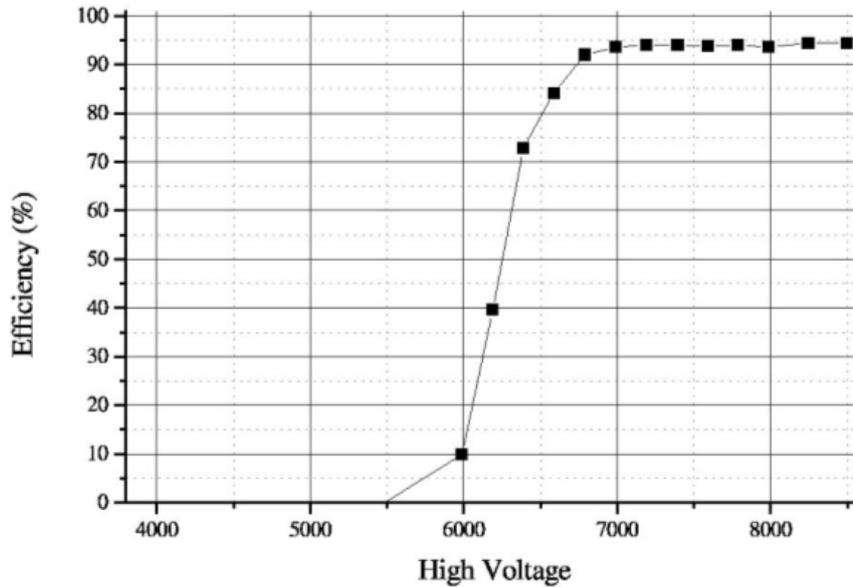


Figura 3.5 Curva di efficienza di un RPC

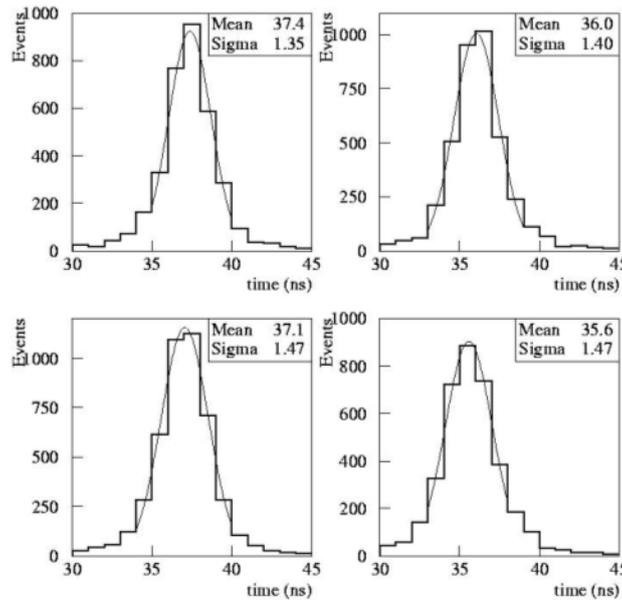


Figura 3.6 Risoluzione temporale

In figure (3.5) e (3.6) sono riportate rispettivamente l'efficienza e la risoluzione temporale misurate a Yangbajing con la prima di queste miscele. Si ha $\varepsilon \geq 95\%$ e $\sigma_t = 1.3$ ns, comprensiva di RPC ed elettronica di lettura, parametri che consentono di prevedere notevoli prestazioni del rivelatore nella ricostruzione degli sciami.

Si è visto che con gli RPC è possibile ottenere un *Read Out* "digitale" della posizione delle singole particelle, grazie all'utilizzo delle STRIP, cosa che non sarebbe stata possibile con gli scintillatori, dato che lavorano in modo analogico, integrando la carica di tutte le particelle che lo

attraversano. Quest'associazione STRIP-particella è valida fino ad un certo valore dell'energia dopo di che una STRIP potrebbe essere colpita da più particelle con la conseguente perdita di informazione. Per questo motivo ogni RPC è "letto" anche da due "Big Pad" (BP), ciascuna di dimensioni $140 \times 125 \text{ cm}^2$, che forniscono un segnale analogico proporzionale al numero di particelle che le attraversano. Dalle misure di ARGO-TEST risulta che fino a ~ 10 particelle cariche/m² la risposta digitale è sufficientemente lineare; per densità maggiori, che si realizzano intorno al "core" di sciame generati da fotoni (protoni) di energia $\geq 10 \text{ TeV}$ (20 TeV) risulta più vantaggioso per la ricostruzione della size N_e l'utilizzo dell'informazione analogica.

Con riferimento alla figura (3.4) il piano di STRIP per la lettura digitale è affacciato all'elettrodo posto a massa, il piano della BP è affacciato all'elettrodo posto a tensione negativa.

3.3 Il sistema di lettura analogica

Il sistema di acquisizione dati digitale di ARGO non consente di effettuare misure su sciame indotti da particelle primarie alle energie più elevate. Questo è dovuto alla densità di strip di lettura, di circa $23/\text{m}^2$, che non consente di effettuare buone misure di sciame adronici con energia superiore a circa 200 TeV, ovvero di sciame indotti da fotoni con energia superiore ai 10 TeV [10]. Questo fenomeno è ben illustrato dalla figura (3.7).

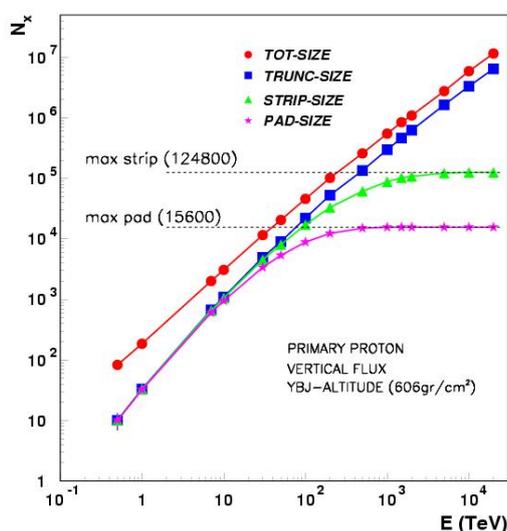


Fig. 3.7 Saturazione del sistema delle strip e delle pad. Sull'asse verticale vi è il numero di particelle dello sciame ("size") mentre sull'asse orizzontale abbiamo l'energia. La linea "Tot-size" rappresenta il numero vero di particelle nello sciame, mentre "Trunc-size" è il numero di particelle rivelate nell'ipotesi di efficienza perfetta dei rivelatori. Le altre due curve rappresentano la risposta delle strip e delle pad, che come si vede rispondono in maniera non lineare intorno ai 10-100 TeV. Tutti i dati sono ottenuti con simulazioni di sciame indotti da protoni provenienti dalla direzione verticale.

La lettura dei segnali delle BP permette di operare in un intervallo di energia maggiore, fino ai PeV, ampliando così la regione della astronomia gamma e aprendo nuovi canali di fisica, in particolare la fisica del “ginocchio” dello spettro e lo studio della composizione in quella regione.

Diamo ora una breve descrizione del funzionamento di questo sistema preposto alla raccolta dei segnali analogici. L’unità logica della raccolta dati analogica è il MINICRATE, che raccoglie i dati di due diversi Cluster. Il segnale raccolto dalla BP viene mandato in una scheda detta Charge Meter (CHM) a otto canali, progettata appositamente dal Servizio Elettronica e Rivelatori dell’INFN di Napoli. Ogni Cluster è servito da tre schede di questo tipo, per un totale di 24 canali provenienti da 12 RPC, un’ulteriore scheda detta Control-Board, digitalizza le informazioni e le invia alla Local Station la quale provvede a farle arrivare al DAQ dell’esperimento. Le schede CHM ricevono il segnale tramite un cavo coassiale di 12,5 m con un’attenuazione del 5% circa. Ogni linea è adattata su 50 Ω . Un segnale tipico in uscita dalla BP è positivo nel tempo di salita di circa 20-40 ns e cade in pochi microsecondi. Per questo motivo nell’elettronica delle CHM è stato implementato un sistema in grado di tagliare la lunga coda del segnale, tramite un amplificatore a frazione costante. Inoltre le schede hanno un limitatore che taglia i segnali con ampiezza maggiore di 40 V per evitare danni alle schede. Per quanto riguarda la lettura del segnale, il circuito è del tipo Peak&Hold, che insegue il massimo valore del segnale e lo mantiene per una durata di 2 μ s. Il segnale di trigger, generato localmente dalla Local Station e poi confermato dal DAQ centrale, fa sì che il valore del Peak&Hold venga digitalizzato da un ADC, e quindi trasmesso come una parola di 12 bit alla Local Station. Le schede CHM possono operare su scale di ampiezza del segnale diverse, e precisamente la scala 0-330 mV, 0-2.5 V e 0-20 V. La scelta della scala determina l’intervallo di energia in cui si intende operare. Così si userà la scala 0-330 mV per effettuare le misure in grado di raccordare le misure fatte col sistema digitale a quelle fatte con l’analogico, ovvero per energie che vanno fino alle centinaia di TeV. Per andare ad energie maggiori si userà una scala diversa. Con il sistema appena discusso, impostando il fondo scala a 20 V, si possono misurare di densità di particelle dell’ordine delle $10^4/m^2$.

Inizialmente sono stati strumentati con il sistema 4 Cluster contigui. Successivamente la zona di rivelazione è stata portata a 16 Cluster, ed attualmente sono in funzione 24 Cluster sui quali è operativa la lettura dei segnali di BP. Il presente lavoro di analisi dati riguarda i dati raccolti con 24 Cluster. L’area di rivelazione consiste in un rettangolo di 6x4 Cluster. Sono attive quindi $24 \times 24 = 576$ BP. L’avanzamento dell’implementazione è illustrato in figura (3.8).

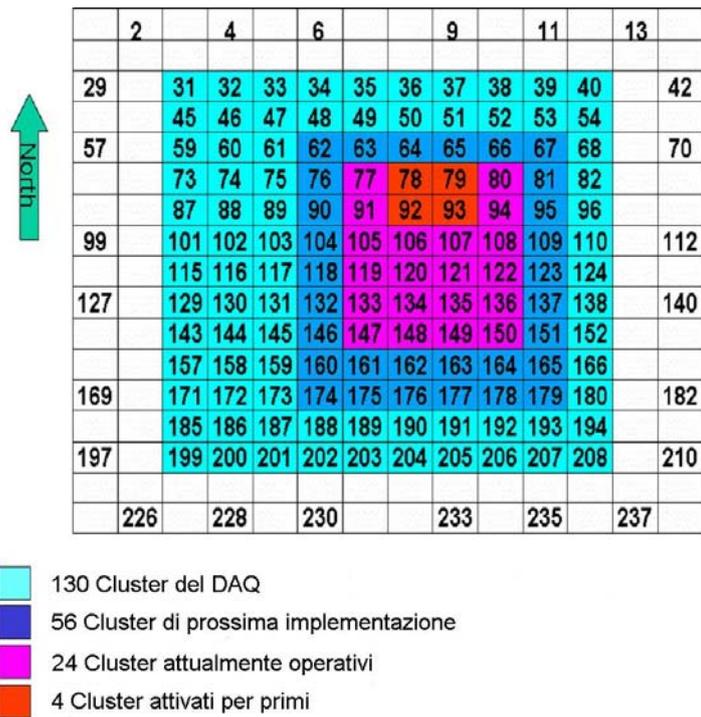


Fig. 3.8 Avanzamento dell'implementazione del sistema di lettura analogica. Sono mostrati tutti i 130 Cluster del DAQ, in cui è pienamente attivo il sistema digitale, e i Cluster in cui è attivo l'analogico.

Capitolo 4

L'analisi dati

4.1 Introduzione

In questo capitolo si descrive il lavoro svolto in questa tesi, ovvero la “misura” della distribuzione laterale di particelle negli EAS; sono stati utilizzando i primi dati forniti dal sistema di lettura analogico dell'esperimento ARGO-YBJ. I dati si riferiscono al periodo febbraio – aprile 2006 quando l'apparato consisteva di 104 Cluster di cui 24 ($\sim 1000 \text{ m}^2$) strumentati con il sistema di lettura analogico, configurato con la scala 0-20 V e con un trigger di 78 hit su Cluster. Le tappe dell'analisi sono state:

- selezionare un campione di eventi contenenti l'informazione sia digitale che analogica;
- applicare tagli finalizzati alla selezione di eventi con il core nella parte centrale del tappeto di rivelazione;
- calcolare la distribuzione laterale dei conteggi di ADC in funzione della distanza dal core e convertire questa distribuzione in numero di particelle (calibrazione);
- confrontare la distribuzione laterale così ottenuta con quella attesa da simulazioni Monte Carlo.

Prima di affrontare l'analisi vera e propria vengono passati in rassegna alcuni risultati ottenuti precedentemente a questo lavoro, che mostrano il corretto funzionamento del sistema di lettura analogico, e che giustificano l'approccio usato per la calibrazione, elemento chiave per la corretta gestione dell'informazione analogica.

4.2 Verifica del corretto funzionamento del sistema di lettura analogico

Nel novembre 2004 un sistema di lettura analogico in grado di leggere 4 Cluster (96 canali di BP) è stato implementato nel sistema di acquisizione generale che a quel tempo gestiva l'informazione digitale di 42 Cluster totali. I dati analogici di quel periodo sono stati presi con due scale, quella con fondo scala a 330 mV e quella con fondo scala a 2,5 V. Le informazioni, digitali e analogiche, derivanti da questi 4 Cluster sono state di notevole importanza per la verifica del corretto funzionamento del sistema di lettura analogico.

1. Innanzitutto è stato verificato che le due BP adiacenti hanno distribuzioni dei conteggi di ADC simili, ovvero evento per evento contano circa allo stesso modo: ciò significa che i dati raccolti sono

effettivamente dati fisici. Questa “correlazione” è evidenziata nella figura (4.1) dalla quale si evince che i conteggi di ADC di due BP vicine, le BP 17 e BP 18, tendono a disporsi lungo una retta.

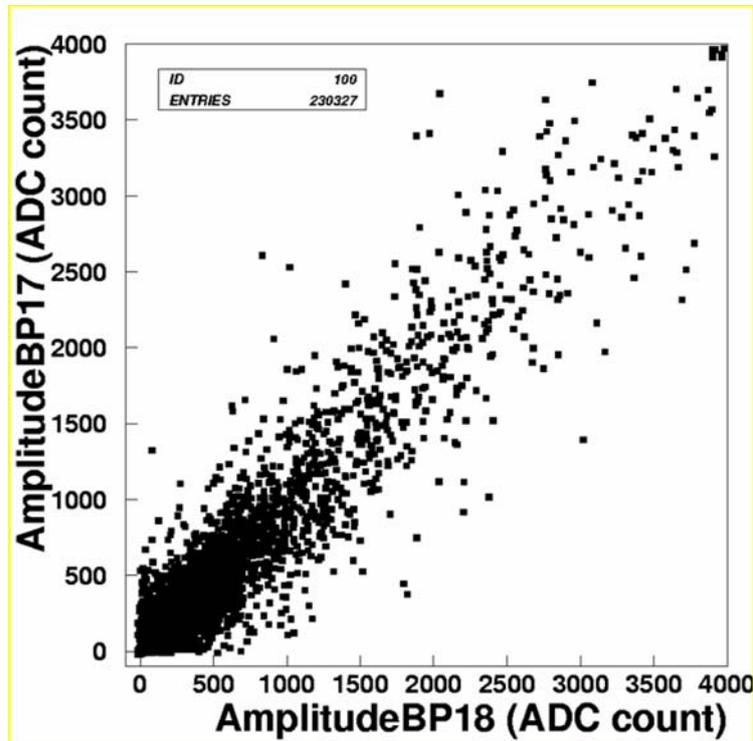


Fig 4.1 Ampiezza di ADC di due BP adiacenti.

2. Una ulteriore verifica del corretto funzionamento del sistema in esame proviene dal confronto, evento per evento, tra il numero di strip corrispondenti ad una BP e ampiezza di conteggi di ADC della BP stessa. Ci si aspetta che per bassi valori di conteggi di ADC (piccole densità) ci sia linearità tra numero di strip accese e conteggi di ADC, mentre all’aumentare dei conteggi di ADC (aumento di densità) tale linearità venga persa gradualmente fino a che non si raggiunge una situazione di saturazione corrispondente al fatto che il numero massimo di strip accese per una BP è 40 (~23 particelle/m²). Questo andamento è stato verificato per le varie BP ed è evidenziato in figura 4.2 per uno dei canali. In particolare nella parte sinistra della figura viene mostrato lo “scatter-plot” del numero di strip accese relative ad una BP rispetto ai conteggi di ADC, cui è sovrapposta la media in ogni intervallo di conteggi - quadratini in rosso-; in quella di destra si riporta inoltre l’ingrandimento della zona di linearità da cui è possibile estrarre l’informazione di conteggi/particella.

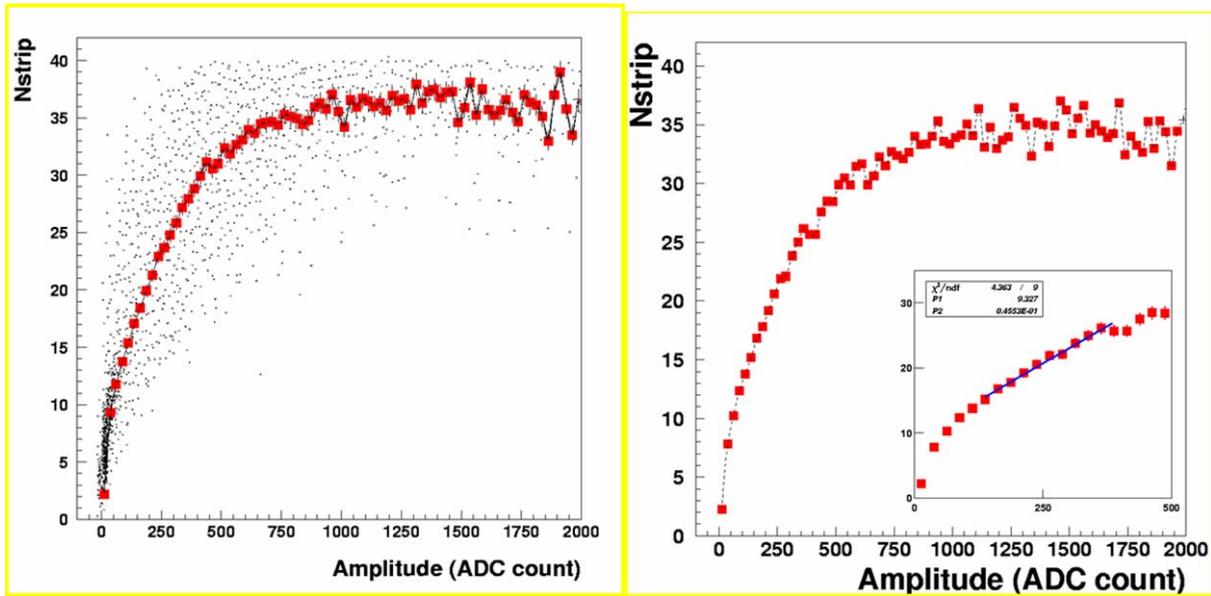


Fig 4.2 Numero di strip attive per una BP confrontato con l'ampiezza di ADC della stessa BP (scala a 330 mV). A sinistra sono riportati tutti i punti sperimentali e i punti della media in ogni intervallo di conteggi, mentre a destra si riporta solo la curva dei valori medi, con un ingrandimento della zona di linearità dalla quale è possibile estrarre il valore di conteggi/particella.

Inoltre da queste distribuzioni può essere estratta un'interessante informazione riguardante il rumore elettronico associato al sistema di lettura analogico. Poiché l'ampiezza di ADC è zero fino a quando $N_{strip} < 5$ si può stabilire che la soglia di rumore per la scala in esame corrisponde a circa 5 particelle/BP (~ 3 particelle/m²).

4.3 Il problema della calibrazione

Un momento fondamentale per l'analisi dei dati forniti dal sistema di lettura analogico, e la loro successiva interpretazione, è la "calibrazione", ovvero la procedura che permette il passaggio dagli spettri di conteggi di ADC agli spettri dell'ampiezza dei segnali di BP, quindi agli spettri di molteplicità di particelle per evento. Lo studio sulla calibrazione, di cui di seguito riportiamo i punti operativi fondamentali, è stato affrontato in una fase precedente a questo lavoro [11]. Innanzitutto è stata verificata, per ogni canale e per ogni scala, la linearità dell'elettronica, impulsando ogni canale della scheda CHM con segnali noti e registrando il relativo conteggio di ADC. Questa operazione produce una curva di taratura che riassume il comportamento del singolo canale. Nella figura (4.3) si riporta un esempio di curva di taratura per la scala 0-330 mV. Curve analoghe si osservano per tutti gli altri canali e per tutte le altre scale.

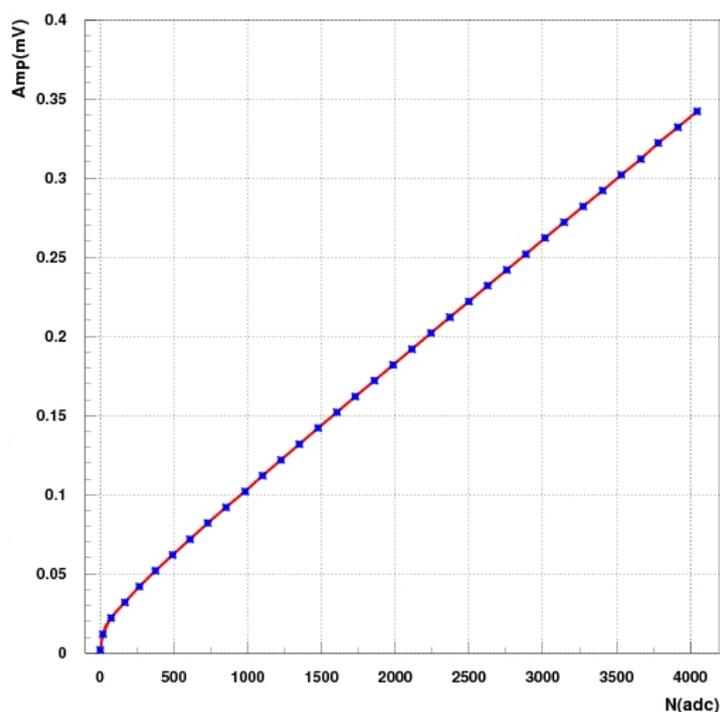


Fig 4. 3 Ampiezza del segnale in mV come funzione del conteggio di ADC per una singola BP (fs 330 mV).

Si vede che la risposta dell'elettronica è lineare eccetto che nella prima parte della curva. Dalle curve sperimentali così ottenute si ricava una forma funzionale, i cui parametri consentono la conversione degli spettri di conteggi di ADC a spettri di ampiezza dei segnali. Per passare, poi, dallo spettro di segnali in tensione a quello di particelle, la procedura più corretta da seguire sarebbe quella di studiare la risposta del rivelatore a diversi flussi noti di particelle. L'esperimento che fornisce questi dati non è ancora stato svolto, per cui si è pensato di calibrare il sistema in un modo diverso, che ora si descriverà. Si può assumere che lo spettro delle strip, e quello dei segnali delle BP, ottenuto sugli stessi eventi, forniscano la stessa informazione fisica. Allora la procedura di calibrazione si può effettuare imponendo che i due spettri forniscano lo stesso risultato fisico, ovvero che i due spettri si sovrappongano. Questo si fa riscaldando lo spettro di BP di un fattore, che rappresenta il numero di strip, quindi di particelle, che generano 1 mV di segnale. Questa procedura è illustrata nella figura (4.4).

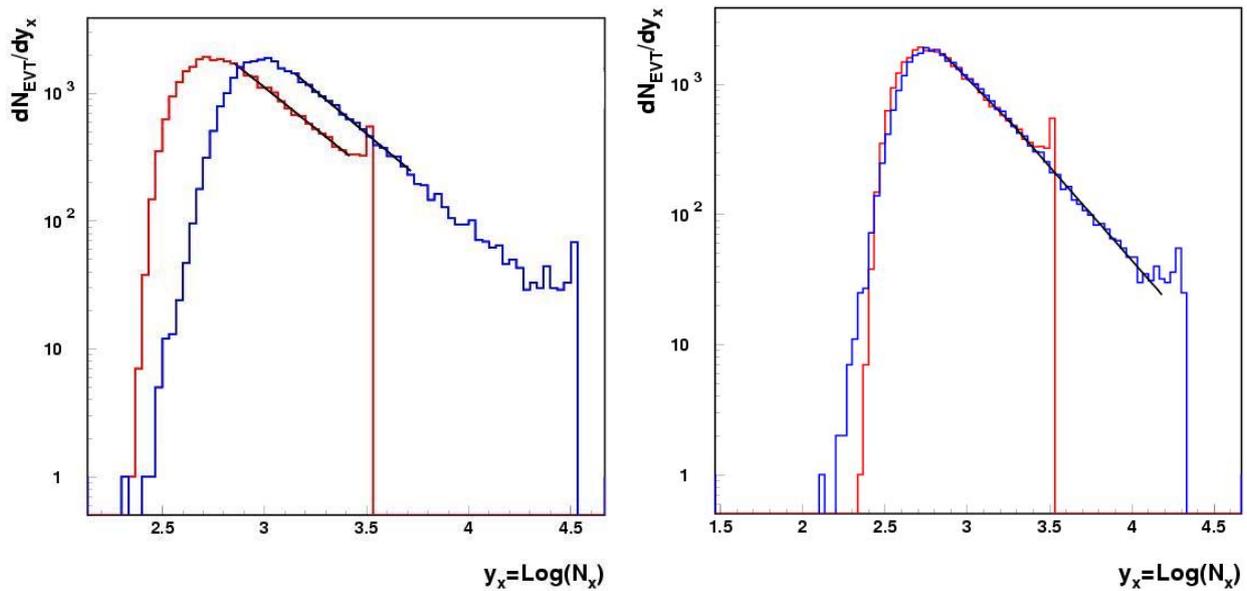


Fig. 4.4 Spettro digitale di strip e spettro analogico (fs 330 mV) di BP. A sinistra: prima dell'applicazione del fattore di conversione. A destra: dopo l'applicazione del fattore di conversione.

Nella parte sinistra si riporta lo spettro digitale di strip (curva rossa) confrontato con quello analogico di ampiezza di tensione. I due spettri hanno la stessa pendenza il che è fondamentale per la correttezza di questo procedimento. Nella parte destra si mostra invece che lo spettro analogico, scalato di un opportuno fattore (che è il fattore cercato), si sovrappone perfettamente allo spettro di strip, mostrandone la continuità. Il valore ottenuto con questa calibrazione, nella scala 0-330 mV, risulta 1,7 mV/particella. La stessa procedura utilizzata per le altre scale fornisce fattori di conversione leggermente più bassi. Poiché sui 4 Cluster sono stati presi dati sia con la scala a 330 mV che con quella a 2,5 V è possibile fare un confronto tra spettri di STRIP e spettri analogici calibrati con le due diverse scale. Il risultato mostra che esiste continuità negli spettri, ovvero che è effettivamente possibile espandere il range dinamico di misura della densità di particelle. Il risultato di questa sovrapposizione è mostrato in figura (4.5), ove si riporta lo spettro, digitale e analogico, di “particelle” moltiplicato per il numero di particelle alla 2,4. Questa rappresentazione risalta la regione di linearità e di sovrapposizione degli spettri rispetto alla rappresentazione usuale. Inoltre, nelle due scale superiori si riportano rispettivamente la densità media di particelle e l'energia media di protoni primari corrispondenti, quest'ultima ottenuta tramite simulazioni.

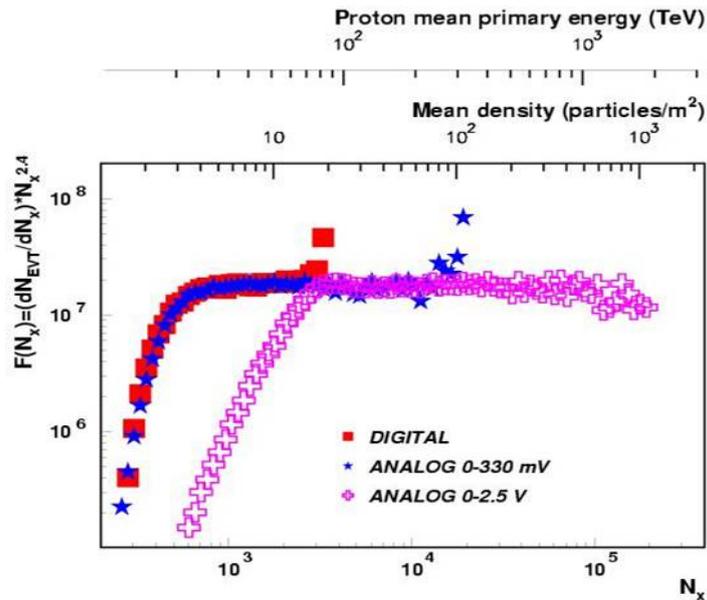


Fig. 4.5 Confronto fra spettro digitale di strip e spettri analogici di BP, relativi a 4 cluster, con le scale 0-330 mV e 2.5 V.

Il fattore di calibrazione trovato, circa 1,7 mV/particella, è prossimo a quello di riferimento, 2 mV/particella, trovato studiando la distribuzione dei segnali di BP al passaggio di una sola particella. La misura del fattore di conversione è stata fatta ponendo un piccolo telescopio verticale di muoni cosmici sopra una BP e leggendo l'ampiezza del segnale analogico in corrispondenza del passaggio di un muone nel telescopio.

La distribuzione di ampiezza ottenuta al livello del mare (Napoli) è mostrata nella figura (4.6).

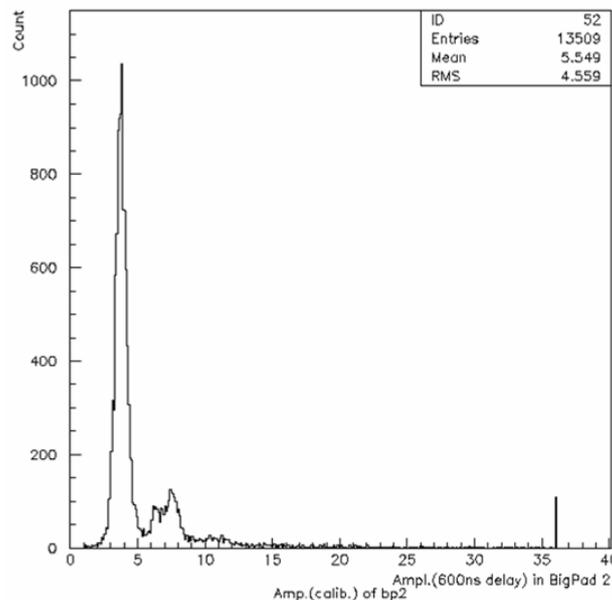


Fig 4.6 Distribuzione dell'ampiezza del segnale analogico di una BP al livello del mare. Sono chiaramente visibili i due picchi, corrispondenti al singolo e doppio streamer.

Come si vede dalla figura, la distribuzione ha un picco molto pronunciato intorno ai 3-4 mV, ed ha un secondo picco verso i 7-8 mV. Questo corrisponde ad avere uno streamer o un doppio streamer rispettivamente. Il valore medio della distribuzione, ~ 5 mV, è una stima del fattore di conversione. La stessa misura ripetuta a YBJ ha fornito il valore di circa 2 mV/particella. In tutto quello che segue si assume questo valore per convertire i conteggi di ADC in numero di particelle, va tuttavia osservato che questa procedura implica una risposta intrinsecamente lineare del rivelatore. In realtà ogni rivelatore mostra una saturazione della risposta in funzione della densità di particelle che lo investono, per l'RPC questo valore è stimato essere ben superiore alle 10^4 particelle/m².

4.4 La selezione degli eventi

Nei paragrafi precedenti è stato evidenziato come i primi dati forniti dal sistema di lettura analogica siano intrinsecamente consistenti, in accordo con quanto previsto. Inoltre, in attesa di una calibrazione assoluta su fascio, è stata descritta una procedura alternativa (relativa) basata sulla raccordabilità di informazione digitale e analogica.

Utilizzando questi risultati ci si propone di analizzare i dati raccolti dal sistema di lettura analogico su 24 cluster di 104 totali (vedi figura (3.8)) al fine di ottenere una prima misura fisicamente significativa: la distribuzione delle particelle secondarie di un sciame in funzione della distanza dal core. Questa distribuzione è di notevole interesse poiché rappresenta la fenomenologia dello “sviluppo laterale” di un EAS.

È da osservare che avendo settato la scala 0-20 V, la massima densità misurabile è di circa 10000 particelle/m² mentre la minima è fornita dal rumore elettronico. Quest'ultimo è stato stimato dalla distribuzione dei conteggi delle BP e risulta essere circa 10 conteggi di ADC (figura (4.7)).

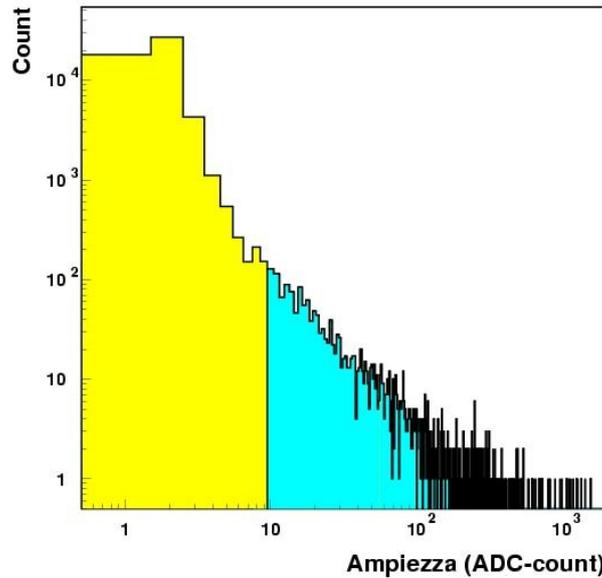


Fig. 4.7 Istogramma dei conteggi di ADC di tutte le BP. In giallo: zona di rumore. In azzurro: zona di linearità e di corretto funzionamento del sistema.

Questo corrisponde a ad una soglia di 1/400 del fondo scala ovvero segnali superiori a 40-50 mV per una densità minima di circa 30 particelle/m².

Per avere una stima delle energie a cui si sta lavorando, sono state condotte simulazioni atte a determinare la distribuzioni laterale in funzione dell'energia e della specie primaria. Invero utilizzando un codice che simula le cascate atmosferiche in aria, CORSIKA/QGSjet, è stato possibile interfacciarne l'uscita ad un programma che simula la risposta del rivelatore (supposto per semplicità continuo). L'algoritmo del programma calcola per ogni energia del primario scelto e alla quota di osservazione di YBJ, la distribuzione

$$\rho(r) = \frac{dN_e}{2\pi r dr} \quad [\text{particelle/m}^2]$$

ovvero la densità delle particelle secondarie prodotte all'interno di corone circolari equispaziate ed equidistanti dal core. Per questo calcolo sono stati simulati sciami verticali con il il core al centro del tappeto centrale. Le curve ottenute sono mostrate in figura (4.8). Ogni curva rappresenta la distribuzione di densità laterale ad un'energia fissata. Le energie sono 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10000 TeV rispettivamente dal basso verso l'alto. È interessante notare che a parità di energia la distribuzione laterale degli sciami prodotti da nuclei di ferro sono più piatte rispetto a quelle dei protoni. Questo è legato alla diversa età degli sciami.

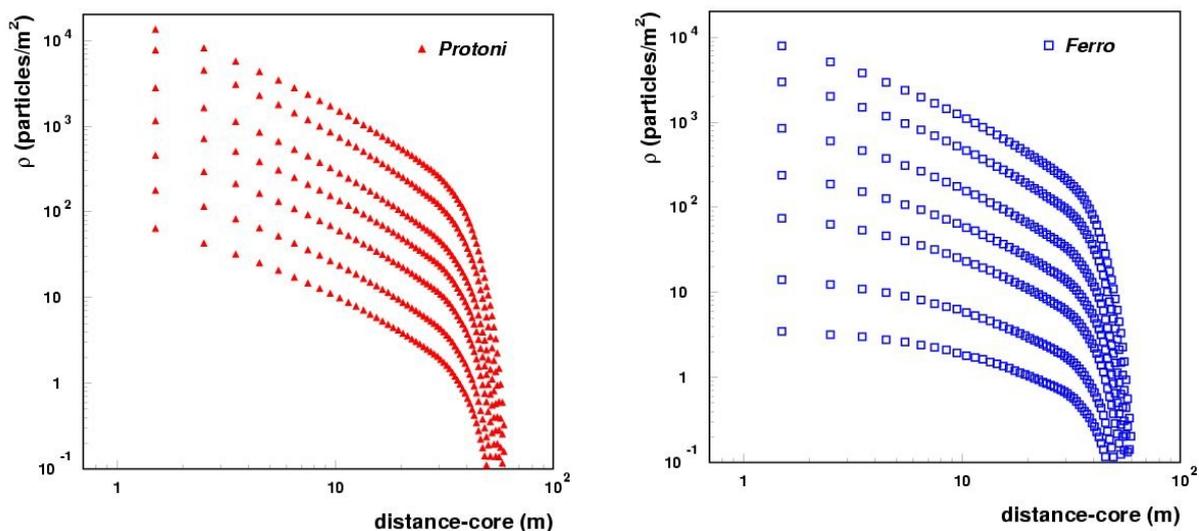


Fig. 4.8 Distribuzione laterale di particelle in sciame indotti da protoni (a sinistra) e da nuclei di ferro (a destra). Le distribuzioni sono tagliate in corrispondenza della dimensione del tappeto di rivelazione.

Osservando le curve di distribuzione laterale simulate le densità calcolate in precedenza corrispondono a energie primarie di

- 100 TeV - 3000 TeV nel caso di protoni
- 500 TeV - 10000 TeV nel caso di ferro
- 400 TeV - 5000 TeV nel caso di una combinazione al 50%

E' stato quindi selezionato il campione di eventi contenenti allo stesso tempo e l'informazione digitale e quella analogica. Poiché il trigger dell'esperimento era impostato su basse energie, intorno a 300 GeV, la frazione di questi eventi era inferiore a 1%. Accumulare una sufficiente statistica ha richiesto quindi una considerevole mole di lavoro.

Il passo successivo è consistito nel selezionare, tramite un algoritmo, una classe di eventi in "buona geometria" e cioè con il core in un'area centrale di 24 cluster (formata da 8 cluster) in modo da avere un'immagine dello sciame il più possibile simmetrica intorno al core. Dall'algoritmo sono stati selezionati eventi in base ai seguenti criteri:

- almeno una BP con ampiezza di ADC maggiore di dieci (in modo da rigettare il rumore elettronico);
- densità media dei conteggi all'interno dell'area fiduciale maggiore di quella esterna;
- cluster con il maggior conteggio di ADC all'interno dell'area fiduciale;
- posizione del core, ricostruita con il metodo del centro di massa pesato con l'ampiezza delle BP, all'interno dell'area fiduciale
- direzione ricostruita intorno alla verticale ($\theta < 20^\circ$)

La condizione di sciame verticale è necessario per una corretta valutazione della densità. La sequenza di tagli ha selezionato un campione di eventi molto significativi, e con le caratteristiche attese. La maggior parte degli eventi ha una BP con conteggio di ADC molto maggiore di tutte le altre, questo fa sì che il core ricostruito coincida sostanzialmente con la posizione di tale BP. Nella tabella seguente si quantifica l'incidenza che ciascun taglio nella sequenza ha comportato nella selezione del campione.

<i>Numero di eventi totali</i>	70383	100%
<i>Almeno una BP > 10</i>	10993	15,6%
<i>Densità interna > Densità esterna</i>	2012	2,9%
<i>Ampiezza Cluster max all'interno</i>	1978	2,8%
<i>Core all'interno</i>	1962	2,7%
<i>Angolo zenitale < 20°</i>	878	1,2%
<i>Ampiezza BP max > 50</i>	445	0,6%

Si vede chiaramente che il taglio più forte è quello che seleziona gli eventi che hanno almeno una BP con più di 10 conteggi di ADC, cosa attesa in considerazione del trigger operante.

4.5 Ricostruzione della distribuzione di densità laterale

Una volta selezionati gli eventi di interesse, si è proceduto alla ricostruzione della distribuzione laterale. Non avendo a disposizione l'energia dello sciame è stato adottato come parametro di classificazione il massimo dei conteggi delle BP. Si è operata una classificazione in tre range di conteggio di BP "massima": 50-500, 500-3000 e > 3000 che come già detto in un modello al 50% di protoni e 50% di nuclei di ferro corrispondono a selezionare energie intorno a 500, 1000, 5000 TeV rispettivamente. Nelle figure (4.9), (4.10) e (4.11) sono mostrate le "immagini" tridimensionali di alcuni eventi in ciascuna delle tre regioni. Lungo gli assi sono riportate rispettivamente la coordinata x e quella y della BP, contate a partire da una BP di riferimento che corrisponde allo spigolo in basso a sinistra dell'intero tappeto centrale; per i 24 Cluster in considerazione si hanno 24 BP lungo x e 24 BP lungo y.

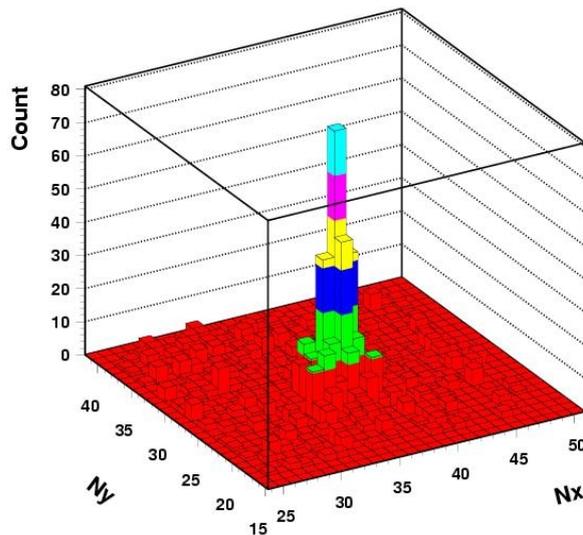
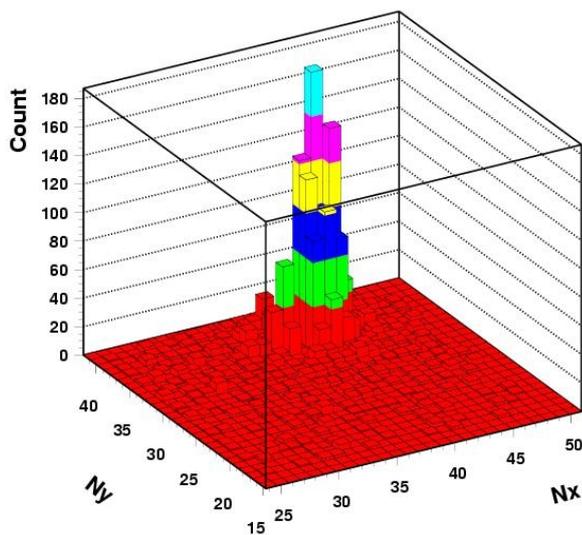


Fig. 4.9 Immagine 3D di due eventi nel range di conteggio massimo di ADC 50-500 (fs 20 V)

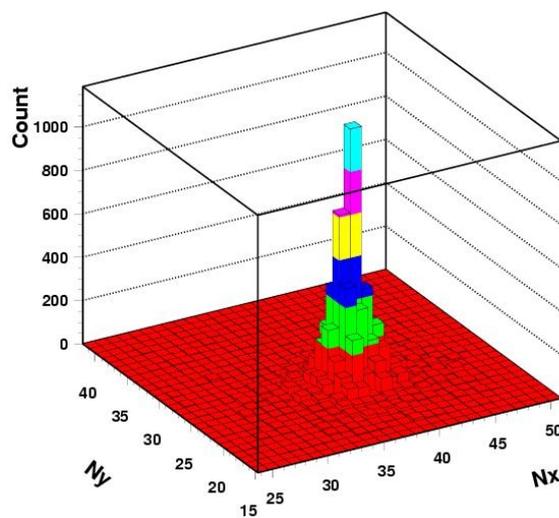
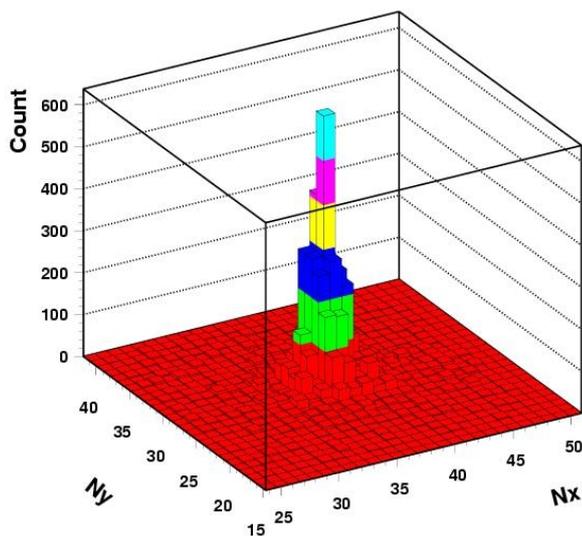


Fig. 4.10 Immagine 3D di due eventi nel range di conteggio della BP con massimo di ADC 500-3000 (fs 20 V)

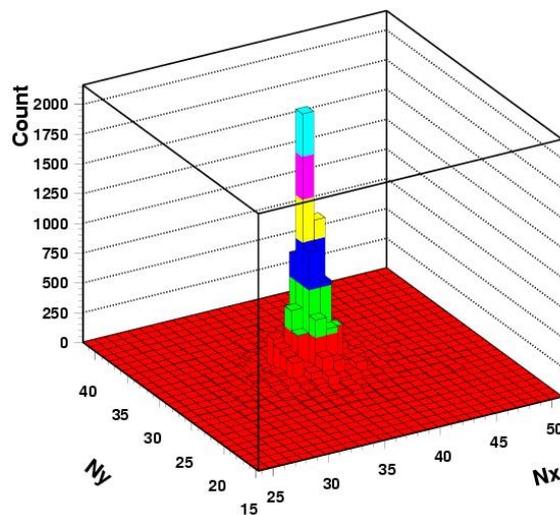
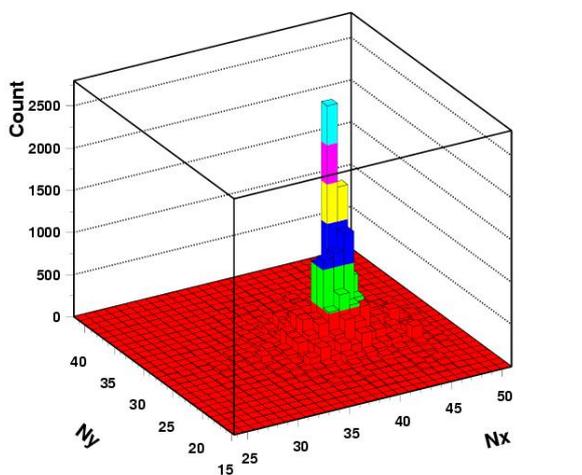


Fig. 4.11 Immagine 3D di due eventi nel range di conteggio massimo di ADC maggiore di 2500 (fs 20 V)

La distribuzione laterale per il singolo evento è stata valutata nel modo seguente. Si parte dalla BP su cui è stato ricostruito il core e si calcola su di essa la densità media di particelle, e questo sarà il primo punto del grafico. Poiché si vuole avere una distribuzione di densità media, si scelgono le BP equidistanti da quella su cui è ricostruito il core, ovvero quelle sulle diagonali rispetto ad esso. Per questo si prendono quattro BP alla volta e si calcola la densità media di particelle su di esse, prendendo come distanza quella tra il centro della BP considerata e il centro della BP del core. A questo punto nasce un problema a grandi distanze dal core. Data la asimmetria del punto di ricostruzione del core rispetto al tappeto di rivelazione, si ha che dopo una certa distanza non si avranno più quattro BP a disposizione ma di meno. Per questo motivo nell'algoritmo di ricostruzione si tiene conto di questo, e si fa in modo che gli zeri non vengano tenuti in conto nel computo della media. La geometria fa sì che la nostra distribuzione sia tagliata intorno ai 20 m (il "braccio di leva" a disposizione). Inoltre nel calcolo della media non si tiene conto delle BP che hanno un conteggio di ADC inferiore alla soglia di rumore di cui si è discusso in precedenza.

Vogliamo ora vedere l'accordo della distribuzione laterale ricavata con simulazioni Monte Carlo con la distribuzione ricavata sperimentalmente. Per fare questo confronto dobbiamo tenere conto del fatto che la distribuzione laterale dipende dalla specie nucleare del primario. La composizione percentuale dei RC, come si è detto nel capitolo 1, varia in funzione dell'energia. Alle energie in cui operiamo c'è una percentuale assai significativa di nuclei di pesanti, quindi il confronto andrebbe fatto pesando opportunamente i vari contributi. Tuttavia, seguendo un approccio puramente euristico ed invalso a queste energie, si assume una composizione a due componenti con stesso peso, ovvero 50% protoni e 50% ferro.

Il risultati della misura e delle simulazioni sono riportati in figura (4.12), dove i punti rappresentano le distribuzioni laterali misurate, le linee invece gli andamenti attesi da Monte Carlo secondo una composizione mista con eguale peso di protoni e nuclei di ferro. Si osserva che l'accordo fra dati e Monte Carlo è particolarmente buono per le energie più elevate. Questo risultato, mostrando il corretto funzionamento del sistema analogico di ARGO-YBJ, conferma le notevoli potenzialità dell'esperimento per la fisica del "ginocchio" e della composizione.

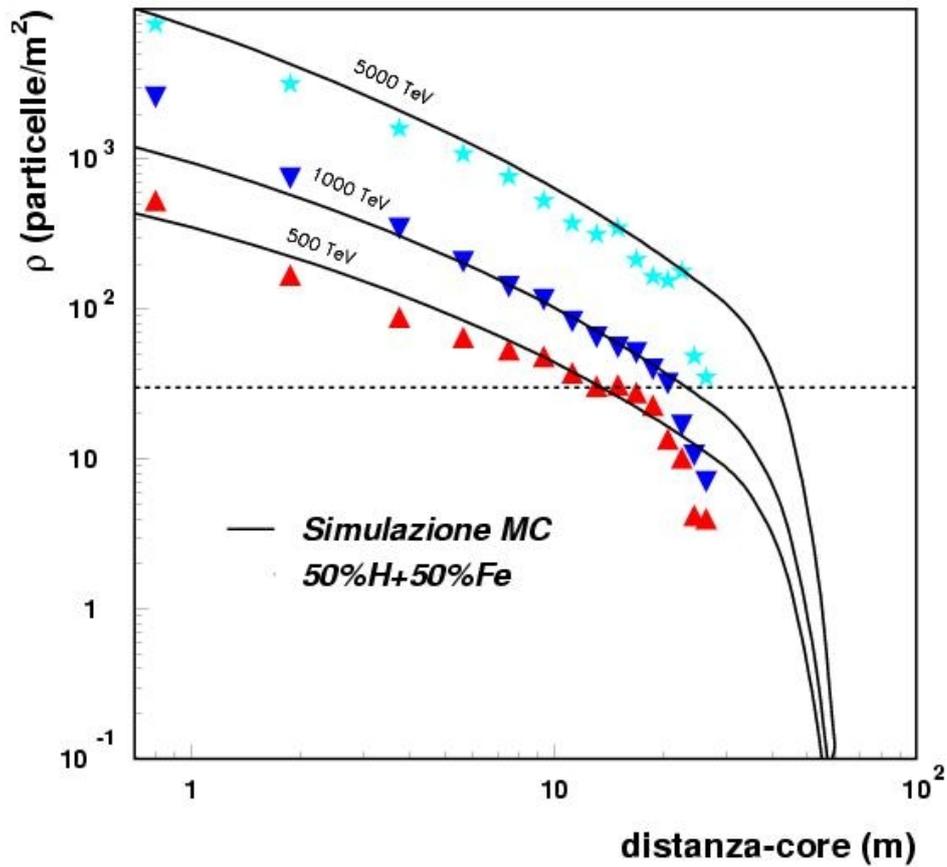


Fig 4.12 Densità laterale di particelle ricavata sperimentalmente (punti) e risultati di simulazioni Monte Carlo (linee) assumendo un modello di composizione con 50% protoni e 50% nuclei di ferro, le energie (Monte Carlo) sono riportate in corrispondenza di ciascuna linea. Gli asterischi si riferiscono all'intervallo di densità massima compreso tra 50-500 conteggi di ADC, i triangoli capovolti (blu) all'intervallo 500-3000 conteggi, in ultimo i triangoli (rossi) a > 3000 conteggi. La linea tratteggiata rappresenta il valore di soglia del sistema analogico impostato a 20 V di fondo scala.

Conclusioni

Nel presente lavoro è stata effettuata un'analisi dei primi dati raccolti nell'esperimento ARGO-YBJ con il sistema di lettura analogica.

Il sistema analogico è stato studiato al fine di capire quanto soddisfi le richieste di progetto, le quali sono riconducibili a linearità di risposta, capacità di misurare alte densità di particelle ($>1000/\text{m}^2$), possibilità di operare in diversi range di energia e raccordabilità delle informazioni appartenenti a range contigui.

Ne risulta che il sistema analogico implementato in ARGO-YBJ permette di misurare da poche decine di particelle/ m^2 fino a $10000/\text{m}^2$. Il sistema risulta stabile e di facile gestibilità.

Dal punto di vista della fisica, il sistema analogico permette di operare effettivamente nella regione del cosiddetto ginocchio dello spettro dei raggi cosmici e pertanto rende accessibile il tema della composizione ai PeV.

Il sistema analogico risulta inoltre particolarmente promettente in relazione allo studio degli sciami atmosferici, esso rende accessibile lo studio di regioni inesplorate di densità intorno al core. La localizzazione del core tramite il segnale della BigPad e le stesse misure intorno al core, aprono buone prospettive per la discriminazione γ /adroni, che è di fondamentale importanza per la γ -astronomia.

Tutto quanto conferma l'elevata potenzialità di ARGO sia nell'ambito della γ -astronomia, sia nello studio della composizione dei raggi cosmici, prima ed dopo il ginocchio dello spettro.

Bibliografia

- [1] P. Sokolsky, “*Introduction to Ultrahigh Energy Cosmic Ray Physics*”, Addison-Wesley, 1989.
- [2] T. K. Gaisser, “*Cosmic Rays and Particle Physics*”, Cambridge University Press, 1990.
- [3] V. L. Ginzburg, S. I. Syrovatskii “*The origin of Cosmic Rays (1969)*”, Oxford Pergamon Press, 1964.
- [4] T. K. Gaisser, “*Cosmic Rays and Particle Physics*”, Cambridge University Press, 1990.
- [5] H. G. Baring in GeV-TeV Gamma Ray Astrophysics Workshop (A.I.P. Conf. Proc. n.515, eds. B. L. Dingus, M. M. Salaman, D. B. Reida, 2000)
- [6] V. L. Ginzburg, S. I. Syrovatskii “*The origin of Cosmic Rays (1969)*”, Oxford Pergamon Press, 1964.
- [7] C. J. Cesarsky, Proc. 20th ICRC Mosca 1987, 8, 87.
- [8] M. Garcia-Munoz et al., ApJ.Suppl. (1987) 64, 269.
- [9] M. Gupta e W. R. Webber, ApJ.Suppl. (1989) 340, 1124.
- [10] U. Heinbach and M. Simon, ApJ (1995) 441, 209.
- [11] B. Wiebel Sooth et al., Astron.Astrophys. (1998), 330, 389.
- [12] T. C. Weekes, *Very High Energy Gamma-Ray Astronomy*, IoP Publishing, 2003.
- [13] P. T. Reynolds et al., *The Astrophysical Journal* 404 (1993) 218.
- [14] http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/public/HESS_catalog.htm
- [15] P. K. F. Greider, “*Cosmic Rays at Earth*”, Elsevier, 2001.
- [16] B. Rossi, *High-Energy Particles*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1952.
- [17] K. Kamata, J. Nishimura, *Suppl. Prog. Theor. Phys.* 6 (1948) 93.
- [18] M. Abbrescia et al., *Astroparticle Physics with ARGO*, Proposal, 1996.
C. Bacci et al., *The ARGO-YBJ Project*, Addendum to the proposal, 1998.
- [19] M. Iacovacci, T. Di Girolamo, G. Di Sciascio, S. Mastroianni, L. Saggese, *Sensitivity of ARGO-YBJ to different composition models in the energy range 10 ÷ 500 TeV*, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 136 (2004) 376–383.
- [20] P. Creti, Z. Y. Feng, M. Iacovacci, L. Saggese, P. R. Shen, X. D. Sheng, *The RPC charge read-out in the ARGO-YBJ experiment*, 29th ICRC Pune (2005) 00, 101-104.

Ringraziamenti

Un grazie particolare a chiunque mi conosce e chiunque parteciperà ai festeggiamenti di questo lieto evento.

Ringrazio i miei genitori, per il loro appoggio costante e per avermi trasmesso la cultura scientifica ed avermi dato le risorse più varie.

Grazie e complimenti a mia sorella Margherita, che mi appoggia anche da Milano, dove in questi giorni sta vivendo dei momenti meravigliosi.

Desidero ringraziare i miei relatori, prof. Michele Iacovacci e prof. Benedetto D'Ettorre Piazzoli, per la fiducia in me che hanno mostrato durante questo lavoro e durante il tirocinio.

Ringraziamenti particolari vanno ai ragazzi dell'auletta del dipartimento, luogo in cui fugare ogni stress e ogni malinconia, luogo in cui studiare, luogo in cui parlare, luogo in cui scherzare e giocare.

Ringrazio il folto gruppo di palermitani che accorreranno in massa per festeggiarmi. Non c'è modo di comunicare quanto affetto provo per loro.

Ringrazio mio cugino Tullio, da cui ho ricevuto stima e fiducia, ed è un compagno ideale per le discussioni più interessanti.

I ringraziamenti più vivi a coloro che hanno reso possibile tutto questo, da Newton a Faraday, a Bruno Rossi, a Lenz (per il suo fondamentale segno meno, che ci salva dall'abisso della non conservazione dell'energia), Maxwell, Boltzmann (per averci chiarito il significato oscuro dell'entropia), a tutti coloro che hanno partecipato al congresso di Solvay (per averci dato da riflettere per almeno altri duecento anni).

Non so chi ringraziare per avermi salvato la vita quasi un anno fa, quando mi è caduto il balcone in testa.

Ringrazio il prof. Catalanotti, per le sue correzioni alla tesi, e per i fondamentali caffè che hanno reso possibile questo lavoro.

I ringraziamenti più sentiti vanno a Luigi, Elvira e Stefano, che mi hanno appoggiato, sostenuto, aiutato, e mi hanno dato la possibilità di lavorare in un ambiente rilassato e sereno. In particolare grazie a Luigi, senza cui questo lavoro non sarebbe stato mai possibile, e Elvira, per avermi fatto conoscere l'esperimento ARGON.

Infine grazie a tutti i saggi orientali, che mi mostrano la strada, anche quando è oscura e perigliosa.

“Non cercare di seguire le orme dei saggi. Cerca ciò che essi cercavano.”

Basho