



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI LECCE

Facoltà di Scienze MM. FF. NN.

Tesi di Laurea in Fisica

**Studio della Radiazione Cosmica con il
Rivelatore ARGO-YBJ in Tibet**

Relatore:

Dott. Ivan De Mitri

Laureanda:

Silvia Vittoria Colona

Correlatori:

Dott. Carla Bleve

Dott. Antonio Surdo

Anno Accademico 2005-2006

*La più bella e profonda emozione che possiamo provare
è il senso del mistero.
L'uomo per il quale non è più familiare il senso del mistero,
che ha perso la facoltà di meravigliarsi e
umiliarsi di fronte alla creazione
è un uomo morto.*

Albert Einstein

ai miei genitori:
i miei punti di riferimento.

Indice

Introduzione	V
1 La Radiazione Cosmica di Alta Energia: Caratteristiche Fisiche e Metodi Sperimentali.	1
1.1 Composizione chimica	1
1.2 Spettro energetico	3
1.2.1 L'effetto GZK	4
1.3 Confinamento magnetico	5
1.4 Origine dei raggi cosmici	6
1.5 Meccanismi di accelerazione	7
1.5.1 Meccanismo di Fermi del secondo ordine	7
1.5.2 Meccanismo di Fermi del primo ordine	8
1.6 Siti di accelerazione	11
1.6.1 Resti di Supernova	12
1.6.2 Pulsar	13
1.6.3 Nuclei Galattici Attivi	13
1.6.4 Gamma Ray Burst	14
1.7 Sciami Atmosferici Estesi	15
1.7.1 Sviluppo longitudinale	17
1.7.2 Distribuzione laterale	17
1.8 Metodi di rivelazione dei Raggi Cosmici	19
1.8.1 Apparati su Satellite	19
1.8.2 Telescopi Čerenkov	21
1.8.3 Apparati di Sciame	22
1.8.4 Apparati di Sciame di nuova generazione	23
2 L'esperimento ARGO-YBJ	26
2.1 Principali Obiettivi	27
2.2 Struttura dell'apparato	27
2.2.1 Le camere ad elettrodi piani resistivi	28
2.2.2 Convertitore in piombo	30
2.2.3 Sistema di controllo del rivelatore	31
2.2.4 La logica del Trigger e il Sistema di acquisizione dati	31

2.3	Stato dell'esperimento	33
2.4	Primi risultati	33
3	Sviluppo di un Metodo di Analisi e Selezione dei Dati: IDAS	42
3.1	Medea++	42
3.2	IDAS: uno strumento per la selezione dei dati per l'esperimento ARGO-YBJ	46
3.2.1	Informazioni provenienti dal DAQ	47
3.2.2	Informazioni provenienti dal DCM	47
3.2.3	Informazioni provenienti dalla ricostruzione dei dati	49
3.2.4	Modalità di Selezione dei Dati	51
3.3	Un'applicazione di IDAS: Analisi dei run prodotti con 42 cluster	51
3.3.1	Configurazione del Detector e Soglia di Trigger	52
3.3.2	Durata dei Run e Rate di Trigger	53
3.3.3	Prestazioni degli RPC	55
3.3.4	Distribuzione di Azimuth	57
3.4	Conclusioni	60
4	Analisi degli Sciami Atmosferici Estesi e Misura delle Sezioni d'urto protone-nucleo e protone-nucleone	62
4.1	Caratteristiche del campione di dati analizzato	63
4.2	Campione di eventi simulati	67
4.2.1	Simulazione dello sviluppo di sciami nell'atmosfera: CORSIKA	67
4.2.2	Simulazione della risposta del detector: ARGOG	68
4.3	Confronto e Analisi tra i campioni di dati reali e simulati	69
4.3.1	Quota di prima interazione	70
4.3.2	Correlazione tra il parametro di conicità e l'altezza di produzione dello sciame	71
4.4	Misura delle Sezioni d'urto protone-nucleo e protone- nucleone	75
	Conclusioni	83
	Bibliografia	85
	Ringraziamenti	89

Introduzione

Lo studio riguardante l'origine e la propagazione della radiazione cosmica gioca un ruolo fondamentale in molte delle tematiche affrontate nel campo della fisica astroparticellare.

L'interesse è sia di tipo astrofisico sia di fisica delle particelle elementari, in quanto coinvolge problemi strettamente connessi alla formulazione di modelli sulla struttura e sull'evoluzione dell'universo e consente di indagare gli oggetti terminali dell'evoluzione stellare, localizzando possibili siti di accelerazione e le sorgenti di energia. Inoltre, permette di studiare i processi fondamentali, quali meccanismi di accelerazione e interazione, che intervengono tra particelle elementari, ad energie non raggiungibili con gli acceleratori.

I raggi cosmici (RC) sono particelle e nuclei atomici di altissima energia che, muovendosi a velocità prossime a quella della luce, colpiscono la Terra da ogni direzione.

Durante il percorso dalla sorgente alla Terra, l'energia e la loro direzione, rispetto alla traiettoria originale, possono variare per effetto dei campi magnetici galattici e dell'interazione con il mezzo interstellare.

Una misura diretta del flusso di raggi cosmici è possibile solo fino ad energie di $\sim 10^{13-14}$ eV, tramite l'utilizzo di palloni e satelliti. Ad energie superiori, le misure devono basarsi, necessariamente, sullo studio degli sciami prodotti nelle interazioni dei primari con l'atmosfera terrestre, mediante apparati operanti al suolo.

Tra questi, l'esperimento ARGO-YBJ, il laboratorio di raggi cosmici ad alta quota sito a YangBaJing, si rivela particolarmente adatto a compiere osservazioni dettagliate della radiazione cosmica isotropa, con un approccio innovativo, dovuto alla sua natura di apparato di rivelazione di sciami estremamente compatto.

Gli obiettivi fisici principali di ARGO-YBJ sono la misura dello spettro e della composizione dei RC in un intervallo di energia compreso tra circa $1 \div 500$ TeV e la ricerca di sorgenti gamma nel range di energia compreso tra 300 GeV e 100 TeV. L'elevato *duty cycle* dell'apparato consente di osservare con continuità le sorgenti nella banda di declinazione compresa tra $-10^\circ \leq \delta \leq 70^\circ$ e di rivelare fenomeni transienti, quali GRB o *solar flares*.

Nell'ambito di un'esperimento quale ARGO-YBJ, lo sviluppo di una metodologia standard di analisi e selezione dei dati riveste un ruolo chiave per il raggiungimento degli obiettivi fisici preposti. Vengono, infatti, registrati alcune migliaia di eventi al secondo, dovuti a RC.

Lo studio effettuato nella prima parte di questo lavoro di tesi, risponde all'esigenza di avere uno strumento che sia in grado di fare un controllo incrociato sia delle performance del detector sia delle quantità misurate, offrendo l'opportunità di verificare la qualità dei dati che si ha a disposizione, in maniera veloce ed efficiente, in modo tale da poterli selezionare per le proprie esigenze di analisi e/o per poter intervenire sul detector per risolvere eventuali problemi.

Una delle caratteristiche che contraddistinguono ARGO-YBJ è la capacità di rivelare un'ampia frazione delle particelle di uno sciame, fornendone un'accurata immagine spazio-temporale.

Questo permette di condurre studi topologici sulla distribuzione delle particelle sul piano del rivelatore, fondamentali per avere una dettagliata ricostruzione delle proprietà dello sciame atmosferico e della direzione di provenienza della particella che lo ha generato.

La seconda parte del lavoro svolto è finalizzata ad un'analisi dell'interazione protone-nucleo e alla misura della sezione d'urto ad altissima energia.

La tesi è articolata come segue:

- Nel primo capitolo si tratteranno le linee essenziali riguardanti le caratteristiche che contraddistinguono i RC, con una breve digressione sui meccanismi di accelerazione e i possibili siti di produzione. In seguito, si discuterà della formazione degli sciami atmosferici estesi e si presenterà una panoramica dei principali metodi di rivelazione con una rassegna degli apparati che hanno dato dei contributi decisivi alla ricerca.
- Nel secondo capitolo si tratteranno, in dettaglio, le caratteristiche e i principali obiettivi dell'esperimento ARGO-YBJ, in particolare se ne discuteranno la struttura e l'architettura software elaborata per l'acquisizione degli eventi dovuti a RC. Si darà, anche, una breve panoramica dei primi risultati fisici, in relazione all'acquisizione ottenuta nel periodo da dicembre 2004 a luglio 2005.
- Nel terzo capitolo si tratterà la procedura software (IDAS) sviluppata nell'ambito di questo lavoro di tesi per il controllo e la gestione dell'enorme quantità di dati messi a disposizione da ARGO-YBJ. Questa offre la possibilità di escludere dalla propria analisi quei run

affetti da problemi e si rivela uno strumento estremamente utile nella fase attuale, in cui si sta assemblando la parte restante del detector, per monitorarne l'operatività e le performance.

- Nel quarto capitolo si presenterà la seconda parte del lavoro di tesi sviluppato. Sfruttando la fine granularità con cui l'immagine spazio-temporale è "fotografata" da ARGO-YBJ, si troverà la correlazione tra i parametri di ricostruzione dello sciame e alcune grandezze fisiche che lo caratterizzano, in particolare la conicità. Sarà, infine, sviluppato un metodo per la misura della sezione d'urto protone-nucleo e protone-nucleone in un intervallo di energia non ancora accessibile per misure fatte agli acceleratori e se ne illustreranno i risultati.

Capitolo 1

La Radiazione Cosmica di Alta Energia: Caratteristiche Fisiche e Metodi Sperimentali.

Lo studio della natura, origine e propagazione dei Raggi Cosmici (RC) riveste un ruolo centrale in molte delle problematiche nella fisica astroparticellare. L'osservazione dei Raggi Cosmici fornisce dati sperimentali che permettono di formulare modelli sulla struttura e sull'evoluzione dell'universo e consente di indagare gli oggetti terminali dell'evoluzione stellare (supernovae, stelle di neutroni isolate o in sistemi binari, buchi neri).

Inoltre, negli urti ad altissima energia dei RC con i nuclei dell'atmosfera, si possono studiare le interazioni tra particelle elementari ad energie non raggiungibili con gli acceleratori.

Una misura diretta del flusso di raggi cosmici è possibile solo fino ad energie di $\sim 10^{13-14}$ eV, tramite l'utilizzo di palloni e satelliti. Ad energie superiori, le misure devono basarsi, necessariamente, sullo studio degli sciami prodotti nelle interazioni dei primari con l'atmosfera terrestre, mediante apparati operanti al suolo.

1.1 Composizione chimica

La Terra viene investita da un flusso di particelle cariche e neutre di alta energia di origine extraterrestre a cui si dà il nome di Raggi Cosmici.

Da misure condotte al di sopra dell'atmosfera terrestre, si ha che, per energie inferiori al GeV, la radiazione cosmica è composta [1] per il 90% da protoni, per il 9% da particelle alpha, mentre il restante 1% è costituito da nuclei pesanti come carbonio, ferro e da particelle quali gamma, neutrini, elettroni e positroni.

Nel tragitto percorso dalla sorgente alla terra, la radiazione cosmica subisce delle variazioni riguardanti l'abbondanza e la tipologia dei suoi elementi, dovute, principalmente, alle interazioni con il mezzo interstellare (ISM).

Elementi quali idrogeno, elio, ferro e carbonio sono detti *primari*, perchè prodotti in grande quantità direttamente nelle sorgenti, altri come ad esempio boro, potassio, titanio e vanadio sono detti *secondari* in quanto prodotti, per spallazione degli elementi pesanti nel mezzo interstellare, da raggi cosmici primari.

Il grafico in figura 1.1 mostra le abbondanze relative nei RC e nel Sistema Solare, in funzione del numero atomico Z , misurate a terra e normalizzate al silicio.

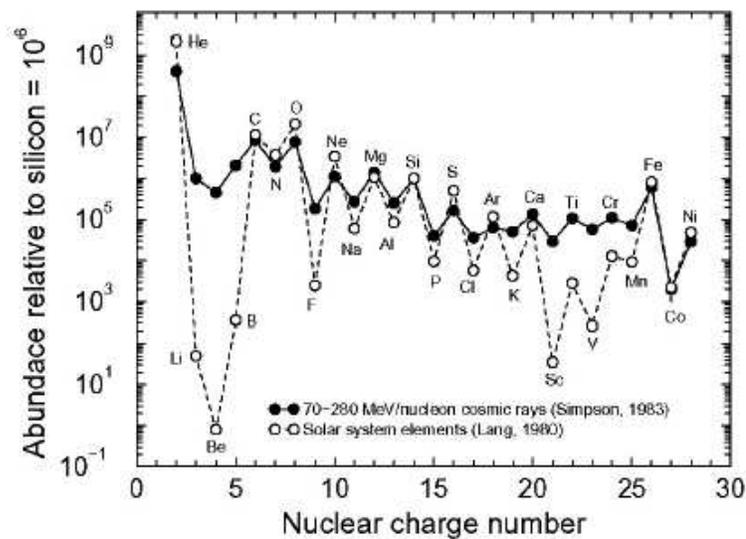


Figura 1.1: *Composizione chimica dei Raggi Cosmici, cerchi scuri, confrontata con quella del Sistema Solare, cerchi vuoti, normalizzata al Si, in funzione del numero atomico Z .*

Tali misure sono possibili per energie inferiori a ~ 10 GeV. Per energie superiori è più difficile ottenere informazioni sulla composizione chimica.

Si osserva una grande differenza [2] nelle abbondanze relative di Li, Be e B. La loro abbondanza nel Sistema Solare è ridotta perché, essendo nuclei leggeri, sono praticamente assenti nella fase finale della nucleosintesi di una stella: in questi processi, infatti, vengono usati come combustibile elementi via via più pesanti.

Nei RC questi elementi sono molto abbondanti perché si formano ogni volta che un nucleo pesante, come l'ossigeno o il carbonio, interagisce con il mezzo

interstellare andando a formare un nucleo più leggero. Allo stesso modo Sc, Ti e V sono prodotti dalla spallazione di Si e Fe.

1.2 Spettro energetico

Nel grafico riportato in figura 1.2, è visibile l'andamento del flusso (isotropo) differenziale dei RC, ovvero del numero di RC rivelati per unità di energia, di tempo, di area e di angolo solido.

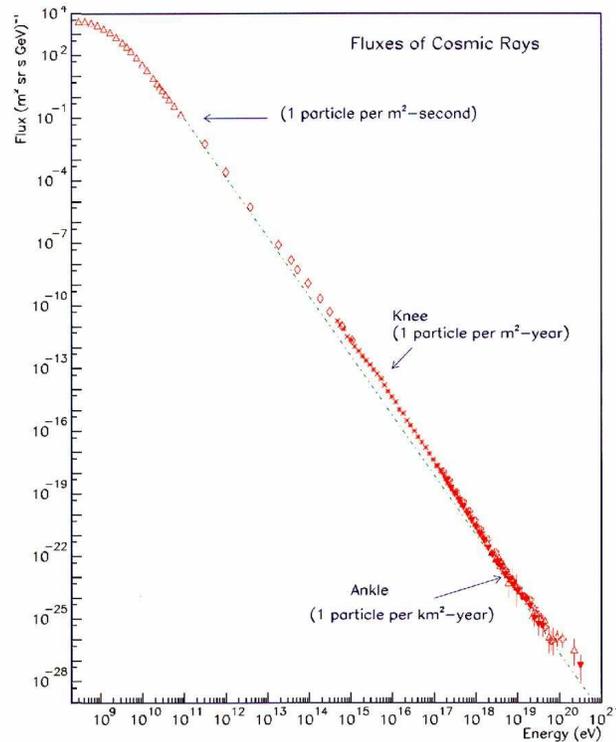


Figura 1.2: *Spettro Energetico differenziale dei RC misurato a terra.*

Tale spettro ricopre un ampio range di energia ed è rappresentato in modo soddisfacente da una legge a potenza.

Per energie minori di 1 GeV/nucleone, lo spettro energetico rivela un'attenuazione rispetto all'andamento che si ha ad energie più elevate.

Questo fenomeno, conosciuto come "*modulazione solare*" del flusso di RC, si spiega col fatto che le particelle della radiazione cosmica si propagano attraverso il mezzo interstellare prima di raggiungere la terra, per cui il loro moto può essere influenzato dal vento solare.

Ciò fa sì che il flusso di RC di bassa energia ($E \lesssim 1$ GeV) sia massimo nei periodi di bassa attività solare, mentre subisce una forte diminuzione nei periodi di massima attività. Proprio per questo si parla di modulazione solare [1].

Per E maggiori di circa 1 GeV/nucleone, lo spettro energetico ha un andamento a legge di potenza:

$$dN(E) = kE^{-\gamma}dE \quad (1.1)$$

con un indice spettrale γ , che non è costante nell'intero range energetico [3]. In figura 1.2 è visibile un primo tratto dello spettro, fino a 10^{15} eV, in cui si ha un $\gamma \simeq 2.7$.

Tra i $10^{15} \div 10^{16}$ eV si nota un cambiamento nella pendenza noto come “*ginocchio*”, dopo il quale l'indice spettrale diventa $\simeq 3.0$. Esso coincide con una forte diminuzione del flusso che, a quelle energie, è dell'ordine di una particella per m^2 all'anno.

Il flusso di RC di energia inferiore a $10^{15} \div 10^{16}$ eV può essere spiegato con un'origine puramente galattica: l'energia del ginocchio rappresenta l'energia limite per la quale una particella resta confinata all'interno della galassia, secondo il modello di confinamento sviluppato brevemente nel paragrafo successivo.

Nell'ultima parte dello spettro, per $E \sim 10^{19}$ eV, vi è la zona nota come “*caviglia*” caratterizzata da un flusso di 1 particella per km^2 all'anno, qui non è ancora possibile avere una chiara valutazione dell'indice spettrale, a causa dello scarso numero di dati.

1.2.1 L'effetto GZK

La brusca riduzione del flusso che si presenta ad energie $E \sim 10^{18 \div 20}$ eV, che è stata osservata nei dati dell'esperimento HiRes [4], ma non in quelli di AGASA [5] (figura 1.3), è nota come effetto GZK, e fu ipotizzata negli anni '60 indipendentemente da Greisen [6] e da due ricercatori russi: Zatsepin e Kuzmin [7].

Il concetto alla base di tale effetto è molto semplice: un protone o un fotone che viaggia nel cosmo può interagire con la radiazione cosmica di fondo e in questo modo creare nuove particelle.

In seguito alle interazioni i RC primari (p e/o γ) terminano la loro propagazione e il loro flusso si riduce.

Queste reazioni sono processi a soglia, cioè non possono avvenire se la particella incidente non ha l'energia sufficiente.

Le interazioni tra raggi cosmici e il fondo cosmico (γ_b) sono le seguenti:

$$\gamma + \gamma_b \rightarrow Z^0 \rightarrow e^+ + e^- \quad (1.2)$$

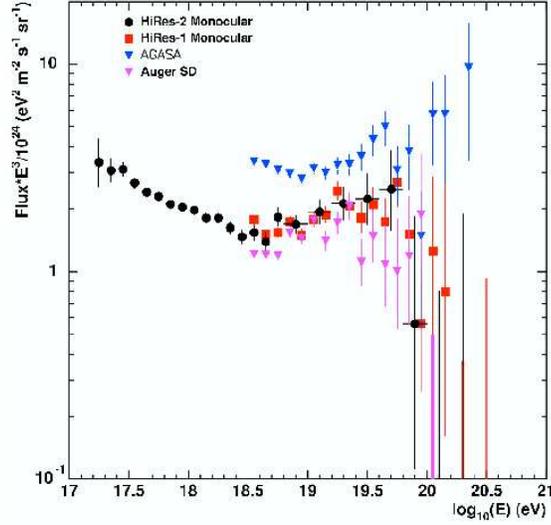


Figura 1.3: *Flusso differenziale dei RC misurato a terra, moltiplicato per E^3 , nella zona del taglio GZK: sono rappresentati gli eventi osservati da diverse collaborazioni, in particolare Agasa e HiRes.*



La risonanza Δ^+ può decadere a sua volta in due modi:



La soglia del processo per un protone è $E_p \sim 4 \cdot 10^{19} eV$.

1.3 Confinamento magnetico

A partire dalle abbondanze relative degli elementi nella galassia, vedi figura 1.1, si può calcolare [2] lo spessore che deve essere attraversato dagli elementi pesanti per produrre l'abbondanza di elementi leggeri presenti nei RC: questo è pari a $X \simeq 5 \text{ g cm}^{-2}$.

Noto lo spessore X è possibile determinare il tempo di confinamento τ dei raggi cosmici nella galassia dalla relazione:

$$X \simeq \rho c \tau \quad (1.6)$$

dove $\rho \simeq 1.6 \cdot 10^{-24} \text{ g cm}^{-3}$, è la densità del mezzo interstellare attraversato, mentre $c = 3 \cdot 10^{10} \text{ cm s}^{-1}$ è la velocità della luce nel vuoto.

Si ha che il tempo di confinamento $\tau \simeq 3 \cdot 10^6$ anni. Possiamo, inoltre, calcolare la lunghezza del cammino percorso mediamente dai RC nella galassia:

$$l = \frac{X}{\rho} = 3 \cdot 10^{24} \text{cm} \approx 1000 \text{kpc} \quad (1.7)$$

Lo spessore del disco galattico $d = 0.2 \text{ kpc} \ll l$, questo implica che i RC all'interno della galassia vengono diffusi più volte dal campo magnetico galattico ($B_{gal} \sim 3 \mu \text{ G}$) prima di uscirne. Questo spiega la diminuzione di flusso riscontrata in coincidenza del "ginocchio".

L'azione del campo magnetico galattico confina, quindi, i RC all'interno della nostra galassia per $\tau \simeq 3 \cdot 10^6$ anni. Affinché ciò avvenga, il raggio di curvatura della traiettoria di una particella, di carica Ze e impulso p , per azione del campo magnetico galattico, deve essere inferiore allo spessore del disco:

$$R = \frac{pc}{ZeBc} \leq d \quad (1.8)$$

Il confinamento magnetico dei RC ha luogo solo per valori di energia tali da soddisfare la (1.8).

1.4 Origine dei raggi cosmici

Una delle prime formulazioni teoriche riguardo l'origine dei raggi cosmici fu concepita da Ginzburg e Syrovatskii [8], i quali ipotizzarono che l'accelerazione dei RC potesse avvenire nelle supernovae e ne calcolarono la potenza disponibile.

Data la densità di energia locale dei RC: $\rho_E \sim 1 \text{ eV/cm}^3$, ho che la potenza necessaria per poter produrre RC galattici è:

$$L_{CR} = \frac{V_D \rho_E}{\tau} \sim 7 \cdot 10^{40} \text{erg/s} \quad (1.9)$$

dove $\tau \simeq 3 \cdot 10^6$ anni, è il tempo di confinamento nella galassia, mentre V_D è il volume del disco galattico dato da:

$$V_D = \pi R^2 d \sim 4 \cdot 10^{66} \text{cm}^3 \quad (1.10)$$

con $R \simeq 15 \text{ Kpc}$ e $d \sim 200 \text{ pc}$ ($1 \text{ pc} = 3 \cdot 10^{18} \text{ cm}$), rispettivamente il raggio e lo spessore del disco galattico.

L'ordine di grandezza di questa potenza (1.9) suggerisce l'implicazione delle supernovae nel meccanismo di accelerazione dei raggi cosmici.

Infatti, considerando, ad esempio, una tipica supernova da cui viene emessa una massa pari a 10 masse solari ($1M_{\odot} \sim 2 \cdot 10^{31}$ Kg) ad una velocità $u=5 \cdot 10^6$ m/s, ho che la potenza disponibile per i raggi cosmici è pari a:

$$L_{SN} \sim 3 \cdot 10^{42} \text{ erg/s} \quad (1.11)$$

dove si è tenuto conto del fatto che in media, nella galassia, avviene un'esplosione di supernova ogni 30 anni [2].

Quindi, risulta evidente come l'onda d'urto prodotta dall'esplosione di una supernova possa essere un sito di accelerazione plausibile per la maggior parte dei raggi cosmici galattici. I meccanismi che consentirebbero tale accelerazione sono esposti nel paragrafo seguente.

1.5 Meccanismi di accelerazione

Lo studio dei processi nei quali le particelle di alta energia sono accelerate ad energie ultrarelativistiche costituisce una tra le questioni più interessanti nella fisica dei raggi cosmici.

I meccanismi ipotizzati devono permettere di ottenere non solo l'andamento a legge di potenza dello spettro energetico e le energie estremamente elevate, fino a 10^{20} eV, raggiunte dalla radiazione cosmica, ma anche la composizione chimica osservata.

L'accelerazione di particelle cosmiche può ricondursi alla presenza di campi magnetici variabili nel tempo, che determinano la formazione di campi elettrici indotti, infatti, se così non fosse si avrebbe che, in gas completamente ionizzati, le cariche libere, ricombinandosi, annullerebbero subito l'effetto di qualunque campo elettrico.

Ciò può avvenire, ad esempio, nelle onde prodotte dall'esplosione di una supernova, oppure in oggetti estremamente compatti con campi magnetici rapidamente variabili (stelle di neutroni e pulsar con periodi di rotazioni molto piccoli).

1.5.1 Meccanismo di Fermi del secondo ordine

L'idea originale di Fermi, sviluppata intorno al 1950, è che la galassia sia piena di nubi di plasma, visibili in figura 1.4, che generano l'accelerazione dei RC, diffondendoli attraverso urti elastici successivi.

Nella visione di Fermi questo è un processo stocastico, un *ensemble* di molti eventi, durante i quali un particella acquista ogni volta una piccola frazione

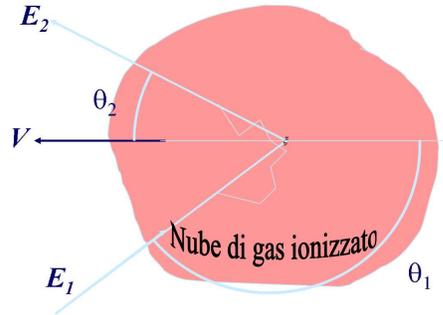


Figura 1.4: *Interazione dei RC con una nube di plasma in moto con velocità $V = \beta c$*

di energia, proporzionale a quella iniziale. Una particella carica di energia iniziale E_1 entra nella nube di plasma, in moto con velocità $V = \beta c$, con un angolo di incidenza θ_1 e viene diffusa dal campo magnetico irregolare ivi presente. Se ne può calcolare l'incremento medio di energia [2].

Indicato con $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ il fattore di Lorentz ed essendo valida l'approssimazione relativistica per le particelle ($E \gg mc^2$), si ottiene un guadagno medio di energia del secondo ordine in β :

$$\left\langle \frac{E_f}{E_i} \right\rangle \simeq \gamma^2 (1 - \beta \langle \cos \theta_1 \rangle) \simeq \frac{1}{1 - \beta^2} \left(1 + \frac{\beta^2}{3} \right) \simeq 1 + \frac{4}{3} \beta^2 + \dots \quad (1.12)$$

Quindi, con le ipotesi fatte fino ad ora, il guadagno di energia è proporzionale a β^2 .

Le nubi di plasma hanno delle velocità molto piccole, con $\beta \leq 10^{-4}$, questo comporta un guadagno di energia molto basso.

Questo è il vero punto debole del meccanismo di Fermi: non spiega l'accelerazione di particelle fino ad energie sufficientemente elevate.

La teoria non è in grado di fornire una corretta rappresentazione dello spettro dei raggi cosmici, in quanto l'indice spettrale che si ottiene dal meccanismo di Fermi è molto più grande di quello misurato sperimentalmente.

Una descrizione migliore del fenomeno si ha se si considerano regioni della galassia in cui ci sono turbolenze, anche a piccole scale, come ad esempio le zone limitrofe ai resti di una supernova, che vedremo in dettaglio nel paragrafo successivo.

1.5.2 Meccanismo di Fermi del primo ordine

Negli anni '70 l'idea di Fermi venne applicata alle onde d'urto [1], come quella generata nell'esplosione di una supernova. In questa nuova versione il

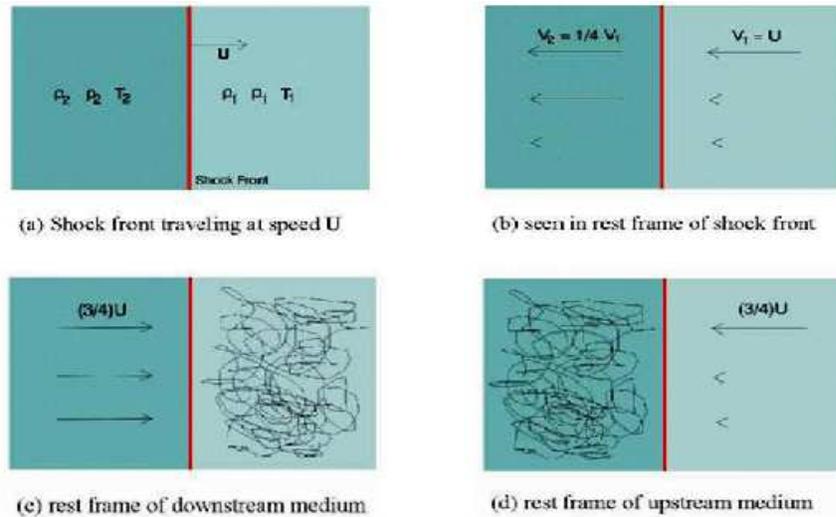


Figura 1.5: *Meccanismo di accelerazione di Fermi del primo ordine: (a) Lo shock si propaga con velocità supersonica U , in un gas stazionario con pressione, temperatura e densità rispettivamente: p_1 , T_1 , ρ_1 ; il fluido downstream dietro l'onda d'urto ha parametri p_2 , T_2 , ρ_2 ; (b) Il flusso di gas nel sistema di riferimento dell'onda d'urto; (c) Nel sistema di riferimento upstream, il fluido downstream ha velocità $\frac{3}{4}U$ e la distribuzione delle velocità è isotropa nel fluido a riposo; (d) Stessa situazione, ma vista nel riferimento in cui il gas downstream è a riposo*

guadagno di energia risulta proporzionale a β . Un'onda d'urto (*shock wave*) è una discontinuità nelle proprietà termodinamiche di un fluido, in cui la velocità varia rapidamente in un certo spessore, e che si muove con velocità (U) maggiore di quella del suono nel mezzo (c_s).

Il fluido non ancora raggiunto dallo shock è detto **upstream**, mentre quello già raggiunto e superato dallo shock è detto **downstream**.

Passando nel fluido downstream le particelle vengono diffuse da parte del campo magnetico ivi presente; nel riferimento solidale con il fluido, la distribuzione delle velocità delle particelle è isotropa (figura 1.5 d).

Ogni particella viene diffusa più volte e dunque può riattraversare lo shock in senso contrario: ogni volta che una particella attraversa la discontinuità, questa incrementa la sua energia.

Un osservatore solidale con lo shock vede il fluido che si avvicina con velocità $v_1 = U \gg v_{suono}$ (figura 1.5 b), mentre alle sue spalle il fluido lascia lo shock con velocità v_2 .

Imponendo l'equazione di continuità:

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2 \quad (1.13)$$

si ottiene:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{v_1}{v_2} \quad (1.14)$$

dove ρ_1 rappresenta la densità del flusso *upstream* e ρ_2 quella del fluido *downstream*.

Se lo shock è supersonico ($U \gg c_s$) si dimostra che:

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{c_p/c_V + 1}{c_p/c_V - 1} \quad (1.15)$$

dove c_p e c_V rappresentano rispettivamente il calore specifico a pressione e a volume costante.

Nel caso di un gas monoatomico il loro rapporto vale $c_p/c_V \sim \frac{5}{3}$ e quindi si ha $v_2 = \frac{1}{4}v_1$.

Nel riferimento solidale con il fluido *upstream* lo shock si muove verso il fluido con velocità U , mentre il fluido *downstream* si avvicina all'osservatore con velocità $V = \frac{3}{4}U$ (figura 1.5 c).

In questo riferimento la distribuzione delle velocità delle particelle di fluido *upstream* è isotropa.

Nella regione *downstream* le particelle hanno velocità $V = \frac{3}{4}U$ e quindi l'energia di una particella che attraversa il fronte dello shock (dalla regione *upstream* alla regione *downstream*) è :

$$E' = \gamma(E + p_x V) \quad (1.16)$$

dove p_x è la componente dell'impulso nella direzione normale allo shock, il quale si muove con velocità non relativistica $U \ll c$ e quindi $\gamma \sim 1$.

Le particelle sono invece relativistiche e in queste ipotesi $E \sim pc$ e $p_x = p \cos\theta \simeq \frac{E}{c} \cos\theta$.

In questo modo è possibile stimare la variazione dell'energia di una particella:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E' - E}{E} \sim \frac{pV \cos\theta}{E} = \frac{V \cos\theta}{c} = \frac{3U}{4c} \cos\theta = \frac{3}{4} \beta \cos\theta \quad (1.17)$$

A questo punto bisogna mediare su θ e si ottiene:

$$\frac{\Delta E}{E} \simeq \frac{2V}{3c} \quad (1.18)$$

Nella situazione in cui le particelle si muovono nel verso opposto la situazione

è analoga e la quantità di energia guadagnata è la stessa. In un ciclo completo di attraversamento dello shock, il guadagno di energia è :

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle \simeq \frac{4V}{3c} = \frac{4}{3}\beta \quad (1.19)$$

Rispetto al meccanismo precedente, in questo caso il guadagno di energia è proporzionale a β e dunque l'accelerazione descritta è più efficiente.

Si può dimostrare che il valore dell'indice spettrale, calcolato con queste ipotesi, è $\gamma \sim 2$ e dunque lo spettro è del tipo $dn(E) \propto E^{-2} dE$.

Il problema principale del meccanismo di Fermi al primo ordine è che, pur essendo notevolmente più realistico rispetto al precedente, non è un processo rapido.

Le particelle devono essere diffuse avanti e indietro rispetto allo shock e nel caso di **resti di supernova** (SNR) hanno un guadagno di energia pari a una parte su 100 in ogni attraversamento.

Questo processo di accelerazione da parte di una SNR dura circa 10^5 anni, da qui si può avere un limite superiore per l'energia delle particelle accelerate pari a $E_{max} \sim 10^5$ GeV/nucleone, che tiene conto anche delle dimensioni dell'onda d'urto e dell'intensità del campo magnetico.

Energie superiori possono essere raggiunte in sistemi come le pulsar o i nuclei galattivi attivi (AGN).

1.6 Siti di accelerazione

Abbiamo visto come le supernovae siano candidate come sorgenti e acceleratrici di raggi cosmici; negli ultimi anni l'attenzione si è concentrata molto sullo studio delle altre possibili sorgenti di RC, soprattutto ad energie più elevate.

Una rappresentazione interessante che raggruppa le possibili sorgenti finora note è il grafico di Hillas [9], figura 1.6.

La possibilità, da parte di una sorgente, di accelerare la radiazione cosmica fino ad una certa energia dipende dalle dimensioni R della sorgente e dal modulo B del campo magnetico locale. Data l'energia massima a cui può essere accelerata una particella in un dato sistema, la relazione tra le due grandezze, L e B , è di inversa proporzionalità.

Gli oggetti astronomici di grandi dimensioni hanno campi magnetici molto deboli, mentre quelli più compatti, come le stelle di neutroni, hanno campi magnetici molto intensi.

Nel grafico sono presenti tutte le possibili sorgenti di RC fino ad un'energia di 10^{20} eV.

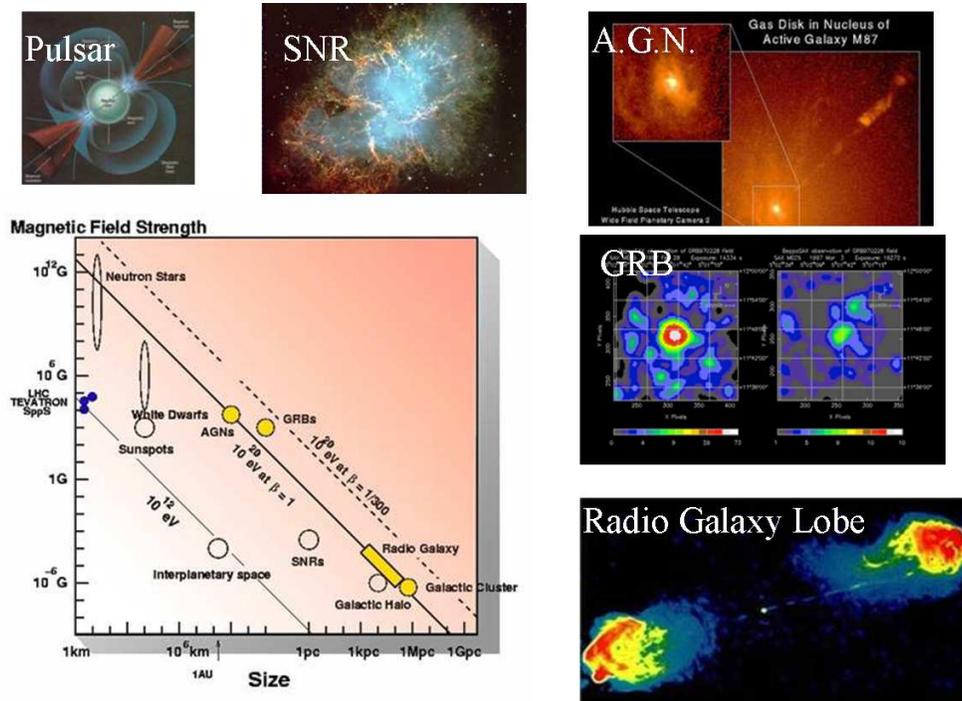


Figura 1.6: *Nell'Hillas Plot le possibili sorgenti di RC sono catalogate in base al campo magnetico che generano e alle loro dimensioni. Le rette rappresentano le energie alle quali i meccanismi in questione riescono a portare le particelle.*

I raggi cosmici con energia minore di 10^{15} eV hanno origine galattica, vediamo quali sono queste possibili sorgenti.

1.6.1 Resti di Supernova

Quando il “combustibile nucleare” di una stella si esaurisce, si crea al suo interno una situazione di instabilità che causa un fenomeno esplosivo, il cui esito finale dipende dalla massa iniziale della stella.

Una supernova (SN) è un’esplosione in cui un’enorme onda d’urto (*shock wave*) disperde nello spazio parte della materia stellare. Dopo questa esplosione restano il nucleo della stella di partenza e del materiale che si espande e che costituisce il resto della supernova (SNR) [10].

A seconda della massa del nucleo residuo si ha una nana bianca, una stella di neutroni o un buco nero.

La generazione dei RC avviene, secondo il meccanismo di Fermi, in corrispondenza delle onde d’urto generate dall’esplosione.

Le esplosioni di supernovae sono, anche, un importante sorgente di neutrini

di bassa energia ($E \sim 10$ MeV), che sono prodotti quando il nucleo di Fe collassa su stesso.

L'emissione di neutrini fa perdere alla stella il 99% della sua energia. Il collasso si blocca solo quando, grazie anche alla pressione esercitata verso l'esterno dai neutrini emessi, si forma un'onda d'urto che accelera le particelle che l'attraversano fino ad energie di $\sim 10^{15}$ eV.

Le particelle cariche accelerate da una SNR possono originare raggi gamma o neutrini interagendo con il mezzo interstellare.

1.6.2 Pulsar

Le Pulsar [10] sono stelle di neutroni che ruotano con un periodo che va da ~ 1 ms a decine di secondi. Sono caratterizzate da campi magnetici molto intensi (sino a 10^{12} Gauss) e da getti relativistici di plasma e radiazione che fuoriescono dai poli magnetici, che sono responsabili dell'accelerazione dei RC sino ad energie elevatissime.

L'asse di rotazione e l'asse del campo magnetico non sono allineati e ciò determina una modulazione dell'emissione, infatti, la prima volta furono osservate come sorgenti radio pulsate, da qui il nome Pulsar.

Queste sono anche intense sorgenti di raggi gamma sino a $\sim 10^{14}$ eV.

Tra le pulsar, la sorgente di raggi gamma più luminosa e maggiormente nota è la Crab Nebula.

1.6.3 Nuclei Galattici Attivi

Vennero scoperti nel 1949 da Carl Seyfert e sono tra le più potenti sorgenti di RC nell'universo, con luminosità tipiche dell'ordine di $10^{42} \div 10^{48}$ erg/s. L'emissione dei Nuclei Galattici Attivi (AGN) [10] interessa tutto lo spettro elettromagnetico e produce un'energia tale che, per interpretare fenomeni tanto violenti, si deve ammettere l'ipotesi che questi abbiano origine da meccanismi diversi e non ancora completamente noti.

Una spiegazione soddisfacente dal punto di vista energetico di questo meccanismo viene data supponendo che al centro di un AGN ci sia un buco nero molto massivo, con massa $M \sim 10^6 \div 10^{10} M_{\odot}$. La materia, che viene attratta verso il buco nero, cadendo si riscalda e in questo modo emette radiazione termica; la materia in caduta libera si dispone su un **disco di accrescimento** attorno al buco nero.

Esistono tipi di AGN diversi per luminosità e spettro di emissione, tuttavia, è possibile comprendere le loro caratteristiche principali nel cosiddetto *modello unificato*.

In questo modello un AGN è formato da:

- Un **motore centrale** composto da un buco nero circondato da un disco di accrescimento, che ruotando emette particelle relativistiche dai poli dell'asse di rotazione.
- Una regione di dimensioni di ~ 1 pc, detta **broad line region** (BLR), composta da nubi di gas in moto a velocità molto elevate, molto dense e calde.
- Una regione toroidale composta da gas e polveri di ~ 1 kpc che circonda il buco nero e la BLR.
- Una regione detta **narrow line region** (NLR), costituita da gas, come la BLR, ma molto meno densi e veloci.

Un tale sistema appare in modo diverso a seconda della posizione dell'osservatore: se, ad esempio, viene osservato da una posizione in linea con la regione toroidale, il sistema mostrerà i lobi e i jet di particelle relativistiche, che non sono visibili se la posizione dell'osservatore è in linea con l'asse polare. Sono AGN in particolare:

- **Quasar** (quasi stellar radio sources): sono sorgenti radio extragalattiche che sono visibili anche nell'ottico (in questo intervallo di frequenze appaiono puntiformi).
- **Radio Galassie**: sono sorgenti radio extragalattiche che emettono poca radiazione nel visibile.
- **Blazars** (da blaze: vampata): hanno un alto grado di polarizzazione e mostrano grossa variabilità su scale temporali dell'ordine di un giorno (se visti dalla terra).

I raggi cosmici generati all'interno di un AGN interagiscono con la radiazione e con la materia che si trovano nel disco di accrescimento o con i fotoni UV dei jet e producono pioni che decadendo producono anche fotoni e neutrini.

L'importanza degli AGN è legata alla loro possibile capacità di accelerare RC fino ad energie di $10^{18} \div 10^{20}$ eV.

1.6.4 Gamma Ray Burst

Alla fine degli anni '60 iniziarono gli *avvistamenti* di lampi di raggi gamma (GRB) [10] provenienti dal cosmo. L'origine di questi lampi era molto dubbia e in particolare non era ancora stato stabilito se

si trattasse di oggetti di origine galattica o extragalattica. Messo in orbita nel '91, il Compton Gamma-Ray Observatory osservò centinaia di eventi, distribuiti isotropicamente. Questa è un'evidenza forte a favore dell'origine extragalattica, perché altrimenti si sarebbe riscontrata una maggiore concentrazione di eventi nel centro della galassia.

Uno dei modelli più accreditati per spiegare l'origine dei GRB è il **modello a palla di fuoco** (*fireball modell*) che prevede che alla fiammata di raggi gamma corrisponda poi un riverbero con lunghezze d'onda maggiori.

La definitiva origine extragalattica è stata attribuita ai GRB dal satellite BeppoSAX, lanciato nel 1996, che ha permesso di associare alcuni GRB a galassie con redshift medio $z \sim 1$.

1.7 Sciami Atmosferici Estesi

Quando un Raggio Cosmico entra nell'atmosfera terrestre interagisce con i nuclei ivi presenti generando, in seguito ad un processo moltiplicativo, uno Sciame Atmosferico Esteso (EAS).

Si chiamano **Sciame Elettromagnetici (EM)** quelli indotti da particelle quali elettroni, positroni e fotoni. Mentre gli sciame iniziati da adroni vengono chiamati **Sciame Adronici**.

È di fondamentale importanza capire le proprietà di sviluppo di uno sciame in atmosfera, perché questo determina e caratterizza le conoscenze possedute nell'ambito della fisica dei raggi cosmici, ad energie al di sopra dei 10^{15} eV. Infatti, a causa della rapida diminuzione del flusso all'aumentare dell'energia, lo studio dei RC può essere effettuato solo mediante la rivelazione degli EAS.

Nel 1954 Heitler sviluppò un semplice modello [2] per illustrare il comportamento caratteristico di uno sciame EM che si sviluppa.

Nel limite ultra-relativistico, la lunghezza di radiazione (λ_0) per la produzione di coppie e il libero cammino medio per l'emissione di fotoni di Bremsstrahlung sono circa uguali alla stessa quantità X_0 (in aria $X_0 \sim 37g/cm^2$).

Inoltre si assume che nel processo di produzione di coppie, l'energia del γ sia egualmente distribuita tra elettrone e positrone, e che a loro volta l'elettrone ed il positrone cedano metà della loro energia al fotone di Bremsstrahlung.

Consideriamo uno sciame iniziato da un fotone di energia E_0 . In questo modello semplificato, produce una coppia dopo aver percorso una distanza in atmosfera di X_0 . L'elettrone ed il positrone, ognuno con energia $E_0/2$, percorrono una distanza X_0 prima di produrre un fotone di energia $E_0/4$ per Bremsstrahlung. Quindi, dopo $2X_0$ ci sono 4 particelle, ognuna con $1/4$ dell'energia del γ iniziale.

La cascata prosegue raddoppiando il numero di particelle ad ogni X_0 . Dopo

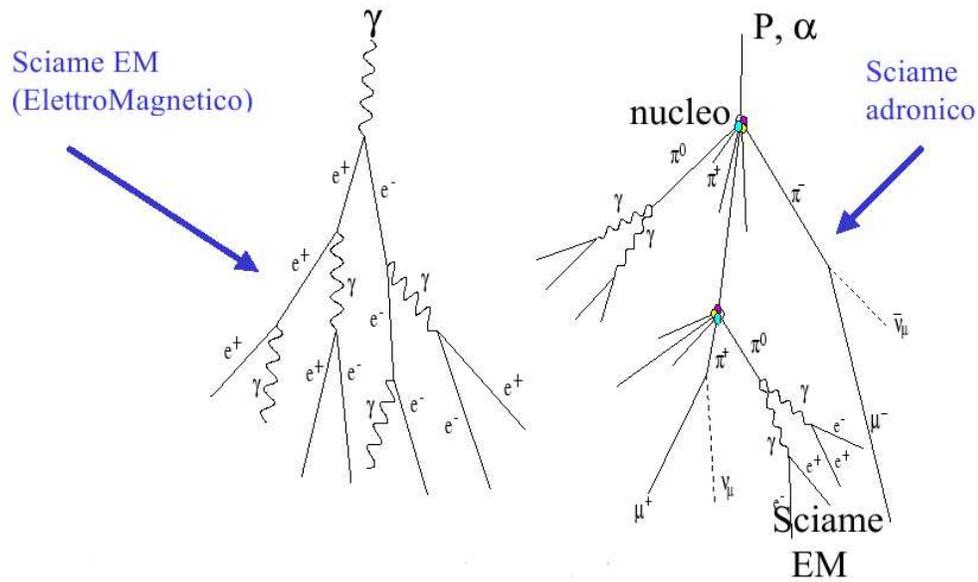


Figura 1.7: *Sciame Atmosferici Estesi: Gli sciame EM sono composti da γ , e^- , e^+ ; Gli Sciame Adronici contengono adroni, tra questi $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu)$ e $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$.*

una distanza nX_0 , il numero totale di particelle è 2^n e l'energia media di ogni particella è circa $E_0/2^n$.

Il processo continua fino a quando l'energia delle singole particelle non raggiunge l'energia critica e poi tende a diminuire rapidamente. L'energia critica è il punto in cui la perdita di energia per processi di ionizzazione e di Bremsstrahlung si equivalgono. A questo punto lo sciame non si sviluppa ulteriormente, finché non viene completamente assorbito.

Al suo massimo, lo sciame ha percorso un numero di lunghezze di radiazione $t_{max} \sim \ln(E_0/E_c)$ ed è composto da un numero di particelle $N_{max} \sim E_0/E_c$ (nell'aria si ha $E_c \simeq 81$ MeV).

La cascata adronica è diversa da quella EM: circa 1/3 dell'energia è spesa ad ogni interazione nella formazione di sciame EM, attraverso la produzione ed il successivo decadimento dei π^0 .

In una schematizzazione molto approssimata si ha che, dopo ogni lunghezza di interazione λ_h (in aria per i pioni $\lambda_h \approx 120$ g/cm², per i protoni $\lambda_h \approx 85$ g/cm²) un adrone produce N_{ch} pioni carichi, e $1/2 N_{ch}$ pioni neutri; i π_0 decadono immediatamente in una coppia di fotoni e danno origine a sciame EM, i π^\pm , invece, percorrono una λ_h e poi interagiscono producendo altri pioni.

Quelli appena esposti sono modelli molto semplificati dello sviluppo degli sciami in atmosfera e servono solo da riferimento per comprendere gli aspetti di base del fenomeno.

Per un'analisi approfondita di questi processi è inevitabile l'uso di tecniche di simulazione, che possono riprodurre, in modo quanto più adeguato, non solo gli andamenti medi, ma anche tutte le fluttuazioni.

1.7.1 Sviluppo longitudinale

Lo sviluppo longitudinale di uno sciame EM è ben descritto dalla formula di Greisen modificata, funzione della profondità t , espressa in lunghezze di radiazione (l.r.):

$$N(t) = \frac{0.31 \cdot A(E_{th})}{\sqrt{y}} e^{-[t_1(1-1.5lns)]} \quad (1.20)$$

dove $A(E_{th})$ rappresenta la frazione di particelle secondarie, prodotte con un'energia di soglia $E > E_{th}$; $y = \ln(E_0/E_c)$, con $E_c = 81$ MeV energia critica dell'aria; $t_1 = t + a_e(E_{th})$, modifica t in termini del parametro $a_e(E_{th})$, funzione dell'energia di soglia E_{th} ; il parametro s , detto *età dello sciame*, si esprime come $s = 3t/(t + 2y)$ e indica lo stato di evoluzione dello sciame ad una data quota: $s < 1$, prima della quota di massimo sviluppo; $s = 1$, massimo sviluppo; $s > 1$, dopo tale massimo.

Nel caso più generale dei RC, lo sviluppo longitudinale può essere descritto dalla stessa forma funzionale (1.20), con l'opportuna riparametrizzazione della profondità: $t_2 = t + \beta(t_m - t) t^\gamma$. La profondità è ridefinita in termini dei parametri β e γ e dalla quota del massimo sviluppo t_m [16].

In figura 1.8 viene riportato lo sviluppo longitudinale per protoni primari di energia 1, 10 e 100 TeV e con $E_{th} = 1$ MeV; anche in questo caso i punti sono "fittati" con la formula di Greisen modificata, ma col parametro t_2 .

1.7.2 Distribuzione laterale

La distribuzione laterale [10] in un EAS è conseguenza soprattutto dello scattering multiplo coulombiano a cui sono sottoposte le particelle cariche. Infatti, elettroni, positroni e gamma vengono generati con un angolo di produzione $\theta \simeq m_e c^2/E$, che non contribuisce in maniera significativa alla distribuzione laterale.

Per gli adroni, invece, la distribuzione laterale è influenzata anche dal momento trasverso medio acquistato nell'atto della loro produzione $\langle P_t^h \rangle \simeq 350$ MeV/c; è proprio il $\langle P_t^h \rangle$ degli adroni che dà luogo alla struttura a "multi-core" negli sciami adronici.

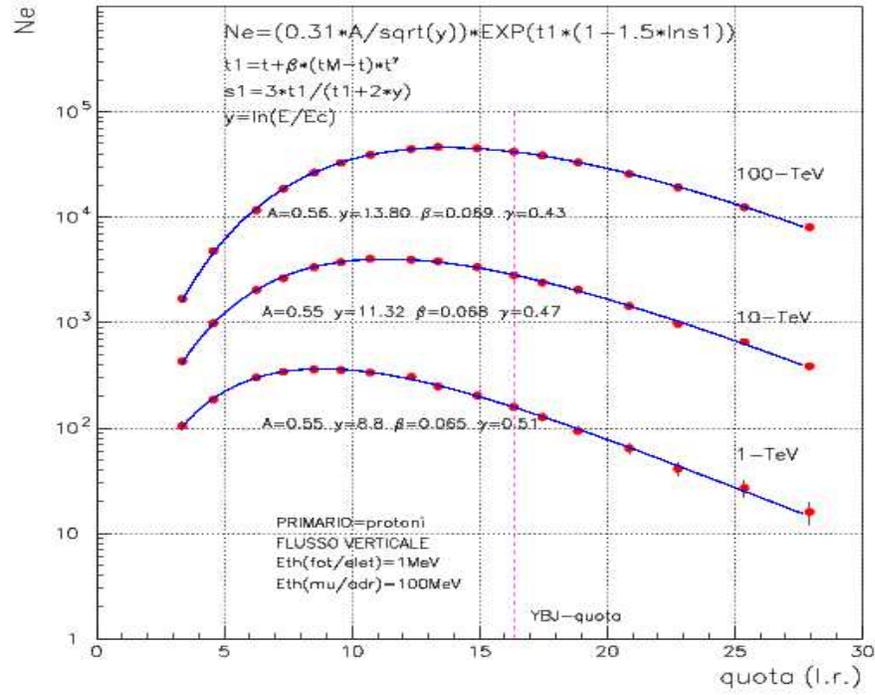


Figura 1.8: Sviluppo longitudinale per protoni primari da 1, 10 e 100 TeV. La linea tratteggiata indica la quota di YBJ.

Tutto ciò fa sì che i secondari si allontanino dall'asse dello sciame, dando luogo ad una *distribuzione laterale*. Inoltre, più ci si allontana dall'asse dello sciame e minore è l'energia delle particelle, dato che quelle prossime alla direzione del primario sono le più energetiche e risentono meno della diffusione coulombiana.

L'estensione laterale dello sciame in aria può essere di diverse centinaia di metri rispetto al core, con una densità decrescente all'aumentare della distanza da esso.

La dimensione tipica di uno sciame nel piano trasverso è $\sim 2-3$ raggi di Molière (ρ_M), dove:

$$\rho_M \approx \frac{21 \text{ MeV}}{E_c} X_0 \quad (1.21)$$

che in aria vale: $\rho_M \sim 10 \text{ g/cm}^2$.

1.8 Metodi di rivelazione dei Raggi Cosmici

Esistono molti tipi di rivelatori per raggi cosmici che si diversificano a seconda dell'intervallo di energia in cui sono sensibili e del tipo di ricerca che svolgono. Ciò è chiaramente visibile in figura 1.9.

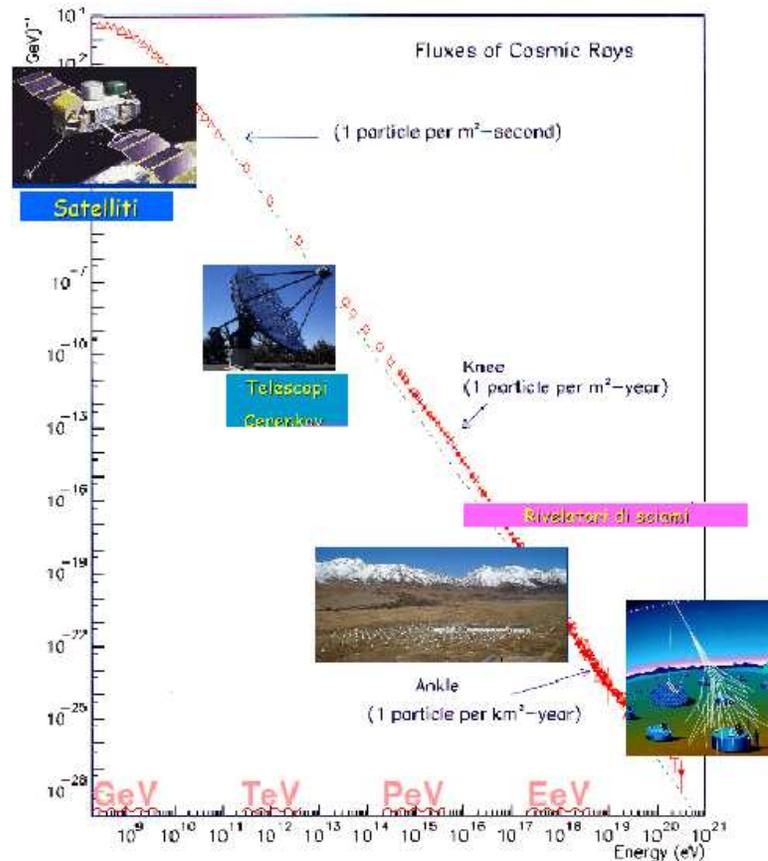


Figura 1.9: Rivelatori di RC: Le Tecniche sono molteplici e dipendono dall'energia del primario.

Ne daremo una breve panoramica con un forte accento agli obiettivi fisici e alle caratteristiche peculiari che li contraddistinguono.

1.8.1 Apparati su Satellite

Un rivelatore satellitare [10] è composto da uno strato di materiale convertitore, nel quale i fotoni incidenti producono coppie $e^+ e^-$, un rivelatore di traccia, dove si ricostruisce la direzione del fotone primario con una risoluzione angolare di $\sim 1^\circ$, e un calorimetro ad assorbimento totale, che

permette una stima dell'energia con una risoluzione del 15%. I RC carichi sono, invece, rivelati per mezzo di un sistema solitamente formato di uno spettrometro, un calorimetro e un rivelatore in grado di identificare le particelle.

Alcuni di questi esperimenti spaziali che studiano i raggi cosmici primari di energia inferiore al "ginocchio" e/o il flusso di fotoni primari sono:

- **CGRO** (Compton Gamma Ray Observatory), del 1991, costituito da 4 rivelatori: BATSE, per l'osservazione dei GRB, OSSE, per la rivelazione di raggi X, COMPTEL, per la rivelazione di raggi γ con energie dell'ordine dei MeV, EGRET, un esperimento sui raggi γ più energetici;
- **ACE** (Advanced Composition Explorer), del 1997. Esso si compone di 9 strumenti che hanno viaggiato a 1500 km da Terra, per misurare la composizione chimica della materia del mezzo interplanetario e galattico. Uno tra i 9 strumenti è CRIS (Cosmic Rays Isotope Spectrometer) che misura la componente isotopica fino a $Z = 30$ nel range di energia tra 100 e 500 MeV;
- **AMS** (Alpha Magnetic Spectrometer) è uno spettrometro magnetico per la rivelazione dei RC, installato sulla stazione spaziale internazionale ISS; i suoi principali obiettivi riguardano lo studio dell'antimateria cosmica, della materia oscura e dei RC primari fuori atmosfera, nell'intervallo di energia che va da 1 GeV a 1TeV.

Esistono anche una classe rivelatori montati su pallone. Questi hanno il compito di rivelare sia i RC primari sia quelli secondari.

Alcuni di questi esperimenti su pallone sono:

- **BESS** (Ballon-borne Experiment with a superconducting Solenoid Spectrometer) che ha volato per la prima volta nel Luglio del 1993, per 17 ore, ad un'altitudine media di 37 km. Il suo scopo è quello di misurare il flusso di e^\pm , p, He e qualche isotopo leggero, rivelare raggi γ da quasar ed altre sorgenti, misurare il flusso di muoni secondari e dell'antielio;
- **JACEE** (Japanase-American Collaborative Emulsion Experiment) ha condotto 14 voli, di cui 5 a lunga durata (5-7 giorni), ad altitudini tali da poter trascurare l'effetto dell'atmosfera. Si compone di una serie di camere ad emulsione in piombo adatte a misurare direttamente la composizione primaria dei RC del ginocchio.

1.8.2 Telescopi Čerenkov

I telescopi Čerenkov (Atmospheric Čerenkov Telescope: ACT) sono utilizzati, soprattutto, per misurare il flusso di fotoni primari di alta energia, attraverso la misura della radiazione Čerenkov, prodotta durante lo sviluppo dello sciame, da essi innescato in atmosfera, vedi figura 1.10.

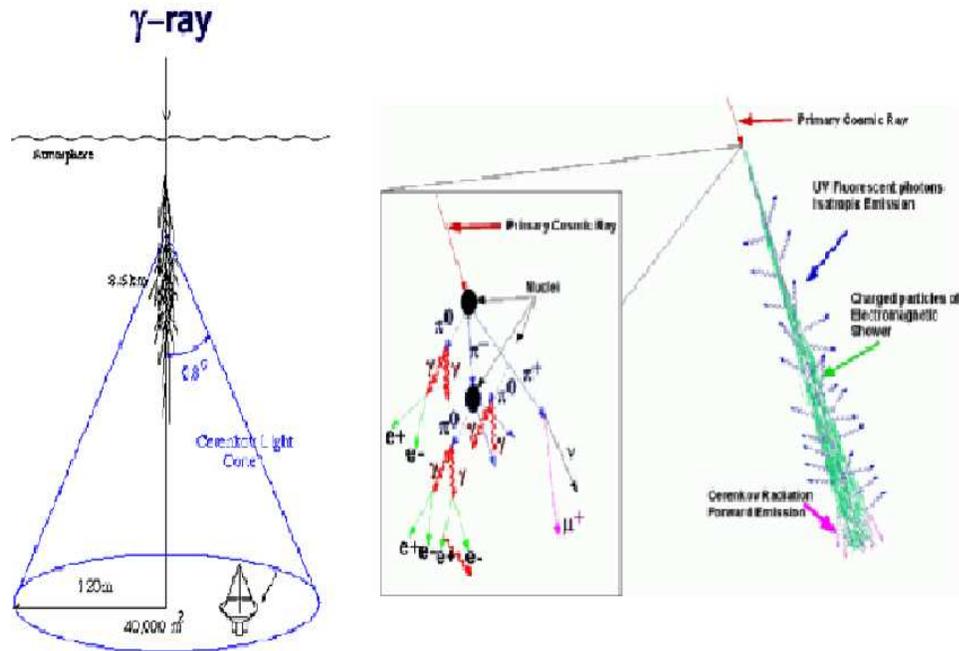


Figura 1.10: I telescopi Čerenkov misurano la radiazione Čerenkov emessa dalle particelle cariche di uno sciame atmosferico.

L'ACT è formato da uno specchio con una superficie sferica o parabolica. La radiazione Čerenkov prodotta è convogliata sui fotomoltiplicatori posti nel piano focale dello specchio. Il successo di questi telescopi è dovuto alla loro capacità di “fotografare” l'immagine Čerenkov dello sciame che si sviluppa in atmosfera, utilizzando la tecnica dell'*Imaging*.

Lo studio della forma dell'immagine prodotta permette di rigettare fino al 99.7% del fondo costituito da sciame innescati da nuclei primari. Infatti, lo sciame prodotto da un raggio γ ha una forma ellittica, regolare e ben definita mentre gli adroni primari generano figure più irregolari.

Gli ACT lavorano in un range energetico compreso tra 250 GeV e 10 TeV, hanno un'eccellente risoluzione angolare di $\sim 0.1^\circ$ e una discreta risoluzione energetica del $\sim 20-40\%$.

Hanno, però, due limitazioni intrinseche: il basso tempo effettivo in cui

l'apparato può effettuare misure (*duty cycle*) e la piccola apertura angolare (*field of view*) [14, 15].

L'osservazione di una sorgente è possibile solo in notti serene e senza Luna, ad esempio, la Crab è osservabile per ~ 5 ore/giorno, ma solo per 4 mesi/anno; infatti durante gli altri 8 mesi è in direzione ottimale per l'osservazione, ma durante il giorno. Questo comporta un *duty cycle* del 10%.

La piccola apertura angolare ($< 5^\circ$) consente l'osservazione di una singola sorgente alla volta, ciò impedisce di eseguire un monitoraggio continuo di tutte le sorgenti osservabili in una data locazione geografica.

Tra i più famosi ACT che usano la tecnica dell'*Imaging* (IACT) troviamo il Telescopio WHIPPLE, con diametro di 10 m, CANGAROO (3.8 m), HEGRA (3 m), MAGIC (17m), HESS (16×12 specchi) e VERITAS (7×12 specchi). Esistono anche un gruppo di rivelatori che includono torri solari come CELESTE [18] e STACEE [17], il loro vantaggio risiede nella grande area di raccolta ottenuta sfruttando strutture preesistenti. Qui la radiazione Čerenkov è convogliata dagli eliostati verso la torre solare, dove uno specchio la focalizza su una griglia di fomoltiplicatori.

1.8.3 Apparati di Sciame

Un Apparato di sciame (*EAS array*) è in grado di rivelare il passaggio del fronte dello sciame prodotto da un primario, che interagisce nella parte alta dell'atmosfera, vedi figura 1.11.

Esso consiste di numerosi rivelatori (tra 50 e 1000), generalmente scintillatori di $\sim 1 \text{ m}^2$, distribuiti su una superficie di 10^4 - 10^5 m^2 e distanziati di 10-20 m.

La loro caratteristica peculiare è quella di avere un ampio *field of view* ($\sim 2\pi \text{ sr}$) e un *duty cycle* del 100 %.

Questo è un grosso vantaggio, in quanto permette di osservare con continuità tutte le sorgenti comprese in una certa banda di declinazione.

La disposizione dei singoli rivelatori permette di campionare una porzione molto piccola (meno dell' 1 %) dello sciame. Questo comporta un'energia di soglia molto alta ($\sim 50 \text{ TeV}$), in quanto per ricostruire lo sciame è necessaria un'elevata densità di particelle su tutta l'area instrumentata.

La ricostruzione del profilo temporale dello sciame, mediante i tempi di arrivo delle particelle secondarie sull'apparato, permette di ricostruire la direzione di provenienza del primario (Tecnica del *Fast Timing*).

La migliore risoluzione temporale raggiungibile con apparati di sciame è dell'ordine $\sim 0.5^\circ - 1^\circ$.

Il numero totale di particelle cariche (*size*) viene determinato tramite un fit con una opportuna funzione di distribuzione laterale delle densità delle particelle misurate sui diversi rivelatori.

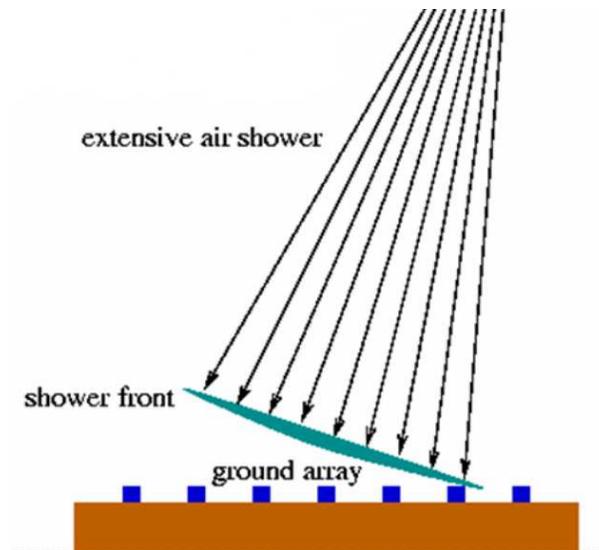


Figura 1.11: Gli EAS array permettono un campionamento della componente secondaria carica tramite rivelatori distribuiti su un'ampia superficie.

Dalla misura della *size* è possibile risalire all'energia del primario. Tuttavia la risoluzione in energia raggiungibile è mediocre a causa delle fluttuazioni nello sviluppo dello sciame.

La discriminazione di sciame indotti da γ e da adroni avviene studiando il contenuto di muoni nello sciame: questo è maggiore in uno sciame adronico. Questa tecnica, però, ha delle limitazioni intrinseche e diventa statisticamente efficace solo ad energie di molte decine di TeV e con rivelatori di μ di grande area.

Tra gli apparati di sciame ricordiamo EAS-TOP, con un'energia di soglia di 10^{14} eV, Tibet AS γ (10^{13} eV) e, ad energie sempre più elevate, KASCADE, AGASA, AKENO e AUGER.

1.8.4 Apparati di Sciame di nuova generazione

La descrizione dei vantaggi e dei limiti intrinseci di ciascuno degli apparati che rivelano RC indirizza verso la costruzione di nuovi detector in cui l'esigenza di avere un alto *duty cycle* e un ampio *field of view*, tipico degli apparati di sciame, si possa ben sposare all'ottima risoluzione angolare e alla grande capacità di eliminare il fondo, che caratterizzano i telescopi Čerenkov.

Ciò comporta un'alta sensibilità verso le sorgenti note e la possibilità di rivelarne di nuove. Non solo, aumentare il numero di particelle cariche rivelate permette di avere l'abbassamento dell'energia di soglia e una migliore risoluzione angolare.

Queste sono le direttive seguite dagli apparati a copertura totale (*full-coverage*): ARGO-YBJ, di cui si discuterà ampiamente più avanti, e MILAGRO.

Quest'ultimo è posto a 2500 m sul livello del mare a Los Alamos. Il suo scopo è quello di studiare gli sciame indotti da primari con un'energia di soglia di ~ 400 GeV, mediante l'utilizzo di rivelatori di luce Čerenkov prodotta in acqua dallo sciame.

In questo primo capitolo si è affrontato un tema di fisica astroparticellare oggi di grande attualità: la problematica riguardante l'origine e la propagazione della radiazione cosmica. L'interesse è sia di tipo astrofisico sia di fisica delle particelle elementari, in quanto coinvolge problemi tipicamente legati alla struttura dell'Universo, per quanto riguarda la propagazione, agli oggetti astrofisici "estremi", per i siti di accelerazione e le sorgenti di energia, e ai processi fondamentali, quali meccanismi di accelerazione e interazione. Una misura diretta del flusso di RC è possibile solo fino ad energie di $\sim 10^{14}$ eV, tramite l'utilizzo di palloni e satelliti. Ad energie superiori, le misure devono basarsi, necessariamente, sullo studio degli sciami prodotti nelle interazioni dei primari con l'atmosfera terrestre, mediante apparati operanti al suolo (rivelatori di EAS).

Date le difficoltà, tipiche delle misure indirette, derivanti da problemi di campionamento e incidenza delle fluttuazioni e la necessità di avere un alto duty cycle e un ampio field of view portano alla nascita di apparati di sciame denominati di nuova generazione, tra i quali ARGO-YBJ.

Nel prossimo capitolo saranno trattate, in dettaglio, le caratteristiche e i principali obiettivi dell'esperimento ARGO-YBJ, in particolare se ne discuteranno la struttura e l'architettura software elaborata per l'acquisizione degli eventi dovuti a RC. Si darà, anche, una breve panoramica dei primi risultati fisici, in relazione all'acquisizione ottenuta nel periodo da dicembre 2004 a luglio 2005.

Capitolo 2

L'esperimento ARGO-YBJ

L'esperimento ARGO-YBJ (*Astrophysical Radiation with Ground-based Observatory at YangBaJing*) è situato nel laboratorio di Raggi Cosmici ad alta quota a YangBaJing, 90 km a nord di Lasha (Tibet, R.P.Cinese), ad un'altitudine di 4300 metri sopra il livello del mare, corrispondente ad uno spessore atmosferico di $\sim 606 \text{ g/cm}^2$; esso è il frutto di una collaborazione di ricerca scientifica internazionale tra Italia e Cina.

È un rivelatore [19, 20] di sciame atmosferici estesi a copertura totale (*full-coverage*), costituito da un tappeto di contatori piani resistivi (RPC), che ricoprono una superficie di $\sim 7000 \text{ m}^2$.

A differenza degli apparati tradizionali, che sono in grado di campionare $\sim 1\%$ delle particelle di uno sciame, ARGO-YBJ consente di rivelarne un'elevata frazione, $\sim 90\%$, fornendone un'accurata immagine spazio-temporale.

La struttura continua permette studi topologici sulla distribuzione delle particelle sul piano del rivelatore, importanti perché forniscono una dettagliata ricostruzione dello sciame atmosferico e della direzione di provenienza della particella che lo ha generato, con la possibilità di distinguerne la natura (per esempio fotoni, protoni o nuclei pesanti) in base alla struttura spazio-temporale dello sciame osservato.

L'alta quota permette agli sciame di energia minore di raggiungere il rivelatore, perché la riduzione dello spessore dell'atmosfera fa aumentare il numero di particelle secondarie che possono raggiungere il suolo.

La combinazione degli effetti dovuti sia alla copertura totale sia all'altitudine permette al rivelatore un ampliamento verso il basso delle energie osservabili: sino a poche centinaia di GeV.

L'eccellente risoluzione temporale del detector, $\sigma_t \simeq 1 \text{ ns}$, permette un'alta sensibilità verso le sorgenti di Raggi Gamma; ciò significa non solo osservare la Crab Nebula, dalle caratteristiche ben note, che può essere utilizzata per "calibrare" l'apparato, ma anche la possibilità di rivelare nuove sorgenti.

In più l'ampio campo di vista (*Field Of View, FOV*) e l'alta percentuale

di tempo effettivo in cui l'apparato può effettuare misure (*Duty Cycle*) garantiscono un monitoraggio continuo del cielo nella banda di declinazione compresa tra: $-10^\circ \leq \delta \leq 70^\circ$.

2.1 Principali Obiettivi

Le caratteristiche innovative di ARGO-YBJ offrono la possibilità di risolvere alcune fondamentali questioni nell'ambito della fisica Astroparticellare e dei Raggi Cosmici, tra le quali:

- la misura dello spettro e della composizione dei protoni primari, in un intervallo di energia compreso tra $1 \div 500$ TeV, in modo da poter rivelare eventuali variazioni dell'indice spettrale nella zona del ginocchio;
- lo studio di sorgenti galattiche ed extragalattiche di raggi gamma nel range di energia compreso tra 300 GeV e 100 TeV;
- la misura del rapporto dei flussi di protoni e anti-protoni nei RC, in un intervallo di energia da 300 GeV a ~ 1 TeV, per investigare le problematiche riguardanti l'asimmetria materia-antimateria nell'Universo;
- lo studio delle proprietà di sviluppo degli sciame atmosferici, sfruttando l'alta risoluzione spazio-temporale con cui l'immagine del fronte dello sciame è fornita;
- l'investigazione del fenomeno dei “*burst*” di raggi gamma, con un'energia superiore a 50 GeV;
- il monitoraggio del campo magnetico solare ed interplanetario per lo studio dei fenomeni solari e della modulazione dei RC galattici di bassa energia (<100 GeV) da parte dell'eliosfera.

2.2 Struttura dell'apparato

Il rivelatore dell'esperimento ARGO-YBJ è un dispositivo a copertura d'area totale di dimensioni 78×74 m², figura 2.1, realizzato con un singolo strato di camere ad elettrodi piani resistivi (RPC). È circondato da un “anello di guardia” (*guard ring*) parzialmente coperto da RPC, che migliora le prestazioni del dispositivo aumentandone l'area attiva fino a 111×99 m². È diviso in 154 unità logiche, chiamate Cluster, di cui 24 disposte nell'anello di guardia, per un totale di 1848 RPC. Ogni camera è ricoperta con 80 strip,

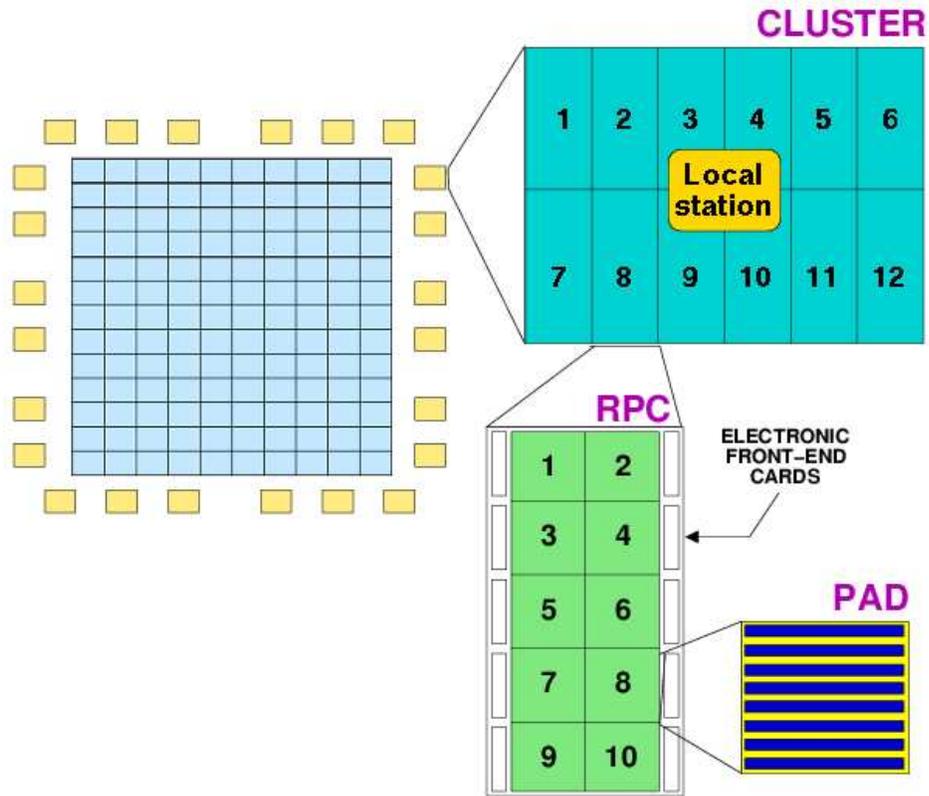


Figura 2.1: *Il Detector ARGO-YBJ e le sue unita' operative: 18480 pad, equipaggiate con 8 strip di read-out, per una accurata ricostruzione dell'immagine spazio-temporale dello sciame.*

di dimensioni $6.7 \times 62 \text{ cm}^2$, collegate in OR a gruppi di 8 per formare l'unità elementare del sistema di rivelazione: la pad.

Le pad danno informazioni temporali sul singolo hit, con una risoluzione temporale di $\sim 1 \text{ ns}$.

La scelta e l'utilizzo degli RPC per ARGO-YBJ si deve all'ottima risoluzione temporale che essi garantiscono ($\simeq 1 \text{ ns}$) e alla possibilità di poterli assemblare in ampie strutture con costi inferiori rispetto ai comuni scintillatori.

2.2.1 Le camere ad elettrodi piani resistivi

Gli RPC [26], utilizzati in ARGO-YBJ, sono dei rivelatori di dimensioni $126 \times 285 \text{ cm}^2$, costituiti da due elettrodi piani e paralleli di bachelite, caratterizzati da un'alta resistività ($\geq 5 \times 10^{11} \Omega \text{ cm}$) e separati da una

gap di 2 mm, riempita da una miscela di gas. Questa è composta da Argon al 15 %, Isobutano al 10 % e Tetrafluoretano al 75 %, specificatamente studiata per operare alle condizioni ambientali tibetane, caratterizzate da una temperatura e da una pressione atmosferica basse.

Alla quota di YangBaJing l'efficienza del detector nel rivelare particelle cariche è del 95 % con un voltaggio di ~ 7.5 kV, vedi figura 2.2.

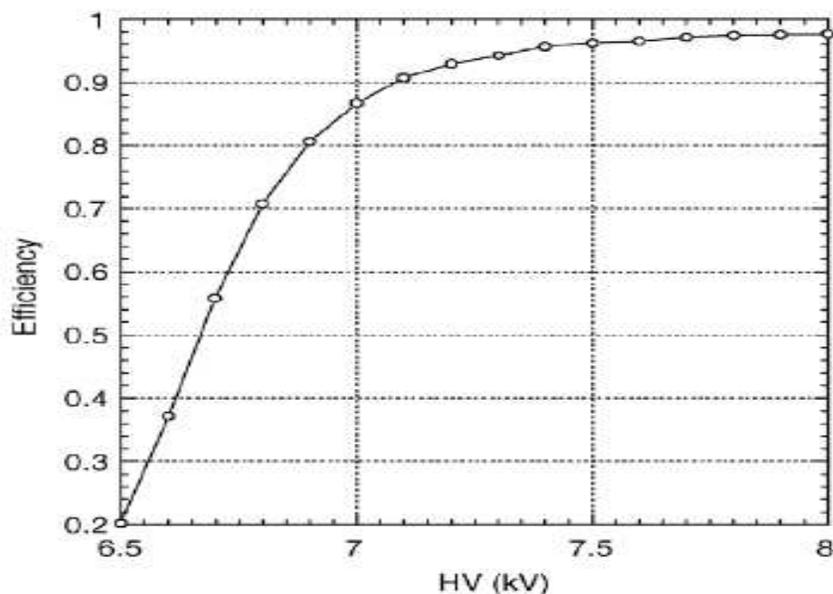


Figura 2.2: *Stima dell'efficienza del detector nel rivelare particelle cariche. Con un voltaggio di 7.5 kV è pari al 95 %.*

Con gli RPC è possibile ottenere un “*Read Out digitale*” delle singole particelle, grazie all'utilizzo di 147840 strip in rame, con una densità di 22 strip/ m^2 realizzata sul tappeto centrale.

Esse sono poste una accanto all'altra con una spaziatura di 3 mm e incollate da un lato ad una lastra di *foam* isolante spesso 3 mm. La stratigrafia del rivelatore è visibile in figura 2.3.

Ciascun RPC è posizionato, insieme alle strip di lettura e l'elettronica di *front-end*, in una scatola di dimensioni $128 \times 282 \times 5$ cm^3 , costituita da 2 strati di *foam* con 2 lamine di alluminio, incollate su entrambi i lati. Sul lato superiore di questa scatola è posto un convertitore in piombo di 0.5 cm e uno strato di *foam* di 5 cm, sui quali, da entrambi i lati, è incollata una lamina di ferro di 0.3 mm.

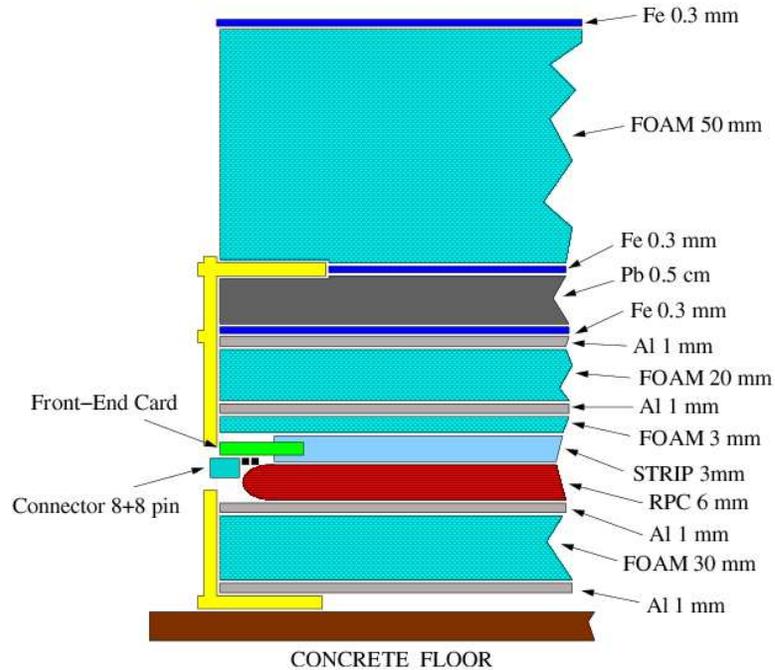


Figura 2.3: *Stratigrafia del Rivelatore.*

2.2.2 Convertitore in piombo

L'energia di soglia di un apparato di sciame può essere diminuita se viene utilizzato un materiale convertitore, il cui scopo è quello di far aumentare il numero di particelle cariche rivelabili, sfruttando la componente fotonica dello sciame, che alla quota di YBJ è circa 7 volte più grande di quella elettronica.

I vantaggi derivanti dalla presenza di uno strato di materiale denso ad alto Z sui rivelatori sono [21]:

- gli elettroni di alta energia possono amplificare il segnale attraverso processi moltiplicativi, che incrementano il numero di particelle rivelabili dall'RPC;
- gli elettroni di bassa energia possono essere assorbiti e non contribuiscono al segnale;
- i fotoni di alta energia generano coppie $e^+ e^-$, fornendo un ulteriore contributo al numero di particelle cariche rivelabili.

Il segnale così amplificato riduce le fluttuazioni temporali, contribuendo ad una migliore definizione del profilo dello sciame. Infatti, le particelle

convertite sono quelle più energetiche a ridosso del fronte della prima particella, mentre, quelle di bassa energia assorbite sono le particelle che tendono a restare indietro e a dar luogo alle code molto ritardate.

Si è calcolato che, con 0.5 cm di Pb posti a 5 cm dal rivelatore, si riesce ad ottenere un aumento del numero di particelle cariche di un fattore ~ 1.8 .

2.2.3 Sistema di controllo del rivelatore

È di fondamentale importanza avere un continuo monitoraggio dei più significativi parametri operativi dell'esperimento, in relazione sia al detector sia all'ambiente.

Per soddisfare tale richiesta è stato sviluppato un Sistema di Controllo del Detector (DCS) [23] in grado di garantire la complessiva affidabilità e robustezza del sistema.

Il controllo costante del flusso regolare di gas e della corrente assorbita da ogni singolo RPC è cruciale per avere un'alta efficienza.

In più, data la sensibilità del DCS ad improvvisi cambiamenti di corrente negli RPC, può essere un importante supporto per l'analisi dei dati, soprattutto quelli concernenti variazioni repentine nella rate di conteggi degli sciami.

Il monitoraggio *online* ad opera del DCS ha il compito di controllare continuamente l'elettronica di front-end degli RPC, la temperatura e l'umidità locale, la pressione barometrica, il voltaggio applicato e la corrente assorbita in ogni canale e tutto ciò che riguarda il corretto funzionamento del detector.

In più il DCS prevede dei comandi atti ad un attendibile riscontro nel tempo del comportamento anomalo del detector.

Segnala, ad esempio, un assorbimento di corrente, da parte di una camera, più alto del limite stabilito a $7\mu\text{A}$ e comincia una procedura di protezione automatica per interrompere la fornitura del corrispondente canale di alto voltaggio, evitando così potenziali danni alle camere.

La collaborazione ha sviluppato, anche, una serie di strumenti adibiti al monitoraggio *online* dell'intero processo di acquisizione dei dati e delle performance del detector, ad opera di “*spy jobs*” e di display, in cui è visibile il comportamento dei singoli cluster, RPC, pad e strip.

2.2.4 La logica del Trigger e il Sistema di acquisizione dati

Il cuore di ARGO-YBJ risiede nell'unità logica in cui è diviso: il Cluster (6×2 RPC); qui, all'interno di una Local Station, comincia la formazione

del trigger. In corrispondenza di un evento relativo all'arrivo di un certo numero di particelle, su una porzione di rivelatore costituita da 12 RPC, viene generato uno specifico segnale (trigger) e successivamente trasmesso ad un'unità centrale.

Questa raccoglie i segnali provenienti da tutte le Local Station e, in base ad opportuni criteri di selezione, stabilisce se l'evento è significativo o meno [24, 25]. Se l'evento viene accettato si comanda a tutte le Local Station di trasferire verso l'unità centrale i dati raccolti, relativi alle posizioni ed ai tempi di arrivo delle particelle sul rivelatore, per la successiva memorizzazione.

In seguito alla selezione dovuta al trigger, l'informazione proveniente da tutte le pad accese viene registrata in una finestra temporale di $2\mu s$ e costituisce quello che è chiamato l' "evento raw". La molteplicità dell'evento indica il numero di pad accese. Il tempo assoluto è dato dall'orologio GPS con un'accuratezza $< 1 \mu s$.

L'informazione registrata per ciascuna pad è relativa ai tempi di arrivo delle particelle sull'insieme di strip.

Il numero di strip accese (molteplicità delle strip) è una misura del numero di particelle cariche che attraversano l'area della pad. In genere, l'accensione di una strip è associata al passaggio di una singola particella e ciò è una buona approssimazione, eccetto che per eventi altamente energetici.

In questo caso, l'uso dell'informazione analogica [29] risulta più vantaggiosa per la ricostruzione della size dello sciame. A questo scopo il segnale di ogni RPC è letto anche da due pad di dimensioni $140 \times 125 \text{ cm}^2$ (*Big Pad*), che forniscono un segnale analogico proporzionale al numero di particelle che lo attraversano.

I tempi di arrivo delle particelle sono letti attraverso un TDC, con una risoluzione temporale di 1 ns, operante in concomitanza con il segnale di trigger.

La selezione dovuta al trigger [30], che interviene nella decisione di accettare o meno un determinato evento e quindi di registrarlo, è di fondamentale importanza per ridurre al minimo il rumore di fondo presente in ARGO-YBJ.

La rate misurata degli hit di fondo è di 400 Hz per Pad. Ciò implica che, nella finestra temporale di $2 \mu s$ in cui si registra l'evento, assumendo che il rumore abbia una distribuzione poissoniana, si hanno in media 12.5 hit di rumore per evento.

Ciò si deve sia alla radioattività ambientale sia allo stesso hardware utilizzato, per cui bisogna tenerne conto nella rivelazione.

Alla luce di ciò sono stati sviluppati degli algoritmi per selezionare *on-line* gli eventi dovuti agli sciame. Questa logica produce un output quando il numero totale di hit, in determinate porzioni dell'apparato, supera un livello di soglia.

Per mantenere il rumore più basso possibile, è stato implementato uno schema di coincidenza di quattro livelli, per correlare solo il segnale delle pad appartenenti ad aree adiacenti. Il sistema offre una buona reiezione del rumore.

Non è superfluo notare che, indipendentemente dal trigger, tutti gli hit che rientrano nella finestra temporale di $2 \mu s$ sono registrati.

2.3 Stato dell'esperimento

Da novembre 2003 a dicembre 2004, 16 cluster sono stati operativi per lo studio delle performance degli RPC alla quota di YBJ e per verificarne la capacità del detector di offrire un'immagine del fronte dello sciame con un'alta granularità e risoluzione temporale.

In seguito, da dicembre 2004 a luglio 2005, 42 cluster sono stati messi in acquisizione per più di 2140 ore. In questo periodo più di 10^9 eventi di RC sono stati registrati, corrispondenti a circa 7 TB di dati su nastro a disposizione.

Dall'immagine in figura 2.4, ottenuta con l'utilizzo di 42 cluster, è visibile l'alta risoluzione spazio-temporale (sopra) e spaziale (sotto), con cui ARGO è capace di "fotografare" il fronte dello sciame.

Allo stato attuale [32] sono operativi 130 cluster, ricoprenti un'area di circa $6000 m^2$, corrispondente al 85 % dell'area appartenente al tappeto centrale. È previsto che per la fine del 2006 si passerà all'acquisizione con 154 cluster, ossia con tutto il rivelatore.

2.4 Primi risultati

In questa sezione si passeranno velocemente in rassegna i primi risultati [33] ottenuti dall'analisi dei dati acquisiti con 42 cluster, $\sim 1/3$ del rivelatore, nel periodo compreso tra dicembre 2004 a luglio 2005.

Questi riguardano:

- l'effetto ombra della Luna;
- la misura dello spettro di RC;
- la ricerca di sorgenti di raggi γ ;
- l'osservazione di fenomeni transienti, quali GRB;
- la fisica del Sole.

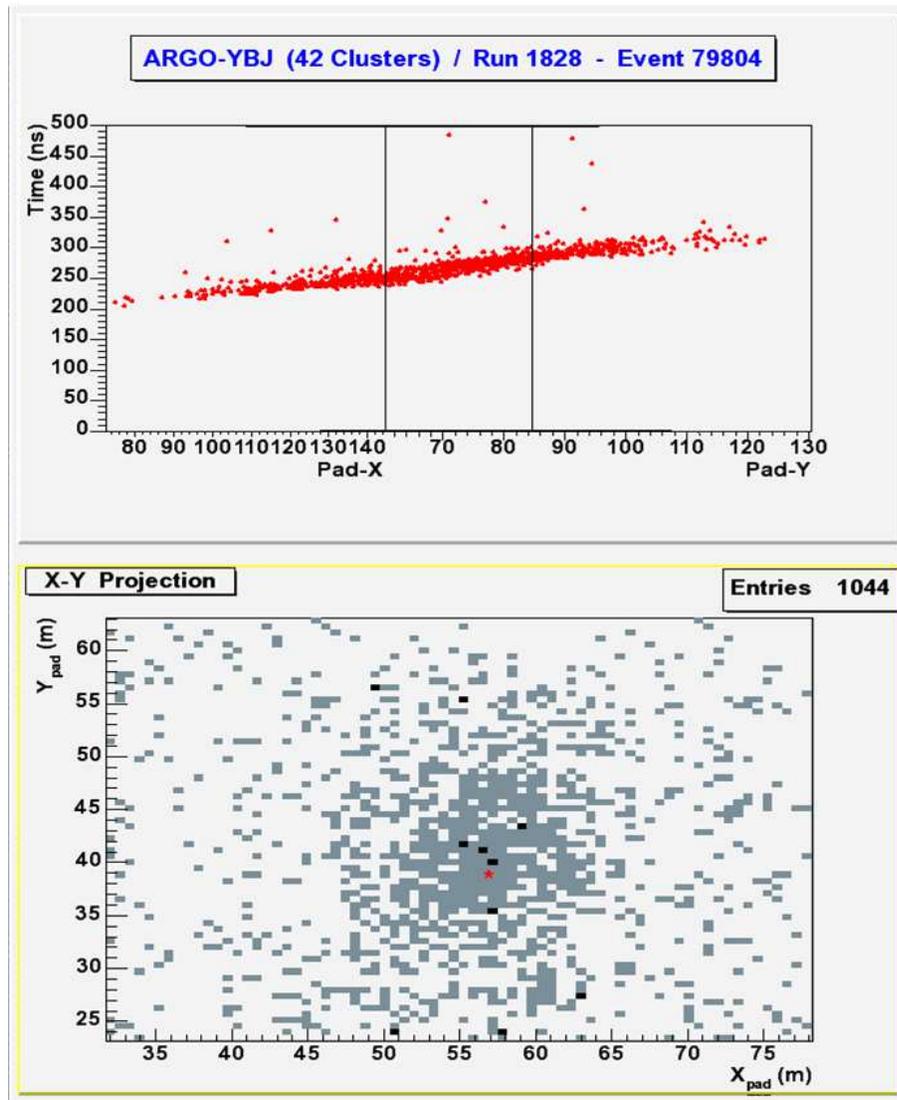


Figura 2.4: Immagine spazio-temporale (sopra) e spaziale (sotto) del fronte di uno sciame ottenuta utilizzando una porzione (42 cluster) del rivelatore.

Ombra della Luna Il passaggio della Luna o del Sole produce un'attenuazione del flusso di raggi cosmici, vedi figura 2.5, rivelabile da uno strumento di risoluzione angolare inferiore a 1° , quale ARGO-YBJ.

Tale effetto viene chiamato “*ombra della Luna o del Sole*” e fu previsto da Clark nel 1957 [34].

L'ombra della Luna è un segnale utilizzato per la verifica del puntamento degli apparati e della risoluzione angolare, mentre la posizione dell'ombra della Luna e del Sole consente una misura del rapporto $p-\bar{p}$ alle energie del TeV.

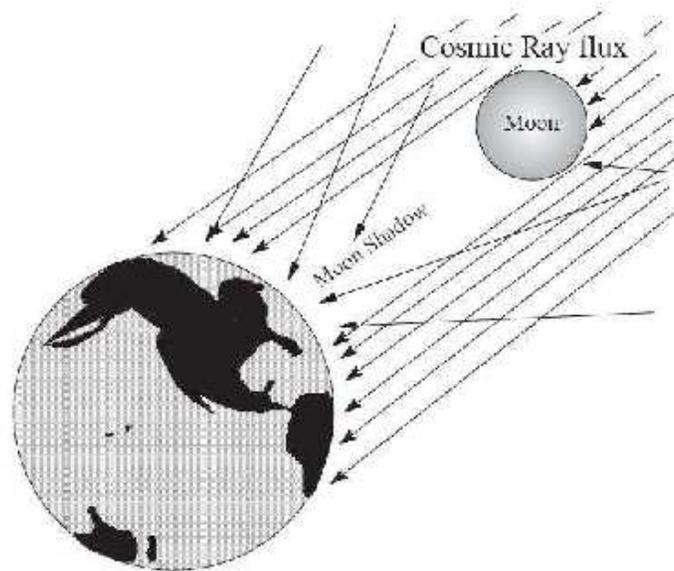


Figura 2.5: *Un diagramma schematico di come si forma l'ombra della luna.*

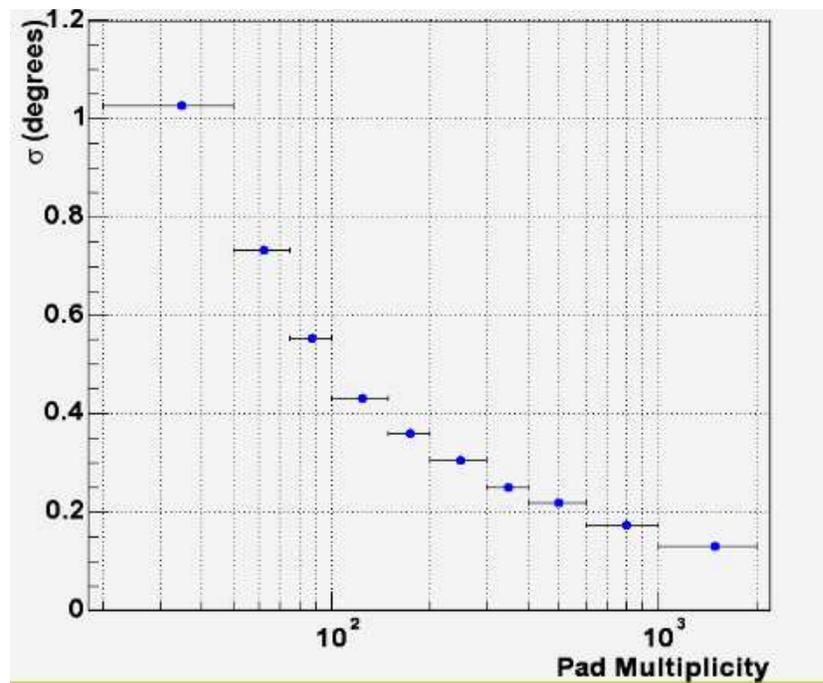


Figura 2.6: *Risoluzione angolare per ARGO-YBJ. Si nota che all'aumentare della molteplicità la risoluzione migliora.*

In figura 2.7 si osserva un deficit di eventi compatibile con quanto aspettato.

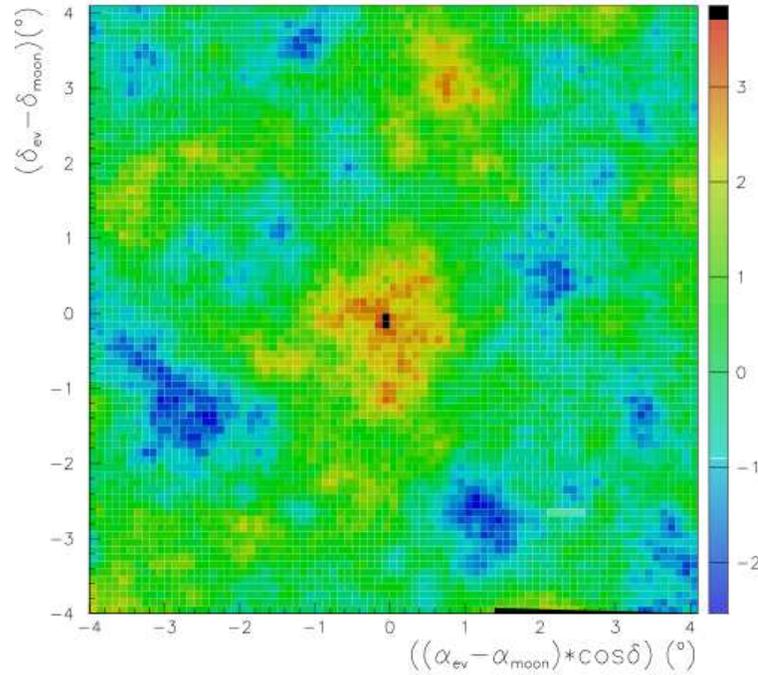


Figura 2.7: *Deficit osservato in corrispondenza della posizione in cui ci si aspetta di trovare la luna. La scala di colori a destra indica la deviazione dalla media in termini di numero di σ .*

Sorgenti di raggi γ In figura 2.8 si mostra la mappa ottenuta con i dati a disposizione. Sono indicati i punti in cui si potrebbero trovare degli eccessi in corrispondenza delle posizioni di alcune delle sorgenti di raggi gamma maggiormente note, quali la Crab Nebula, Mkr 421 e Mkr 501.

In realtà, quello che si osserva è il flusso isotropo di RC e questo è ragionevole in questa fase preliminare di osservazione, in cui si è fatto uso solo di 1/3 dell'apparato per un intervallo limitato di tempo.

Misura dello spettro di strip Lo spettro misurato, con ARGO-YBJ, è dovuto ai primari con un'energia che si estende da pochi TeV fino a 500 TeV, un range energetico misurabile attraverso metodi diretti. Questo viene confrontato con quello ricavato da misure dirette fatte con i satelliti RUNJOB [36] e JACEE [37].

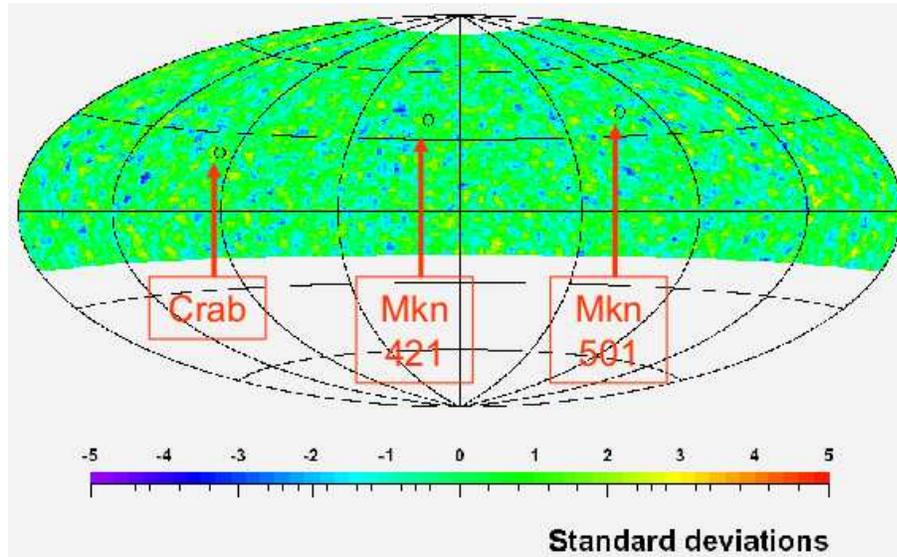


Figura 2.8: *Mappa preliminare del cielo. Si nota il flusso isotropo di RC e la posizione in cui ci si aspetta di trovare le sorgenti di raggi gamma maggiormente note.*

Utilizzando la risposta digitale (strip) del rivelatore, è possibile ricostruire lo spettro dei RC osservato. Per fare ciò si misura lo spettro di strip [22], selezionando eventi con core localizzato in una piccola area fiduciale al centro del carpet.

Dal confronto, visibile in figura 2.9, dello spettro di strip misurato da ARGO-YBJ con quello simulato sulla base delle misure di flusso fatte da RUNJOB e JACEE, si può affermare che c'è un buon accordo tra ARGO-YBJ e RUNJOB, anche se, tuttavia, bisogna avere più dati per diminuire gli errori statistici ed affinare il metodo di analisi per diminuire quelli sistematici.

Questo crea un “ponte”, che non ha precedenti nella storia degli apparati di sciame, tra le misure dirette e quelle indirette.

Osservazione di fenomeni transienti: GRB La misura della rate per ciascun cluster (*scaler mode*), con un tempo di integrazione pari a 0.5 secondi e un'energia di soglia $E \sim 10$ GeV, permette di rivelare fenomeni transienti, quali GRB o *solar flares*. Questi vengono visti come una fluttuazione non statistica dei conteggi sul fondo dovuto ai RC.

Per ciascun cluster, si sono usati 4 *scaler* per registrare la rate di coincidenza nel momento in cui il numero di hit è $\geq 1, \geq 2, \geq 3, \geq 4$ [35] in una finestra temporale di 150ns. Questo è utile per avere un'indicazione sullo spettro della sorgente nel caso in cui venisse rivelata.

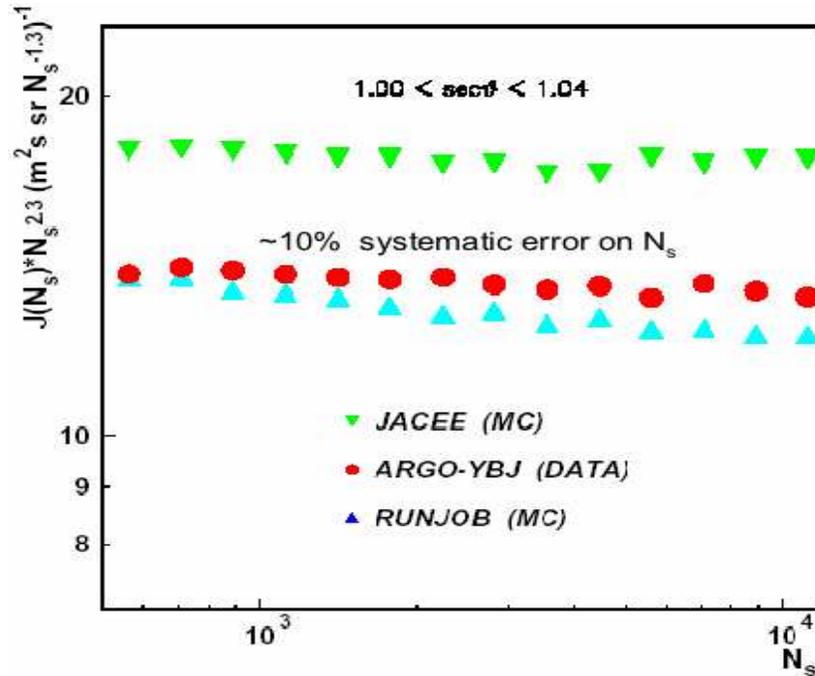


Figura 2.9: Confronto tra la misura dello spettro di strip per ARGO e quello ricavato dalle misure di RUNJOB e JACEE.

In figura 2.10 si può vedere un limite alla fluena dei GRB per i 4 canali di molteplicità studiati per ARGO-YBJ, confrontati con altri esperimenti.

Inoltre, è stata fatta un'analisi per la ricerca di un certo numero di eventi di GRB, verificatisi durante il periodo di presa dati con i 42 cluster.

Non è stata osservata nessuna emissione significativa per i GRB segnalati, nel *field of view* di ARGO-YBJ con un $\theta < 40^\circ$; questo permette di tracciare dei limiti superiori di fluena attorno a 10 GeV per gli eventi in questione (figura 2.11).

Fisica del sole Ad energie minori di circa 1 GeV/nucleone il flusso di RC è influenzato dal campo magnetico solare, per cui lo spettro energetico rivela un'attenuazione rispetto all'andamento che si ha a più alte energie. Questo provoca una diminuzione nella rate di conteggi osservabile.

Le variazioni riscontrabili nei due riquadri in alto sono dovute a fenomeni transienti, quali *solar flares*, anche se bisogna tener conto della pressione e della temperatura del detector, che possono far variare il flusso e quindi la risposta del rivelatore. Effetti questi individuabili e che possono essere corretti, riquadro in basso a destra.

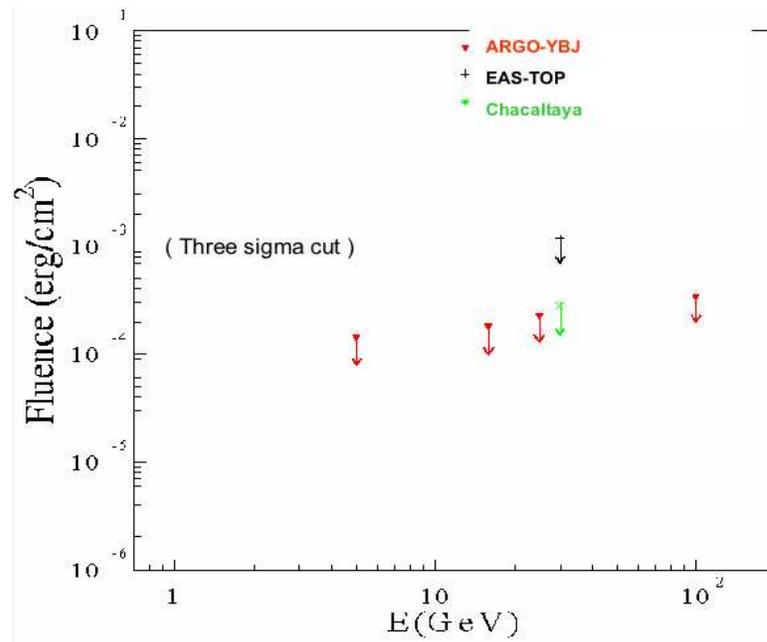


Figura 2.10: Sensibilità di ARGO-YBJ (42 cluster) nella rivelazione di fenomeni transienti confrontata con altri esperimenti.

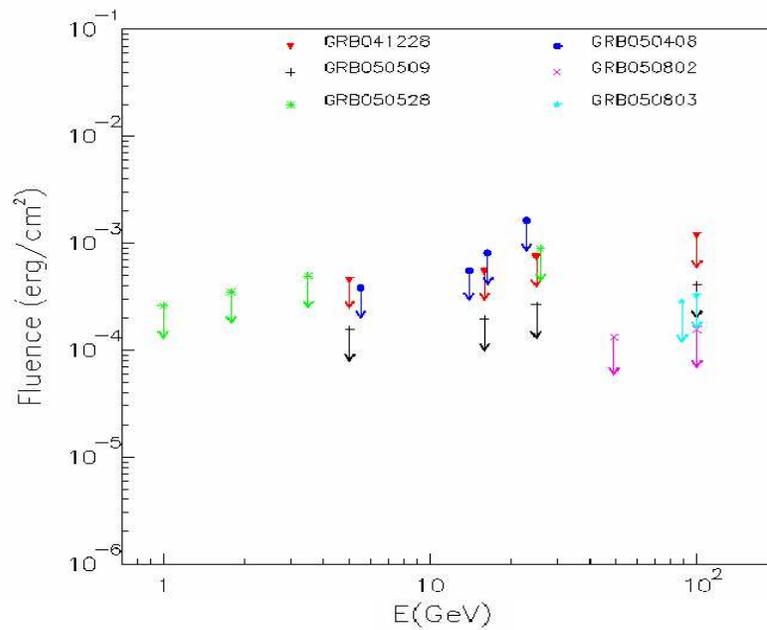


Figura 2.11: Limite superiore di fluenza tracciato per alcuni GRB, nel field of view di ARGO-YBJ, con un $\theta < 40^\circ$.

In figura 2.12 è riportato il risultato dell'analisi dei dati di ARGO-YBJ in corrispondenza di un *solar flares* verificatosi il 19 gennaio 2005. Una volta tenuto conto degli effetti di temperatura e pressione sulla rate di conteggi, si può osservare una effettiva diminuzione del segnale.

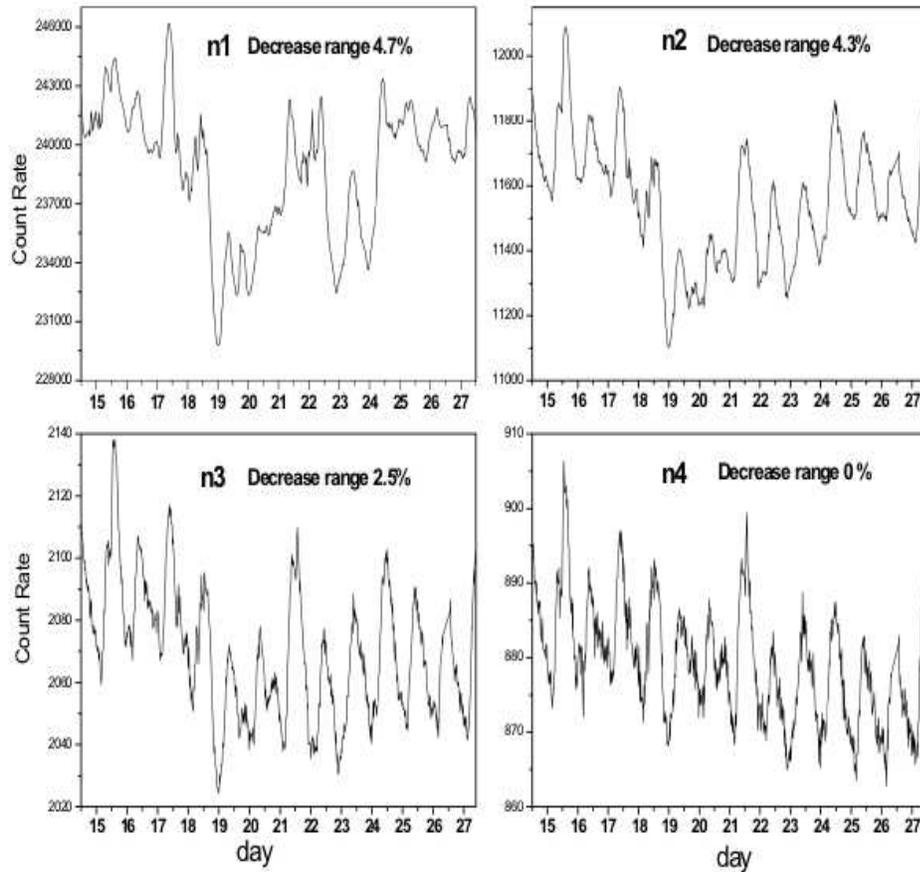


Figura 2.12: Rate di conteggi in corrispondenza al verificarsi di un *solar flares* il 19 gennaio 2005.

In questo secondo capitolo è stato analizzato, in particolare, l'esperimento ARGO-YBJ, il laboratorio di RC ad alta quota sito a YangBaJing. La sua natura, di apparato di rivelazione di sciame estremamente compatto, lo rende adatto a compiere osservazioni dettagliate della radiazione cosmica con un approccio innovativo rispetto agli apparati di misura "a campionamento" finora utilizzati.

Si è discusso nel dettaglio la struttura hardware che lo caratterizza e l'architettura software adibita sia al monitoraggio online del corretto funzionamento dell'apparato sia alla registrazione degli eventi dovuti ai RC. Infine, si è presentata una breve panoramica dei primi risultati ottenuti dai dati acquisiti con 42 cluster nel periodo compreso tra dicembre 2004 a luglio 2005.

Nel prossimo capitolo si tratterà la procedura software (IDAS) sviluppata nell'ambito di questo lavoro di tesi per il controllo e la gestione dell'enorme quantità di dati messi a disposizione da ARGO-YBJ. Questa offre la possibilità di escludere dalla propria analisi quei run affetti da problemi e si rivela uno strumento estremamente utile nella fase attuale, in cui si sta assemblando la parte restante del detector, per monitorarne l'operatività e le performance.

Capitolo 3

Sviluppo di un Metodo di Analisi e Selezione dei Dati: IDAS

Nell'ambito di un esperimento quale ARGO-YBJ, lo sviluppo di una metodologia standard di analisi e selezione dei dati riveste un ruolo chiave per il raggiungimento degli obiettivi fisici preposti.

Lo studio effettuato durante questo lavoro di tesi e presentato in questo capitolo, risponde all'esigenza di avere uno strumento che sia in grado di fare una verifica sia delle performance del detector sia delle quantità misurate.

IDAS (*Implementing DATA Selection*) nasce con l'obiettivo di fornire, al potenziale utilizzatore, la possibilità di verificare la qualità dei dati che ha a disposizione, in maniera veloce ed efficiente, in modo tale da poterli selezionare per le proprie esigenze di analisi.

Di seguito, dopo aver discusso le modalità di ricostruzione degli eventi dovuti a Raggi Cosmici, si entrerà nel dettaglio della procedura sviluppata in questo lavoro di tesi per la selezione dei dati e il monitoraggio delle performance dell'apparato.

I risultati ottenuti con 42 cluster sono presentati nel paragrafo 3.3.

3.1 Medea++

Medea++ (*Main Experimental Data Environment for Argo*) è un programma in C++ sviluppato per l'analisi e la ricostruzione dei dati, dalla Collaborazione ARGON-YBJ [39].

Può essere utilizzato per processare sia i dati provenienti dal Sistema di Acquisizione (DAQ) del Detector sia quelli relativi alle simulazioni Monte

Carlo. L'output standard del codice consiste in ntuple¹ di ROOT [38] di eventi ricostruiti, utilizzabili nei vari livelli di analisi.

La procedura implementata per la ricostruzione ufficiale degli eventi consiste in:

1. filtro di noise;
2. calibrazione temporale;
3. prima fase della ricostruzione della direzione: fit piano;
4. ricostruzione del core dello sciame;
5. seconda fase della ricostruzione della direzione: fit conico.

Con questo metodo si ottiene una buona risoluzione angolare (accuratezza nella stima della direzione di arrivo del primario), pari a $\sim 0.5^\circ$.

Filtro di Noise ARGO-YBJ registra i dati in una finestra temporale di $2 \mu s$, il filtro di noise individua la finestra di ampiezza pari a 400 ns, in cui il numero di hit è massimo. Questa selezione riduce il rumore, dovuto all'accensione casuale delle singole pad.

Calibrazione Temporale A causa di lunghezze differenti dei cavi in uso o a effetti strettamente correlati con l'elettronica dell'apparato, le informazioni temporali, provenienti dalle pad, possono avere delle differenze sistematiche. La calibrazione temporale corregge questi effetti sistematici, attraverso due passi successivi, utilizzando gli eventi stessi.

Il primo consiste nel correggere i tempi delle singole pad, per avere una distribuzione dei tempi residui dal fit del fronte dello sciame con un picco scelto a zero. Nel secondo i tempi delle singole pad sono ulteriormente corretti, per riottenere la simmetria del detector rispetto all'angolo di azimuth [40].

Fit Piano In prima approssimazione, il fronte dello sciame è assunto piano, per cui si può definire la variabile:

$$\chi^2(ns^2) = \frac{1}{c^2} \sum_i w [lx_i + my_i + nz_i + c(t_0 - t_i)]^2 \quad (3.1)$$

¹un'ntupla è un insieme di eventi, ognuno caratterizzato da un numero fissato di variabili.

la cui minimizzazione fornisce i parametri geometrici del piano. La somma include tutte le pad con segnali di tempo t_i , c è la velocità della luce nel vuoto, (x_i, y_i, z_i) sono le coordinate del centro della i -sima pad, (l, m, n) sono i coseni direttori del piano, che fissano anche la direzione di provenienza del primario, t_0 è l'istante di arrivo dello sciame sul piano dei rivelatori, w è il numero di strip accese all'interno dell' i -sima pad.

I parametri del fit sono il tempo *offset* t_0 e i coseni direttori.

Dopo questa minimizzazione [46] i segnali di tempo che deviano più di $K \cdot \sigma$ fuori dal fit della funzione sono esclusi da un'ulteriore analisi. Qui $\sigma = \sqrt{\frac{\chi^2}{N-3}}$ è la deviazione standard della distribuzione dei tempi intorno al fit piano, mentre $K = 1.5 - 2$.

La procedura viene, quindi, ripetuta iterativamente sino a che le differenze tra il risultato del fit in due passi successivi non siano trascurabili.

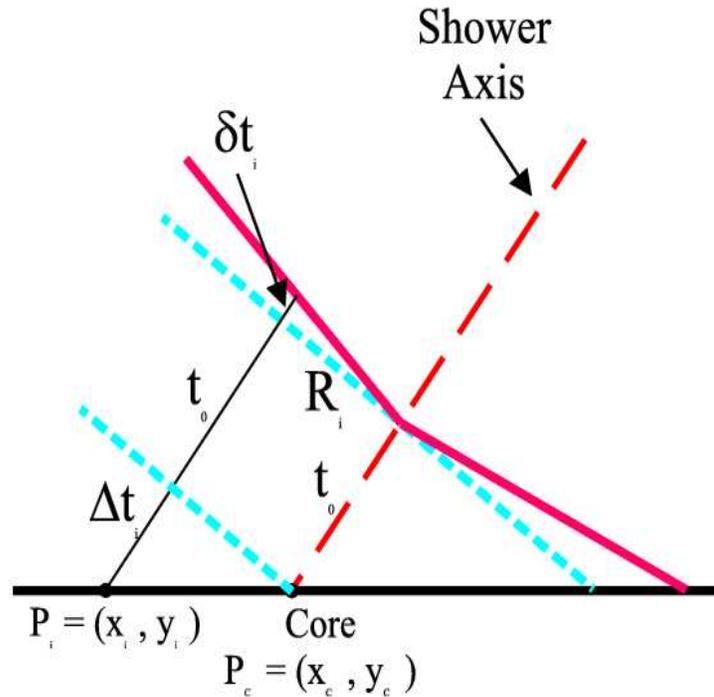


Figura 3.1: Geometria del fronte dello sciame. La linea tratteggiata costituisce il fit piano che approssima il profilo temporale conico dello sciame.

Ricostruzione del core dello sciame L'algoritmo implementato per ricostruire il core dello sciame è il Maximum Likelihood (ML) [41].

Qui, la funzione di Nishimura-Kamata-Greisen (NKG) utilizzata per approssimare la distribuzione laterale delle particelle in uno sciame è modificata per tener conto degli effetti dovuti al rivelatore [43] ed è pari:

$$\rho(r) = f\left(\frac{r}{r'_M}\right) \frac{N_0}{(r'_M)^2} \quad (3.2)$$

dove ρ è la densità di particelle a distanza r dall'asse dello sciame, $r'_M = r_M/D$ è il raggio di Moliere modificato ($r_M = 133\text{m}$ è il raggio di Moliere alla quota di YBJ e D è un parametro di correzione fissato dalle simulazioni), e:

$$f\left(\frac{r}{r'_M}\right) = C \cdot r^{A-2} \cdot \left(1 + \frac{r}{r'_M}\right)^{-B} \quad (3.3)$$

Il set di parametri (A,B,C,D) sono stati adottati per descrivere la distribuzione laterale dello sciame indipendentemente dall'energia del raggio cosmico primario [27].

Fit Conico Partendo dalla direzione del primario, determinata con il fit piano (coseni direttori l_p, m_p) e dalla posizione del core ottenuta utilizzando la funzione NKG e il metodo ML, si calcola la correzione conica [45].

In tal caso si assume che il fronte dello sciame abbia un profilo conico e che l'asse del cono coincida con la direzione di provenienza del primario e il vertice del cono coincida con il core dello sciame.

I parametri caratterizzanti vengono determinati minimizzando la quantità:

$$\chi^2(ns^2) = \frac{1}{c^2} \sum_i w [lx_i + my_i + nz_i + c(t_0 - t_i) + c(\alpha R_i)]^2 \quad (3.4)$$

L'approssimazione conica implica un termine in più, rispetto al fit piano, dato da:

$$\delta t_i = \frac{\alpha}{c} \cdot R_i \quad (3.5)$$

dove:

$$R_i = \sqrt{(\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2) - (l\Delta x_i + m\Delta y_i)^2} \quad (3.6)$$

e $\Delta x_i = x_i - x_c$, $\Delta y_i = y_i - y_c$, con (x_c, y_c) coordinate del core dello sciame e α parametro di concità.

3.2 IDAS: uno strumento per la selezione dei dati per l'esperimento ARGO-YBJ

IDAS è una procedura, sviluppata nell'ambito di questo lavoro di tesi, che si pone come obiettivo quello di fornire un metodo veloce ed efficace, per selezionare i dati a disposizione e nel contempo verificarne la qualità.

Questo diventa un passo obbligato quando si ha a disposizione una grande quantità di dati (la *trigger rate* di ARGO-YBJ è di circa 2kHz). Infatti, avere un set di variabili che descrivono lo "status" del run e che permettono di avere un quadro generale del funzionamento dell'apparato, costituisce un passo preliminare per qualsiasi analisi. Inoltre, permette di monitorare nel tempo la stabilità dell'apparato.

La strategia applicata nell'implementazione di IDAS [47] consiste nel ricavare un'ntupla, che riassume, per ciascun run, le informazioni messe a disposizione dal DAQ e quelle ottenute dalla ricostruzione degli eventi e dal DCM, uno dei moduli di Medea++ definito nella sezione 3.2.2.

L'input è costituito da:

- i file.clu, provenienti dal DAQ, che danno indicazioni riguardanti la configurazione del detector;
- i file ascii del DCM, un modulo di Medea++, adibito al controllo delle operazioni del detector e della consistenza dei dati;
- le ntuple di default di Medea++, che contengono, per ciascun evento, i parametri ricostruiti del primario e altre informazioni sulla ricostruzione.

Le ntuple globali di run, prodotte da IDAS, consentono di monitorare la qualità dei run nel tempo, individuare possibili malfunzionamenti dell'apparato, verificare la consistenza delle informazioni provenienti da diverse fonti.

Ciò fornisce un quadro generale sulla qualità dei dati, anche limitatamente a un particolare periodo di interesse. Inoltre, in questo lavoro, sono stati sviluppati gli strumenti necessari per selezionare i dati in base alla loro qualità, escludendo, eventualmente, dei periodi in cui vi sono evidenti malfunzionamenti di parte dell'apparato.

Solo i dati che superano questi filtri di qualità, verranno analizzati per le analisi che costituiscono gli obiettivi di ARGO-YBJ (studio di RC, mappe del cielo, spettro dei RC,...).

3.2.1 Informazioni provenienti dal DAQ

Il sistema DAQ di ARGO-YBJ registra la configurazione dei run in diversi file, tra questi i file.clu forniscono informazioni sulla configurazione del detector, come ad esempio quali cluster sono installati, quali in acquisizione e in trigger e infine la soglia di trigger.

Queste informazioni sono particolarmente rilevanti nella fase attuale in cui il rivelatore è in costruzione e la sua configurazione varia nel tempo.

Una delle procedure (script) di IDAS, elaborata in questo lavoro di tesi, legge le quantità dai file.clu e le immagazzina in un'ntupla di root, salvata nel file DAQtoIDAS.root.

Per ciascun run le variabili attualmente a disposizione nell'ntupla sono:

- **NRun_clu**: numero del run, secondo lo schema standard del DAQ;
- **NCluOn**: numero di cluster in acquisizione, rilevati dal sistema DAQ;
- **NCluTr**: numero di cluster in trigger;
- **Trigger**: la soglia di trigger;
- **Y**: tempo di inizio del run, anno (esempio: 5 sta per 2005);
- **D**: tempo di inizio del run, giorno (1-365);
- **H**: tempo di inizio del run, ora (0-23);
- **M**: tempo di inizio del run, minuto (0-59);
- **TSec_clu**: tempo di inizio del run, secondi.

3.2.2 Informazioni provenienti dal DCM

Il DCM (*Data Check Manager*) di ARGO è uno dei moduli di Medea++, eseguito quando vengono ricostruite le quantità misurate.

Il suo scopo è quello di fornire uno strumento capace di monitorare le operazioni del detector ed avere una prima verifica della consistenza degli eventi registrati.

Il DCM segnala significative deviazioni statistiche dai valori aspettati di alcune quantità come la rate di trigger e l'occupazione di cluster e di pad.

Per ciascun run analizzato, esso provvede a dare 2 diversi output:

1. un file ascii, contenente importanti informazioni corredate con relativi commenti, che vedremo nel dettaglio più avanti;
2. un file di ROOT, con tutti i grafici e gli istogrammi usati per l'analisi statistica.

Nell'ambito di questo lavoro di tesi si è sviluppata una seconda script di IDAS che legge le quantità presenti nel file ascii del DCM e le scrive in un'ntupla di root, salvata nel file DCMtoIDAS.root, con un entry per ciascun run.

Le variabili attualmente a disposizione nell'ntupla sono:

- **NRun**: numero del run, secondo lo schema standard del DAQ;
- **Date**: data del run, nel formato YDDDDHHMM;
- **TLast_dcm**: durata del run, in secondi;
- **CFlag**: flag di continuità, mi segnala se la rate di eventi è continua o discontinua. È pari a 1 nel primo caso, a 0 nel secondo.
Il DCM calcola la rate ogni 10 secondi, per cui prima di scrivere il file ascii ricava la rate media e la $\sigma = \sum_i (\frac{1}{N} \sqrt{\sum_i (rate[i] - media)^2})$. La rate è considerata discontinua se esistono misure che deviano più di 3σ dalla media;
- **NCluOff**: numero di cluster senza hit;
- **NPadOff**: numero di pad senza hit;
- **NPadCold**: numero di pad con basso conteggio di rate, 3σ fuori la media;
- **NPadWarm**: numero di pad con alto conteggio di hit, 3σ fuori la media;
- **NHitPPad**: numero medio di hit per pad;
- **SigNhitPPad**: sigma del numero di hit per pad;
- **TotRate**: media della rate totale, in Hz;
- **SigTotRate**: sigma della rate totale, Hz;
- **NRateOut**: numero di misure di rate campionate fuori della media di 3σ ;
- **F_dcma**: flag di controllo, pari a 0 se il file ascii è stato prodotto, a 1 se non è stato prodotto, a 3 per run molto corti, la cui durata è < 500 secondi.

Nel caso di run molto corti (< 500 s), le quantità strettamente connesse alla rate sono poste a zero, in quanto non avrebbe senso alcun calcolo statistico con poche misure.

3.2.3 Informazioni provenienti dalla ricostruzione dei dati

La ricostruzione, fatta da Medea++, produce un'ntupla di root, in cui, per ciascun evento, vengono salvati i parametri ricostruiti dello sciame e altre informazioni, legate alla bontà della ricostruzione.

Si è sviluppata una terza script di IDAS che analizza, per ciascun run, alcune distribuzioni chiave e parametrizza i risultati, che vengono poi immagazzinati nel file RECOtoIDAS.root. Quest'ultimo contiene un' ntuple di root, con un entry per ciascun run.

Tra le distribuzioni a disposizione dell'utilizzatore, quella azimutale (ϕ) fornisce una prima indicazione del comportamento generale del detector.

Dal secondo *step* della calibrazione è chiaramente visibile, nel riquadro a sinistra della figura 3.2, come, prima della calibrazione, ci si aspetta di osservare una modulazione sinusoidale dell'azimuth, con un'ampiezza di \sim il 10%. Mentre nel riquadro a destra, della stessa figura, osserviamo un andamento che è chiaramente anomalo. In questo caso, si trattava del disallineamento temporale di alcuni cluster.

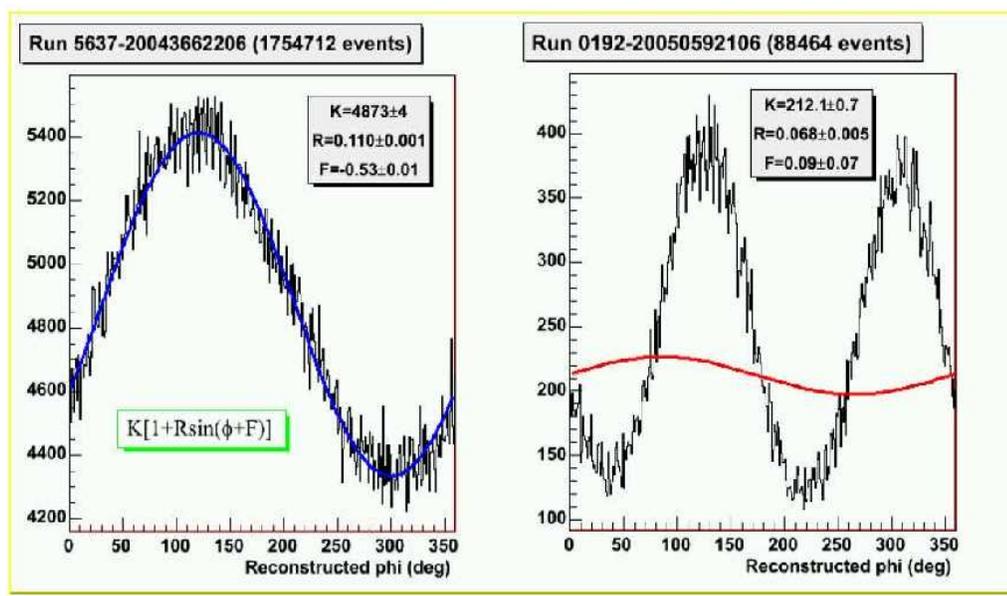


Figura 3.2: Nel riquadro a sinistra è visibile la distribuzione di Azimuth, per un dato run analizzato, prima della calibrazione temporale, con il risultato del fit, in blu. Nel riquadro a destra è chiaramente evidente come la distribuzione di Azimuth si discosti dall'andamento aspettato, visibile a sinistra; questo è un chiaro sintomo di run con problemi, evidenziati, anche, dai valori anomali del fit.

La script di IDAS calcola, per ciascun run, i parametri del fit che descrivono l'andamento sinusoidale della distribuzione di azimuth, insieme ai loro errori e ai relativi valori di χ^2 , utilizzando la funzione:

$$y(\phi) = K[1 + R\sin(\phi + F)] \quad (3.7)$$

dove K è un parametro di normalizzazione, R ed F sono rispettivamente l'ampiezza e la fase della modulazione. I risultati di questo tipo di fit possono essere utili, insieme ad altre informazioni, per identificare, rapidamente, eventuali problemi nella risposta del rivelatore.

Le variabili attualmente a disposizione nell'ntupla sono:

- **NRun_reco**: numero del run, secondo lo schema standard del DAQ;
- **Year**: tempo di inizio del run, riferito all'anno;
- **SecOfYear**: tempo di inizio del run, riferito ai secondi dell'anno;
- **TLast**: durata del run, in secondi. Nei run in cui è zero è dovuto ad un temporaneo malfunzionamento dell'orologio GPS;
- **F_reco**: flag di controllo, pari a 0 se il file è stato processato, a 1 se non è stato processato, a 2 se è stato processato, ma non contiene l'ntupla;
- **Nev**: numero di eventi nel run;
- **K_pl**: parametro di normalizzazione del fit della distribuzione di azimuth (ϕ);
- **R_pl**: ampiezza della modulazione del fit della distribuzione di azimuth (ϕ);
- **F_pl**: fase della modulazione del fit della distribuzione di azimuth (ϕ);
- **Kerr_pl**: stima dell'errore su K_{pl} ;
- **Rerr_pl**: stima dell'errore su R_{pl} ;
- **Ferr_pl**: stima dell'errore su F_{pl} ;
- **PhChi2_pl**: stima del χ^2 del fit.

Il pedice "pl" fa riferimento al tipo di fit utilizzato, in questo caso quello piano, per determinare il fronte dello sciame.

3.2.4 Modalità di Selezione dei Dati

Le variabili, contenute nei file DAQtoIDAS.root, DCMtoIDAS.root e RECOtoIDAS.root, sono concatenate e salvate dalla script ChainIDASntples.C in un'unica ntupla di root: IDAS-all.root, che le contiene tutte, con un entry per ciascun run analizzato.

Insieme all'ntupla globale, viene fornita all'utente una script apposita: ProduceGoodRunsList.C, questa consente di stabilire alcune condizioni logiche sulle variabili a disposizione, per poi salvare la lista di file relativi ai run selezionati nel file GoodRuns.lst.

Una volta prodotta la lista di run selezionati, considerati utili per una data analisi, IDAS offre la possibilità, tramite la script ChainGoodRuns.C, di aprire, contemporaneamente, tutti i file della propria lista, per avere una visione di insieme di tutti gli eventi ricostruiti e soprattutto degli andamenti delle quantità ivi presenti, per poter effettuare una data analisi.

3.3 Un'applicazione di IDAS: Analisi dei run prodotti con 42 cluster

La procedura appena illustrata non solo garantisce la possibilità di avere una lista di run selezionati con cui poter fare le analisi di fisica previste, ma anche di avere una panoramica delle performance del detector.

Infatti, a partire dalle variabili immagazzinate nell'ntupla IDAS-all.root è possibile fare un controllo incrociato delle informazioni provenienti dal DAQ, dalla Ricostruzione e dal Data Check offline, per avere varie informazioni sul periodo di presa dati considerato e sui problemi eventualmente presenti.

Di seguito, sono riportate le possibili applicazioni di IDAS [48] per i run prodotti con 42 cluster, in modo tale da capirne meglio le potenzialità e le modalità di selezione dei dati, che permettono di avere una lista di run adatti alle analisi di fisica previste.

Il formato analizzato in questa sezione è quello usato per i run dal 1835 al 6333, con un detector operativo con 42 cluster. Il periodo di tempo analizzato è compreso tra dicembre 2004 e luglio 2005 e i diversi colori si riferiscono ai diversi mesi. I grafici, mostrati nelle figure riportate di seguito, permettono di monitorare la continuità temporale dell'operatività e delle performance del detector e/o di individuare eventuali problemi hardware.

L'assenza di dati in particolari periodi, chiaramente visibili nelle figure proposte, sono dovuti a interruzioni nell'acquisizione, dovuti essenzialmente all'attività connessa con l'installazione del resto del rivelatore.

3.3.1 Configurazione del Detector e Soglia di Trigger

In figura 3.3 è riportata la soglia di Trigger, che per la configurazione di 42 cluster è pari di norma a 60, in funzione del tempo.

Il Trigger è il minimo numero di hit, che fa scattare l'acquisizione e la successiva registrazione di un evento dovuto a Raggi Cosmici.

I run che si discostano dalla soglia stabilita fanno parte di test condotti sull'apparato o di esigenze di analisi e di campionamento dello sciame differenti, i cui dettagli verranno trattati in maniera approfondita nel capitolo successivo.

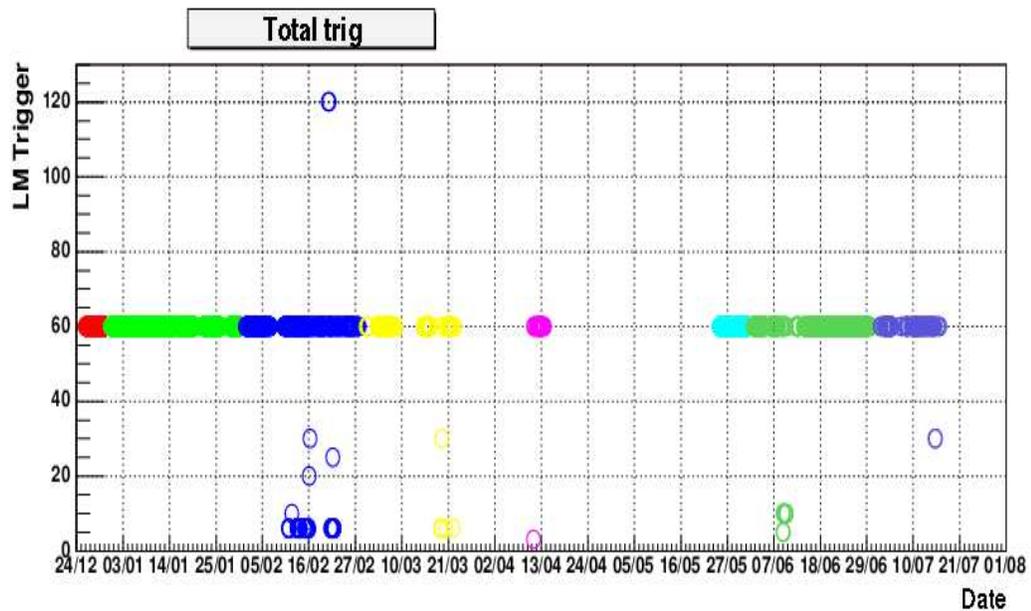


Figura 3.3: La soglia di Trigger in funzione del tempo per l'intero periodo di acquisizione con 42 cluster. In queste figure (e nelle successive) sull'asse delle ascisse sono indicati giorni e mesi del 2004-2005.

La figura 3.4 mostra una chiara panoramica del numero di cluster in acquisizione in funzione del tempo.

I cerchi blu rappresentano la configurazione del detector secondo lo schema fornito dai file.clu provenienti dal DAQ, mentre, sovrapposti a questi, i triangoli rossi indicano il numero di cluster che effettivamente hanno degli hit, informazione proveniente dal file ascii del DCM.

Le discrepanze osservabili tra le due fonti, e qui evidenziate, si devono essenzialmente all'eliminazione, in fase di ricostruzione con Medea++ delle quantità misurate, di cluster con noti problemi in fase di acquisizione.

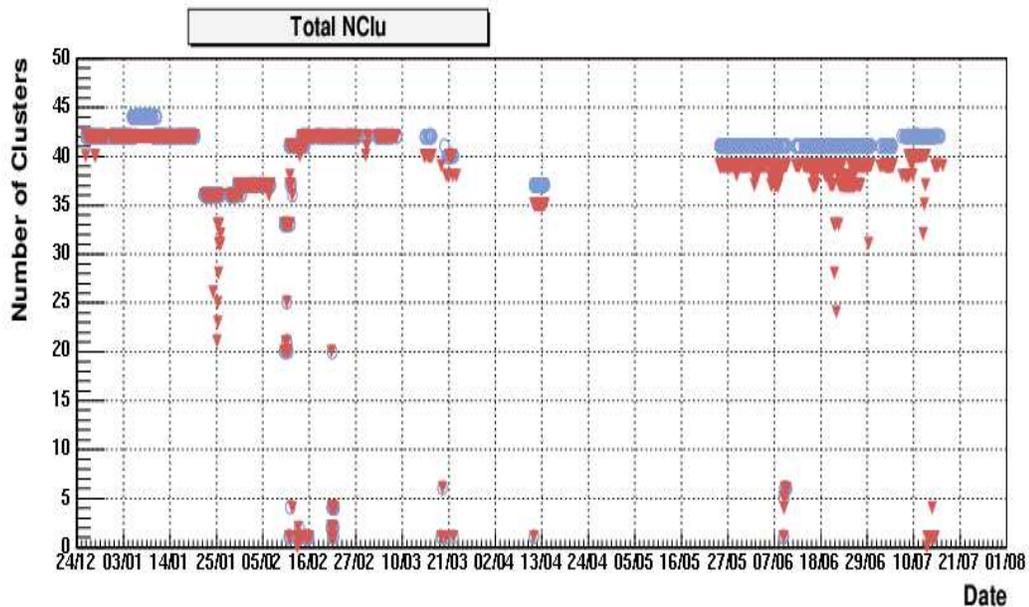


Figura 3.4: Confronto tra il numero di Cluster in acquisizione, indicato dal file *clu* del DAQ (cerchi blu), e quelli che hanno effettivamente hit come segnalato dal file *ascii* del DCM (triangoli rossi), in funzione del tempo.

3.3.2 Durata dei Run e Rate di Trigger

La figura 3.5 mette in evidenza l'alto *duty cycle* dell'apparato, che è uno dei punti forza dell'esperimento ARGO-YBJ.

Qui, si può chiaramente vedere il numero di ore al giorno in cui il detector è in acquisizione, in funzione del tempo.

Nonostante si tratti di un campione di presa dati riferito ad un periodo di test e costruzione del rivelatore, la percentuale di tempo in cui l'apparato è in acquisizione è molto alta.

L'intento è quello di avere a disposizione una quantità, che dia chiare indicazioni e una misura della continuità e dell'efficienza dell'intero processo di acquisizione dei dati, in particolare sull'operatività del DAQ e sulle performance del detector.

A tal proposito, la figura in questione mostra, per Marzo e Luglio, un livello al di sotto di quello ragionevole, dovuto all'installazione degli altri cluster.

In figura 3.6 è riportata la rate degli eventi in funzione del tempo. Nel primo periodo di presa dati, fino ad aprile, la rate reale degli eventi è sottostimata, a causa dell'alto valore di tempo morto del DAQ. Successivamente, una volta risolto il problema, la rate aumenta del 15-20 % e corrisponde effettivamente a quella vera.

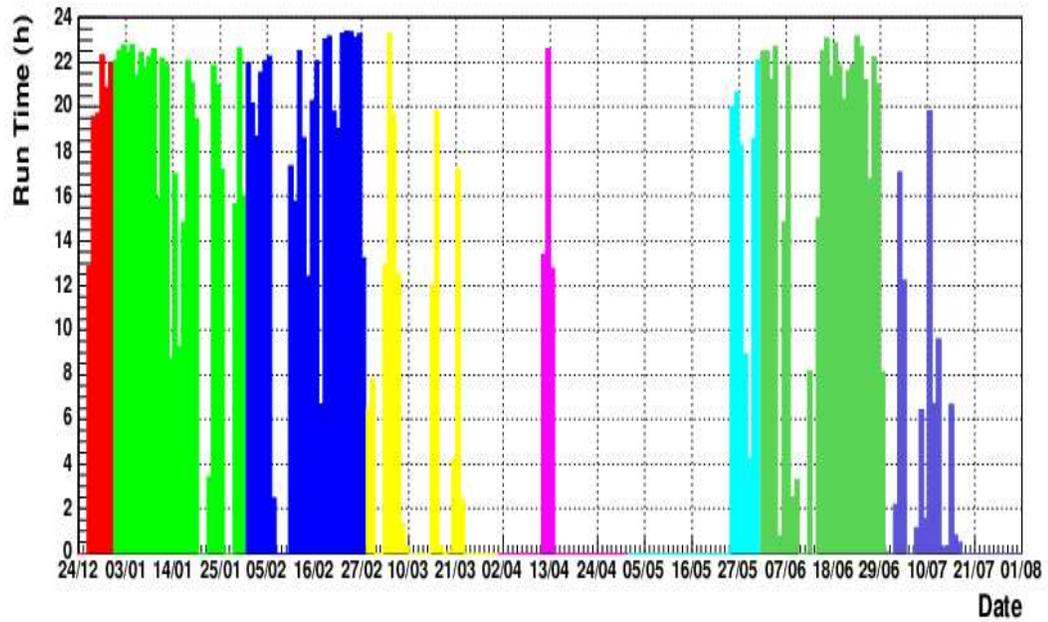


Figura 3.5: Numero di ore al giorno in cui il detector è in acquisizione, in funzione del tempo.

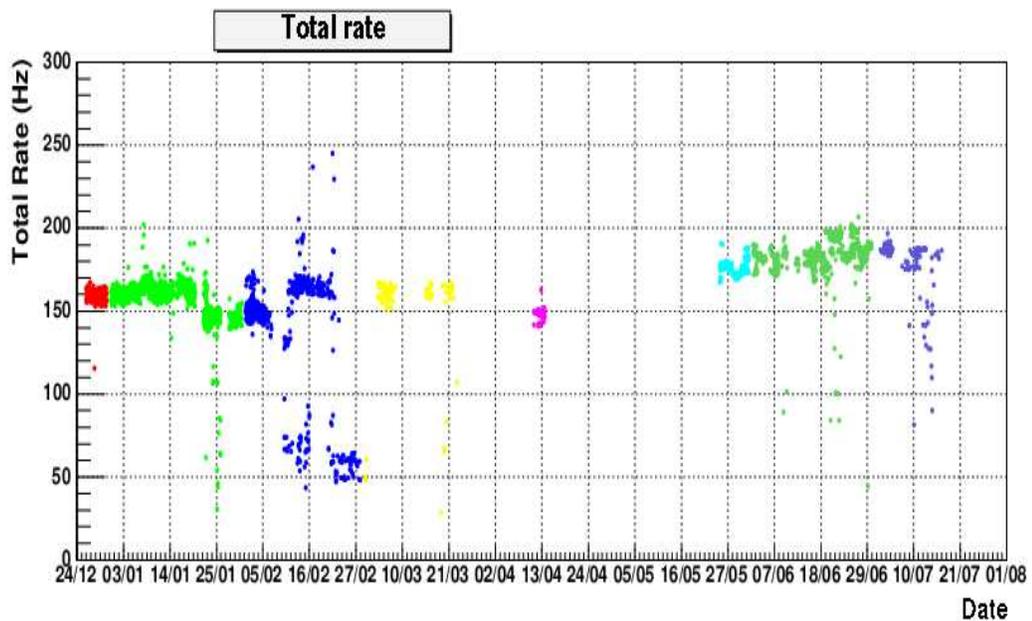


Figura 3.6: Rate degli Eventi in funzione del tempo.

La figura 3.7 mostra la distribuzione della durata dei run relativa ai mesi del periodo di acquisizione con 42 cluster.

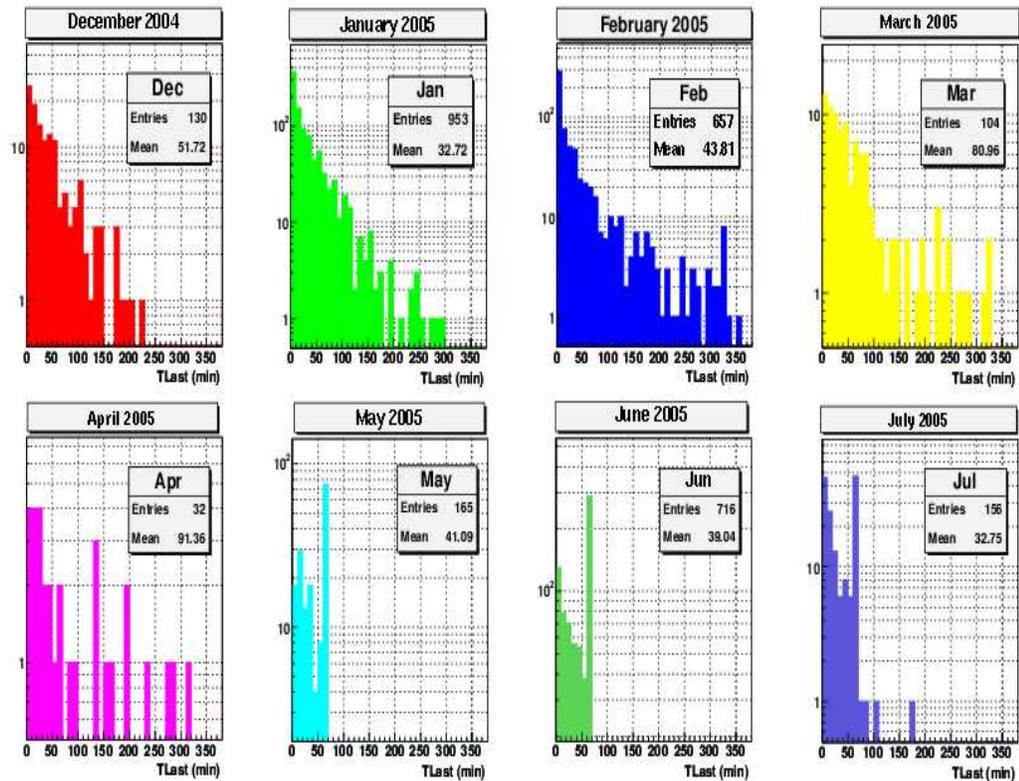


Figura 3.7: Durata dei Run per i diversi mesi, da Dicembre 2004 a Luglio 2005.

3.3.3 Prestazioni degli RPC

Utilizzando alcune delle variabili messe a disposizione da IDAS, è possibile monitorare il funzionamento del detector.

Una volta calcolata, per ciascun run, la media del numero di hit per pad, possiamo avere un'idea del numero di pad "cold", figura 3.8, che scartano di 3σ in basso rispetto alla media, e del numero di pad "warm", figura 3.9, che scartano di 3σ in alto rispetto alla media.

La figura 3.10 mostra la σ del numero di hit per pad, in funzione del tempo. Qui risulta in maniera evidente come questa variabile possa essere utilizzata per individuare un funzionamento anomalo del detector.

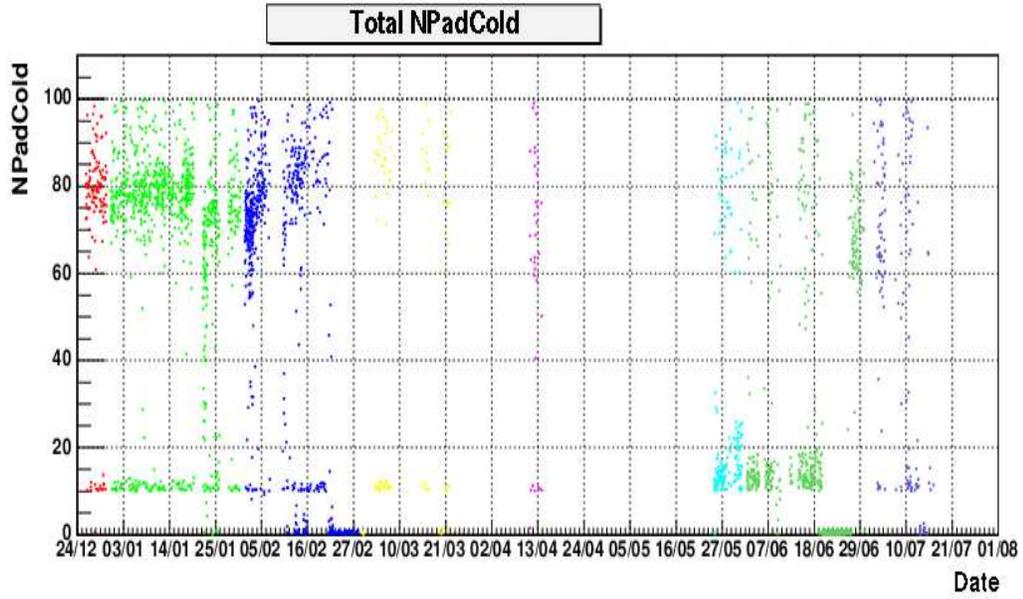


Figura 3.8: Numero di pad “cold”, che scartano di $+3\sigma$ in basso rispetto alla media in funzione del tempo.

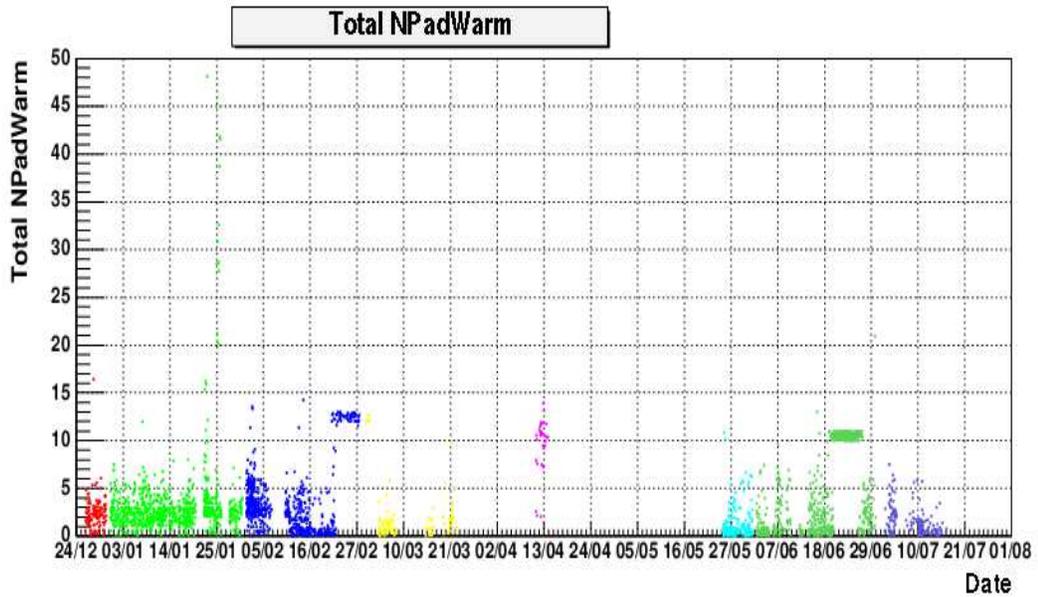


Figura 3.9: Numero di pad “warm”, che scartano di $+3\sigma$ in alto rispetto alla media in funzione del tempo.

Infatti, rispecchia problemi, effettivamente riscontrati e successivamente risolti, con alcuni dei cluster, alla fine di febbraio e verso la seconda metà di giugno.

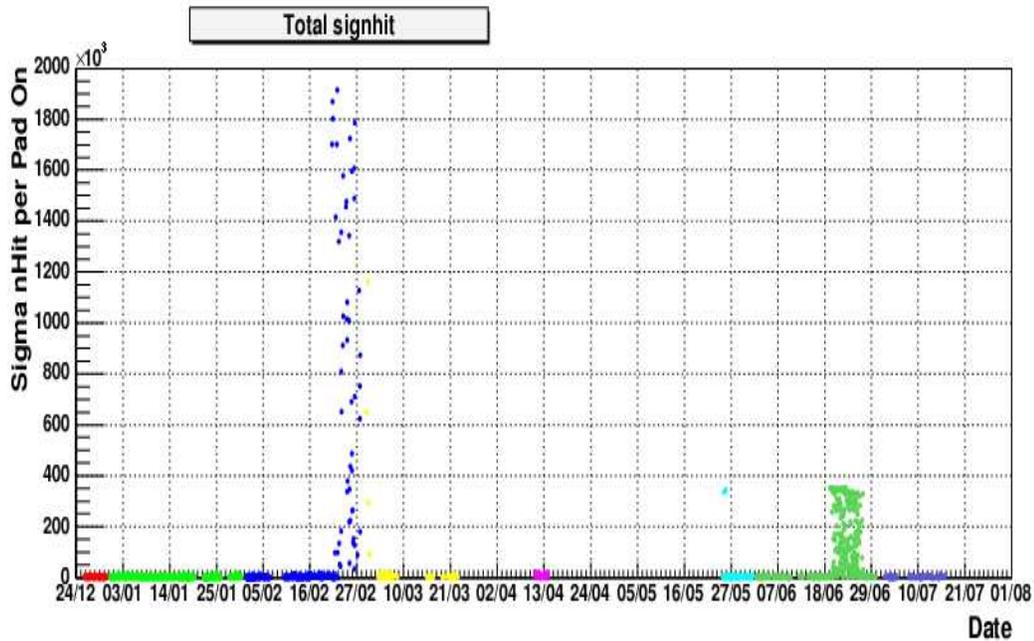


Figura 3.10: *Sigma della distribuzione del numero di hit per pad. Questa quantità mostra una grossa deviazione quando il detector funziona in modo anomalo.*

Altrettanto interessante è l'esame della figura 3.11, in questo caso si analizza la distribuzione di azimuth degli eventi per ciascun run. Prima della seconda fase della calibrazione temporale, con le correzioni sistematiche complete, ci si aspetta di avere una modulazione per l'azimuth con un'ampiezza di circa il 10 % e un periodo di 2π . Come spiegato, il fit di questa distribuzione è effettuato da IDAS ed i risultati sono salvati nell'ntupla di root che si ha a disposizione.

In figura è visibile il χ^2 di questo fit diviso per il numero di gradi di libertà, questa quantità è molto utile per identificare operazioni anomale del detector.

3.3.4 Distribuzione di Azimuth

Un'analisi più approfondita della variazione nel tempo della distribuzione di azimuth, figura 3.12, fornisce importanti indizi in relazione all'operatività del detector.

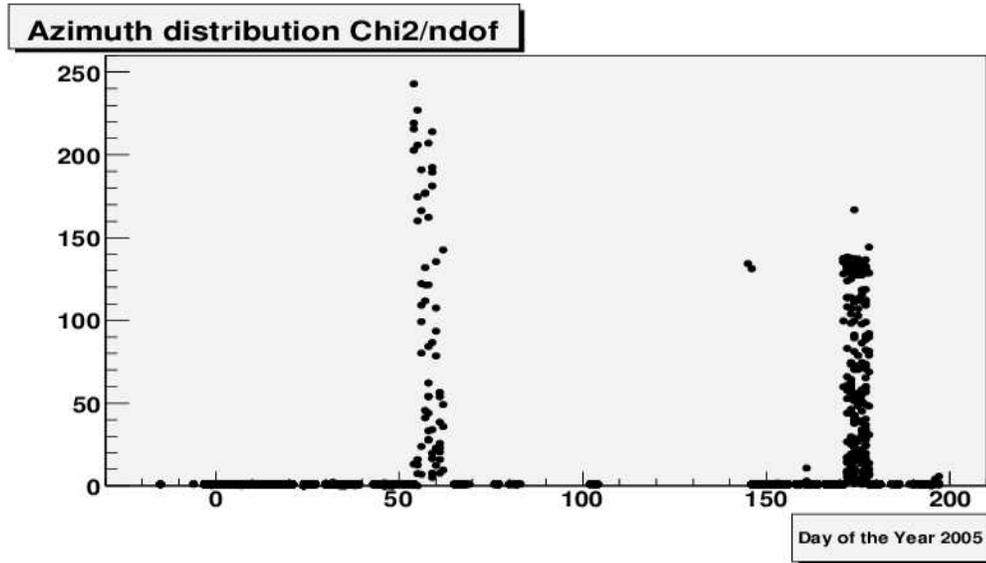


Figura 3.11: Valori del χ^2 del fit dell'andamento della distribuzione di azimuth, in funzione del tempo. Questa quantità mette in evidenza le eventuali condizioni anomale di acquisizione intervenute in ciascun run.

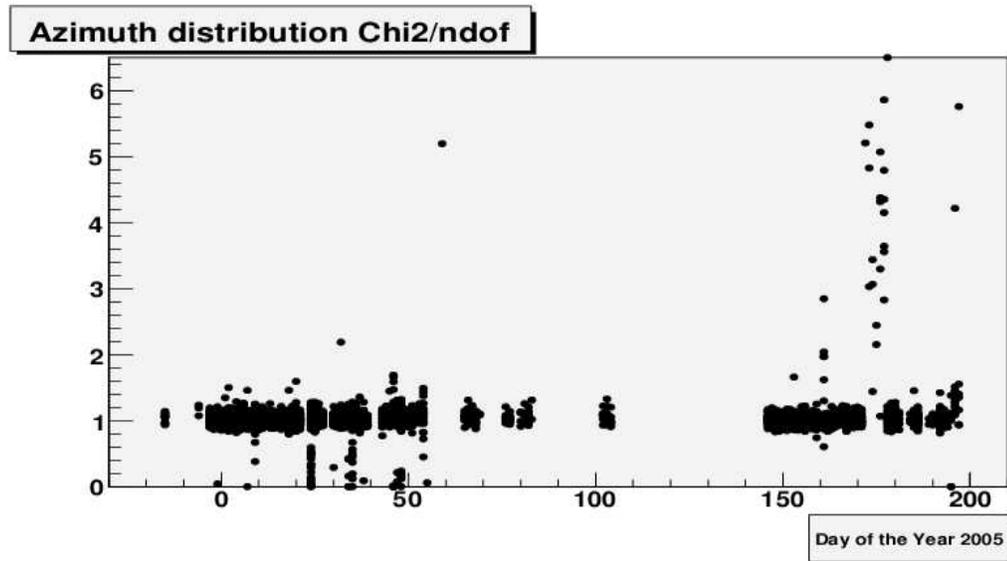


Figura 3.12: Zoom dello stesso valore di χ^2 riportato in figura 3.11; a parte alcuni brevi periodi, i dati sono ben descritti dalla funzione di modulazione usata nel fit, vedi la (3.7).

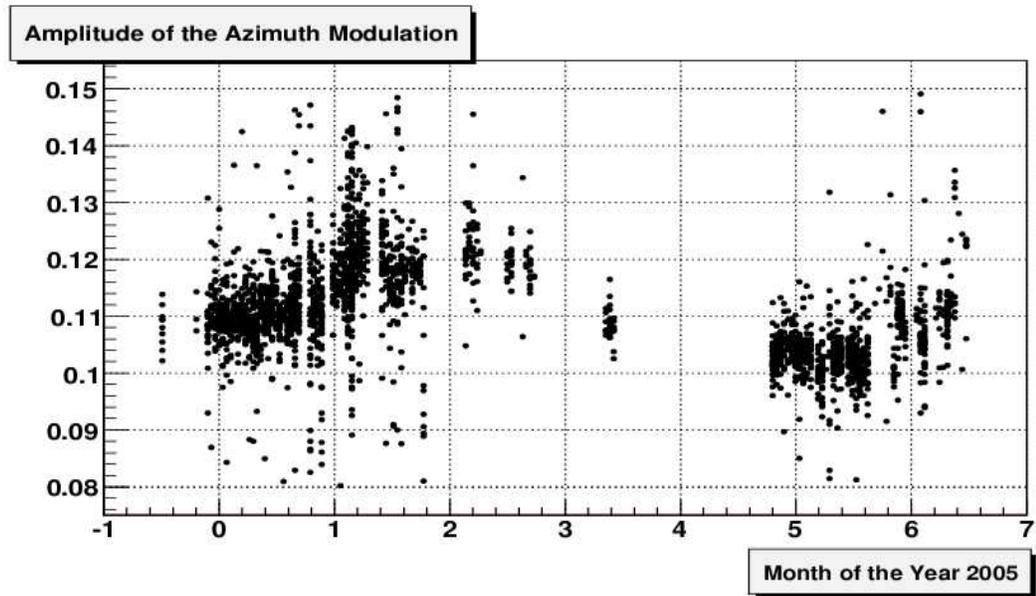


Figura 3.13: Ampiezza di modulazione della distribuzione di azimuth in funzione del tempo.

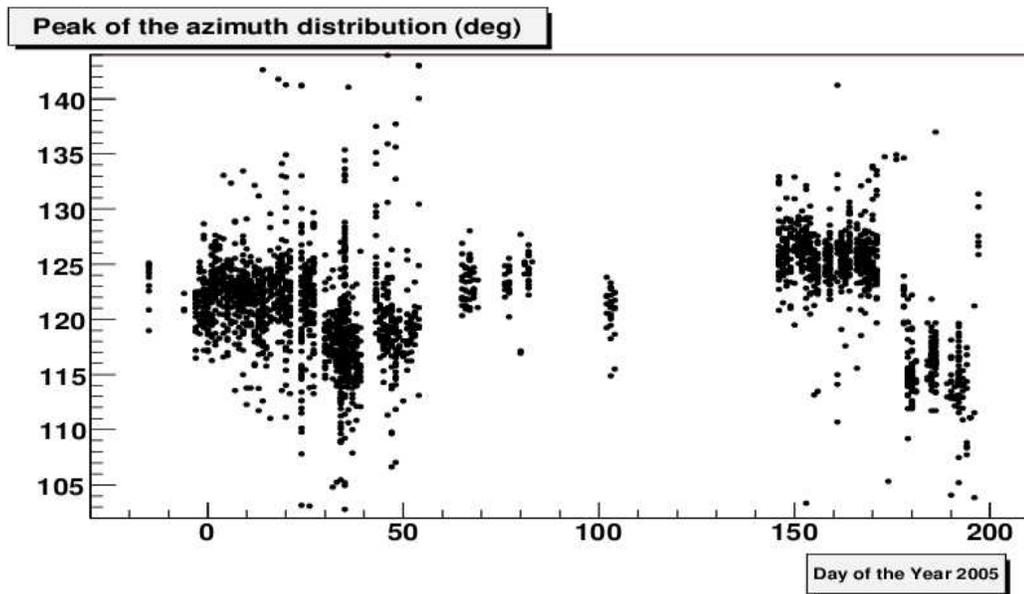


Figura 3.14: Posizione del picco della distribuzione di Azimuth in funzione del tempo.

La figura 3.13 mette in evidenza un andamento sinusoidale dell'ampiezza di modulazione, normalizzata a 1, in funzione del tempo, con un periodo di 6 mesi. Le origini di questo comportamento sono da ricondursi, molto probabilmente, ad effetti strumentali sistematici, come suggerisce la posizione, nel tempo, del picco della distribuzione di azimuth, visibile in figura 3.14; anche se solo uno studio più approfondito può escludere, in maniera univoca, che ciò non possa avere una qualche correlazione con i parametri ambientali che possono influenzare la misura del flusso dei raggi cosmici.

3.4 Conclusioni

La procedura sviluppata nell'ambito di questo lavoro di tesi risponde in maniera esaustiva alle esigenze di chi si appresta a fare dell'analisi fisica. IDAS è ormai ampiamente utilizzato dalla Collaborazione e si è rivelato uno strumento estremamente efficace nell'individuazione e nell'eliminazione di quei run affetti da problemi, legati all'*hardware* o alla ricostruzione.

Inoltre, offre la possibilità di controllare e gestire, in maniera semplice e veloce, l'enorme quantità di dati prodotti da ARGO-YBJ e di monitorare la continuità temporale dell'operatività e delle performance del detector.

Questo risulta particolarmente utile nella fase attuale in cui il rivelatore è in costruzione e la sua configurazione varia nel tempo.

IDAS ha contribuito in maniera significativa ai primi risultati fisici presentati nel paragrafo 2.3.1 ed ottenuti con i dati acquisiti con 42 cluster, nel periodo compreso tra dicembre 2004 e luglio 2005.

Attualmente, si stanno adattando le script, facenti parte della procedura sviluppata, per leggere i nuovi formati dei file e supportare la configurazione con 130 cluster.

In questo terzo capitolo si è discusso, in dettaglio, della procedura software sviluppata nell'ambito della prima parte di questo lavoro di tesi: IDAS. Le script che compongono IDAS danno la possibilità di gestire e controllare, in maniera efficace e veloce, l'enorme quantità di dati messi a disposizione dall'esperimento ARGO-YBJ, offrendo la possibilità di escludere dalla propria analisi quei run affetti da problemi, legati all'hardware o alla ricostruzione. Inoltre, mette a disposizione una lista di run che hanno superato i filtri di qualità dettati da IDAS, utilizzabili per le analisi di fisica che costituiscono gli obiettivi di ARGO-YBJ.

È stata discussa, anche, un'applicazione di IDAS che comprende l'analisi dei run prodotti con 42 cluster nel periodo compreso tra dicembre 2004 e luglio 2005, per illustrarne le potenzialità e le modalità di selezione dei dati.

Nel prossimo capitolo si presenterà la seconda parte di questo lavoro di tesi in cui, sfruttando l'alta risoluzione spazio-temporale con cui l'immagine del fronte dello sciame è fornita, si ricaverà la correlazione tra i parametri di ricostruzione dello sciame e alcune grandezze fisiche che lo caratterizzano. Inoltre sarà sviluppato un metodo per la misura della sezione d'urto protone-aria e protone-nucleone e se ne mostreranno i primi risultati.

Capitolo 4

Analisi degli Sciame Atmosferici Estesi e Misura delle Sezioni d'urto protone-nucleo e protone-nucleone

Una delle caratteristiche che contraddistinguono ARGO-YBJ è la capacità di rivelare un'ampia frazione delle particelle di uno sciame, fornendone un'accurata immagine spazio-temporale.

Questo permette di condurre studi topologici sulla distribuzione delle particelle sul piano del rivelatore, fondamentali per avere una dettagliata ricostruzione delle proprietà dello sciame atmosferico e della direzione di provenienza della particella che lo ha generato.

In più, offre la possibilità di distinguere la natura del primario (fotoni, protoni o nuclei) in base ad un'analisi della struttura spazio-temporale dello sciame osservato.

Lo studio, sviluppato nell'ambito di questo lavoro di tesi, si pone come obiettivo di stabilire una correlazione tra i parametri di ricostruzione dello sciame e alcune grandezze fisiche che lo caratterizzano.

In particolare, si esplora l'idea secondo cui una ricostruzione accurata con fit conico del fronte dello sciame permette di trovare una correlazione tra la conicità α , qualora venga trattata come parametro libero nel fit conico, e l'altezza nell'atmosfera della prima interazione del primario, legata allo stadio di sviluppo dello sciame.

Inoltre, l'andamento della distribuzione di azimuth permette di avere informazioni riguardanti la natura, l'energia del primario e l'interazione protone-nucleo ad altissima energia, non raggiungibile con gli acceleratori oggi disponibili, ed offre l'opportunità di misurare la sezione d'urto protone-nucleo (σ_{p-air}) e protone-nucleone (σ_{p-N}), utilizzando un metodo sviluppato in questo lavoro di tesi, di cui si mostreranno i primi risultati.

4.1 Caratteristiche del campione di dati analizzato

La necessità di avere un'accurata ricostruzione delle caratteristiche dello sciame e di investigare l'intervallo di massima variazione del parametro di conicità α , detta alcune condizioni nella scelta del campione di dati reali analizzato.

La tipologia di eventi utilizzati hanno una richiesta di Trigger specifica, relativa ai 20 cluster centrali, in modo tale da selezionare eventi di *size*¹ cospicua concentrati, in massima parte, in un'area ristretta del detector. Questi mostrano, in maniera evidente, un'accentuata conicità, visibile in

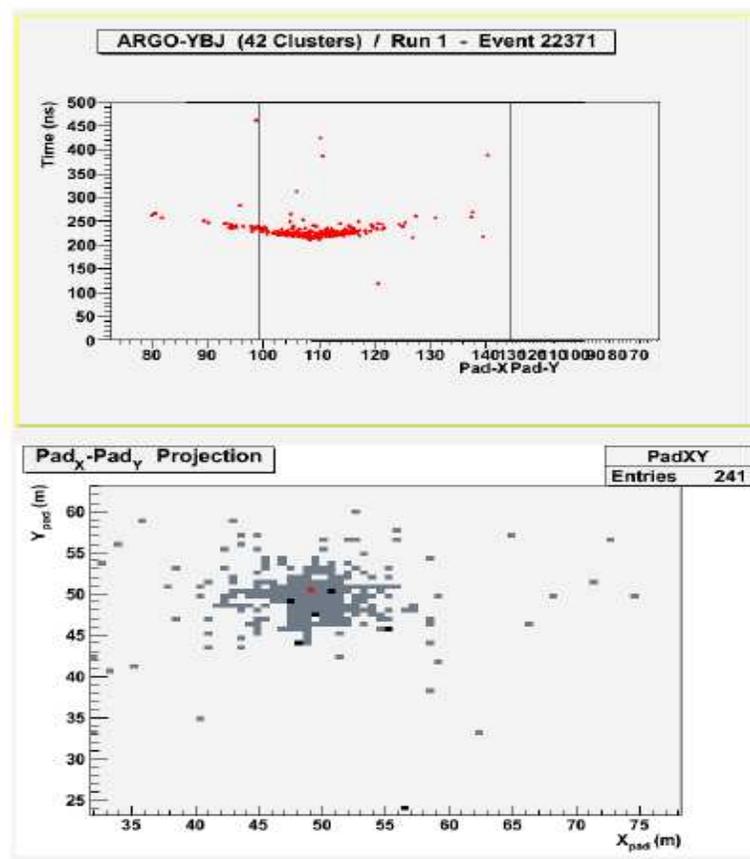


Figura 4.1: *Evento con evidenza di accentuata conicità.*

¹la *size* è il contenuto di particelle (hit) di uno sciame.

figura 4.1, che suggerisce un'interazione a grande profondità del primario. Da qui nasce l'idea di correlare la conicità dello sciame, il cui fronte è ricostruito facendo il fit conico con α parametro libero, all'altezza di produzione dello stesso.

Un'accurata ricostruzione dello sciame è cruciale, per avere una determinazione attendibile della posizione del core, della sua direzione e della sua conicità.

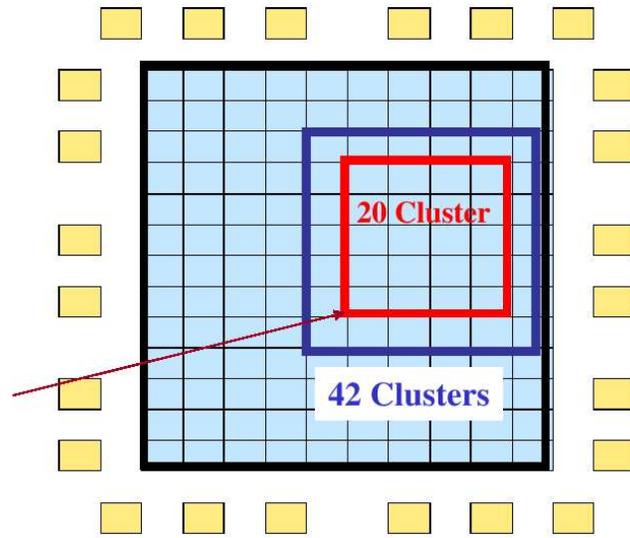


Figura 4.2: Dettaglio dei 42 cluster e dei 20 cluster centrali utilizzati per selezionare eventi con un'accentuata conicità.

Analisi del parametro di conicità ricostruito: $\text{rec-}\alpha$ È di fondamentale importanza, nel presente studio, che la ricostruzione del parametro di conicità degli eventi sia accurato. Per cui si impongono le seguenti condizioni logiche:

1. la posizione del core dello sciame deve trovarsi internamente ad un'area fiduciale;
2. la densità di hit nei 20 cluster centrali deve essere maggiore rispetto a quella presente nella corona esterna costituita da 22 cluster;
3. il cluster con la maggiore densità di hit deve essere uno dei 20 appartenenti alla zona centrale;
4. i 6 cluster, dei 20 centrali, appartenenti al perimetro più interno, devono avere una molteplicità ≥ 3 .

Le condizioni sopra elencate selezionano un campione di eventi il cui core cade, con sufficiente attendibilità, all'interno di un'area fiduciale del detector, la cui funzionalità è spiegata in maggior dettaglio nella sezione successiva.

Definizione dell'estensione spaziale dello sciame: R_{70} Per dare una misura dell'estensione spaziale dello sciame si definisce il parametro R_{70} come il raggio del cerchio che include il 70% di hit intorno alla posizione del core ricostruito. Nell'analisi svolta si utilizza un taglio su R_{70} , in modo tale da selezionare eventi il cui core è ricostruito in un'area fiduciale ($30 \times 30 \text{ m}^2$) del detector, il perimetro rosso in figura 4.3.

In più, si richiede che R_{70} abbia un limite superiore per escludere la percentuale di eventi, per i quali la ricostruzione del core non è attendibile, a causa di effetti di detector limitato. La distribuzione del parametro R_{70} è visibile in figura 4.4.

L'analisi della distribuzione di R_{70} in funzione di $\text{rec-}\alpha$, figura 4.5, indica il range, in termine di R_{70} , in cui il parametro di conicità varia. Ciò indirizza verso la scelta di un limite superiore per R_{70} pari a 20 m.

La necessità di selezionare eventi di size cospicua e ben localizzati in un'area ristretta del detector, per le esigenze di analisi sopra discusse, porta come conseguenza naturale quella di escludere eventi, per i quali la richiesta di trigger abbia una soglia di molteplicità pari a 60, estesa ai 42 cluster [64].

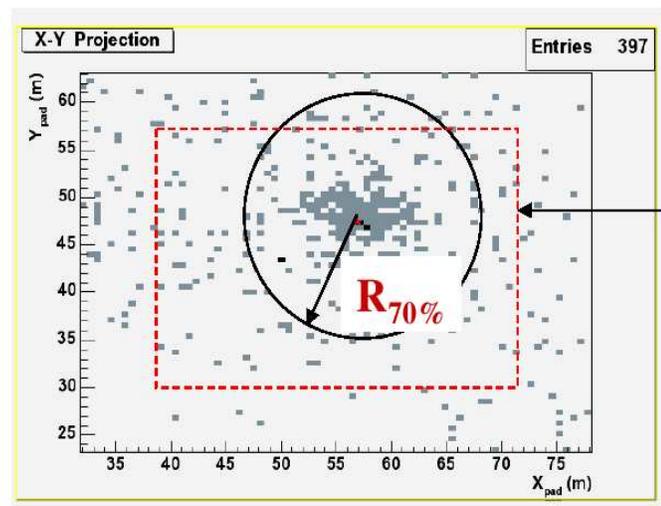


Figura 4.3: R_{70} è il raggio del cerchio che include il 70% degli hit nell'evento. Il perimetro rosso delimita l'area fiduciale entro la quale si richiede che si trovi la posizione del core.

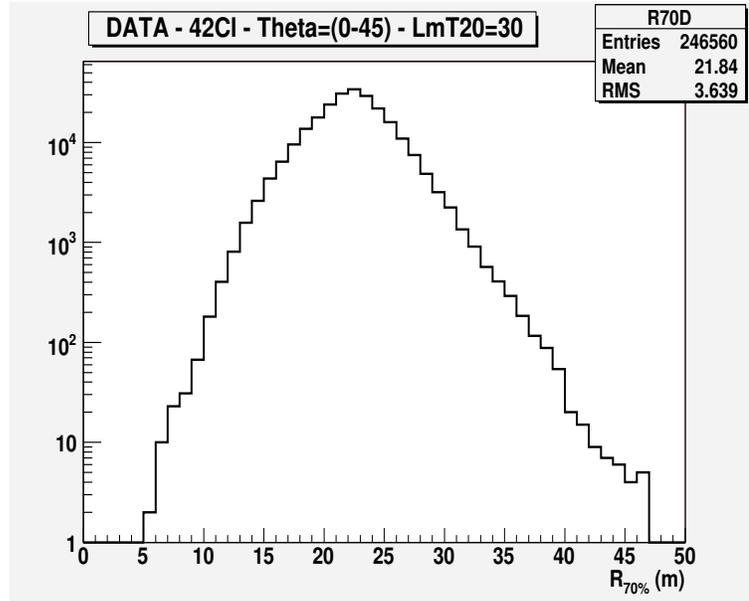


Figura 4.4: Distribuzione del parametro di estensione spaziale R_{70} . Esso permette di selezionare eventi, con molteplicità cospicua, il cui core è ricostruito all'interno di un'area fiduciale.

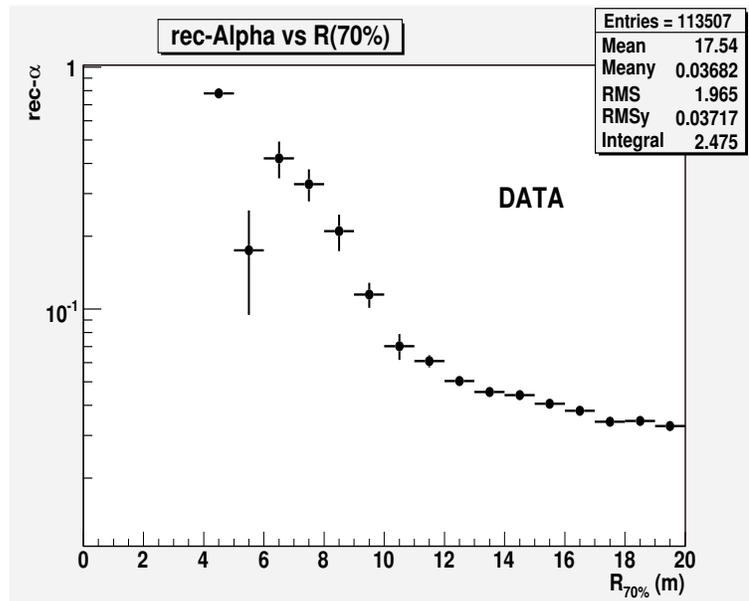


Figura 4.5: La distribuzione di R_{70} in funzione di $rec-\alpha$ dà indicazioni riguardo l'intervallo di variazione del parametro di conicità.

4.2 Campione di eventi simulati

La possibilità di simulare uno sciame atmosferico è fornita dall'impiego di tecniche Monte Carlo (MC), in grado di seguire lo sciame nel suo sviluppo e fornire i valori delle sue grandezze fondamentali.

Tutte le grandezze fisiche che caratterizzano uno sciame concorrono con pesi diversi all'identificazione del primario, alla sua energia e alla direzione di provenienza. La conoscenza delle caratteristiche di uno sciame indotto da un primario di una data energia permette di ottenere i valori medi delle quantità osservabili e le corrette fluttuazioni.

Fissato il numero di massa A e l'energia E del primario, lo sviluppo di uno sciame dipende fortemente dalla sezione d'urto inelastica (σ_{inel}) di interazione, del primario e dei secondari, con i nuclei dell'atmosfera e dalla frazione di energia trasferita alle particelle secondarie.

Una giusta interpretazione dei dati richiede un confronto con il campione di dati simulato, ciò garantisce una corretta ricostruzione delle grandezze fisiche che si vogliono studiare.

Nel presente studio, la simulazione dei campioni passa attraverso tre fasi. Nella prima si utilizza un programma di simulazione degli EAS: CORSIKA [50]. Nella seconda si simula la risposta del rivelatore ARGONIE, al passaggio degli sciame, generati da CORSIKA, tramite il programma ARGONIE [62], con la stessa condizione di trigger, relativa ai 20 cluster centrali, utilizzata nei dati reali, in modo tale da selezionare sciame con accentuata conicità. Nella terza, utilizzando l'output, fornito da ARGONIE si ricostruiscono le quantità fisiche che caratterizzano lo sciame tramite il programma di analisi Medea++ [39], lasciando α come parametro libero nel fit del fronte dello sciame.

4.2.1 Simulazione dello sviluppo di sciame nell'atmosfera: CORSIKA

CORSIKA (*COsmic Ray Simulation for KAscade*) è un programma di simulazione MC scritto in linguaggio FORTRAN [52] per la generazione e la propagazione di sciame atmosferici originati da raggi cosmici primari.

È stato sviluppato nel 1989 per lo studio degli eventi nell'esperimento Kascade [54] sulla base di tre programmi: HPDM [55], ISOBAR[57], EGS4 [51].

ISOBAR tratta le interazioni adroniche nell'intervallo di energia 0.3÷10 GeV nel sistema di riferimento del centro di massa.

HPDM descrive le interazioni adroniche di alta energia in accordo con i dati sperimentali fino a 10^{15} eV, mentre EGS4 tratta le interazioni elettromagnetiche, che avvengono nello sviluppo di un EAS.

Successivamente al programma sono state aggiunte varie altre opzioni. Per le interazioni di alta energia attualmente è possibile scegliere anche tra modelli di interazione: VENUS [58], DPMJET [59], QGSJET [53] e SIBYLL, ed è in corso di ottimizzazione NEXUS [60].

Per le interazioni adroniche di bassa energia ($E < 100$ GeV) è possibile avere una trattazione più adeguata grazie all'aggiunta del programma GEISHA [61], software sviluppato per lo studio dei processi agli acceleratori, all'interno del programma GEANT3 [63]. Esso è in grado di lavorare fino alle energie delle centinaia di GeV nel sistema del laboratorio. Le informazioni sulle interazioni con gli atomi che costituiscono l'atmosfera sono estrapolate dagli esperimenti a bersaglio fisso.

Le differenze dovute al tipo di modello utilizzato permettono di effettuare un'analisi sulle incertezze di tipo sistematico, indotte dall'assunzione di un modello di interazione rispetto ad un altro.

Per le simulazioni effettuate nella presente tesi si è utilizzato il codice CORSIKA QGSJET per le interazioni adroniche.

All'inizio del processo di simulazione è possibile scegliere una certa varietà di parametri per specificare le caratteristiche dello sciame da generare. Deve essere definita la particella primaria, la sua energia, che può essere fissa o variare entro un certo intervallo con un andamento dello spettro a scelta.

Può essere fissato il punto di prima interazione oppure lasciato al calcolo del programma in base alla sezione d'urto del primario in atmosfera.

Ancora, è possibile fissare l'angolo di incidenza della particella primaria ad un dato valore o all'interno di un intervallo con una funzione di distribuzione fissata.

Vi è la possibilità di selezionare i parametri atmosferici in modo da tener conto delle variazioni stagionali e del luogo. Inoltre, si può scegliere il modello di interazione adronica di alta energia, le caratteristiche dello sviluppo longitudinale e l'energia di soglia delle particelle secondarie.

L'atmosfera adottata è la *Standard Atmosphere* parametrizzata da Linsley.

4.2.2 Simulazione della risposta del detector: ARGOG

ARGOG è un programma sviluppato per fornire una simulazione completa della risposta del detector, per eventi dovuti a sciame atmosferici estesi. È basato su GEANT3, un pacchetto software del Cern [63].

Esso simula la completa geometria del detector e tiene conto di eventuali intercapedini tra camere e della stratigrafia, visibile in figura 2.3, del rivelatore.

Per simulare la risoluzione temporale misurata degli RPC, applica una dispersione pari a 1ns sui tempi di arrivo delle particelle generate con

CORSIKA. ARGOG distribuisce, in maniera random, la posizione del core degli sciami generati con CORSIKA su un'area rettangolare, le cui dimensioni possono essere scelte a seconda delle esigenze dell'utilizzatore.

Simula la presenza di rumore, nella stessa misura in cui è presente sul detector, 400 Hz per PAD, ed è in grado di riprodurre la stessa logica di trigger.

4.3 Confronto e Analisi tra i campioni di dati reali e simulati

A questo punto, i campioni di dati reali e simulati hanno, in linea di principio, le stesse caratteristiche, vedi figure 4.6 e 4.7, per cui è possibile fare un'analisi comparata per ricavare informazioni utili riguardo agli obiettivi prefissati.

Il campione di sciami simulati prodotto è indotto da protoni, con energia compresa tra 0.1-100 TeV e angolo di zenith (θ) compreso tra ($0^\circ - 45^\circ$).

Si analizzano, di seguito, alcune delle distribuzioni MC ricavate dal campione di dati simulato, in relazione allo studio condotto in questo lavoro di tesi.

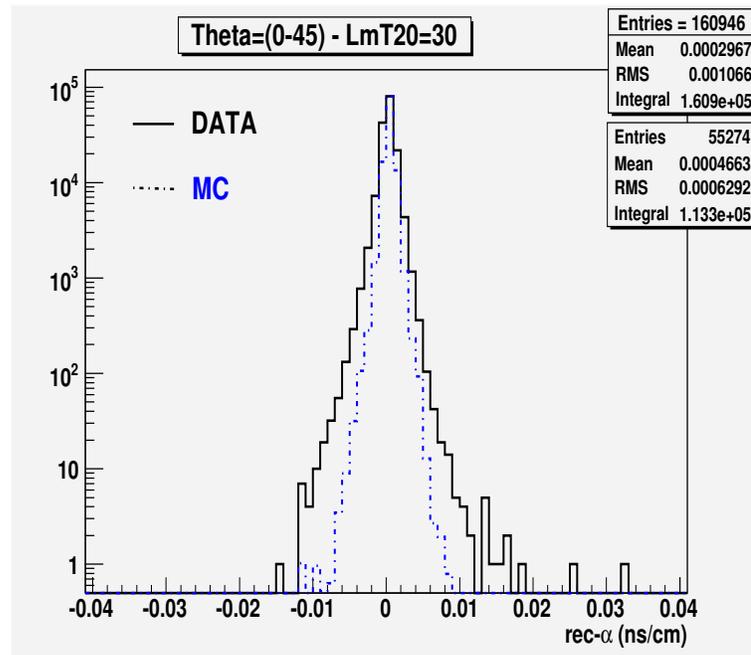


Figura 4.6: Distribuzione del parametro di conicità ricostruito, $rec-\alpha$, per i dati reali, in nero, e per il MC, in blu. La figura mostra che si può fare un ragionevole confronto tra i due campioni.

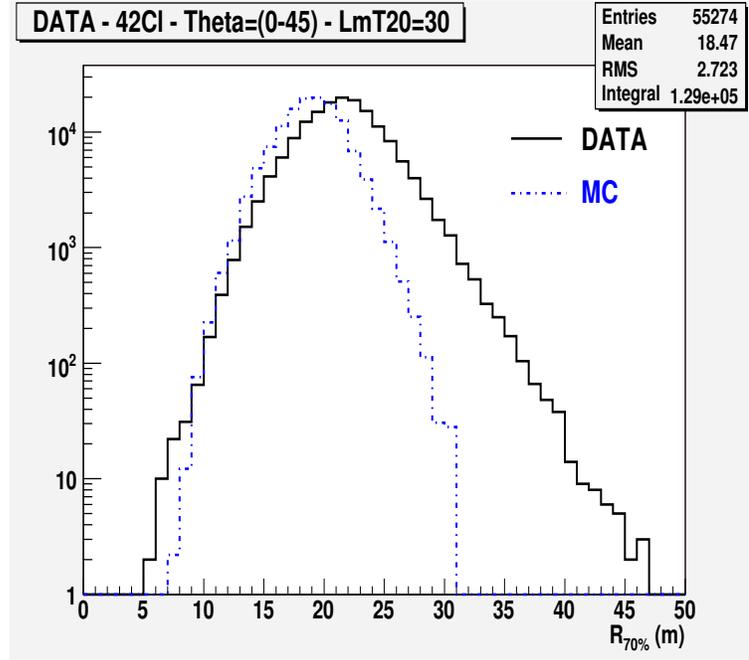


Figura 4.7: Distribuzione del parametro di estensione spaziale dello sciame, R_{70} , per i dati reali, in nero, e per il MC, in blu. Anche qui si può fare un ragionevole confronto tra i due campioni, almeno per $R_{70} < 20$ m.

4.3.1 Quota di prima interazione

La quota di prima interazione, visibile in figura 4.8, è il punto nell'atmosfera in cui il primario interagisce. Come per tutte le grandezze che caratterizzano uno sciame, essa fluttua.

Le fluttuazioni della quota di prima interazione diminuiscono all'aumentare della massa del primario. Infatti, la distribuzione $F(t_1)$ del punto t_1 di prima interazione in atmosfera è data:

$$F(t_1) = \frac{1}{\lambda} \cdot e^{-t_1/\lambda} \quad (4.1)$$

dove λ è la lunghezza di interazione nell'atmosfera, ovvero il libero cammino medio del primario, la cui trattazione verrà discussa in dettaglio nel paragrafo 4.3.3.

Questa determina l'entità delle fluttuazioni della quota di prima interazione essendo:

$$\sigma(t_1) = \sqrt{\langle t_1^2 \rangle - \langle t_1 \rangle^2} = \lambda \quad (4.2)$$

Sciame generati da nuclei pesanti hanno fluttuazioni minori.

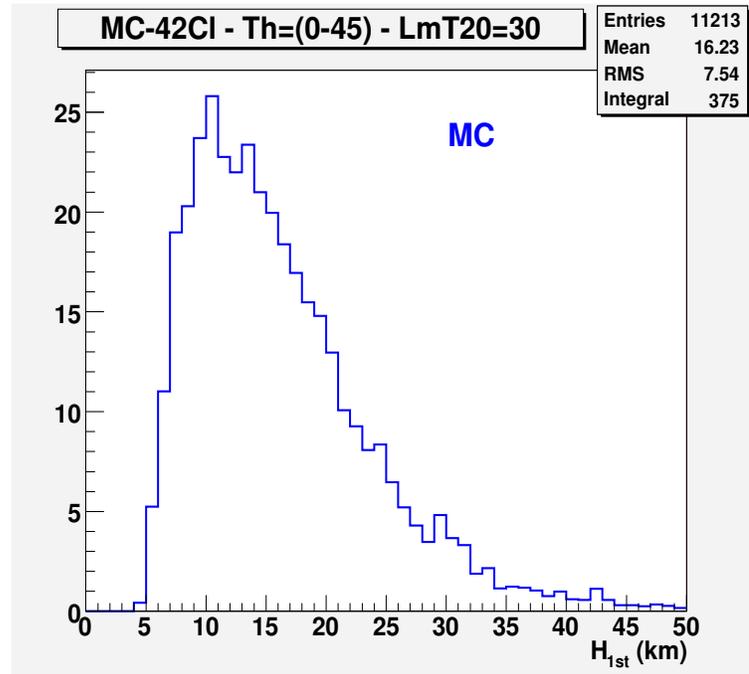


Figura 4.8: Quota di prima interazione per il campione di dati simulati.

La figura 4.9 mostra chiaramente come i primari maggiormente energetici hanno un'altezza di prima interazione a quote più alte rispetto a quelli con più basse energie, che interagiscono più in profondità.

L'andamento riportato in figura 4.10 dimostra come all'aumentare del raggio del cerchio, che definisce l'estensione spaziale dello sciame, aumenta anche l'energia posseduta dal primario, che ha generato lo sciame. Questo conferma che eventi maggiormente energetici hanno un'estensione spaziale sul detector maggiore e che R_{70} può essere un buon parametro per avere informazioni sull'energia del primario.

4.3.2 Correlazione tra il parametro di conicità e l'altezza di produzione dello sciame

L'obiettivo è quello di cercare una correlazione tra il parametro di conicità (α) dello sciame e l'altezza di produzione dello stesso, per fare ciò si deve scegliere un campione di dati reali appropriato. La selezione di eventi ben localizzati in un'area ristretta del detector, che mostrano un'accentuata conicità, visibile in figura 4.1, si rivelano particolarmente adatti per lo studio in atto. Infatti, ciò suggerisce un'interazione a grande profondità del primario.

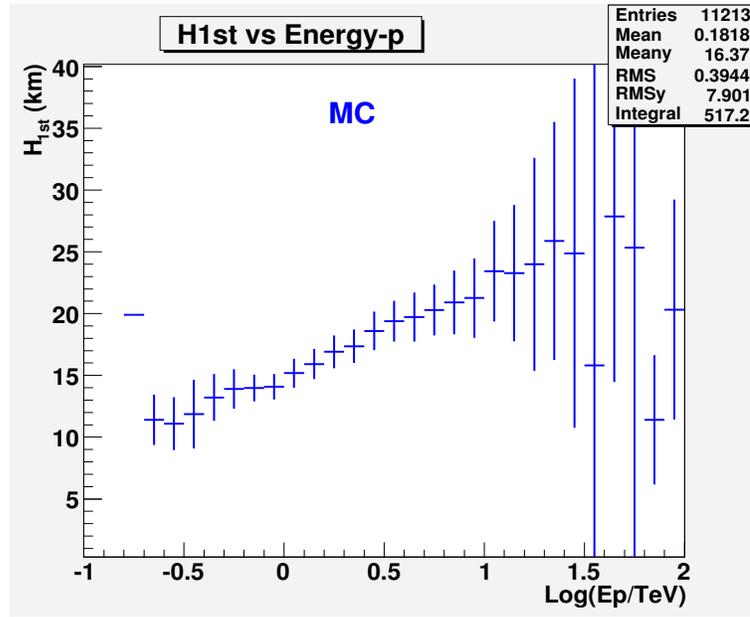


Figura 4.9: Altezza di produzione dello sciame in funzione dell'energia. Per basse energie del primario, si osserva un'interazione più in profondità nell'atmosfera.

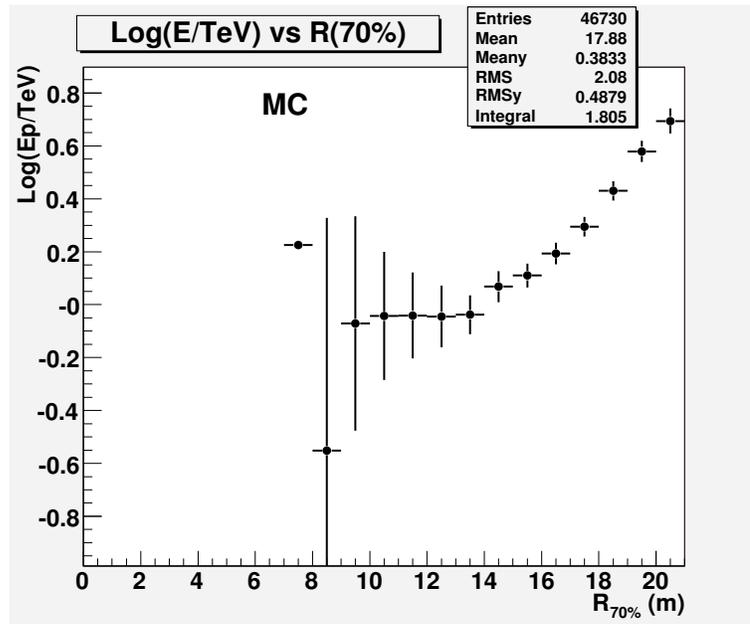


Figura 4.10: Relazione tra il parametro R_{70} , misura dell'estensione spaziale dello sciame, e l'energia del primario.

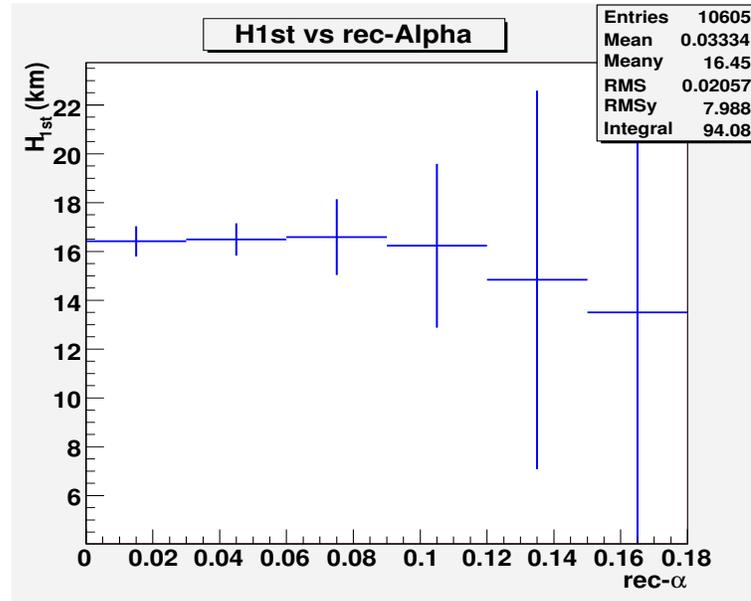


Figura 4.11: *Correlazione tra il parametro di conicità e l'altezza di produzione dello sciame.*

La necessità di avere un'accurata ricostruzione delle caratteristiche dello sciame è fondamentale per avere una determinazione attendibile della posizione del core e della conicità dell'evento. Questo porta a definire alcune condizioni logiche, sfruttando alcuni parametri, quali quello di estensione spaziale R_{70} e quello che definisce la densità degli hit sul piano del detector, di cui si è ampiamente discusso nel paragrafo 4.1.

Una corretta interpretazione dei dati richiede un confronto con un campione di dati simulato. Per questo motivo si è prodotto con CORSIKA un campione di sciame indotto da protoni, con un'energia compresa tra 0.1 - 100 TeV e un angolo di zenith (θ) compreso tra (0 - 45°), se ne è simulata la risposta del rivelatore tramite ARGOG, dopo di che se ne sono ricostruite le quantità fisiche tramite Medea++.

L'analisi di alcune quantità derivanti dalle simulazioni MC, quali la quota di prima interazione, figura 4.8, e la relazione tra l'altezza di produzione dello sciame e la sua energia, figura 4.9, sostengono l'ipotesi fatta, secondo cui eventi maggiormente energetici hanno un'altezza di interazione più in alto nell'atmosfera, mentre i primari che possiedono un'energia minore interagiscono più in profondità ed hanno una conicità più accentuata. Tale correlazione è visibile in figura 4.11.

Dall'analisi della figura 4.12 si può affermare, in maniera molto preliminare, che eventi con una conicità (ns/cm) compresa tra $0.09 < \text{rec-}\alpha < 0.12$ hanno un'altezza di prima interazione pari a 16.26 km, quelli con $0.12 < \text{rec-}\alpha < 0.15$

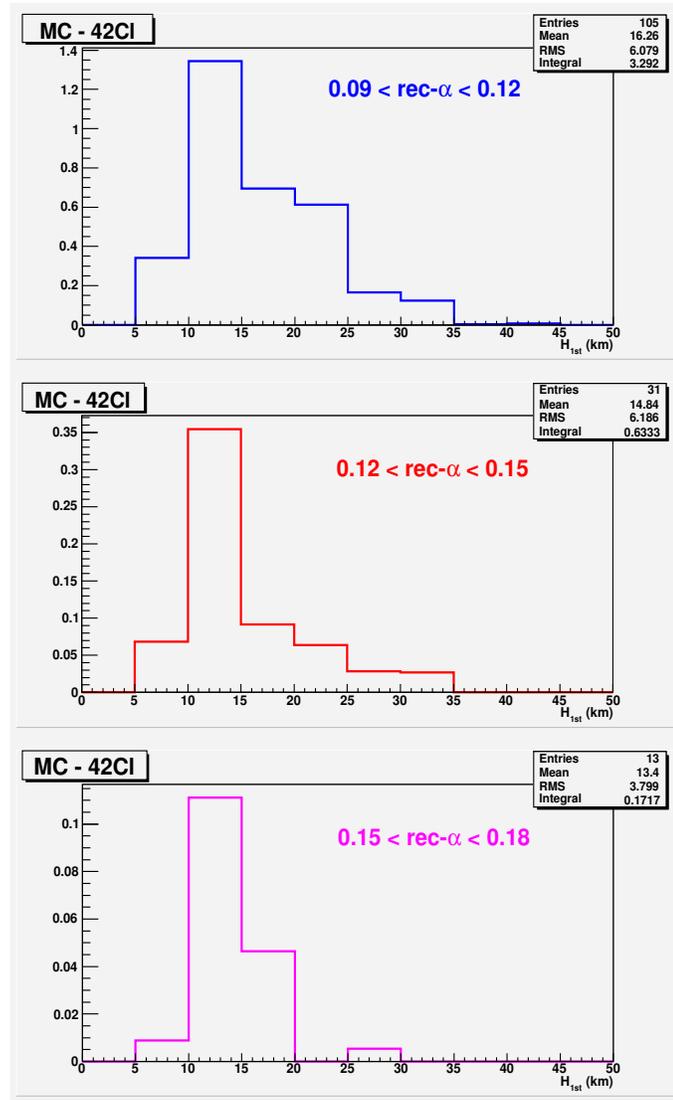


Figura 4.12: Distribuzione dell' altezza di interazione del primario corrispondente a tre diversi range di α .

pari a 14.84 km, quelli con $0.15 < \text{rec-}\alpha < 0.18$ pari a 13.4 km. Questo andamento, per la statistica limitata in termini di range energetico simulato e di estensione del rivelatore, non permette di avere indicazioni sufficientemente precise sull'altezza di prima interazione del primario e questo, lo ribadiamo, costituisce un passo molto preliminare nell'analisi fatta. Però, si ritiene che uno studio più approfondito sulla ricostruzione (core e direzione) può migliorare l'andamento e inoltre l'aggiunta di uno strato di piombo sugli RPC potrà diminuire le fluttuazioni intrinseche, nei termini visti nel paragrafo 2.2.2 del capitolo 2.

4.4 Misura delle Sezioni d'urto protone-nucleo e protone-nucleone

Dall'analisi dei parametri di ricostruzione dello stadio di sviluppo dello sciame, ricavati sia per il MC sia per i dati reali, è possibile sviluppare un metodo per la misura della probabilità dell'interazione protone-nucleo (sezione d'urto σ_{p-air}) e protone-nucleone (σ_{p-N}) ad energie, non raggiungibili con gli acceleratori.

Dal fit della relazione che descrive la rate di conteggi in funzione dell'angolo di zenith (θ) ricostruito e del numero di particelle (Nhit) presenti nell'evento, è possibile avere una stima del libero cammino medio (λ_{oss}) di interazione tra il primario che ha generato lo sciame e i nuclei d'aria, per determinati valori di energia, corrispondenti a intervalli di molteplicità ben definiti.

La rate osservata, figura 4.13, deve variare con lo spessore di atmosfera attraversato e, quindi, con l'angolo di zenith θ :

$$R(\theta) = R(0)e^{-(\sec\theta-1)h_0/\lambda_{oss}} \quad (4.3)$$

dove h_0 è la quota del livello di osservazione, che per ARGO-YBJ è pari a 606 g/cm^2 .

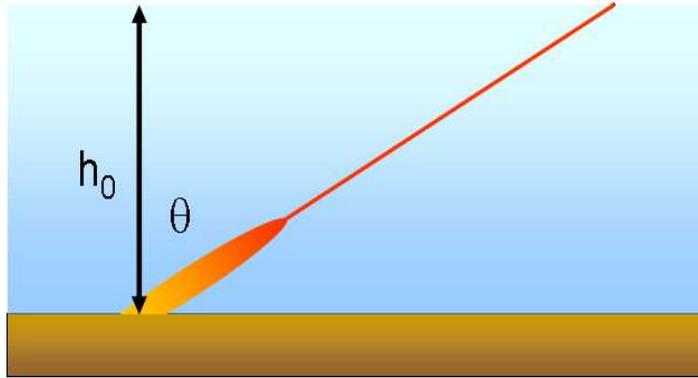


Figura 4.13: La rate osservata varia con lo spessore di atmosfera attraversato e, quindi, con l'angolo di zenith.

A causa delle fluttuazioni nello sviluppo longitudinale di uno sciame è necessario tener conto del fatto che il libero cammino medio (λ_{oss}), ricavato da tale distribuzione, non corrisponde propriamente a quello reale (λ_{int}), che

caratterizza l'interazione della particella con i nuclei di aria. In realtà, la relazione che li lega è:

$$\lambda_{oss} = k\lambda_{int} \quad (4.4)$$

dove k è un parametro che deve essere stimato attraverso le simulazione MC e che dipende dal modello di interazione, dall'energia e dal set di osservabili sperimentali.

Dai parametri ottenuti facendo il fit della distribuzione della variabile $\eta = (\sec\theta - 1)$ con la formula (4.3) e dal valore di k ricavato dalle simulazioni, si può ricavare il libero cammino medio di interazione protone-aria: λ_{p-air} .

Da cui ricavo la sezione d'urto protone-aria dalla relazione:

$$\sigma_{p-air}(mbarn) \sim \frac{2.4 \cdot 10^4}{\lambda_{p-air}(g/cm^2)} \quad (4.5)$$

dove il valore costante presente dipende dal numero di Avogadro e dalla media del numero atomico dei nuclei, che compongono l'atmosfera (in prima approssimazione 77 % azoto e 21 % ossigeno,...).

Il passaggio che porta dalla sezione d'urto protone-aria a quella protone-nucleone richiede l'utilizzo di un modello teorico appropriato.

Dal confronto e l'analisi di tre modelli utili allo scopo, in particolare la teoria di Glauber-Matthiae in figura 4.14, il modello di Pi-Durand e quello di Wibig - Sobczynska in figura 4.15, risulta che sono in ragionevole accordo in un intervallo di errore del 5 % nel range di energia considerato. Per cui si possono utilizzare i diagrammi ricavati in questi modelli per ricavare la sezione d'urto protone-nucleone da quella protone-aria.

Procedura Avendo a disposizione sia le simulazioni sia i dati reali si stabilisce un intervallo di molteplicità, lo stesso per entrambi i campioni, corrispondente a determinati valori di energia forniti dal MC, vedi figure 4.16 e 4.17.

Viene effettuato il fit della distribuzione MC di η , visibile nelle figure 4.18 e 4.19 in un appropriato range angolare, nei due intervalli di molteplicità scelti, per determinare il libero cammino medio di interazione osservato sui dati simulati λ_{oss}^{MC} , da cui si ricava il parametro k , tramite la relazione 4.4, da utilizzare poi nel campione di dati reali, nei termini spiegati sopra.

A questo punto, facendo il fit della distribuzione di η per il campione di dati reali, visibile nelle figure 4.20 e 4.21, si hanno tutti gli elementi necessari per calcolare il libero cammino medio reale di interazione del RC, utilizzando il parametro k ricavato dal MC. In tal modo è possibile avere una misura della sezione d'urto RC-aria, σ_{RC-air} , per ciascun intervallo di molteplicità, ossia di energia considerato.

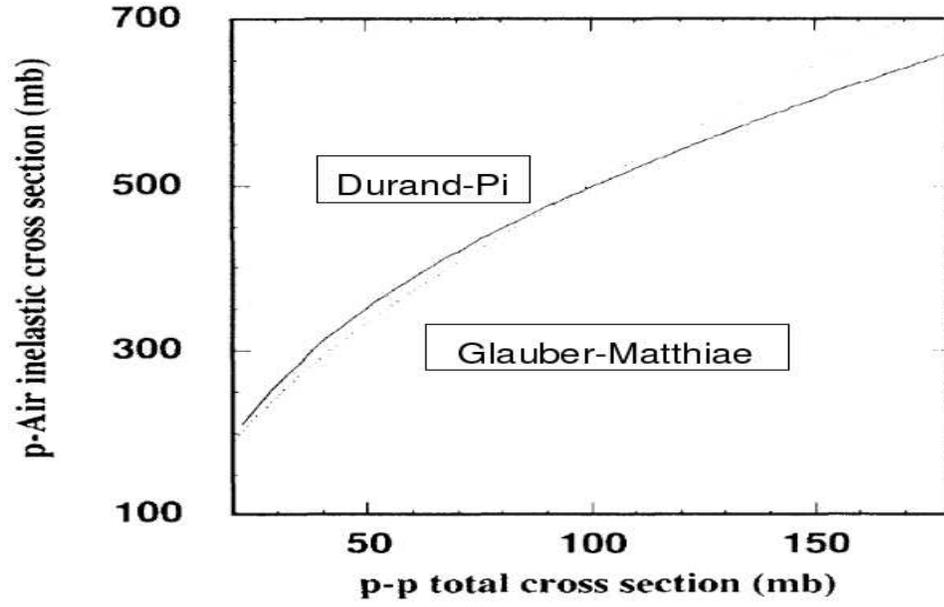


Figura 4.14: Confronto tra teoria di Glauber-Matthiae e modello di Durand-Pi.

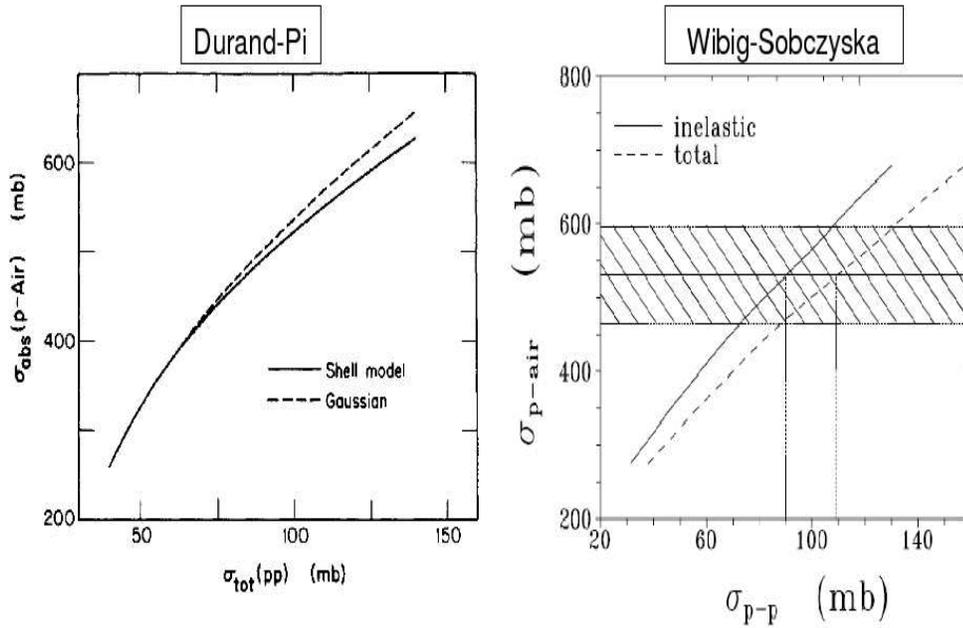


Figura 4.15: Confronto tra modello di Durand-Pi e Wibig-Sobczyska.

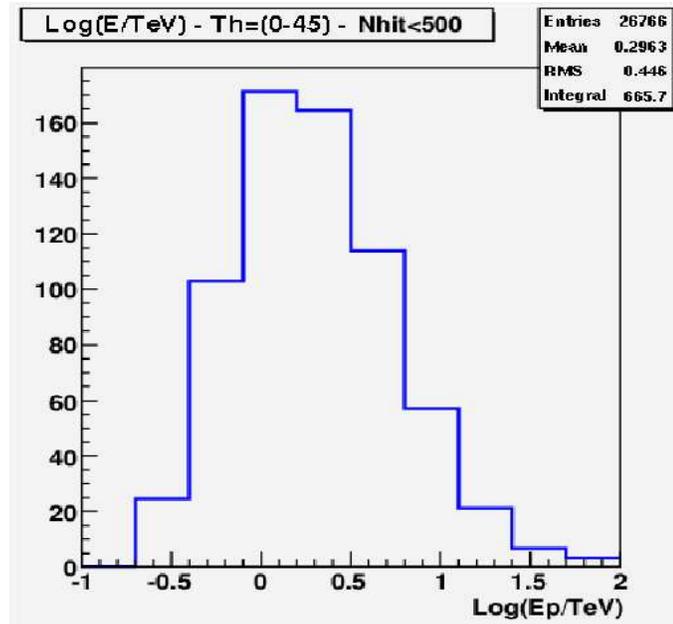


Figura 4.16: Distribuzione di energia per il MC corrispondente ad un intervallo di molteplicità minore di 500.

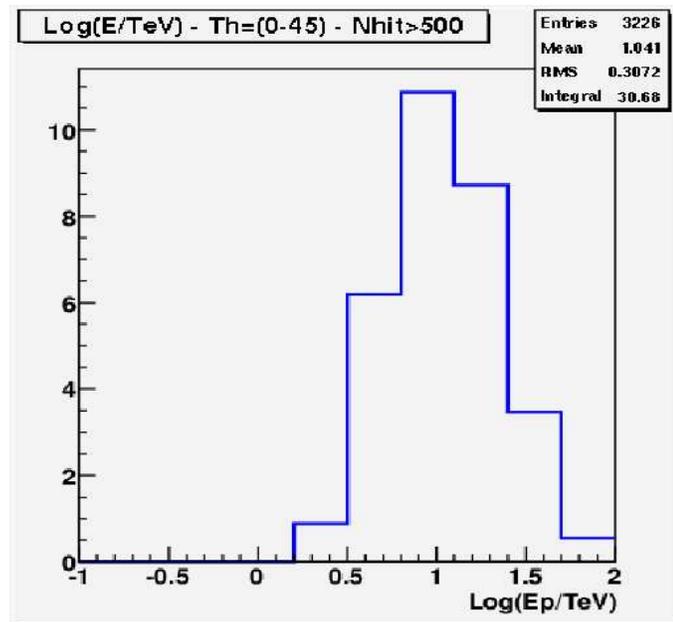


Figura 4.17: Distribuzione di energia per il MC corrispondente ad un intervallo di molteplicità maggiore di 500.

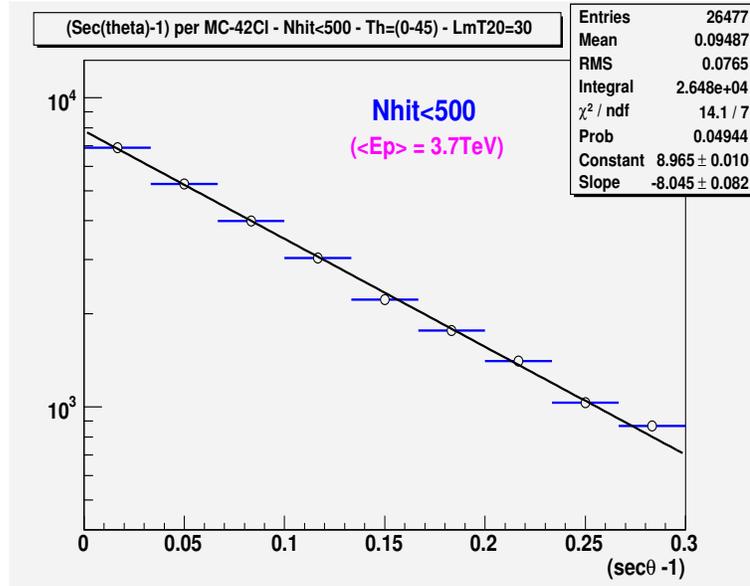


Figura 4.18: Fit della distribuzione di η per MC nell'intervallo di molteplicità in cui il numero di hit è minore di 500, corrispondente ad un'energia media del primario $\langle E_p \rangle = 3.7 \text{ TeV}$.

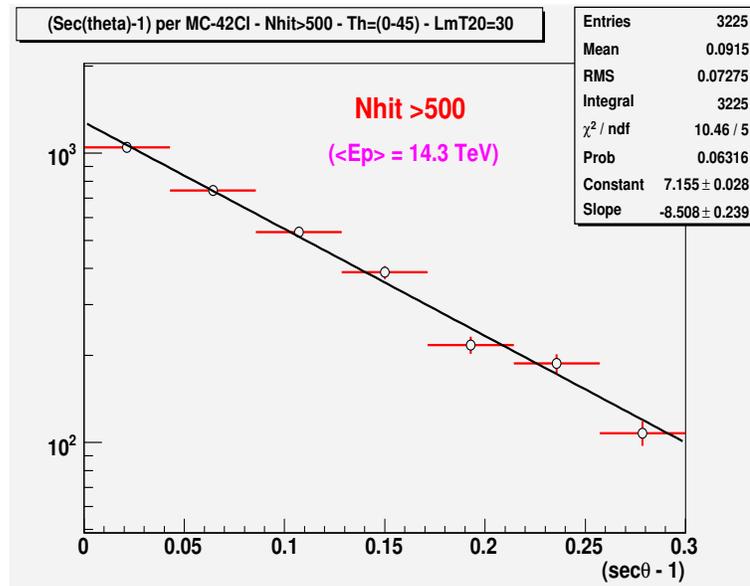


Figura 4.19: Fit della distribuzione di η per MC nell'intervallo di molteplicità in cui il numero di hit è maggiore di 500, corrispondente ad un'energia media del primario $\langle E_p \rangle = 14.3 \text{ TeV}$.

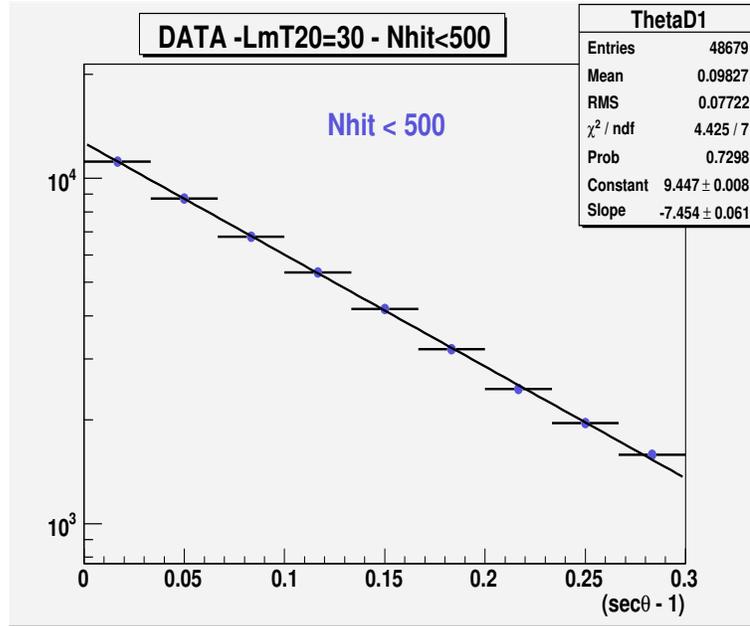


Figura 4.20: *Fit della distribuzione di η per il campione di dati reali, nell'intervallo di molteplicità in cui il numero di hit è minore di 500.*

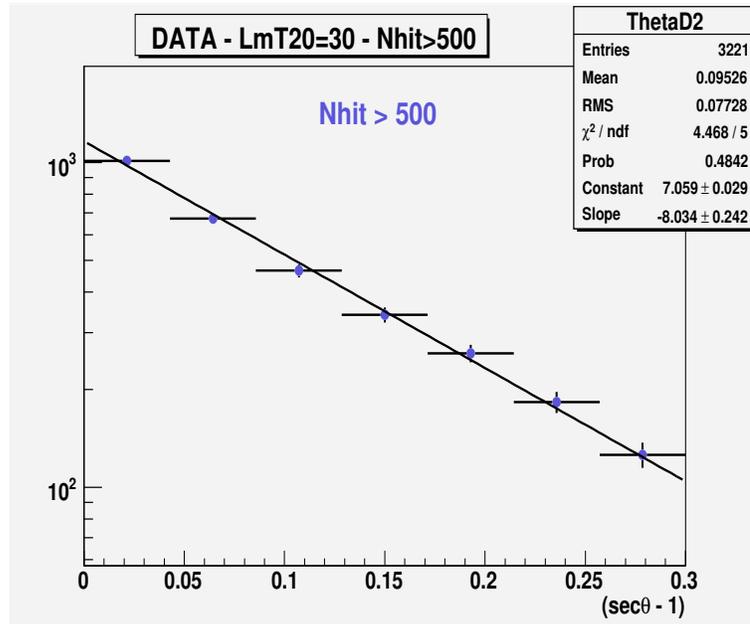


Figura 4.21: *Fit della distribuzione di η per il campione di dati reali nell'intervallo di molteplicità in cui il numero di hit è maggiore di 500.*

Si osserva che se il flusso di RC ha una percentuale di protoni maggiore del 15 % e un contributo dovuto ai nuclei pesanti, in particolare elio, minore del 10 %, condizioni ampiamente soddisfatte dal range di energia in cui si sta lavorando, allora si può assumere che $\sigma_{RC-air} \simeq \sigma_{p-air}$, trascurando il contributo dovuto ai nuclei pesanti [65].

In figura 4.22 è visibile la σ_{p-air} misurata col metodo appena descritto, i punti in rosso, si nota chiaramente il buon accordo con gli altri dati sperimentali.

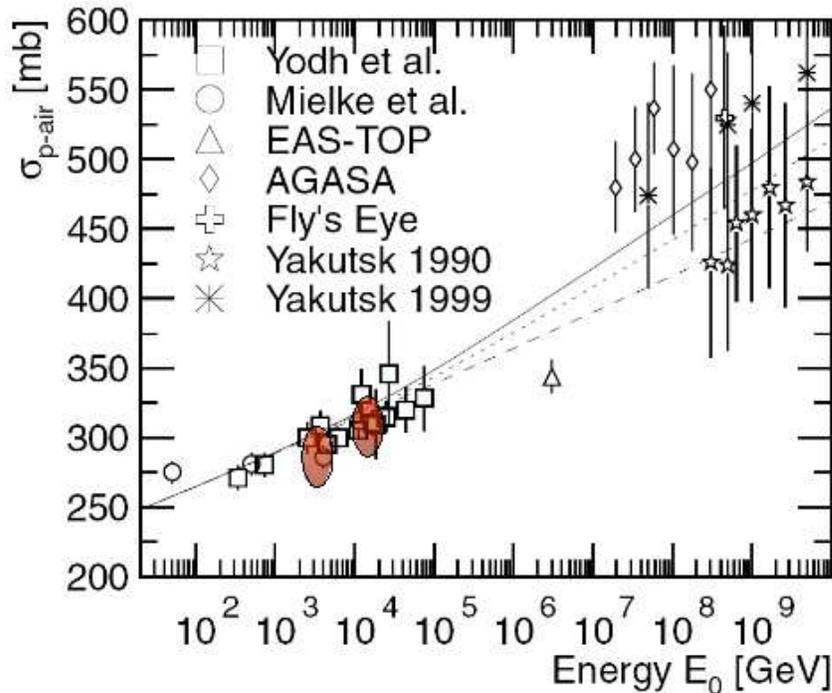


Figura 4.22: Sezione d'urto protone-aria.

Il passaggio dalla sezione d'urto protone-aria σ_{p-air} a quella protone-nucleone σ_{p-N} si ottiene considerando i diagrammi nelle figure 4.14 e 4.15. I risultati ottenuti sono presentati in tabella 4.1 e illustrati in figura 4.23. È chiaramente evidente come i valori trovati con ARGONAT, in rosso, si collocano con un buon accordo sulla linea che congiunge i punti ricavati da esperimenti agli acceleratori (a sinistra) con quelli ricavati da esperimenti con RC ad alta energia (a destra).

Questo risultato, che costituisce uno studio preliminare, ma molto incoraggiante, mostra le potenzialità della procedura attuata e delle selezioni

adoperate e offre la possibilità di effettuare delle misure di sezione d'urto a intervalli di energia non ancora raggiunti con gli acceleratori di particelle.

Nhit	$\langle E \rangle$	k	σ_{p-air} (mbarn)	σ_{p-N} (mbarn)
< 500	3.67 ± 0.04 TeV	0.96 ± 0.05	283 ± 15	40 ± 4
> 500	14.3 ± 0.2 TeV	0.97 ± 0.05	307 ± 20	47 ± 5

Tabella 4.1: Risultati ottenuti.

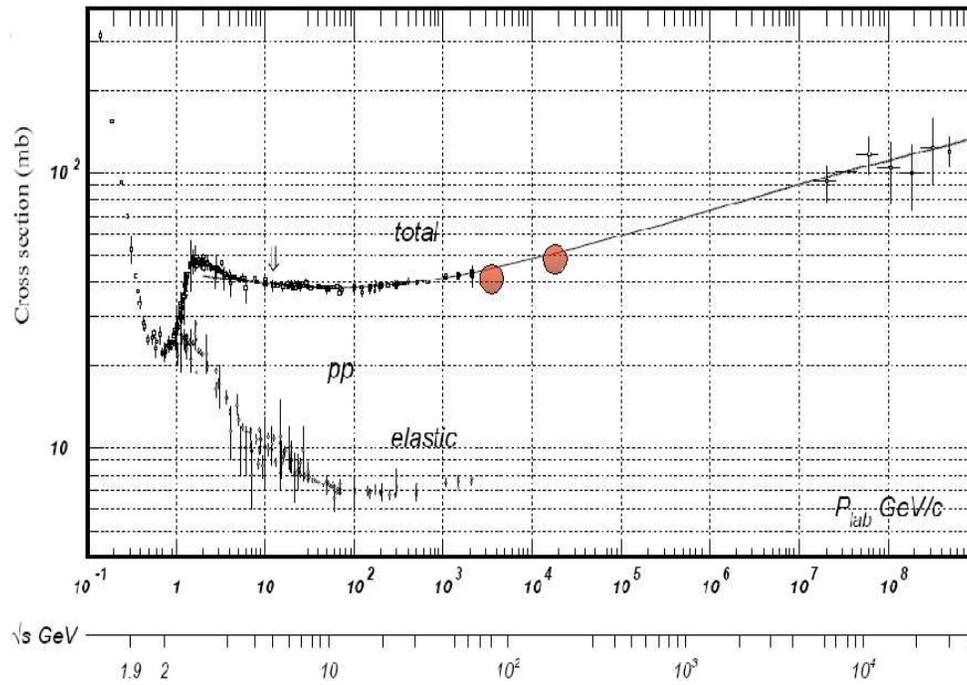


Figura 4.23: Sezione d'urto p-p.

Conclusioni

Il presente lavoro di tesi si inserisce nell'ambito dell'esperimento ARGO-YBJ, il laboratorio di raggi cosmici ad alta quota sito a YangBaJing. La sua natura, di apparato di rivelazione di sciami estremamente compatto, lo rende adatto a compiere osservazioni dettagliate della radiazione cosmica, con un approccio innovativo rispetto agli apparati di misura "a campionamento" finora utilizzati.

Nell'ambito di un'esperimento quale ARGO-YBJ, lo sviluppo di una metodologia standard di analisi e selezione dei dati riveste un ruolo chiave per il raggiungimento degli obiettivi fisici preposti. Vengono, infatti, registrati alcune migliaia di eventi, dovuti a RC, al secondo.

La procedura software, sviluppata nell'ambito della prima parte di questo lavoro di tesi: IDAS, si pone come obiettivo quello di fornire, al potenziale utilizzatore, la possibilità di verificare la qualità dei dati che si ha a disposizione, in maniera veloce ed efficiente, in modo tale da poterli selezionare per le proprie esigenze di analisi. Inoltre, permette di monitorare nel tempo la stabilità dell'apparato e di individuare eventuali problemi hardware. Questo risulta particolarmente utile nella fase attuale in cui il rivelatore è in costruzione e la sua configurazione varia nel tempo.

IDAS ha contribuito in maniera significativa ai primi risultati fisici presentati nel paragrafo 2.3.1 ed ottenuti con i dati acquisiti con 42 cluster, nel periodo compreso tra dicembre 2004 e luglio 2005.

Attualmente, si stanno adattando le script, facenti parte della procedura sviluppata, per leggere i nuovi formati dei file e supportare la configurazione con 130 cluster.

La seconda parte del lavoro di tesi sviluppato è finalizzata ad un'analisi fenomenologica dell'interazione protone-nucleo ad altissima energia. Sfruttando la fine granularità con cui l'immagine spazio-temporale è "fotografata" da ARGO-YBJ, si è ricavata la correlazione tra i parametri di ricostruzione dello sciame e alcune grandezze fisiche che lo caratterizzano, in particolare la conicità.

Lo studio proposto esplora l'idea secondo cui una dettagliata ricostruzione con fit conico del fronte dello sciame permette di trovare una correlazione tra la conicità α e l'altezza nell'atmosfera della prima interazione del primario, legata allo stadio di sviluppo dello sciame. Il risultato ottenuto, per

quanto preliminare, permette una stima grossolana dell'altezza della prima interazione del primario.

Si è sviluppato, infine, un metodo per la misura della sezione d'urto protone-nucleo e protone-nucleone in un intervallo di energia, in cui le misure fatte agli acceleratori non danno informazioni.

I risultati ottenuti, che costituiscono uno studio preliminare, ma molto incoraggiante, mostrano le potenzialità della procedura attuata e delle selezioni adoperate e offre la possibilità di effettuare delle misure di sezione d'urto a intervalli di energia non ancora raggiunti con gli acceleratori di particelle.

Bibliografia

- [1] M.S.Longair: *High Energy Astrophysics, vol 1&2*. Cambridge University Press, 1994.
- [2] T.K.Gaisser: *Cosmic Rays and Particle Physics*. Cambridge University Press, 1992.
- [3] J.Knapp: *The giant awakes*. High-Energy Astrophysics, 2005.
- [4] <http://hires.physics.utah.edu>
- [5] <http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/>
- [6] K.Greisen: *Physical Review Letters*. 16 (1966) 748.
- [7] G.T.Zatsepin et V.A.Kuzmin *JETP Letters*. 4 (1966) 78.
- [8] S.I.Syrovatzkii et V.L. Ginzburg: *The Origin of Cosmic Rays*. Pergamon Press, Classic monograph, 1964.
- [9] A.M.Hillas: *Ann. Rev. Astro. Astroph.* 22 (1984) 425-444.
- [10] <http://www.isapp2005.to.infn.it/Lessons>
- [11] D.Perkins: *Particle Astrophysics*. Oxford University Press, 2003.
- [12] A.M.Hillas: *Cosmic Rays*. Pergamon Press, 1972.
- [13] D.Thompson et al.: *The Astrophysical Journal Suppl.* 86 (1993) 629.
- [14] M.F.Cawley & T.C.Weekes: *Experimental Astronomy*. 6 (1995) 7.
- [15] G.M.Mohanty et al.: *Astroparticle Physics*. 9 (1998) 15.
- [16] E.J.Fenyves et al.: *Physical Review D*. 37 (1988) 649.
- [17] S.Oser et al.: *Astrophysical Journal*. 547 (2001) 949.
- [18] S.De Naurois et al. *Astrophysical Journal*. 566 (2002) 343.

-
- [19] M.Abbrescia et al.: *Astroparticle Physics with ARGO*. Proposal, 1996. 6 (1997) 313.
- [20] C. Bacci et al.: *The ARGO-YBJ Project*. Addendum to the Proposal, 1998.
- [21] S.D.Bloomer, J.Linsley et A.A.Watson: *Nuclear Physics*. 14 (1988) 645-656.
- [22] L.Saggese et E.Rossi: *Measurement of strip size spectrum with ARGO-YBJ experiment*. 29th International Cosmic Ray Conference, Pune (India), 2005.
- [23] P.Camarri, R.Cardarelli et Q.Gou: *Control and Monitoring of the ARGO-YBJ detector*. 29th International Cosmic Ray Conference, Pune (India), 2005.
- [24] A.Aloisio, P.Branchini, S.Cavaliere et al.: *Bus-based DAQ Architecture for the ARGO-YBJ Experiment*. ARGO-YBJ note.
- [25] A.Aloisio, F.Barone, S.Mastroianni et al.: *The ARGO DAQ System*. ARGO-YBJ note .
- [26] X.Sheng, R.Cardarelli, G.Liguori et al.: *Performances of the Resistive Plate Chambers at YBJ*. 29th International Cosmic Ray Conference, Pune (India), 2005.
- [27] C.Bleve: *Tesi di dottorato*. Università di Lecce, Agosto 2003.
- [28] H.He: *The Online System of the ARGO Experiment*. 28th International Cosmic Ray Conference 2003.
- [29] P.Creti, M.Iacovacci et L.Saggese: *The RPC charge read-out in the ARGO-YBJ experiment*. 29th International Cosmic Ray Conference, Pune (India), 2005.
- [30] S.Mastroianni: *The ARGO-YBJ inclusive trigger*. 29th International Cosmic Ray Conference, Pune (India), 2005.
- [31] G.Di Sciascio: *Status of the ARGO-YBJ experiment*. ARGO-YBJ note.
- [32] I.De Mitri: *Very High Energy Gamma Ray Astronomy and Cosmic Ray Physics with the ARGO-YBJ experiment*. International Europhysics Conference on High Energy Physics, Lisboa (Portugal), 2005.
- [33] I.De Mitri: *ARGO-YBJ Status and first results*. CRIS 06, Catania, 2006.
- [34] G.W.Clark: *Physical Review*. 108 (1957) 450.

- [35] T.Di Girolamo, G.Di Sciascio et al.: *Performance of the ARGO-YBJ detector operated in scaler mode*. 29th International Cosmic Ray Conference, Pune (India), 2005.
- [36] V.A.Apanasenko et al.: *Astroparticle Physics*. 16 (2001) 13.
- [37] R.Asakimori et al.: *Astrophysical Journal*. 502 (1998) 278.
- [38] <http://root.cern.ch/>
- [39] C.Bleve, I.De Mitri, G.Marsella, D.Martello et al.: *How to with Medea++*. ARGO-YBJ 2003-002, 30 Gennaio 2003.
- [40] P.Bernardini, A.K.Calabrese Melcarne et al.: *Time Calibration of the ARGO-YBJ detector (42 cluster)*. ARGO-YBJ/2005-002, 7 Giugno 2005.
- [41] D.Martello et al.: *Recostruction of the EAS core position with the ARGO-YBJ detector*. Proceedings of ICRC, 2001.
- [42] K.Greisen: *Prog. Cosmic Ray Phys*. 3 (1956) 1.
- [43] G.Di Sciascio: *Identification of core outside the ARGO-YBJ carpet*. ARGO-YBJ/2002-02.
- [44] D.Campana, B.D'Ettorre Piazzoli, G.Di Sciascio: *NIM A344*. 1994, 250.
- [45] E.Rossi: *Tesi di Dottorato*. Università di Napoli, Novembre 2005.
- [46] G.Di Sciascio, D.Campana, T.Di Girolamo et al.: *First results on the angular resolution of the ARGO-YBJ detector*. 29th International Cosmic Ray Conference, Pune (India), 2005.
- [47] C.Bleve, S.Colona et I.De Mitri: *IDAS A tool for ARGO-YBJ data selection and analysis*. ARGO-YBJ/2006-01, 22 Febbraio 2006.
- [48] C.Bleve, S.Colona et I.De Mitri: *IDAS based Data Quality Checks for the 42-cluster Run (Dec 2004 - Jul 2005)*. ARGO-YBJ/2006-02, 22 Febbraio 2006.
- [49] G.Marsella: *Online and Data Quality*. ARGO-YBJ note. 1 Luglio 2005.
- [50] D.Heck, J.Knapp, J.N.Capdevielle, G.Schatz et T.Thouw: *Report FZKA 6019*. Forschungszentrum Karlsruhe, 1998; http://www-ik3.fzk.de/~heck/corsika/physics_description/corsika_phys.html.
- [51] W.R.Nelson, H.Hirayama et D.W.O.Rogers: *Report SLAC 265*. Stanford Linear Accelerator Center, 1985.

-
- [52] D.Heck et J.Knapp: *Extensive Air Shower Simulation with CORSIKA: A User's Guide*.
- [53] N.N.Kalmykov, S.S.Ostapchenko, *Yad. Fiz.* 56 (1993) 105; *Phys. at Nucl.* 56(3) (1993) 346; N.N. Kalmykov, S.S.Ostapchenko et A.I.Pavlov, *Bull. Russ. Acad. Sci. (Physics)* 58 (1994) 1966.
- [54] H.H.Mielke et al.: *Proc. 21th Int. Cosmic Ray Conf.* 1990, 4.
- [55] J.N.Capdevielle: *Nucl. Part. Phys.* 15 (1989) 909.
- [56] P.K.F.Grieder: *Report Inst. for Nuclear Studies*. 1970, INS-J125, Univ. of Tokyo.
- [57] P.K.F.Grieder: *Proc. 16th Int. Cosmic Ray Conf.* Kioto, 9 (1979) 161.
- [58] K.Werner: *Phys. Rep.* 232 (1993) 87.
- [59] J.Ranft: *Phys. Rev. D* 51 (1995) 64.
- [60] H.J:Drescher et al.: *arXiv: hep-ph/0007198*.
- [61] H.Fesefeld: *Report PITHA-85/02*. RWTH Aachen, 1985.
- [62] D.Martello & A.Surdo: *ARGO-G, ARGO Detector through GEANT3 package*. ARGO-YBJ/2000-001, 16 Novembre 2000.
- [63] R.Brun et al.: *GEANT 3.21 - detector description and simulation tool*. CERN Prog. Lib., W5013, 1993.
- [64] A.Surdo: *Fenomenologia dei RC e Trigger*. ARGO-YBJ General Meeting, Aprile 2006.
- [65] M.Honda, M.Nagano et al.: *Physical Review Letters*. 70 (1993) 5.
- [66] J.R.Hörandel: *Nuclear and Particle Physics*. 29 (2003) 2439-2464 e riferimenti ivi presenti.

Ringraziamenti

È arrivato il momento, quello per cui ho lavorato tanti anni...mi sto laureando, quasi non mi sembra vero, immagino come sarà quel giorno, ma faccio fatica a inquadralo in uno spazio-tempo reale, allora chiudo gli occhi e ripercorro mentalmente tutto ciò che è stato. Lo scherzo fatto dai dottorandi il primo giorno di lezione, le statistiche del Prof. Anni, tutto ciò che mi ha fatto ridere e disperare e mi ha spinto ad andare avanti sempre. Ciò che mi ha formato e appassionato e che mi ha indirizzato verso la strada intrapresa. È bello percepire che ciò che si è scelto di fare è proprio la cosa che hai sempre sentito di voler fare, perchè ti arricchisce in maniera unica e ti piace nelle mille sfaccettature in cui ti si presenta.

Sfoglio la mia tesi, sorrido, sono pagine che racchiudono tutto ciò che ho imparato da laureanda, in termini di conoscenze e di tecniche e soprattutto di modo di lavorare per raggiungere determinati obiettivi fisici.

Per questo devo ringraziare le persone che mi hanno seguito in questo percorso formativo. In primo luogo, il mio relatore, il Dott. Ivan De Mitrì che è riuscito a propormi sette differenti argomenti di tesi, nel momento in cui gli e l'ho chiesto (conservo ancora i fogli), offrendomi l'opportunità di scegliere, fondamentale per me. Lo ringrazio per le mille spiegazioni e per la precisione con cui cura i dettagli; ogni volta che ho avuto bisogno di lui per il mio lavoro è stato sempre presente e spero non si sia mai scandalizzato per tutto ciò che *so di non sapere*, offrendomi l'opportunità di imparare tante cose nuove.

Ringrazio la Dott. Carla Bleve, è stata lei che mi ha introdotto nei labirinti della programmazione in C++ e nel paese delle meraviglie di Root, fornendomi anche un valido *filo di Arianna* nel primo e un *coniglietto*, assai dispettoso all'inizio, ma molto docile poi, nel secondo, per potermi districare. Grazie per avermi fornito tutti gli strumenti necessari che mi hanno reso indipendente e capace di gestire al meglio e con serenità il lavoro, anche in tua assenza.

Ringrazio il Dott. Surdo, la sua tenacia nel lavoro e le sue dettagliate spiegazioni mi hanno permesso di addentrarmi sempre più nell'ambito della ricerca fatta con l'esperimento ARGO-YBJ, aiutandomi ad affinare il mio

senso critico per tutto ciò che sembra essere, ma non è. Grazie per avermi insegnato tutti i trucchetti che mi sono stati utilissimi per fare le figure e per avermi reso in grado di maneggiare e modificare, a mio piacimento, le tantissime script sviluppate durante il lavoro.

Un grazie particolare a tutti i membri del mio gruppo di lavoro, il loro aiuto è stato prezioso per risolvere i tanti problemi tecnici che ho incontrato all'inizio.

Grazie a Aldo e Giulia, i miei genitori, che mi hanno dato la possibilità di continuare gli studi e mi hanno sostenuto sempre, anche quando non erano d'accordo con le decisioni che prendevo. La mia ricerca di un significato nella vita spesso mi ha condotto lontano, loro sono il mio rifugio sicuro, la mia fonte di amore incondizionato. Grazie al mio caro nonno e ai miei fratelli: Riccardo, Alessandro, Alberto, Aurora e Marilena, nei momenti in cui ero giù hanno saputo tendermi la mano e si sono presi cura di me, facendomi fare le migliori risate. Vi voglio bene famiglia!

Un grazie speciale a Monica, Marisa, Mariangela, Sabrina, Afra, Alessandro, Gianna, Mariapina, Manuela e Pier Paolo, ogni volta che mi sono trovata in difficoltà hanno saputo toccare la mia anima, donandomi dosi di speranza e rendendomi capace di rialzarmi, per affrontare con forza il nuovo giorno. La loro presenza nella mia vita è una costante. Grazie a tutte le persone che mi sono vicine e che sono sempre pronte a darmi una mano: Angelo, Carlo, Lorena, Loretta, Francesco, Enrico, Cinzia, Maria Luisa, Anna Rita, Silvio, Daniela.

Grazie per tutto l'amore che ho avuto la fortuna di ricevere e di donare a mia volta....*come può uno scoglio, arginare il mare....*grazie a me che ho saputo sostenere le sfide che il destino mi ha presentato, trovando sempre la forza di rialzarmi, anche nei momenti in cui credevo di non farcela e *sorridere dei guai, proprio come non hai fatto mai e poi pensare che domani sarà sempre meglio....*sono felice!